

# Η φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού και το θεμελιώδες ερώτημα κατά την έναρξη της αντισεισμικής μελέτης

Ομιλία στο ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ, 23-02-2017

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Α.Π.Θ.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ομότιμος καθηγητής Δρ. Πολ. Μηχ. Ιωάννης Ε. Αβραμίδης



## Σημειώσεις ομιλίας

### ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 1

Στην περίπου 40-λεπτη αυτή παρουσίαση θα συζητήσουμε -και θα ξαναθυμηθούμε μαζί, διότι πρακτικά αυτά που θα πω τα γνωρίζετε- ορισμένα βασικά θέματα που συναρτώνται με ένα θεμελιώδες ερώτημα που πρέπει πάντα να τίθεται και να απαντάται κατά την έναρξη μιας αντισεισμικής μελέτης, το οποίο όμως ερώτημα στη συνήθη πράξη δεν τίθεται καν -για διάφορους λόγους-, παρόλο που η απάντηση στο ερώτημα αυτό έχει άμεση επίπτωση στην επιτελεσματικότητα της κατασκευής, δηλαδή στην αντισεισμική της επίδοση, στο πόσο καλά και με ποιόν τρόπο αντιστέκεται στον ισχυρό σεισμό σχεδιασμού. Ποιό είναι το ερώτημα αυτό; Θα το δούμε σε λίγο. Στον τίτλο δεν αναφέρεται σκοπίμως για να προκαλέσει την προσοχή σας.

Επίσης και η φωτογραφία που βλέπετε θέλει να επιστήσει την προσοχή σε ένα συγκεκριμένο θέμα, στο οποίο επίσης θα αναφερθώ παρακάτω, και που έχει να κάνει με τις ιδιότητες της αντοχής της κατασκευής από τη μια και της πλαστιμότητάς της από την άλλη.

### ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 2

Σύνοψη της πορείας της ομιλίας.

### ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 3

Αρχίζοντας υπενθυμίζω πολύ σύντομα ότι η σύγχρονη φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού βασίζεται σε ορισμένες διαπιστώσεις και εκτιμήσεις που αφορούν στην ιδιαιτερότητα της σεισμικής δράσης - έναντι των υπόλοιπων επιπονήσεων στις οποίες πρέπει να αντέξει μια κατασκευή. Οι ιδιαιτερότητες αυτές συνίσταται στα εξής:

(α) Οι πολύ υψηλές σεισμικές επιταχύνσεις που ενδέχεται να δεχθεί μια συγκεκριμένη κατασκευή έχουν σχετικά μικρή πιθανότητα εκδήλωσης κατά τη συμβατική διάρκεια ζωής της κατασκευής, λόγω της γενικώς μεγάλης γεωγραφικής διασποράς των υψηλών σεισμικών εντάσεων.

(β) Οι συντελεστές που καθορίζουν τη σεισμική απόκριση των κατασκευών είναι πολυάριθμοι και εν μέρει πιθανοτικού χαρακτήρα (άγνωστη η διεύθυνση του σεισμού, άγνωστο το ακριβές περιεχόμενο συχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης, άγνωστη η διάρκειά της, κ.ά.).

Για τους λόγους αυτούς χαρακτηρίζουμε τον σεισμό ως μία επιπόνηση τυχηματικού χαρακτήρα.

Στον *τυχηματικό* αυτό χαρακτήρα της σεισμικής δράσης στηρίζεται η άποψη, ότι ο καταστρεπτικός σεισμός θεωρείται ότι αποτελεί μία μάλλον σπάνια επιπόνηση ενός κάθε φορά πολύ μικρού ποσοστού του συνολικού αριθμού κτιρίων μιας χώρας.

### ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 4

Με βάση τις εκτιμήσεις αυτές μπορούμε να πούμε τα εξής:

- Καταρχάς, είναι σαφές, ότι η κατασκευή σεισμικά άτρωτων κτιρίων που να μην υφίστανται ποτέ καμία βλάβη είναι ανέφικτη. Με άλλα λόγια, **απόλυτη αντισεισμική προστασία** είναι ουτοπική.
- Δεύτερον, η απαίτηση να κατασκευάζονται όλα τα κτίρια, μιας χώρας ή μιας περιοχής, έτσι ώστε να αντέχουν *χωρίς καμία βλάβη* στον σεισμό σχεδιασμού, δηλαδή η απαίτηση κατασκευής

κτιρίων με **πλήρη αντισεισμική προστασία**, θεωρείται οικονομικά επαχθής, διότι θα απαιτούσε υπερβολική μεταφορά πόρων από άλλους τομείς ζωτικής σημασίας για το κοινωνικό σύνολο.

- Για τους λόγους αυτούς επιδιώκεται ένας συγκερασμός οικονομίας και ηθικής (διάβαζε: προστασία ανθρώπινης ζωής) και η επίτευξη ενός οικονομικά και ψυχολογικά αποδεκτού επιπέδου ασφάλειας, στα πλαίσια του οποίου εγκαταλείπεται για τις συμβατικές κατασκευές η επιδίωξη πλήρους αντισεισμικής προστασίας και γίνεται αποδεκτή η εμφάνιση βλαβών (**μερική αντισεισμική προστασία**). Πιο συγκεκριμένα, οι κατασκευές διακρίνονται σε ειδικές κατασκευές **υψηλού** κινδύνου και σε συνήθεις, συμβατικές κατασκευές **κανονικού** κινδύνου και η ασφάλεια κλιμακώνεται σε δύο επίπεδα.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 5

- Για κατασκευές **υψηλού κινδύνου** (όπως π.χ. συγκροτήματα ατομικών αντιδραστήρων, πετροχημικές εγκαταστάσεις με αποθήκες επικίνδυνων αερίων κ.ά.π.), δηλ. για κατασκευές των οποίων οι ενδεχόμενες βλάβες και πολύ περισσότερο η κατάρρευση θα είχαν πολύ αρνητικές συνέπειες για μία ευρύτερη περιοχή και ένα μεγάλο σύνολο ανθρώπων, εγείρεται γενικώς η απαίτηση της παντελούς αποφυγής βλαβών υπό τον σεισμό σχεδιασμού, δηλαδή απαιτείται πρακτικά ελαστική συμπεριφορά (→ **πλήρης** αντισεισμική προστασία).
- Αντίθετα, για κατασκευές **κανονικού κινδύνου** (όπως π.χ. κτίρια κατοικιών ή γραφείων, σχολεία, νοσοκομεία κ.ά.), δηλαδή για κατασκευές των οποίων οι βλάβες ή ακόμη και η κατάρρευση δεν έχουν ευρύτερες συνέπειες, αλλά περιορίζονται - το πολύ - στην άμεση γειτονία τους, εγκαταλείπεται η επιδίωξη πλήρους αντισεισμικής προστασίας και γίνεται αποδεκτή η εμφάνιση βλαβών. Αυτό σημαίνει ότι υπό τον σεισμό σχεδιασμού επιτρέπεται στην κατασκευή να εισέλθει στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς και να υποστεί μη αναστρέψιμες πλαστικές παραμορφώσεις (**μερική** αντισεισμική προστασία), οι οποίες όμως δεν πρέπει να οδηγήσουν στην άμεση κατάρρευσή της. Για **συμβατικές** δηλαδή κατασκευές καθορίζεται ένα χαμηλότερο επίπεδο αντισεισμικής ασφάλειας.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 6

Αποδεχόμαστε λοιπόν βλάβες. Αλλά με έναν συγκεκριμένο τρόπο, ο οποίος συνοψίζεται στις εξής κλασικές θεμελιώδεις απαιτήσεις, που βέβαια τις γνωρίζετε πολύ καλά:

- Για μικρής έντασης σεισμούς η κατασκευή πρέπει να παραμείνει *ελαστική* (χωρίς βλάβες).
- Για μέσης έντασης σεισμούς γίνονται αποδεκτές βλάβες, αλλά μόνο σε μη φέροντα στοιχεία.
- Για ισχυρούς σεισμούς (όπως είναι ο *σεισμός σχεδιασμού* με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 έτη) γίνονται αποδεκτές βλάβες και στον φ/ο, αλλά η πιθανότητα μερικής ή ολικής κατάρρευσης πρέπει να είναι επαρκώς μικρή.

Με την αποδοχή βλαβών, πιστεύεται ότι μπορεί να καταναλωθεί το **μεγαλύτερο** μέρος της εισερχόμενης στην κατασκευή σεισμικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτόν, επιτρέπεται μια σημαντική μείωση της μέγιστης επιτάχυνσης σχεδιασμού, δηλ. των σεισμικών φορτίων, διαιρώντας την διά του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ . Στον δικό μας ΕΑΚ λαμβάναμε συνήθως  $q=3.5$ .

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 7

Ας το δούμε και σε ένα γράφημα υπό μορφή φάσματος απόκρισης.

.....(επεξήγηση διαφάνειας)....

«Εξωλογιστική» σημαίνει ότι δεν γίνεται ανελαστική, μη γραμμική ανάλυση της κατασκευής. Όμως, βέβαια, διενεργούνται διάφοροι επί μέρους υπολογιστικοί έλεγχοι εξασφάλισης της ικανότητας του φ/ο να καταναλώσει τη σεισμική ενέργεια που δεν καλύπτεται υπολογιστικά.

...(σύντομη αναφορά των τριών ομάδων ελέγχων/μέτρων α., β., γ.).....

Αυτό που πρέπει να συγκρατήσουμε είναι ότι **«αποδοχή βλαβών»** σημαίνει ότι για να **παραλάβουμε τη σεισμική ενέργεια εκμεταλλευόμαστε τη διαθέσιμη πλαστιμότητα της κατασκευής**. Σε ποιόν βαθμό την εκμεταλλευόμαστε; Αυτό γίνεται φανερό από τον τρόπο με τον οποίο κάνουμε την ανάλυση του φ/ο.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 8

.....(επεξήγηση διαφάνειας).....

Το πόσο μπορούμε να μειώσουμε τα σεισμικά φορτία, σε τί βαθμο δηλαδή μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τη διαθέσιμη πλαστιμότητα του φ/ο, το καθορίζουν οι κανονισμοί. Δηλαδή οι κανονισμοί καθορίζουν τις μέγιστες τιμές που επιτρέπεται να λάβει το  $q$ , με το οποίο διενεργείται η ελαστική ανάλυση, χωρίς βεβαίως να απαγορεύουν την επιλογή μιας μικρότερης τιμής για το  $q$ , δηλ. ενός υψηλότερου επιπέδου αντισεισμικής ασφάλειας.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να κατανοηθεί - όχι μόνο από τον δομοστατικό μελετητή, αλλά και από τον εκάστοτε κύριο του έργου - ότι το χαμηλότερο αυτό επίπεδο αντισεισμικής ασφάλειας συμβατικών κατασκευών **καθορίζεται** από τους αντισεισμικούς κανονισμούς ως το **κατ' ελάχιστον επιτρεπτό**, χωρίς βεβαίως να απαγορεύεται η επιλογή ενός υψηλότερου επιπέδου αντισεισμικής ασφάλειας.

Οριακά μάλιστα, αν επιλεγεί  $q=1$ , η κατασκευή θα συμπεριφερθεί υπό τον σεισμό σχεδιασμού θεωρητικά πλήρως ελαστικά, χωρίς πλαστικοποιήσεις (βλάβες). Αυτό αντιστοιχεί στην πλήρη αντισεισμική προστασία που ανέφερα στην αρχή και η οποία αποτελεί από την πλευρά του κυρίου του έργου μία καταρχάς εύλογη απαίτηση. Για το κόστος της όποιας επιλογής θα μιλήσουμε λίγο αργότερα.

Πράγματι, οι νέες τάσεις αντισεισμικού σχεδιασμού που επικρατούν πλέον περιλαμβάνουν περισσότερο επίπεδα επιτελεστικότητας, όπως φαίνεται στην επόμενη διαφάνεια.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 9

Στη διαφάνεια αυτή βλέπουμε τα 4 επίπεδα επιτελεστικότητας που προβλέπουν ορισμένοι αμερικανικοί κανονισμοί.

Βλέπουμε επίσης στο κάτω μέρος τα 3 επίπεδα επιτελεστικότητας που προβλέπει ο δικός μας ΚΑΝΕΠΕ.

Οι κανονισμοί αυτοί **δεν** αφορούν προσώρας στο σχεδιασμό νέων κατασκευών, αλλά στην αποτίμηση ή στον ανασχεδιασμό υφιστάμενων κατασκευών.

Σε αντιπαράθεση, ο ΕΑΚ και ο ΕΚ8 αναφέρονται ρητά μόνο στην Προστασία ζωής, δηλ. καθορίζουν έναν μόνο συγκεκριμένο στόχο σχεδιασμού ή επίπεδο αντισεισμικής επίδοσης ή επιτελεστικότητας. Όπως όμως ήδη ανέφερα, δεν εμποδίζει κανείς τον κύριο του έργου να απαιτήσει μεγαλύτερη αντισεισμική ασφάλεια, δηλαδή να επιβάλει μια μικρότερη τιμή για τον συντελεστή  $q$ .

Η ιδέα αυτή ενός αντισεισμικού σχεδιασμού με βάση την επιθυμητή επίδοση της κατασκευής (performance based design), δηλ. την επιθυμητή επιτελεστικότητά της, θεωρώ βέβαιο ότι θα επηρεάσει σημαντικά την εξέλιξη και του ΕΚ8 κατά τα επόμενα χρόνια.

Ας δούμε αυτή τη διαβάθμιση των στόχων σχεδιασμού υπό μορφή ενός διαγράμματος → επόμενη διαφάνεια.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 10

.....(επεξήγηση διαγράμματος).....

Βλέπουμε ότι όταν ο στόχος σχεδιασμού είναι «Προστασία ζωής», τότε η εκμετάλλευση της διαθέσιμης πλαστιμότητας οδηγεί τον φ/ο βαθιά στην ανελαστική περιοχή.

Στο σημείο αυτό θέλω να τονίσω η πολυσυζητημένη πλαστιμότητα μιας κατασκευής ο/σ είναι πρακτικά αυτό που παλιά ονομάζαμε -με κάπως μεταφυσικό τρόπο- το **«φιλότιμο» του μπετόν**. Η πλαστιμότητα υπήρχε πάντα σε κάποιο βαθμό στις κατασκευές μας, απλώς παλαιότερα δεν την αξιοποιούσαμε ρητά στις μελέτες μας. Σήμερα βρίσκεται στο επίκεντρο της προσοχής μας και καλώς κάνει. Όμως, αν και είναι πάντα ζητούμενη, από μόνη της δεν αρκεί. Η αντισεισμική ασφάλεια απαιτεί καταρχάς επαρκή και κατάλληλα κατανεμημένη δυσκαμψία, και επαρκή και κατάλληλα κατανεμημένη αντοχή. Και πέραν αυτών απαιτεί βέβαια και πλαστιμότητα. Και αυτό

είναι το «μήνυμα» που θέλει να περάσει η φωτογραφία της ακόλουθης διαφάνειας που την είδαμε και στην αρχή (→επόμενη διαφάνεια).

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 11

Το κτίριο (ακριβέστερα: το πλαίσιο της πλευράς που βλέπουμε) είναι πλάστιμο, πλαστιμότατο. Και όμως κατέρρευσε. Προφανώς ο συνολικός φορέας είχε έλλειμα δυσκαμψίας ή/και αντοχής.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 12

Ας κάνουμε μια σύντομη ανακεφαλαίωση των όσων είπαμε μέχρι τώρα.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 13

Απομένει να συζητήσουμε τα εξής.....

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 14

Στο σημείο αυτό ας θυμηθούμε και πάλι τον δικό μας ΕΑΚ-2000.

Η ιδέα ενός αντισεισμικού σχεδιασμού με βάση την επίδοση (performance based design) **υπήρχε εν σπέρματι, υπό απλοποιημένη μορφή, και στον ΕΑΚ-2000**, όπου η απλοποιημένη μορφή επιλογής του επιπέδου επιτελεσματικότητας γινόταν με την επιλογή του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  (και σε ένα κατά πολύ μικρότερο βαθμό στην επιλογή του *συντελεστή σπουδαιότητας*).

Ο ΕΑΚ καθορίζει καταρχάς τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του  $q$ , οι οποίες αντιστοιχούν στο χαμηλότερο επιτρεπτό επίπεδο αντισεισμικής προστασίας, και οι οποίες βέβαια δεν είναι υποχρεωτικές. Για συνήθεις κατασκευές από Ο/Σ η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ήταν το  $q=3.5$ , που αντιπροσωπεύει το επίπεδο αντισεισμικής επίδοσης «προστασία ζωής», στα πλαίσια του οποίου γίνονται αποδεκτές μέχρι και σημαντικές βλάβες, χωρίς μάλιστα να αποκλείεται παντελώς η κατέρρευση. Πρόκειται προφανώς για την ελάχιστη επιτρεπτή επιτελεσματικότητα.

Ο ΕΑΚ-2000 δίνει όμως και η δυνατότητα επιλογής μικρότερων τιμών για το  $q$ , δηλαδή υψηλότερων επιπέδων αντισεισμικής επίδοσης. Ρητά μάλιστα αναφέρει τις τιμές :

$q=1.5$  ή  $\max q/2$  (συνήθως  $3,5/2=1,75$ ) [ελεγχόμενες βλάβες μικρής έκτασης και επισκευάσιμες], και  $q=1$  [πολύ περιορισμένες ή μηδενικές βλάβες, άμεση χρήση, υψηλή επιτελεσματικότητα]

Μάλιστα, στις περιπτώσεις αυτές δεν απαιτούνται ικανοτικοί έλεγχοι για την εξασφάλιση αξιόπιστου ελαστοπλαστικού μηχανισμού, ακριβώς επειδή η κατασκευή υπό τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να εισέλθει ελάχιστα ή και καθόλου στην ανελαστική περιοχή.

Οι δύο πρώτες επιλογές αντιστοιχούν προφανώς σε μερική αντισεισμική προστασία, ενώ η τελευταία σε πλήρη αντισεισμική προστασία, με την έννοια πάντοτε της θεωρητικά ελαστικής συμπεριφοράς υπό τον σεισμό σχεδιασμού.

Μετά την υπενθύμιση αυτή, ας επανέλθουμε στο θεμελιώδες ερώτημα: Μελέτη **χωρίς** ή **με** εκμετάλλευση της πλαστιμότητας; Και αν **με**, τότε πόση;

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 15

Αν η απάντηση είναι **χωρίς**, αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση θα γίνει για σχετικώς **μικρές** τιμές του  $q$ . Συνεπώς τα σεισμικά φορτία θα είναι σχετικώς μεγάλα και θα οδηγήσουν σε σχετικώς μεγάλες διατομές και αντίστοιχη όπλιση των δομικών στοιχείων. Συνολικά η κατασκευή θα έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία, θα έχει μεγαλύτερη αντοχή και υπό τον σεισμό σχεδιασμού θα υποστεί σχετικά μικρές ή και καθόλου βλάβες, δηλ. θα είναι κατασκευή **υψηλής σεισμικής επίδοσης ή επιτελεσματικότητας**. Στην περίπτωση αυτή **δεν απαιτείται** οπωσδήποτε η λήψη ιδιαίτερων πρόσθετων μέτρων εξασφάλισης της πλαστιμότητας της κατασκευής (Σημ.: Υπενθυμίζεται ότι κάθε κατασκευή διαθέτει εγγενή ή «φυσική» πλαστιμότητα κάποιου βαθμού, καθώς και υπεραντοχή κάποιου βαθμού). Εντούτοις, είναι βεβαίως στη διακριτική ευχέρεια του ιδιοκτήτη - και συνιστάται ενθέρμως - να απαιτήσει επιπλέον τον εφοδιασμό της κατασκευής με το επιθυμητό επίπεδο

πλαστιμότητας, η οποία θα αποτελέσει πρόσθετη εφεδρεία για την περίπτωση υπέρβασης του σεισμού σχεδιασμού.

Αν η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι **ΜΕ**, αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση θα γίνει για σχετικώς **μεγάλες** τιμές του  $q$ . Συνεπώς τα σεισμικά φορτία θα είναι μικρότερα (από εκείνα της προηγούμενης περίπτωσης) και θα οδηγήσουν σε σχετικώς μικρότερες διατομές και μικρότερους οπλισμούς των δομικών στοιχείων. Συνολικά η κατασκευή θα γίνει πιο εύκαμπτη, θα έχει μικρότερη αντοχή και υπό τον σεισμό σχεδιασμού θα υποστεί μεγαλύτερες βλάβες, δηλ. θα είναι κατασκευή **χαμηλής σεισμικής επίδοσης ή επιτελεστικότητας**. Στην περίπτωση αυτή **απαιτείται** οπωσδήποτε η λήψη ιδιαίτερων μέτρων εξασφάλισης εκείνου του επιπέδου διαθέσιμης πλαστιμότητας της κατασκευής που κατ' ελάχιστον αντιστοιχεί στο μέγεθος του επιλεγέντος συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ .

**Αυτό που οπωσδήποτε πρέπει να συνειδητοποιηθεί είναι το εξής:**

(1) Η ύπαρξη διαθέσιμης πλαστιμότητας σε μία κατασκευή δεν σημαίνει ότι θα πρέπει οπωσδήποτε να την εκμεταλλευτούμε για την παραλαβή του σεισμού σχεδιασμού (μειώνοντας τα σεισμικά φορτία). Μπορούμε να την αφήσουμε π.χ. ως εφεδρεία για τυχόν υπέρβαση του σεισμού σχεδιασμού.

(2) Η μη απαίτηση πλαστιμότητας δεν σημαίνει έλλειψη πλαστιμότητας και ψαθυρή κατασκευή. Το ότι δεν γίνεται εκμετάλλευση της πλαστιμότητας δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει πλαστιμότητα. Υπενθυμίζω και πάλι: Παλιότερα δεν γινόταν ρητή εκμετάλλευση της πλαστιμότητας. Υπήρχε όμως πάντα η **εγγενής πλαστιμότητα του Ο/Σ**, την οποία τότε ονομάζαμε «**το φιλότιμο του μπετόν**», και η οποία έσωσε πολλές κατασκευές.

Για να εμπεδώσουμε τα προηγούμενα ας δούμε και αυτό το διάγραμμα → διαφάνεια 16.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 16

Στο σχήμα αυτό συνοψίζονται οι επιπτώσεις της αρχικής απόφασης για το επίπεδο επιτελεστικότητας, δηλ. για την τιμή του  $q$ , και φαίνονται απλουστευμένα υπό μορφή διαγράμματος σε όρους «αντοχής - παραμόρφωσης» (ή «τέμνουσας βάσης - οριζόντιας μετατόπισης») οι πιθανοί τρόποι απόκρισης **3 διαφορετικών κατασκευών** σε σεισμούς μικρής, μέσης και μεγάλης έντασης, καθώς και σε σεισμούς που υπερβαίνουν τον σεισμό σχεδιασμού:

Για μικρής έντασης σεισμούς και οι τρεις κατασκευές Α, Β και Γ συμπεριφέρονται ελαστικά (μηδενικές βλάβες στον  $\varphi/\sigma$ , σημεία  $A_1, B_1, \Gamma_1$ ).

Για μέσης έντασης σεισμούς οι υψηλής αντοχής κατασκευές Β και Γ παραμένουν ελαστικές (σημεία  $B_2, \Gamma_2$ ), ενώ η χαμηλότερης αντοχής κατασκευή Α εισέρχεται στην πλαστική περιοχή (σημείο  $A_2$ ).

Υπό τον μεγάλη έντασης **σεισμό σχεδιασμού** οι υψηλής αντοχής κατασκευές Β και Γ εξακολουθούν να συμπεριφέρονται ελαστικά (σημεία  $B_3, \Gamma_3$ ), ενώ η χαμηλότερης αντοχής κατασκευή Α εισέρχεται βαθύτερα στην πλαστική περιοχή, χωρίς όμως να καταρρεύσει, αφού διαθέτει επαρκή πλαστιμότητα (σημείο  $A_3$ ). Η αξιοποίηση της πλαστιμότητάς της συνεπάγεται βεβαίως ένα αντίστοιχο επίπεδο βλαβών (διαρροών, πλαστικοποιήσεων).

Τέλος, στην περίπτωση υπέρβασης του σεισμού σχεδιασμού, μόνο η υψηλής αντοχής και υψηλής πλαστιμότητας κατασκευή Γ έχει πιθανότητες αποφυγής της κατάρρευσης.

Είναι βέβαια σαφές ότι η επιλογή μεγαλύτερης επιτελεστικότητας αυξάνει το κόστος της κατασκευής, για το οποίο θα μιλήσουμε στη συνέχεια.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 17

Τώρα περί του πρακτέου: Είναι σαφές ότι το στοχευόμενο επίπεδο αντισεισμικής επίδοσης (επιτελεστικότητας) το καθορίζει ο κύριος του έργου, ο ιδιοκτήτης, αυτός που πληρώνει.

Εφόσον γίνεται χρήση ισοδύναμων γραμμικών (ελαστικών) μεθόδων ανάλυσης ακόμη και κατασκευές που προβλέπεται να εισέλθουν στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς, η επιλογή του επιπέδου επίδοσης γίνεται ουσιαστικά μέσω της επιλογής του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ .

Όσο πιο μικρό το  $q$ , τόσο μεγαλύτερα τα φορτία υπολογισμού, και άρα τόσο στιβαρότερη η κατασκευή, κάτι που σημαίνει περισσότερα κυβικά σκυροδέματος και περισσότερα κιλά χάλυβα. Καλή λοιπόν η υψηλότερη επιτελεστικότητα όταν επιλέγουμε  $q=1$ , αλλά μήπως έτσι εκτοξεύεται το κόστος κατασκευής σε δυσθεώρητα ύψη;

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 18

Για να απαντηθεί τεκμηριωμένα το ερώτημα αυτό, είχαμε διεξάγει προ πολλών ετών μια οικονομοτεχνική μελέτη με χρηματοδότηση μάλιστα του ΟΑΣΠ. Μελετήθηκε παραμετρικά ένα πολύ μεγάλο πλήθος φορέων ο/σ, αμιγώς πλαισιακοί, μικτοί, τοιχωματικοί, για διάφορους αριθμούς ορόφων και σε διάφορες περιοχές σεισμικής επικινδυνότητας και για διάφες τιμές του  $q$ . Κάποια βασικά, συγκεντρωτικά αποτελέσματα βλέπουμε στον πίνακα αυτόν.

Για σχεδιασμό με  $q=1$  οι μεταβολές κόστους κυμαίνονται στη μεν ζώνη Σ.Ε. I από 5% έως 8.5%, στις δε ζώνες II και III από 14.5% έως 22%.

Για σχεδιασμό με  $q=1.5$ , για τον οποίο σύμφωνα με τον ΕΑΚ-2000 δεν απαιτείται ικανοτικός σχεδιασμός, οι μεταβολές κόστους μειώνονται στη μεν ζώνη Σ.Ε. I από 4% έως 5.5 %, και στις ζώνες II και III από 11% έως 15%.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ανατρέπουν την ακόμη και σήμερα (2017) διαδεδομένη -αλλά ατεκμηρίωτη- αντίληψη, ότι ο σχεδιασμός κατασκευών με τρόπο που υπό τον σεισμό σχεδιασμού να παραμένουν στην ελαστική περιοχή οδηγεί σε πολλαπλάσιο, απαγορευτικά υψηλό κόστος έναντι ενός 'ελαστοπλαστικού' σχεδιασμού με  $q=3.5$  (που συνεπάγεται βλάβες υπό τον σεισμό σχεδιασμού, χωρίς παράλληλα να αποκλείει παντελώς την κατάρρευση!).

Όπως τεκμηριώθηκε με τη διενεργηθείσα οικονομοτεχνική έρευνα, η αύξηση του συνολικού κόστους κατασκευής για πλήρη αντισεισμική προστασία κάθε άλλο παρά υπέρογκη είναι, χωρίς μάλιστα να ληφθεί υπόψη το κόστος των μετασεισμικών επισκευών, το κόστος μεταστέγασης, μεταφοράς δραστηριοτήτων, η προκύπτουσα κοινωνική αναστάτωση, το κόστος περιθάλψης τραυματιών κ.λ.π..

Όλως ιδιαιτέρως ισχύει αυτό για τη ζώνη I. Πρόκειται πιστεύω για μία αύξηση του κόστους, την οποία οι περισσότεροι ιδιοκτήτες θα αποδέχονταν σήμερα ευχαρίστως, γνωρίζοντας τα σημαντικά πλεονεκτήματα της 'πλήρους' αντισεισμικής προστασίας.

Με βάση όλα αυτά θα ήθελα να κάνω την εξής σύσταση-πρόταση:

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 19

Είναι μία πρόταση υπέρ της επιλογής της **πλήρους ή σχεδόν πλήρους** αντισεισμικής επίδοσης. Διότι .....(→ επόμενη διαφάνεια).

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 20

Διότι με την πλήρη ή σχεδόν πλήρη αντισεισμική προστασία ( $q \leq 1.75$ ) ικανοποιείται το κοινωνικό αίτημα αποφυγής θυμάτων και οικονομικά δυσβάστακτων ζημιών τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο.

Και θα ήθελα να τελειώσω προβάλλοντας αυτήν την εντυπωσιακή φωτογραφία, που νομίζω ότι συμπυκνώνει σε μια εικόνα σχεδόν το σύνολο των προβλημάτων – τεχνικών (βλ. πίσω την βλαβείσα κατασκευή), αλλά και κοινωνικών και οικονομικών. Μια εικόνα – χίλιες λέξεις!

Και για να μην τελειώσουμε θλιβερά, ας δούμε και μία ακόμη φωτογραφία από ένα ρεπορτάζ σε εφημερίδα του 1978 .....(επόμενη διαφάνεια).

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 21

.... όπου ο καλός δημοσιογράφος μας υπενθυμίζει, κι ας μην το θεωρήσουμε αυτό ασέβεια, ότι μόνον ο αγιασμός δεν μπορεί να μας σώσει. Πρέπει κι εμείς κάπως να φροντίσουμε τα του οίκου μας.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 22

### Βιβλιογραφία

Το υλικό των διαφανειών αντλήθηκε εν μέρει από τα εξής συγγράμματα:

Αβραμίδης Ι. Ε., Αθανατοπούλου Α., Μορφίδης Κ., Σέξτος Α. "Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων Ο/Σ και Αριθμητικά παραδείγματα ανάλυσης & διαστασιολόγησης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες", Εκδ.: Αυτοέκδοση των συγγραφέων, ISBN 978-960-6706-00-4, Θεσσαλονίκη, 2011.

Avramidis, I., Athanatoroulou, A., Morfidis, K., Sextos, A., Giaralis, A. "*Eurocode-Compliant Seismic Analysis and Design of R/C Buildings - Concepts, Commentary and Worked Examples with Flowcharts*", SPRINGER, Series: Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Vol. 38, Hardcover ISBN 978-3-319-25269-8, Series ISSN 1573-6059; eBook ISBN 978-3-319-25270-4; DOI 10.1007/978-3-319-25270-4), Jan. 2016.