

Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς πολυώροφων κτιρίων από Ο/Σ σχεδιασμένων με βάση τους Ευρωκώδικες 2 και 8

Χ.Ι. Αθανασιάδου

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Κ. Πλάνου

Πολιτικός Μηχανικός

Λέξεις κλειδιά: σεισμική συμπεριφορά, πολυώροφα πλαίσια, Ευρωκώδικας 8, πλαστιμότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Γίνεται αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς δύο δεκαώροφων κτιρίων από Ο/Σ, ενός αμιγώς πλαισιακού και ενός με δίδυμο φορέα παραλαβής οριζοντίων δυνάμεων, σχεδιασμένων σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 2 και 8 και για τα δύο επίπεδα πλαστιμότητας ('H' και 'M') που επιτρέπονται σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας όπως η Ελλάδα, καθώς και σύγκριση μεταξύ τους τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής άποψης. Προέκυψε ότι ο σχεδιασμός των κτιρίων ήταν επιτυχής και για τα δύο επίπεδα πλαστιμότητας, ενώ δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό, όλοι οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί επιτρέπουν τη δημιουργία ρηγματώσεων (ανελαστική συμπεριφορά) στα κτίρια κατά τη διάρκεια του σεισμού σχεδιασμού, με την προϋπόθεση ότι οι ρηγματώσεις αυτές θα δημιουργηθούν σε προκαθορισμένες θέσεις των δομικών στοιχείων, τα οποία έχουν σχεδιαστεί έτσι, ώστε πέρα από την αντοχή, να διαθέτουν και την απαιτούμενη πλαστιμότητα για να μπορούν να αντεπεξέλθουν. Ο Ευρωκώδικας 8 (EC8) (CEN 2004) επιτρέπει γενικά το σχεδιασμό των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ) για τρία διαφορετικά επίπεδα πλαστιμότητας, τα χαμηλής ('L'), μέσης ('M') και υψηλής ('H') πλαστιμότητας, με τις απαιτήσεις αντοχής να μειώνονται κατά σειρά παρουσίας και τις απαιτήσεις πλαστιμότητας να αυξάνονται αντίστοιχα. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση της τιμής του συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς q , ο οποίος αποτελεί διαιρέτη των σεισμικών επιταχύνσεων σχεδιασμού (και ως εκ τούτου και των εντατικών μεγεθών σχεδιασμού), με την αύξηση του επιπέδου πλαστιμότητας, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται και οι απαιτήσεις πλαστιμότητας των κατασκευών. Το τελευταίο επιτυγχάνεται τόσο με αύξηση των κατασκευαστικών απαιτήσεων (ελάχιστες διαστάσεις διατομών δομικών στοιχείων, ελάχιστοι οπλισμοί διαμήκεις και κυρίως εγκάρσιοι, μεγαλύτερα μήκη αγκύρωσης, απαίτηση για περισσότερη επιμέλεια κατά το στάδιο της κατασκευής) όσο και με υπολογισμό των φορτίων διατομής σχεδιασμού με βάση όχι μόνο τα αποτελέσματα της ανάλυσης - στατικής ή δυναμικής - αλλά και με ικανοτικούς ελέγχους. Ειδικά για τις κατασκευές χαμηλής πλαστιμότητας ο Ευρωκώδικας 8 επιτρέπει να σχεδιάζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις αποκλειστικά και μόνο του Ευρωκώδικα 2 (EC2), με την τιμή του συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς q να μην ξεπερνά το 1.50. Ωστόσο, συστήνεται να μη σχεδιάζονται κατασκευές με τόσο περιορισμένη δυνατότητα μετελαστικών παραμορφώσεων παρά μόνο σε περίπτωση κτιρίων με σεισμική μόνωση στη βάση είτε κτιρίων σε περιοχές χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας. Ως τέτοιες ορίζονται οι περιοχές όπου η σεισμική επιτάχυνση εδάφους σχεδιασμού $a_g \leq 0.08$ g είτε $a_g S \leq 0.10$ g όπου S ο συντελεστής εδάφους ($1.0 < S < 1.40$ για τα φάσματα σχεδιασμού τύπου 1 του EC8 και $1.0 < S < 1.80$ για τα φάσματα σχεδιασμού τύπου 2 του EC8 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους). Είναι φανερό ότι η περίπτωση αυτή δεν αφορά χώρες με υψηλή σεισμική επικινδυνότητα όπως η Ελλάδα, όπου, σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 και τις

τροποποιήσεις του, η χαμηλότερη τιμή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους σχεδιασμού $\alpha_{g, \min} = 0.16$. Μετά από αυτά αποφασίστηκε, στα πλαίσια της παρούσας, να μην εξεταστεί η σεισμική συμπεριφορά κατασκευών χαμηλής πλαστιμότητας και η έρευνα να περιοριστεί σε κτίρια μέσης είτε υψηλής πλαστιμότητας σύμφωνα με τον EC8.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς πολυώροφων κτιρίων από Ο/Σ, σχεδιασμένων σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 2 και 8 και για τα δύο επίπεδα πλαστιμότητας ('H' και 'M') που επιτρέπονται σε περιοχές υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας όπως η Ελλάδα, καθώς και η σύγκριση μεταξύ τους τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη.

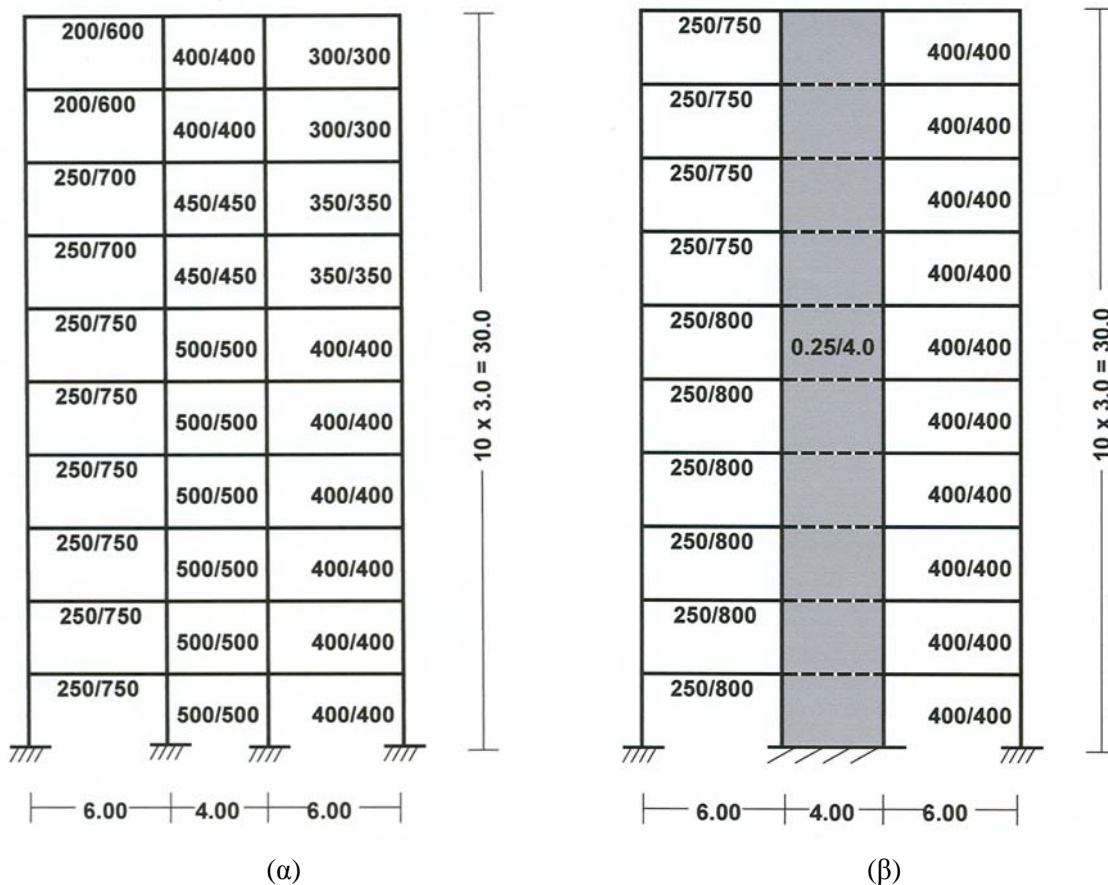
2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας σχεδιάστηκαν δύο δεκαώροφα συμμετρικά κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, ένα με αμιγώς πλαισιακό φορέα παραλαβής οριζοντίων δυνάμεων και ένα με δίδυμο φορέα, με βάση τις απαιτήσεις των Ευρωκωδικών 2 και 8 για τα επίπεδα υψηλής (DCH) και μέσης (DCM) πλαστιμότητας που εισάγει ο EC8 και με τιμή σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους σχεδιασμού $\alpha_g = 0.25 g$. Το κάθε ένα από τα δύο κτίρια θεωρήθηκε ότι αποτελείται από μία σειρά ομοίων πλαισίων σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Επομένως, για τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του κτιρίου σε μία διεύθυνση αρκεί η μελέτη ενός μόνο τυπικού επιπέδου πλαισίου. Οι διαστάσεις των διατομών των φορέων προέκυψαν ίδιες και για τα δύο επίπεδα πλαστιμότητας. Τα γραμμικά μορφώματα των τυπικών πλαισίων των φορέων φαίνονται στο Σχήμα 1, ενώ η προμέτρηση του απαιτούμενου οπλισμού (στο σύνολο είτε ξέχωρα διαμήκους και εγκάρσιου) φαίνεται στο Σχήμα 2.

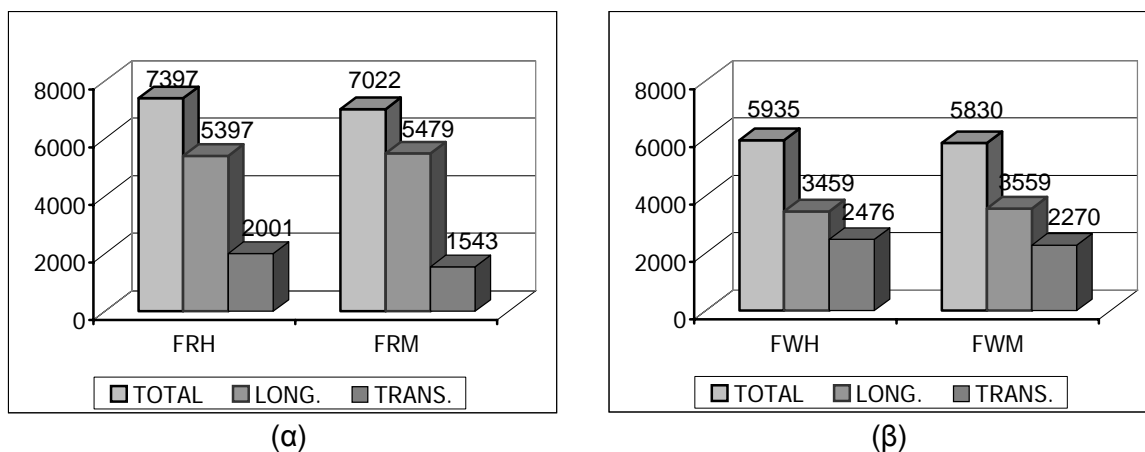
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2, στους φορείς της υψηλής πλαστιμότητας προκύπτουν ελαφρά (ως 5%) μεγαλύτερες απαιτήσεις οπλισμού σε σχέση με αυτούς της μέσης πλαστιμότητας, που οφείλονται κυρίως στις αυξημένες απαιτήσεις εγκάρσιου οπλισμού (που φθάνουν να είναι ως και 30% περισσότεροι στους πλαισιακούς φορείς υψηλής πλαστιμότητας από τους αντίστοιχους της μέσης) για να εξασφαλιστούν τα υψηλά επίπεδα πλαστιμότητας, ενώ οι διαμήκεις οπλισμοί προκύπτουν παρόμοιοι, ελαφρά περισσότεροι στους φορείς μέσης πλαστιμότητας.

Τα κτίρια αυτά 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 οι ακόλουθες τιμές ροπών αδρανείας: $I = 0.4 I_g$ για τις δοκούς, $I = 0.8 I_g$ για τα υποστυλώματα, $I = 0.6 I_g$ για το τοίχωμα στους κατώτερους ορόφους και $I = 0.5 I_g$ για το τοίχωμα στους ανώτερους ορόφους με τα χαμηλά αξονικά φορτία (Penelis and Kappos 1997).

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 καταρρεύσεις) και δεκάδες ανθρώπινα θύματα. Και τα 8 επιταχυνσιογραφήματα βάσης ομαλοποιήθηκαν, με βάση τη μέθοδο Housner, ως προς τη φασματική ένταση του φάσματος σχεδιασμού του EC8 (τύπου 1) για σεισμική επιτάχυνση εδάφους σχεδιασμού $\alpha_g = 0.25 g$ (σεισμός σχεδιασμού) αλλά και για τη διπλάσια τιμή ($\alpha_g = 0.50 g$) που θεωρήθηκε ο σεισμός 'αποφυγής κατάρρευσης'.



Σχήμα 1. Γραμμικά μορφώματα φορέων. (α) Πλαισιακοί φορείς. (β) Δίδυμοι φορείς.



Σχήμα 2. Προμέτρηση οπλισμού. (α) Πλαισιακοί φορείς. (β) Δίδυμοι φορείς.

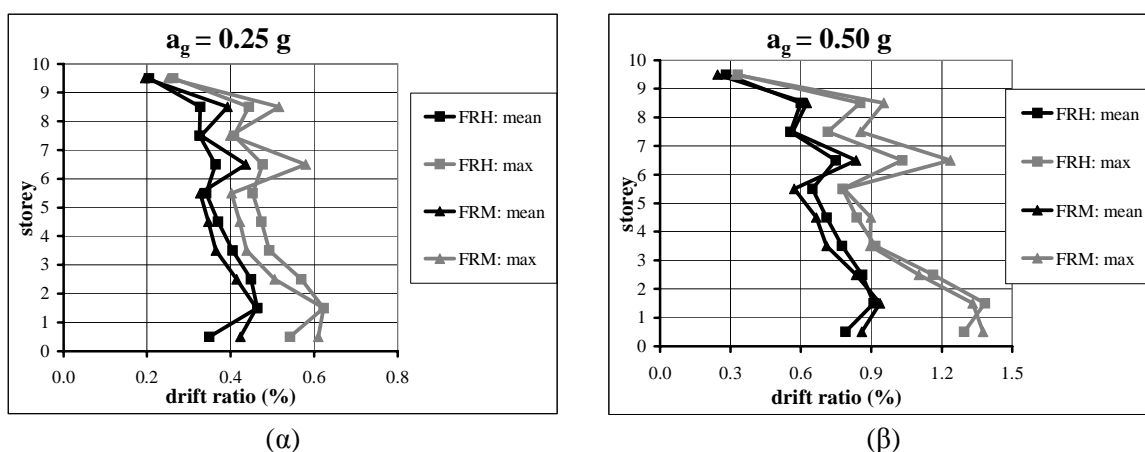
Τα κριτήρια αστοχίας που θεωρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ήταν τόσο καθολικά (αφορούν δηλαδή σε έναν όροφο ή στο σύνολο της κατασκευής) όσο και τοπικά, που αφορούν σε μια συγκεκριμένη διατομή. Ως γενικά κριτήρια αστοχίας θεωρήθηκαν οι μεγάλες τιμές των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων και συγκεκριμένα 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 κατακορύφων 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. Εξάλλου, οι επιμέρους διατομές θεωρήθηκε ότι αστοχούν είτε εφόσον απαιτούνται πλαστικές στροφές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες διαθέσιμες (καμπτική αστοχία) είτε εφόσον οι τιμές των τεμνουσών 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 μ . Για τιμές του μ μεγαλύτερες του 4 το μερίδιο του σκυροδέματος μηδενίζεται στις δοκούς, ενώ στα κατακόρυφα στοιχεία (όπου συνυπάρχει η εγκάρσια θλίψη) παραμένει πάντα μια ελάχιστη τιμή $V_c = 0.3 V_{c0}$.

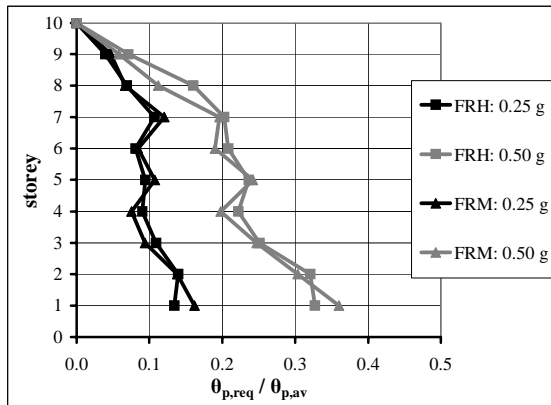
3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.1 Πλαισιακοί φορείς

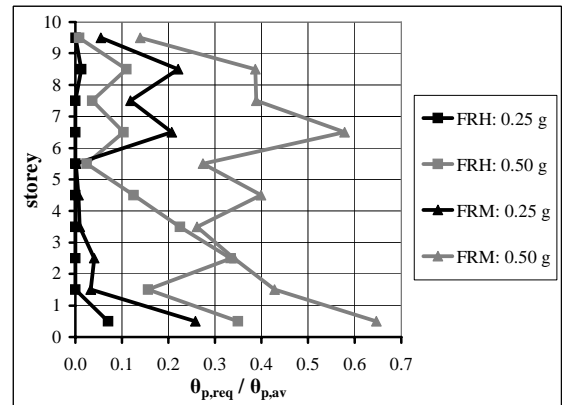
Στο Σχήμα 3 φαίνονται οι ανηγμένες τιμές των μεγίστων σχετικών μετακινήσεων ορόφων των πλαισιακών φορέων του Σχ. 1α (ως FRH αναφέρεται ο πλαισιακός φορέας υψηλής πλαστιμότητας ενώ ως FRM ο αντίστοιχος της μέσης). Με μαύρη γραμμή έχει σχεδιαστεί ο μέσος όρος των οκτώ τιμών σχετικού βέλους ορόφου που αντιστοιχούν στα οκτώ επιταχυνσιογραφήματα βάσης που θεωρήθηκαν (σύμφωνα με τον EC8 επιτρέπεται να θεωρούνται μέσες τιμές όταν η ανάλυση έχει γίνει για τουλάχιστον επτά επιταχυνσιογραφήματα) ενώ με γκριζα γραμμή φαίνεται η μέγιστη τιμή που προέκυψε για κάποια διέγερση. Όπως φαίνεται από το σχήμα, όλες οι τιμές σχετικών βελών είναι σχετικά χαμηλές, με μεγαλύτερη τιμή το 0.62% για το σεισμό σχεδιασμού (αντίστοιχη μέση τιμή 0.54%) και 1.38% για το διπλάσιο σεισμό (αντίστοιχη μέση τιμή 0.92%). Οι τιμές αυτές είναι πολύ χαμηλότερες από το 2% που είχε θεωρηθεί ως όριο αστοχίας και θεωρούνται χαμηλές, πολύ περισσότερο που αφορούν σε δεκαώροφους καθαρά πλαισιακούς φορείς των οποίων οι τυχόν τοιχοπληρώσεις, οι οποίες γενικά αυξάνουν τη δυσκαμψία των κατασκευών, έχουν αγνοηθεί κατά την ανάλυση. Επιπλέον, δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο πλαστιμοτήτων.



Σχήμα 3. Ανηγμένα σχετικά βέλη ορόφων πλαισιακών φορέων. (α) $a_g = 0.25 \text{ g}$. (β) $a_g = 0.50 \text{ g}$.

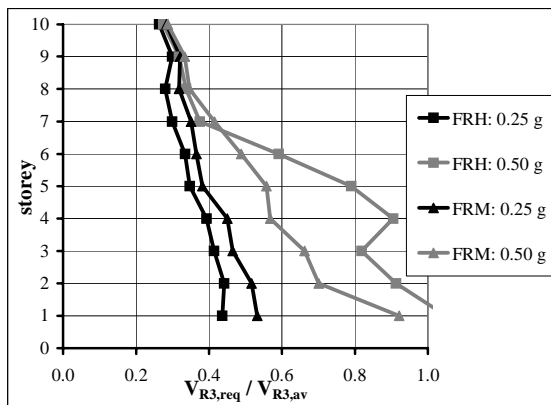


(α)

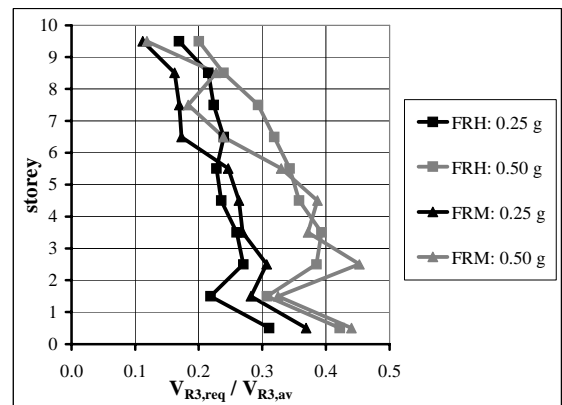


(β)

Σχήμα 4. Λόγοι απαιτούμενων προς διαθέσιμες τιμές πλαστικών στρωφών δομικών στοιχείων πλαισιακών φορέων. (α) Δοκοί. (β) Υποστύλωματα.

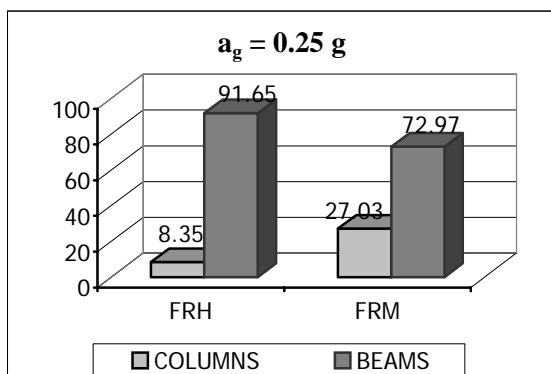


(α)

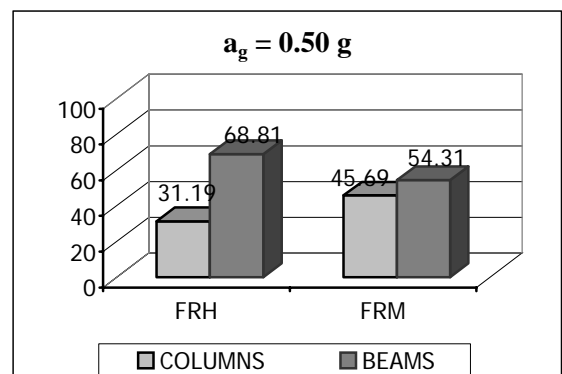


(β)

Σχήμα 5. Έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού πλαισιακών φορέων. (α) Δοκοί. (β) Υποστύλωματα.



(α)



(β)

Σχήμα 6. Απορρόφηση ενέργειας στους πλαισιακούς φορείς. (α) $a_g = 0.25$ g. (β) $a_g = 0.50$ g.

Στο σχήμα 4 φαίνονται οι λόγοι (μέσες τιμές) των απαιτούμενων προς τις διαθέσιμες ικανότητες πλαστικών στροφών των δοκών (Σχ. 4α) και υποστυλωμάτων (Σχ. 4β) των πλαισιακών φορέων του σχήματος 1α. Οι μαύρες γραμμές αντιστοιχούν στα αποτελέσματα του σεισμού σχεδιασμού ενώ οι γκριζές στα αντίστοιχα του σεισμού αποφυγής κατάρρευσης. Όπως φαίνεται στο 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 σεισμό σχεδιασμού και το 0.35 για το διπλάσιο, ενώ ελάχιστες είναι οι διαφορές μεταξύ των δύο πλαστιμοτήτων. Ακόμη καλύτερη είναι η εικόνα στα υποστυλώματα υψηλής πλαστιμότητας (Σχ. 4β) όπου, για το σεισμό σχεδιασμού, πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται μόνο στη βάση και στον 9^ο όροφο, απόδειξη ότι ο ικανοτικός σχεδιασμός που εισάγει ο EC8 είναι επιτυχής για την υψηλή πλαστιμότητα. Πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται στα εσωτερικά υποστυλώματα του φορέα μέσης πλαστιμότητας (που έχουν τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις και οπλισμό με τα αντίστοιχα της υψηλής, ενώ οι δοκοί που συντρέχουν σε αυτά διαθέτουν σαφώς περισσότερους διαμήκεις οπλισμούς από ότι οι αντίστοιχες του FRH), ωστόσο η τιμή του λόγου $\theta_{p,req}/\theta_{p,av}$ δεν ξεπερνά το 0.26 (στη βάση) για το σεισμό σχεδιασμού και το 0.65 για το διπλάσιο (Σχ. 4β).

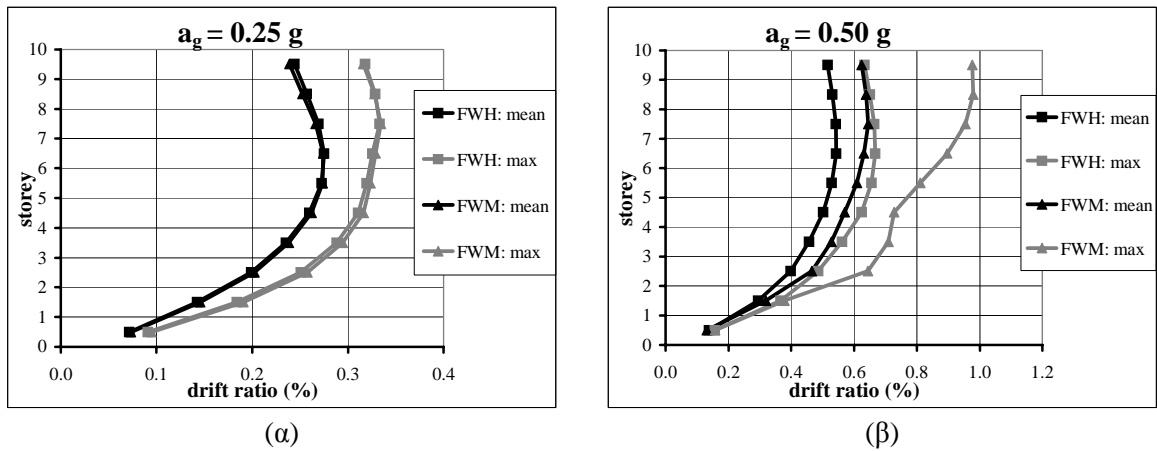
Στο σχήμα 5 φαίνεται ο έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού στις δοκούς (Σχ. 5α) και τα υποστυλώματα (Σχ. 5β) των πλαισιακών φορέων. Όπως φαίνεται στο Σχ. 5α, οι μέγιστες τέμνουσες δοκών που προκύπτουν από την ανάλυση για το σεισμό σχεδιασμού δεν ξεπερνούν το 55% των αντίστοιχων αντοχών, με τις δοκούς μέσης πλαστιμότητας (που έχουν λιγότερους εγκάρσιους οπλισμούς) να εμφανίζουν, όπως αναμενόταν, μεγαλύτερες τιμές $V_{R3,req}/V_{R3,av}$. Ωστόσο, στο διπλάσιο σεισμό η εικόνα αντιστρέφεται με τις δοκούς υψηλής πλαστιμότητας να εμφανίζουν σαφώς μεγαλύτερες τιμές λόγου $V_{R3,req}/V_{R3,av}$ μέχρι και τον 8^ο όροφο, ενώ οι δοκοί του 1^{ου} ορόφου (και για κάποιους σεισμούς και των υπολοίπων, μέχρι και τον 7^ο), αστοχούν από διάτμηση (Σχ. 5α). Αστοχία από διάτμηση εμφανίζεται και στις δοκούς 1^{ου} ορόφου του FRM για κάποιες καταγραφές, αλλά η μέση τιμή του λόγου $V_{R3,req}/V_{R3,av}$ είναι $0.92 < 1.0$. Η χειρότερη συμπεριφορά σε διάτμηση των δοκών υψηλής πλαστιμότητας σε σχέση με αυτές της μέσης μπορεί να αποδοθεί στον υψηλό βαθμό ανελαστικοποίησης σε ένα σεισμό διπλάσιας έντασης από αυτήν του σεισμού σχεδιασμού, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του σκυροδέματος στην περιοχή της στήριξης και την ανάληψη της τέμνουσας αποκλειστικά από τον υπάρχοντα οπλισμό, που φαίνεται να μην επαρκεί. Στην περίπτωση των δοκών του FRM, που διαθέτουν λιγότερο εγκάρσιο οπλισμό αλλά περισσότερο διαμήκη, μπορεί οι λόγοι $\theta_{p,req}/\theta_{p,av}$ να προκύπτουν αντίστοιχοι και ίσως ελαφρά δυσμενέστεροι από του FRH, οι τιμές όμως απαιτούμενης πλαστιμότητας μ προκύπτουν μικρότερες από ότι στο FRH, με αποτέλεσμα να συνεισφέρει και το σκυρόδεμα στην παραλαβή της τέμνουσας ακόμη και στον πολύ ισχυρό σεισμό. Μια λύση στο πρόβλημα θα ήταν πιθανόν η καθιέρωση αυστηρότερων απαιτήσεων ελαχίστου εγκάρσιου οπλισμού στις δοκούς υψηλής πλαστιμότητας (π.χ. η απαγόρευση χρήσης συνδετήρων διαμέτρου Φ6). Όσον αφορά στα υποστυλώματα, η συμπεριφορά σε διάτμηση και των δύο πλαισιακών φορέων κρίνεται ικανοποιητική αφού σε καμία περίπτωση ο λόγος $V_{R3,req}/V_{R3,av}$ δεν ξεπερνά το 0.50 (Σχ. 5β).

Στο σχήμα 6 φαίνεται η απορρόφηση ενέργειας από τα δομικά στοιχεία των φορέων που εξετάστηκαν για το σεισμό σχεδιασμού (Σχ. 6α) και το διπλάσιο (Σχ. 6β). Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο ικανοτικός σχεδιασμός του φορέα FRH ήταν επιτυχής, αφού το 92% της ενέργειας που εκλύθηκε κατά το σεισμό σχεδιασμού απορροφήθηκε από τις δοκούς, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό του FRM ήταν 73%. Αλλά και στο διπλάσιο του σεισμού σχεδιασμού το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας απορροφάται από τις δοκούς με τα αντίστοιχα ποσοστά να έχουν τιμές 69% και 54% για το FRH και το FRM αντίστοιχα..

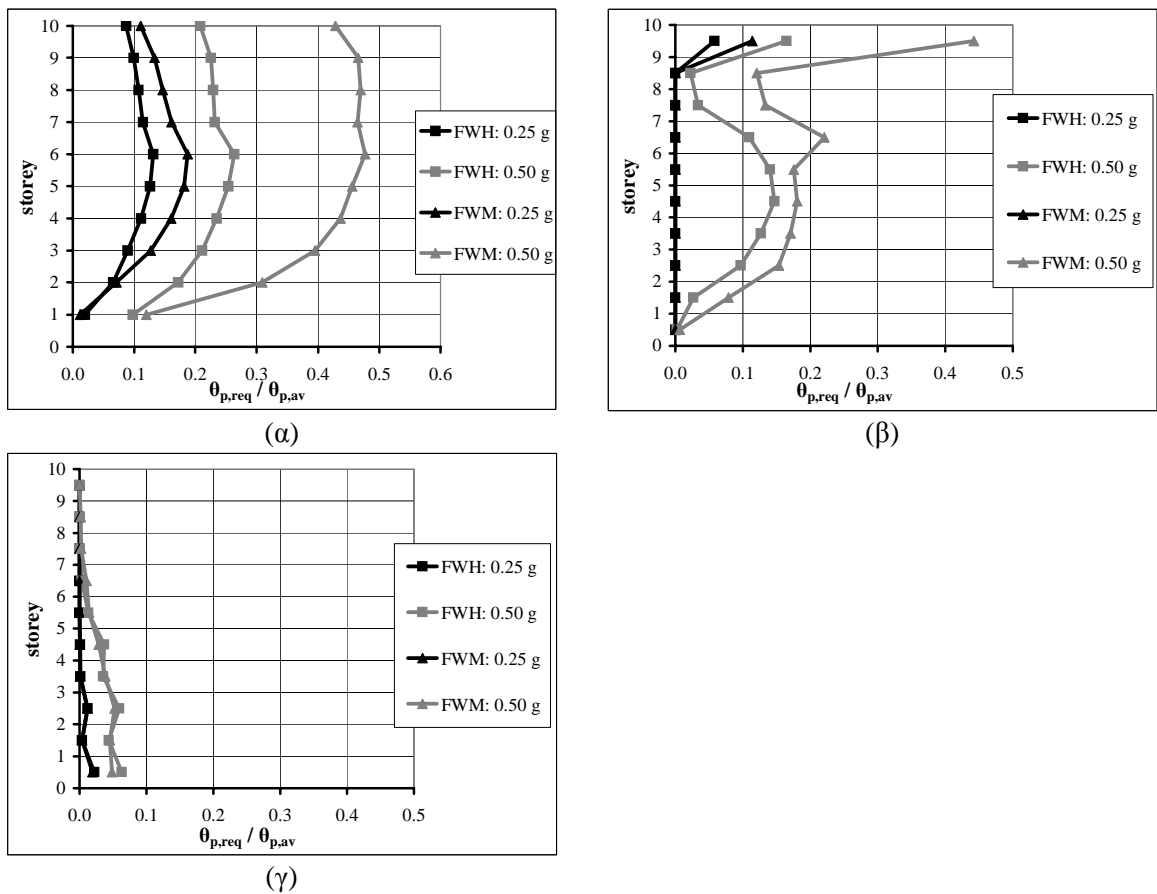
3.2 Δίδυμοι φορείς

Στο Σχ. 7 φαίνονται οι ανηγμένες σχετικές μετακινήσεις ορόφων των διδύμων φορέων του Σχ.1β (FWH είναι ο φορέας υψηλής πλαστιμότητας ενώ FWM ο αντίστοιχος της μέσης). Όπως φαίνεται από το σχήμα, όλες οι τιμές των σχετικών βελών είναι χαμηλές, μην ξεπερνώντας το 0.35% για το σεισμό σχεδιασμού και το 1.00% για το διπλάσιό του στη δυσμενέστερη περίπτωση. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των αμιγώς πλαισιακών φορέων λόγω της

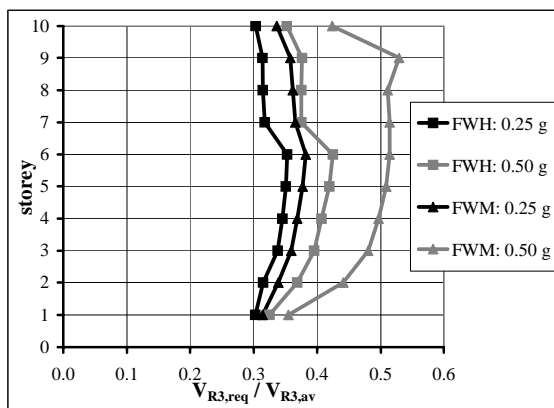
μεγάλης δυσκαμψίας του τοιχώματος. Εξάλλου, τα σχετικά βέλη ορόφων σχεδόν ταυτίζονται για το σεισμό σχεδιασμού, ενώ στο διπλάσιο σεισμό το FWM παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές.



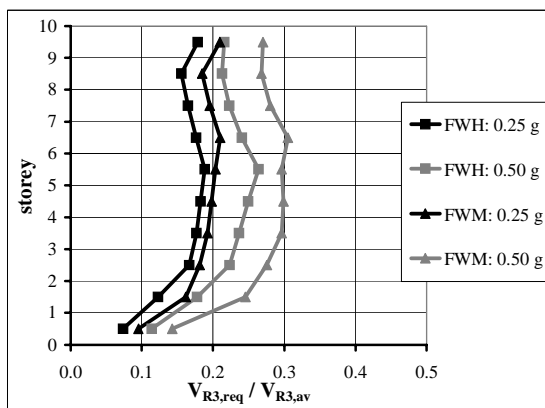
Σχήμα 7. Ανηγμένα σχετικά βέλη ορόφων διδύμων φορέων. (α) $a_g = 0.25 \text{ g}$. (β) $a_g = 0.50 \text{ g}$.



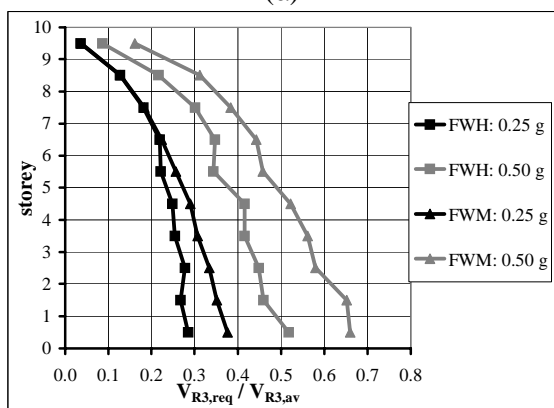
Σχήμα 8. Λόγοι απαιτούμενων προς διαθέσιμες τιμές πλαστικών στρωφών δομικών στοιχείων διδύμων φορέων. (α) Δοκοί. (β) Υποστρώματα. (γ) Τοιχώματα



(α)

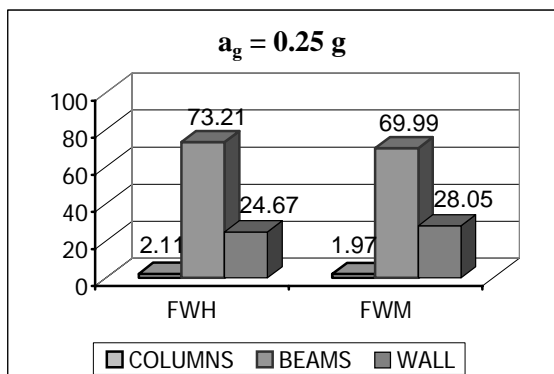


(β)

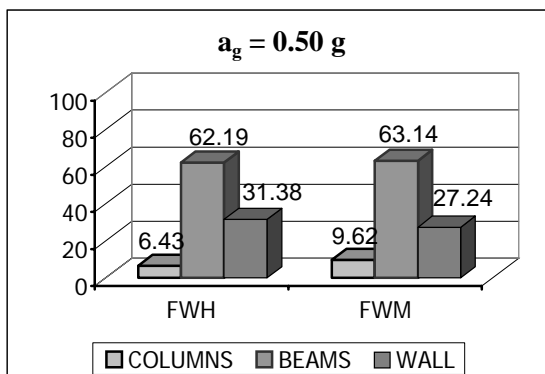


(γ)

Σχήμα 9. Έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού διδύμων φορέων. (α) Δοκοί. (β) Υποστυλώματα. (γ) Τοιχώματα



(α)



(β)

Σχήμα 10. Απορρόφηση ενέργειας στους δίδυμους φορείς. (α) $a_g = 0.25$ g. (β) $a_g = 0.50$ g.

Στο σχήμα 8 φαίνονται οι λόγοι (μέσες τιμές) των απαιτούμενων προς τις διαθέσιμες ικανότητες πλαστικών στροφών των δοκών (Σχ. 8α), των υποστυλωμάτων (Σχ. 8β) και του τοιχώματος (Σχ.

8γ) των διδύμων φορέων του σχήματος 1β. Όπως φαίνεται στο Σχ. 8α, οι τιμές των λόγων $\theta_{p,req}/\theta_{p,av}$ των δοκών είναι σχετικά χαμηλές, αντίστοιχες με αυτές των πλαισιακών φορέων, ενώ ο φορέας υψηλής πλαστιμότητας φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη απόκριση από τον αντίστοιχο της μέσης. Αντίστοιχη είναι η εικόνα και στα υποστυλώματα (Σχ. 8β) ενώ η τιμή του λόγου $\theta_{p,req}/\theta_{p,av}$ του τοιχώματος σε καμιά περίπτωση δεν ξεπερνά το 0.10 (Σχ. 8γ).

Στο σχήμα 9 φαίνεται ο έλεγχος διαγώνιου εφελκυσμού στις δοκούς (Σχ. 9α), τα υποστυλώματα (Σχ. 9β) και το τοίχωμα (Σχ. 9γ) των διδύμων φορέων. Όπως φαίνεται στο Σχ. 9α, οι μέγιστες τέμνουσες δοκών που προκύπτουν από την ανάλυση δεν ξεπερνούν σε καμιά περίπτωση το 55% των αντίστοιχων αντοχών, με τις δοκούς μέσης πλαστιμότητας (που έχουν λιγότερους εγκάρσιους οπλισμούς) να εμφανίζουν, όπως αναμενόταν, μεγαλύτερες τιμές $V_{R3,req}/V_{R3,av}$. Ακόμη καλύτερη είναι η εικόνα στα υποστυλώματα (Σχ. 9β), όπου ο λόγος $V_{R3,req}/V_{R3,av}$ δεν ξεπερνά πουθενά το 0.40. Όσον αφορά στο τοίχωμα, οι μέσες τιμές των λόγων $V_{R3,req}/V_{R3,av}$ κρίνονται ικανοποιητικές αφού στο δυσμενέστερο σημείο (στη βάση) δεν ξεπερνούν το 0.40 για το σεισμό σχεδιασμού και το 0.70 για το διπλάσιο (Σχ. 9γ). Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι για μια καταγραφή (τη μία από τις δύο συνιστώσες του σεισμού της Θεσσαλονίκης) παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία του τοιχώματος μέσης πλαστιμότητας στη βάση, που αποτελεί μια από τις πλέον ανεπιθύμητες μορφές αστοχίας φορέα. Ωστόσο, επειδή αφενός αυτό παρατηρήθηκε μόνο στη συγκεκριμένη καταγραφή και με δεδομένη, αφετέρου, την ευαισθησία των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης στα δεδομένα επιταχυνσιογραφήματα βάσης (η οποία αποτελεί και το λόγο που επιβάλλεται η χρήση σημαντικού αριθμού από αυτά για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων) κρίνεται ότι η αστοχία που παρουσιάστηκε αποτελεί μεμονωμένο γεγονός και δεν πρέπει να επηρεάσει τα συμπεράσματα της ανάλυσης.

Τέλος, στο σχήμα 10 φαίνεται η απορρόφηση ενέργειας από τα δομικά στοιχεία των διδύμων φορέων που εξετάστηκαν για το σεισμό σχεδιασμού (Σχ. 10α) και το διπλάσιο (Σχ. 10β). Όπως φαίνεται από το σχήμα, και για τους δύο φορείς, το σύνολο σχεδόν της ενέργειας που εκλύθηκε κατά το σεισμό σχεδιασμού απορροφήθηκε από τις δοκούς και το τοίχωμα (73% και 25% αντίστοιχα για το φορέα FWH, ενώ το αντίστοιχα ποσοστά του FWM ήταν 70% και 28%), ενώ τα υποστυλώματα και των δύο φορέων απορρόφησαν μόλις το 2% της ενέργειας που εκλύθηκε. Αλλά και στο διπλάσιο του σεισμού σχεδιασμού το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας απορροφάται από τις δοκούς και τα τοιχώματα, με τα υποστυλώματα να απορροφούν μόλις το 6.5% και 9.5% της ενέργειας για το FWH και το FWM αντίστοιχα (Σχ. 10).

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Οι φορείς που σχεδιάστηκαν με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 και για τα δύο επίπεδα πλαστιμότητας που συστήνονται για περιοχές με μεγάλη σεισμική επικινδυνότητα φαίνονται να συμπεριφέρονται ικανοποιητικά στο σεισμό σχεδιασμού αφού παρουσιάζουν γενικά χαμηλές τιμές σχετικών μετακινήσεων ορόφων, δημιουργούν 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. Η καθολική συμπεριφορά όλων των φορέων ως συνόλων κρίνεται ικανοποιητική αφού οι σχετικές μετακινήσεις ορόφων εμφάνισαν, σε κάθε περίπτωση, σχετικά χαμηλές τιμές, σημαντικά χαμηλότερες από τα όρια που είχαν τεθεί. Όπως αναμενόταν, σαφώς καλύτερη ήταν η εικόνα στους (πιο δύσκαμπτους) δίδυμους φορείς.
3. Η καμπτική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων όλων των φορέων κρίνεται ικανοποιητική αφού δεν παρουσιάστηκε καμπτική αστοχία σε κανένα στοιχείο, ούτε για σεισμό με ένταση διπλάσια αυτής του σεισμού σχεδιασμού.
4. Οι δοκοί των πλαισιακών φορέων υψηλής πλαστιμότητας φαίνεται να παρουσιάζουν πρόβλημα διατμητικής αντοχής στον πολύ δυνατό σεισμό (με ένταση διπλάσια αυτής του σεισμού

σχεδιασμού) λόγω εκτεταμένης ανελαστικοποίησης και, ως εκ τούτου, αδυναμίας του σκυροδέματος να συμμετάσχει στην παραλαβή της τέμνουσας. Αντίστοιχο πρόβλημα δε φαίνεται να παρουσιάζουν οι δοκοί του πλαισιακού φορέα μέσης πλαστιμότητας. Πιθανή λύση στο πρόβλημα θα έδινε η καθιέρωση αυστηρότερων ορίων ελαχίστων εγκαρσίων οπλισμών δοκών (π.χ. η απαγόρευση της χρήσης του Φ6) στις δοκούς υψηλής πλαστιμότητας.

5. Η διατμητική συμπεριφορά των κατακόρυφων στοιχείων όλων των φορέων κρίνεται γενικά ικανοποιητική.
6. Δε φαίνεται να υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των φορέων υψηλής και μέσης πλαστιμότητας ούτε από τεχνικής αλλά ούτε και από οικονομικής άποψης και εναπόκειται στο μελετητή Μηχανικό να επιλέξει ποιο από τα δύο επίπεδα πλαστιμότητας προτιμά.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

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).

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.

Penelis, G.G. and Kappos, A.J. (1997). *Earthquake-resistant Concrete Structures*. E & FN SPON (Chapman & Hall), London.