

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΜΜΙΚΤΟΥ ΔΙΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Μιχαέλα Ελματζόγλου

Υποψ. Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΑΠΘ
TK-541 24 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
e-mail: emichael@civil.auth.gr

Άρης Αβδελάς

Ομότιμος Καθηγητής, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΑΠΘ
TK-541 24 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
e-mail: avdelas@civil.auth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύμμικτα διχαλύβδινα (Σ.Δ.) τοιχώματα αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες, εγκιβωτισμένο σκυροδέμα και συνδέσμους διάτμησης που ενώνουν τις μεταλλικές πλάκες με τον πυρήνα σκυροδέματος και εξασφαλίζουν τη σύμμικτη δράση των δύο υλικών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα με στόχο τη μελέτη της απόκρισης Σ.Δ. τοιχωμάτων σε σεισμικά φορτία, θλιπτικά φορτία και την εκτίμηση της διαθέσιμης πλαστιμότητας για την ευρεία εφαρμογή τους σε οικοδομικά έργα. Αρχικά, ένα απλοποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τη μελέτη της συμπεριφοράς των Σ.Δ. τοιχωμάτων υπό μονότονη φόρτιση και στη συνέχεια υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε ένα σύνθετο αριθμητικό μοντέλο για την ανάδειξη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και τη μορφή αστοχίας των συνδέσμων διάτμησης σε ένα Σ.Δ. τοίχωμα, καθώς η συμπεριφορά τους κρίνεται κρίσιμη για την εξασφάλιση της σύμμικτης δράσης που αναπτύσσεται μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας προκύπτει ότι με την τήρηση των προτεινόμενων μέτρων τα Σ.Δ. τοιχώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διατμητικά τοιχώματα σε πολυώροφα κτίρια.

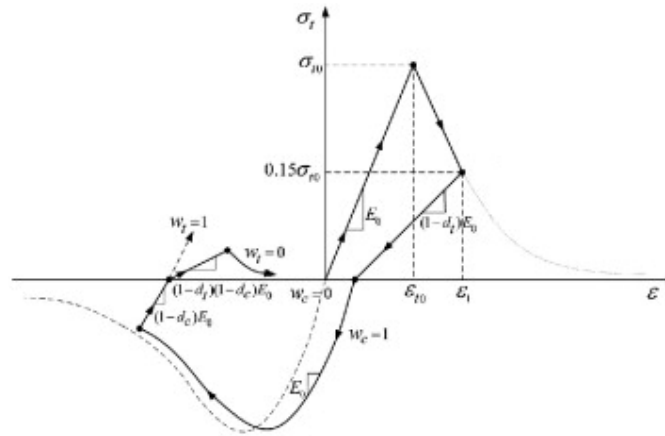
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα διατμητικά τοιχώματα είναι αναμφισβήτητα ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία σε ένα δομικό σύστημα. Τα σύμμικτα διχαλύβδινα (Σ.Δ.) τοιχώματα είναι ένα από τα πιο καινοτόμα δομικά συστήματα και ήδη εφαρμόζονται στην πράξη τα τελευταία χρόνια σε πυρηνικές εγκαταστάσεις. Τα πρώτα στοιχεία [1,2] αποδεικνύουν την υπεροχή τους έναντι των τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος και των χάλυβδινων τοιχωμάτων ως προς την κατασκευασιμότητα και τη σεισμική συμπεριφορά. Η κατασκευή τους είναι ένα ανοιχτό

θέμα για την επιστημονική κοινότητα και η εφαρμογή τους μέχρι σήμερα είναι περιορισμένη. Τα περισσότερα πειράματα που έγιναν για την ανάλυση της συμπεριφοράς τους εκπονήθηκαν σε μικρή κλίμακα και επικεντρώθηκαν στην ελαστική περιοχή απόκρισης. Ακόμη, στα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους θεωρήθηκε απουσία σχετικής μετακίνησης μεταξύ των υλικών χάλυβα και σκυροδέματος στην επιφάνεια επαφής [3] και οι σύνδεσμοι διάτμησης δεν προσομοιώθηκαν. Επίσης, η προσομοίωση της ανακυκλιζόμενης μη γραμμικής απόκρισης και η απώλεια αντοχής και δυσκαμψίας λόγω βλαβών δεν έχουν διερευνηθεί διεξοδικά. Έτσι, σε αντίθεση με την ευρεία χρήση των Σ.Δ. τοιχωμάτων σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, η εφαρμογή τους για την αντισεισμική προστασία κτιρίων κατοικιών δεν είναι ακόμη ευρέως διαδεδομένη λόγω της έλλειψης δεδομένων για τη σεισμική συμπεριφορά τους στα επίπεδα παραμόρφωσης που αναμένονται κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των Σ.Δ. τοιχωμάτων μέσω της χρήσης των άμεσων μεθόδων ολοκλήρωσης. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία του μοντέλου έχει αποδειχθεί σε προηγούμενη μελέτη [2]. Στη συνέχεια, ένα τρισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε με τη χρήση του προγράμματος ANSYS Workbench 15.0 [4]. Το αναλυτικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για τη σύγκριση της συμπεριφοράς των ήλων κεφαλής, που χρησιμοποιούνται ως διατμητικοί σύνδεσμοι, μέσω της μεταβολής των κρίσιμων παραμέτρων που αναδείχθηκαν κατά την ανάλυση των απλοποιημένων μοντέλων. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των αναλυτικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η έμμεση μέθοδος ολοκλήρωσης για την ανάλυση της συμπεριφοράς και των μορφών αστοχίας των ήλων κεφαλής.

3. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

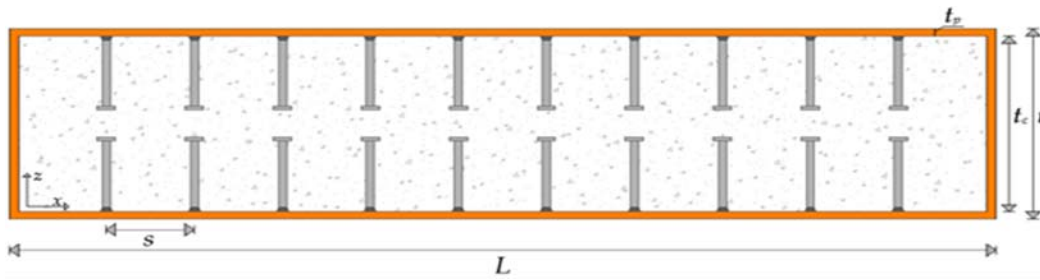
Κατά τη δημιουργία των αριθμητικών μοντέλων λήφθηκε υπόψιν η μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών, η μη γραμμική συμπεριφορά των συνδέσμων διάτμησης στη διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος και ο τοπικός λυγισμός των χαλύβδινων πλακών που συνδέεται με τη γεωμετρική μη γραμμικότητα. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος και των χαλύβδινων πλακών επιλέχθηκε το τρισδιάστατο οκτάκομβο εξάεδρο στερεό πεπερασμένο στοιχείο SOLID65 [4] και το τετράκομβο επιφανειακό στοιχείο SHELL181 [4], αντίστοιχα. Μη γραμμικά ελατήρια χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των συνδέσμων διάτμησης. Επιπρόσθετα, οι συνθήκες επαφής χάλυβα-σκυροδέματος δεν ήταν γνωστές εκ των προτέρων. Το συγκεκριμένο μη γραμμικό πρόβλημα εντάσσεται στη γενική κατηγορία προβλημάτων μονόπλευρης επαφής με τριβή [5] και για την προσομοίωση του χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα μη γραμμικά επιφανειακά στοιχεία επαφής. Οι νόμοι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται αναλυτικά στο [2]. Στο Σχ. 1 περιγράφεται η συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Αρχικά, το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται γραμμικά μέχρι το σημείο ρηγμάτωσης. Κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση η ελαστική δυσκαμψία υποβαθμίζεται. Αυτή η υποβάθμιση περιγράφεται από τις μεταβλητές d_t , d_c ($0 \leq d_t, d_c \leq 1$) και χαρακτηρίζεται από τη διάνοιξη και το κλείσιμο των ρωγμών στο σκυρόδεμα.



Σχ. 1 Ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά σκυροδέματος

Η τυπική διατομή των δοκιμίων που αναλύθηκαν παρουσιάζεται στο Σχ. 2. Οι κύριες μεταβλητές που εξετάστηκαν ήταν ο λόγος όψεων του τοιχώματος (LA για τα τοιχώματα με χαμηλό λόγο όψεων 0,75 - IA για τα τοιχώματα με ενδιάμεσο λόγο όψεων 1,25 - HA για τα τοιχώματα με μεγάλο λόγο όψεων 2,0), το πάχος του τοιχώματος (LT για τα τοιχώματα με μικρό πάχος 200 mm - IT για τα τοιχώματα με ενδιάμεσο πάχος 300 mm - HT για τα τοιχώματα με μεγάλο πάχος 400 mm), η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (NC για σκυρόδεμα κανονικής αντοχής 30 MPa - HC για σκυρόδεμα υψηλής αντοχής 40 MPa), η αντοχή διαρροής του χάλυβα (NS για χάλυβα κανονικής αντοχής 235 MPa - HS για χάλυβα υψηλής αντοχής 355 MPa), ο λόγος λυγηρότητας και το ποσοστό οπλισμού. Τα δοκίμια σχεδιάστηκαν με βάση το Παράρτημα 9 του Κανονισμού AISC [6] σε συνδυασμό με τον EC4 [7]. Κάθε δοκίμιο αναλύθηκε αρχικά υπό μονότονη φόρτιση για την εύρεση της μετατόπισης διαρροής και στη συνέχεια υπό ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση. Το πρωτόκολλο φόρτισης υπολογίστηκε με βάση τον Κανονισμό ACI [8].

Λόγω του ότι η γενική τάση των αποτελεσμάτων είναι ίδια, η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μονότονη και την ανακυκλιζόμενη φόρτιση των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχ. 3 για διάφορες τιμές του λόγου όψεων. Για τη σύγκριση της απόκρισης στο στάδιο που ακολουθεί την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, οι καμπύλες μονότονης φόρτισης επεκτάθηκαν μέχρι τη μετατόπιση που αντιστοιχεί στον τελευταίο κύκλο της ανάλυσης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Όσο αφορά τα αποτελέσματα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, αρχικά παρατηρήθηκε μείωση της δυσκαμψίας σε μετατοπίσεις μεγαλύτερες από αυτές που συνδέονται με τη διαρροή των χαλύβδινων πλακών. Στα τοιχώματα με μικρό λόγο όψεων, η στένωση των βρόγχων υστέρησης και η πτώση της αντοχής ήταν κυρίαρχα στοιχεία, ενώ στα τοιχώματα με μικρό λόγο όψεων ήταν εμφανή χαρακτηριστικά μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου. Αυτά τα χαρακτηριστικά οφείλονται στον εκτενή τοπικό λυγισμό των χαλύβδινων πλακών, στη θραύση των χαλύβδινων πλακών στη βάση των τοιχωμάτων, στη ρηγμάτωση και στη σύνθλιψη του σκυροδέματος. Τα τοιχώματα με μεγάλο λόγο όψεων είχαν μία σταθερή και πλάστιμη συμπεριφορά.

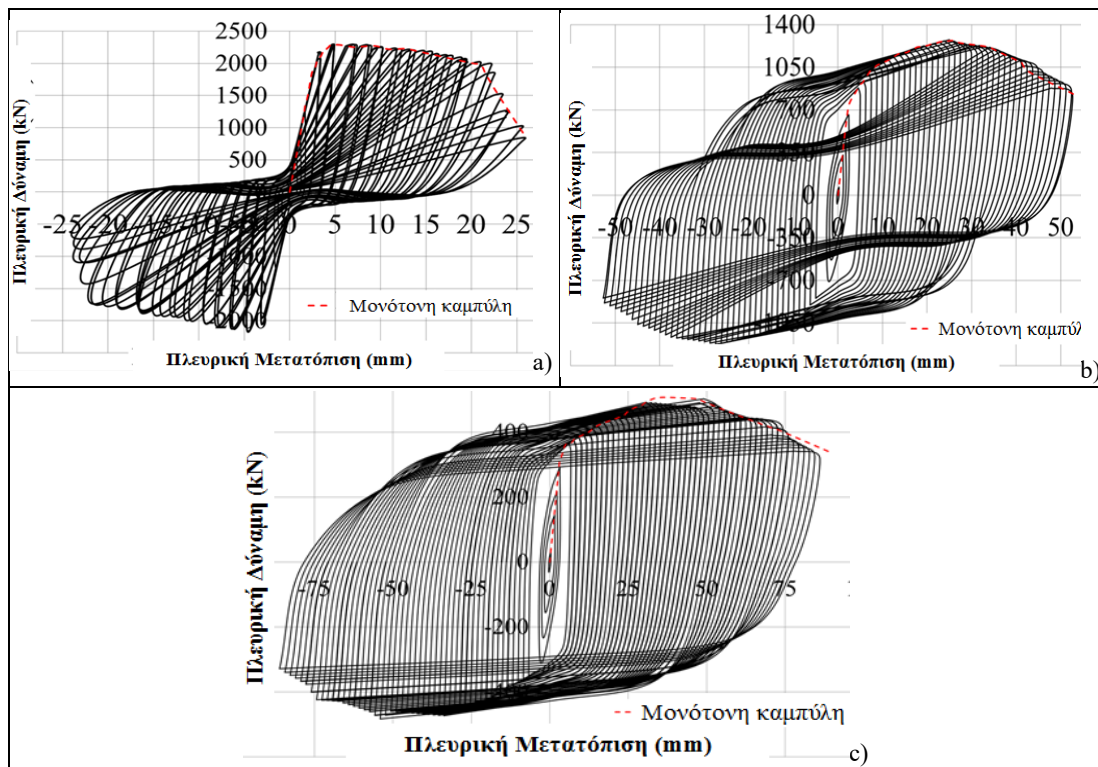


Σχ. 2 Διατομή Σ.Δ. δοκιμίων

Μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μονότονη και την ανακυκλιζόμενη φόρτιση των δοκιμίων είναι εμφανές ότι η διαφορά μεταξύ των αντοχών που υπολογίστηκαν σε κάθε περίπτωση ήταν αμελητέα. Ο ελαστικός κλάδος ήταν όμοιος και η συμπεριφορά των δοκιμίων μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου υπερτιμήθηκε ελαφρώς από τη καμπύλη μονότονης φόρτισης. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην εξαιρετική μετελαστική συμπεριφορά του χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα, η μεγάλη εφελκυστική αντοχή και η πλαστιμότητα του χάλυβα εμπόδισαν την απότομη πτώση της αντοχής του Σ.Δ. τοιχώματος λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς του σκυροδέματος που χαρακτηρίζεται από τη σύνθλιψη στα κάτω άκρα του τοιχώματος. Γενικά, η καμπύλη που προέκυψε από τη μονότονη φόρτιση των δοκιμίων έδωσε μία αντιπροσωπευτική πρόβλεψη της γενικής συμπεριφοράς των Σ.Δ. τοιχωμάτων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς τους.

Λαμβάνοντας υπόψιν τον μηχανισμό μεταφοράς φορτίου, η επιβαλλόμενη εντός επιπέδου διατμητική δύναμη στην κορυφή του τοιχώματος προκάλεσε μία ροπή ανατροπής και μία διατμητική δύναμη στη βάση οδηγώντας σε ένα συνδυασμό ορθών και διατμητικών τάσεων. Έτσι, κάθε τοίχωμα υποβλήθηκε σε ένα συνδυασμό εντός επιπέδου κάμψης και διάτμησης. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο μεγεθών διέπει την πλευρική αντοχή. Γενικά, η συμπεριφορά και ο μηχανισμός αστοχίας ήταν παρόμοια σε όλα τα Σ.Δ. δοκίμια. Όλα τα δοκίμια υπέστησαν παρόμοιες βλάβες κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αστόχησαν λόγω της εντός επιπέδου κάμψης και όχι λόγω της εντός επιπέδου διάτμησης. Γενικά, η διαδικασία αστοχίας ενός Σ.Δ. τοιχώματος που υποβάλλεται σε μονότονη φόρτιση μπορεί να απλοποιηθεί σε τρία βασικά στάδια: το ελαστικό στάδιο, το στάδιο διαρροής και το στάδιο αστοχίας. Το ελαστικό στάδιο ξεκίνησε από την αρχή της φόρτισης και έφτασε μέχρι την αρχή της διαρροής στα δοκίμια. Στο στάδιο αυτό η παραμόρφωση των δοκιμίων ήταν σχεδόν ελαστική και η οριζόντια δύναμη αυξανόταν γραμμικά με την αύξηση της πλευρικής μετατόπισης. Στο συγκεκριμένο στάδιο δεν παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός. Το στάδιο ανάπτυξης διαρροής ξεκίνησε από τη στιγμή εμφάνισης της διαρροής σε ένα τμήμα των δοκιμίων και έφτασε μέχρι την ανάπτυξη του μέγιστου φορτίου στα δοκίμια. Αρχικά, τα τοιχώματα υπέστησαν ελαφρύ τοπικό λυγισμό στη βάση στο δεξί (θλιβόμενο) άκρο. Στη συνέχεια, ο τοπικός λυγισμός έγινε πιο εμφανής και επεκτάθηκε μετά από την περαιτέρω φόρτιση των δοκιμίων. Το στάδιο αστοχίας ξεκίνησε από το μέγιστο φορτίο έως το σημείο αστοχίας των δοκιμίων. Με την περαιτέρω αύξηση της επιβαλλόμενης πλευρικής μετατόπισης, ο υπάρχων τοπικός λυγισμός αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό κυρίως από τη βάση του τοιχώματος έως την πρώτη σειρά των ήλων κεφαλής. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε σύνθλιψη του σκυροδέματος, ενώ η θραύση λόγω εκτενούς τοπικού λυγισμού ξεκίνησε στο θλιβόμενο άκρο και επεκτάθηκε στο πάχος του τοιχώματος. Τελικά, τα δοκίμια έχασαν την ικανότητα ανάληψης πλευρικού φορτίου και υπέστησαν ολική αστοχία που αναγνωρίστηκε στην αριθμητική ανάλυση από την αδυναμία σύγκλισης. Τέλος, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά των

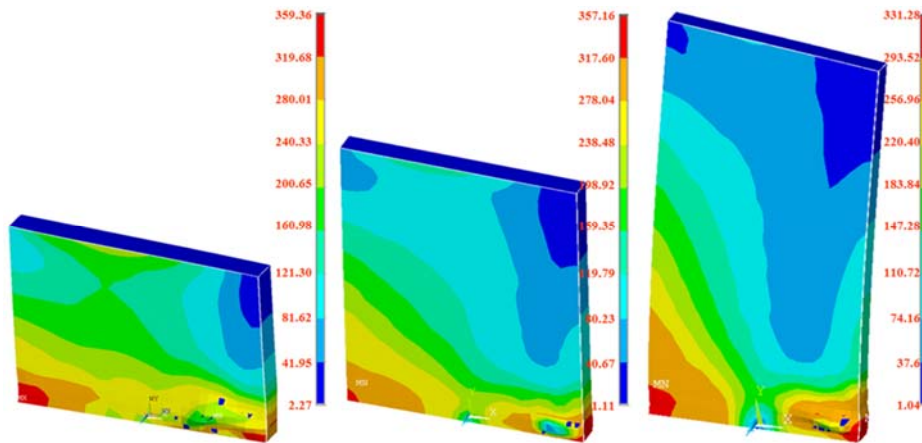
δοκιμίων μετά το σημείο επίτευξης της μέγιστης αντοχής ήταν στενά συνδεδεμένη με την απόσταση των συνδέσμων ιδιαίτερα στη βάση του τοιχώματος, η οποία αποδείχθηκε ως η κρίσιμη περιοχή των Σ.Δ. τοιχωμάτων, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.



Σχ. 3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μονότονη και την ανακυκλιζόμενη φόρτιση των δοκιμίων των δοκιμίων: a) LALTNCNS-20-4.6% b) IALTNCNS-20-4.6% c) HALTNCNS-20-4.6%.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Μία προκαταρκτική μελέτη έγινε με τη χρήση των απλοποιημένων μοντέλων, ώστε να διαπιστωθούν ποιες παράμετροι επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά των συνδέσμων διάτμησης. Με βάση τα αποτελέσματα τάσεων που προέκυψαν από την προκαταρκτική ανάλυση αναγνωρίστηκαν οι περιπτώσεις που οι σύνδεσμοι διάτμησης ή το περιβάλλον σκυρόδεμα μπορεί να αστοχήσουν πριν την επίτευξη της αντοχής των Σ.Δ. τοιχωμάτων καθώς και οι κρίσιμες παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των συνδέσμων διάτμησης.

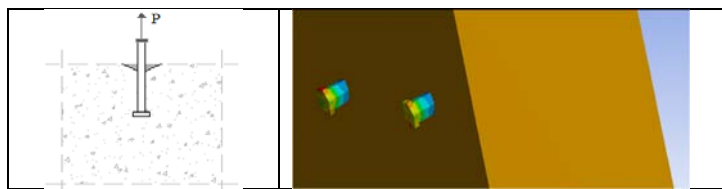


Σχ. 4 Αποτελέσματα ανάλυσης δοκιμίων υπό μονότονη φόρτιση – Βλάβες και κατανομή τάσεων Von-Mises στις χαλύβδινες πλάκες στο σημείο αστοχίας των δοκιμίων LALTNCNS-20-4.6%, IALTNCNS-20-4.6% και HALTNCNS-20-4.6%.

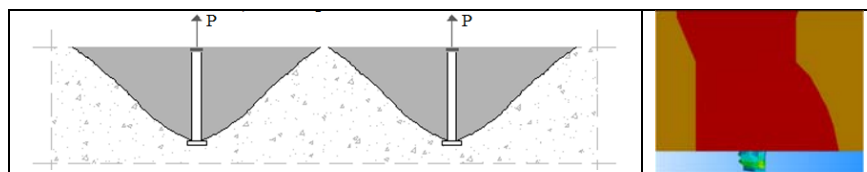
Αρχικά, εξετάστηκαν δύο φορτιστικές περιπτώσεις: α) ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέσω της επιβολής μετατοπίσεων στους κόμβους του χάλυβα και του σκυροδέματος που βρίσκονται στην κορυφή των δοκιμίων και β) θλιπτική φόρτιση μέσω της επιβολής ομοιόμορφων πιέσεων στην άνω επιφάνεια του τοιχώματος. Αν και η γενική συμπεριφορά του τοιχώματος ήταν διαφορετική σε κάθε φορτιστική περίπτωση, παρατηρήθηκε ότι η ορθή δύναμη στη διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος ήταν αμελητέα στην περίπτωση της εντός επιπέδου διατμητικής φόρτισης. Έτσι, η θλιπτική φόρτιση επιλέχθηκε για την περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς των συνδέσμων διάτμησης. Στη συνέχεια, το απλοποιημένο αριθμητικό μοντέλο αναλύθηκε με στόχο την εύρεση των παραμέτρων σχεδιασμού που είναι κρίσιμες για τη συμπεριφορά των συνδέσμων διάτμησης σε ένα Σ.Δ. τοίχωμα. Ο λόγος όψεων του τοιχώματος αν και αναδείχθηκε ως η κρίσιμότερη παράμετρος για τη σεισμική απόκριση ενός Σ.Δ. τοιχώματος, δεν επηρέασε άμεσα την αντοχή και τη μορφή αστοχίας των συνδέσμων διάτμησης. Έτσι, η ανάλυση του σύνθετου μοντέλου έγινε μόνο σε τοιχώματα με λόγο όψεων ίσο με 2,0. Επίσης, εξετάστηκε η επιρροή της απόστασης μεταξύ των συνδέσμων διάτμησης. Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι για τη διερεύνηση των διάφορων μορφών αστοχίας των ήλων κεφαλής με το αναλυτικό μοντέλο, η μεταξύ τους απόσταση πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αποφευχθεί η ομαδική συμπεριφορά τους και ταυτόχρονα αρκετά μικρή για την αποτροπή του τοπικού λυγισμού πριν τη διαρροή των χαλύβδινων πλακών.

Τα σύνθετα αριθμητικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα ANSYS Workbench 15.0 [4] περιελάμβαναν κάθε κατασκευαστική λεπτομέρεια ενός Σ.Δ. τοιχώματος και των ήλων κεφαλής. Για τη διεξαγωγή της κύριας παραμετρικής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν 48 δοκίμια, όμως περαιτέρω δοκίμια εξετάστηκαν για την ανάλυση της συχνότητας κάθε τρόπου αστοχίας των ήλων κεφαλής και την ανάπτυξη πιθανών λύσεων για τη διαφύλαξη της πλαστιμότητας ενός Σ.Δ. τοιχώματος. Το πάχος των χαλύβδινων πλακών λήφθηκε ίσο με 9 mm, ώστε να είναι δυνατή η διερεύνηση ενός μεγάλου εύρους διαμέτρων των συνδέσμων. Το ύψος, το μήκος και το συνολικό πάχος των δοκιμίων λήφθηκαν 3000 mm, 1500 mm και 300 mm, αντίστοιχα. Το όριο διαρροής του χάλυβα των χαλύβδινων πλακών και των ήλων κεφαλής λήφθηκε ίσο με 275 MPa και 350 MPa, αντίστοιχα. Εξετάστηκαν έξι διαφορετικές κατηγορίες σκυροδέματος με θλιπτική αντοχή 16 MPa, 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa και 40 MPa, καθώς στην προκαταρκτική μελέτη η αντοχή του σκυροδέματος που περιβάλλει τους συνδέσμους αποδείχθηκε κρίσιμη για την τελική μορφή αστοχίας των συνδέσμων.

Γενικά, η επιθυμητή μορφή αστοχίας των ήλων κεφαλής σε ένα Σ.Δ. τοίχωμα είναι η διατμητική αστοχία. Όσο αφορά την εφελκυστική αστοχία των συνδέσμων, κατά τη διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης παρατηρήθηκε εξόλκευση των ήλων κεφαλής, όπως φαίνεται στο Σχ. 5. Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας επηρεάστηκε σημαντικά από το λόγο της διαμέτρου κεφαλής d_h προς τη διάμετρο κορμού d των συνδέσμων διάτμησης. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για θλιπτική αντοχή σκυροδέματος ίση με 25 MPa, η εξόλκευση των συνδέσμων μπορεί να αποφευχθεί εάν $1,50 \leq d_h/d \leq 1,90$. Το μέγιστο απαιτούμενο όριο μειώνεται σε 1,70 και 1,60 με την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος σε 30 MPa και 35 MPa, αντίστοιχα. Η διάρρηξη του σκυροδέματος εμφανίστηκε μόνο στην περίπτωση μείωσης του συνολικού πάχους τοιχώματος σε 250 mm και 200 mm, όπως φαίνεται στο Σχ. 6. Συμπερασματικά, σε Σ.Δ. τοιχώματα περιορισμένου πάχους η αστοχία λόγω διάρρηξης του σκυροδέματος είναι πιο πιθανή μορφή αστοχίας από ότι η εξόλκευση των ήλων κεφαλής. Η διατμητική αστοχία του σκυροδέματος σε αντίθεση με τη διάρρηξη συνέβη μόνο στην περιοχή που περιβάλλει τον σύνδεσμο διάτμησης και κάθετα στην επιβαλλόμενη διατμητική δύναμη. Για τη συγκεκριμένη μορφή αστοχίας, ο λόγος του ύψους h προς τη διάμετρο του ήλου d κρίθηκε κρίσιμος. Όμως τα όρια που προτείνονται από τον EC4 [7] κρίθηκαν ικανοποιητικά για την αποφυγή της συγκεκριμένης όπως και όλων των υπόλοιπων ψαθυρών εφελκυστικών μορφών αστοχίας.



Σχ. 5 Εξόλκευση ήλων κεφαλής



Σχ. 6 Διάρρηξη σκυροδέματος

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο αρχικός στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των Σ.Δ. τοιχωμάτων με τη χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων [1-2] και των άμεσων μεθόδων ολοκλήρωσης. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκε η συμπεριφορά των τοιχωμάτων αρχικά υπό μονότονη και στη συνέχεια υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέσω της μεταβολής κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίθηκαν και αποδείχθηκε ότι οι καμπύλες που προέκυψαν από τη μονότονη φόρτιση των δοκιμών έδωσαν μία ικανοποιητική εκτίμηση της αντοχής και της πλαστιμότητας των Σ.Δ. τοιχωμάτων. Στη συνέχεια, αναλύθηκε ο μηχανισμός μεταφοράς φορτίου και η διαδικασία αστοχίας των τοιχωμάτων που μπορεί να απλοποιηθεί σε τρία στάδια: ελαστικό στάδιο, στάδιο ανάπτυξης διαρροής και στάδιο αστοχίας. Ο δεύτερος στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των ήλων κεφαλής. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα σύνθετο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για την

ανάλυση της συμπεριφοράς των ήλων κεφαλής σε ένα Σ.Δ. τοίχωμα μέσω της μεταβολής των κρίσιμων παραμέτρων που αναδείχθηκαν από την ανάλυση των απλοποιημένων μοντέλων. Γενικά, η επιθυμητή μορφή αστοχίας των ήλων κεφαλής είναι η διατμητική. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι με την υιοθέτηση των προτεινόμενων ορίων και των ορίων που προτείνονται από τον EC4 [7] μπορεί να αποφευχθεί η ψαθυρή μορφή αστοχίας των ήλων κεφαλής σε ένα Σ.Δ. τοίχωμα. Έτσι, η σύμμικτη δράση διαφυλάσσεται, η πλαστιμότητα αυξάνεται και τα Σ.Δ. τοιχώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διατμητικά τοιχώματα σε πολυώροφα κτίρια.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] ELMATZOGLOU M. and AVDELAS A. “Finite element modeling of double-steel plate composite shear walls”, *Proc. 7th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering (IC-SCCE)*, Vol. I, 2016, pp. 197-205.
- [2] ELMATZOGLOU M. and AVDELAS A. “Numerical modeling of Double-Steel Plate Composite Shear Walls”, *Computation*, Special Issue, Vol. 5(1), No. 12, 2017. doi:10.3390/computation5010012. <http://www.mdpi.com/2079-3197/5/1/12>
- [3] EPACKACHI S., WHITTAKER A.S., VARMA A.H. and KURT E.G. “Finite element modeling of steel-plate concrete composite wall piers”, *Eng. Struct.* 100 (2015) 369–384. doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.023.
- [4] ANSYS INC, *Workbench User's Guide Release 15.0*, Ansys Inc., Southpointe, Canonsburg, 2013.
- [5] PANAGIOTOPOULOS P.D. and AVDELAS A.V. “A hemivariational inequality approach to the unilateral contact problem and substationarity principles”, *Ingenieur-Archiv* 54 (1984) 401-412.
- [6] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, *Specification for safety-related steel structures for nuclear facilities/ Supplement no. 1*, AISC N690-12s1, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA, 2015.
- [7] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, *Eurocode 4—Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2004.
- [8] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 374 (ACI), *Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.

FINITE ELEMENT MODEL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR OF DOUBLE-STEEL PLATE COMPOSITE SHEAR WALLS

Michaela Elmatzoglou

Phd Student, Civil Engineer
Steel Structures Laboratory AUTH
GR-541 24 Thessaloniki, Greece
E-mail: emichael@civil.auth.gr

Aris Avdelas

Professor Emeritus, Civil Engineer
Steel Structures Laboratory AUTH
GR-541 24 Thessaloniki, Greece
E-mail: avdelas@civil.auth.gr

SUMMARY

Double-steel plate concrete (SC) walls consist of a concrete core with exterior steel faceplates and shear connectors which join steel faceplates with concrete and guarantee the composite action between the two different materials. The objective of this research is the investigation of the seismic performance, compression behaviour of SC composite shear walls and the assessment of available ductility for application to buildings using two different finite element models. A simplified three-dimensional finite element model has initially been used to investigate the in-plane monotonic and cyclic response of SC walls. Next, three-dimensional extensively detailed finite element models have been developed to comprehensively investigate the critical parameters, which affect the behaviour and failure modes of welded headed studs embedded in SC walls since their behaviour is critical for ensuring composite action between steel and concrete. On the basis of the results, it has been concluded that SC walls have the potential to be used as shear walls in multi-story buildings provided that all the proposed measures are taken.