

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΠΟΜΕΙΩΜΕΝΑ ΠΕΛΜΑΤΑ ΔΟΚΟΥ (RBS) ΥΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Δημήτριος Θ. Παχούμης<sup>a</sup>, Ευάγγελος Γ. Γαλούσης<sup>b</sup>, Χρίστος Ν. Κάλφας<sup>c</sup>,  
Χρήστος Ε. Σοφίας<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Δρ. MSc Πολιτικός Μηχανικός

<sup>b</sup> Καθηγητής Δ.Π.Θ.

<sup>c</sup> Αναπλ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.

<sup>d</sup> Υποψ. Διδ., MSc Πολιτικός Μηχανικός  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Δ.Π.Θ.  
Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail : [mslgroup@civil.duth.gr](mailto:mslgroup@civil.duth.gr)

## 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

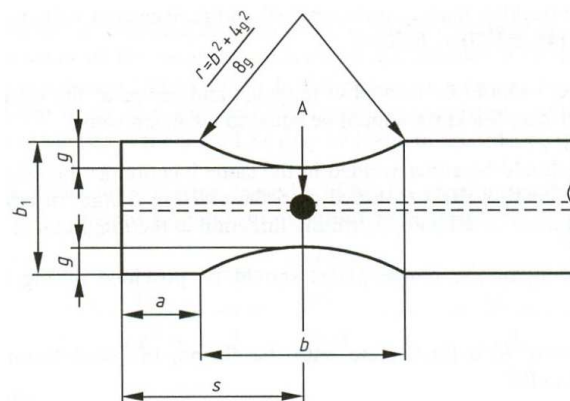
Η αδιαμφισβήτητη αποτελεσματικότητα των συνδέσεων ροπής με απομειωμένα πέλματα δοκού (RBS), ερευνήθηκε διεξοδικά, χρησιμοποιώντας αμερικάνικες προδιαγραφές και αντίστοιχου τύπου διατομές. Τα ελάχιστα δεδομένα που υπάρχουν από την Ευρωπαϊκή πρακτική, οδήγησαν στην υιοθέτηση από τον EC8 μέσω των ή αυτών των τιμών της FEMA, για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απομείωσης πελμάτων με κυκλική απότμηση. Από πειραματικές προσεγγίσεις που έχουν πραγματοποιηθεί έχει τεθεί εν αμφιβόλω η αποτελεσματικότητα της χρήσης των τιμών αυτών σε διατομές Ευρωπαϊκού προφίλ [1 & 2]. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος, με κυκλικής απότμησης απομειωμένη διατομή πελμάτων δοκού, και με τη χρήση διατομών Ευρωπαϊκού προφίλ, υπό κυκλική φόρτιση. Οι γεωμετρικές παράμετροι της κυκλικής απομείωσης κυμαίνονται εκτός των προτεινόμενων τιμών του EC8. Ακόμη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτεταμένου αναλυτικού προγράμματος συνδέσεων αυτής της μορφής, υπό μονοτονική φόρτιση, με τη χρήση π/σ. Τόσο τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας όσο και αυτά του αναλυτικού προγράμματος, καταδεικνύουν την αναγκαιότητα της αναπροσαρμογής των γεωμετρικών παραμέτρων, για τη χρήση τους σε διατομές Ευρωπαϊκού τύπου.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όλκιμος σχεδιασμός μεταλλικών πλαισίων που αναλαμβάνουν ροπές (Moment Resisting frames, MR), βασίζεται σε γενικές διατάξεις, που σκοπό έχουν την εξασφάλιση επαρκούς αντοχής, όπως επίσης και σε λεπτομερείς κανόνες για τη διατήρηση της απαιτούμενης ικανότητας ενεργειακής απώλειας. Σε τοπικό επίπεδο, κατασκευαστικές λεπτομέρειες υιοθετούνται για την αποφυγή εμφάνισης τοπικών αστοχιών, ώστε πλαστικές αρθρώσεις να μπορούν να αναπτυχθούν πλήρως, επιτρέποντας την ανακατανομή των καμπτικών

ροπών στην κατασκευή. Σε καθολικό επίπεδο, η διαδικασία του ικανοτικού σχεδιασμού εφαρμόζεται ώστε να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση των πλαστικών πόρων του δομικού συστήματος [3]. Στην πράξη, τα MR πλαίσια, που σχεδιάζονται σύμφωνα με τον απλό κανόνα του ιεραρχικού κριτηρίου των μελών (ισχυρά υποστυλώματα – ασθενείς δοκοί), γενικά παρουσιάζουν υψηλές υπέρ-αντοχές στις διατομές των μελών, επιπρόσθετα των φτωχών σε ενεργειακή απώλεια μηχανισμών κατάρρευσης [4]. Κατά τη διάρκεια των σεισμών του Northridge (Η.Π.Α.) και του Kobe (Ιαπωνία) συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος παρουσίασαν αναπάντεχα σοβαρές αστοχίες, επιδεικνύοντας περιορισμένη διαθέσιμη ολκιμότητα και ικανότητα ενεργειακής απορρόφησης. Συνεπώς, προέκυψε η απαίτηση για βελτιώσεις των λεπτομερειών, ώστε να μειωθούν τα επίπεδα των τάσεων στα πέλματα της δοκού και στις συγκολλήσεις. Συγκεκριμένα, οι πλέον πιεστικές ανάγκες είναι: i) η βελτίωση της διαθέσιμης στροφικής ικανότητας των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος και ii) η βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των πλαισιακών κατασκευών.

Και οι δύο, ανωτέρω αναφερόμενοι, αντικειμενικοί στόχοι μπορούν να επιτευχθούν, εάν οι πλαστικές παραμορφώσεις εμφανιστούν στις δοκούς, μακριά από το μέτωπο του υποστυλώματος. Τέτοιες συνθήκες, είναι δυνατό να επιτευχθούν με την εισαγωγή νέων μορφώσεων συνδέσεων, όπως οι συνδέσεις με απομειωμένα πέλματα δοκού (RBS ή dogbone connections) (σχ. 1) και οι ενισχυμένες συνδέσεις (reinforced connections). Οι πρώτες αξιοποιούν την εξασθένηση της διατομής της δοκού σε μια κατάλληλη θέση, μακριά από τον κόμβο, όπου οι ανελαστικές παραμορφώσεις πρέπει να συγκεντρωθούν. Και στις δυο περιπτώσεις, το επίπεδο των τάσεων κοντά στη σύνδεση δοκού-υποστυλώματος μειώνεται, εξαιτίας της προγενέστερης μείωσης της καμπτικής ροπής κατάρρευσης στα άκρα της δοκού, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής της σύνδεσης.



Σχ. 1: Η μορφή της απομείωσης (dogbone)

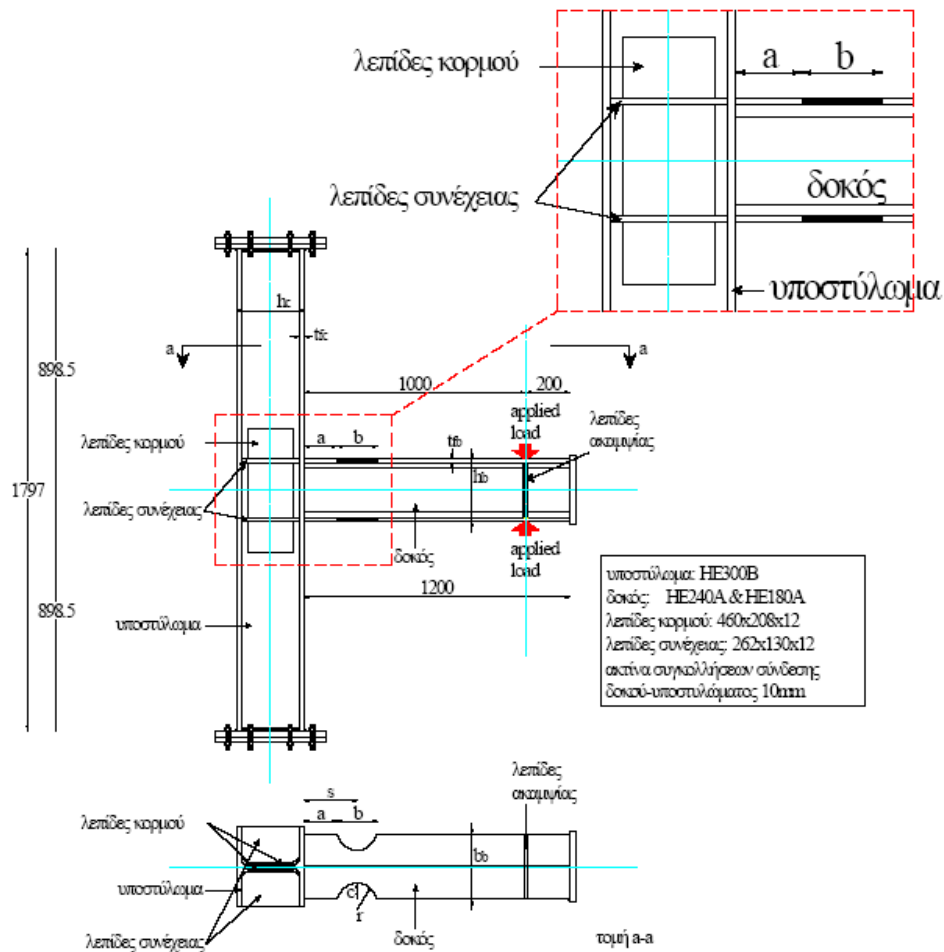
Η απομείωση συγκεκριμένων περιοχών ενός δομικού στοιχείου, ώστε να μετατραπούν σε αξιόπιστες περιοχές ενεργειακής απορρόφησης σε περίπτωση σεισμού, ως ιδέα, προτάθηκε ήδη από τις αρχές τις δεκαετίας του '80 από τον Plumier [5]. Ωστόσο, το σύνολο των κανόνων και η τεχνολογία που διέπουν τις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος με απομειωμένα πέλματα δοκού (RBS), όπως και η συμπεριφορά τους υπό καταστάσεις κυκλικής φόρτισης ερευνήθηκε, διεξοδικά, στις Η.Π.Α., μετά το σεισμό του Northridge και του Kobe. Εξαιτίας μάλιστα της αξιόπιστης συμπεριφοράς, των ιδιαίτερα ικανοποιητικών επιπέδων ολκιμης συμπεριφοράς και της οικονομίας που επέδειξαν, αποτέλεσαν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας και άλλων ερευνητών παγκοσμίως (Chen [6],

Engelhardt et al. [7], Jones et al. [8] κ.α.) και έγιναν αρκετές προτάσεις για την εξέλιξη τους.

Το κύριο αποτέλεσμα της απομείωσης των πελμάτων της δοκού, είναι ο εξαναγκασμός μόρφωσης της πλαστικής άρθρωσης μακριά από την περιοχή της σύνδεσης. Περιοχή ιδιαίτερα «ευπαθή» στην εμφάνιση πρόωρων αστοχιών, ένεκα των πιθανών ατελειών των συγκολλήσεων, αλλά και εξαιτίας της συγκέντρωσης τάσεων λόγω της κάμψης του πέλματος του υποστυλώματος και της ύπαρξης των συγκολλήσεων. Διακριτικό γνώρισμα αυτού του τύπου των συνδέσεων, είναι η απότμηση τμημάτων των πελμάτων της δοκού, σε μια περιοχή όμορη της σύνδεσης της δοκού με το υποστύλωμα, ώστε να δημιουργηθούν εκεί οι πλαστικές αρθρώσεις. Εκτεταμένα πειραματικά και αναλυτικά προγράμματα διεξήχθησαν αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης λύσης. Ακόμη αποδείχθηκε ότι η χρήση κυκλικού σχήματος απότμησης οδηγεί σε μεγαλύτερη στρωφική ικανότητα της σύνδεσης, συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο προφίλ απότμησης, ενώ παράλληλα είναι η πλέον οικονομική από άποψη εκτέλεσης.

	Όρια προσομοιώματος	Όρια EC8, part 3 [9]	FEMA 350 [10]/ 351 [11]
a	$a = (0.30 \div 0.90) b_f$	$a = 0.60 b_f$	$a = (0.50 \div 0.75) b_f$
b	$b = (0.50 \div 1.00) d_b$	$b = 0.75 d_b$	$b = (0.65 \div 0.85) d_b$
c ή g	$g \leq 0.25 b_f$	$g \leq 0.25 b_f$	$c \leq 0.25 b_f$

*Πίν. 1: Όρια γεωμετρικών παραμέτρων του προτεινόμενου προσομοιώματος*



Σχ.2: Πειραματική διάταξη

Σήμερα, τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες σχεδιασμού συνδέσεων δοκού-υποστύλωματος με απομειωμένα πέλματα δοκού (RBS) προτείνονται στη βιβλιογραφία. Από τη μια πλευρά, η μέθοδος σχεδιασμού της FEMA, η οποία βασίζεται σε μια, αποκλειστικά πειραματική προσέγγιση, και προκύπτει από τα αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του 'post-Northridge' SAC προγράμματος [12]. Σ' αυτή βασίζεται και η μεθοδολογία του Ευρωκώδικα 8 [9], η οποία υιοθετεί τη διαδικασία αλλά και τους περιορισμούς της FEMA, είτε αυτούσιους είτε κατά τους μέσους όρους (πιν. 1). Από την άλλη, το κριτήριο σχεδιασμού που προτάθηκε από τους Ιταλούς ερευνητές Montuori και Piluso, το οποίο βασίζεται σε μια απλοποιημένη αναλυτική προσέγγιση.

Στο παρόν άρθρο, εξετάζεται η συμπεριφορά σύνδεσης ροπής με απομειωμένα πέλματα δοκού (RBS), υπό κυκλική φόρτιση, και με χρήση διατομών Ευρωπαϊκού προφίλ (σχ. 2). Δύο πειράματα διεξήχθησαν ώστε να διερευνηθούν οι υιοθετημένες από τον EC8 τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων. Ακόμη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτεταμένου αναλυτικού προγράμματος συνδέσεων αυτής της μορφής, υπό μονοτονική φόρτιση, με τη χρήση  $\pi/\sigma$ . Τόσο από τα πειραματικά αποτελέσματα όσο και από αυτά των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται εμφανής η ανάγκη αναπροσαρμογής των τιμών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απομείωσης, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ασφαλώς και σε Ευρωπαϊκού τύπου διατομές.

### 3.ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Δύο τύποι δοκιμίων μελετήθηκαν και ονομάστηκαν RBS3 και RBS4. Τα δύο δοκίμια αποτελούν τμήμα πειραματικής έρευνας. Κάθε δοκίμιο αποτελείται από δοκό διατομής HE180 A και ένα υποστυλώμα HE300 B. Όπως και στα προηγούμενα δοκίμια συνδυάζεται η απότμηση ‘dogbone’ της δοκού με συγκολλητή σύνδεση δοκού-υποστυλώματος μεγάλων ραφών. Για τη δημιουργία ισχυρού panel zone, που θα οδηγήσει τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης στην απομειωμένη περιοχή της δοκού, τοποθετήθηκαν στα υποστυλώματα των δοκιμίων διπλές λεπίδες κορμού και εγκάρσιες ενισχύσεις, πάχους ίσου με το πάχος του κορμού του υποστυλώματος και με το πάχος των πελμάτων της δοκού αντίστοιχα.

Οι RBS συνδέσεις **δεν** σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές που προτείνονται από τον Ευρωκώδικα EC8, Part 3 [9]. Η τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων της κυκλικής απομείωσης των δύο δοκιμίων κυμαίνονται εκτός των προτεινόμενων ορίων. Οι τελικές

Δοκίμιο	$b_f$ (mm)	$d_b$ (mm)	a % $b_f$ (mm)	b % $d_b$ (mm)	g % $b_f$ (mm)	s (mm)	r (mm)			
RBS3	180	171	80	144	75	128.25	40	36	208.125	75.11
RBS4	180	171	40	72	60	102.6	25	22.5	123.3	69.73

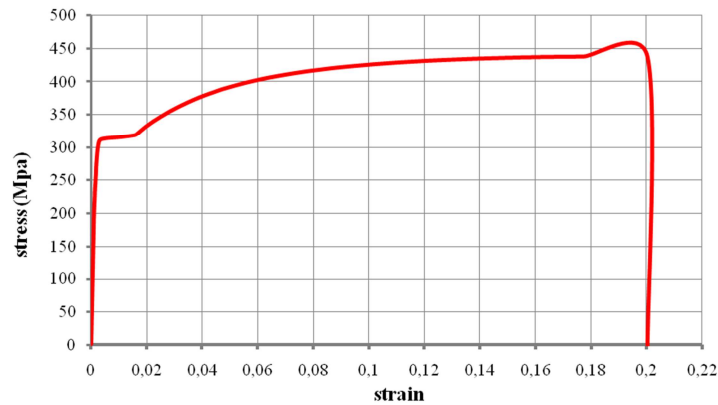
Πιν. 2: Τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων της απομείωσης των πειραματικών δοκιμίων

Τιμές	a 30 έως 90 ανά 5	b 50 έως 100 ανά 5	g 5 έως 25 ανά 0.025
1. Η γεωμετρική παράμετρος a, ως ποσοστό % του πλάτους της διατομής της δοκού $b_f$			
2. Η γεωμετρική παράμετρος b, ως ποσοστό % του ύψους της διατομής της δοκού $d_b$			
3. Η γεωμετρική παράμετρος g, ως ποσοστό % του πλάτους της διατομής της δοκού $b_f$			

Πιν. 3: Όρια γεωμετρικών παραμέτρων απομείωσης των αναλυτικών προσομοιωμάτων διαστάσεις των γεωμετρικών παραμέτρων της απομείωσης φαίνονται στον πίν. 2. Παράλληλα με την πειραματική διαδικασία ένα πλήθος αναλυτικών προσομοιωμάτων επιλύθηκε με την μέθοδο των π/σ. Οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων της απομείωσης αυτών των προσομοιωμάτων μεταβάλλεται σύμφωνα με τον πίν. 3.

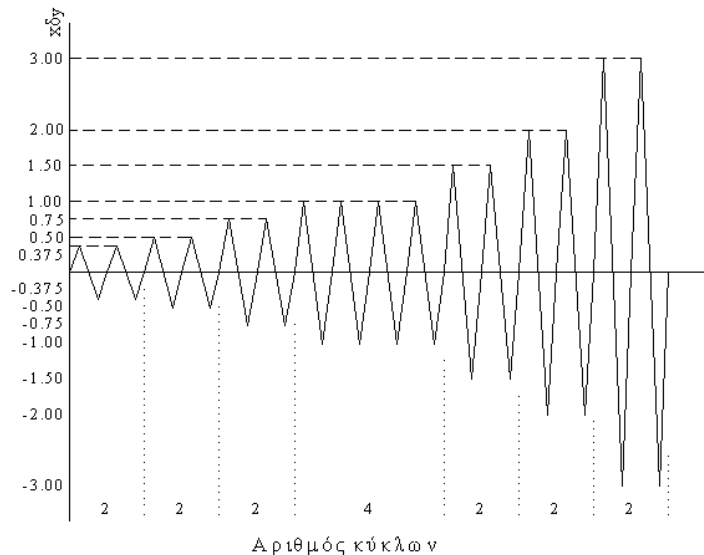
#### 4.ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ & ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Οι τιμές των μηχανικών ιδιότητες των μεταλλικών διατομών και των λεπίδων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων προέκυψαν από πειραματικές δοκιμές κάμψης 3-σημείων στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Δ.Π.Θ., για την πραγματοποίηση των οποίων ελήφθησαν δοκίμια τόσο από τα πέλαμα όσο και από τον κορμό των διατομών. Οι προκύπτουσες τιμές είναι: μέτρο ελαστικότητας  $E=209000 \text{ N/mm}^2$ , όριο διαρροής  $f_y=310 \text{ Mpa}$  και όριο θραύσης  $f_u=430 \text{ Mpa}$  (σχ. 4). Για τα αναλυτικά προσομοιώματα το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο χάλυβας S235.



Σχ.4: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων υλικού πειραματικών δοκιμών

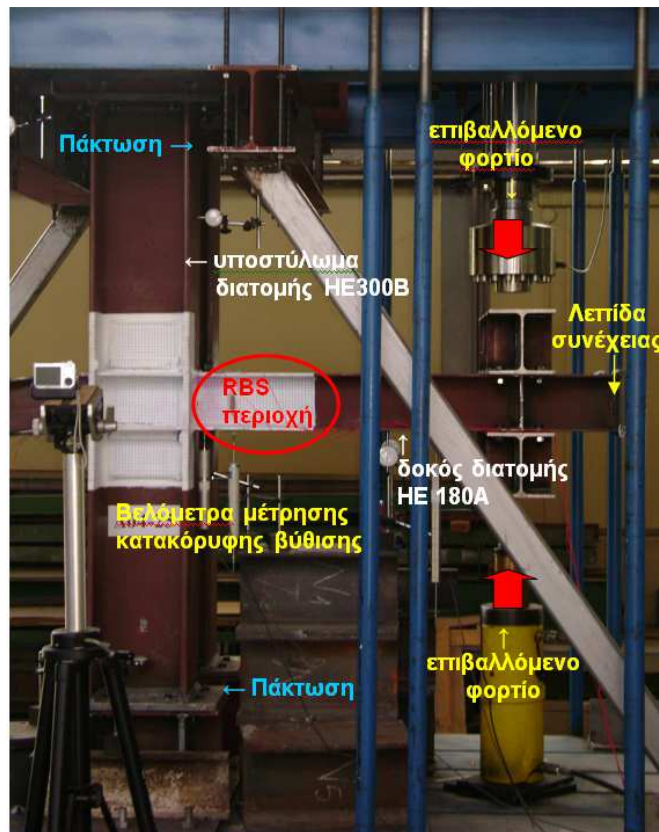
Κάθε δοκίμιο φορτίστηκε σε απόσταση 1.00m. από το μέτωπο του υποστυλώματος με την επιβολή εναλλασσόμενης μετατόπισης σύμφωνα με το πρωτόκολλο φόρτισης του σχ. 5. Για τα αναλυτικά προσομοιώματα ακολουθήθηκε μονοτονική φόρτιση.



Σχ. 5: Πρωτόκολλο φόρτισης

## 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα πειράματα διενεργήθησαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ. Μια γενική εικόνα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στη φωτ. 1. Οι εξωτερικές διαστάσεις των δοκιμών ήταν 1797 mm για το κατακόρυφο μέλος, που συμπεριφέρεται ως υποστύλωμα, και 1200 mm για το οριζόντιο μέλος, που λειτουργεί ως δοκός. Οι εγκάρσιες ενισχύσεις του υποστυλώματος ήταν πάχους ίσου με των πελμάτων της δοκού και οι λεπίδες κορμού ήταν πάχους μεγαλύτερου αυτού κορμού του υποστυλώματος. Χρησιμοποιήθηκε επίσης μια ακραία λεπίδα ( $t_p=20$  mm), στο ελεύθερο άκρο της δοκού εξασφαλίζοντας την ομοιογενή συμπεριφορά των διατομών. Τα πέλατα και ο κορμός της δοκού συγκολλήθηκαν στο μέτωπο του υποστυλώματος. Η ακτίνα συγκόλλησης είχε τιμή 8 mm για όλα τα δοκίμια και πιστοποιήθηκε με έλεγχο διεισδυτικών υγρών πριν από την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας.



Φωτ. 1: Η πειραματική διάταξη.

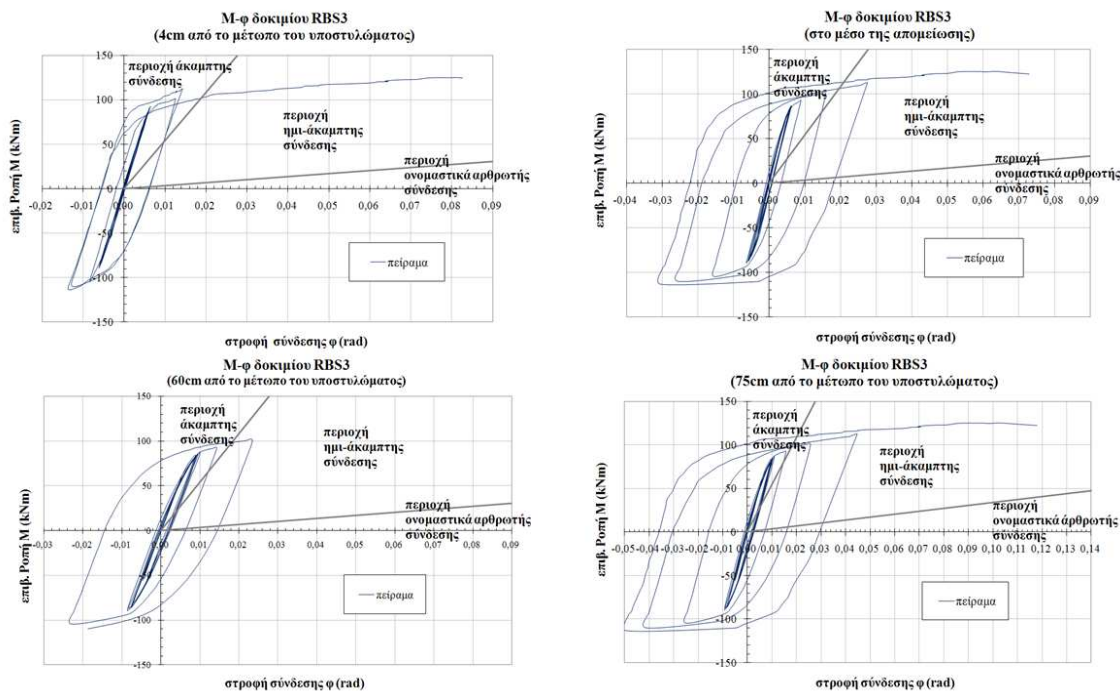
Σε όλα τα δοκίμια αποφασίστηκε να σχεδιαστεί ο κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε για τα πεπερασμένα στοιχεία στην υπό εξέταση περιοχή. Ο σχεδιασμός έγινε σε πλήρη αντιστοιχία με το μέγεθος των διαστάσεων του πεπερασμένου στοιχείου για τον κορμό και τα πέλματα των υποστυλωμάτων και των δοκών. Η αποτύπωση αυτή πραγματοποιήθηκε για τη σύγκριση των παραμορφώσεων, τον καθορισμό της ακριβούς θέσης των οργάνων μέτρησης, τη φωτογραφική αποτύπωση και γενικότερα το συγκρίσιμο των αποτελεσμάτων πειράματος και θεωρητικού μοντέλου. Οι στηρίξεις, θεωρούμενες ως πακτώσεις, κατασκευάστηκαν με συνδέσεις εκτεταμένης λεπίδας. Το φορτίο επιβλήθηκε μέσω δυο υδραυλικών εμβόλων ικανότητας 1000 kN το καθένα. Βελόμετρα, αναλογικά και ηλεκτρονικά, τοποθετήθηκαν για τις απαραίτητες μετρήσεις των παραμορφώσεων (φωτ. 1).

## 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η διερεύνηση της λειτουργίας ή όχι της απομείωσης στην προστασία της σύνδεσης υπό κυκλική φόρτιση αποτέλεσε αντικείμενο της έρευνας. Ενδεχόμενη λειτουργία της σηματοδοτείται από την εμφάνιση της πλαστικής άρθρωσης στο εσωτερικό της δοκού, συγκεκριμένα στην περιοχή της απομείωσης, και κατά συνέπεια αποφυγή ψαθυρής αστοχίας στην περιοχή της σύνδεσης. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών επικεντρώθηκαν στις παραμορφώσεις που εμφανίστηκαν καθώς και στις στροφές των συνδέσεων. Η ροπή υπολογίστηκε στη διεπιφάνεια δοκού-υποστυλώματος,  $M=P*L$ , όπου  $L$  η απόσταση του άξονα επιβολής του φορτίου με τον άξονα στο μέτωπο του υποστυλώματος. Στα σχ. 6 & 7 παρουσιάζονται οι καμπύλες ροπής-στροφής των δύο δοκιμών, σε αποστάσεις 4 cm, 60 cm και 75 cm από το μέτωπο του υποστυλώματος, καθώς και στο μέσο της απομείωσης. Σημειώνεται, ότι στα διαγράμματα αυτά

καθορίζονται και τα όρια ταξινόμησης με βάση τη στροφική ακαμψία της σύνδεσης για την κατηγοριοποίηση της.

Για το δοκίμιο RBS3 η διαρροή του κόμβου εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου με τιμή μετατόπισης ίση με το  $1.0\delta_y$  της θεωρητικής μετατόπισης διαρροής και έγινε εμφανής με τη διατήρηση μόνιμης παραμόρφωσης του συστήματος, με το πέρας της αποφόρτισης. Η πλαστική άρθρωση εμφανίστηκε στην περιοχή της απομείωσης και εξαιτίας αυτού η περιοχή της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος παρέμεινε στην ελαστική περιοχή. Προχωρώντας στην εφαρμογή του πρωτοκόλλου φόρτισης, η διαρροή γινόταν περισσότερο εμφανής με το λυγισμό του κάτω πέλματος, στην περιοχή της απομείωσης, να γίνεται ολοένα και εντονότερος. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου στο διπλάσιο της θεωρητικής μετατόπισης διαρροής  $\delta_y$  παρατηρήθηκε λυγισμό και στο άνω πέλμα της δοκού. Εξαιτίας των περιορισμών της πειραματικής διάταξης και ειδικότερα την αδυναμία επιβολής υψηλότερων τιμών φορτίου κατά την αρνητική φόρτιση, μετά την ολοκλήρωση των κύκλων στο τριπλάσιο της μετατόπισης διαρροής  $\delta_y$  το πείραμα συνεχίστηκε μονοτονικά. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας φόρτισης παρατηρήθηκε και λυγισμός του κορμού



Σχ. 6: Καμπύλες M-φ δοκίμιου RBS 3

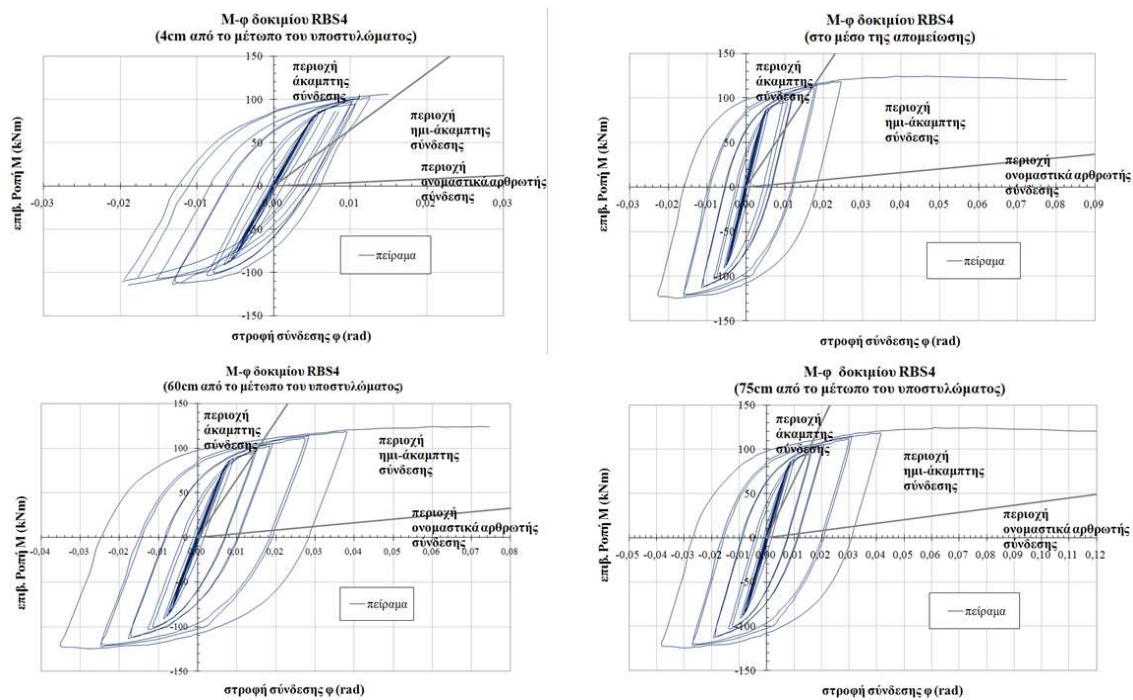
της δοκού πλησίον της απομειωμένης περιοχής του κάτω πέλματος. Επισημαίνεται ότι οι λυγισμοί αυτοί δεν συνοδεύτηκε από σημαντική αλλοίωση της συμπεριφοράς του δοκίμιου. Το δοκίμιο RBS3 ξεπέρασε τα 0.11 rad στροφής χωρίς να παρατηρηθεί καμία μορφή αστοχίας στην περιοχή του κόμβου. Τόσο το υποστύλωμα όσο και οι συγκολλήσεις της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος παρέμειναν ανεπηρέαστα εξαιτίας της λειτουργίας της απομείωσης. Το πείραμα τερματίστηκε καθώς τερματίστηκαν τα διαθέσιμα όρια του πλαισίου φόρτισης (φωτ. 2).

Το δοκίμιο RBS3 επέδειξε άριστη συμπεριφορά υπό κυκλική φόρτιση παρά το γεγονός ότι η τιμή της παραμέτρου  $a$  της απομείωσης ήταν μεγαλύτερη του 80% του  $b_f$  που ορίζεται ως το ανώτερο όριο από τον EC8 και τη FEMA. Η μόρφωση της πλαστικής άρθρωσης



πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της απομείωσης, με εκτεταμένο λυγισμό να προκύπτει τόσο στα πέλματα της δοκού όσο και στον κορμό της. Η ολκιμότητα ξεπέρασε κατά πολύ τα 0.03 rad που θεωρούνται ως το άνω όριο της  $\varphi$  που απαιτείται στην πράξη, για τη διασφάλιση όλκιμης συμπεριφοράς υπό κυκλική φόρτιση.

Η συμπεριφορά του δοκιμίου RBS4, υπό κυκλική φόρτιση, παρουσιάζεται στο σχήμα 7. Η διαρροή του κόμβου εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου, με τιμή μετατόπισης ίση με τη θεωρητική μετατόπισης διαρροής και έγινε εμφανής με την εμφάνιση έντονου λυγισμού του κάτω πέλματος. Η πλαστική άρθρωση εμφανίστηκε στην περιοχή της απομείωσης και εξαιτίας αυτού η περιοχή της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος παρέμεινε στην ελαστική περιοχή. Κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου με τιμή μετατόπισης ίση με το  $1.5\delta_y$  της θεωρητικής μετατόπισης διαρροής παρατηρήθηκε λυγισμό και στο άνω πέλμα της δοκού. Οι τοπικοί λυγισμοί των πελμάτων στην περιοχή της απομείωσης, γίνονταν ολοένα και περισσότερο εμφανείς με κάθε περαιτέρω φόρτιση. Και σε αυτό το πείραμα, εξαιτίας των περιορισμών της πειραματικής διάταξης, μετά την ολοκλήρωση των κύκλων στο τετραπλάσιο της μετατόπισης διαρροής  $\delta_y$  το πείραμα συνεκλήθη μονοτονικά και



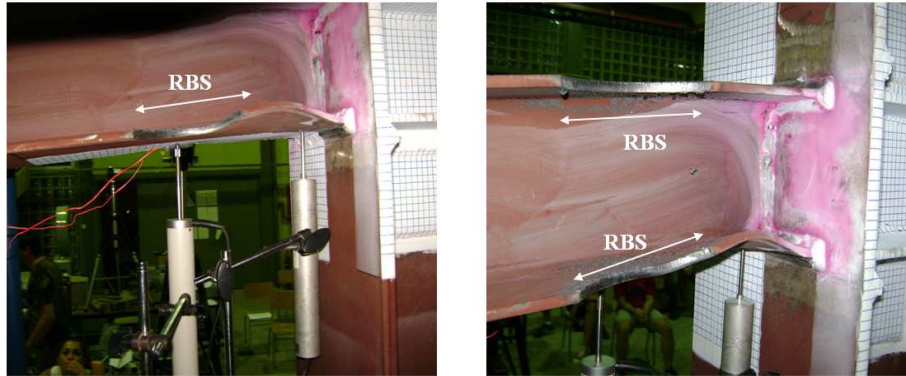
Σχ. 7: Καμπύλες M-φ δοκιμίου RBS 4

ωστόσο το δοκίμιο RBS4 ξεπέρασε τα 0.12 rad στροφής χωρίς να παρατηρηθεί καμία μορφή αστοχίας στην περιοχή του κόμβου πέραν των έντονων τοπικών λυγισμών των πελμάτων στην περιοχή της απομείωσης. Το πείραμα τερματίστηκε καθώς τερματίστηκαν τα διαθέσιμα όρια του πλαισίου φόρτισης (φωτ. 3).

Συμπερασματικά, παρά το γεγονός ότι οι τιμές των παραμέτρων a και b της απομείωσης βρισκόταν εκτός των ορίων που προτείνονται από τον EC8 και τη FEMA το δοκίμιο RBS4 συμπεριφέρθηκε εξαιρετικά υπό κυκλική φόρτιση. Η πλαστική άρθρωση σχηματίστηκε στην περιοχή της απομείωσης και όχι στην περιοχή της σύνδεσης της δοκού με το

υποστύλωμα. Το δοκίμιο RBS4 ανέπτυξε 0.12 rad στροφής ξεπερνώντας κατά πολύ τα 0.03 rad, διασφαλίζοντας όλκιμη συμπεριφορά της σύνδεσης υπό κυκλική φόρτιση.

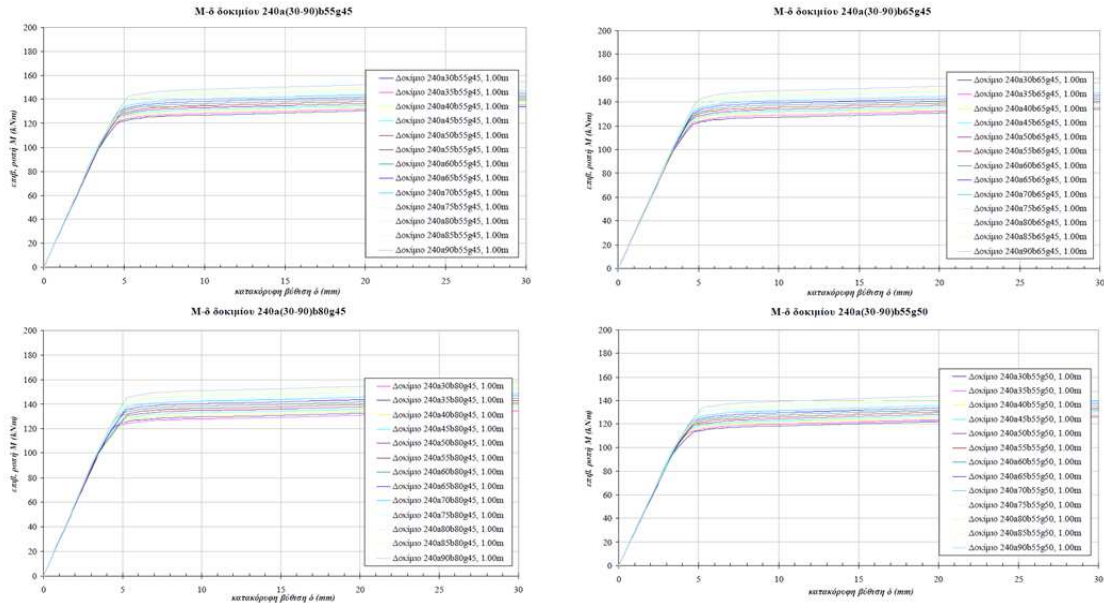
Από τα αποτελέσματα του αναλυτικού προγράμματος το οποίο εκπονήθηκε, και δείγμα των αποτελεσμάτων του παρατίθεται μέσω των διαγραμμάτων του σχήματος 8, προκύπτει ότι: συνδέσεις των οποίων οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων της απομείωσης κυμαίνονται εντός των προτεινόμενων ορίων δεν προστατεύουν την σύνδεση ενώ άλλες με τιμές εκτός των προτεινόμενων από τον EC8 και τη FEMA οδηγούν τη μόρφωση της άρθρωσης εντός της απομειωμένης περιοχής.



Φωτ. 2: Η παραμόρφωση του κάτω πέλματος της δοκού για 0.09 & 0.11 rad στροφής (RBS3)



Φωτ. 3: Η παραμόρφωση του κάτω πέλματος της δοκού για 0.12 rad στροφής (RBS4)



Σχ. 8: Καμπύλες M-δ προσομοιωμάτων π/σ

## 8.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειράματα και το αναλυτικό πρόγραμμα π/σ που πραγματοποιήθηκαν στην τεχνική της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος με απομειωμένα πέλματα δοκού (RBS) κατέδειξαν τα κάτωθι:

- Τα αποτελέσματα και των δύο πειραμάτων επιβεβαίωσαν ότι η απόκριση αυτού του τύπου συνδέσεων, υπό κυκλική φόρτιση, είναι εξαιρετική. Η μόρφωση της πλαστικής άρθρωσης στην απομειωμένη περιοχή της δοκού προστατεύει τη σύνδεση δοκού-υποστυλώματος. Δεν παρατηρήθηκε θραύση των συγκολλήσεων σε κανένα από τα δύο πειράματα. Τόσο το δοκίμιο RBS3 (0.11 rad) όσο και το δοκίμιο RBS4 (0.12 rad) ξεπέρασαν το αποδεκτό όριο των 0.03 radian πλαστικής στροφής υπερθεματίζοντας την γενικότερη αξία της συγκεκριμένης διαδικασίας ανάλυσης.
- Η παρουσία των ζωνών απομείωσης οδηγούν σε μικρότερες απαιτήσεις αντοχής στις γειτονικές περιοχές. Κάτι τέτοιο παρατηρήθηκε και στα πειραματικά δοκίμια και στα αναλυτικά προσομοιώματα, όπου η πλαστική άρθρωση έλαβε χώρα στην περιοχή της απομείωσης.
- Απομειώνοντας τα πέλματα της δοκού κοντά στην περιοχή της σύνδεσης ώστε η αντοχή έναντι ροπής να είναι ίση με την αντοχή σχεδιασμού, δημιουργείται μια διευρυμένη πλαστική ζώνη και η ικανότητα παραμόρφωσης μπορεί να βελτιωθεί.
- Τα δοκίμια RBS3 και RBS4, καθώς και πλήθος αναλυτικών προσομοιωμάτων με τιμές γεωμετρικών παραμέτρων εκτός των προτεινόμενων ορίων του EC8 και της FEMA, επέδειξε εξαιρετική συμπεριφορά υπό κυκλική φόρτιση. Αντίθετα κάποια άλλα σχεδιασμένα σύμφωνα με τις προτάσεις των κανονισμών δεν λειτούργησαν όπως αναμενόταν. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι οι γεωμετρικές παράμετροι της απομείωσης, για κυκλική απομείωση, θα πρέπει να

αναπροσαρμοστούν ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν ασφαλώς σε Ευρωπαϊκού προφίλ διατομές.

## 9. ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] Pachoumis D., Galoussis E., Kalfas C. and Christitsas A. “Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: experimental analysis and FEM simulation”, *Engineering Structures*, Vol. 31, 2009, pp. 216-223.
- [2] Pachoumis D., Galoussis E., Kalfas C. and 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.
- [3] Faggiano B., De Matteis G., Landolfo R. and Mazzolani F.M. “A survey on ductile design of MR frames”, *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Cape Town, South Africa, 2001, pp. 965 - 974.
- [4] Faggiano B. “Earthquake resistant steel frames: a new method for ductile design”, *PhD Thesis in Structural Engineering*, University of Naples, Italy, ‘Federico II’, 2000.
- [5] 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.
- [6] Chen S.J., Chu J.M. and Chou Z.L. “Dynamic behaviours of steel frames with beam flanges shaved around connection”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 42, 1997, pp. 49-70.
- [7] Engelhardt M.D. and Sabol T.A. “Seismic-resistant steel moment connections: developments since the 1994 Northridge earthquake”, *In: Zandonini R., Elnashai A., Dexter R., Editors, Progress in structural engineering and materials*, Vol. 1, 1997, pp. 68-77.
- [8] Jones S.I. L., Fry G.T. and Engelhardt M.D. “Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connections”, *Engineering Journal*, Vol. 128, 2002, pp. 441-451.
- [9] EN 1993-8:2005. “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings”, CEN 2005.
- [10] FEMA 350. “Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings”, Washington D.C., 2000.
- [11] FEMA 351. “Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment frame buildings”, Washington D.C., 2000.
- [12] SAC 96-03. “Interim guidelines. FEMA 267/A”, 1997, SAC Joint Venture, California, USA.

## **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF REDUCED BEAM SECTION MOMENT CONNECTIONS (RBS) SUBJECTED TO CYCLIC LOADING**

**Dimitrios T. Pachoumis<sup>a</sup>, Evangelos G. Galoussis<sup>b</sup>, Christos N. Kalfas<sup>c</sup>,  
Christos E. Sofias<sup>d</sup>**

<sup>a</sup> Dr, MSc Civil Engineer

<sup>b</sup> Professor DUTH

<sup>c</sup> Assistant Professor DUTH

<sup>d</sup> Phd. Cand., MSc Civil Engineer  
Steel Structures Laboratory DUTH  
Xanthi, Greece

e-mail: [mslgroup@civil.duth.gr](mailto:mslgroup@civil.duth.gr)

### **ABSTRACT**

The RBS connection effectiveness was widely investigated using US design and construction practices. Recommendations for the design and detailing of the RBS member were prescribed in EC8, Part3. However, the effectiveness of these recommendations for European profile is dubious, due to limited existing data from European research. An experimental program performed in order to evaluate the proposed values of the geometrical characteristics of the RBS and the results are presented in the present paper. Two full scale subassemblages were tested under cyclic loading. The RBS connections weren't designed according to the recommendations proposed by EC8, Part 3. A theoretical model was also created with the finite element simulating the RBS connection. The analysis confirms the need for readjustment of the geometrical characteristics of the RBS in order to apply to the European profiles.