

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΕΤΗΡΙΔΑ
ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΑΡΙΘΜ. ΤΟΥ ΤΟΜΟΥ

ΣΑΛΟΝΙΚΙΟΥ Ν. ΘΩΜΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Π.Σ. Α.Π.Θ.
Ε.Μ.Υ. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΣΙΔΗΡΟΠΑΓΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΤΜ. ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ Α.Π.Θ.

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ
ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΛΟΓΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ 1÷1.5 ΜΕ
ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΠΛΙΣΗΣ ΥΠΟ
ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΠΟΥ ΥΠΟΒΛΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ Α.Π.Θ.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 1998

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Γ. ΠΕΝΕΛΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ι. ΤΕΓΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Α. ΚΑΠΠΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γ. ΠΕΝΕΛΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Π. ΖΑΡΑΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Μ. ΦΑΡΔΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Ι. ΤΕΓΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Κ. ΣΤΥΛΙΑΝΙΔΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Α. ΚΑΠΠΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Σ. ΠΑΝΤΑΖΟΠΟΥΛΟΥ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

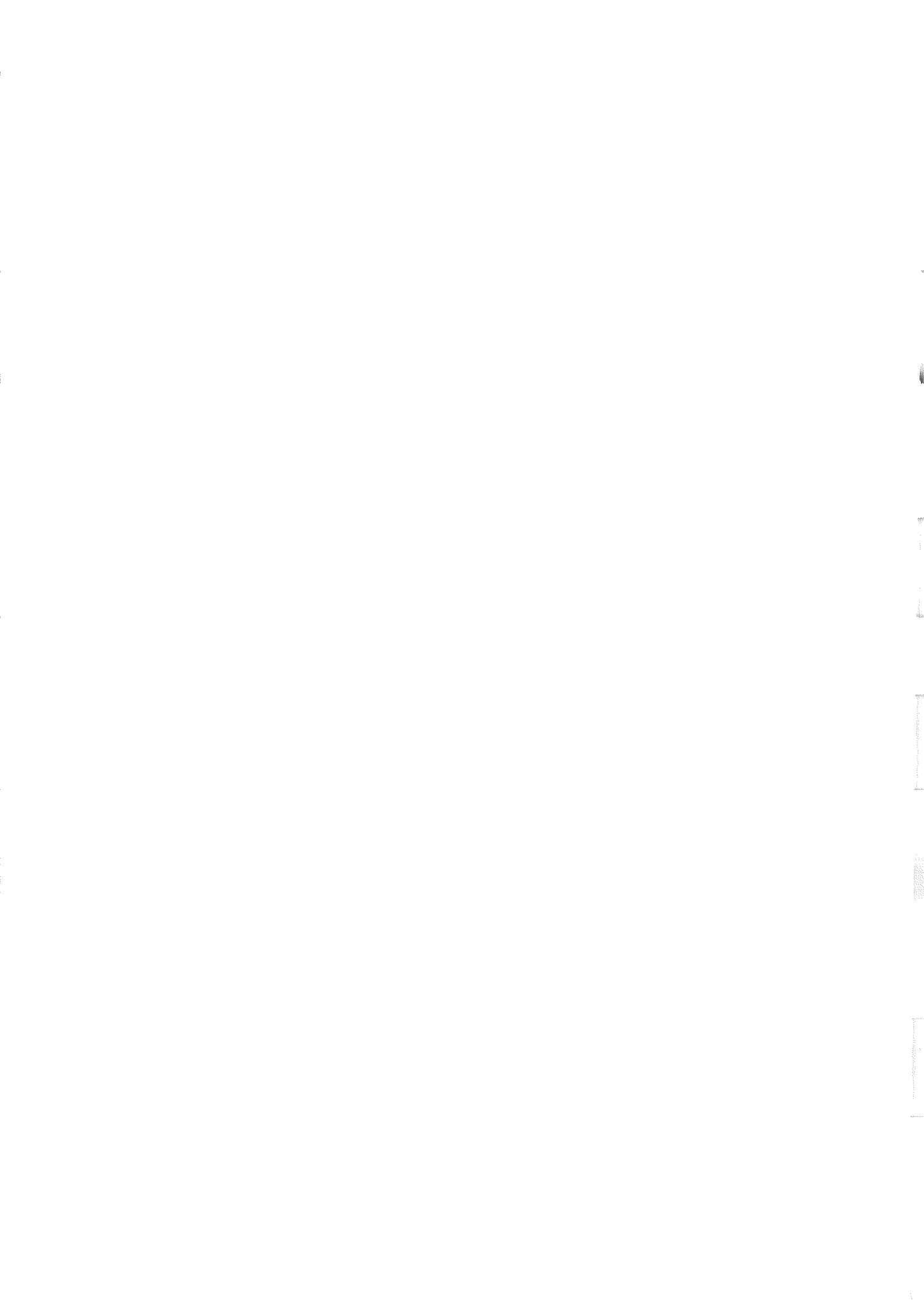
Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα.

(Νόμος 5343/1932, αρθρ. 202, παράγρ. 2)

Αφιερώνεται:

στους γονείς μου

στη σύζυγό μου



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σημαντικός ρόλος των τοιχωμάτων στην αντισεισμική άμυνα των κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος σε συνδυασμό με το ανοικτό διεθνώς πεδίο έρευνας οδήγησε το Εργαστήριο Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος Α.Π.Θ. στην απόφαση να ασχοληθεί με τη διερεύνηση και βελτίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος που υπόκεινται σε σεισμικού τύπου φόρτιση· παράλληλα δίνεται έμφαση στο φαινόμενο της διατμητικής ολίσθησης που εμφανίζεται μετά την καμπτική διαρροή και στην άρση των δυσμενών συνεπειών του μέσω κατάλληλου τρόπου όπλισης. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε πειραματικό πρόγραμμα που περιελάμβανε ένδεκα δοκίμια. Τα δοκίμια αυτά χωρίστηκαν σε δύο σειρές. Η πρώτη σειρά περιελάμβανε έξι δοκίμια (σειρά MSW) με λόγο όψης 1.5 και η δεύτερη σειρά περιελάμβανε πέντε δοκίμια (σειρά LSW) με λόγο όψης 1.0. Οι διαστάσεις της διατομής διατηρούνταν σταθερές σε όλα τα δοκίμια. Στόχος της εργασίας ήταν η βελτίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων και η εύρεση της επιρροής που ασκεί μια σειρά παραμέτρων στην αλληλεπίδραση μεταξύ κάμψης και διάτμησης (με έμφαση στην διατμητική ολίσθηση) όπως είναι:

- η αξονική φόρτιση των τοιχωμάτων
- ο λόγος όψης των τοιχωμάτων
- το ποσοστό οπλισμού στις κρυφοκολόνες και στον κορμό
- ο τρόπος τοποθέτησης του κύριου οπλισμού (χιαστί οπλισμός σε διάφορες θέσεις)
- η ύπαρξη του αρμού σκυροδέτησης

Προκειμένου η παρούσα ερευνητική εργασία να προσεγγίσει τους στόχους της πληρέστερα, χωρίστηκε σε τέσσερα μέρη όπου κάθε μέρος πραγματεύεται τα εξής:

ΜΕΡΟΣ Α

- Εισαγωγή
- Κριτική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις πειραματικές εργασίες στα τοιχώματα και έκθεση συμπερασμάτων
- Κριτική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις αναλυτικές εργασίες στα τοιχώματα και έκθεση συμπερασμάτων
- Κριτική ανασκόπηση των κυριότερων διεθνών κανονισμών σχετικά με τα τοιχώματα και έκθεση συμπερασμάτων

ΜΕΡΟΣ Β

- Προβληματισμοί και στόχοι της έρευνας
- Γενικός σχεδιασμός του παρόντος ερευνητικού πειραματικού προγράμματος
- Σχεδιασμός των δοκιμίων, της μεθόδου δοκιμής και της πρότυπης πειραματικής διάταξης που κατασκευάστηκε
- Γενικά αποτελέσματα από την παρατήρηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων και φωτογραφίες
- Αποτελέσματα των πειραμάτων σε μορφή διαγραμμάτων
- Επεξεργασία αποτίμηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

ΜΕΡΟΣ Γ

- Αναλυτική προσέγγιση της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων

ΜΕΡΟΣ Δ

- Προτάσεις για την καλύτερη διαστασιολόγηση, όπλιση και αναλυτική προσομοίωση των τοιχωμάτων
- Συμπεράσματα
- Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας έγινε εξ ολοκλήρου στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος Α.Π.Θ. σε διάστημα τεσσάρων ετών. Σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης εργασίας στάθηκε πραγματικός αρωγός ο Καθηγητής του Εργαστηρίου κ. Γ. Πενέλης τον οποίο και ευχαριστώ θερμά, όχι μόνο διότι μου εμπιστεύθηκε τον πανάκριβο και υψηλής τεχνολογίας εξοπλισμό του εργαστηρίου, όχι μόνο για τη συνεχή παρακολούθηση, συμβολή και επίβλεψη στην εκπόνηση και παρουσίαση της διατριβής αυτής, αλλά και για την αμέριστη ηθική συμπαράσταση και καταλυτική συμβολή του στην υπέρβαση δυσκολιών οποιασδήποτε φύσης, επιστημονικών, οικονομικών και τεχνικών.

Ευχαριστώ θερμά τον Αν. Καθηγητή κ. Ι. Τέγο μέλος της τριμελούς επιτροπής για την καθοδήγηση, επίβλεψη και γενικότερη συμβολή του στην εκπόνηση της διατριβής αυτής.

Ευχαριστώ θερμά τον Αν. Καθηγητή κ. Α. Κάππο μέλος της τριμελούς επιτροπής για τη συνεχή επίβλεψη και συμβολή του στο σχεδιασμό, εκπόνηση, αξιολόγηση και αξιοποίηση της διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Αν. Καθηγητή κ. Κ. Στυλιανίδη για την καταλυτική συμβολή του στον σχεδιασμό και την οργάνωση των διατάξεων φόρτισης-αντίδρασης, καταγραφής και για τις πολύτιμες συμβουλές του στο πειραματικό μέρος.

Τέλος, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην

ολοκλήρωση του έργου.

Τον Τομέα Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών για την οικονομική βοήθεια που παρείχε στην αγορά αδρανών και χάλυβα.

Την Επιτροπή Ερευνών Α.Π.Θ. για την οικονομική βοήθεια που παρείχε.

Την Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Κοινότητας για την οικονομική ενίσχυση που παρείχε μέσω της σύμβασης CHRXCT₉₃₀₂₀₁ (ερευνητικό πρόγραμμα ENESE, του προγράμματος HCM)

Τον τεχνίτη του Εργαστηρίου Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος κ. Φαίδωνα Τηλκερίδη για την σημαντική βοήθειά του στην σκυροδέτηση και εγκατάσταση των δοκιμίων.

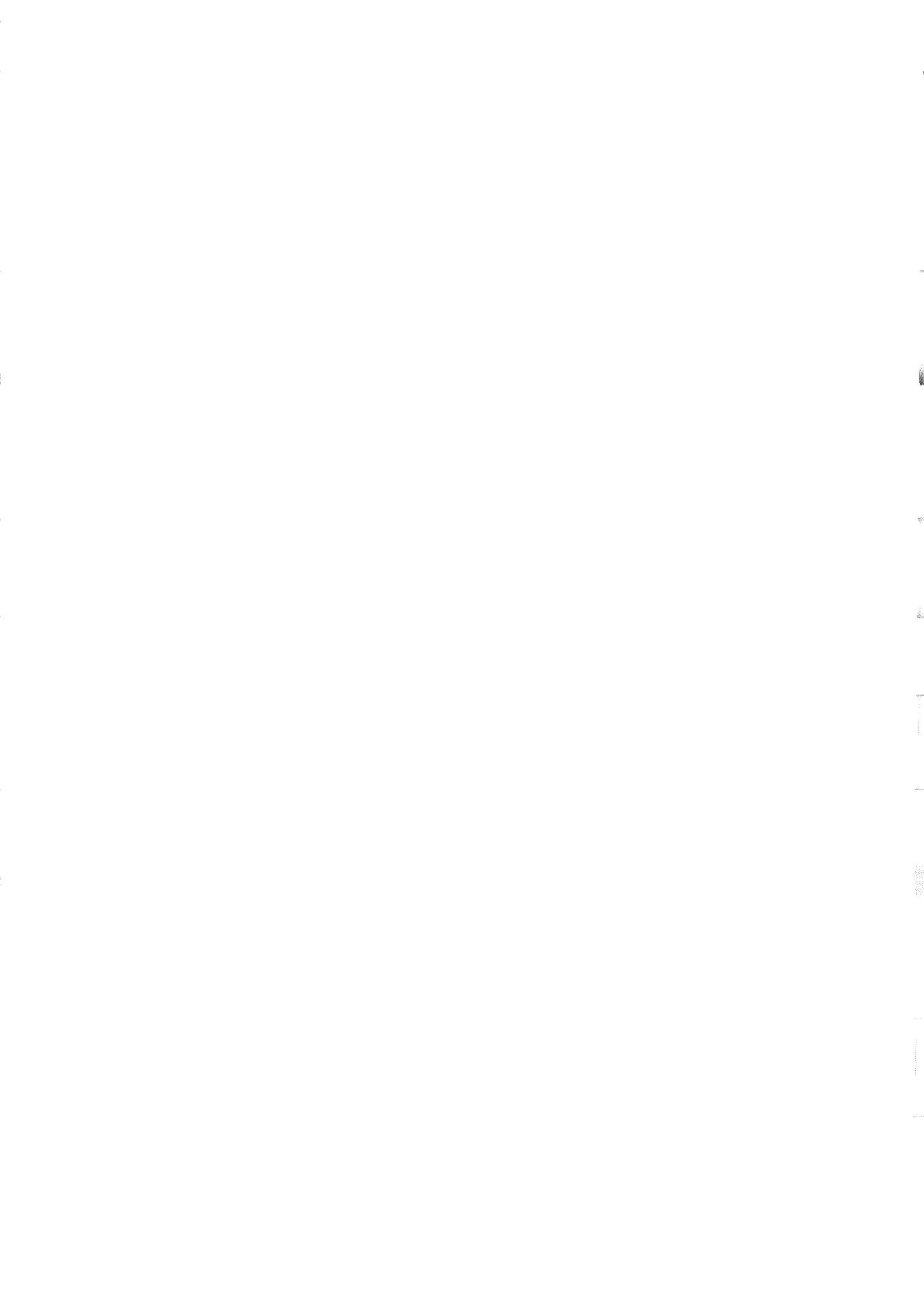
Τους μηχανουργούς Γ. Γεωργιάδη και Α. Γούσιο για την επιμελημένη δουλειά τους στη συμπλήρωση της πειραματικής διάταξης και στην κατασκευή εξαρτημάτων.

Την ΣΙΔΕΝΟΡ Χαλυβουργία Βορείου Ελλάδος Α.Ε. για την κάλυψη του προγράμματος με τον απαιτούμενο σπλισμό.

Την TITAN Α.Ε. τσιμέντων για την προμήθεια όλης της ποσότητας τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα.

Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 1998

Σαλονικιός Ν. Θωμάς



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|-------------------|----|
| ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ | 10 |
|-------------------|----|

ΜΕΡΟΣ Α

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ

| | |
|--|-----|
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 12 |
| 1.1. ΓΕΝΙΚΑ | 14 |
| 1.2. ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ | 18 |
| 2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ | 21 |
| 2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ | 21 |
| 2.2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ | 60 |
| 3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ | 80 |
| 3.1. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ... | 80 |
| 3.2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ | 90 |
| 4. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΔΙΕΘΝΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ | 92 |
| 4.1. EUROCODE 8 | 92 |
| 4.2. ACI 318-95, UBC-1997 | 99 |
| 4.3. NZS 3101 | 100 |
| 4.4. Ε.Κ.Σ., Ε.Α.Κ. | 102 |
| 4.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 104 |

ΜΕΡΟΣ Β

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ - ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

| | |
|---|-----|
| 5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ | 106 |
| 5.1. ΑΝΟΙΚΤΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ | 106 |
| 5.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ | 108 |

| | |
|--|------------|
| 5.3. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ - ΟΡΓΑΝΑ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ | 123 |
| 5.3.1. Πλαίσιο αντίδρασης | 123 |
| 5.3.2. Εγκατάσταση δοκιμίου | 127 |
| 5.3.3. Διάταξη επιβολής φόρτισης | 128 |
| 5.3.4. Ιστορία φόρτισης | 130 |
| 5.3.5. Μετρήσεις | 133 |
| 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 137 |
| 6.1. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ | 138 |
| 6.2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ | 150 |
| 6.2.1. Γενικές παρατηρήσεις στη συμπεριφορά των δοκιμών με άνοιγμα διάτμησης 1.0 | 152 |
| 6.2.2. Γενικές παρατηρήσεις στη συμπεριφορά των δοκιμών με άνοιγμα διάτμησης 1.5 | 156 |
| 6.3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΡΟΧΩΝ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ | 161 |
| 6.3.1. Σχολιασμός βρόχων υστέρησης δοκιμών με άνοιγμα διάτμησης 1.0 | 161 |
| 6.3.2. Σχολιασμός βρόχων υστέρησης δοκιμών με άνοιγμα διάτμησης 1.5 | 168 |
| 6.3.3. Βρόχοι υστέρησης δοκιμών | 178 |
| 7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 231 |
| 7.1. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑ ΑΝΤΟΧΗΣ | 231 |
| 7.2. ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 240 |
| 7.3. ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ | 249 |
| 7.4. ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ | 256 |

ΜΕΡΟΣ Γ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

| | |
|---|-----|
| 8. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ R.C.COL.A. -90. | 268 |
| 9. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΕΜΝΟΥΣΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΠΡΟΤΕΙ- ΝΟΥΝ ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ | 270 |
| 10. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΔΙΑΤ- ΜΗΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ | 275 |

ΜΕΡΟΣ Δ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

| | |
|--|------------|
| 11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 278 |
| 12. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ | 283 |
| 13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 285 |



ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

- A : Ενέργεια που αποσβέσθηκε
 A_{fl} : Αποσβεσθήσα ενέργεια από τον μηχανισμό κάμψης
 A_{sh} : Αποσβεσθήσα ενέργεια από τον μηχανισμό διάτμησης
 A_{sl} : Αποσβεσθήσα ενέργεια από τον μηχανισμό ολίσθησης
 b_w : Πλάτος τοιχώματος
 δ_{top} : Οριζόντια μετατόπιση στη κορυφή του δοκιμίου
 δ_{dg} : Διαγώνια παραμόρφωση
 δ_{ax} : Αξονική παραμόρφωση
 δ_{sl} : Διατμητική ολίσθηση σε ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου
 δ_{tot} : Συνολική οριζόντια μετατόπιση σε ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου
 δ_{fl} : Καμπτική οριζόντια μετατόπιση σε ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου
 δ_{sh} : Διατμητική οριζόντια μετατόπιση σε ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου
 E : Μέτρο ελαστικότητας
 E_c : Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος
 E_s : Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα
 Φ : Συντελεστής υπεραντοχής
 f_c : Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
 f_{cd} : Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σχεδιασμού
 f'_c : Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος κατά A.C.I.
 f_y : Όριο διαρροής χάλυβα
 $f_{y,k}$: Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα
 $f_{y,d}$: Αντοχή χάλυβα σχεδιασμού
 $f_{y,h}$: Όριο διαρροής οριζόντιου οπλισμού
 $f_{y,v}$: Όριο διαρροής κατακόρυφου οπλισμού
 G : Μέτρο διάτμησης σκυροδέματος
 G_{cr} : Μέτρο διάτμησης ρηγματωμένου σκυροδέματος
 H : Ύψος δοκιμίου
 H_w : Ύψος δοκιμίου
 K_i : Δυσκαμψία στοιχείου για το i σημείο φόρτισης
 K_0 : Αρχική δυσκαμψία
 L : Ύψος διατομής τοιχώματος
 L_w : Ύψος διατομής τοιχώματος

- I_w : Ύψος διατομής τοιχώματος
 μ : Πλαστιμότητα μετατοπίσεων
 μ_δ : Πλαστιμότητα μετατοπίσεων
 M : Ροπή
 M_{Rd} : Ροπή αντοχής σχεδιασμού
 M_{Sd} : Δρώσα ροπή σχεδιασμού
 M_R : Ροπή αντοχής
 N_{sd} : Δρώσα αξονική φόρτιση σχεδιασμού
 q : Συντελεστής συμπεριφοράς
 ρ : Ποσοστό οπλισμού
 ρ_η : Ποσοστό οπλισμού
 ρ_v : Ποσοστό κατακόρυφου οπλισμού κορμού
 ρ_h : Ποσοστό οριζόντιου οπλισμού κορμού
 τ : Διατμητική τάση
 τ_{Rd} : Διατμητική αντοχή σχεδιασμού
 τ_0 : Ελαστική διατμητική τάση
 V : Τέμνουσα δύναμη
 V_{sd} : Δρώσα τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού
 V_{Rd} : Τέμνουσα δύναμη αντοχής σχεδιασμού
 V_{cd} : Τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού που παραλαμβάνει το σκυρόδεμα
 V_n : Ονομαστική διατμητική αντοχή κατά A.C.I.

ΜΕΡΟΣ Α

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος είτε σε συνδυασμό με άλλα δομικά στοιχεία είτε ανεξάρτητα αποτελούν την κύρια γραμμή άμυνας των κατασκευών έναντι εξωτερικών δράσεων και ιδιαίτερα των σεισμικών δράσεων [5], [6], [102]. Λόγω της ικανότητάς τους να ανθίστανται σε φορτίσεις κάθετα στο επίπεδό τους έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία τους με τα πλαίσια δοκών και υποστυλωμάτων είτε αποτελώντας στοιχείο του πλαισίου είτε υποστηρίζοντας την άρση ανάπτυξης μεγάλων μετατοπίσεων των πλαισίων μέσω των πλακών [4], [17], [37], [73], [103], [111]. Καθώς τα φορτία διατομής που αναπτύσσονται στις διατομές των τοιχωμάτων από τη δράση των κατακόρυφων φορτίων των κτιρίων είναι μικρά, θεωρείται ότι η κύρια κατάσταση όπου η συνεισφορά τους είναι μεγάλη είναι εκείνη κατά την οποία η κατασκευή καταπονείται σε σεισμική διέγερση της βάσης της [2]. Υπό κατακόρυφα φορτία η διατομή των τοιχωμάτων παραμένει συνήθως στην ελαστική περιοχή, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην ευστάθεια του δομικού συστήματος. Κατά τη διέγερση της βάσης ενός κτιρίου με τοιχώματα και γραμμικά δομικά στοιχεία (δοκούς, υποστυλώματα) τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στα τοιχώματα διάτμησης παραλαμβάνονται από τον οπλισμό και το σκυρόδεμα. Με την αύξηση των φορτίων διατομής αναπτύσσονται ολοένα και μεγαλύτερες τάσεις στα υλικά του τοιχώματος, εξασφαλίζοντας έτσι την ικανοποίηση του κριτηρίου αντοχής, κατά το οποίο πρέπει οι δρώσες δυνάμεις να είναι μικρότερες από τις δυνάμεις στις οποίες δύναται να αντισταθεί η διατομή του τοιχώματος [35], [52], [53], [54], [55], [56], [57]. Η υψηλή συνεισφορά των τοιχωμάτων στην αντοχή των αντισεισμικών κατασκευών αυξάνει με την ενεργοποίηση της ανελαστικής τους λειτουργίας. Κατά την παραπάνω λειτουργία οι δυνάμεις που αναπτύσσονται και δρουν στη ρηγματωμένη περιοχή του στοιχείου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που δύνανται να παραλειφθούν από την ελαστική κατάσταση [102]. Έτσι ενεργοποιούνται μια σειρά από μηχανισμοί (μηχανισμοί προχωρημένης διαρροής) που παραλαμβάνουν ένα σταθερό ποσοστό από τις δρώσες δυνάμεις και καταναλώνουν ένα μεγάλο τμήμα από την ενέργεια που εισάγεται στο δομικό σύστημα κατά την απόκρισή του λόγω της

διέγερσης της βάσης του, διατηρώντας έτσι την ένταση σε όλα τα στοιχεία του δομήματος σε επιθυμητά επίπεδα [14], [15], [18], [20], [33], [67], [77], [78], [113].

Λόγω, λοιπόν, της σπουδαιότητας των τοιχωμάτων για τις αντισεισμικές κατασκευές άρχισε από πολύ νωρίς στα εργαστήρια οπλισμένου σκυροδέματος να γίνεται παγκοσμίως συστηματική έρευνα τόσο σε πειραματικό όσο και σε αναλυτικό επίπεδο, με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων υπό κατακόρυφα και οριζόντια σεισμικά φορτία [11], [12], [13]. Η πειραματική έρευνα που έγινε και γίνεται αφορά τον προσδιορισμό της ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων καθώς στον αντισεισμικό σχεδιασμό που επιβάλλουν οι σύγχρονοι κανονισμοί θεωρείται δεδομένο ότι τα δομικά στοιχεία των κατασκευών που υπόκεινται σε σεισμική διέγερση της βάσης τους αναπτύσσουν ανελαστική συμπεριφορά [1], [21], [22], [23], [28], [29], [65], [66]. Επομένως έγινε σύντομα κατανοητό ότι η βαθύτερη γνώση της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την ορθότερη διαμόρφωση των κανονισμών και άρα τη σύνταξη ρεαλιστικών προδιαγραφών τόσο για τον προσδιορισμό των σεισμικών φορτίων (συντελεστής συμπεριφοράς q) όσο και για την διαστασιολόγηση των κατασκευών.

Αρχικά τα τοιχώματα αντιμετωπίστηκαν ως δοκοί. Αυτού του είδους η προσομοίωση έδινε κάποια προσέγγιση, η οποία με την πρόοδο της έρευνας και τη βελτίωση των μετρητικών διατάξεων κρίθηκε ανεπαρκής. Έτσι, έγινε φανερή η ανάγκη για ιδιαίτερη αντιμετώπιση των τοιχωμάτων, ώστε να αναπτυχθούν μοντέλα που να προσομοιώνουν, κατά το δυνατό καλύτερα, περισσότερες παραμέτρους [107], [108], [109].

Οι κυριότεροι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται σήμερα για την ερμηνεία της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων είναι:

α) Ακραίες περισφιγμένες περιοχές που λειτουργούν:

- Ως στοιχεία αξονικά φορτιζόμενα (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω κάμψης) [16], [38].
- Ως βλήτρα στα άκρα του κεντρικού πάνελ που παραλαμβάνουν, ιδιαίτερα στο θλιβόμενο άκρο, διατμητική ένταση [40].
- Ως η περιοχή αγκύρωσης του οπλισμού κορμού [79].

β) Κεντρικό φάτνωμα που λειτουργεί:

- Ως στοιχείο αξονικά φορτιζόμενο με υποτυπώδη περίσφιξη (πλέγματα+άγκιστρα).
- Ως το κύριο στοιχείο παραλαβής διατμητικών δυνάμεων του τοιχώματος [3].
- Ως δευτερεύον στοιχείο παραλαβής κάμψης [107], [108], [109].

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές σειρές πειραμάτων, προκειμένου να προσδιοριστεί και να βελτιωθεί η ανελαστική συμπεριφορά των τοιχωμάτων. Έτσι, ενώ το πρόβλημα της κάμψης δείχνει να έχει αντιμετωπισθεί επαρκώς καθώς υπάρχει ικανοποιητική σύμπτωση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων σε ότι αφορά την καμπτική συμπεριφορά τοιχωμάτων, το πρόβλημα της διάτμησης εξακολουθεί να βρίσκεται υπό εντατική διερεύνηση λόγω της διαφοράς μεταξύ πειραμάτων και ανάλυσης σε ότι αφορά τη διατμητική συμπεριφορά τοιχωμάτων [104], [105]. Η διαφορά δείχνει να οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη μη θεώρηση φαινομένων όπως είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ κάμψης και διάτμησης, η επιρροή της οποίας δεν είναι σταθερή και εξαρτάται κυρίως από το επίπεδο της ορθής και της ταυτόχρονης διατμητικής έντασης, καθώς επίσης και από το βαθμό ρηγμάτωσης του στοιχείου [71], [108]. Επίσης έχουν διαπιστωθεί ασυμβατότητες σε σύγχρονους κανονισμούς στο θέμα του προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής ιδιαίτερα σε τοιχώματα που καταπονούνται σε υψηλή τέμνουσα. Ακόμη είναι γενικά αποδεκτό ότι τοιχώματα που υπόκεινται σε υψηλή ανακυκλιζόμενη διατμητική ένταση παρουσιάζουν μικρή πλαστιμότητα, μικρή ικανότητα απόσβεσης ενέργειας, απότομη μείωση της δυσκαμψίας και ψαθυρού τύπου αστοχία με αποτέλεσμα το πεδίο της έρευνας στα παραπάνω θέματα να επιδέχεται ακόμη αρκετή διερεύνηση [10], [20], [79], [113].

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος είναι συχνή η χρήση τοιχωμάτων προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή και η ευστάθεια των κατασκευών τόσο υπό κατακόρυφα όσο και υπό οριζόντια σεισμικά φορτία. Η παρούσα διατριβή ασχολείται με τον προσδιορισμό και τη βελτίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα που υπόκεινται σε οριζόντια σεισμική φόρτιση. Το ειδικότερο αντικείμενο της διατριβής καθορίζεται μετά την ανασκόπηση των κυριοτέρων διεθνών κανονισμών και της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τη συμπεριφορά τέτοιων τοιχωμάτων. Εξαρχής ορίστηκε ότι η παρούσα έρευνα αφορά τοιχώματα με κύριο διαμήκη οπλισμό στα άκρα, κατάλληλα περισφιγμένο με συνδετήρες και διπλό πλέγμα στον κορμό με άγκιστρα. Η παραπάνω επιλογή έγινε καθώς αυτά τα τοιχώματα

χρησιμοποιούνται για την παραλαβή υψηλής έντασης στις κατασκευές και άρα είναι πολύ πιθανό να αναπτύξουν ανελαστική συμπεριφορά. Τοιχώματα χωρίς οπλισμό ή μόνο με οπλισμό κορμού, όπως επιτρέπουν διάφοροι κανονισμοί, δεν αντιμετωπίζονται στη παρούσα εργασία.

Οι κυριότεροι μηχανισμοί ανάληψης έντασης που θεωρούνται σήμερα στα τοιχώματα είναι:

Μηχανισμός ανάληψης κάμψης

Κατά την ενεργοποίηση του καμπτικού μηχανισμού αναπτύσσονται εφελκυστικές δυνάμεις στο χάλυβα της εφελκυστικής ίνας, οι οποίες εξισορροπούνται από αντίστοιχες θλιπτικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα της θλιβόμενης ακραίας ίνας του στοιχείου. Με αυτόν τον τρόπο επέρχεται η ισορροπία εξωτερικών δυνάμεων και εσωτερικών δυνάμεων για την παραλαβή των αναπτυσσόμενων φορτίων διατομής.

Μηχανισμός ανάληψης τέμνουσας

Ο τρόπος ανάληψης τέμνουσας από τα τοιχώματα είναι ακόμη υπό συνεχή διερεύνηση διεθνώς. Παρ' όλα αυτά έχουν θεσπιστεί κανόνες και προσομοιώματα που δείχνουν να ερμηνεύουν ικανοποιητικά τη διατμητική συμπεριφορά των τοιχωμάτων. Έτσι, τοίχωμα που καταπονείται σε διάτμηση αναπτύσσει πρωτίστως ένα μηχανισμό, όπου η τέμνουσα δύναμη παραλαμβάνεται από λοξά θλιβόμενα στοιχεία σκυροδέματος και από τον εφελκυσμένο χάλυβα του οπλισμού κορμού. Επίσης για την ασφαλή μεταβίβαση των διατμητικών δυνάμεων στη θεμελίωση απαιτείται η ενεργοποίηση μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας σε επίπεδο διατομής. Εκεί η τέμνουσα δύναμη παραλαμβάνεται από τον οπλισμό του εφελκυσμένου τμήματος μέσω λειτουργίας βλήτρου και από την τριβή μεταξύ των αδρανών εκατέρωθεν του ρήγματος, η οποία ενισχύεται από την ύπαρξη θλιπτικών δυνάμεων και ενδεχομένως από πρόσθετο οπλισμό.

Τύποι αστοχίας

Οι τύποι αστοχίας που εμφανίζονται στα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία υπόκεινται σε σεισμική διέγερση της βάσης τους και έχουν προσδιοριστεί και ταξινομηθεί από διάφορους ερευνητές (Σχ. 1) είναι:

α) Αστοχία λόγω διαρροής του εφελκυσμένου οπλισμού ένεκα κάμψης.

β) Αστοχία σε θλίψη της θλιβόμενης ζώνης του τοιχώματος ένεκα κάμψης.

γ) Αστοχία σε διαγώνιο εφελκυσμό του κορμού του τοιχώματος ένεκα διατμήσεως.

δ) Αστοχία σε διαγώνια σύνθλιψη του κορμού του τοιχώματος ένεκα διατμήσεως.

ε) Αστοχία σε διατμητική ολίσθηση του τοιχώματος λόγω τέμνουσας δύναμης.

Η εμφάνιση ορισμένων μορφών αστοχίας ενισχύεται ή υποβιβάζεται συναρτήσει διαφόρων ομάδων παραμέτρων όπως είναι:

- Η ομάδα παραμέτρων που εξαρτώνται από τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του σκυροδέματος και του χάλυβα.

- Η ομάδα παραμέτρων που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τη μορφή της όψης και της διατομής του τοιχώματος.

- Η ομάδα παραμέτρων που εξαρτώνται από τη διάταξη και την ποσότητα των οπλισμών, τη συνεργασία χάλυβα-σκυροδέματος και την κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων στο τοίχωμα.

- Το είδος της φόρτισης στην οποία υπόκειται το τοίχωμα.

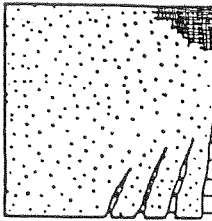
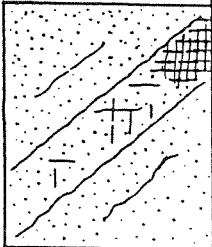
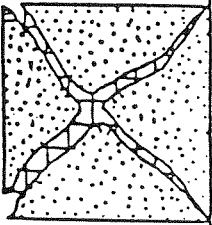
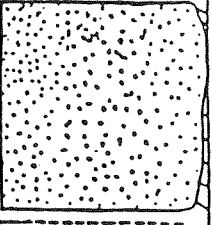
Έχει παρατηρηθεί συχνά η διαρροή και αστοχία κάποιου μηχανισμού, ενώ αρχικά είχε εμφανιστεί ρηγμάτωση σε κάποιον άλλο μηχανισμό ανάληψης έντασης. Έτσι, με δεδομένη την αλληλεπίδραση μεταξύ των διάφορων μηχανισμών ανάληψης έντασης, το πρόβλημα να καταγραφεί, να κατανοηθεί και να βελτιωθεί η αντισεισμική συμπεριφορά τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα γίνεται ακόμη πιο σύνθετο.

Με βάση τα παραπάνω καταστρώθηκε η εξής μεθοδολογία με την εφαρμογή της οποίας προσδιορίστηκαν διεθνώς ανοικτά ερευνητικά θέματα:

α) Ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με πειραματικές εργασίες στα τοιχώματα.

β) Ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με αναλυτικές εργασίες στα τοιχώματα.

γ) Ανασκόπηση των κυριότερων διεθνών κανονισμών.

| | | | | |
|---|--|---|---|--------------------------------|
|  |  |  |  | <p>ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ</p> |
| <p>ΚΑΜΠΤΙΚΗ (Πλάστιμη)</p> | <p>ΚΑΜΠΤΙΚΗ (Ψαθυρή)</p> | <p>ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΟΥ ΚΟΡΜΟΥ (Θλίψη)</p> | <p>ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ</p> | <p>ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗ</p> |

Σχ. 1. Μορφές αστοχίας κρίσιμων περιοχών τοιχωμάτων

1.2. ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Με δεδομένη πλέον την υψηλή σπουδαιότητα των τοιχωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος στις αντισεισμικές κατασκευές η παρούσα διατριβή ασχολείται με τη διερεύνηση, τον προσδιορισμό και τη βελτίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς τους. Ειδικότερα, τα τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης 1.0 έως 1.5 καταπονούνται σε τέμνουσα και ροπή για τις οποίες δεν είναι σαφές το είδος αστοχίας που θα επέλθει. Το παραπάνω πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο σύνθετο, λόγω των ασαφών ορίων μεταξύ καμπτικής και διατμητικής αστοχίας, ιδιαίτερα κατά την περίπτωση που διάφορες ομάδες παραμέτρων μεταβάλλονται, μεγεθύνοντας ή υποβαθμίζοντας κάθε φορά τις αντίστοιχες καμπτικές ή διατμητικές παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, με την πρόοδο της ρηγμάτωσης και τη μεταβολή της δυσκαμψίας μεταβάλλεται η συνεισφορά κάθε μηχανισμού ανάληψης έντασης, με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιθανό η τελική αστοχία του δοκιμίου να επέρχεται από την διαρροή μηχανισμού ο οποίος ενεργοποιείται εντονότερα μετά την ρηγμάτωση κάποιου άλλου μηχανισμού. Συγκεκριμένα, ενώ φαίνεται να υπάρχει σαφής αλληλεπίδραση μεταξύ του καμπτικού και διατμητικού μηχανισμού ανάληψης έντασης, δεν έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχα αναλυτικά μοντέλα ούτε έχουν θεσπιστεί διατάξεις κανονισμών που να λαμβάνουν υπόψη τους την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο αυτών μηχανισμών. Επειδή το παραπάνω φαινόμενο είναι εντονότερο σε στοιχεία με λόγο όψης μεταξύ 1.5 και 1.0 κρίνεται σκόπιμο να γίνει διερεύνηση της μεταβολής της συνεισφοράς των μηχανισμών ανάληψης έντασης για τέτοιου είδους τοιχώματα. Αυτό γίνεται επειδή για λόγους όψης άνω του 1.5 με μεγάλη πιθανότητα, είναι ενισχυμένη η επιρροή της κάμψης και άρα της ορθής έντασης, ενώ για λόγους όψης κάτω από 1.0 υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ενίσχυσης αντίστοιχα της επιρροής της διατμητικής έντασης. Όπως προκύπτει από τις ανασκοπήσεις, μέχρι σήμερα δεν έχει προσδιοριστεί σαφώς η διαφοροποίηση και η μεταβολή των παραπάνω μηχανισμών, όταν το δομικό στοιχείο εκδηλώνει την ανελαστική συμπεριφορά του. Επιπλέον δεν έχει γίνει συστηματική διερεύνηση για την άρση των δυσμενών συνεπειών των διατμητικών παραμορφώσεων στην ανελαστική συμπεριφορά των τοιχωμάτων με λόγο όψης 1.5 και 1.0 και της επιρροής σε αυτές μιας ομάδας παραμέτρων, όπως είναι ο ισχυρός οπλισμός κορμού κλασσικού τύπου (διπλό ορθογώνιο πλέγμα), η αξονική δύναμη και οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί διαφόρων τύπων.

Σε κανένα σύγχρονο κανονισμό δεν έχουν θεσπιστεί διατάξεις σύμφωνα με τις οποίες να ελέγχονται και να διαστασιολογούνται τα δομικά στοιχεία με κριτήριο τον πιθανότερο τρόπο τελικής αστοχίας τους, η εμφάνιση του οποίου είναι πολύ πιθανό να

υστερεί χρονικά. Πράγματι μετά την καμπτική διαρροή δημιουργείται οριζόντια διαμπερής ρηγμάτωση, η οποία παρέχει πρόσφορο πεδίο για την εκδήλωση αστοχίας από διατμητική ολίσθηση. Έτσι, με τη γενικευμένη αντιμετώπιση των τοιχωμάτων που τείνουν να επιβάλουν οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί (αντιμετώπιση του τύπου “όχι μεγαλύτερη τέμνουσα στα τοιχώματα πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο” ανεξάρτητα από το άνοιγμα διάτμησης και τον τύπο όπλισης) υπάρχει υψηλή πιθανότητα να εμφανιστούν απρόβλεπτες και δυσμενείς μορφές τελικής αστοχίας με όλα τα δυσμενή επακόλουθα για το δομικό στοιχείο και την κατασκευή.

Στα προτεινόμενα μέχρι σήμερα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης της ανελαστικής διατμητικής δυσκαμψίας τονίζεται σαφώς η ανάγκη για καλύτερη μοντελοποίηση της διατμητικής ανελαστικής υστερητικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων, και συγκεκριμένα ο ορθός συνυπολογισμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ κάμψης και διάτμησης, λόγω της αδυναμίας των παραπάνω μοντέλων να περιγράψουν ορθολογικά (μη εμπειρικά) και με ικανοποιητική ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η παρούσα διατριβή στοχεύει:

- α) Στην απευθείας μέτρηση όπου αυτό είναι δυνατό ή στον έμμεσο υπολογισμό των παραμορφώσεων των κυριότερων μηχανισμών ανάλυσης έντασης στα τοιχώματα και στον προσδιορισμό του βαθμού διαρροής του κάθε μηχανισμού, προκειμένου να προσδιοριστούν οι κυριότερες αιτίες της μείωσης της αντοχής και της αστοχίας τοιχωμάτων με άνοιγμα διάτμησης 1.5 και 1.0.
- β) Στην άρση ή στη μείωση της διαρροής και της αστοχίας μηχανισμών με σχετικώς ψαθυρού τύπου αστοχία όπως είναι οι μηχανισμοί διάτμησης με φτωχό ανελαστικό κλάδο και άρα μικρή ικανότητα απόσβεσης ενέργειας, οι οποίοι επιταχύνουν ως γνωστό την πτώση αντοχής των τοιχωμάτων [39]. Έτσι γίνεται συγκριτική διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης της παραμόρφωσης των μηχανισμών διάτμησης με κλασικού τύπου οπλισμό και με δισδιαγώνιο οπλισμό. Επίσης ελέγχεται η επιρροή της αξονικής δύναμης στη μεταβολή των διατμητικών παραμορφώσεων.
- γ) Στην κριτική βαθμονόμηση των διατάξεων των κυριότερων κανονισμών σκυροδέματος σχετικά με τη διαστασιολόγηση των τοιχωμάτων έναντι ορθής και διατμητικής έντασης και στην πρόταση βελτιωμένων διατάξεων για καλύτερη και ορθολογικότερη προσέγγιση στο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης κάμψης και διάτμησης, το οποίο φαίνεται να αντιμετωπίζεται συνολικά και γενικευμένα.
- δ) Στον πειραματικό προσδιορισμό νόμων τέμνουσας δύναμης - διατμητικής

παραμόρφωσης και στην εξαγωγή συμπερασμάτων προκειμένου να συμβάλει η παρούσα εργασία στη βελτίωση της αναλυτικής προσομοίωσης της υστερητικής συμπεριφοράς του μηχανισμού διάτμησης.

Τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας αφορούν προφανώς τα τοιχεία που δοκιμάστηκαν, ωστόσο, λόγω της υψηλής τεχνολογίας του πειραματικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε αποτελούν αξιόπιστους οδηγούς για μια πρώτη ερμηνεία των ερωτημάτων που τέθηκαν, ενώ αποτελούν επίσης αξιόπιστο υλικό για τη διασταύρωσή τους με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών προκειμένου να εκτιμηθεί η ορθότητα και η βαρύτητά τους.

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Cardenas, A. E., Magura, D. D., (P.C.A. 1973)

Αντοχή τοιχωμάτων ορθογωνικής διατομής [18], [19].

Παράμετροι:

Η κύρια παράμετρος για τα πρώτα έξι δοκίμια αυτής της εργασίας ήταν η ποσότητα και η κατανομή του κατακόρυφου οπλισμού κορμού ενώ ο οριζόντιος οπλισμός κορμού ήταν ίσος με το 0.27% της διατομής σκυροδέματος. Στα επόμενα έξι δοκίμια οι παράμετροι που ερευνήθηκαν ήταν η ποσότητα και η κατανομή τόσο του κατακόρυφου όσο και του οριζόντιου οπλισμού κορμού. Το έβδομο από τα κοντά τοιχώματα ελέγχθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση προκειμένου να βρεθεί η επιρροή τέτοιου τύπου φόρτισης σε κοντά τοιχώματα.

- 4 δοκίμια με $M/V = 2L_w$ σε απόσταση $L_w/2$ από τη βάση
- 2 δοκίμια με $M/V = 1L_w$ σε απόσταση $L_w/2$ από τη βάση
- 7 δοκίμια με $M/V = 0.5L_w$ σε απόσταση $L_w/2$ από τη βάση

Φόρτιση : Οριζόντια μονότονη ή ανακυκλιζόμενη και αξονική δύναμη στο πρώτα έξι.

Συμπεράσματα:

- Το αξονικό φορτίο αυξάνει την ικανότητα ανάληψης ροπών αλλά μειώνει την καμπυλότητα για την οποία επέρχεται η αστοχία και άρα την πλαστιμότητα καμπυλοτήτων.
- Οριζόντιος οπλισμός διάτμησης ίσος με το 0.27% της διατομής σκυροδέματος ήταν αρκετός για να επιτρέψει την καμπτική αστοχία έναντι της διατμητικής στα τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης 2 και 1, ενώ επίσης στα τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης 0.5 το παραπάνω ελάχιστο ποσοστό οριζόντιου οπλισμού προσδίδει υψηλή ικανότητα ανάληψης φορτίου. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι σε τοιχώματα με χαμηλό άνοιγμα διάτμησης παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα μεγαλύτερο ποσοστό τέμνουσας δύναμης από ότι σε τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης πάνω από 1.
- Δεν παρατηρήθηκε σαφής διαφορά στην αντοχή μεταξύ όμοιων δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Σε όλα τα τοιχώματα παρατηρήθηκε διαρροή του διαμήκους οπλισμού ενώ η

ικανότητα ανάληψης οριζόντιων φορτίων αυξήθηκε με την αύξηση του κατακόρυφου οπλισμού κορμού.

Barda, F., Hanson, J. M. and Corley, W. G. , (P.C.A. 1977)

Διατμητική αντοχή χαμηλών τοιχωμάτων με ακραίες περισφιγμένες περιοχές [10].

Παράμετροι:

Οι κύριες παράμετροι που μεταβάλλονταν σε αυτή την εργασία ήταν η ποσότητα του καμπτικού οπλισμού, του κατακόρυφου και οριζόντιου οπλισμού κορμού καθώς επίσης ο λόγος όψης H/L (Σχ. 2). Επίσης διερευνήθηκε η επιρροή της ανακύκλισης στη συμπεριφορά των τοιχωμάτων. Δοκιμάστηκαν 8 τοιχώματα, μικρού λόγου όψης με περισφιγμένες, διαπλατυσμένες περιοχές στα άκρα.

Συμπεράσματα:

- Δοκίμια υπό ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση έχουν $\cong 10\%$ μικρότερη διατμητική αντοχή από αυτά με οριζόντια μονότονη φόρτιση. Οι υπάρχουσες μεθοδολογίες σχεδιασμού υποεκτιμούν την αντοχή δοκιμίων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Η επιρροή του ποσού του οριζόντιου οπλισμού κορμού έχει μικρή σημασία στη διατμητική αντοχή τοιχωμάτων με λόγο διάτμησης μικρότερο του 0.5. Η διατμητική αντοχή αυξάνει σαφώς με την προσθήκη κατακόρυφου οπλισμού κορμού.
- Οι τέμνουσες δυνάμεις μεταφέρονται μέσω της πλάκας που βρίσκεται στην κορυφή του τοιχώματος στη βάση του, μέσω των θλιβομένων διαγωνίων σκυροδέματος που σχηματίζονται ανάμεσα από τα ρήγματα.
- Η ύπαρξη της πλάκας στην κορυφή τοιχωμάτων με λόγο όψης 0.25 και 0.5 έχει σαφή επιρροή στη διατμητική αντοχή τους.
- Η πλαισιακή λειτουργία που αναπτύσσεται μέσω των περισφιγμένων ζωνών οδηγεί σε πλαστική μορφή αστοχίας.

Oesterle, G. R., Fiorato, E. A., Aristazabal-Ochoa, D. J., Corley, G.W.
(P.C.A. 1977)

Υστερητική συμπεριφορά τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος
[34], [67], [68].

Παράμετροι

Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν σε κάθε δοκίμιο ήταν η μορφή διατομής των τοιχωμάτων (Σχ. 3,4), οι ποσότητες των οπλισμών κάμψης, διάτμησης και περίσφιξης, η ιστορία φόρτισης, η αξονική θλιπτική δύναμη και η αντοχή σκυροδέματος. Επίσης δύο δοκίμια επισκευάστηκαν και ξαναδοκιμάστηκαν.

Στόχος της εργασίας ήταν να προσδιοριστεί η επιρροή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης στα χαρακτηριστικά της καμπύλης φόρτισης - παραμόρφωσης των δοκιμίων, όπως είναι η πλαστιμότητα, η δυσκαμψία, η ικανότητα απόσβεσης ενέργειας και αντοχή.

Σχεδιάστηκαν 16 δοκίμια με λόγο όψης ίσο με 2.4. Τα δοκίμια είχαν ορθογωνική διατομή (2), διατομή με υποστυλώματα στα άκρα (12) και διατομή με εγκάρσιες διαπλατύνσεις στα άκρα (2).

Συμπεράσματα:

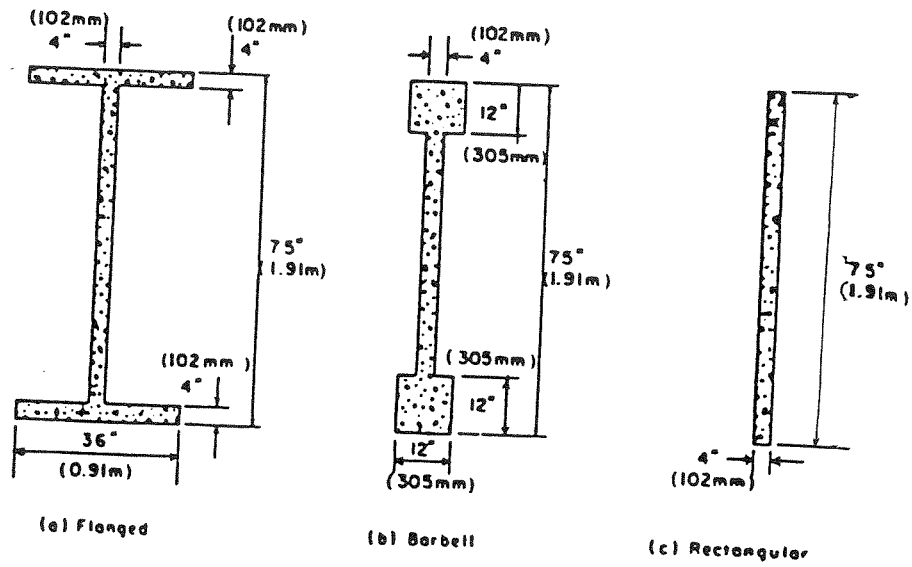
- Η υστερητική συμπεριφορά που παρατηρήθηκε καθώς και τα χαρακτηριστικά της καμπύλης φόρτισης παραμόρφωσης των τοιχωμάτων είναι παρόμοια με αυτή των δοκών.
- Τα τοιχώματα που δοκιμάστηκαν επέδειξαν ικανοποιητική ικανότητα ανελαστικής παραμόρφωσης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Γενικά η πλαστιμότητα στροφών αυξήθηκε με την μείωση του επιπέδου της διατμητικής έντασης.
- Δοκίμια που υπόκεινται σε υψηλή διατμητική ένταση χάνουν την αντοχή τους λόγω αστοχίας του κορμού σε σύνθλιψη. Στην παρούσα εργασία θλιπτική τάση της τάξης του 0.1f_c αύξησε την πλαστιμότητα για την οποία επήλθε η αστοχία κορμού. Επίσης η αύξηση της ποσότητας του οριζόντιου οπλισμού κορμού είχε πολύ μικρή επιρροή στην πλαστιμότητα για την οποία επήλθε η αστοχία κορμού.
- Η διατμητική παραμόρφωση στην πλαστική περιοχή του τοιχώματος είναι συζευγμένη με την καμπτική στροφή. Αυτή η σύζευξη οδηγεί σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις, οι οποίες προκύπτουν μετά την καμπτική διαρροή. Η πιο πάνω μορφή παραμόρφωσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κατασκευές που σχεδιάζονται

με θεωρία πλαστικότητας.

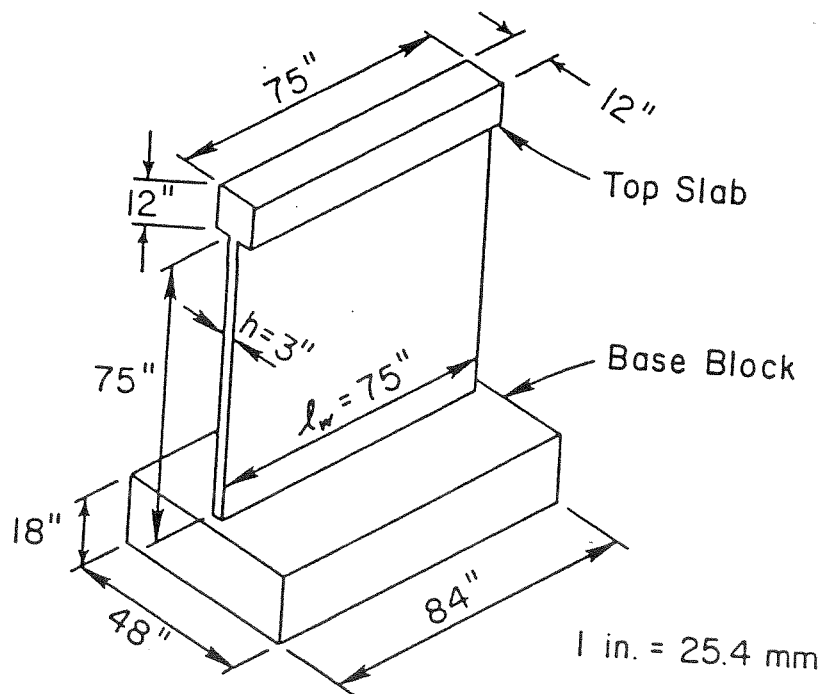
- Η σχέση που παρατηρήθηκε μεταξύ διατμητικής παραμόρφωσης και καμπτικής στροφής είναι δυνατό να απλοποιησει τη μοντελοποίηση της ανελαστικής διατμητικής παραμόρφωσης.
- Όλα τα δοκίμια επέδειξαν αντοχή μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει από τον κανονισμό A.C.I. Building Code 1971.
- Δοκίμιο που υποβλήθηκε σε 25 ανελαστικούς κύκλους είχε κατά 20% μικρότερη αντοχή από αντίστοιχο δοκίμιο που φορτίστηκε μονότονα.
- Η πρόσθεση οριζόντιων συνδετήρων περίσφιξης γύρω από τον κύριο καμπτικό οπλισμό στην κρυφοκολόνα δεν είχε σαφή επιρροή στην αντοχή τοιχωμάτων με καμπτική κυρίως συμπεριφορά, ενώ αντίθετα οδήγησε σε αύξηση αντοχής των τοιχωμάτων με διατμητική κυρίως συμπεριφορά κατά 22%. Επίσης η πρόσθεση συνδετήρων διπλασίασε την πλαστιμότητα μετατοπίσεων στην κορυφή για τοιχώματα με καμπτική συμπεριφορά, ενώ δεν είχε σαφή επιρροή στην αντίστοιχη πλαστιμότητα τοιχωμάτων με διατμητική κυρίως συμπεριφορά.
- Όλα τα δοκίμια επέδειξαν ικανοποιητική ανελαστική συμπεριφορά.
- Η επισκευή δοκιμίου με την επανασκυροδέτηση του σκυροδέματος κορμού, έδωσε τοίχωμα ίσης αντοχής με το αρχικό. Επίσης τα δύο δοκίμια είχαν τον ίδιο τύπο τελικής αστοχίας (διατμητικό), ενώ η αρχική δυσκαμψία του παρθενικού δοκιμίου ήταν υψηλότερη από την αντίστοιχη δυσκαμψία του επισκευασμένου δοκιμίου.
- Η αστοχία του κορμού των τοιχωμάτων σε σύνθλιψη οδηγεί στην απώλεια της ικανότητας του τοιχώματος να παραλάβει άλλη ένταση.
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη διατμητική τάση των $10\sqrt{f'_c}$ psi ($0.83\sqrt{f'_c}$ MPa) που επιτρέπει ο κανονισμός κτιρίων ACI 1983 δεν εξασφαλίζει τα τοιχώματα από πιθανή αστοχία του κορμού σε σύνθλιψη.
- Η αστοχία του κορμού σε σύνθλιψη εξαρτάται από το μέγεθος της διατμητικής έντασης και το επίπεδο της αντίστοιχης παραμόρφωσης.
- Το πηλίκο της οριζόντιας μετατόπισης κορυφής προς το ύψος του δοκιμίου (δ) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με έμφαση στον αντισεισμικό σχεδιασμό τοιχωμάτων. Η σχέση της διατμητικής παραμόρφωσης γ με το παραπάνω πηλίκο για χαμηλή αξονική δύναμη ή μηδενική είναι της μορφής:

$$\gamma = [0.76 - 2.6N / (A_g \cdot f'_c)] / \delta \quad \text{για } 0 < N / (A_g \cdot f'_c) \leq 0.09$$

- Τοιχώματα που υπόκεινται σε χαμηλή ονομαστική διατμητική ένταση εμφανίζουν σχεδόν οριζόντια ρήγματα, ενώ ασθενής λειτουργία δικτυώματος εμφανίζεται για τη μεταφορά τέμνουσας. Μετά τη διαρροή η τέμνουσα μεταφέρεται κυρίως μέσω τριβής και λειτουργίας βλήτρου μέχρι την αστοχία του τοιχώματος σε κάμψη.
- Η αξονική δύναμη μειώνει την πλαστιμότητα στροφών σε υψηλά τοιχώματα ενώ η ύπαρξή της έχει το αντίθετο αποτέλεσμα σε τοιχώματα με υψηλή διατμητική ένταση, καθώς η αξονική ένταση αυξάνει τη δυσκαμψία μέσω της αύξησης της συνεισφοράς του μηχανισμού εμπλοκής αδρανών και αποτρέπει τη μείωση της διατμητικής δυσκαμψίας και αντοχής που συνεπάγεται η απώλεια της επικάλυψης σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Η διατμητική αστοχία μπορεί να αποφευχθεί, εάν ο απαιτούμενος οριζόντιος οπλισμός κορμού προσδιοριστεί έτσι ώστε να προηγείται η καμπτική αστοχία της διατμητικής. Περαιτέρω αύξηση του οριζόντιου οπλισμού κορμού έχει μικρή συμβολή στη βελτίωση της πλαστιμότητας δοκιμίων που αστοχούν από θραύση του κορμού.
- Οι περισφιγμένες ακραίες περιοχές περιορίζουν την αστοχία από διατμητική ολίσθηση στη βάση λειτουργώντας ως μεγάλα βλήτρα.
- Τα ορθογωνικά τοιχώματα είναι πιο επιρρεπή στην αστοχία λόγω της απώλειας της εκτός επιπέδου ευστάθειας. Τοιχώματα με διαπλατυσμένα άκρα ή με ενισχυμένες περισφιγμένες περιοχές έχουν μεγαλύτερη εκτός επιπέδου δυσκαμψία, αλλά είναι πιο επιρρεπή στην αστοχία από θραύση κορμού λόγω της γενικώς υψηλότερης ικανότητάς τους να αναλαμβάνουν ροπή έναντι τέμνουσας και άρα λόγω του έντονου περιορισμού της θλιβόμενης ζώνης.
- Η αντοχή του σκυροδέματος επηρεάζει την αντοχή θραύσης του κορμού και των περισφιγμένων ζωνών καθώς επίσης και τη συμμετοχή του μηχανισμού εμπλοκής αδρανών στην ανάληψη της τέμνουσας δύναμης.
- Η μείωση της δυσκαμψίας είναι συνάρτηση της μέγιστης μετακίνησης που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενο κύκλο.



Σχ.4. Τυπικές διατομές δοκιμίων με τις διαστάσεις τους από την εργασία των Oesterle et al το 1980.



Σχ. 5. Διαστάσεις δοκιμίου ορθογωνικής διατομής από την εργασία των Cardenas et al. 1980.

A. E. Cardenas, H. G. Russel and W. G. Corley (P.C.A. 1980)
Αντοχή χαμηλών τοιχωμάτων [20].

Παράμετροι:

Οι κυριότερες παράμετροι που διερευνήθηκαν σε αυτή την εργασία ήταν η επιρροή του οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού κορμού τοιχωμάτων με λόγο όψης 1, χωρίς συνδετήρες περίσφιξης των άκρων και με απουσία αξονικής δύναμης στην ανελαστική συμπεριφορά τοιχωμάτων Ο/Σ (Σχ. 5). Ασκήθηκε οριζόντια μονότονη φόρτιση στην κεφαλή έξι δοκιμίων, ενώ σε ένα δοκίμιο ασκήθηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Στόχος: Βαθμονόμηση διατάξεων του ACI 318-77 για τον οπλισμό διάτμησης χαμηλών τοιχωμάτων που υπόκεινται σε οριζόντιες δυνάμεις. Κατασκευάστηκαν 7 δοκίμια με λόγο όψης 1

Συμπεράσματα

Για τα τοιχώματα που δοκιμάστηκαν, ποσοστό οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού κορμού ίσο με 0.25% της διατομής σκυροδέματος συνεισφέρει στην επίτευξη ικανοποιητικής διατμητικής αντοχής των τοιχωμάτων. Επίσης παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μείωση της τάξης του 10% στην αντοχή των τοιχωμάτων, όταν πάμε από μονότονη σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Αξίζει να τονιστεί εδώ πως τα δύο όμοια δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση παρουσίασαν τον ίδιο τύπο αστοχίας (διατμητική ολίσθηση).

Wang, T.Y., Bertero, V.V., and Popov, E.P., (Berkeley, 1975)

Υστερητική συμπεριφορά τοιχωμάτων Ο/Σ με διαπλατύνσεις [111].

Κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια με διαπλατύνσεις στα άκρα σε κλίμακα 1/3 που προσομοίωναν τους τρεις πρώτους ορόφους πολυώροφου τοιχώματος.

Τα κυριότερα συμπεράσματα αυτής της εργασίας είναι:

- με την παρούσα μεθοδολογία κατασκευής τα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος είναι δυνατό να επιδείξουν πλάστιμη συμπεριφορά ακόμη και υπό υψηλή διατμητική επιπόνηση ($10\sqrt{f'_c}$)
- η πλαστιμότητα μετατοπίσεων υπό μονότονη φόρτιση είναι αρκετά υψηλότερη ($\mu_s=10$) από την αντίστοιχη πλαστιμότητα που προκύπτει υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση ($\mu_s=4$). Η δεύτερη τιμή είναι πιο ρεαλιστική καθώς με την οριζόντια ανακύκλιση προσομοιώνεται καλύτερα η σεισμική διέγερση της βάσης από ότι με την οριζόντια

μονότονη φόρτιση

- το ποσό της σεισμικής τέμνουσας που μπορεί να παραλάβει ένα τοίχωμα υποεκτιμάται από τους κανονισμούς με αποτέλεσμα ο λόγος διάτμησης να είναι χαμηλότερος και άρα το τοίχωμα να έχει πιο ψαθυρή συμπεριφορά από ότι αρχικά είχε προβλεφθεί.

Vallenas, M.J., Bertero, V.V., and Popov, E.P., (Berkeley, 1979)

Υστερητική συμπεριφορά τοιχωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος [103].

Παράμετροι:

Σε αυτή την εργασία διερευνήθηκε η επιρροή στην υστερητική συμπεριφορά τοιχωμάτων (όπως είναι η δυσκαμψία, η αντοχή, η πλαστιμότητα, η συμμετοχή των διάφορων μηχανισμών ανάληψης έντασης στις συνολικές μετατοπίσεις, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και η μορφή τελικής αστοχίας), της μορφής του συνδετήρα (τετραγωνικοί έναντι σπειροειδών), της μορφής της διατομής των τοιχωμάτων (ορθογωνική διατομή έναντι διατομής με διαπλατύσεις), του ανοίγματος διάτμησης, της μονότονης έναντι ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Διερευνήθηκε επίσης η καταλληλότητα των τεχνικών επισκευής. Κατασκευάστηκαν 4 δοκίμια από τα οποία δύο με διαπλατύσεις και δύο ορθογωνικής διατομής (Σχ. 6,7). Ένα δοκίμιο από κάθε ομάδα υποβλήθηκε σε μονότονη φόρτιση και ένα σε ανακυκλιζόμενη. Τα δοκίμια αυτά επισκευάστηκαν και ξαναδοκιμάστηκαν.

Συμπεράσματα:

- Η μέγιστη καμπτική αντοχή τοιχωμάτων δύναται να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια από την εξίσωση:

$$M_{\max} = (A_{\text{scol}} \cdot f_{\max} + D/2)d$$

Όπου:

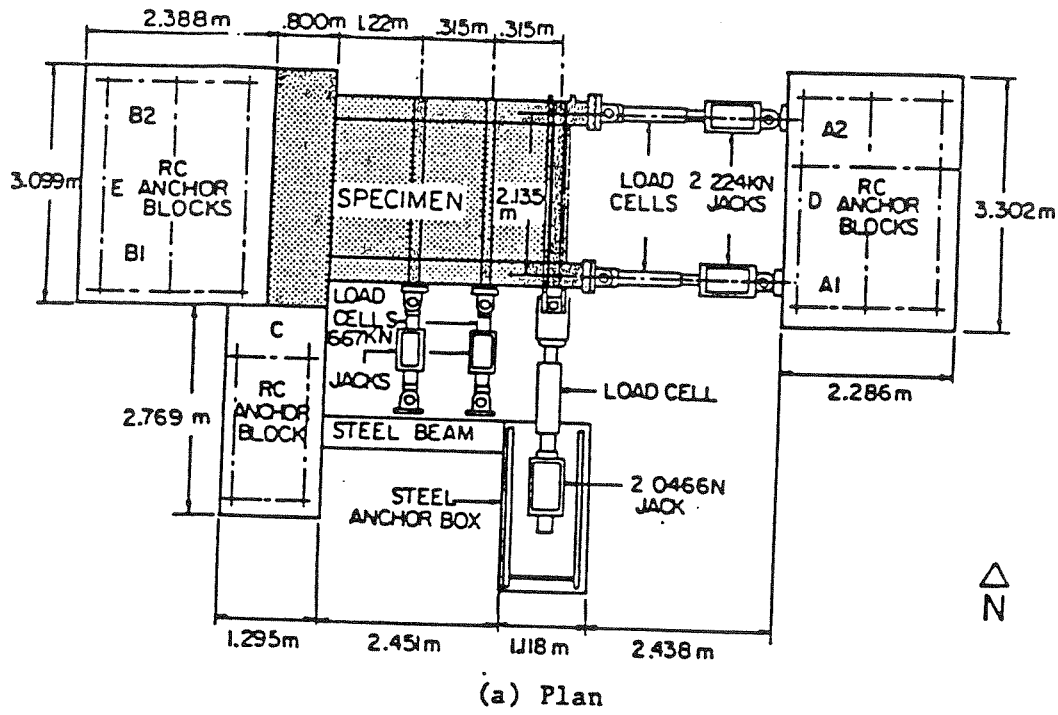
A_{scol} : Διατομή χάλυβα στην κρυφοκολόνα

f_{\max} : Μέγιστη εφελκυστική αντοχή διαμήκους οπλισμού

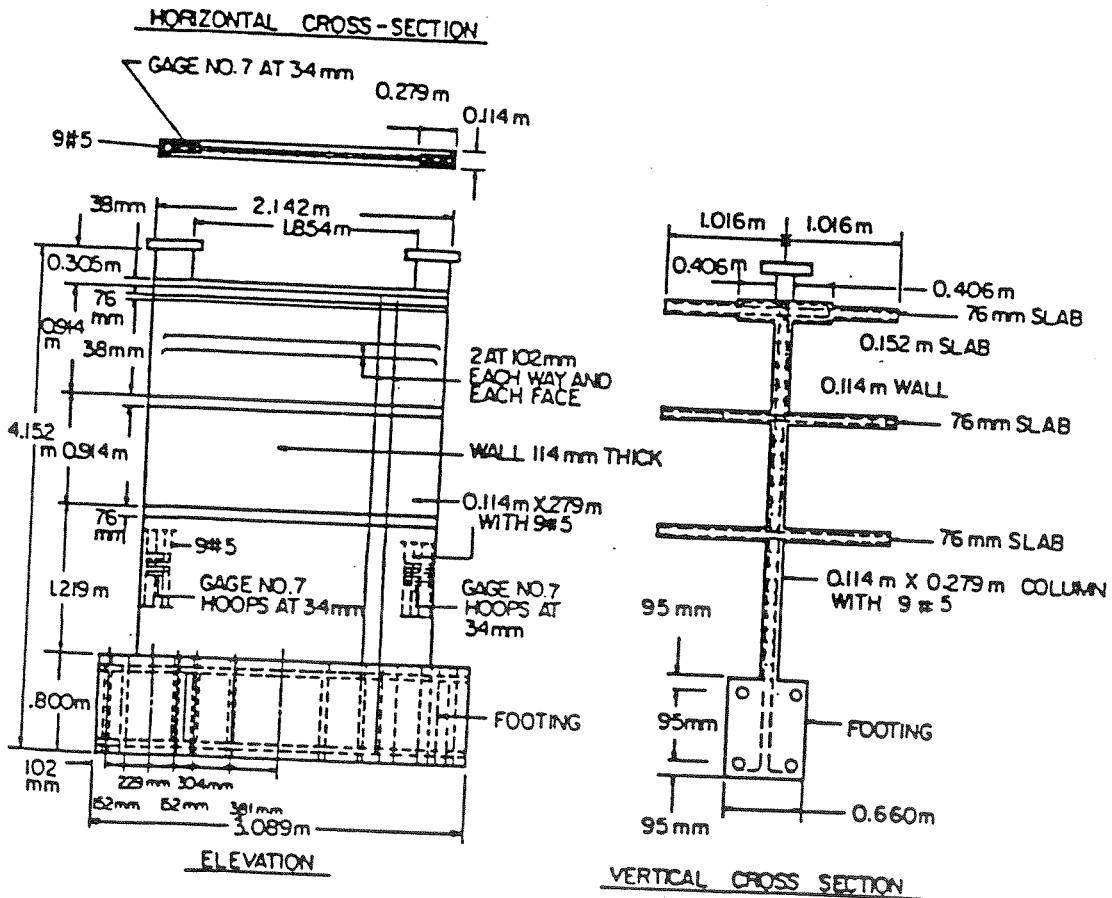
D: Αξονική δύναμη

d: Αξονική απόσταση μέσων κρυφοκολόνων

- Η διατμητική αντοχή υπό μονότονη φόρτιση δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από τον UBC, επειδή στις αντίστοιχες εξισώσεις δεν λαμβάνονται ικανοποιητικά υπόψη παράμετροι, όπως οι ακριβείς ιδιότητες των υλικών, η συνεισφορά των ακραίων



Σχ.6. Λεπτομέρειες από τα πειράματα που έγιναν στο EERC/UBC από τους Wang et al το 1975 και Vallenias et al το 1979.



Σχ. 7. Λεπτομέρειες από τα πειράματα που έγιναν στο EERC/UBC από τους Wang et al το 1975 και Vallenias et al το 1979.

περισφιγμένων περιοχών, η κράτυνση του χάλυβα, η αρνητική επιρροή της πλάκας στη διεύρυνση των ρηγμάτων και η μείωση της δυσκαμψίας στην αρχή των κύκλων φόρτισης για μεγάλες μετατοπίσεις, όπου, ενώ το θλιβόμενο πέγμα δεν κλείνει εντελώς, το εφελκόμενο έχει αρχίσει να ανοίγει. Πρέπει να τονιστεί εδώ η σημαντική συνεισφορά του θλιβόμενου περισφιγμένου πέγματος με τους διαμήκεις οπλισμούς που αποτελεί σημαντικό μηχανισμό ανάληψης τέμνουσας σε προχωρημένο μετελαστικό επίπεδο.

- Στα τοιχώματα με διαπλατύνσεις αναπτύχθηκε διατμητική τάση της τάξης $1.12\sqrt{f_c}$ (Mpa) που οδήγησε σε διατμητική αστοχία ενώ η αντίστοιχη τάση στα τοιχώματα ορθογωνικής διατομής ήταν $0.78\sqrt{f_c}$ (Mpa) χωρίς να επέλθει διατμητική αστοχία.
- Όλα τα δοκίμια είχαν την ικανότητα να φέρουν τα αξονικά φορτία που επιβάλλονταν αφού είχαν χάσει την ικανότητα ανάληψης οριζόντιων φορτίων.
- Για τα τοιχώματα με διαπλατύνσεις ο λόγος μετατόπισης κορυφής προς το ύψος ήταν 6.23% για μονότονη και 4.05% για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ενώ για τα ορθογωνικά τοιχώματα οι αντίστοιχες τιμές ήταν 2.38% και 1.93% αντίστοιχα. Η τελική απορρόφηση ενέργειας ήταν 23% μεγαλύτερη για τα τοιχώματα με διαπλατύνσεις, ενώ για το αυτό επίπεδο παραμόρφωσης τα ορθογωνικά τοιχώματα απορόφησαν 16% περισσότερη ενέργεια.
- Δεν παρατηρήθηκε διαφορά στη συμπεριφορά μεταξύ τοιχωμάτων με σπειροειδείς και ορθογωνικούς συνδετήρες καθώς η μείωση αντοχής λόγω αυξημένης αποφλείωσης που παρατηρήθηκε στο δοκίμιο με σπειροειδή συνδετήρα ισορροπήθηκε από την αύξηση θλιπτικής αντοχής που επέφερε αυτού του είδους η περίσφιξη.

Piia, R., Bertero, V. V. (Berkeley, 1980)

Επιρροή της ποσότητας και του τρόπου τοποθέτησης οπλισμού κορμού στην υστερητική συμπεριφορά τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος [47].

Παράμετροι:

Η επιρροή του ποσού και του τρόπου τοποθέτησης του οπλισμού κορμού του τοιχώματος, η αποτελεσματικότητα των τεχνικών επισκευής με εποξειδική ρητίνη και επανασκυροδέτηση καθώς επίσης η επιρροή του αρμού σκυροδέτησης στην συνολική αντισεισμική συμπεριφορά τοιχωμάτων.

Δοκιμάστηκαν δύο δοκίμια κλίμακας 1/3 σε τρεις σειρές δοκιμών. Στην πρώτη δοκιμή επεβλήθησαν κύκλοι φόρτισης μέχρι τη διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού. Μετά την επισκευή με εποξειδική ρητίνη έγινε η δεύτερη δοκιμή· σ' αυτήν επεβλήθησαν κύκλοι φόρτισης μέχρι την διαρροή του οπλισμού και μετά μονότονη φόρτιση μέχρι την αστοχία. Στην τρίτη δοκιμή, αφού επισκευάστηκε το δοκίμιο με νέο σκυρόδεμα, επεβλήθησαν κύκλοι φόρτισης μέχρι την αστοχία.

Παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση κατά 45° του οπλισμού κορμού ήταν πιο αποτελεσματική στην ανάληψη ανακυκλιζόμενης τέμνουσας από ότι στα δοκίμια που ο οπλισμός κορμού τοποθετήθηκε με τον κλασικό τρόπο. Υπήρξε βελτίωση της τελικής μορφής αστοχίας των τοιχωμάτων και παρατηρήθηκε αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Η συμμετοχή των διατμητικών παραμορφώσεων στις συνολικές παραμορφώσεις ήταν υψηλότερη στον πρώτο όροφο, όπου εκδηλώθηκε έντονη ανελαστική συμπεριφορά και αυξήθηκε στις υψηλότερες πλαστιμότητες μετακινήσεων. Το παραπάνω γεγονός ήταν λιγότερο εμφανές για τοιχώματα με διαγώνιο οπλισμό. Υψηλή σημασία βρέθηκε να έχει η καλή περίσφιξη των ακραίων περιοχών και οι διαπλατύνσεις στα άκρα παρά η σχάρα του κορμού. Το ποσό του οπλισμού βρέθηκε να επηρεάζει περισσότερο την πλαστιμότητα των δοκιμίων που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση παρά την πλαστιμότητα μονοτονικά φορτιζόμενων δοκιμίων. Η επισκευή τοιχωμάτων με εποξειδική ρητίνη δεν αποκατέστησε πλήρως τη δυσκαμψία των αρχικών τοιχωμάτων, αλλά προσέδωσε την απαιτούμενη δυσκαμψία για την ανάπτυξη ικανοποιητικής ανελαστικής συμπεριφοράς. Επίσης ο αρμός σκυροδέτησης συμπεριφέρθηκε πολύ καλά, αν και ο οπλισμός εκεί δεν ικανοποιούσε τις ελάχιστες απαιτήσεις του κανονισμού.

Wagner, T. M. and Bertero, V. V. (Berkeley 1982)

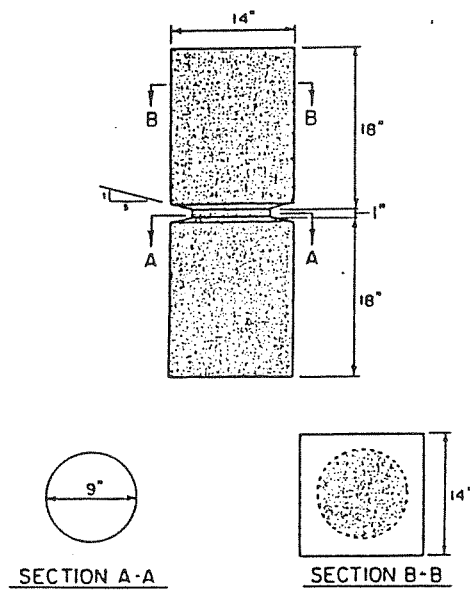
Μηχανική συμπεριφορά ακραίων περισφιγμένων περιοχών τοιχωμάτων διάτμησης [110].

Προσομοίωση της κρυφοκολόνας με δοκίμιο προκειμένου να προσδιοριστεί η ικανότητα ανάληψης τέμνουσας για διάφορες τιμές του αξονικού φορτίου. Η τιμή της αρχικής τέμνουσας που παραλαμβάνεται μέσω τριβής αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του επιπέδου της ορθής έντασης (Σχ. 8,9,10,11).

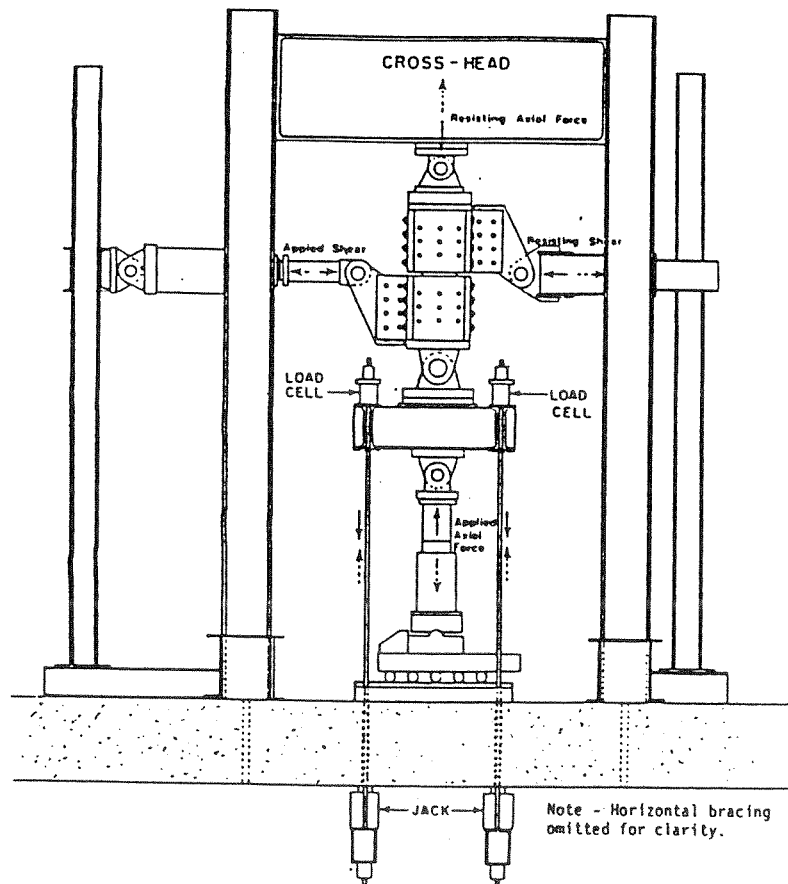
$$\tau = \sigma \cdot \tan\theta + \tau_0$$

Για θραυσμένη επιφάνεια είναι:

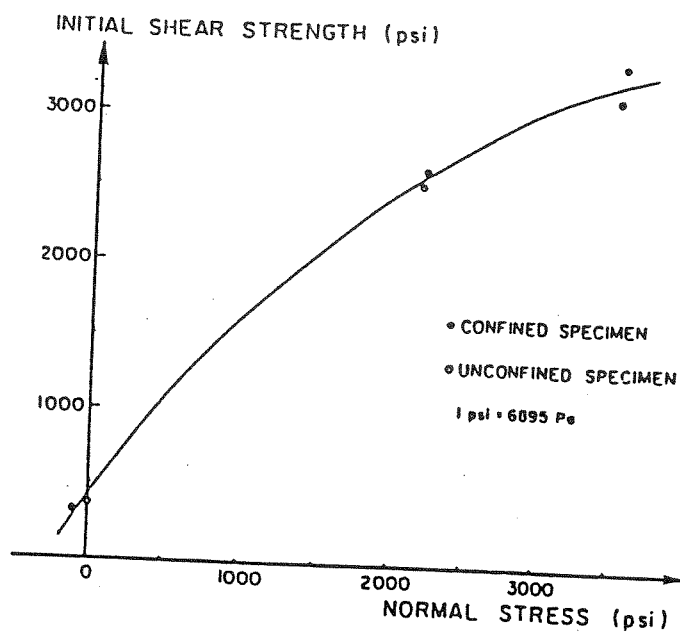
$$\tau = \sigma \cdot \tan\theta, \quad \theta = 32^\circ$$



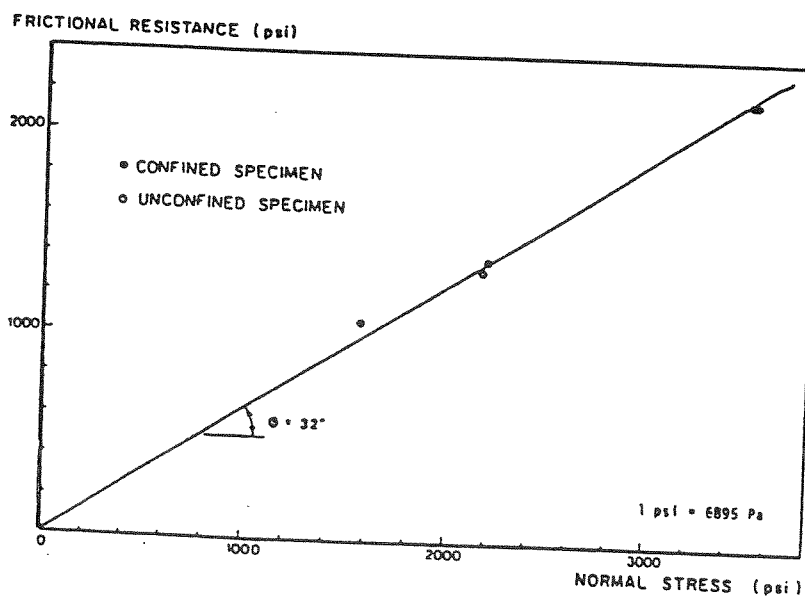
Σχ. 8. Γεωμετρία δοκιμίων από την εργασία των Wagner και Bertero το 1982.



Σχ. 9. Πειραματική διάταξη φόρτισης από την εργασία των Wagner και Bertero το 1982.



Σχ. 10. Διάγραμμα αρχικής διατμητικής αντοχής - ορθής τάσης από την εργασία των Wagner και Bertero το 1982.



Σχ. 11. Διάγραμμα αντίστασης τριβής - ορθής τάσης από την εργασία των Wagner και Bertero το 1982.

Alexander C. M. et al. (McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada 1973)

Πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε τοιχώματα διάτμησης [7].

Παράμετροι:

Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν στην παρούσα έρευνα αφορούσαν την μορφή της καμπύλης φορτίου μετατόπισης, τη μεταβολή της δυσκαμψίας, τη μορφή ρηγμάτωσης, την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και την ικανότητα επίδειξης πλάστιμης συμπεριφοράς τοιχωμάτων που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η παραπάνω έρευνα έγινε για διάφορα ανοίγματα διάτμησης, με ή χωρίς αξονικό φορτίο. Κατασκευάστηκαν 5 δοκίμια με άνοιγμα διάτμησης 2, 1.3 και 0.65 υπό κλίμακα 1/2 (Σχ. 12).

Συμπεράσματα :

Η ύπαρξη αξονικού φορτίου αυξάνει την ικανότητα ανάληψης οριζόντιων δυνάμεων, ελαττώνει το ρυθμό μείωσης δυσκαμψίας, και αυξάνει την πλαστιμότητα. Η απορρόφηση ενέργειας βελτιώνεται με την αύξηση της ρηγμάτωσης.

Hernandez O. and Zermeno M. (Mexico 1980)

Αντοχή και συμπεριφορά τοιχωμάτων υπό διατμητική αστοχία [38].

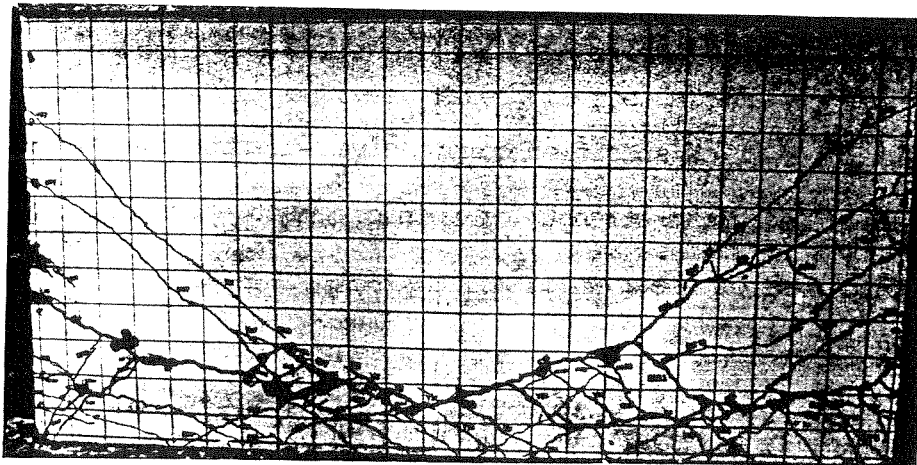
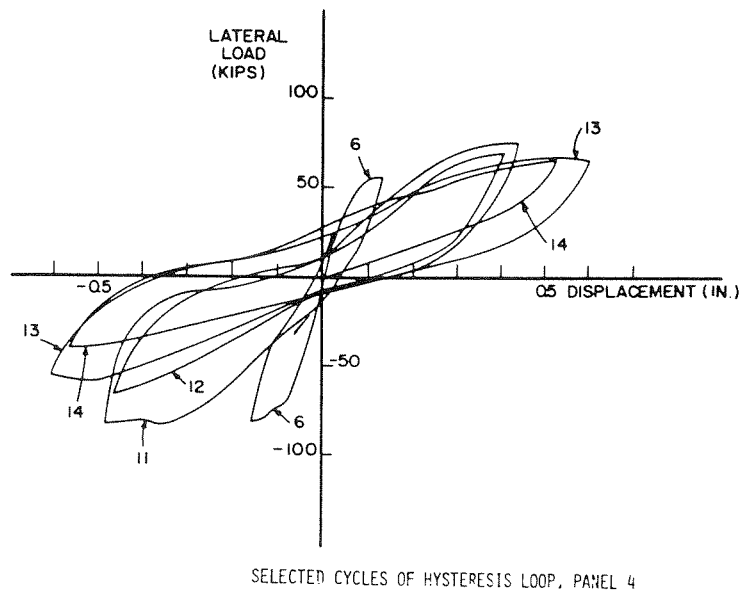
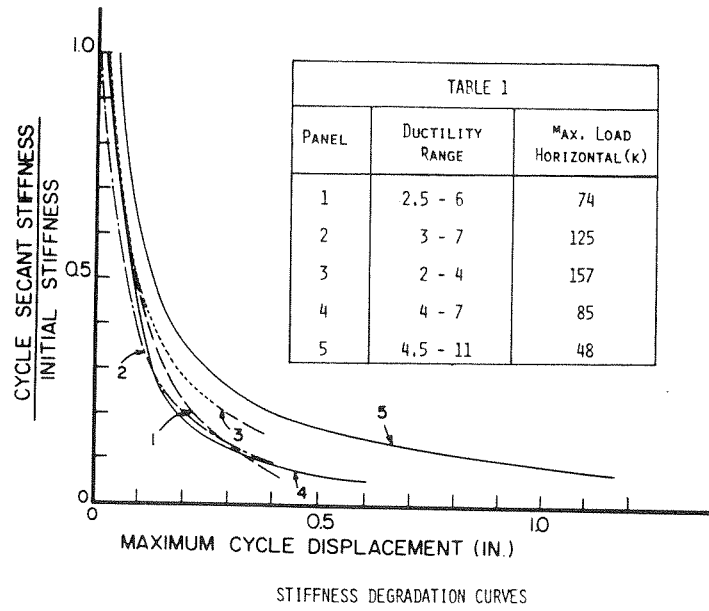
22 δοκίμια, Κλίμακα 1:8

1 δοκίμιο, Πλήρης κλίμακα

Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της επιρροής της διατμητικής αστοχίας στην αντοχή και ανελαστική συμπεριφορά τοιχωμάτων. Κατασκευάστηκαν δοκίμια με διάφορα ανοίγματα διάτμησης (M/VL), διάφορες ποιότητες σκυροδέματος, ποσό και κατανομή του οπλισμού κορμού. Μελετήθηκε ακόμη η επιρροή της αξονικής φόρτισης και η επιρροή των πλακών στην ανελαστική συμπεριφορά των δοκιμίων.

Τα κυριότερα αποτελέσματα ήταν:

- Τοιχώματα που πρόκειται να αστοχήσουν σε τέμνουσα, έχουν ασαφή υστερητική συμπεριφορά.
- Προτείνεται να τοποθετούνται όμοια ποσοστά οπλισμού και στις δύο διευθύνσεις του κορμού για να αποφευχθεί διατμητική αστοχία



Σχ. 12. Καμπύλες μείωσης της δυσκαμψίας, βρόχοι υστέρησης δοκιμίου PANEL 4 και τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου PANEL 2 από την εργασία των Alexander et al το 1973.

- Τα ενδιάμεσα τμήματα της πλάκας παρέχουν σαφή δυσκαμψία και διαφραγματική λειτουργία προσδίδοντας στα τοιχεία μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης κατά την αστοχία, χωρίς να αυξάνεται αντίστοιχα η αντοχή του τοιχώματος.
- Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την ικανότητα παραμόρφωσης κατά την αστοχία είναι το επίπεδο της διατμητικής έντασης, το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού καθώς και το ποσοστό του οπλισμού κορμού.
- Το ποσό και η κατανομή του οπλισμού στα περισφιγμένα άκρα δεν επηρεάζει την ικανότητα παραμόρφωσης κατά την αστοχία.

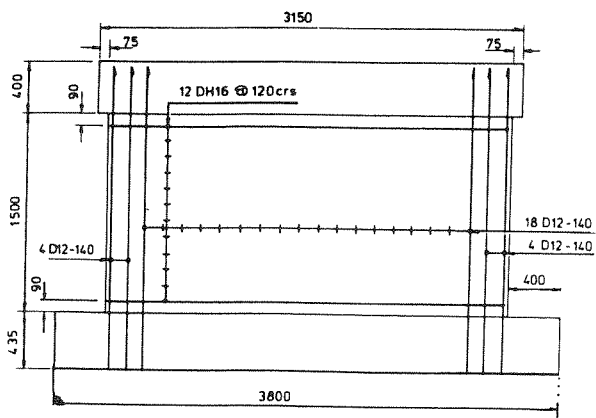
T. Park, M. J. N. Priestley and A. J. Syngge (New Zealand, Canterbury University 1982)

Πλαστιμότητα χαμηλών αντισεισμικών τοιχωμάτων [79].

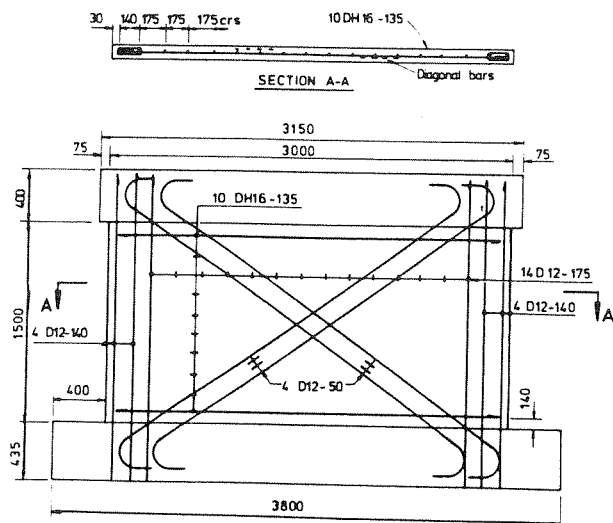
Παράμετροι:

Οι κυριότερες παράμετροι που ελέγχθηκαν σε αυτή την εργασία αφορούσαν την μορφή της διατομής των τοιχωμάτων. Κατασκευάστηκαν τοιχώματα με ορθογωνική διατομή και διατομή με διαπλατύνσεις στα άκρα. Επίσης ελέγχθηκε η επιρροή της ύπαρξης κύριου δισδιαγώνιου οπλισμού κορμού στην ανελαστική συμπεριφορά αυτών των τοιχωμάτων. Κατασκευάστηκαν τέσσερα τοιχώματα με λόγο όψης 0.5 υπό κλίμακα 1/2 από τα οποία δύο είχαν ορθογωνική διατομή και δύο διατομή με διαπλατύνσεις στα άκρα (Σχ. 13α,13β). Σκοπός της εργασίας ήταν:

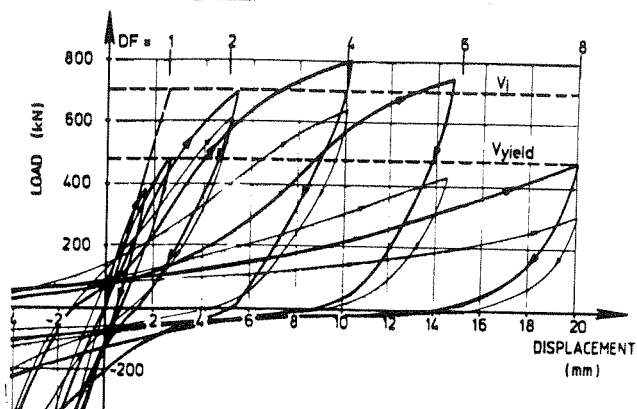
- Να εξεταστεί εάν χαμηλά τοιχώματα με καμπτικού τύπου αστοχία μπορούν να αναπτύξουν υψηλή πλαστιμότητα
- Να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της υστερητικής συμπεριφοράς χαμηλών τοιχωμάτων και να διερευνηθεί η ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια σε σύγκριση με τη σχετική ικανότητα των δοκών και των στύλων.
- Να προσδιοριστεί η μέγιστη πλαστιμότητα μετατοπίσεων
- Να μελετηθεί η συμμετοχή των διατμητικών παραμορφώσεων στην απορρόφηση ενέργειας και τη μείωση της δυσκαμψίας.
- Να εξεταστεί η επιρροή των διαπλατυμένων άκρων στη συνολική υστερητική συμπεριφορά αυτών των τοιχωμάτων.
- Να προσδιοριστούν κανόνες μείωσης των παραμορφώσεων λόγω διατμητικής



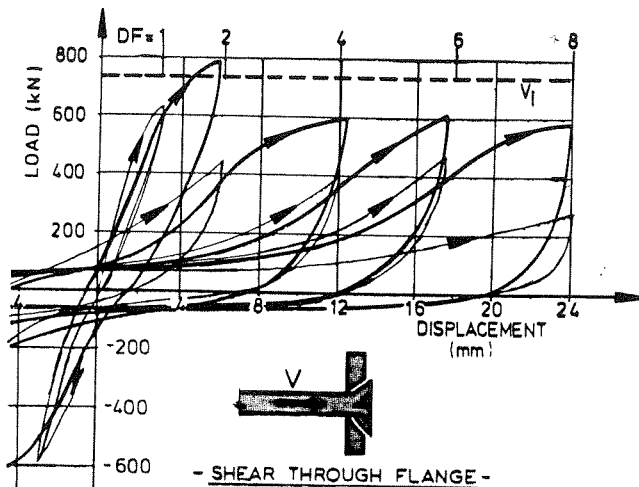
(a) ELEVATION - WALL 1



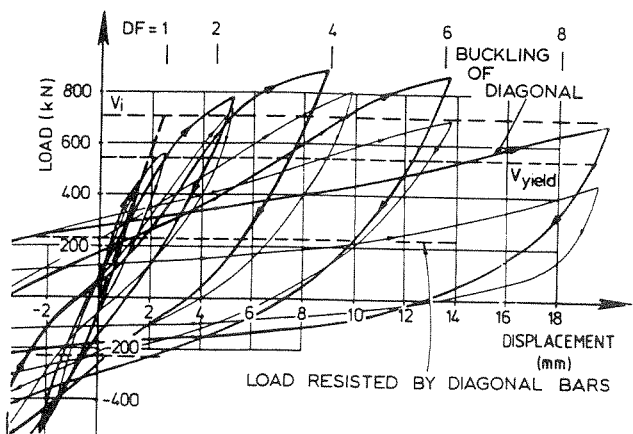
(b) ELEVATION WALL 2



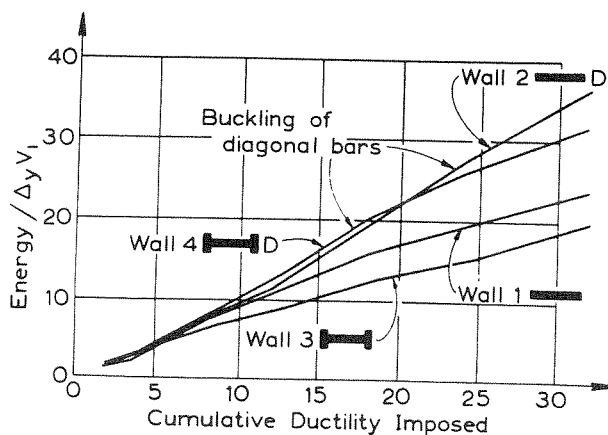
Load-deflection relationship for Wall 1



Load-deflection relationship for flanged Wall



Load-deflection relationship for diagonally reinforced Wall 2



Specific energy dissipation with cumulative ductility

Σχ. 13. Τυπικές όψεις δοκιμών, χαρακτηριστικοί βρόχοι υστέρησης, και διάγραμμα απορρόφησης ενέργειας - πλαστιμότητας από την εργασία των Park et al το 1982.

ολίσθησης.

Βρέθηκε ότι:

Μπορούμε να επιτύχουμε πλάσטיμη συμπεριφορά με την αποτροπή της διατμητικής αστοχίας και την εξασφάλιση της διαρροής του καμπτικού οπλισμού. Το παραπάνω επιτυγχάνεται με την επίτευξη τέτοιας διατμητικής αντοχής στα τοιχώματα ώστε η καμπτική αστοχία να έρχεται για ροπή που δημιουργεί τέμνουσα μικρότερη από την απαιτούμενη για διατμητική αστοχία σε λοξό εφελκυσμό ή διαγώνια σύνθλιψη. Ο διαγώνιος οπλισμός βρέθηκε να αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και να μειώνει τις ολισθήσεις στη βάση των τοιχωμάτων· αυτό ισχύει ακόμη και για λοξό οπλισμό που παραλαμβάνει μόνο ένα 30% της αναπτυσσόμενης τέμνουσας. Ο διδιαγώνιος οπλισμός που τοποθετείται για την παραλαβή τέμνουσας βρέθηκε ότι λειτουργεί ικανοποιητικά καθώς διαπιστώθηκε η διαρροή του. Οριζόντια δύναμη μεταφέρεται απευθείας από την κορυφαία δοκό στο έδαφος μέσω των θλιβόμενων διαγωνίων. Τα τοιχώματα με διαπλατύνσεις είναι πιο επιρρεπή στη διατμητική ολίσθηση κυρίως λόγω της μικρής θλιβόμενης ζώνης (Σχ. 13).

T. Paulay and W. J. Goodsir (New Zealand, 1985)

Πλαστιμότητα τοιχωμάτων [78].

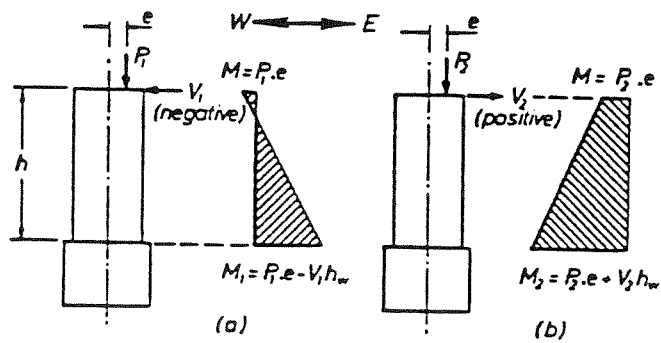
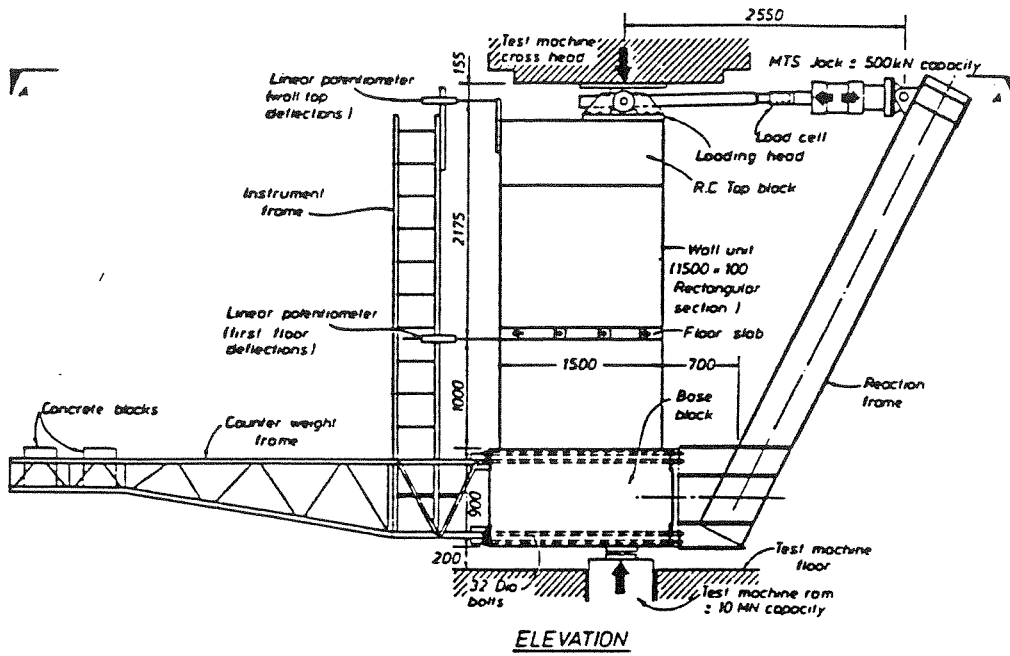
Παράμετροι:

Οι παράμετροι αυτής της εργασίας ήταν η μορφή διατομής (τρια δοκίμια με ορθογωνική διατομή και ένα δοκίμιο με μορφή τύπου T), η ύπαρξη ασύμετρων συνδετήρων στα άκρα τριών δοκιμίων και συμμετρικών σε ένα δοκίμιο. Κατασκευάστηκαν 4 δοκίμια υπό κλίμακα 1:3. Στην κεφαλή εφαρμόστηκε έκκεντρη αξονική φόρτιση και οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Σχ. 14).

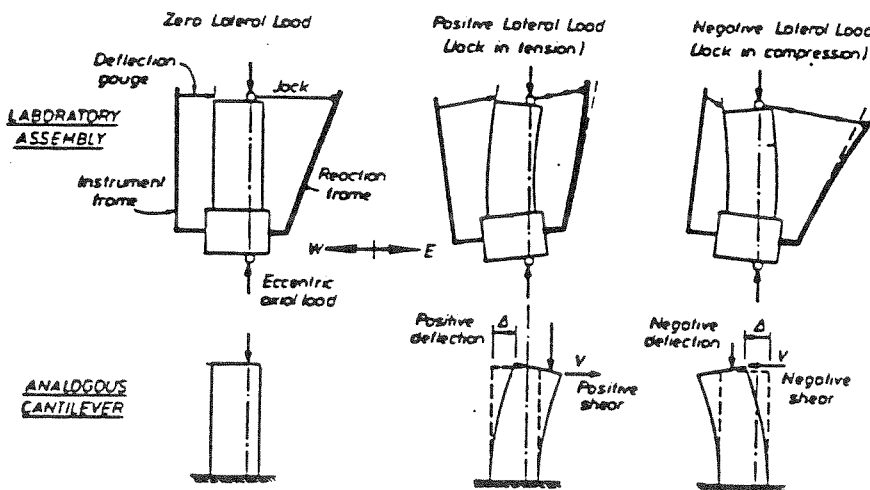
Στόχος της εργασίας ήταν να προσδιοριστεί η ικανότητα των περισφιγμένων άκρων να αναπτύσσουν οριζόντια ευστάθεια υπό υψηλή αξονική επιπόνηση καθώς επίσης και η μελέτη της συνολικής ανελαστικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Συμπεράσματα

- Η αστοχία των δοκιμίων άρχισε από θραύση του απερίσφικτου σκυροδέματος δίπλα στις περισφιγμένες περιοχές. Δεν επέρχεται απώλεια της εκτός επιπέδου ευστάθειας, όταν το πάχος του τοιχώματος είναι μεγαλύτερο από το ένα δέκατο του ύψους του δοκιμίου.



Bending Moment Patterns Applied to Test Specimens.



Σχ. 14. Πειραματική διάταξη και μέθοδος φόρτισης από την εργασία των Goodsir et al το 1985.

- Η περισφιγμένη περιοχή πρέπει να καλύπτει τα 2/3 της θλιβόμενης ζώνης και όχι μόνο τη μισή, όπως ορίζει ο N.Z.C.
- Οι οριζόντιες διατμητικές παραμορφώσεις στην πλαστική περιοχή των τοιχωμάτων, όταν συνδυαστούν με μεγάλες αξονικές και καμπτικές φορτίσεις, έχουν ως αποτέλεσμα τον κατακερματισμό των περισφιγμένων περιοχών. Λόγω αυτής της αδυναμίας έχουμε ανακατανομή των κατακόρυφων θλιπτικών δυνάμεων και πέρα από την ακραία περισφιγμένη ζώνη, με αποτέλεσμα την αστοχία του απερίσφικτου σκυροδέματος στον κορμό.
- Οι διαπλατύνσεις στα άκρα των τοιχωμάτων ή οι ακραίες κρυφοκολόνες βοηθούν στην αποτροπή της απώλειας της εκτός επιπέδου ευστάθειας των τοιχωμάτων αυξάνοντας την αντίστοιχη δυσκαμψία.

F.V.Yanez, R. Park & T. Paulay. (Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1992)

Σεισμική συμπεριφορά τοιχωμάτων με ακανόνιστα ανοίγματα [115].

Κατασκευάστηκαν 6 τοιχώματα Ο/Σ με ανοίγματα διάφορων μεγεθών και τυχαίας τοποθέτησης (ίδιου συνολικού εμβαδού) τα οποία υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ο κατακόρυφος οπλισμός ήταν 0.5% της διατομής του σκυροδέματος σε όλες τις περιπτώσεις (Σχ. 15).

Συμπεράσματα:

- Το μέγεθος και η θέση των ανοιγμάτων δεν έχουν σαφή επιρροή στην υστερητική συμπεριφορά των τοιχωμάτων, όταν τα ανοίγματα αυτά έχουν ίδιο εμβαδόν.
- Ο σχεδιασμός των τοιχωμάτων με ακανόνιστα ανοίγματα χρησιμοποιώντας τη θεωρία των δεσμών (εφελκυσμός) και των ενισχυμένων περισφιγμένων περιοχών (θλίψη) κρίνεται αξιόπιστος από την σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Όλα τα δοκίμια επέδειξαν πλάστιμη καμπτική συμπεριφορά με λόγο σχετικής μετατόπισης βάσης κορυφής 2%.
- Το μοντέλο δεσμών και περισφιγμένων περιοχών που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής αστοχίας των τοιχωμάτων με ακανόνιστα ανοίγματα δίνει συγκριτικά αποτελέσματα και με ακρίβεια ίση ή και λίγο μεγαλύτερη από αυτή της ελαστικής ανάλυσης τοιχωμάτων με κανονικά ανοίγματα. Το παραπάνω μοντέλο

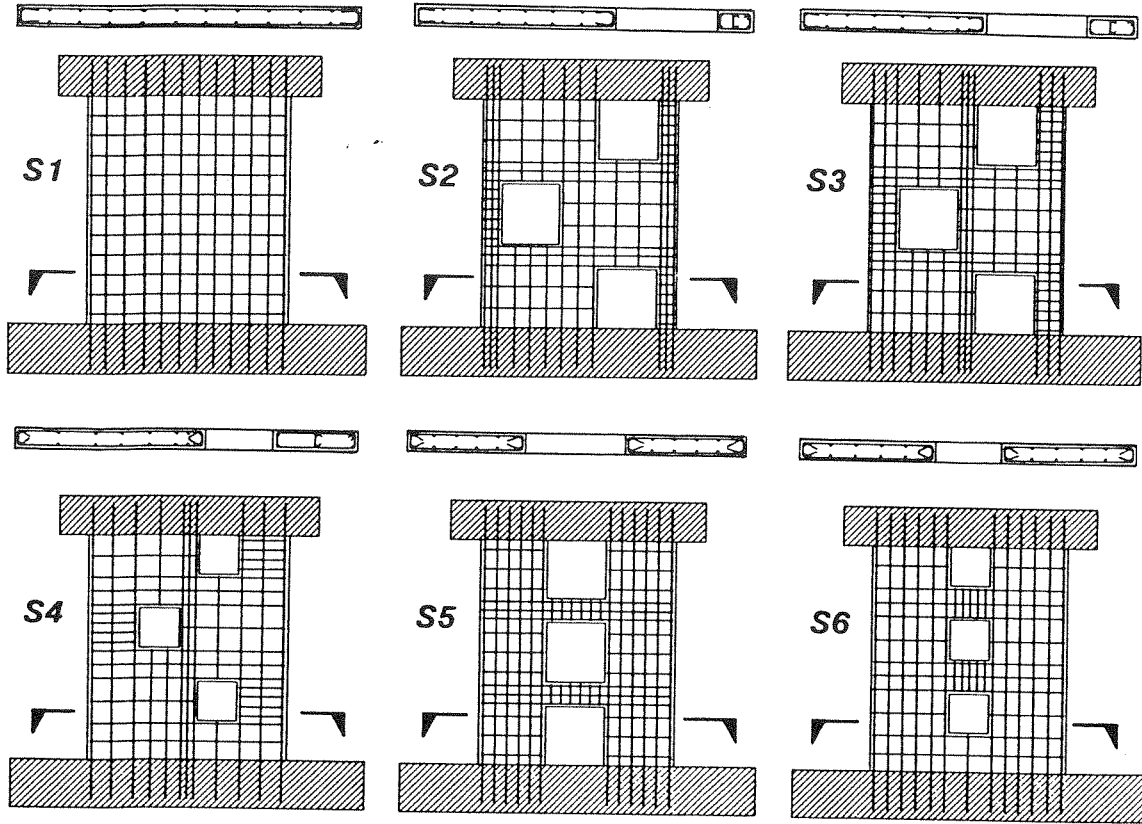


Figure 1. Wall specimens S1 to S6 (cross sections are shown to a larger scale).

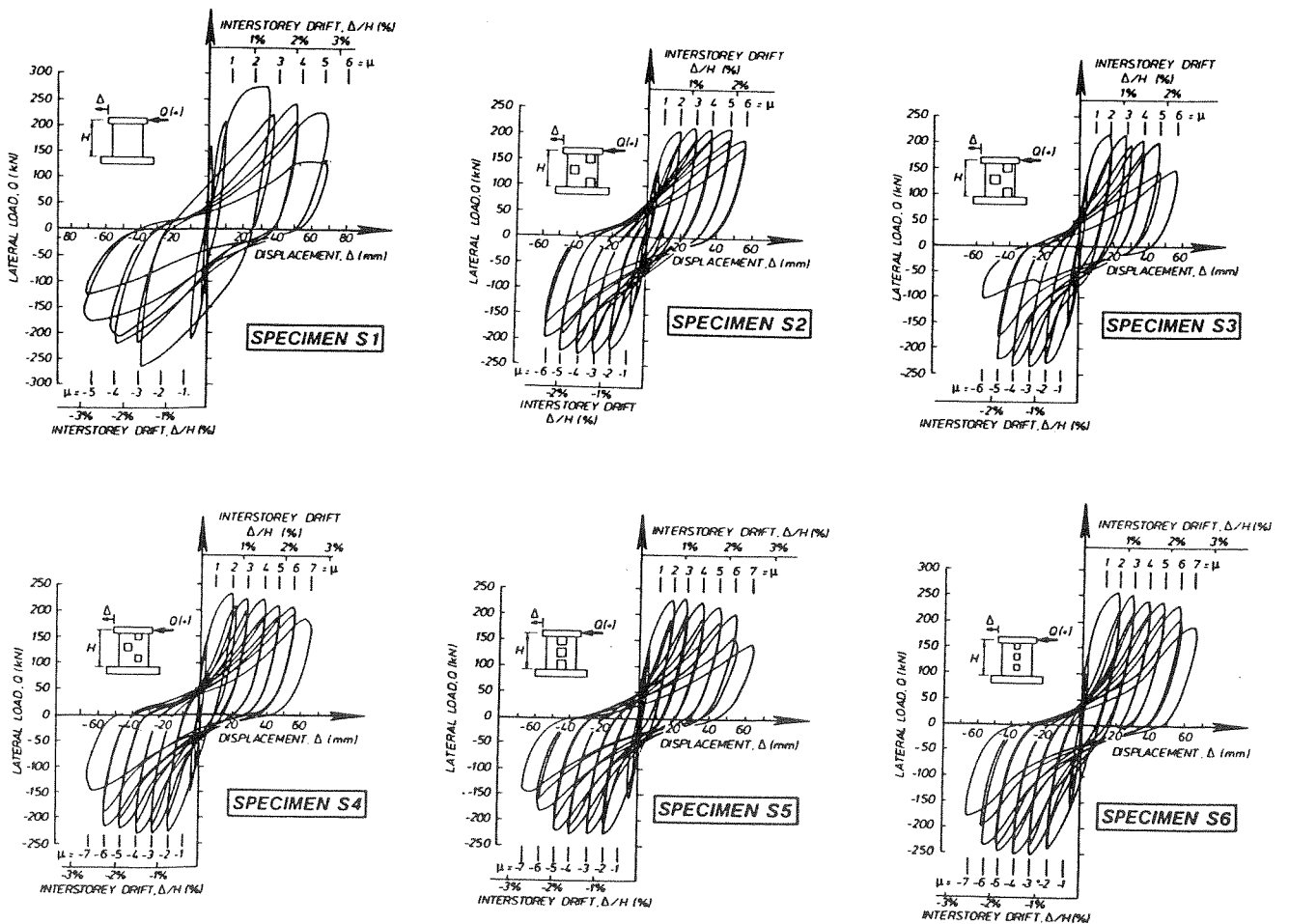


Figure 4. Experimentally observed lateral load versus lateral displacement response.

δείχνει να είναι κατάλληλο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό τοιχωμάτων με ακανόνιστα ανοίγματα.

- Η δυσκαμψία τοιχωμάτων χωρίς ανοίγματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τοιχώματα με εμβαδόν ανοιγμάτων μικρότερο ή ίσο με το 10% του εμβαδού της επιφάνειάς τους.

I. D. Lefas, M. D. Kotsovos (Imperial College, London 1988)

Συμπεριφορά τοιχωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος και προτάσεις για τον σχεδιασμό τους με την μέθοδο της οριακής κατάστασης αστοχίας [54], [55], [56], [57] (Σχ. 16).

Παράμετροι:

- Ανοιγμα διάτμησης 1 και 2 (Σχ. 17,18)
- Υπαρξη και απουσία εξωτερικής αξονικής δύναμης (αξονική τάση ίση με 0.0, 0.1, 0.2 της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος)
- Αντοχή σκυροδέματος (45MPa και 30MPa)
- Διάφορα ποσοστά οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού κορμού.
- Μέθοδος επισκευής με επανασκυροδέτηση θραυσμένου σκυροδέματος και μέθοδος επισκευής με επανασκυροδέτηση θραυσμένου σκυροδέματος και έννεμα εποξειδικού κονιάματος στα κυριότερα καμπτικά ρήγματα ταυτόχρονα.

Κατασκευάστηκαν 17 δοκίμια υπό κλίμακα 1:3.

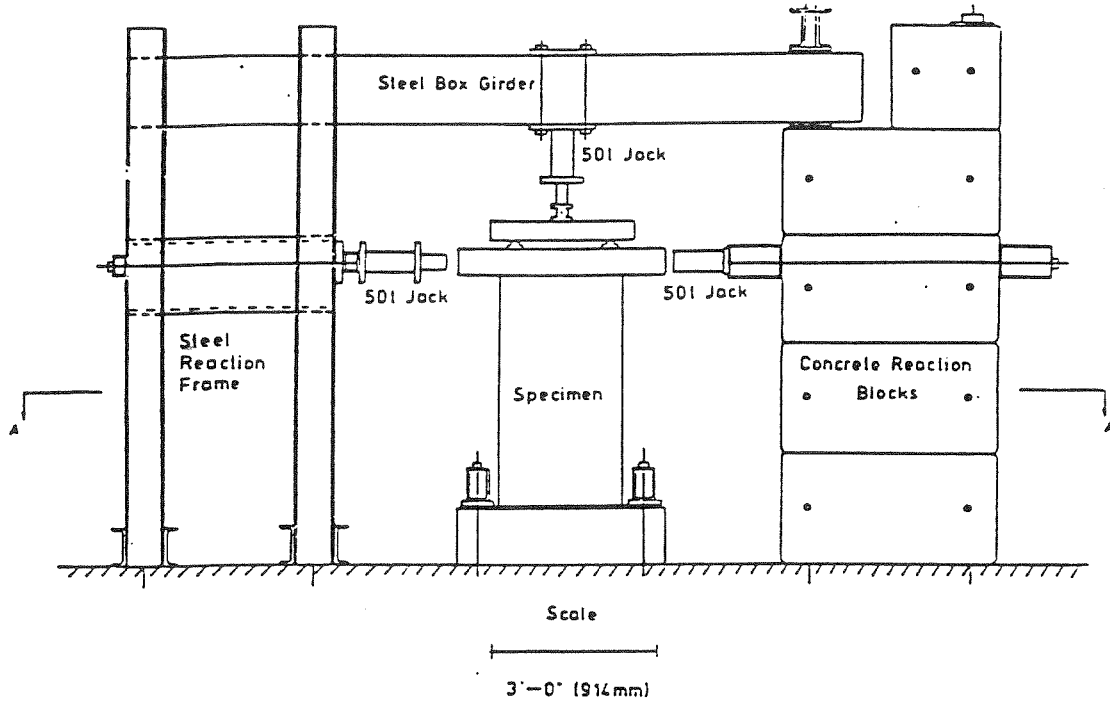
SW11 - SW17 άνοιγμα διάτμησης 1 υπό μονότονη φόρτιση.

SW21 - SW26 άνοιγμα διάτμησης 2 υπό μονότονη φόρτιση.

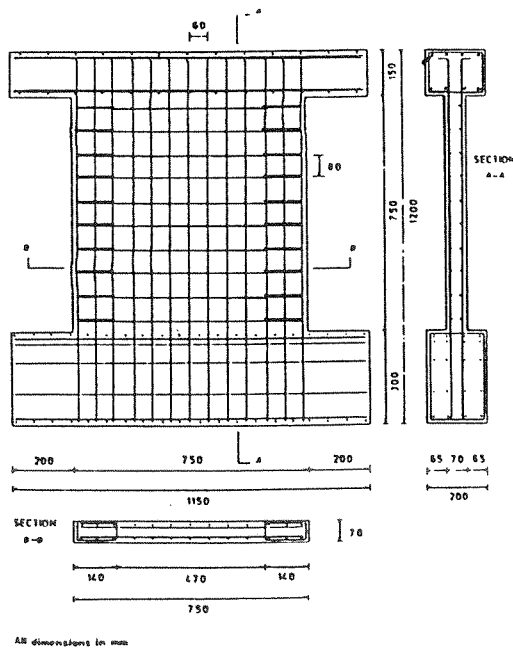
SW30 - SW33 άνοιγμα διάτμησης 2, υποβλήθηκαν σε 4 με 5 κύκλους φόρτισης μέχρι αστοχίας, επισκευάστηκαν και ξαναδοκιμάστηκαν.

Συμπεράσματα:

- Για όλες τις περιπτώσεις που ερευνήθηκαν βρέθηκε ότι ενώ η αξονική φόρτιση μειώνει την ικανότητα ανάπτυξης κατακόρυφων και οριζόντιων μετατοπίσεων, αυξάνει την ικανότητα ανάληψης οριζόντιων φορτίων και τη δυσκαμψία. Αυτή η παρατηρούμενη αύξηση μεγενθύνεται με την αύξηση του ανοίγματος διάτμησης.
- Αντίθετα με το τι γινόταν μέχρι τώρα δεκτό ο οριζόντιος οπλισμός κορμού δεν έχει

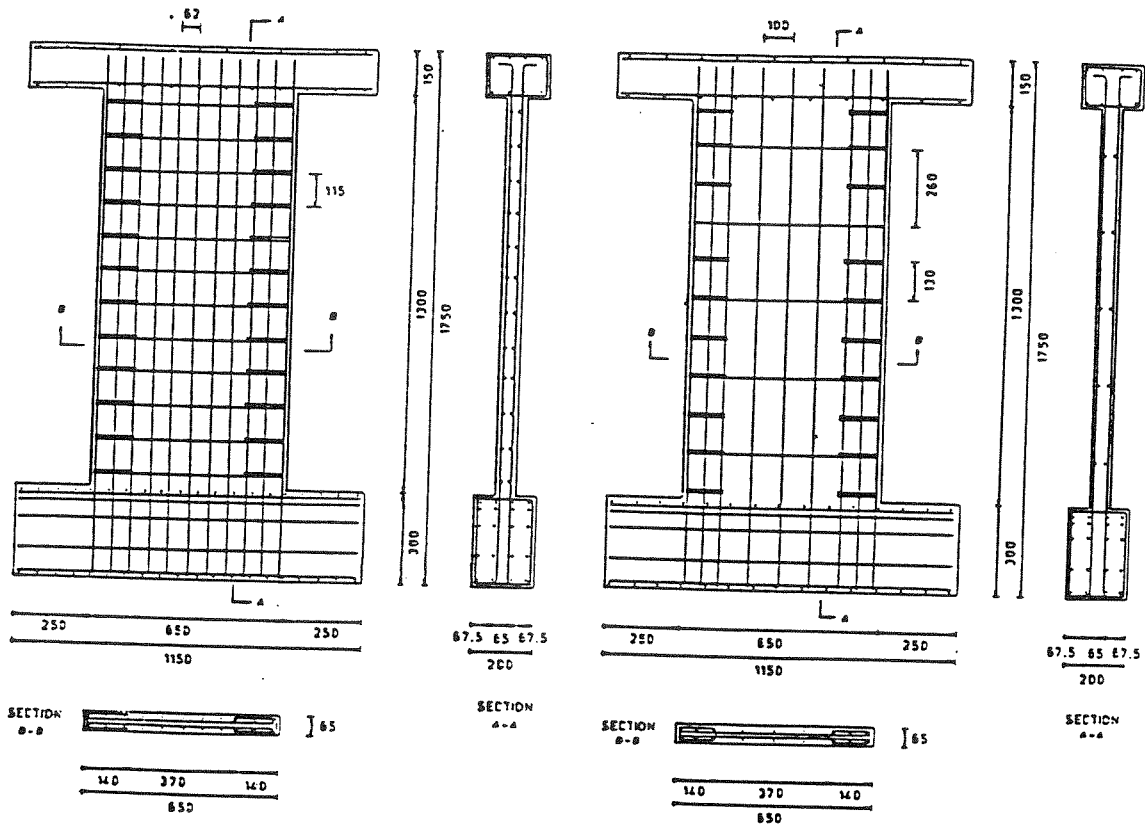


Σχ. 16. Πειραματική διάταξη φόρτισης από την εργασία των Lefas et al το 1988.



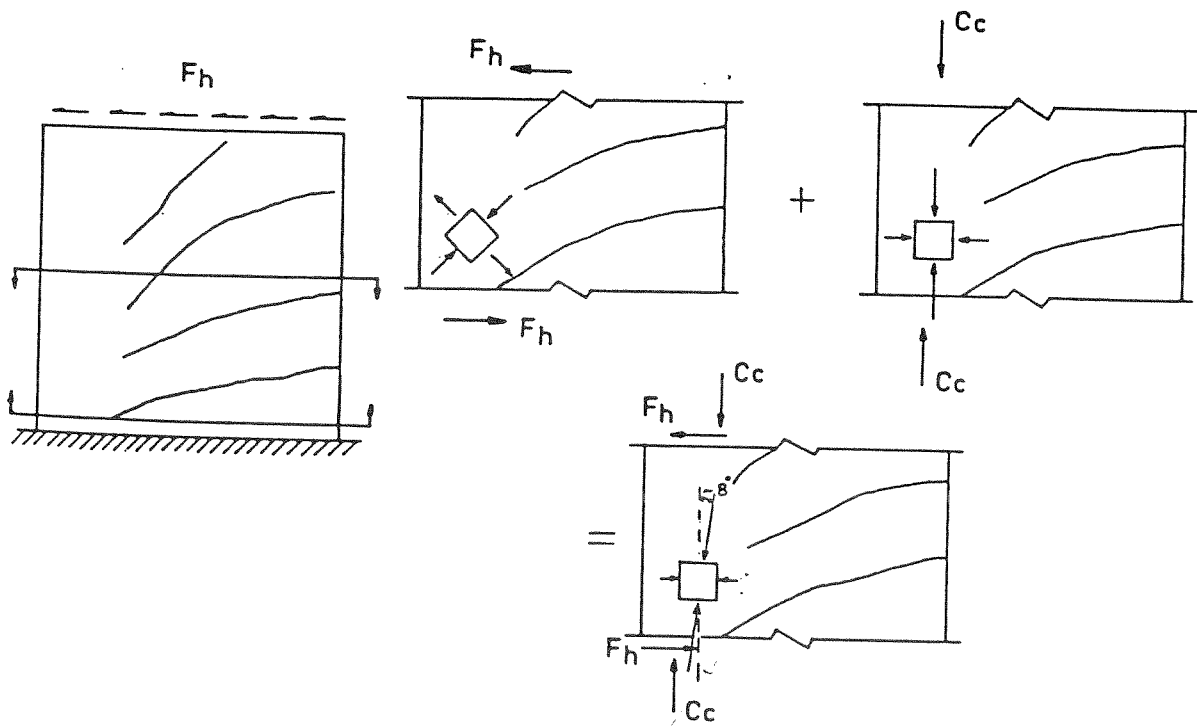
a) Walls with aspect ratio 1

Σχ. 17. Λεπτομέρειες τυπικού δοκιμίου με λόγο όψης 1.0 από την εργασία των Lefas et al το 1988.



b) Walls with aspect ratio 2

Σχ. 18. Λεπτομέρειες τυπικών δοκιμίων με λόγο όψης 2.0 από την εργασία των Lefas et al το 1988.



Σχ. 19. Σχηματική παρουσίαση των μηχανισμών αστοχίας τοιχωμάτων με λόγο όψης 1.0 από την εργασία των Lefas et al το 1988.

σαφή επιρροή στην ικανότητα ανάληψης τέμνουσας, καθώς η μείωση του οριζόντιου οπλισμού κορμού στο μισό της τιμής που ορίζουν οι κανονισμοί δεν επηρεάζει τη φόρτιση αστοχίας. Αυτό το γεγονός δεν εξηγείται από το μοντέλο του δικτυώματος.

- Η απόκριση της αντοχής και παραμορφωσιμότητας των τοιχωμάτων βρέθηκε να είναι ανεξάρτητα από τη αντοχή του σκυροδέματος που ποικίλλει από 30-45 MPa.
- Η αρχική μερική αποφλοίωση της θλιβόμενης ζώνης στην περιοχή των ακμών των λοξών ρηγμάτων ή των βαθύτερων καμπτικών ρηγμάτων με την αύξηση της μετατόπισης οδήγησε στην αποφλοίωση ολόκληρης της θλιβόμενης ζώνης. Αυτού του είδους η αστοχία ήταν εντονότερη στο δοκίμια με μικρό άνοιγμα διάτμησης και στα δοκίμια με υψηλή αξονική ένταση (Σχ. 19).
- Η διατμητική αντοχή βελτιώνεται με την εμφάνιση συνθηκών τριαξονικής θλιπτικής κατάστασης στη θλιβόμενη περιοχή κοντά στη βάση του τοιχώματος, όταν η καμπτική ροπή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.
- Τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης των τοιχωμάτων βρέθηκε να είναι ανεξάρτητα από τον τύπο της φόρτισης (μονότονη, ανακυκλιζόμενη). Τα υψηλά τοιχώματα έδειξαν σαφώς καμπτική συμπεριφορά πριν την αστοχία, ανεξάρτητα από τον τύπο οπλισμού, απορροφώντας ικανοποιητικά ποσά ενέργειας.
- Η καμπτική αντοχή και η αντοχή σε διάτμηση των επισκευασμένων τοιχωμάτων εξαρτιόνταν κυρίως από την καταπόνηση του χάλυβα στην πρώτη σειρά πειραμάτων. Τα τοιχώματα που επισκευάστηκαν με επανασκυροδέτηση και ρητίνη είχαν μεγαλύτερη αντοχή, υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και δυσκαμψίας από τα αντίστοιχα που επισκευάστηκαν μόνο με επανασκυροδέτηση του θραυσμένου σκυροδέματος.

K. Pilakoutas and A. Elnashai (Imperial College, London 1990)

Αντισεισμικός σχεδιασμός τοιχωμάτων Ο/Σ [30], [32], [82].

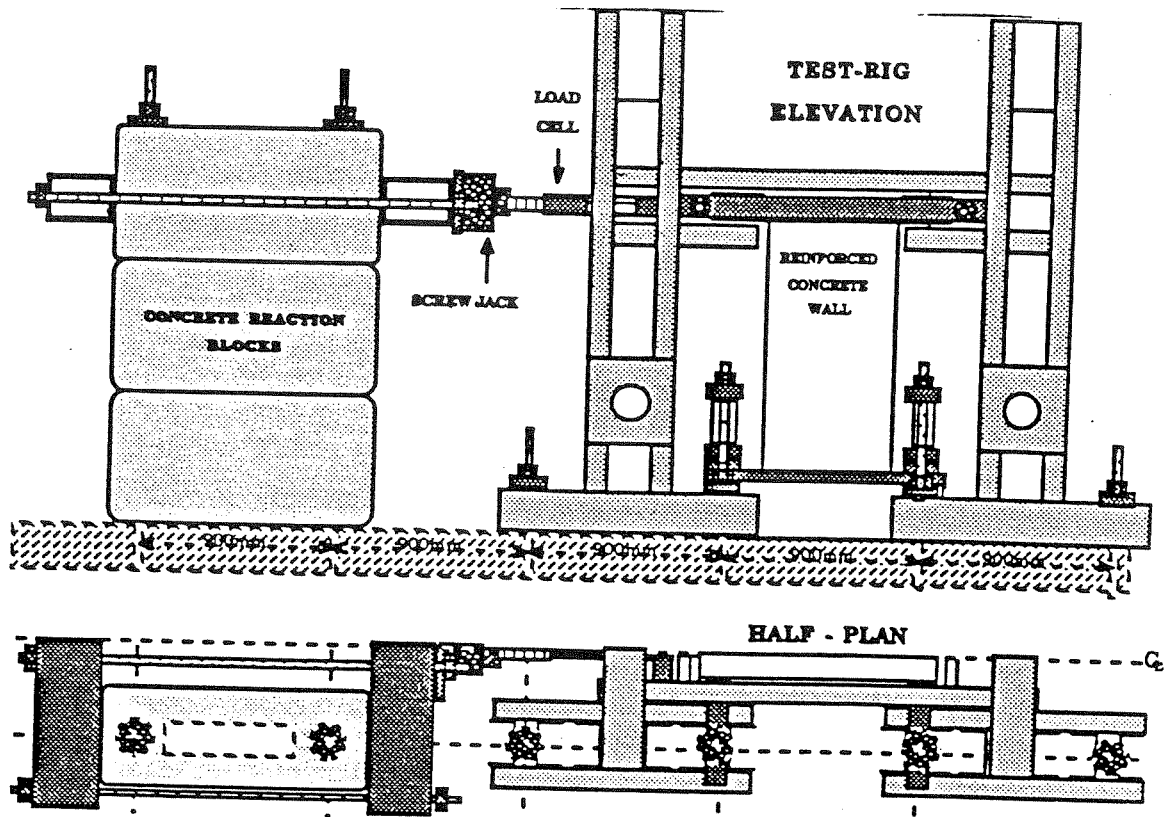
Παράμετροι:

Μέγεθος κρυφοκολόνας

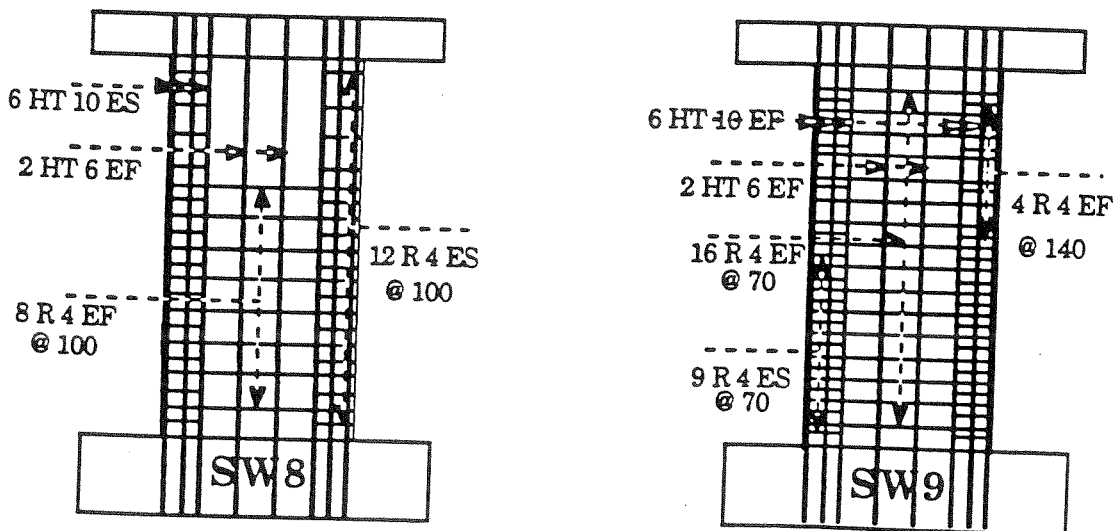
Ποσοστό οπλισμού περίσφιξης κρυφοκολόνων

Ύψος περίσφιξης κρυφοκολόνας

Ποσοστό οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού κορμού (Σχ. 21)



Σχ. 20. Διάταξη φόρτισης για τα δοκίμια κλίμακας 1: 2.5 από την εργασία των Pirlakoutas et al 1990.



Σχ. 21. Λεπτομέρειες οπλισμών δοκιμίων SW8 και SW9 από την εργασία των Pirlakoutas et al 1990.

Στόχοι:

- Προσδιορισμός καμπτικής και διατμητικής συμπεριφοράς αντισεισμικών τοιχωμάτων.
- Μελέτη καμπτικής και διατμητικής υπεραντοχής των τοιχωμάτων έναντι αυτής των κανονισμών.
- Έλεγχος της υπόθεσης ότι η αντοχή αστοχίας δεν εξαρτάται από την ποιότητα σκυροδέματος και την ιστορία φόρτισης.
- Επιρροή του οπλισμού κορμού στην διατμητική συμπεριφορά τοιχωμάτων και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Κατασκευάστηκαν 9 τοιχώματα από τα οποία τα έξι υπό κλίμακα 1:2.5 καταπονήθηκαν σε οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση και τα 3 υπό κλίμακα 1:5 δοκιμάστηκαν στη σεισμική τράπεζα (Σχ. 20).

Συμπεράσματα:

- Η συνεισφορά των κύκλων πριν τη διαρροή και των διατμητικών παραμορφώσεων στη συνολική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας δείχνει να είναι μάλλον χαμηλή. Η περισσότερη από την ενέργεια που απορροφήθηκε οφειλόταν στις καμπτικές παραμορφώσεις για υψηλά επίπεδα πλαστιμότητας
- Οι παραμορφώσεις αστοχίας που μετρήθηκαν ήταν σαφώς υψηλότερες από τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν αναλυτικά
- Οι τιμές των κανονισμών για τη διατμητική αντοχή του σκυροδέματος υποεκτιμούν σαφώς την πειραματική αντοχή
- Η αύξηση του οπλισμού κορμού πέρα από τον απαιτούμενο από τους κανονισμούς δεν επιφέρει σαφή βελτίωση στην ανελαστική συμπεριφορά των τοιχωμάτων
- Η τέμνουσα δύναμη παραλαμβάνεται μερικώς από τον χάλυβα της εφελκυσμένης περιοχής και από το σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης. Η διατμητική αστοχία επέρχεται με τη διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα και τη διατμητική αστοχία της θλιβόμενης ίνας.

Lopez M. (Imperial College, London 1991)

Αντισεισμική συμπεριφορά τοιχωμάτων Ο/Σ με μικρό άνοιγμα διατμήσεως [58].

Παράμετροι:

- Ποσοστό οπλισμού περίσφιξης κρυφοκολόνων
- Ύψος περίσφιξης κρυφοκολόνας
- Ποσοστό οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού κορμού
- Τρόπος επιβολής της φόρτισης
- Άνοιγμα διάτμησης 1, λόγος όψης 2.

Σκοπός:

Σκοπός της παραπάνω εργασίας είναι ο προσδιορισμός των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας στην πλαστική περιοχή των τοιχωμάτων και η ποσοτική εκτίμηση της συμμετοχής αυτών των μηχανισμών στη διατμητική αντοχή. Η εργασία αυτή στοχεύει επίσης στην κατασκευή απλοποιημένου αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης της καμπύλης φορτίου μετατόπισης τοιχωμάτων που υπόκεινται σε υψηλή διατμητική ένταση, για την ανελαστική ανάλυση των κατασκευών. Κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 4.5x45cm υπό κλίμακα 1:5.

Συμπεράσματα:

- Η αντοχή σε διαγώνιο εφελκυσμό πλαστικής άρθρωσης τοιχωμάτων σε προχωρημένο στάδιο αστοχίας οφείλεται σε δύο μηχανισμούς: α)Στους οριζόντιους οπλισμούς κορμού που παραλαμβάνουν δύναμη μέσω αξονικού εφελκυσμού και β)Στη διατμητική αντοχή της θλιβόμενης ζώνης
- Ο οπλισμός περίσφιξης αυξάνει την πλαστιμότητα τοιχωμάτων με χαμηλό λόγο διάτμησης καθυστερώντας τη μείωση της θλιβόμενης ζώνης. Επίσης, επέρχεται ξαφνικά απώλεια της διατμητικής αντοχής, μόλις η αντοχή σε διαγώνιο εφελκυσμό εξαντληθεί
- Οι διατάξεις των κανονισμών για τον υπολογισμό του μήκους της πλαστικής άρθρωσης είναι συντηρητικές για τοιχώματα με χαμηλό λόγο όψης. Προτείνεται η θέσπιση ενός μέγιστου μήκους πλαστικής άρθρωσης ίσο με $M/2.5V$. Αποτελεί ερώτημα, αν χρειάζεται περίσφιξη πάνω από αυτή την περιοχή

- Δεν απαιτείται σχεδιασμός έναντι διατμητικής ολίσθησης τοιχωμάτων, με άνοιγμα διάτμησης μεγαλύτερο ή ίσο του 1.1
- Η αστοχία τοιχωμάτων υπό διαγώνιο εφελκυσμό συμβαίνει σε πολύ μικρότερες μετακινήσεις από ότι στα τοιχώματα που δεν αστοχούν με αυτό τον τρόπο
- Δεν μπορεί να αποφευχθεί η μείωση στην απορρόφηση ενέργειας (λόγω pinching) τοιχωμάτων με χαμηλό λόγο όψης και συμβατικούς οπλισμούς.
- Η αύξηση του ποσοστού του οριζόντιου οπλισμού κορμού σε τοιχώματα που αστοχούν λόγω τέμνουσας υπό διαγώνιο εφελκυσμό έχει σαφή επιρροή στη συμπεριφορά των τοιχωμάτων, ενώ δεν υπάρχει διαφορά, όταν η αστοχία επέλθει από θραύση του θλιβόμενου σκυροδέματος.

T. Nakachi, T. Toda & T. Makita (Japan, 1991)

Ικανότητα παραμόρφωσης πολυώροφων τοιχωμάτων Ο/Σ μετά την καμπτική διαρροή [64].

Κύριες παράμετροι:

- Περίσφιξη κρυφοκολόνας, δηλαδή ποσό συνδετήρων στην περισφιγμένη περιοχή
- Περίσφιξη του οπλισμού κορμού
- Διάφορα ποσοστά οριζόντιου οπλισμού κορμού

Κατασκευάστηκαν 5 δοκίμια σε κλίμακα 1:5, όπου προσομοιώνονται οι τρεις πρώτοι όροφοι κτιρίου. Επίσης δοκιμάστηκαν 22 δοκίμια που αντιπροσώπευαν την κρυφοκολόνα με διάφορα ποσοστά οπλισμού περισφίξης και κάποια άλλα που προσομοίωναν ένα τμήμα του κορμού με διάφορους τύπους περισφίξης.

Συμπεράσματα:

- Η πλαστική περιοχή συγκεντρώθηκε στη βάση της κρυφοκολόνας. Η θλιπτική παραμόρφωση του θλιβόμενου σκυροδέματος βρέθηκε να είναι ανάλογη με τη γωνία σχετικής μετακίνησης κορυφής και βάσης
- Η ικανότητα παραμόρφωσης τοιχωμάτων αυξάνει, καθώς αυξάνει και το ποσοστό του οριζόντιου οπλισμού κορμού
- Η περισφίξη του οπλισμού κορμού έχει σαφή επιρροή στην ικανότητα παραμόρφωσης και φυσικά την αυξάνει.

- Η καμπτική αντοχή των τοιχωμάτων που υπολογίστηκε με fiber model προσεγγίζει πολύ καλά τα πειραματικά αποτελέσματα.

Tomii, M., Esaki, F., Mitsuyama, H. (Japan 1988)

Πειραματική μελέτη για την αύξηση της πλαστιμότητας τοιχωμάτων Ο/Σ με διαπλατύνσεις αποτρέποντας την αστοχία από διατμητική ολίσθηση (περίσφιξη της κορυφής και της βάσης των διαπλατύνσεων με τετράγωνους χαλύβδινους σωλήνες) [96].

Παράμετροι:

Οι κυριότερες παράμετροι της παραπάνω εργασίας ήταν η κλίμακα των δοκιμίων, το ποσοστό και ο τρόπος τοποθέτησης του οπλισμού περίσφιξης, το ποσοστό του οπλισμού κορμού, το ποσοστό του διαμήκη χάλυβα και το πάχος του κορμού.

Σκοπός

Στόχος της εργασίας αυτής είναι να επιτευχθεί πλάσιμη καμπτική συμπεριφορά σε τοιχώματα με μικρό άνοιγμα διάτμησης (<1) αποτρέποντας τη διατμητική αστοχία και την καταστροφή του σκυροδέματος στην κορυφή και την βάση των ακραίων υποστρωμάτων μέσω περίσφιξης με χαλύβδινες κοιλοδοκούς.

5 δοκίμια, Κλίμακα 1:3

7 δοκίμια, Κλίμακα 1:10

Συμπεράσματα:

- Είναι δύσκολο να αποτραπεί η διατμητική αστοχία των ακραίων περισφιγμένων περιοχών τοιχωμάτων με λεπτό κορμό, όταν δεν τοποθετείται εκεί ισχυρός διαμήκης οπλισμός, ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχει ισχυρός οπλισμός περίσφιξης. Είναι δυνατό να μειώσουμε την αρνητική επιρροή της διάτμησης στις ακραίες περισφιγμένες περιοχές τοιχωμάτων με την τοποθέτηση χαλύβδινων κοιλοδοκών σε αυτή τη θέση
- Με την παραπάνω μέθοδο περίσφιξης και την κατάλληλη επιλογή πάχους κορμού και διαμήκους οπλισμού, έτσι ώστε η αντοχή σε τέμνουσα που απαιτείται για διατμητική ολίσθηση να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τέμνουσα που απαιτείται για καμπτική αστοχία, αυξάνεται η ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης των ακραίων περισφιγμένων περιοχών λόγω του περιορισμού των διατμητικών παραμορφώσεων
- Οι διατμητικές και αξονικές παραμορφώσεις καταπονούν την ακραία κολόνα των τοιχωμάτων σε ένα ύψος ίσο με 1.5 φορά το πλάτος της

- Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στη συμπεριφορά των τοιχωμάτων που να οφείλονταν στην αλλαγή της κλίμακας.

H. Hiraishi, H. Shiohara, T. Kavashima, H. Tomatsuri, A. Kurosawa,
Y. Budo (Japan 1988)

Πειραματική μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς πολυώροφων τοιχωμάτων με διαπλατυσμένα άκρα [40].

Παράμετροι:

Κατασκευάστηκαν δοκίμια με δοκούς και χωρίς δοκούς στις στάθμες των πλακών και με πολύτμητους συνδετήρες ή συνδετήρες με άγκιστρα στα διαπλατυσμένα άκρα. Επίσης σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε διαφορετικό ποσοστό οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού κορμού. Τα 5 δοκίμια σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν υπό κλίμακα 1/4, έτσι ώστε να διαρρέουν σε κάμψη πριν φθάσουν την οριακή διατμητική αντοχή τους. Στα δοκίμια WF-2, WF-3, WF-4 μεταβάλλονταν το εμβαδόν της ακραίας περισφιγμένης διατομής. Το δοκίμιο WF-1 ήταν όμοιο με το WF-2 με μόνη διαφορά το γεγονός ότι είχε εσωτερικές δοκούς. Το δοκίμιο WF-5 είχε ισχυρή περίσφιξη και 1.33 φορές λεπτότερο κορμό, από τα άλλα δοκίμια. Ο οπλισμός κορμού στην οριζόντια διεύθυνση ήταν τόσοσ, ώστε η διατμητική αντοχή να υπερέχει της καμπτικής.

Συμπεράσματα:

- Όταν ο λόγος της αναλαμβανόμενης αξονικής δύναμης της κρυφοκολώνας προς την αντίστοιχη θλιπτική αντοχή διατηρείται κάτω από 0.7, τότε το τοίχωμα επιδεικνύει πλάστιμη ανελαστική συμπεριφορά.
- Η ικανότητα παραμόρφωσης του δοκιμίου WF-2 χωρίς δοκούς δεν ήταν μικρότερη από αυτή του τοιχώματος WF-1 με δοκούς. Το δοκίμιο WF-1 είχε υψηλότερη δυσκαμψία κατά τη διαρροή.
- Η ικανότητα παραμόρφωσης μπορεί να βελτιωθεί, αν τοποθετηθεί ισχυρός οπλισμός περίσφιξης στις κρυφοκολώνες και αν μειωθεί το πάχος του κορμού.

R. Fukuzawa, O. Chiba, T. Hatori, K. Yagishita, M. Watabe (Japan 1988).
Μελέτη των χαρακτηριστικών φορτίου-παραμόρφωσης ισχυρά οπλισμένων τοιχωμάτων με διαπλατύνσεις στα άκρα [36].

Παράμετροι:

- Λόγος οπλισμού του τοιχώματος (ρ_w) από 0% ÷ 2.8%
- Αξονικές τάσεις (σ_o) 0.0, 20, 40 kg/cm²
- M/QD 0.4, 0.6 και 0.8
- Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος: f_c : 240 και 360 kg/cm²
- Ποσοστό του διαμήκους οπλισμού του υποστρώματος: ρ_g : 1.2 και 2.0%.

Κατασκευάστηκαν 27 δοκίμια

Συμπεράσματα

- Η γωνία διατμητικών παραμορφώσεων γ_{max} κατά τη μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική τάση κυμαίνεται από 4.8×10^{-3} ÷ 6×10^{-3} rad
- Τα ασθενώς οπλισμένα τοιχώματα αστόχησαν από διαγώνια σύνθλιψη, ενώ τα ισχυρά οπλισμένα από διατμητική ολίσθηση
- Ο λόγος M/QD (άνοιγμα διάτμησης) είναι αντιστρόφως ανάλογος των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο τοίχωμα
- Η μέγιστη αναλαμβανόμενη τέμνουσα από το τοίχωμα, όπως προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση, δίνει ικανοποιητική σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχ. 22).

$$Q_{max} = \tau_{max} \cdot t \cdot D \quad \tau_o = 27\sqrt{f_c}(1.9 - 1.5M/QD) \quad \alpha = 0.4 + \Sigma A_c / A_w \rightarrow (\Sigma A_c / A_w \leq 0.6)$$

$$\tau_{max} = \alpha \cdot \tau_o + \tau_s + \tau_o \quad \tau_s = \rho_w \sigma_v / 2, \tau_o = \sigma_o \quad \alpha = 1.0 \rightarrow (\Sigma A_c / A_w > 0.6)$$

όπου

t = πάχος του τοιχώματος

D = μήκος του τοιχώματος

A_c = εμβαδόν διατομής ακραίας κολόνας

A_w = εμβαδόν διατομής τοιχώματος (= $t \times D$)

$\rho_w \sigma_v \leq 6\sqrt{f_c}$ για ($\rho_w \leq 2.4\%$)

$\sigma_o = 0 \div 40 \text{ kg/cm}^2$ $M/QD = 0.4 \div 0.8$ $f_c = 150 \div 600 \text{ kg/cm}^2$

$\Sigma A_c / A_w \geq 0.2$

Table 1 Specimens

| M/QD | Pw(%) | | | | | | | | |
|------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 0.3 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 2.0 | 2.4 | 2.8 |
| 0.4 | | | ○ | | ○ | | ○ | | |
| 0.6 | △○□ | △○□ | △○□ | △○□ | △○□ | △○□ | △○□ | △○□ | △○□ |
| 0.8 | | | ◇ | | ◇ | | ◇ | | |

△: $\sigma_s=0\text{kg/cm}^2$ ○,▽,◇: $\sigma_s=20\text{kg/cm}^2$ □: $\sigma_s=40\text{kg/cm}^2$
 ▽: Longitudinal reinforcement ratio of column =1.2%
 ◇: $F_c=240\text{kg/cm}^2$ the others 360kg/cm^2

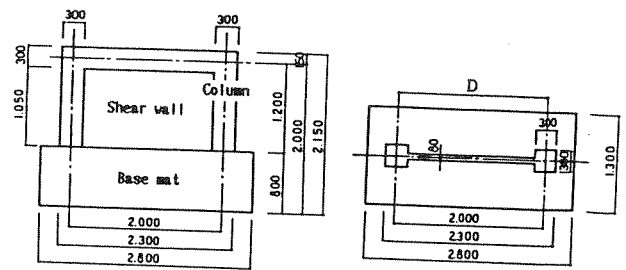


Fig. 1 Shape of a specimen (M/QD=0.6)

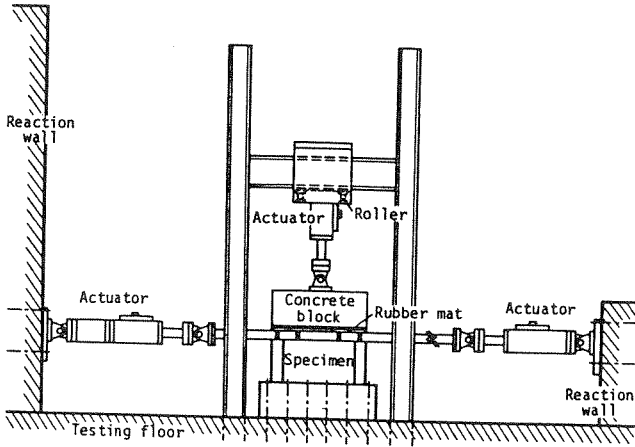


Fig. 2 Loading devices

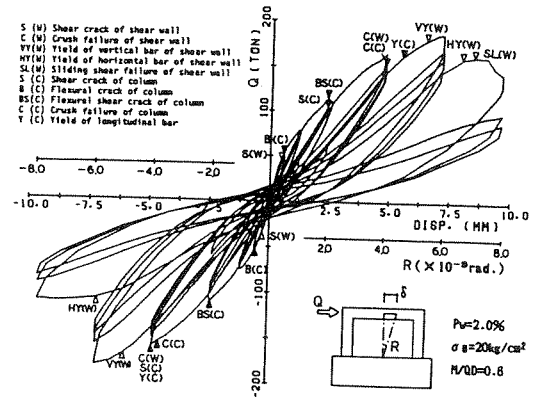


Fig. 3 Load-deflection characteristics

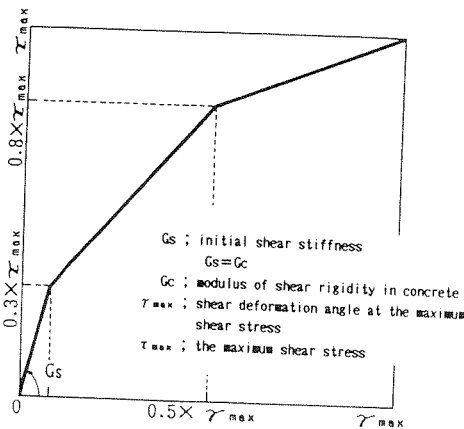


Fig. 12 Skeleton curve

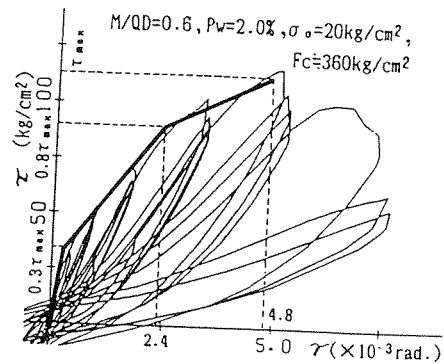


Fig. 13 Comparison of results of experiment and skeleton curve by modeling

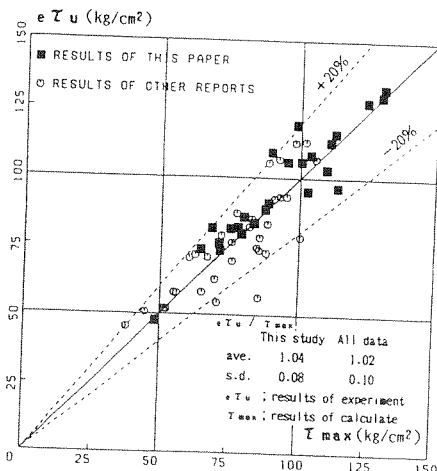


Fig. 10 Comparison of $e\tau_u$ and τ_{max}

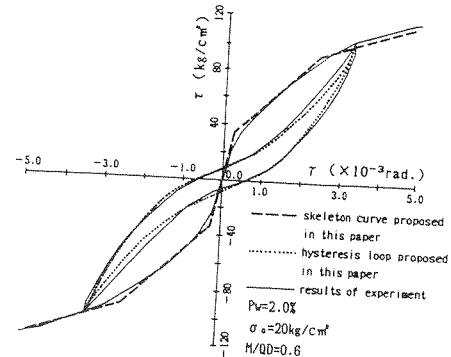


Fig. 16 Comparison modeled load-deflection characteristics with experiment ones

Σχ. 22. Δοκίμια, πειραματική διάταξη φόρτισης, χαρακτηριστικοί βρόχοι και συγκριτικά διαγράμματα από την εργασία των Fukuzawa et al 1988.

Από την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης η μέση τιμή του λόγου της πειραματικής προς την εκτιμώμενη αντοχή είναι 1.04. Οι βρόχοι διατμήσεως που προκύπτουν από την παρούσα εργασία προσομοιώνονται ικανοποιητικά από την παρακάτω εξίσωση:

$$Y = (1 - B)X^3 \mp AX^2 + BX \pm A$$

όπου: $A=3S/8$ (S εμβαδόν βρόχου διάτμησης)

B κλίση ως προς τον Y

$$S=0.24 + 16\gamma \text{ και } B = 0.5 - 76\gamma + 0.01 \sigma_0$$

J. Takahashi, A. Shibata, T. Shiga (Japan 1988)

Δείκτες ρηγμάτωσης τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος για εκτίμηση βλαβών από σεισμό [94].

Δύο ειδών δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν.

3 δοκίμια με $a/D \approx 1.0$, Κλίμακα 1:4 καμπτοδιατμητική αστοχία

2 δοκίμια με $a/D \approx 1.5$, Κλίμακα 1:5 καμπτική αστοχία

Ανακυκλιζόμενη φόρτιση τοιχωμάτων και μετά την αστοχία, επισκευή με εποξειδικό κονίαμα (epoxy-mortar) και επαναδοκιμή. Επιβλήθηκε αξονική δύναμη της τάξης $f_c/6$ ανά υποστύλωμα, όπου f_c η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Στόχος της εργασίας ήταν να προσδιοριστούν δείκτες σύμφωνα με τους οποίους, αφενός να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απομένουσας αντοχής των τοιχωμάτων από την διατμητική ρηγμάτωση που παρατηρήθηκε και αφετέρου να μπορούμε να προσδιορίσουμε την αναμενόμενη διατμητική ρηγμάτωση για διάφορα επίπεδα παραμόρφωσης. Επίσης έγινε έλεγχος των μεθόδων επισκευής με εποξειδικό κονίαμα.

Συμπεράσματα:

- Οι καμπύλες των βρόχων παρθετικού και επισκευασμένου τοιχώματος έχουν ικανοποιητική σύμπτωση, γεγονός που δείχνει ότι με τη χρήση εποξειδικού κονιάματος μπορούμε να επαναπροσδώσουμε ικανοποιητική δυσκαμψία, αντοχή και πλαστιμότητα στα τοιχωμάτων Ο/Σ που έχουν αστοχίσει προηγουμένως.
- Η οριακή παραμόρφωση για το διώροφο τοίχωμα ήταν της τάξης του 11/1000 rad στον πρώτο όροφο, όπου παρατηρήθηκε καμπτοδιατμητική αστοχία, ενώ για το τριώροφο τοίχωμα η αντίστοιχη παραμόρφωση ήταν της τάξης του 20/1000 rad, όπου

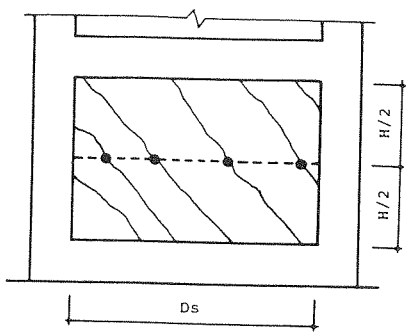
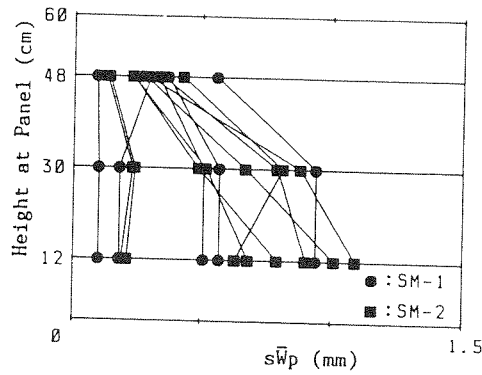
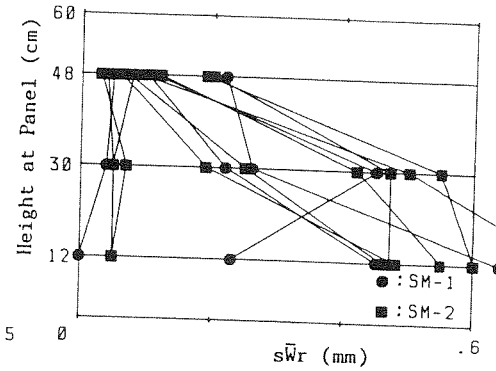


Fig. 4 Reference Line for Measurement of Crack Widths and the Number of Cracks



a) at the Peak Deformation



b) at the Load Removal

Fig. 5 Comparison of Crack Width on Reference Lines for Different Heights of Wall Panel

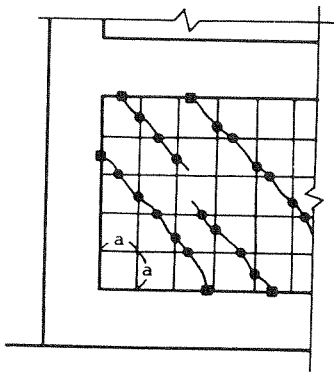


Fig. 6 Approximate Calculation of Crack Length (Grid-Line-Method)

Shear Crack Length (sL)

$$sL = (N_g + N_b / 2) a / \sqrt{2}$$

N_g : The Number of Intersections of Grids Lines and Shear Cracks (●)

N_b : The Number of Intersections of Boundary Lines and Shear Cracks (■)

a : Unit Length between each Grid

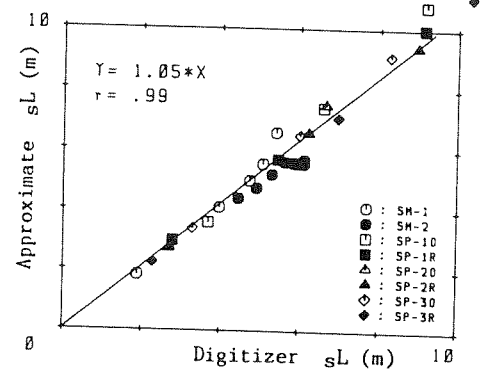
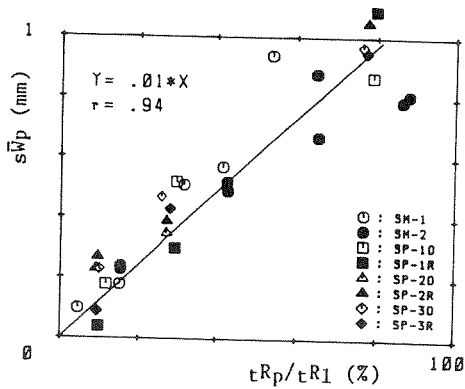
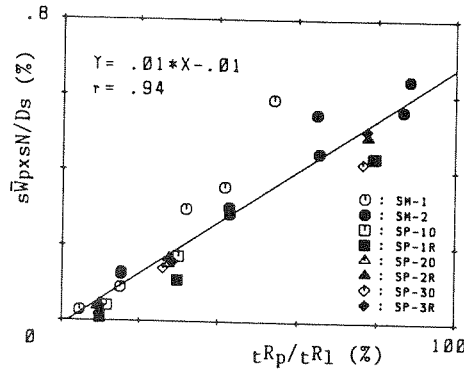


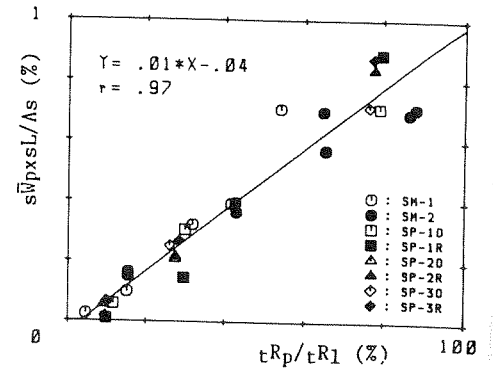
Fig. 7 Comparison of Crack Length by Approximate and Exact Calculation



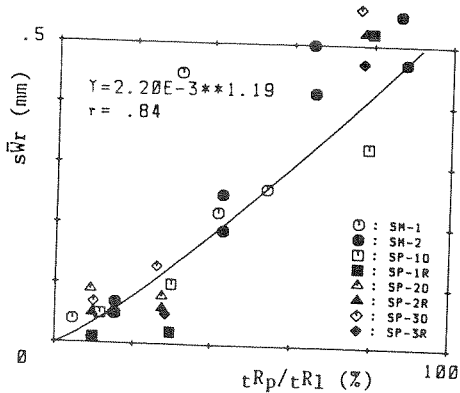
a) at the Peak Deformation



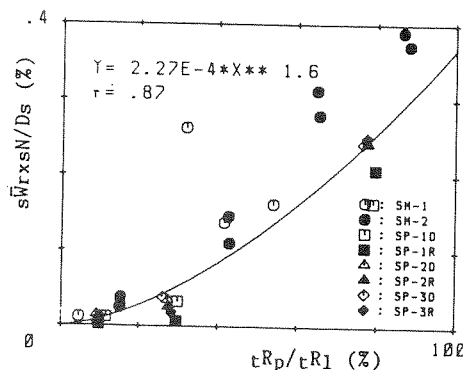
a) at the Peak Deformation



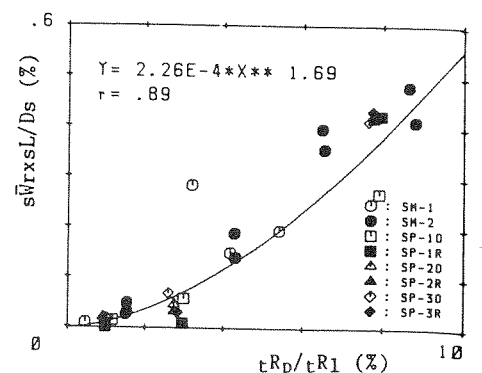
a) at the Peak Deformation



b) at the Load Removal



b) at the Load Removal



b) at the Load Removal

Fig. 8 Shear Crack Width vs. Deformation Ratio

Fig. 9 Shear Crack Width Ratio vs. Deformation Ratio

Fig. 10 Shear Crack Area Ratio vs. Deformation Ratio

Σχ. 23. Μέθοδος υπολογισμού δεικτών ρηγματώσεως και συγκριτικά διαγράμματα από την εργασία των Takahashi et al 1988.

παρατηρήθηκε καμπτική αστοχία

- Το μέσο πάχος των ρηγμάτων που διαπερνούν τη γραμμή αναφοράς στο μέσο του τοιχώματος ισούται με το μέσο πάχος των ρηγμάτων όλου του κορμού
- Το μήκος των ρηγμάτων διάτμησης είναι $sL = (N_g + N_b/2) a/\sqrt{2}$, όπου:
 - N_g : το πλήθος των σημείων τομής ρηγμάτων και κάθε γραμμής του καννάβου,
 - N_b : το πλήθος των σημείων τομής του περιγράμματος κορμού του δοκιμίου με τα ρήγματα διάτμησης,
 - a_n : η απόσταση μεταξύ γραμμών του καννάβου.

Δείκτες διατμητικής ρηγμάτωσης τοιχωμάτων:

| | Κατά τη μέγιστη φόρτιση | Κατά την άρση της φόρτισης |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Πάχος ρήγματος | $s \bar{W}_p$ | $s \bar{W}_r$ |
| Πηλίκο διατμητικά ρηγματωμένου πλάτους | $\frac{s \bar{W}_p \times sN}{D_s}$ | $\frac{s \bar{W}_r \times sN}{D_s}$ |
| Πηλίκο διατμητικά ρηγματωμένου εμβαδού | $\frac{s \bar{W}_p \times sL}{A_s}$ | $\frac{s \bar{W}_r \times sL}{A_s}$ |

όπου:

$s \bar{W}_p$ και $s \bar{W}_r$: το μέσο πάχος του ρήγματος κατά τη μέγιστη φόρτιση και μετά την άρση της φόρτισης

sN : το πλήθος των ρηγμάτων που περνούν τη γραμμή αναφοράς

sL : το εκτιμώμενο συνολικό μήκος ρηγμάτων

D_s και A_s : το μήκος και το εμβαδόν του κορμού του τοιχώματος αντίστοιχα.

Με την χρήση των δεικτών ρηγμάτωσης είναι δυνατό να εκτιμήσουμε την αναμενόμενη ρηγμάτωση τοιχωμάτων για διάφορες τιμές του λόγου της σχετικής

μετακίνησης προς το ύψος και αντίστροφα (Σχ. 23).

U.S.A. - JAPAN PROGRAM (Tsukuba, Japan) [102].

Επταώροφη κατασκευή με πλάκα, δοκούς, στύλους, τοιχώματα σε κλίμακα 1:1 υπό οριζόντια και κατακόρυφα φορτία. Σχεδιασμός σύμφωνα με τον U.B.C. 1979.

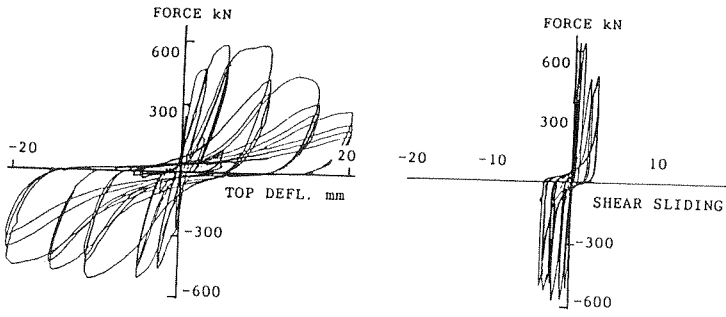
Σύμφωνα με τον U.B.C. η τέμνουσα αντοχής στη βάση της κατασκευής που δοκιμάστηκε προέκυψε 273kps. Από την ανάλυση η αντίστοιχη τέμνουσα βάσης προέκυψε 601kps για μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση βάσης 0.36g. Οι Charnex-Bertero προέβλεψαν αντοχή 664kps και 819kps για τριγωνική και ορθογωνική οριζόντια φόρτιση, αντίστοιχα. Με το drain 2D βρέθηκε τέμνουσα βάση 767kps, 16% μεγαλύτερη από του Chavez και πιο κοντά στην ορθογωνική κατανομή φορτίων. Η πειραματική αντοχή ήταν 954kps, δηλαδή περίπου 3.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του U.B.C.

Το κτίριο δεν αστόχησε κατά τα ψευδοδυναμικά τεστ με ανακυκλιζόμενη τριγωνική φόρτιση, αν και έφθασαν σε επίπεδα πλαστιμότητας 6 για τα τοιχώματα και 4 για όλη την κατασκευή.

Το τοίχωμα σχεδιάστηκε για ομοιόμορφη διατμητική τάση V_u μικρότερη από $5\sqrt{f'_c}$ (psi) και κατά τη μέγιστη τέμνουσα $V = 954\text{kps}$, η V_u του τοιχώματος ήταν μόλις κάτω από $12\sqrt{f'_c}$ (psi). Δηλαδή, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι, αν με κατάλληλο σχεδιασμό είναι δυνατό να διατηρήσουμε τις διατμητικές τάσεις χαμηλά στα τοιχώματα Ο/Σ, τότε αυτά μπορούν να απορροφήσουν υψηλή ποσότητα ενέργειας και να αναπτύξουν υψηλή πλαστιμότητα και σταθερή υστερητική συμπεριφορά μέσω καμπτικής διαρροής.

Μοντέλο υπό κλίμακα 1:5, όμοιο με το μεσαίο πλαίσιο της προηγούμενης κατασκευής, που δοκιμάστηκε σε σεισμική τράπεζα, έδειξε σαφή αύξηση της αντοχής σε σχέση με το φυσικό μοντέλο κλίμακας 1:1 υπό τριγωνική φόρτιση.

Η σημερινή γνώση στη μοντελοποίηση κατασκευών Ο/Σ δεν επιτρέπει την ακριβή και ρεαλιστική εκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής και δυστρεψίας (distortion) των κατασκευών. Το παραπάνω πρόβλημα οφείλεται κυρίως στη δυσκολία και στις αβεβαιότητες της εκτίμησης τόσο της αξονικής, καμπτοδιατμητικής και στρεπτικής δυσκαμψίας όσο και των σχέσεων υστερητικής δύναμης - δυστρεψίας των κατασκευών Ο/Σ. Ειδικότερα αυτές οι αβεβαιότητες και οι δυσκολίες οφείλονται στην τρισδιάστατη αλληλοεπρροή μεταξύ φορτίων διατομής, αντοχής και δυστρεψίας στις κρίσιμες περιοχές των δομικών στοιχείων.



(a) Overall response (b) Sliding shear response

Figure 2. Hysteretic relationships for Wall 1

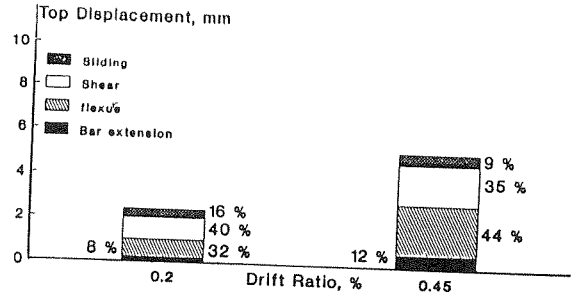
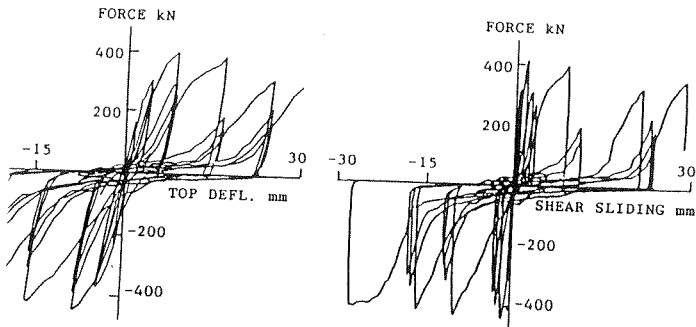


Figure 3. Components of horizontal displacement for Wall 1



a) Overall response (b) Sliding shear response

Figure 5. Hysteretic relationships for Wall 4

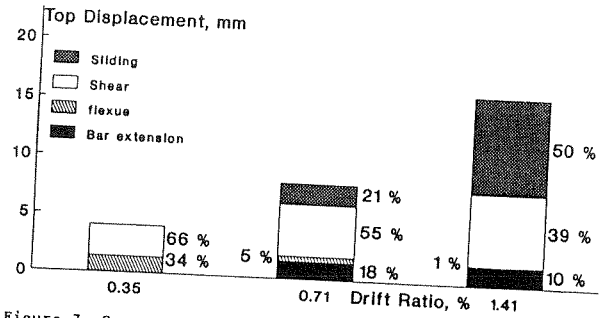
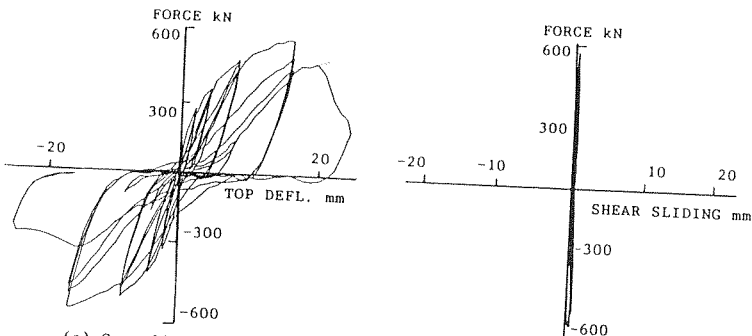


Figure 7. Components of horizontal displacement for Wall 4



(a) Overall response (b) Sliding shear response

Figure 9. Hysteretic relationships for Wall 6

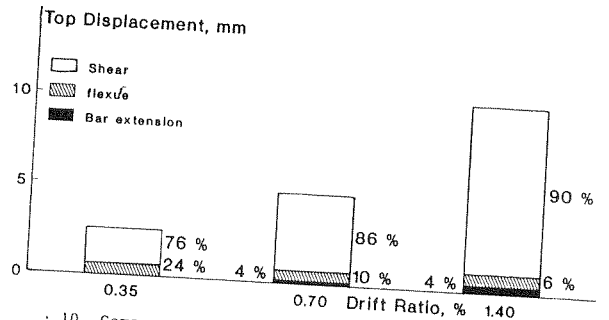


Figure 10. Components of horizontal displacement for Wall 6

Σχ. 24. Βρόχοι υστέρησης συνολικής μετατόπισης - δύναμης, ολίσθησης βάσης - δύναμης τοιχωμάτων και επιμέρους συνιστώσες της συνολικής μετατόπισης από την εργασία των Saatcioglu et al 1990.

M. Saatcioglu (1990)

Υστερητική συμπεριφορά χαμηλών τοιχωμάτων [85].

Στην παρούσα εργασία δοκιμάστηκαν τρία τοιχώματα. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι κυριότερες παράμετροι είναι η αντοχή του σκυροδέματος, η ύπαρξη πρόσθετου οπλισμού ολίσθησης στη βάση και το ποσοστό του οριζόντιου οπλισμού κορμού (Σχ. 24).

Συμπεράσματα:

- Η ανελαστική συμπεριφορά χαμηλών τοιχωμάτων βελτιώνεται με την αποφυγή της αστοχίας σε ολίσθηση και διαγώνιο εφελκυσμό.
- Η αποφυγή της αστοχίας σε διαγώνιο εφελκυσμό επιτυγχάνεται με την χρήση ισχυρού οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού στον κορμό.
- Η αποφυγή της αστοχίας από διατμητική ολίσθηση επιτυγχάνεται με την χρήση ισχυρού κατακόρυφου οπλισμού στη βάση, ο οποίος όμως μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρή διαμήκη θραύση του κορμού στη θέση λίγο πάνω από τον οπλισμό ολίσθησης.

2.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται συνοπτική κριτική περιγραφή των αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος που υπόκεινται σε οριζόντια σεισμικά φορτία.

Σκοπός της συντριπτικής πλειοψηφίας των μέχρι τώρα εργασιών που αφορούν την κατάστροψη εξισώσεων για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των παραπάνω στοιχείων είναι ο προσδιορισμός και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους, όταν υπόκεινται σε οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση που δημιουργεί ένταση η οποία οδηγεί σε αναπτυσσόμενες τάσεις πάνω από αυτές που απαιτούνται για την ρηγμάτωση του σκυροδέματος και την είσοδο του χάλυβα του οπλισμού στην ανελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης. Η ορθή μοντελοποίηση της ανελαστικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ενέργεια κεφαλαιώδους σημασίας λόγω της επιρροής τους σε όλη τη κατασκευή είτε μέσω της επιρροής των σεισμικών φορτίων είτε μέσω της συμβολής τους στη σεισμική και μετασεισμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι τύποι μοντέλων για την προσομοίωση της ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων. Αυτά κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο προσομοίωσης και διακριτοποίησης του στοιχείου και των επιμέρους μηχανισμών ανάληψης έντασης. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται τα αναλυτικά μοντέλα λεπτομερούς (μικροσκοπικής) διακριτοποίησης όπου το τοίχωμα προσομοιώνεται λεπτομερώς. Εδώ γίνεται προσπάθεια να προσεγγισθούν κατά το δυνατό τα χαρακτηριστικά του τοιχώματος τόσο από άποψη γεωμετρίας όσο και από άποψη μηχανικών χαρακτηριστικών είτε των επιμέρους υλικών, όπως είναι το σκυρόδεμα και ο χάλυβας, είτε του οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο θεωρείται ως ένα υλικό. Η φόρτιση των παραπάνω μοντέλων είναι δυνατό να είναι είτε στατικής είτε δυναμικής φύσεως. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα αναλυτικά μοντέλα μακροσκοπικής προσομοίωσης. Αυτού του είδους τα μοντέλα προϋποθέτουν τον εκ των προτέρων καθορισμό των μηχανισμών ανάληψης έντασης. Έτσι, με την πρόσδοση κατάλληλων ελαστικών και ανελαστικών ιδιοτήτων στους επιμέρους μηχανισμούς οπλισμένου σκυροδέματος που θεωρούνται για την ανάληψη έντασης, προσομοιώνεται η συμπεριφορά του δομικού στοιχείου είτε για στατική είτε για δυναμική εξωτερική φόρτιση. Ο εκ των προτέρων καθορισμός των μηχανισμών ανάληψης έντασης στα μακροσκοπικά μοντέλα έχει αφενός το πλεονέκτημα του εύκολου ελέγχου και της εποπτείας της συμπεριφοράς του δομικού στοιχείου που μοντελοποιείται και αφετέρου το μειονέκτημα του κατά πόσο οι θεωρούμενοι μηχανισμοί υφίστανται ή προσομοιώνονται ορθά. Επίσης με τα μακροσκοπικά μοντέλα προσομοιώνεται το δομικό στοιχείο με τους θεωρούμενους μηχανισμούς που σκοπό έχουν να περιγράψουν μια συγκεκριμένη ιδιότητα (συνήθως συνιστώσα παραμόρφωσης) υπακούοντας σε προκαθορισμένο νόμο συμπεριφοράς, ο οποίος συνήθως προσδιορίζεται πειραματικά. Έτσι με λίγα στοιχεία επιτυγχάνεται η απεικόνιση της συμπεριφοράς του στοιχείου που διερευνάται, με κύριο κέρδος την εύκολη και εποπτική προσομοίωση και τον μικρό όγκο αποτελεσμάτων προς αξιολόγηση. Αντίθετα, τα μοντέλα λεπτομερούς διακριτοποίησης (μικροσκοπικά) δίνουν την εικόνα της συμπεριφοράς των στοιχείων που προσομοιώνουν, μέσω ενός πολύ μεγάλου αριθμού δεδομένων. Επίσης, η διαχείριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων αυτών απαιτεί την κατασκευή προεπεξεργαστή και μεταεπεξεργαστή, ειδικού για κάθε πρόγραμμα ανάλυσης.

Μοντέλα (λεπτομερέστερης) μικροσκοπικής προσομοίωσης.

A. B. Agrawal, L. G. Jaeger, A. A. Mufti (Canada 1981)

Συμπεριφορά τοιχωμάτων υπό σεισμική εδαφική κίνηση [2].

Η παρούσα εργασία κατά τη γνώμη των συγγραφέων αποτελεί την πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης έντασης για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος. Η παρούσα μέθοδος απαιτεί ένα μοντέλο υλικών για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς του οπλισμένου σκυροδέματος και ένα δεύτερο αναλυτικό μοντέλο για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών φορτίου - μετατόπισης της κατασκευής που υπόκειται σε σεισμική διέγερση.

Μοντελοποίηση υλικών (Σχ. 27)

Για την προσομοίωση του σκυροδέματος γίνεται η παραδοχή του ομογενούς και ισότροπου υλικού για την κατάσταση πριν τη ρηγμάτωση και δημιουργείται το μητρώο $[D_c]$ διαστάσεων 3×3 . Η ρηγμάτωση λαμβάνεται υπόψη με τη δημιουργία ρηγμάτων κατά τη διεύθυνση των κύριων τάσεων, μόλις η επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σ_c ξεπεραστεί. Η ρηγμάτωση μοντελοποιείται με τον μηδενισμό της αρχικής δυσκαμψίας του σκυροδέματος στη διεύθυνση των κύριων τάσεων και το αρχικό ελαστικό μητρώο $[D_c]$ μετασχηματίζεται στο αντίστοιχο ρηγματωμένο $[D_c]_{cr}$, το οποίο περιέχει επιπλέον τον όρο μεταφοράς τέμνουσας $\alpha=0.5$ στη θέση 33, μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψη η εμπλοκή αδρανών και η λειτουργία βλήτρου. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των στοιχείων σκυροδέματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη έξι πιθανές καταστάσεις ρηγμάτωσης:

- α) Κατάσταση χωρίς ρήγματα
- β) Κατάσταση με ρήγματα ανοικτά σε μία διεύθυνση
- γ) Κατάσταση με ρήγματα κλειστά σε μία διεύθυνση
- δ) Κατάσταση με ρήγματα ανοικτά σε μία διεύθυνση και κλειστά στην άλλη
- ε) Κατάσταση με ρήγματα κλειστά σε δύο διευθύνσεις
- στ) Κατάσταση με ρήγματα ανοικτά σε δύο διευθύνσεις

Στην παρούσα εργασία δεν λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά: i) η κατάσταση κατά την

οποία είναι κλειστά τα ρήγματα και στις δύο διευθύνσεις με την κατάσταση που δεν υπάρχει ρηγματώση καθώς επίσης ii) η κατάσταση που υπάρχουν ρήγματα στην μία μόνο διεύθυνση και είναι ανοικτά και η κατάσταση που υπάρχουν ρήγματα και στις δύο διευθύνσεις, αλλά είναι ανοικτά της μίας μόνο διεύθυνσης. Τα ρήγματα μίας διεύθυνσης κλείνουν, όταν οι παραμορφώσεις στην άλλη διεύθυνση ε_y^v ξεπεράσουν τις προηγούμενες εφελκυστικές παραμορφώσεις ε_y . Δηλαδή τα ρήγματα της μίας διεύθυνσης κλείνουν, όταν το πάχος ρήγματος $C_w = \varepsilon_y - \varepsilon_y^v$ γίνει μικρότερο του μηδενός. Κλειστά ρήγματα σε μία διεύθυνση ξαναανοίγουν, μόλις οι τάσεις που δρουν κάθετα σε αυτά γίνουν εφελκυστικές, ενώ νέα ρήγματα δημιουργούνται σε αυτήν τη διεύθυνση, όταν η τάση του σκυροδέματος ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή. Σε σκυρόδεμα που έχει ρήγματα ανοικτά σε δύο διευθύνσεις γίνεται η παραδοχή ότι μπορεί να παραληφθεί μόνο τέμνουσα, ενώ ο συντελεστής ανάληψης τέμνουσας μειώνεται στο μισό για κάθε διεύθυνση ρηγμάτων. Καθώς τα δύο σετ ρηγμάτων μορφώνονται σε διαφορετική κατεύθυνση, τα μητρώα υλικών τροποποιούνται ξεχωριστά στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου. Τα δύο μητρώα με μειωμένο τον συντελεστή α στο μισό για το κάθε ένα προστίθενται, για να δώσουν το μητρώο ιδιοτήτων υλικού $[D_c]_{cr}$ για το στοιχείο με ρήγματα ανοικτά σε δύο διευθύνσεις. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε διαξονική σύνθλιψη χρησιμοποιείται το κριτήριο διαρροής von Mises. Το σκυρόδεμα αρχίζει να διαρρέει στα στοιχεία όπου

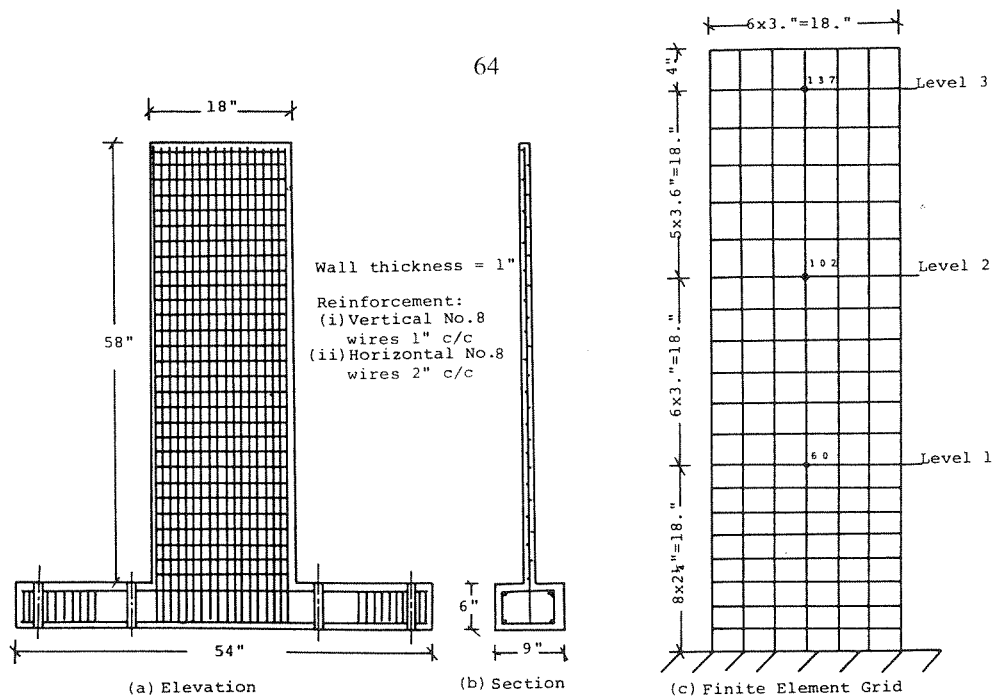
$$F(\sigma) = (\sigma_x^c{}^2 - \sigma_x^c \sigma_y^c + \sigma_y^c{}^2 + 3 \sigma_{xy}^c{}^2)^{1/2} - \sigma_0^c > 0$$

σ_0^c : η διαξονική αντοχή του σκυροδέματος. Θεωρείται ότι το στοιχείο συνθλίβεται, όταν η παραμόρφωση ξεπεράσει την τιμή 0.003. Για τον οπλισμό γίνεται η παραδοχή του μονοαξονικά επιπονούμενου υλικού και προσομοιώνεται με το μητρώο $[D_s]$ διαστάσεων 3×3 , όπου μη μηδενικός είναι μόνο ο όρος 11 με τιμή ρE_s . Το μητρώο οπλισμένου σκυροδέματος $[D_c]$ προκύπτει προσθέτοντας τα μητρώα σκυροδέματος $[D_c]$ και χάλυβα $[D_s]$ μεταξύ τους. Στα στοιχεία που ο χάλυβας εισέρχεται στην πλαστική περιοχή το ρE_s αντικαθίσταται από το ρE_{sh} στο αντίστοιχο μητρώο $[D_s]$.

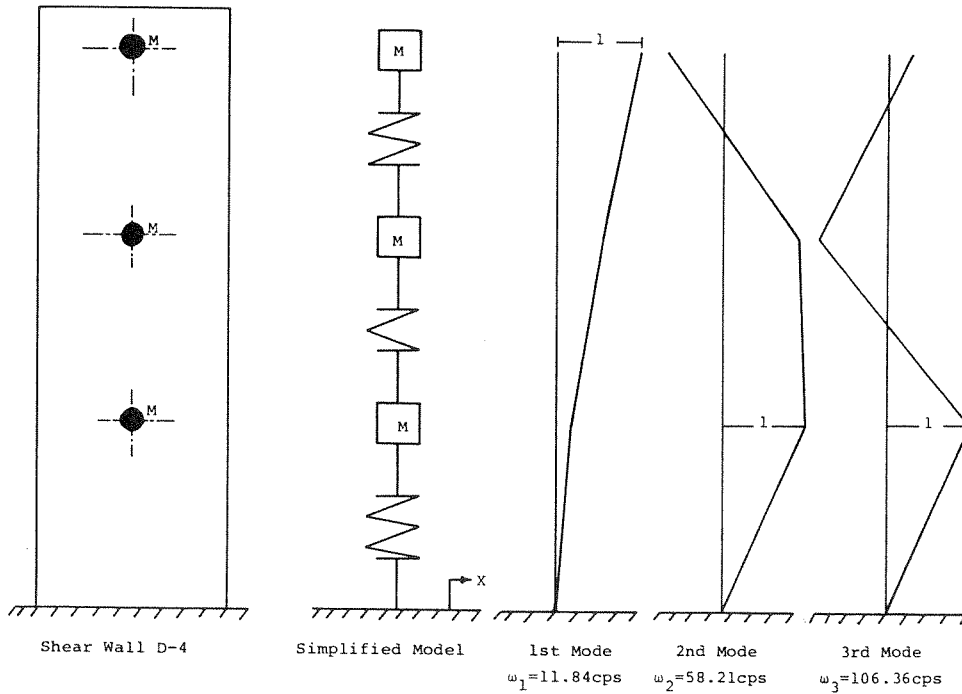
Μοντελοποίηση ανάλυσης

Η μοντελοποίηση της κατασκευής για την ανελαστική ανάλυση γίνεται με ορθογωνικά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι, δύο μεταφορικές μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση των αξόνων και η εντός επιπέδου στροφή του κάθε κόμβου (Σχ. 25).

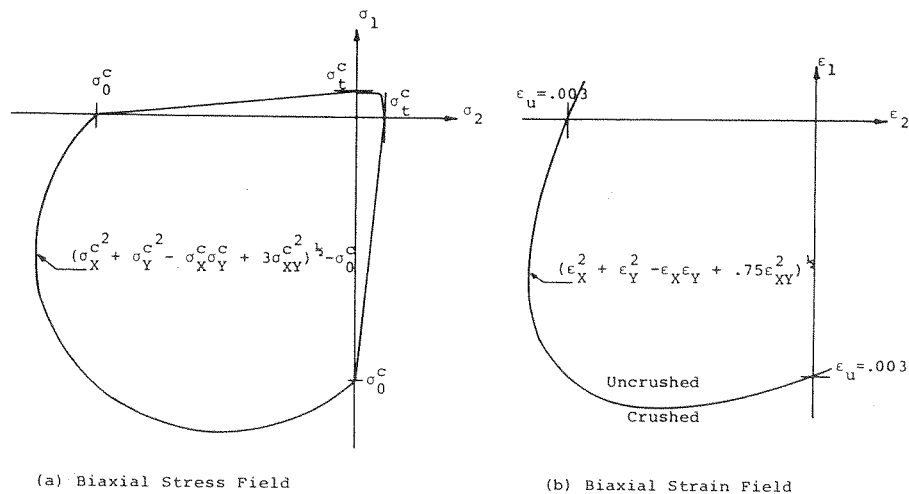
Το σύστημα πεπερασμένων στοιχείων που μορφώνουν τον φορέα επιλύεται για τη



Σχ. 25. Γεωμετρία, οπλισμοί και διακριτοποίηση δοκιμίου D-4 από την εργασία των Agrawal et al 1981.



Σχ. 26. Απλοποιημένη διακριτοποίηση δοκιμίου D-4 για δυναμική ανάλυση από την εργασία των Agrawal et al 1981.



Σχ. 27. Περιβάλλουσες καμπύλες αστοχίας για το σκυρόδεμα από την εργασία των Agrawal et al 1981.

βασική εξίσωση της δυναμικής θεωρώντας τις μάζες σημειακά συγκεντρωμένες στις στάθμες των ορόφων (Σχ. 26):

$$[M]\{\ddot{r}'\}+[C]\{\dot{r}'\}+[K^*]\{r\}=-[M]\{\ddot{r}'_g\}$$

Η απευθείας επίλυση της παραπάνω εξίσωσης δεν είναι δυνατή λόγω τόσο της μεταβολής του μητρώου δυσκαμψίας που μεταβάλλεται εξαιτίας της ανελαστικής φύσης του Οπλισμένου Σκυροδέματος όσο και λόγω της ακανόνιστης μορφής του εισαγόμενου επιταχυνσιογραφήματος. Έτσι η παραπάνω εξίσωση ξαναγράφεται σε διαφορική μορφή

$$[M]\{\Delta r''\}+[C]\{\Delta r'\}+[K^*]\{\Delta r\}=-[M]\{\Delta r'_g\}.$$

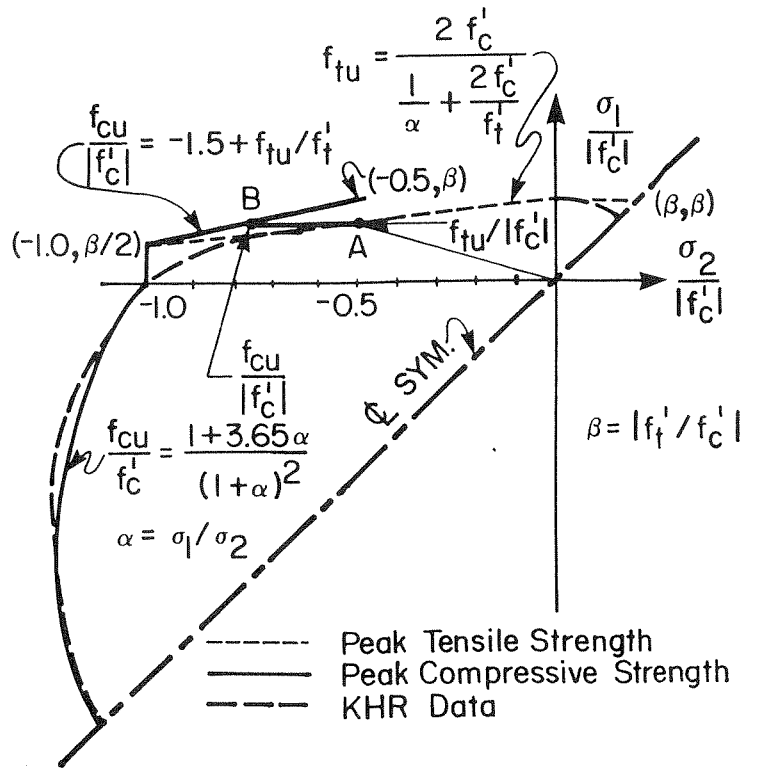
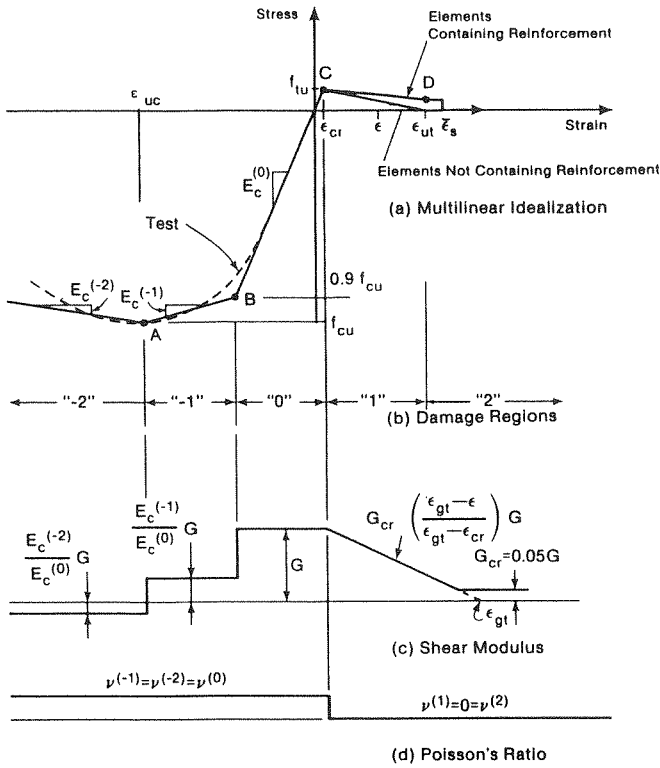
Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης γίνεται με την “μέθοδο β’ (β=0.25) του Newmark για μικρά βήματα ολοκλήρωσης Δt, όπου σε κάθε βήμα η επιτάχυνση θεωρείται σταθερή, ενώ η δυσκαμψία επαναυπολογίζεται και δίνεται ως αρχική για το επόμενο διάστημα ολοκλήρωσης.

Από την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου για την προσομοίωση τοιχώματος που δοκιμάστηκε προηγούμενα σε εργαστήριο με φορτία την B-N συνιστώσα του σεισμού του El Centro 1940 προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για τις δυνατότητές του στην προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς επίπεδων κατασκευών από Ο/Σ που υπόκεινται σε σεισμικές φορτίσεις. Έτσι συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου με τα αντίστοιχα πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα που προκύπτουν με το μοντέλο της μεταβαλλόμενης δυσκαμψίας “modified EI method”, τα αποτελέσματα που προκύπτουν εδώ είναι καλύτερα για τις μετατοπίσεις, όμοια για την επιτάχυνση και τις ροπές στη βάση και όχι τόσο καλά για την τέμνουσα στη βάση. Το προτεινόμενο μοντέλο ενδέχεται να βελτιωθεί εισάγοντας αντί της σταθεράς α για την διάτμηση έναν συντελεστή που να λαμβάνει υπόψη την εμπλοκή αδρανών και τη λειτουργία βλήτρου συναρτήσε του εύρους ρωγμών.

S. Balakrishnan and D. W. Murray

Μοντέλο σκυροδέματος για την ανελαστική ανάλυση των κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [8], [9].

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται μοντέλο σκυροδέματος για την ανάλυση των κατασκευών, το οποίο λαμβάνει υπόψη βελτιωμένο μοντέλο για την ανελαστική διατμητική δυσκαμψία, ενώ γίνεται η παραδοχή της συνεχούς (ομοιόμορφης) ρηγμάτωσης. Για την μονοαξονική επιπόνηση λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα



Note: superscripts in parentheses denote damage regions.

Σχ. 28. Μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών των υλικών συναρτήσει της παραμόρφωσης από την αναλυτική εργασία των Balakrishnan et al 1988.

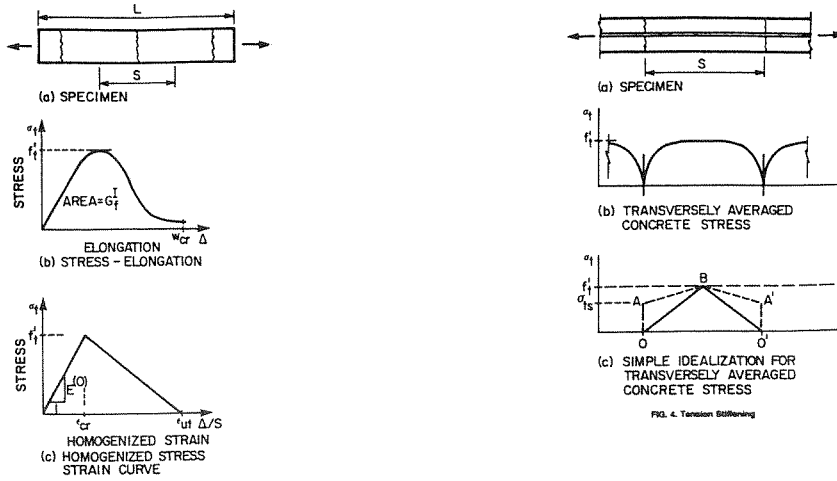
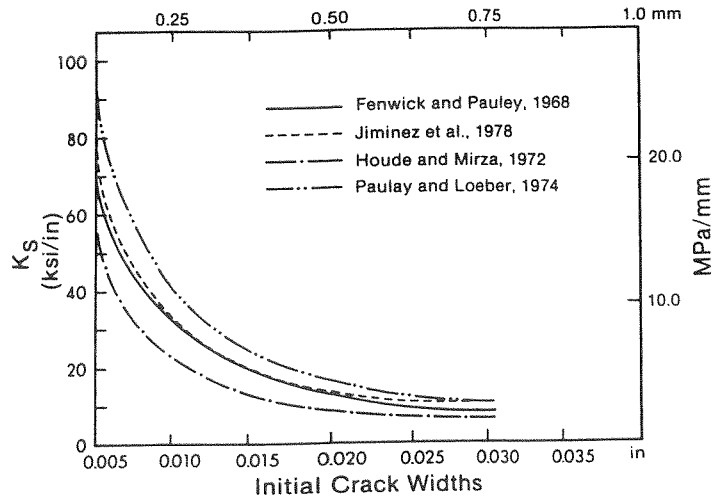
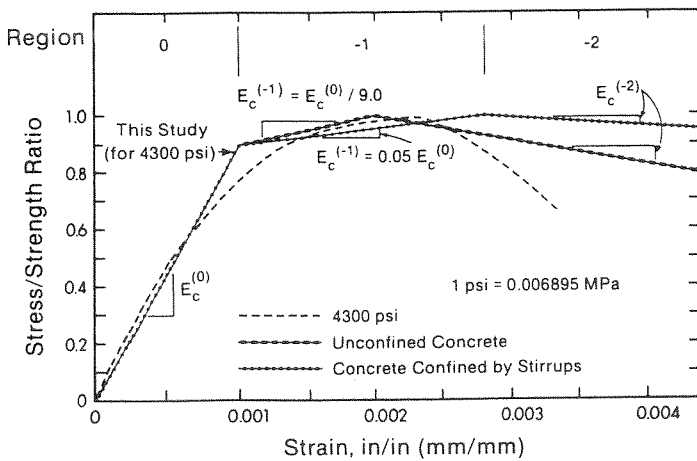


FIG. 4. Tension Softening



Σχ. 29. Συγκριτικά διαγράμματα ανηγμένης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης και διατμητικής δυσκαμψίας - αρχικού εύρους ρήγματος από την αναλυτική εργασία των Balakrishnan et al 1988.

αύξησης και μείωσης της τάσης του χάλυβα καθώς πάμε από τα ρήγματα προς το συμπαγές τμήμα του σκυροδέματος κατά τον εφελκυσμό, ενώ τα αντίστοιχα φαινόμενα λαμβάνονται υπ' όψη κατά τη θλίψη. Σε συνθήκες διαξονικής έντασης το μοντέλο θεωρείται ορθότροπο μετά την ρηγμάτωση και η διεύθυνση της ρηγμάτωσης καθορίζει τον προσανατολισμό των αξόνων ορθογωνικότητας. Η διατμητική δυσκαμψία είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας. Έτσι, ενώ για το διάστημα θλιπτικής διαρροής - εφελκυστικής ρηγμάτωσης είναι σταθερή με τιμή G , για το διάστημα μετά την εφελκυστική ρηγμάτωση είναι φθίνουσα λαμβάνοντας την τιμή $G_{cr}=0.05G$, όταν η επιμήκυνση του χάλυβα φθάσει στη τιμή 0.01 . Στο διάστημα μετά τη θλιπτική διαρροή μέχρι την οριακή αντοχή η διατμητική δυσκαμψία έχει τιμή $[E_c^{(-1)}/E_c^{(0)}]G$. Μετά το σημείο της μέγιστης θλιπτικής αντοχής η διατμητική δυσκαμψία έχει την τιμή $[E_c^{(-2)}/E_c^{(0)}]G$. Επίσης ο συντελεστής poisson λαμβάνεται σταθερός υπό θλίψη και ίσος με το 0 υπό εφελκυσμό. Για τη διαξονική επιπόνηση γίνεται η παραδοχή ότι εφελκυστικές τάσεις κάτω από την μισή τιμή της εφελκυστικής αντοχής δεν προκαλούν μείωση στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και ότι όταν το σκυρόδεμα ρηγματωθεί, τότε η θλιπτική του αντοχή μειώνεται στη τιμή που προκύπτει από την αλληλοτομία της οριζόντιας γραμμής που περνά από την εφελκυστική τάση ρηγμάτωσης με την καμπύλη αντοχής (Σχ. 28,29).

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραπάνω μεθόδου με αντίστοιχες εργασίες σχετικά με την ανελαστική συμπεριφορά δίσκων οπλισμένου σκυροδέματος προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι προτεινόμενες τεχνικές προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε ότι αφορά τον τύπο αστοχίας, την φόρτιση αστοχίας και τα χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτίου - μετατόπισης. Η εκτίμηση της ανελαστικής θλιπτικής αντοχής στην αρχή της ρηγμάτωσης που βασίστηκε στη συνθήκη της διαξονικής επιπόνησης δείχνει να είναι αποτελεσματική για την προτεινόμενη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Κατά την αστοχία δοκιμίων από ψαθυρή θραύση σκυροδέματος χωρίς την διαρροή οπλισμού απαιτείται αύξηση της ανελαστικής δυσκαμψίας στο προτεινόμενο μοντέλο, για να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά του πλέγματος του οπλισμού κατά την θραύση

D. HOEDAJANTO (Indonesia 1988)

Απλοποιημένο μοντέλο προσομοίωσης της διατμητικής συμπεριφοράς δίσκων ΟΣ [43].

Για τον σχηματισμό του προτεινόμενου μοντέλου έγινε η παραδοχή πως, όπως για το σκυρόδεμα υπό καθαρό εφελκυσμό από τη μη ρηγματωμένη δυσκαμψία $A_g E_c$ παίρνουμε την ρηγματωμένη μέσω της σχέσης $\rho A_g E_c$, (όπου ρ το ποσοστό οπλισμού της ρηγματωμένης διατομής) έτσι και για την διατμητική δυσκαμψία η αντίστοιχη ανελαστική προκύπτει ως συνάρτηση της ελαστικής $G_{cr}=f(\rho\eta G)$. Θεωρώντας λοιπόν $\rho=(\rho_x+\rho_y)/2$ και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των Vecchio et all που δοκίμασαν 22 δοκίμια σε καθαρή διάτμηση ρυθμίστηκε η $G_{cr}=f(\rho\eta G)$ έτσι, ώστε να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Προκύπτει λοιπόν:

$$G_{cr}=\omega\rho\eta G$$

$$\begin{aligned} \text{όπου :} \quad \omega &= 1.0 && \text{για } (\rho_x f_{sx1} + \rho_y f_{sy1})/2 \leq f'_c/8 \\ \omega &= 0.7 && \text{για } (\rho_x f_{sx1} + \rho_y f_{sy1})/2 > f'_c/8 \end{aligned}$$

Το προτεινόμενο μοντέλο περιγραφής της υστεριτικής διατμητικής συμπεριφοράς δίσκων οπλισμένου σκυροδέματος προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα των Vecchio et all σε ότι αφορά την μονότονη φόρτιση. Στην περίπτωση της υστεριτικής συμπεριφοράς ο κλάδος της αποφόρτισης στο προτεινόμενο μοντέλο είναι συντηρητικός δείχνοντας ότι είναι πολύ πιθανό τα αποτελέσματα των Vecchio et all να μην είναι άμεσα εφαρμόσιμα σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος που καταπονούνται σε κάμψη και διάτμηση. Στο προτεινόμενο υστερητικό μοντέλο γίνονται οι παραδοχές:

- α) Δεν καθορίζεται όριο διατμητικής αντοχής
- β) Οι καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης ακολουθούν την ευθεία γραμμή που ενώνει το σημείο (0,0) με το μέγιστο σημείο της περιβάλλουσας που επιτεύχθηκε στο προηγούμενο βήμα φόρτισης.

C. Sittipunt and S. Wood.

Ανάλυση της συμπεριφοράς τοιχωμάτων διάτμησης ΟΣ με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [90].

Στην παρούσα εργασία κατασκευάζονται τετράκομβα ισοπαραμετρικά επιφανειακά στοιχεία για την μοντελοποίηση του σκυροδέματος και γραμμικά στοιχεία δύο κόμβων για την μοντελοποίηση του οπλισμού προκειμένου να προσομοιωθεί η ανελαστική

συμπεριφορά τοιχωμάτων υπό ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση. Εξ αρχής έγιναν τέσσερις παραδοχές στη συμπεριφορά των τοιχωμάτων οι οποίες προέκυψαν από την παρατήρηση πειραμάτων σε τοιχώματα:

α) Τα ρήγματα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στο χαμηλότερο μέρος του τοιχώματος

β) Οι διατμητικές παραμορφώσεις στο χαμηλότερο μέρος του τοιχώματος είναι μεγαλύτερες

γ) Υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση τα ρήγματα σε κάθε θέση τείνουν να είναι σχεδόν κάθετα στα ρήγματα που δημιουργήθηκαν για φόρτιση στην προηγούμενη διεύθυνση

δ) Ο προσανατολισμός των ρηγμάτων δεν αλλάζει σε όλη τη διάρκεια του πειράματος

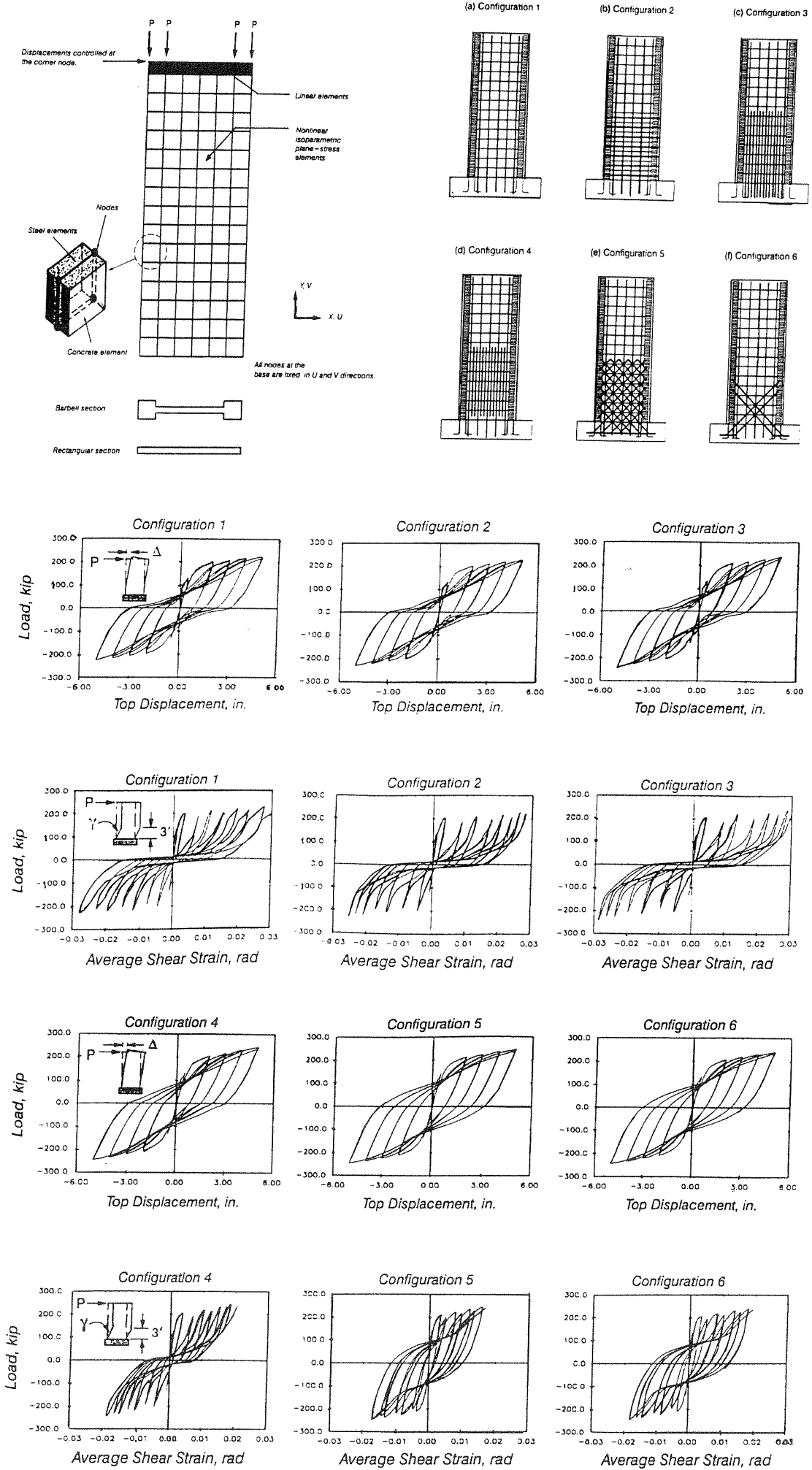
Στο προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιείται κριτήριο αντοχής για τη δημιουργία και διεύρυνση των ρηγμάτων. Για την ορθότερη προσομοίωση της ορθής και διατμητικής εντατικής κατάστασης κατασκευάστηκε ξεχωριστό μοντέλο για την περιγραφή της κάθε κατάστασης. Μέσω εννέα παραμέτρων λαμβάνονται υπόψη η εμπλοκή αδρανών, η λειτουργία βλήτρου και η μείωση αντοχής λόγω ανακύκλισης στο διατμητικό υστερητικό μοντέλο. Επίσης μέσω οκτώ παραμέτρων λαμβάνονται υπόψη η μείωση της τάσης του χάλυβα στα τμήματα του μη ρηγματωμένου σκυροδέματος, η διαφορετική συμπεριφορά περισφιγμένου και απερίσφικτου σκυροδέματος, το κλείσιμο και ξαναάνοιγμα των ρηγμάτων καθώς επίσης και η μείωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος λόγω ανακύκλισης, στο μοντέλο απεικόνισης της ορθής έντασης. Για την βαθμονόμηση του μοντέλου έγιναν συγκρίσεις μεταξύ πειράματος και ανάλυσης σε ότι αφορά:

α) Την καμπύλη του φορτίου - μετατόπισης

β) Την καμπύλη της τέμνουσας δύναμης - μέσης διατμητικής παραμόρφωσης στη βάση του τοιχώματος

γ) Την τελική μορφή αστοχίας

Προέκυψε το συμπέρασμα ότι το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο αναπαριστά με ικανοποιητική ακρίβεια τα βασικότερα χαρακτηριστικά της ανελαστικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων, όπως είχαν μετρηθεί κατά το πείραμα. Επίσης, ο περιορισμός των διατμητικών παραμορφώσεων στη βάση των τοιχωμάτων βελτιώνει την υστερητική



Σχ. 30. Αναλυτικά μοντέλα τοιχομάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος και χαρακτηριστικοί βρόχοι υστέρησης για διάφορους τύπου οπλισμού από την εργασία των Sittipunt et al 1995.

συμπεριφορά τους (Σχ. 30).

Μοντέλα μακροσκοπικής προσομοίωσης.

Τα μακροσκοπικά μοντέλα περιγραφής ανελαστικής συμπεριφοράς είναι τα πρώτα που εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση τοιχωμάτων Ο\Σ που υπόκεινται σε σεισμική διέγερση της βάσης τους. Αρχικά προτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της μεταβλητής δυσκαμψίας “EI” το οποίο εφαρμόστηκε αρχικά στις δοκούς, ενώ αποδείχθηκε ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και στα τοιχώματα. Το τοίχωμα προσομοιώνεται με ένα γραμμικό στοιχείο στο μέσο της διατομής θεωρώντας τη μάζα συγκεντρωμένη στις στάθμες των ορόφων. Η ανελαστική συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση ανελαστικού στροφικού ελατηρίου τοποθετημένου στα άκρα (βάση και κορυφή) του γραμμικού στοιχείου. Στο στροφικό ελατήριο προσδίδονται ιδιότητες ανάλογα με τον οπλισμό της ακραίας ίνας, τις ποιότητες των υλικών και τις διαστάσεις της διατομής. Επίσης προτείνονται και μοντέλα με διπλή μοντελοποίηση σε κάθε άκρο στοιχείου, όπου εκτός από το στροφικό ελατήριο που περιγράψαμε προηγουμένως τοποθετείται και στροφικό ελατήριο κόμβου προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ολίσθηση του εφελκόμενου οπλισμού κατά το μήκος του. Αυτού του τύπου τα μοντέλα χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι οι ανελαστικές παραμορφώσεις είναι σημειακά συγκεντρωμένες, ενώ ο υπόλοιπος φορέας παραμένει ελαστικός. Οι Park et al το 1987 παρουσίασαν ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την ανελαστική συμπεριφορά σε όλο το μήκος του στοιχείου [77]. Επίσης κατά καιρούς προτάθηκαν διάφορα ανελαστικά μοντέλα για την προσομοίωση των τοιχωμάτων, τα οποία βασίζονται στο μοντέλο του δικτυώματος και τα οποία μέσω ανελαστικών ραβδωτών στοιχείων προσομοιώνουν τους επιμέρους μηχανισμούς ανάληψης έντασης [25],[27]. Τα ραβδωτά στοιχεία τοποθετούνται στην περίμετρο οριζόντια και κάθετα, ενώ εσωτερικά τοποθετούνται κεκλιμένα. Έτσι μέσω της θέσης τους, της κλίσης τους και μέσω κατάλληλων ιδιοτήτων που τους προσδίδονται γίνεται η προσομοίωση των μηχανισμών ανάληψης αξονικής έντασης, ροπής και τέμνουσας στα τοιχώματα Ο\Σ.

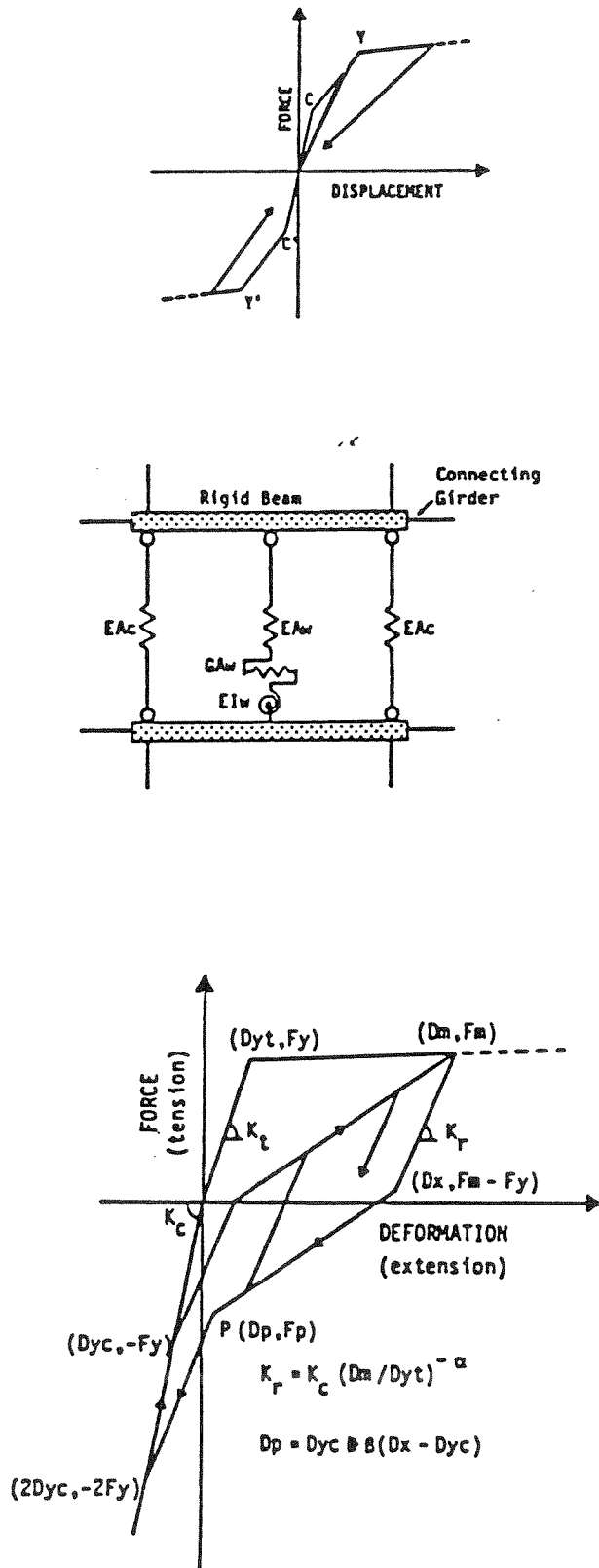
Τα μοντέλα της ισοδύναμης δοκού και του δικτυώματος για τα τοιχώματα που περιγράφονται προηγουμένως έχουν τα βασικά μειονεκτήματα της θεώρησης της τοποθέτησης του στροφικού ελατηρίου στον κεντροβαρικό άξονα, γεγονός που επηρεάζει την ανάλυση κατά την επίλυση μεικτών πλαισίων καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη ορθά η αλληλοεπιρροή των γραμμικών στοιχείων με το τοίχωμα. Στην πραγματικότητα η θέση του ουδέτερου άξονα είναι μεταβαλλόμενη σε κάθε κύκλο και

καθ' ύψος. Η παραπάνω ασυμβατότητα αίρεται με τη χρήση του μοντέλου του δικτυώματος στο οποίο όμως περιοριζόμαστε, από την αξιόπιστη χρήση του μόνο σε μονότονη φόρτιση, λόγω των δυσκολιών στον καθορισμό της τοπολογίας της κατασκευής και των ιδιοτήτων των υλικών των στοιχείων του δικτυώματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Σχ. 37,38).

Το 1984 οι Kabeyasawa et all παρουσίασαν το μακροσκοπικό μοντέλο των τριών κάθετων γραμμών για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων ΟΣ το οποίο και περιγράφουμε παρακάτω (Σχ. 31).

Μοντέλο των τριών κάθετων ράβδων [50], [107], [108], [109].

Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο άκαμπτες δοκοί στο πάνω και κάτω τμήμα κάθε στοιχείου. Οι δύο άκαμπτες δοκοί συνδέονται με τρία γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία από τα οποία δύο τοποθετούνται στα άκρα για την προσομοίωση της αξονικής δυσκαμψίας των ακραίων περισφιγμένων περιοχών και ένα στην μέση για την προσομοίωση των ιδιοτήτων του κεντρικού πάνελ. Το στοιχείο στη μέση προσομοιώνει την αξονική και στρεπτική δυσκαμψία του κεντρικού πάνελ καθώς επίσης και τη διατμητική δυσκαμψία όλου του τοιχώματος μέσω τριών συγκεντρωμένων ελατηρίων σε απόσταση ίση με c φορές το ύψος του στοιχείου (Σχ. 31). Η αξονική δυσκαμψία των ελατηρίων που προσομοιώνουν τις κρυφοκολόνες και την αξονική φέρουσα ικανότητα του κεντρικού πάνελ μειώνεται στο 90%, όταν η θλιπτική δύναμη σε αυτά από τα κατακόρυφα φορτία και την κάμψη προκαλέσει διαρροή στο περισφιγμένο σκυρόδεμα. Όταν το στοιχείο διαρρεύσει σε εφελκυσμό (κατάσταση κατά την οποία η εφελκυστική δύναμη είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των δυνάμεων που απαιτούνται για την διαρροή σε εφελκυσμό του διαμήκους οπλισμού), τότε η αντίστοιχη δυσκαμψία μειώνεται στο 10% της αρχικής. Το υστερητικό μοντέλο για την αξονική δυσκαμψία που παρουσιάζουμε στο σχήμα (Σχ. 31,32) καθορίζεται αρχικά με τη χρήση του σημείου Y' στη θέση $(D_{yc}, -F_y)$ το οποίο αντιπροσωπεύει τη θέση αύξησης της θλιπτικής αξονικής δυσκαμψίας για κύκλους κατά τους οποίους δεν έχει ακόμη διαρρεύσει ο οπλισμός σε εφελκυσμό. Σε αυτή τη φάση πέρα από το σημείο Y' η θλιπτική δυσκαμψία ακολουθεί την κλίση της αντίστοιχης αρηγμάτωσης. Για τους κύκλους κατά τους οποίους διαρρέει ο εφελκυσμένος οπλισμός το μοντέλο ακολουθεί τη διγραμμική περιβάλλουσα που έχει καθοριστεί για τον χάλυβα κατά την φόρτιση σε αξονικό εφελκυσμό, ενώ η αποφόρτιση γίνεται με γωνία ίση με αυτή της θλιπτικής δυσκαμψίας μειωμένη περίπου



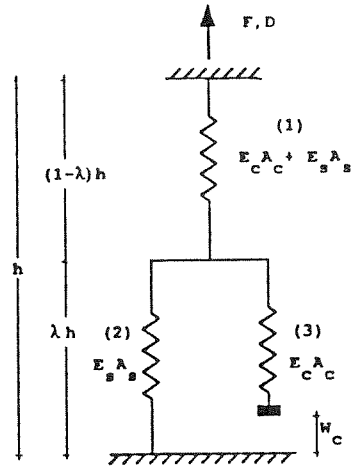
Σχ. 31. Υστερητικό μοντέλο τύπου O.O.H.M., συνολικό μοντέλο τοιχώματος και υστερητικό μοντέλο αξονικής δυσκαμψίας των Kabeyasawa et al το 1982.

κατά το πηλίκιο της μετατόπισης διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού προς την μέγιστη πραγματοποιούμενη μετατόπιση υψωμένο στη δύναμη $\alpha=0.9$ που παριστάνει την παράμετρο μείωσης της δυσκαμψίας αποφόρτισης $K_r=K_c(D_m/D_y)^{-\alpha}$. Η αποφόρτιση συνεχίζει με αυτή τη κλίση μέχρι του σημείου που η δύναμη εφελκυσμού πέσει σε τιμή ίση με την υπεραντοχή του χάλυβα (ασκηθείσα δύναμη - δύναμη διαρροής) (D_x, F_m-F_y). Από το σημείο αυτό μέχρι την τιμή θλιπτικής παραμόρφωσης D_p ίση με την θλιπτική παραμόρφωση διαρροής του σκυροδέματος $D_p=D_{yc}+\beta \cdot (D_x-D_{yc})$ το μοντέλο αποφορτίζει ευθύγραμμα με κλίση όμοια με αυτήν της αντίστοιχης φόρτισης (όπου $\beta=0.2$ η παράμετρος με την οποία λαμβάνεται υπόψη η αύξηση δυσκαμψίας κατά το κλείσιμο των ρωγμών και D_x η παραμόρφωση αλλαγής δυσκαμψίας κατά την αποφόρτιση). Από το σημείο P το μοντέλο βρίσκει την καμπύλη αρηγμάτωτης θλιπτικής δυσκαμψίας στο σημείο $Y''(2D_{yc}, -2F_y)$ και συνεχίζει κατά το μήκος της. Με αυτό το μοντέλο προσομοιώνονται οι αξονικές δυσκαμψίες των ακραίων περισφιγμένων περιοχών των τοιχωμάτων και του κεντρικού πάνελ με την προϋπόθεση όμως της εισαγωγής των αντίστοιχων εμβαδών διατομής.

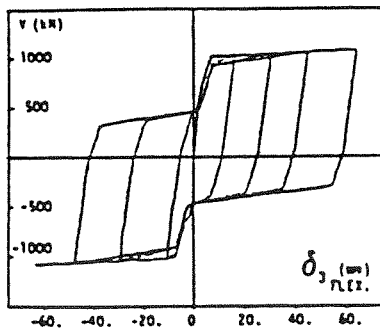
Η διατμητική δυσκαμψία του τοιχώματος προσομοιώνεται με την χρήση οριζόντιου ελατηρίου στο κεντρικό στοιχείο του μοντέλου. Η ελαστική διατμητική δυσκαμψία προσδιορίζεται ως: $K_s=GA_w/kh$. Η τέμνουσα δύναμη ρηγμάτωσης προκύπτει $V_c=0.438(f_c')^{1/2}A_w$. Επίσης χρησιμοποιείται η εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τον Hirose για τον προσδιορισμό της τέμνουσας δύναμης αστοχίας V_u . Η δυσκαμψία κατά τη διαρροή σε διάτμηση λαμβάνεται ίση με αK_s (όπου $\alpha=0.46\rho_{wh} \cdot f_{wy}/f_c'+0.14$). Η διατμητική δυσκαμψία μετά την διαρροή λαμβάνεται ίση με $0.1K_s$.

Η δυστρεψία του κεντρικού πάνελ προσομοιώθηκε με στροφικό ελατήριο στο μέσον του στοιχείου. Η ρηγμάτωση προκαλείται όταν αναπτύσσεται εφελκυσμός στην ακραία ίνα του πάνελ υπό τα κατακόρυφα φορτία και την καμπτική ροπή [$M_c=P(uL)/6$]. Η ροπή διαρροής ισούται με την ροπή που προκαλεί η διαρροή όλων των κατακόρυφων οπλισμών.

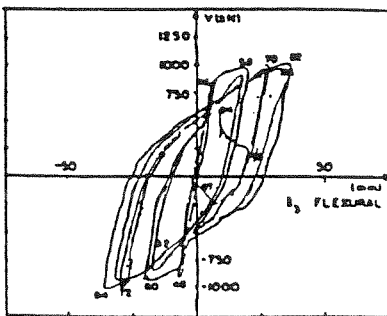
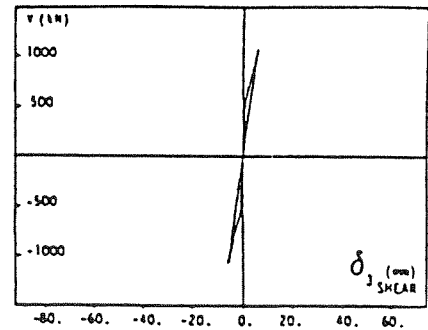
Για την περιγραφή της υστερητικής συμπεριφοράς των ελατηρίων διάτμησης και στροφής του κεντρικού πάνελ χρησιμοποιήθηκε το υστερητικό μοντέλο προσανατολισμού στην αρχή των αξόνων (Origin - Oriented Hysteresis Model) (Σχ. 31). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο όταν η φόρτιση φθάσει το προηγούμενο μέγιστο φορτίο τότε αυτή ακολουθεί την αρχικά καθορισθείσα καμπύλη φορτίου μετατόπισης. Η αποφόρτιση είναι ευθεία γραμμή που διέρχεται από το σημείο (0,0). Επιλέχθηκε το προτεινόμενο μοντέλο καθώς από την φύση του δίνει μικρή απορροφώμενη ενέργεια σε κάθε κύκλο, γεγονός που ισχύει στην πραγματικότητα σε φορείς που είτε



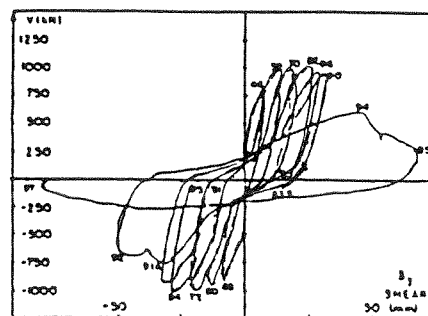
Σχ. 32. Προτεινόμενο μοντέλο ακραίας ίνας τοιχωμάτων από τους Vulkano και Bertero το 1986.



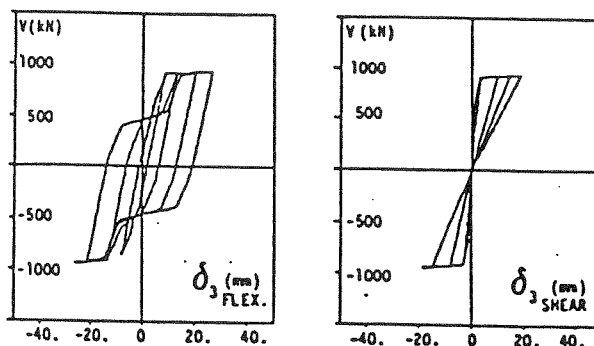
a) Analytical



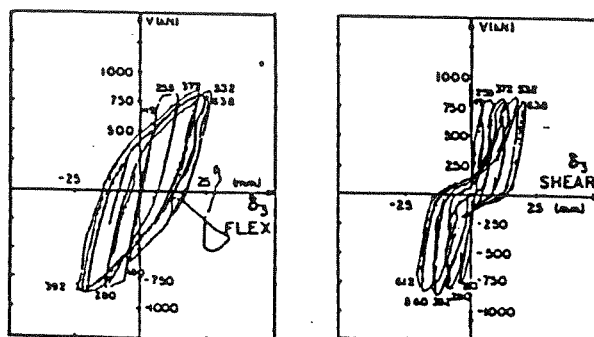
b) Experimental (10)



Σχ. 33. Πειραματικά και αναλυτικά υπολογισμένοι βρόχοι υστέρησης τοιχώματος με διαπλατύνσεις στα άκρα (δοκίμιο 4) από τους Vulkano και Bertero το 1986.

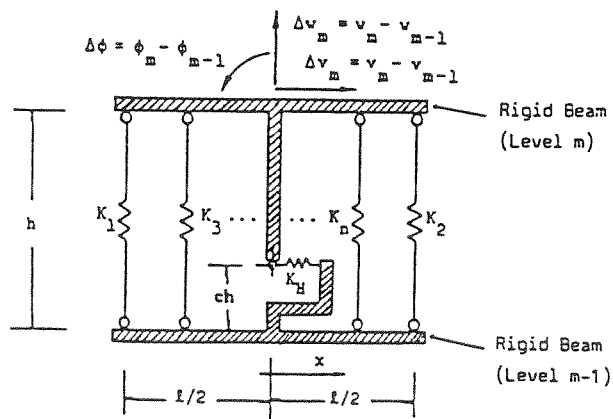


a) Analytical

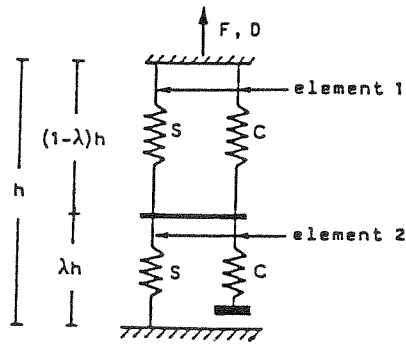


b) Experimental (10)

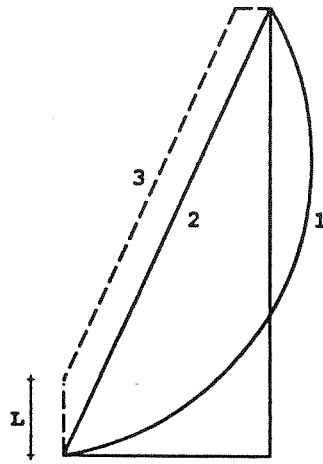
Σχ. 34. Πειραματικά και αναλυτικά υπολογισμένοι βρόχοι υστέρησης τοιχώματος ορθογωνικής διατομής (δοκίμιο 6) από τους Vulcano και Bertero το 1986.



Σχ. 35. Μοντέλο των πολλαπλών κάθετων γραμμών που προτάθηκε από τους Vulcano et al το 1988.

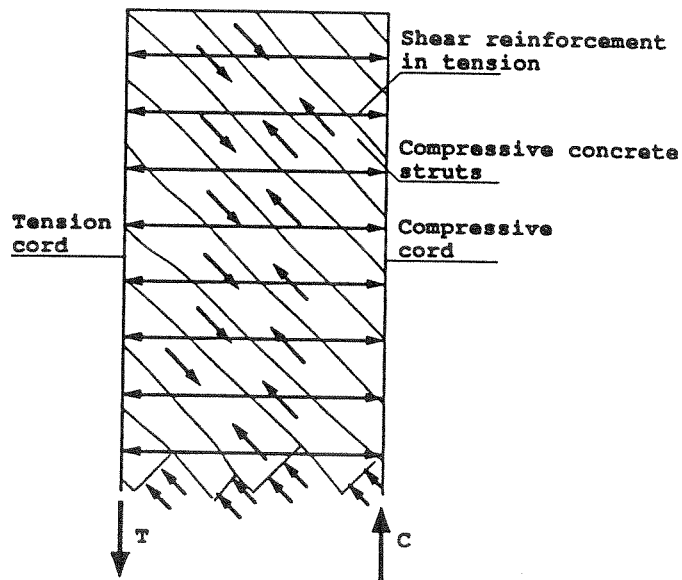


Σχ. 36. Μοντέλο αξονικά φορτιζόμενου στοιχείου που προτάθηκε από τους Vul-
kano et al το 1988.



- 1 - diagram obtained from global analysis of the building
- 2 - linear envelope
- 3 - design envelope

Σχ. 37. Περιβάλλουσες καμπτικών ροπών τοιχωμάτων



Σχ. 38. Μοντέλο δικτυώματος για γραμμικά στοιχεία Ο/Σ.

καταπονούνται σε υψηλή τέμνουσα είτε είναι ελαφρά οπλισμένοι έναντι κάμψης.

Το μοντέλο που περιγράφηκε δέχτηκε τροποποιήσεις και βελτιώσεις σε αρκετά σημεία μετά τη σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι ουσιαστικότερες από αυτές αφορούν τη μοντελοποίηση του αξονικά καταπονούμενου στοιχείου, τη βελτίωση του διατμητικού υστερητικού μοντέλου και την αντικατάσταση του στροφικού ελατηρίου του κεντρικού πάνελ με μια σειρά κατακόρυφων ελατηρίων (μακροσκοπικό fiber model, Multi Vertical Line Element) μεταξύ των δύο ακραίων (Σχ. 35). Το υστερητικό μοντέλο αξονικής δυσκαμψίας τροποποιείται και συντίθεται πλέον από δύο επιμέρους τμήματα προκειμένου να ληφθούν υπόψη χωριστά αφενός το μη ρηγματωμένο σκυρόδεμα και ο οπλισμός και αφετέρου η υστερητική συμπεριφορά των υλικών και η αύξηση της δυσκαμψίας με το κλείσιμο των ρωγμών (Σχ. 33,34,36).

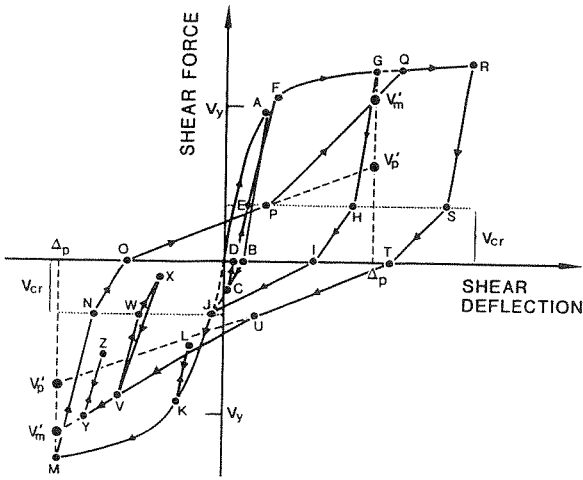
Ozcebe G. and Saatcioglu M.

Αναλυτικό μοντέλο περιγραφής της υστερητικής διατμητικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων από Ο/Σ [72].

Το μοντέλο αυτό περιγράφει την υστερητική διατμητική συμπεριφορά δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη τέμνουσα και ροπή. Αρχικά ορίζεται η περιβάλλουσα καμπύλη αντοχής η οποία είναι ουσιαστικά μια σχέση δύναμης - παραμόρφωσης υπό μονότονη φόρτιση. Η παραπάνω περιβάλλουσα καμπύλη περιλαμβάνει σημεία διατμητικής ρηγμάτωσης και διατμητικής διαρροής. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός από πειραματικά αποτελέσματα για τον καθορισμό κανόνων που θα περιγράφουν την ιστορία φόρτισης και αποφόρτισης των στοιχείων που προσομοιώνονται (Σχ. 39,40).

Κλάδος αποφόρτισης

Δύο κλίσεις της περιβάλλουσας καμπύλης αντοχής χρησιμοποιούνται κυρίως για να καθορίσουν τον κλάδο αποφόρτισης. Η κλίση της γραμμής που ενώνει τη αρχή των αξόνων με την τέμνουσα διατμητικής ρηγμάτωσης [V_{cr} : αντιστοιχεί στην τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσει διατμητική τάση ίση με $0.33(f'_c)^{0.5}$] ονομάζεται κλίση k_1 . Η κλίση της γραμμής που ενώνει το σημείο διατμητικής διαρροής του ίδιου τεταρτημορίου με το σημείο διατμητικής ρηγμάτωσης για φόρτιση στην άλλη διεύθυνση ονομάζεται κλίση k_2 . Η κλίση του κλάδου αποφόρτισης k για τέμνουσα δύναμη πάνω από τη τέμνουσα διαρροής λαμβάνει τιμές από δύο συναρτήσεις σχ.40 οι οποίες περιέχουν την κλίση k_2 και τον όρο Δ/Δ_y . Για το ποιά συνάρτηση θα ενεργοποιηθεί εξαρτάται από την τιμή της τέμνουσας δύναμης και αν αυτή βρίσκεται



Σχ. 39. Υστερητικό μοντέλο περιγραφής της διατμητικής ανελαστικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων από Ο/Σ που προτάθηκε από τους Ozcebe et al 1989.

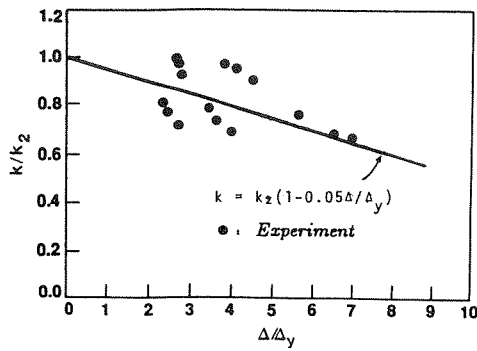
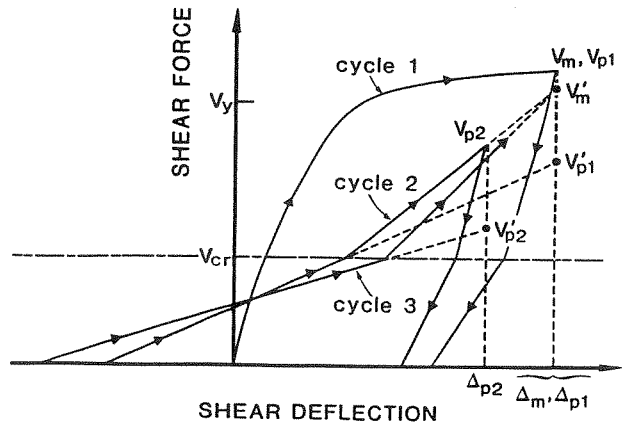


FIG. 2. Variation of Unloading Slope with Ductility above Cracking Load

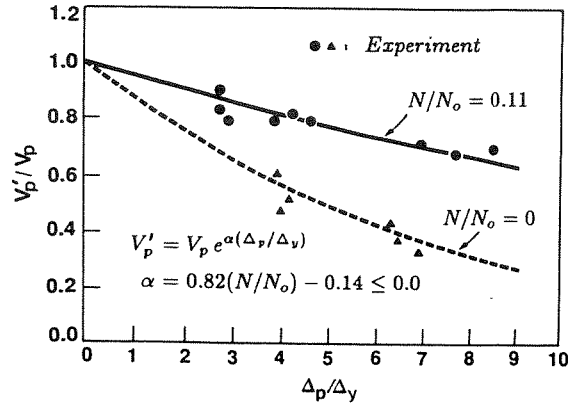


FIG. 6. Variation of Stiffness Degradation with Ductility during Reloading below Cracking Load

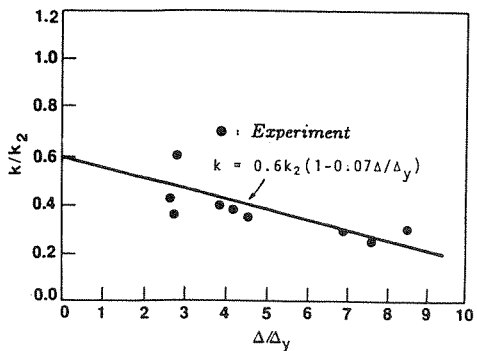


FIG. 3. Variation of Unloading Slope with Ductility below Cracking Load

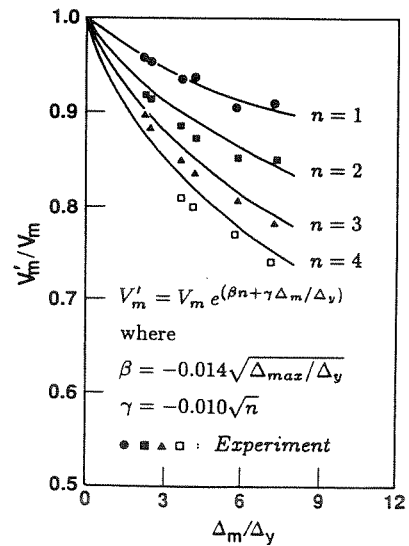


FIG. 7. Variation of Stiffness Degradation with Ductility During Reloading Above Cracking Load

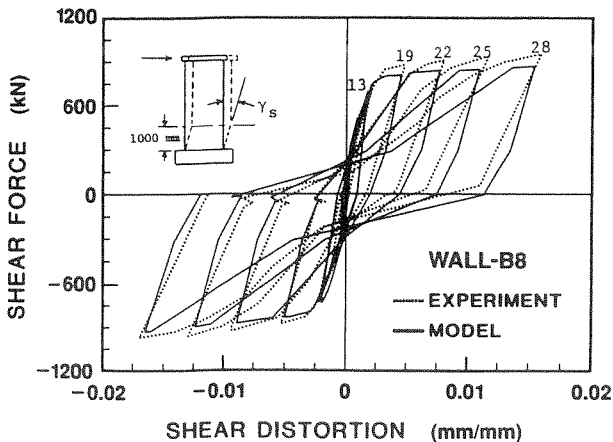


FIG. 15. Comparison of Experimental and Analytical Hysteresis Loops for Wall B8 at 1,000 mm from Support

Σχ. 40. Συγκρίσεις της απόκρισης των κυριότερων χαρακτηριστικών καθώς και όλου του μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα.

πάνω ή κάτω από την τέμνουσα διατμητικής ρηγμάτωσης. Πριν την τέμνουσα ρηγμάτωσης η κλίση είναι αυτή της περιβάλλουσας. Μεταξύ της τέμνουσας ρηγμάτωσης και της τέμνουσας διαρροής η κλίση δίνεται από τη σχέση: $k=k_1-(k_1-k_2)\cdot(\Delta-\Delta_{cr})/(\Delta_y-\Delta_{cr})$.

Κλάδος φόρτισης και επαναφόρτισης

Ο κλάδος φόρτισης και επαναφόρτισης καθορίστηκε από την παρατήρηση πειραματικών αποτελεσμάτων. Λαμβάνονται υπόψη αρκετές παράμετροι όπως η ύπαρξη αξονικής δύναμης και η αντοχή σε αξονική θλίψη, ο αριθμός των πλήρων κύκλων φόρτισης, το εύρος της διατμητικής παραμόρφωσης και η τιμή της τέμνουσας δύναμης στον προηγούμενο κύκλο. Οι παραπάνω παράμετροι μεταβάλλονται κατάλληλα ανάλογα με το επίπεδο της τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τις τέμνουσες ρηγμάτωσης και διαρροής.

Το προτεινόμενο μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη του την μεταβολή της περιβάλλουσας καμπύλης αντοχής όταν αλλάζει η αξονική φόρτιση κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Επίσης η εφαρμογή του περιορίζεται στα δομικά στοιχεία των οποίων η διατμητική αντοχή είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη καμπτική. Τυπικά χαρακτηριστικά της διατμητικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων από Ο/Σ όπως είναι το στένωμα των βρόχων υστέρησης στην αρχή των αξόνων και η μείωση της δυσκαμψίας περιγράφονται ικανοποιητικά από το προτεινόμενο μοντέλο.

3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

3.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.

Παράμετροι που έχουν προσδιοριστεί και διερευνηθεί

Ένας μεγάλος αριθμός από τις εργασίες που έχουν εκπονηθεί την τελευταία εικοσαετία με σκοπό τον προσδιορισμό και την εκτίμηση της συμπεριφοράς των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος είχαν αντικείμενο τα τοιχώματα.

Παρ' όλα αυτά και ενώ για αρκετές συνιστώσες της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων υπάρχει ταύτιση των απόψεων των αντίστοιχων ερευνητικών ομάδων, είναι επίσης αρκετές οι παράμετροι για τις οποίες οι απόψεις, για τη συμβολή και τον

τρόπο εκτίμησής τους, δίστανται.

Μετά την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας οι παράμετροι που έχουν προσδιοριστεί και ελεγχθεί από διάφορους ερευνητές έχουν χωριστεί στις εξής ομάδες:

α) Παράμετροι που εξαρτώνται από τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των υλικών χωρίς να θεωρείται η μεταξύ τους συνεργασία:

- Αντοχή σε θλίψη του απερίσφικτου σκυροδέματος.
- Αντοχή, είδος και μετελαστική συμπεριφορά του χάλυβα.

β) Παράμετροι που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τη μορφή της διατομής του στοιχείου:

- Οι τιμές των λόγων H_w/L_w και $M/V * L_w$
- Η ύπαρξη διαπλατύνσεων στα άκρα του τοιχώματος
- Η συμμετρία της διατομής και του οπλισμού
- Ο τρόπος σύνδεσης του τοιχώματος με τον υπόλοιπο φορέα (πλάκες, δοκοί)
- Η ύπαρξη ανοιγμάτων.

γ) Παράμετροι που εξαρτώνται από τη διάταξη και την ποσότητα των οπλισμών, τη συνεργασία χάλυβα σκυροδέματος και την κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων.

- Το ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού στη διατομή
- Η ποσότητα του οριζόντιου οπλισμού κορμού
- Η ποσότητα του κατακόρυφου οπλισμού κορμού
- Η διάταξη και η κατανομή του οπλισμού στον κορμό
- Η ύπαρξη ισχυρού οπλισμού στα άκρα του τοιχώματος
- Η περίσφιξη του οπλισμού κορμού.

δ) Παράμετροι που εξαρτώνται από τον τρόπο επιβολής της φόρτισης, το είδος της φόρτισης καθώς επίσης την επιλογή και τις δυνατότητες σε εξοπλισμό του ερευνητή για το πείραμα:

- Το είδος της φόρτισης (ανακυκλιζόμενη ή μονότονη φόρτιση)
- Η μετατόπιση σε κάθε κύκλο και το πλήθος των κύκλων φόρτισης
- Η επιλογή της κύριας παραμέτρου ελέγχου του πειράματος
- Η ικανότητα του στοιχείου να αναπτύσσει ικανοποιητική πλαστιμότητα μετατοπίσεων, καμπυλοτήτων και στροφών
- Το επίπεδο της διατμητικής έντασης πριν την αστοχία
- Η ύπαρξη αξονικού φορτίου.
- Το επίπεδο της ορθής έντασης πριν την αστοχία

- Η μεταβολή του αξονικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου

Ανάλυση των παραμέτρων που διερευνήθηκαν

A. Ιδιότητες υλικών

Στην πρώτη ομάδα παραμέτρων ανήκουν οι αντοχές του χάλυβα σε εφελκυσμό και του απερίσφικτου σκυροδέματος σε θλίψη.

i) Αντοχή απερίσφικτου σκυροδέματος (f_c)

Η αντοχή σκυροδέματος του τοιχώματος είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος και επηρεάζει τη συνολική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου, καθώς το μέγεθος της συνεισφοράς μιας ομάδας μηχανισμών στην ανάληψη της αναπτυσσόμενης έντασης εξαρτάται άμεσα από την τιμή αυτή. Έτσι, η συνεισφορά του μηχανισμού εμπλοκής αδρανών είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του f_c , καθώς, ως γνωστόν, οι δυνάμεις πρόσφυσης του τσιμεντοπολτού και των αδρανών αυξάνουν με την αύξηση του f_c . Επίσης, η ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι ανάλογη με την τιμή f_c . Έτσι, με την επίτευξη ικανοποιητικής θλιπτικής αντοχής στο σκυρόδεμα μπορεί να καθοριστεί η παραμόρφωση της θλιβόμενης περιοχής, για την οποία επέρχεται αστοχία της επικάλυψης (αποφλοίωση) ή αστοχία λόγω θραύσης του σκυροδέματος των θλιβομένων διαγωνίων στον κορμό του τοιχώματος. Με την άρση ή έστω τον περιορισμό της αποφλοίωσης της διατομής, λόγω της βελτίωσης της ποιότητας του σκυροδέματος για ένα δεδομένο επίπεδο σχεδιασμού, αποφεύγεται η ψαθυρή αστοχία η οποία ήταν πολύ πιθανό να συμβεί είτε μέσω ασύμμετρης αποφλοίωσης της θλιβόμενης περιοχής που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία από λυγισμό, είτε λόγω της καταστροφής τμήματος του κορμού και την υπερβολική αύξηση των τάσεων στους άλλους μηχανισμούς ανάληψης τέμνουσας. Επίσης, η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι άμεση συνάρτηση της απερίσφικτης αντοχής.

ii) Αντοχή και πλαστιμότητα του χάλυβα

Στα τοιχώματα τα οποία έχουν εξασφαλιστεί έναντι διατμητικού τύπου αστοχίας, η ικανότητα του χάλυβα να αναπτύσσει ικανοποιητική αντοχή και τον απαιτούμενο μετελαστικό κλάδο είναι καθοριστική για τη διασφάλιση πλάστιμης συμπεριφοράς, ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και την ανάπτυξη της απαιτούμενης αντοχής. Η υπεραντοχή που παρατηρείται μερικές φορές στην πλαστική περιοχή του διαγράμματος τάσης - παραμόρφωσης του χάλυβα βοηθά πολύ στην αύξηση της αντοχής και της

απορροφούμενης ενέργειας από το τοίχωμα. Επίσης, η ανάπτυξη υψηλής συνάφειας βελτιώνει σαφώς την ικανότητα απόσβεσης ενέργειας από το δομικό στοιχείο. Σαφής ακόμη είναι η αύξηση της αντοχής και πλαστιμότητας όλου του στοιχείου με την αύξηση της αντοχής του χάλυβα. Σε τοιχώματα με προέχουσα διατμητική συμπεριφορά εκτός από την άμεση συνεισφορά του οπλισμού στην αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα του ρηγματωμένου λόγω κάμψης σκυροδέματος (μέσω του μηχανισμού δικτυώματος), την ανάληψη τέμνουσας υποβοηθά και η λειτουργία του οπλισμού μεταξύ των ρηγμάτων ως βλήτρο. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση της ρηγματώσης του σκυροδέματος από λοξό εφελκυσμό, η αντοχή και η μετελαστική συμπεριφορά του χάλυβα επηρεάζουν άμεσα το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του στοιχείου, αποτρέποντας αφενός τον μηδενισμό της αντοχής και δημιουργώντας μηχανισμό ανάληψης τέμνουσας και αφετέρου επιτρέποντας μετελαστικές παραμορφώσεις.

B. Γεωμετρία του στοιχείου και της διατομής

i) Οι τιμές των λόγων H_w/L_w , $M/(V \cdot L_w) = a_s$

Είναι πολλές οι περιπτώσεις όπου οι λόγοι αυτοί είναι διαφορετικοί. Η σύμπτωση των τιμών τους συμβαίνει μόνο στην περίπτωση του τοιχώματος προβόλου που φορτίζεται σε απόσταση H_w από την πάκτωση με μοναχική δύναμη [$H_w/L_w = M/(V \cdot L_w) \Rightarrow H_w \cdot V = M$]. Από την τιμή του λόγου $M/(V \cdot L_w)$ εξαρτάται η συμπεριφορά και η μορφή αστοχίας του τοιχώματος. Για τιμές των λόγων $M/(V \cdot L_w)$ μικρότερες της μονάδας επέρχεται διατμητική αστοχία των τοιχωμάτων, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 2 η αστοχία είναι καμπτικού τύπου. Για τιμές μεταξύ του 1 και 2 δεν είναι σαφής η μορφή αστοχίας που θα επέλθει, καθώς αυτή μπορεί να είναι είτε καμπτικού, είτε διατμητικού, είτε καμπτοδιατμητικού τύπου. Προφανώς, η επιθυμητή μορφή αστοχίας για κάθε τύπο τοιχώματος είναι η καμπτικού τύπου, και στην περίπτωση που αυτή είναι αδύνατη, η καμπτοδιατμητικού, καθώς αυτές δεν αποτελούν αστοχία ψαθυρής μορφής. Έτσι, κατά καιρούς, έγιναν πολλές προσπάθειες για τη βελτίωση του τύπου αστοχίας των τοιχωμάτων με την άρση της ψαθυρότητας στην αστοχία τους.

ii) Ύπαρξη διαπλατύνσεων στα άκρα

Έχουν γίνει πολλά πειράματα προκειμένου να εκτιμηθεί η συνεισφορά των διαπλατύνσεων στα άκρα των τοιχωμάτων. Έχουν γίνει δοκιμές τόσο σε βραχεία ($a_s < 1.5$) όσο και σε ψηλά ($a_s > 1.5$) τοιχώματα. Οι διαπλατύνσεις στα άκρα προσφέρουν

μια περιοχή, όπου είναι δυνατόν να παραληφθούν μεγάλα φορτία, τα οποία προέρχονται είτε από κάμψη είτε από αξονική δύναμη. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται περιοχές, όπου είναι δυνατόν να συντρέξουν αρκετά δομικά στοιχεία στην άκρη του τοιχώματος χωρίς κατασκευαστικές δυσκολίες (όπως αντίθετα συμβαίνει στα ορθογωνικά τοιχώματα) ή πρόκληση τοπικών βλαβών. Σε τοιχώματα με διαπλατύνσεις έχουν μετρηθεί αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις υψηλότερες ($1.12\sqrt{f_c}$ MPa) από τις αντίστοιχες σε τοιχώματα ορθογωνικής διατομής ($0.78\sqrt{f_c}$ MPa) [16]. Επίσης, τα τοιχώματα με διαπλατύνσεις στα άκρα είναι λιγότερο ευαίσθητα σε σχέση με τα αντίστοιχα ορθογωνικής διατομής, στην απώλεια της εκτός επιπέδου ευστάθειας. Τα τοιχώματα ορθογωνικής διατομής έχουν μικρότερη εκτός επιπέδου δυσκαμψία, αλλά είναι λιγότερο επιρρεπή στην αστοχία από σύνθλιψη του σκυροδέματος του κορμού, λόγω της γενικά μικρότερης ικανότητάς τους σε ανάληψη ροπής έναντι τέμνουσας σε σχέση με τα τοιχώματα με διαπλατυσμένα άκρα. Επίσης, τα διαπλατυσμένα άκρα βρέθηκε να υποβοηθούν τη διατμητική αστοχία των τοιχωμάτων και ιδιαίτερα των χαμηλών, καθώς περιορίζουν σημαντικά τη θλιβόμενη ζώνη με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ μεγάλων ροπών αντοχής και συνακόλουθα διατμητικών τάσεων, που οδηγούν συχνά στην αστοχία από διατμητική ολίσθηση.

iii) Συμμετρία της διατομής

Καθώς μια από τις συχνότερες αιτίες αστοχίας των τοιχωμάτων είναι η απώλεια ευστάθειας του θλιβόμενου μέλους, έχει μεγάλη σημασία η συμμετρία τόσο της διατομής όσο και του οπλισμού. Έτσι, είναι πολύ πιθανό σε μη συμμετρικές διατομές να παρατηρούνται υψηλές παραμορφώσεις (εκτός και εντός επιπέδου) στο ασθενέστερο τμήμα της διατομής, των οποίων η δράση και η αρνητική λειτουργία δυσχεραίνει με την ανακύκλιση, οδηγώντας σε αστοχία το ασθενές μέλος.

iv) Σύνδεση του τοιχώματος με τον υπόλοιπο φορέα

Ο τρόπος σύνδεσης των τοιχωμάτων με τον υπόλοιπο φορέα επηρεάζει σαφώς τη συμπεριφορά τους. Έτσι, όσο πιο δύσκαμπτες είναι οι συνδέσεις (δοκοί σε μία ή δύο διευθύνσεις) τόσο μεγαλύτερη είναι η επιρροή στη συμπεριφορά των τοιχωμάτων, καθώς αναπτύσσεται ένταση τόσο στο επίπεδο λειτουργίας όσο και στην κάθετη διεύθυνση, με αποτέλεσμα τη διαξονική καταπόνηση του δομικού στοιχείου, κατά την οποία η αστοχία επέρχεται για πολύ μικρότερη ένταση από την αντίστοιχη μονοαξονική. Από σχετική ερευνητική εργασία, όπου δοκιμάστηκε τρισδιάστατος φορέας (από Ο/Σ) υπό κλίμακα 1:5 σε σεισμική καταπόνηση, προέκυψε το

συμπέρασμα ότι υπάρχουν σαφείς αδυναμίες στην ακριβή ή έστω ικανοποιητική εκτίμηση της αλληλεπίδρασης των δομικών στοιχείων και κρίσιμων περιοχών τρισδιάστατων φορέων με τις εσωτερικές δυνάμεις και τη μεταβολή της δυσκαμψίας.

ν) Ύπαρξη ανοιγμάτων

Η ύπαρξη ανοιγμάτων βρέθηκε να επηρεάζει σαφώς τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων. Έτσι, μια σειρά από εργασίες που έγιναν κατά καιρούς έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων με ανοίγματα. Από το εύρος και τη θέση των ανοιγμάτων στο τοίχωμα, αυτά χωρίστηκαν σε :

- Τοιχώματα με κανονικά ανοίγματα (μικρού εμβαδού)
- Τοιχώματα με τυχαία ανοίγματα
- Συζευγμένα τοιχώματα (τοιχώματα με κανονικά ανοίγματα, αλλά μικρής διατομής στοιχείο σκυροδέματος μεταξύ των ανοιγμάτων).

Χαρακτηριστικό στοιχείο της συμπεριφοράς αυτών των στοιχείων αποτελεί η ύπαρξη περιοχών όπου εμφανίζονται υψηλές τάσεις με αποτέλεσμα την πρόωρη ρηγμάτωση. Τα τοιχώματα με ανοίγματα είναι δυνατό να θεωρηθούν ως στοιχεία που συντίθενται από δίσκους συνδεδεμένους μεταξύ τους με στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία μεταβιβάζουν ένταση λειτουργώντας ως ελκυστήρες (ties) ή ως θλιβόμενα στοιχεία (struts) ή ως δύσκαμπτα στοιχεία, τα οποία είναι σε θέση να μεταβιβάσουν ισχυρή τέμνουσα. Σε εργασία που έγινε με σκοπό την αποτίμηση της επιρροής της θέσης, του μεγέθους και της κανονικότητας των ανοιγμάτων σε τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος [115] βρέθηκε ότι το μέγεθος και η θέση τους δεν έχει σαφή επιρροή στην υστερητική συμπεριφορά τους. Επίσης, ο σχεδιασμός των τοιχωμάτων με ακανόνιστα ανοίγματα χρησιμοποιώντας το μοντέλο υποκατάστατων θλιπτήρων και ελκυστήρων είναι κατάλληλος για τον αντισεισμικό σχεδιασμό αυτών των στοιχείων. Ακόμη, επιτυγχάνεται καλή προσομοίωση του μηχανισμού αντίστασης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη χρήση του παραπάνω μοντέλου. Εξάλλου, σε περιπτώσεις όπου το συνολικό εμβαδόν των ανοιγμάτων είναι κάτω του 10% του συνολικού εμβαδού της επιφάνειας του τοιχώματος, η δυσκαμψία του στοιχείου δεν διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη δυσκαμψία του πλήρους.

Γ. Οπλισμός

Μια άλλη σειρά παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των τοιχωμάτων είναι το ποσοστό του οπλισμού και το πλήθος των ράβδων, η διατομή και η κατανομή του οπλισμού στον κορμό, η ύπαρξη ισχυρού οπλισμού στα άκρα του τοιχώματος και η

περίσφιξη τόσο του οπλισμού των άκρων όσο και του οπλισμού του κεντρικού φατνώματος. Η ύπαρξη και μόνο του οπλισμού στη διατομή αυξάνει την ικανότητα του στοιχείου για παραμορφώσεις που μπορεί να οφείλονται στη δράση αμιγούς αξονικής φόρτισης ή στη συνδυασμένη δράση τέμνουσας, ροπής και αξονικής δύναμης. Ο οπλισμός στον κορμό προστατεύει το τοίχωμα από διατμητική αστοχία. Επίσης, ενώ αρχικά είχε γίνει δεκτό ότι ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος οπλισμός κορμού είχαν την ίδια συνεισφορά στην ανάληψη οριζόντιων δυνάμεων, πρόσφατα ορισμένοι ερευνητές διατυπώνουν την άποψη ότι η συνεισφορά του οριζόντιου οπλισμού κορμού είναι περιορισμένη, καθώς δεν παρατηρείται διαφορά στην ικανότητα ανάληψης τέμνουσας μεταξύ τοιχωμάτων με κατά πολύ διαφορετικό οριζόντιο οπλισμό κορμού. Συγκεκριμένα, οι Lefas et al [54], Elnashai et al [82] σε εργασίες τους αναφέρουν ότι η αύξηση του οριζόντιου οπλισμού κορμού πάνω από την τιμή που απαιτείται για την αποτροπή της διατμητικής αστοχίας, δεν βελτιώνει την ικανότητα ανάληψης τέμνουσας. Το παραπάνω προδίδει αδυναμία του μοντέλου του δικτυώματος, καθώς δεν μπορεί να εξηγηθεί η μη αύξηση της αναλαμβανόμενης τέμνουσας με τη χρήση του. Η τοποθέτηση του οπλισμού κορμού υπό γωνία 45° οδήγησε σε βελτιωμένη συμπεριφορά, καθώς η τελική εικόνα του δοκιμίου (μορφή ρηγμάτωσης) μετά το πείραμα βελτιώθηκε, και επίσης περισσότερη ενέργεια απορροφήθηκε σε σύγκριση με τα συμβατικά δοκίμια. Επίσης, η συμμετοχή των διατμητικών παραμορφώσεων στις συνολικές ήταν μικρότερη στα δοκίμια όπου ο οπλισμός κορμού τέθηκε με κλίση. Αυτό το γεγονός εξηγεί και την αύξηση στην απόσβεση ενέργειας, καθώς λόγω του περιορισμού των διατμητικών παραμορφώσεων δημιουργήθηκε αυξημένη καμπτική μετατόπιση και άρα περισσότερο πλαστική συμπεριφορά. Σε μια προσπάθεια επίτευξης πλαστικής συμπεριφοράς κοντών τοιχωμάτων ($H_w/L_w = 0.5$) με την αποτροπή της διατμητικής αστοχίας μέσω διαγώνιου κύριου οπλισμού οι Paulay, Priestly και Singe (1982) βελτίωσαν σημαντικά την ικανότητα απόσβεσης ενέργειας (διπλασιασμός) και μείωσαν τις ολισθήσεις στη βάση των τοιχωμάτων. Επίσης, οι διατμητικές παραμορφώσεις μειώθηκαν σημαντικά έναντι των καμπτικών, οδηγώντας έτσι σε κυρίως καμπτική συμπεριφορά. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί ακόμη η διαρροή του διαγώνιου οπλισμού που σχεδιάστηκε ώστε να παραλαμβάνει το 30% της δρώσας τέμνουσας. Επίσης πρέπει να τονιστούν ιδιαίτερα οι εργασίες που εκπονήθηκαν στο εργαστήριο Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος Α.Π.Θ. με σκοπό την βελτίωση των αντισεισμικών ιδιοτήτων υποστυλωμάτων (μικρό άνοιγμα διάτμησης) και εξωτερικών κόμβων, με την χρήση χιαστί οπλισμών, που έδειξαν την αποτελεσματικότητα αυτού του τρόπου όπλισης [74], [98], [99], [100].

Η καμπτική συμπεριφορά των τοιχωμάτων οφείλεται στην ύπαρξη αρκετού οπλισμού στα άκρα τους. Η ικανότητα του τοιχώματος να πάρει πλαστικές παραμορφώσεις και να διατηρεί ταυτόχρονα υψηλή αντοχή είναι ανάλογη με το ποσοστό οπλισμού στα άκρα. Ο οπλισμός των άκρων τίθεται με τέτοιο τρόπο, ώστε μαζί με τους συνδετήρες να δημιουργούνται συνθήκες περίσφιξης για το εγκιβωτισμένο σκυρόδεμα. Οι συνδετήρες αυξάνουν την ικανότητα του στοιχείου για αξονική παραμόρφωση στη θέση αυτή και συνεισφέρουν θετικά στην ανάληψη της ροπής και μέρους της τέμνουσας. Πραγματικά, οι ακραίες περιοχές των τοιχωμάτων, τόσο των ορθογωνικών όσο και αυτών με διαπλατύνσεις στα άκρα, λειτουργούν ως μεγάλα βλήτρα μειώνοντας τις διατμητικές παραμορφώσεις. Επίσης έχουν παρατηρηθεί ρηγματώσεις που οφείλονται στη μείωση της διατομής του σκυροδέματος, λόγω της ύπαρξης των συνδετήρων στα άκρα με το δυσάρεστο φαινόμενο της εμφάνισης ρηγμάτων ανά απόσταση ίση με αυτή των συνδετήρων. Επίσης, λόγω της ανακύκλισης, παρατηρείται κατακερματισμός του σκυροδέματος της περισφιγμένης περιοχής με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής σε θλίψη και την αύξηση των παραμορφώσεων με συνέπεια την επιβάρυνση του κορμού και άρα την επίσπευση ψαθυρού τύπου αστοχίας. Επίσης με την ανακύκλιση, η ρηγματώση της επικάλυψης της περισφιγμένης περιοχής γίνεται εντονότερη με αποτέλεσμα την ασύμμετρη αποφλοίωση, δημιουργώντας έτσι ευνοϊκές συνθήκες για αστοχία λόγω απώλειας της ευστάθειας. Η περίσφιξη του οπλισμού του κορμού βρέθηκε να αυξάνει τόσο την αντοχή σε τέμνουσα όσο και την ικανότητα απόσβεσης ενέργειας.

Δ. Παράμετρος ελέγχου της φόρτισης, ύπαρξη αξονικού φορτίου

Μια σειρά παραμέτρων που υπεισέρχονται στα διάφορα πειράματα με εμφανές αποτέλεσμα στα εξαγόμενα συμπεράσματα, οφείλονται στη φόρτιση και στην αναπτυσσόμενη ένταση.

i) Φόρτιση

Στα πειράματα παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής των τοιχωμάτων κατά 10%, όταν αυτά δοκιμάστηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Α.Φ.) από την αντίστοιχη αντοχή σε μονότονη φόρτιση (Μ.Φ.), μικρότερη απορροφούμενη ενέργεια στην Α.Φ. από ότι στην Μ.Φ., μικρότερη μείωση της δυσκαμψίας στην Μ.Φ. από ότι στην Α.Φ., ενώ βρέθηκε ότι το μέγεθος της προηγούμενης μετατόπισης επηρεάζει σημαντικά τη δυσκαμψία στον επόμενο κύκλο φόρτισης. Τα παραπάνω προβλήματα δείχνουν να ξεπερνιούνται με την εφαρμογή της ψευδοδυναμικής μεθόδου όπου χρησιμοποιούνται

τροποποιημένες πραγματικές καταγραφές ως ιστορίες φόρτισης, οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από την ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου. Επίσης, η ύπαρξη δυνατότητας επιλογής τρόπου ελέγχου του πειράματος μέσω της φόρτισης ή της μετατόπισης (displacement or load control) βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα του πειράματος, λόγω της δυνατότητας ρεαλιστικότερης προσομοίωσης των φορτίων (π.χ. αξονικό φορτίο με load control και οριζόντιες δυνάμεις με displacement control). Η επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου ελέγχου, τόσο των δυνάμεων όσο και των μετατοπίσεων (controlling parameter), δίνει μεγάλη δυνατότητα για την ευκολότερη αναλυτική εκτίμηση των παραμέτρων και της συμπεριφοράς των δοκιμίων μετά το πείραμα.

Ε. Άλλες παράμετροι

Μια άλλη πολύ σημαντική ομάδα παραμέτρων είναι αυτές που εξαρτώνται από τη συνεργασία χάλυβα-σκυροδέματος και την κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων. Το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς των στοιχείων με αντισεισμικές ιδιότητες είναι η ικανότητα επίτευξης της απαιτούμενης μετακίνησης. Μέσω του δείκτη καμπυλοτήτων προκύπτουν και οι αντίστοιχοι δείκτες για τις στροφές και τις μετατοπίσεις, καθώς αυτές παράγονται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από την καμπύλωση του στοιχείου. Ειδικότερα, στις μετατοπίσεις υπεισέρχεται και η διατμητική παραμόρφωση, η συμβολή της οποίας είναι υψηλή στα τοιχώματα Ο/Σ. Ο συγκεντρωμένος οπλισμός στα άκρα αυξάνει την πλαστιμότητα, ιδιαίτερα στην περίπτωση που υπάρχει ικανοποιητική περίσφιξη. Η συμβολή της περίσφιξης στην βελτίωση της πλαστιμότητας οριοθετείται από τη διατμητική αστοχία. Επίσης με εναλλακτικό τρόπο τοποθέτησης του οπλισμού κορμού αυξάνουμε την ικανότητα καμπτικής παραμόρφωσης και άρα τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων, στροφών και μετατοπίσεων. Η περίσφιξη του οπλισμού κορμού αυξάνει την ικανότητα παραμόρφωσης του τοιχώματος με σαφή αύξηση της πλαστιμότητας. Εξάλλου, ο εγκιβωτισμός του κάτω μέρος της κρυφοκολώνας και για ύψος 1,5 φορές το πλάτος της με χαλύβδινη κοιλοδοκό αυξάνει την πλαστιμότητα και μειώνει τις διατμητικές παραμορφώσεις.

Ο τύπος της αστοχίας των τοιχωμάτων, δηλαδή αν θα είναι καμπτικής ή διατμητικής μορφής, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο των αντίστοιχων καμπτικών ή διατμητικών τάσεων. Ο λόγος του ύψους προς το πλάτος του τοιχώματος, οι διαστάσεις και η μορφή της διατομής είναι οι παράγοντες που καθορίζουν ποιές τάσεις θα φθάσουν πρώτα στην τιμή αστοχίας τους.

Συμπεράσματα

– Είναι αρκετά σαφής ο τρόπος λειτουργίας των μηχανισμών ανάληψης της τέμνουσας στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης, ενώ η ποσοτική εκτίμηση της συνεισφοράς του καθενός μηχανισμού απαιτεί ακόμη ευρεία ερευνητική προσπάθεια για να κριθεί ικανοποιητική, ιδίως κατά την περίπτωση υψηλής διατμητικής επιπόνησης και στην περίπτωση ύπαρξης αξονικού φορτίου.

– Η ύπαρξη διαπλατυνσεων στα άκρα των τοιχωμάτων επιβάλλεται όταν στις περιοχές αυτές συμβάλλουν ισχυρές δοκοί. Επίσης στα πολύ υψηλά κτίρια και συγκεκριμένα στα τοιχώματα όπου αναμένεται ισχυρή ορθή ένταση (από κάμψη ή/και κατακόρυφη δύναμη) επιβάλλεται η χρήση τοιχωμάτων με διαπλατυσμένα άκρα. Αποτελεί όμως ανοικτό σημείο κατά πόσο τα παραπάνω σημεία βελτίωσης καθώς και η ικανοποιητική εκτός επιπέδου ευστάθεια αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα που προέρχονται από τη συχνή ψαθυρή αστοχία των παραπάνω στοιχείων λόγω θραύσης του σκυροδέματος στον κορμό ή στη διεπιφάνεια κορμού- υποστυλώματος ή λόγω της αστοχίας του ακραίου υποστυλώματος σε διάτμηση εξαιτίας του περιορισμού του ύψους της θλιβόμενης ζώνης στα τοιχώματα με διαπλατυνσεις. Απαιτείται επίσης περαιτέρω διερεύνηση για τον προσδιορισμό των ελάχιστων διαστάσεων αυτών των στοιχείων.

– Έχει καταστεί σαφές από τα μέχρι σήμερα πειραματικά αποτελέσματα ότι η μείωση της συμμετοχής των διατμητικών παραμορφώσεων στις συνολικές παραμορφώσεις αυξάνει την ικανότητα του τοιχώματος για απορρόφηση ενέργειας και πλαστική παραμόρφωση, ενώ βελτιώνει την τελική εικόνα του ρηγματωμένου στοιχείου (δεν εκπονήθηκαν εργασίες με αυτό το θέμα).

– Η προστασία της περισφιγμένης περιοχής κοντά στη βάση του τοιχώματος είναι ενέργεια μεγάλης σημασίας καθώς ο περιορισμός της αποφλοιώσης, της καταστροφής του περισφιγμένου σκυροδέματος και του λυγισμού των ράβδων αυξάνει την αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης των τοιχωμάτων ακόμη και αυτών με κυρίως διατμητική συμπεριφορά.

– Η ύπαρξη του αξονικού φορτίου επηρεάζει τη συμπεριφορά των τοιχωμάτων, όπως έχει αποδειχθεί από τα μέχρι σήμερα πειράματα. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού όμως, το αξονικό φορτίο των τοιχωμάτων δεν παραμένει σταθερό αλλά μεταβάλλεται γύρω από την τιμή ηρεμίας. Καθώς δεν έχουν γίνει εργασίες με θέμα την αποτίμηση της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων που υπόκεινται σε οριζόντια φόρτιση με

ταυτόχρονη δράση μεταβαλλόμενου αξονικού φορτίου θα είχε πραγματικό ενδιαφέρον ο έλεγχος αυτής της παραμέτρου.

– Ο περιορισμός των διατμητικών παραμορφώσεων, η συμμετοχή των οποίων είναι σημαντική ακόμη και στα ψηλά τοιχώματα, είναι δυνατό να επιτευχθεί με τη χρήση δισδιαγώνιου οπλισμού, ο οποίος θα προέρχεται από το συμβατικό οπλισμό κορμού. Με το δισδιαγώνιο οπλισμό επιτυγχάνεται ακόμη και αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού του οπλισμού κοντά στην ακραία περισφιγμένη περιοχή αυξάνοντας την αντοχή της. Η βελτίωση της αντοχής της κρυφοκολώνας δεν είναι σαφής, καθώς δημιουργούνται ταυτόχρονα δυσμενείς συνθήκες με την πιθανή μεταφορά δυνάμεων αγκύρωσης στην περιοχή αυτή.

– Στη χώρα μας δεν έχει γίνει καμία πειραματική εργασία με αντικείμενο την αποτίμηση της συμπεριφοράς τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος που να έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευασθεί σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό, την υφιστάμενη κατασκευαστική πρακτική και την ποιότητα των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως, π.χ. μέση κυβική αντοχή στα δοκίμια των Lefa, Pilakouta ίση προς 45 MPa, ενώ η συνήθης αντοχή του σκυροδέματος εφαρμογής στη χώρα μας είναι $16 \div 20$ MPa.

3.2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ.

Από τις μέχρι τώρα εργασίες φαίνεται πως, σε ότι αφορά την προσομοίωση της καμπτικής συμπεριφοράς και την προσομοίωση της ικανότητας των τοιχωμάτων να παραλαμβάνουν αξονικά φορτία, το τροποποιημένο μοντέλο των πολλαπλών κάθετων ράβδων δίνει καλά αποτελέσματα συγκρινόμενο με τα αντίστοιχα πειραματικά, το ΟΟΗΜ προσομοίωσης της διατμητικής δυσκαμψίας δεν δίνει ικανοποιητική σύμπτωση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων (Vulcano, Bertero, Colotti). Το παραπάνω απεικονίζεται εντονότερα σε τοιχώματα υπό υψηλή διατμητική ένταση όπου οι αποκλίσεις αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι εντονότερες. Είναι πολύ πιθανό η θεώρηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ καμπτικής και διατμητικής συμπεριφοράς και η σωστή μοντελοποίησή της να βελτιώσει τη σύμπτωση μεταξύ πειράματος και ανάλυσης σε ότι αφορά τη διατμητική συμπεριφορά.

Εστιάζοντας στο μοντέλο περιγραφής της υστερητικής συμπεριφοράς που χρησιμοποιείται και στα πειραματικά μέχρι τώρα αποτελέσματα, διαπιστώνονται οι εξής ασυμβατότητες:

α) Το προτεινόμενο μοντέλο περιγραφής της διατμητικής υστερητικής συμπεριφοράς θεωρεί δεδομένο το γεγονός ότι θα επέλθει είτε καμπτική είτε διατμητική αστοχία, ενώ είναι πολύ συχνή η εμφάνιση μεικτού τύπου αστοχίας.

β) Δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιπτώσεις κατά τις οποίες εμφανίζεται καμπτική διαρροή αρχικά και αυξημένες διατμητικές παραμορφώσεις ή και όψιμη διατμητική αστοχία. Ιδιαίτερα μετά την καμπτική διαρροή, ακόμη και για τέμνουσες πολύ κάτω από αυτές που αντιστοιχούν στη διατμητική αστοχία, οι βρόγχοι διατμήσεως αλλάζουν εντελώς μορφή στρέφοντας τα κοίλα προς τα επάνω και σχηματίζοντας οξύ ρύγχος στην κορυφή (υστερητικό διατμητικό μοντέλο Ozcebe και Saatcioglu [72]).

γ) Ο ακραίος περισφιγμένος σπλισμός στο πάνω μέρος της πλαστικής άρθρωσης έχει αρκετά περιθώρια ανάληψης διατμητικού εφελκυσμού, άσχετα εάν έχει συνυπολογιστεί στη διατμητική αντοχή ή όχι.

δ) Είναι πολύ πιθανό οι διατμητικές παραμορφώσεις στα πρώτα δύο - τρία κύρια καμπτικά ρήγματα από τη βάση να είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες παραμορφώσεις λίγο πιο πάνω, γεγονός που να απαιτεί ειδική μοντελοποίηση του μηχανισμού ανάληψης τέμνουσας στη βάση του τοιχείου.

Κατά την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανθολογήθηκαν και οι παρακάτω πειραματικές και αναλυτικές εργασίες το υλικό των οποίων χρησιμοποιήθηκε και είναι οι: [31], [44], [45], [46], [48], [59], [60], [61], [62], [63], [75], [76], [80], [81], [83], [84], [93], [95], [97], [106], [112], [114].

4.ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΔΙΕΘΝΩΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ.

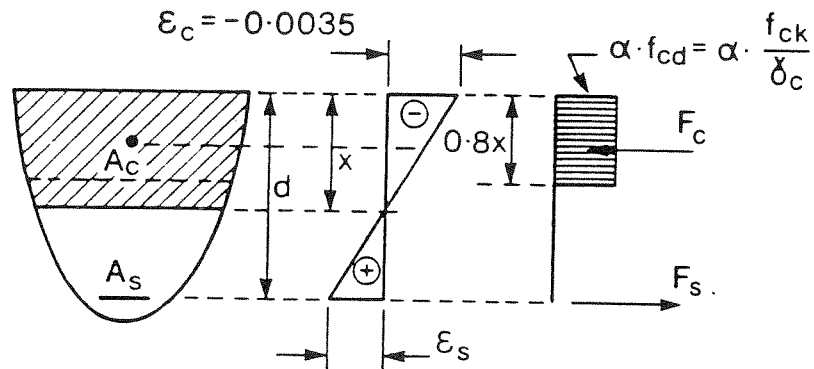
4.1. EUROCODE 8 [21], [22], [23].

Τοιχώματα σε κατασκευές πλαστιμότητας “H” και “M”

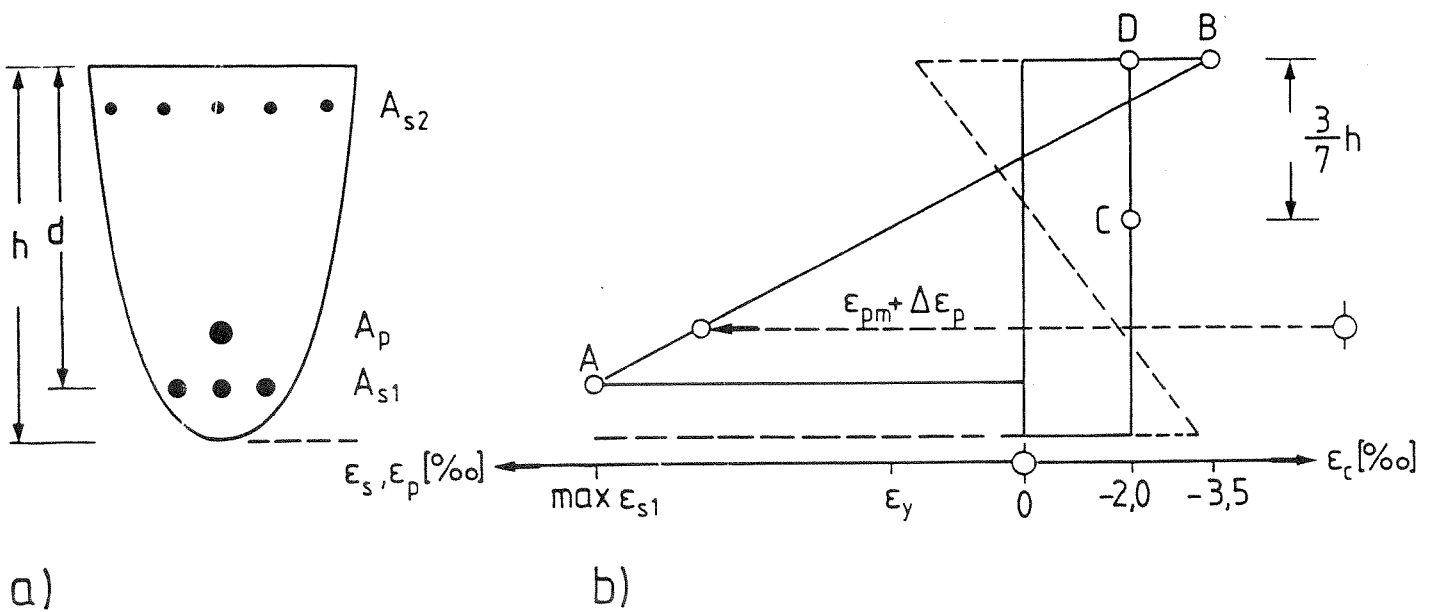
i). Καμπτική αντοχή τοιχωμάτων

Για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής τοιχωμάτων Ο/Σ σύμφωνα με τον Ευροκώδικα γίνεται η παραδοχή της επιπεδότητας των διατομών. Η παραμόρφωση του χάλυβα κατά τη θλίψη ή κατά τον εφελκυσμό είναι όμοια με αυτή του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται. Η καμπτική αντοχή προκύπτει από την ισορροπία των δυνάμεων της διατομής. Έτσι, για τις θλιπτικές τάσεις του σκυροδέματος γίνεται η παραδοχή του ορθογωνικού διαγράμματος τάσεων με τιμή $0.85 f_{cd}$, ενώ σε στοιχεία με μικρό πλάτος ακραίας ίνας $0.8 f_{cd}$. Το ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων εκτείνεται σε ένα μήκος ίσο με 0.8 φορές το μήκος του ουδέτερου άξονα. Η τάση του χάλυβα πριν τη διαρροή λαμβάνεται ίση με E_s φορές την παραμόρφωση, ενώ μετά τη διαρροή λαμβάνεται ίση με την τάση διαρροής (f_{yk}/γ_s). Σε καθαρή θλίψη η μέγιστη επιτρεπόμενη βράχυνση του σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με 0.002. Σε διατομές υπό κάμψη η μέγιστη επιτρεπόμενη βράχυνση του σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με 0.0035. Σε ενδιάμεσες καταστάσεις το διάγραμμα παραμόρφωσης ορίζεται έτσι, ώστε η βράχυνση του σκυροδέματος, σε απόσταση ίση με τα 3/7 του ύψους της διατομής από τη θλιβόμενη, να είναι μικρότερη ή ίση με 0.002.

Κατά τον Ευροκώδικα 8, τα εντατικά μεγέθη με τα οποία θα διαστασιολογούνται και θα ελέγχονται τα τοιχώματα προκύπτουν από τη στατική ανάλυση της κατασκευής για τους σεισμικούς συνδυασμούς. Ειδικά για το σχεδιασμό τοιχωμάτων (με άνοιγμα διάτμησης ≥ 2) μέσου και μεγάλου επιπέδου πλαστιμότητας θα λαμβάνεται υπόψη και η επιρροή δυναμικών φαινομένων. Αν δεν γίνεται ακριβέστερος υπολογισμός, τότε για μεν τη ροπή αυτή θα θεωρείται σταθερή και ίση με τη ροπή βάσης σε ένα ύψος ίσο με το μήκος πλαστικής άρθρωσης του τοιχώματος, μόνο για τα τοιχώματα μεγάλης λυγηρότητας, ενώ για τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης κάτω του δύο η ροπή διαστασιολόγησης θα είναι αυτή που προκύπτει από την ανάλυση. Η τέμνουσα θα πολλαπλασιάζεται με τον αυξητικό συντελεστή $\gamma_{Rd} \cdot (M_{Rd}/M_{Sd}) \leq q$ και με αυτή την αυξημένη τιμή θα γίνονται οι έλεγχοι. Για την αξονική δύναμη συνιστάται να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της κατά την αλλαγή της φοράς της σεισμικής



Σχ. 41. Ιδεατή ορθογωνική κατανομή θλιπτικών τάσεων σε καμπτόμενη διατομή στοιχείου από Ο/Σ.



Σχ. 42. Διαγράμματα παραμόρφωσης που θεωρούνται κατά τη διαστασιολόγηση με τη μέθοδο της οριακής κατάστασης αστοχίας κατά τον EUROCODE.

διέγερσης (Σχ. 41,42,43,44).

Η καμπτική αντοχή θα προσδιορίζεται όπως στα υποστυλώματα υπό την δυσμενέστερη θλιπτική αξονική δύναμη του σεισμικού συνδυασμού.

$$M_R < (M_s)_{C.D.}$$

ii). Αντοχή σε θλίψη, διαγώνιου θλιπτήρα

$$V_{sd} \leq V_{Rd,2}$$

όπου

$$V_{Rd,2} = 0.4(0.7 - f_{ck}/200)f_{cd}b_{wo}z \text{ στην κρίσιμη περιοχή}$$

και

$$V_{Rd,2} = 0.5(0.7 - f_{ck}/200)f_{cd}b_{wo}z \text{ εκτός κρίσιμης περιοχής}$$

Όπου το ύψος της πλαστικής άρθρωσης είναι:

- ίσο με το μήκος του τοιχώματος
- το ύψος του πρώτου ορόφου
- το 1/6 του ύψους του τοιχώματος

z : απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους των κρυφοκολώνων, το οποίο μπορεί να ληφθεί ίσο με $0.8l_w$

b_{wo} : πάχος κορμού του τοιχώματος

f_{ck} : χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος όχι μεγαλύτερη από 40 MPa

iii). Αντοχή σε διαγώνιο εφελκυσμό

$$V_{sd} \leq V_{Rd,3}$$

Όπου $V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{wd}$

Προτείνεται να χρησιμοποιείται ακριβές μοντέλο για την εκτίμηση της $V_{Rd,3}$, το οποίο να λαμβάνει υπόψη την ανελαστική επιρροή μεγάλων ανακυκλιζόμενων παραμορφώσεων. Εάν δεν χρησιμοποιείται ακριβέστερο μοντέλο, θα εφαρμόζονται οι παρακάτω τύποι:

α) Για $\alpha_s = \frac{M_{sd}}{V_{sd} \cdot l_w} \geq 2$ θα εφαρμόζονται οι διατάξεις για τα υποστυλώματα

β) Για $2.0 > \alpha_s = \frac{M_{sd}}{V_{sd} \cdot l_w} > 1.3$ θα χρησιμοποιείται απλοποιημένο μοντέλο

δικτύωματος όπως παρακάτω:

Οι οριζόντιες ράβδοι οι οποίες πρέπει να είναι καλά αγκυρωμένες στα ακραία περισφιγμένα στοιχεία και θα τοποθετούνται καθ' ύψος του τοιχώματος, πρέπει να ικανοποιούν την ανισότητα:

$$V_{sd} \leq \rho_h f_{yd,h} b_{wo} z + V_{cd}$$

ενώ κατακόρυφες ράβδοι κατάλληλα αγκυρωμένες και ματισμένες κατά το ύψος του τοιχώματος θα τοποθετούνται κατά μήκος του κορμού. Το ποσοστό τους προκύπτει από την πλήρωση της ανισότητας

$$V_{sd} \leq \rho_v f_{yd,v} b_{wo} z + V_{cd} + \min N_{sd}$$

β) Για $\alpha_s \leq 1.3$, η παρακάτω εμπειρική σχέση θα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού

$$V_{sd} \leq [\rho_h f_{yd,h} (\alpha_s - 0.3) + \rho_v f_{yd,v} (1.3 - \alpha_s)] b_{wo} z + V_{cd}$$

όπου για $\alpha_s < 0.3$ τότε $\alpha_s = 0.3$ και $(\rho_v f_{yd,v}) / (\rho_h f_{yd,h}) \leq 1$.

γ) Ο όρος V_{cd} θα υπολογίζεται όπως παρακάτω:

– Για εφελκυστική αξονική δύναμη

- Στην πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = 0$$

- Έξω από την πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = 2.5 l_w b_w \tau_{Rd}$$

– Για θλιπτική δύναμη

- Στην πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = \tau_{Rd} (1.2 + 40\rho) b_{wo} z$$

- Έξω από την πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = 2.5 l_w b_w \tau_{Rd} \beta_1$$

Σε κάθε περίπτωση θα λαμβάνεται ελάχιστη τιμή $\rho_h, \rho_v = 2.0\%$

iv). Αντοχή σε διατμητική ολίσθηση

$$V_{sd} \leq V_{Rd,s}$$

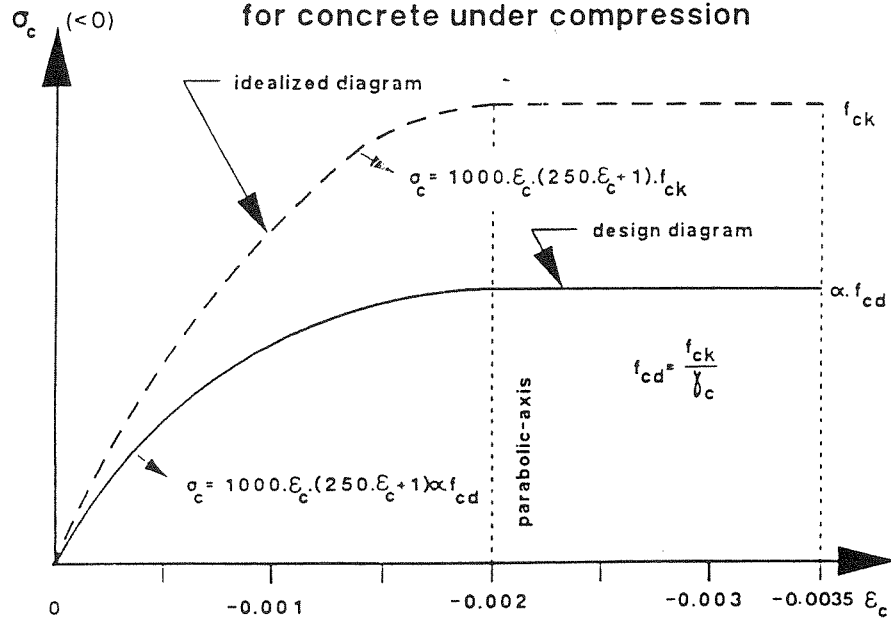
$$\text{όπου } V_{Rd,s} = V_{dd} + V_{id} + V_{fd}$$

$$\text{με } V_{dd} = \min \left[1.3 \sum A_{sj} \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}}, 0.25 f_{yd} \sum A_{sj} \right]$$

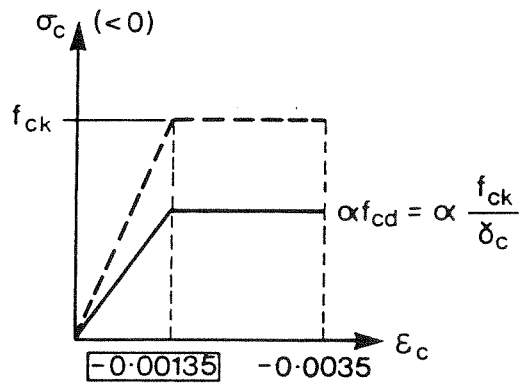
αντοχή βλήτρου κατακόρυφου οπλισμού

$$\text{με } V_{id} = \sum A_{si} \cdot f_{yd} \cdot \cos \varphi$$

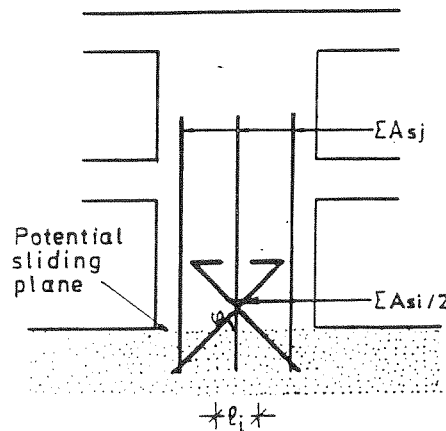
Parabolic-rectangular stress strain diagram for concrete under compression



Σχ. 43. Παραβολικό - ορθογωνικό διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για το σκυρόδεμα υπό θλίψη κατά τον EUROCODE.



Σχ. 44. Διγραμμικό διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για το σκυρόδεμα κατά τον EUROCODE.



Σχ. 45. Οπλισμοί που ανθίσταται στην διατμητική ολίσθηση τοιχωμάτων κατά τον EUROCODE 8.

αντίσταση σε τέμνουσα κεκλιμένων ράβδων και

$$V_{fd} = \min \left\{ \left[\mu_f \cdot \left(\sum A_{sj} f_{yd} + N_{sd} \right) \xi + M_{sd} / z \right], \left[0.25 f_{cd} \cdot \xi \cdot l_w \cdot b_{wo} \right] \right\}$$

αντίσταση τριβής.

Σε τοιχώματα με λόγο όψης κάτω του δύο, συνιστάται η μισή δρώσα τέμνουσα στη βάση του τοιχώματος να παραλαμβάνεται από δισδιαγώνιο οπλισμό, ενώ ψηλότερα η αντίστοιχη αναλαμβανόμενη τέμνουσα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ένα τέταρτο της δρώσας. Οι κεκλιμένες ράβδοι πρέπει να είναι κατάλληλα αγκυρωμένες και στις δύο πλευρές, στην θέση όπου αναμένεται διατμητική ολίσθηση και πρέπει να διέρχονται από όλες τις διατομές σε ύψος ίσο με την μικρότερη τιμή από $0.5l_w$ ή $0.5H_w$ από τη βάση.

Η αύξηση της καμπτικής αντοχής ΔM_{Rd} λόγω των κεκλιμένων ράβδων είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε διατμητική αστοχία. Κατά συνέπεια είτε πρέπει να αυξάνεται η καμπτική αντοχή (και άρα έμμεσα η τέμνουσα που πρέπει να παραληφθεί) μέσω της σχέσης (Σχ. 45)

$$\Delta M_{Rd} = 1/2 \sum A_{si} f_{yd} \sin \phi_i$$

είτε να μειώνεται η τέμνουσα αντοχής μέσω της σχέσης

$$V_{id} = \sum A_{si} f_{yd} (\cos \phi - 1/2 \sin \phi_i / (a_s l_w))$$

ν). Τοπική πλαστιμότητα

α) Στις κρίσιμες περιοχές τοιχωμάτων (κοντά στη βάση) θα εξασφαλίζεται ένας κατάλληλος συντελεστής πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ίσος με:

$$\mu_{1/r} = 1.0 q^2 \text{ για τοιχώματα γενικά}$$

$$\mu_{1/r} = 0.8 q^2 \text{ για συζευγμένα τοιχώματα}$$

όπου q είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς που λήφθηκε στην ανάλυση. Εάν για την επίτευξη του παραπάνω συντελεστή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων απαιτηθεί βράχυνση του σκυροδέματος πάνω από 0.0035, τότε η ικανότητα ανάληψης αξονικής δύναμης λόγω απώλειας επικάλυψης θα υπολογίζεται μέσω της ικανοποίησης του απαιτούμενου μηχανικού ογκομετρικού ποσοστού συνδετήρων (ω_{wd}).

Η ικανοποίηση των παραπάνω γίνεται όταν ο οπλισμός περίσφιξης οριστεί όπως παρακάτω

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq \kappa_0 \mu_{1/r} V_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot (0.35 A_c / A_o + 0.15) - 10 \varepsilon_{cu}$$

$$\text{όπου } \omega_{wd} = \frac{\text{όγκος των συνδετήρων και συνδέσμων}}{\text{όγκος του περισφηνμένου σκυρ / τος}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \geq \omega_{wd, \min}$$

όπου για επίπεδο πλαστιμότητας "H" $\kappa_0=55$

$$\omega_{wd, \min}=0.13$$

$$N_{sd}=0.5(N_{sd}/2+M_{sd}/z)$$

b) Η περίσφιξη των ακραίων περιοχών θα γίνεται σε όλο το ύψος της πλαστικής άρθρωσης και οριζόντια μέχρι του σημείου όπου, υπό ανακύκλιση, το απερίσφικτο σκυρόδεμα του κορμού δεν θα παραμορφώνεται (θλιπτικά) πάνω από 2.0‰.

vi). Ειδικές διατάξεις

α) $\rho_{h, \min} = \rho_{v, \min} = 2.0\text{‰}$ ή $\varnothing 8/200$

b) Στους αρμούς διακοπής εργασίας ένα ελάχιστο ποσοστό ρ_{\min} καλά αγκυρωμένου οπλισμού θα τοποθετείται στον αρμό.

$$\rho_{\min} \geq \max \left\{ \left(1.3f_{ct,0.05} - \frac{N_{sd}}{A_w} \right) / f_{yd} \left(1 + 1.5\sqrt{f_{cd} / f_{yd}} \right), 0.0025 \right\}$$

όπου A_w το οριζόντιο συνολικό εμβαδόν της διατομής του κορμού του τοιχώματος. Η N_{sd} λαμβάνεται θετική, όταν ενεργεί θλιπτικά.

c) Το πάχος του κορμού δεν θα είναι μικρότερο από 150mm ή $h_s/20$ ή $ql_w/60$.

d) Προκειμένου να αποφευχθεί οριζόντια αστάθεια (κάθετα στο επίπεδο) του περισφηνμένου ακραίου στοιχείου του τοιχώματος, το πάχος τους θα πρέπει να πληροί τους επόμενους κανόνες:

$$\text{i) Για } l_c \geq \begin{cases} 2b_w \\ 0.2l_w \end{cases} \quad \text{τότε } b_w \leq \begin{cases} 200 \text{ mm} \\ h_s / 10 \end{cases}$$

$$\text{ii) Για } l_c < \begin{cases} 2b_w \\ 0.2l_w \end{cases} \quad \text{τότε } b_w \leq \begin{cases} 200 \text{ mm} \\ h_s / 15 \end{cases}$$

iii) Σε περίπτωση που η θλιβόμενη περισφηνμένη άκρη του τοιχώματος συνδέεται σε ανένδοτη διαπλάτυνση με $b_f = h_s/15$, $l_f \geq h_s/5$, τότε:

$$\text{για } l_c \leq 3 b_{w0} \quad \text{είναι} \quad b_w \leq \begin{cases} 150 \text{ mm} \\ h_s / 20 \\ ql_w / 60 \end{cases}$$

e) Το ποσοστό του συνολικού κατακόρυφου οπλισμού ρ_v σε ολόκληρο το τοίχωμα πρέπει να είναι πάνω από 0.004.

f) Θα γίνεται έλεγχος της ικανότητας μεταφοράς των δυνάμεων διαφράγματος και των πατωμάτων στα τοιχώματα.

g) Τυχαία ανοίγματα, μη κανονικά διατεταγμένα, έτσι ώστε να σχηματίζονται συζευγμένα τοιχώματα, πρέπει να αποφεύγονται, εκτός και εάν η επιρροή τους είναι ασήμαντη ή λαμβάνεται υπόψη μέσω κατάλληλης μοντελοποίησης και ανάλυσης.

4.2. ACI 318 - 95, UBC-1997 [1], [101].

Σύμφωνα με τον κανονισμό που ισχύει στις Η.Π.Α., τα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος διαστασιολογούνται σε κάμψη, διάτμηση και αξονική δύναμη για κάθε έκκεντρη, οριζόντια ή άλλη φόρτιση, στην οποία υπόκειται.

i). Καμπτική αντοχή τοιχωμάτων

Για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής θα λαμβάνεται ως μέγιστη επιτρεπτή θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος η τιμή $3\epsilon_c$. Η τάση του χάλυβα πριν τη διαρροή f_y θα λαμβάνεται ίση με E_s φορές την παραμόρφωση, ενώ για παραμόρφωση μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στην f_y , η τάση θα λαμβάνεται ίση με f_y . Για το σκυρόδεμα θα θεωρείται ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων με μέγιστη τιμή ίση με $0.85 f'_c$ για ένα μήκος ίσο με $a = \beta_1 c$. Όπου c η απόσταση του ουδέτερου άξονα από την ακραία θλιβόμενη ίνα και β_1 συντελεστής ίσος με 0.85 για σκυρόδεμα με $f'_c = 4000\text{psi}$ (28MPa). Για σκυρόδεμα με $f'_c < 4000\text{psi}$, το β_1 μειώνεται ανά 0.05 για κάθε 1000psi μείωση αντοχής ($\beta_1 \geq 0.65$).

Για κυρίως καμπτόμενα τοιχώματα, που υπόκεινται δηλαδή σε καθαρή κάμψη ή σε κάμψη με ορθή δύναμη $\Phi P_n < 0.1 f'_c A_g$ ή $\Phi P_n < \Phi P_b$, τότε το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ρ που τοποθετείται, δεν θα υπερβαίνει την τιμή $0.75\rho_b$, όπου ρ_b το ποσοστό οπλισμού για το οποίο ισορροπεί η διατομή μόνο υπό την ροπή χωρίς την αξονική δύναμη. Σε διατομές με θλιβόμενο οπλισμό δεν απαιτείται η μείωση του ρ_b κατά 0.75. Για στοιχεία με συνδετήρες $\Phi\rho_{y(\max)} = 0.8\Phi[0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$.

Στα άκρα των τοιχωμάτων θα δημιουργούνται περισφιγμένες περιοχές, όπου η αναπτυσσόμενη τάση είναι πάνω από $0.2f'_c$ και θα συνεχίζεται μέχρι η αναπτυσσόμενη τάση να είναι κάτω από $0.15f'_c$, υπό φορτία που έχουν πολλαπλασιαστεί με τους συντελεστές ενίσχυσης της έντασης καθώς επίσης και όπου η

θλιπτική παραμόρφωση είναι πάνω από 0.003. Το συνολικό εμβαδό διατομής τετραγωνικών συνδετήρων δεν θα είναι μικρότερο από αυτό που προκύπτει από τις εξισώσεις :

$$A_{sh} = 0.09 s h_c f'_c / f_{yh}$$

Η μέγιστη απόσταση συνδετήρων δεν θα υπερβαίνει την τιμή των 150mm, το 1/4 της μικρότερης διάστασης του περισφιγμένου μέλους ή 6Φ₁.

ii). Διατμητική αντοχή τοιχωμάτων

Η ονομαστική αντοχή σε τέμνουσα των τοιχωμάτων δεν θα είναι πάνω από την τιμή $V_n \geq A_{cv} (0.166\sqrt{f'_c} + \rho_n f_y)$ γενικά, ενώ για τοιχώματα με λόγο $h_w/l_w < 2.0$ η αντίστοιχη αντοχή θα προκύπτει από την εξίσωση $V_n \leq A_{cv} (0.08\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y)$, όπου το α_c μεταβάλλεται γραμμικά από 3.0 μέχρι 2.0 για $(h_w/l_w) = 1.5$ και $(h_w/l_w) = 2.0$, αντίστοιχα.

$$V_n \neq 0.83 \sqrt{f'_c}$$

Όταν η τέμνουσα σχεδιασμού δεν ξεπερνά την τιμή $0.08A_{cv}\sqrt{f'_c}$, τότε τίθεται ο ελάχιστος οπλισμός διάτμησης $\rho_v=0.0025$, αλλά όχι πιο αραιά από 475mm. Ο οπλισμός διάτμησης τοποθετείται σε δύο πλέγματα, όταν η τέμνουσα σχεδιασμού ξεπερνά την τιμή $0.166A_{cv}\sqrt{f'_c}$

4.3. NZS 3101-1995 [65], [66].

Κατά το Νεοζηλανδικό Κανονισμό τα τοιχώματα πρέπει να σχεδιάζονται έναντι κάθε κατακόρυφης και οριζόντιας φόρτισης (εντός και εκτός επιπέδου) στην οποία υπόκεινται.

i). Καμπτική αντοχή τοιχωμάτων

Για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής θεωρείται ότι η μέγιστη ωφέλιμη παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του σκυροδέματος δεν θα υπερβαίνει την τιμή 0.003. Η τάση του χάλυβα πριν τη διαρροή f_y θα λαμβάνεται ίση με E_s φορές την παραμόρφωση, ενώ για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν στην f_y , η τάση θα λαμβάνεται f_y . Για τον υπολογισμό της μέγιστης καμπτικής αντοχής θεωρείται ομοιόμορφο ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων για το σκυρόδεμα με τιμή $(0.85-0.004(f_c-55))f_c \geq 0.75f_c$ για $f_c \leq 55\text{MPa}$ σε ένα μήκος ίσο με $a = \beta_1 c$, όπου c η απόσταση του ουδέτερου άξονα από την ακραία θλιβόμενη ίνα και $\beta_1 = (0.85-0.008(f_c-30)) \geq 0.65$ για $f_c \leq 30\text{MPa}$. Οι διαμήκεις οπλισμοί που προκύπτουν τοποθετούνται στις ακραίες

περιοχές του τοιχώματος. Σε κάθε θέση του τοιχώματος το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού πρέπει να είναι πάνω του $0.7/f_y$ και όχι μεγαλύτερο από $16/f_y$.

ii). Περισφιγμένες περιοχές

Στις περιοχές των τοιχωμάτων που ο λόγος $\rho_l = A_s/(b s_v)$ έχει τιμή πάνω από $3/f_y$ θα τίθενται συνδετήρες όπως ορίζεται παρακάτω. Σε αυτή την περίπτωση τίθενται συνδετήρες ανά απόσταση ίση με 10 φορές τη διάμετρο της στηριζόμενης ράβδου με εμβαδό σκέλους συνδετήρα, όχι κάτω από

$$A_{te} \geq \frac{\Sigma A_b f_y}{96 f_{yt}} \frac{S}{d_b}$$

όπου ΣA_b εμβαδό των διαμήκων ράβδων ανά σκέλος συνδετήρα.

Επίσης όταν ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από $C_c = 0.8(0.3\Phi_o/\mu) L_w$ από την ακραία θλιβόμενη ίνα τότε ορθογωνικοί ή πολυγωνικοί συνδετήρες θα περιβάλλουν το διαμήκη οπλισμό, έτσι ώστε το συνολικό εμβαδόν των συνδετήρων σε ένα μήκος S_h θα είναι μεγαλύτερο από τις τιμές :

$$A_{sh} = \left(\frac{\mu}{40} + 0.1 \right) S_h h'' \frac{A_g^*}{A_c^*} \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(\frac{c}{l_w} - 0.07 \right)$$

Η περίσφιξη θα εκτείνεται σε μήκος $c' = \max (c - 0.7c_c , 0.5c)$ και η απόσταση των συνδετήρων θα είναι μικρότερη από $6\Phi_L$ ή $b/2$ ή 150mm σε όλο το ύψος της κρίσιμης περιοχής.

iii) Διατμητική αντοχή

Ο σχεδιασμός των τοιχωμάτων έναντι σεισμικής τέμνουσας θα βασίζεται στη σχέση

$$V^* \leq \Phi V_n ,$$

όπου V^* η δρώσα τέμνουσα δύναμη που προκύπτει από το συνδυασμό φόρτισης για την οριακή κατάσταση αστοχίας και V_n η ονομαστική διατμητική αντοχή της διατομής που προκύπτει από την συνολική ονομαστική διατμητική τάση v_n :

$$V_n = v_n b_w d \Rightarrow V_n = v_n b_w 0.8 l_w$$

$$v_n = v_c + v_{As} \text{ όπου:}$$

$$v_c \leq 0.6 \sqrt{\frac{N^*}{A_g}}$$

και η ονομαστική διατμητική τάση πρέπει να είναι:

$$v_n \leq \left(\frac{\Phi_{ow}}{\mu} + 0.15 \right) \sqrt{f'_c}$$

Οπλισμός κορμού για την αποφυγή αστοχίας σε λοξό εφελκυσμό.

Όταν $v_n > v_c$, τότε τίθεται οπλισμός στον κορμό:

$$A_v = \frac{(v_n - v_c) b_w s_2}{f_{yt}} \geq \frac{0.7 b_w s_2}{f_{yt}} \text{ και } s_2 \leq (L_w/5, 3h, 450\text{mm}).$$

Το ποσοστό του κατακόρυφου οπλισμού κορμού ρ_n δεν θα είναι μικρότερο από $0.7/f_{yn}$ και $s_1 \leq (L_w/3, 3h, 450\text{mm})$, όπου $\rho_n = A_{st} / b_w l_w$.

4.4. Ε.Κ.Σ., Ε.Α.Κ. 1997 [28], [29].

Για τη διαστασιολογήση των τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τους Ελληνικούς Κανονισμούς εφαρμόζονται οι γενικές διατάξεις που ισχύουν για όλα τα δομικά στοιχεία με μικρές διαφοροποιήσεις από στοιχείο σε στοιχείο.

i). Κάμψη με ορθή δύναμη

Για τον έλεγχο των διατομών των τοιχωμάτων σε κάμψη γίνονται δεκτές οι παρακάτω αρχές:

- α) Ισχύει η αρχή επιπεδότητας των διατομών του Bernouli
- β) Ο οπλισμός υφίσταται τις ίδιες παραμορφώσεις με το περιβάλλον σκυροδέμα
- γ) Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αμελείται
- δ) Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με:
 - 0.0035 σε κάμψη
 - 0.002 σε κεντρική θλίψη

ε) Η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του οπλισμού λαμβάνεται ίση με 0.02

Η ροπή αντοχής μιας διατομής προκύπτει σαν την ροπή που δίνει ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων με τάση το 85% της χαρακτηριστικής αντοχής του σκυροδέματος, διαιρεμένης με τον συντελεστή ασφάλειας του υλικού, που εκτείνεται σε ένα μήκος ίσο με 0.8 φορές την απόσταση της ακραίας θλιβόμενης ίνας από τον ουδέτερο άξονα.

Για τον προσδιορισμό της έντασης του χάλυβα αυτή προκύπτει ίση με E_s φορές την αντίστοιχη παραμόρφωση μέχρι τη διαρροή, ενώ μετά τη διαρροή αυτή λαμβάνεται

σταθερή και ίση με την τάση διαρροής.

ii). Διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας δύναμης

Για την διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας η δρώσα τέμνουσα πρέπει να είναι μικρότερη από την τέμνουσα που απαιτείται για την αστοχία του σκυροδέματος του κορμού σε διαγώνια σύνθλιψη (V_{rd2}) και από την τέμνουσα που απαιτείται για την αστοχία του στοιχείου σε λοξό εφελκυσμό (V_{rd3}).

$$V_{sd} \leq V_{rd2}, V_{rd3}$$

$V_{rd2} = 1/2v f_{cd} b_w 0.9d$ με $v = 0.7 - f_{ck}/200 \geq 0.5$, ενώ κατά την ύπαρξη θλιπτικών δυνάμεων η V_{rd2} μειώνεται στην τιμή $V_{rd2,red} = 1.67V_{rd2}(1 - \sigma_{cp,eff}/f_{cd}) < V_{rd2}$, όπου $\sigma_{cp,eff} = (N_{sd} - f_{yk} A_{s2}/\gamma_c)/A_c$ με A_{s2} : η διατομή του οπλισμού στη θλιβόμενη ζώνη και f_{yk} η χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής του θλιβόμενου οπλισμού ($f_{yk}/\gamma_c \leq 400 \text{ N/mm}^2$). Για συνδυασμό δράσεων που περιλαμβάνουν σεισμό ορίζουμε δύο κατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο της αξονικής δύναμης σύμφωνα με τα οποία:

Για $N_{sd} > -0.1A_c f_{cd}$ τότε $V_{rd3} = V_{wd} + V_{cd} = V_{wd} + 0.25V_{Rd1}$ όπου:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rdk}(1.2 + 40\rho_l) + 0.15\sigma_{cp}] b_w d \text{ και}$$

V_{wd} για $\alpha_c = M_{sd}/V_{sd} l_w \geq 2.0$ και μη εναλλασσόμενου προσίμου τέμνουσα ή για εναλλασσόμενου προσίμου τέμνουσα με τιμή $V_{sd} \leq 3(2+\zeta)\tau_{rd} b_w d$ είναι $V_{wd} = (A_{sw}/s) 0.9d f_{ywd} (1 + \cot\alpha) \sin\alpha$, ενώ για εναλλασσόμενου προσίμου τέμνουσα με τιμή $V_{sd} \geq 6(2+\zeta)\tau_{rd} b_w d$, τότε όλη η τέμνουσα πρέπει να παραληφθεί με δισδιαγώνιο οπλισμό. Για τις ενδιάμεσες τιμές της V_{sd} η μισή τέμνουσα παραλαμβάνεται με διπλό ορθογωνικό πλέγμα και η άλλη μισή με δισδιαγώνιο οπλισμό. Για $2.0 > \alpha_c > 1.3$ πρέπει να διατάσσεται οριζόντιος οπλισμός ικανός να παραλάβει τέμνουσα $V_{sd} - V_{cd} = \rho_h f_{yd,h} b_w d_e$ και κατακόρυφος $V_{sd} - V_{cd} - \min N_{sd} = \rho_v f_{yd,v} b_w d_e$. Για $\alpha_c \leq 1.3$ ο όρος $V_{wd} = [\rho_h f_{yd,h} (\alpha_c - 0.3) + \rho_v f_{yd,v} (1.3 - \alpha_c)] b_w d_e$

Για $N_{sd} \leq -0.1A_c f_{cd}$ ισχύουν τα παραπάνω με την διαφορά ότι ο όρος $V_{cd} = 0.7V_{Rd1}$

iii). Ακραίες περισφιγμένες περιοχές τοιχωμάτων

Στις κρίσιμες περιοχές των τοιχωμάτων ή όπου η βράχυνση του σκυροδέματος είναι πάνω του 0.2% πρέπει να διαμορφώνονται υποστυλώματα σε μήκος από το άκρο ίσο με $1.5b$ ή $0.15l_w$ ή σε τόσο μήκος ώστε η βράχυνση του σκυροδέματος να είναι κάτω του 0.2%. Στις ακραίες αυτές περιοχές ο κατακόρυφος οπλισμός πρέπει να είναι μεταξύ 0.008 και 0.04 της αντίστοιχης διατομής σκυροδέματος του υποτιθέμενου υποστυλώματος. Για τον υπολογισμό της περισφίξεως θα λαμβάνεται υπόψη για κάθε

άκρο αξονική δύναμη $N_{\text{eff}} \approx 2/3(N_{\text{sd}}/2 + M_{\text{sd}}/z)$ και πρέπει:

$$\omega_{\text{wd}} = \frac{\text{όγκος των συνδετήρων και συνδέσμων}}{\text{όγκος του περισφιγμένου σκυρ / τος}} \cdot \frac{f_{\text{yd}}}{f_{\text{ct}}} \geq (1/\alpha)(2/3)v_d(0.35A_c/A_0 + 0.15) \geq 0.1$$

4.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξετάζοντας τη μεθοδολογία με την οποία αντιμετωπίζουν οι διάφοροι κανονισμοί το σεισμικό πρόβλημα στα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος προκύπτει αρχικά το συμπέρασμα ότι, εκτός από την φάση της ανάλυσης μιας κατασκευής, η διαφορετική σεισμικότητα μεταξύ περιοχών που ισχύει ο ίδιος κανονισμός λαμβάνεται υπόψη και στην φάση της διαστασιολόγησης. Με τη θέσπιση κανόνων κυρίως στο Νεοζηλανδικό κανονισμό και στον Ευρωκώδικα ισχύουν διαφορετικές σχέσεις για τον έλεγχο των μελών των κατασκευών, ανάλογα με το επίπεδο της ανελαστικής καταπόνησης του κάθε στοιχείου. Έτσι, στο Νεοζηλανδικό κανονισμό υπάρχουν οι κατασκευές περιορισμένης πλαστιμότητας (μέχρι 3) και οι κατασκευές με πλαστιμότητα (μετακινήσεων) πάνω του τρία, για τις οποίες οι διατάξεις είναι αυστηρότερες. Αντίστοιχα, στον Ευρωκώδικα έχουν θεσπιστεί διατάξεις για κατασκευές χαμηλού, μέσου και υψηλού επιπέδου πλαστιμότητας, με αυστηρότερες προφανώς διατάξεις για τις τελευταίες. Η διαφορά των δύο παραπάνω κανονισμών με τον αντίστοιχο του ACI έγκειται στο γεγονός ότι αυτός ο κανονισμός χωρίζει τις κατασκευές σε αντισεισμικές, που πρόκειται δηλαδή να δεχθούν σεισμική επιπόνηση και σε κατασκευές που δε διαστασιολογούνται έναντι σεισμικών φορτίων. Ο ίδιος χωρισμός γίνεται και σε επίπεδο δομικών στοιχείων μιας κατασκευής ορίζοντας ότι υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξουμε ποια μέλη της κατασκευής θα συμμετάσχουν στην αντισεισμική άμυνα της κατασκευής και ποιά όχι. Ο Ελληνικός κανονισμός δεν κάνει τέτοιου είδους διάκριση άμεσα αλλά έμμεσα, ορίζοντας κανόνες με βάση την αλλαγή του προσήμου της δρώσας τέμνουσας στα στοιχεία. Προφανώς, αν ληφθεί υπόψη το μέγεθος της Ελλάδος και η υψηλή σεισμικότητά της, τότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι ορθά στον Ελληνικό κανονισμό ορίζονται αντισεισμικές διατάξεις για όλες τις κατασκευές, όπως συμβαίνει και στον Νεοζηλανδικό κανονισμό και στον Ευρωκώδικα, με τη διαφοροποίηση της θέσπισης διαφόρων επιπέδων πλαστιμότητας.

Σε επίπεδο διαστασιολόγησης, αναφορικά με την κάμψη οι κανονισμοί που ελέγχθηκαν δείχνουν να συγκλίνουν. Σε ότι αφορά την διατμητική αντοχή η κυριότερη διαφορά έγκειται στο ότι ο Ευρωκώδικας και ο Νεοζηλανδικός κανονισμός αγνοούν

εντελώς τη συνεισφορά του σκυροδέματος στην ανάληψη τέμνουσας σε κατασκευές υψηλού επιπέδου πλαστιμότητας, σε αντίθεση με τον Ελληνικό και τον αντίστοιχο κανονισμό του ACI, οι οποίοι επιτρέπουν την ανάληψη μεριδίου τέμνουσας από το σκυρόδεμα.

Ο Νεοζηλανδικός κανονισμός δεν επιβάλλει σαφή διαφορετική αντιμετώπιση στα τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης κάτω του δύο, όπως συμβαίνει στον Ελληνικό κανονισμό και στον Ευροκώδικα. Επιπλέον, οι δύο τελευταίοι κανονισμοί είναι οι μόνοι που λαμβάνουν πρόσθετα μέτρα για την αστοχία από διατμητική ολίσθηση ενώ ο Νεοζηλανδικός κανονισμός αναφέρει απλά ότι πρέπει να προστατεύονται τα κοντά τοιχώματα από αστοχία σε ολίσθηση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κανονισμός του ACI αντιμετωπίζει τα τοιχώματα γενικευμένα, ορίζοντας κάτω και πάνω όριο στη διατμητική αντοχή.

ΜΕΡΟΣ Β

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

5.1. ΑΝΟΙΚΤΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

Μετά τη διερεύνηση και ανάλυση των σύγχρονων κανονισμών, όπως οι EUROCODE 8, ACI 318-83 και NZS 3101, καθώς επίσης και όλων των διαθέσιμων πρόσφατων πειραματικών και αναλυτικών εργασιών, της διεθνούς βιβλιογραφίας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος χρήζουν πειραματικής έρευνας στο πεδίο της ανελαστικής συμπεριφοράς τους και ειδικότερα σε θέματα που αφορούν την ανελαστική συμπεριφορά τοιχωμάτων που υπόκεινται σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις, καθώς, όπως προκύπτει από τη σχετική βιβλιογραφία, ο ρυθμός πτώσης της αντοχής τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος και οι ανελαστικές διατμητικές παραμορφώσεις είναι μεγέθη ανάλογα. Έτσι κρίνεται σκόπιμο να μετρηθούν οι καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις στην περιοχή των τοιχωμάτων όπου αναμένεται έντονη ρηγμάτωση λόγω οριζόντιας ανακυκλιζόμενης φόρτισης στην κορυφή. Επίσης υπάρχει ανάγκη αφενός του συσχετισμού της πτώσης αντοχής σε ανελαστικό επίπεδο με τις προσδιορισθείσες διατμητικές παραμορφώσεις και αφετέρου μελέτης της δυνατότητας μείωσής τους με τη χρήση σκόπιμα τοποθετούμενου δισδιαγώνιου οπλισμού (κατά γωνία 45°) στην περιοχή όπου αναμένεται έντονη ρηγμάτωση. Ο δισδιαγώνιος οπλισμός είναι δυνατό να τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε είτε να διέρχεται από τις κρυφοκολόνες, στη βάση του δοκιμίου, οπότε το σημείο τομής των διαγωνίων ράβδων να βρίσκεται σε ύψος ίσο με $L_w/2$, είτε να διέρχεται από τον κορμό στη βάση του δοκιμίου. Ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησης του δισδιαγώνιου οπλισμού θα προσδιοριστεί πειραματικά. Εκτός από τη συγκριτική διερεύνηση μεταξύ των δύο τύπων χιαστί οπλισμών στην ανελαστική συμπεριφορά των δοκιμίων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική διερεύνηση της ανελαστικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων με κλασικού τύπου οπλισμό και χιαστί τύπου οπλισμό που δύνανται να παραλάβουν υπολογιστικά όμοια μέγιστη ροπή και τέμνουσα. Πράγματι ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέτρηση της διαφοράς της κατανομής των επιμέρους συνιστωσών της συνολικής μετατόπισης μεταξύ όλων των τύπων των

δοκιμίων προκειμένου να προσδιοριστούν οι διαφορετικές ελαστικές και ανελαστικές ιδιότητες λόγω των διαφορετικών τύπων οπλισμών. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει και το οικονομικό κριτήριο της απαίτησης σε ποσότητα οπλισμού (κλασικού έναντι χιαστί) προκειμένου να επιτευχθεί η παραπάνω ομοιότητα.

Όπως προκύπτει από τις προηγούμενες ανασκοπήσεις είναι σαφής η επιρροή της αξονικής δύναμης στην ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά των τοιχωμάτων. Έτσι φαίνεται να παρουσιάζει ενδιαφέρον η συγκριτική διερεύνηση της ανελαστικής συμπεριφοράς μεταξύ τοιχωμάτων με αξονική και χωρίς αξονική εξωτερική καταπόνηση, προκειμένου να μελετηθεί η διαφορετική κατανομή των εσωτερικών παραμορφώσεων λόγω της ύπαρξης ή μη της αξονικής δύναμης. Το επίπεδο της αξονικής δύναμης καθορίζεται από την σχέση του EUROCODE 8 σύμφωνα με τον οποίο προτείνεται διαφορετική αντιμετώπιση για στοιχεία αξονικά επιπονούμενα με δύναμη πάνω ή κάτω από την τιμή $N_s=0.07A_c \cdot f_c$. Άρα καθορίζεται ο έλεγχος να γίνει σε δοκίμια με μηδενική αξονική και σε δοκίμια με αξονική δύναμη $N_s=0.07A_c \cdot f_c$ προκειμένου να αποφανθούμε τόσο για τις διαφορές στη συμπεριφορά όσο και για την ορθότητα του παραπάνω ορίου. Αυτά τα δύο δοκίμια οπλίζονται με ίδιο ακριβώς οπλισμό για να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Η διαστασιολόγησή τους (διαστάσεις, διαμήκεις οπλισμοί και οπλισμοί περίσφιξης κρυφοκολόνων, οπλισμοί κορμού) έγινε με τις ελάχιστες απαιτήσεις του EUROCODE 8 προκειμένου να διερευνηθεί η ορθότητα των ορίων που έχει θεσπίσει ο παραπάνω κανονισμός. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμίων με τον ελάχιστο οπλισμό και των δοκιμίων με περισσότερο οπλισμό κλασικού τύπου, προκειμένου να προσδιοριστεί η επιρροή της ποσότητας του οπλισμού στην ανελαστική συμπεριφορά των τοιχωμάτων.

Στους αρμούς σκυροδέτησης οι διαμήκεις οπλισμοί κάμψης και διάτμησης στη συντριπτική τους πλειοψηφία συνδέονται μεταξύ τους με απλή παράθεση. Επομένως ανάντι του αρμού σκυροδέτησης και για ένα ύψος ίσο με το μήκος παράθεσης υπάρχει ο διπλάσιος διαμήκης οπλισμός κάμψης και διάτμησης από ότι στο υπόλοιπο μήκος του στοιχείου, ο οποίος όμως δεν είναι σίγουρο με ποιό τρόπο επηρεάζει την περιοχή παράθεσης, η οποία τυγχάνει να είναι περιοχή έντονης ρηγμάτωσης, καθώς δεν λειτουργούν με πλήρη δύναμη οι οπλισμοί σε όλο το μήκος τους. Έτσι γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του δοκιμίου με κλασικού τύπου οπλισμό αρκετά πάνω από τον μέγιστο, με όμοιο δοκίμιο το οποίο διαφέρει ως προς το προηγούμενο στο ότι έχει γίνει αρμός σκυροδέτησης στη βάση του και ότι έχουν μπει αναμονές για τους διαμήκεις οπλισμούς, οι οποίοι συνδέονται μέσω παράθεσης με τους

οπλισμούς του δοκιμίου.

Όλες οι παραπάνω συγκριτικές δοκιμές γίνονται μεταξύ δοκιμίων με λόγο όψης 1.5 καθώς επίσης και μεταξύ δοκιμίων με λόγο όψης 1.0. Συγκρίσεις ακόμη γίνονται και μεταξύ όμοιων δοκιμίων των δύο παραπάνω ομάδων προκειμένου να προσδιοριστεί η διαφορετική συμπεριφορά δοκιμίων με λόγο όψης πάνω ή κάτω από την τιμή 1.3, όπως καθορίζει ο EUROCODE 8.

Εκτός από την παραπάνω συγκριτική αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση του τρόπου τελικής αστοχίας και η βαθμονόμησή του σύμφωνα με τις διατάξεις του EUROCODE 8, ο οποίος θεσπίζει τρεις πιθανούς τύπους αστοχίας για τα τοιχώματα (κάμψη, διάτμηση, ολίσθηση).

5.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ [87], [88].

Η παρούσα διατριβή εστιάζεται κυρίως στη μελέτη και διερεύνηση της ανελαστικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκεινται σε υψηλή ανακυκλιζόμενη τέμνουσα και στον προσδιορισμό και καταγραφή της επιρροής μιας σειράς παραμέτρων που δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς από άλλους ερευνητές, όπως :

- λόγος όψης τοιχωμάτων: $h_w/l_w = 1.5$ και $h_w/l_w = 1$
- ύπαρξη κύριου δισδιαγώνιου οπλισμού σε τοιχώματα με λόγο όψης 1 και 1.5
- τρόπος τοποθέτησης του κύριου δισδιαγώνιου οπλισμού, δηλαδή υπό γωνία 45^0 και με σημείο τομής των διαγώνιων ράβδων στη μέση της βάσης για δύο δοκίμια και σε απόσταση ίση με $0.5l_w$ για άλλα δύο.
- ύπαρξη και απουσία αξονικού φορτίου για τοιχώματα με λόγο όψης 1 και 1.5
- διάφορα ποσοστά διαμήκους οπλισμού ακραίων περισφιγμένων περιοχών, και οπλισμού κορμού για τοιχώματα με λόγο όψης 1 και 1.5
- ύπαρξη αρμού σκυροδέτησης χωρίς εκτράχυνση του σκυροδέματος και πρόσθετο οπλισμό

στην αρχική δυσκαμψία, αντοχή, απόσβεση ενέργειας, πτώση αντοχής, ωφέλιμη παραμόρφωση, τελική κατάσταση δοκιμίου, πλαστιμότητα, κατανομή των επιμέρους παραμορφώσεων (καμπτικές, διατμητικές, ολίσθησης) , πτώση αντοχής μεταξύ κύκλων φόρτισης ίδιας μετατόπισης, και κυρίως στη μελέτη του φαινομένου της διατμητικής

ολίσθησης μεταξύ των επιφανειών που συνθέτουν τα καμπτικά ρήγματα στη βάση του δοκιμίου.

Σχεδιάζονται δύο σειρές δοκιμών: Η μία σειρά αποτελείται από δοκίμια με λόγο όψης 1 (σειρά LSW) και η άλλη σειρά από δοκίμια με λόγο όψης 1.5 (σειρά MSW). Στη σειρά δοκιμών LSW κατασκευάζονται 5 δοκίμια με όμοιες διαστάσεις (βλ. Σχ.46-50) με τις εξής διαφοροποιήσεις. Τα δοκίμια LSW2 και LSW3 έχουν οπλισμό κορμού 2#Ø4.2/10 που αντιστοιχεί σε ποσοστό 2.77‰, ενώ στις κρυφοκολώνες το ποσοστό του κύριου διαμήκους οπλισμού ρ_{cc} , όπως αυτό ορίζεται στον πίνακα (Π.1.), είναι $0.013(6\text{Ø}18/\text{κρυφοκολόνα}) > 0.008$. Οι συνδετήρες είναι από οπλισμό διατομής Ø4.4 και τίθενται ανά 2.4cm. Το δοκίμιο LSW3 ελέγχεται σε οριζόντια ιστορία φόρτισης όμοια με αυτή του δοκιμίου LSW2, ενώ καταπονείται επιπλέον σε κατακόρυφο φορτίο $N = 0.07A_c f_c$ προκειμένου να προσδιοριστεί η επιρροή του αξονικού φορτίου στις παραμέτρους που ερευνούνται.

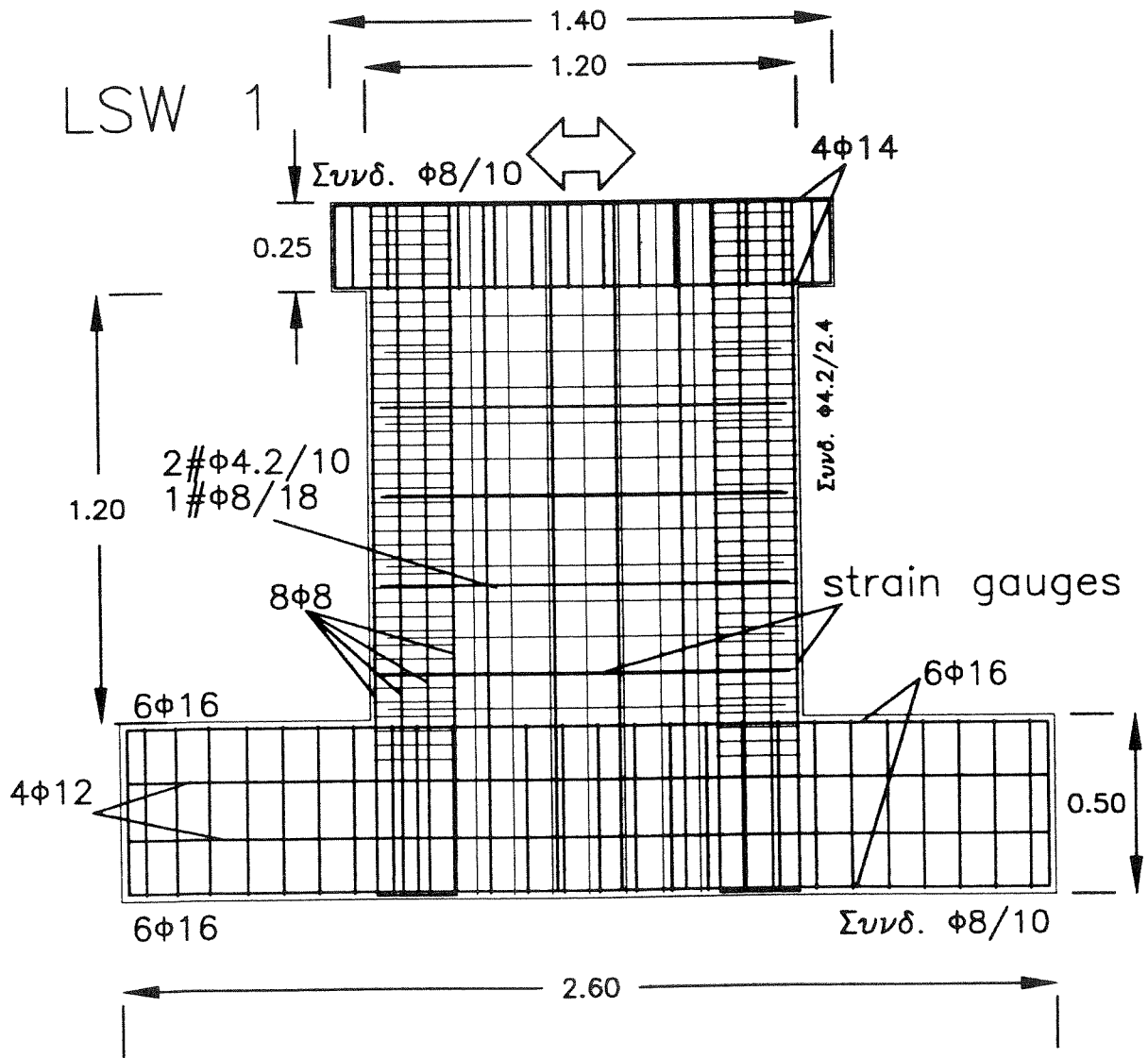
Το δοκίμιο LSW1 είναι όμοιο με το δοκίμιο LSW2 χωρίς αξονική δύναμη και με ίδια διάταξη οπλισμών με τις εξής διαφοροποιήσεις. Στον κορμό εκτός από το πλέγμα 2#Ø4.2/10 τίθεται και 1#Ø8/17 (τέσσερις οπλισμοί οριζόντιοι και τέσσερις κατακόρυφοι). Οι παραπάνω οπλισμοί κορμού αντιστοιχούν σε ποσοστό 5.65‰. Επίσης, στις ακραίες περισφιγμένες περιοχές τίθενται επιπλέον 2Ø8 (άρα συνολικά 8Ø8 ανά κρυφοκολόνα) και το ποσοστό διαμήκους οπλισμού γίνεται $0.017 > 0.008$. Έτσι, μπορούν να προσδιοριστούν οι διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά (παραμέτρους που διερευνούνται) των τοιχωμάτων λόγω ύπαρξης και μη ύπαρξης αξονικής δύναμης, καθώς επίσης και για τις διαφοροποιήσεις που οφείλονται στη μεταβολή της ποσότητας οπλισμού στον κορμό και τις ακραίες περισφιγμένες περιοχές των τοιχωμάτων. Το δοκίμιο LSW5 σχεδιάστηκε όμοιο με το δοκίμιο LSW2 με μόνη διαφοροποίηση την τοποθέτηση επιπλέον του 2#Ø4.2/10 κύριου δισδιαγώνιου οπλισμού στο τοίχωμα. Τοποθετούνται 3Ø8 ανά διεύθυνση με κλίση 45°. Η επιλογή των 3Ø8 με γωνία 45° έγινε, διότι, εάν αυτό το ποσοστό προστεθεί στο ποσοστό του 2#Ø4.2/10, τότε λαμβάνουμε ποσοστό:

$$2\text{#}\text{Ø}4.2/10 + 3\text{Ø}8 \text{ με γωνία } 45^\circ + 3\text{Ø}8 \text{ με γωνία } 135^\circ = 2.77\text{‰} + 3\text{‰} = 5.77\text{‰},$$

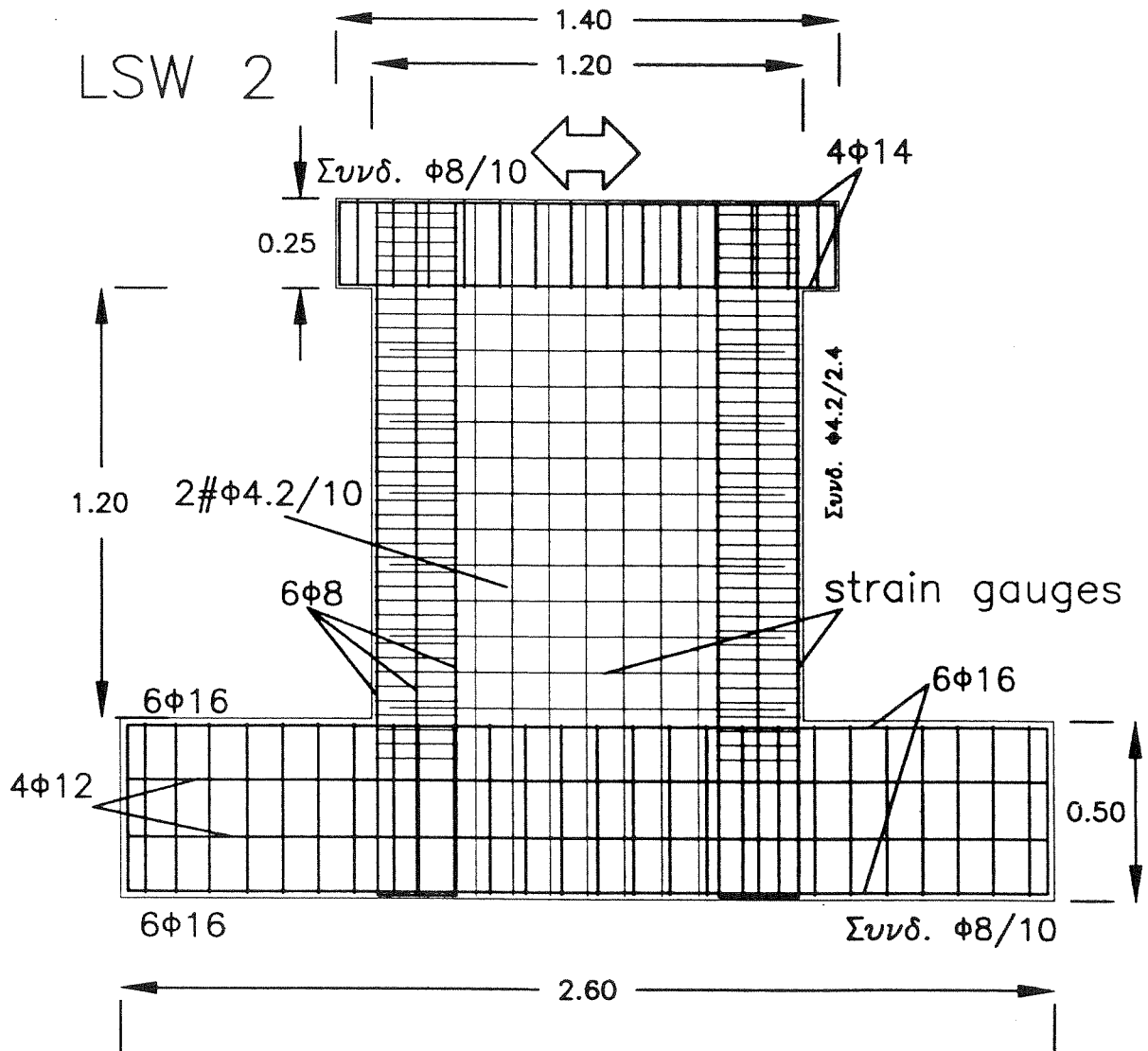
το οποίο είναι περίπου ίσο με το ποσοστό που αντιστοιχεί στον οπλισμό κορμού του δοκιμίου LSW1, δηλαδή :

$$2\text{#}\text{Ø}4.2/10 + 4\text{Ø}8 \text{ κατακόρυφα} = 2.77\text{‰} + 2.86\text{‰} = 5.63\text{‰} \cong 5.77\text{‰}$$

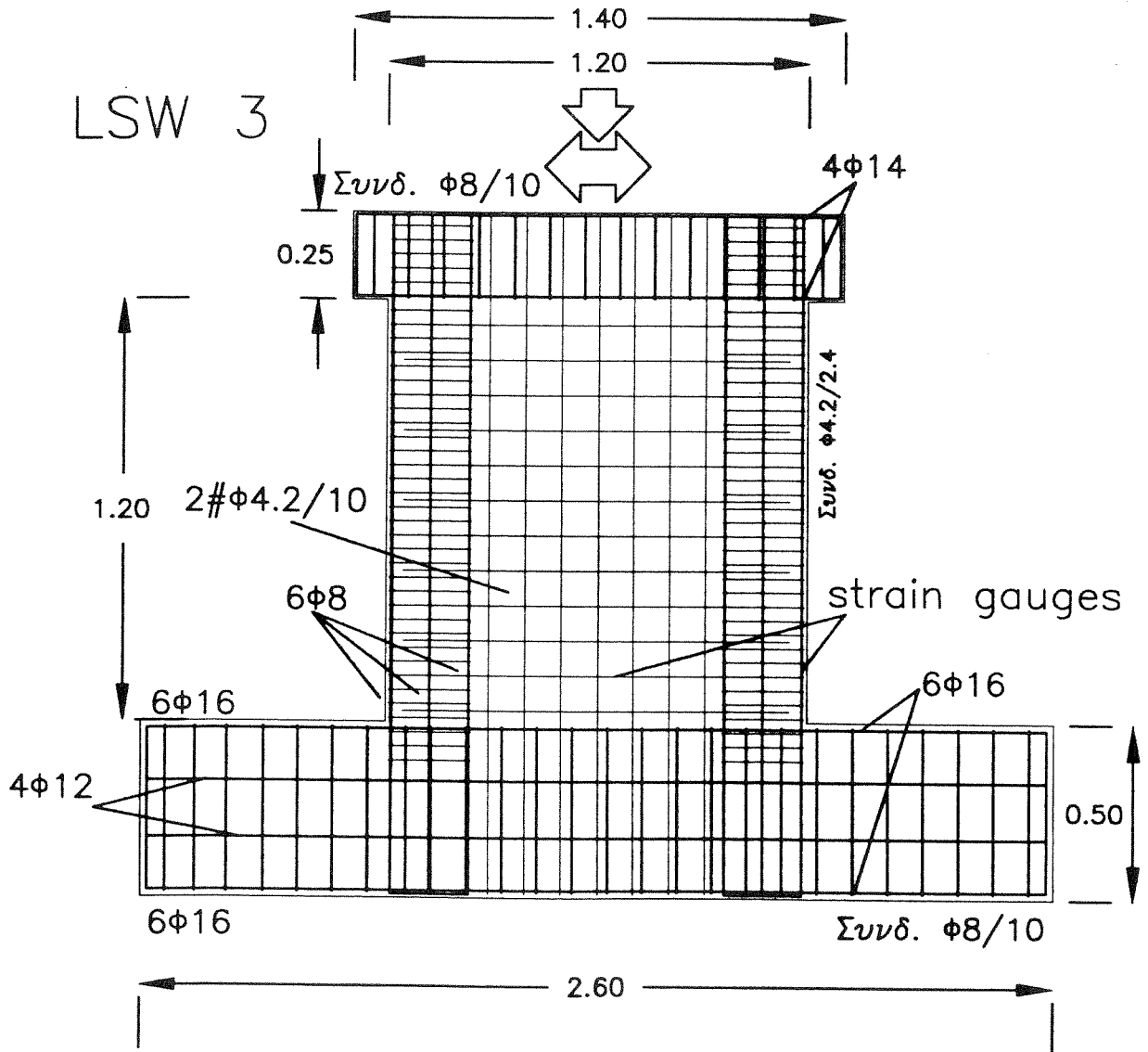
άρα, τοποθετώντας ίδιο ποσοστό οπλισμού στον κορμό είναι δυνατό να ελεγχθεί η μεταβολή και η διαφοροποίηση των παραμέτρων που διερευνούνται, λόγω του διαφορετικού τρόπου τοποθέτησης οπλισμών.



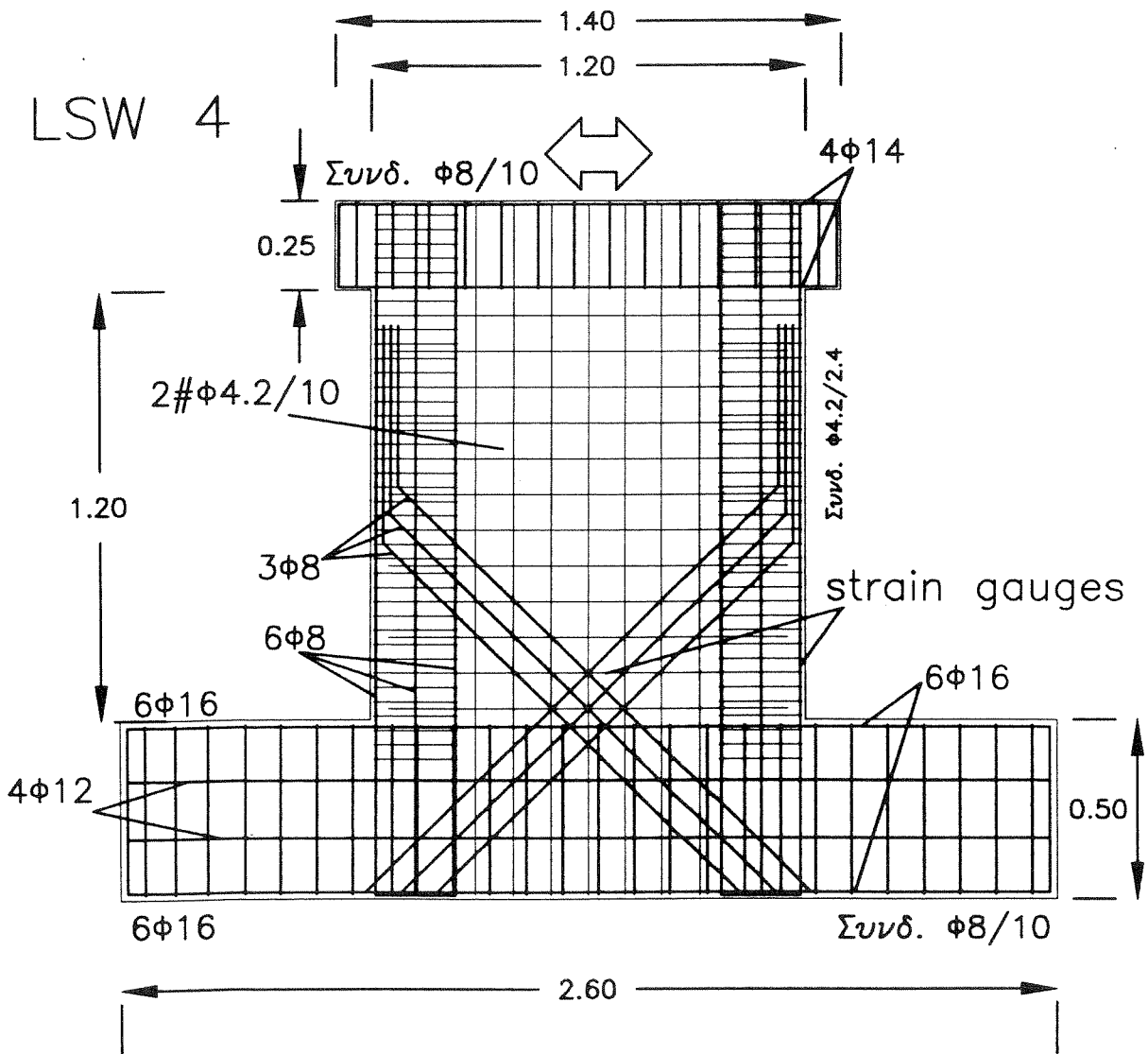
Σχ. 46. Οπλισμοί δοκιμίου LSW1



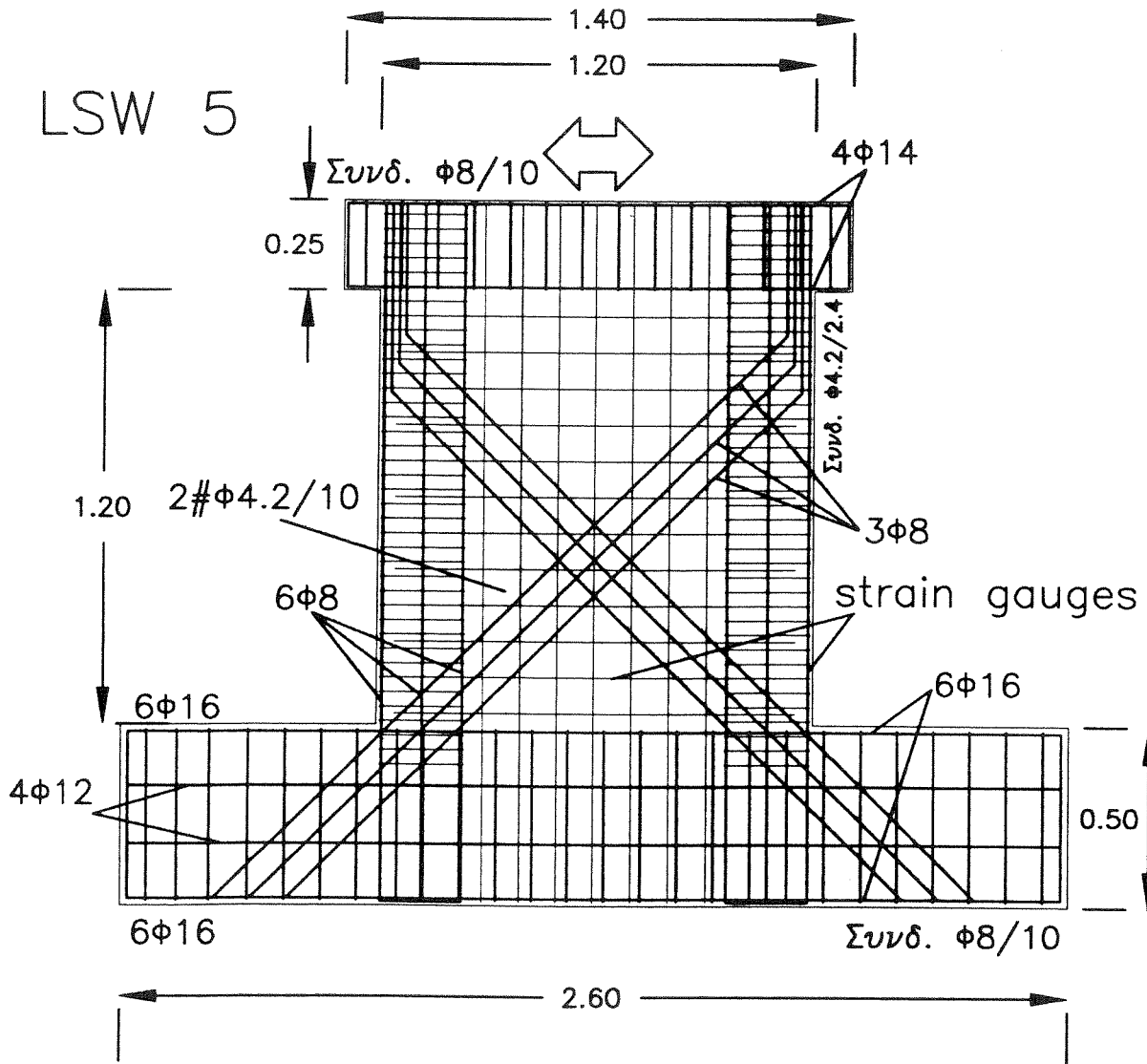
Σχ. 47. Οπλισμοί δοκιμίου LSW2



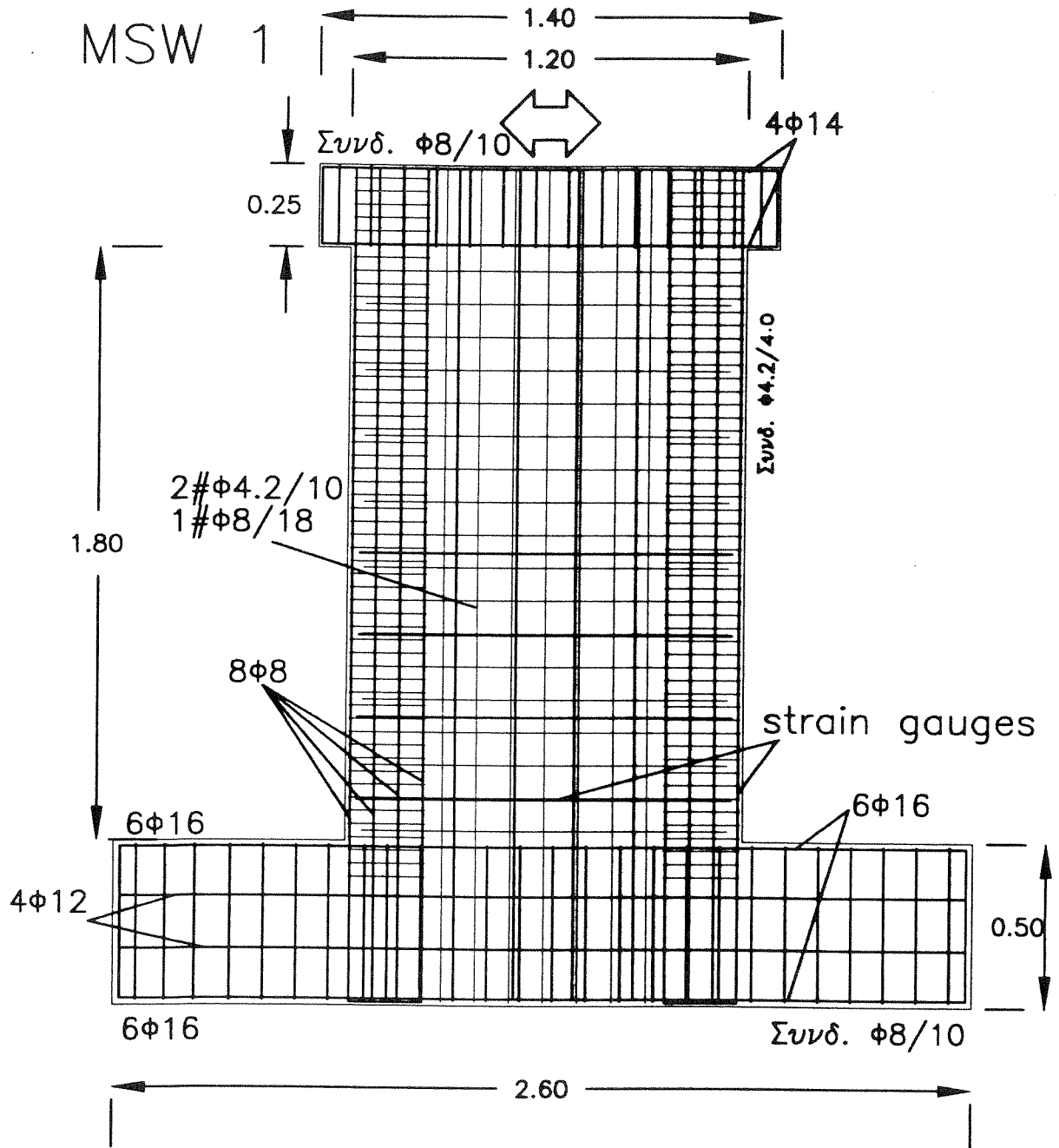
Σχ. 48. Οπλισμοί δοκιμίου LSW3



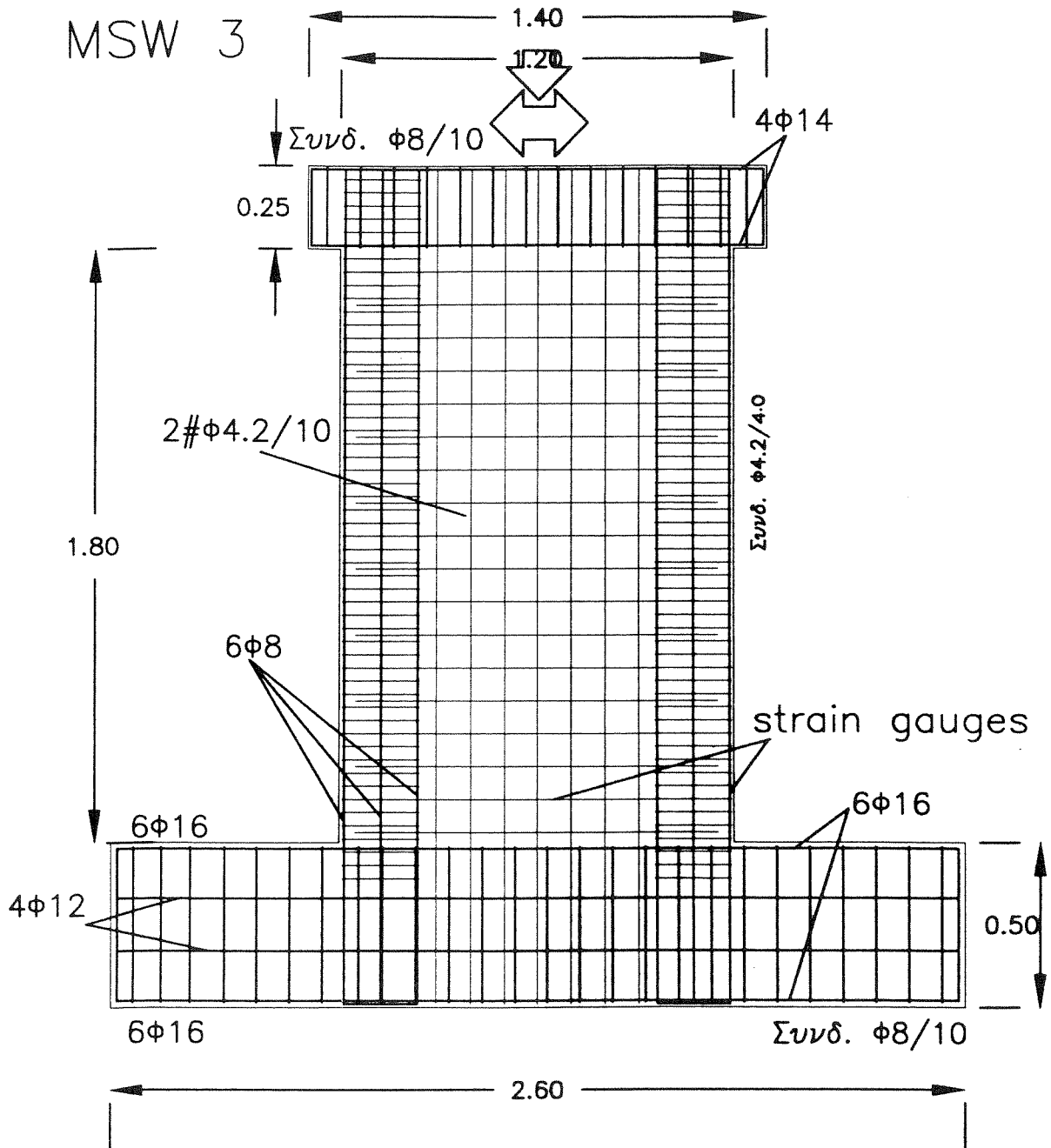
Σχ. 49. Οπλισμοί δοκιμίου LSW4



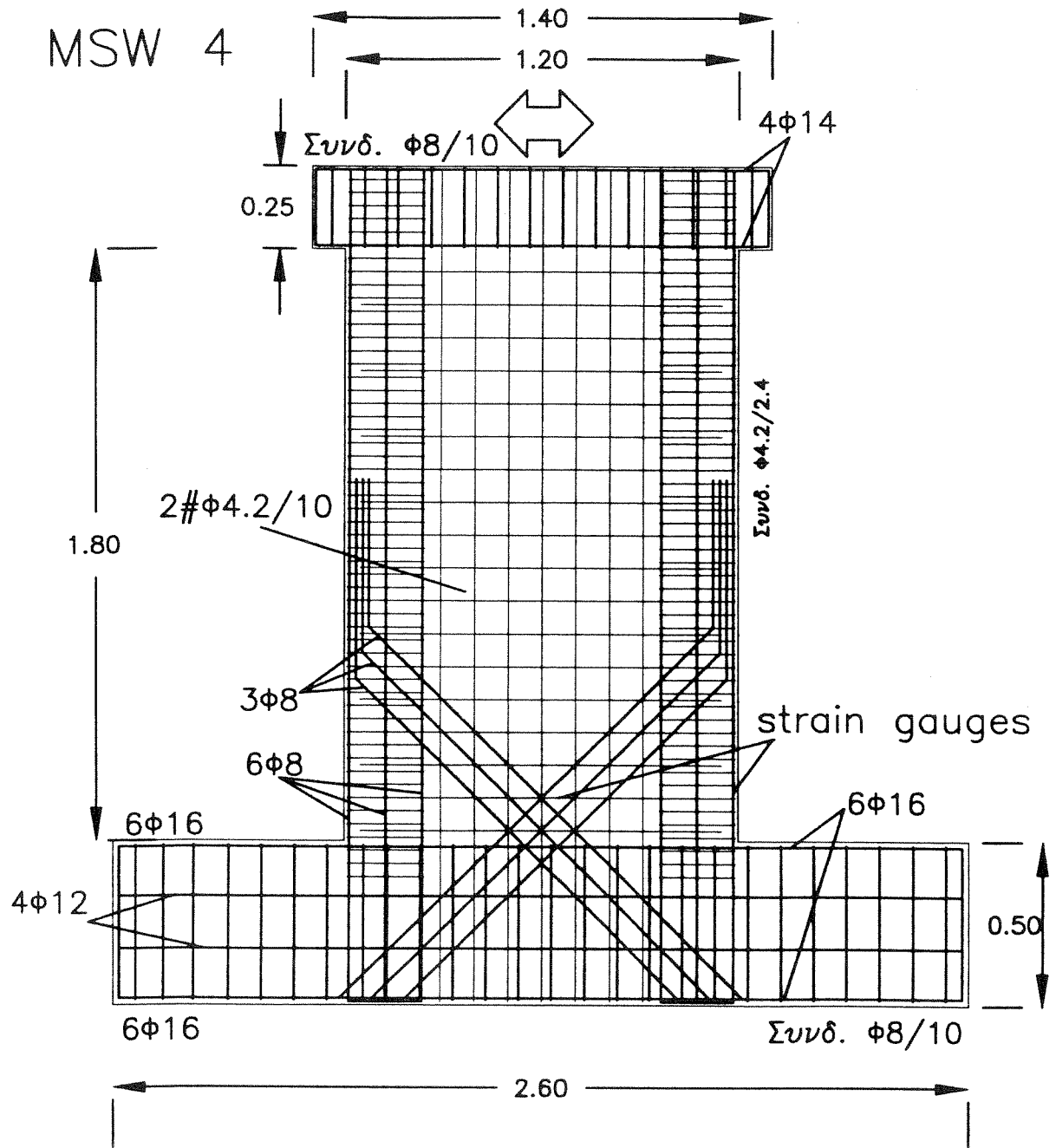
Σχ. 50. Οπλισμοί δοκιμίου LSW5



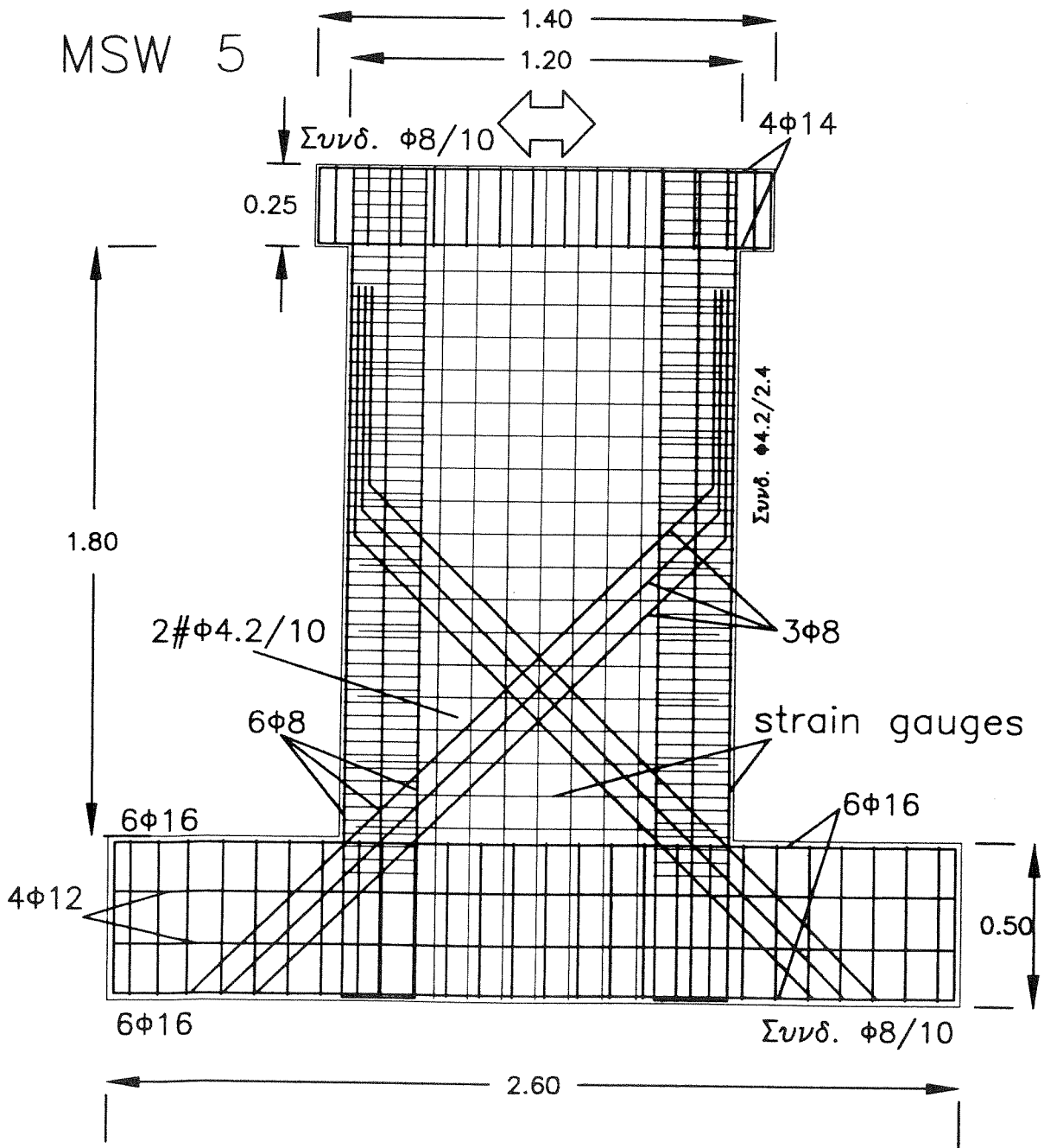
Σχ. 51. Οπλισμοί δοκιμίου MSW1



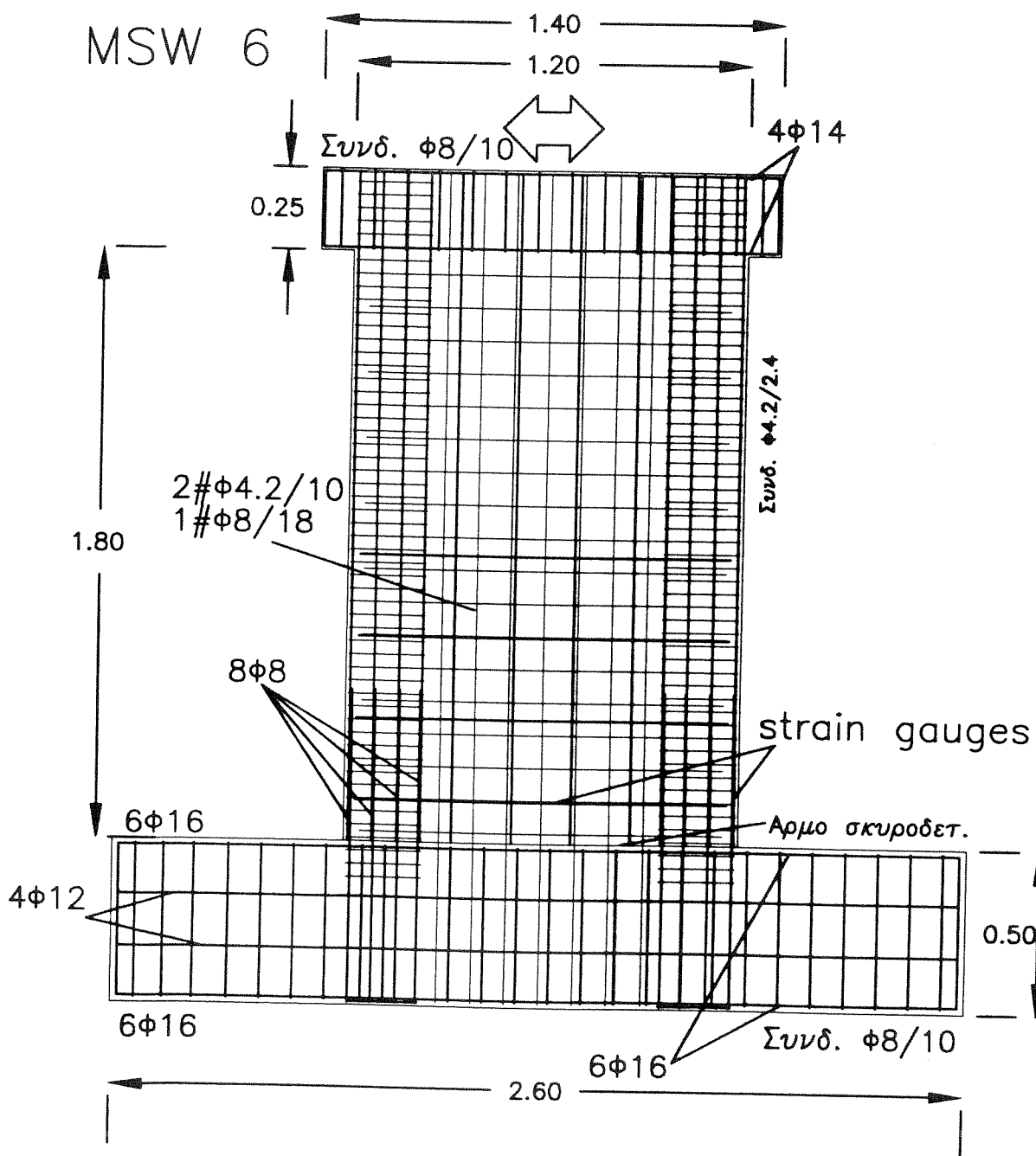
Σχ. 53. Οπλισμοί δοκιμίου MSW3



Σχ. 54. Οπλισμοί δοκιμίου MSW4



Σχ. 55. Οπλισμοί δοκιμίου MSW5



Σχ. 56. Οπλισμοί δοκιμίου MSW6

| No | Δοκίμιο | Διατομή | Εμβ.Διατ. | Υψος | Αν. Διατμ. | A _{cc} | ρ _h | ρ _v | ρ _{cc} | ρ _w | ρ _d | Σχόλια |
|----|---------|---------------------------------|-----------------|----------------|--|---------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|---|
| | | b _w × l _w | | h _w | a _s =h _w /l _w | l _c × b _w | | | | | | |
| | | cm × cm | cm ² | cm | | cm ² | % | % | % | % | % | |
| 1 | LSW1 | 10 × 120 | 1200 | 120 | 1 | 240 | 0.565 | 0.565 | 1.7 | 1.7 | — | — |
| 2 | LSW2 | 10 × 120 | 1200 | 120 | 1 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.7 | — | — |
| 3 | LSW3 | 10 × 120 | 1200 | 120 | 1 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.7 | — | — |
| 4 | LSW4 | 10 × 120 | 1200 | 120 | 1 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.7 | — | N=0.07A _c f _c |
| 5 | LSW5 | 10 × 120 | 1200 | 120 | 1 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.7 | 0.416 | φ _d =45° l _d =0 |
| 6 | MSW1 | 10 × 120 | 1200 | 180 | 1.5 | 240 | 0.565 | 0.565 | 1.7 | 1.1 | — | φ _d =45° l _d =0.8l _w |
| 7 | MSW2 | 10 × 120 | 1200 | 180 | 1.5 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.1 | — | — |
| 8 | MSW3 | 10 × 120 | 1200 | 180 | 1.5 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.1 | — | — |
| 9 | MSW4 | 10 × 120 | 1200 | 180 | 1.5 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.7 | 0.416 | φ _d =45° l _d =0 |
| 10 | MSW5 | 10 × 120 | 1200 | 180 | 1.5 | 240 | 0.277 | 0.277 | 1.3 | 1.7 | 0.416 | φ _d =45° l _d =0.8l _w |
| 11 | MSW6 | 10 × 120 | 1200 | 180 | 1.5 | 240 | 0.565 | 0.565 | 1.7 | 1.7 | — | Αριθός Σκυρ. |

$$A_{cc} = l_c \times b_w = \max\{2 \times b_w, 0.2 \times l_w\} \times b_w$$

$$\rho_h = A_{sh} / (b_w \times S_h), \rho_v = A_{sv} / (b_w \times S_v), \rho_{cc} = A_{sc} / A_{cc},$$

$$\rho_w = (I_{stir} \times A_{stir}) / (l_c \times b_w \times s), \rho_d = A_{sd} / (b_w \times l_{web})$$

A_{sd}: Εμβαδό διαγωνίου οπλισμού.

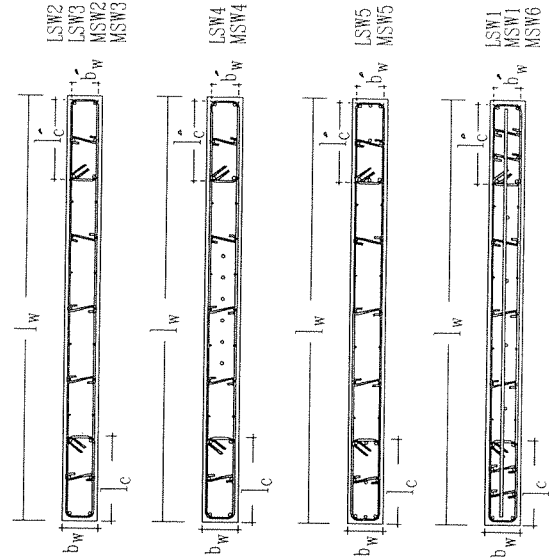
A_{sc}: Εμβαδό διαμήκη οπλισμού κρυφοκολόνας.

A_{sh}: Εμβαδό οριζόντιου οπλισμού κορμού.

A_{sv}: Εμβαδό κατακόρυφου οπλισμού κορμού.

l_d: Απόσταση μεταξύ των αξόνων του διαγώνιου οπλισμού στη βάση του δοκιμίου.

Τυπικές διατομές τοιχωμάτων :



Π.1. Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών όπου παρουσιάζονται οι τυπικές διατομές όλων των δοκιμών και τα διάφορα ποσοστά οπλισμού.

Επίσης, στο δοκίμιο LSW5 οι κύριοι δισδιαγώνιοι οπλισμοί που περιγράφηκαν παραπάνω διέρχονται μέσα από τις κρυφοκολόνες του δοκιμίου στη βάση του (Σχ.50), έτσι ώστε ο διαμήκης οπλισμός των ακραίων περισφιγμένων περιοχών, στη θέση της μέγιστης ροπής να είναι ίσου εμβαδού για τα δοκίμια LSW1 και LSW5, δηλαδή :

$$LSW1 \rightarrow 8\varnothing 8 / \text{κρυφοκολόνα}$$

$$LSW5 \rightarrow 6\varnothing 8 + (3 \times \cos 45^\circ) \varnothing 8 \cong 8\varnothing 8 / \text{στη βάση της κρυφοκολόνας}$$

Το δοκίμιο LSW4 σχεδιάστηκε ίδιο με το δοκίμιο LSW5 με μόνη διαφοροποίηση ότι το σημείο τομής των δισδιαγώνιων οπλισμών βρίσκεται σε ύψος $h_d = 0$ από τη βάση του τοιχώματος, ενώ στο δοκίμιο LSW5 το σημείο τομής των δισδιαγώνιων οπλισμών βρίσκεται σε ύψος $h_d = l_w/2$ από τη βάση του τοιχώματος.

Η σειρά δοκιμίων MSW1, MSW2, MSW3, MSW4, MSW5 είναι όμοια με τη σειρά δοκιμίων LSW1, LSW2, LSW3, LSW4 και LSW5, που περιγράφηκε παραπάνω με διαφοροποίηση τον λόγο h_w/l_w που για τη σειρά MSW έχει τιμή 1.5 έναντι της τιμής 1 για τη σειρά LSW. Επιπλέον, κατασκευάστηκε το δοκίμιο MSW6, το οποίο είναι όμοιο με το δοκίμιο MSW1, με μόνη διαφοροποίηση την ύπαρξη αρμού σκυροδέτησης στη βάση του τοιχώματος χωρίς καμιά ειδική επεξεργασία του σκυροδέματος και χωρίς πρόσθετο οπλισμό. Στη βάση του δοκιμίου τοποθετήθηκαν οπλισμοί αναμονής τόσο στις κρυφοκολόνες όσο και στον κορμό. Έγινε η πρώτη σκυροδέτηση της βάσης και μετά 4 ημέρες σκυροδετήθηκε το κυρίως δοκίμιο, αφού μπήκαν οι οπλισμοί στη θέση τους. Έτσι, συγκρίνοντας τα δοκίμια MSW1 και MSW6 μεταξύ τους προσδιορίζεται η επιρροή του κακού τύπου αρμού σκυροδέτησης στην ανελαστική συμπεριφορά των τοιχωμάτων (Σχ. 51 - 56), (Πιν.1).

Υλικά

Για τη σκυροδέτηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο υψηλής αντοχής τύπου Portland. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θραυστά (λατομείου). Η ακριβής σύνθεση του σκυροδέματος ήταν:

| | |
|---|----------|
| Θραυστή άμμος λατομείου (διαμ. $0 \div 4\text{mm}$): | 100 kg. |
| Θραυστό αδρανές (ρύζι) λατομείου (διαμ. $4 \div 8\text{mm}$): | 50 kg. |
| Θραυστό αδρανές (γαρμύπλι) λατομείου (διαμ. $8 \div 16\text{mm}$): | 110 kg. |
| Τσιμέντο υψηλής αντοχής (τύπου Portland): | 50 kg. |
| Νερό: | 32.5 kg. |

Με την παραπάνω σύνθεση επιτεύχθηκε μέση θλιπτική αντοχή της τάξης των 24MPa στα δοκίμια που λήφθηκαν για αυτόν το σκοπό.

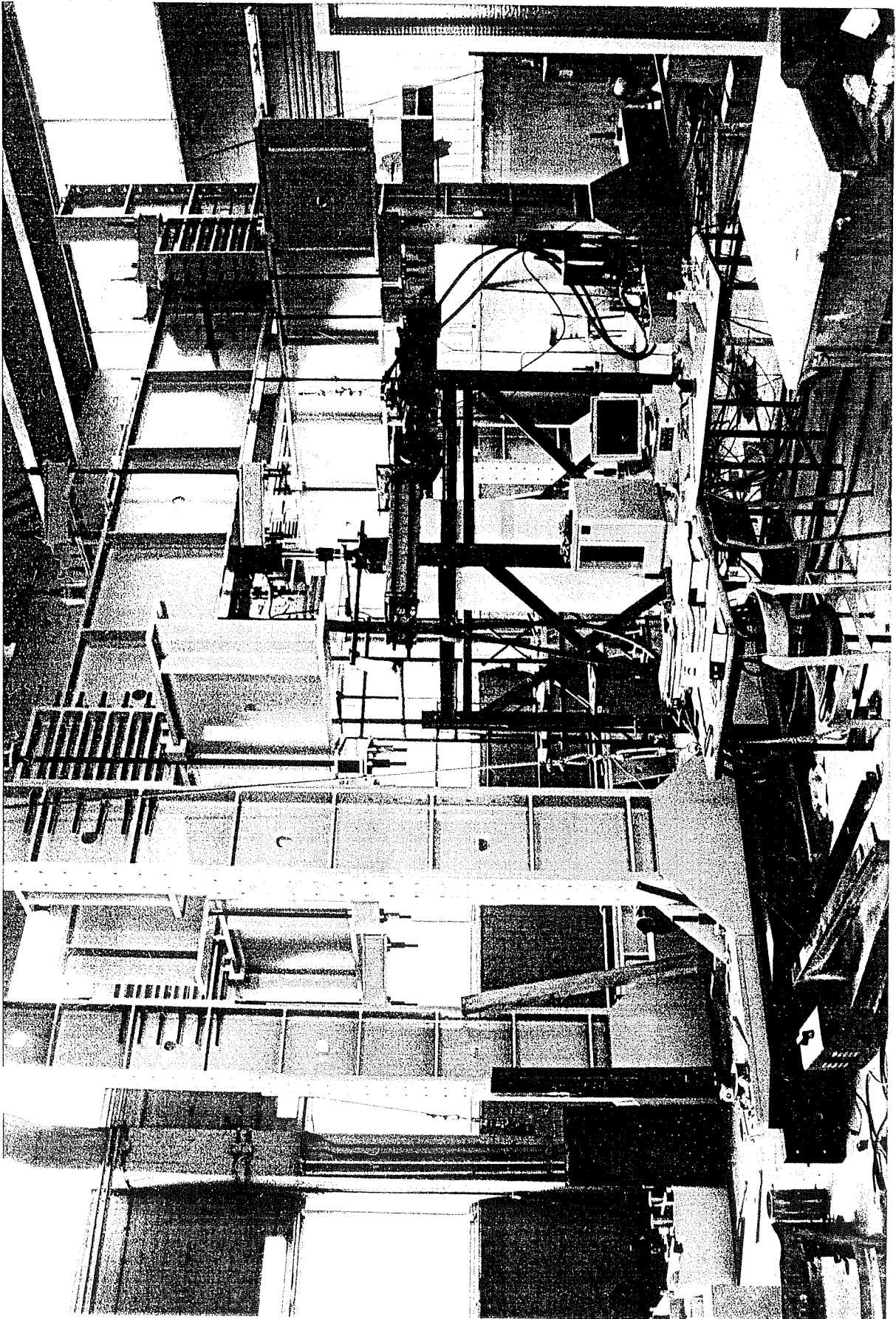
Χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με νευρώσεις, ποιότητας S500 για τον οπλισμό διαμέτρου 8 χιλιοστών με όριο διαρροής 585.5MPa και μέγιστη αντοχή 678.2MPa. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για τον οπλισμό κορμού και τους συνδετήρες είχε όριο διαρροής 575.0MPa και μέγιστη αντοχή 648.0MPa.

5.3. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ - ΟΡΓΑΝΑ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ [86].

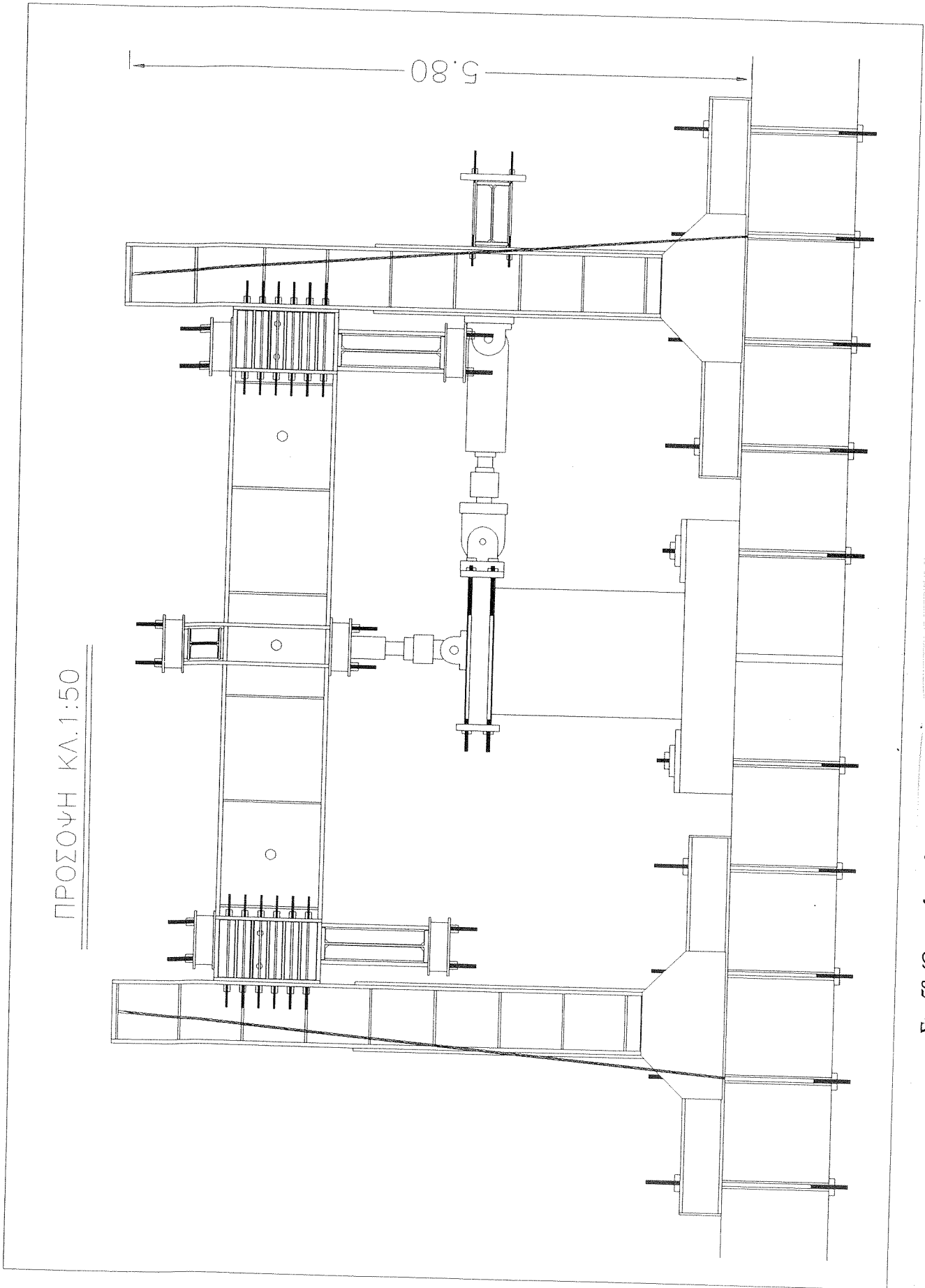
5.3.1. Πλαίσιο αντίδρασης

Τα πειράματα έγιναν στο Εργαστήριο Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ.. Χρησιμοποιήθηκε η αίθουσα δοκιμών που διαθέτει το εργαστήριο. Η αίθουσα δοκιμών διαστάσεων 14×17 μέτρων διαθέτει προεντεταμένο δάπεδο πάχους ενός μέτρου. Το δάπεδο συνδέεται ολόσωμα στο κάτω μέρος του με τοιχώματα πάχους εξήντα εκατοστών, τα οποία θεμελιώνονται στο έδαφος μέσω ισχυρής κοιτόστρωσης. Επίσης στην επιφάνεια του δαπέδου υπάρχει κανάβος οπών σε δύο διευθύνσεις με διάσταση κανάβου ένα μέτρο. Σε κάθε οπή υπάρχει αγκυρωμένος χαλύβδινος σωλήνας με μεταλλική φλάντζα στην αρχή και στο τέλος του.

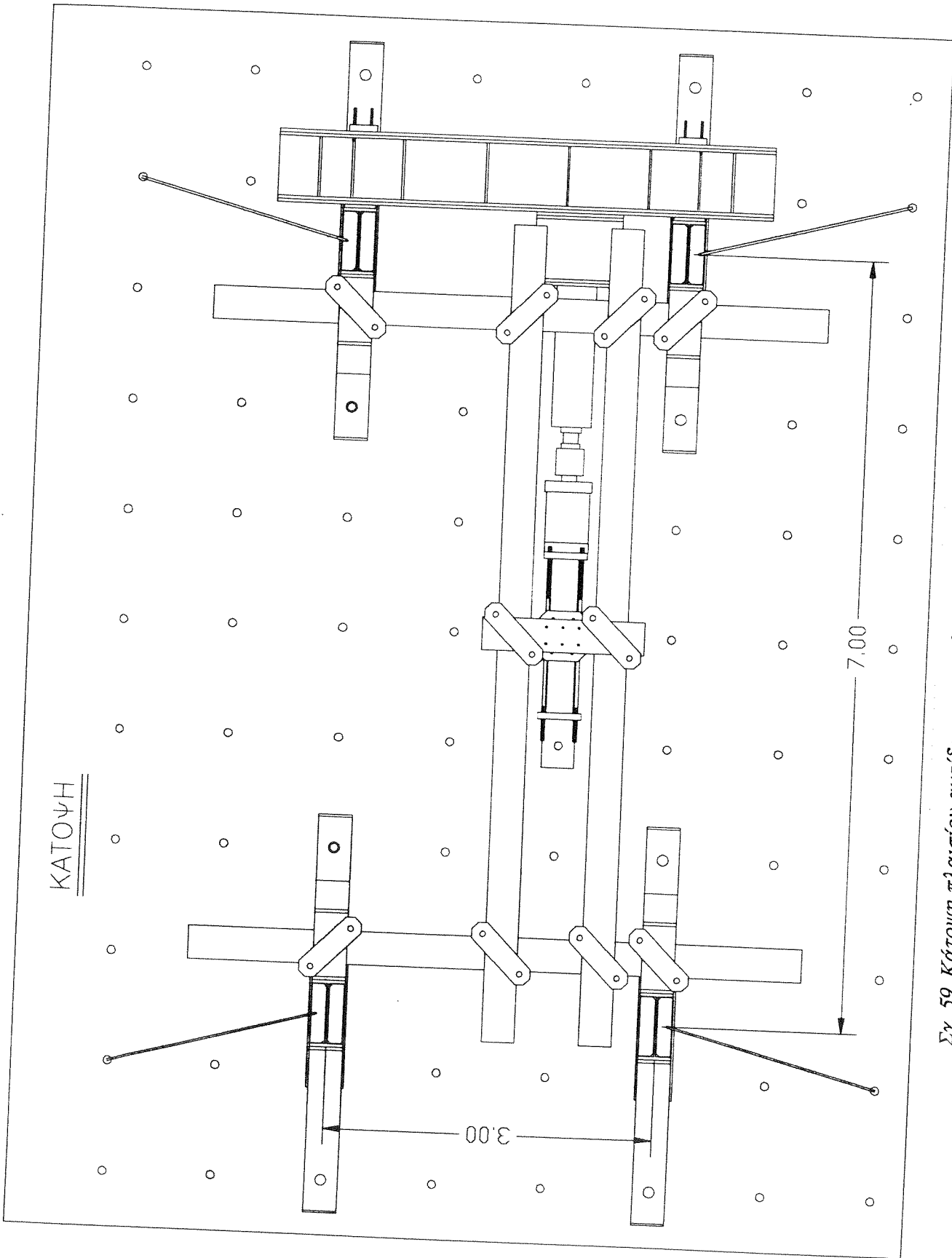
Για τη στήριξη των εμβόλων και την ανάληψη των κατακόρυφων και οριζόντιων δυνάμεων και ροπών που αναπτύσσονται κατά το πείραμα, μελετήθηκε και κατασκευάστηκε μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης. Την μελέτη και επίβλεψη του μεταλλικού πλαισίου έκαναν οι Γ. Πενέλης, Κ. Στυλιανίδης και Θ. Σαλονικιός. Το πλαίσιο σχεδιάστηκε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή και εύκολη η τροποποίησή του, όχι μόνο για τα παρόντα πειράματα αλλά και για μελλοντικές πειραματικές εργασίες. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα αποσύνδεσης, μετακίνησης και επανασύνδεσης των μελών του ανάλογα με τις διαστάσεις των δοκιμών και ανάλογα με τις δυνάμεις που αναμένεται να αναπτυχθούν. Ο φορέας του πλαισίου αποτελείται από τέσσερα υποστυλώματα όπως φαίνονται στα σχήματα 58 και 59. Τα υποστυλώματα στηρίζονται στο δάπεδο μέσω ειδικού μεταλλικού εδράνου σύνθετης διατομής. Τα έδρανα έχουν τέσσερις οπές ανά ένα μέτρο για την αγκύρωσή τους στο δάπεδο. Η αγκύρωση στο δάπεδο γίνεται με προεντεταμένους κοχλίες (της εταιρείας Diwidag) μήκους δύο μέτρων και ικανότητας ανάληψης δύναμης προέντασης 600KN (2400KN δύναμη αγκύρωσης ανά υποστύλωμα). Σε κάθε υποστύλωμα τοποθετείται πρόβολος μήκους ενός μέτρου ο οποίος συνδέεται με το υποστύλωμα μέσω δώδεκα



Φωτ. 1. Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης



Σχ. 58. Όψη πλαισίου αντίδρασης και διάταξης φόρτισης.



Σχ. 59. Κάτοψη πλαισίου αντίδρασης και διάταξης φόρτισης.

προεντεταμένων κοχλιών με δύναμη προέντασης 250KN (συνολικά 3000KN ανά πρόβολο). Από τους προβόλους αναρτώνται δοκοί, οι οποίες συνδέουν τους στύλους ανά δύο μεταξύ τους σχηματίζοντας δύο πλαίσια. Σε αυτές τις εγκάρσιες δοκούς εδράζονται δύο δοκοί, οι οποίες ενώνουν τα δύο πλαίσια μεταξύ τους. Εκτός από τη σύνδεση των δύο πλαισίων μεταξύ τους και τη στήριξη του κατακόρυφου εμβόλου, σκοπός αυτών των δοκών είναι να παραλάβουν τις αντιδράσεις που προκύπτουν από την επιβολή του αξονικού φορτίου και να τις μεταφέρουν στα υποστυλώματα και κατόπιν στο έδαφος. Οι συνδέσεις των δοκών μεταξύ τους και με τους προβόλους γίνονται μέσω δύο μεταλλικών προεντεταμένων κοχλιών ανά σύνδεση με δύναμη προέντασης 600KN ανά κοχλία (1200KN ανά σύνδεση). Για την ανάρτηση του εμβόλου επιβολής της οριζόντιας δύναμης και την παραλαβή και μεταφορά των αντίστοιχων αντιδράσεων χρησιμοποιείται οριζόντια δοκός η οποία στηρίζεται στα δύο υποστυλώματα του κάθε πλαισίου. Η σύνδεση της οριζόντιας δοκού με τα υποστυλώματα γίνεται επίσης μέσω προεντεταμένων κοχλιών με δύναμη προεντάσεως 250KN ανά κοχλία (500KN ανά σύνδεση). Όλες οι συνδέσεις γίνονται μέσω προεντεταμένης επαφής προκειμένου να υπάρχει ευελιξία στην τροποποίηση του πλαισίου. Επειδή τα έδρανα των υποστυλωμάτων δέχονται υψηλή τέμνουσα δύναμη κατά την επιβολή της οριζόντιας δύναμης φόρτισης των δοκιμίων, κατασκευάστηκαν ειδικοί αναστολείς ολίσθησης, οι οποίοι αίρουν τη διατμητική ολίσθηση του εδράνου, λειτουργώντας ως βλήτρα μέσα στην οπή του εδράνου και στην οπή του δαπέδου αντίδρασης (Σχ. 58,59), (Φωτ. 1).

5.3.2. Εγκατάσταση δοκιμίου

Τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν μαζί με το μπλόκ αγκύρωσης στη βάση τους και τη δύσκαμπτη κεφαλή επιβολής της φόρτισης. Η αγκύρωση του δοκιμίου στο δάπεδο αντίδρασης γινόταν μέσω προεντεταμένων κοχλιών με δύναμη προέντασης 400KN ανά κοχλία (800KN για το δοκίμιο), οι οποίοι συνέδεαν το μπλοκ αγκύρωσης του δοκιμίου με το εν λόγω δάπεδο. Επίσης για την άρση τυχούσας ολίσθησης ολόκληρου του δοκιμίου λόγω της οριζόντιας φόρτισης, χρησιμοποιήθηκαν αναστολείς ολίσθησης μεταξύ του δαπέδου και της βάσης αγκύρωσης του δοκιμίου. Για την επιβολή του οριζόντιου φορτίου κατασκευάστηκε σύστημα δύο δύσκαμπτων μεταλλικών πλακών με τέσσερις προεντεταμένους κοχλίες, το οποίο εφαρμόστηκε στην κεφαλή του δοκιμίου. Το έμβολο αγκυρώθηκε στη μία μεταλλική πλάκα μέσω προεντεταμένων κοχλιών, έτσι, ώστε η μεν ώθηση του δοκιμίου να γίνεται απευθείας, η δε έλξη να γίνεται μέσω της πίσω μεταλλικής πλάκας, η οποία συνδέεται με το έμβολο μέσω των τεσσάρων

κοχλιών και της μπροστά μεταλλικής πλάκας. Μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε, όλα τα πειράματα διεξήχθησαν χωρίς προβλήματα (Σχ. 58,59), (Φωτ. 1,2).

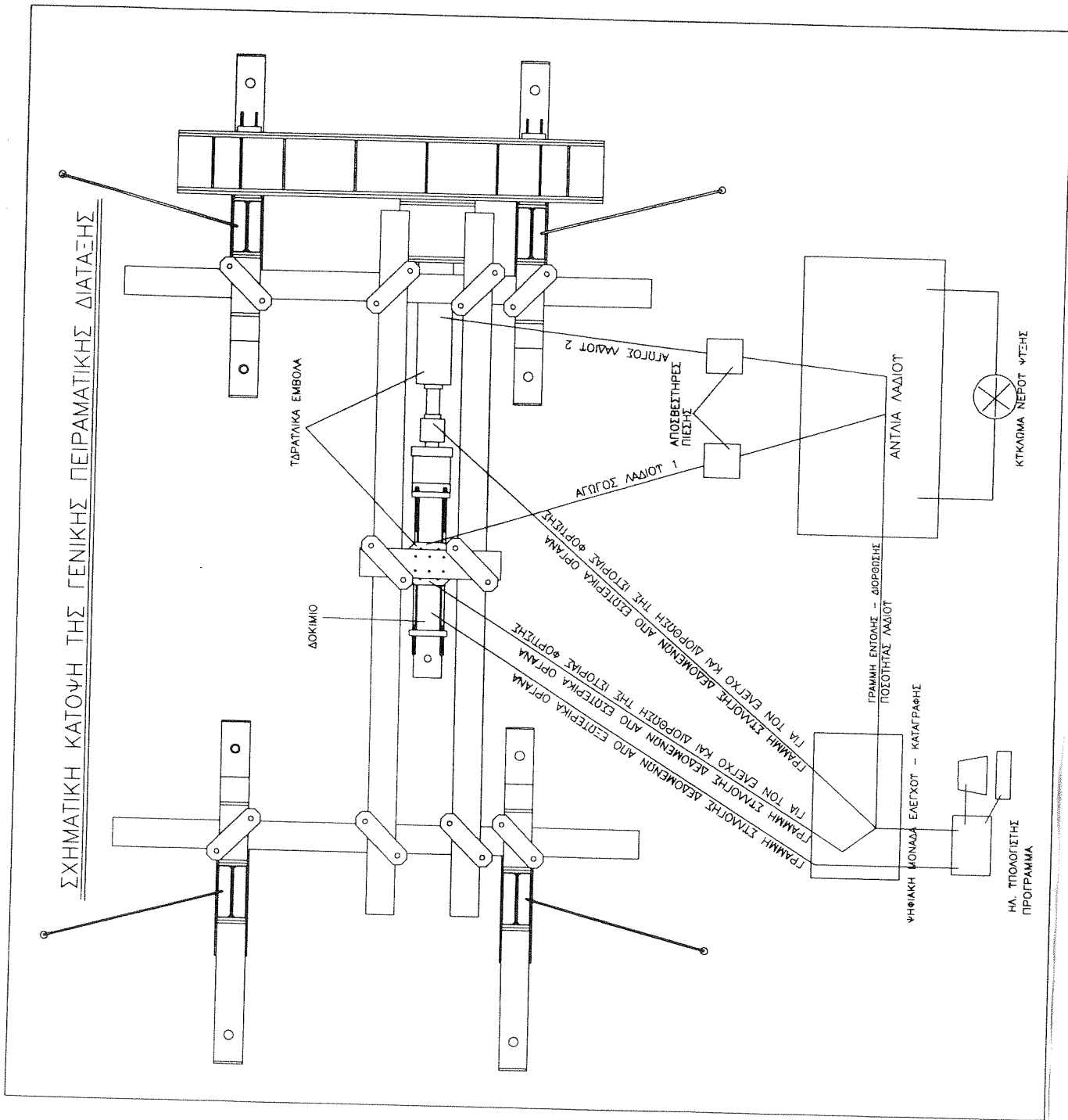
5.3.3. Διάταξη επιβολής φόρτισης [92]

Για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο έμβολα της M.T.S.. Η επιβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων έγινε με έμβολο διπλής ενέργειας, μονού πέρατος της σειράς 243. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι τύπου 243.60-01, με ικανότητα επιβολής θλιπτικού φορτίου 1013kN, ενώ η ικανότητα επιβολής του αντίστοιχου εφελκυστικού είναι 648kN. Το χρήσιμο εμβαδό διατομής του θαλάμου πίεσης λαδιού είναι 506.74cm^2 για το θάλαμο συσσώρευσης λαδιού κατά τη θλίψη, ενώ το αντίστοιχο εμβαδό για τον εφελκυσμό είναι 324.31cm^2 . Η συνολική χρήσιμη διαδρομή του εμβόλου είναι είκοσι ίντσες, δηλαδή 508mm ($\pm 254\text{mm}$). Το έμβολο είναι εφοδιασμένο με αισθητήρα δύναμης (Load cell) κοχλιωμένο στο μπροστά τμήμα του, ενώ εσωτερικά διαθέτει γραμμικό διαφορικό μετρητή μετατόπισης (LVDT).

Η επιβολή των κατακόρυφων φορτίων έγινε με έμβολο διπλής ενέργειας, διπλού πέρατος της σειράς 244. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει το όνομα 244.31, ικανότητα επιβολής θλιπτικού και εφελκυστικού φορτίου $\pm 250\text{kN}$. Το χρήσιμο εμβαδό διατομής του θαλάμου πίεσης λαδιού είναι 126.65cm^2 . Η συνολική χρήσιμη διαδρομή του εμβόλου είναι δώδεκα ίντσες δηλαδή 304.8mm ($\pm 152.4\text{mm}$). Το έμβολο είναι εφοδιασμένο με αισθητήρα δύναμης (Load cell) κοχλιωμένο στο μπροστά τμήμα του, ενώ εσωτερικά διαθέτει γραμμικό διαφορικό μετρητή μετατόπισης.

Η εισαγωγή και εξαγωγή του λαδιού προς και από τα έμβολα γίνεται με ελαστικούς αγωγούς υψηλής πίεσης. Πριν την εισαγωγή του λαδιού στο έμβολο παρεμβάλλεται σερβοβαλβίδα, η οποία ρυθμίζει την παροχή του λαδιού στο θάλαμο του εμβόλου. Οι σερβοβαλβίδες είναι της M.T.S. της σειράς 252 και συγκεκριμένα στο μικρό έμβολο υπάρχει ο τύπος 252.33A με παροχетеυτικότητα 227l/m, ενώ στο μικρό έμβολο υπάρχει ο τύπος 252.25C με παροχетеυτικότητα 56l/m.

Στους αγωγούς μεταξύ των σερβοβαλβίδων και της υψηλής πίεσεως αντλίας λαδιού παρεμβάλλονται αποσβεστήρες και ρυθμιστές πίεσης, οι οποίοι επιπλέον φιλτράρουν το λάδι δεύτερη φορά. Η κύρια λειτουργία τους είναι να απορροφούν λάδι κατά την ανάπτυξη υψηλής πίεσης και να το επιστρέφουν σε περιόδους χαμηλής πίεσης. Η αντλία λαδιού είναι τύπου 506.62 της M.T.S. και έχει ικανότητα ανάπτυξης πίεσης 21MPa και παροχетеυτικότητας 284l/min. Για την ψύξη του λαδιού της αντλίας κατασκευάστηκε υπόγειο σύστημα εν σειρά συνδεδεμένων δεξαμενών (αναπτυγμένων



Σχ. 60. Σχηματική άποψη της διάταξης φόρτισης καθώς και των διατάξεων προγραμματισμού - καταγραφής, άντλησης λαδιού πίεσης και νερού ψύξης

οριζοντίως) με κατάλληλη αντλία για την παροχή του απαιτούμενου νερού ψύξης.

Τα έμβολα, οι σερβοβαλβίδες, οι αποσβεστήρες πίεσης καθώς και η αντλία λαδιού συνδέονται με ψηφιακή μονάδα ελέγχου προκειμένου να επιβάλλονται, να ελέγχονται και να διορθώνονται οι εντολές που δίνονται για εκτέλεση μετατόπισης ή επιβολής δύναμης στα έμβολα μέσω του αντίστοιχου λογισμικού. Έτσι η εντολή επιβολής δύναμης έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του εμβόλου με παράλληλο πυκνό έλεγχο (ανά μικρά χρονικά διαστήματα) της ένδειξης του ενσωματωμένου στο έμβολο μετρητή δύναμης. Με την προσέγγιση της εντολής το πρόγραμμα στέλνει σήμα για μικρή αύξηση ή μείωση της δύναμης ώσπου να επιτευχθεί η προκαθορισθείσα ακρίβεια στο συγκεκριμένο βήμα, οπότε και εκτελείται το επόμενο βήμα. Με όμοιο τρόπο επιβάλλονται και οι μετατοπίσεις οι οποίες μετρούνται ελέγχονται και διορθώνονται με ενσωματωμένο σε κάθε έμβολο μετρητή μετατοπίσεων. Επίσης μέσω της παραπάνω ψηφιακής μονάδας γίνεται η συλλογή και αποθήκευση των μετρήσεων εξωτερικών οργάνων, τα οποία έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν και ως όργανα ελέγχου του πειράματος.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι το πακέτο προγραμμάτων TestStar της M.T.S., το οποίο απαιτεί λειτουργικό περιβάλλον O.S.2 . Μέσω του προγράμματος (TestWare application program) καθορίζονται η ιστορία φόρτισης, ο τρόπος επιβολής της φόρτισης (μέσω ελεγχόμενων μετατοπίσεων ή μέσω ελεγχόμενων δυνάμεων), η επιθυμητή ακρίβεια (σε δύο στάδια πέρα από τα οποία γίνεται είτε απλή επισήμανση είτε διακοπή του πειράματος είτε κλείσιμο όλου του συστήματος και αναίρεση της πίεσης), οι μετρήσεις πέρα από τις οποίες γίνεται ο τερματισμός του πειράματος, τα κανάλια ελέγχου και καταγραφής (controller definition program) καθώς επίσης οι χρήστες και οι αντίστοιχοι κωδικοί πρόσβασης (system administration program) (Σχ. 60), (Φωτ. 2).

5.3.4. Ιστορία φόρτισης

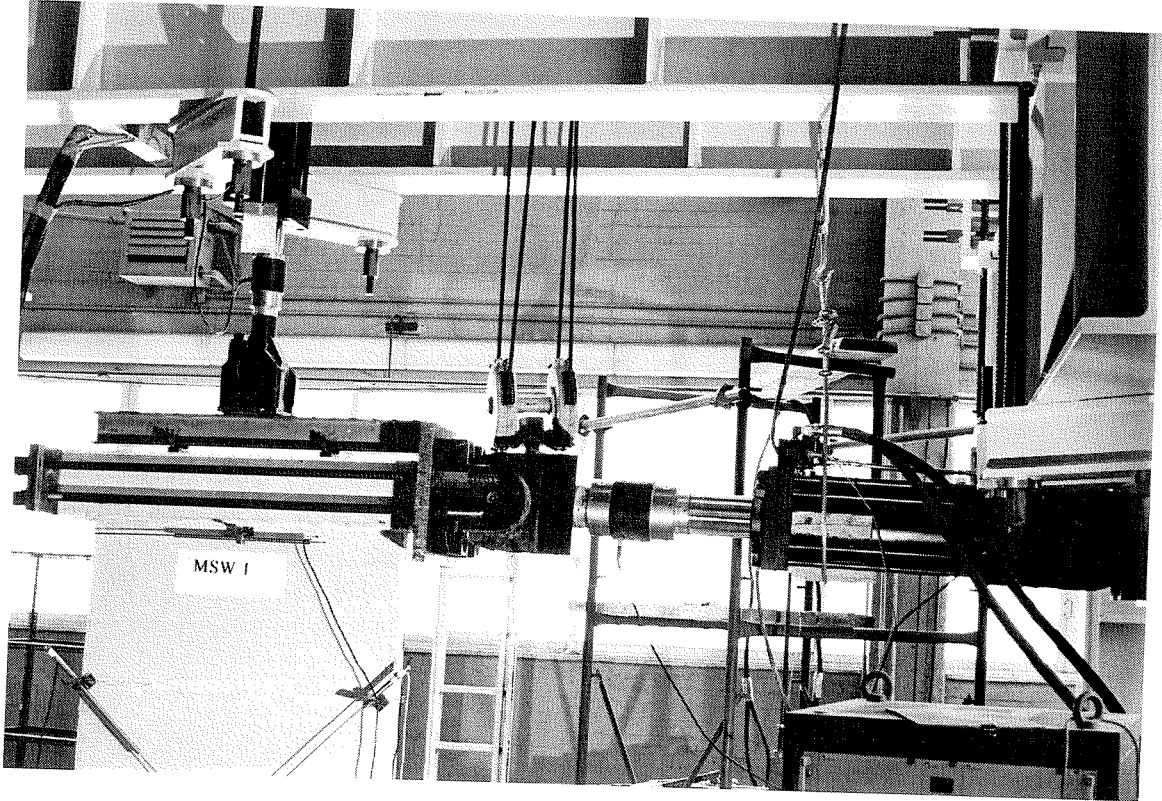
Αξονική φόρτιση

Στα δοκίμια που επιβλήθηκε αξονική φόρτιση, επιλέχθηκε η κύρια παράμετρος ελέγχου του κατακόρυφου εμβόλου να είναι η δύναμη. Η παραπάνω επιλογή έγινε προκειμένου η δύναμη να διατηρείται σταθερή καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, ανεξάρτητα από τη θέση και την παραμόρφωση του δοκιμίου και της κεφαλής του. Έτσι επιλέχθηκε η τιμή $N = 0.07A_c f_c$ για τα δοκίμια LSW3 και MSW3. Το έμβολο επιβολής της κατακόρυφης δύναμης έπαιρνε ή απέβαλλε λάδι, τόσο ώστε η αξονική δύναμη που έδειχνε ο μετρητής δύναμής του να διατηρείται στην αρχική

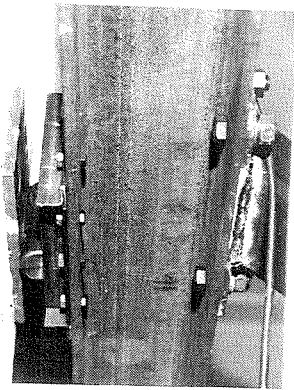
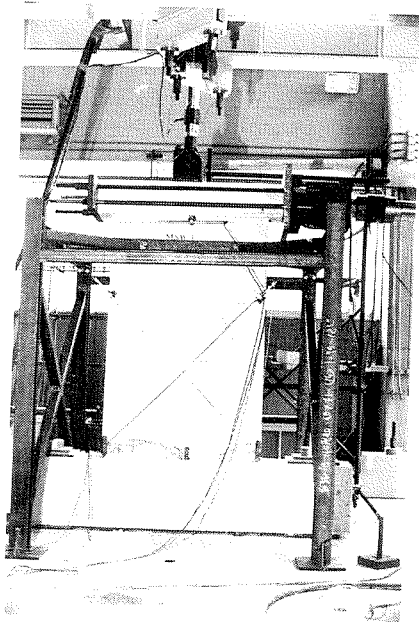
προκαθορισμένη τιμή.

Οριζόντια φόρτιση [86]

Οι κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμική διέγερση της βάσης τους καταπονούνται σε ένταση η οποία είναι ανάλογη της επιτάχυνσης της σεισμικής διέγερσης και της κατανομής και μεγέθους της μάζας της κατασκευής. Κατά τις αλλαγές της φοράς της σεισμικής κίνησης η βάση της κατασκευής σε πολύ μικρό χρόνο μηδενίζει την ταχύτητά της και την αναπτύσσει ξανά με αντίθετη φορά. Αποτέλεσμα αυτής της κίνησης είναι να αναπτύσσονται αδρανειακές παραμορφώσεις στην ανωδομή κατά την προσπάθειά της να διατηρήσει την προηγούμενη παραμορφωσιακή της κατάσταση. Αποτέλεσμα της παραπάνω αδρανειακής παραμόρφωσης είναι να αναπτύσσεται ένταση στα δομικά στοιχεία της κατασκευής επιπλέον της έντασης από τα κατακόρυφα φορτία. Από τη θεώρηση των δυνατών τρόπων ταλάντωσης των πλαισιακών κατασκευών που υπόκεινται σε σεισμική διέγερση της βάσης τους, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή συμμετοχή του κάθε τρόπου ταλάντωσης, βγαίνει το συμπέρασμα ότι μια αξιόπιστη προσομοίωση της παραμόρφωσης της ανωδομής της κατασκευής υπό σεισμικά φορτία προκύπτει από τη θεώρηση οριζοντίων καθ' ύψος κατανεμημένων δυνάμεων στις στάθμες των ορόφων. Η ένταση που προκύπτει στα δομικά στοιχεία της κατασκευής από αυτήν τη φόρτιση προσομοιώνεται ικανοποιητικά με την θεώρηση των τεμνουσών δυνάμεων στα σημεία μηδενισμού των ροπών. Έτσι, για τον πειραματικό έλεγχο δομικών στοιχείων και δομικών υποσυνόλων από πολύ νωρίς σε όλα τα εργαστήρια Οπλισμένου Σκυροδέματος, εφαρμόζεται διεθνώς, η μέθοδος της επιβολής οριζόντιας δύναμης στην κεφαλή των δοκιμίων. Η παραπάνω μέθοδος δίνει ρηγμάτωση όμοια με αυτή που προκαλεί ο σεισμός στα δομικά στοιχεία των κατασκευών, αλλά με τον περιορισμό ότι αυτή εμφανίζεται στη μία πλευρά του δοκιμίου. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη για την επιβολή ανακυκλιζόμενης οριζόντιας φόρτισης στην κεφαλή των δοκιμίων, ενέργεια που βελτίωσε την εικόνα ρηγμάτωσης των δοκιμίων και είχε σαν αποτέλεσμα την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής σεισμικής καταπόνησης των δομικών στοιχείων. Επίσης μέσω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης προσδιορίστηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνιστώσες της παραμόρφωσης των δοκιμίων καθώς με την μονότονη φόρτιση υποβαθμίζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις. Έτσι, κατά τον πειραματικό έλεγχο των δοκιμίων εφαρμόζεται ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση στην κορυφή. Η φόρτιση επιβάλλεται με ελεγχόμενες μετατοπίσεις. Μετά την πτώση της αντοχής δεν είναι δυνατό να επιβληθεί φόρτιση με ελεγχόμενες δυνάμεις καθώς με αυτόν τον τρόπο μετρούνται οι δυνάμεις



Φωτ. 2. Διάταξη επιβολής οριζόντιου και κατακόρυφου φορτίου στη κεφαλή των δοκιμίων (η χαλύβδινη δοκός δεν χρησιμοποιήθηκε).



Φωτ. 3. Πλαίσιο εγκάρσιας αντιστήριξης και λεπτομέρεια κύλισης.

αλλά οι αντίστοιχες μετατοπίσεις προκύπτουν πολύ υψηλές, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μη ρεαλιστικά αποτελέσματα ιδιαίτερα κατά την καταγραφή της ανελαστικής συμπεριφοράς του δοκιμίου. Έτσι, προκειμένου να διερευνηθεί η απόκριση του κάθε δοκιμίου σε σεισμική φόρτιση, επιβάλλονται προκαθορισμένες, ανακυκλιζόμενες, οριζόντιες, αύξουσες μετατοπίσεις στην κεφαλή του. Στο κανάλι που εφαρμόζει και ελέγχει την οριζόντια δύναμη επιλέχθηκε η κύρια παράμετρος ελέγχου να είναι η μετατόπιση. Έτσι, δόθηκαν προκαθορισμένες μετατοπίσεις στο οριζόντιο έμβολο, οι οποίες εκτελέστηκαν μέχρι την πτώση της αντοχής του δοκιμίου κάτω από το 50% της μέγιστης αναπτυσσόμενης. Το οριζόντιο έμβολο εκτελεί αρχικά τρεις απλούς κύκλους με εύρος $\pm 2\text{mm}$, $\pm 4\text{mm}$, $\pm 6\text{mm}$, μετά εκτελεί τριπλούς κύκλους αυξανόμενους ανά 2mm σε κάθε τριάδα μέχρι τον κύκλο $\pm 16\text{mm}$ και μετά εκτελεί τριπλούς κύκλους αυξανόμενους ανά 4mm σε κάθε τριάδα μέχρι, όπως αναφέραμε, η αντοχή του δοκιμίου να πέσει κάτω από το 50% της αντίστοιχης μέγιστης.

5.3.5. Μετρήσεις

Για την επιβολή των οριζόντιων και κατακόρυφων δυνάμεων χρησιμοποιήθηκαν τα δύο έμβολα της M.T.S. που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα οποία έχουν ενσωματωμένους μετρητές ελέγχου-καταγραφής δύναμης και μετατόπισης. Οι παραπάνω μετρήσεις αποθηκεύονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Εκτός από τους παραπάνω μετρητές χρησιμοποιήθηκαν L.V.D.T., τα οποία τοποθετήθηκαν στις εξής θέσεις πάνω στα δοκίμια (Φωτ. 5).

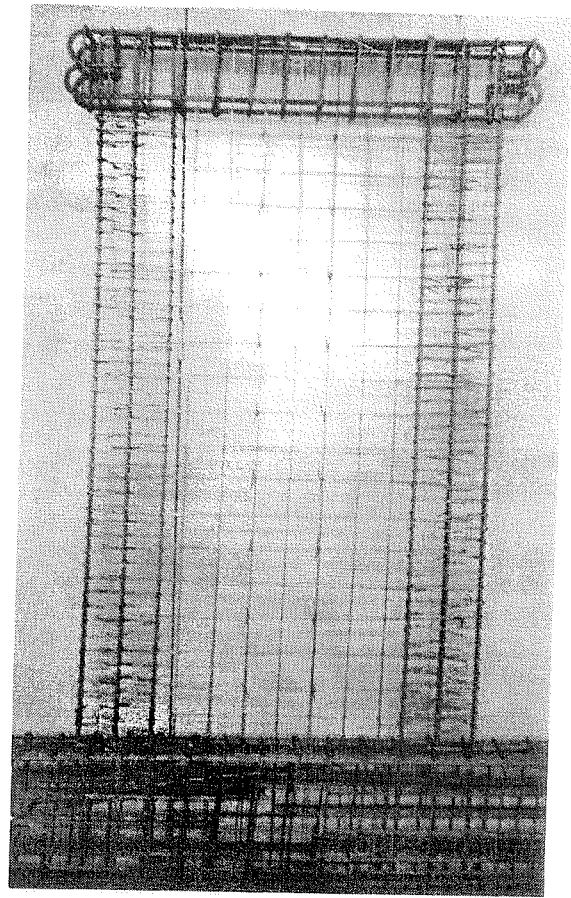
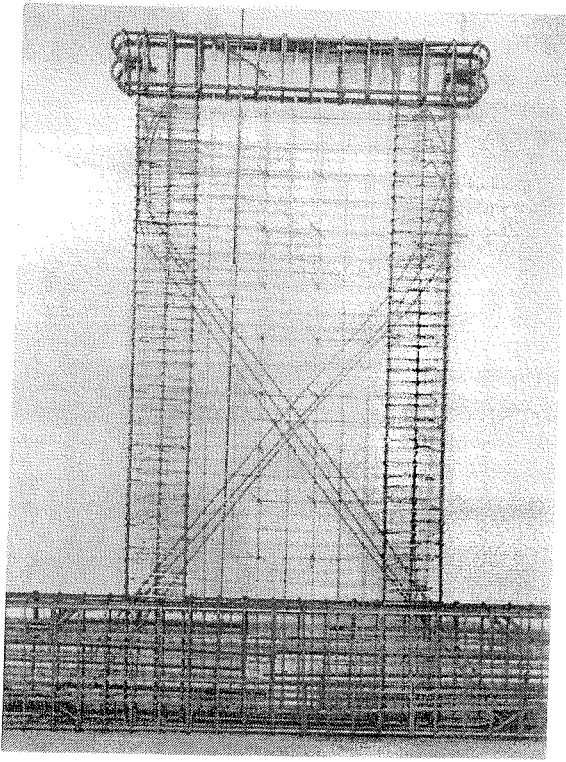
Τοποθετήθηκε ένα L.V.D.T. στην κεφαλή κάθε δοκιμίου, για τη μέτρηση των μετατοπίσεων της κεφαλής. Ένα δεύτερο L.V.D.T. τοποθετήθηκε σε απόσταση ίση με $2b_w \cong 20\text{cm}$ από τη βάση του δοκιμίου, για τη μέτρηση των ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου. Δύο όργανα τοποθετήθηκαν στις κρυφοκολώνες των δοκιμίων και για ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου L_w , για τη μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων των ακραίων περισφιγμένων περιοχών υπό σύνθλιψη και κάμψη. Τέλος, δύο όργανα τοποθετήθηκαν υπό γωνία 45° και από την κάτω θέση της κρυφοκολόνας (σε σταθερό σημείο) μέχρι το άνω μέρος της απέναντι κρυφοκολόνας σε ύψος ίσο με L_w .

Από τις απευθείας μετρήσεις των οργάνων αυτών έγιναν τα διαγράμματα της τέμνουσας δύναμης και παραμόρφωσης που μετρήθηκε σε κάθε θέση, καθώς επίσης και τα διαγράμματα των επιμέρους συνιστωσών της συνολικής μετακίνησης, όπως είναι οι καμπτικές παραμορφώσεις, οι διατμητικές παραμορφώσεις και οι παραμορφώσεις ολίσθησης μετά από την απαιτούμενη επεξεργασία. Τα L.V.D.T. ήταν

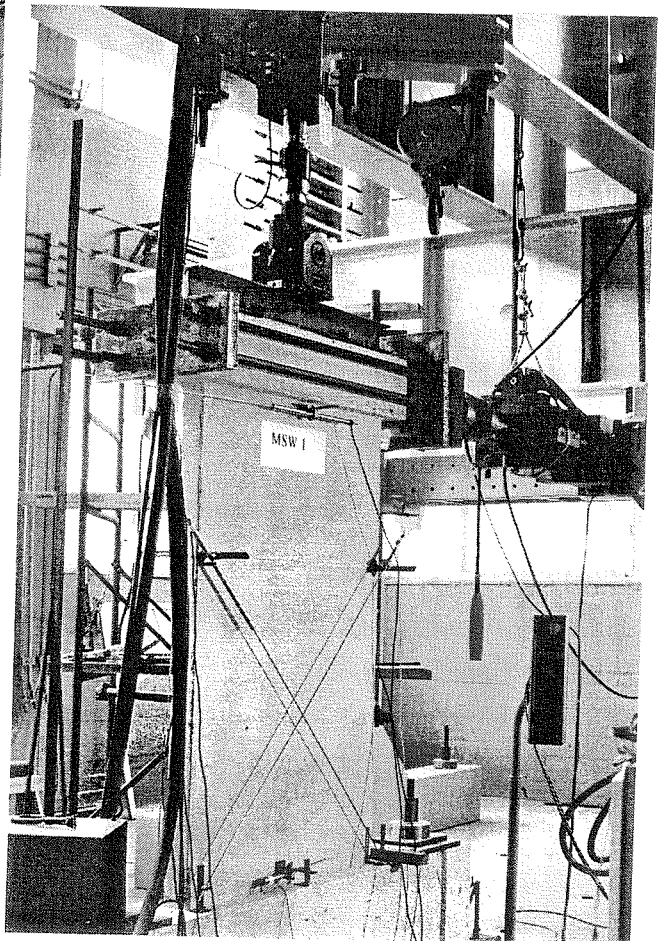
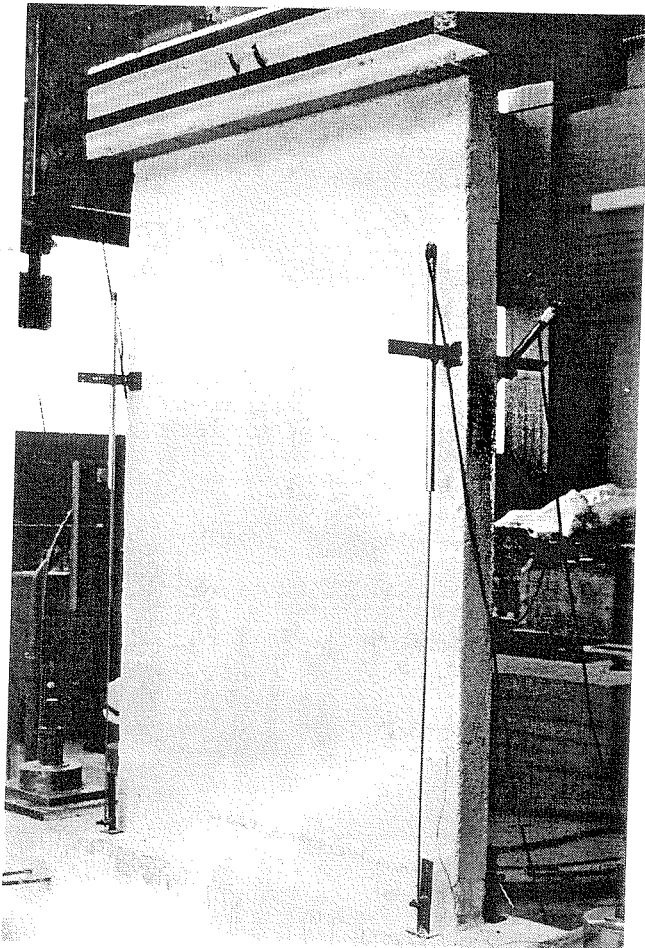
της εταιρείας Shaevitz και ο τύπος τους ήταν HR-DC των $\pm 15V$.

Εκτίμηση καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων [89]

Από τις καταγραφές των οργάνων που τοποθετήθηκαν στα δοκίμια προέκυψαν οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις σε κάθε θέση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός των επιμέρους παραμορφώσεων, το άθροισμα των οποίων να δίνει τη μετατόπιση που καταγράφηκε στην κορυφή. Για αυτόν τον σκοπό θεωρήθηκαν τρεις κύριες παραμορφώσεις. Η μετατόπιση στην κορυφή που οφείλεται στην καμπτική παραμόρφωση του δοκιμίου. Η διατμητική παραμόρφωση του κορμού του τοιχώματος. Οι διατμητικές ολισθήσεις του δοκιμίου στα καμπτικά ρήγματα για ύψος ίσο με 2.0 φορές το πάχος του τοιχείου. Η μέτρηση της παραπάνω διατμητικής ολίσθησης στη βάση του δοκιμίου γίνεται απευθείας με την τοποθέτηση LVDT σε αυτή τη θέση. Έτσι, μένει να προσδιοριστεί είτε η διατμητική παραμόρφωση στον κορμό, οπότε η καμπτική προκύπτει ως η διαφορά των δύο παραπάνω από τις συνολικές μετατοπίσεις, είτε η καμπτική παραμόρφωση, οπότε η διατμητική προκύπτει ως η διαφορά των δύο άλλων παραμορφώσεων από τις συνολικές. Με τον τρόπο που τοποθετήθηκαν τα όργανα στο δοκίμιο είναι δυνατό να προσδιορισθούν οι καμπτικές και οι διατμητικές παραμορφώσεις. Το άθροισμά τους δίνει τις συνολικές παραμορφώσεις στην κορυφή. Οι παραπάνω μετρήσεις αφορούν τις παραμορφώσεις και τις μετατοπίσεις σε ένα ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα μεταξύ των δοκιμίων με λόγο όψης 1 και 1.5. Η οριζόντια μετατόπιση ένεκα κάμψης, σε ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου, προκύπτει από το άθροισμα των παραμορφώσεων των οργάνων που τοποθετήθηκαν στις κρυφοκολόνες. Η διατμητική παραμόρφωση του κορμού του τοιχώματος προκύπτει σαν το ημίάθροισμα των ενδείξεων των διαγώνιων οργάνων ανοιγμένων οριζοντίως, από τις οποίες αφαιρούνται οι αντίστοιχες καμπτικές. Για τον υπολογισμό των επιμέρους παραμορφώσεων, παράλληλα με την παραπάνω μεθοδολογία, χρησιμοποιούνται και διαμορφώνονται κατάλληλα οι αλγόριθμοι άλλων ερευνητών [41], [42], [89] προκειμένου να προσδιοριστούν οι επιμέρους παραμορφώσεις κατά το δυνατό πιο αξιόπιστα.

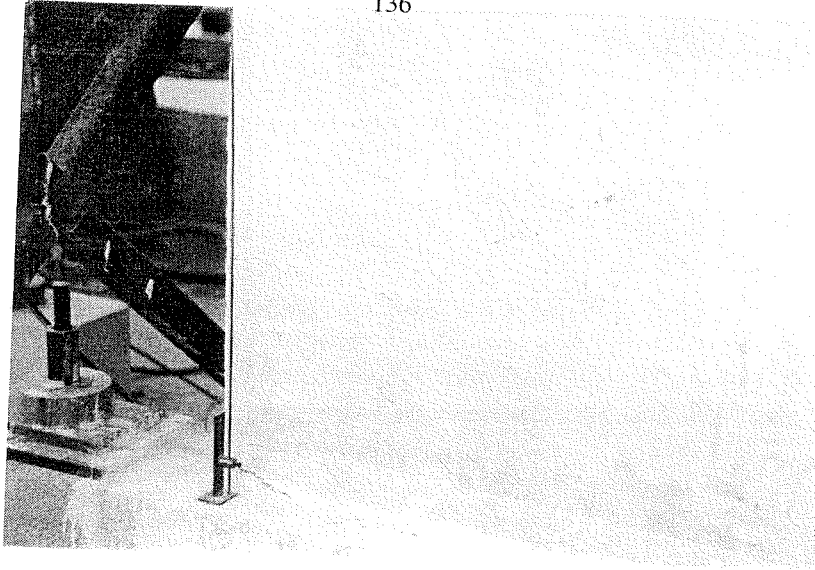


Φωτ. 4. Οπλισμοί τυπικών δοκιμίων (MSW5, MSW2, MSW3).

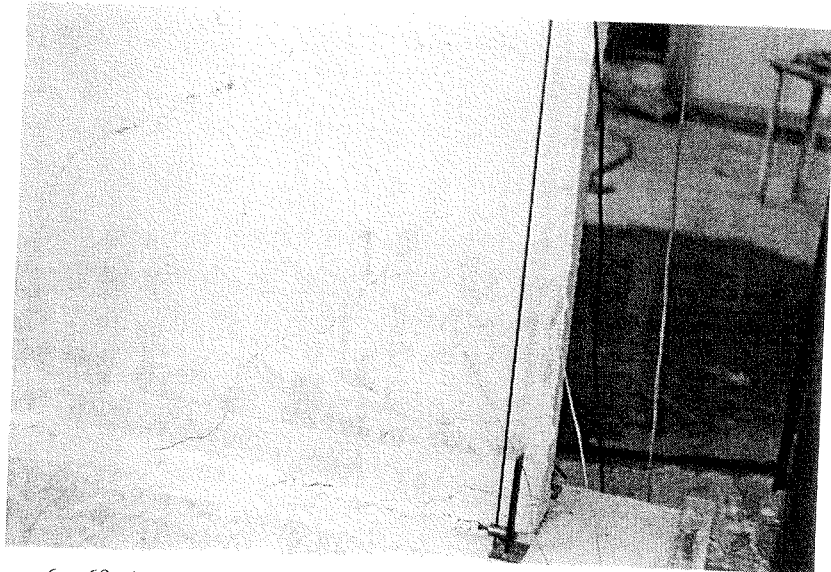


Φωτ. 5. Διάταξη των μετρητών παραμόρφωσης και μετατόπισης (L.V.T.D.'s).

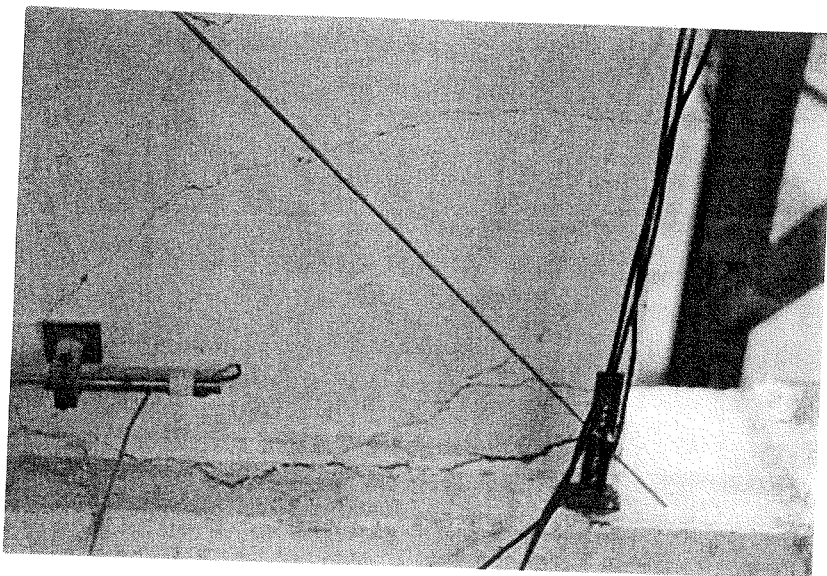
(6α)



(6β)



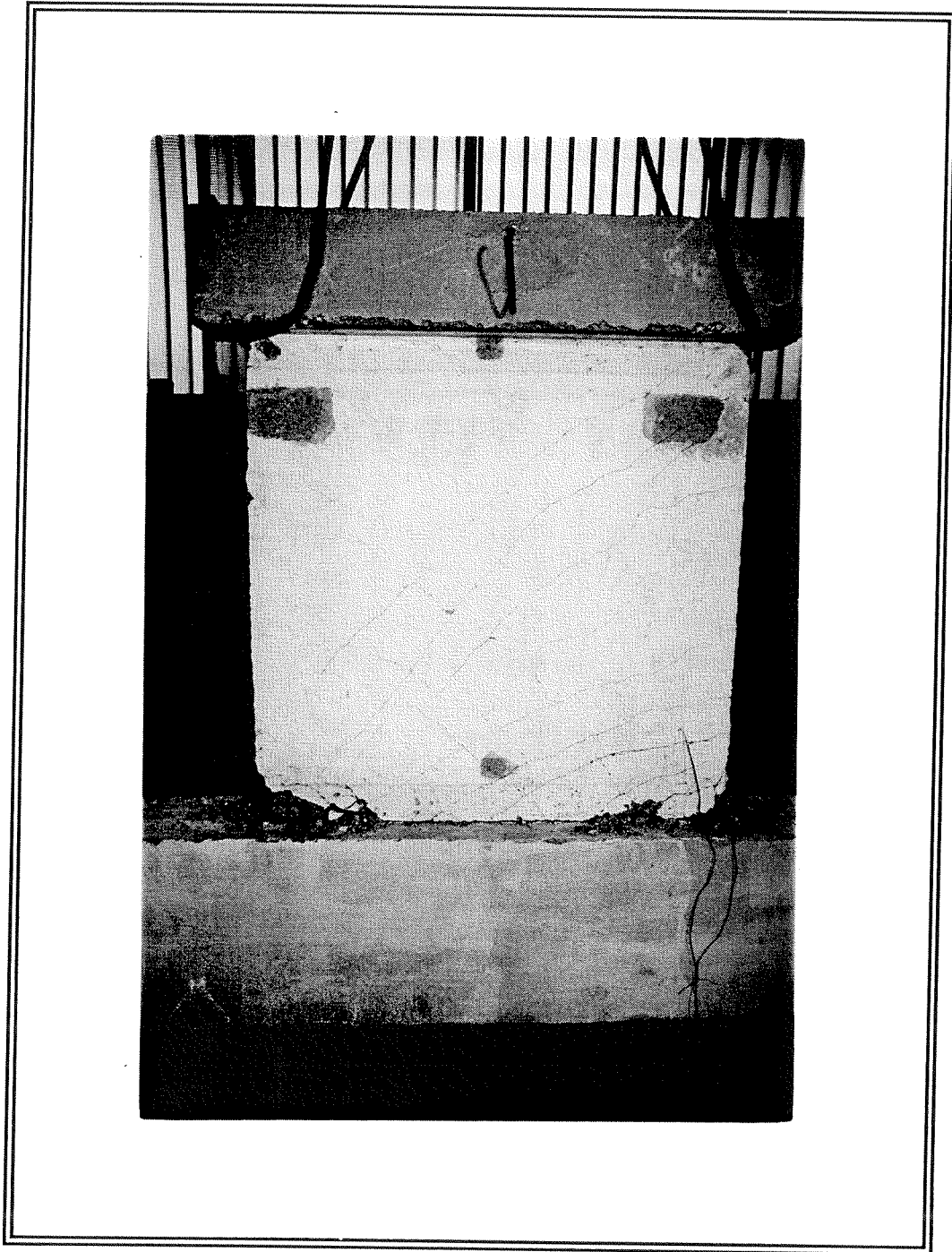
Φωτ. 6α, 6β. Δημιουργία καμπτικών και διατμητικών ρηγμάτων στα άκρα του δοκιμίου MSW1.



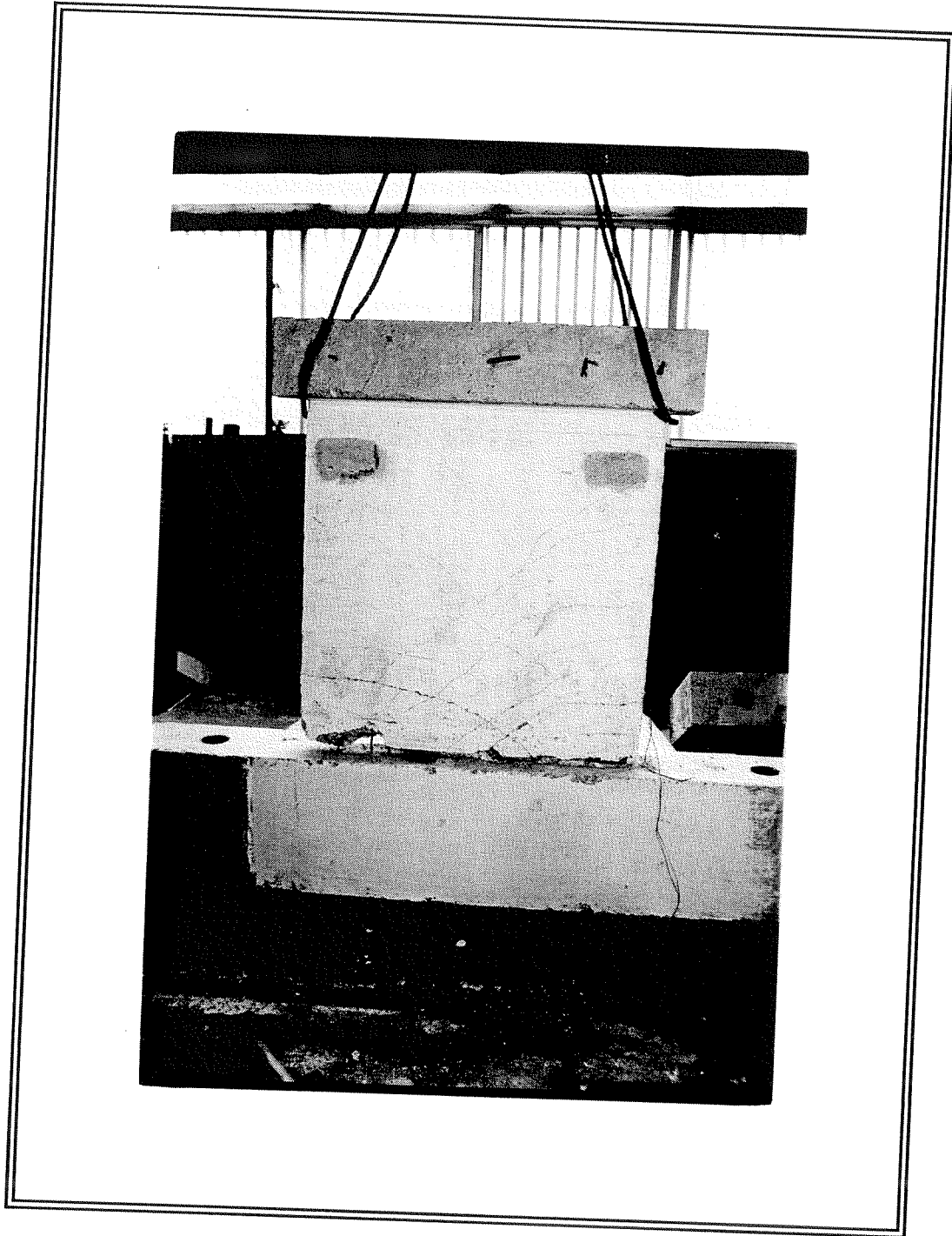
Φωτ. 7. Διεύρυνση καμπτικού ρήγματος στη βάση του δοκιμίου MSW1.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

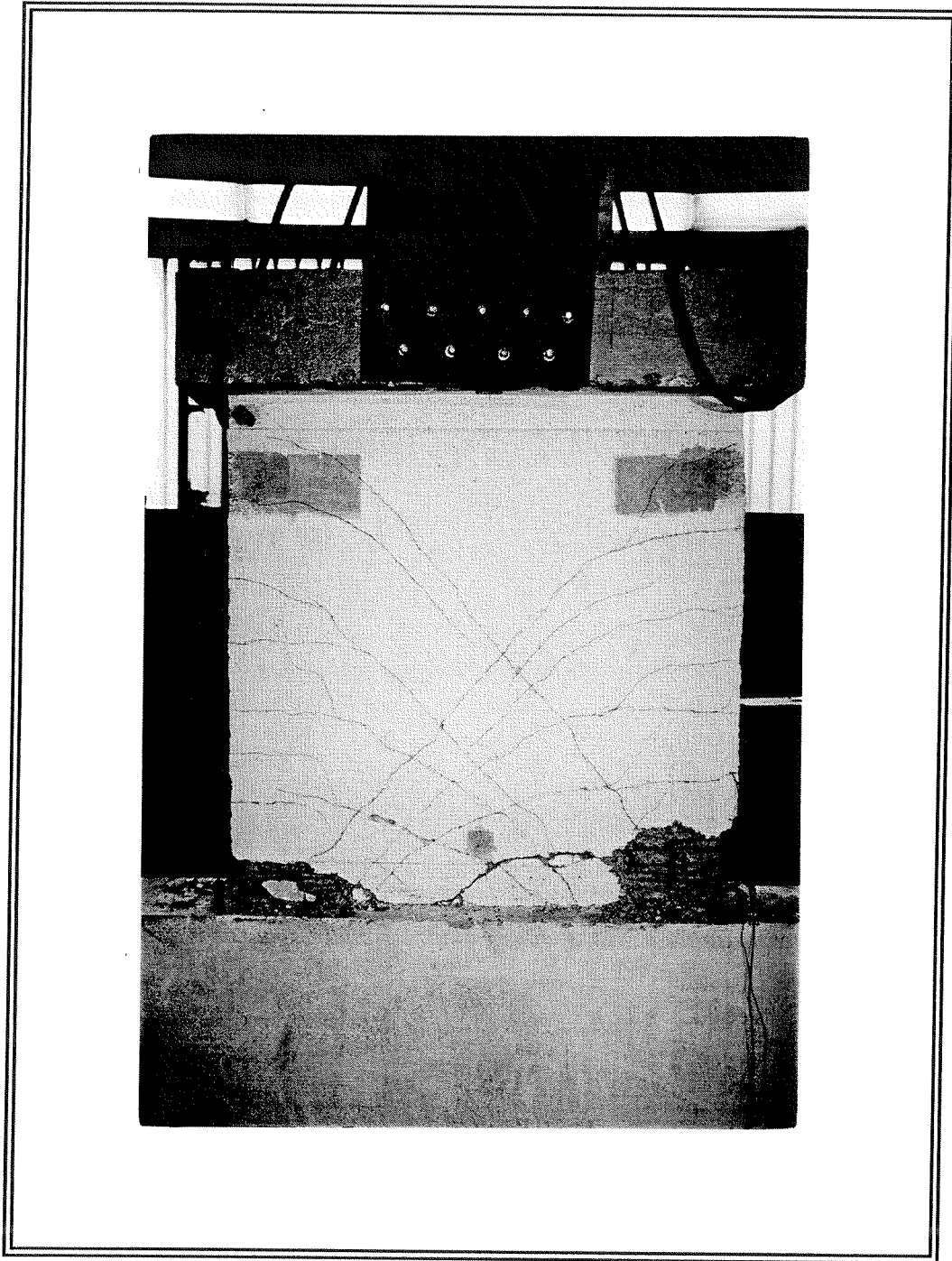
6.1. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ



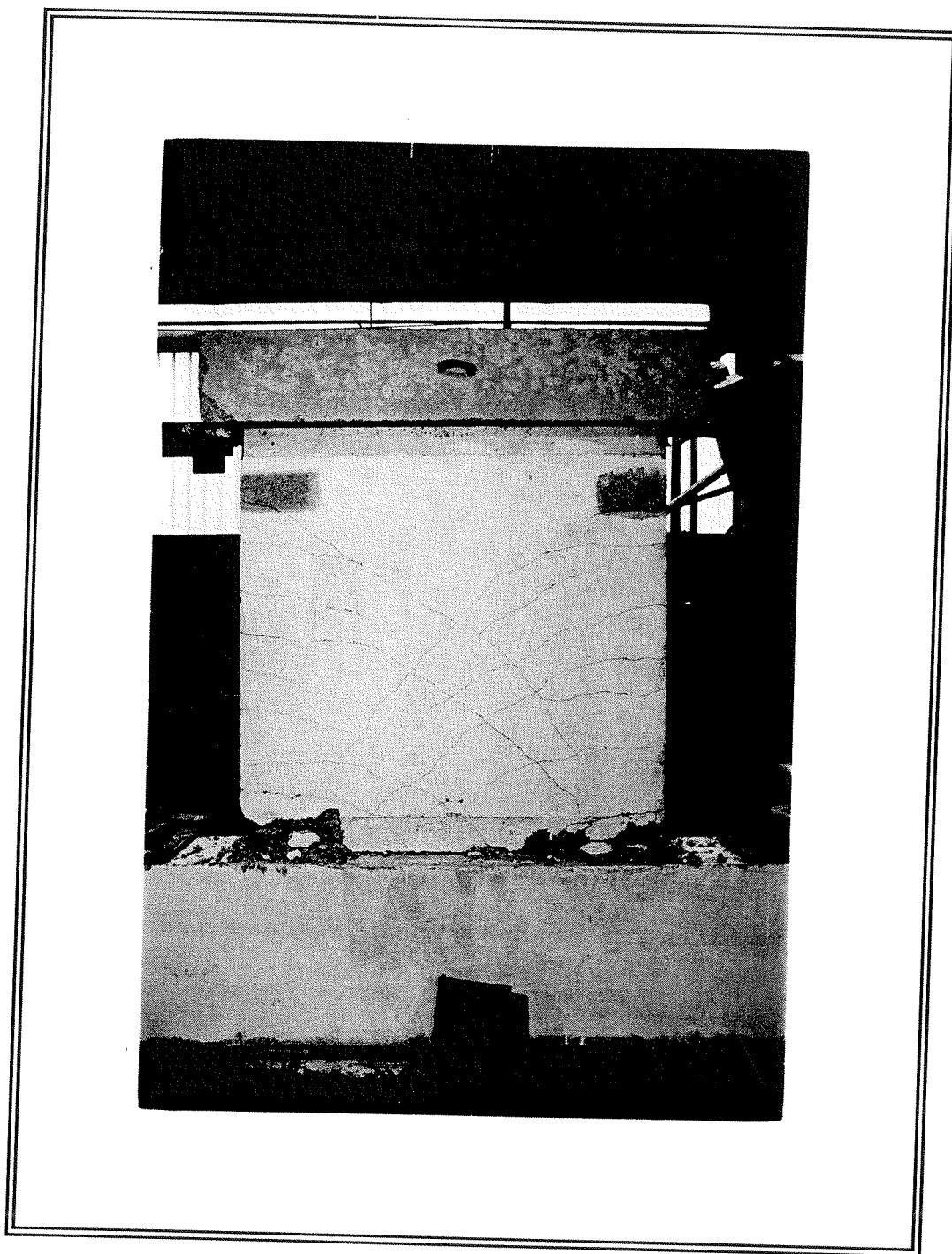
Φωτ. 11. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου LSW1



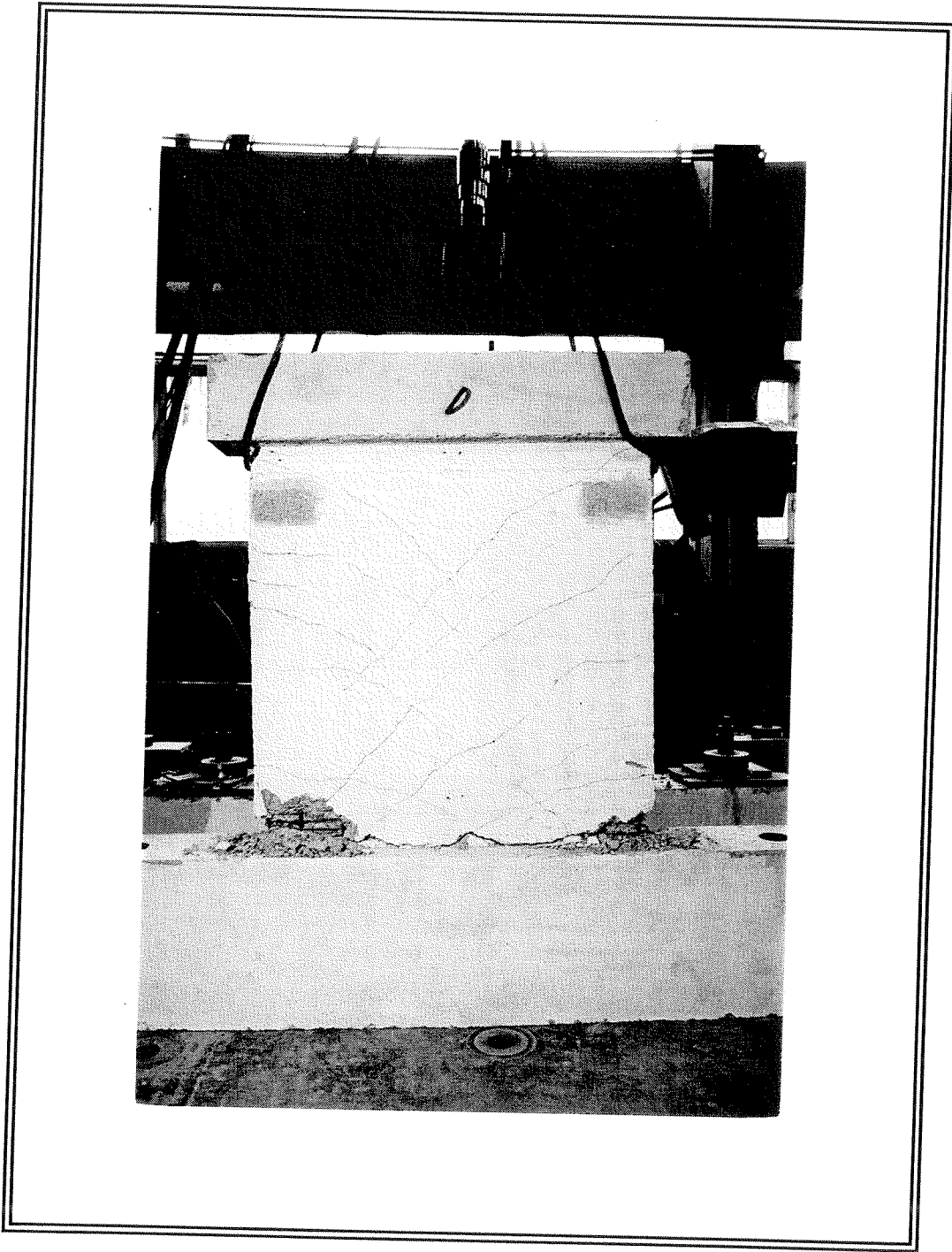
Φωτ. 12. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου LSW2



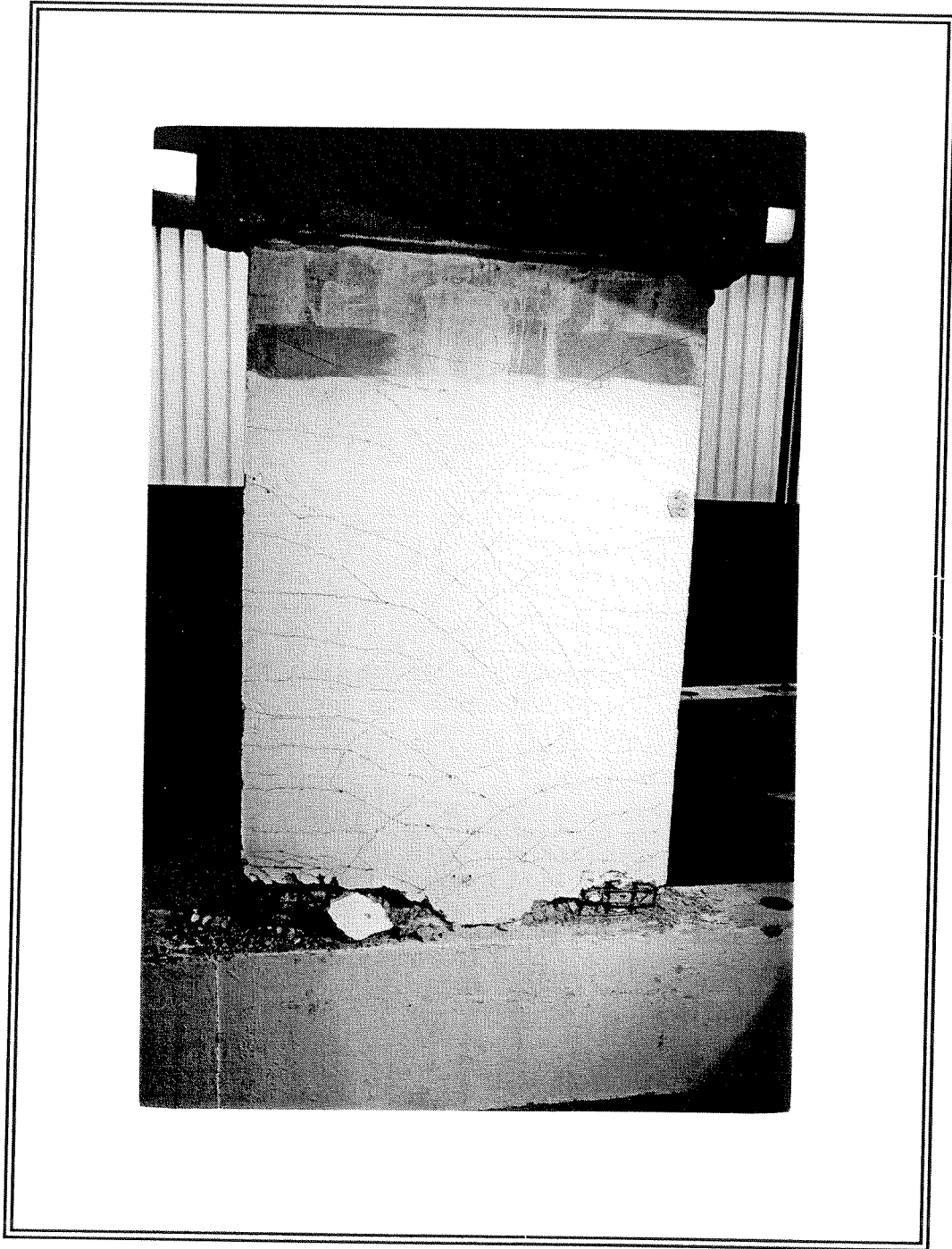
Φωτ. 13. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου LSW3



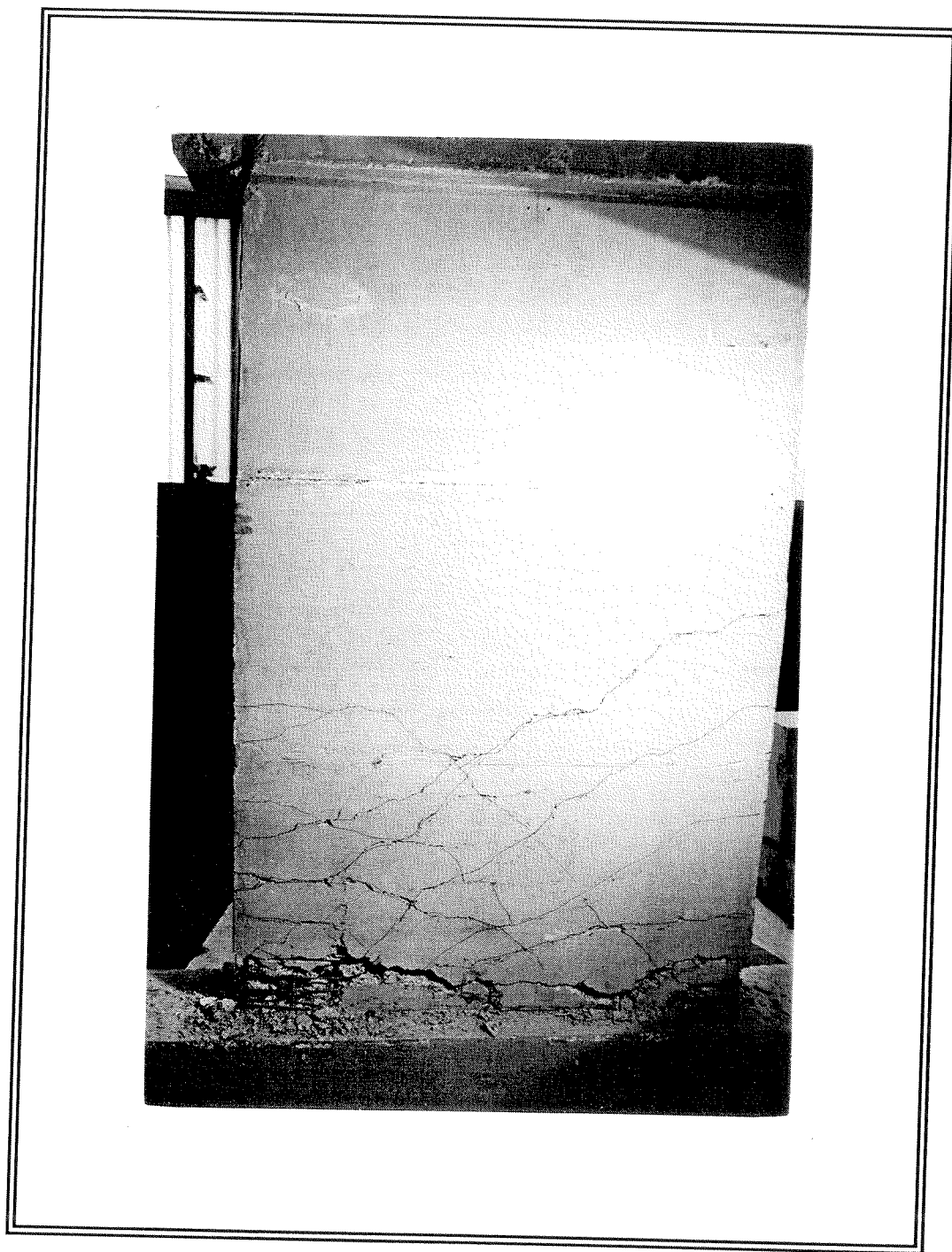
Φωτ. 14. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου LSW4



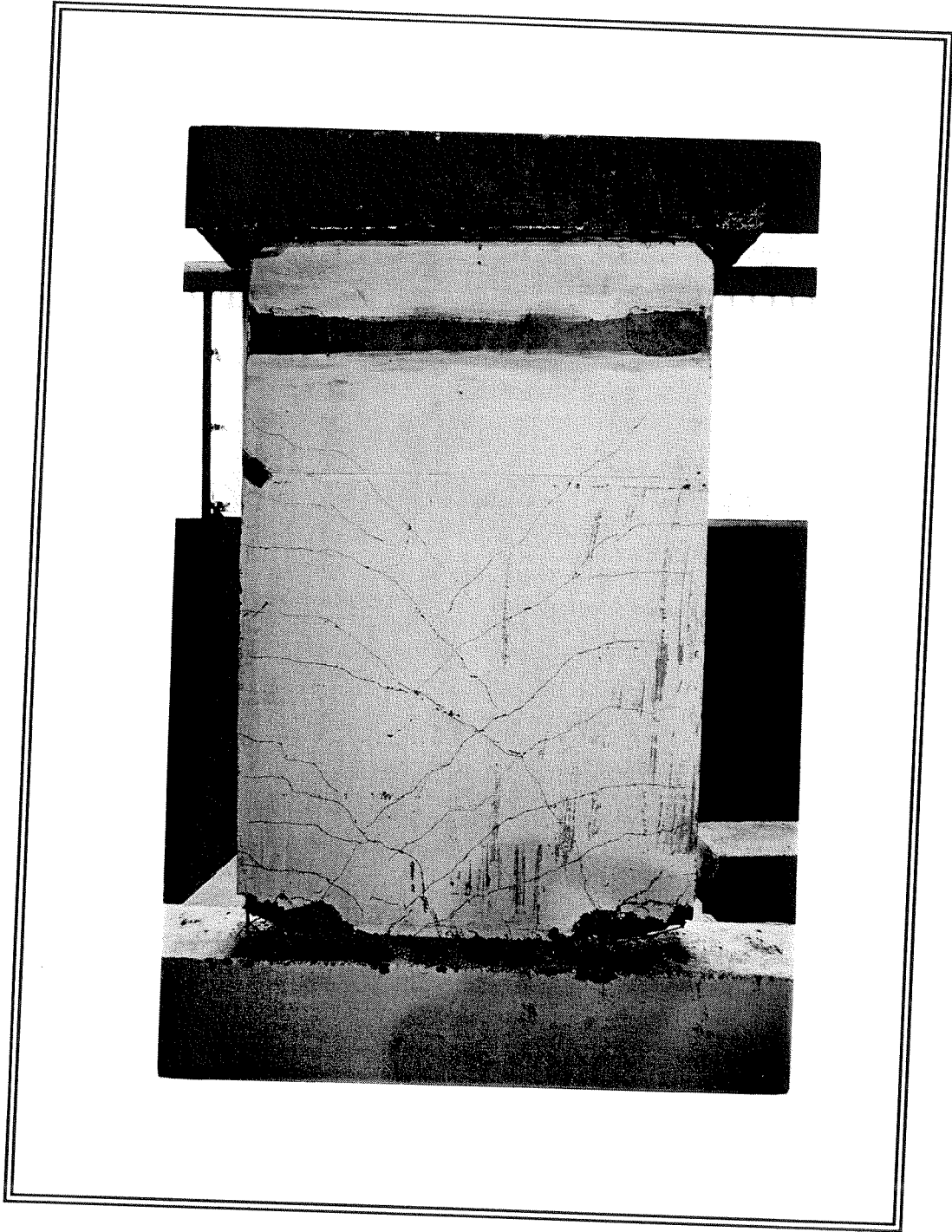
Φωτ. 15. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου LSW5



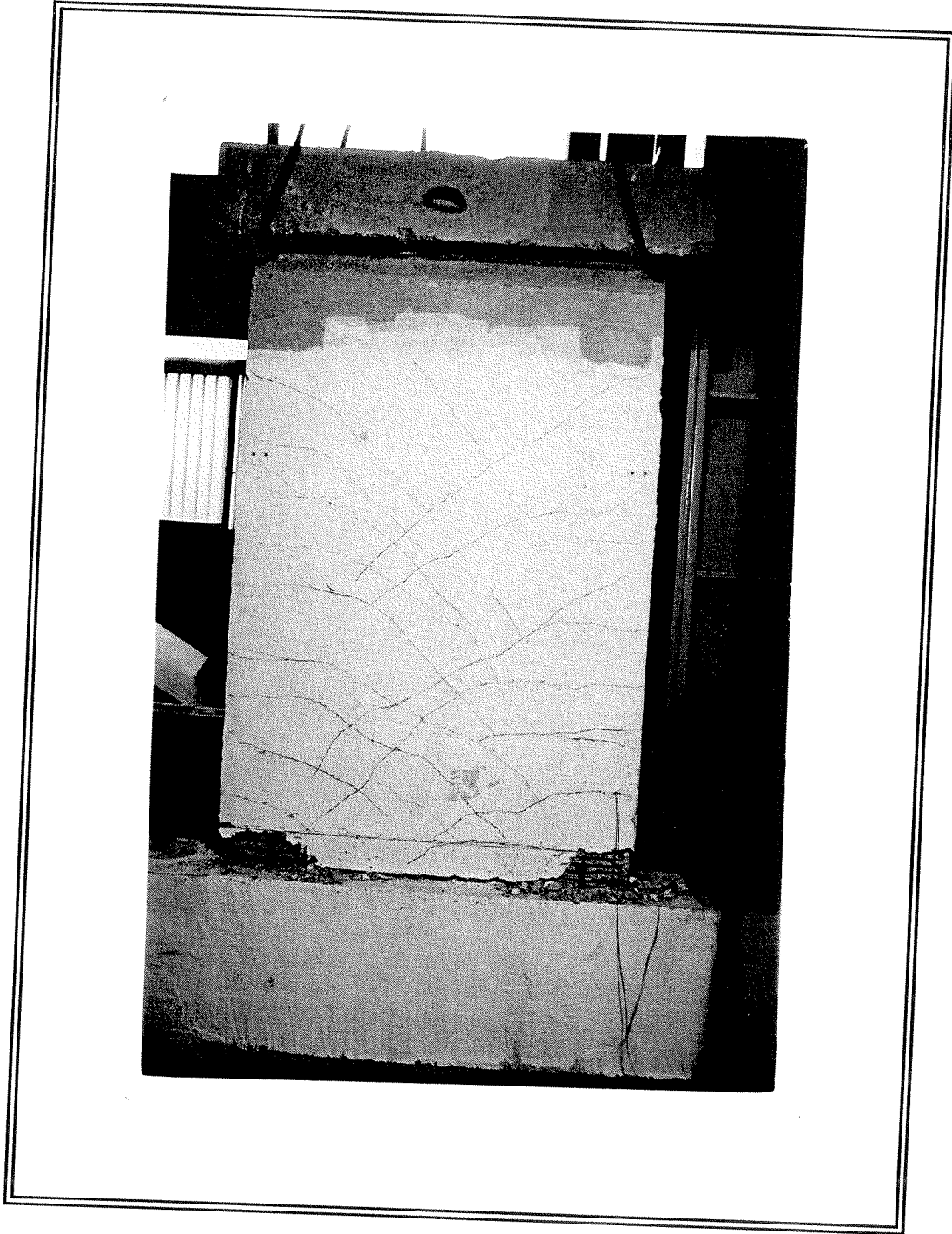
Φωτ. 16. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου MSWI



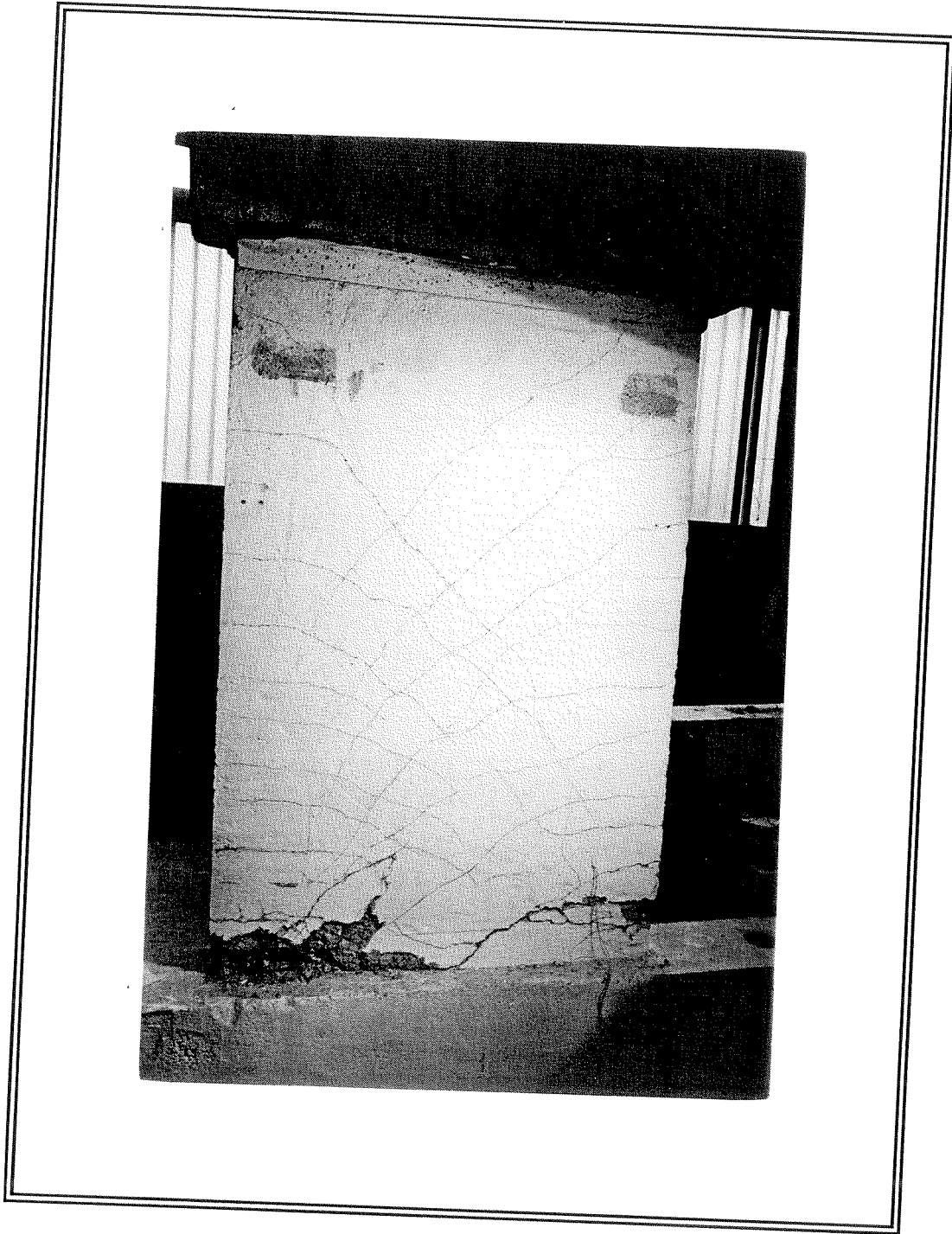
Φωτ. 17. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου MSW2



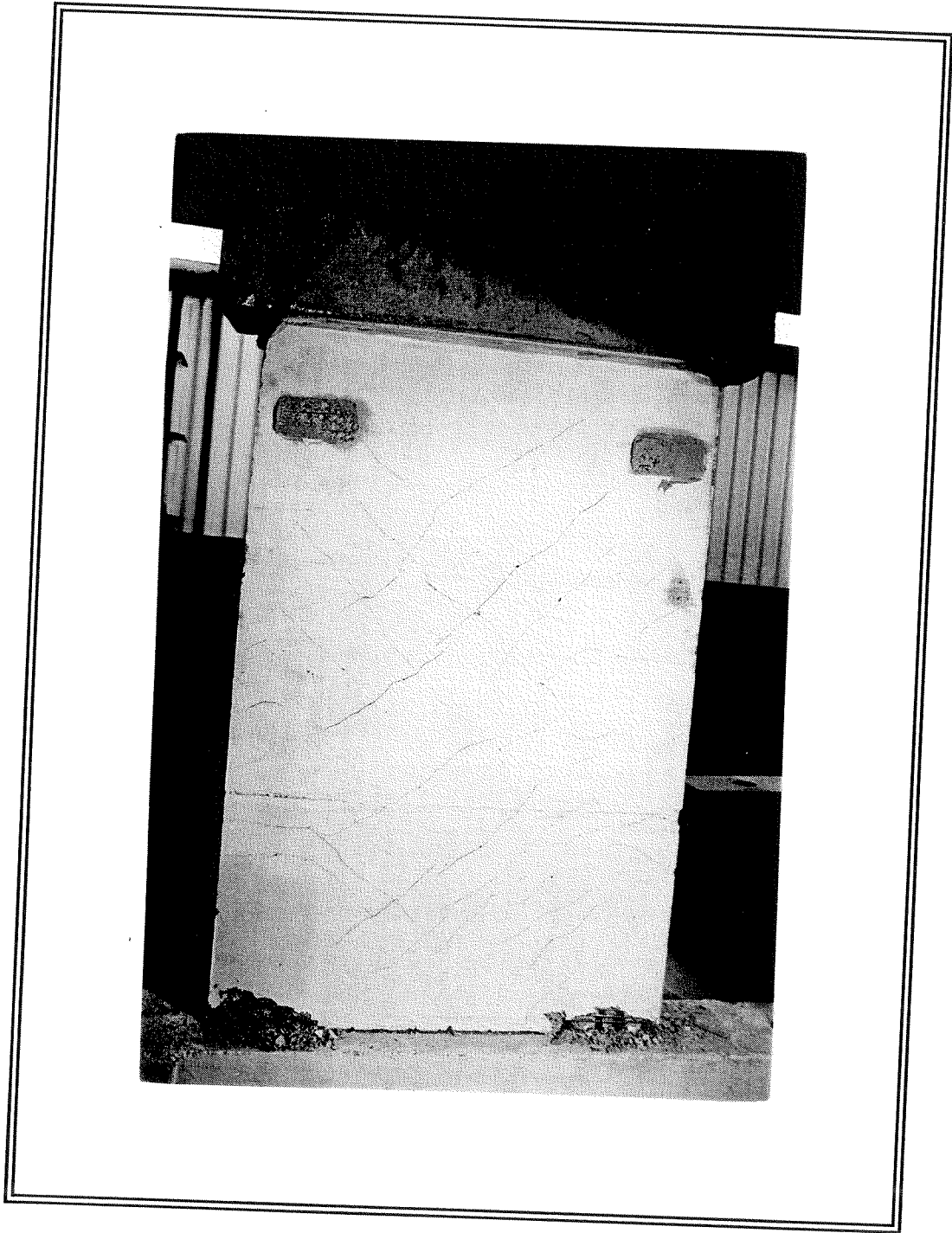
Φωτ. 18. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου MSW3



Φωτ. 19. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου MSW4



Φωτ. 20. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου MSW5



Φωτ. 21. Τελική μορφή αστοχίας δοκιμίου MSW6

6.2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στα δοκίμια της σειράς LSW εμφανίστηκαν αρχικά τριχοειδή καμπτικά ρήγματα για τέμνουσα της τάξης των 120 KN, ενώ στον τρίτο κύκλο για τέμνουσα της τάξης των 190 KN εμφανίστηκαν κύρια διατμητικά ρήγματα. Τα διατμητικά ρήγματα άρχισαν να διευρύνονται μέχρι του σημείου που άρχισε να εφελκύεται έντονα η ακραία περισφιγμένη περιοχή ένεκα κάμψης και εμφανίστηκαν κύρια καμπτικά ρήγματα εφελκυσμού μέχρι του ύψους του $(0.3 \div 0.4)h_w$ στα δοκίμια LSW1, LSW2 και LSW5. Το παραπάνω φαινόμενο εξηγείται από το γεγονός ότι το δοκίμιο LSW1 είχε ισχυρό καμπτικό οπλισμό στις κυροφοκολόνες, έτσι ώστε δημιουργήθηκαν τα διατμητικά ρήγματα στον κορμό από τη θέση $(0.6 \div 1)h_w$ μέχρι τη βάση της απέναντι κρυφοκολόνας, και στις δύο διευθύνσεις, λόγω της ανακύκλισης. Τα διατμητικά ρήγματα δεν διευρύνθηκαν καθώς στη θέση των ακραίων περισφιγμένων περιοχών λειτούργησαν οι κρυφοκολόνες με τους διαμήκεις οπλισμούς και τους συνδετήρες σαν πάνελ οπλισμένα έναντι διατμήσεως καθώς, αφενός το πλάτος των κρυφοκολόνων αντιπροσώπευε το 40% του συνολικού πλάτους του τοιχώματος και αφετέρου στο πάνω μέρος των χιαστί ρηγμάτων η διάτμηση ήταν η μόνη ένταση. Στη βάση του δοκιμίου μετά τη διαμόρφωση των αρχικών καμπτικών ρηγμάτων για φόρτιση στη μία διεύθυνση αναπτύχθηκαν κάθετα διατμητικά ρήγματα κατά τη φόρτιση στην άλλη διεύθυνση. Αποτέλεσμα της παραπάνω ρομβοειδούς ρηγμάτωσης της θλιβόμενης ζώνης με διαγώνια ρήγματα και στις δύο διευθύνσεις ήταν η αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων, η εμφάνιση αντίστοιχων υψηλών διατμητικών παραμορφώσεων, η επιτάχυνση απώλειας της επικάλυψης των οπλισμών και η εμφάνιση υψηλών παραμορφώσεων στις θλιβόμενες ζώνες με αποτέλεσμα την εμφάνιση ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου και το λυγισμό διαμήκων ράβδων, λόγω της μη καλής λειτουργίας των συνδετήρων εξαιτίας της απώλειας της επικάλυψης. Δηλαδή, πρέπει να τονιστεί ότι χωρίς την επικάλυψη διαδοχικοί συνδετήρες δεν υποστήριζαν ικανοποιητικά τον διαμήκη οπλισμό, επειδή η υπό λυγισμό ράβδος τους μετακίνησε προς τα πάνω και προς τα κάτω επιτρέποντας τη δημιουργία μεγαλύτερου μήκους λυγισμού. Τις παραπάνω παρατηρήσεις δικαιολογεί και το διαφορετικό εύρος των διατμητικών ρηγμάτων κατά μήκος τους, που ψηλά είναι μικρότερο και προς τα κάτω διευρύνεται. Ομοια κατάσταση παρατηρήθηκε και για το δοκίμιο LSW3 με μόνη διαφορά την εντονότερη καταπόνηση της θλιβόμενης ζώνης και την απώλεια της επικάλυψης της κρυφοκολόνας για μεγαλύτερο ύψος. Τα δοκίμια με τους χιαστί οπλισμούς

παρουσίασαν γενικά μικρότερη ρηγμάτωση (LSW4 - LSW5), ενώ τα ρήγματα που αναπτύχθηκαν στον κορμό και στις κρυφοκολόνες είχαν πολύ μικρή παραμένουσα παραμόρφωση. Αντίθετα, στις ακραίες περισφιγμένες περιοχές επήλθε συντριβή του σκυροδέματος, αφενός λόγω του έντονου εφελκυσμού των οπλισμών και αφετέρου λόγω της έντονης θλίψης.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι γενικώς η αστοχία στη σειρά δοκιμίων LSW προήλθε από τη βλάβη που υπέστησαν οι κρυφοκολόνες σε ένα ύψος το πολύ μέχρι $0.2h_w$ μετά τη διαρροή του διαμήκους οπλισμού και στην έντονη διαμεπή ρηγμάτωση του τοιχείου στη βάση του. Αυτά τα γεγονότα οφείλονται αρχικά στο σχηματισμό καμπτικών και στη συνέχεια διατμητικών ρηγμάτων, εγκάρσια στη διεύθυνση των καμπτικών ρηγμάτων, με συνέπεια την έντονη βράχυνση του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης το οποίο ταυτόχρονα καταπονούνται και σε έντονη τέμνουσα καθώς μαζί με τον κατακόρυφο οπλισμό κορμού ήταν ο μόνος μηχανισμός ανάληψης τέμνουσας. Έτσι, η υψηλή αξονική επιπόνηση της κρυφοκολόνας σε συνδυασμό με την αντίστοιχη διατμητική και τον ανακυκλιζόμενο χαρακτήρα της φόρτισης οδήγησαν μέσα από μία εξομάλυνση της διεπιφάνειας των ρηγμάτων στην αστοχία, τόσο λόγω διατμητικής ολίσθησης όσο και λόγω μείωσης του ουδέτερου άξονα που προήλθε από τον κατακερματισμό της ακραίας περισφιγμένης περιοχής.

Τα δοκίμια της σειράς MSW επέδειξαν κυρίως καμπτική συμπεριφορά. Τα δοκίμια MSW1, MSW2, MSW3 και MSW6 με κλασικού τύπου οπλισμό ανέπτυξαν έντονη ρηγμάτωση μέχρι του ύψους $h_w \cong l_w$. Τα δοκίμια MSW4 και MSW5 με χιαστί οπλισμό ανέπτυξαν ρήγματα από πολύ νωρίς σε όλο το ύψος τους, γεγονός που δείχνει ότι γενικά είχαν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Τα ρήγματα ήταν στην αρχή οριζόντια, αλλά με την αύξηση των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων συνέχισαν κεκλιμένα με φορά προς τη θλιβόμενη ζώνη. Γενικά τα δοκίμια της σειράς MSW εμφάνισαν καμπτική κυρίως συμπεριφορά με μικρής σημασίας διατμητικά ρήγματα, τα οποία περιορίστηκαν κυρίως ψηλά. Αυτό που αξίζει να τονιστεί είναι ότι αρχικά αναπτύχθηκε έντονος εφελκυσμός του διαμήκους καμπτικού οπλισμού με συνέπεια τον περιορισμό της θλιβόμενης ζώνης σε τόση έκταση, ώστε υπό τον συνδυασμό του αξονικού φορτίου λόγω κάμψης (στη κρυφοκολόνα) και την έντονη διάτμηση, αυτή να ενδώσει αρχικά στις διατμητικές παραμορφώσεις και να λειανθεί το σκυρόδεμα λόγω ανακυκλιζόμενης ολίσθησης, με αποτέλεσμα να απωλεσθεί τελικά και η ικανότητα ανάπτυξης θλιπτικών τάσεων και άρα η ικανότητα ανάληψης ροπής. Επίσης, παρατηρήθηκε σε μικρότερη όμως κλίμακα το φαινόμενο της ρομβοειδούς ρηγμάτωσης στην περιοχή θλίψης των κρυφοκολόνων που οφείλονταν καθαρά στη

δημιουργία βαθέων καμπτικών ρηγμάτων και στις δύο παρειές, γεγονός που επηρέασε την τελική αντοχή των κρυφοκολόνων.

6.2.1. Γενικές παρατηρήσεις στη συμπεριφορά των δοκιμίων με άνοιγμα διάτμησης 1.0 (LSW)

Από τις γενικές παρατηρήσεις που περιγράψαμε παραπάνω μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρεις κύριες καταστάσεις τις οποίες διέρχονται τα δοκίμια της σειράς LSW:

α) Κατάσταση τριχοειδούς καμπτικής και κύριας διατμητικής ρηγμάτωσης. Αρχή της διαρροής του καμπτικού μηχανισμού (Φωτ. 6α,6β).

β) Κατάσταση κύριας καμπτικής και ταυτόχρονα κύριας διατμητικής ρηγμάτωσης. Οριζόντιος κλάδος (Φωτ. 7).

γ) Κατάσταση αποδιοργάνωσης οπλισμένου σκυροδέματος κατά τόπους, συντριβής και τελικής αστοχίας. Κατερχόμενος κλάδος (Φωτ. 8,9,10α,10β).

A) Κατάσταση τριχοειδούς καμπτικής και κύριας διατμητικής ρηγμάτωσης

Κατά την έναρξη των κύκλων φόρτισης τα δοκίμια παρουσίασαν όμοιου τύπου ρηγμάτωση. Η ρηγμάτωση που παρατηρήθηκε αφορούσε αρχικά, στους πρώτους δύο τρεις κύκλους φόρτισης, τριχοειδή ρήγματα σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Αυτά είναι δυνατό να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες, με κυριότερα κριτήρια:

- i) τη θέση των ρηγμάτων
- ii) τη μεταβολή κλίσης κατά το μήκος τους.

Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα χαμηλά ρήγματα με μεταβλητή κλίση (πολύ μικρή στην αρχή τους και μεγαλύτερη μετά) είναι καμπτικού τύπου ρήγματα και τα διαγώνια ρήγματα με σταθερή σχεδόν κλίση είναι διατμητικά ρήγματα.

Από την παρατήρηση στην κατάσταση (A) καταγράφηκαν αρχικά τα τριχοειδή καμπτικά και διατμητικά ρήγματα. Από τα δύο είδη ρηγμάτων που μορφώθηκαν αρχικά, συνέχισαν να διευρύνονται τα διατμητικά ρήγματα, το εύρος των οποίων έφθασε μέχρι και την τάξη του 1mm. Στο κάτω μέρος των ακραίων περισφιγμένων περιοχών τα ρήγματα της μιας διεύθυνσης συναντώνται με τα ρήγματα της άλλης διεύθυνσης, δημιουργώντας το φαινόμενο της ρομβοειδούς ρηγμάτωσης του σκυροδέματος στη θέση αυτή. Στην κατάσταση (A), μέχρι δηλαδή το σημείο

μόρφωσης τριχοειδών ρομβοειδών ρηγμάτων στο κάτω μέρος των ακραίων περισφιγμένων περιοχών η αντοχή των τοιχωμάτων είναι αύξουσα με συνεχή μείωση της κλίσης της από τη θέση εμφάνισης των πρώτων ρηγμάτων (τριχοειδών καμπτικών και κυρίων διατμητικών) μέχρι τη θέση του πρώτου σχηματισμού ρομβοειδών ρηγμάτων. Πρέπει να τονιστεί πως, προς το τέλος της κατάστασης (Α) ο οπλισμός που διέρχεται από τα διατμητικά ρήγματα μπαίνει στη φάση διαρροής, παράλληλα με τον καμπτικό οπλισμό.

B) Κατάσταση κύριας καμπτικής και ταυτόχρονα κύριας διατμητικής ρηγμάτωσης

Το δοκίμιο εισέρχεται στην κατάσταση τύπου (B) με τον καμπτικό και διατμητικό οπλισμό περίπου στην ίδια φάση διαρροής. Εδώ, ο καμπτικός οπλισμός που υπάρχει στις ακραίες περισφιγμένες περιοχές επιφορτίζεται επίσης και με το έργο ανάληψης διατμητικής έντασης. Έτσι, η παραπάνω προστιθέμενη διατμητική ένταση δημιουργεί πρόσθετο εφελκυστικό φορτίο στο χάλυβα, με αποτέλεσμα τη διεύρυνση των ρηγμάτων. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως όσο μικρότερη είναι η καμπτική καταπόνηση του χάλυβα τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα ανάληψης πρόσθετης δύναμης από διάτμηση. Από το σχεδιασμό των δοκιμίων προκύπτει ότι το πλάτος των κρυφοκολόνων αντιστοιχεί στο 40% του συνολικού πλάτους του δοκιμίου αφενός, και αφετέρου ο κατακόρυφος περισφιγμένος οπλισμός στη μία κρυφοκολόνα είναι υπερτριπλάσιος από τον κατακόρυφο οπλισμό διάτμησης στον κορμό του τοιχείου. Επιπροσθέτως, η ροπή στην πάνω άκρη των διατμητικών ρηγμάτων είναι μικρή και άρα υπάρχει αρκετό περιθώριο στο χάλυβα να συνεισφέρει στην άρση διεύρυνσης του πάνω μέρους του διατμητικού ρήγματος. Αποτέλεσμα της παραπάνω λειτουργίας είναι ο περιορισμός της διάνοιξης του άνω άκρου του διατμητικού ρήγματος, μέχρι του σημείου να παραμείνει αυτό στην τριχοειδή κατάσταση. Στην απέναντι κρυφοκολόνα και κάτω το διατμητικό ρήγμα διαπερνά κάθετα προηγούμενα καμπτικά. Παράλληλα, όμως, λόγω της θλιπτικής κατάστασης εκεί, ένεκα κάμψης, μειώνεται αισθητά ο λοξός ελκυσμός στον οποίο οφείλεται η διάνοιξη του διατμητικού ρήγματος, με αποτέλεσμα την άρση της διεύρυνσής του. Παράλληλα με την παραπάνω διαδικασία διευρύνονται τα καμπτικού τύπου ρήγματα, που είναι κάθετα στα προηγούμενα διατμητικά. Η ρηγμάτωση αυξάνεται βαθμιαία με αποτέλεσμα το σχηματισμό της ρομβοειδούς ρηγμάτωσης στο μεγαλύτερο ύψος του τοιχείου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται διαμπερή πριονωτά ρήγματα κατά μήκος του στοιχείου με συνέπεια την έντονη εμπλοκή των ρομβικών τεμαχίων, που μαζί με τον οπλισμό και το τμήμα της διατομής

που λειτουργεί υπό θλίψη είναι οι κύριοι μηχανισμοί ανάληψης τέμνουσας, ενώ η θλιβόμενη διατομή του σκυροδέματος σε συνδυασμό με τον εφελκυσμένο οπλισμό παραλαμβάνει τη δρώσα ροπή. Όπως παρατηρούμε, η θλιβόμενη περιοχή του σκυροδέματος συνεισφέρει τόσο στην ανάληψη της τέμνουσας μέσω δυνάμεων τριβής όσο και στην ανάληψη της ροπής μέσω θλίψης. Έτσι, η διπλή διατμητική και θλιπτική επιπόνηση μετά τον έντονο εφελκυσμό του χάλυβα σε συνδυασμό με την εκτενή ρηγμάτωση λόγω ανακύκλισης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας της θλιβόμενης ζώνης και την αύξηση των διατμητικών και θλιπτικών παραμορφώσεων. Με την αύξηση των παραπάνω παραμορφώσεων φθάνουμε στην οριακή αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος και άρα στην απώλεια της επικάλυψης σκυροδέματος των οπλισμών, ο ρόλος της οποίας ήταν πολύ σημαντικός για τη διατήρηση της συνολικής αντοχής του δοκιμίου. Το σκυρόδεμα της επικάλυψης αύξαινε σημαντικά τη διατομή του δοκιμίου που λειτουργούσε υπό θλίψη και υποβοηθούσε τη λειτουργία των συνδετήρων έναντι λυγισμού των διαμήκων ράβδων. Με την απώλεια της επικάλυψης του σκυροδέματος αναπτύσσονταν υψηλές τάσεις στο ρηγματωμένο θλιβόμενο σκυρόδεμα και άρα υψηλές θλιπτικές παραμορφώσεις με συνέπεια να δημιουργηθούν οι συνθήκες για την αστοχία του δοκιμίου. Άρα στην κατάσταση (B) το δοκίμιο αυξάνει την αντοχή του, λίγο περισσότερο από ότι στο τέλος της κατάστασης (A), μέχρι τη μέγιστη τιμή της και έχουμε μικρή μείωση της αντοχής στο τέλος λόγω της απώλειας της επικάλυψης.

Γ) Κατάσταση της κατά τόπους αποδιοργάνωσης οπλισμένου σκυροδέματος, συντριβής και αστοχίας

Την κατάσταση (A) και (B) διήλθαν όλα τα δοκίμια της σειράς LSW με μικρές διαφοροποιήσεις όπως περιγράψαμε στο επόμενο κεφάλαιο. Στην κατάσταση (Γ) οι διαφοροποιήσεις από δοκίμιο σε δοκίμιο ήταν μεγαλύτερες. Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν ήταν τα εξής:

- i) Έντονος εφελκυσμός χάλυβα σε σημείο που κατά τη θλίψη να μην είναι δυνατό να κλείσουν τα ρήγματα και να λυγίζει το θλιβόμενο μέλος του τοιχώματος εγκάρσια στην διεύθυνση λειτουργίας του στοιχείου. Το ύψος της κρυφοκολόνας που λύγισε ήταν της τάξης του $2b_w$.
- ii) Λυγισμός κύριου καμπτικού οπλισμού μεταξύ των συνδετήρων. Αυτή η κατάσταση παρατηρήθηκε αφού οι συνδετήρες έχασαν τη συνάφειά τους με το σκυρόδεμα. Σε αυτή τη φάση ο διαμήκης οπλισμός που τίνει να λυγίσει μετατοπίζει

τους συνδετήρες είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω αυξάνοντας το μήκος τοπικού λυγισμού επισπεύδοντας το λυγισμό.

iii) Εντονος εφελκυσμός του χάλυβα, υψηλή καταπόνηση του θλιβόμενου σκυροδέματος σε θλίψη και διάτμηση, υψηλές θλιπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις, λείανση των ρηγμάτων λόγω αποκόλλησης αδρανών και τεμαχίων σκυροδέματος και άρα υψηλές διατμητικές παραμορφώσεις ολίσθησης στη βάση μεταξύ των χειλών των καμπτικών ρηγμάτων. Με την ολίσθηση, τριβή και απώλεια του σκυροδέματος λόγω τριβής αυξήθηκαν οι διατμητικές παραμορφώσεις σε ένα ύψος μέχρι $2b_w$ με αποτέλεσμα η διατμητική ολίσθηση στη βάση του τοιχείου να είναι η καθοριστική παράμετρος απώλειας της αντοχής.

Από τα τρία προηγούμενα φαινόμενα κανένα δεν εμφανίστηκε μεμονωμένο. Σε κάθε δοκίμιο εμφανίστηκαν και οι τρεις καταστάσεις Γi, Γii, Γiii. Η συμμετοχή του κάθε φαινομένου στην κατάσταση (Γ), άλλοτε ενισχύθηκε και άλλοτε υποβιβάστηκε. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι το γεγονός πως ο ισχυρός καμπτικός οπλισμός στα άκρα των τοιχωμάτων μετά τη διαρροή του λόγω ελκυσμού, εμποδίζει το κλείσιμο των ρηγμάτων στη θλιβόμενη ζώνη, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της ολίσθησης στη βάση του δοκιμίου. Το παραπάνω γεγονός αποδεικνύεται από την παρατήρηση των ολισθήσεων στη βάση των δοκιμίων της σειράς LSW, όπου ουσιαστικά οι παραπάνω ολισθήσεις άρτηκαν με την τοποθέτηση ισχυρού κεκλιμένου οπλισμού στον κορμό του τοιχώματος LSW4 (και όχι στην κρυφοκολόνα), ο οποίος ουσιαστικά αύξησε το μήκος της θλιβόμενης ζώνης χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση της θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος και του εφελκυσμού που παρατηρήθηκε στα δοκίμια με αξονική δύναμη, ισχυρό κλασικού τύπου οπλισμό και χιαστί οπλισμό διερχόμενο από τις κρυφοκολόνες. Αποτέλεσμα της χαμηλής θλιπτικής τάσης στη θλιβόμενη ίνα του δοκιμίου LSW4 ήταν η διατήρηση της ικανότητας στην εν λόγω περιοχή να παραλάβει τέμνουσα σε αντίθεση με τη θλιβόμενη ίνα των δοκιμίων LSW1, LSW3, LSW5, όπου η θλιπτική τάση ήταν υψηλή και τα περιθώρια ανάληψης τέμνουσας πολύ μικρά. Συγκεκριμένα, οι τελικές ολισθήσεις στη βάση του δοκιμίου LSW4 ήταν της τάξης 2mm, που αντιπροσωπεύει περίπου το 20% της συνολικής μετατόπισης στην κεφαλή, ενώ αντίθετα για τα υπόλοιπα δοκίμια οι ολισθήσεις ήταν της τάξης του 60% με εξαίρεση το δοκίμιο LSW5, που το ποσοστό συμμετοχής των διατμητικών ολισθήσεων ήταν της τάξης του 35%.

6.2.2. Γενικές παρατηρήσεις στη συμπεριφορά των δοκιμίων με άνοιγμα διάτμησης 1.5 (MSW)

Από την παρατήρηση των δοκιμίων της σειράς MSW ξεχωρίζουμε τις τρεις καταστάσεις που προαναφέραμε, Α, Β, Γ, με σαφώς υποβαθμισμένο το φαινόμενο της αρχικής διαγώνιας διατμητικής ρηγμάτωσης. Το φαινόμενο της ρομβοειδούς ρηγμάτωσης εμφανίζεται κυρίως λόγω διασταύρωσης μεταξύ καμπτικών ρηγμάτων διαφορετικής κατεύθυνσης. Γενικά, τα δοκίμια διέρχονται τις τρεις καταστάσεις που προαναφέραμε, Α, Β, Γ, με μόνη διαφορά τη μειωμένη συμμετοχή των διατμητικών παραμορφώσεων που οφείλονται στο λοξό εφελκυσμό, του κορμού των δοκιμίων.

Α) Κατάσταση τριχοειδούς καμπτικής και διατμητικής ρηγμάτωσης

Κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης τα δοκίμια διαμορφώνουν τριχοειδή ρήγματα καθ' ύψος. Αυτά που παρουσιάζουν καλύτερη κατανομή (πυκνά σε όλο σχεδόν το ύψος) είναι τα ρήγματα των δοκιμίων MSW1, MSW4, MSW5. Σε όλα τα δοκίμια έχουμε προοδευτική διεύρυνση των καμπτικών ρηγμάτων ενώ τα διατμητικά ρήγματα μετά το σχηματισμό τους ελάχιστα διευρύνθηκαν με εξαίρεση μερικά διατμητικά ρήγματα του δοκιμίου MSW3 που είχε αξονική φόρτιση, μειωμένο καμπτικό και διατμητικό σπλισμό, ενώ αντίθετα υψηλή αντοχή. Έτσι, λόγω της υψηλής τέμνουσας που αναπτύχθηκε και λόγω του μειωμένου σπλισμού διευρύνθηκαν τα διατμητικά ρήγματα που βρίσκονταν σε ένα ύψος $h = l_w$.

Στο κάτω μέρος ($\cong l_w/2$) του δοκιμίου έχουμε τη διασταύρωση μεταξύ καμπτικών ρηγμάτων και το σχηματισμό ρομβοειδούς ρηγμάτωσης, όπως στα δοκίμια της σειράς LSW, με τη σημαντική διαφοροποίηση ότι οι γωνίες των ρόμβων στα δοκίμια MSW είναι περίπου 90° και οι τέσσερις, ενώ στα δοκίμια της σειράς LSW οι κατακόρυφες (πάνω και κάτω) γωνίες των ρόμβων είναι μεγαλύτερες από 90° , ενώ οι οριζόντιες (δεξιά - αριστερά) είναι μικρότερες από 90° . Αυτό έχει ως συνέπεια την καλύτερη συμπεριφορά του ρηγματωμένου σκυροδέματος από άποψη διατμήσεως στα δοκίμια της σειράς MSW, καθώς με αυτόν τον τρόπο παρέχεται καλύτερη εμπλοκή των τμημάτων σκυροδέματος ανάμεσα στα ρήγματα. Παρατηρούμε, λοιπόν ότι, ακόμη και στην κατάσταση (Α), προς το τέλος της, το σκυρόδεμα παρουσιάζει έντονη ρηγμάτωση.

Β) Κατάσταση κύριας καμπτικής ρηγμάτωσης

Στην κατάσταση Β το κυρίαρχο φαινόμενο είναι αυτό της κάμψης. Τα καμπτικά

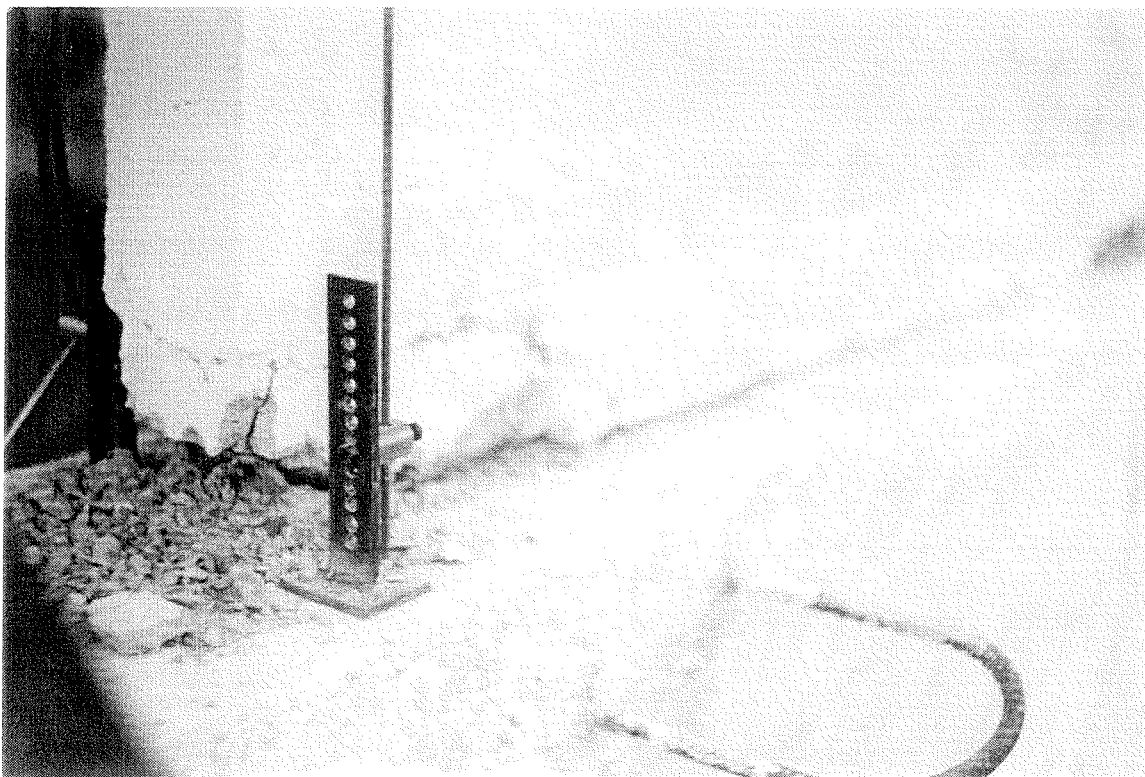
ρήγματα διευρύνονται και εκτείνονται σχεδόν μέχρι την απέναντι θλιβόμενη κρυφοκολόνα. Τα καμπτικά ρήγματα ξεκινούν περίπου οριζόντια αλλά κατά μήκος αυξάνουν την κλίση τους, φθάνοντας μέχρι την τιμή των 45° . Η κλίση των καμπτικών ρηγμάτων αυξάνει με την απόσταση της αρχής τους από τη βάση του δοκιμίου. Η καμπύλη αντοχής είναι αύξουσα και φθίνουσα προς το τέλος. Το τέλος της κατάστασης (B) ορίζεται με την απώλεια επικάλυψης του σκυροδέματος. Η επικάλυψη της ακραίας θλιβόμενης ίνας είναι αυτή που ξεκολλάει πρώτη, ενώ στο επόμενο στάδιο (Γ) ξεκολλάει και η επικάλυψη στις πλευρές της κρυφοκολόνας. Η πτώση αντοχής στην κατάσταση (B) οφείλεται στη μερική απώλεια συνάφειας οπλισμού σκυροδέματος, λόγω του έντονου εφελκυσμού και στις πρώτες μικρές αποφλοιώσεις που παρατηρούνται στη θλιβόμενη ζώνη.

Το φαινόμενο της μερικής απώλειας συνάφειας εφελκυσμένου οπλισμού σε καμπτόμενο στοιχείο υπάρχει από το σχηματισμό των πρώτων καμπτικών ρηγμάτων, αλλά με περιορισμένη συμμετοχή λόγω της μικρής επιμήκυνσης του χάλυβα και είναι αδύνατο να εντοπισθεί, λόγω της μεγάλης ταχύτητας αύξησης της αντοχής που επιδεικνύει το δοκίμιο. Κοντά στη μέγιστη αντοχή και στην κατάσταση έντονης επιμήκυνσης του χάλυβα η απώλεια συνάφειας (ολίσθηση οπλισμών) προχωράει περισσότερο μέσα στα τμήματα σκυροδέματος που βρίσκονται μεταξύ των καμπτικών ρηγμάτων, επιτρέποντας επιμήκυνση του χάλυβα σε μεγαλύτερο μήκος του και άρα μειώνοντας την αντίσταση των οπλισμών σε εφελκυσμό και άρα κάμψη. Το φαινόμενο της ολίσθησης οπλισμών αυξάνει γενικά την πλαστιμότητα, ειδικότερα σε δοκίμια με λόγο όψης κάτω του δύο, όπου εμφανίζεται μειωμένη καμπτική ρηγμάτωση και μικρότερο συνολικό μήκος χάλυβα προς επιμήκυνση, προκειμένου να εκτελεστεί η μετατόπιση κορυφής, οπότε έχουμε πρόιμη διαρροή του χάλυβα. Με την εισχώρηση της επιμήκυνσης του χάλυβα στα στοιχεία σκυροδέματος μεταξύ των ρηγμάτων έχουμε μείωση της τάσης του χάλυβα, καθώς μεγαλύτερο μήκος οπλισμού πρέπει πλέον να αναπτύξει την ίδια επιμήκυνση.

Γ) Κατάσταση της κατά τόπους αποδιοργάνωσης οπλισμένου σκυροδέματος, συντριβής και αστοχίας

Σε αυτήν την κατάσταση εμφανίζεται όμοια συμπεριφορά με αυτή που περιγράψαμε για τα δοκίμια LSW, με τη διαφορά ότι τα φαινόμενα είναι περισσότερο καμπτικά. Συγκεκριμένα, έχουμε έντονο εφελκυσμό του οπλισμού κάμψης με μεγάλη παραμένουσα παραμόρφωση στο χάλυβα και άρα εντονότερη απώλεια επικάλυψης (για μικρότερη δύναμη από ότι στα δοκίμια της σειράς LSW) καθώς επίσης και λυγισμό

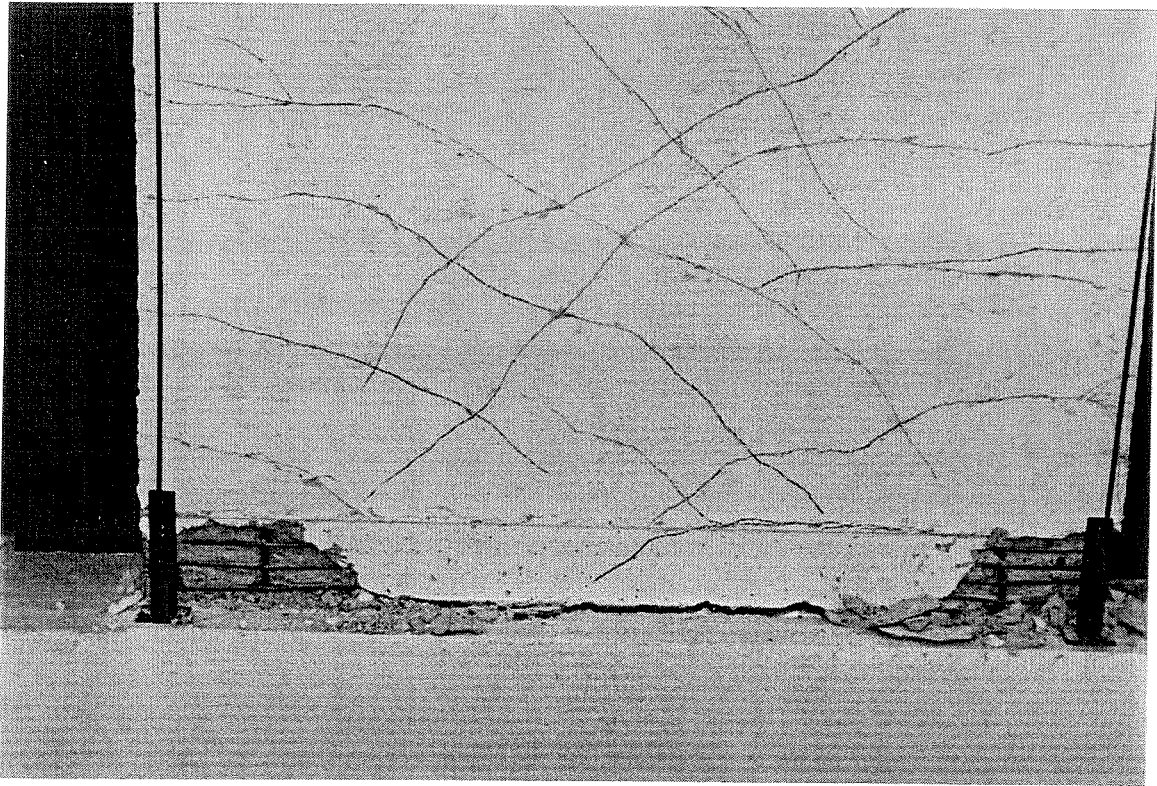
διαμήκων ράβδων. Συνέπεια των παραπάνω ήταν ο περιορισμός της θλιβόμενης ζώνης (με την απώλεια της επικάλυψης), η αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων, λόγω της μη λειτουργίας του θλιβόμενου οπλισμού, αφού λύγισε, και άρα αδυναμία του σκυροδέματος να παραλάβει τέμνουσα, καθώς εξαντλήθηκε η αντοχή του στη θλίψη. Αποτέλεσμα του παραπάνω φαινομένου ήταν να παρατηρηθούν ολισθήσεις στη βάση των δοκιμίων, οι οποίες ήταν της τάξης του 30% - 40% των συνολικών μετατοπίσεων στη κεφαλή για τα δοκίμια με κλασικό οπλισμό και αρμό, 18% για το δοκίμιο με την αξονική δύναμη και 10% - 14% για τα δοκίμια με χιαστί οπλισμό.



Φωτ. 8. Το διαμπερές καμπτικό ρήγμα στη βάση του δοκιμίου MSW3 έδωσε περιορισμένες διατμητικές ολισθήσεις.



Φωτ. 9. Στο δοκίμιο MSW5 οι ακραίες περισφιγμένες περιοχές καταπονήθηκαν έντονα, σε θλίψη και διάτμηση ή εφελκυσμό, λόγω της υψηλής αντοχής που αναπτύχθηκε με αποτέλεσμα τη συντριβή του σκυροδέματος και το λυγισμό των διαμήκων ράβδων.



(10α)



(10β)

Φωτ. 10α, 10β. Το διαμπερές καμπτικό ρήγμα στη βάση του δοκιμίου MSW4 ουσιαστικά δεν έδωσε διατμητικές ολισθήσεις, καθώς από το μέσον του διέρχεται δισδιαγώνιος οπλισμός, ενώ οι ακραίες περισφιγμένες περιοχές καταπονήθηκαν έντονα σε θλίψη λόγω κάμψης.

6.3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΡΟΧΩΝ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων καταγράφηκαν οι βρόχοι που παρουσιάζονται παρακάτω για όλα τα δοκίμια. Οι παρακάτω βρόχοι υστερητικής συμπεριφοράς σχεδιάζονται για την μετατόπιση στην κορυφή, την παραμόρφωση της ακραίας περισφιγμένης περιοχής σε ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου, τη συνολική διαγώνια παραμόρφωση στο ίδιο ύψος και τη διατμητική παραμόρφωση (ολίσθηση) του δοκιμίου σε απόσταση ίση με 20εκ. από τη βάση του, συναρτήσει της συνολικά καταγραφείσας τέμνουσας δύναμης. Από την παρατήρηση των βρόχων προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα, για τις πρώτες ελαστικές και ανελαστικές (για τον χάλυβα) παραμορφώσεις, την αντοχή, τη μείωση αντοχής, την απορρόφηση ενέργειας, τη συνολική ικανότητα παραμόρφωσης του δοκιμίου, τη συμπεριφορά της κρυφοκολόνας υπό θλιπτική και εφελκυστική φόρτιση, το βαθμό εφελκυσμού των ακραίων περισφυγμένων περιοχών, την ικανότητα κλεισίματος των καμπτικών ρηγμάτων όπου ο χάλυβας έχει διαρρέψει, το βαθμό διατμητικής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και διαρροής του οπλισμού του κορμού των τοιχωμάτων, την ιστορία διατμητικής ολίσθησης μέσα στα κύρια καμπτικά ρήγματα της βάσης του δοκιμίου και την επίδραση σε όλα τα παραπάνω των παραμέτρων που μεταβάλλονται μεταξύ των δοκιμίων. Παρακάτω επιχειρείται ένας δοκίμιο προς δοκίμιο σχολιασμός της καταγραφείσας συμπεριφοράς των δοκιμίων σε όλα τα παραπάνω, με σκοπό αφενός να δοθούν κάποιες πρώτες απαντήσεις στους στόχους της έρευνας από την παρατήρηση των βρόχων υστερήσης σε κάθε θέση και αφετέρου να καθορισθούν παράμετροι προς λεπτομερέστερη επεξεργασία και αξιολόγηση.

6.3.1. Σχολιασμός βρόχων υστερήσης δοκιμίων με άνοιγμα διάτμησης 1.0

Δοκίμιο LSW1

Το δοκίμιο LSW1 κατασκευάστηκε όμοιο με το δοκίμιο MSW1 σε οπλισμό και διαστάσεις διατομής, με μόνη διαφορά το ύψος που ήταν κατά 1.5 φορές μικρότερο. Έτσι, λοιπόν, αν επρόκειτο το δοκίμιο να παρουσιάσει καμπτική συμπεριφορά, έπρεπε να αναπτύξει ίδια καμπτική αντοχή με την αντίστοιχη αντοχή του ομοίου του δοκιμίου (MSW1) και επίσης να αναπτύξει κατά 1.5 φορές μεγαλύτερη τέμνουσα. Από τους βρόχους υστερήσης προκύπτει ότι η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου είναι της τάξης των 262KN έναντι 197KN που ανέπτυξε το όμοιο αλλά υψηλότερο δοκίμιο. Η μέγιστη ροπή στη βάση του χαμηλού δοκιμίου είναι κατά 10% μικρότερη από την αντίστοιχη ροπή του ομοίου αλλά υψηλότερου δοκιμίου, ενώ αντίστοιχα το χαμηλό δοκίμιο έχει

κατά 25% υψηλότερη τέμνουσα. Όπως παρατηρούμε, η υψηλότερη κατά 25% τέμνουσα οδήγησε ίδια διατομή σε κατά 10% μικρότερη καμπτική αντοχή. Καθώς όμως τα διαγώνια ρήγματα δεν διευρύνθηκαν και άρα δεν άρχισε η διαρροή του μηχανισμού του διαγώνιου εφελκυσμού, η επιρροή της τέμνουσας δύναμης συγκεντρώθηκε στο ρηγματωμένο, λόγω κάμψης, σκυρόδεμα, μέσω της ολοένα αυξανόμενης λείανσης των ρηγμάτων τα οποία έχουν γενικά μικρή κλίση.

Στο τέλος του πειράματος η αντοχή του δοκιμίου ήταν της τάξης των 200KN που επήλθε για μετατόπιση της τάξης των 11.5mm που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μετατοπίσεων 4.8. Η μετατόπιση αστοχίας αντιστοιχεί σε ποσοστό 0.96% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής λόγω της ανακύκλισης ήταν της τάξης του 5.4% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και της τάξης του 2.5% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στους τρεις κύκλους πριν την μέγιστη αντοχή του δοκιμίου. Στους τρεις κύκλους αμέσως μετά τη μέγιστη αντοχή τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 6.3% και 7%, ενώ στο τέλος του πειράματος οι παραπάνω τιμές διαμορφώθηκαν σε 8.5% και 3.5% αντίστοιχα. Από την παρατήρηση των βρόχων υστέρησης προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας (μετά την καμπτική ρηγμάτωση και διαρροή) η δύναμη είναι περίπου το 8.5% της αντίστοιχης μέγιστης στον ίδιο κύκλο, κατά την έναρξη του οριζόντιου κλάδου, ενώ στο πέρας του πειράματος η δύναμη που παραλαμβάνει το δοκίμιο κατά τη διέλευσή του από τη θέση ισορροπίας είναι το 15% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Η παραπάνω στένωση των βρόχων του δοκιμίου στην αρχή των αξόνων δείχνει την έντονη επιρροή της διάτμησης και την ενεργοποίηση των μηχανισμών βλήτρου και εμπλοκής αδρανών σε μεγάλο βαθμό, καθώς η μικρή αναλαμβανόμενη δύναμη στην αρχή των αξόνων σε έντονο ανελαστικό επίπεδο προδίδει μικρή συμμετοχή των καμπτικών παραμορφώσεων και άρα υψηλή των διατμητικών στην επίτευξη της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης στην κεφαλή.

Στην ακραία ίνα μετά από επιμήκυνση λόγω κάμψης της τάξης των 5mm (0.42% του μήκους ακραίας ίνας) τα καμπτικά ρήγματα δεν έκλειναν εντελώς στο άλλο μισό του κύκλου, με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου. Επίσης από τους βρόχους ολίσθησης προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε έντονο ανελαστικό επίπεδο για την ίδια μετατόπιση στην κορυφή και σχεδόν για ίδια δύναμη αυξάνουν σημαντικά, μόνο λόγω ανακύκλισης και άρα λείανσης της διεπιφάνειας των ρηγμάτων, οι ολισθήσεις (διατμητικές παραμορφώσεις σε ύψος 20εκ. από τη βάση) στη βάση του δοκιμίου. Στο τέλος του πειράματος οι ολισθήσεις ήταν της τάξης του 55% της συνολικής μετατόπισης στην κεφαλή.

Δοκίμιο LSW2

Το δοκίμιο LSW2 είναι όμοιο με το δοκίμιο LSW1 με τη διαφορά ότι έχει κατά 6/8 λιγότερο διαμήκη οπλισμό στα άκρα και περίπου τον μισό οπλισμό στον κορμό. Επίσης έχει ίδιο οπλισμό και διαστάσεις διατομής με το δοκίμιο MSW2, μόνο που είναι 1.5 φορές χαμηλότερο. Τα δύο δοκίμια ανέπτυξαν όμοια καμπτική αντοχή, αφού η τέμνουσα του δοκιμίου LSW2 είναι κατά 1.5 φορές μεγαλύτερη από την τέμνουσα του δοκιμίου MSW2. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέγιστη τέμνουσα των 193KN που αναπτύχθηκε δεν επηρέασε την καμπτική συμπεριφορά του δοκιμίου και άρα την καμπτική αντοχή. Στο τέλος του πειράματος η αντοχή του δοκιμίου ήταν της τάξης των 145KN και η μετατόπιση αστοχίας ήταν 10.4mm, που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μετατοπίσεων ίση με 3.9. Η μετατόπιση αστοχίας αντιστοιχεί σε ποσοστό 0.86% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής λόγω της ανακύκλισης ήταν της τάξης του 7% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και της τάξης του 1.5% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στους τρεις κύκλους, πριν τη μέγιστη αντοχή του δοκιμίου. Στους τρεις κύκλους αμέσως μετά την μέγιστη αντοχή τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 9% και 3%, ενώ στο τέλος του πειράματος οι παραπάνω τιμές διαμορφώθηκαν σε 9.5% και 5.5% αντίστοιχα. Από την παρατήρηση των βρόχων υστέρησης προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας (μετά την καμπτική ρηγμάτωση και διαρροή) η δύναμη είναι περίπου το 15% της αντίστοιχης μέγιστης στον ίδιο κύκλο, κατά την έναρξη του οριζόντιου κλάδου, ενώ στο πέρας του πειράματος η δύναμη που παραλαμβάνει το δοκίμιο κατά τη διέλευσή του από τη θέση ισορροπίας είναι το 20% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Τα παραπάνω ποσοστά είναι σαφώς ψηλότερα από τα αντίστοιχα ποσοστά του προηγούμενου δοκιμίου, γεγονός που δείχνει τη μικρότερη στένωση στην αρχή των αξόνων και άρα τη μικρότερη επιρροή της τέμνουσας δύναμης στην ανελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου. Στην ακραία ίνα μετά από επιμήκυνση λόγω κάμψης της τάξης των 6.5mm (0.54%) τα καμπτικά ρήγματα δεν έκλειναν εντελώς στο άλλο μισό του κύκλου, με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου. Τα καμπτικά ρήγματα άρχισαν να μην κλείνουν υπό θλίψη ένεκα κάμψεως στο δοκίμιο LSW2 για μεγαλύτερη προηγούμενη επιμήκυνση της ακραίας ίνας από ότι στο δοκίμιο LSW1, λόγω του λιγότερου διαμήκους οπλισμού. Πράγματι ο λόγος των επιμηκύνσεων, αμέσως μετά τις οποίες τα καμπτικά ρήγματα υπό θλίψη είχαν παραμένονσα εφελκυστική παραμόρφωση, είναι ακριβώς αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των ποσοστών των διαμήκων οπλισμών. Σε

αυτό το δοκίμιο όπως και στο προηγούμενο από τους βρόχους ολίσθησης προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε έντονο ανελαστικό επίπεδο για την ίδια μετατόπιση στην κορυφή και σχεδόν για ίδια δύναμη αυξάνουν μόνο λόγω ανακύκλισης και άρα λείανσης της διεπιφάνειας των ρηγμάτων οι ολισθήσεις (διατμητικές παραμορφώσεις σε ύψος 20εκ. από τη βάση) στη βάση του δοκιμίου. Στο τέλος του πειράματος οι ολισθήσεις ήταν της τάξης του 50% της συνολικής μετατόπισης στην κεφαλή.

Δοκίμιο LSW3

Προκειμένου να αποφανθούμε για την επιρροή της αξονικής δύναμης και να προσδιορίσουμε κατά πόσο το όριο της αξονικής δύναμης ίσης με το 7% της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων έχει σαφή επιρροή στην ανελαστική συμπεριφορά των τοιχωμάτων, κατασκευάστηκε το δοκίμιο LSW3, όμοιο με το δοκίμιο LSW2, στο οποίο ασκήθηκε επιπλέον η παραπάνω αξονική δύναμη. Παρατηρήθηκε σαφής αύξηση αντοχής από 193 σε 268KN και βελτίωση όλων των ανελαστικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου. Παρά την υψηλή τέμνουσα δύναμη που αναπτύχθηκε (όση του δοκιμίου LSW1) και τον σχετικά λίγο οπλισμό (όσος ο οπλισμός του δοκιμίου LSW2) το δοκίμιο LSW3 επέδειξε καμπτική κυρίως συμπεριφορά όπως και το όμοιο υψηλότερο δοκίμιο MSW3. Τα δύο δοκίμια αστόχησαν για την ίδια ακριβώς ροπή και δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές από την ύπαρξη υψηλότερης τέμνουσας στο δοκίμιο LSW3. Στο τέλος του πειράματος η αντοχή ήταν της τάξης των 200KN και η μετατόπιση αστοχίας 16.3mm, που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μετατοπίσεων 5.3. Η μετατόπιση αστοχίας αντιστοιχεί σε ποσοστό 1.36% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής λόγω της ανακύκλισης ήταν της τάξης του 4.6% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και της τάξης του 1% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στους τρεις κύκλους, πριν την μέγιστη αντοχή του δοκιμίου. Στους τρεις κύκλους, αμέσως μετά την μέγιστη αντοχή, τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 6% και 2.5%, ενώ στο τέλος του πειράματος οι παραπάνω τιμές διαμορφώθηκαν σε 4.8% και 1% αντίστοιχα. Η γενικά μικρότερη πτώση αντοχής μεταξύ ίδιων κύκλων από ότι στα προηγούμενα δύο δοκίμια αιτιολογείται από τη θετική συμβολή της αξονικής δύναμης στο μηχανισμό εμπλοκής αδρανών μέσω της ανάπτυξης θλιπτικών τάσεων και άρα μέσω του περιορισμού της λείανσης των ρηγμάτων. Από την παρατήρηση των βρόχων υστέρησης προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας (μετά την καμπτική ρηγμάτωση και διαρροή) η δύναμη είναι περίπου το 15% της αντίστοιχης μέγιστης στον ίδιο κύκλο, κατά την έναρξη του οριζόντιου κλάδου, ενώ στο πέρας του πειράματος η δύναμη που παραλαμβάνει το δοκίμιο κατά

τη διελευσή του από τη θέση ισορροποίας είναι το 30% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Τα παραπάνω ποσοστά είναι επίσης ψηλότερα από τα αντίστοιχα ποσοστά των προηγούμενων δοκιμίων, γεγονός που δείχνει την μικρότερη στένωση στην αρχή των αξόνων και άρα τη μικρότερη επιρροή της τέμνουσας δύναμης στην ανελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου λόγω της αξονικής δύναμης. Σε έντονο ανελαστικό επίπεδο δεν παρατηρήθηκαν παραμένοντα ανοικτά καμπτικά ρήγματα στις ακραίες ίνες κατά τη θλίψη τους ένεκα κάμψης. Οι ακραίες περισφιγμένες περιοχές παρουσίασαν τοπικό λυγισμό με την απώλεια της επικάλυψης και την έναρξη θραύσης του σκυροδέματος της ακραίας περισφιγμένης περιοχής. Αυτή η θραύση οφείλεται στην εξάντληση αντοχής που επείλθε από την διαξονική εντατική κατάσταση που δημιουργήθηκε εκεί από την θλιπτική επιπόνηση ένεκα της κάμψης και της αξονικής δύναμης καθώς και από την υψηλή διατμητική ένταση (λόγω της αύξησης αντοχής) στην οποία καταπονούνταν η θλιβόμενη ζώνη. Οι ολισθήσεις στην βάση μειώθηκαν αρκετά σε σχέση με τα άλλα δύο δοκίμια και στο τέλος του πειράματος ήταν το 37% της συνολικής μετατόπισης στην κορυφή.

Δοκίμιο LSW4

Το δοκίμιο LSW4 σχεδιάστηκε όπως ακριβώς το δοκίμιο LSW2, με τις ίδιες διαστάσεις και οπλισμούς, με τη μόνη διαφορά ότι προστέθηκαν διαγώνια στον κορμό οπλισμοί $6\varnothing 8$ (τρεις ανά διεύθυνση). Οι προστιθέμενοι δισδιαγώνιοι οπλισμοί ανηγμένοι οριζοντίως και καθέτως δίνουν εμβαδό ίσο με αυτό του πρόσθετου διατμητικού οπλισμού του δοκιμίου LSW1. Το σημείο τομής των διαγώνιων οπλισμών ήταν στο μέσον της βάσης του δοκιμίου.

Η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε το δοκίμιο ήταν της τάξης των 232KN, ενώ στο πέρας του πειράματος η αντοχή ήταν 175KN, που αντιστοιχεί σε μετατόπιση κορυφής 10mm, η οποία δίνει πλαστιμότητα μετατοπίσεων ίση με 3.8. Η μετατόπιση κορυφής κατά την αστοχία αντιστοιχεί στο 0.84% του ύψους του δοκιμίου. Το δοκίμιο LSW4 επέδειξε καμπτική κυρίως συμπεριφορά, όπως και το όμοιο υψηλότερο δοκίμιο MSW4. Τα δύο δοκίμια αστόχησαν για την ίδια ακριβώς ροπή και δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές από την ύπαρξη 1.5 φορές υψηλότερης τέμνουσας στο δοκίμιο LSW4. Η πτώση αντοχής λόγω της ανακύκλισης ήταν της τάξης του 5.4% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και της τάξης του 4% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στους τρεις κύκλους, πριν την μέγιστη αντοχή του δοκιμίου. Στους τρεις κύκλους αμέσως μετά τη μέγιστη αντοχή τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 10% και 7%, ενώ στο τέλος του πειράματος οι παραπάνω τιμές διαμορφώθηκαν σε 7.5% και

3% αντίστοιχα. Κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας στον τελευταίο κύκλο η αναλαμβανόμενη δύναμη ήταν το 50% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον ίδιο κύκλο, ενώ στην αρχή του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής το αντίστοιχο ποσοστό ήταν της τάξης του 18%. Παρατηρούμε δηλαδή ότι σε έντονο ανελαστικό επίπεδο υπάρχει εξάλειψη της στένωσης των βρόχων υστέρησης στην αρχή των αξόνων που χαρακτηρίζει δοκίμια με υψηλή διατμητική παραμόρφωση (αντίθετα εμφανίζεται διεύρυνση) και άρα αρχίζει να ενισχύεται η υπόθεση ότι η χρήση του δισδιαγώνιου οπλισμού ως κύριου οπλισμού διάτμησης εξάρει και ενισχύει την καμπτική συμπεριφορά έναντι της διατμητικής. Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγουμε από την παρατήρηση της κλίσης των βρόχων υστέρησης μετά την διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας σε έντονο ανελαστικό επίπεδο, καθώς αυτοί έχουν τα κοίλα είτε στραμμένα προς τα κάτω είτε σχεδόν οριζόντια. Η ακραία περισφιγμένη περιοχή δεν παρουσίασε εκτός επιπέδου λυγισμό, ενώ στο πέρας του πειράματος παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός των θλιβόμενων ράβδων. Αρκετά καμπτικά ρήγματα παρέμειναν ανοικτά ακόμη και για θλιπτική φόρτιση (ένεκα κάμψης) της ακραίας ίνας, αφού στο προηγούμενο μισό του κύκλου ο εφελκυσμός σε αυτή τη θέση και για ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου είχε φθάσει τα 8mm (0.7%). Οι ολισθήσεις στη βάση του δοκιμίου ήταν της τάξης του 20% της συνολικής μετατόπισης στην κορυφή. Το παραπάνω γεγονός εξηγείται από τη θέση των διαγώνιων ράβδων στην κρίσιμη διατομή της βάσης. Πράγματι, αν αναλογιστούμε ότι οι κεκλιμένες ράβδοι βρίσκονταν στο μέσο της διατομής και έτσι είχαν περιορισμένη συμβολή στην αντοχή του δοκιμίου και άρα μικρή επιπόνηση και εφελκυστική παραμόρφωση, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η άρση των ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου οφείλεται στη διπλή λειτουργία των κεκλιμένων ράβδων που περιγράφουμε παρακάτω:

α) Απευθείας λειτουργία του κεκλιμένου οπλισμού που λόγω της κλίσης του και της μη διαρροής του δεν επέτρεψε τη διατμητική ολίσθηση

β) Εμμεση λειτουργία του κεκλιμένου οπλισμού που λόγω της θέσης του και της κλίσης του περιόρισε την καμπτική ρηγμάτωση αυξάνοντας το μήκος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής, επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη χαμηλής διατμητικής τάσης στη ρηγματωμένη διατομή και άρα τη διατήρηση της μεγάλης συμμετοχής του μηχανισμού εμπλοκής αδρανών στην ανάληψη τέμνουσας ακόμη και σε έντονο ανελαστικό επίπεδο.

Δοκίμιο LSW5

Το δοκίμιο LSW5 κατασκευάστηκε όμοιο με το δοκίμιο LSW4 εκτός του γεγονότος ότι οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί τέμονταν σε ύψος ίσο με $l_w/2$ από τη βάση του και άρα διέρχονταν από τις ακραίες περισφιγμένες περιοχές. Έτσι οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί συνέβαλαν εκτός από την άρση της ολισθήσης και στην αύξηση της καμπτικής αντοχής του δοκιμίου. Η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε το δοκίμιο ήταν της τάξης των 246KN. Στο πέρας του πειράματος η αντοχή ήταν της τάξης των 184KN που επήλθε για μετατόπιση στην κορυφή ίση με 14.8mm, η οποία αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μετατοπίσεων 4.0. Το ποσοστό της μετατόπισης αστοχίας ήταν της τάξης του 1.25% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής λόγω ανακύκλισης ήταν της τάξης του 6.7% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και 1.7% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στην αρχή του ευθύγραμμου κλάδου της καμπύλης αντοχής του δοκιμίου. Στο πέρας του ευθύγραμμου κλάδου οι αντίστοιχες πτώσεις αντοχής ήταν της τάξης του 10% και 3.4%, ενώ στο τέλος του πειράματος τα παραπάνω ποσοστά διαμορφώθηκαν σε 4.5% και 3.3%. Κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας στον τελευταίο κύκλο, η αναλαμβανόμενη δύναμη ήταν το 55% της αντίστοιχης μέγιστης αναπτυσσόμενης στον ίδιο κύκλο, ενώ στην αρχή του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής το αντίστοιχο ποσοστό ήταν της τάξης του 12%. Στην ακραία ίνα διατηρήθηκαν ανοικτά ρήγματα ακόμη και υπό θλίψη, αφού η επιμήκυνση λόγω εφελκυσμού σε ύψος ίσο με το πλάτος είχε φθάσει την τιμή των 12mm (1%). Στην κρίσιμη διατομή της βάσης μετρήθηκαν ολισθήσεις της τάξης των 6mm που αντιστοιχούν σε ποσοστό 40% της συνολικής μετατόπισης της κεφαλής.

Για το δοκίμιο LSW5 παρατηρούμε ότι ο δισδιαγώνιος οπλισμός διέρρευσε στη θέση της βάσης της ακραίας ίνας και οι διατμητικές ολισθήσεις δεν ήταν περιορισμένες. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αναπτυσσόμενη τέμνουσα δύναμη είναι πολύ υψηλή σε σημείο που να επηρεάσει την ανελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου, και η αστοχία να επέλθει για ροπή μικρότερη από τη ροπή αστοχίας του όμοιου υψηλότερου δοκιμίου. Άρα η υψηλή τέμνουσα επηρέασε σαφώς την αντοχή και επέσπευσε την αστοχία επιτρέποντας λιγότερο καμπτική συμπεριφορά σε αυτό το δοκίμιο.

6.3.2. Σχολιασμός βρόχων υστέρησης δοκιμίων με άνοιγμα διάτμησης 1.5

Δοκίμιο MSW1

Από την παρατήρηση των βρόχων υστέρησης δύναμης - μετατόπισης κορυφής του δοκιμίου MSW1 διαπιστώνεται έντονη μείωση της δυσκαμψίας για τέμνουσα δύναμη της τάξης των 75KN, που αντιστοιχεί σε ροπή 144.4KNm. Στη θέση αυτή θεωρείται ότι άρχισαν να μορφώνονται και να διευρύνονται τα πρώτα καμπτικά ρήγματα στην εφελκόμενη ίνα του σκυροδέματος όπως προκύπτει και από τους αντίστοιχους βρόχους τέμνουσας δύναμης - αξονικής παραμόρφωσης κρυφοκολόνας. Η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε το δοκίμιο ήταν της τάξης των 197 KN. Το δοκίμιο θεωρείται ότι αστόχησε για πλαστιμότητα μετατοπίσεων ίση με 4 και η αντοχή για αυτήν τη μετατόπιση έπεσε στην τιμή των 150KN. Η μετατόπιση αστοχίας μετρήθηκε σε 24.8mm που αντιστοιχεί σε ποσοστό 1.3% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής λόγω της ανακύκλισης ήταν της τάξης του 4% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και της τάξης του 2% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στην αρχή του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης δύναμης μετατόπισης του δοκιμίου. Στο πέρας του οριζόντιου κλάδου τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 14% και 7%, ενώ στο τέλος του πειράματος οι παραπάνω τιμές διαμορφώθηκαν σε 6% και 4.5% αντίστοιχα. Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επιρροή της ανακύκλισης είναι πολύ υψηλή στην κατάσταση κατά την οποία η αντοχή του δοκιμίου αρχίζει να φθίνει. Αν αναλογιστούμε ότι σε αυτή τη φάση (πέρας ευθύγραμμου κλάδου της καμπύλης δύναμης παραμόρφωσης) το δοκίμιο έχει ταυτόχρονα την υψηλότερη τέμνουσα και την εντονότερη ρηγμάτωση, τότε είναι πολύ πιθανό το πέρας του ευθύγραμμου κλάδου να επέρχεται από την τέμνουσα καμπτικής διαρροής για κάποιο συγκεκριμένο βαθμό λείανσης των ρηγμάτων. Προφανώς για την πτώση αντοχής είναι απαραίτητο να έχει σταματήσει η δημιουργία νέων ρηγμάτων ή η διέυρυνση των προηγούμενων, έτσι ώστε η ανελαστική παραμόρφωση στην κορυφή να επιτυγχάνεται από τη διέυρυνση και τη διατμητική παραμόρφωση των ίδιων σε κάθε κύκλο ρηγμάτων. Την παραπάνω υπόθεση ενισχύει το γεγονός ότι στο πέρας του οριζόντιου κλάδου για το αυτό επίπεδο μετατόπισης η μείωση αντοχής μεταξύ των τριών κύκλων είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση σε οποιαδήποτε άλλη τριάδα κύκλων. Αρα, όπως προκύπτει, είναι χρήσιμο να προσδιορισθεί η κρίσιμη επιμήκυνση της ακραίας περισφιγμένης περιοχής για την οποία επέρχεται το πέρας του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης δύναμης μετατόπισης. Η επαναλαμβανόμενη διέυρυνση των ίδιων από κάποιο σημείο και μετά ρηγμάτων μειώνει την ικανότητα ανάληψης έντασης με τους εξής δύο τρόπους: α)

Καταστροφή ολοένα και περισσότερων δεσμών μεταξύ των αδρανών στα χείλη των ρηγμάτων β) Συνεχής μείωση του χρήσιμου μήκους ρήγματος με την αυξανόμενη διεύρυνσή του.

Από την παρατήρηση των βρόχων υστέρησης προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας (μετά την καμπτική ρηγμάτωση και διαρροή) η δύναμη είναι περίπου το 15% της αντίστοιχης μέγιστης στον ίδιο κύκλο, κατά την έναρξη του οριζόντιου κλάδου, ενώ στο πέρας του πειράματος η δύναμη που παραλαμβάνει το δοκίμιο κατά τη διελευσή του από τη θέση ισορροπίας είναι το 30% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Γενικά γύρω από τη θέση ισορροπίας οι βρόχοι του δοκιμίου MSWI παρουσιάζουν έντονη στένωση, γεγονός που δείχνει τη μικρή γενικά ικανότητα του στοιχείου να αναπτύξει υστερητική συμπεριφορά συνοδευόμενη από ικανοποιητική απορρόφηση ενέργειας.

Η ακραία περισφιγμένη περιοχή του δοκιμίου παρουσιάζει ιδιότητες αξονικά φορτιζόμενου στοιχείου. Δεν σημειώθηκε λυγισμός από θλίψη του τμήματος της ακραίας ίνας που είχε αποφλοιωθεί, ενώ στο πέρας του πειράματος σημειώθηκε λυγισμός διαμήκων ράβδων. Μετά από την επιμήκυνση της ακραίας ίνας κατά 9mm (αντίστοιχη πλαστιμότητα μετατοπίσεων στην κορυφή 2.5) τα ρήγματα δεν κλείνουν εντελώς (παραμένονσα εφελκυστική παραμόρφωση, υπό θλίψη 2mm στο τέλος) κατά την αλλαγή της φοράς της τέμνουσας δύναμης. Πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι το πέρας του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής του δοκιμίου συμπίπτει με την έναρξη της διατήρησης ανοικτών ρηγμάτων κατά τη θλίψη της κρυφοκολόνας. Επίσης, ταυτόχρονα σχεδόν, οι βρόχοι ολίσθησης στη βάση του δοκιμίου αρχίζουν να έχουν μεγάλη συμμετοχή στη συνολική μετατόπιση του δοκιμίου. Ακόμη για κύκλους ίδιας μετατόπισης στην κορυφή έχουμε αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων στη βάση του δοκιμίου, γεγονός που δείχνει καθαρά την επιρροή της ανακύκλισης στην εξασθένιση του μηχανισμού εμπλοκής αδρανών, μέσα στα καμπτικά ρήγματα. Έτσι, για πλαστιμότητα μετατοπίσεων στην κορυφή της τάξης του 2.5 έχουμε διπλασιασμό των διατμητικών παραμορφώσεων στη βάση από 1 σε 2mm. Σε αυτήν τη φάση η πτώση αντοχής ήταν της τάξης του 20% της μέγιστης. Μετά τη λείανση των ρηγμάτων ενεργοποιούνται οι διαμήκεις οπλισμοί που διέρχονται εγκάρσια από τα ρήγματα και η αντοχή διατηρείται περίπου σταθερή. Το γεγονός ότι, αφού ενδώσει ο μηχανισμός εμπλοκής αδρανών, λειτουργεί πλέον ο κατακόρυφος διαμήκης οπλισμός (ως βλήτρο) που διέρχεται από τα οριζόντια (διασταυρούμενα) καμπτικά ρήγματα, αποδεικνύεται από το γεγονός ότι η μορφή των βρόχων ολίσθησης είναι τέτοια, ώστε η αντοχή τους αυξάνεται, αφού ο οπλισμός παραμορφωθεί υπό μορφή αμφιπάκτου (πακτωμένο

βλήτρο στα χείλη του ρήγματος) που μετακινείται η μία πάκτωση. Κατά τη στροφή αυτή του οπλισμού δεν παρατηρείται αύξηση αντοχής, ενώ με το πέρας της αυξάνει απότομα η αντοχή για δύο κυρίως λόγους: α) κλείσιμο των οριζόντιων ρηγμάτων στο πέρας της περιστροφής β) κατάκλιση, λόγω της παραμόρφωσης του οπλισμού κατά την φορά της τέμνουσας δύναμης. Στο πέρας του πειράματος οι ολισθήσεις στη βάση του δοκιμίου ήταν το 30% της μετατόπισης στην κεφαλή. Αμιγής ανελαστική διατμητική συμπεριφορά δεν διαπιστώθηκε καθώς τα διαγώνια ρήγματα που δημιουργήθηκαν στον κορμό δεν διευρύνθηκαν.

Δοκίμιο MSW2

Το δοκίμιο MSW2 είναι όμοιο με το δοκίμιο MSW3 και δοκιμάστηκε πρώτο από όλα. Κατά τον αρχικό σχεδιασμό του προγράμματος το δοκίμιο MSW2 επρόκειτο να φορτιστεί επιπλέον της οριζόντιας δύναμης και με αξονικό φορτίο. Σε αυτή τη φάση δεν χρησιμοποιήθηκε διάταξη εγκάρσιας αντιστήριξης με αποτέλεσμα, στην αρχή του πειράματος, το δοκίμιο να χάσει την εκτός επιπέδου ευστάθειά του. Μετά την κατασκευή του πλαισίου πλευρικής αντιστήριξης των δοκιμίων (Φωτ. 3) επαναλήφθηκε η δοκιμή στο συγκεκριμένο δοκίμιο χωρίς την αξονική δύναμη. Από τους βρόχους που σχεδιάστηκαν προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα είναι ακριβή σε ότι αφορά την αντοχή, την πλαστιμότητα και τη μείωση αντοχής, ενώ κρίθηκαν ικανοποιητικά σε ότι αφορά την ολίσθηση στη βάση του δοκιμίου, την απορρόφηση ενέργειας και την παραμόρφωση της κρυφοκολόνας. Η καμπτική ρηγματώση έγινε εντονότερη για τέμνουσα της τάξης των 60KN. Ενώ το δοκίμιο είχε υψηλές διατμητικές παραμορφώσεις δεν εμφανίστηκαν διαγώνια διατμητικά ρήγματα. Έτσι, η ύπαρξη υψηλών διατμητικών παραμορφώσεων εξηγείται από την έντονη οριζόντια μικρορηγματώση, λόγω της αρχικής εκτός επιπέδου παραμόρφωσης του δοκιμίου, η οποία άρθηκε βέβαια, για να γίνει το πείραμα, τα ρήγματα όμως συνέχισαν να υπάρχουν.

Η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε το δοκίμιο ήταν της τάξης των 124KN, ενώ το δοκίμιο θεωρήθηκε ότι αστόχησε για πλαστιμότητα μετατοπίσεων κορυφής ίση με 3.45 και η αντοχή στο πέρας του πειράματος ήταν της τάξης των 90KN. Το ποσοστό της μετατόπισης αστοχίας του δοκιμίου ως προς το ύψος του ήταν της τάξης του 2.9%, το οποίο είναι υψηλό και οφείλεται στην αρχική οριζόντια μικρορηγματώση του δοκιμίου στο ύψος της κρίσιμης περιοχής. Η πτώση αντοχής λόγω ανακύκλισης ήταν της τάξης του 3% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και της τάξης του 1% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης πριν τη μέγιστη αντοχή. Στο πέρας του

οριζόντιου κλάδου η μείωση αντοχής ήταν της τάξης του 7.5% και 5.5% αντίστοιχα. Η μικρότερη μείωση αντοχής σε αυτό το δοκίμιο σε σχέση με το προηγούμενο, εξηγείται από το πολύ χαμηλό επίπεδο της τέμνουσας που αναπτύχθηκε και άρα την περιορισμένη λείανση των ρηγμάτων. Από την παρατήρηση των βρόχων υστέρησης προκύπτει το συμπέρασμα ότι κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας (σε έντονο ανελαστικό επίπεδο) η δύναμη είναι της τάξης του 35% της αντίστοιχης μέγιστης στον ίδιο κύκλο φόρτισης. Στην αρχή της διαρροής η αντίστοιχη αναλογία είναι της τάξης του 12.5%. Παρατηρούμε δηλαδή ότι γύρω από τη θέση ισορροπίας οι βρόχοι παρουσιάζουν έντονη στένωση απεικονίζοντας έτσι την αδυναμία του δοκιμίου να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας.

Η ακραία περισφιγμένη περιοχή παρουσιάζει ιδιότητες αξονικά φορτιζόμενου στοιχείου. Για επιμήκυνση της τάξης των 10mm (αντίστοιχη πλαστιμότητα 2.0) τα ρήγματα δεν κλείνουν εντελώς κατά τη θλίψη της κρυφοκολόνας. Επίσης και εδώ το πέρας του οριζόντιου κλάδου οριοθετείται από το φαινόμενο μη κλεισίματος των καμπτικών ρωγμών. Δεν παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός της ακραίας περισφιγμένης περιοχής, ενώ σημειώθηκε τοπικός λυγισμό ράβδων μετά την απώλεια της επικάλυψης. Από την παρατήρηση των βρόχων ολισθήσεως στη βάση του δοκιμίου προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι ολισθήσεις αυξάνονται από τη στιγμή που αρχίζουν να μην κλείνουν τα καμπτικά ρήγματα και έπειτα. Στο τέλος του πειράματος οι διατμητικές ολισθήσεις στη βάση του δοκιμίου ήταν της τάξης του 20% της συνολικής μετατόπισης στην κεφαλή.

Από τη συγκριτική διερεύνηση των αποτελεσμάτων των δύο δοκιμίων προκύπτει το συμπέρασμα ότι γενικά τα δύο δοκίμια έχουν όμοιου τύπου συμπεριφορά, με τη διαφοροποίηση ότι στο δοκίμιο με αρκετή ποσότητα οπλισμού, όπου αναπτύχθηκε υψηλή τέμνουσα δύναμη, η πτώση αντοχής λόγω ανακύκλισης ήταν εντονότερη από την αντίστοιχη του δοκιμίου με το λιγότερο οπλισμό. Επίσης η ποσότητα καμπτικού και διατμητικού οπλισμού δεν βελτιώνει την εικόνα των βρόχων υστέρησης από ενεργειακή άποψη (εκτός βέβαια από τη μικρή αύξηση λόγω αύξησης αντοχής), ούτε μειώνει τη συμμετοχή των διατμητικών ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου· αντίθετα την αυξάνει. Η αύξηση των ολισθήσεων παρατηρείται σε προχωρημένο βέβαια ανελαστικό επίπεδο, το οποίο είναι ο κανόνας σε κατασκευές με απαιτήσεις υψηλής πλαστιμότητας.

Δοκίμιο MSW3

Το δοκίμιο MSW3 είναι όμοιο με το δοκίμιο MSW2 ως προς τη γεωμετρία και τον οπλισμό. Εκτός από την οριζόντια δύναμη επιβλήθηκε αξονική δύναμη ίση με το 10% της θλιπτικής αντοχής του τοιχείου. Κατά την επιβολή των κύκλων φόρτισης τα τριχοειδή καμπτικά ρήγματα που δημιουργήθηκαν αρχικά, άρχισαν να διευρύνονται για τέμνουσα δύναμη της τάξης των 90KN. Τα διαγώνια ρήγματα στον κορμό προέρχονται από τη διεύρυνση των καμπτικών ρηγμάτων που δημιουργήθηκαν καθ' ύψος του τοιχώματος. Η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε το δοκίμιο ήταν της τάξης των 176KN. Η αντοχή έπεσε στο 75% της μέγιστης (130KN) για μετατόπιση της τάξης των 25mm που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μετατοπίσεων 4.6 και στο 1.3% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής του δοκιμίου λόγω ανακύκλισης ήταν της τάξης του 4.5% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και 2.3% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο φόρτισης για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στην αρχή του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής του δοκιμίου. Στο πέρας του οριζόντιου κλάδου οι αντίστοιχες πτώσεις αντοχής ήταν της τάξης του 11.5% και 2%, ενώ στο τέλος του πειράματος τα ποσοστά διαμορφώθηκαν σε 5% και 7% . Η δύναμη κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας είναι το 35% της αντίστοιχης μέγιστης στον ίδιο κύκλο κατά το πέρας του πειράματος, ενώ στην αρχή του οριζόντιου κλάδου το αντίστοιχο ποσοστό είναι της τάξης του 17%. Παρατηρούμε δηλαδή ότι στο δοκίμιο με την αξονική φόρτιση, παρά το γεγονός ότι υπήρχε σχετικά μικρότερο ποσοστό οπλισμού από ότι στο δοκίμιο MSW1, αναπτύχθηκε υψηλή αντοχή και καταγράφηκαν βρόχοι μεγάλου εμβαδού γεγονός που δείχνει ότι η ύπαρξη αξονικής δύναμης της τάξης του 10% της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων είναι αρκετή για να προσδώσει στα τοιχώματα τις ευεργετικές ιδιότητες θλιβόμενου μέλους. Επίσης η ανάπτυξη υψηλής τέμνουσας οδήγησε σε μεγαλύτερη μείωση της αντοχής από ότι στο δοκίμιο MSW2 (με ίδιο οπλισμό και χωρίς αξονική δύναμη) στο πέρας του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής, ενώ συγκριτικά με το δοκίμιο MSW1 που είχε περισσότερο οπλισμό και καθόλου αξονική δύναμη η αντίστοιχη μείωση αντοχής ήταν μικρότερη, γεγονός που αναδεικνύει την ευεργετική συνεισφορά της αξονικής δύναμης έναντι του οπλισμού. Άρα όπως προκύπτει, από ενεργειακής άποψης και από άποψης αντοχής είναι προτιμότερη η κατασκευή τοιχωμάτων μικρής διατομής με υψηλό ποσοστό αξονικής θλίψης παρά τοιχωμάτων μεγάλης διατομής με αρκετό οπλισμό και αξονική θλίψη κάτω του 10% της θλιπτικής αντοχής.

Η ακραία περισφιγμένη περιοχή λόγω της υψηλής αξονικής φόρτισης ένεκα κάμψης

και αξονικής δύναμης δεν διατήρησε ανοικτά ρήγματα κατά τη θλίψη της, ενώ παρουσιάστηκε τοπικός λυγισμός και συντριβή του σκυροδέματος σε ύψος ίσο με το πλάτος της κρυφοκολόνας σε προχωρημένη ανελαστική κατάσταση. Οι οριζόντιες ολισθήσεις στη βάση του δοκιμίου στο τέλος του πειράματος ήταν της τάξης του 20% και, όπως παρατηρούμε, δεν μειώθηκαν, λόγω της αξονικής φόρτισης, σε σχέση με αυτές του ομοίου δοκιμίου χωρίς αξονική δύναμη. Άρα, όπως προκύπτει, η αξονική δύναμη δεν μειώνει τις διατμητικές ολισθήσεις στη βάση του δοκιμίου καθώς η υπαρχή της συνεπάγεται αύξηση της δρώσας τέμνουσας και άρα αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων στην λόγω κάμψης ρηγματωμένη διατομή, παρά το γεγονός ότι δεν διαπιστώθηκαν παραμένοντα ανοικτά ρήγματα. Το παραπάνω γεγονός εξηγείται από τη συντριβή του σκυροδέματος στο κάτω μέρος του δοκιμίου που προκλήθηκε από την ταυτόχρονη δράση υψηλής ορθής (λόγω κάμψης και αξονικής δύναμης) και διατμητικής έντασης.

Δοκίμιο MSW4

Το δοκίμιο MSW4 σχεδιάστηκε όπως ακριβώς το δοκίμιο MSW2 με τις ίδιες διαστάσεις και οπλισμούς με την μόνη διαφορά ότι προστέθηκαν διαγώνια στον κορμό οπλισμοί 6Ø8 (τρεις ανά διεύθυνση). Οι προστιθέμενοι δισδιαγώνιοι οπλισμοί ανηγμένοι οριζοντίως και καθέτως δίνουν εμβαδό ίσο με αυτό του πρόσθετου διατμητικού οπλισμού του δοκιμίου MSW1. Το σημείο τομής των διαγώνιων οπλισμών ήταν στο μέσον της βάσης του δοκιμίου.

Τα οριζόντια καμπτικά ρήγματα που μορφώθηκαν αρχικά, άρχισαν να διευρύνονται για τέμνουσα της τάξης των 80KN. Η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε το δοκίμιο ήταν της τάξης των 158KN, ενώ στο πέρας του πειράματος η αντοχή ήταν 118KN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση κορυφής 26mm, η οποία δίνει πλαστιμότητα μετατοπίσεων ίση με 4. Η μετατόπιση κορυφής αντιστοιχεί στο 1.35% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής λόγω ανακύκλισης ήταν της τάξης του 5% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και 1.5% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατοπίσεων στην αρχή του ευθύγραμμου κλάδου της καμπύλης αντοχής του δοκιμίου. Στο πέρας του ευθύγραμμου κλάδου οι αντίστοιχες πτώσεις αντοχής ήταν της τάξης του 12% και 7%, ενώ στο τέλος του πειράματος τα παραπάνω ποσοστά διαμορφώθηκαν σε 7% και 4%. Κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας στον τελευταίο κύκλο η αναλαμβανόμενη δύναμη ήταν το 60% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον ίδιο κύκλο, ενώ στην αρχή του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής το αντίστοιχο ποσοστό ήταν της τάξης του 16%. Παρατηρούμε

δηλαδή ότι σε έντονο ανελαστικό επίπεδο υπάρχει σχεδόν εξάλειψη της στένωσης των βρόχων υστέρησης στην αρχή των αξόνων, που χαρακτηρίζει δοκίμια με υψηλή διατμητική παραμόρφωση και άρα αρχίζει να ενισχύεται η υπόθεση ότι η χρήση του δισδιαγώνιου οπλισμού ως κύριου οπλισμού διάτμησης εξάρει και ενισχύει την καμπτική συμπεριφορά έναντι της διατμητικής. Σε όμοιου τύπου συμπέρασμα καταλήγουμε από την παρατήρηση της κλίσης των βρόχων υστέρησης μετά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισοροπίας σε έντονο ανελαστικό επίπεδο καθώς αυτοί έχουν τα κοίλα είτε στραμμένα προς τα κάτω είτε σχεδόν οριζόντια. Η ακραία περισφιγμένη περιοχή δεν παρουσίασε εκτός επιπέδου λυγισμό, ενώ στο πέρας του πειράματος παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός των θλιβόμενων ράβδων. Αρκετά καμπτικά ρήγματα παρέμειναν ανοικτά ακόμη και για θλιπτική φόρτιση (ένεκα κάμψης) της ακραίας ίνας, αφού στο προηγούμενο μισό του κύκλου ο εφελκυσμός εκεί σε ύψος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου, είχε φθάσει τα 10mm που αντιστοιχεί σε ποσοστό ίσο με το 0.83% του μήκους της ακραίας ίνας. Οι ολισθήσεις στη βάση του δοκιμίου ήταν της τάξης του 10% της συνολικής μετατόπισης στην κορυφή, γεγονός που δείχνει ότι αυτές ουσιαστικά καταργήθηκαν. Το παραπάνω γεγονός εξηγείται από την θέση των διαγώνιων ράβδων στην κρίσιμη διατομή της βάσης. Πράγματι, αν αναλογιστούμε ότι οι κεκλιμένες ράβδοι βρίσκονταν στο μέσο της διατομής και έτσι είχαν περιορισμένη συμβολή στην αντοχή του δοκιμίου και άρα μικρή επιπόνηση και εφελκυστική παραμόρφωση, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η άρση των ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου οφείλεται στη διπλή λειτουργία των κεκλιμένων ράβδων που περιγράφουμε παρακάτω:

α) Απευθείας λειτουργία του κεκλιμένου οπλισμού που λόγω της κλίσης του και της μη διαρροής του δεν επέτρεψε τη διατμητική ολίσθηση

β) Εμμεση λειτουργία του κεκλιμένου οπλισμού που λόγω της θέσης του και της κλίσης του περιόρισε την καμπτική ρηγματώση, αυξάνοντας το μήκος θλιβόμενης ζώνης της διατομής, επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη χαμηλής διατμητικής τάσης στη ρηγματωμένη διατομή και άρα την διατήρηση της συμμετοχής του μηχανισμού εμπλοκής αδρανών στην ανάληψη τέμνουσας ακόμη και σε έντονο ανελαστικό επίπεδο.

Τα διαγώνια ρήγματα που δημιουργήθηκαν στον κορμό προέρχονται από ελαστική διατμητική ρηγματώση. Η μόρφωση της κλίσης αυτών των ρηγμάτων σε οριζόντια κατά το πέρας τους στο άνω άκρο οφείλεται καθαρά στην ύπαρξη του διαμήκους καμπτικού οπλισμού με την οριζόντια ισχυρή περίσφυξη, ο οποίος δεν επέτρεψε τη

διεύρυνσή τους κατά γωνία 45° , αλλά κατά την ασθενέστερη των 0° , όπου υπήρχε μόνο ο διαμήκης οπλισμός.

Δοκίμιο MSW5

Το δοκίμιο MSW5 κατασκευάστηκε όμοιο με το δοκίμιο MSW4 εκτός του γεγονότος ότι οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί τέμονταν σε ύψος ίσο με $l_w/2$ από τη βάση του και άρα διέρχονταν από τις ακραίες περισφιγμένες περιοχές. Έτσι οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί συνέβαλαν επιπλέον της άρσης της ολίσθησης και στην αύξηση της καμπτικής αντοχής του δοκιμίου. Κατά το πείραμα τα αρχικά τριχοειδή ρήγματα άρχισαν να διευρύνονται για τέμνουσα της τάξης των 80KN. Τα διαγώνια ρήγματα στον κορμό προέρχονταν από διατμητική ρηγμάτωση και δεν παρατηρήθηκε διαρροή του διερχόμενου από αυτά οπλισμού. Η μέγιστη αντοχή που ανέπτυξε το δοκίμιο ήταν της τάξης των 187KN. Στο πέρας του πειράματος η αντοχή ήταν της τάξης των 140KN, που επήλθε για μετατόπιση στην κορυφή ίση με 26mm, η οποία αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μετατοπίσεων 4.5. Το ποσοστό της μετατόπισης αστοχίας ήταν της τάξης του 1.35% του ύψους του δοκιμίου. Η πτώση αντοχής λόγω ανακύκλισης ήταν της τάξης του 3.3% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και 1.5% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στην αρχή του ευθύγραμμου κλάδου της καμπύλης αντοχής του δοκιμίου. Στο πέρας του ευθύγραμμου κλάδου οι αντίστοιχες πτώσεις αντοχής ήταν της τάξης του 11.5% και 4%, ενώ στο τέλος του πειράματος τα παραπάνω ποσοστά διαμορφώθηκαν σε 4.3% και 3%. Κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας στον τελευταίο κύκλο η αναλαμβανόμενη δύναμη ήταν το 43% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον ίδιο κύκλο ενώ στην αρχή του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής το αντίστοιχο ποσοστό ήταν της τάξης του 16%. Στην ακραία ίνα διατηρήθηκαν ανοικτά ρήγματα ακόμη και υπό θλίψη, αφού η επιμήκυνση λόγω εφελκυσμού σε ύψος ίσο με το πλάτος είχε φθάσει την τιμή των 11mm. Στην κρίσιμη διατομή της βάσης μετρήθηκαν ολισθήσεις της τάξης των 3.5mm που αντιστοιχούν σε ποσοστό 13.3% της συνολικής μετατόπισης της κεφαλής. Για τέμνουσα ίση με την τέμνουσα αστοχίας του δοκιμίου MSW4 το αντίστοιχο ποσοστό ήταν της τάξης του 5%.

Παρατηρείται λοιπόν σαφής βελτίωση όλων των ανελαστικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων, όπως είναι η απορρόφηση ενέργειας και η ανελαστική δυσκαμψία που αυξάνουν και η ταχύτητα μείωσης αντοχής που μειώνεται με τη χρήση των δισδιαγώνιων οπλισμών. Επίσης, ενώ στα δοκίμια με χιαστί οπλισμό ο διαμήκης καμπτικός οπλισμός είναι κατά 6/8 λιγότερος από τον αντίστοιχο οπλισμό του

δοκιμίου, MSW1 και όμοιος με τον αντίστοιχο οπλισμό του δοκιμίου MSW2 επιτεύχθηκε πλαστιμότητα 4 και 4.5 για τα δοκίμια MSW4 και MSW5 έναντι πλαστιμότητας 3.5 και 4 για τα δοκίμια MSW2 και MSW1 αντίστοιχα. Ταυτόχρονα οι διατμητικές ολισθήσεις που μετρήθηκαν στα δοκίμια με τον δισδιαγώνιο οπλισμό ήταν περίπου οι μισές των αντίστοιχων ολισθήσεων στα δοκίμια με κλασικό οπλισμό.

Για το δοκίμιο MSW5 παρατηρούμε ότι, ενώ ο δισδιαγώνιος οπλισμός διέρρευσε στην θέση της βάσης της ακραίας ίνας, οι διατμητικές ολισθήσεις ήταν περιορισμένες. Παρά τη διαρροή του δισδιαγώνιου οπλισμού η άρση των διατμητικών παραμορφώσεων εξηγείται από τη θεώρηση ότι αφενός η διαρροή ήταν περιορισμένη στο μήκος της ράβδου που διέρχονταν από τη κρυφοκολόνα, αφετέρου μια πολύ μικρή ολίσθηση εντός των καμπτικών ρηγμάτων στα δοκίμια με χιαστί οπλισμό (το 0.3 της αντίστοιχης ολίσθησης για τα δοκίμια με κλασικού τύπου οπλισμό) αρκούσε, για να περιστραφεί η κεκλιμένη ράβδος τόσο ώστε να κλείσουν τα καμπτικά ρήγματα και να ενισχυθεί η εμπλοκή αδρανών με επιπλέον ενεργό μήκος ρήγματος.

Δοκίμιο MSW6

Το δοκίμιο MSW6 κατασκευάστηκε όμοιο με το δοκίμιο MSW1 με μόνη διαφοροποίηση την ύπαρξη αρμού σκυροδέτησης στη βάση του και τη σύνδεση των διαμήκων οπλισμών μέσω παράθεσης. Το εν λόγω δοκίμιο επέδειξε μέγιστη αντοχή της τάξης των 202KN, ενώ τα τριχοειδή καμπτικά ρήγματα στη βάση άρχισαν να διευρύνονται για τέμνουσα πάνω από 70KN. Δεν παρατηρήθηκε ρηγμάτωση καθ' ύψος και οι βλάβες συγκεντρώθηκαν στη βάση του δοκιμίου, ακριβώς στον αρμό. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, ενώ λίγο πιο πάνω από τη βάση του δοκιμίου υπήρχε ο διπλάσιος οπλισμός (16Ø8), σε κάθε ακραία ίνα του δοκιμίου (αν και με ελλιπή αγκύρωση), ακριβώς στη βάση του δοκιμίου υπήρχε ο μισός οπλισμός. Έτσι κατά τον εφελκυσμό ένεκα κάμψης, η ρηγμάτωση συγκεντρώθηκε στη βάση του δοκιμίου που είχε τον μισό οπλισμό. Η διαρροή του διαμήκους οπλισμού δεν προχώρησε στο μήκος παράθεσης. Από την εξέταση των βρόχων υστέρησης παρατηρούμε ότι υπάρχει ασυμμετρία ως προς την αναλαμβανόμενη δύναμη μεταξύ των ημικυκλίων φόρτισης. Αυτό εξηγείται επίσης από το γεγονός ότι, ενώ υπάρχει συμμετρικός οπλισμός και στα δύο άκρα του δοκιμίου, κατά την κάμψη λειτουργεί διαφορετικό ποσοστό σε κάθε άκρο. Έτσι κατά την κρίσιμη ρηγμάτωση (120KN) ο εφελκυσόμενος οπλισμός ήταν ο μισός του αντίστοιχου θλιβόμενου, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν μικρές ασυμμετρίες αρχικά στους βρόχους υστέρησης οι οποίες μεγενθύνθηκαν για μεγαλύτερες τιμές επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.

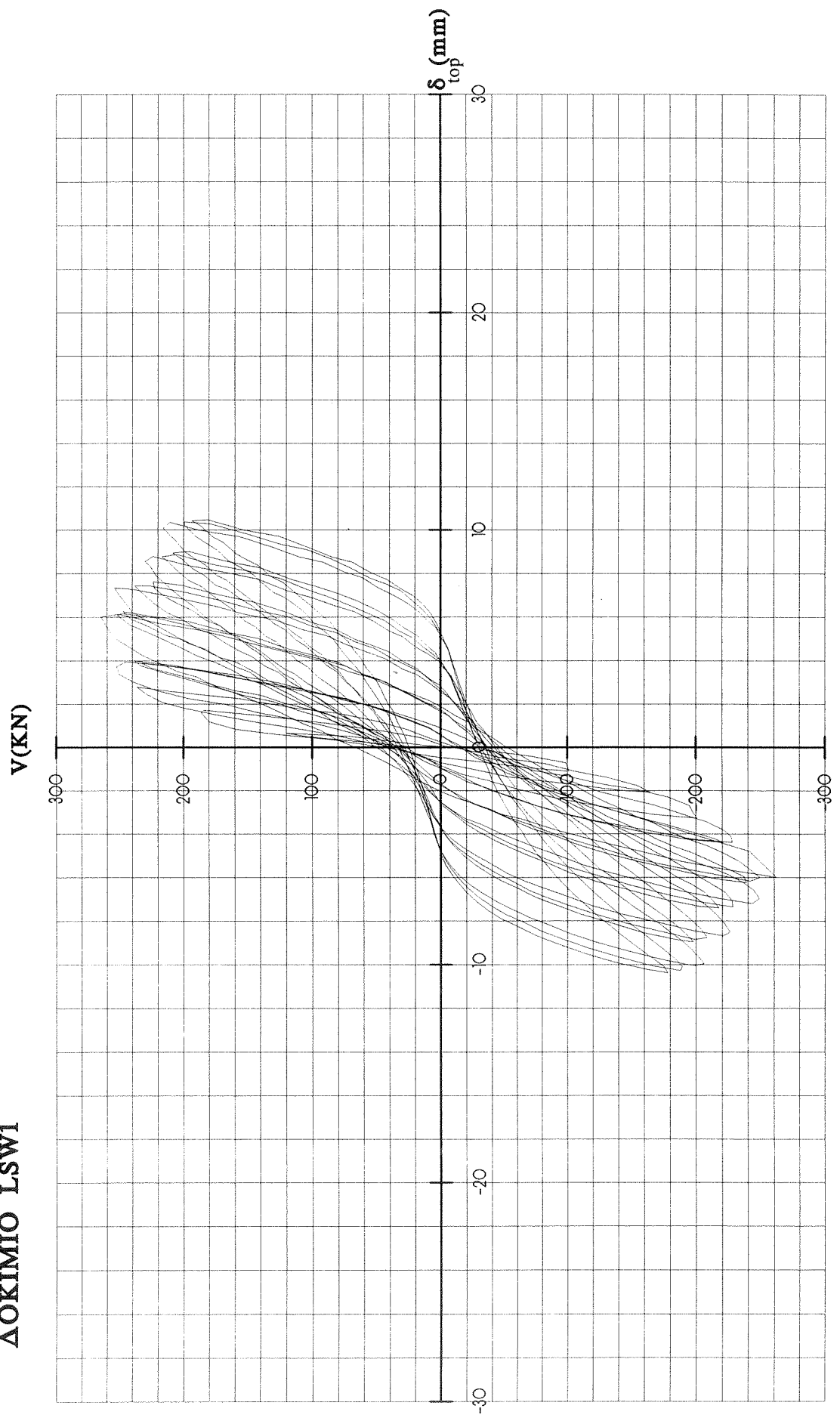
Στο πέρας του πειράματος η αντοχή ήταν της τάξης των 150KN και η αντίστοιχη μετατόπιση της τάξης των 28mm, που αντιστοιχεί σε παστιμότητα μετατοπίσεων 2.8. Η μετατόπιση αστοχίας αντιστοιχεί σε ποσοστό 1.45% του ύψους του δοκιμίου.

Η πτώση αντοχής λόγω ανακύκλισης ήταν της τάξης του 3% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και 2% από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο, για το αυτό επίπεδο μετατόπισης στην αρχή του ευθύγραμμου κλάδου της καμπύλης αντοχής του δοκιμίου. Στο πέρας του ευθύγραμμου κλάδου οι αντίστοιχες πτώσεις αντοχής ήταν της τάξης του 10% και 6%, ενώ στο τέλος του πειράματος τα παραπάνω ποσοστά διαμορφώθηκαν σε 9% και 9%. Κατά τη διέλευση του δοκιμίου από τη θέση ισορροπίας στον τελευταίο κύκλο η αναλαμβανόμενη δύναμη ήταν το 25% της μέγιστης αναπτυσσόμενης στον ίδιο κύκλο, ενώ στην αρχή του οριζόντιου κλάδου της καμπύλης αντοχής το αντίστοιχο ποσοστό ήταν της τάξης του 10%.

Κατά τη θλίψη της κρυφοκολόνας δεν παρατηρήθηκαν παραμένοντα ανοικτά καμπτικά ρήγματα που είχαν διαρρεύσει στον προηγούμενο μισό κύκλο, λόγω της περιορισμένης καμπτικής ρηγμάτωσης. Οι ολισθήσεις ήταν της τάξης των 10mm, που αντιστοιχούν στο 36% της μετατόπισης στην κορυφή.

Βρόχοι υστέρησης δοκιμίων

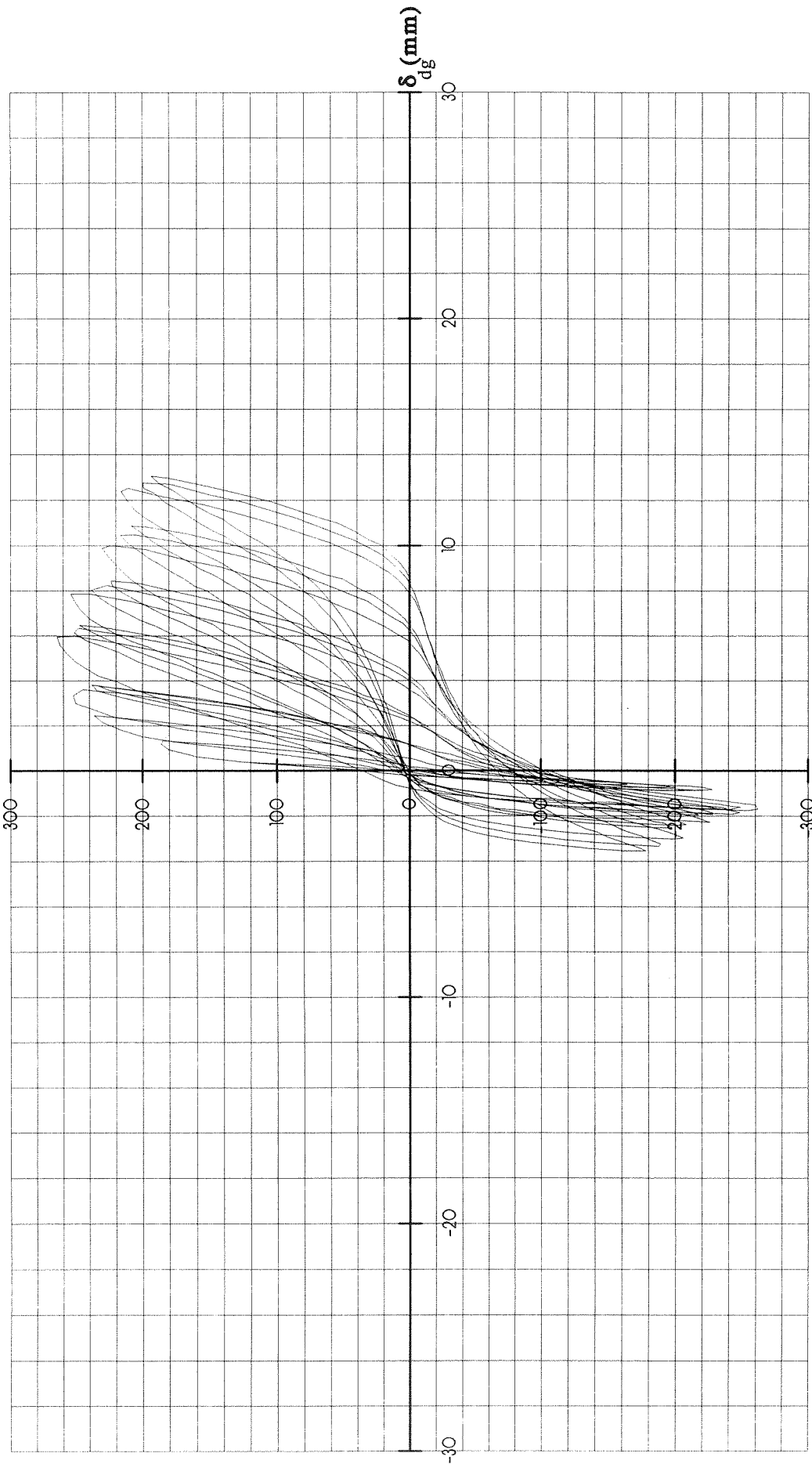
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW1



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW1

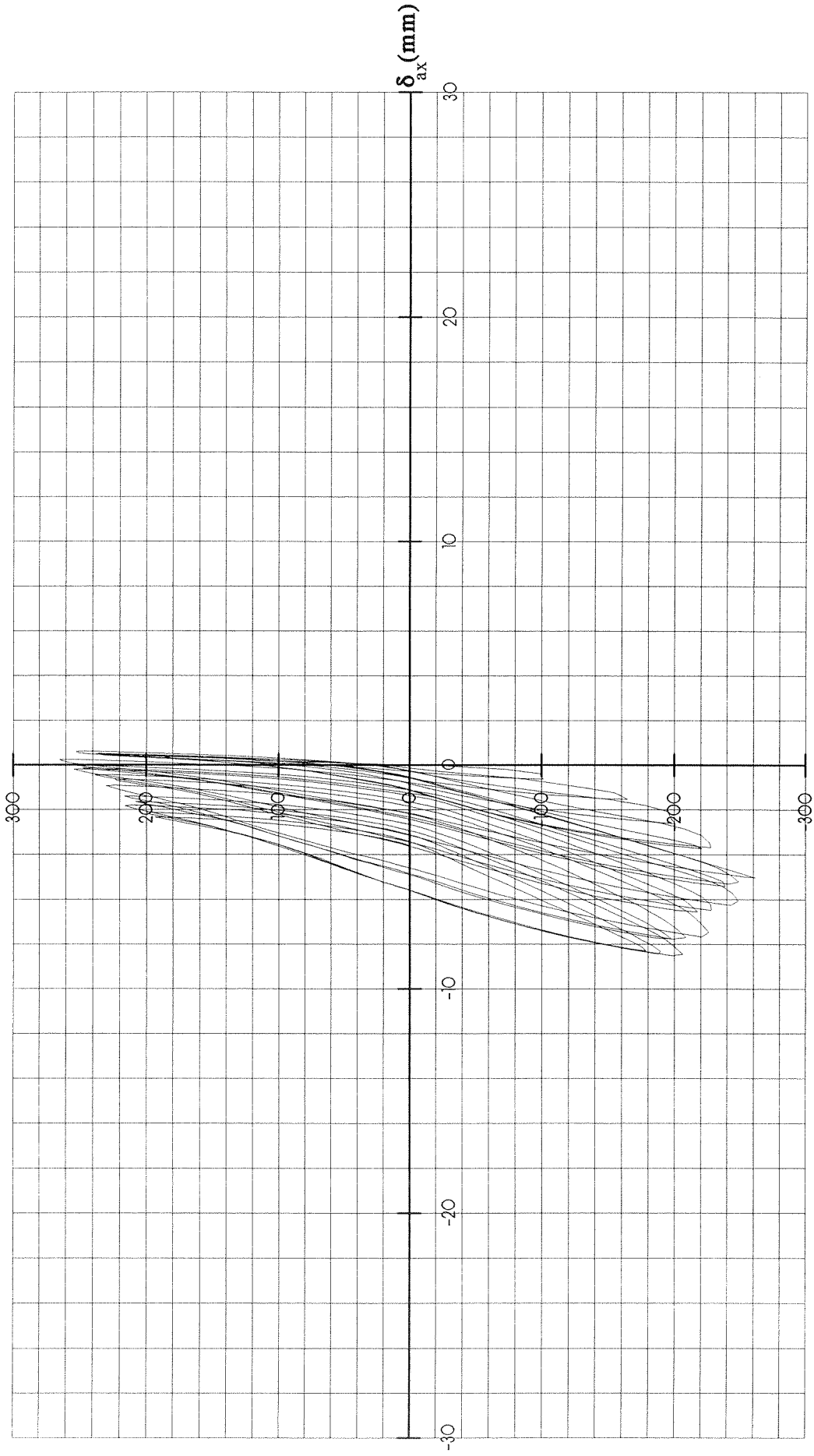
V (KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW1

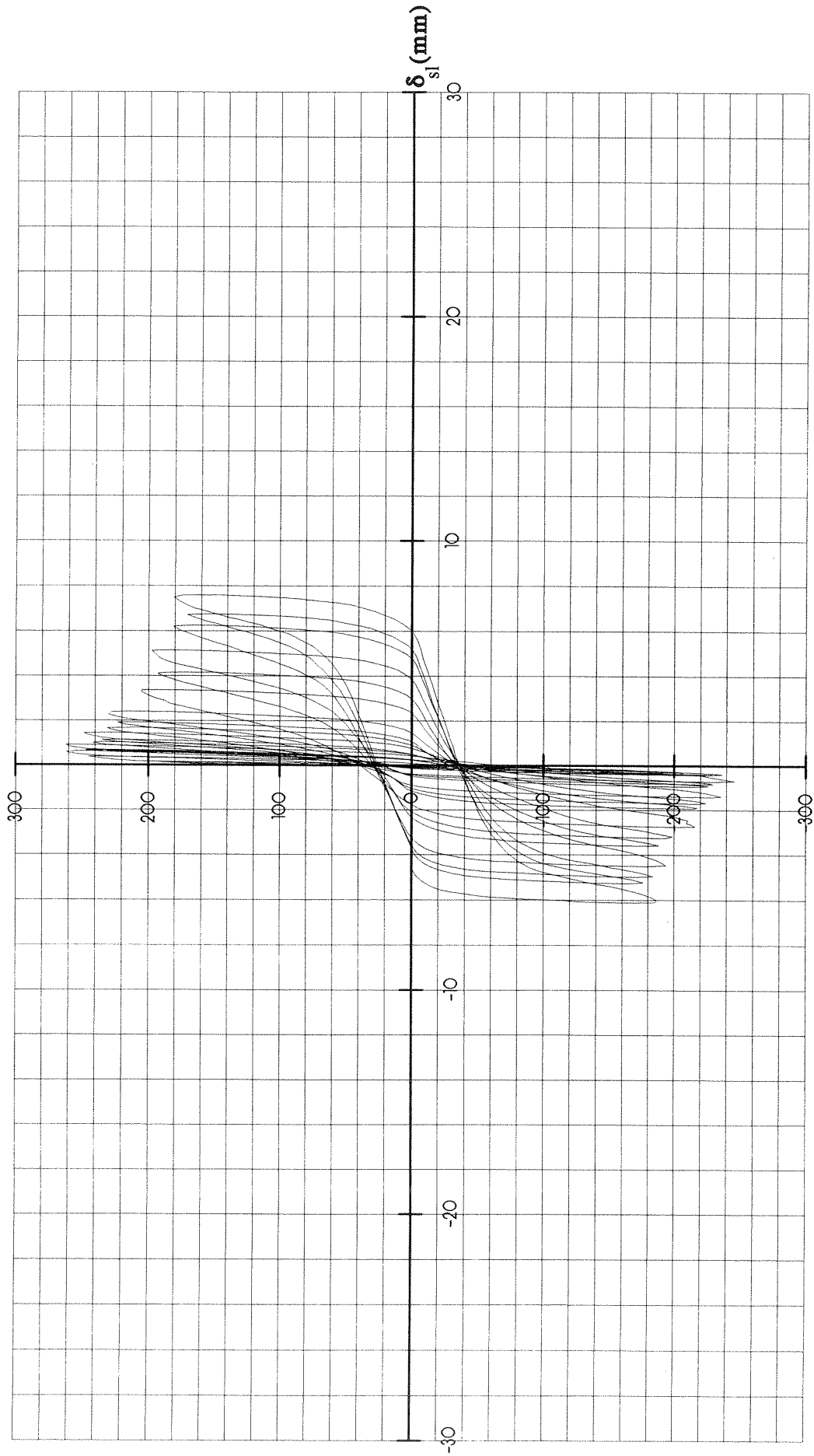
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW1

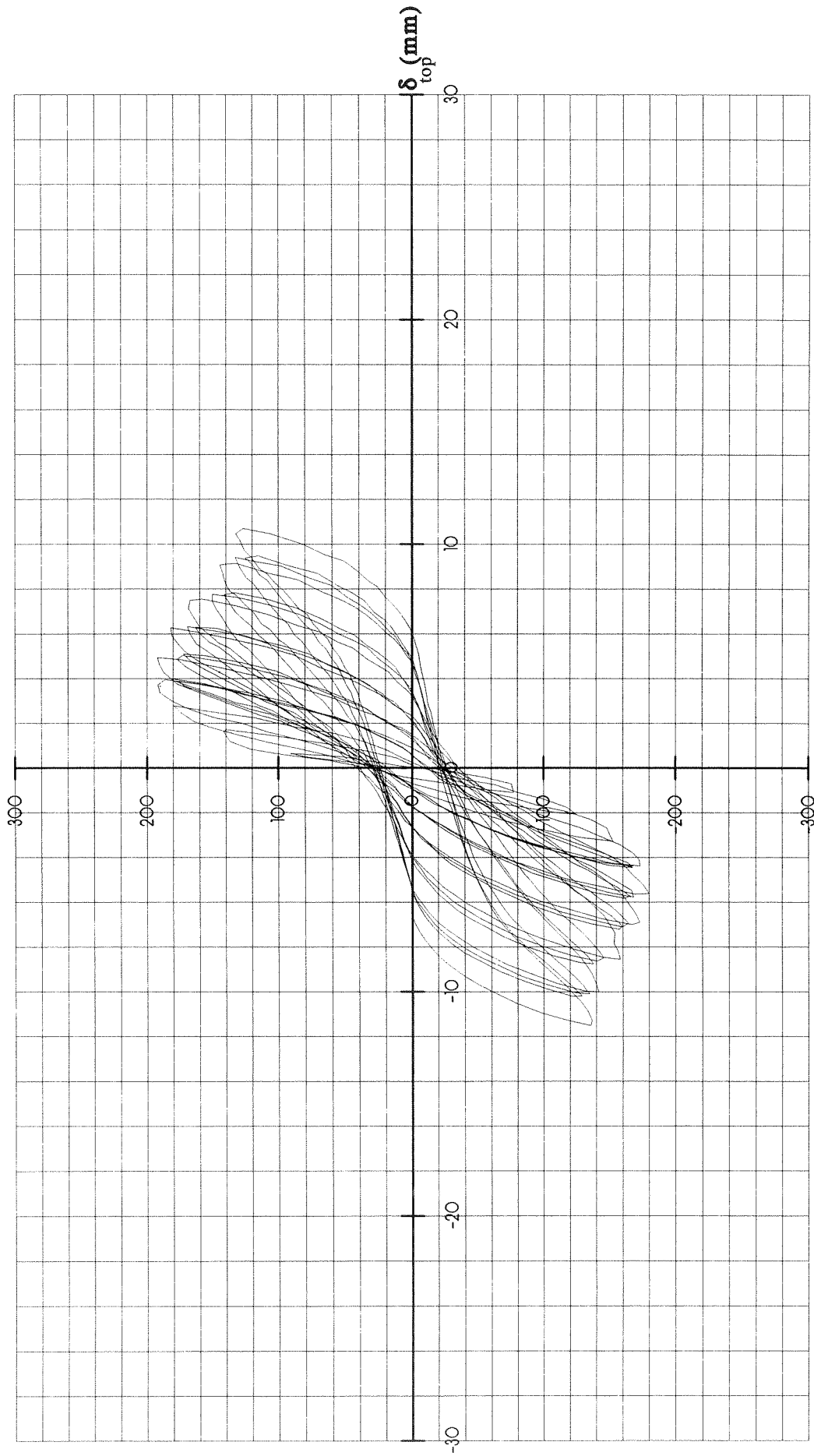
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW2

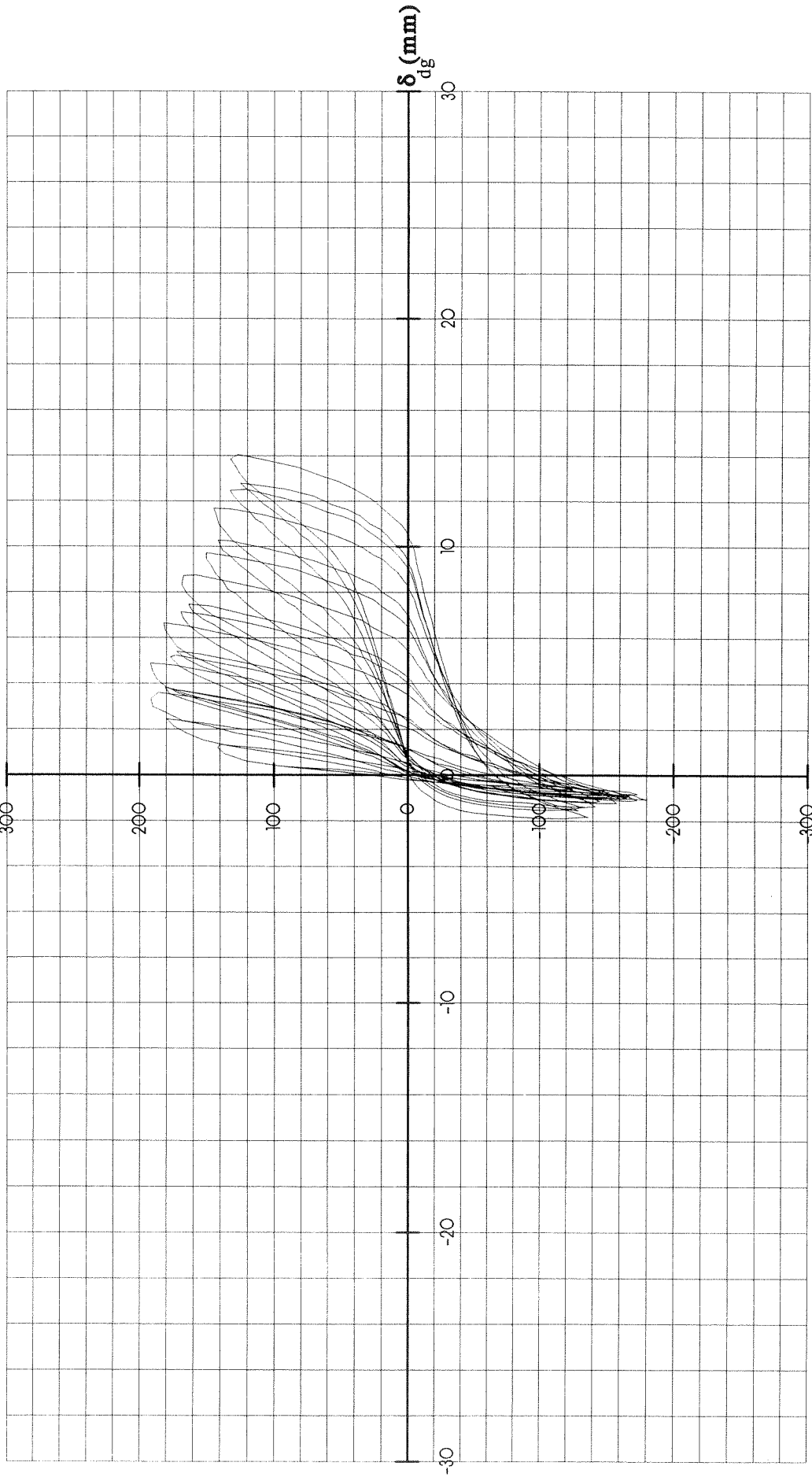
V(kN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW2

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW2

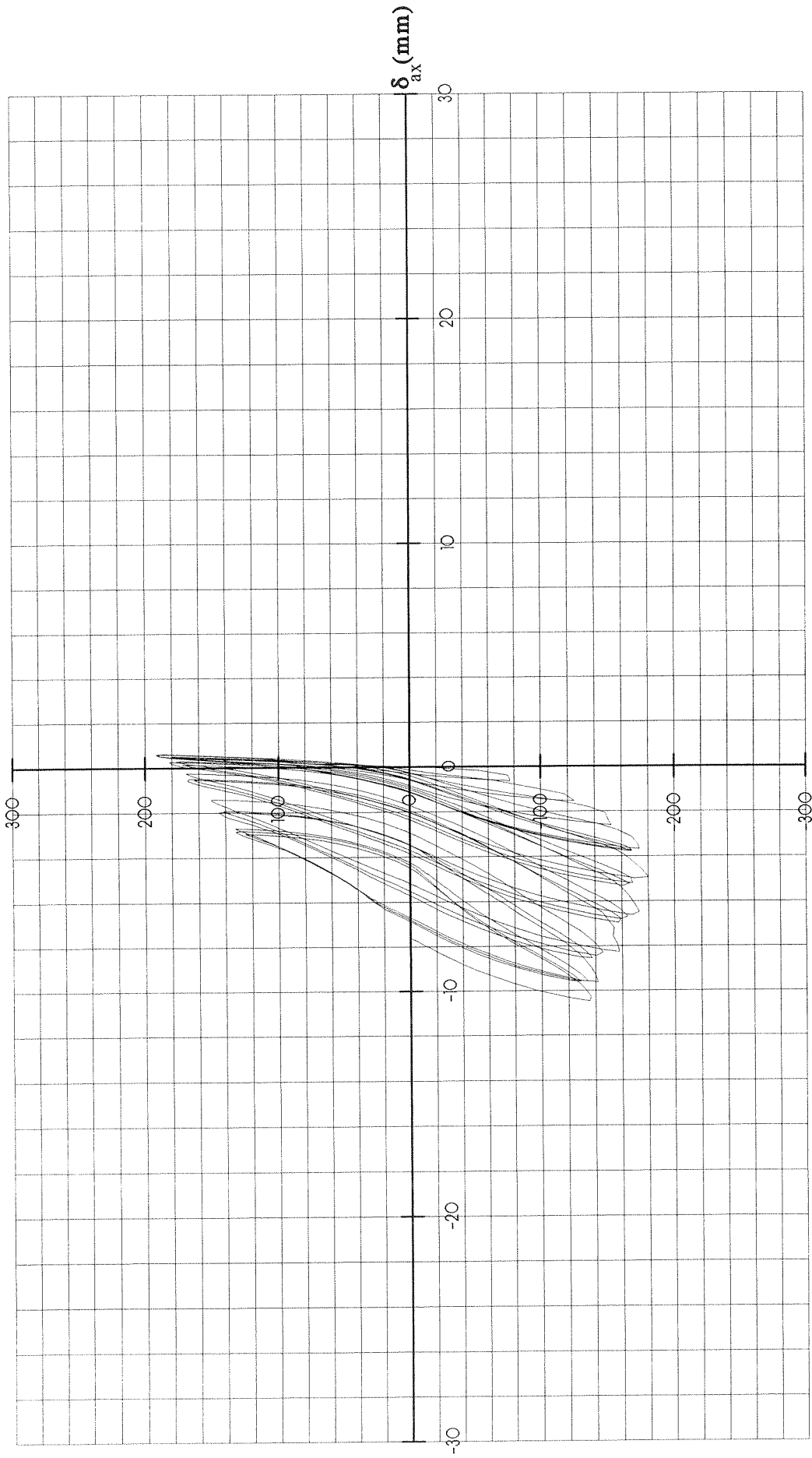
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW2

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW2

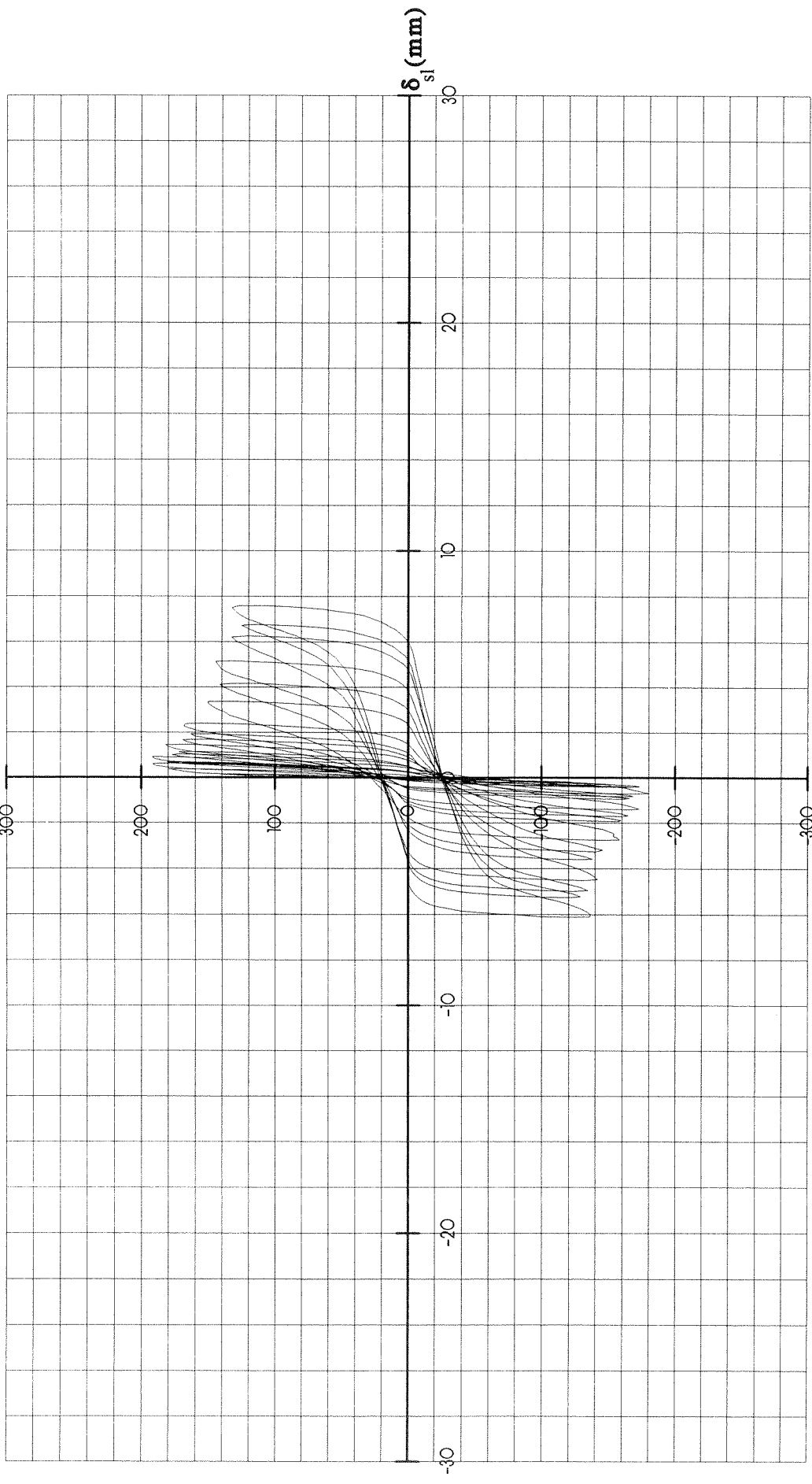
V (KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW2

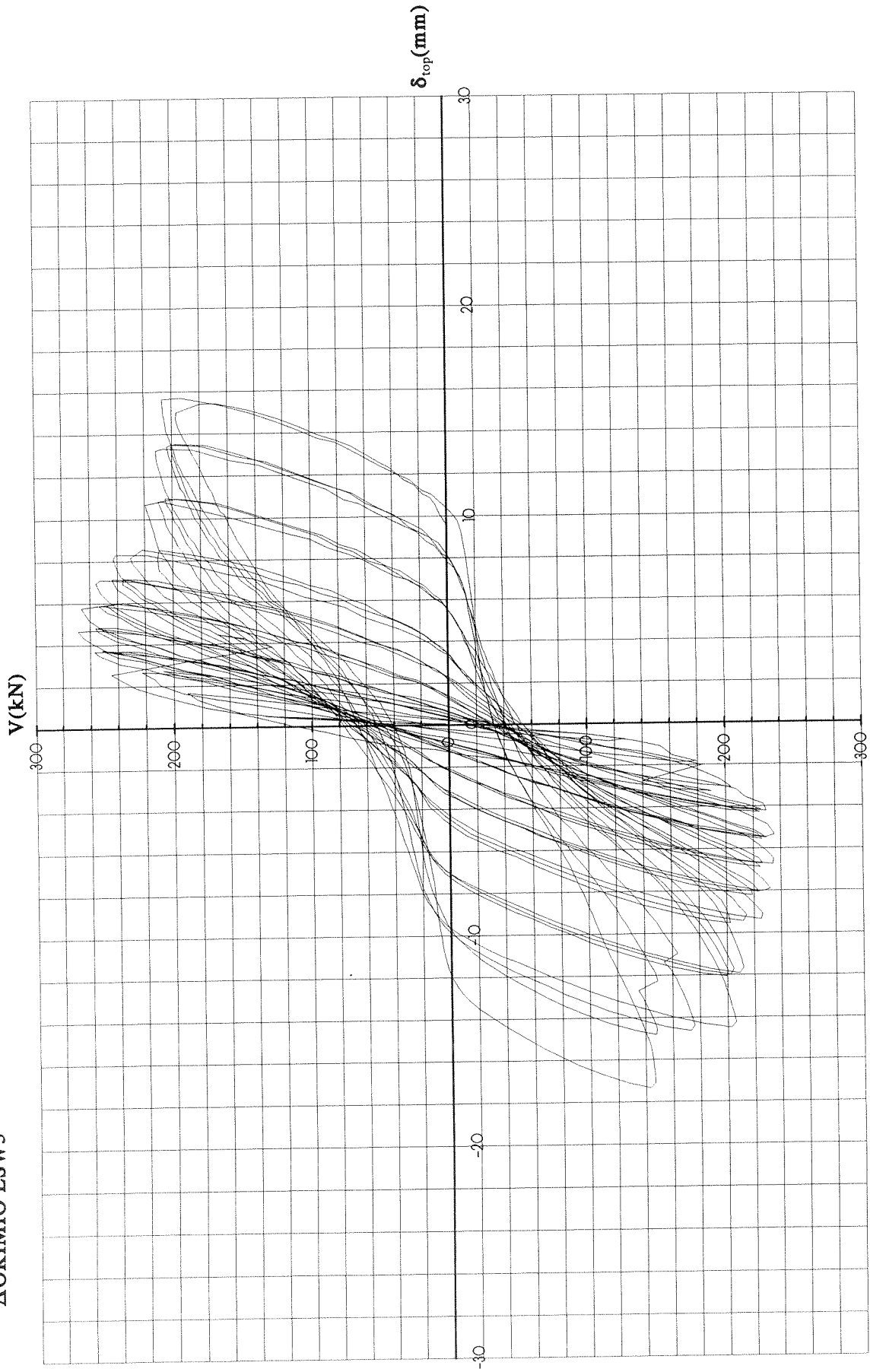
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW2

V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW2

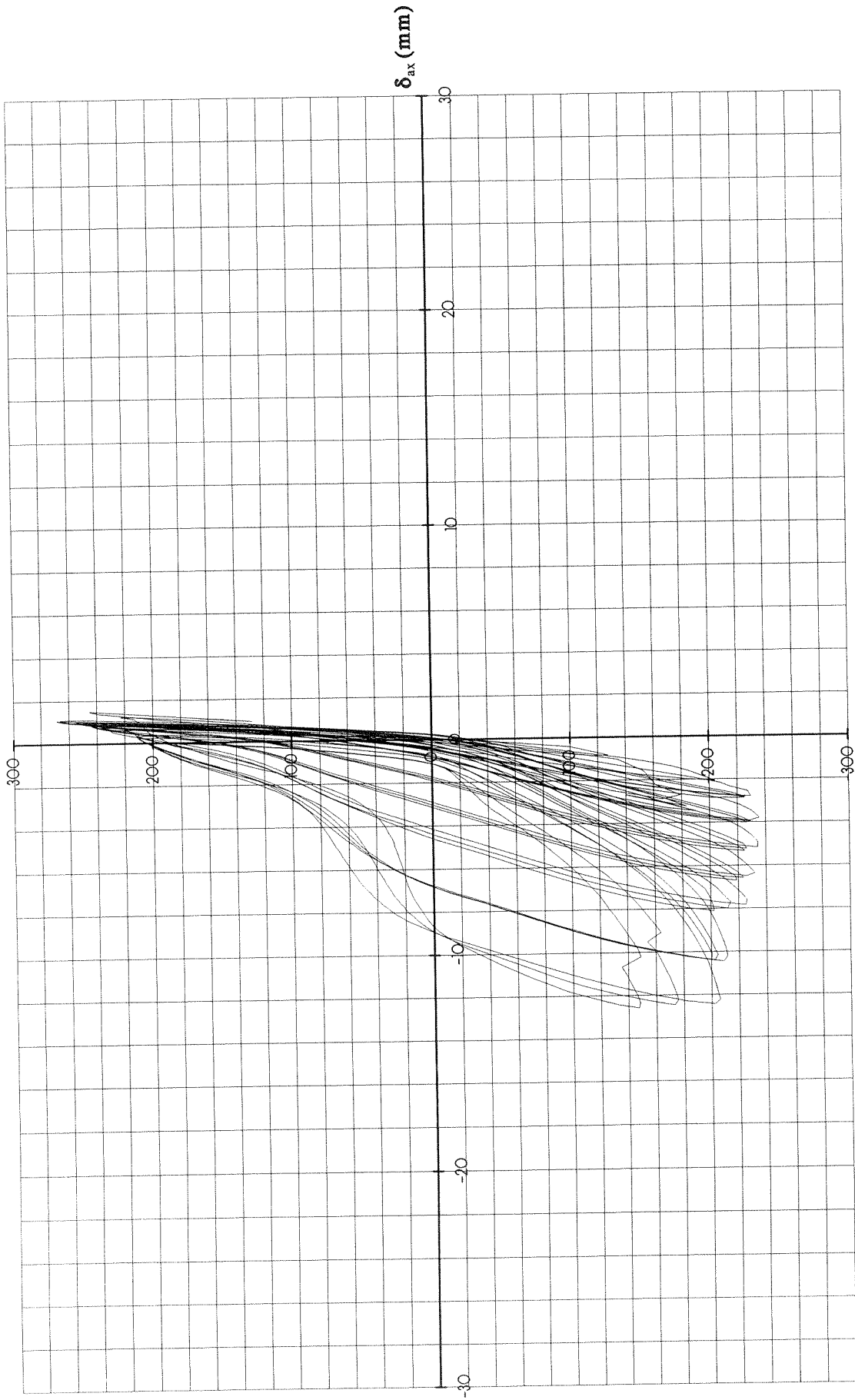
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW3

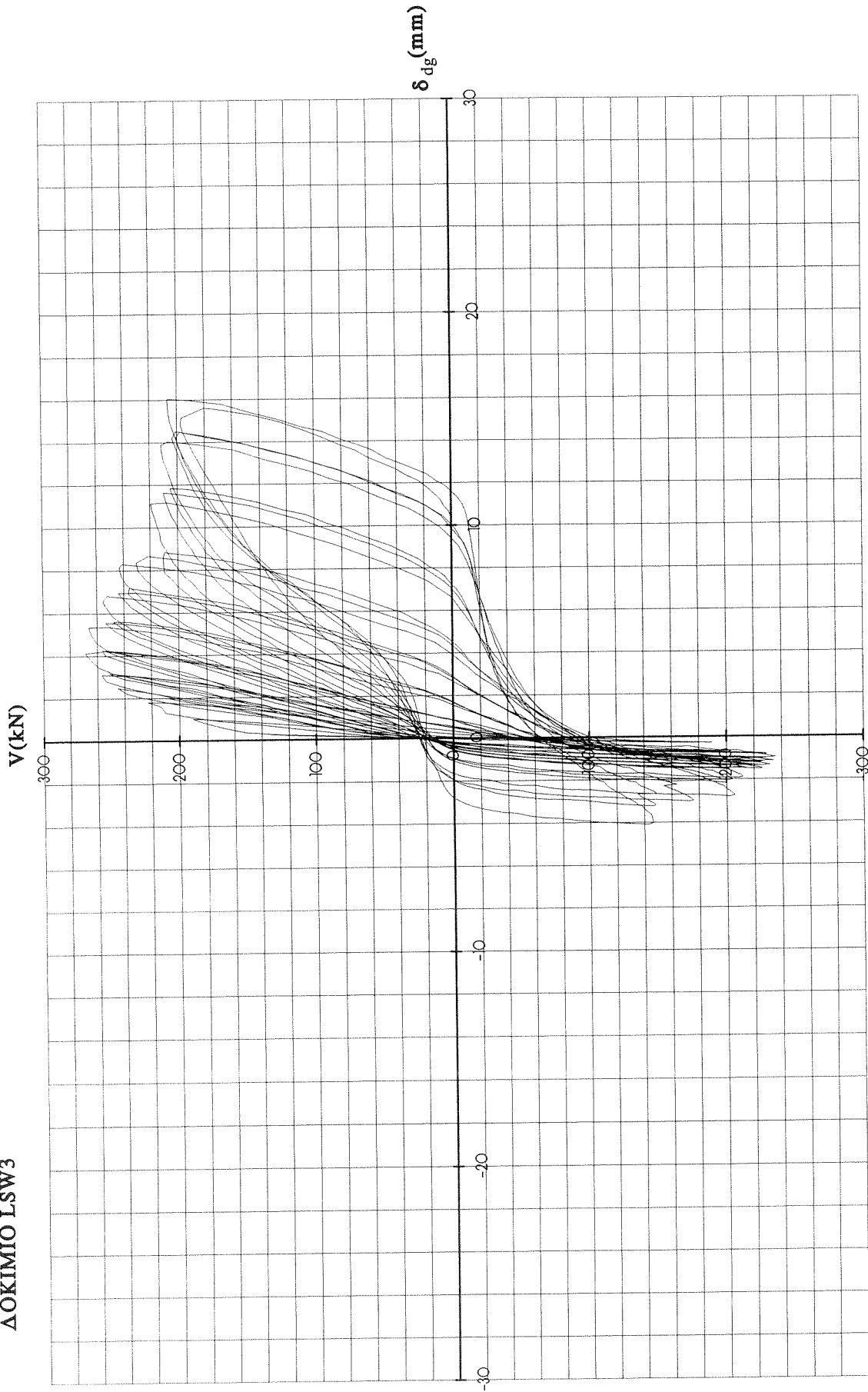
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW3

V (kN)



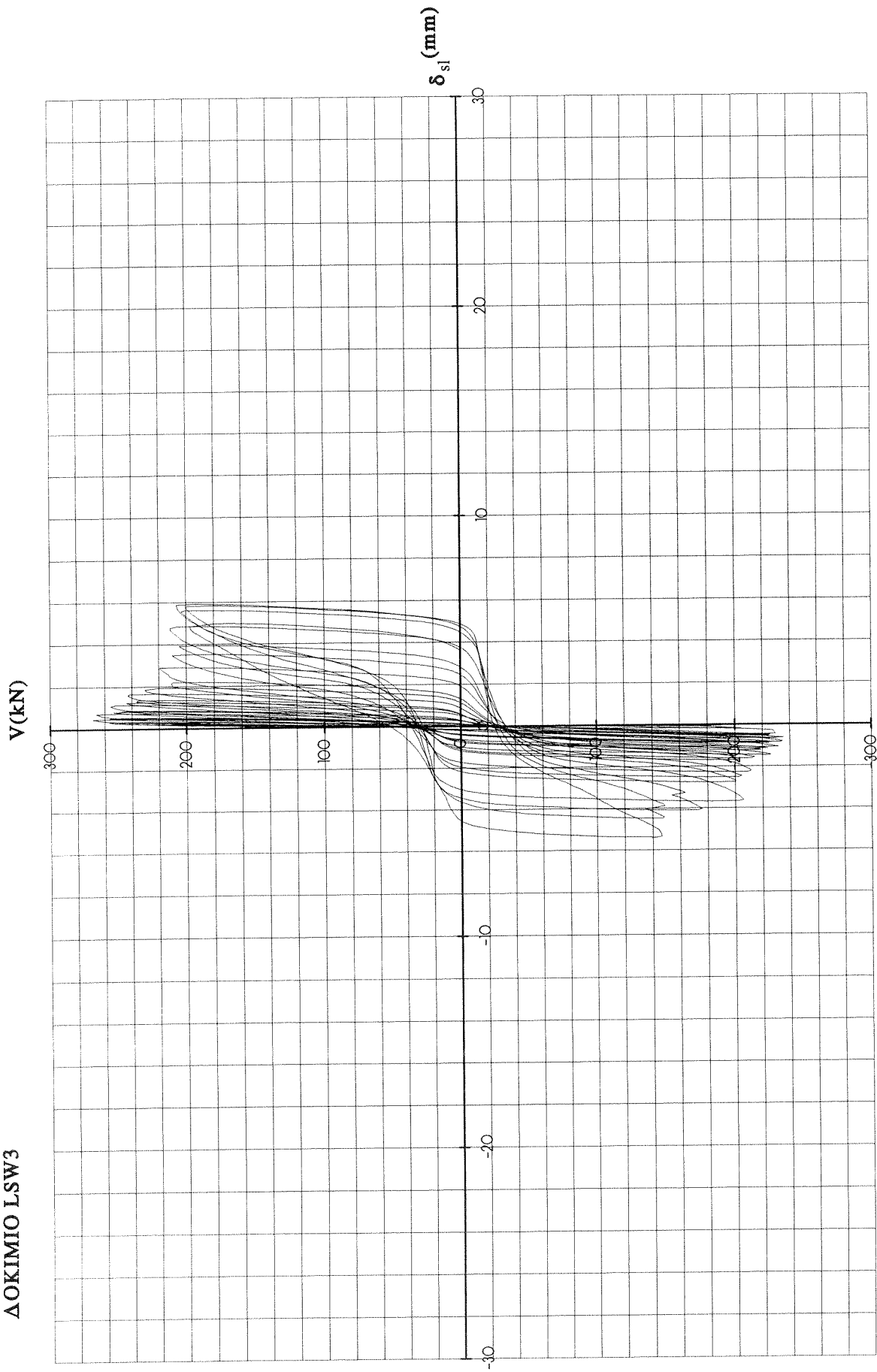
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW3

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW3

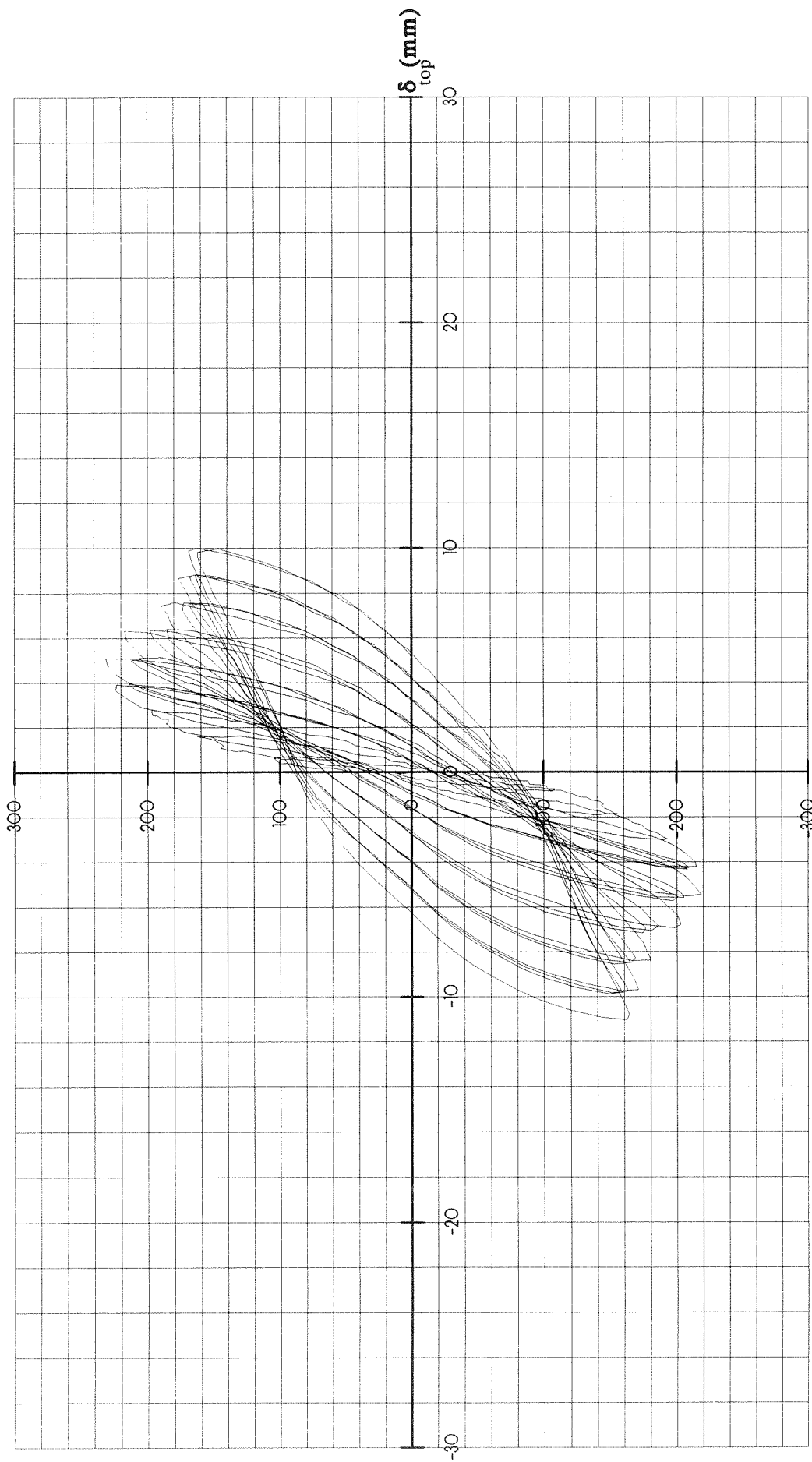
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW3

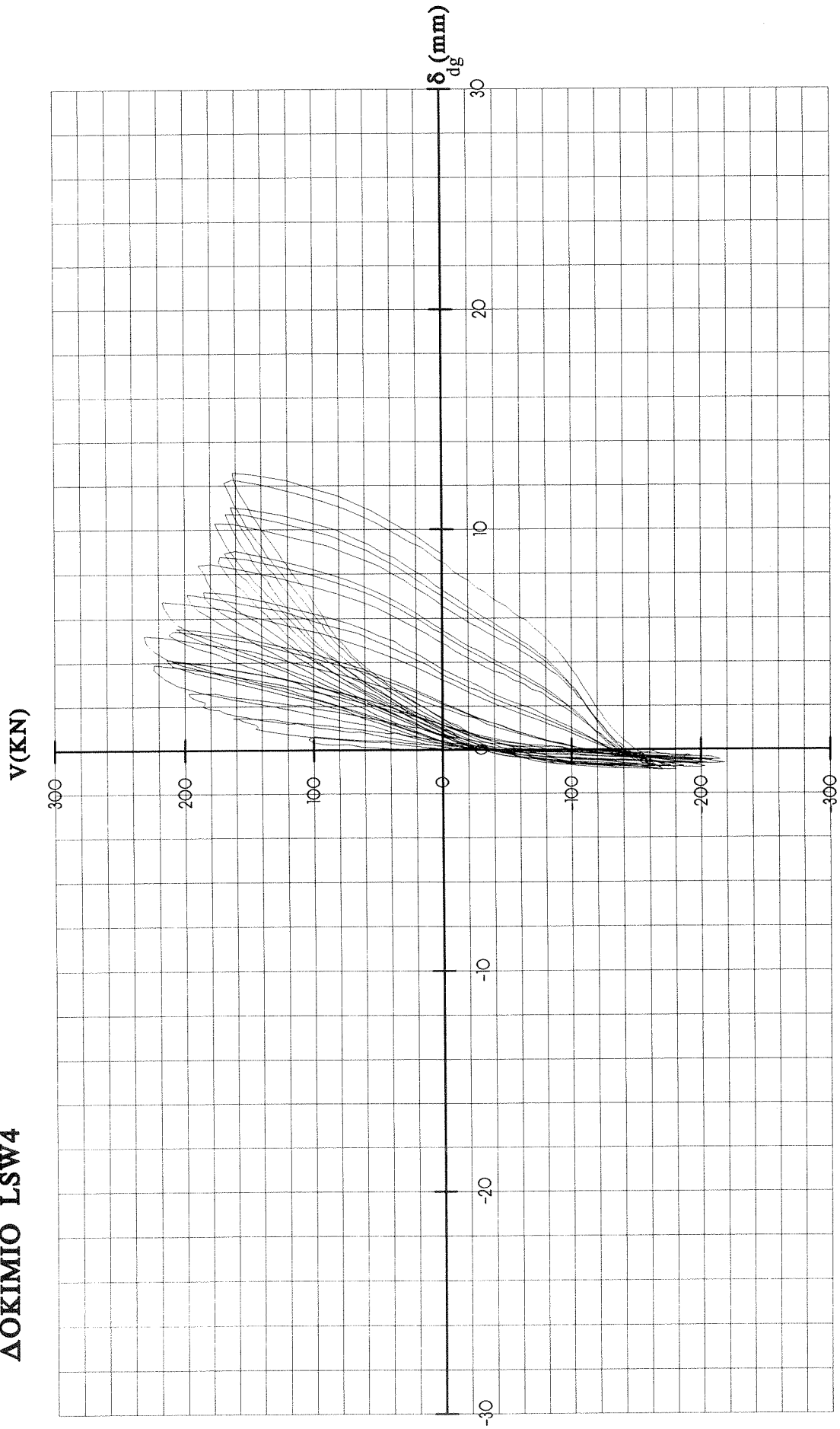
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW4

V (KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW4

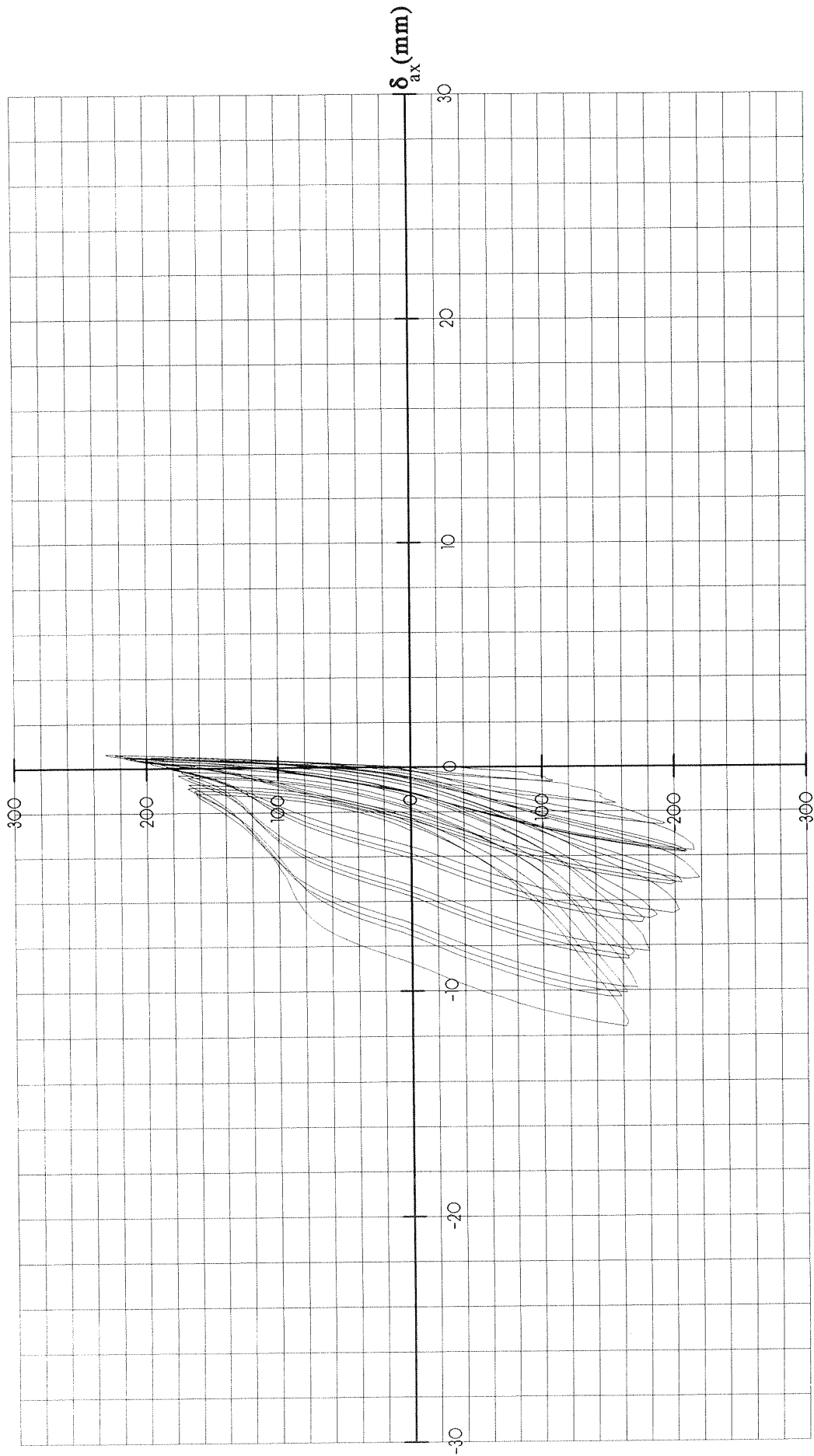
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW4



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW4

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW4

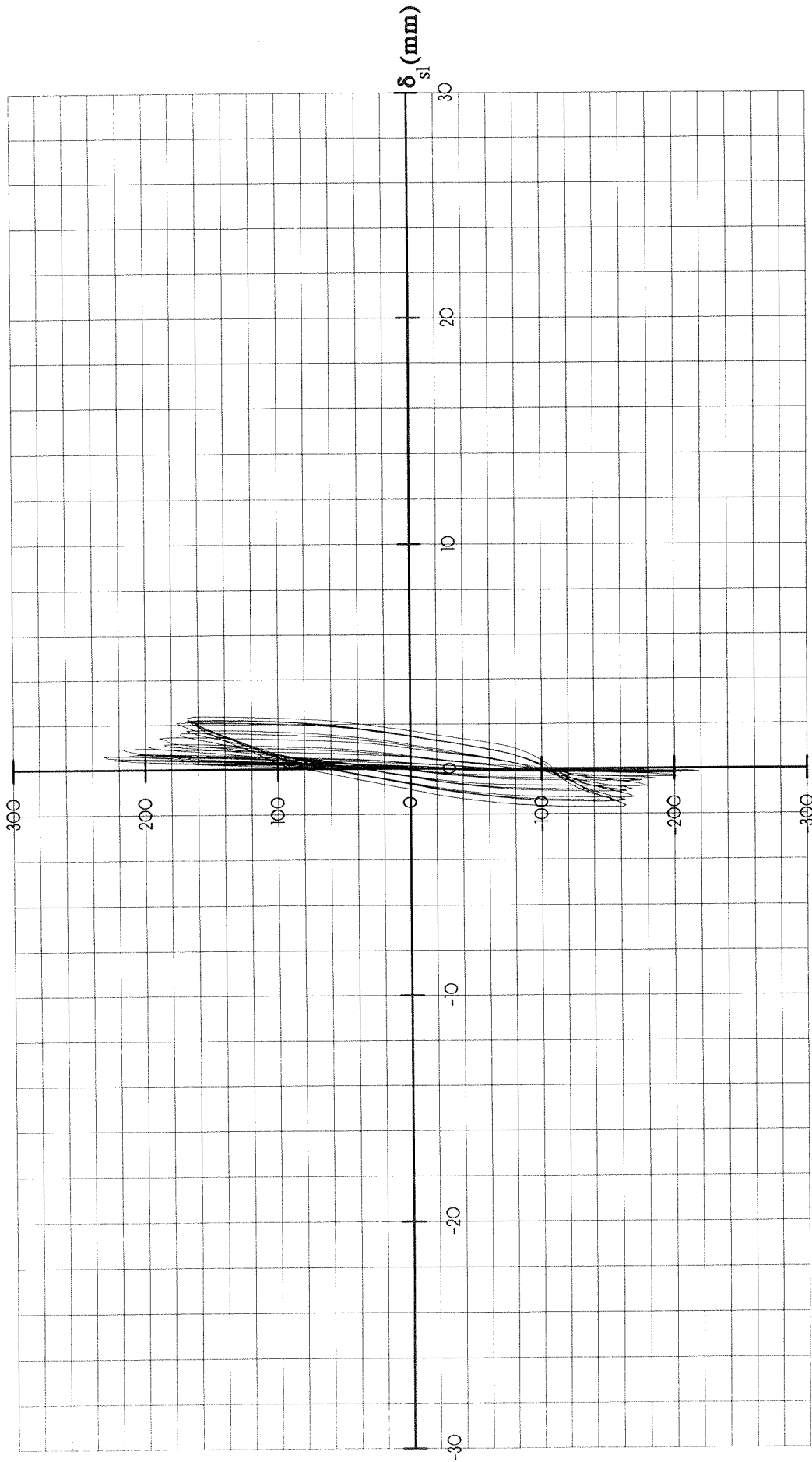
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW4

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW4

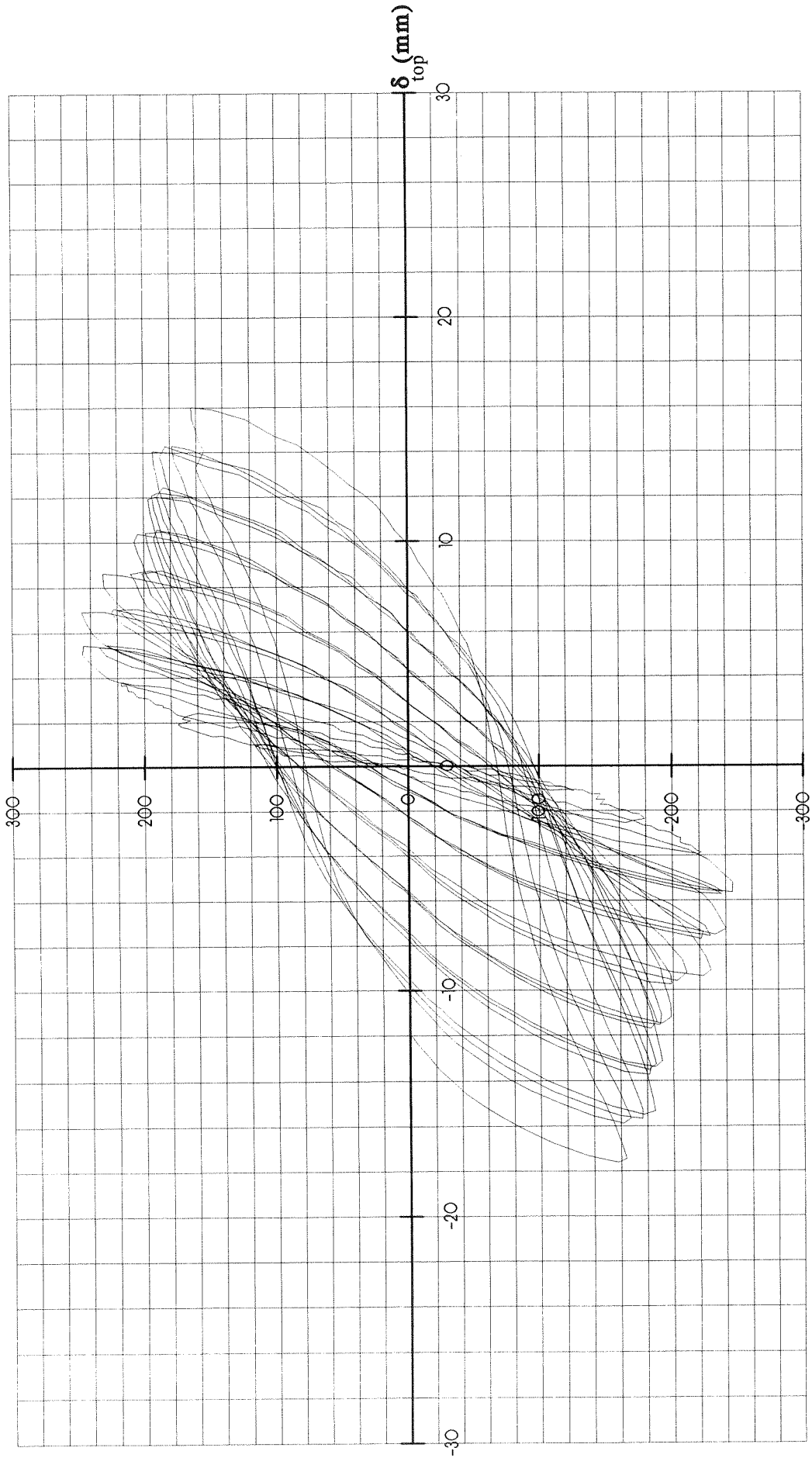
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW4

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW5

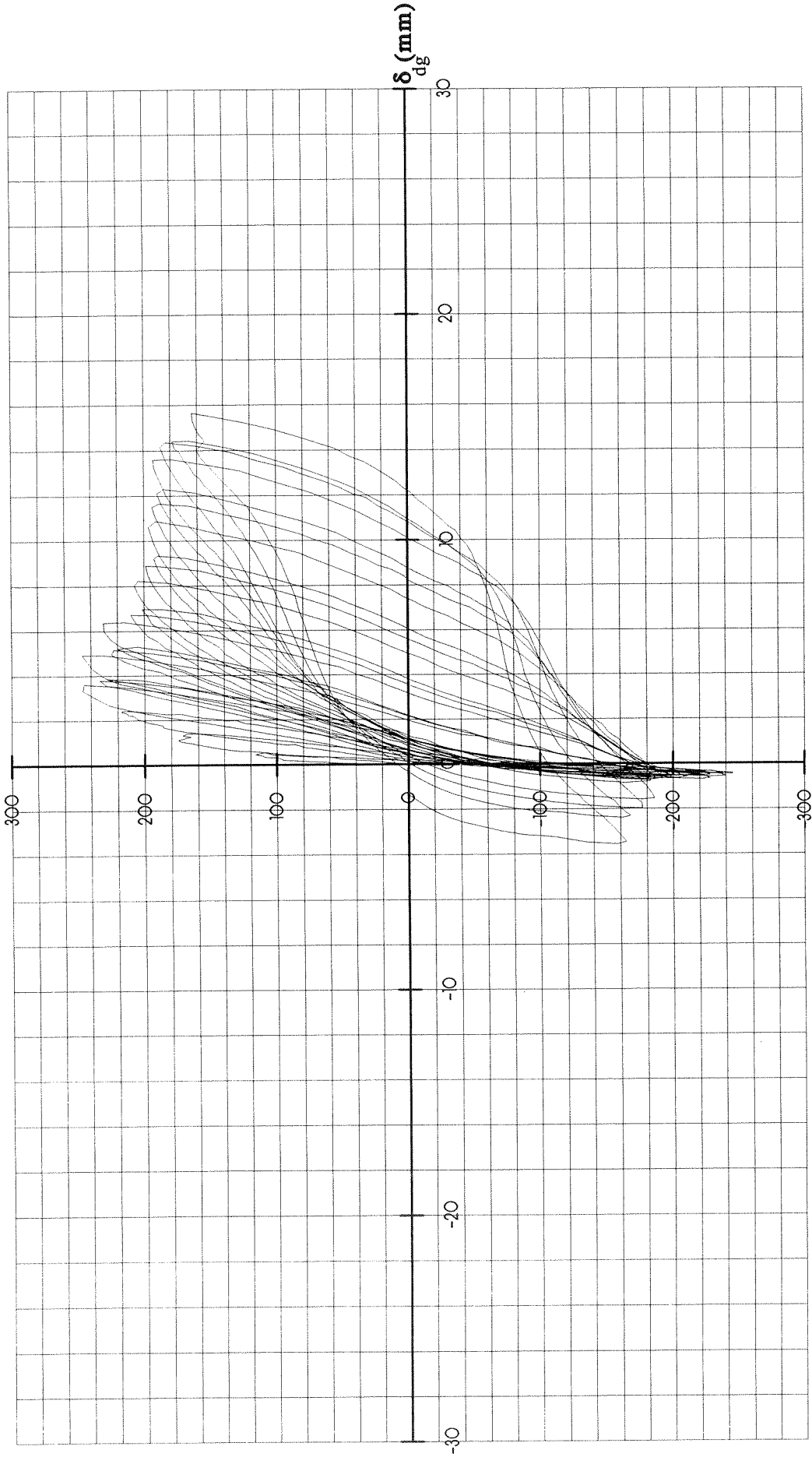
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW5

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW5

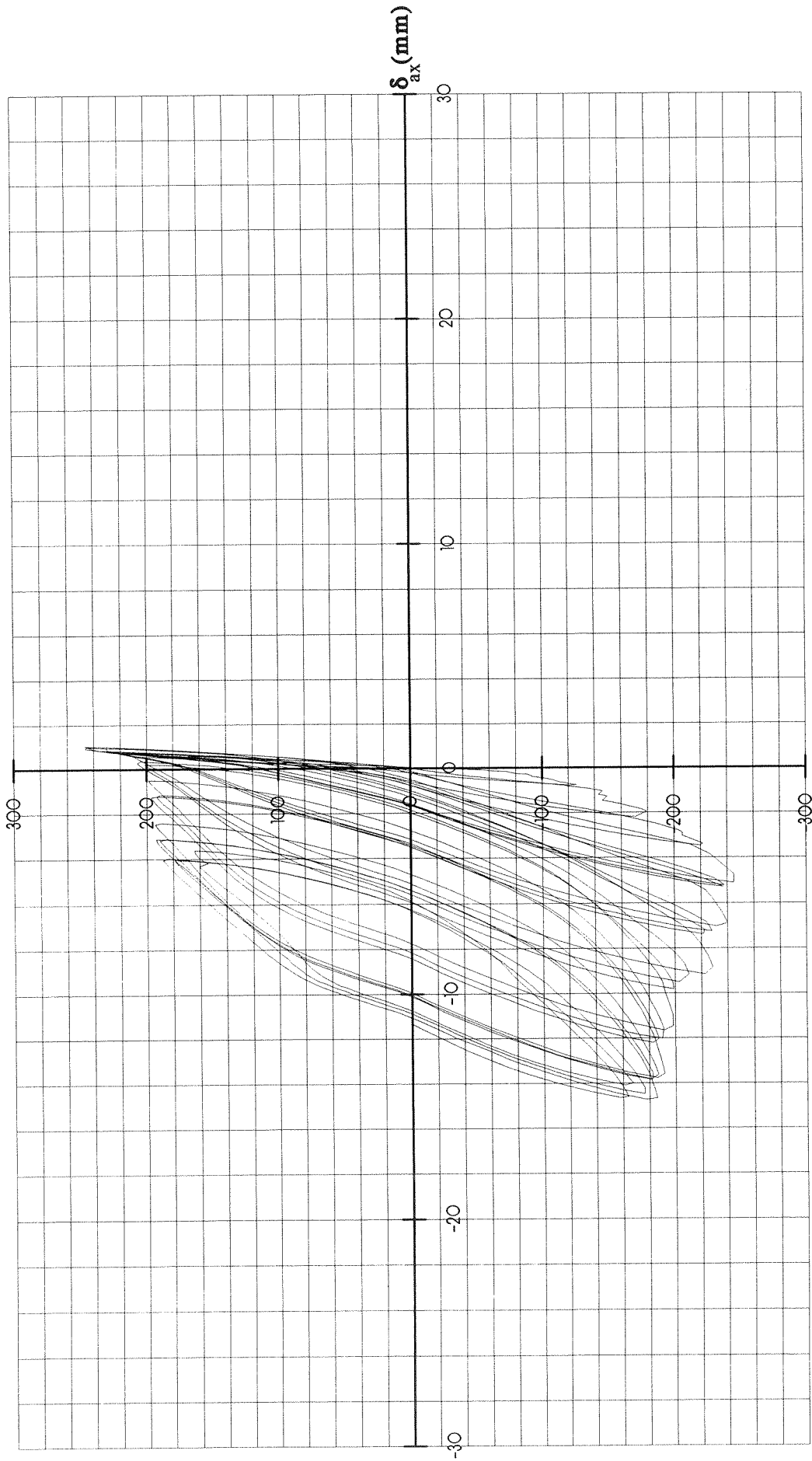
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW5

ΔΟΚΙΜΙΟ LSW5

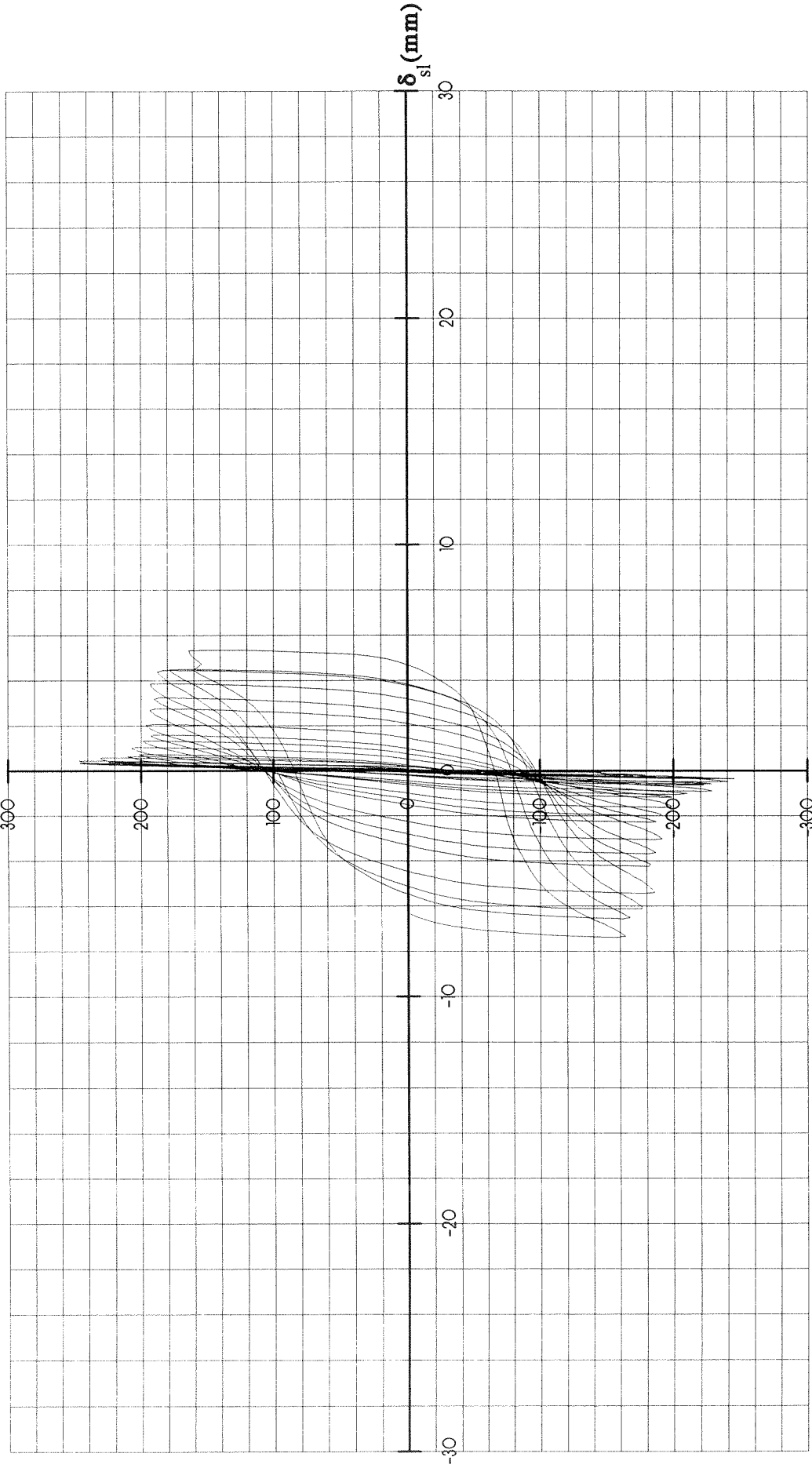
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW5

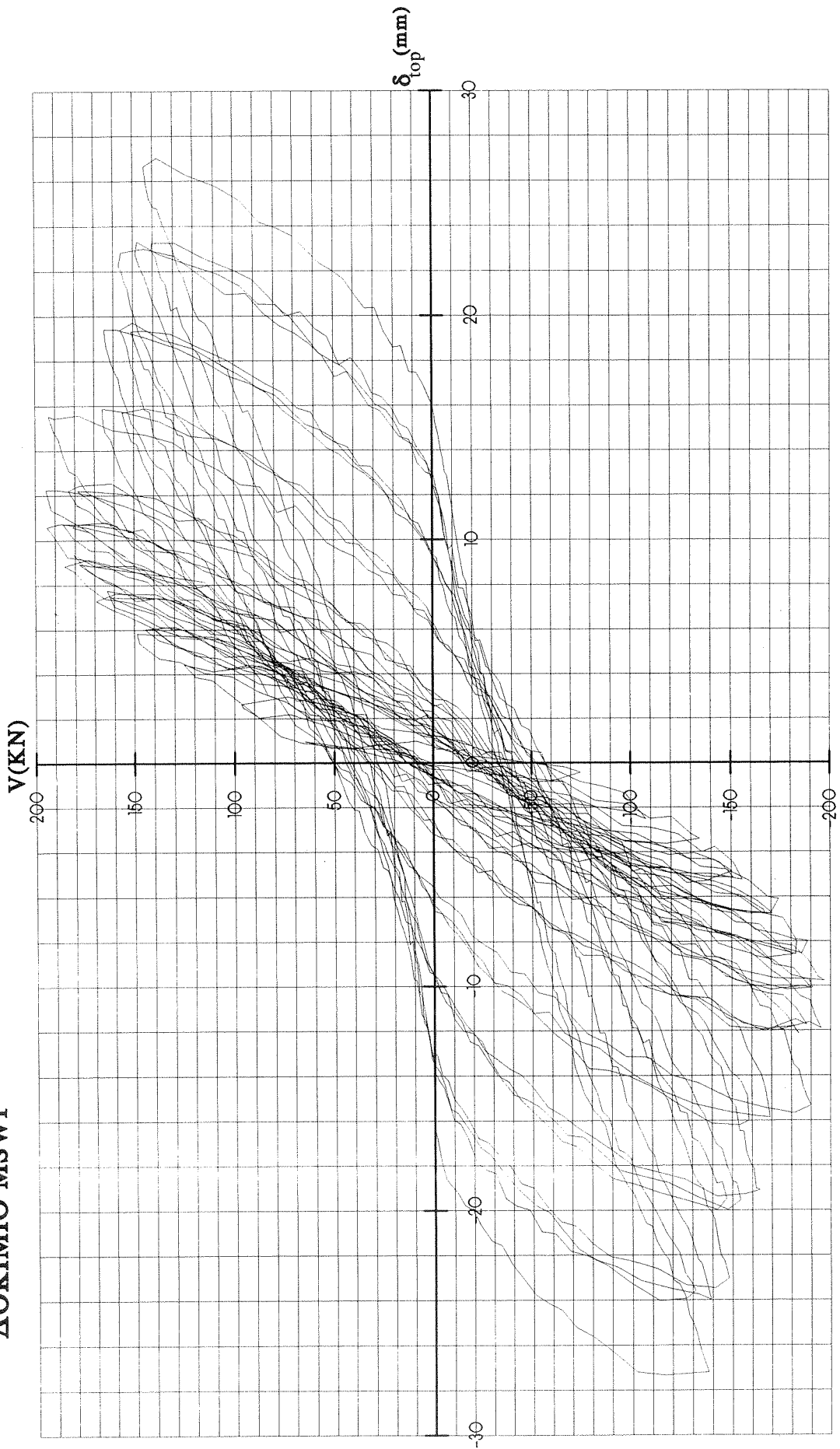
ΔΟΚΙΜΙΟ LSW5

V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW5

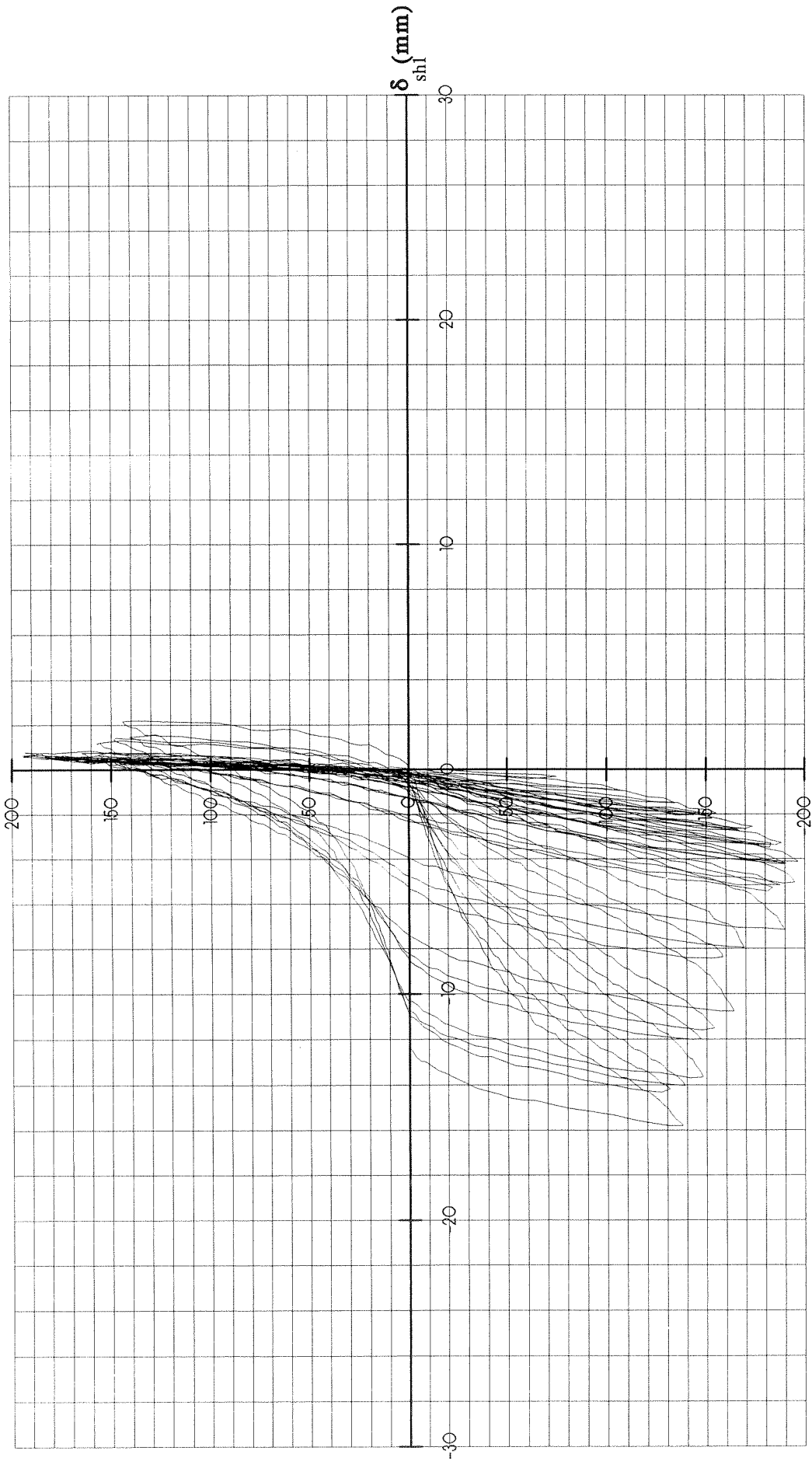
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW1



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW1

V(KN)



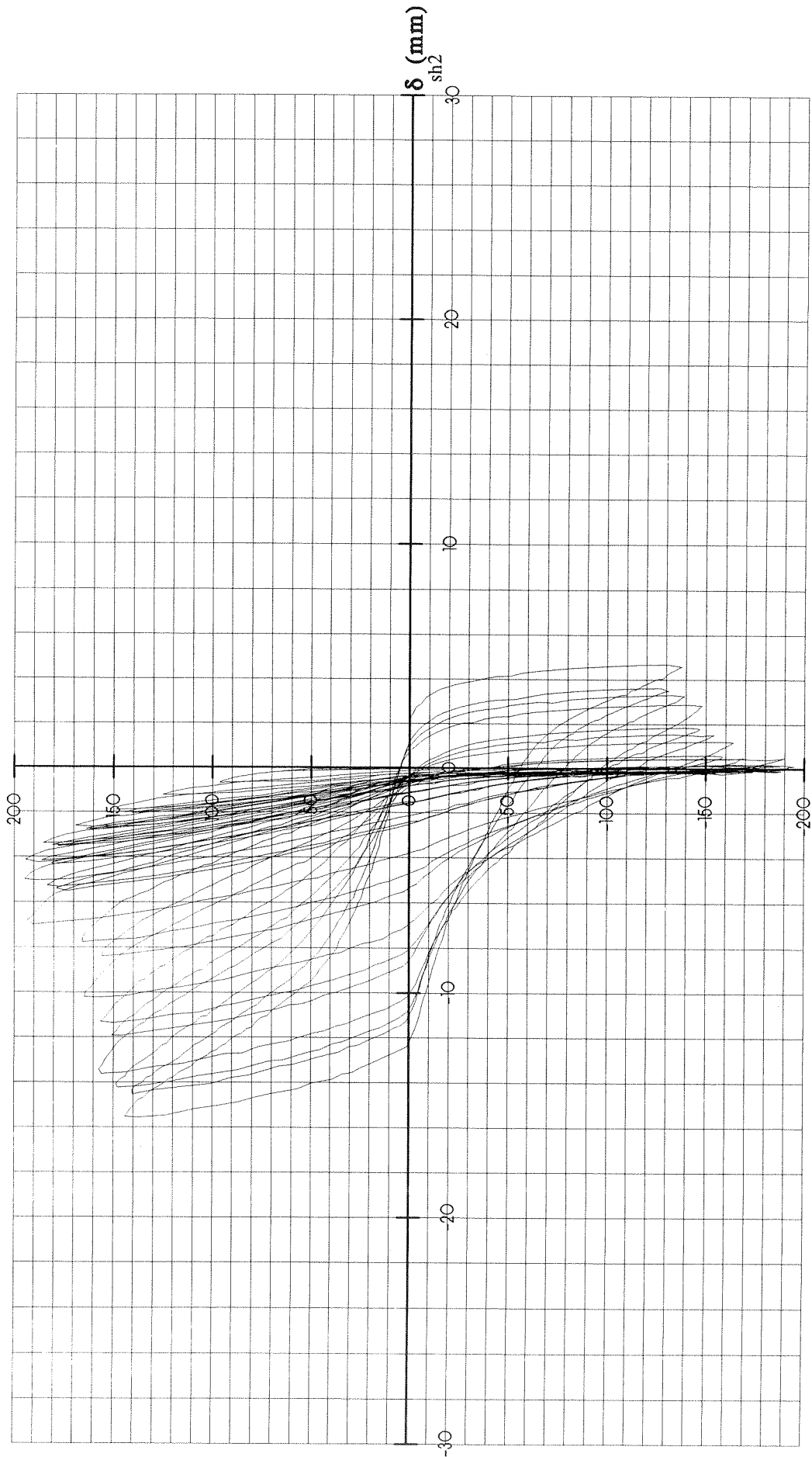
200

δ_{shl} (mm)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW1

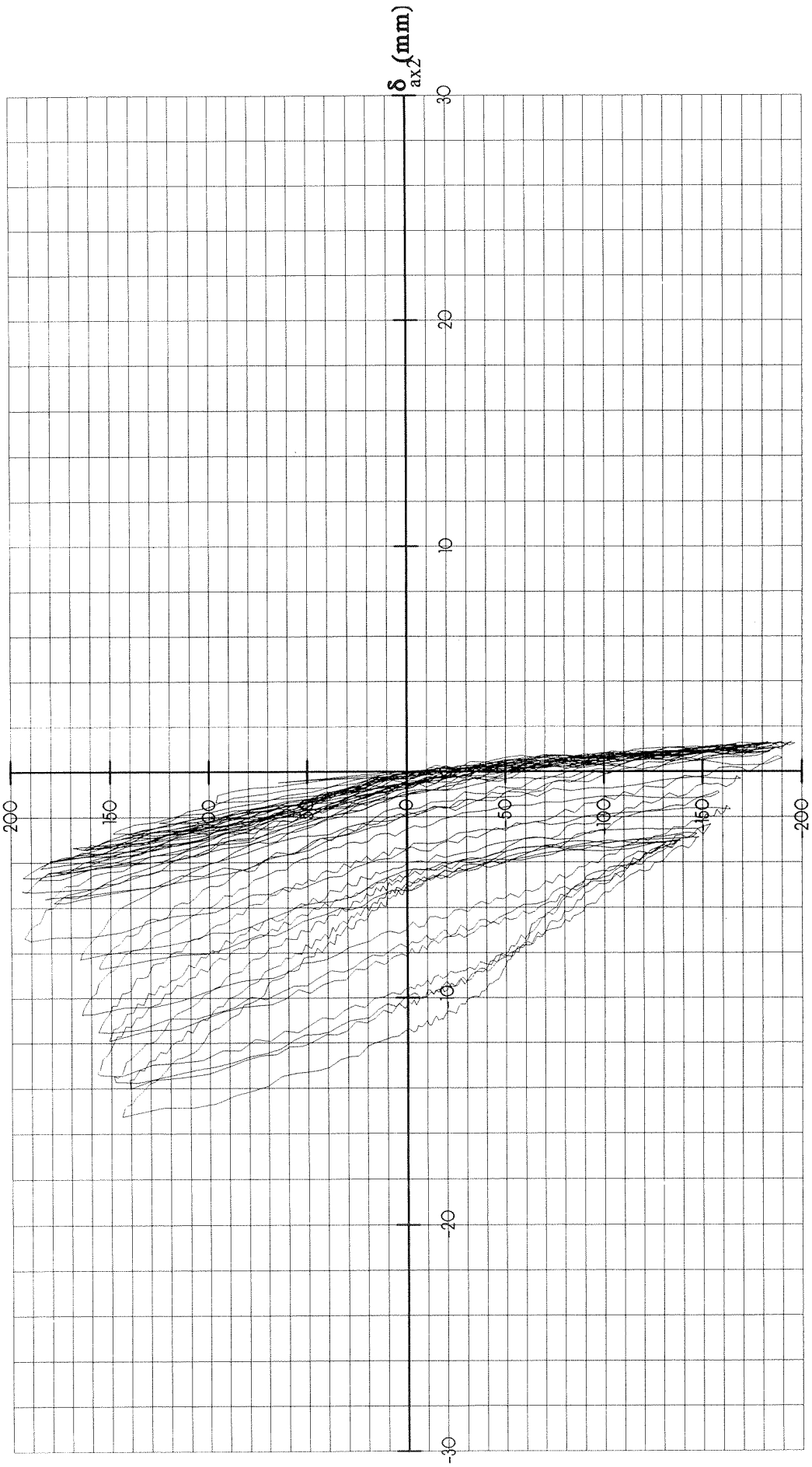
V (KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW1

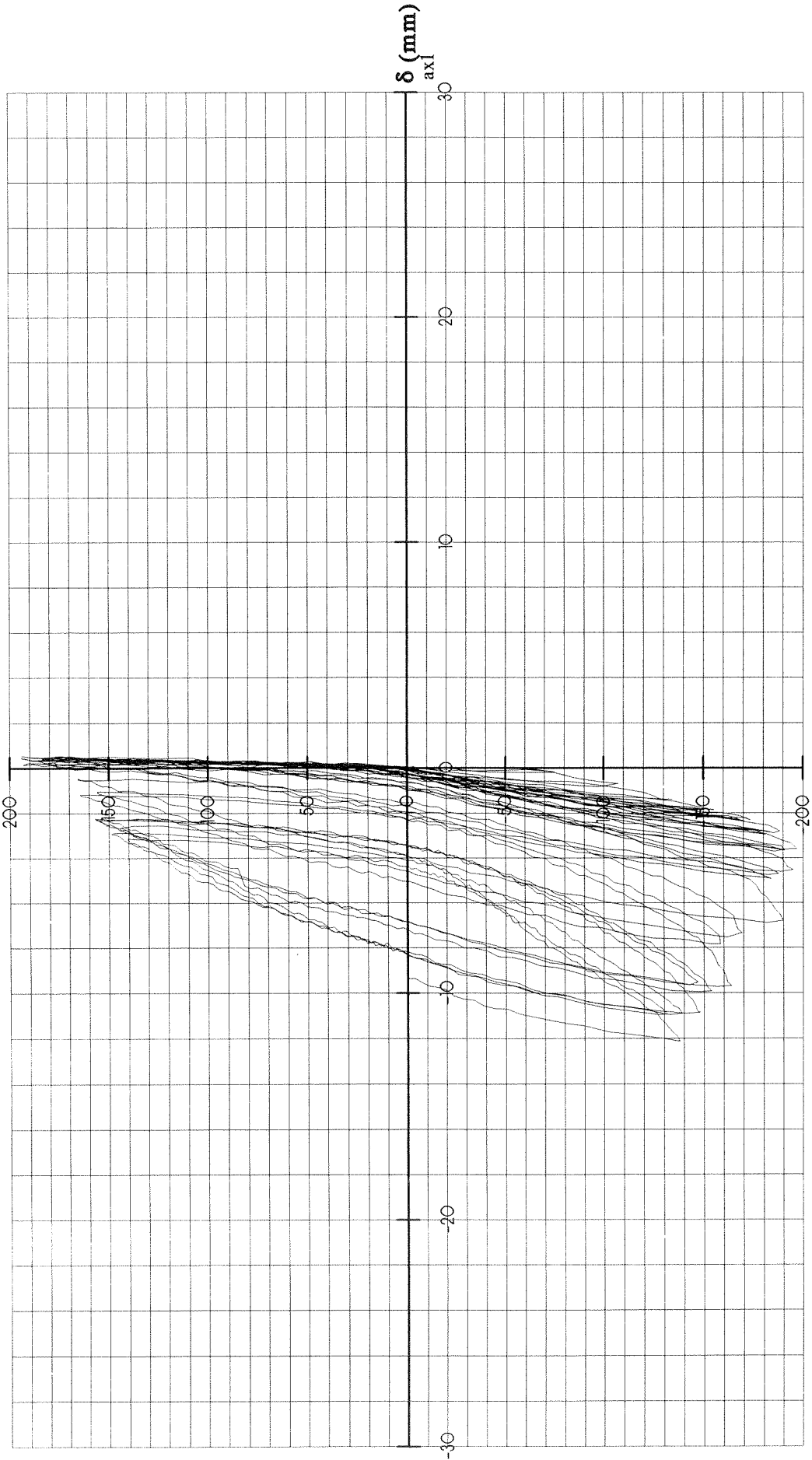
V (kN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW1

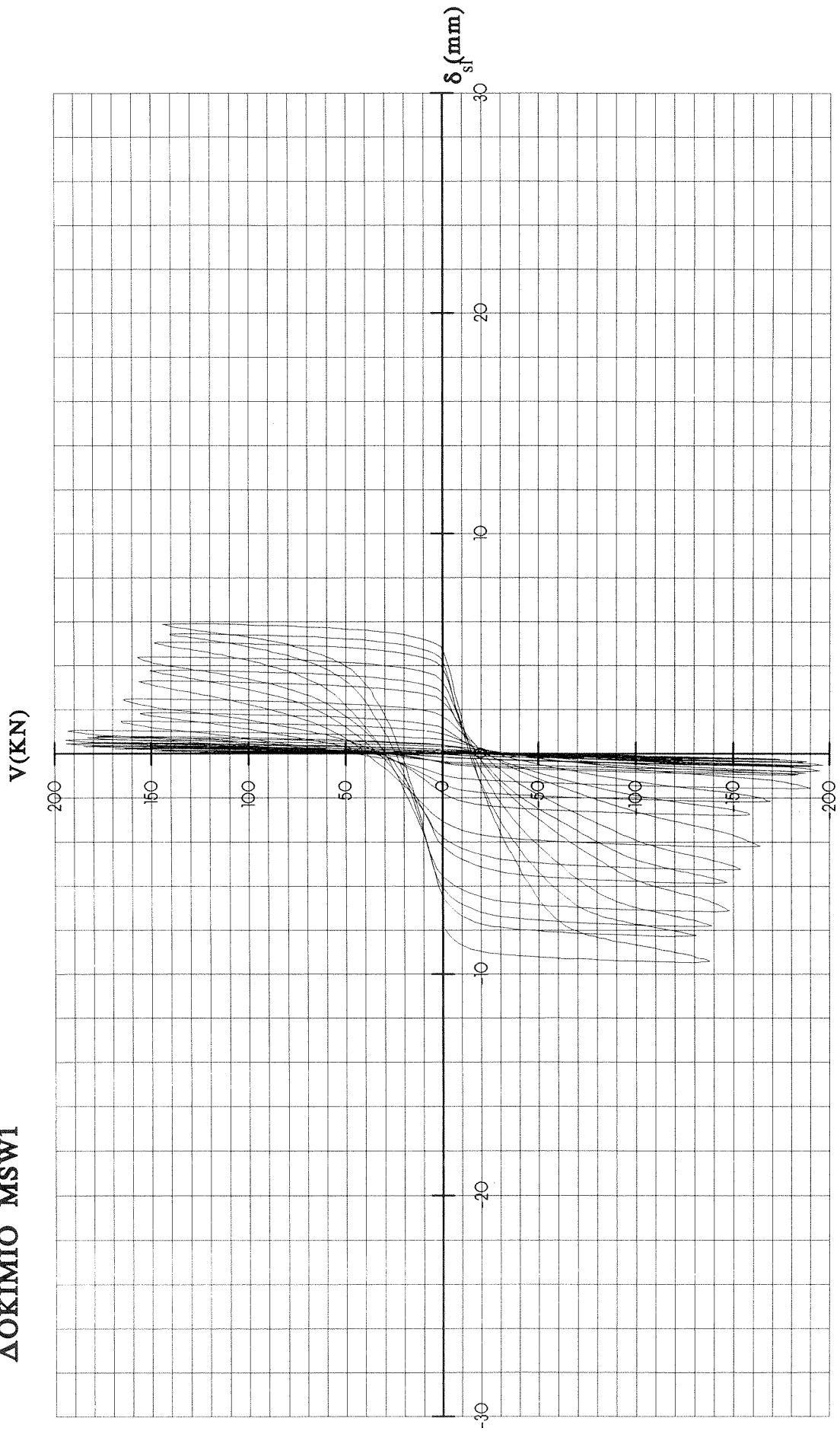
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW1

V (KN)



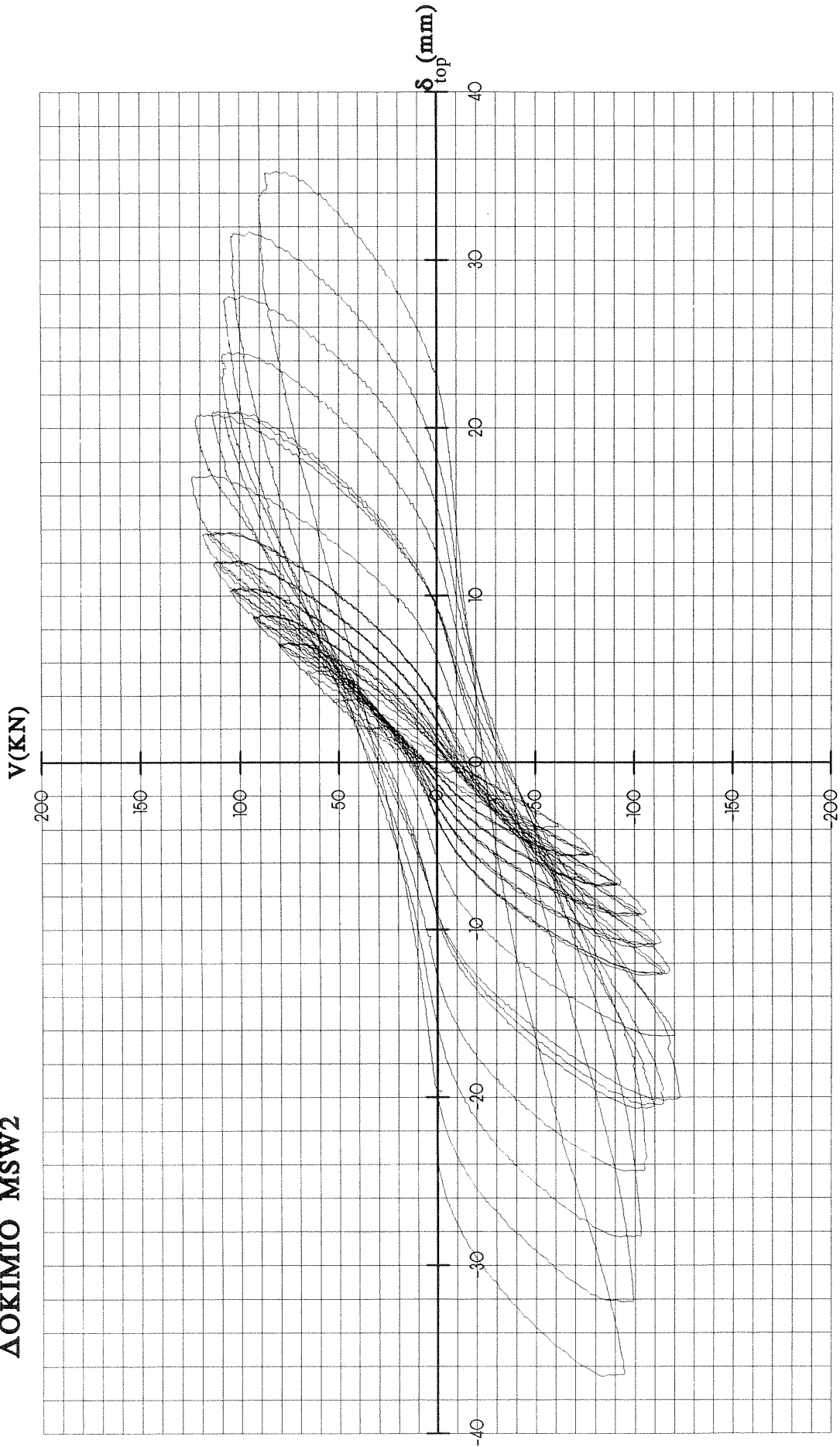
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW1

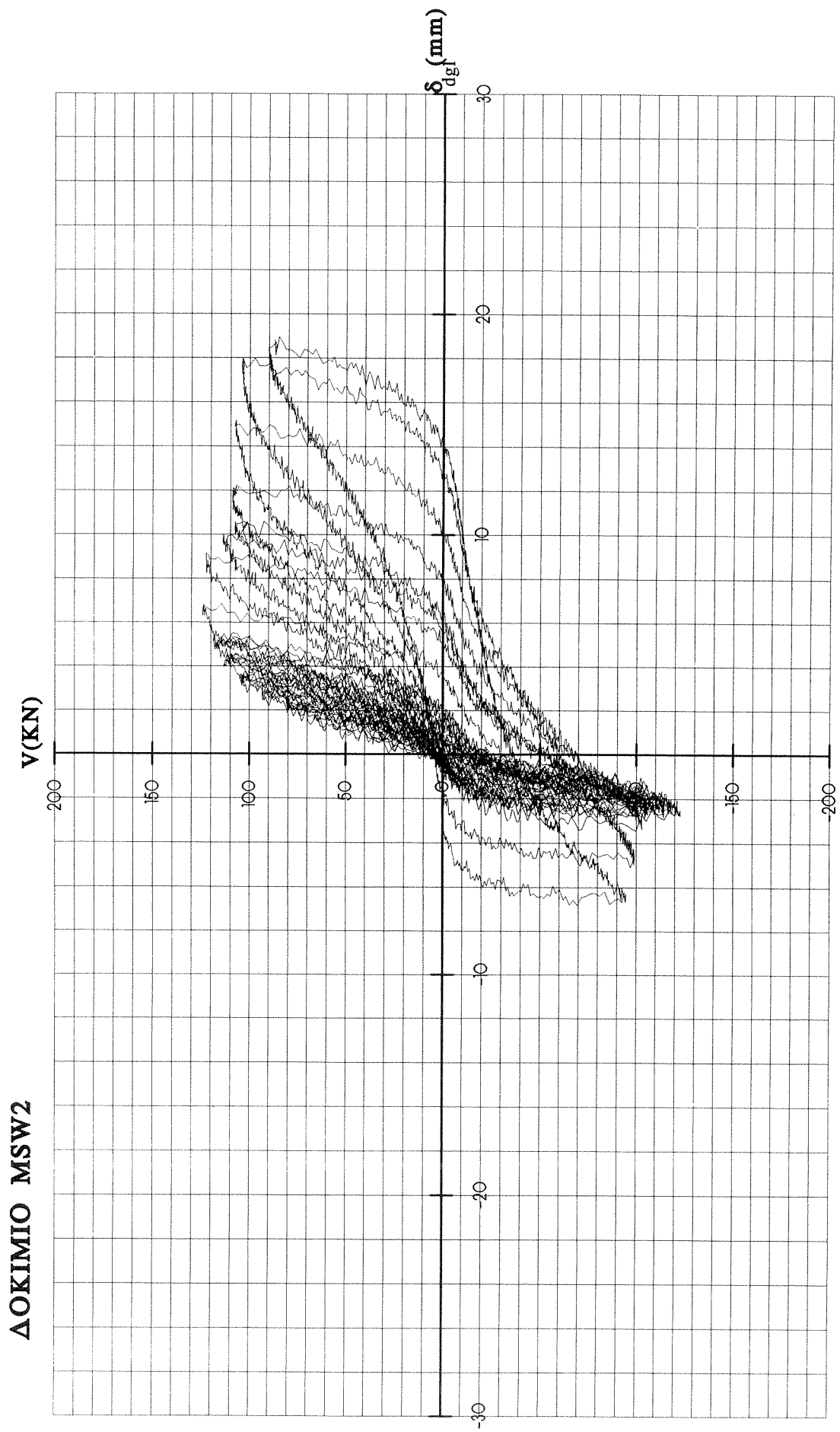


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW1

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW2

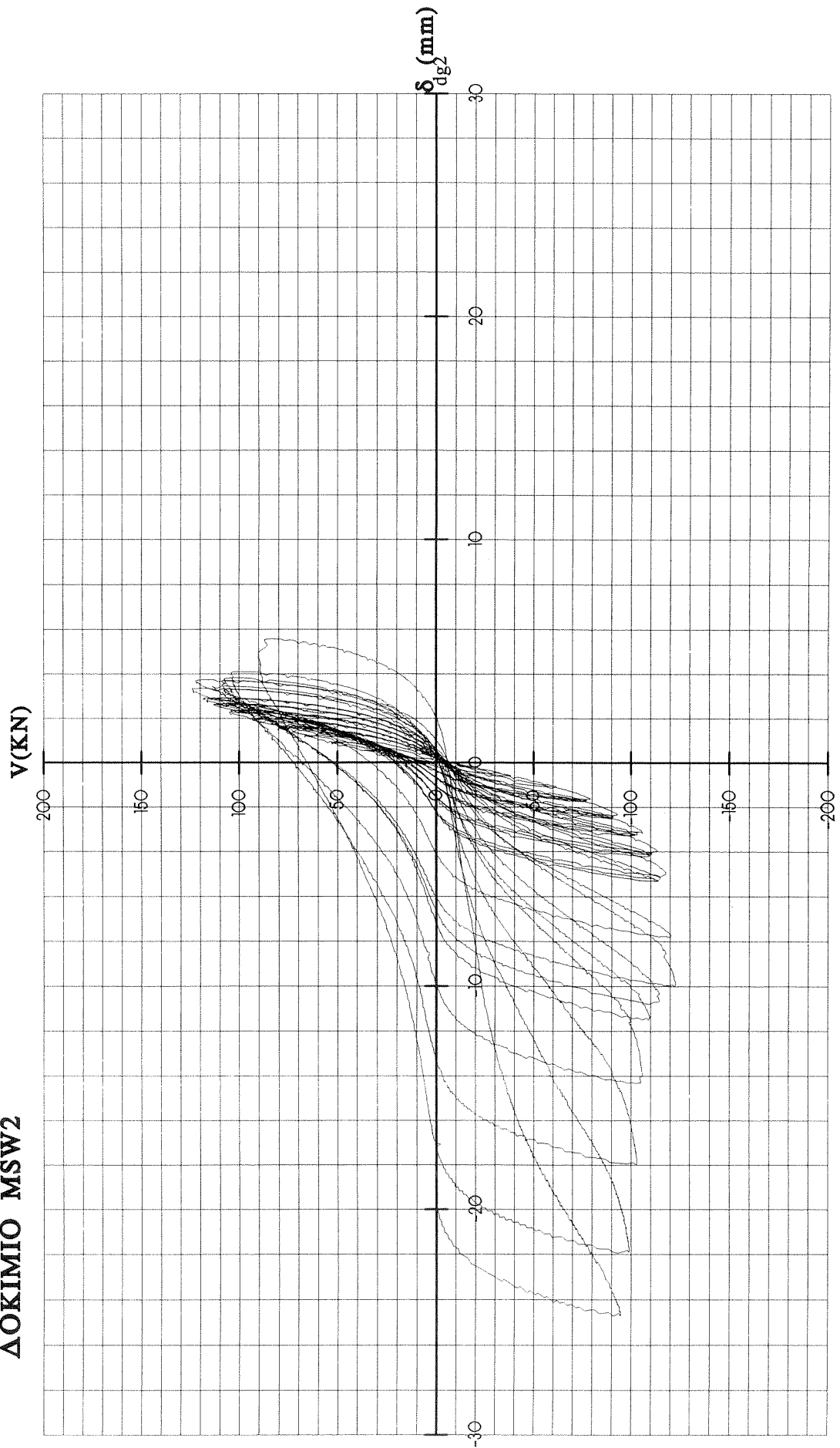


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW2



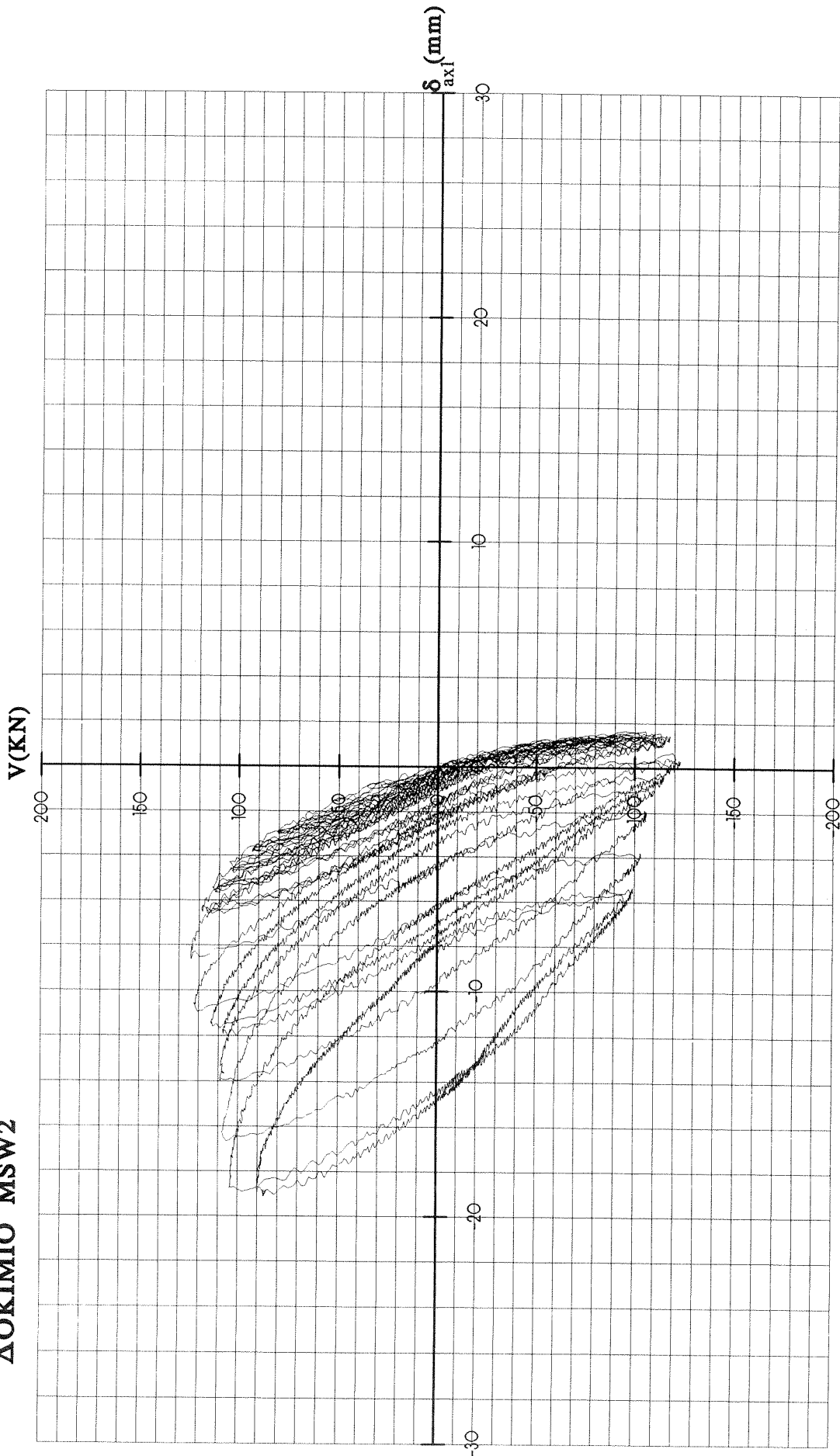
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW2

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW2



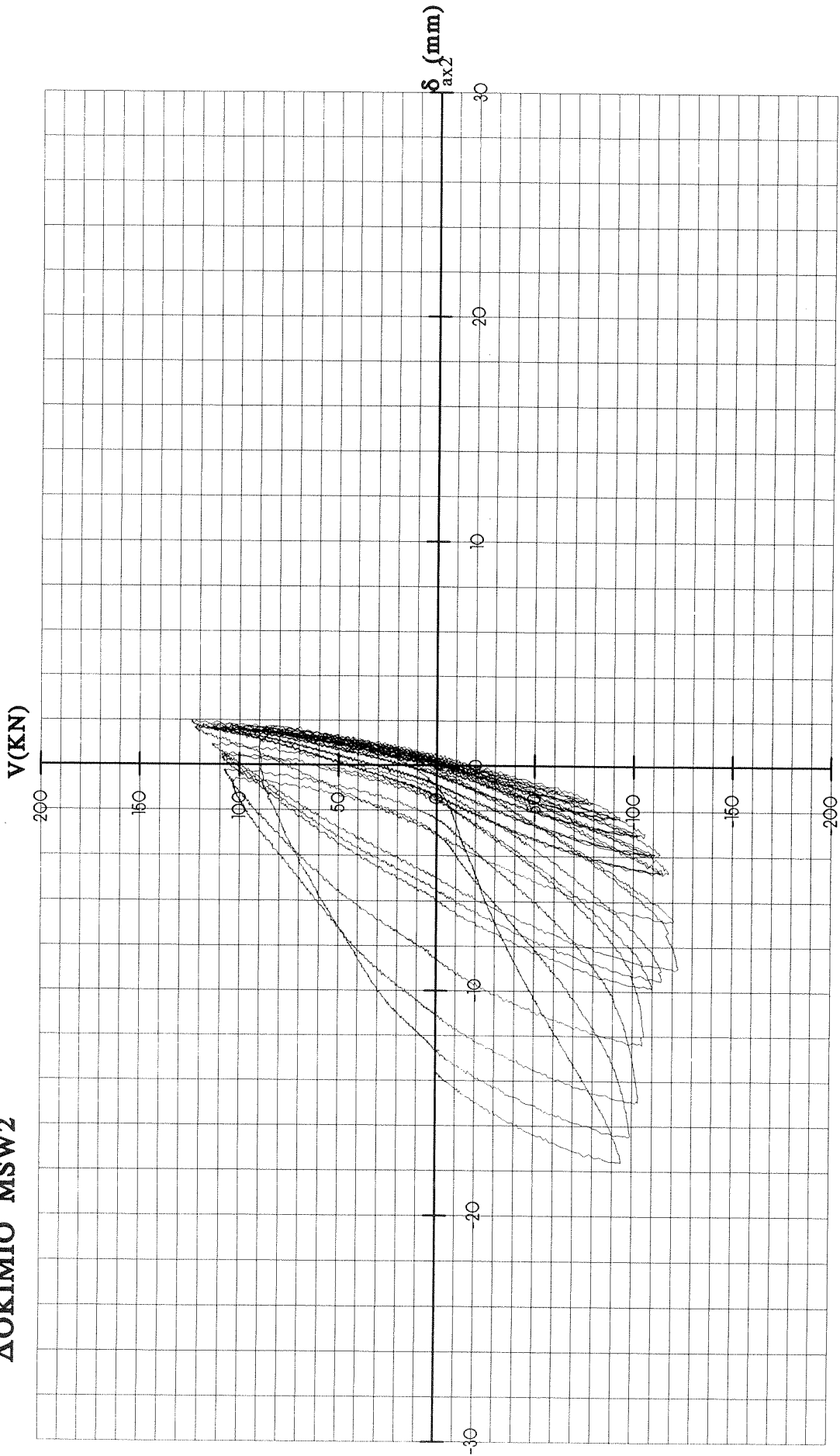
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW2

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW2



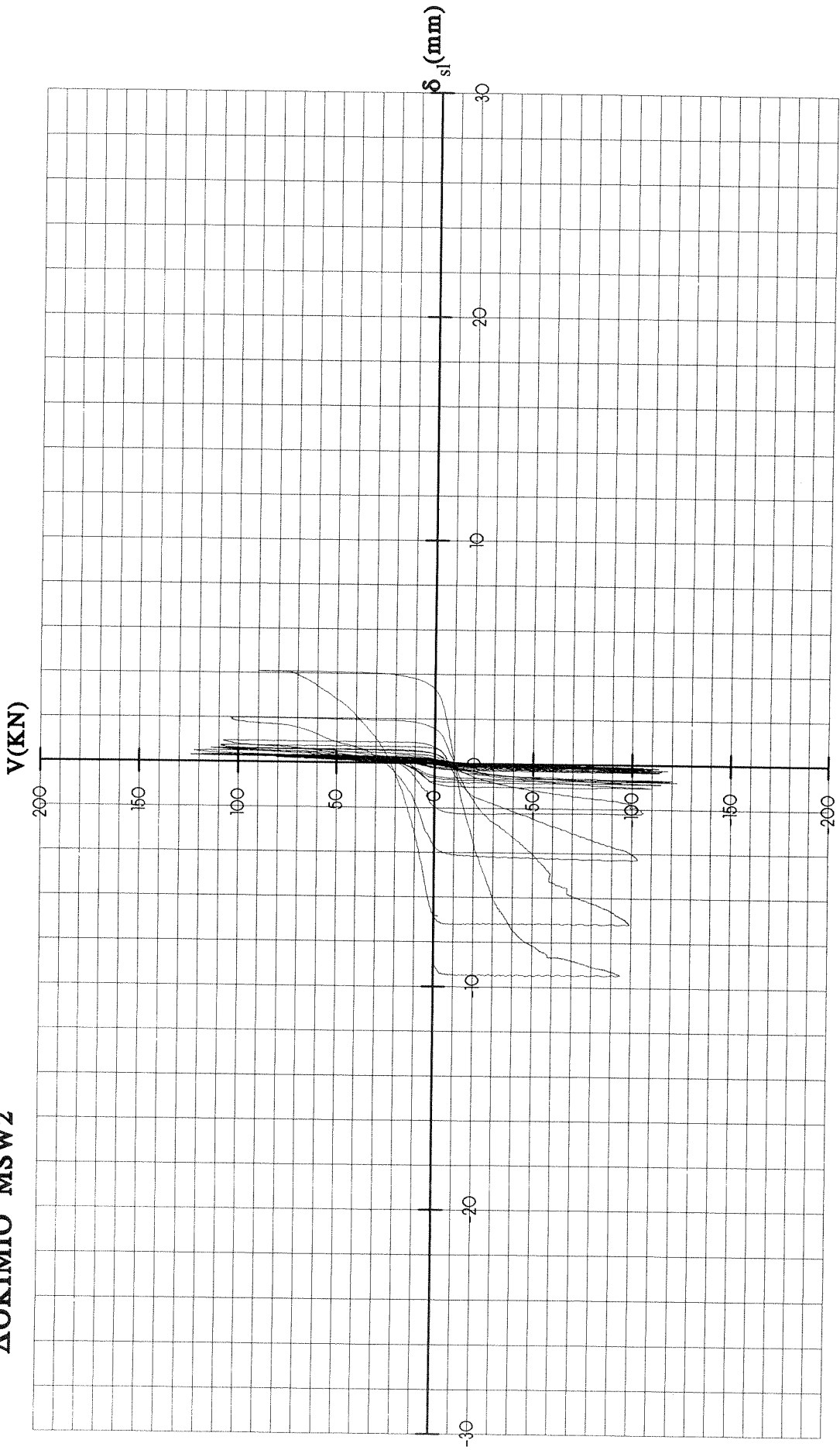
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW2

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW2



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW2

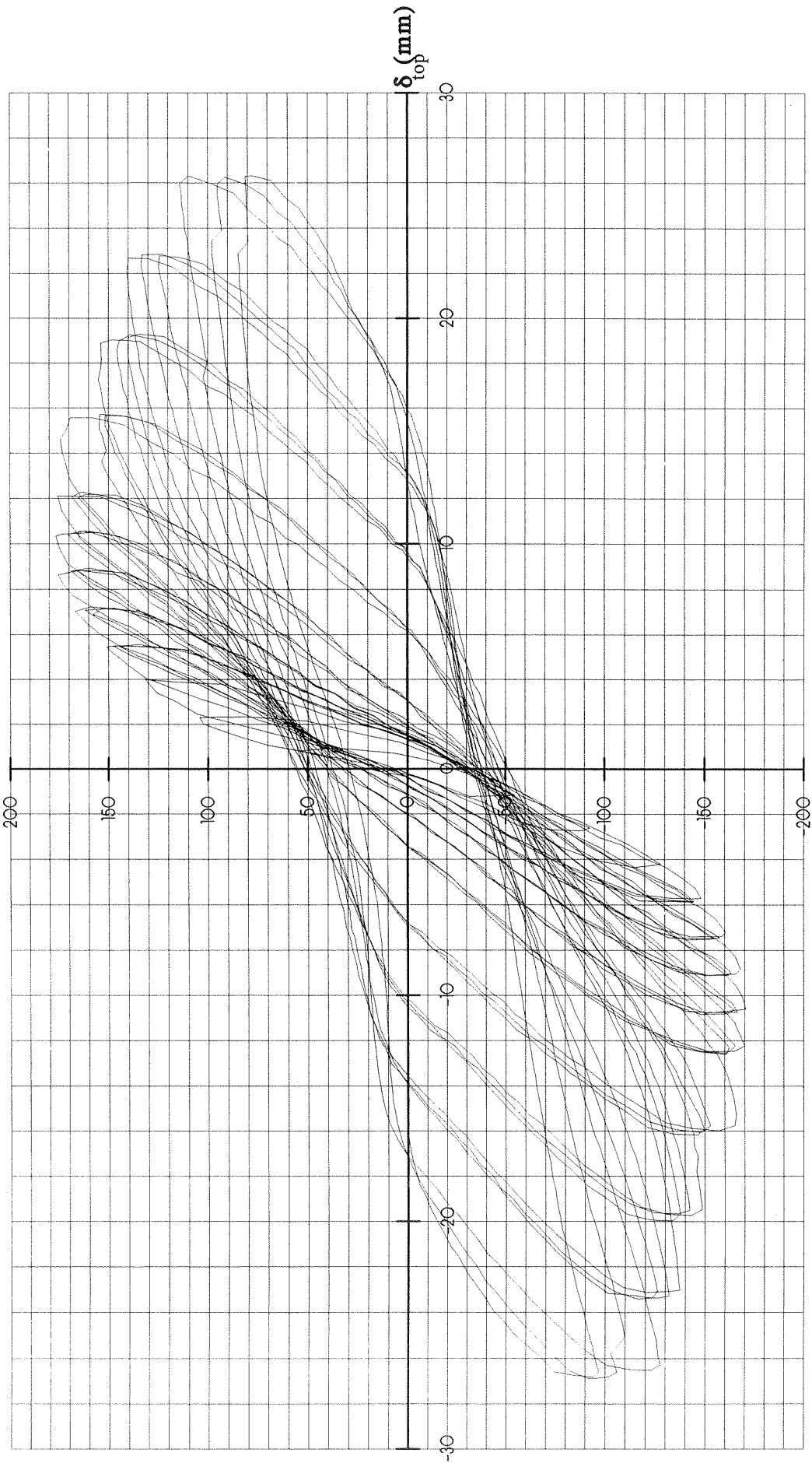
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW2



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW2

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW3

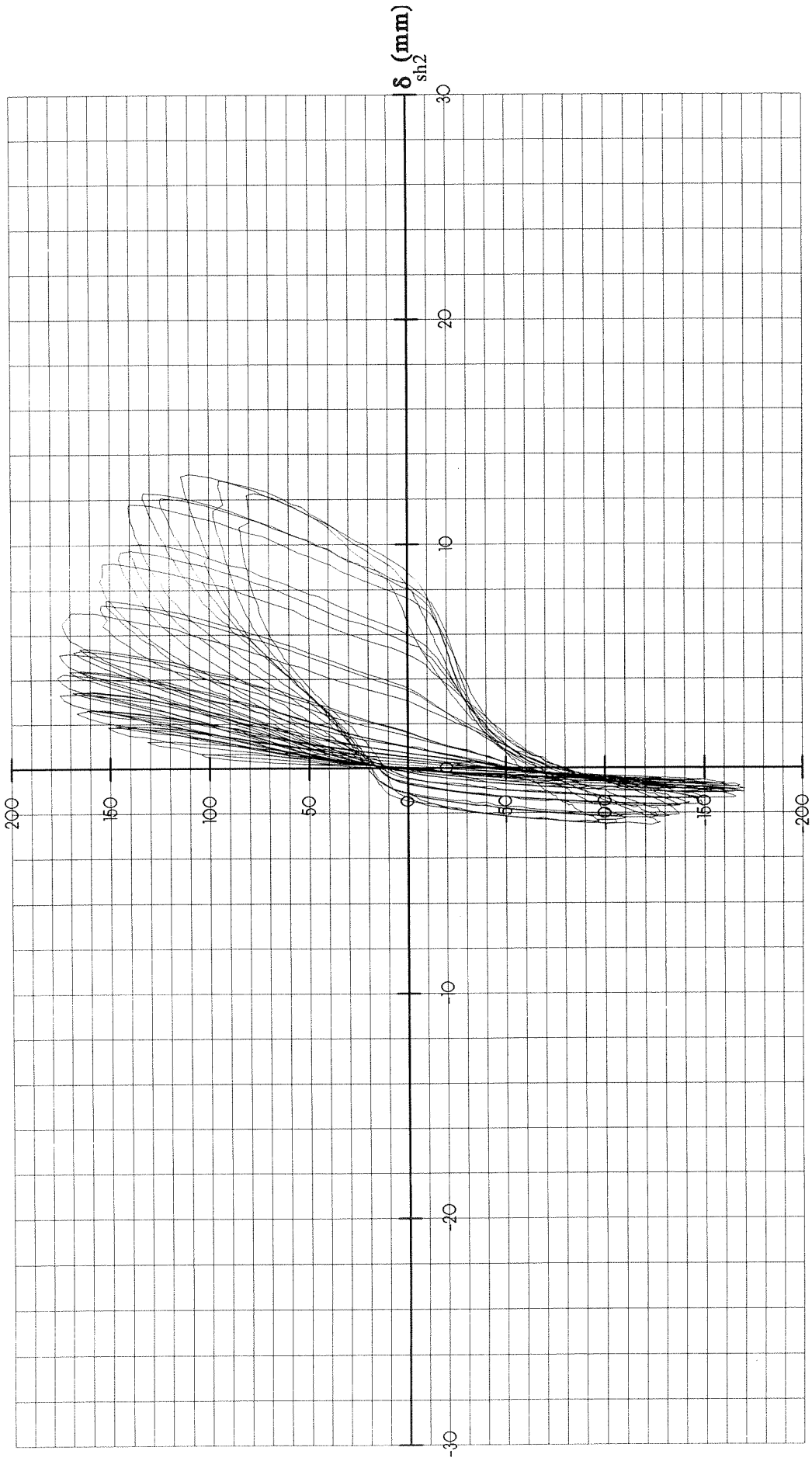
V (KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW3

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW3

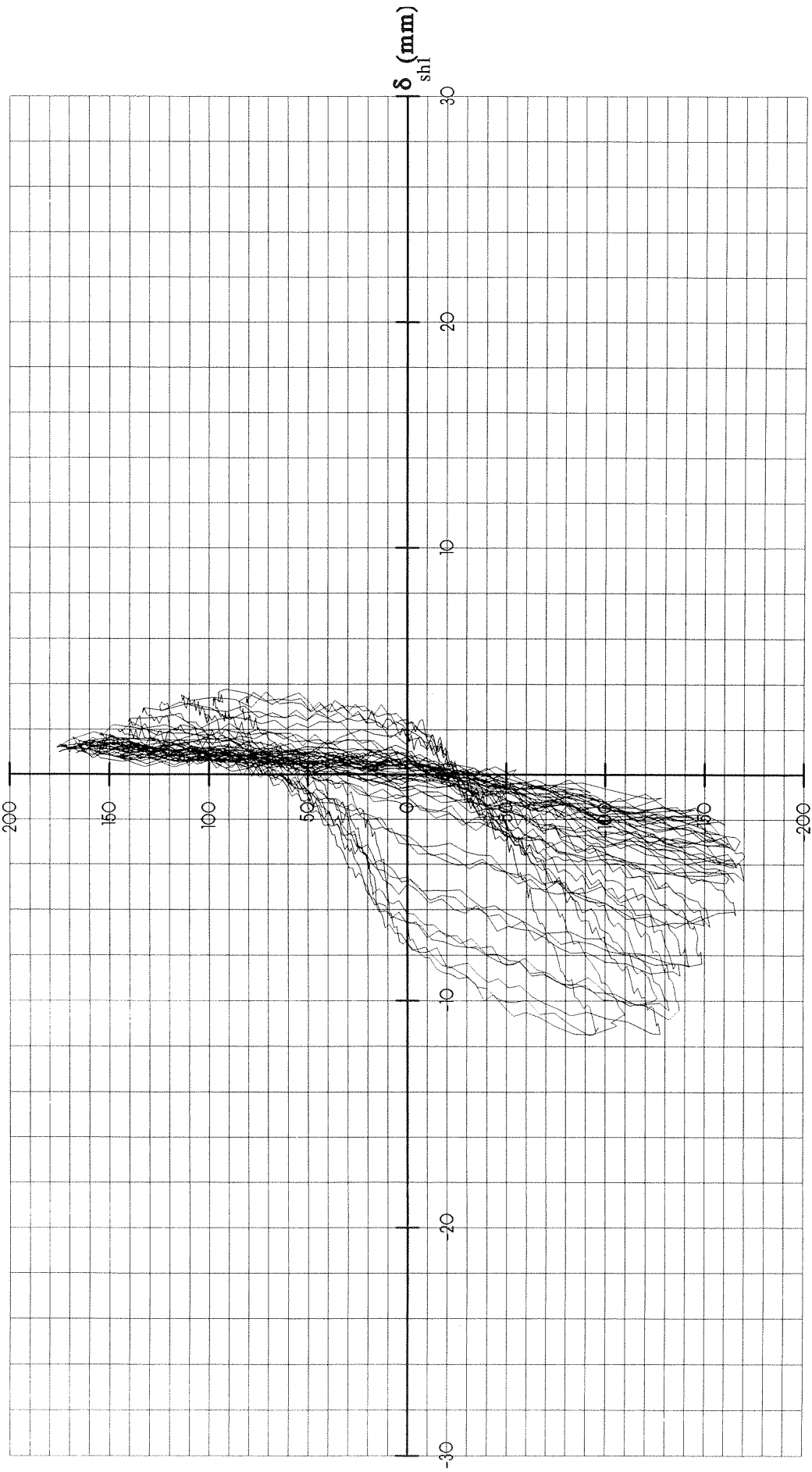
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW3

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW3

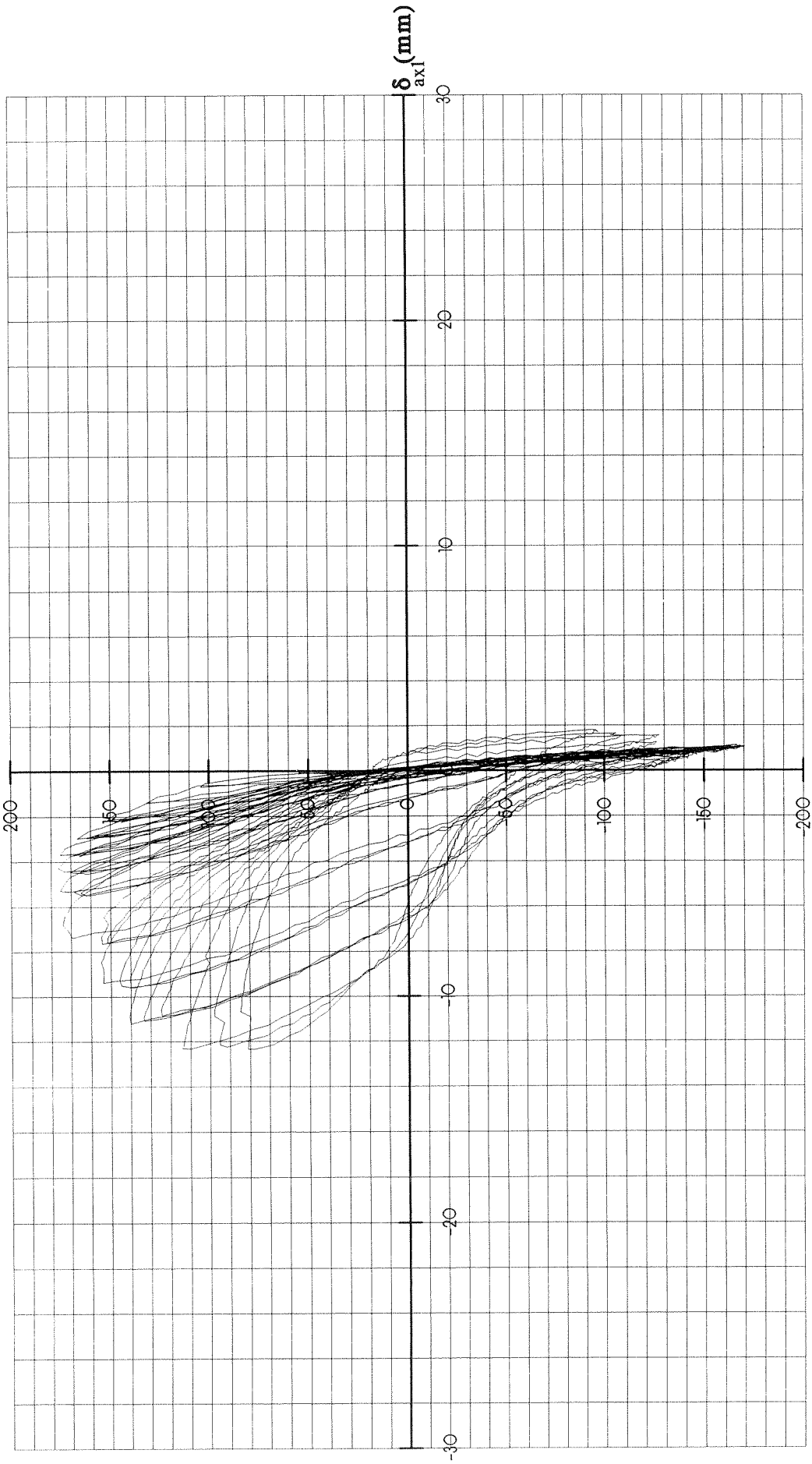
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW3

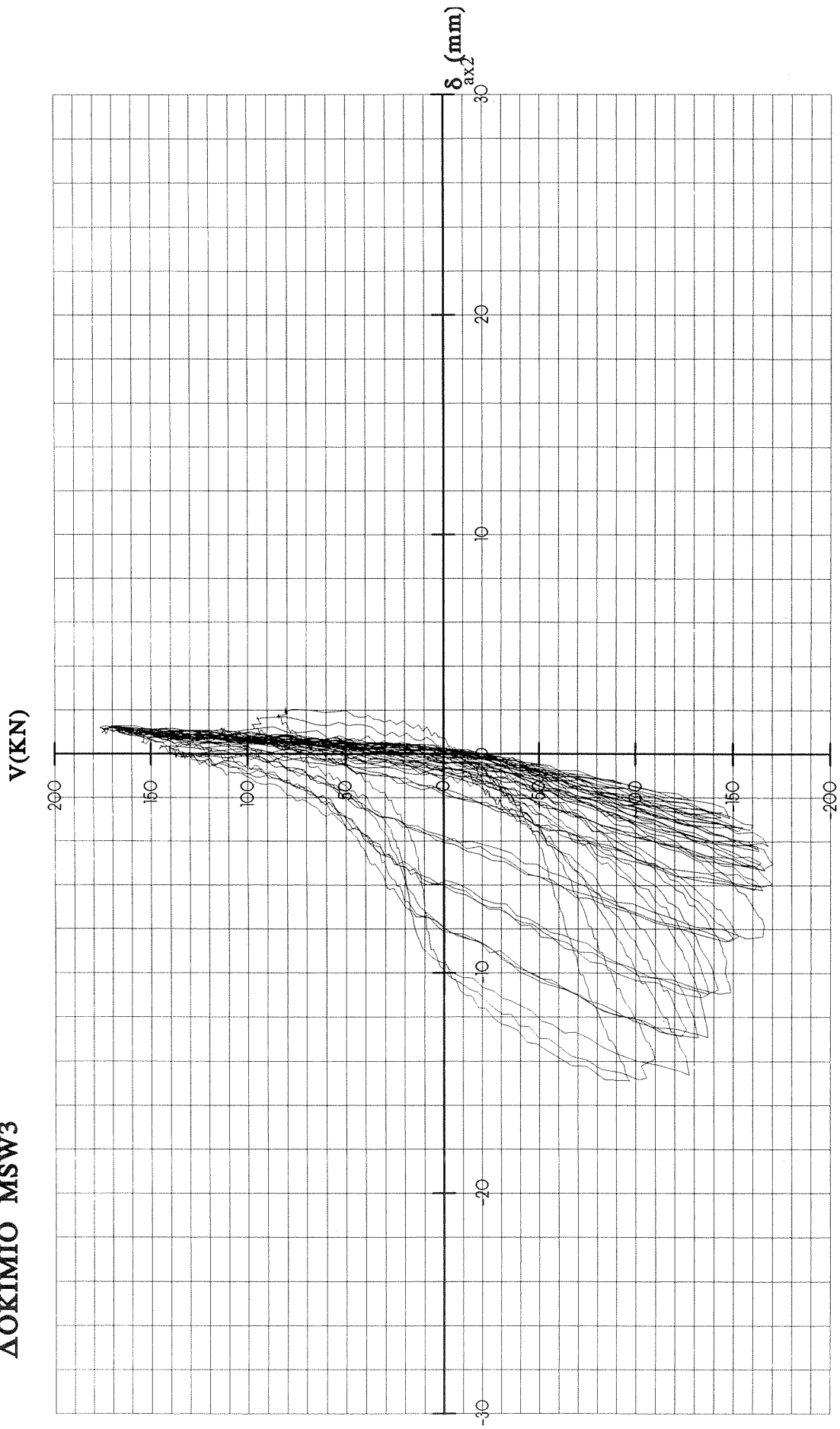
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW3

V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW3

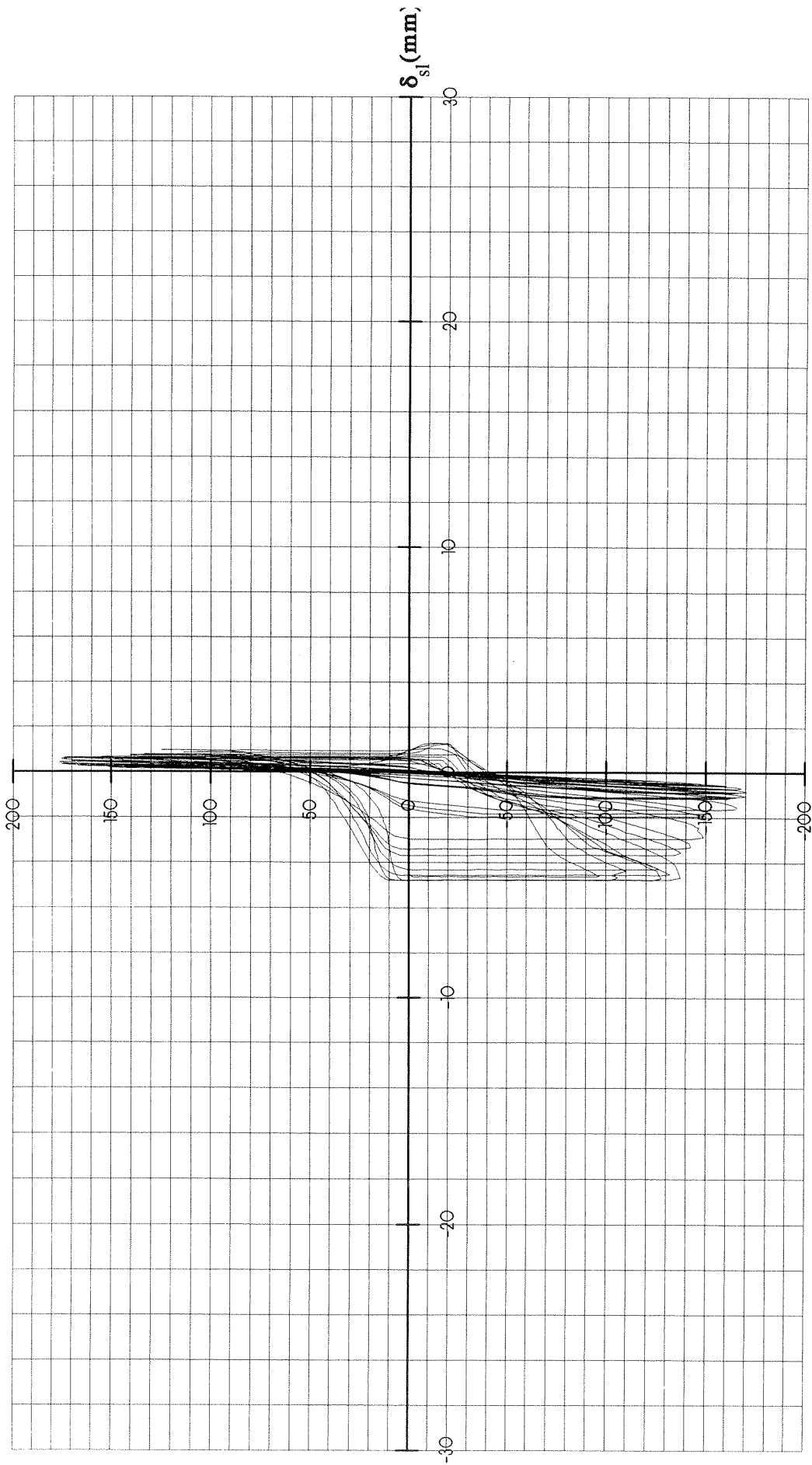
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW3

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW3

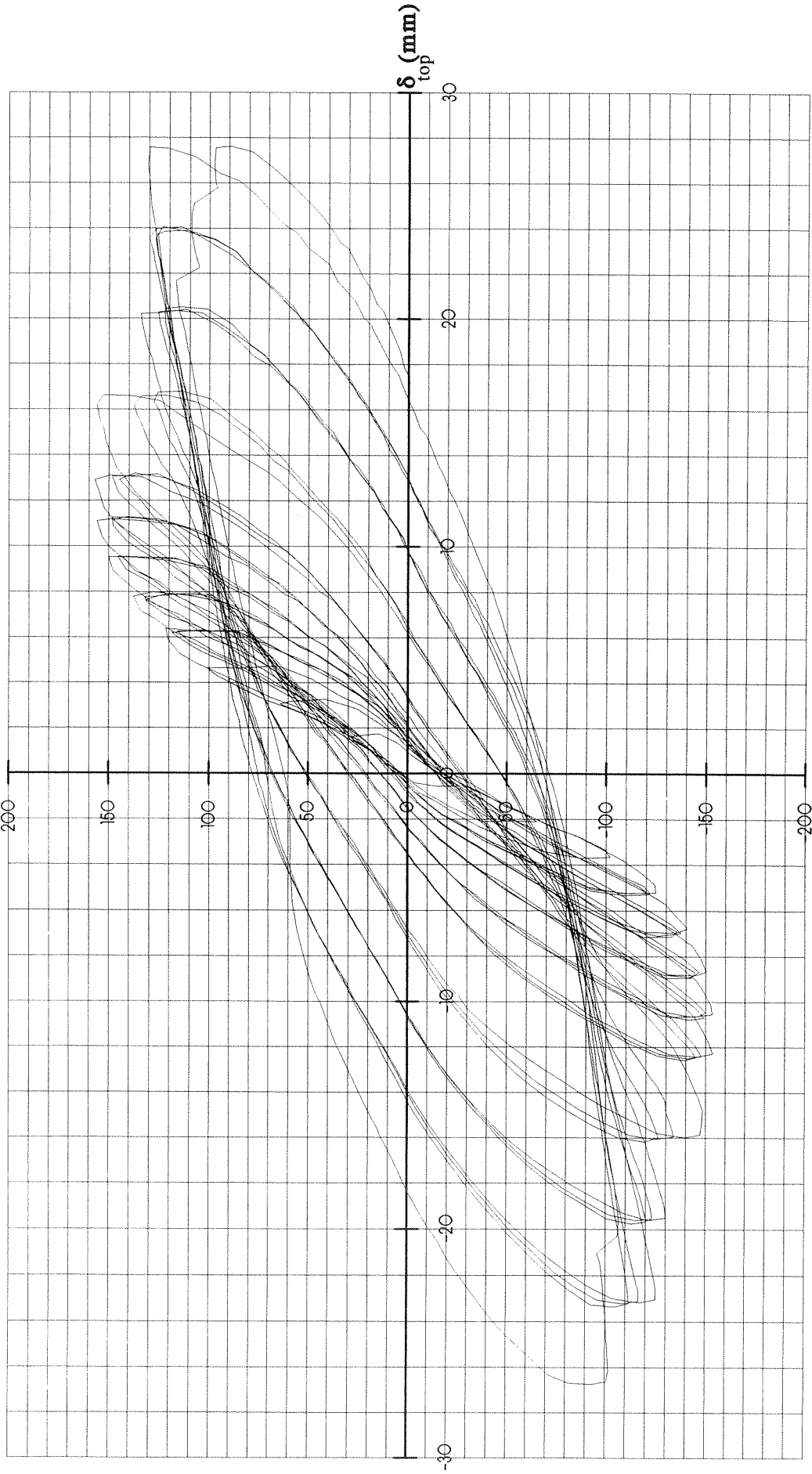
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW3

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW4

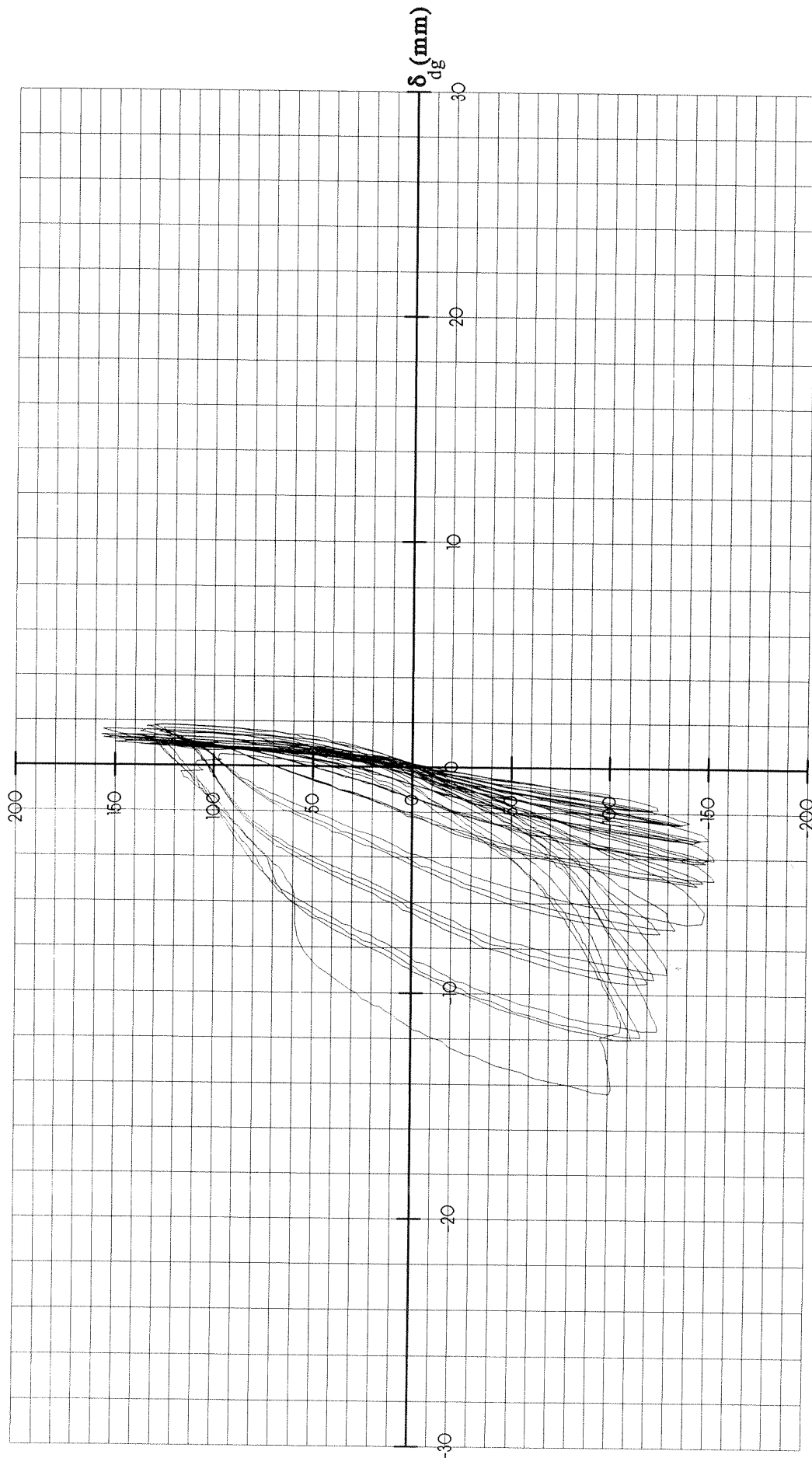
V (KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW4

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW4

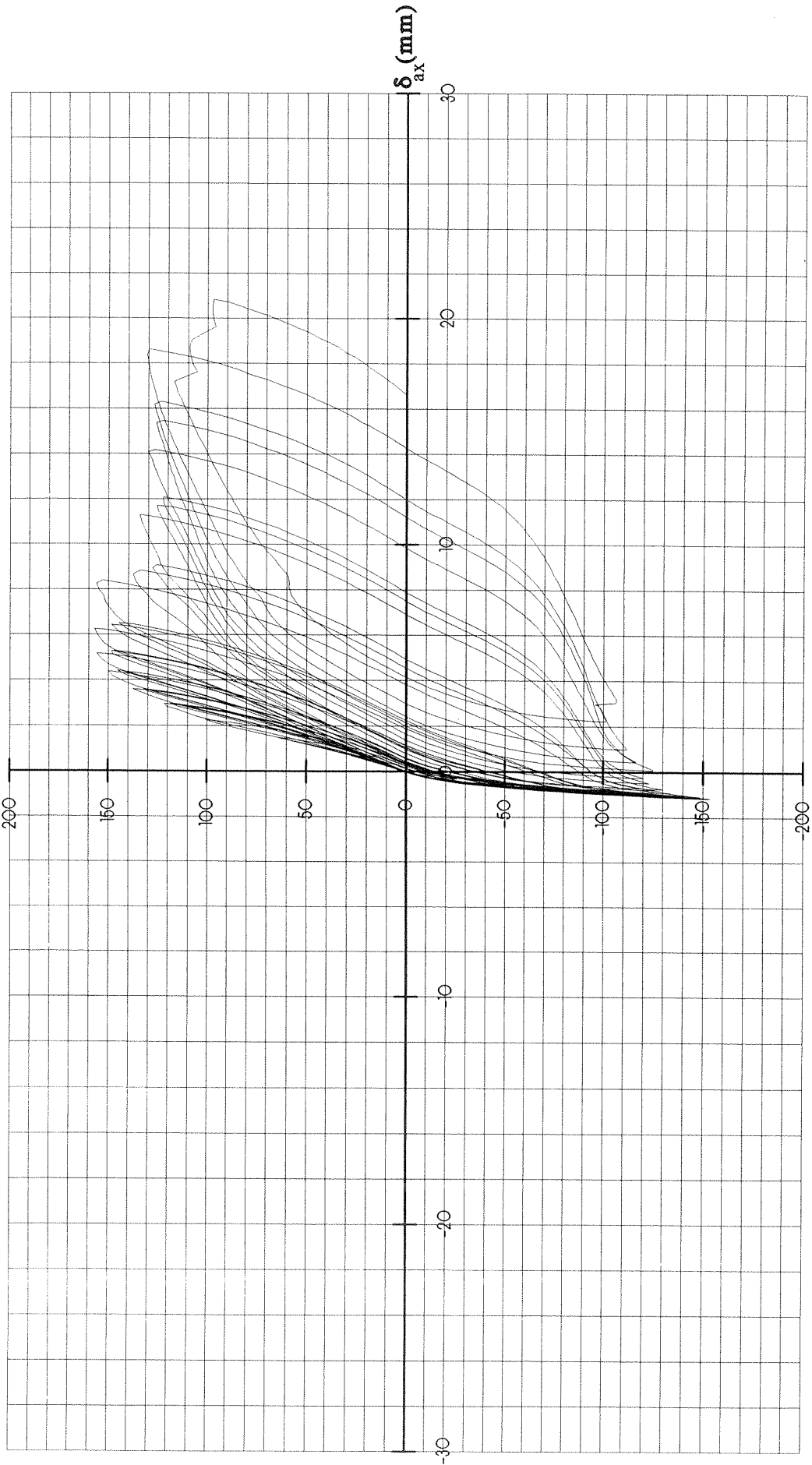
V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW4

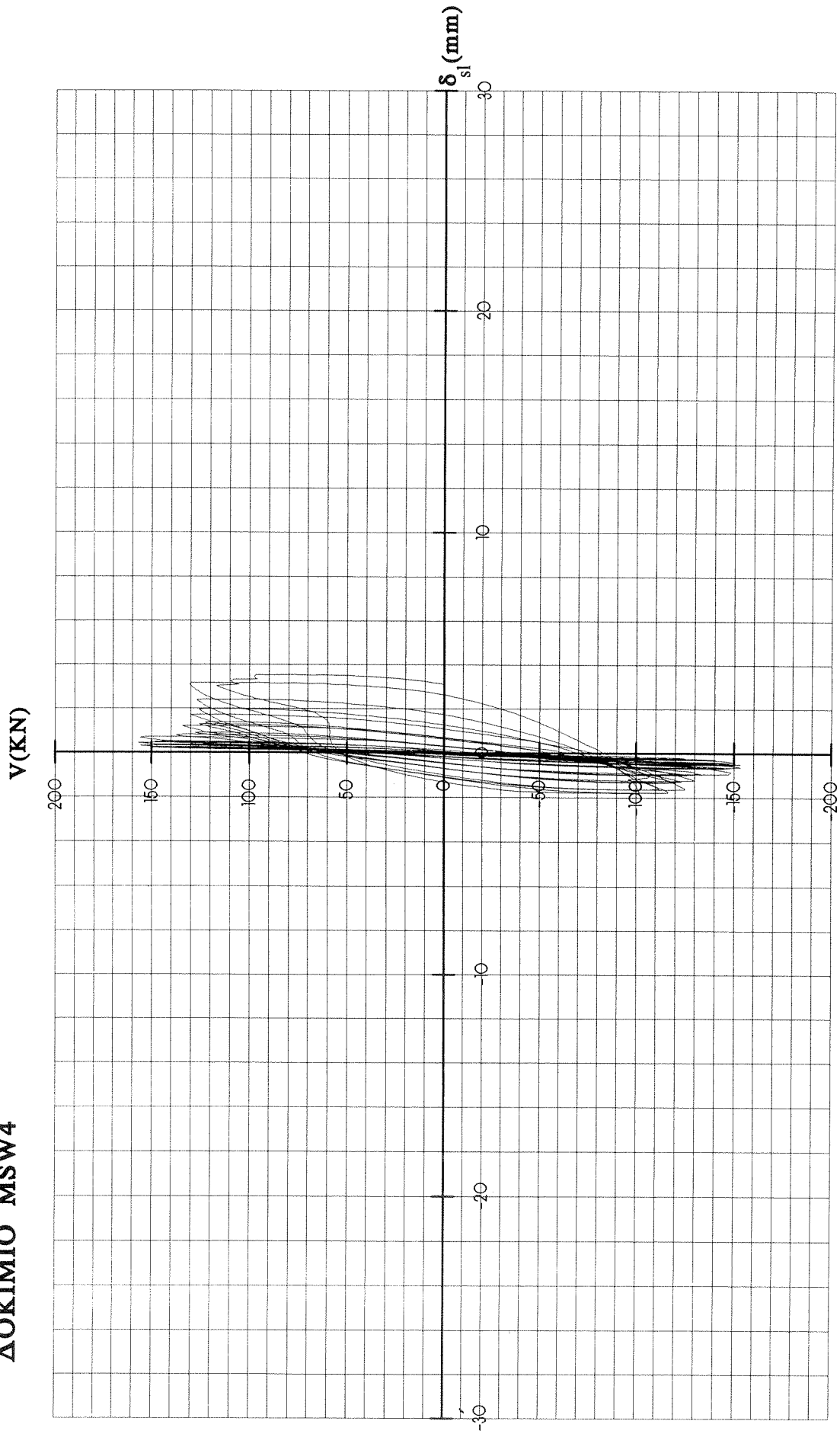
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW4

V(KN)



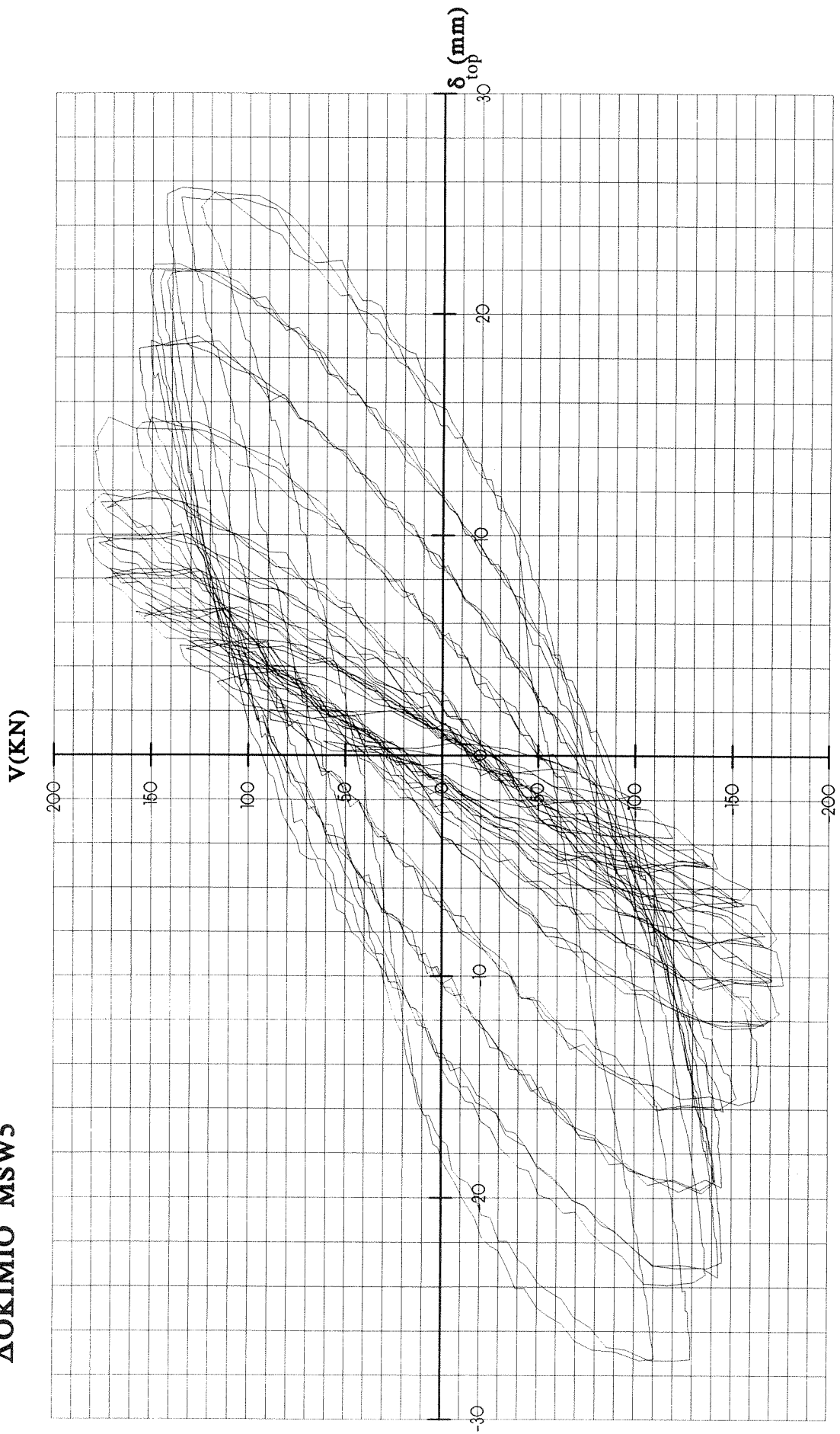
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW4

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW4



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW4

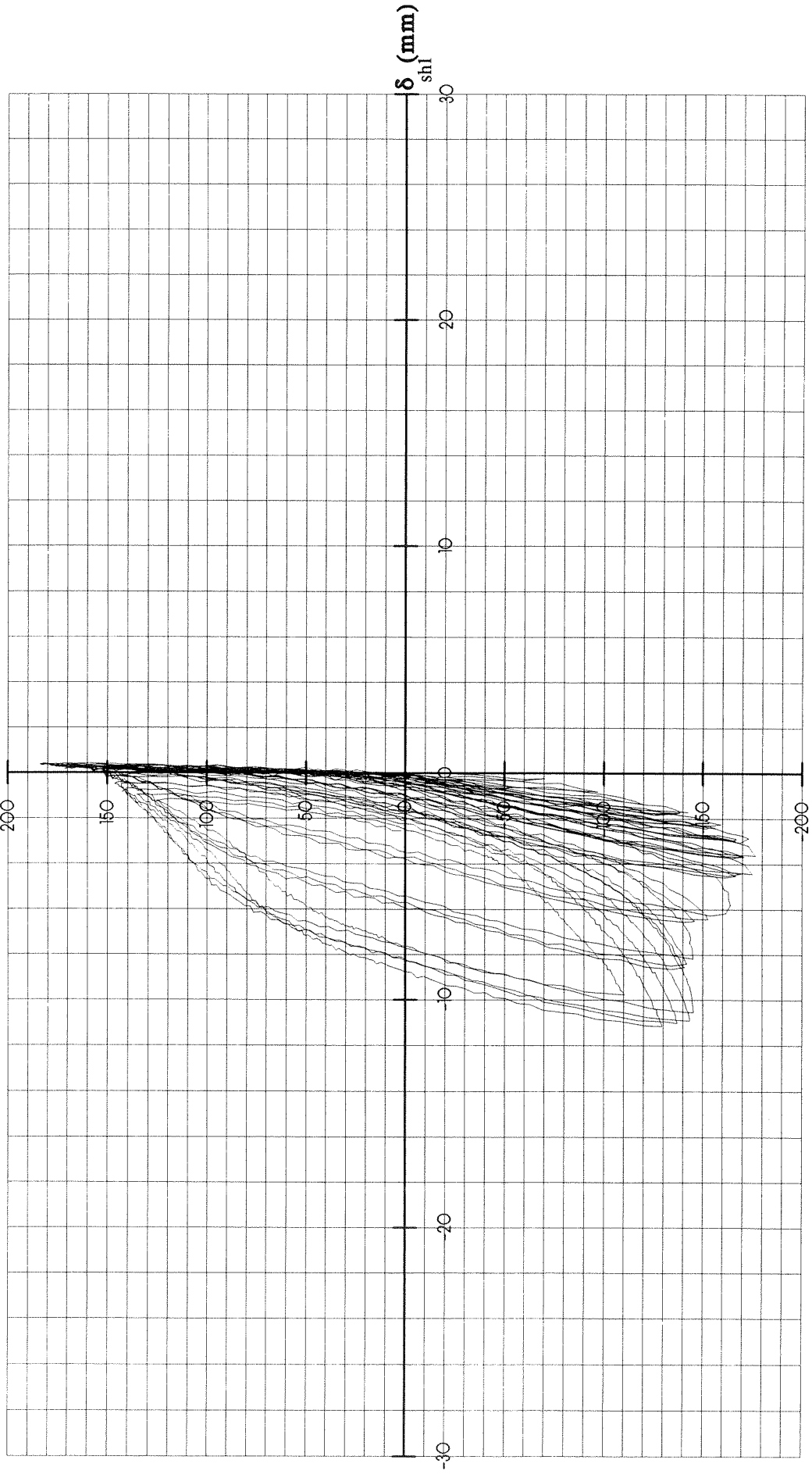
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW5



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW5

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW5

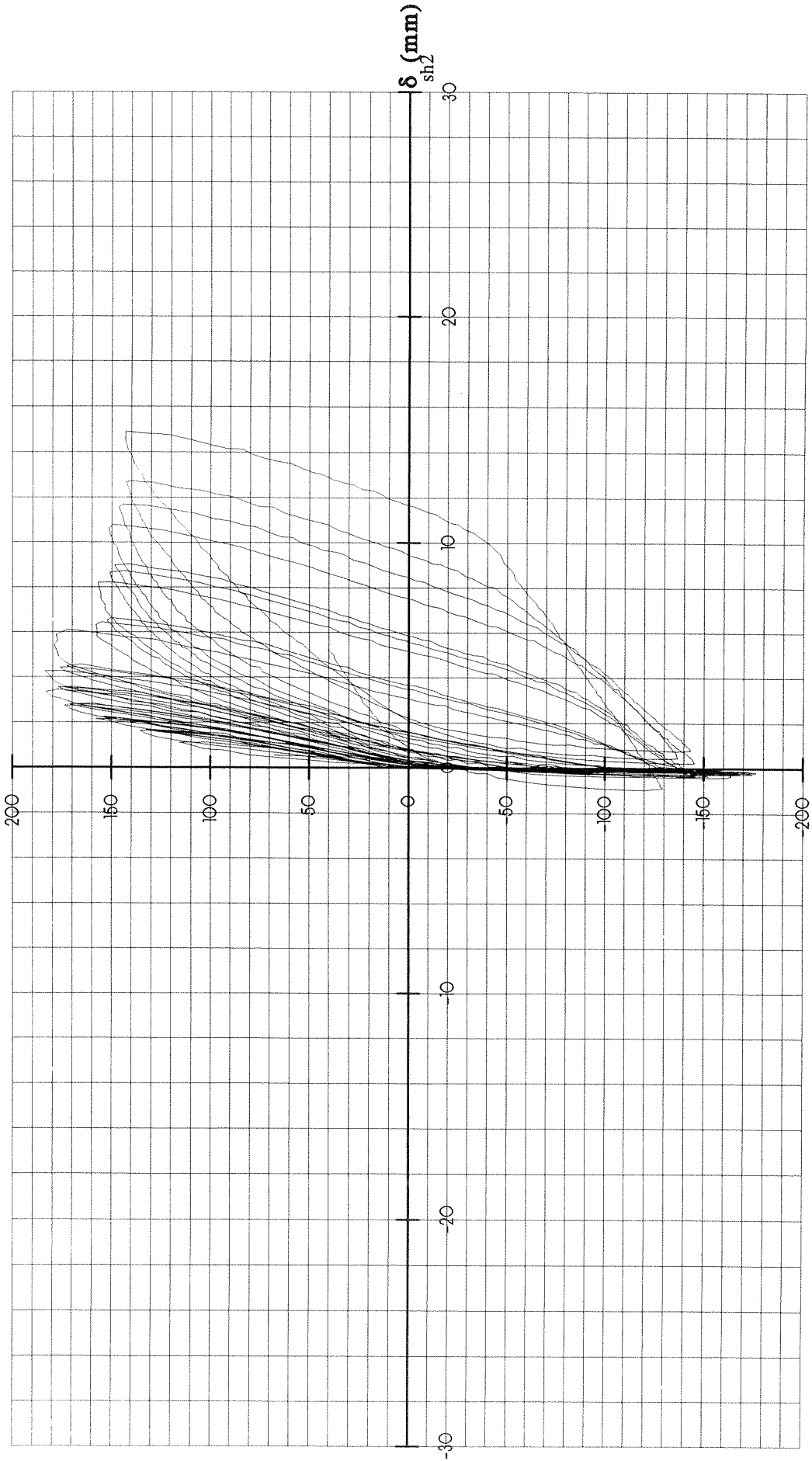
V (KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW5

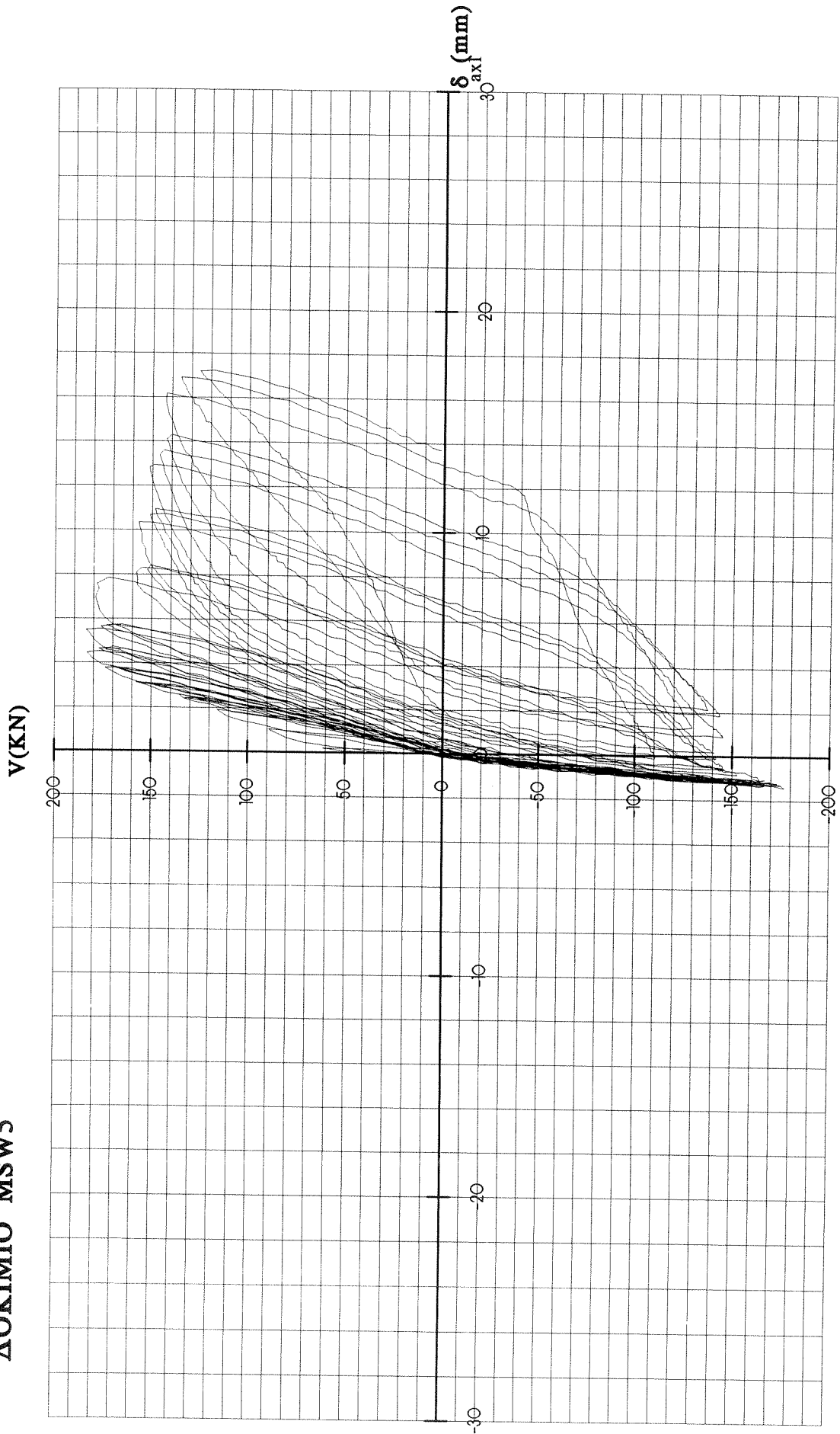
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW5

V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW5

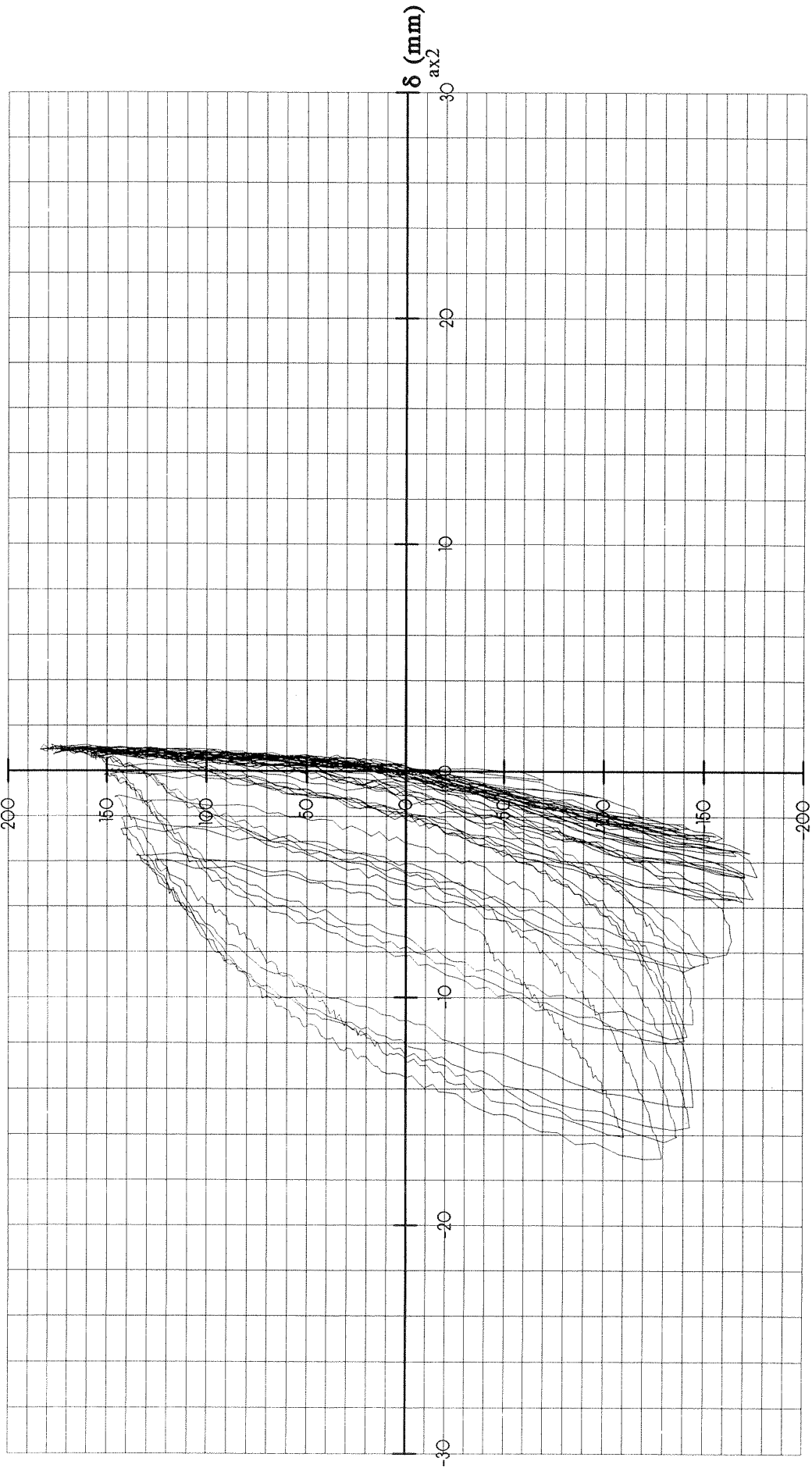
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW5



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW5

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW5

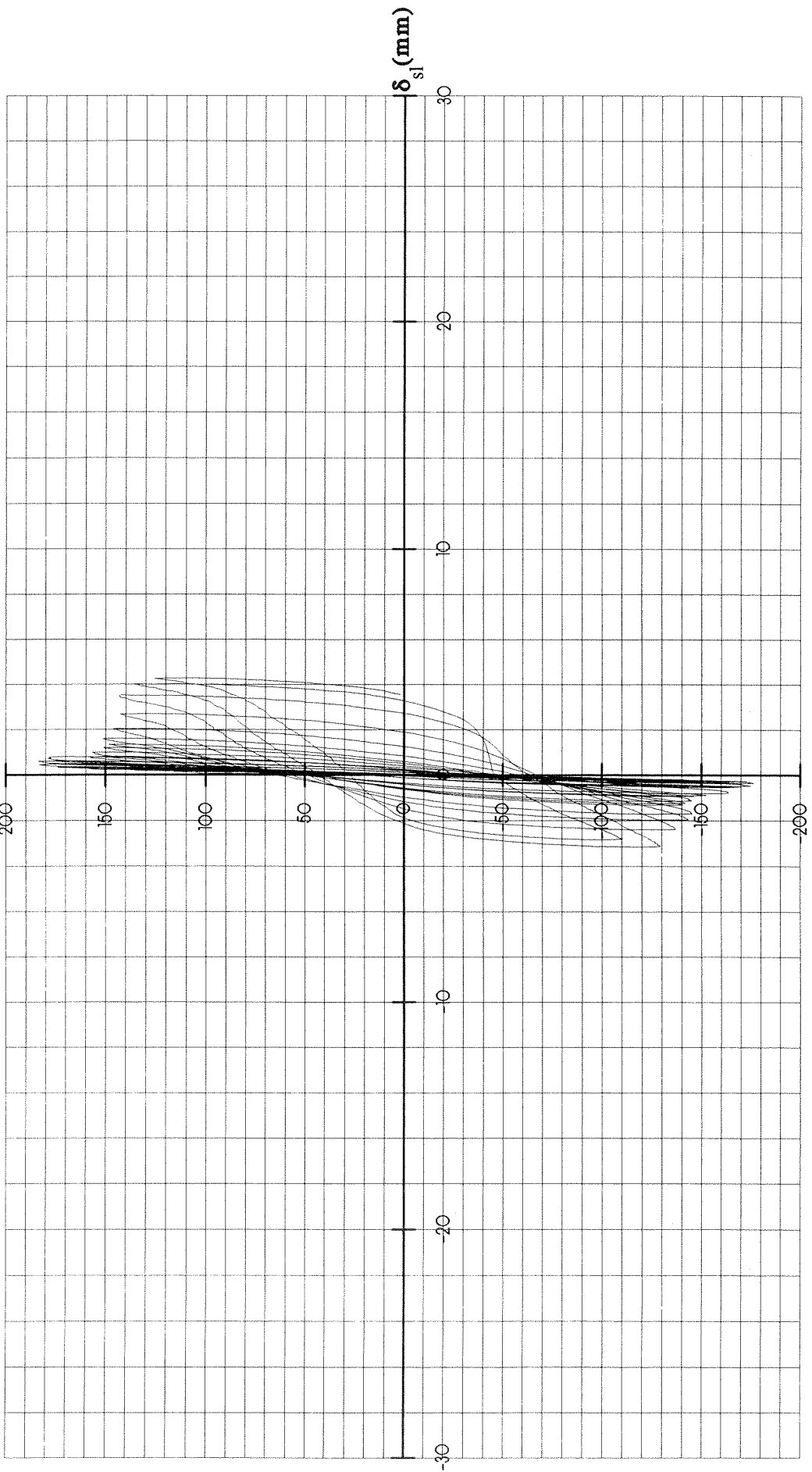
V (kN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΩΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW5

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW5

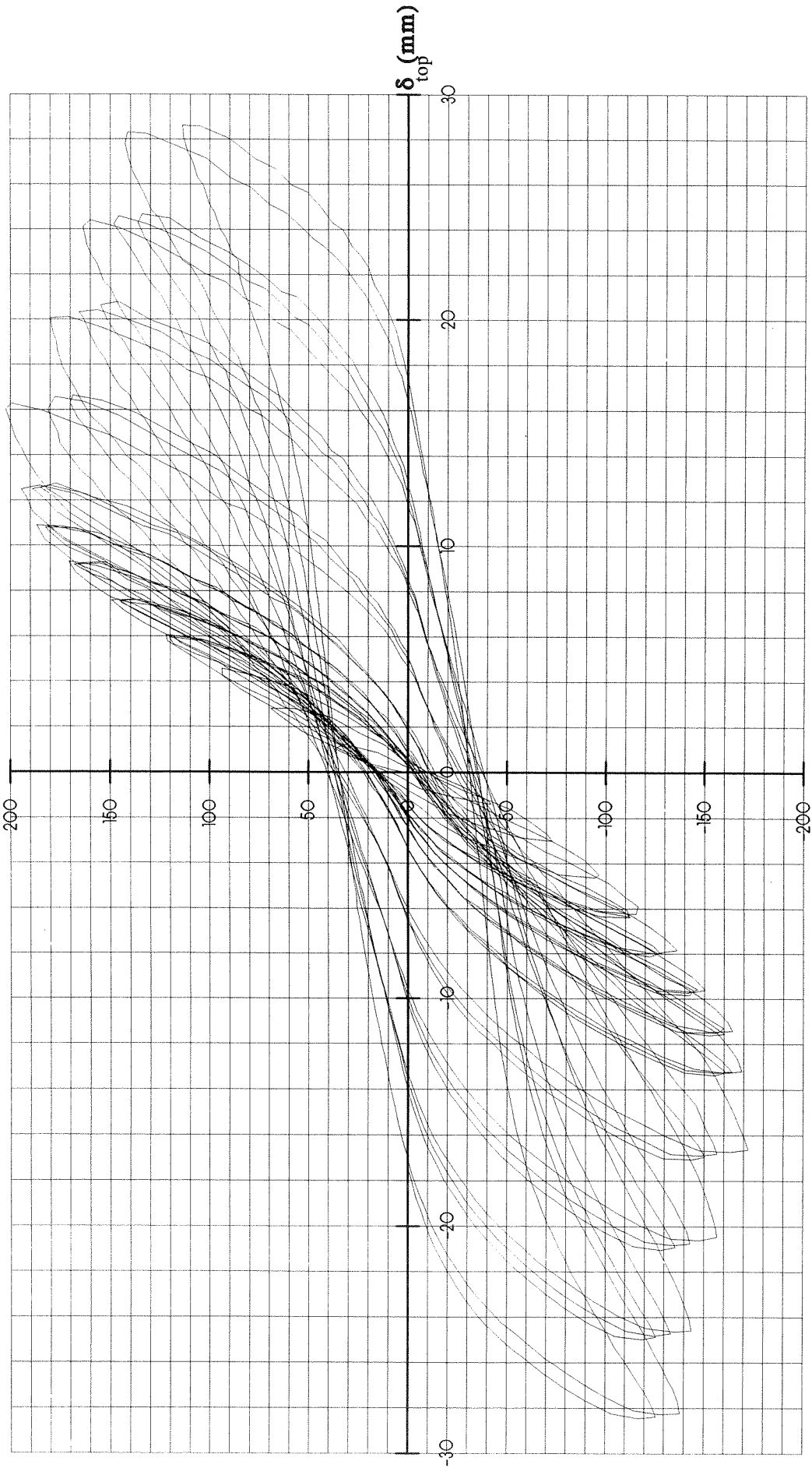
V(KN)



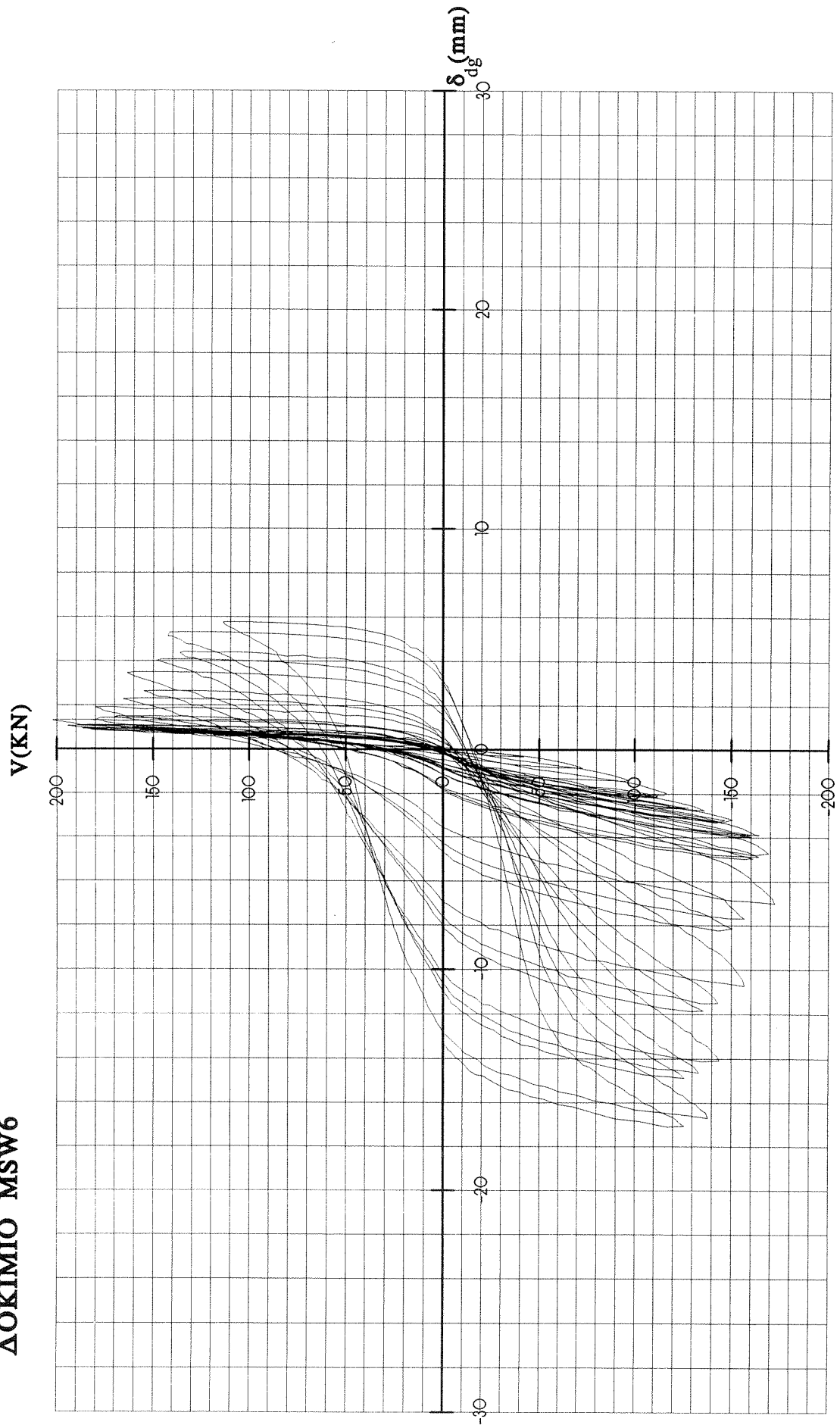
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW5

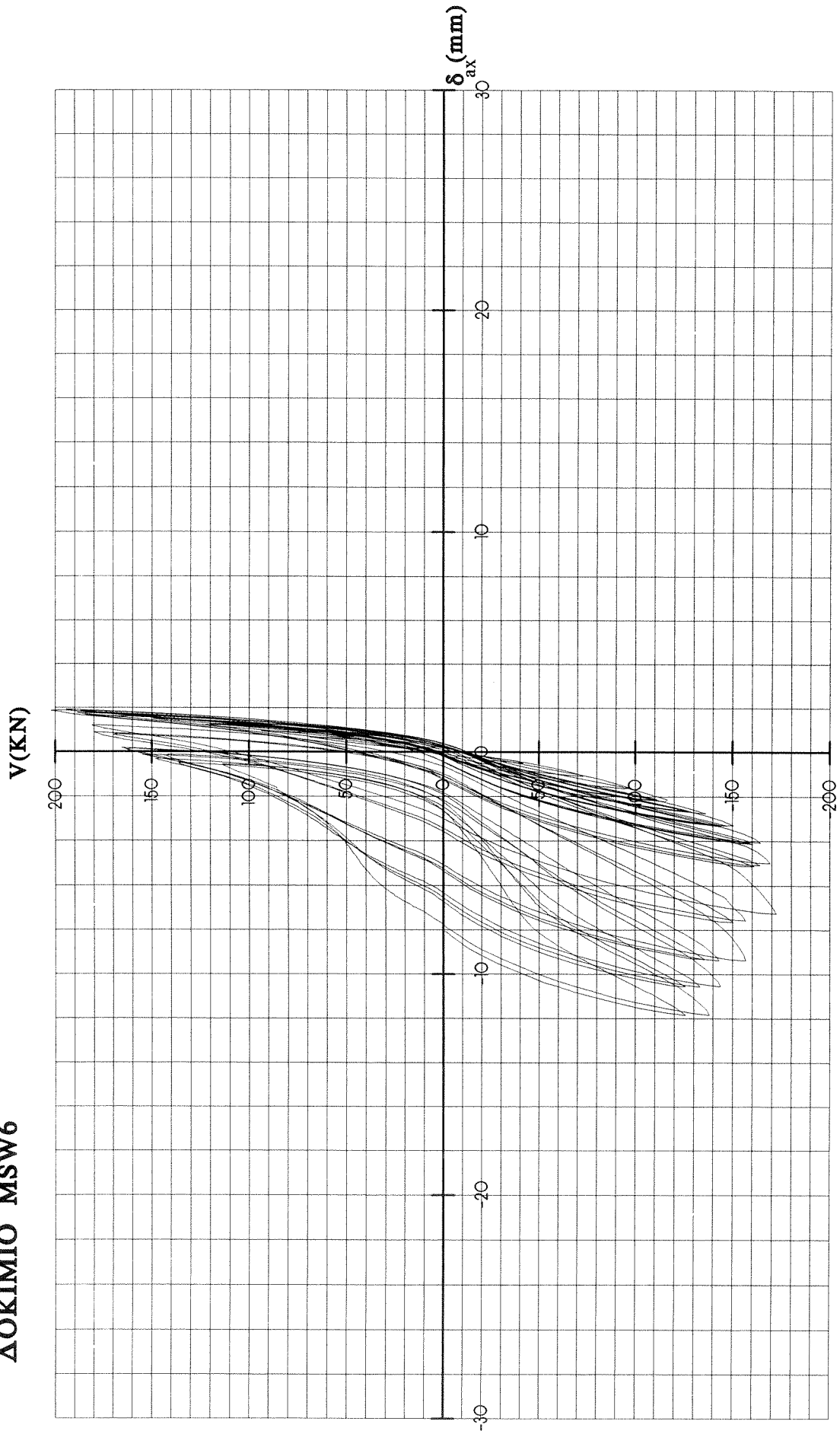
ΔΟΚΙΜΙΟ MSW6

V(KN)



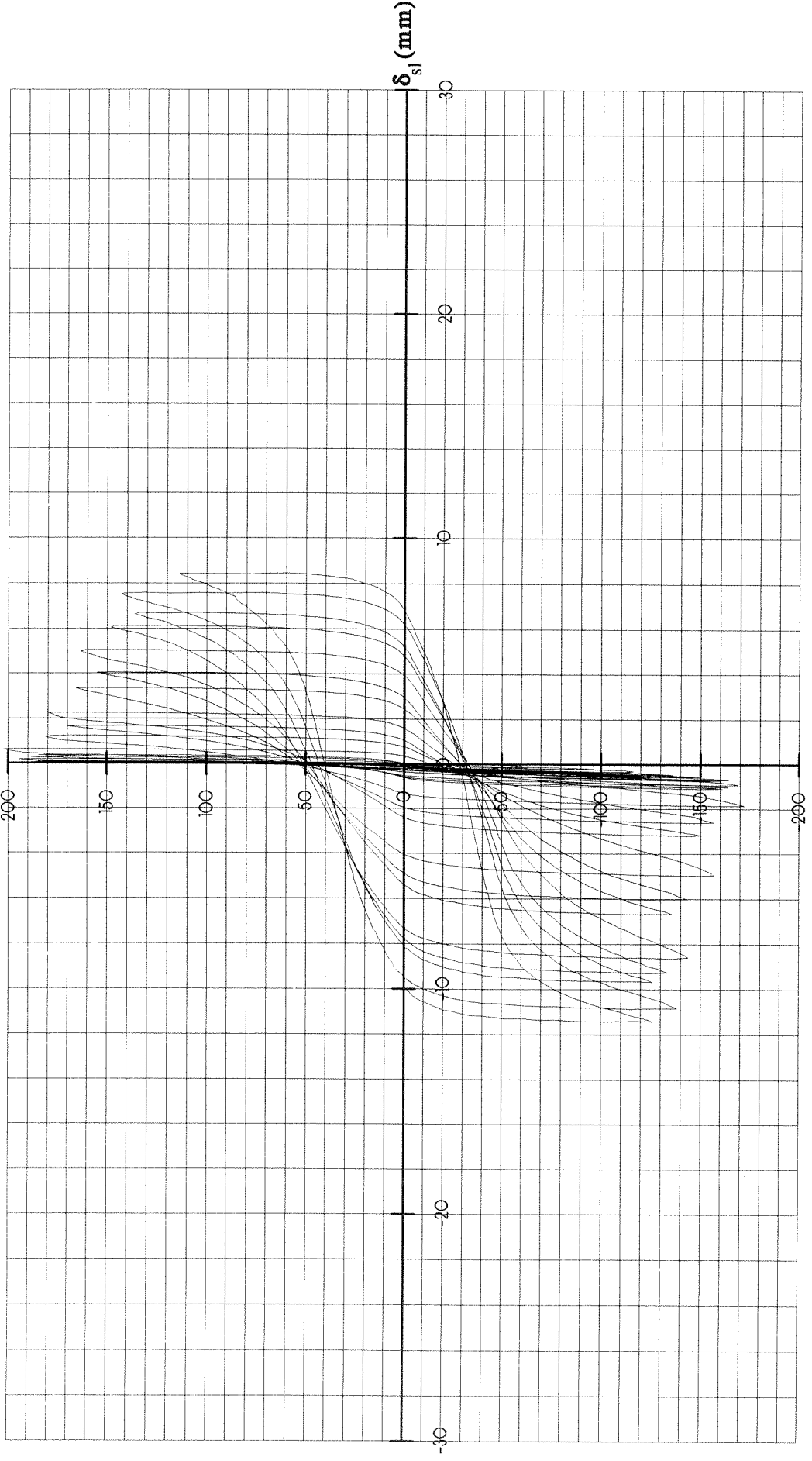
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW6

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW6**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW6**

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW6**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΡΥΦΟΚΟΛΟΝΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW6**

ΔΟΚΙΜΙΟ MSW6

V(KN)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW6

7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

7.1. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑ ΑΝΤΟΧΗΣ

Από την παρατήρηση των καμπυλών που ενώνουν τις κορυφές των βρόχων και στις δύο διευθύνσεις φόρτισης προκύπτει κατ' αρχάς το συμπέρασμα ότι η μέγιστη αντοχή και η κλίση της περιβάλλουσας καμπύλης μεταβάλλεται από δοκίμιο σε δοκίμιο. Έτσι από την ομάδα δοκιμίων MSW τη μεγαλύτερη αντοχή παρουσιάζουν τα δοκίμια MSW1, MSW6, MSW5 και MSW3, πιο μικρή το δοκίμιο MSW4 και τη μικρότερη το δοκίμιο MSW2. Τα δοκίμια MSW1 και MSW6 έχουν ίδιο οπλισμό σε ποσότητα και τρόπο τοποθέτησης με τη διαφορά ότι υπάρχει ένα μήκος παράθεσης από τη βάση του δοκιμίου MSW6 μέχρι και ύψους 80cm. Το αποτέλεσμα της παράθεσης είναι τριπλό :

- α) Δεν επιτρέπει τη ρηγμάτωση και τη διαρροή του χάλυβα σε κάποιο ύψος από τη βάση καθώς η διαρροή συγκεντρώνεται στη βάση του δοκιμίου, όπου υπάρχει ο μισός οπλισμός από ό,τι παραπάνω.
- β) Δημιουργεί πρόσθετες συνθήκες εγκιβωτισμού του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ίνα με τη λειτουργία εκεί του διπλάσιου οπλισμού κατά τη θλίψη.
- γ) Καθυστερεί σημαντικά το λυγισμό των διαμήκων ράβδων του θλιβόμενου πέλματος, καθώς με τη λειτουργία κατά τη θλίψη του διπλάσιου οπλισμού ασκείται η μισή θλιπτική δύναμη σε κάθε ράβδο, καθυστερώντας σημαντικά το λυγισμό τους.

Έτσι με τη συγκέντρωση της καμπτικής ρηγμάτωσης στη βάση του δοκιμίου έχουμε μεγάλη και έντονη μείωση της κλίσης στην αρχή της περιβάλλουσας αντοχής του δοκιμίου MSW6 έναντι του δοκιμίου MSW1, η οποία επηρέασε το δοκίμιο εντονότερα.

Το δοκίμιο MSW5 είχε περίπου ίδια ποσότητα οπλισμού με το δοκίμιο MSW1 ο οποίος ήταν τοποθετημένος με τον τρόπο που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα. Η καμπύλη του δοκιμίου MSW1 είναι γενικά όμοια με την αντίστοιχη καμπύλη αντοχής του δοκιμίου MSW5. Η περιβάλλουσα του δοκιμίου MSW5 βρίσκεται γενικά χαμηλότερα από τη περιβάλλουσα καμπύλη του δοκιμίου MSW1, γεγονός που οφείλεται σαφώς στην ταυτόχρονη λειτουργία ποσοστού του κύριου καμπτικού οπλισμού για την παραλαβή διάτμησης. Έτσι γίνεται σαφές πως η μικρότερη γενικά αντοχή του δοκιμίου MSW5 οφείλεται στο γεγονός ότι ο δισδιαγώνιος οπλισμός

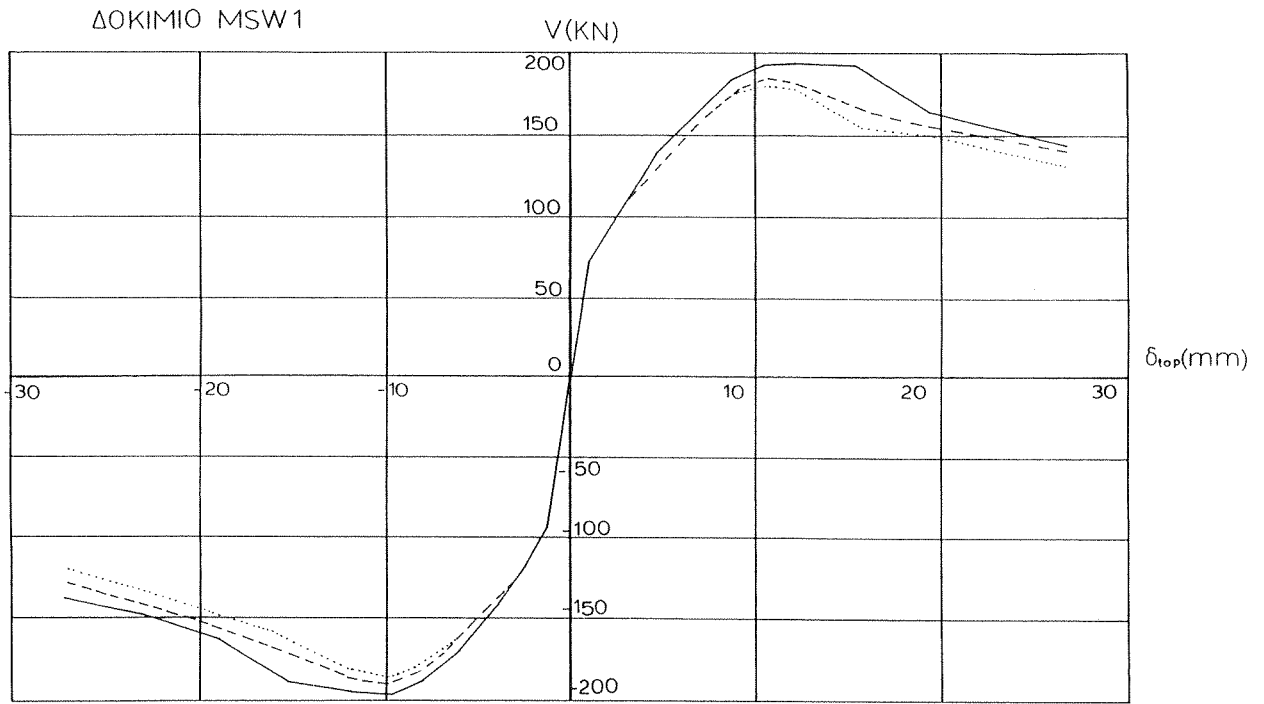
καταπονείται σε εφελκυσμό ένεκα κάμψης και διάτμησης, καθώς επίσης στο γεγονός ότι ο δισδιαγώνιος οπλισμός λόγω της κλίσης του σε μικρή απόσταση από τη βάση αρχίζει και συμμετέχει στην κάμψη με μειωμένο μοχλοβραχίονα. Γενικώς οι αντοχές των δύο δοκιμίων με κλασικό οπλισμό MSW1 και ισοδύναμο δισδιαγώνιο MSW5 είναι πολύ κοντά. Ομοια αντοχή με αυτή των προηγούμενων δοκιμίων επέδειξε και το δοκίμιο MSW3, το οποίο είχε μεν σχεδόν το μισό καμπτικό και διατμητικό οπλισμό με τα παραπάνω δοκίμια, αλλά έφερε επιπλέον αξονική δύναμη της τάξης του 7% της θλιπτικής αντοχής του. Έτσι η περιβάλλουσα καμπύλη αντοχής του δοκιμίου MSW3 έχει όμοια μορφή με αυτήν των δοκιμίων MSW1 και MSW5, ενώ η κλίση της είναι όμοια στην αρχή και εντονότερη μετά την μέγιστη αντοχή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η καμπτική ρηγμάτωση περιορίστηκε χαμηλά και ότι προκειμένου να επιτευχθούν οι επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στην κεφαλή του δοκιμίου αναπτύχθηκαν και διατμητικά ρήγματα στον κορμό του τοιχείου, που οδήγησαν σε γρήγορη μείωση της αντοχής. Το δοκίμιο MSW4 με τους χιαστί οπλισμούς να διέρχονται από την μέση της βάσης του είχε σαφώς χαμηλότερη αντοχή από αυτή των παραπάνω δοκιμίων και μικρότερη αρχική κλίση, λόγω της μικρής ποσότητας του διαμήκους καμπτικού οπλισμού στα άκρα. Ο κλασικός οπλισμός διάτμησης μαζί με τον δισδιαγώνιο οπλισμό στον κορμό διατήρησε την αντοχή υψηλά, ακόμη και σε έντονο ανελαστικό επίπεδο. Το δοκίμιο MSW2 ανέπτυξε γενικά χαμηλή αντοχή σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια. Οι ρηγματώσεις, λόγω της αρχικά εκτός επιπέδου παραμόρφωσής τους, οδήγησαν σε μικρή κλίση τις περιβάλλουσες καμπύλης αντοχής στην αρχή και σε μεγάλες τελικά παραμορφώσεις στο τέλος τους. Γενικά το δοκίμιο ανέπτυξε τη θεωρητική καμπτική αντοχή του, ενώ το φαινόμενο της μικρής γενικά κλίσης της περιβάλλουσας καμπύλης αντοχής εξαλείφεται στον μετέπειτα υπολογισμό της πλαστιμότητας, αφού αυτή είναι ανηγμένο μέγεθος.

Ομοια συμπεριφορά παρατηρείται και μεταξύ των δοκιμίων της σειράς LSW. Οι αντοχές των δοκιμίων LSW1, LSW3 και LSW5 είναι του αυτού μεγέθους μεταξύ τους, αλλά υψηλότερες από τις αντίστοιχες αντοχές των άλλων δοκιμίων. Η αντοχή του δοκιμίου LSW2 είναι η χαμηλότερη από τις άλλες της σειράς, ενώ η αντοχή του δοκιμίου LSW4 βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα. Όπως προέκυψε από τα πειράματα τα δοκίμια LSW1, LSW3 και LSW5 παρουσίασαν αρχική διατμητική ρηγμάτωση για τέμνουσα της τάξης των 180kN, ενώ τα δοκίμια LSW2 και LSW4 για τέμνουσα της τάξης των 140kN. Πέρα από αυτή τη θέση η αντοχή αυξάνει αρκετά καθώς τελικά δεν διαρρέει ο οπλισμός διάτμησης αλλά ο καμπτικός οπλισμός.

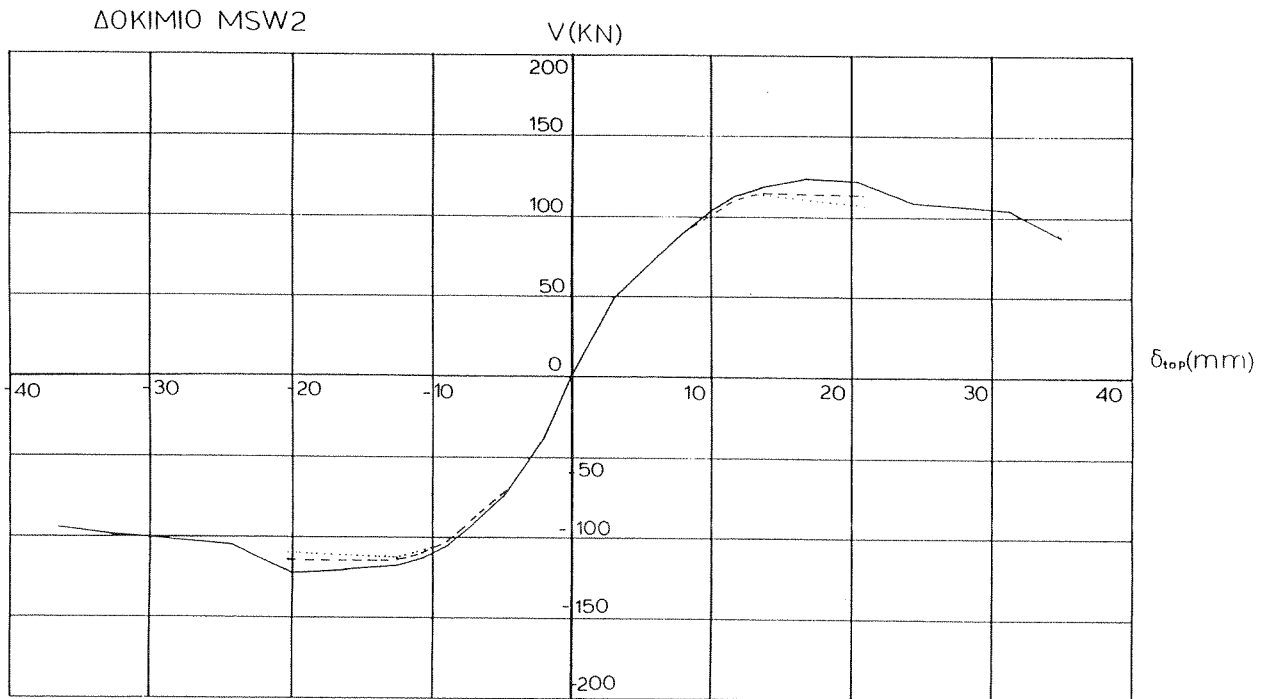
Επίσης σχεδιάστηκαν οι περιβάλλουσες καμπύλες της σειράς των δεύτερων και

τρίτων κύκλων που επιβλήθηκαν μετά τη μετατόπιση καμπτικής διαρροής, προκειμένου να προσδιορισθεί η επιρροή της ανακύκλισης στη συμπεριφορά των δοκιμίων. Παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση της αντοχής από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο από ότι από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο για το αυτό επίπεδο μετατόπισης. Επίσης, ενώ πριν τη μέγιστη αντοχή η διαφορά αντοχής μεταξύ πρώτου και δεύτερου κύκλου αυξάνεται σταθερά, όπως και η διαφορά αντοχής δεύτερου και τρίτου κύκλου με εντονότερη την πρώτη, αμέσως μετά την μέγιστη αντοχή οι διαφορές αυξάνουν απότομα, για να αρχίσουν να συγκλίνουν πάλι με την αύξηση των μετατοπίσεων. Η απότομη αύξηση της διαφοράς μεταξύ πρώτου και δεύτερου κύκλου και μεταξύ δεύτερου και τρίτου κύκλου, που παρατηρείται κατάντι της μέγιστης αντοχής, απεικονίζει καθαρά το γεγονός ότι η πτώση αντοχής οφείλεται σε μείωση της συμμετοχής στην ανάληψη έντασης ψαθυρών μηχανισμών, όπως είναι η εμπλοκή αδρανών και η λειτουργία βλήτρου. Το κυριότερο αίτιο της μείωσης της συμμετοχής των παραπάνω μηχανισμών, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι οι έντονες ανελαστικές καμπτικές παραμορφώσεις, οι οποίες αφενός μειώνουν το χρήσιμο μήκος ρήγματος στο οποίο λειτουργεί η εμπλοκή αδρανών, αφετέρου αυξάνουν το μήκος του βλήτρου που ανθίσταται στη διάτμηση. Οι συνέπειες του παραπάνω γεγονότος μειώνονται, όπως προκύπτει από τις περιβάλλουσες αντοχής, από το δεύτερο στον τρίτο κύκλο, καθώς αφού οι παραπάνω μηχανισμοί ενδώσουν αρχικά, μειώνονται οι συνέπειες της ανακύκλισης (λόγω λείανσης κυρίως), όταν αυτοί αναγκαστούν να ενδώσουν για δεύτερη φορά. Στην ομάδα δοκιμίων με λόγο όψης περίπου 1 οι διαφορές μεταξύ των τριών κύκλων ίσης μετατόπισης αρχίζουν αμέσως μετά την αρχική διατμητική ρηγμάτωση και είναι σταθερές στο υπόλοιπο μήκος της καμπύλης αντοχής, ενώ αρχίζουν να συγκλίνουν στο πέρας της.

Επίσης από τα διαγράμματα των περιβαλλουσών καμπυλών αντοχής των δοκιμίων της σειράς LSW προκύπτει το συμπέρασμα ότι η πτώση αντοχής φθάνει στο 75% της μέγιστης, για πολύ μικρότερη μετατόπιση της κορυφής των δοκιμίων από την αντίστοιχη μετατόπιση των δοκιμίων της σειράς MSW. Εξαίρεση αποτελούν τα δοκίμια LSW3 και LSW5 των οποίων η μετατόπιση αστοχίας είναι κοντά στη μετατόπιση αστοχίας των δοκιμίων MSW3 και MSW5, αν αυτή πολλαπλασιαστεί με το πηλίκο των λόγων όψεων των δοκιμίων των δύο σειρών (Διαγρ. 1-6).

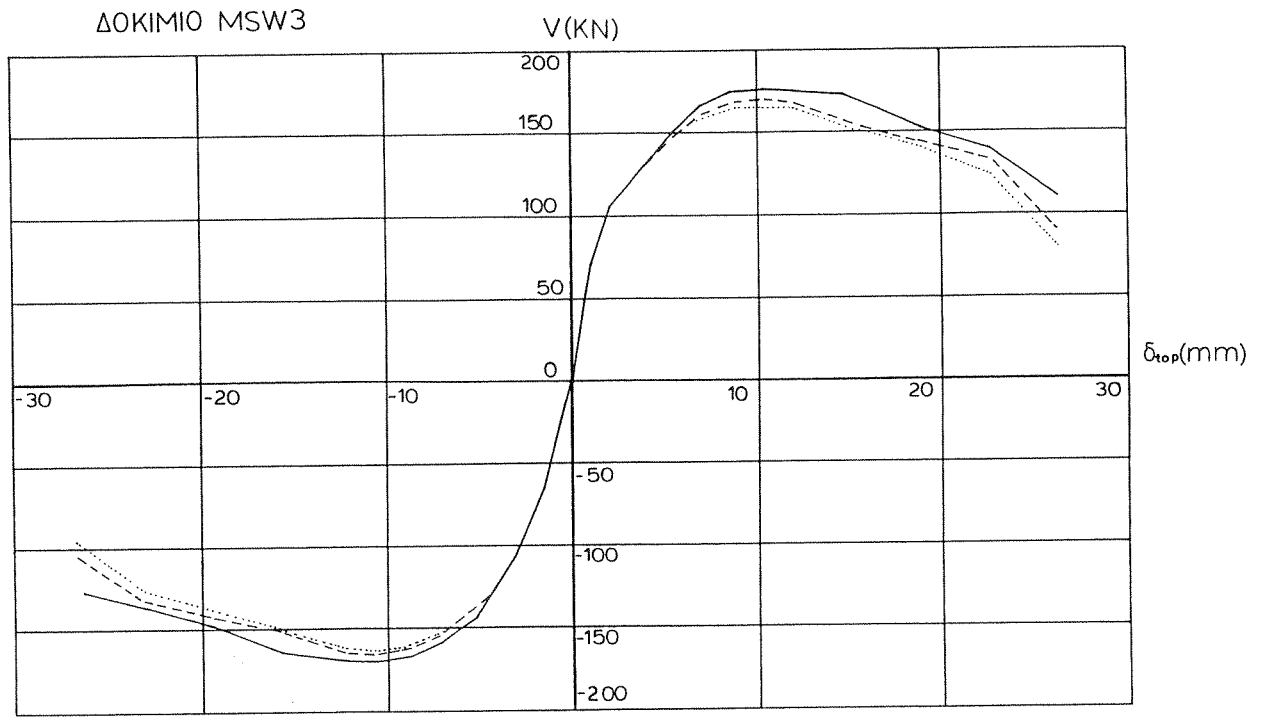


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW1

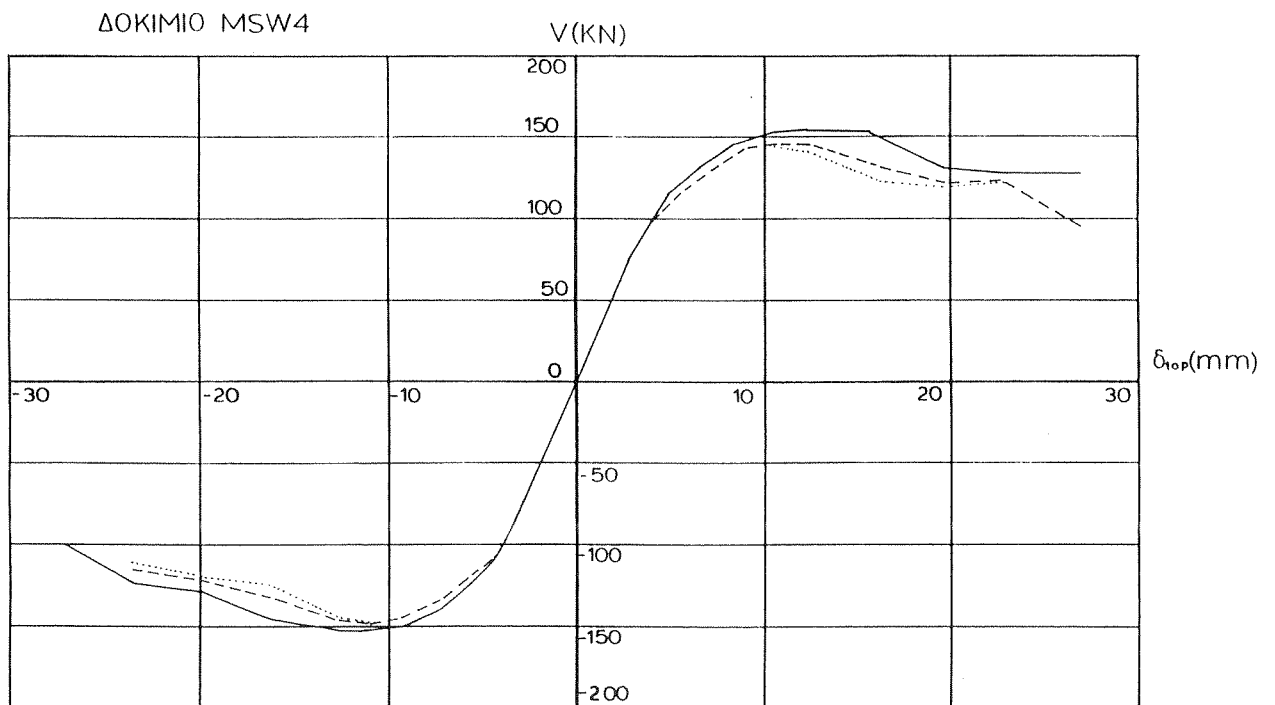


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW2

Διαγρ. 1. Περιβάλλουσες καμπύλες αντοχής δοκιμίων MSW1 και MSW2
 (— πρώτος κύκλος, ----- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

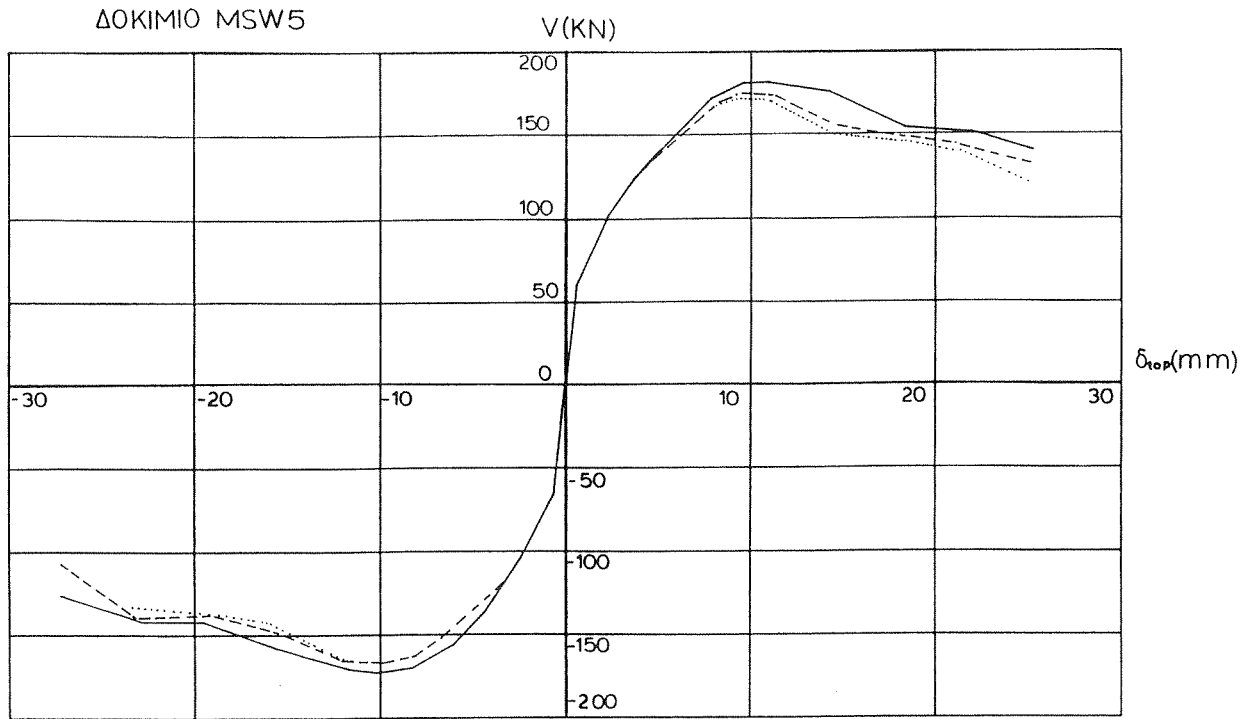


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW3

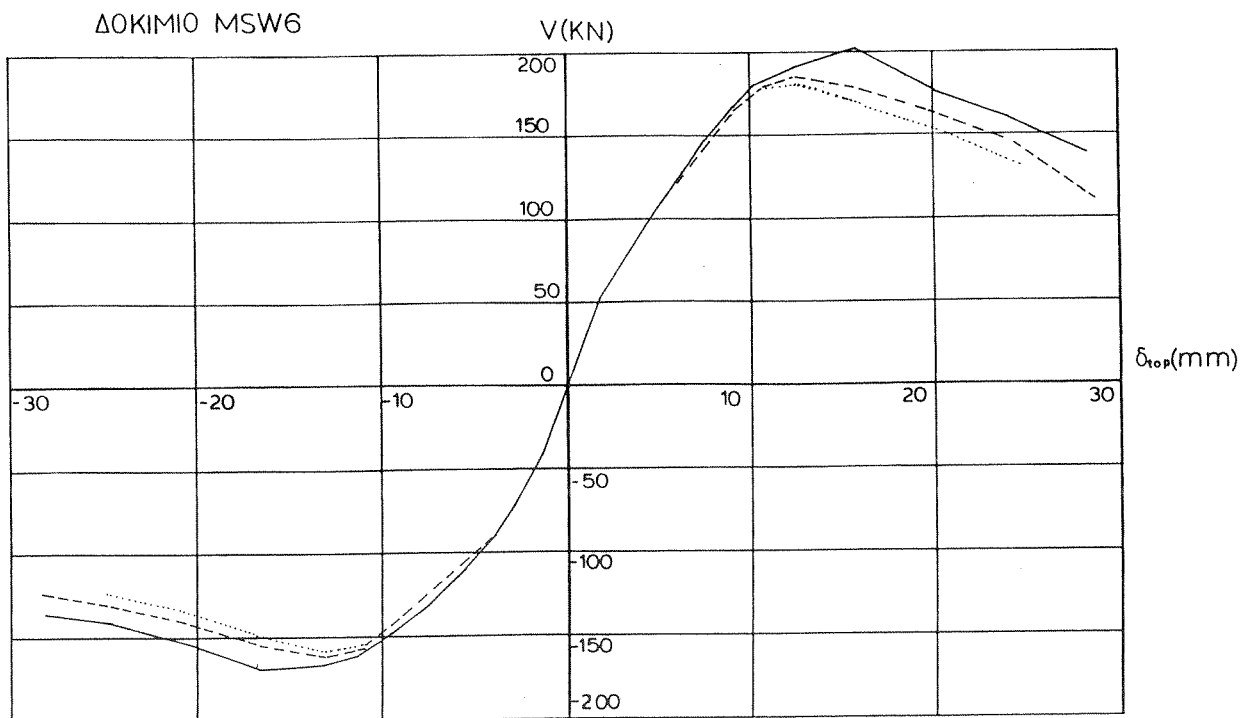


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW4

Διαγρ. 2. Περιβάλλουσες καμπύλες αντοχής δοκιμίων MSW3 και MSW4
(— πρώτος κύκλος, ---- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

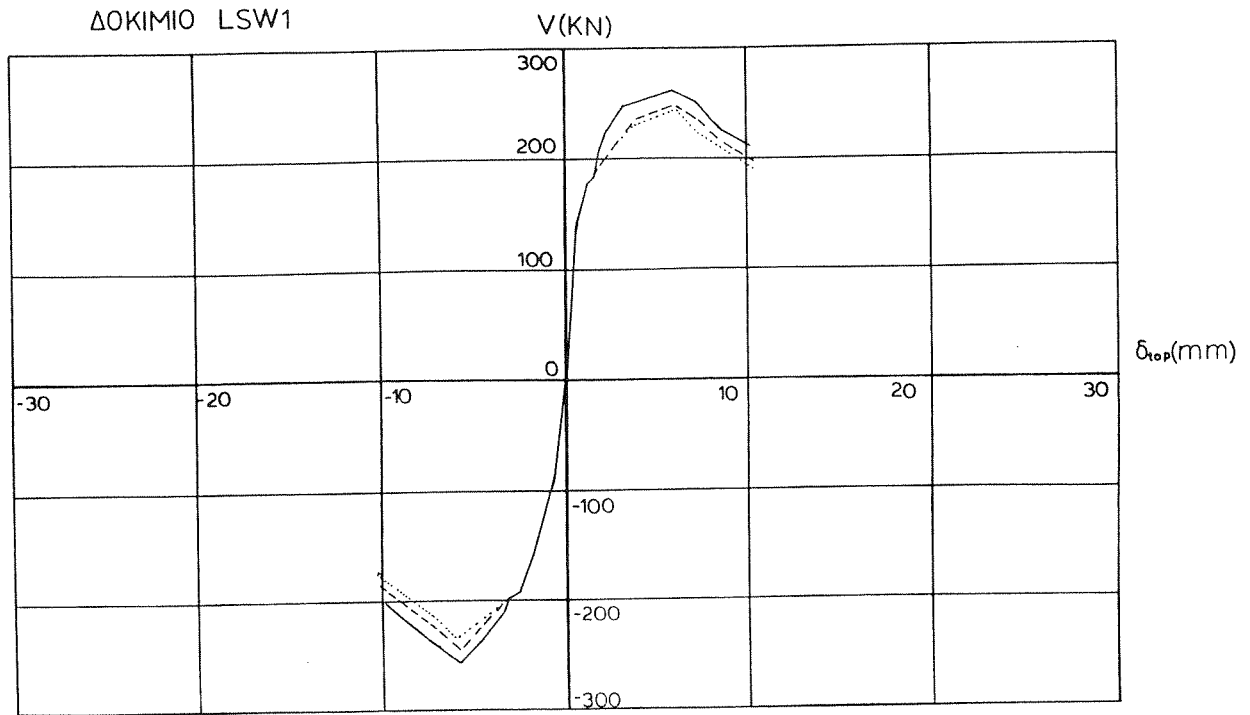


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW5

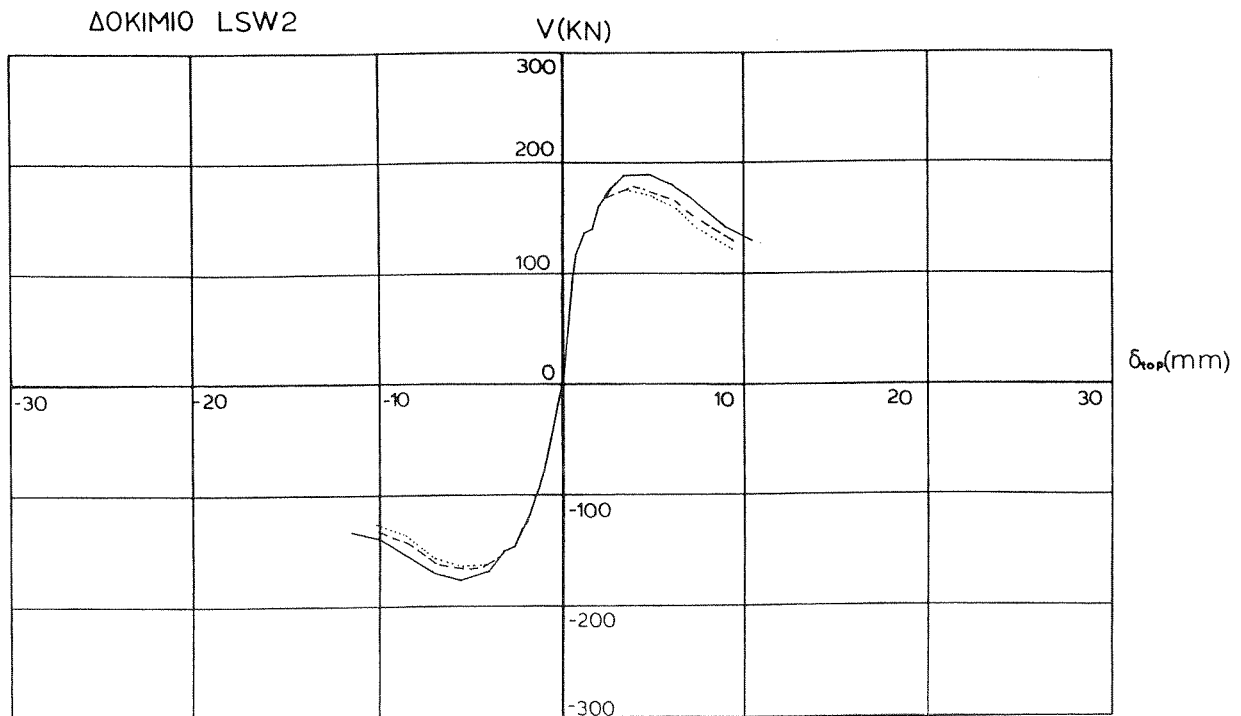


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ MSW6

Διαγρ. 3. Περιβάλλουσες καμπύλες αντοχής δοκιμίων MSW5 και MSW6
 (— πρώτος κύκλος, ---- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

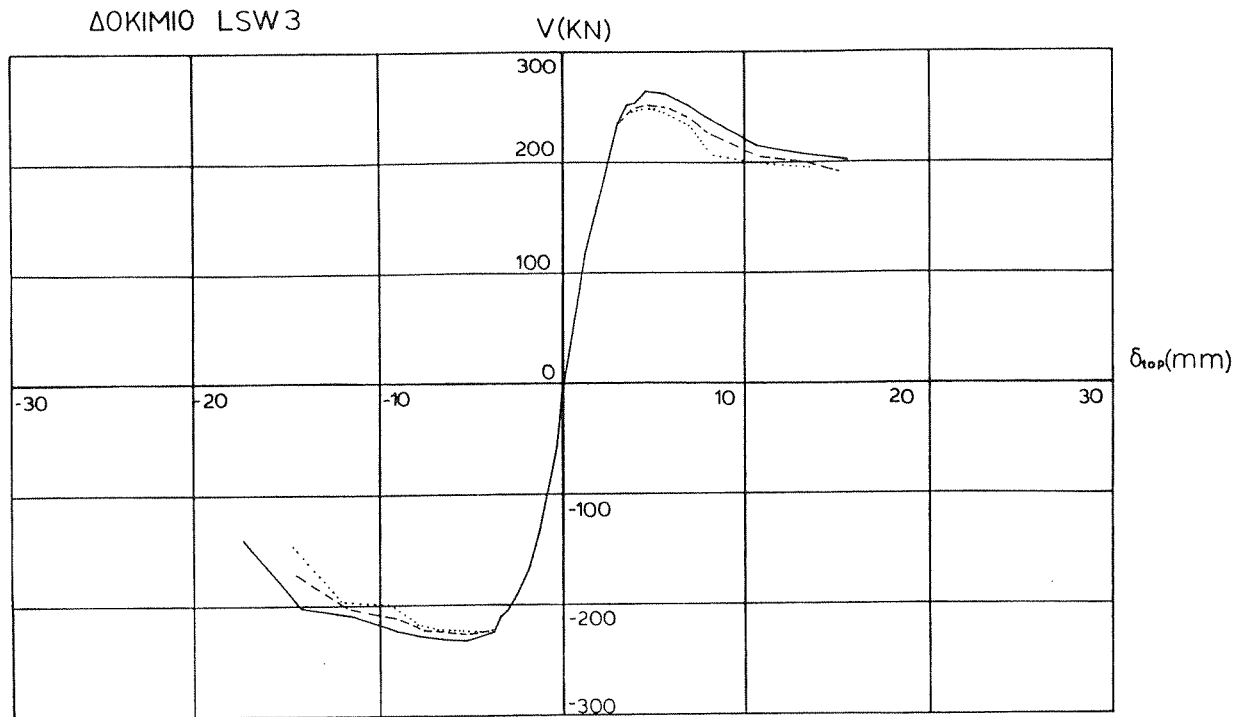


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW1

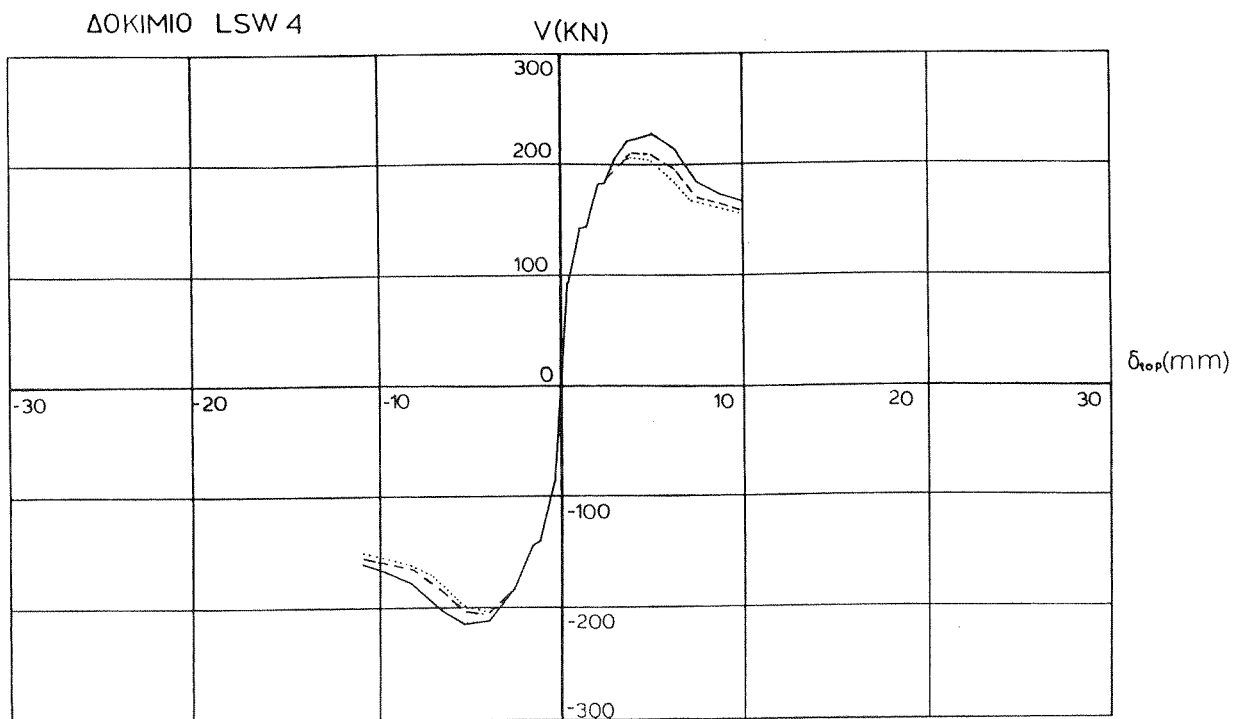


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW2

Διαγρ. 4. Περιβάλλουσες καμπύλες αντοχής δοκιμίων LSW1 και LSW2
(— πρώτος κύκλος, ---- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

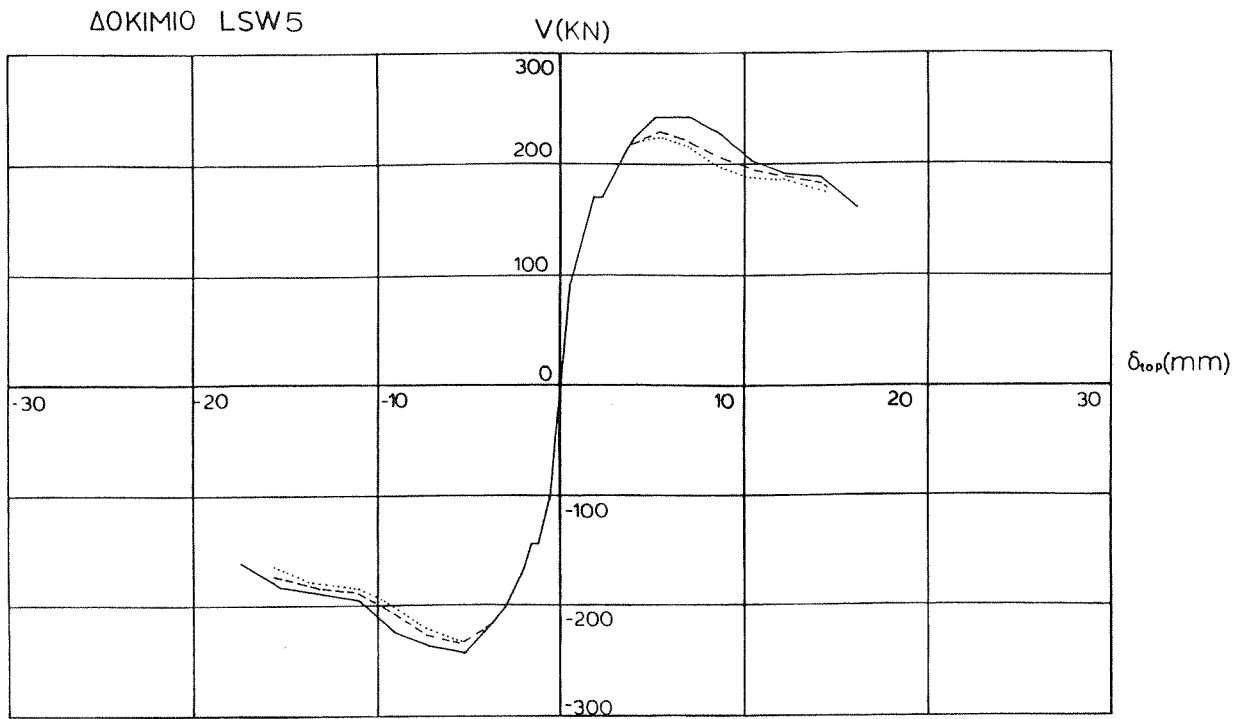


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW4

Διαγρ. 5. Περιβάλλουσες καμπύλες αντοχής δοκιμίων LSW3 και LSW4
(— πρώτος κύκλος, ---- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).



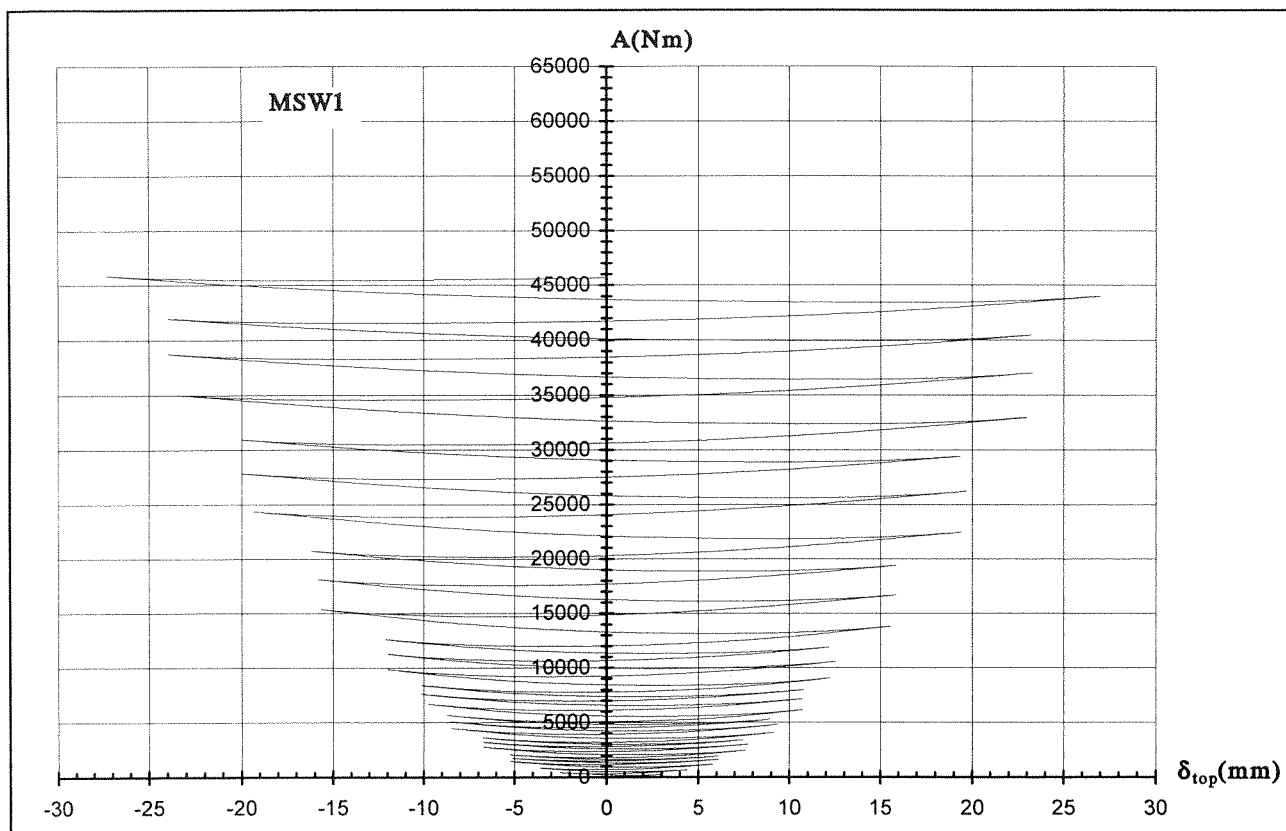
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ LSW5

Διαγρ. 6. Περιβάλλουσες καμπύλες αντοχής δοκιμίων LSW5
 (— πρώτος κύκλος, ----- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

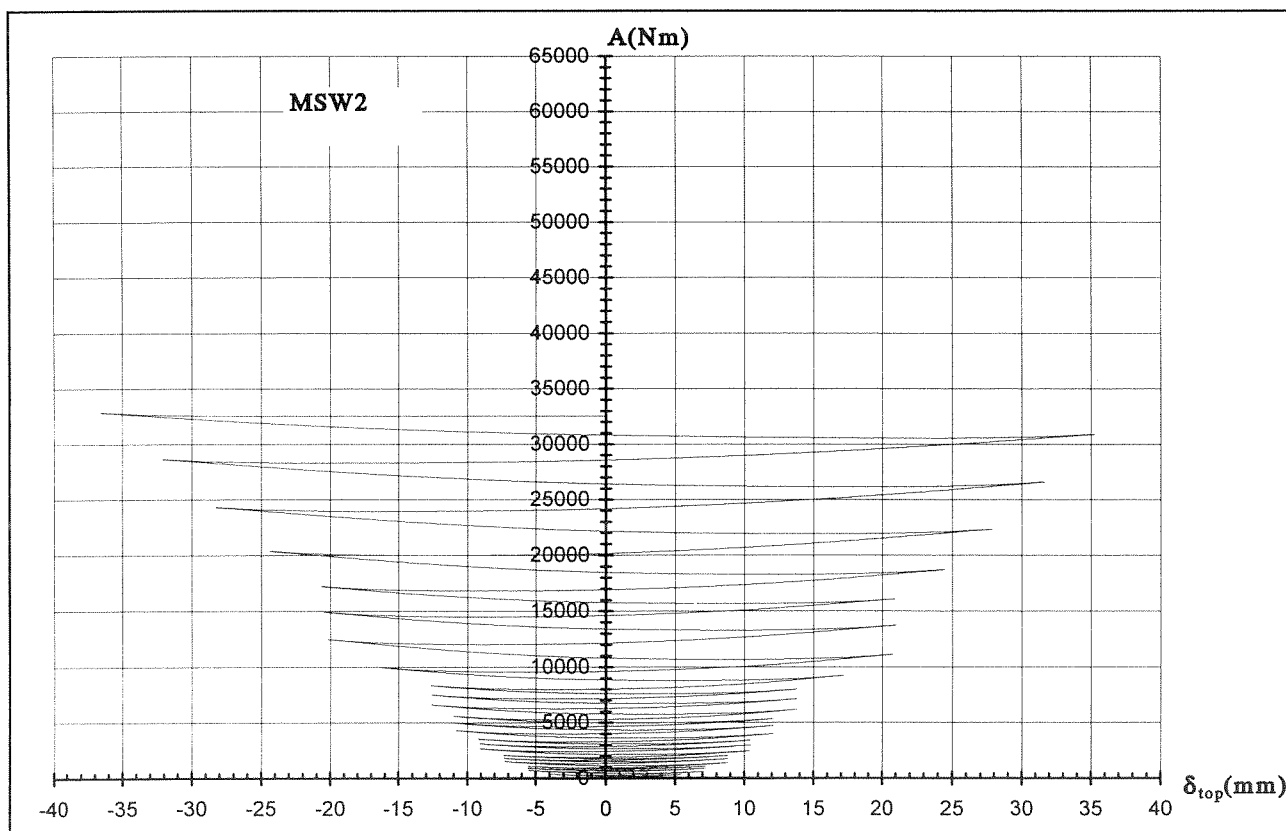
7.2. ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για όλα τα δοκίμια σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συνολικής απόσβεσης ενέργειας - μετατόπισης. Όπως αναμένονταν, τα δοκίμια της σειράς MSW απόσβεσαν κατά μέσο όρο περισσότερη ενέργεια από τα δοκίμια της σειράς LSW. Όπως προκύπτει, η συνολική ενέργεια που αποσβέσθηκε είναι συνάρτηση της μετατόπισης, υψωμένη σε άρτια δύναμη. Επίσης, όπως είναι γνωστό, από τη συνολική κάθε φορά ενέργεια που αποσβένεται, ένα ποσό αποσβένεται από την καμπτική παραμόρφωση του δοκιμίου, ένα ποσό από τη διατμητική παραμόρφωση του κορμού και ένα ποσό από τη διατμητική ολίσθηση στη βάση του δοκιμίου. Η ποσότητα ενέργειας που αποσβένεται από τη διατμητική ολίσθηση του δοκιμίου στη βάση του προκύπτει από το εμβαδόν των βρόχων στην εν λόγω θέση. Από την παρατήρηση της ενέργειας που αποσβένεται λόγω ολίσθησης του δοκιμίου στη βάση του, προκύπτει το συμπέρασμα ότι αυτή είναι απευθείας ανάλογη της διατμητικής παραμόρφωσης και ισούται με 1000 φορές τη διατμητική ολίσθηση εκεί. Όμοια θεωρούμε ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις στον κορμό των τοιχωμάτων αποσβένουν ενέργεια ίση με 1000 φορές την διατμητική παραμόρφωση στον κορμό. Έτσι από την συνολικά αποσβεσθήσα ενέργεια κάθε δοκιμίου, αν αφαιρεθεί η ενέργεια που αποσβένεται από τους μηχανισμούς διάτμησης, προκύπτει η αποσβεσθήσα ενέργεια λόγω της παραμόρφωσης του μηχανισμού κάμψης. Από την παρατήρηση του πίνακα απόσβεσης ενέργειας όλων των δοκιμίων προκύπτει το συμπέρασμα ότι στα δοκίμια LSW1 και LSW2 αποσβέσθηκε ίσο περίπου ποσό ενέργειας από την κάμψη και τη διάτμηση. Στα άλλα δοκίμια το ποσό ενέργειας που αποσβέσθηκε από τη διάτμηση ήταν κατά πολύ χαμηλότερο από το αντίστοιχο ποσό που αποσβέσθηκε από την κάμψη. Επίσης, ενώ τα δοκίμια LSW1, LSW3 και LSW5 ανέπτυξαν περίπου ίδια αντοχή, το συνολικό ποσό ενέργειας που αποσβέσθηκε στα δοκίμια LSW3 και LSW5 ήταν 2.5 φορές μεγαλύτερο από την αντίστοιχη ενέργεια που αποσβέσθηκε στο δοκίμιο LSW1. Αυτό δείχνει την κυρίαρχα καμπτική συμπεριφορά που διέπει τη συμπεριφορά αυτών των δοκιμίων. Όμοια η αποσβεσθήσα ενέργεια του δοκιμίου LSW2 ήταν περίπου το 1/3 της αντίστοιχης ενέργειας των δοκιμίων LSW3 και LSW5, ενώ αντίστοιχα για το δοκίμιο LSW4 ήταν περίπου η μισή. Από ενεργειακής απόψεως, λοιπόν, αξονική δύναμη της τάξης του 7% της θλιπτικής αντοχής και η ύπαρξη δισδιαγώνιου οπλισμού διερχόμενου από τα άκρα του τοιχείου βελτιώνουν σαφώς τη συμπεριφορά των τοιχωμάτων με λόγο όψης 1, ενώ η χρήση δισδιαγώνιου οπλισμού στο μέσον του τοιχώματος επιφέρει μικρότερη βελτίωση. Αντίστοιχα στα δοκίμια με λόγο όψης 1.5 η απόσβεση ενέργειας είναι ανάλογη του

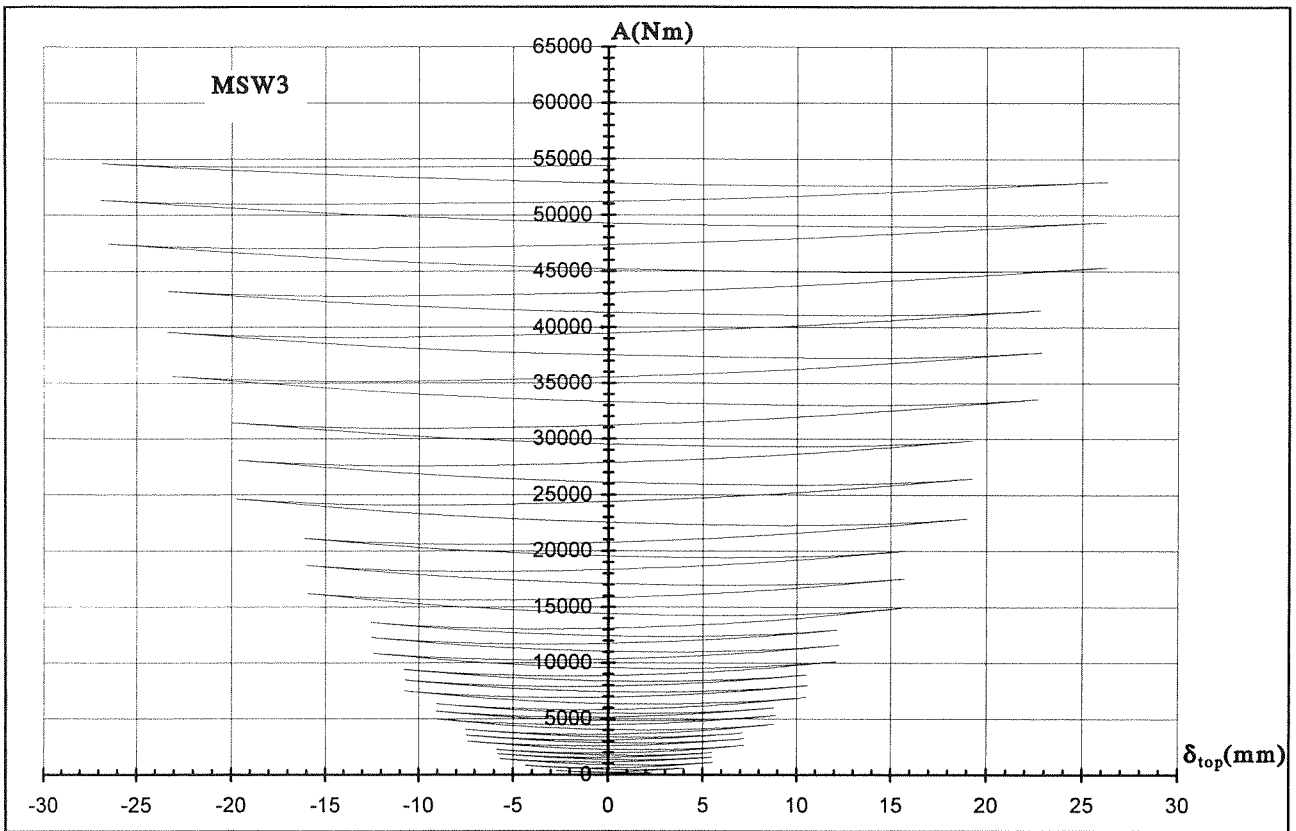
ποσοστού οπλισμού της διατομής. Επίσης, για ίδια ποσοστά κλασικού και δισδιαγώνιου οπλισμού η χρήση κεκλιμένων ράβδων αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης και απόσβεσης ενέργειας (1.5 φορές), πολύ λιγότερο όμως από την αντίστοιχη αύξηση στα δοκίμια με λόγο όψης 1.0 . Επίσης, η ύπαρξη αξονικής δύναμης αυξάνει σημαντικά την ικανότητα απορρόφησης και απόσβεσης ενέργειας ακόμη και για χαμηλά ποσοστά καμπτικού και διατμητικού οπλισμού. Η ύπαρξη του αρμού σκυροδέτησης στη βάση του τοιχείου μείωσε την ικανότητα απόσβεσης ενέργειας κατά 12%, γεγονός που οφείλεται στη συγκέντρωση της καμπτικής ρηγμάτωσης στη βάση του δοκιμίου (Διαγρ. 7-18).



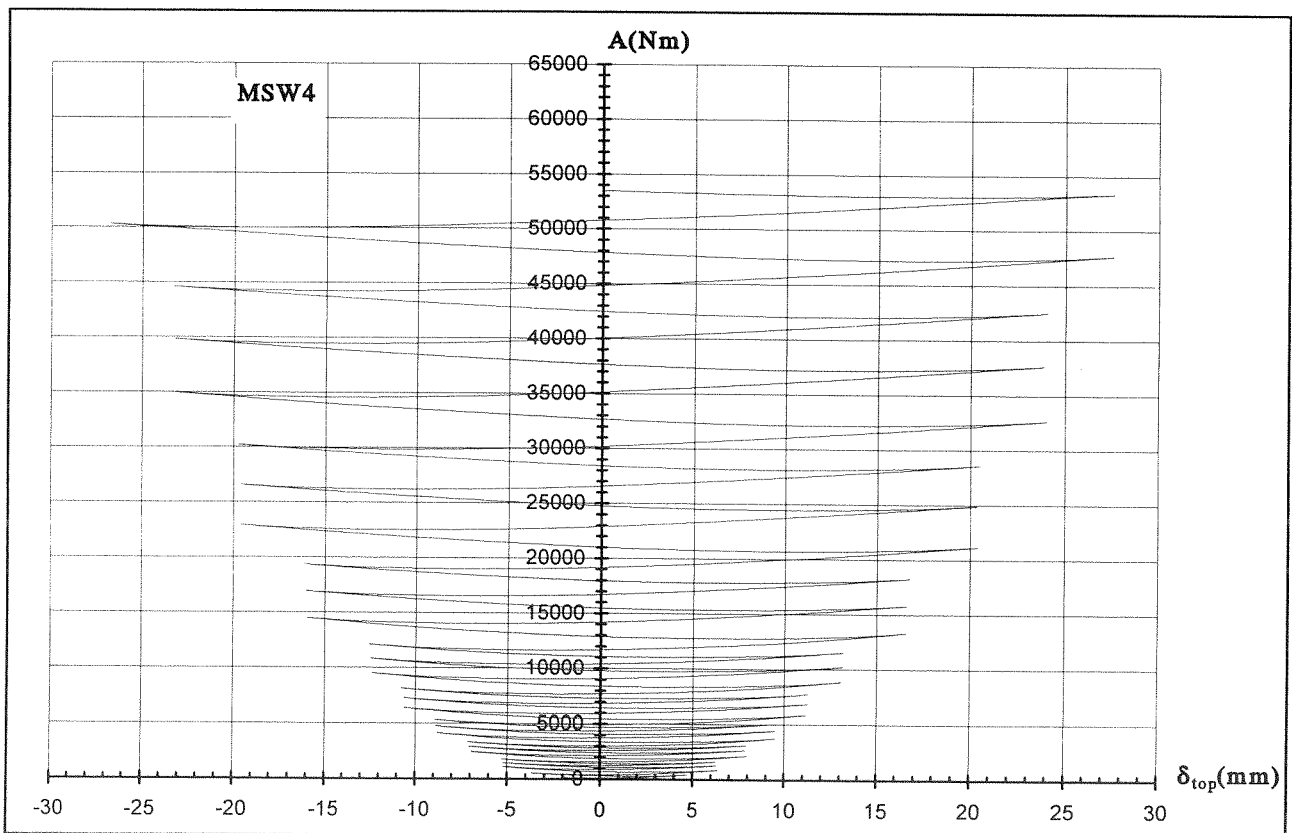
Διαγρ. 7. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο MSW1.



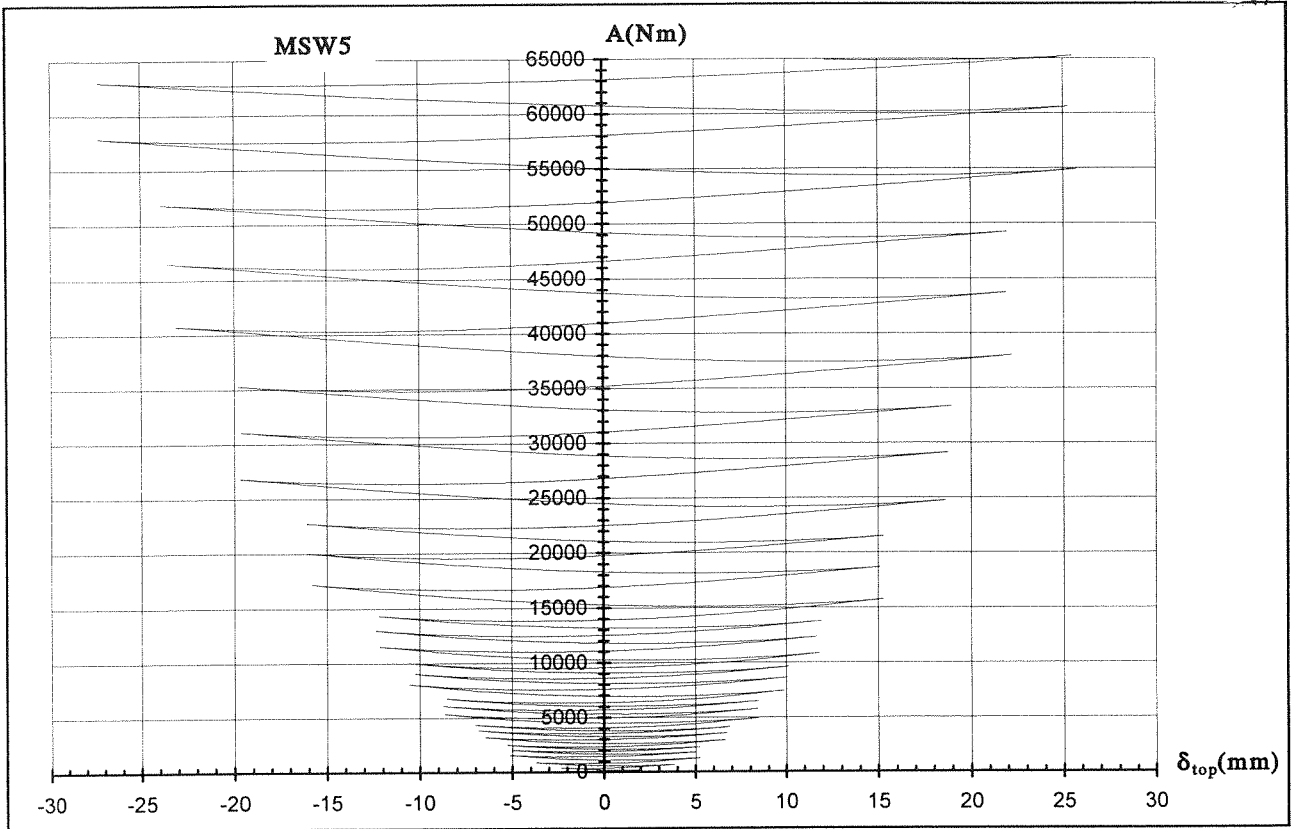
Διαγρ. 8. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο MSW2.



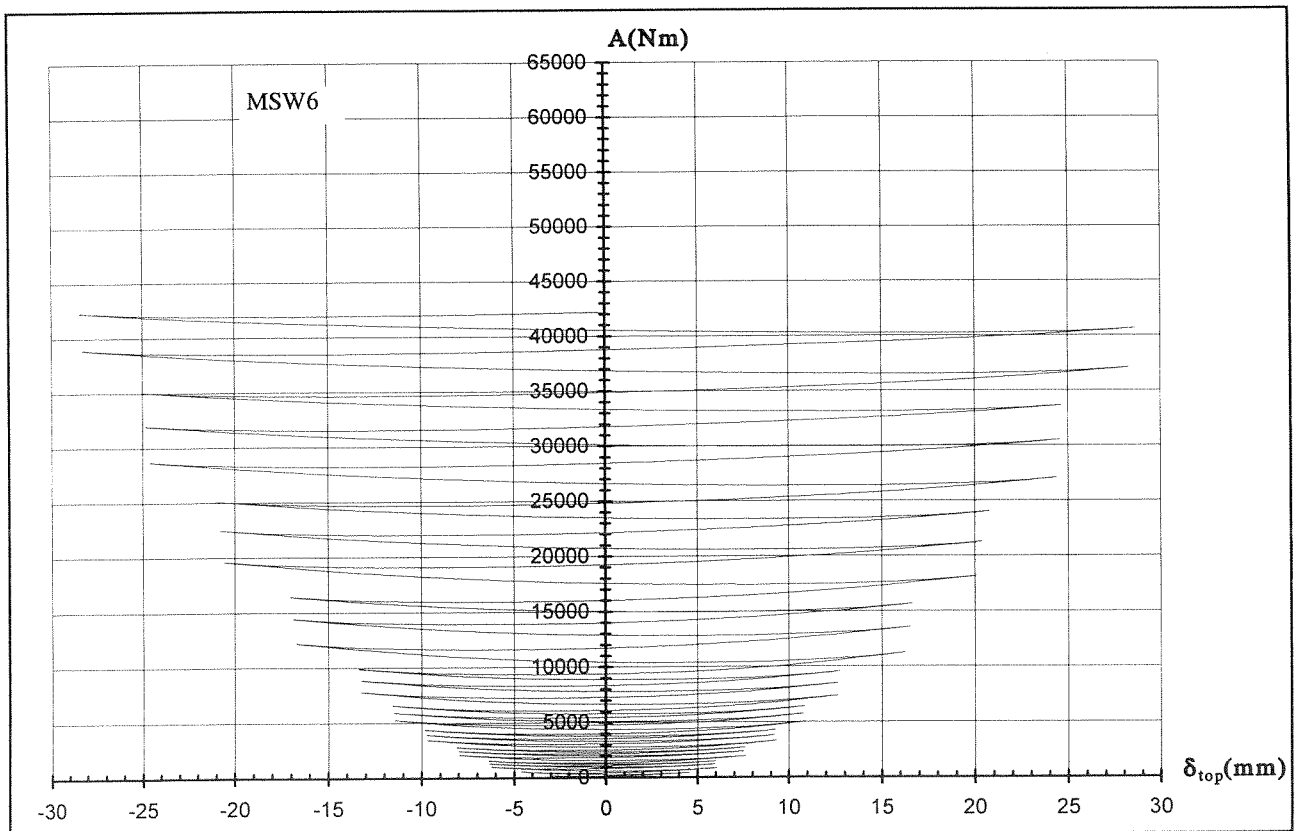
Διαγρ. 9. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο MSW3.



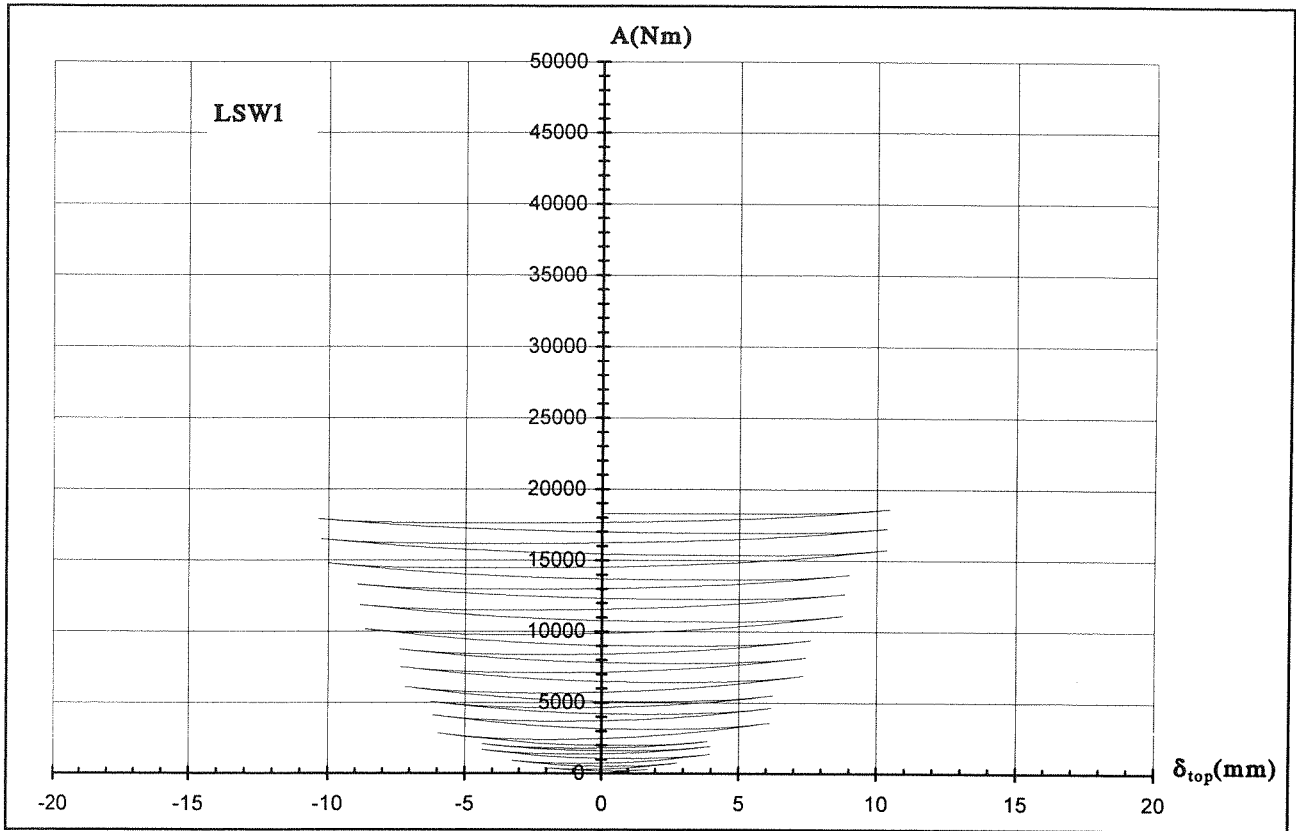
Διαγρ. 10. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο MSW4.



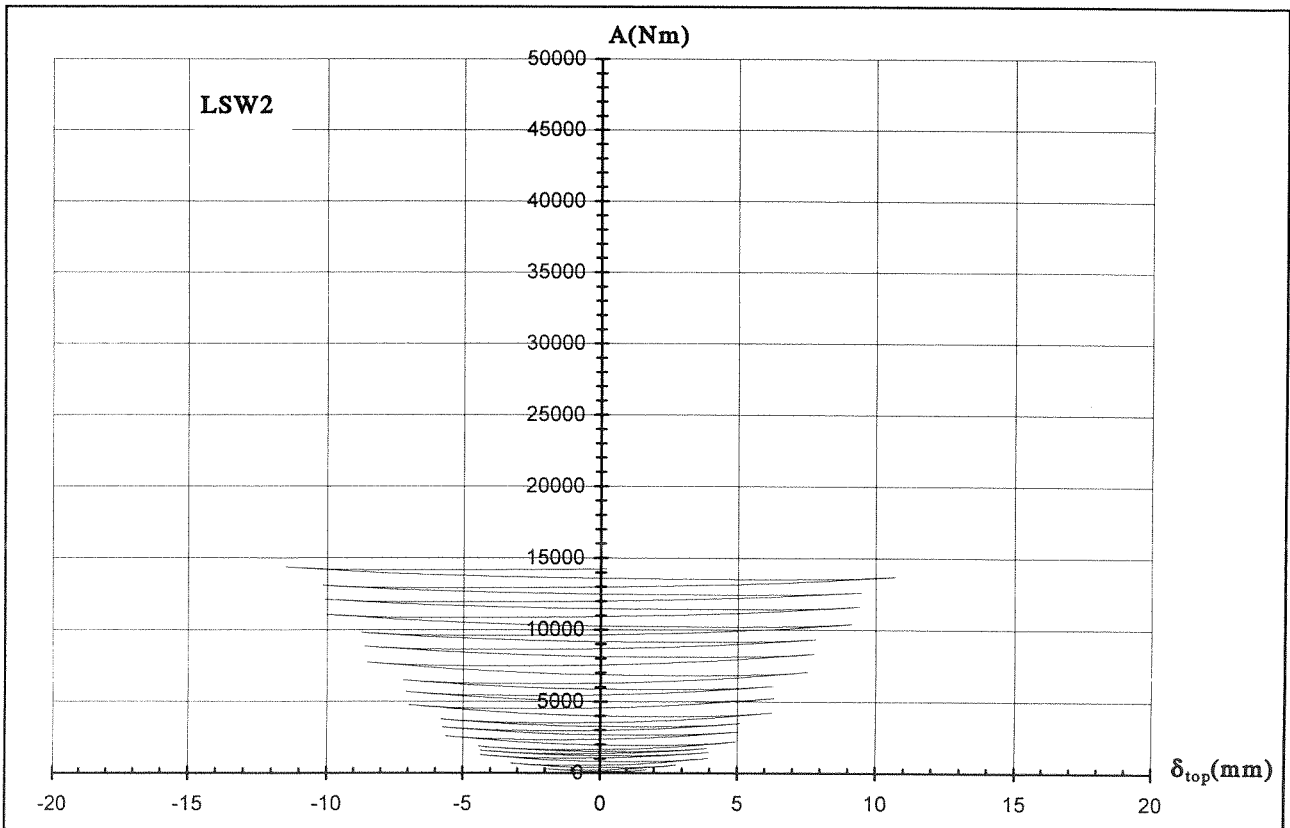
Διαγρ. 11. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο MSW5.



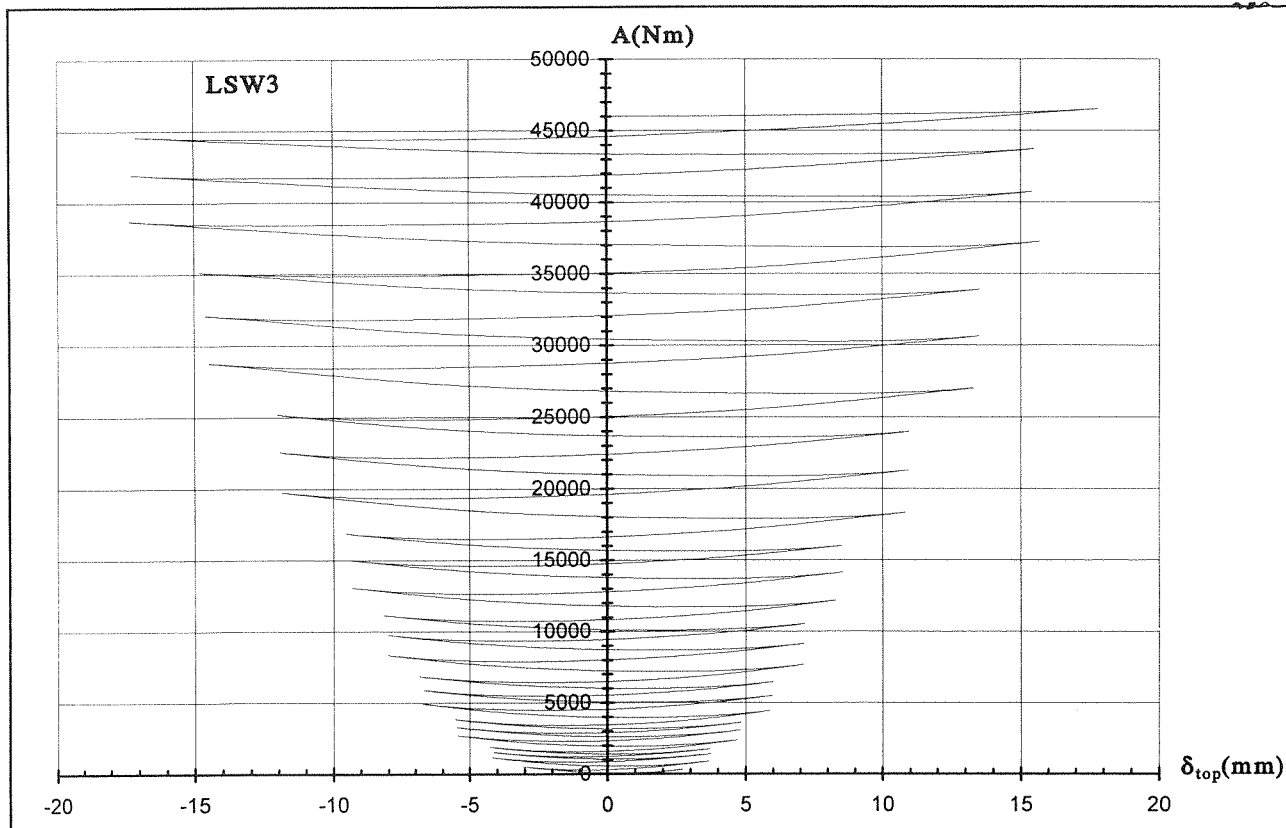
Διαγρ. 12. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο MSW6.



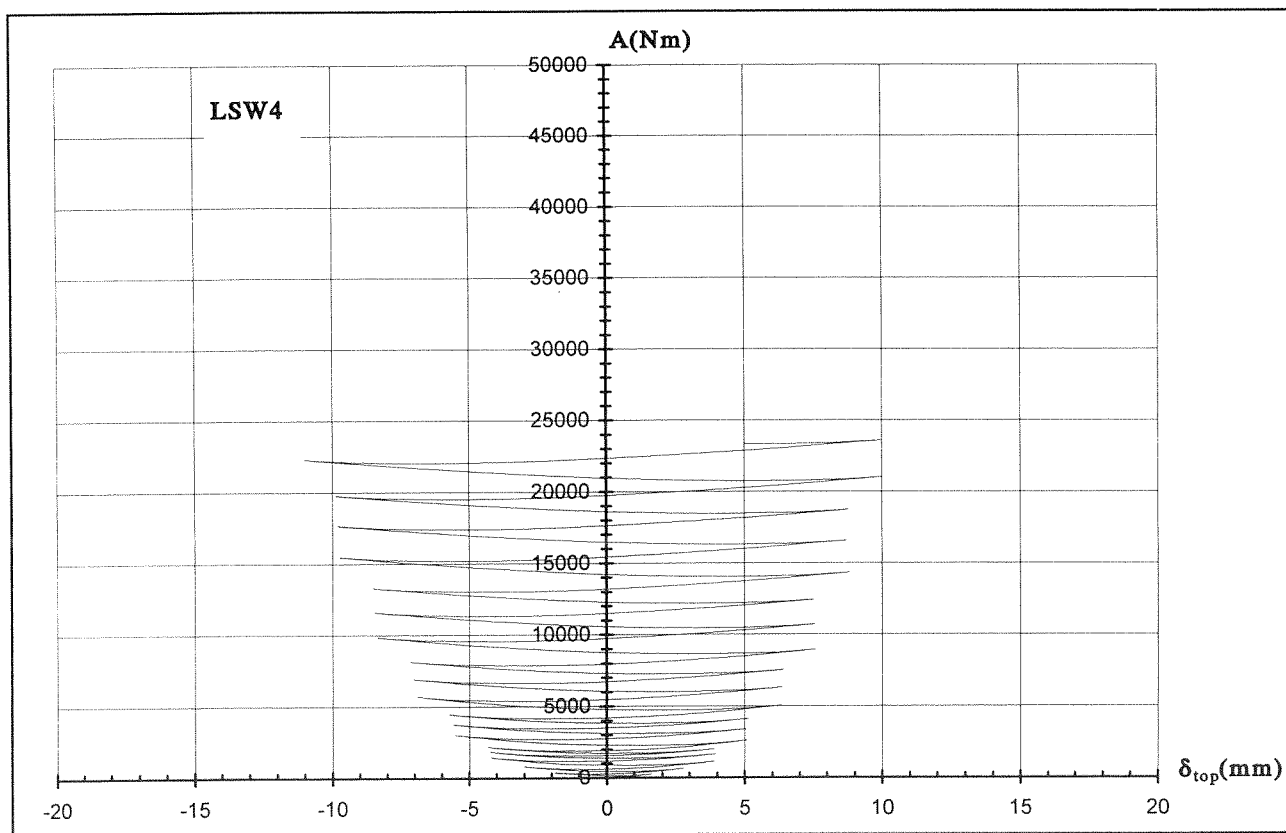
Διαγρ. 13. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο LSW1.



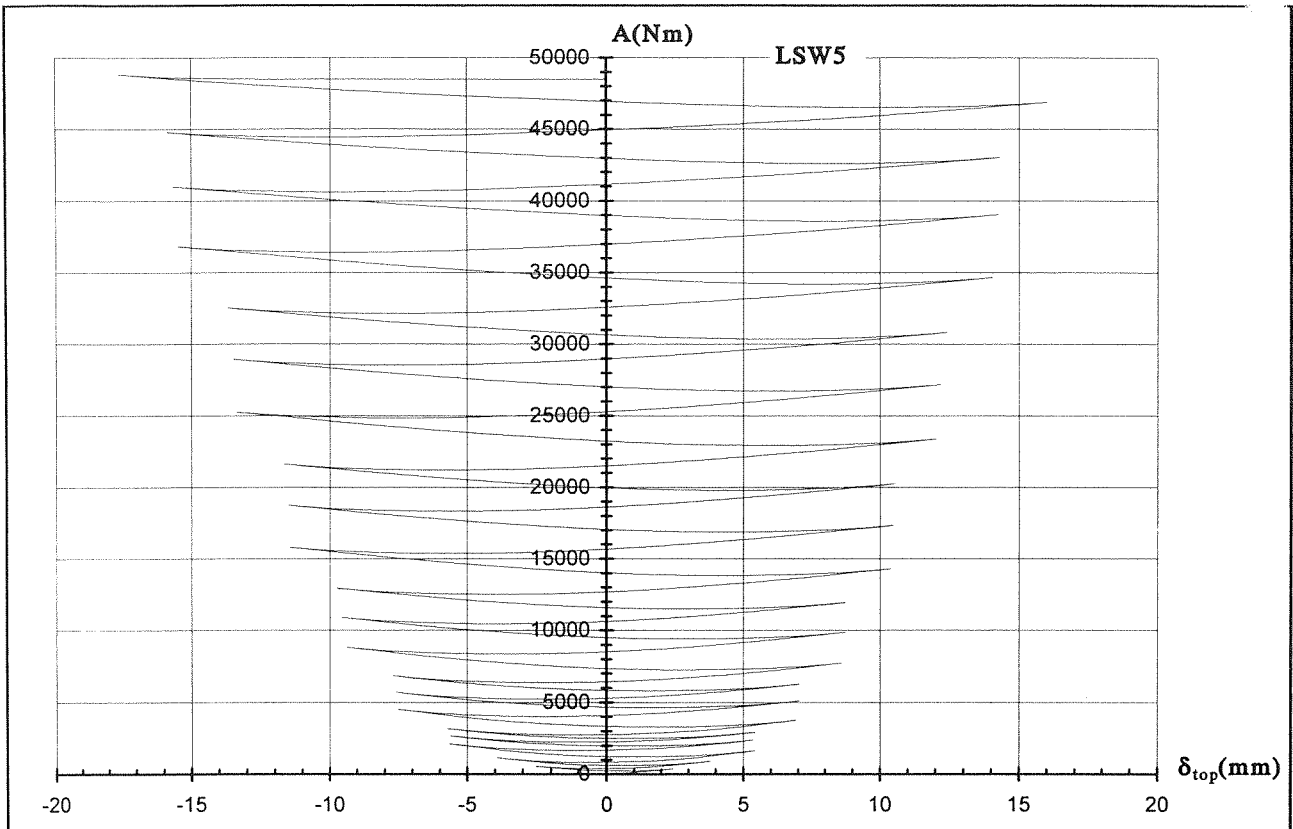
Διαγρ. 14. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο LSW2.



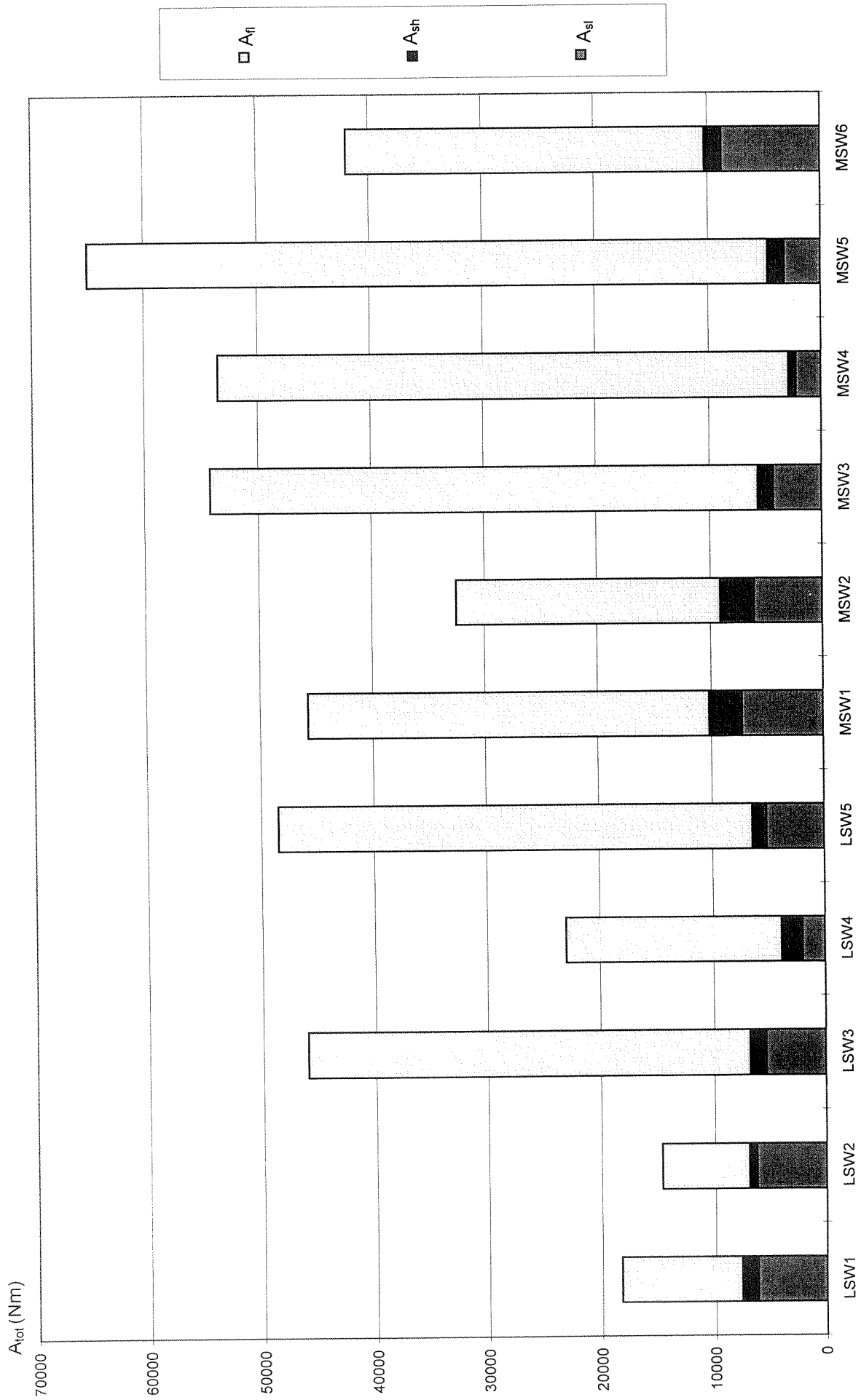
Διαγρ. 15. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο LSW3.



Διαγρ. 16. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο LSW4.



Διαγρ. 17. Διάγραμμα επιβαλλόμενης μετατόπισης - συνολικής απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο LSW5.



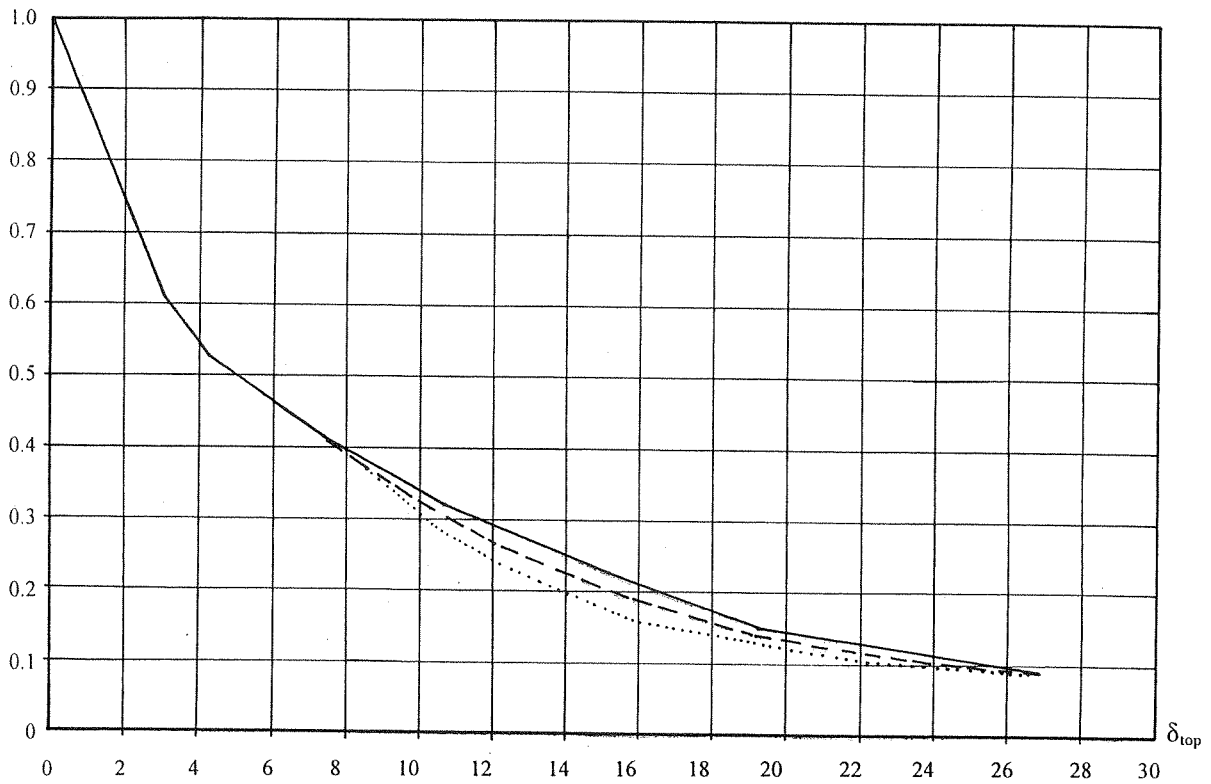
Διαγρ. 18. Συνολικά ποσά ενέργειας που απορροφήθηκαν από τους μηχανισμούς κάμψης (A_{fi}), διάτμησης (A_{sh}) και ολίσθησης (A_{sl}) για όλα τα δοκίμια.

7.3. ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Χρήσιμο μέγεθος για την αξιολόγηση της ανελαστικής συμπεριφοράς των δοκιμίων είναι η μεταβολή της δυσκαμψίας τους σε όλη τη διάρκεια του πειράματος [24]. Έτσι κατασκευάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της δυσκαμψίας - μετατόπισης για όλα τα δοκίμια. Η δυσκαμψία εισάγεται ως ανηγμένο μέγεθος ως προς την αρχική δυσκαμψία, προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα. Ως αρχική δυσκαμψία χρησιμοποιείται η μέση τιμή των αρχικών δυσκαμψιών των δοκιμίων. Η τιμή αυτή θεωρήθηκε σωστή, καθώς για μετατόπιση της τάξης του 0.15% του ύψους των υψηλότερων δοκιμίων, προκύπτει κατά μέσο όρο η μισή δυσκαμψία από ότι η αρχική (όπως καθορίζουν οι κανονισμοί). Για τα χαμηλά δοκίμια ως αρχική δυσκαμψία λήφθηκε η ίδια δυσκαμψία με τα υψηλά πολλαπλασιασμένη με το λόγο των ελαστικών δυσκαμψιών των δύο ομάδων δοκιμίων. Από τη μορφή των διαγραμμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μεταβολή της δυσκαμψίας είναι φθίνουσα συνάρτηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης στην κορυφή. Επίσης προκύπτει ότι η ύπαρξη της αξονικής δύναμης ελαττώνει το ρυθμό μείωσης της δυσκαμψίας και στις δύο ομάδες δοκιμίων. Όμοια το ρυθμό πτώσης της δυσκαμψίας μειώνει και η αύξηση του ποσοστού οπλισμού στον κορμό και στα άκρα. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιρροή της ύπαρξης και της θέσης δισδιαγώνιου οπλισμού στη μεταβολή της δυσκαμψίας σε σχέση με την ύπαρξη κλασικού τύπου οπλισμού και για τις δύο ομάδες δοκιμίων (Διαγρ.19-29).

K_i/K_0

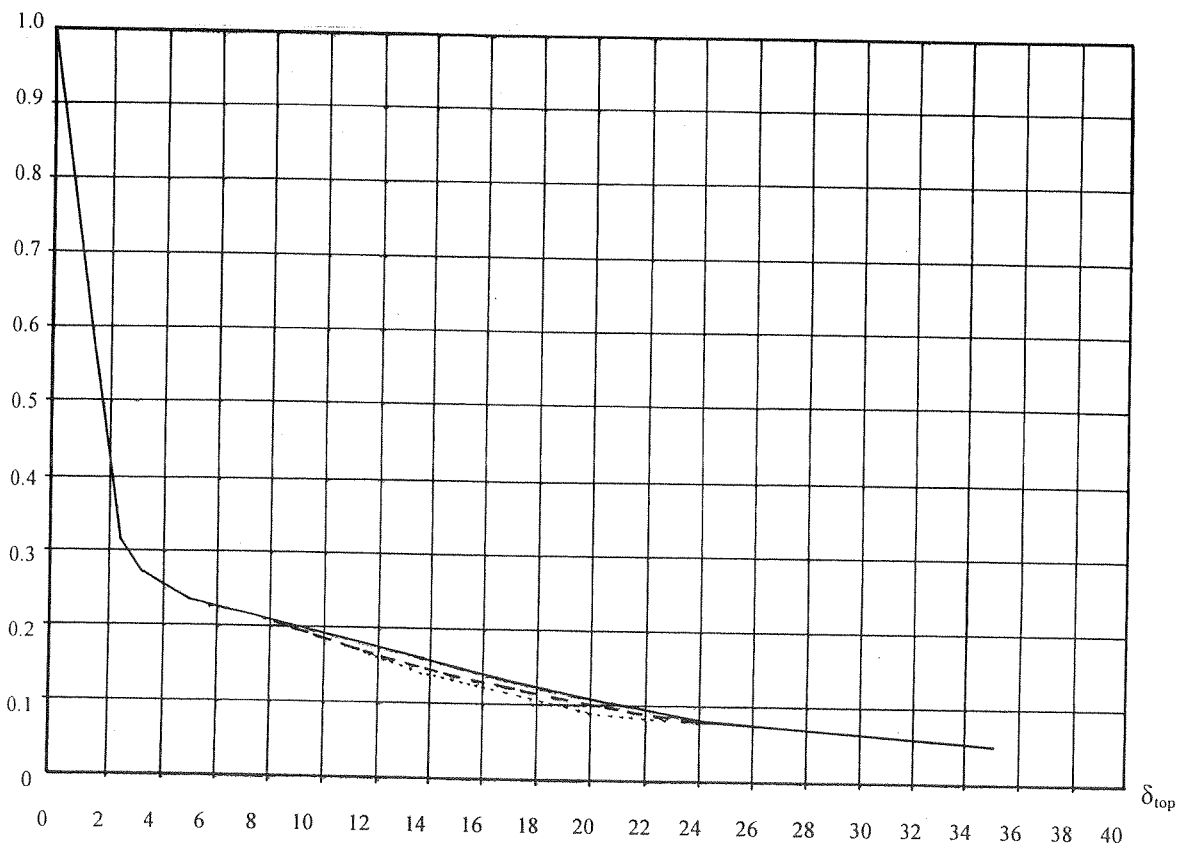
MSW1



Διαγρ. 19. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο MSW1 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

 K_i/K_0

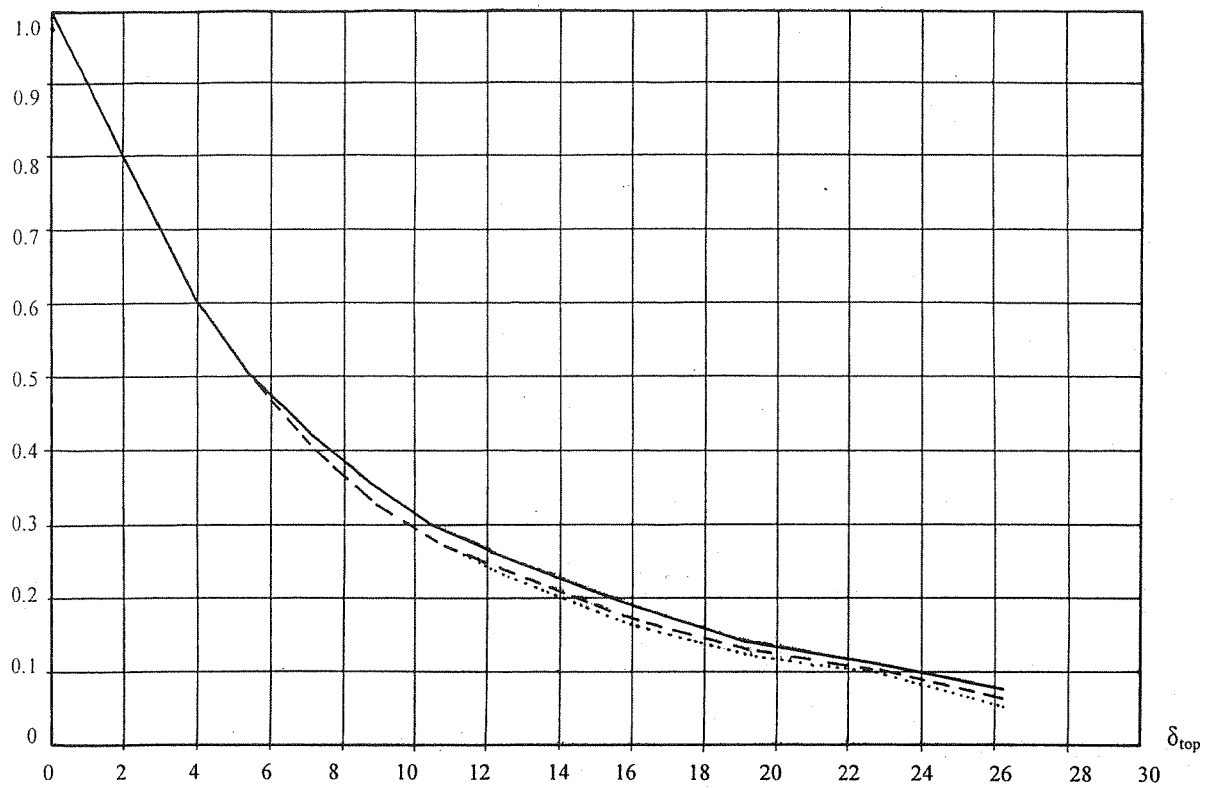
MSW2



Διαγρ. 20. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο MSW2 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

K_i/K_0

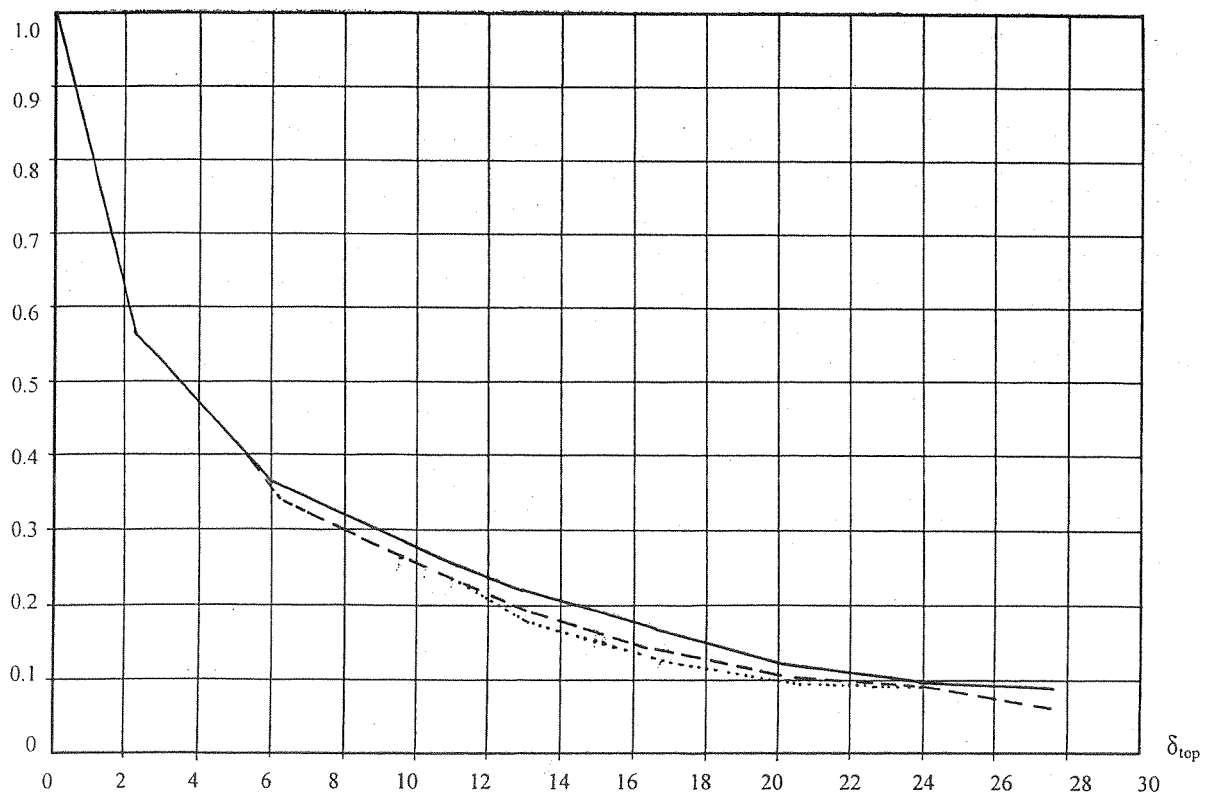
MSW3



Διαγρ. 21. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο MSW3 (— πρώτος κύκλος, — δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

 K_i/K_0

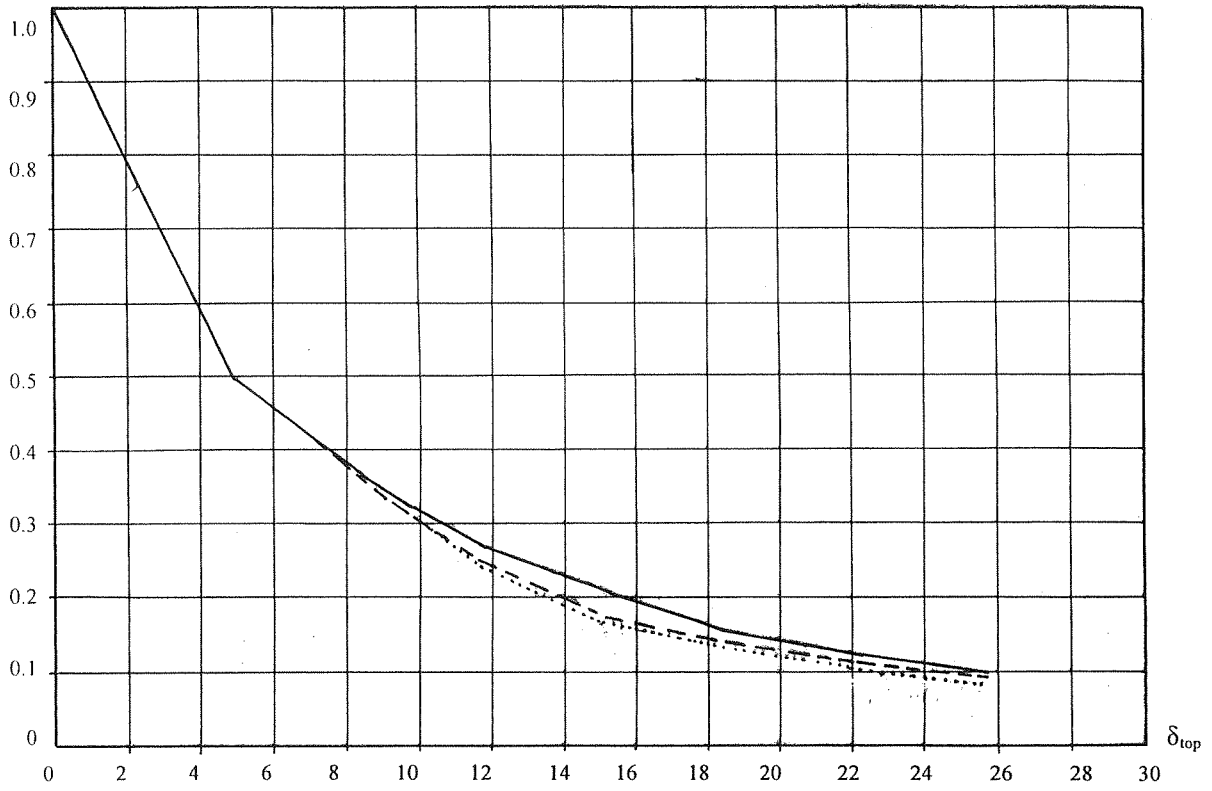
MSW4



Διαγρ. 22. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο MSW4 (— πρώτος κύκλος, — δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

MSW5

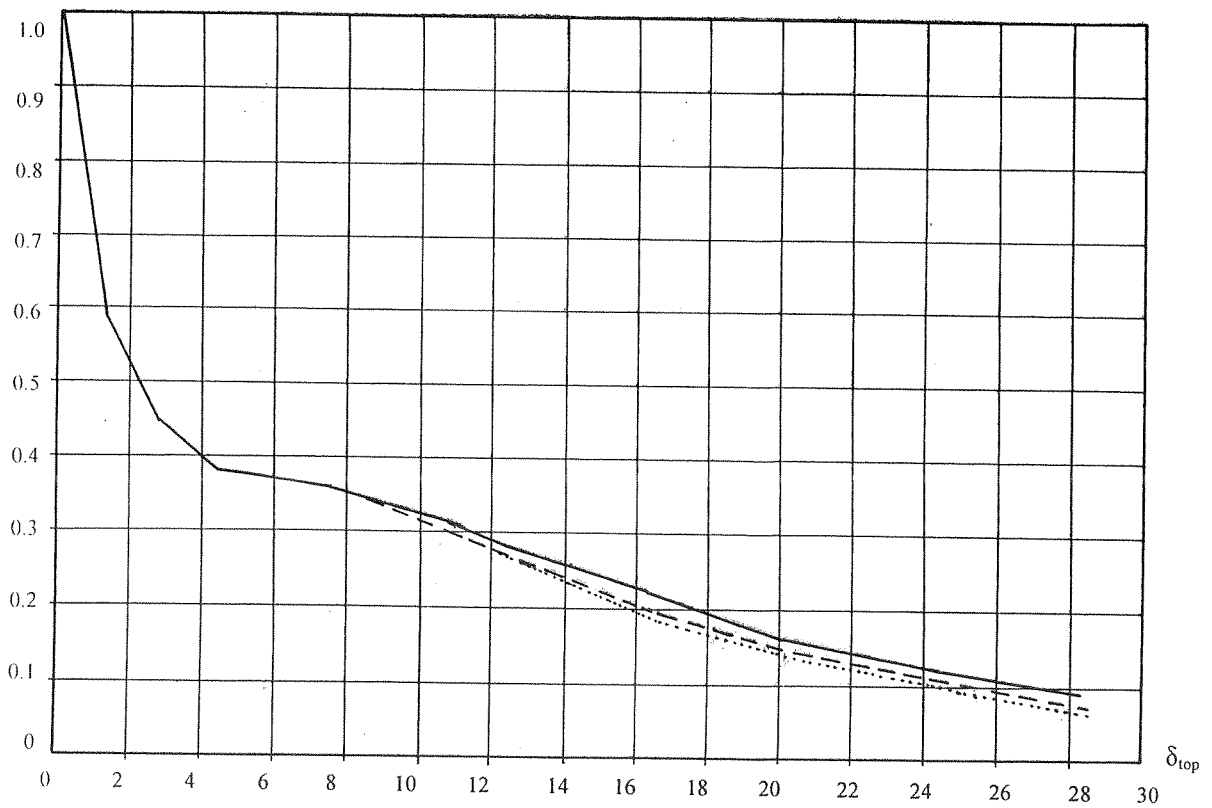
K_i/K_o



Διαγρ. 23. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο MSW5 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

MSW6

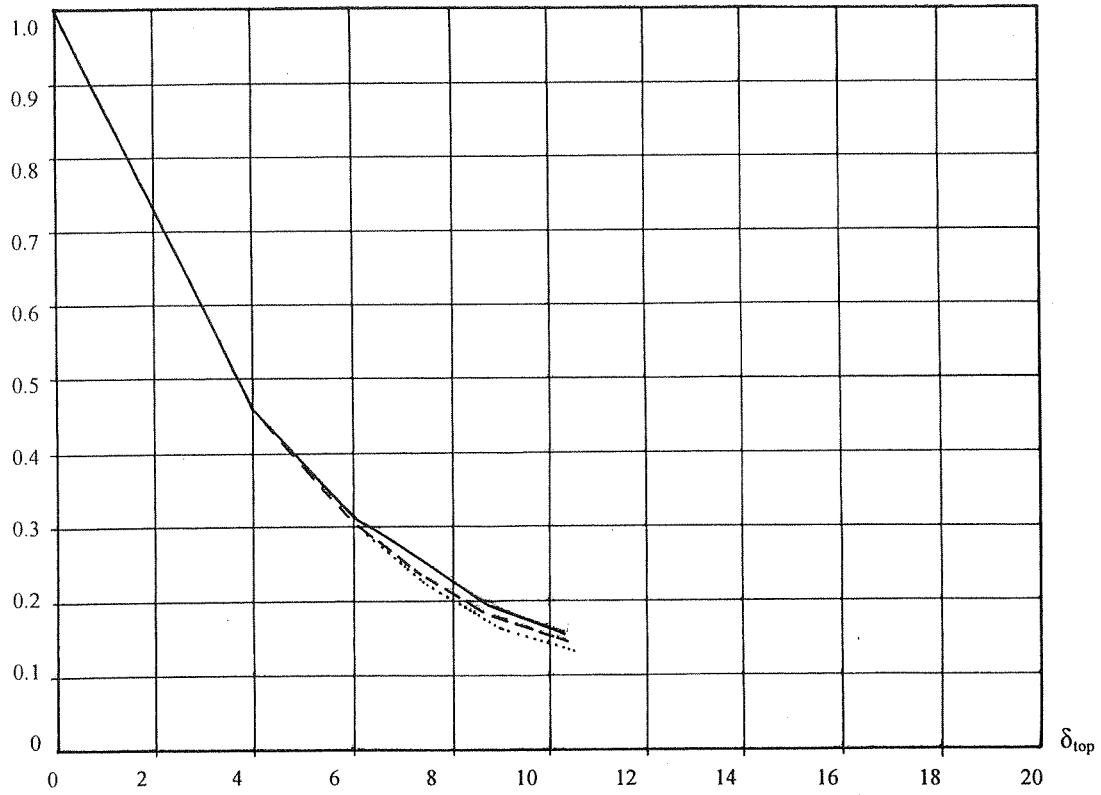
K_i/K_o



Διαγρ. 24. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο MSW6 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

K_i/K_0

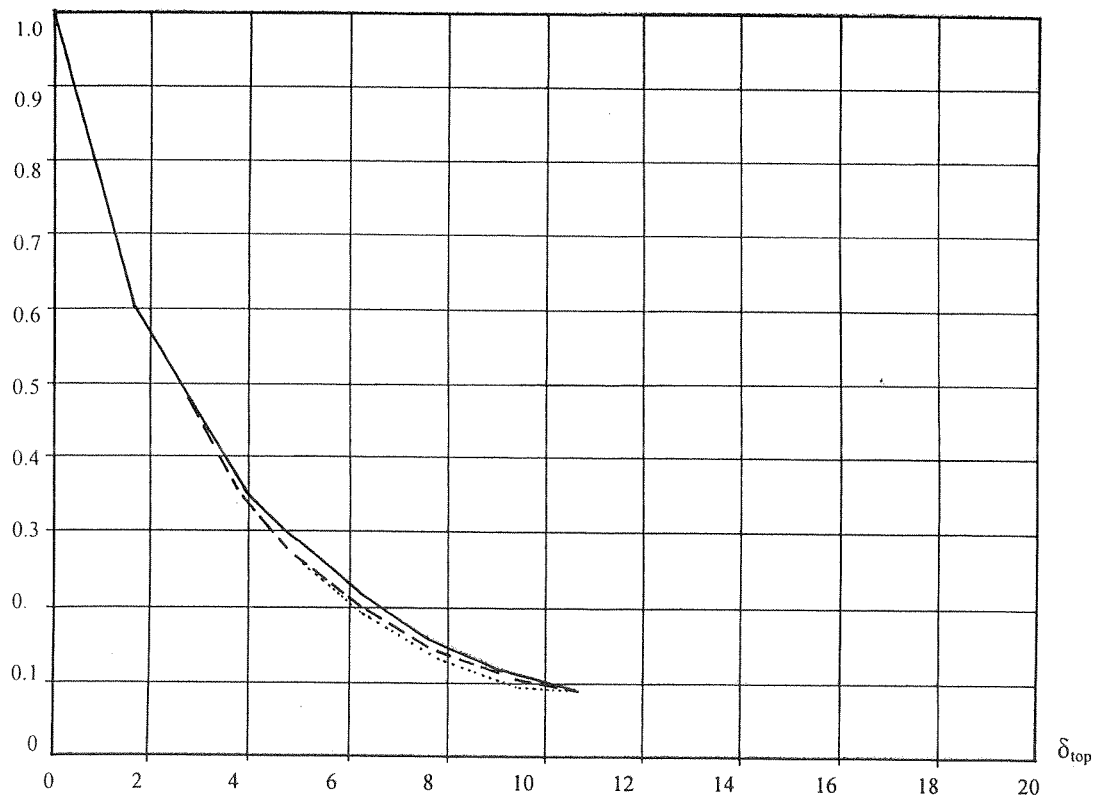
LSW1



Διαγρ. 25. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο LSW1 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

 K_i/K_0

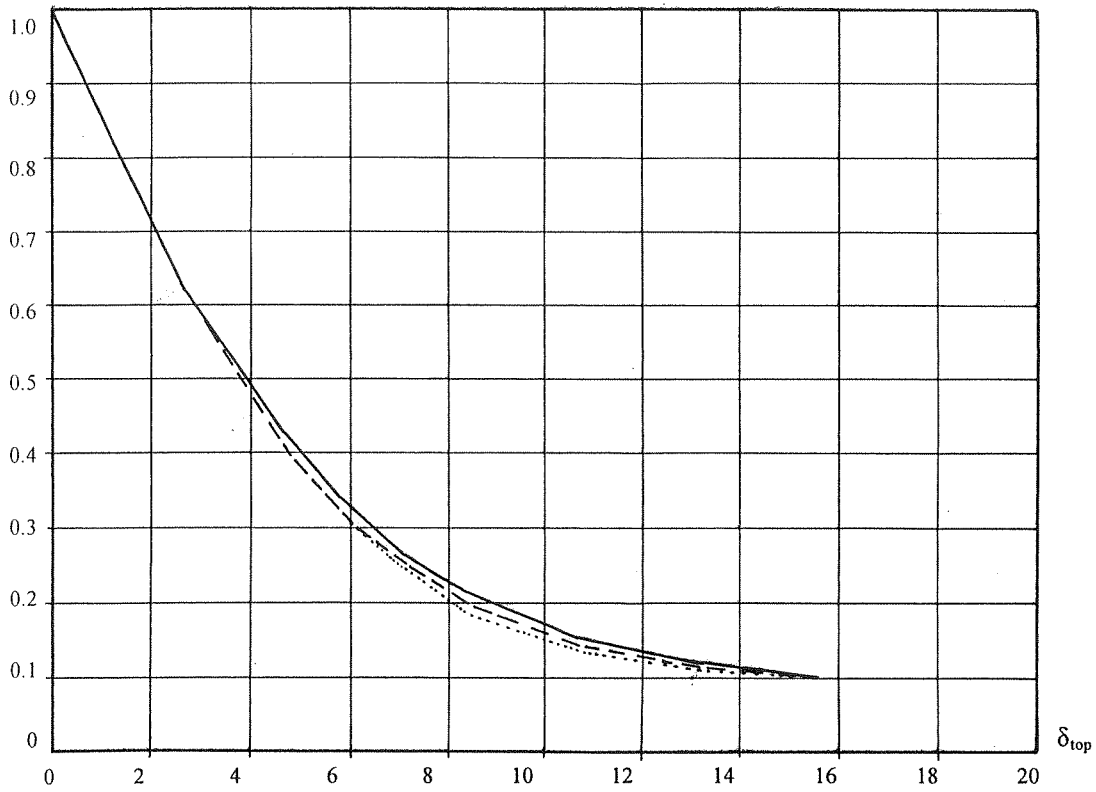
LSW2



Διαγρ. 26. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο LSW2 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

LSW3

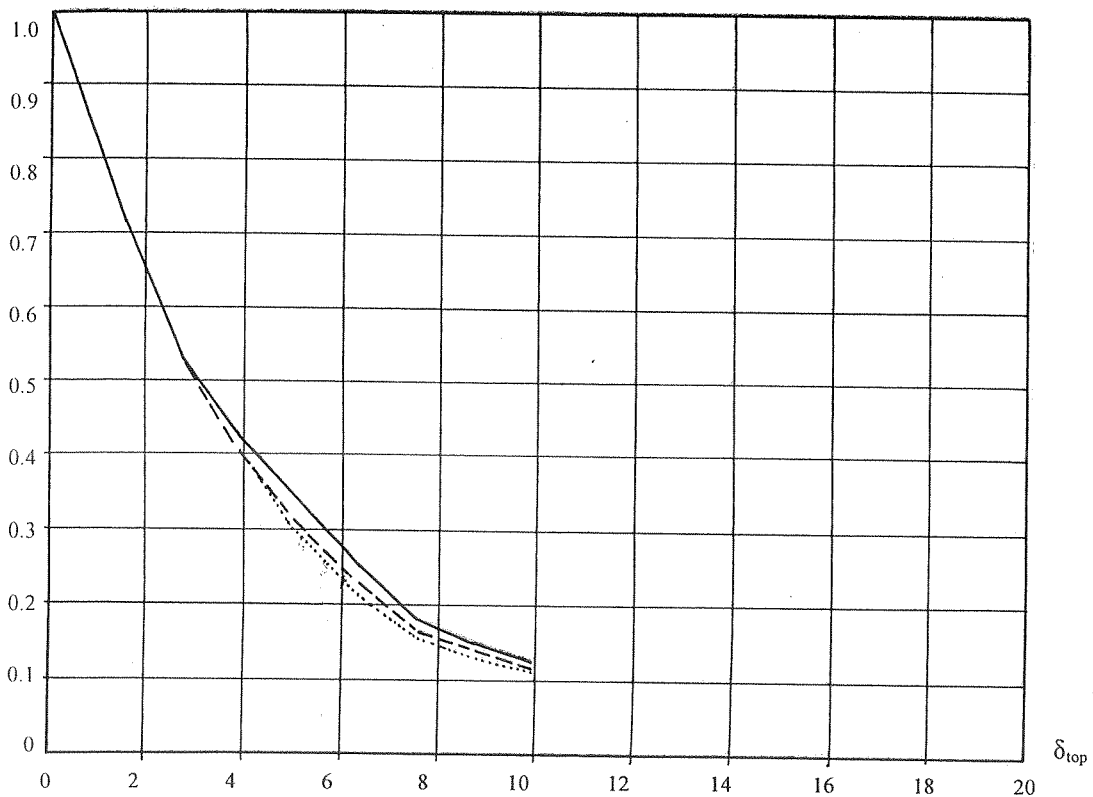
K_i/K_0



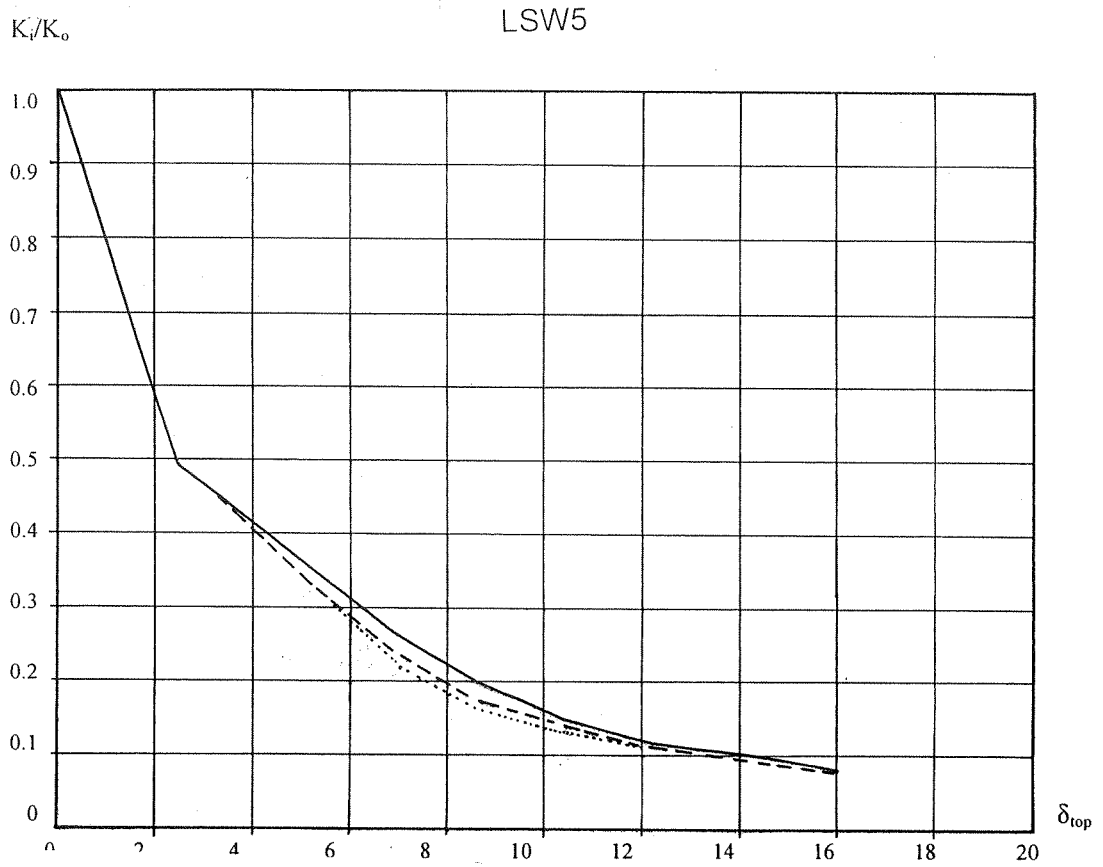
Διαγρ. 27. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο LSW3 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

LSW4

K_i/K_0



Διαγρ. 28. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο LSW4 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).



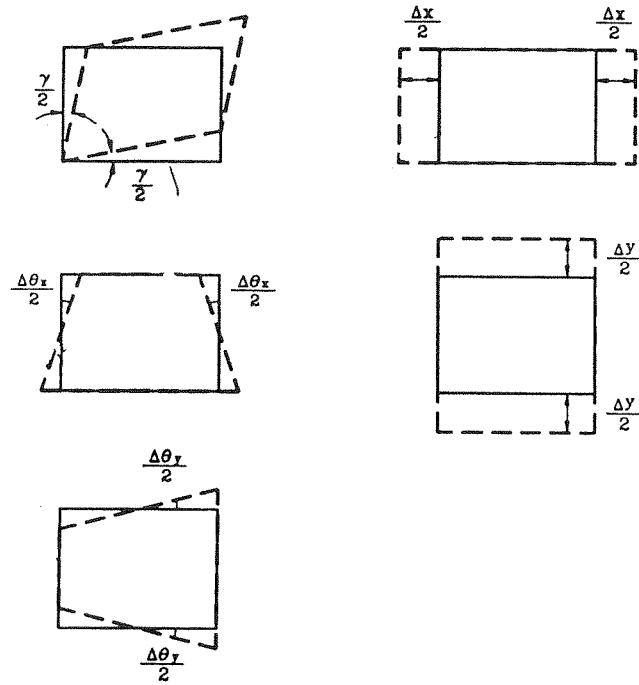
Διαγρ. 29. Διάγραμμα μετατόπισης - ανηγμένης δυσκαμψίας για το δοκίμιο LSW5 (— πρώτος κύκλος, --- δεύτερος κύκλος, τρίτος κύκλος).

7.4. ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

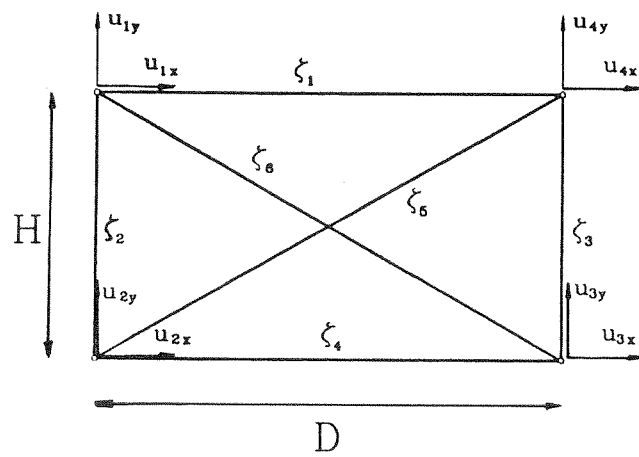
Για τον υπολογισμό της πλαστιμότητας αστοχίας των τοιχωμάτων χρησιμοποιείται ως μετατόπιση διαρροής η μετατόπιση που αντιστοιχεί σε τέμνουσα ίση με το 75% της μέγιστης αντοχής. Θεωρούμε ότι το δοκίμιο αστοχεί, όταν η αντοχή του πέσει στο 75% της μέγιστης αντοχής. Η πλαστιμότητα μετατοπίσεων προκύπτει ως το πηλίκο της μετατόπισης για πτώση αντοχής στο 75% της μέγιστης διά τη μετατόπιση κατά την οποία επιτυγχάνεται τέμνουσα δύναμη ίση με το 75% της μέγιστης αντοχής κατά την έναρξη του πειράματος. Κατόπιν παρουσιάζονται πίνακες πλαστιμότητας - μετατοπίσης για το κάθε δοκίμιο, όπου για κάθε επίπεδο πλαστιμότητας υπολογίζονται και οι επιμέρους συνιστώσες της συνολικής μετατόπισης. Θεωρείται ότι για την επίτευξη της πλαστιμότητας στην κεφαλή συμμετέχουν περισσότερο ή λιγότερο οι μηχανισμοί ανάληψης έντασης του κάθε δοκιμίου. Μέσω της παραμόρφωσης αυτών των μηχανισμών επιτυγχάνεται η επιβαλλόμενη μετατόπιση στην κορυφή του δοκιμίου. Για τον προσδιορισμό του βαθμού συμμετοχής του κάθε μηχανισμού και της βαρύτητάς της στην επίτευξη της επιβαλλόμενης μετατόπισης στην κορυφή, για τη δεδομένη γεωμετρία των δοκιμίων και τις δεδομένες συνθήκες στήριξης που έχουμε, βασιστήκαμε στην εργασία των F. Seible και A. Igarashi [89]. Οι παραπάνω ερευνητές στο τμήμα εφαρμοσμένης μηχανικής του Πανεπιστημίου του San Diego στην California, βασιζόμενοι σε προηγούμενη εργασία των Safarini - Wilson στο Berkeley το 1983, εξέφρασαν σε μητρική μορφή την εξίσωση που περιγράφει τους πιθανούς τρόπους παραμόρφωσης του δίσκου. Σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές ο επίπεδος δίσκος έχει πέντε πιθανούς τρόπους παραμόρφωσης (Σχ. 61).

- i) Διατμητική παραμόρφωση
- ii) Καμπτική παραμόρφωση των κατακόρυφων πλευρών του
- iii) Καμπτική παραμόρφωση των οριζόντιων πλευρών του
- iv) Αξονική παραμόρφωση οριζόντια
- v) Αξονική παραμόρφωση κατακόρυφα

Για δίσκο ύψους H και πλάτους D οι παραμορφώσεις εντός του επιπέδου του σε μητρική μορφή προκύπτουν [89] (Σχ.62):



Σχ. 61. Πιθανοί τρόποι παραμόρφωσης τοιχωμάτων.



Σχ. 62. Καθορισμός κομβικών μετακινήσεων και σχετικών παραμορφώσεων.

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\chi \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2H & -1/2D & -1/2H & -1/2D & -1/2H & 1/2D & 1/2H & 1/2D \\ 1/H & 0 & -1/H & 0 & 1/H & 0 & -1/H & 0 \\ 0 & -1/D & 0 & 1/D & 0 & -1/D & 0 & 1/D \\ -1/2 & 0 & -1/2 & 0 & 1/2 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & -1/2 & 0 & -1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ u_{2x} \\ u_{2y} \\ u_{3x} \\ u_{3y} \\ u_{4x} \\ u_{4y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ως προς σύστημα αναφοράς σε γωνία του δίσκου στη βάση του όπου $u_{2x}=0$, $u_{2y}=0$ και $u_{3y}=0$ αν η παραπάνω μητρική σχέση, εκφραστεί συναρτήσει των παραμορφώσεων των τεσσάρων πλευρών και των διαγωνίων του δίσκου, προκύπτει η παρακάτω μητρική εξίσωση που ισχύει για τετράγωνο δίσκο ($H=D$, δηλαδή στη κρίσιμη περιοχή του τοιχώματος):

$$\begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \\ \zeta_5 \\ \zeta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.707 & 0.707 & 0 \\ -0.707 & 0.707 & 0 & 0 & 0.707 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ u_{4x} \\ u_{4y} \\ u_{3x} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Για τις οριακές συνθήκες του προβλήματός λόγω της ύπαρξης άκαμπτης κεφαλής η $\zeta_1=0$. Επίσης, θεωρώντας ότι στη βάση του δοκιμίου δεν υπάρχει οριζόντια επιμήκυνση, τότε η $\zeta_4=0$. Από τις παραδοχές που γίνονται προκύπτει ότι $u_{1x}=u_{4x}$ και $u_{3x}=0$. Από την (2) βάσει των παραπάνω οι $\zeta_2, \zeta_3, \zeta_5, \zeta_6$ προσδιορίζονται ως:

$$\zeta_2 = u_{1y} \quad (3)$$

$$\zeta_3 = u_{4y} \quad (4)$$

$$\zeta_5 = 0.707u_{4x} + 0.707u_{4y} \quad (5)$$

$$\zeta_6 = -0.707u_{1x} + 0.707u_{1y} + 0.707u_{3x} \quad (6)$$

αφαιρώντας την (6) από την (5) έχουμε :

$$\zeta_5 - \zeta_6 = 0.707(u_{1x} + u_{4y} + u_{1x} - u_{1y}) \Rightarrow \frac{\zeta_5 - \zeta_6}{0.707} = 2u_{1x} + u_{4y} - u_{1y} \Rightarrow \frac{\zeta_5 - \zeta_6}{0.707} - u_{4y} + u_{1y} = 2u_{1x} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\zeta_5 - \zeta_6}{0.707} - u_{4y} + u_{1y} \right) / 2 = u_{1x} \Rightarrow \left[\frac{\zeta_5 - \zeta_6}{0.707} + (u_{1y} - u_{4y}) \right] / 2 = u_{1x} \quad (7)$$

Αφαιρώντας από τα δύο μέλη της (7) τον όρο $(u_{1y}-u_{4y})$ έχουμε:

$$\left[\frac{\zeta_5 - \zeta_6}{0.707} + (u_{1y}-u_{4y}) \right] / 2 - (u_{1y}-u_{4y}) = u_{1x} - (u_{1y}-u_{4y}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left[\frac{\zeta_5 - \zeta_6}{0.707} - (u_{1y}-u_{4y}) \right] / 2 = u_{1x} - (u_{1y}-u_{4y}) \quad (8)$$

Ο όρος $(u_{1y}-u_{4y})$ δίνει το άθροισμα της επιμήκυνσης και βράχυνσης των κατακόρυφων πλευρών του δίσκου λόγω κάμψης και άρα την οριζόντια καμπτική μετατόπιση στην κεφαλή του τετράγωνου δίσκου. Με την αφαίρεση αυτού του όρου από τις συνολικές μετατοπίσεις στην κεφαλή προκύπτει η διατμητική παραμόρφωση του δίσκου λόγω οριζόντιου φορτίου στην κεφαλή. Κατά την ύπαρξη ολισθήσεων στη βάση του δοκιμίου αυτές αφαιρούνται και από τα δύο μέλη της (8).

Σχεδιάζονται τα διαγράμματα πλαστιμότητας και :

- Διατμητικής ολίσθησης στη βάση του δοκιμίου από τις καταγραφές δ_{sl}
- Διατμητικής παραμόρφωσης στον κορμό του τοιχείου δ_{sh} και διατμητικής ολίσθησης στη βάση από την (8) $\delta_{sl} + \delta_{sh}$.
- Διατμητικής παραμόρφωσης στον κορμό του τοιχείου δ_{sh} , διατμητικής ολίσθησης από τις παραπάνω σχέσεις και καμπτικής μετατόπισης στην κορυφή ($\delta_{\Pi} = (u_{1y}-u_{4y})$) $\delta_{sl} + \delta_{sh} + \delta_{\Pi}$.

Επειδή είναι μετρημένη η συνολική μετατόπιση στην κορυφή και οι επιμέρους παραμορφώσεις στα άκρα του τοιχείου, το πρόβλημα είναι υπερκαθορισμένο. Όπως είναι αναμενόμενο, σε υπερκαθορισμένα προβλήματα προκύπτει σφάλμα μεταξύ συνολικής μετρηθείσας και συνολικής υπολογισθείσας παραμόρφωσης. Προφανώς το σφάλμα υπεισέρχεται, επειδή δεν ισχύουν ακριβώς οι παραδοχές που έγιναν κατά τα διάφορα βήματα υπολογισμού. Το σφάλμα κατανέμεται ισοβαρώς και στις τρεις επιμέρους παραμορφώσεις που μετρήθηκαν, έτσι ώστε να επέλθει σύμπτωση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων μετατοπίσεων (Πιν. 2-11), (Διαγρ.30-34).

| MSW1 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.25 | 2.35 | 5.2 |
| 2 | 0.75 | 3.65 | 10.4 |
| 3 | 3.8 | 5.25 | 15.65 |
| 4 | 7.25 | 10.15 | 20.85 |

| MSW2 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.3 | 1.25 | 7.3 |
| 2 | 0.65 | 3.3 | 14.6 |
| 3 | 4.2 | 8.1 | 21.9 |
| 3.45 | 6.1 | 9.1 | 25.2 |

| MSW3 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.3 | 1.4 | 4.4 |
| 2 | 0.9 | 2.55 | 8.75 |
| 3 | 1.5 | 3.65 | 13.15 |
| 4 | 2.7 | 3.9 | 17.5 |
| 4.6 | 4.3 | 5.65 | 20.15 |

| MSW4 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.2 | 0.2 | 4.95 |
| 2 | 0.7 | 2.1 | 9.85 |
| 3 | 1.2 | 2.15 | 14.8 |
| 4 | 2.25 | 2.85 | 19.7 |

Πιν. 2-4. Επιμέρους συνιστώσες μετατοπίσεις της συνολικής μετατόπισης για διάφορα επίπεδα πλαστιμότητας.

| MSW5 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.15 | 0.65 | 4.5 |
| 2 | 0.45 | 1.75 | 9 |
| 3 | 0.75 | 2.7 | 13.5 |
| 4 | 2.25 | 4.1 | 18 |
| 4.5 | 3.2 | 4.7 | 20.25 |

| MSW6 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.3 | 3.3 | 8.5 |
| 2 | 3.5 | 6.5 | 17 |
| 2.52 | 8.75 | 10.25 | 21.4 |

| LSW1 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.4 | 1 | 2.4 |
| 2 | 0.7 | 2.15 | 4.8 |
| 3 | 1.3 | 3.1 | 7.2 |
| 4 | 4 | 5.7 | 9.6 |
| 4.8 | 6.2 | 7.6 | 11 |

| LSW2 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.35 | 0.7 | 2.7 |
| 2 | 0.8 | 1.5 | 5.35 |
| 3 | 2.95 | 3.85 | 8 |
| 3.89 | 6.25 | 6.9 | 10.4 |

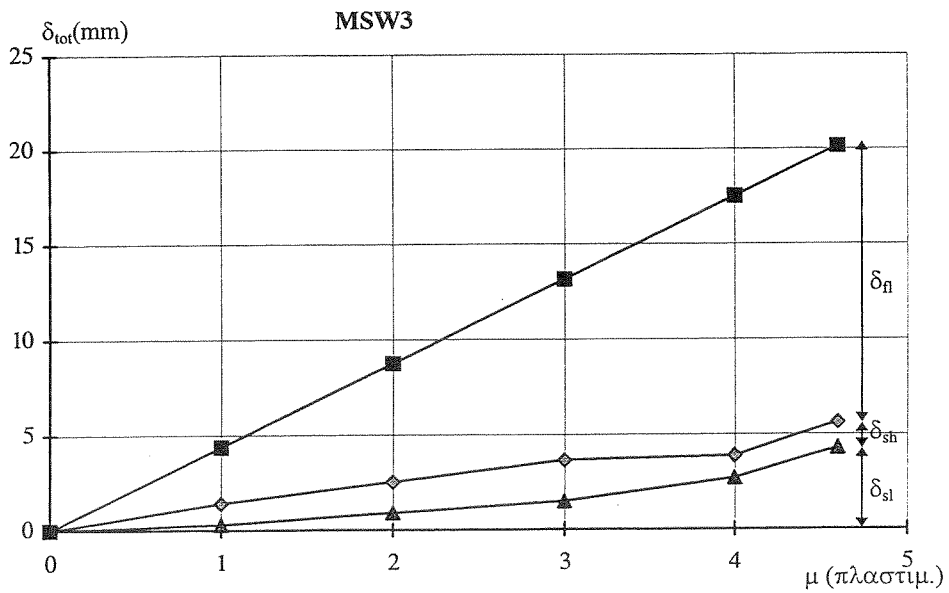
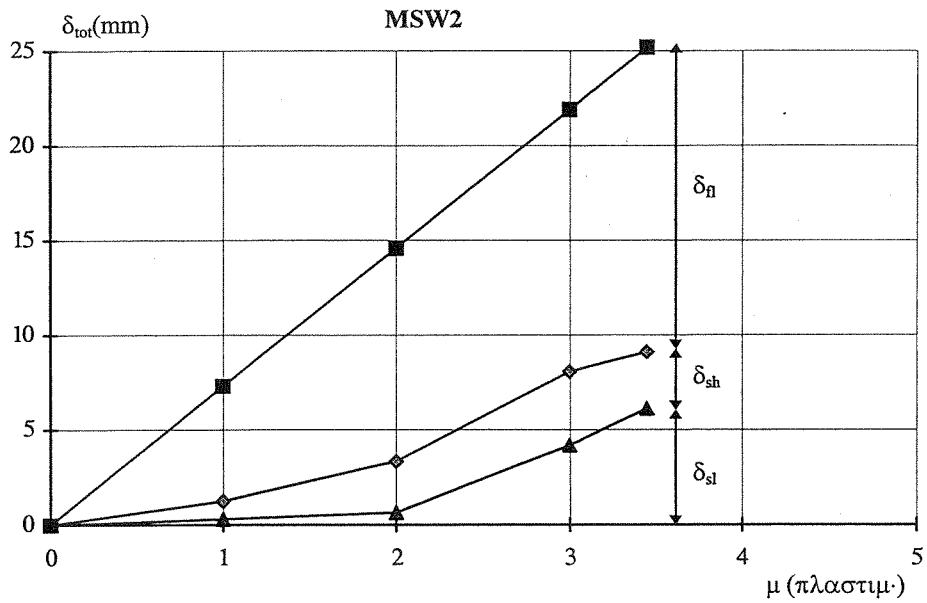
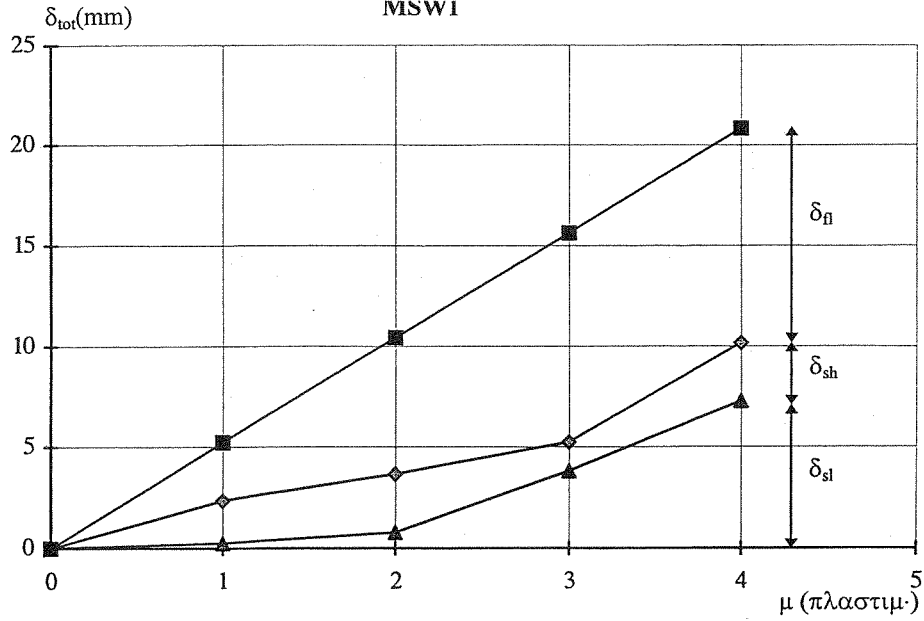
Πιν. 5-8. Επιμέρους συνιστώσες μετατοπίσεις της συνολικής μετατόπισης για διάφορα επίπεδα πλαστιμότητας.

| LSW3 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.2 | 1 | 3.05 |
| 2 | 0.75 | 2.3 | 6.1 |
| 3 | 1.9 | 3.3 | 9.2 |
| 4 | 3.15 | 5.4 | 12.2 |
| 5 | 4.75 | 6.7 | 15.3 |
| 5.325 | 5.35 | 6.75 | 16.3 |

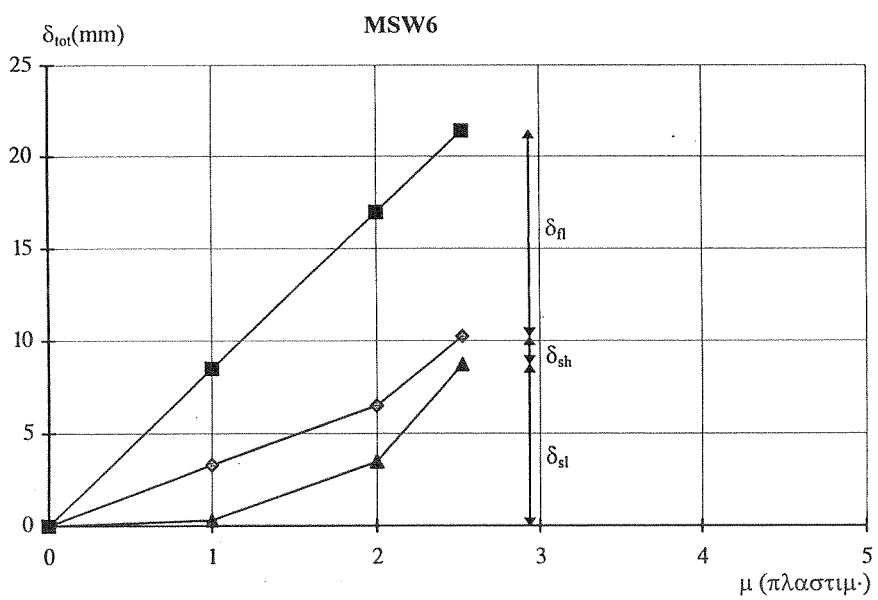
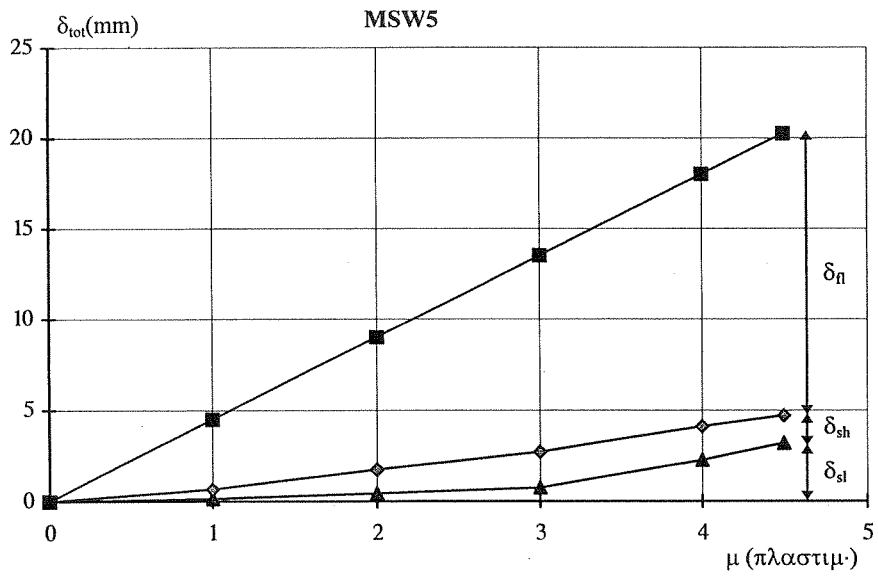
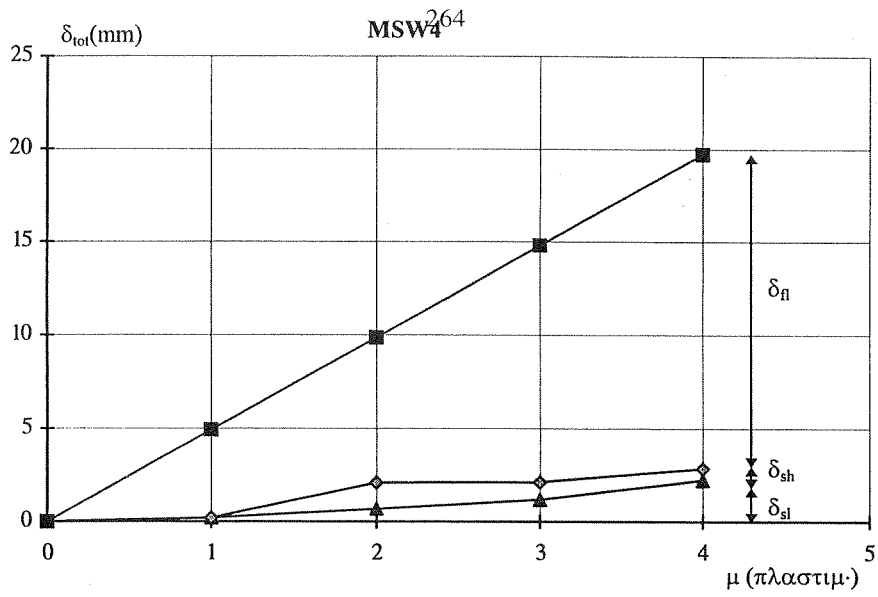
| LSW4 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.2 | 0.6 | 5.65 |
| 2 | 0.35 | 1.2 | 5.3 |
| 3 | 1.25 | 3.1 | 7.9 |
| 3.8 | 2 | 3.85 | 10 |

| LSW5 | δ_{sl} | $\delta_{sl}+\delta_{sh}$ | $\delta_{sl}+\delta_{sh}+\delta_{fl}$ |
|-------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| μ | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.3 | 0.45 | 3.7 |
| 2 | 0.7 | 1.05 | 7.3 |
| 3 | 1.6 | 2.5 | 11 |
| 4 | 5.15 | 6.4 | 14.65 |

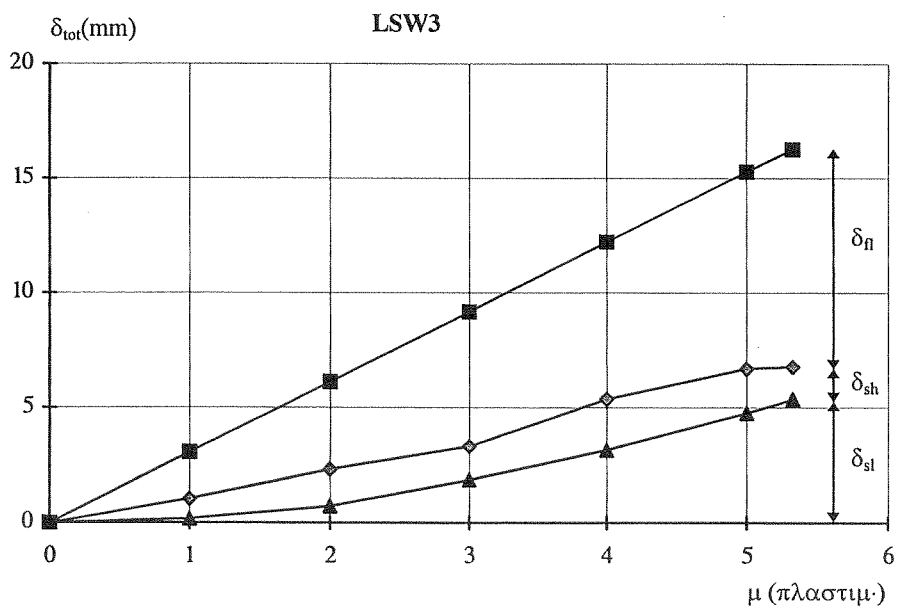
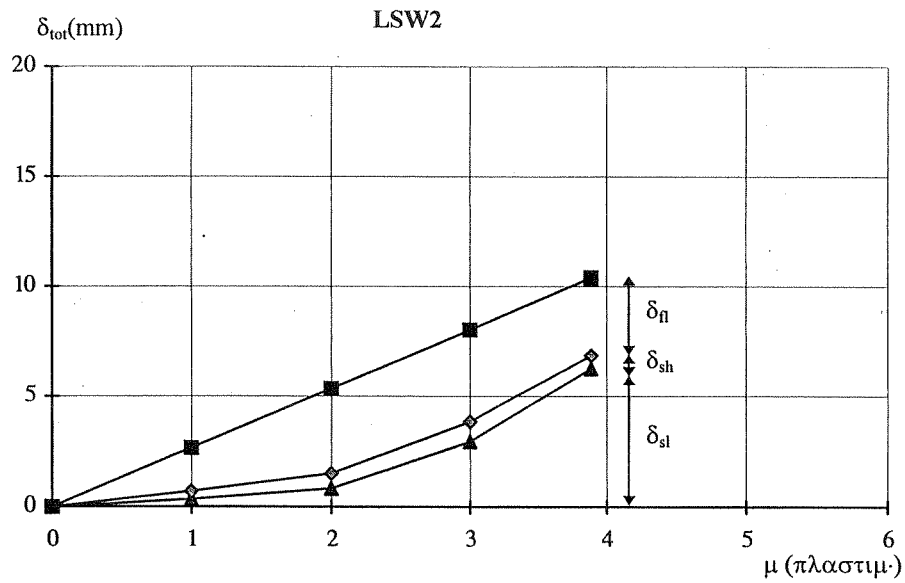
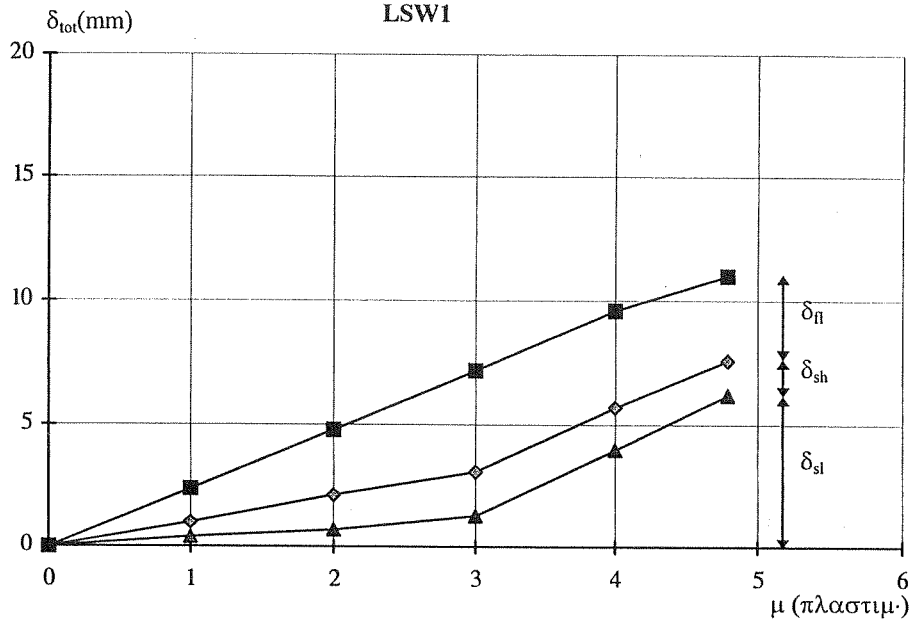
Πιν. 9-11. Επιμέρους συνιστώσες μετατοπίσεις της συνολικής μετατόπισης για διάφορα επίπεδα πλαστιμότητας.



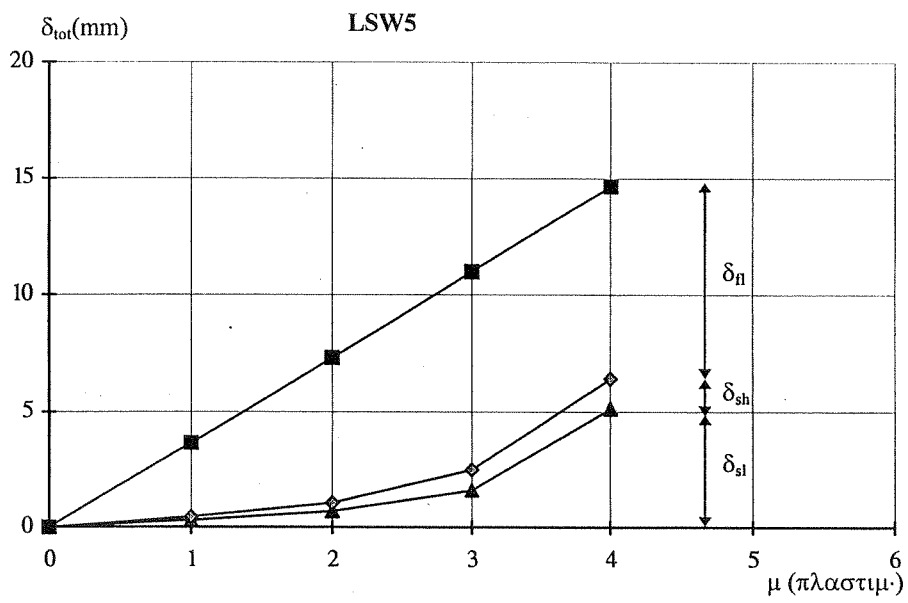
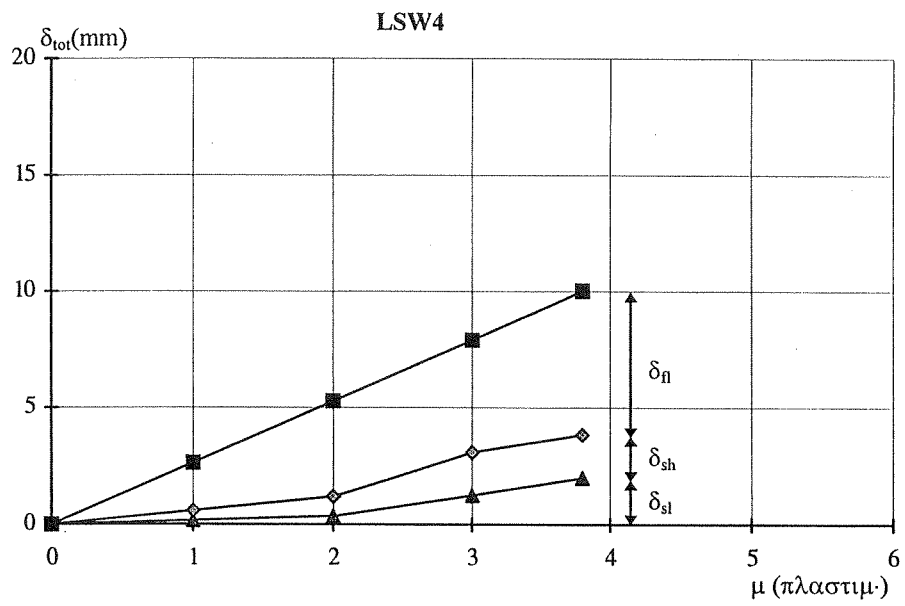
Διαγρ. 30. Διαγράμματα των επιμέρους συνιστωσών παραμόρφωσης συναρτήσει της πλαστιμότητας για τα δοκίμια MSW1, MSW2, MSW3.



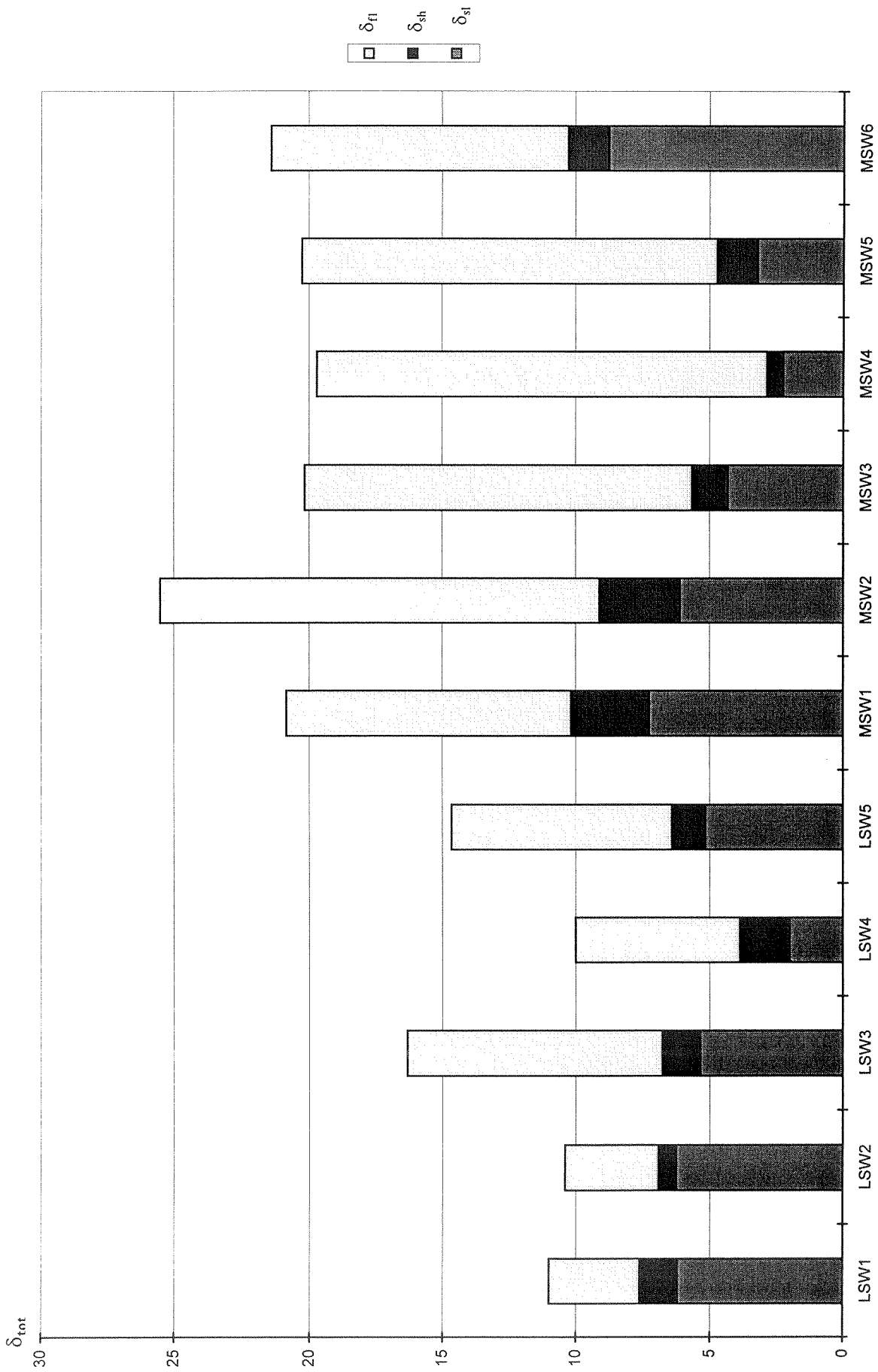
Διαγρ. 31. Διαγράμματα των επιμέρους συνιστωσών παραμόρφωσης συναρτήσει της πλαστιμότητας για τα δοκίμια MSW4, MSW5, MSW6.



Διαγρ. 32. Διαγράμματα των επιμέρους συνιστωσών παραμόρφωσης συναρτήσει της πλαστιμότητας για τα δοκίμια LSW1, LSW2, LSW3.



Διαγρ. 33. Διαγράμματα των επιμέρους συνιστωσών παραμόρφωσης συναρτήσει της πλαστιμότητας για τα δοκίμια LSW4, LSW5.



Διαγρ. 34. Διάγραμμα των επιμέρους συνιστωσών της τελικής παραμόρφωσης για όλα τα δοκίμια.

ΜΕΡΟΣ Γ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

8. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ R.C.COL.A [49].

Για τη βαθμονόμηση των διατάξεων των κυριότερων διεθνών κανονισμών σχετικά με τα τοιχώματα προσδιορίστηκε αναλυτικά (με το πρόγραμμα R.C.COL.A.90[49]) η καμπτική αντοχή των τοιχωμάτων και η αντίστοιχη τέμνουσα. Επίσης προσδιορίστηκε και η τέμνουσα που αντιστοιχεί στην καμπτική διαρροή. Το πρόγραμμα αναλύει διατομές από οπλισμένο σκυρόδεμα που υπόκεινται σε μονοαξονική κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη. Η ανάλυση γίνεται για μονότονα αύξουσα ροπή μέχρι την αστοχία για την οποία ελέγχονται διάφορα κριτήρια. Για τους καταστατικούς νόμους των υλικών, δηλαδή τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης που απαιτούνται για την ανάλυση, το πρόγραμμα περιλαμβάνει μια πλούσια “βιβλιοθήκη” και συγκεκριμένα οκτώ διαφορετικούς νόμους για το περισφιγμένο σκυρόδεμα, δύο νόμους για το απερίσφικτο σκυρόδεμα και δύο νόμους για το χάλυβα των οπλισμών. Η γεωμετρία της διατομής μπορεί να είναι τυχούσα, αλλά η ανάλυση είναι ακριβής, όταν υπάρχει ένας άξονας συμμετρίας κάθετα προς τον ουδέτερο άξονα της διατομής. Για την κατανομή των παραμορφώσεων καθ’ ύψος της διατομής γίνεται δεκτή η αρχή της επιπεδότητας των διατομών, ενώ αγνοείται η επιρροή της ολίσθησης των ράβδων του οπλισμού σε σχέση με το περιβάλλον σκυρόδεμα. Στη γενική περίπτωση η μεθοδολογία που ακολουθείται στο πρόγραμμα συνίσταται στο χωρισμό της διατομής σε “η” οριζόντιες λωρίδες. Τόσο οι λωρίδες του σκυροδέματος όσο και οι διάφορες στρώσεις των οπλισμών καθορίζονται από τις αποστάσεις τους (y_i) από έναν άξονα αναφοράς που είναι το κέντρο βάρους των οπλισμών της διατομής του σκυροδέματος. Για δεδομένο αξονικό φορτίο N και δεδομένη τιμή της παραμόρφωσης στην ακραία θλιβόμενη ίνα (ϵ_c) είναι δυνατό να βρεθεί η ροπή M της διατομής και η αντίστοιχη καμπυλότητα, ϕ . Η διαδικασία που ακολουθείται είναι να ληφθεί μια πρώτη τιμή για το ύψος του ουδέτερου άξονα (x), οπότε καθορίζεται το διάγραμμα των παραμορφώσεων. Για δεδομένη παραμόρφωση ϵ_{ci} στο κέντρο λωρίδας i καθορίζεται από το διάγραμμα $\sigma_c - \epsilon_c$ η τάση σ_{ci} στη λωρίδα. Αντίστοιχα, από τις παραμορφώσεις ϵ_{si} του χάλυβα υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις σ_{si} στις διάφορες στρώσεις των οπλισμών, με βάση

το διάγραμμα $\sigma_s-\varepsilon_s$. Για m στρώσεις οπλισμών και για τις n λωρίδες σκυροδέματος πρέπει να πληροῦται η συνθήκη ισορροπίας

$$N = \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si}$$

Αν η προηγούμενη σχέση δεν πληροῦται, διορθώνεται το ὕψος του ουδέτερου ἄξονα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ἔως ὅτου προσδιοριστεί το ὕψος x , για το οποίο πληροῦται με ικανοποιητική ακρίβεια η συνθήκη ισορροπίας. Η αναλαμβανόμενη ροπή υπολογίζεται ἀπὸ τη σχέση:

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} y_{si}$$

και η αντίστοιχη καμπυλότητα φ ἀπὸ τη σχέση $\varphi = \varepsilon_c / x$.

Για την εισαγωγή της διατομής των τοιχωμάτων οι θέσεις και η διατομή των οπλισμών δόθηκαν ακριβῶς, ἐνῶ για την εισαγωγή της διατομής του σκυροδέματος ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Ορίστηκαν τρεῖς λωρίδες με διατομή ἀπερίσφικτου σκυροδέματος για την επικάλυψη στην ἀρχή της κρυφοκόλωνα, ἐνῶ σε αὐτή τη θέση η διατομή του περισφιγμένου σκυροδέματος ἦταν μηδενική. Στη θέση της περισφιγμένης διατομής δόθηκαν 40 λωρίδες με πλάτος ἀπερίσφικτου σκυροδέματος ἴσο με το συνολικό πλάτος της επικάλυψης και στα δύο ἄκρα, ἐνῶ το υπόλοιπο τμήμα δόθηκε ως περισφιγμένο. Ὅμοια στον κορμό δόθηκαν 114 λωρίδες σκυροδέματος με μηδενικό πλάτος περισφιγμένου σκυροδέματος, ἐνῶ ολόκληρο το πλάτος κάθε λωρίδας δόθηκε με ιδιότητες ἀπερίσφικτου σκυροδέματος. Ὅμοια εισηχθησαν τα δεδομένα και για την ἄλλη ἀκραία ἴνα. Ὡς ροπή διαρροῆς λήφθηκε (για ἀπλότητα) η ροπή για την οποία διαρρέει ο εφελκόμενος χάλυβας στην ἀκραία ἴνα και ως ροπή ἀστοχίας λήφθηκε η ροπή πάνω ἀπὸ την οποία ἀστοχεῖ το δοκίμιο σε κάμψη. Ἀπὸ την παρατήρηση των ἀναλυτικῶν και πειραματικῶν ἀντοχῶν των δοκιμῶν (πιν. 12) προκύπτει το συμπέρασμα ὅτι η τελική ἀστοχία των δοκιμῶν ἐπῆλθε ἀπὸ κάμψη με ἐξαίρεση το δοκίμιο LSW1 που εἶχε ψαθυρή ἀστοχία, και τα δοκίμια MSW5, LSW3 που ἀνέπτυξαν κατὰ 9% υψηλότερη ἀντοχή. Η ἀπότομη μείωση της μέγιστης ἀντοχῆς και το μικρό σχετικά μήκος του εὐθύγραμμου κλάδου της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης προφανῶς μας προβληματίζει για την ἐπιρροή μίας σειράς παραμέτρων στην ἀνελαστική συμπεριφορά των δοκιμῶν. Ἐτσι, η ἀρχική εικόνα της καλῆς σύμπτωσης πειραματικῶν και ἀναλυτικῶν ἀποτελεσμάτων παύει να ἰσχύει, αν θεωρήσουμε την ἀντοχή σε ἔντονο ἀνελαστικό ἐπίπεδο, η οποία δίνει μεν ικανοποιητικὸ μήκος εὐθύγραμμο κλάδο, ἀλλὰ ἔχει χαμηλότερη ἀντοχή.

9. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΕΜΝΟΥΣΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΥΝ ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Για τη βαθμονόμηση των διατάξεων των κυριότερων διεθνών κανονισμών προσδιορίσαμε τη διατμητική αντοχή των τοιχωμάτων με βάση τον EUROCODE 8 και με βάση τον A.C.I. Έτσι, προσδιορίστηκαν οι τέμνουσες αντοχής σε διαγώνια σύνθλιψη, διαγώνιο εφελκυσμό, και διατμητική ολίσθηση κατά EUROCODE.

Αντοχή σε τέμνουσα κατά Ευρωκώδικα 8

Αντοχή σε θλίψη, διαγώνιου θλιπτήρα

$$V_{sd} \leq V_{Rd,2}$$

όπου $V_{Rd,2} = 0.4(0.7 - f_{ck}/200)f_{cd}b_{wo}z$ στην κρίσιμη περιοχή

και $V_{Rd,2} = 0.5(0.7 - f_{ck}/200)f_{cd}b_{wo}z$ εκτός κρίσιμης περιοχής

Όπου το ύψος της πλαστικής άρθρωσης είναι:

- ίσο με το μήκος του τοιχώματος
- το ύψος του πρώτου ορόφου
- το 1/6 του ύψους του τοιχώματος

z απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους των κρυφοκολόνων, το οποίο μπορεί να ληφθεί ίσο με $0.8l_w$

b_{wo} το πάχος κορμού του τοιχώματος

f_{ck} χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος όχι μεγαλύτερη από 40 MPa

Αντοχή σε διαγώνιο εφελκυσμό

$$V_{sd} \leq V_{Rd,3}$$

Όπου $V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{wd}$

Προτείνεται να χρησιμοποιείται ακριβές μοντέλο για την εκτίμηση της $V_{Rd,3}$, το οποίο να λαμβάνει υπόψη την ανελαστική επιρροή μεγάλων ανακυκλιζόμενων παραμορφώσεων. Εάν δεν χρησιμοποιείται ακριβέστερο μοντέλο, θα εφαρμόζονται οι παρακάτω τύποι:

α) Για $\alpha_s = \frac{M_{sd}}{V_{sd} \cdot l_w} \geq 2$ θα εφαρμόζονται οι διατάξεις για τα υποστυλώματα

β) Για $2.0 > \alpha_s = \frac{M_{sd}}{V_{sd} \cdot l_w} > 1.3$ θα χρησιμοποιείται απλοποιημένο μοντέλο

δικτυώματος όπως παρακάτω:

Ετσι, οι οριζόντιες ράβδοι, οι οποίες πρέπει να είναι καλά αγκυρωμένες στα ακραία περισφιγμένα στοιχεία, και θα τοποθετούνται καθ' ύψος του τοιχώματος πρέπει να ικανοποιούν την ανισότητα:

$$V_{sd} \leq \rho_h f_{yd,h} b_{wo} z + V_{cd}$$

ενώ οι κατακόρυφες ράβδοι κατάλληλα αγκυρωμένες και ματισμένες κατά το ύψος του τοιχώματος θα τοποθετούνται κατά μήκος του κορμού. Το ποσοστό τους προκύπτει από την πλήρωση της ανισότητας

$$V_{sd} \leq \rho_v f_{yd,v} b_{wo} z + V_{cd} + \min N_{sd}$$

γ) Για $\alpha_s \leq 1.3$, η παρακάτω εμπειρική σχέση θα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού

$$V_{sd} \leq [\rho_h f_{yd,h} (\alpha_s - 0.3) + \rho_v f_{yd,v} (1.3 - \alpha_s)] b_{wo} z + V_{cd}$$

όπου για $\alpha_s < 0.3$ τότε $\alpha_s = 0.3$ και $(\rho_v f_{yd,v}) / (\rho_h f_{yd,h}) \leq 1$.

Ο όρος V_{cd} υπολογίζεται όπως παρακάτω:

– Για εφελκυστική αξονική δύναμη

- Στην πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = 0$$

- Έξω από την πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = 2.5 l_w b_w \tau_{Rd}$$

– Για θλιπτική δύναμη

Στην πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = \tau_{Rd} (1.2 + 40\rho) b_{wo} z$$

Έξω από την πλαστική άρθρωση

$$V_{cd} = 2.5 l_w b_w \tau_{Rd} \beta_1$$

– Σε κάθε περίπτωση θα λαμβάνεται ελάχιστη τιμή $\rho_u, \rho_v = 2.5\%$

Αντοχή σε διατμητική ολίσθηση

$$V_{sd} \leq V_{Rd,s}$$

$$\begin{aligned} \text{όπου} \quad V_{Rd,s} &= V_{dd} + V_{id} + V_{fd} \\ \text{με} \quad V_{dd} &= \min \left[1.3 \sum A_{sj} \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}}, 0.25 f_{yd} \sum A_{sj} \right] \end{aligned}$$

αντοχή βλήτρου κατακόρυφου οπλισμού

$$\text{με} \quad V_{id} = \sum A_{si} \cdot f_{yd} \cdot \cos \varphi$$

αντίσταση σε τέμνουσα κεκλιμένων ράβδων και

$$\text{και} \quad V_{fd} = \min \left\{ \left[\mu_f \cdot \left(\sum A_{sj} f_{yd} + N_{sd} \right) \xi + M_{sd} / z \right], \left[0.25 f_{cd} \cdot \xi \cdot l_w \cdot b_{wo} \right] \right\}$$

αντίσταση τριβής.

Σε τοιχώματα με λόγο όψης κάτω του δύο, συνιστάται η μισή δρώσα τέμνουσα στη βάση του τοιχώματος να παραλαμβάνεται από δισδιαγώνιο οπλισμό, ενώ ψηλότερα, η αντίστοιχη αναλαμβανόμενη τέμνουσα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ένα τέταρτο της δρώσας. Οι κεκλιμένες ράβδοι πρέπει να είναι κατάλληλα αγκυρωμένες και στις δύο πλευρές στη θέση όπου αναμένεται διατμητική ολίσθηση και πρέπει να διέρχονται από όλες τις διατομές σε ύψος ίσο με τη μικρότερη τιμή από $0.5l_w$ ή $0.5H_w$ από τη βάση.

Αντοχή σε τέμνουσα κατά A.C.I.

Η ονομαστική αντοχή σε τέμνουσα των τοιχωμάτων δεν θα είναι πάνω από την τιμή $V_n \geq A_{cv} (0.166 \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y)$ γενικά, ενώ για τοιχώματα με λόγο $h_w/l_w < 2.0$ η αντίστοιχη αντοχή θα προκύπτει από την εξίσωση $V_n \leq A_{cv} (0.08 \alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y)$, όπου το α_c μεταβάλλεται γραμμικά από 3.0 μέχρι 2.0 για $(h_w/l_w) = 1.5$ και $(h_w/l_w) = 2.0$, αντίστοιχα.

Συγκριτική αξιολόγηση κανονισμών

Από την εφαρμογή των τύπων που αναφέρθηκαν προηγουμένως προκύπτουν οι υπολογιστικές αντοχές σε τέμνουσα, που παρουσιάζονται στον πίνακα 12. Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι αντοχές σε τέμνουσα με βάση τον A.C.I. είναι κατά πολύ υψηλότερες από τις αντίστοιχες αντοχές σε διαγώνιο εφελκυσμό που δίνει ο EUROCODE. Αυτή η διαφορά οφείλεται στη θεώρηση από τον A.C.I. της συμμετοχής μέρους της διατομής σκυροδέματος στην ανάληψη τέμνουσας, ακόμη και κατά την απουσία αξονικού φορτίου. Επίσης, η αντοχή

| ΔΟΚΙΜΙΟ | f_c (Μpa) | Διατηρητική αντοχή (kN) κατά ACI 318-95 | Διατηρητική αντοχή (kN) σε εφελκισμό κατά EC8 | Διατηρητική αντοχή (kN) σε διαγώνια σύνθλιψη κατά EC8 | Διατηρητική αντοχή (kN) σε διατηρητική ολίθηση κατά EC8 | Τέμνουσα (kN) κατά την καμπτική διαροή από ανάλυση V_{ufl} | Πειραματική τέμνουσα αστοχίας (kN) | V_{uexp} / V_{ufl} |
|---------|----------------|--|--|--|---|---|---|----------------------|
| | | V_n | V_{Rd3} | V_{Rd2} | $V_{Rd,s}$ | Τέμνουσα (kN) κατά την μέγιστη καμπτική αντοχή από ανάλυση V_{ufl} | V_{uexp} | |
| MSW1 | 26.1 | 553 | 324 | 571 | 222 | 141/202 | 197 | 0.98 |
| MSW2 | 26.2 | 350 | 162 | 573 | 137 | 94/127 | 124 | 0.98 |
| MSW3 | 24.1 | 344 | 233 | 536 | 165 | 130/171 | 176 | 1.03 |
| MSW4 | 24.6 | 552 | 327 | 545 | 296 | 102/156 | 158 | 1.01 |
| MSW5 | 22 | 545 | 327 | 498 | 268 | 120/169 | 187 | 1.10 |
| MSW6 | 27.5 | 557 | 324 | 594 | 231 | 141/202 | 202 | 1.00 |
| LSW1 | 22.2 | 541 | 324 | 498 | 195 | 205/294 | 262 | 0.89 |
| LSW2 | 21.6 | 342 | 162 | 492 | 117 | 136/184 | 191 | 1.04 |
| LSW3 | 23.9 | 343 | 233 | 533 | 163 | 190/249 | 268 | 1.07 |
| LSW4 | 23.2 | 548 | 327 | 521 | 288 | 146/226 | 232 | 1.03 |
| LSW5 | 24.9 | 553 | 327 | 551 | 283 | 174/245 | 247 | 1.01 |

Πιν. 12. Συγκριτικός πίνακας αντοχών με βάση διεθνείς κανονισμούς, αναλυτικούς υπολογισμούς και τους πειραματικούς ελέγχους.

σε διατμητική ολίσθηση, όπως προκύπτει από τον EUROCODE, στα δοκίμια και των δύο ομάδων με κλασικού τύπου οπλισμό είναι περίπου ίση ή μικρότερη από τη μέγιστη αναπτυσσόμενη αντοχή. Το γεγονός αυτό κρίνεται θετικό καθώς, όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα, πράγματι μετά από τους πρώτους κύκλους φόρτισης η αντοχή των δοκιμίων μειώνεται λόγω ανακύκλισης και λόγω αύξησης της μετατόπισης. Έτσι ορθά ο EUROCODE προβλέπει χαμηλή διατμητική αντοχή (από διατμητική ολίσθηση) στη ρηγματωμένη λόγω κάμψης διατομή τοιχωμάτων στην πλαστική περιοχή τους, ιδιαίτερα όταν σχεδιάζουμε με υψηλές απαιτήσεις πλαστιμότητας. Το παραπάνω γεγονός ενισχύεται στα δοκίμια με λόγο όψης ίσο με ένα. Άρα, ενώ αρχικά το δοκίμιο φαίνεται να έχει κάποια αντοχή η οποία διατηρείται περίπου σταθερή μέχρι την επίτευξη πλαστιμότητας μετατοπίσεων στην κορυφή 2, για μεγαλύτερη πλαστιμότητα η αντοχή μειώνεται. Έτσι από επίπεδο πλαστιμότητας 2 μέχρι την επίτευξη πλαστιμότητας 3.5 η αντοχή είναι φθίνουσα και κατόπιν σχεδόν σταθερή. Κατά το σχεδιασμό ενός τοιχώματος για την επίτευξη υψηλής πλαστιμότητας, πρέπει ως αντοχή σε διάτμηση να λαμβάνεται η μικρότερη τέμνουσα αντοχής, και η διαστασιολόγηση έναντι διατμήσεως να γίνεται έτσι, ώστε όλες οι αντοχές σε τέμνουσα (διαγώνια σύνθλιψη, λοξό εφελκυσμό και ολίσθηση) να είναι μεγαλύτερες από την δρώσα. Αυτό που θα προκύψει είναι τοίχωμα με την επιθυμητή καμπτική αντοχή, αλλά ενισχυμένο έναντι διατμήσεως. Λόγω της υπερδιαστασιολόγησης σε διάτμηση, αίρονται οι δυσμενείς επιπτώσεις των διατμητικών παραμορφώσεων, όπως είναι η μικρή απορρόφηση ενέργειας και οι υψηλές διατμητικές παραμορφώσεις.

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι, ενώ ο EUROCODE προβλέπει σωστά τη μείωση αντοχής λόγω ανακύκλισης, μέσω του καθορισμού χαμηλής αντοχής σε διατμητική ολίσθηση υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις στον καθορισμό της ακριβούς τιμής αυτής της μείωσης. Οι αποκλίσεις αυτές γίνονται εντονότερες κατά τη χρήση δισδιαγώνιου οπλισμού καθώς, όπως προκύπτει υπολογιστικά, υπερεκτιμάται σαφώς η συνεισφορά του στην αντοχή της διατομής έναντι διατμητικής ολίσθησης στη βάση.

10. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, ο ακριβής προσδιορισμός της αντοχής σε διατμητική ολίσθηση της ρηγματωμένης λόγω κάμψης διατομής σκυροδέματος στη βάση των τοιχωμάτων (και πιθανά άλλων δομικών στοιχείων με άνοιγμα διάτμησης κάτω του δύο) απαιτεί καλύτερη προσέγγιση, προκειμένου να υπάρξει σύμπτωση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων σε ό,τι αφορά την αντοχή τους για υψηλά επίπεδα πλαστιμότητας. Στα τοιχώματα αυτά, αφού αναπτυχθεί η μέγιστη αντοχή για μετατόπιση που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μετατοπίσεων της τάξης του δύο, για πλαστιμότητα πάνω από τρία η αντοχή πέφτει περίπου στο 75% της μέγιστης. Κατά τη φάση μείωσης της αντοχής των τοιχωμάτων παρατηρείται μεγάλη αύξηση των διατμητικών ολισθήσεων στη βάση τους. Οι διατμητικές ολισθήσεις αυξάνουν για τέμνουσα μικρότερη από την προηγουμένως μέγιστη αναπτυσσόμενη. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι για υψηλή πλαστιμότητα η αντοχή των τοιχωμάτων μειώνεται από διαρροή του μηχανισμού ανάληψης των διατμητικών παραμορφώσεων στην έντονα ρηγματωμένη λόγω κάμψης περιοχή σκυροδέματος. Σε αυτή τη φάση και μετά τη διαρροή του οπλισμού κάμψης, η αντοχή του τοιχώματος ισούται με την αντοχή σε διατμητική ολίσθηση. Συγκρίνοντας την αντοχή των τοιχωμάτων για πλαστιμότητα γύρω στο τέσσερα με την αντοχή σε ολίσθηση που δίνει ο EUROCODE, μπορούμε να αποφανθούμε για την ορθότητα της αντοχής σε ολίσθηση που δίνει ο παραπάνω κανονισμός. Από τη σύγκριση των τελικών αντοχών των τοιχωμάτων με την αντοχή σε διατμητική ολίσθηση που δίνει ο EUROCODE προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι αντοχές του κανονισμού είναι γενικά υψηλότερες. Για την ερμηνεία του φαινομένου θα πρέπει να εκτιμηθεί η συμπεριφορά που επέδειξαν τα δοκίμια όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Δοκίμια με λόγο όψης 1.5

Τα δοκίμια αυτά είχαν γενικά υψηλότερη καταπόνηση σε κάμψη απ' ότι σε διάτμηση σε σχέση με τα δοκίμια με λόγο όψης 1. Έτσι ο οπλισμός που διέρχονταν από τη βάση τους δεχόταν γενικά υψηλό εφελκυσμό, είτε αυτός ήταν οπλισμός κάμψης είτε οπλισμός διάτμησης. Έτσι υπήρχαν γενικά πολύ μικρά περιθώρια για τη λειτουργία βλήτρου. Επίσης στα δοκίμια της ίδιας ομάδας με δισδιαγώνιο οπλισμό, για να αναπτυχθεί ο μηχανισμός τριβής μέσω εμπλοκής αδρανών, έπρεπε να διαρρεύσει ο παραπάνω κεκλιμένος οπλισμός. Άρα δημιουργείται αυτόματα ο προβληματισμός κατά

πόσο σε δοκίμια με άνοιγμα διάτμησης 1.5 πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία ως βλήτρων οπλισμών που βρίσκονται σε καμπτική διαρροή. Όμοια κατά την ύπαρξη δισδιαγώνιου οπλισμού δημιουργείται ο προβληματισμός της δυνατότητας ανάπτυξης και λειτουργίας του μηχανισμού τριβής, αφού για την ενεργοποίησή του απαιτείται η διαρροή του κεκλιμένου οπλισμού, η οποία πρέπει να καταστέλλεται για την ορθή παραλαβή της ολίσθησης.

Δοκίμια με λόγο όψης 1.0

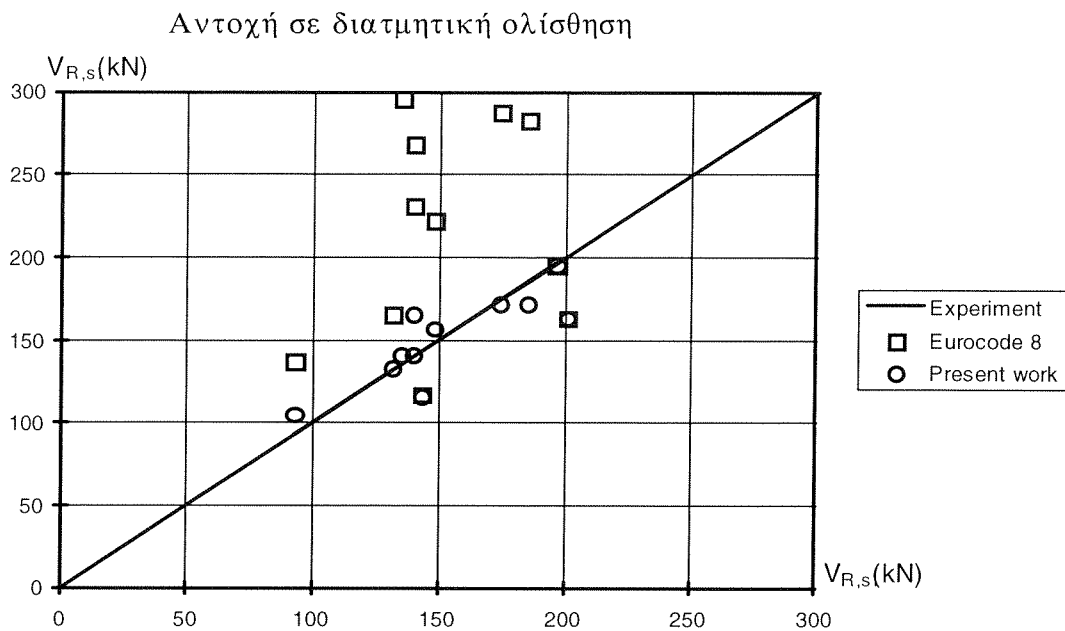
Στα δοκίμια με λόγο όψης 1.0 αναπτύχθηκε γενικά υψηλή διατμητική ένταση από ότι καμπτική. Έτσι θεωρείται ότι οι υψηλές διατμητικές παραμορφώσεις οδήγησαν στην ανάπτυξη της λειτουργίας τουλάχιστον του οπλισμού κορμού ως βλήτρου. Κατά τη λειτουργία βλήτρου και λόγω της μικρής έστω περιστροφής των οπλισμών (άρα κλείσιμο των ρηγμάτων) ενεργοποιείται και ο μηχανισμός τριβής, μόνο όταν δεν υπάρχουν δισδιαγώνιοι οπλισμοί.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι σε τοιχώματα με λόγο όψης 1.5, για τον υπολογισμό της αντοχής σε διατμητική ολίσθηση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο ο όρος της τριβής της θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος κατά την όπλιση με κλασικού τύπου οπλισμό, ενώ, όταν τίθενται δισδιαγώνιοι οπλισμοί, για αυτόν το σκοπό, πρέπει να θεωρούμε ότι μόνο αυτοί παραλαμβάνουν την τέμνουσα στη ρηγματωμένη εκ κάμψης διατομή σκυροδέματος. Οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί δεν πρέπει να διαρρέουν για την ορθότερη επίτευξη του σκοπού τους.

Σε δοκίμια με άνοιγμα διάτμησης 1.0 για τον υπολογισμό της αντοχής σε διατμητική ολίσθηση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο η λειτουργία βλήτρου όσο και ο όρος της τριβής. Όταν τοποθετείται δισδιαγώνιος οπλισμός για την ανάληψη της τέμνουσας ολίσθησης, παραλείπεται μόνο ο όρος της τριβής, ενώ ισχύει η λειτουργία βλήτρου.

Για τον έλεγχο των παραπάνω συμπερασμάτων έγιναν τα διαγράμματα τελικής αντοχής των δοκιμίων (στο τέλος του πειράματος) και αντοχής σε διατμητική ολίσθηση, με βάση τόσο τον EUROCODE όσο και την προτεινόμενη μεθοδολογία.

Όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας, σε κατασκευές που σχεδιάζονται με υψηλές απαιτήσεις πλαστιμότητας, η αντοχή των τοιχωμάτων σε διατμητική ολίσθηση πρέπει (υπάρχει καλύτερη σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα) να λαμβάνεται υπόψη με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία, ιδιαίτερα όταν αναμένεται αυτά τα τοιχώματα να αναπτύξουν πλαστιμότητα μετατοπίσεων μεγαλύτερη από τρία (Σχ. 63).



Σχ. 63. Συγκριτικό διάγραμμα αντοχής σε διατμητική ολίσθηση για υψηλά επίπεδα πλαστιμότητας με βάση τον EUROCODE 8, την προτεινόμενη μεθοδολογία, και την τελική αντοχή των δοκιμίων.

ΜΕΡΟΣ Δ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- i) Για τον προσδιορισμό του τρόπου τελικής αστοχίας τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη κυρίως τις ανελαστικές ιδιότητες του οπλισμού και του σκυροδέματος. Είναι πολύ πιθανό η τελική μορφή αστοχίας τέτοιων στοιχείων να επέλθει από την αστοχία, λόγω εξασθένησης των μηχανισμών ανάληψης έντασης που ενεργοποιούνται μετά τη ρηγμάτωση και διαρροή άλλου μηχανισμού.
- ii) Στα τοιχώματα που δοκιμάστηκαν, ενώ αρχικά εμφανίστηκε να διαρρέει ο μηχανισμός της κάμψης σε όλα τα δοκίμια, η τελική μορφή αστοχίας που επήλθε για τα περισσότερα δοκίμια ήταν η αστοχία από διατμητική ολίσθηση. Οι διατμητικές ολισθήσεις αυξήθηκαν σημαντικά μετά την καμπτική διαρροή.
- iii) Στα τοιχώματα Οπλισμένου Σκυροδέματος η διατμητική ολίσθηση που μπορεί να εμφανιστεί στη βάση τους είναι δύο ειδών :
 - Διατμητική ολίσθηση μετά τη καμπτική διαρροή του στοιχείου από τη δράση ανακυκλιζόμενης τέμνουσας. Αυτού του είδους η διατμητική ολίσθηση εμφανίζεται σχεδόν πάντα για πλαστιμότητα μετατοπίσεων μεγαλύτερη του 2 και για χαμηλή σχετικά τέμνουσα δύναμη. Είναι ο κανόνας σε τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης κάτω του δύο και πάνω από ένα όπως προέκυψε από την παρούσα εργασία.
 - Διατμητική ολίσθηση που εμφανίζεται πριν την καμπτική διαρροή για επίπεδα πλαστιμότητας μετατοπίσεων κάτω του δύο. Οφείλεται κυρίως σε θραύση του σκυροδέματος κατά μήκος της βάσης του δοκιμίου. Εμφανίζεται σε τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης κάτω από ένα. Δεν εμφανίστηκε στη παρούσα σειρά πειραμάτων.
- iv) Για τη διαστασιολόγηση των τοιχωμάτων έναντι τέμνουσας δύναμης για δεδομένο επίπεδο πλαστιμότητας πρέπει η αντοχή να καθορίζεται συναρτήσει της πλαστιμότητας που θέλουμε να πετύχουμε. Έτσι, για πλαστιμότητα μετατόπισης της

τάξης του 2, όπως προκύπτει από τις περιβάλλουσες καμπύλες αντοχής, η αντοχή του τοιχώματος είναι υψηλότερη από την αντοχή του στοιχείου που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα της τάξης του 4. Η μείωση αντοχής των τοιχωμάτων όταν πάμε από πλαστιμότητα 2 σε πλαστιμότητα 4, είναι της τάξης του 30%. Για ενδιάμεσες τιμές πλαστιμοτήτων η αντοχή προκύπτει με γραμμική παρεμβολή. Κύριο αίτιο αυτού του είδους της πτώσης αντοχής είναι η αύξηση των διατμητικών ολισθήσεων σε έντονο ανελαστικό επίπεδο.

- v) Η τέμνουσα που αντιστοιχεί στην καμπτική αστοχία των τοιχωμάτων πρέπει να είναι μικρότερη από τις τέμνουσες αντοχής σε διαγώνια σύνθλιψη, λοξό εφελκυσμό και διατμητική ολίσθηση, έτσι ώστε να έχουμε κατά το δυνατό μικρότερη μείωση αντοχής (καμπτική συμπεριφορά) σε υψηλές πλαστιμότητες.
- vi) Η αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη χρήση οπλισμού πρέπει να αυξάνει την καμπτική αντοχή κατά το δυνατόν λιγότερο.
- vii) Οι διατμητικές ολισθήσεις αυξάνονται σημαντικά, όταν αρχίζουν να μη κλείνουν υπό θλίψη τα καμπτικά ρήγματα που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο μισό του κύκλου φόρτισης από καμπτικό εφελκυσμό.
- viii) Ο έλεγχος της διατμητικής ολίσθησης είναι δυνατός με τη χρήση δισδιαγώνιου οπλισμού.
- ix) Σκόπιμα τοποθετούμενος δισδιαγώνιος οπλισμός για την άρση των ολισθήσεων δεν πρέπει να διαρρέει. Το παραπάνω επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του δισδιαγώνιου οπλισμού στο μέσον της διατομής του τοιχώματος στη βάση του. Έτσι επιτυγχάνουμε κατά το δυνατό μικρότερη καταπόνηση σε εφελκυσμό λόγω κάμψης σε τέτοιου είδους οπλισμό και άρα μικρότερη αύξηση της καμπτικής αντοχής.
- x) Από τη σύγκριση της συμπεριφοράς δοκιμίων με χιαστί οπλισμό διερχόμενο από το μέσον της βάσης του τοιχώματος και από τα άκρα του τοιχώματος, προκύπτει το συμπέρασμα ότι με τη χρήση χιαστί οπλισμών διερχόμενων από το μέσον της βάσης του τοιχείου μειώνουμε αποτελεσματικότερα τις διατμητικές ολισθήσεις στη ρηγματωμένη από κάμψη περιοχή του τοιχείου.
- xi) Η μειωμένη αποτελεσματικότητα του δισδιαγώνιου οπλισμού που διέρχεται από τα άκρα της βάσης του δοκιμίου να περιορίσει τις διατμητικές ολισθήσεις οφείλεται στην λόγω κάμψης διαρροή αυτού του οπλισμού, που οδηγεί αφενός σε ανεπιθύμητη

- αύξηση της καμπτικής αντοχής και αφετέρου σε αύξηση ολισθήσεων μετά τη διαρροή αυτού του οπλισμού.
- xii) Ως βέλτιστος σχεδιασμός έναντι ολίσθησης προκρίνεται ο χιαστί οπλισμός που διέρχεται από το μέσον της βάσης του δοκιμίου και γενικά όποιοσδήποτε τρόπος όπλισης ελαχιστοποιεί το πηλίκο της μεγίστη προς την τελική αντοχή.
- xiii) Κατά τη χρήση χιαστί οπλισμών που διέρχονται από το μέσον της διατομής του τοιχώματος για τον περιορισμό των διατμητικών ολισθήσεων αυξάνεται το μήκος της θλιβόμενης ζώνης και συνεπώς κατανέμεται η διατμητική ένταση σε μεγαλύτερο μήκος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη διατήρηση χαμηλής διατμητικής έντασης στη ρηγματωμένη λόγω κάμψης περιοχή σκυροδέματος.
- xiv) Σε στοιχεία κυρίως καμπτόμενα οι κατακόρυφοι οπλισμοί διάτμησης καταπονούνται σε εφελκυσμό από κάμψη, συνήθως πάνω από το όριο διαρροής τους. Αρα είναι αμφίβολη η συμμετοχή τους στη διατμητική αντοχή σε ολίσθηση της βάσης της διατομής. Αντίθετα, σε δομικά στοιχεία με μικρότερη καμπτική καταπόνηση η συνεισφορά των διαμήκων οπλισμών διάτμησης στην ανάληψη της παραπάνω έντασης μέσω της λειτουργίας βλήτρου είναι υψηλότερη.
- xv) Για την ανάπτυξη του όρου της τριβής και την παραλαβή της τέμνουσας δύναμης ολίσθησης απαιτείται αρχική σχετική μετακίνηση μεταξύ των χειλών των ρηγμάτων. Όταν χρησιμοποιείται δισδιαγώνιος οπλισμός για την παραλαβή της ολίσθησης, ο οποίος δεν αναμένεται να διαρρεύσει, τότε δεν αναπτύσσεται ο όρος της τριβής για την παραλαβή της διατμητικής ολίσθησης.
- xvi) Καλύτερη σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας έχουμε, όταν, για τον υπολογισμό της αντοχής σε διατμητική ολίσθηση που εμφανίζεται σε τοιχώματα με λόγο όψης 1.5 που υπόκεινται σε ανελαστικούς κύκλους φόρτισης, μετά τη καμπτική διαρροή λάβουμε υπόψη μόνο τον όρο της τριβής του θλιβόμενου σκυροδέματος και αγνοήσουμε τη λειτουργία βλήτρου. Αυτό ισχύει μόνο όταν τοποθετούμε κλασικού τύπου οπλισμό διάτμησης (πλέγμα). Όταν τίθεται δισδιαγώνιος οπλισμός, πρέπει να θεωρούμε ότι αυτός παραλαμβάνει όλη την τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου.
- xvii) Σε τοιχώματα με λόγο όψης 1.0 η αντοχή σε ολίσθηση δίνεται από τη λειτουργία βλήτρου και την τριβή του θλιβόμενου σκυροδέματος. Όταν τίθεται δισδιαγώνιος

- οπλισμός, ο όρος της τριβής παραλείπεται και υπολογίζουμε τη συνεισφορά μόνο του δισδιαγώνιου οπλισμού και της λειτουργίας βλήτρου.
- xviii) Οι δισδιαγώνιοι οπλισμοί εκτός από την λειτουργία τους για την παραλαβή της τέμνουσας ολίσθησης λειτουργούν και στην παραλαβή της τέμνουσας δύναμης λοξού εφελκυσμού.
- xix) Η περίσφιξη των άκρων των τοιχωμάτων, όπως καθορίζεται από τον EURO-CODE 8, είναι ικανοποιητική για τοιχώματα με λόγο όψης 1.0. Για τοιχώματα με λόγο όψης πάνω από 1.5, όταν θέλουμε να πετύχουμε υψηλή πλαστιμότητα, κρίσιμη παρουσιάζεται η περίσφιξη τμήματος της κρυφοκολόνας σε ύψος ίσο με τρεις φορές το πάχος του τοιχείου. Σε αυτό το ύψος οι συνδετήρες δεν πρέπει να απέχουν πάνω από το ένα τέταρτο του ύψους του τοιχείου ή τρεις φορές τη διάμετρο της λεπτότερης διαμήκου ράβδου.
- xx) Η ύπαρξη αξονικής δύναμης ίσης με το 7% της θλιπτικής αντοχής του τοιχείου βελτιώνει σαφώς όλα τα ανελαστικά χαρακτηριστικά του τοιχείου, όπως είναι η δυσκαμψία, η πλαστιμότητα, η καμπτική αντοχή και η απορρόφηση ενέργειας. Η αντοχή σε διαγώνιο εφελκυσμό δεν βελτιώνεται κατά την ύπαρξη υψηλής αξονικής φόρτισης και πρέπει να αυξάνουμε κατάλληλα τον οριζόντιο οπλισμό κορμού για τη αποφυγή διατμητικής αστοχίας.
- xxi) Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας τοιχωμάτων με άνοιγμα διάτμησης 1.5 είναι κατά μέσο όρο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη απορροφώμενη ενέργεια τοιχωμάτων με λόγο όψης 1.0. Επίσης τα δοκίμια με δισδιαγώνιο οπλισμό απορροφούν περισσότερη ενέργεια από τα δοκίμια με ισοδύναμο, κλασικού τύπου οπλισμό, ενώ αξονική δύναμη της τάξης του 7% της θλιπτικής αντοχής των τοιχωμάτων αυξάνει σημαντικά την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.
- xxii) Η ύπαρξη αρμού σκυροδέτησης και η σύνδεση των οπλισμών εκεί μέσω παράθεσης δεν επηρεάζει τη μέγιστη αντοχή των τοιχωμάτων, αλλά μειώνει σημαντικά την πλαστιμότητα και την απορρόφηση ενέργειας. Τα παραπάνω οφείλονται στον περιορισμό της ρηγμάτωσης καθ' ύψος και στη συγκέντρωση των βλαβών στη βάση του τοιχείου, λόγω της ύπαρξης διπλάσιου οπλισμού ανάντι της βάσης του τοιχείου, έστω και μη επαρκώς αγκυρωμένου. Επίσης, κατά την κάμψη λειτουργεί διπλάσιος οπλισμός ως θλιβόμενος από ότι ως εφελκυόμενος. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος μετά τη φάση διαρροής του οπλισμού προκύπτουν ασύμμετροι βρόχοι υστέρησης.

- xxiii) Ο U.B.C. υπερεκτιμά σαφώς τη διατμητική αντοχή των τοιχωμάτων καθώς θεωρεί υψηλή συμμετοχή του σκυροδέματος στην ανάληψη της τέμνουσας δύναμης.
- xxiv) Η θέσπιση από τον ελληνικό κανονισμό της θεώρησης δυσκαμψίας ίσης με την μισή αρχική σε δοκίμια που δεν φορτίζονται αξονικά, και των $2/3$ της αρχικής σε δοκίμια αξονικά φορτιζόμενα, κρίνεται ορθή από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας και βρέθηκε ότι ισχύει και για τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης 1.5 και 1.0
- xxv) Για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού ανάληψης τέμνουσας των τοιχωμάτων, μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούμε ανελαστικό ελατήριο τοποθετημένο μετά από παραμετρική ανάλυση σε κάποιο ύψος από τη βάση. Μέσω των ιδιοτήτων αυτού του ελατηρίου προσπαθούμε να περιγράψουμε την ανελαστική διατμητική συμπεριφορά των τοιχωμάτων. Αυτού του είδους η μοντελοποίηση κρίνεται σε όλη τη βιβλιογραφία ως ανεπαρκής.
- xxvi) Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι καλύτερο μοντέλο για την περιγραφή της ανελαστικής διατμητικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων είναι το μοντέλο Saatcioglu, που προβλέπει δύο επίπεδα διατμητικής διαρροής. Το επίπεδο διατμητικής διαρροής κατά τη μέγιστη αντοχή και το επίπεδο διατμητικής διαρροής με μικρότερη τέμνουσα δύναμη, που οφείλεται στην εξασθένηση κάποιου διατμητικού μηχανισμού να αναπτύξει τη μέγιστη αντοχή του. Αυτού του είδους το μοντέλο κρίνεται κατάλληλο για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού της ολίσθησης.
- xxvii) Για την καλύτερη προσομοίωση της ανελαστικής διατμητικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων πρέπει να τοποθετούμε οριζόντιο διατμητικό ελατήριο κάτω από άκαμπτη δοκό στη βάση του τοιχείου. Πάνω από αυτή τη δοκό πρέπει να βρίσκονται κατακόρυφα καμπτικά ελατήρια για την περιγραφή της κάμψης και οριζόντιο ελατήριο για την περιγραφή της διατμητικής ανελαστικής συμπεριφοράς του κορμού των τοιχωμάτων. Το ελατήριο της βάσης πρέπει να ενεργοποιείται, μόλις αρχίσει να υφίσταται παραμένουσα καμπτική παραμόρφωση. Δηλαδή, μόλις το μήκος της κρυφοκόλonaς υπό θλίψη αρχίσει να είναι μεγαλύτερο από το αρχικό. Το οριζόντιο ελατήριο θα έχει αντοχή ίση με την αντοχή της ρηγματωμένης διατομής της βάσης του τοιχείου σε διατμητική ολίσθηση.

12. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής κρίνεται σκόπιμο να γίνουν προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της καλύτερης γνώσης και της περαιτέρω βελτίωσης των μηχανικών αντισεισμικών ιδιοτήτων των τοιχωμάτων. Οι προτάσεις συνοψίζονται σε τέσσερα, προγράμματα που μπορούν να εκτελεστούν ανεξάρτητα μεταξύ τους :

- α) Πειραματικό πρόγραμμα με στόχο τη διερεύνηση της ικανότητας των διαμήκων οπλισμών διάτμησης των τοιχωμάτων να λειτουργήσουν ως βλήτρα σε περιοχές έντονης καμπτικής ρηγμάτωσης. Σε αυτές τις περιοχές εξαντλείται η αντοχή του παραπάνω οπλισμού λόγω αξονικού εφελκυσμού από κάμψη και δημιουργείται η απορία της απομένουσας ικανότητας του οπλισμού να λειτουργήσει ως βλήτρο. Από την παρούσα εργασία προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λειτουργία βλήτρου παύει να υφίσταται μετά από προχωρημένη καμπτική διαρροή (τοιχώματα με άνοιγμα διάτμησης 1.5).
- β) Πειραματικό πρόγραμμα με στόχο τη βαθμονόμηση των μεθόδων επισκευής τοιχωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος. Καθώς υπάρχουν τα δοκίμια προς επισκευή με καταγεγραμμένη τη συμπεριφορά τους, είναι πράγματι ενδιαφέρον να επισκευαστούν με διάφορες μεθόδους, οι οποίες θα βαθμονομηθούν με κριτήριο τη συμπεριφορά που καταγράφηκε για τα παρθενικά δοκίμια.
- γ) Πειραματικό πρόγραμμα με στόχο την εκμαίευση των μηχανικών ιδιοτήτων των τοιχωμάτων όχι με προκαθορισμένη ανακυκλιζόμενη φόρτιση στην κορυφή, αλλά με φόρτιση, οι μετατοπίσεις της οποίας θα επιβάλλονται σε πραγματικό χρόνο και θα προκύπτουν από καταγεγραμμένο επιταχυνσιογράφημα, κατάλληλα ενισχυμένο για να αστοχεί το τοίχωμα. Οι επιβαλλόμενες μετατοπίσεις θα προκύπτουν από την επίλυση της βασικής εξίσωσης της δυναμικής για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα ολοκλήρωσης, όπου σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης η δυσκαμψία θα είναι η μετρηθείσα δύναμη του προηγούμενου βήματος.
- δ) Αναλυτικό πρόγραμμα για την κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων, όπου θα εισαχθούν δύο κριτήρια, με βάση τα οποία θα ενεργοποιούνται ή θα καταργούνται αντίστοιχα, σκόπιμα τοποθετημένα οριζόντια διατμητικά ελατήρια για την προσομοίωση του μηχανισμού ολίσθησης τοιχωμάτων. Έτσι, όταν κατά τη θλίψη της ακραίας ίνας (λόγω ορθής έντασης) το μήκος της κρυφοκολόνας είναι μεγαλύτερο από το

αρχικό θα ενεργοποιείται το ελατήριο της ολίσθησης. Επίσης για την αντοχή του ελατηρίου πρέπει να θεσπιστεί κριτήριο για τον συνυπολογισμό ή όχι :

i) της αντοχής βλήτρου με βάση το βαθμό καμπτικής διαρροής του στροφικού ελατηρίου που προσομοιώνει την καμπτική συμπεριφορά του κορμού του τοιχείου

ii) της τριβής σκυροδέματος με βάση την ύπαρξη ή όχι δισδιαγώνιου οπλισμού.

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) ACI Committee 318 (1992) "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary (ACI 318R-89); revised 1995", ACI, Detroit, Michigan.
- 2) Agrawal, A.B., Jaeger, L.G. and Mufti, A.A. (1981) "Response of RC Shear Wall under Ground Motions", *Journal of the Structural Division, ASCE*, V. 107, No. ST2, pp. 395-411.
- 3) Aktan, A.E. and Bertero, V.V. (1985) "RC structural walls: Seismic design for shear". *J. Struct. Engineering, ASCE*, V. 111, No. 8, 1775-1791.
- 4) Aktan, A.E. and Bertero, V.V., "Seismic Response of R/C Frame-Wall Structures", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 110, No 8, August 1984, pp. 1803-1821.
- 5) Aktan, A.E., Bertero, V.V., Chowdhury, A.A. and Nagashima, T., "Experimental and Analytical predictions of the Mechanical Characteristics of a 1/5 Scale Model of a 7-Story R/C Frame-Wall Building Structure" *Report No UCB/EERC-83/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.*
- 6) Aktan, A.E., Bertero, V.V. and Piazza, M., "Prediction of the Seismic Responses of R/C Frame-Coupled Wall Structures", *Report No UCB/EERC-82/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1982.*
- 7) Alexander, C.M., Heidebrecht, A.C., and Tso, W.K., "Cyclic Load Tests on Shear Wall Panels", *5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, 1974, Vol. 1, pp. 1116-1119.*
- 8) Balakrishnan, S., and David W. Murray, "Concrete Constitutive Model for NLFE Analysis of Structures", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 114, Jul. 1988, pp. 1449-1466.

- 9) Balakrishnan, S., Elwi A. and David W. Murray, "Effect of Modeling on NLFE Analysis of Concrete Structures", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 114, Jul. 1988, pp. 1467-1487.
- 10) Barda, F., Hanson, J.M. and Corley, W.G., "Shear Strength of Low Rise Walls With Boundary Elements", *SP-53, American Concrete Institute*, Detroit, 1977, pp. 149-202.
- 11) Benjamin, J.R. and Williams, H.A., "The Behaviour of One-Storey Reinforced Concrete Shear Walls", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 83, March 1957, pp. 1-49.
- 12) Benjamin, J.R. and Williams, H.A., "Behaviour of One Storey reinforced Concrete Shear Walls Containing Openings", *ACI Journal*, Vol. 55, No 5, 1958, pp. 605-618.
- 13) Benjamin, J.R. and Williams, H.A., "Reinforced Concrete Shear walls Assemblies", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 86, No 8, August 1960, pp. 1-32.
- 14) Bertero, V.V., Popov, E.P. and Wang, T.Y., "Hysteretic Behaviour of Reinforced Concrete Concrete Flexural Members with Special Web Reinforcement", *Report No UCB/EERC-74/09, Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, 1974.
- 15) Bertero, V.V. and Popov, E.P., "Hysteretic Behaviour of Ductile Moment Resisting Reinforced Concrete Frame Components" *Report No UCB/EERC-75/16, Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, 1975.
- 16) Bertero, V.V., "State of the Art and Practice in Seismic Resistant Design of R/C Frame-Wall Structural Systems", *8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco 1984, Vol. V, pp. 613-620.
- 17) Bertero, V.V. (1980) "Seismic behavior of R/C wall structural systems", *Proceedings of 7th World Conf. on Earthq. Engng.*, Istanbul, Turkey, Sep. 1980, **6**, pp. 323-330.

- 18) Cardenas, A.E. and Magura, D., "Strength of High-Rise Shear Walls-Rectangular Cross Section", *SP-36, American Concrete Institute*, Detroit 1973, pp. 119-131.
- 19) Cardenas, A.E., Hanson, J.M., Corley, W.G. and Hognestad, E., "Design Provisions for Shear Walls", *ACI Journal*, Vol. 70, 1973, No 3, pp. 221-230.
- 20) Cardenas A.E., Russel, H.G. and Corley W.G., (1980) "Strength of Low Rise Structural Walls", *Publication SP-63, American Concrete Institute, Detroit*, pp. 221-241.
- 21) CEN Techn. Comm. 250 (1994) "Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 1: Basis of design (ENV 1991-1)", CEN, Brussels.
- 22) CEN Techn. Comm. 250 (1991) "Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General rules and rules for buildings (ENV 1992-1-1)", CEN, Brussels.
- 23) CEN Techn. Comm. 250 / SC8 (1994, 1995) "Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1: General rules (ENV 1998-1-1/2/3)", CEN, Brussels.
- 24) Clough, R.W. and Johnston, S.B., "Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements", *2nd Japan National Conference on Earthquake Engineering*, 1966, pp. 227-232.
- 25) Collins, M.P. and Mitchell, D., "Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams", *PCI Journal*, September-October 1980, Vol. 25, pp. 32-100.
- 26) Colotti, V. and Vulcano, A., "Behaviour of R/C Structural Walls Subjected to Severe Cyclic Loadings", (in Italian), *Procs. AICAP (Italian Association of Reinforced and Prestressed Concrete) Conference*, Stresa, Italy, 1987.
- 27) Divakar, M.P., Fafitis, A. and Shah, S.P., "Constitutive Model for Shear Transfer in Cracked Concrete", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 113, May 1987, pp. 1046-1062.

- 28) Elnashai, A.S., Pilakoutas, K. and Ambraseys, N.N., (1990) "Experimental Behaviour of Reinforced Concrete Walls Under Earthquake Loading", *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.19, pp. 389-407.
- 29) Elnashai, A.S., "Nonlinear Analysis of Composite Tubular Joints", *PhD Thesis*, University of London, 1984.
- 30) Elnashai, A.S., Pilakoutas, K. and Ambraseys, N.N., "Experimental Behaviour of Reinforced Concrete Walls Under Earthquake Loading", *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, No 3, April 1990, pp. 389-407.
- 31) Fiorato, A.E., Oesterle, R.G. and Corley, W.G., "Importance of Reinforcement Details in Earthquake Resistant Structural Walls", *Workshop on "Earthquake Resistant Reinforced Concrete Building Construction"*, University of California, Berkeley, 1977, Vol. III, pp. 1430-1451.
- 32) Fiorato, A.E., Oesterle, R.G. and Corley, W.G., "Ductility of Structural Walls for Design of Earthquake Resistant Buildings" *6th World Conference on Earthquake Engineering*, New-Delhi, 1977, Vol. 3, pp. 2797-2802.
- 33) Fukada, Y., "Study on the Restoring Force Characteristics of Reinforced Concrete Buildings" (*in Japanese*), *Kanto District Symposium, AIJ*, No 40, 1969, pp. 121-24.
- 34) Fukuzawa, R., Chiba, O., Hatori, T., Yagishita, K., Watabe, M., "Study on Load - Deflection Characteristics of Heavily Reinforced Concrete Shear Walls", *Proceedings of 9th World Conf. on Earthq. Engng.*, (Tokyo-Kyoto, Japan, Aug. 1988), Maruzen (Tokyo), **IV**, 517-522.
- 35) Goodsir, W.J., "The Design of Coupled Frame-Wall Structures for Seismic Actions", *PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch*, New Zealand, 1985.
- 36) Hernandez, O. and Zermeno, M. (1980) "Strength and behaviour of structural walls with shear failure", *Proceedings of 7th World Conf. on Earthq. Engng.*, Istanbul, Turkey, Sep. 1980, **4**, 121-124.

- 37) Hidalgo, P.A. and Jordan, R. M. (1996) "Strength and Energy Dissipation Characteristics of Reinforced Concrete Walls under Shear Failure", *11th World Conference on Earthquake Engineering* (Acapulco, Mexico, June 1996), Paper No. 816 (CD ROM Proceedings).
- 38) Hiraishi, H. et al. (1989) "Experimental study on seismic performance of multi-story shear walls with flanged cross-sections", *Proceedings of 9th World Conf. on Earthq. Engng.*, (Tokyo-Kyoto, Japan, Aug. 1988), Maruzen (Tokyo), **IV**, 553-558.
- 39) Hirashi, H., "Evaluation of Shear and Flexural Deformations of Flexural Type Shear Walls", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 17, No 2, June 1984, pp. 135-144.
- 40) Hirashi, H., "Evaluation of Shear and Flexural Deformations of Flexural Type Shear Walls", *8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, 1984, Vol. 5, pp. 677-685.
- 41) Hoedajanto, D., "Simple Model for Shear Response of R/C Panels", *9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto 1988, Vol. VI, pp. 29-34.
- 42) Huang, C. and Sheu, M.S., "Experimental and Theoretical Study on Aseismic Behaviour of Low-Rise R.C. Shear Walls", *9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto 1988, Vol. VI, pp. 35-40.
- 43) Hsu, T.T.C. and Mo, L.Y., "Softening of Concrete in Low-Rise Shearwalls", *ACI Journal*, Vol. 82, November-December 1985, pp. 883-889.
- 44) Hsu, T.T.C., Mau, S.T. and Chen, B., "Theory of Shear Transfer Strength of Reinforced Concrete", *ACI Journal*, Vol. 84, March-April 1987, pp. 149-160.
- 45) Iliya, R. and Bertero, V.V., (1980) "Effects of Amount and Arrangement of Wall - Panel Reinforcement on Hysteretic Behaviour of Reinforced Concrete Walls", *Report No UCB/EERC-80/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.*

- 46) Jimenez, R., White, R.N. and Gergely, P., "Cyclic Shear and Dowel Action Models in R/C", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 108, May 1982, pp. 1106-1123.
- 47) Kabeyasawa, H., Shiohara, H., Otani, S. and Aoyama, H., "Analysis of the Full-Scale Seven-Storey Reinforced Concrete Test Structure: Test PSD3", *3rd Joint Coordinating Committee Mtg of the US-Japan Cooperative Research Program*, BRI, Thukuba, Japan, 1982.
- 48) Kanaan, A.E. and Powell, G.H., "DRAIN-2D, A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Planar Structures", *Report No UCB/EERC-73/06, Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, 1973.
- 49) "Κανονισμός για τη μελέτη και κατασκευή έργων από σκυρόδεμα", Υ.ΠΕ.ΧΩ, Αθήνα, 1994.
- 50) Kappos, A.J. (1993) "RCCOLA-90: A microcomputer program for the analysis of the inelastic response of reinforced concrete sections", *ESEE Rep. 1996, I.C., London*.
- 51) Kotsovos, M.D., "Mechanisms of Shear Failure", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 35, No 123, 1983, pp. 99-106.
- 52) Kotsovos, M.D., 'Compressive Force Path Concept: Basics for Reinforced Concrete Ultimate Limit State Design', *ACI Journal*, Vol. 85, January-February 1988, pp. 68-75.
- 53) Lefas, I.D. and Kotsovos, M.D., (1990) "Strength and Deformation Characteristics of Reinforced Concrete Walls under Load Reversals", *ACI Journal*, Vol.87, pp.
- 54) Lefas, I.D. and Kotsovos, M.D., "Behaviour of Reinforced Concrete Structural Walls: a New Interpretation", *IABSE Colloquium on Computational Mechanics of Concrete Structures, Advances and ApplicationsΣ*, Delft 1987.

- 55) Lefas, I.D., (1988) "Behaviour of Reinforced Concrete Structural Walls", *Ph.D Thesis*, University of London.
- 56) Lefas, I.D., Katsovos, M.D. and Ambraseys, N.N., (1990) "Behaviour of Reinforced Concrete Structural Walls, Strength, Deformation Characteristics and Failure Mechanism", *ACI Journal*, Vol.87, pp. 23-30.
- 57) Lopes, Mario, (1991) "Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Walls with Low Shear Ratio", *Ph.D Thesis* Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
- 58) Ma, S.M., Bertero, V.V. and Popov, E.P., "Experimental and Analytical Studies of hysteretic Behaviour of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams", *Report No UCB/EERC-76/02, Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, 1976.
- 59) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 114, No 8, August 1988, pp. 1804-1826.
- 60) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Observed Stress-Strain Behaviour of Confined Concrete", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 114, No 8, August 1988, pp. 1804-1826.
- 61) Mo, Y.L., "Analysis and Design of Low-Rise Structural Walls Under Dynamically Applied Shear Forces", *ACI Journal*, Vol. 85, March-April 1988, pp. 180-189.
- 62) Moss, P.J., Carr, A.J. and Buchanan, A.H., "Seismic Response of Low Rise Buildings", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 19, No 3, September 1986, pp. 180-199.
- 63) Nakachi, T., Toda, T., Makita, T., "Experimental Study on Deformation Capacity of Reinforced Concrete Shear Walls After Flexural Yielding", *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*, Madrid, Spain, 1992, p.p. 3231-3236.

- 64) “Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός & Αιτιολογική Εκθεση”, Ο.Α.Σ.Π., Αθήνα, 1995
- 65) NZS 3101 (1995) “Concrete Structures Standard: Part 1-The Design of Concrete Structures”, *Standards Association of New Zealand*, Wellington, 1995.
- 66) NZS 4203:1984, “Code of Practice for General Structural Design and Design Loadings for Buildings”, *Standards Association of New Zealand*, Wellington, 1992.
- 67) Oesterle, R.G., Fiorato, A.E., Aristizabal - Ochoa, J.D. and Corley, W.G., (1980) “Hysteretic Response of Reinforced Concrete Structural Walls”, in: *ACISP-63: Reinforced Concrete Structures subjected to Wind and Earthquake Forces*, American Concrete Institute, Detroit, 243-273.
- 68) Oesterle, R.g., Aristizabal-Ochoa, J.D., Shiu, K.N. and Corley, W.G., “Web Crushing of Reinforced Concrete Walls”, *ACI Journal*, Vol. 81, May-June 1984, pp. 231-241.
- 69) Otani, S., “SAKE II A Computer Program for Inelastic Response of R/C Frames to Earthquakes”, *Civil Engineering Studies, Structural Research Series, Report No 413*, University of Illinois, Urbana, 1974.
- 70) Otani, S., “Hysteresis Model of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis”, *8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco 1984, Vol. IV, pp. 551-558.
- 71) Otani, S., Kabeyasawa, T., Shiohara, H and Aoyama, H. (1985) “Analysis of the Full Scale Seven Story Reinforced Concrete Test Structure” in *ACI SP-84: Earthquake Effects on Reinforced Concrete Structures*, ACI, Detroit, Mich., pp. 203-239.
- 72) Ozcebe, G. and Saatcioglu, M., “Hysteretic Shear Model for Reinforced Concrete Members”, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 115, No 1, January 1989, pp. 132-148.
- 73) Pantazopoulou, S. and Imran, I. (1992) “Slab-wall connections under lateral forces”, *ACI Struct. Journal*, **89** (5), 515-527.

- 74) Papanikolaou, K.V., Tegos, I.A., Penelis, G.G., (1992) “ A comparative study on the seismic performance of conventionally and non conventionally reinforced short members”, *International journal of European Earthquake Engineering*, February 1992, p.p. 45-53
- 75) Park, R. and Paulay, T. (1975) *Reinforced Concrete Structures*, J. Wiley & Sons, New York.
- 76) Paulay, T. (1980) “Earthquake-resisting shearwalls - New Zealand design trends”, *Journal of the ACI*, **77** (3), 144-152.
- 77) Park, Y.J., Reinhorn, A.M. and Kunnath, S.K., “IDARC: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame-Shear Wall Structures”, *Report No NCEER-87/0008, National Center for Earthquake Engineering Research*, State University of New York, Buffalo, 1987.
- 78) Paulay, T., Goodsir, J. W., “The ductility of structural walls”, *Bulletin of the New Zealand National Society For Earthquake Engineering*, Vol 18, No 3, September 1985, p.p. 250-268
- 79) Paulay, T., Priestley, M.J.N. and Syngé, A.J. (1982) “Ductility in Earthquake Resisting Squat Shear-walls”, *ACI Journal*, V.79, No. 4, 257-269.
- 80) Πενέλης, Γ.Γ. και Κάππος, Α. Ι. (1990) “Αντισεισμικές Κατασκευές από Σκυρόδεμα”, *Εκδόσεις Ζήτη*, Θεσσαλονίκη.
- 81) Penelis G.G. and A.J. Kappos (1997), “*Earthquake-resistant Concrete Structures*”, E & FN SPON (Chapman & Hall), London (592 pp).
- 82) Pilakoutas, K. “Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Walls”, *PhD Thesis*, University of London, 1990.
- 83) Popov, E.P., “Seismic Behaviour of Structural Subassemblages”, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 106, No ST7, July 1980, pp. 1451-1474.

- 84) Saatcioglu, M. (1991a) "Deformability of Reinforced Concrete Columns", in *ACI SP-127: Earthquake Resistant Concrete Structures: Inelastic Response and Design*, ACI, Detroit, Mich., pp. 421-452.
- 85) Saatcioglu, M. (1991b) "Hysteretic Shear Response of Low-rise Walls", in: *Concrete Shear in Earthquakes*, Elsevier, 105-114.
- 86) Salonikios, T., Tegos, J., Kappos, A., Penelis, G., "Cyclic shear behaviour of low slenderness R.C walls" *5th SECED conference on European Seismic Design and Practice*, 26-27 October 1996, Chester England.
- 87) Σαλονικιός, Θ., Τέγος, Ι., Πενέλης, Γ., Κάππος, Α., "Αντισεισμική συμπεριφορά τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με συμβατικές και μη συμβατικές διατάξεις όπλισης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση" *12ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος*, Λεμεσός 1996.
- 88) Salonikios, T., Tegos, I., Kappos, A. and Penelis, G. (1996) "Squat R/C walls under inelastic shear reversals", *11th World Conference on Earthquake Engineering* (Acapulco, Mexico, June 1996), CD ROM Proceedings, Pergamon, Paper No. 749.
- 89) Seible, F., Igarashi, A., "Full scale testing of masonry structures under simulated seismic loadings", J. Donea and P. M. Jones (eds.), *Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering*, 1991, p.p. 119-148
- 90) Sittipunt, C. and Wood, S.L. (1995) "Influence of Web Reinforcement on the Cyclic Response of Structural Walls", *ACI Struct. Journal*, V. 92, No. 6, Nov.-Dec. 1995, 745-756.
- 91) Smith, B.S. and Girgis, A., "Simple Analogous Frames for Shear Wall Analysis", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 110, No ST11, November 1984, pp. 2655-2666.
- 92) Στυλιανίδης, Κ., Παπανικολάου, Κ., Σαλονικιός, Θ. : "Νέο σύστημα ανακυκλιζόμενης φόρτισης του Εργαστηρίου Σιδηροπαγούς Σκυροδέματος Α.Π.Θ.", *11ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος*, Κέρκυρα 1994.

- 93) Takayanagi, T., Derecho, A.T. and Corley, W.G. (1979) "Analysis of Inelastic Shear Deformation Effects in Reinforced Concrete Structural Wall Systems", *Proceed. CSCE-ASCE-ACI-CEB Intern. Symp. on Nonlinear Design of Concrete Structures*, Univ. of Waterloo, Ontario, Canada, pp. 545-579.
- 94) Takahashi, J., Shibata, A., Shiga, T., "Crack Indices of Reinforced Concrete Shear Walls for Seismic Damage Evaluation", *9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto 1988, Vol. IV, pp. 547-552.
- 95) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N., "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 96, No ST12, 1970, pp. 2557-2573.
- 96) Tomii, M., Esaki, F., Mitsuyama, H., "Experimental Study to Increase Ductility of R/C Framed Shear Walls by Preventing Slip Failure of Monolithic Infilled Wall Panel (Confining Top and Bottom Portions of Edge Columns in Square Steel Tube)", *9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto 1988, Vol. IV, pp. 499-504.
- 97) Tassios, T.P. (1984) "Masonry, infill and R.C. walls under cyclic actions", *3rd CIB Intl. Symposium on Wall Structures*, Warsaw, Poland.
- 98) Tegos, I. and Penelis., G.G. (1988) "Seismic Resistance of Short Columns and Coupling Beams Reinforced with Inclined Bars", *ACI Journal*, Vol. 85, pp.82-88.
- 99) Tegos, I.A., Tsonos, A.G. and Penelis, G.G., (1988) "Seismic Resistance of Diagonally Reinforced Concrete Beam-Column Joints", *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo - Kyoto, Japan, Vol., pp.
- 100) Tsonos, A.G., Tegos, I.A. and Penelis, G.G., (1992) "Seismic Resistance of Type 2 Exterior Beam-Column Joints Reinforced with Inclined Bars", *ACI Journal*, Vol.89, No.1, pp. 3-12.
- 101) Uniform Building Code (1997) "Shear Walls, Diaphragms and Trusses", *Chapter 19, Division 2, Concrete, p.p.2-161, ICBO, California, U.S.A.*

- 102) Japan Joint Technical Coordinating Committee "Interim Summary Report on Tests of 7-story R.C. Building", *ASCE Journal*, Vol. 110, No. 10, October 1984, pp. 2393-2411.
- 103) Vallenias, J.M., Bertero, V.V. and Popov, E.R., "Hysteretic Behaviour of Reinforced Concrete Walls", *Report No UCB/EERC-79/20, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1979.*
- 104) Vecchio, F.J., "The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses", *Phd Thesis*, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1981.
- 105) Vecchio, F.J. and Collins, M.P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Journal*, Vol. 83, 1986, pp. 219-231.
- 106) Vecchio, F.J. and Collins, M.P., "Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory", *ACI Journal*, Vol. 85, 1988, pp. 258-268.
- 107) Vulcano, A. and Bertero, V.V., "Nonlinear Analysis of R/C Structural Walls", *8th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 6.5, Lisbon 1986, pp. 1-8.
- 108) Vulcano, A. and Bertero, V.V. (1987) "Analytical Models for predicting the Lateral Response of R C Shear Walls: Evaluation of their Reliability", *Rep. No. UCB/EERC-87/19*, Univ. of Calif. at Berkeley.
- 109) Vulcano, A., Bertero, V.V. and Colotti, V., "Analytical Modelling of R/C Structural Walls", *9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. VI, Tokyo-Kyoto 1988, pp. 41-46.
- 110) Wagner, T.M., Bertero, V.V. (1982) "Mechanical Behavior of Shear Wall Vertical Boundary Members: an Experimental Investigation", *Report No UCB/EERC-82/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.*

- 111) Wang, T.T., Bertero, V.V. and Popov, E.P., "Hysteretic Behaviour of Reinforced Concrete Framed Walls", *Report No UCB/EERC-75/23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.*
- 112) Wood, S.L., (1989) "Minimum Tensile Reinforcement Requirements in Walls" *ACI Journal* Vol.86, pp. 582-591.
- 113) Wood, S.L., (1990) "Shear Strength of Low-Rise Reinforced Concrete Walls", *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 1, pp. 99-107.
- 114) Wood, S.L. (1991) "Observed behavior of slender reinforced concrete walls subjected to seismic loading", in *ACI SP-127: Earthquake Resistant Concrete Structures: Inelastic Response and Design*, ACI, Detroit, Mich., 453-477.
- 115) Yanez, F.V., Park, R. & Paulay, T., "Seismic behaviour of walls with irregular openings", *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*, Madrid, Spain 1992, p.p. 3303-3308