

Σχεδιασμός Σύμμικτων Κόμβων Δοκών-Υποστυλωμάτων



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Δ. Θαρωνιάτη

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Οκτώβριος 2014 ΕΜΚ ΔΕ 2014/27

Θαρωνιάτη Κ. Δ. (2014). Σχεδιασμός Σύμμικτων Κόμβων Δοκών-Υποστυλωμάτων Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2014/27 Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Tharoniati K. D. (2014). Design of Composite Beam to Column Joints Diploma Thesis EMK ΔE 2014/27 Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	5
 Εισαγωγή Γενικά Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας Θεωρήσεις και γενικές παραδοχές	6 6 7 7
 2 Δομικές ιδιότητες μεταλλικού κόμβου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 2.1 Βασικά συστατικά μέρη 2.1.1 Θλιβόμενη ζώνη	10 11 12 15 16 21
 3 Δομικές ιδιότητες σύμμικτου κόμβου	23 23 26 26 31 31 32 34 35
 4 Επίλυση μεταλλικών κόμβων 4.1 Μονόπλευρη διαμόρφωση μεταλλικού κόμβου	36 36 48 50 53 53 55 57
 5 Επιλύσεις σύμμικτων κόμβων	60 60 65 67 70 70 72 73
6 Συμπεράσματα	76

	6.1 Ταξινόμηση κόμβων με βάση την δυσκαμψία και την αντοχή	76
	6.2 Γενικές παρατηρήσεις	78
7	Βιβλιογραφία	84
П	αράρτημα Α. Χρήσιμοι πίνακες	
П	αράρτημα Β. Υπολογισμός ω και ρ	89
П	αράρτημα Γ. Αριθμητικά παραδείγματα επιλύσεων	90
	7.1 Μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου με ενισχυτικά ελάσματα κορμού	90
	7.1.1 Αρνητικές ροπές	90
	7.1.2 Θετικές ροπές	91
	7.2 Μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου με εγκάρσιες νευρώσεις	91
	7.2.1 Αρνητικές ροπές	92
	7.2.2 Θετικές ροπές	92

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΚ ΔΕ 2014/27

Σχεδιασμός Σύμμικτων Κόμβων Δοκών-Υποστυλωμάτων

Θαρωνιάτη Κ. Δ. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Η δυνατότητα αξιοποίησης της καμπύλης σχεδιασμού ροπής-στροφής των κόμβων στην ανάλυση και στον σχεδιασμό ενός φορέα αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, αφενός λόγω ακριβέστερης προσομοίωσης της πραγματικής συμπεριφοράς του φορέα και αφετέρου λόγω της δυνατότητας εκμετάλλευσης της μετελαστικής απόκρισης των κόμβων σε περιπτώσεις σχεδιασμού με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας. Ωστόσο, όσον αφορά τους σύμμικτους φορείς δεν υπάρχει ένα σαφές και πλήρες πλαίσιο προσδιορισμού των δομικών ιδιοτήτων των κόμβων τους και προς το παρόν αντιμετωπίζονται ως μεταλλικοί.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η εκτίμηση των δομικών ιδιοτήτων ενός σύμμικτου κόμβου δοκού- υποστυλώματος και η σύγκριση της ροπής αντοχής και της αρχικής δυσκαμψίας με τον αντίστοιχο μεταλλικό. Όσον αφορά την στροφική ικανότητα του κόμβου εξετάζεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί η απαιτούμενη στροφή, με βάση το ασθενέστερο συστατικό μέρος, και δεν προσδιορίζεται η ακριβής τιμή της. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος των συστατικών μερών του μέρους 1.8 του Ευρωκώδικα 3, η οποία επεκτείνεται λαμβάνοντας υπόψη τον οπλισμό και την πλάκα σκυροδέματος ως επιπλέον βασικά συστατικά μέρη ενός σύμμικτου κόμβου. Συγκεκριμένα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην περίπτωση σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος με κοχλιωτή μετωπική πλάκα, η οποία αποτελεί και τη συνηθέστερη περίπτωση σύνδεσης.

Αποδεικνύεται, εν τέλει, ότι στην περίπτωση που ένας κόμβος σύμμικτου φορέα μελετηθεί ως μεταλλικός υπάρχει σημαντική υποτίμηση της ροπής αντοχής. Επίσης, φαίνεται ότι για την δυσκαμψία δεν μπορεί να προκύψει ένα ασφαλές συμπέρασμα σύγκρισης.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS FACULTY OF CIVIL ENGINEERING INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS EMK $\Delta E 2014/27$

Design of composite beam to column joints

Tharoniati K. D. (supervised by Vayas I.)

Abstract

The possibility to take into account the design moment-rotation characteristic of joints in the analysis and design of a structure is considered as an advantage because the behavior of the structure can be simulated more accurately and the post-elastic joint responce can be utilized in case design with increased ductility requirements is neccessary. The lack of a design manual regarding composite joints has led to check composite joints as metal ones.

In this diploma thesis is attempted the evaluation of the structural properties of a composite beam to column joint and the comparison between the estimated values of moment resistance and initial stiffness and the corresponding values of the metal joint. Regarding the rotation capacity of a joint, this diploma thesis is limited to examine only the joint's ability to perform the required rotation, therefore the exact value of rotation capacity is not estimated.

For this purpose the component method of Eurocode 3 part 1.8 is extended considering the reinforcement and concrete slab as additional basic components of a composite joint. Specifically, this diploma thesis focuses on joints with end plate connection which is the most common type of connection.

It turns out that if a composite joint is checked as a metal one, the values of moment resistance and stiffness are significantly underestimated. Also, it appears that a safe conclusion about the comparison between the stiffnesses of a composite joint and the metal one can not be obtained.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Βάγια Ιωάννη, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Σπηλιόπουλο Ανδρέα για την καθοριστική συμβολή του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στον συνάδελφο κ. Τερζίδη Άγγελο για την αμέριστη συμπαράσταση, υποστήριξη και κατανόηση που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι κόμβοι μιας πλαισιακής κατασκευής παίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατανομή και στο μέγεθος των εντατικών μεγεθών σε ολόκληρο το φορέα, όπως επίσης και στο μέγεθος των μετακινήσεων. Σύμφωνα με την συνήθη πρακτική σχεδιασμού, προς διευκόλυνση της ανάλυσης και του σχεδιασμού των πλαισίων, οι κόμβοι θεωρούνται είτε άκαμπτοι, θεωρώντας μηδενική σχετική στροφή μεταξύ των συνδεόμενων μελών είτε αρθρωτοί, θεωρώντας συνθήκες απλής στήριξης, χωρίς μεταφορά ροπής. Στην πραγματικότητα τα παραπάνω αποτελούν άνω και κάτω όρια της πεπερασμένης δυσκαμψίας ενός κόμβου, η οποία στη συνήθη περίπτωση κυρίαρχης καμπτικής καταπόνησης, περιγράφεται από μια καμπύλη ροπής-στροφής μέσω της οποίας συσχετίζεται η καμπτική ροπή που ασκείται στον κόμβο από τη δοκό με την αναπτυσσόμενη στροφή μεταξύ των συνδεόμενων μελών.

Στην εκτίμηση της καμπύλης ροπής-στροφής αφιερώνεται το μεγαλύτερο κομμάτι του μέρους 1.8 του Ευρωκώδικα 3, σύμφωνα με το οποίο η συμπεριφορά της εφελκυόμενης ζώνης προσομοιώνεται με ισοδύναμες συνδέσεις βραχέων Τ και η εύρεση των δομικών ιδιοτήτων του κόμβου επιτυγχάνεται με τη μέθοδο των συστατικών μερών.

Όσον αφορά την περίπτωση σύμμικτων κόμβων, δεν υπάρχει σαφές και πλήρες πλαίσιο σχεδιασμού στον Ευρωκώδικα 4, επομένως προς το παρόν αντιμετωπίζονται ως μεταλλικοί ακολουθώντας το πρότυπο του Ευρωκώδικα 3 περί μεταλλικών κόμβων. Η παραπάνω έλλειψη αποτέλεσε το βασικό κίνητρο πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.2 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο αποσαφηνίζονται οι θεωρήσεις και οι γενικές παραδοχές που έχουν πραγματοποιηθεί προκειμένου αφενός να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων και αφετέρου να μην υπάρχει σύγχυση. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται το βασικό πλαίσιο σχεδιασμού ενός μεταλλικού κόμβου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο δίνεται το βασικό πλαίσιο σχεδιασμού ενός μεταλλικόν κόμβου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4 και 5, στα οποία έχει πραγματοποιηθεί λεπτομερής επίλυση μεταλλικών κόμβων και των αντίστοιχών τους σύμμικτων, προκειμένου στο έκτο κεφάλαιο να υπάρξει η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των συμπερασμάτων. Τέλος, στα δύο πρώτα παραρτήματα αναγράφονται πίνακες και διαδικασίες που η παραπομπή σε αυτά είναι πολύ συχνή μέσα στο κείμενο και σκόπιμα τοποθετήθηκαν στο τέλος ενώ στο τρίτο παράρτημα δίνονται πίνακες με αριθμητικά παραδείγματα.

1.3 Θεωρήσεις και γενικές παραδοχές

Θεωρείται ότι ο κόμβος ανήκει σε ένα σύμμικτο πλαίσιο παραλαβής ροπών, επομένως οι ζώνες απόδοσης ενέργειας βρίσκονται στις δοκούς, οι οποίες θα πρέπει να διαθέτουν επαρκή πλαστιμότητα και αντοχή. Για τον σχεδιασμό του κόμβου, ακολουθείται η αρχή σχεδιασμού β του Ευρωκώδικα 8 για υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας, σύμφωνα με την οποία προορίζεται στις ζώνες απόδοσης ενέργειας να γίνεται εκμετάλλευση της σύμμικτης συμπεριφοράς της δοκού.

Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη πλαστιμότητα πρέπει να αποφεύγεται ο πρόωρος λυγισμός του μεταλλικού τμήματος και να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα του θλιβόμενου σκυροδέματος κατά το σεισμικό γεγονός. Η αποφυγή του πρόωρου λυγισμού του μεταλλικού τμήματος επιτυγχάνεται με την επιλογή διατομών κατηγορίας 1. Όσον αφορά την σύνθλιψη του σκυροδέματος ακολουθείται το Παράρτημα C του Ευρωκώδικα 8 και οι εξής κανόνες περί πλάστιμων σύμμικτων δοκών:

- Η διατμητική σύνδεση πλάκας-δοκού επιβάλλεται να είναι πλήρης στην περίπτωση που οι διατμητικοί σύνδεσμοι δεν είναι πλάστιμοι, ενώ εάν είναι πλάστιμοι επιτρέπεται και η μερική σύνδεση με ελάχιστο βαθμό σύνδεσης 80%.
- Η αντοχή σχεδιασμού των διατμητικών συνδέσμων μειώνεται κατά 25%.
- Η συνολική αντοχή των διατμητικών συνδέσμων στην περιοχή του κόμβου δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από την πλαστική αντοχή των οπλισμών.
- Στη ζώνη σύνδεσης της δοκού με το υποστύλωμα πρέπει να υπάρχει ειδικός αντισεισμικός οπλισμός.
- ο λόγος x/d της απόστασης x μεταξύ της άνω ίνας του θλιβόμενου σκυροδέματος και του πλαστικού ουδέτερου άξονα, και του ύψους d της σύμμικτης διατομής πρέπει να συμμορφώνεται με τις τιμές του πίνακα (1.1).

J 1 J 1			•
Κατηγορία πλαστιμότητας	q	$f_{\rm y} ({ m N/mm}^2)$	άνω όριο <i>x/d</i>
	$1,5 < q \le 4$	355	0,27
КПМ	$1,5 < q \le 4$	235	0,36
	<i>q</i> > 4	355	0,20
КПҮ	<i>q</i> > 4	235	0,27

Πίνακας 1.1: Οριακές τιμές του x/d για πλαστιμότητα δοκών με πλάκα

1.4 Δεδομένα

Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων, πραγματοποιούνται συγκεκριμένες παραδοχές οι οποίες θεωρούνται δεδομένες στα επόμενα κεφάλαια και αναγράφονται παρακάτω.

- 1. Οι ποιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κόμβων είναι οι εξής:
 - Δομικός χάλυβας S235
 - Σκυρόδεμα C20/25
 - Χάλυβας οπλισμών Β500C

- Κοχλίες 10.9
- Διατμητικοί σύνδεσμοι S235
- 2. Το άνοιγμα των εγκάρσιων δοκών είναι 7.0 m.
- 3. Στην περίπτωση που μια σειρά κοχλιών βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο θλίψης δεν θα λαμβάνεται υπόψη καθώς είτε δεν θα προλαβαίνει να βρεθεί σε εφελκυσμό, είτε η εφελκυστική δύναμη που θα αναπτύξει, σε συνδυασμό με τον μικρό μοχλοβραχίονα, θα προσφέρει αμελητέα ροπή.
- 4. Θεωρείται ότι η σύνδεση της δοκού με το υποστύλωμα δεν μεταβάλλεται όσον αφορά τα τμήματα των μελών που εμπλέκονται στην συναρμογή και τα μέσα για την πραγματοποίηση της. Δηλαδή σε κάθε περίπτωση των κεφαλαίων 4 και 5 μελετάται η ίδια σύνδεση είτε ως μονόπλευρη ή αμφίπλευρη και είτε ως μεταλλική ή σύμμικτη.

Συγκεκριμένα, στο σχήμα (1.1) παρουσιάζεται η σύνδεση με τις επιλεγμένες διατομές και αποστάσεις:

-240-



Σχήμα 1.1: Λεπτομέρεια κόμβου

Η αντοχή ενός κοχλία M22 ποιότητας 10.9 σε εφελκυσμό προκύπτει, σύμφωνα με ν πίνακα 3.4 του Ευρωκώδικα 3, από της σχέση :

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 100 kN/cm^2 \times 3.03 cm^2}{1.25} \Longrightarrow F_{t,Rd} = 218.16 kN$$

5. Στην περίπτωση των σύμμικτων κόμβων, θεωρείται πλάκα σκυροδέματος καθαρού ύψους d_{eff}=13cm επί χαλυβδόφυλλου ύψους 7cm. Το χαλυβδόφυλλο τοποθετείται με τις αυλακώσεις παράλληλες στη δοκό. Επί του χαλυβδόφυλλου συγκολλούνται διατμητικοί ήλοι κεφαλής Φ19 ύψους 170mm.

Η αντοχή ενός ήλου προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{Rd} = \min\left[\frac{\frac{0.8f_u(\frac{\pi d^2}{4})}{\gamma_v};\frac{0.29ad^2\sqrt{f_{ck}E_{cm}}}{\gamma_v}}{\gamma_v}\right] \Rightarrow$$

$$P_{Rd} = \min\left[\frac{\frac{0.8\times 36kN/cm^2\times(\frac{\pi\times 1.9^2}{4})}{1.25};\frac{0.29\times 1\times 1.9^2\times\sqrt{2kN/cm^2\times 2900kN/cm2}}{1.25}}{1.25}\right] \Rightarrow$$

 $P_{Rd} = 63.80 kN$

Στην αντοχή εφαρμόζεται ο παρακάτω μειωτικός συντελεστής k1 λόγω του ότι η πλάκα δεν είναι συμπαγής αλλά αποτελείται από χαλύβδινο φύλλο και πλάκα σκυροδέματος.

$$k_1 = 0.6 \times \frac{b_0}{h_p} \times \left(\frac{h}{h_p} - 1\right) \le 1.0 \Longrightarrow k_1 = 0.6 \times \frac{5cm}{7cm} \times \left(\frac{14.5cm}{7cm} - 1\right) \Longrightarrow k_1 = 0.459$$

Επομένως $P_{Rd} = 29.30 kN$

Επιπλέον, η αντοχή σχεδιασμού των διατμητικών συνδέσμων στις πλάστιμες ζώνες πολλαπλασιάζεται επί έναν συντελεστή μείωσης 0.75, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Τελικά $P_{Rd} = 22.00 kN$.

Οι συγκεκριμένοι διατμητικοί σύνδεσμοι θεωρούνται πλάστιμοι, επομένως επιτρέπεται μερική διατμητική σύνδεση.

6. Η ροπή αδράνειας της σύμμικτης δοκού για αρνητικές ροπές, προκύπτει ίση με $I = 26772.24 cm^4$, θεωρώντας τη διατομή ρηγματωμένη, ενώ για την περίπτωση των θετικών ροπών προκύπτει ίση με $I = 1651244.60 cm^4$, θεωρώντας τη διατομή αρηγμάτωτη. Προφανώς για την εύρεση των ροπών αδράνειας έχουν ληφθεί υπόψη τα κατάλληλα συνεργαζόμενα πλάτη b_{eff} .

2 Δομικές ιδιότητες μεταλλικού κόμβου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3

Ένας κόμβος προσομοιώνεται με ένα στροφικό ελατήριο, οι ιδιότητες του οποίου εκφράζονται μέσω μιας καμπύλης ροπής-στροφής. Στην καμπύλη ροπής-στροφής πρέπει να καθορίζονται οι τρείς κύριες δομικές ιδιότητες ενός κόμβου, οι οποίες είναι οι εξής:

- Ροπή αντοχής
- Στροφική δυσκαμψία
- Στροφική ικανότητα



Σχήμα 2.1: Καμπύλη σχεδιασμού ροπής-στροφής

Απλοποιητικά μπορεί να θεωρηθεί ότι όταν η ροπή στον κόμβο ξεπεράσει τα 2/3 της ροπής αντοχής του κόμβου, η δυσκαμψία μειώνεται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.2: Στροφική δυσκαμψία ανάλογα με τη $M_{i.Ed}$

Όπου το n είναι ο διορθωτικός συντελεστής δυσκαμψίας, ο οποίος προσδιορίζεται από τον πίνακα 5.2 του μέρους 1.8 του Ευρωκώδικα 3 και στην περίπτωση κόμβου δοκούυποστυλώματος με κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα θεωρείται ίσος με 2.

2.1 Βασικά συστατικά μέρη

2.1.1 Θλιβόμενη ζώνη

Η θλιβόμενη ζώνη για την περίπτωση κόμβου με κοχλιωτή σύνδεση υποστυλώματος-μετωπικής πλάκας περιλαμβάνει τα παρακάτω συστατικά μέρη:

- Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση
- Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη
- Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη

2.1.1.1 Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση

Για ένα μονόπλευρο κόμβο ή για έναν αμφίπλευρο στον οποίο τα ύψη των δοκών είναι παραπλήσια, η αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση $V_{wp,Rd}$ του μη ενισχυμένου κορμού του υποστυλώματος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 \times f_{y,wc} \times A_{vc}}{\sqrt{3} \times \gamma_{M0}}$$
(2.1)

Όπου: Α_{νc} η επιφάνεια διάτμησης του υποστυλώματος.

Στην περίπτωση που ο κορμός του υποστυλώματος ενισχύεται με εγκάρσιες νευρώσεις στην εφελκυόμενη και στη θλιβόμενη ζώνη ταυτόχρονα, υπάρχει η δυνατότητα προσαύξησης κατά $V_{wp,add,Rd}$ ως εξής:

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,fc,Rd}}{d_s} \le \frac{2 \times M_{pl,fc,Rd} + 2 \times M_{pl,st,Rd}}{d_s}$$
(2.2)

Όπου:

- d_s είναι η απόσταση μεταξύ των κεντροβαρικών γραμμών των νευρώσεων
- $M_{p\ell,fc,Rd}$ είναι η πλαστική αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη του πέλματος του υποστυλώματος
- $M_{p\ell,st,Rd}$ είναι η πλαστική αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη της νεύρωσης

2.1.1.2 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

Η αντοχή σχεδιασμού του κορμού του υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega \times k_{wc} \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc} \times f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \le \frac{\omega \times k_{wc} \times \rho \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc} \times f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$
(2.3)

όπου:

- ω είναι ένας μειωτικός συντελεστής, με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η πιθανή αλληλεπίδραση με τη διάτμηση στον κορμό του υποστυλώματος.
- b_{eff,c,wc} είναι το ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη το οποίο για την περίπτωση σύνδεσης με κοχλιωτή μετωπική πλάκα θεωρείται ίσο με:

 $b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p$

- ρ είναι μειωτικός συντελεστής για το λυγισμό του ελάσματος.
- k_{wc} είναι μειωτικός συντελεστής ο οποίος για προκαταρκτικούς υπολογισμούς θεωρείται ίσος με 1.00.

Η διαδικασία υπολογισμού των ω και ρ δίνεται στο Παράρτημα Β.

2.1.1.3 Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη

Η αντοχή σχεδιασμού σε θλίψη του πέλματος και του κορμού της δοκού δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$F_{c,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{\left(h - t_{fb}\right)} \tag{2.4}$$

όπου:

- h είναι το ύψος της συνδεόμενης δοκού.
- *M*_{c,Rd} είναι η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή της διατομής της δοκού, απομειωμένη αν απαιτείται λόγω αλληλεπίδρασης με τέμνουσα.

2.1.2 Εφελκυόμενη ζώνη

- Πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη
- Μετωπική πλάκα σε κάμψη
- Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό
- Κορμός δοκού σε εφελκυσμό

2.1.2.1 Ισοδύναμο βραχύ ταυ σε εφελκυσμό

Στην περίπτωση κοχλιωτών κόμβων δοκού-υποστυλώματος, η απόκριση της εφελκυόμενης ζώνης μπορεί να προσεγγισθεί από εκείνη ισοδύναμων βραχέων ταυ.

Η αστοχία μιας μεμονωμένης σύνδεσης βραχέος ταυ πραγματοποιείται με την πλαστικοποίηση του πέλματος, των κοχλιών ή και των δύο ταυτόχρονα. Εάν το πέλμα θεωρηθεί γραμμικός φορέας, η εκτίμηση της πλαστικής αντοχής βασίζεται στον σχηματισμό τοπικών πλαστικών αρθρώσεων επί αυτού και η αστοχία μπορεί να επέλθει σύμφωνα με τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας παρακάτω:

- 1^{ος} μηχανισμός: πλήρης πλαστικοποίηση του πέλματος με τον σχηματισμό τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων, δύο πλησίον της συναρμογής με τον κορμό και δύο στη θέση των κοχλιών.
- 2°ς μηχανισμός: πλαστικοποίηση του πέλματος με σχηματισμό δύο πλαστικών αρθρώσεων, πλησίον της συναρμογής με τον κορμό και αστοχία των δύο κοχλιών.
- 3°ς μηχανισμός: αστοχία μόνο των δύο κοχλιών, με πλήρη αποκόλληση του πέλματος.

12



Σχήμα 2.3: Μηχανισμοί αστοχίας σύνδεσης βραχέως ταυ

Η δύναμη που προκύπτει για κάθε μηχανισμό υπολογίζεται εφαρμόζοντας ισορροπία στην τελική κατάσταση αστοχίας.

Στον πίνακα (2.1) παρουσιάζονται οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτουν οι παραπάνω δυνάμεις.

	Μπορεί να εμφανιστούν δυνάμεις επαφής, δηλ. $L_{\rm b} \leq L_{\rm b}^{*}$		Χωρίς δυνάμεις επαφής
Μηχανισμός 1	Μέθοδος 1	Μέθοδος 2 (εναλλακτική μέθοδος)	
χωρίς ενισχυτικά ελάσματα	$F_{\rm T,1,Rd} = \frac{4M_{p(.1,Rd}}{m} \qquad \qquad F_{\rm T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{p(.1,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$		$= 2M_{p(1,Rd)}$
με ενισχυτικά ελάσματα	$F_{\mathrm{T,1,Rd}} = \frac{4M_{p(1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{\rm T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{p(1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w(m+n)}$	$P_{\mathrm{T},1-2,\mathrm{Rd}} = \frac{1}{m}$
Μηχανισμός 2	$F_{\mathrm{T},2,\mathrm{Rd}} = \frac{2M_{p(,2,\mathrm{Rd}} + n\Sigma F_{t,\mathrm{Rd}}}{m+n}$		•
Μηχανισμός 3	$F_{\mathrm{T},3,\mathrm{Rd}} = \Sigma F_{t,\mathrm{Rd}}$		

Πίνακας 2.1: Αντοχή σχεδιασμού πέλματος βραχέως ταυ

Όπου:

•
$$M_{pl,i,Rd} = \frac{0.25 \sum l_{eff,i} t_f^2 f_y}{\gamma_{M0}}$$

•
$$M_{pl,i,Rd} = \frac{0.25 \sum l_{eff,1} t_{bp}^2 f_y}{\gamma_{M0}}$$

•
$$n = \min(e_{\min}; 1.25m)$$

Την παραπάνω θεώρηση, όσον αφορά την οριακή ανάλυση της σύνδεσης, υιοθετεί ο Ευρωκώδικας 3 στο μέρος 1.8 περί μεταλλικών κόμβων, με την απαίτηση βέβαια το συνολικό ενεργό μήκος $\Sigma \ell_{eff}$ ενός ισοδύναμου βραχέος ταυ να είναι τέτοιο, ώστε η αντοχή σχεδιασμού του πέλματός του να είναι ισοδύναμη με εκείνη του βασικού συστατικού μέρους του κόμβου που αντιπροσωπεύει. Περισσότερα στοιχεία, όσον αφορά τα ενεργά

μήκη, αναγράφονται στα κεφάλαια που αφορούν συστατικά μέρη τα οποία βρίσκονται στην εφελκυόμενη ζώνη.

2.1.2.2 Πέλμα υποστυλώματος σε εγκάρσια κάμψη

Η αντοχή σχεδιασμού και ο μηχανισμός αστοχίας ενός πέλματος υποστυλώματος σε εγκάρσια κάμψη, σε συνδυασμό με τους κοχλίες σε εφελκυσμό, πρέπει να προσδιορίζεται με βάση ένα ισοδύναμο βραχύ ταυ και για τις δύο περιπτώσεις:

- για κάθε μεμονωμένη σειρά κοχλιών που απαιτείται να παραλάβει εφελκυσμό.
- για κάθε ομάδα σειρών κοχλιών που απαιτείται να παραλάβουν εφελκυσμό.

Οι ομάδες σειρών κοχλιών εκατέρωθεν οποιασδήποτε εγκάρσιας νεύρωσης συνδεόμενης με το πέλμα του υποστυλώματος, πρέπει να προσομοιώνονται με ξεχωριστά ισοδύναμα βραχέα ταυ.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα ενεργά μήκη των ισοδύναμων βραχέων ταυ για τις περιπτώσεις μη ενισχυμένου και ενισχυμένου πέλματος υποστυλώματος.

Η δύναμη πλαστικοποίησης της σύνδεσης του κάθε ισοδύναμου βραχέως ταυ προκύπτει από την μικρότερη τιμή των αντιστοιχών $F_{pl,1}, F_{pl,2}$ και $F_{pl,3}$.

2.1.2.3 Μετωπική πλάκα σε κάμψη

Η αντοχή σχεδιασμού και ο μηχανισμός αστοχίας της μετωπικής πλάκας σε κάμψη, σε συνδυασμό με τους κοχλίες σε εφελκυσμό, πρέπει να προσδιορίζεται με βάση ένα ισοδύναμο βραχύ ταυ και για τις δύο περιπτώσεις:

- για κάθε μεμονωμένη σειρά κοχλιών που απαιτείται να παραλάβει εφελκυσμό
- για κάθε ομάδα σειρών κοχλιών που απαιτείται να παραλάβουν εφελκυσμό

Οι ομάδες σειρών κοχλιών εκατέρωθεν οποιασδήποτε νεύρωσης συνδεόμενης με τη μετωπική πλάκα, καθώς και η σειρά κοχλιών στο προεξέχον τμήμα σε προεξέχουσες μετωπικές πλάκες, πρέπει να προσομοιώνονται με ξεχωριστά ισοδύναμα βραχέα ταυ.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα ενεργά μήκη των ισοδύναμων βραχέων ταυ για την περίπτωση μετωπικής πλάκας σε κάμψη.

Η δύναμη πλαστικοποίησης της σύνδεσης του κάθε ισοδύναμου βραχέως ταυ προκύπτει από την μικρότερη τιμή των αντιστοιχών $F_{pl,1}, F_{pl,2}$ και $F_{pl,3}$.

2.1.2.4 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό

Η αντοχή σχεδιασμού ενός μη ενισχυμένου κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega \times b_{eff,t,wc} \times t_{wc} \times f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$$
(2.5)

Όπου:

- ω είναι ένας μειωτικός συντελεστής, με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η πιθανή αλληλεπίδραση με τη διάτμηση στον κορμό του υποστυλώματος και η διαδικασία υπολογισμού του παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.
- b_{eff,c,wc} είναι το ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό το οποίο για κοχλιωτή σύνδεση λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος ταυ που αντιστοιχεί στο πέλμα του υποστυλώματος.

2.1.2.5 Κορμός δοκού σε εφελκυσμό

Σε μία κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα, η αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό του κορμού της δοκού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \times t_b \times f_{y,wb}}{\gamma_{M0}}$$
(2.6)

Όπου:

 Το ενεργό πλάτος b_{eff,t,wb} του κορμού της δοκού σε εφελκυσμό πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος ταυ που αντιστοιχεί στη μετωπική πλάκα σε κάμψη για μία μεμονωμένη σειρά κοχλιών ή μια ομάδα κοχλιών.

2.2 Ροπή αντοχής κόμβου

Η ροπή αντοχής είναι η μέγιστη ροπή της καμπύλης σχεδιασμού ροπής-στροφής, η οποία προκύπτει από κατανομή των δυνάμεων στο εσωτερικό του κόμβου και υπολογισμό των αντοχών σχεδιασμού των βασικών συστατικών μερών του έναντι αυτών των δυνάμεων.

Η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή *M*j,Rd ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος με μία κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_{j,Rd} = \sum_{r} h_r F_{tr,Rd}$$
(2.7)

Όπου:

- $F_{tr,Rd}$ είναι η ενεργός αντοχή σε εφελκυσμό της σειράς κοχλιών r
- h_r είναι η απόσταση της σειράς κοχλιών r από το κέντρο θλίψης
- *r* είναι ο αριθμός των σειρών κοχλιών

Η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ της σειράς κοχλιών r πρέπει να λαμβάνεται ίση με την αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{t,Rd}$ της σειράς κοχλιών, θεωρώντας τη ως μεμονωμένη και απομειωμένη αν απαιτείται.

Η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό *Ftr*,Rd της σειράς κοχλιών *r*, θεωρώντας τη ως μεμονωμένη, πρέπει να λαμβάνεται ίση με τη μικρότερη τιμή των αντοχών σχεδιασμού σε εφελκυσμό των επόμενων βασικών συστατικών μερών με μια σειρά κοχλιών:

- πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη $F_{\rm t,fc,Rd}$
- μετωπική πλάκα σε κάμψη F_t,ep,Rd
- κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό $F_{\rm t,wc,Rd}$
- κορμός δοκού σε εφελκυσμό $F_{\rm t,wb,Rd}$

Η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ της σειράς κοχλιών r πρέπει να μειώνεται, αν χρειάζεται από την τιμή $F_{t,Rd}$ έτσι ώστε όταν συνυπολογίζονται όλες οι σειρές κοχλιών άνω της r, συμπεριλαμβανομένης και της ίδιας, να ικανοποιούνται οι επόμενες συνθήκες:

- $\Sigma F_{t,Rd} \leq V_{wp,Rd} / \beta$
- $\Sigma F_{t,Rd} \leq \min(F_{c,wc,Rd}; F_{c,fb,Rd})$

Επίσης, μείωση στην ενεργό αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό της σειράς κοχλιών r από την τιμή $F_{t,Rd}$ επέρχεται, αν το άθροισμα των αντοχών σχεδιασμού των σειρών κοχλιών μέχρι και την σειρά r, οι οποίες σχηματίζουν μέρος της ίδιας ομάδας κοχλιών υπερβαίνει την αντοχή σχεδιασμού της ομάδας αυτής θεωρούμενης ως σύνολο. Η συνθήκη αυτή πρέπει να ικανοποιείται για τα εξής συστατικά μέρη:

- κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό $F_{t,wc,Rd}$
- πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη $F_{\rm t,fc,Rd}$
- μετωπική πλάκα σε κάμψη $F_{\rm t,ep,Rd}$
- κορμός δοκού σε εφελκυσμό F_t, wb, Rd

Τέλος, όταν η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ μιας από τις προηγούμενες σειρές κοχλιών x είναι μεγαλύτερη από 1,9 $F_{t,Rd}$, τότε η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ της σειράς κοχλιών r πρέπει να απομειώνεται, αν

χρειάζεται, έτσι ώστε:
$$F_{tr,Rd} \leq F_{tx,Rd} imes rac{h_r}{h_x}$$
.

Όπου:

 h_x είναι η απόσταση από τη σειρά κοχλιών x μέχρι το κέντρο θλίψης

xείναι η πιο απομακρυσμένη σειρά κοχλιών από το κέντρο θλίψης η οποία έχει αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό μεγαλύτερη από 1,9 $\rm F_{t,Rd}$

2.3 Στροφική δυσκαμψία κόμβου

Η στροφική δυσκαμψία ορίζεται ως η τέμνουσα δυσκαμψία, η οποία σε μια καμπύλη σχεδιασμού ροπής-στροφής υφίσταται μέχρι τη στροφή φ_{Xd} οπού για πρώτη φορά η ροπή $M_{j,Ed}$ γίνεται ίση με τη ροπή αντοχής $M_{j,Rd}$ αλλά όχι για μεγαλύτερες στροφές.

Συγκεκριμένα θεωρείται ότι η αρχική στροφική δυσκαμψία $S_{j,ini}$, η οποία ταυτίζεται με την κλίση της ελαστικής περιοχής της καμπύλης σχεδιασμού ροπής-στροφής, υφίσταται μέχρι την τιμή 2/3 $M_{j,Rd}$ ενώ για τιμές της ροπής μεταξύ 2/3 $M_{j,Rd}$ - $M_{j,Rd}$ μειώνεται λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή n.



Σχήμα 2.4: Στροφική δυσκαμψία ανάλογα του μεγέθους της φόρτισης

Η αρχική στροφική δυσκαμψία ενός κόμβου προσδιορίζεται από τις ευκαμψίες των βασικών συστατικών μερών του, η κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από έναν ελαστικό συντελεστή k_i . Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συντελεστές ki που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ανάλογα με τη διαμόρφωση του κόμβου και των αριθμό των σειρών κοχλιών σε εφελκυσμό και στον πίνακα 2.3 φαίνονται οι ελαστικοί συντελεστές δυσκαμψίας των συστατικών μερών.

Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με κοχλιωτές συνδέσεις μετωπικής πλάκας	Αριθμός σειρών κοχλιών σε εφελκυσμό	Συντελεστές δυσκαμψίας k _i που πρέπει να ληφθούν υπόψη
Μονόπλευρος	Μία	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Δύο ή περισσότερες	$k_1; k_2; k_{eq}$
Αμφίπλευρος – Ροπές ίσες και αντίρροπες	Μία	$k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Δύο ή περισσότερες	$k_2; k_{eq}$
Αμφίπλευρος – Ροπές άνισες	Μία	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Δύο ή περισσότερες	$k_1; k_2; k_{eq}$

Πίνακας 2.2: Απαιτούμενοι συντελεστές ki για κόμβους με κοχλιωτές μετωπικές πλάκες

Συστατικό μέρος	Συντελεστής δυσκαμψίας $k_{\rm i}$		
Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση	Μη ενισχυμένος, μονόπλευρος κόμβος, ή αμφίπλευρος κόμβος με παραπλήσια ύψη δοκών	ενισχυμένος	
	$k_1 = \frac{0.38A_{VC}}{\beta z}$	$k_1 = \infty$	
	z είναι ο μοχλοβραχίονας από το Σχήμα β είναι η παράμετρος μετασχηματισμού	α 6.15 δ από την 5.3(7)	
Κορμός	μη ενισχυμένος	ενισχυμένος	
υποστυλώματος σε θλίψη	$k_2 = \frac{0.7 b_{\text{eff},c,wc} t_{wc}}{d_c}$	$k_2 = \infty$	
	$b_{\rm eff,c,wc}$ είναι το ενεργό πλάτος από την 6.2.6.2		
Κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό	ενισχυμένη ή μη κοχλιωτή σύνδεση με μία σειρά κοχλιών σε εφελκυσμό ή μη ενισχυμένη συγκολλητή σύνδεση	ενισχυμένη συγκολλητή σύνδεση	
	$k_3 = \frac{0.7b_{\text{eff},t,wc} t_{wc}}{d_c}$	$k_3 = \infty$	
6.2.6.3. Για έναν κόμβο με μία σειρά κοχλιών σε εφελκυσμό το δ _{eff} λαμβάνεται ίσο με το μικρότερο από τα ενεργά μήκη ℓ _{eff} (μεμονωμ ομάδας σειρών κοχλιών) που δίνονται για τη συγκεκριμένη σειρά κ Πίνακα 6.4 (μη ενισχυμένο πέλμα υποστυλώματος) ή στον Πίνακα (ενισχυμένο πέλμα υποστυλώματος).		χλιών σε εφελκυσμό το b _{eff,twe} πρέπει να ενεργά μήκη ℓ _{eff} (μεμονωμένη ή ως μέλος α τη συγκεκριμένη σειρά κοχλιών στον υλώματος) ή στον Πίνακα 6.5	
		αμένη ή ως μέλος ομάδας σειρών η σειοά κονλιών στον Πίνακα 6.4 για μη	
 κοχλιών σε εφελκυσμό) κοχλιών στον Πίνακα 6.4 γι ενισχυμένο πέλμα υποστυλώματος ή στον Πίνακα 6.5 για ενισχυμένο πέλμα υποστυλώματος ή όπως ορίζεται στο Σχήμα 6.8 			
$ \begin{array}{ccc} M \varepsilon \tau \omega \pi i \kappa \dot{\eta} \\ \pi \lambda \dot{\alpha} \kappa \alpha \sigma \varepsilon \\ \kappa_{5} = \frac{0.9 \ell_{eff} t_{p}^{-3}}{m^{3}} \end{array} $			
(μία σειρά κοχλιών σε εφελκυσμό)	 ^ℓeff ^{eff} το μικρότερο από τα ενεργά μήκη (μεμονωμένη ή ως μέλος ομάδας σειρών κοχλιών) που δίνονται για τη συγκεκριμένη σειρά κοχλιών στον Πίνακα 6.6 <i>m</i> γενικά όπως ορίζεται στο Σχήμα 6.11, αλλά για μία σειρά κοχλιών στο προεξέχον τμήμα της μετωπικής πλάκας είναι <i>m</i> = <i>m</i>_x, όπου το <i>m</i>_x ορίζεται στο Σχήμα 6.10 		
$\begin{array}{c} K \ \ \kappa \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$		προεντεταμένοι ή μη	
κοχλιών)	L _b το παραμορφώσιμο μήκος του κοχλία, το οποίο λαμβάνεται ίσο με το μήκος συγκράτησης (συνολικό πάχος μετάλλου και δακτυλίων), συν το μισό του αθροίσματος του πάχους της κεφαλής κοχλία και του πάχους περικοχλίου		

Πίνακας 2.3: Συντελεστές βασικών συστατικών μερών

Τελικά, η στροφική δυσκαμψία Sj ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος υπολογίζεται από τη σχέση (2.8), με την προϋπόθεση ότι η αξονική δύναμη $N_{\rm Ed}$ στο συνδεόμενο μέλος δεν υπερβαίνει το 5% της αντοχής σχεδιασμού $N_{\rm p\ell,Rd}$ της διατομής του.

$$S_{j} = \frac{E \times z^{2}}{\mu \times \sum_{i} \frac{1}{k_{i}}}$$
(2.8)

όπου:

- z είναι ο μοχλοβραχίονας
- μ είναι ο λόγος δυσκαμψίας Sj,ini / Sj, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής: αν $M_{j,Ed} \le 2/3M_{j,Rd} \Longrightarrow \mu = 1$

 $\alpha v \ 2/3M_{i,Rd} < M_{i,Rd} \leq M_{i,Rd} \Longrightarrow \mu = (1.5M_{i,Rd} / M_{i,Rd})^{\psi}$

Εν προκειμένω, ο συντελεστής μ θα λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα.

Στην περίπτωση που εφελκύονται περισσότερες από μία σειρές κοχλιών, οι συντελεστές δυσκαμψίας ki των αντίστοιχων βασικών συστατικών μερών πρέπει να αντιπροσωπεύονται με έναν ισοδύναμο συντελεστή δυσκαμψίας keq, ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$k_{eq} = \frac{\sum_{r} k_{eff,r} h_r}{z_{eq}}$$
(2.9)

Οπού:

hr είναι η απόσταση μεταξύ της σειράς κοχλιών r και του κέντρου θλίψης

keff, *r* είναι ο ενεργός συντελεστής δυσκαμψίας της σειράς κοχλιών *r* λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές δυσκαμψίας *ki* των εξής βασικών συστατικών μερών:

- κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό (k₃)
- πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη (k_4)
- μετωπική πλάκα σε κάμψη (k₅)
- κοχλίες σε εφελκυσμό (k_{10})

και δίνεται από τη σχέση :
$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_{r} \frac{1}{k_{i,r}}}$$

zeq είναι ο ισοδύναμος μοχλοβραχίονας ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$z_{eq} = \frac{\sum_{r} k_{eff,r} \times h_r^2}{\sum_{r} k_{eff,r} \times h_r}$$
(2.10)

Ανάλογα με τη μέθοδο ανάλυσης του φορέα ένας κόμβος ταξινομείται ως προς τη δυσκαμψία ή ως προς την αντοχή ή ως προς τη δυσκαμψία και την αντοχή.

Στην περίπτωση που η ανάλυση είναι ελαστική οι κόμβοι ταξινομούνται με βάση τη στροφική δυσκαμψία τους και πρέπει να διαθέτουν επαρκή αντοχή προκειμένου να μεταφέρουν τις δυνάμεις και τις ροπές οι οποίες δρουν επ' αυτών. Ένας κόμβος μπορεί να ταξινομηθεί ως άκαμπτος, ονομαστικά αρθρωτός ή ημιάκαμπτος με βάση τη δυσκαμψία του. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 θεωρούνται τα παρακάτω όρια:



L_c είναι το ύψος ορόφου ενός υποστυλώματος

Σχήμα 2.5: Όρια Ευρωκώδικα 3 για ταξινόμηση με βάση τη δυσκαμψία

Στην περίπτωση που η ανάλυση είναι πλαστική, οι κόμβοι πρέπει να ταξινομούνται σύμφωνα με την αντοχή τους και πρέπει να διαθέτουν επαρκή στροφική ικανότητα προκειμένου να επιτρέπουν την ανάπτυξη των απαιτούμενων στροφών. Ένας κόμβος μπορεί να ταξινομηθεί ως πλήρους αντοχής, μερικής αντοχής ή ονομαστικά αρθρωτός με βάση την αντοχή του. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η απαίτηση του Ευρωκώδικα 3 προκειμένου ένας κόμβος να ταξινομηθεί ως πλήρους αντοχής. Σημειώνεται ότι για να ταξινομηθεί ως ονομαστικά αρθρωτός πρέπει η ροπή αντοχής *M*j,Rd να μην είναι μεγαλύτερη από το 25% της ροπής αντοχής που απαιτείται για ένα κόμβο πλήρους αντοχής και να διαθέτει επαρκή στροφική ικανότητα.

 α) Κεφαλή υποστυλώματος 		Είτε	$M_{\mathrm{j,Rd}} \geq M_{\mathrm{b,p\ell,Rd}}$
	🖌 M _{j,Sd}	ή	$M_{ m j,Rd} \geq M_{ m c,p\ell,Rd}$
β) Εντός του ύψους υποστυλώματος		Είτε	$M_{\mathrm{j,Rd}} \geq M_{\mathrm{b,p\ell,Rd}}$
	🖌 M _{j,Sd}	ή	$M_{ m j,Rd} \ge 2 M_{ m c,p\ell,Rd}$

Υπόμνημα:

M_{b,pl,Rd} είναι η πλαστική αντοχή σχεδιασμού σε ροπή της δοκού
M_{c,pl,Rd} είναι η πλαστική αντοχή σχεδιασμού σε ροπή του υποστυλώματος
Σχήμα 2.6: Κόμβοι πλήρους αντοχής

Εάν η ανάλυση είναι ελαστοπλαστική, οι κόμβοι πρέπει να ταξινομούνται σύμφωνα με τη δυσκαμψία και την αντοχή τους. Ένας κόμβος μπορεί να ταξινομηθεί ως συνεχής όταν διαθέτει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία, ως αρθρωτός όταν διαθέτει χαμηλή αντοχή και δυσκαμψία και ως ημισυνεχής όταν διαθέτει ενδιάμεση αντοχή και δυσκαμψία.

2.4 Στροφική ικανότητα κόμβου

Η στροφική ικανότητα ενός κόμβου είναι η μέγιστη στροφή της καμπύλης σχεδιασμού ροπής-στροφής.

Θεωρείται κρίσιμη παράμετρος σε περιπτώσεις σχεδιασμού με απαιτήσεις υψηλής πλαστιμότητας, καθώς από αυτήν εξαρτάται η έκταση της ανακατανομής των εντατικών μεγεθών μετά την έλευση της πλαστικοποίησης. Για τον σχεδιασμό δεν απαιτείται αποτίμηση της στροφικής ικανότητας του κόμβου στην περίπτωση που η ροπή αντοχής του κόμβου $M_{j,Rd}$ είναι ίση με τουλάχιστον 1.2 φορές την πλαστική ροπή αντοχής $M_{pl,Rd}$ του συνδεόμενου μέλους.

Όσον αφορά την περίπτωση κοχλιωτών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος, και μόνο στην περίπτωση που η αξονική δύναμη N_{Ed} στο συνδεόμενο μέλος δεν υπερβαίνει το 5% της πλαστικής αντοχής σχεδιασμού $N_{pl,Rd}$ της διατομής του, ισχύουν τα εξής:

- 1) Ένας κόμβος δοκού-υποστυλώματος του οποίου η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή Mj,Rd περιορίζεται από την αντοχή σχεδιασμού του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση, μπορεί να θεωρηθεί ότι διαθέτει επαρκή στροφική ικανότητα αν: $d/t_w \leq 69\varepsilon$
- 2) Ένας κόμβος με σύνδεση με κοχλιωτή μετωπική πλάκα μπορεί να θεωρηθεί ότι διαθέτει επαρκή στροφική ικανότητα για πλαστική ανάλυση, αν πληρούνται και οι δύο επόμενες συνθήκες:
 - a) η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή του κόμβου περιορίζεται από την αντοχή σχεδιασμού ενός εκ των δύο:
 - i) πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη
 - ii) μετωπική πλάκα ή εφελκυόμενο γωνιακό πέλματος σε κάμψη
 - b) το πάχος t του πέλματος του υποστυλώματος ή της μετωπικής πλάκας πέλματος (όχι απαραίτητα το ίδιο συστατικό μέρος με του (a)) ικανοποιεί τον περιορισμό: $t \leq 0.36d \sqrt{f_{ub}/f_y}$.

Σημειώνεται ότι η εκτίμηση της στροφικής ικανότητας αποτελεί ένα θολό σημείο στην προσπάθεια εκτίμησης της απόκρισης ενός κόμβου. Γενικά θεωρείται ότι το συστατικό μέρος με την μικρότερη αντοχή συνεισφέρει με όλη τη δυνατή παραμόρφωση

του, ενώ τα υπόλοιπα συστατικά μέρη με παραμορφώσεις αντίστοιχες του λόγου $\frac{F_{x,Ed}}{F_{x,Rd}}$

δηλαδή θεωρείται μια ελαστική σχέση μεταξύ των παραμορφώσεων και των δυνάμεων. Εάν βέβαια πριν την επίτευξη της πλήρους παραμορφωσιμότητας του ασθενέστερου συστατικού μέρους διαρρέουν και άλλα συστατικά μέρη τότε προφανώς η συμπεριφορά των συστατικών μερών δεν είναι γραμμική.

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιορίζεται στο να εξετάσει εάν ο κόμβος διαθέτει την απαραίτητη στροφική ικανότητα, και όχι στο να εκτιμήσει την τιμή της. Με τον όρο απαραίτητη στροφική ικανότητα εννοείται η ικανότητα του κόμβου να αναπτύξει την απαιτούμενη στροφή από τη στιγμή που πλαστικοποιείται μέχρι την στιγμή που δημιουργείται η τελευταία πλαστική άρθρωση στο φορέα και επέρχεται κατάρρευση. Γενικώς, με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, συστατικά μέλη με υψηλή πλαστιμότητα θεωρούνται το πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη, η μετωπική πλάκα σε κάμψη, τα γωνιακά σε κάμψη και ο κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση. Συστατικά μέρη με περιορισμένη πλαστιμότητα θεωρούνται ο κορμός του υποστυλώματος σε θλίψη και το πέλμα της δοκού σε θλίψη, ενώ ψαθυρό συστατικό μέρος θεωρείται η αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 3 είτε του πέλματος του υποστυλώματος σε κάμψη είτε της μετωπικής πλάκας σε κάμψη.

3 Δομικές ιδιότητες σύμμικτου κόμβου

3.1 Βασικά συστατικά μέρη

Οι αντοχές των παρακάτω συστατικών μερών ενός σύμμικτου κόμβου δεν διαφέρουν από του αντίστοιχου μεταλλικού:

- Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση
- Πέλμα υποστυλώματος σε εγκάρσια κάμψη
- Μετωπική πλάκα σε κάμψη
- Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό
- Κορμός δοκού σε εφελκυσμό

Εκτός από την αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη και την αντοχή του πέλματος και του κορμού της δοκού σε θλίψη που διαφέρουν στην προκειμένη περίπτωση, θεωρούνται και δύο νέα συστατικά μέρη για την προσομοίωση των δομικών ιδιοτήτων ενός σύμμικτου κόμβου:

- Πλάκα σκυροδέματος σε θλίψη
- Χαλύβδινος οπλισμός πλάκας σε εφελκυσμό

Για την εύρεση των αντοχών των συστατικών μερών, πλάκα σκυροδέματος σε θλίψη και οπλισμός πλάκας σε εφελκυσμό, ακολουθείται το Παράρτημα C του Ευρωκώδικα 8.

3.1.1 Θλιβόμενη ζώνη

3.1.1.1 Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση



Σχήμα 3.1: Φάτνωμα κορμού υποστυλώματος σε διάτμηση

Στην περίπτωση είτε μονόπλευρης διαμόρφωσης είτε αμφίπλευρης, με άνισες ροπές εκατέρωθεν του κόμβου το φάτνωμα του κορμού του υποστυλώματος καλείται να

παραλάβει τη διαφορά της ροπής $M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed}$. Η ροπή αυτή αναλύεται σε ζεύγος διατμητικών δυνάμεων ως εξής:

$$V_{cp} = \frac{M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed}}{z}$$
(3.1)

Όπου z ο μοχλοβραχίονας μεταξύ εφελκυστικών και θλιπτικών δυνάμεων.

Προφανώς στην περίπτωση ενός σύμμικτου κόμβου ο μοχλοβραχίονας z μεταβάλλεται σε σχέση με τον αντίστοιχο μεταλλικό, επομένως το ύψος του φατνώματος του κορμού του υποστυλώματος που καταπονείται σε διάτμηση μεταβάλλεται.

Για την περίπτωση των αρνητικών ροπών ο μοχλοβραχίονας εφελκυστικώνθλιπτικών δυνάμεων φαίνεται στο σχήμα αριστερά ενώ αντίστοιχα για την περίπτωση των θετικών στο σχήμα δεξιά.



Σχήμα 3.2: Φάτνωμα κορμού υποστυλώματος σύμμικτου κόμβου σε διάτμηση

Επομένως, στην περίπτωση σύμμικτου κόμβου καταπονείται μεγαλύτερη περιοχή του φατνώματος σε διάτμηση. Η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση λαμβάνεται απ' ευθείας από τον αντίστοιχο μεταλλικό.

3.1.1.2 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

3.1.1.2.1 Αρνητικές ροπές

Για τη φορά αρνητικών ροπών η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη δεν διαφέρει από την αντοχή ενός αντίστοιχου μεταλλικού κόμβου, καθώς το ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη δεν μεταβάλλεται.

3.1.1.2.2 Θετικές ροπές

Σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 8.4.3 του Ευρωκώδικα 4 το ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη $b_{eff,c,wc}$ πρέπει να προσδιορίζεται υποθέτοντας διασπορά 45° μέσω της μετωπικής πλάκας.

Κατά τ' άλλα, ο υπολογισμός της αντοχής του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη ακολουθεί το σύνηθες πρότυπο που επιβάλλει ο Ευρωκώδικας 3.

3.1.1.3 Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη

Προφανώς, υπάρχει μεταβολή σε σχέση με τους αντίστοιχους μεταλλικούς κόμβους αφενός λόγω συμμετοχής της πλάκας σκυροδέματος και του οπλισμού στον υπολογισμό της ροπής αντοχής της δοκού και αφετέρου λόγω αύξησης του ύψους της δοκού.

3.1.1.3.1 Αρνητικές ροπές



Σχήμα 3.3: Μοχλοβραχίονας κέντρων θλίψης-εφελκυσμού



3.1.1.3.2 Θετικές ροπές



Σχήμα 3.4: Μοχλοβραχίονας κέντρων θλίψης-εφελκυσμού

$$F_{c,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{\left(h - \frac{t_{fb}}{2} - \frac{h_{\pi\lambda}}{2}\right)}$$
(3.3)

3.1.2 Εφελκυόμενη ζώνη

Η μεταβίβαση των εφελκυστικών δυνάμεων της δοκού στο υποστύλωμα πραγματοποιείται μέσω των σειρών κοχλιών που βρίσκονται σε εφελκυσμό. Ως εκ τούτου δεν θεωρείται καμία αλλαγή σε σχέση με τον αντίστοιχο μεταλλικό, αφού οι ενεργές περιοχές σε εφελκυσμό δεν μεταβάλλονται τόσο ως προς το πλάτος τους, όσο και ως προς τη θέση τους.

3.1.3 Πλάκα σκυροδέματος σε θλίψη και οπλισμός πλάκας σε εφελκυσμό

Για την προσομοίωση των δομικών ιδιοτήτων της πλάκας σκυροδέματος σε θλίψη θεωρούνται τρείς μηχανισμοί σύμφωνα με τις ενεργοποιημένες περιοχές σκυροδέματος σε θλίψη.

Ο παραπάνω μηχανισμός ενεργοποιείται μόνο στην περίπτωση που υπάρχει εγκάρσια δοκός με διατμητικούς ήλους στους οποίους αγκυρώνονται οι διαμήκεις οπλισμοί της πλάκας.

Η αντοχή του οπλισμού της πλάκας σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\rm Rds} = A_s \times f_{\rm vd}$$
(3.4)

Όπου As είναι το εμβαδόν του διαμήκους οπλισμού της πλάκας εντός του συνεργαζόμενου πλάτους της πλάκας για αρνητικές ροπές.

Eπίσης, για να μην αστοχούν οι ήλοι απαιτείται η ικανοποίηση της συνθήκης:1.1×n×P_{Rd} ≥ F_{Rds} (3.5)

3.1.3.1 Εξωτερικά υποστυλώματα με εγκάρσια δοκό

3.1.3.1.1 Αρνητικές ροπές



Σχήμα 3.5: Μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου

26

Ο χάλυβας οπλισμού As και οι διατμητικοί σύνδεσμοι τοποθετούνται σε πλάτος ίσο με το συνεργαζόμενο πλάτος, το οποίο λαμβάνεται από τον πίνακα 7.5 ΙΙ του Ευρωκώδικα 3 και στη συγκεκριμένη περίπτωση, των αρνητικών ροπών, λαμβάνεται ίσο με 2×0,1*l*.

Ο οπλισμός της πλάκας ενεργοποιείται σε εφελκυσμό και η αντοχή σχεδιασμού των ράβδων οπλισμού εντός του b_{eff} δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Rds} = A_s f_{yd} \tag{3.6}$$

Η διαρροή του οπλισμού πρέπει να πραγματοποιείται πριν την αστοχία της διατμητικής σύνδεσης της πλάκας, επομένως πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$P_{Rd} \ge 1.1 F_{Rds} \tag{3.7}$$

n είναι ο αριθμός των συνδέσμων στο συνεργαζόμενο πλάτος P_{Rd} είναι η αντοχή σχεδιασμού ενός συνδέσμου.

3.1.3.1.2 Θετικές ροπές



Στην περίπτωση θετικών ροπών στην περιοχή του κόμβου, ενεργοποιείται η πλάκα σκυροδέματος σε θλίψη. Το συνεργαζόμενο πλάτος λαμβάνεται από τον πίνακα 7.5ΙΙ και στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνεται ίσο με 2×0.075×*l*.

Θεωρούνται τρείς μηχανισμοί μεταφοράς δυνάμεων από την πλάκα στο υποστύλωμα ανάλογα με την ενεργοποιημένη περιοχή σε θλίψη:

Σχήμα 3.6: Μηχανισμός 1

Ο μηχανισμός 1 περιγραφεί την απευθείας θλίψη στο υποστύλωμα. Η τιμή σχεδιασμού η οποία μεταφέρεται μέσω του μηχανισμού αυτού δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή η οποία δίδεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$F_{Rd1} = b_c \times d_{eff} \times f_{cd} \tag{3.8}$$

Όπου d_{eff} το ενεργό ύψος της πλάκας σκυροδέματος



Σχήμα 3.7: Μηχανισμός 2

Ο μηχανισμός 2 περιγράφει τη μεταφορά θλιπτικής δύναμης μέσω θλιπτήρων σκυροδέματος με κλίση προς τις πλευρές του υποστυλώματος. Εάν η γωνία κλίσης ισούται με 45°, η τιμή σχεδιασμού της δύναμη η οποία μεταφέρεται μέσω του μηχανισμού αυτού δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή που δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{Rd2} = 0.7 \times h_c \times d_{eff} \times f_{cd} \tag{3.9}$$

Ο απαιτούμενός εγκάρσιος οπλισμός, ο οποίος ονομάζεται αντισεισμικός, προκύπτει από τη σχέση:

$$A_T \ge \frac{F_{Rd\,2}}{f_{vd,T}} \tag{3.10}$$

Ο οποίος εκτείνεται σε μήκος $l_r = b_c + 4h_c + 2l_b$

Στην περίπτωση που η διατομή του υποστυλώματος είναι κοίλη ορθογωνική ο συγκεκριμένος μηχανισμός δεν ενεργοποιείται.



Σχήμα 3.8: Μηχανισμός 3

Ο μηχανισμός 3 ενεργοποιείται λόγω της ύπαρξης εγκάρσιας δοκού και περιγράφει τον μηχανισμό μεταφοράς δυνάμεων από την πλάκα στο υποστύλωμα μέσω των διατμητικών συνδέσμων.

$$F_{Rd3} = n \times P_{Rd} \tag{3.11}$$

- n είναι ο αριθμός των ήλων εντός του συνεργαζόμενου πλάτους beff
- P_{Rd} είναι η αντοχή ενός ήλου

Εάν ικανοποιείται η σχέση (3.9) τότε επιτυγχάνεται πλήρης μεταφορά της θλιπτικής δύναμης σχεδιασμού της πλάκας.

$$F_{Rd1} + F_{Rd2} + F_{Rd3} > b_{eff} d_{eff} f_{cd}$$
(3.12)

3.1.3.2 Εσωτερικά υποστυλώματα



Σχήμα 3.9: Αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου

Σε αντίθεση με την περίπτωση μιας μονόπλευρης διαμόρφωσης κόμβου, όπου δρουν είτε αρνητικές, είτε θετικές ροπές και ενεργοποιείται, αντίστοιχα, είτε ο οπλισμός της πλάκας σε εφελκυσμό, είτε η πλάκα του σκυροδέματος σε θλίψη, στην προκειμένη περίπτωση ενεργοποιούνται και τα δύο συστατικά μέρη συγχρόνως.

Επομένως, το συνολικό εντατικό μέγεθος που αναπτύσσεται στην πλάκα και οφείλεται στις ροπές κάμψης των εκατέρωθεν πλευρών του υποστυλώματος και χρειάζεται να μεταφερθεί στο υποστύλωμα είναι το άθροισμα της εφελκυστικής δύναμη Fst στις ράβδους οπλισμού που είναι παράλληλες με τη δοκό στην πλευρά του υποστυλώματος, όπου η ροπή είναι αρνητική, και της θλιπτικής δύναμης Fsc στο σκυρόδεμα στην πλευρά του υποστυλώματος, όπου η ροπή είναι θετική.

Προκείμενου να μελετηθεί ο κόμβος ως δύο μεμονωμένοι αλλά αλληλεπιδρώντες κόμβοι θεωρείται κατανομή της συνολικής δύναμης, $F_{Rd} = F_{Rd1} + F_{Rd2} + F_{Rd3}$, εκατέρωθεν του κόμβου σε εφελκυστική δύναμη οπλισμού και σε θλιπτική δύναμη σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό θεωρούνται οι συντελεστές κατανομής α,β,γ για τους μηχανισμούς 1,2,3 αντίστοιχα όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.10: Μηχανισμός 1



Σχήμα 3.11: Μηχανισμός 2



Σχήμα 3.12: Μηχανισμός 3

Οι εκφράσεις των μηχανισμών δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες του προηγούμενου υποκεφαλαίου.

Ο αντισεισμικός οπλισμός A_T τοποθετείται και στις δύο πλευρές εκατέρωθεν του κόμβου για την περίπτωση αντιστροφής των ροπών κάμψης.

Η συνολική δύναμη που πρέπει να μεταφερθεί στο υποστύλωμα κατανέμεται σε εφελκυστική δύναμη οπλισμού, στην δοκό με αρνητική ροπή, και θλιπτική δύναμη πλάκας, στην δοκό με θετική ροπή ως εξής:

$$F_{Rds} = \alpha \times F_{Rd1} + \beta \times F_{Rd2} + \gamma \times F_{Rd3} \le A_s \times f_{yd}$$
(3.13)

$$F_{Rdc} = (1 - \alpha) \times F_{Rd1} + (1 - \beta) \times F_{Rd2} + (1 - \gamma) \times F_{Rd3}$$
(3.14)

3.2 Ροπή αντοχής κόμβου

3.2.1 Αρνητικές ροπές



Σχήμα 3.13: Ισορροπία δυνάμεων

Η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή *M*j,Rd ενός σύμμεικτου κόμβου δοκούυποστυλώματος με μία κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα υπολογίζεται, για αρνητικές ροπές, από τη σχέση:

$$M_{j,Rd} = h_s F_s + \sum_r h_r F_{tr,Rd}$$
(3.15)

Όπου:

- As είναι η αντοχή του οπλισμού της πλάκας σε εφελκυσμό
- hs είναι η απόσταση του ολισμού της πλάκας από το κέντρο θλίψης
- $F_{tr,Rd}$ είναι η ενεργός αντοχή σε εφελκυσμό της σειράς κοχλιών r
- h_r είναι η απόσταση της σειράς κοχλιών r από το κέντρο θλίψης
- r είναι ο αριθμός των σειρών κοχλιών

Όσον αφορά την ενεργό αντοχή σε εφελκυσμό της σειράς κοχλιών r υπάρχει διαφοροποίηση σε σχέση με τον μεταλλικό κόμβο, καθώς λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη του οπλισμού της πλάκας. Δηλαδή στην παρούσα θεώρηση, ο οπλισμός της πλάκας συμπεριφέρεται ως μια σειρά κοχλιών και μάλιστα η πλέον απομακρυσμένη από το κέντρο

θλίψης. Κατά τ' άλλα, υπάρχει συμμόρφωση με τους περιορισμούς που επιβάλλει ο Ευρωκώδικας 3, οι οποίοι αναγράφονται στο υποκεφάλαιο 2.2.

Συνοπτικά, η ροπή αντοχής προκύπτει ως εξής:

$$\begin{split} F_{1} &= \min \left\{ F_{cfb,1}; F_{epb,1}; F_{cwt,1}; F_{bwt,1} \right\} \\ F_{x,r} &= \min \left\{ \begin{matrix} F_{x,(r)} \\ F_{x,(r)+(r-1)} - F_{r-1} \\ F_{x,(r)+(r-1)+(r-2)} - F_{r-1} - F_{r-2} \\ ... \end{matrix} \right\} \\ F_{c} &= \min \left\{ \begin{matrix} F_{cws} \\ \beta \\ - F_{s}; F_{cwc} - F_{s}; F_{bfwc} - F_{s} \\ \end{matrix} \right\} \\ F_{tr,Rd} &= \min \left\{ \begin{matrix} F_{r} \\ F_{c} - F_{r-1} - F_{r-2} - ... - F_{1} \\ \end{matrix} \right\} \end{split}$$

Όπου:

 F_1 η εφελκυστική δύναμη της πιο απομακρυσμένης σειράς κοχλιών από το κέντρο θλίψης $F_{x,r}$ η δύναμη της σειράς κοχλιών r για το συστατικό μέρος x

 $F_{x,(r)+(r-1)+\dots}$ η δύναμη της σειράς κοχλιών r λαμβάνοντας την υπόψη ως μέλος της ομάδας κοχλιών $(r)+(r-1)+\dots,$ για το συστατικό μέρος x

F_c η θλιπτική δύναμη του κόμβου

 F_s η εφελκυστική δύναμη του οπλισμού

 $F_{tr,Rd}$ η ενεργός εφελκυστική αντοχή της σειράς κοχλιών r

3.2.2 Θετικές ροπές



Σχήμα 3.14: Ισορροπία δυνάμεων

Η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή M_{j,Rd} ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος με μία κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα υπολογίζεται, για θετικές ροπές, από τη σχέση:

$$M_{j,Rd} = \sum_{r} h_r F_{tr,Rd}$$
(3.16)

Όπου:

- $F_{\rm tr,Rd}$ είναι η ενεργός αντοχή σε εφελκυσμό της σειράς κοχλιών r
- *h_r* είναι η απόσταση της σειράς κοχλιών *r* από το κέντρο θλίψης, το οποίο ταυτίζεται με το κέντρο βάρους της συμπαγούς πλάκας.
- r είναι ο αριθμός των σειρών κοχλιών

Όσον αφόρα την ενεργό αντοχή σε εφελκυσμό της σειράς κοχλιών r υπάρχει διαφοροποίηση σε σχέση με τον μεταλλικό κόμβο εξ' αιτίας της ύπαρξης της πλάκας σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη της πλάκας λαμβάνεται υπόψη στον εξής περιορισμό:

Η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ της σειράς κοχλιών r πρέπει να μειώνεται, αν χρειάζεται από την τιμή $F_{t,Rd}$ έτσι ώστε όταν συνυπολογίζονται όλες οι σειρές κοχλιών άνω της r, συμπεριλαμβανομένης και της ίδιας, να ικανοποιούνται οι επόμενες συνθήκες:

- $\Sigma_{Ft,Rd} \leq V_{wp,Rd} / \beta$
- $\Sigma F_{t,Rd} \leq \min(F_{c,wc,Rd}; F_{c,fb,Rd})$
- $\Sigma F_{t,Rd} \leq F_{Rdc}$ Opiou F_{Rdc} h antoch the plakace skurodémator se qlíyh.

Κατά τ' άλλα, εφαρμόζονται οι περιορισμοί που επιβάλλει ο Ευρωκώδικας 3, οι οποίοι αναγράφονται στο υποκεφάλαιο 2.2.

Συνοπτικά, η ροπή αντοχής προκύπτει ως εξής:

$$\begin{split} F_{1} &= \min\left\{F_{cfb,1}; F_{epb,1}; F_{cwt,1}; F_{bwt,1}\right\} \\ F_{x,r} &= \min\left\{\begin{matrix}F_{x,(r)} \\ F_{x,(r)+(r-1)} - F_{r-1} \\ F_{x,(r)+(r-1)+(r-2)} - F_{r-1} - F_{r-2} \\ \dots \\ \end{matrix}\right\} \\ F_{c} &= \min\left\{\frac{F_{cws}}{\beta}; F_{cwc}; F_{bfwc}; F_{c,Rd}\right\} \\ F_{tr,Rd} &= \min\left\{\begin{matrix}F_{r} \\ F_{c} - F_{r-1} - F_{r-2} - \dots - F_{1}\end{matrix}\right\} \end{split}$$

Όπου:

 F_1 η εφελκυστική δύναμη της πιο απομακρυσμένης σειράς κοχλιών από το κέντρο θλίψης $F_{x,r}$ η δύναμη της σειράς κοχλιών r για το συστατικό μέρος x

 $F_{x,(r)+(r-1)+...}$ η δύναμη της σειράς κοχλιών r λαμβάνοντας την υπόψη ως μέλος της ομάδας κοχλιών (r)+(r-1)+..., για το συστατικό μέρος x

F_c η θλιπτική δύναμη του κόμβου

F_{c,Rd} η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος

 $F_{tr,Rd}$ η ενεργός εφελκυστική αντοχή της σειράς κοχλιών r

3.3 Στροφική δυσκαμψία κόμβου

Η στροφική δυσκαμψία ενός σύμμικτου προσδιορίζεται αντίστοιχα με ενός μεταλλικού με τις παρακάτω βασικές διαφορές:

- Στην αποτίμηση της στροφικής δυσκαμψίας λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά της πλάκας και του οπλισμού της πλάκας.
- Ο διορθωτικός συντελεστής δυσκαμψίας n, για την περίπτωση σύνδεσης δοκούυποστυλώματος με μετωπική πλάκα, λαμβάνεται ίσος με 1.5.

Για την περίπτωση μη ενισχυμένου κόμβου με τη σύνδεση να πραγματοποιείται με μετωπική πλάκα, οι συντελεστές του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση και του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη λαμβάνονται από τις σχέσεις (3.14) και (3.15) αντίστοιχά:

$$k_1 = 0.87 \frac{0.38A_{\nu c}}{\beta z}$$
(3.17)

$$k_{2} = \frac{0.2b_{eff,c,wc}t_{wc}}{d_{c}}$$
(3.18)

Ο συντελεστής δυσκαμψίας της πλάκας λαμβάνεται ίσος με το άπειρο ενώ στον πίνακα (3.1) παρουσιάζεται η τιμή του συντελεστή δυσκαμψίας του οπλισμού για την εκάστοτε περίπτωση διαμόρφωσης.

Διαμόρφωση	Δρώσες ροπές	Συντελεστής δυσκαμψίας
Μονόπλευρη	-	$k_{\rm s,r} = \frac{A_{\rm s,r}}{3.6h}$
	$M_{\rm Ed,1} = M_{\rm Ed,2}$	$k_{\rm s,r} = \frac{A_{\rm s,r}}{(h/2)}$
Αμφίπλευρη		Για τον κόμβο με $M_{\rm Ed,1}$:
	$M_{{\rm Ed},1} > M_{{\rm Ed},2}$	$k_{\rm s,r} = \frac{A_{\rm s,r}}{h\left(\frac{1+\beta}{2}+K_{\beta}\right)}$ • $\mu\varepsilon$:
		$K_{\beta} = \rho (4, 5\rho = 8, 5\rho + 7, 2)$
		1 ια τον κομρό με $M_{Ed,2}$.
		$k_{\rm s,r} = \frac{A_{\rm s,r}}{h\left(\frac{1-\beta}{2}\right)}$

Πίνακας 3.1: Συντελεστής k_s οπλισμού

Στην τιμή του k_s εφαρμόζεται ο παρακάτω μειωτικός συντελεστής k_{slip} για να ληφθεί υπόψη η μείωση στη δυσκαμψία λόγω παραμόρφωσης των διατμητικών ήλων.

$$k_{slip} = \frac{1}{1 + \frac{E_s k_{s,r}}{K_{sc}}}$$
(3.19)

34
Όπου:

$$K_{sc} = \frac{Nk_{sc}}{\nu - \left(\frac{\nu - 1}{1 + \frac{\kappa}{2}}\right)\frac{h_s}{d}}$$
(3.20)

$$v = \sqrt{\frac{(1+\xi)Nk_{sc}ld_s^2}{E_a I_a}}$$
(3.21)

$$\xi = \frac{E_{\alpha}I_{\alpha}}{d_s^2 E_s A_s}$$
(3.22)

3.4 Στροφική ικανότητα κόμβου

Όσον αφορά ένα σύμμικτο κόμβο, ισχύουν όσα αναγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.5 με την προϋπόθεση βέβαια να λαμβάνεται υπόψη ότι η παραμόρφωση της πλάκας σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του σκυροδέματος για την περίπτωση κεντρικής θλίψης, η οποία σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 είναι 2‰.

4 Επίλυση μεταλλικών κόμβων

4.1 Μονόπλευρη διαμόρφωση μεταλλικού κόμβου

4.1.1 Αντοχές βασικών συστατικών μερών

4.1.1.1 Αρνητικές ροπές

Σύμφωνα με τις παραδοχές του πρώτου κεφαλαίου η τρίτη σειρά κοχλιών δεν λαμβάνεται υπόψη καθώς βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο θλίψης.

4.1.1.1.1 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε διάτμηση

Η λυγηρότητα του κορμού του υποστυλώματος ικανοποιεί την απαίτηση του Ευρωκώδικα 3:

 $\frac{d}{t} < 69\varepsilon \Longrightarrow 27.09 < 69\varepsilon = 69$

Εφόσον ο κόμβος είναι μονόπλευρος και ο κορμός του υποστυλώματος δεν είναι ενισχυμένος, η αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση του κορμού του υποστυλώματος θα προκύψει από τη σχέση (2.1): $V_{wa,Rd} = 700.05 kN$.

4.1.1.1.2 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

Για κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα το ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη δίνεται από τη σχέση:

 $b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p$

Όπου:

S = rc για υποστύλωμα ελατής διατομής Η

 $S_p = 2 \times t_p$ καθώς το τμήμα της μετωπικής πλάκας πλησίον του πέλματος είναι επαρκές. Επομένως: b_{eff,c,wc}=30.95cm

Σύμφωνα με τον πίνακα (7.7), για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου, η προσεγγιστική τιμή της παραμέτρου μετασχηματισμού β ισούται με τη μονάδα. Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα (7.6) ο μειωτικός συντελεστής ω για την αλληλεπίδραση με διάτμηση ισούται με το ω1. Δηλαδή ισχύει:

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \times \left(\frac{b_{eff,c,wc}}{A_{vc}}\right)^2}} = 0.827$$

Η λυγηρότητα του κορμού του υποστυλώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{\lambda}_{p} = 0.932 \times \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \times d_{wc} \times f_{y,wc}}{E \times t_{wc}^{2}}} = 0.861$$

Όπου $d_{wc} = h_c - 2 \times (t_{fc} + r_c)$ για υποστύλωμα ελατής διατομής Η. 36 Για $\overline{\lambda_p} > 0.72$ ο μειωτικός συντελεστής ρ για το λυγισμό του ελάσματος προκύπτει από τη σχέση : $\rho = \frac{(\overline{\lambda}_p - 0.2)}{\overline{\lambda_p}^2} = 0.892$.

Ο μειωτικός συντελεστής K_{wc} αγνοείται στη φάση της προκαταρκτικής μελέτης και επομένως θεωρείται ότι ισχύει K_{wc} =1.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τη σχέση (2.3) ισχύει: $F_{c.wc.Rd}$ =590.95kN

4.1.1.1.3 Αντοχή πέλματος και κορμού δοκού σε θλίψη

Η κατάταξη της διατομής IPE360 της δοκού για χάλυβα ποιότητας S235 και για συνθήκες καθαρής κάμψης επιτρέπει την εφαρμογή πλαστικής-πλαστικής μεθόδου, επομένως ο υπολογισμός της αντοχής σχεδιασμού σε ροπή της διατομής της δοκού βασίζεται στην πλαστική θεωρία και προκύπτει ως εξής:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 23946.50 kNcm$$

Τελικά η δύναμη που παραλαμβάνει το κάθε πέλμα της δοκού προκύπτει από τη σχέση (2.4): $F_{c,Rd} = 689.50 kN$.

4.1.1.1.4 Αντοχή πέλματος υποστυλώματος σε εγκάρσια κάμψη

Στην προκειμένη περίπτωση το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με εγκάρσιες νευρώσεις επομένως, τα ενεργά μήκη του ισοδύναμου βραχέως Τ προκύπτουν από τον πίνακα (7.1). Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι αποστάσεις που απαιτούνται για την εύρεση των ενεργών μηκών.



 $m = (w - t_{wc})/2 - 0.8r_c = 32.9mm$ $n = \min(e_{min}, 1.25m) = 41.125mm$

Πρώτη σειρά κοχλιών

Η πρώτη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται ακραία σειρά ως προς τη θέση της. Αν η σειρά κοχλιών θεωρηθεί ως μεμονωμένη, τότε το ενεργό μήκος του ισοδύναμου ταυ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση:

 $l_{eff,1} = \min(\min(2\pi n; \pi n + 2e_1), \min(4m + 1.25e; 2m + 0.625e + e_1)) = 162.05mm$

Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: leff,2= min(4m+1.25e;2m+0.625e+e1)= 162.05mm.

Μηχανισμός Ι

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,1} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 343.70 kNcm$$

Εφόσον το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με ελάσματα, η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,Rd}}{m} = 417.85 kN$$

Μηχανισμός 2

$$M_{pl,2,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,2} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 343.70 kNcm$$

Τελικά η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,2,Rd} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m+n} = 335.25kN$$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 δίνεται από τη σχέση:

 $F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 436.30 kN.$

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 2. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ του υποστυλώματος της πρώτης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: $F_{T,Rd}$ = 335.25kN.

Δεύτερη σειρά κοχλιών

Η δεύτερη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται εσωτερική σειρά ως προς τη θέση της. Αν η σειρά κοχλιών θεωρηθεί ως μεμονωμένη, τότε το ενεργό μήκος του ισοδύναμου ταυ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση: $l_{eff,1} = \min(2\pi n; 4m + 1.25e) = 206.72mm$. Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: leff,2= 4m+1.25e= 244.10mm.

Μηχανισμός Ι

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,1} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 438.40 kNcm$$

Εφόσον το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με ελάσματα, η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,Rd}}{m} = 533.05 kN$$

Μηχανισμός 2

$$M_{pl,2,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,2} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 517.70 kNcm$$

Τελικά η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,2,Rd} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m+n} = 382.30kN$$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 δίνεται από τη σχέση: $F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 382.30 kN.$

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 2. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ του υποστυλώματος της δεύτερης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: $F_{T,Rd}$ =382.30 kN.

Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών

Το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ της συγκεκριμένης ομάδας σειρών κοχλιών για το μηχανισμό 1 δίνεται από τη σχέση:

$$\sum l_{eff,1} = \min(2p_2 + \min(\pi m + p_1; 2e_1 + p_1); p_2 + \min(2m + 0.625e + 0.5p_1; e_1 + 0.5p_1))$$

Οπού p_i το κατακόρυφο συνεργαζόμενο πλάτος για την i σειρά κοχλιών. Εν προκειμένω:

p1=110.00mm p2= (110.00+220.00)/2= 165.00mm

Επομένως $\sum l_{eff,1} = 260.00mm$ Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2: $\sum l_{eff,2} = p_2 + \min(2m + 0.625e + 0.5p_1; e_1 + 0.5p) = 260.00mm$

Μηχανισμός Ι

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,1} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 551.40 kNcm$$

Εφόσον το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με ελάσματα, η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,Rd}}{m} = 670.40 kN$$

Μηχανισμός 2

$$M_{pl,2,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,2} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 551.40 kNcm$$

Τελικά η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,2,Rd} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m+n} = 633.80 kN$$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 δίνεται από τη σχέση: $F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 872.65 kN$.

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 2. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ του υποστυλώματος της συγκεκριμένης ομάδας σειρών κοχλιών περιορίζεται στα: $F_{T,Rd}$ = 633.80kN.

4.1.1.1.5 Αντοχή μετωπικής πλάκας σε κάμψη

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι αποστάσεις που απαιτούνται για την εύρεση των ενεργών μηκών.



 $n=\min(e_{min},1.25m)=60mm$

Πρώτη σειρά κοχλιών •

Η πρώτη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται ως σειρά κοχλιών εκτός του εφελκυόμενου πέλματος της δοκού. Θεωρώντας τη σειρά κοχλιών ως μεμονωμένη, το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση: $l_{eff,1} = \min(l_{eff,nc}; l_{eff,cp})$

Όπου:

$$\begin{split} l_{e\!f\!f,nc} &= \min \left(4m_x + 1.25e_x; e + 2m_x + 0.625e_x; 0.5b_p; 0.5w + 2m_x + 0.625e_x \right) = 120.00mm \\ l_{e\!f\!f,cp} &= \min \left(2\pi m_x; \pi m_x + w; \pi m_x + 2e \right) = 208.66mm \\ \text{Επομένως, } l_{e\!f\!f,l} = 120.00mm. \\ \text{Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: } l_{e\!f\!f,2} = l_{e\!f\!f,nc} = 120.00mm \end{split}$$

Μηχανισμός Ι

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,1} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 440.60 kNcm$$

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,Rd}}{m} = 530.70 kN$$

Μηχανισμός 2

$$M_{pl,2,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,2} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 440.60 kNcm$$

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,2,Rd} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m+n} = 360.35kN$$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 δίνεται από τη σχέση: $F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 436.30 kN$.

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 2. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ της μετωπικής πλάκας της πρώτης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: F_{T,Rd}= 360.35kN.

Δεύτερη σειρά κοχλιών

Η δεύτερη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται ως πρώτη σειρά κοχλιών κάτω από το εφελκυόμενο πέλμα της δοκού. Θεωρώντας τη σειρά κοχλιών ως μεμονωμένη, το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση: $l_{eff,1} = \min(2\pi n; an) = 320.90mm$

Όπου το α προκύπτει από τον πίνακα (7.4) για $\lambda 1 = \frac{m}{m+e} = \frac{52.60}{52.60+60.00} = 0.467$ και

$$\lambda 2 = \frac{m_2}{m+e} = \frac{50.51}{52.60+60.00} = 0.40.449$$
 ίσο με 6.10.

Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: $l_{eff,2} = am = 320.90mm$

Μηχανισμός Ι

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,1} \times t_{f}^{2} \times f_{y}}{\gamma_{M0}} = 1178.30 kNcm$$

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times M_{pl,Rd}}{m} = 895.95 kN$$

Μηχανισμός 2

$$M_{pl,2,Rd} = 0.25 \times \frac{\sum l_{eff,2} \times t_f^{2} \times f_y}{\gamma_{M0}} = 1178.30 kNcm$$

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times M_{pl,2,Rd} + n \times \sum F_{t,Rd}}{m+n} = 441.75kN$$

Μηχανισμός 3 Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 δίνεται από τη σχέση: $F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 436.30 kN$

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 3. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ της μετωπικής πλάκας της δεύτερης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: F_{T,Rd}= 436.30kN.

• Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών

Δεν μπορεί να προσομοιωθεί με ισοδύναμο βραχύ Τ καθώς η πρώτη σειρά κοχλιών βρίσκεται στο προεξέχον τμήμα της μετωπικής πλάκας.

4.1.1.1.6 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό

Όπως αναφέρθηκε στο 2° κεφάλαιο σε μία κοχλιωτή σύνδεση το ενεργό πλάτος beff,t,wc του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος Τ που αντιστοιχεί στο πέλμα του υποστυλώματος. Επομένως ισχύει:

- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,nc} = 162.05 \text{mm}$ gia the prist seiral koclumn.
- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,cp} = 206.70 \text{ mm}$ gia th deútern seirá koclión.
- $b_{eff,t,wc} = \sum l_{eff,1} = 260.00 \text{mm}$ για την ομάδα της πρώτης και δεύτερης σειράς κογλιών.

Ο μειωτικός συντελεστής ω για την πιθανή επιρροή της διάτμησης στον κορμό του υποστυλώματος προσδιορίζεται από τον πινάκα 7.6 χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα beff,t,wc και θεωρώντας β=1 για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου.

Πρώτη σειρά κοχλιών: $ω = ω_1 = 0.942 \Longrightarrow F_{t,wc,Rd} = 394.80 kN$

Δεύτερη σειρά κοχλιών: $\omega = \omega_1 = 0.911 \Rightarrow F_{t.wc.Rd} = 486.90 kN$

Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $\omega = \omega_1 = 0,869 \Longrightarrow F_{t,wc,Rd} = 584.20 kN$

4.1.1.1.7 Αντοχή κορμού δοκού σε εφελκυσμό

Η πρώτη σειρά κοχλιών βρίσκεται στο προεξέχον τμήμα της μετωπικής πλάκας και ως εκ τούτου δεν εφελκύει τον κορμό της δοκού. Επομένως, για τη δεύτερη σειρά κοχλιών ισχύει beff,t,wb= 320.90mm και η αντοχή σχεδιασμού της σε εφελκυσμό του κορμού της δοκού προκύπτει από τη σχέση:

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \times t_{wb} \times f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 603.30kN$$

4.1.1.2 Θετικές ροπές

Σύμφωνα με τις παραδοχές του πρώτου κεφαλαίου η τρίτη σειρά κοχλιών βρίσκεται μεσα στην πλάκα του σκυροδέματος επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη. 42

- 4.1.1.2.1 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε διάτμηση Λαμβάνεται απ' ευθείας από το υποκεφάλαιο 4.1.1.1 : $V_{wp,Rd} = 700.05 kN$.
- 4.1.1.2.2 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη Λαμβάνεται απ' ευθείας από το υποκεφάλαιο 4.1.1.2 : $F_{c,wc,Rd}$ =590.95kN.
- 4.1.1.2.3 Αντοχή πέλματος και κορμού δοκού σε θλίψη

Λαμβάνεται απ' ευθείας από το υποκεφάλαιο 4.1.1.2 : $F_{c,Rd} = 689.50 kN$.

4.1.1.2.4 Αντοχή πέλματος υποστυλώματος σε εγκάρσια κάμψη

Τα ενεργά μήκη των ισοδύναμων βραχέων Τ που προσομοιώνουν την αντοχή σχεδιασμού του πέλματος του υποστυλώματος σε κάμψη προκύπτουν από τον πίνακα (2.2). Οι αποστάσεις που απαιτούνται για τον υπολογισμό των ενεργών μηκών δίνονται στο παρακάτω σχήμα:



 $m = (w - t_{wc})/2 - 0.8r_c = 32.9mm$ $n = min(e_{min}, 1.25m) = 41.125mm$

Πρώτη σειρά κοχλιών

Η πρώτη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται ακραία σειρά ως προς τη θέση της. Αν η σειρά κοχλιών θεωρηθεί ως μεμονωμένη, τότε το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση:

 $l_{e\!f\!f,1} = \min(\min(2\pi n; \pi n + 2e_1), \min(4m + 1.25e; 2m + 0.625e + e_1)) = 206.72mm$ Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: leff,2= min(4m+1.25e; 2m+0.625e+e1)= 212.05mm.

Μηχανισμός l $M_{pl,1,Rd} = 438.40 kNcm$ Εφόσον το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με ελάσματα, η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι: $F_{T.1.Rd} = 533.05 kN$

Μηχανισμός 2 $M_{pl,2,Rd} = 449.75 kNcm$

Τελικά η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 προκύπτει: $F_{T,2,Rd} = 363.90 kN$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 είναι: $F_{T,3,Rd} = 436.30 kN$

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 2. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ του υποστυλώματος της πρώτης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: $F_{T,Rd}$ = 363.90kN.

• Δεύτερη σειρά κοχλιών

Η δεύτερη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται εσωτερική σειρά ως προς τη θέση της. Αν η σειρά κοχλιών θεωρηθεί ως μεμονωμένη, τότε το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση:

 $l_{eff,1} = \min(2\pi m; 4m + 1.25e) = 206.72mm$

Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: leff,2= 4m+1.25e= 244.10mm.

Μηχανισμός 1 $M_{pl.l.Rd} = 438.40 kNcm$

Εφόσον το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με ελάσματα, η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι: $F_{T,1,Rd} = 533.05 kN$

$$\begin{split} &M\eta \chi a vi σμός 2 \\ &M_{pl,2,Rd} = 517.70 kNcm \\ &\text{Τελικά η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με:} \\ &F_{T,2,Rd} = 382.30 kN \end{split}$$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 ισούται με: $F_{T,3,Rd} = 436.30 kN$

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 2. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ του υποστυλώματος της δεύτερης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: $F_{T,Rd}$ = 382.30kN.

• Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών

Το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ της συγκεκριμένης ομάδας σειρών κοχλιών για το μηχανισμό 1 δίνεται από τη σχέση:

$$\sum_{e_{ff,1}} l_{e_{ff,1}} = \min(2p_2 + \min(\pi m + p_1; 2e_1 + p_1); p_2 + \min(2m + 0.625e + 0.5p_1; e_1 + 0.5p_1))$$

Οπού p_i το κατακόρυφο συνεργαζόμενο πλάτος για την iσειρά κοχλιών.

44

Ev προκειμένω: p1= 220.00mm p2= (220.00+110.00)/2= 165.00mm

Επομένως $\sum l_{eff,1} = 365.00mm$ Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2: $\sum l_{eff,2} = p_2 + \min(2m + 0.625e + 0.5p_1; e_1 + 0.5p) = 365.00mm$

 $M_{pl,1,Rd} = 774.10 kNcm$ Εφόσον το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με ελάσματα, η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι: $F_{T,1,Rd} = 941.20 kN$

Μηχανισμός 2 $M_{pl,2,Rd} = 774.10 kNcm$

Τελικά η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με: $F_{T,2,Rd} = 693.95 kN$

Μηχανισμός 3

Μηχανισμός Ι

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 προκύπτει: $F_{T,3,Rd} = 872.64 kN$

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 2. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ του υποστυλώματος της συγκεκριμένης ομάδας σειρών κοχλιών περιορίζεται στα: F_{T,Rd}=693.95kN.

4.1.1.2.5 Αντοχή μετωπικής πλάκας σε κάμψη

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι αποστάσεις που απαιτούνται για την εύρεση των ενεργών μηκών.



 $n = \min(e, 1.25m) = 60mm$

• Πρώτη σειρά κοχλιών

Η πρώτη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται ως πρώτη σειρά κοχλιών κάτω από το εφελκυόμενο πέλμα της δοκού. Θεωρώντας τη σειρά κοχλιών ως μεμονωμένη, το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση: $l_{eff,l} = \min(2\pi m; am) = 320.90mm$

Όπου το α προκύπτει από τον πίνακα (7.4) για $\lambda 1 = \frac{m}{m+e} = \frac{52.60}{52.60+60.00} = 0.467$ και

 $\lambda 2 = \frac{m_2}{m+e} = \frac{50.51}{52.60+60.00} = 0.449$ ίσο με 6.10. Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: $l_{eff,2} = am = 320.90mm$

Mηχανισμός 1 $M_{pl,1,Rd} = 1178.30 kNcm$ Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι: $F_{T,1,Rd} = 895.95 kN$

Mηχανισμός 2 $M_{pl,2,Rd} = 1178.30 kN cm$ Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με: $F_{T,2,Rd} = 441.75 kN$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 ισούται με: $F_{T,3,Rd} = 436.30 kN$

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 3. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ της μετωπικής πλάκας της πρώτης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: F_{T,Rd}= 436.30kN.

• Δεύτερη σειρά κοχλιών

Η δεύτερη σειρά κοχλιών χαρακτηρίζεται ως εσωτερική σειρά κοχλιών. Θεωρώντας τη σειρά κοχλιών ως μεμονωμένη, το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ για το μηχανισμό 1 προκύπτει από τη σχέση: $l_{eff,1} = \min(2\pi m; 4m + 1.25e) = 285.40mm$ Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2 ισχύει: $l_{eff,2} = 4m + 1.25e = 285.40mm$

Mηχανισμός 1 $M_{pl,1,Rd} = 1048.05 kNcm$ Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι: $F_{T,1,Rd} = 796.90 kN$

Μηχανισμός 2 $M_{pl,2,Rd} = 11048.05 kN cm$ Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με: $F_{T,2,Rd} = 418.60 kN$

Μηχανισμός 3 Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 ισούται με: $F_{T,3,Rd} = 436.30 kN$

46

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 3. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ της μετωπικής πλάκας της δεύτερης σειράς κοχλιών περιορίζεται στα: F_{T,Rd}= 418.60kN.

• Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών

Το ενεργό μήκος του ισοδύναμου βραχέως Τ της συγκεκριμένης ομάδας σειρών κοχλιών για το μηχανισμό 1 δίνεται από τη σχέση:

$$\sum l_{eff,1} = \min(\pi m + p_1 + 2p_2; 0.5p_1 + am - 2m - 0.625e)$$

Οπού: pi το κατακόρυφο συνεργαζόμενο πλάτος για την i σειρά κοχλιών.

Εν προκειμένω: p1=220.00mm

p2= (220.00+110.00)/2= 165.00mm

Επομένως $\sum l_{eff,1} = 453.20 mm$

Αντίστοιχα για το μηχανισμό 2: $\sum l_{e\!f\!f,2} = 0.5 p_1 + am - 2m - 0.625e + p_2 = 453.20mm$

Μηχανισμός Ι

 $M_{pl,1,Rd} = 1664.05 kNcm$

Εφόσον το πέλμα του υποστυλώματος δεν ενισχύεται με ελάσματα, η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 1 είναι: $F_{T.1.Rd} = 1265.30 kN$

Μηχανισμός 2 Μ _{pl,2,Rd} =1664.05kNcm

Τελικά η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με τον μηχανισμό 2 ισούται με: $F_{T,2,Rd} = 760.50 kN$

Μηχανισμός 3

Η αντοχή για αστοχία σύμφωνα με το μηχανισμό 3 είναι: $F_{T,3,Rd} = 872.65 kN$.

Από τους τρείς μηχανισμούς αστοχίας, ασθενέστερος είναι ο μηχανισμός 3. Επομένως, η αντοχή του βραχέως Τ του υποστυλώματος της συγκεκριμένης ομάδας σειρών κοχλιών περιορίζεται στα: F_{T,Rd}= 760.50kN.

4.1.1.2.6 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό

Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.1.7, σε μία κοχλιωτή σύνδεση το ενεργό πλάτος $b_{eff,t,wc}$ του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος Τ που αντιστοιχεί στο πέλμα του υποστυλώματος.

Επομένως ισχύει:

- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,nc} = 206.72 \text{ mm}$ gia the prist seiral koclide.
- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,cp} = 206.72 mm$ gia th deútern seirá koclión.
- $b_{eff,t,wc} = \sum l_{eff,1} = 365.00 \text{mm}$ για την ομάδα της πρώτης και δεύτερης σειράς κογλιών.

Ο μειωτικός συντελεστής ω για την πιθανή επιρροή της διάτμησης στον κορμό του υποστυλώματος προσδιορίζεται από τον πινάκα 6.3 χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα $b_{eff,t,wc}$ και θεωρώντας β=1 για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου.

- Πρώτη σειρά κοχλιών: $ω = ω_1 = 0.911 \Rightarrow F_{t.wc.Rd} = 486.90 kN$
- Δεύτερη σειρά κοχλιών: $ω = ω_1 = 0.911 \Longrightarrow F_{t.wc.Rd} = 486.90 kN$
- Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $ω = ω_1 = 0,781 ⇒ F_{t,wc,Rd} = 737.30kN$

4.1.1.2.7 Αντοχή κορμού δοκού σε εφελκυσμό

Το ενεργό πλάτος $b_{\rm eff,t,wb}$ του κορμού της δοκού σε εφελκυσμό πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος ταυ που αντιστοιχεί στη μετωπική πλάκα σε κάμψη για μία μεμονωμένη σειρά κοχλιών ή μια ομάδα κοχλιών.

Πρώτη σειρά κοχλιών: $b_{eff,t,wc} = 320.90 mm \Rightarrow F_{t,wb,Rd} = 603.30 kN$ Δεύτερη σειρά κοχλιών: $b_{eff,t,wc} = 285.40 mm \Rightarrow F_{t,wb,Rd} = 536.60 kN$ Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $b_{eff,t,wc} = 453.20 mm \Rightarrow F_{t,wb,Rd} = 852.00 kN$

4.1.2 Ροπές αντοχής κόμβου

Η εύρεση της ενεργούς αντοχής σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ της σειράς κοχλιών r πραγματοποιείται σύμφωνα με τους κανόνες που επιβάλλει το μέρος 1.8 του Ευρωκώδικα 3, οι οποίοι αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.3.

4.1.2.1 Αρνητικές ροπές

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζονται οι ενεργές αντοχές της πρώτης και της δεύτερης σειράς κοχλιών για αρνητική φορά ροπών, εφαρμόζοντας τους προαναφερθέντες κανόνες.

	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε		700.05-394.80=		700.05kN
διάτμηση		305.20 kN		700.05KIN
Κορμός υποστυλώματος σε		590.90-394.80=		590.90kN
θλίψη		196.10kN		
Πέλμα και κορμός δοκού σε		689.50-394.80= -		689.50kN
θλίψη		294.70kN		
Πέλμα υποστυλώματος σε	335 25kN	min{382.30;633.80-	622 901-N	
κάμψη	555.25KIN	335.25kl 335.25}= 298.55kN	033.00KIN	
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	360.35kN			
		436.30kN		
Κορμός υποστυλώματος σε	E 204 80kM	min{486.90;584.20-	584.20kN	
εφελκυσμό	374.00KIN	394.80}= 189.40kN		
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό		603.30kN		
Ftr,Rd	335.25kN	189.40kN		

Πίνακας 4.1: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

Τελικά, η ροπή αντοχής προκύπτει: $M_{B,Rd}^{-} = 335.25 \times 393.25 + 189.40 \times 283.25 = 185.50 kNm$



Σχήμα 4.1: Μηχανικό προσομοίωμα αντοχής για αρνητικές ροπές

4.1.2.2 Θετικές ροπές

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζονται οι ενεργές αντοχές της πρώτης και της δεύτερης σειράς κοχλιών για θετική φορά ροπών, εφαρμόζοντας τους προαναφερθέντες κανόνες.

	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε		700.05-486.90=		700.051/N
διάτμηση		213.15 kN		700.03KIN
Κορμός υποστυλώματος σε		590.90-486.90=		590.90kN
θλίψη		104.00kN		
Πέλμα και κορμός δοκού σε		689.50-486.90= -		689.50kN
θλίψη		202.60kN		
Πέλμα υποστυλώματος σε	262.001-N	min{382.30;693.95-	693.95kN	
κάμψη	303.90KIN	363.90}= 330.05kN		
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	436.30kN	min{418.60;760.50-	760.50kN	
		436.30}= 330.05kN		
Κορμός υποστυλώματος σε	486.90kN	min{486.90;737.30-	737.30kN	
εφελκυσμό		486.90}=250.40kN		
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό	603.30kN	min{536.60;852.00-	852.00kN	
		603.30}=248.70kN		
Ftr,Rd	363.90kN	104.00kN		

Πίνακας 4.2: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

Τελικά, η ροπή αντοχής προκύπτει:

 $M_{B,Rd}^+ = 363.90 \times 283.65 + 104.00 \times 63.65 = 109.85 kNm$



Σχήμα 4.2: Μηχανικό προσομοίωμα αντοχής για θετικές ροπές

4.1.3 Στροφική δυσκαμψία κόμβου

4.1.3.1 Αρνητικές ροπές

Για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου και δύο σειρές κοχλιών σε εφελκυσμό οι συντελεστές ki που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής: k1, k2, keq.



Σχήμα 4.3: Μηχανικό προσομοίωμα δυσκαμψίας για αρνητικές ροπές

To k1 υπολογίζεται ως εξής: $k_1 = \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = \frac{0.38 \times 57.33 cm^2}{1.00 \times 33.825 cm} = 0.644 cm$.

Όπου ο μοχλοβραχίονας z υπολογίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 7.5 του παραρτήματος για την περίπτωση κοχλιωτής σύνδεσης με προεξέχουσα μετωπική πλάκα και δυο μόνο ενεργοποιημένες εφελκυόμενες σειρές κοχλιών.

To k2 υπολογίζεται ως εξής: $k_2 = \frac{0.7 \times b_{e\!f\!f,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 30.96 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.102 cm$. To keff,1 προκύπτει από τη σχέση: $k_{e\!f\!f,1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,1}} + \frac{1}{k_{4,1}} + \frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{10,1}}}$

Όπου:

$$k_{3,1} = \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 16.20 cm \times 1.10 cm}{29.8 cm} = 0.418 cm$$

$$k_{4,1} = \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 9.50 cm \times 1.90^3 cm^3}{3.29^3 cm^3} = 1.647 cm$$

$$k_{5,1} = \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_p^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 12.00 cm \times 2.50^3 cm^3}{3.32^3 cm^3} = 4.610 cm$$

$$k_{10,1} = \frac{1.6 \times A_s}{L_b} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^2}{6.80 cm} = 0.713 cm$$

Επομένως,
$$k_{eff,1} = \frac{1}{\frac{1}{0.418} + \frac{1}{1.647} + \frac{1}{4.610} + \frac{1}{0.713}} = 0.216cm$$

To keff,2 προκύπτει από τη σχέση : $k_{e\!f\!f,2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,2}} + \frac{1}{k_{4,2}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10,2}}}$

Όπου:

$$\frac{1}{0.534} + \frac{1}{2.860} + \frac{1}{2.519} + \frac{1}{0.713}$$

$$\text{Teliká, } z_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1^2 + k_{eff,2} \times h_2^2}{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2} = \frac{0.216 \times 39.325^2 + 0.248 \times 28.325^2}{0.216 \times 39.325 + 0.248 \times 28.325} = 34.346cm$$

Επομένως, $k_{eq} = \frac{0.216 \times 39.325 + 0.248 \times 28.325}{34.346} = 0.452$ Η στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής:

$$S = \frac{21000kN/cm^2 \times 33.825^2 cm^2}{1 \times \left[\frac{1}{0.644cm} + \frac{1}{0.102cm} + \frac{1}{0.452cm}\right]} = 17706.95kNm$$

4.1.3.2 Θετικές ροπές

Για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου και δύο σειρές κοχλιών σε εφελκυσμό οι συντελεστές ki που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής: k1, k2, keq.



Σχήμα 4.4: Μηχανικό προσομοίωμα δυσκαμψίας για θετικές ροπές

To k1 υπολογίζεται ως εξής: $k_1 = \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = \frac{0.38 \times 57.33 cm^2}{1.00 \times 17.365 cm} = 1.254 cm$.

Όπου ο μοχλοβραχίονας z υπολογίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 7.5 του παραρτήματος, για την περίπτωση κοχλιωτής σύνδεσης με μετωπική πλάκα και δυο ή περισσότερες εφελκυόμενες σειρές κοχλιών.

Το k2 υπολογίζεται ως εξής:.
$$k_2 = \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 30.96 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.799 cm$$

Το keff,1 προκύπτει από τη σχέση: $k_{eff,1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,1}} + \frac{1}{k_{4,1}} + \frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{10,1}}}$
Όπου:

$$k_{3,1} = \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 20.67 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.534 cm$$
$$k_{4,1} = \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 20.00 cm \times 1.90^3 cm^3}{3.29^3 cm^3} = 3.467 cm$$
$$k_{5,1} = \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_p^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 28.54 cm \times 2.50^3 cm^3}{5.26^3 cm^3} = 2.758 cm$$

52

$$k_{10,1} = \frac{1.6 \times A_s}{L_b} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^2}{6.80 cm} = 0.713 cm$$

Επομένως: $k_{e\!f\!f,1} = \frac{1}{\frac{1}{0.534} + \frac{1}{3.467} + \frac{1}{2.758} + \frac{1}{0.713}} = 0.255 cm$

To keff,2 προκύπτει από τη σχέση: $k_{e\!f\!f,2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,2}} + \frac{1}{k_{4,2}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10,2}}}$

Όπου:

$$\begin{split} k_{3,2} &= \frac{0.7 \times b_{eff,x,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 20.67 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.534 cm \\ k_{4,2} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 16.50 cm \times 1.90^3 cm^3}{3.29^3 cm^3} = 2.860 cm \\ k_{5,2} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_p^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 16.50 cm \times 2.50^3 cm^3}{5.26^3 cm^3} = 1.594 cm \\ k_{10,2} &= \frac{1.6 \times A_s}{L_b} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^2}{6.80 cm} = 0.713 cm \\ \text{Еπομένως: } k_{eff,2} &= \frac{1}{\frac{1}{0.534} + \frac{1}{2.860} + \frac{1}{1.594} + \frac{1}{0.713}} = 0.235 cm \\ \text{Επομένως: } k_{eff,1} \times h_1^2 + k_{eff,2} \times h_2^2} = \frac{0.255 \times 28.365^2 + 0.235 \times 6.365^2}{0.255 \times 28.365 + 0.235 \times 6.365} = 24.595 cm \\ \text{Еπομένως, } k_{eq} &= \frac{0.255 \times 28.365 + 0.235 \times 6.365}{24.595} = 0.355 . \\ \text{H στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής: } \\ S &= \frac{21000 kN / cm^2 \times 17.365^2 cm^2}{1 \times \left[\frac{1}{1.254 cm} + \frac{1}{0.799 cm} + \frac{1}{0.355 cm}\right]} = 13013.80 kNm . \end{split}$$

4.2 Αμφίπλευρη διαμόρφωση μεταλλικού κόμβου

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 μία αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου μπορεί να προσομοιωθεί ως δύο διακριτοί αλλά αλληλεπιδρώντες κόμβοι, ένας σε κάθε πλευρά. Επομένως, στην προκειμένη περίπτωση, ο κόμβος της αριστερής πλευράς αντιμετωπίζεται ως ένας μεμονωμένος κόμβος στον οποίο δρουν θετικές ροπές, ενώ στον κόμβο δεξιά δρουν αρνητικές ροπές.

4.2.1 Διαφοροποιήσεις σε σχέση με την μονόπλευρη διαμόρφωση

Οι απαιτούμενες αντοχές των βασικών συστατικών μερών υπολογίστηκαν στα υποκεφάλαια 4.1.1 και 4.1.2 για αρνητικές και θετικές ροπές αντίστοιχα, όμως, υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις στην αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη και σε

εφελκυσμό, εξ' αιτίας της αλληλεπίδρασης των κόμβων, οι οποίες επισημαίνονται στη συνέχεια.

4.2.1.1 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

Για κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα το ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη δίνεται από τη σχέση:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p$$

Όπου:

S = rc για υποστύλωμα ελατής διατομής Η

 $S_p = 2 \times t_p$ καθώς το τμήμα της μετωπικής πλάκας πλησίον του πέλματος είναι επαρκές. Επομένως: $b_{eff,c,wc}$ =30.95cm

Σύμφωνα με τον πίνακα (7.7), για αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου στον οποίο ισχύει $M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$, η προσεγγιστική τιμή της παραμέτρου μετασχηματισμού β ισούται με 2. Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα (7.6) ο μειωτικός συντελεστής ω για την αλληλεπίδραση με διάτμηση ισούται με το ω2. Δηλαδή ισχύει:

$$\omega = \omega 2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5.2 \times \left(\frac{b_{eff,c,wc}}{A_{vc}}\right)^2}} = 0.594$$

Η λυγηρότητα του κορμού του υποστυλώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{\lambda}_{p} = 0.932 \times \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \times d_{wc} \times f_{y,wc}}{E \times t_{wc}^{2}}} = 0.861 > 0.72 \Longrightarrow \rho = 0.891$$

Όπου $d_{wc} = h_c - 2 \times (t_{fc} + r_c) = 29.8 \text{ cm}$ για υποστύλωμα ελατής διατομής Η. Ο μειωτικός συντελεστής K_{wc} αγνοείται στη φάση της προκαταρκτικής μελέτης και επομένως θεωρείται ότι ισχύει K_{wc} =1.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τη σχέση (2.3) ισχύει: $F_{c,wc,Rd}$ =423.85kN.

4.2.1.2 Αντοχή κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό

4.2.1.2.1 Αρνητικές ροπές

Όπως αναφέρθηκε στο 2° κεφάλαιο σε μία κοχλιωτή σύνδεση το ενεργό πλάτος $b_{eff,t,wc}$ του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος Τ που αντιστοιχεί στο πέλμα του υποστυλώματος. Επομένως ισχύει:

- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,nc} = 162.05 \text{mm}$ για την πρώτη σειρά κοχλιών.
- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,cp} = 206.70 \text{ mm}$ gia th deútern seirá kocliún.
- $b_{eff,t,wc} = \sum l_{eff,1} = 260.00 \text{mm}$ για την ομάδα της πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών.

Ο μειωτικός συντελεστής ω για την πιθανή επιρροή της διάτμησης στον κορμό του υποστυλώματος προσδιορίζεται από τον πινάκα 7.6 χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα b_{eff,t,wc}

και θεωρώντας β=2 για αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου. Τα $F_{t,wc,Rd}$ προκύπτουν από τη σχέση (2.9).

Πρώτη σειρά κοχλιών: $ω = ω2 = 0.816 \Rightarrow F_{t,wc,Rd} = 341.70kN$ Δεύτερη σειρά κοχλιών: $ω = ω_2 = 0.742 \Rightarrow F_{t,wc,Rd} = 396.30kN$ Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $ω = ω_2 = 0.660 \Rightarrow F_{t,wc,Rd} = 443.75kN$

4.2.1.2.2 Θετικές ροπές

Αντίστοιχα για τις θετικές ροπές ισχύει:

- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,nc} = 206.72 \text{ mm}$ gia the prist seiral koclige.
- $b_{eff,t,wc} = l_{eff,cp} = 206.72 \text{mm}$ gia th deútern seirá koclión.
- $b_{eff,t,wc} = \sum l_{eff,1} = 365.00 \text{mm}$ για την ομάδα της πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών.

Ο μειωτικός συντελεστής ω για την πιθανή επιρροή της διάτμησης στον κορμό του υποστυλώματος προσδιορίζεται από τον πινάκα 7.6 χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα $b_{eff,t,wc}$ και θεωρώντας β=2 για αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου. Τα $F_{t,wc,Rd}$ προκύπτουν από τη σχέση (2.9).

- Πρώτη σειρά κοχλιών: $ω = ω_2 = 0.742 \Rightarrow F_{t.wc.Rd} = 396.30 kN$
- Δεύτερη σειρά κοχλιών: $ω = ω_2 = 0.742 ⇒ F_{t,wc,Rd} = 396.30 kN$
- Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $ω = ω_2 = 0.530 ⇒ F_{t,wc,Rd} = 500.75kN$

4.2.2 Ροπές αντοχής κόμβου

Η εύρεση της ενεργούς αντοχής σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ της σειράς κοχλιών r πραγματοποιείται σύμφωνα με τους κανόνες που επιβάλλει το μέρος 1.8 του Ευρωκώδικα 3, οι οποίοι αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.2.

4.2.2.1 Αρνητικές ροπές

Σύμφωνα με τα υποκεφάλαια 4.1, 4.2.1, 4.2.2.1 οι τιμές των αντοχών των βασικών συστατικών μερών για αρνητικές ροπές στην περιοχή του κόμβου είναι οι εξής: Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση: $V_{wp,Rd} = 700.05kN$

Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη: $F_{c,wc,Rd} = 423.85 kN$ Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη: $F_{c,Rd} = 689.50 kN$

Πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη: Πρώτη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}= 335.25kN Δεύτερη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}=382.30kN Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: F_{T,Rd}= 633.80kN Μετωπική πλάκα σε κάμψη: Πρώτη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}= 360.35kN Δεύτερη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}= 436.35kN

Κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό: Πρώτη σειρά κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 341.70 kN$ Δεύτερη σειρά κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 396.30 kN$ Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 443.75 kN$

Κορμός δοκού σε εφελκυσμό: Δεύτερη σειρά κοχλιών: $F_{t,wb,Rd} = 603.30 kN$

	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε		700.05/2-341.70=		700.05/2-350.03kN
διάτμηση		8.30 kN		700.03/2-330.03KIN
Κορμός υποστυλώματος σε		423.85-341.70=		423.85kN
θλίψη		82.15kN		
Πέλμα και κορμός δοκού σε		689.50-341.70=		689 50kN
θλίψη		347.80kN		009.JUKIN
Πέλμα υποστυλώματος σε	225 251-N	min{382.30;633.80-	633.80kN	
κάμψη	555.25KIN	335.25}= 298.55kN		
	360 35kN			
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	500.55Ki (436.30kN		
Κορμός υποστυλώματος σε	241 70kN	min{396.30;443.75-	443.75kN	
εφελκυσμό	541.70KN	341.70}= 102.05kN		
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό		603.30kN		
Ftr,Rd	335.25kN	8.30kN		

Πίνακας 4.3: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειρών κοχλιών σε εφελκυσμό

Τελικά, η ροπή αντοχής προκύπτει:

 $M_{B,Rd}^- = 335.25 \times 393.25 + 8.30 \times 28.25 = 132.10 kNm$

4.2.2.2 Θετικές ροπές

Σύμφωνα με τα υποκεφάλαια 4.1, 4.2.1, 4.2.2.2 οι τιμές των αντοχών των βασικών συστατικών μερών για θετικές ροπές στην περιοχή του κόμβου είναι οι εξής: Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση: $V_{wp,Rd} = 700.05kN$

Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη: $F_{c,wc,Rd} = 423.85 kN$

Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη: $F_{c,Rd} = 689.50 kN$

Πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη: Πρώτη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}= 363.90kN Δεύτερη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}=382.30 kN Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: F_{T,Rd}= 693.95kN Μετωπική πλάκα σε κάμψη: Πρώτη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}= 436.30kN Δεύτερη σειρά κοχλιών: F_{T,Rd}= 418.60kN Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών :F_{T,Rd}= 763.95kN

Κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό: Πρώτη σειρά κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 396.30 kN$ Δεύτερη σειρά κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 396.30 kN$ Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 500.75 kN$

Κορμός δοκού σε εφελκυσμό: Πρώτη σειρά κοχλιών: $F_{t,wb,Rd} = 613.20kN$ Δεύτερη σειρά κοχλιών: $F_{t,wb,Rd} = 536.60kN$ Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $F_{t,wb,Rd} = 861.90kN$

Intractory III E				
	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε		700.05/2-396.30=		
διάτμηση		-46.25kN		700.05/2=350.02kN
Κορμός υποστυλώματος σε		423.85-396.30=		
θλίψη		27.55kN		423.85kN
Πέλμα και κορμός δοκού σε		689.50-396.30= -		
θλίψη		293.20kN		689.50kN
Πέλμα υποστυλώματος σε		min{382.30;693.95-		
κάμψη	363.90kN	363.90}= 330.05kN	693.95kN	
		min{418.60;760.50-		
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	436.30kN	436.30}= 330.05kN	760.50kN	
Κορμός υποστυλώματος σε		min{396.30;500.75-		
εφελκυσμό	396.30kN	396.30}= 104.45kN	500.75kN	
		min{536.60;852.00-		
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό	613.20kN	603.30}=248.70kN	852.00kN	
Ftr,Rd	363.90kN	0		

Πίνακας 4.4: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

Τελικά, η ροπή αντοχής προκύπτει: $M_{B,Rd}^+ = 363.90 \times 283.65 = 103.20 kNm$

4.2.3 Στροφική δυσκαμψία κόμβου

Σε μία αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου δοκού-υποστυλώματος, κάθε κόμβος πρέπει να προσομοιώνεται ως ξεχωριστό στροφικό ελατήριο, στο οποίο κάθε ελατήριο διαθέτει μία καμπύλη ροπής-στροφής η οποία ενσωματώνει τη συμπεριφορά του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση, καθώς επίσης και την επιρροή της αντίστοιχης σύνδεσης.

4.2.3.1 Αρνητικές ροπές

Για αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου με άνισες ροπές εκατέρωθεν, και δύο σειρές κοχλιών ενεργοποιημένες σε εφελκυσμό οι απαραίτητοι συντελεστές είναι οι k_1 , k_2 και k_{eq} .

Τα k_1 και k_2 υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = \frac{0.38 \times 57.33 cm^2}{2.00 \times 33.825 cm} = 0.322 cm \\ k_2 &= \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 30.97 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.800 cm \,. \end{aligned}$$

To keff,1 υπολογίζεται από τη σχέση : $k_{e\!f\!f,1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,1}} + \frac{1}{k_{4,1}} + \frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{10,1}}}$

Όπου:

$$\begin{aligned} k_{3,1} &= \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 16.20 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.419 cm \\ k_{4,1} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}}{m^3} = \frac{0.9 \times 9.5 cm \times 1.90^3 cm^3}{3.29^3 cm^3} = 1.647 cm \\ k_{5,1} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_p}{m^3} = \frac{0.9 \times 12.00 cm \times 2.50^3 cm^3}{3.32^3 cm^3} = 4.611 cm \\ k_{10,1} &= \frac{1.6 \times A_s}{L_b} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^2}{6.80 cm} = 0.713 cm \\ \text{Еπομένως: } k_{eff,1} &= \frac{1}{1 cm} \frac{1}$$

$$\frac{1}{0.419} + \frac{1}{1.647} + \frac{1}{4.611} + \frac{1}{0.713}$$

To keff,2 υπολογίζεται από τη σχέση:
$$k_{e\!f\!f,2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,2}} + \frac{1}{k_{4,2}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10,2}}}$$

Όπου:

Eπομένως:
$$k_{eff,2} = \frac{1}{\frac{1}{0.534} + \frac{1}{2.860} + \frac{1}{2.519} + \frac{1}{0.713}} = 0.249 cm}{\frac{1}{\frac{1}{0.534} + \frac{1}{2.860} + \frac{1}{2.519} + \frac{1}{0.713}}}$$

Τελικά, $z_{eq} = \frac{k_{eff,1} \times h_1^2 + k_{eff,2} \times h_2^2}{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2} = \frac{0.217 \times 39.325^2 + 0.249 \times 28.325^2}{0.217 \times 39.325 + 0.249 \times 28.325} = 34.347 cm$

58

Επομένως, $k_{eq} = \frac{0.217 \times 39.325 + 0.249 \times 28.325}{34.347} = 0.454$ Η στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής: $s = \frac{21000 kN/cm^2 \times 33.825^2 cm^2}{36636.00 kNm}$.

$$S = \frac{1}{1 \times \left[\frac{1}{0.322cm} + \frac{1}{0.800cm} + \frac{1}{0.454cm}\right]} = 36636.00kNm$$

4.2.3.2 Θετικές ροπές

Για αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου, με άνισες ροπές εκατέρωθεν , και μια σειρά κοχλιών ενεργοποιημένη σε εφελκυσμό οι απαραίτητοι συντελεστές είναι οι k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 και k_{10} .

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = \frac{0.38 \times 57.33 cm^2}{2.00 \times 33.825 cm} = 0.322 cm \\ k_2 &= \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 31.05 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.800 cm \,. \\ k_3 &= \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 20.00 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.517 cm \\ k_4 &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 20.00 cm \times 1.90^3 cm^3}{3.29^3 cm^3} = 3.467 cm \\ k_5 &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_p^{-3}}{m^3} = \frac{0.9 \times 29.35 cm \times 2.50^3 cm^3}{5.26^3 cm^3} = 2.836 cm \\ k_{10} &= \frac{1.6 \times A_s}{L_b} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^2}{6.80 cm} = 0.713 cm \end{aligned}$$

στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής:

$$S = \frac{21000kN/cm^2 \times 28.365^2 cm^2}{1 \times \left[\frac{1}{0.322cm} + \frac{1}{0.800cm} + \frac{1}{0.517cm} + \frac{1}{3.467cm} + \frac{1}{2.836cm} + \frac{1}{0.713cm}\right]} = 20275.10kNm$$

5 Επιλύσεις σύμμικτων κόμβων



5.1 Μονόπλευρη διαμόρφωση σύμμικτου κόμβου

Σχήμα 5.1: 3D απεικόνιση σύμμικτου κόμβου

5.1.1 Αντοχές βασικών συστατικών μερών

Η τιμή της αντοχής του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση, όπως επίσης και οι τιμές των αντοχών του πέλματος του υποστυλώματος σε κάμψη, της μετωπικής πλάκας σε κάμψη, του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό και του κορμού της δοκού σε εφελκυσμό, για κάθε σειρά κοχλιών, δεν μεταβάλλονται σε σχέση με τον αντίστοιχο μεταλλικό κόμβο, επομένως λαμβάνονται απ' ευθείας από την επίλυση του μεταλλικού κόμβου.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η αντοχή του πέλματος και του κορμού της δοκού σε θλίψη και η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη μεταβάλλονται, το μεν λόγω συμβολής της πλάκας και του οπλισμού της στην ροπή αντοχής της δοκού, και το δε λόγω μεταβολής του ενεργού πλάτους του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη ανάλογα με τη φορά της επιβαλλόμενης ροπής.

5.1.1.1 Αρνητικές ροπές



Σχήμα 5.2: Μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου με beff για αρνητικές ροπές

Για αρνητικές ροπές στην περιοχή του κόμβου, ενεργοποιείται ο οπλισμός της πλάκας σε εφελκυσμό. Το συνεργαζόμενο πλάτος beff της πλάκας σκυροδέματος για τον προσδιορισμό της πλαστικής ροπής αντοχής της δοκού, για αρνητικές ροπές, λαμβάνεται από τον πίνακα 7.5 ΙΙ του Ευρωκώδικα 8 από τη σχέση: $b_{eff} = 2 \times 0.1 \times l = 140 cm$. Ο υπάρχων διαμήκης οπλισμός εντός του beff είναι 6Φ18 και για την διατμητική κάλυψη της πλάκας, κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση, τοποθετούνται 16 ζεύγη ήλων στην εγκάρσια δοκό. Οι οπλισμοί θεωρείται ότι αγκυρώνονται πλήρως, παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει ακραία λωρίδα σκυροδέματος, ώστε να μπορούν να αναπτύξουν πλήρως την εφελκυστική τους αντοχή.

5.1.1.1.1 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

Για αρνητικές ροπές στην περιοχή του κόμβου, η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη δεν διαφοροποιείται από του αντίστοιχου μεταλλικού επομένως, Fc,wc,RD=590.95kN.

5.1.1.1.2 Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 1 η ροπή αντοχής της υπό εξέταση δοκού, μπορεί να προκύψει από την εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης. Το εμβαδόν του οπλισμού της πλάκας εντός του beff προκύπτει ως εξής: $A_s = n \times \frac{\pi \times d}{4}^2 = 6 \times \frac{\pi \times 1.8^2}{4} = 15.27 cm^2$

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία εύρεσης της πλαστικής ροπής αντοχής της δοκού.

- Θλιπτική δύναμη σιδηροδοκού:
- $D = A_a \times f_{ad} = 72.73 cm^2 \times 23.50 kN/cm^2 = 1709.15 kN$

Εφελκυστική δύναμη οπλισμού:

$$Z_s = A_s \times f_{sd} = 15.27 cm^2 \times \frac{50 kN/cm^2}{1.15} = 663.83 kN.$$

• Εφελκυστική δύναμη πέλματος σιδηροδοκού: $Z_f = 2 \times f_{ad} \times b_{f0} \times t_{f0} = 2 \times 23.50 kN/cm^2 \times 17.00 cm \times 1.27 cm = 1014.73 kN$

Η θέση του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται ως εξής:

$$z_0 = d + t_{f0} + \frac{D - Z_s - Z_f}{2 \times f_{ad} \times t_w} = 13cm + 1.27cm + \frac{(1709.15 - 663.83 - 1014.73)kN}{2 \times 23.50kN/cm^2 \times 0.80cm} = 15.10cm$$

Η εφελκυστική δύναμη του κορμού της σιδηροδοκού υπολογίζεται ως εξής: $Z_w = 2 \times f_{ad} \times t_w \times (z_0 - d - t_{f0}) \Longrightarrow$ $Z_w = 2 \times 23.50 kN / cm^2 \times 0.80 cm \times (15.10 - 13.00 - 1.27) cm = 30.59 kN$

Τελικά, $M_{pl,Rd} = Dz_a - Z_s z_s - Z_f (d + \frac{t_{f0}}{2}) - Z_w(\frac{z_0 + d + t_{fo}}{2}) \Longrightarrow$

$$M_{pl,Rd} = 1709.15 \times 38 - 663.83 \times 40 - 1014.73 \times (13 + \frac{1.27}{2}) - 30.59 \times (\frac{15.10 + 13.00 + 1.27}{2}) \Longrightarrow$$

 $M_{pl,Rd} = 480.05 kNm$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.1): $F_{c,fb,Rd} = \frac{480.05kNm}{(560.00 - \frac{12.70}{2} - 40)mm} = 934.65kN$.

5.1.1.1.3 Οπλισμός πλάκας σε εφελκυσμό

Η αντοχή του οπλισμού σε εφελκυσμό είναι:

$$\begin{split} F_{\rm Rds} &= 15.27 cm^2 \times \frac{50}{1.15} kN/cm^2 = 663.83 kN \,. \\ \text{Επιπλέον, ικανοποιείται η συνθήκη: } 1.1 \times n \times P_{\rm Rd} \geq F_{\rm Rds} \Longrightarrow 1.1 \times 32 \times 22.00 > 663.83 kN \,. \end{split}$$

5.1.1.2 Θετικές ροπές



Σχήμα 5.3: Μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου με beff για θετικές ροπές

Για θετικές ροπές στην περιοχή του κόμβου, ενεργοποιείται η πλάκα του σκυροδέματος σε θλίψη. Το συνεργαζόμενο πλάτος b_{eff} της πλάκας σκυροδέματος για τον προσδιορισμό της πλαστικής ροπής αντοχής της δοκού, για θετικές ροπές, λαμβάνεται από τον πίνακα 7.5 ΙΙ του Ευρωκώδικα 8 από τη σχέση: $b_{eff} = 2 \times 0.075 \times l = 105 cm$. Ο υπάρχων διαμήκης οπλισμός εντός του beff είναι 4Φ18 και για την διατμητική κάλυψη της πλάκας, κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση, τοποθετούνται 12 ζεύγη ήλων στην εγκάρσια δοκό.

5.1.1.2.1 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

 $b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p = 1.27 + 2\sqrt{2} \times 0.6 + 5 \times (1.9 + 2.7) + (2.5 + 8.00)$ Επομένως: b_{eff,c,wc}=36.47*cm*

Σύμφωνα με τον πίνακα (7.7), για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου, η προσεγγιστική τιμή της παραμέτρου μετασχηματισμού β ισούται με τη μονάδα. Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα (7.6) ο μειωτικός συντελεστής ω για την αλληλεπίδραση με διάτμηση ισούται με το ω1. Δηλαδή ισχύει: $\omega = \omega_1 = -\frac{1}{2} = 0.782$

$$\omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \times \left(\frac{36.47}{57.33}\right)^2}} = 0.782$$

Η λυγηρότητα του κορμού του υποστυλώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{\lambda}_{p} = 0.932 \times \sqrt{\frac{36.47 \times 29.80 \times 23.50}{21000 \times 1.10^{2}}} = 0.93 > 0.72 \Longrightarrow \rho = 0.84$$

Ο μειωτικός συντελεστής K_{wc} αγνοείται στη φάση της προκαταρκτικής μελέτης και επομένως θεωρείται ότι ισχύει K_{wc} =1.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τη σχέση (2.3) ισχύει: $F_{c,wc,Rd}$ =619.85 kN.

5.1.1.2.2 Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 1 η ροπή αντοχής της υπό εξέταση δοκού, μπορεί να προκύψει από την εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης. Το εμβαδόν του οπλισμού της πλάκας εντός του beff προκύπτει ως εξής: $A_s = n \times \frac{\pi \times d}{4}^2 = 4 \times \frac{\pi \times 1.8^2}{4} = 10.18 cm^2$

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία εύρεσης της πλαστικής ροπής αντοχής της δοκού.

Η συμβολή του οπλισμού της πλάκας λαμβάνεται προσεγγιστικά υπόψη μέσω εφαρμογής στο πλάτος της πλάκας b του μεγεθυντικού συντελεστή:

$$1 + \rho_s \left(\frac{f_{sd}}{0.85 f_{cd}} - 1 \right) = 1.2786$$

• Εφελκυστική δύναμη σιδηροδοκού:

$$Z = A_a f_{yd} = 72.73 cm^2 \times 23.50 kN/cm^2 = 1709.16 kN$$

Η θέση του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται ως εξής:

$$z_{0} = \frac{Z}{\left[1 + \rho_{s} \left(\frac{f_{sd}}{0.85f_{cd}} - 1\right)\right] b 0.85f_{cd}} = 11.23cm$$

Σύμφωνα με τον πίνακα (1.1) πρέπει: $x/d < 0.27 \Longrightarrow 11.23/56.00 < 0.27$.

Τελικά,
$$M_{pl,Rd} = Z\left(z_a - \frac{z_0}{2}\right) \Rightarrow M_{pl,Rd} = 1709.16kN\left(38.00cm - \frac{11.23cm}{2}\right) = 553.50kNm$$

Σύμφωνα με τη σχέση (2.4):
$$F_{c,fb,Rd} = \frac{553.50kNm}{(560.00 - \frac{12.70}{2} - \frac{200}{2})mm} = 1220.05kN$$

5.1.1.2.3 Πλάκα σκυροδέματος σε θλίψη

Το συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας σκυροδέματος προκύπτει όπως στο υποκεφάλαιο 5.1.1.2.

Μηχανισμός Ι

$$F_{Rd1} = 30.00 cm \times 13.00 cm \times \frac{2.00}{1.5} kN/cm^2 = 520.00 kN$$

Μηχανισμός 2

$$F_{Rd2} = 0.7 \times 39.00 cm \times 13.00 cm \times \frac{2.00}{1.5} kN/cm^2 = 473.20 kN$$

Ο απαιτούμενός εγκάρσιος οπλισμός προκύπτει από τη σχέση:

$$A_T \ge \frac{473.00kN}{\left(\frac{50kN/cm^2}{1.15}\right)} = 10.88cm^2.$$

Επομένως, τοποθετούνται 5 Φ18 τα οποία κατανέμονται σε μια απόσταση, ίση με hc=39cm, κατά μήκος της δοκού. Το απαιτούμενο μήκος των ράβδων οπλισμού είναι: $l_r = b_c + 4h_c + 2l_b = 30cm + 4 \times 39cm + 2 \times 18cm = 222cm$.

$$\begin{split} &M\eta \chi a v i \sigma \mu \acute{o} \varsigma \; 3 \\ &F_{Rd3} = 2 \times 12 \times 22 k N = 528 k N \; . \end{split}$$

Τελικά, η αντοχή της πλάκας σκυροδέματος σε θλίψη υπολογίζεται από τη σχέση: $F_{\rm Rd} = \min(F_{\rm Rd1} + F_{\rm Rd2} + F_{\rm Rd3}; b_{\rm eff} \times d_{\rm eff} \times f_{\rm cd}) \Longrightarrow$

$$F_{Rd} = \min\left((520 + 473 + 528)kN; 105cm \times 13cm \times \frac{2.00}{1.5}kN/cm^2\right) = 1521kN$$

Επομένως, για τον επιλεγμένο αριθμό n των διατμητικών ήλων επιτυγχάνεται μερική διατμητική κάλυψη με βαθμό: 1521/1820 = 83%.

5.1.2 Ροπές αντοχής κόμβου

5.1.2.1 Αρνητικές ροπές

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζονται οι ενεργές αντοχές της πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών, για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου και για αρνητική φορά ροπών, σύμφωνα με τους κανόνες που αναγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.2.1.

	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση	700.05-663.80= 36.70 kN	0		700.05kN
Κορμός υποστυλώματος σε θλίψη	590.95-663.80= -72.85 kN	0		590.90kN
Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη	934.655-663.80= 270.85 kN	0		934.65kN
Πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη	335.25kN	0	633.80kN	
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	360.35kN	0		
Κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό	394.80kN	0	584.20kN	
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό		0		
Ftr,Rd	0	0		

Πίνακας 5.1: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

Ο κορμός του υποστυλώματος αστοχεί σε θλίψη πριν την ενεργοποίηση της πρώτης σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό.

Τελικά, ροπή αντοχής προσφέρει μόνο ο εγκάρσιος οπλισμός και προκύπτει από την εξίσωση:

 $M_{B,Rd}^- = 663.80 \times 513.65 = 340.95 kNm$



Σχήμα 5.4: Μηχανικό προσομοίωμα αντοχής για αρνητικές ροπές

5.1.2.2 Θετικές ροπές

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζονται οι ενεργές αντοχές της πρώτης και της δεύτερης σειράς κοχλιών, για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου και για θετική φορά ροπών, σύμφωνα με τους κανόνες που αναγράφονται στην υποπαράγραφο 3.2.2.

5				
	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε		700.05-486.90=		700.051-N
διάτμηση		213.15 kN		700.05KIN
Κορμός υποστυλώματος σε		619.90-486.90=		619.90kN
θλίψη		133.00kN		
Πέλμα και κορμός δοκού σε		1220.05-486.90=		1220.07kN
θλίψη		733.15kN		
Πλάκα σκυροδέματος σε		1521.00-486.90=		1521.00kN
θλίψη		1034.10kN		
Πέλμα υποστυλώματος σε	262 001-N	min{382.30;693.95-	602 051 N	
κάμψη	303.90KIN	363.90}= 330.05kN	095.95KIN	
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	426 201-N	min{418.60;760.50-	760.50kN	
	450.50KIN	436.30}= 324.20kN		
Κορμός υποστυλώματος σε	486 00kN	min{486.90;737.30-	737.30kN	
εφελκυσμό	400.90KIN	486.90}= 250.40kN		
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό	603.30kN	min{536.60;852.00-	852.00kN	
		603.30}=248.70kN		
Ftr,Rd	363.90kN	133.00kN		

Πίνακας 5.2: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

Τελικά, η ροπή αντοχής προκύπτει από την σχέση:

 $M_{B,Rd}^+ = 363.90 \times 390.00 + 133.00 \times 170.00 = 164.50 kNm$

66



Σχήμα 5.5: Μηχανικό προσομοίωμα αντοχής για θετικές ροπές

5.1.3 Στροφική δυσκαμψία κόμβου

5.1.3.1 Αρνητικές ροπές

Για μονόπλευρη διαμόρφωση σύμμικτου κόμβου και καμία σειρά κοχλιών σε εφελκυσμό οι συντελεστές k_i που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής: k_1 , k_2 και k_s .



Σχήμα 5.6: Μηχανικό προσομοίωμα δυσκαμψίας για αρνητικές ροπές

$$k_1 = 0.87 \times \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = 0.87 \times \frac{0.38 \times 57.33 cm^2}{1.00 \times 51.325 cm} = 0.369 cm.$$

$$k_{2} = \frac{0.2 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_{c}} = \frac{0.2 \times 30.97 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.229 cm.$$

Το ks για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου δίνεται από τη σχέση:

$$k_s = \frac{A_s}{3.6 \times h} = \frac{15.27 cm^2}{3.6 \times 39 cm} = 0.109 cm$$

$$\begin{split} &\Sigma \tau \circ \mu \eta \kappa \circ \zeta 50\% \ l = 330 \text{cm} \ \circ \upsilon \pi \acute{a} \rho \chi \circ \upsilon N = \frac{330}{105} \times 12 \approx 37.7 \ \dot{\eta} \lambda \circ \iota \\ &\xi = \frac{E_a I_a}{d_s^2 E_a A_a} = \frac{16270 \text{cm}^4}{34^2 \text{ cm}^2 \times 72.73 \text{cm}^2} = 0.193 \\ &\nu = \sqrt{\frac{(1 + \xi)Nk_{sc} ld_s^2}{E_a I_a}} = \sqrt{\frac{(1 + 0.193) \times 37.7 \times 1000 \text{kN} / \text{cm} \times 700 \text{cm} \times 34^2 \text{cm}^2}{21000 \text{kN} / \text{cm}^2 \times 16270 \text{cm}^4}} = 10.32 \\ &K_{sc} = \frac{Nk_{sc}}{\nu \left(\frac{\nu - 1}{1 + \xi}\right) \frac{h_s}{d_s}} = \frac{37.7 \times 1000 \text{kN} / \text{cm}}{10.32 \left(\frac{10.32 - 1}{1 + 0.193}\right) \frac{51.325 \text{cm}}{34 \text{cm}}} = 37.700 \text{kN} / \text{cm}} \\ &k_{slip} = \frac{1}{1 + \frac{E_s k_s}{K_{sc}}} = \frac{1}{1 + \frac{21000 \text{kN} / \text{cm}^2 \times 0.026 \text{cm}}{37.700 \text{kN} / \text{cm}}} = 0.985 \end{split}$$

Επομένως $k_s = k_s k_{slip} = 0.109 cm \times 0.985 = 0.107$

Η στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής:

$$S = \frac{21000kN/cm^2 \times 51.325^2 cm^2}{1 \times \left[\frac{1}{0.369cm} + \frac{1}{0.229cm} + \frac{1}{0.107cm}\right]} = 33684.80kNm$$

5.1.3.2 Θετικές ροπές

Για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου και δύο σειρές κοχλιών σε εφελκυσμό οι συντελεστές k_i που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής: k_1 , k_2 , k_{eq} .



Σχήμα 5.7: Μηχανικό προσομοίωμα δυσκαμψίας για θετικές ροπές

To k1 υπολογίζεται ως εξής: $k_1 = 0.87 \times \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = 0.87 \times \frac{0.38 \times 57.33 cm^2}{1.00 \times 33.825 cm} = 0.560 cm$.

Όπου ο μοχλοβραχίονας z υπολογίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 7.5 του παραρτήματος για την περίπτωση κοχλιωτής σύνδεσης με μετωπική πλάκα και δυο ή περισσότερες εφελκυόμενες σειρές κοχλιών, θεωρώντας ως κέντρο θλίψης το μέσο της πλάκας σκυροδέματος.

To k2 υπολογίζεται ως εξής:
$$k_2 = \frac{0.2 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.2 \times 36.47 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.269 cm$$
.
To keff,1 προκύπτει από τη σχέση: $k_{eff,1} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,1}} + \frac{1}{k_{4,1}} + \frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{10,1}}}$

Όπου:

$$\begin{aligned} k_{3,1} &= \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 20.67 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.534 cm \\ k_{4,1} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}}{m^3} = \frac{0.9 \times 20.00 cm \times 1.90^3 cm^3}{3.29^3 cm^3} = 3.467 cm \\ k_{5,1} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_p}{m^3} = \frac{0.9 \times 28.82 cm \times 2.50^3 cm^3}{5.26^3 cm^3} = 2.785 cm \\ k_{10,1} &= \frac{1.6 \times A_s}{L_b} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^2}{6.80 cm} = 0.713 cm \\ \text{Еπομένως: } k_{eff,1} &= \frac{1}{\frac{1}{0.534} + \frac{1}{3.467} + \frac{1}{2.785} + \frac{1}{0.713}} = 0.255 cm \end{aligned}$$

Το keff,2 προκύπτει από τη σχέση: $k_{e\!f\!f,2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{3,2}} + \frac{1}{k_{4,2}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10,2}}}$

Όπου:

$$\begin{split} k_{3,2} &= \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 \times 20.67 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.534 cm \\ k_{4,2} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}}{m^3} = \frac{0.9 \times 16.50 cm \times 1.90^3 cm^3}{3.29^3 cm^3} = 2.860 cm \\ k_{5,2} &= \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_p}{m^3} = \frac{0.9 \times 16.50 cm \times 2.50^3 cm^3}{5.26^3 cm^3} = 1.594 cm \\ k_{10,2} &= \frac{1.6 \times A_s}{L_b} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^2}{6.80 cm} = 0.713 cm \\ \text{Еπομένως: } k_{eff,2} &= \frac{1}{\frac{1}{0.534} + \frac{1}{2.860} + \frac{1}{1.594} + \frac{1}{0.713}} = 0.235 cm \\ \text{Тελικά, } z_{eq} &= \frac{k_{eff,1} \times h_1^2 + k_{eff,2} \times h_2^2}{k_{eff,1} \times h_1 + k_{eff,2} \times h_2} = \frac{0.255 \times 39.00^2 + 0.235 \times 17.00^2}{0.255 \times 39.00 + 0.235 \times 17.00} = 32.695 cm \end{split}$$

Επομένως, $k_{eq} = \frac{0.255 \times 39.000 + 0.235 \times 17.000}{32.695} = 0.426 cm$.

Η στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής:

$$S = \frac{21000kN/cm^2 \times 32.150^2 cm^2}{1 \times \left[\frac{1}{0.560cm} + \frac{1}{0.269cm} + \frac{1}{0.426cm}\right]} = 27648.90kNm$$

5.2 Αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου



Σχήμα 5.8: Αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου

5.2.1 Διαφοροποιήσεις σε σχέση με την μονόπλευρη διαμόρφωση

Η παραπάνω αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση καμπτικής καταπόνησης ενός κόμβου αμφίπλευρης διαμόρφωσης λόγω ότι στον κόμβο εμφανίζεται το άθροισμα της εφελκυστικής δύναμης λόγω του οπλισμού στην περιοχή των αρνητικών ροπών και της θλιπτικής δύναμης της πλάκας στην περιοχή των θετικών ροπών. Επιπλέον, το φάτνωμα

του υποστυλώματος διατέμνεται από δύναμη $V_{wp,Ed} = \frac{M^+ + M^-}{h}$.

Η τιμή της αντοχής του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση όπως επίσης και οι τιμές των αντοχών του πέλματος του υποστυλώματος σε κάμψη, της μετωπικής πλάκας σε κάμψη και του κορμού της δοκού σε εφελκυσμό, για κάθε σειρά κοχλιών, λαμβάνονται απ' ευθείας από την επίλυση του αντίστοιχού μεταλλικού κόμβου.

Προκείμενου να μελετηθεί ο κόμβος ως δύο μεμονωμένοι αλλά αλληλεπιδρώντες κόμβοι θεωρείται κατανομή της συνολικής δύναμης, $F_{Rd} = F_{Rd1} + F_{Rd2} + F_{Rd3}$, εκατέρωθεν του κόμβου σε εφελκυστική δύναμη οπλισμού και σε θλιπτική δύναμη σκυροδέματος.

Για τη δοκό με την αρνητική ροπή, η εφελκυστική δύναμη του οπλισμού δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Rds} = \alpha \times F_{Rd1} + \beta \times F_{Rd2} + \gamma \times F_{Rd3} \le A_s \times f_{yd}$$
(5.1)

70
Ενώ για δοκό με θετική ροπή, η θλιπτική δύναμή της πλάκας σκυροδέματος δίνεται από τη σχέση:

$$F_{Rdc} = (1 - \alpha) \times F_{Rd1} + (1 - \beta) \times F_{Rd2} + (1 - \gamma) \times F_{Rd3}$$
(5.2)

Όπου:

- $F_{Rd1} = 30.00 cm \times 13.00 cm \times \frac{2.00}{1.5} kN/cm^2 = 520.00 kN$
- $F_{Rd2} = 0.7 \times 39.00 cm \times 13.00 cm \times \frac{2.00}{1.5} kN/cm^2 = 473.20 kN$
- $F_{Rd3} = 2 \times 16 \times 22.00 kN = 704.00 kN$
- *α*=0.30, *β*=0.30, *γ*=0.33

5.2.1.1 Αρνητικές ροπές

5.2.1.1.1 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

Η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη λαμβάνεται απευθείας από τον αντίστοιχο μεταλλικό κόμβο, δηλαδή από το υποκεφάλαιο 4.2. Επομένως, $F_{c,wc,Rd}$ =423.85kN.

5.2.1.1.2 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό

Η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό για την πρώτη και τη δεύτερη σειρά κοχλιών έχει υπολογιστεί στο υποκεφάλαιο 4.2.

Πρώτη σειρά κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 341.70 kN$ Δεύτερη σειρά κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 396.30 kN$ Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών: $F_{t,wc,Rd} = 443.75 kN$.

5.2.1.1.3 Οπλισμός πλάκας σε εφελκυσμό

Από τη σχέση (3.10),

 $F_{Rds} = 0.3 \times 520.00 kN + 0.3 \times 473.20 kN + 0.33 \times 704.00 kN \le 15.27 cm^2 \times \frac{50}{1.15} kN / cm^2 \implies F_{Rds} = \min(530.30;663.90) = 530.30 kN.$

5.2.1.2 Θετικές ροπές

5.2.1.2.1 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη

 $b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p = 1.27 + 2\sqrt{2} \times 0.6 + 5 \times (1.9 + 2.7) + (2.5 + 8.00)$ Exometives: $b_{eff,c,wc} = 36.47 \ cm$

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.7, για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου, για την τιμή της παραμέτρου μετασχηματισμού ισχύει $\beta \approx 2$. Επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα 7.6 ο

μειωτικός συντελεστής ω για την αλληλεπίδραση με διάτμηση ισούται με το ω2. Δηλαδή

ασχύει:
$$ω = ω_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5.2 \times \left(\frac{36.47}{57.33}\right)^2}} = 0.531$$

Η λυγηρότητα του κορμού του υποστυλώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{\lambda}_{p} = 0.932 \times \sqrt{\frac{36.47 \times 29.80 \times 23.5}{21000 \times 1.10^{2}}} = 0.934 > 0.72 \Longrightarrow \rho = 0.841$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τη σχέση (2.3) ισχύει: $F_{c,wc,Rd}$ =421.10 kN.

5.2.1.2.2 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό

Η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό για την πρώτη και τη δεύτερη σειρά κοχλιών έχει υπολογιστεί στο υποκεφάλαιο 4.2.2.2.

- Πρώτη σειρά κοχλιών: $ω = ω_2 = 0.742 ⇒ F_{t,wc,Rd} = 396.30 kN$
- Δεύτερη σειρά κοχλιών: $ω = ω_2 = 0.742 ⇒ F_{t,wc,Rd} = 396.30 kN$
- Ομάδα πρώτης και δεύτερης σειράς κοχλιών:
- $\omega = \omega_2 = 0.530 \Longrightarrow F_{t,wc,Rd} = 500.75 kN.$

5.2.1.2.3 Πλάκα σκυροδέματος σε θλίψη

Από τη σχέση (3.11) $F_{Rdc} = (1-0.3) \times 520.00 kN + (1-0.3) \times 473.20 kN + (1-0.33) \times 704.00 kN = 1166.90 kN$

5.2.2 Ροπές αντοχής κόμβου

5.2.2.1 Αρνητικές ροπές

Πίνακας 5.3: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση	700.05/2-530.30= -180.27 kN	0		700.05kN
Κορμός υποστυλώματος σε θλίψη	590.90-530.30= 60.60kN	0		590.90kN
Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη	1220.05-530.30= 689.75kN	0		1220.07kN
Πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη	363.90kN	0	693.95kN	
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	436.30kN	0	760.50kN	
Κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό	396.30kN	0	500.75kN	
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό	603.30kN	0	852.00kN	
Ftr,Rd	0	0		

 $M_{B,Rd}^- = 530.30 \times 513.65 = 272.40 kNm.$

5.2.2.2 Θετικές ροπές

, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,				
	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε		700.05/2-396.30=		700.051/N
διάτμηση		-46.27 kN		700.03KIN
Κορμός υποστυλώματος σε		590.90-396.30=		500 00kN
θλίψη		194.60kN		J90.90KIN
Πέλμα και κορμός δοκού σε		1220.05-396.30=		1220 07kN
θλίψη		823.75kN		1220.07KIN
Πλάκα σκυροδέματος σε		1521.00-396.30=		1521 00EN
θλίψη		1124.70kN		1321.00KIN
Πέλμα υποστυλώματος σε	262 001-N	min{382.30;693.95-	602 051-N	
κάμψη	303.90KIN	363.90}= 330.05kN	095.93KIN	
	426 201-N	min{418.60;760.50-	760 501-N	
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	430.30KIN	436.30}= 324.20kN	700.30KIN	
Κορμός υποστυλώματος σε	206 201-N	min{396.30;500.75-	500 751-N	
εφελκυσμό	390.30KIN	396.30}= 104.45kN	500.75KIN	
	602 201-N	min{536.60;852.00-	852 001-N	
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό	003.30KIN	603.30}= 248.70kN	032.00KIN	
Ftr,Rd	363.90kN	0		

Πίνακας 5.3: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

Τελικά, $M_{B,Rd}^+ = 363.90 \times 390.00 = 141.90 kNm$.

Στον συγκεκριμένο κόμβο, δεν ικανοποιείται η σύσταση του παραρτήματος C του Ευρωκώδικα 8 για τη σύνθλιψη του σκυροδέματος σύμφωνα με την οποία:

 $1.2 \times (F_{sc} + F_{st}) \le F_{Rd1} + F_{Rd2} + F_{Rd3} \Longrightarrow$ $1.2 \times (663.80 + 1820) kN \le (520.00 + 473.20 + 463.00) kN$

Επομένως, είναι απαραίτητη η εφαρμογή πρόσθετων διατάξεων για την αύξηση της ικανότητας της ένωσης να μεταφέρει δυνάμεις από την πλάκα στο υποστύλωμα.

5.2.3 Στροφική δυσκαμψία κόμβου

5.2.3.1 Αρνητικές ροπές

Για αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου με άνισες ροπές εκατέρωθεν, και καμία σειρά κοχλιών ενεργοποιημένη σε εφελκυσμό οι απαραίτητοι συντελεστές είναι οι k_1 , k_2 και k_s .

Τα k₁ και k₂ υπολογίζονται ως εξής:

$$k_{1} = 0.87 \times \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = 0.87 \times \frac{0.38 \times 57.33 cm^{2}}{2.00 \times 51.325 cm} = 0.185 cm$$
$$k_{2} = \frac{0.2 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_{c}} = \frac{0.2 \times 30.97 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.229 cm$$

Ο κόμβος καταπονείται από ροπές με διαφορετικό πρόσημο, επομένως όπως έχει ήδη αναφερθεί ο συντελεστής μετασχηματισμού β ισούται με δύο. Επομένως:

$$K_{\beta} = \beta (4.3\beta^2 - 8.9\beta + 7.2) = 2 \times (4.3 \times 2^2 - 8.9 \times 2 + 7.2) = 13.2$$

$$k_{s} = \frac{A_{s}}{h\left(\frac{1+\beta}{2} + K_{\beta}\right)} = \frac{15.27cm^{2}}{39cm \times \left(\frac{1+2}{2} + 13.2\right)} = 0.026cm$$

Επιπλέον πρέπει να εφαρμοσθεί ο μειωτικός συντελεστής k_{slip} λόγω της παραμόρφωσης των διατμητικών ήλων.

Στο μήκος 50% l=330cm υπάρχουν
$$N = \frac{330}{105} \times 12 \approx 37.7$$
 ήλοι

$$\xi = \frac{E_{\alpha}I_{\alpha}}{d_s^2 E_a A_a} = \frac{16270 cm^4}{34^2 cm^2 \times 72.73 cm^2} = 0.193$$

$$v = \sqrt{\frac{(1+\xi)Nk_{sc}ld_s^2}{E_a I_a}} = \sqrt{\frac{(1+0.193) \times 37.7 \times 1000 kN/cm \times 700 cm \times 34^2 cm^2}{21000 kN/cm^2 \times 16270 cm^4}} = 10.32$$

$$K_{sc} = \frac{Nk_{sc}}{v\left(\frac{v-1}{1+\xi}\right)\frac{h_s}{d_s}} = \frac{37.7 \times 1000 kN/cm}{10.32\left(\frac{10.32-1}{1+0.193}\right)\frac{51.325 cm}{34 cm}} = 37.700 kN/cm$$

$$k_{slip} = \frac{1}{1+\frac{E_s k_s}{K_{sc}}} = \frac{1}{1+\frac{21000 kN/cm^2 \times 0.026 cm}{37.700 kN/cm}} = 0.985$$

Επομένως $k_s = k_s k_{slip} = 0.026 cm \times 0.985 = 0.025$

Η στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής:

$$S = \frac{21000kN/cm^2 \times 51.325^2 cm^2}{1 \times \left[\frac{1}{0.185cm} + \frac{1}{0.229cm} + \frac{1}{0.025cm}\right]} = 11114.50kNm$$

5.2.3.2 Θετικές ροπές

Για αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου, με άνισες ροπές εκατέρωθεν, και μια σειρά κοχλιών ενεργοποιημένη σε εφελκυσμό οι απαραίτητοι συντελεστές είναι οι k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 και k_{10} . Όπου:

$$\begin{split} k_1 &= 0.87 \times \frac{0.38 \times A_{vc}}{\beta \times z} = 0.87 \times \frac{0.38 \times 57.33 cm^2}{2.00 \times 39.00 cm} = 0.243 cm \\ k_2 &= \frac{0.2 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0.2 \times 36.46 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.269 cm \,. \end{split}$$

74

$$k_{3} = \frac{0.7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_{c}} = \frac{0.7 \times 20.00 cm \times 1.10 cm}{29.80 cm} = 0.517 cm$$

$$k_{4} = \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{fc}}{m^{3}} = \frac{0.9 \times 20.00 cm \times 1.90^{3} cm^{3}}{3.29^{3} cm^{3}} = 3.467 cm$$

$$k_{5} = \frac{0.9 \times l_{eff} \times t_{p}}{m^{3}} = \frac{0.9 \times 29.35 cm \times 2.50^{3} cm^{3}}{5.26^{3} cm^{3}} = 2.836 cm$$

$$k_{10} = \frac{1.6 \times A_{s}}{L_{b}} = \frac{1.6 \times 3.03 cm^{2}}{6.80 cm} = 0.713 cm$$

στροφική δυσκαμψία του κόμβου προκύπτει ως εξής: $S = \frac{21000kN/cm^2 \times 42.50^2 cm^2}{1 \times \left[\frac{1}{0.243cm} + \frac{1}{0.269cm} + \frac{1}{0.517cm} + \frac{1}{3.467cm} + \frac{1}{2.836cm} + \frac{1}{0.713cm}\right]} = 27044.60kNm$

6 Συμπεράσματα

6.1 Ταξινόμηση κόμβων με βάση την δυσκαμψία και την αντοχή

Όπως ειπώθηκε στο κεφάλαιο 1, η εκτίμηση της στροφικής ικανότητας ενός κόμβου δεν είναι εύκολη υπόθεση λόγω των μη γραμμικών φαινομένων μετά την πλαστικοποίηση. Παρ' όλα αυτά η παρούσα διπλωματική εργασία περιορίζεται στο να εξετάσει εάν ο κόμβος διαθέτει την απαραίτητη στροφική ικανότητα, και όχι στο να εκτιμήσει την τιμή της. Επομένως, οι παρακάτω καμπύλες φτάνουν μέχρι την Φ_{xd} η οποία είναι η στροφή για ροπή ίση με την ροπή αντοχής σχεδιασμού $M_{i,Rd}$.



Σχήμα 6.1: Καμπύλες σχεδιασμού Μ-φ για την περίπτωση αρνητικών ροπών σε μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου

Παρατηρείται ότι ο σύμμικτος κόμβος διαθέτει 83% και 101% υψηλότερη αντοχή και αρχική δυσκαμψία αντίστοιχα, σε σχέση με τον αντίστοιχο μεταλλικό. Προφανώς και οι δύο κόμβοι ταξινομούνται ως ημιάκαμπτοι ως προς τη δυσκαμψία και ως μερικής αντοχής ως προς την αντοχή.



Σχήμα 6.2: Καμπύλες σχεδιασμού Μ-φ για την περίπτωση θετικών ροπών σε μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου

Παρατηρείται ότι ο σύμμικτος κόμβος διαθέτει 49% και 112% υψηλότερη αντοχή και αρχική δυσκαμψία αντίστοιχα, σε σχέση με τον αντίστοιχο μεταλλικό. Προφανώς και οι δύο κόμβοι ταξινομούνται ως ονομαστικά αρθρωτοί.



Σχήμα 6.3: Καμπύλες σχεδιασμού Μ-φ για την περίπτωση αρνητικών ροπών σε αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου

Παρατηρείται ότι ο σύμμικτος κόμβος διαθέτει 106% υψηλότερη αντοχή και 69% χαμηλότερη αρχική δυσκαμψία, σε σχέση με τον αντίστοιχο μεταλλικό. Και οι δύο κόμβοι ταξινομούνται ως μερικής αντοχής και ημιάκαμπτοι.



Σχήμα 6.4: Καμπύλες σχεδιασμού Μ-φ για την περίπτωση θετικών ροπών σε αμφίπλευρη διαμόρφωση κόμβου

Παρατηρείται ότι ο σύμμικτος κόμβος διαθέτει 38% και 33% υψηλότερη αντοχή και αρχική δυσκαμψία αντίστοιχα, σε σχέση με τον αντίστοιχο μεταλλικό. Προφανώς και οι δύο κόμβοι ταξινομούνται ως ονομαστικά αρθρωτοί.

6.2 Γενικές παρατηρήσεις

Σύμφωνα με το παραπάνω υποκεφάλαιο, υπάρχει μια γενική υποτίμηση της αντοχής ενός σύμμικτου κόμβου στην περίπτωση που μελετηθεί ως μεταλλικός. Όσον αφορά τη δυσκαμψία, παρατηρείται ότι στην περίπτωση της αμφίπλευρης διαμόρφωσης υπερεκτιμάται, καθώς η δυσκαμψία του οπλισμού επί τον αντίστοιχο μοχλοβραχίονα δεν υπερβαίνει την δυσκαμψία των δύο εφελκυόμενων σειρών κοχλιών, που δεν ενεργοποιούνται στην περίπτωση του σύμμικτου, επί τον αντίστοιχο τους μοχλοβραχίονα.

Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε μερικές περιπτώσεις σύμμικτων κόμβων δεν προλαβαίνει να εφελκυστεί καμία σειρά κοχλιών, σε αντίθεση με τους αντίστοιχους μεταλλικούς που και οι δυο σειρές κοχλιών βρίσκονται σε εφελκυσμό πριν την αστοχία. Αυτό οπωσδήποτε μπορεί να θεωρηθεί λάθος σχεδιασμού, αν θεωρήσουμε τον κόμβο ως ένα μεμονωμένο στοιχείο, καθώς εξ' αιτίας της πρόωρης αστοχίας του ασθενέστερου συστατικού μέρους του κόμβου δεν υπάρχει εκμετάλλευση της αντοχής των κοχλιών. Πιθανότατα, για το λόγο αυτό ο οπλισμός της πλάκας πρέπει να μειωθεί στον ελάχιστο απαιτούμενο. Βέβαια, κατά το σχεδιασμό ενός πραγματικού φορέα οι διατομές επιλέγονται με βάση τους ελέγχους των βασικών δομικών μελών και έπειτα πραγματοποιείται έλεγχος των κόμβων, επομένως ο κόμβος δεν είναι αυτός που καθορίζει το πάχος της πλάκας, τον οπλισμό κάμψης της πλάκας ή τον αριθμό των διατμητικών συνδέσμων.

Στα συγκεκριμένα παραδείγματα, για την περίπτωση του εσωτερικού σύμμικτου κόμβου παρατηρείται ότι η αστοχία επέρχεται λόγω αστοχίας του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση. Η μορφή της αστοχίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.5: Διατμητική αστοχία κορμού υποστυλώματος

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, η συγκεκριμένη αστοχία θεωρείται πλάστιμη και ο κόμβος διαθέτει την απαιτούμενη στροφική ικανότητα εάν η λυγηρότητα του κορμού του υποστυλώματος δεν είναι πολύ μεγάλη. Δηλαδή πρέπει να ικανοποιείται ο περιορισμός $\frac{d}{t_w} < 69\varepsilon$.

Όσον αφορά τις περιπτώσεις των εξωτερικών σύμμικτων κόμβων, παρατηρείται ότι η αστοχία επέρχεται λόγω αστοχίας του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη. Η συγκεκριμένη αστοχία δεν θεωρείται επιθυμητή γιατί είναι ασταθής. Η μορφή της αστοχίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.6: Κορμός υποστυλώματος σε θλίψη

Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη είτε ενισχυτικών ελασμάτων κορμού, είτε εγκάρσιων νευρώσεων. Στο παράρτημα Γ υπάρχουν οι επιγραμματικές επιλύσεις των παραπάνω εναλλακτικών.

Ενίσχυση κορμού με ελάσματα



Σχήμα 6.7: Σύγκριση καμπύλων σχεδιασμού Μ-φ



Σχήμα 6.8: Σύγκριση καμπύλων σχεδιασμού Μ-φ

Εάν ο κορμός του υποστυλώματος ενισχυθεί με ελάσματα παρατηρείται αύξηση της ροπής αντοχής κατά 31% για αρνητικές ροπές και κατά 25% για θετικές ροπές. Για την περίπτωση των αρνητικών ροπών η αστοχία επέρχεται λόγω αστοχίας του πέλματος και του κορμού της δοκού σε θλίψη ενώ για την περίπτωση των θετικών ροπών αντίστοιχα, αστοχεί ο κορμός της δοκού σε εφελκυσμό, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι και στις δύο περιπτώσεις η αστοχία μεταφέρεται στη δοκό, η οποία διαθέτει επαρκή στροφική ικανότητα. Όσον αφορά τη στροφική δυσκαμψία παρατηρείται ότι στην περίπτωση της ενίσχυσης του κορμού και για αρνητική φορά ροπών, προκύπτει χαμηλότερη σε σχέση με του μη ενισχυμένου παρά την αύξηση της δυσκαμψίας των ελατηρίων k1 (λόγω αύξησης A_{vc}) και k2 (λόγω αύξησης του $t_{wc,ev}$). Η παραπάνω παρατήρηση οφείλεται στο γεγονός ότι η δυσκαμψία που προσφέρει η ενεργοποιημένη σειρά κοχλιών σε εφελκυσμό επί τον μοχλοβραχίονα του σχήματος 6.9 είναι χαμηλότερη σε σχέση με τη δυσκαμψία του οπλισμού που χάνεται λόγω της μεταβολής του μοχλοβραχίονα από τη θέση του σχήματος 5.6 σε αυτή του σχήματος 6.9.



Σχήμα 6.9: Μηχανικό προσομοίωμα δυσκαμψίας σύμμικτου κόμβου με ενισχυτικά ελάσματα κορμού



φ mrad

•





Σχήμα 6.11: Σύγκριση καμπύλων σχεδιασμού Μ-φ

Εάν ο κόμβος ενισχυθεί με εγκάρσιες νευρώσεις παρατηρείται αύξηση της ροπής αντοχής κατά 4% για αρνητικές ροπές και κατά 28% για θετικές ροπές. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι η αστοχία του κόμβου επέρχεται λόγω αστοχίας του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως θεωρείται πλάστιμη μορφή αστοχίας.

Τα χαλυβδόφυλλα, όπως επισημαίνεται στο κεφάλαιο 1, έχουν τοποθετηθεί με τις νευρώσεις παράλληλα στη δοκό.. Για ακριβέστερη προσομοίωση θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη τα κενά του σκυροδέματος τόσο στην αντοχή όσο και στην εύρεση του κέντρου θλίψης.



Στην περίπτωση που τα χαλυβδόφυλλα τοποθετούνταν κάθετα στη δοκό, αφενός θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη ο κατάλληλος συντελεστής μείωσης για την αντοχή των ήλων και αφετέρου να εξετάζονταν οι εξής δύο περιπτώσεις:





Στην πρώτη περίπτωση θλίβεται σαφώς μεγαλύτερη περιοχή του κορμού του υποστυλώματος σε σχέση με τη δεύτερη όμως στη δεύτερη περίπτωση παρέχεται μεγαλύτερος μοχλοβραχίονας στις εφελκυόμενες σειρές κοχλιών.

Τέλος, για την εύρεση της στροφικής δυσκαμψίας θεωρήθηκαν οι συντελεστές k_i για κάθε συστατικό μέρος που προσφέρει στην αντοχή του κόμβου. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 το μέτρο ελαστικότητας Ε λαμβάνεται υπόψη στην τελική σχέση ωστόσο θα ήταν προτιμότερο, για την περίπτωση των σύμμικτων κόμβων, να λαμβάνεται υπόψη στους συντελεστές k_i λόγω της διαφοράς των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ δομικού χάλυβα και χάλυβα οπλισμών.

7 Βιβλιογραφία

- 1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (1999). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- 3. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., (2005β). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- 4. Βάγιας Ι. (2010). «Σύμμικτες Κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- 5. Ευρωκώδικας 3 Μέρος 1-1 (ΕΝ1993-1-1). «Σχεδιασμός φορέων από χάλυβα, γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια». Ιούνιος 2004.
- 6. Ευρωκώδικας 3 Μέρος 1.8 (ΕΝ1993-1-8). «Σχεδιασμός φορέων από χάλυβα, σχεδιασμός κόμβων». Μάιος 2003.
- Ευρωκώδικας 4 Μέρος 1.1 (prEN1994-1-1). «Σχεδιασμός σύμμικτων φορέων, γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια». Ιανουάριος 2004
 Ευρωκώδικας 8 - Μέρος 1 (EN1998-1). «Αντισεισμικός σχεδιασμός, γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια». Ιούνιος 2004
- 8. Beg D., Zupancic E., Vayas I., «On the rotation capacity of moment connections». Journal of Constructional Steel Research 60 (2004) 601-620
- 9. Bijlaard F. «Joints in Steel Structures based on Eurocode 3 »
- 10. Grecea D., Stratan A., Ciutina A., Dubina D. (2004) «Rotation Capacity of Mr Beam to Column Joints under Cyclic Loading». Connections in Steel Structures V- Amsterdam
- 11. Steenhuis M., Jaspart J.-P., Gomes F. Leino T. (1998) «Application of the Component Method to Steel Joints »

Παράρτημα Α. Χρήσιμοι πίνακες

Θέση σειράς	Σειρά κοχλιών θεω μεμονωμένη	ρούμενη ως	Σειρά κοχλιών θεωρούμενη ως μέλος ομάδας σειρών κοχλιών	
κοχλιών	Κυκλικές μορφές	Μη κυκλικές μορφές	Κυκλικές μορφές	Μη κυκλικές μορφές
	^U eff,cp	Ceff,nc	¹ eff,cp	Ueff,nc
Εσωτερική σειρά κοχλιών	$2\pi m$	4m + 1,25e	2p	Р
Ακραία σ ειρά κοχλιών	Το μικρότερο από: 2πm πm + 2e ₁	Το μικρότερο από: 4m + 1,25e 2m + 0,625e + e ₁	To μικρότερο από: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	Tο μικρότερο από: 2m + 0.625e + 0.5p $e_1 + 0.5p$
Μηχανισμός 1:	$\ell_{\rm eff,1} = \ell_{\rm eff,nc} \alpha \lambda \lambda \dot{\alpha} \ell_{\rm eff,1} \leq \ell_{\rm eff,cp}$		$\sum \ell_{eff,1} = \sum \ell_{eff,nc}$	αλλά $\sum \ell_{eff,1} \leq \sum \ell_{eff,cp}$
Μηχανισμός 2:	$\ell_{eff,2} = \ell_{eff,nc}$		$\sum \ell_{eff,2} = \sum \ell_{eff,nc}$	

Πίνακας 7.1: Ενεργά μήκη μη ενισχυμένου πέλματος υποστυλώματος

Πίνακας 7.2: Ενεργά μήκη ενισχυμένου πέλματος υποστυλώματος

Θέση σειράς	Σειρά κοχλιών θεωρούμενη ως μεμονωμένη		Σειρά κοχλιών θεωρούμενη ως μέλος ομάδας σειρών κοχλιών	
κοχλιών	Κυκλικές μορφές ℓ _{eff.cp}	Μη κυκλικές μορφές l _{eff.nc}	Κυκλικές μορφές ℓ _{eff.cp}	Μη κυκλικές μορφές l _{eff.nc}
Σειρά κοχλιών πλησίον νεύρωσης	$2\pi m$	am	$\pi m + p$	$0.5p + \alpha m$ - $(2m + 0.625e)$
Άλλη εσωτερική σειρά κοχλιών	$2\pi m$	4m + 1,25e	2 <i>p</i>	р
Άλλη ακραία σειρά κοχλιών	Το μικρότερο από: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	Το μικρότερο από: 4m + 1,25e $2m + 0,625e + e_1$	Το μικρότερο από: πm + p $2e_1 + p$	Το μικρότερο από: 2m + 0.625e + 0.5p $e_1 + 0.5p$
Ακραία σειρά κοχλιών πλησίον νεύρωσης	Το μικρότερο από: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m$ - (2m + 0,625e)	δεν υπάρχει	δεν υπάρχει
Μηχανισμός 1:	$\ell_{\text{eff},1} = \ell_{\text{eff,nc}} \ \alpha \lambda \lambda \dot{\alpha} \ \ell_{\text{eff},1} \leq \ell_{\text{eff,cp}}$		$\sum \ell_{\text{eff},1} = \sum \ell_{\text{eff,nc}} \ \alpha \lambda \lambda \dot{\alpha} \ \sum \ell_{\text{eff},1} \leq \sum \ell_{\text{eff,cp}}$	
Μηχανισμός 2:	$\ell_{eff,2} = \ell_{eff,nc}$		$\sum \ell_{\rm eff,2} = \sum \ell_{\rm eff,nc}$	

	Σειρά κοχλιών θεω μεμονωμένη	ρούμενη ως	Σειρά κοχλιών θεωρούμενη ως μέλος ομάδας σειρών κοχλιών		
Θεόη δείρας κοχλίων	Κυκλικές μορφές ℓ _{eff.cp}	Μη κυκλικές μορφές l _{eff.nc}	Κυκλικές μορφές ℓ _{eff.cp}	Μη κυκλικές μορφές ℓ _{eff.nc}	
Σειρά κοχλιών εκτός εφελκυόμενου πέλματος δοκού	To μικρότερο από: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	To μικρότερο από: $4m_x + 1,25e_x$ $e+2m_x+0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w+2m_x+0,625e_x$			
Πρώτη σειρά κοχλιών κάτω από το εφελκυόμενο πέλμα της δοκού	$2\pi m$	am	$\pi m + p$	0.5p + am - (2m + 0.625e)	
Αλλη εσωτερική σειρά κοχλιών	$2\pi m$	4m + 1,25 e	2 <i>p</i>	р	
Αλλη ακραία σειρά κοχλιών	$2\pi m$	4m + 1,25 e	$\pi m + p$	2m+0,625e+0,5p	
Μηχανισμός 1:	$\ell_{\rm eff,1} = \ell_{\rm eff,nc} ~~ \alpha \lambda \lambda \dot{\alpha} ~~ \ell_{\rm eff,1} \leq \ell_{\rm eff,cp}$		$\sum \ell_{eff,1} = \sum \ell_{eff,nc} \; \alpha \lambda \lambda \acute{\alpha} \; \sum \ell_{eff,1} \leq \sum \ell_{eff,cp}$		
Μηχανισμός 2:	$\ell_{\text{eff},2} = \ell_{\text{eff,nc}}$		$\sum \ell_{\rm eff,2} = \sum \ell_{\rm eff,nc}$		

Πίνακας 7.3: Ενεργά μήκη μετωπικής πλάκας

Πίνακας 7.4: Τιμές του α για ενισχυμένα πέλματα υποστυλώματος και μετωπικές πλάκες



Τύπος σύνδεσης	Κέντρο θλιψης	Μοχλοβραχίονας	Κατανομή δυνάμεων
α) Συγκολλητή σύνδεση	Στο μέσο του πάχους του θλιβομενου πέλματος	z = h - th h το ύψος της συνδεόμενης δοκού th το πάχος του πελματος της δοκού	
β) Κοχλιωτή σύνδεση με γωνιακά πελμάτων	Στο μέσο του πάχους του σκέλους του γωνιακού στο θλιβομενο πέλμα	Η απόσταση από το κέντρο θλίψης μέχρι την εφελκυόμενη σειρά κοχλιάν	┎╷ ┍╴╻╺╶╬╪══╴╷ ┍╶╖╺╶╬╪══╴┙
γ) Κοχλωτή συνδεση με μεταπτική πλάκα και μία μόνο ενεργοπουμένη εφελκυόμενη σειρά κοχλιών	Στο μέσο του πάχους του θλιβόμενου πέλματος	Η απόσταση από το κέντρο θλίψης μέχρι την εφελκυόμενη σειρά κοχλιάν	
 δ) Κοχλιωτή συνδεση με προεξέχουσα μετωπική πλάκα και δύο μόνο ενεργοποιημένες εφελιουόμενες σειρές κοχλιάν 	Στο μέσο του πάχους του θλιβόμενου πέλματος	Συντηρητικά, το z μπορεί να λαμβάνεται ως η απόσταση από το κάντρο θλίψης μέχρι το σημείο στο μέσο των δύο εφελκούμενων σειρών κοχλιών	
ε) Αλλη κοχλιωτή σύνδεση με μεταπτική πλάκα και με δύο ή περισσότερες εφελκυόμενες σειρές κοχλιών	Στο μέσο του πάχους του θλιβόμενου πέλματος	Μία προσεγγιστική τιμή μπορεί να προκύψει θεωρώντας την απόσταση από το κέντρο θλίψης μέχρι το σημείο στο μέσο των δύο πιο απομακρυσμένων εφελκυόμενων σειρών κοχλιών	Μια πιο ακριβής τιμή μπορεί να προσδιοριστεί θεωράντας το μοχλοβραχίονα z ίσο με z _{ap} , το οποίο προκόπτει χρησιμοποιάντας τη μέθοδο που δίνεται στην 6.3.3.1.

Πίνακας 7.5: Κέντρο θλίψης, μοχλοβραχίονας z και κατανομή δυνάμεων

Παράρτημα Β. Υπολογισμός ω και ρ

Το ω υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

_.

5 5 15	
Παράμετρος μετασχηματισμού β	Μειωτικός συντελεστής ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 < \beta < 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1-\beta)(1-\omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_{1} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^{2}}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$

Πίνακας 7.6: Μειωτικός συντελεστής ω για την αλληλεπίδραση με διάτμηση

Όπου β είναι η προσεγγιστική τιμή της παραμέτρου μετασχηματισμού σύμφωνα με τον πίνακα παρακάτω:

Πίνακας 7.7:	Προσεγγιστικές	, τιμές της	παραμέτρο	ου μετασχηματισμο	ύβ	
					_	



1.1.1.1 Υπολογισμος ρ
Για
$$\overline{\lambda}_p ≤ 0.72 \Rightarrow \rho = 1.0$$

Για $\overline{\lambda}_p > 0.72 \Rightarrow \rho = (\overline{\lambda}_p - 0.2)/\overline{\lambda}_p^2$
Όπου $\overline{\lambda}_p$ είναι η λυγηρότητα του ελάσματος, η οποία προκύπτει από τη
σχέση: $\overline{\lambda}_p = 0.932 \times \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \times d_{wc} \times f_{y,wc}}{E \times t_{wc}^2}}$

Παράρτημα Γ. Αριθμητικά παραδείγματα επιλύσεων

7.1 Μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου με ενισχυτικά ελάσματα κορμού



7.1.1 Αρνητικές ροπές

TT/ 7.2	F /	1 0	, ,	^ /	<u>^</u> /
	EVEOVOC UV	ተሰላክ ጥላይስነስ	GUOI) GEIOG	~ ƘᲘ୰ୗ (101)	$\sigma_{E} = E (0 E M K) \sigma_{U} \sigma_{U}$
11000005.5.5.	Lichlogan		ομου οσιρω	5 102/1001	ου υφυλικούμο

	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε	1068.10-663.80=	404.30-557.70=		
διάτμηση	404.30kN	-153.40 kN		1068.10kN
Κορμός υποστυλώματος σε	1463.25-663.80=	799.45-557.70=		
θλίψη	799.45kN	241.75kN		1463.25kN
Πέλμα και κορμός δοκού σε	934.65-663.80=	270.65-557.70=		
θλίψη	270.85kN	-287.05kN		934.65kN
Πέλμα υποστυλώματος σε		min{382.30;633.80-		
κάμψη	335.25kN	335.25}= 298.55kN	633.80kN	
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	360.35kN	436.30kN		
Κοομός υποστυλώματος σε		min{691.00:834.20-		
εφελκυσμό	557.70kN	557.70}= 276.50kN	834.20kN	
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό		603.30kN		
Ftr,Rd	270.85kN	0		

 $M_{B,Rd}^- = 663.80 \times 513.25 + 270.85 \times 393.25 = 447.20 kNm$

S = 22607 kNm

7.1.2 Θετικές ροπές

Πινακάς 5.5. Ενεργός αντόχη σχεσιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό					
	1η σειρά	2η σειρά	1η και 2η σειρά	θλιβόμενο τμήμα	
Κορμός υποστυλώματος σε		1068.10-691.00=		1069 10kN	
διάτμηση		377.10 kN		1008.10KIN	
Κορμός υποστυλώματος σε		1670.75-691.00=		1670 7EKN	
θλίψη		979.75kN		1070.75KN	
Πέλμα και κορμός δοκού σε		1132.70-691.00=		1122 ZOPN	
θλίψη		441.70kN		1152.70KIN	
Πέλμα υποστυλώματος σε	262 OUKN	min{382.30;693.95-	602 05KN		
κάμψη	363.90kN	363.90}=330.05kN	033.35KN		
Μετωπικό πλάκα σε κάιμμο	436.30kN	min{418.60;760.50-	760.50kN		
Μετωλική λλακά σε καμφή		436.30}=324.20kN			
Κορμός υποστυλώματος σε	601 00KN	min{691.00;1065.50-	1065 50kN		
εφελκυσμό	091.00KN	691.00}= 374.50kN	1003.3000		
Κοριμός δοκού σε εφελκισμό	603 30KN	min{536.60;852.00-	852 00kN		
κορμος σοκού σε εφελκύσμο	005.3000	603.30}= 248.70kN	032.00KIN		
Ftr,Rd	363.90kN	248.70kN			

Πίνακας 5.3: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

 $M^{+}_{B,Rd} = 363.90 \times 425.00 + 248.70 \times 205.00 = 205.65 kNm$

S = 35182kNm

7.2 Μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου με εγκάρσιες νευρώσεις



7.2.1 Αρνητικές ροπές

Πίνακας 5.3: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

				· · ·
	1" σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε	700.05-663.80=			
διάτμηση	36.70 kN	0		700.05kN
Κορμός υποστυλώματος σε	*			
θλίψη				
Πέλμα και κορμός δοκού σε	934.655-663.80=			
θλίψη	270.85 kN	0		934.65kN
Πέλμα υποστυλώματος σε				
κάμψη	346.20kN	0		
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	360.35kN	0		
Κορμός υποστυλώματος σε				
εφελκυσμό	435.30kN	0		
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό		0		
Ftr,Rd	36.70kN	0		

 $M^-_{B,Rd} = 663.80 \times 513.25 + 36.70 \times 393.25 = 355.10 kNm$

S = 26497 kNm

7.2.2 Θετικές ροπές

Πίνακας 5.3: Ενεργός αντοχή σχεδιασμού σειράς κοχλιών σε εφελκυσμό

J				
	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	1 ^η και 2 ^η σειρά	θλιβόμενο τμήμα
Κορμός υποστυλώματος σε		700.05-486.90=		
διάτμηση		213.15 kN		700.05kN
Κορμός υποστυλώματος σε		*		
θλίψη				
Πέλμα και κορμός δοκού σε		1220.05-486.90=		
θλίψη		733.15kN		1220.07kN
Πλάκα σκυροδέματος σε		1521.00-486.90=		
θλίψη		1034.10kN		1521.00kN
Πέλμα υποστυλώματος σε		min{393.20;756.90-		
κάμψη	393.20kN	393.20}= 363.70kN	756.90kN	
		min{418.60;760.50-		
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	436.30kN	436.30}= 324.20kN	760.50kN	
Κορμός υποστυλώματος σε		min{486.90;737.30-		
εφελκυσμό	486.90kN	486.90}=250.40kN	737.30kN	
		min{536.60;852.00-		
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό	603.30kN	603.30}= 248.70kN	852.00kN	
Ftr,Rd	393.20kN	213.15kN		

 $M_{B,Rd}^+ = 393.20 \times 425.00 + 213.15 \times 205.00 = 210.80 kNm$

S = 22195 kNm

92