

Έργο – Ερευνητικό Πρόγραμμα :

Θεωρητική - Παραμετρική Διερεύνηση και Βελτιστοποίηση της Σεισμικής Ενίσχυσης Συμβατικών Κτιριακών Κατασκευών με Φέροντα Οργανισμό από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Πυλωτή μέσω μη έκκεντρων Χαλύβδινων Χιαστών Συνδέσμων Δυσκαμψίας (concentric – X-braces)

Περίληψη

Ερευνητικού

Προγράμματος

Επιστημονικός Υπεύθυνος:

Δημήτρης Σ. Σοφιανόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής

Φορέας Χρηματοδότησης:

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού
και Προστασίας

Βόλος , Αύγουστος 2012

1. Σκοπός και Αντικείμενο του Προγράμματος

Ο σκοπός – αντικείμενο του Προγράμματος – Έργου συνίσταται στην Θεωρητική και Παραμετρική Διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής άμεσα εφαρμόσιμων κανόνων και συστάσεων, προκειμένου επιτευχθεί η σεισμική ενίσχυση υφιστάμενων συμβατικών κτιρίων με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα με πυλωτή, με χρήση μη έκκεντρων χαλύβδινων συνδέσμων δυσκαμψίας (concentric X-Braces).

Τέτοιου είδους κατασκευές, με τοιχοπληρωμένα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος από τον 1^ο όροφο και άνω, με πυλωτή στο ισόγειο, απαντώνται κατά κόρον στην Ελληνική Επικράτεια. Αυτές, ως επί το πλείστον, έχουν μελετηθεί – κατασκευαστεί με βάση παλαιότερους Κανονισμούς (πριν το 1985) και κατά τεκμήριο παρουσιάζουν αυξημένη σεισμική τρωτότητα ιδιαίτερα στην πυλωτή καθόσον:

(α) Η πιθανότητα δημιουργίας «μαλακού ορόφου» υπό σεισμικές διεγέρσεις είναι ιδιαζόντως αυξημένη για το ισόγειο, με γνωστές τις σχετικές επιπτώσεις, οι δε τοιχοπληρώσεις άνωθεν δεν έχουν ληφθεί υπόψη στον υποτυπώδη για τα σημερινά δεδομένα αντισεισμικό σχεδιασμό.

(β) Δεν υπάρχει ομοιόμορφη καθ' ύψος κατανομή ούτε της δυσκαμψίας ούτε της αντοχής του δομήματος, γεγονός που το καθιστά ευάλωτο σε εδαφικές κινήσεις.

Λόγω των ανωτέρω, στο παρόν Πρόγραμμα μελετάται η αξιολόγηση μέσω θεωρητικών και παραμετρικών αναλύσεων της επίδρασης και της βιωσιμότητας της χρήσης μη έκκεντρων χαλύβδινων Χ-συνδέσμων δυσκαμψίας, ώστε να αφαιρεθεί (ή να μειωθεί αισθητά) η σεισμική τρωτότητα πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ) με πυλωτή. Η όλη μελέτη βασίστηκε στη φιλοσοφία της «αποκατάστασης» της συνέχειας της δυσκαμψίας και της αντοχής καθ' ύψος, παρά στην οποιαδήποτε ενίσχυση δομικών μελών.

2. Μεθοδολογία

Μετά από λεπτομερή βιβλιογραφική ανασκόπηση και λαμβάνοντας υπ' όψη τα ομολογουμένως πενιχρά σχετικά ευρήματα, το Πρόγραμμα υλοποιήθηκε σε τρία στάδια, που έχουν ως εξής:

2.1. Παραμετρική μελέτη

Με σκοπό τον προσδιορισμό του εύρους δυσκαμψίας και αντοχής που συνεισφέρει η παρουσία Χ-συνδέσμων από χάλυβα (χωρίς εκκεντρότητα) στη συνολική απόκριση πλαισίων από ΟΣ με πυλωτή πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη μέσω του ειδικού λογισμικού RUAUMOKO^[1], η οποία συνοπτικά περιελάμβανε τα ακόλουθα:

(α) Προσομοίωση και βαθμονόμηση της συμπεριφοράς χαλύβδινου συνδέσμου – ενισχυτικού μέλους με χρήση του μοντέλου των Remennikov και Walpole^[2] με κατάλληλο επιμερισμό σε ζώνες ανελαστικής συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

(β) Προσομοίωση και βαθμονόμηση της συμπεριφοράς τοιχοπλήρωσης μέσω του στοιχείου τύπου ελατηρίου σε συνδυασμό με τον κανόνα υστέρησης τοίχου πλήρωσης διαγωνίου στοιχείου του Crisafulli^[3,4].

(γ) Προσομοίωση και βαθμονόμηση της συμπεριφοράς ραβδωτών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω υιοθέτησης ενός ιδιαίτερου στοιχείου δοκού – στύλου, το οποίο λαμβάνει υπ' όψη τη μη γραμμική συμπεριφορά υλικού, ενώ τα διαγράμματα ροπών – καμπυλοτήτων και αλληλεπίδρασης αξονικού φορτίου – ροπής αποκτήθηκαν από το λογισμικό MyBiAxial^[5].

(δ) Υιοθέτηση της φιλοσοφίας *αφαίρεσης της σεισμικής τρωτότητας της πυλωτής*, με χρήση μη έκκεντρων χαλύβδινων Χ – συνδέσμων, με σκοπό την επίτευξη συνέχειας της δυσκαμψίας και της αντοχής, χωρίς επίδραση σε άλλα δομικά μέλη.

(ε) Υποθέτοντας την πυλωτή τοιχοπληρωμένη, και τη συμπεριφορά του σχετικού πλαισίου (πλήρως τοιχοπληρωμένου καθ' ύψος) ως σημείο αναφοράς, υπολογισμός της πλευρικής αντοχής V_{INF} και της δυσκαμψίας K_{INF} των τοίχων αυτών με χρήση της αξονικής αντοχής και της δυσκαμψίας των διαγωνίων στοιχείων του προσομοιώματος αυτών.

(στ) Θεώρηση των ακόλουθων γενικών περιπτώσεων πλαισίων, που αντιπροσωπεύουν τυπικές καθ' ύψος επίπεδες διατάξεις του φέροντα οργανισμού των υπό μελέτη δομημάτων (σύμφωνα με τον Πίνακα 1 που ακολουθεί):

(στ₁) Απλό (μη τοιχοπληρωμένο) πλαίσιο, που έχει μελετηθεί

με παλαιό αντισεισμικό κανονισμό

(στ₂) Πλήρως τοιχοπληρωμένο πλαίσιο

(στ₃) Πλαίσιο με πυλωτή

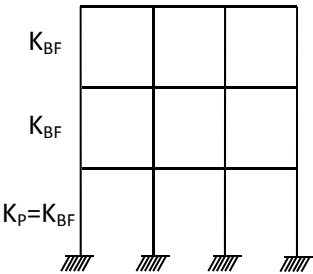
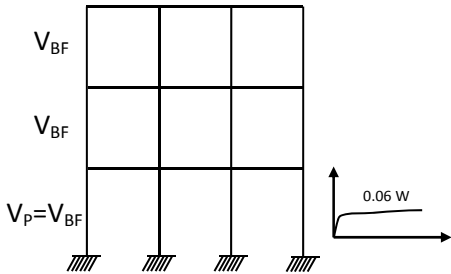
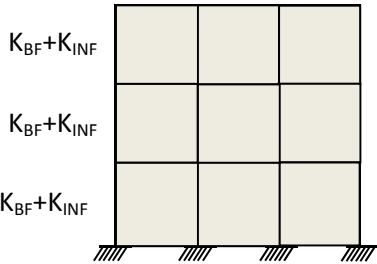
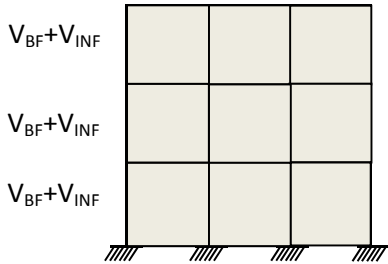
(στ₄) Ενισχυμένο πλαίσιο (Χ-σύνδεσμοι στη πυλωτή, τοίχοι από τον 1^ο όροφο και πάνω)

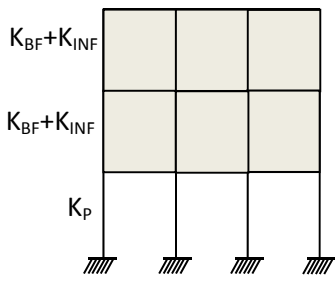
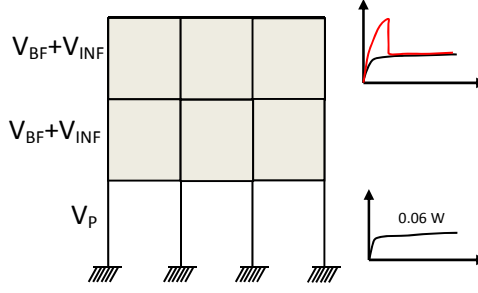
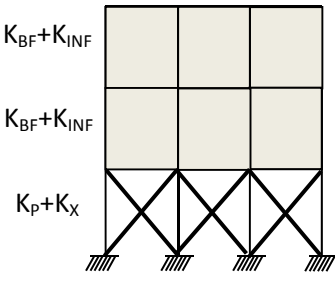
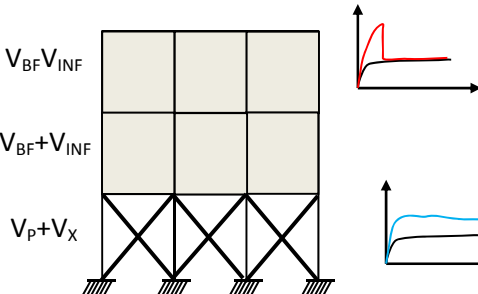
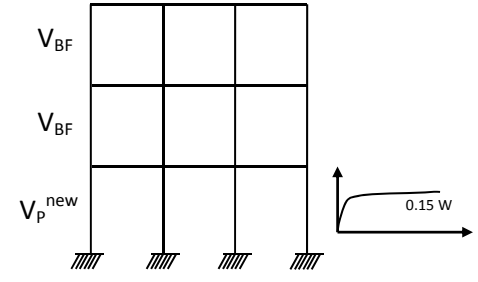
και ορισμός των παραμέτρων δυσκαμψίας K και (πλευρικής) αντοχής V κατά περίπτωση

K_{BF} : Δυσκαμψία των ανώτερων ορόφων του απλού πλαισίου

K_P	:	Δυσκαμψία του ισογείου του απλού πλαισίου και του πλαισίου με πυλωτή ($K_P = K_{BF}$)
K_{IN}	:	Δυσκαμψία όλων των τοίχων σε έναν όροφο
K_X	:	Πλευρική δυσκαμψία όλων των Χ-συνδέσμων του ισογείου του ενισχυμένου πλαισίου
V_{BF}	:	Αντοχή των ανώτερων ορόφων του απλού πλαισίου
V_P	:	Αντοχή του ισογείου του απλού πλαισίου και του πλαισίου με πυλωτή ($V_P = V_{BF}$)
V_{IN}	:	Αντοχή όλων των τοίχων σε έναν όροφο
V_X	:	Πλευρική αντοχή όλων των Χ-συνδέσμων του ισογείου του ενισχυμένου πλαισίου

Πίνακας 1. Τύπος πλαισίου και παράμετροι ορόφων για δυσκαμψία και αντοχή

Τύπος Πλαισίου	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ
ΑΠΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ Μελέτη με παλαιό αντισεισμικό κανονισμό		
ΠΛΗΡΩΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ		

<p>ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ ΠΥΛΩΤΗ</p>		
<p>ΕΝΙΣΧΥ- ΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ</p>		
<p>ΑΠΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ Μελέτη με ΙΣΧΥΟΝΤΑ αντισεισμικό κανονισμό</p>		

(ζ) Υπολογισμός της πλευρικής δυσκαμψίας και αντοχής, που απαιτείται να παρασχεθούν από τους συνδέσμους, έτσι ώστε να απαλειφθούν οι σοβαρές κατακόρυφες ανωμαλίες – ασυνέχειες των πλαισίων με πυλωτή, σύμφωνα με το κατωτέρω σκεπτικό:

Καθόσον ο σκοπός της μελέτης ήταν η «αφαίρεση της σεισμικής τρωτότητας» με τοποθέτηση Χ-συνδέσμων στα φανώματα της πυλωτής, είναι λογικό να μεταχειριστεί κανείς το πλήρως τοιχοπληρωμένο πλαίσιο ως σημείο αναφοράς/βάση. Υποθέτοντας και την πυλωτή τοιχοπληρωμένη, η πλευρική αντοχή και η δυσκαμψία των

τοιχών αυτών μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση της αξονικής αντοχής και της δυσκαμψίας των διαγώνιων στοιχείων (που προσομοιάζουν τις τοιχοπληρώσεις) με βάση τις εξισώσεις:

$$V_{INF} = \cos\theta (0.5 f_m) \sum_i^{nb} w_{si} t_i \quad K_{INF} = \cos^2\theta E_m \sum_i^{nb} w_{si} t_i \quad (1)$$

όπου, n_b είναι ο αριθμός των ανοιγμάτων σε έναν όροφο, f_m είναι η πρισματική αντοχή της τοιχοποιίας σε MPa, E_m είναι το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας σε MPa ($E_m \sim 500 f_m$), w_{si} είναι το ενεργό πλάτος του διαγώνιου στοιχείου που προσομοιάζει την τοιχοποιία, t_i είναι το πάχος της τοιχοποιίας και θ είναι η γωνία του διαγώνιου στοιχείου ως προς την οριζόντια. Η σταθερά 0.5 που πολλαπλασιάζει την πρισματική αντοχή τίθεται για να ληφθεί υπόψη ότι η τοιχοποιία ρηγματώνεται και χάνει αντοχή για πολύ μικρές παραμορφώσεις, οπότε η τιμή $0.5f_m$ είναι μια εκτίμηση της ενεργού ή αξιόπιστης αντοχής της τοιχοποιίας στον υπολογισμό της πλευρικής αντοχής μιας τοιχοπλήρωσης.

Συνεπώς, όταν δεν υπάρχουν τοίχοι στην πυλωτή, τα V_{IN} και K_{IN} θα είναι το έλλειμμα σε πλευρική αντοχή και δυσκαμψία του απλού πλαισίου σε σχέση με το πλήρως τοιχοπληρωμένο. Ορίζοντας το λόγο μεταξύ της αντοχής της πυλωτής και του αμέσως υπερκείμενου ορόφου (με την υπόθεση ότι όλοι οι παραπάνω όροφοι έχουν τις ίδιες με αυτό ιδιότητες) ως β και τον αντίστοιχο λόγο δυσκαμψιών ως α μπορούμε να γράψουμε:

$$\alpha = \frac{(K_A + K_P)_{1st/piloti}}{(K_{BF} + K_{INF})_{2nd}} \quad \beta = \frac{(V_A + V_P)_{1st/piloti}}{(V_{BF} + V_{INF})_{2nd}} \quad (2)$$

όπου K_A και V_A είναι το έλλειμμα σε δυσκαμψία και αντοχή του πλαισίου με πυλωτή, όπως ορίστηκε προηγούμενα. Αυτές οι τιμές θα αντικατασταθούν με K_x και V_x στην περίπτωση του ενισχυμένου πλαισίου. Τιμές των α και β ίσες με τη μονάδα καταδεικνύουν ομοιόμορφη κατανομή δυσκαμψίας και αντοχής μεταξύ των δύο πρώτων ορόφων (ισογείου και 1ου κατά τα Ελληνικά ειωθότα). Το κάτω φράγμα των α και β υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2) για K_A και V_A ίσα με το μηδέν. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων που υπεισέρχονται στις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να ευρεθούν αριθμητικά (όπως στην παρούσα μελέτη) ή με απ' ευθείας υπολογισμούς, αν οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιηθούν κατά το σχεδιασμό. Θεωρώντας ότι τα K_A και V_A πρόκειται να υπολογιστούν μετά τον καθορισμό των α και β , οι εξισώσεις λαμβάνουν την μορφή:

$$K_A = \alpha (K_{BF} + K_{INF})_{2nd} - (K_P)_{1st/piloti} \\ V_A = \beta (V_{BF} + V_{INF})_{2nd} - (V_P)_{1st/piloti} \quad (3)$$

(η) Πραγματοποίηση παραμετρικών αναλύσεων για δύο τυπικά

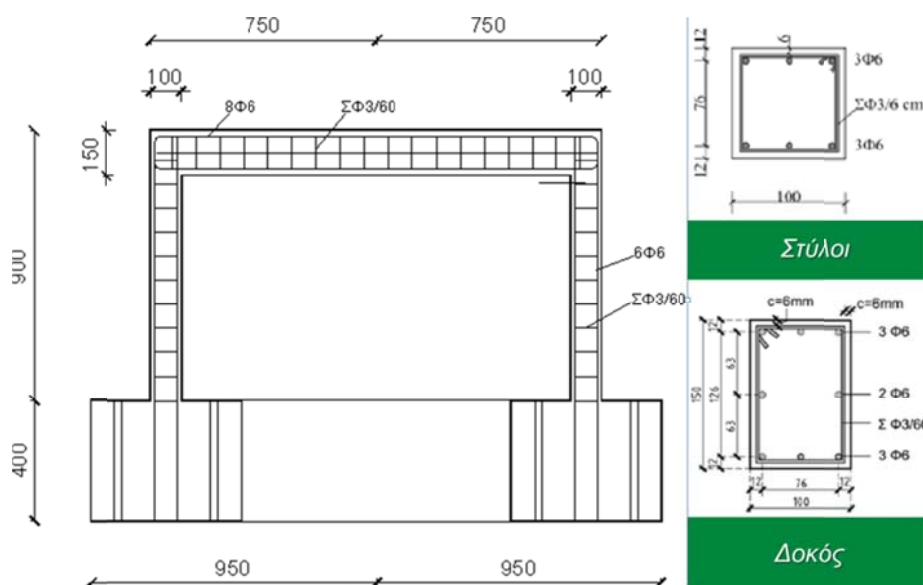
πλαίσια από ΟΣ με τρία ανοίγματα σε κάτοψη, ενός τριώροφου και ενός πενταόροφου, που αποτελούσαν επίπεδα μέρη του Φ.Ο. κατασκευών μελετημένων με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό που ίσχυε πριν το 1985. Χρήση σημαντικού αριθμού σεισμικών

διεγέρσεων, οι οποίες προέκυψαν από ένα φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΑΚ για έδαφος τύπου Β και σεισμική ζώνη ΙΙ, υπό μορφή χρονοϊστοριών επιτάχυνσης βάσης μέσω του λογισμικού SIMQKE^[6]. Οι παραμετρικές αυτές αναλύσεις θεώρησαν σταθερές είτε τις τιμές της παραμέτρου α , με αντίστοιχο υπολογισμό της επιτευχθείσας τιμής της παραμέτρου β , είτε με σταθερές τις τιμές της παραμέτρου β , με αντίστοιχο υπολογισμό της επιτευχθείσας τιμής της παραμέτρου α . Με βάση τις ανωτέρω παραμετρικές αναλύσεις και τα σχετικά ευρήματα, προέκυψε καθαρά ότι για να επιτευχθεί ο τεθείς στόχος **αφαίρεσης της σεισμικής τρωτότητας της πυλωτής**, θα πρέπει **η δυσκαμψία και η αντοχή των Χ-συνδέσμων** να υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις:

$$1.5 < \beta < 2.5 \text{ ενώ } \alpha \approx 1.0$$

2.2. Πειραματική διερεύνηση – πρόγραμμα που υλοποιήθηκε

Στα πλαίσια του Προγράμματος πραγματοποιήθηκαν τέσσερα πειράματα. Το 1^ο πείραμα αφορούσε ένα μικρής κλίμακας πλαίσιο – δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης, οι διαστάσεις και ο οπλισμός του οποίου φαίνονται στο Σχήμα 1, υπό στατική (μονοτονική) φόρτιση. Τα υπόλοιπα τρία πειράματα αφορούσαν πλαίσια ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών με το παραπάνω, αλλά ενισχυμένα με διαφορετικές το καθένα διατάξεις χαλύβδινων Χ-συνδέσμων, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με έλεγχο πλευρικών μετατοπίσεων μεγάλου εύρους (μέχρι την αστοχία). Τα πειραματικά αποτελέσματα για το απλό πλαίσιο χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκριτική αξιολόγηση και βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων τριών πειραμάτων.



Σχήμα 1. Δοκίμιο απλού πλαισίου

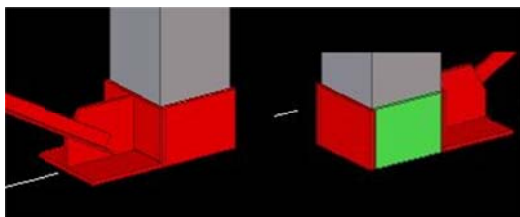
Για τα πειράματα των δοκιμών με Χ-συνδέσμους τηρήθηκαν για το σχεδιασμό και την υλοποίηση των συνδέσμων οι ακόλουθες γενικές αρχές:

(α) Η αντοχή του συστήματος των Χ-συνδέσμων να μην υπερβαίνει το πενταπλάσιο της καμπτικής αντοχής του απλού (γυμνού) πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα.

(β) Η δυσκαμψία του συστήματος των Χ-συνδέσμων να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή της τοιχοπλήρωσης, αν αυτή υπήρχε στο φάτνωμα του πλαισίου.

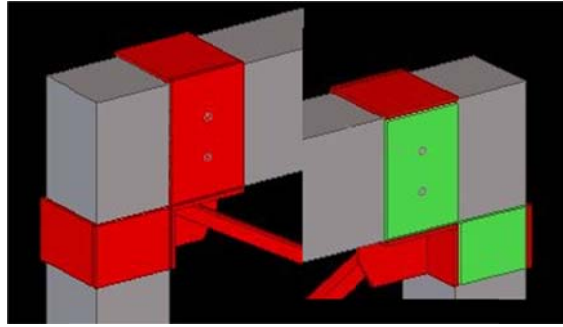
(γ) Οι συνδέσεις των Χ-συνδέσμων μέσω κομβοελασμάτων τόσο στους κόμβους δοκών – στύλων του πλαισίου όσο και στις βάσεις των στύλων του να είναι εύκολα εφαρμόσιμες σε υφιστάμενα πλαίσια με πυλωτή.

Ιδιάζουσα σημασία για το σχεδιασμό είχε ο τρόπος υλοποίησης των συνδέσεων με κομβοελάσματα των Χ-συνδέσμων στις τέσσερις γωνίες του απλού πλαισίου. Λόγω των δυσκολιών σύνδεσης των κομβοελασμάτων στις βάσεις των στύλων με τη θεμελίωση (μεμονωμένα πέδιλα, πεδιλοδοκοί ή κοιτόστρωση) αποφασίστηκε τα εν λόγω κομβοελάσματα να μην συνδεθούν με τη θεμελίωση κατά την οριζόντια διεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, η σύνδεση με τη βάση του στύλου υλοποιήθηκε μέσω μεταλλικού κολάρου από συγκολλημένα γύρω-γύρω μεταλλικά ελάσματα. Το κολάρο αυτό δεν αγκυρώθηκε στο στύλο αλλά αφέθηκε ελεύθερη η προς τα πάνω ολίσθηση του κατά μήκος του στύλου. Προς το κάτω τούτο απεφεύχθη μέσω ελάσματος βάσης συγκολλημένου στο κομβοέλασμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο στη βάση του στύλου (επιφάνεια έδρασης). Τούτο απεικονίζεται στο Σχήμα 2 (εμπρόσθια και οπίσθια όψη)



Σχήμα 2. Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης Χ-συνδέσμων με τη βάση των στύλων

Η άνω σύνδεση κομβοελάσματος των Χ-συνδέσμων με τον κόμβο δοκού – στύλου υλοποιήθηκε μέσω ενός μεταλλικού κολάρου περί τον στύλο (όμοια με αυτό στη βάση του στύλου δεν αγκυρώνεται στη δοκό) και μέσω ενός άλλου κολάρου με τη δοκό, όπως φαίνεται στις δύο τρισδιάστατες όψεις του Σχήματος 3.



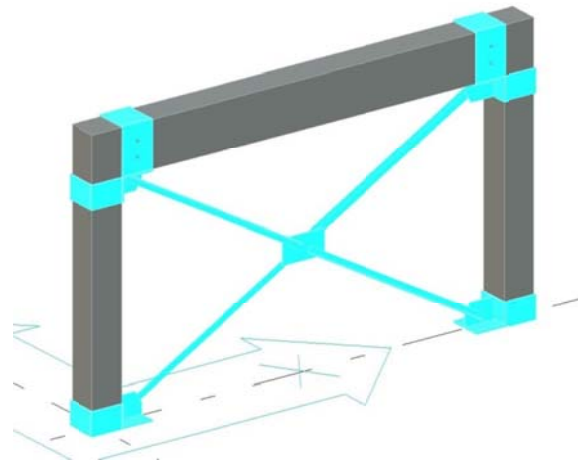
Σχήμα 3. Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης X-συνδέσμων με τον κόμβο δοκού-στύλου του πλαισίου

Είναι εμφανής η παρουσία στη σύνδεση αυτή τόσο ελάσματος στην άνω παρειά της δοκού όσο και δύο κοχλιών που διαπερνούν τη δοκό και συνδέουν το κολάρο με αυτήν. Το έλασμα αυτό χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα μόνο για λόγους κατασκευαστικής ευκολίας. Σε πραγματικές κατασκευές με πυλωτή η παρουσία του είναι ανέφικτη λόγω παρουσίας πλάκας δαπέδου, οπότε η σύνδεση μπορεί να υλοποιηθεί μόνο μέσω των κοχλιών, οι οποίοι επίσης χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη. Η όλη σύνδεση σχεδιάστηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εμποδίζεται η ολίσθηση τόσο κατακόρυφα (για το κολάρο του στύλου) όσο και οριζόντια (για το κολάρο της δοκού).

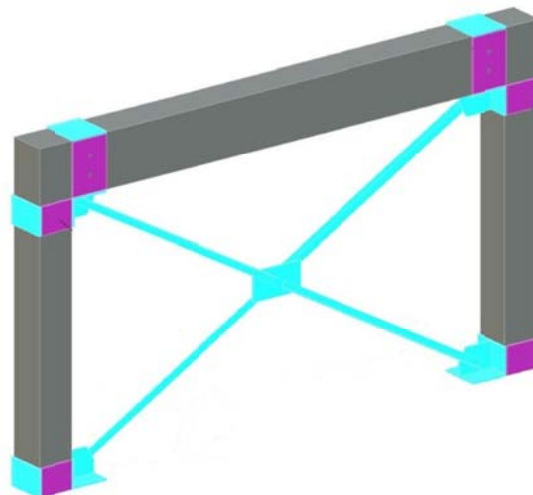
Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των συγκεκριμένων συνδέσεων των X-συνδέσμων με το πλαίσιο από ΟΣ είναι το ότι σε πραγματικές υφιστάμενες κατασκευές τα κόλλαρα στη βάση και την κορυφή των στύλων μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν, καθόσον οι στύλοι στο επίπεδο της πυλωτής είναι περιμετρικά ελεύθερες. Η όλη διάταξη συνδέσεων επιτρέπει περιορισμένη στροφή και άνω/κάτω κίνηση των κολάρων στις βάσεις των στύλων μόνο όταν οι διαγώνιοι σύνδεσμοι, που συνδέονται με τα κολάρα αυτά, εφελκύνονται. Επίσης, αυτή η περιορισμένη ευκαμψία προσδίδει στο σύστημα μια προφανή επιπρόσθετη πλαστιμότητα.

Με βάση αυτές τις γενικές απαιτήσεις θεωρήθηκαν έγινε σχεδιασμός τριών συστημάτων X-συνδέσμων. Το πρώτο σύστημα διέθετε διαγώνια μέλη διατομής απλού ισοσκελούς γωνιακού L20x3, συγκολλητά με τέσσερα κομβοελάσματα στις γωνίες και με ένα κεντρικό κομβοέλασμα στο μέσο. Οι ραφές σχεδιάστηκαν με αντοχή μεγαλύτερη της εφελκυστικής αντοχής εκάστου διαγώνιου μέλους, τα δε κομβοελάσματα πέραν από την απαίτηση αυτή σύμφωνα με τη γεωμετρία που υποδείχθηκε στις εργασίες των Yoo et al^[7,8]. Το σύστημα τελικά διέθετε 2.6 φορές μεγαλύτερη αντοχή και 3.6 φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία από τις αντίστοιχες τιμές του απλού (γυμνού) πλαισίου, όπως αυτές μετρήθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα δεύτερο σύστημα υλοποιήθηκε μέσω μελών διατομής διπλών γωνιακών 2L20x3/5, με αποτέλεσμα πενταπλάσια αντοχή σε σχέση

με αυτή του απλού πλαισίου (επίσης μετρηθείσα πειραματικά). Στα δύο πρώτα αυτά συστήματα οι πειραματικά αποκτηθείσες τιμές αντοχής ήταν σχετικά κοντά με τις τιμές που βρέθηκαν στην φάση προκαταρκτικού σχεδιασμού. Στο τρίτο σύστημα έγινε χρήση μελών διατομής L25x3 και η αντοχή και δυσκαμψία που προέκυψε από τα πειράματα ήταν 1.9 και 3 φορές μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες του απλού πλαισίου. Πριν τη διεξαγωγή κάθε πειράματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές των υλικών των συνδέσμων (ονομαστικής ποιότητας χάλυβα S235) και μετρήθηκαν η πραγματική τάση και παραμόρφωση διαρροής αλλά και η τάση θραύσης αυτών, που βρέθηκαν σημαντικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες ονομαστικές. Τελικά, ο σχεδιασμός των Χ-συνδέσμων έγινε με βάση τις μετρηθείσες αυτές τιμές. Μια γενική εικόνα των δοκιμών και των τριών διατάξεων απεικονίζεται σε τρισδιάστατη μορφή στο Σχήμα 4, που ακολουθεί.



(α)



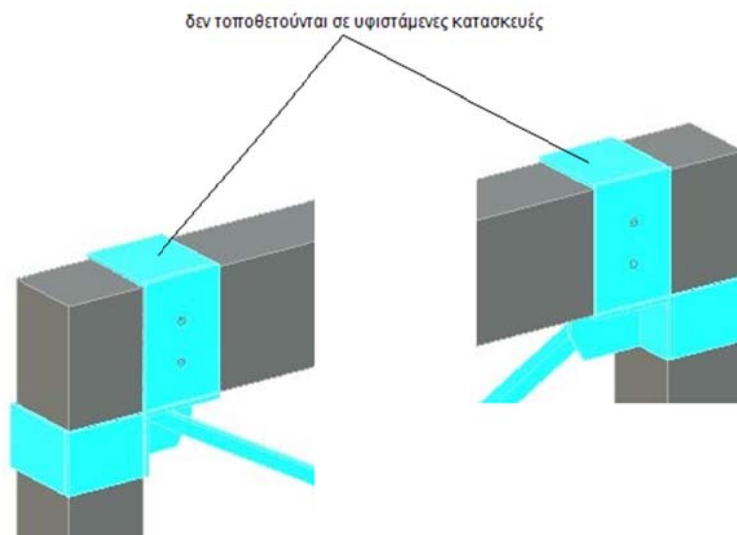
(β)

Σχήμα 4. Ενδεικτική εμπρόσθια (α) και οπίσθια (β) όψη δοκιμών με Χ-συνδέσμους

Και στα τρία πειράματα με Χ-συνδέσμους η μορφή αστοχίας του συστήματος ως συνόλου προήλθε από θραύση κατακόρυφων ραφών σε ένα από τα κολάρα στις βάσεις των στύλων. Δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές ή θραύση σε κανένα από τα μέλη των συνδέσμων ούτε σε κάποιο κομβοέλασμα παρόλη την ανελαστική παραμόρφωση υπό μεγάλης πλαστιμότητας ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι στύλοι από ΟΣ αστόχησαν μέσω δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης, αποσάθρωσης του σκυροδέματος, λυγισμού των κύριων οπλισμών και διαρροής των συνδετήρων.

Τα κολάρα στις βάσεις των στύλων, στα οποία είχαν συγκολληθεί τα κομβοέλασματα κάτω σύνδεσης των συνδέσμων, δεν κατασκευάστηκαν υπό τύπον πάκτωσης – αγκύρωσης στο δάπεδο ή τη θεμελίωση, αλλά με εμφανή στροφική ικανότητα και ελεύθερα να ολισθαίνουν κατακόρυφα κατά μήκος εκάστου στύλου. Η συγκεκριμένη επινόηση – μορφή σχεδιασμού δεν προέκυψε τυχαία αλλά λαμβάνοντας υπ’ όψη τις δυνατότητες εφαρμογής σε πραγματική βάση. Όντως, σε υφιστάμενα κτίρια με φέροντα οργανισμό από ΟΣ και πυλωτή είναι μη πρακτικό (και εν πολλοίς άκρως δαπανηρό) ως ανέφικτο να υλοποιηθεί πακτωμένη σύνδεση στη βάση των στύλων (ουσιαστικά με το δάπεδο και ακόμα δυσκολότερα με την υπάρχουσα θεμελίωση). Κατά συνέπεια ο υιοθετηθείς – και προτεινόμενος – τρόπος σχεδιασμού της σύνδεσης των Χ-συνδέσμων με τις βάσεις των στύλων διαθέτει ισχυρά πλεονεκτήματα.

Αντίστοιχα, οι συνδέσεις των Χ-συνδέσμων με τους κόμβους δοκού - στύλων του πλαισίου υλοποιήθηκαν μέσω δύο κολάρων, ενός περιμετρικά του στύλου και ενός περιμετρικά της δοκού αλλά και συνδεδεμένου μέσω διαμπερών κοχλιών κάθετα στο επίπεδο του πλαισίου. Τα δύο αυτά κολάρα ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους συγκολλητά με το κομβοέλασμα του Χ-συνδέσμου, οπότε ήταν πρακτικά δεσμευμένη τόσο η μετατόπιση κατά μήκος είτε της δοκού είτε του στύλου αλλά και η ικανότητα στροφής. Όπως ήδη προαναφέρθηκε, το έλασμα στην άνω παρειά της δοκού τοποθετήθηκε για λόγους ευκολίας κατασκευής της πειραματικής διάταξης. Στην προτεινόμενη λύση αυτό δεν θα υπάρχει, πλην όμως θα διατηρηθούν οι διαμπερείς κοχλίες (το κολάρο θα είναι από πάνω «ανοιχτό»), όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σκαρίφημα.



Οι συνδέσεις δοκών – στύλων, στην περιοχή εκτός των κολάρων προς τη γωνία του πλαισίου, ήταν ουσιαστικά προστατευμένες, καθόσον υπέστησαν περιορισμένες εφελκυστικές ρωγμές ακόμα και για μεγάλες επιβληθείσες πλευρικές μετατοπίσεις (τάξης μεγέθους πλαστιμότητας 15 και μεγαλύτερες).

Η συνολική απόκριση του τρόπου σύνδεσης των Χ-συνδέσμων με το πλαίσιο από ΟΣ κατέδειξε ικανοποιητική απόκριση σε όλες τις περιπτώσεις, δίδοντας τη δυνατότητα στις εφελκυσόμενες και θλιβόμενες διαγωνίους να προσδώσουν στο σύστημα την παρατηρηθείσα αυξημένη αντοχή και πλαστιμότητα – ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Σημειωτέον ότι οι συγκολλήσεις των Χ-συνδέσμων με τα κομβοελάσματα έμειναν άθικτες, έχοντας σχεδιαστεί για να αναλαμβάνουν τη μέγιστη αναμενόμενη δράση από τα συνδεόμενα μέλη.

Πέραν των ανωτέρω, η διαστασιολόγηση – επιλογή των επί μέρους τμημάτων, οι συγκολλήσεις και όλοι οι σχετικοί υπολογισμοί των τριών συστημάτων των Χ-συνδέσμων (στην οριακή κατάσταση αστοχίας) έγινε σύμφωνα με τις αντίστοιχες διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 αλλά και με γνώμονα τις συστάσεις του Ευρωκώδικα 8 (για κατασκευές από χάλυβα). Ιδιαίτερα δε τονίζεται ότι – συγκριτικά – τη βέλτιστη απόκριση μεταξύ των τριών διατάξεων επέδειξε η 1η, για την οποία η πραγματική αδιάστατη λυγηρότητα των Χ-συνδέσμων ευρίσκεται εντός των ορίων της παραγράφου 6.7.3 του Μέρους 1 του EC8 (σύμφωνα και με τις συστάσεις της παραγράφου 8.5.5.4 του ΚΑΝΕΠΕ), καθόσον ισχύει ότι

$$1.3 < \bar{\lambda}_{y,z}^{\text{πειραματική}} = 1.443 \leq 2.$$

3. Συμπεράσματα -Τελικές Προτάσεις - Χρησιμότητα

3.1. Φιλοσοφία προτεινόμενης επέμβασης

Η προτεινόμενη «**δομητική επέμβαση**» - σύμφωνα με το ορισμό της στην §2.3.α του ΚΑΝΕΠΕ – για την σεισμική ενίσχυση συμβατικών κτιριακών κατασκευών με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα με πυλωτή μέσω μη έκκεντρων χαλύβδινων χιαστών συνδέσμων δυσκαμψίας – εισάγει μια εναλλακτική φιλοσοφία. Αυτή συνίσταται στην υιοθέτηση της **αφαίρεσης της σεισμικής τρωτότητας της πυλωτής** αντί για πλήρη προσεισμική ενίσχυση της κατασκευής, με ότι αυτή συνεπάγεται. Μια τέτοια φιλοσοφία – προσέγγιση επέμβασης φαίνεται περισσότερο οικονομική και άμεσα εφαρμόσιμη, και αναμένεται να προτιμηθεί από τους ιδιοκτήτες / χρήστες των σχετικών κατασκευών. Τούτο καθόσον περιλαμβάνει εργασίες μόνο στο ισόγειο – πυλωτή και δεν προβλέπει κάτι σχετικό για τα δομικά αλλά και μη δομικά στοιχεία των υπερκείμενων ορόφων. Τούτο βρίσκεται σε συμφωνία με τα κριτήρια αλλά και τις στρατηγικές επεμβάσεων του ΚΑΝΕΠΕ.

Προς τούτο εισάγονται δύο δείκτες / λόγοι **α** και **β** , οι οποίοι αποτελούν τους λόγους της δυσκαμψίας και της αντοχής του δομήματος στο επίπεδο της πυλωτής προς αυτές του αμέσως υπερκείμενου (1ου – πλήρως τοιχοπληρωμένου) ορόφου αντίστοιχα. Οι δείκτες αυτοί ουσιαστικά αποτελούν τα σχετικά μέτρα συνέχειας (ομοιομορφίας καθ' ύψος) τόσο της αντοχής όσο και της δυσκαμψίας στα δύο πρώτα επίπεδα (ισόγειο – 1ο όροφο) της κατασκευής.

3.2. Προτεινόμενες τιμές των δεικτών α και β

Μετά από αποτίμηση της υφιστάμενης κατασκευής (§2.1 του ΚΑΝΕΠΕ) προτείνεται όπως οι μη έκκεντροι χαλύβδινοι Χ-σύνδεσμοι σχεδιαστούν και εφαρμοστούν κατά τέτοιο τρόπο, που να ικανοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις, που αφορούν το εύρος των τιμών των δεικτών **α** και **β** :

$$\alpha \approx 1.00, 1.5 < \beta < 2.5$$

3.3. Σχεδιασμός και λεπτομέρειες συνδέσεων του συστήματος

Χ-συνδέσμων στην πυλωτή

Οι επί μέρους υπολογισμοί και η εν γένει διαστασιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος μη έκκεντρων χαλύβδινων Χ-συνδέσμων δυσκαμψίας (ραβδωτών μελών, κομβοελασμάτων, συνδέσεων και συγκολλήσεων) δύναται και προτείνεται να πραγματοποιείται με βάση τα περιεχόμενα τόσο του Ευρωκώδικα 3 όσο και του Ευρωκώδικα 8, δηλαδή με βάση τις ισχύουσες διατάξεις περί αντισεισμικού

σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών, που εν πολλοίς περιέχονται στα σχετικά εδάφια του ΚΑΝΕΠΕ. Αναλυτικότερα, προτείνονται τα ακόλουθα:

(α) Η διατομή των Χ-συνδέσμων να είναι απλό ισοσκελές γωνιακό από χάλυβα (που διαθέτει ίδια ροπή αδράνειας και προς τους δύο κύριους άξονες), η δε επιλογή της (σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο) να γίνει όχι με βάση τις ονομαστικές τιμές της αντοχής αλλά από πειραματικές τοιαύτες μετά από εργαστηριακές δοκιμές. Περαιτέρω δε προτείνεται να ισχύει η σχέση για την ανηγμένη λυγηρότητα εκάστου μέλους του τέλους της §3.6 της παρούσας.

(β) Οι συνδέσεις να πραγματοποιηθούν με συγκολλήσεις κατάλληλου πάχους λαιμού και διαστάσεων μέσω κομβοελασμάτων τόσο στο κέντρο όσο και στα άκρα των μελών, ειδικότερα δε να τηρηθεί η απαίτηση καθαρού μήκους εντός των γωνιακών κομβοελασμάτων αλλά και των απαιτήσεων σχεδιασμού για τα κομβοελάσματα των Yoo et al.

(γ) Τα σκέλη των γωνιακών που βρίσκονται εκτός του κατακόρυφου επιπέδου κεντρικά στο ελεύθερο άνοιγμα της πυλωτής να μην βρίσκονται στην ίδια πλευρά αλλά να εναλλάσσονται

(δ) Σε ότι αφορά τη διαμόρφωση των συνδέσεων των Χ-συνδέσμων με το υφιστάμενο πλαίσιο από οπλισμένο σκυρόδεμα της πυλωτής προτείνεται όπως:

(δ₁) Για τις συνδέσεις στις βάσεις των στύλων των πλαισίων της πυλωτής το κομβοέλασμα να συνδέεται συγκολλητά με εξωραφές με τρισδιάστατο κολάρο που περιβάλλει τη βάση των στύλων (και μορφώνεται από τέσσερα χαλύβδινα ελάσματα που συνδέονται με εσωραφές). Το κολάρο αυτό δεν θα συνδέεται με το οριζόντιο επίπεδο – πλάκα δαπέδου ούτε με τη θεμελίωση, αλλά θα επιτρέπει την προς τα άνω κίνηση (κατακόρυφα πάνω στο στύλο) όταν η συνδεόμενη διαγώνιος εφελκύεται. Έτσι θα εξασφαλίζεται περιορισμένη ευκαμψία μεταξύ πλαισίου και Χ-συνδέσμων με αποτέλεσμα σταδιακή αύξηση της αντοχής τους και κατά συνέπεια αυξημένη πλαστιμότητα.

(δ₂) Για τις συνδέσεις με τους κόμβους δοκού – στύλων από οπλισμένο σκυρόδεμα το κομβοέλασμα να συνδέεται μέσω συνδυασμού τρισδιάστατων κολάρων (που μέσω της συγκόλλησης τους με το κομβοέλασμα αποτελούν μονολιθική σύνδεση). Το μεν κολάρο που συνδέεται με την κορυφή του στύλου κατασκευάζεται με τέσσερα ελάσματα που περικλείουν το στύλο, ενώ το κολάρο σύνδεσης με τη δοκό με τρία ελάσματα (όλα τα ως άνω συνδεόμενα με εσωραφές). Το οριζόντιο μέρος – έλασμα θα τίθεται σε επαφή με την κάτω παρειά της δοκού, τα δε υπόλοιπα δύο κατακόρυφα

ελάσματα στις δύο κατακόρυφες παρειές της δοκού, συνδεόμενα μεταξύ τους και με τη δοκό μέσω διαμπερών κοχλίων κατάλληλης διαμέτρου και ποιότητας, που να αντέχουν την προβλεπόμενη διατμητική καταπόνηση. Οι κοχλίες αυτοί θα διέλθουν μέσω οπών που θα διανοιχθούν στις δοκούς επί τόπου. Ο τρόπος αυτός διαμόρφωσης της σύνδεσης κατέδειξε εξαιρετική απόκριση, προστατεύοντας αποτελεσματικά τη σύνδεση δοκού – στύλων από ΟΣ του υπάρχοντος πλαισίου, σε όλες τις πλευρές του, ακόμα και για μεγάλες πλευρικές μετακινήσεις, έως και 15 φορές μεγαλύτερες των μετατοπίσεων διαρροής του μη ενισχυμένου πλαισίου.

(δ₃) Τέλος, προτείνεται η κατά το δυνατόν αποφυγή αθέλητων κατασκευαστικών εκκεντροτήτων προς τη ίδια πλευρά (με κατάλληλο έλεγχο οριζοντίωσης και κατακορύφωσης του συστήματος κατά την τοποθέτηση του), προκειμένου αποφευχθεί καθολικός εκτός επιπέδου του πλαισίου λυγισμός αυτού. Παρά ταύτα και σε μια τέτοια περίπτωση η εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης θα οδηγήσει σε ικανοποιητικό επίπεδο την εκπλήρωση των τεθέντων στόχων. Επιπρόσθετα δε, πέραν κάποιων μικρών εργασιών «λείανσης» των επιφανειών των στύλων και της δοκού από ΟΣ στην περιοχή σύνδεσης με τα κολάρια, ουδεμία επί πλέον επεξεργασία των διεπιφανειών προτείνεται, αλλά ούτε και ενδιάμεση παρουσία – εφαρμογή κάποιου άλλου είδους συνδετικού υλικού.

Τα αποτελέσματα – συμπεράσματα του Προγράμματος αποτελούν μια νέα προσέγγιση δομητικής επέμβασης σε υφιστάμενα κτίρια με πυλωτή και πιστεύεται ότι είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμα από τον ΟΑΣΠ, και πιθανώς εντάξιμα και στον ΚΑΝΕΠΕ.

4. Ενδεικτική Βιβλιογραφία

1. Carr, A. (2007) RUAUMOKO – Inelastic Dynamic Analysis Computer Program. University of Canterbury, New Zealand.
2. Remennikov AM, Walpole WR. (1997) “Modeling the inelastic cyclic behavior of a bracing member for work-hardening material.” *Int. J. Solids Struct.*, 34(27), pp. 3491-3515.
3. Crisafulli, F. J. (1997) “Seismic behavior of reinforced concrete structures with masonry infills.” PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Canterbury.
4. Crisafulli, F.J., Carr, A.J. (2007). “Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures.” *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 40(2), 69 – 77.
5. Charalampakis, A. E., Koumousis, V. K., (2008) “Ultimate strength analysis of composite sections under biaxial bending and axial load”, *Advances in Engineering Software*, doi:10.1016/j.advengsoft.2008.01.007

6. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H. (1976) "Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra" MIT Department of Civil Engineering Research Report R76-4, Order Number 527
7. Yoo, J.-H., Roeder, C.W. and Lehman, D.E. (2008). "Analytical Performance Simulation of Special Concentrically Braced Frames." *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 134(6), 881 – 889.
8. Yoo, J.-H., Lehman, D.E., Roeder, C.W. (2008). "Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames." *Journal of Constructional Steel Research* 64(6), 607 – 623.