

## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΕΛΗΜΗΤΡΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

<u>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ</u>

ΒΟΥΓΙΟΥΚΑΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## <u>ΜΕΡΟΣ Α'</u>

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

ΣK	ΟΠΟΣ	5
1.		·····/
	1.1 Μεγεθή που επήρεαζουν την αντοχή συναφείας	/
	1.2 Μηχανισμος συναφειας	<u>8                                    </u>
	1.3 Καμπτομενή οοκός από οπλισμένο σκυροόεμα	9
	1.4 Υπολογισμος τασης συναφειας	11
	1.5 Συμπερασματικα	11
2.	ΑΓΚΥΡΩΣΗ	12
	2.1 Απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης και διαθέσιμο μήκος	12
	2.2 Θέσεις ελέγχου του μήκους αγκύρωσης	13
	2.3 Τρόποι μείωσης μήκους αγκύρωσης	14
	2.4 Εναλλακτικοί τρόποι αγκύρωσης	14
3.	ΑΣΤΟΧΙΕΣ	15
	3.1 Αστοχία διάσπασης από συνάφεια	15
	3.2 Αστοχία αγκύρωσης διαμηκών οπλισμών	15
٨	EXBOROVIKEZ	17
4.	ΔΤΕμοωκώδικας 2	17
	4.1 Δυκύοωση διαμήκων οάβδων	'/
	4.1.1 Αγκορωση σιαμηκών ραροών	<u></u> 17 18
	4.1.2 Oplaki hadi obvayelas	10
	4.1.3 Βάθικο μηκός αγκόρωσης	10
	4.1.5 Δγκυρώσεις με συγκόλληση ράβδων	21
	4.1.3 Αγκορωσεις με συγκολληση ραροών	<u></u>
	4.2.1 Αγκύρωση οάβδων	20
	4.3 Δμερικάνικος κανονισμός σκυροδέματος ΔCI318 ΔCI 352R	25
	4.3.1 Εμθύνοσιμη αγκύρωση	25
	4.2.2 Euliverium gyrriecogn $u\pi \delta \Omega$ (up	
	4.3.2 Ευθυγραμμή αγκυρωσή υπο θλίψη	20
	4.3.3 Aykupwoli $\mu$ e dyklotpu olio e $\psi$ enkuo $\mu$ o	21
	4.3.4 Aykupuoli $\mu$ e olulivuoli 100 ukpoo (ileaded bal)	20
	4.3.3 Αγκορωση με συγκολληση ραροσο κασεια στην ραροσ	20
	4.3.6 Κρισιμα τμηματά για την αναττυξή της σιαμηκούς στιλισμού	24
	4.3.7 Ράβδοι με διαπλάτυνση άκοου στον κόμβο	<u></u> 31
5.	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΕΣ ΔΡΑΣΕΙ	Σ 33
6.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	35
6.1 Exterior beam-column joint study with non-conventional rei		
	detailing using mechanical anchorage under reversal loading,	05
	S Kajagopai and S Prabavatny, India	35

- 6.2 Evaluation of mechanical anchorage of reinforcement by exterior beam- column joint experiments, Sung - Chul CHUN, Dae -Young KIM, Vancouver, Canada 44
- Vancouver, Canada \_\_\_\_\_44 6.3 Large-Scale Experiments and Thorough Data Analysis of Headed Bars in Beam-Column Joints, Thomas Kang, Choi, D.-, D. U \_\_\_\_47
- 6.4 Seismic design of reinforced concrete beam-column joints with heade bars, Thomas H.-K. Kang, Myoungsu Shin, Nilanjan Mitra and John F.Bonacci \_\_\_\_\_48
- 6.5 Experimental investigation of bond strength under high loading rates. Mathias Michal, Manfred Keuser, George Solomos, Marco Peroni, Martin Larcher, and Beatriz Esteban, Germany \_\_\_\_\_51
- 6.6 Degradation model of bond performance between deteriorated concrete and corroded deformed steel bars. Yuan-Zhou Wu, Heng-Lin Lv, Shu-Chun Zhou, Zhong-Nian Fang, China,2016 \_\_\_\_\_52

## <u>ΜΕΡΟΣ Β'</u>

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	
Τ. ΕΠΙΛΟΙ Η ΜΟΡΦΗΖ-ΖΤΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ	<u>55</u>
2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ	_57
3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	<u>57</u>
4. ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	<u>63</u>
5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΩΝ-ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ (M-1/R)	<u>63</u>
6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (Ρ-δ)	.65
<ol> <li>ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟ(ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ)</li> </ol>	67
7.1 Μέθοδος ευθύνραμμης ανκύρωσης	67
7.2 Μέθοδος συγκολλημένης ράβδου	68
7.3 Μέθοδος αγκύρωσης με διαπλάτυνση κεφαλής(headed bars	).70
7 4 Μέθοδος αγκύρωσης με νοήση εξωτερικής πλάκας	71
	70
	73
ο. ΓΕυθυγραμμή αγκυρωση	_/ 3 
9. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΛΛΙΠΗΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ	<u>80</u>
10.ΕΛΛΙΠΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΕC2 ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ	
ΜΕΘΟΔΟΙ	.83
10.1 Ευθύγραμμη αγκύρωση	.83
10.2 Εγκάρσια συγκολλημένη ράβδος	.86
10.3 Αγκύρωση με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars)	.89
11.ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΑΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	Q1
	<u>.</u>
12. ΕΛΛΙΠΗΣ ΑΙ ΚΥΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΕΟΖ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟ	Л 01
ΚΑΙΑ ΙΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	.94
12.1 Ευθυγραμμη αγκυρωση	.94
12.2 Εγκάρσια συγκολλημένη ράβοος	.95
12.3 Αγκύρωση με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars)	.96
12.4 Αντιμετώπιση ελλιπής ευθύγραμμης αγκύρωσης με χρήση	_
εξωτερικής πλάκας αγκύρωσης	<u>97</u>
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101

## <u> ΣΚΟΠΟΣ :</u>

Κατά την εκπόνηση της εργασίας επιδιώκεται να γίνει μια πλήρης ανάλυση και σύγκριση της συμπεριφοράς διαφορετικών μορφών αγκύρωσης ,που αναφέρονται το Ευρωκώδικα αλλά και στον Αμερικάνικο κανονισμό, με σκοπό το σωστό σχεδιασμό δοκιμίων για την μετέπειτα διενέργεια πειραμάτων που θα μας επιτρέψουν να βγάλουμε ασφαλέστερα αποτελέσματα και να επιβεβαιώσουμε τα όσα συμπεράσματα βγάλουμε από αυτόν τον σχεδιασμό . Οι μορφές αγκύρωσης που μελετάμε είναι :

- 1. Αγκύρωση με ευθύγραμμο μήκος
- 2. Αγκύρωση με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο
- 3. Αγκύρωση με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bar)
- 4. Αγκύρωση με εξωτερική συγκολλημένη μεταλλικλή πλάκα

# ΜΕΡΟΣ Α

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

## 1. <u>ΣΥΝΑΦΕΙΑ</u>

Δύο είναι τα υλικά που αποτελούν το οπλισμένο σκυρόδεμα· το σκυρόδεμα και ο οπλισμός-χάλυβας. Οι ιδιότητες αυτών των δυο υλικών είναι διαφορετικές αλλά και συμπληρωματικές. Δηλαδή, το σκυρόδεμα έχει χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη, ενώ ο χάλυβας σε εφελκυσμό. Το σκυρόδεμα και ο χάλυβας συνεργάζονται απόλυτα σαν αποτέλεσμα του κοινού συντελεστή θερμικής διαστολής.

Κατά την κατασκευή των στοιχείων, οι ράβδοι του οπλισμού που χρησιμοποιούνται δεν είναι συνεχόμενες αλλά χωρίζονται σε τμήματα με περιορισμένο μήκος (12m μέγιστο), γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη για αγκύρωση και μάτησή τους.

Για να έχουν τα δύο υλικά κοινές παραμορφώσεις πρέπει να συνεργάζονται πλήρως, δηλαδή δεν πρέπει να υπάρχει ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Σε αυτό συμβάλλει η συνάφεια.

Ως «συνάφεια» ορίζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ του σκυροδέματος και των οπλισμών σε ένα δομικό στοιχείο. Οι εν λόγω τάσεις εξασφαλίζουν ότι τα υλικά λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύνολο. Οι δυνάμεις συνάφειας αναπτύσσονται σαν αντίσταση στην εφελκυστική δύναμη και, έτσι, εμποδίζουν τη ράβδο να ολισθήσει.

Η τιμή των τάσεων συνάφειας σε ένα σημείο είναι ανάλογη της τάσης διαρροής της ράβδου (f<sub>y</sub>) και της διαμέτρου της ράβδου (Φ) και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης της θέσης του σημείου από το ελεύθερο άκρο της ράβδου. Επιπλέον, τη συνάφεια επηρεάζουν το ανάγλυφο της ράβδου, η ποιότητα του σκυροδέματος, η διεύθυνση και θέση της ράβδου σε σχέση με την διεύθυνση σκυροδέτησης, η επικάλυψη της ράβδου και το είδος φόρτισης.

#### 1.1 <u>Μεγέθη που επηρεάζουν την αντοχή συνάφειας</u>

<u>Εγκάρσιες τάσεις</u>: Οι εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις αυξάνουν την αντοχή της συνάφειας ενώ οι εγκάρσιες εφελκυστικές τη μειώνουν.

Ποιότητα χάλυβα : Οι νευροχάλυβες διαθέτουν καλύτερη συνάφεια γιατί διαθέτουν τον πρόσθετο μηχανισμό της αντίστασης του εγκλωβισμένου σκυροδέματος μεταξύ των νευρώσεων.

Ποιότητα σκυροδέματος : Η συνάφεια αυξάνεται με την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος.

Σύνθεση σκυροδέματος : Η συνάφεια εξασφαλίζεται μέσω του τσιμεντοπολτού ο οποίος αποτελεί την κόλλα του μίγματος του σκυροδέματος. Για μεγαλύτερη συνάφεια με τον οπλισμό απαιτείται μεγαλύτερη διεπιφάνεια μεταξύ τσιμεντοπολτού και ράβδων οπλισμού η οποία εξασφαλίζεται με μικρότερες σύνθεσεις σκυροδέματος με αδρανή.

<u>Θέση ράβδου οπλισμού :</u> Όσο πλησιέστερα στην ελεύθερη επιφάνεια του ξυλοτύπου βρίσκεται η ράβδος του οπλισμού τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα δημιουργίας κάτω από αυτή μηνίσκου νερού, άρα μειώνεται και η αντοχή της συνάφειας. Λόγω αυτού του μηχανισμού έχουμε και τον διαχωρισμό σε ευνοϊκές και μη ευνοϊκές συνθήκες.

Διεύθυνση ράβδου : Ράβδος παράλληλη στη διεύθυνση σκυροδέτησης έχει μεγαλύτερη συνάφεια από ράβδο κάθετη καθώς είναι λιγότερο εκτεθειμένη στον προηγούμενο μηχανισμό δημιουργίας μηνίσκου νερού.



Σχήμα 1.1 : Σχηματισμός κενών ή πόρων κάτω από οριζόντια ράβδο, λόγω συνιζήσεως του σκυροδέματος (βιβλιογραφία 1,Γκρός)



Σχήμα 1.2 : Αντοχή συνάφειας ανάλογα προς τη θέση της ράβδου κατά τη σκυροδέτηση. Αποτελέσματα δοκιμών εξολκεύσεως (βιβλιογραφία 1,Γκρός)

#### 1.2 <u>Μηχανισμός συνάφειας</u>

Καθώς τα υλικά παραμορφώνονται, ταυτόχρονα το σκυρόδεμα λόγω της μικρής εφελκυστικής αντοχής του ρηγματώνεται. Αμέσως μετά τη ρηγμάτωση, τις δυνάμεις εφελκυσμού τις παραλαμβάνουν οι οπλισμοί ώστε να εξασφαλιστεί η ισορροπία του στοιχείου χωρίς μεγάλες παραμορφώσεις. Για την απρόσκοπτη αυτή λειτουργία δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή αγκύρωση των οπλισμών.

Μετά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος υπάρχει ολίσθηση μεταξύ αυτού και του χάλυβα. Στην περιοχή των κύριων ρωγμών αλλά και ανάμεσα σε αυτές κάνουν συχνά την εμφάνισή τους ορισμένες μικρορωγμές και, κατά συνέπεια, δημιουργούνται συνεχείς σχετικές ολισθήσεις μεταξύ των υλικών.

Στην αρχή, ανάμεσα στην επιφάνεια του χάλυβα και στο σκυρόδεμα που το περιβάλει, υπάρχει η πρόσφυση, που αντιστοιχεί σε πολύ μικρό τμήμα της συνάφειας και καταστρέφεται για πολύ μικρές μετατοπίσεις. Μετά την καταστροφή της πρόσφυσης, ακολουθεί η ενεργοποίηση της μάζας του σκυροδέματος που προβάλει αντίσταση μέσω του μηχανισμού τριβής. Η συνάφεια -λόγω τριβής -αυξάνει με την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας τη ράβδου και με τη αύξηση της εγκάρσιας προς την κατεύθυνση εξόλκευσης τάσης.

Το μεγαλύτερο μέρος της συνάφειας στους νευροχάλυβες δημιουργείται από την αντίσταση του σκυροδέματος μεταξύ των νευρώσεων. Το μέγεθος της αντίστασης εξαρτάται από την μορφή, την απόσταση και το ύψος των νευρώσεων, την ποιότητα του σκυροδέματος και την εγκάρσια τάση.

Τέλος, στις θέσεις των νευρώσεων είναι αναμενόμενη η τοπική θραύση του σκυροδέματος και η μικρορηγμάτωση. Από την άλλη πλευρά, στη μεταξύ των νευρώσεων περιοχή, η θραύση ξεκινά ως εφελκυστική αντοχή με τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων.



Σχήμα 1.3 : ποιοτική παράσταση δευτερευουσών μικρορωγμών μεταξύ των κύριων ρωγμών σε ράβδο οπλισμένου σκυροδέματος υπό κεντρικό εφελκυσμό (βιβλιογραφία 10,Τάσιος)



Σχήμα 1.4 :Δυνάμεις στις νευρώσεις της ράβδου και τροχιές τάσεων στις οδοντώσεις του σκυροδέματος (βιβλιογραφία 1,Γκρός)

#### 1.3 Καμπτόμενη δοκός απο οπλισμένο σκυρόδεμα

Στην περίπτωση καμπτόμενης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα, όσο η ένταση M είναι αρκετά μικρή ώστε να μην ξεπερνιέται η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος, δηλαδή ισχύει  $\sigma_{ct}=y_1*M/I < f_{ct}$ , η διατομή λειτουργεί ως ομογενής και οι τάσεις στις ράβδους οπλισμού που βρίσκονται σε απόσταση y από τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής έχουν τιμή  $\sigma_s=\alpha^*\sigma_{c,s}=a^*M^*y$ , όπου a=Es/Ec καθώς ισχύει ο νόμος του Hooke.

Η κατανομή των τάσεων κατά μήκος της δοκού δίνεται στο σχήμα 1.6. Παρατηρείται πως ανάμεσα στις στηρίξεις και στα σημεία επιβολής της φόρτισης η τέμνουσα διατηρεί σταθερή τιμή.

Η τέμνουσα είναι ο λόγος που οδηγεί στην ανάπτυξη της τάσης συνάφειας μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος στην περιοχή ανάμεσα στις στηρίξεις και στα σημεία επιβολής των φορτίων. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση που είναι αναγκασμένος να παραλάβει ο χάλυβας από την τάση του σκυροδέματος συνεχώς μεταβάλλεται (αυξάνεται). Αναφορικά με την ένταση της συνάφειας, αυτή εξαρτάται από την τέμνουσα δύναμη και εκδηλώνεται για ένταση είτε πριν τη ρηγμάτωση είτε μετά από αυτή, για την περιοχή μεταξύ των ρωγμών. Σε περιοχές που η τέμνουσα είναι μηδέν δεν αναπτύσσονται τάσεις συνάφειας, με εξαίρεση τις περιοχές ανάπτυξης των ρωγμών.

Το στάδιο καταπόνησης όπου η ακραία τάση εφελκυσμού είναι μικρότερη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος ονομάζεται κατάσταση Ι και ισχύει ο νόμος **σ**<sub>ct</sub> <**f**<sub>ct</sub>. Όσο αυξάνεται η φόρτιση, η εφελκυστική αντοχή υπερβάλλεται με αποτέλεσμα να εμφανιστούν ρωγμές. Ο νόμος του Hooke ισχύει μέχρι τη στιγμή που οι ρωγμές θα ξεπεράσουν την ουδέτερη γραμμή όπου θα ισχύει πλέον το καμπύλο διάγραμμα τάσεων. Το στάδιο καταπόνησης όπου η εφελκυόμενη ζώνη έχει ρηγματωθεί και οι εφελκυστικές δυνάμεις λαμβάνονται εξολοκλήρου από τον οπλισμό, ονομάζεται κατάσταση ΙΙ.



Σχήμα 1.5 : Πρότυπο καμπτόμενης δοκού (βιβλιογραφία 1,Γκρος)





- α) διαγράμματα ροπών (Μ) τεμνουσών (V)
- β) διαγράμματα εξελίξεως των τάσεων στους οπλισμούς σ<sub>s</sub> και στο σκυρόδεμα στο ύψος των οπλισμών σ<sub>c,s</sub> για ένταση προ ρηγμάτωσης
- γ) διάγραμμα τάσεων συνάφειας για ένταση προ ρηγμάτωσης
- δ) διαγράμματα σ\_s και σ\_{c,s} για ένταση μετά την ανάπτυξη των ρωγμών
- ε) διάγραμμα τάσεων συνάφειας τα για ένταση μετά την ανάπτυξη των ρωγμών

#### 1.4 Υπολογισμός τάσης συνάφειας

Η τάση συνάφειας εκτιμάται πειραματικά κατά την εξόλκευση ράβδων οπλισμού. Το μέγεθος της τάσης συνάφειας είναι αυτό που προκύπτει σαν μέση τιμή  $\mathbf{T}_m$ =P/ (u\*I<sub>s</sub>) όπου u :η περίμετρος της ράβδου οπλισμού και I<sub>s</sub> : το μήκος συνεργασίας χάλυβα-σκυροδέματος . Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η εξέλιξη των τάσεων του χάλυβα και των τάσεων συνάφειας κατά την εξόλκευση ευθύγραμμης ράβδου . Η μέση τιμή συνάφειας είναι  $\mathbf{T}_m$ =(2/3)\* $\mathbf{T}_u$ . Για νευροχάλυβες έχουμε :  $\mathbf{T}_{m,k}$ =(2/3)\*3,5\*f<sub>ctk</sub>=2,5\* f<sub>ctk</sub> ενώ για λείες ράβδους η τιμή είναι μικρότερη  $\mathbf{T}_{m,k}$ =(2/3)\*2\*f<sub>ctk</sub>=1,3\* f<sub>ctk</sub> . Για τον προσδιορισμό των οριακών τιμών συνάφειας ισχύει :  $\mathbf{f}_{bd}$ =t m,k/ $\mathbf{Y}_c$  όπου  $\mathbf{Y}_c$ =1,5 . Έτσι για νευροχάλυβες έχουμε f<sub>bd</sub>=1,6\*f<sub>ctk</sub> και για λείους f<sub>bd</sub>=0,8 \*f<sub>ctk</sub> .



Σχήμα 1.7 : Ποιοτική παράσταση των τάσεων χάλυβα και τάσεων συνάφειας κατά την εξόλκευση ευθύγραμμης ράβδου (βιβλιογραφία 10,Τάσιος)

## 1.5<u>Συμπερασματικά</u>

Στην περίπτωση που δεν αναπτυχθούν οι τάσεις συνάφειας ο χάλυβας δεν εντείνεται και δεν συμβάλει στην καμπτική αντοχή του φορέα. Αυτό έχει σαν επακόλουθο, ο φορέας να συμπεριφέρεται ως άοπλος και να αστοχεί ψαθυρά όταν υπάρχει υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος.

Επιπλέον, σε περίπτωση που εξασθενήσουν οι τάσεις συνάφειας σε κάποια θέση εξαιτίας της κακής διεπιφάνειας μεταξύ των υλικών, ο οπλισμός δεν θα μπορέσει να αναπτύξει τη μέγιστη τάση διαρροής του. Συνεπώς, ο φορέας δε θα αναπτύξει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητά του.

Κατά τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του φορέα, τα μεγέθη αστοχίας της κρίσιμης διατομής υπολογίζονται για τάση χάλυβα ίση με την τάση διαρροής του. Λόγω αυτού, πρέπει το μήκος της ράβδου από το άκρο της μέχρι τη θέση κρίσιμης διατομής να είναι αρκετό ώστε να αναπτυχθεί τάση ίση με την τάση διαρροής αλλά και να εξασφαλίζεται η καλή συνάφεια στο μήκος αυτό.

## 2 <u>ΑΓΚΥΡΩΣΗ</u>

Ως «αγκύρωση» ορίζεται η προέκταση μιας ράβδου μέσα στο σκυρόδεμα με τέτοιο μήκος ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη συνάφεια μεταξύ των υλικών, με σκοπό να εξαντλείται το όριο διαρροής του χάλυβα πριν την εξόλκευσή του από το σκυρόδεμα.

Ο τρόπος αγκύρωσης κατέχει ουσιαστικό ρόλο κατά τον προσδιορισμό του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης. Υπάρχουν τέσσερις τρόποι αγκύρωσης : α) ευθύγραμμη αγκύρωση β) καμπύλη αγκύρωση-άγκιστρα ορθογωνικά , κυκλικά αναβολείς γ) ευθύγραμμη με μία ή περισσότερες κάθετα συγκολλημένες ράβδους δ) αγκύρωση με πρόσθετα στοιχεία (πλάκα, κεφαλή).



Σχήμα 2.1 : Τύποι αγκύρωσης οπλισμού (βιβλιογραφία 1,Γκρος)

## 2.1 Απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης και διαθέσιμο μήκος

Το μικρότερο μήκος που μπορεί να υπάρχει για την αγκύρωση, έτσι ώστε να μην έχουμε αστοχία της συνάφειας, είναι αυτό για το οποίο οι τάσεις συνάφειας φτάνουν την οριακή τιμή τους, δηλαδή την αντοχή συνάφειας **f**<sub>b</sub>.

Το μήκος αυτό ονομάζεται βασικό (απαιτούμενο) μήκος αγκύρωσης  $I_{b,rqd}$  και δίνεται από τον τύπο :  $I_{b,rqd} = (\emptyset/4)^*(\sigma_{sd} / f_d)$ . Όταν η τάση  $\sigma_s$  είναι ίση με την αντοχή  $f_{sy}$  τότε η ράβδος αναπτύσσει τη μέγιστη ικανότητά της και ισχύει:  $I_{b,rqd} = (\emptyset/4)^*(f_{sy} / f_d)$ 

Το μήκος αγκύρωαης που χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό δίνεται από τον τύπο : **I**<sub>bd</sub> = α<sub>1</sub> α<sub>2</sub> α<sub>3</sub> α<sub>4</sub> α<sub>5</sub> **I**<sub>b,rqd</sub> ≥ **I**<sub>b,min</sub> όπου οι συντελεστές α1,α2,α3,α4,α5 είναι μειωτικοί συντελεστές που αναφέρονται στην επιρροή της μορφής των ράβδων, στην επιρροή της ελάχιστης επικάλυψης σκυροδέματος, στην

επιρροή της περίσφιξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού, στην επίδραση μίας ή περισσοτέρων συγκολλημένων εγκάρσιων ράβδων κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού Ι<sub>bd</sub> και στην επιρροή της πίεσης εγκάρσια στο επίπεδο της διάρρηξης κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού,.

Ι<sub>b,min</sub>: Είναι το ελάχιστο μήκος αγκύρωσης το οποίο, όταν δεν υπάρχει άλλος περιορισμός, ορίζεται ως εξής:

- για αγκυρώσεις υπό εφελκυσμό: I<sub>b,min</sub> > max{0,3I<sub>b,rqd</sub>,10Ø,100 mm}
 - για αγκυρώσεις υπό θλίψη: I<sub>b,min</sub> > max{0,6I<sub>b,rqd</sub>,10Ø,100 mm}

Σε κάθε περίπτωση το μήκος αγκύρωσης I<sub>bd</sub> πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το απαιτούμενο I<sub>b,rqd</sub> διαφορετικά ο φορέας θα αστοχήσει από υπέρβαση των τάσεων συνάφειας.

#### 2.2 Θέσεις ελέγχου του μήκους αγκύρωσης

#### Τριγωνικό ή υπερβολικό διάγραμμα ροπών Μ

Το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης είναι ανάλογο της αναπτυσσόμενης τάσης και κατά συνέπεια της καμπτικής ροπής. Σε περίπτωση που το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης είναι μεγαλύτερο του απαιτούμενου στη θέση μέγιστης ροπής, τότε το ίδιο θα ισχύει και σε οποιαδήποτε άλλη θέση. Έτσι, οι θέσεις που είναι κρίσιμες για τον έλεγχο σε κάμψη (σημείο μέγιστης ροπής) είναι οι κρίσιμες θέσεις ελέγχου.



Σχήμα 2.2 : Τριγωνικό διάγραμμα ροπών Μ (βιβλιογραφία 12,Μπάκα)

## <u>Παραβολικό διάγραμμα ροπών Μ</u>

Στην περίπτωση που το διάγραμμα ροπών είναι παραβολικό, τότε δεν επαρκεί ο έλεγχος μόνο στις κρίσιμες θέσεις έναντι καμπτικής ροπής αλλά χρειάζεται επιπλέον έλεγχος . Κατά τον πρόσθετο έλεγχο το μήκος αγκύρωσης σε μία διατομή μέχρι τη θέση μηδενικής ροπής πρέπει να είναι μεγαλύτερο από **χ=M<sub>Rdu</sub>/V<sub>sd</sub>**, όπου **M<sub>Rdu</sub>** η ροπή αστοχίας στη διατομή και **V<sub>sd</sub>** η τέμνουσα στη θέση μηδενικής ροπής.



Σχήμα 2.3 : Παραβολικό διάγραμμα ροπών Μ (βιβλιογραφία 12,Μπάκα)

## 2.3 Τρόποι μείωσης μήκους αγκύρωσης

Κατά την κατασκευή ενός έργου, τα μήκη που διατίθενται για την αγκύρωση των ράβδων είναι συχνά περιορισμένα, ιδιαίτερα σε εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων. Για τον παραπάνω λόγο, δημιουργείται η ανάγκη να μειώσουμε το μήκος που απαιτείται. Αυτό το επιτυγχάνεται με τις εξής τροποποιήσεις :

-Υιοθετούνται ράβδοι μικρότερης διαμέτρου.

-Αυξάνεται το εμβαδόν του οπλισμού που καταλήγει στη θέση κοντά στο άκρο των ράβδων, έτσι ώστε να μειωθεί η τάση τους.

-Διαμορφώνονται μη ευθύγραμμες αγκυρώσεις.

-Υιοθετούνται νευροχάλυβες.

## 2.4<u>Εναλλακτικοί τρόποι αγκύρωσης</u>

Για την αγκύρωση των διαμήκη ράβδων εκτός από την ευθύγραμμη αγκύρωση υπάρχουν και άλλοι τρόποι που δίνονται στους κανονισμούς και είναι οι εξής :

- Αγκύρωση με διαμόρφωση άγκιστρου. Εδώ πρέπει να δίνεται προσοχή στη διάμετρο τυμπάνου κάμψης των ράβδων.

- Αγκύρωση με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο. Η ποιότητα των συγκολλήσεων πρέπει να αποδειχτεί ότι είναι επαρκής.

- Αγκύρωση με διαπλάτυνση της κεφαλής της ράβδου (headed bar).

Λεπτομέρειες για την χρήση αυτού του τρόπου αγκύρωσης δίνονται στον Αμερικάνικο κανονισμό οπλισμένου σκυροδέματος.

- Αγκύρωση με εξωτερική πλάκα αγκυρώσεως.

## 3 <u>ΑΣΤΟΧΙΕΣ</u>

#### 3.1 Αστοχία διάσπασης από συνάφεια

Στο σκυρόδεμα που βρίσκεται γύρω από τον οπλισμό δημιουργούνται περιμετρικές εφελκυστικές τάσεις οι οποίες οφείλονται στις τάσεις συνάφειας που δρουν κατά μήκος των ράβδων. Σε μέλη με έντονες μεταβολές ροπών κατά το μήκος τους μπορούν να υπάρχουν υψηλές τάσεις συνάφειας. Σε περίπτωση που οι διαμήκεις οπλισμοί μιας δοκού ή ενός υποστυλώματος δεν περιβάλλονται από πυκνούς συνδετήρες ή εγκάρσιους συνδέσμους, είναι πιθανή η δημιουργία ρωγμών διάσπασης κατά μήκος των ράβδων, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί μεγάλης διαμέτρου ή όταν το πάχος της επικάλυψης είναι μικρό. Σαν αποτέλεσμα των ρωγμών διάσπασης έχουμε αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης και μείωση της συνάφειας των διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών. Εάν η αποφλοίωση φτάσει στα όρια των συνδετήρων, δημιουργείται ο κίνδυνος να ανοίξουν οι συνδετήρες και να χαθεί η περίσφιγξη. Τα παραπάνω φαινόμενα επιδεινώνονται στην περίπτωση που προϋπάρχει διάβρωση του οπλισμού.

#### 3.2 Αστοχία αγκύρωσης διαμηκών οπλισμών

Στις ακραίες δοκούς ο διαμήκης οπλισμός πρέπει να αγκυρωθεί μέσα στον κόμβο δοκού– υποστυλώματος. Σε πολλές περιπτώσεις το πλάτος του υποστυλώματος δεν είναι αρκετό για αυτή την αγκύρωση ακόμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί άγκιστρο. Μια συνηθισμένη περίπτωση ανεπαρκούς αγκύρωσης είναι αυτή στην οποία οι κάτω ράβδοι δοκών αγκυρώνονται σε μικρό βάθος μέσα στον κόμβο. Όταν δεν υπάρχει επαρκές μήκος αγκύρωσης, οι ράβδοι ολισθαίνουν και δημιουργείται ρωγμή κάθετα προς τη διεύθυνση ολίσθησης. Όταν η σκυροδέτηση του υποστυλώματος φτάνει σε στάθμη πάνω από τη μασχάλη της δοκού, οι κάτω οπλισμοί της δοκού δεν μπορούν εύκολα να αγκυρωθούν μέσα στον κόμβο και κατά το σεισμό προκύπτει κατακόρυφη ρωγμή στη σύνδεση δοκού και κόμβου. Οι διαμήκεις οπλισμοί, σε ακραίους κόμβους υποστυλωμάτων, αγκυρώνονται μέσα στον κόμβο.

Σε παλαιότερες κατασκευές εντός του κόμβου δεν τοποθετούνταν συνδετήρες, οπότε οι οπλισμοί του υποστυλώματος αγκυρώνονταν σε άοπλο σκυρόδεμα. Στις ζώνες αγκύρωσης μπορεί να δημιουργηθεί διάρρηξη απερίσφυκτου σκυροδέματος, λόγω των τάσεων που οφείλονται στη δράση κυκλικών φορτίσεων. Στους σύγχρονους κανονισμού απαιτείται η τοποθέτηση εγκάρσιων οπλισμών στις περιοχές των αγκυρώσεων και στους κόμβους.



Εικόνα 3.1 Ανεπαρκής αγκύρωση πάνω & κάτω ράβδων δοκού (βιβλιογραφία 19, Γιαννόπουλος)





Γιαννόπουλος)

Εικόνα 3.2 : Ανεπαρκής αγκύρωση Εικόνα 3.3 : Διάρρηξη (βιβλιογραφία 19, κάτω ράβδων δοκού απερίσφιγκτου σκυροδέματος κόμβου λόγω σκυροδέτησης υποστυλώματος πάνω α<u>πό τη μασχάλη δοκού (βιβλιογραφία 19,Γιανν</u>όπουλος)



Εικόνα 3.4 :Μικρό μήκος αγκύρωσης (βιβλιογραφία 23)

#### 4 ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

Στον ευρωκώδικα 2, στο κεφάλαιο 8, γίνεται αναφορά στους κανονισμούς και στους περιορισμούς που πρέπει να τηρούνται όσον αφορά στις αγκυρώσεις των οπλισμών σε συνήθη κτίρια και γέφυρες. Σαν επιπλέον απαιτήσεις για την αγκυρώσεις στους κόμβους ο ευρωκώδικας 8, στο κεφάλαιο 5, εισάγει κάποιους περιορισμούς που αφορούν στις διαμέτρους στις διαμήκεις ράβδους των δοκών που αγκυρώνονται σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων. Επίσης γίνεται αναφορά σε εναλλακτικούς τρόπους αγκύρωσης όπως ράβδοι με κεφαλή αγκύρωσης ή πλάκα αγκύρωσης με συγκόλληση στα άκρα της ράβδου, χωρίς όμως να δίνονται λεπτομέρειες γι'αυτούς.

#### 4.1 Ευρωκώδικας 2

#### 4.1.1 Αγκύρωση διαμήκων ράβδων

Οι ράβδοι οπλισμού, τα σύρματα ή τα συγκολλητά δομικά πλέγματα θα πρέπει να είναι αγκυρωμένα, έτσι ώστε οι δυνάμεις συνάφειας να μεταβιβάζονται με ασφάλεια στο σκυρόδεμα, χωρίς την εμφάνιση διαμήκων ρηγματώσεων ή αποφλοιώσεων. Εάν είναι απαραίτητο θα πρέπει να τοποθετείται εγκάρσιος οπλισμός.

Οι μέθοδοι αγκύρωσης φαίνονται στο Σχήμα 4.1.





σμό Ι<sub>ν</sub> για οποιοδήποτε σχήμα μετρού-μενο καμπύλωση κατά μήκος του άξονα της ράβδου.

a)Βασικό μήκος αγκύρωσης υπό εφελκυ- b) Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης για τυπική



α) Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης για τυπικό άγκιστρο



d)Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης για τυπικό βρόχο



e) Ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης με συγκολλημένη εγκάρσια ράβδο

#### Σχήμα 4.1: Μέθοδοι αγκύρωσης μη ευθυγράμμων ράβδων (βιβλιογραφία 3, EC2)

#### 4.1.2 Οριακή τάση συνάφειας

Η οριακή αντοχή συνάφειας πρέπει να είναι επαρκής ώστε να αποκλείεται η αστοχία της συνάφειας.

Η τιμή σχεδιασμού για την οριακή τάση συνάφειας, f<sub>bd</sub>, για ράβδους με νευρώσεις μπορεί να ληφθεί ως:

 $f_{bd}$  = 2,25 \* η<sub>1</sub> \* η<sub>2</sub> \*  $f_{ctd}$  (4.1) όπου:

f<sub>ctd</sub> : είναι η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος.

Λόγω της αυξημένης ψαθυρότητας των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής, το f<sub>ctk,0,05</sub> πρέπει να περιοριστεί στη τιμή που αντιστοιχεί στο C60/75, εκτός αν μπορεί να τεκμηριωθεί ότι η μέση τάση συνάφειας υπερβαίνει αυτό το όριο. ηι:είναι ένας συντελεστής που έχει σχέση με τη ποιότητα των συνθηκών συνάφειας και τη θέση της ράβδου κατά τη σκυροδέτηση (Σχήμα 4.2):

η1 = 1,0 όταν εξασφαλίζονται 'ευνοϊκές' συνθήκες και

η<sub>1</sub>= 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<sub>2</sub> :σχετίζεται με τη διάμετρο των ράβδων:

η<sub>2</sub> = 1,0 για  $\emptyset \le$  32 mm

η<sub>2</sub> = (132 - Ø) / 100 για Ø > 32 mm



a)  $45^\circ \le \alpha \le 90^\circ$ 



:

b) h ≤ 250 mm

a) και b) 'ευνοϊκές' συνθήκες συνάφειας για όλες τις ράβδους  c) και d) μη γραμμοσκιασμένη περιοχή - 'ευνοϊκές' συνθήκες συνάφειας
 γραμμοσκιασμένη περιοχή - 'δυσμενείς' συνθήκες
 συνάφειας

#### Α Διεύθυνση σκυροδέτησης

Σχήμα 4.2: Διάκριση συνθηκών συνάφειας (βιβλιογραφία 3, EC2)



c) h > 250 mm

d)  $h \ge 600 \text{ mm}$ 



### 4.1.3 Βασικό μήκος αγκύρωσης

Στον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο τύπος του χάλυβα και τα χαρακτηριστικά συνάφειας των ράβδων.

Το βασικό απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης, Ι<sub>b,rqd</sub> για αγκύρωση ράβδου που καταπονείται με δύναμη Α<sub>s</sub>·σ<sub>sd</sub>, με τη παραδοχή σταθερής τάσης συνάφειας ίσης με f<sub>bd</sub> δίδεται από τη σχέση:

 $I_{b,rqd} = (\emptyset/4) \cdot (\sigma_{sd} / f_d) (4.2)$ 

όπου:

**σ**<sub>sd</sub> : είναι η τάση σχεδιασμού της ράβδου στη θέση από όπου αρχίζει να μετράται η αγκύρωση.

Για καμπτόμενες ράβδους το βασικό μήκος αγκύρωσης, Ι<sub>b</sub> και το μήκος σχεδιασμού Ι<sub>bd</sub> πρέπει να μετράται κατά μήκος της αξονικής γραμμής της ράβδου (βλέπε Σχήμα 4.1a).

#### 4.1.4 Μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού

Το μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού, **Ι<sub>bd</sub> δίδεται από τη σχέση**:

 $\mathbf{I}_{bd} = \alpha_1 \, \alpha_2 \, \alpha_3 \, \alpha_4 \, \alpha_5 \, \mathbf{I}_{b,rgd} \ge \mathbf{I}_{b,min} \qquad (4.3)$ 

όπου α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, α<sub>3</sub>, α<sub>4</sub> και α<sub>5</sub> είναι συντελεστές που δίνονται στο πίνακα 4.1: **α**<sub>1</sub>: Αναφέρεται στην επιρροή της μορφής των ράβδων με την παραδοχή επαρκούς επικάλυψης (Σχήμα 4.1).

α<sub>2</sub>: Αναφέρεται στην επιρροή της ελάχιστης επικάλυψης σκυροδέματος (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Τιμές του c<sub>d</sub> για δοκούς και πλάκες (βιβλιογραφία 3, EC2)

**α**<sub>3</sub>: Αναφέρεται στην επιρροή της περίσφιξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού. **α**<sub>4</sub>: Αναφέρεται στην επίδραση μίας ή περισσοτέρων συγκολλημένων εγκάρσιων ράβδων ( $\emptyset_t > 0,6\emptyset$ ) κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού l<sub>bd</sub>.

α<sub>5</sub>: Αναφέρεται στην επιρροή της πίεσης εγκάρσια στο επίπεδο της διάρρηξης κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού.

Aπαιτείται  $(\alpha_2 \alpha_3 \alpha_5) \ge 0,7$ 

I<sub>b,rqd</sub>: Λαμβάνεται από την Σχέση (4.2)

I<sub>b,min</sub>: Είναι το ελάχιστο μήκος αγκύρωσης το οποίο, εάν δεν υπάρχει άλλος περιορισμός, ορίζεται ως εξής:

- για αγκυρώσεις υπό εφελκυσμό: I<sub>b,min</sub> > max{0,3I<sub>b,rqd</sub>,10Ø,100 mm} (4.4)

- για αγκυρώσεις υπό θλίψη: I<sub>b,min</sub> > max{0,6I<sub>b,rqd</sub>,10Ø,100 mm} (4.5)

Απλουστευτικά και εναλλακτικά, το μήκος αγκύρωσης υπό εφελκυσμό μερικών από τις μορφές ράβδων που φαίνονται στο Σχήμα 4.1 μπορεί να οριστεί ως το ισοδύναμο μήκος αγκύρωσης I<sub>b,eq</sub>. Το I<sub>b,eq</sub>, όπως ορίζεται στο Σχήμα 4.1, ισούται προς:

- α<sub>1</sub>\*Ι<sub>b,rqd</sub> για τις μορφές ράβδων των Σχημάτων 4.1b, 4.1c και 4.1d (Πίνακας 4.1 για τιμές του α<sub>1</sub>)

-α<sub>4</sub>\*I<sub>b,rqd</sub> για τη μορφή ράβδου του Σχήματος 4.1e

(Πίνακας 4.1 για τιμές του α<sub>4</sub>)

όπου: τα α1 και α4 όπως έχουν ήδη οριστεί, το Ι<sub>b,rqd</sub> υπολογίζεται από τη Σχέση (4.2)

Παράγοντας	<b>T</b> /	Ράβδοι οπλισμών		
επιρροής	τυπος αγκυρωσης	Υπό εφελκυσμό	Υπό θλίψη	
	Ευθύγραμμη	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$	
Μορφή ράβδων	Μη ευθύγραμμη (βλέπε Σχήμα 4.1 (b), (c) και (d)	α <sub>1</sub> = 0,7 εάν c <sub>d</sub> > 3∅ αλλιώς α <sub>1</sub> = 1,0 (Σχήμα 4.3 για τιμές του c <sub>d</sub> )	$\alpha_{1} = 1,0$	
	Ευθύγραμμη	$ \begin{aligned} &\alpha_2 = 1 - 0, 15 \cdot (c_d - \varnothing) / \varnothing \\ &\geq 0, 7 \\ &\leq 1, 0 \end{aligned} $	α <sub>2</sub> = 1,0	
Επικάλυψη σκυροδέματος	Μη ευθύγραμμη (βλέπε Σχήμα 4.1 (b), (c) και (d)	α <sub>2</sub> = 1 - 0,15⋅(c <sub>d</sub> - 3∅)/∅ ≥ 0,7 ≤ 1,0 (βλέπε Σχήμα 4.3 για τιμές του c <sub>d</sub> )	α <sub>2</sub> = 1,0	
Περίσφιξη με εγκάρσιο οπλισμό μη συγκολλημένο στον κύριο οπλισμό	Όλοι οι τύποι	α <sub>3</sub> = 1 - Κλ ≥ 0,7 ≤ 1,0	α <sub>3</sub> = 1,0	
Περίσφιξη με συγκολλημένο εγκάρσιο οπλισμό*	Όλοι οι τύποι, η θέση και το μέγεθος όπως καθορίζεται στο Σχήμα 4.1 (e)	α <sub>4</sub> = 0,7	$   \alpha_4 = 0,7 $	
Περίσφιξη με εγκάρσια πίεση	Όλοι οι τύποι	$ α_5 = 1 - 0,04p $ ≥ 0,7 ≤ 1,0	-	

Πίνακας 4.1:	Τιμές των συντελεστών α	<sub>1</sub> , α <sub>2</sub> , α <sub>3</sub> , α <sub>4</sub> και α	α <sub>5</sub> (βιβλιογραφία 3, EC2)
--------------	-------------------------	---	--------------------------------------

όπου:

 $\lambda$ = (ΣA<sub>st</sub> - ΣA<sub>st,min</sub>)/A<sub>s</sub>

**ΣΑ**st: εμβαδόν διατομής του εγκάρσιου οπλισμού κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού I<sub>bd</sub>

ΣΑ<sub>st,min</sub> :εμβαδόν διατομής του ελάχιστου εγκάρσιου οπλισμού (0,25Α<sub>s</sub> για δοκούς και μηδενικό για πλάκες)

**Α**<sub>s</sub> :εμβαδόν διατομής της αγκυρούμενης ράβδου με τη μέγιστη διάμετρο **Κ** :συντελεστής με τιμές που φαίνονται στο Σχήμα 4.4

**Ρ** :εγκάρσια πίεση [MPa] στη κατάσταση αστοχίας κατά μήκος του I<sub>bd</sub>

Για άμεσες στηρίξεις, το Ι<sub>bd</sub> μπορεί να ληφθεί μικρότερο από το Ι<sub>b,min</sub> αρκεί να υπάρχει τουλάχιστον ένα εγκάρσιο σύρμα συγκολλημένο στο μήκος στήριξης και σε απόσταση τουλάχιστον 15 mm από την έναρξη του μήκους στήριξης.



Σχήμα 4.4: Τιμές του Κ για δοκούς και πλάκες (βιβλιογραφία 3, EC2)

#### 4.1.5 Αγκυρώσεις με συγκόλληση ράβδων

Ενίσχυση της αγκύρωσης των προηγούμενων παραγράφων μπορεί να επιτευχθεί με εγκάρσιες συγκολλημένες ράβδους (Σχήμα 4.6) που εδράζονται στο σκυρόδεμα. Η ποιότητα των συγκολλήσεων πρέπει να αποδειχτεί ότι είναι επαρκής.



Σχήμα 4.6: Συγκολλημένη εγκάρσια ράβδος ως σύστημα αγκύρωσης (βιβλιογραφία 3, EC2)

Η φέρουσα ικανότητα της αγκύρωσης μέσω μίας συγκολλημένης εγκάρσιας ράβδου (διάμετρος 14 mm - 32 mm), συγκολλημένης στην εσωτερική παρειά μίας κύριας ράβδου είναι **F**<sub>btd</sub>.

Η τάση σ<sub>sd</sub> στη Σχέση (4.2) μπορεί να μειωθεί κατά F<sub>btd</sub>/A<sub>s</sub> όπου A<sub>s</sub> είναι το εμβαδόν διατομής της υπό αγκύρωση ράβδου.

Η τιμή του F<sub>btd</sub> καθορίζεται από τη σχέση:

 $\mathbf{F}_{btd} = \mathbf{I}_{td} \mathcal{O}_t \, \boldsymbol{\sigma}_{td}$  αλλά όχι μεγαλύτερη από  $\mathbf{F}_{wd}$  (4.6) όπου:

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

Itd :είναι το μήκος σχεδιασμού της εγκάρσιας ράβδου: Itd = 1,16Øt(fyd/σtd)<sup>0,5</sup> ≤It
 It :είναι το μήκος της εγκάρσιας ράβδου, όχι μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των ράβδων που αγκυρώνονται.

Øt :είναι η διάμετρος της εγκάρσιας ράβδου

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

**σ**<sub>cm</sub> : είναι η θλιπτική τάση του σκυροδέματος κάθετα και στις δύο ράβδους (μέση τιμή, θλίψη θετική)

y :είναι η συνάρτηση: y = 0,015 + 0,14e<sup>(-0,18x)</sup>

x :είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία: x = 2(c/Ø<sub>t</sub>)+1

c :είναι η επικάλυψη σκυροδέματος κάθετα και στις δύο ράβδους

Εάν δύο ράβδοι ίδιου μεγέθους είναι συγκολλημένες στις απέναντι παρειές της υπό αγκύρωση ράβδου, η φέρουσα ικανότητα που προκύπτει από την Σχέση (8.8) μπορεί να διπλασιαστεί εφόσον η επικάλυψη της εξώτερης ράβδου πληροί τις απαιτήσεις.

Εάν δύο ράβδοι είναι συγκολλημένες στην ίδια πλευρά με ελάχιστη απόσταση 3Ø, η φέρουσα ικανότητα μπορεί να πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή 1,41.

Για ονομαστικές διαμέτρους ράβδων έως και 12 mm, η φέρουσα ικανότητα της αγκύρωσης μιας διασταυρούμενης συγκολλημένης ράβδου εξαρτάται κυρίως από την φέρουσα ικανότητα σχεδιασμού της συγκόλλησης και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

 $F_{btd} = F_{wd} \le 16A_s f_{cd} \varnothing_t / \varnothing_1 (4.7)$ όπου:

 $\mathbf{F}_{wd}$  :αντοχή διάτμησης σχεδιασμού της συγκόλλησης (Σχέση 4.6)  $\mathcal{O}_t$  :ονομαστική διάμετρος της εγκάρσιας ράβδου:  $\mathcal{O}_t \leq 12 \text{ mm}$ 

 $\emptyset_{l}$ :ονομαστική διάμετρος της υπό αγκύρωση ράβδου:  $\emptyset_{l} \leq 12 \text{ mm}$ 

Εάν τοποθετηθούν δύο εγκάρσιες συγκολλημένες ράβδοι με ελάχιστη απόσταση Ø<sub>t</sub>, το μήκος αγκύρωσης που προκύπτει από τη Σχέση (4.3) πρέπει να πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή 1,41.

## 4.2 Ευρωκώδικας 8

## 4.2.1 Αγκύρωση ράβδων

## Δοκοί

Το τμήμα του διαμήκους οπλισμού δοκών που κάμπτεται για αγκύρωση μέσα σε κόμβους θα διατάσσεται πάντοτε στο εσωτερικό των αντιστοίχων συνδετήρων των υποστυλωμάτων.

Για την αποφυγή αστοχίας συνάφειας, η διάμετρος των διαμήκων ράβδων δοκού που διέρχονται μέσω κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων, *d*<sub>bL</sub>, θα περιορίζεται σύμφωνα με τις ακόλουθες εκφράσεις:

α) για εσωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων:

$$\frac{d_{\rm bL}}{h_{\rm c}} \le \frac{7.5 \cdot f_{\rm ctm}}{\gamma_{\rm Rd} \cdot f_{\rm yd}} \cdot \frac{1 + 0.8 \cdot \nu_{\rm d}}{1 + 0.75 k_{\rm D} \cdot \rho' / \rho_{\rm max}}$$
(4.8a)

β) για εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων:

$$\frac{d_{\rm bL}}{h_{\rm c}} \le \frac{7.5 \cdot f_{\rm ctm}}{\gamma_{\rm Rd} \cdot f_{\rm yd}} \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \nu_{\rm d}\right) \quad (4.8b)$$

όπου

h<sub>c</sub> : είναι το πλάτος του υποστυλώματος παράλληλα προς τις ράβδους

f<sub>ctm</sub> : είναι η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος

fyd : είναι η τιμή σχεδιασμού της τάσης διαρροής χάλυβα

ν<sub>d</sub> : είναι η ανηγμένη αξονική δύναμη σχεδιασμού στο υποστύλωμα, που λαμβάνεται με την ελάχιστη τιμή της για την σεισμική κατάσταση σχεδιασμού (ν<sub>d</sub> = N<sub>Ed</sub>/f<sub>cd</sub>·A<sub>c</sub>);

*k*<sub>D</sub> : είναι συντελεστής που εκφράζει την κατηγορία πλαστιμότητας,

*k*<sub>D</sub> = 1 για ΚΠΥ και

*k*<sub>D</sub> = 2/3 για ΚΠΜ

ρ' :είναι το ποσοστό οπλισμού των θλιβόμενων ράβδων που διέρχονται από τον κόμβο

ρ<sub>max</sub> :είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό εφελκυόμενου οπλισμού.

<sub>/Rd</sub> : είναι ο συντελεστής αβεβαιότητας προσομοιώματος για την τιμή σχεδιασμού των αντοχών

<sub>γRd</sub>= 1,2 για ΚΠΥ

<sub>γRd</sub>= 1,0 για ΚΠΜ

(λόγω υπεραντοχής προερχόμενης από την σκλήρυνση λόγω παραμόρφωσης του διαμήκους οπλισμού της δοκού)

Οι παραπάνω περιορισμοί (εκφράσεις (4.8)) δεν εφαρμόζονται σε διαγώνιες ράβδους που διέρχονται από κόμβους.

Εάν η απαίτηση που καθορίζεται παραπάνω δεν μπορεί να ικανοποιηθεί σε εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων, λόγω μικρού ύψους *h*<sub>c</sub>, του υποστυλώματος παράλληλα προς τις ράβδους, μπορούν να ληφθούν τα ακόλουθα πρόσθετα μέτρα για την εξασφάλιση της αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού δοκών.

α) Η δοκός ή η πλάκα μπορεί να εκταθεί οριζόντια σε μορφή προβόλου προς τα έξω (βλέπε Σχήμα 4.7α).

β) Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ράβδοι με κεφαλή αγκύρωσης ή πλάκα αγκύρωσης με συγκόλληση στα άκρα της ράβδου (βλέπε Σχήμα 4.7b).

γ) Ράβδοι μπορούν να καμφθούν προς το εσωτερικό του κόμβου με ελάχιστο μήκος 10*d*<sub>bL</sub> και να διαταχθεί εγκάρσιος οπλισμός κοντά στο εσωτερικό της καμπύλης κάμψης των ραβδών (βλέπε Σχήμα 4.7γ).

Άνω ή κάτω ράβδοι που διέρχόνται από εσωτερικούς κόμβους θα τερματίζονται σε μέλη που συνδέονται στον κόμβο σε απόσταση όχι μικρότερη από Icr (μήκος της κρίσιμης περιοχής του μέλους)από την παρειά του κόμβου.



Σύμβολα

А πλάκα αγκύρωσης

В συνδετήρες που περικλείουν τις ράβδους του υποστυλώματος



## 4.3 Αμερικάνικος κανονισμός σκυροδέματος ACI318, ACI 352R

Ο Αμερικάνικος κανονισμός ασχολείται με τις αγκυρώσεις των οπλισμών στο κεφάλαιο 12 (chapter 12) για την έκδοση του 2008 και στο κεφάλαιο 25 (chapter 25) για την έκδοση του 2014. Συγκεκριμένα αναφέρεται σε πέντε είδη αγκυρώσεων: στην ευθύγραμμη αγκύρωση(embedment length), στην αγκύρωση με άγκιστρο(hook), στην αγκύρωση με διαμορφωμένη κεφαλή (headed deformed), στην αγκύρωση με μηχανικά μέσα (mechanical device) και τέλος στο συνδυασμό αυτών. Άγκιστρα και κεφαλές δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για οπλισμό που βρίσκεται σε θλίψη.

## 4.3.1 Ευθύγραμμη αγκύρωση

Το ευθύγραμμο μήκος αγκύρωσης **I**<sub>d</sub> καθορίζεται από τα παρακάτω, όμως δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 12 in(30,5 cm).

Πίνακας 4.2 : Ευθύγραμμο μήκος αγκύρωσης (βιβλιογραφία 5, ACI-318-08)

	Ράβδοι με διάμετρο ≤No6 (Φ20)	Ράβδοι με διάμετρο ≥Νο7(Φ22)
Καθαρή απόσταση ράβδων ή ματισμένων ράβδων όχι μικρότερη από d <sub>b</sub> , επικάλυψη όχι μικρότερη από d <sub>b</sub> , και συνδετήρες ή εγκάρσιοι σύνδεσμοι κατά μήκος του L <sub>d</sub> όχι μικρότερο από το ελάχιστο του κώδικα ή απόσταση ράβδων ή ματισμένων ράβδων όχι μικρότερο από 2 d <sub>b</sub> και επικάλυψη όχι μικρότερη από d <sub>b</sub>	$\left(\frac{f_{y}\psi_{t}\psi_{e}}{25\lambda\sqrt{f_{c}'}}\right)d_{b}$	$\left(\frac{f_{y}\psi_{t}\psi_{e}}{20\lambda\sqrt{f_{c}'}}\right)d_{b}$
Άλλες περιπτώσεις	$\left(\frac{3f_{y}\psi_{t}\psi_{e}}{50\lambda\sqrt{f_{c}'}}\right)d_{b}$	$\left(\frac{3f_{y}\psi_{t}\psi_{e}}{40\lambda\sqrt{f_{c}'}}\right)d_{b}$

Για τον υπολογισμό του μήκους χρησιμοποιείται ο τύπος :

$$\ell_{d} = \left(\frac{3}{40} \frac{f_{y}}{\lambda_{\sqrt{f_{c}'}}} \frac{\psi_{t} \psi_{e} \psi_{s}}{\left(\frac{c_{b} + K_{tr}}{d_{b}}\right)}\right) d_{b}$$
(1)

Όπου ο περιοριστικός όρος  $(c_b + K_{tr})/d_b$  δεν μπορεί να είναι μικρότερος από 2,5

και  $K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{sn}$  μπορεί απλοποιητικά να ληφθεί μηδέν ακόμα και αν υπάρχει οπλισμός περίσφιξης.

Συντελεστές:

F'c= θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

f<sub>v</sub> : εφελκυστική τάση ράβδου

Ktr: συντελεστής συνεισφοράς περιορισμού οπλισμού σε όλο το πιθανό διαρρηγμένο επίπεδο

ψt : συντελεστής θέσης οπλισμού

ψt= 1.3 εάν 12" σκυροδέματος έχουν σκυροδετηθεί κάτω από τους οπλισμούς

wt=1.0 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

ψe : συντελεστής επικάλυψης

ψε=1.0, για απροστάτευτες ράβδους

ψe=1.5 για ράβδους προστατευμένες με επικάλυψη <3d<sub>b</sub> ή καθαρή απόσταση

μεταξύ ράβδων <6 db

ψε=1,2 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Επισημαίνεται ότι το γινόμενο ψt \* ψe δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από

1.7.

ψs : συντελεστής μεγέθους οπλισμού

ψs =0.8 για Νο6(Φ20) ράβδους οπλισμού και μικρότερες

ψs =1 για ράβδους οπλισμού μεγαλύτερες του Νο7(Φ22).

λ : συντελεστής σκυροδέματος

λ=1 για συνήθη σκυροδέματα

λ=1.3 για ελαφροσκυρόδεμα

εάν προσδιορίζεται η χαρακτηριστική κυλινδρική αντοχή του σκυροδέματος (splitting tensile strength) το λ δίνεται ως:  $\lambda = f_{ct}/(6.7 \sqrt{f'_c}) \le 1.0$ 

Όπου :

f<sub>ct</sub>= εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Atr : Εμβαδό σκέλους συνδετήρα

d<sub>b</sub> : διάμετρος ράβδου

n : αριθμός ράβδων

s : μέγιστη απόσταση συνδετήρων κατά μήκος του μήκους μάτισης.

C: είναι ένας παράγοντας που αντιπροσωπεύει τη μικρότερη τιμή από α) την μικρότερη επικάλυψη της ράβδου β) τη μισή απόσταση από κέντρο σε κέντρο των ράβδων.

## 4.3.2 Ευθύγραμμη αγκύρωση υπό θλίψη

Το μήκος αγκύρωσης για ράβδους σε θλίψη Idc μπορεί να πάρει την μεγαλύτερη από τις τιμές  $(0.02f_y/\lambda_s/f_c^{-1})d_b$  και  $(0.0003f_y)d_b$  αλλά δεν μπορεί να είναι λιγότερο από 8 in(20,32 cm).

#### 4.3.3 Αγκύρωση με άγκιστρα υπό εφελκυσμό

Το μήκος αγκύρωσης με άγκιστρα Ι<sub>dh</sub> δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερο από την μεγαλύτερη τιμή των 8d<sub>b</sub> και 6 in. Το μήκος Ι<sub>dh</sub> είναι ίσο με (0.02ψe\*fy / λ √f<sub>'c</sub>)\*d<sub>b</sub>.

ψε=1.2 για επικαλυμμένες ράβδους

λ=0,75 για ελαφρύ σκυρόδεμα

για όλες τις άλλες περιπτώσεις ψe=1 και λ=1.

Το μήκος Idh μπορεί να πολλαπλασιαστεί με τους παρακάτω συντελεστές :

α) Για ράβδο με διάμετρο μεγαλύτερη ή ίση με No.11(Φ35), με άγκιστρα με κάλυψη όχι μικρότερη από 2,5 in και με άγκιστρο 90 μοίρες(σχήμα 4.8) : συντελεστής **0,7**.

β) Για 90 μοίρες άγκιστρα από ράβδους με διάμετρο Νο. 11(Φ35) και μικρότερη, οι οποίες είναι περισφιγμένες με συνδετήρες κάθετους στη ράβδοπου αγκυρώνεται με κενό μεταξύ τους όχι μεγαλύτερο από 3d<sub>b</sub> κατά μήκος του I<sub>dh</sub>- ή περισφιγμένες με συνδετήρες παράλληλους στη ράβδο- που αγκυρώνεται με κενό μεταξύ τους όχι μεγαλύτερο από 3d<sub>b</sub> κατά μήκος της επέκτασης του αγκίστρου(σχήμα 4.9):

συντελεστής 0,8.

γ)Για 180 μοίρες άγκιστρο από ράβδους με διάμετρο Νο. 11 και μικρότερο, οι οποίες είναι περισφιγμένες με συνδετήρες παράλληλες στην ράβδο που αγκυρώνεται με κενό μεταξύ τους- όχι μεγαλύτερο από 3d<sub>b</sub> κατά μήκος του I<sub>dh</sub> : συντελεστής **0,8** 

Ο πρώτος συνδετήρας στις περιπτώσεις β) και γ) πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση ίση ή μεγαλύτερη του 2d<sub>b</sub> από το άγκυστρο.

Οι γάντζοι δεν πρέπει να θεωρούνται ενεργοί όταν οι ράβδοι είναι υπό θλίψη.







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



Σχήμα 4.9 : Λεπτομέρεια κάθετων και παράλληλων συνδετήρων (βιβλιογραφία 5, ACI-318-08)



Σχήμα 4.10 : Λεπτομέρεια επικάλυψης σκυροδέματος (βιβλιογραφία 5, ACI-318-08)

## 4.3.4 Αγκύρωση με διαπλάτυνση του άκρου (headed bar)

Περιορισμοί για ράβδους με διαπλάτυνση του άκρου είναι :

1. Το όριο διαρροής της ράβδου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 60000 psi (413.4MPa) .

2. Το μέγεθος της ράβδου δεν μπορεί να ξεπερνάει το Νο.11(Φ35).

3. Δεν επιτρέπεται ελαφροσκυρόδεμα.

4. Η καθαρή περιοχή για την κεφαλή **A**<sub>brg</sub> δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη από **4A**<sub>b</sub>.

5. Η επικάλυψη της ράβδου δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 2d<sub>b</sub>.

6. Η καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων που αγκυρώνονται δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 4d<sub>b</sub>.

Το μήκος αγκύρωσης για διαπλάτυνση του άκρου είναι :

I<sub>dh</sub>= (0.016ψe\*fy / √f<sub>c</sub>)\*d<sub>b</sub> το οποίο δεν μπορεί να είναι μικρότερο από τη μεγαλύτερη των τιμών 8d<sub>b</sub> και 6 in I<sub>dh</sub>≥max(8d<sub>b</sub>,6in).

Το διευρυμένο άκρο δεν ενεργοποιείται όταν η ράβδος είναι σε θλίψη.

## Όπου :

f'c= θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

f<sub>y</sub> : εφελκυστική τάση ράβδου

ψe : συντελεστής επικάλυψης

ψε=1.2, για ράβδους προστατευμένες από διάβρωση.

ψe=1 για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.



Σχήμα 4.11 : Αγκύρωση με διευρυμένο άκρο (βιβλιογραφία 5, ACI-318-08)

Επισημαίνεται πώς, όταν χρησιμοποιούνται μικρά κενά μεταξύ ράβδων με διαπλάτυνση κεφαλής υπάρχει κίνδυνος αστοχίας του σκυροδέματος. Για να αποφευχθεί αυτός ο κίνδυνος το μήκος αγκύρωσης πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από d/1,5, όπου d:στατικό ύψος(σχήμα 4.12). Επίσης την αστοχία αυτή προλαμβάνουν οι συνδετήρες(σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.12 : Αστοχία σκυροδέματος (βιβλιογραφία 7, ACI-318R-14)



Σχήμα 4.13 : Προστασία από συνδετήρες (βιβλιογραφία 7, ACI-318R-14)

## 4.3.5 Αγκύρωση με συγκόλληση ράβδου κάθετα στην ράβδο οπλισμού

Το μήκος για αγκύρωση με συγκολλημένη ράβδο I<sub>d</sub> μετριέται από το κρίσιμο σημείο, υπολογίζεται όπως το ευθύγραμμο μήκος I<sub>d</sub> πολλαπλασιασμένο με μειωτικό συντελεστή

## $\psi_w = max((fy-35000) / fy, 5^*d_b/s) \le 1$ .

Επιτρέπεται να χρησιμοποιείται στον τύπο (1) ψe=1 για προστατευμένες ράβδους από διάβρωση.

Η κάθετα συγκολλημένη ράβδος τοποθετείται σε απόσταση όχι μικρότερη από 2in από το κρίσιμο σημείο. Όταν η απόσταση είναι μικρότερη τότε ψ<sub>w</sub>=1.



Σχήμα 4.14 :Αγκύρωση με συγκολλημένη ράβδο (βιβλιογραφία 5, ACI-318R-08)

Στο τεύχος με τίτλο "Συστάσεις για τη σχεδίαση κόμβων δοκώνυποστυλωμάτων κατά τη μονολιθική κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος (Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures) ACI 352-13 και στο κεφάλαιο 4.5 γίνεται λόγος στη διαμόρφωση των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων και σε περιορισμούς που επιβάλλονται. Διαρθρωτικές συνδέσεις ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, Τύπου 1 και τύπου 2 με βάση τις συνθήκες φόρτισης για τη σύνδεση και τις αναμενόμενες παραμορφώσεις των συνδεδεμένων μελών του πλαισίου, όταν αντιστέκονται σε πλευρικά φορτία.

**Τύπος 1**-Μια σύνδεση τύπου 1 αποτελείται από μέλη που έχουν σχεδιαστεί για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις αντοχής του κανονισμού ACI 318, για τα μέλη χωρίς σημαντική ανελαστική παραμόρφωση.

**Τύπος 2**-Σε μια σύνδεση τύπου 2, τα μέλη του πλαισίου έχουν σχεδιαστεί για να έχουν σταθερή δύναμη κάτω από την παραμόρφωση ανατροπής στο ανελαστικό φάσμα.

Οι απαιτήσεις για συνδέσεις εξαρτώνται από τις παραμορφώσεις του μέλους στον κόμβο που προκαλούνται από τη φόρτιση σχεδιασμού.

*Τύπος* 1 είναι μια σύνδεση που έχει στιγμιαία αντίσταση και έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το ACI 318.

*Τύπου* 2 είναι μια σύνδεση που έχει μέλη που απαιτούνται να εκτονώνουν την ενέργεια μέσα από αντιστροφή της παραμόρφωσης σε ανελαστικό φάσμα.

#### 4.3.6 Κρίσιμα τμήματα για την ανάπτυξη της διαμήκους οπλισμού μέλος

Για δοκούς ,το κρίσιμο τμήμα για τις διαμήκεις ράβδους οι οποίες διαμορφώνονται είτε με άγκιστρο είτε με διαπλάτυνση κεφαλής , λαμβάνεται ανάλογα με το αν έχουμε *τύπο 1* ή *τύπο 2* όπως στο σχήμα. Παρατηρούμε ότι ο τύπος 2 χρησιμοποιεί έναν περιορισμένο πυρήνα.



Σχήμα 4.15 :τύποι συνδέσεων (βιβλιογραφία 7, ACI-318R-14)

#### 4.3.7 Ράβδοι με διαπλάτυνση άκρου στον κόμβο

Οι κεφαλές των άκρων των ράβδων πρέπει να τοποθετούνται εντός του περιορισμένου πυρήνα, 2 in (50mm) από το πίσω μέρος αυτού, όπως στο σχήμα4.16. Για το ελάχιστο μήκος Ι<sub>dt</sub> όπως έχει υπολογιστεί, πρέπει να ισχύει Ι<sub>dt</sub>≥max(8d<sub>b</sub>,6in(50mm)). Για τους κόμβους *τύπου* 1 και 2 το μήκος Ι<sub>dt</sub> μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι 0,75 του μήκος για τις ράβδους με άγκιστρο. Για άγκιστρο το μήκος είναι :  $\ell_{dh} = \frac{\alpha f_v d_b \text{ (MPa)}}{6.2 \sqrt{f_c'} \text{ (MPa)}} \qquad \acute{\eta} \quad \ell_{dh} = \frac{\alpha f_v d_b \text{ (psi)}}{75 \sqrt{f_c'} \text{ (psi)}}$ 



Σχήμα 4.16 :Κόμβος με διαμόρφωση άγκιστρου και κεφαλής. (βιβλιογραφία 7, ACI-318R-14)

## 5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρουμε κάποια πράγματα που αφορούν στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση και στην συμπεριφορά των υλικών του οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκεινται σε αυτή.

Όσο αφορά το σκυρόδεμα όταν η ταχύτητα φόρτισης είναι μεγάλη (σεισμική) η θλιπτική αντοχή αυξάνεται κατά 20% περίπου σε σύγκριση με τη στατική φόρτιση ενώ μειώνεται η παραμόρφωση θραύσης. Επίσης υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση ανάλογα με το πώς επιβάλλουμε την ένταση παρατηρούμε τα ακόλουθα :

 Στην περίπτωση επιβαλλόμενης τάσης η επανάληψη φόρτισης – αποφόρτισης από 0 σε σ<sub>c</sub> έχει συνέπεια την σταδιακή αύξηση τον παραμενουσών παραμορφώσεων και έτσι το σκυρόδεμα απαιτείται να παραμορφώνεται ολοένα και περισσότερο για να φτάσει στην επιθυμητή τάση, με αποτέλεσμα την αποδιοργάνωση του φορέα. Έχουμε κατά συνέπεια μείωση του μέτρου ελαστικότητας και αύξηση παραμόρφωσης για σ<sub>0</sub>, συναρτήσει του πλήθους των κύκλων.



 Στην περίπτωση επιβαλλόμενης παραμόρφωσης η επανάληψη κύκλων παραμορφώσεων από 0 έως ε<sub>c</sub> έχει ως συνέπεια τη σταδιακή μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης στην μέγιστη παραμόρφωση ε<sub>c</sub>, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του φορέα. Έχουμε δηλαδή αύξηση παραμένουσας παραμόρφωσης και μείωση τάσης με την οποία αποκρίνεται ο φορέας



Γενικά ανεξάρτητα του τρόπου επιβολής της έντασης, η επαναλαμβανόμενη φόρτιση (τάσεις μεγαλύτερες από 0,4f<sub>c</sub>) συνεπάγεται και υποβάθμιση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος.

Για το σκυρόδεμα υπό θλίψη μετά τη ρηγμάτωσή του( άμεσος εφελκυσμός) παρατηρείται σημαντική θλίψη για μηδενική παραμόρφωση λόγω της σχετικής μετακίνησης των χειλών της ρωγμής. Επίσης η θλιπτική τάση για μηδενική παραμόρφωση μειώνεται όσο αυξάνεται το άνοιγμα της ρωγμής κατά την πρώτη φόρτιση σε εφελκυσμό.

Όσο αφορά τον χάλυβα το όριο διαρροής αυξάνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα επιβολής παραμορφώσεων(σεισμικές παραμορφώσεις) κατά 15%

περίπου σε σχέση με το στατικό όριο. Για το χάλυβας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση παρατηρούμε τα εξής :

- Πρακτικώς καμμία μείωση του ορίου διαρροής.
- Μείωση της απομένουσας ολκιμότητας.
- Καμπύλωση του διαγράμματος μετά την πρώτη διαρροή.



Με την ανακύκλιση η συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος παρουσιάζει σημαντική επιδείνωση ενώ η επίδρασή της αυξάνει την εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος οπότε μειώνεται το εύρος των ρωγμών.



Βρόχοι υστέρησης :

Κατά την εναλλασσόμενη φόρτιση στον δεύτερο κύκλο, για να αναλάβει ένταση το σκυρόδεμα πρέπει να κλείσουν πρώτα οι ρωγμές που έχουν ήδη δημιουργηθεί και που βρίσκονται τώρα στην θλιβόμενη περιοχή. Μέχρι οι να συμβεί αυτό οι παραμορφώσεις είναι μεγάλες. Για την αύξηση του εμβαδού των βρώχων (αύξηση απορροφούμενης ενέργειας) απαιτείται η τοποθέτηση θλιβόμενου οπλισμού ο οποίος θα αναλάβει τις θλιτικές τάσεις πριν κλείσουν οι προηγούμενες ρωγμές. Κατά την εναλλασσόμενη φόρτιση παρατηρείται μείωση του μέγιστου φορτίου που μπορεί να αναληφθεί και αντίστοιχη αύξηση των παραμορφώσεων με συνέπεια την επέκταση της αποδιοργάνωσης).





## 6 <u>ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ</u>

#### 6.1 <u>Exterior beam-column joint study with non-conventional reinforcement</u> <u>detailing using mechanical anchorage under reversal loading, S</u> <u>Rajagopal and S Prabavathy, India .</u>

Στο πείραμα αυτό γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του κόμβου με αντικατάσταση του αγκίστρου με μηχανική αγκύρωση(headed bar) στις περιπτώσεις που υπάρχει και διαμόρφωση οπλισμού Χεντός του κόμβου.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο γκρουπ με διαφορετική διάταξη των ράβδων εντός του κόμβου, με τρία δοκίμια το καθένα στα οποία έχουμε διαφορετικό τρόπο αγκύρωσης.

Στο γκρουπ 1 έχουμε κανονική αγκύρωση με άγκιστρο ή με μηχανική αγκύρωση, ενώ στο γκρουπ 2 έχουμε διαμόρφωση του οπλισμού με μορφή Χ εντός του κόμβου

Με Α συμβολίζονται τα δοκίμια που έχουν σχεδιαστεί με μηχανική αγκύρωση (headed bar) σύμφωνα με τον ACI-352.

Με Β συμβολίζονται τα δοκίμια που έχουν σχεδιαστεί με άγκιστρο 90 μοιρών σύμφωνα με τον ACI-318.

Με C συμβολίζονται τα δοκίμια που έχουν σχεδιαστεί με άγκιστρο 90 μοιρών σύμφωνα με τον IS-456.



Σχήμα 6.1 : Λεπτομέρειες οπλισμού εντός κόμβου και μηχανικής αγκύρωσης (headed bar). (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.2 : Λεπτομέρειες υποστυλώματος και δοκού (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.3 :Δοκίμιο τύπου Α (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.4 :Δοκίμιο τύπου Β (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.5 :Δοκίμιο τύπου C (Βιβλιογραφία 15)
Οι δυνάμεις που δρούν στον κόμβο καθώς και οι ρωγμές φαίνονται στο επόμενο σχήμα.

- Τ : εφελκυστική ένταση οπλισμού

- Cc: θλιπτική ένταση οπλισμού

- Cs : θλιπτική ένταση σκυροδέματος
- V : Διατμητική δύναμη
- b : Δοκός
- ς : Υποστύλωμα
- fc : Διαγώνιος εφελκυσμός
- ft : Διαγώνια θλίψη



Codes details	Equations	Required development length(mm)	Provided development length (mm)	Beam bars anchorage type	Specimen types with groups
ACI-352	$L_{dt} = \frac{3}{4} * (L_{dh})$	200.63	250.00	T-Type mechanical anchorage	A1-I & A2-II
ACI-318	$L_{dh} = \frac{\alpha * f_y d_b}{6.2 \sqrt{f_c'}}$	267.50	272.00	90-degree standard bent anchorages	B1-I & B2-II
<i>IS</i> <b>—</b> 456	$L_d = \frac{\phi \sigma_s}{4 \tau_{bd}}$	644.73	710.00	90-degree standard bent full anchorage	C1-I & C2-II

Πίνακας 6.1 :Προϋποθέσεις και απαιτήσεις για τα μήκη αγκύρωσης των ράβδων που χρησιμοποιούνται στον κόμβο (Βιβλιογραφία 15)

#### <u>Αποτελέσματα :</u>

Στα σχήματα 6.6 και 6.7 φαίνονται οι συμπεριφορές για το γκρουπ 1 (A1, B1, C1) και 2 (A2,B2,C2).

Στο σχήμα 6.8 βλέπουμε τις μέγιστες φορτίσεις για τα δύο γκρουπ.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι για το γκρουπ 1(κανονική αγκύρωση) έχουμε :

-μέγιστα φορτία: A1=73,00kN , B1=68,00 kN , C1=71,75 kN

- μετατοπίσεις : A1=52,72mm , B1=40,90mm , C1=50,62mm

Βγαίνει έτσι το συμπέρασμα ότι η περίπτωση Α1 έχει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε σύγκριση με τις Β1 και C1 κατά 6,85% και 1,71% αντίστοιχα.

Για το γκρουπ 2(διαμόρφωση του οπλισμού με μορφή Χ εντός του κόμβου) έχουμε:

-μέγιστα φορτία: A2=79,5kN , B2=78,5 kN , C2=79,3 kN

- μετατοπίσεις : A2=60,66mm , B2=67,00mm , C2=65,29mm

Βγαίνει έτσι το συμπέρασμα ότι η περίπτωση Α2 έχει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε σύγκριση με τις B2 και C2 κατά 1,26% και 0,31% αντίστοιχα.



Σχήμα 6.6 : Διαγράμματα δυνάμεων-μετακινήσεων για το γκρουπ 1 (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.7 : Διαγράμματα δυνάμεων-μετακινήσεων για το γκρουπ 2 (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.8 : Διαγράμματα μέγιστων δυνάμεων – μετακινήσεων (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.9 : Μέγιστες Μετατοπίσεις δοκιμίων (Βιβλιογραφία 15)

Στα σχήματα 6.10 και 6.11 συγκρίνουμε τα γκρουπ 1 και 2 μεταξύ τους και βγάζουμε το συμπέρασμα ότι για κάθε περίπτωση A,B,C τα δοκίμια από το γκρουπ 2 έχουν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η χρήση τον ράβδων σε μορφή Χ αυξάνει σημαντικά την δύναμη του κόμβου.

Στο σχήμα 6.12 βλέπουμε ότι τα δοκίμια A2,B2,C2 του γκρουπ 2 έχουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα (μ= δu/δy) από τα αντίστοιχα A1,B1,C1 του γκρουπ 1 κατά 18,31%, 32,24% και 23,67% αντίστοιχα. Μεγαλύτερη τιμή όλων έχει το δοκίμιο A2.

Βγάζουμε έτσι το συμπέρασμα ότι αυτός ο συνδυασμός αγκύρωσης(μηχανική αγκύρωση) και διαμόρφωσης των οπλισμών Χ στον κόμβο μας δίνει τη μέγιστη πλαστιμότητα .



Σχήμα 6.10 : Διαγράμματα μέγιστων φορτίων-μετακινήσεων για το γκρουπ 1 και 2 (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.11 : Φέρουσα ικανότητα δοκιμών (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.12 : Πλαστιμότητα δοκιμίων (Βιβλιογραφία 15)



Σχήμα 6.13 : Ακαμψία και μετατοπίσεις (Βιβλιογραφία 15)

		Ulti	mate		Ulti	mate lace-			
Speci- mens name and groups	Yielding displace- ment in mm $(\delta_y)$	lo in (F Left Side	ad kN 2u) Right Side	Average ultimate load in kN (P <sub>u</sub> )	in ت (ا Left Side	Right Side	Average displace- ment for ultimate load in mm $(\delta_u)$	Average displace- ment ductility factor $\mu = \delta_u / \delta_y$	Average stiffness kN/mm $k = P_u/\delta_y$ in
A1-I B1-I C1-I A2-II B2-II C2-II	4.50 5.00 5.20 4.23 5.50 5.12	72.00 70.00 71.00 79.00 77.00 77.50	74.00 66.00 72.50 80.00 80.00 81.00	73.00 68.00 71.75 79.50 78.50 79.25	42.13 35.96 45.63 56.00 65.00 54.63	63.30 45.85 55.60 65.32 69.00 75.96	52.715 40.905 50.615 60.660 67.000 65.295	11.714 8.181 9.734 14.340 12.182 12.753	16.222 13.600 13.798 18.794 14.273 15.479

Πίνακας 6.2 : Αποτελέσματα πειράματος : δύναμη διαρροής , Φέρουσα ικανότητα, πλαστιμότητα , ακαμψία (Βιβλιογραφία 15)

Στον παραπάνω πίνακα 6.2 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του πειράματος και παρατηρούμε ότι το δοκίμιο A1 έχει τη μεγαλύτερη ακαμψία (K= Pu/δy) από το γκρουπ 1, ενώ το A2 έχει την μεγαλύτερη ακαμψία από το γκρουπ 2.

Συνολικά παρατηρούμε ότι τα δοκίμια του γκρουπ2 έχουν μεγαλύτερη ακαμψία σε σχέση με αυτά του γκρουπ1, ενώ το δοκίμιο A2 έχει την μέγιστη ακαμψία μεγαλύτερη κατά 13,83% συγκριτικά με την ακαμψία του A1.

Στις εικόνες 6.1 και 6.2 βλέπουμε τις αστοχίες που έλαβαν χώρα σε κάθε δοκίμιο. Στις περιπτώσεις B1,C1,B2,C2 όπου έχουμε άγκιστρα βλέπουμε την αστοχία στον κόμβο που οφείλεται στη διαγώνια θλίψη που προκαλείται από τα άγκιστρα εντός του κόμβου.

Παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις Α1 και Α2 όπου έχουμε την μηχανική αγκύρωση, η ρηγμάτωση περιορίζεται και ο κόμβος δεν χάνει την αντοχή του. Βέλτιστη όμως είναι η περίπτωση του δοκιμίου Α2 με συνδυασμό μηχανικής αγκύρωσης και διαμόρφωσης οπλισμού σε μορφή Χ εντός του κόμβου όπου έχει την μικρότερη ρηγμάτωση.



Εικόνα 6.1 : Αστοχίες δοκιμίων για το γκρουπ 1 (Βιβλιογραφία 15)



Εικόνα 6.2 : Αστοχίες δοκιμίων για το γκρουπ 2 (Βιβλιογραφία 15)

#### Συμπέρασμα :

Από το πείραμα προκύπτει ότι η μηχανική αγκύρωση (headed bar) έχει καλύτερη συμπεριφορά από την αγκύρωση με άγκιστρο όσον αφορά την φέρουσα ικανότητα, την πλαστιμότητα και την ακαμψία. Ειδικά ο συνδυασμός αυτού του τύπου αγκύρωσης με την διαμόρφωση ράβδων σε μορφή Χ εντός του κόμβου αυξάνει ακόμα περισσότερο την αντοχή του κόμβου έναντι σε σεισμό.

#### 6.2 <u>Evaluation of mechanical anchorage of reinforcement by exterior</u> <u>beam- column joint experiments, Sung - Chul CHUN, Dae -Young KIM,</u> <u>Vancouver, Canada.</u>

Σκοπός του πειράματος είναι να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της μηχανικής αγκύρωσης με headed bars και να συγκριθεί με την κλασσική αγκύρωση με άγκιστρα.

Χρησιμοποιήθηκαν 2 διατάξεις εξωτερικών κόμβων δοκού-υποστυλώματος. Η μία διάταξη(JC-1, JM-1) σχεδιάστηκε έτσι ώστε να υπάρχει καπμτική αστοχία και η άλλη(JC-2,JM-2) ώστε να υπάρχει διατμητική αστοχία στον κόμβο. Οι διατάξεις έχουν την ίδια γεωμετρία και τις ίδιες ιδιότητες υλικών. Η κυκλική φόρτιση εφαρμόστηκε στη δοκό. Το C συμβολίζει το άγκιστρο και το M την μηχανική αγκύρωση



JC-1





	Expected		Beam			Column		
Specimen	Failure Mode	Anchorage	B×H [mm]	Re-bars [upper/lower]	Stirrup	B×D [mm]	Re-bars	Ноор
JC-1	Beam	90 degree hook		4-D22	D10@200			D10@300-3 legs
JM-1	Failure	Mechanical anchor	350	3-D22	(D10@100 in the	500	16 000	(D10@150 in the
JC-2	Joint Shoar	90 degree hook	× 500	8-D22	vicinities of loading	× 500	10-022	vicinities of reaction
JM-2	Failure	ailure Mechanical anchor		6-D22	point and joint)			points and joint)

Γ

Πίνακας 6.3 : Λεπτομέρειες δοκιμίων (Βιβλιογραφία 13)

1



Εικόνα 5.3 : Διάταξη πειράματος και πορεία φόρτισης (Βιβλιογραφία 13)

Κατά τον σχεδιασμό έχουμε δύναμη του σκυροδέματος f<sub>c</sub> είναι 40,8 MPa και η δύναμη διαρροής του οπλισμού f<sub>y</sub> είναι 392MPa και οι οπλισμοί είναι D22 και D10.

Η αντοχές διαρροής που μετρήθηκαν ήταν πολύ κοντά στις τιμές σχεδιασμού, ενώ οι καμπτικές δυνάμεις ξεπέρασαν τις τιμές σχεδιασμού κατά 26-36 %. Η αντοχή του σκυροδέματος στο πείραμα ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σχεδιασμού. Οι καμπτικές δυνάμεις αυξήθηκαν. Αποτελέσματα για διάταξη υπό καμπτική αστοχία :

JC-1 : έχουμε αστοχία σκυροδέματος για 4δy και του οπλισμού για 8δy JM-1 : Η συμπεριφορά είναι όμοια με πριν. Το σκυρόδεμα αστοχεί για 8δy και ο οπλισμός για 12δy



Εικόνα 6.4 : Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης και τελική μορφή δοκιμίων μετά το πείραμα (Βιβλιογραφία 13)

Αποτελέσματα για διάταξη υπό διατμητική αστοχία :

JC-2 : Στο θετικό κύκλο έχω σταθερή συμπεριφορά μέχρι 8δy αλλά για αρνητικό κύκλο έχουμε μείωση φόρτισης λόγο διατμητικής αστοχίας του κόμβου.

JM-2 : Μέχρι 4δy έχω την ίδια συμπεριφορά με πρίν αλλά έχω διατμητική αστοχία για κύκλο 7δy



Εικόνα 6.5 : Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης και τελική μορφή δοκιμίων μετά το πείραμα (Βιβλιογραφία 13)

TADLEAT

IABLE 2 Test Results									
Expected		Design Strength		Measured Strength		Ductility	Enorgy		
Failure	Specimen	Be	am	Jo	int			Batio	Dissipation
Mode		$M_y$	Mn	$\phi_i V_{in}$	V <sub>ju</sub>	IVI <sub>y</sub>	IVIn	Tidilo	Dissipation
Boom	JC-1(+)	248	265	1 / 12	659	254	361	0	02
Flexure Failure	JC-1(-)	188	204	1,413	492	187	257	0	92
	JM-1(+)	248	265	1 250	659	233	335	10	127
	JM-1(–)	188	204	1,559	492	193	260	12	137
Joint Shear	JC-2(+)	419	478	1 204	1,341	450	563	0	126
	JC-2(-)	334	383	1,394	951	294	379	0	120
	JM-2(+)	419	478	1 224	1,341	428	568	7	100
raiure	JM-2(-)	334	383	1,334	951	355	407		122

4 D

Where  $M_y$ ,  $M_n$ ,  $\phi_j V_{jn}$  and  $V_{ju}$  mean yield strength, flexural strength, shear strength and applied shear force,

Πίνακας 6.4 : Αποτελέσματα πειράματος (Βιβλιογραφία 13)

Συμπέρασμα :

Για τον κόμβο υπό καμπτική αστοχία, η μηχανική αγκύρωση (JM-1) είχε ίδια αντοχή και μετατόπιση διαρροής με την αγκύρωση με άγκιστρο (JC-1) όμως έχει μεγαλύτερη πλασιμότητα.

Για τον κόμβο υπό διατμητική αστοχία, η μηχανική αγκύρωση (JM-2) είχε ίδια αντοχή και μετατόπιση διαρροής με την αγκύρωση με άγκιστρο (JC-1). Η συμπεριφορά του JM-2 σε αρνητική κατεύθυνση ήταν καλύτερη από το JC-2, όπου το άγκιστρο τοποθετήθηκε έξω από τον κόμβο.

Από τη μελέτη αυτή, είχε εκτιμηθεί ότι η μηχανική αγκύρωση(headed bars), σε σύγκριση με το άγκιστρο, έχει καλύτερη αντοχή σε εξωτερικό κόμβο δοκούυποστυλώματος. Ειδικά, η μηχανική αγκύρωση έχει καλύτερη αντοχή από το άγκιστρο του οποίου η επέκταση είναι τοποθετημένη προς τα έξω του κόμβου.

#### 6.3 Large-Scale Experiments and Thorough Data Analysis of Headed Bars in Beam-Column Joints, Thomas Kang, Choi, D.-, D. U

Πραγματοποιήθηκαν από κοινού πειράματα στο πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα(OU) και της Κορέας (HNU), κατά τα οποία έγιναν έλεγχοι κόμβων σε κυκλική φόρτιση. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν τη μορφή ταυ, όπως φαίνονται στις φωτογραφίες και η τοποθέτηση των οπλισμών αφορούσε την αγκύρωση με headed bars και με hooked bars, βασισμένη στον αμερικάνικο κανονισμό ACI318-08 και ACI352.

Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν τα πειράματα είναι ότι οι ράβδοι που αγκυρώνονται με headed bars έχουν καλύτερη αντοχή από αυτές που αγκυρώνονται με hooked bars (άγκιστρα).



Εικόνα 6.6 : Διαμόρφωση κόμβου (Βιβλιογραφία 16)

#### 6.4 <u>Seismic design of reinforced concrete beam-column joints with heade</u> <u>bars, Thomas H.-K. Kang, Myoungsu Shin, Nilanjan Mitra and John</u> <u>F.Bonacci</u>.

Στη μελέτη αυτή γίνεται σύγκριση παλαιότερων πειραμάτων που αφορούν κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων με χρήση της αγκύρωσης με headed bars και με φόρτιση σχεδόν στατική και ανακυκλιζόμενη. Τα πειράματα που περιλαμβάνει η έρευνα έχουν πραγματοποιηθεί σε χώρες όπως οι Η.Π.Α, η Κορέα, η Ιαπωνία, και η Ταϊβάν. Κατά τη μελέτη αξιολογείται και εκτιμάται οι αμερικάνικοι κανονισμοί ACI 318-08 και ACI35R-02.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν έχων σχήμα Τ και Γ και αναπαριστούν εξωτερικούς κόμβους . Υπάρχουν τρείς κατηγορίες που αφορούν την αστοχία Κατηγορία 1: πλαστική άρθρωση που ακολουθείται από υποβάθμιση του κόμβου, Κατηγορία 2 : πλαστική άρθρωση που ακολουθείται από αστοχία του κόμβου Κατηγορία 3 : αστοχία του κόμβου πριν την δημιουργία πλαστικής άρθρωσης.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν βασίζονται σε στατιστικές απεικονίσεις των αποτελεσμάτων όλων των πειραμάτων και αφορούν :

- 1. Την καθαρή επικάλυψη των προς αγκύρωση ράβδων cs
- 2.Τα όρια διαρροής για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα fy , fc
- 3.Το μέγεθος της κεφαλής
- 4.Την πλευρική επικάλυψη των ράβδων
- 5.Τη χρήση πολλών στρώσεων ράβδων

Τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 6.7 : Σύγκριση μεταξύ για τα μήκη αγκύρωσης που παρέχονται και αυτών απαιτούνται (Βιβλιογραφία 14)



Εικόνα 6.8 : καθαρές αποστάσεις σε ένα στρώμα σε σχέση με τη διάμετρο της ράβδου (Βιβλιογραφία 14)



Εικόνα 6.10 : το μέγεθος της κεφαλής σε σχέση το μήκος αγκύρωσης (Βιβλιογραφία 14)



Εικόνα 6.11 : Καθαρή πλευρική επικάλυψη για κατηγορία 1 (Βιβλιογραφία 14)



Εικόνα 6.12 : Κόμβοι με πολλαπλές στρώσεις ράβδων με headed bars (Βιβλιογραφία 14)

Σελίδα | 49

Με βάση τα προηγούμενα η μελέτη καταλήγει στα εξής συμπεράσματα :

- Το μήκος αγκύρωσης I<sub>dt</sub> για αγκύρωση σε κόμβο δοκούυποστυλώματος με headed bars με βάση το ACI352R-02 βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα ενώ το μήκος αγκύρωσης I<sub>dt</sub> με βάση το ACI 318-08 είναι πιο συντηρητικό.
- 2. Τα αποτελέσματα των τεστ απέδειξαν ότι ο δεσμός κατά μήκος της κεφαλής και το εμβαδόν συνέβαλαν στην αγκύρωση αλλά σε διαφορετικό βαθμό για διάφορα επίπεδα μετατόπισης. Έτσι για την εξασφάλιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς πρέπει να καθορίζεται είτε το ελάχιστο μέγεθος κεφαλής της είτε πρέπει να θεωρηθεί ένας όρος που σχετίζεται με το εμβαδόν κατά την τον υπολογισμό της αγκύρωσης.
- Με βάση τα προηγούμενα η καθαρή επιφάνεια για την κεφαλή πρέπει να είναι τουλάχιστον το τριπλάσιο της επιφάνειας της ράβδου.
- 4. Η καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων (c<sub>s</sub>) μπορεί να μειωθεί σε 2d<sub>b</sub> από 4d<sub>b</sub> όπου απαιτείται στον ACI 318-08 ακόμα και για χρήση πολλαπλών επιπέδων οπλισμού. Αυτό βασίστηκε στην παρατήρηση ότι καμία επιρροή δεν υπήρχε στην αντίσταση του κόμβου με ράβδους headed bars με c<sub>s</sub> μεταξύ 1,2d<sub>b</sub> και 7,6d<sub>b</sub>.
- Τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι σύμφωνα με τον περιορισμό του ACI352R-02 όσο αφορά τα όρια διαρροής σκυροδέματος και χάλυβα f<sub>c</sub>'>15000 psi (100MPa), f<sub>y</sub>>78 ksi(540MPa). Κατά συνέπεια τα όριο που θέτει ο ACI318-08 f<sub>c</sub>'≤6000 psi (41MPa), f<sub>y</sub>≤60 ksi(410MPa) μπορούν να επεκταθούν.
- 6. Ο περιορισμό του ACI318-08 που αφορά την πλευρική επικάλυψη και για την κεφαλή (c<sub>ch</sub> = 1,5 in. [38 mm]) και για τη ράβδο (c<sub>cb</sub> = 2d<sub>b</sub>) μπορεί να εφαρμοστεί σε κόμβους με αγκύρωση ράβδων με headed bars καθώς δεν αναφέρεται καμία αστοχία πλευρικής επικάλυψης c<sub>cb</sub> με ελάχιστο πάχος 1,5d<sub>b</sub>.
- 7. Η οριζόντια συγκράτηση του οπλισμού δεν είναι απαραίτητη για εξωτερικό κόμβο με headed bars δεδομένου ότι υπάρχουν οι προαναφερθείσες απαιτήσεις για καθαρή πλευρική επικάλυψη, υπάρχουν κλειστά άγκιστρα εντός του κόμβου και οτι η δοκός είναι τουλάχιστον τα <sup>3</sup>/<sub>4</sub> του πάχους του υποστυλώματος.

6.5 <u>Experimental investigation of bond strength under high loading rates.</u> <u>Mathias Michal, Manfred Keuser, George Solomos, Marco Peroni,</u> <u>Martin Larcher, and Beatriz Esteban, Germany.</u>

Το πείραμα αφορά την συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος, συγκεκριμένα τη συνάφεια ράβδων-σκυροδέματος, υπό στατική και δυναμική φόρτιση όπως έκρηξη και σύγκρουση. Παράμετροι που επηρεάζουν την συνάφεια σύμφωνα με το πείραμα είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, η γεωμετρία των ραβδώσεων του οπλισμού και το μήκος αγκύρωσης. Κατά την πορεία του πειράματος εμφανίζεται το παρακάτω διάγραμμα όπου φαίνεται η σχέση μεταξύ των τάσεων που αναπτύσονται και της ολίσθησης του οπλισμού.



Εικόνα 6.13 : Διάγραμμα τάσης-ολίθησης (Βιβλιογραφία 18)

Μπορούμε να δούμε πως μέχρι η τιμή ολίσθησης να γίνει 1,5mm έχουμε μια ανεκτή ανάπτυξη τάσεων. Αυτό σημαίνει και μια ανεκτή αντοχή της συνάφειας. Στη συνέχεια όταν η ολίσθηση γίνει 3,00mm η τάση που αναπτύσσεται μικραίνει σημαντικά, γεγονός που συνεπάγεται και την αντίστοιχη μείωση της αντοχής της συνάφειας η οποία γίνεται πρακτικά μηδενική. 6.6 <u>Degradation model of bond performance between deteriorated</u> <u>concrete and corroded deformed steel bars. Yuan-Zhou Wu, Heng-Lin</u> <u>Lv, Shu-Chun Zhou, Zhong-Nian Fang, China,2016.</u>

Στο πείραμα μελετάται η απόδοση της συνάφειας μεταξύ αποσαθρωμένου σκυροδέματος και διαβρωμένων ράβδων. Η σχέση της αλλοίωσης και της αντοχής της συνάφειας φαίνεται στο διάγραμμα.



Εικόνα 6.14 : Διάγραμμα αντοχής- χρόνος διάβρωσης (Βιβλιογραφία 17)

Παρατηρούμε πως στις δύο περιπτώσεις ,όπου αφορούν ράβδους με μικρότερη διάμετρο, υπάρχει αρχικά μια αύξηση της αντοχής καθώς αυξάνει η αλλοίωση.

Στη συνέχεια για τους τύπους C και D του παραπάνω διαγράμματος εμφανίζονται οι σχέσεις ολίσθησης-αντοχής συνάφειας ως εξής



Εικόνα 6.15 : Διάγραμμα αντοχή-ολίσθηση τύπου C (Βιβλιογραφία 17)



Εικόνα 6.16 : Διάγραμμα αντοχή-ολίσθηση τύπου D (Βιβλιογραφία 17)

Στα διαγράμματα διακρίνοντε πέντε στάδια : το στάδιο χωρίς ολίσθηση, το στάδιο της διάσπασης, το στάδιο μείωσης και υπολειπόμενο τμήμα.

Παρατηρούμε πως και στις δύο περιπτώσεις για ολίσθηση 1,5 με 2,0mm η αντοχή έχει μεγάλες τιμές ενώ για ολίσθηση 3,00 με 7,0 mm η αντοχή μικραίνει συνεχώς μέχρι που για ολίσθηση μεγαλύτερη των 7,00mm η αντοχή γίνεται ελάχιστη.

Από τα δύο τελευταία πειράματα βγάζουμε το συμπέρασμα πως αφότου η δύναμη που ασκείται στη ράβδο φθάσει την αντοχή της συνάφειας,τότε η ράβδος αρχίζει να ολισθαίνει μέσα το κυρόδεμα. Όσο η ολίσθηση αυτή έχει τιμές μέχρι 1,5mm δεχόμαστε πως η αντοχή είναι ικανοποιητική,ενώ από 1,5mm μέχρι 3,00mm η αντοχή συνεχώς μειώνεται μέχρι που στα 3,00mm θεωρούμε πως έχουμε οριστική αστοχία.

Το συμπέρασμα αυτό θα χρησιμοποιήσουμε αργότερα στο σχεδιασμό του δικού μας πειράματος.

# ΜΕΡΟΣ Β

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

## 1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΡΦΗΣ-ΣΤΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ-ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

Για την επιλογή της μορφής του δοκιμίου ελήφθησαν υπόψη οι μορφές των σχημάτων 1 και 2. Λόγω ότι η διάταξη του σχήματος 1 δεν μπορεί να επιτευχθεί στο εργαστήριο, καθώς και για το λόγω ότι έχουν υπάρξει ήδη πειράματα με την μορφή του σχήματος 2 αποτελέσματα των οποίων θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε, επιλέχτηκε η μορφή του σχήματος 2.



σχήμα 1 : διάταξη κόμβου

Έτσι το δοκίμιο διαμορφώνεται ως μία αμφιέριστη ράβδος συνολικού μήκους 2,40 m, πλάτους 0,15 m και μεταβλητού ύψους 0,25 m κοντά στα σημεία των στηρίξεων και 0,30 m σε ένα κεντρικό τμήμα, το μήκος του οποίου είναι μεταβλητό και εξαρτάται από το μήκος αγκύρωσης που χρησιμοποιούμε κάθε φορά. Η μεταβολή αυτή στο ύψος της δοκού είναι και αυτή που μας βοηθάει στη μελέτη της αγκύρωσης καθώς σε αυτή την διαπλάτυνση τοποθετούνται οι προς μελέτη ράβδοι. Η εφαρμογή της δύναμης W γίνεται μέσω διάταξης η οποία την διαμοιράζει σε δύο σημειακά φορτία P σε ίσες αποστάσεις από τις στηρίξεις της δοκού a.



σχήμα 3 : διαμόρφωση δοκιμίου

Για το στατικό μοντέλο της αμφιέρειστης δοκού προκύπτουν οι ακόλουθες μορφές διαγραμμάτων ροπών και τεμνουσών τις τιμές των οποίων θα προσδιορίσουμε στην πορεία.

σχήμα 2 : διάταξη ράβδου



Για την μελέτη και τη σύγκριση των μεθόδων αγκύρωσης έχω τις εξής μεθόδους :

- Ευθύγραμμη αγκύρωση
- Αγκύρωση με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο
- Αγκύρωση με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars)
- Αγκύρωση με εξωτερική πλάκα

# 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ

Κατά το σχεδιασμό της δοκού χρησιμοποιείται σκυρόδεμα C20/25 και ράβδους οπλισμού B500c διαμέτρου Φ16. Η καθαρή επικάλυψη που υπάρχει είναι c=1,00cm . Ο οπλισμός διάτμησης είναι Φ8 δίτμητος. Για τον προσδιορισμό των αντοχών σχεδιασμού για το σκυρόδεμα και το χάλυβα χρησιμοποιούνται οι συντελεστές γ<sub>c</sub>=1,00 και γ<sub>s</sub>=1,00 και έτσι οι αντοχές σχεδιασμού είναι ίσες με τις χαρακτηριστικές f<sub>cd</sub>=f<sub>ck</sub> και f<sub>yd</sub>=f<sub>yk</sub>. Από τα παραπάνω έχουμε αναλυτικά :

#### <u>Χαρακτηριστικά για το σκυρόδεμα :</u>

Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος :	f <sub>ck</sub> =20 MPa
Θλιπτική αντοχή σχεδιασμού σκυροδέματος :	f <sub>cd</sub> =20 MPa
Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος :	f <sub>cm</sub> =28 MPa
Μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος :	f <sub>ctm</sub> =2,2 MPa
Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος :	f <sub>ctk0.05</sub> =1,5 MPa
Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος :	E <sub>cm</sub> =30000 MPa
Παραμόρφωση διαρροής σκυροδέματος :	ε <sub>cy</sub> =0,02

#### Χαρακτηριστικά για τον χάλυβα :

Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή χάλυβα :	f <sub>vk</sub> =500 MPa
Εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού χάλυβα :	f <sub>yd</sub> =500 MPa
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα :	É <sub>s</sub> =200000 MPa
Παραμόρφωση διαρροής χάλυβα :	ε <sub>sy</sub> =0,0025

## <u>Χαρακτηριστικά για τη γεωμετρία και το εμβαδό του οπλισμού :</u>

Στατικό ύψος :	d=h-(c+Φ/2+Φ <sub>συνδ.</sub> )=0.274 m
Απόσταση κάτω οπλισμού:	d <sub>1</sub> = c+Φ/2+Φ <sub>συνδ.</sub> =0,04 m
από κάτω ίνα	d <sub>1</sub> =0,04 m (headed bars)
Απόσταση άνω οπλισμού :	d <sub>2</sub> = c+Φ/2+Φ <sub>συνδ.</sub> =0,026 m
από άνω ίνα	
Εμβαδόν άνω οπλισμού :	$A_{s2} = 2^{*}(\pi^{*}1,6^{2}/4) = 4,02 \text{ cm}^{2}$
Εμβαδόν κάτω οπλισμού :	$A_{s1}=2^{*}(\pi^{*}1,6^{2}/4)=4,02 \text{ cm}^{2}$

# 3.ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Καθώς τα φορτία εφαρμόζονται στα σημεία όπως προαναφέρθηκε,στη ράβδο αρχίζει να εφελκύεται η κάτω ίνα, ενώ η άνω ίνα αρχίζει να θλίβεται. Όσο τα φορτία αυξάνουν τόσο η θλιβόμενη ζώνη (x) της διατομής της δοκού θα μικραίνει καθώς μεγαλύτερο τμήμα θα εφελκύεται. Έτσι κατά την συνεχόμενη αύξηση των φορτίων διακρίνουμε 5 φάσεις μέσω των οποίων υπολογίζουμε τις παραμορφώσεις στις άνω και κάτω ίνες του σκυροδέματος καθώς και των ράβδων, τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα και στις ράβδους και τέλος τις ροπές που αντιστοιχούν σε κάθε φάση μέχρι την τελική αστοχία της ράβδου. Οι 5 αυτές φάσεις είναι : 1) λίγο πριν τη ρηγμάτωση της κάτω ίνας σκυροδέματος 2) αμέσως μετά τη ρηγμάτωση 3) το σημείο διαρροής της εφελκυόμενης ράβδου 4) το σημείο διαρροής της άνω θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος και 5) το σημείο αστοχίας της διατομής. Χαρακτηριστικό για κάθε φάση είναι οι παραμορφώσεις που επιβάλλονται στο σκυρόδεμα και στους οπλισμούς και το ύψος της θλιβόμενης ζώνης ενώ βασική προϋπόθεση είναι η συνισταμένη των δυνάμεων να είναι μηδέν (ΣF=0). Για να πετύχουμε αυτή την προϋπόθεση κάθε φορά μεταβάλουμε το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x. Αναλυτικά έχουμε :

## 1) λίγο πριν τη ρηγμάτωση της κάτω ίνας σκυροδέματος

Από συνεχείς δοκιμές του x προκύπτει :  $\mu = E_s / E_{cm} =$ 6.67 X= 0.1487 Παραμορφώσεις :  $\epsilon_{c1} = f_{ct\kappa 0,05}/E_{cm} =$ 0.00005  $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{c1}^*((h-x)-d_2)/(h-x) =$ 3,7\*10<sup>-5</sup>  $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{c1}^* (x-d2)/(h-x) =$ 4,1\*10<sup>-5</sup>  $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{c1} x/(h-x) =$ 4.9\*10<sup>-5</sup> εs2 εs1 ۶c1 κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής Τάσεις :  $\sigma_{c1} = \epsilon_{c1} * E_{cm} =$ 1,50 MPa  $\sigma_{s1} = \epsilon_{s1} * E_s =$ 7,36 MPa  $\sigma_{s2} = \epsilon_{s2} E_s =$ 8.11 MPa  $\sigma_{c2} = \epsilon_{c2} E_{cm} =$ 1,47 MPa Δυνάμεις :  $F_{c1}=0,5*b*(h-x)*\sigma_{c1}/1000=$ 17,03 kN  $F_{s1} = \sigma_{s1} A_{s1} =$ 2.96 kN  $F_{s2}=A_{s2}*\sigma_{\sigma 2}=$ -3,26 kN  $F_{c2}=0.5*b*(h-x)*\sigma_{c2}/1000=$ -16.72 kN ΣF= 0,00 kN Ροπές :  $M_{c1}=F_{c}^{*}(h/2-(h-x)/3)=$ 1.69 kNm  $M_{s1}=F_{s1}^{*}(h/2-d_{2})=$ 0,37 kNm  $M_{s2} = F_{s2}^*(h/2 - d_2)$ 0,40 kNm  $M_{c2} = F_{c2}^{*}(h/2 - x/3) =$ 1,68 kNm M<sub>cr</sub>= 4,15 kNm Από τα παραπάνω προκύπτουν τα φορτία :

W <sub>cr</sub> =2*M <sub>cr</sub> /a=2*4,15/0,8=		10,36	kN
	P <sub>cr</sub> =W <sub>cr</sub> /2=	5,18	kN

2) αμέσως μετά τη ρηγμάτωση

 $F_{c2}=0,5^{h}/2^{x}\epsilon_{c2}/1000=$ 

18395 kN

F<sub>c</sub>≈F<sub>s</sub>



κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής

3) διαρροή της εφελκυόμενης ράβδου

Κατά τη διαρροή της εφελκυόμενης ράβδου θέλουμε η παραμόρφωση για τον κάτω οπλισμό A<sub>s1</sub> να είναι ε<sub>s1</sub>=0,0025 η παραμόρφωση για τον άνω οπλισμό A<sub>s2</sub> πρέπει να είναι ε<sub>s2</sub><0,0025 και η παραμόρφωση του θλιβόμενου σκυροδέματος πρέπει να είναι ε<sub>c2</sub><0,02. Από συνεχείς δοκιμές προκύπτει :

Ύψος θλιβόμενης ζώνης :

x= 0,0904 m Παραμορφώσεις :  $ε_{c2} = ε_{s1} * x/(d-x) = 0,00133 < 0,002$   $ε_{s2} = ε_{s1} * (x-d_2)/(d-x) = 0,00095 < 0,00250$  $σ_{cd} = f_c * (1-(1-ε_{c2}/ε_{cy})^2) = 17,77$  MPa



κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής

Από πίνακες του EC2 και για ε<sub>c2</sub>=0,00133 προκύπτουν : Συντελεστής πλήρωσης : α=0,509 Συντελεστής κέντρου βάρους : ζ'=0,356

Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζουμε τις δυνάμεις και τις ροπές ως εξής : Δυνάμεις :

F <sub>c</sub> =	=-a*x*b*f <sub>cd</sub> =	-124,74	kN		
F <sub>s1</sub>	=f <sub>yd</sub> *A <sub>s</sub> =	201,00	kN		
F <sub>s2</sub>	$_{2}=A_{s}*f_{yd}*\epsilon_{s}/\epsilon_{y}=$	-76,26	kN		
	ΣF=	0,00	kN		
Рот	τές :				
Mc	=F <sub>c</sub> *(h/2-ζ'*x)=	14,0	69	kNm	
$M_{s}$	<sub>1</sub> =F <sub>s1</sub> *(h/2-d <sub>1</sub> )=	22,	11	kNm	
Ms	<sub>2</sub> =F <sub>s2</sub> *(h/2-d <sub>2</sub> )=	9,4	6	kNm	
	M <sub>ys</sub> =	46,2	25	kNm	

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα φορτία :

V	V <sub>ys</sub> =2*M <sub>ys</sub> /a=2*46,25/0,8=	115,63	kN
	P <sub>ys</sub> =W <sub>ys</sub> /2=	57,82	kN

4) διαρροή της άνω θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος

Κατά τη διαρροή της εφελκυόμενης ράβδου θέλουμε η παραμόρφωση για την άνω ίνα σκυροδέματος να είναι ε<sub>c2</sub>=0,002 και η παραμόρφωση για τον άνω οπλισμό A<sub>s2</sub> πρέπει να είναι ε<sub>s2</sub><0,0025. Από συνεχείς δοκιμές του x προκύπτει :

Ύψος θλιβόμενης ζώνης :x=0,0568mΠαραμορφώσεις : $ε_{s1} = ε_{c2}*(d-x)/x =$ 0,00715> $ε_{s2} = ε_{c2}*(x-d_2)/x =$ 0,00109<</td>0,00250



κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής

Από πίνακες του EC2 και για ε<sub>c2</sub>=0,002 προκύπτουν : Συντελεστής πλήρωσης : α=0,667 Συντελεστής κέντρου βάρους : ζ'=0,375

Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζουμε τις δυνάμεις και τις ροπές ως εξής : Δυνάμεις :

Fc	=-a*x*b*f <sub>cd</sub> =	-113,75	kN
$F_{s}$	<sub>s1</sub> =f <sub>yd</sub> *A <sub>s</sub> =	201,00	kN
$F_{s}$	$_{s2}=A_{s}*f_{yd}*\epsilon_{s}/\epsilon_{y}=$	-87,25	kN
	ΣF=	0,00	kN
Po	πές :		
M	<sub>c</sub> =F <sub>c</sub> *(h/2-ζ'*x)=	14,64	kNm
M	<sub>s1</sub> =F <sub>s1</sub> *(h/2-d <sub>1</sub> )=	22,11	kNm
M	<sub>s2</sub> =F <sub>s2</sub> *(h/2-d <sub>2</sub> )=	10,82	kNm
	M <sub>yc</sub> =	47,57	kNm

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα φορτία :

۷	V <sub>yc</sub> =2*M <sub>ys</sub> /a=2*47,57/0,8=	118,92	kN
	P <sub>yc</sub> =W <sub>ys</sub> /2=	59,46	kN

#### 5) αστοχία διατομής

Κατά την αστοχία της διατομής θέλουμε η παραμόρφωση για την άνω ίνα σκυροδέματος να είναι ε<sub>cy</sub>=0,0035 και η παραμόρφωση για τον άνω οπλισμό A<sub>s2</sub> πρέπει να είναι ε<sub>s2</sub><0,0025. Από συνεχείς δοκιμές προκύπτει :

Ύψος θλιβόμενης ζώνης :x=0,0408Παραμορφώσεις : $ε_{s1} = ε_{c2}*(d-x)/x = 0,01882$ >0,00250 $ε_{s2} = ε_{c2}*(x-d_2)/x = 0,00127$ <</td>0,00250



κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής

Από πίνακες του EC2 και για ε<sub>c2</sub>=0,0035 προκύπτουν : Συντελεστής πλήρωσης : α=0,81 Συντελεστής κέντρου βάρους : ζ'=0,416

Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζουμε τις δυνάμεις και τις ροπές ως εξής : Δυνάμεις :

F <sub>c</sub> =-a*x*b*f <sub>cd</sub> =	-99,07	kN	
$F_{s1}=f_{yd}^*A_s=$	201,00	kN	
$F_{s2}=A_s*f_{yd}*\epsilon_s/\epsilon_y=$	-101,93	kN	
ΣF=	0,00	kN	
Ροπές :			
$M_{c}=F_{c}^{*}(h/2-\zeta'^{*}x)=$	13,18	kNm	
$M_{s1}=F_{s1}^{*}(h/2-d_{1})=$	22,11	kNm	
$M_{s2} = F_{s2}^{*}(h/2 - d_{2}) =$	12,64	kNm	
M <sub>u</sub> =	47,93	kNm	

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα φορτία :

۷	V <sub>u</sub> =2*Mu/a=2*47,93/0,8=	119,82	kN
	$P_u=Wu/2=$	59,91	kN

Συγκεντρωτικά :

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή Μ (kNm)	
5,18	10,36	4,15	6
57,82	115,63	46,25	i
59,46	118,92	47,57	i
59,91	119,82	47,93	(

ρηγμάτωση διαρροή οπλισμού διαρροή θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος αστοχία διατομής

Πίνακας 1 : Συγκεντρωτικός πίνακας δυνάμεων και ροπών αντοχής

## 4.ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Για να επαρκεί ο οπλισμός σε διάτμηση πρέπει η τέμνουσα που μπορεί να αναλάβει ο οπλισμός διάτμησης να είναι μεγαλύτερη από αυτή που εφαρμόζεται δηλαδή πρέπει να ισχύει V<sub>Rd,s</sub>>P.

Από προηγούμενο πίνακα διακρίνουμε ότι το διάγραμμα τεμνουσών θα έχει τιμές 63,43 kN και -63,43 kN αντίστοιχα άρα η μέγιστη τέμνουσα που δέχεται η δοκός κατ' απόλυτη τιμή είναι P=63,43 kN.

Για τον οπλισμό διάτμησης χρησιμοποιούμε δίτμητους ράβδους Φ8 τοποθετημένους κάθετα στις διαμήκεις ράβδους. Έτσι έχουμε :

Eµβαδόν σκελών των συνδετήρων :  $A_{sw}=n^*\pi^*\Phi^2/4=2^*\pi^*0,8^2/4=1 \text{ cm}^2$ Όριο διαρροής :  $f_{ywd}=500 \text{ MPa}$ Γωνία που σχηματίζει ο πολισμός διάτµησης με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέµνουσας άξονα :  $a=90^{\circ}$ Γωνία που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες σκυροδέµατος με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέµνουσας άξονα :  $\theta=45^{\circ}$  $z=0,9^*\delta=0,9^*0,274=0,2466 \text{ m}=24,66 \text{ cm}$ Απόσταση συνδετήρων :  $s_w=19 \text{ cm}$ Άρα τελικά έχουμε :  $V_{Rd,s}=(A_{sw}/s_w)^*z^* f_{ywd}^*(cot\theta+cota)^*sina=(1/19)^*24,66^*50^*1=64,89 \text{ kN}}$  $V_{Rd,s} > P$ 

Άρα η επιλογή μας για συνδετήρες Φ8/19 (δίμτητους) επαρκεί.

## 5.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΩΝ-ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ (M-1/R)

Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας έχουμε δύο τρόπους α) με τον όρο 1/R=(ε<sub>s1</sub>+ε<sub>c2</sub>)/(d\*1000) ή β) με τον όρο 1/R=M/EI. Εδώ χρησιμοποιείται ο πρώτος όρος γιατί είναι πιο ακριβής και προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα. Έτσι έχουμε :

<u>Πριν τη ρηγμάτωση :</u> ε<sub>s1</sub>=0,000037 ε<sub>c2</sub>=0,000049

 $1/R_{cr} = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^{1000}) = (3,7+4,9)^{10^{-5}}/(0,274^{1000}) = 3,30^{10^{-7}} \text{ mm}^{-1}$ 

<u>Μετά τη ρηγμάτωση :</u> ε<sub>s1</sub>=0,000212 ε<sub>c2</sub>=0,0000099

 $1/R = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^{1000}) = (21, 2+0, 99)^{10^{-5}}/(0, 274^{1000}) = 1, 2^{10^{-6}} \text{ mm}^{-1}$ 

<u>Διαρροή χάλυβα :</u> ε<sub>s1</sub>=0,0025 ε<sub>c2</sub>=0,00133

 $1/R_{y} = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^{1000}) = (2,5+1,33)^{10^{-3}}/(0,274^{1000}) = 1,47^{10^{-5}} \text{ mm}^{-1}$ 

Διαρροή άνω θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος : ε<sub>s1</sub>=0,00715 ε<sub>c2</sub>=0,002

 $1/R_2 = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^{1000}) = (7,15+2)^{10^{-3}}/(0,274^{1000}) = 3,52^{10^{-5}} \text{ mm}^{-1}$ 

<u>Αστοχία διατομής :</u> ε<sub>s1</sub>=0,01882 ε<sub>c2</sub>=0,0035

 $1/R_2 = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^{1000}) = (20,02 + 3,5)^{10^{-3}}/(0,274^{1000}) = 8,59^{10^{-5}} \text{ mm}^{-1}$ 

Από τα παραπάνω προκύπτει το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων (M-1/R) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.

ροπή(kNm)	1/R(mm⁻¹)
0	0
4,15	3,30*10 <sup>-7</sup>
4,15	1,20*10 <sup>-6</sup>
46,25	1,47*10 <sup>-5</sup>
47,57	3,52*10 <sup>-5</sup>
47,93	8,59*10 <sup>-5</sup>

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά σημεία διαγράμματος σχήματος 4



Σχήμα 4: διάγραμμα M-1/R

## 6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (Ρ-δ)

Για το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ξεκινάμε να φορτίζουμε τη δοκό, μέχρι η δύναμη να φτάσει στη δύναμη ρηγμάτωσης η ροπή αδράνειας που χρησιμοποιούμε είναι αυτή της αρηγμάτωτης διατομής Ι<sub>g</sub> αμέσως μετά τη ρηγμάτωση η ροπή αδράνειας είναι αυτή της ρηγματωμένης διατομής Ι<sub>cr</sub>. Στη συνέχεια και καθώς η δύναμη αυξάνεται η ροπή αδράνειας που χρησιμοποιούμε είναι αυτή της μέσης συμβατικής Ι<sub>e</sub> μέχρι τη στιγμή της αστοχίας. Η μετατόπιση κάθε στιγμή υπολογίζεται για το σημείο 1,2m (μέσον της ράβδου) και δίνεται από τον τύπο δ=κ\*L<sup>2</sup>\*1/R όπου κ:συντελεστής, L: το μήκος της δοκού και 1/R: η καμπυλότητα.

Αναλυτικά έχουμε :

Ροπή αδράνειας αρηγμάτωτης διατομής :

 $I_g=b^{+h^3/12}+b^{+h^*}(x-h/2)^2+\mu^{+A_{s1}*}(d-x)^2+(\mu-1)^{+A_{s2}*}(x-d_2)^2=$  0,000405077 m<sup>4</sup> Όπου x=0,1487 και μ=6,67.

Ροπή αδράνειας ρηγματωμένης διατομής :

Για τον υπολογισμό της νέας ροπής αδράνειας πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το νέο θλιβόμενο ύψος :

150\*x²/2=μ\*Å<sub>s</sub>\*(d-x)=>x²+35,75x-9295=0=> x=80,2 mm →0,0802 m Kαι κατά συνέπεια :  $I_{cr}=(b*x^3/3)+(\mu-1)*A_{s2}*(x-d_2)^2+\mu*A_{s1}*(h-x)^2=0,0001620 m^4$ 

Όπου x=0,0287 και μ=6,67.

<u>Μέση συμβατική ροπή αδράνειας :</u>  $I = (M_{cr}/M)^{3*}Ig + (1 - (M_{cr}/M)^{3})^{*}I_{cr}$ 

<u>Συντελεστής κ :</u> κ=0,125-a<sup>2</sup>/6=0,125-(1/3)<sup>2</sup>/6=0,106

Η καμπυλότητα 1/R μεταξύ των τιμών από τη ρηγμάτωση μέχρι τη διαρροή του χάλυβα δύνεται από τον τύπο : 1/R=M/E<sub>cm</sub>\*I

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης (Ρ-δ) δίνεται στο σχήμα 5.

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
5,18	10,36	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	0,0002	4,15
10	20,00	0,000196	1,36*10 <sup>-6</sup>	587868	0,0008	8,00
20	40,00	0,000166	3,21*10 <sup>-6</sup>	499132	0,0020	16,00
30	60,00	0,000163	4,90*10 <sup>-6</sup>	490211	0,0030	24,00
40	80,00	0,000163	6,56*10 <sup>-6</sup>	488040	0,0040	32,00
50	100,00	0,000162	8,21*10 <sup>-6</sup>	487266	0,0050	40,00
57,82	115,63	0,000162	1,47*10 <sup>-6</sup>	313851	0,0090	46,25
59,46	118,92	0,000162	3,52*10 <sup>-5</sup>	135196	0,0215	47,57
59,91	119,82	0,000162	8,59*10 <sup>-5</sup>	55828	0,0524	47,93

Πίνακας 3 : Πίνακας αποτελεσμάτων για υπολογισμό καμπτικής αντοχής της δοκού



Σχήμα 5: διάγραμμα Ρ-δ

#### <u>7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ</u> (ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ)

## 7.1 <u>Μέθοδος ευθύγραμμης αγκύρωσης</u>

Το βασικό ευθύγραμμο μήκος αγκύρωσης υπολογίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 και για ευνοϊκές συνθήκες από τον τύπο I<sub>b,rqd</sub>=(Φ/4)\*(f<sub>yd</sub>/f<sub>bd</sub>) όπου f<sub>bd</sub>=2,25\*n<sub>1</sub>\*n<sub>2</sub>\*f<sub>ctd</sub> η τιμή σχεδιασμού για την οριακή τάση συνάφειας.

Στο πείραμά μας έχουμε:

Ράβδο Φ16 Αντοχή σκυροδέματος : f<sub>cd</sub>=20 MPa Αντοχή χάλυβα : f<sub>yd</sub>=500MPa Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος : f<sub>ctd</sub> = f<sub>ctk0.05</sub>= 1,5 MPa n<sub>1</sub>=1 και n<sub>2</sub>=1

Άρα η αντοχή συνάφειας είναι  $f_{bd}$ =2,25\*n<sub>1</sub>\*n<sub>2</sub>\*f<sub>ctd</sub>=2,25\*1\*1\*1,5=3,375 MPa Και το βασικό ευθύγραμμο μήκος αγκύρωσης είναι :

 $I_{b,rqd}$ =( $\Phi/4$ )\*( $f_{yd}/f_{bd}$ )= (16/4)\*(500/3,375)=593 mm  $\rightarrow$  0,59 m

Το μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού δίνεται από τον τύπο :

 $I_{bd} = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 I_{b,rqd}$ 

Για τους συντελεστές με βάση τον EC2 έχουμε :

C=	3,2	cm		
C <sub>1</sub> =	1	cm		
a=	8,2	cm		
c <sub>d</sub> =	1	cm	<3Ф=	4,8
K=	0,1			
A <sub>s</sub> =	2,01	cm2	φ16	
ΣA <sub>st</sub> =	0,5	cm2	φ8	
ΣA <sub>st,min</sub> =	0,5025	cm2	φ16	
λ=	0,00			

_	εφελκυμός	Θλίψη
a <sub>1</sub> =	1,00	1,00
a <sub>2</sub> =	1,00	1,00
a <sub>3</sub> =	1,00	1,00
a4=	-	-
a <sub>5</sub> =	-	-

Άρα τελικά :

 $I_{bd} = a_1^* a_2^* a_3^* a_4^* a_5^* I_{b,rqd} = 1*1*1*1*593 = 593 \text{ mm} \rightarrow 0,59 \text{ m}$  για εφελκυσμό και για θλίψη

Απαιτείται από τον κανονισμό η αγκύρωση να υπερβαίνει το ελάχιστο μήκος αγκύρωσης το οποίο δίνεται από τον τύπο :

 $I_{b,min}$ =max(0,3\* $I_{b,rqd}$ ; 10Φ; 100mm)= max (0,3\*593 ; 10\*16 ; 100mm)= max (178 ; 160 ; 100mm)=178 mm → 0,18 m για εφελκυσμό και  $I_{b,min}$ =max(0,3\* $I_{b,rqd}$ ; 10Φ; 100mm) =max (0,3\*593 ; 10\*16 ; 100mm)= max (178 ; 160 ; 100mm)=178 mm → 0,18 m για θλίψη.

Από τα παραπάνω επαληθεύεται ότι Ι bd> Ι b,min .

Η διαμόρφωση του δοκιμίου καθώς και τα αναπτύγματα των οπλισμών φαίνονται στο σχήμα 6 και 7 αντίστοιχα.





Σχήμα 6: διαμόρφωση δοκιμίου και οπλισμού για ευθύγραμμη αγκύρωση





## 7.2 Μέθοδος εγκάρσιας συγκολλημένης ράβδου

Το μήκος αγκύρωσης με την χρήση εγκάρσιας συγκολλημένης ράβδου κατά τον Ευρωκώδικα 2 δίνεται από τον τύπο :  $I_b=(\Phi/4)^*(f_{yd}-F_{btd}/A_{st})/f_{bd}$ 

όπου F<sub>btd</sub> η φέρουσα ικανότητα της αγκύρωσης με χρήση συγκολλημένης ράβδου και A<sub>st</sub> το εμβαδόν διατομής της υπό αγκύρωση ράβδου.

Στο πείραμα λαμβάνουμε :

Διαμήκη ράδβο Φ16

Εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο Φ14

Αντοχή σκυροδέματος : fcd=20 MPa

Αντοχή χάλυβα : f<sub>yd</sub>=500MPa

Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος :  $f_{ctd} = f_{ctk0.05} = 1,5$  MPa

Εμβαδόν διατομής της υπό αγκύρωση ράβδου Ast=π\*14²/4=153,94 mm²

Επικάλυψη οπλισμού c=3,2 cm

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζουμε το μήκος της εγκάρσιας ράβδου και την δύναμη συνάφειας ως εξής :

x=2*(c/Φ <sub>t</sub> )+1=2*(3,2 y=0,015+0,14*e <sup>(-0,18</sup>	2/1,4)+1= <sup>(*x)=</sup>			5,57 0,0664			
$\sigma_{td} = (f_{ctd} + \sigma_{cm})/y =$		22,61	<3*fcd=	60			
$I_{td}$ =1,16* $\Phi_t$ *sqrt(f <sub>yd</sub> /c	( <sub>td</sub> )=		76,38	mm	<lt=< td=""><td>70,00</td><td>mm</td></lt=<>	70,00	mm
$F_{btd} = I_{td} * \Phi_t * \sigma_{td} =$	22,15	KN					
F <sub>btd</sub> /A <sub>st</sub> =	110,21	MPa					

όπου σ<sub>td</sub> η τάση του σκυροδέματος.

 $I_{b} = (\Phi/4)^{*} (f_{yd} - F_{btd}/A_{st}) / f_{bd} = (16/4)^{*} (500 - 110, 21) / 3,375 = 462 \text{ mm} \rightarrow 0,46 \text{ m}$ 

Η διαμόρφωση του δοκιμίου καθώς και τα αναπτύγματα των οπλισμών φαίνονται στο σχήμα 8 και 9 αντίστοιχα.



Σχήμα 8:διαμόρφωση δοκιμίου και οπλισμού αγκύρωσης με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο



Σχήμα 9: ανάπτυγμα οπλισμού για αγκύρωση με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο

# 7.3 Μέθοδος αγκύρωσης με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars)

Το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης με διαπλάτυνση κεφαλής υπολογίζεται με βάση τους αμερικάνικους κανονισμούς ACI 318R- 352.

Στη μέθοδο αγκύρωσης με headed bars πρέπει να τηρούνται οι εξής περιορισμοί :

7 Το όριο διαρροής της ράβδου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 60000 psi (413,4MPa) .

8 Το μέγεθος της ράβδου δεν μπορεί να ξεπερνάει το No.11(Φ35).

9 Δεν επιτρέπεται ελαφροσκυρόδεμα.

10 Η καθαρή περιοχή για την κεφαλή **A**<sub>brg</sub> δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη από **4A**<sub>b</sub>.

11 Η επικάλυψη της ράβδου δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 2d<sub>b</sub>.

12 Η καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων που αγκυρώνονται δεν μπορεί να είναι μικρότερη από **4d**<sub>b</sub>.

Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς έχουμε :

 $f_{cd}$ =20 MPa  $f_{yd}$ =500 MPa Φ16 → A<sub>b</sub>=π\*16<sup>2</sup>/4=201,06 mm<sup>2</sup> ψ<sub>e</sub>=1,2 : συντελεστής επικάλυψης άρα το εμβαδόν της κεφαλής είναι :

 $A_{brg}$ >  $A_b$ →  $A_{brg}$ >4\*201,06mm<sup>2</sup>→ $A_{brg}$ > 804,25 mm<sup>2</sup> Και κατά συνέπεια η διάμετρος είναι :

d<sub>brg</sub>>(804,24\*4/π)^0,5→d<sub>brg</sub>> 32

mm<sup>2</sup>

Το μήκος αγκύρωσης σύμφωνα με τον κανονισμό ACI 318R δίνεται από τον τύπο  $I_{dt}=0,016*\psi_e*\Phi*f_{yd}/(f_{ck}^{0.5})$  ενώ πρέπει να είναι μικρότερο από max(8\*Φ; 6in(152,4mm)). Αναλυτικά έχουμε :

$I_{dt}=0.016^{*}\psi_{e}^{*}\Phi^{*}f_{yd}/(f_{ck}^{0.5})=$	34,35	mm

I<sub>dt</sub>≥max(8\*Φ ; 6in(152,4mm))≥ 152,4 mm

Κατά τον αμερικάνικο κανονισμό ACI 352 το μήκος αγκύρωσης δίνεται από τον τύπο I<sub>dh</sub>=f<sub>yd</sub>\*Φ/(6,2\*f<sub>cd</sub><sup>0,5</sup>) ενώ μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι 0,75 του μήκος για τις ράβδους με άγκιστρο I<sub>dt</sub>=0,75\*I<sub>dh</sub>. Αναλυτικά προκύπτει: Μήκος για ράβδο με άγκιστρο :

I <sub>dh</sub> =500*16/(6,2*2	0 <sup>0,5</sup> )=	2	89	Mm	-	·>	0,29	m
και μήκος αγκύρω	σης (hea	aded bar)	:				_	
l <sub>dt</sub> =0,75*289=	216	mm	->		0,22	m		



1,06

0,57

0,1

Η διαμόρφωση του δοκιμίου καθώς και τα αναπτύγματα των οπλισμών φαίνονται στο σχήμα 10 και 11 αντίστοιχα.



0,57

0,1

Σχήμα 10: διαμόρφωση δοκιμίου και οπλισμού για αγκύρωση με headed bars





## 7.4Μέθοδος αγκύρωσης με χρήση εξωτερικής πλάκας

Για να εξασφαλίσουμε την λειτουργία της μεθόδου αυτής επιθυμούμε το εμβαδόν και το πάχος της πλάκας που θα χρησιμοποιήσουμε να είναι τέτοιο ώστε να επαρκεί για να παραλάβει τις δυνάμεις που θα αναπτυχθούν. Επίσης προσοχή πρέπει να δοθεί και στην επάρκεια και τη σωστή περάτωση της συγκόλλησης μεταξύ των εφελκυόμενων ράβδων και της εξωτερικής πλάκας. Η δύναμη που αναπτύσσεται είναι αυτή που έχουμε υπολογίσει για τον εφελκυόμενο οπλισμό F<sub>s</sub>=201 kN. Έτσι προκύπτουν :

απαιτούμενη επιφάνεια :

As=F <sub>s</sub> /f <sub>c</sub>	<sub>k</sub> =201/2=	100,50	cm <sup>2</sup>
h=	6,7	cm	
b=	15	cm	

πραγματική επιφάνεια :

h=	7	cm
b=	15	cm
As=b*h=	105	cm <sup>2</sup>

έλεγχος συγκόλλησης :

0/10/1/03	••••••••	10.12.						
$\beta_w =$	0,8							
<b>γ</b> <sub>M2</sub> =	1,25							
$f_u =$	360	MPa						
$h=\beta_w^*\gamma_{M2}^*\Phi^*\sqrt{3^*f_y}/4^*f_u=$			0,96	Cm	->	1.00	cm	πάχος ελάσματος

Η διαμόρφωση του δοκιμίου καθώς και τα αναπτύγματα των οπλισμών φαίνονται στο σχήμα 12 και 13 αντίστοιχα.



Σχήμα 12: διαμόρφωση δοκιμίου και οπλισμού αγκύρωση με εξωτερική πλάκα



Σχήμα 13: ανάπτυγμα οπλισμού για αγκύρωση με εξωτερική πλάκα
#### 8. <u>ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕ ΕΛΛΙΠΕΣ ΜΗΚΟΣ</u> <u>ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ</u>

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά που αναμένουμε από τις αγκυρώσεις όταν το μήκος αγκύρωσης που χρησιμοποιούμε είναι μικρότερο από αυτό που απαιτείται.

#### 8.1 <u>Ευθύγραμμη αγκύρωση</u>

Στον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε τις διαφορές στην αντοχή που προκύπτουν όταν το μήκος αγκύρωσης μειώνεται σταδιακά από αυτό που απαιτείται από τον κανονισμό για να λειτουργεί πλήρως η αγκύρωση μέχρι να φτάσουμε σε ένα ποσοστό της τάξεως του 10% αυτού . Παρατηρούμε ότι το ποσοστό μεταβολής της αντοχή της δοκού είναι ίσο με το ποσοστό με το οποίο μειώνεται κάθε φορά το μήκος αγκύρωσης

μήκος	δυναμη στο επιπεδο	ύψος	επιβολή	συνολική	% ποσοστό επι
αγκύρωσης	της κατω ράβδου (F)	θλιβόμενης	δύναμης (P <sub>RD</sub> )	δύναμη (W <sub>RD</sub> )	της αρχικης
(L)		ζώνης (χ)			αντοχής
0,59	201,20	0,0408	59,97	119,94	100
0,53	181,08	0,0380	54,14	108,29	90
0,47	160,96	0,0354	48,29	96,59	81
0,42	140,84	0,0331	42,43	84,85	71
0,36	120,72	0,0310	36,54	73,09	61
0,30	100,60	0,0291	30,65	61,31	51
0,24	80,48	0,0274	24,76	49,51	41
0,18	60,36	0,0258	18,85	37,70	31
0,12	40,24	0,0244	12,94	25,89	22
0,06	20,12	0,0231	7,03	14,07	12

Πίνακας 4 : Πίνακας δυνάμεων κατά τη μείωση του μήκους αγκύρωσης

Στην πορεία θα δούμε το πώς διαμορφώνονται τα διαγράμματα ροπήςκαμπυλότητας (M-1/R) και δύναμης- μετατόπισης (P-δ) για ενδεικτικό μήκος αγκύρωσης 0,42m (70% του απαιτούμενου) και 0,12m (20% του απαιτούμενου).

Στο πλαίσιο της προσέγγισης της συμπεριφοράς της ράβδου κατά αυτή την μέθοδο αγκύρωσης, λαμβάνονται υπόψη προηγούμενα πειράματα(θεωρητικό υπόβαθρο, πειράματα 6.5 και 6.6) σύμφωνα με τα οποία όταν φθάσουμε την δύναμη αστοχίας της συνάφειας τότε λαμβάνει μέρος αρχικά μία ολίσθηση της ράβδου εντός του σκυροδέματος της τάξης των 1,50 mm κατά την οποία η αγκύρωση συνεχίζει να έχει μία αποδεκτή αντοχή. Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερή πλέον την δύναμη που εφαρμόζουμε, η ολίσθηση αυτή μεγαλώνει μέχρι να φτάσει στα 3,00mm όπου θεωρούμε ότι έχουμε και την οριστική αστοχία της αγκύρωσης.

Για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης μετά τη στιγμή όπου η δύναμη που εφαρμόζεται στη ράβδο γίνει ίση με το όριο αντοχής της αγκύρωσης, χρησιμοποιείται η παρακάτω μέθοδος(βιβλιογραφία 21 και 22).

Αρχικά , υπολογίζεται η απόσταση του επιπέδου των εφελκυόμενων ράβδων (οπλισμός A<sub>s1</sub>) από τον ουδέτερο άξονα σύμφωνα με τον τύπο : y=h-x-d<sub>1</sub> , όπου h :το ύψος της δοκού , x: το ύψος της θλιβόμενης περιοχής και d1: το επίπεδο του οπλισμού A<sub>s1</sub> από την κάτω ίνα της δοκού.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η παραμόρφωση (ε) που λαμβάνει μέρος στο επίπεδο αυτό, ε=y/r, όπου 1/r: η καμπυλότητα της ράβδου. Επίσης ισχύει ε=Δl/lo => ε=(I –lo)/lo, όπου I: το μήκος της ράβδου στο επίπεδο του κάτω οπλισμού A<sub>s1</sub> κατά την παραμόρφωση και lo=2,40m το αρχικό μήκος της ράβδου. Από τον παραπάνω τύπου λύνοντας ως προς Ι προκύπτει:  $I=(ε+1)^*$  Io.

Όπως έχει αναφερθεί, αφότου η δύναμη που επιβάλλεται στη ράβδο γίνει ίση με την αντοχή της αγκύρωσης , λαμβάνει μέρος ολίσθηση της ράβδου. Έτσι έχουμε :

Για ολίσθηση 1,5mm το νέο μήκος στο επίπεδο της ράβδου είναι l'=l+0,0015. Από τον τύπο ε=(l' –lo)/lo, όπου lo=l, βρίσκουμε την παραμόρφωση και από τον τύπο 1/r=-(ε/y) προκύπτει η αντίστοιχη καμπυλότητα της ράβδου.

Άρα, το επιπλέον βέλος λόγω ολίσθησης προκύπτει από τον τύπο δ'=κ\*l'\*1/r, όπου κ:συντελεστής, Ι': το νέο μήκος στο επίπεδο της ράβδου μετά από ολίσθηση της ράβδου, 1/r:η καμπυλότητα.

Τελικά, το συνολικό βέλος κάμψης λόγω της φόρτισης και της ολίσθησης είναι δτ=δ+δ', όπου δ: το βέλος κάμψης λόγω φόρτισης.

Για ολίσθηση 3,00mm ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Έτσι έχουμε : l''=l+0,003 : νέο μήκος στο επίπεδο του As1 και για ολίσθηση 0,003 ε'=(l''+lo)/lo :παραμόρφωση , όπου lo=l 1/r=-(ε'/y) :καμπυλότητα δ''=κ\*l''<sup>2\*</sup>1/r : βέλος κάμψης λόγω ολίσθησης 0,003

δτ'=δ+δ'' : βέλος λόγω φόρτισης και ολίσθησης

Για μήκος 0,42 m η δύναμη αστοχίας του δοκιμίου είναι W=84,85 kN ενώ η δύναμη που πρέπει να αναπτυχθεί στη ράβδο για την αστοχία της αγκύρωσης (δύναμη αστοχίας αγκύρωσης) είναι F=140,84 kN. Αναλυτικά :

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
4,67	9,34	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1130793	0,0002	3,74
10	20,00	0,000187	1,43*10 <sup>-6</sup>	560164	0,0009	8,00
20	40,00	0,000165	3,23*10 <sup>-6</sup>	495167	0,0020	16,00
30	60,00	0,000163	4,91*10 <sup>-6</sup>	488633	0,0030	24,00
40	80,00	0,000162	6,57*10 <sup>-6</sup>	487043	0,0040	32,00
42,43	84,85	0,000162	9,86*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0060	47,93
42,43	84,85	0,000162	2,75*10 <sup>-3</sup>	485882	0,0077	47,93
42,43	84,85	0,000162	5,5 <sup>1*10<sup>-3</sup></sup>	485882	0,0094	47,93

Πίνακας 5 : Πίνακας υπολογισμών για μήκος ευθύγραμμης αγκύρωσης I=0,42m





Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι ροπές αδράνειας πριν και μετά τη ρηγμάτωση έχουν ως εξής :

#### Πρίν τη ρηγμάτωση

$$\begin{split} I_{g} = b^{*}h^{3}/12 + b^{*}h^{*}(x-h/2)^{2} + \mu^{*}A_{s1}^{*}(d-x)^{2} + (\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2} = & 0,0004051 \text{ m}^{2} \\ \hline K\alpha I & \\ \underline{M\epsilon t\dot{\alpha} \ Tn \ \rho\eta\gamma\mu\dot{\alpha}\tau\omega\sigma\eta} \\ 150^{*}x^{2}/2 = \mu^{*}As^{*}(d-x) = > \\ x^{2} + 35,75x - 9295 = 0 = > x = & 80,2 \text{ mm} \rightarrow & 0,0802 \text{ m} \\ I_{cr} = (b^{*}x^{3}/3) + (\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2} + \mu^{*}A_{s1}^{*}(h-x)^{2} = & 0,0001620 \text{ m}^{2} \end{split}$$

Αντίστοιχα οι καμπυλότητες είναι :

<u>Πριν τη ρηγμάτωση</u>  $1/R_{cr}=(ε_{s1}+ε_{c2})/(d*1000)= 3,304*10^{-7} mm^{-1}$ 

<u>Μετά τη ρηγμάτωση</u>  $1/R=(ε_{s1}+ε_{c2})/(d*1000)=$  1,179\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>

Κατά την αστοχία

 $1/R_{u}=M/EI=$  9,864\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>

Συνολικά :

ροπή(kNm)	1/R(mm⁻¹)
0	0
3,74	3,304*10 <sup>-7</sup>
3,74	1,179*10 <sup>-6</sup>
47,93	9,864*10 <sup>-6</sup>

Πίνακας 6 : Χαρακτηριστικά σημεία διαγράμματος σχήματος 17



Σχήμα 17 :διάγραμμα M-1/R για μήκος ευθύγραμμης αγκύρωσης I=0,42m

Για μήκος 0,12 m η δύναμη αστοχίας του δοκιμίου είναι W=25,89 kN ενώ η δύναμη που αναπτύσσεται στη ράβδο κατά την αστοχία της αγκύρωσης (δύναμη αστοχίας αγκύρωσης) είναι F=40,24 kN. Αναλυτικά :

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
4,67	9,34	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1130793	0,0002	3,74
10	20,00	0,000187	1,43*10 <sup>-6</sup>	560349	0,0009	8,00
12,94	25,89	0,000173	2,13*10 <sup>-6</sup>	486088	0,0013	10,36
12,94	25,89	0,000173	2,6 <mark>5*10<sup>-3</sup></mark>	486088	0,0029	10,36
12,94	25,89	0,000173	5,30*10 <sup>-3</sup>	486088	0,0046	10,36

Πίνακας 7 : Πίνακας υπολογισμών για μήκος ευθύγραμμης αγκύρωσης I=0,12m



Σχήμα 18 :διάγραμμα Ρ-δ για μήκος ευθύγραμμης αγκύρωσης I=0,12m

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και εδώ οι ροπές αδράνειας πριν και μετά τη ρηγμάτωση έχουν ως εξής :

#### Πρίν τη ρηγμάτωση

$$\begin{split} I_{g} = b^{*}h^{3}/12 + b^{*}h^{*}(x-h/2)^{2} + \mu^{*}A_{s1}^{*}(d-x)^{2} + (\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2} = & 0,0004051 \text{ m}^{2} \\ \hline \text{Kal} & \\ \frac{M\epsilon t\dot{\alpha} \text{ Tn } \rho\eta\gamma\mu\dot{\alpha}\tau\omega\sigma\eta}{150^{*}x^{2}/2 = \mu^{*}As^{*}(d-x) = >} \\ x^{2} + 35,75x - 9295 = 0 = >x = & 80,2 \text{ mm} \rightarrow & 0,0802 \text{ M} \\ I_{cr} = (b^{*}x^{3}/3) + (\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2} + \mu^{*}A_{s1}^{*}(h-x)^{2} = & 0,0001620 \text{ m}^{2} \end{split}$$

Αντίστοιχα οι καμπυλότητες είναι :

<u>Πριν τη ρηγμάτωση</u>  $1/R_{cr}=(ε_{s1}+ε_{c2})/(d*1000)= 3,304*10^{-7} mm^{-1}$ 

Μετά τη ρηγμάτωση

 $1/R=(\epsilon_{s1}+\epsilon_{c2})/(d^{*}1000)=$  1,179<sup>\*</sup>10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>

<u>Κατά την αστοχία</u>

 $1/R_u=M/EI=$  2,130\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>

Συνολικά :

ροπή(kNm)	1/R(mm <sup>-1</sup> )
0	0
3,74	3,304*10 <sup>-7</sup>
3,74	1,179*10 <sup>-6</sup>
10,36	2,130*10 <sup>-6</sup>

Πίνακας 8 : Χαρακτηριστικά σημεία διαγράμματος σχήματος 19



Σχήμα 19 :διάγραμμα M-1/R για μήκος ευθύγραμμης αγκύρωσης I=0,12m

Παρατηρούμε ότι και στις 2 περιπτώσεις η αστοχία είναι πρόωρη σε σύγκριση με την αρχικά υπολογισμένη αντοχή και απότομη χωρίς να έχουν προηγηθεί η διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού και η αστοχία της άνω θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος όπως είχαμε υπολογίσει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μήκος αγκύρωσης δεν είναι αυτό που απαιτείται ώστε να αναπτυχθεί πλήρως η δύναμη συνάφειας με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πλέον η συνεργασία μεταξύ των υλικών και η δοκός να αστοχεί σε μικρότερες τιμές επιβολής φορτίου από ότι είχαμε υπολογίσει για την καμπική αντοχή.

#### 8.2 Μέθοδος εγκάρσιας συγκολλημένης ράβδου

Υπολογίζουμε εκ νέου τη δύναμη αστοχίας της αγκύρωσης όταν το μήκος αυτής είναι 0,1 m και προκύπτει :

 $F_{btd} = I_{td} * \Phi_t * \sigma_{td} = 22,15 \text{ KN}$   $I_b = (\Phi/4) * (f_{yd} - F_{btd}/A_{st}) / f_{bd}$   $I_b = 100 \text{ mm} -> 0,10 \text{ m}$   $F = (f_{bd} * \pi * \Phi * I_b) + F_{btd} = 39,12 \text{ kN}$ 

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την δύναμη και την ροπή αστοχίας όπως το κεφάλαιο 3.

```
εc2 =
         0.0035
         0,0243
  X=
                   m
Παραμορφώσεις :
  εs1 =
          0.03397
                              0,00250
                       >
 εs2 =
          -0,00025
                       <
                              0.00250
 Από πίνακες του ΕC2 και για ε<sub>c2</sub>=0,0035 προκύπτουν :
Συντελεστής πλήρωσης :
                             α=0.81
Συντελεστής κέντρου βάρους : ζ'=0,416
Δυνάμεις :
  Fc=
         -59,01 kN
 Fs1=
          39,12 kN
 Fs2=
          19.89 kN
  ΣF=
           0.00
                 kΝ
Ροπές :
  Mc=
          8,26
                  kNm
          4,30
 Ms1=
                  kNm
          -2,47
 Ms2=
                  kNm
          10,09
 M_{RD} =
                  kNm
```

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα φορτία :

W <sub>RD</sub> =	25,23	kN
P <sub>RD</sub> =	12,61	kN

Για φόρτιση της ράβδου με δύναμη W=25,23 kN → P=12,61 kN προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα και διαγράμματα.

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m <sup>4</sup> )	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
4,67	9,34	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1130793	0,0002	3,74
10	20,00	0,000187	1,43*10 <sup>-6</sup>	560164	0,0009	8,00
12,61	25,23	0,000174	2,08*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0013	10,09

Πίνακας 9 : Πίνακας υπολογισμών για αγκύρωση με συγκολλημένη ράβδο με μήκος I=0,10m



Σχήμα 20 :διάγραμμα Ρ-δ για αγκύρωση με συγκολλημένη ράβδο με μήκος I=0,10m

## Πρίν τη ρηγμάτωση

$$I_{g} = b^{*}h^{3}/12 + b^{*}h^{*}(x-h/2)^{2} + \mu^{*}A_{s1}^{*}(d-x)^{2} + (\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2} = 0,0004051 \qquad m^{2}$$

Αντίστοιχα οι καμπυλότητες είναι :

<u>Πριν τη ρηγμάτωση</u>  $1/R_{cr} = (ε_{s1} + ε_{c2})/(d*1000) = 3,304*10^{-7} mm^{-1}$ 

<u>Μετά τη ρηγμάτωση</u>

 $1/R=(\epsilon_{s1}+\epsilon_{c2})/(d^{*}1000)=$  1,179<sup>\*</sup>10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>

<u>Κατά την αστοχία</u>

 $1/R_u=M/EI=$  2,077\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>

Συνολικά :

ροπή(kNm)	1/R(mm <sup>-1</sup> )			
0	0			
3,74	3,304*10 <sup>-7</sup>			
3,74	1,179*10 <sup>-6</sup>			
10,09	2,077*10 <sup>-6</sup>			

Πίνακας 10 : Χαρακτηριστικά σημεία διαγράμματος



Σχήμα 21 :διάγραμμα M-1/R για αγκύρωση με συγκ. ράβδο με μήκος I=0,10m

Παρατηρούμε ότι και σε αυτή την περίπτωση η αστοχία είναι πρόωρη χωρίς να έχουν προηγηθεί η διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού και η αστοχία της άνω θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος όπως αναμένουμε κατά την καμπτική αντοχή. Αυτό οφείλεται στον ίδιο μηχανισμό απώλειας της συνάφειας όπως και πριν στην ευθύγραμμη αγκύρωση με αποτέλεσμα η δοκός να αστοχεί πάλι σε μικρότερες τιμές επιβολής φορτίου από ότι είχαμε υπολογίσει για την καμπική αντοχή.

#### 9. <u>ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΛΛΙΠΗΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΜΕ</u> <u>ΧΡΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ</u>

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο το ελλιπές μήκος αγκύρωσης συνεπάγεται μειωμένη καμπτική αντοχή καθώς η αστοχία της αγκύρωσης προηγείται της αστοχίας έναντι κάμψης. Ένας τρόπος ώστε να μπορούμε να καλύψουμε τη διαφορά που έχουμε σε απαίτηση αγκύρωσης είναι να χρησιμοποιήσουμε εξωτερική πλάκα αγκύρωσης την οποία συγκολλάμε στον εφελκυόμενο οπλισμό. Κατά τον τρόπο αυτό ένα μέρος της συνολικής δύναμης αγκύρωσης θα το λαμβάνει το ευθύγραμμο τμήμα που διαθέτουμε και το υπόλοιπο θα το αναλαμβάνει η εξωτερική πλάκα η οποία θα το μεταβιβάζει σαν θλιπτική δύναμη στο σκυρόδεμα. Από προηγούμενο κεφάλαιο για ευθύγραμμο μήκος αγκύρωσης με μήκος 0,12 m έχουμε δύναμη αγκύρωσης 40,24 kN άρα η δύναμη που απαιτείται να παραλάβει η πλάκα είναι 201-40,24= 160,76 kN. Η δύναμη αυτή είναι συνάρτηση του εμβαδού της πλάκας, έτσι έχουμε :

F=f <sub>ck</sub> *A=2*A=>160,76=2*A=>A=	80,4 cm <sup>2</sup>		
h=A/15=	5,4 cm		
άρα τοποθετώ πλάκα 15*5,4=81 c	m² με αντοχή 81*2=	162	kN
Τελική δύναμη αντοχής αγκύρωα	σης : F=162+40,24=	202,24	kN

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με την προσθήκη της εξωτερικής πλάκας αγκύρωσης η δύναμη αστοχίας του δοκιμίου είναι W=119,82 kN ενώ η δύναμη που πρέπει να αναπτυχθεί στη ράβδο για την αστοχία της αγκύρωσης (δύναμη αστοχίας αγκύρωσης) είναι F=202,24 kN. Αναλυτικά :

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή M (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
5,18	10,36	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	0,0002	4,15
10	20,00	0,000196	1,36*10 <sup>-6</sup>	587375	0,0008	8,00
20	40,00	0,000166	3,21*10 <sup>-6</sup>	498569	0,0020	16,00
30	60,00	0,000163	4,90*10 <sup>-6</sup>	489641	0,0030	24,00
40	80,00	0,000162	6,56*10 <sup>-6</sup>	487468	0,0040	32,00
50	100,00	0,000162	8,22*10 <sup>-6</sup>	486694	0,0050	40,00
57,82	115,63	0,000162	1,47*10 <sup>-5</sup>	313851	0,0090	46,25
59,46	118,92	0,000162	3,52*10 <sup>-5</sup>	135196	0,0215	47,57
59,91	119,82	0,000162	8,59*10 <sup>-5</sup>	55828	0,0524	47,93

Πίνακας 11 : Πίνακας υπολογισμών για ευθύγραμμη αγκύρωση με μήκος I=0,12m και εξωτερική πλάκα



Σχήμα 22 :διάγραμμα Ρ-δ για ευθύγραμμη αγκύρωση με μήκος I=0,12m και εξωτερική πλάκα

<u>Πρίν τη ρηγμάτωση</u>					
$I_g = b^*h^3/12 + b^*h^*(x-h/2)^2 + \mu^*A_{s1}^*(d-x)^2 + (\mu-1)^*A_{s2}^*(x-h/2)^2 + (\mu-1)^*A_{$		0,0	00405 n	n²	
$1/R_{cr} = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^* 1000) = 3,304^* 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$					
<u>Αμέσως μετά τη ρηγμάτωση</u> 150*x²/2=μ*As*(d-x)=> x²+35,75x-9295=0=>x=	80,2	mm	$\rightarrow$	0,0802	М
$I_{cr} = (b^{*}x^{3}/3) + (\mu - 1)^{*}A_{s2}^{*}(x - d_{2})^{2} + \mu^{*}A_{s1}^{*}(h - x)^{2} = 1/R = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^{*}1000) = 1,195^{*}10^{-6} \text{ mm}^{-1}$	0,0001620	m²			

Διαρροή Χάλυβα

 $1/Ry=(\epsilon_{s1}+\epsilon_{c2})/(d^{*}1000)=$  1,47<sup>\*</sup>10<sup>-5</sup> mm<sup>-1</sup>

<u>Διαρροή άνω ίνας σκυροδέματος</u>  $1/R_2 = (ε_{s1} + ε_{c2})/(d*1000) = 3,52*1^{-5} mm^{-1}$ 

Αστοχία διατομής

 $1/R_{u}=(\epsilon_{s1}+\epsilon_{c2})/(d^{*}1000)=$  8,59<sup>\*</sup>10<sup>-5</sup> mm<sup>-1</sup>

ροπή(kNm)	1/R(mm <sup>-1</sup> )
0	0
4,15	3,30 <sup>*</sup> 10 <sup>-7</sup>
4,15	1,20*10 <sup>-6</sup>
46,25	1,47*10 <sup>-5</sup>
47,57	3,52*10 <sup>-5</sup>
47,93	8,59*10 <sup>-5</sup>





Σχήμα 23 :διάγραμμα M-1/R για ευθύγραμμη αγκύρωση με μήκος I=0,12m και εξωτερική πλάκα Παρατηρούμε ότι μετά την τοποθέτηση της εξωτερικής πλάκας αγκύρωσης αναμένουμε η αγκύρωση να λειτουργήσει πλήρως και το δοκίμιο να αστοχεί λόγω κάμψης και όχι λόγω αστοχίας αγκύρωσης. Άρα η καμπτική αντοχή θα είναι αυτή που έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 3.

#### 10. ΕΛΛΙΠΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΕC2 ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Στο κεφάλαιο αυτό θα συγκρίνουμε τις αντοχές και τη συμπεριφορά των μεθόδων αγκύρωσης με ευθύγραμμο τμήμα, με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο και με διαπλάτυνση κεφαλής. Επιλέγουμε σαν ενιαίο μήκος για όλες τις μεθόδους αυτό που έχει προκύψει από την μέθοδο με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars) στο κεφάλαιο 7 δηλαδή I=0,22 m.

#### 10.1 Ευθύγραμμη αγκύρωση

Για την ευθύγραμμη αγκύρωση έχουμε δύναμη που αναπτύσσεται στον εφελκυόμενο οπλισμό F=F<sub>bd</sub>\*π\*Φ\*L\*2=3,375\*π\*16\*0,22\*2=74,64 kN ενώ για τη συνολική δύναμη που εφαρμόζεται στη δοκό κατά την αστοχία (φορτίο αστοχίας) έχουμε :

εc2 =	0,0035		
x=	0,0269	m	
εs1 =	0,03034	>	0,00250
εs2 =	0,00012	<	0,00250
a=	0,81		
ζ′=	0,416		
Δυνά	μεις :		
Fr-	-65 31	L∕NI	

Fc=	-65,34	kN
Fs1=	74,64	kN
Fs2=	-9,30	kN
ΣF=	0,00	kN
Ροπές	:	
Mc=	9,07	kNm
Ms1=	8,21	kNm
Ms2=	1,15	kNm
M <sub>RD</sub> =	18,43	kNm

Από τα παραπάνω προκύπτει δύναμη αστοχίας :

W <sub>RD</sub> =	46,09	kN
P <sub>RD</sub> =	23,04	kN

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
4,67	9,34	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1130793	0,0002	3,74
10	20,00	0,000187	1,43*10 <sup>-6</sup>	560164	0,0009	8,00
20	40,00	0,000165	3,23*10 <sup>-6</sup>	495167	0,0020	16,00
23,04	46,09	0,000164	3,79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0023	18,43
23,04	46,09	0,000164	3,79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0040	18,43
23.04	46.09	0,00016	3.79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0056	18,43

Τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό δυνάμεων-μετατοπίσεων δίνονται στον παρκάτω πίνακα και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στο σχήμα 24 :

Πίνακας 13 : Πίνακας υπολογισμών για ευθύγραμμη αγκύρωση με μήκος I=0,22m



Σχήμα 24 :διάγραμμα Ρ-δ για ευθύγραμμη αγκύρωση με μήκος l=0,22m

Για τον υπολογισμό των ροπών αδράνειας και την καμπυλοτήτων έχουμε :

Πρίν τη ρηγμάτωση  $I_{a}=b^{h^{3}}/12+b^{h^{*}}(x-h/2)^{2}+\mu^{*}A_{s1}^{*}(d-x)^{2}+(\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2}=$ 0.000405077 m<sup>2</sup> 3,304\*10<sup>-7</sup> mm<sup>-1</sup>  $1/R_{cr} = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^* 1000) =$ Αμέσως μετά τη ρηγμάτωση 150\*x<sup>2</sup>/2=µ\*As\*(d-x)=> x<sup>2</sup>+35,75x-9295=0=>x= 80,2 mm 0,0802 m  $I_{cr}=(b^{*}x^{3}/3)+(\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2}+\mu^{*}A_{s1}^{*}(h-x)^{2}=$ 0,0001620 m<sup>2</sup>  $1/R = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^* 1000) =$ 1.179\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup> Αστοχία διατομής 3,794\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>  $1/R_u = M/EI =$ 

Σελίδα | 85



Σχήμα 26:διαμόρφωση δοκιμίου για ευθύγραμμη αγκύρωση



Πίνακας 14 : Χαρακτηριστικά σημεία διαγράμματος σχήματος 25

Συγκεντρωτικά : ροπή(kNm) 1/R(mm<sup>-1</sup>) 0,0000 0 3,3039\*10<sup>-7</sup> 3,74 1,1788\*10<sup>-6</sup> 3,74 3,7941\*10<sup>-6</sup> 18,43



Σχήμα 27: ανάπτυγμα οπλισμού για ευθύγραμμη αγκύρωση

#### 10.2 Εγκάρσια συγκολλημένη ράβδος

Για τη μέθοδο με συγκολλημένη ράβδο υπολογίζουμε αρχικά τη δύναμη στον εφελκυόμενο οπλισμό :

$F_{btd} = I_{td} * \Phi_t * \sigma_{td} =$		22,15	KN		
$I_b = (\Phi/4)^* (fyd-Fb)$	otd/Ast	t)/fbd			
I <sub>b</sub> =	260	mm	->	0,26	m
$F=(f_{bd}^*\pi^*\Phi^*I_{b})+I_{b}^*I_{b})+I_{b}^*I_{b}^*I_{b})+I_{b}^*I_{b}^*I_{b}^*I_{b})+I_{b}^*I_{b}^*I_{b}^*I_{b}^*I_{b})+I_{b}^*I_{b}^*I_{b}^*I_{b}^*I_{b})+I_{b}^*I$	F <sub>btd</sub> =		66,26	kN	

Όπως μπορούμε να δούμε η δύναμη αυτή προκύπτει λόγω του υπάρχοντος μήκους της ράβδου.

Στη συνέχεια και για τη δύναμη αυτή υπολογίζουμε την δύναμη αστοχίας της δοκού ως εξής :

εc2 =	0,0035		
x=	0,0262	m	
εs1 =	0,03119	>	0,00250
εs2 =	0,00003	<	0,00250
a=	0,81		
ζ'=	0,416		

Δυνάμεις :

Fc=	-63,75	kN
Fs1=	66,26	kN
Fs2=	-2,51	kN
ΣF=	0,00	kN
Ροπές :		
Mc=	8,87	kNm
Ms1=	7,29	kNm
Ms2=	0,31	kNm
M <sub>RD</sub> =	16,47	kNm

Από τα παραπάνω προκύπτει δύναμη αστοχίας :

W <sub>RD</sub> =	41,17	kN
P <sub>RD</sub> =	20,58	kN

23

Τα αποτελέσματα για την συμπεριφορά της δοκού με τη συγκεκριμένη μέθοδο δίνονται στον πίνακα και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στο . σνήμα 28 ·

	5.					
Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή M (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
4,67	9,34	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1130793	0,0002	3,74
10	20,00	0,000187	1,43*10 <sup>-6</sup>	560164	0,0009	8,00
20,58	41,17	0,000165	3,39*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0021	16,47

Πίνακας 15 : Πίνακας υπολογισμών για αγκύρωση με συγκολλημένη ράβδο και μήκος I=0,22m



Σχήμα 28 :διάγραμμα Ρ-δ για αγκύρωση με συγκολλημένη ράβδο και μήκος I=0,22m

Για τον υπολογισμό των ροπών αδράνειας και την καμπυλοτήτων έχω :

Πρίν τη ρηγμάτωση

 $I_{a}=b^{h^{3}}/12+b^{h^{*}}(x-h/2)^{2}+\mu^{*}A_{s1}^{*}(d-x)^{2}+(\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2}=$ 0.000405077 m<sup>2</sup>  $1/R_{cr} = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^* 1000) =$ 3.304\*10<sup>-7</sup> mm<sup>-1</sup> Αμέσως μετά τη ρηγμάτωση  $150^{*}x^{2}/2=\mu^{*}As^{*}(d-x)=>$  $x^{2}+35,75x-9295=0=>x=$ 80,2 mm 0,0802 m  $I_{cr}=(b^{*}x^{3}/3)+(\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2}+\mu^{*}A_{s1}^{*}(h-x)^{2}=$ 0,0001620 m<sup>2</sup> 1,179\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup>  $1/R = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^* 1000) =$ Αστοχία διατομής 3,389\*10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup> 1/R<sub>u</sub>=M/EI=

Σελίδα | 88

Συγκεντρωτικά :	
ροπή(kNm)	1/R(mm <sup>-1</sup> )
0	0

3,74	3,304*10 <sup>-7</sup>
3,74	1,179*10 <sup>-6</sup>
16,47	3,389*10 <sup>-6</sup>

Πίνακας 16 : Χαρακτηριστικά σημεία διαγράμματος σχήματος 26



Σχήμα 29 :διάγραμμα M-1/R για αγκύρωση με συγκολλημένη ράβδο και μήκος I=0,22m



Σχήμα 30:διαμόρφωση δοκιμίου για εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο



Σχήμα 31: ανάπτυγμα οπλισμού για εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο

#### 10.3 <u>Αγκύρωση με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars)</u>

Οι υπολογισμοί για την αντοχή της δοκού έχουν γίνει στο κεφάλαιο 3 παρακάτω φαίνεται ο πίνακας :

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
5,18	10,36	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	0,0002	4,15
10	20,00	0,000196	1,36*10 <sup>-6</sup>	587375	0,0008	8,00
20	40,00	0,000166	3,21*10 <sup>-6</sup>	498569	0,0020	16,00
30	60,00	0,000163	4,90*10 <sup>-6</sup>	489641	0,0030	24,00
40	80,00	0,000162	6,56*10 <sup>-6</sup>	487468	0,0040	32,00
50	100,00	0,000162	8,22*10 <sup>-6</sup>	486694	0,0050	40,00
57,82	115,63	0,000162	1,47*10 <sup>-5</sup>	313851	0,0090	46,25
59,46	118,92	0,000162	3,52*10 <sup>-5</sup>	135196	0,0215	47,57
59,91	119,82	0,000162	8,59*10 <sup>-5</sup>	55828	0,0524	47,93

Πίνακας 17 : Πινακας αποτελεσμάτων (headed bars)

Διαπιστώνουμε ότι για μήκος αγκύρωσης ίσο με το απαιτούμενο για τη μέθοδο headed bars I=0,22 m η ευθύγραμμη και με συγκολλημένη ράβδο αγκύρωση αστοχούν μακράν. Αυτό μπορεί να μας οδηγήσει στο συμπέρασμα πως όταν λόγω γεωμετρίας της κατασκευής έχω μικρό χώρο για αγκύρωση, κυρίως σε εξωτερικούς κόμβους, η μέθοδος με headed bars μπορεί να μου εξασφαλίσει καλή συμπεριφορά και πλήρη αγκύρωση.



Σχήμα 32: διαμόρφωση δοκιμίου για αγκύρωση με headed bar



Σχήμα 33: ανάπτυγμα οπλισμού για αγκύρωση με headed bar

#### 11. <u>ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΥΠΟ</u> <u>ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.</u>

Κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση της δοκού αναμένουμε να έχουμε παραμένουσες μετατοπίσεις . Ο προσδιορισμός αυτών των παραμορφώσεων έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμίων. Από τα προηγούμενα πειράματα και τα διαγράμματα που έχουν προκύψει παρατηρήθηκε ότι σε κάθε αποφόρτιση ,από δύναμη P σε 0, έχουμε μία παραμένουσα μετατόπιση που αντιστοιχεί κατά μέσο όρο στο 67% της μετατόπισης κατά την φόρτιση ενώ κατά την αποφόρτιση ,από –P σε 0 , η μετατόπιση είναι της τάξης του 41% της προηγούμενης τιμής. Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της μετατόπισης προσθέτουμε στις προηγούμενες τιμές τις μετατοπίσεις που προκύπτουν λόγο μονοτονικής φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε να προσεγγίσουμε την αύξηση της παραμόρφωσης που αναμένουμε λόγω της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος. Στο σχήμα 34 φαίνονται τα διαγράμματα των προηγούμενων πειραμάτων.



Σχήμα 34 :διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης κατά τα προηγούμενα πειράματα

# Στον επόμενο πίνακα έχουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση ενώ στο σχήμα 35 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα.

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m <sup>4</sup> )	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
5,18	10,36	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	0,00020	4,15
0	0,00	0,000405	0	1254775	0,00000	0
-5,18	-10,36	0,000405	-3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	-0,00020	-4,15
0	0,00	0,000405	0	1254775	0,00000	0
10	20,00	0,000196	1,36*10 <sup>-6</sup>	587375	0,0008	8,00
20	40,00	0,000166	3,21*10 <sup>-6</sup>	498569	0,0020	16,00
30	60,00	0,000163	4,90*10 <sup>-6</sup>	489641	0,0030	24,00
40	80,00	0,000162	6,56*10 <sup>-6</sup>	487468	0,0040	32,00
50	100,00	0,000162	8,22*10 <sup>-6</sup>	486694	0,0050	40,00
0	0,00	0,000162	0	498569	0,0034	0
-10	-20,00	0,000196	-1,36*10 <sup>-6</sup>	587375	0,0025	-8,00
-20	-40,00	0,000166	-3,21*10 <sup>-6</sup>	498569	0,0014	-16,00
-30	-60,00	0,000163	-4,90*10 <sup>-6</sup>	489641	0,0004	-24,00
-40	-80,00	0,000162	-6,56*10 <sup>-6</sup>	487468	-0,0006	-32,00
-50	-100,00	0,000162	-8,22*10 <sup>-6</sup>	486694	-0,0017	-40,00
0	0	0,000162	0	486694	0,0014	0
20	40,00	0,000166	3,21*10 <sup>-6</sup>	498569	0,0033	16,00
40	80,00	0,000162	6,56*10 <sup>-6</sup>	487468	0,0054	32,00
50	100,00	0,000162	8,22*10 <sup>-6</sup>	486694	0,0064	40,00
57,82	115,63	0,000162	1,47*10 <sup>-5</sup>	313851	0,0104	46,25
59,46	118,92	0,000162	3,52*10 <sup>-5</sup>	135196	0,0229	47,57
0	0,00	0,000162	2,50*10 <sup>-8</sup>	313851	0,0153	0,00
-20	-40,00	0,000166	-3,21*10 <sup>-6</sup>	498569	0,0134	-16,00
-40	-80,00	0,000162	-6,56*10 <sup>-6</sup>	487468	0,0113	-32,00
-50	-100,00	0,000162	-8,22*10 <sup>-6</sup>	486694	0,0103	-40,00
-57,82	-115,63	0,000162	-1,47*10 <sup>-5</sup>	313851	0,0063	-46,25
-59,46	-118,92	0,000162	-3,52*10 <sup>-5</sup>	135196	-0,0062	-47,57
0	0	0,000162	2,25*10 <sup>-9</sup>	135196	0,0014	0
10	20,00	0,000196	1,36*10 <sup>-6</sup>	587375	0,0022	8,00
20	40,00	0,000166	3,21*10 <sup>-6</sup>	498569	0,0033	16,00
30	60,00	0,000163	4,90*10 <sup>-6</sup>	489641	0,0044	24,00
40	80,00	0,000162	6,56*10 <sup>-6</sup>	487468	0,0054	32,00
55	110,00	0,000162	9,03*10 <sup>-6</sup>	487468	0,0069	44,00
59,91	119,82	0,000162	8,59*10 <sup>-5</sup>	55828	0,0538	47,93

Πίνακας 18 : Πίνακας αποτελεσμάτων για ανακυκλιζόμενη φόρτιση



Σχήμα 35 :διάγραμμα Ρ-δ για ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Για τον υπολογισμό των ροπών αντίδρασης και των καμπυλοτήτων έχουμε : <u>Πρίν τη ρηγμάτωση</u>

 $I_{g}=b^{h^{3}}/12+b^{h^{*}}(x-h/2)^{2}+\mu^{A_{s1}}(d-x)^{2}+(\mu-1)^{A_{s2}}(x-d_{2})^{2}=$ 0.00040508 m<sup>4</sup>  $1/R_{cr}=(\epsilon_{s1}+\epsilon_{c2})/(d^{*}1000)=$  3,304-10<sup>-7</sup> mm<sup>-1</sup> Αμέσως μετά τη ρηγμάτωση 150\*x<sup>2</sup>/2=µ\*As\*(d-x)=> x<sup>2</sup>+35,75x-9295=0=>x= 80.2 0.0802 m mm  $I_{cr}=(b^{*}x^{3}/3)+(\mu-1)^{*}A_{s2}^{*}(x-d_{2})^{2}+\mu^{*}A_{s1}^{*}(h-x)^{2}=$ 0,0001620 m<sup>4</sup>  $1/R=(\epsilon_{s1}+\epsilon_{c2})/(d^{*}1000)=$  1,195<sup>\*</sup>10<sup>-6</sup> mm<sup>-1</sup> Διαρροή Χάλυβα 1,474\*10<sup>-5</sup> mm<sup>-1</sup>  $1/Ry=(\epsilon_{s1}+\epsilon_{c2})/(d^{*}1000)=$ Διαρροή άνω ίνας σκυροδέματος 3,518\*10<sup>-5</sup> mm<sup>-1</sup>  $1/R_2 = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^* 1000) =$ Αστοχία διατομής  $1/R_u = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{c2})/(d^*1000) = 8,585^*10^{-5} \text{ mm}^{-1}$ 

Συγκεντρωτικά :

ροπή(kNm)	1/R(mm <sup>-1</sup> )			
0	0			
4,15	3,304*10 <sup>-7</sup>			
4,15	1,195*10 <sup>-6</sup>			
46,25	1,474*10 <sup>-5</sup>			
47,57	3,518*10 <sup>-5</sup>			
47,93	8,585*10 <sup>-5</sup>			

Πίνακας 19 : καμπυλότητες

Πρέπει να σημειωθεί πως οι μετατοπίσεις αναμένονται να είναι μεγαλύτερες στο πείραμα καθώς λόγω της εναλλασσόμενης φόρτισης το εύρος των ρωγμών συνεχώς θα αυξάνει με αποτέλεσμα σε κάθε κύκλο να χρειάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση για να κλείσουν οι ρωγμές. Τονίζεται πως οι υπολογισμοί θα μας δείχνουν μόνο την προσέγγιση των αναμενόμενων παραμορφώσεων καθώς το μέγεθος και ο τρόπος της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια.

#### 12. <u>ΕΛΛΙΠΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΕC2 ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</u> <u>ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .</u>

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε τις μεθόδους αγκύρωσης με ευθύγραμμο τμήμα και με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο, όταν έχουμε ελλιπές μήκος αγκύρωσης. Επιλέγουμε σαν ενιαίο μήκος αυτό που έχει προκύψει από την μέθοδο με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars) στο κεφάλαιο 7 δηλαδή I=0,22 m. Οι αντοχές αστοχίας είναι ίδιες με αυτές που έχουμε υπολογίσει στο κεφάλαιο 11.

## 12.1 Ευθύγραμμη αγκύρωση

Για την ευθύγραμμη αγκύρωση έχουμε δύναμη που αναπτύσσεται στον εφελκυόμενο οπλισμό F=F<sub>bd</sub>\*π\*Φ\*L\*2=3.375\*π\*16\*0,22\*2=74,64 kN ενώ η δύναμη αστοχίας έχει υπολογιστεί ως W=46,09 kN (P=23,04 kN). Τα αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης στο σχήμα 36:

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	EI (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
5,18	10,36	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	0,0002	4,15
23,04	46,09	0,000165	3,79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0023	18,43
23,04	46,09	0,000165	3,79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0040	18,43
0	0,00	0,000165	0	485882	0,0027	0
-5,18	-10,36	0,000405	-3,30*10 <sup>-7</sup>	-1254775	0,0025	-4,15
-23,04	-46,09	0,000165	-3,79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0003	-18,43
-30	-60	0,000163	-4,90*10 <sup>-6</sup>	489641	-0,0003	-24,00
0	0,00	0,000165	1,77*10 <sup>-9</sup>	485882	0,0011	0,00
23,04	46,09	0,000165	3,79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0034	18,43
23,04	46,09	0,000165	3,79*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0056	18,43

Πίνακας 20 : Πίνακας υπολογισμών για ευθύγραμμη αγκύρωση με μήκος I=0,22m κατά την ανακύκλιση



Σχήμα 36 :διάγραμμα Ρ-δ για αγκύρωση με συγκ. ράβδο και μήκος l=0,22m κατά την ανακύκλιση

Κατά τον υπολογισμό του παραπάνω πίνακα ακολουθείται η εξής διαδικασία.

Στην αρχή φορτίζεται η ράβδος μέχρι το όριο αντοχής της αγκύρωσης. Στη συνέχεια διατηρείται σταθερή η επιβαλλόμενη δύναμη και λαμβάνεται υπόψη η ολίσθηση του οπλισμού κατά 1,50mm και υπολογίζεται το αντίστοιχο βέλος κάμψης. Στην πορεία, γίνεται αποφόρτιση και αντιστροφή της διεύθυνσης του φορτίου, έτσι ώστε να προκύπτει αντιστροφή του βέλους (θλίψη άνω ίνας) και έπειτα επαναφόρτιση μέχρι τη δύναμη αντοχής της αγκύρωσης και επιπλέον ολίσθηση 3,00mm.

## 12.2 Εγκάρσια συγκολλημένη ράβδος

Για τη μέθοδο με συγκολλημένη ράβδο υπολογίζουμε αρχικά τη δύναμη στον εφελκυόμενο οπλισμό :

$F_{btd} = I_{td}^* \Phi_t^* \sigma_{td} =$		22,15	KN		
$lb=(\Phi/4)^*(fyd-Fb)$	otd/As	t)/fbd			
lb=	260	mm	->	0,26	m
F=(fbd*π*Φ*lb)+	-F <sub>btd</sub> =		66,26	kN	

Στη συνέχεια και για τη δύναμη αυτή έχουμε υπολογίσει την δύναμη αστοχίας της δοκού ως W=41,17 kN ( P=20,58 kN ). Τα αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπησης στο σχήμα 37.

Συγκεντρωμένα Φορτία Ρ (kN)	Συνολική Δύναμη W (kN)	Ροπή αδράνειας Ι (m⁴)	1/R(mm <sup>-1</sup> )	El (kNm²)	Μετατόπιση δ (m) στο 1,2m	Ροπή Μ (kNm)
0	0,00	0	0	0	0	0
5,18	10,36	0,000405	3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	0,0002	4,15
10	20	0,000196	1,36*10 <sup>-6</sup>	587375	0,0008	8,00
20,58	41,17	0,000166	3,39*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0021	16,47
0	0,00	0,000166	0	0	0,0014	0
-5,18	-10,36	0,000405	-3,30*10 <sup>-7</sup>	1254775	0,0012	-4,15
-20,58	-41,17	0,000166	-3,39*10 <sup>-6</sup>	485882	-0,0007	-16,47
0	0,00	0,000166	0	0	0,0006	0
10	20	0,000196	1,36*10 <sup>-6</sup>	587375	0,0014	8,00
20,58	41,17	0,00017	3,39*10 <sup>-6</sup>	485882	0,0026	16,47

Πίνακας 21 : Πίνακας υπολογισμών για αγκύρωση με συγκ. ράβδο και μήκος I=0,22m



Σχήμα 37 :διάγραμμα Ρ-δ για αγκύρωση με συγκ. ράβδο και μήκος I=0,22m

## 12.3 <u>Αγκύρωση με διαπλάτυνση κεφαλής (headed bars)</u>

Το μήκος που έχει επιλεχθεί είναι αυτό που απαιτεί ο κανονισμός για την συγκεκριμένη μέθοδο με διαπλάτυνση κεφαλής. Έτσι ο πίνακας με τους υπολογισμούς δύναμης –μετατόπισης και το αντίστοιχο διάγραμμα είναι αυτό που έχει προκύψει από το προηγούμενο κεφάλαιο.

#### <u>12.4 Αντιμετώπιση ελλιπής ευθύγραμμης αγκύρωσης με χρήση εξωτερικής</u> πλάκας αγκύρωσης

Μια άλλη επιλογή για να κάνουμε την αγκύρωση να λειτουργήσει σε τέτοιο μικρό μήκος είναι η συγκόλληση εξωτερικής πλάκας. Όπως έχει αναφερθεί ήδη κατά τη λειτουργία αυτής της μεθόδου η δύναμη λόγω του μήκους του ευθύγραμμου τμήματος είναι 74,64 kN . Η δύναμη που απαιτείται λοιπόν να παραλάβει η πλάκα είναι 201-74,64= 126,36 kN. Η δύναμη αυτή είναι συνάρτηση του εμβαδού της πλάκας, έτσι έχουμε :

F=(f <sub>ck</sub> *A)=2*A=>112,78=2*A=>A= h=A/15=	4,2 cm	63,2	$cm^2 \rightarrow$	b= h=	15 cm 4,5 cm
άρα τοποθετώ πλάκα 15*4,5=	67,5 cr	n <sup>2</sup>			,
με αντοχή 67,5*2=	135 cr	n		_	
Τελική δύναμη αντοχής αγκύρωση	ς: 2	209,64	kN		

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με την προσθήκη της εξωτερικής πλάκας αγκύρωσης η δύναμη αστοχίας του δοκιμίου είναι W=119,82 kN ενώ η δύναμη που πρέπει να αναπτυχθεί στη ράβδο για την αστοχία της αγκύρωσης ( δύναμη αστοχίας αγκύρωσης ) είναι F=209,64 kN. Άρα η εξαντλείται η καμπτική αντοχή της δοκού και ο πίνακας των αποτελεσμάτων καθώς και το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης είναι αυτά που έχουν προκύψεις στο προηγούμενο κεφάλαιο.

# ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στην περίπτωση που δεν αναπτυχθούν οι τάσεις συνάφειας ο χάλυβας δεν εντείνεται και δεν συμβάλει στην καμπτική αντοχή του φορέα. Αυτό έχει σαν επακόλουθο, ο φορέας να συμπεριφέρεται ως άοπλος και να αστοχεί ψαθυρά όταν υπάρχει υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος.
- Σε περίπτωση που εξασθενήσουν οι τάσεις συνάφειας σε κάποια θέση εξαιτίας της κακής διεπιφάνειας μεταξύ των υλικών, ο οπλισμός δεν θα μπορέσει να αναπτύξει τη μέγιστη τάση διαρροής του. Συνεπώς, ο φορέας δε θα αναπτύξει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητά του.
- Κατά τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του φορέα, τα μεγέθη αστοχίας της κρίσιμης διατομής υπολογίζονται για τάση χάλυβα ίση με την τάση διαρροής του. Λόγω αυτού, πρέπει το μήκος της ράβδου από το άκρο της μέχρι τη θέση κρίσιμης διατομής να είναι αρκετό ώστε να αναπτυχθεί τάση ίση με την τάση διαρροής αλλά και να εξασφαλίζεται η καλή συνάφεια στο μήκος αυτό.
- Στην περίπτωση επιβαλλόμενης τάσης η επανάληψη φόρτισης αποφόρτισης από 0 σε σ<sub>c</sub> έχει συνέπεια την σταδιακή αύξηση τον παραμενουσών παραμορφώσεων και έτσι το σκυρόδεμα απαιτείται να παραμορφώνεται ολοένα και περισσότερο για να φτάσει στην επιθυμητή τάση, με αποτέλεσμα την αποδιοργάνωση του φορέα.
- Για το σκυρόδεμα υπό θλίψη μετά τη ρηγμάτωσή του( άμεσος εφελκυσμός) παρατηρείται σημαντική θλίψη για μηδενική παραμόρφωση λόγω της σχετικής μετακίνησης των χειλών της ρωγμής. Επίσης η θλιπτική τάση για μηδενική παραμόρφωση μειώνεται όσο αυξάνεται το άνοιγμα της ρωγμής κατά την πρώτη φόρτιση σε εφελκυσμό.
- Με την ανακύκλιση η συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος παρουσιάζει σημαντική επιδείνωση ενώ η επίδρασή της αυξάνει την εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος οπότε μειώνεται το εύρος των ρωγμών
- Κατά την εναλλασσόμενη φόρτιση στον δεύτερο κύκλο, για να αναλάβει ένταση το σκυρόδεμα πρέπει να κλείσουν πρώτα οι ρωγμές που έχουν ήδη δημιουργηθεί και που βρίσκονται τώρα στην θλιβόμενη περιοχή. Μέχρι οι να συμβεί αυτό οι παραμορφώσεις είναι μεγάλες. Για την αύξηση του εμβαδού των βρώχων (αύξηση απορροφούμενης ενέργειας) απαιτείται η τοποθέτηση θλιβόμενου οπλισμού ο οποίος θα αναλάβει τις θλιπτικές τάσεις πριν κλείσουν οι προηγούμενες ρωγμές. Κατά την εναλλασσόμενη φόρτιση παρατηρείται μείωση του μέγιστου φορτίου που μπορεί να αναληφθεί και αντίστοιχη αύξηση των παραμορφώσεων με συνέπεια την επέκταση της αποδιοργάνωσης
- Όσο η αγκύρωση καλύπτει τις απαιτήσεις η αστοχία οφείλεται στην υπέρβαση της καμπτικής αντοχής της δοκού.
- Όταν η αγκύρωση είναι μικρότερη η αστοχία είναι λόγω υπέρβασης της δύναμης συνάφειας άρα απώλεια συνεργασίας των υλικών άρα απότομη αύξηση του βέλους και της δύναμης που παραλαμβάνει μόνο το σκυρόδεμα άρα ο φορέας συμπεριφέρεται ως άοπλος και αστοχεί ψαθυρά.

- Για το μήκος αγκύρωσης που απαιτεί η μέθοδος headed bars, η ευθύγραμμη αγκύρωση και η αγκύρωση με άγκιστρο αστοχούν μακράν.
- Λύση για να λειτουργήσει στο μικρό μήκος η ευθύγραμμη αγκύρωση είναι να τοποθετηθεί εξωτερική πλάκα.
- Κατά την αγκύρωση με εξωτερική πλάκα όσο μεταβάλλεται το μήκος ακύρωσης της ράβδου, μεταβάλλεται και το απαιτούμενο εμβαδό της εξωτερικής πλάκας και αντίστροφα.
- Στην ανακύκληση θέλουμε να έχουμε καμπτική αστοχία, καθώς έτσι αποδεικνύεται ότι δουλεύει η αγκύρωση.
- Το γεγονός ότι η ράβδος φτάνει στην καμπτική αστοχία οφείλεται στην καλή (πλήρη) λειτουργία της αγκύρωσης αλλιώς θα υπάρχει αστοχία λόγω αγκύρωσης.
- Όταν έχουμε ανακύκληση και επαρκή αγκύρωση, σημαντικός παράγοντας για την αστοχία είναι η αντοχή σκυροδέματος (υπό θλίψη) και το μέγεθος αποδιοργάνωσής του (εύρος και απόσταση των ρωγμών).
- Για τη μεθόδου αγκύρωσης με headed bars, τη λειτουργία της αγκύρωσης (άρα και της συνεργασίας των υλικών) την εξασφαλίζει η δύναμη συνάφειας μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος και η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ της κεφαλής και του σκυροδέματος. Η δύναμη αυτή εκφράζεται σαν θλίψη στον όγκου του σκυροδέματος(εμβαδό κώνου σκυροδέματος). Εκτός από τη διάμετρο της κεφαλής μπορεί να παίξει κάποιο ρόλο στην αγκύρωση και το μήκος της.
- Για τη μεθόδου αγκύρωσης με εγκάρσια συγκολλημένη ράβδο, τη λειτουργία της αγκύρωσης (άρα και της συνεργασίας των υλικών) την εξασφαλίζει η δύναμη συνάφειας μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος και η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ της εγκάρσιας ράβδου και του σκυροδέματος.
- Για τη μεθόδου αγκύρωσης με συγκολλημένη πλάκα αγκύρωσης, τη λειτουργία της αγκύρωσης (άρα και της συνεργασίας των υλικών) την εξασφαλίζει η δύναμη συνάφειας μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος και η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ της πλάκας και του σκυροδέματος. Κρίσιμο είναι επίσης το πάχος της εξωτερικής πλάκας καθώς και η αντοχή της συγκόλλησης.
- Σε όλες τις παραπάνω μεθόδους οι μηχανισμοί που αναπτύσσονται ώστε να εξασφαλίζεται η αγκύρωση είναι συνδυασμός των μηχανισμών που παίρνουν μέρος κατά την ανάπτυξη της συνάφειας ράβδουσκυροδέματος(πρόσφυση, τριβή, αντίσταση του σκυροδέματος μεταξύ των νευρώσεων) και θλίψης στο σκυρόδεμα (αντίσταση του σκυροδέματος μεταξύ κεφαλής, εγκάρσιας ράβδου και εξωτερικής πλάκας αντίστοιχα).
- Στο headed bars κατά τη θλίψη μπορεί να έχουμε αποφλοίωση της επικάλυψης, κατά την εφελκυστική επαναφορά όμως η αγκύρωση αναμένουμε να λειτουργήσει κανονικά μέχρι την αστοχία.
- Κατά την ανακύκλιση αναμένουμε οι μετατοπίσεις να είναι μεγαλύτερες από αυτές που έχουν υπολογιστεί για μονοτονική φόρτιση.

 Σύμφωνα με την υπόδειξη από το προηγούμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε προτείνεται να τοποθετηθούν βελόμετρα στις στηρίξεις, στη μέση και στα άκρα της δοκού.

#### <u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

- Γεώργιος Ρ.Γκρός, " Οπλισμένο Σκυρόδεμα κατά τον Ελληνικό Κανονισμό 2000", Αθήνα 2004
- 2. Μ.Δ. Κωτσοβός, "Οπλισμένο Σκυρόδεμα", Αθήνα 2010
- Ευρωκώδικας 2, ΕΝ 1992-1-1:2004, "Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα"
- 4. Ευρωκώδικας 8, ΕΝ 1998-1 : 2004, "Αντισεισμικός σχεδιασμός"
- 5. ACI-318R-08, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
- 6. ACI-352R-02, "Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures", 2002
- ACI 318R-14, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-14) Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI,2014
- 8. ACI 352R-02, Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures, John F.Bonacci, Sergio M.Alcocer
- Απόστολος Κωνσταντινίδης, 'Έφαρμογές οπλισμένου σκυροδέματος' , Αθήνα 1993
- 10. Θ.Π.Τάσιος, Π.Ι.Γιαννόπουλος, Κ.Γ.Τρέζος, Σ.Γ.Τσουκαντάς,
   "Οπλισμένο Σκυρόδεμα με βάση τον νέο ελληνικό κανονισμό σκυροδέματος", Αθήνα 2005
- 11.Θ.Τάσιος, Π.Γιαννόπουλος, Κ.Τρέζος, Σ.Τσουκαντάς, Ε.Βιντζηλαίου, Π.Πλαϊνης, Ι.Σιγάλας, 'Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα'', Αθήνα 2011
- 12. Α.Μπάκα, ''Σχεδιασμός και επίβλεψη κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα'' , Αθήνα 2004
- 13. Sung-Chul CHUN, Dae-Young KIM , "Evaluation of mechanical anchorage of reinforcement by exterior beam-column joint experiments", Vancouver, Canada, August 2004
- 14. 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/November- December 2009.

- 15. S.RAJAGOPAL, S.PRABAVATHY, "Exterior beam-column joint study with non-conventional reinforcement detailing using mechanical anchorage under reversal loading", Department of Civil Engineering ,Mepco Schlenk Engineering College, Sovakasi, India.
- 16. Thomas Kang, Choi, D.-, D. U , "Large-Scale Experiments and Thorough Data Analysis of Headed Bars in Beam-Column Joints"
- 17. Yuan-Zhou Wu, Heng-Lin Lv, Shu-Chun Zhou, Zhong-Nian Fang, "Degradation model of bond performance between deteriorated concrete and corroded deformed steel bars", China, 2016
- 18. Mathias Michal, Manfred Keuser, George Solomos, Marco Peroni, Martin Larcher, and Beatriz Esteban, Experimental investigation of bond strength under high loading rates", Germany
- 19. www.episkevesold.civil.upatras.gr/ergasies%202005/11.pdfl Γιαννόπουλος, "Βλάβες από τον σεισμό της Αθήνας 1999"
- 20. www.teetrip.tee.gr/giannop\_1.pdf Γιαννόπουλος Ιωάννης & Γιαννόπουλος Πλούταρχος ,"Βλάβες από σεισμό σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα"
- 21.eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TME266/ELASTIC\_CURVE\_ 1.pdf Παναγιώτης Ρουσής "Γεωμετρικές Μέθοδοι Υπολογισμού Μετακινήσεων" 2009.
- 22.<u>www.eng.ucy.ac.cy/CEE220/cee220\_Pres6.pdf</u> Πέτρος Κωμοδρόμος, 2004
- 23. seismicz.weebly.com/alphasigmatauomicronchi943alphaalphagammakappaupsilonrho974sigmaepsilonomeganu.html