



Μαρία Στρατουρά

Διπλωματούχος Πολιτικός
Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων

Μ.Δ. Κωτσοβός
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιουνιος 2012

**Βελτίωση Αντισεισμικής Συμπεριφοράς με τη
χρήση Οπλισμού χωρίς Συνάφεια**

Μεταπτυχιακή Εργασία



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος

Βελτίωση Αντισεισμικής Συμπεριφοράς με τη χρήση Οπλισμού χωρίς Συνάφεια

Μεταπτυχιακή Εργασία

της Στρατούρα Μαρία

Επιβλέπων: Μιχαήλ Δ. Κωτσοβός, καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από τριμελή επιτροπή στις Ιουνίου 2012

.....
Μ.Δ Κωτσοβός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Σπυλιόπουλος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Βουγιούκας
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα. Ιουνιος 2012

Η παρούσα Μεταπτυχιακή (Διπλωματική) Εργασία με τίτλο «Βελτίωση Αντισεισμικής Συμπεριφοράς με τη χρήση Οπλισμού χωρίς Συνάφεια» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών».

Επιβλέπων της, διετέλεσε ο καθηγητής Μιχαήλ Δ. Κωτσοβό, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγησή του και την έμπρακτη βοήθειά του. Η άριστη επιστημονική του κατάρτιση, σε συνδυασμό με την αδιάλειπτη προθυμία να με βοηθήσει με κάθε τρόπο, ήταν πρωταρχικής σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Στην πραγματοποίηση των πειραμάτων, σημαντική ήταν η συμβολή του διδάκτορα Γερασίμου Κωτσοβού, τον οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος, για την αδιάκοπη βοήθειά του, την έμπρακτη αλλά κ την ηθική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Γενικότερα αξίζουν πολλές ευχαριστίες στο τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου, αναφερόμενοι, φυσικά, στον Π. Παπανδρέου, που συνέβαλε τα μέγιστα στην εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας .

Θα ήταν παράλειψη μου, να μην ευχαριστήσω προσωπικά τον αδελφό μου Κυριάκο Στρατουρά για την πολύτιμη βοήθεια του στο εργαστήριο για την υλοποίηση-σχεδιασμό των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, που με το δικό τους τρόπο ο καθένας, με ενθάρρυναν και με στήριζαν καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω αυτούς που πάντα στέκονται δίπλα μου, τόσο στις καλές όσο και στις κακές στιγμές, τους γονείς μου Χαράλαμπο και Παναγιώτα.

Αθήνα, Ιούνιος 2012

Στρατουρά Χαρ. Μαρία

.....
Στρατουρά Μαρία
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρία Χ. Στρατουρά, 2012
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να τηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα.....	1
Σχήματα	vii
Πρόλογος	1
Εισαγωγή	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
Μεθοδολογία Σχεδιασμού	6
2.1 Θεωρία της Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης	6
2.1.1 Εισαγωγή	6
2.1.2 Λειτουργία Αμφιέριστης Δοκού	7
2.1.3 Συμβολή Αρηγμάτων και Ρηγματωμένου Σκυροδέματος	10
2.1.4 Αίτια Αστοχίας	12
2.1.5 Κατάταξη Ειδών Αστοχίας.....	15
2.1.6 Συμπεράσματα.....	18
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	19
2.2.1 Κριτήριο Αστοχίας	21
2.2.2 Υπολογισμός Διαμήκη Οπλισμού	22
2.2.3 Γραμμικά Στοιχεία Κατηγορίας II.....	23
2.3 ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ	29
2.3.1 Εισαγωγή	29
2.3.2 Αντοχή Διαμήκους Θλιπτήρα και Ελκυστήρα	30
2.3.3 Αντοχή Διαγώνιων Θλιπτήρων και Εγκάρσιων Ελκυστήρων.....	31
2.3.4 Στοιχεία στα οποία Απαιτείται κατά το Σχεδιασμό Οπλισμός Διάτμησης ...	33
2.3.5 Θεμελιώδεις Παραδοχές.....	35
2.3.5 Πλαστιμότητα και Τρόποι που Επιτυγχάνεται	36
2.3.6 Ο Μηχανισμός και ο Οπλισμός Περισφίξεως	38
Πειραματική Διαδικασία.....	43
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
3.1.1 Περιγραφή Δοκιμών	43

3.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	44
3.2.1	Διεξαγωγή Πειράματος.....	47
3.3	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	48
3.4	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	49
3.4.1	Διάταξη Οπλισμών από Σχεδιασμό	51
	Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών	52
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	52
4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	53
4.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	54
4.3.1	Δοκίμιο B-CFP-O	54
4.3.2	Δοκίμιο B-EC-O	56
4.3.3	Δοκίμιο NB-CFP-0	58
4.3.4	Δοκίμιο B-CFP-N	60
4.3.5	Δοκίμιο B-EC-N	62
4.3.6	Δοκίμιο NB-CFP-N	64
	Συμπεράσματα	66
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	68
	Μεθοδολογία Σχεδιασμού ΤΘΔ.....	68
A.1	Υπολογισμός Ροπών Αντοχής Διατομών	68
A.2	Υπολογισμός Ροπών Αντοχής Διατομών	69
A.2.1	Υπολογισμοί δοκιμίων NB-CFP-O	70
A.2.2	Υπολογισμοί δοκιμίων B-CFP-N και NB-CFP-N, όπου N= 280KN.....	71
A.3	Υπολογισμός ροπής διαρροής.....	71
A.3.1	Υπολογισμοί δοκιμίων NB-CFP-O	72
A.3.2	Υπολογισμοί δοκιμίων B-CFP-N και NB-CFP-N, όπου N= 280KN.....	73
A.4	Σχεδιασμός έναντι τέμνουσας.....	73
A.4.1	Υπολογισμοί δοκιμίων NB-CFP-O	74
A.4.2	Υπολογισμοί δοκιμίων B-CFP-N και NB-CFP-N, όπου N= 280KN.....	76
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	
	ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ	77
B.1	Διαστασιολόγηση για τέμνουσα δύναμη.....	77

B.1.1	Υπολογισμοι για B-EC-0	77
B.1.2	Υπολογισμοί για B-EC-N	78
B.2	Ο Μηχανισμός και ο Οπλισμός Περισφίξεως	78
B.2.1	Υπολογισμοί για B-EC-0	78
B.2.2	Υπολογισμοί για B-EC-N	79
	Βιβλιογραφία	81

ΣΧΗΜΑΤΑ

ΣΧΗΜΑ 2.1	Σχηματική απεικόνιση ρηγματώσεως και παραμορφωμένου σχήματος αμφιέριστης δοκού λίγο πριν την αστοχία.	7
ΣΧΗΜΑ 2.2	Εσωτερικές δράσεις ισοδύναμες με την καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη σε διατομή που περιλαμβάνει ρωγμή.	8
ΣΧΗΜΑ 2.3	Ισοροπία τμήματος της δοκού μεταξύ δύο διατομών που περιλαμβάνουν διαδοχικές ρωγμές: (α) μεταβολή καμπτικών ροπών, (β) μεταβολή διαμήκων δράσεων, (γ) δύναμη συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος.	8
ΣΧΗΜΑ 2.4	Μηχανισμός μεταφοράς εξωτερικού φορτίου στη στήριξη: (α) δράση προβόλου, (β) αλλαγή στη διεύθυνση της θλιπτικής δύναμης.	10
ΣΧΗΜΑ 2.5	Πειραματικές καμπύλες τάσεως-ανηγμένης παραμορφώσεως σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη.	11
ΣΧΗΜΑ 2.6	Επίδραση τριβής που προκαλείται από διάφορες πειραματικές μεθόδους στη διεπιφάνεια δοκιμίου σκυροδέματος και πλάκας φόρτισης, στις καμπύλες θλιπτικής τάσης-θλιπτικής ανηγμένης παραμόρφωσης του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη.	11
ΣΧΗΜΑ 2.7	«Αρηγμάτωτο» τμήμα αμφιέριστης δοκού (υπό τη δράση του εγκάρσιου φορτίου και των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνειά του με το ρηγματωμένο τμήμα της δοκού).	12
ΣΧΗΜΑ 2.8	Επίδραση τοπικής απώλειας συνάφειας στην εφελκυστική δύναμη που αναλαμβάνει ο καμπτικός χάλυβας.	14
ΣΧΗΜΑ 2.9	Ανακατανομή εσωτερικών δυνάμεων λόγω απώλειας συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και διαμήκη οπλισμού.	15
ΣΧΗΜΑ 2.10	Χαρακτηριστικές κατηγορίες συμπεριφοράς αμφιέριστης δοκού στην οριακή κατάσταση αστοχίας της.	16
ΣΧΗΜΑ 2.11	(α) Φυσικό προσομοίωμα («χτένα») αμφιέριστης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εγκάρσιο φορτίο.	20
ΣΧΗΜΑ 2.11	(β) Επίδραση αξονικού φορτίου στο φυσικό προσομοίωμα της δοκού.	21
ΣΧΗΜΑ 2.12	Υπολογισμός καμπτικής αντοχής του φυσικού προσομοιώματος της δοκού.	23
ΣΧΗΜΑ 2.13	Οριακή κατάσταση αστοχίας – επισήμανση των κρίσιμων μηκών.	24
ΣΧΗΜΑ 2.14	Απώλεια της συνάφειας.	26
ΣΧΗΜΑ 2.15	Εσωτερικές δυνάμεις καθ' ύψος της διατομής.	30
ΣΧΗΜΑ 2.16	«λοιποί» μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας.	32
ΣΧΗΜΑ 2.17	Συμβολισμοί για δομικά στοιχεία καταπονούμενα από τέμνουσα δύναμη.	33

ΣΧΗΜΑ 2.18	Η περίσφιγξη του σκυροδέματος σε ορθογωνικές διατομές που επιτυγχάνεται μέσω καμπύλωσης των γωνιών.	39
ΣΧΗΜΑ 2.19	Διάταξη των συνδετήρων των δοκών.....	40
ΣΧΗΜΑ 2.20	Χαρακτηριστικά περίσφιγξης.....	41
ΣΧΗΜΑ 3.1	Πειραματική διάταξη.....	45
ΣΧΗΜΑ 3.2	Ιστορία Εναλασσόμενης φόρτισης.....	47
ΣΧΗΜΑ 3.3	Πειραματικά εντατικά μεγέθη.....	49
ΣΧΗΜΑ 3.4	Διαστάσεις (σε mm) και οπλισμός δοκού που χρησιμοποιήθηκε για τις φορτίσεις.....	51
ΣΧΗΜΑ 4.1	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P/Pf – μ), <i>B-CFP-O</i>	54
ΣΧΗΜΑ 4.2	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P/Pf – μ), <i>B-EC-O</i>	56
ΣΧΗΜΑ 4.3	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P/Pf – μ), <i>NB-CFP-O</i> . ..	58
ΣΧΗΜΑ 4.4	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P/Pf – μ), <i>B-CFP-N</i> . ..	60
ΣΧΗΜΑ 4.5	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P/Pf – μ), <i>B-EC-N</i>	62
ΣΧΗΜΑ 4.6	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P/Pf – μ), <i>N B-CFP-N</i> . ..	64
ΣΧΗΜΑ Α.4	Κατανομή εντατικών μεγεθών του φορέα.....	74

ΠΙΝΑΚΕΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1	Βασικές τιμές του συντελεστή φ_0 (EC8, Table 5.1).	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1	Συνοπτικός κατάλογος δοκιμίων και οι αντίστοιχες τιμές εγκαρσίου οπλισμού στα κρίσιμα μήκη.	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2	Χαρακτηριστικές τιμές χάλυβα οπλισμών.....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1	Υπολογιστικές - Πειραματικές τιμές ροπών αντοχής - διαρροής και αστοχίας.	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2	Οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στο μέγιστο φορτίο της τελευταίας ομάδας τριών ολοκληρωμένων κύκλων φόρτισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μ	53

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σύμμεικτες κατασκευές αποτελούμενες από σκυρόδεμα και χάλυβα με τη μορφή ράβδων ενσωματωμένων στο σκυρόδεμα. Η εκτεταμένη και επιτυχής χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος ως δομικού υλικού οφείλεται, αφ' ενός, στην ευχέρεια παραγωγής του, στο μικρό κόστος του και στη δυνατότητα μόρφωσής του σε οποιοδήποτε σχήμα και, αφ' ετέρου, στην καλή συνεργασία σκυροδέματος και χάλυβα μέσω της οποίας αλληλοσυμπληρώνονται τα πλεονεκτήματα των δύο υλικών. Το σκυρόδεμα παρέχει προστασία στο χάλυβα έναντι διάβρωσης και πυρκαγιάς, στην δράση των οποίων ο χάλυβας είναι ευάλωτος, ενώ ο χάλυβας αναλαμβάνει (τοποθετούμενος κατάλληλα) τις εφελκυστικές δυνάμεις τις οποίες το σκυρόδεμα, λόγω της χαμηλής εφελκυστικής αντοχής του, αδυνατεί να αναλάβει. Λόγω της σύμμεικτης φύσης των κατασκευών από Ο.Σ., οι μέθοδοι σχεδιασμού διαφοροποιούνται από αυτές των κατασκευών με ομογενή υλικά και συνιστούν ιδιαίτερο γνωστικό αντικείμενο.

Η εργασία χωρίζεται σε πέντε κεφάλαια. Στο εισαγωγικό Κεφάλαιο 1 γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στο εξεταζόμενο πρόβλημα.

Το Κεφάλαιο 2 πραγματεύεται τις βάσεις σχεδιασμού συμφωνά με την μεθοδολογία της Τροχιάς Θλιπτικής Δύναμη και παρουσιάζει τους νέους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς Οπλισμένου Σκυροδέματος (EC2) και του Ευρωπαϊκού Αντισεισμικού σχεδιασμού (EC8).

Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται μια προσπάθεια περιγραφής της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή των έξι ισοστατικών δοκιμών. Επίσης, παρατίθενται οι αναλυτικές σχέσεις με βάση των οποίων γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές.

Το Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει την περιγραφή των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα εξεταζόμενα δοκίμια. Οι πειραματικές δοκιμές φόρτισης

περιγράφονται ξεχωριστά για τα δοκίμια ελέγχου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων και πινάκων. Ανά σειρά γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων προκειμένου να διευκολυνθεί η μετέπειτα εξαγωγή συμπερασμάτων.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω ακολουθούν τα συμπεράσματα της παρούσας Διατριβής Διπλώματος Ειδίκευσης, τα οποία παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5. Από την ανασκόπηση αυτή προκύπτει ότι οι εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί δεν καλύπτουν πλήρως την έκταση του προβλήματος. Βοηθούν ωστόσο στην εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων τα οποία δίνουν κατευθύνσεις για τον τρόπο που πρέπει να κινηθούν οι περαιτέρω έρευνες.

Στα Παραρτήματα Α' και Β' δίνεται αναλυτικά η πορεία καθώς και οι απαραίτητοι υπολογισμοί, συμφωνά με την μεθοδολογία της ΤΘΔ σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας και τέλος, δίνεται η πορεία υπολογισμών συμφώνα με τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς (EC2 – EC8).

Με βάση την παραπάνω πειραματική δραστηριότητα ανοίγονται σημαντικοί δρόμοι πάνω στην έρευνα που αφορά την εισαγωγή παραμέτρων που θα οδηγήσουν σε ασφαλέστερα συμπεράσματα και βελτίωση σχεδιασμού δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος.

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός του φέροντος οργανισμού μιας κατασκευής στην *Οριακή Κατάσταση Αστοχίας* βασίζεται στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής, γεγονός το οποίο οδηγεί σε λύσεις με επαρκές περιθώριο ασφαλείας έναντι αστοχίας της κατασκευής. Η υιοθέτηση αυτής της μεθόδου σχεδιασμού οφείλεται στην πεποίθηση ότι οδηγεί σε ασφαλείς έναντι αστοχίας κατασκευές, παράλληλα δε, σε οικονομικότερες λύσεις αφού οι ψηλές εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται στον φέροντα οργανισμό, κατά την οριακή αυτή κατάσταση, οδηγούν στην επιλογή των ελάχιστων δυνατών διατομών και του ελάχιστου απαιτούμενου οπλισμού.

Οι προσδοκίες που δημιούργησε η υιοθέτηση της λογικής των Οριακών Καταστάσεων Αστοχίας οδήγησαν στην ενσωμάτωσή της στους πλείστους ισχύοντες κανονισμούς, εντούτοις, ο πειραματικός έλεγχος δεν έχει δώσει αποτελέσματα που να δικαιώνουν την μέθοδο. Υπάρχει πληθώρα δημοσιευμένων πειραματικών εργασιών στις οποίες φαίνεται να υπάρχει απόκλιση μεταξύ των αναμενόμενων τιμών των εντατικών μεγεθών, που υπολογίστηκαν με τις ισχύουσες μεθόδους και της πραγματικής συμπεριφοράς κατά το πείραμα δίνοντας αποτελέσματα σε βάρος της ασφάλειας και της οικονομικότητας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ψαθυρή θραύση λόγω τέμνουσας, ενώ ο θεωρητικός υπολογισμός, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, είχε προβλέψει καμπτική αστοχία και πλαστική συμπεριφορά. Το αντίστροφο επίσης παρατηρήθηκε, δηλαδή ενώ ο υπολογισμός προέβλεπε αστοχία σε τέμνουσα για συγκεκριμένη τιμή

φόρτισης, το δοκίμιο παρουσίασε μεγαλύτερες αντοχές, σε κάποιες περιπτώσεις, μάλιστα, ξεπέρασε και την καμπτική αντοχή των θεωρητικών τιμών.

Οι παραπάνω αποκλίσεις μεταξύ προβλεπόμενης και πειραματικής αντοχής (ψαθυρή αστοχία, υποεκτίμηση ή και υπερεκτίμηση της φέρουσας ικανότητας) προκάλεσαν μια έντονη αμφισβήτηση της εγκυρότητας των ελληνικών κανονισμών (ΕΚΩΣ, ΕΑΚ) αλλά και, γενικότερα, του συνόλου των κανονισμών (BS 8110, ACI 318-83, CAS, CEB-FIP Model code κτλ) με κοινό θεωρητικό υπόβαθρο την λογική των Οριακών Καταστάσεων Αστοχίας. Το μέγεθος των αποκλίσεων βρέθηκε να είναι τόσο μεγάλο, που δεν θα μπορούσε παρά να αποδοθεί στην ανεπάρκεια του θεωρητικού υποβάθρου των παραπάνω μεθόδων υπολογισμού.

Πράγματι, το σύγγραμμα των Kotsinos & Pavlovic με τίτλο *structural concrete: Finite-element analysis for limit-state design (1995)*, στο οποίο έγινε διερεύνηση των αιτιών των αποκλίσεων, οδήγησε στην διαπίστωση ότι οι αποκλίσεις οφείλονται στην ανεπάρκεια της θεωρητικής βάσης των ισχυουσών μεθόδων υπολογισμού. Πιο συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι θεμελιώδεις παραδοχές των μεθόδων σχεδιασμού, που περιγράφουν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και το μηχανισμό αντοχής δομικών στοιχείων, έχουν υιοθετηθεί μετά από λανθασμένη ερμηνεία πειραματικών δεδομένων ή από την χρησιμοποίηση υποθέσεων οι οποίες, αν και ισχύουν για άλλα υλικά (όπως λ.χ. ο χάλυβας) με διαφορετική συμπεριφορά (όπως λ.χ. η ελαστική συμπεριφορά) και δεν είναι συμβιβαστές με την συμπεριφορά κατασκευών από σκυρόδεμα όταν το ασκούμενο φορτίο πλησιάσει τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Θα γίνει αναλυτικότερη αναφορά στην συνέχεια όσον αφορά τις λανθασμένες παραδοχές του ισχύοντος θεωρητικού υποβάθρου.

Μια νέα μεθοδολογία σχεδιασμού η οποία γίνεται μέσα στο πλαίσιο της λογικής των οριακών καταστάσεων συμπεριφοράς αλλά σε αντίθεση με τις ισχύουσες κανονιστικές μεθόδους δεν υιοθετά τις παραδοχές που γίνονταν μέχρι τώρα παραμένοντας, εντούτοις, συμβιβαστή με την συμπεριφορά του σκυροδέματος, είναι η μέθοδος που προτείνει η θεωρία της *Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης* (ΤΘΔ). Η θεωρία αυτή αντικαθιστά το κλασικό προσομοίωμα του δικτύωματος, που αποτελεί βάση των

ισχυουσών μεθόδων σχεδιασμού, με φυσικά προσομοιώματα που προκύπτουν από την αναγνώριση των τμημάτων ενός φορέα μέσω των οποίων τα εξωτερικά φορτία μεταφέρονται στις στηρίξεις, και επιβάλλει την ενίσχυση αυτών των τμημάτων με τρόπο που να προσδίδει στον φορέα επιθυμητές τιμές φέρουσας ικανότητας και πλαστιμότητας. Επειδή ακριβώς αυτά τα τμήματα περιβάλλουν τις τροχιές των εσωτερικών θλιπτικών δράσεων, ονομάστηκε και *Τροχιά της Θλιπτικής Δύναμης*. Αναλυτικότερα στην μέθοδο σχεδιασμού σύμφωνα με την ΤΘΔ θα αναφερθούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας Διπλώματος Διατριβής Ειδίκευσης, είναι να συνδράμει όσο αυτό είναι εφικτό στον έλεγχο της εγκυρότητας δυο μεθόδων σχεδιασμού και συγκεκριμένα της μεθοδολογίας Τ.Θ.Δ και τους Ευροκώδικες 2 και 8, που πραγματεύονται, την μελέτη- σχεδιασμό, υπολογισμό και διαστασιολόγηση κατασκευών από οπλισμένο και προεντεταγμένο σκυρόδεμα καθώς και τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών. Ταυτόχρονα, επιδιώκεται η σύγκριση μεταξύ των δυο παραπάνω μεθόδων, καθώς και η προσπάθεια διεξαγωγής συμπερασμάτων για τη βελτίωση των υπαρχουσών διατάξεων των κανονισμών.

2

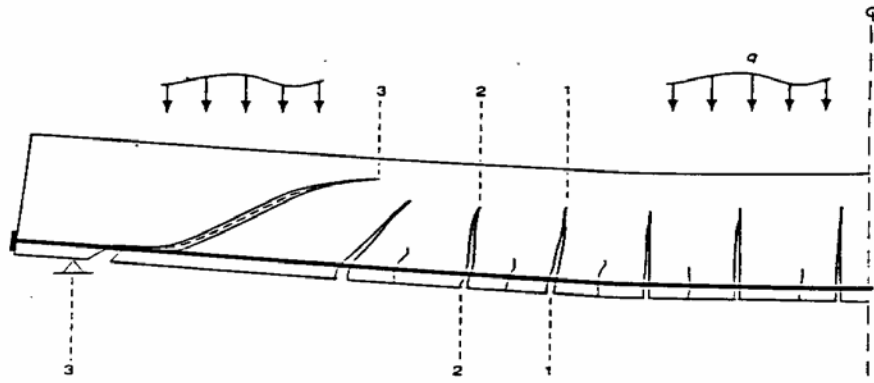
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

2.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

2.1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή της μεθοδολογίας της Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης, το θεωρητικό υπόβαθρο της ποιοτικής περιγραφής της λειτουργίας ενός δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα στην οριακή κατάσταση αστοχίας του, δίνοντας έμφαση στο μηχανισμό μεταφοράς ενός εξωτερικού φορτίου από το σημείο εφαρμογής του στις στηρίξεις. Το θεωρητικό υπόβαθρο βασίζεται στην περιγραφή της λειτουργίας της αμφιέριστης δοκού, λόγω άφθονων πειραματικών στοιχείων για τη συμπεριφορά της. Κύριο χαρακτηριστικό της λειτουργίας της είναι ότι τόσο η φέρουσα ικανότητα όσο και ο μηχανισμός αστοχίας της συνδέονται με το τμήμα της που περικλείει τις τροχιές των θλιπτικών τάσεων στο εσωτερικό της, λίγο πριν την απώλεια της φέρουσας ικανότητάς της. Έτσι προέκυψε και το όνομα της αντίστοιχης θεωρίας περιγραφής της. Η ΤΘΔ, αποδεικνύεται ότι περιγράφει ικανοποιητικά τα αίτια που υπαγορεύουν την συμπεριφορά αμφιέριστων δοκών, με ένα τρόπο που είναι συμβιβαστός με όλα τα πειραματικά στοιχεία που έχουν δημοσιευθεί μέχρι σήμερα.

2.1.2 Λειτουργία Αμφιέρειστης Δοκού



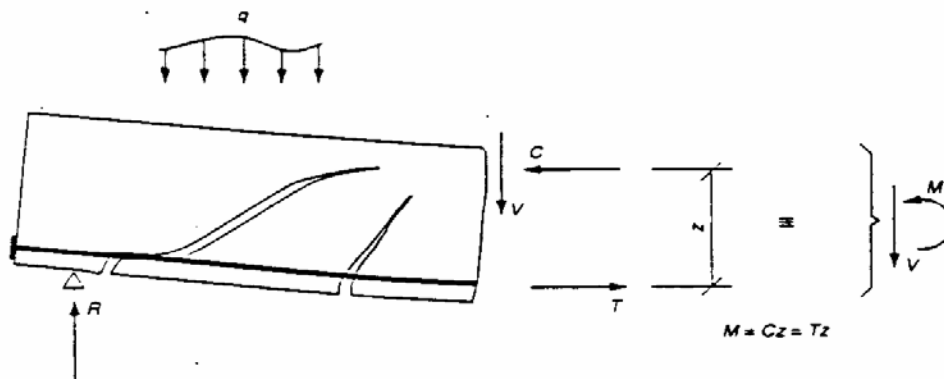
ΣΧΗΜΑ 2. 1 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΛΙΓΟ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

ΣΧΗΜΑ 2.1 Σχηματική απεικόνιση ρηγματώσης και παραμορφωμένου σχήματος αμφιέρειστης δοκού λίγο πριν την αστοχία.

Από τη φυσική συμπεριφορά της αμφιέρειστης δοκού υπό εγκάρσια φόρτιση, όπως φαίνεται και στο **(Σχήμα 2.1)**, προκύπτει ότι η ρηγματώσή της καλύπτει ένα μεγάλο τμήμα της δοκού και χαρακτηρίζεται τόσο από κατακόρυφες όσο και από κεκλιμένες ρωγμές, οι οποίες, ξεκινώντας από το κάτω πέλμα, προεκτείνονται στον κορμό της δοκού, σταματώντας σε μικρή απόσταση από το άνω πέλμα της. Ιδιαίτερα όταν η αστοχία της δοκού συνδέεται με το σχηματισμό κεκλιμένων ρωγμών, οι ρωγμές αυτές διεισδύουν στην θλιβόμενη ζώνη και προεκτείνονται προς την στήριξη, κατά μήκος του διαμήκη οπλισμού, καταστρέφοντας τη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα.

Ουσιαστικά λοιπόν το σκυρόδεμα παραμένει αρηγμάτωτο μόνο σε ένα σχετικά μικρό τμήμα της δοκού. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει αφενός μεν τις ακραίες περιοχές της δοκού, μέχρι τη βαθιά κεκλιμένη ρωγή που σχηματίζεται πλησιέστερα στις στηρίξεις, αφετέρου δε μια λεπτή σχετικά ζώνη, μεταβλητού πάχους, που σχηματίζεται μεταξύ των κορυφών των ρωγμών και του άνω πέλματος και ενώνει τις παραπάνω αρηγμάτωτες ακραίες περιοχές.

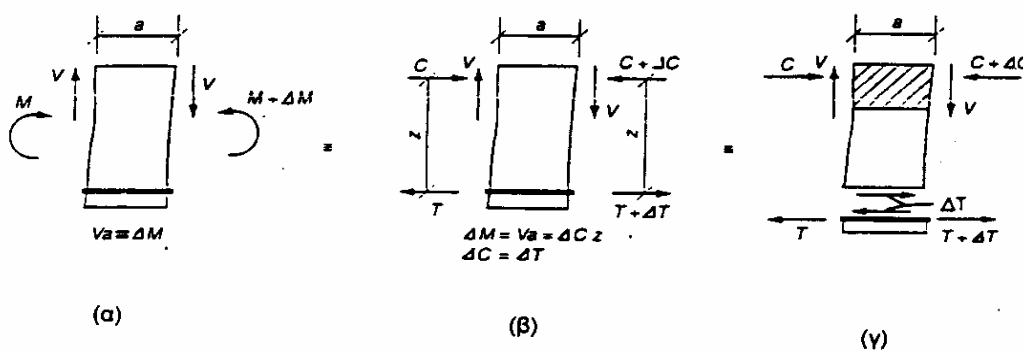
Παρά την εκτεταμένη ρηγματώση η δράση δοκού, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μεταφορά φορτίου στις στηρίξεις, επιτυγχάνει τον προορισμό της.



ΣΧΗΜΑ 2.2 Εσωτερικές δράσεις ισοδύναμες με την καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη σε διατομή που περιλαμβάνει ρωγή.

Από την εσωτερική ένταση σε κάθε διατομή της δοκού (*Σχήμα 2.2*), προκύπτει ότι οι αξονικές εσωτερικές δυνάμεις αναπτύσσουν μία δράση ισοδύναμη με την καμπτική ροπή λόγω του εξωτερικού φορτίου, ενώ η τέμνουσα δύναμη είναι ισοδύναμη με τη συνισταμένη των εξωτερικών εγκάρσιων δυνάμεων που ασκούνται στο τμήμα της δοκού αριστερά της αντίστοιχης διατομής.

Η σχέση μεταξύ αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων μπορεί να προκύψει από τη θεώρηση των συνθηκών ισορροπίας ενός τμήματος της δοκού μεταξύ δύο διατομών που περιλαμβάνουν διαδοχικές ρωγμές (*Σχήμα 2.3*).

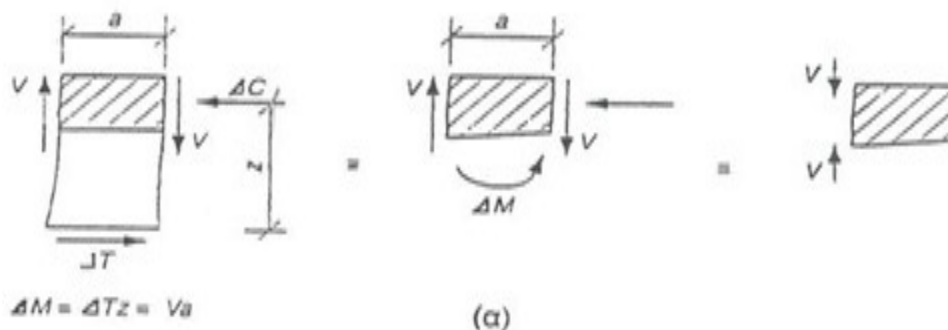


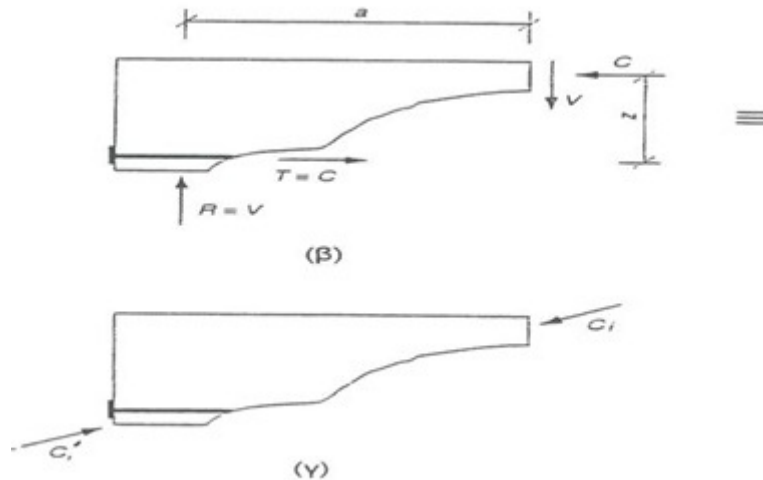
ΣΧΗΜΑ 2.3 Ισορροπία τμήματος της δοκού μεταξύ δύο διατομών που περιλαμβάνουν διαδοχικές ρωγμές: (α) μεταβολή καμπτικών ροπών, (β) μεταβολή διαμήκων δράσεων, (γ) δύναμη συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος.

Η δράση του ζεύγους των τεμνουσών δυνάμεων στις ακραίες διατομές του παραπάνω στερεού αντισταθμίζεται από τη μεταβολή της καμπτικής ροπής μεταξύ των διατομών αυτών. Η μεταβολή αυτή της καμπτικής ροπής οφείλεται κυρίως στην μεταβολή (μέσα στο διάστημα μεταξύ των ακραίων διατομών του στερεού) του μεγέθους των αξονικών εσωτερικών δυνάμεων, δηλαδή της θλιπτικής δύναμης που ασκείται στο σκυρόδεμα και της εφελκυστικής δύναμης που αναλαμβάνει ο χάλυβας.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής του μεγέθους των παραπάνω εσωτερικών δυνάμεων είναι η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, μέσω της οποίας ένα τμήμα της εφελκυστικής δύναμης που ασκείται στον χάλυβα μεταβιβάζεται στο σκυρόδεμα (**Σχήμα 2.3**). Η δύναμη συνάφειας είναι η μοναδική «εξωτερική» δύναμη που ακείται σε κάθε λωρίδα σκυροδέματος μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών, δεδομένου ότι στην οριακή κατάσταση αστοχίας της δοκού δεν αναπτύσσονται στις επιφάνειες των ρωγμών δυνάμεις λόγω «εμπλοκής αδρανών», ενώ η «δράση βλήτρου», ακόμα κι αν υπάρχει είναι αμελητέα.

Η παραπάνω λωρίδα σκυροδέματος αποτελεί ουσιαστικά ένα «πρόβολο», πακτωμένο στην θλιπτική ζώνη της δοκού, ο οποίος υπόκειται στη δράση «τέμνουσας» δύναμης κατά μήκος της διεπιφάνειας σκυροδέματος και χάλυβα. Η καμπτική ροπή που προκαλείται, εξισορροπεί την δράση του ζεύγους των τεμνουσών δυνάμεων στην θλιβόμενη ζώνη της δοκού. Ταυτόχρονα, η κάμψη του «προβόλου» αποτελεί τον μηχανισμό μεταφοράς του εξωτερικού φορτίου με την μορφή τέμνουσας δύναμης, μεταφέρεται από το σημείο εφαρμογής του σε μια απόσταση ίση με το διάστημα μέσα στο οποίο διατηρείται η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα (**Σχήμα 2.4**).



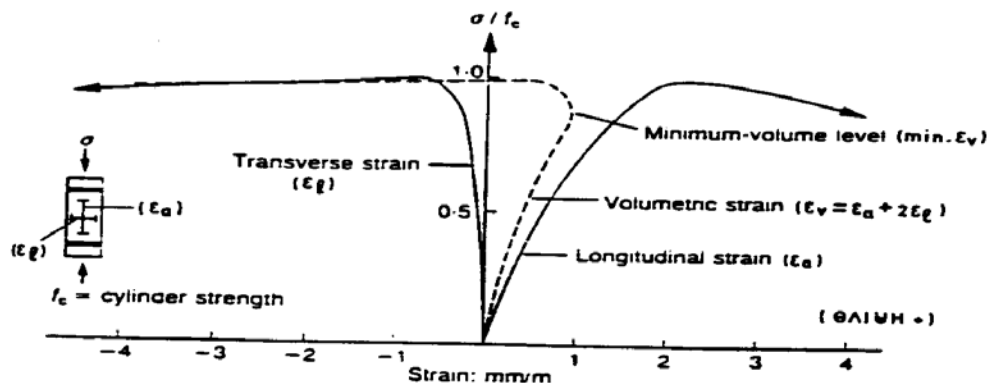


ΣΧΗΜΑ 2.4: Μηχανισμός μεταφοράς εξωτερικού φορτίου στη στήριξη: (α) δράση προβόλου, (β)αλλαγή στη διεύθυνση της θλιπτικής δύναμης.

2.1.3 Συμβολή Αρηγμάτωτου και Ρηγματωμένου Σκυροδέματος

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι στην οριακή κατάσταση αστοχίας, η συμβολή του αρηγμάτωτου σκυροδέματος αποτελεί ουσιαστικά την συνολική συμβολή του σκυροδέματος στην ανάληψη του εξωτερικού φορτίου στη δοκό, αφού αναλαμβάνει τόσο την αξονική θλιπτική δύναμη, όσο και την τέμνουσα λόγω κάμψης της δοκού. Το μεγαλύτερο τμήμα της τέμνουσας αυτής, οι ισχύοντες κανονισμοί θεωρούν ότι αναλαμβάνεται από το ρηγματωμένο σκυροδέμα, μέσω της «εμπλοκής αδρανών» και της «δράσης βλήτρου»! Η εφελκόμενη ζώνη της δοκού αναλαμβάνει μια τιμή της τάξης του 5-10 % της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη.

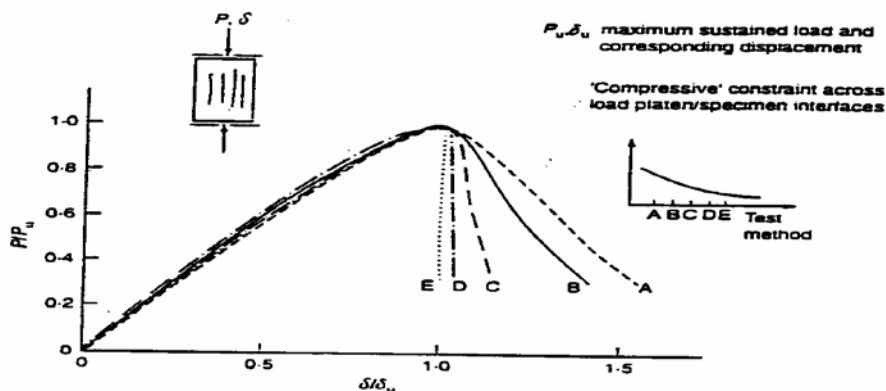
Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγεί και η θεώρηση του διαγράμματος τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων, που περιγράφει την συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη όπως δείχνει στα **Σχήματα 2.5** και **2.6**.



ΣΧΗΜΑ 2.5 Πειραματικές καμπύλες τάσεως-ανηγμένης παραμορφώσεως σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη.

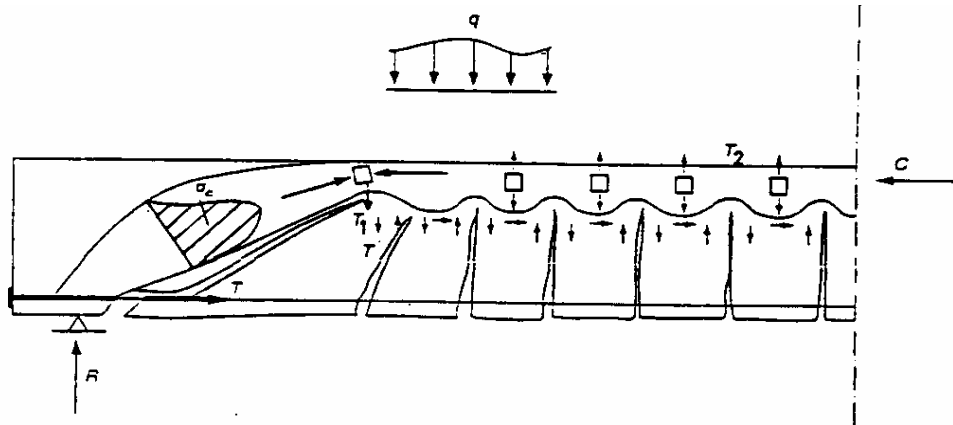
Ο ανοδικός κλάδος περιγράφει την συμπεριφορά του αρηγμάτωτου σκυροδέματος, ενώ ο φθιτός κλάδος την αντίστοιχη του ρηγματωμένου, όπου όπως προκύπτει πειραματικά, υποδηλώνει μια άμεση και πλήρη απώλεια της φέρουσας ικανότητας του υλικού.

Βασικό πλεονέκτημα του ρηγματωμένου σκυροδέματος, σε αντίθεση με το αρηγμάτωτο, είναι ο σχηματισμός «προβόλων» άοπλου σκυροδέματος μεταξύ διαδοχικών καμπτικών ή κεκλιμένων ρωγμών. Δημιουργείται έτσι ένας μηχανισμός με σημαντική συμβολή στην μεταφορά του εξωτερικού φορτίου στις στηρίξεις, μέσω του αρηγμάτωτου τμήματος της δοκού.



ΣΧΗΜΑ 2.6 Επίδραση τριβής που προκαλείται από διάφορες πειραματικές μεθόδους στη διεπιφάνεια δοκιμίου σκυροδέματος και πλάκας φόρτισης, στις καμπύλες θλιπτικής τάσης-θλιπτικής ανηγμένης παραμόρφωσης του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη.

2.1.4 Αίτια Αστοχίας



ΣΧΗΜΑ 2.7 «Αρηγμάτωτο» τμήμα αμφιέρειστης δοκού (υπό τη δράση του εγκάρσιου φορτίου και των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνειά του με το ρηγματωμένο τμήμα της δοκού).

Το (Σχήμα 2.7) παρουσιάζει το αρηγμάτωτο τμήμα της δοκού ως ελεύθερο στερεό, απομονωμένο από το υπόλοιπο τμήμα της, μαζί με το εξωτερικό φορτίο που ασκείται στο άνω πέλμα της και τις εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην τομή κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο τμημάτων της, του αρηγμάτωτου και του ρηγματωμένου. Το σχήμα παρουσιάζει επίσης ενδεικτικές θέσεις περιοχών όπου είναι δυνατόν να αναπτυχθούν εφελκυστικές τάσεις μέσα στο παραπάνω αρηγμάτωτο τμήμα.

Γίνεται φανερό ότι μόνο μία λωρίδα αυτού του τμήματος, που αποτελεί ομαλή συνέχεια της θλιβόμενης ζώνης της δοκού, χρησιμεύει για την μεταφορά της εσωτερικής θλιπτικής δράσης στη στήριξη. Από το υπόλοιπο του τμήματος, το κάτω μέρος παρέχει το απαιτούμενο μήκος αγκυρώσεως για τον διαμήκη οπλισμό, ενώ το άνω μέρος παραμένει στην ουσία εντατικώς αδρανές, με την έννοια ότι δεν συμμετέχει στην μεταφορά των εσωτερικών δράσεων στη στήριξη, παρόλο που μέσα σε αυτό αναπτύσσονται παρασιτικές τάσεις μικρού μεγέθους και τυχαίου προσανατολισμού.

Εκτός από την συμβολή του (μέσω «κάμψης προβόλου») στην μεταφορά του εξωτερικού φορτίου στη στήριξη, το ρηγματωμένο τμήμα της δοκού, που παρεμβάλλεται μεταξύ του αρηγμάτωτου τμήματος και του διαμήκη οπλισμού, λειτουργεί και ως σύνδεσμος των δύο αυτών τμημάτων (δηλαδή του αρηγμάτωτου σκυροδέματος και του χάλυβα), ο οποίος ταυτόχρονα, διατηρεί την μεταξύ τους απόσταση πρακτικώς σταθερή.

Η αναζήτηση των αιτίων της αστοχίας της δοκού θα πρέπει να ξεκινήσει από τη διαπίστωση, ότι η συνολική συνεισφορά του σκυροδέματος στην φέρουσα ικανότητα της δοκού γίνεται από το αρηγμάτωτο τμήμα, με την προϋπόθεση ότι η δοκός σχεδιάστηκε ώστε η αστοχία της να μην οφείλεται σε απώλεια της φέρουσας ικανότητας του οπλισμού, τότε οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αναζήτηση των αιτίων αστοχίας επικεντρώνεται στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα και συγκεκριμένα στις περιοχές εκείνες της θλιβόμενης ζώνης όπου είναι δυνατή η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων. Τέτοιες περιοχές είναι οι ακόλουθες :

(α) Περιοχές αλλαγής της διεύθυνσης της τροχιάς της συνισταμένης των θλιπτικών τάσεων:

Μια εγκάρσια εφελκυστική δύναμη (T_1) πρέπει να αναπτύσσεται στη περιοχή όπου η παραπάνω τροχιά αλλάζει διεύθυνση, ως αντίδραση στη δράση της κατακόρυφης συνιστώσας της συνισταμένης των κεκλιμένων θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στο ακραίο τμήμα της δοκού. Η κατακόρυφη αυτή συνιστώσα τείνει να αποκολλήσει το άνω μέρος της θλιβόμενης ζώνης από το υπόλοιπο τμήμα της δοκού, προκαλώντας μια περίπου οριζόντια ρωγμή στην περιοχή της αλλαγής των τροχιών των θλιπτικών τάσεων (Η αλλαγή της τροχιάς των θλιπτικών τάσεων απαιτεί, για λόγους ισορροπίας, την ανάπτυξη μιας δύναμης, κάθετης στην τροχιά, που διχοτομεί τη γωνία που σχηματίζει η μεταβολή της τροχιάς).

(β) Διεπιφάνεια μεταξύ αρηγμάτωτου και ρηγματωμένου σκυροδέματος:

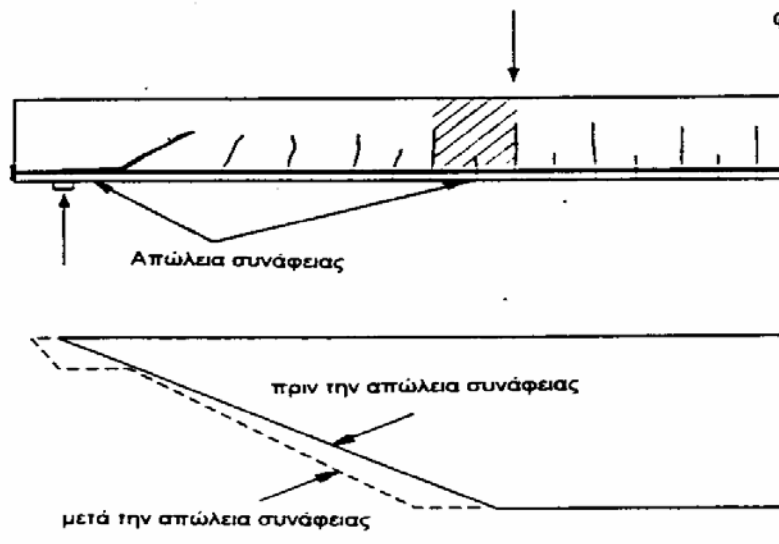
Όπως φαίνεται και στο **(Σχήμα 2.7)**, εφελκυστικές (με την έννοια ότι τείνουν να απομακρύνουν το ρηγματωμένο από το αρηγμάτωτο τμήμα) δυνάμεις αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια αυτή λόγω της «κάμψης προβόλων» της ρηγματωμένης ζώνης. Αστοχία στην περιοχή αυτή μπορεί να συμβεί, όχι μόνο διότι η εφελκυστική δράση λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή της, αλλά και επειδή η κεκλιμένη ρωγμή στην περιοχή αυτή έχει τον πλέον ευνοϊκό προσανατολισμό.

(γ) Περιοχές παράπλευρες στις διατομές όπου υπάρχουν κύριες καμπτικές ή κεκλιμένες ρωγμές:

Η διόγκωση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη των διατομών που περιλαμβάνουν κύριες ρωγμές προκαλεί εγκάρσιο εφελκυσμό (δύναμη T_2) στις παράπλευρες περιοχές.

(δ) Περιοχές σημειακών φορτίων:

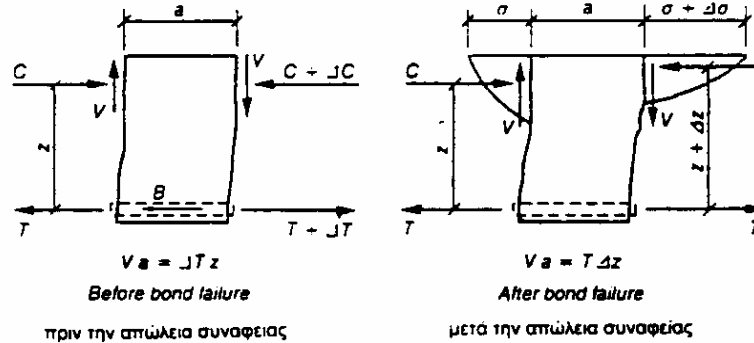
Οι περιοχές αυτές περιλαμβάνουν συνήθως διατομές στις οποίες ασκούνται μεγάλες τέμνουσες δυνάμεις και μεγάλες καμπτικές ροπές (Σχήμα 2.8).



ΣΧΗΜΑ 2.8 Επίδραση τοπικής απώλειας συνάφειας στην εφελκυστική δύναμη που αναλαμβάνει ο καμπτικός χάλυβας.

Στην οριακή κατάσταση αστοχίας της δοκού είναι δυνατόν να καταστραφεί η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και εφελκυόμενου οπλισμού σε μια τέτοια περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών καμπτικών ρωγμών (Σχήμα 2.9). Από το σχήμα φαίνεται ότι το γεγονός αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε μια προέκταση της δεξιάς καμπτικής ρωγμής που μειώνει το βάθος της θλιβόμενης ζώνης, με την αύξηση του μοχλοβραχίονα των αξονικών εσωτερικών δυνάμεων, με αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης των θλιπτικών τάσεων σε σχέση με τις τάσεις στην αριστερή πλευρά του στοιχειώδους τμήματος, πράγμα που οδηγεί σε μεγαλύτερη διόγκωση του σκυροδέματος. Η διόγκωση αυτή του

σκυροδέματος προκαλεί εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις στις παράπλευρες περιοχές όπως και στην περίπτωση (γ).



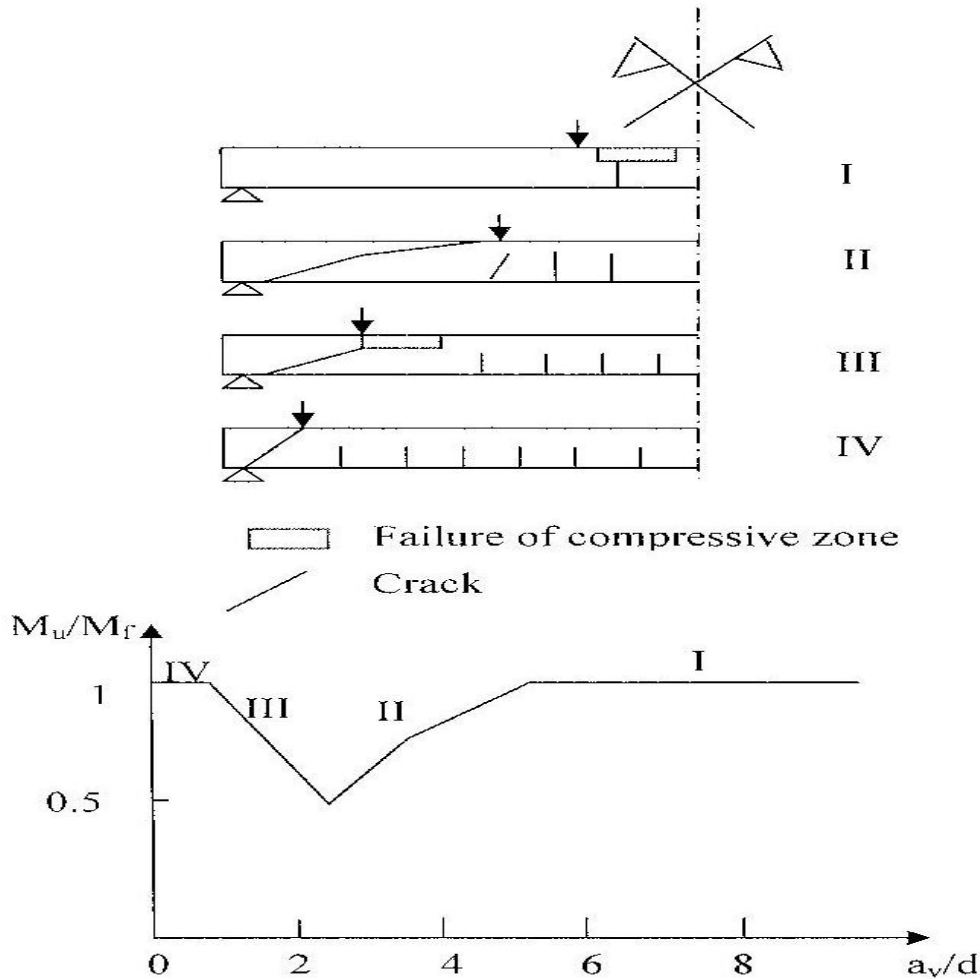
ΣΧΗΜΑ 2.9 Ανακατανομή εσωτερικών δυνάμεων λόγω απώλεια συναφείας μεταξύ σκυροδέματος και διαμήκη οπλισμού.

2.1.5 Κατάταξη Ειδών Αστοχίας

Οι βασικές διαφορές της παραπάνω περιγραφής λειτουργίας της δοκού, ως προς τις επικρατούσες αντιλήψεις, συνοψίζονται ως εξής:

1. Η φέρουσα ικανότητα της δοκού οφείλεται στον διαμήκη οπλισμό και στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα, μέσω του οποίου το εξωτερικό φορτίο μεταφέρεται στις στηρίξεις. Στη μεταφορά αυτή συμβάλλει, μέσω της «κάμψης προβόλου», το ρηγματωμένο σκυρόδεμα, το οποίο όμως δεν έχει ουσιαστική συμβολή στη φέρουσα ικανότητα της δοκού.
2. Αστοχία της δοκού προκαλείται από την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα, που είναι εγκάρσιες στη διεύθυνση της τροχιάς των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της κάμψης της δοκού.

Η πρώτη, προκύπτει ευθέως, ύστερα από σειρές πειραματικών στοιχείων και διαπιστώσεων.



ΣΧΗΜΑ 2.10 Χαρακτηριστικές κατηγορίες συμπεριφοράς αμφιέρειστης δοκού στην οριακή κατάσταση αστοχίας της.

Το (Σχήμα 2.10) , στο οποίο γίνεται μια σχηματική παρουσίαση της σχέσης μεταξύ της φέρουσας ικανότητας και του διατμητικού μήκους (a_v), για διάφορα ποσοστά (ρ) διαμήκη οπλισμού ($\rho = A_s/bd$, όπου A_s το εμβαδόν της διατομής του διαμήκη οπλισμού και b, d , το πλάτος και το στατικό ύψος της διατομής αντίστοιχα), για την περίπτωση αμφιέρειστης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα χωρίς συνδετήρες υπό διπλό σημειακό φορτίο, οδηγεί στην παρακάτω ταξινόμηση της συμπεριφοράς της δοκού ανάλογα με την τιμή του ανηγμένου διατμητικού μήκους (a_v/d):

- **Κατηγορία I**

Αντιστοιχεί σε σχετικά μεγάλες τιμές του διατμητικού μήκους ($a_v/d > 5$) και χαρακτηρίζεται από αστοχία σε κάμψη.

- **Κατηγορία II**

Αντιστοιχεί σε τιμές του ανηγμένου διατμητικού μήκους μεταξύ περίπου 2,5 και 5 ($2,5 < a_v/d < 5$) και χαρακτηρίζεται από ψαθυρή αστοχία που σχετίζεται με το σχηματισμό μιας βαθιάς κεκλιμένης ρωγμής μέσα στο διατμητικό μήκος. Ψαθυρή αστοχία μπορεί επίσης να συμβάλει ως αποτέλεσμα περίπου οριζόντιας ρηγμάτωσης της θλιβόμενης ζώνης στην περιοχή του σημειακού φορτίου, που συμβαίνει ανεξάρτητα της ρηγμάτωσης του κορμού.

Ένας άλλος τρόπος αστοχίας των δοκών που χαρακτηρίζονται από συμπεριφορά κατηγορίας II, συνδέεται με τη ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στη θλιβόμενη ζώνη που προκαλούνται από την απώλεια της συνάφειας είναι πιθανότερο να συμβεί κυρίως σε περιοχές της δοκού όπου η τιμή της καμπτικής ροπής πλησιάζει την καμπτική αντοχή. Πραγμάτι, για την περίπτωση σημειακών φορτίων, μια τέτοια περιοχή είναι η περιοχή της διατομής που περιλαμβάνει το σημείο φόστισης.

- **Κατηγορία III**

Αντιστοιχεί σε τιμές του ανηγμένου διατμητικού μήκους μεταξύ 1 και 2,5 ($1 < a_v/d < 2,5$) και, όπως στην περίπτωση της κατηγορίας II, χαρακτηρίζεται από ψαθυρή αστοχία που προκαλείται από την εμφάνιση μιας κεκλιμένης ρωγμής μέσα στο διατμητικό μήκος. Σε αντίθεση όμως με την κατηγορία II, η κεκλιμένη ρωγμή αφενός μεν σχηματίζεται ανεξάρτητα από τις υπάρχουσες καμπτικές ρωγμές, αφετέρου δε χρειάζεται αύξηση του εξωτερικού φορτίου για να προεκταθεί σε βαθμό που να προκαλέσει αστοχία.

- **Κατηγορία IV**

Αντιστοιχεί σε τιμές του ανηγμένου διατμητικού μήκους μικτότερες του 1 και χαρακτηρίζεται από δύο τύπους αστοχίας: (α) «πλάστιμο», στην περίπτωση που η αστοχία οφείλεται στην αστοχία του αρηγμάτωτου τμήματος περί το μέσον τη δοκού, κοντά στο άνω πέλμα της και (β) «ψαθυρό», στην περίπτωση που η αστοχία προκαλείται από αστοχία του αρηγμάτωτου τμήματος που συνδέει το άνω πέλμα με την περιοχή της στήριξης. Ο τρόπος αυτός αστοχίας εξαρτάται από το πλάτος της διατομής της δοκού με την πιθανότητα πλάστιμης αστοχίας να αυξάνεται με το μέγεθος του πλάτους.

2.1.6 Συμπεράσματα

Πιο κάτω, ανακεφαλαιώνονται τα αποτελέσματα από σειρές πειραμάτων με τρόπο που αναδεικνύονται τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά που διέπουν την συμπεριφορά μιας αμφιέριστης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα, χωρίς συνδετήρες, στην οριακή κατάσταση αστοχίας υπό μονοτονική φόρτιση. Προκύπτουν έτσι κάποια βασικά συμπεράσματα :

1. Η δοκός μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από: (α) ένα *αρηγμάτωτο τμήμα*, που περιλαμβάνει τις δύο ακραίες περιοχές της, μέχρι την πλησιέστερη στις στηρίξεις κεκλιμένη ρωγμή, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με μια λωρίδα σκυροδέματος μεταβλητού πάχους, μεταξύ του άνω πέλματος και της νοητής επιφάνειας που διέρχεται από τις κορυφές των καμπτικών και κεκλιμένων ρωγμών, (β) ένα *ρηγματωμένο τμήμα*, που αποτελείται από «προβόλους σκυροδέματος», που σχηματίζονται μεταξύ διαδοχικών καμπτικών και κεκλιμένων ρωγμών και είναι πακτωμένες στη λεπτή λωρίδα του αρηγμάτωτου τμήματος και (γ) τον *διαμήκη οπλισμό*, που εκτείνεται σε όλο το μήκος της δοκού, σε μικρή απόσταση από το κάτω πέλμα της και είναι σε πλήρη συνάφεια με το σκυρόδεμα τουλάχιστον στην περιοχή αγκύρωσης.

2. Το αρηγμάτωτο τμήμα περικλείει τις τροχιές των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της κάμψης της δοκού και έχουν ένα περίπου οριζόντιο προσανατολισμό, κατά μήκος της μεσαίας λεπτής λωρίδας του, ο οποίος αλλάζει στην περιοχή της κορυφής, της πλησιέστερης στην στήριξη, κεκλιμένης ρωγμής και γίνεται

διαγώνιος στις ακραίες περιοχές. Η θέση της αλλαγής στην κατεύθυνση των τροχιών φαίνεται να εξαρτάται από παραμέτρους όπως π.χ. το ανεγμένο διατμητικό μήκος για την περίπτωση σημειακού φορτίου και το ανεγμένο μήκος για την περίπτωση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου.

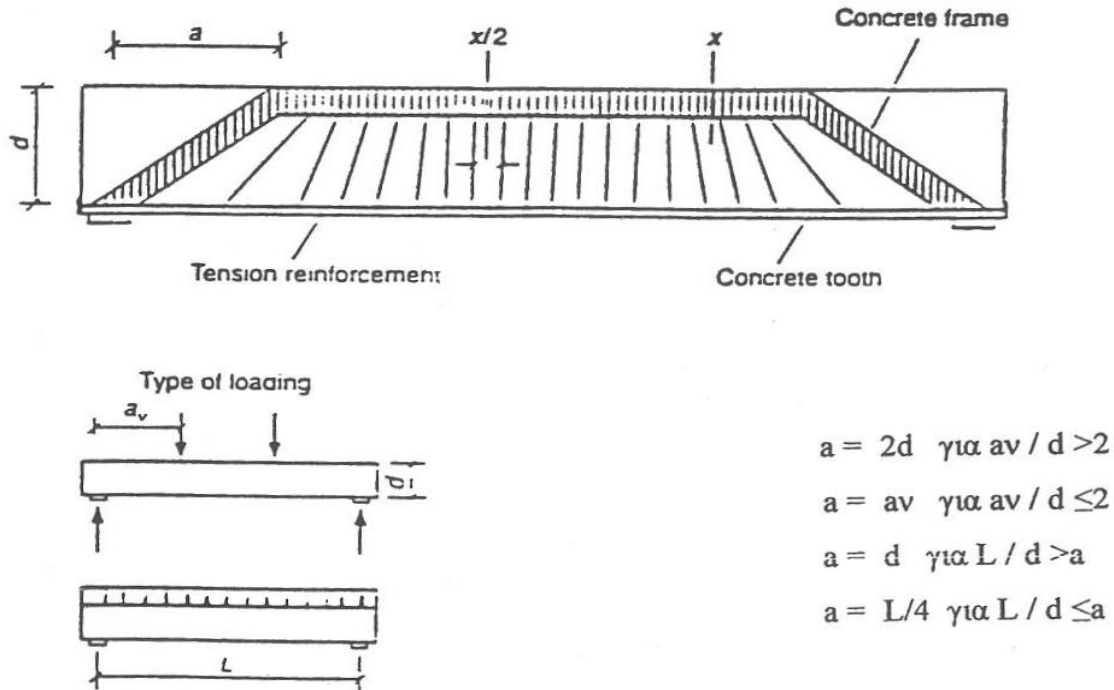
3. Σε αντίθεση με το ρηγματωμένο, το αρηγμάτωτο σκυρόδεμα έχει σημαντική συμβολή στην φέρουσα ικανότητα της δοκού, ενώ το ρηγματωμένο, μέσω της «κάμψης προβόλου», δημιουργεί ένα μηχανισμό ο οποίος δίνει τη δυνατότητα στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα να μεταφέρει το εξωτερικό φορτίο στις στηρίξεις.

4. Η αστοχία της δοκού φαίνεται να συνδέεται με την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο αρηγμάτωτο τμήμα της.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η ποιοτική περιγραφή της δοκού που περιγράφηκε μετασχηματίζεται σε μια νέα μεθοδολογία που είναι κατάλληλη για το σχεδιασμό κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, η ποιοτική αυτή περιγραφή συμπυκνώνεται σε ένα φυσικό προσομοίωμα μιας αμφιέριστης δοκού στην οριακή κατάσταση αστοχίας της, με χαρακτηριστικά συμπεριφοράς (όπως λ.χ. διαδικασία ρηγμάτωσης, εσωτερική εντατική κατάσταση, μηχανισμό μεταφοράς εξωτερικού φορτίου στις στηρίξεις, μηχανισμό αστοχίας, κτλ) τα χαρακτηριστικά εκείνα της δοκού που περιγράφηκαν παραπάνω. Το φυσικό αυτό προσομοίωμα αποτελεί τη βάση της νέας μεθοδολογίας σχεδιασμού η οποία, αρχικά διαμορφώνεται έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό αμφιέριστων δοκών από σιδηροπαγές σκυρόδεμα.

Όπως φαίνεται στην (**Σχήμα 2.11**), η δοκός προσομοιάζεται ως «χτένα» με τα «δόντια» πακτωμένα σε ένα πλαίσιο αποτελούμενο από ένα οριζόντιο και δυο κεκλιμένα ραβδωτά στοιχεία. Τα κεκλιμένα στοιχεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με ένα ελκυστήρα αγυρωμένο στα άκρα τους.

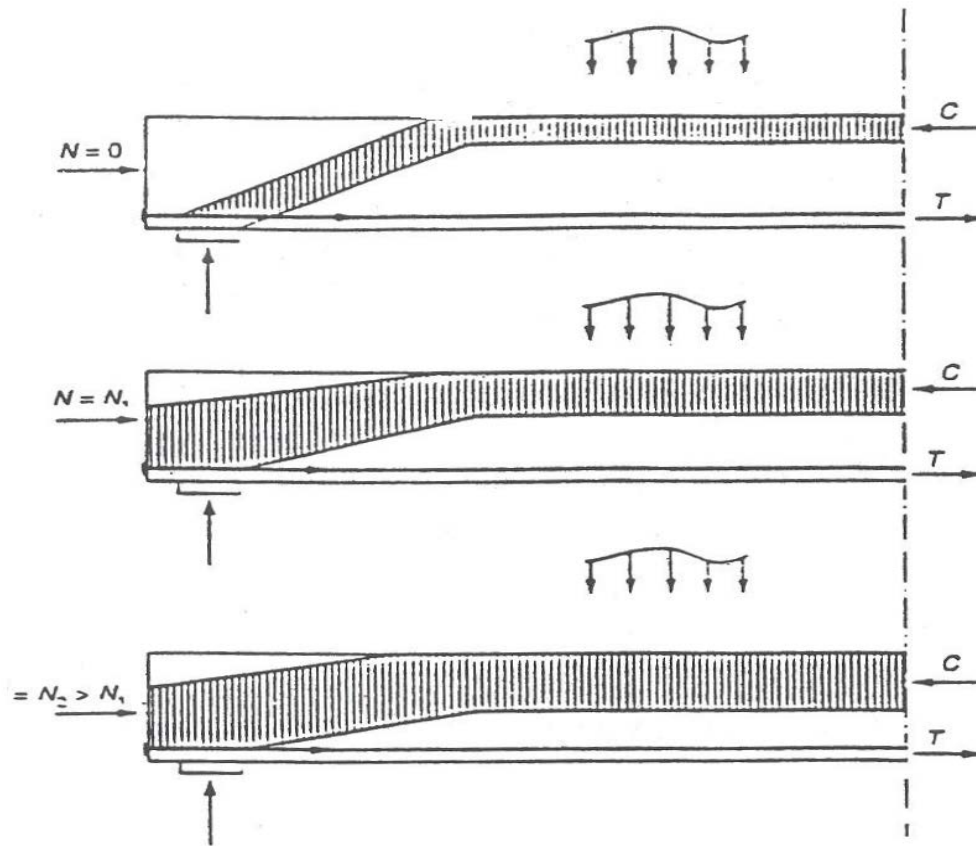


ΣΧΗΜΑ 2.11 (α) Φυσικό προσομοίωμα («χτένα») αμφιέριστης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εγκάρσιο φορτίο.

Στο (Σχήμα 2.11(β)) απεικονίζει σχηματικά την επίδραση της παρουσίας αξονικού φορτίου στο παραπάνω προσομοίωμα. Στο προσομοίωμα αυτό, που αποτελεί μια απλουστευμένη μορφή της φυσικής κατάστασης της δοκού, η δοκός προσομοιάζεται ως «χτένα» με «δόντια» πακτωμένα σε ένα πλαίσιο αποτελούμενο από ένα οριζόντιο και δύο κεκλιμένα ραβδωτά στοιχεία.

Παραβάλλοντας το προσομοίωμα αυτό με την δοκό στο (Σχήμα 2.1) γίνεται φανερό ότι :

1. Το πλαίσιο αποτελεί μια απλουστευμένη μορφή του αρηγμάτωτου τμήματος της δοκού που περικλείει τις τροχιές των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω κάμψης.
2. Ο ελκυστήρας αποτελεί τον καμπτικό οπλισμό.
3. Τα «δόντια» της «χτένας» προσομοιάζουν τις λωρίδες («προβόλους») σκυροδέματος που σχηματίζονται μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών στο εφελκυσμένο ρηγματωμένο τμήμα της δοκού.



ΣΧΗΜΑ 2.11 (β) Επίδραση αξονικού φορτίου στο φυσικό προσομοίωμα της δοκού.

2.2.1 Κριτήριο Αστοχίας

Για την χρησιμοποίησή του, το φυσικό προσομοίωμα θα πρέπει να συμπληρωθεί με ένα κριτήριο αστοχίας, ικανό να προβλέψει την φέρουσα ικανότητα και τον τρόπο αστοχίας της δοκού και το οποίο να είναι συμβιβαστό με τα πειραματικά στοιχεία του (σχήματος 2.10).

Η πρόβλεψη της φέρουσας ικανότητας για την περίπτωση συμπεριφοράς I είναι ευχερής, διότι, σε αυτήν την περίπτωση αντιστοιχεί στην καμπτική αντοχή της δοκού.

Αντίθετα, για την περίπτωση συμπεριφοράς τύπου II, όπου απαιτείται μια αναλυτική περιγραφή της φέρουσας ικανότητας, εισάγεται η παρακάτω σχέση, που αποτελεί μια παραλλαγή της εμπειρικής σχέσης για την αντοχή διατομών υπό την συνδυασμένη δράση καμπτικής ροπής και τέμνουσας δύναμης:

$$M_f = \left[F_{s1} \left(\frac{h}{2} - d1 \right) + F_c \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2} \right) + F_{s2} \left(\frac{h}{2} - d1 \right) \right] \quad (2.1)$$

Όπου,

M_f Καμπτική αντοχή της διατομής

x Ύψος θλιβόμενης ζώνης

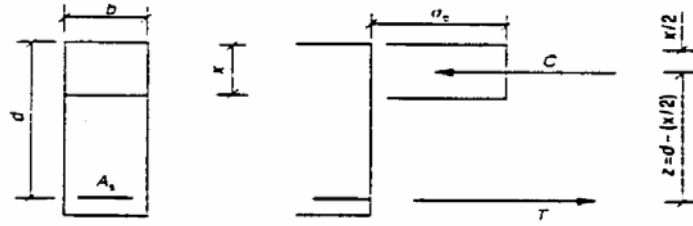
d Στατικό ύψος διατομής

b Πλάτος δοκιμίου

f_c Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

2.2.2 Υπολογισμός Διαμήκη Οπλισμού

Ο διαμήκης οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε η διατομή να έχει καμπτική αντοχή M_f . Το (Σχήμα 2.12) παρουσιάζει μια απλοποιημένη απεικόνιση των εσωτερικών δράσεων που αναπτύσσονται σε μια δεδομένη διατομή λίγο πριν τη στιγμή της καμπτικής αστοχίας. Η θλιβόμενη ζώνη της δοκού θεωρείται ότι υπόκειται σε μια ομοιόμορφα κατανεμημένη τάση, της οποίας η συνισταμένη δράση είναι ισοδύναμη με αυτή που αντιστοιχεί στην πραγματική διανομή των τάσεων που προκαλεί η κάμψη της δοκού. Η ένταση της ομοιόμορφα κατανεμημένης τάσης λαμβάνεται ίση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (f_{cyl}), που προσδιορίζεται από πειράματα σε κυλινδρικά δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο μεταξύ 2 και 2,5. Αν και η τιμή αυτή της έντασης είναι μεγαλύτερη κατά 15% της τιμής που χρησιμοποιούν οι ισχύοντες κανονισμοί, θα πρέπει να θεωρηθεί ως συντηρητική, διότι η τριαξονική εντατική κατάσταση που επικρατεί στη θλιβόμενη ζώνη, λίγο πριν την αστοχία της δοκού σε κάμψη, επιτρέπει την ανάπτυξη μιας μέσης διαμήκουσ τάσης με τιμή πολύ μεγαλύτερη της f_{cyl} .



ΣΧΗΜΑ 2.12 Υπολογισμός καμπτικής αντοχής του φυσικού προσομοιώματος της δοκού.

Από την ισοδυναμία των εσωτερικών δράσεων (δηλαδή της συνισταμένης των θλιπτικών τάσεων στο οριζόντιο στοιχείο του πλαισίου και της εφελκυστικής δύναμης που αναλαμβάνει ο οπλισμός) προκύπτει:

$$C = b \cdot x \cdot \left(\frac{f_{cyl}}{\gamma_c} \right) = T = A_s \frac{f_y}{\gamma_s} \quad (2.2)$$

$$M_f = C \cdot z$$

όπου,

C Συνισταμένη των θλιπτικών τάσεων

T Εφελκυστική δύναμη του διαμήκη οπλισμού

A_s Εμβαδό διατομής οπλισμού

f_y Όριο διαρροής χάλυβα

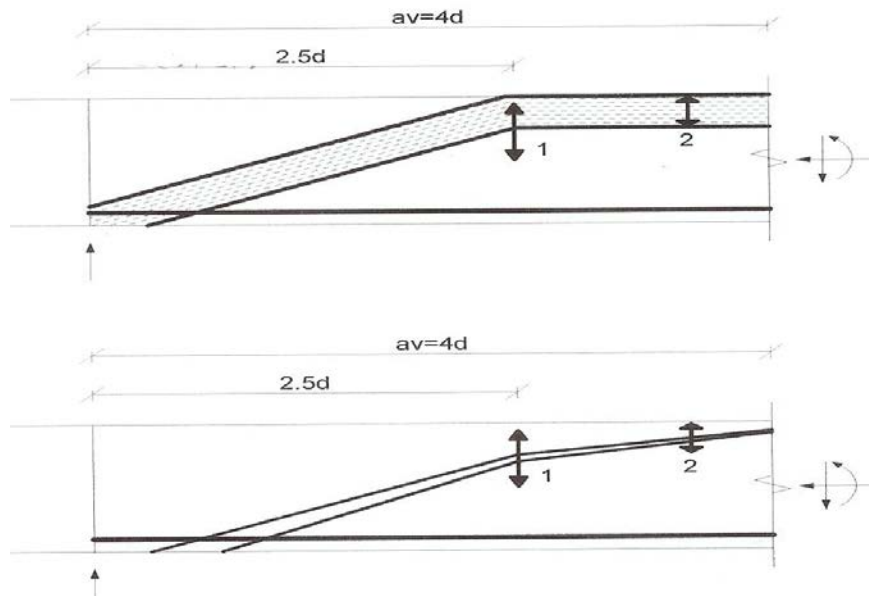
γ_c, γ_s Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας του σκυροδέματος και του χάλυβα αντίστοιχα

z Απόσταση μεταξύ των σημείων εφαρμογής των δυνάμεων C και T

2.2.3 Γραμμικά Στοιχεία Κατηγορίας II

Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από τιμές του ανηγμένου διατμητικού μήκους (A_v/d) μεγαλύτερες του 2.5. Το σχήμα 1^α παρουσιάζει το προσομοίωμα ενός τέτοιου

στοιχείου μετά την ρηγματώση του σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας και αποτελεί μία απλή αλλά ρεαλιστική απεικόνιση της εντατικής κατάστασης ενός στοιχείου (πρόβολος υπό την δράση σημειακού φορτίου) στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Έχειδειχτεί ότι η αστοχία σε τέμνουσα, τέτοιων στοιχείων, συνδέεται με την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων είτε στην περιοχή αλλαγής της διεύθυνσης των θλιπτικών τάσεων (θέση 1) είτε στην θλιβόμενη ζώνη του στοιχείου στην περιοχή όπου αναπτύσσεται συνδυασμός μέγιστης ροπής και τέμνουσας δύναμης (θέση 2) (σχήμα 1β).



ΣΧΗΜΑ 2.13 Οριακή κατάσταση αστοχίας – επισήμανση των κρίσιμων μηκών.

2.2.3.1 Αντοχή σε τέμνουσα, στοιχείων χωρίς εγκάρσιο οπλισμό

Σύμφωνα με την μέθοδο της ΤΘΔ η συνιστώσα των εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων οι οποίες αναπτύσσονται στο σημείο 1 είναι αριθμητικώς ίση με την δρώσα τέμνουσα δύναμη. Σύμφωνα με την αρχή του St Venant, η επιρροή των τάσεων αυτών μηδενίζεται σε απόσταση ίση με το στατικό ύψος της διατομής d , εκατέρωθεν του σημείου 1, στο οποίο η τροχιά των θλιπτικών τάσεων αλλάζει διεύθυνση. (Το σημείο 1 των εφελκυστικών τάσεων με μέγιστη τάση είναι ισοδύναμη με ομοιόμορφη κατανομή τάσεων $0,25 \cdot f_t$ (όπου f_t η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος) η οποία αναπτύσσεται σε περιοχή με εμβαδόν ίσο με $b(2d)$ (όπου b το πλάτος της διατομής του στοιχείου), τότε

η εφελκυστική δύναμη που μπορεί να αναλάβει το σκυρόδεμα χωρίς την παρουσία εφελκυσμού στην περιοχή αυτή είναι ίση με :

$$T_{II,I} = 0.5 \cdot b \cdot d \cdot f_t \quad (2.3)$$

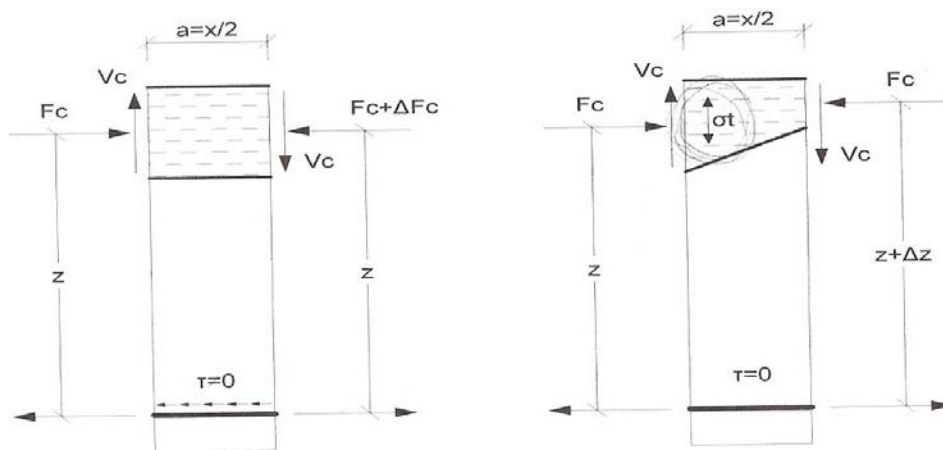
Η δύναμη $T_{II,I}$ είναι περίπου ίση με την κατακόρυφη συνιστώσα της κεκλιμένης θλιπτικής δύναμης και αντιπροσωπεύει την τιμή της τέμνουσας δύναμης $V_{II,I}$, η οποία αναπτύσσεται στο διατμητικό μήκος του στοιχείου πριν συμβεί αστοχία στην περιοχή αλλαγής της διεύθυνσης των θλιπτικών τάσεων.

Παράλληλα, εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται στη θλιβόμενη ζώνη στην περιοχή του στοιχείου στο οποίο αναπτύσσεται συνδυασμός ροπής και τέμνουσας δύναμης λόγω της απώλειας συνάφειας μεταξύ καμπτομένου οπλισμού και σκυροδέματος η οποία αναπόφευκτα συμβαίνει. Ο μηχανισμός αστοχίας του σκυροδέματος στην περίπτωση αυτή φαίνεται στο σχήμα. Το σχήμα παρουσιάζει τμήμα δομικού στοιχείου μεταξύ δύο διατομών οι οποίες ορίζονται από συνεχόμενες ρωγμές, καθώς και τις εσωτερικές δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται στις διατομές πριν και μετά την απώλεια της συνάφειας τ , η οποία είναι απαραίτητη για την αύξηση της εφελκυστικής δύναμης κατά DFs. Η μεταφορά της τέμνουσας δύναμης γίνεται με τη μεταβολή της ροπής η οποία συμβαίνει με την μεταβολή της εφελκυστικής δύναμης του καμπτικού οπλισμού $V = \frac{dF_s}{dx} \cdot z$ (λόγω συνάφειας) ή λόγω της μεταβολής του

μοχλοβραχίονα των εσωτερικών διαμήκων δυνάμεων $V = \frac{dF_s}{dx} \cdot F_s$ (μετά την απώλεια συνάφειας). Από το σχήμα φαίνεται ότι η απώλεια συνάφειας οδηγεί σε προέκταση της δεξιάς ρωγμής συνεπώς στην μείωση της θλιβόμενης ζώνης ζ , η οποία είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση της ισορροπίας ροπών του στοιχείου.

$$F_c \cdot \frac{(x - x_1)}{2} = V \cdot \frac{x}{2} \quad (2.4)$$

Η μείωση της θλιβόμενης ζώνης οδηγεί στην αύξηση της έντασης των θλιπτικών τάσεων σε σχέση με την αριστερή παρειά του στοιχείου, έχοντας ως αποτέλεσμα την διόγκωση του σκυροδέματος. Η διόγκωση του σκυροδέματος οδηγεί στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων (σ_t στο Σχήμα) στις παράπλευρες περιοχές.



ΣΧΗΜΑ 2.14 Απόλεια της συνάφειας.

Αν υποθεθεί ότι η ένταση της θλιπτικής τάσης στην διατομή αριστερά είναι ίση με f_c (όπου f_c η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος), η σ_c μπορεί να θεωρηθεί ίση με την εγκάρσια θλιπτική τάση (p) (συμβιβαστό εγκάρσιας παραμόρφωσης) στην δεξιά διατομή του στοιχείου (λόγω της μείωσης) της θλιβόμενης ζώνης που συνεπάγεται η αύξηση του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών ορθών δυνάμεων) σε τιμή για να παραμείνει η δύναμη σταθερή. Η ορθή θλιπτική τάση δεξιά είναι ίση με :

$$\sigma_c = f_c + 5 \cdot p \quad (2.5)$$

Και συνεπώς επειδή $\sigma_c = p$ και αντικαθιστώντας την σ_t με f_c η οποία είναι η μέγιστη εγκάρσια εφελκυστική τάση υπέρβασης της οποίας οδηγεί σε οριζόντια ρηγμάτωση της θλιβόμενης ζώνης και στην απότομη της φέρουσας ικανότητας προκύπτει ότι :

$$\sigma_c = f_c + 5 \cdot \sigma_t \quad (2.6)$$

Υποθέτοντας ότι το πλάτος της διατομής είναι σταθερό, το βάθος (x_1) της θλιβόμενης ζώνης στην δεξιά διατομή του στοιχείου από την σχέση:

$$F_c = f_c \cdot b \cdot x = \sigma_c \cdot b \cdot x_1 \quad (2.7)$$

Και είναι ίσο με,

$$x_1 = x \cdot \frac{f_c}{\sigma_c} \quad (2.8)$$

Η τέμνουσα δύναμη ($V_{II,2}$) η οποία αναπτύσσεται πριν την αστοχία της θλιβόμενης ζώνης (όταν η εγκάρσια εφελκυστική αντοχή εξαντλείται $f_t = \sigma_t$) προκύπτει εκφράζοντας στην εξίσωση (2) τον λόγω $\frac{x_1}{x}$ συναρτήσει των f_c και f_t από τις σχέσεις (4) και (6),

$$V_{II,2} = F_c \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + 5 \cdot \frac{f_t}{f_c}} \right] \quad (2.9)$$

Η εφελκυστική αντοχή f_t δίδεται (για τον σχεδιασμό) από τις σχέσεις ,

$$f_t = 1.4 \cdot (f_c - 8) / 10)^{2/3} \quad (2.10)$$

$$f_t = 2.12 \cdot \ln(1 + f_c / 10) \quad (2.11)$$

Η τέμνουσα δύναμη την οποία μπορεί να αναλάβει ένα στοιχείο κατηγορίας II χωρίς την παρουσία εγκάρσιου οπλισμού καθορίζεται από την ελάχιστη τιμή μεταξύ των $V_{II,1}$ και $V_{II,2}$.

2.2.3.2 Αντοχή σε τέμνουσα στοιχείων με εγκάρσιο οπλισμό

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα σύμφωνα με την μέθοδο ΤΘΔ σε γραμμικά στοιχεία συμπεριφοράς κατηγορίας II αναγνωρίζονται 2 περιοχές 1 και 2 (Σχήμα 1) οι οποίες είναι κρίσιμες . Σκοπός του σχεδιασμού είναι η εξασφάλιση επαρκούς αντοχής στις περιοχές αυτές ώστε να αποκλειστεί κάθε άλλη μορφή αστοχίας πλην της καμπτικής.

Για να αποφευχθεί πρόωρη αστοχία, όταν οι τιμές της τέμνουσας δύναμης (V_f) που αντιστοιχεί στην καμπτική αστοχία στις θέσεις 1 και 2 υπερβαίνουν τις τιμές $V_{II,1}$ και $V_{II,2}$, αντίστοιχα, τοποθετείται εγκάρσιος οπλισμός ικανός να παραλάβει την συνολική τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται στις περιοχές αυτές.

Ο οπλισμός διανέμεται σύμφωνα με την αρχή του St Venant, σε απόσταση δ εκατέρωθεν της θέσης 1 (2d συνολικά) και αναλαμβάνει τις εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται λόγω της αλλαγής της διεύθυνσης των θλιπτικών τάσεων. Ο συνολικός εγκάρσιος οπλισμός που τοποθετείται από την σχέση,

$$A_s = \frac{V_{f(1)}}{f_y} \quad (2.12)$$

Στο μήκος του στοιχείου στο οπλισμό συμβαίνει απώλεια της συνάφειας μεταξύ καμπτόμενου οπλισμού και περιβάλλοντος σκυροδέματος τοποθετείται εγκάρσιος οπλισμός ικανός να αναλάβει τις εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στην θλιβόμενη ζώνη. Από τις εξισώσεις (2) , (4) και (5) η εφελκυστική τάση (f_t) που αναπτύσσεται είναι ίση με,

$$f_t = \frac{f_c}{5 \cdot \left(\frac{F_c}{V_{f(2)}} - 1 \right)} \quad (2.13)$$

Οι εφελκυστικές τάσεις αυτές αναπτύσσονται στο μισό του στοιχειώδους τμήματος του σχήματος και συνεπώς ο οπλισμός που απαιτείται δίδεται από την σχέση ,

$$A_s = \frac{f_t \cdot b \cdot \frac{d}{2}}{f_y} = \frac{f_t \cdot b \cdot d}{2f_y} \quad (2.14)$$

2.3 ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

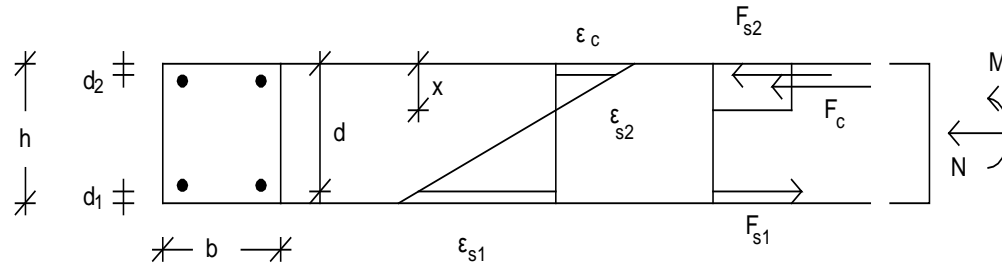
2.3.1 Εισαγωγή

Ο Ευρωκώδικας 2 (EN1992-1-1:2003) αποτελεί μέρος μιας σειράς τεχνικών κανονιστικών έργων για τις δομικές κατασκευές από απλό, οπλισμένο και προεντεταγμένο σκυρόδεμα. Ο Ευρωκώδικας 2 εφαρμόζεται για το σχεδιασμό του φέροντα οργανισμού. Το δομικό έργο πρέπει να μορφώνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά την προβλεπόμενη διάρκεια χρήση του να είναι εξασφαλισμένα, με επαρκή αξιοπιστία, η φέρουσα ικανότητα λειτουργίας και η ανθεκτικότητα. Ο Ευρωκώδικας 2, δεν καλύπτει τις ειδικές απαιτήσεις του αντισεισμικού σχεδιασμού. Οι αντίστοιχες απαιτήσεις καλύπτονται από τον Ευρωκώδικα 8.

Συμφωνά με τον Ευρωκώδικα 8 (EN1998-1:2003, CEN, 2003) προβλέπει για κτίρια από σκυρόδεμα 3 κατηγορίες πλαστιμότητας. Στις δύο ανώτερες από αυτές κατηγορίες πλαστιμότητας Μ-Μέση και Η-Υψηλή, ο σχεδιασμός βασίζεται στην πλαστιμότητα και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Για τις κατηγορίες αυτές ο σχεδιασμός επιδιώκει τον έλεγχο της μετελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς του δομήματος και τον καθορισμό των θέσεων απορρόφησης ενέργειας μέσω: α) της μόρφωσης του δομικού συστήματος (με τοιχώματα ή με υποστυλώματα ισχυρότερα από τις δοκούς), και β) της διαμόρφωσης των περιοχών όπου αναμένεται να συγκεντρωθούν οι ανελαστικές παραμορφώσεις έτσι ώστε να απορροφούν με ασφάλεια την απαιτούμενη ενέργεια παραμόρφωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με ποσοτική συσχέτιση της απαιτούμενης ικανότητας ανελαστικής παραμόρφωσης των περιοχών αυτών με την κατηγορία πλαστιμότητας και με την τιμή του δείκτη συμπεριφοράς q που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό.

2.3.2 Αντοχή Διαμήκους Θλιπτήρα και Ελκυστήρα

Ο διαμήκης θλιπτήρας και ο διαμήκης ελκυστήρας του δικτύωματος έχουν τις διαστάσεις της θλιβόμενης ζώνης και του διαμήκη οπλισμού. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής γίνεται με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος στο οποίο φαίνεται η εντατική κατάσταση της διατομής.



ΣΧΗΜΑ 2.15 Εσωτερικές δυνάμεις καθ' ύψος της διατομής.

Αστοχία της θλιβόμενης ζώνης συμβαίνει όταν η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος στην ακραία θλιβόμενη ίνα λαμβάνει παραμόρφωση ίση με 0,0035, ενώ για το χάλυβα το όριο αυτό διαμορφώνεται συμβατικά σε παραμόρφωση 0,020, ενώ η πραγματική παραμόρφωση θραύσης φτάνει ή και ξεπερνά το 0,12.

Με την παραδοχή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα για τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_s μικρότερες από την παραμόρφωση ϵ_y που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής, η τάση που αναπτύσσεται στο χάλυβα προκύπτει από τη σχέση $\sigma_s = \epsilon_s E_s$, όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα. Για μεγαλύτερες τιμές θα πρέπει η σχέση να τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να ληφθεί υπ' όψη και η κράτωση.

Η ισοδυναμία των εσωτερικών και των εξωτερικών μεγεθών όπως φαίνεται και στο (Σχήμα 2.11) εκφράζεται από τις σχέσεις :

$$N = F_c + F_{s2} - F_{s1} \quad (2.15)$$

$$M_f = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2}\right) + F_{s2} \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2}\right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1\right) \quad (2.16)$$

Όπου,

$$F_c = h \cdot b \cdot x$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \sigma_y$$

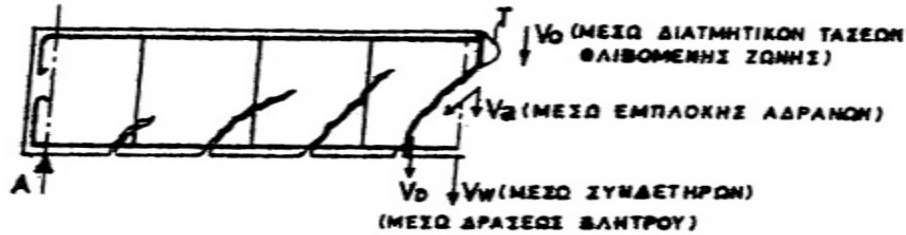
Οι ισχύοντες κανονισμοί, οι οποίοι βασίζονται στη λογική των οριακών καταστάσεων συμπεριφοράς και λαμβάνουν υπόψη τη μη-γραμμική συμπεριφορά τόσο των υλικών όσο και της κατασκευής, επιβάλλουν το φορτίο σχεδιασμού να αντιστοιχεί στη φέρουσα ικανότητα του πλέον κρίσιμου διαμήκη θλιπτήρα. Ο αντίστοιχος διαμήκης ελκυστήρας (ο οποίος περιέχεται μεταξύ των ίδιων διαδοχικών εγκάρσιων ελκυστήρων με τον διαμήκη θλιπτήρα) πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση διαρροής.

2.3.3 Αντοχή Διαγώνιων Θλιπτήρων και Εγκάρσιων Ελκυστήρων

Η δράση της αξονικής θλίψης συμβάλει στη μείωση του πλήθους, της διαδρομής και του εύρους των ρωγμών και επιπλέον οδηγεί σε εντονότερη συμβολή των επικουρικών μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας, διότι προκαλεί την αύξηση της θλιβόμενης ζώνης.

Οι επικουρικοί μηχανισμοί ανάληψης τέμνουσας είναι :

- Η συνισταμένη των θλιπτικών τάσεων της αρηγμάτωτης θλιβόμενης ζώνης, η οποία είναι κεκλιμένη με αποτέλεσμα η κατακόρυφη συνιστώσα της V_o να μειώνει την προς ανάληψη τέμνουσα.
- Η αλληλεμπλοκή των αδρανών του σκυροδέματος κατά μήκος της ρωγμής μέσω της οποίας μεταφέρεται τέμνουσα V_a .
- Η δράση βλήτρου του διαμήκους σπλισμού, που έχει τοποθετηθεί για άλλους λόγους και διαπερνά τις διατμητικές ρωγμές μειώνοντας την δρώσα τέμνουσα κατά V_d .



ΣΧΗΜΑ 2.16 «λοιποί» μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας.

Η τέμνουσα σχεδιασμού η οποία μεταφέρεται με τους επικουρικούς μηχανισμούς είναι $V_{cd} \approx 2.5 \cdot T_{Rd} \cdot b_w \cdot d$. Η έκφραση αυτή είναι προσεγγιστική και διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του δομικού στοιχείου (δοκοί, υποστυλώματα, τοιχία) και το είδος της εντατικής κατάστασης (με ή χωρίς σεισμό). Για υποστυλώματα η έκφραση παίρνει τη μορφή (EC2- 6.2.2):

$$V_{cd} = 0.3 \cdot V_{Rd1}$$

για μικρή αξονική δύναμη ($v > -0,1$)

$$V_{cd} = 0.9 \cdot V_{Rd1}$$

για μεγάλη αξονική δύναμη ($v < -0,1$)

Όπου,

$$v = \frac{N_{sd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} \quad (2.17)$$

$$V_{Rdc} = \left[C_{Rdc} \cdot k \cdot (100 \cdot p_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (2.18)$$

$C_{rd,c}$ είναι η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος παρουσία εγκάρσιας θλίψης (προτεινόμενη τιμή $0,18/\gamma_c$)

k_1 συντελεστής ο οποίος παίρνει την τιμή $0,15$

k συντελεστής με βάση τον οποίο λαμβάνονται υπ' όψη τα φαινόμενα κλίμακας

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ σε mm}$$

$$p_1 \text{ γεωμετρικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού} \quad p_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0.02$$

σ_{cp} για να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των ορθών τάσεων (οι θλιπτικές τάσεις παίρνουν θετικό πρόσημο και οι εφελκυστηκές αρνητικό)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} < 0.2 \cdot f_{cd} \text{ (MPa)}$$

f_{ck} χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος.

N_{ed} αξονικό φορτίο διατομής λόγω φόρτισης ή προέντασης ($N_{ed} > 0$ για θλίψη).

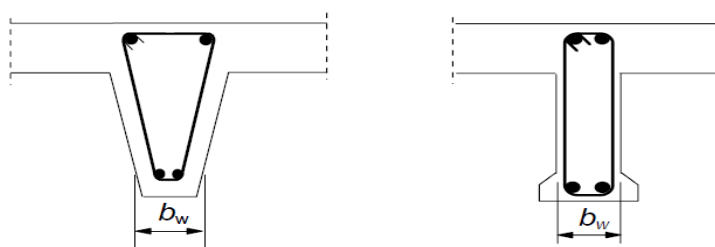
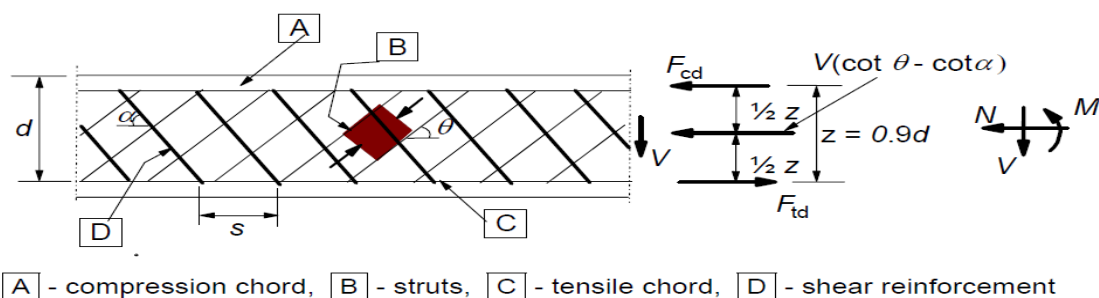
A_c εμβαδόν διατομής

b_w μικρότερο πλάτος κορμού στην εφελκυστική περιοχή (mm).

d ενεργό ύψος διατομής.

2.3.4 Στοιχεία στα οποία Απαιτείται κατά το Σχεδιασμό Οπλισμός Διάτμησης

Για τη διαστασιολόγηση σε διάτμηση, θεωρείται ότι το δομικό στοιχείο αποτελείται από θλιβομένη και εφελκυσμένη ζώνη, η απόσταση των κέντρων βάρους των οποίων ισούται με το μοχλοβραχίονα ζ των εσωτερικών δυνάμεων. Η ζώνη διάτμησης τότε έχει ύψος z και πλάτος b_w . Ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων θεωρείται ότι είναι κάθετος προς το διαμήκη οπλισμό, η δε επιρροή των ράβδων του διαμήκους οπλισμού που κάμπτονται προς τα πάνω δεν λαμβάνεται υπόψη.



ΣΧΗΜΑ 2.17 Συμβολισμοί για δομικά στοιχεία καταπονούμενα από τέμνουσα δύναμη.

Οι Συμβλισμοί από το *Σχήμα 2.17* είναι :

- α είναι η γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτμησης με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού (η θετική φορά της φαίνεται στο Σχήμα 6.5)
- θ είναι η γωνία που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες σκυροδέματος με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού
- F_{td} είναι η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής δύναμης στο διαμήκη οπλισμό
- F_{cd} είναι η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης στο σκυρόδεμα στη διεύθυνση του διαμήκους άξονα του στοιχείου
- b_w είναι το ελάχιστο πάχος του στοιχείου μεταξύ της εφελκυσμένης χορδής και του θλιβόμενου πέλματος του δικτύωματος
- z είναι ο μοχλοβραχίονας της διατομής σε ένα στοιχείο σταθερού ύψους, ο οποίος αντιστοιχεί στην καμπτική ροπή που δρα στο στοιχείο. Στο σχεδιασμό έναντι διάτμησης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς αξονικό φορτίο, μπορεί ενγένει να ληφθεί για το μοχλοβραχίονα η προσεγγιστική τιμή $z = 0,9d$.

Η γωνία θ δεν πρέπει να ξεπερνά συγκεκριμένα όρια $1 \leq \cot\theta \leq 2,5$

2.3.4.1 Οπλισμός Διάτμησης από Κατακόρυφους Συνδετήρες

Τυπική περίπτωση οπλισμού διάτμησης, είναι οι κατακόρυφοι συνδετήρες που χρησιμοποιούνται κυρίως στα κτιριακά έργα. Οι εξισώσεις που τους καθορίζουν είναι :

$$V_{rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$$

$$V_{Rd,max} = a_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (2.19)$$

Όπου,

A_{sw} είναι το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού διάτμησης

s είναι η απόσταση των συνδετήρων

f_{ywd} είναι η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης

ν_1 είναι ένας δείκτης μείωσης της αντοχής για σκυρόδεμα ρηγματωμένο λόγω διάτμησης

$$\nu_1 = 0.9 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0.5$$

α_{cw} είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την εντατική κατάσταση στη θλιβόμενη διαγώνιο

$$\alpha_{sw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \left(0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd} \right)$$

σ_{cp} είναι η μέση θλιπτική τάση του σκυροδέματος, λαμβανόμενη με θετικό πρόσημο, λόγω του αξονικού φορτίου σχεδιασμού. Η τιμή αυτή πρέπει να υπολογίζεται παίρνοντας τη μέση τιμή της τάσης στη διατομή του σκυροδέματος, λαμβανομένου υπόψη και του οπλισμού. Δεν απαιτείται υπολογισμός της σε αποστάσεις μικρότερες από $0.5d \cot \theta$ από την παρειά μιας στήριξης.

2.3.4.1 Μέγιστες Αποστάσεις του Οπλισμού Διάτμησης

Η μέγιστη απόσταση των λοξών ράβδων κατά τη διεύθυνση του εφελκόμενου από κάμψη οπλισμού δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει την ακόλουθη τιμή:

$$\max s_w = 0.6 \cdot d \cdot (1 + \cot a) \quad (2.20)$$

2.3.5 Θεμελιώδεις Παραδοχές

Προϋπόθεση για να λειτουργήσει η μέθοδος είναι να βασίζεται σε παραδοχές οι οποίες είναι συμβατές με τις θεμελιώδεις ιδιότητες του σκυροδέματος.

Σε ένα ραβδωτό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να είναι δυνατός ο σχηματισμός κεκλιμένων θλιπτήρων στη ρηγματωμένη εφελκόμενη ζώνη του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης, ο διαμήκης και ο εγκάρσιος

οπλισμός, μπορούν να αναλάβουν θλιπτικές και εφελκυστικές δυνάμεις αντίστοιχα. Άρα θεωρείται ότι είναι δυνατό να αποτελέσουν τους διαμήκεις θλιπτήρες και ελκυστήρες καθώς και τους εγκάρσιους ελκυστήρες του δικτυώματος.

Ο σχηματισμός κεκλιμένων θλιπτήρων θεωρείται ότι εξασφαλίζεται με τους μηχανισμούς εμπλοκής αδρανών και δράσης βλήτρου.

Για να εξασφαλιστεί η πλάστιμη συμπεριφορά του στοιχείου προϋποθέτει την ανάπτυξη ανηγμένης παραμόρφωσης 0,0035 στην ακραία θλιβόμενη ίνα του αρηγγάτωτου σκυροδέματος. Είναι γνωστό όμως ότι η φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη αντιστοιχεί σε ανηγμένη παραμόρφωση 0,002. Άρα για να αναπτυχθεί μεγαλύτερη παραμόρφωση πρέπει να υπάρχει φθιτός κλάδος της καμπύλης τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα, αφού αυτός περιγράφει την συμπεριφορά του ρηγματωμένου σκυροδέματος.

2.3.5 Πλαστιμότητα και Τρόποι που Επιτυγχάνεται

Όπως είναι γνωστό, η πλαστιμότητα, δηλαδή η ικανότητα μιας κατασκευής να υφίσταται μεγάλου εύρους ανελαστικές παραμορφώσεις χωρίς ουσιώδη μείωση της αποκρίσεώς της, αποτελεί μια ιδιότητα πολύτιμη για τη σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών. Ο βασικός τρόπος για να αυξηθεί η πλαστιμότητα είναι η αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης του σκυροδέματος μέσω περίσφιγξης. Αυτή η περίσφιγξη επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης διάταξης καλά κλεισμένων συνδετήρων.

Οι λόγοι για τους οποίους είναι αναγκαία η πλαστιμότητα είναι :

- Όταν ένα πλάστιμο στοιχείο (ή ένα πλάστιμο δόμημα) πλησιάζει στην αστοχία του, οι παραμορφώσεις του είναι μεγάλες. Οι “προειδοποιητικές” παραμορφώσεις επιτρέπουν τη λήψη μέτρων (απομάκρυνση ενοίκων, μείωση φορτίων, κτλ) . Αντιθέτως, οι ψαθυρές αστοχίες είναι απότομες και συμβαίνουν υπό μικρές παραμορφώσεις χωρίς καμία προειδοποίηση.

- Καθίσταται δυνατή η ανακατανομή έντασεως μέσα στο δόμημα. Αν ένα στοιχείο με πλάστιμη συμπεριφορά φτάσει στο μέγιστο της αποκρίσεως του, για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες παραμορφώσεις θα συνεχίσει να αναπτύσσει αντίσταση (μειωμένη έναντι της μέγιστης), ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία θα αναπτύξουν μεγαλύτερη απόκριση διατηρώντας έτσι την ισορροπία του συστήματος.

- Μείωση των συμβατικών σεισμικών φορτίων σχεδιασμού.

Δομικά στοιχεία όπως πλάκες, υπόγεια και θεμελίωσή τους, δευτερεύουσες δοκοί (όχι πάνω σε υποστυλώματα), κόμβοι στους οποίους δεν συντρέχουν κατακόρυφα στοιχεία, θεωρούνται δομικά στοιχεία χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας

Η πλαστιμότητα των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από την πλαστιμότητα των υλικών, το σχεδιασμό των μελών και κόμβων, και τις λεπτομέρειες όπλισης (κατασκευαστικές διατάξεις).

Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 για το ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού στα άκρα δοκών και το μηχανικό ποσοστό οπλισμού περίσφιγξης υποστυλωμάτων, ω_{wd} , συνδέονται με την τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, μ_{ϕ} , και μέσω αυτού με την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς q :

$$\begin{aligned} \mu_{\phi} &= 2q_0 - 1 && \text{εάν } T_1 \geq T_C \\ \mu_{\phi} &= 1 + 2(q_0 - 1)T_C/T_1 && \text{εάν } T_1 < T_C \end{aligned}$$

όπου q_0 είναι η αντίστοιχη βασική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς από τον Πίνακα 2.1 και T_1 είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου, που και οι δύο λαμβάνονται στο κατακόρυφο επίπεδο στο οποίο λαμβάνει χώρα η κάμψη, ενώ T_C είναι η περίοδος που ορίζει το ανώτατο όριο της περιοχής σταθερής επιτάχυνσης του φάσματος.

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός και η προς τούτο ελαστική ανάλυση κτιρίων Ο/Σ βασίζεται σε μία συμβατική ελαστική δυσκαμψία που θεωρείται ότι αντιστοιχεί σ' αυτήν του ελαστικού κλάδου ενός απλοποιημένου μονοβαθμίου μη-γραμμικού συστήματος με περίπου ελαστοπλαστική σχέση οριζοντίων δυνάμεων-μετακινήσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 Βασικές τιμές του συντελεστή q_0 (EC8, Table 5.1).

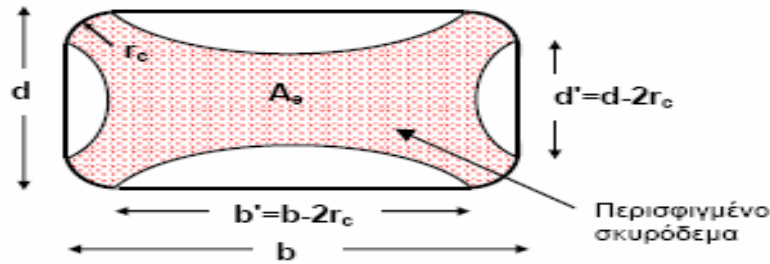
STRUCTURAL TYPE	DCM	DCH
Frame system, dual system, coupled wall system	$3,0\alpha_w/\alpha_1$	$4,5\alpha_w/\alpha_1$
Wall system	3,0	$4,0\alpha_w/\alpha_1$
Torsionally flexible system	2,0	3,0
Inverted pendulum system	1,5	2,0

2.3.6 Ο Μηχανισμός και ο Οπλισμός Περίσφιγξης

Περίσφιγξη σκυροδέματος είναι η κατάσταση κατά την οποία το σκυρόδεμα βρίσκεται σε κατάσταση τριαξονικής θλίψης, η οποία πρακτικά δημιουργείται όταν οι εγκάρσιοι οπλισμοί του στοιχείου παρεμποδίζουν την πλευρική διόγκωση. Ο περιορισμός της εγκάρσιας διαστολής του δοκιμίου έχει σαν αποτέλεσμα αφενός την αύξηση της αντοχής του και αφετέρου την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης στη θραύση.

Η περίσφιγξη ενεργοποιείται όταν αρχίζουν να δημιουργούνται οι εσωτερικές ρωγμές συνάφειας μεταξύ αδρανών και κονιάματος, που χαρακτηρίζουν την ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Ο ρόλος της περίσφιγξης σε ένα στοιχείο σκυροδέματος είναι πολύ σημαντικός. Αρχικά αυξάνει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στην κύρια διεύθυνση, παράλληλα αυξάνει τη μέγιστη κρίσιμη παραμόρφωση σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από το συμβατικό όριο αστοχίας ϵ_{cu} . Ωστόσο, ο πιο σημαντικός ρόλος της περίσφιγξης έγκειται στην αύξηση της πλαστιμότητας. Με δεδομένη μάλιστα την επιρροή της σεισμικής φόρτισης σε μια κατασκευή, είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζεται η πλάσטיμη συμπεριφορά ενός φορέα σε όσο το δυνατό μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Στην περίπτωση ορθογωνικού υποστυλώματος η περίσφιγξη είναι λιγότερο αποδοτική. Προκειμένου να είναι αποδοτική η περίσφιγξη σε ορθογωνικά υποστυλώματα είναι απαραίτητη η καμπύλωση των γωνιών τους.

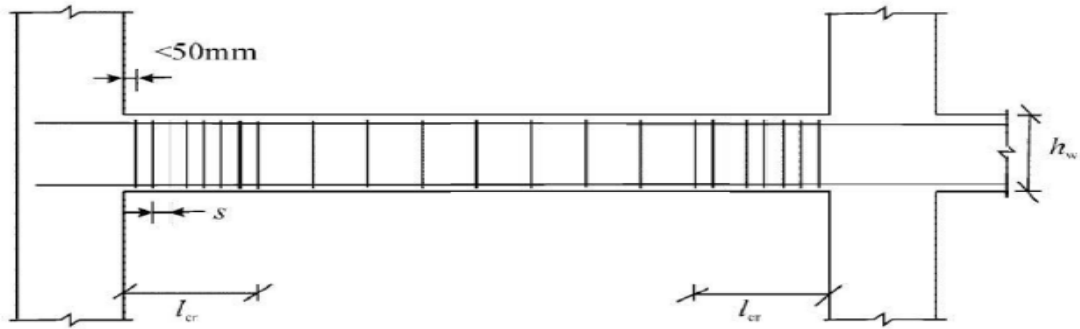


ΣΧΗΜΑ 2.18 Η περίσφιγξη του σκυροδέματος σε ορθογωνικές διατομές που επιτυγχάνεται μέσω καμπύλωσης των γωνιών.

Στις θέσεις αυτές ασκούνται από το συνδετήρα στο σκυρόδεμα δυνάμεις F , οι οποίες, σε συνδυασμό με την κατακόρυφη θλίψη δημιουργούν κατάσταση τριαξονικής θλίψης στο σκυρόδεμα το οποίο περιβάλλεται από τους συνδετήρες. Είναι γνωστό ότι η παρουσία τριαξονικής θλίψης προκαλεί αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, αύξηση της ανηγμένης παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε αυτήν την αντοχή, καθώς και μείωση της κλίσης του φθιτού κλάδου του διαγράμματος $\sigma-\epsilon$.

Αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας έχουμε στις κρίσιμες περιοχές, στις οποίες σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις, οπότε είναι αναγκαία η ύπαρξη ικανοποιητικού οπλισμού περισφίξεως. Αυτός ο οπλισμός θα προσδώσει την απαιτούμενη πλαστιμότητα. Ακόμη η αύξηση των αντοχών για την αντιστάθμιση της απώλειας του μη περισφιγμένου σκυροδέματος λόγω παραμόρφωσης θραύσης (0,0035) θα περιορίσει τη μείωση της φέρουσας ικανότητας σε αποδεκτά από τον κανονισμό επίπεδα.

Κατά το σχεδιασμό, το απαιτούμενο ποσοστό συνδετήρων είναι συνάρτηση της επιθυμητής πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων. Για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν επιλέχθηκε μεσαία κατηγορία πλαστιμότητας (DCM) η οποία αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα σε όρους καμπυλοτήτων σε $\mu_\phi=2$.



ΣΧΗΜΑ 2.19 Διάταξη των συνδετήρων των δοκών.

Κρίσιμες περιοχές για υποστυλώματα μέσης κατηγορίας πλαστιμότητας (DCM) :

$$l_{cr} = \max\{h_c; l_{cl} / 6; 0,45\}$$

Όπου,

h_c είναι η μεγαλύτερη διάσταση της διατομής του υποστυλώματος (σε μέτρα), και

l_{cl} είναι το καθαρό μήκος του υποστυλώματος (σε μέτρα).

Εάν $l/h_c < 3$, ολόκληρο το ύψος του κύριου σεισμικού υποστυλώματος θα θεωρείται ως κρίσιμη περιοχή και θα οπλίζεται αναλόγως.

Στην κρίσιμη περιοχή στην βάση κύριων σεισμικών υποστυλωμάτων πρέπει να διατίθεται τιμή της πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, μ_ϕ , τουλάχιστον ίση με αυτήν που δίνεται στην **5.2.3.4(3)**.

$$\omega_w = \frac{\text{όγκος κλειστών συνδετήρων}}{\text{όγκος σκυροδέματος πυρήνα}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (2.22)$$

Οφείλει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$\alpha\omega_w \geq 30 \cdot V_d \cdot \mu_\phi \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035 \quad (2.23)$$

όπου :

μ_ϕ είναι η απαιτούμενη τιμή της πλαστιμότητας καμπυλοτήτων

v_d είναι η ανηγμένη αξονική δύναμη σχεδιασμού ($v_d = N_{Ed}/A_c \cdot f_{cd}$);

$\varepsilon_{sy,d}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης του χάλυβα στην διαρροή

h_c είναι το ύψος της συνολικής διατομής (παράλληλα με την οριζόντια διεύθυνση στην οποία εφαρμόζεται η τιμή του μ_ϕ)

h_o είναι το ύψος του περισφιγμένου πυρήνα (έως τον άξονα των συνδετήρων)

b_c είναι το πλάτος της συνολικής διατομής

b_o είναι το πλάτος του περισφιγμένου πυρήνα (έως τον άξονα των συνδετήρων)

α είναι συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης και ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του εντός των συνδετήρων όγκου του σκυροδέματος, το οποίο απολαμβάνει περισφίξεως. Ίσος με $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$

α_n εξαρτάται απ' την διάταξη των συνδετήρων εντός της διατομής και εκφράζει το ανενεργό από απόψεως περισφίξεως τμήμα της διατομής.

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_o \cdot h_o}$$

όπου n ο αριθμός των διαμήκων ράβδων που είναι δεμένες σε γωνία συνδετήρα.

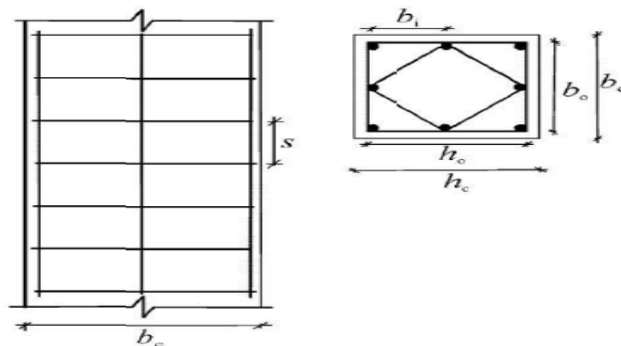
α_s εξαρτάται απ' την καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων και εκφράζει το ανενεργό από απόψεως περισφίξεως τμήμα του στοιχείου καθ' ύψος .

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right)$$

όπου s είναι η απόσταση των συνδετήρων και b_o η διάσταση του πυρήνα της διατομής.

ω_w το ογκομετρικό μηχανικό ποσοστό των συνδετήρων και για τετραγωνικούς συνδετήρες όπως στα δοκίμια υπολογίζεται από τη σχέση, $\omega_w = 4 \cdot b \cdot A_{sw} \cdot \frac{f_{sy}}{b_c \cdot s \cdot f_c}$,

Όπου A_{sw} και f_{sy} η διατομή και το όριο διαρροής των συνδετήρων και f_c η αντοχή του σκυροδέματος.



ΣΧΗΜΑ 2.20 Χαρακτηριστικά περισφιγξης.

Εντός των κρίσιμων περιοχών των κύριων σεισμικών υποστυλωμάτων θα προβλέπονται κλειστοί ή μονοσκελείς συνδετήρες διαμέτρου τουλάχιστον 6mm σε ισαπόσταση που να εξασφαλίζει μια ελάχιστη πλαστιμότητα και να αποτρέπει τοπικό λυγισμό των διαμηκών ράβδων. Η διάταξη των συνδετήρων πρέπει να είναι τέτοια ώστε η διατομή να τίθεται υπό συνθήκες τριαξονικής φόρτισης που προκαλούνται από τους συνδετήρες.

Η ισαπόσταση, s , των συνδετήρων (σε χιλιοστά) δεν υπερβαίνει:

$$s = \min\{b_o/2; 175; 8d_{bL}\}$$

όπου,

b_o (σε χιλιοστά) είναι η ελάχιστη διάσταση του πυρήνα σκυροδέματος, και
 d_{bL} είναι η ελάχιστη διάμετρος των διαμηκών ράβδων (σε χιλιοστά).

Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ράβδων του διαμήκου οπλισμού που δεσμεύονται από κλειστούς συνδετήρες ή εγκάρσιους συνδέσμους δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 200mm (λαμβάνοντας όμως υπόψη την απαίτηση του EN 1992-1-1 για ράβδους του διαμήκου οπλισμού εντός των περιοχών θλίψης της διατομής, όπου δε θα πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 150mm από δεσμευμένες από τον οπλισμό περίσφιγξης ράβδους).

3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα περιγράφεται, η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς έξι ραβδωτών πρισματικών φορέων που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο Ω.Σ. του ΕΜΠ και σχεδιάστηκαν σύμφωνα με την μέθοδο της Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης (ΤΘΔ) και των ευρωπαϊκών κανονισμών (EC2¹**Error! Reference source not found.**¹ EC8¹**Error! Reference source not found.**¹). Ακολούθως, περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική έρευνα που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ και αφορούσε ακριβώς την συμπεριφορά δοκιμίων που υπόκεινται σε κάμψη με αξονική δύναμη.

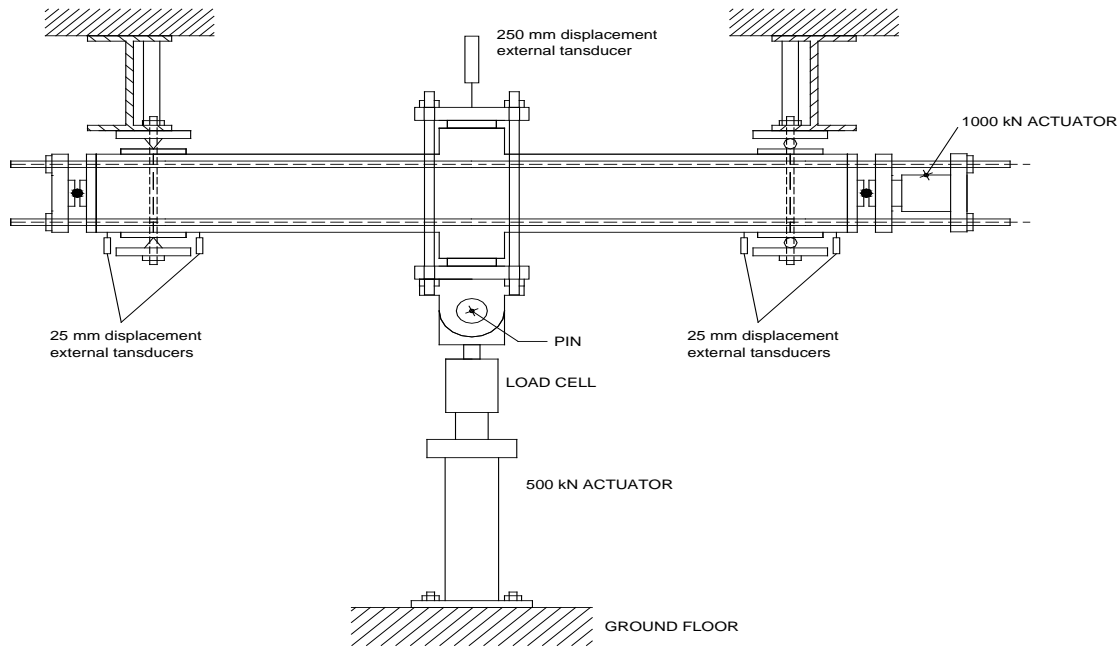
3.1.1 Περιγραφή Δοκιμίων

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν για την πειραματική διαδικασία είναι αμφιέριστοι ραβδωτοί πρισματικοί φορείς όπως αυτά φαίνονται στο *σχήμα 3.8*. Τα δοκίμια έχουν μήκος 1950mm και ορθογωνική διατομή 200x200mm. Το (ενδια)μεσο τμήμα του δοκιμίου είναι μονολιθικά συνδεδεμένο με ορθογωνικό πρισματικό στοιχείο (με πλάτος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου), το οποίο είναι υπερ-ενισχυμένο, έτσι ώστε να παραμένει άθικτο κατά την πειραματική διαδικασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα τμήματα AB και CD του φορέα, η τιμή του ανοιγμένου διατμητικού μήκους (a_v/d) είναι ίση με 4.9 m. Οι δυο ακραίες στηρίξεις χρησιμοποιήθηκαν για την αγκύρωση του δοκιμίου στην διάταξη του *σχήματος 3.1* κατά την πειραματική διαδικασία, με τρόπο που οι συνοριακές συνθήκες του να προσομοιάζουν με συνθήκες άρθρωσης.

Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από έξι ράβδους χάλυβα υψηλής συνάφειας, διαμέτρου 16mm (Φ16), με τάσεις διαρροής 550 MPa και τάσεις θραύσης 650 MPa. Ο εγκάρσιος οπλισμός αποτελείται από συνδετήρες διαμέτρου 6mm (Φ6) με τάσεις διαρροής 300 MPa, η τιμή της οποίας είναι μικρότερη από τα 400 MPa που προβλέπεται από τον κανονισμό. Οι συνδετήρες έχουν διαταχθεί πυκνότερα στα «κρίσιμα μήκη» του δοκιμίου, σύμφωνα με τους κανονισμούς. Παρόλα αυτά, δεν αποτελούν αντικείμενο σύγκρισης στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίστηκε από πειράματα που προηγήθηκαν σε κυλινδρικά δοκίμια και βρέθηκε να είναι ίση με 34 MPa. Τα κυλινδρικά δοκίμια είχαν αποξηραθεί σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος καλυμμένα με υγρή λινάτσα για ένα μήνα. Μετά την πάροδο του χρόνου αυτού αποθηκεύτηκαν στο εργαστήριο με θερμοκρασία 20° C και σχετική υγρασία περίπου 50%. Τέλος η επικάλυψη των οπλισμών του δοκιμίου ήταν 2cm.

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση της πειραματικής διάταξης στην οποία εκτελέστηκε το πειραματικό κομμάτι της παρούσας διατριβής. Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να επιβάλλεται μονότονη και πλευρική, ανακυκλιζόμενη φόρτιση στο μέσο του δοκιμίου με ταυτόχρονη επιβολή σταθερού αξονικού φορτίου σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Επίσης, ο σχεδιασμός είχε στόχο την εύκολη και άμεση καταγραφή όλων των στοιχείων και των μετρήσεων που προέκυπταν από την πειραματική διαδικασία. Για την υλοποίηση του σχεδιασμού της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε ένα ισχυρό πλαίσιο του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το πλαίσιο προσέφερε τη δυνατότητα της χρήσης ενός συστήματος με ισχυρό δάπεδο και δύο όμοια πλαίσια από χάλυβα διατομής διπλού Ταυ. Το πλαίσιο διαθέτει οπές σε συγκεκριμένα σημεία, οι οποίες επιτρέπουν την διέλευση ράβδων προέντασης ώστε να δημιουργούνται συνθήκες πάκτωσης σε όλο το σύστημα της πειραματικής διάταξης. Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται η χρησιμοποιούμενη πειραματική διάταξη.



ΣΧΗΜΑ 3.1: Πειραματική διάταξη

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η γενική περιγραφή του συστήματος της πειραματικής διάταξης, καθώς και των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λήψης των επιθυμητών στοιχείων από κάθε πείραμα. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δυο βασικά μέρη. Το ένα είναι το σύστημα επιβολής του αξονικού φορτίου και το άλλο είναι το υδραυλικό έμβολο που προκαλεί την πλευρική φόρτιση και μπορεί να μεταφέρει φορτίο έως και 500 KN (112,4 Kpf). Το σύστημα επιβολής του αξονικού φορτίου αποτελεί ένα εσωτερικό σύστημα, κάτι το οποίο είναι πολύ θετικό στο θέμα της ασφάλειας της διάταξης. Οι συνθήκες πάκτωσης του συστήματος επιβολής του αξονικού φορτίου επιτυγχάνονται μέσω αγκύρωσης με δύσκαμπτες πλάκες, πάχους 4cm, στις οποίες βιδώνουν οι πλευρικές αρθρώσεις της διάταξης. Στο άνω άκρο της πειραματικής διάταξης τοποθετείται μια πολύ δύσκαμπτη μεταλλική δοκός. Ανάμεσα στην κεφαλή του δοκαριού και τη δύσκαμπτη μεταλλική δοκό εφαρμόζεται μια μεταλλική πλάκα πάχους 4cm, πάνω στην οποία τοποθετούνται υδραυλικοί γρύλοι διπλής δράσης με ηλεκτροκίνητη αντλία προκειμένου να επιβληθεί το αξονικό φορτίο στο δοκάρι. Η αξονική θλιπτική δύναμη-εφαρμόστηκε ομόκεντρα χρησιμοποιώντας μια εξωτερική δύναμη προέντασης με τη βοήθεια τεσσάρων υψηλής απόδοσης ράβδων απο χάλυβα (ντιζες) συμμετρικά διατεταγμένες προς τον διαμήκη

άξονα του δοκιμίου. Ο υδραυλικός γρύλος και η αντλία λαδιού που χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη ήταν σε θέση να διατηρήσουν τη σταθερή αξονική δύναμη με ακρίβεια ± 5 kN (1,12 KPF).

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την εκτέλεση των δοκιμών είναι σχετικά απλή. Αρχικά γίνεται η επιβολή του αξονικού φορτίου, στη συνέχεια επιβάλλεται η οριζόντια μετατόπιση με τη μορφή χρονοϊστορίας από κύκλους εξαναγκασμένων μετατοπίσεων στο μεσαίο τμήμα της δοκού. Το εύρος κάθε μετατόπισης αυξάνεται βαθμιαία σε κάθε κύκλο και η εγκάρσια μετατόπιση του φορτίου είναι ελεγχόμενη. Γινόταν διακοπή σε τακτά χρονικά διαστήματα, για μετατοπίσεις της τάξεως περίπου των 5 χιλιοστών (0.2in). Στο σημείο αυτό, το φορτίο διατηρούνταν σταθερό για περίπου 1 λεπτό για να γίνει καταγραφή- επισήμανση της παρούσας ρηγμάτωσης του δοκιμίου και η λήψη φωτογραφιών που καταδεικνύουν την μορφή και το εύρος της ρηγμάτωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός φόρτισης δεν είναι σταθερός σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Στους πρώτους κύκλους της φόρτισης ο ρυθμός είναι αργός ενώ στη συνέχεια αυξάνεται χωρίς να επηρεάζεται η συμπεριφορά του δοκιμίου. Όλα τα όργανα είναι συνδεδεμένα με ένα υπολογιστικό σύστημα και καταγράφονται οι τιμές τους. Η καταγραφή των δεδομένων είναι συγχρονισμένη μέσω εσωτερικού χρονομέτρου, έτσι ώστε να είναι δυνατή ανά πάσα στιγμή η σύγκριση των μετρήσεων. Οι μετρήσεις των οργάνων καταγράφονται σε μονάδες ηλεκτρικής τάσης και στη συνέχεια κάθε τιμή πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή βαθμονόμησης, ώστε να προκύψει το επιθυμητό μέγεθος. Τα στοιχεία που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής περιγράφονται στη συνέχεια. Το πιο βασικό είναι η καταγραφή της οριζόντιας μετατόπισης στο μεσαίο τμήμα του δοκαριού, η οποία ουσιαστικά περιγράφει την ακριβή μετατόπιση της κορυφής του σε σχέση με την αρχική θέση. Η καταγραφή αυτή γίνεται απευθείας από το μηκυσιόμετρο (LVDTs) που υπάρχει ενσωματωμένο στο πίσω τμήμα του δοκιμίου. Από το έμβολο οριζόντιας μετατόπισης γίνεται επίσης και η καταγραφή της ασκούμενης οριζόντιας δύναμης. Η καταγραφή του αξονικού φορτίου χρησιμοποιείται απευθείας από την αντλία παροχής πίεσης λαδιού στους γρύλους. Τέλος, κατά τη διάρκεια της δοκιμής γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων των πέντε μηκυσιομέτρων. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται όλα τα μεγέθη που προκύπτουν από τις μετρήσεις των καταγραφών κάθε δοκιμής.

3.2.1 Διεξαγωγή Πειράματος

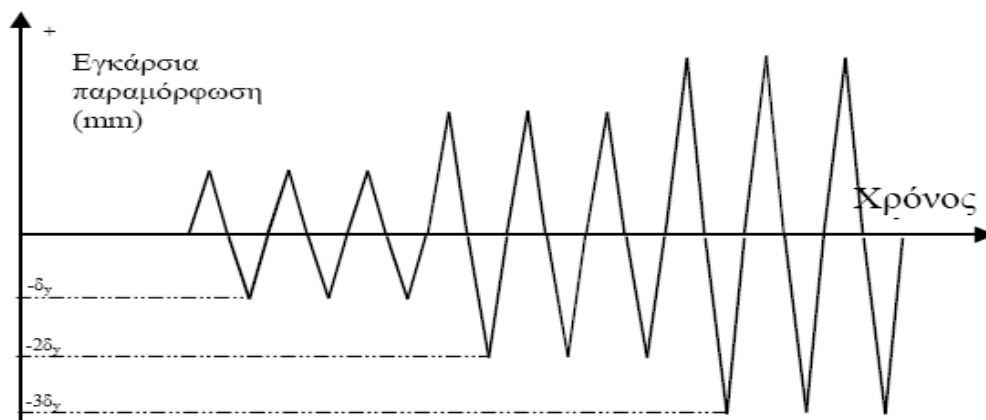
Το πείραμα περιλαμβάνει την υποβολή των δοκιμίων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση με ταυτόχρονη επιβολή αξονικού φορτίου σταθερής τιμής. Πρώτα επιβάλλεται η αξονική και στη συνέχεια η εγκάρσια δύναμη.

- **Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση**

Στα δοκίμια με ανακυκλιζόμενο φορτίο η φόρτιση επιβάλλεται αρχικά μέχρι την αντίστοιχη της μετατόπισης δy τιμής, ακολούθως, αναστρέφεται η φόρτιση μέχρι $-\delta y$. Όταν συμπληρωθούν τρεις ανακυκλίσεις τότε θεωρούμε ότι έχουμε επιτυχή κύκλο και προχωρούμε σε φόρτιση για $2\delta y$ στην ίδια λογική και ούτω καθ' εξής. Η φόρτιση σταματά όταν το φορτίο πέσει στο 85% της μέγιστης τιμής του.

Εκείνο που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι, όπως συμβαίνει και με το σκυρόδεμα, η περιβάλλουσα της επαναλαμβανόμενης φόρτισης ταυτίζεται περίπου με την καμπύλη που αντιστοιχεί σε μονότονη φόρτιση.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει συγκεντρωτικά την όλη ιστορία της φόρτισης.



ΣΧΗΜΑ 3.4 Ιστορία Εναλασσόμενης φόρτισης.

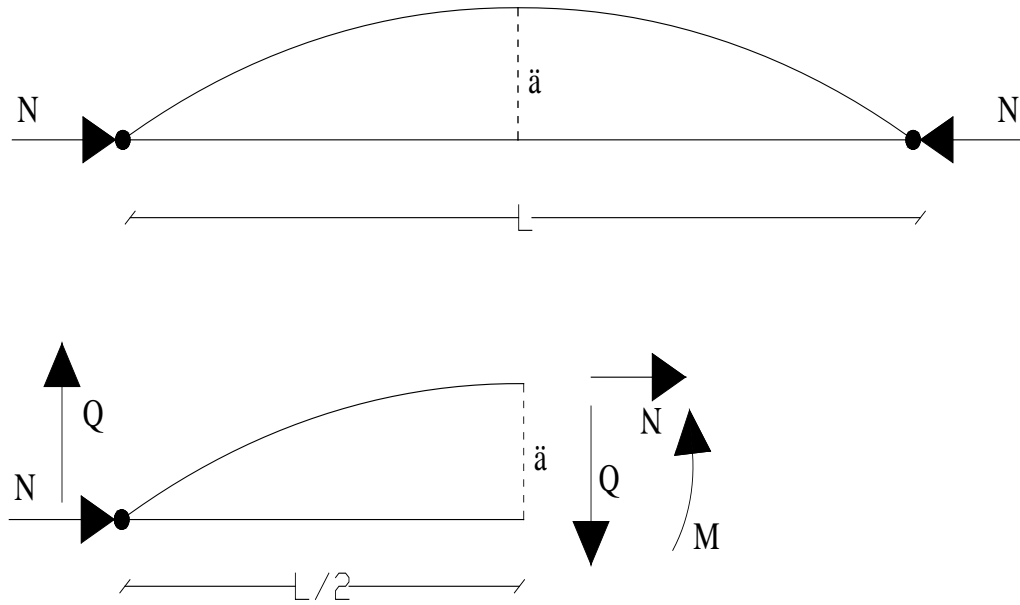
3.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μεγεθών που εξάγονται από τις καταγεγραμμένες μετρήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επίσης γίνεται αναφορά στη μαθηματική ανάλυση των μετρήσεων, μέσα από την οποία προέκυψαν όλες οι σημαντικές παράμετροι για το σχολιασμό των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας.

Ένα από τα μεγέθη που μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των προηγούμενων μετρήσεων είναι ο δείκτης πλαστιμότητας που προσδιορίζεται εύκολα και χρησιμοποιείται ευρέως από την παρακάτω σχέση :

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

Τέλος, από τις μετρήσεις που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία υπολογίζεται η ροπή κάμψης και τεμνουσών δυνάμεων . Για τον υπολογισμό της μέγιστης αναπτυσσόμενης ροπής υπολογίζεται αρχικά η τιμή που προκύπτει από το γινόμενο της οριζόντιας δύναμης σε κάθε στιγμή, με την κατακόρυφη απόσταση μέχρι τη διατομή της βάσης του δοκιμίου (δ). Σε αυτή τη ροπή προστίθεται η ροπή που προκαλείται από τη συμβολή του αξονικού φορτίου επί την απόσταση της ευθείας εφαρμογής από το σημείο περιστροφής των κατακόρυφων ράβδων προέντασης της πειραματικής διάταξης (**Σχήμα 3.5**). Η συνολική ροπή ισούται με :



ΣΧΗΜΑ 3.6 Πειραματικά εντατικά μεγέθη.

$$M_{\text{exp.}} = Q_{\text{exp.}} \cdot \frac{L}{2} + N \cdot \delta$$

$$Q_{\text{exp.}} = \frac{P_{\text{max,exp.}}}{2}$$

3.4 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στα πλαίσια της διερεύνησης της εγκυρότητας της ισχύουσας μεθόδου της ΤΘΔ , χρησιμοποιήθηκαν έξι αμφιεριστά δοκίμια . Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων έχουν αναφερθεί στην δεύτερη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η ονοματολογία τα δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 Συνοπτικός κατάλογος δοκιμών και οι αντίστοιχες τιμές εγκάρσιου οπλισμού στα κρίσιμα μήκη.

Εγκάρσιος Οπλισμός (mm)		
Δοκίμιο	Κρίσιμη Περιοχή	Διατμητικό Μήκος
B-CFP-0	90	90
B-EC-0	80	160
NB-CFP-0	90	90
B-CFP-N	90	90
B-EC-N	30	90
NB-CFP-N	90	90
Unit conversion factor: 1in =25.4mm		

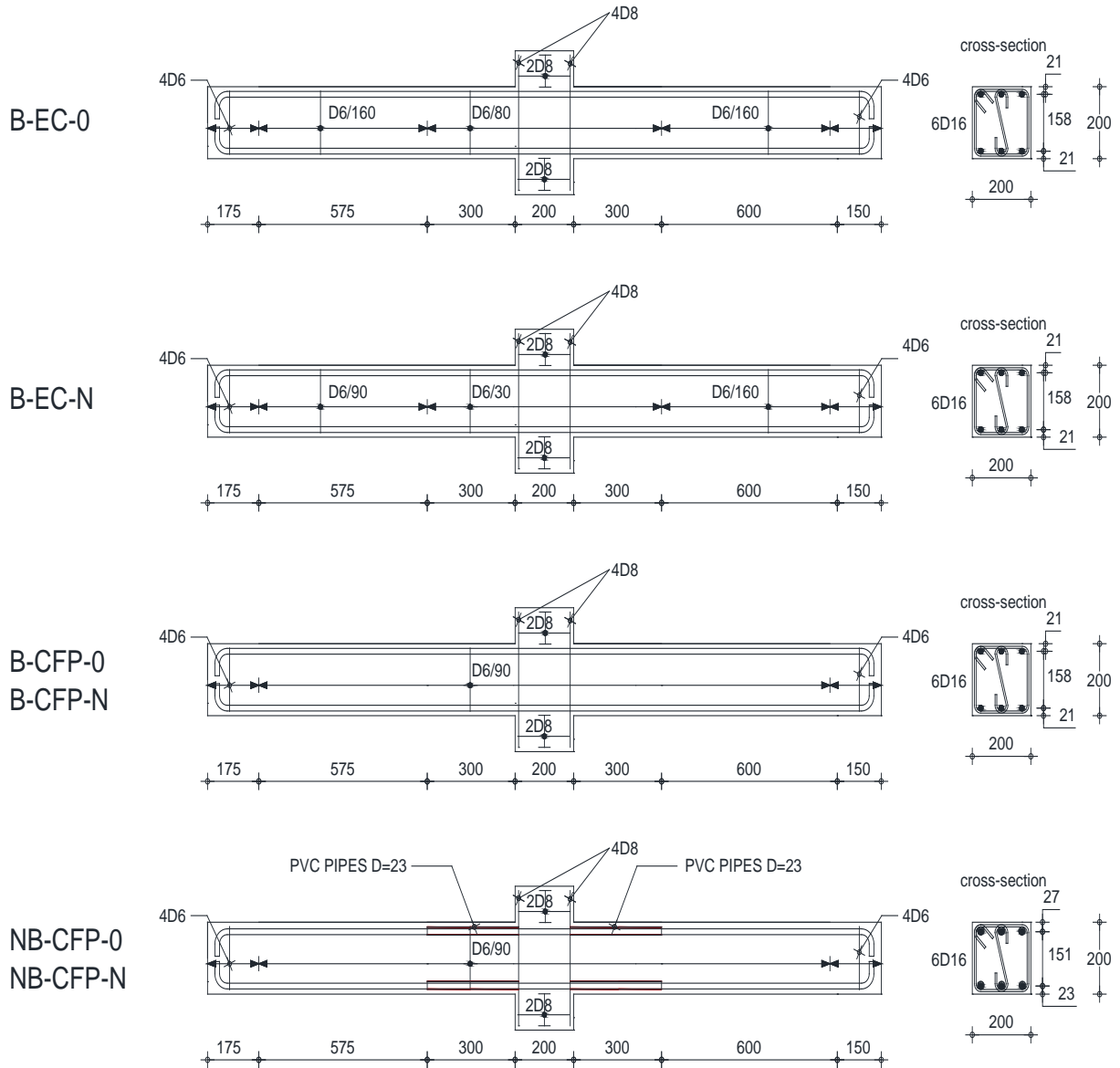
Το πρώτο σκέλος της ονοματολογίας δηλώνει χαρακτηριστικά σχεδιασμού του δοκιμίου, το γράμμα B χαρακτηρίζει τα δοκίμια που υπάρχει συνάφεια μεταξύ χάλυβα σκυροδέματος και το NB αυτά που δεν έχουν συνάφεια. Το δεύτερο σκέλος δηλώνει την μέθοδο σχεδιασμού των δοκιμών. Η μεθολογία που επιλέχθηκε είναι η TΘΔ¹**Error! Reference source not found.** και ο EC8¹**Error! Reference source not found.**¹. Στο τρίτο σκέλος δηλώνεται ο τρόπος φόρτισης.

Στον (Πινάκα 3.2) δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν για τον εγκάρσιο και διαμήκη οπλισμό των δοκιμών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 Χαρακτηριστικές τιμές χάλυβα οπλισμών.

	Όριο διαρροής fy (MPa)	Όριο αντοχής fu (MPa)	παραμόρφωση διαρροής εy (%)	παραμόρφωση αστοχίας εu (%)
Διαμήκης Οπλισμός	550	650		12.3
Εγκάρσιος οπλισμός	300			

3.4.1 Διάταξη Οπλισμών από Σχεδιασμό



ΣΧΗΜΑ 3.7 Διαστάσεις (σε mm) και οπλισμός δοκού που χρησιμοποιήθηκε για τις φορτίσεις.

4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία ελέγχου έξι αμφιεριστων ραβδόμορφων δομικών στοιχείων, που είχαν σχεδιαστεί με βάση τη μεθοδολογία της τροχιάς της θλιπτικής δύναμης (ΤΘΔ) και τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EC8. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δοκίμια είναι ορθογωνικής διατομής $200 \times 200 \text{ mm}^2$. Το ενδιάμεσο τμήμα του δοκιμίου είναι μονολιθικά συνδεδεμένο με ορθογωνικό πρισματικό στοιχείο (με πλάτος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου), το οποίο είναι υπερ-ενισχυμένο, έτσι ώστε να παραμένει άθικτο κατά την πειραματική διαδικασία. Τα πειράματα αυτά έχουν σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς υπό μονότονη υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε δy , $2\delta y$, $3\delta y$ και $4\delta y$.

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα **σχήματα 4.1-4.6** και τους **πίνακες 4.1-4.2**. Στα σχήματα 4.1 - 4.6 δίνονται οι καμπύλες συμπεριφοράς υπό εναλλασσόμενη επιπόηση. Στον πίνακα 4.1 δίνονται οι τιμές των ροπών αντοχής, μαζί με τις αντίστοιχες τιμές αντοχής που προβλέπονται από τις μεθόδους υπολογισμού των οποίων έγινε χρήση στην παρούσα εργασία. Τέλος στον πίνακα 4.42, δίνονται οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στο μέγιστο φορτίο της τελευταίας ομάδας τριών ολοκληρωμένων κύκλων φόρτισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μ .

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Υπολογιστικές - Πειραματικές τιμές ροπών αντοχής - διαρροής και αστοχίας.

Δοκίμα	Μέθοδος Σχεδιασμου	N (kN)	M _v (kNm)	P _v (kN)	M _f (kNm)	P _f (kN)	P _{exp} (kN)	M _{exp} (kNm)	M _{exp} /M _{f,calc}
B-CFP-0	CFP	0	52.7	120.4	53,8	123	128,67	56,29	1,05
B-EC-0	EC2,EC8	0	52.7	120.4	53,8	123	126,79	55,47	1,03
NB-CFP-0	CFP	0	49.9	114.0	50,7	115,9	127,16	55,63	1,10
B-CFP-N	CFP	280	54.2	123.5	72,7	166,1	164,16	73,70	1,01
B-EC-N	EC2,EC8	280	54.2	123.5	72,7	166,1	170,33	76,53	1,05
NB-CFP-N	CFP	280	49.5	113.4	68,2	155,8	158,68	71,57	1,05

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 Οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στο μέγιστο φορτίο της τελευταίας ομάδας τριών ολοκληρωμένων κύκλων φόρτισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μ..

Δοκίμα	N (KN)	δ1κ	δ2κ	δ3κ	δ4κ	δ5κ	δ6κ	μ1κ	μ2κ	μ3κ	μ4κ	μ5κ	μ6κ
B-CFP-0	0	7,20	16,71	26,75	40,08			0,81	1,88	3,01	4,51		
B-EC-0	0	7,83	16,35	30,52				0,79	1,65	3,08			
NB-CFP-0	0	7,96	17,59	27,65	37,80	70,06		0,76	1,68	2,64	3,61	6,69	
B-CFP-N	280	6,39	14,73	24,83	35,86	36,33		0,95	2,19	3,69	5,33	4,66	
B-EC-N	280	6,60	15,64	25,98	36,89	48,37	57,41	0,92	2,18	3,62	5,14	6,74	8,00
NB-CFP-N	280	6,68	15,90	25,81	36,65	48,17		0,87	2,07	3,36	4,77	6,27	

(1) Οι τιμές που βρίσκονται σε **μωβ** πλαίσιο αντιστοιχούν στις δ_{failure} και μ_{failure} όπου,

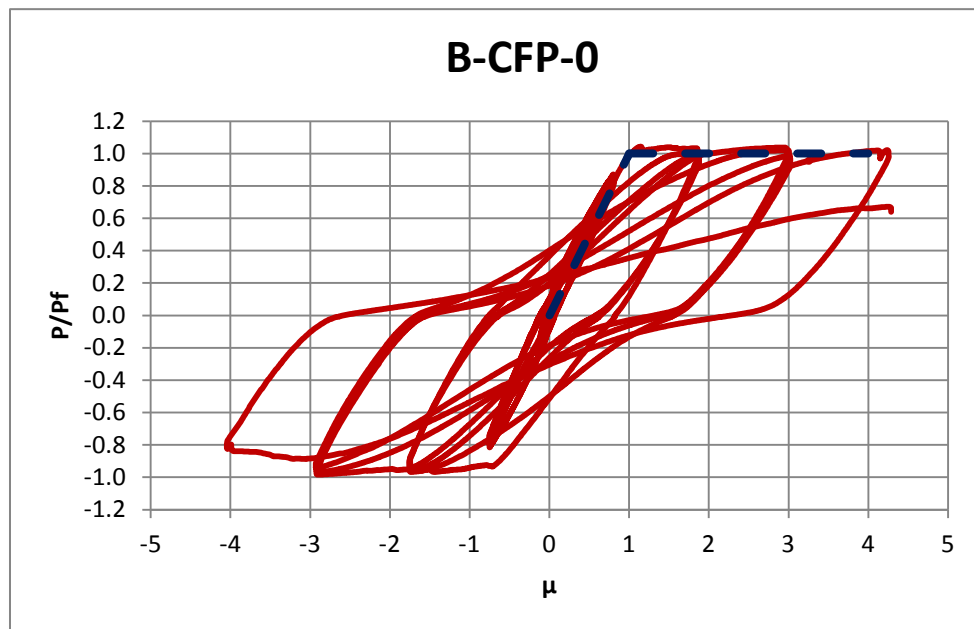
$$\mu_{fail} = \frac{\delta_{fail}}{\delta_{ny}}$$

(2) Σε **γαλάζιο** πλαίσιο αναγράφονται οι δ_{sust} και ο δείκτη πλαστιμότητας μ_{sustained} όπου,

$$\mu_{sust} = \frac{\delta_{sust}}{\delta_{ny}}$$

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.3.1 Δοκίμιο B-CFP-O



ΣΧΗΜΑ 4.1 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως ($P/P_f - \mu$), B-CFP-O.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε τέσσερις ομάδες ανακύκλισης με μέγιστη μετατόπιση δ_y , $2\delta_y$, $3\delta_y$ και $4\delta_y$ (όπου δ_y αντιστοιχεί στο φορτίο διαρροής του φορέα). Για κάθε ομάδα ανακύκλισης το δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις κύκλους (φόρτισης - αποφόρτισης). Αστοχία προκλήθηκε στον δεύτερο κύκλο της πέμπτης ομάδας (με μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση $4\delta_y$).

Στον πρώτο κύκλο, άρχισαν να αναπτύσσονται ρωγμές στο άνω πέλμα του δοκιμίου. Οι ρωγμές αυτές κατά την διάρκεια των δοκιμών άρχισαν να αυξάνονται (κατά εύρος και μήκος). Στο αριστερό τμήμα του δοκιμίου, μεταξύ του ανοιγμένου διατμητικού μήκους και στην περιοχή επιβολής του φορτίου, παρατηρήθηκε η ανάπτυξη έντονης διαγώνιας ρηγματώσης (*Εικόνα 4.1*). Κατά την αστοχία παρατηρήθηκε αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στο αριστερό τμήμα του δοκιμίου περιοχή στην οποία η καμπτική ροπή και η τέμνουσα δύναμη λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους (*Εικόνα 4.2, Σχήμα A.4, Κατανομή εντατικών μεγεθών στον φορέα*).

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το δ_{sust} προκύπτει από την τέταρτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 26,75 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 2,98. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή δ_{fail} ίση με 40,08 mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι $\mu_{fail} = 4,26$.

Το μέγιστο φορτίο (φέρουσα ικανότητα) το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 128,67 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τρίτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 26,49 mm.

Οι τιμές των ροπών αντοχής οι οποίες υπολογιστήκαν με βάση τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό (βλ. *Πινάκα 4.1*). Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 4,63 % .

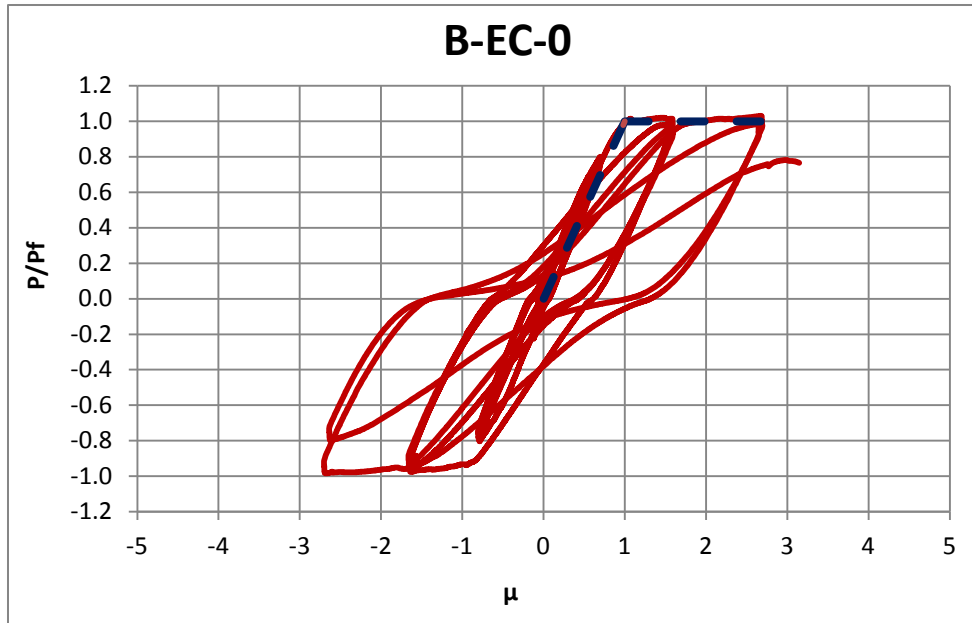


ΕΙΚΟΝΑ 4.1 Ανακυκλιζόμενη φόρτιση .



ΕΙΚΟΝΑ 4.2 Αστοχία του δοκιμίου υπό Ανακυκλιζόμενη φόρτιση χωρίς αξονικό φορτίο.

4.3.2 Δοκίμιο B-EC-O



ΣΧΗΜΑ 4.2 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως ($P/P_f - \mu$), B-EC-O.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις ομάδες ανακύκλισης με μέγιστη μετατόπιση δ_y , $2\delta_y$ και $3\delta_y$ (όπου δ_y αντιστοιχεί στο φορτίο διαρροής του φορέα). Για κάθε ομάδα ανακύκλισης το δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις κύκλους (φόρτισης-αποφόρτισης). Αστοχία προκλήθηκε στον τρίτο κύκλο της τρίτης ομάδας (με μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση $3\delta_y$).

Με τις πρώτες ανακυκλήσεις ρωγμές άρχισαν να αναπτύσσονται στο άνω πέλμα του δοκιμίου. Κατά την διάρκεια του πειράματος οι ρωγμές αυτές επεκτάθηκαν σταδιακά. Στο αριστερό τμήμα του δοκιμίου παρατηρήθηκε ανάπτυξη έντονης ρηγματώσης εντός του ανοιγμένου διατμητικού μήκους. Στο δεξί τμήμα του δοκιμίου η ρηγματώση επεκτείνεται από το άνω πέλμα του δοκιμίου προς το σημείο επιβολής τους φορτίου (*Εικόνα 4.3*). Κατά αστοχία παρατηρήθηκε η πλήρης αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στο δεξί τμήμα του δοκιμίου. Στην περιοχή αυτή αναπτύσσονται και οι μέγιστες τιμές καμπτικής ροπής και τέμνουσας δύναμης (*Εικόνα 4.4, Σχήμα Α.4 Κατανομή εντατικών μεγεθών στον φορέα*).

Από τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το δ_{sust} προκύπτει από την τέταρτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 16,35 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 1,65. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή δ_{fail} ίση με 30,52 mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι $\mu_{fail} = 3,08$.

Το μέγιστο φορτίο (φέρουσα ικανότητα), το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο, είναι 126,80 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τρίτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 26,49 mm.

Οι τιμές των ροπών αντοχής οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό (βλ. *Πίνακα 4.1*). Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 3,10 %.

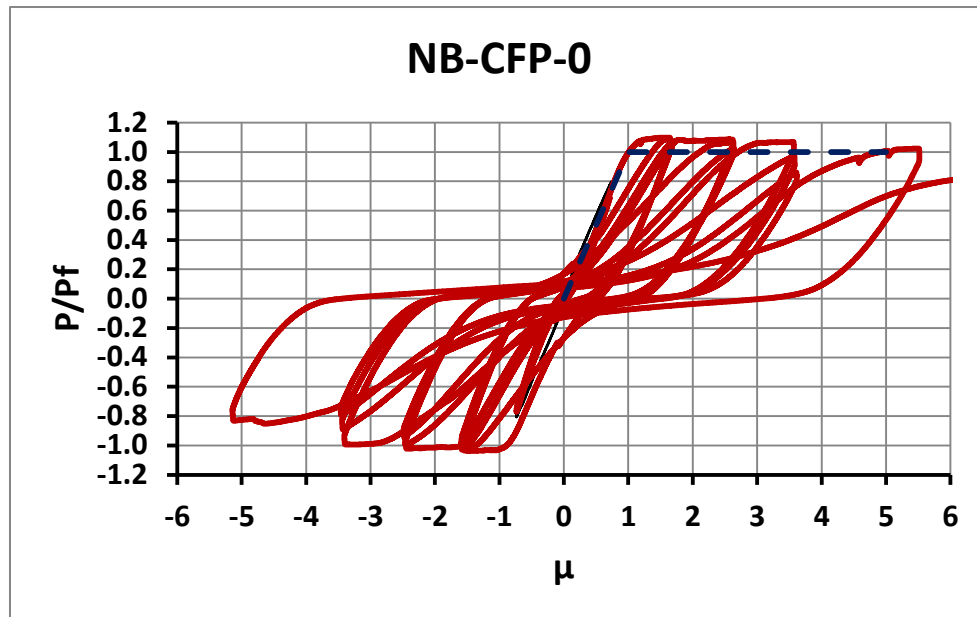


ΕΙΚΟΝΑ 4.3 Ανακυκλιζόμενη φόρτιση .



ΕΙΚΟΝΑ 4.4 Αστοχία δοκιμίου υπό Ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

4.3.3 Δοκίμιο NB-CFP-0



ΣΧΗΜΑ 4. Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως ($P/P_f - \mu$), NB-CFP-0.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε πέντε ομάδες ανακύκλισης με μέγιστη μετατόπιση δ_y , $2\delta_y$, $3\delta_y$, $4\delta_y$ και $5\delta_y$ (όπου δ_y αντιστοιχεί στο φορτίο διαρροής του φορέα). Για κάθε ομάδα ανακύκλισης το δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις κύκλους (φόρτισης-αποφόρτισης). Αστοχία προκλήθηκε στον δεύτερο κύκλο της πέμπτης ομάδας (με μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση $5\delta_y$).

Παρατηρείται ρηγμάτωση από την αρχή, στο ανοιγμένο διατμητικό μήκος του δοκιμίου. Με την πάροδο των δοκιμών παρατηρήθηκε ο σχηματισμός καμπτικής - διατμητικής ρωγμής στο δεξί τμήμα του δοκιμίου, μεταξύ του άνω πέλματος της στηρίξεως και επεκτείνεται προς το μέσον του δοκιμίου (**Εικόνα 4.5**). Εξαιτίας της καταστροφής της συνάφειας, παρατηρείται ρηγμάτωση σε μικρότερο βαθμό και αρχίζει αμέσως μετά το σημείο που υπάρχουν οι σωλήνες στο δοκίμιο (300mm δεξιά - αριστερά του κόμβου). Η αστοχία προκλήθηκε από κεκλιμένες καμπτικές - διατμητικές ρωγμές, που εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή 2 (συμφωνά με την μέθοδο ΤΘΔ) του φορέα και την αποδιοργάνωση του σκυροδέματος (**Εικόνα 4.6**).

Από τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το δ_{sust} προκύπτει από την τέταρτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 37,80 mm με

την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 3,61. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή δ_{fail} ίση με 70,06 mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι $\mu_{fail} = 4,51$.

Το μέγιστο φορτίο (φέρουσα ικανότητα) το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 128,20 kN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τρίτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 16,47 mm.

Οι τιμές των ροπών αντοχής οι οποίες υπολογιστήκαν με βάση τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό (βλ. *Πίνακας 4.1*). Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 9,72% .

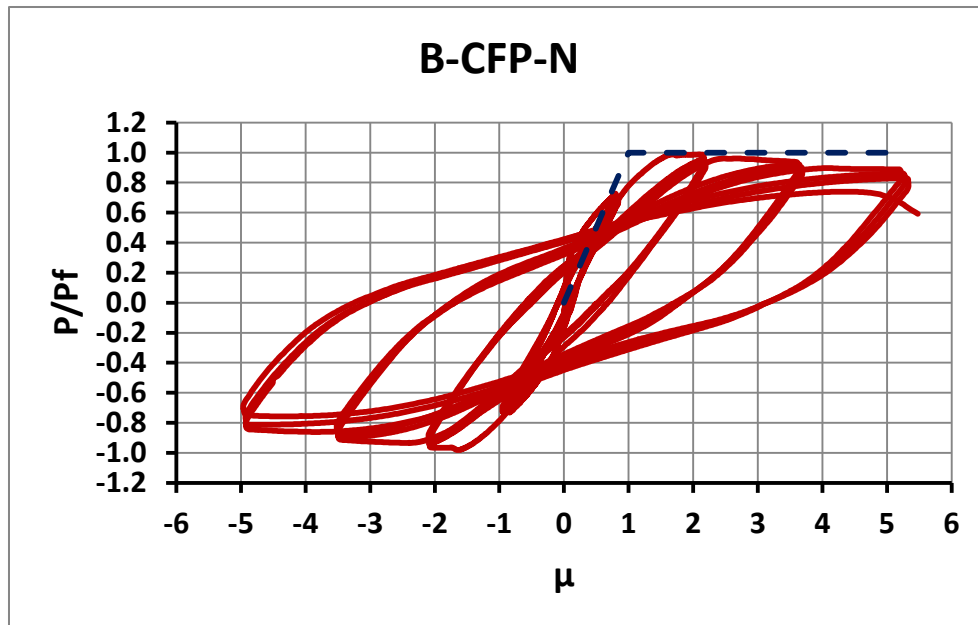


ΕΙΚΟΝΑ 4.5 Ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



ΕΙΚΟΝΑ 4.6 Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα μετά την διαρροή.

4.3.4 Δοκίμιο B-CFP-N



ΣΧΗΜΑ 4.4 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως ($P/P_f - \mu$), *B-CFP-N*.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε πέντε ομάδες ανακύκλισης με μέγιστη μετατόπιση δ_y , $2\delta_y$, $3\delta_y$, $4\delta_y$ και $5\delta_y$ (όπου δ_y αντιστοιχεί στο φορτίο διαρροής του φορέα). Για κάθε ομάδα ανακύκλισης το δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις κύκλους (φόρτισης-αποφόρτισης). Αστοχία προκλήθηκε στον πρώτο κύκλο της πέμπτης ομάδας (με μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση $5\delta_y$).

Με τις πρώτες ανακυκλήσεις άρχισαν να αναπτύσσονται στο άνω πέλμα μικρές ρωγμές. Με την πάροδο των δοκιμών επεκταθήκαν σταδιακά κυρίως στο δεξιό τμήμα του δοκιμίου, διπλά από τον κόμβο (Εικόνα 4.7). Επίσης αξίζει να αναφερθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής δημιουργήθηκαν λοξές ρωγμές, οι οποίες καταδεικνύουν την καμπτοδιατμητική αστοχία του μέλους (Εικόνα 4.8).

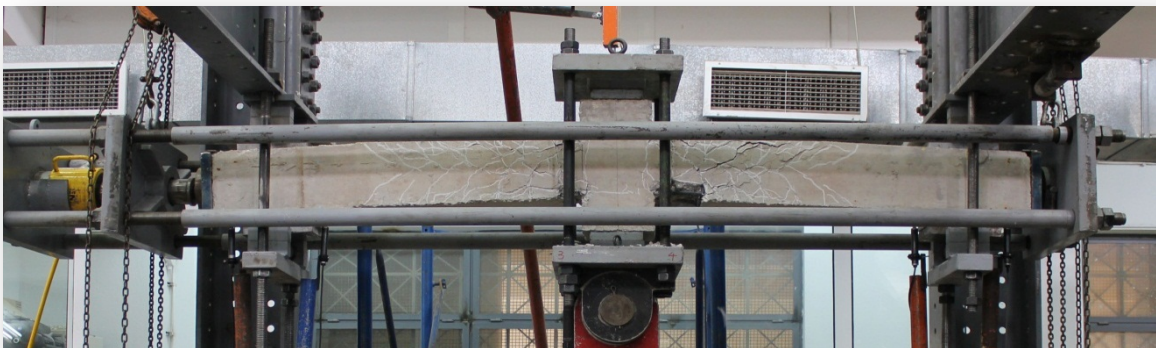
Από τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το δ_{sust} προκύπτει από την τέταρτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 35,86 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 5,33. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή δ_{fail} ίση με 36,33 mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι $\mu_{fail} = 5,40$.

Το μέγιστο φορτίο (φέρουσα ικανότητα) το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 164,14 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τρίτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 11,50 mm.

Οι τιμές των ροπές αντοχής οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό (βλ. *Πίνακας 4.1*). Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 1,38 % .

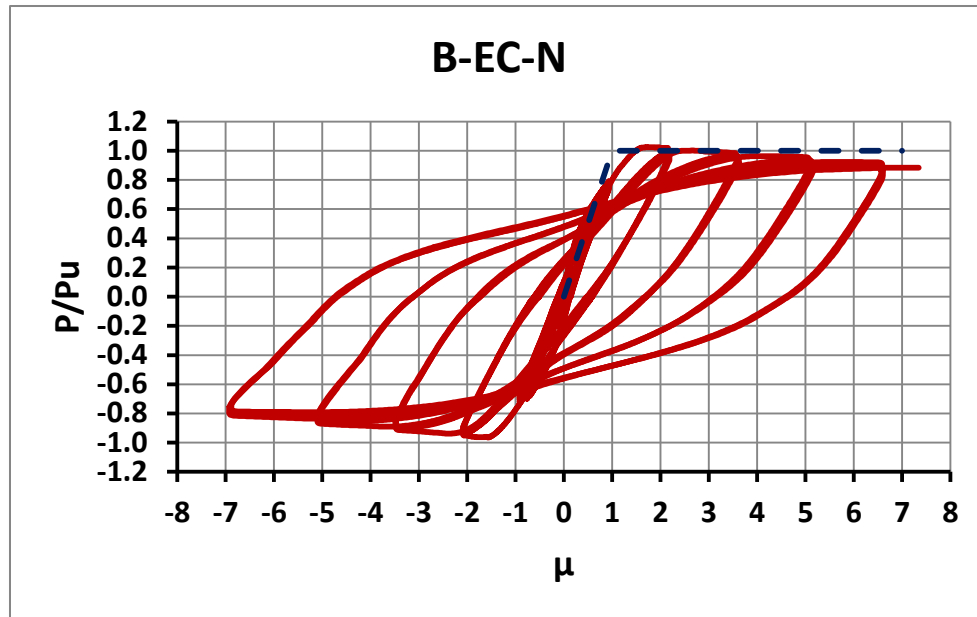


ΕΙΚΟΝΑ 4.7 Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα .



ΕΙΚΟΝΑ 4.8 Αστοχία δοκιμίου με αξονική δύναμη.

4.3.5 Δοκίμιο B-EC-N



ΣΧΗΜΑ 4.5 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως ($P/P_f - \mu$), B-EC-N.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε έξι ομάδες ανακύκλισης με μέγιστη μετατόπιση δ_y , $2\delta_y$, $3\delta_y$, $4\delta_y$, $5\delta_y$ και $6\delta_y$ (όπου δ_y αντιστοιχεί στο φορτίο διαρροής του φορέα). Για κάθε ομάδα ανακύκλισης το δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις κύκλους (φόρτισης-αποφόρτισης). Αστοχία προκλήθηκε στον πρώτο κύκλο της έκτης ομάδας (με μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση $6\delta_y$).

Παρατηρήθηκαν έντονες διαγώνιες ρωγμές που προεκτείνονται προς το άνω πέλμα, στην περιοχή του φορτίου επιβολής και προέκταση τους προς την θλιβόμενη ζώνη (**Εικόνα 4.10**). Η αστοχία του φορέα προκλήθηκε μετά τον σχηματισμό καμπτοδιατμητικών ρωγμών σε περιοχή «κρίσιμων μηκών» παράλληλα με πλήρη αποσάθρωση του σκυροδέματος περί το δεξιό τμήμα της πλαστικής άρθρωσης (**Εικόνα 4.11**).

Από τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το δ_{sust} προκύπτει από την τέταρτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 48,37 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 6,74. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας

παίρνει την τιμή δ_{fail} ίση με 57,41 mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι $\mu_{fail} = 8,00$.

Το μέγιστο φορτίο (φέρουσα ικανότητα) το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 170,3 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τρίτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 12,21 mm.

Οι τιμές των ροπές αντοχής οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό (βλ. *Πίνακας 4.1*). Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 5,27 % .

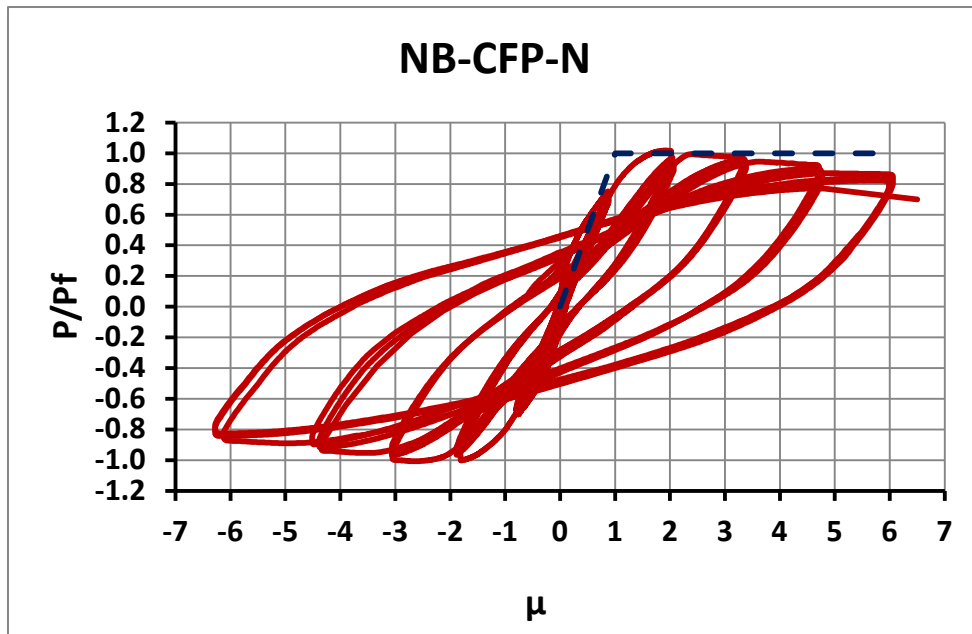


ΕΙΚΟΝΑ 4.9 Ρηγμάτωση του φορέα στην θέση επιβολής του εγκάρσιου φορτίου.



ΕΙΚΟΝΑ 4.10 Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα μετά την διαρροή.

4.3.6 Δοκίμιο NB-CFP-N



ΣΧΗΜΑ 4.6 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P/Pf – μ),N B-CFP-N.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε πέντε ομάδες ανακύκλισης με μέγιστη μετατόπιση δ_y , $2\delta_y$, $3\delta_y$, $4\delta_y$ και $5\delta_y$ (όπου δ_y αντιστοιχεί στο φορτίο διαρροής του φορέα). Για κάθε ομάδα ανακύκλισης το δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις κύκλους (φόρτισης-αποφόρτισης). Αστοχία προκλήθηκε στον πρώτο κύκλο της πέμπτης ομάδας (με μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση $5\delta_y$).

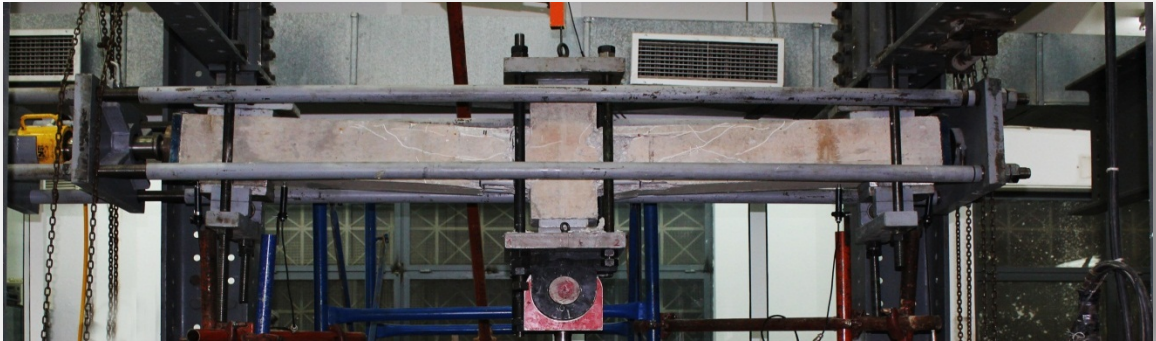
Με την πάροδο των δοκιμών παρατηρήθηκαν καμπτικές - διατμητικών ρωγμές να επεκτείνονται από το άνω πέλμα προς τη θέση της πλαστικής αρθρώσεως, καθώς και ο σχηματισμός μιας οριζόντιας ρωγμής που ξεκινά από το άνω πέλμα της στηρίξεως και επεκτείνεται προς το μέσον του δοκιμίου (**Εικόνα 4.11**). Εξαιτίας της καταστροφής της συνάφειας παρατηρείται μειωμένη ρηγμάτωση. Το δοκίμιο απώλεσε της φέρουσα ικανότητά του από την δημιουργία κεκλιμένων ρωγμών, που εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή 2(συμφωνά με την μέθοδο ΤΘΔ) του φορέα. Η ψαθυρή συμπεριφορά του δοκιμίου καταδεικνύεται στο δεξί τμήμα, διπλά από τον κόμβο (περιοχής του επιβαλλόμενου φορτίου) (**Εικόνα 4.12**). Στο δεξί τμήμα του δοκιμίου παρατηρήθηκε παραμόρφωση των σωλήνων που είχαν τοποθετηθεί για την καταστροφή της συνάφειας. Το δοκίμιο αποκτούσε μεγαλύτερη δυσκαμψία, αλλά μετά έπεφτε. Για τον λόγο αυτό το

πείραμα σταμάτησε μιας και οι δυνατότητες της πειραματικής διάταξης δεν το επέτρεπαν.

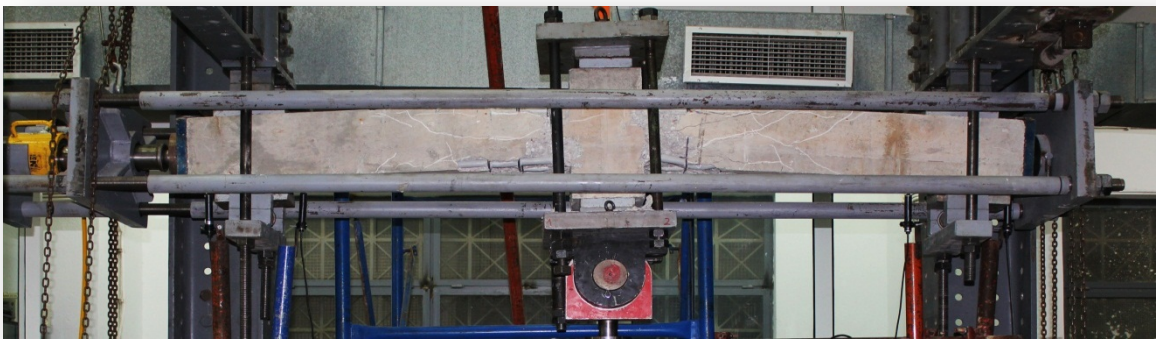
Από τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το δ_{sust} προκύπτει από την τέταρτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 48,17 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 6,27.

Το μέγιστο φορτίο (φέρουσα ικανότητα) το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 158,7 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τρίτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 14,76 mm.

Οι τιμές των ροπές αντοχής οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τα καταγεγραμμένα πειραματικά αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό (βλ. *Πίνακας 4.1*). Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου παρουσιάζεται μια διαφορά της τάξης του 4,95 % .



ΕΙΚΟΝΑ 4.11 Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα.



ΕΙΚΟΝΑ 4.12 Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα μετά την διαρροή.

5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία. Μέσω της απ' ευθείας παρατήρησης και καταγραφής της συμπεριφοράς μιας διάταξης, όπως η φέρουσα ικανότητα και ο τρόπος αστοχίας που προσδιορίστηκαν πειραματικά, παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τις προβλέψεις των μεθόδων υπολογισμού.

Μετά από προσεκτική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

ΤΘΔ – ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

- Όσον αφορά, τα δοκίμια που σχεδιαστήκαν με την μέθοδο της ΤΘΔ και τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό για N ίσον με μηδέν ($N = 0$), παρατηρήθηκε λιγότερο κατανεμημένη ρηγματώση στο δοκίμιο που σχεδιαστηκε σύμφωνα με την μέθοδο της ΤΘΔ.
- Η τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μ και στις δυο περιπτώσεις αντιστοιχεί σε υψηλό δείκτη πλαστιμότητας (DCH). Η τιμή της πλαστιμότητας στην ΤΘΔ υπερβαίνει αυτήν του κανονισμού.
- Στην περίπτωση που επιβλήθηκε αξονικό φορτίο ($N \neq 0$), και για τις δυο μεθοδολογίες σχεδιασμού παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά στην κατανομή ρηγματώσης στο δοκίμιο

ΤΘΔ – ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑ

- Τα δοκίμια που έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα τη μεθοδολογία της ΤΘΔ χωρίς συνάφειας χάλυβα – σκυροδέματος, διαπιστώνεται ότι έχουν μικρότερο αριθμό ρωγμών αλλά με μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τα δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς με συνάφεια.
- Στην περίπτωση όπου δε επεβλήθη αξονικό φορτίο ($N=0$) η αστοχία προκλήθηκε στο ανοιγμένο διατμητικό μήκος του δοκιμίου .
- Στην περίπτωση παρουσίας αξονικού φορτίου ($N \neq 0$), το δοκίμιο είχε λιγότερη ρηγματώση με τις ρωγμές να αναπτύσσονται συμμετρικά σε όλο το μήκος του δοκιμίου

ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑ – ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

- Στην περίπτωση όπου δε επεβλήθη αξονικό φορτίο ($N=0$), παρατηρήθηκε διαφορετική κατανομή των ρωγμών, στην περίπτωση που δε είχαμε συνάφεια αναπτύχθηκαν λιγότερες ρωγμές αλλά με μεγαλύτερο εύρος στην περιοχή του ανοιγμένου διατμητικού μήκους ενώ όταν είχαμε συνάφεια οι ρωγμές που αναπτύχθηκαν ήταν περισσότερες και ομοιόμορφα κατανεμημένες.
- Η αυξημένη τιμή πλαστιμότητας του δοκιμίου που σχεδιάστηκε χωρίς συνάφειας αποτελεί μια απόδειξη για την καλύτερη δομική συμπεριφορά αυτού.
- Λιγότερη ρηγματώση είχε το πρώτο δοκίμιο στην περίπτωση παρουσίας αξονικού φορτίου ($N \neq 0$) σε σχέση με αυτό του κανονισμού.
- Η τιμή της πλαστιμότητας, του δοκιμίου του κανονισμού περίπου ίδιες, αλλά αξίζει να σημειωθεί το δοκίμιο NB-CFP-N ότι θα μπορούσε να συνεχίσει – Επερνέ φορτίο (σταμάτησε γιατί οι συνθήκες της διάταξη δεν το επέτρεπαν).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΘΔ

A.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Το παρόν κεφάλαιο αφορά τον αναλυτικό υπολογισμό της καμπτικής αντοχής των δοκιμίων τα οποία αποτελούν ραβδωτούς πρισματικούς φορείς ραβδωτοί πρισματικοί φορείς όπως αυτά φαίνονται στο *Σχήμα A.4*. Τα δοκίμια έχουν μήκος 1950mm και ορθογωνική διατομή 200x200 mm.

Η αντοχή του σκυροδέματος f_c σε μονοαξονική θλίψη και η τάση διαρροής του χάλυβα σε εφελκυσμό, προσδιορίστηκαν από δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος τα οποία ελήφθησαν κατά την σκυροδέτηση και από δοκιμές σε ράβδους χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε τόσο στον εγκάρσιο όσο και στον διαμήκη οπλισμό, αντίστοιχα. Η τιμή για την αντοχή του σκυροδέματος είναι f_c ίση με 34 MPa ενώ τιμή της τάσης διαρροής και της εφελκυστικής αστοχίας του διαμήκη οπλισμού f_{ywd} ίση με 300MPa. Η κατανομή των θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα θεωρείται ότι είναι ορθογωνική σε όλο το ύψος της θλιβόμενης ζώνης (x) και έχει τιμή ίση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Η καμπτική αντοχή υπολογίσθηκε για πλήρη εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής του εφελκυόμενου διαμήκους οπλισμού (ανεξάρτητα αν αυτό δεν είναι συμβιβαστό με την διατήρηση της επιπεδότητας της διατομής). Το μέτρο ελαστικότητας (E) του χάλυβα λαμβάνεται ίσο με $E=200$ GPa. Τέλος, σημειώνεται ότι όλοι οι υπολογισμοί έγιναν χωρίς συντελεστές ασφαλείας.

A.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Μοναδική προϋπόθεση για πλάστιμη μορφή καμπτικής αστοχίας είναι την στιγμή που η παραμόρφωση του εφελκόμενου οπλισμού είναι ίση με την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα η ανηγμένη παραμόρφωση της ακραίας ίνας του σκυροδέματος να είναι μικρότερη από 3.5%. Από τις εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων καθώς και ισοροπίας των δυνάμεων της διατομής και θεωρώντας παραμόρφωση σκυροδέματος 3.5‰ για την ακραία θλιβόμενη ίνα, τον εφελκόμενο οπλισμό να έχει διαρρεύσει ενώ τον διαμήκη θλιβόμενο όχι υπολογίζεται το βάθος της θλιβόμενης ζώνης (x). Η τιμή της θλιβόμενης ζώνης ελέγχεται από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων ώστε να ισχύει η υπόθεση για τις παραμορφώσεις του εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού.

Για το υπολογισμό της ροπής αντοχής θεωρούμε ότι η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος δίνεται από τη σχέση:

$$F_c = x \cdot b \cdot f_c$$

Σύμφωνα με το συμβιβαστό των παραμορφώσεων οι τιμές των παραμορφώσεων του εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(d-x)\varepsilon_c}{x} \quad \varepsilon_{s2} = \frac{(x-d)}{x} \cdot \varepsilon_c, \text{ αντίστοιχα.}$$

Σύμφωνα με την αρχική υπόθεση η δύναμη του εφελκόμενου οπλισμού δίδεται από την σχέση :

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot f_y$$

ενώ του διαμήκη θλιβόμενου από την σχέση

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E = A_{s2} \cdot \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_c \cdot E$$

A.2.1 Υπολογισμοί δοκιμίων NB-CFP-O

- $F_c = 34 \text{ Mpa}$
- $f_y = 540 \text{ MPa}$
- $b = 200 \text{ mm}$
- $h = 200 \text{ mm}$
- $d_1 = 21 \text{ mm}$
- $d = 179 \text{ mm}$

$$A_s = 3\Phi 16 = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 16^2}{4} = 602,88 \text{ mm}^2$$

$$F_{s1} = A_s \times f_y = 602,88 \times 540 = 325,56 \text{ KN}$$

$$A1 = f_c \cdot b = 34 \cdot 200 = 6800$$

$$A2 = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_c - A_{s1} \cdot f_y - N = 96460,8$$

$$A3 = -A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_c \cdot d1 = -8,86 \cdot 10^6$$

$$x = \frac{[-A2 + (A2^2 - 4 \cdot A1 \cdot A3)^{0,5}]}{2A1} = 29,7 \text{ mm}$$

$$z = \frac{d - x}{2} = 164,2 \text{ mm}$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 123,606 \text{ KN}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(d - x) \cdot \varepsilon_c}{x} = 1,76 \cdot 10^{-2}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{(x - d1)}{x} \varepsilon_c = 1,03 \cdot 10^{-3}$$

$$F_c = x \cdot b \cdot f_c = 201,950 \text{ KN}$$

$$M_f = \left[FS1 \left(\frac{h}{2} - d1 \right) + Fc \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2} \right) + FS2 \left(\frac{h}{2} - d1 \right) \right] = 52,7 \text{ KNm}$$

A.2.2 Υπολογισμοί δοκιμίων Β-CFP-N και NB-CFP-N, όπου N= 280KN

$$A_s = 3\Phi 16 = \frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 16^2}{4} = 602,88 \text{ mm}^2$$

$$F_{s1} = A_s \times f_y = 602,88 \times 540 = 325,56 \text{ KN}$$

$$A1 = f_c \cdot b = 6800$$

$$A2 = AS2 \cdot E_s \cdot \varepsilon_c - AS1 \cdot f_y - N = -183539,2$$

$$A3 = -AS2 \cdot E_s \cdot \varepsilon_c \cdot d1 = -8,86 \cdot 10^6$$

$$x = \frac{[-A2 + (A2^2 - 4 \cdot A1 \cdot A3)^{0,5}]}{2A1} = 52,0 \text{ mm}$$

$$z = \frac{d-x}{2} = 153,0 \text{ mm}$$

$$FS2 = AS2 \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 251,706 \text{ KN}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(d-x) \cdot \varepsilon_c}{x} = 8,54 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{(x-d1)}{x} \varepsilon_c = 2,09 \cdot 10^{-3}$$

$$Fc = x \cdot b \cdot f_c = 353,849 \text{ KN}$$

$$M_f = \left[FS1 \left(\frac{h}{2} - d1 \right) + Fc \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2} \right) + FS2 \left(\frac{h}{2} - d1 \right) \right] \Rightarrow M_f = 71,8 \text{ KNm}$$

A.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Ως ροπή διαρροής μιας διατομής νοείται η ροπή εκείνη που καταπονεί την διατομή και η οποία προκαλεί ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής στο πρώτο από τα στοιχεία: άνω θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος ή εφελκόμενος οπλισμός. Ως ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής σκυροδέματος νοείται ε_c ίση με 2‰ ενώ για τον συγκεκριμένο χάλυβα ε_s ίσο με 2,71‰. Λόγω της παρουσίας αξονικού θλιπτικού φορτίου, το πιθανότερο είναι η ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος να λαμβάνει τιμή ανηγμένης παραμόρφωση ίση με την παραμόρφωση διαρροής προτού διαρρεύσει ο εφελκόμενος οπλισμός (η υπόθεση αυτή ελέγχεται από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων μετά τον προσδιορισμό του βάθους της θλιβόμενης ζώνης).

Για το υπολογισμό της ροπής διαρροής θεωρούμε ότι οι θλιπτικές τάσεις στην θλιβόμενη ζώνη έχουν τριγωνική κατανομή και η θλιπτική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$F_c = \frac{1}{2} \cdot x \cdot b \cdot f_c$$

A.3.1 Υπολογισμοί δοκιμίων NB-CFP-O

$$A_1 = 0.5 \cdot b \cdot f_c = 3400$$

$$A_2 = E_s A_{s1} \varepsilon_s + E_s A_{s2} \varepsilon_s + N = 4.82 \cdot 10^5$$

$$A_3 = -\varepsilon_s A_{s2} E_s d_1 - E_s d A_{s1} \varepsilon_s = -4.82 \cdot 10^7$$

$$x = \frac{[-A_2 + (A_2^2 - 4 \cdot A_1 \cdot A_3)^{0.5}]}{2 \cdot A_1} = 67.7 \text{ mm}$$

$$z = \frac{d - x}{3} = 156.4 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x}{x \cdot \varepsilon_c} = 3.29 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x - d_1}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.38 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_c = 0.002$$

$$F_{s1} = A_{s1} \varepsilon_{s1} = 396.506$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 166.343$$

$$F_c = \frac{1}{2} b \cdot f_c \cdot \varepsilon_{s1} = 230.163$$

$$M_f = \left[FS1 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1 \right) + F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3} \right) + FS2 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1 \right) \right] \Rightarrow M_f = 62.3 \text{ KNm}$$

A.3.2 Υπολογισμοί δοκιμίων B-CFP-N και NB-CFP-N, όπου N= 280KN

$$A_1 = 0.5 \cdot b \cdot f_c = 0.5 \cdot 280 \cdot 55 = 3400$$

$$A_2 = E_s A_{s1} \varepsilon_s + E_s A_{s2} \varepsilon_s + N = 2.02 \cdot 10^5$$

$$A_3 = -\varepsilon_s A_{s2} E_s d_1 - E_s d A_{s1} \varepsilon_s = -4.82 \cdot 10^7$$

$$x = \frac{[-A_2 + (A_2^2 - 4 * A_1 * A_3)^{0.5}]}{2A_1} = 93.0mm$$

$$z = \frac{d - x}{3} = 148.0mm$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d - x}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.85 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x - d_1}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.55 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_c = 0.002$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1} = 222.944$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 186.705$$

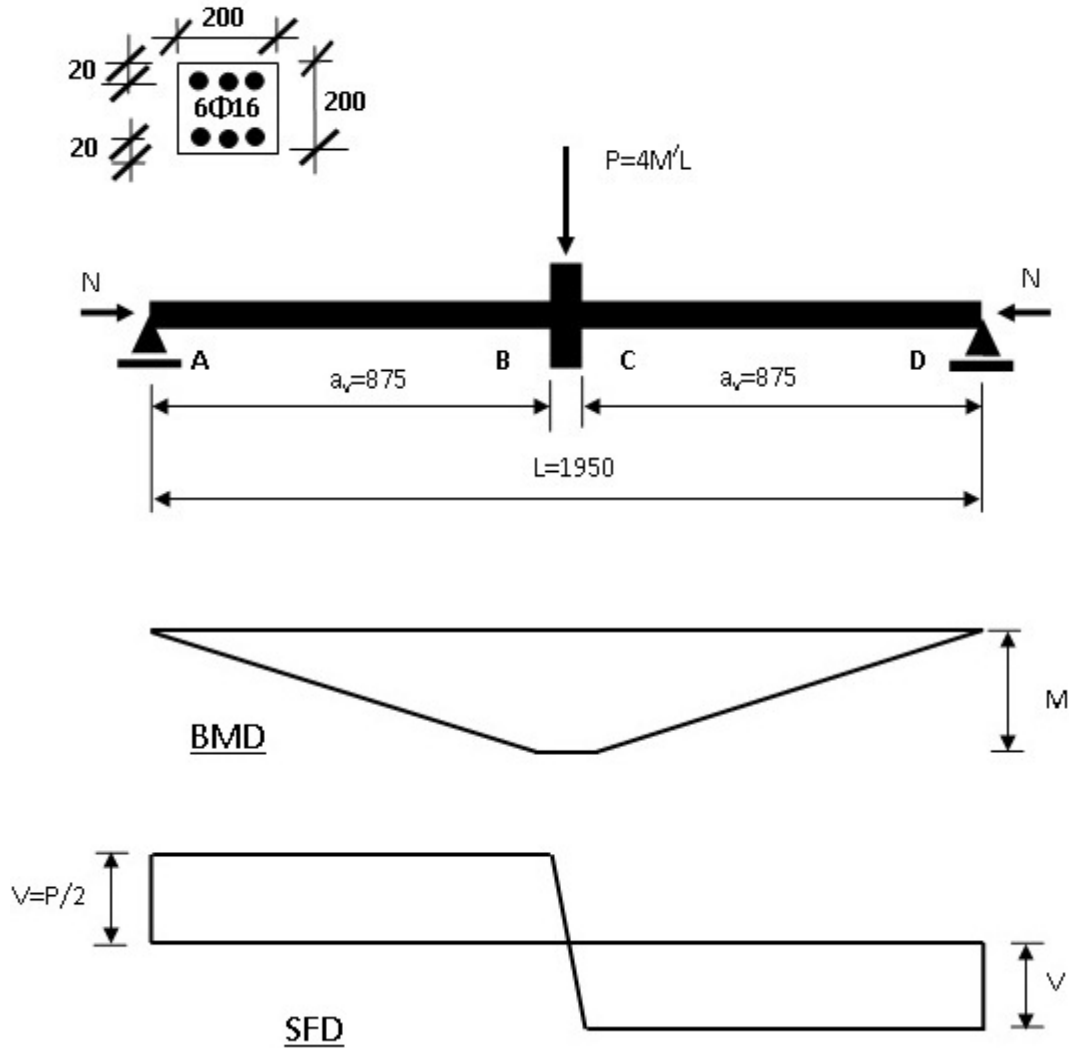
$$F_c = \frac{1}{2} b \cdot f_c \cdot \varepsilon_{s1} = 316.239$$

$$M_f = \left[FS1 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1 \right) + Fc \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3} \right) + FS2 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1 \right) \right] \Rightarrow M_f = 54.2KNm$$

A.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ

Ο υπολογισμός του εγκάρσιου σπλισμού γίνεται με βάση τη μέθοδο της *Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης* για την περίπτωση συμπεριφοράς τύπου II, όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Ακολουθεί η διαδικασία ελέγχου αντοχής σε τέμνουσα, με στόχο να αποτραπεί κάθε μορφή αστοχίας πριν την εξάντληση της αντοχής της δοκού σε κάμψη.

Κατωτέρω δίνονται τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών του φορέα.



ΣΧΗΜΑ Α.4 Κατανομή εντατικών μεγεθών του φορέα

Α.4.1 Υπολογισμοί δοκιμίων NB-CFP-O

Ελάχιστος εγκάρσιος οπλισμός

Οπλισμός ικανός να αναλαμβάνει ένταση $0,5MPa$

Ελάχιστη απόσταση μεταξύ συνδετήρων $\frac{d}{2} = \frac{179}{2} = 89.50$

- $M_y = 62.3$

- $M_f = 52.7$
- $f_t = 2.65 \text{ Mpa}$
- $F_c = 34 \text{ KN}$
- $x = 29.7 \text{ mm}$

Συνδετήρες Φ6 τρίμητοι : $89,50 \text{ mm}^2$

Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 1

- $\alpha_v = 875 \text{ mm}$
- $d = 179 \text{ mm}$
- $\alpha_v / d = 4.9 > 2.5$

⇒ Συμπεριφορά κατηγορίας II

$$V_{sd} = 52.7 \text{ KN}$$

$$T_{II,1} = 0.5 \cdot b \cdot d \cdot f_t = 47.4$$

$$V_{II,2} = F_c \cdot [1 - 1 / (1 + 5f_t / f_c)] = 56.6 \text{ KN}$$

$$V_w = 52.7 \text{ KN}$$

$$A_{w(2d)} = \frac{128.2 \cdot 1000}{f_{y=300}} = 175.6 \text{ mm}^2$$

$$s = 89.5 \text{ mm}$$

$$A_{w(2d)} = \frac{128.2 \cdot 1000}{f_{y=300}} = 175.6 \text{ mm}^2$$

$$s = 89.5 \text{ mm}$$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 2

$$A_{w(2d)} = 143.2 \text{ mm}^2$$

$$s = 106 \text{ mm}$$

A.4.2 Υπολογισμοί δοκιμίων B-CFP-N και NB-CFP-N, όπου N= 280KN

$$M_y = 54.2KNm$$

$$M_f = 72.7KNm$$

$$f_t = 2.65MPa$$

$$F_c = 353.8KN$$

$$x = 52mm$$

Συνδετήρες Φ6 τριμητοι: $84.82mm^2$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 1

$$a_v = 875mm$$

$$d = 179mm$$

$$a_v / d = 4.9 > 2,5$$

⇒ Συμπεριφορά κατηγορίας II

$$V_{sd} = Mf = 72.7KN$$

$$T_{II,1} = 0.5bdf_t = 47.4$$

$$V_{II,2} = F_c[1 - 1 / (1 + 5f_t / f_c)] = 99.2KN$$

$$V_w = 72.7KN$$

$$A_{w(2d)} = 239.3mm^2$$

$$s = 84.6mm$$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 2

$$A_{w(2d)} = 103.3mm^2$$

$$s = 98mm$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

Β.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΙΑ ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΔΥΝΑΜΗ

Β. Στοιχεία στα οποία απαιτείται κατά το σχεδιασμό οπλισμός διάτμησης

- $b_c = 200 \text{ mm}$
- $h_c = 200 \text{ mm}$
- $b_i = 179 \text{ mm}$
- $h_o = 190 \text{ mm}$

Β.1.1 Υπολογισμοί για Β-ΕC-0

$$f_{ck} = 60 \text{ Mpa}$$

$$A_{sw} = \frac{3 \cdot \pi \cdot 6^2}{4} = 84,78$$

$$s_w = 160$$

$$f_{yv} = 300 \text{ Mpa}$$

$$\cot \theta = 2,5$$

$$z = 0,9 \cdot d = 161,10$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{yv} \cdot \cot \theta = 64,02$$

$$V_{Rd,max} = \frac{a \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = 266,65$$

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s}; V_{Rd,max} \} = 64,02$$

$$AS_{\min} = \frac{V_{Rd}}{f_{yv}} = 213,41$$

Βάσει των παραπάνω υπολογίζεται η αντοχή σε τέμνουσα του δοκιμίου με την παρουσία εγκάρσιου οπλισμού. Έτσι εκλέγονται τρίμητοι συνδετήρες **Φ6/80**.

B.1.2 Υπολογισμοί για B-EC-N

$$f_{ck} = 60 \text{ Mpa}$$

$$A_{sw} = \frac{3 \cdot \pi \cdot 6^2}{4} = 84,78$$

$$s_w = 90$$

$$f_{yv} = 300 \text{ Mpa}$$

$$\cot \theta = 2.5$$

$$z = 0.9 \cdot d = 161.10$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{yv} \cdot \cot \theta = 113.82$$

$$V_{Rd,max} = \frac{a \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = 266,65$$

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s}; V_{Rd,max} \} = 113.82$$

$$AS_{\min} = \frac{V_{Rd}}{f_{yv}} = 379.39$$

Βάσει των παραπάνω υπολογίζεται η αντοχή σε τέμνουσα του δοκιμίου με την παρουσία εγκάρσιου οπλισμού. Έτσι εκλέγονται τρίμητοι συνδετήρες **Φ6/30**.

B.2 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ Ο ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΕΩΣ

B.2.1 Υπολογισμοί για B-EC-0

Στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης (EC8- 5.4.3.2.2), δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\omega_w = \frac{\text{όγκος κλειστών συνδετήρων}}{\text{όγκος σκυροδέματος πυρήνα}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 765.1 \text{ cm}^2$$

$$q_o = 1.5 - 2$$

$$\mu_\phi = 2 \cdot q - 1 = 2 \cdot 1.5 - 1 = 2$$

$$w_w = 765.1 \cdot 28.26 = 21621.73$$

$$\varepsilon_{syd} = \frac{f_{ywd}}{200000} = \frac{300}{200000} = 0.0015$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης και ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του εντός των συνδετήρων όγκου του σκυροδέματος και απολαμβάνει περισφιγξεως είναι ίσος με $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0.564$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_o \cdot h_o} = 0.754$$

Επομένως, ο πρόσθετος οπλισμός που θα τοποθετηθεί στις κρίσιμες περιοχές του φορέα υπολογίζεται από την επαλήθευση των παρακάτω σχέσεων, εφαρμόζοντας τον απαραίτητο αριθμό δοκιμών, ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

$$w_c = b_o \cdot h_o \cdot s = 1710000$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = 0.748$$

$$\alpha \omega_w \geq 30 \cdot V_d \cdot \mu_\phi \cdot \varepsilon_{syd} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035 \Rightarrow 0.142489 > -0.035$$

$$s = \min \left\{ \frac{b_o}{2}; 175mm; 8d_{bt} \right\} = 300mm$$

Άρα, εντός των κρίσιμων περιοχών θα τοποθετηθούν συνδετήρες **Ø6/80**:

B.2.2 Υπολογισμοί για B-EC-N

Στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περισφιγξης: (EC8- 5.4.3.2.2), δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\omega_w = \frac{\text{όγκος κλειστών συνδετήρων}}{\text{όγκος σκυροδέματος πυρήνα}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 765.1 \text{ cm}^2$$

$$q_o = 1.5 - 2$$

$$\mu_\phi = 2 \cdot q - 1 = 2 \cdot 1.5 - 1 = 2$$

$$V_d = \frac{N_{ed}}{(A_c \cdot f_{cd})} = 0.206 \leq 0.65$$

$$w_w = 765.1 \cdot 28.26 = 21621.73$$

$$\varepsilon_{syd} = \frac{f_{ywd}}{2000000} = 0.0015$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης και ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του εντός των συνδετήρων όγκου του σκυροδέματος και απολαμβάνει περισφιγξεως είναι ίσος με $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0.564$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_o \cdot h_o} = 0.754$$

Επομένως, ο πρόσθετος οπλισμός που θα τοποθετηθεί στις κρίσιμες περιοχές του φορέα υπολογίζεται από την επαλήθευση των παρακάτω σχέσεων, εφαρμόζοντας τον απαραίτητο αριθμό δοκιμών, ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

$$w_c = b_o \cdot h_o \cdot s = 1710000$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = 0.747$$

$$\alpha \omega_w \geq 30 \cdot V_d \cdot \mu_\phi \cdot \varepsilon_{syd} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035 \Rightarrow 0.142489 > 0.022647$$

$$s = \min \left\{ \frac{b_o}{2}; 175mm; 8d_{bl} \right\} = 300mm$$

Άρα, εντός των κρίσιμων περιοχών θα τοποθετηθούν συνδετήρες **Φ6/30**.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μ.Δ.Κωτσοβός, «Εισαγωγή στο Σχεδιασμό Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με τη Μέθοδο της Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης». Εκδόσεις Ε.Μ.Π 1999.
2. Μ.Δ.Κωτσοβός, «ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - Εισαγωγή στο σχεδιασμό με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο των κανονισμών». Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2001.
3. Ευρωκώδικας 2 (EC2) ENV 1992, «Σχεδιασμός Κατασκευών από Σκυρόδεμα».
4. Ευρωκώδικας 8 (EC8) ENV 1998, «Αντισεισμικός Σχεδιασμός των Κατασκευών».
5. Θ. Τάσιος, Π. Γιαννόπουλος, Ε. Βινζηλαίου, Π. Πλαϊνης, Ι.Σιγάλας, Κ. Τρέζος και Σ. Τσουκαντάς, «Σημειώσεις για τις Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα». Εκδόσεις Ε.Μ.Π 2003.
6. Πενέλης, Α Καππος, «Αντισεισμικές Κατασκευές από Σκυρόδεμα». Εκδόσεις ΖΗΤΗ 1990.
7. Π.Ι. Γιαννόπουλος, «Πλαστιμότητα κατασκευών από Οπλισμένο Σκυροδέμα».
8. Α. Μπάκα, «Κατασκευές από Σκυρόδεμα»