### ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΟΧΛΙΩΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΑ ΠΕΛ-ΜΑΤΑ

Κωνσταντίνος Ν. Κονδυλίδης<sup>a</sup>, Χρήστος Ε. Σοφίας<sup>b</sup>, Δημήτριος Θ. Παχούμης<sup>b</sup>, Χρίστος Ν. Κάλφας<sup>c</sup> <sup>a</sup> MSc. Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ. <sup>b</sup> Δρ MSc. Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ. <sup>c</sup> Καθηγητής Δ.Π.Θ. Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Δ.Π.Θ. Ξάνθη, Ελλάδα e-mail: <u>mslgroup@civil.duth.gr</u>

### 1.ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια της ευρύτερης ερευνητικής προσπάθειας που πραγματοποιείται τα τελευταία χρόνια στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Δ.Π.Θ., σχετικά με τη συμπεριφορά κοχλιωτών συνδέσεων ροπής δοκού υποστυλώματος με χρήση της τεχνικής RBS. Συγκεκριμένα, το αντικείμενο που εξετάζεται είναι η επιρροή της μεταβολής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της δοκού, και ειδικότερα το ύψος της, στην αποτελεσματικότητα της εν λόγω τεχνικής. Η διερεύνηση αφορά πέντε διαφορετικά μεγέθη δοκού διατομής τύπου HEA, των οποίων οι γεωμετρικές παράμετροι της απομείωσης διατηρούνται σταθερές και σύμφωνες με τις διατάξεις του EC8. Έπειτα από προσομοίωση των αντίστοιχων αναλυτικών μοντέλων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και πραγματοποιείται αξιολόγηση του τρόπου συμπεριφοράς της σύνδεσης.

### 2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τόσο η εξασφάλιση επαρκούς αντοχής όσο και η δυνατότητα απορρόφησης ικανών ποσών ενέργειας, είναι οι θεμελιώδεις αρχές που διέπουν τη φιλοσοφία του αντισεισμικού σχεδιασμού συνδέσεων μεταλλικών πλαισίων που αναλαμβάνουν ροπές. Οι αναπάντεχα σοβαρές αστοχίες του παρελθόντος (Northridge 1994 και Kobe 1995) σε συνδέσεις δοκώνυποστυλωμάτων, κατέδειξαν την αδυναμία των έως τότε εφαρμοζόμενων τύπων συνδέσεων, σε περιπτώσεις ισχυρών ανακυκλιζόμενων φορτίσεων, οδηγώντας τους επιστήμονες στην αναζήτηση νέων τεχνικών για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών [1]. Βασικός στόχος ήταν η βελτίωση της διαθέσιμης στροφικής ικανότητας της σύνδεσης με την εμφάνιση της πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της δοκού. Μία από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν, είναι η σύνδεση με απομειωμένα πέλματα δοκού (RBS), γνωστή και ως 'dogbone' σύνδεση, η εφαρμογή της οποίας αξιοποιεί την εξασθένιση της διατομής της δοκού σε μια κατάλληλη θέση, μακριά από τον κόμβο, οδηγώντας εκεί τις ανελαστικές παραμορφώσεις. Στο παρόν άρθρο, διερευνάται η εφαρμογή της τεχνικής της απομείωσης των πελμάτων της δοκού (RBS), σε πέντε διαφορετικά μεγέθη δοκού διατομής τύπου HEA. Συγκεκριμένα εξετάζεται η επιρροή της μεταβολής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της δοκού στη γενικότερη συμπεριφορά της σύνδεσης, η επιτυχία δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης μακριά από την κρίσιμη περιοχή του κόμβου και η αποτελεσματικότητα εν γένει των επιταγών που θέτει ο Ευρωπαϊκός αντισεισμικός κανονισμός [5], όσον αφορά το σχεδιασμό συνδέσεων του τύπου αυτού.

## 3.ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Κατά το σχεδιασμό των προσομοιωμάτων επιλέχθηκαν για τις δοκούς πλατύπελμες διατομές τύπου ΗΕΑ με τη διατομή του υποστυλώματος να παραμένει ΗΕ300B σε κάθε περίπτωση. Για τη μόρφωση της σύνδεσης της δοκού επί του υποστυλώματος χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένη μετωπική λεπίδα (πίν. 1), η οποία συγκολλάται στη δοκό και κοχλιώνεται στο υποστύλωμα (σχ. 1).

Η ποιότητα του χάλυβα, όλων των στοιχείων των προσομοιωμάτων, ήταν S275. Το μέγεθος και η ποιότητα των κοχλιών, των οποίων τα στοιχεία παρατίθενται στον πίνακα 1, μεταβαλλόταν ανάλογα με το μέγεθος της διατομής της δοκού, ώστε να ικανοποιούνται οι γεωμετρικές απαιτήσεις του κανονισμού.



Σχ.1 Φορέας και γεωμετρία της απομείωσης.

| Διατομή<br>Υποστυλώματος | Διατομή<br>Δοκού | Εκτεταμένη<br>μετωπική λεπίδα | Ποιότητα<br>χάλυβα | Κοχλίες   |
|--------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|
| HE300B                   | HE160A           | 310 x 200 x 20                | S 275              | M 20 8.8  |
| HE300B                   | HE180A           | 350 x 200 x 20                | S 275              | M 24 10.9 |
| HE300B                   | HE200A           | 350 x 200 x 20                | S 275              | M 24 10.9 |
| HE300B                   | HE220A           | 390 x 220 x 20                | S 275              | M 24 10.9 |
| HE300B                   | HE240A           | 390 x 240 x 25                | S 275              | M 24 10.9 |

Πιν. 1: Χαρακτηριστικά συνδέσεων με εκτεταμένη μετωπική λεπίδα.

Όλα τα δοκίμια καταπονήθηκαν υπό μονοτονική φόρτιση, με τη μορφή επιβαλλόμενης μετατόπισης, η οποία ασκήθηκε σε απόσταση ενός μέτρου από το μέτωπο του υποστυλώματος. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τιμές της ροπής διαρροής τόσο της πλήρους διατομής όσο και της αντίστοιχης απομειωμένης για κάθε αναλυτικό προσομοίωμα.

Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απομείωσης, επιλέχθηκαν σταθερές για όλες τις διατομές τιμές (ποσοστά %), εντός των ορίων που θέτουν τόσο η FEMA [6, 7] όσο και ο Ευρωκώδικας 8 [5], οι οποίες παρατίθενται στον πίνακα 3.

| Διατομή δοκού | M <sub>RD,nom</sub> | M <sub>RD,rbs</sub> |
|---------------|---------------------|---------------------|
| HE160A        | 67.4                | 44.8                |
| HE180A        | <i>89.3</i>         | 59                  |
| HE200A        | 118                 | 78.4                |
| HE220A        | 156.3               | 103.4               |
| HE240A        | 204.9               | 135.8               |

Πιν.2 Αντοχές δοκών.



Σχ.2 Σημείο επιβολής της φόρτισης

| Διατομή | $\mathbf{b}_{\mathbf{f}}$ | d <sub>b</sub> | a             |      | b       |      | g             |      | S     | r     |
|---------|---------------------------|----------------|---------------|------|---------|------|---------------|------|-------|-------|
|         | (mm)                      | (mm)           | $\%b_{\rm f}$ | (mm) | $\%d_b$ | (mm) | $\%b_{\rm f}$ | (mm) | (mm)  | (mm)  |
| HE160A  | 160                       | 152            | 70            | 112  | 75      | 114  | 40            | 32   | 169   | 66.7  |
| HE180A  | 180                       | 171            | 70            | 126  | 75      | 128  | 40            | 36   | 190   | 75.1  |
| HE200A  | 200                       | 190            | 70            | 140  | 75      | 143  | 40            | 40   | 211.2 | 83.4  |
| HE220A  | 220                       | 210            | 70            | 154  | 75      | 158  | 40            | 44   | 232.7 | 92.4  |
| HE240A  | 240                       | 230            | 70            | 168  | 75      | 173  | 40            | 48   | 254.2 | 101.5 |

Πιν.3 Χαρακτηριστικά απομείωσης δοκών.

### 4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα ροπής στροφής καθώς και φωτογραφίες της περιοχής της σύνδεσης, σε χαρακτηριστικά σημεία του ιστορικού φόρτισης, όπως αυτά προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.



Φωτ.1 Έναρξη διαρροής στο κέντρο της απομείωσης (α) και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της δοκού (β).



(α) (β) Φωτ.2 Όψη προσομοιώματος κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.3 Καταπόνηση των κοχλιών κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.4 Έναρξη διαρροής στο κέντρο της απομείωσης (α) και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της δοκού (β).







Φωτ.6 Καταπόνηση των κοχλιών κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.7 Έναρξη διαρροής στο κέντρο της απομείωσης (α) και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της δοκού (β).



(α) (β) Φωτ.8 Όψη προσομοιώματος κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.9 Καταπόνηση των κοχλιών κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.10 Έναρζη διαρροής στο κέντρο της απομείωσης (α) και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της δοκού (β).



(α) (β) Φωτ.11 Όψη προσομοιώματος κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.12 Καταπόνηση των κοχλιών κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.13 Έναρζη διαρροής στο κέντρο της απομείωσης (α) και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της δοκού (β).



Φωτ.14 Όψη προσομοιώματος κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Φωτ.15 Καταπόνηση των κοχλιών κατά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης (α) και μετά το τέλος της φόρτισης (β).



Σχ.8 Συγκεντρωτικό διάγραμμα Μ-φ προσομοιωμάτων π/σ.

# 5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασική επιδίωξη της συγκεκριμένης τεχνικής σχεδιασμού είναι η προστασία της σύνδεσης και, στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, η επιρροή που έχει σε αυτήν η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της δοκού. Επομένως, το βασικό κριτήριο περί της αποτελεσματικότητας του RBS είναι η επιτυχία δημιουργίας της πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της απομείωσης, γεγονός που εξασφαλίζει την επιθυμητή μορφή αστοχίας [2, 3, 4].

Όσον αφορά τις διατομές HE160A και HE180A η εφαρμογή της απομείωσης έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της συμπεριφοράς των συνδέσεων. Η μετελαστική τους απόκριση είναι άκρως ικανοποιητική ενώ η δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης είναι εμφανές ότι πραγματοποιείται εντός του πλάτους της απομείωσης. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στη δοκό διατομής HE200A, ωστόσο εμφανίζονται αυξημένα επίπεδα καταπονήσεων στη μετωπική λεπίδα, χωρίς ωστόσο να εντοπίζεται κάποιο πρόβλημα στη σύνδεση.

Αντίθετα, η παρουσία του RBS δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική για τις δοκούς διατομής HE220A και HE240A. Δεν είναι πλέον σαφές ότι η χρήση της απότμησης των πελμάτων συμβάλλει στην προστασία του κόμβου. Η μετωπική λεπίδα παρουσιάζει σημαντικά επίπεδα καταπονήσεων (φωτ. 10β & 13β) ενώ στην παραμορφωμένη δοκό δεν δημιουργείται η πλαστική άρθρωση στην επιθυμητή θέση (φωτ. 11β & 14β). Εξίσου σημαντική είναι και η αύξηση της καταπόνησης των εφελκυόμενων κοχλιών στις δύο τελευταίες περιπτώσεις διατομών (φωτ. 12 & 15), γεγονός που καταδεικνύει το ότι η απομείωση δεν προστατεύει τα κρίσιμα στοιχεία της σύνδεσης, όπως επιβάλλει η φιλοσοφία της συγκεκριμένης τεχνικής σχεδιασμού.

Από την παραμετρική ανάλυση καταδεικνύεται πως αυξάνοντας την ακαμψία του στοιχείου (μέσω του ύψους της διατομής) η εφαρμογή ίδιας κυκλικής απότμησης (σταθερά ποσοστά γεωμετρικών παραμέτρων) οδηγεί σε μείωση της επιρροής της εν λόγω τεχνικής στην προστασία του κόμβου. Η εκτενέστερη αναλυτική διερεύνηση καθώς και η εκτέλεση πειραματικών δοκιμών απαιτείται ώστε να επιβεβαιωθούν πλήρως τα εξαγόμενα της παρούσας εργασίας.

### 6.ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] Plumier A. "Prefabricated dissipative zones as design concept for composite steel concrete structures", *Proceedings of the Ninth European Conference on Earthquake Engineering*, Moscow, Belgium, 1990.
- [2] Pachoumis D., Galoussis E., Kalfas C., Christitsas A. "Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: experimental analysis and FEM simulation", *Engineering Structures*, Vol. 31, 2009, pp. 216-223.
- [3] Pachoumis D., Galoussis E., Kalfas C., Efthimiou I. "Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections - experimental analysis and finite element model simulation", *Engineering Structures*, Vol. 32, 2010, pp. 2683-2692.
- [4] C.E. Sofias, C.N. Kalfas, D.T. Pachoumis "Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment endplate connections under cyclic loading", Engineering Structures 59 (2014) 320–329
- [5] EN 1993-8:2005. "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 3: Assessment and retrofitting of buildings", CEN 2005.
- [6] FEMA 350. "Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings", Washington D.C., 2000.
- [7] FEMA 351. "Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment frame buildings", Washington D.C., 2000.

### INFLUENCE OF SECTION'S SIZE ON THE BEHAVIOUR OF REDUCED BEAM SECTION BOLTED MOMENT CONNECTIONS – FEM SIMULATION

Konstantinos N. Kondylidis<sup>a</sup>, Christos E. Sofias<sup>b</sup>, Dimitrios T. Pachoumis<sup>b</sup>, Christos N. Kalfas<sup>c</sup> <sup>a</sup> MSc. Civil Engineer DUTH <sup>b</sup> Dr. MSc. Civil Engineer DUTH <sup>c</sup> Professor DUTH Steel Structures Laboratory DUTH Xanthi, Greece e-mail: <u>mslgroup@civil.duth.gr</u>

#### ABSTRACT

The current paper is part of last years' research effort that takes place in Steel Structures Laboratory of D.U.Th., regarding reduced-beam-section bolted connections. The influence of section's size on the general behavior of the connection is investigated, in order to evaluate the effectiveness of the RBS technique. FEM analysis was held for five different common wide-flanged European sections, with flange reduction accordant to EC8, Part3. The results of the analysis are presented in this paper, accompanied by a general evaluation of the connection's behaviour. Significant divergence from the desired failure mode was observed in three models, a fact demonstrating that the generality governing EC8 recommendations regarding the geometrical parameters of the RBS technique, might be considered dubious.