

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Πρόλογος</b> .....	1
<b>Εισαγωγή</b> .....	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
<b>Μεθοδολογία Σχεδιασμού</b> .....	7
2.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ.....	7
2.1.1 Εισαγωγή.....	7
2.1.2 Λειτουργία Αμφιέριστης Δοκού.....	8
2.1.3 Συμβολή Αρηγμάτωτου και Ρηγματωμένου Σκυροδέματος.....	12
2.1.4 Αίτια Αστοχίας.....	14
2.1.5 Κατάταξη Ειδών Αστοχίας.....	17
2.1.6 Συμπεράσματα.....	20
2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	21
2.2.1 Κριτήριο Αστοχίας.....	23
2.2.2 Υπολογισμός Διαμήκη Οπλισμού.....	24
2.2.3 Γραμμικά Στοιχεία Κατηγορίας II.....	26
2.3 ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ.....	31
2.3.1 Εισαγωγή.....	31
2.3.2 Αντοχή Διαμήκους Θλιπτήρα και Ελκυστήρα.....	32
2.3.3 Αντοχή Διαγώνιων Θλιπτήρων και Εγκάρσιων Ελκυστήρων.....	33
2.3.4 Δομικά Στοιχεία με Σταθερό Πάχος.....	36
2.3.5 Θεμελιώδεις Παραδοχές.....	38
2.3.5 Πλαστιμότητα και Τρόποι που Επιτυγχάνεται.....	39
2.3.6 Ο Μηχανισμός και ο Οπλισμός Περισφίξεως.....	42
<b>Πειραματική Διαδικασία</b> .....	48
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	48
3.1.1 Περιγραφή Δοκιμίων.....	48
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	49
3.2.1 Διεξαγωγή Πειράματος.....	53
3.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	54

3.4	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	56
3.4.1	Διάταξη Οπλισμών από Σχεδιασμό .....	58
	<b>Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών.....</b>	<b>62</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	62
4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	63
4.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	66
4.3.1	Δοκίμιο A1-ΤΘΔ-M750. ....	66
4.3.2	Δοκίμιο A2-ΤΘΔ-A750. ....	68
4.3.3	Δοκίμιο A3-ΤΘΔ-M630. ....	71
4.3.4	Δοκίμιο A4-ΤΘΔ-A630. ....	73
4.3.5	Δοκίμιο A5-ΤΘΔ-M500. ....	76
4.3.6	Δοκίμιο A6-ΤΘΔ-A500. ....	79
	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>82</b>
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	
	<b>Μεθοδολογία Σχεδιασμού ΤΘΔ .....</b>	<b>84</b>
A.1	Υπολογισμός Ροπών Αντοχής Διατομών .....	84
A.2	Υπολογισμός Ροπών Αντοχής Διατομών .....	85
A.2.1	Με Αξονική Δύναμη N= 750.....	87
A.2.2	Με Αξονική Δύναμη N= 630.....	88
A.2.3	Με Αξονική Δύναμη N= 500.....	90
A.3	Υπολογισμός ροπής διαρροής.....	91
A.3.1	Με Αξονική Δύναμη N= 750.....	92
A.3.2	Με Αξονική Δύναμη N= 630.....	92
A.3.3	Με Αξονική Δύναμη N= 500.....	93
A.4	Σχεδιασμός έναντι τέμνουσας.....	93
A.4.1	Με αξονική Δύναμη N= 750 .....	94
A.4.2	Με αξονική Δύναμη N= 630 .....	96
A.4.3	Με αξονική Δύναμη N= 500 .....	97
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b>	<b>98</b>
	<b>ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ .....</b>	<b>98</b>

B.1	Διαστασιολόγηση για τέμνουσα δύναμη.....	98
B.1.1	Με αξονική Δύναμη $N=750\text{KN}$ .....	99
B.1.2	Με αξονική Δύναμη $N=630\text{KN}$ .....	100
B.1.3	Με αξονική Δύναμη $N=500\text{KN}$ .....	101
B.2	Ο Μηχανισμός και ο Οπλισμός Περισφίξεως.....	102
B.2.1	Με Αξονική Δύναμη $N=750\text{KN}$ .....	102
B.2.2	Με Αξονική Δύναμη $N=630\text{KN}$ .....	103
B.2.3	Με Αξονική Δύναμη $N=500\text{KN}$ .....	104
<b>Βιβλιογραφία</b>	.....	<b>106</b>

## ΣΧΗΜΑΤΑ

2.1	Σχηματική απεικόνιση ρηγματώσεως και παραμορφωμένου σχήματος αμφιέριστης δοκού λίγο πριν την αστοχία.....	7
2.2	Εσωτερικές δράσεις ισοδύναμες με την καμπτική ροπή και τέμνουσα δύναμη σε διατομή που περιλαμβάνει ρωγμή.....	8
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.....	9
2.4	Μηχανισμός μεταφοράς εξωτερικού φορτίου στη στήριξη: (α) δράση προβόλου, (β)αλλαγή στη διεύθυνση της θλιπτικής δύναμης .....	10
2.5	Πειραματικές καμπύλες τάσεως-ανηγμένης παραμορφώσεως σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη .....	11
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 .....	12
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).....	13
2.8	Επίδραση τοπικής απώλειας συνάφειας στην εφελκυστική δύναμη που αναλαμβάνει ο καμπτικός χάλυβας.....	15
2.9	Ανακατανομή εσωτερικών δυνάμεων λόγω απώλειας συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και διαμήκη οπλισμού.....	16
2.10	Χαρακτηριστικές κατηγορίες συμπεριφοράς αμφιέριστης δοκού στην οριακή κατάσταση αστοχίας της.....	17
2.11	(α) Φυσικό προσομοίωμα («χτένα») αμφιέριστης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εγκάρσιο φορτίο .....	21
2.11	(β) Επίδραση αξονικού φορτίου στο φυσικό προσομοίωμα της δοκού.....	22
2.12	Υπολογισμός καμπτικής αντοχής του φυσικού προσομοιώματος της δοκού.....	23
2.13	Οριακή κατάσταση αστοχίας – επισήμανση των κρίσιμων μηκών.....	25
2.14	Απώλεια της συνάφειας.....	27
2.15	Εσωτερικές δυνάμεις καθ' ύψος της διατομής.....	31
2.16	«λοιποί» μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας.....	33
2.17	Συμβολισμοί για δομικά στοιχεία καταπονούμενα από τέμνουσα δύναμη .....	35

<b>2.18</b>	Η περίσφιγξη του σκυροδέματος σε ορθογωνικές διατομές που επιτυγχάνεται μέσω καμπύλωσης των γωνιών.....	41
<b>2.19</b>	Διάταξη των συνδετήρων των δοκών .....	42
<b>2.20</b>	Χαρακτηριστικά περίσφιγξης .....	44
<b>3.1</b>	Πειραματική διάταξη. ....	48
<b>3.2</b>	Σύστημα επιβολής αξονικού φορτίου (α) υδραυλικός γρύλος και (β) ηλεκτροκίνητη αντλία λαδιού. ....	49
<b>3.3</b>	Ιστορία μονοτονικής φόρτισης.....	51
<b>3.4</b>	Ιστορία Εναλασσόμενης φόρτισης.....	52
<b>3.5</b>	Τυπικό διάγ/μα δύναμης, παραμόρφωσης μελών με πλάστιμη συμπεριφορά.....	53
<b>3.6</b>	Πειραματικά εντατικά μεγέθη.....	54
<b>3.7</b>	Φυσικό Προσομοίωμα αμφιέριστης δοκού με συμπεριφορά κατηγορίας II, υπό σημειακό φορτίο και η επισήμανση των κρισίμων μηκών .....	56
<b>3.8</b>	Διαστάσεις και οπλισμός δοκού που χρησιμοποιήθηκε για τις φορτίσεις.....	56
<b>3.9</b>	Διαστάσεις και ο Διαμήκης οπλισμός δοκού με αξονικό φορτίο αξονικό φορτίο $N=750\text{KN}$ για τις περιπτώσεις (α) Δοκιμίου A-TΘΔ-750 και (β) Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό. ....	57
<b>3.10</b>	Διαστάσεις (σε mm) και ο Διαμήκης οπλισμός δοκού με αξονικό φορτίο $N=630\text{KN}$ για τις περιπτώσεις (α) Δοκιμίου A-TΘΔ-630 και (β) Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό. ....	57
<b>3.11</b>	Διαστάσεις (σε mm) και ο Διαμήκης οπλισμός δοκού με αξονικό φορτίο $N=500\text{KN}$ για τις περιπτώσεις (α) Δοκιμίου A-TΘΔ-500 και (β) Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό .....	58
<b>4.1</b>	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως , A1-TΘΔ-M750.....	63
<b>4.2</b>	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως , A2-TΘΔ-M750.....	65
<b>4.3</b>	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως , A3-TΘΔ-M630.....	68
<b>4.4</b>	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως , A4-TΘΔ-A630.....	70
<b>4.5</b>	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως , A5-TΘΔ-M500.....	73
<b>4.6</b>	Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως , A6-TΘΔ-A500.....	75
<b>A.1</b>	Εσωτερική επιπόνηση διατομής υπό τη συνδυασμένη δράση αξονικής δύναμης και μονοαξονικής κάμψης για $N=750$ .....	83
<b>A.2</b>	Εσωτερική επιπόνηση διατομής υπό τη συνδυασμένη δράση αξονικής δύναμης και μονοαξονικής κάμψης για $N=630$ .....	84

<b>A.3</b>	Εσωτερική επιπόνηση διατομής υπό τη συνδυασμένη δράση αξονικής δύναμης και μονοαξονικής καμψης για $N=500$ .....	86
<b>A.4</b>	Αμφίεστρεκτη δοκός και Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων.....	90

## ΠΙΝΑΚΕΣ

2.1	Βασικές τιμές του συντελεστή $\eta_0$ .....	40
3.1	Κατάλογος δοκιμών πειραματικής εφαρμογής .....	55
3.2	Χαρακτηριστικές τιμές χάλυβα οπλισμών .....	55
4.1	Υπολογιστικές τιμές ροπών διαρροής και αστοχίας υπό διαφορές αξονικές δυνάμεις .....	60
4.2	Πειραματικές τιμές τεμνουσών δυνάμεων και ροπών αντοχής .....	61
4.3	Πειραματικές και υπολογιστικές τιμές για διαφορές αξονικές δυνάμεις και των αντίστοιχων μετατοπίσεων για μονοτονικά φορτιζόμενα δοκίμια .....	61
4.4	Οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στο μέγιστο φορτίο της τελευταίας ομάδας τριών ολοκληρωμένων κύκλων φόρτισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας $\mu$ .....	62
4.5	Συνοπτικός κατάλογος δοκιμών και οι αντίστοιχες τιμές εγκαρσίου οπλισμού στα κρίσιμα μήκη .....	62

Το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης αφορά την διερεύνηση της αντισεισμικής συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος των οποίων ο σχεδιασμός έγινε βάσει της μεθόδου της Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης. Η εκπόνηση της διατριβής έγινε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ . Επιβλέπων της, διετέλεσε ο καθηγητής Μιχαήλ Δ. Κωτσοβός , τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγησή του και την έμπρακτη βοήθειά του. Στην πραγματοποίηση των πειραμάτων, σημαντική ήταν η συμβολή του διδάκτορα Γερασίμου Κωτσοβού, τον οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω, 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, στους Γ. Τσότρα, Δ. Πατσέλη, Π. Παπανδρέου, που συνέβαλαν τα μέγιστα στην εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας .

ΑΘΗΝΑ 2009



# 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

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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 της αποτελεσματικότητας της Τροχιάς Θλιπτικής Δύναμης.

# 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

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 πλάστιμη 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 Kotsovos & 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.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 δικτυώματος, 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.



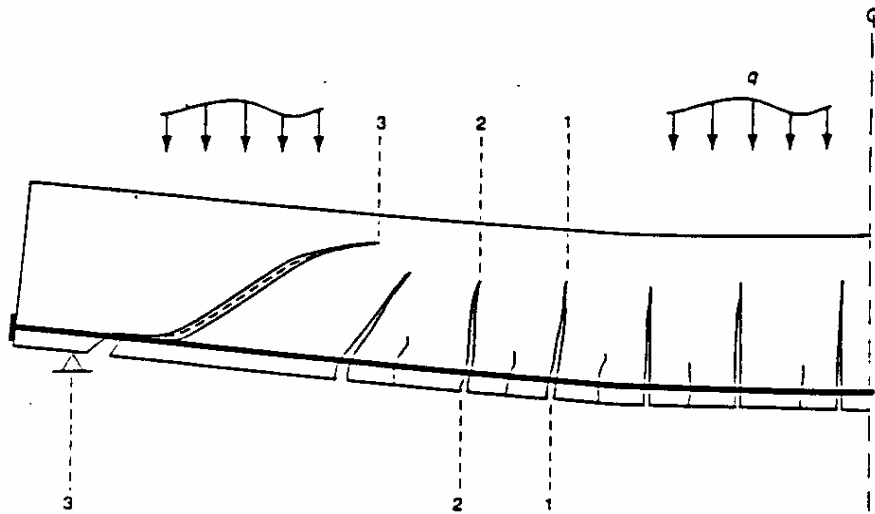
# ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

## 2.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

### 2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗΣ ΔΟΚΟΥ



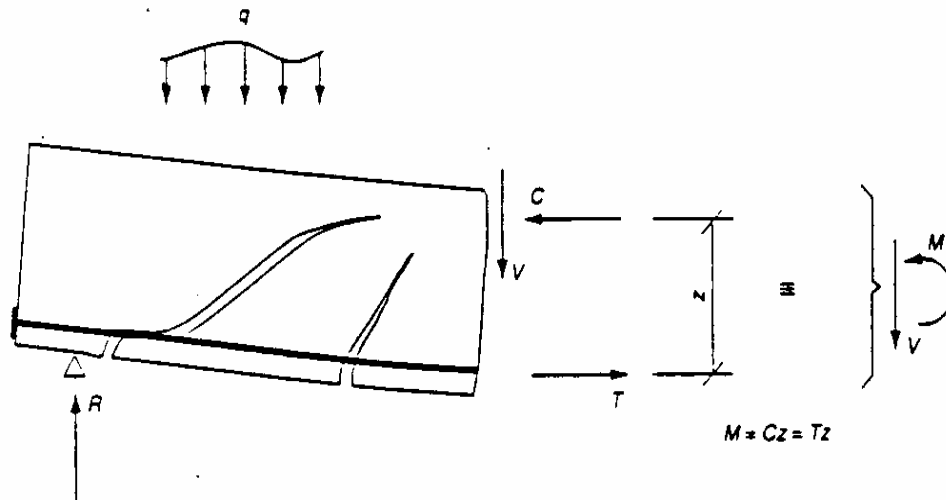
ΣΧΗΜΑ 2.1 Σχηματική απεικόνιση ρηγμάτωσης και παραμορφωμένου σχήματος αμφιέρειστης δοκού λίγο πριν την αστοχία.

Από τη φυσική συμπεριφορά της αμφιέρειστης δοκού υπό εγκάρσια φόρτιση, όπως φαίνεται και στο (Σχήμα 2.1), προκύπτει ότι η ρηγμάτωσή 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.



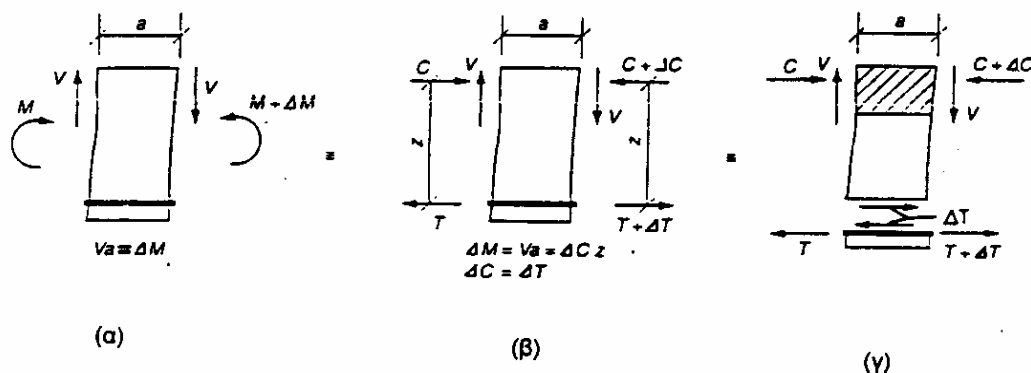
Παρά την εκτεταμένη ρηγμάτωση η δράση δοκού, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μεταφορά φορτίου στις στηρίξεις, επιτυγχάνει τον προορισμό της.



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

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.

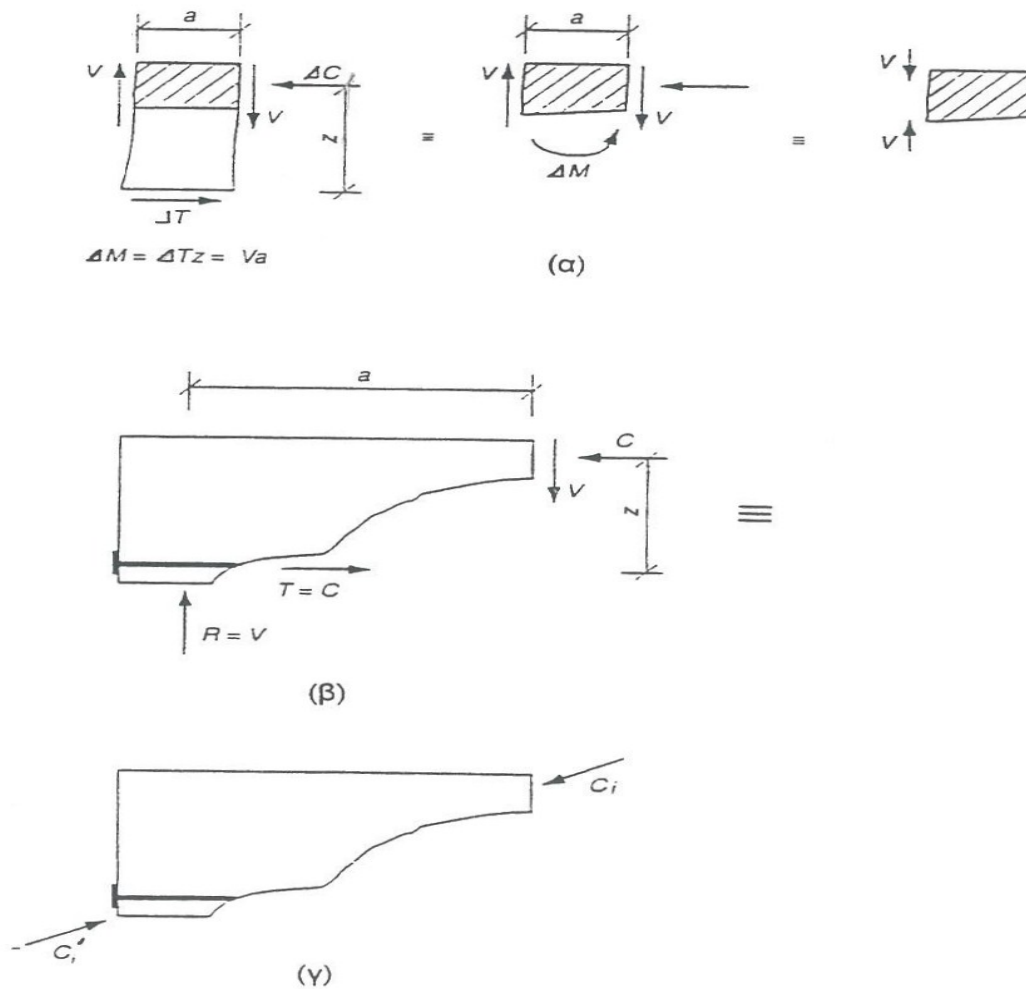
Η δράση του ζεύγους των τεμνουσών δυνάμεων στις ακραίες διατομές του παραπάνω στερεού αντισταθμίζεται από τη μεταβολή της καμπτικής ροπής μεταξύ των διατομών αυτών. Η μεταβολή αυτή της καμπτικής ροπής οφείλεται κυρίως στην μεταβολή (μέσα στο διάστημα μεταξύ των ακραίων διατομών του στερεού) του μεγέθους 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 ασκείται 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

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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).

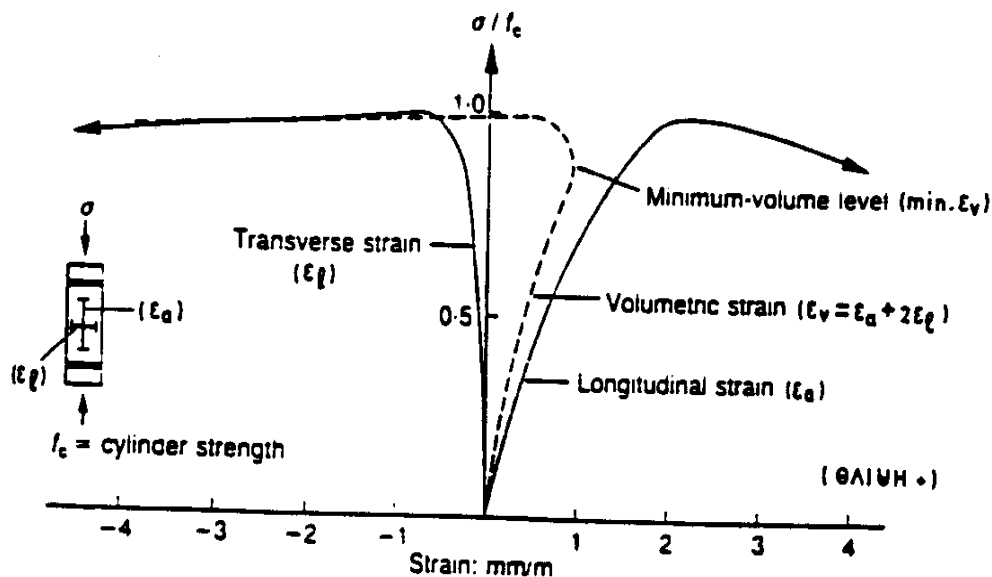


**ΣΧΗΜΑ 2.4:** Μηχανισμός μεταφοράς εξωτερικού φορτίου στη στήριξη: (α) δράση προβόλου, (β) αλλαγή στη διεύθυνση της θλιπτικής δύναμης.

### 2.1.3 ΣΥΜΒΟΛΗ ΑΡΗΓΜΑΤΩΤΟΥ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

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 σκυρόδεμα, 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.

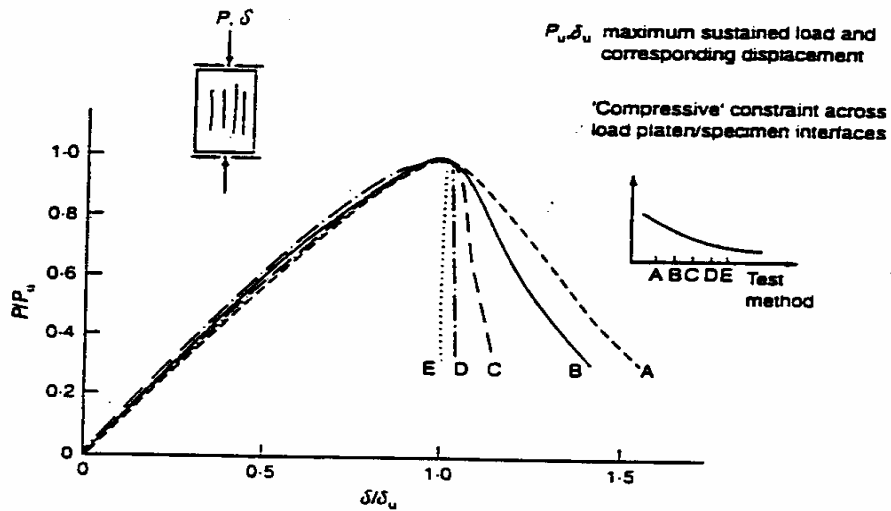
Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγεί και η θεώρηση του διαγράμματος τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων, που περιγράφει την συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη όπως δείχνει στα **Σχήματα 2.5** και **2.6**.



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

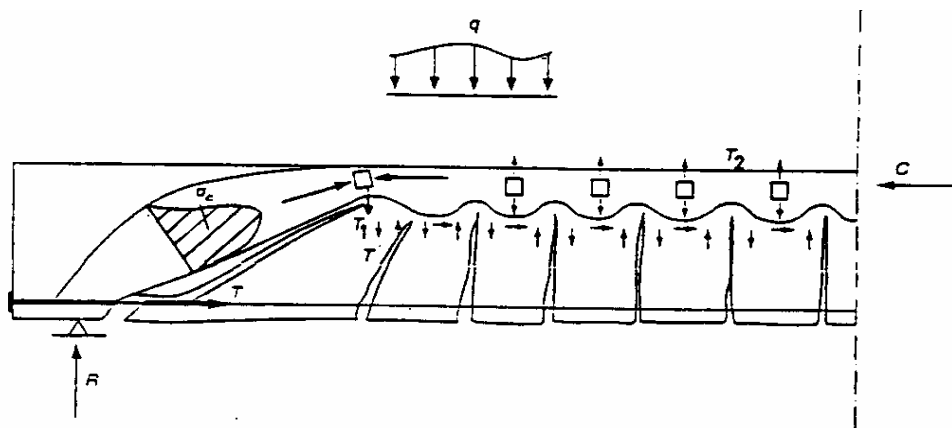
Ο ανοδικός κλάδος περιγράφει την συμπεριφορά του αρηγμάτωτου σκυροδέματος, ενώ ο φθιτός κλάδος την αντίστοιχη του ρηγματωμένου, όπου όπως προκύπτει πειραματικά, υποδηλώνει μια άμεση και πλήρη απώλεια της φέρουσας ικανότητας του υλικού.

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 ΑΙΤΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ



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).

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 πέλαμα 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 ρωγή 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:***

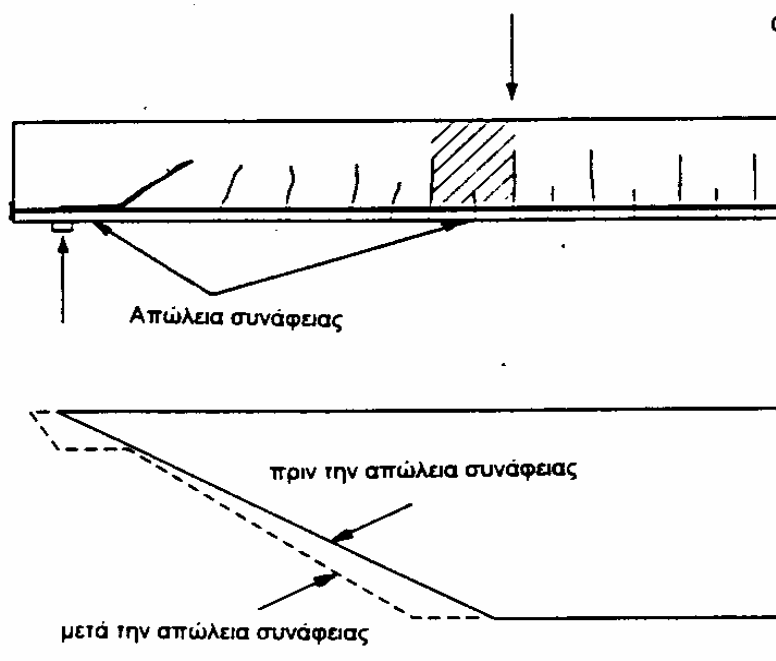
Όπως φαίνεται και στο **(Σχήμα 2.7)**, εφελκυστικές (με την έννοια ότι τείνουν να απομακρύνουν το ρηγματωμένο από το αρηγμάτωτο τμήμα) δυνάμεις αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια αυτή λόγω της «κάμψης προβόλων» της ρηγματωμένης ζώνης. Αστοχία στην περιοχή αυτή μπορεί να συμβεί, όχι μόνο διότι η εφελκυστική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

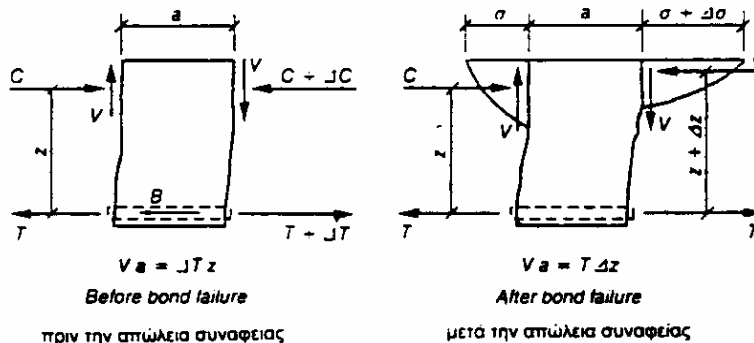


**ΣΧΗΜΑ 2.8** Επίδραση τοπικής απώλειας συνάφειας στην εφελκυστική δύναμη που αναλαμβάνει ο καμπτικός χάλυβας.

Στην οριακή κατάσταση αστοχίας της δοκού είναι δυνατόν να καταστραφεί η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και εφελκυσμένου 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).



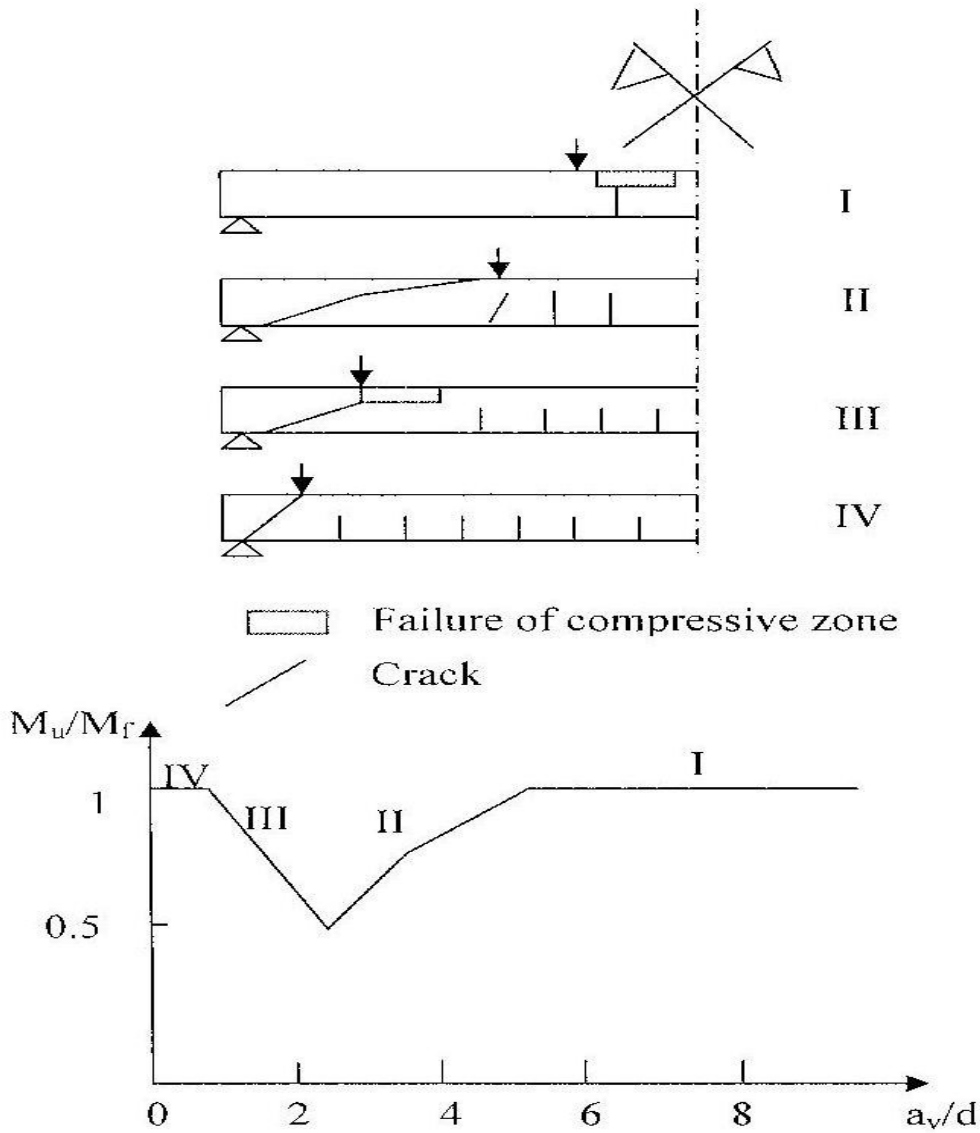
ΣΧΗΜΑ 2.9 Ανακατανομή εσωτερικών δυνάμεων λόγω απώλειας συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και διαμήκη οπλισμού.

### 2.1.5 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΕΙΔΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

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 ( $\rho$ ) 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 την 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 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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.

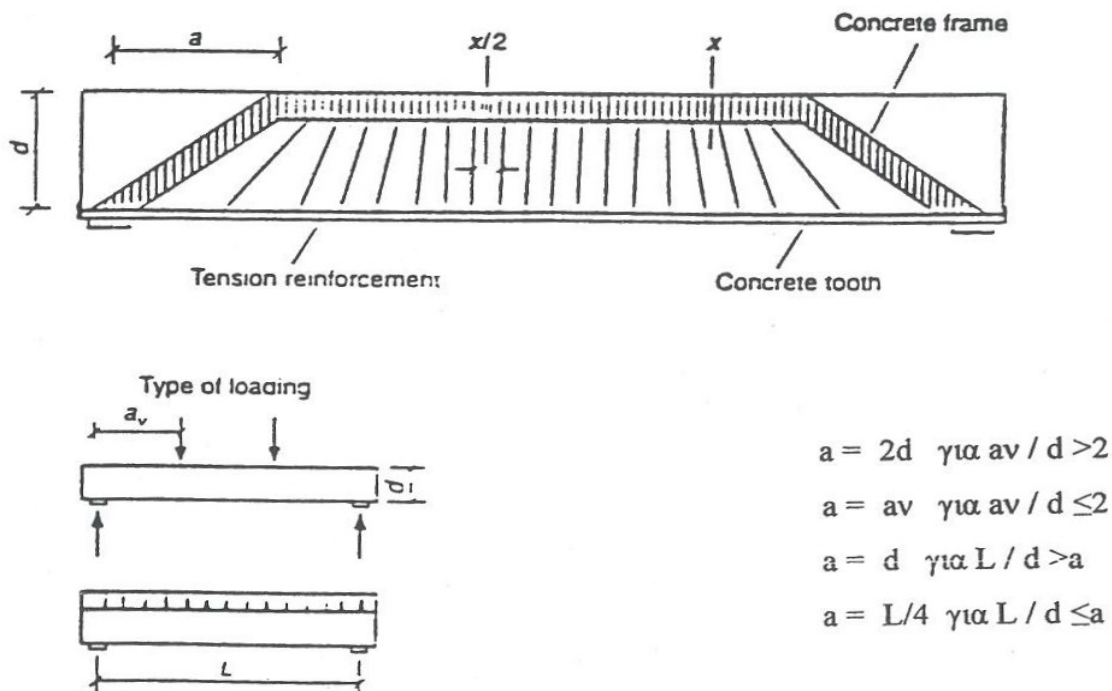
3. Σε αντίθεση με το ρηγματωμένο, το αρηγμάτωτο σκυρόδεμα έχει σημαντική συμβολή στην φέρουσα ικανότητα της δοκού, ενώ το ρηγματωμένο, μέσω της «κάμψης προβόλου», δημιουργεί ένα μηχανισμό ο οποίος δίνει τη δυνατότητα στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα να μεταφέρει το εξωτερικό φορτίο στις στηρίξεις.

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 μεθολογίας 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.



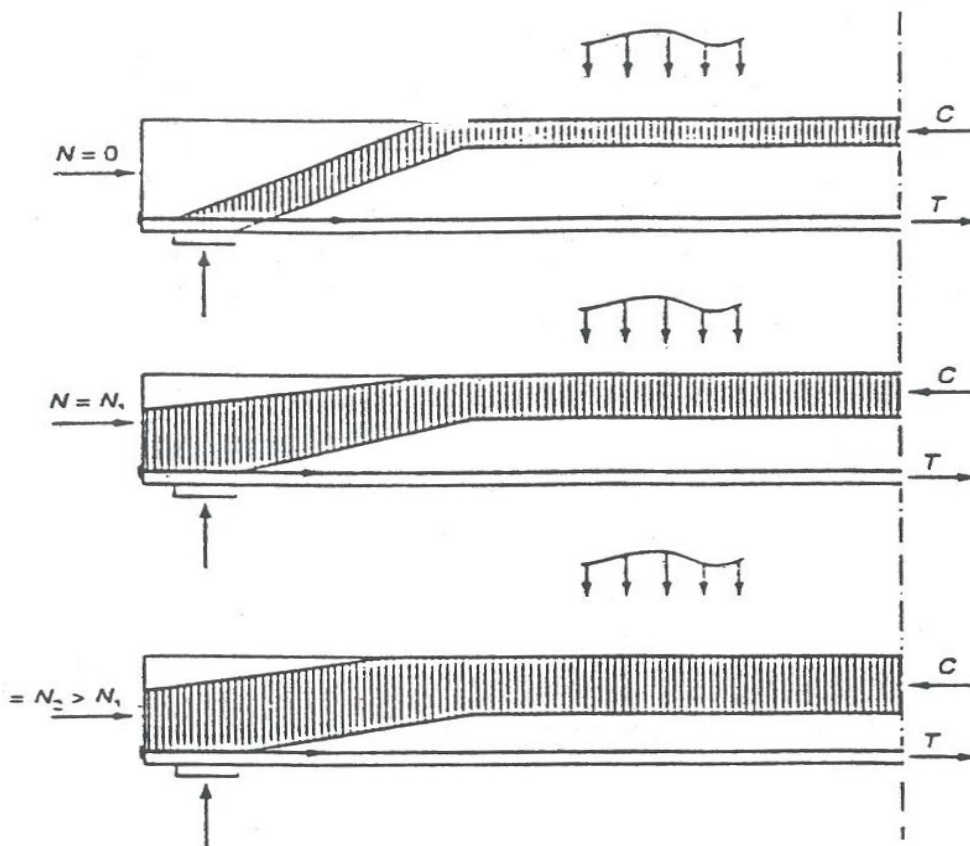
**ΣΧΗΜΑ 2.11 (α)** Φυσικό προσομοίωμα («χτένα») αμφιέριστης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εγκάρσιο φορτίο.

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 εφελκυόμενο ρηγματωμένο τμήμα της δοκού.



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

### 2.2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

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 ΙΙ, 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:

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

Όπου,

$M_f$  : Καμπτική αντοχή της διατομής

$x$  : Ύψος θλιβόμενης ζώνης

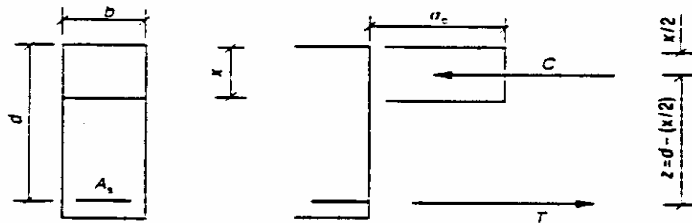
$d$  : Στατικό ύψος διατομής

$b$  : Πλάτος δοκιμίου

$f_c$  : Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

### 2.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΜΗΚΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

Ο διαμήκης οπλισμός υπολογίζεται έτσι ώστε η διατομή να έχει καμπτική αντοχή  $M_f$ .



**ΣΧΗΜΑ 2.12** Υπολογισμός καμπτικής αντοχής του φυσικού προσομοιώματος της δοκού.

Το (σχήμα 2.12) παρουσιάζει μια απλοποιημένη απεικόνιση των εσωτερικών δράσεων που αναπτύσσονται σε μια δεδομένη διατομή λίγο πριν τη στιγμή της



## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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  $f_{cyl}$ .

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:

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

όπου,  $C$  : Συνισταμένη των θλιπτικών τάσεων

$T$  : Εφελκυστική δύναμη του διαμήκη οπλισμού

$A_s$  : Εμβαδό διατομής οπλισμού

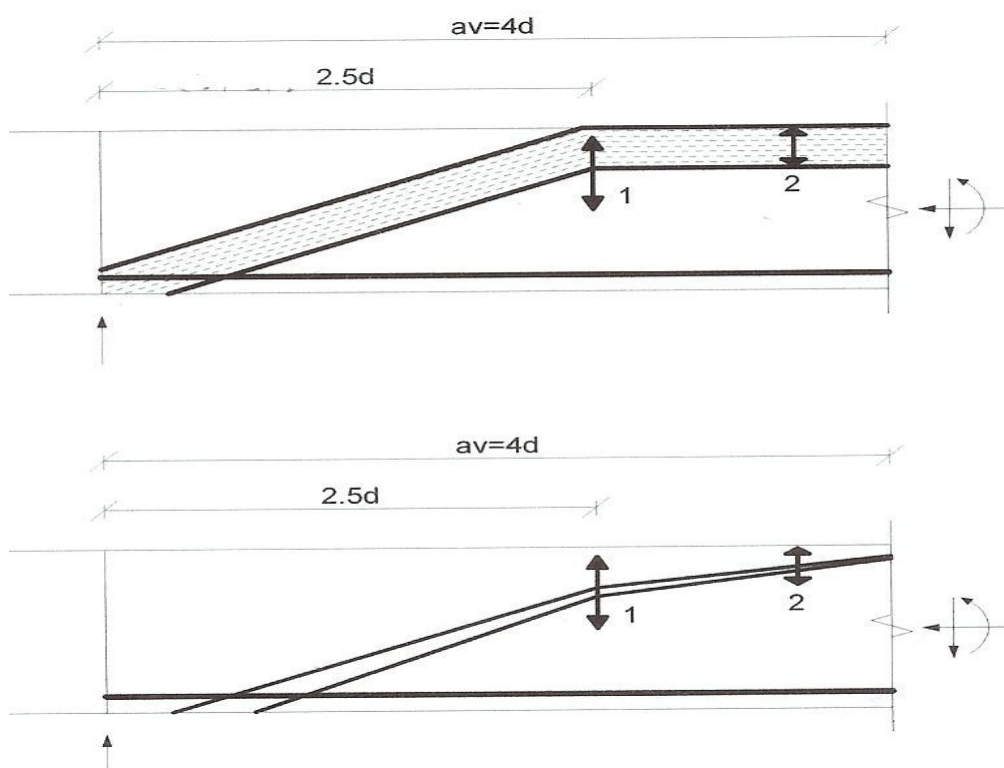
$f_y$  : Όριο διαρροής χάλυβα

$\gamma_c, \gamma_s$  : Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας του σκυροδέματος και του χάλυβα αντίστοιχα

$Z$  : Απόσταση μεταξύ των σημείων εφαρμογής των δυνάμεων  $C$  και  $T$

### 2.2.3 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ II

Τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από τιμές του ανηγμένου διατμητικού μήκους ( $A_v/d$ ) μεγαλύτερες του 2.5. Το σχήμα 1<sup>α</sup> παρουσιάζει το προσομοίωμα ενός τέτοιου στοιχείου μετά την ρηγμάτωση 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 βρίσκεται σε απόσταση  $2.5 \cdot d$  από το σημειακό φορτίο). Υποθέτοντας ότι η κατανομή 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 σκυροδέμα χωρίς την παρουσία εφελκυσμού στην περιοχή αυτή είναι ίση με :

$$T_{II,I} = 0.5 \cdot b \cdot d \cdot f_t \quad (1)$$

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.

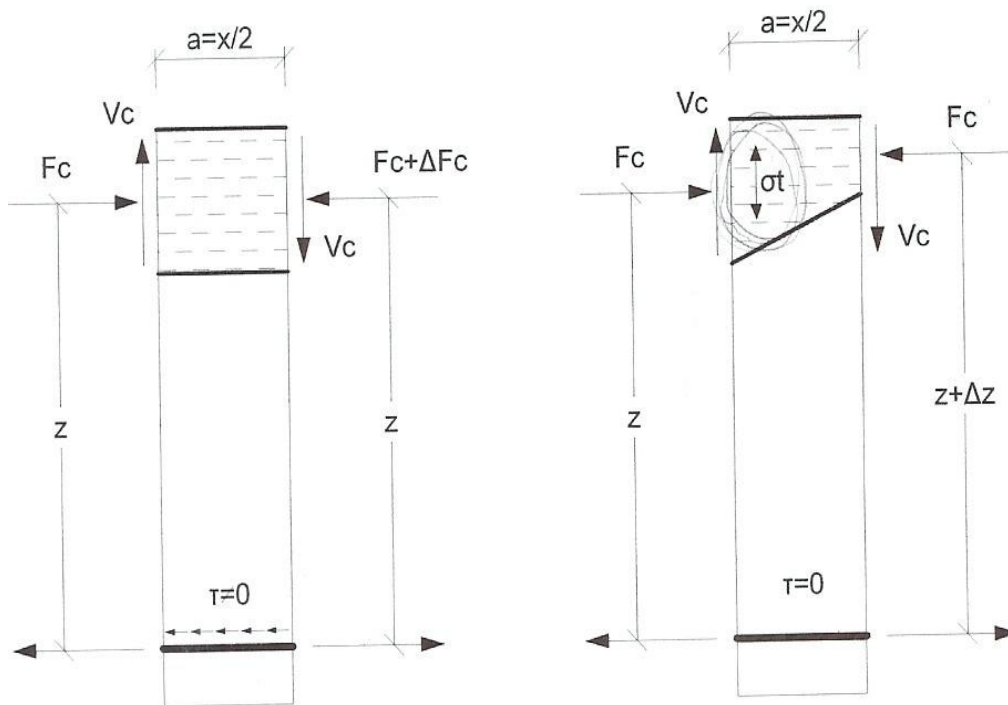
Παράλληλα, εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται στη θλιβόμενη ζώνη στην περιοχή του στοιχείου στο οποίο αναπτύσσεται συνδυασμός ροπής και τέμνουσας δύναμης λόγω της απώλειας συνάφειας μεταξύ καμπτομένου οπλισμού και σκυροδέματος η οποία αναπόφευκτα συμβαίνει. Ο μηχανισμός αστοχίας του σκυροδέματος στην 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  $\tau$ , η οποία είναι απαραίτητη για την αύξηση της εφελκυστικής δύναμης κατά  $DF_s$ . Η μεταφορά της τέμνουσας δύναμης γίνεται με τη μεταβολή της ροπής η οποία συμβαίνει με την μεταβολή της εφελκυστικής δύναμης του

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

καμπτικού οπλισμού  $V = \frac{dF_s}{dx} \cdot z$  (λόγω συνάφειας) ή λόγω της μεταβολής του μογλοβραχίονα των εωτερικών 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  $\zeta$ , η οποία είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση της ισορροπίας ροπών του στοιχείου.

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

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 ( $\sigma_t$  στο Σχήμα) στις παράπλευρες περιοχές.



ΣΧΗΜΑ 2.14 Απόλεια της συνάφειας

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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  $\sigma_t$  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 :

$$\sigma_c = f_c + 5 \cdot p \quad (3)$$

Και συνεπώς επειδή  $\sigma_c = p$  και αντικαθιστώντας την  $\sigma_t$  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 :

$$\sigma_c = f_c + 5 \cdot \sigma_t \quad (4)$$

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

$$F_c = f_c \cdot b \cdot x = \sigma_c \cdot b \cdot x_1 \quad (5)$$

Και είναι ίσο με,

$$x_1 = x \cdot (f_c / \sigma_c) \quad (6)$$

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  $x_1/x$  συναρτήσει των  $f_c$  και  $f_t$  από τις σχέσεις (4) και (6),

$$V_{II,2} = F_c \cdot [1 - 1/(1 + 5 \cdot f_t / f_c)] \quad (7)$$

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

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

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

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  $\delta$  εκατέρωθεν της θέσης 1 ( 2 $\delta$  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,

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

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,

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

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

$$A_s = \frac{f_t \cdot b \cdot d / 2}{f_y} = \frac{f_t \cdot b \cdot d}{2f_y}$$

## 2.3 ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

### 2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

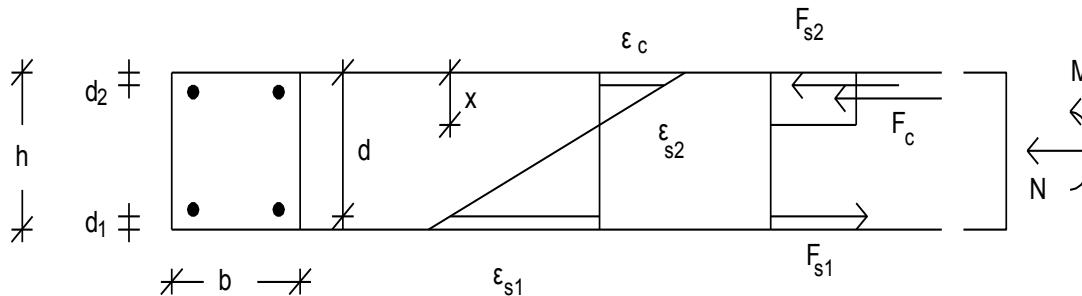
Ο Ευρωκώδικας 2 (EN1992-1-1:2003) αποτελεί μέρος μιας σειράς τεχνικών κανονιστικών έργων για τις δομικές κατασκευές από απλό, οπλισμένο και προεντεταγμένο σκυρόδεμα. Ο Ευρωκώδικας 2 εφαρμόζεται για το σχεδιασμό του φέροντα οργανισμού . Το δομικό έργο πρέπει να μορφώνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά την 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 ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΘΛΙΠΤΗΡΑ ΚΑΙ ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ

Ο διαμήκης θλιπτήρας και ο διαμήκης ελκυστήρας του δικτυώματος 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  $\epsilon_s$  μικρότερες από την παραμόρφωση  $\epsilon_y$  που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής, η τάση που αναπτύσσεται στο χάλυβα προκύπτει από τη σχέση  $\sigma_s =$



$\varepsilon_s E_s$ , 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 2.1.1)** εκφράζεται από τις σχέσεις :

$$N = F_c + F_{s2} - F_{s1}$$

$$M_f = F_c \cdot (h/2 - x/2) + F_{s2} (h/2 - x/2) + F_{s1} (h/2 - d_1)$$

Όπου,

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

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

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

$M_f$  : ροπή αντοχής διατομής

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.

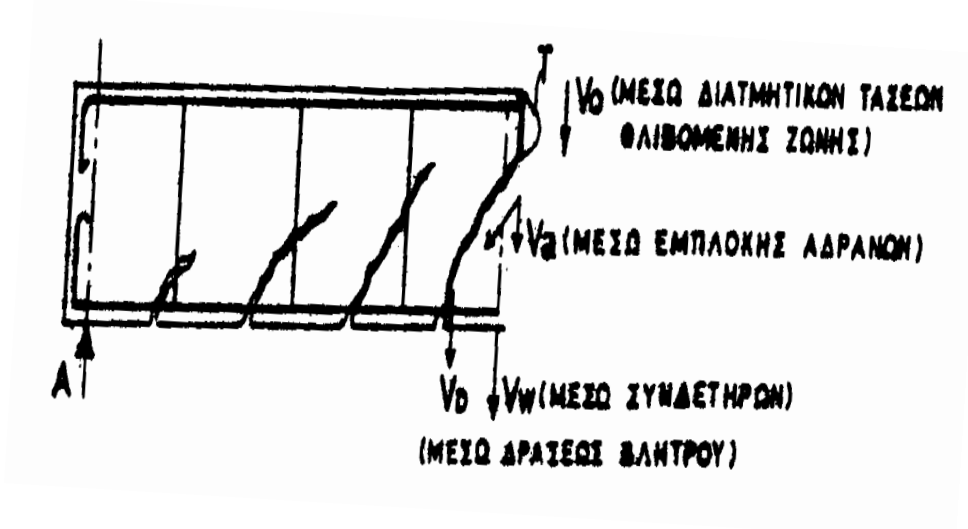
### 2.3.3 ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ ΘΛΙΠΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ

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 :

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

- 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 οπλισμού, 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):

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

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

για μικρή αξονική δύναμη ( $v > -0,1$ )

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

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

Όπου,

$$v = \frac{N_{sd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}}$$

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

$C_{Rd,c}$  : 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

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

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

$\sigma_{cp}$  : για να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των ορθών τάσεων (οι θλιπτικές τάσεις παίρνουν θετικό πρόσημο και οι εφελκυστικές αρνητικό)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} < (MP_a) .$$

$f_{ck}$  : χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος.

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

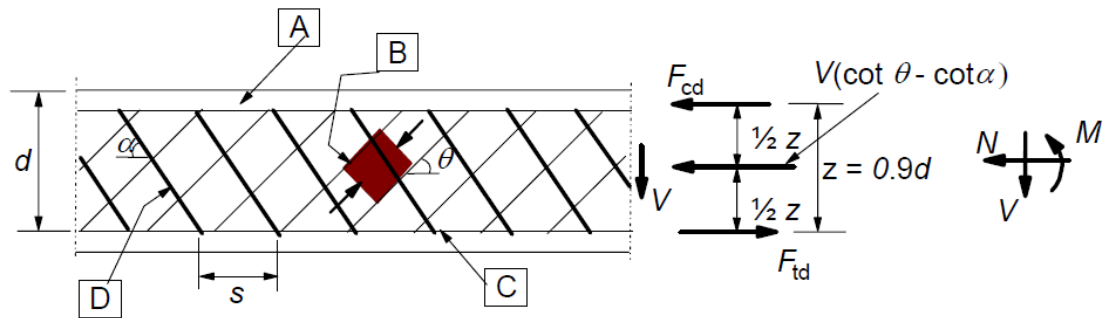
$A_c$  : εμβαδόν διατομής

$b_w$  : μικρότερο πλάτος κορμού στην εφελκυσόμενη περιοχή (mm).

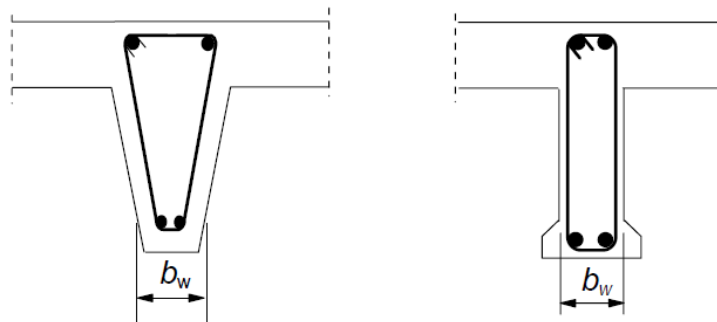
$d$  : ενεργό ύψος διατομής.

**2.3.4 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΑΧΟΣ**

Για τη διαστασιόλογηση σε διάτμηση, θεωρείται ότι το δομικό στοιχείο αποτελείται από θλιβομέμη και εφελκυστική ζώνη, η απόσταση των κέντρων βάρους των οποίων ισούται με το μοχλοβραχίονα  $\zeta$  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.



**A** - compression chord, **B** - struts, **C** - tensile chord, **D** - shear reinforcement



**ΣΧΗΜΑ 2.17** Συμβολισμοί για δομικά στοιχεία καταπονούμενα από τέμνουσα δύναμη.

Οι Συμβολισμοί από το **Σχήμα 2.17** είναι :

$\alpha$  : γωνία μεταξύ οπλισμού διάτμησης και άξονα του δομικού στοιχείου

$\theta$  : γωνία μεταξύ των θλιβόμενων διαγωνίων σκυροδέματος και του άξονα του δομικού στοιχείου

$F_s$  : εφελκυστική δύναμη στο διαμήκη οπλισμό

$F_c$  : θλιπτική δύναμη σκυροδέματος κατά τη διεύθυνση του άξονα του δομικού στοιχείου

$b_w$  : ελάχιστο πλάτος κορμού

$z$  : χαρακτηρίζει, σε ένα δομικό στοιχείο σταθερού πάχους, το μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων που αντιστοιχεί στην μέγιστη ροπή του εξεταζόμενου τμήματος του δομικού στοιχείου. Για τον έλεγχο σε διάτμηση μπορεί να λαμβάνεται γενικά σαν  $z = 0.9 \cdot d$ . Σε δομικά στοιχεία με κεκλιμένους τένοντες πρέπει να προβλέπεται στην εφελκυσόμενη πλευρά διαμήκης οπλισμός που να αναλαμβάνει τις διαμήκεις εφελκυστικές δυνάμεις.

Για την γωνία  $\theta$  ισχύει ο περιορισμός  $1 \leq \cot \theta \leq 2.5 (45^\circ \leq \theta \leq 21.8^\circ)$

#### 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 :

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

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

Όπου,

$A_{sw}$  : διατομή μιας ράβδου

$S$  : απόσταση των ράβδων του οπλισμού διάτμησης κατά τη διεύθυνση του μήκους της δοκού

$f_{ywd}$ : τιμή για τη διαστασιολόγηση, του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης

$v_1$  : συντελεστής αποτελεσματικότητας

$$v_1 = 0.9 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0.5$$

$\alpha_{cw}$  : απαιτούμενος οπλισμός

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

### 2.3.4.2 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:

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

### 2.3.5 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

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 δικτύωματος.

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 αρηγμάτωτου 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 ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΠΟΥ ΕΠΙΤΥΓΧΑΝΕΤΑΙ***

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 ασχέτως αν ανήκουν σε φορείς με ή χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας.

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η πλαστιμότητα μπορεί να αναφέρεται είτε σε όλη την κατασκευή ή μόνο σε τμήμα της. Το μέγεθος του δείκτη πλαστιμότητας θα διαφέρει σε κάθε περίπτωση:

- Υλικό: π.χ. σκυρόδεμα  $\mu=1-2$
- Διατομή: π.χ. διατομή ελαφρά οπλισμένη  $\mu=10-20$
- Δοκός ή Υποσύλωμα: συνήθως μικρότερο  $\mu$ . Κίνδυνος αστοχίας της συνάφειας ή διάτμησης ή επιβάρυνση από ετερόσημους κύκλους φόρτισης.
- Κατασκευή:  $\mu$  μπορεί να είναι μεγάλο. Εξαρτάται από τη θέση των πλαστικών αρθρώσεων και τη συμπεριφορά των κόμβων.

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

Πιο εύκολη η θεώρηση και ο υπολογισμός της πλαστιμότητας Διατομών Ω.Σ. από την πλαστιμότητα Δοκών Ω.Σ. Παράμετροι που επηρεάζουν την πλαστιμότητα Διατομών οπλισμένου σκυροδέματος:

- Υλικά ( $\sigma - \epsilon$  καμπύλες, περίσφιγξη)
- Γεωμετρία (σχήμα διατομής,  $\rho, \rho'$ )
- Φορτία (αξονικά, έκκεντρα)
- Άλλα (τύπος και ταχύτητα φορτίσεως)

Παράμετροι που επηρεάζουν την πλαστιμότητα δοκών οπλισμένου σκυροδέματος:

- Παράμετροι που επηρεάζουν την πλαστιμότητα Διατομών



## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

- Διάτμηση
- Συνάφεια (αγκυρώσεις, ενώσεις)

Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 για το ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού στα άκρα δοκών και το μηχανικό ποσοστό οπλισμού περίσφιγξης υποστρωμάτων,  $\omega_{wd}$ , συνδέονται με την τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων,  $\mu\phi$ , και μέσω αυτού με την τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ :

$$\mu\phi=2q-1 \quad \text{εάν } T1 \geq TC \quad (1)$$

$$\mu\phi=1+2(q-1)TC/T1 \quad \text{εάν } T1 < TC \quad (2)$$

όπου,

$T1$  : ιδιοπερίοδος του κτιρίου

$TC$  : περίοδος στην αρχή φθιτού κλάδου του ελαστικού 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).

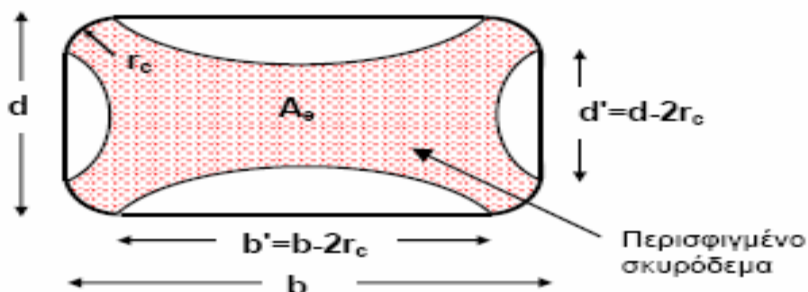
STRUCTURAL TYPE	DCM	DCH
Frame system, dual system, coupled wall system	$3,0\alpha_v/\alpha_1$	$4,5\alpha_v/\alpha_1$
Wall system	3,0	$4,0\alpha_v/\alpha_1$
Torsionally flexible system	2,0	3,0
Inverted pendulum system	1,5	2,0

### 2.3.6 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ Ο ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΕΩΣ

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  $\epsilon_{cu}$ . 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 πλάστιμη 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.



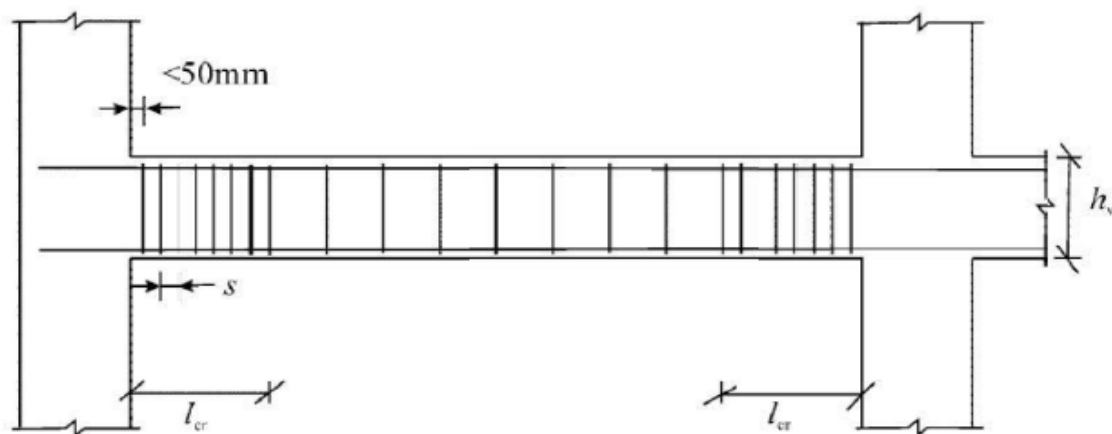
**ΣΧΗΜΑ 2.18** Η περίσφιγξη του σκυροδέματος σε ορθογωνικές διατομές που επιτυγχάνεται μέσω καμπύλωσης των γωνιών.

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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) :

$$l_{cr} = \max \left\{ h_c ; \frac{l_{cr}}{6} ; 450mm \right\}$$

Εάν ισχύει  $l_c/h_c < 3$ , ολόκληρο το ύψος του υποστυλώματος θα πρέπει να θεωρείται ως κρίσιμη περιοχή και θα πρέπει να οπλίζεται αναλόγως (EC8 – 5.4.3.2.2)

$h_c$  : η μέγιστη διάσταση υποστυλώματος

$h_{cl}$  : καθαρό ύψος υποστυλώματος

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

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

Οφείλει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

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

όπου :

$\mu_\phi$  : είναι η απαιτούμενη τιμή του συντελεστή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων.

$V_d$  : το ανηγμένο αξονικό φορτίο  $V_d = N_{sd} / (A_c \cdot f_{cd})$  το οποίο πρέπει να είναι  $V_d \leq 0.65$ .

$\varepsilon_{sy,d}$  : είναι η τιμή σχεδιασμού της ανηγμένης παραμόρφωσης του χάλυβα κατά τη διαρροή.

$h_c$  : είναι το συνολικό ύψος της διατομής (παράλληλα στην οριζόντια διεύθυνση στην οποία αναφέρεται ο συντελεστής  $\mu_\phi$ ).

$h_o$  : είναι το ύψος του περισφιγμένου πυρήνα (μετρημένο μέχρι τον κεντροβαρικό άξονα των συνδετήρων).

$b_c$  : είναι το συνολικό πλάτος της διατομής.

$b_o$  : είναι το πλάτος του περισφιγμένου πυρήνα (μετρημένο μέχρι τον κεντροβαρικό άξονα των συνδετήρων).

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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

(αποδοτικότητα περισφίγξεως) = (αποδοτικότητα εντός διατομής) \* (αποδοτικότητα καθ' ύψος)

$\alpha_n$  : εξαρτάται απ' την διάταξη των συνδετήρων εντός της διατομής και εκφράζει το ανενεργό από απόψεως περισφίγξεως 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.

$\alpha_s$  : εξαρτάται απ' την καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων και εκφράζει το ανενεργό από απόψεως περισφίγξεως τμήμα του στοιχείου καθ' ύψος .

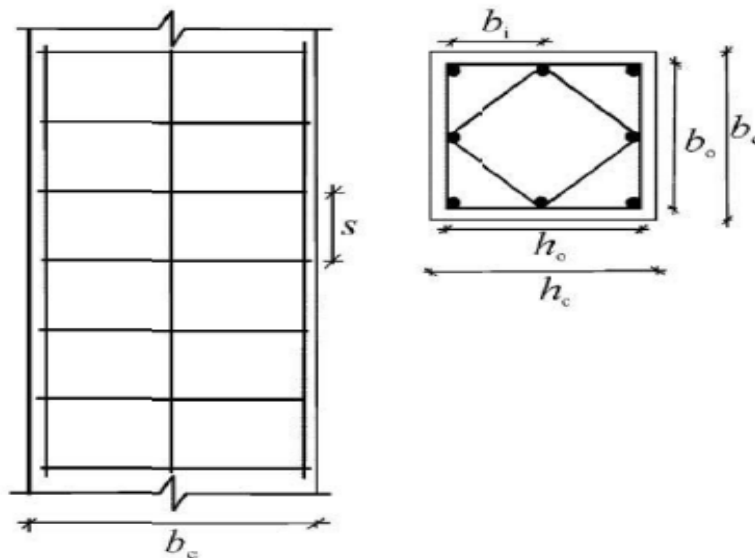
$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right)$  όπου s είναι η απόσταση των συνδετήρων και  $b_o$  η

διάσταση του πυρήνα της διατομής.

$\omega_w$  : το ογκομετρικό μηχανικό ποσοστό των συνδετήρων και για τετραγωνικούς συνδετήρες όπως στα δοκίμια υπολογίζεται από τη σχέση,

$\omega_w = 4 \cdot b \cdot A_{sw} \cdot f_{sy} / (b^2 \cdot s \cdot f_c)$ , 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 περισφίγξης.

- Η διάμετρος  $d_{bw}$  των συνδετήρων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από 6mm

- Η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων, δεν υπερβαίνει την τιμή:

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

- Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ράβδων του διαμήκους 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 διαμήκους 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).



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα περιγράφεται, η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς έξι αμφιεριστων δοκιμίων που υπήρχαν στο εργαστήριο και σχεδιάστηκαν σύμφωνα με την μέθοδο της Τροχιάς της Θλιπτικής Δύναμης (ΤΘΔ). 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 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν για την πειραματική διαδικασία είναι αμφιεριστοι ραβδωτοί πρισματικοί φορείς. Τα δοκίμια έχουν μήκος 2000mm και ορθογωνική διατομή πλάτους 150mm ύψους 300mm . οι δυο ακραίες στηρίξεις χρησιμοποιήθηκαν για την ακύρωση του δοκιμίου στην πειραματική διάταξη με τρόπο που οι συνοριακές συνθήκες του να προσομοιάζουν συνθήκες άρθρωσης.



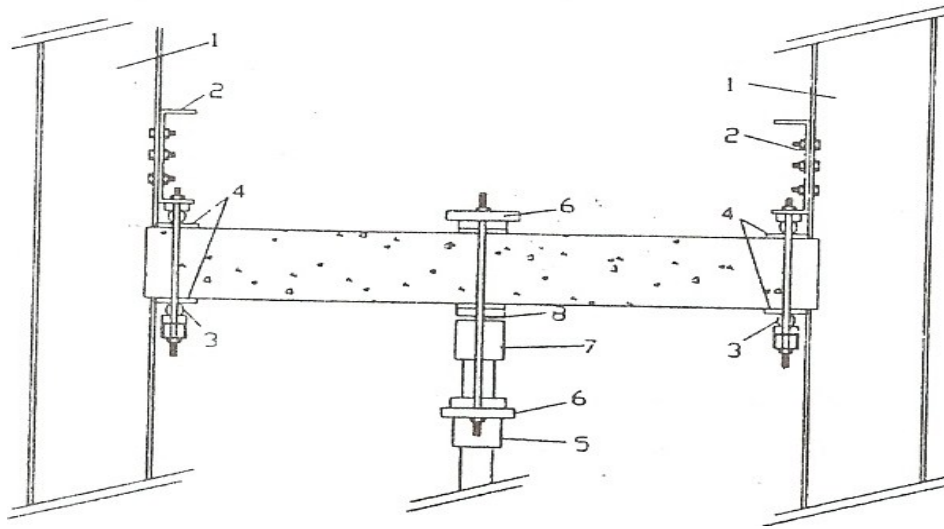
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από τέσσερις ράβδους χάλυβα υψηλής συνάφειας διαμέτρου 14mm (Φ14) με τάσεις διαρροής 540 MPa και τάσεις θραύσης 650 MPa . Ο εγκάρσιος οπλισμός αποτελείται από συνδετήρες διαμέτρου 6mm (Φ6) , σε αποστάσεις των 140mm. Οι συνδετήρες έχουν διαταχθεί πυκνότερα στα «κρίσιμα μήκη» του δοκιμίου σύμφωνα με ΤΘΔ (Σχήμα 3.1), δηλαδή υπήρχαν συνδετήρες ανά αποστάσεις των 100mm. Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίστηκε από πειράματα σε κυλινδρικά δοκίμια και βρέθηκε να είναι ίση με 55 MPa. 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 ως 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 ακλόνητους τοίχους αντίδρασης. 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.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



ΣΧΗΜΑ 3.1 Πειραματική διάταξη.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη μια 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. 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 πάνω 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. Στα δύο άκρα της διάταξης αγκυρώνονται δυο ράβδοι προέντασης από ανοξείδωτο χάλυβα, διαμέτρου Φ32.

Ο υδραυλικός γρύλος και η αντλία λαδιού που χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



**ΕΙΚΟΝΑ 3.2** Σύστημα επιβολής αξονικού φορτίου (α) υδραυλικός γρύλος και (β) ηλεκτροκίνητη αντλία λαδιού.

Η καταγραφή της τιμής του αξονικού φορτίου γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, με τη βοήθεια βαλβίδας που μετατρέπει την ασκούμενη πίεση σε ηλεκτρικό σήμα. Το αξονικό φορτίο καταγράφεται επίσης με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μετρητών παραμόρφωσης, οι οποίοι τοποθετούνται στις οριζόντιες ράβδους προέντασης του συστήματος επιβολής του αξονικού φορτίου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η τιμή του αξονικού φορτίου παρακολουθείται με τη βοήθεια ενός μανομέτρου, που υπάρχει στην ηλεκτροκίνητη αντλία παροχής πίεσης. Λόγω της οριζόντιας μετακίνησης του δεξιού μέρους του δοκιμίου, είναι αναγκαία η τοποθέτηση μιας διάταξης αρθρώσεων στα άκρα των ράβδων επιβολής του αξονικού φορτίου. Η διάταξη αυτή αποτελείται από δυο μεταλλικές κεφαλές σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Κάθε κεφαλή αποτελείται από δύο τμήματα, τα οποία όταν ενωθούν αφήνουν μια κυκλική οπή στο κέντρο. Μέσα σε αυτή την οπή έχει τοποθετηθεί μεταλλικός κύλινδρος υψηλής αντοχής. Στο κέντρο του κυλίνδρου υπάρχει διαμπερής εγκάρσια οπή, μέσα από την οποία διέρχεται η ράβδος αξονικού φορτίου, η οποία αγκυρώνεται στην άλλη πλευρά του κυλίνδρου. Με την τοποθέτηση του παραπάνω συστήματος είναι δυνατή η ελεύθερη περιστροφή της ράβδου χωρίς κατακόρυφη μετακίνηση.

Η επιβολή της οριζόντιας εξαναγκασμένης μετατόπισης γίνεται με τη βοήθεια υδραυλικού εμβόλου (MTS). Είναι σημαντικό το υδραυλικό έμβολο να έχει τη

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

δυνατότητα καταγραφής της εφαρμοζόμενης μετατόπισης και του ασκούμενου φορτίου. Για αυτό το λόγο, το κινούμενο στέλεχος του πιστονιού διαθέτει μηκυνσιόμετρο, ενώ στο μπροστινό τμήμα του εμβόλου υπάρχει ενσωματωμένη δυναμοκυψέλη. Οι ενδείξεις της δυναμοκυψέλης και του μηκυνσιομέτρου καταγράφονται ως ηλεκτρικό σήμα στο υπολογιστικό σύστημα και με τον κατάλληλο συντελεστή βαθμονόμησης βρίσκονται οι επιθυμητές τιμές δύναμης και μετατόπισης. Εκτός από τον βασικό εξοπλισμό που αναφέρθηκε παραπάνω, υπήρξε ανάγκη μέτρησης και άλλων στοιχείων αναφορικά με τη δοκιμή.

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την εκτέλεση των δοκιμών είναι σχετικά απλή. Αρχικά γίνεται η επιβολή του αξονικού φορτίου, στη συνέχεια επιβάλλεται η οριζόντια φόρτιση με τη μορφή χρονοϊστορίας από κύκλους εξαναγκασμένων μετατοπίσεων στο μεσαίο τμήμα της δοκού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η μελέτη τόσο του ελαστικού όσο και του πλαστικού κλάδου της συμπεριφοράς των δοκιμίων. Το εύρος κάθε μετατόπισης αυξάνεται βαθμιαία σε κάθε κύκλο. Το μέγιστο πλευρικό φορτίο που εφαρμόζεται από το έμβολο της MTS είναι  $\pm 500\text{KN}$ . 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 είναι τα ακόλουθα. 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 μηκυνσιόμετρο 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

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

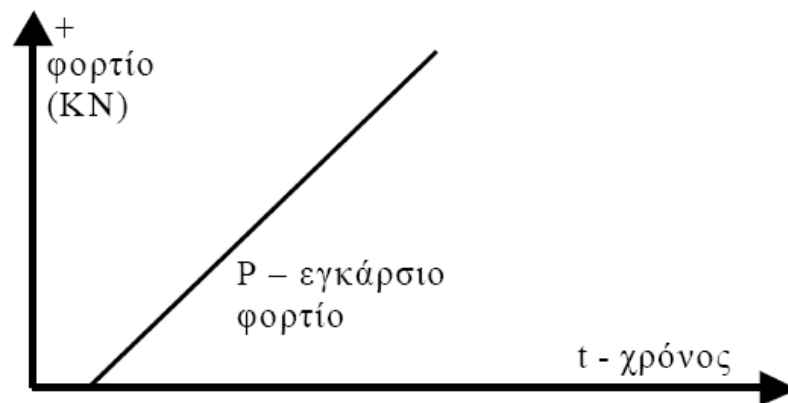
μετρήσεων των τριών μηκυνσιομέτρων. Στην επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου παρουσιάζονται όλα τα μεγέθη που προκύπτουν από τις μετρήσεις των καταγραφών κάθε δοκιμής.

### 3.2.1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

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

- **Μονοτονική Φόρτιση**

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η ιστορία της μονοτονικής φόρτισης.



ΣΧΗΜΑ 3.3. Ιστορία μονοτονικής φόρτισης

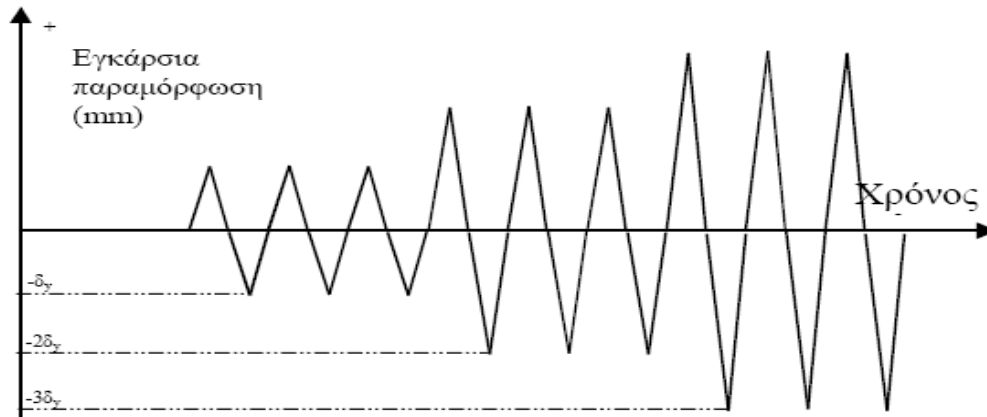
- **Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση**

Στα δοκίμια με ανακυκλιζόμενο φορτίο η φόρτιση επιβάλλεται αρχικά μέχρι την αντίστοιχη της μετατόπισης  $\delta y$  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.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

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.

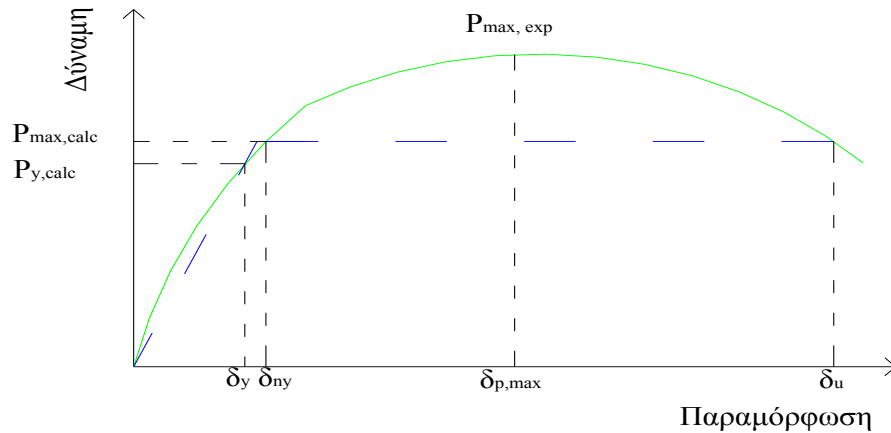
### 3.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

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 ονομαστική τιμή μετακίνησης ( $\delta_{ny}$ ). Πρόκειται ουσιαστικά για την τιμή της μετατόπισης που αντιστοιχεί στο πειραματικό φορτίο της καμπύλης (P- $\delta$ ) (Σχήμα 3.4) αυξημένο με λόγο που είναι ίσος με  $P_{max,calc}$  προς  $P_{y,calc}$ . Πιο κάτω φαίνεται η σχηματική παράσταση αλλά και η σχέση που χρησιμοποιείται.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

$$\delta_{ny} = \delta_y \cdot \left( \frac{P_{\max, calc}}{P_{y, calc}} \right) \quad (1)$$



**ΣΧΗΜΑ 3.5** Τυπικό διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης μελών με πλαστική συμπεριφορά.

Για το πλαστικό μέλος που δίνεται στο (Σχήμα 3.4),  $\delta_y$  είναι η παραμόρφωση διαρροής που αντιστοιχεί στη διαρροή του χάλυβα και μια δύναμη  $P_{y, calc}$  και  $\delta_u$  είναι η οριακή παραμόρφωση που αναπτύσσεται χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής (αστοχία και αποδιοργάνωση των διατομών).

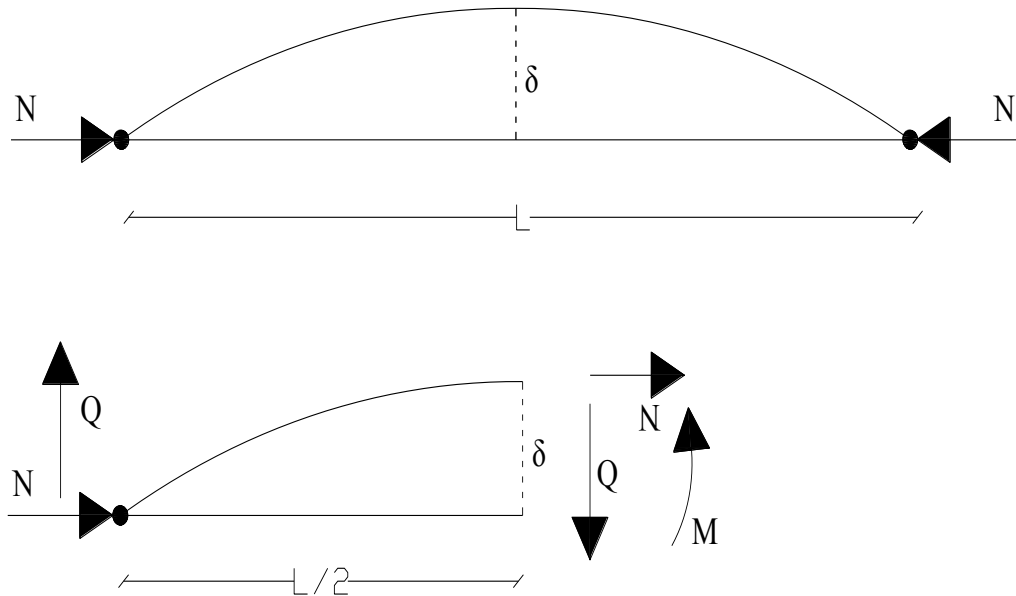
Ένα από τα μεγέθη που μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των προηγούμενων μετρήσεων είναι ο δείκτης πλαστιμότητας που προσδιορίζεται εύκολα και χρησιμοποιείται ευρέως από την παρακάτω σχέση :

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

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

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

διατομή της βάσης του δοκιμίου ( $\delta$ ). 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.

$$M_{\text{exp.}} = Q_{\text{exp.}} \cdot \frac{L}{2} + N \cdot \delta \quad (3)$$

$$Q_{\text{exp.}} = \frac{P_{\text{max,exp.}}}{2} \quad (4)$$

### 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** Κατάλογος δοκιμών πειραματικής εφαρμογής.

Δοκίμιο	διαστ.	διαμήκης Οπλισμός		Εγκάρσιος Οπλισμός		
		άνω	κάτω	αριστ.	μεσο	δεξιά
<b>A1-TΘΔ-M750</b>	15X30	2Φ14	2Φ14	Φ6/140	Φ6/100	Φ6/140
<b>A2-TΘΔ-A750</b>	15X30	2Φ14	2Φ14	Φ6/140	Φ6/100	Φ6/140
<b>A3-TΘΔ-M630</b>	15X30	2Φ14	2Φ14	Φ6/140	Φ6/100	Φ6/140
<b>A4-TΘΔ-A630</b>	15X30	2Φ14	2Φ14	Φ6/140	Φ6/100	Φ6/140
<b>A5-TΘΔ-M500</b>	15X30	2Φ14	2Φ14	Φ6/140	Φ6/100	Φ6/140
<b>A6-TΘΔ-A500</b>	15X30	2Φ14	2Φ14	Φ6/140	Φ6/100	Φ6/140

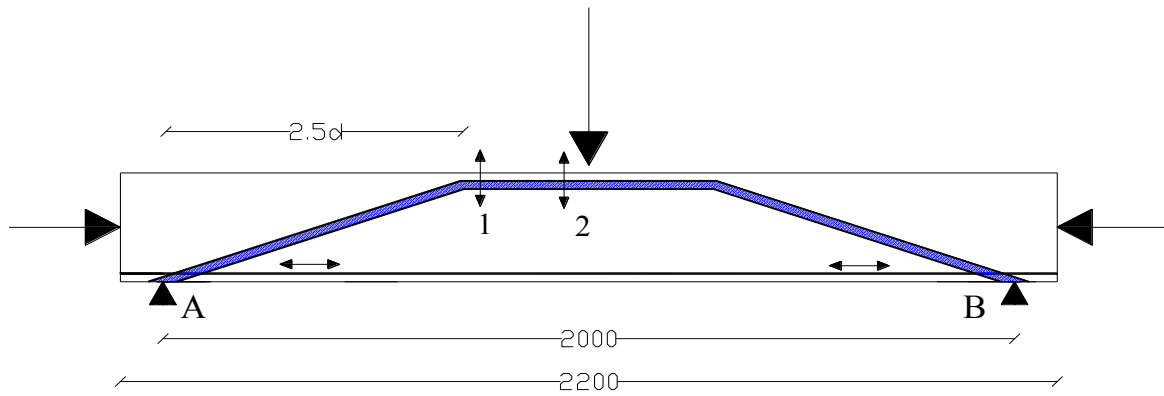
Το πρώτο σκέλος της ονοματολογίας δηλώνει τον αριθμό του δοκιμίου. Το δεύτερο σκέλος δηλώνει την μέθοδο σχεδιασμού των δοκιμίων. Η μεθολογία που επιλέχθηκε είναι η ΤΘΔ. Στο τρίτο σκέλος δηλώνεται ο τρόπος φόρτισης, το γράμμα Μ χαρακτηρίζει τα δοκίμια που έχουν υποβληθεί υπό μονότονη φόρτιση και Α αυτά που έχουν υποβληθεί σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ενώ ο αριθμός 750 δηλώνει την τιμή του αξονικού φορτίου που είχε επιβληθεί στο δοκίμιο κατά την διάρκεια του πειράματος.

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

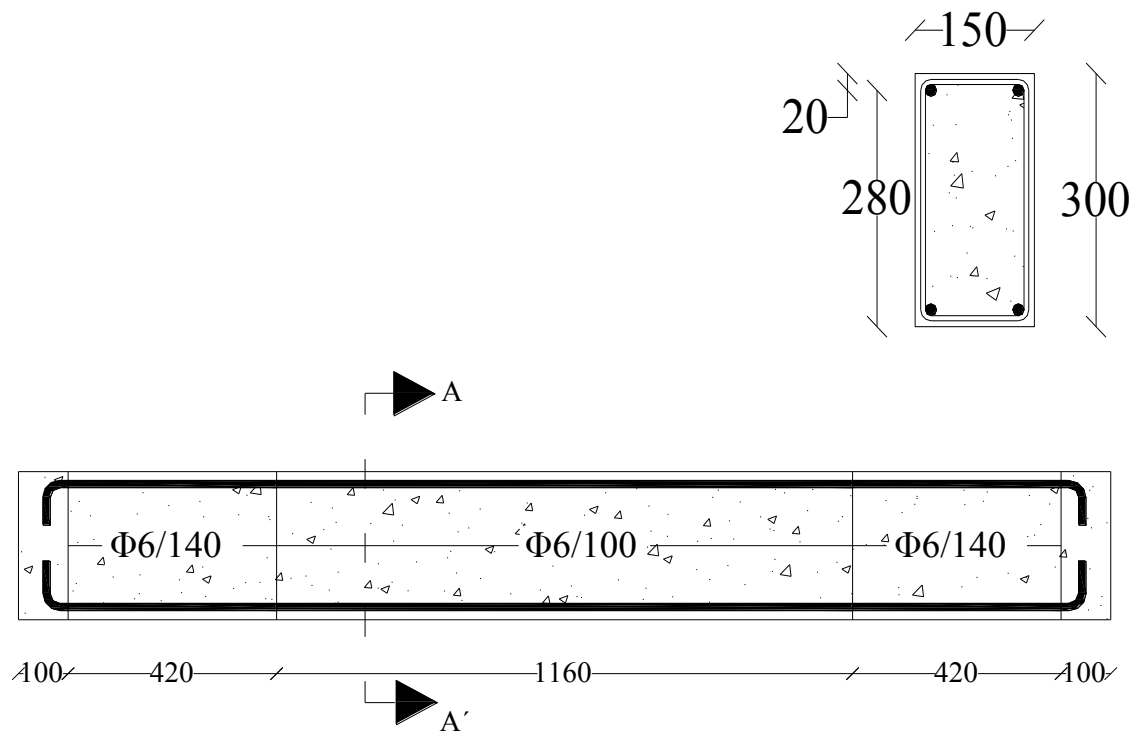
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2** Χαρακτηριστικές τιμές χάλυβα οπλισμών.

	Όριο διαρροής $f_y$ (MPa)	Όριο αντοχής $f_u$ (MPa)	παραμόρφωση διαρροής $\epsilon_y$ (%)	παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u$ (%)
<b>Διαμήκης Οπλισμός</b>	540	650		12.3
<b>Εγκάρσιος οπλισμός</b>	300			

3.4.1 ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΠΛΙΣΜΩΝ ΑΠΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.

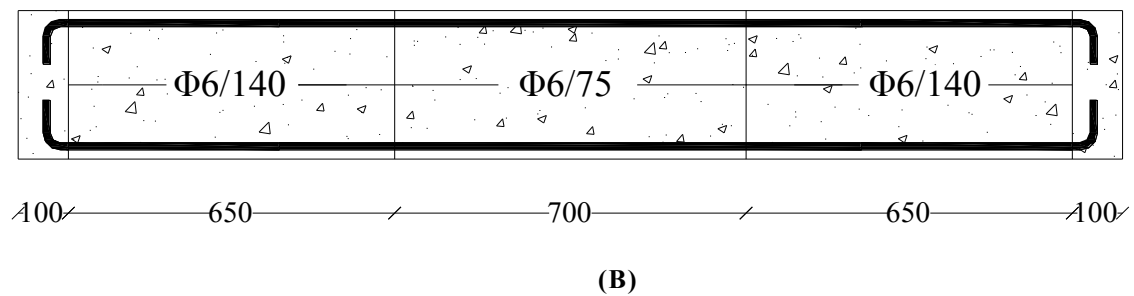
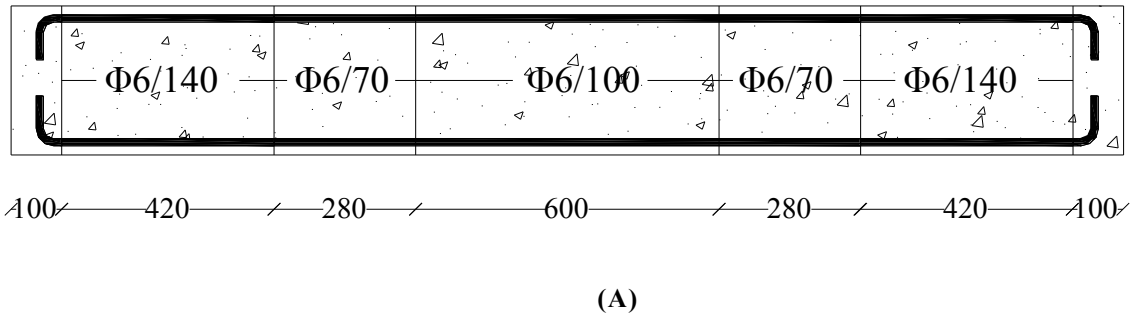


ΣΧΗΜΑ 3.7 Φυσικό Προσομοίωμα αμφιέριστης δοκού με συμπεριφορά κατηγορίας II, υπό σημειακό φορτίο και η επισήμανση των κρίσιμων μηκών.

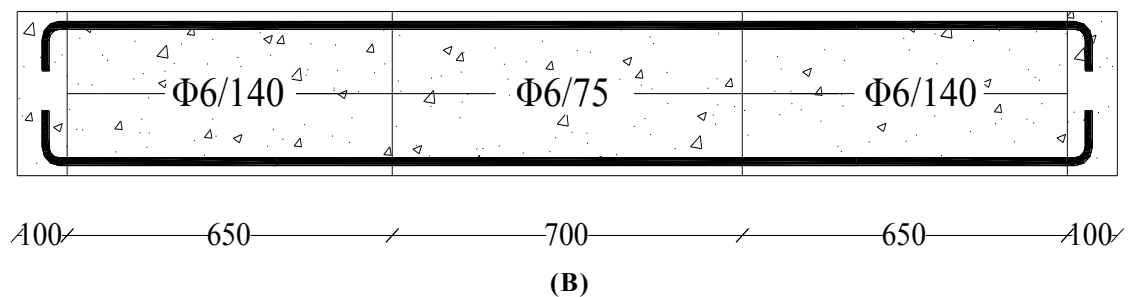
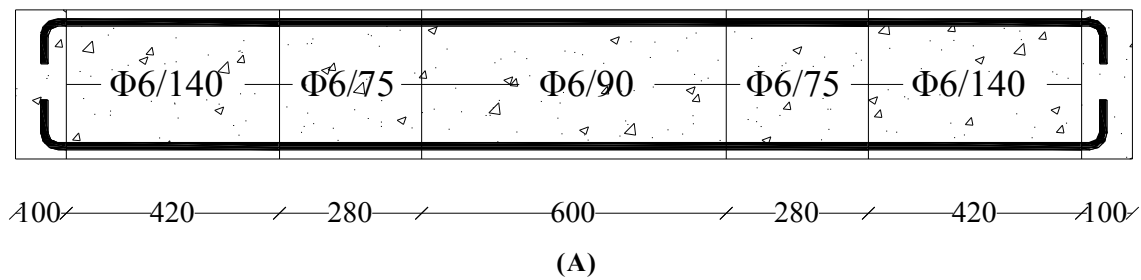


ΣΧΗΜΑ 3.8 Διαστάσεις (σε mm) και οπλισμός δοκού που χρησιμοποιήθηκε για τις φορτίσεις.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

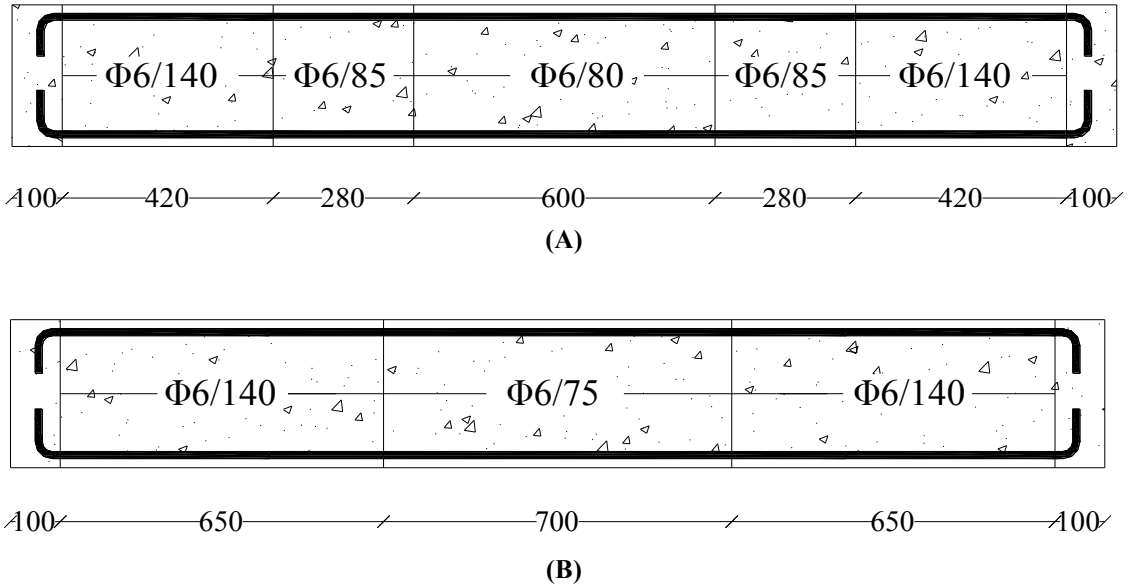


**ΣΧΗΜΑ 3.9** Διαστάσεις (σε mm) και ο Διαμήκης οπλισμός δοκού με αξονικό φορτίο  $N=750\text{KN}$  για τις περιπτώσεις (α) Δοκιμίου Α-ΤΘΔ-750 και (β) Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό.



**ΣΧΗΜΑ 3.10** Διαστάσεις (σε mm) και ο Διαμήκης οπλισμός δοκού με αξονικό φορτίο  $N=630\text{KN}$  για τις περιπτώσεις (α) Δοκιμίου Α-ΤΘΔ-630 και (β) Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



**ΣΧΗΜΑ 3.11** Διαστάσεις (σε mm) και ο Διαμήκης οπλισμός δοκού με αξονικό φορτίο  $N=500KN$  για τις περιπτώσεις (α) Δοκιμίου Α-ΤΘΔ-500 και (β) Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

# 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). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δοκίμια είναι ορθογωνικής διατομής  $300 \times 150 \text{mm}^2$ . Τα πειράματα αυτά έχουν ως σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς υπό μονότονη φόρτιση μέχρι αστοχίας και ανακύκλιση στην μέγιστη μετατόπιση κ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε  $\delta y$ ,  $2\delta y$ ,  $3\delta y$  και  $4\delta y$ .

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα **σχήματα 4.1-4.6** και τους **πίνακες 4.1-4.4**. Στα σχήματα 4.2, 4.4 και 4.6 δίνονται οι καμπύλες συμπεριφοράς τριών ξεχωριστών φορέων υπό εναλλασσόμενη επιπόνη στην μέγιστη μετατόπιση ( $P_{\max}$ ) και στα σχήματα 4.1, 4.3 και 4.5 τα διαγράμματα που προκύπτουν από μονότονη φόρτιση. Στον πίνακα 4.1 δίνονται οι τιμές των ροπών αντοχής και τεμνουσών δυνάμεων μαζί με τις αντίστοιχες τιμές αντοχής που προβλέπονται από τις μεθόδους υπολογισμού των οποίων έγινε χρήση στην παρούσα εργασία. και τέλος στους πίνακες 4.1 – 4.4, δίνονται οι πειραματικές και υπολογιστικές τιμές υπό διαφορες αξονικές δυνάμεις και των αντίστοιχων μετατοπίσεων για τα μονοτονικά / ανακυκλιζόμενα δοκίμια.

## 4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Υπολογιστικές τιμές ροπών διαρροής και αστοχίας υπό διαφορές αξονικές δυνάμεις.

Δοκίμια	Υπολογισθέντα Στοιχεία				
	N(KN)	Pu,calc (KN)	Py,calc (KN)	My,calc (KNm)	Mf,calc (KNm)
300x150mm Μονότονη	750	256.4	179.9	89.9	128.2
300x150mm Ανακυκλιζόμενη					
300x150mm Μονότονη	630	240.5	179.3	89.7	120.2
300x150mm Ανακυκλιζόμενη					
300x150mm Μονότονη	500	219.4	178.4	89.2	109.7
300x150mm Ανακυκλιζόμενη					
300x150mm Σχεδιασμού	315	175.4	136.4	68.2	87.7

- (1) Στην τελευταία σειρά αναγράφονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των δοκιμίων.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2** Πειραματικές τιμές τεμνουσών δυνάμεων και ροπών αντοχής.

Δοκίμια	Πειραματικές τιμές						
	N(KN)	P <sub>max,exp</sub> (KN)	δ <sub>y,exp</sub> (mm)	V <sub>exp</sub>	M <sub>exp</sub> (Knm)	M <sub>exp</sub> /M <sub>f,calc</sub>	V <sub>exp</sub> /V <sub>calc</sub>
300x150mm Μονότονη	750	261.10	11.14	130.55	135.64	1.06	1.02
300x150mm Ανακυκλιζόμενη		194.64	9.71	97.32	102.17	0.80	0.77
300x150mm Μονότονη	630	259.85	10.18	129.93	133.09	1.11	1.08
300x150mm Ανακυκλιζόμενη		246.01	12.34	123.01	127.70	1.06	1.02
300x150mm Μονότονη	500	226.42	10.32	113.21	115.54	1.05	1.03
300x150mm Ανακυκλιζόμενη		230.96	12.18	115.48	118.68	1.08	1.05

- (1) Όπου δ<sub>y,exp</sub> η μετατόπιση που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο διαρροής, σχηματισμού μιας πλαστικής άρθρωσης

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3** Πειραματικές και υπολογιστικές τιμές για διαφορες αξονικές δυνάμεις και των αντίστοιχων μετατοπίσεων για μονοτονικά φορτιζόμενα δοκίμια.

Δοκίμια	N	P <sub>y,calc</sub>	P <sub>max,calc</sub>	δ <sub>y</sub>	δ <sub>ny</sub>	0.85P <sub>max,calc</sub>	δ <sub>u</sub>	μ
300x150mm Μονότονη	750	179.90	256.40	2.80	3.99	217.94	11.47	2.87
300x150mm Μονότονη	630	178.40	240.50	3.20	4.31	204.43	10.26	2.38
300x150mm Μονότονη	500	179.30	219.40	4.00	4.89	186.49	13.22	2.70

- (1) Όπου P<sub>y,calc</sub>, P<sub>max,calc</sub> οι τιμές του φορτίου διαρροής στο σημείο επιβολής του φορτίου και μέγιστο πειραματικό φορτίο αντιστοίχως.

- (2) μ ο δείκτης πλαστιμότητας και ισούται με  $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_{ny}}$ .



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

- (3) Οι τιμές για το  $\delta_{ny}$ , υπολογίζονται για το  $\max \delta$  διότι δεν φθάσαμε στο 0,85P.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4** Οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στο μέγιστο φορτίο της τελευταίας ομάδας τριών ολοκληρωμένων κύκλων φόρτισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστικότητας  $\mu$ .

Δοκίμια	N	δ1κ	δ2κ	δ3κ	δ4κ	μ1κ	μ2κ	μ3κ	μ4κ
<b>300x150mm</b> Ανακυκλιζόμενη	<b>750</b>	3.63	6.67	9.71	-	0.91	1.67	2.43	-
<b>300x150mm</b> Ανακυκλιζόμενη	<b>630</b>	3.02	6.33	9.03	12.33	0.70	1.47	2.09	2.86
<b>300x150mm</b> Ανακυκλιζόμενη	<b>500</b>	6.50	13.18	-	-	1.33	2.69	-	-

- (1) Οι τιμές που βρίσκονται σε **μωβ** πλαίσιο αντιστοιχούν στις  $\delta_{fail}$  και  $\mu_{fail}$  όπου

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

- (2) Σε **γαλάζιο** πλαίσιο αναγράφονται οι  $\delta_{sust}$  και ο δείκτη πλαστικότητας  $\mu_{sust}$ , όπου

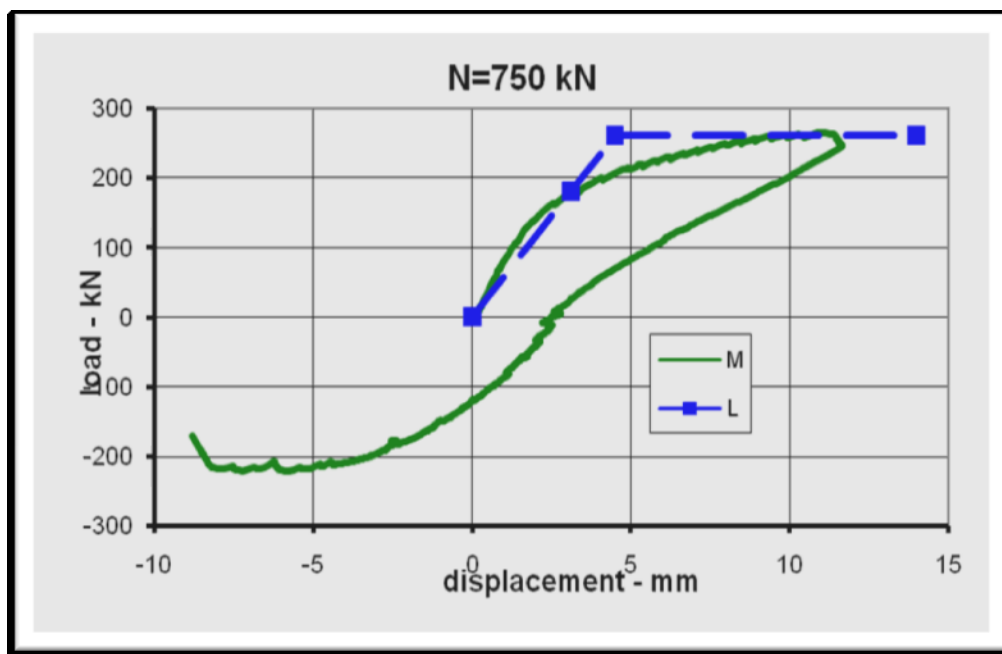
$$\mu_{sust} = \frac{\delta_{sust}}{\delta_{ny}}$$

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5** Συνοπτικός κατάλογος δοκιμών και οι αντίστοιχες τιμές εγκαρσίου σπλισμού στα κρίσιμα μήκη.

Δοκίμιο	Σχεδιασμού (des)		Ευρωπαϊκός	ΤΘΔ	
	1	2	Κρίσιμο Μήκος	1	2
<b>A1-ΤΘΔ-M750</b>	Φ6/105	Φ6/100	Φ6/75	Φ6/70	Φ6/100
<b>A2-ΤΘΔ-A750</b>	Φ6/105	Φ6/100	Φ6/75	Φ6/70	Φ6/100
<b>A3-ΤΘΔ-M630</b>	Φ6/105	Φ6/100	Φ6/75	Φ6/75	Φ6/90
<b>A4-ΤΘΔ-A630</b>	Φ6/105	Φ6/100	Φ6/75	Φ6/75	Φ6/90
<b>A5-ΤΘΔ-M500</b>	Φ6/105	Φ6/100	Φ6/75	Φ6/85	Φ6/80
<b>A6-ΤΘΔ-A500</b>	Φ6/105	Φ6/100	Φ6/75	Φ6/85	Φ6/80

### 4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 4.3.1 ΔΟΚΙΜΙΟ A1-TΘΔ-M750.



ΣΧΗΜΑ 4.1 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P – δ), A1-TΘΔ-M750.

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση μέχρι τη μέγιστη τιμή των 11.65 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος ήταν  $P_{\max}^{\text{πειραματικό}}=261.10 \text{ KN}$  και εμφανίστηκε για μετατόπιση  $\delta=11.14 \text{ mm}$ .

Παρατηρήθηκαν έντονες διαγώνιες ρωγμές που προεκτείνονται προς το άνω πέλμα, στην περιοχή του φορτίου επιβολής, καθώς επίσης βλέπουμε να αναπτύσσεται μια οριζόντια ρωγμή, που ξεκινά από το αριστερό τμήμα (στήριξη) του φορέα μας και να εκτείνεται προς το κέντρο (περιοχή επιβολής φορτίου). (Εικόνα 4.1).

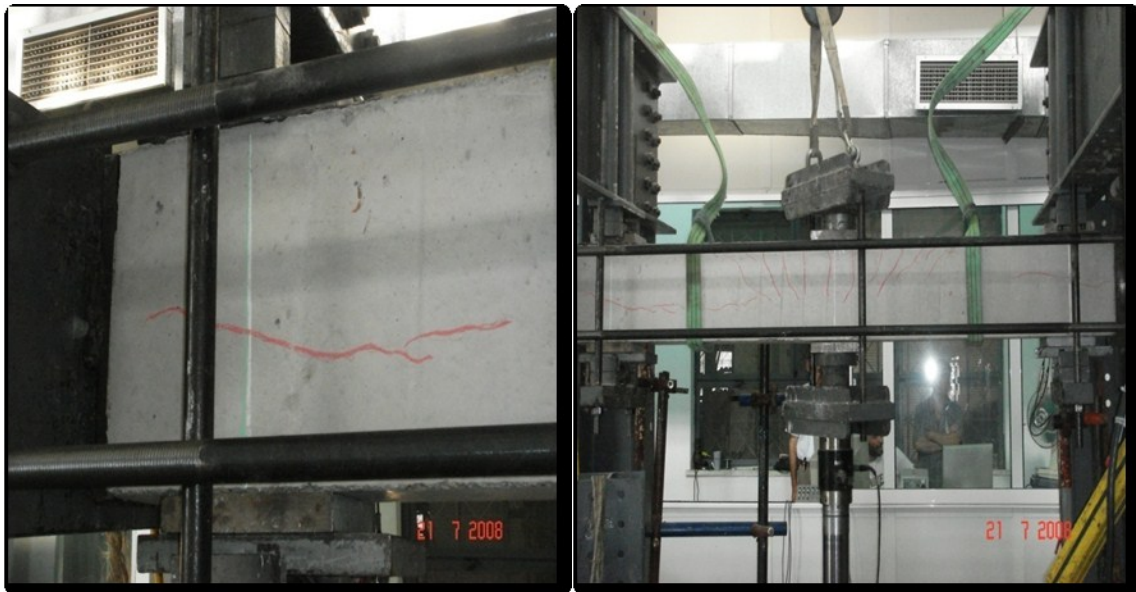
Την αστοχία προκάλεσαν οι κεκλιμένες ρωγμές (Εικόνα 4.2), που εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή 2(συμφώνα με την μέθοδο ΤΘΔ) του φορέα και παρατηρήθηκε ξαφνική αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στον κορμό του δοκιμίου περί την περιοχή της επιβολής φορτίου.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Περά ταύτα, από τον 87 **Πίνακας 4.3** φαίνεται ότι με βάση την πλαστική ανάλυση, το δοκίμιο έχει σχεδιαστεί για φορτίο αστοχίας 256,4KN και φορτίο διαρροής 179.9 KN, με την πλαστική άρθρωση να επέρχεται για  $\delta_{ny}=3.99\text{mm}$  και το δείκτη πλαστιμότητας να παίρνει την τιμή 2.87 (**Πίνακας 4.3**).

Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι, όσον αφορά τις ροπές αντοχής οι οποίες καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, τόσο στο σημείο επιβολής του φορτίου όσο υπάρχει μια, μικρή αύξηση, της τάξης του 6% (**Πίνακας 4.2**).

Συμφώνα με τις πειραματικές τιμές, η μέση αντοχή του σκυροδέματος θα πρέπει να είναι  $f_c=70$  (προσαρμόζω το  $f_c$  για να δικαιολογηθεί η αντοχή του φορέα για  $M_{,exp}=135,5 \text{ KNm}$ ). Αυτή η αύξηση της θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος οδηγεί σε προσθετές απαιτήσεις και για τον οπλισμό (Στην θέση 1 αλλαγής της θλιπτικής τροχιάς θα πρέπει να είχα  $\Phi 6/70$  και στην περιοχή 2 αντίστοιχη του κρίσιμου μήκους,  $\Phi 6/75$ ).

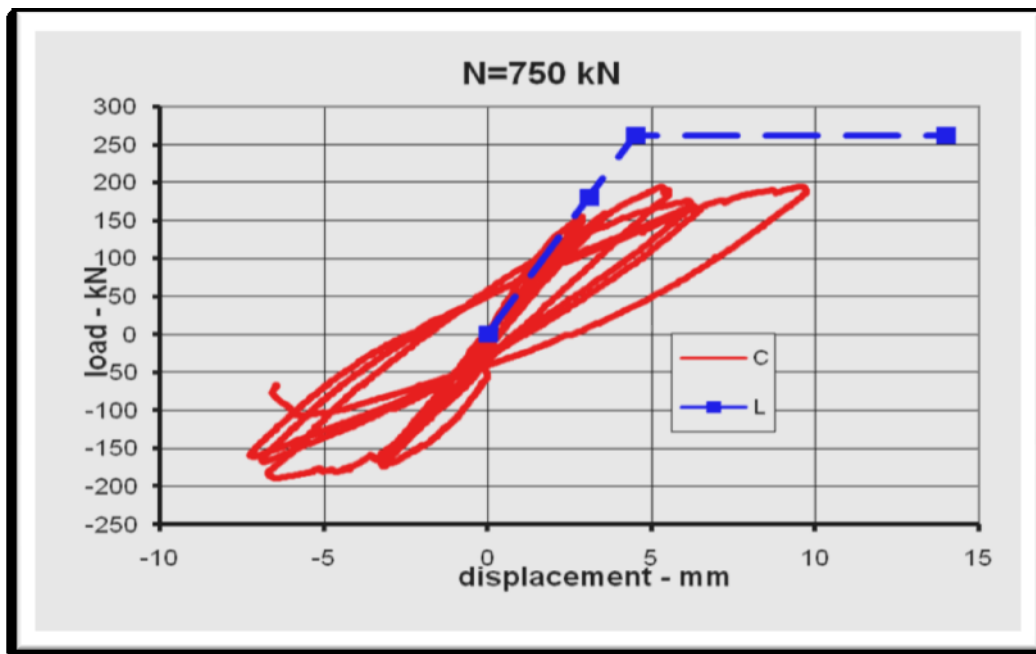


**ΕΙΚΟΝΑ 4.1** Μονότονη φόρτιση με αξονικό φορτίο  $N=750\text{KN}$ .



ΕΙΚΟΝΑ 4.2 Αστοχία δοκιμίου υπό Μονότονη φόρτιση με αξονικό φορτίο  $N=750\text{KN}$

#### 4.3.2 ΔΟΚΙΜΙΟ A2-TΘΔ-A750.



ΣΧΗΜΑ 4.2 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως ( $P - \delta$ ), A2-TΘΔ-M750.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε τρεις ομάδες ανακυκλίσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μετατόπιση  $\delta$ ,  $2\delta$  και  $3\delta$  αντίστοιχα. Οι δυο πρώτες ομάδες

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

αποτελούνται από τρεις κύκλους φόρτισης ενώ στο πρώτο κύκλο φόρτισης της τρίτης ομάδας, επέρχεται αστοχία του δοκιμίου.

Παρατηρήθηκε από την αρχή στην περιοχή της αριστερής στήριξης η ανάπτυξη οριζόντιας ρωγμής και σταδιακή επέκταση της προς την περιοχή του επιβαλλομένου φορτίου (**Εικόνα 4.3**). Την αστοχία προκάλεσε διάρρηξη τους δοκιμίου στην αριστερή στήριξη, με αποτέλεσμα να στραβώσει η μετωπική πλακά ως απόρροια του υψηλού επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου (**Εικόνα 4.4**). Επομένως το  $\delta_{sust}$  προκύπτει από την δεύτερη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 6.67 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 1.67, τιμή πολύ μικρή βάση του κανονισμού.

Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή  $\delta_{fail}=9.71\text{mm}$  με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι  $\mu_{fail}=2.43$ .

Το μέγιστο φορτίο το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 194.64 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τρίτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 9.71 mm.

Ακόμη, όσον αφορά τις ροπές αντοχής οι οποίες καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παρουσιάζουν μείωση με αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου υπάρχει μια μείωση της τάξης του 20.3% (**Πίνακας 4.2**).

Τα δοκίμια πληρούσαν τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού κανονισμού στο κρίσιμο μήκος, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση ήταν  $\Phi 6/75$ . Όπως φαίνεται, η μέθοδος ΤΘΔ επαρκεί στους κανονισμούς για απαιτήσεις πλαστιμότητας.



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

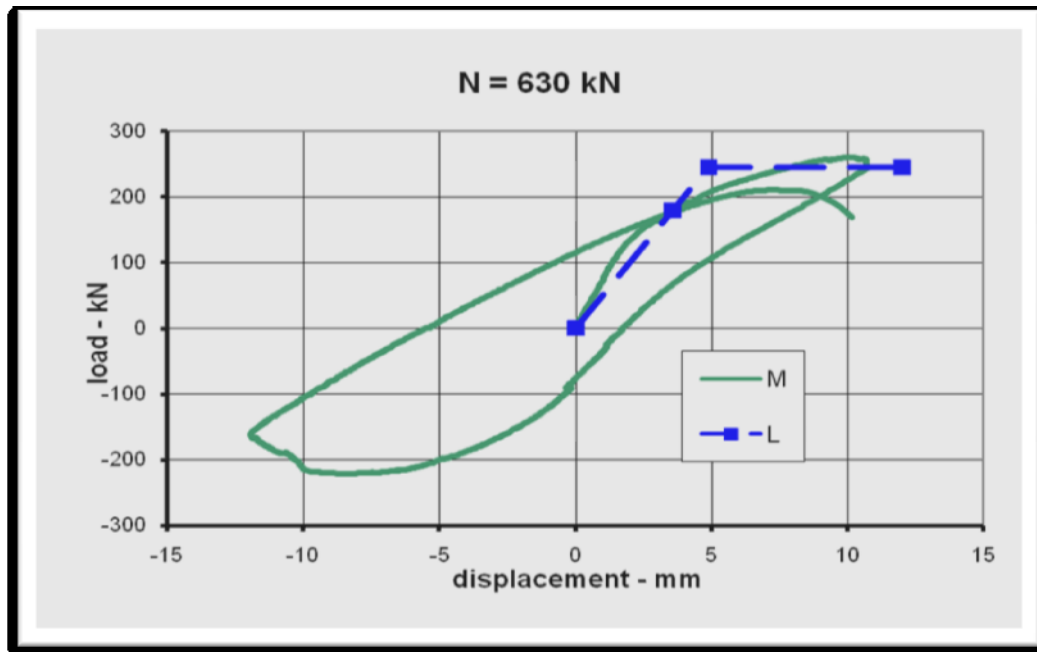


**ΕΙΚΟΝΑ 4.3** Ανακυκλιζόμενη φόρτιση με αξονικό φορτίο  $N=750\text{KN}$ .



**ΕΙΚΟΝΑ 4.4** Αστοχία δοκιμίου υπό Ανακυκλιζόμενη φόρτιση με αξονικό φορτίο  $N=750\text{KN}$ .

## 4.3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ Α3-ΤΘΔ-Μ630.



ΣΧΗΜΑ 4.3 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως ( $P - \delta$ ), Α3-ΤΘΔ-Μ630.

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση μέχρι τη μέγιστη τιμή των 11.94 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος ήταν  $P_{\max}^{\text{πειραματικό}} = 259.85 \text{ kN}$  και εμφανίστηκε για μετατόπιση  $\delta = 10.18 \text{ mm}$ .

Παρατηρήθηκαν έντονες διαγώνιες ρωγμές που προεκτείνονται προς το άνω πέλαμα, στην περιοχή του φορτίου επιβολής (Εικόνα 4.5). Την αστοχία προκάλεσαν οι κεκλιμένες καμποδιατημητικές ρωγμές, που εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή 2 (συμφωνά με την μέθοδο ΤΘΔ) του φορέα και παρατηρήθηκε σταδιακή και ψαθυρή συμπεριφορά στην θέση (2), αριστερά της περιοχής του επιβαλλόμενου φορτίου (Εικόνα 4.6).

Με βάση την πλαστική ανάλυση, το δοκίμιο έχει σχεδιαστεί για φορτίο αστοχίας 240.50 kN και φορτίο διαρροής 179.30 kN, με την πρώτη πλαστική άρθρωση να επέρχεται για  $\delta_{ny} = 4.31 \text{ mm}$  και το δείκτη πλαστιμότητας να παίρνει την τιμή 2.38 (Πίνακας 4.3).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Ακόμη, όσον αφορά τις ροπές αντοχής οι οποίες καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, τόσο στο σημείο επιβολής του φορτίου όσο και στη μεσαία στήριξη υπάρχει μια, μικρή αύξηση, της τάξης του 11 % (Πίνακας 4.2).

Συμφώνα με τις πειραματικές τιμές, η μέση αντοχή του σκυροδέματος θα πρέπει να είναι  $f_c=113$  (προσαρμόζω το  $f_c$  για να δικαιολογηθεί η αντοχή του φορέα για  $M_f=133.09$  KNm). Αυτή η αύξηση της θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος οδηγεί σε προσθετές απαιτήσεις και για τον οπλισμό (Στην θέση 1 αλλαγής της θλιπτικής τροχιάς θα πρέπει να είχα  $\Phi 6/70$  και στην περιοχή 2, αντίστοιχη του κρίσιμου μήκους,  $\Phi 6/40$ ).



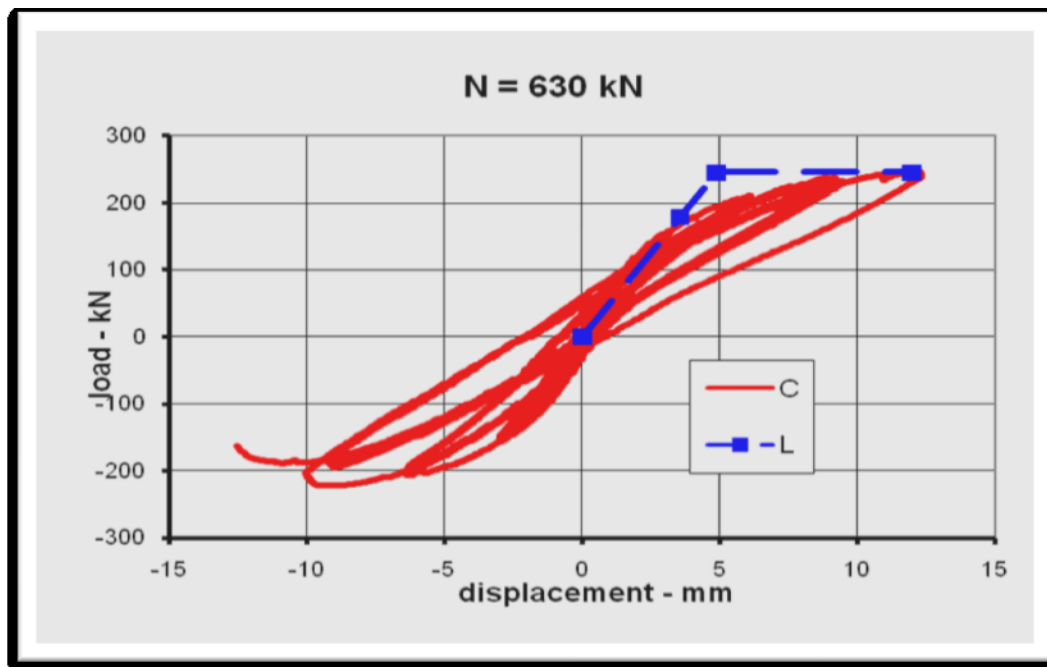
**ΕΙΚΟΝΑ 4.5** Μονότονη φόρτιση με αξονικό φορτίο  $N=630$ KN.





ΕΙΚΟΝΑ 4.6 Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα μετά την διαρροή ,N=630kN.

#### 4.3.4 ΔΟΚΙΜΙΟ A4-TΘΔ-A630.



ΣΧΗΜΑ 4.4 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P – δ), A4-TΘΔ-A630.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε τέσσερις ομάδες ανακυκλίσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μετατόπιση  $\delta$ ,  $2\delta$ ,  $3\delta$  και  $4\delta$  αντίστοιχα. Οι τρεις πρώτες ομάδες αποτελούνται από τρεις κύκλους φόρτισης ενώ στο πρώτο κύκλο φόρτισης της τέταρτης

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ομάδας, επέρχεται αστοχία του δοκιμίου. Παρατηρήθηκε από την αρχή στην περιοχή της αριστερής στήριξης η ανάπτυξη οριζόντιας ρωγμής και σταδιακή επέκταση της προς την περιοχή του επιβαλλομένου φορτίου (**Εικόνα 4.7**). Επίσης αξίζει να αναφερθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής δημιουργήθηκαν λοξές ρωγμές, οι οποίες καταδεικνύουν την καμπτοδιατημτική αστοχία του μέλους (**Εικόνα 4.8, 9**).

Επομένως το  $\delta_{sust}$  προκύπτει από την τρίτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 9.03 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 2.09, τιμή πολύ μικρή βάση του κανονισμού.

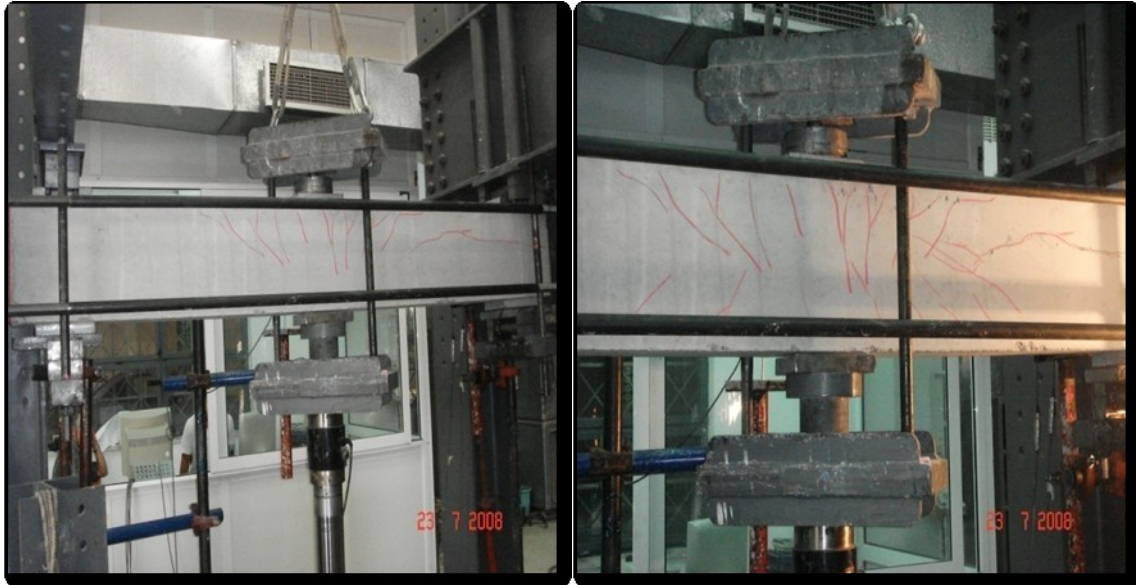
Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή  $\delta_{fail}=12.33$  mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι  $\mu_{fail}=2.86$  (**πινάκας 4.4**).

Το μέγιστο φορτίο το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 246.01 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τέταρτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 12.34mm.

Ακόμη, όσον αφορά τις ροπές αντοχής οι οποίες καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παρουσιάζουν μείωση με αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου υπάρχει μια μείωση της τάξης του 6.24% (**Πίνακας 4.2**).

Τα δοκίμια πληρούσαν τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού κανονισμού στο κρίσιμο μήκος, ο οποίος στην προκείμενη περίπτωση ήταν  $\Phi 6/75$ . Όπως φαίνεται, η μέθοδος ΤΘΔ επαρκεί στους κανονισμούς για απαιτήσεις πλαστιμότητας.

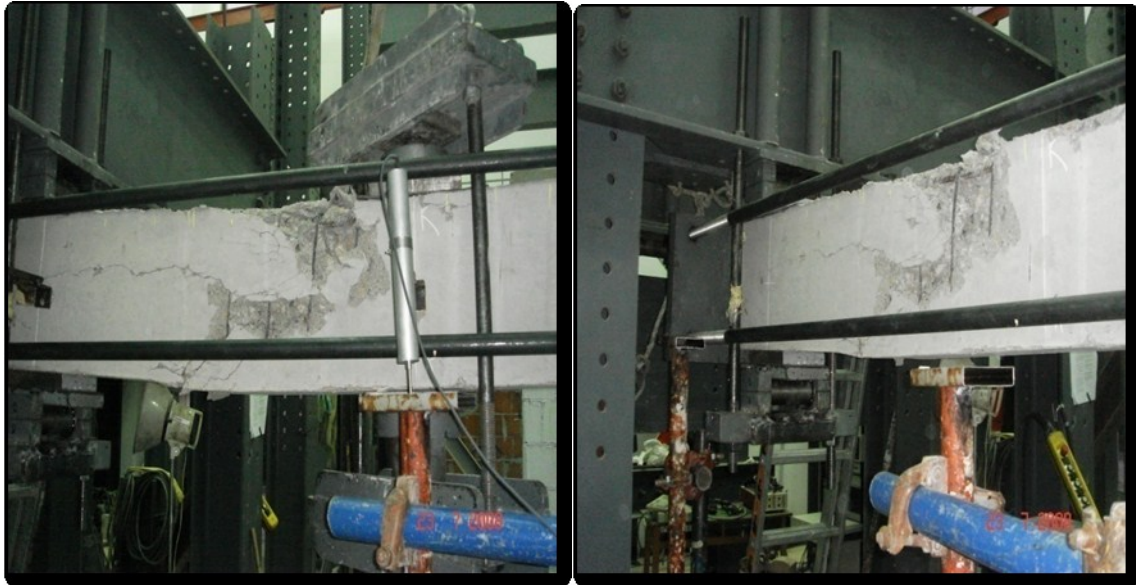
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ



**ΕΙΚΟΝΑ 4.7** Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα ,N=630KN.

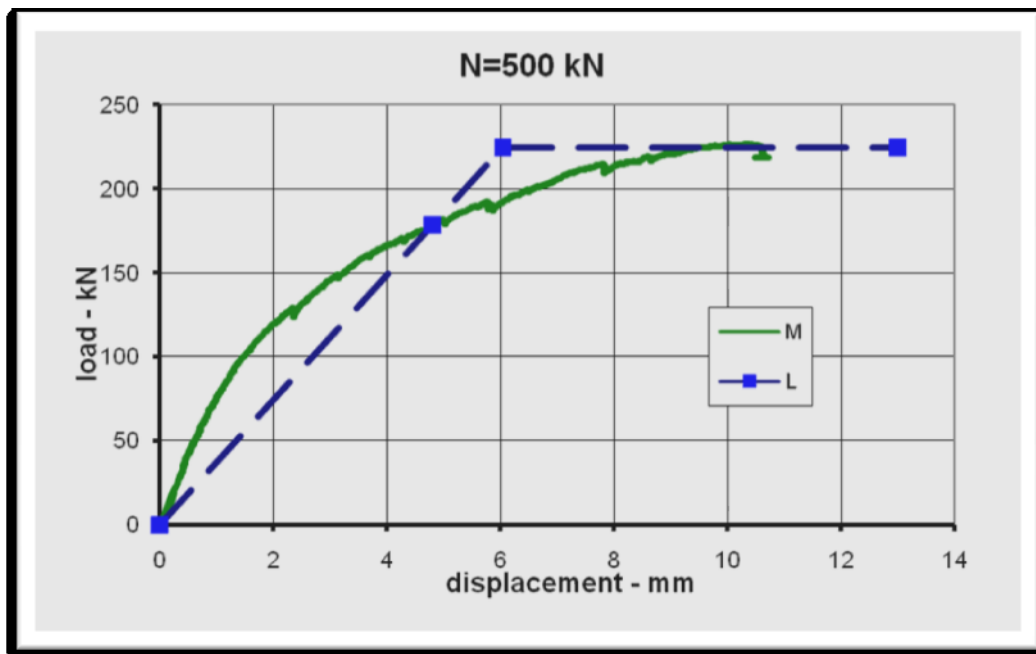


**ΕΙΚΟΝΑ 4.8** Αστοχία δοκιμίου με αξονική δύναμη N=630KN, αποτίναξη σκυροδέματος.



ΕΙΚΟΝΑ 4.9 Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα (πίσω πλευρά).

#### 4.3.5 ΔΟΚΙΜΙΟ A5-TΘΔ-M500.



ΣΧΗΜΑ 4.5 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψης (P – δ), A5-TΘΔ-M500.

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση μέχρι τη μέγιστη τιμή των 10.72 mm.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος ήταν  $P_{\max}^{\text{πειραματικό}}=226.42 \text{ KN}$  και εμφανίστηκε για μετατόπιση  $\delta=10.32 \text{ mm}$ .

Στο δοκίμιο αυτό, παρατηρήθηκαν έντονες διαγώνιες ρωγμές που προεκτείνονται προς το άνω πέλμα, στην περιοχή του φορτίου επιβολής και πρέκταση τους προς την θλιβόμενη ζώνη (**Εικόνα 4.10**). Η αστοχία του φορέα πραγματοποιήθηκε μετά τον σχηματισμό καμπτοδιατμητικών ρωγμών σε περιοχή «κρίσιμων μηκών» παράλληλα με πλήρη αποσάθρωση του σκυροδέματος περί την περιοχή αυτή (**Εικόνα 4.11**).

Με βάση την πλαστική ανάλυση, το δοκίμιο έχει σχεδιαστεί για φορτίο αστοχίας 219.4 KN και φορτίο διαρροής 178.40 KN, με την πρώτη πλαστική άρθρωση να επέρχεται για  $\delta_{ny}=4.89 \text{ mm}$  και το δείκτη πλαστιμότητας να παίρνει την τιμή 2.70 (**Πίνακας 4.3**).

Ακόμη, όσον αφορά τις ροπές αντοχής οι οποίες καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, τόσο στο σημείο επιβολής του φορτίου όσο και στη μεσαία στήριξη υπάρχει μια, μικρή αύξηση, της τάξης του 5 % (**Πίνακας 4.2**).

Συμφώνα με τις πειραματικές τιμές, η μέση αντοχή του σκυροδέματος θα πρέπει να είναι  $f_c=85$  (προσαρμόζω το  $f_c$  για να δικαιολογηθεί η αντοχή του φορέα μου για  $M_f=115.54 \text{ KNm}$ ). Αυτή η αύξηση της θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος οδηγεί σε προσθετές απαιτήσεις και για τον οπλισμό (Στην θέση 1 αλλαγής της θλιπτικής τροχιάς θα πρέπει να είχα  $\Phi 6/80$  και στην περιοχή 2 αντίστοιχη του κρίσιμου μήκους,  $\Phi 6/50$ ).



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

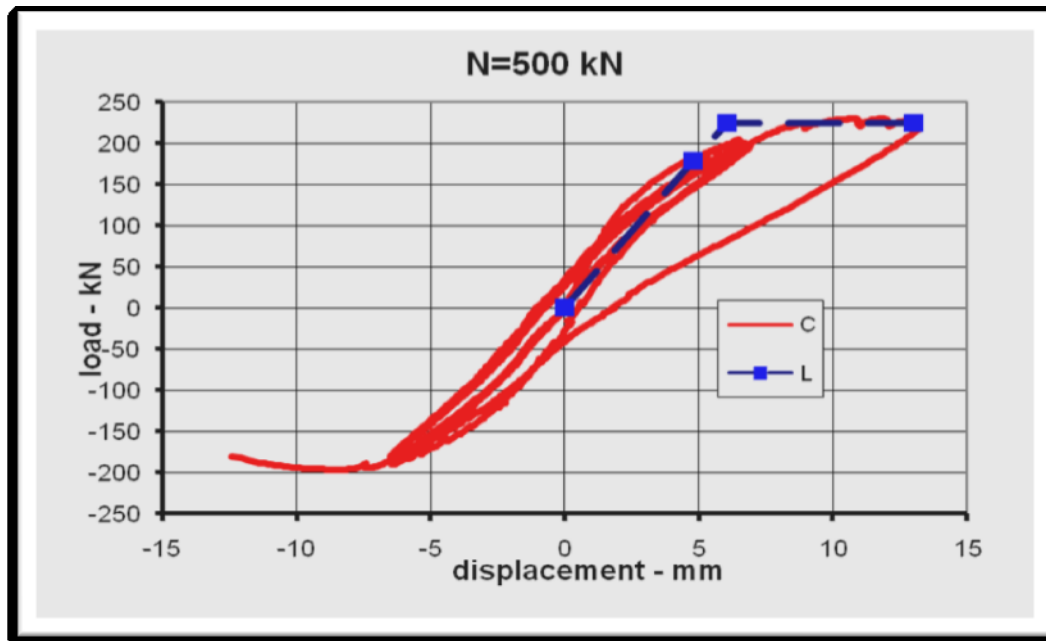


**ΕΙΚΟΝΑ 4.9** Ρηγμάτωση του φορέα στην θέση επιβολής του εγκάρσιου φορτίου.



**ΕΙΚΟΝΑ 4.10** Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα μετά την διαρροή.

## 4.3.6 ΔΟΚΙΜΙΟ Α6-ΤΘΔ-Α500.



ΣΧΗΜΑ 4.6 Διάγραμμα φόρτισης φορτίου- βέλους κάμψεως (P – δ), Α6-ΤΘΔ-Α500.

Το εν λόγω δοκίμιο υποβλήθηκε σε 2 ομάδες ανακυκλίσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μετατόπιση  $\delta$  και  $2\delta$  αντίστοιχα. Οι πρώτη ομάδα αποτελείται από τρεις κύκλους φόρτισης ενώ στο πρώτο κύκλο φόρτισης της δεύτερης ομάδας, επέρχεται αστοχία του δοκιμίου. Το δοκίμιο απώλεσε την φέρουσα ικανότητά του ξαφνικά μόλις επιχειρήθηκε να αυξηθεί το βέλος κάμψης. Από τα διαγράμματα ροπών κάμψης και τεμνουσών δυνάμεων προκύπτει ότι η δοκός αστόχησε μετά τη εξάντληση της καμπτικής αντοχής. Την αστοχία προκάλεσαν οι διαγώνιες ρωγμές που εμφανίζονται κυρίως στην κάτω εφελκόμενη περιοχή του φορέα και παρατηρήθηκε ξαφνική αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στον κορμό του δοκιμίου περί την περιοχή του επιβαλλόμενου φορτίου (Εικόνα 4.11).

Επομένως το  $\delta_{sust}$  προκύπτει από την πρώτη ομάδα ανακυκλίσεων και λαμβάνει την τιμή 6,50 mm με την πλαστιμότητα να καταγράφεται στο 1,33, τιμή πολύ μικρή βάση του κανονισμού.

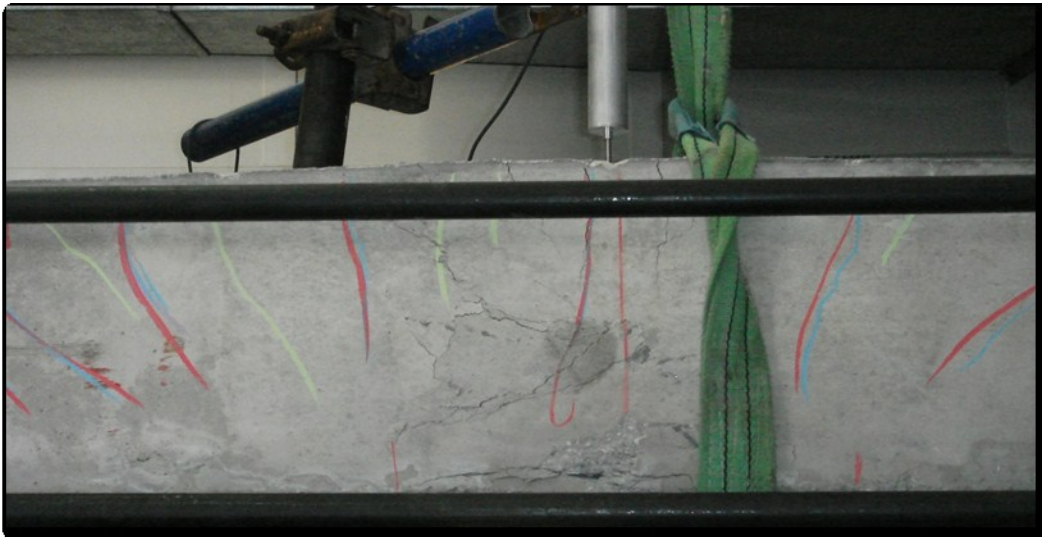
Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή  $\delta_{fail}=13.18$  mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι  $\mu_{fail}=2.69$  (πινάκας 4.4).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Το μέγιστο φορτίο το οποίο παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 230.96 KN και εμφανίζεται κατά τον πρώτο κύκλο της τέταρτης ανακυκλήσεως για μετατόπιση 12.18mm.

Ακόμη, όσον αφορά τις ροπές αντοχής οι οποίες καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παρουσιάζουν μείωση με αυτές που υπολογίστηκαν κατά το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, στο σημείο επιβολής του φορτίου υπάρχει μια μείωση της τάξης του 8.19% (**Πίνακας 4.2**).

Τα δοκίμια πληρούσαν τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού κανονισμού στο κρίσιμο μήκος, ο οποίος στην προκείμενη περίπτωση ήταν  $\Phi 6/75$ . Όπως φαίνεται, η μέθοδος ΤΘΔ επαρκεί στους κανονισμούς για απαιτήσεις πλαστιμότητας.



**ΕΙΚΟΝΑ 4.11** Ρηγματωμένη κατάσταση του φορέα μετά την διαρροή για  $N=500KN$ .



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής γίνεται μια συνοπτική αναφορά των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία.. Μέσω της απ' ευθείας παρατήρησης και καταγραφής της συμπεριφοράς μιας διάταξης (όπως π.χ. η φέρουσα ικανότητα, ο τρόπος αστοχίας, κτλ) που προσδιορίστηκαν πειραματικά, παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τις προβλέψεις των μεθόδων υπολογισμού. Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις γίνεται ο εντοπισμός των συγκεκριμένων μεθόδων υπολογισμού που συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς για τα οποία διαπιστώθηκε η απόκλιση των προβλεπόμενων από τις πειραματικές τιμές.

Στη δική μας περίπτωση και μετά από προσεκτική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα :

- Στις διατομές παρατηρείται ανάπτυξη μεγάλων αντοχών στο σκυρόδεμα στην θλιβόμενη ζώνη, η οποία μπορεί να υπάρξει μόνο όταν το σκυρόδεμα βρίσκεται υπό τριαξονική έναταση. Στην θλιβόμενη ζώνη οι θλιπτικές τάσεις του σκυροδέματος για την ισοδυναμία των εξωτερικών

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

δυνάμεων της κρίσιμης διατομής φαίνεται να έχουν μέση τάση μεγαλύτερη από την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Γεγονός το οποίο δεν μπορεί να αποδοθεί στην περίσφιξη λόγω του εγκάρσιου οπλισμού.

- Όλα τα δοκίμια ανέπτυξαν τον απαιτούμενο από τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς δείκτη πλαστιμότητας για μεσαίας πλαστιμότητας κατηγορίας στοιχείων (DCM) ( $q=1.5$ ) ενώ ένα από αυτά, A4-TΘΔ-A630 ανέπτυξε δείκτη πλαστιμότητας ( $q=2$ ) που αντιστοιχεί σε υψηλής πλαστιμότητας στοιχεία (DCH). Οι δείκτες αυτοί αναφέρονται σε ισοστατικά συστήματα (inverted pendulum system).
- Ασφαλή συμπεράσματα δεν μπορούν να βγουν στα δοκίμια τα οποία είχαμε διάρρηξη σκυροδέματος εξαιτίας του αξονικού φορτίου.
- Όλες οι τιμές για πλαστιμότητα που καταγράφηκαν ήταν μεγαλύτερες του ενός και η αστοχία σε όλα τα δοκίμια προκλήθηκε από αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## 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 τετραγωνικής διατομής, 200x200 mm και των οποίων η κατανομή των παραμορφώσεων και τάσεων στην διατομή φαίνεται στα σχήματα Α(1-3).

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 σπλισμό, αντίστοιχα. Η τιμή για την αντοχή του σκυροδέματος είναι  $f_c=55\text{MPa}$  ενώ τιμή της τάσης διαρροής και της εφελκυστικής αστοχίας του διαμήκη σπλισμού  $f_{ywd} = 300\text{MPa}$ . 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

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

θλίψη. Η καμπτική αντοχή υπολογίσθηκε για πλήρη εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής του εφελκυσμένου διαμήκους οπλισμού (ανεξάρτητα αν αυτό δεν είναι συμβιβαστό με την διατήρηση της επιπεδότητας της διατομής). Το μέτρο ελαστικότητας (E) του χάλυβα λαμβάνεται ίσο με  $E=200\text{GPa}$ . Τέλος σημειώνεται ότι όλοι οι υπολογισμοί έγιναν χωρίς συντελεστές ασφαλείας.

### Συμβολισμοί

$b$  = συνολικό πλάτος διατομής σκυροδέματος

$h$  = συνολικό ύψος διατομής σκυροδέματος

$d$  = στατικό ύψος διατομής

$\chi$  = βάθος θλιβόμενης ζώνης

$C$  = απόσταση κέντρου βάρους διαμήκων ράβδων από την επιφάνεια του σκυροδέματος

$f_s$  = τάση διαμήκους χάλυβα

$f_{yv}$  = τάση διαρροής εγκάρσιου χάλυβα

$f_c$  = τάση σκυροδέματος

### A.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Μοναδική προϋπόθεση για πλάστιμη μορφή καμπτικής αστοχίας είναι την στιγμή που η παραμόρφωση του εφελκυσμένου 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 εφελκυσμένο 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

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ώστε να ισχύει η υποθέση 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:

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

όπου  $F_c$  : η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος

$x$  : το βάθος της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος

$b$  : το πλάτος του δοκιμίου

$f_c$  : η αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη.

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

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(d-x)\varepsilon_c}{x} \quad \varepsilon_{s2} = \frac{(x-d1)}{x} \cdot \varepsilon_c, \text{ αντίστοιχα.}$$

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

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

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Α. Υπολογισμοί δοκιμίων 30x15

$$b = 150\text{mm}$$

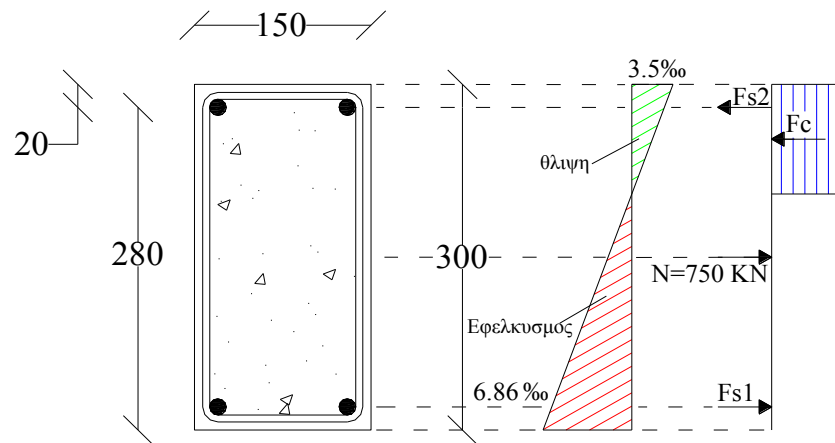
$$h = 300\text{mm}$$

$$c = 20\text{mm}$$

$$d = 280\text{mm}$$

Αντοχή διαμήκουσ χάλυβα:  $f_y = 650\text{MPa}$

#### A.2.1 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N = 750$



**ΣΧΗΜΑ Α.1** Εσωτερική επιπόνηση διατομής υπό τη συνδυασμένη δράση αξονικής δύναμης και μονοαξονικής καμψης για  $N=750$ .

$$A_s = 2\Phi 14 = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 14^2}{4} = 307,72\text{mm}^2$$

$$F_{s1} = A_s \times f_y = 307,72 \times 650 = 200,018\text{KN}$$

$$A1 = f_c \cdot b = 55 \cdot 300 = 8250$$

$$A2 = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_c - A_{s1} \cdot f_y - N = 307,72 \cdot 200000 \cdot 0,0035 - 307,72 \cdot 650 - 750000 = -734614$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

$$A3 = -A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_c \cdot d1 = -307.72 \cdot 200000 \cdot 0.0035 \cdot 20 = -4.31 \cdot 10^6$$

$$x = \frac{[-A2 + (A2^2 - 4 \cdot A1 \cdot A3)^{0.5}]}{2A1} = 94.6 \text{ mm}$$

$$z = \frac{d-x}{2} = 232.7 \text{ mm}$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 307.72 \cdot 200000 \cdot 2.76 \cdot 10^{-3} = 169848 = 169.848 \text{ KN}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(d-x)\varepsilon_c}{x} = \frac{(280-94.6) \cdot 0.0035}{94.6} = 6.86 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{(x-d1)}{x} \varepsilon_c = \frac{(94.6-20)}{94.6} \cdot 0.0035 = 2.76 \cdot 10^{-3}$$

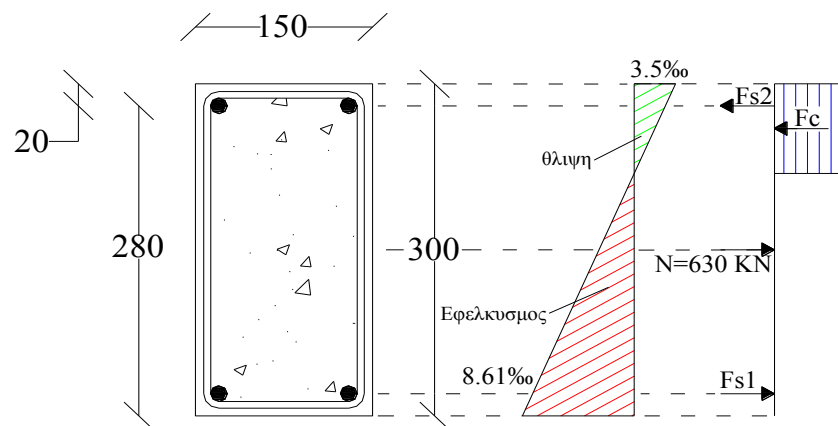
$$F_c = x \cdot b \cdot f_c = 94.6 \cdot 150 \cdot 55 = 780.170 \text{ KN}$$

$$M_f = [F_{s1}(h/2 - d1) + F_c(h/2 - x/2) + F_{s2}(h/2 - d1)] =$$

$$\Rightarrow M_f = [200018(300/2 - 20) + 780170(300/2 - 94.6/2) + 169848(300/2 - 20)] =$$

$$\Rightarrow M_f = 128.2 \text{ KNm}$$

### A.2.2 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N=630



ΣΧΗΜΑ Α.2 Εσωτερική επιτόνηση διατομής υπό τη συνδυασμένη δράση αξονικής δύναμης και μονοαξονικής κάμψης για  $N=630$ .



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

$$A_s = 2\Phi 14 = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 14}{4} = 307,72 \text{mm}^2$$

$$F_{S1} = A_s \times f_y = 307,72 \times 650 = 200,018 \text{KN}$$

$$A1 = f_c \cdot b = 55 \cdot 150 = 8250$$

$$A2 = AS2 \cdot E_s \cdot \varepsilon_c - AS1 \cdot f_y - N = 307.72 \cdot 200000 \cdot 0.0035 - 307.72 \cdot 650 - 630000 = -614614$$

$$A3 = -AS2 \cdot E_s \cdot \varepsilon_c \cdot d1 = -307.72 \cdot 200000 \cdot 0.0035 \cdot 20 = -4.31 \cdot 10^6$$

$$x = \frac{[-A2 + (A2^2 - 4 \cdot A1 \cdot A3)^{0.5}]}{2A1} = 80.9 \text{mm}$$

$$z = \frac{d-x}{2} = 239.5 \text{mm}$$

$$FS2 = AS2 \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 307.72 \cdot 200000 \cdot 2.37 \cdot 10^{-3} = 146.112 \text{KN}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(d-x)\varepsilon_c}{x} = 8.61 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{(x-d1)}{x} \varepsilon_c = 2.64 \cdot 10^{-3}$$

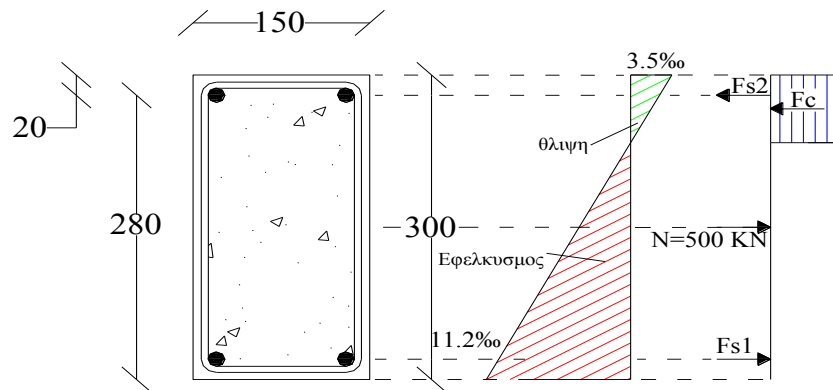
$$Fc = x \cdot b \cdot f_c = 80.9 \cdot 150 \cdot 55 = 667.833 \text{KN}$$

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

$$\Rightarrow M_f = \left[ \begin{array}{l} 200.018\left(\frac{300}{2} - 20\right) + 667.883\left(\frac{300}{2} - \frac{80.9}{2}\right) + 162.185 \\ \left(\frac{300}{2} - 20\right) \end{array} \right] =$$

$$\Rightarrow M_f = 120.2 \text{KNm}$$

**A.2.3 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N= 500**



**ΣΧΗΜΑ Α.3** Εσωτερική επιτόνηση διατομής υπό τη συνδυασμένη δράση αξονικής δύναμης και μονοαξονικής καμψης για N=500.

$$A_s = 2\Phi 14 = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 14}{4} = 307,72 \text{ mm}^2$$

$$F_{s1} = A_s \times f_y = 307,72 \times 650 = 200,018 \text{ KN}$$

$$A1 = f_c \cdot b = 55 \cdot 150 = 8250$$

$$A2 = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_c - A_{s1} \cdot f_y - N = 307,72 \cdot 200000 \cdot 0,0035 - 307,72 \cdot 650 - 500000 = -486614$$

$$A3 = -A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_c \cdot d1 = -307,72 \cdot 200000 \cdot 0,0035 \cdot 20 = -4,31 \cdot 10^6$$

$$x = \frac{[-A2 + (A2^2 - 4 \cdot A1 \cdot A3)^{0,5}]}{2A1} = 66,6 \text{ mm}$$

$$z = \frac{d-x}{2} = 246,7 \text{ mm}$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 307,72 \cdot 200000 \cdot 2,45 \cdot 10^{-3} = 150,702 \text{ KN}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(d-x)\varepsilon_c}{x} = 1,12 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{(x-d1)}{x} \varepsilon_c = 2,45 \cdot 10^{-3}$$

$$F_c = x \cdot b \cdot f_c = 66,6 \cdot 150 \cdot 55 = 549,316 \text{ KN}$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

$$\begin{aligned} M_f &= \left[ FS1\left(\frac{h}{2} - d1\right) + Fc\left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2}\right) + FS2\left(\frac{h}{2} - d1\right) \right] = \\ \Rightarrow M_f &= \left[ \begin{array}{l} 200.018\left(\frac{300}{2} - 20\right) + 549.316\left(\frac{300}{2} - \frac{66.6}{2}\right) + 150.702 \\ \left(\frac{300}{2} - 20\right) \end{array} \right] = \\ \Rightarrow M_f &= 109.7 \text{ KNm} \end{aligned}$$

### 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  $\epsilon_c = 2\%$  ενώ για τον συγκεκριμένο χάλυβα  $\epsilon_s = 2.71\%$ . 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:

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

Όπου,  $F_c$  : η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος

$x$  : το βάθος της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος

$b$  : το πλάτος του δοκιμίου

$f_c$  : η αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### A.3.1 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=750$

$$A_1 = 0.5 \cdot b \cdot f_c = 0.5 \cdot 280 \cdot 55 = 4125$$

$$A_2 = E_s A_{s1} \varepsilon_s + E_s A_{s2} \varepsilon_s + N = -5.04 \cdot 10^5$$

$$A_3 = -\varepsilon_s A_{s2} E_s d_1 - E_s d A_{s1} \varepsilon_s = -3.69 \cdot 10^7$$

$$x = \frac{[-A_2 + (A_2^2 - 4 \cdot A_1 \cdot A_3)^{0.5}]}{2 \cdot A_1} = 173.7 \text{ mm}$$

$$z = \frac{d-x}{3} = 222.1 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d-x}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.22 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x-d_1}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.77 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_c = 0.002$$

$$F_{s1} = A_{s1} \varepsilon_{s1} = 75348.4$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 108914.0$$

$$F_c = \frac{1}{2} b \cdot f_c \cdot \varepsilon_{s1} = 716434.4$$

$$M_f = \left[ FS1 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1\right) + Fc \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3}\right) + FS2 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1\right) \right] = 89.9 \text{ KNm}$$

### A.3.2 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=630$

$$A_1 = 0.5 \cdot b \cdot f_c = 0.5 \cdot 280 \cdot 55 = 4125$$

$$A_2 = E_s A_{s1} \varepsilon_s + E_s A_{s2} \varepsilon_s + N = -3.84 \cdot 10^5$$

$$A_3 = -\varepsilon_s A_{s2} E_s d_1 - E_s d A_{s1} \varepsilon_s = -3.69 \cdot 10^7$$

$$x = \frac{[-A_2 + (A_2^2 - 4 \cdot A_1 \cdot A_3)^{0.5}]}{2 A_1} = 152.0 \text{ mm}$$

$$z = \frac{d-x}{3} = 229.3 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d-x}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.69 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x-d_1}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.74 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_c = 0.002$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1} = 103715.4$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 106887.8$$

$$F_c = \frac{1}{2} b \cdot f_c \cdot \varepsilon_{s1} = 626827.6$$

$$M_f = \left[ FS1 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1\right) + F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3}\right) + FS2 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1\right) \right] = 89.7 \text{KNm}$$

### A.3.3 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=500$

$$A_1 = 0.5 \cdot b \cdot f_c = 0.5 \cdot 280 \cdot 55 = 4125$$

$$A_2 = E_s A_{s1} \varepsilon_s + E_s A_{s2} \varepsilon_s + N = -3.84 \cdot 10^5$$

$$A_3 = -\varepsilon_s A_{s2} E_s d_1 - E_s d A_{s1} \varepsilon_s = -3.69 \cdot 10^7$$

$$x = \frac{[-A_2 + (A_2^2 - 4 \cdot A_1 \cdot A_3)^{0.5}]}{2 \cdot A_1} = 152.0 \text{mm}$$

$$z = \frac{d-x}{3} = 229.3 \text{mm}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d-x}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.69 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x-d_1}{x \cdot \varepsilon_c} = 1.74 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_c = 0.002$$

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1} = 103715.4$$

$$F_{s2} = A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = 106887.8$$

$$F_c = \frac{1}{2} b \cdot f_c \cdot \varepsilon_{s1} = 626827.6$$

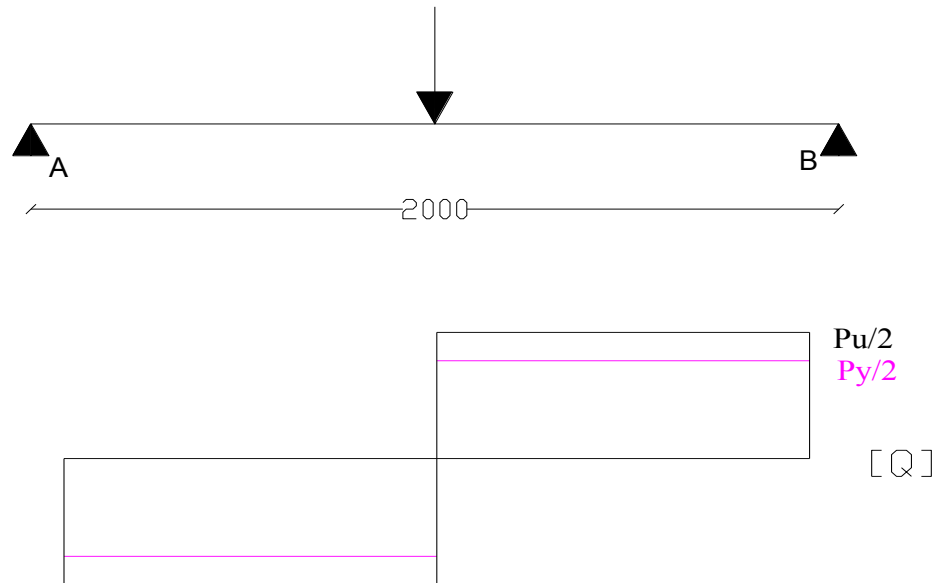
$$M_f = \left[ FS1 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1\right) + F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3}\right) + FS2 \cdot \left(\frac{h}{2} - d1\right) \right] = 89.7 \text{KNm}$$

## A.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ

Ο υπολογισμός του εγκάρσιου οπλισμού 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.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Κατωτέρω δίνονται τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών του φορέα.



ΣΧΗΜΑ Α.4 Αμφιέσφιστη δοκός και Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων.

### A.4.1 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=750$

- Ελάχιστος εγκάρσιος οπλισμός

Οπλισμός ικανός να αναλαμβάνει ένταση  $0,5MPa$

Ελάχιστη απόσταση μεταξύ συνδετήρων  $d/2 = 280/2 = 140$

$$\Rightarrow V_{\epsilon\lambda\alpha\chi} = 0,5 \times b \times 1000 = 0,5 \times 150 \times 1000 = 750KN$$

$$As_{\epsilon\lambda\alpha\chi} = V_{\epsilon\lambda\alpha\chi} / f_{yv} = 100000 / 300 = 333.00mm^2$$

$$\Rightarrow s = 170 > 140$$

▷ Απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός:  $\emptyset 6/140$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

$$M_y = 89.9 \text{KNm}$$

$$M_f = 128.2 \text{KNm}$$

$$f_t = 3.93 \text{MPa}$$

$$F_c = 780.2 \text{KN}$$

$$x = 94.6 \text{mm}$$

Συνδετήρες Φ6 δίτητοι:  $56,55 \text{mm}^2$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 1

$$a_v = 1000 \text{mm}$$

$$d = 280 \text{mm}$$

$$a_v / d = 3.6 >$$

⇒ Συμπεριφορά κατηγορίας II

$$V_{sd} = 128.2 \text{KN}$$

$$T_{II,1} = 0.5 \cdot b \cdot d \cdot f_t = 82.5$$

$$V_{II,2} = F_c \cdot [1 - 1 / (1 + 5f_t / f_c)] = 205.3 \text{KN}$$

$$V_w = 128.2 \text{KN}$$

$$A_{w(2d)} = \frac{128.2 \cdot 1000}{f_y = 300} = 427.4 \text{mm}^2$$

$$s = \frac{2 \cdot 28,26 \cdot 2 \cdot 180}{264} = 74.1 \text{mm}$$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 2

$$A_{w(2d)} = \frac{128.2 \cdot f_c}{5(F_c - 79.2)bd \cdot 300 / 2} = 151.4 \text{mm}^2$$

$$s = \frac{2 \cdot 28,26 \cdot 280}{151.4} = 104.5 \text{mm}$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### A.4.2 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=630$

$$M_y = 89.7 \text{KNm}$$

$$M_f = 120.2 \text{KNm}$$

$$f_t = 3.93 \text{MPa}$$

$$F_c = 667.8 \text{KN}$$

$$x = 80.9 \text{mm}$$

Συνδετήρες Φ6 δίτιμτοι:  $56,55 \text{mm}^2$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 1

$$a_v = 1000 \text{mm}$$

$$d = 280 \text{mm}$$

$$a_v / d = 3.6 >$$

⇒ Συμπεριφορά κατηγορίας II

$$V_{sd} = Mf = 120.2 \text{KN}$$

$$T_{II,1} = 0.5 b d f_t = 82.5$$

$$V_{II,2} = F_c [1 - 1 / (1 + 5 f_t / f_c)] = 175.7 \text{KN}$$

$$V_w = 120.2 \text{KN}$$

$$A_{w(2d)} = \frac{120.2 \cdot 1000}{f_y = 300} = 400.8 \text{mm}^2$$

$$s = \frac{2 \cdot 28,26 \cdot 2 \cdot 280}{400.8} = 79.0 \text{mm}$$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 2

$$A_{w(2d)} = \frac{120.2 \cdot f_c}{5 \cdot (F_c - 68.7) b \cdot d \cdot 300 / 2} = 169.2 \text{mm}^2$$

$$s = \frac{2 \cdot 28,26 \cdot 280}{120.2} = 93.6 \text{mm}$$



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### A.4.3 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=500$

$$M_y = 89.2 \text{KNm}$$

$$M_f = 109.7 \text{KNm}$$

$$f_t = 3.93 \text{MPa}$$

$$F_c = 549.3 \text{KN}$$

$$x = 66.6 \text{mm}$$

Συνδετήρες Φ6 δίτιμητοι:  $56,55 \text{mm}^2$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 1

$$a_v = 1000 \text{mm}$$

$$d = 280 \text{mm}$$

$$a_v / d = 3.6 >$$

⇒ Συμπεριφορά κατηγορίας II

$$V_{sd} = Mf = 109.7 \text{KN}$$

$$T_{II,1} = 0.5 b d f_t = 82.5$$

$$V_{II,2} = F_c [1 - 1 / (1 + 5 f_t / f_c)] = 144.5 \text{KN}$$

$$V_w = 109.7 \text{KN}$$

$$A_{w(2d)} = \frac{109.7 \cdot 1000}{f_y = 300} = 365.7 \text{mm}^2$$

$$s = \frac{2 \cdot 28,26 \cdot 2 \cdot 280}{365.7} = 86.6 \text{mm}$$

- Εγκάρσιος οπλισμός στο θέση 2

$$A_{w(2d)} = \frac{109.7 \cdot f_c}{5(F_c - 109.7) b d \cdot 300 / 2} = 192.1 \text{mm}^2$$

$$s = \frac{2 \cdot 28,26 \cdot 280}{109.7} = 82.4 \text{mm}$$

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

## ΕΥΡΩΠΑΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

### **B.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΙΑ ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΔΥΝΑΜΗ**

#### **B. Υπολογισμοί δοκιμίων 30x15**

$$b_c = 150mm$$

$$h_c = 300mm$$

$$b_i = 100mm$$

$$b_o = 128mm$$

$$h_o = 276mm$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### **B.1.1 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=750KN$**

$$A_s = 2\Phi 14 = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 14^2}{4} = 307,72 mm^2$$

$$C_{Rd} = 0.18$$

$$K = 1.845 \geq 1.00$$

$$K_1 = 0.15$$

$$f_{ck} = 55 MPa$$

$$A_c = b \cdot h = 300 \cdot 150 = 45000$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 16.67 \leq 0.02 \cdot f_{cd} [MPa]$$

$$P_i = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = 0.007327 \leq 0.02$$

$$\beta = 1$$

$$V = \frac{0.6 \cdot [(1 - f_{ck})]}{200} = 0.435$$

$$V_{min} = 0.035 \cdot K^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0.650577$$

Βάσει των παραπάνω υπολογίζεται η αντοχή σε τέμνουσα του δοκιμίου χωρίς την παρουσία εγκάρσιου οπλισμού. Έτσι:

$$V_{Rdc} = \left[ C_{Rdc} \cdot k \cdot (100 \cdot p_i \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d = [0.18 \cdot 1.845 \cdot 3.43 + 0.15 \cdot 16.67] \cdot 150 \cdot 280$$

$$\Rightarrow 52.83 KN$$

$$\min V_{Rdc} = (V_{min} + K_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b \cdot d = 132.32 KN$$

$$V_{Rdc} = 152.82 KN > 132.32 KN$$

$$V_{ed} = 0.5 \cdot b \cdot d \cdot V \cdot f_{ck} = 502.43 KN$$

$$V_{ed} = 502.43 KN < N = V_{Rdc}$$

Συνεπώς, εκλέγονται δίτητοι συνδετήρες  **$\Phi 6/140$** .

$$*\left(\frac{d}{2} = 140 mm\right)$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### **B.1.2 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=630KN$**

$$A_s = 2\Phi 14 = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 14^2}{4} = 307,72 mm^2$$

$$C_{Rd} = 0.18$$

$$K = 1.845 \geq 1.00$$

$$K_1 = 0.15$$

$$f_{ck} = 55$$

$$A_c = b \cdot h = 300 \cdot 150 = 45000$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 14 \leq 0.02 \cdot f_{cd} [MP_a]$$

$$P_i = \frac{A_{s1}}{b_w} \cdot d = 0.007327 \leq 0.02$$

$$\beta = 1$$

$$V = \frac{0.6 \cdot [(1 - f_{ck})]}{200} = 0.435$$

$$V_{\min} = 0.035 \cdot K^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0.650577$$

Βάσει των παραπάνω υπολογίζεται η αντοχή σε τέμνουσα του δοκιμίου χωρίς την παρουσία εγκάρσιου οπλισμού. Έτσι:

$$V_{Rdc} = \left[ C_{Rdc} \cdot k \cdot (100 \cdot p_i \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d = [0.18 \cdot 1.845 \cdot 3.43 + 0.15 \cdot 16.67] \cdot 150 \cdot 280$$

$$\Rightarrow 136.03 KN$$

$$\min V_{Rdc} = (V_{\min} + K_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b \cdot d = 115.53 KN$$

$$V_{Rdc} = 136.03 KN > 115.53 KN$$

$$V_{ed} = 0.5 \cdot b \cdot d \cdot V \cdot f_{ck} = 502.43 KN$$

$$V_{ed} = 502.43 KN < N = V_{Rdc}$$

Συνεπώς, εκλέγονται δίτητοι συνδετήρες  **$\Phi 6/140$** .

$$*\left(\frac{d}{2} = 140 mm\right)$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### **B.1.3 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=500KN$**

$$A_s = 2\Phi 14 = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 14^2}{4} = 307,72 mm^2$$

$$C_{Rd} = 0.18$$

$$K = 1.845 \geq 1.00$$

$$K_1 = 0.15$$

$$f_{ck} = 55$$

$$A_c = b \cdot h = 300 \cdot 150 = 45000$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 11.11 \leq 0.02 \cdot f_{cd} [MP_a]$$

$$p_i = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = 0.007327 \leq 0.02$$

$$\beta = 1$$

$$V = \frac{0.6 \cdot [(1 - f_{ck})]}{200} = 0.435$$

$$V_{\min} = 0.035 \cdot K^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0.650577$$

Βάσει των παραπάνω υπολογίζεται η αντοχή σε τέμνουσα του δοκιμίου χωρίς την παρουσία εγκάρσιου οπλισμού. Έτσι:

$$V_{Rdc} = \left[ C_{Rdc} \cdot k \cdot (100 \cdot p_i \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d = [0.18 \cdot 1.845 \cdot 3.43 + 0.15 \cdot 16.67] \cdot 150 \cdot 280$$

$$\Rightarrow 17.82 KN$$

$$\min V_{Rdc} = (V_{\min} + K_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b \cdot d = 92.32 KN$$

$$V_{Rdc} = 117.82 KN > 97.32 KN$$

$$V_{ed} = 0.5 \cdot b \cdot d \cdot V \cdot f_{ck} = 502.43 KN$$

$$V_{ed} = 502.43 KN < N = V_{Rdc}$$

Συνεπώς, εκλέγονται δίτητοι συνδετήρες  **$\Phi 6/140$**

$$*\left(\frac{d}{2} = 140 mm\right)$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Ως κρίσιμες νοούνται εκείνες οι περιοχές όπου είναι πιθανό να εμφανιστούν οι πλαστικές αρθρώσεις.

Για τη διαστασιολόγηση με Ευρωπαϊκούς κανονισμούς χρησιμοποιούμε στάθμη πλαστιμότητας DCM (Medium Ductility). Το κρίσιμο μήκος είναι (EC8, 5.4.3.2.2) :

$$l_{cr} = \max(h, 450mm) = \max(300, 450) = 450mm$$

### B.2 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ Ο ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΕΩΣ

#### B.2.1 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=750KN$

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

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

$$q_o = 1.5 \sim$$

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

$$V_d = \frac{N_{ed}}{(A_c \cdot f_{cd})} = \frac{750000}{(45000 \cdot 55)} = 0.303 \leq 0.65$$

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

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

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης και ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του εντός των συνδετήρων όγκου του σκυροδέματος και απολαμβάνει περισφίγξεως είναι ίσος με  $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0.298$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_o \cdot h_o} = 0.316$$

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.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

$$w_c = b_o \cdot h_o \cdot s = 276 \cdot 128 \cdot 75 = 2649600$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = 0.611$$

$$\alpha \omega_w \geq 30 \cdot V_d \cdot \mu_\phi \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035 \Rightarrow 0.008592 >$$

$$s = \min \left\{ \frac{b_o}{2}; 175mm; 8d_{bl} \right\} = 75mm$$

Άρα, εντός των κρίσιμων περιοχών θα τοποθετηθούν συνδετήρες **Ø6/75**:

### **B.2.2 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ $N=630KN$**

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 :

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

$$q_o = 1.5 \sim$$

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

$$V_d = \frac{N_{ed}}{(A_c \cdot f_{cd})} = \frac{6300000}{(45000 \cdot 55)} = 0.255 \leq 0.65$$

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

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

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης και ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του εντός των συνδετήρων όγκου του σκυροδέματος και απολαμβάνει περισφίγξεως είναι ίσος με  $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0.281$

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_o \cdot h_o} = 0.316$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

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.

$$w_c = b_o \cdot h_o \cdot s = 276 \cdot 128 \cdot 75 = 2649600$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = 0.611$$

$$\alpha_{\omega_w} \geq 30 \cdot V_d \cdot \mu_\phi \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035 \Rightarrow 0.008592 > 5$$

$$s = \min \left\{ \frac{b_o}{2}; 175mm; 8d_{bl} \right\} = 75mm$$

Άρα, εντός των κρίσιμων περιοχών θα τοποθετηθούν συνδετήρες **Φ6/75**.

### **B.2.3 ΜΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N=500KN**

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 :

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

$$q_o = 1.5 \sim$$

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

$$V_d = \frac{N_{ed}}{(A_c \cdot f_{cd})} = \frac{5000000}{(45000 \cdot 55)} = 0.202 \leq 0.65$$

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

$$\varepsilon_{sy,d} = \frac{f_{ywd}}{200000} = \frac{300}{200000} = 0.0015$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης και ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του εντός των συνδετήρων όγκου του σκυροδέματος και απολαμβάνει περισφίξεως είναι ίσος με  $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s = 0.255$



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

$$\alpha_n = 1 - \sum_n \frac{b_i^2}{6 \cdot b_o \cdot h_o} = 0.316$$

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.

$$w_c = b_o \cdot h_o \cdot s = 276 \cdot 128 \cdot 75 = 2649600$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{b_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = 0.611$$

$$\alpha \omega_w \geq 30 \cdot V_d \cdot \mu_\phi \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_o} - 0,035 \Rightarrow 0.008592 > 0.69$$

$$s = \min \left\{ \frac{b_o}{2}; 175mm; 8d_{bl} \right\} = 75mm$$

Άρα, εντός των κρίσιμων περιοχών θα τοποθετηθούν συνδετήρες **Φ6/75**.

## 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»