ΔΟΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΥΠΟ ΙΣΧΥΡΗ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Θεοχάρης Παπαθεοχάρης

Υπ. Διδάκτωρ Π.Θ. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Βόλος, Ελλάδα email: th_papath@yahoo.gr

Γιαννούλα Χατζοπούλου

Υπ. Διδάκτωρ Π.Θ. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Βόλος, Ελλάδα email: chatzopoulougiannoula@gmail.com

Σπύρος Α. Καραμάνος

Καθηγητής Π.Θ. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Βόλος, Ελλάδα email: skara@mie.uth.gr Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Εδιμβούργου Σκωτία, Ηνωμένο Βασίλειο email: spyros.karamanos@ed.ac.uk

Φίλιππος Κ. Περδικάρης

Καθηγητής Π.Θ. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Βόλος, Ελλάδα email: filperd@uth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από πειραματικές δοκιμές και αριθμητικές αναλύσεις πάνω σε σεισμικούς συνδέσμους (seismic links) που υπόκεινται σε ισχυρή ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε συνδυασμένη κάμψη και διάτμηση αναπαριστώντας τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης ενός σεισμικού συνδέσμου κατά την διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές υπό σταθερό και αυξανόμενο εύρος μετατοπίσεων και οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το διαφορετικό υλικό, το μήκος του συνδέσμου και ο τύπος της διατομής. Για την προσομοίωση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα και τα αριθμητικά αποτελέσματα βρέθηκαν να είναι σε καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σεισμικοί σύνδεσμοι από χάλυβα είναι στοιχεία απορρόφησης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές μεταλλικών κτιρίων έναντι σεισμού αλλά και για τη σεισμική προστασία υφιστάμενων κατασκευών. Οι σύνδεσμοι σχεδιάζονται για να υποβληθούν σε μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις απορροφώντας μεγάλο μέρος της σεισμικής ενέργειας, ώστε η υπόλοιπη κατασκευή να παραμείνει χωρίς βλάβες. Η χρήση τους στο σχεδιασμό έκκεντρων συνδέσμων (eccentric bracing) έναντι σεισμού ξεκίνησε τη δεκαετία του '70 [1] και του '80 [2]-[6], και φτάνει έως τις ημέρες μας [7]-[11].

Η παρούσα μελέτη αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου ερευνητικού προγράμματος (MATCH, 2013-2016) [12] που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και είχε ως στόχο την εξέταση των μηχανισμών αστοχίας των σεισμικών συνδέσμων που υπόκεινται σε ολίγο-κυκλική κόπωση λόγω ισχυρού σεισμού προκειμένου να εξασφαλιστεί μία σαφώς όλκιμη συμπεριφορά. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές δεκαέξι (16) σεισμικών συνδέσμων υπό ισχυρή ανακυκλιζόμενη φόρτιση και αντίστοιχες αντιπροσωπευτικές αριθμητικές προσομοιώσεις. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αφορούσαν το υλικό των συνδέσμων, το μήκος των συνδέσμων και τον τύπος της διατομής τους. Για την προσομοίωση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων (FE) ABAQUS/Standard. Οι δοκιμές των συνδέσμων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο "Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος" του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ενώ οι δοκιμές του χάλυβα (strip tests) που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του καταστατικού μοντέλου του υλικού των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο "Μηγανικής και Αντοχής των Υλικών" του Τμήματος Μηγανολόγων Μηγανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε τη δοκιμή δεκαέξι (16) δοκιμίων σεισμικών συνδέσμων. Τρεις τύποι διατομών εξετάστηκαν (Σχ. 1): (α) μορφής διπλού ταυ ΗΕΑ 100 από χάλυβα S355, (β) κοίλη κυκλική διατομή 76.1x3.2 mm (CHS) από χάλυβα S700, και (γ) κοίλη ορθογωνική διατομή 60x60x3 mm (RHS) από χάλυβα S700. Το πειραματικό πρόγραμμα και τα κυριότερα πειραματικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον Error! Reference source not found.



(α)



Σχ. 1: Δοκίμια σεισμικών συνδέσμων: (α) κοίλης διατομής, (β) ΗΕΑ 100.

δοκίμιο	κατηγορία χάλυβα	μήκος, mm	μέγιστο φορτίο, P _{max} (kN)	οριζόντια μετατόπιση, δ₁ (mm)	κύκλοι έως την αστοχία, Ν _f	RBS
CHS-1	S700	300	117,3	ECCS	8	\checkmark
CHS-2		300	-107,8	±6	27	\checkmark
CHS-3		150	-219,5	±8	2	\checkmark
CHS-4		150	-221,2	±6	22	\checkmark
RHS-1	S700	300	-102,4	ECCS	8	\checkmark
RHS -2		300	80,3	±6	82	\checkmark
RHS -3		150	-207,9	±10	1	\checkmark
RHS -4		150	-212,4	±8	2	\checkmark
HEA -1	S355	300	256,4	ECCS, ±16 ^a	20+37 ^a	\checkmark
HEA -2		300	271,0	ECCS, ±20 ^a	20+16 ^a	\checkmark
HEA -3		300	278,1	ECCS	20	\checkmark
HEA -4		300	289,8	±24	16	\checkmark
HEA -5		150	241,8	ECCS	18	\checkmark
HEA -6		150	-243,3	±9	21	\checkmark
HEA -7		150	-240,5	±8	22	\checkmark
HEA -8		150	261,9	±11	6	\checkmark

^a Φόρτιση με σταθερό πλάτος μετατόπισης.

Πιν.1: Πρόγραμμα δοκιμών και πειραματικά αποτελέσματα.

Για κάθε τύπο διατομής εξετάστηκαν δύο διαφορετικά μήκη δοκιμίων, με μήκος 150mm και 300mm. Κοντά στα άκρα των δοκιμίων οι παραπάνω διατομές υιοθετήθηκαν με μειωμένη αντοχή (RBS) με σκοπό τη δημιουργία της αστοχίας μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο των μετατοπίσεων και το ιστορικό φόρτισης που εφαρμόστηκε περιελάμβανε μετατοπίσεις σταθερού και αυξανόμενου πλάτους (ECCS No.45). Το οριζόντιο φορτίο επιβαλλόταν στα δοκίμια μέσω ενός ειδικού μεταλλικού πλαισίου φόρτισης το οποίο ήταν αρθρωμένο στις βάσεις των υποστυλωμάτων του, ενώ ένα ειδικό σύστημα κυλίσεων απέτρεπε τις εκτός επιπέδου μετακινήσεις (Σχ. 2). Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις, οι στροφές και οι τοπικές παραμορφώσεις των δοκιμίων καταγράφονταν κατά τη διάρκεια των δοκιμών μέσω κατάλληλων μετρητικών οργάνων (Error! Reference source not found.).



Σχ. 2: Πειραματική διάταξη και ηλεκτρομηκυνσιόμετρα στις κρίσιμές περιοχές των δοκιμίων.

Όλα τα δοκίμια (CHS, RHS και HEA) αστόχησαν μέσα στα όρια της ολίγο-κυκλικής κόπωσης στην περιοχή μειωμένης αντοχής με εξαίρεση τα ορθογωνικά μήκους 150 mm και δύο δοκίμια HEA 100 μήκους 300 mm που αστόχησαν στη συγκόλληση. Τα δοκίμια διπλού ταυ αστόχησαν στη συγκόλληση όταν υποβλήθηκαν σε μετατοπίσεις μεγαλύτερες των ±20 mm. Εικόνες από τη ρηγμάτωση των δοκιμίων στην αστοχία παρουσιάζονται στο **Error! Reference source not found.**



(β)

Σχ. 3: Ρημάτωση των δοκιμίων στην αστοχία για τα δοκίμια: (α) κοίλης διατομής, (β) ΗΕΑ διατομής.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Τα αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών αναπτύχθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Standard. Οι σύνδεσμοι απομονώθηκαν από το εξωτερικό πλαίσιο φόρτισης με τη χρήση κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, ενώ τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 8-κομβικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8R. Τα μοντέλα πεπερασμένων για τα δοκίμια HEA 100 και κυκλικής διατομής με μήκος 300 και 150 mm αντίστοιχα παρουσιάζονται στο Σχ. α και 4β, αντίστοιχα.

Το μοντέλο του καταστατικού νόμου βαθμονομήθηκε με τη βοήθεια κυκλικών δοκιμών του χάλυβα από τον οποίο κατασκευάστηκαν οι σύνδεσμοι και έχει παρουσιαστεί εκτεταμένα στην [12]. Στους συνδέσμους επιβλήθηκαν ταυτόχρονα κατακόρυφες μετατοπίσεις και στροφές στα δύο άκρα τους με βάση τις αντίστοιχες κατακόρυφες μετρήσεις και στροφές των πειραματικών δοκιμών ώστε τελικά να υποβληθούν σε συνδυασμένη κάμψη και διάτμηση. Ένα τέτοιο παράδειγμα αριθμητικού μοντέλου φαίνεται στο Error! Reference source not found.



Σχ. 4: Αριθμητικά μοντέλα: (α) ΗΕΑ 100 με μήκος 300 mm, (β) CHS με μήκος 150 mm, (γ) ΗΕΑ 100 με κατακόρυφες μετατοπίσεις και στροφές δύο άκρα του.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αντιπροσωπευτικές συγκρίσεις μεταξύ πειραματικών δοκιμών και αριθμητικών προσομοιώσεων παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Τα πειραματικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα βρέθηκαν να είναι σε καλή συμφωνία. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε δείχνει ικανό να προβλέψει την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης αλλά και την παραμορφωμένη κατάσταση του συνδέσμου.

Διαγράμματα φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης για τον σύνδεσμο HEA-1 με μήκος 300 mm σε φόρτιση με αυξανόμενη μετατόπιση (ECCS πρωτόκολλο) παρουσιάζονται στο Σχ. Η πειραματική καμπύλη και τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία. Η παραμορφωμένη κατάσταση του συνδέσμου παρουσιάζεται στο Σχ. . Παρατηρείται ότι παρόλο που ο κορμός παρουσιάζει ισχυρή παραμόρφωση, η αστοχία συνέβη στο πέλμα εξαιτίας της μειωμένης αντοχής της διατομής.



Σχ 5: Διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης για τον σύνδεσμο ΗΕΑ-1 με μήκος 300 mm: (α) πειραματική δοκιμή, (β) αριθμητική προσομοίωση.



Σχ. 6: Παραμορφωμένη κατάσταση για τον σύνδεσμο ΗΕΑ-1 με μήκος 300 mm: α) αριθμητική προσομοίωση, (β) πειραματική δοκιμή.

Η καμπύλη φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης για το κυκλικό δοκίμιο CHS-4 με μήκος 150 mm σε φόρτιση με μετατόπιση σταθερού πλάτους και η παραμορφωμένη κατάσταση του συνδέσμου παρουσιάζονται στα Σχ. και Σχ., αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, τοπικός λυγισμός εμφανίστηκε στην περιοχή των οπών (RBS) στη διάρκεια του πρώτου κύκλου και ο οποίος τελικά οδήγησε στην αστοχία. Παρόμοια μορφή αστοχίας προέκυψε και από την αριθμητική προσομοίωση.



Σχ 7: Διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης για τον κυκλικό σύνδεσμο CHS-4 με μήκος 150 mm: (α) πειραματική δοκιμή, (β) αριθμητική προσομοίωση.



Σχ. 8: Παραμορφωμένη κατάσταση για τον κυκλικό σύνδεσμο CHS-4 με μήκος 150 mm: α) αριθμητική προσομοίωση, (β) πειραματική δοκιμή

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απόκριση οριζόντιων σεισμικών συνδέσμων από χάλυβα υπό ισχυρή ανακυκλιζόμενη φόρτιση μελετήθηκε μέσω πειραματικών δοκιμών και αριθμητικών αναλύσεων. Η σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι τα αριθμητικά μοντέλα είναι ικανά να περιγράψουν τόσο τη συμπεριφορά των συνδέσμων όσο και τη μορφή της αστοχίας τους υπό ισχυρή ανακύκλιση. Οι περισσότεροι σύνδεσμοι που εξετάστηκαν άντεξαν ένα ικανό αριθμό ισχυρών ανακυκλίσεων πριν την αστοχία. Η πλειονότητα των δοκιμίων αστόχησαν στην περιοχή της διατομής μειωμένης αντοχής με εξαίρεση τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής μήκους 150 mm και δύο δοκίμια διπλού ταυ μήκους 300 mm τα οποία αστόχησαν στη συγκόλληση.

7. ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Roeder C.W., Popov E.P., "Eccentrically braced steel frames for earthquakes", *Journal of the Structural Division*, Vol. 104(3), pp. 391–412, ASCE, 1978.
- [2] Hjelmstad K.D., Popov E.P., "Cyclic behaviour and design of link beams", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109(10), pp. 2387–403, ASCE, 1983
- [3] Malley J.O., Popov E.P., "Shear links in eccentrically braced frames", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109(10), pp. 2275–95, 1984.
- [4] Kasai K., Popov E.P., "General behaviour of WF steel shear link beams". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112(2), pp. 362–82, ASCE, 1986.
- [5] Ricles J..M, Popov E.P., "Dynamic analysis of seismically resistant eccentrically braced frames", *Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California*, 1987.
- [6] Popov E.P., Engelhardt M.D., "Seismic eccentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.10, pp. 321–54, 1988.
- [7] Fehling E., Pauli W., Bouwkamp J.G., "Use of vertical shear-Links in eccentrically braced frames", *Earthquake Enginnering, Tenth World Conference*, Balkema, Rotterda, 1992.
- [8] Stratan A., Dubina D., "Bolted links for eccentrically braced steel frames", Connections in Steel Structures V,Amsterdam, 2004.
- [9] Berman J.W., Bruneau M., "Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames", *Engineering Structures*, Vol. 29, pp. 1929–1938, 2007.
- [10] Della Corte G., D'Aniello M., Landolfo R., "Analytical and numerical study of plastic overstrength of shear links", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.82, pp. 19–32, 2013.
- [11] Ji X., Ma Q., Wang Y., Okazaki T., "Cyclic behavior of steel shear links used in replaceable coupling beams", *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska, 2014.
- [12] Schaffrath S. et al. "Material Choice for Seismic Resistant Structures" RFSR-CT-2013-00024, *Final-Term report*, 2017.

STRUCTURAL BEHAVIOR OF STEEL SEISMIC LINKS UNDER STRONG CYCLIC LOADING

Theocharis Papatheocharis

Ph.D. Candidate Department of Civil Engineering, University of Thessaly Volos, Greece email: th_papath@yahoo.gr

Giannoula Chatzopoulou

Ph.D. Candidate Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly Volos, Greece email: chatzopoulougiannoula@gmail.com

Spyros A. Karamanos

Professor Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly Volos, Greece email: skara@mie.uth.gr School of Engineering, The University of Edinburgh Scotland, UK email: spyros.karamanos@ed.ac.uk

Philip C. Perdikaris Professor Department of Civil Engineering, University of Thessaly Volos, Greece email: filperd@uth.gr

SUMMARY

In the present paper, results from an experimental and numerical investigation on horizontal seismic links under strong full-reversing cyclic loading are presented. Link specimens were subjected to combined shear and bending loading, representing the real conditions during a severe seismic event. Sixteen (16) large scale tests were conducted for different steel material grades, lengths and section types. Three types of cross sections were under consideration: H-shape section (HEA) with S355 steel, circular hollow section (CHS) with S700 steel and rectangular hollow section (RHS) with S700 steel. Loading histories with both constant and increasing amplitudes were applied. Three dimensional numerical models were also employed for the numerical simulation of the tests in the commercial finite element software ABAQUS/Standard. Numerical models were found capable of simulating the structural behavior of the links under repeated loading. The key was the adoption and calibration of an efficient plasticity model for the simulation of both the plastic plateau upon initial yielding and the Bauschinger effect under reverse loading.