

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΟΜΒΟΥ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

Παναγιώτης Τσίκας
Πολιτικός Μηχανικός ΜΔΕ
Πανεπιστήμιο Πατρών
Πάτρα, Ελλάδα
e-mail: panostsikas@upatras.gr

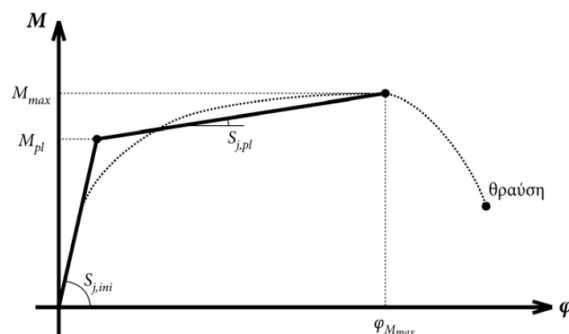
1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διερεύνηση της στρωφικής ικανότητας ενός κόμβου αποτελεί αντικείμενο με ιδιαίτερο ερευνητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον. Στην παρούσα ερευνά επιχειρείται η προσέγγιση του προβλήματος με χρήση 3D πεπερασμένων στοιχείων, επιλέγονται συγκεκριμένοι κόμβοι δοκού υποστυλώματος δυο κομβί με μετωπική πλάκα και δυο με γωνιακά. Για τη διερεύνηση του θέματος χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Για κάθε κόμβο δίνονται, διαγράμματα ροπής-στρωφής. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ελέγχεται συγκρίνοντας τ' αναλυτικά αποτελέσματα με αντίστοιχα πειραματικά. Τέλος εκτιμάται η στρωφική ικανότητα των κόμβων χρησιμοποιούνται και απλοποιημένα αναλυτικά προσομοιώματα.

Από τα αποτελέσματα προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την στρωφική ικανότητα των κόμβων ποσοτικοποιώντας την σχέση της μέγιστης αναλαμβανόμενης ροπής και της αντίστοιχης στρωφής για κάθε περίπτωσης κόμβου που εξετάστηκε, με τα σχετικά μεγέθη ενός ιδεατού άκαμπτου κόμβου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που προκύπτουν χρησιμοποιώντας προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων με τα απλοποιημένα αναλυτικά προσομοιώματα.

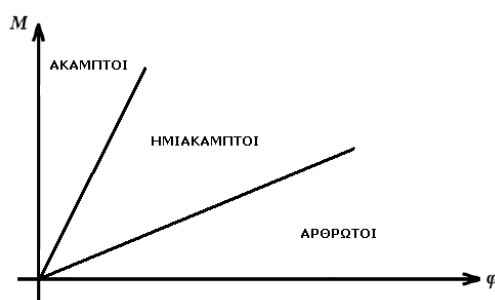
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στρωφική ικανότητα ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος από χάλυβα αποτελεί ένα χαρακτηριστικό της απόκρισης, το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμο, για τον σχεδιασμό πλαστικών πλαισιακών κατασκευών, με πλεονεκτήματα στην σεισμική συμπεριφορά και την αξιοπιστία. Η διερεύνηση της στρωφικής ικανότητας του κόμβου παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον. Το πρόβλημα είναι εντόνως μη γραμμικό τόσο από άποψη νόμου συμπεριφοράς του υλικού όσο και από άποψη συνθηκών επαφής μεταξύ των συνδεόμενων. Στο Σχ. 1 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη ροπής M - στρωφής φ ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος.



Σχ. 1: Καμπύλη ροπής-στρωφής κόμβου δοκού-υποστυλώματος, με προσαρμογή διγραμμικής καμπύλης ροπής-στρωφής.

Ο Ευρωκώδικας 3 [5], και το αναθεωρημένο Παράρτημα J [6], προτείνουν να ταξινομούνται οι κόμβοι δοκού – υποστυλώματος ως άκαμπτοι, ημιάκαμπτοι και ονομαστικά αρθρωτοί, συγκρίνοντας την αρχική τους στρωφική δυσκαμψία $S_{j,ini}$ με τα όρια ταξινόμησης που φαίνονται στο Σχ. 2.



Δυσκαμψία Ακαμπτων κόμβων

$$S_{j,ini} \geq 8E_b I_b / L_b, \text{ για Αμετάθετα πλαίσια}$$

$$S_{j,ini} \geq 25E_b I_b / L_b, \text{ για Μετάθετα πλαίσια}$$

Δυσκαμψία Αρθρωτών κόμβων

$$S_{j,ini} \geq 0.5E_b I_b / L_b$$

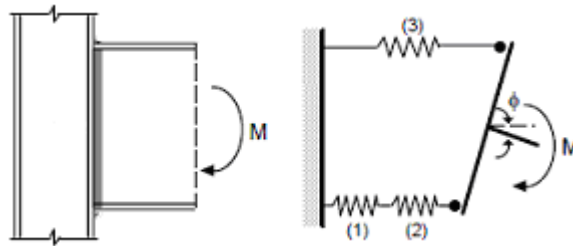
Σχ. 2: Ταξινόμηση ανάλογα με τη δυσκαμψία του κόμβου (Ευρωκώδικας 3) [5].

Γίνεται ένας διαχωρισμός μεταξύ των αντιστηριζόμενων και μη αντιστηριζόμενων πλαισίων και τα όρια της ταξινόμησης εξαρτώνται από τη ροπή αδράνειας I_b και το άνοιγμα L_b της συνδεόμενης δοκού.

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

3.1 Υπολογισμός στρωφικής ικανότητας

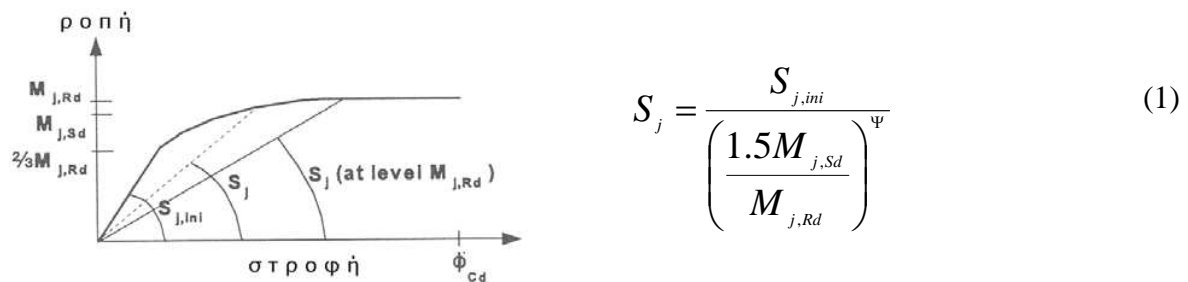
Οι διαθέσιμες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της στρωφικής απόκρισης κόμβων δοκού – υποστρώματος, μπορούν να καταταγούν σε τέσσερις κατηγορίες: α) μαθηματικά, β) αναλυτικά, γ) μηχανικά και δ) προσομοιώματα βασισμένα σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων [8]. Από άποψη πολυπλοκότητας, περισσότερο σύνθετα είναι τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στο αντίθετο άκρο βρίσκονται τα απλοποιημένα αναλυτικά προσομοιώματα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μηχανικά προσομοιώματα (Σχ. 3), τα οποία βασίζονται στην διάσπαση του συνολικού προβλήματος σε απλούστερα τμήματα.



Σχ. 3: Μηχανικό προσομοίωμα κόμβου

3.2 Μοντέλο του παραρτήματος J του Ευρωκώδικα 3

Το μοντέλο που προβλέπει ο Ευρωκώδικας 3 στο Παράρτημα J, αποτελεί σημαντική εξέλιξη στο θέμα της στρωφικής συμπεριφοράς των κόμβων, [6]. Η στρωφική ικανότητα αποτελείται από τρία τμήματα Σχ. 3.



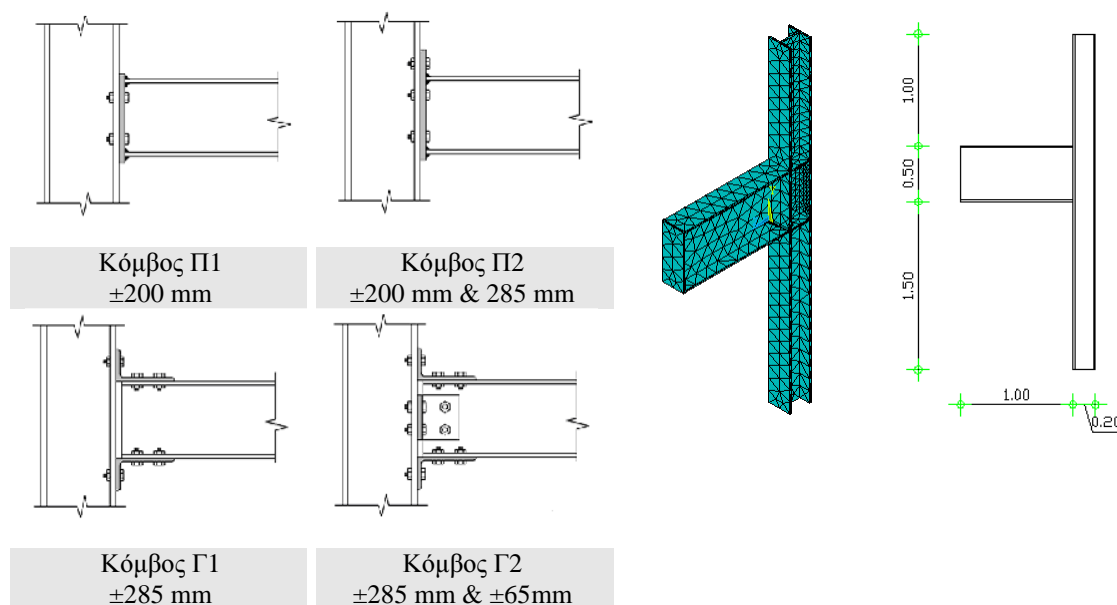
Σχ. 3: Μη γραμμική καμπύλη M - φ κατά το Παράρτημα J [6].

Έως τη στάθμη των 2/3 της αντοχής σχεδιασμού $M_{j,Rd}$, η καμπύλη είναι γραμμική – ελαστική και η δυσκαμψία είναι $S_{j,ini}$. Μεταξύ των $2/3 M_{j,Rd}$ και της $M_{j,Rd}$, η καμπύλη εμφανίζεται μη γραμμική. Τέλος, μετά από τη στάθμη της $M_{j,Rd}$, εμφανίζεται ένας οριζόντιος κλάδος, ενώ το πέρας της καμπύλης M – φ αντιστοιχεί στη στρωφική ικανότητα Φ_{cd} του κόμβου. Η μορφή του μη γραμμικού τμήματος της καμπύλης υπολογίζεται με την εξ. (1), όπου: $\psi = 2,7$ για συγκολλητούς κόμβους και κόμβους με μετωπική πλάκα και 3,1 για κόμβους με γωνιακά πελμάτων.

4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 Δεδομένα κόμβων

Για τη διερεύνηση της στρωφικής ικανότητας, γίνονται αναλύσεις σε μια σειρά κόμβων. Αναλύονται δυο κομβοί με μετωπική πλάκα (κομβοί Π1 και Π2), δυο κομβοί με γωνιακά (κομβοί Γ1 και Γ2) και ένας κόμβος με άκαμπτη σύνδεση δοκού – υποστυλώματος (κόμβος Α). Στο Σχ. 4 παρουσιάζονται οι μορφές των κόμβων και η θέση των κοχλιών από τον κεντροβαρικό άξονα της δοκού.



Σχ. 4: Χαρακτηριστικά μεταλλικών κόμβων

Η δοκός είναι IPE500 και έχει μήκος 1,00 m. Το υποστυλόμετρο είναι HPB200 με συνολικό ύψος 3,00 m. Η ποιότητα του χάλυβα είναι S235 (δοκός και υποστυλόμετρο) και 6.8 για τους κοχλίες. Χρησιμοποιούνται κοχλίες κατηγορίας M20.

4.2 Προσομοίωση τοιχοπληρωμένων πλαισίων με πεπερασμένα στοιχεία

Για τη κατασκευή του τρισδιάστατου προσομοιώματος χρησιμοποιείται το στοιχείο SOLID 45 του προγράμματος ANSYS [1],[2],[3],[4]. Πρόκειται για ένα στοιχείο 8 κόμβων με 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του υποστυλώματος της δοκού και των κοχλιών. Η διεπιφάνεια προσομοιώνεται με Contact Pair (ζεύγος επαφής) χρησιμοποιώντας τα στοιχεία Conta175 και Target 174.

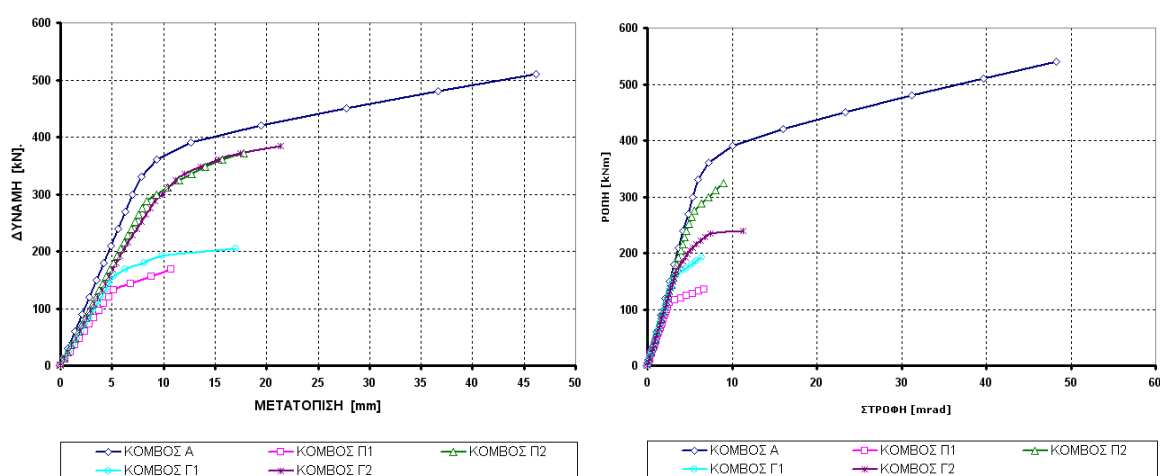
4.3 Διαδικασία φόρτισης

Η διαδικασία φόρτισης ακολουθεί την αντίστοιχη πειραματική και είναι η εξής: αφού πακτωθεί το υποστυλόμετρο στο κάτω άκρο και στο άνω μέρος του, επιβάλλεται κατακόρυφη μετακίνηση στο άκρο της δοκού η τιμή της οποίας μεταβάλλεται σε κάθε βήμα (Pushover)

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης κόμβων

Στη συνέχεια (Σχ. 5) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση των πέντε κόμβων. Δυο κομβοί με μετωπική πλάκα (κομβοί Π1 και Π2), δυο κομβοί με γωνιακά (κομβοί Γ1 και Γ2) και ένας κόμβος με άκαμπτη σύνδεση δοκού – υποστυλώματος (κόμβος Α). Με βάση τα αποτελέσματα δίνονται συγκριτικά διαγράμματα τέμνουσας – μετακίνησης (Σχ. 5α) και ροπής – στροφής (Σχ. 5β). Στον Πίν. 1 δίνονται χαρακτηριστικές τιμές από το Σχ. 5α, για την τέμνουσα και τη μετακίνηση του κάθε κόμβου σε χαρακτηριστικά στοιχεία. Ομοίως στον Πίν. 2 δίνονται χαρακτηριστικές τιμές από το Σχ. 5β, για τη ροπή και τη στρόφη των κόμβων σε χαρακτηριστικά σημεία. Όλοι οι κομβοί έχουν αναλυθεί σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ANSYS (FEM) [1],[2],[3],[4].



Σχ. 5: α) Συγκριτικό διαγράμματα κόμβων Τέμνουσας – Μετακίνησης. β) Συγκριτικό διαγράμματα κόμβων Ροπής - Στροφής

Τέμνουσα – Μετακίνηση [FEM]										
	Κόμβος Α		Κόμβος Π1		Κόμβος Π2		Κόμβος Γ1		Κόμβος Γ2	
	F [kN]	u [mm]	F [kN]	u [mm]	F [kN]	u [mm]	F [kN]	u [mm]	F [kN]	u [mm]
Διαρροή	330	7,84	132	5,14	288	8,37	156	5,13	288	9,19
Κ [kN/m]	42091		25680		34408		30409		31338	
	1,00 ¹		0,61		0,82		0,72		0,74	
Αστοχία	540	55,81	180	12,73	372	17,79	204	11,79	348	21,34
	1,00 ²	1,00 ³	0,33	0,23	0,68	0,32	0,38	0,21	0,64	0,38
μ	7,12		2,47		2,13		2,30		2,32	

¹ Λόγος δυσκαμψίας κόμβου ως προς δυσκαμψία Άκαμπτου
² Λόγος τέμνουσας αστοχίας κόμβου ως προς τέμνουσα αστοχίας Άκαμπτου
³ Λόγος μετακίνησης αστοχίας κόμβου ως προς μετακίνηση αστοχίας Άκαμπτου

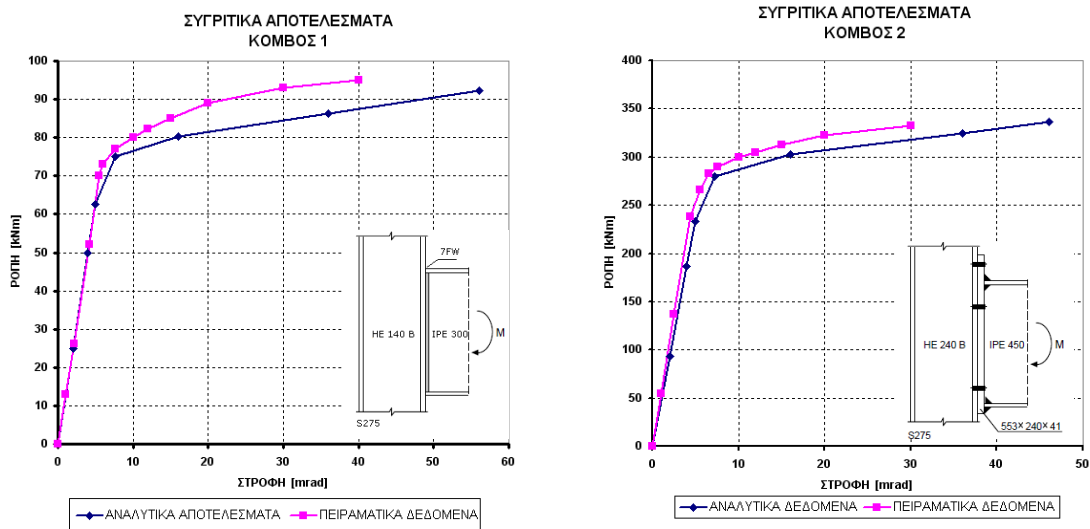
Πίν. 1. Αποτελέσματα ανάλυσης κόμβων Τέμνουσας - Μετακίνησης

Ροπή - Στροφή [FEM]										
	Κόμβος Α		Κόμβος Π1		Κόμβος Π2		Κόμβος Γ1		Κόμβος Γ2	
	M [kNm]	φ [mrad]	M [kNm]	φ [mrad]	M [kNm]	φ [mrad]	M [kNm]	φ [mrad]	M [kNm]	φ [mrad]
Διαρροή	300	5,29	108	2,46	240	4,65	156	3,15	162	3,25
S	56621		43926		51592		49523		49850	
	1,00 ¹		0,78		0,91		0,87		0,88	
Αστοχία	490	48,27	136	6,73	324	9,01	192	6,36	240	11,28
	1,00 ²	1,00 ³	0,28	0,14	0,66	0,19	0,39	0,13	0,49	0,23
μ	9,12		2,73		1,82		2,01		3,47	

Πίν. 2. Αποτελέσματα ανάλυσης κόμβων Ροπής - Στροφής

5.2 Συγκριτικά αποτελέσματα

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της ερευνώζ ελέγχεται συγκρίνοντας, αναλυτικά αποτελέσματα με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα κόμβων [7]. Με τα πειραματικά αποτελέσματα ελέγχοντα τα αποτελέσματα που προκύπτουν με βάση το Μοντέλο του Ευρωκώδικα 3 παράρτημα j, [6]. Για το σκοπό αυτό επιλέγονται δυο κομβοί (ένας με άκαμπτη σύνδεση και ένας με μετωπική πλάκα). Τα χαρακτηριστικά των κόμβων παρουσιάζονται στο Σχ. 5 στο οποίο συγκρίνονται τα αναλυτικά με τα αντίστοιχα πειραματικά. Αναλυτικότερα αποτελέσματα δίνονται στον Πίν. 3.



Σχ. 6: Συγκριτικά διαγράμματα Ροπής - Στροφής κόμβων

	Πεπερασμένα [FEM]				Ευρωκώδικα 3				Πειραματικά			
	Κόμβος 1		Κόμβος 2		Κόμβος 1		Κόμβος 2		Κόμβος 1		Κόμβος 2	
	M kNm	φ mrad	M kNm	φ mrad	M kNm	φ mrad	M kNm	φ mrad	M kNm	φ mrad	M kNm	φ mrad
Διαρροή	67	4,6	260	6,2	61	5,2	229	5,8	74	5,6	280	8,1
Αστοχία	83	53,8	323	46,6	75	66,1	316	46,6	92	67,3	355	58,3
S	14488		42300		11922		39369		13214		34568	
μ	11,58		7,58		12,80		8,50		12,02		7,20	

Πίν. 3. Αποτελέσματα κόμβων Ροπής - Στροφής

Όπως σαφώς μπορεί να παρατηρηθεί από το σύνολο των αποτελεσμάτων η προσομοίωση των κόμβων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων αλλά και με βάση το μοντέλο του Ευρωκώδικα 3 παρουσιάζουν καλή σύγκλιση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, (Πίν. 4).

	Πεπερασμένα [FEM]				Ευρωκώδικα 3				Πειραματικά			
	Κόμβος 1		Κόμβος 2		Κόμβος 1		Κόμβος 2		Κόμβος 1		Κόμβος 2	
	M	φ	M	φ	M	φ	M	φ	M	φ	M	φ
Διαρροή	0,91	0,83	0,93	0,76	0,83	0,92	0,82	0,72	1,00	1,00	1,00	1,00
Αστοχία	0,90	0,80	0,91	0,80	0,82	0,98	0,89	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00
S	1,10		1,22		0,90		1,14		1,00		1,00	
μ	0,96		1,05		1,07		1,18		1,00		1,00	

Πίν. 4. Συγκριτικά αποτελέσματα ανάλυσης κόμβων

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αναλυτικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σ' αυτή την εργασία εξάγονται οι εξής παρατηρήσεις: (α) Τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζουν καλή σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα, και μικρή απόκλιση από τα αποτελέσματα με βάση το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα 3. (β) Η ανάλυση των κόμβων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος. (γ) Η χρήση μετωπικής πλάκας για τη σύνδεση του κόμβου δοκού-υποστυλώματος, έχει καλύτερα αποτελέσματα από τα γωνιακά. (δ) Στην περίπτωση του πλήρως άκαμπτου κόμβου (κόμβος A) αστοχεί ο κορμός του υποστυλώματος ενώ στις περιπτώσεις χρήσης μετωπικής πλάκα ή γωνιακών αστοχούν τα πέλματα του υποστυλώματος ή η σύνδεση.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ANSYS, Inc (1999) ANSYS 5.5 Theory Reference Manual, 9th edition, SAS IP Inc., Houston, USA.
- [2] ANSYS, Inc (1999) ANSYS 5.6 Elements Reference Manual, 11th edition, SAS IP Inc., Houston, USA.
- [3] ANSYS, Inc (1999) ANSYS 5.7 Structural Analysis Guide, SAS IP Inc., Houston, USA.
- [4] ANSYS, Inc. (2000) ANSYS 5.7 Structural Analysis Guide, ANSYS release 5.7, Southpointe, Canonsburg, USA.
- [5] CEN European Committee for Standardization (1992): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and for buildings, ENV 1993-1-1, Brussels, Belgium.
- [6] CEN European Committee for Standardization (1994): Eurocode 3: Design of steel structures – Revised Annex J, ENV 1993-1-1, Document CEN/TC250/SC3-N419E, June, Brussels, Belgium.
- [7] L. Simoes da Silva, L. Calado, R. Simoes and A. Girao, Evaluation of ductility in steel and composite beam-to-column joints: Analytical evaluation. In: R. Leon and W.S. Easterling, Editors, Connections in steel structures iv: Steel connections in the new millenium, AISC, USA (2002), pp. 223–232
- [8] Μπέσκος Δ., Ιωαννίδης Γ. (2003) Αντισεισμικός Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών, ΕΑΠ.

INVESTIGATION OF STEEL BEAM-COLUMN JOINT ROTATION

Panagiotis Tsikas
Civil Engineering M.Sc.
University of Patras
Patra, Greece
e-mail: panostsikas@upatras.gr

SUMMARY

The investigation of joint rotation is the subject of particular research and practical interest. This research attempts to approach the problem by using 3D finite elements, discrete beam column joints are selected, two joints with front plate and two with corner. To investigate this issue the finite element program ANSYS was used. Torque-turn diagrams are given for every joint. The results reliability is tested comparing analytical results with experimental data. Finally, the rotation of joints is estimated. Simplified analytical models are also used.

Useful conclusions are obtained by the results about the joints rotation quantifying the ratio of the maximum torque and the corresponding shift for each joint case examined, with the relative magnitudes of a virtual rigid hub. The comparison of the analysis results obtained using the complex finite element with the simplified analytical models is very interesting.