

Αποτίμηση Σεισμικής Συμπεριφοράς μη Επαρκώς Σχεδιασμένων Πλαισιακών Κτιρίων Seismic performance assessment of under-designed Frame Buildings

Reyes GARCIA¹, Yaser JEMAA², Yasser HELAL³, Κύπρος
ΠΗΛΑΚΟΥΤΑΣ⁴

Λέξεις κλειδιά: Σεισμική αποτίμηση, Κατασκευές Ο.Σ., Αναλύσεις χρονοϊστορίας, DRAIN-3D.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια συγκριτική διερεύνηση ενός πλαισιακού κτιρίου με οπλισμένο σκυρόδεμα που δοκιμάστηκε σε σεισμική τράπεζα. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με δύο προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων καθώς και με σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων. Το κτίριο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις παλιές τεχνικές που χρησιμοποιείτο στην νότια Ευρώπη χωρίς αντισεισμικούς κανονισμούς. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν το SAP2000™ και DRAIN-3D, το δεύτερο από τα οποία μπορεί να συνυπολογίσει την επίδραση των κόμβων με ανεπαρκείς λεπτομέρειες όπλισης. Έπειτα από ένα πλήθος μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας και χρησιμοποιώντας επιταχυνσιογραφήματα για διαφορετικές σεισμικές εντάσεις, βρέθηκε ότι παράμετροι όπως τα ανοίγματα και η εξόλκευση των ράβδων οπλισμού από τους κόμβους, επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος. Συμπεραίνεται ότι για την υψηλού επιπέδου σεισμική αποτίμηση των κτιρίων, τα προσομοιώματα πρέπει να είναι ικανά να συνυπολογίσουν κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την συμπεριφορά των υπάρχοντων κτιρίων.

ABSTRACT: This study compares the predicted response provided by two Finite Element Analysis programmes, and the actual response of a full-scale 3D RC frame tested using a shaking table. The structure was designed and built according

¹ Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: cip07rg@sheffield.ac.uk

² Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: cip06jky@sheffield.ac.uk

³ Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: cip06yh@sheffield.ac.uk

⁴ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: K.Pilakoutas@sheffield.ac.uk

to typical old pre-seismic construction practice of southern Europe. The building is modelled and analysed using SAP2000™ and DRAIN-3D software, where the latter explicitly includes the effect of poor joint detailing. By running a series of Nonlinear Time-History Analysis and using code-compatible accelerograms for different seismic intensities, it is found that features as gap opening and bar pullout at joints significantly influence the displacement response of RC frame buildings. Based on the results and on a critical evaluation of the research tools, it is concluded that in high level seismic assessment, analytical models must fully incorporate the critical parameters controlling the seismic behaviour of existing structures.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά το γεγονός ότι σε πολλές χώρες έχουν εφαρμοστεί νέοι αντισεισμικοί κανονισμοί (για παράδειγμα στην Λατινική Αμερική, Ινδία, Τουρκία κ.α.), οι πρόσφατοι καταστροφικοί σεισμοί δημιούργησαν σοβαρά προβλήματα σε υποδομές οι οποίες κατασκευάστηκαν μετά την καθιέρωση των νέων κανονισμών. Ο ανεπαρκής σχεδιασμός, η χρήση υλικών με «φτωχές» ιδιότητες και οι κατασκευαστικές κακοτεχνίες κατέστησαν πολλές από τις κατασκευές αυτές ανίκανες να αντέξουν τις αυξημένες απαιτήσεις που προέρχονται από ένα πλήθος σεισμικών δονήσεων. Η ανάγκη για μείωση της σεισμικής τρωτότητας των υπάρχοντων κτιρίων έχει μεγάλη σημασία και η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει την έρευνα σε νέες αναπτυσσόμενες τεχνικές για την αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας υπάρχοντων φορέων από Ο.Σ. (Pinto *et al.*, 2002, Balsamo *et al.*, 2005, Della Corte *et al.*, 2006). Ωστόσο, λιγότερη προσοχή έχει δοθεί στην διερεύνηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών των αναλυτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την υψηλού επιπέδου σεισμική αποτίμηση ανεπαρκών υφισταμένων κτιρίων από Ο.Σ. υποβαλλόμενων σε ισχυρή σεισμική δόνηση.

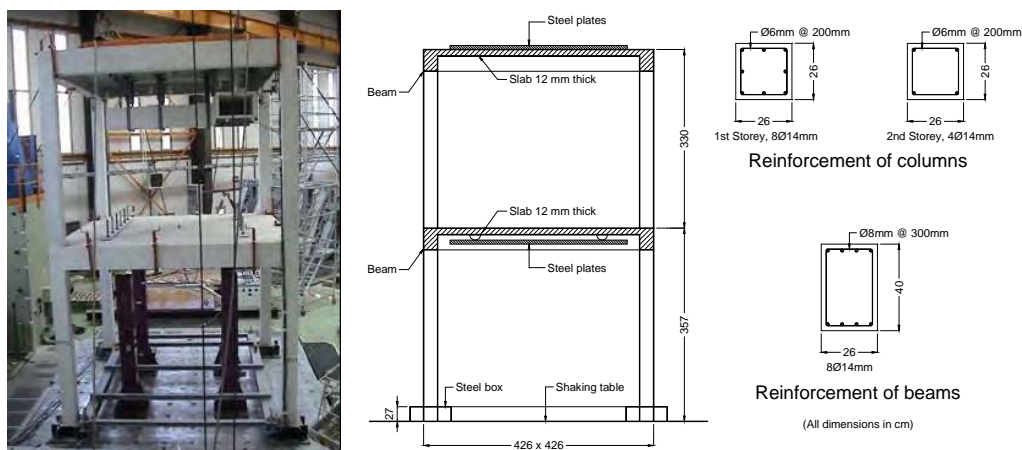
Από την φύση του προβλήματος, η προσομοίωση ανεπαρκών κτιρίων είναι ένα πρόβλημα με αρκετές αβεβαιότητες κατά την αποτίμηση γεγονός που οφείλεται στην έλλειψη ικανών υπολογιστικών εργαλείων. Στην καθημερινή πρακτική η αποτίμηση των υπάρχοντων κτιρίων πραγματοποιείται με «Pushover» αναλύσεις ή μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας χρησιμοποιώντας προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία δίνουν την δυνατότητα για ακριβή προσδιορισμό της συμπεριφοράς των κτιρίων. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένες αδυναμίες των κτιρίων οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά των κτιρίων και είναι δύσκολο να συνυπολογιστούν στα περισσότερα από τα εμπορικά προγράμματα. Πιο συγκεκριμένα, η πρόσθετη μετατόπιση που οφείλεται στην ολίσθηση των ράβδων οπλισμού στους κόμβους είναι ένα φαινόμενο που συχνά αγνοείται. Για παράδειγμα, σε εσωτερικούς κόμβους (βάσει των κανονισμών), η πρόσθετη μετατόπιση λόγω της ολίσθησης του χάλυβα οπλισμού μπορεί να προκαλέσει πρόσθετη μετατόπιση περίπου ίση με το 33% της συνολικής μετατόπισης που αντιστοιχεί στο φορτίο αστοχίας (Kwak and Filippou,

1990). Επιπλέον η πρόωρη αποκόλληση και η επακόλουθη απομοίωση των ιδιοτήτων των κόμβων μπορούν να επηρεάσουν την απόκριση και να προκαλέσουν εκτεταμένες βλάβες στο κτίριο (για παράδειγμα στην Ταϊβάν και στην Τουρκία, 1999). Επομένως, αφού η ολίσθηση των ράβδων οπλισμού στους κόμβους επηρεάζει σημαντικά την απόκριση των κτιρίων από Ο.Σ., η συνεισφορά του φαινομένου αυτού θα πρέπει να συνυπολογίζεται κατά την σεισμική αποτίμηση με χρήση αναλυτικών εργαλείων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αφού συγκριθούν οι αποκρίσεις που υπολογίστηκαν με την χρήση δύο προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμή ενός τρισδιάστατου κτιρίου από Ο.Σ. το οποίο δοκιμάστηκε σε πλήρη κλίμακα σε σεισμική τράπεζα (Chaudat *et al.*, 2005), να διερευνηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί που έχουν τα διαθέσιμα λογισμικά για την σεισμική αποτίμηση υπαρχόντων κτιρίων. Το κτίριο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σύμφωνα με την τυπική κατασκευαστική πρακτική που χρησιμοποιείται στο παρελθόν στην νότια Ευρώπη καθώς αυτή θεωρείται αντιπροσωπευτική ενός τυπικού υποδιαστασιοποιημένου κτιρίου στις αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτό το κτίριο προσομοιώθηκε με χρήση των προγραμμάτων SAP2000™ (CSI, 2000) και DRAIN-3D (Prakash *et al.*, 1994). Η ακρίβεια των προγραμμάτων αυτών εκτιμάται πραγματοποιώντας μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας χρησιμοποιώντας επιταχυνσιογραφήματα για διαφορετικά επίπεδα σεισμικής έντασης.

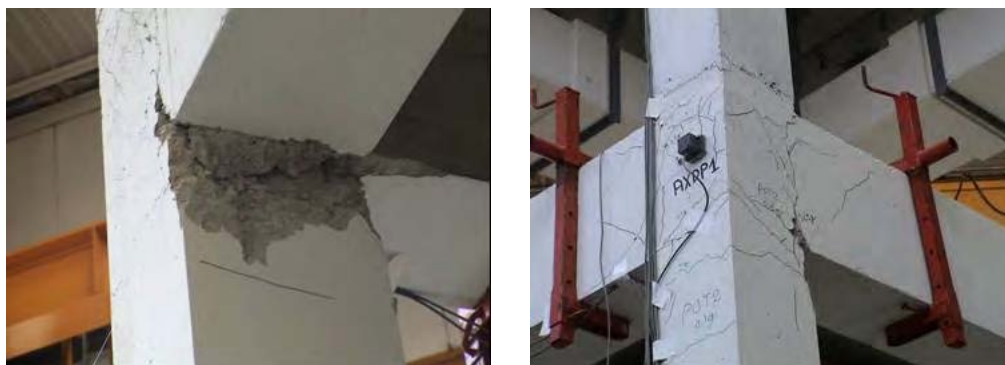
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Για την διερεύνηση της συμπεριφοράς των υπαρχόντων υποδιαστασιοποιημένων κτιρίων και των σύγχρονων μεθόδων ενίσχυσης, μια πλαισιακή κατασκευή από Ο.Σ. δοκιμάστηκε σε σεισμική τράπεζα στο εργαστήριο CEA στο Saclay (στην Γαλλία), σαν μέρος του προγράμματος Ecoleader (Chaudat *et al.*, 2005, Chaudat *et al.*, 2006). Το δώροφο κτίριο που εξετάστηκε ήταν κανονικό σε όψη και σε κάτοψη και σχεδιάστηκε έτσι ώστε τα υποστυλώματα και οι κόμβοι να παθαίνουν βλάβες κατά την διάρκεια των δοκιμών. Η γεωμετρία του κτιρίου, οι διατομές των στοιχείων καθώς και ο οπλισμός τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών προσδιορίστηκαν έπειτα από δοκιμές και βρέθηκε ότι η τάση διαρροής για το χάλυβα οπλισμού είναι 551 MPa και η τάση αστοχίας είναι 656 MPa, ενώ για το σκυρόδεμα η θλιπτική αντοχή βρέθηκε ίση με 20 MPa και το μέτρο ελαστικότητας 25545 MPa. Μια πρόσθετη μάζα 9 τόνων προστέθηκε σε κάθε πλάκα τοποθετώντας μεταλλικές πλάκες.



Σχήμα 1. Γενική όψη και γεωμετρία του πλαισιακού κτιρίου.

Στην κατασκευή τοποθετήθηκαν ειδικά όργανα για την παρακολούθηση των μετατοπίσεων σε κάθε όροφο κατά την διάρκεια της δοκιμής. Στην παρούσα διερεύνηση οι μετατοπίσεις στην οροφή του δευτέρου ορόφου επιλέγεται σαν την αντιπροσωπευτική παράμετρο της μέγιστης απόκρισης και χρησιμοποιείται για την σύγκριση με τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας. Η πρώτη και δεύτερη φυσική ιδιοσυχνότητα βρέθηκαν ίσες με 1.9 και 5.6 Hz, και υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας δοκιμές «λευκού θορύβου» πριν από την αρχή της πειραματικής δοκιμής. Μία καταγραφή βασισμένη στο φάσμα του Ευρωκώδικα 8 για τύπο εδάφους C (CEN-EC8, 2004) χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή του κτιρίου. Το κτίριο δοκιμάστηκε για αυξανόμενη μέγιστη επιτάχυνση εδάφους από 0.1g σε 0.4g. Μετά την δοκιμή, οι σοβαρότερες βλάβες εμφανίστηκαν στα υποστυλώματα και στους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων (Σχήμα 2). Περισσότερες λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη υπάρχει στην εργασία των Chaudat *et al.* (2005).



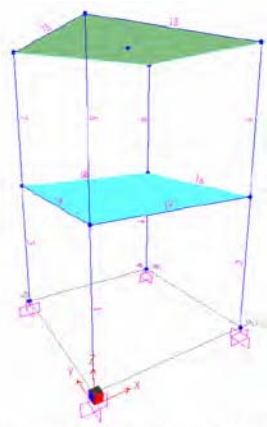
Σχήμα 2. Βλάβες σε κόμβους και υποστυλώματα μετά την δοκιμή με μέγιστη επιτάχυνση εδάφους 0.4g.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αρχικά αποτελέσματα της έρευνας αυτής που σκοπό έχει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πλαισιακών κατασκευών.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΣΤΟ SAP2000™

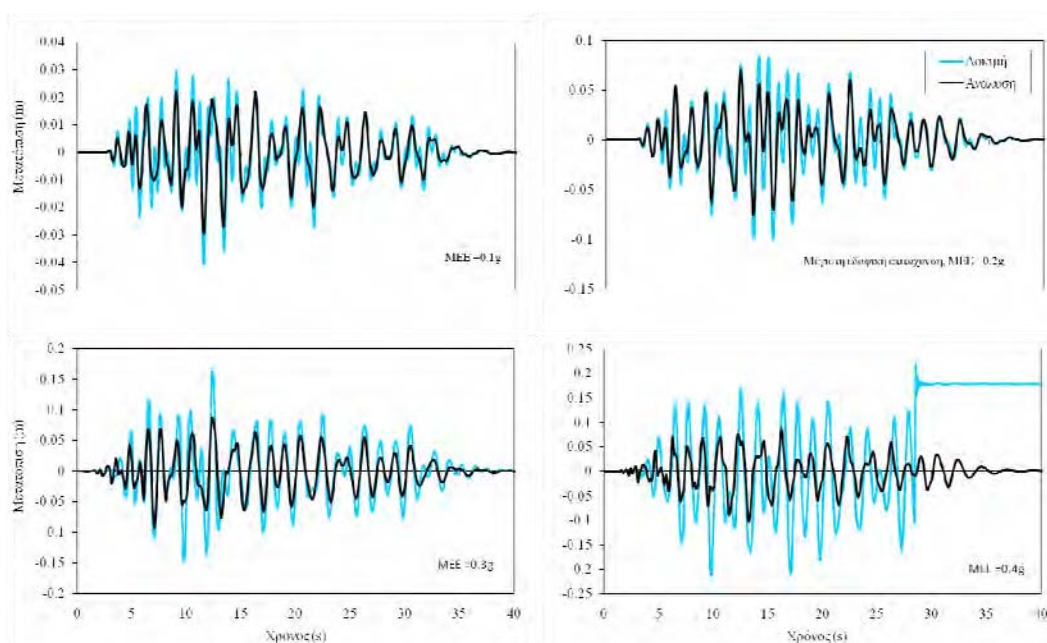
Ανάμεσα σε ένα πλήθος διαθέσιμων λογισμικών για δομοστατικές αναλύσεις, το SAP2000™ είναι ένα από τα δημοφιλέστερα καθώς είναι αρκετά εύκολο στη χρήση και έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί αναλύσεις ακόμα και σε πολύπλοκες κατασκευές. Για την διερεύνηση της αξιοπιστίας του συγκεκριμένου λογισμικού ως προς την πρόβλεψη της πειραματικής συμπεριφοράς του φορέα που εξετάζεται, κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα και πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας (Σχήμα 3). Δοκοί και υποστυλώματα προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία ενώ επιφανειακά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των πλακών. Τα μήκη των δοκών και των υποστυλωμάτων προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τις αποστάσεις από το κέντρο βάρους του κάθε στοιχείου. Σε μια πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης των κόμβων, τα άκρα των δοκών και των υποστυλωμάτων θεωρήθηκαν ως μερικώς άκαμπτα. Ο χάλυβας οπλισμού και το σκυρόδεμα προσομοιώθηκαν σύμφωνα με τα μοντέλα που προτείνονται στον Ευρωκώδικα 2 (CEN, 2004), και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των υλικών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η μείωση της δυσκαμψίας δεν μπορούσε να προσομοιωθεί λόγω των περιορισμών του συγκεκριμένου λογισμικού.

Το πρόσθετο βάρος που εισάχθηκε με τις χαλύβδινες πλάκες εφαρμόστηκε σαν κατανεμημένο φορτίο στις πλάκες. Η ιστορία φόρτισης επιβλήθηκε σαν εδαφική επιτάχυνση στην βάση του κτιρίου. Οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν από την ιδιομορφική ανάλυση για την 1^η και 2^η ιδιομορφή ήταν ίσες με 2.1 και 5.9 Hz και το προσομοίωμα θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό του κτιρίου που δοκιμάσθηκε.



Σχήμα 3. Προσομοίωμα του πλαισιακού κτιρίου στο SAP2000™.

Μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των αποκρίσεων που υπολογίστηκαν με το SAP2000™ και των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, τα αποτελέσματα που υπολογίζονται με χρήση του προγράμματος SAP2000™ δείχνουν να είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.1g για την οποία το κτίριο δεν έχει εμφανίσει βλάβες και είναι στην ελαστική περιοχή. Καθώς η ένταση της διέγερσης αυξάνεται, η ακρίβεια και η συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αναλυτικό προσομοίωμα δεν μπορεί να συνυπολογίσει τις βλάβες που προκαλούνται μετά από κάθε διέγερση. Επομένως η πειραματική απόκριση υποεκτιμάτε στην περίπτωση που εξετάζεται σεισμική εδαφική επιτάχυνση από 0.2 έως 0.4g. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με 0.4g οι πειραματικές μετρήσεις των μετατοπίσεων δεν είναι σωστές μετά από T=28 δευτερόλεπτα λόγω αστοχίας του οργάνου μέτρησης.



Σχήμα 4. Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας που υπολογίστηκαν με χρήση του SAP2000™ και των αντίστοιχων πειραματικών.

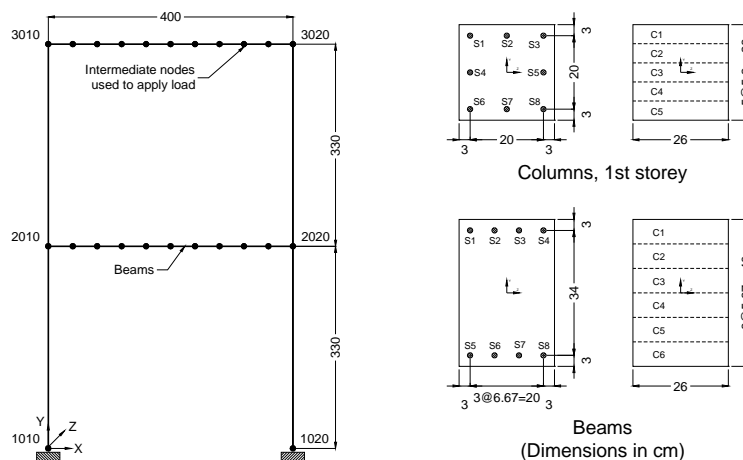
Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο αυτή δείχνουν ότι με χρήση του προσομοιώματος που είναι διαθέσιμο στο SAP2000™ μπορεί να επιτευχθεί καλή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων στην ελαστική περιοχή, ενώ για μεγάλες εντάσεις της σεισμικής διέγερσης τα αποτελέσματα δεν είναι σε καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά. Επιπλέον, το συγκεκριμένο πρόγραμμα αδυνατεί να συνυπολογίσει την μείωση της δυσκαμψίας και να εισάγει πλαστικές αρθρώσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την χρήση άλλων, περισσότερο

σύνθετων αναλυτικών εργαλείων για την σεισμική αποτίμηση της ικανότητας των κτιρίων από Ο.Σ.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΣΤΟ DRAIN-3D

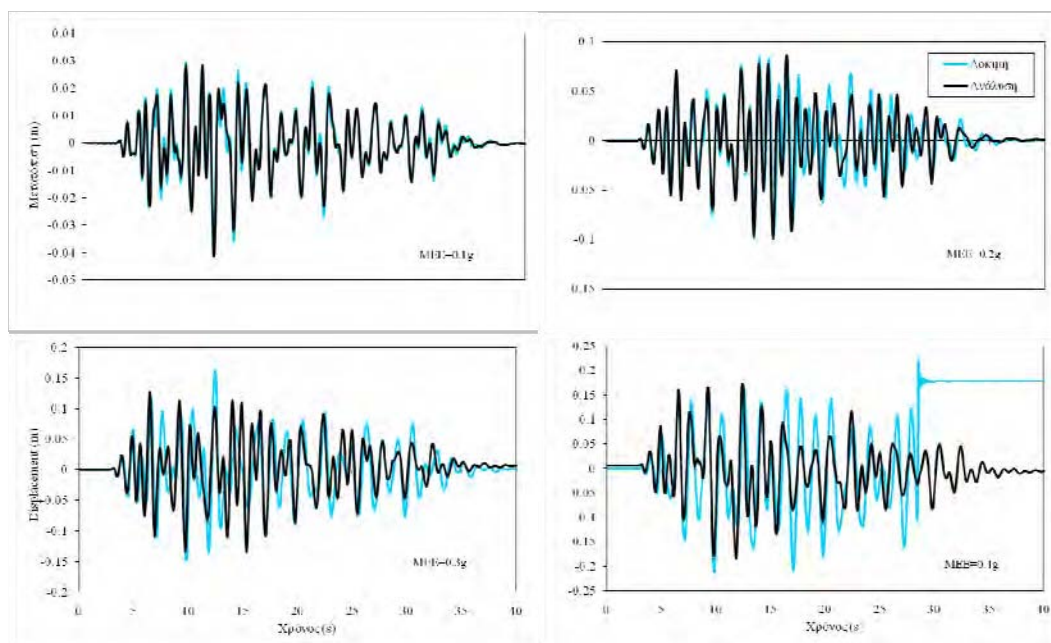
Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο φαίνεται η ανάγκη για πιο προχωρημένα αναλυτικά εργαλεία που στοχεύουν στην βελτίωση της προβλεπόμενης απόκρισης. Το κτίριο που περιγράφηκε προηγουμένως προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα DRAIN-3D. Λόγω της συμμετρίας της κατασκευής, πραγματοποιήθηκε δυσδιάστατη ανάλυση για υπολογιστική ευκολία. Οι δοκοί και τα υποστυλώματα προσομοιώθηκαν με ένα στοιχείο από ίνες (element) 15 με κατανεμημένη πλαστιμότητα (Prakash et al., 1994). Τα μήκη των στοιχείων καθορίστηκαν βάσει των διαστάσεων τους, μετρώντας από το κεντροβαρικό άξονα των στοιχείων. Η διατομή αποτελείται από διακριτά στοιχεία χάλυβα και ίνες σκυροδέματος, στοιχείο που αναμένεται να αυξήσει την ακρίβεια της ανάλυσης (Σχήμα 5). Η συμπεριφορά του οπλισμού από χάλυβα καθώς και του σκυροδέματος καθορίστηκε βάσει των διαγραμμάτων τάσεων παραμορφώσεων που προτείνονται στον Ευρωκώδικα 2. Σαν μια πρώτη προσέγγιση, τα άκρα των υποστυλωμάτων και των δοκών θεωρήθηκαν άκαμπτα έτσι ώστε να προσομοιώνονται οι κόμβοι. Λόγω του συνυπολογισμού της μείωσης της δυσκαμψίας στις αναλύσεις, αναμένεται βελτίωση της προβλεπόμενης απόκρισης.

Για την προσομοίωση των φορτίων των πλακών και των δοκών, συγκεντρωμένα φορτία εφαρμόζονται στους ενδιάμεσους κόμβους των δοκών, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5. Οι μάζες κάθε ορόφου θεωρήθηκαν συγκεντρωμένες στους κόμβους με ειδικό βάρος σκυροδέματος ίσο με 24 kN/m^3 . Η ελαστική απόσβεση εισάχθηκε μέσω ενός συντελεστή απόσβεσης της μάζας και ενός συντελεστή δυσκαμψίας του στοιχείου χρησιμοποιώντας το μοντέλο απόσβεσης Rayleigh (Chopra, 2001). Τιμές ίσες με 3 και 2% προσδιορίστηκαν για την πρώτη και δεύτερη ιδιομορφή αντίστοιχα, παρά το γεγονός ότι αναγνωρίζεται ότι τέτοιες τιμές μπορεί να αλλάξουν ανάλογα με την ιδιοσυχνότητα του κτιρίου.



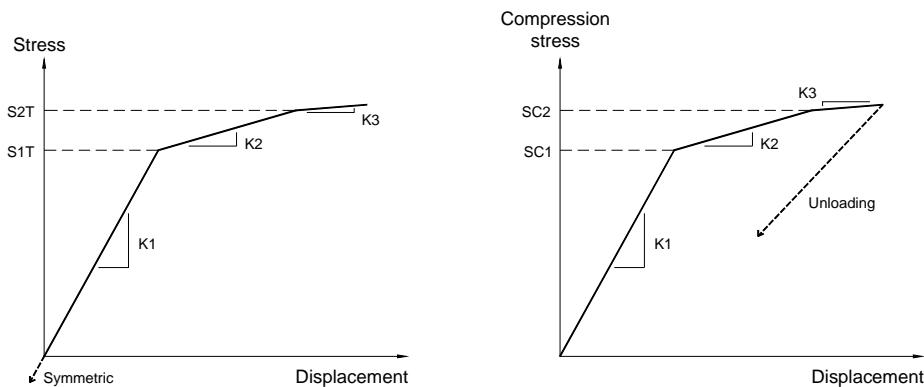
Σχήμα 5. Παρουσίαση του φορέα (αριστερά) και των στοιχείων αποτελούμενα από ίνες που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των υποστυλωμάτων και των δοκών στο πρόγραμμα DRAIN-3D.

Οι τιμές που υπολογίστηκαν για την πρώτη και δεύτερη φυσική ιδιομορφή ήταν ίσες με 1.9 και 5.0 Hz αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστρορίας που υπολογίστηκαν με χρήση του προγράμματος DRAIN-3D και των πειραματικών αποτελεσμάτων για διαφορετικές εντάσεις. Όπως φαίνεται οι προβλέψεις με χρήση του αναλυτικού προσομοιώματος είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.1 και 0.2g. Για υψηλότερες τιμές της επιτάχυνσης, 0.3 και 0.4g, το προτεινόμενο προσομοίωμα δείχνει να έχει ικανοποιητική ακρίβεια στην πρόβλεψη της συχνότητας, ενώ η απόκριση σε όρους μετατοπίσεων φαίνεται να υποεκτιμάτε σε πολλά από τα σημεία της απόκρισης. Είναι φανερό ότι το προτεινόμενο προσομοίωμα είναι πιο δύσκαμπτό από τον πραγματικό φορέα με αποτέλεσμα να φαίνεται η ανάγκη για προσομοίωση με περισσότερη ακρίβεια.



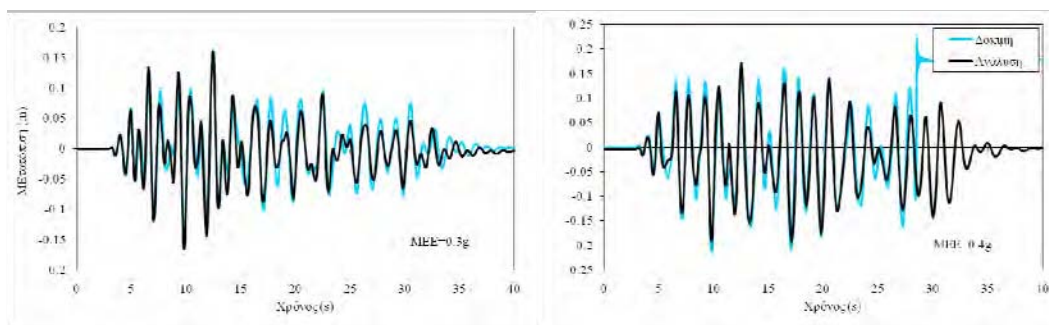
Σχήμα 6. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων μη γραμμικών αναλύσεων χρονιστορίας και των αντίστοιχων πειραματικών.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 6 καθώς και προηγούμενη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Sheffield (Kyriakides, 2008) προτείνουν την εισαγωγή παραμέτρων που μειώνουν την συμπεριφορά των στοιχείων από Ο.Σ. όπως η εξόλκευση των ράβδων οπλισμού και το άνοιγμα των ρωγμών στα άκρα των υποστλωμάτων. Ένα δεύτερο προσομοίωμα εξετάστηκε με χρήση του προγράμματος DRAIN-3D στο οποίο εισήχθη η ολίσθηση των ράβδων οπλισμού στους κόμβους. Η γεωμετρία του προσομοιώματος είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Στην περίπτωση αυτή πρόσθετοι κόμβοι προστέθηκαν στα άκρα των δοκών έτσι ώστε να προσομοιωθούν οι κόμβοι δοκών υποστλωμάτων. Όπως και προηγουμένως, το στοιχείο 15 χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των δοκών και των υποστλωμάτων. Οι παραμορφώσεις στις συνδέσεις δοκών-υποστλωμάτων προσομοιώθηκαν με αρθρώσεις σύνδεσης μηδενικού μήκους στα άκρα των μελών. Οι ιδιότητες των στοιχείων «ινών» επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προσομοιωθεί η ολίσθηση των οπλισμών στους κόμβους συμπεριλαμβάνοντας το φαινόμενο της απομείωσης θεωρώντας πλήρη απομείωση τόσο για την δυσκαμψία όσο και για την αντοχή (Prakash *et al.*, 1994). Οι ιδιότητες των κενών που δημιουργούνται λόγω ρηγμάτωσης καθορίστηκαν έτσι ώστε να προσομοιώνεται το άνοιγμα της ρηγμάτωσης στα υποστλώματα στο σημείο των συνδέσεων (Σχήμα 7). Η διατομή των στοιχείων, τα φορτία, οι μάζες και οι τιμές των αποσβέσεων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ίδια ακριβώς με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο προσομοίωμα.



Σχήμα 7. Προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξόλκευση (αριστερά) και για τα κενά λόγω ρηγμάτωσης (Prakash *et al.*, 1994).

Τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων του καινούριου προσομοιώματος για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.3 και 0.4g παρουσιάζονται στο Σχήμα 8. Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα αυτά ότι οι μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων που υπολογίστηκαν από τις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας είναι τώρα σε καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ο συνυπολογισμός της εξόλκευσης των ράβδων οπλισμού και των ανοιγμάτων λόγω ρηγματώσεων έχουν βελτιώσει τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά.



Σχήμα 8. Σύγκριση αποτελεσμάτων μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας που υπολογίστηκαν με χρήση του DRAIN-3D και πειραματικών αποτελεσμάτων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα εργασία προκύπτει ότι οι κατασκευαστικές ανεπάρκειες όπως η ολίσθηση των οπλισμών στους κόμβους μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόκριση τυπικών κατασκευών από Ο.Σ.. Αυτές οι ανεπάρκειες δεν είναι δυνατόν να συνυπολογιστούν με χρήση των συμβατικών λογισμικών. Προηγμένες προσομοιώσεις με χρήση του προγράμματος DRAIN-3D και τον συνυπολογισμό της σχετικής ολίσθησης χάλυβα σκυροδέματος καθώς και την απομείωση της δυσκαμψίας έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στον προσδιορισμό της απόκρισης των κατασκευών κυρίως σε υψηλές σεισμικές εντάσεις.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Balsamo, A., Colombo, A., Manfredi, G., Negro, P., & Prota A., “Seismic behavior of a full-scale RC frame repaired used CFRP laminates”. Engineering Structures, No. 27 (2005) 769-780

CEN Eurocode 2: Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Comité Européen de Normalisation Standard EN-1992-1-1 (2004)

CEN Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Comité Européen de Normalisation Standard EN 1998-1(2004)

Chaudat, T., Garnier, C., Cvejjic, S., Poupin, S., Le Corre, M. & Mahe, M., “Seismic tests on a reinforced concrete bare frame with FRP retrofitting”, Report Ecoleleader project No. 2, Technical Report (2005)

Chaudat, T., Pilakoutas, K., Papastergiou, P. & Ciupla, M.A., “Shaking table tests on RC retrofitted frame with FRP”, in Proceedings of 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (Geneva, Switzerland, September 3-8, 2006), Paper No. 996

Chopra, A.K. «Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering», Prentice Hall, London (2001)

CSI SAP2000 «Three dimensional static and dynamic finite element analysis and design of structures», Analysis Reference Ver. 11.0, Computer and Structures Inc., USA (2000).

Della Corte, G., Barecchia, E. & Mazzolani, F.M., “Seismic upgrading of RC buildings by FRP: full-scale tests of a real structure”. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 18, No 5 (2006) 659-669

Kwak H. & Filippou F., “Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads”, University of California, Berkeley. Technical Report UCB/SEMM-90/14 (1990)

Kyriakides, N., “Vulnerability of RC buildings and risk assessment for Cyprus”, Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ. Πηλακούτα), Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Sheffield (2008)

Pinto, A.V., Verzeletti, G., Molina, J., Varum, H., Pinho, R. and Coelho, E., “Pseudodynamic tests on non-seismic resisting RC frames (bare and selective retrofit frames)”, European Commission, Joint Research Centre, IPSC, ELSA, Ispra, Italy, Technical Report EUR 20244 (2002)

Prakash, V., Powell, G.H. & Campbell, S., “Drain-3DX: Base program description and user guide”, University of California-Berkeley, USA, SEEM Report 94/07 (1994)