

# Παραμετρική μελέτη πολυωρόφων κτιρίων από Ο/Σ σχεδιασμένων με βάση τους Ελληνικούς Κανονισμούς με και χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας

Χ.Ι. Αθανασιάδου

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Γ. Παναγόπουλος

Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Μ.Δ. Μαρκουλάκης

Πολιτικός Μηχανικός

Λέξεις κλειδιά: σεισμική συμπεριφορά, Μ.Α.Α.Π., Χ.Α.Α.Π., Ε.Α.Κ., Ε.Κ.Ω.Σ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Γίνεται αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς δύο τετραωρόφων κτιρίων από Ο/Σ με δίδυμο φορέα παραλαβής οριζοντίων δυνάμεων, σχεδιασμένων σύμφωνα με τους ισχύοντες Ελληνικούς Κανονισμούς με και χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, καθώς και σύγκριση μεταξύ τους τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη. Προέκυψε ότι οικονομικά δεν έχουν μεγάλες διαφορές, με το φορέα ΜΑΑΠ να έχει ελαφρά μεγαλύτερες απαιτήσεις υλικών. Η σεισμική συμπεριφορά του φορέα ΜΑΑΠ προέκυψε ικανοποιητική, ενώ ο ΧΑΑΠ συμπεριφέρεται μεν ικανοποιητικά στο σεισμό σχεδιασμού, όχι όμως και σε κάποιον ισχυρότερο με μεγαλύτερη περίοδο επανάληψης.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός του 2000 (ΕΑΚ2000) (Ο.Α.Σ.Π. & Σ.Π.Μ.Ε. 2000α) και ο Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ 2000) (Ο.Α.Σ.Π. & Σ.Π.Μ.Ε. 2000β) επιτρέπουν το σχεδιασμό των αντισεισμικών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικά είτε με είτε χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας. Ο σχεδιασμός με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας (Μ.Α.Α.Π.) προϋποθέτει θεώρηση δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων σε προκαθορισμένα κατάλληλα σημεία κατά τη διάρκεια του σεισμού σχεδιασμού, δηλαδή του σεισμού μέσης έντασης με περίοδο επανάληψης της τάξης των 50 ετών. Αυτό σημαίνει ότι επιτρέπεται η μείωση των τιμών των σεισμικών δράσεων σχεδιασμού μέσω της αυξημένης τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  (που αποτελεί διαιρέτη της σεισμικής επιτάχυνσης σχεδιασμού) που, για την περίπτωση πλαισιακών ή διδύμων φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ) έχει την τιμή  $q = 3.50$  (ΕΑΚ 2000). Σε αντιστάθμισμα, επιβάλλεται να λαμβάνονται ιδιαίτερα μέτρα τόσο για την αύξηση της διαθέσιμης πλαστιμότητας σε όλες τις κρίσιμες περιοχές όσο και για την ορθολογική κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων σε κατάλληλες θέσεις (προς αποφυγή δημιουργίας μηχανισμού ορόφου) αλλά και την αποφυγή δημιουργίας ψαθυρών μορφών αστοχίας όπως για παράδειγμα η διατμητική.

Από την άλλη, ο σχεδιασμός χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας (Χ.Α.Α.Π.) θεωρεί ως δεδομένο ότι η κατασκευή θα παραμείνει στην ελαστική περιοχή κατά τη διάρκεια του σεισμού σχεδιασμού (και για το λόγο αυτόν απαλλάσσει από την υποχρέωση πολύπλοκων υπολογιστικά και κυρίως κατασκευαστικά λύσεων), προϋποθέτει όμως σχεδιασμό με αυξημένες τιμές σεισμικών δράσεων θεωρώντας τιμές συντελεστή συμπεριφοράς  $q \leq 1.50$ .

Σε κάθε περίπτωση, θεωρείται πρωτεύον ζήτημα η ασφάλεια και προστασία της ανθρώπινης ζωής. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και στην περίπτωση ενός ιδιαίτερα ισχυρού σεισμού – πολύ

ισχυρότερου από το σεισμό σχεδιασμού - και με περίοδο επανάληψης πολύ μεγαλύτερη από τη διάρκεια ζωής του έργου - της τάξης των 500 ετών - η κατασκευή, έστω και αν υποστεί σημαντικές βλάβες στο σκελετό, οφείλει να μην καταρρεύσει.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς πολυώροφων κτιρίων από Ο/Σ, σχεδιασμένων σύμφωνα με τους ισχύοντες Ελληνικούς Κανονισμούς ΕΚΩΣ 2000 και ΕΑΚ 2000 με και χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, καθώς και η σύγκριση μεταξύ τους τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ενώ έχουν γίνει κατά καιρούς ανάλογες εργασίες για φορείς από Ο/Σ σχεδιασμένους με βάση τις εκάστοτε διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 (Kappos & Athanassiadou 1997, Fardis & Panagiotakos 1997, Athanassiadou, Kappos & Ziakos 2003), από όσο τουλάχιστον γνωρίζουν οι γράφοντες, δεν έχει γίνει κάτι ανάλογο για κτίρια σχεδιασμένα με βάση τους ισχύοντες Ελληνικούς Κανονισμούς, ιδιαίτερα δε για φορείς χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας.

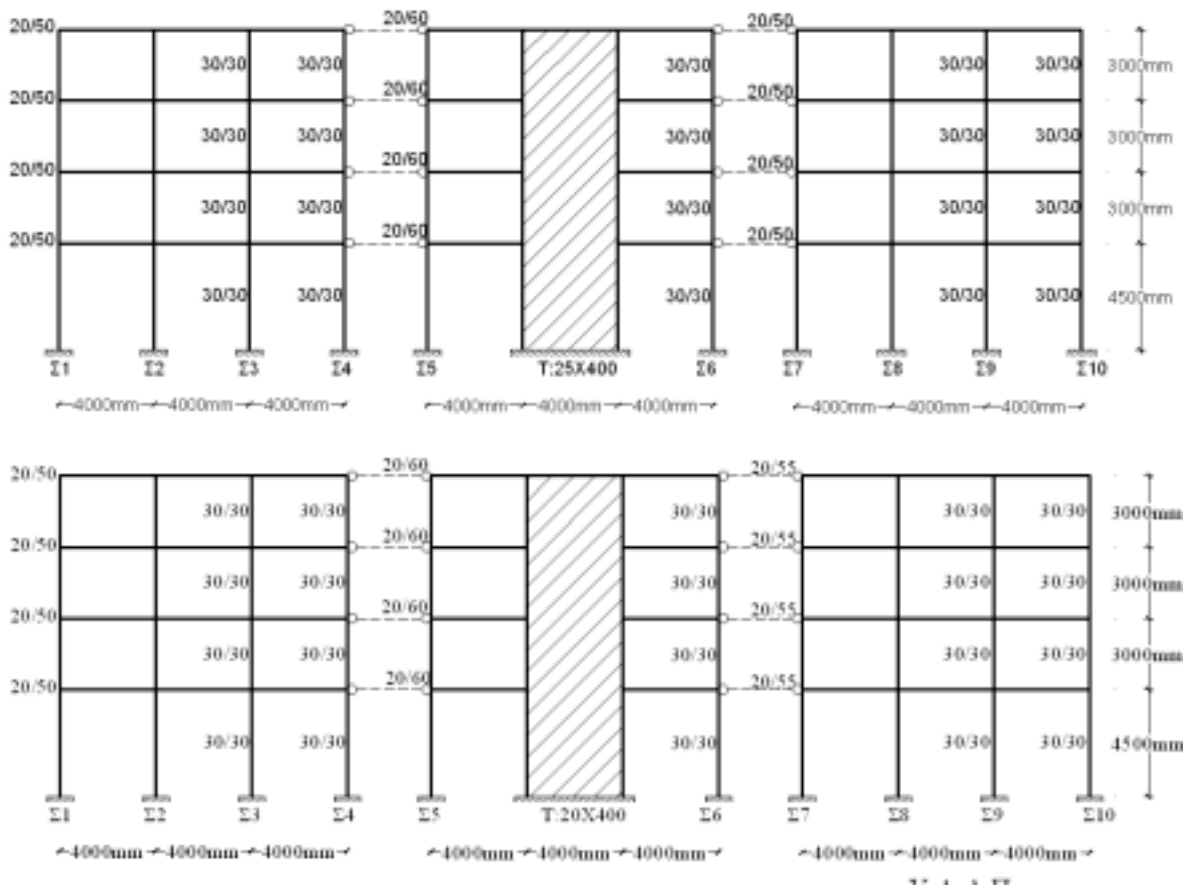
## 2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας σχεδιάστηκαν δύο όμοια τετραώροφα συμμετρικά κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με διπλό σύστημα ανάληψης σεισμικών δράσεων σύμφωνα με τις διατάξεις των Ελληνικών Κανονισμών ΕΚΩΣ 2000 και ΕΑΚ 2000 για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Ι και τιμή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους σχεδιασμού  $a_g = 0.16 g$ . Τα γραμμικά μορφώματα των φορέων και οι διαστάσεις των διατομών των στοιχείων φαίνονται στο σχήμα 1 (λόγω συμμετρίας έχει σχεδιαστεί ο μισός φορέας). Από τα δύο κτίρια το πρώτο σχεδιάστηκε με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας (ΜΑΑΠ) ενώ το δεύτερο χωρίς (ΧΑΑΠ). Ως υλικά κατασκευής και στα δύο κτίρια χρησιμοποιήθηκαν σκυρόδεμα C20/25 και χάλυβας S500.

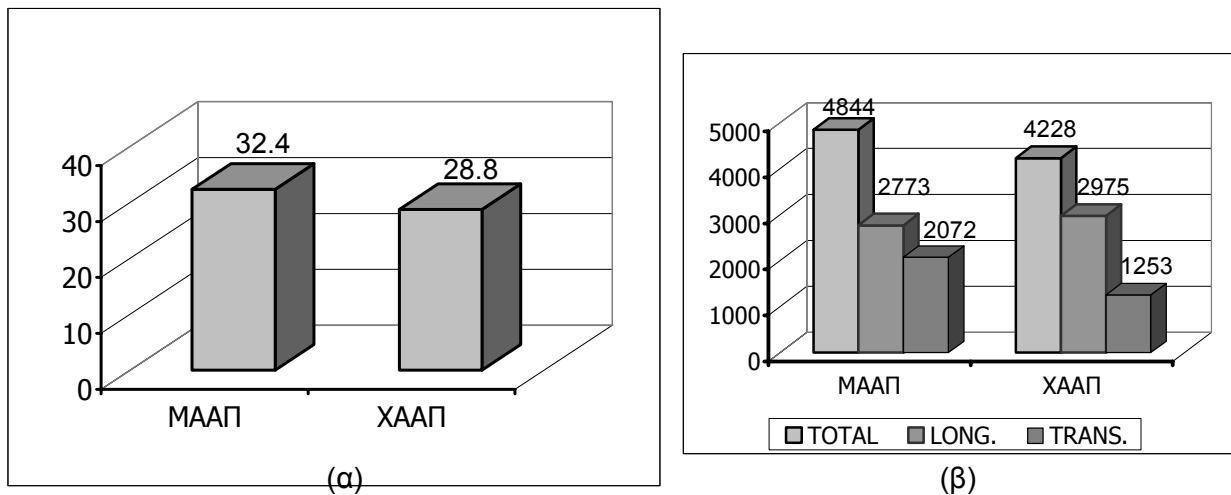
Στο σχήμα 2 φαίνεται η προμέτρηση των υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα) των δύο κτιρίων (τα αποτελέσματα αναφέρονται στο μισό φορέα). Ειδικά στην περίπτωση του απαιτούμενου οπλισμού θεωρήθηκε σκόπιμο, πέρα από το σύνολο, να φαίνονται ξεχωρά οι ποσότητες του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2 στο κτίριο με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας απαιτείται 12.5% περισσότερο σκυρόδεμα, που οφείλεται στο πάχος του τοιχώματος (στα τοιχώματα ΧΑΑΠ επιτρέπεται πάχος κορμού 200 mm, ενώ στα ΜΑΑΠ το ελάχιστο  $t = 250$  mm, 25% μεγαλύτερο από ότι στα ΧΑΑΠ). Από την άλλη, οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων προέκυψαν ακριβώς ίδιες, ενώ το κτίριο ΧΑΑΠ έχει κάποιες δοκούς μεγαλύτερου ύψους διατομής από τις αντίστοιχες του ΜΑΑΠ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Ο συνολικός οπλισμός του κτιρίου ΜΑΑΠ προέκυψε περίπου 15% περισσότερος από τον αντίστοιχο του ΧΑΑΠ, που οφείλεται στην κατά 65% μεγαλύτερη απαίτηση εγκάρσιου οπλισμού, ενώ οι διαμήκεις οπλισμοί του ΧΑΑΠ προέκυψαν κατά 7.3% περισσότεροι, όπως αναμενόταν.

Τα δύο κτίρια του Σχ. 1 υποβλήθηκαν σε σεισμική διέγερση βάσης και υπολογίστηκαν οι (ανελαστικές) οριζόντιες μετακινήσεις των ορόφων και οι απαιτούμενες πλαστιμότητες στα άκρα των δομικών στοιχείων. Η ανελαστική δυναμική ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα DRAIN-2000 (Kappos and Dymiotis 2000), που αποτελεί σημαντική επέκταση του γνωστού προγράμματος DRAIN2D με δυνατότητα υπολογισμού των κυριότερων δεικτών αποτίμησης σεισμικής συμπεριφοράς. Η υστερητική συμπεριφορά των δοκών, των εσωτερικών υποστυλωμάτων και του τοιχώματος προσομοιώθηκε με το τροποποιημένο μοντέλο Takeda, ενώ για τα ακραία υποστυλώματα χρησιμοποιήθηκε το διγραμμικό μοντέλο, το οποίο είναι μεν λιγότερο ακριβές από το μοντέλο Takeda, το στοιχείο όμως του προγράμματος που το περιέχει λαμβάνει υπόψη σε κάθε χρονική στιγμή την αλληλεπίδραση ροπών - αξονικών δυνάμεων που είναι πολύ σημαντική για τα υποστυλώματα αυτά. Εξάλλου, για να ληφθεί υπόψη η μείωση της δυσκαμψίας λόγω ρηγμάτωσης θεωρήθηκαν μειωμένες τιμές ροπών αδρανείας σύμφωνα με τα σχόλια της παραγράφου 3.2.3 του ΕΑΚ2000 (Ο.Α.Σ.Π. & Σ.Π.Μ.Ε. 2000α), θεωρήθηκε δηλαδή  $I = 0.4 I_g$  για τις δοκούς,  $I = 0.6 I_g$  για τα εξωτερικά υποστυλώματα,  $I = 0.8 I_g$  για τα εσωτερικά υποστυλώματα και  $I = 0.6 I_g$  για το τοίχωμα, όπου  $I_g$  η ροπή αδρανείας της αρχικής, αρηγμάτωτης διατομής.



Σχήμα 1. Γραμμικά μορφώματα φορέων. Άνω: Φορέας ΜΑΑΠ. Κάτω: Φορέας ΧΑΑΠ



Σχήμα 2. Προμέτρηση υλικών. (α) Σκυρόδεμα (m³). (β) Χάλυβας (kg).

Τα επιταχυνσιογραφήματα βάσης που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ήταν οι δύο οριζόντιες συνιστώσες των καταγραφών των σεισμών της Βόλβης (1978), των Αλκυονίδων

(1981), της Καλαμάτας (1986) και της Αθήνας (καταγραφή στα Σεπόλια) (1999), δηλαδή των κυριότερων από τους σεισμούς που χτύπησαν μεγάλα αστικά κέντρα στον ελληνικό χώρο κατά την τελευταία τριακονταετία με πολλές σημαντικές ζημιές (έως και καταρρέψεις) και δεκάδες ανθρώπινα θύματα. Και τα 8 επιταχυνσιογραφήματα βάσης ομαλοποιήθηκαν, με βάση τη μέθοδο Housner, ως προς τη φασματική ένταση του ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων του ΕΑΚ 2000 (Παράρτημα Α) για σεισμική επιτάχυνση εδάφους σχεδιασμού  $a_g = 0.16$  g (σεισμός σχεδιασμού) αλλά και για τη διπλάσια τιμή ( $a_g = 0.32$  g) που θεωρήθηκε ο σεισμός 'αποφυγής κατάρρευσης'.

Τα κριτήρια αστοχίας που θεωρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ήταν τόσο καθολικά (αφορούν δηλαδή σε έναν όροφο ή στο σύνολο της κατασκευής) όσο και τοπικά, που αφορούν σε μια συγκεκριμένη διατομή. Ως γενικά κριτήρια αστοχίας θεωρήθηκαν οι μεγάλες τιμές των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων και συγκεκριμένα η υπέρβαση συγκεκριμένων ορίων. Στα πλαίσια της παρούσας θεωρήθηκαν ως όρια είτε το 2% του ύψους ορόφου σε συνδυασμό με τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων τόσο στην κεφαλή όσο και στον πόδα όλων των κατακόρυφων στοιχείων του ορόφου (μηχανισμός ορόφου), είτε (ανεξάρτητα μηχανισμού) το 3% του ύψους ορόφου, πέρα από το οποίο το κόστος επισκευής των φερόντων και μη φερόντων στοιχείων θεωρείται μεγαλύτερο από το κόστος ανακατασκευής (Penelis & Karros 1997). Εξάλλου, οι επιμέρους διατομές θεωρήθηκε ότι αστοχούν είτε εφόσον απαιτούνται πλαστικές στροφές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες διαθέσιμες (καμπτική αστοχία) είτε εφόσον οι τιμές των τέμνουσών που προκύπτουν από τη δυναμική ανάλυση είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τέμνουσες αντοχής (διατμητική αστοχία). Η διατμητική αστοχία μπορεί να οφείλεται είτε σε αστοχία από διαγώνιο εφελκυσμό (που είναι και ο κανόνας) είτε από διαγώνια θλίψη είτε από διατμητική ολίσθηση. Για τον υπολογισμό της τέμνουσας αντοχής σε διαγώνιο εφελκυσμό λαμβάνεται υπόψιν η μείωση της τιμής του 'μεριδίου του σκυροδέματος' λόγω ανελαστικοποίησης της διατομής ως συνάρτηση της απαιτούμενης πλαστιμότητας  $\mu$ . Για τιμές του  $\mu$  μεγαλύτερες του 4 το μερίδιο του σκυροδέματος μηδενίζεται στις δοκούς, ενώ στα κατακόρυφα στοιχεία (όπου συνυπάρχει η εγκάρσια θλίψη) παραμένει πάντα μια ελάχιστη τιμή  $V_c = 0.3 V_{c0}$ .

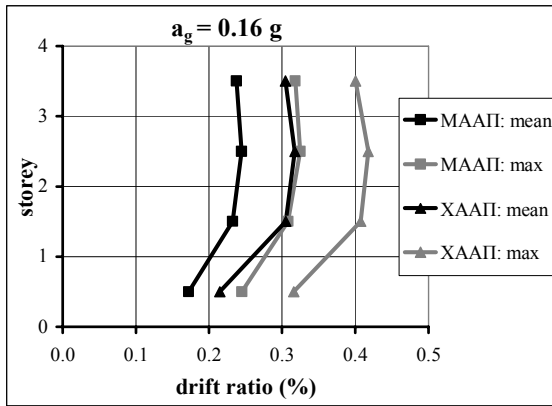
### 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

#### 3.1 Σεισμός σχεδιασμού

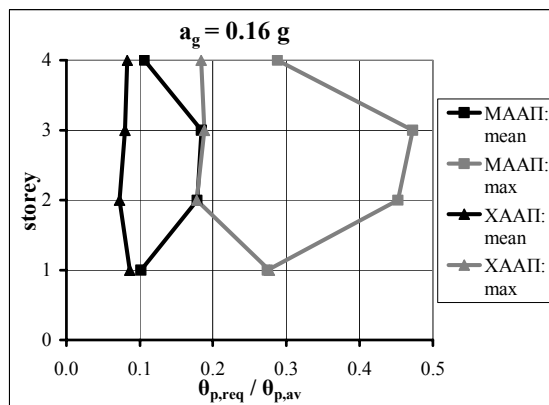
Στο σχήμα 3 φαίνονται οι ανηγμένες τιμές των μεγίστων σχετικών μετακινήσεων ορόφων των φορέων του Σχ. 1 για το σεισμό σχεδιασμού ( $a_g = 0.16$ g). Με μαύρη γραμμή έχει σχεδιαστεί ο μέσος όρος των οκτώ τιμών σχετικού βέλους ορόφου που αντιστοιχούν στα οκτώ επιταχυνσιογραφήματα βάσης που θεωρήθηκαν, ενώ με γκρίζα γραμμή φαίνεται η μέγιστη τιμή που προέκυψε για κάποια διέγερση. Υιοθετήθηκε δηλαδή η διάταξη του Ευρωκώδικα 8 (CEN 2004) που επιτρέπει να θεωρούνται μέσες τιμές όταν η ανάλυση έχει γίνει για τουλάχιστον επτά επιταχυνσιογραφήματα, έτσι ώστε τα συμπεράσματα να μην επηρεάζονται από την ευαισθησία των αποτελεσμάτων στα δεδομένα επιταχυνσιογραφήματα βάσης. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3, όλες οι τιμές σχετικών βελών είναι σχετικά χαμηλές, με μεγαλύτερη τιμή το 0.42% για το κτίριο ΧΑΑΠ (αντίστοιχη μέση τιμή 0.32%). Οι τιμές αυτές θεωρούνται χαμηλές, πολύ χαμηλότερες από το 2% που είχε θεωρηθεί ως όριο αστοχίας. Από την άλλη, το προφίλ των σχετικών μετακινήσεων των δύο κτιρίων είναι παρόμοιο, όμως τα σχετικά βέλη του φορέα ΧΑΑΠ είναι συστηματικά μεγαλύτερα από 25% μέχρι και 35% από τα αντίστοιχα του ΜΑΑΠ, γεγονός που οφείλεται στη μειωμένη δυσκαμψία του τοιχώματος και κατά συνέπεια και του φορέα.

Στο σχήμα 4 φαίνονται οι λόγοι των απαιτούμενων προς τις διαθέσιμες ικανότητες πλαστικών στροφών των δοκών (Σχ. 4α), των υποστυλωμάτων (Σχ. 4β) και του τοιχώματος (Σχ. 4γ) των φορέων του σχήματος 1 για το σεισμό σχεδιασμού. Οι τιμές που φαίνονται στα σχήματα 4β και 4γ αντιστοιχούν στο δυσμενέστερο στοιχείο του φορέα, που τυπικά ανήκει στο ίδιο πλαίσιο που είναι και το τοίχωμα, ενώ τα γραμμικά στοιχεία των δύο άλλων πλαισίων παρουσιάζουν τυπικά χαμηλές

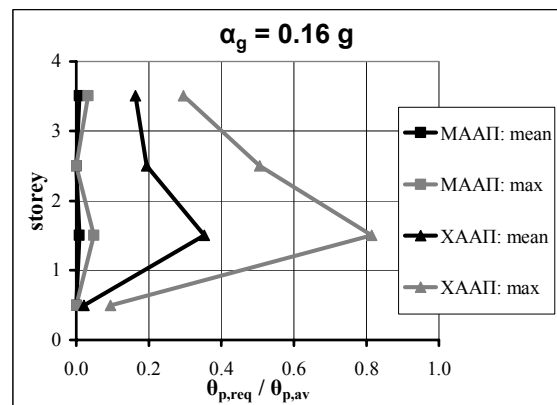
τιμές φορτίων διατομής - χαμηλότερες από τις αντίστοιχες αντοχές - και δε διαρρέουν. Όπως φαίνεται από το Σχ. 4α, οι διαθέσιμες πλαστικές στροφές των δοκών είναι σε κάθε περίπτωση σημαντικά μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες, με την τιμή του λόγου  $\theta_{p,req}/\theta_{p,av}$  να μην ξεπερνά το 0.20 για το φορέα ΜΑΑΠ και το 0.50 για το ΧΑΑΠ, ενώ συστηματικά οι τιμές  $\theta_{p,req}/\theta_{p,av}$  του ΧΑΑΠ είναι υπερδιπλάσιες από τις αντίστοιχες του ΜΑΑΠ.



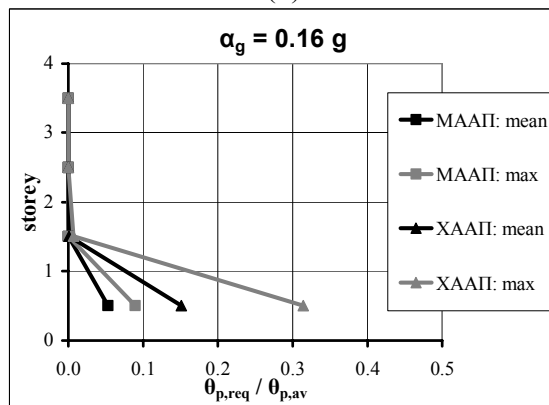
Σχήμα 3. Ανηγμένα σχετικά βέλη ορόφων.



(α)



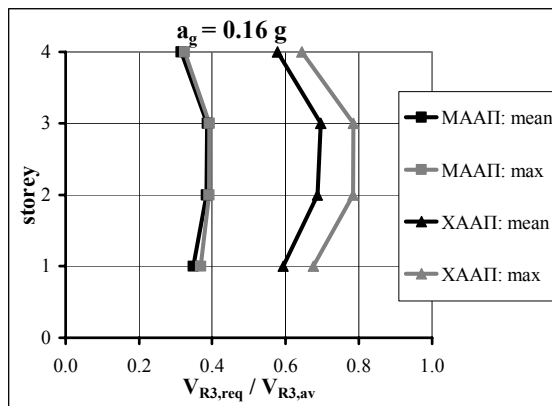
(β)



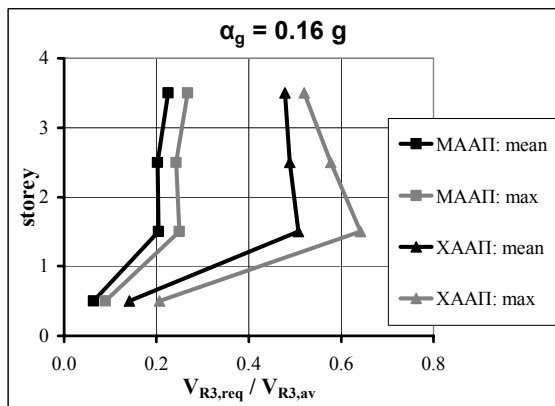
(γ)

Σχήμα 4. Λόγοι απαιτούμενων προς διαθέσιμες τιμές πλαστικών στροφών δομικών στοιχείων.

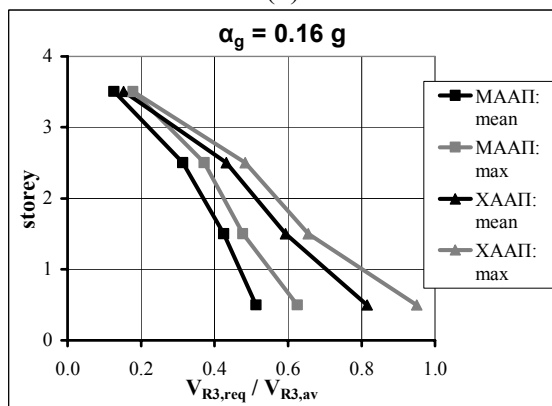
(α) Δοκοί. (β) Υποστυλώματα. (γ) Τοιχώματα



(α)

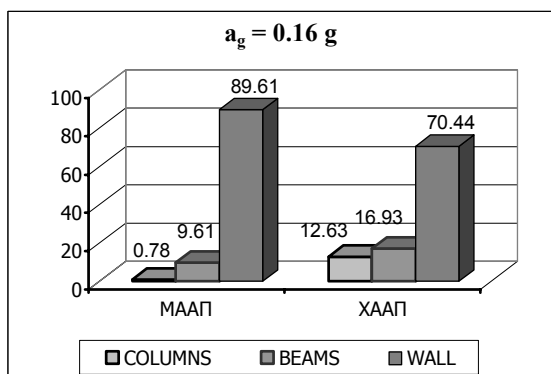


(β)



(γ)

Σχήμα 5. Έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού φορέων. (α) Δοκοί. (β) Υποστυλώματα. (γ) Τοιχώματα



Σχήμα 6. Απορρόφηση ενέργειας

Πολύ καλή είναι η εικόνα στα υποστυλώματα ΜΑΑΠ (Σχ. 4β) όπου η τιμή του λόγου  $\theta_{p,req} / \theta_{p,av}$  δεν ξεπερνά το 0.05 με τη μέση τιμή να αγγίζει το 0. Σαφώς μεγαλύτερες είναι οι τιμές του λόγου  $\theta_{p,req} / \theta_{p,av}$  των υποστυλωμάτων ΧΑΑΠ, ωστόσο κρίνονται ικανοποιητικές καθώς, σε κάθε περίπτωση, παραμένουν αρκετά μικρότερες της μονάδας (δυσμενέστερη τιμή 0.81) με τη μέση

τιμή (που κυρίως ενδιαφέρει) να μην ξεπερνά το 0.35. Όσον αφορά στα τοιχώματα, η συμπεριφορά τους είναι πολύ ικανοποιητική καθώς, και στους δύο φορείς, σχηματίζουν πλαστική άρθρωση μόνο στη βάση με τιμές  $\theta_{p,req} / \theta_{p,av}$  που δεν ξεπερνούν το 0.1 για το ΜΑΑΠ και το 0.31 (με μέση τιμή 0.15) για το ΧΑΑΠ.

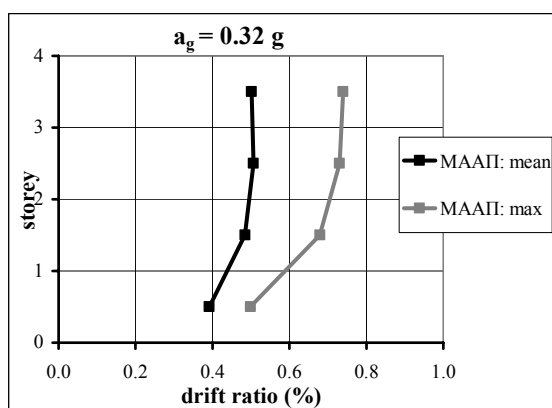
Ο έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού (τυπικά δυσμενέστερος από αυτόν σε διαγώνια θλίψη) φαίνεται στο σχήμα 5. Όπως φαίνεται από το σχήμα, όλα τα δομικά στοιχεία και των δύο φορέων αντέχουν σε διάτμηση, με τις χαμηλότερες τιμές  $V_{R3,req} / V_{R3,av}$  να εμφανίζονται στα υποστυλώματα και τις δυσμενέστερες στη βάση του τοιχώματος. Σαφώς καλύτερη, όπως αναμενόταν, είναι η εικόνα του φορέα ΜΑΑΠ με τους κατά πολύ αυξημένους εγκάρσιους οπλισμούς, ενώ η μέση τιμή του λόγου  $V_{R3,req} / V_{R3,av}$  στη βάση του τοιχώματος ξεπερνά το 0.8 και για κάποια καταγραφή (τη μία από τις δύο συνιστώσες του σεισμού της Αθήνας) πλησιάζει τη μονάδα.

Στο σχήμα 6 φαίνεται η απορρόφηση ενέργειας (μέσες τιμές) από τα δομικά στοιχεία των φορέων που εξετάστηκαν. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το μεγάλο ποσοστό της ενέργειας απορροφήθηκε (και στους δύο φορείς) από το τοίχωμα με την πλαστική άρθρωση που δημιουργήσε στη βάση, ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας απορροφήθηκε στο μεν φορέα ΜΑΑΠ σχεδόν αποκλειστικά από τις δοκούς, ενώ στο ΧΑΑΠ σημαντικό μέρος της ενέργειας απορροφήθηκε και από τα υποστυλώματα.

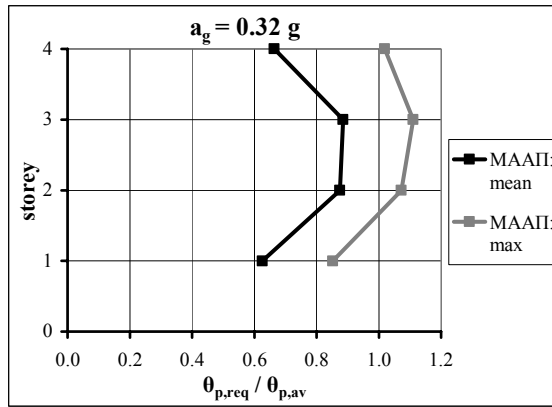
### 3.2 Σεισμός 'αποφυγής κατάρρευσης'

Στα σχήματα 7 έως 10 φαίνεται η απόκριση του φορέα ΜΑΑΠ στο διπλάσιο του σεισμού σχεδιασμού (σεισμός 'αποφυγής κατάρρευσης' με  $a_g = 0.32 g$ ). Στο σχήμα 7 φαίνονται οι ανηγμένες σχετικές μετακινήσεις ορόφων, στο σχήμα 8 οι λόγοι των απαιτούμενων προς τις διαθέσιμες τιμές πλαστικών στρωφών των δομικών στοιχείων, στο σχήμα 9 ο έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού και στο Σχ. 10 η απορρόφηση ενέργειας. Όπως φαίνεται από το Σχ. 7, οι ανηγμένες τιμές σχετικών μετακινήσεων ορόφων του φορέα παραμένουν χαμηλές και για το διπλάσιο του σεισμού σχεδιασμού, μην ξεπερνώντας σε καμιά περίπτωση το 0.75%.

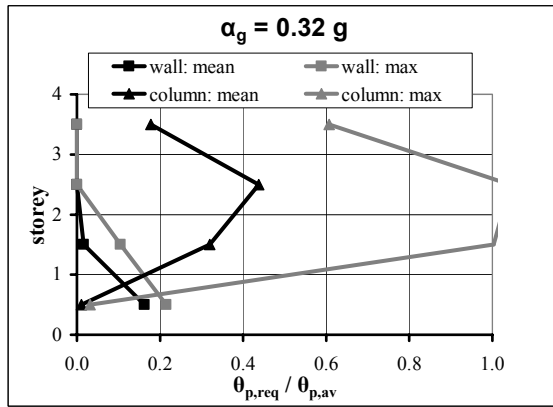
Από το σχήμα 8 φαίνεται ότι, κατά μέσο όρο, κανένα δομικό στοιχείο δεν αστοχεί από κάμψη. Ωστόσο, σε αρκετές καταγραφές παρατηρούνται καμπτικές αστοχίες των δοκών του 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> ορόφου στην επαφή με το τοίχωμα, ενώ σε δύο περιπτώσεις αστοχούν και τα υποστυλώματα που τις στηρίζουν (να σημειωθεί ότι, λόγω της παρουσίας των ισχυρών τοιχωμάτων, δεν απαιτήθηκε ικανοτικός έλεγχος στους κόμβους κατά το σχεδιασμό και τα υποστυλώματα διαστασιολογήθηκαν με βάση τα φορτία διατομής της ανάλυσης). Από την άλλη, σε καμιά περίπτωση δεν παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία στοιχείου (Σχ. 9), γεγονός που αποδεικνύει την επιτυχία του ικανοτικού ελέγχου σε τέμνουσα που επιβάλλει ο ΕΑΚ στα δομικά στοιχεία των φορέων ΜΑΑΠ. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ο διαφορετικός τρόπος λειτουργίας των υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων στην ανάλυση των σεισμικών δυνάμεων που φαίνεται καθαρά στα Σχ. 8β και 9β.



Σχήμα 7. Ανηγμένα σχετικά βέλη ορόφων.

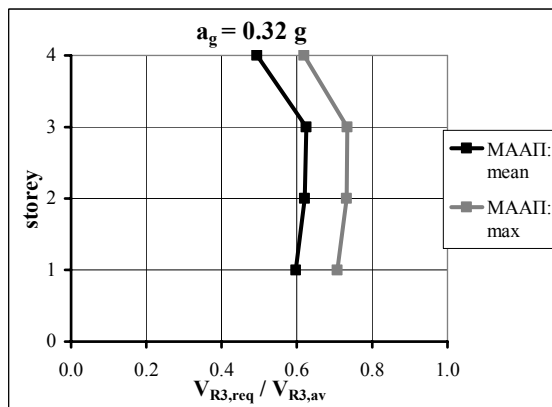


(α)

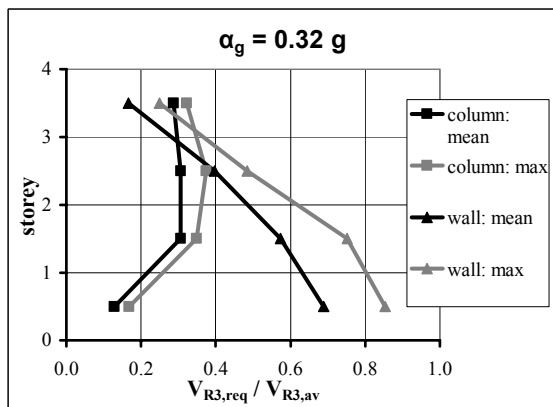


(β)

Σχήμα 8. Λόγοι απαιτούμενων προς διαθέσιμες τιμές πλαστικών στρωφών δομικών στοιχείων. (α) Δοκοί. (β) Κατακόρυφα στοιχεία.

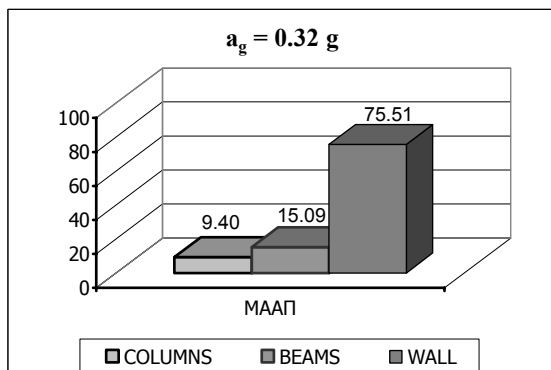


(α)



(β)

Σχήμα 9. Έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού φορέων. (α) Δοκοί. (β) Κατακόρυφα στοιχεία.





#### Σχήμα 10. Απορρόφηση ενέργειας

Όπως και στο σεισμό σχεδιασμού, το μεγαλύτερο τμήμα της ενέργειας απορροφήθηκε από το τοίχωμα στη βάση (Σχήμα 10), ενώ σημαντικό τμήμα της (περίπου το 15%) απορροφήθηκε από τις δοκούς (κυρίως αυτές στην επαφή με το τοίχωμα) αλλά και τα υποστυλώματα (του ίδιου πλαισίου) που απορρόφησαν το 10% της ενέργειας. Τα δομικά στοιχεία των δύο άλλων πλαισίων δεν απορρόφησαν παρά ελάχιστο ποσοστό ενέργειας καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις είτε παρέμειναν στην ελαστική περιοχή είτε, αν δημιουργήθηκε πλαστική άρθρωση, οι απαιτούμενες πλαστιμότητες ήταν πολύ χαμηλές.

Όσον αφορά στους φορείς ΧΑΑΠ, η συμπεριφορά τους στο διπλάσιο του σεισμού σχεδιασμού ήταν γενικά κακή. Με εξαίρεση δύο καταγραφές, όλες οι υπόλοιπες παρουσίασαν καμπτική και διατμητική αστοχία των δοκών στην επαφή με το τοίχωμα, καμπτική αστοχία των υποστυλωμάτων του ίδιου πλαισίου και διατμητική αστοχία του τοιχώματος στη βάση. Θεωρείται ότι, τουλάχιστον με τις ελάχιστες απαιτήσεις που θέτουν ο ΕΚΩΣ 2000 και ο ΕΑΚ 2000, ένας τέτοιος φορέας δε μπορεί να αντέξει στον πολύ ισχυρό σεισμό με ένταση πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του σεισμού σχεδιασμού. Πιθανόν η καθιέρωση αυστηρότερων διατάξεων ελαχίστων εγκάρσιων οπλισμών στις δοκούς (όπου η ελάχιστη απαίτηση συνδετήρων είναι μόλις Φ8/300) και στη βάση του τοιχώματος των φορέων ΧΑΑΠ να έδινε μια λύση, ωστόσο αυτό είναι θέμα που πρέπει να διερευνηθεί.

#### 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Οι φορείς που σχεδιάστηκαν με βάση τους ισχύοντες Ελληνικούς Κανονισμούς με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας συμπεριφέρονται ικανοποιητικά στο σεισμό σχεδιασμού αφού παρουσιάζουν γενικά χαμηλές τιμές σχετικών μετακινήσεων ορόφων, δημιουργούν γενικά πλαστικές αρθρώσεις στα προκαθορισμένα σημεία (στις δοκούς και στη βάση των τοιχωμάτων) - όπου απορροφάται το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που εκλύεται - με διαθέσιμες ικανότητες πλαστικών στροφών πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες απαιτήσεις, ενώ παρουσιάζουν διατμητική αντοχή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη απαίτηση.
2. Οι σχετικές μετακινήσεις ορόφων του φορέα ΜΑΑΠ στο σεισμό διπλάσιας έντασης από το σεισμό σχεδιασμού (σεισμός 'αποφυγής κατάρρευσης') παρέμειναν χαμηλές, γεγονός που, σε συνδυασμό με τη μη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα των δύο πλαισίων που δεν περιέχουν τοίχωμα, εξασφαλίζει την κατασκευή από τον κίνδυνο δημιουργίας μηχανισμού ορόφου.
3. Η συμπεριφορά του φορέα ΜΑΑΠ στο σεισμό 'αποφυγής κατάρρευσης' θεωρείται γενικά ικανοποιητική αφού, εκτός από τις χαμηλές τιμές σχετικών μετακινήσεων, δεν παρουσίασε πουθενά διατμητικές αστοχίες ενώ οι κάποιες καμπτικές αστοχίες που εμφανίστηκαν σε δύο περιπτώσεις (ακόμη και σε υποστυλώματα) δε θεωρείται ότι μπορούν να οδηγήσουν το κτίριο σε κατάρρευση.
4. Οι φορείς χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας φαίνεται ότι συμπεριφέρονται σχετικά ικανοποιητικά στο σεισμό σχεδιασμού, παρόλο που δεν παραμένουν στην ελαστική περιοχή - παραδοχή με την οποία σχεδιάστηκαν - ενώ παρουσιάζουν όλους τους δείκτες συμπεριφοράς δυσμενέστερους από ότι οι αντίστοιχοι ΜΑΑΠ. Πέραν αυτού, στο διπλάσιο του σεισμού σχεδιασμού, η συμπεριφορά τους είναι γενικά κακή και χρειάζεται να ληφθούν μέτρα, αυξάνοντας για παράδειγμα τις ελάχιστες απαιτήσεις εγκάρσιων οπλισμών. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα.
5. Όσον αφορά στη σύγκριση των φορέων από οικονομική άποψη, στους φορείς ΜΑΑΠ απαιτούνται και περισσότερος όγκος σκυροδέματος και περισσότεροι οπλισμοί, κυρίως εγκάρσιοι, χωρίς όμως οι διαφορές να είναι ιδιαίτερα μεγάλες.

Η εργασία αυτή αποτελεί τμήμα μιας γενικότερης έρευνας της σεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων από Ο/Σ που σχεδιάστηκαν με βάση τους Ελληνικούς Κανονισμούς, που βρίσκεται σε εξέλιξη στο Εργαστήριο Κατασκευών από Σκυρόδεμα και Φέρουσα Τοιχοποιία του Α.Π.Θ. και

περιλαμβάνει τόσο φορείς με διαφορετικό αριθμό ορόφων όσο και περιοχές διαφορετικής σεισμικής επικινδυνότητας. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής θα παρουσιαστούν σύντομα.

## 5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Athanassiadou, C.J., Kappos, A.J & Ziakos, K.. 2003. Seismic Performance of Multistorey R/C Buildings Designed to the New Eurocode 8 (prEN-1998-1). *1<sup>st</sup> FIB Symposium on Concrete Structures in Seismic Regions*, Athens, Greece, CD-ROM Proceedings: 018
- CEN (Comité Européen de Normalisation). 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part I: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1).
- Fardis, M.N. & Panagiotakos, T. 1997. Seismic design and response of bare and masonry-infilled reinforced concrete buildings. Part I: Bare structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 1(1): 219-256.
- Kappos, A.J. & Athanassiadou, C.J. 1997. Influence of ductility class on seismic performance of R/C structures designed to Eurocodes 2 and 8. *European Earthquake Engineering*, XI(2): 32-46.
- Kappos, A.J. & Dymiotis, C. (2000). *DRAIN-2000: A program for the inelastic time-history and seismic reliability analysis of 2-D structures*. Heriot-Watt University, Edinburgh.
- Ο.Α.Σ.Π. & Σ.Π.Μ.Ε. (2000α). Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000 (ΕΑΚ 2000).
- Ο.Α.Σ.Π. & Σ.Π.Μ.Ε. (2000β). Ελληνικός Κανονισμός Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ 2000).
- Penelis, G.G. & Kappos, A.J. (1997). *Earthquake-resistant Concrete Structures*. E & FN SPON (Chapman & Hall), London.