



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

**Συμπεριφορά εναλλακτικών αγκυρώσεων σε
ανακυκλιζόμενη φόρτιση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μάντζαρης Ανδρέας

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Βουγιούκας Εμμανουήλ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Γενικά περί αγκυρώσεων οπλισμών	5
1.1 Τάσεις συνάφειας	5
1.2 Μέθοδοι αγκύρωσης ράβδων οπλισμού.....	8
1.2.1 Ευρωκώδικας 2.....	8
1.2.2 Αμερικάνικος κανονισμός ACI-318.....	15
1.3 Αστοχία αγκύρωσης διαμήκων οπλισμών.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - Πειραματικές διατάξεις για εναλλακτική αγκύρωση και σχετικές αναφορές.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - Ανάπτυξη λογισμικού για τη μη γραμμική συμπεριφορά δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος.....	36
3.1 Καμπτική αντοχή.....	36
3.2 Υπολογισμός παραμορφώσεων, καμπυλότητας, στροφής και βέλους κάμψης.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - Πείραμα.....	52
4.1 Πειραματική διάταξη και γεωμετρία δοκού-δοκιμίου.....	52
4.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής.....	54
4.3 Προσδιορισμός εναλλακτικών αγκυρώσεων.....	56
4.3.1 Συμβατική αγκύρωση Ευρωκώδικας 2.....	56
4.3.2 Δοκίμιο με μηχανική αγκύρωση (headed bars).....	58
4.3.3 Δοκίμιο με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο.....	62
4.3.4 Δοκίμιο με εξωτερική πλάκα αγκύρωσης.....	65
4.3.5 Δοκίμιο με ελλειπή αγκύρωση.....	69
4.4 Θεωρητική ανάλυση δοκιμίων με βάση το λογισμικό.....	70
4.5 Υλικά πειράματος.....	75
4.5.1 Σκυρόδεμα.....	74
4.5.2 Όργανα καταγραφής μετρήσεων.....	76
4.6 Περιγραφή της πειραματικής δοκιμής και πειραματικές μετρήσεις.....	79
4.6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων θεωρητικής και πειραματικής προσέγγισης.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Συμπεράσματα.....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των εναλλακτικών αγκυρώσεων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για το σκοπό αυτό έγινε ανάλυση σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο κάποιων τροποποιημένων δοκών με εναλλακτική αγκύρωση. Η χρήση της εναλλακτικής αγκύρωσης είναι αναγκαία σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ο χώρος για το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης, όπως για παράδειγμα σε επέκταση ορόφου σε υφιστάμενο κτίριο το οποίο έχει κατασκευαστεί με παλαιότερους κανονισμούς και τα υποστυλώματα έχουν μικρές διαστάσεις ώστε να αγκυρωθεί ο οπλισμός των δοκών. Άλλες περιπτώσεις που μπορεί να γίνει χρήση των εναλλακτικών αγκυρώσεων είναι σε κόμβους όπου έχει τοποθετηθεί πολύ πυκνός οπλισμός οπότε με αυτόν τον τρόπο γίνεται αποσυμφόρηση του κόμβου.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι τάσεις συνάφειας και τον ρόλο που έχουν στην αγκύρωση των οπλισμών. Επιπλέον αναφέρουμε τους τρόπους αγκύρωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 και τον Αμερικάνικο Κανονισμό ACI – 318. Τέλος παρουσιάζουμε κάποιες αστοχίες αγκύρωσης οπλισμών σε υφιστάμενες κατασκευές.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται σε πειραματικές διατάξεις για εναλλακτικές αγκυρώσεις και σχετικές αναφορές που έχουν εκτελεστεί μέχρι σήμερα, όπου παρατηρούμε σημαντικά συμπεράσματα για τις εναλλακτικές αγκυρώσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του λογισμικού (Excel) για τη μη γραμμική συμπεριφορά των δοκών και ο τρόπος υπολογισμού παραμορφώσεων, καμπυλοτήτων, στροφών και βελών κάμψεως.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και οι λεπτομέρειες του πειράματος. Στη συνέχεια αναφέρεται στον προσδιορισμό των εναλλακτικών αγκυρώσεων με τρεις τρόπους και στη θεωρητική ανάλυση

με βάση το λογισμικό. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η επεξεργασία τους, καθώς επίσης και η σύγκριση των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Επίσης προτάθηκαν κάποιες αλλαγές για περαιτέρω διερεύνηση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών υπό την επίβλεψη του λέκτορα Εμμανουήλ Βουγιούκα.

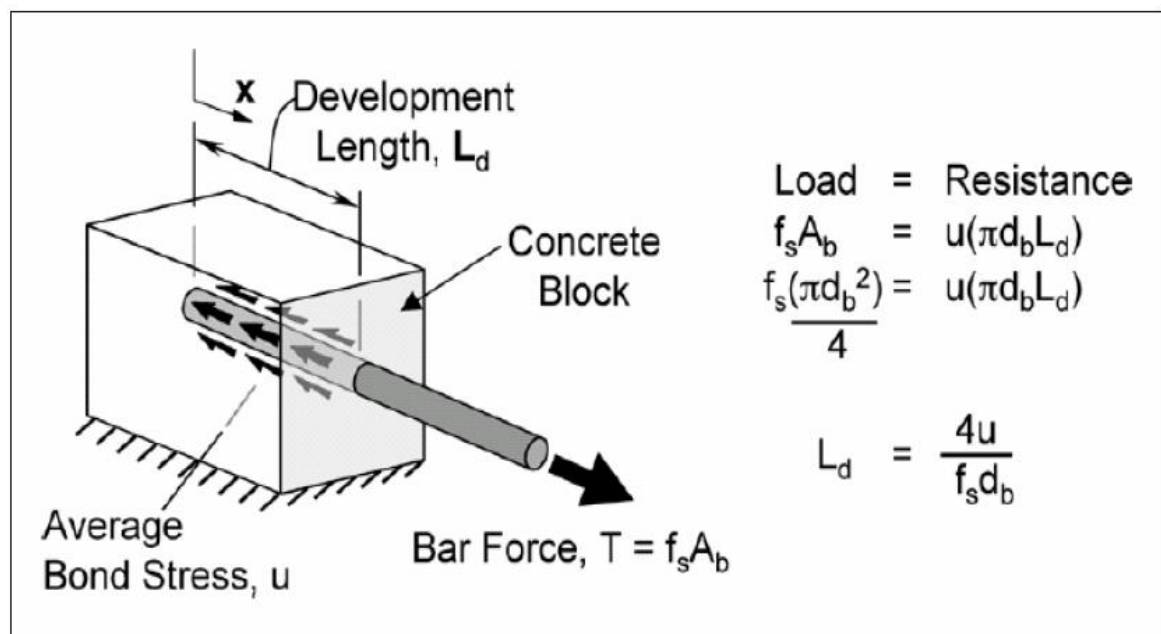
Θα ήθελα να ευχαριστήσω για την πολύτιμη προσφορά του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών και τον καθηγητή κ. Μαρίνο Καττή, καθώς επίσης και τους διδάκτορες Βασίλη Καρατζαφέρη και Νεφέλη Μιτσοπούλου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον λέκτορα κ. Στρατή Μπαδογιάννη για τη καθοδήγηση στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Γενικά περί αγκυρώσεων οπλισμών

1.1 Τάσεις συνάφειας

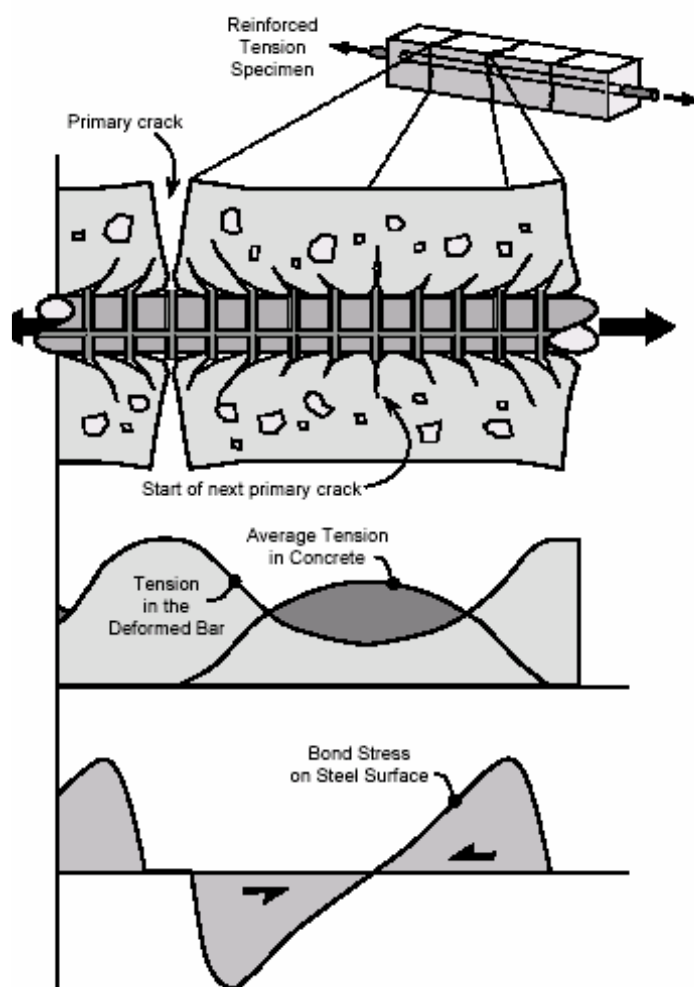
Η συνεργασία μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα σε μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος επιτυγχάνεται μέσω της **συνάφειας**. Η συνάφεια ορίζεται ως η συνδυασμένη δράση των μηχανισμών που παρεμποδίζουν τη σχετική ολίσθηση μεταξύ των ράβδων οπλισμού και του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Οι επιμέρους μηχανισμοί της συνάφειας είναι η τριβή, η πρόσφυση και η αντίσταση του σκυροδέματος το οποίο εγκλωβίζεται μεταξύ των νευρώσεων. Η συνδυασμένη δράση των μηχανισμών αυτών αποτελούν τις τάσεις συνάφειας στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και χάλυβα. Επομένως, οι τάσεις συνάφειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ικανότητα μιας ράβδου οπλισμού να αγκυρωθεί στο σκυρόδεμα. Επιπλέον, ένας άλλος βασικός παράγοντας της ικανότητας αγκύρωσης οπλισμών είναι το **μήκος αγκύρωσης** με το οποίο θα ασχοληθούμε λεπτομερώς παρακάτω.



Εικ. 1 Τάσεις συνάφειας και μήκος αγκύρωσης [2]

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα μίας ράβδου να αγκυρωθεί στο σκυρόδεμα είναι η γεωμετρία της επιφάνειας της ράβδου (λεία ή με νευρώσεις), η διεύθυνση και η θέση της ράβδου σε σχέση με τη διεύθυνση

σκυροδετήσεως, το είδος της φορτίσεως (μονοτονική- ανακυκλιζόμενη, στατική – δυναμική, εφελκυσμός – θλίψη), η δύναμη που επιτρέπεται να μεταφέρει η ράβδος, η ποιότητα του σκυροδέματος (δηλαδή κατηγορία σκυροδέματος (f_{ck}) και οι επιτόπου συνθήκες (ευνοϊκές ή δυσμενείς συνθήκες συνάφειας)). Επίσης, η αγκύρωση μιας ράβδου οπλισμού επηρεάζεται από την απόσταση μεταξύ των ράβδων, την επικάλυψη του οπλισμού, τη διαμόρφωση της ράβδου (ευθύγραμμη, καμπύλη, με ηλεκτροσυγκόλληση εγκαρσίως), η παρουσία εγκάρσιου οπλισμού, η πίεση εγκάρσια στο επίπεδο διάρρηξης κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης.



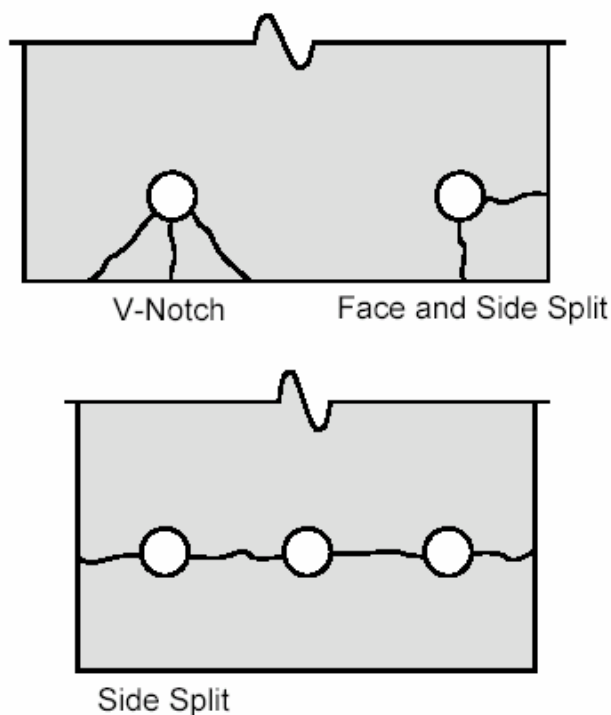
Εικ. 2 Ανάπτυξη εγκάρσιων ρωγμών σε ράβδο υπό εφελκυσμό [2]

Οι νευροχάλυβες αναπτύσσουν τις τάσεις συνάφειας λόγω των νευρώσεων τους οι οποίες βρίσκονται σε άμεση επαφή με το σκυρόδεμα. Όταν αναπτυχθούν οι εφελκυστικές τάσεις στη ράβδο εμφανίζονται εγκάρσιες

ρωγμές στο σκυρόδεμα οι οποίες ξεκινούν από τις νευρώσεις (Εικ. 2). Οι τάσεις συνάφειας οι οποίες αναπτύσσονται δεν είναι ομοιόμορφες. Στην Εικ. 2 παρουσιάζεται τόσο η κατανομή των τάσεων συνάφειας όσο και των εφελκυστικών τάσεων που δημιουργούνται από μία ράβδο νευροχάλυβα η οποία καταπονείται σε εφελκυσμό.

Οι τάσεις συνάφειας λαμβάνουν τη μέγιστη τους τιμή κοντά στη ρηγμάτωση και φθίνουν όσο το σκυρόδεμα είναι σε θέση να διατηρήσει την εφελκυστική του αντοχή. Τότε η τάση συνάφειας αλλάζει πρόσημο και μία νέα ρωγμή δημιουργείται. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «tension stiffening». Η ράβδος πρέπει να σημειωθεί ότι δεν διαρρέει ομοιόμορφα στο ρηγματωμένο σκυρόδεμα όταν είναι επαρκώς αγκυρωμένη. Η διαρροή λαμβάνει χώρα τοπικά και κοντά στις ρηγματωμένες περιοχές.

Η απώλεια της συνάφειας μπορεί να γίνει για διάφορους λόγους. Οι παράλληλες προς τον άξονα της ράβδου τάσεις να υπερβούν την διατμητική αντοχή μεταξύ του σκυροδέματος και των νευρώσεων με αποτέλεσμα η ράβδος να αποσπασθεί «εξολκευθεί» από το σκυρόδεμα. Η πιο συνήθης μορφή αστοχίας είναι όταν οι αποσχιστικές ρωγμές από τις νευρώσεις διαπεράσουν το σκυρόδεμα με θραύση της επικάλυψης (Εικ. 3).



Εικ. 3 Μορφές αστοχίας συνάφειας [2]

1.2 Μέθοδοι αγκύρωσης ράβδων οπλισμού

1.2.1 Ευρωκώδικας 2 (EN 1992-1-1:2004)

Ως βασικό μήκος αγκύρωσης l_b χαρακτηρίζουμε το μήκος μίας ευθύγραμμης ράβδου χάλυβα μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, το οποίο εξασφαλίζει μέσω της συνάφειας, την μεταφορά της δύναμης του χάλυβα στο γειτονικό σκυρόδεμα (Εικ. 5). Η αναλαμβανόμενη από μια ράβδο οπλισμού

$$\text{εφελκυστική δύναμη είναι : } F_s = A_s f_{yd} = \frac{\Phi^2}{4} \pi f_{yd} \quad (1.1)$$

$$\text{Η δύναμη συνάφειας είναι : } l_b \pi \Phi f_{bd} \quad (1.2)$$

Οπότε από το άθροισμα των οριζόντιων δυνάμεων προκύπτει :

$$l_b = \frac{\Phi \sigma_{sd}}{4 f_{bd}} = \frac{\Phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \quad (1.3)$$

f_{bd} =οριακή τάση συνάφειας

f_{yd} =τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του χάλυβα

Φ = διάμετρος ράβδου οπλισμού

Η τιμή σχεδιασμού για την οριακή τάση συνάφειας, f_{bd} , για ράβδους με νευρώσεις μπορεί να ληφθεί ως:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad (1.4)$$

όπου:

f_{ctd} : είναι η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Λόγω της αυξημένης ψαθυρότητας των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής, το $f_{ctk,0,05}$ πρέπει να περιοριστεί στη τιμή που αντιστοιχεί στο C60/75, εκτός αν μπορεί να τεκμηριωθεί ότι η μέση τάση συνάφειας υπερβαίνει αυτό το όριο.

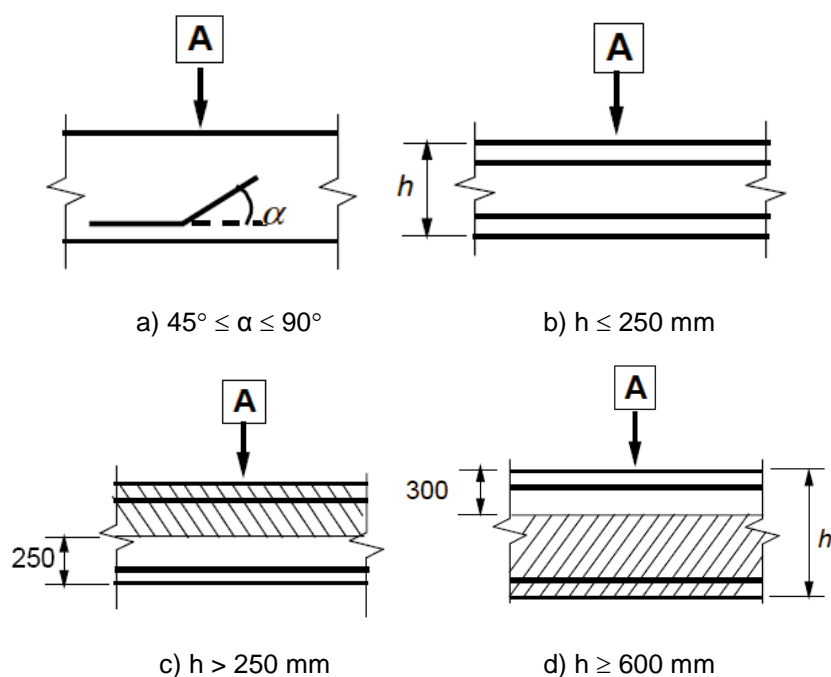
η_1 : είναι ένας συντελεστής που έχει σχέση με τη ποιότητα των συνθηκών συνάφειας και τη θέση της ράβδου κατά τη σκυροδέτηση (Εικ. 4):

$\eta_1 = 1,0$ όταν εξασφαλίζονται ‘ευνοϊκές’ συνθήκες και
 $\eta_1 = 0,7$ για όλες τις άλλες περιπτώσεις και για ράβδους σε δομικά στοιχεία κατασκευασμένα με ολισθαίνοντες ξυλοτύπους, εκτός αν μπορεί να τεκμηριωθεί η ύπαρξη ‘ευνοϊκών’ συνθηκών συνάφειας.

η_2 σχετίζεται με τη διάμετρο των ράβδων:

$\eta_2 = 1,0$ για $\varnothing \leq 32$ mm

$\eta_2 = (132 - \varnothing) / 100$ για $\varnothing > 32$ mm

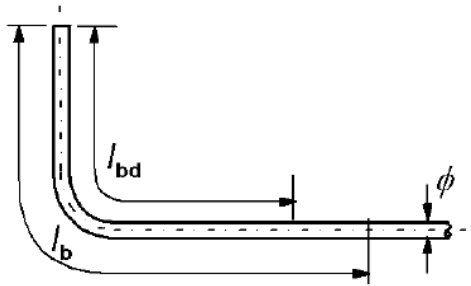


Εικ. 4 Διάκριση συνθηκών συνάφειας (A η διεύθυνση σκυροδέτησης) [1]

(a) και (b) ‘ευνοϊκές’ συνθήκες συνάφειας για όλες τις ράβδους, (c) και (d) μη γραμμοσκιασμένη περιοχή - ‘ευνοϊκές’ συνθήκες συνάφειας, γραμμοσκιασμένη περιοχή - ‘δυσμενείς’ συνθήκες συνάφειας.

Οι μέθοδοι αγκύρωσης σύμφωνα με τον **ευρωκώδικα 2** (EN 1992-1-1:2004) είναι οι εξής :

A) Βασικό μήκος αγκύρωσης l_b υπό εφελκυσμό για οποιοδήποτε σχήμα μετρούμενο κατά μήκος του άξονα της ράβδου



Εικ. 5 Βασικό μήκος αγκύρωσης [1]

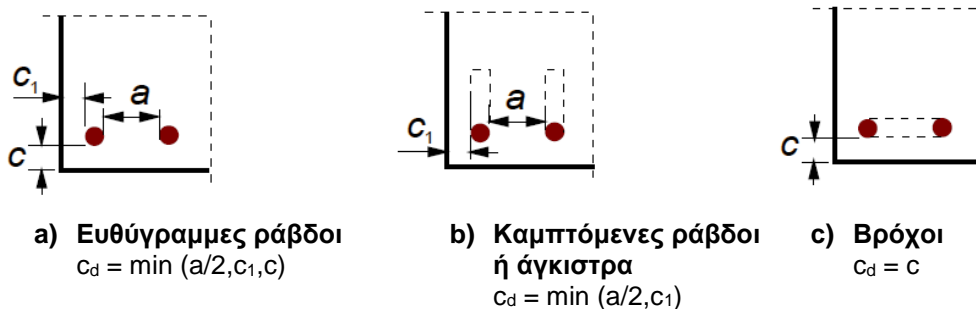
Το μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού, l_{bd} δίδεται από τη σχέση:

$$l_{bd} = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 l_b \geq l_{b, \min} \quad (1.5)$$

όπου a_1 , a_2 , a_3 , a_4 και a_5 είναι συντελεστές που δίνονται στο πίνακα :

a_1 : Αναφέρεται στην επιρροή της μορφής των ράβδων με την παραδοχή επαρκούς επικάλυψης (βλέπε Εικ. 5).

a_2 : Αναφέρεται στην επιρροή της ελάχιστης επικάλυψης σκυροδέματος (βλέπε Εικ. 6).



a) Ευθύγραμμες ράβδοι
 $c_d = \min (a/2, c_1, c)$

**b) Καμπτόμενες ράβδοι
ή άγκιστρα**
 $c_d = \min (a/2, c_1)$

c) Βρόχοι
 $c_d = c$

Εικ. 6 Τιμές του c_d για δοκούς και πλάκες [1]

a_3 : Αναφέρεται στην επιρροή της περίσφιξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού.

a_4 : Αναφέρεται στην επίδραση μίας ή περισσότερων συγκολλημένων εγκάρσιων ράβδων ($\varnothing_t > 0,6\varnothing$) κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού l_{bd} .

a_5 : Αναφέρεται στην επιρροή της πίεσης εγκάρσια στο επίπεδο της διάρρηξης κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού.

$$\text{Απαιτείται } (a_2 a_3 a_5) \geq 0,7 \quad (1.6)$$

$l_{b, \min}$: Είναι το ελάχιστο μήκος αγκύρωσης το οποίο, εάν δεν υπάρχει άλλος περιορισμός, ορίζεται ως εξής:

-για αγκυρώσεις υπό εφελκυσμό: $l_{b,min} > \max\{0,3l_{b,rqd}, 10\varnothing, 100 \text{ mm}\}$ (1. 7)

- για αγκυρώσεις υπό θλίψη: $l_{b,min} > \max\{0,6l_{b,rqd}, 10\varnothing, 100 \text{ mm}\}$ (1. 8)

Παράγοντας επιρροής	Τύπος αγκύρωσης	Ράβδοι οπλισμών	
		Υπό εφελκυσμό	Υπό θλίψη
Μορφή ράβδων	Ευθύγραμμη	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	Μη ευθύγραμμη (βλέπε Σχήμα 8.1 (b), (c) και (d))	$\alpha_1 = 0,7$ εάν $c_d > 3\varnothing$ αλλιώς $\alpha_1 = 1,0$ (βλέπε Σχήμα 8,3 για τιμές του c_d)	$\alpha_1 = 1,0$
Επικάλυψη σκυροδέματος	Ευθύγραμμη	$\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot (c_d - \varnothing) / \varnothing$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	Μη ευθύγραμμη (βλέπε Σχήμα 8.1 (b), (c) και (d))	$\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot (c_d - 3\varnothing) / \varnothing$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (βλέπε Σχήμα 8.3 για τιμές του c_d)	$\alpha_2 = 1,0$
Περίσφιξη με εγκάρσιο οπλισμό μη συγκολλημένο στον κύριο οπλισμό	Όλοι οι τύποι	$\alpha_3 = 1 - K\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
Περίσφιξη με συγκολλημένο εγκάρσιο οπλισμό*	Όλοι οι τύποι, η θέση και το μέγεθος όπως καθορίζεται στο Σχήμα 8.1 (e)	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Περίσφιξη με εγκάρσια πίεση	Όλοι οι τύποι	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	-

Πίνακας 1 Τιμές των συντελεστών $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ και α_5 [1]

όπου:

$$\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$$

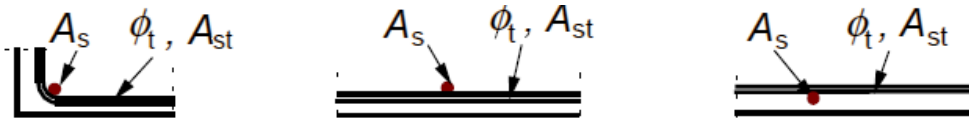
ΣA_{st} : εμβαδόν διατομής του εγκάρσιου οπλισμού κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού l_{bd}

$\Sigma A_{st,min}$: εμβαδόν διατομής του ελάχιστου εγκάρσιου οπλισμού (0,25 A_s για δοκούς και μηδενικό για πλάκες)

A_s : εμβαδόν διατομής της αγκυρούμενης ράβδου με τη μέγιστη διάμετρο

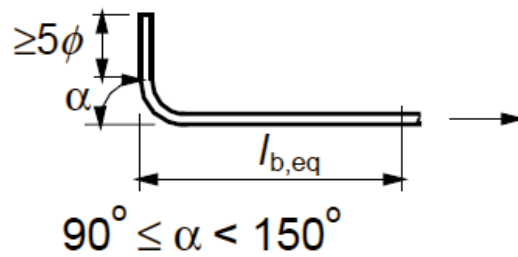
K: συντελεστής με τιμές που φαίνονται στην Εικ. 7

P: εγκάρσια πίεση [MPa] στη κατάσταση αστοχίας κατά μήκος του l_{bd}

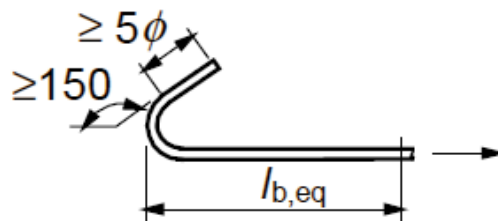


Εικ. 7 Τιμές του K για δοκούς και πλάκες [1]

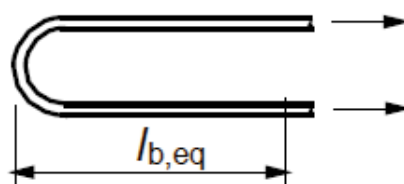
B)



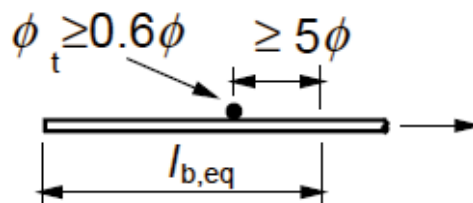
Εικ. 8 Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης για τυπική καμπύλωση [1]



Εικ. 9 Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης για τυπικό άγκιστρο [1]



Εικ. 10 Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης για τυπικό βρόχο [1]



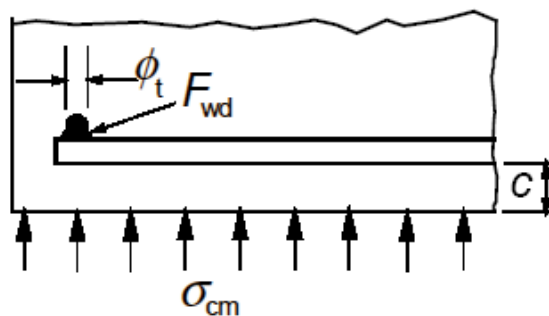
Εικ. 11 Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης με συγκολλημένη εγκάρσια ράβδο [1]

Απλουστευτικά και εναλλακτικά έναντι της μεθόδου (α), το μήκος αγκύρωσης υπό εφελκυσμό μερικών από τις μορφές ράβδων που φαίνονται στις παραπάνω εικόνες μπορεί να οριστεί ως το ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης $l_{b,eq}$. Το $l_{b,eq}$, όπως ορίζεται στις παραπάνω εικόνες, ισούται προς:

- $\alpha_1 l_{b,rqd}$ για τις μορφές ράβδων των Εικ. 8, Εικ. 9, Εικ. 10
(βλέπε Πίνακας 1 για τιμές του α_1)
- $\alpha_4 l_{b,rqd}$ για τη μορφή ράβδου της Εικ. 11
(βλέπε Πίνακα 1 για τιμές του α_4)

Καμπυλώσεις και άγκιστρα δεν συνεισφέρουν στις αγκυρώσεις υπό θλίψη. Όπου χρησιμοποιούνται μηχανικά εξαρτήματα αγκύρωσης, οι προδιαγραφές των δοκιμών θα πρέπει είναι σύμφωνες με τις προδιαγραφές σχετικών προϊόντων ή ενός Ευρωπαϊκού Τεχνικού Πιστοποιητικού.

Γ) Ο ευρωκώδικας 2 αναφέρεται στις αγκυρώσεις **με συγκόλληση εγκάρσιων ράβδων**, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μία εναλλακτική αγκύρωση καθώς με τον τρόπο που θα δούμε παρακάτω μειώνεται το $l_{b,rqd}$.



Εικ. 12 Συγκολλημένη εγκάρσια ράβδος ως σύστημα εναλλακτικής αγκύρωσης [1]

Η φέρουσα ικανότητα της αγκύρωσης μέσω μίας συγκολλημένης εγκάρσιας ράβδου (διάμετρος 14 mm - 32 mm) (Εικ. 12), συγκολλημένης στην εσωτερική παρειά μίας κύριας ράβδου είναι F_{btd} . Η τάση σ_{sd} στη Σχέση (1.3) μπορεί να μειωθεί κατά F_{btd}/A_s όπου A_s είναι το εμβαδόν διατομής της υπό αγκύρωση ράβδου.

$$F_{btd} = l_{td} \Phi_t \sigma_{td} \leq F_{wd} \quad (1.9)$$

όπου:

F_{wd} είναι η διατμητική αντοχή σχεδιασμού της συγκόλλησης (καθοριζόμενη ως ένα μέρος της $A_s f_{yd}$ π.χ. $0,5A_s f_{yd}$ όπου A_s είναι το εμβαδόν διατομής της υπό αγκύρωση ράβδου και f_{yd} είναι η τάση διαρροής σχεδιασμού).

l_{td} είναι το μήκος σχεδιασμού της εγκάρσιας ράβδου: $l_{td} = 1,16\varnothing_t(f_{yd}/\sigma_{td})^{0,5} \leq l_t$

l_t είναι το μήκος της εγκάρσιας ράβδου, όχι μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των ράβδων που αγκυρώνονται.

\varnothing_t είναι η διάμετρος της εγκάρσιας ράβδου

σ_{td} είναι η τάση του σκυροδέματος: $\sigma_{td} = (f_{ctd} + \sigma_{cm})/y \leq 3f_{cd}$

σ_{cm} είναι η θλιπτική τάση του σκυροδέματος κάθετα και στις δύο ράβδους (μέση τιμή, θλίψη θετική)

y είναι η συνάρτηση: $y = 0,015 + 0,14e^{(-0,18x)}$

x είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία: $x = 2(c/\varnothing_t)+1$

c είναι η επικάλυψη σκυροδέματος κάθετα και στις δύο ράβδους

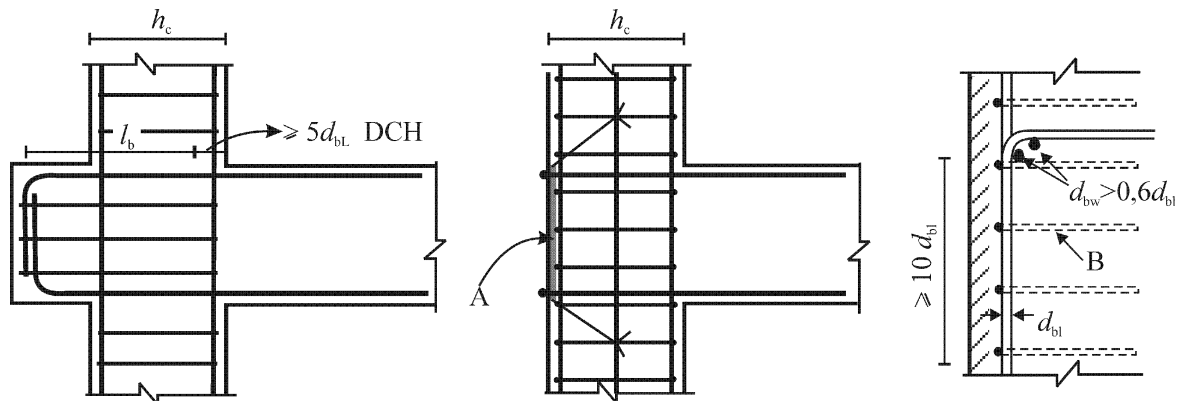
Όπως παρατηρούμε ο ευρωκώδικας 2 δεν αναφέρεται σε εναλλακτικές αγκυρώσεις με πλάκες αγκύρωσης ή μηχανική αγκύρωση με καρφί, παρά μόνο σε συγκόλληση εγκάρσιων ράβδων. Ο **ευρωκώδικας 8** μόνο αναφέρεται σε πλάκες αγκύρωσης σε κόμβο δοκού-υποστυλώματος με αυξημένες απαιτήσεις παλσιμότητας (Εικ. 13), αλλά ως πρόσθετο μέτρο σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται η παρακάτω απαίτηση :

α) για εσωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων:

$$\frac{d_{bL}}{h_c} \leq \frac{7,5 \cdot f_{ctm}}{\gamma_{Rd} \cdot f_{yd}} \cdot \frac{1 + 0,8 \cdot \nu_d}{1 + 0,75k_D \cdot \rho' / \rho_{\max}} \quad (1.10)$$

β) για εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων:

$$\frac{d_{bL}}{h_c} \leq \frac{7,5 \cdot f_{ctm}}{\gamma_{Rd} \cdot f_{yd}} \cdot (1 + 0,8 \cdot \nu_d) \quad (1.11)$$



Εικ. 13 Επιπλέον μέτρα για αγκύρωση σε εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων [10]

1.2.2 Αμερικάνικοι κανονισμοί ACI-318R-08 και ACI-352R-02

Α) Το μήκος αγκύρωσης l_d (ευθύγραμμη αγκύρωση) σύμφωνα με τον Αμερικάνικο κανονισμό ACI-318R-08, για διάφορες περιπτώσεις σε εφελκυσμό υπολογίζετε από τον παρακάτω πίνακα :

Παραδοχές	Μέγεθος ράβδων $\leq \Phi 20$	Μέγεθος ράβδων $> \Phi 20$
Απόσταση ράβδων ή ματισμένων ράβδων όχι λιγότερη από d_b , επικάλυψη όχι μικρότερη από d_b , και συνδετήρες ή εγκάρσιοι σύνδεσμοι κατά μήκος του l_d όχι μικρότερο από το ελάχιστο του κώδικα ή Απόσταση ράβδων ή ματισμένων ράβδων όχι μικρότερο από $2 d_b$ και επικάλυψη όχι μικρότερη από d_b .	$\left(\frac{f_y \psi_t \psi_e}{25 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$	$\left(\frac{f_y \psi_t \psi_e}{20 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$
Άλλες περιπτώσεις	$\left(\frac{3 f_y \psi_t \psi_e}{50 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$	$\left(\frac{3 f_y \psi_t \psi_e}{40 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$

Πίνακας 2 Υπολογισμός l_d [4]

Πρέπει να σημειώσουμε ότι σε κάθε περίπτωση το μήκος αγκύρωσης l_d δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 12 in. (1 inch=25.4 mm).

Ένας δεύτερος και γενικότερος τρόπος υπολογισμού του μήκους αγκύρωσης l_d , δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$l_d = \left(\frac{3f_y \psi_t \psi_e \psi_s}{40\lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \quad (1.12)$$

Όπου $\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \leq 2.5$ και $K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{s \cdot n}$

Για τον συντελεστή K_{tr} ο κανονισμός επιτρέπει να λαμβάνεται ίσος με το μηδέν ακόμα και αν υπάρχει οπλισμός περισφιξης.

f_y : εφελκυστική τάση ράβδου (psi), 1MPa=145psi

$\psi_t = 1.3$ εάν 12" σκυροδέματος έχουν σκυροδετηθεί κάτω από τους οπλισμούς (top bars) και 1.0 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις

$\psi_e =$ συντελεστής προστασίας από διάβρωση με τιμές 1.0, για απροστάτευτες ράβδους, 1.5 για ράβδους προστατευμένες με επικάλυψη <3db ή απόσταση μεταξύ ράβδων <6 db και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις 1,2.

Επισημαίνεται ότι το γινόμενο $\alpha \cdot \beta$ δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 1.7.

$\psi_s =$ συντελεστής οπλισμού αναλόγως της διαμέτρου του οπλισμού με τιμές 0.8 για Νο6(19mm) ράβδους οπλισμού και μικρότερες και 1 για ράβδους οπλισμού μεγαλύτερες του Νο7(22mm).

$\lambda =$ συντελεστής σκυροδέματος που λαμβάνει τη τιμή 1 για συνήθη σκυροδέματα και 1.3 για ελαφροσκυροδέμα εκτός εάν προσδιορίζεται η χαρακτηριστική κυλινδρική αντοχή του σκυροδέματος (split strength) οπότε το λ δίνεται ως:

$$\lambda = \frac{6,7\sqrt{f'_c}}{f_{ct}} \geq 1 \quad (1.13)$$

f'_c = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

f_{ct} = εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

A_{tr} =Εμβαδό σκέλους συνδετήρα

d_b =διάμετρος ράβδου

n = αριθμός ράβδων

s = μέγιστη απόσταση συνδετήρων κατά μήκος του μήκους μάτισης.

c =η μικρότερη τιμή από :

- Το μισό της κεντρικής απόστασης μεταξύ των ράβδων και
- Της επικάλυψης του σκυροδέματος στη ράβδο συν το μισό της διαμέτρου της ράβδου.

Οι παράμετροι οι οποίοι αυξάνουν το μήκος παράθεσης l_d είναι το f_y , το α για τις άνω ράβδους, ο συντελεστής προστασίας από διάβρωση (β), η επικάλυψη σύμφωνα με τα οριζόμενα ανωτέρω και η διάμετρος οπλισμού (d_b), ενώ οι παράμετροι οι οποίοι μειώνουν το l_d είναι η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (μέχρι τη τιμή των 100 psi) και η αύξηση του ποσοστού του οπλισμού περίσφιξης (K_{tr}) όταν ληφθεί υπ' όψιν στους υπολογισμούς.

Για το βασικό μήκος αγκύρωσης σε **θλίψη** l_{dc} δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερο από 8 in. και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$l_{dc} = \max \left(\frac{0.02 f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b ; 0.0003 f_y d_b \right) \quad (1.14)$$

Β) Για την **αγκύρωση με άγκιστρα** το μήκος αγκύρωσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$l_{dh} = \frac{0.02 \psi_e f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b \quad (1.15)$$

Όπου

$\psi_e = 1.2$ για ράβδους προστατευμένες έναντι διάβρωσης και 1,0 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις

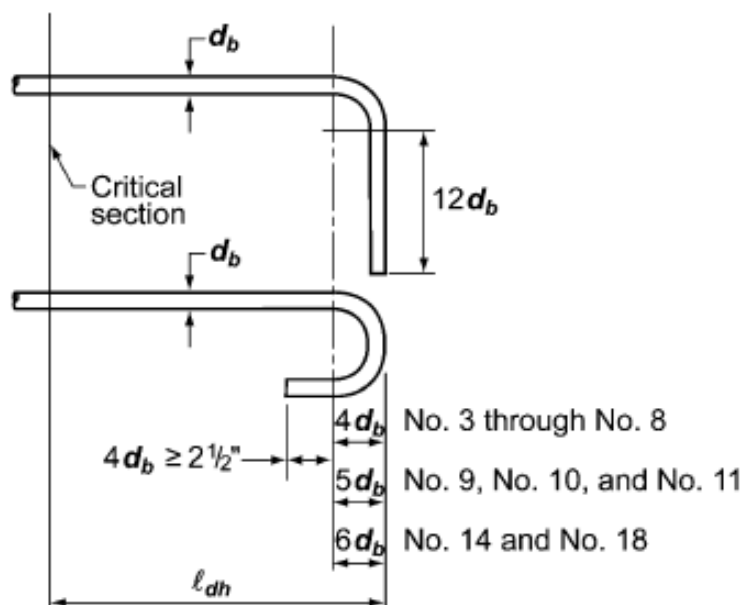
$\lambda = 0,75$ για ελαφροσκυρόδεμα και 1,0 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις

Το μήκος αγκύρωσης l_{dh} σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να είναι μικρότερο από :

$$l_{dh} \geq \max(8d_b; 6in.) \quad (1.16)$$

Επιπλέον το μήκος αγκύρωσης l_{dh} μπορεί να πολλαπλασιάζεται με τους παρακάτω συντελεστές :

α) Για ράβδους Νο 11 και μικρότερα άγκιστρα με 2,5 in. και άγκιστρα με 90° (Εικ. 14), ο συντελεστής είναι 0,7.



Εικ. 14 Λεπτομέρειες για άγκιστρα [4]

β) Για 90° άγκιστρα ράβδων μέχρι Νο 11, τα οποία είναι μέσα σε συνδετήρες (περίσφιξη) (για λεπτομέρειες βλέπε Εικ. 15), ο συντελεστής είναι 0,8.

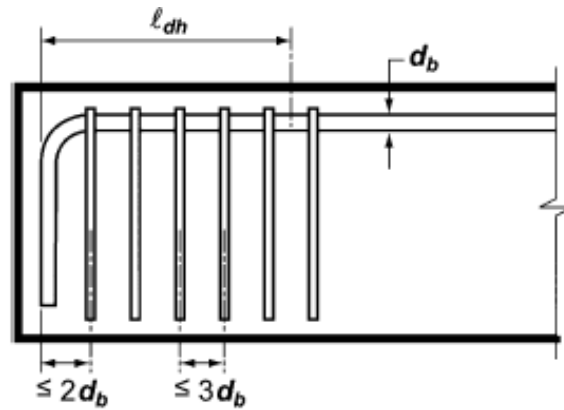


Fig. R12.5.3(a)—Ties or stirrups placed perpendicular to the bar being developed, spaced along the development length ℓ_{dh} .

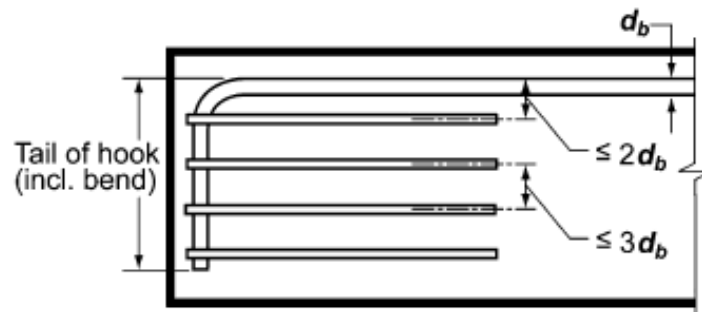


Fig. R12.5.3(b)—Ties or stirrups placed parallel to the bar being developed, spaced along the length of the tail extension of the hook plus bend.

Εικ. 15 Λεπτομέρειες για άγκιστρα μέσα σε συνδετήρες [4]

Γ) Για την **μηχανική αγκύρωση** με διεύρυνση του άκρου της ράβδου (headed bars) ο Αμερικάνικος κανονισμός αναφέρει τα εξής :

- το όριο διαρροής της ράβδου δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 60000 psi (413,69 Mpa)
- η ράβδος δεν μπορεί είναι μεγαλύτερη από No 11 (Φ36)
- δεν επιτρέπεται το ελαφροσκυρόδεμα
- η καθαρή επιφάνεια του διευρυμένου άκρου (head) A_{brg} πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $4 \cdot A_b$ (επιφάνεια της ράβδου που πρόκειται να αγκυρωθεί)
- η επικάλυψη της ράβδου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $2 \cdot d_b$
- απόσταση μεταξύ των ράβδων να μην είναι λιγότερη από $4 \cdot d_b$

Ο υπολογισμός για το μήκος αγκύρωσης l_{dt} δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$l_{dt} = \frac{0.016\psi_e f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b \quad (1.17)$$

Όπου

Ο τύπος ισχύει μόνο για μονάδες σε psi.

f'_c = δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 60000 psi (413,69 MPa)

ψ_e = 1.2 για ράβδους προστατευμένες έναντι διάβρωσης και 1,0 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις

Για μονάδες σε MPa χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο :

$$l_{dt} = \frac{0.75\psi_e f_y}{6.2\sqrt{f'_c}} d_b \quad (1.18)$$

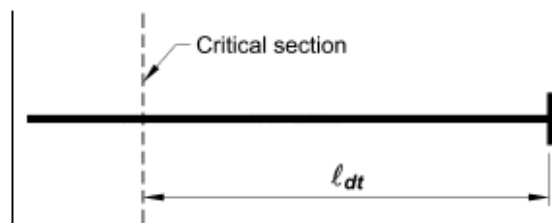


Fig. R12.6(a)—Development of headed deformed bars.

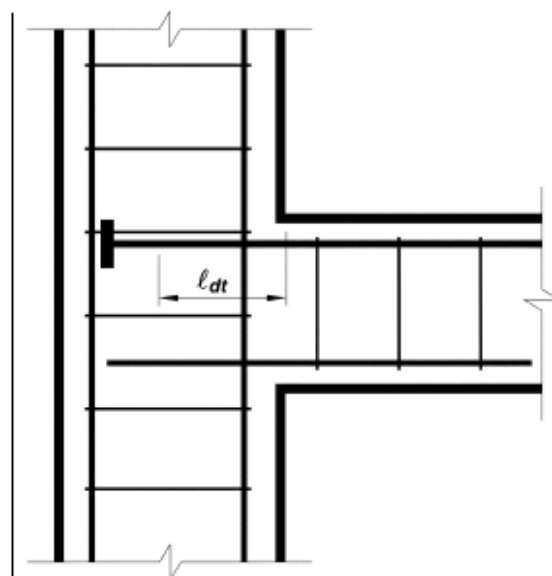
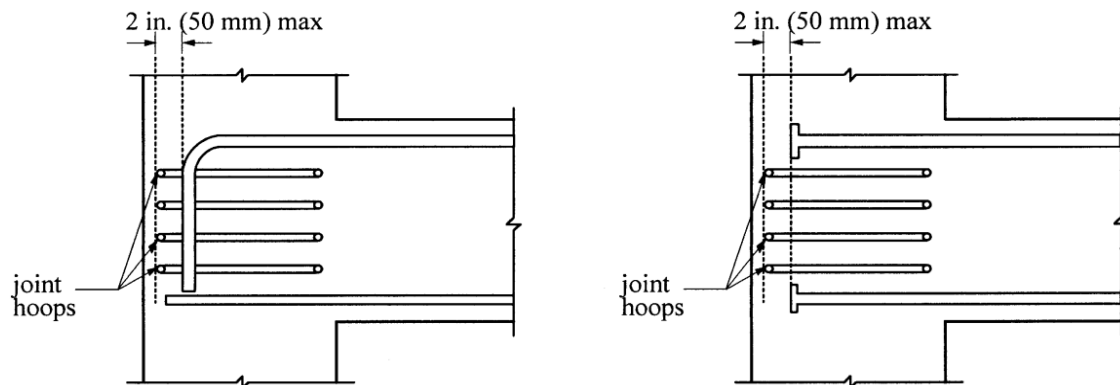


Fig. R12.6(b)—Headed deformed bar extended to far side of column core with anchorage length that exceeds l_{dt} .

Εικ. 16 Αγκύρωση με διευρυμένο άκρο (headed bar) [4]

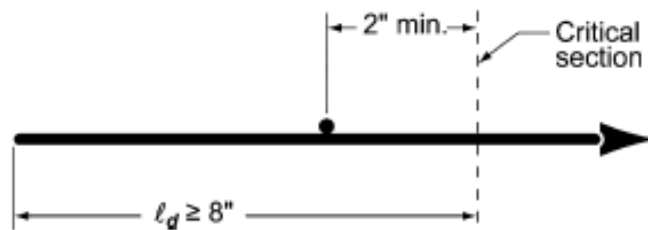
Επιπλέον αναφέρεται ότι η αγκύρωση με διευρυμένο άκρο (headed bar) δεν συνεισφέρει θετικά στη θλίψη.



Εικ. 17 Λεπτομέρειες για αγκύρωση με headed bars σε κόμβο [5]

Δ) Ο Αμερικάνικος κανονισμός αναφέρεται σε αγκύρωση με **συγκολλημένο σύρμα**. Ο τρόπος υπολογισμού είναι παρόμοιος με τον τύπο (1.12) και Πίνακας 2 με την διαφορά ότι πρέπει το μήκος αγκύρωσης να πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή ψ_w ο οποίος δίνεται παρακάτω :

$$\psi_w = \max \left(\frac{f_y - 35000}{f_y}; \frac{5d_b}{s} \right) \leq 1.0 \quad (1.19)$$



Εικ. 18 Αγκύρωση με συγκολλημένο σύρμα [4]

1.3 Αστοχία αγκύρωσης διαμήκων οπλισμών

Ο διαμήκης οπλισμός ακραίων δοκών πρέπει να αγκυρωθεί μέσα στον κόμβο δοκού – υποστυλώματος. Σε πολλές περιπτώσεις το πλάτος του υποστυλώματος δεν επαρκεί για αυτή την αγκύρωση ακόμα και εάν χρησιμοποιηθεί άγκιστρο στο άκρο της ράβδου. Συνήθης περίπτωση ανεπαρκούς αγκύρωσης είναι οι κάτω ράβδοι δοκών που αγκυρώνονται σε μικρό βάθος μέσα στον κόμβο. Όταν το μήκος αγκύρωσης δεν επαρκεί οι ράβδοι ολισθαίνουν και δημιουργείται ρωγμή κάθετα προς τη διεύθυνση ολίσθησης (Εικ. 19, Εικ. 20).



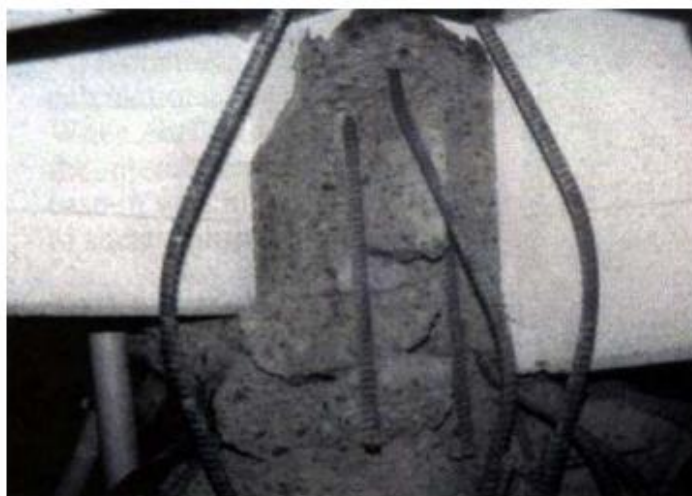
Εικ. 19 Ανεπαρκής αγκύρωση πάνω & κάτω ράβδων δοκού [3]

Στην Εικ. 20 η σκυροδέτηση του υποστυλώματος έφτασε σε στάθμη πάνω από τη μασχάλη της δοκού με αποτέλεσμα οι κάτω οπλισμοί της δοκού να μην μπορούν εύκολα να αγκυρωθούν μέσα στον κόμβο και να προκύψει κατά το σεισμό κατακόρυφη ρωγμή στη σύνδεση δοκού και κόμβου.



Εικ. 20 Ανεπαρκής αγκύρωση κάτω ράβδων δοκού λόγω σκυροδέτησης υποστυλώματος πάνω από τη μασχάλη δοκού [3]

Σε ακραίους κόμβους υποστυλωμάτων οι διαμήκεις οπλισμοί αγκυρώνονται μέσα στον κόμβο. Σε παλαιότερες κατασκευές δεν τοποθετούνταν συνδετήρες μέσα στον κόμβο, οπότε οι οπλισμοί του υποστυλώματος αγκυρώνονταν σε ουσιαστικά άοπλο σκυρόδεμα. Υπό τη δράση κυκλικών ανελαστικών φορτο-αποφορτίσεων αναπτύσσονται τάσεις διάρρηξεως στις ζώνες αγκύρωσης οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν διάρρηξη του απερίσφιγτου σκυροδέματος του κόμβου (Εικ. 21). Όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί απαιτούν την τοποθέτηση εγκάρσιων οπλισμών στις περιοχές των αγκυρώσεων και στους κόμβους συνήθως επαρκεί ο εγκάρσιος οπλισμός που πρέπει να υπάρχει και εξυπηρετεί άλλο σκοπό (π.χ. οπλισμός διάτμησης).



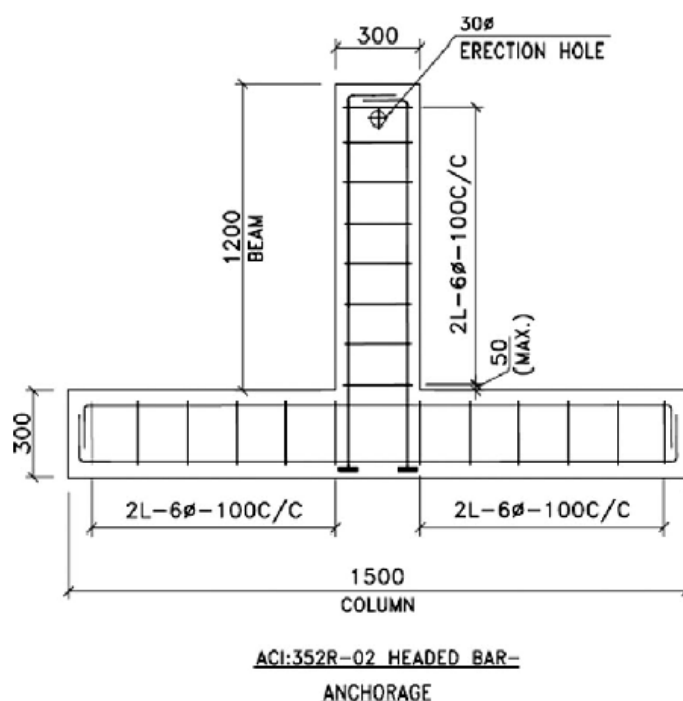
Εικ. 21 Διάρρηξη απερίσφιγτου σκυροδέματος κόμβου [3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο- Πειραματικές διατάξεις για εναλλακτική αγκύρωση και σχετικές αναφορές

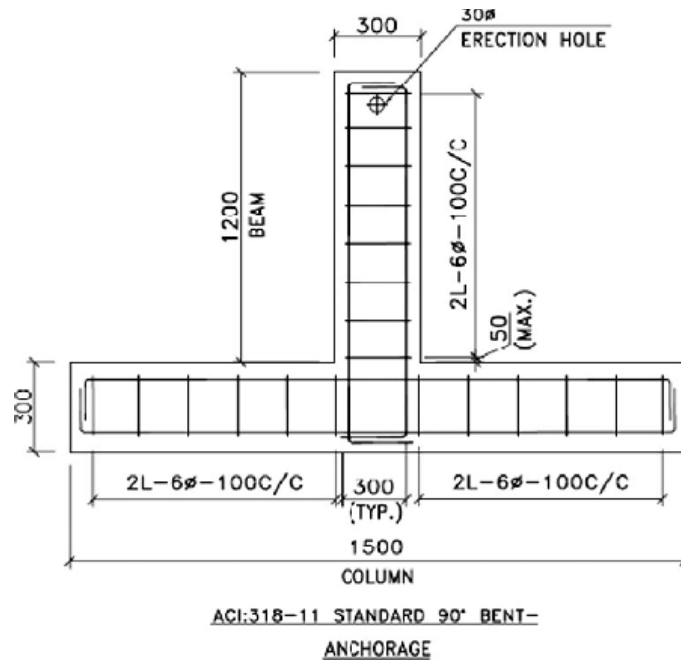
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο Αμερικάνικος κανονισμός (ACI-318-08) επιτρέπει ως εναλλακτική λύση τη μηχανική αγκύρωση με κεφαλή στο άκρο (mechanical anchorage with headed bars) ώστε να μειωθεί το μήκος αγκύρωσης μίας ράβδου οπλισμού. Παρακάτω θα αναπτύξουμε μερικά από τα πειράματα που έχουν γίνει παγκοσμίως με θέμα τη μηχανική αγκύρωση με διευρυμένο άκρο της ράβδου που πρόκειται να αγκυρωθεί.

S RAJAGOPAL and S PRABAVATHY, “Μελέτη κόμβου δοκού-υποστυλώματος με μη συμβατικές λεπτομέρειες όπλισης-με μηχανική αγκύρωση σε εναλλασσόμενη φόρτιση”, India 2014.

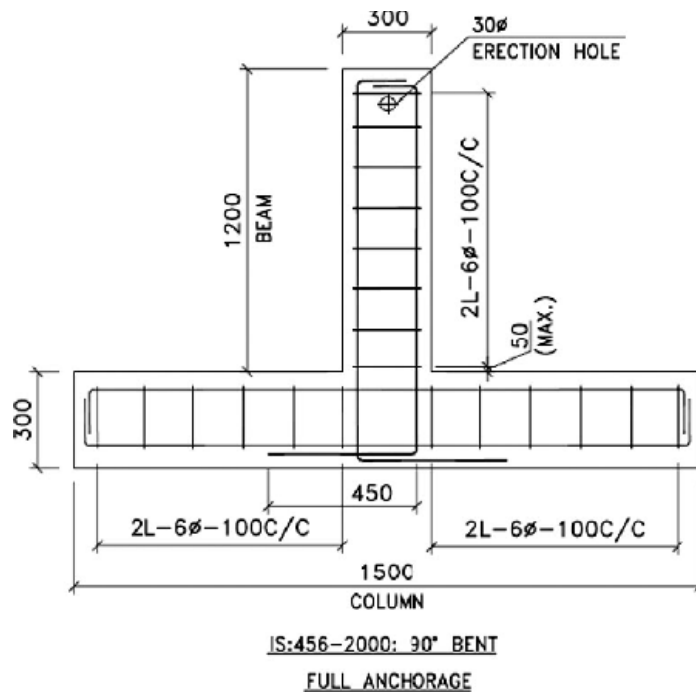
Στη συγκεκριμένη αναφορά έχουν κατασκευαστεί τρία δοκίμια κόμβου δοκού-υποστυλώματος, ώστε να μελετηθεί και να συγκριθεί η συμπεριφορά τους σε εναλλασσόμενη φόρτιση. Ο κόμβος δοκού-υποστυλώματος είναι η πιο κρίσιμη περιοχή σε μια κατασκευή κατά την οποία υπόκειται σε σεισμό. Η σωστή αγκύρωση είναι απαραίτητη ώστε ο κόμβος να αποδώσει τα αναμενόμενα.



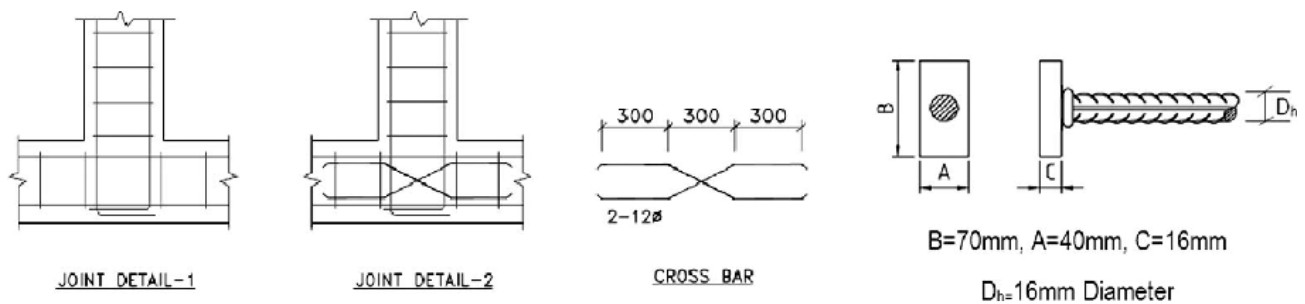
Εικ. 22 Δοκίμιο A με μηχανική αγκύρωση (headed bars) σύμφωνα με ACI-352R-02 [7]



Εικ. 23 Δοκίμιο Β με συμβατική αγκύρωση σύμφωνα με ACI-318-11 [7]

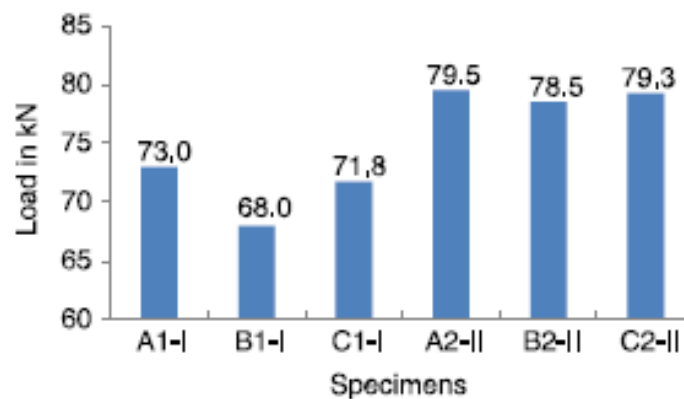


Εικ. 24 Δοκίμιο C με συμβατική αγκύρωση σύμφωνα με IS:456-2000 [7]

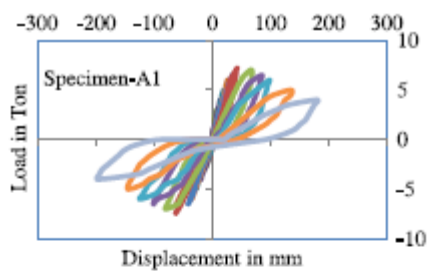


Εικ. 25 Λεπτομέρειες όπλισης κόμβου δοκού υποστυλώματος [7]

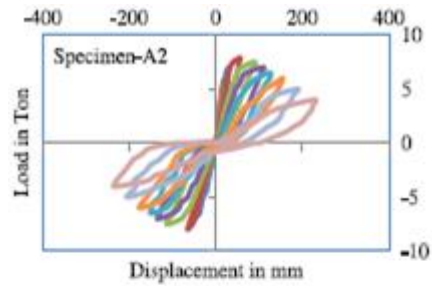
Τα αποτελέσματα των δοκιμών, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα (Εικ. 27, Εικ. 28), δείχνουν ότι για την ομάδα 1 (βλέπε Εικ. 25 Detail-1) τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα έχει ο τύπος-A (headed bars) με 73 KN και ακολουθεί ο τύπος-C και τύπος-B (Εικ. 26). Για την ομάδα 2 (βλέπε Εικ. 25) τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα έχει και πάλι ο τύπος-A (headed bars) με 79,5 KN με μικρή διαφορά από το τύπο-C με 79,3 KN και ακολουθεί ο τύπος-B με 78,5 KN (Εικ. 26). Επιπλέον από την Εικ. 26 παρατηρούμε ότι η ομάδα 2 των δοκιμών, η οποία έχει χιαστί οπλισμό μέσα στο κόμβο, παρουσιάζει σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας από ότι η ομάδα 1.



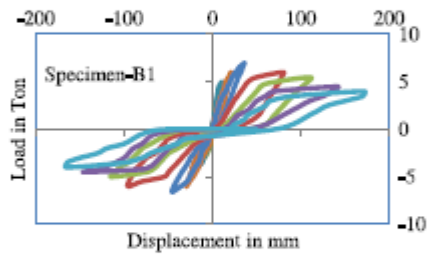
Εικ. 26 Φέρουσα ικανότητα [7]



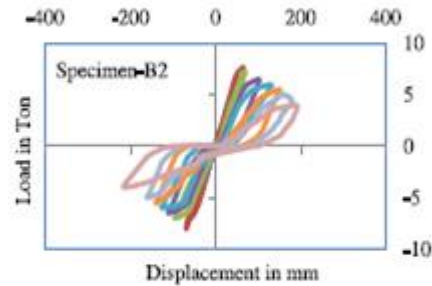
Load vs displacement (A1).



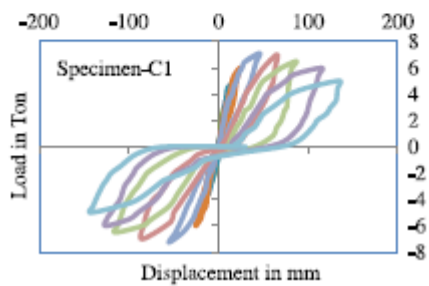
Load vs displacement (A2).



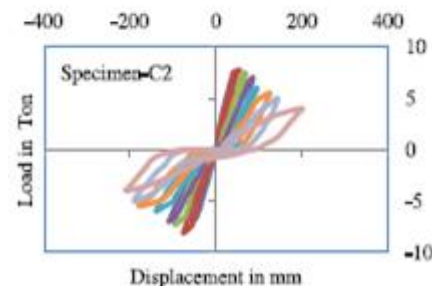
Load vs displacement (B1).



Load vs displacement (B2).

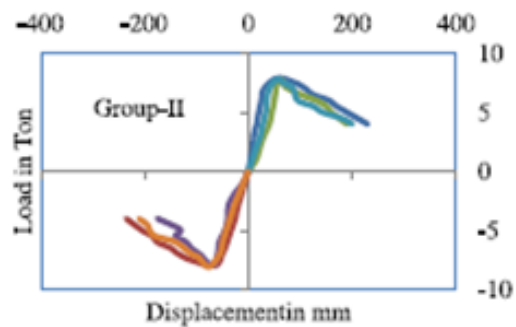
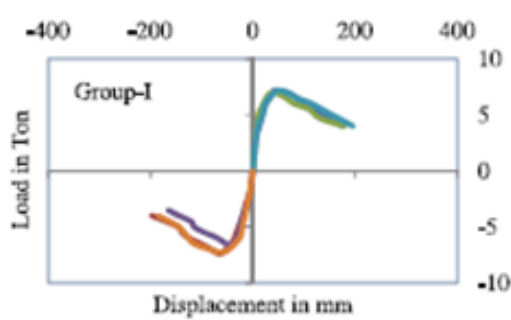


Load vs displacement (C1).



Load vs displacement (C2).

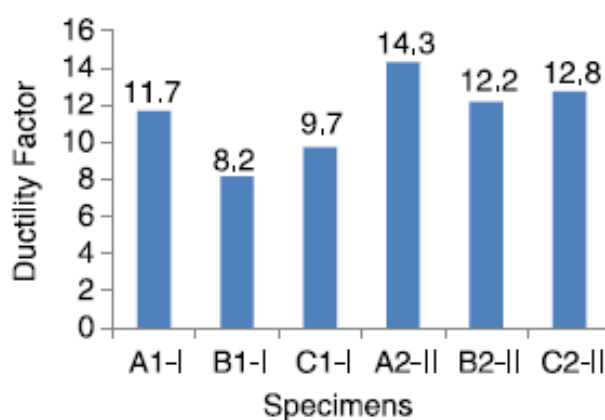
Εικ. 27 Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για τους τρεις τύπους δοκιμών [7]



Εικ. 28 Διαγράμματα μέγιστου φορτίου-μετατόπισης [7]

Ένας σημαντικός παράγοντας που μας ενδιαφέρει σε ένα κόμβο, ο οποίος καταπονείται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (σεισμό), είναι η πλαστιμότητα. Η πλαστιμότητα δίνει τη δυνατότητα στον κόμβο να παραμορφώνεται και μετά τη διαρροή των υλικών, χωρίς να χάνει την φέρουσα ικανότητα. Η πλαστιμότητα (μ) μπορεί να υπολογιστεί από το λόγο της μετακίνησης στην αστοχία (δ_u) προς την μετακίνηση διαρροής (δ_y).

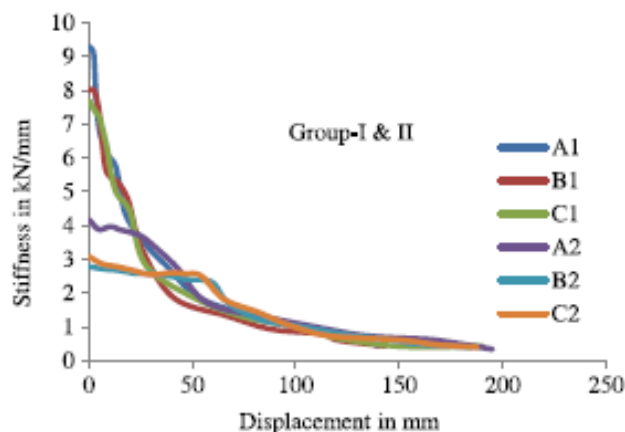
$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2.1)$$



Εικ. 29 Πλαστιμότητα (μ) [7]

Όπως παρατηρούμε από την Εικ. 29, η πλαστιμότητα για την αγκύρωση με headed bars (τύπος-A) είναι μεγαλύτερη και για τις δύο ομάδες δοκιμίων. Επιπλέον η ομάδα II έχει αρκετά μεγαλύτερη πλαστιμότητα, λόγω του χιαστί σπλισμού.

Κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση το σκυρόδεμα μέσα στον κόμβο δοκού-υποστυλώματος αποδιοργανώνεται λόγω των ρηγματώσεων που δημιουργούνται. Επομένως είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η μείωση της ακαμψίας του κόμβου. Η ακαμψία (K) υπολογίζεται από το λόγο της μέγιστης δύναμης (P) προς τη μέγιστη μετακίνηση (δ). Όπως παρατηρούμε στην Εικ. 30 και στον Πίνακα 3 την μεγαλύτερη ακαμψία έχει ο τύπος-A (headed bars) και για τις δύο ομάδες.



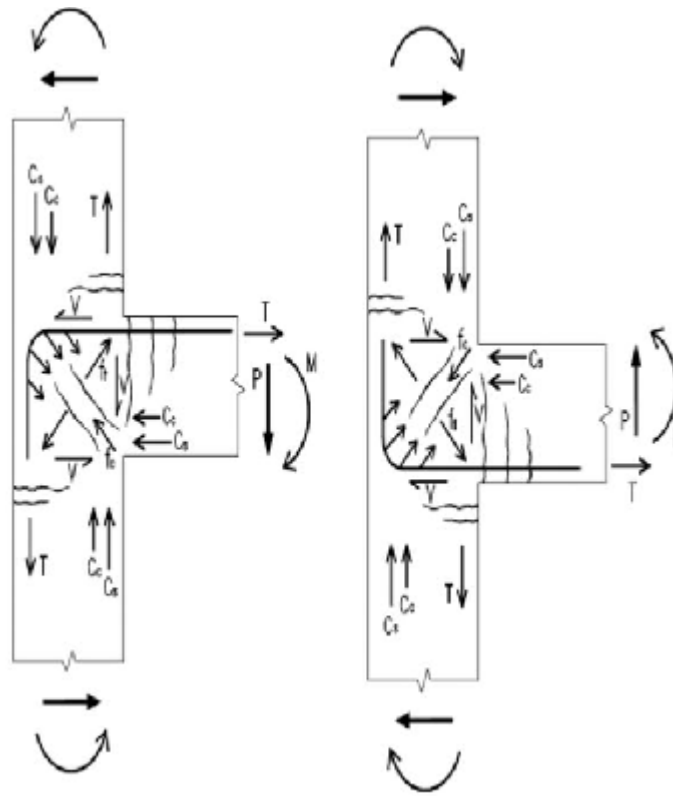
Εικ. 30 Διάγραμμα ακαμψίας-μετακίνησης [7]

Table 2. Observed yield load, ultimate load, ductility and stiffness of test specimens.

Specimens name and groups	Yielding displacement in mm (δ_y)	Ultimate load in kN (P_u)		Average ultimate load in kN (P_u)	Ultimate displacement in mm (δ_u)		Average displacement for ultimate load in mm (δ_u)	Average displacement ductility factor $\mu = \delta_u/\delta_y$	Average stiffness kN/mm $k = P_u/\delta_y$ in
		Left Side	Right Side		Left Side	Right Side			
		A1-I	4.50		72.00	74.00			
B1-I	5.00	70.00	66.00	68.00	35.96	45.85	40.905	8.181	13.600
C1-I	5.20	71.00	72.50	71.75	45.63	55.60	50.615	9.734	13.798
A2-II	4.23	79.00	80.00	79.50	56.00	65.32	60.660	14.340	18.794
B2-II	5.50	77.00	80.00	78.50	65.00	69.00	67.000	12.182	14.273
C2-II	5.12	77.50	81.00	79.25	54.63	75.96	65.295	12.753	15.479

Πίνακας 3 Μέση ακαμψία, πλαστιμότητα [7]

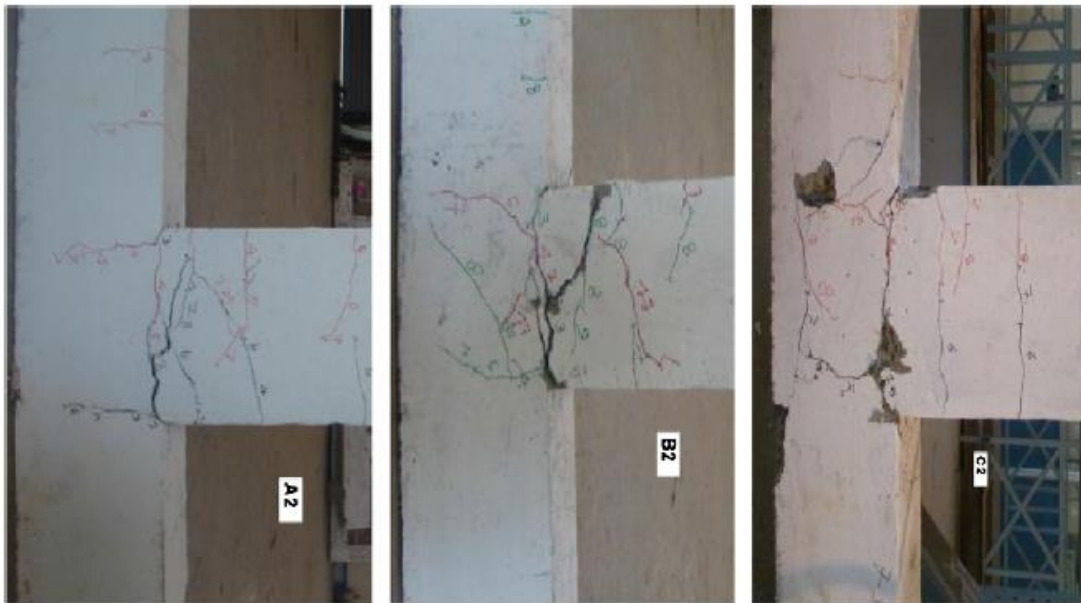
Από τις Εικ. 32, Εικ. 33 παρατηρούμε ότι καμπτικές και διατμητικές ρωγμές έχουν δημιουργηθεί σε όλα τα δοκίμια. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά στα δοκίμια τύπου-A, τα οποία έχουν μηχανική αγκύρωση (headed bars) και στα υπόλοιπα δοκίμια τύπου-B και τύπου-C, δεν έχουν διαγώνια ρωγή μέσα στον κόμβο. Αυτό συμβαίνει επειδή οι σπλισμοί της δοκού δεν έχουν αγκυρωθεί με άγκιστρο, επομένως δεν αναπτύσσεται κατά τη μία διαγώνιο θλίψη και κατά την άλλη εφελκυσμός(Εικ. 31). Επομένως οι κόμβοι με μηχανική αγκύρωση εκτός ότι έχουν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα, έχουν και λιγότερες ρηγματώσεις το οποίο σημαίνει ότι θα επισκευάζεται και πιο εύκολα.



Εικ. 31 Δυνάμεις που καταπονούν τον κόμβο σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση [7]



Εικ. 32 Καμπτικές και διατμητικές ρωγμές στα δοκίμια της ομάδας 1 [7]



Εικ. 33 Καμπτικές και διατμητικές ρωγμές στα δοκίμια της ομάδας 2 [7]

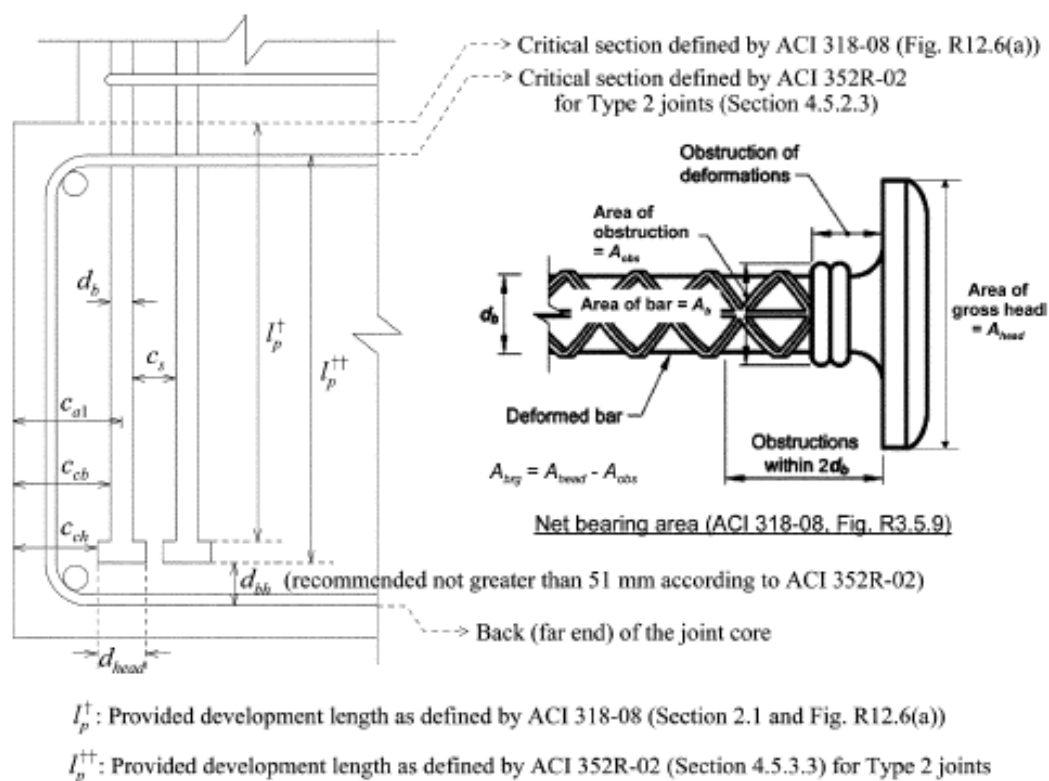
Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι σύμφωνα με τα πειράματα των S RAJAGOPAL και S PRABAVATHY, οι κόμβοι με μηχανική αγκύρωση έχουν καλύτερη απόδοση από ότι με συμβατική αγκύρωση, εφόσον υπερτερούν σε φέρουσα ικανότητα, πλαστιμότητα και ακαμψία. Επιπλέον με τη μηχανική αγκύρωση δημιουργείται και αποσυμφόρηση των οπλισμών μέσα στον κόμβο.

Thomas H.-K. Kang, Myoungsu Shin, Nilanjan Mitra, and John F. Bonacci, "Seismic Design of Reinforced Concrete Beam-Column Joints with Headed Bars", ACI STRUCTURAL JOURNAL, 2009.

Στη συγκεκριμένη αναφορά για τον Αμερικάνικο κανονισμό (ACI) έχει γίνει μία προσπάθεια να συγκεντρωθούν όλα τα πειραματικά δεδομένα από όλο τον κόσμο ώστε να αξιολογηθούν, επειδή ο ACI-352R-02 και ο ACI-318-08 βασίζονταν σε περιορισμένη πειραματική έρευνα. Όλα τα πειραματικά δεδομένα αφορούν ανακυκλική φόρτιση κόμβου δοκού-υποστυλώματος με μηχανική αγκύρωση. Κύριος στόχος της μελέτης αυτής είναι η τεκμηρίωση των πειραματικών ερευνών, η ανασκόπηση των πειραματικών δεδομένων και να προτείνει κατευθυντήριες γραμμές στο σχεδιασμό ώστε να συμπληρώσει τους κανονισμούς ACI-352R-02 και ο ACI-318-08.

Από το σύνολο των δοκιμών για τις οποίες έχουν αναφερθεί τα σχετικά δεδομένα, διαπιστώθηκε ότι τάσεις συνάφειας ενεργοποιούνται για πολύ

μικρές παραμορφώσεις οπότε αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής στην αγκύρωση του οπλισμού. Καθώς όμως οι παραμορφώσεις αυξάνονται, το διευρυμένο άκρο του οπλισμού ή κεφάλι ράβδου (headed bar) έχει σημαντική συνεισφορά στην αγκύρωση κατά την ανελαστική συμπεριφορά (μετά από 2,5-4% παραμόρφωση). Αυτό σημαίνει ότι και οι δύο μηχανισμοί συμβάλουν στην ικανοποιητική συμπεριφορά του κόμβου στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση, αλλά με διαφορετικό βαθμό ανάλογα με τις παραμορφώσεις.



Εικ. 34 Λεπτομέρειες όπλισης με μηχανική αγκύρωση [8]

Τα συμπεράσματα και οι συστάσεις που μπορούν να εξαχθούν από αυτή τη μελέτη είναι τα εξής :

Το μήκος αγκύρωσης l_{dt} για μηχανική αγκύρωση (headed bars) σε κόμβο δοκού-υποστυλώματος που συνιστά ο κανονισμός ACI-352R-02 είναι πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα, ενώ το μήκος αγκύρωσης που καθορίζει ACI-318-08 είναι πιο συντηρητικός.

Βάσει της εξέτασης των προηγούμενων δεδομένων, η καθαρή επιφάνεια της κεφαλής της ράβδου προτείνεται να είναι τουλάχιστον τριπλάσια από την

επιφάνεια της διατομής της ράβδου που πρόκειται να αγκυρωθεί σε ένα κόμβο δοκού-υποστυλώματος.

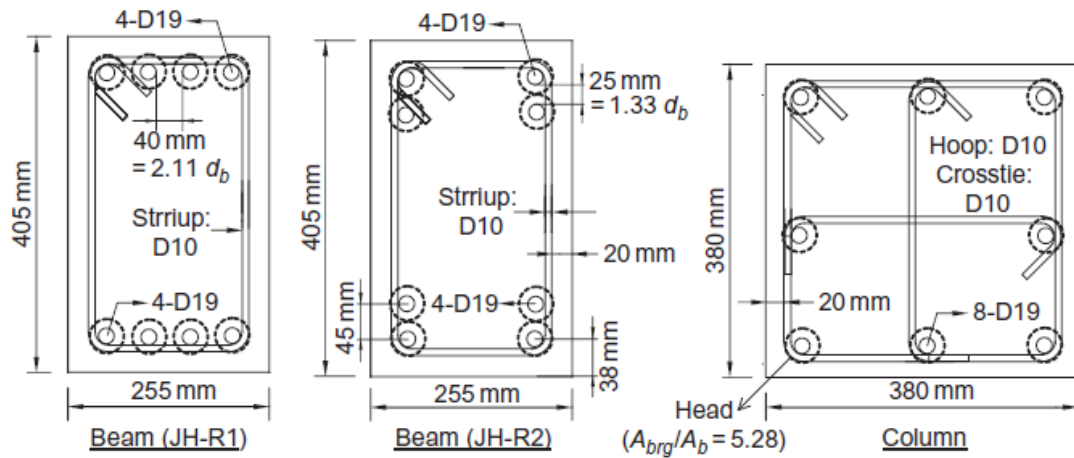
Για το σχεδιασμό κόμβου δοκού-υποστυλώματος, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ράβδων μπορεί να μειωθεί σε $2d_b$ από $4d_b$, η οποία απαιτείται από το ACI 318-08. Αυτό βασίζεται στην παρατήρηση ότι η αντοχή του κόμβου δοκού-υποστυλώματος δεν επηρεάζεται από τη καθαρή απόσταση των ράβδων (C_s), καθώς η απόσταση C_s κυμαίνεται από $1.2d_b$ έως $7.6d_b$.

THOMAS H.-K. KANG, WOOSUK KIM, and MYOUNGSU SHIN, “Cyclic Testing for Seismic Design Guide of Beam-Column Joints with Closely Spaced Headed Bars”, Korea 2011.

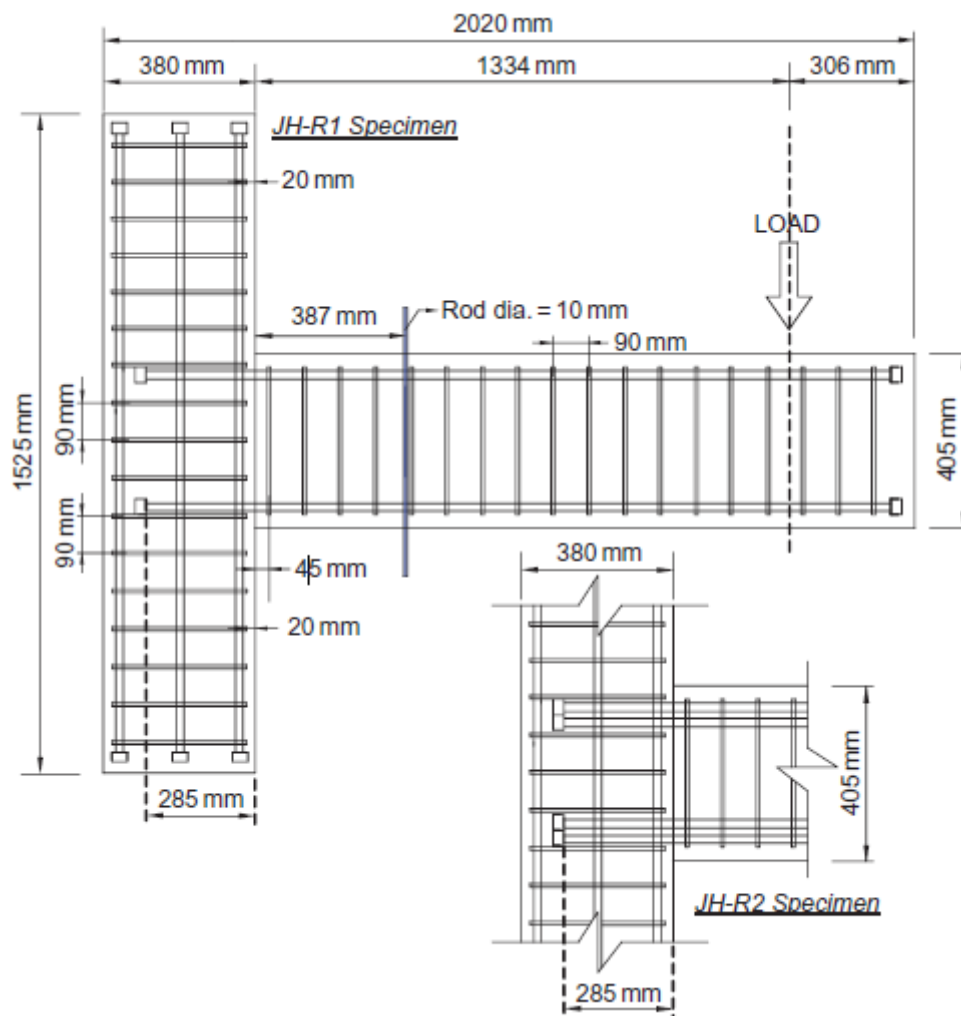
Το συγκεκριμένο πείραμα αναφέρεται στις υπερβολικές αυστηρές απαιτήσεις του ACI 318-08, όσον αφορά τις καθαρές αποστάσεις μεταξύ των ράβδων οπλισμού που αγκυρώνονται με μηχανική αγκύρωση (headed bars). Με το πείραμα αυτό στόχος είναι να διερευνηθεί κυρίως η σεισμική συμπεριφορά των κόμβων δοκού-υποστυλώματος, στους οποίους έχουν χρησιμοποιηθεί οπλισμοί με μικρές καθαρές αποστάσεις μεταξύ τους και περισσότερες από μια στρώσεις οπλισμών. Το συμπέρασμα ήταν ότι η καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων περίπου $2d_b$ ή τη χρήση των δύο στρώσεων οπλισμού μπορεί να επιτραπεί σε εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων με μηχανική αγκύρωση.

Σε αυτή τη μελέτη, εξετάστηκαν δύο κόμβοι δοκού-υποστυλώματος : ένας κόμβος με μία στρώση οπλισμού και μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και ο άλλος με δύο οριζόντιες στρώσεις με μηχανική αγκύρωση (headed bars) (Εικ. 35). Κάθε δοκίμιο αντιπροσωπεύει μια εξωτερική σύνδεση δοκού-υποστυλώματος σε πλευρική φόρτιση από σεισμό, λαμβάνοντας υπόψη μια πραγματική κατασκευή με ύψος 2,9 m και μήκος ανοίγματος 4,5 m, και επίσης τα δοκίμια έχουν κατασκευαστεί σε κλίμακα περίπου στα 2/3 της πραγματικής. Τα δείγματα σχεδιάστηκαν λεπτομερώς τηρώντας τις σεισμικές απαιτήσεις του κανονισμού (ACI 318-08) και τις συστάσεις (ACI 352R-02) που εφαρμόζονται για κόμβους δοκού-υποστυλώματος, εκτός από μερικές παραμέτρους σχεδιασμού που είναι στο επίκεντρο της παρούσας έρευνας. Αυτές οι παράμετροι είναι: (1) η καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων οπλισμού και (2) ο αριθμός των οριζόντιων στρώσεων των ράβδων. Η ενότητα 12.6 του

κανονισμού ACI 318-08 απαιτεί την ελάχιστη καθαρή απόσταση των $4d_b$ μεταξύ των ράβδων, έτσι ώστε να γίνεται έμμεσα απαγορευτική η χρήση πολλαπλών στρωμάτων ράβδων οπλισμού με κεφαλή σε δοκούς.



Εικ. 35 Τομές δοκού και υποστυλώματος [9]



Εικ. 36 Διαστάσεις και λεπτομέρειες από τους δύο κόμβους (JH-R1 και JH-R2) [9]

Τα δοκίμια παρουσιάζουν ικανοποιητική πλαστιμότητα, με ανάπτυξη πλαστικής άρθρωσης στη δοκό και καμία αξιοσημείωτη μείωση της αντοχής του κόμβου ή κάποιος ασυνήθιστος μηχανισμός αστοχίας. Αυτό το συμπέρασμα βασίζεται από τη συνολική απόκριση φορτίου-μετατόπισης, τις ρωγμές που δημιουργήθηκαν, τη στροφή της δοκού, τις διατμητικές παραμορφώσεις του κόμβου και τη σύγκριση μεταξύ της ροπής αντοχής σχεδιασμού και της μετρούμενης ροπής. Επιπλέον, τα δοκίμια με μικρές αποστάσεις μεταξύ των ράβδων (JH-R1) και με πολλαπλές στρώσεις ράβδων (JHR2), έδειξαν ικανοποιητική απόδοση υπό πλευρική ανακυκλιζόμενη φόρτιση και ειδικότερα, η υποβάθμιση της αντοχής κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου, δηλαδή μετά από παραμόρφωση 4%, ήταν μόνο περίπου 6 έως 8% του μέγιστου φορτίου στο JH-R1 και JH-R2 αντίστοιχα. Το δοκίμιο JH-R2 με δύο στρώσεις οπλισμού και σε μικρή κατακόρυφη απόσταση ο ένας από τον άλλον έδειξε μια υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας, καθώς και υψηλότερη τέμνουσα δυσκαμψία από JH-R1. Αυτό έγινε πιθανώς επειδή η μικρότερη απόσταση μεταξύ των ράβδων στο JH-R1 επιτάχυνε ελαφρώς τη μείωση της συνάφειας των τεσσάρων ράβδων οπλισμού. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών και προηγούμενα δεδομένα δοκιμών, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων περίπου $2d_b$ ή η χρήση δύο στρώσεων οπλισμού μπορεί να επιτρέπεται σε εξωτερικούς κόμβους δοκών υποστυλωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο- Ανάπτυξη λογισμικού για τη μη γραμμική συμπεριφορά δοκών οπλισμένου σκυροδέματος

Για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας των δοκιμών του παρακάτω πειράματος χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα excel. Εκτός από τη φέρουσα ικανότητα των δοκιμών, με το λογισμικό υπολογίζουμε τις παραμορφώσεις κάθε διατομής κατά μήκος της δοκού ανά ένα εκατοστό και κατ' επέκταση της καμπυλότητας ($1/r$), της στροφής (θ) και τα βέλη κάμψης (w). Με βάση το λογισμικό θα υπολογίσουμε την αντοχή του κάθε δοκιμίου, καθώς και τις παραμορφώσεις, καμπυλότητα, στρόφη, βέλος κάμψης.

3.1 Καμπτική αντοχή M_{Rd}

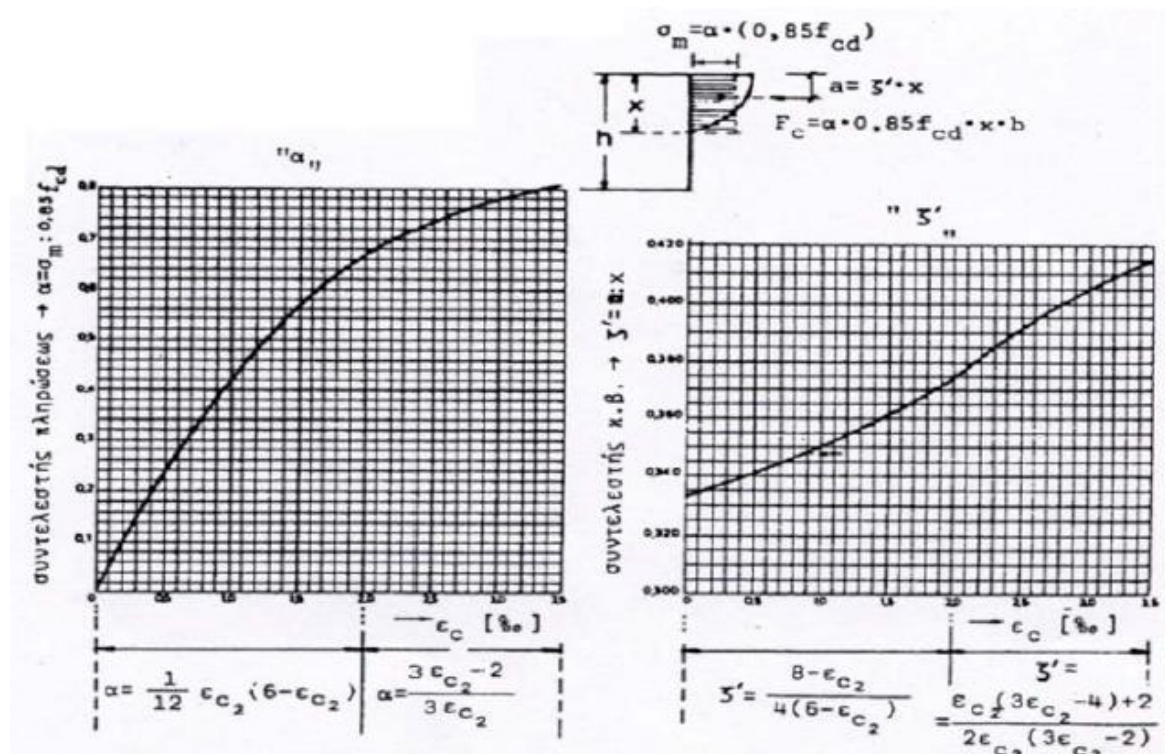
Αρχικά ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα της διατομής της δοκού όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα (Εικ. 37).

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			
h=	0,24 m		
b=	0,15 m		
d=	0,223 m		
d1=	0,017 m	(επικάλυψη άπο τη κάτω ίνα)	
d2=	0,02 m	(επικάλυψη άπο τη άνω ίνα)	
As1=2Φ8	100,53 mm ²		
As2=2Φ8	100,53 mm ²		
f _y =	500 Mpa		
f _c =	16 Mpa		
f _{ctm} =	1,9 Mpa		
ε _y =	2,5 ‰		
E _c =	27500 Mpa		
E _s =	200.000 Mpa		

Εικ. 37 Εισαγωγή δεδομένων διατομής δοκού

Για την αντοχή σε κάμψη στην κατάσταση αστοχίας ακολουθήσαμε τα εξής : Αρχικά θεωρήσαμε $\epsilon_{c2}=3.5$ ‰ και με όμοια τρίγωνα υπολογίζουμε τις παραμορφώσεις ϵ_{s1} και ϵ_{s2} συναρτήσεϊ του x (ύψος θλιβόμενης ζώνης). Στη

συνέχεια υπολογίζουμε τους συντελεστές πλήρωσης (α) και κέντρο βάρους (ζ') τα οποία είναι συναρτήσεις του ϵ_{c2} και οι τύποι δίνονται από των Ευρωκώδικα 2 [1].



Εικ. 38 Διαγράμματα και τύποι για τους συντελεστές α και ζ' [1]

Ακολουθεί ο υπολογισμός της θλιπτικής δύναμης στο σκυρόδεμα F_c και στο χάλυβα F_{s2} και η εφελκυστική δύναμη στο χάλυβα F_{s1} , όπως φαίνεται στους παρακάτω τύπους .

$$F_c = \alpha x f_{cd} b \quad (3.1)$$

$$F_{s1} = A_{s1} f_y \quad (3.2)$$

$$F_{s2} = A_{s2} f_y \frac{\epsilon_{s2}}{\epsilon_y} \quad (3.3)$$

Επιπλέον ελέγχεται αν οι χάλυβες έχουν υπερβεί το όριο διαρροής μέσω της συνθήκης $\epsilon_{s1} < \epsilon_y$ και αν ισχύει χρησιμοποιούμε τον τύπο(3.3), διαφορετικά χρησιμοποιούμε το τύπο (3.2). Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω δυνάμεις

υπολογίζουμε τη συνισταμένη $\Sigma F = F_c + F_{s1} + F_{s2} = 0$, η οποία πρέπει να είναι μηδέν για να υπάρχει ισορροπία στη διατομή. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις ροπές ως προς το κέντρο βάρους της διατομής όπως φαίνεται παρακάτω.

$$M_c = F_c \left(\frac{h}{2} - \zeta \cdot \chi \right) \quad (3.4)$$

$$M_{s1} = F_{s1} \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) \quad (3.5)$$

$$M_{s2} = F_{s2} \left(\frac{h}{2} - d_2 \right) \quad (3.6)$$

Από το άθροισμα των ροπών M_c, M_{s1}, M_{s2} υπολογίζουμε την ροπή αστοχίας M_{Rd} . Η διαδικασία αυτή γίνεται στο excel με την εντολή goal seek (αναζήτηση στόχου) (Εικ. 39), όπου αναζητούμε το κελί ΣF να είναι ίσο με το μηδέν αλλάζοντας το χ (ύψος θλιβόμενης ζώνης).

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	
h=	0,24 m
b=	0,15 m
d=	0,223 m
d1=	0,017 m
d2=	0,02 m
As1=2Φ8	100,53 mm ²
As2=2Φ8	100,53 mm ²
fy=	500 Mpa
fc=	16 Mpa
fctm=	1,9 Mpa
εy=	2,5 ‰
Ec=	27500 Mpa
Es=	200.000 Mpa

(επικάλυψη άπο τη κάτω ίνα)
(επικάλυψη άπο τη άνω ίνα)

Αναζήτηση στόχου

Ορισμός κελιού: \$G\$22

Στην πηγή: 0

Αλλαγή του κελιού: \$B\$18

OK Άκυρο

Σημείο όπου αστοχεί η διατομή:	
εc2=	3,5 ‰
x=	0,0222 m
εs1=εc2*(d-x)/x=	31,60479018 ‰ > εy=2,5
εs2=εc2*(x-d2)/x=	0,351588324 ‰ < εy=2,5
a=(3*εc2-2)/(3*εc2)=	0,810
ζ=(εc2*(3*εc2-4)+2)/(2*εc2*(3*εc2-2))=	0,416
Fc=	-43,20 KN
Fs1=	50,27 KN
Fs2=	-7,07 KN
Σ (F) =	0,00
Mc=	4,78 KNm
Ms1=	5,18 KNm
Ms2=	0,71 KNm
Mrd=	10,67 KNm

Εικ. 39 Εφαρμογή της εντολής αναζήτηση στόχου στο excel

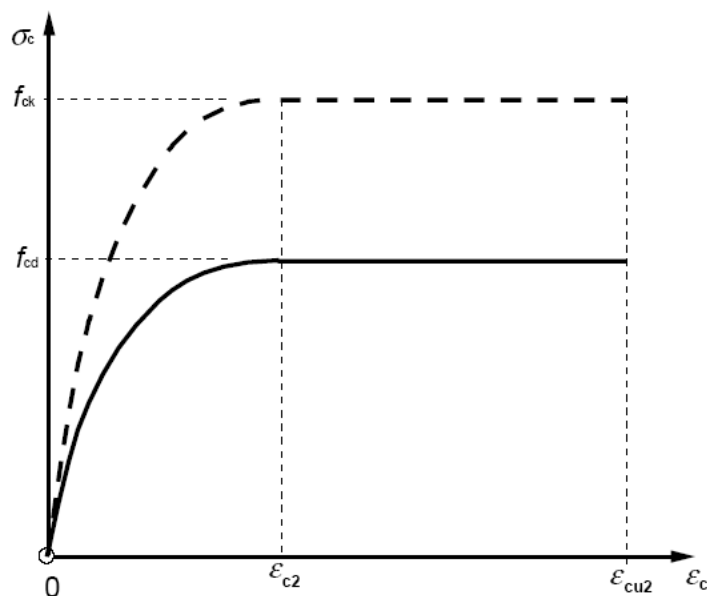
Με αυτόν τον τρόπο έχουν υπολογιστεί αυτόματα οι παραμορφώσεις, οι δυνάμεις και οι ροπές, ώστε να ισορροπεί η διατομή, δηλαδή το άθροισμα των δυνάμεων να είναι μηδέν.

Εκτός από την καμπτική αντοχή M_{Rd} , με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε τη ροπή M_{yc} , στην οποία διαρρέει το σκυρόδεμα στην ίνα 2 (πάνω), με τη διαφορά ότι θεωρούμε παραμόρφωση διαρροής $\epsilon_{c2}=2\text{‰}$ αντί για $\epsilon_{c2}=3,5\text{‰}$ (Εικ. 40).

Σημείο όπου διαρρέει το σκυρόδεμα στην ίνα 2 :							
$\epsilon_{c2}=\epsilon_{cy}=\text{‰}$	2						
$x=\text{m}$	0,0258						
$\epsilon_{s1}=\epsilon_{c2}*(d-x)/x=\text{‰}$	15,29970621	$> \epsilon_{y}=2,5$	$F_c=\text{KN}$	-41,25	$M_c=\text{KNm}$	4,55	
$\epsilon_{s2}=\epsilon_{c2}*(x-d)/x=\text{‰}$	0,448456842	$< \epsilon_{y}=2,5$	$F_{s1}=\text{KN}$	50,27	$M_{s1}=\text{KNm}$	5,18	
$a=(3*\epsilon_{c2}-2)/(3*\epsilon_{c2})=\text{‰}$	0,667		$F_{s2}=\text{KN}$	-9,02	$M_{s2}=\text{KNm}$	0,90	
$\zeta=(\epsilon_{c2}*(3*\epsilon_{c2}-4)+2)/(2*\epsilon_{c2}*(3*\epsilon_{c2}-2))=\text{‰}$	0,375		$\Sigma (F)=$	0,00	$M_{yc}=\text{KNm}$	10,63	

Εικ. 40 Υπολογισμός ροπής όπου διαρρέει το σκυρόδεμα

Για τη ροπή M_y , στην οποία διαρρέει ο εφελκόμενος χάλυβας, θεωρούμε $\epsilon_{s1}=f_y/E_s=2,5\text{‰}$ (Εικ. 42). Επιπλέον επειδή χρησιμοποιούμε το παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα για το σκυρόδεμα (Εικ. 41) και η παραμόρφωση του σκυροδέματος είναι κάτω από το 2‰ ($\epsilon_{c2}=0,904\text{‰}$), η τάση του σκυροδέματος υπολογίζεται από τον τύπο (3.7).



Εικ. 41 Παραβολικό – ορθογωνικό διάγραμμα σκυροδέματος [1]

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cy}} \right)^n \right] \quad (3.7)$$

Σημείο όπου διαρρέει ο εφελκόμενος χάλυβας εs1 :							
εs1=εyd=	2,5 ‰						
x=	0,059 m						
εc2=εs1*x/(d-x)=	0,9044 ‰ < 2 ‰	Fc=	-38,22 KN	Mc=	3,80 KNm		
εs2=εs1*(x-d2)/(d-x)=	0,599 ‰ < 2,5 ‰	Fs1=	50,27 KN	Ms1=	5,18 KNm		
σcd=fc*(1-(1-εc2/εcy)^n)=	11,20 Mpa	Fs2=	-12,05 KN	Ms2=	1,20 KNm		
n=	2	Σ (F) =	0,00	My=	10,18 KNm		
a=εc2*(6-εc2)/12=	0,384						
ζ=(8-εc2)/(4*(6-εc2))=	0,348	(1/r)y=	0,01527				

Εικ. 42 Υπολογισμός ροπής M_y όπου διαρρέει ο εφελκόμενος χάλυβας

Για τη ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} θεωρούμε $\varepsilon_{c1} = f_{ctm}/E_c = 0.0691$ ‰ και όμοια με την ροπή M_y υπολογίζουμε τη ροπή ρηγμάτωσης (Εικ. 43).

Σημείο στη κατάσταση ρηγμάτωσης :							
εc1=fctm/E=	0,0691 ‰						
x=	0,121 m	Fc2=	-0,58 KN	Mc2=	0,05 KNm		
εc2=εc1*x/(h-x)=	0,0703 ‰ < 2 ‰	Fs1=	1,19 KN	Ms1=	0,12 KNm		
εs1=εc1*(d-x)/(h-x)=	0,0592 ‰ < 2,5 ‰	Fs2=	-1,18 KN	Ms2=	0,12 KNm		
εs2=εc1*(x-d2)/(h-x)=	0,0587 ‰ < 2,5 ‰	Fc1=	0,57 KN	Mc1=	0,05 KNm		
		Σ (F) =	0,00	Mcr=	0,33 KNm		
σcd=fc*(1-(1-εc2/εcy)^n)=	1,11 Mpa						
n=	2						
a=εc2*(6-εc2)/12=	0,029						
ζ=(8-εc2)/(4*(6-εc2))=	0,334						

Εικ. 43 Υπολογισμός της ροπής ρηγμάτωσης M_{cr}

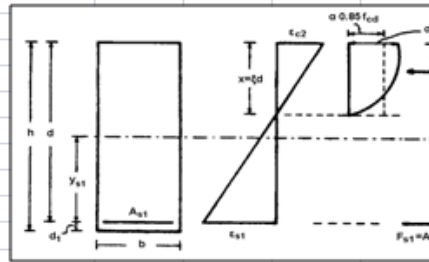
Για την εφελκυστική τάση σκυροδέματος f_{ctm} το οποίο εισάγουμε στην αρχή στα δεδομένα, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος E_c , τα βρίσκουμε στον ευρωκώδικα 2 όπως παρατηρούμε στον παρακάτω Πίνακας 4.

Αντοχή														Αναλυτική σχέση / Εξήγηση			
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90			
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105			
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)		
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck} (2/3) \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \text{ fl In}(1+(f_{cm}/10)) > C50/60$		
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0.05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5% οριακό ποσοστό (fractile)		
$F_{ctk,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0.95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95% οριακό ποσοστό (fractile)		
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0.3}$ (f_{cm} σε MPa)		
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	βλ. Σχήμα 3.2 $\epsilon_{c1} (\text{‰}) = 0,7 f_{cm}$ 0,31 < 28		
ϵ_{cu1} (‰)		3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	βλ. Σχήμα 3.2 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c1} (\text{‰}) = 2,8 + 27[(98 -$		
ϵ_{c2} (‰)		2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	βλ. Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c2} (\text{‰}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)$ 0,53	
ϵ_{cu2} (‰)		3,5										3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	βλ. Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu2} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100] / 4$
N		2,0										1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100] / 4$
ϵ_{c3} (‰)		1,75										1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	βλ. Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c3} (\text{‰}) = 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50)/40]$
ϵ_{cu3} (‰)		3,5										3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	βλ. Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu3} (\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100] / 4$

Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος [1]

Επίσης χρησιμοποιήσαμε μακροεντολές ώστε να είναι πιο γρήγορος ο υπολογισμός των παραπάνω ροπών και παραμορφώσεων και έτσι με τη χρήση του κουμπιού επίλυση υπολογίζονται αυτόματα (Εικ. 44).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ										
2	h=	0,24	m								
3	b=	0,15	m								
4	d1=	0,025	m								
5	d2=	0,02	m								
6	d=	0,215	m								
7	As1=2Φ8	100,53	mm ²								
8	As2=2Φ8	100,53	mm ²								
9	fy=	500	Mpa								
10	fc=	16	Mpa								
11	fctm=	1,9	Mpa								
12	εy=	2,5	‰								
13	Ec=	27500	Mpa								
14	Es=	200.000	Mpa								
15											
16	Σημείο όπου αποτοίει η διατομή:										
17	εc2=	3,5	‰								
18	x=	0,0222	m								
19	εs1=εc2*(d-x)/x=	30,34542551	‰ > εy=2,5			Fc=	-43,20	KN	Mc=	4,78	KNm
20	εs2=εc2*(x-d2)/x=	0,351588324	‰ < εy=2,5			Fs1=	50,27	KN	Ms1=	4,78	KNm
21	a=(3*εc2-2)/(3*εc2)=	0,810				Fs2=	-7,07	KN	Ms2=	0,71	KNm
22	ζ=(εc2*(3*εc2-4)+2)/(2*εc2*(3*εc2-2))=	0,416				Σ (F) =	0,00		Mrd=	10,27	KNm
23											
24	Σημείο όπου διαρρέει το σκυρόδεμα στην ίνα 2 :										
25	εc2=εcy=	2	‰								
26	x=	0,0258	m								
27	εs1=εc2*(d-x)/x=	14,67908895	‰ > εy=2,5			Fc=	-41,25	KN	Mc=	4,55	KNm
28	εs2=εc2*(x-d2)/x=	0,448456842	‰ < εy=2,5			Fs1=	50,27	KN	Ms1=	4,78	KNm
29	a=(3*εc2-2)/(3*εc2)=	0,667				Fs2=	-9,02	KN	Ms2=	0,90	KNm
30	ζ=(εc2*(3*εc2-4)+2)/(2*εc2*(3*εc2-2))=	0,375				Σ (F) =	0,00		M=	10,23	KNm
31											
32	Σημείο όπου διαρρέει ο εφελκόμενος χάλυβας εs1 :						0,6007881				
33	εs1=εyd=	2,5	‰								
34	x=	0,058	m								
35	εc2=εs1*x/(d-x)=	0,9188	‰ < 2 ‰			Fc=	-38,19	KN	Mc=	3,81	KNm
36	εs2=εs1*(x-d2)/(d-x)=	0,601	‰ < 2,5 ‰			Fs1=	50,27	KN	Ms1=	4,78	KNm
37	σcd=fc*(1-(1-εc2/εcy)^n)=	11,32	Mpa			Fs2=	-12,08	KN	Ms2=	1,21	KNm
38	n=	2				Σ (F) =	0,00		My=	9,80	KNm
39	a=εc2*(6-εc2)/12=	0,389									
40	ζ=(8-εc2)/(4*(6-εc2))=	0,348				(1/r)y=	0,01590				
41											
42											
43	Σημείο πριν τη ρηγματώση :										
44	εc1=fctm/E=	0,0691	‰								
45	x=	0,118	m			Fc2=	-0,52	KN	Mc2=	0,04	KNm
46	εc2=εc1*x/(h-x)=	0,0670	‰ < 2 ‰			Fs1=	1,10	KN	Ms1=	0,10	KNm
47	εs1=εc1*(d-x)/(h-x)=	0,0549	‰ < 2,5 ‰			Fs2=	-1,12	KN	Ms2=	0,11	KNm
48	εs2=εc1*(x-d2)/(h-x)=	0,0557	‰ < 2,5 ‰			Fc1=	0,53	KN	Mc1=	0,04	KNm
49						Σ (F) =	0,00		Mcr=	0,30	KNm
50	σcd=fc*(1-(1-εc2/εcy)^n)=	1,05	Mpa								
51	n=	2									
52	a=εc2*(6-εc2)/12=	0,028									
53	ζ=(8-εc2)/(4*(6-εc2))=	0,334									
54											



(επικάλυψη άπο τη κάτω ίνα)
(επικάλυψη άπο τη άνω ίνα)

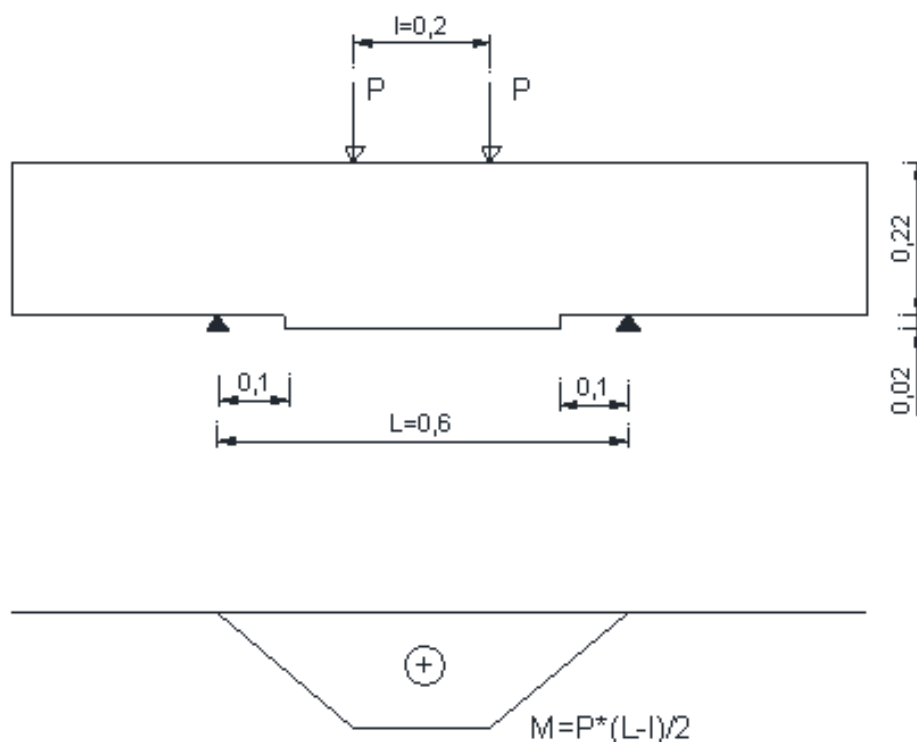
Επίλυση

Εικ. 44 Υπολογισμός ροπών και παραμορφώσεων

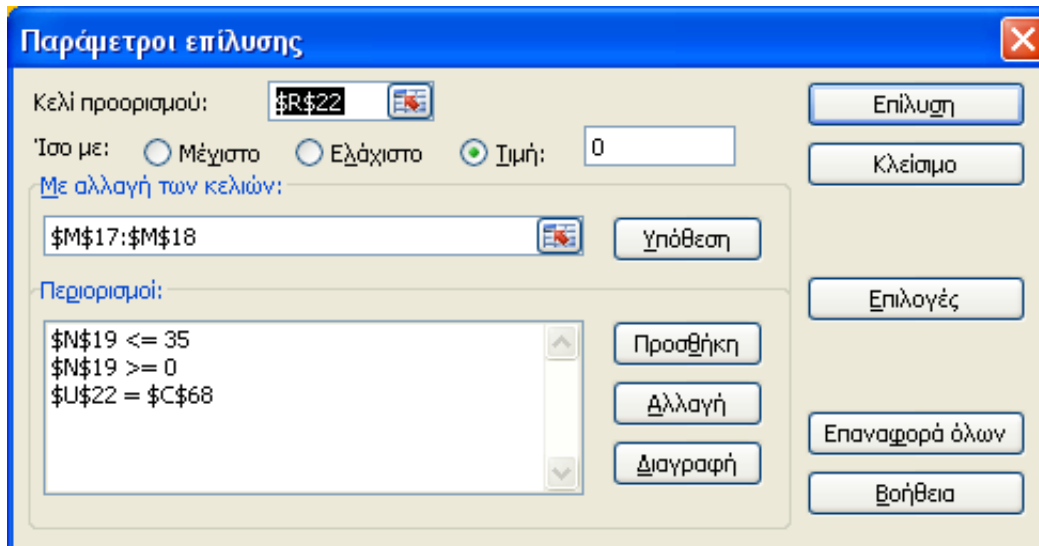
3.2 Υπολογισμός παραμορφώσεων, καμπυλότητας, στροφής και βέλους κάμψης

Το πρώτο μέρος του λογισμικού αναφέρεται στις τέσσερις χαρακτηριστικές ροπές (M_{Rd} , M_{yc} , M_y , M_{cr}) και τις αντίστοιχες παραμορφώσεις. Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τις παραμορφώσεις και τη καμπυλότητα κατά μήκος της δοκού. Επίσης υπολογίζουμε τη στροφή θ της δοκού με βάση το ΚΑΝΕΠΕ και το βέλος κάμψης.

Καταρχάς υπολογίζουμε τη ροπή, με βάση το φορτίο αστοχίας που έχει υπολογιστεί από το πρώτο μέρος, ανά ένα εκατοστό (1cm) από τη στήριξη κατά μήκος της δοκού μέχρι τη μέγιστη ροπή. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της εφαρμογής solver στο excel, γνωρίζοντας τη ροπή σε κάθε σημείο της δοκού, υπολογίζουμε τη παραμόρφωση του εφελκόμενου χάλυβα ϵ_{s1} και το ύψος της θλιβόμενης ζώνης χ . Επιπλέον στην εφαρμογή solver έχουμε τη δυνατότητα να βάλουμε και κάποιους περιορισμούς, δηλαδή η παραμόρφωση του σκυροδέματος ϵ_{c2} να κυμαίνεται από 0 έως 3,5 ‰.



Εικ. 45 Δοκίμιο και διάγραμμα ροπών για θετικές ροπές



Εικ. 46 Εφαρμογή solver στον παρακάτω πίνακα (Εικ. 47)

Παραμορφώσεις κατά μήκος της δοκού :					
$\epsilon_{s1} =$	0,6352632 ‰				
$x =$	0,073 m				
$\epsilon_{c2} = \epsilon_{s1} * x / (d - x) =$	0,3252 ‰ < 2 ‰	$F_c =$	-8,03 KN	$M_c =$	0,77 KNm
$\epsilon_{s2} = \epsilon_{s1} * (x - d_2) / (d - x) =$	0,236 ‰ < 2,5 ‰	$F_{s1} =$	12,77 KN	$M_{s1} =$	1,21 KNm
$\sigma_{cd} = f_c * (1 - (1 - \epsilon_{c2} / \epsilon_{cy})^n) =$	4,78 Mpa	$F_{s2} =$	-4,74 KN	$M_{s2} =$	0,47 KNm
$n =$	2	$\Sigma (F) =$	0,00	$M =$	2,45 KNm
$a = \epsilon_{c2} * (6 - \epsilon_{c2}) / 12 =$	0,154				
$\zeta = (8 - \epsilon_{c2}) / (4 * (6 - \epsilon_{c2})) =$	0,338				

Εικ. 47 Υπολογισμός παραμορφώσεων κατά μήκος της δοκού

Έτσι με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε όλες τις παραμορφώσεις ανά ένα εκατοστό μέχρι το σημείο μέγιστης ροπής. Επειδή ο φορέας είναι συμμετρικός το μήκος στο οποίο υπολογίσαμε τις παραμορφώσεις είναι από 0,0478 έως 0,20 m. Στον παρακάτω πίνακα (Εικ. 48) φαίνονται τα αποτελέσματα από την επίλυση της solver (χ , ϵ_{c2} , ϵ_{s1}) για κάθε ένα εκατοστό της δοκού, καθώς επίσης και της καμπυλότητας ($1/r$). Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας θεωρούμε ότι η δοκός συμπεριφέρεται γραμμικά οπότε

χρησιμοποιούμε τον τύπο (3.8). Επιπλέον για να είναι πιο αυτοματοποιημένος ο τρόπος υπολογισμού έχουν χρησιμοποιηθεί μακροεντολές.

$$\frac{1}{r} = \frac{(\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1})}{d} \quad (3.8)$$

64	P=	51,33	KN	(Φορτίο αστοχίας)			
65							
66	A/A	y (m) μήκος δοκού	M (KNm)	x (m) υψος θλιβόμενης ζώνης	εc2 (‰)	εs1 (‰)	1/r (m-1)
67	1	0	0	0	0	0	0
68	2	0,0478	2,45	0,073	0,3252	0,63526	0,00446747
69	3	0,0578	2,97	0,070	0,3737	0,76665	0,00530372
70	4	0,0678	3,48	0,069	0,4200	0,89773	0,00612874
71	5	0,0778	3,99	0,067	0,4646	1,02856	0,00694502
72	6	0,0878	4,51	0,066	0,5080	1,15919	0,00775434
73	7	0,0978	5,02	0,064	0,5503	1,28965	0,00855804
74	8	0,1078	5,53	0,063	0,5918	1,41998	0,00935715
75	9	0,1178	6,05	0,062	0,6326	1,55021	0,01015252
76	10	0,1278	6,56	0,061	0,6728	1,68035	0,01094482
77	11	0,1378	7,07	0,061	0,7125	1,81042	0,01173465
78	12	0,1478	7,59	0,060	0,7519	1,94044	0,01252249
79	13	0,1578	8,10	0,059	0,7910	2,07042	0,01330878
80	14	0,1678	8,61	0,059	0,8298	2,20039	0,01409391
81	15	0,1778	9,13	0,058	0,8685	2,33034	0,01487824
82	16	0,1878	9,64	0,058	0,9071	2,4603	0,0156621
83	17	0,1978	10,15	0,031	1,5245	9,14206	0,04961205
84	18	0,2	10,27	0,022	3,5	30,3454	0,15742058

Εικ. 48 Πίνακας παραμορφώσεων και καμπυλότητας

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη στροφή θ σύμφωνα με το Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ). Ο υπολογισμός της γωνίας στροφής χορδής στην καμπτική διαρροή της κρίσιμης περιοχής ενός μέλους μπορεί να προσδιορίζεται με τη χρήση των ακόλουθων εκφράσεων :

- Για δοκούς ή υποστυλώματα :

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \frac{(L_s + a_v z)}{3} + 0,0014 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (3.9)$$

- Για τοιχώματα :

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \frac{(L_s + a_v z)}{3} + 0,0013 + \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (3.10)$$

Όπου :

$(1/r)_y$: η καμπυλότητα διαρροής

L_s : Το μήκος διάτμησης (= στην ακραία διατομή του στοιχείου), δηλαδή η απόσταση της ακραίας διατομής από το σημείο μηδενισμού των ροπών.

a_v : ο συντελεστής ισούται με 1 αν η τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου, V_{R1} , υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή, $V_{Mu} = M_y / L_s$, και με 0 αν είναι μεγαλύτερη ($V_{R1} > V_{Mu}$). Η τέμνουσα V_{R1} κατά ευρωκώδικα.

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (3.11)$$

$$\text{Όπου : } C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}, \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \quad d(mm), \quad \rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0.02,$$

$$k_1 = 0,15, \quad \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0.2 f_{cd} (MPa)$$

f_y : η τάση διαρροής του χάλυβα σε MPa

f_c : η αντοχή του σκυροδέματος σε MPa

h : το ύψος της διατομής

z : ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων ($\approx 0,9d$)

d_b : η μέση διάμετρος ράβδου του εφελκόμενου οπλισμού

Ο πρώτος όρος εκφράζει τη συμβολή των καμπτικών παραμορφώσεων, ο δεύτερος όρος τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις στο μήκος L_s , ενώ ο

τρίτος όρος εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου.

Για τη μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία του στοιχείου :

$$\theta_{um} = 0.0160.3^v \left[\frac{\max(0.01; \omega 2)}{\max(0.01; \omega 1)} f_c \right]^{0.025} (a_s)^{0.35} 25^{\left(ap_s \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} 1.25^{100 p_d} \quad (3. 12)$$

Όπου :

a_s : ο λόγος διάτμησης, $M/V \cdot h = L_s/h$

$\omega 1, \omega 2$: Το μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού

v : η ανηγμένη αξονική δύναμη ως προς τις διαστάσεις της διατομής $N/bh f_c$

p_s : το γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης $A_{sh}/b_w s_h$

p_d : το γεωμετρικό ποσοστό τυχόντος δισδιαγώνιου οπλισμού

f_{yw}, f_c : οι αντοχές χάλυβα συνδετήρων και σκυροδέματος αντίστοιχα σε MPa

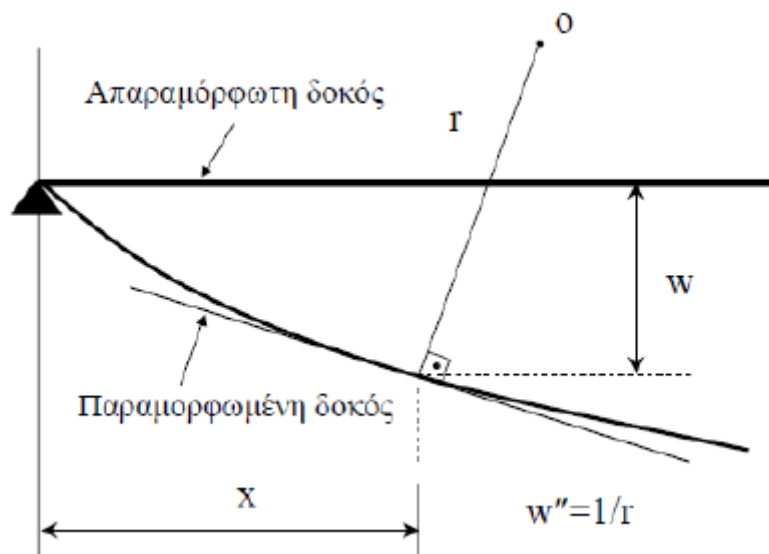
α : ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης που λαμβάνεται ίσος με μηδέν όταν οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος ($\geq 135^\circ$ στις γωνίες και $\geq 90^\circ$ στο ενδιάμεσο των πλευρών).

86										
87	Υπολογισμός θ Σύμφωνα με ΚΑΝΕΠΕ									
88										
89	$\theta y = (1/r)y^2(Ls + av^2z)/3 + 0,0014*(1 + 1,5*h/Ls) + (1/r)y*d*fy/(8*fc^{1/2})$									
90	$Ls = l/2 = 0,6$	$0,3$ m	(διαμηθικό μήκος)							
91										
92	$\kappa = 1 + (200/d)^{1/2} = 1 + (200/150)^{1/2} =$		$2,17 > 2 \rightarrow$	$\kappa =$	2					
93	$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c = 0,18/1,50 =$		$0,12$							
94	$A_s =$		$1,01$	cm^2						
95	$\rho_l = A_s/b*d = 1,01/(15*12,8) =$		$0,00526$							
96	$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} * \kappa * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + \kappa * 1 * \sigma] * b * w * d = [0,12 * 2 * (100 * 0,00526 * 16)^{1/3}] * 150 * 128 =$							$9306,98$		
97	$V_{Rd,c} =$		$9,31$	KN						
98										
99	$V_{m,u} = M_y/L_s = 8,90/0,3 =$		$29,67$	KN		$>$	$V_{Rd,c} \rightarrow av =$	1		
100										
101	$\theta y = (1/r)y^2(Ls + av^2z)/3 + 0,0014*(1 + 1,5*h/Ls) + (1/r)y*d*fy/(8*fc^{1/2}) =$							$0,03428195$	rad	
102										
103										
104	$\omega_1 = A_s1*fy_d/(b*d*fc_d) =$		$0,144441042$							
105	$\omega_2 = A_s2*fy_d/(b*d*fc_d) =$		$0,144441042$							
106	$\rho_s = A_s h/bw*sh =$		$0,006698667$							
107										
108	$\theta_{um} = 0,016*(0,3^4 v) * ((\max(0,01; \omega_2)/\max(0,01; \omega_1)) * f_{cj}^{0,025}) * (a_s^{0,35}) * (25^{(a * \rho_s * fy_w / fc)}) * (1,25^{(100 * \rho_d)}) =$									
109	$\theta_{um} =$		$0,041038714$	rad						

Εικ. 49 Υπολογισμός στρωφής σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ

Ο υπολογισμός του βέλους κάμψης γίνεται μέσω της παρακάτω σχέσης, όπως φαίνεται στο σχήμα.

$$w'' = \frac{1}{r} \quad (3.13)$$



Εικ. 50 Καμπυλότητα και βέλος κάμψης [6]

Επομένως υπολογίζεται η καμπυλότητα μέσω των παρακάτω σχέσεων :

$$\frac{1}{r} = \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_c)}{d} = \frac{M}{E_c I} \quad (3.14)$$

Επειδή η δοκός αποτελείται από δύο περιοχές, μία αρηγμάτωση και μία ρηγματωμένη, υπολογίζουμε μία μέση ροπή αδράνειας I_e .

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{Rd}} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{Rd}} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (3.15)$$

Όπου :

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} I_g}{h - x} \quad (3.16)$$

M_{Rd} : η ροπή κάμψης που προκαλεί το ζητούμενο βέλος κάμψης

Για την αρηγμάτωση διατομή :

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh \left(x - \frac{h}{2} \right)^2 + \mu A'_s (x - d')^2 + \mu A_s (d - x)^2 \quad (3.17)$$

$$x = \frac{\left(\mu A_s d + \mu A'_s d' + A_c \frac{h}{2} \right)}{A_c + \mu A'_s + \mu A_s} \quad (3.18)$$

$$\mu = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.19)$$

Για την ρηγματωμένη διατομή :

$$x = d \left(-\mu(\rho + \rho') + \sqrt{\mu^2(\rho + \rho')^2 + 2\mu \left[\rho + \rho' \left(\frac{d'}{d} \right) \right]} \right) \quad (3.20)$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} \left(\frac{x}{d} \right)^3 + \mu \rho \left(1 - \frac{x}{d} \right)^2 + \mu \rho' \left(\frac{x}{d} - \frac{d'}{d} \right)^2 \quad (3.21)$$

$$\left(\frac{1}{r} \right) = \frac{M}{E_c I_e} \quad (3.22)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση 3.13 προκύπτει προσεγγιστικά :

$$w = kl^2 \left(\frac{1}{r} \right) \quad (3.23)$$

Φόρτιση	Διάγραμμα ροπών κάμψης	Κ
		0.125
		$\frac{1 - 3a^2}{48(1-a)}$ εάν $a = \frac{1}{2}$ $K = \frac{1}{12}$
		0.0625
		$0.125 - \frac{a^2}{6}$
		0.104
		0.102
		$K = 0.104 \left(1 - \frac{\beta}{10} \right)$ $\beta = \frac{M_A + M_B}{M_C}$
		βέλος στο άκρο $\frac{a(3-a)}{6}$ φορτίο στο άκρο $K = 0.333$
		$\frac{a(4-a)}{12}$ εάν $a = 1$ $K = 0.25$
		$K = 0.083 \left(1 - \frac{\beta}{4} \right)$ $\beta = \frac{M_A + M_B}{M_C}$
		$\frac{1}{80} \frac{(5 - 4a^2)^2}{3 - 4a^2}$

Εικ. 51 Τιμές παραμέτρου κ για διάφορα διαγράμματα ροπών κάμψης [6]

112					
113	Υπολογισμός βέλους κάμψης κατά την αστοχία				
114					
115	Αρηγμάτωση διατομή				
116	$\mu=Es/Ec=$	7,27			
117	$x=(\mu*As1*d+\mu*As2*d2+Ac*h/2)/(Ac+\mu*As2+\mu*As1)=$		0,119902	m	
118	$Jg=b*h^3/12+b*h*(x-h/2)^2+(Es/Ec)*As2*(x-d2)^2+(Es/Ec)*As1*(d-x)^2=$			0,000186709	m4
119	$Mcr=(fct*Jg)/(h-x)=$	2,95	KNm		
120	Ρηγματωμένη διατομή				
121	$x=d*(-\mu*(\rho1+\rho2)+(\mu^2*(\rho1+\rho2)^2+2*\mu*(\rho1+\rho2*(d2/d1)))^0,5)=$		0,039097421	m	
122	$Jcr=b*d^3*((1/3)*(x/d)^3+\mu*\rho1*(1-x/d)^2+\mu*\rho2*(x/d-d2/d)^2)=$		2,58774E-05	m4	
123	$Je=(Mcr/Mrd)^3*Jg+(1-(Mcr/Mrd)^3)*Jcr=$	2,97084E-05		m4	
124	$(1/r)u=Mrd/(Ec*Je)=$	0,012566016		m^-1	
125	$k=0,125-a^2/6=$	0,106			
126	$wu=k*I^2*(1/r)u=$	0,0482		cm	
127					
128	Υπολογισμός βέλους κάμψης κατά τη διαρροή				
129	$(1/r)y=My/(Ec*Jcr)=$	0,011991421		m^-1	
130	$wy=k*I^2*(1/r)y=$	0,0460		cm	
131					
132	Υπολογισμός βέλους κάμψης κατά τη ρηγμάτωση				
133	$(1/r)t=Mcr/(Ec*Jg)=$	0,00057529		m^-1	
134	$wt=k*I^2*(1/r)t=$	0,0022		cm	

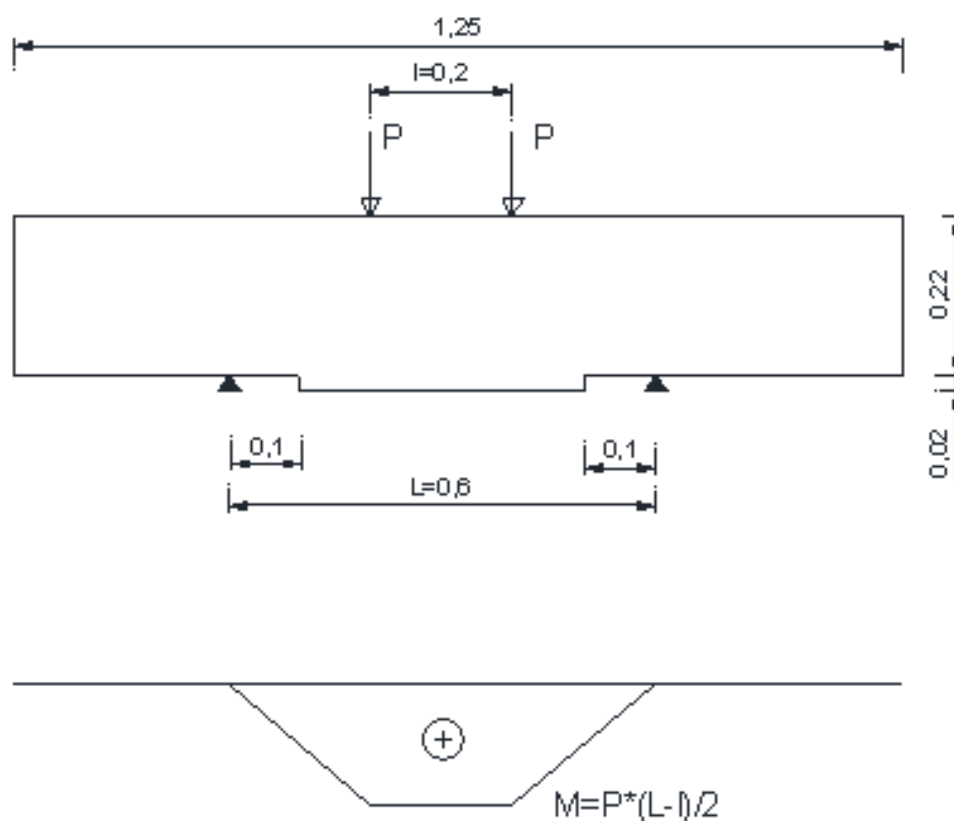
Εικ. 52 Υπολογισμός βέλους κάμψης

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ο υπολογισμός του βέλους κάμψης στη κατάσταση αστοχίας της διατομής, στη κατάσταση διαρροής της διατομής και στη κατάσταση ρηγμάτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – Πείραμα

4.1 Πειραματική διάταξη και γεωμετρία δοκού

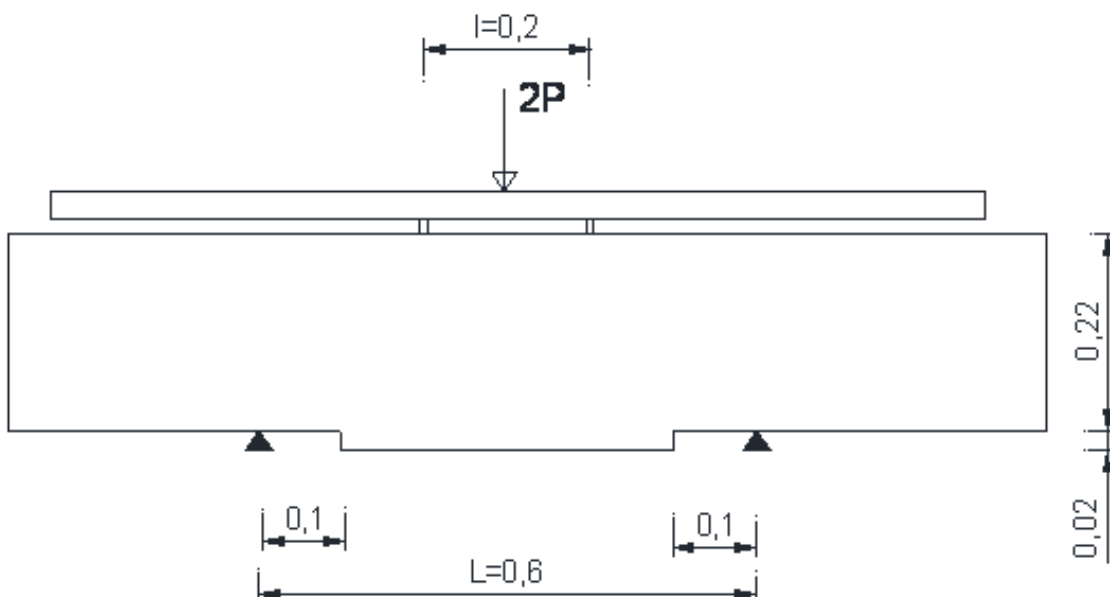
Σκοπός του πειράματος είναι η διερεύνηση των εναλλακτικών αγκυρώσεων και της συμπεριφοράς της δοκού σε ανακυκλική φόρτιση. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν τέσσερα δοκίμια, όπου η κάθε δοκός έχει μεγαλύτερη διατομή μεταξύ των στηρίξεων (0,15x0,24), ώστε να διερευνηθεί η εναλλακτική αγκύρωση του εφελκυσμένου οπλισμού, ενώ το υπόλοιπο τμήμα της δοκού έχει διατομή 0,15x0,22. Η περιοχή που μας ενδιαφέρει φαίνεται στη παρακάτω εικόνα (Εικ. 53) και η εναλλακτική αγκύρωση βρίσκεται στη διατομή 0,15x0,24. Τα δοκίμια έχουν κάποιες διαφορές στις διαστάσεις λόγω κατασκευαστικού σφάλματος αλλά και άλλων λόγων που θα αναφερθούν παρακάτω στη παρουσίαση όλων των δοκιμίων.



Εικ. 53 Πειραματική διάταξη για θετικές ροπές

Επιπλέον πρέπει να αναφέρουμε ότι η ανάγκη για εναλλακτική αγκύρωση προκύπτει από το γεγονός ότι ο εφελκόμενος οπλισμός στη διατομή $0,15 \times 0,24$ πρέπει να έχει ένα επαρκές μήκος αγκύρωσης από τη μέγιστη ροπή. Στη περίπτωση όπου δεν υπάρχει επαρκές μήκος αγκύρωσης ο χάλυβας δεν μπορεί να αναπτύξει τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για οπλισμό $\Phi 8$ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, όπως θα δούμε και παρακάτω στους υπολογισμούς, χρειάζεται μήκος αγκύρωσης $0,27$ m το οποίο δεν υπάρχει λόγω της γεωμετρίας της δοκού. Γι' αυτό κάνουμε χρήση των εναλλακτικών αγκυρώσεων με μηχανική αγκύρωση (headed bars), εγκάρσια συγκολλημένη ράβδος και πλάκα αγκύρωσης εξωτερικά.

Η δοκιμή πραγματοποιείται με μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων και εφαρμόσθηκε στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών. Η δοκός αφού τοποθετηθεί στη μηχανή, καταπονείται με δύο κατακόρυφες δυνάμεις που επιβάλλονται από τη μηχανή. Η επιβολή των δυνάμεων αυτών γίνεται μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου, που διαθέτει μετακινούμενες θέσεις των σημείων εφαρμογής των δυνάμεων (Εικ. 54, Εικ. 55).



Εικ. 54 Πειραματική διάταξη για θετικές ροπές

Με το στοιχείο αυτό, η ολική δύναμη της μηχανής διαιρείται σε δυο ίσες δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στο καθένα από τα δυο στοιχεία της δοκού - δοκιμίου. Η απόσταση ανάμεσα στις θέσεις εφαρμογής των δύο δυνάμεων είναι δυνατό να μεταβάλλεται.

Η πειραματική δοκιμή εκτελείται ως εξής: η δοκός- δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή κάμψης σχηματίζοντας μια αμφι-προέχουσα αμφιέριστη δοκό με συγκεκριμένο άνοιγμα (Εικ. 54, Εικ. 55). Στη συνέχεια, ρυθμίζοντας το μεταλλικό στοιχείο της μηχανής, η δοκός φορτίζεται με δυο ίσες κατακόρυφες δυνάμεις, που απέχουν μεταξύ τους μια επιλεγμένη απόσταση η οποία είναι μικρότερη από το άνοιγμα του δοκιμίου.



Εικ. 55 Πειραματική διάταξη για θετικές ροπές

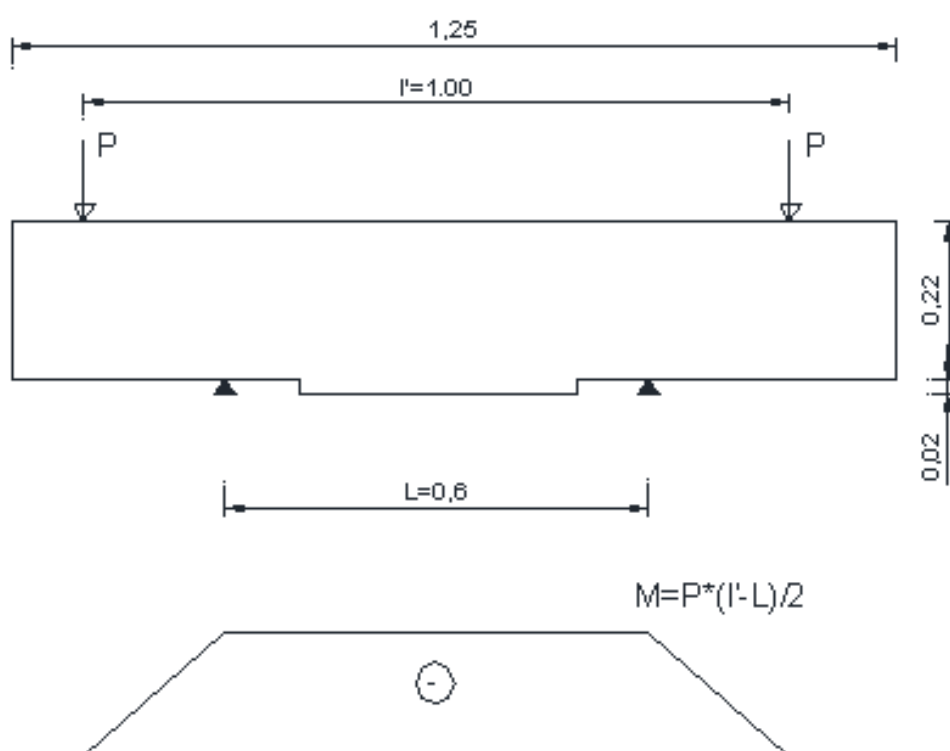
4.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής

Η πειραματική δοκιμή εκτελείται ως εξής : αφού η δοκός τοποθετηθεί στη μηχανή, έτσι ώστε οι δύο δυνάμεις της μηχανής να εφαρμόζονται εσωτερικά των στηρίξεων, αρχίζει η επιβολή των δυνάμεων στη δοκό-δοκίμιο (Εικ. 54). Η επιβολή των δυνάμεων γίνεται σιγά-σιγά και αυξητικά, προκειμένου να

αποφεύγονται δυναμικά φαινόμενα. Από την έναρξη επιβολής της δύναμης, και σε κάθε χρονική στιγμή από την έναρξη επιβολής της δύναμης, καταγράφονται:

- Το επιβαλλόμενο φορτίο P της μηχανής στη δοκό από την έναρξη της επιβολής της φόρτισης.
- Κατακόρυφες μετατοπίσεις Δl στο μέσον και στο άκρο της δοκού

Οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε κάθε χρονική στιγμή εκτέλεσης του πειράματος. Μετά το μηδενισμό της φόρτισης, μπορεί να γίνει ανακύκλιση της φόρτισης. Για να πραγματοποιηθεί ανακύκλιση της φόρτισης, ρυθμίζεται η απόσταση των επιβαλλόμενων δυνάμεων να είναι ίση με l' , που είναι μεγαλύτερη από το μήκος L , δηλαδή εξωτερικά των στηρίξεων (Εικ. 56). Με τον συγκεκριμένο τρόπο ο οπλισμός που μας ενδιαφέρει θλίβεται αντί να εφελκύεται όπως προηγουμένως.



Εικ. 56 Πειραματική διάταξη για αρνητικές ροπές

4..3 Προσδιορισμός εναλλακτικής αγκύρωσης

4.3.1 Συμβατική αγκύρωση Ευρωκώδικα 2

Το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 υπολογίζεται ως εξής :

$$l_{b,rqd} = \frac{\Phi \sigma_{sd}}{4 f_{bd}} = \frac{\Phi f_{yd}}{4 (2.25n_1n_2f_{ctd})} = 0.297m$$

$$f_{ctd} = 1.3MPa \text{ από τον Πίνακα 4 στο Κεφάλαιο 3.}$$

$$n_1=1$$

$$n_2=1$$

Στη συνέχεια το μήκος αγκύρωσης l_{bd} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κάποιους συντελεστές από τον παρακάτω τύπο :

$$l_{bd} = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 l_b \geq l_{b,\min}$$

Όπου :

$$a_1=1$$

$$a_2 = 1 - 0.15 \frac{(c_d - 3 * \Phi)}{\Phi} = 1,26 \text{ όμως πρέπει να είναι μικρότερο από}$$

ένα άρα $a_2=1$.

$$c_d = \min\left(\frac{a}{2}; c_1\right) = \min\left(\frac{12}{2}; 1\right) = 1cm$$

$$K=0,1$$

$$\lambda = \frac{(\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,\min})}{A_s} = 0.75$$

$$a_3 = 1 - K * \lambda = 0,925$$

$$a_5=1$$

$$l_{bd} = 1 * 1 * 1 * 0,925 * 0,297 = 0,27m$$

$l_{b,min} = \max(0.3 * l_{b,rqd}; 10 * \Phi; 100mm) = 100mm$ για αγκυρώσεις υπό εφελκυσμό

$l_{b,min} = \max(0.6 * l_{b,rqd}; 10 * \Phi; 100mm) = 178.4mm$ για αγκυρώσεις υπό θλίψη

Σε κάθε περίπτωση το $l_{bd} > l_{b,min}$ οπότε το μήκος αγκύρωσης για ευθύγραμμη αγκύρωση είναι $l_{bd} = 0.27m$.

106	Συμβατική μη ευθύγραμμη αγκύρωση για Φ8				
107	$l_{b,rqd} = \Phi * f_{yd} / 4 * f_{bd} = \Phi * f_{yd} / (4 * 2,25 * n_1 * n_2 * f_{ctd}) = 0,008 * 500 / (4 * 2,25 * 1 * 1 * 1,3) =$				0,297 m
108	$f_{ctd} =$	1,3 Mpa			
109	$l_{b,d} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$				
110	$l_{b,min} = \max(0,3 * l_{b,rqd}; 10 * \Phi; 100mm) =$	100 mm			για αγκυρώσεις υπο εφελκυσμό
111	$l_{b,min} = \max(0,6 * l_{b,rqd}; 10 * \Phi; 100mm) =$	178,37 mm			για αγκυρώσεις υπο θλίψη
112	$\alpha_1 =$	1			
113	$\alpha_2 = 1 - 0,15 * (c_d - 3 * \Phi) / \Phi = 1 - 0,15 * (10 - 3 * 8) / 8 =$		1,26	1	
114	$c_d = \min(a/2, c_1) = \min(12/2; 1) = \min(6; 1) =$	1 cm			
115	$K =$	0,1			
116	$\lambda = (0,5024 - 0,1256) / 0,5024 =$	0,75			
117	$\alpha_3 = 1 - K * \lambda = 1 - 0,1 * 0,925 =$	0,925			
118	$\alpha_5 =$	1			
119	$l_{b,d} = 1 * 1 * 1 * 0,925 * 0,297 =$	0,27 m			> $l_{b,min} = 0,10$

Εικ. 57 Υπολογισμός συμβατικής αγκύρωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2

4.3.2 Δοκίμιο με μηχανική αγκύρωση (headed bars)

Ένας τρόπος εναλλακτικής αγκύρωσης είναι η μηχανική αγκύρωση (headed bars), δηλαδή διευρυμένο άκρο στο χάλυβα σπλισμού (καρφί) (Εικ. 58). Η αγκύρωση με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται σύμφωνα με τον Αμερικάνικο κανονισμό **ACI-318R-08** και **ACI-352R-02** που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1^ο. Ο συγκεκριμένος τρόπος δεν καταργεί το μήκος αγκύρωσης αλλά το μειώνει πολύ, περίπου στο 45% του μήκους αγκύρωσης που απαιτείται από τον Ευρωκώδικα 2.



Εικ. 58 Μηχανική αγκύρωση (headed bars)



Εικ. 59 Μηχανική αγκύρωση (headed bars)

Οι υπολογισμοί είναι οι εξής :

$$l_{dt} = \frac{0.75\psi_e f_y}{6.2\sqrt{f'_c}} d_b = 0.145m$$

Όπου :

$$\psi_e=1.2$$

$$f_y=500 \text{ Mpa}$$

$$f_c=16 \text{ MPa}$$

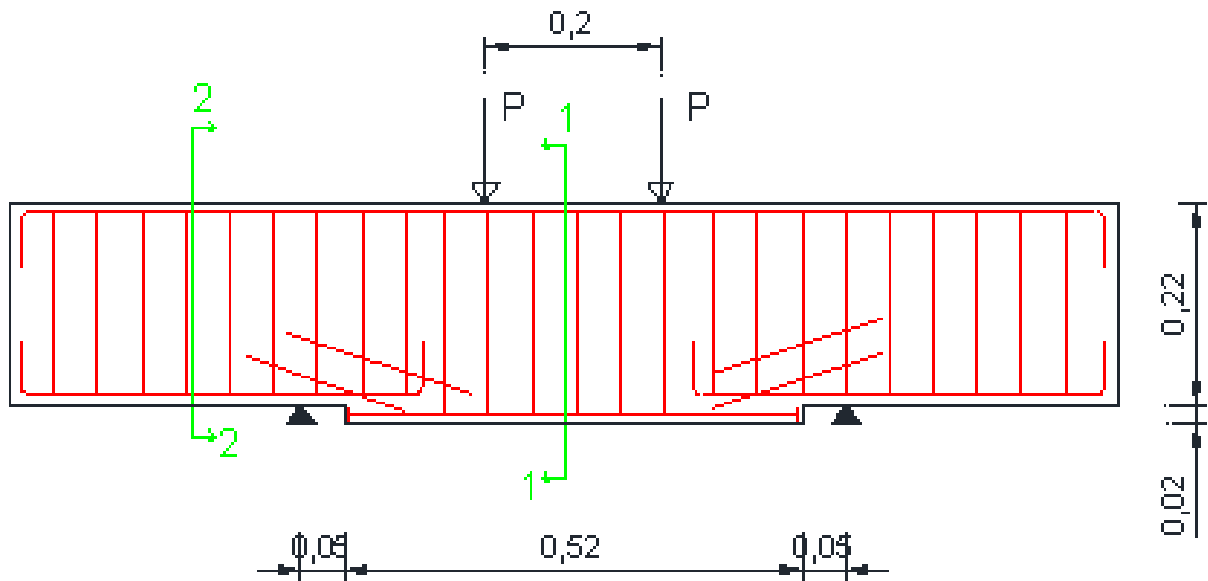
$$d_b=8 \text{ mm}$$

Η επιφάνεια του άκρου (headed bar) A_{brg} πρέπει να είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη από τη διατομή του οπλισμού που αγκυρώνεται.

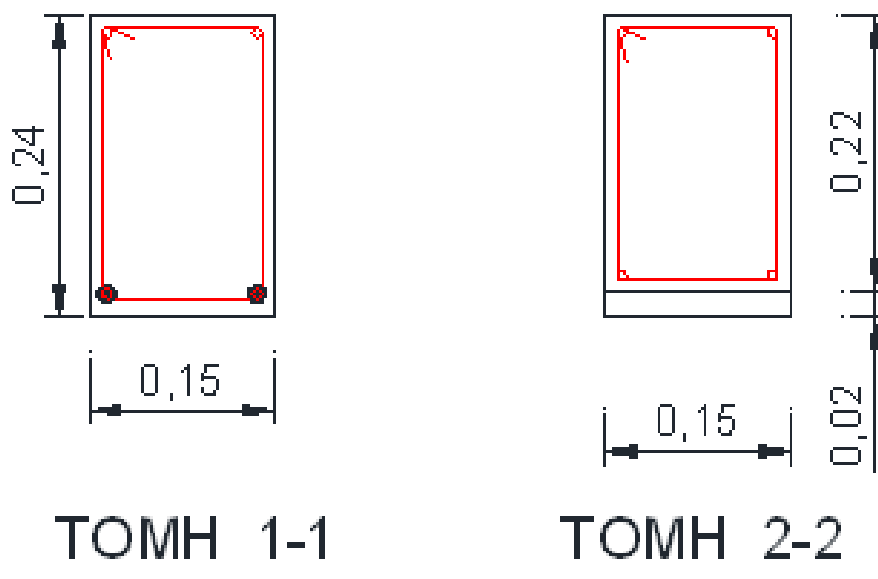
33	Μηχανική αγκύρωση σύμφωνα με ACI 318-08				
34					
35	$\psi_e=$	1,2			
36	$f_y=$	500 Mpa			
37	$d_b=$	8 mm			
38	$f_c=$	16 MPa			
39	$l_{dt}=0,75*\psi_e*f_y*d_b/(6,2*f_c^{0,5})=$		145,16 mm		0,145 m
40					
41	$A_b=\pi*d^2/4=$	50,24 mm ²			
42	$A_{brg}=4*A_b=4*50,24=$	200,96 mm ²		(εμβαδόν κεφαλής)	

Εικ. 60 Υπολογισμοί για μηχανική αγκύρωση

Επομένως το μήκος αγκύρωσης που πρέπει να υπάρχει από τη μέγιστη ροπή είναι $l_{dt}=0.145 \text{ m}$ γι' αυτό όπως παρατηρούμε από το σχέδιο (Εικ. 61) η διατομή μεταξύ των στηρίξεων έχει μεγαλύτερο μήκος από τα υπόλοιπα δοκίμια. Η διαφορά στο μήκος αγκύρωσης είναι σημαντική καθώς η συμβατική αγκύρωση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 είναι $l_{bd}=0.27 \text{ m}$.



Εικ. 61 Όψη δοκιμίου με μηχανική αγκύρωση (headed bars)



Εικ. 62 Τομές δοκιμίου με μηχανική αγκύρωση (headed bars)

Ο οπλισμός διάτμησης υπολογίστηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 :
Αρχικά υπολογίζουμε τον ελάχιστο διατμητικό οπλισμό:

$$P_{w,\min} = \frac{(0.08\sqrt{f_{ck}})}{f_{yk}} = 0.00064$$

$$\frac{A_{sw,min}}{s} = p_{w,min} b_w = 0.00064 * 15 * 100 = 0.96 cm^2 / m$$

$$s_{l,max} = 0.75d(1 + \cot a) = 0.75 * 0.198 * (1 + \cot 90) = 0.149m$$

Για δίδμητους συνδετήρες Φ8/14 : $\frac{A_{sw,min}}{s} = 7.14 cm^2 / m$

$$V_{Rd,s,min} = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) * z * f_{yd} * \cot \theta = 63,62 KN$$

$V_{Ed} = 51.33 KN$ (Η τέμνουσα από τη στατική ανάλυση όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι $V_{Ed}=P$)

Επομένως $V_{Rd,s,min} > V_{Ed}$ άρα επαρκή ο ελάχιστος διατμητικός οπλισμός.

Επιπλέον πύκνωση συνδετήρων στο κρίσιμο μήκος $l_{cr} = h = 0.21m$

$$s = \min\left(\frac{h_w}{4}; 24d_w; 225; 8d_l\right) = (52.5; 192; 225; 64) = 52.5mm$$

Άρα επιλέγω Φ8/5 στο κρίσιμο μήκος $l_{cr} = h = 0.21m$ αλλά επειδή η δοκός έχει μήκος 1,25 m τοποθετώ παντού Φ8/5.

Ο διαγώνιος οπλισμός που φαίνεται στο σχέδιο (Εικ. 61) τοποθετήθηκε για τον περιορισμό της ρηγμάτωσης λόγω της ασυνέχειας στη διατομή της δοκού.

121	Οπλισμός διάτμησης :					
122	<u>Ελάχιστα:</u>					
123	$p_{w,min}=(0.08(fck)^{0.5})/f_{yk}=(0.08*(16)^{0.5})/500=$			0,00064		
124	$(A_{sw,min}/s)=p_{w,min}*b_w=0.00064*15*100=$			0,96	cm ² /m	
125	$s_{1,max}=0.75*d*(1+cot\alpha)=0.75*0.198*(1+cot90)=$			0,1485	→	14 cm
126	Για δίδμητους Φ8/14 :	$(A_{sw,min}/s)=$		7,14	cm ² /m	
127	$\theta=45$					
128	$V_{Rd,s,min}=(A_{sw}/s)*z*f_{ywd}*cot\theta=(7,14/10000)*0,513*434,78*1000=$			63,62	KN >	51,33 KN
129	Πύκνωση συνδετήρων $l_{cr}=h=0,21$ m					
130	$s=\min(h_w/4; 24*d_w; 225; 8*d_l)=\min(210/4; 24*8; 225; 8*8)=\min(60; 192; 225; 64)=52,5mm=5,25cm$					
131	Άρα επιλέγω Φ8/5 στο l_{cr}					

Εικ. 63 Υπολογισμός οπλισμού διάτμησης

4.3.3 Δοκίμιο με αγκύρωση εγκάρσια συγκολλημένη ράβδος

Ο ευρωκώδικας 2, όπως αναφερθήκαμε στο Κεφάλαιο 1 έχει ως εναλλακτικό τρόπο αγκύρωσης τη συγκόλληση ράβδου εγκάρσια στον οπλισμό που θέλουμε να αγκυρώσουμε. Με αυτόν τον τρόπο, όπως και στον προηγούμενο με τη μηχανική αγκύρωση, δεν καταργείται το μήκος αγκύρωσης αλλά το μειώνει ακόμα περισσότερο περίπου 59% του αρχικού μήκους αγκύρωσης l_{bd} .



Εικ. 64 Αγκύρωση με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο

Οι υπολογισμοί είναι οι εξής :

$$l_b = \left(\frac{\Phi}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right) = \left(\frac{\Phi}{4}\right) \left(\frac{f_{yd} - \frac{F_{btd}}{A_s}}{f_{bd}}\right)$$

Δηλαδή μειώνουμε την τάση του εφελκόμενου οπλισμού με την ποσότητα

$$\frac{F_{btd}}{A_s} \cdot$$

$$F_{btd} = 16 * A_s * f_{cd} * \frac{\Phi_t}{\Phi_l} = 12.87 \text{ KN}$$

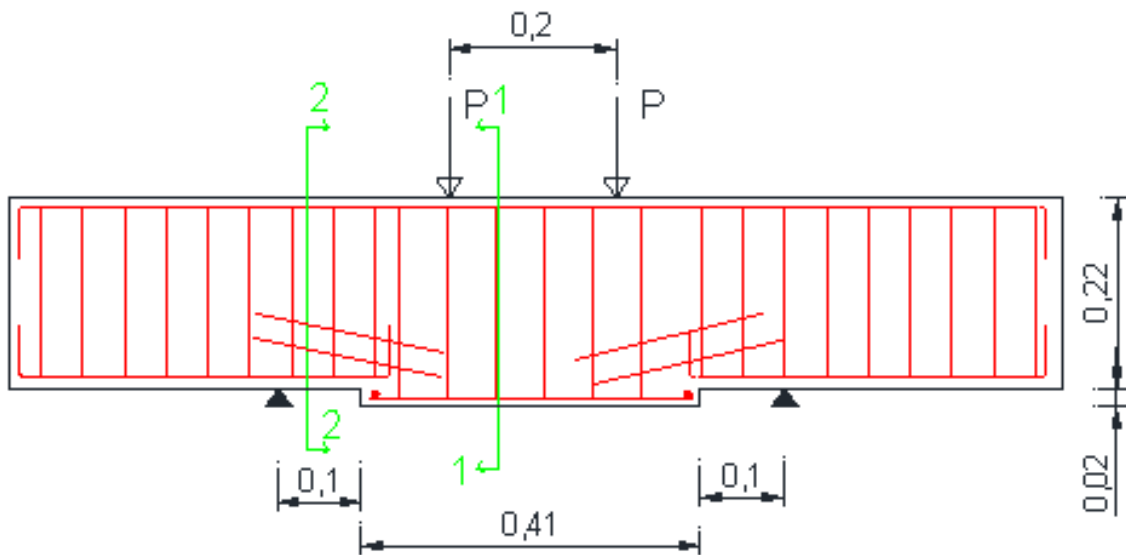
Αναλυτικά οι υπολογισμοί φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 65).

87	Αγκύρωση με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο						
88	f _{cd} =	16 Mpa					
89	f _{yd} =	500 Mpa	xwris synt. Asfaleias				
90	Φ _t =	8 mm	Φ8				
91	c=	8 mm					
92	x = 2(c/∅ _t)+1=	3,00					
93	y = 0,015 + 0,14e ^(-0,18x) =	0,096585		Για ράβδους έως Φ12 ισχύει F_{btd}=F_{wd}≤16*As*f_{cd}*Φ_t/Φ_l			
94	f _{ctd} =	1,3 Mpa					
95	σ _{cm} =	0					
96	σ _{td} = (f _{ctd} + σ _{cm})/y ≤ 3f _{cd}	13,45968 <	48				
97	l _{td} =1,16*Φ _t *(f _{yd} /σ _{td}) ^{0,5} =	56,56081 mm <	l _t =	75 mm			
98	F _{btd} =l _{td} *Φ _t *σ _{td} =	6,090323 KN <	17,59292 KN				
99	A _s =	50,27 mm ²					
100	F _{wd} =0,7*A _s *f _{yd} =	17,59292 KN >	16*A _s *f _{cd} *Φ _t /Φ _l =	12,8679635 KN			
101	f _{bd} =2,25*n ₁ *n ₂ *f _{ctd} =	2,925 Mpa					
102	l _b =(Φ/4)*σ _{sd} /f _{bd} =(Φ/4)*((f _{yd} -F _{btd} /A _s)/f _{bd})=	0,166838 m	l _{b,eq} =a ₄ *l _b =	0,11678632 m			
103	F _{btd} /A _s =	121,163133 Mpa					

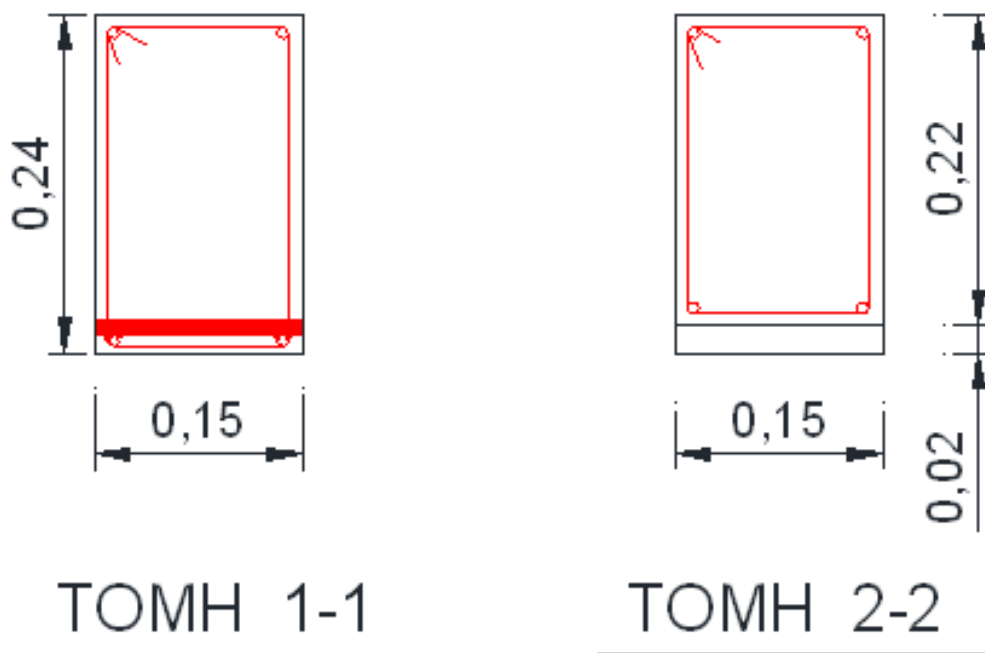
Εικ. 65 Υπολογισμοί για αγκύρωση με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο

Επομένως το μήκος αγκύρωσης που χρειάζεται ο οπλισμός είναι

$$l_{b,eq} = 0.11m, \text{ ενώ στη μηχανική αγκύρωση χρειάζεται } 0,15m.$$



Εικ. 66 Όψη δοκιμίου με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο



Εικ. 67 Τομές δοκιμίου με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο

Από τα σχέδια του δοκιμίου (Εικ. 66) παρατηρούμε ότι το μήκος της διατομής που μελετάμε είναι 0,41 m, ενώ στο προηγούμενο δοκίμιο με τη μηχανική αγκύρωση ήταν 0,52 m λόγω του μεγαλύτερου μήκους αγκύρωσης. Ο οπλισμός διάτμησης είναι ίδιος με το προηγούμενο δοκίμιο.

4.3.4 Δοκίμιο με εξωτερική πλάκα αγκύρωσης

Ο τρόπος αγκύρωσης με εξωτερική πλάκα δεν υπάρχει σε κάποιο κανονισμό ως εναλλακτικός τρόπος αγκύρωσης, αλλά αναφέρεται στον Ευρωκώδικα 8 ως πρόσθετο μέτρο σε περίπτωση που δεν πληρούνται κάποια κριτήρια.



Εικ. 68 Δοκίμιο με πλάκα αγκύρωσης



Εικ. 69 Λεπτομέρεια πλάκας αγκύρωσης

Οι υπολογισμοί είναι οι εξής :

Πρώτος έλεγχος είναι η επιφάνεια στην οποία ασκεί θλιπτικές τάσεις η πλάκα αγκύρωσης :

$$\frac{\pi\Phi^2}{4} f_y = Af_c \rightarrow A = \frac{\pi\Phi^2}{4} \frac{f_y}{f_c} = 15.7cm^2$$

Η επιφάνεια του ελάσματος που έχουμε τοποθετήσει :

$$A_s = 5 * 13.5 = 67.5cm^2 > A = 15.7cm^2$$

Δεύτερος έλεγχος η διατμητική αστοχία της συγκόλλησης μεταξύ του ελάσματος και του χάλυβα οπλισμού. Ο έλεγχος γίνεται για τη συγκόλληση διότι είναι συνήθως ασθενέστερη από το έλασμα.

$$\frac{\pi\Phi^2}{4} f_y = (\pi\Phi h) \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} \rightarrow h = \frac{\beta_w \gamma_{M2} \Phi \sqrt{3}}{4} \frac{f_y}{f_u} = 0,48 \text{ cm}$$

Οπου :

$$\beta_w = 0.8$$

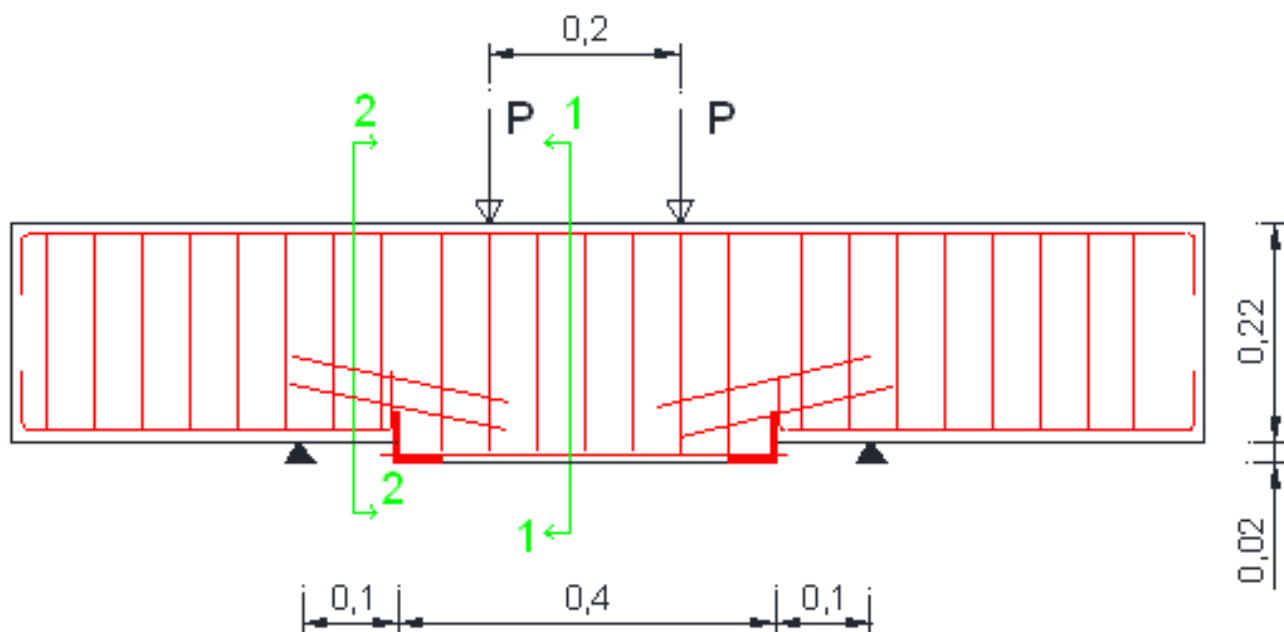
$$\gamma_{M2} = 1,25$$

f_u = όριο θραύσης της συγκόλλησης

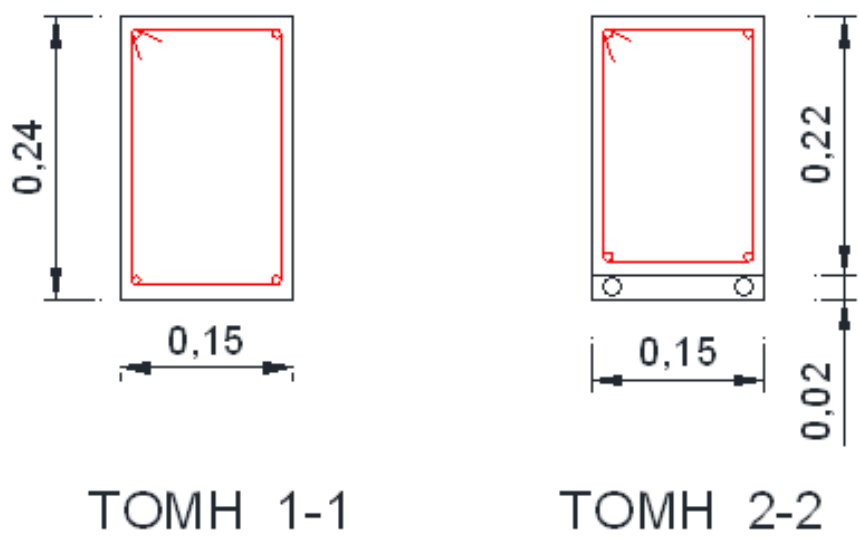
Το πάχος του ελάσματος είναι 0,5 cm, επομένως επαρκεί.

153	Πλάκα αγκύρωσης					
154	$f_y =$	500 Mpa				
155	$f_c =$	16 MPa				
156	$\Phi =$	0,8 cm				
157						
158	$A = (\pi \cdot \Phi^2 / 4) \cdot (f_y / f_c) = (3,14 \cdot 0,8^2) \cdot (500 / 16) =$		15,7 cm²		< A_s	
159	$A_s = 5 \cdot 13,5 =$	67,5 cm ²	(επιφάνεια ελάσματος)			
160						
161	$h = ((3^{\wedge}0,5) \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \Phi \cdot f_y) / (4 \cdot f_u) = ((3^{\wedge}0,5) \cdot 0,8 \cdot 1,25 \cdot 0,8 \cdot 500) / (4 \cdot 360) =$				0,48 cm < h_s	
162	$\beta_w =$	0,8 (για χάλυβα S235)				
163	$\gamma_{M2} =$	1,25				
164	$f_u =$	360 Mpa				

Εικ. 70 Υπολογισμός πλάκα αγκύρωσης



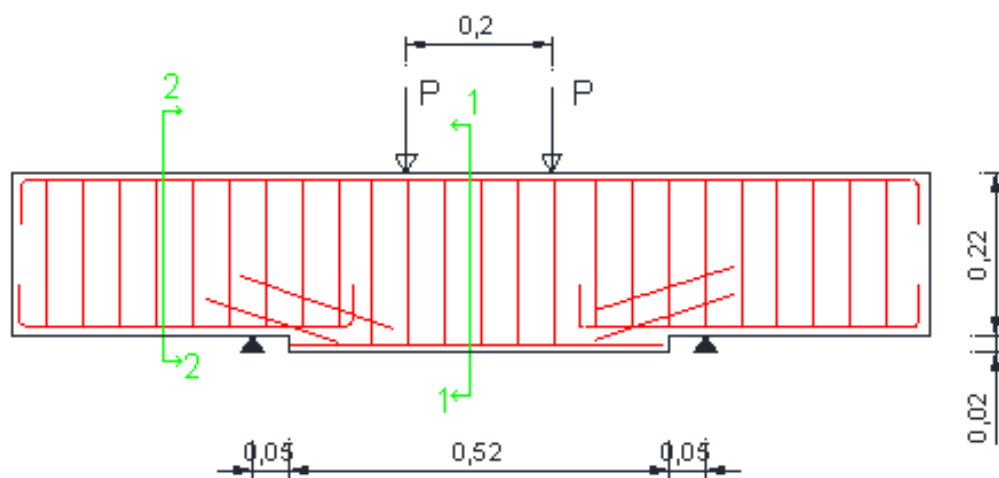
Εικ. 71 Όψη δοκιμίου με πλάκα αγκύρωσης



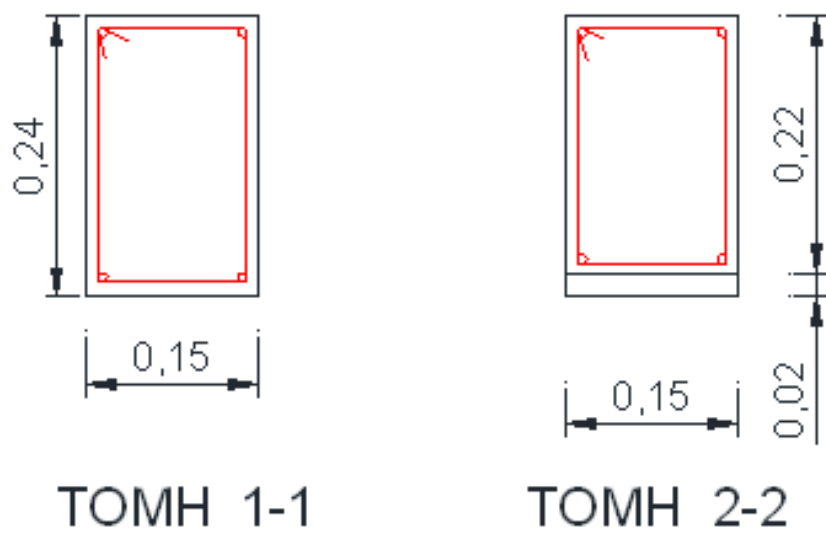
Εικ. 72 Τομές δοκιμίου με πλάκα αγκύρωσης

4.3.5 Δοκίμιο με ελλιπή αγκύρωση

Το συγκεκριμένο δοκίμιο κατασκευάστηκε με σκοπό να μπορεί να συγκριθεί με τα δοκίμια που έχουν πλήρη αγκύρωση, όπως αναφέραμε παραπάνω. Ο σχεδιασμός του δοκιμίου βασίστηκε στο δοκίμιο με μηχανική αγκύρωση (headed bars), έχει δηλαδή τις ίδιες διαστάσεις με τη διαφορά ότι δεν έχει μηχανική αγκύρωση (καρφί) στον εφελκόμενο οπλισμό.



Εικ. 73 Όψη δοκού με ελλιπή αγκύρωση



Εικ. 74 Τομές δοκιμίου με ελλιπή αγκύρωση

4.4 Θεωρητική ανάλυση δοκιμίων με βάση το λογισμικό

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύσαμε ακριβώς τη λειτουργία του λογισμικού και κάποια από τα αποτελέσματα των δοκιμίων. Οι διατομές των τεσσάρων δοκιμίων είναι ίδιες, με ελάχιστες διαφορές στο d (απόσταση του εφελκυσμένου οπλισμού από την κάτω ίνα) λόγω κατασκευαστικών σφαλμάτων. Επομένως η θεωρητική ανάλυση με το λογισμικό ισχύει και για τα τέσσερα δοκίμια, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 75). Αρχικά υπολογίστηκε η καμπτική αντοχή $M_{Rd} = 10.27 \text{KNm}$ καθώς και ροπή όπου διαρρέει το σκυρόδεμα $M_{yc} = 10.23 \text{KNm}$, η ροπή όπου διαρρέει ο χάλυβας $M_y = 9.80 \text{KNm}$, η ροπή ρηγμάτωσης $M_{Cr} = 2.95 \text{KNm}$.

Το φορτίο αστοχίας υπολογίζεται ως εξής :

$$M_{sd} = \frac{P}{2}(L-l) = 0.20P(\text{KNm})$$

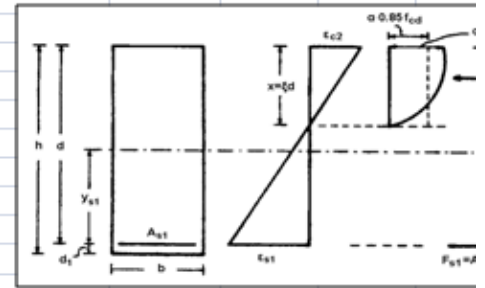
$$M_{sd} = 0.20P = M_{Rd} \rightarrow P_u = \frac{M_{Rd}}{0.20} = \frac{10.27}{0.20} = 51.35 \text{KN}$$

Άρα θεωρητικά στη μηχανή κάμψης πρέπει να επιβάλλουμε φορτίο $2P=102.70 \text{KN}$.

1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

2	h=	0,24 m
3	b=	0,15 m
4	d1=	0,025 m
5	d2=	0,02 m
6	d=	0,215 m
7	As1=2Φ8	100,53 mm ²
8	As2=2Φ8	100,53 mm ²
9	fy=	500 Mpa
10	fc=	16 Mpa
11	fctm=	1,9 Mpa
12	εy=	2,5 ‰
13	Ec=	27500 Mpa
14	Es=	200.000 Mpa

(επικάλυψη από τη κάτω ίνα)
(επικάλυψη από τη άνω ίνα)



16 Σημείο όπου αποτογεί η διατομή:

17	εc2=	3,5 ‰					
18	x=	0,0222 m					
19	εs1=εc2*(d-x)/x=	30,34549148 ‰	> εy=2,5	Fc=	-43,20 KN	Mc=	4,78 KNm
20	εs2=εc2*(x-d2)/x=	0,351582188 ‰	< εy=2,5	Fs1=	50,27 KN	Ms1=	4,78 KNm
21	a=(3*εc2-2)/(3*εc2)=	0,810		Fs2=	-7,07 KN	Ms2=	0,71 KNm
22	ζ=(εc2*(3*εc2-4)+2)/(2*εc2*(3*εc2-2))=	0,416		Σ (F) =	0,00	Mrd=	10,27 KNm

24 Σημείο όπου διαρρέει το σκυρόδεμα στην ίνα 2 :

25	εc2=εcy=	2 ‰					
26	x=	0,0258 m					
27	εs1=εc2*(d-x)/x=	14,6793218 ‰	> εy=2,5	Fc=	-41,25 KN	Mc=	4,55 KNm
28	εs2=εc2*(x-d2)/x=	0,448435182 ‰	< εy=2,5	Fs1=	50,27 KN	Ms1=	4,78 KNm
29	a=(3*εc2-2)/(3*εc2)=	0,667		Fs2=	-9,02 KN	Ms2=	0,90 KNm
30	ζ=(εc2*(3*εc2-4)+2)/(2*εc2*(3*εc2-2))=	0,375		Σ (F) =	0,00	Myc=	10,23 KNm

32 Σημείο όπου διαρρέει ο εφελκυσμένος γάλυβας es1 :

33	εs1=εyd=	2,5 ‰					
34	x=	0,058 m					
35	εc2=εs1*x/(d-x)=	0,9188 ‰	< 2 ‰	Fc=	-38,19 KN	Mc=	3,81 KNm
36	εs2=εs1*(x-d2)/(d-x)=	0,601 ‰	< 2,5 ‰	Fs1=	50,27 KN	Ms1=	4,78 KNm
37	σcd=fc*(1-(1-εc2/εcy) ⁿ)=	11,32 Mpa		Fs2=	-12,08 KN	Ms2=	1,21 KNm
38	n=	2		Σ (F) =	0,00	Mγ=	9,80 KNm
39	a=εc2*(6-εc2)/12=	0,389					
40	ζ=(8-εc2)/(4*(6-εc2))=	0,348					

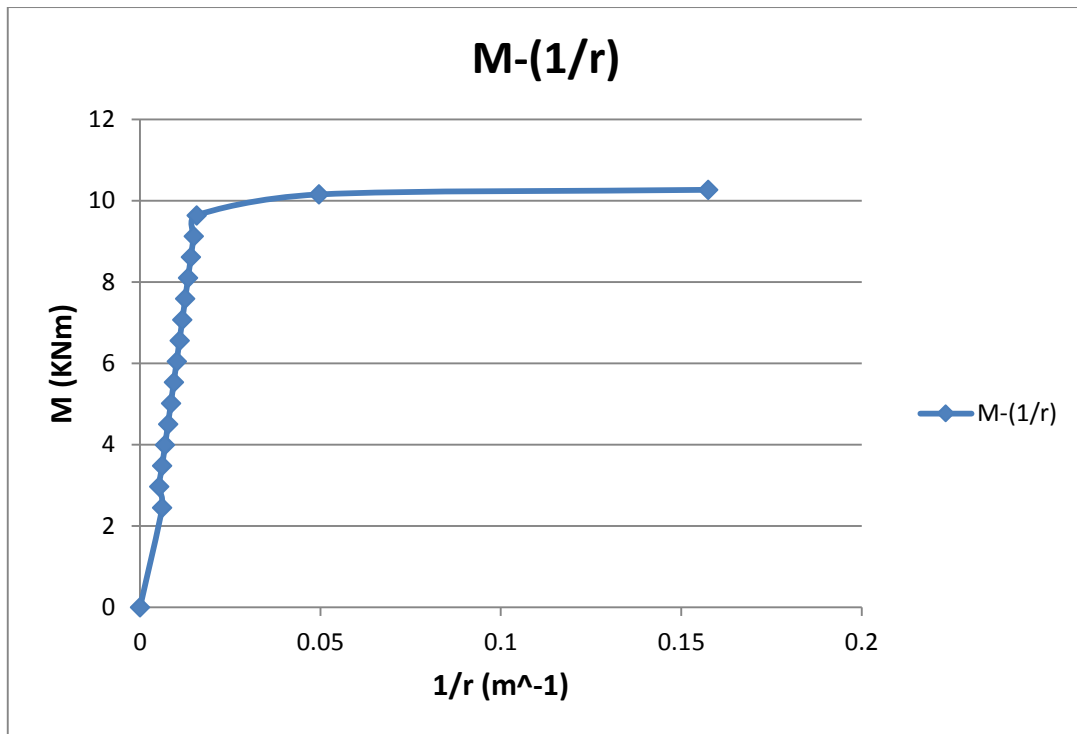
Επίλυση

Εικ. 75 Υπολογισμός χαρακτηριστικών ροπών

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παραμορφώσεις και οι καμπυλότητες κατά μήκος των δοκών και το διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων.

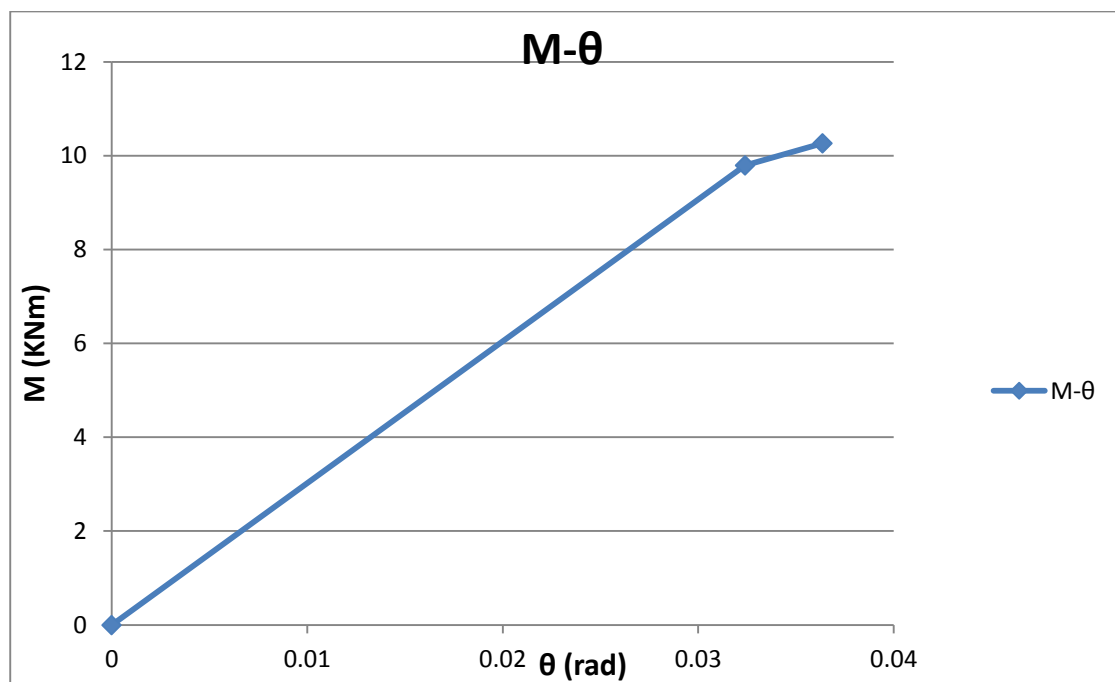
A/A	y (m)	M (KNm)	x (m) υψος θλιβόμενης ζώνης	ϵ_{c2} (‰)	ϵ_{s1} (‰)	1/r (m ⁻¹)
1	0	0	0	0	0	0
2	0,0478	2,45	0,06333535	0,387236	0,743864	0,00611405
3	0,0578	2,97	0,07045107	0,373653	0,766648	0,00530372
4	0,0678	3,48	0,06852211	0,419954	0,897725	0,00612874
5	0,0778	3,99	0,0669002	0,464623	1,028556	0,00694502
6	0,0878	4,51	0,0655113	0,507997	1,159186	0,00775434
7	0,0978	5,02	0,06430513	0,550326	1,289652	0,00855804
8	0,1078	5,53	0,06324605	0,591803	1,419985	0,00935715
9	0,1178	6,05	0,06230794	0,632583	1,550209	0,01015252
10	0,1278	6,56	0,06147111	0,67279	1,680347	0,01094482
11	0,1378	7,07	0,06072037	0,712532	1,810417	0,01173465
12	0,1478	7,59	0,06004379	0,751897	1,940437	0,01252249
13	0,1578	8,10	0,05943186	0,790965	2,070422	0,01330878
14	0,1678	8,61	0,05887688	0,829806	2,200385	0,01409391
15	0,1778	9,13	0,05837256	0,868481	2,330341	0,01487824
16	0,1878	9,64	0,0579137	0,90705	2,460301	0,0156621
17	0,1978	10,15	0,03072913	1,524535	9,142056	0,04961205
18	0,2	10,27	0,02223343	3,5	30,34543	0,15742058

Εικ. 76 Παραμορφώσεις και καμπυλότητα κατά μήκος των δοκών



Εικ. 77 Διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων

Επιπλέον με βάση το ΚΑΝΕΠΕ υπολογίστηκε η στροφή διαρροής $\theta_y = 0,0324rad$ και η στροφή αστοχίας $\theta_{um} = 0,0364rad$ και το διάγραμμα ροπής – στροφής.

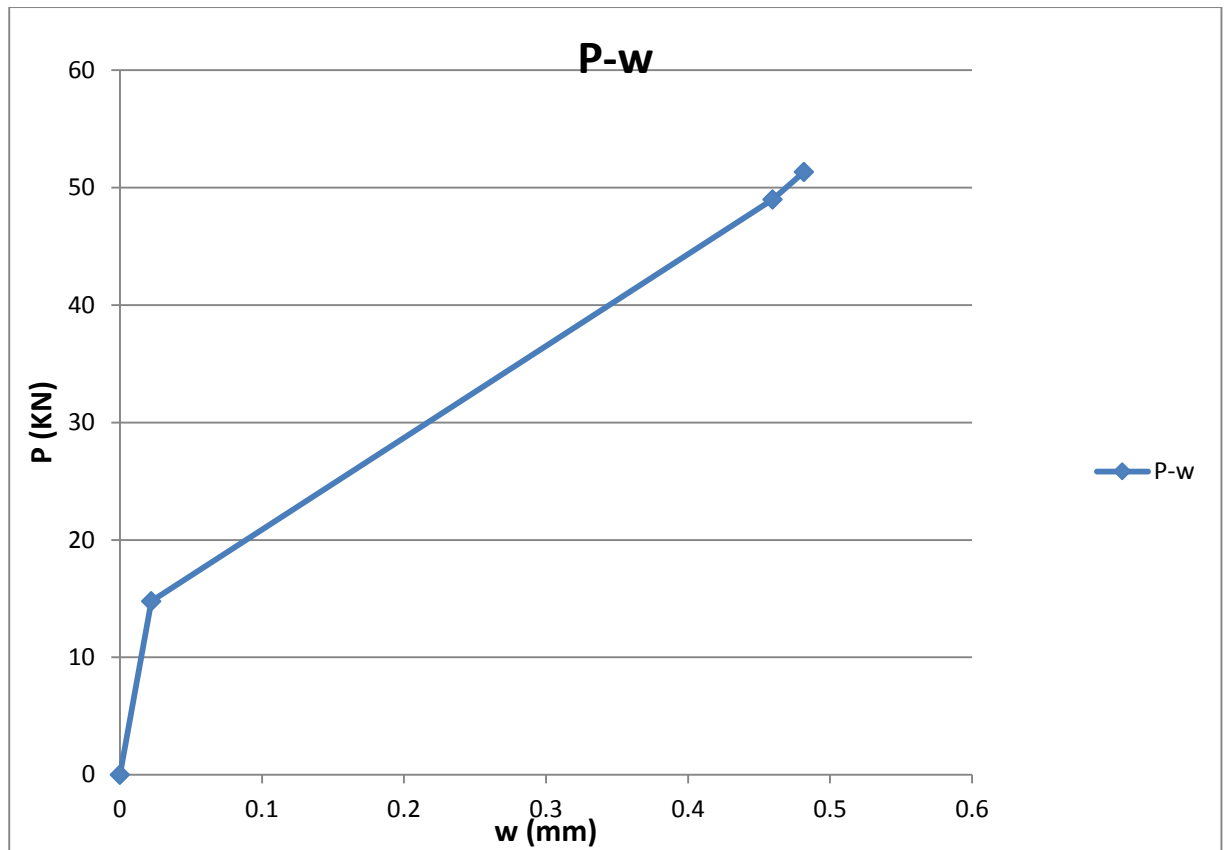


Εικ. 78 Διάγραμμα ροπής - στροφής

Τέλος υπολογίζουμε τα βέλη κάμψης με τον τρόπο που αναφέραμε στο Κεφάλαιο 3 και το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης.

112					
113	Υπολογισμός βέλους κάμψης κατά την αστοχία				
114					
115	Αρηγμάτωση διατομή				
116	$\mu=Es/Ec=$	7,27			
117	$x=(\mu*As1*d+\mu*As2*d2+Ac*h/2)/(Ac+\mu*As2+\mu*As1)=$		0,119902 m		
118	$Jg=b*h^3/12+b*h*(x-h/2)^2+(Es/Ec)*As2*(x-d2)^2+(Es/Ec)*As1*(d-x)^2=$			0,000186709 m4	
119	$Mcr=(fct*Jg)/(h-x)=$	2,95 KNm			
120	Ρηγματωμένη διατομή				
121	$x=d*(-\mu*(\rho1+\rho2)+(\mu^2*(\rho1+\rho2)^2+2*\mu*(\rho1+\rho2*(d2/d1)))^0,5)=$		0,039097421 m		
122	$Jcr=b*d^3*((1/3)*(x/d)^3+\mu*\rho1*(1-x/d)^2+\mu*\rho2*(x/d-d2/d)^2)=$		2,58774E-05 m4		
123	$Je=(Mcr/Mrd)^3*Jg+(1-(Mcr/Mrd)^3)*Jcr=$	2,97084E-05 m4			
124	$(1/r)u=Mrd/(Ec*Je)=$	0,012566016 m^-1			
125	$k=0,125-a^2/6=$	0,106			
126	$wu=k*I^2*(1/r)u=$	0,0482 cm			
127					
128	Υπολογισμός βέλους κάμψης κατά τη διαρροή				
129	$(1/r)y=My/(Ec*Jcr)=$	0,011991421 m^-1			
130	$wy=k*I^2*(1/r)y=$	0,0460 cm			
131					
132	Υπολογισμός βέλους κάμψης κατά τη ρηγμάτωση				
133	$(1/r)t=Mcr/(Ec*Jg)=$	0,00057529 m^-1			
134	$wt=k*I^2*(1/r)t=$	0,0022 cm			

Εικ. 79 Υπολογισμός βέλους κάμψης



Εικ. 80 Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης

4.5 Υλικά πειράματος

4.5.1 Σκυρόδεμα

Η σύνθεση του σκυροδέματος των δοκιμίων έγινε με αναλογία υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5) και με σκοπό να είναι ποιότητας C 16/20. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland και ο λόγος νερού προς τσιμέντο 0,55.

Η Παρασκευή σκυροδέματος έγινε με τη χρήση ηλεκτρικού αναδευτήρα στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών. Για κάθε δοκό – δοκίμιο πάρθηκαν τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x10 cm.

Σκυρόδεμα C16/20	kg
Cement	400
0-4 mm aggregates	927
4-8 mm aggregates	336
8-16mm aggregates	420
water	221
sika viscocrete (ρευστοποιητής) (gr)	500
Μέση υγρασία αδρανών	1,07
Μέση απορροφητικότητα αδρανών	1,05
Μέση πυκνότητα αδρανών	2,65
w/c	0,55
κάθιση (mm)	120

Πίνακας 5 Αναλογία υλικών σκυροδέματος ανά 1 m³

Τα δοκίμια ύστερα από τη σκυροδέτηση τους, καταβρέχονταν με νερό και καλύφθηκαν με βρεγμένες λινάτσες ώστε να διατηρηθούν σε ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας περίπου 20 °C και σχετικής υγρασίας η οποία δεν ξεπερνούσε το 90 %. Η χρονική διάρκεια που μεσολάβησε ανάμεσα στην κατασκευή των δοκιμίων και της εκτέλεσης του πειράματος ήταν δύο μήνες.

4.5.2 Όργανα καταγραφής των μετρήσεων

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του πειράματος είναι η μηχανή κάμψης με το μεταλλικό στοιχείο όπου επιβάλλει δύο συγκεντρωμένα φορτία, ηλεκτρονικό βελόμετρο, μηχανικά βελόμετρα, σύστημα καταγραφής μετρήσεων (DATA LOGGER) της επιβαλλόμενης δύναμης και του ηλεκτρονικού βελόμετρου. Στο δοκίμιο με τη μηχανική αγκύρωση (headed bars) τοποθετήθηκε στη μέση της δοκού το ηλεκτρονικό βελόμετρο και το μηχανικό βελόμετρο έξω από τις στηρίξεις (Εικ. 83). Στο δοκίμιο με ελλειπής αγκύρωση τοποθετήθηκε το μηχανικό βελόμετρο στη μέση της δοκού (Εικ. 84).



Εικ. 81 Σύστημα καταγραφής φορτίου



Εικ. 82 Σύστημα καταγραφής μετρήσεων (DATA LOGGER) του ηλεκτρονικού βελόμετρου



Εικ. 83 Το δοκίμιο με μηχανική αγκύρωση στη μηχανή κάμψης



Εικ. 84 Το δοκίμιο με ελλιπή αγκύρωση στη μηχανή κάμψης

4.6 Περιγραφή της πειραματικής δοκιμής και πειραματικές μετρήσεις

Στη παράγραφο 4.1 αναφέρθηκε ότι σκοπός του πειράματος είναι να διερευνηθεί η συμπεριφορά των δοκών με εναλλακτική αγκύρωση και συγκεκριμένα σε ανακυκλική φόρτιση, έτσι ώστε ο σπλισμός με εναλλακτική αγκύρωση να βρεθεί σε συνθήκες εφελκυσμού και θλίψης. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν τα τέσσερα δοκίμια που αναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους ώστε να συγκριθεί η συμπεριφορά τους.

Αρχικά η πρώτη δοκός - δοκίμιο που τοποθετήθηκε στη μηχανή κάμψης ήταν η δοκός με τη μηχανική αγκύρωση (headed bars). Με τη τοποθέτηση του δοκιμίου στη μηχανή κάμψης, τοποθετήθηκαν τα μεταλλικά στοιχεία που ασκούν το φορτίο σε απόσταση 0,20 m εσωτερικά από τις στηρίξεις (Εικ. 85). Η δοκός φορτίστηκε αρχικά μέχρι τα 70 KN και αποφορτίστηκε μέχρι το μηδέν. Στη συνέχεια για να επέλθει η δοκός σε ανακυκλική φόρτιση, δηλαδή να θλίβεται η εναλλακτική αγκύρωση, τοποθετήθηκαν τα μεταλλικά στοιχεία εξωτερικά των στηρίξεων σε απόσταση 0,17 m από τη κάθε στήριξη (Εικ. 86). Η δοκός φορτίστηκε και πάλι μέχρι τα 70 KN και αποφορτίστηκε. Έτσι διεξάχθηκε ένας κύκλος φόρτισης – αποφόρτισης για θετικές ροπές και ένας κύκλος φόρτισης – αποφόρτισης για αρνητικές ροπές.



Εικ. 85 Φόρτιση εσωτερικά των στηρίξεων για θετικές ροπές



Εικ. 86 Φόρτιση εξωτερικά των στηρίξεων για αρνητικές ροπές

Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για φορτία 80 KN, 90 KN, 100 KN. Στη φόρτιση με 100 KN παρατηρήθηκαν οι πρώτες εμφανείς ρωγμές στη μέση της δοκού. Επειδή η μηχανή κάμψης δεν είχε μεγαλύτερη δυνατότητα φορτίου πάνω από 110 KN διαφοροποιήσαμε την επιβολή του φορτίου έτσι ώστε το συνολικό φορτίο να ασκείται στη μέση της δοκού. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι το θεωρητικό φορτίο αστοχίας είναι 102,7 KN, οπότε θεωρητικά η μηχανή κάμψης θα μπορούσε να φτάσει το φορτίο αστοχίας της δοκού. Λόγω όμως των υπεραντοχών των υλικών το φορτίο αστοχίας πρακτικά είναι μεγαλύτερο, επομένως για να αστοχήσει η δοκός – δοκίμιο και να φτάσει τη ροπή αντοχής αλλάξαμε θέση στα μεταλλικά στοιχεία της μηχανής κάμψης στη μέση της δοκού. Επιπλέον αλλάξαμε τη θέση των μεταλλικών στοιχείων και στην αντίθετη φόρτιση, η απόσταση εξωτερικά από τη στήριξη ήταν 0,17 m και τη κάναμε 0,20 m. Επομένως μετά τις διαφοροποιήσεις στην επιβολή του φορτίου συνεχίστηκε η πειραματική διαδικασία όπως προηγουμένως επιβάλλοντας φορτία 104 KN, 108 KN, 110 KN.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6) φαίνονται οι μετρήσεις του ηλεκτρονικού βελόμετρου από το DATA LOGGER. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται το

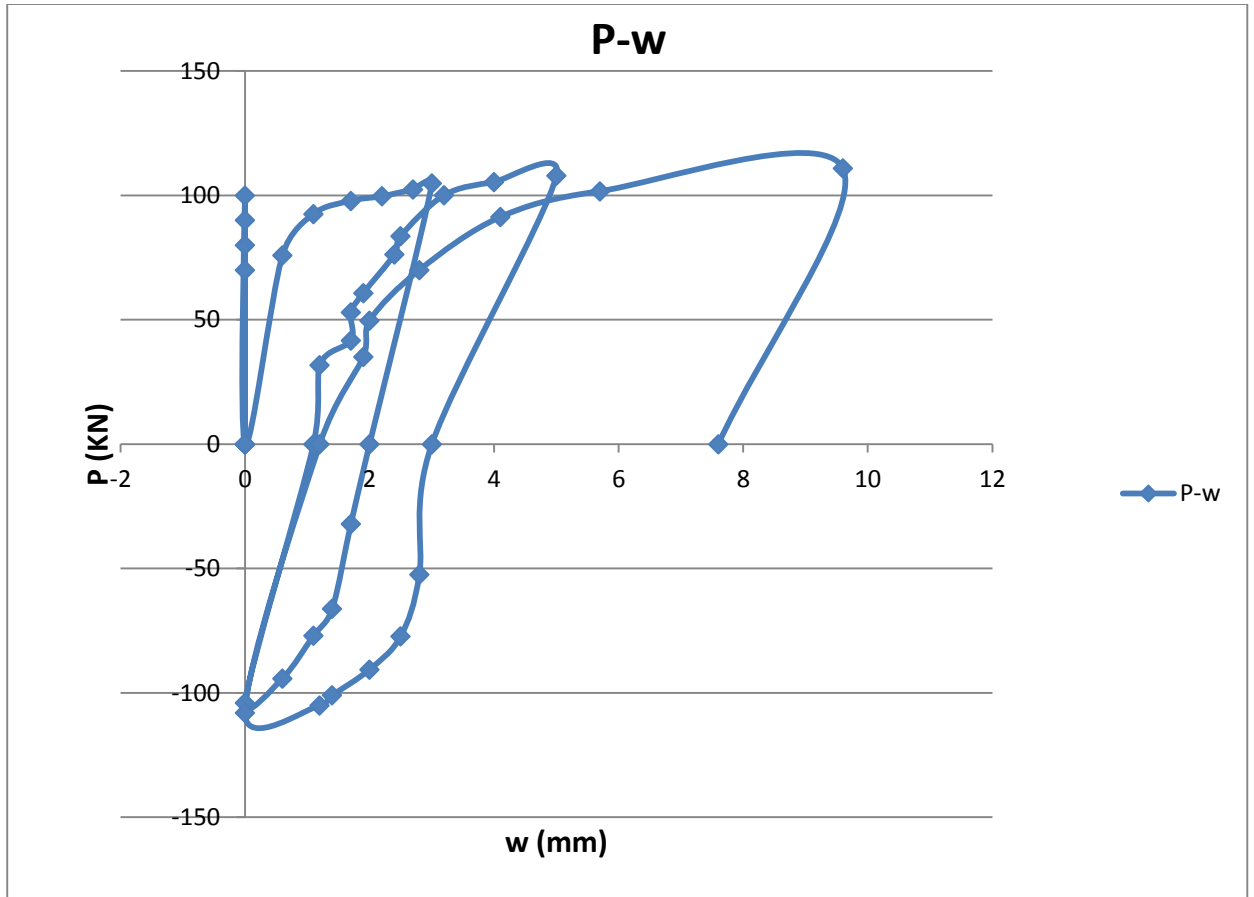
φορτίο, όπου φαίνεται η φόρτιση αποφόρτιση και η αντιστροφή της φόρτισης με αρνητικό πρόσημο. Στη δεύτερη στήλη φαίνεται η μετατόπιση της δοκού όπου παρατηρούμε μόνο θετικές τιμές, δηλαδή μετατόπιση προς τη φορά της φόρτισης όπου τη θεωρούμε θετική. Η δοκός αρχικά φορτίζεται στη μέση επομένως έχει ένα θετικό βέλος προς τα κάτω και στη συνέχεια αποφορτίζεται. Κατά την αποφόρτιση η δοκός δεν επαναφέρεται στην αρχική της θέση, αλλά έχει μία παραμένουσα μετατόπιση. Στην αντίστροφη φόρτιση το βέλος της δοκού είναι αρνητικό αλλά υπάρχει και η παραμένουσα μετατόπιση από τη προηγούμενη φόρτιση, οπότε στις μετρήσεις παρατηρούμε θετικές τιμές μετατόπισης και μηδενικές. Κανονικά θα έπρεπε να είχαμε και αρνητικές, έστω και μικρές αλλά επειδή το ηλεκτρονικό βελόμετρο δεν μπορεί να καταγράψει πολύ μικρές μετατοπίσεις της τάξεως των 0,10 mm, έδειχνε μηδενικές τιμές. Όπως θα δούμε στο επόμενο δοκίμιο το μηχανικό βελόμετρο έχει καταγράψει και αρνητικές πολύ μικρές μετατοπίσεις.

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 7) φαίνονται οι μετρήσεις από το μηχανικό βελόμετρο που είχε τοποθετηθεί εξωτερικά από τις στηρίξεις. Στη πρώτη στήλη όπως και προηγουμένως καταγράφεται το φορτίο για φόρτιση και αντίστροφη φόρτιση με θετικές και αρνητικές τιμές αντίστοιχα. Στη δεύτερη στήλη καταγράφονται οι μετατοπίσεις της δοκού όπου με θετικές τιμές θεωρούμε τις μετατοπίσεις που έχουν φορά αντίθετη με τη φόρτιση και αρνητικές τις μετατοπίσεις που έχουν τη φορά της φόρτισης.

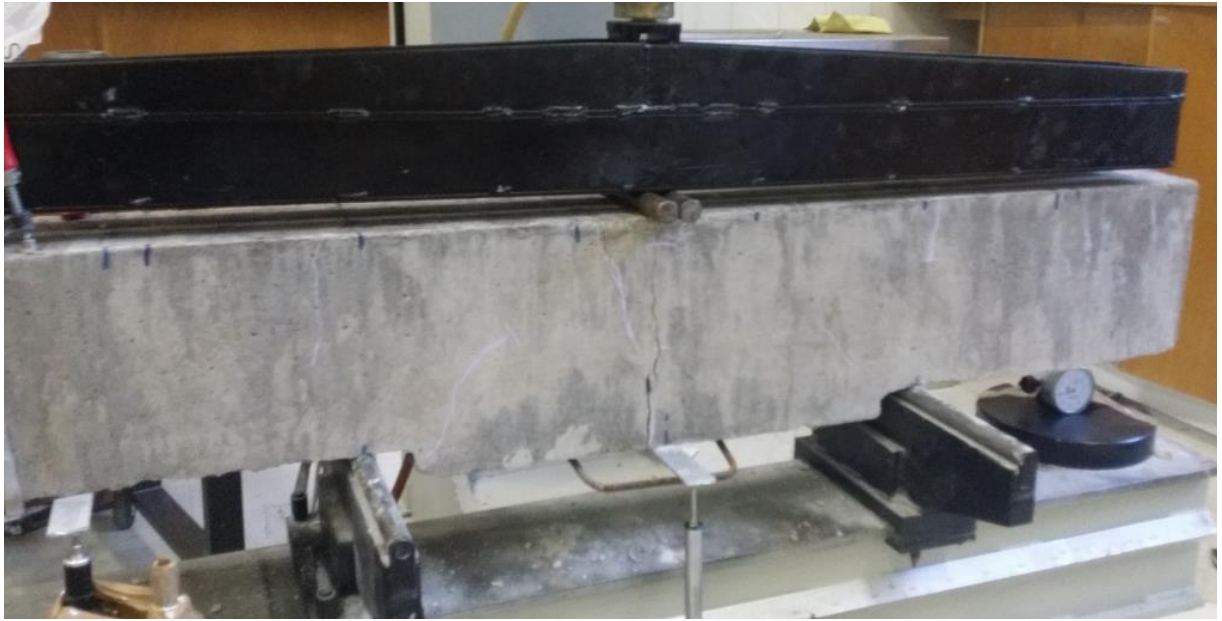
Επιπλέον στις παρακάτω εικόνες (Εικ. 87, Εικ. 89) έχουν σχηματιστεί τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης από τις προηγούμενες μετρήσεις. Από τα δύο διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι έχουν σημαντικές παραμένουσες μετατοπίσεις. Επίσης μια σημαντική διαφορά είναι ότι στο διάγραμμα με το βελόμετρο στην άκρη της δοκού, παρατηρούμε μεγάλες αρνητικές μετατοπίσεις.

Φορτίο (KN)	Μετατόπιση στη μέση (ηλεκτρονικό βελόμετρο) (mm)
0	0,00
70	0,00
0	0,00
80	0,00
0	0,00
90	0,00
0	0,00
100	0,00
0	0,00
75,89	0,60
92,55	1,10
97,84	1,70
99,68	2,20
102,44	2,70
104,8	3,00
0	2,00
-32,05	1,70
-66,21	1,40
-76,98	1,10
-94,16	0,60
-104	0,00
0	1,10
31,75	1,20
41,66	1,70
52,96	1,70
60,73	1,90
76,3	2,40
83,68	2,50
100,1	3,20
105,37	4,00
108	5,00
0	3,00
-52,4	2,80
-77,23	2,50
-90,59	2,00
-100,97	1,40
-105	1,20
-108	0,00
0	1,20
35,1	1,90
49,68	2,00
70,03	2,80
91,32	4,10
101,69	5,70
110,85	9,60
0	7,60

Πίνακας 6 Μετρήσεις δοκιμίου με μηχανική αγκύρωση στη μέση της δοκού



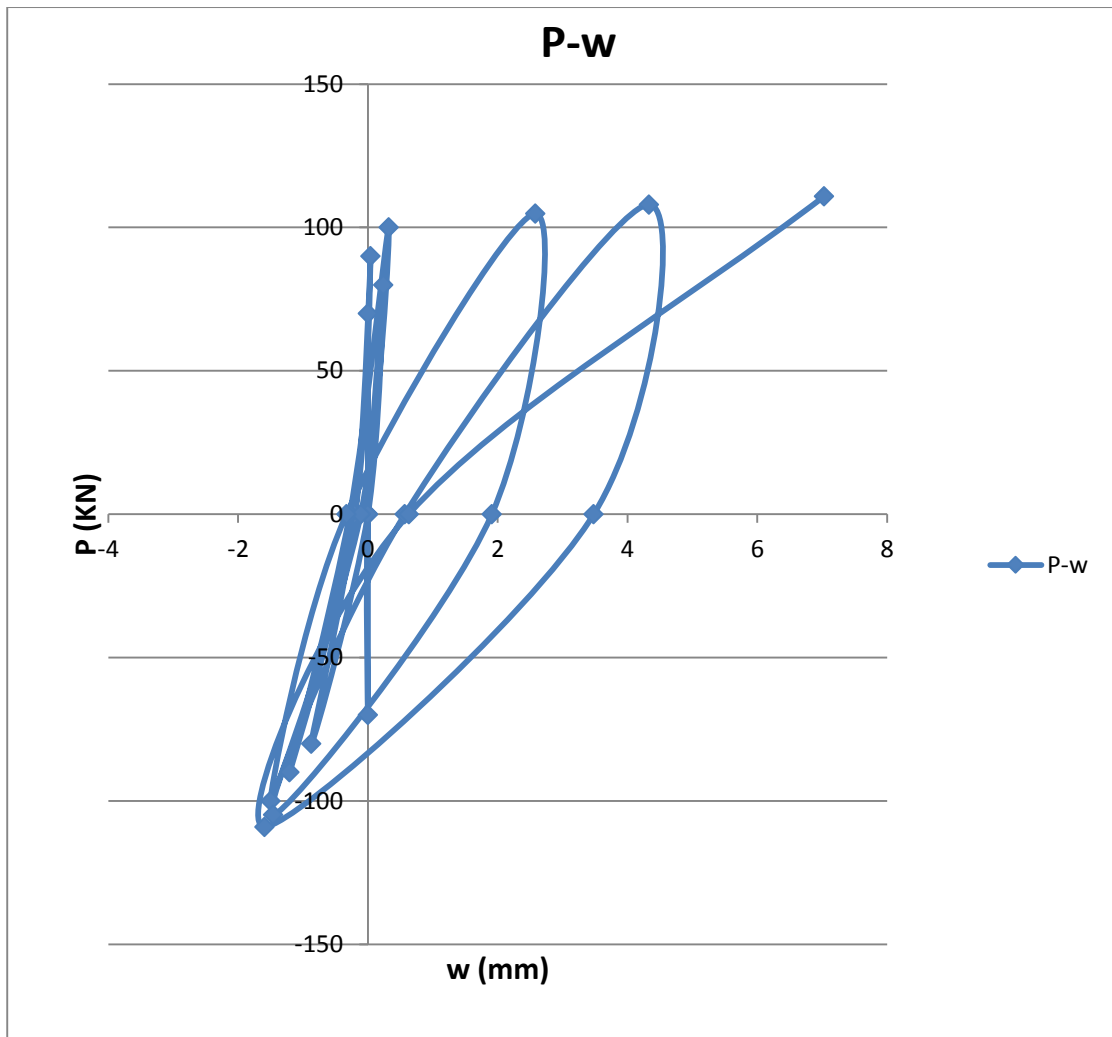
Εικ. 87 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου με μηχανική αγκύρωση (βελόμετρο στη μέση της δοκού)



Εικ. 88 Δοκός με μηχανική αγκύρωση (headed bars) σε κατάσταση αστοχίας

Φορτίο (KN)	Βέλος στην άκρη (μηχανικό βελόμετρο (mm))
0	0
70	0
0	0
-70	0
0	0
80	0,24
0	0
-80	-0,87
0	-0,2
90	0,04
0	-0,2
-90	-1,21
0	-0,28
100	0,32
0	-0,11
-100	-1,5
0	-0,33
104,8	2,58
0	1,91
-104,8	-1,46
0	0,57
108	4,33
0	3,48
-109	-1,59
0	0,63
110,85	7,03

Πίνακας 7 Μετρήσεις δοκιμίου με μηχανική αγκύρωση εξωτερικά από τις στηρίξεις

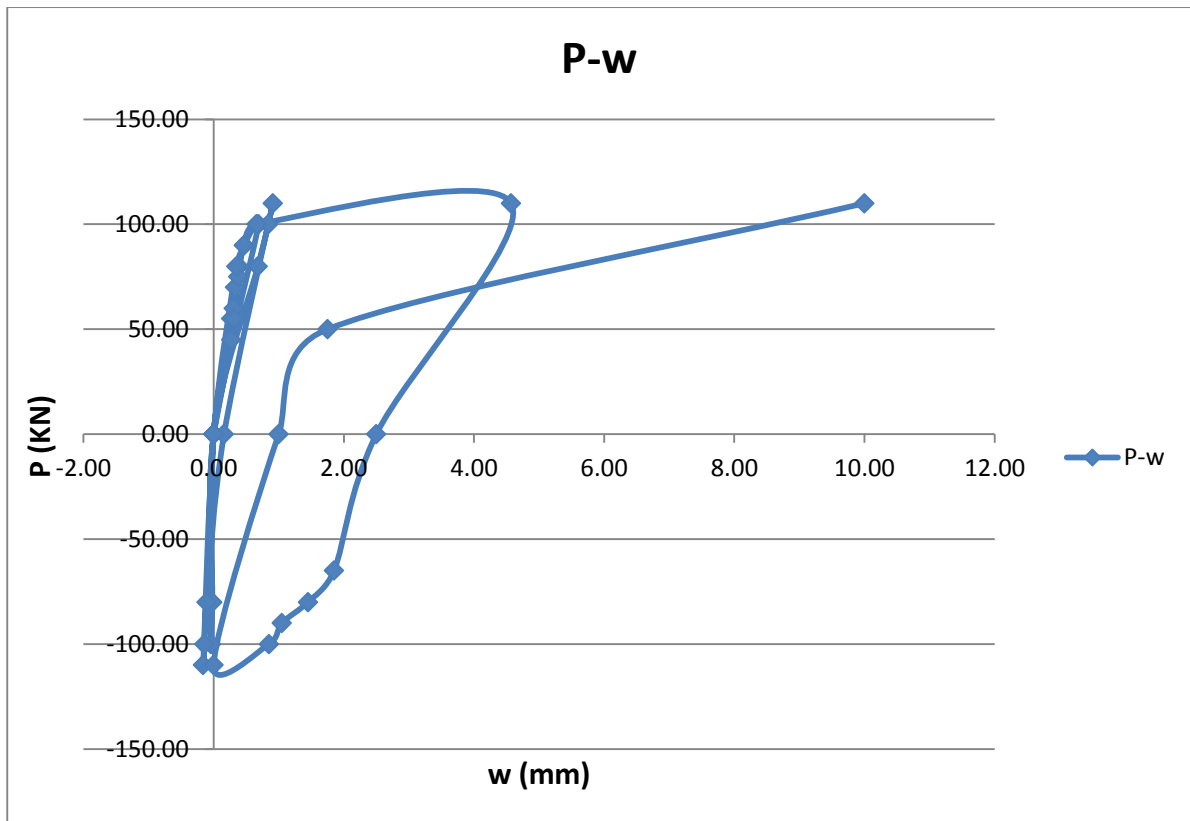


Εικ. 89 Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου με μηχανική αγκύρωση (βελόμετρο εξωτερικά των στηρίξεων)

Στη δεύτερη φάση του πειράματος τοποθετήθηκε στη μηχανή κάμψης η δοκός με ελλιπή αγκύρωση. Η διαδικασία του πειράματος είναι παρόμοια με τη προηγούμενη δοκιμή, με μικρές διαφορές στο μέγεθος του φορτίου όπως φαίνεται στις μετρήσεις (Πίνακας 8). Από τις μετρήσεις και το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης (Εικ. 90) παρατηρούμε τις πολύ μικρές αρνητικές μετατοπίσεις που εξηγήσαμε στις παραπάνω παραγράφους.

Φορτίο (KN)	Βέλος στη μέση μηχανικό βελόμετρο) (mm)
0,00	0,00
45,00	0,27
55,00	0,27
60,00	0,31
70,00	0,33
80,00	0,39
0,00	0,00
-80,00	-0,03
0,00	0,00
55,00	0,31
75,00	0,38
90,00	0,47
100,00	0,69
0,00	0,00
-80,00	-0,02
-100,00	-0,04
0,00	0,00
80,00	0,68
100,00	0,84
110,00	0,91
0,00	0,16
-80,00	-0,11
-100,00	-0,14
-110,00	-0,16
0,00	0,00
80,00	0,35
90,00	0,47
100,00	0,66
110,00	4,57
0,00	2,50
-65,00	1,85
-80,00	1,45
-90,00	1,05
-100,00	0,85
-110,00	0,00
0,00	1,00
50,00	1,75
110,00	10,00

Πίνακας 8 Μετρήσεις δοκιμίου με ελλιπή αγκύρωση



Εικ. 90 Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίου με ελλiptή αγκύρωση



Εικ. 91 Δοκός με ελλiptή αγκύρωση στη κατάσταση ρηγμάτωσης



Εικ. 92 Δοκός με ελλiptή αγκύρωση στη κατάσταση αστοχίας



Εικ. 93 Δοκός με ελλiptή αγκύρωση στο τελευταίο κύκλο φόρτισης - αποφόρτισης

4.6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων θεωρητικής και πειραματικής προσέγγισης

Στη παράγραφο 4.4 υπολογίστηκαν οι θεωρητικές ροπές αστοχίας και διαρροής $M_u = 10.27 KNm$, $M_y = 9.80 KNm$, οι οποίες είναι ίδιες και για τα δύο δοκίμια εφ' όσον οι διαστάσεις και ο οπλισμός είναι ίδια. Από τα πειραματικά διαγράμματα της προηγούμενης παραγράφου συμπεραίνουμε ότι και στα δύο δοκίμια η ροπή αστοχίας είναι $M_u = 16.5 KNm$ και η ροπή διαρροής $M_y = 15 KNm$. Η διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών ροπών αστοχίας και διαρροής οφείλονται είτε στις υπεραντοχές των υλικών είτε σε σφάλματα κατά τη κατασκευή των δοκιμίων. Η παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε εδώ είναι ότι τα δύο δοκίμια έχουν ίδια φέρουσα ικανότητα παρά τον διαφορετικό τρόπο αγκύρωσης.

		μηχανική αγκύρωση - ελλιπής αγκύρωση	
		Θεωρητική	Πειραματική
Αστοχία (KNm)	10,27	16,50	
Διαρροή (KNm)	9,80	15,00	

Πίνακας 9 Ροπές αστοχίας και διαρροής

Τα θεωρητικά βέλη κάμψεως που υπολογίστηκαν για τα δύο δοκίμια στη παράγραφο 4.4 είναι στην αστοχία $w_u = 0.48 mm$ και στην διαρροή $w_y = 0.44 mm$. Τα πειραματικά βέλη κάμψεως που παρατηρούμε στα διαγράμματα (Εικ. 89, Εικ. 90) είναι πολύ διαφορετικά σε σχέση με τα θεωρητικά. Για το δοκίμιο με μηχανική αγκύρωση είναι $w_u = 5.00 mm$,

$w_y = 1.10mm$ και για το δοκίμιο με ελλειπής αγκύρωση είναι $w_u = 4.57mm$,
 $w_y = 0.66mm$.

	μηχανική αγκύρωση		ελλειπής αγκύρωση	
	Θεωρητική	Πειραματική	Θεωρητική	Πειραματική
Αστοχία (mm)	0,48	5,00	0,48	4,57
Διαρροή (mm)	0,44	1,10	0,44	0,66

Πίνακας 10 Βέλη κάμψεως στην αστοχία και στη διαρροή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η συμπεριφορά των εναλλακτικών αγκυρώσεων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέσω της πειραματικής και θεωρητικής διαδικασίας που παρουσιάστηκε στα παραπάνω κεφάλαια.

Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και των διαγραμμάτων παρατηρούμε ότι τα δύο δοκίμια δεν έχουν σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά τους, αν λάβουμε υπ' όψιν και τα σφάλματα των μετρήσεων (Πίνακας 9, Πίνακας 10). Πρέπει να αναφέρουμε ότι τα δοκίμια λόγω κατασκευαστικού λάθους κατασκευάστηκαν μεγαλύτερα με αποτέλεσμα η θεωρητική ροπή αντοχής (10,27 KNm) και το φορτίο αστοχίας (102,7 KN) να είναι μεγαλύτερα από τα αρχικώς σχεδιασμένα. Το θεωρητικό φορτίο αστοχίας 102,7 KN είναι υπολογισμένο με τα φορτία να ασκούνται σε δύο σημεία και απόσταση 0,20 m από τις στηρίξεις (Εικ. 94).



Εικ. 94 Φόρτιση εσωτερικά των στηρίξεων σε απόσταση 0,20 m από τις στηρίξεις

Το μέγιστο φορτίο που μπορούσε να επιβάλλει η μηχανή κάμψης είναι 110 KN το οποίο είναι μεγαλύτερο από το θεωρητικό φορτίο αστοχίας αλλά πολύ κοντά. Έτσι λόγω των υπεραντοχών των υλικών η δοκός δεν αστόχησε σε φορτίο 102,7 KN αλλά ούτε και στα 110 KN που μπορούσε να επιβάλλει η

μηχανή. Γι' αυτό το λόγο αλλάξαμε την επιβολή του φορτίου από δύο σημεία σε ένα σημείο στη μέση της δοκού (Εικ. 95).

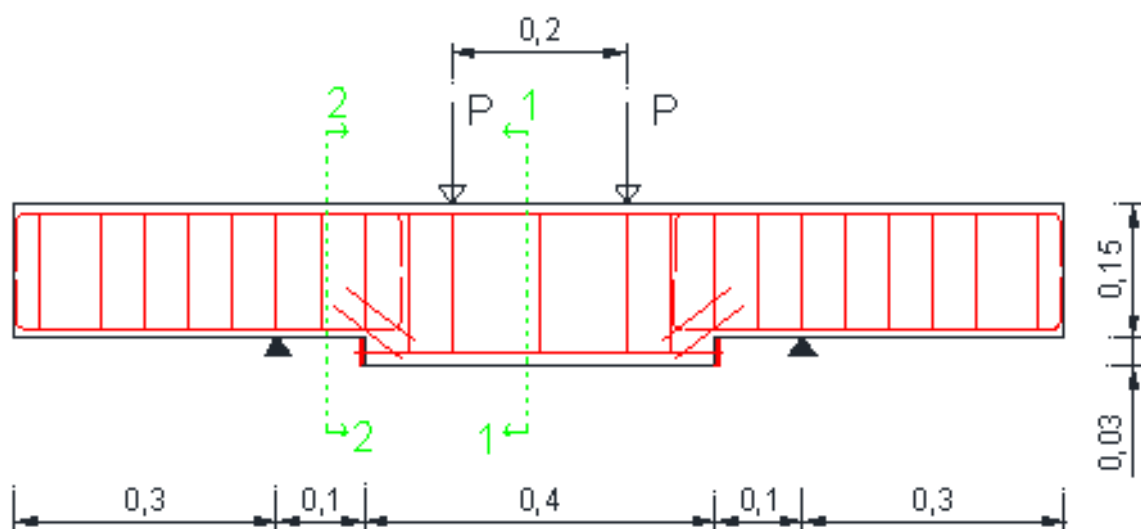


Εικ. 95 Φόρτιση στη μέση της δοκού

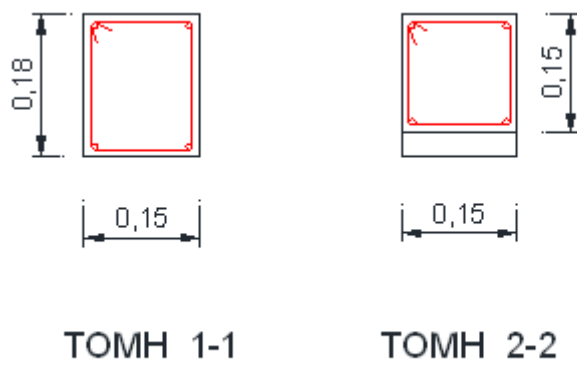
Ο σκοπός μας όμως ήταν να αστοχήσει η δοκός με επιβολή φορτίου σε δύο σημεία (Εικ. 94) διότι το μήκος αγκύρωσης του εφελκυσμένου οπλισμού είναι μικρότερο από τη μέγιστη ροπή. Έχοντας το μήκος αγκύρωσης μικρότερο από αυτό που απαιτείται (0,27 m σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2) μπορεί να διερευνηθεί η συμπεριφορά της εναλλακτικής αγκύρωσης. Εμείς όμως για να φέρουμε τη δοκό στη κατάσταση αστοχίας επιβάλλαμε το φορτίο στη μέση επομένως το μήκος αγκύρωσης μεγαλώνει φτάνοντας το 0,25 m, δηλαδή σχεδόν σε αυτό που απαιτεί ο Ευρωκώδικας 2. Αυτό επιβεβαιώθηκε παρατηρώντας τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα, όπου παρατηρούμε μικρές αποκλίσεις για τα δύο δοκίμια στα βέλη κάμψεως λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα σφάλματα των μετρήσεων, αλλά και οι ροπές αστοχίας και διαρροής είναι ίδιες.

Επομένως για τους παραπάνω λόγους δεν εκτελέστηκε το πείραμα για τα άλλα δύο δοκίμια καθώς δεν θα είχαμε σημαντικά αποτελέσματα για την εναλλακτική αγκύρωση των οπλισμών.

Για να έχουμε μια σαφέστερη εικόνα για τη συμπεριφορά των δοκιμίων με εναλλακτική αγκύρωση πρέπει τα δοκίμια να δοκιμαστούν σε άλλη μηχανή κάμψης με μεγαλύτερη δυνατότητα επιβολής φορτίου. Διαφορετικά μπορούν να κατασκευαστούν τα δοκίμια με μικρότερες διαστάσεις ώστε να δοκιμαστούν στη συγκεκριμένη μηχανή κάμψης. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα σχέδια με τις διαστάσεις που πρέπει να έχουν τα δοκίμια (Εικ. 96, Εικ. 97). Επιπλέον πρέπει να τοποθετηθούν περισσότερα βελόμετρα στις στηρίξεις και δύο εξωτερικά των στηρίξεων.



Εικ. 96 Όψη δοκού με νέες διαστάσεις



Εικ. 97 Τομές δοκού με νέες διαστάσεις

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ευρωκώδικας 2, EN 1992-1-1:2004, “Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα”
- [2] Thompson M., K., Jirsa, J., O., Breen, J. E. and Klingner. R.E (2002), “Anchorage behavior of headed reinforcement: Literature Review”, Report No FHWA/TX-O-1855-1. Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin, 2002.
- [3] Γιαννόπουλος Ιωάννης & Γιαννόπουλος Πλούταρχος, ΒΛΑΒΕΣ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΩΠΛΙΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, (http://www.teetrip.tee.gr/giannop_1.pdf)
- [4] ACI-318R-08, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary”, Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
- [5] ACI-352R-02, “Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures”, 2002
- [6] Μ.Δ. Κωτσοβός, ‘Οπλισμένο Σκυρόδεμα’, Αθήνα 2010
- [7] S RAJAGOPAL and S PRABAVATHY, ‘Exterior beam-column joint study with non-conventional reinforcement detailing using mechanical anchorage under reversal loading’, India 2014
- [8] Thomas H.-K. Kang, Myoungsu Shin, Nilanjan Mitra, and John F. Bonacci, “Seismic Design of Reinforced Concrete Beam-Column Joints with Headed Bars”, ACI STRUCTURAL JOURNAL, 2009
- [9] THOMAS H.-K. KANG, WOOSUK KIM, and MYOUNGSU SHIN, “Cyclic Testing for Seismic Design Guide of Beam-Column Joints with Closely Spaced Headed Bars”, Korea 2011
- [10] Ευρωκώδικας 8, EN 1998-1 : 2004, “ Αντισεισμικός σχεδιασμός”
- [11] Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ), 2009