

Αβραμίδη Ι. Ε., Αναστασιάδης Κ., Αθανατοπούλου Α., Καταβέλος Α.

"Ο μύθος του επαχθούς κόστους αντισεισμικών κατασκευών που μελετώνται για ελαστική συμπεριφορά υπό τον σεισμό σχεδιασμού"

14^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως, 15-17 Οκτ. 2003.

Ο μύθος του επαχθούς κόστους αντισεισμικών κατασκευών που μελετώνται για ελαστική συμπεριφορά υπό τον σεισμό σχεδιασμού

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναπτύσσεται και τεκμηριώνεται τεχνικο-οικονομικά με χρήση αριθμητικών παραδειγμάτων ένα νέο κανονιστικό πλαίσιο που περιλαμβάνει τα ακολουθα τρία επίπεδα αντισεισμικής προστασίας των κτιρίων υπό τον σεισμό σχεδιασμού:

- Πλήρης αντισεισμική προστασία χωρίς απαίτηση ανελαστικών παραμορφώσεων υπό τον σεισμό σχεδιασμού ($q_1=1$, $F_{y1}=F_{ελ1}$),
- Μερική αντισεισμική προστασία με απαίτηση περιορισμένων ανελαστικών παραμορφώσεων υπό τον σεισμό σχεδιασμού ($q_2=0.5 q_{max}$, $F_{y2}=F_{ελ2} / 0.5 q_{max}$),
- Μερική αντισεισμική προστασία με απαίτηση εκτεταμένων ανελαστικών παραμορφώσεων υπό τον σεισμό σχεδιασμού ($q_3=q_{max}$, $F_{y3}=F_{ελ3} / q_{max}$).

Η κατασκευαστική υλοποίηση των δύο πρώτων από τα παραπάνω επίπεδα στηρίζεται είτε (α) στην εκτεταμένη χρήση τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε (β) σε σταθμισμένη χρήση τοιχωμάτων και ταυτόχρονη αύξηση των διατομών και οπλισμών των υποστυλωμάτων. Το τρίτο επίπεδο προστασίας ταυτίζεται ουσιαστικά με το ισχύον σήμερα. Για τα προτεινόμενα επίπεδα αντισεισμικής προστασίας διενεργήθηκε τεχνικο-οικονομική διερεύνηση με στόχο την διαπίστωση της προκύπτουσας αύξησης του συνολικού κόστους κατασκευής των κτιρίων. Στους παράγοντες που διερευνήθηκαν συμπεριλαμβάνονται: η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας, το είδος του φέροντος οργανισμού (αμιγώς πλαισιακός, μικτός), η θέση του συνήθως υπάρχοντος πυρήνα στην κάτοψη (κέντρο, γωνία), το πλήθος των ορόφων και η ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης. Από την παραπάνω τεχνικο-οικονομική διερεύνηση προέκυψε ότι η επικρατούσα, αν και ατεκμηρίωτη βιβλιογραφικώς, άποψη περί υψηλού ή και απαγορευτικού κόστους αντισεισμικών κατασκευών που μελετώνται για ελαστική συμπεριφορά υπό τον σεισμό σχεδιασμού είναι λανθασμένη. Το πρόσθετο κόστος για μία κατασκευή που σχεδιάζεται για $q=1$, δηλ. έτσι ώστε να μην υποστεί βλάβες υπό τον σεισμό σχεδιασμού, έναντι ενός σχεδιασμού για $q=3.5$ (δηλ. αποδοχή βλαβών) όχι μόνον δεν είναι απαγορευτικό, αλλά κυμαίνεται σε σχετικώς χαμηλά επίπεδα (αύξηση της τάξεως από 3% έως 22% επί του συνολικού κόστους κατασκευής στις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας I έως IV αντίστοιχα). Η αύξηση αυτή γίνεται κατά κανόνα εύκολα αποδεκτή από τον κύριο του έργου δεδομένων των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρέχει ο σχεδιασμός για $q=1$.

1 ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ: ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗ - ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Εύλογη επιθυμία και απαίτηση κάθε πολίτη από ένα αντισεισμικό κτίριο είναι η προστασία τόσο του ίδιου του κτιρίου από ανεπιθύμητες βλάβες (προστασία κατασκευής), όσο και η προστασία της ζωής του από ενδεχόμενη κατάρρευση (προστασία ζωής). Κανένας πολίτης δεν θα ήθελε την από δικαιολογημένο φόβο εγκατάλειψη της κατοικίας του λόγω εκτεταμένων ρηγματώσεων μετά τον σεισμό και την εν συνεχεία δαπανηρή επισκευή της· ακόμη περισσότερο δεν θα ήθελε την κατεδάφιση της κατοικίας του λόγω μη επισκευασιμότητας και φυσικά δεν

συζητείται καθόλου η τραγική περίπτωση της κατάρρευσης κατά τον σεισμό με αναπόφευκτους θανάτους ανθρώπων.

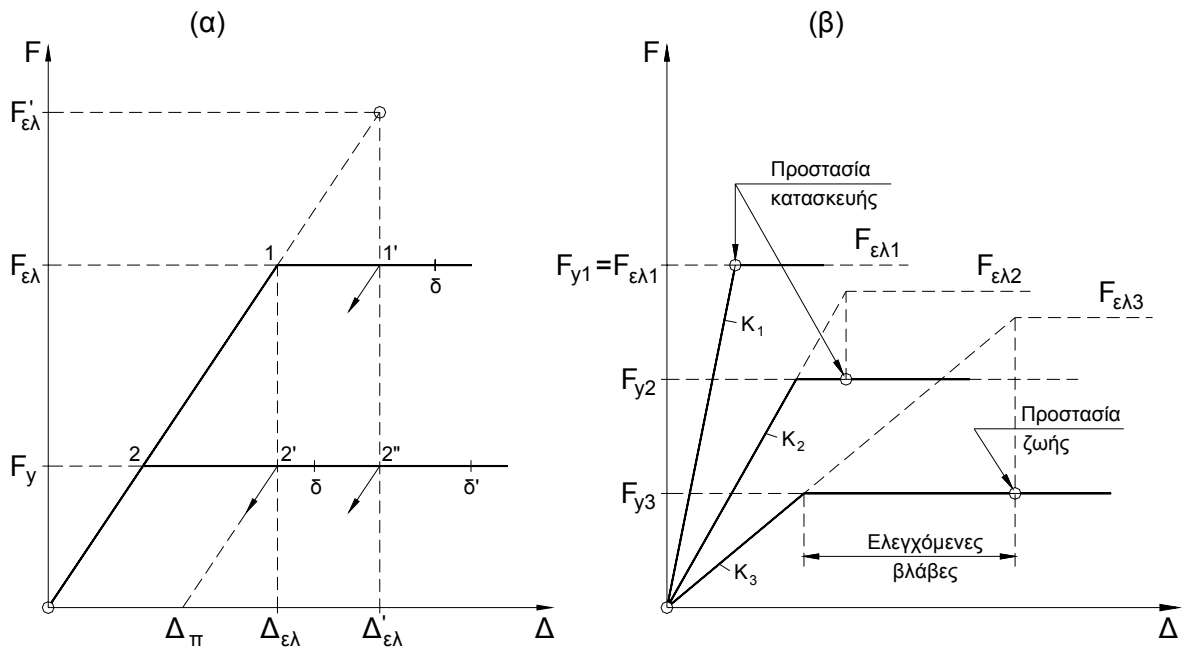
Εντούτοις, οι αντισεισμικοί κανονισμοί δεν ικανοποιούν τις παραπάνω εύλογες απαιτήσεις του κοινωνικού συνόλου, ιδιαίτερα ως προς το σκέλος της "προστασίας κατασκευής", αλλά εν μέρει και ως προς το σκέλος της "προστασίας ζωής". Πράγματι, η προστασία των μη φέροντων στοιχείων (π.χ. τοίχων) προβλέπεται μόνον για σεισμούς της καθημερινότητας, 2.5 φορές μικρότερους από τον σεισμό σχεδιασμού (άρθρο 4.2.2.[2] του ΕΑΚ-2000). Επομένως, υπό τον σεισμό σχεδιασμού είναι δυνατόν να εμφανιστούν εκτεταμένες ρηγματώσεις ή/και καταρρεύσεις των τοίχων πλήρωσης με αποτέλεσμα την προσωρινή εγκατάλειψη του κτιρίου και την εν συνεχεία δαπανηρότατη επισκευή του.

Αλλά ούτε και των φερόντων στοιχείων προβλέπεται η προστασία από βλάβες υπό τον σεισμό σχεδιασμού. Εκείνο που προβλέπεται για τα στοιχεία αυτά είναι η λήψη ειδικών μέτρων πλαστικής συμπεριφοράς (ικανοτικός σχεδιασμός, αξιόπιστος πλαστικός μηχανισμός διαρροής), ώστε να υποστούν "περιορισμένες και επιδιορθώσιμες βλάβες" και κατά συνέπεια η πιθανότητα κατάρρευσης του κτιρίου να είναι "επαρκώς μικρή" (βλ. άρθρα 1.2.1, 1.3.1 και αντίστοιχα σχόλια του ΕΑΚ-2000). Τελικά, υπό τον σεισμό σχεδιασμού, η μεν "προστασία κατασκευής" δεν αποτελεί κύριο μέλημα, η δε "προστασία ζωής" επιδιώκεται να επιτευχθεί υπό καθεστώς ελεγχόμενων βλαβών στα φέροντα στοιχεία, χάρη στην ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσής τους. Αυτό σημαίνει, με άλλα λόγια, ότι θα είναι αναπόφευκτη η λόγω πολλών ρηγματώσεων προσωρινή εγκατάλειψη των κτιρίων και η εν συνεχεία δαπανηρότατη επισκευή των βλαβών. Δεν αποκλείεται, βέβαια, και η κατεδάφιση λόγω μεγάλου κόστους επισκευής ή ακόμη και η κατάρρευση κατά τον σεισμό λόγω πιθανών κακοτεχνιών και άλλων αστάθμητων παραγόντων. Η εικόνα αυτή επιβαρύνεται ακόμη περισσότερο σε περίπτωση υπέρβασης του σεισμού σχεδιασμού, διότι τα μεν αποθέματα αντοχής είναι εξαντλημένα ούτως ή άλλως, τα δε αποθέματα πλαστιμότητας -αν υπάρχουν- θα είναι περιορισμένα.

Η προηγούμενη αναντιστοιχία μεταξύ αντισεισμικών κανονισμών και κοινωνικών απαιτήσεων οφείλεται σε οικονομικούς λόγους. Πιστεύεται, δηλαδή, ότι το κόστος αύξησης της αντοχής όλων των κτιρίων ώστε να μην εισέρχονται στην πλαστική περιοχή συμπεριφοράς υπό τον σεισμό σχεδιασμού (και άρα να μην εμφανίζουν βλάβες) είναι δυσανάλογα μεγάλο συγκριτικά με το κόστος επισκευής ενός μέρους των κτιρίων που θα απαιτηθεί να επισκευασθούν· επίσης, ακόμη και οι ανθρώπινες απώλειες από σεισμό είναι πολύ λιγότερες από τις απώλειες από άλλα αίτια (π.χ. τροχαία). Όμως σε συγκρίσεις αυτού του είδους απαιτείται να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες (υπερσυγκέντρωση πληθυσμού, δραστηριοτήτων και αξιών σε μεγάλα αστικά κέντρα, μη ανοχή από το κοινωνικό σύνολο θυμάτων από σεισμό, διατάραξη κοινωνικού ιστού, κ.λ.π.). Πρωτίστως όμως απαιτείται η εκτίμηση του απαιτούμενου επιπλέον κόστους για την αναβάθμιση της αντισεισμικής προστασίας των κτιρίων στο επιθυμητό από το κοινωνικό σύνολο επίπεδο. Το θέμα αυτό αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας ανακοίνωσης.

2 ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Ένας απλός καθορισμός επιπέδων αντισεισμικής προστασίας μπορεί να γίνει με βάση το απλοποιημένο ελαστοπλαστικό διάγραμμα Δύναμης F - Παραμόρφωσης Δ του συστήματος (σχ. 1α). Στο διάγραμμα αυτό συμβολίζουμε με $F_{ελ}$ και $\Delta_{ελ}$ την αναπτυσσόμενη μέγιστη δύναμη και παραμόρφωση υπό τον σεισμό σχεδιασμού, θεωρώντας γραμμικά ελαστική συμπεριφορά. Συμβολίζουμε επίσης με το F_y την ανεξάρτητη από τον σεισμό δύναμη διαρροής (αντοχή) του συστήματος. Αν $F_y \geq F_{ελ}$, τότε θα έχουμε ελαστική-γραμμική συμπεριφορά υπό τον σεισμό σχεδιασμού και για τον λόγο αυτό η $F_{ελ}$ μπορεί να θεωρηθεί ως η ελάχιστη απαιτούμενη αντοχή για να παραμείνει το σύστημα στην ελαστική περιοχή συμπεριφοράς. Στην περίπτωση αυτή η απαίτηση πλαστικής παραμόρφωσης (πλαστιμότητας) είναι μηδέν και μετά τον σεισμό οι παραμε-



Σχέδιο 1. Επίπεδα αντισεισμικής προστασίας

νουσες παραμορφώσεις θα είναι μηδενικές (κλείσιμο ρωγμών στην εφελκόμενη ζώνη σκυροδέματος, ανυπαρξία βλαβών). Αν $F_y < F_{ελ}$, τότε υπό τον σεισμό σχεδιασμού το σύστημα εισέρχεται υποχρεωτικά στην πλαστική περιοχή συμπεριφοράς και εμφανίζει μία απαίτηση πλαστικής παραμόρφωσης 22' (ή και μεγαλύτερη σε δύσκαμπτα συστήματα με ιδιοπερίοδο $T < 0,5$ sec). Για την αποφυγή της κατάρρευσης, η υπόψη απαιτούμενη πλαστική παραμόρφωση θα πρέπει να είναι μικρότερη από την διαθέσιμη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης 2δ ή $2\delta'$, η οποία εξαρτάται από τα ειδικά μέτρα πλάστιμης συμπεριφοράς που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή. Επίσης, μετά τον σεισμό θα έχουμε τις παραμένουσες πλαστικές παραμορφώσεις Δ_π , δηλαδή θα έχουμε ορατές βλάβες ανάλογα με το μέγεθος της Δ_π .

Αλλά απαίτηση πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να προκύψει και για $F_y = F_{ελ}$ στην περίπτωση σεισμού μεγαλύτερου από τον σεισμό σχεδιασμού. Για τον μεγαλύτερο σεισμό η ελάχιστη απαιτούμενη αντοχή για να παραμείνει το σύστημα στην ελαστική περιοχή θα είναι $F_{ελ}' > F_{ελ}$ και άρα για $F_y = F_{ελ} < F_{ελ}'$ θα έχουμε την απαίτηση πλαστικής παραμόρφωσης 11'. Επομένως, ακόμη και στην περίπτωση $F_y = F_{ελ}$ θα απαιτηθεί κάποια διαθέσιμη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης $1\delta > 11'$ για την αντιμετώπιση πιθανού σεισμού μεγαλύτερου από τον σεισμό σχεδιασμού. Βέβαια, για τον υπόψη μεγαλύτερο σεισμό και για $F_y < F_{ελ}$, θα έχουμε την πολύ μεγαλύτερη απαίτηση πλαστικής παραμόρφωσης 22''. Η απαίτηση αυτή μπορεί είτε να υπερβαίνει την διαθέσιμη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης ($2\delta < 22''$) είτε όχι ($2\delta' > 22''$), αν το σύστημα διαθέτει την πρόσθετη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης $\delta\delta'$. Στην πρώτη περίπτωση θα έχουμε κατάρρευση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση θα έχουμε εκτεταμένες βλάβες, πιθανώς μη επισκευάσιμες, λόγω της μεγάλης παραμένουσας πλαστικής παραμόρφωσης $\Delta_\pi' > \Delta_\pi$.

Έπειτα από τις προηγούμενες διευκρινιστικές παρατηρήσεις, ορίζουμε τα παρακάτω τρία επίπεδα αντισεισμικής προστασίας συναρτήσει των τιμών του πολύ γνωστού συντελεστή συμπεριφοράς $q = F_{ελ}/F_y$ (σχ. 1β):

1. Πλήρης αντισεισμική προστασία χωρίς απαίτηση ανελαστικών παραμορφώσεων υπό τον σεισμό σχεδιασμού ($q_1=1, F_{y1}=F_{ελ1}$),
2. Μερική αντισεισμική προστασία με απαίτηση περιορισμένων ανελαστικών παραμορφώσεων υπό τον σεισμό σχεδιασμού ($q_2=0.5 q_{max}, F_{y2}=F_{ελ2} / 0.5 q_{max}$),
3. Μερική αντισεισμική προστασία με απαίτηση εκτεταμένων ανελαστικών παραμορφώσεων υπό τον σεισμό σχεδιασμού ($q_3=q_{max}, F_{y3}=F_{ελ3} / q_{max}$).

Ο σεισμός σχεδιασμού και τα q_{max} δίδονται από τον ΕΑΚ-2000.

Είναι προφανές ότι το τρίτο επίπεδο ταυτίζεται με το ισχύον σήμερα, ενώ το δεύτερο και το πρώτο αντιστοιχούν στις αναφερόμενες ως δυνατές επιλογές στις παραγράφους 4.1.4.[5] και 2.3.5.[3], αντίστοιχα, του ΕΑΚ-2000. Κύριο χαρακτηριστικό του πρώτου (και σε πολύ μεγάλο βαθμό του δεύτερου) επιπέδου αντισεισμικής προστασίας είναι η "προστασία κατασκευής", η οποία επιτυγχάνεται με αύξηση της αντοχής και δραστική μείωση των απαιτήσεων πλαστιμότητας. Μείωση των απαιτήσεων πλαστιμότητας δεν σημαίνει βέβαια και μείωση της διαθέσιμης πλαστιμότητας του συστήματος. Η τελευταία, αρχίζοντας από το κατώτατο όριο της εγγενούς πλαστιμότητας του οπλισμένου σκυροδέματος (της τάξης του $q=1,8$), μπορεί να φθάσει μέχρι τα συνήθη μεγέθη με την υποχρεωτική πύκνωση των συνδετήρων στα άκρα των δομικών στοιχείων (περίσφιξη). Εξάλλου, ο αποκλεισμός σχηματισμού "μηχανισμού ορόφου" είναι δεδομένος λόγω της προσθήκης ικανού αριθμού τοιχωμάτων για την αύξηση της αντοχής του συστήματος.

3. ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η κατασκευαστική υλοποίηση των δύο πρώτων από τα παραπάνω επίπεδα στηρίζεται είτε στην εκτεταμένη χρήση τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε σε σταθμισμένη χρήση τοιχωμάτων και ταυτόχρονη αύξηση των διατομών και οπλισμών των υποστυλωμάτων. Το τρίτο επίπεδο προστασίας ταυτίζεται ουσιαστικά με το ισχύον σήμερα. Για τα προτεινόμενα επίπεδα αντισεισμικής προστασίας διενεργήθηκε πολυπαραμετρική τεχνικο-οικονομική διερεύνηση με στόχο την διαπίστωση της εξάρτησης του συνολικού κόστους κατασκευής τυπικών πολυόροφων κτιρίων του Ελλαδικού χώρου από την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q που χρησιμοποιείται για την μείωση της σεισμικής δράσης.

3.1 Γενικά

Οι βασικές μορφές φερόντων οργανισμών που εξετάστηκαν είναι: (α) 4-όροφο με πυρήνα στο κέντρο, με ή χωρίς πρόσθετα επίπεδα τοιχώματα, (β) 8-όροφο με πυρήνα στο κέντρο, με ή χωρίς πρόσθετα επίπεδα τοιχώματα, (γ) 8-όροφο με έκκεντρο πυρήνα, και (δ) 10-όροφο αμιγές χωροπλαίσιο. Στις παραμέτρους που ελήφθησαν υπόψη περιλαμβάνονται, εκτός από την τιμή του q , η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας (Ζ.Σ.Ε.), το είδος του φέροντος οργανισμού (ύπαρξη ή μη πυρήνα /τοιχωμάτων), η θέση του συνήθως υπάρχοντος πυρήνα του κλιμακοστασίου στην κάτοψη (κέντρο, γωνία), ο αριθμός των ορόφων του κτιρίου και ορισμένες άλλες (όπως π.χ. η τάξη μεγέθους της υφιστάμενης υπεραντοχής, η διαστασιολόγηση με ή χωρίς διενέργεια ικανοτικού ελέγχου, η επιρροή του μεγέθους των κατακορύφων φορτίων, η ενδοσιμότητα του εδάφους θεμελίωσης).

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην επιρροή του επιπέδου υπεραντοχής (υπερδιαστασιολόγησης) των κατασκευών. Η επιρροή των υπερδιαστασιολογημένων διατομών είναι καθοριστική και εξετάστηκε σε όλες γενικά τις περιπτώσεις με την βοήθεια του συντελεστή εξάντλησης της αντοχής διατομής (δείκτης cap [capacity]). Διότι είναι σαφές, ότι ένα κτίριο που μελετάται για $q=3.5$, το οποίο όμως για διάφορους λόγους (π.χ. αρχιτεκτονικές ή λειτουργικές απαιτήσεις) υπερδιαστασιολογείται και επομένως διαθέτει σημαντικές υπεραντοχές, είναι σε θέση να παραλάβει μεγαλύτερες σεισμικές επιπονήσεις (μικρότερο q) χωρίς ιδιαίτερη αύξηση του κόστους. Γιαυτό, προκειμένου να διαπιστωθεί με ρεαλιστικό τρόπο η αύξηση του κόστους που συνοδεύει

την μείωση της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς από $q=3.5$ σε $q=1$, θα πρέπει ο αρχικός φορέας που μελετάται για $q=3.5$ να είναι προσεκτικά διαστασιολογημένος ώστε να μην έχει ιδιαίτερες υπεραντοχές (δηλ., να έχει συντελεστές εξάντλησης των αντοχών των διατομών του κοντά στη μονάδα), ενώ οι όποιες υπεραντοχές θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ομοιόμορφα κατανεμημένες. Για να διαπιστωθεί η επιρροή των υπεραντοχών επί του κόστους, όλοι οι μελετηθέντες φορείς επιλύθηκαν μία φορά χωρίς και μία δεύτερη φορά με κάποιες υπερδιαστασιολογήσεις, των οποίων η τάξη μεγέθους κινείται σε συνήθη στην πράξη επίπεδα.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι - όπως έδειξαν δημοσιευμένες μελέτες με χρήση της υπερωθητικής ανάλυσης (pushover analysis) - φορείς που μελετήθηκαν για $q=3.5$, αλλά στη συνέχεια υπερδιαστασιολογήθηκαν και διαθέτουν σημαντικές υπεραντοχές, εισέρχονται λίγο μόνον ή και καθόλου στην ανελαστική περιοχή υπό τον σεισμό σχεδιασμού, γεγονός που αφενός αντιφάσκει με την φιλοσοφία σχεδιασμού τους και αφετέρου δημιουργεί ψευδαισθήσεις αντισεισμικής επάρκειας (οφειλόμενες, π.χ., στην ανομοιόμορφη κατανομή των άδηλων υπεραντοχών).

Η Ζ.Σ.Ε. IV εξετάστηκε μόνο στον τύπο του 4-ωρόφου, αφού καλύπτει μικρό τμήμα του Ελλαδικού χώρου και με περιορισμένη έως ανύπαρκτη χρήση πολυόροφων κατασκευών. Η περίπτωση του 4-όροφου φορέα με έκκεντρα τοποθετημένο πυρήνα (στην περίμετρο) αγνοήθηκε, αφού η χρήση πρόσθετων τοιχωμάτων για τις μικρότερες τιμές του q αίρει τις οποιεσδήποτε στρεπτικές επιρροές αυτής της εκκεντρότητας.

Κατά τα λοιπά ακολουθήθηκαν με συνέπεια οι διάφορες παραδοχές και επιταγές του ΕΑΚ-2000 (π.χ. σχετικά με τις απαιτούμενες απομειώσεις των δυσκαμψιών δοκών και τοιχωμάτων). Επίσης, για λόγους αναλογικής (και όχι στρεβλής) απεικόνισης των τιμών μεταβολής κόστους έγινε στα σχετικά διαγράμματα γραμμική παρεμβολή των ενδιάμεσων τιμών μεταξύ των υπολογισμένων τιμών για $q=3.50$ και $q=1.50$.

Θα πρέπει, τέλος, να σημειωθεί, ότι όλες οι απαιτούμενες αναλύσεις διενεργήθηκαν με επαγγελματικά προγράμματα της ελληνικής αγοράς, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές μεταβολές του κόστους κατασκευής, όπως αυτό προκύπτει από τις μελέτες που εκπονούνται με τη βοήθεια του διαθέσιμου στη χώρα συμβατικού επαγγελματικού λογισμικού.

3.2 Τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς

Με τη βοήθεια του συντελεστή συμπεριφοράς q μειώνονται τα σεισμικά φορτία λόγω μετελαστικής συμπεριφοράς της πραγματικής κατασκευής, σε σχέση με τα φορτία που προκύπτουν υπολογιστικά σε απεριόριστα ελαστικό σύστημα. Οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς που επιλέχθηκαν για την μελέτη των τυπικών κτηρίων είναι :

- $q=3.50$: Πρόκειται για την μέγιστη τιμή που επιτρέπει ο ΕΑΚ-2000 για συνήθη πολυόροφα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα (πλαισιακά ή μικτά συστήματα, βλ. παρ. 2.3.5.[2] ΕΑΚ-2000).
- $q=1,50$: Μέχρι την τιμή αυτή η συμπεριφορά της κατασκευής για τον σεισμό σχεδιασμού μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ελαστική (βλ. παρ. και Σ.3.1.1.[2]γ ΕΑΚ-2000).
- $q=1,00$: Πρόκειται για την περίπτωση της κατ'εξοχήν ελαστικής συμπεριφοράς υπό τον σεισμό σχεδιασμού (βλ. παρ. 2.3.5.[3] ΕΑΚ-2000).

3.3 Ικανοτικοί έλεγχοι

Η πραγματοποίηση ή μη των απαιτούμενων ικανοτικών ελέγχων εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς (για φορείς με επαρκή τοιχώματα) και λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση. Όταν η επίλυση γίνεται με συντελεστή συμπεριφοράς ίσο με 3.50, πρέπει να εξασφαλίζεται ένας αξιόπιστος ελαστοπλαστικός μηχανισμός απόκρισης. Οι ικανοτικοί έλεγχοι δεν απαιτούνται όταν χρησιμοποιείται συντελεστής συμπεριφοράς q που δεν υπερβαίνει την τιμή 1.50 και πάντως όχι μικρότερη του 1, όπου q οι τιμές που δίνονται στον πίνακα 2.6 του ΕΑΚ-2000.

Προκειμένου να διαπιστωθεί η διαφοροποίηση (αύξηση) του κόστους κατασκευής λόγω ικανοτικών ελέγχων, 8-όροφος φορέας με εκκεντρότητα (πυρήνας στη γωνία) διαστασιολογήθηκε με ικανοτικό έλεγχο κόμβων ακόμη και στις περιπτώσεις του $q=1.50$ και $q=1$.

3.4 Ανάλυση του κόστους

Ως τιμές μονάδας χάλυβα και σκυροδέματος ελήφθησαν :

1 kgf χάλυβα : 150 δρχ ή 0,44 € (προμήθεια, μεταφορά και τοποθέτηση).

1 m³ σκυροδέματος : 35.000 δρχ ή 102,71 € (προμήθεια, μεταφορά και σκυροδέτηση).

Το κόστος του φέροντα οργανισμού προκύπτει από τις συνολικές ποσότητες χάλυβα και σκυροδέματος, θεμελίωσης και ανωδομής. Το κόστος αυτό του φέροντα οργανισμού θεωρείται ότι σε κάθε περίπτωση αποτελεί το 25% περίπου του συνολικού κόστους του κτιρίου, ποσοστό που προκύπτει κατά κανόνα για συνήθεις κατασκευές. Σημειώνεται, ότι στην διερεύνηση του 4-ωρόφου φορέα, όπου έγινε χρήση τοιχωμάτων, δεν ελήφθη υπόψη η θετική διαφορά κόστους από την «ισόποση» αντικατάσταση της τοιχοποιίας (μπατικής ή δρομικής) από τα αντίστοιχα τοιχώματα (εκτιμώμενη μείωση 25%). Κατά συνέπεια, τα προκύπτοντα ποσοστά αύξησης είναι εν μέρει συντηρητικά για την περίπτωση αυτή.

4. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λόγω του περιορισμένου χώρου, στον ακόλουθο πίνακα 1 δίνονται για τα μελετηθέντα κτίρια και για τις διάφορες ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας μόνο τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όσον αφορά στα ποσοστά αύξησης του συνολικού κόστους κατασκευής τους για τις περιπτώσεις $q=1$ και $q=1.5$ έναντι σχεδιασμού τους για $q=3.5$.

Πίνακας 1. Ποσοστιαία αύξηση συνολικού κόστους κατασκευής έναντι σχεδιασμού για $q=3.50$

	$q=1.5$	$q=1$
Z.Σ.Ε. I	2.5 – 3.5 %	3.0 – 7.0 %
Z.Σ.Ε. II	4.0 – 5.5 %	5.0 – 8.5 %
Z.Σ.Ε. III	11.0 – 14.0 %	14.5 – 18.5 %
Z.Σ.Ε. IV	≤ 15.0 %	≤ 22.0 %

Πρέπει να τονισθεί στο σημείο αυτό, ότι λόγω του πολυπαραμετρικού χαρακτήρα του προσδιορισμού της αύξησης του κόστους κατασκευής με μειούμενο q , τα παραπάνω αριθμητικά στοιχεία απεικονίζουν απλώς την τάξη μεγέθους της αναμενόμενης αύξησης κόστους και δεν πρέπει να λαμβάνονται ως ισχύοντα σε κάθε μεμονωμένη περίπτωση.

Έτσι, σύμφωνα με το πίνακα 1, για σχεδιασμό με $q=1$ οι μεταβολές κόστους κυμαίνονται στις μεν ζώνες Σ.Ε. I και II από 3% έως 8.5%, στις δε ζώνες III και IV 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 στις μεν ζώνες Σ.Ε. I και II από 2.5% έως 5.5 % και στις ζώνες III και IV από 11% έως 15%.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ανατρέπουν την μέχρι σήμερα κυριαρχούσα - αλλά ατεκμηρίωτη - αντίληψη, ότι ο σχεδιασμός κατασκευών με τρόπο που υπό τον σεισμό σχεδιασμού να παραμένουν

στην ελαστική περιοχή συνεπάγεται υπερβολικά 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 ιδιαίτερος ισχύει αυτό για τις ζώνες I και II. Πρόκειται επομένως για μία αύξηση του κόστους, την οποία πολλοί ιδιοκτήτες θα αποδέχονταν σήμερα ευχαρίστως, γνωρίζοντας τα σημαντικά πλεονεκτήματα της 'πλήρους' (δηλ. $q=1$) αντισεισμικής προστασίας.

Από τα αναλυτικά διαγράμματα σχετικού κόστους ανά ζώνη Σ.Ε. (βλ. Αβραμίδης & Αναστασιάδης (2002)), τα οποία δεν παρατίθενται εδώ λόγω περιορισμένου χώρου, διακρίνεται τάση ομαδοποίησης των καμπυλών κόστους αφενός των ζωνών I και II και αφετέρου των ζωνών III και IV. Αυτό βρίσκεται σε αρμονία με τις μεταβολές μεταξύ των επιταχύνσεων σχεδιασμού στις διάφορες ζώνες Σ.Ε..

Σε όλες τις ζώνες Σ.Ε. και για όλους τους φορείς παρατηρείται γενικά η ευνοϊκή επιρροή της υπεραντοχής των διατομών στη σχετική μεταβολή του κόστους (μικρότερες ακραίες τιμές και κλίσεις), η οποία εντείνεται με αυξανόμενα αποθέματα αντοχών (μεγαλύτερες υπερδιαστασιολογήσεις) στον αρχικό φορέα (που μελετήθηκε για $q=3.50$).

Η εντονότερη μεταβολή του κόστους κατά την μετάβαση από την τιμή $q=1.50$ στην τιμή $q=1$ (σε σχέση με τη μεταβολή του κόστους από το $q=3.50$ στο $q=1.50$) οφείλεται στην πλήρη εξάντληση των διαθέσιμων αρχικών υπεραντοχών των διατομών μέχρι την τιμή $q=1.50$, με αποτέλεσμα να απαιτείται για $q=1$ σχεδόν καθολική αλλαγή των διατομών (κυρίως στις ζώνες Σ.Ε. III, IV). Δηλαδή σε όλες τις ζώνες Σ.Ε. και για ελαστική ή σχεδόν ελαστική συμπεριφορά όλων των διερευνηθέντων φορέων υπάρχει γενικά «πλήρης» εκμετάλλευση των αντοχών των υλικών (κατ'εξοχήν του χάλυβα), αφού το απαιτούμενο ποσοστό οπλισμού κινείται κοντά στις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές (4% για υποστυλώματα και 1% έως 2% περίπου για δοκούς).

Οι πολύοροφοι φορείς με αμιγώς πλαισιακή λειτουργία και παρά την απαραίτητη διενέργεια ικανοτικού ελέγχου σε όλες τις περιπτώσεις, εμφανίζουν γενικά τις μικρότερες μεταβολές κόστους, ιδίως στις ζώνες Σ.Ε. I και II. Αντίθετα, το 4-όροφο εμφανίζει γενικά τις μεγαλύτερες μεταβολές στις ζώνες Σ.Ε. III και IV, κυρίως λόγω της αναγκαίας προσθήκης των τοιχωμάτων. Η προσφυγή στην προσθήκη τοιχωμάτων (και όχι απλά αύξηση του οπλισμού ή και των διαστάσεων των υποστυλωμάτων) για μικρότερα q ήταν αναγκαία στη διερεύνηση του 4-όροφου σε αντίθεση με άλλους φορείς κυρίως λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας του, με συνέπεια η παραπέρα κλιμάκωση του σεισμικού φορτίου (λόγω μεταβολής του q) να γίνεται ταχύτερα και δραστηκότερα σε όλες τις ζώνες Σ.Ε. (προσέγγιση στις μέγιστες τιμές του εκάστοτε φάσματος σχεδιασμού). Επίσης σημειώνεται, ότι η μεταβολή του μητρώου δυσκαμψίας λόγω της συνεχούς αλλαγής (αύξησης) των διατομών ορισμένων διερευνούμενων φορέων μειώνει τις ιδιοπεριόδους ταλάντωσης αυξάνοντας έτσι κατά κανόνα το σεισμικό τους φορτίο.

Οι ικανοτικοί έλεγχοι κόμβων, που έγιναν ακόμη και για τις περιπτώσεις $q=1.50$ και $q=1$ στον 8-όροφο με έκκεντρο πυρήνα φορέα καθώς και στον 10-όροφο, έδειξαν ότι η αύξηση του κόστους που προκύπτει από την διενέργεια ικανοτικού ελέγχου κόμβων είναι μικρή (περίπου 1 έως 4%).

5. ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Από την παραπάνω τεχνικο-οικονομική διερεύνηση προκύπτει ότι η επικρατούσα, αν και ατεκμηρίωτη βιβλιογραφικώς, άποψη περί υψηλού ή και απαγορευτικού κόστους αντισεισμικών κατασκευών που μελετώνται για ελαστική συμπεριφορά υπό τον σεισμό σχεδιασμού είναι λανθασμένη. Το πρόσθετο κόστος για μία κατασκευή που σχεδιάζεται για $q=1$, δηλ. έτσι ώστε να μην υποστεί βλάβες υπό τον σεισμό σχεδιασμού, έναντι ενός σχεδιασμού για $q=3.5$ (δηλ. αποδοχή βλαβών) όχι μόνον δεν είναι απαγορευτικό, αλλά κυμαίνεται σε σχετικώς χαμηλά επίπεδα (αύξηση της τάξεως από 2.5% έως 22% επί του συνολικού κόστους κατασκευής στις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας I έως IV αντίστοιχα). Η αύξηση αυτή γίνεται κατά κανόνα εύκολα αποδεκτή από τον κύριο του έργου δεδομένων των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρέχει ο σχεδιασμός για $q=1$.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΑΚ-2000, Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός.

Αβραμίδης, Ι. Ε. & Αναστασιάδης, Κ. 2002. Ανάπτυξη (α) πρότυπων αριθμητικών παραδειγμάτων για την υποστήριξη της ορθής εφαρμογής του ΕΑΚ-2000 και τον έλεγχο προγραμμάτων Η/Υ και (β) νέου κανονιστικού πλαισίου αντισεισμικής προστασίας κτιρίων και βελτίωση διατάξεων για τα φαινόμενα β' τάξης. Έκθεση ερευνητικού προγράμματος, Ο.Α.Σ.Π., Δεκ. 2002.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Ο.Α.Σ.Π. για τη χρηματοδότηση του παραπάνω ερευνητικού προγράμματος.