



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος

Διπλωματική εργασία:

“Πειραματική διερεύνηση δοκών από
ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών
συνθέσεων υπό μονοτονική φόρτιση.”

Επόπτης: Ζέρης Χρήστος

Σπουδαστής: Βιτάλης Σαρρής

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χρήστο Ζέρη, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τη συνεχή θεωρητική υποστήριξή του, καθώς και την καθοδήγησή του στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π. πριν, μετά και κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω για τη συνεργασία τους το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π. και ειδικότερα τον κύριο Παπανδρέου, τον κύριο Πατσέλη και τον κύριο Τσότρα, χωρίς την παρουσία των οποίων, η διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας θα ήταν ανέφικτη.

ΒΙΤΑΛΗΣ ΣΑΡΡΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

.: ΠΡΟΛΟΓΟΣ :	1
.: ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ :	2
.: ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 :: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ::	
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	7
.: ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 :: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ::	
2.1 RILEM TC 162-TDF: Μέθοδοι ελέγχου και σχεδιασμού σκυροδέματος ενισχυμένου με χαλύβδινες ίνες.....	9
2.2 Χρήσιμες προεκτάσεις στη δοκιμή RILEM TC 162-TDF.....	16
2.3 Συνεισφορά συνδετήρων και χαλύβδινων ιών στη διατμητική αντοχή δοκών σε καμπτοδιατμητική καταπόνηση.....	19
2.4 Διατμητική αντοχή δοκών από ινοπλισμένο με χαλύβδινες ίνες σκυρόδεμα χωρίς εγκάρσιο οπλισμό.....	34
.: ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ::	
3.1 Προετοιμασία του πειράματος.....	52
3.2 Έλεγχος κυλινδρικών δοκιμίων.....	58
.: ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ::	
4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	62
4.2 Περιγραφή της ενοργάνωσης των δοκιμίων.....	64

**.: ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ:.**

5.1 Εισαγωγή.....	73
5.2 Δοκίμιο D100.....	74
5.3 Δοκίμιο D150.....	93
5.4 Δοκίμιο D200.....	110
5.5 Δοκίμιο M100.....	127
5.6 Δοκίμιο M150.....	144
5.7 Δοκίμιο M200.....	160

**.: ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 :: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ:.**

6.1 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμίων.....	178
6.2 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με σχέσεις της βιβλιογραφίας.....	181

.: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ :.....	182
-------------------------------	------------

Κεφάλαιο 1ο

Εισαγωγή

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται, κυρίως στο εξωτερικό, αλλά και στην Ελλάδα προσπάθειες βελτίωσης των υπαρχόντων δομικών υλικών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους σε συνδυασμό με καλύτερα χαρακτηριστικά των νέων υλικών. Μία από αυτές τις προσπάθειες είναι η παρασκευή σκυροδέματος με προσθήκη ινών, ή αλλιώς ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα μείγμα αποτελούμενο από τσιμέντο, νερό, λεπτά και χοντρά αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες. Μπορεί, επίσης, να περιέχει ποζολάνες ή και άλλα πρόσμικτα, όπως το συμβατικό σκυρόδεμα. Οι ίνες είναι μικρού μήκους, της τάξης των μερικών εκατοστών και διαμέτρου που είναι συνήθως κλάσμα του χιλιοστού, και διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του, σε ποσοστό της τάξης του 1-3% κ.ό. Χρησιμοποιούνται ίνες διαφόρου σχήματος, μεγέθους αλλά και υλικού όπως χάλυβας και, πλέον πρόσφατα, πολυμερή και γυαλί, ή και άλλα φυσικά υλικά. Για κατασκευαστικούς λόγους χρησιμοποιούνται περισσότερο οι ίνες κατασκευασμένες από χάλυβα.

Υπό κανονικές συνθήκες, το σκυρόδεμα περιέχει πολυάριθμες μικρορωγμές που ενυπάρχουν στη μάζα από τη διαδικασία πήξης. Η ταχεία επέκταση των μικρορωγμών κάτω από συνθήκες επιβαλλόμενης τάσης είναι υπεύθυνη τόσο για τη χαμηλή εφελκυστική αντοχή όσο και για την αστοχία του υλικού. Αρχικά, παρατηρήθηκε πως τόσο η εφελκυστική όσο και η καμπτική αντοχή του σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν σημαντικά με την προσθήκη πυκνά διατεταγμένων ινών, οι οποίες εμποδίζουν την επέκταση των μικρορωγμών, δηλαδή καθυστερούν την εμφάνιση των εφελκυστικών ρωγμών και αυξάνουν την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, της ικανότητας δηλαδή του υλικού να απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση, που αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο σκυρόδεμα, υπό παρόμοιες συνθήκες καταπόνησης.

Ερευνητές έχουν εντοπίσει σημαντική βελτίωση στη μεταρηγματωμένη συμπεριφορά του σκυροδέματος, το οποίο εμπεριέχει χαλύβδινες ίνες. Με άλλα λόγια, παρόλο που η μέγιστη εφελκυστική αντοχή μπορεί να μην αυξάνεται πολύ, οι εφελκυστικές παραμορφώσεις κατά τη θραύση αυξήθηκαν σημαντικά. Γι' αυτό το λόγο, συγκρινόμενο με το άοπλο, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι πολύ πιο άκαμπτο και ανθεκτικό σε κρούση. Είναι πάντως φανερό, πως η προσθήκη ινών στο μείγμα

του σκυροδέματος δίνει ένα υλικό πολύ πιο πλάστιμο από το συμβατικό σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, στις Η.Π.Α., όπου χρησιμοποιείται ευρέως το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (High Strength Concrete), το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλές αντοχές σε θλίψη (μεγαλύτερες των 60 MPa), αλλά είναι έντονα ψαθυρό (μετά από ένα ελαστικό κλάδο αστοχεί απότομα), η προσθήκη ινών αποτελεί σημαντική λύση για ένα νέο πιο πλάστιμο υλικό υψηλών αντοχών.

Η είσοδος αυτής της νέας τεχνολογίας ήρθε το 1971, όταν για την κατασκευή ενός πάρκινγκ αυτοκινήτων στο αεροδρόμιο Heathrow του Λονδίνου, κατασκευάστηκαν πλάκες πάχους 65 mm και εμβαδού 3250 mm² από σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες ίνες. Το μείγμα περιείχε χαλύβδινες ίνες διαμέτρου 0.25 mm και μήκους 25 mm. Μετά από χρήση 5 ετών, δεν υπήρξε ίχνος ρωγμής. Επίσης, το 1971, το U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory πραγματοποίησε ελεγχόμενες φορτίσεις σε πλάκες ινοπλισμένου σκυροδέματος αεροδιαδρόμου στο Vicksburg του Mississippi. Ο αεροδιάδρομος υποβλήθηκε σε φορτίσεις τροχών C5A αεροσκάφους (13600 kg ανά τροχό για 12 τροχούς). Στο πείραμα έγινε σύγκριση της συμπεριφοράς μιας πλάκας ινοπλισμένου σκυροδέματος πάχους 150 mm με μία απλού σκυροδέματος πάχους 250 mm. Στην τελευταία, η πρώτη ρωγή εμφανίστηκε μετά από 40 φορτίσεις, ενώ στην ινοπλισμένη μετά από 350. Επίσης, το απλό σκυρόδεμα αστόχησε μετά από 950 φορτίσεις, ενώ το ινοπλισμένο μετά από 8735 φορτίσεις είχε τριχοειδείς ρωγμές και ήταν ακόμη χρήσιμο.

Σήμερα, η τεχνολογία του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι αποδεκτή και χρησιμοποιείται ευρέως σε επιφανειακούς φορείς που υπόκεινται σε μεγάλες φορτίσεις, όπως αεροδρόμια, βιομηχανικά δάπεδα, στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Η χρήση του σε αυτόν το τομέα είναι αναγκαία, καθώς καθυστερεί σημαντικά την εμφάνιση των ρωγμών και κυρίως μειώνει το πάχος των επιφανειακών φορέων, μειώνοντας ταυτόχρονα σημαντικά το κόστος κατασκευής. Τα τελευταία χρόνια οι χρήσεις του ινοπλισμένου σκυροδέματος έχουν επεκταθεί σε παρά πολλές κατηγορίες έργων πολιτικού μηχανικού λόγω των βελτιωμένων μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του σε σύγκριση με το συμβατικό άοπλο σκυρόδεμα.

1.2 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί πολλές πειραματικές εργασίες με στόχο την έρευνα στην προσφορά των ιών σε γραμμικούς φορείς με διάφορες φορτίσεις, διατομές, ποσοστά ιών, μεγέθη κ.ά. Τις πιο συγγενείς με την παρούσα εργασία βλέπουμε και στο δεύτερο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής αναφοράς.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος της συμπεριφοράς σε κάμψη και διάτμηση ινοπλισμένων αμφιέριστων δοκών ορθογωνικής διατομής, έναντι εγκάρσιου μονοτονικού φορτίου ισομοιρασμένου σε δύο σημεία εφαρμογής που ισαπέχουν από τις στηρίξεις.

Όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφική αναφορά ένα στοιχείο που δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς είναι η χρήση μείγματος ιών διαφορετικού σχήματος και διαστάσεων σε σύγκριση με τη συμπεριφορά δοκών με ένα είδος ίνας. Αυτή η σύγκριση, καθώς και ο σχολιασμός της συμπεριφοράς των δοκιμίων με διαφορετική ποσότητα ιών αποτελούν μέρος της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2ο

Βιβλιογραφική διερεύνηση

2.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1 RILEM TC 162-TDF: Μέθοδοι ελέγχου και σχεδιασμού σκυροδέματος ενισχυμένου με χαλύβδινες ίνες

(Ιανουάριος – Φεβρουάριος 2000)

ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ (πρότυπος έλεγχος)

2.1.1 Σκοπός της δοκιμής

Η ακόλουθη μέθοδος προσδιορίζει την εφελκυστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης που προκύπτει από τον πειραματικό έλεγχο μιας αμφιέριστης δοκού με μία τεχνητή εγκοπή στο μέσον υπό τη φόρτιση “τριών σημείων” (3 point loading), δηλαδή μιας δοκού εδραζόμενης σε δύο στηρίξεις φορτιζόμενης στο μέσον.

Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό:

- Του ορίου αναλογικότητας (limit of proportionality, LOP), δηλαδή της τάσης που αντιστοιχεί στο σημείο της καμπύλης φορτίου – παραμόρφωσης F_u , και εμφανίζεται σαν το όριο αναλογικής αύξησης αντίστασης ανάλογα με το βέλος στο άνοιγμα, προσδιορίζεται στο βήμα 5 παρακάτω ως όριο αναλογικότητας.
- Των δύο εφελκυστικών αντοχών σε κάμψη που ταυτοποιούν τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου υλικού μέχρι την επιλεγόμενη παραμόρφωση. Αυτές οι αντοχές προσδιορίζονται στο βήμα 5.

Εκτός της απαιτούμενης μέτρησης του βέλους της δοκού στο μέσον (δ), προαιρετικά προβλέπεται και η συνεχής μέτρηση του ανοίγματος της εγκοπής στη βάση της δοκού (crack mouth opening displacement CMOD). Ο σκοπός και των δύο μετρήσεων είναι να βρεθεί σε τελική φάση:

- Το διάγραμμα μεταξύ του ανοίγματος της ρωγμής CMOD στην εγκοπή και της κατακόρυφης παραμόρφωσης της δοκού στο μέσον, δ .
- Το διάγραμμα μεταξύ τάσης και ανοίγματος ρωγμής CMOD κατά μήκος του δοκιμίου κατά τη δοκιμή κάμψης αφενός, και μεταξύ τάσης και πλάτους ρωγμής κατά τη διαξονική εφελκυστική δοκιμή αφετέρου.

2.1.2 Κατασκευή των δοκιμών

Για τον προβλεπόμενο έλεγχο χρησιμοποιούνται δοκοί από ινπολισμένο σκυρόδεμα τετραγωνικής διατομής 150mm x 150mm με ελάχιστο μήκος 550mm ως πρότυπα δοκίμια για το πείραμα. Το πρότυπο καθορίζει ότι δεν ενδείκνυνται για έλεγχο σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες μήκους μεγαλύτερου των 60mm και για σύνθεση με μέγιστη διάμετρο αδρανούς μεγαλύτερης των 32mm. Η διαδικασία σκυροδέτησης των μητρών των δοκιμών φαίνεται στο Σχήμα 2.1.1. Είναι επιθυμητό η περιοχή 1 να είναι διπλάσια από την περιοχή 2.

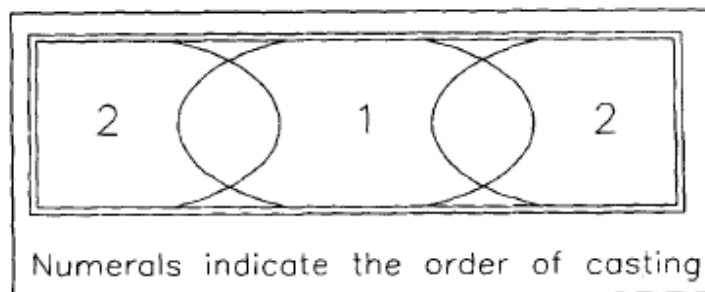


Fig. 1 - Production method for casting the specimen.

Σχήμα 2.1.1: Μέθοδος πλήρωσης των καλουπιών

Η συμπύκνωση του μείγματος επιτυγχάνεται συνήθως μέσω εξωτερικής δόνησης, καθώς η εσωτερική δόνηση (χρησιμοποίηση δονητή) μπορεί να προκαλέσει μη ομογενή κατανομή των ινών στα δοκίμια.

Τα δοκίμια πρέπει να τοποθετούνται σε υγρό περιβάλλον για 24 έως 48 ώρες μετά την σκυροδέτηση. Μετά, αποθηκεύονται σε ελεγχόμενες συνθήκες +20°C και ποσοστό υγρασίας R.H. \geq 95% μέχρι την προετοιμασία της δοκιμής.

Μετά την ωρίμανση, οι δοκοί ρηγματώνονται τεχνητά με τη χρήση τροχού. Κάθε δοκός στρέφεται 90° ως προς την ανοιχτή επιφάνεια της σκυροδέτησης και κατόπιν πριονίζεται κατά πλάτος στο μέσον του μήκους της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.2. Το πλάτος της εγκοπής είναι 2-3mm και έχει βάθος (Σχήμα 2.1.2) $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$.

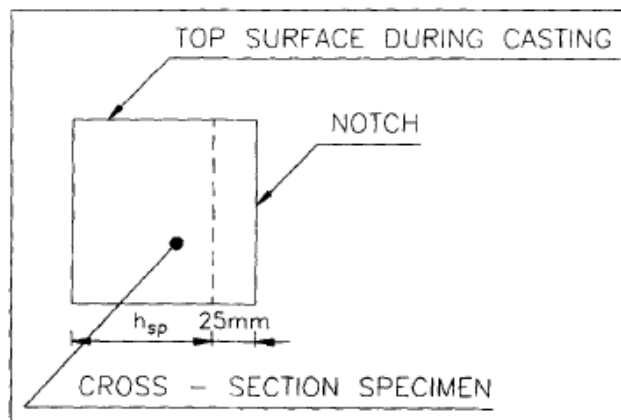


Fig. 2 - Position of the notch sawn into the test beam.

Σχήμα 2.1.2: Θέση πριονίσματος της τεχνητής εγκοπής στο δοκίμιο

Σημειώνεται πάντως, ότι για τα δοκίμια μπορεί να επιλεχθούν και διαφορετικές διαστάσεις. Στις Η.Π.Α., χρησιμοποιούνται συνήθως δοκοί διατομής 100mm x 100mm με μήκος ανοίγματος 300mm. Στη Νορβηγία και τη Σουηδία, καθώς και στον οργανισμό Efnarc, χρησιμοποιούνται δοκοί ύψους 75mm και πλάτους 125mm. Το μήκος ανοίγματος είναι 450mm. Τα δοκίμια δεν τροχίζονται και δεν περιστρέφονται, όπως αναφέρονται παραπάνω και φορτίζονται όπως σκυροδετήθηκαν. Χρειάζεται προσοχή για τη διασφάλιση λείων επιφανειών στις στηρίξεις.

2.1.3 Απαιτήσεις για τη συσκευή επιβολής φορτίου

Για τη δοκιμή απαιτείται μία συσκευή επιβολής φορτίου που είναι ικανή να λειτουργεί υπό ελεγχόμενες συνθήκες και να επιβάλλει μία συνεχή αύξηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου στο μέσον (δ), προτιμότερα δε μια μηχανή τύπου “κλειστού κύκλου” ελέγχου. Μια συσκευή με ικανότητα μόνο συνεχούς αύξηση του φορτίου δεν είναι κατάλληλη για την πλήρη καταγραφή της καμπύλης φορτίου – παραμόρφωσης, μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου F_u .

Η δυσκαμψία του εξοπλισμού φόρτισης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να αποφευχθούν ασταθείς ζώνες στις καμπύλες φορτίου – παραμόρφωσης ($F-\delta$) και $F-CMOD$. Δοκιμές κατά τη διάρκεια των οποίων παρατηρήθηκαν αστάθειες πρέπει να απορρίπτονται.

Το ρόλο των στηρίξεων θα φέρουν δύο κύλινδροι διαμέτρου 30mm, ελεύθεροι να περιστρέφονται. Οι κύλινδροι τοποθετούνται σε χαλύβδινες πλάκες που επιτρέπουν τις οριζόντιες μετακινήσεις κατά τη δοκιμή και ελαχιστοποιούν την πιθανότητα εμφάνισης οριζόντιων δυνάμεων στα δοκίμια που θα εμποδίσουν το άνοιγμα ρωγμής και άρα θα αλλοιώσουν τη μέτρηση. Το φορτίο δρα επίσης μέσω ενός κυλίνδρου, διαμέτρου 30mm.

Οι απαραίτητοι βαθμοί ελευθερίας για κάθε στήριξη φαίνονται στο Σχήμα 2.1.3.

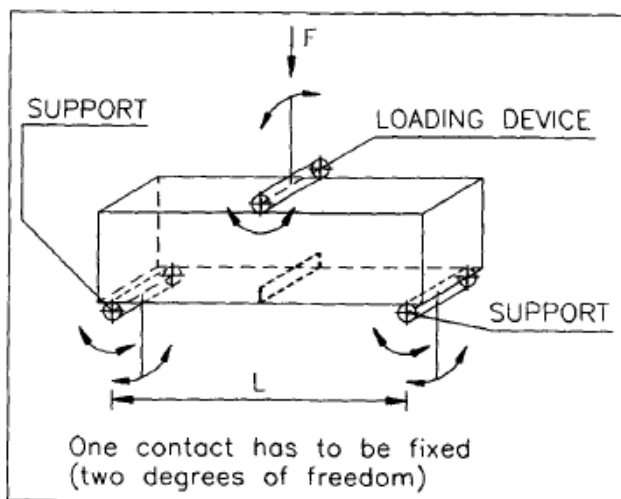


Fig. 3 – Position of the load and supports of the beam specimen.

Σχήμα 2.1.3: Θέση φορτίου και στηρίξεων των δοκιμίων

Η συσκευή μέτρησης παραμόρφωσης πρέπει να είναι ικανή να καταγράψει με ακρίβεια την παραμόρφωση στο μέσον του ανοίγματος, αποκλείοντας εξωτερικές παραμορφώσεις της συσκευής και των στηρίξεων των δοκών. Το άνοιγμα της ρωγμής CMOD πρέπει να μετρείται και στις δύο πλευρές του δοκιμίου (δ_I , δ_{II}), η δε διάταξη πρέπει να λειτουργεί απρόσκοπτα, ώστε να αποφεύγεται η επιρροή της στροφής.

Στο Σχήμα 2.1.4 φαίνεται μια παραστατική απεικόνιση μιας πιθανής πειραματικής διάταξης για την καταγραφή της απόκρισης. Η καταγραφή του ανοίγματος της εγκοπής CMOD με χρήση LVDT (linear voltage displacement transducer) είναι προαιρετική. Η πρότυπη απόσταση των σημείων για μια τέτοια καταγραφή είναι 40mm (Σχήμα 2.1.4).

Η ακρίβεια της καταγραφής του φορτίου πρέπει να είναι της τάξης των 0.1 kN. Η ακρίβεια για την καταγραφή των μετατοπίσεων στο μέσον, αλλά και στην εγκοπή πρέπει να είναι της τάξης των 0.01mm.

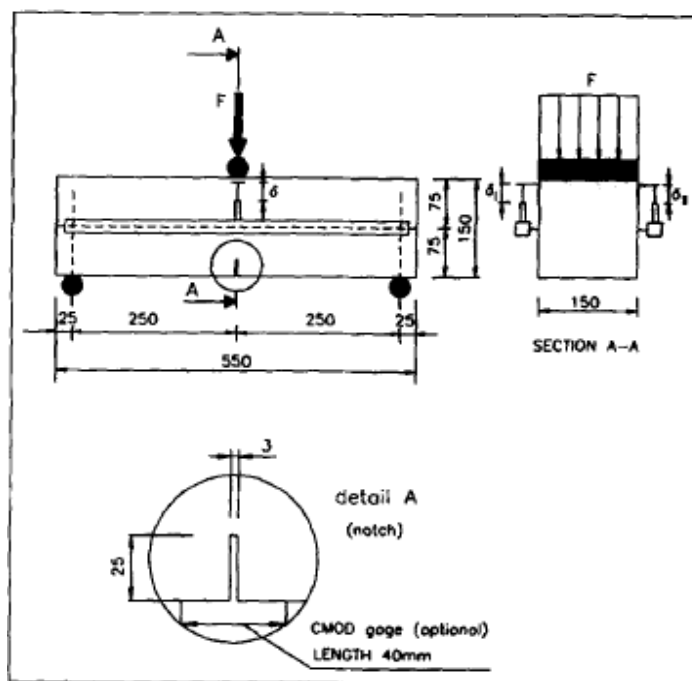


Fig. 4 – Arrangement of displacement monitoring gauges.

Σχήμα 2.1.4: Καθορισμός των θέσεων μετρητικών οργάνων

2.1.4 Περιγραφή της διαδικασίας

Το μήκος ανοίγματος στη δοκιμή τριών σημείων είναι 500mm (Σχήμα 2.1.4). Η συσκευή της δοκιμής πρέπει να λειτουργεί έτσι ώστε η μετρούμενη μέση παραμόρφωση στο μέσο του δοκιμίου να αυξάνεται με σταθερό ρυθμό 0.2 mm/min. Κατά τη διάρκεια του πειράματος οι τιμές του φορτίου και της μέσης κατακόρυφης παραμόρφωσης στο μέσον ($\delta = (\delta_I + \delta_{II})/2$) καταγράφονται συνεχώς. Η καταγραφή του ανοίγματος ρωγμής είναι προαιρετική. Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων F- δ , F-CMOD θα εξεταστούν τουλάχιστον 3 δοκίμια.

2.1.5 Υπολογισμός

Το φορτίο στο όριο της αναλογικότητας (F_u σε N) προσδιορίζεται ακολουθώντας το κατάλληλο διάγραμμα στο Σχήμα 2.1.5. Η ροπή στο μέσον του δοκιμίου που αντιστοιχεί στη δύναμη F_u δίνεται από τον τύπο:

$$M_u = \frac{F_u \cdot L}{2} \quad (\text{Nmm})$$

όπου L το μήκος του δοκιμίου σε mm.

Θεωρώντας μία κριτηριακή τάση καθ' ύψος της διατομής όπως στο Σχήμα 2.1.6, το όριο της

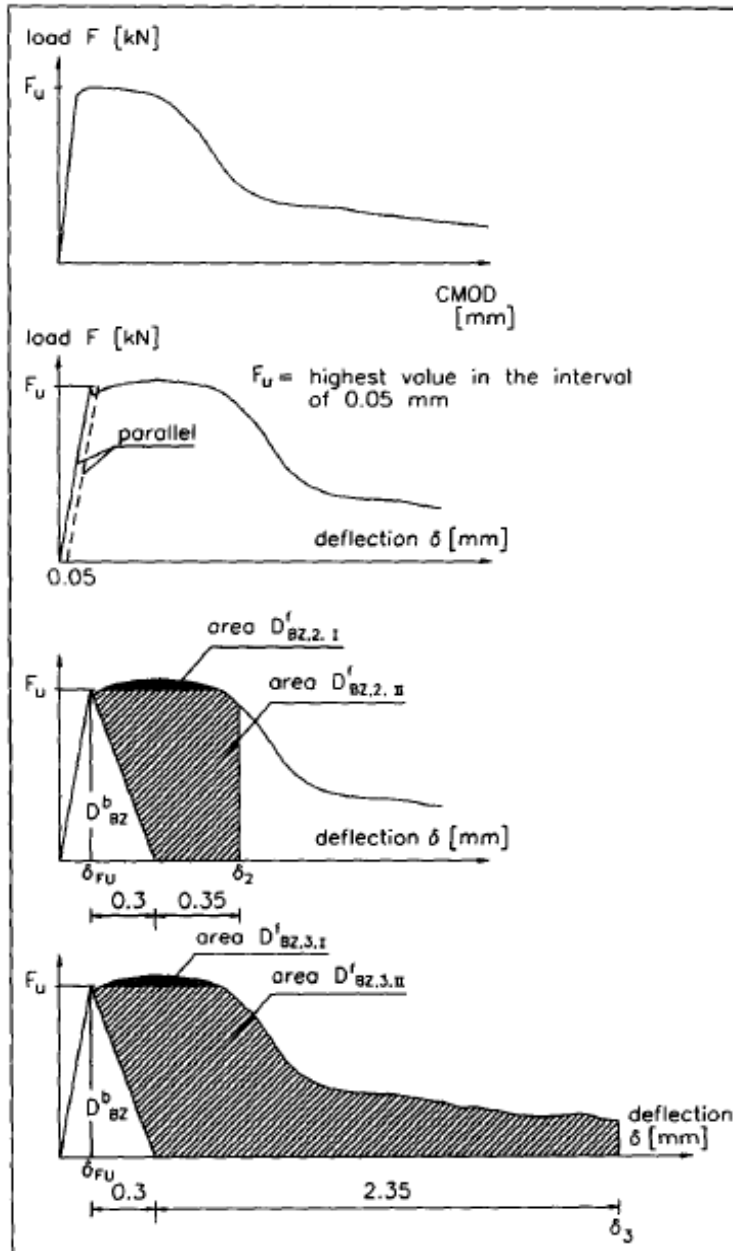


Fig. 5 – Diagrams.

Σχήμα 2.1.5: Διαγράμματα F - δ και F - $CMOD$ (προαιρετικό) αναλογικότητας $f_{ct,II}$ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$f_{fct,fl} = \frac{3F_u L}{2bh_{sp}^2} \quad (N/mm^2)$$

όπου b το πλάτος του δοκιμίου σε mm και h_{sp} η απόσταση μεταξύ της άκρης της εγκοπής και του άνω άκρου της διατομής της δοκού σε mm (Σχήμα 2.1.6).

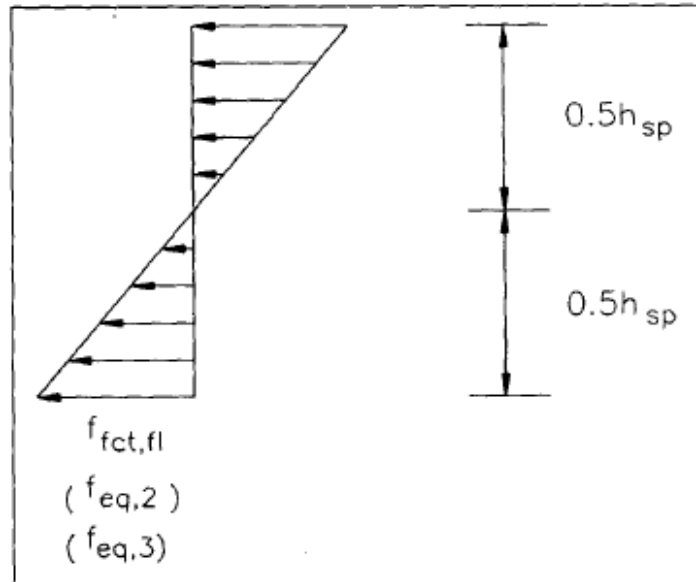


Fig. 6 – Stress distribution assumed.

Σχήμα 2.1.6: Θεώρηση κατανομής τάσεων

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας $D_{BZ,2}$ ($D_{BZ,3}$) αντίστοιχα, είναι ίση με το εμβαδόν του τμήματος κάτω από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης F - δ μέχρι μια καθορισμένη τιμή της μετατόπισης δ_2 (δ_3) αντίστοιχα, όπως περιγράφεται παρακάτω (Σχήμα 2.1.5). Η τιμή $D_{BZ,2}$ ($D_{BZ,3}$) αποτελείται από δύο μέρη:

- απλό σκυρόδεμα : D_{BZ}^b (Nmm)
- επιρροή των χαλύβδινων ινών :

$$\Rightarrow D_{BZ,2}^f = D_{BZ,2,I}^f + D_{BZ,2,II}^f \quad (Nmm)$$

$$D_{BZ,3}^f = D_{BZ,3,I}^f + D_{BZ,3,II}^f \quad (Nmm).$$

Η διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στα δύο αυτά μέρη μπορεί να προσδιοριστεί ως μία ευθεία γραμμή που συνδέει το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στην τιμή F_u δ_{Fu} και το σημείο της καμπύλης με τετμημένη $\delta_{Fu} + 0.3$ mm. Η δ_{Fu} είναι η μετατόπιση στο όριο της αναλογικότητας. Οι μετατοπίσεις δ_2 , δ_3 προσδιορίζονται με τη σειρά τους ως:

$$\delta_2 = \delta_{Fu} + 0.65 \text{ mm} \quad (mm)$$

$$\delta_3 = \delta_{Fu} + 2.65 \text{ mm} \quad (mm).$$

Η δύναμη F_2 (αντίστοιχα, F_3) είναι ίση με τη μέση δύναμη που καταγράφηκε στη γραμμοσκιασμένη περιοχή $D_{BZ,2}^f$ ($D_{BZ,2}^f$) και υπολογίζεται ακολούθως:

$$F_2 = \frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \quad (N)$$

$$F_3 = \frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \quad (N)$$

Η ροπή στο μέσον του ανοίγματος των πειραματικών δοκιμίων που αντιστοιχεί στην F_2 (αντίστοιχα, F_3) είναι:

$$M_2 = \frac{F_2 L}{2} = \left(\frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{4} \quad (Nmm)$$

$$M_3 = \frac{F_3 L}{2} = \left(\frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{4} \quad (Nmm)$$

Με τη θεώρηση κατανομής τάσεων όπως στο Σχήμα 2.1.6, η ισοδύναμη εφελκυστική αντοχή σε κάμψη $f_{eq,2}$ και αντίστοιχα $f_{eq,3}$ μπορούν να προσδιοριστούν από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} = \left(\frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (N/mm^2)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} = \left(\frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (N/mm^2)$$

Σημείωση: Αν η ρωγή ξεκινήσει εκτός της εγκοπής, το πείραμα πρέπει να απορριφθεί.

2.2. Χρήσιμες προεκτάσεις στη δοκιμή RILEM TC 162 – TDF

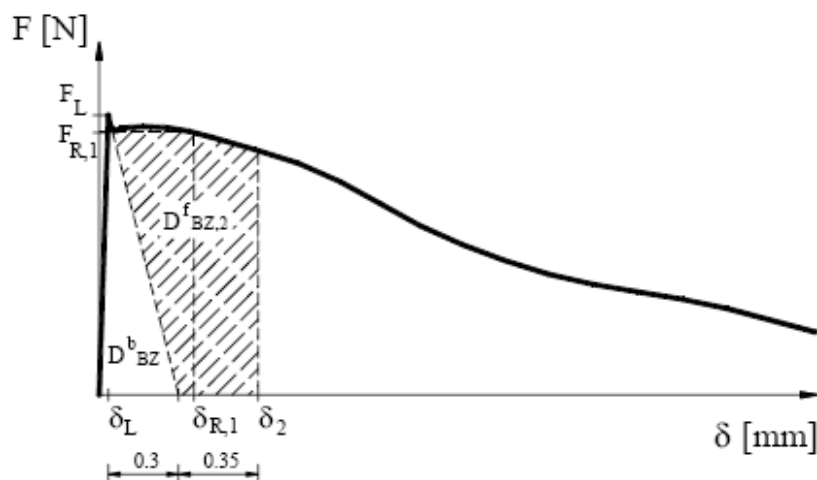
Πηγή:

(Συμπεριφορά σκυροδέματος ενισχυμένου με χαλύβδινες ίνες μετά τη ρηγμάτωση)

Ιανουάριος – Φεβρουάριος 2005

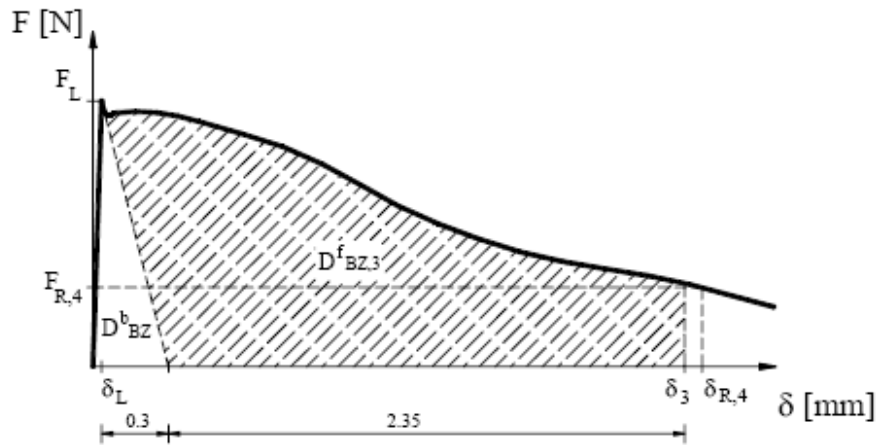
2.2.1 Θεώρηση των παραμέτρων της ισοδύναμης (equivalent) και απομένουσας (residual) εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη

Η γεωμετρία των δοκιμίων, η μέθοδος πλήρωσης των μητρών, η διαδικασία συντήρησης των δοκιμίων, οι διαστάσεις και η θέση της εγκοπής στο δοκίμιο, οι συνθήκες φόρτισης και στηρίξεων, τα χαρακτηριστικά για τον εξοπλισμό και τις συσκευές που απαιτούνται για την καταγραφή των δεδομένων της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος δίνονται στην έρευνα της RILEM TC 162 – TDF.



Σχήμα 2.2.1: Προσδιορισμός των παραμέτρων εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη $f_{eq,2}$ και $f_{r,1}$ κατά RILEM TC 162 - TDF

Από μία δοκιμή κάμψης τριών σημείων, εξάγεται μία καμπύλη φορτίου – μετατόπισης $F - \delta$, παρόμοια με αυτές στα Σχήματα 2.2.1 και 2.2.2 εξάγεται. Εάν τοποθετηθεί κατάλληλο ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο στην εγκοπή του δοκιμίου, μπορεί αντίστοιχα να καταγραφεί και ένα διάγραμμα φορτίου – ανοίγματος ρωγμής στην εγκοπή, $F - \text{CMOD}$. Χρησιμοποιώντας αυτά τα διαγράμματα, η RILEM TC 162 – TDF πρότείνει τον προσδιορισμό του φορτίου στο όριο αναλογικότητας (F_L , που ισοδυναμεί με την τιμή F_u του κεφαλαίου 2.1), καθώς και τις ισοδύναμες ($f_{eq,2}$, $f_{eq,3}$) και τις απομένουσες ($f_{r,1}$, $f_{r,4}$) εφελκυστικές αντοχές σε κάμψη, σε μετατόπιση δ_2 και δ_3 , αντίστοιχα. Η δύναμη F_L είναι η ανώτατη τιμή της αντοχής που καταγράφηκε.



Σχήμα 2.2.2: Προσδιορισμός των παραμέτρων εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη $f_{eq,3}$ και $f_{R,4}$ κατά RILEM TC 162 - TDF

Οι παράμετροι $f_{eq,2}$, $f_{eq,3}$ σχετίζονται με την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του υλικού μέχρι τις μετατοπίσεις δ_2 και δ_3 αντίστοιχα, όπου

$$\delta_2 = \delta_L + 0.65 \text{ mm}$$

$$\delta_3 = \delta_L + 2.65 \text{ mm}$$

και δ_L είναι η μετατόπιση που αντιστοιχεί στο φορτίο F_L που παρέχουν οι μηχανισμοί ενίσχυσης του υλικού λόγω της παρουσίας ινών ($D_{BZ,2}^f$, $D_{BZ,3}^f$), όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2.2.1 και 2.2.2. Το τμήμα της ενέργειας που απορροφάται από τη ρηγμάτωση του δοκιμίου δε λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό της f_{eq} . Οι παράμετροι $f_{R,1}$, $f_{R,4}$ είναι οι τάσεις που αντιστοιχούν στις δυνάμεις $F_{R,1}$, $F_{R,4}$ αντίστοιχα, σε μετατοπίσεις $\delta_{R,1} = 0.46 \text{ mm}$ και $\delta_{R,4} = 3.0 \text{ mm}$. Αναλυτικά, σύμφωνα με το RILEM TC 162 – TDF οι ισοδύναμες και οι απομένουσες εφελκυστικές αντοχές σε κάμψη δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

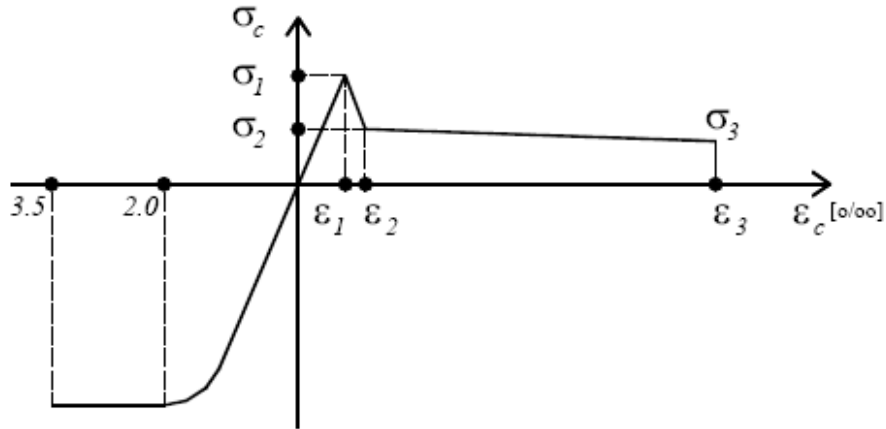
$$f_{eq,2} = \frac{3 D_{BZ,2}^f L}{2 \cdot 0.50 b h_{sp}^2} ; f_{eq,3} = \frac{3 D_{BZ,3}^f L}{2 \cdot 2.50 b h_{sp}^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

$$f_{R,1} = \frac{3 F_{R,1} L}{2 b h_{sp}^2} ; f_{R,4} = \frac{3 F_{R,4} L}{2 b h_{sp}^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

όπου b το πλάτος του δοκιμίου σε mm, h_{sp} η απόσταση μεταξύ της άκρης της εγκοπής και του άνω άκρου της διατομής της δοκού σε mm και L το μήκος ανοίγματος δοκού σε mm.

2.2.2 Συσχέτιση των παραμέτρων εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη με την καμπύλη $\sigma - \epsilon$ του υλικού

Στο Σχήμα 2.2.3 απεικονίζεται το διάγραμμα που έχει προταθεί από τη RILEM TC 162 – TDF για τη συμπεριφορά του υλικού σε θλίψη και εφελκυσμό.

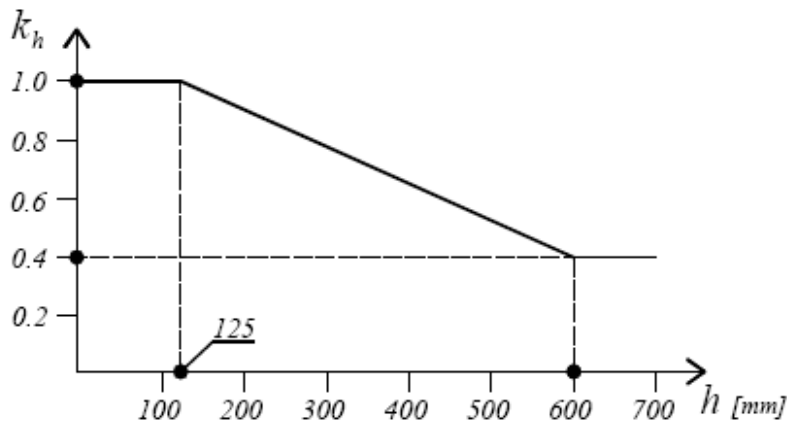


Σχήμα 2.2.3: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σ - ϵ για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα κατά RILEM TC 162 – TDF

Τα σημεία του διαγράμματος έχουν προσδιοριστεί από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0.7f_{ctm,\beta} (1.6-d) & \sigma_2 &= 0.45f_{R,1}k_h & \sigma_3 &= 0.37f_{R,4}k_h \\ \epsilon_1 &= \sigma_1/E_c & \epsilon_2 &= \epsilon_1 + 0.1\% & \epsilon_3 &= 25\% \\ E_c &= 9500(f_{cm})^{1/3} \end{aligned}$$

όπου $f_{ctm,\beta}$ είναι η μέση εφελκυστική αντοχή σε κάμψη, E_c το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε MPa, d το στατικό ύψος της δοκού σε m και k_h παράμετρος που χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη η επιρροή του ύψους της διατομής μετά το σημείο τη μέγιστη αντοχή. Οι τιμές της παραμέτρου k_h δίνονται στο Σχήμα 2.2.4.



Σχήμα 2.2.4: Τιμές της παραμέτρου k_h σε συνάρτηση με το ύψος δοκιμίου κατά RILEM TC 162 – TDF

2.3 Συνεισφορά συνδετήρων και χαλύβδινων ινών στη διατμητική αντοχή δοκών σε καμπτοδιατμητική καταπόνηση

(Calogero Cucchiara, Lidia La Mendola, Maurizio Papia)

5 Αυγούστου 2002

2.3.1 Εισαγωγή

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε αμφιέριστες δοκούς ορθογωνικής διατομής από ινοπλισμένο σκυρόδεμα (χαλύβδινες ίνες με άγκιστρα) με ή χωρίς εγκάρσιο οπλισμό συνδετήρων υπό την επίδραση δύο κατακόρυφων συγκεντρωμένων φορτίων συμμετρικά τοποθετημένων. Οι δοκιμές έγιναν με ελεγχόμενες παραμορφώσεις, επιτρέποντας την καταγραφή ολοκληρωμένων καμπύλων δύναμης-παραμόρφωσης, από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με τη φέρουσα ικανότητα και την πλάστιμη συμπεριφορά μέχρι την αστοχία. Ανάλογα με την ποσότητα εγκάρσιου οπλισμού, με το ποσοστό των ινών στο μείγμα και το διατμητικό άνοιγμα (M/Vd), ο μηχανισμός κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από επικρατούσα κάμψη ή διάτμηση, γεγονός το οποίο οδηγεί στην επιρροή των προαναφερθέντων κατασκευαστικών παραγόντων στη φέρουσα ικανότητα και τη συμπεριφορά των δοκών μετά τη διαρροή. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τοποθέτηση των ινών σε επαρκές ποσοστό μπορεί να μεταβάλλει την ψαθυρή μορφή αστοχίας, που χαρακτηρίζει την αστοχία από διάτμηση, σε μια πλάστιμη μορφή αστοχίας, όπως είναι η αστοχία από κάμψη. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί στο συμπέρασμα πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαλύβδινες ίνες, αντί της αύξησης του εγκάρσιου οπλισμού. Οι τιμές των διατμητικών τάσεων κατά τη θραύση καταγράφηκαν πειραματικά και συγκρίνονται με αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από εμπειρικές εκφράσεις διαθέσιμες στη βιβλιογραφία και η συσχέτιση κρίνεται ικανοποιητική.

2.3.2 Προγραμματισμός του πειράματος

Υλικά:

Κατασκευάστηκε σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland τύπου 42,5, άμμο, αδρανή και νερό με αναλογία μείγματος 450 kg/m^3 , 850 kg/m^3 , 1050 kg/m^3 , 160 kg/m^3 αντίστοιχα. Η μέγιστη διάμετρος αδρανών είναι 10 mm και επιλέχθηκε με βάση τις συστάσεις της RILEM TC 162-TDF (2000). Χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες με άγκιστρα μαζί με υγρό γαλάκτωμα κόλλας για καλύτερη διασπορά στο μείγμα. Τα χαρακτηριστικά των ινών είναι: μήκος $L_f=30 \text{ mm}$, διάμετρος $D_f=0,5 \text{ mm}$ (το οποίο δίνει ένα λόγο διαστάσεων $L_f/D_f = 60$) ονομαστικής αντοχής 1115 MPa. Οι ίνες χρησιμοποιήθηκαν σε ποσοστά $V_f = 1\%$ και 2% σε σχέση με τον όγκο του σκυροδέματος δηλαδή 80 kg/m^3 και 160 kg/m^3 αντίστοιχα.

Λόγω της μείωσης της εργασιμότητας του σκυροδέματος από την ύπαρξη των ινών,

χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής σε ποσότητα 1,5% κ.β. του τσιμέντου στο μείγμα. Για τον σχεδιασμό των δοκών με την απουσία εγκάρσιου οπλισμού απαιτείται η γνώση της θλιπτικής αντοχής του απλού σκυροδέματος που περιγράφηκε παραπάνω. Γι' αυτό το λόγο, σκυροδετήθηκαν 3 κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100mm και ύψους 200mm. Για την εύρεση και άλλων παραμέτρων στην αντοχή και παραμορφωσιακή ικανότητα του σκυροδέματος, ταυτόχρονα με την προετοιμασία των δοκών από απλό και ινοπλισμένο σκυρόδεμα, παρασκευάστηκαν 6 κυλινδρικά δοκίμια με τις ίδιες διαστάσεις, στα οποία θα πραγματοποιηθούν 3 θλιπτικές δοκιμές και 3 δοκιμές σε έμμεσο εφελκυσμό για κάθε τύπο σκυροδέματος.

Ο διαμήκης οπλισμός των δοκών έχει διάμετρο 20mm, καμπτόμενος στα άκρα για καλύτερες συνθήκες αγκύρωσης, ενώ ο εγκάρσιος οπλισμός έχει διάμετρο 6mm. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με αντοχή $f_{yk} > 435 \text{ MPa}$.

Δοκοί:

Ετοιμάστηκαν 8 ομάδες δοκών με διαφορετικές ποσότητες συνδετήρων και/ή ινών. Για κάθε ομάδα κατασκευάστηκαν 2 δοκοί με ίδιο εγκάρσιο οπλισμό, με σκοπό να μελετηθούν 2 διαφορετικές τιμές διατμητικού μήκους, και να εκτιμηθεί η επιρροή αυτής της παραμέτρου στην αλληλεπίδραση ροπής και διάτμησης. Όλες οι δοκοί έχουν διατομή ορθογωνική με διαστάσεις $b = 150 \text{ mm}$, $h = 250 \text{ mm}$ και μήκος ανοίγματος $L = 2500 \text{ mm}$. Το εμβαδό του διαμήκους οπλισμού A_s επιλέχθηκε με σκοπό να επιτευχθεί, δεδομένης της απουσίας διατμητικού οπλισμού, μία πρόιμη διατμητική αστοχία. Η οριακή τιμή της ροπής της δοκού, παρουσία της διάτμησης, λαμβάνοντας υπόψη και την τοξωτή λειτουργία της δοκού δίνεται απ' τον τύπο:

$$M_u = \left[0.83 \xi \rho^{\frac{1}{3}} f_c'^{\frac{1}{2}} \frac{a}{d} + 206.9 \xi \rho^{\frac{5}{6}} \left(\frac{a}{d} \right)^{-\frac{3}{2}} \right] b d^2 \quad 2.3.1$$

όπου $\rho = A_s / (bd)$ είναι το ποσοστό του εφελκυσμένου οπλισμού, f_c' είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa, a/d είναι ο λόγος διατμητικού ανοίγματος προς το στατικό ύψος και ξ είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη της το μέγεθος αδρανούς:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + d/(25d_a)}} \quad 2.3.2$$

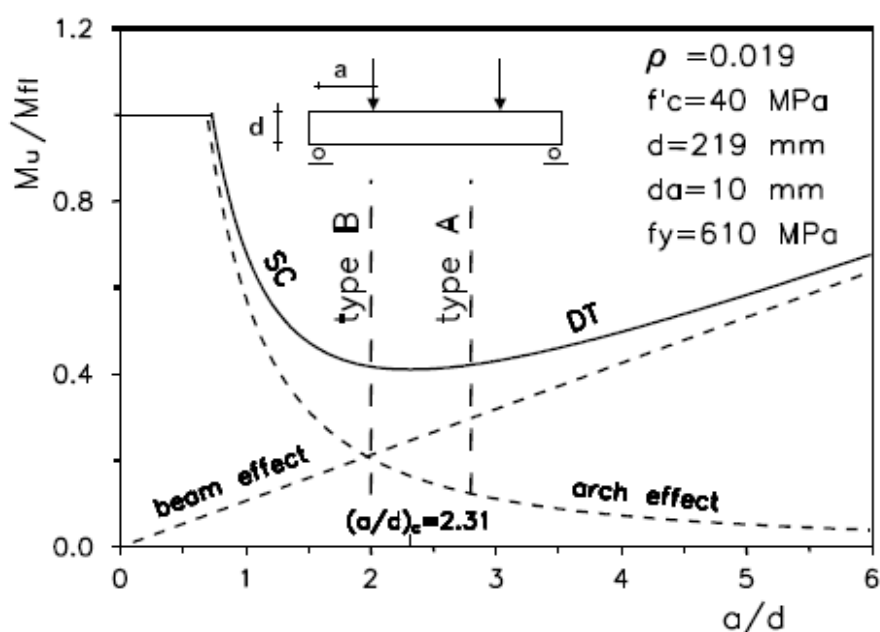
όπου d_a η μέγιστη διάμετρος αδρανούς.

Η καμπτική φέρουσα ικανότητα της δοκού, σύμφωνα με το συμβατικό υπολογισμό κατά ACI Building Code βρίσκεται από τη σχέση:

$$M_n = b d^2 \rho f_y \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_c'} \right) \quad 2.3.3$$

όπου f_y η αντοχή σε διαρροή του χάλυβα οπλισμού.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο εφελκόμενος σπλισμός των δοκών αποτελείται από δύο διαμήκειες ράβδους διαμέτρου 20mm, η σχετική καμπτική ικανότητα M_u / M_{pl} , όπου M_u είναι η καμπτική αντοχή και M_{pl} η αντοχή σε κάμψη σε σχέση με τα διάφορα διατμητικά μήκη δίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3.1), μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία που απαιτούνται για την κατάρτιση της καμπύλης (κοιλιάδας) του Kani (1966). Συγκεκριμένα, f'_c είναι η μέση τιμή της αντοχής των τριών κυλινδρικών δοκιμίων απλού σκυροδέματος, f_y είναι η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής μετά από δοκιμή σε τρεις διαμήκειες ράβδους, ενώ το στατικό ύψος d μένει ίδιο σε όλες τις δοκούς με ή χωρίς συνδετήρες, με επικάλυψη 15mm στην περίπτωση ύπαρξης συνδετηρών και 21 mm στην περίπτωση απουσίας των συνδετηρών.



Σχήμα 2.3.1: Επιρροή του a/d στη ροπή αντοχής (Κοιλιάδα του Kani)

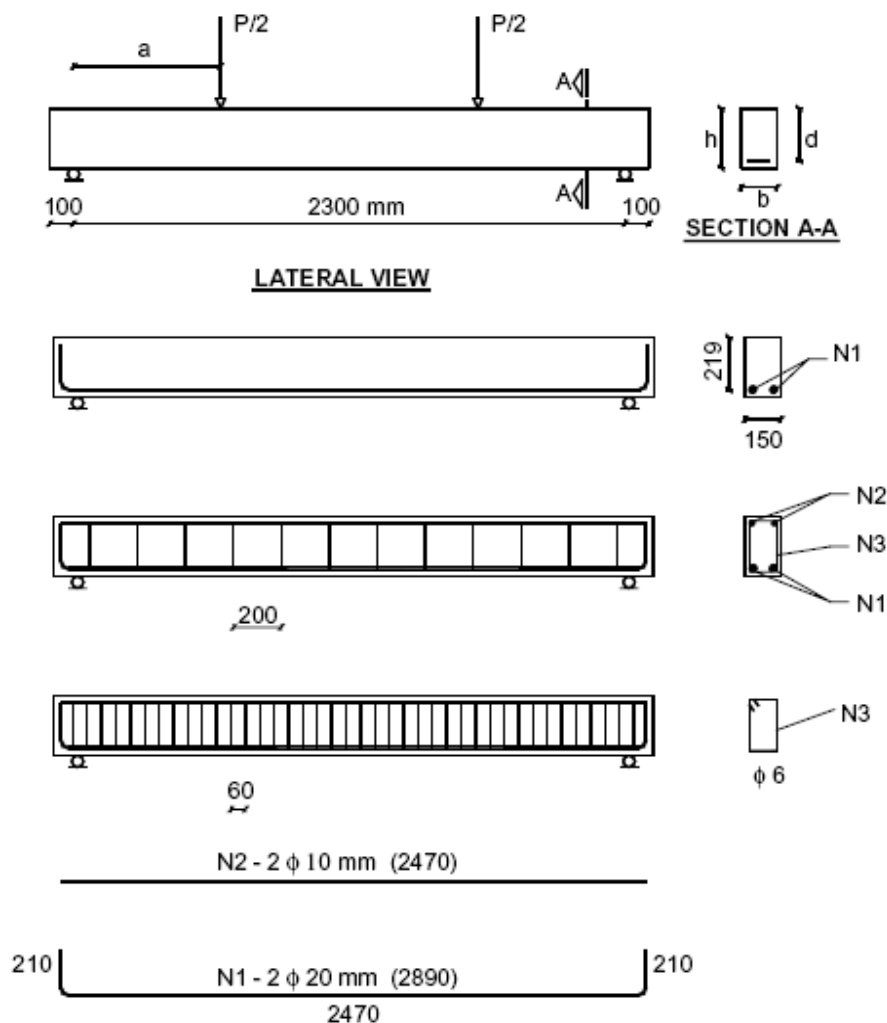
Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο λόγος M_u / M_{pl} ελαχιστοποιείται για $(a/d)_c = 2,31$. Η τιμή αυτή του λόγου a/d είναι μια κρίσιμη τιμή, καθώς διαχωρίζει 2 μορφές αστοχίας: για $a/d > (a/d)_c$ ο μηχανισμός δοκού κυριαρχεί και η αστοχία συνήθως παρουσιάζεται λόγω διαγώνιου εφελκυσμού ενώ για $a/d < (a/d)_c$ υπερισχύει ο μηχανισμός τόξου και η αστοχία παρουσιάζεται κυρίως λόγω αστοχίας της θλιβόμενης ράβδου σκυροδέματος. Οι τιμές του a/d που επιλέχθηκαν στο πείραμα χαρακτηρίζουν τις διαφορετικές μορφές αστοχίας: $a/d = 2,8$ για την A σειρά δοκιμίων και $a/d = 2,0$ για τη B σειρά δοκιμίων.

Όταν χρησιμοποιούνται συνδετήρες, τοποθετούνται δύο διαμήκειες ράβδοι διαμέτρου 10mm στη θλιβόμενη περιοχή της διατομής(πάνω) για την καλύτερη αγκύρωση των συνδετηρών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3.2) φαίνονται οι διαφορετικοί τύποι δοκιμίων που θα εξεταστούν, με διαφορετικές αποστάσεις εγκάρσιου οπλισμού $s = 200\text{mm}$ και $s = 60\text{mm}$.

Κάθε δοκός έχει ονομαστεί με ένα γράμμα και δύο αριθμούς: το γράμμα αντιπροσωπεύει το διατμητικό μήκος που επιλέχθηκε για τη δοκιμή (A για $a/d = 2,8$ και B για $a/d = 2,0$). Ο πρώτος αριθμός αντιπροσωπεύει το ποσοστό χαλύβδινων ινών (0 χωρίς ίνες, 1 για $V_f = 1\%$, 2 για $V_f = 2\%$) και ο δεύτερος τον οπλισμό με συνδετήρες (0 χωρίς συνδετήρες, 1 για $s = 200\text{mm}$ και 2 για $s = 60\text{mm}$).

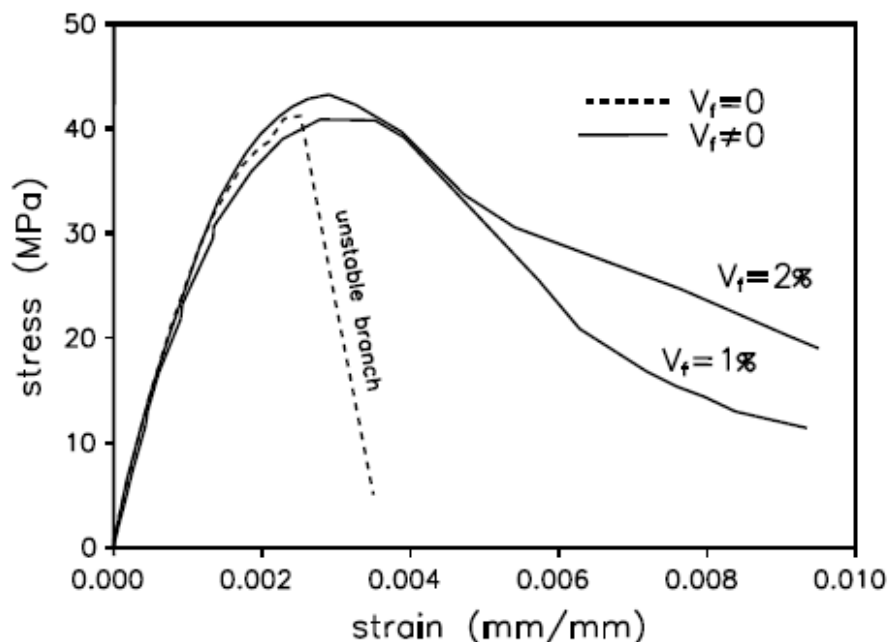


Σχήμα 2.3.2: Γεωμετρία και λεπτομέρειες όπλισης

2.3.3 Αποτελέσματα πειραμάτων των υλικών

Σκυρόδεμα:

Για κάθε τύπο σκυροδέματος πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές σε θλίψη. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.3.3) παρουσιάζονται οι μέσες καμπύλες που προέκυψαν για κάθε τύπο (οι τιμές σε κάθε ομάδα δοκιμών ήταν πολύ κοντά μεταξύ τους).



Σχήμα 2.3.3: Καμπύλες σ-ε από θλιπτικές δοκιμές για απλό και ινοπλισμένο σκυρόδεμα

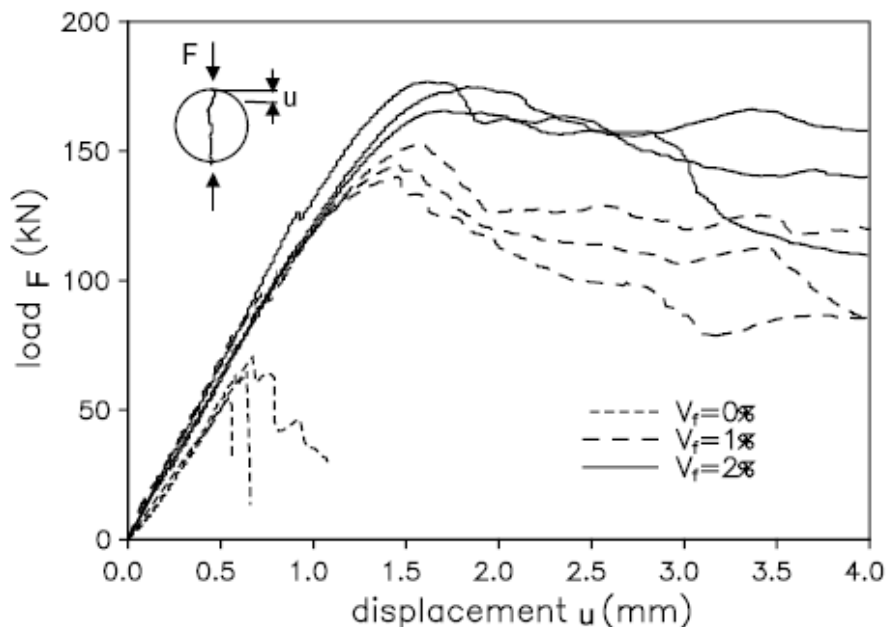
Η καμπύλη που αναφέρεται στο απλό σκυρόδεμα δείχνει έναν περίπου ελαστικό αρχικό κλάδο, στη συνέχεια έναν μη γραμμικό κλάδο μέχρι τη μέγιστη τάση, όπου εμφανίζεται η ρηγμάτωση με ταχύτατη διάδοση των ρωγμών. Αυτό το φαινόμενο δεν επιτρέπει πολύ αξιόπιστη καταγραφή της καμπύλης μετά την κορυφή του διαγράμματος. Οι καμπύλες του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι αρκετά συγγενικές με του απλού στον ανοδικό κλάδο, αλλά μετά την κορυφή του διαγράμματος έχουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά λόγω της πιο σταδιακής ρηγμάτωσης των ινοπλισμένων δοκιμών που επιτρέπουν μια πιο πλάστιμη συμπεριφορά. Οι μέσες τιμές των δοκιμών f_c' η μέγιστη τάση, ϵ_0 η αντίστοιχη παραμόρφωση και E_c το αρχικό μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.3.1).

Properties of concrete mixtures

V_f (%)	f_c' (MPa)	$\epsilon_0 \times 10^3$	E_c (MPa)	f_t' (MPa)
0	41.20	2.513	26 094	2.02
1	40.85	2.780	26 236	4.65
2	43.23	2.898	26 373	5.49

Πίνακας 2.3.1: Ιδιότητες σκυροδέματος

Για την αξιολόγηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές εφελκυσμού, οι καμπύλες των οποίων (δύναμη – παραμόρφωση) δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.3.4). Οι τιμές της μέγιστης εφελκυστικής τάσης f_t' δίνονται στον παραπάνω πίνακα.



Σχήμα 2.3.4: Αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών διάρρηξης για απλό και ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Χάλυβας:

Για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού των συνδετήρων(6mm) και του διαμήκους οπλισμού(20mm) πραγματοποιήθηκαν τρεις εφελκυστικές δοκιμές σε δοκίμια μήκους 300mm για κάθε διάμετρο ράβδου. Οι τιμές που προέκυψαν από τις μέσες καμπύλες σ - ϵ είναι οι ακόλουθες: μέτρο ελαστικότητας $E_s = 232000$ MPa, τάση διαρροής $f_y = 610$ MPa για το διαμήκη οπλισμό και $f_y = 510$ MPa για το χάλυβα των συνδετήρων.

2.3.4 Πειραματική διάταξη

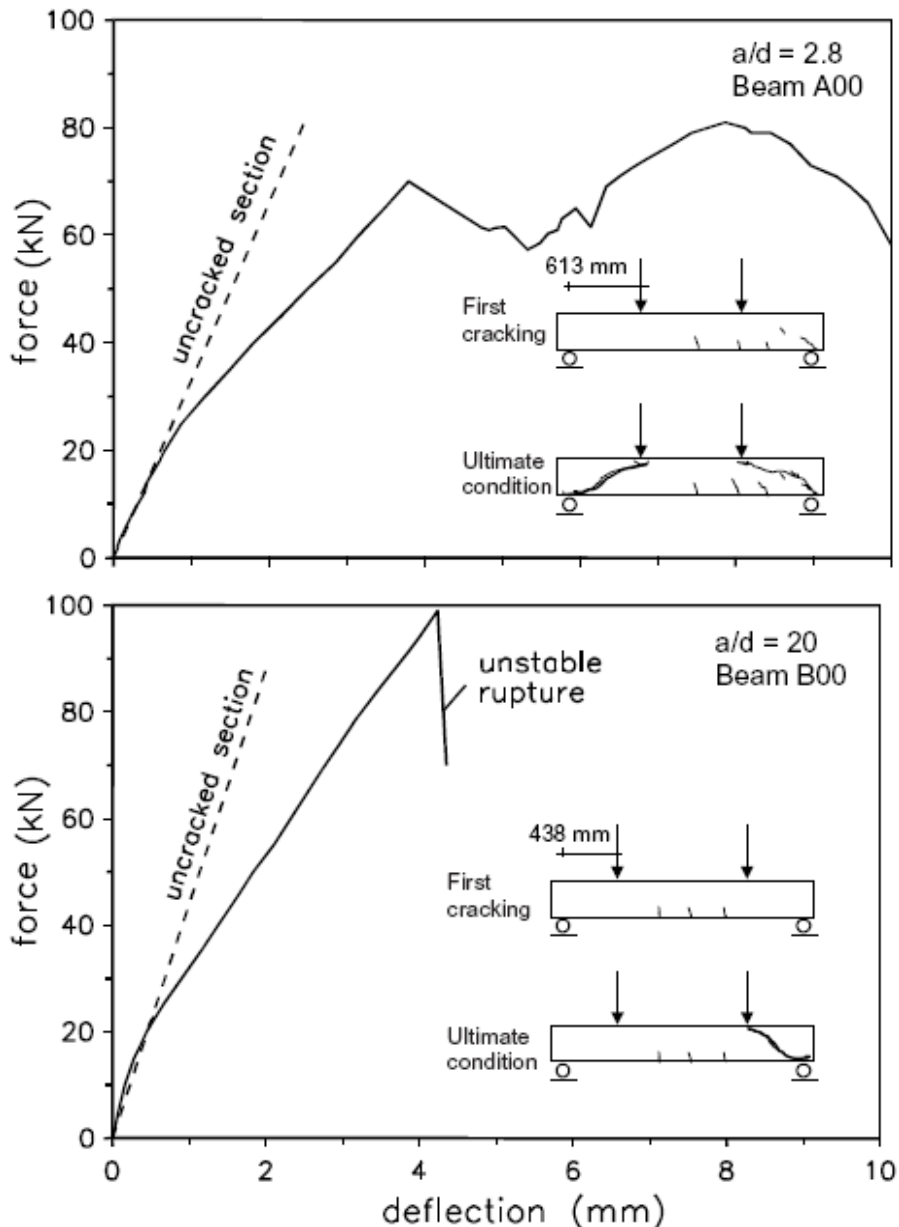
Για την υλοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε έμβολο με μέγιστη φορτική ικανότητα 600 kN. Η δύναμη P εφαρμόστηκε στο μέσο μιας άκαμπτης σιδηράς δοκού, η οποία “πατάει” με δύο κυλίνδρους πάνω στη δοκό του σκυροδέματος. Ανάλογα με την τοποθέτηση των κυλίνδρων υλοποιείται η επιλογή του διατμητικού μήκους της δοκού που εξετάζεται.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, ελέγχονται οι παραμορφώσεις της δοκού με ρυθμό 0,5 mm/min με τη χρήση τριών LVDT: το ένα τοποθετείται στο μέσο του ανοίγματος στο κατώτερο σημείο της δοκού και τα άλλα δύο στις στηρίξεις. Η πραγματική παραμόρφωση της δοκού σε κάθε βήμα προκύπτει αν από την τιμή στο μέσο της δοκού αφαιρεθεί η μέση τιμή των μετακινήσεων στις στηρίξεις της.

2.3.5 Αποτελέσματα των πειραμάτων και ανάλυση

-Δοκοί χωρίς διατμητικό οπλισμό:

Οι δοκοί από απλό σκυρόδεμα χωρίς συνδετήρες εξετάστηκαν και για τα δύο διατμητικά μήκη για να επιβεβαιωθούν οι αναμενόμενες μορφές αστοχίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις καμπύλες $P - \delta$ (Σχήμα 2.3.5), όπου P η συνολική δύναμη και δ η παραμόρφωση της δοκού όπως εξηγήθηκαν παραπάνω. Και οι δύο καμπύλες δείχνουν μειωμένη καμπτική ικανότητα, όπως και αναμενόταν. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι: η δοκός A00 φτάνει στην οριακή κατάσταση για $P_u = 81$ kN, που αναλογεί σε ροπή $M_u = 24,834$ kNm. Αυτή η ροπή σε σύγκριση με την M_{fl} από την εξίσωση 2.3.3



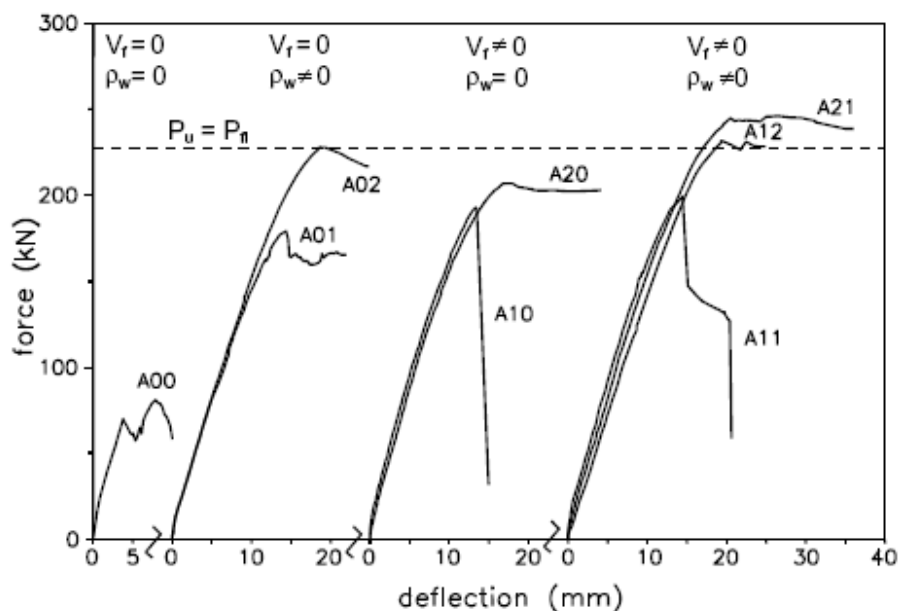
Σχήμα 2.3.5: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για δοκούς χωρίς διατμητικό οπλισμό

για $f_y = 610$ MPa, $f_c' = 41,2$ MPa ($M_{fl} = 69,583$ kNm), δίνει $M_u / M_{fl} = 0,357$ αντί της θεωρητικής τιμής 0,423. Η δοκός B00 φτάνει στην οριακή κατάσταση για $P_u = 99$ kN και μειωμένη καμπτική ικανότητα $M_u / M_{fl} = 0,312$ αντί της θεωρητικής τιμής 0,418. Η διαφορά αυτή (16% και 25%

αντίστοιχα) δεν είναι σοβαρή, αν ληφθεί υπόψη πως μόνο μια δοκιμή πραγματοποιήθηκε για την κάθε περίπτωση. Εξάλλου, η θεωρητική καμπύλη (του Kani) έχει επιβεβαιωθεί παρόλο που υπερεκτιμά λίγο τις πραγματικές τιμές. Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται εξίσου πώς εμφανίζεται η πρώτη ρηγμάτωση, καθώς και η μορφή του ρηγματωμένου φορέα στο τέλος κάθε πειράματος. Και στις δύο περιπτώσεις η αστοχία χαρακτηρίστηκε από τη δημιουργία διαγώνιων ρωγμών. Η μορφή της καμπύλης αποδεικνύει αυτό που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών: για τη δοκό A00 η επιρροή της δοκού κυριαρχεί στο μηχανισμό κατάρρευσης και η αστοχία προκύπτει λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, ακολουθούμενη από μία διαγώνια ασταθή ρωγή που επεκτείνεται μέχρι τη θλιβόμενη ζώνη. Για τη δοκό B00 η επιρροή τόξου κυριαρχεί στην αστοχία με διαγώνια ρηγμάτωση που οδηγεί σε διαχωρισμό του σκυροδέματος κατά μήκος της ρωγμής. Γι' αυτό το λόγο, μετά την ανάληψη του μέγιστου φορτίου εμφανίζεται ραγδαία αύξηση του εύρους της ρωγμής μην επιτρέποντας κάποια σημαντική καταγραφή του κλάδου μετά τη μέγιστη αντοχή. Στα ίδια διαγράμματα παρουσιάζονται και οι θεωρητικές ελαστικές κλίσεις του αρηγμάτωτου σκυροδέματος.

-Δοκοί με διατμητικό οπλισμό:

Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκαριών ενισχυμένα σε διάτμηση με ίνες και/ή συνδετήρες. Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για την Α σειρά δοκιμών με $a/d = 2,8$ παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3.6).

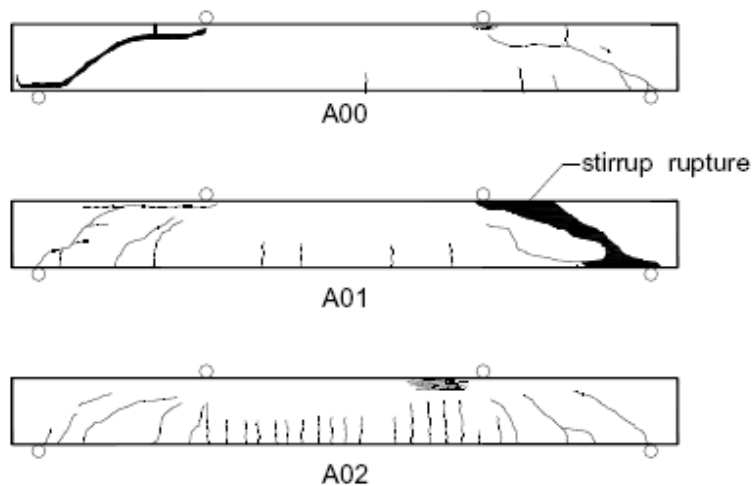


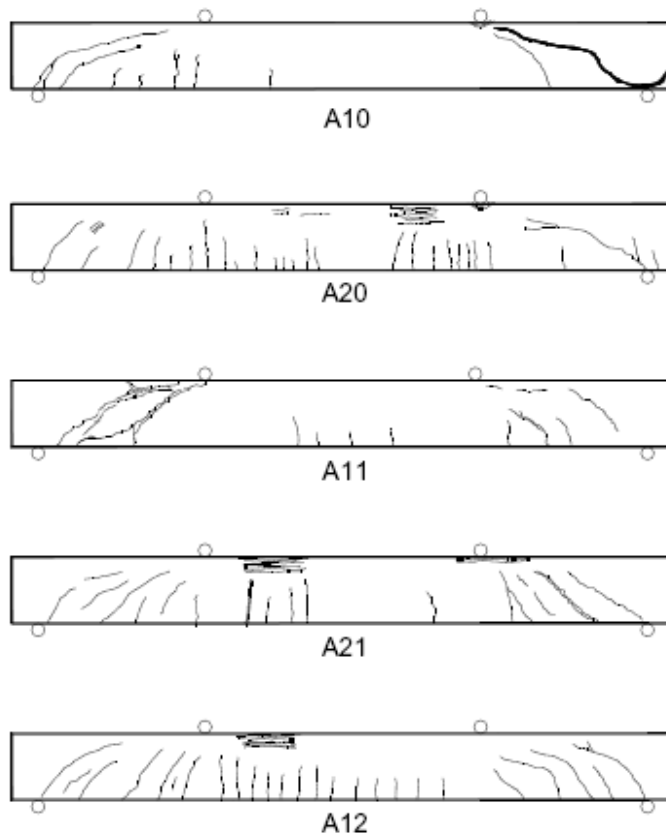
Σχήμα 2.3.6: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για την Α σειρά δοκιμών ($a/d = 2,8$)

Οι προηγούμενες καμπύλες (χωρίς διατμητικό οπλισμό) παρουσιάζονται επίσης για άμεση σύγκριση της συμπεριφοράς των διαφόρων δοκιμών. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η θεωρητική τιμή του μέγιστου φορτίου $P_n = 227$ KN, στο οποίο η δοκός φτάνει τη μέγιστη καμπτική της

ικανότητα (για $M_u / M_n = 1,0$). Η σύγκριση των καμπυλών δείχνει πως η προσθήκη διατμητικού οπλισμού σε ικανοποιητική ποσότητα μπορεί να αλλάξει τη μορφή της αστοχίας: αλλαγή από την ψαθυρή άοπλη διατμητική αστοχία σε μια πιο πλάστιμη καμπτική φαίνεται τόσο από το μέγιστο φορτίο (πλησιάζει το P_n) όσο και από τον κλάδο μετά τη μέγιστη αντοχή που είναι απότομα ψαθυρός στην πρώτη περίπτωση, ενώ στη δεύτερη σχεδόν οριζόντιος (σταθερή αντοχή υπό αύξουσα παραμόρφωση).

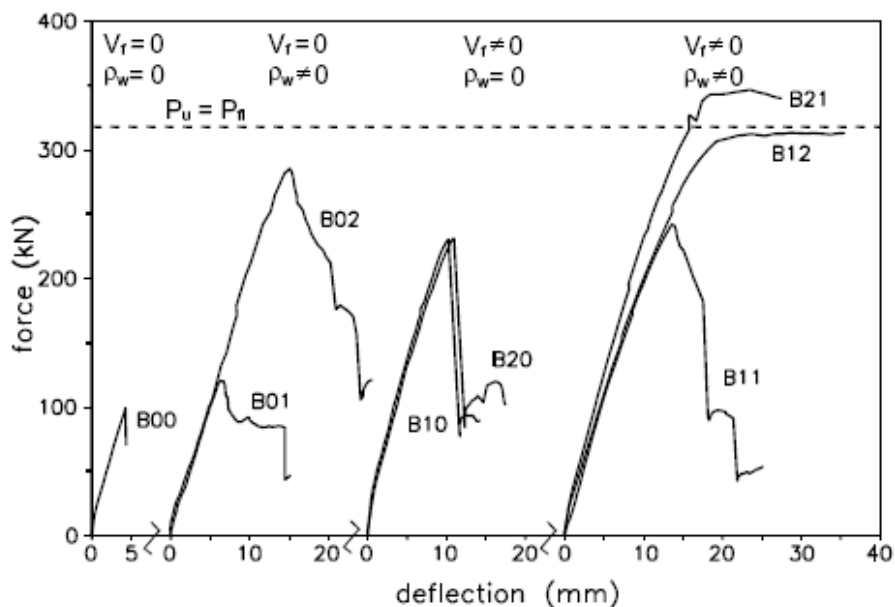
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3.7) φαίνονται οι ρηγματωμένοι φορείς κατά την αστοχία για την Α σειρά δοκιμών ($a/d = 2,8$). Παρατηρείται πως η καμπτική μορφή αστοχίας (δοκοί A02, A20, A21, A12) χαρακτηρίζεται από ρωγμές που εμφανίζονται σταδιακά, επιτρέποντας στη δοκό να αναπτύξει σημαντική πλαστιμότητα. Όταν η αστοχία είναι ψαθυρή (δοκοί A00, A01, A10, A11), οι περισσότερες ρωγμές εντοπίζονται στον περιορισμένο χώρο γύρω από τη διαγώνιο που συνδέει τη στήριξη με το σημείο επιβολής του φορτίου $P/2$. Όταν η απόσταση των συνδετήρων είναι μεγάλη ($s = 200\text{mm}$) όπως στη δοκό A01, παρατηρείται θραύση του συνδετήρα που βρίσκεται κατά μήκος της διαγώνιας ρωγμής, φαινόμενο το οποίο μπορεί να αποφευχθεί με την προσθήκη ιών, όπως φαίνεται στη δοκό A11.





Σχήμα 2.3.7: Σχέδια ρηγματωμένου φορέα κατά την αστοχία για την Α σειρά δοκιμών

Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για τη σειρά δοκιμών Β με $a/d = 2,0$ φαίνονται στο Σχήμα 2.3.8. Η σύγκριση με τη σειρά Α των δοκιμών δείχνει μια πιο ψαθυρή συμπεριφορά. Μόνο οι δοκοί Β12 και Β21 έφτασαν την πλήρη καμπτική ικανότητα της δοκού. Όλες οι υπόλοιπες χαρακτηρίστηκαν από ψαθυρή αστοχία με διαγώνιες ρωγμές, σε μερικές περιπτώσεις και με



Σχήμα 2.3.8: Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για τη Β σειρά δοκιμών ($a/d = 2,0$)

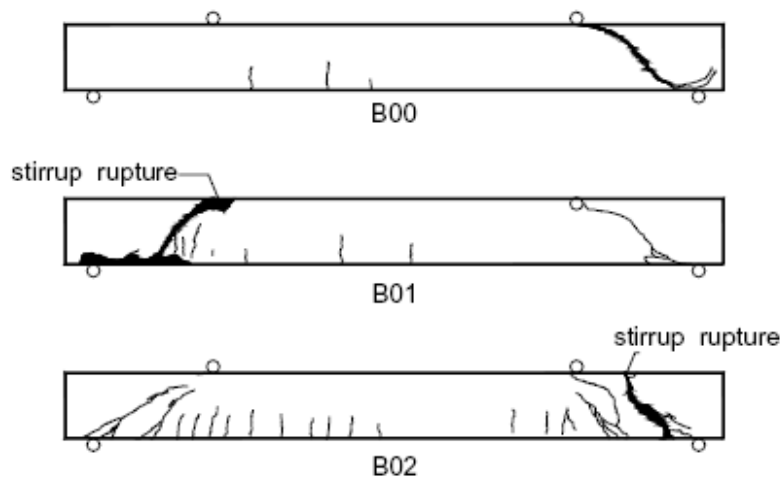
θραύση των συνδετήρων.

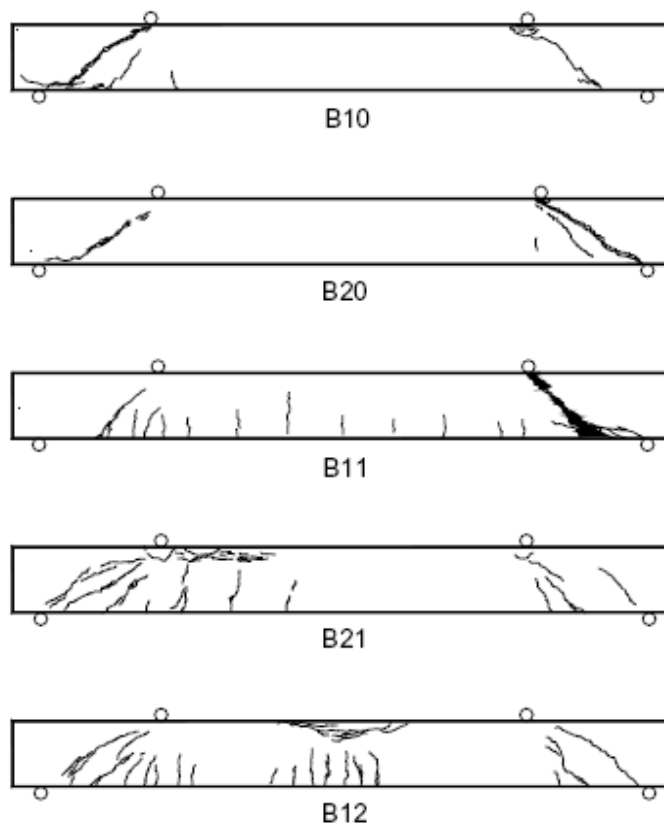
Παρατηρείται πως όταν η διαγώνια ρωγή διασχίζει κάποιους συνδετήρες, η αστοχία είναι σταδιακή και οι ρωγμές πιο κατανεμημένες, όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.3.9) στις ρηγματωμένες δοκούς B01 και B02.

Για τη σειρά δοκών B, η χρήση των συνδετήρων είναι λιγότερο επωφελής σε σύγκριση με τις δοκούς A. Αυτό συμβαίνει διότι στην αστοχία κυριαρχεί η επιρροή τόξου, πραγματοποιώντας παραμορφώσεις οι οποίες δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη του μηχανισμού δικτυώματος (Moersch), στον οποίο και βασίζεται η επιλογή των συνδετήρων.

Παρακολουθώντας τις μορφές των ρηγματωμένων φορέων, βρίσκουμε μια συσχέτιση ανάμεσα στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης και στο μηχανισμό ρηγμάτωσης.

Η εργαστηριακή έρευνα έδειξε γενικά πως η χρήση των ινών βελτιώνει τη συμπεριφορά των δοκιμίων και για τις δύο σειρές A και B, τόσο ώστε μια ικανοποιητική ποσότητα ινών μπορεί να μετατρέψει τη μορφή αστοχίας, όπως φάνηκε στις δοκούς A11 και B11. Η επιρροή των ινών είναι πιο προφανής στη σειρά δοκιμίων A, στα οποία εμφανίζονται αρκετές ρωγμές, γεγονός το οποίο έχουν συνεισφέρει οι ίνες με την αντίσταση τους στο άνοιγμα των ρωγμών. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται από τη σύγκριση των δοκών χωρίς συνδετήρες και με διαφορετικές δοσολογίες ινών. Στην A περίπτωση παρατηρείται σημαντική βελτίωση όταν χρησιμοποιούνται ίνες σε ποσοστό κ.ό. 2% σε σύγκριση με τα δοκίμια με ποσοστό ινών 1% (βλ. καμπύλες δοκών A10, A20). Αντίθετα στην περίπτωση B, οι καμπύλες είναι παρόμοιες για τα δύο διαφορετικά ποσοστά (βλ. καμπύλες δοκών B10, B20).





Σχήμα 2.3.9: Σχέδια ρηγματωμένου φορέα κατά την αστοχία για τη Β σειρά δοκιμών

Οριακή διατμητική αντοχή

Σ' αυτό το σημείο παρουσιάζεται μια σύγκριση των τιμών της οριακής διατμητικής αντοχής, όπως καταγράφηκε στην εργαστηριακή έρευνα ($v_u = V_u/(bd)$, όπου $V_u = P_u/2$) με τις τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιώντας σχέσεις από την προϋπάρχουσα βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, για τις δοκούς χωρίς διατμητικό οπλισμό, χρησιμοποιήθηκε η σχέση 2.3.1 για την οριακή τιμή της μέσης διατμητικής τάσης v_c :

$$v_c = v_a + v_b = 0.83 \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{\rho} \cdot \chi \quad 2.3.4$$

όπου

$$\chi = \sqrt{f'_c} + 250 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}} \quad 2.3.5$$

όπου v_a και v_b είναι οι διατμητικές τάσεις λόγω λειτουργίας τόξου και δοκού αντίστοιχα. Μια τρίτη έκφραση απαιτείται στη σχέση 2.3.4 όταν υπάρχουν και συνδετήρες, όπως στους Russo and Puleri (1997):

$$v_s = \frac{1.67 \sqrt{f'_c}}{\chi} \rho_w f_{yw} \quad 2.3.6$$

όπου $\rho_w = A_w/(bs)$ είναι το ποσοστό των συνδετήρων (εμβαδόν A_w προς πλάτος του κορμού b επί τη μεταξύ τους απόσταση s) και f_{yw} η τάση διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων. Στον Πίνακα 2.3.2 παρατηρούμε τη σύγκριση μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και αυτών που προέκυψαν απ' το πείραμα.

Type	Observed v_u (MPa)	Predicted [Eqs. (4) and (6)] v_u (MPa)	Observed v_u /predicted v_u
A00	1.233	1.467	0.840
A01	2.723	2.605	1.045
A02	3.470	5.261	0.660
B00	1.507	2.031	0.742
B01	1.833	2.853	0.642
B02	4.340	4.772	0.909

Πίνακας 2.3.2: Οριακές διατμητικές αντοχές για δοκούς από απλό σκυρόδεμα

Για τις δοκούς από ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές εκφράσεις από την προϋπάρχουσα βιβλιογραφία για μια σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Η προσφορά των ινών έχει αποτιμηθεί από μια εμπειρική σχέση από τους Al-Ta'an και Al-Feel (1990) βασισμένη σε πειράματα 89 δοκών:

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{L_f}{D_f} \quad 2.3.7$$

όπου k είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη το σχήμα των ινών. Για ίνες με άγκιστρα, όπως αυτές που χρησιμοποιήθηκαν, έχει προταθεί $k = 1,2$. Αυτή η τιμή υιοθετήθηκε στη μελέτη. Η συνεισφορά των ινών προστέθηκε στη σχέση 2.3.4 όπου δεν υπήρχαν συνδετήρες και στη σχέση 2.3.4 και 2.3.6 όπου υπήρχαν.

Οι Swamy et al. (1993) Έχουν προτείνει άλλη έκφραση για τη συνεισφορά των ινών στη διατμητική αντοχή v_f ως συνάρτηση της μέσης τάσης συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος τ :

$$v_f = 0.37 \tau V_f \frac{L_f}{D_f} \quad 2.3.8$$

όπου το τ έχει προταθεί να λαμβάνεται 4,15 MPa για χαλύβδινες ίνες στην περίπτωση απουσίας περαιτέρω δοκιμών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, όπως στην παρούσα έρευνα.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μια ακόμα εμπειρική σχέση προς σύγκριση διατυπωμένη από τον Sharma (1986) για ινοπλισμένες δοκούς:

όπου k' μια σταθερά ίση με 2/3 και f'_t η εφελκυστική αντοχή που προέκυψε από τις δοκιμές

$$v_c + v_f = k' f'_t \left(\frac{d}{a} \right)^{0.25} \quad 2.3.9$$

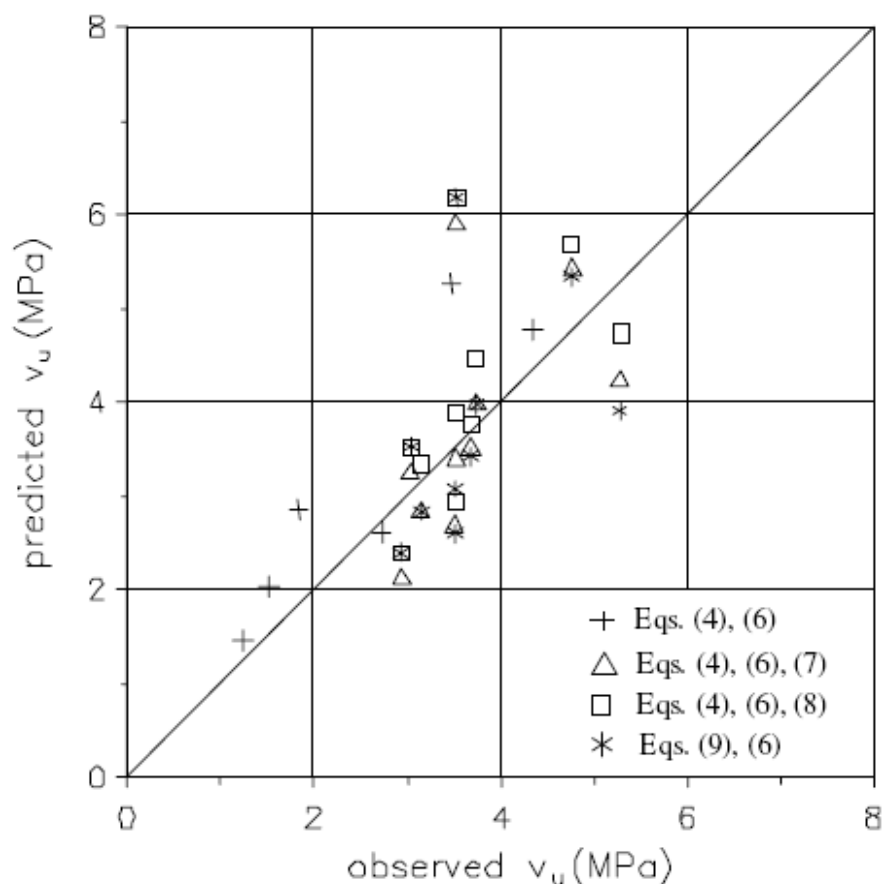
εφελκυσμού. Για τις δοκούς που έχουν και συνδετήρες έχει προστεθεί και η συνεισφορά των συνδετήρων (Σχέση 2.3.6).

Στον Πίνακα 2.3.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα της σύγκρισης:

Type	Observed v_u (MPa)	Predicted [Eqs. (4), (6) and (7)] v_u (MPa)	Predicted [Eqs. (4), (6) and (8)] v_u (MPa)	Predicted [Eqs. (9) and (6)] v_u (MPa)	Observed v_u /mean of predicted v_u
A10	2.934	2.143	2.384	2.396	1.271
A20	3.145	2.853	3.335	2.829	1.046
A11	3.034	3.279	3.521	3.533	0.881
A12	3.526	5.932	6.173	6.185	0.578
A21	3.744	3.998	4.481	3.975	0.902
B10	3.503	2.706	2.947	2.607	1.272
B20	3.516	3.416	3.898	3.078	1.015
B11	3.678	3.527	3.768	3.427	1.029
B12	4.767	5.442	5.683	5.342	0.868
B21	5.276	4.248	4.730	3.909	1.228

Πίνακας 2.3.3: Οριακές διατμητικές αντοχές για δοκούς από ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3.10) παρατίθενται σε διάγραμμα οι τιμές και τον δύο Πινάκων για άμεση σύγκριση. Παρατηρείται πως οι προβλεπόμενες τιμές από τις διάφορες σχέσεις της βιβλιογραφίας είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους. Η διαφορά μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προβλεπόμενων κρίνεται ικανοποιητική, δεχόμενοι των περιορισμένο αριθμό δειγμάτων για κάθε μορφή – παράμετρο δοκιμίων.



Σχήμα 2.3.10: Σύγκριση καταγεγραμμένων και προβλεπόμενων μέσων τιμών της οριακής διατμητικής αντοχής

2.3.6 Συμπεράσματα

Η πειραματική έρευνα που παρουσιάστηκε, περιελάμβανε την καμπτοδιαμητική καταπόνηση δοκών με ταυτόχρονο έλεγχο των μετατοπίσεων αποδεικνύοντας τη δυνατότητα αλλαγής της μορφής αστοχίας σε πλέον πλάσιμη μορφή με τη χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος. Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι:

- Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε πως οι ινοπλισμένες δοκοί παρουσιάζουν πιο σταδιακή ρηγμάτωση με μειωμένο πάχος ρωγμών.
- Είναι δυνατό να επιτευχθεί παρόμοια συμπεριφορά από πλευράς διαμητικής αντοχής χρησιμοποιώντας χαλύβδινες ίνες σε επαρκή ποσότητα αντί των συνδετήρων, αν και ο συνδυασμός των δύο δείχνει πιο κατάλληλος, καθώς οι συνδετήρες επιτρέπουν μεγαλύτερη παραμορφωσιακή ικανότητα πέραν του ελαστικού ορίου.
- Η παρουσία των ιών δείχνει να είναι πιο σημαντική σε δοκούς, οι οποίες υπό την απουσία επαρκούς διαμητικού οπλισμού αστοχούν κυρίως από την καμπτοδιαμητική απαίτηση.

Γενικώς, όπως παρατηρείται και στις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης το βασικό συμπέρασμα είναι πως η χρήση χαλύβδινων ιών μετατρέπει την ψαθυρή διαμητική αστοχία σε μια πιο πλάσιμη καμπτική, επιτρέποντας μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας, όπως παρατηρείται και από τα σχέδια των ρηγματωμένων φορέων.

2.4 Διατμητική αντοχή δοκών από ινοπλισμένο με χαλύβδινες ίνες σκυρόδεμα χωρίς εγκάρσιο οπλισμό

(Ιούλιος - Αύγουστος, 2002)

2.4.1 Εισαγωγή

Η προσθήκη χαλύβδινων ινών σε μια ενισχυμένη δοκό από σκυρόδεμα είναι γνωστό ότι αυξάνει τη διατμητική αντοχή της και, σε περίπτωση που προστίθεται επαρκής αριθμός ινών, η ψαθυρή διατμητική αστοχία μπορεί να αντικατασταθεί από μια περισσότερο πλάστιμη συμπεριφορά. Η αυξανόμενη αυτή διατμητική αντοχή και πλαστιμότητα των ινοπλισμένων δοκών, οφείλεται στην μεταρηγματωμένη εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Αυτή η υπολειπόμενη αντοχή επίσης τείνει να ελαττώσει το εύρος και το μέγεθος των ρωγμών. Η χρήση των χαλύβδινων ινών είναι ιδιαίτερος ελκυστική στα σκυροδέματα υψηλής αντοχής, τα οποία είναι σχετικώς ψαθυρά χωρίς ίνες, καθώς επίσης και όταν οι συμβατικοί συνδετήρες μειωθούν.

Η βιβλιογραφία περιγράφει πολυάριθμες δημοσιεύσεις ορθογωνικών ινοπλισμένων δοκών χωρίς συνδετήρες, από τις οποίες δεκαέξι δημοσιεύτηκαν από τους Adebbar et al. Batson, Jenkins, και Spatney (1972). Οι ερευνητές αυτοί εκτέλεσαν την πρώτη μεγάλη πειραματική έρευνα αυτής της μορφής δοκιμών, που περιλαμβάνει 42 δοκίμια ινοπλισμένων δοκών χωρίς συνδετήρες, που αστόχησαν σε διάτμηση. Μεταγενέστερες έρευνες σε συμβατικής αντοχής σκυρόδεμα και υψηλής αντοχής σκυρόδεμα επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της προσθήκης χαλύβδινων ινών και αναγνώρισαν τις ουσιαστικές παραμέτρους που επιδρούν στην διατμητική αντοχή. Η αύξηση της διατμητικής αντοχής μπορεί να ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με τη γεωμετρία των δοκών και τις ιδιότητες υλικού. Για παράδειγμα, σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από τους Narayana και Darwish (1987), η αύξηση της διατμητικής αντοχής που αποδίδεται στις χαλύβδινες ίνες ποικίλει από 13% έως 170%.

Όπως με τις συμβατικά οπλισμένες δοκούς από σκυρόδεμα, η οριακή διατμητική αντοχή μειώνεται με την αύξηση του λόγου a/d (όπου a το διατμητικό μήκος και d το στατικό ύψος της δοκού), αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού διαμήκους οπλισμού ρ και αυξάνεται με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος f_c' . Αυτές οι επιδράσεις αποδίδονται στην ανάπτυξη της λειτουργίας ασίδας στις δοκούς με χαμηλές τιμές του λόγου a/d και στον τύπο αστοχίας του διαγώνιου εφελκυσμού (λειτουργία δικτυώματος), στις δοκούς με υψηλότερες τιμές του λόγου a/d . Επίσης οι Li, Ward, και Hamza αναφέρουν ότι, όπως έχει παρατηρηθεί σε συμβατικές δοκούς, η μέση διατμητική τάση στην αστοχία μειώνεται με την αύξηση του στατικού ύψους.

Η αύξηση της διατμητικής αντοχής οφειλόμενη στις ίνες εξαρτάται όχι μόνο από την

ποσότητα των ινών, που συνήθως εκφράζεται σαν ογκομετρικό ποσοστό ινών V_f , αλλά επίσης από τον λόγο μορφής L/D (μήκος/διάμετρο) και τις συνθήκες αγκύρωσης των χαλύβδινων ινών. Για παράδειγμα, όσον αφορά την εργασιμότητα, θα μπορούσε να είναι κατάλληλη η χρήση κοντόχοντρων και λείων ινών, αλλά μετά την ρηγμάτωση του σκυροδέματος, τέτοιες ίνες θα αντιστέκονται σε εφελκυσμό χειρότερα από ότι ίνες με μεγαλύτερο μήκος και αγκυρωμένα άκρα.

Έρευνες επίσης έχουν αναπτύξει εμπειρικές εκφράσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής. Για παράδειγμα, οι Sharma (1986), Narayanan και Darwish (1987), Ashour, Hasanain και Wafa (1992), και Imam (1994) έχουν προτείνει σχέσεις υπολογισμού της οριακής μέσης διατμητικής τάσης v_u . Επιπλέον, αν και η έναρξη της διατμητικής ρηγμάτωσης είναι δύσκολο να αποδειχθεί με αξιοπιστία, οι Narayanan και Darwish επίσης πρότειναν μία διαδικασία για τον υπολογισμό της μέσης διατμητικής τάσης κατά την έναρξη της διατμητικής ρηγμάτωσης, v_{cr} .

Παρά την εκτενή ερευνητική δραστηριότητα στο αντικείμενο, οι υπάρχουσες σχέσεις υπολογισμού δεν έχουν εκτιμηθεί με βάση ένα μεγάλο αριθμό πειραματικών αποτελεσμάτων και, σε μερικές περιπτώσεις, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα της διατμητικής αντοχής περιλαμβάνουν δοκιμές δοκών που αστόχησαν σε κάμψη παρά σε διάτμηση.

2.4.2 Προγραμματισμός του πειράματος

Δώδεκα ενισχυμένα δοκάρια σκυροδέματος ελέγχθηκαν σε αστοχία για τον υπολογισμό της επίδρασης των: ογκομετρικό ποσοστό ινών V_f , λόγος a/d και της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, στην αντοχή και πλαστιμότητα των δοκών (Πίνακας 2.4.1). Οι πρώτες εννέα δοκοί, που είχαν το όνομα FHB (fiber-reinforced higher-strength concrete beams), κατασκευάστηκαν με σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής περίπου 65 MPa. Αυτές οι δοκοί υψηλής αντοχής περιλάμβαναν όλους τους συνδυασμούς των τριών ογκομετρικών ποσοστών σε χαλύβδινες ίνες ($V_f = 0, 0.5$ και 0.75%) και τους τρεις λόγους ($a/d = 2, 3$ και 4). Οι τελευταίες τρεις δοκοί (Test Series FNB2), των οποίων το σκυρόδεμα είχε μία μέση θλιπτική αντοχή 31 MPa, συμπεριλήφθηκαν για την εκτίμηση της επίδρασης της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στην διατμητική αντοχή. Για αυτές τις τρεις δοκούς, το ογκομετρικό ποσοστό ινών κρατήθηκε σταθερό στο 0.5%, ενώ ο λόγος a/d κυμαινόταν από 2 έως 4.

Το Σχήμα 2.4.1 δείχνει τις λεπτομέρειες των δοκιμίων. Όλες οι δοκοί είχαν την ίδια εγκάρσια διατομή (125x250mm), στατικό ύψος δοκού $d=212$ mm και καμπτικό οπλισμό: δύο ράβδους $\Phi 16$, που αντιστοιχούν σε ποσοστό διαμήκους οπλισμού 1.5%. Οι διαμήκεις ράβδοι αγκυρώθηκαν προς τα πάνω πίσω από τις στηρίξεις και στερεώθηκαν από τρεις συνδετήρες $\Phi 10$ σε κάθε άκρο. Αυτή η λεπτομέρεια αποκλείει την πιθανότητα αστοχίας των αγκυρώσεων, η οποία μπορεί να είναι σημαντική στην πράξη. Δεν τοποθετήθηκαν καθόλου συνδετήρες στο ελεγχόμενο

διαμητικό μήκος .

Για την πρόληψη των δοκών από την ανάπτυξη σημαντικών αξονικών δυνάμεων, οι δοκοί στηρίχθηκαν με κύλιση και άρθρωση, αντίστοιχα, στα δύο άκρα τους (Σχήμα 2.4.1).

Πίνακας 2.4.1: Σύνοψη πειραματικού προγραμματισμού

Table 1—Summary of test program

Beam designation	Fiber-volume fraction V_f , %	Shear-span/depth ratio a/d	Concrete compressive strength f'_c , MPa	Average shear stress		Ultimate displacement, mm	Failure mode
				v_{cr} , MPa	v_u , MPa		
FHB1-2	0	2.0	62.6	1.67	3.02	6.08	Shear
FHB2-2	0.5	2.0	63.8	1.94	5.09	16.50	Shear-flexure
FHB3-2	0.75	2.0	68.6	2.22	5.44	34.35	Shear-flexure
FHB1-3	0	3.0	62.6	1.48	2.53	9.68	Shear
FHB2-3	0.5	3.0	63.8	1.67	3.09	18.2	Flexure
FHB3-3	0.75	3.0	68.6	1.80	3.40	33.59	Flexure
FHB1-4	0	4.0	62.6	1.26	1.98	13.86	Shear
FHB2-4	0.5	4.0	63.8	1.54	2.41	28.49	Flexure
FHB3-4	0.75	4.0	68.6	1.57	2.74	43.87	Flexure
FNB2-2	0.5	2.0	30.8	1.30	4.04	8.93	Shear
FNB2-3	0.5	3.0	30.8	1.11	2.55	10.81	Shear
FNB2-4	0.5	4.0	30.8	1.07	2.0	41.07	Flexure

Table 2—Concrete mixture designs

Type	V_f , %	Quantity of material				w/c, %	Slump, mm
		Cement, kg/m ³	Fine aggregate, kg/m ³	Coarse aggregate, kg/m ³	High-range water-reducing admixture, ℓ		
FHB1 Series	0	480	560	1060	9.35	33	104
FHB2 Series	0.5	480	560	1060	10.5	33	96
FHB3 Series	0.75	480	560	1060	12.4	33	83
FNB2 Series	0.5	299	704	1098	—	62	131

Πίνακας 2.4.2: Σύνοψη μείγματος σκυροδέματος

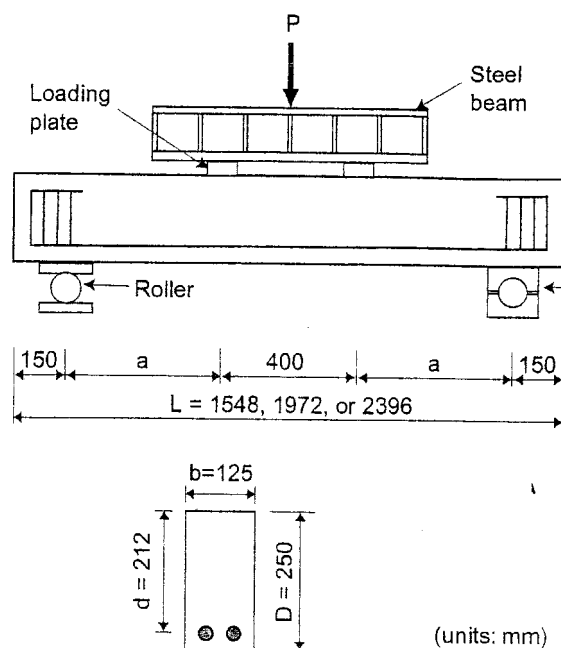


Fig. 1—Details of test beams.

Σχήμα 2.4.1: Σχέδια δοκών προς δοκιμή

2.4.3 Ιδιότητες υλικών

Ο Πίνακας 2.4.2 αναφέρεται στις αναλογίες σχεδιασμού και ινών για τα τέσσερα μείγματα. Ο λόγος νερού-τσιμέντου (w/c) ήταν 0.33 για τις δοκούς υψηλής αντοχής (FHB1, FHB2 και FHB3) και 0.62 για τις δοκούς συμβατικής αντοχής (FNB2). Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland τύπου Ι. Τα χοντρά αδρανή ήταν θραυστό χαλίκι με μέγιστο κόκκο 19 mm και τα λεπτά αδρανή ήταν φυσική άμμος ποταμού. Χρησιμοποιήθηκε μία μεγάλη ποικιλία ρευστοποιητή, για την βελτίωση της εργασιμότητας στο υψηλής αντοχής σκυρόδεμα.

Οι χαλύβδινες ίνες είχαν άγκιστρα στα άκρα τους, μήκος 50 mm και διάμετρο 0.8 mm, που αντιστοιχεί σε L/D= 62.5. Η ονομαστική αντοχή διαρροής των χαλύβδινων ινών ήταν 1079 MPa. Ο χάλυβας οπλισμού είχε εφελκυστική τάση διαρροής 442 MPa και μέγιστη αντοχή 638 MPa .

Οι τιμές της θλιπτικής αντοχής f'_c , εφελκυστικής αντοχή διάρρηξης f_{sp} , αντοχής σε κάμψη f_r , και μέτρο ελαστικότητας E_c για τα τέσσερα μείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.3. Η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη μετρήθηκαν με κυλίνδρους 100x200mm. Η αντοχή σε κάμψη υπολογίστηκε με δοκίμια διαστάσεων 150x150x530 mm. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4.3, η προσθήκη των ινών αύξησε τις αντοχές σε διάρρηξη και κάμψη πολύ περισσότερο από ότι αύξησε την θλιπτική αντοχή. Για παράδειγμα, η προσθήκη ινών ποσοστού 0.5% (FHB2) αύξησε τις αντοχές σε διάρρηξη και κάμψη κατά 36% και 13% αντίστοιχα, ενώ αύξησε την θλιπτική αντοχή μόνο κατά 2%.

Table 3—Measured properties of hardened concrete

Type	V_f , %	f'_c , MPa	f_{sp} , MPa	f_r , MPa	E_c , GPa
FHB1 Series	0	62.6	4.32	8.92	33.5
FHB2 Series	0.5	63.8	5.88	10.10	37.8
FHB3 Series	0.75	68.6	6.08	10.69	38.2
FNB2 Series	0.5	30.8	3.83	7.75	31.2

Πίνακας 2.4.3: Τιμές αντοχής και περιεκτικότητας σε ίνες για κάθε τύπο σκυροδέματος

2.4.4 Αποτελέσματα δοκιμών

Οι τυπικές καταγραφές φορτίου - παραμόρφωσης φαίνονται στο Σχήμα 2.4.2 για τις τρεις δοκούς σκυροδέματος υψηλότερης αντοχής με a/d=2.0. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ποσοστού των ινών, αυξήθηκαν τόσο το μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο όσο και η οριακή παραμόρφωση. Αυτή η συμπεριφορά ήταν τυπική και για τις άλλες δοκούς.

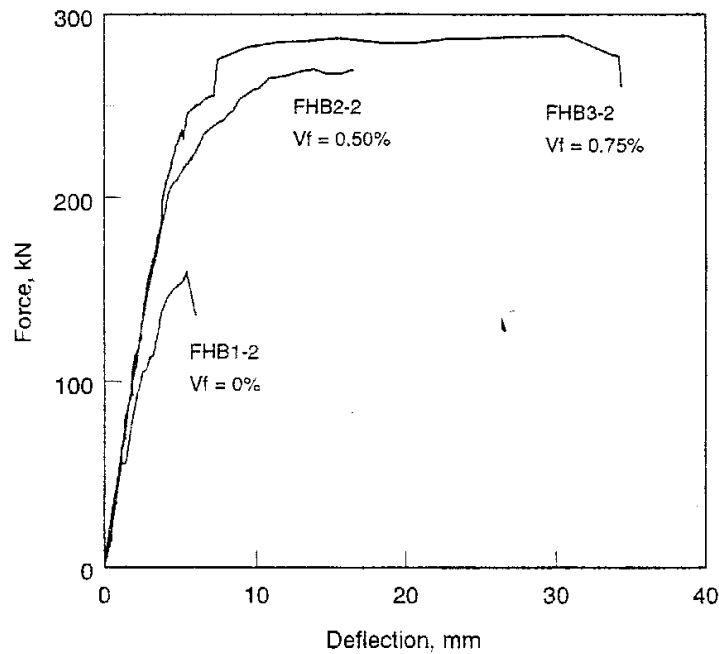


Fig. 2—Typical force-deflection histories ($a/d = 2$).

Σχήμα 2.4.2: Τυπικές καμπύλες φορτίου παραμόρφωσης για $a/d = 2.0$

2.4.5 Μορφές αστοχίας

Η παρουσία των χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα επηρεάζει έντονα την κατανομή των ρωγμών κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.4.3, για τις τρεις δοκούς με $a/d = 2.0$. Οι τρεις δοκοί είναι ίδιες με μόνη διαφορά το ποσοστό ινών που περιέχουν. Οι αριθμοί δίπλα στις ρωγμές αναφέρονται στο φορτίο (σε τόνους) στο οποίο οι ρωγμές πρωτοεμφανίστηκαν. Στο δοκίμιο FHB1-2, το οποίο δεν είχε καθόλου χαλύβδινες ίνες, πρώτα εμφανίστηκαν καμπτικές ρωγμές εντός της περιοχής σταθερής ροπής (στο μέσο) και, αργότερα, δύο λοξές διαμητικές ρωγμές εμφανίστηκαν (μία σε κάθε ακραίο τρίτο του ανοίγματος) στις περιοχές σταθερής τέμνουσας. Η δοκός αστόχησε ξαφνικά κατά μήκος μιας μονής διαμητικής ρωγμής.

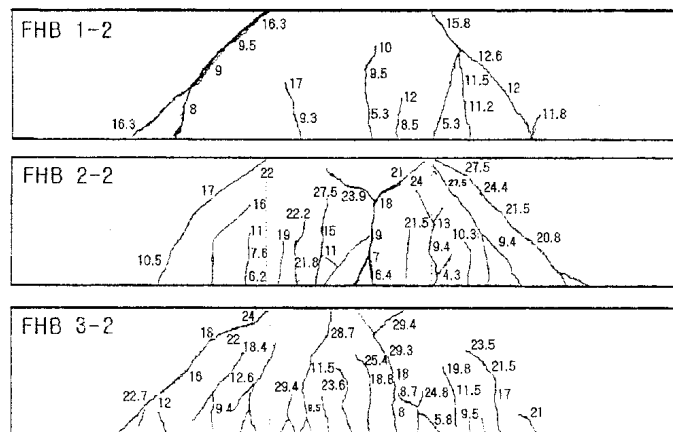


Fig. 3—Typical crack patterns ($a/d = 2$).

Σχήμα 2.4.3: Τυπικές μορφές ρηγματώσης για $a/d = 2.0$

Καθώς το ογκομετρικό ποσοστό ινών αυξήθηκε σε 0.50% και 0.75% για τα FHB2-2 και FHB3-2, αντίστοιχα, ο τρόπος αστοχίας άλλαξε σε ένα συνδυασμό διάτμησης και κάμψης. Σε τέτοιες αστοχίες, εμφανίζονται ταυτόχρονα σημαντικές διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές, οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου να επέλθει η αστοχία. Παρατηρήθηκε ότι οι καμπτικές και διατμητικές ρωγμές βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους καθώς το ογκομετρικό ποσοστό των ινών αυξάνει (Σχήμα 2.4.3). Πέραν αυτού, στις δοκούς σκυροδέματος χωρίς ίνες, το εύρος ρωγμών ήταν τυπικά από 90 έως 170 mm, ενώ το εύρος αυτό μειωνόταν στα 70 έως 90 mm με την προσθήκη ινών.

Τα είδη αστοχίας για όλες τις δοκούς δείχνονται στον Πίνακα 2.4.1. Όλες οι δοκοί σκυροδέματος χωρίς ίνες αστόχησαν σε διάτμηση, που αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση σε απότομη ψαθυρής μορφής αστοχία κατά μήκος μιας μεμονωμένης διατμητικής ρωγμής. Καθώς η περιεκτικότητα των ινών αυξάνει, το είδος της αστοχίας αλλάζει από διατμητική σε καμπτοδιατμητική ($\alpha/d = 2$) ή καμπτική αστοχία ($\alpha/d=3$ ή 4). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4.1 και στο Σχήμα 2.4.2, η οριακή παραμόρφωση αυξήθηκε μέχρι 5 φορές (για σταθερό L και α/d) με αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες, όπου η οριακή παραμόρφωση καθορίστηκε ως η παραμόρφωση στην οποία η ικανότητα ανάληψης του φορτίου έπεφτε σημαντικά.

2.4.6 Οριακή αντοχή

Οι οριακές διατμητικές αντοχές των δώδεκα δοκών δείχνονται στον Πίνακα 2.4.1, όπου δίνεται η μέση διατμητική τάση στην αστοχία, v_u , που καθορίζεται ως η μέγιστη διατμητική δύναμη διαιρούμενη με το πλάτος δοκού επί το στατικό ύψος ($v_u = V/bd$). Το Σχήμα 2.4.4 δείχνει ότι η μέση διατμητική τάση στην αστοχία συνεχώς μειώνεται με αύξηση του α/d . Επίσης, η διαφορά στην αντοχή μεταξύ δοκών με $\alpha/d = 2$ και $\alpha/d = 3$ ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από τη διαφορά μεταξύ δοκών που είχαν $\alpha/d = 3$ και $\alpha/d = 4$. Τέτοια συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη εξαιτίας της μείωσης της επίδρασης τοξωτής λειτουργίας καθώς το α/d αυξανόταν. Παρόμοια συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη για δοκούς που αστοχούσαν σε κάμψη. Ειδικότερα, αν η καμπτική αντοχή της δοκού M_{ult} ελέγχει τη μέγιστη διάτμηση, η οριακή διάτμηση M_{ult} / α θα είναι ανάλογη του $1/\alpha$.

Η επιρροή της περιεκτικότητας σε ίνες στην αντοχή ινοπλισμένων δοκών φαίνεται στο Σχήμα 2.4.5 για τις δοκούς υψηλής αντοχής. Η αντοχή των ινοπλισμένων δοκών κυμαίνεται από 122 έως 180 % της αντοχής των δοκών που δεν περιέχουν ίνες. Η αύξηση της αντοχής ήταν ιδιαίτερος μεγάλη (69 έως 80 %) για τις δοκούς με χαμηλό α/d (2.0), που αστόχησαν σε ένα συνδυασμό διάτμησης και κάμψης (Πίνακας 2.4.1). Για μεγαλύτερες τιμές α/d , που απαιτούνται πιο συχνά στην πράξη, η αύξηση στην αντοχή κυμαίνεται από 22 έως 38%. Αυτές οι δοκοί αστόχησαν σε κάμψη, έτσι το εφαρμοζόμενο φορτίο κατά την αστοχία δεν είναι ίδιο με την διατμητική αντοχή,

παρά μόνο εξασφαλίζει ένα χαμηλότερο όριο για την διατμητική αντοχή.

Η επίδραση στην αντοχή σκυροδέματος μπορεί να εκτιμηθεί συγκρίνοντας έξι πειράματα δοκών με περιεκτικότητα σε ίνες 0.5% (Σειρές FHB2 και FNB2). Καθώς η αντοχή του σκυροδέματος περίπου διπλασιάστηκε (από 31 σε 65 MPa), η αντοχή αυξήθηκε (για ένα δεδομένο ποσοστό ινών και διατμητικό μήκος) από 21 σε 26%.

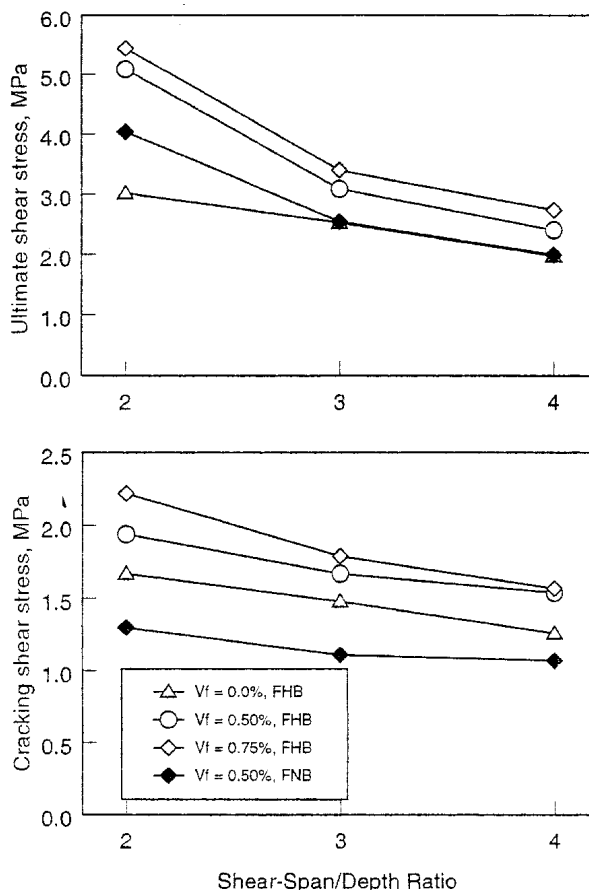


Fig. 4—Influence of a/d on shear resistance.

Σχήμα 2.4.4: Επιρροή του a/d στη διατμητική συμπεριφορά

2.4.7 Διατμητική αντοχή ρηγμάτωσης

Οι τιμές της μέσης διατμητικής τάσης κατά την έναρξη της διαγώνιας ρηγμάτωσης υπολογίστηκαν βασιζόμενες στην καταγεγραμμένη τέμνουσα τη στιγμή που ξεκινάει η ρηγμάτωση (Πίνακας 2.4.1). Όπως παρατηρήθηκε για την οριακή αντοχή σε διάτμηση, η μέση διατμητική τάση κατά την στιγμή της έναρξης της διαγώνιας ρηγμάτωσης μειώθηκε με την αύξηση του a/d (Σχήμα 2.4.4), αυξήθηκε με την αύξηση του ποσοστού ινών (Σχήμα 2.4.5) και αυξήθηκε με την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος (Πίνακας 2.4.1). Οι ίνες εμφανίστηκαν να είναι δραστικές στην επιβράδυνση του σχηματισμού ρωγμών, έως και να σταματούν την επέκτασή τους αφού δημιουργήθηκαν.

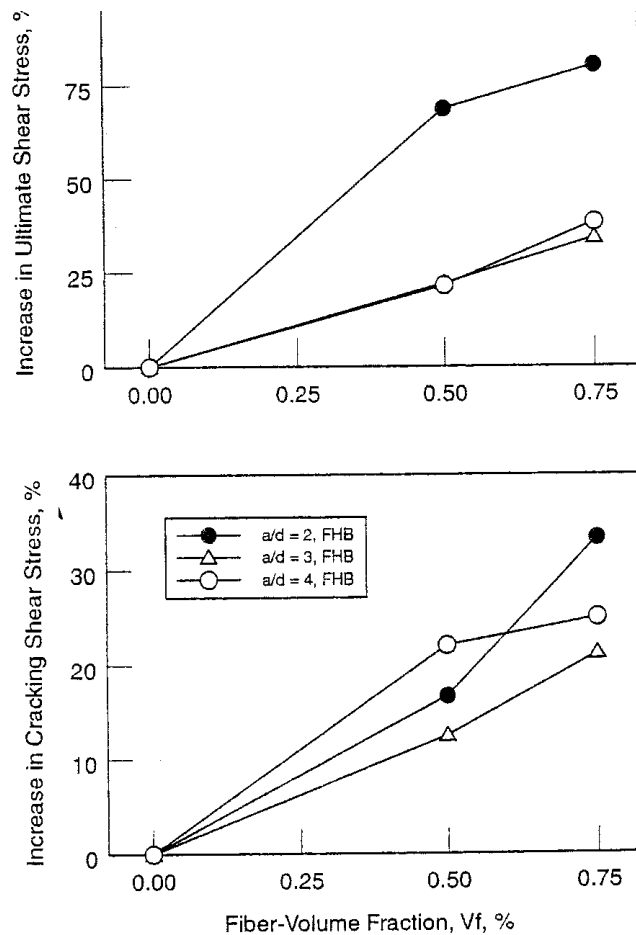


Fig. 5—Influence of fiber volume on increased shear resistance.

Σχήμα 2.4.5: Επιρροή ποσοστού ινών στη διατμητική συμπεριφορά

Η επιρροή των χαλύβδινων ινών στο φορτίο διαγώνιας ρηγμάτωσης ήταν μικρότερη από την επιρροή στη μέγιστη διατμητική αντοχή. Ειδικότερα, η αύξηση στη διατμητική αντοχή σε ρηγμάτωση κυμάνθηκε από 13 έως 33% σε σχέση με αυτήν σε όμοιες δοκούς χωρίς ίνες (Σχήμα 2.4.5). Αντίθετα, η αντοχή του σκυροδέματος επηρέασε την διατμητική ρηγμάτωση περισσότερο από την αντοχή αστοχίας. Συγκρίνοντας τις σειρές δοκιμών FHB2 και FNB2, φαίνεται ότι η αύξηση στη θλιπτική αντοχή αυξάνει την διατμητική τάση ρηγμάτωσης από 44 έως 50%.

Όπως έχει αναφερθεί για τις δοκούς χωρίς ίνες, οι δοκοί με μικρό λόγο a/d έφεραν περισσότερο φορτίο μετά τη διατμητική ρηγμάτωση από ότι τα δοκάρια με μεγάλο a/d . Για παράδειγμα, για $a/d=2$, η οριακή διατμητική τάση των ινοπλισμένων δοκών (v_u) κυμαίνεται από 245 έως 311% της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης (v_{cr}). Σε αντίθεση, η v_u κυμαίνεται από 157 έως 230 % της v_{cr} για δοκούς με $a/d = 3$ και 4. Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στην αστάθεια του μηχανισμού ανίδας για μεγάλα a/d και στη μεγαλύτερη αλληλεπίδραση μεταξύ καμπτικού και διατμητικού τύπου αστοχίας.

2.4.8 Αριθμός διατμητικών αστοχιών

Τα δώδεκα δοκίμια που παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο, αποδεικνύουν την επιρροή της προσθήκης των χαλύβδινων ινών στα ινοπλισμένα δοκάρια. Από μόνα τους, ωστόσο, αυτά τα δεδομένα είναι ανεπαρκή για να δώσουν εκφράσεις διατμητικής αντοχής για το σχεδιασμό, λόγω του ότι ο αριθμός των δοκιμών ήταν πολύ μικρός. Από τις εννέα δοκούς που περιέχουν χαλύβδινες ίνες, μόνο οι δύο αστόχησαν σε καθαρή διάτμηση και δύο αστόχησαν κάτω από συνδυασμό κάμψης και διάτμησης. Οι άλλες πέντε δοκοί με ίνες, τα οποία αστόχησαν σε κάμψη, εξασφαλίζουν μόνο ένα χαμηλότερο όριο για τη διατμητική αντοχή.

Για αυτό το λόγο, συλλέχθηκαν πρόσθετα δεδομένα από τη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό των υπαρχουσών και προτεινόμενων εξισώσεων για τη διατμητική ρηγμάτωση και αντοχή ινοπλισμένων δοκών ορθογωνικής διατομής. Πειράματα δοκών προστέθηκαν στα δεδομένα μόνο όταν οι ερευνητές περιέγραψαν τις αστοχίες ως διατμητικές αστοχίες ή όταν τα ρηγματωμένα δοκίμια δείχνουν ότι αυτός ο τύπος αστοχίας κυριαρχεί. Επιπλέον, οι δοκοί χωρίς ίνες ή με συμβατικό εγκάρσιο οπλισμό, όπου υπήρξαν, αφαιρέθηκαν. Ο λόγος a/d κυμάνθηκε από 1.0 έως 5.5 και το ποσοστό διαμήκους οπλισμού χρειάστηκε να είναι τουλάχιστον 0.5%. Για πρακτικούς σκοπούς, ήταν επίσης απαραίτητο να εξαιρεθούν κάποιες δοκιμές όπου οι αναφορές τους δεν εξασφάλιζαν επαρκή πληροφόρηση για τις εκφράσεις της διατμητικής αντοχής που επετεύχθησαν.

Βασιζόμενοι σε αυτά τα κριτήρια, συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα από 139 δοκιμές αυτής και έντεκα προηγούμενων μελετών. Για 46 από τα δοκίμια που ελέγχθηκαν, οι ερευνητές αναφέρουν τη μέση διατμητική τάση κατά την στιγμή της έναρξης της διατμητικής ρηγμάτωσης. Ο Πίνακας 2.4.4 παρουσιάζει τον αριθμό των δοκιμών που ικανοποίησαν το κριτήριο διατμητικής αστοχίας από κάθε μελέτη.

Το πλήθος των δοκιμών ποικίλει όσον αφορά το ογκομετρικό ποσοστό των ινών (0.22 έως 2%), το ανοιγμένο διατμητικό άνοιγμα a/d (1.0 έως 5.0), τη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (21 έως 112 MPa), το ποσοστό διαμήκους οπλισμού (1.1 έως 5.7%), και το στατικό ύψος (102 έως 570 mm). Τα περισσότερα από τα δοκίμια ήταν μικρά και μόνο 12% από τα 139 δοκάρια είχαν στατικό ύψος μεγαλύτερο από 250mm. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική, γιατί η διατμητική αντοχή της δοκού – κυρίως για δοκούς χωρίς εγκάρσιο οπλισμό – είναι γνωστό ότι μειώνεται με την αύξηση του στατικού ύψους των δοκών.

2.4.9 Προτεινόμενες σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής

Ορισμένοι ερευνητές πρότειναν εμπειρικές εξισώσεις για την εκτίμηση της μέσης διατμητικής τάσης στη διατμητική αστοχία v_u για μία ινοπλισμένη δοκό. Στατιστικές ως προς την ακρίβεια των έξι από αυτές τις εξισώσεις δίνονται στον Πίνακα 2.4.4. Για κάθε σειρά δοκιμών και για τα 139 δοκίμια στο σύνολο, ο πίνακας δείχνει τη μέση τιμή και το συντελεστή απόκλισης του

λόγου της εμπειρικά μετρούμενης διάτμησης προς την υπολογιζόμενη διάτμηση ($v_{u,exp}/v_{u,calc}$):

Table 4—Statistical evaluation of expressions for shear strength

Test series	No. of tests	Mean value of $v_{u,exp}/v_{u,calc}$ (coefficient of variation)					
		Sharma	Narayanan	Ashour		Imam	Proposed
		Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (5)	Eq. (6)	Eq. (7)	Eq. (9)
This investigation	4	1.59 (0.15)	1.70 (0.03)	1.83 (0.03)	1.34 (0.04)	1.30 (0.05)	1.33 (0.05)
Ashour, Hasanain, and Wafa ³	11	1.25 (0.40)	1.03 (0.15)	1.17 (0.12)	1.09 (0.10)	0.63 (0.32)	0.86 (0.13)
Batson, Jenkins, and Spatney ⁴	42	0.96 (0.46)	1.10 (0.10)	1.14 (0.11)	1.29 (0.18)	—	1.01 (0.09)
Casanova and Rossi ¹⁹	2	1.45 (0.00)	1.53 (0.00)	1.80 (0.00)	1.44 (0.00)	0.98 (0.00)	1.25 (0.00)
Imam, Vandewalle, and Mortelmans ⁵	5	0.79 (0.37)	1.20 (0.14)	1.53 (0.12)	1.23 (0.16)	0.97 (0.11)	0.99 (0.07)
Kaushik, Gupta, and Tarafdar ⁷	9	1.17 (0.05)	1.11 (0.12)	1.25 (0.11)	0.89 (0.16)	0.76 (0.14)	0.93 (0.08)
Li, Ward, and Hamza ⁹	6	1.26 (0.24)	1.47 (0.15)	1.61 (0.10)	1.20 (0.12)	—	1.32 (0.10)
Lim, Paramasivam, and Lee ¹⁰	7	1.01 (0.36)	0.97 (0.05)	1.08 (0.11)	0.85 (0.10)	0.67 (0.23)	0.82 (0.07)
Mansur, Ong, and Paramasivam ¹¹	9	1.50 (0.15)	1.19 (0.12)	1.29 (0.12)	0.94 (0.13)	0.88 (0.12)	0.98 (0.11)
Murty and Venkatacharyulu ¹²	4	1.30 (0.14)	1.07 (0.09)	1.11 (0.13)	0.82 (0.10)	—	0.85 (0.14)
Narayanan and Darwish ¹³	29	1.54 (0.27)	1.09 (0.15)	1.23 (0.16)	1.00 (0.15)	—	0.97 (0.12)
Noghabai ²¹	11	1.71 (0.17)	1.33 (0.16)	1.52 (0.16)	1.23 (0.16)	1.13 (0.17)	1.07 (0.15)
All tests	139	1.26 (0.37)	1.15 (0.18)	1.27 (0.19)	1.12 (0.21)	0.87 (0.29)	1.00 (0.15)

Πίνακας 2.4.4: Στατιστική αποτίμηση των σχέσεων διατμητικής αντοχής

• **Σχέση του Sharma (1986)**

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των δικών του δοκιμών και εκείνων των Batson, Jenkins και Spatney (1972), ο Sharma πρότεινε μία απλή εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών:

$$v_u = kf_i'(d/a)^{0.25} \quad (MPa) \quad (1) \quad 2.4.1$$

όπου

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$k = 2/3$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_i' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $0.79(f_c')^{0.5}$ [MPa]

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου [MPa]

Η απλότητα της εξίσωσης (1) την κάνει ελκυστική, αλλά αυτή η εξίσωση δεν περιλαμβάνει παραμέτρους με σημαντική επίδραση στη διατμητική αντοχή, όπως το ογκομετρικό ποσοστό ινών (Σχήμα 2.4.5), το σχήμα των ινών και το ποσοστό διαμήκους οπλισμού. Επιπλέον, η εξίσωση 2.4.1 υποεκτιμά την επίδραση του λόγου a/d , συνεπώς, είναι υπερβολικά συντηρητική για χαμηλές τιμές

του λόγου a/d και καθόλου συντηρητική για ψηλές τιμές του λόγου a/d (Σχήμα 2.4.6). Η μέση τιμή του λόγου της μετρηθείσας διατμητικής αντοχής προς την υπολογιζόμενη διατμητική αντοχή ήταν 1.26 για τα 139 δοκίμια και ο συντελεστής απόκλισης για αυτόν τον λόγο ήταν 37% (Πίνακας 2.4.4).

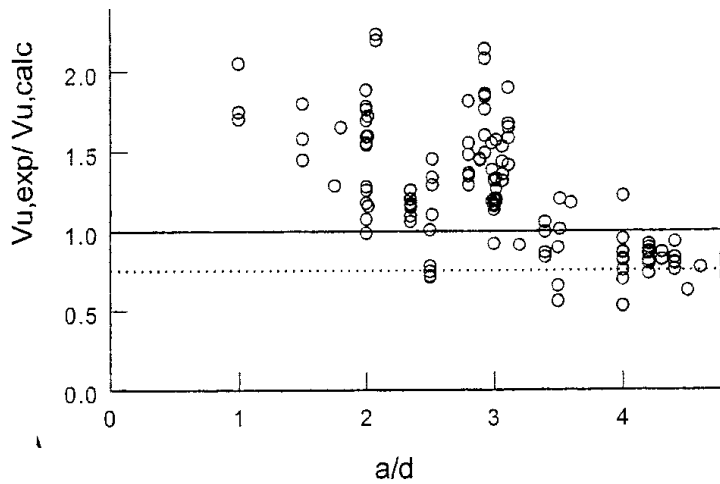


Fig. 6—Evaluation of Sharma's Eq. (1).

Σχήμα 2.4.6: Αποτίμηση της αξιοπιστίας πρόβλεψης της αντοχής από την εξίσωση 2.4.1 (Sharma, 1986)

• Σχέση των Narayanan και Darwish (1987)

Οι Narayanan και Darwish (1982) πρότειναν μια εμπειρική σχέση για τη μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία v_u :

$$v_u = e \left[0.24 f_{spfc} + 80 \rho \frac{d}{a} \right] + v_b \quad (\text{MPa}) \quad (2) \quad 2.4.2$$

όπου

f_{spfc} = η αντοχή κυλίνδρου σε διάρρηξη

$$= f_{cu} / (20 - \sqrt{F}) + 0.7 + 1.0 \sqrt{F} \quad (\text{MPa}) \quad (3) \quad 2.4.3$$

ρ = ποσοστό διαμήκους οπλισμού

F = συντελεστής γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών = $(L_f/D_f)V_f d_f$

e = συντελεστής τοξωτής λειτουργίας: 1.0 για $a/d > 2.8$ και $2.8d/a$ για $a/d < 2.8$

f_{cub} = θλιπτική αντοχή κύβου [MPa]

L_f = μήκος ίνας

D_f = διάμετρος ίνας

V_f = ογκομετρικό ποσοστό ινών

d_f = συντελεστής συνάφειας: 0.5 για ευθύγραμμες ίνες, 0.75 για ίνες με άγκιστρα, 1.0 για οδοντωτές

$v_b = 0.41 \tau F$

τ = μέση τάση συνάφειας ινών και σκυροδέματος, ίση με 4.15 MPa όπως έχει προταθεί από τους

Swamy, Mangat και Rao, ελλείπει κατάλληλων δοκιμών.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το πρώτο τμήμα στις αγκύλες της εξίσωσης 2.4.2 περιγράφει τη συνεισφορά των ινών από την άποψη της αντοχής του κυλίνδρου σε διάρρηξη, το δεύτερο τμήμα περιγράφει τη δράση βλήτρου και το τρίτο τμήμα περιγράφει την συνεισφορά των ινών διαμέσου μιας ρωγμής που τείνει να εκδηλωθεί. Ο συντελεστής των ινών F περιγράφει όχι μόνο το ογκομετρικό ποσοστό ινών και το συντελεστή λυγηρότητας αλλά και, μέσω ενός συντελεστή συνάφειας d_f , αναφέρεται στην ποικιλία των συνθηκών αγκύρωσης των ινών.

Ο αδιάστατος συντελεστής e , που αναφέρεται στην τοξωτή λειτουργία, είναι όμοιος με τον αντίστοιχο συντελεστή στη σχέση διατμητικής αντοχής που προτάθηκε από τον Zsutty για συμβατικές δοκούς χωρίς ίνες :

$$v_u = 11.4e \left(f_c \rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} \quad (MPa) \quad (4) \quad 2.4.4$$

Όπου

$e=1.0$ για $a/d > 2.5$ και $2.5d/a$ για $a/d < 2.5$.

Η εξίσωση 2.4.2 εξετάζει τις παραμέτρους που επηρεάζουν την διατμητική αντοχή, περιλαμβανομένου του όγκου και του σχήματος των ινών, του a/d , της αντοχής του σκυροδέματος και του ποσοστού διαμήκους οπλισμού. Επιπλέον, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μόνο σε διατμητικές αστοχίες έτσι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.7, η εξίσωση 2.4.2 εξασφάλισε αξιόπιστα, αν και συντηρητικά την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής. Ο μέση τιμή του λόγου $v_{u,exp}/v_{u,calc}$ ήταν 1.15 και ο αντίστοιχος συντελεστής απόκλισης ήταν 18 %.

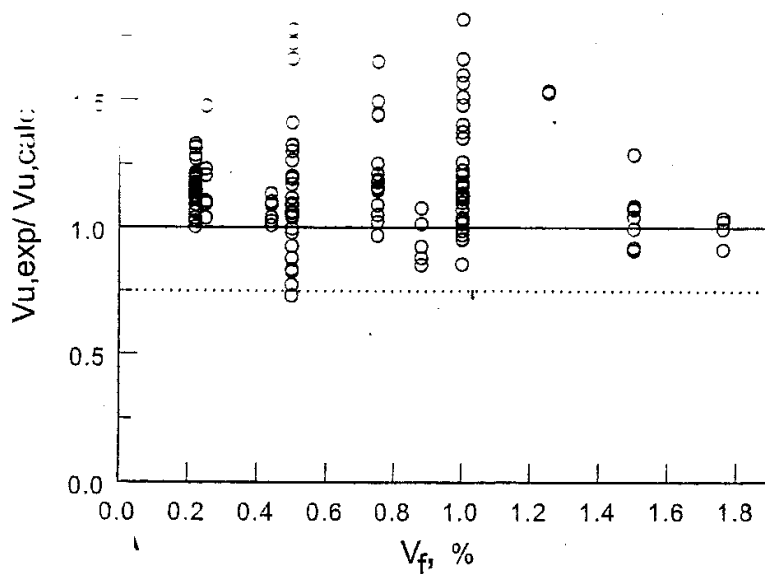


Fig. 7—Evaluation of Narayanan and Darwish's Eq. (2).
Σχήμα 2.4.7: Αποτίμηση της αξιοπιστίας πρόβλεψης της αντοχής από την εξίσωση 2.4.2 (Narayanan και Darwish, 1987)

• **Σχέσεις των Ashour, Hasanain και Wafa (1992)**

Οι Ashour, Hasanain και Wafa εξέτασαν 18 δοκούς κατασκευασμένες από υψηλής αντοχής ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των πειραμάτων, πρότειναν δύο σχέσεις για την πρόβλεψη αντοχών τέτοιων δοκών. Η πρώτη σειρά εκφράσεων ήταν παρόμοια με του Zsutty (εξίσωση 2.4.4), αλλά τροποποιήθηκε για να συμπεριλάβει τις ίνες .

Για $a/d \geq 2.5$,

$$v_u = (2.11\sqrt[3]{f'_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (MPa) \quad (5a) \quad 2.4.5a$$

Για $a/d < 2.5$,

$$v_u = [Eq. (5a)] \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (MPa) \quad (5b) \quad 2.4.5b$$

Η δεύτερη εξίσωση ήταν παρόμοια με την (11-4) του ACI Building Code, απλώς τροποποιημένη για να συμπεριλάβει την επιρροή των ινών:

$$v_u = (0.7\sqrt{f'_c} + 7F) \frac{d}{a} + 17.2\rho \frac{d}{a} \quad (MPa) \quad (6) \quad 2.4.6$$

Οι εξισώσεις 2.4.5 και 2.4.6 περιλαμβάνουν τις ίδιες παραμέτρους που περιλαμβάνει η εξίσωση 2.4.2. Οι σταθερές των εξισώσεων 2.4.5 και 2.4.6 καθορίστηκαν με γραμμική παλινδρόμηση πάνω στα αποτελέσματα των πειραμάτων των Ashour, Hasanain και Wafa και, σύμφωνα με τους συγγραφείς, αυτές οι εξισώσεις εξασφαλίζουν μία καλύτερη εφαρμογή για υψηλής αντοχής σκυροδέματα σε σχέση με την εξίσωση 2.4.2 των Narayanan και Darwish. Ωστόσο οι εξισώσεις 2.4.5 και 2.4.6 είναι λιγότερο ακριβείς από ότι η εξίσωση 2 για το μεγαλύτερο αριθμό των 139 πειραμάτων. Συγκεκριμένα, οι Ashour, Hasanain και Wafa συμπεριέλαβαν αποτελέσματα δοκιμών για δοκούς με ποσοστό διαμήκους οπλισμού 0.37% ή με $a/d = 6.0$, ακόμα και αν ανέφεραν ότι τα δοκάρια αυτά αστόχησαν σε κάμψη.

• **Σχέση των Imam και Vandewalle (1994)**

Οι Imam και Vandewalle τροποποίησαν μία έκφραση που είχαν αναπτύξει οι Bazant και Sun για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής σε συνήθους αντοχής δοκούς συμβατικού σκυροδέματος. Οι Bazant και Sun έδωσαν μία έκφραση που βασίστηκε στα αποτελέσματα μη γραμμικής θραυστομηχανικής, που δείχνει ότι η διατμητική ικανότητα ποικίλει με τη μέγιστη

διάμετρο αδρανούς d_a και το λόγο του στατικού ύψους δοκού προς τη μέγιστη διάμετρο αδρανούς d/d_a . Η εξίσωση των Imam και Vandewalle διαφέρει από την εξίσωση των Bazant και Sun μόνο ως προς τον παράγοντα οπλισμού ω που αντικατέστησε το μηχανικό ποσοστό οπλισμού ρ , ενώ οι λοιπές σταθερές προσαρμόστηκαν σαν αποτέλεσμα στατιστικών αναλύσεων.

$$v_u = 0.6\Psi^3\sqrt{\omega}\left[(f'_c)^{0.44} + 275\sqrt{\frac{\omega}{(a/d)^5}}\right] \text{ (MPa)} \quad (7) \quad 2.4.7$$

όπου,

Ψ = παράγοντας επιρροής του σχήματος

$$= \frac{1 + \sqrt{(5.08/d_a)}}{\sqrt{1 + d/(25d_a)}};$$

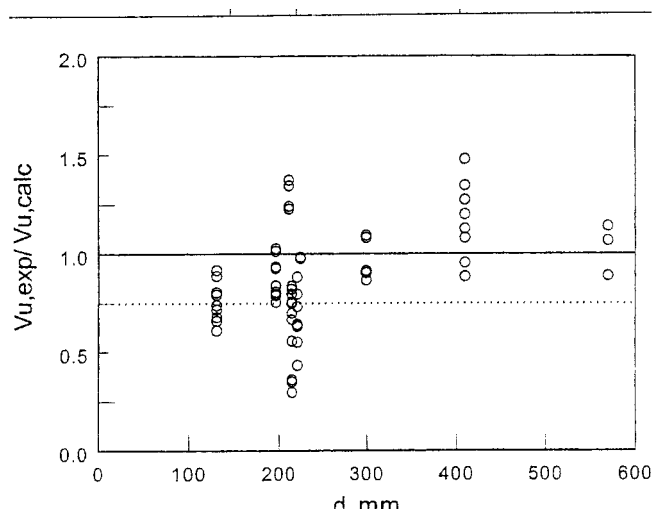
ω = παράγοντας οπλισμού = $\rho(1 + 4F)$

F = συντελεστής γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών = $(L_f/D_f)V_f d_f$

d_f = συντελεστής συνάφειας: 0.5 για λείες ίνες, 0.9 για ίνες διαφορετικής μορφής, 1.0 για ίνες με άγκιστρα

Η εξίσωση 2.4.7 ενσωματώνει την επίδραση παραμέτρων από άλλα μοντέλα υπολογισμού και προσθέτει την επιρροή του μεγέθους του δοκιμίου. Αυτή η εξίσωση, ωστόσο, επιβεβαιώθηκε μόνο με 29 δοκιμές ινοπλισμένου σκυροδέματος δοκών, από τα οποία μερικά αστόχησαν σε κάμψη αντί της διάτμησης. Η τελική εξίσωση ήταν λιγότερο ακριβής από την εξίσωση 2.4.2, και η εξίσωση 2.4.7 ήταν σημαντικά μη συντηρητική για τα πειράματα των Ashour, Hasanain και Wafa και των Lim, Paramasivam και Lee (Πίνακας 2.2.4).

Η διαδικασία δείχνει να υπεραντισταθμίζει την επίδραση του στατικού ύψους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.8, αυτή η εξίσωση τείνει να υπερεκτιμήσει την αντοχή των δοκών μικρού ύψους και να υποεκτιμήσει την αντοχή των δοκών μεγάλου ύψους.



Σχήμα 2.4.8: Αποτίμηση της αξιοπιστίας πρόβλεψης της αντοχής από την εξίσωση 2.4.7 (Imam και Vandewalle)

• **Προτεινόμενη σχέση της παρούσας έρευνας**

Μία νέα εξίσωση για τη διατμητική αντοχή αναπτύχθηκε με συνδυασμό της μορφής που είχε η εξίσωση του Zsutty για την επίδραση της εφελκυστικής αντοχής στη δράση τόξου με ένα πρόσθετο όρο για τις ίνες, που δηλώνει την απευθείας συνεισφορά των ινών στην αντίσταση σε διάτμηση.

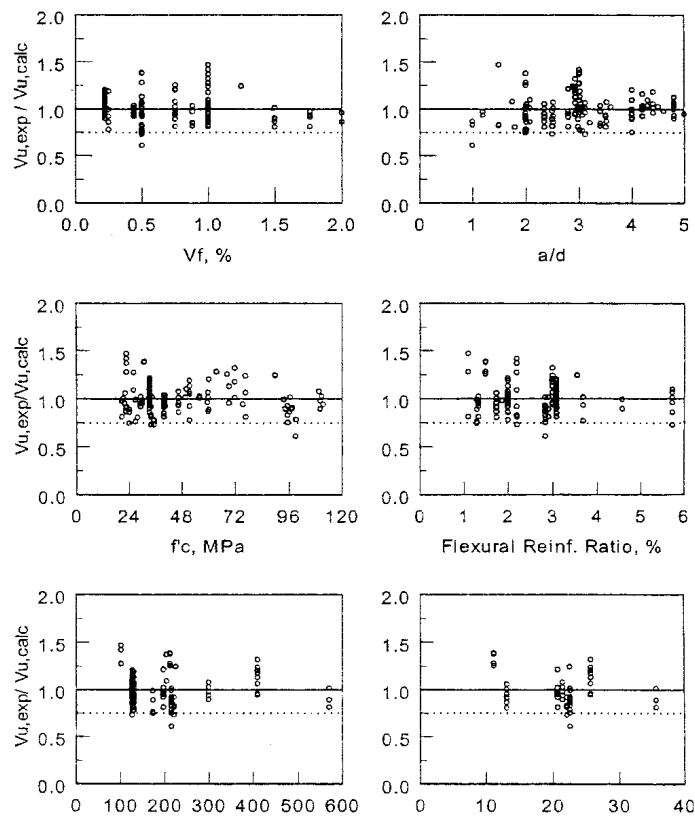
$$v_u = A e f_{spfc}^{\text{exp1}} \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{\text{exp2}} + B v_b^{\text{exp3}} \quad (\text{MPa}) \quad 2.4.8$$

όπου $v_b = 0.41 \tau F$, όπως προσδιορίστηκε στη σχέση 2.4.2.

Σε αυτή τη σχέση, η τιμή του e είναι ίση με 1.0 για $a/d > a/d_{\text{μετατροπής}}$ και ίσο με $(a/d_{\text{μετατροπής}} * d/a)$ για $a/d \leq a/d_{\text{μετατροπής}}$. Αυτή η σχέση εμφάνισε μια μέση τιμή 1.00 για το λόγο μετρηθείσας διατμητικής αντοχής προς υπολογισμένη διατμητική αντοχή και ελαχιστοποίησε τον συντελεστή απόκλισης (COV = 14.9%) για τις ακόλουθες τιμές σταθερών: $A = 2.1$, $B = 0.8$, $a/d_{\text{μετατροπής}} = 3.5$, $\text{exp1} = 0.70$, $\text{exp2} = 0.22$ και $\text{exp3} = 0.97$. Με μια μικρή απώλεια ακρίβειας (COV = 15.3%), η εξίσωση 2.4.8 μπορεί να γραφεί σε μορφή παρόμοια με την πρωτότυπη σχέση του Zsutty:

$$v_u = 3.7 e f_{spfc}^{2/3} \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} + 0.8 v_b \quad (\text{MPa}) \quad 2.4.9$$

όπου $e = 1.0$ για $a/d > 3.4$ και $3.4d/a$ για $a/d \leq 3.4$.



Σχήμα 2.4.9: Αποτίμηση της αξιοπιστίας πρόβλεψης της αντοχής από την προτεινόμενη εξίσωση 2.4.9

Το Σχήμα 2.4.9 δείχνει ότι η προτεινόμενη εξίσωση με επαρκή ακρίβεια λαμβάνει υπόψη της τις επιδράσεις των παραμέτρων: ογκομετρικό ποσοστό ινών, ανηγμένο διατμητικό μήκος a/d , θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, ποσοστό διαμήκους οπλισμού, στατικό ύψος δοκού d και λόγο του στατικού ύψους δοκού προς τη μέγιστη διάμετρο αδρανούς d/d_a . Ειδικότερα, η ακρίβεια της εξίσωσης 9 δεν ποικίλει με το d ή το d/d_a . Η επιρροή της διάστασης μπορεί να είναι λιγότερο σημαντικές στις ινοπλισμένες δοκούς από ότι στις συμβατικές, διότι οι τρόποι αστοχίας είναι πιο πλάστιμοι στις ινοπλισμένες. Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι είναι πιθανό οι επιδράσεις του μεγέθους να μην είναι προφανείς στα αποτελέσματα, γιατί οι περισσότερες δοκοί ήταν μικρές.

Για δοκούς χωρίς ίνες, η εξίσωση 2.4.9 είναι όμοια με την εξίσωση 2.4.44 του Zsutty και εξασφαλίζει μία λογική εκτίμηση της διατμητικής αντοχής. Για δοκάρια χωρίς ίνες, η εξίσωση 2.4.9 διαφέρει ως προς την εξίσωση 2.4.4 μόνο στο ότι η εφελκυστική αντοχή αντικαθιστά τη θλιπτική αντοχή και η τιμή της εμπειρικής σταθεράς αλλάζει. Η εξίσωση 9 εφαρμόστηκε (θέτοντας $V_f = 0.0$) σε 40 προηγούμενα πειράματα δοκών χωρίς ίνες και σε τρεις δοκούς χωρίς ίνες που περιγράφονται στον Πίνακα 2.4.1. Για αυτές τις δοκούς, ο λόγος της μετρηθείσας διατμητικής αντοχής προς την υπολογιζόμενη διατμητική αντοχή είχε μία μέση τιμή στο 1.06 με ένα συντελεστή απόκλισης 32%.

Table 5—Statistical evaluation of expressions for cracking shear

Test series	No. of tests	Mean value of $v_{cr,exp}/v_{cr,calc}$ (COV)	
		Proposed Eq. (11)	Narayanan (Eq. (10))
This investigation	4	1.10 (0.08)	1.27 (0.06)
Mansur, Ong, and Paramasivam ¹¹	9	0.92 (0.04)	1.05 (0.07)
Murty and Venkatacharyulu ¹²	4	1.09 (0.12)	1.30 (0.15)
Narayanan and Darwish ¹³	29	1.00 (0.16)	1.12 (0.14)
All tests	46	1.00 (0.14)	1.13 (0.14)

Πίνακας 2.4.5: Στατιστική αποτίμηση των σχέσεων διατμητικής ρηγμάτωσης

2.4.10 Σχέσεις για τη διαγώνια ρηγμάτωση

Οι Narayanan και Darwish πρότειναν μία εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της μέσης διατμητικής τάσης κατά την έναρξη της διαγώνιας ρηγμάτωσης v_{cr} . Η τάση αυτή υπολογίστηκε ως η τέμνουσα τη στιγμή της ρηγμάτωσης διαιρούμενη με το πλάτος επί το στατικό ύψος δοκού.

$$v_{cr} = 0.24f_{spfc} + 20\rho\frac{d}{a} + 0.5F \text{ (MPa)} \quad (10) \quad 2.4.10$$

$$v_{cr} = 3(f_{spfc})^{2/3}\left(\rho\frac{d}{a}\right)^{1/3} \text{ (MPa)} \quad (11) \quad 2.4.11$$

Οι εξισώσεις 2.4.10 και 2.4.11 εκτιμήθηκαν για 46 δοκιμές, για τις οποίες παρατηρήσεις που αφορούν την διαγώνια ρηγμάτωση είναι διαθέσιμες στον Πίνακα 2.4.5. Η ακρίβεια και των δύο εξισώσεων ήταν όμοια, αλλά η προτεινόμενη εξίσωση της έρευνας είναι απλούστερη.

2.4.11 Συμπεράσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα από δώδεκα δοκούς ινοπλισμένου σκυροδέματος αποδεικνύουν την επίδραση του ποσοστού χαλύβδινων ινών, του ανηγμένου διατμητικού μήκους a/d , και της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στη διαγώνια ρηγμάτωση, τη διατμητική αντοχή, την οριακή παραμόρφωση και τον τρόπο αστοχίας. Η αύξηση στην αντοχή ήταν ιδιαίτερα μεγάλη (69 έως 80%) για δοκούς με το μικρότερο a/d ($a/d=2.0$), τα οποία αστόχησαν σε συνδυασμό διάτμησης και κάμψης. Η αύξηση στην αντοχή της δοκού ήταν μικρότερη (22 έως 38%) για δοκούς με μεγαλύτερο a/d , που αστόχησαν σε κάμψη. Η προσθήκη άρα χαλύβδινων ινών μείωσε το εύρος και το μέγεθος των ρωγμών, αύξησε την παραμορφωσιακή ικανότητα και μετέτρεψε τον ψαθυρό τρόπο αστοχίας σε όλκιμο.

Τα αποτελέσματα από τα 139 πειράματα των ινοπλισμένων δοκών που αστόχησαν σε διάτμηση αναλύθηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια των έξι εξισώσεων σχεδιασμού για τη διατμητική αντοχή. Από τις υπάρχουσες διαδικασίες, η διαδικασία που προτάθηκε από τους Narayanan και Darwish ήταν η περισσότερο ακριβής. Οι διαδικασίες που προτάθηκαν σε αυτή την μελέτη (εξισώσεις 2.4.9 και 2.4.11) επιπλέον βελτιώνουν την ακρίβεια των εκτιμήσεων για την διατμητική αντοχή και την έναρξη της διαγώνιας ρηγμάτωσης. Για την προτεινόμενη εξίσωση, ο λόγος της μετρηθείσας διατμητικής αντοχής προς την υπολογιζόμενη διατμητική αντοχή είχε μία μέση τιμή στο 1.0 και ένα συντελεστή απόκλισης 15%. Η προτεινόμενη εξίσωση επίσης εξασφαλίζει λογικά αποτελέσματα για δοκούς χωρίς ίνες.

Η ακρίβεια της εκτίμησης της διατμητικής αντοχής δεν ποικίλει ανάλογα με το στατικό ύψος της δοκού (Σχήμα 2.4.9). Αυτή η μη επιρροή του στατικού ύψους της δοκού οφείλεται στην αυξανόμενη πλαστιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Διαφορετικά, η προφανής έλλειψη επίδρασης του μεγέθους μπορεί να είναι συνέπεια του γεγονότος ότι οι δοκοί, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, είχαν μικρό μέγεθος.

Κεφάλαιο 3ο

Κατασκευή των δοκιμίων

3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.1. Προετοιμασία του πειράματος:

Για την πειραματική διερεύνηση της συνεισφοράς των χαλύβδινων ινών στη διατμητική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν πειραματικά στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π. 6 δοκοί με ίδια σύνθεση σκυροδέματος και διαφορετική δοσολογία και τύπο ινών από χάλυβα στο μείγμα. Για κάθε μείγμα ινών, κατασκευάστηκε επιπλέον ένα κυλινδρικό δοκίμιο ύψους 30 cm και διαμέτρου 15 cm για δοκιμή θλίψης και ένα πρισματικό δοκίμιο διατομής 10 cm x 10 cm και μήκους 50 cm για δοκιμή κάμψης, για το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του μείγματος. Όλες οι δοκοί έχουν ίδιες διαστάσεις διατομής 15 cm x 30 cm και μήκους 231 cm.

Οι 6 δοκοί είναι χωρισμένες σε δύο ομάδες: η πρώτη ομάδα περιέχει ένα μόνο τύπο ινών (ίνες της DRAMIX RC65/35BN, $L = 35 \text{ mm}$, $L/D = 65$) σε 3 διαφορετικές δοσολογίες ($V_f = 1.2\%$, $V_f = 1.8\%$ και $V_f = 2.4\%$ όπου V_f το ογκομετρικό ποσοστό ινών, που αντιστοιχούν σε 100 kg/m^3 , 150 kg/m^3 και 200 kg/m^3 αντίστοιχα στο μείγμα), ενώ η δεύτερη περιέχει μείγμα τριών ινών της ΕΤΑΛ σε αναλογία 1:1:2, των: της μεγάλης χωρίς κωδική ονομασία ($L = 80 \text{ mm}$, $L/D = 80$), της μεσαίας (600 023, $L = 60 \text{ mm}$, $L/D = 60$) και της μικρής (600 002, $L = 31 \text{ mm}$, $L/D = 40$) στις ίδιες δοσολογίες. Για την κατασκευή των δοκών χρησιμοποιήθηκαν σιδηρότυποι του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π. με τις κατάλληλες διαστάσεις. Κάθε δοκός οπλίστηκε καμπτικά μόνο στην εφελκόμενη ζώνη (λόγω μονοτονικής φόρτισης) με τρεις ράβδους διαμέτρου 14 mm (3Φ14 που αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $A_s/bd = 1.14 \%$ με $d = 27 \text{ cm}$) (Εικόνα 3.1.1). Οι διαμήκεις ράβδοι αγκυρώθηκαν προς τα πάνω πέρα από τις στηρίξεις και στερεώθηκαν από τρεις συνδετήρες Φ8 σε κάθε στήριξη. Αυτή η λεπτομέρεια αποκλείει την πιθανότητα αστοχίας των αγκυρώσεων, η οποία μπορεί να είναι σημαντική στην πράξη. Δεν τοποθετήθηκαν καθόλου συνδετήρες στο διατμητικό μήκος με σκοπό τον εντοπισμό της καθαρής διατμητικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες.

Για την παρασκευή του μείγματος του ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σύνθεση:

Τσιμέντο τύπου ΙΙ: 280 kg/m^3

Άμμος : 819 kg/m^3

Γαρμπίλι: 700 kg/m^3

Χαλίκι: 350 kg/m^3

Νερό: 171 kg/m^3



Εικόνα 3.1.1: Σιδηρότυποι δοκών πριν τη σκυροδέτηση

Για την καλύτερη εργασιμότητα, κατά τη σκυροδέτηση κάθε δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε επιπλέον ρευστοποιητής τύπου SIKΑ VISCOCRETE 4000, σε διαφορετική δοσολογία για την κάθε δοκό ανάλογα με την ποσότητα ινών. Αναλυτικά, για την κάθε σκυροδέτηση:

Για τα δοκάρια που περιέχουν DRAMIX:

-1.2% κ.ό. σκυροδέματος (100 kg/m^3): 3.99 kg/m^3 ρευστοποιητή

-1.8% κ.ό. σκυροδέματος (150 kg/m^3): 5.985 kg/m^3 ρευστοποιητή

-2.4% κ.ό. σκυροδέματος (200 kg/m^3): 5.985 kg/m^3 ρευστοποιητή

Για τα δοκάρια με το μείγμα ινών της ΕΤΑΛ:

-1.2% κ.ό. σκυροδέματος (100 kg/m^3): 4.988 kg/m^3 ρευστοποιητή

-1.8% κ.ό. σκυροδέματος (150 kg/m^3): 6.983 kg/m^3 ρευστοποιητή

-2.4% κ.ό. σκυροδέματος (200 kg/m^3): 7.98 kg/m^3 ρευστοποιητή

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στον Πίνακα 3.1.1 βλέπουμε το κάθε δοκίμιο με την κωδική του ονομασία για τη διευκόλυνση της περιγραφής παρακάτω:

Ονομασία δοκιμίου	Τύπος ιών	Ογκομετρικό ποσοστό ιών (%)	Περιεκτικότητα ιών (kg/m ³)
D100	DRAMIX	1.2	100
D150	DRAMIX	1.8	150
D200	DRAMIX	2.4	200
M100	μείγμα ιών της ΕΤΑΛ	1.2	100
M150	μείγμα ιών της ΕΤΑΛ	1.8	150
M200	μείγμα ιών της ΕΤΑΛ	2.4	200

Πίνακας 3.1.1: Ονοματολογία των δοκιμίων

Σε κάθε τύπο δοκού αντιστοιχεί ένα πρισματικό και ένα κυλινδρικό δοκίμιο. Φωτογραφίες των μητρών των δοκιμίων βλέπουμε στην Εικόνα 3.1.2.



Εικόνα 3.1.2: Καλούπια των δοκιμίων

Για τη σκυροδέτηση χρησιμοποιήθηκε ο αναμκτήρας του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π., καθώς λόγω της προσθήκης ιών χρειάστηκε συνεχής παρακολούθηση (Εικόνες 3.1.3 και 3.1.4).



Εικόνα 3.1.3: Ανάμειξη ινών DRAMIX στο μείγμα

Οι ίνες της DRAMIX ήταν σε δέσμες που χωρίζουν με την προσθήκη ρευστοποιητή, ενώ στο μείγμα της ΕΤΑΛ η μικρή και η μεσαία ίνα ήταν διαχωρισμένες και μόνο η μεγάλη σε δέσμες. Η ανάμειξη των ινών έγινε “εν υγρώ”.



Εικόνα 3.1.4: Ανάμειξη των υλικών στον αναμεικτήρα

Μετά την ανάμειξη των υλικών, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα εγχύεται στα καλούπια με χρήση κατάλληλων εργαλείων (φτυάρι κ.ά.) (Εικόνα 3.1.5).



Εικόνα 3.1.5: Τελικό μείγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος

Κατά την τοποθέτηση του σκυροδέματος στα καλούπια απαιτήθηκε σωστή και συνεχής δόνηση για την καλύτερη διασπορά των υλικών (ίνες, τσιμεντοπολτός και αδρανή) μέσα στο μείγμα (Εικόνα 3.1.6). Τα δοκίμια ελέγχου του υλικού (κύλινδρος και πρίσμα) δονήθηκαν εξωτερικά επί της δονητικής τράπεζας του Εργαστηρίου Ω. Σ. Ε.Μ.Π. (Εικόνα 3.1.7).



Εικόνα 3.1.6: Τοποθέτηση στα καλούπια και δόνηση του σκυροδέματος

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Μετά τη σκυροδέτηση, οι δοκοί καλύφθηκαν με υγρούς μουσαμάδες και έμειναν έτσι στο εργαστήριο για 3-4 μέρες με συνεχή διαβροχή ημερησίως. Έπειτα, αφαιρέθηκαν οι μουσαμάδες και τα καλούπια και τα δοκάρια αφέθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος μέχρι να αποκτήσει το σκυρόδεμα την αντοχή του (τουλάχιστον 28 ημέρες), ώστε να προχωρήσουν οι πειραματικές διαδικασίες. Να σημειωθεί, ότι ο χρόνος που πέρασε ήταν μεγαλύτερος των 28 ημερών για κάθε δοκό και δοκίμιο.



Εικόνα 3.1.1: Πλήρωση των δοκιμίων με ινοπλισμένο σκυρόδεμα

3.2. Έλεγχος κυλινδρικών δοκιμών:

Μετά το πέρας των 28 ημερών τα κυλινδρικά δοκίμια ήταν έτοιμα για τη δοκιμή θλίψης στη συσκευή θλίψης, που βρίσκεται στο εργαστήριο Ω. Σ.. Αναλυτικά, ακολουθεί παρουσίαση για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά:

- DRAMIX 100 kg/m³ (D100) (88 μέρες μετά τη σκυροδέτηση)



Το κυλινδρικό δοκίμιο D100 (Εικόνα 3.2.1) αστόχησε στην τιμή των 614 kN στη μηχανή θλίψης, που αντιστοιχεί σε τάση 34.66 MPa. Δεχόμενοι ότι για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει η σχέση $E_c = 9500 (f_{cm})^{1/3}$ (βλ. Κεφάλαιο 2.2), μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας του D100, $E_c = 30.97$ GPa.

Εικόνα 3.2.1: Μορφή αστοχίας του κυλινδρικού δοκιμίου D100 μετά τη δοκιμή θλίψης

- DRAMIX 150 kg/m³ (D150) (88 μέρες μετά τη σκυροδέτηση)



Το κυλινδρικό δοκίμιο D150 (Εικόνα 3.2.2) αστόχησε στην τιμή των 568 kN στη μηχανή θλίψης, που αντιστοιχεί σε τάση 32.1 MPa. Δεχόμενοι ότι για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει η σχέση $E_c = 9500 (f_{cm})^{1/3}$ (βλ. Κεφάλαιο 2.2), μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας του D150, $E_c = 30.19$ GPa.

Εικόνα 3.2.2: Μορφή αστοχίας του κυλινδρικού δοκιμίου D150 μετά τη δοκιμή θλίψης

- DRAMIX 200 kg/m³ (D200) (91 μέρες μετά τη σκυροδέτηση)



Εικόνα 3.2.3: Μορφή αστοχίας του κυλινδρικού δοκιμίου D200 μετά τη δοκιμή θλίψης

Το κυλινδρικό δοκίμιο D200 (Εικόνα 3.2.3) αστόχησε στην τιμή των 630 kN στη μηχανή θλίψης, που αντιστοιχεί σε τάση 35.6 MPa. Δεχόμενοι ότι για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει η σχέση $E_c = 9500 (f_{cm})^{1/3}$ (βλ. Κεφάλαιο 2.2), μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας του D200, $E_c = 31.25$ GPa. Στο δοκίμιο D200, αξίζει να σημειωθεί η κακή ποιότητα του επιφανειακού σκυροδέματος λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε ίνες, που εντούτοις δεν οδηγεί σε πτώση της θλιπτικής αντοχής.

- Μείγμα ινών ΕΤΑΛ 100 kg/m³ (M100) (67 μέρες μετά τη σκυροδέτηση)



Εικόνα 3.2.4: Μορφή αστοχίας του κυλινδρικού δοκιμίου M100 μετά τη δοκιμή θλίψης

Το κυλινδρικό δοκίμιο M100 (Εικόνα 3.2.4) αστόχησε στην τιμή των 583 kN στη μηχανή θλίψης, που αντιστοιχεί σε τάση 32.93 MPa. Δεχόμενοι ότι για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει η σχέση $E_c = 9500 (f_{cm})^{1/3}$ (βλ. Κεφάλαιο 2.2), μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας του M100, $E_c = 30.45$ GPa.

- Μείγμα ινών ΕΤΑΛ 150 kg/m³ (M150) (67 μέρες μετά τη σκυροδέτηση)



Εικόνα 3.2.5: Μορφή αστοχίας του κυλινδρικού δοκιμίου M150 μετά τη δοκιμή θλίψης

Το κυλινδρικό δοκίμιο M150 (Εικόνα 3.2.5) αστόχησε στην τιμή των 579 kN στη μηχανή θλίψης, που αντιστοιχεί σε τάση 32.73 MPa. Δεχόμενοι ότι για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει η σχέση $E_c = 9500 (f_{cm})^{1/3}$ (βλ. Κεφάλαιο 2.2), μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας του M150, $E_c = 30.39$ GPa

- Μείγμα ινών ΕΤΑΛ 200 kg/m³ (M200) (91 μέρες μετά τη σκυροδέτηση)



Εικόνα 3.2.6: Μορφή αστοχίας του κυλινδρικού δοκιμίου M200 μετά τη δοκιμή θλίψης

Το κυλινδρικό δοκίμιο M200 (Εικόνα 3.2.6) αστόχησε στην τιμή των 468 kN στη μηχανή θλίψης, που αντιστοιχεί σε τάση 26.4 MPa. Αυτή η τιμή δεν είναι αποδεκτή, καθώς αναμενόταν τιμή άνω των 30 MPa, όπως στα παραπάνω. Ενδέχεται να κατά την κατασκευή του κυλίνδρου να μην υπήρξε η κατάλληλη δόνηση, ώστε δεν επιτεύχθηκε η ανάμιξη των υλικών ίνας και σκυροδέματος.

Κεφάλαιο 4ο
Πειραματική διάταξη

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης:

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να δοθεί με εποπτικό τρόπο μια σαφής κατά το δυνατόν περιγραφή της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Η διάταξη στεγάζεται στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π.

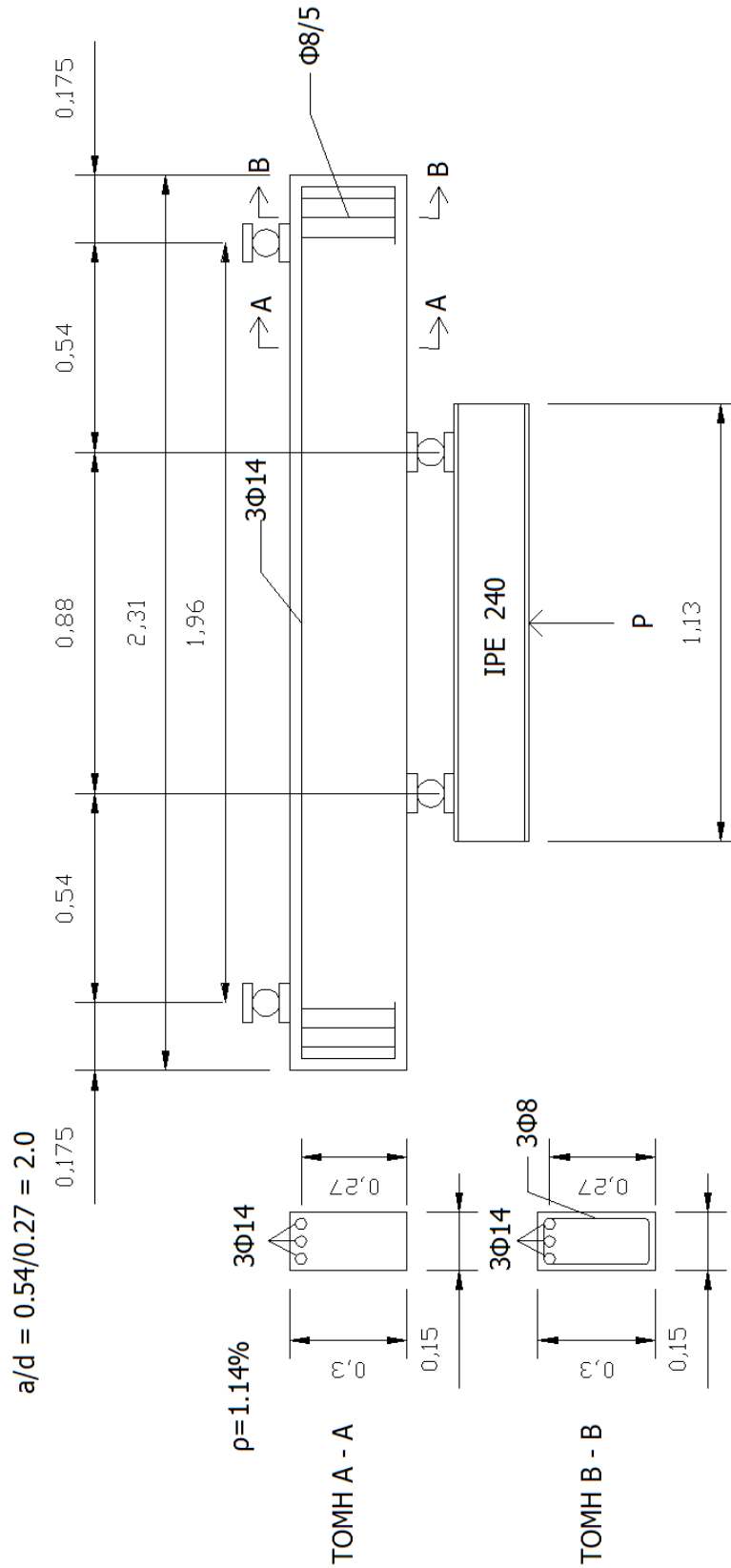
Το εργαστήριο παρέχει πλήρη υποδομή ώστε να γίνεται ασφαλής τοποθέτηση των υπό εξέταση δοκιμίων σε καλά στερεωμένες θέσεις, υλοποιώντας κατά βούληση σε ορισμένα σημεία του φορέα αμετάθετους μηχανισμούς στηρίξεων – κυλίσεων. Παρατίθεται παρακάτω στο Σχήμα 4.1.2 το σχέδιο της πειραματικής διάταξης. Οι στηρίξεις υλοποιούνται με τη βοήθεια κυλινδρικών χαλύβδινων κυλίσεων και ικανού αριθμού μεταλλικών πλακών (Εικόνα 4.1.1) που συγκρατούνται μέσω χαλύβδινων ράβδων (ντίτζες) οι οποίες στερεώνονται επαρκώς σε ισχυρά μεταλλικά πλαίσια διατομών μορφής Η (HEA 320) και τα οποία πακτώνονται στο δάπεδο του Εργαστηρίου. Οι ράβδοι αυτοί βρίσκονται εκατέρωθεν του διαμήκους άξονα του δοκιμίου, στην περιοχή στήριξης, και συγκρατούν τις μεταλλικές πλάκες και τα χαλύβδινα στοιχεία πάνω στα οποία στηρίζεται το δοκίμιο σε προκαθορισμένες θέσεις. Στις χαλύβδινες ράβδους υπάρχουν κοχλίες που με κατάλληλο σφίξιμο, φροντίζουν ώστε να κρατάνε σε επαφή τα στοιχεία υλοποίησης των στηρίξεων με τα δοκίμια στην πάνω επιφάνεια αυτών, καθώς από κάτω ασκεί δύναμη το υδραυλικό έμβολο του Εργαστηρίου.



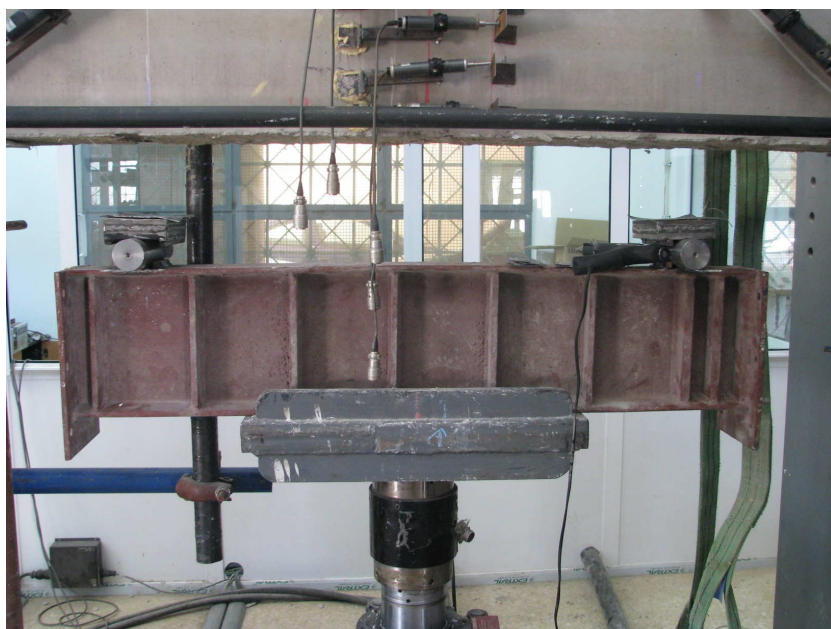
Εικόνα 4.1.1: Στοιχεία υλοποίησης στηρίξεων

Για την υλοποίηση της φόρτισης στα τρίτα της δοκού χρησιμοποιήθηκε σιδηρά δοκός ενισχυμένης διατομής IPE 240, μήκους 1.13 m (Εικόνα 4.1.3), η οποία μεταφέρει το φορτίο του εμβόλου του Εργαστηρίου σε δύο σημεία της δοκού που ισαπέχουν των στηρίξεων, έτσι ώστε να υλοποιηθεί το επιθυμητό διατμητικό μήκος της εξεταζόμενης δοκού. Για όλα τα δοκίμια επιλέχθηκε ένας ενιαίος λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος $a/d =$

2.0, ως ο πιο κρίσιμος για τη διατμητική καταπόνηση. Το στατικό ύψος των δοκών εκτιμήθηκε στα 27 cm, λαμβάνοντας υπόψη το ύψος των σιδηροτύπων, την απαιτούμενη επικάλυψη, τη διατομή των συνδετήρων στα άκρα των δοκιμίων, καθώς και την ακτίνα της ράβδου οπλισμού.



Σχήμα 4.1.2: Σχέδιο πειραματικής διάταξης



Εικόνα 4.1.3: Η σιδηρά δοκός διατομής I240 επί της πρέσας του εργαστηρίου

4.2 Περιγραφή της ενοργάνωσης των δοκιμών:

Η καταγραφή των δεδομένων φορτίου – μετατόπισης στη θέση εφαρμογής του φορτίου γίνεται ψηφιακά σε ηλεκτρονικό καταγραφικό συνδεδεμένο με το έμβολο, με μετρήσεις κατά μικρά χρονικά διαστήματα. Για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων σε επιλεγμένα σημεία της δοκού κατά μήκος και καθ ύψος χρησιμοποιούνται αναλογικά βελόμετρα, των οποίων οι σχετικές μετατοπίσεις (επιμηκύνσεις ή σμικρύνσεις) καταγράφονται επίσης ψηφιακά κατά τα χρονικά διαστήματα από το ίδιο καταγραφικό, ώστε να υπάρχει κοινή χρονική βάση.

Συνολικά τοποθετήθηκαν δέκα βελόμετρα σε κάθε δοκό. Πέντε από αυτά (κανάλια 6,7,8,9,10) (Σχήμα 4.2.2) τοποθετήθηκαν καθ ύψος της διατομής της δοκού στο μέσον του ανοίγματος για την παρακολούθηση των διαμήκων παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος λόγω κάμψης, καθώς και τον προσδιορισμό του ουδέτερου άξονα. Λόγω του τρόπου επιβολής του φορτίου, η περιοχή μέτρησης είναι υπό σταθερή ροπή και μηδενική τέμνουσα. Δύο επαγωγικά βελόμετρα (κανάλια 4,5) τοποθετήθηκαν διαγώνια ένα σε κάθε διατμητικό μήκος με διεύθυνση κάθετα στη διαγώνια ρωγή που αναμενόταν να δημιουργηθεί για την παρακολούθηση των διατμητικών παραμορφώσεων πριν και μετά τη ρηγμάτωση, αλλά και κατά τη διαρροή. Επιπλέον, ένα βελόμετρο τοποθετήθηκε πάνω απ' τη μεσαία διατομή (κανάλι 1) (Σχήμα 4.2.2) για την καταγραφή του βέλους της δοκού σε συνδυασμό με άλλα δύο βελόμετρα (κανάλια 2, 3) (Σχήμα 4.2.2), καθένα από τα οποία τοποθετήθηκε κάτω από κάθε στήριξη. Με αυτό τον τρόπο, το πραγματικό βέλος της δοκού σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται από την

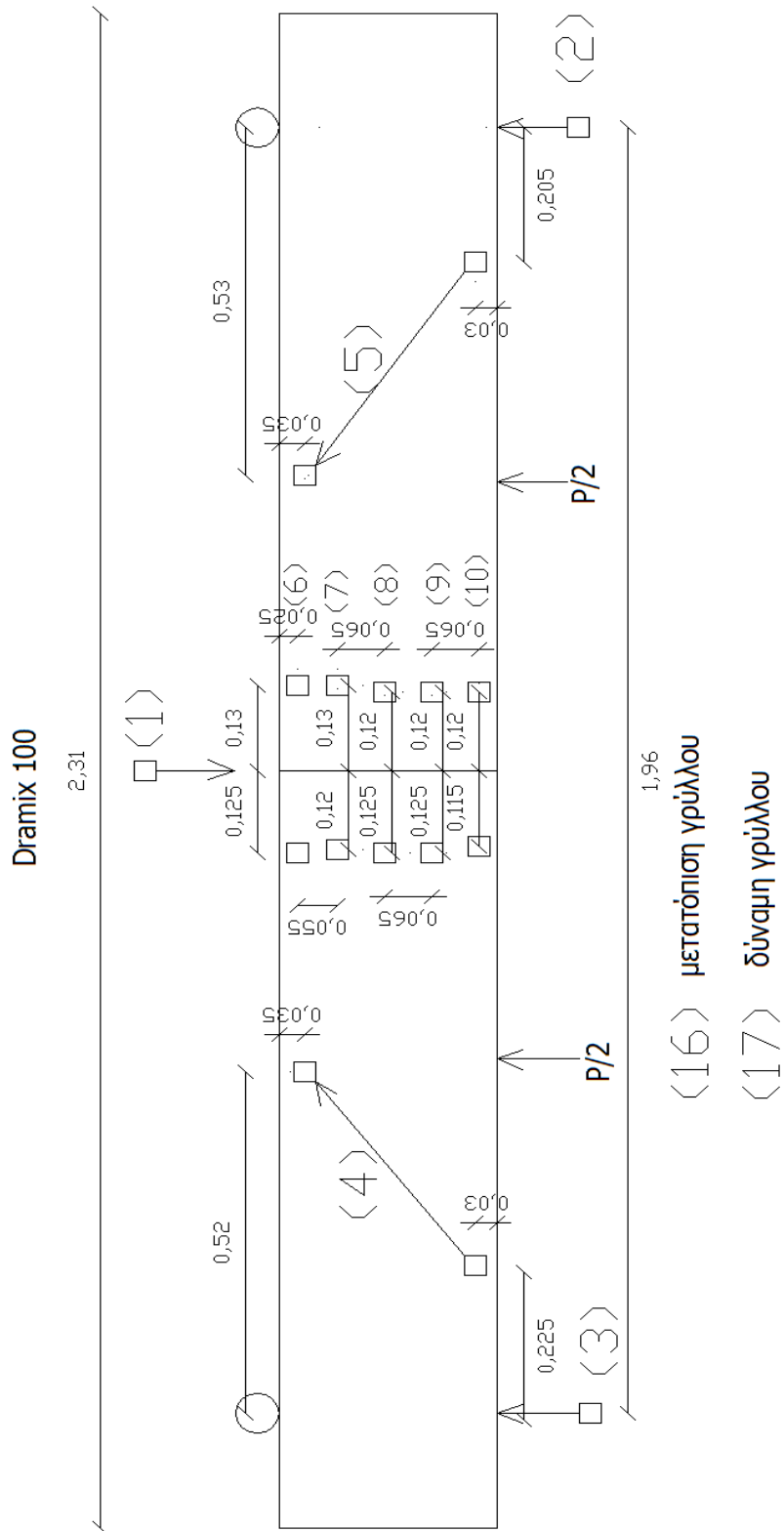
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

ένδειξη του κεντρικού βελομέτρου μείον τον μέσο όρο των ενδείξεων των δύο ακραίων.

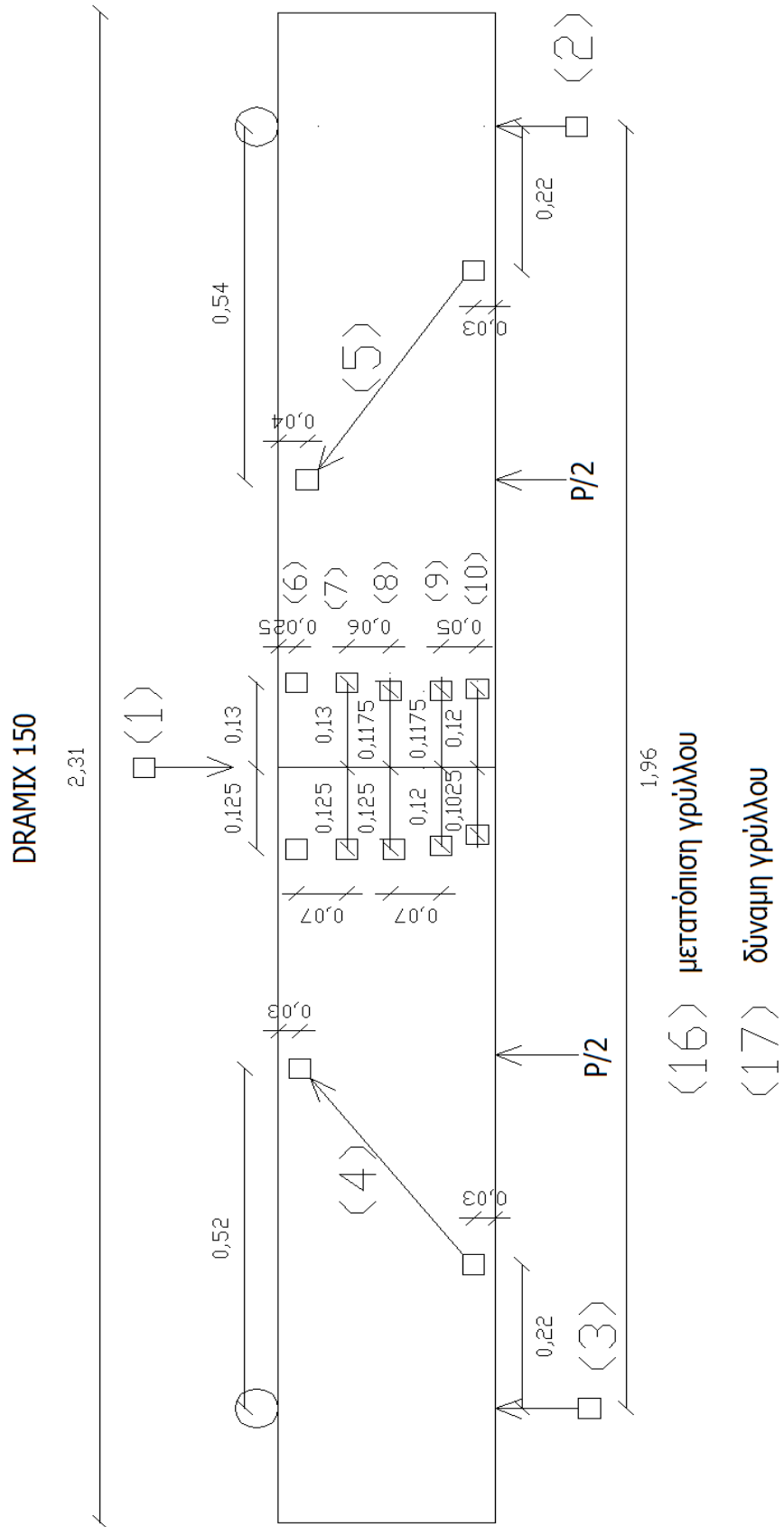
Για όλα τα προαναφερθέντα πραγματοποιήθηκε αναλυτική καταγραφή ανά τακτά χρονικά διαστήματα με ηλεκτρονικό τρόπο σε δέκα κανάλια. Υπήρξαν δύο κανάλια, από τα οποία το ένα κατέγραφε τη μετατόπιση του υδραυλικού εμβόλου (γρύλου MTS) στο κανάλι 16 και το άλλο καταγράφει τη δύναμη του υδραυλικού εμβόλου στο κανάλι 17, που επιβάλλεται στο μέσο της σιδηράς δοκού. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι αναμένεται σημαντική διαφορά ανάμεσα στο σχετικό βέλος της εξεταζόμενης ινοπλισμένης δοκού και του καναλιού 16 (μετατόπιση εμβόλου), λόγω του αναμενόμενου βέλους της σιδηράς δοκού εφαρμογής του φορτίου, καθώς και των εγκαρσίων στηρίξεων. Η πλήρης τυποποίηση για την τοποθέτηση των βελομέτρων πρακτικά δεν είναι εφικτή. Ως εκ τούτου, για κάθε δοκό που εξετάζεται παρουσιάζεται διαφορά ως προς την τοποθέτηση, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αποφυγή λαθών κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στην Εικόνα 4.2.1 βλέπουμε φωτογραφία της πειραματικής διάταξης (συγκεκριμένα του δοκιμίου D100) λίγο πριν την έναρξη του πειράματος. Αναλυτικά ακολουθούν σχέδια για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά και τις ακριβείς θέσεις των βελομέτρων σε αυτές.



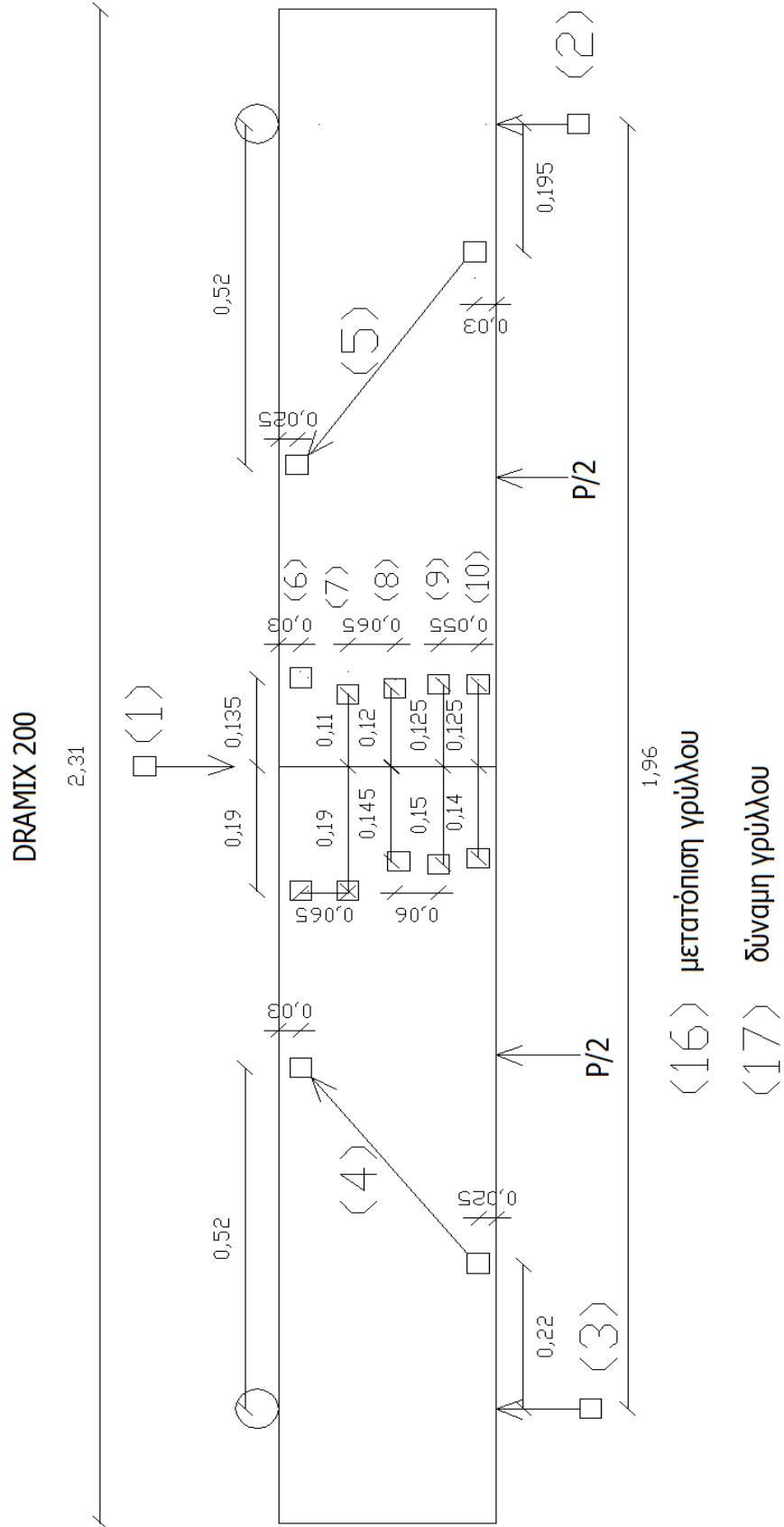
Εικόνα 4.2.1: Εικόνα πειραματικής διάταξης (Δοκίμιο D100)



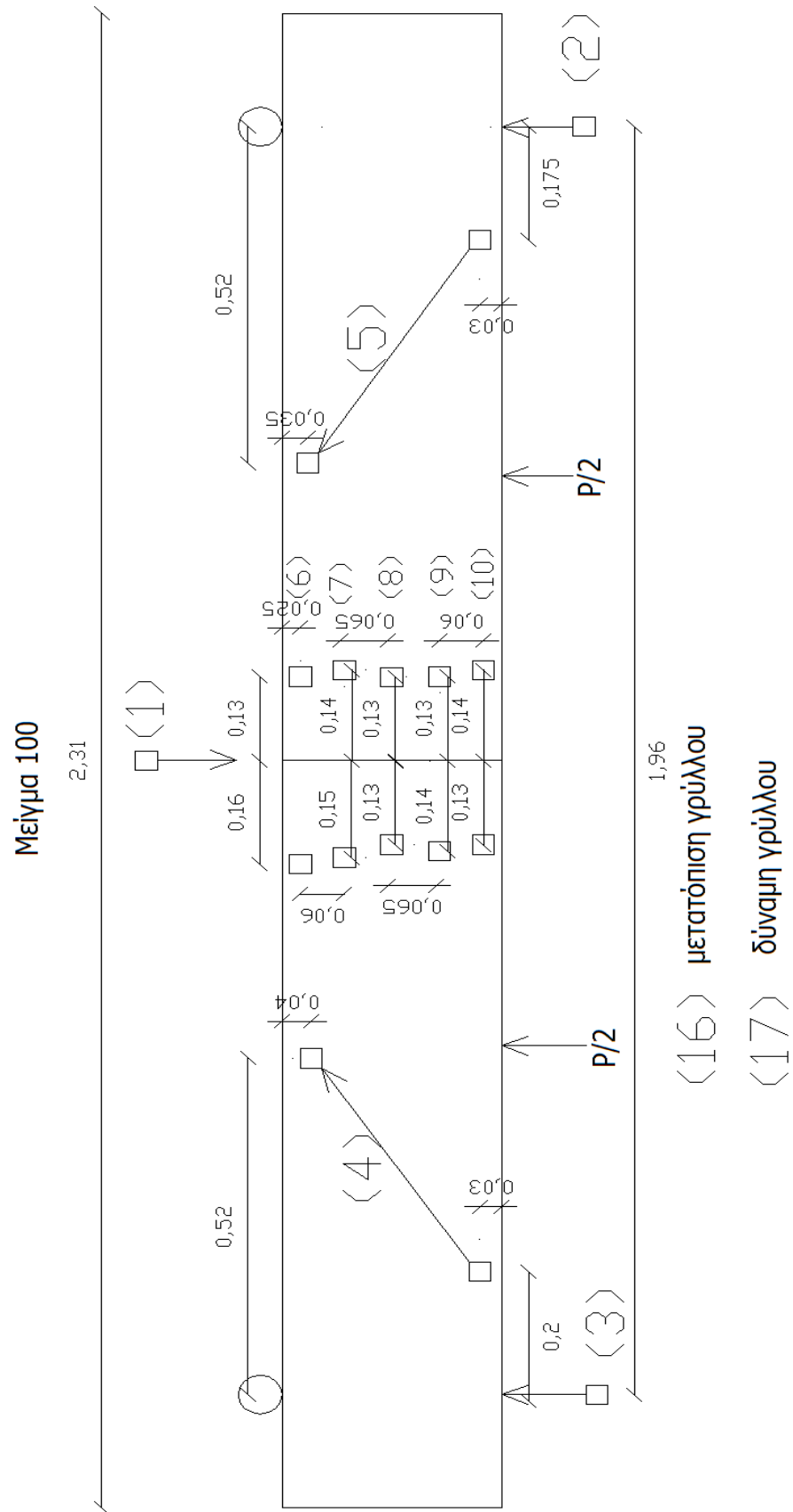
Σχήμα 4.2.2: Διάταξη βελομέτρων για το δοκίμιο D100



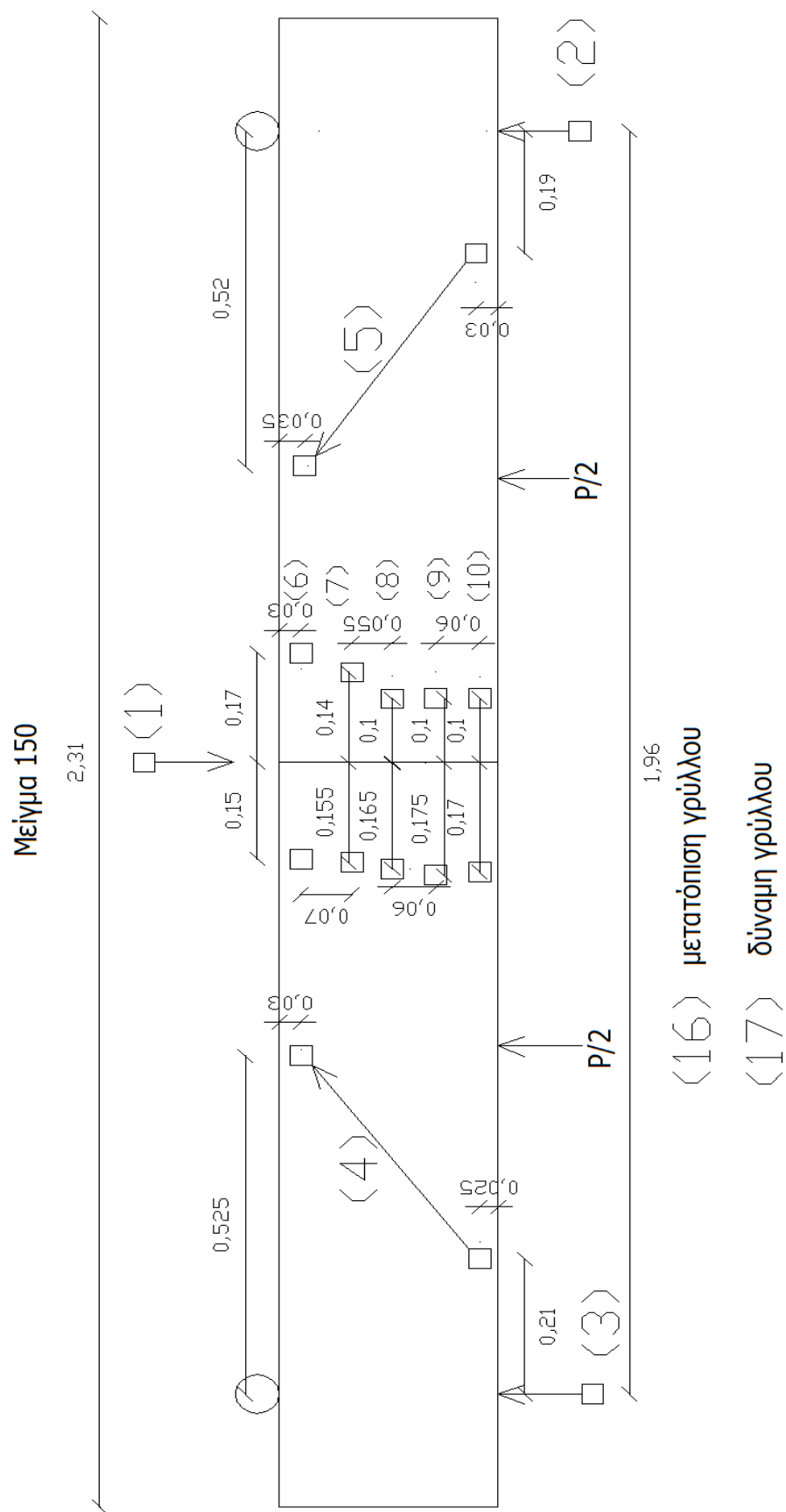
Σχήμα 4.2.3: Διάταξη βελομέτρων για το δοκίμιο D150



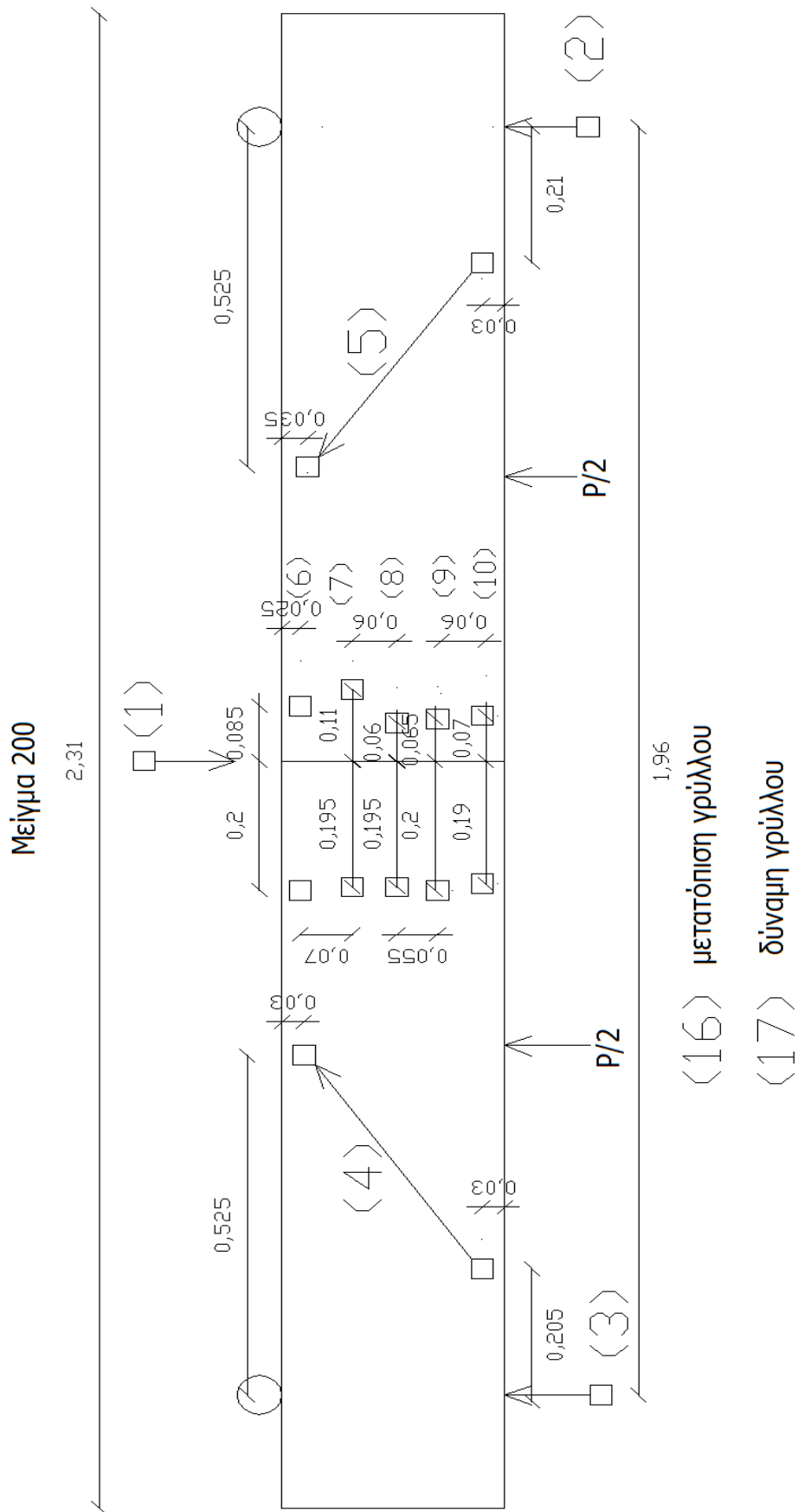
Σχήμα 4.2.4: Διάταξη βελομέτρων για το δοκίμιο D200



Σχήμα 4.2.5: Διάταξη βελομέτρων για το δοκίμιο M100



Σχήμα 4.2.6: Διάταξη βελομέτρων για το δοκίμιο M150



Σχήμα 4.2.7: Διάταξη βελομέτρων για το δοκίμιο M200

Κεφάλαιο 5ο

*Παρουσίαση και ανάλυση των
πειραματικών αποτελεσμάτων*

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων για τα έξι δοκίμια.

Τα έξι δοκίμια χωρίζονται σε δύο ομάδες. Στην πρώτη ομάδα θα μελετηθεί η συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος με την προσθήκη ενός τύπου ίνας συγκεκριμένα της DRAMIX RC65/35BN, με μήκος $L = 35\text{mm}$ και λόγο μορφής (μήκος/διάμετρο, L/D) = 65. Στο κάθε δοκίμιο τίθεται διαφορετική περιεκτικότητα ινών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ποσότητες 100 kg/m^3 , 150 kg/m^3 και 200 kg/m^3 , δηλαδή 1,2%, 1,8% και 2,4% κ.ό. του σκυροδέματος, αντίστοιχα. Επειδή θα γίνεται συνεχής αναφορά, το κάθε δοκίμιο της πρώτης ομάδας θα ονομάζεται D100, D150 και D200 αντίστοιχα (Πίνακας 5.1.1). Στη δεύτερη ομάδα δοκιμών, θα μελετηθεί η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με την προσθήκη μείγματος τριών ειδών ίνας της ΕΤΑΛ σε αναλογία 1:1:2 (της μεγάλης και μη τυποποιημένης με $L = 80\text{ mm}$ και $L/D = 80$ της μεσαίας INOMIX 600 023 με $L = 60\text{ mm}$ και $L/D = 60$ και της μικρής INOMIX 600 002 με $L = 31\text{ mm}$ και $L/D = 40$) στις ίδιες ποσότητες με την πρώτη 100 kg/m^3 , 150 kg/m^3 και 200 kg/m^3 . Οι ονομασίες των δοκιμών της δεύτερης ομάδας θα είναι εν συντομία M100, M150 και M200 (Πίνακας 5.1.1).

Ο λόγος διάτμησης για όλα τα δοκίμια και στις δύο σειρές δοκιμών παραμένει σταθερός και ίσος προς $a/d = 2.0$, δηλαδή τα συμμετρικά φορτία εφαρμόζονται σε δύο σημεία, το καθένα από τα οποία ισαπέχει σε απόσταση 54 cm από την κάθε στήριξη (Σχήμα 4.1.2). Το τμήμα της δοκού από τη στήριξη μέχρι το φορτίο είναι περιοχή σταθερής τέμνουσας και το τμήμα ανάμεσα στα δύο φορτία είναι περιοχή σταθερής ροπής. Για κάθε δοκίμιο θα διερευνηθεί η συμπεριφορά του στις δύο περιοχές, καθώς και ο μηχανισμός της αστοχίας του.

Ονομασία δοκιμίου	Τύπος ινών	Ογκομετρικό ποσοστό ινών (%)	Περιεκτικότητα ινών (kg/m^3)
D100	DRAMIX	1.2	100
D150	DRAMIX	1.8	150
D200	DRAMIX	2.4	200
M100	μείγμα ινών της ΕΤΑΛ	1.2	100
M150	μείγμα ινών της ΕΤΑΛ	1.8	150
M200	μείγμα ινών της ΕΤΑΛ	2.4	200

Πίνακας 5.1.1: Ονοματολογία δοκιμών που ελέγχθηκαν πειραματικά

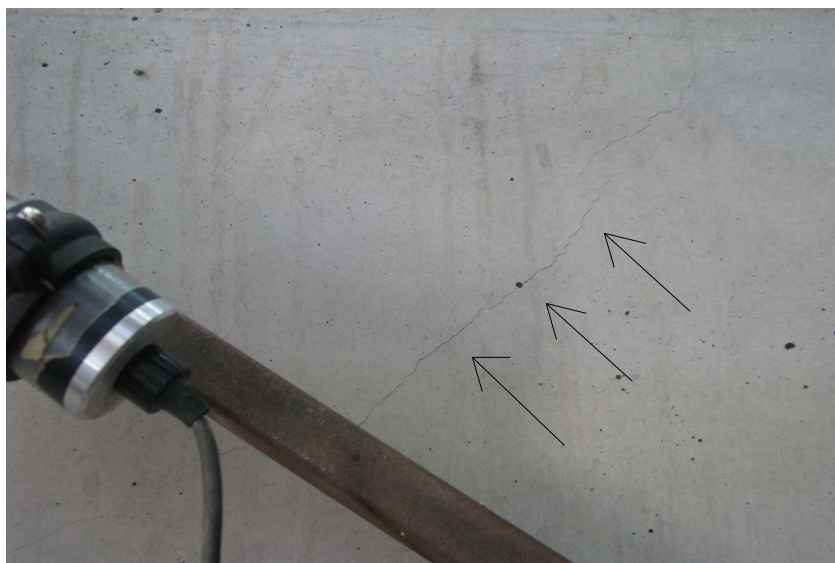
5.2. Δοκίμιο D100

5.2.1 Συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος

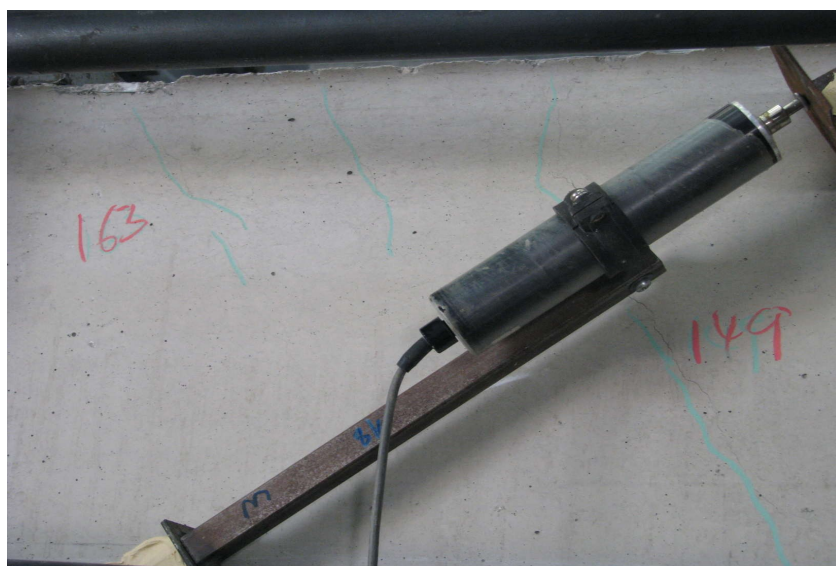
Το δοκίμιο D100 σε χαμηλή στάθμη φορτίου εμφάνισε διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας δύναμης (Εικόνες 5.2.1.1 και 5.2.1.2), οι οποίες δεν άνοιξαν αμέσως, βοηθώντας το δοκίμιο να παραλαμβάνει συνεχώς περισσότερη φέρουσα δύναμη και ενέργεια. Στη μία πλευρά μάλιστα του δοκιμίου (αυτή στην οποία, σημειωτέον, δεν επήλθε η αστοχία) παρατηρήθηκε η ανάπτυξη και άλλων τριχοειδών διατμητικών ρωγμών, πέραν της κύριας (Εικόνα 5.2.1.3).



Εικόνα 5.2.1.1: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής αριστερά

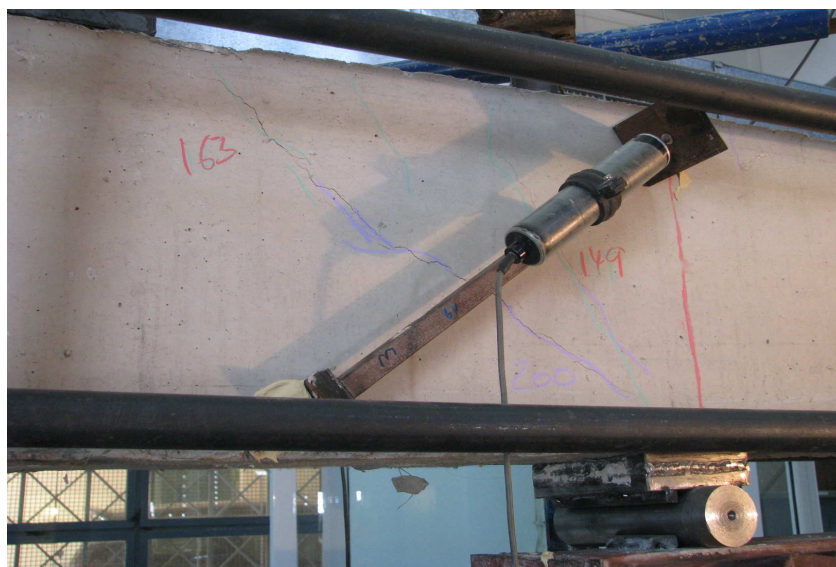


Εικόνα 5.2.1.2: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής δεξιά



Εικόνα 5.2.1.1: Εμφάνιση τριχοειδών ρωγμών στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου

Όσο το φορτίο (όπου φορτίο ονομάζουμε το συνολικό φορτίο P με το οποίο φορτίζουμε τη σιδηρά δοκό, η οποία στηρίζεται σε 2 κυλίνδρους που φορτίζουν το δοκίμιο σε 2 σημεία συμμετρικά) ανεβαίνει, οι ρωγμές ανοίγουν περισσότερο, με τη διαφορά ότι στη μία πλευρά του δοκιμίου είναι πιο διάσπαρτες και πιο μικρού εύρους ενώ στην άλλη παρατηρείται μία διακριτή ρωγμή που διερύνεται συνεχώς (Εικόνες 5.2.1.4 και 5.2.1.5).



Εικόνα 5.2.1.2: Επέκταση διαμητικών ρωγμών στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου



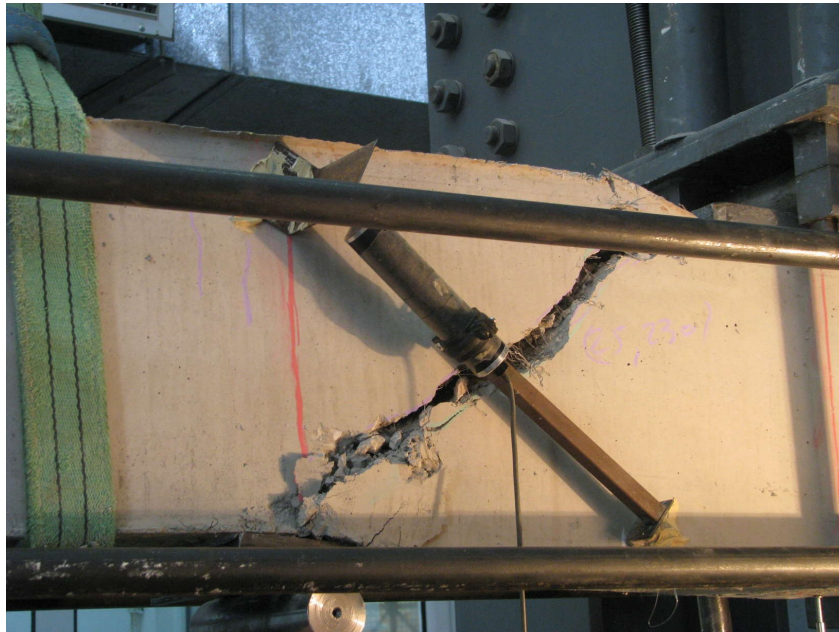
Εικόνα 5.2.1.3: Επέκταση διατμητικής ρωγμής στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου

Στη συνέχεια, εμφανίστηκαν και κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές στην περιοχή σταθερής ροπής, ανάμεσα στα σημεία εφαρμογής του φορτίου στο δοκίμιο (Εικόνα 5.2.1.6), οι οποίες όμως, όπως φαίνεται και στο σχήμα, δεν βρίσκονται εντός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων, οπότε χάθηκε σημαντική πληροφορία για την τοπική καμπύλωση της δοκού.

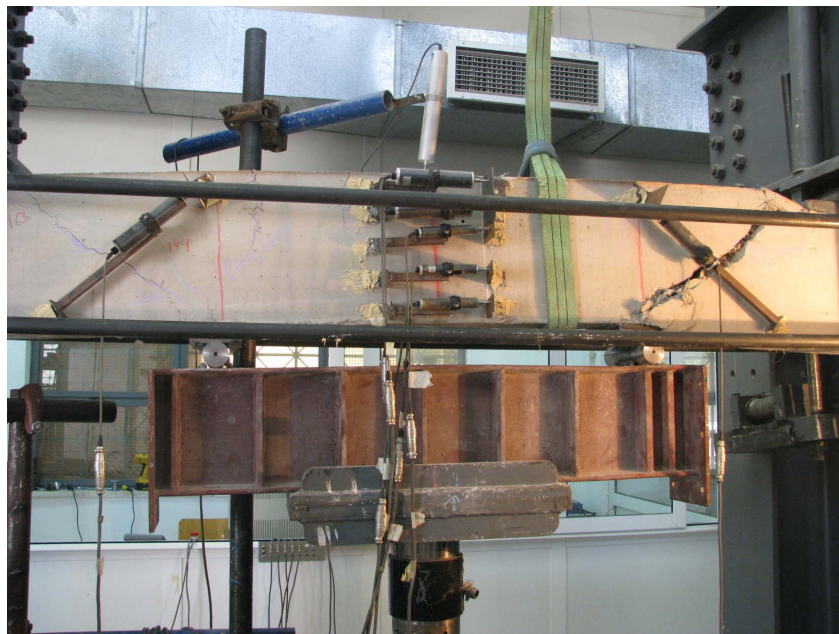


Εικόνα 5.2.1.4: Εμφάνιση καμπτικών ρωγμών στην περιοχή σταθερής ροπής

Σε αυτή τη φάση, η δοκός έχει χάσει ήδη σημαντική από τη φέρουσα ικανότητά της και η διατμητική ρωγμή δεξιά ανοίγει περισσότερο σε πλάτος και σε μήκος, καθώς μπαίνει και στη θλιβόμενη ζώνη κάτω. Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε ότι λυγίζουν τα διαμήκη σίδερα (Εικόνα 5.2.1.7), ενώ πλέον η ρωγμή επεκτείνεται οριζόντια κατά μήκος του εφελκυόμενου οπλισμού προς τη στήριξη (απώλεια συνάφειας). Στο σημείο αυτό, οι ίνες είναι καθοριστικές στην τήρηση της επικάλυψης στη θέση της. Η γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία φαίνεται στην Εικόνα 5.2.1.8.



Εικόνα 5.2.1.5: Εικόνα διαμητικής ρωγμής που προκάλεσε την αστοχία

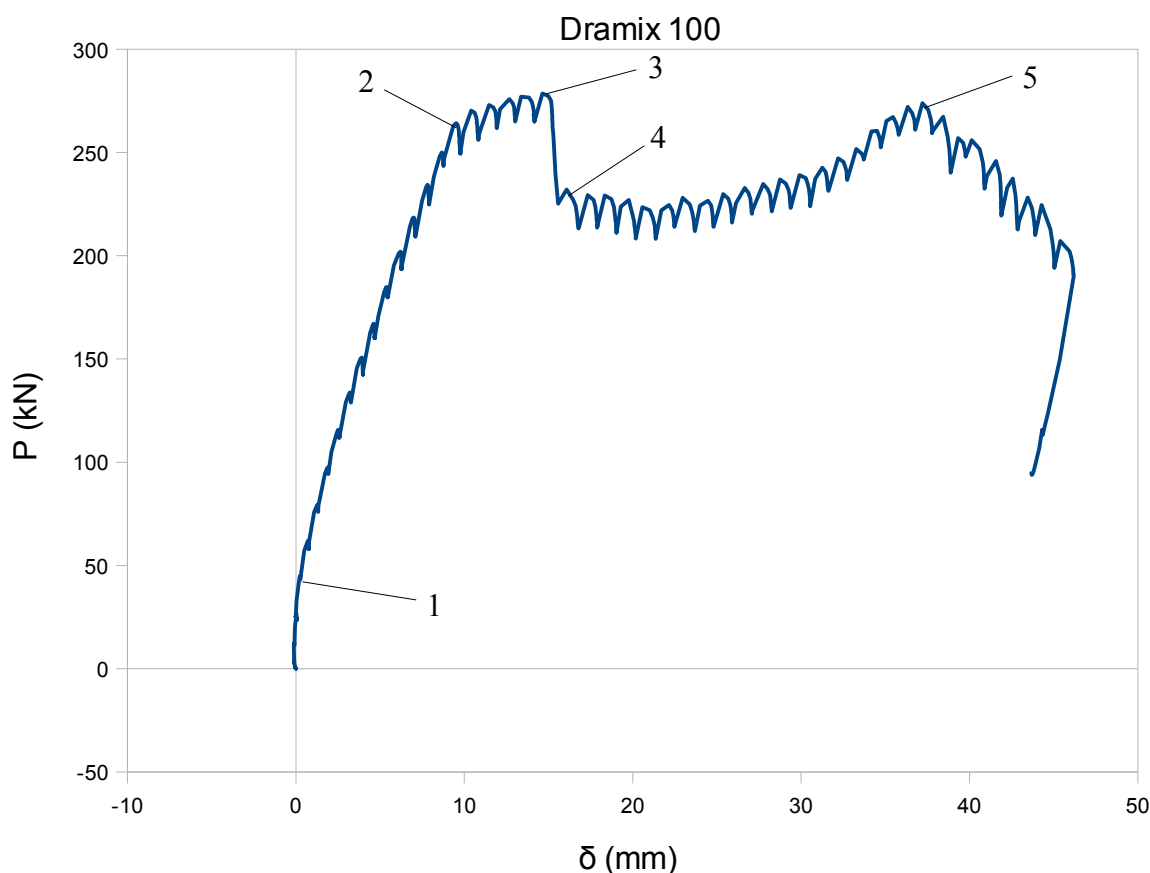


Εικόνα 5.2.1.6: Γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία

5.2.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των καταγραφών του πειράματος

- Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης $P - \delta$:

Η τιμή του φορτίου και των λοιπών καταγραφών παραμόρφωσης και μετατόπισης καταγράφονται συνεχώς ταυτόχρονα. Η τιμή του καμπτικού βέλους της δοκού για κάθε στιγμή θα δίνεται αν από την τιμή του κατακόρυφου βελομέτρου που βρίσκεται στο μέσον (κανάλι 1) αφαιρέσουμε τη μέση τιμή των καταγραφών των βελομέτρων που βρίσκονται κάτω από τις στηρίξεις (κανάλια 2 και 3). Έτσι, προκύπτει η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης $P - \delta$ (Σχήμα 5.2.2.1)



Σχήμα 5.2.2.1: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης του δοκιμίου D100

	P (kN)	δ (mm)
Σημείο 1	43.1	0.264
Σημείο 2	264.18	9.521
Σημείο 3	278.56	13.845
Σημείο 4	229.4	17.324
Σημείο 5	273.86	37.198

Πίνακας 5.2.2.1: Φορτίο και παραμόρφωση στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης το δοκίμιο, αν και αστόχησε διατμητικά, παρουσίασε μια πλάστιμη συμπεριφορά με αρχική απώλεια της φέρουσας ικανότητας και κατόπιν κράτυνση στα αρχικά επίπεδα αντοχής. Η ρηγμάτωση του δοκιμίου φαίνεται να πραγματοποιείται όντως σε χαμηλή στάθμη φορτίου ($P_{cr} = 43.1$ kN), όπου και αλλάζει η κλίση του διαγράμματος (σημείο 1). Το δοκίμιο φαίνεται να διαρρέει σε στάθμη φορτίου 264.2 kN με παραμόρφωση 9.52 mm (σημείο 2), στη συνέχεια αυξάνει η αντοχή του με μικρότερη κλίση έως 278.6 kN με παραμόρφωση 13.85 mm και κατόπιν χάνει ένα ποσοστό της αντοχής του (18.1%) συνεχίζοντας να παραμορφώνεται (σημείο 4). Το δοκίμιο παρουσιάζει κράτυνση και επανάκτηση της αντοχής του (273.9 kN) σε παραμόρφωση 37.2 mm μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας στα 44 mm (σημείο 5). Η τιμή της πλαστιμότητας για αυτό το δοκίμιο είναι ίση με $q_d = 44/9.52 = 4.62$. Οι ακαμψίες του δοκιμίου για τις τρεις αρχικές κλίσεις του διαγράμματος υπολογίζονται παρακάτω:

Αρηγμάτωτος κλάδος: $K_{gr} = P_1/\delta_1 = 163.26$ kN/mm

Ρηγματωμένος κλάδος: $K_y = (P_2 - P_1)/(\delta_2 - \delta_1) = 23.88$ kN/mm

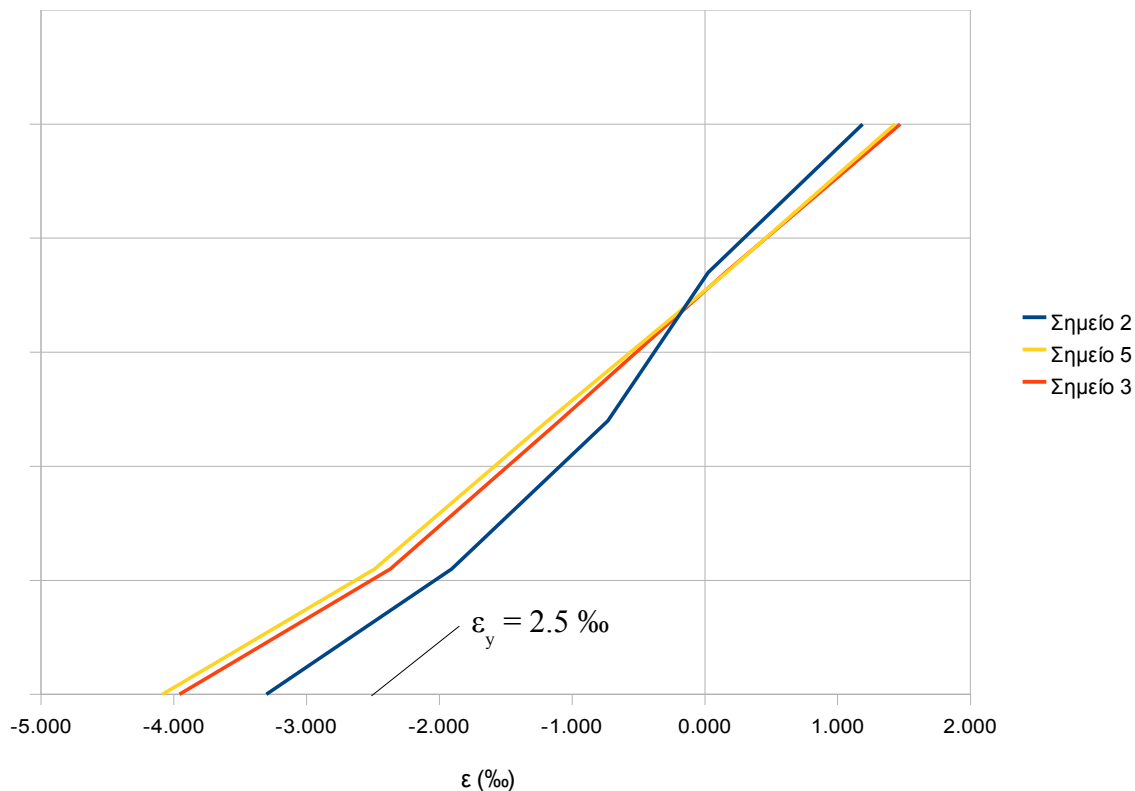
Κλάδος κράτυνσης: $K_h = (P_3 - P_2)/(\delta_3 - \delta_2) = 3.33$ kN/mm

Η μέγιστη συνολική δύναμη που έφτασε το έμβολο είναι ίση με $P_{max} = 278.6$ kN. Εφόσον το δοκίμιο αστόχησε διατμητικά μπορούμε να πούμε ότι η οριακή διατμητική του αντοχή είναι ίση με $P_{max}/2 = 139.28$ kN. Εφόσον η κατηγορία του άοπλου σκυροδέματος (βάσει μελέτης σύνθεσης) είναι αντοχής C25/30, μία αντίστοιχη δοκός από το ίδιο σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη ίνας και χωρίς διατμητικό οπλισμό θα είχε διατμητική αντοχή ίση με

$$V_c = 2 * f_{ctm} * b_w * d/3,$$

όπου $f_{ctm} = 2600$ kPa για σκυρόδεμα με χαρακτηριστική αντοχή $f_{ck} = 25$ MPa, $b_w = 0.15$ m και $d = 0.27$ m για τις δοκούς του πειράματος. Άρα, η διατμητική αντοχή του άοπλου δοκιμίου θα είναι 70.2 kN, δηλαδή παρατηρούμε αύξηση της τάξης του 98.4 % στη διατμητική αντοχή του δοκιμίου D100, καθώς και μία πλάστιμη διατμητική συμπεριφορά, σε αντίθεση με την ψαθυρή αστοχία του συμβατικού δοκιμίου.

Αξίζει να παρατηρηθεί λόγω της διάταξης των βελομέτρων στη μεσαία διατομή, η συμπεριφορά της μεσαίας διατομής σε κρίσιμα σημεία της καμπύλης P - δ. Στο σημείο 1 δεν είναι δυνατή η απεικόνιση αυτή, καθώς τα σημεία είναι πολύ χαμηλή η στάθμη του φορτίου και δε δίνει ικανές παραμορφώσεις για καλύτερη ευκρίνεια. Για όλα τα υπόλοιπα σημεία ακολουθούν τα διαγράμματα παραμορφώσεων στη μεσαία διατομή (Σχήμα 5.2.2.2).



Σχήμα 5.2.2.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ ύψος της διατομής για τα σημεία του διαγράμματος 2,3 και 5

Το διάγραμμα παραμορφώσεων για το σημείο 4 του διαγράμματος έχει ακριβώς τις ίδιες τιμές με του σημείου 3, το οποίο είναι και λογικό καθώς τα σημεία βρίσκονται πολύ κοντά στο διάγραμμα, οπότε δεν απεικονίζεται για καλύτερη ευκρίνεια. Να σημειωθεί ότι με θετικό πρόσημο απεικονίζεται η θλίψη στο παραπάνω διάγραμμα. Αναλυτικά, παρατίθενται στον Πίνακα 5.2.2.1 τα κρίσιμα σημεία της καμπύλης όπως επιλέχθηκαν το φορτίο και η παραμόρφωση για το κάθε σημείο.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα παραμορφώσεων της μεσαίας διατομής για τα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος P – δ, η παραδοχή Bernoulli – Euler για την επιπεδότητα της διατομής σε κάθε χρονική στιγμή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης, παρατηρείται πως από τη στιγμή της διαρροής του δοκιμίου (σημείο 2) αυξάνεται η καμπυλότητα λόγω της κράτυνσης φτάνοντας στο μέγιστο φορτίο (σημείο 3), ενώ μετά διατηρείται σχετικά σταθερή η μέση καμπυλότητά της, παρόλο που το φορτίο πέφτει ενδιάμεσα (σημείο 4) και μετά αυξάνεται πάλι (σημείο 5) μέχρι την αστοχία.

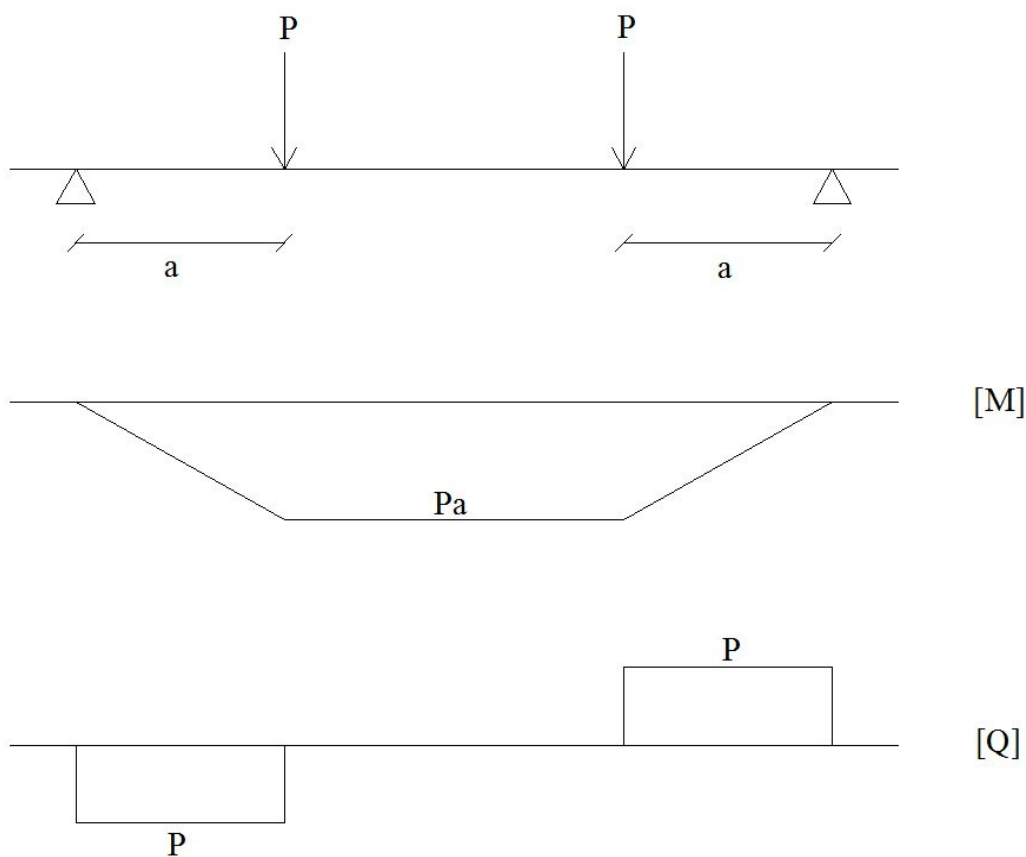
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αξίζει να σημειωθεί η καμπτική συμπεριφορά της δοκού, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα παραμορφώσεων. Μία πρώτη παρατήρηση είναι πως ο ουδέτερος άξονας της δοκού σε όλα τα σημεία που φαίνονται στο σχήμα είναι περίπου στο ύψος του δεύτερου βελομέτρου μετρώντας από τη θλιβόμενη ίνα. Από την Σχήμα 4.2.2, βλέπουμε ότι το βελόμετρο αυτό (κανάλι 9) βρίσκεται σε απόσταση 9 cm από τη θλιβόμενη ακραία ίνα της διατομής. Οπότε μπορούμε να εξάγουμε συμπέρασμα για το πάχος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής, ότι είναι 9 cm. Ένα άλλο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει, είναι από το βελόμετρο που βρίσκεται στην άκρη της εφελκυόμενης περιοχής, δηλαδή περίπου στο ύψος του χάλυβα οπλισμού (2.5 cm από την ακραία ίνα), παρόλο που το δοκίμιο αστοχεί σε διάτμηση, ο διαμήκης χάλυβας έχει διαρρεύσει μετά τη διαρροή του δοκιμίου (σημείο 2). Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι οι παραμορφώσεις του “κάτω” βελομέτρου όπως φαίνεται στην Σχήμα 5.2.2.2 είναι ίσες προς 4% μεγαλύτερες από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα S500 ($\epsilon_y = 2.5\%$). Το τελευταίο συμπέρασμα, βέβαια, είναι ορατό και από τις φωτογραφίες της δοκού κατά τη διάρκεια του πειράματος και τις κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές που έχουν εμφανιστεί εντός της περιοχής σταθερής ροπής της δοκού. Βέβαια, η ανηγμένη παραμόρφωση του χάλυβα αλλάζει επάνω από τις ρωγμές.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Καμπύλη ροπών – καμπυλοτήτων $M - \varphi$:

Από τις συνεχείς μετρήσεις του φορτίου P μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος να εξάγουμε μία τιμή της ροπής M στο μέσον, καθώς όπως προκύπτει από το διάγραμμα ροπών της αμφιέρειστης δοκού που φορτίζεται σε ίσες αποστάσεις a από στηρίξεις (Σχήμα 5.2.2.3) η ροπή στο μέσον ισούται με το γινόμενο της δύναμης P επί το διατμητικό μήκος a , που είναι ίσο με 54 cm για το πείραμα που διεξάγεται.



Σχήμα 5.2.2.3: Διαγράμματα ροπών και τεμνουσών για τη φόρτιση της πειραματικής διάταξης

Για τις τιμές της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής, εφόσον έχει ήδη αποδειχθεί παραπάνω ότι η κατανομή των παραμορφώσεων της διατομής δεν απέχει πολύ από την ευθεία για διάφορες χρονικές στιγμές (παραδοχή Bernoulli – Euler), αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των παραμορφώσεων των δύο ακραίων βελομέτρων καθ ύψος. Το άθροισμα των απόλυτων τιμών των παραμορφώσεων αυτών διαιρούμενο με την υψομετρική τους απόσταση H δίνει τη μέση τιμή της κλίσης του διαγράμματος για κάθε χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς αρχικές αποστάσεις βελομέτρων για το δοκίμιο όπως δίνονται στο κεφάλαιο της πειραματικής διάταξης (Σχήμα 4.2.2).

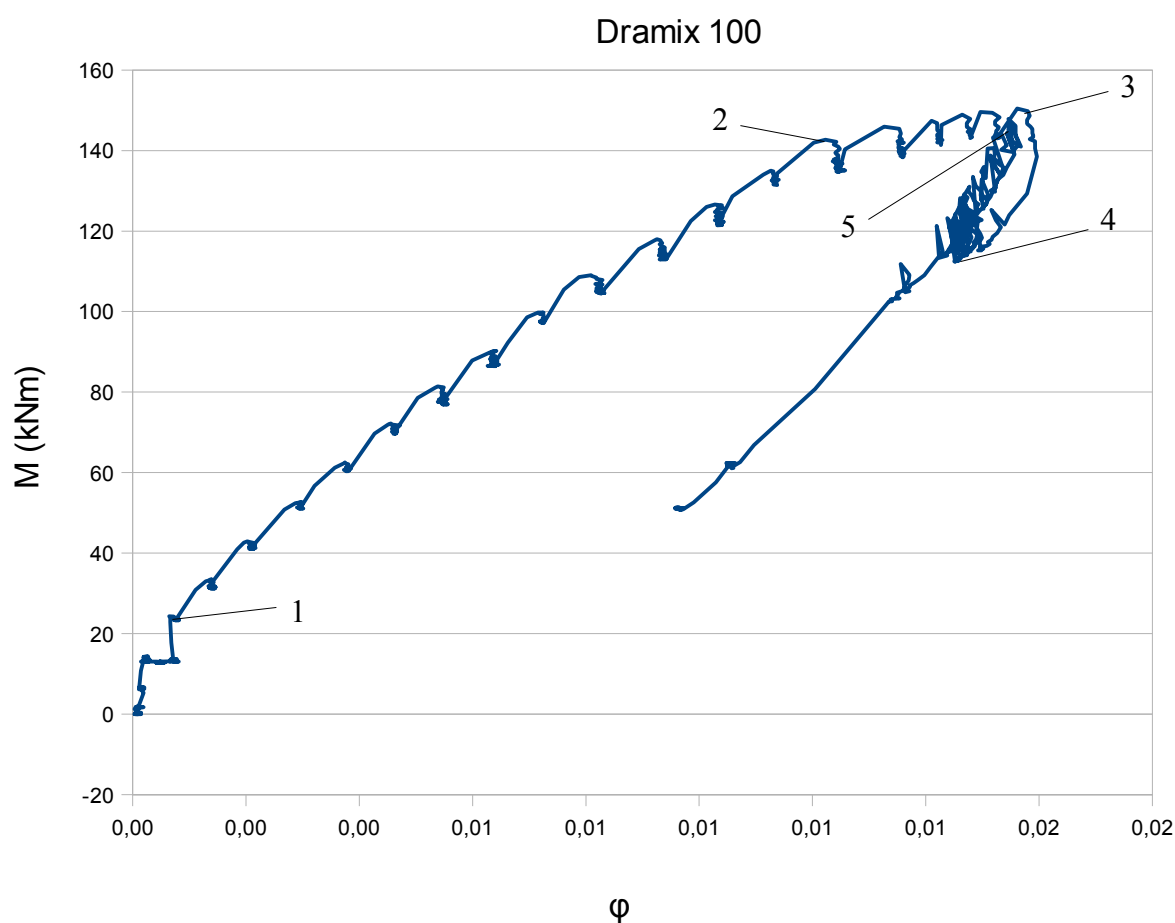
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αναλυτικά, η μέση καμπυλότητα της μεσαίας διατομής υπολογίστηκε ως:

$$\varphi = \frac{(|\varepsilon(6)| + |\varepsilon(10)|)}{H}$$

όπου $\varepsilon(6)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου πάνω βελομέτρου όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη, $\varepsilon(10)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου κάτω βελομέτρου και H η υψομετρική απόσταση των δύο βελομέτρων, που για το δοκίμιο D100 είναι 250 mm (Σχήμα 4.2.2).

Υπολογίζοντας τις τιμές της ροπής και της καμπυλότητας για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει η καμπύλη $M - \varphi$ (Σχήμα 5.2.2.4):



Σχήμα 5.2.2.4: Καμπύλη ροπών - καμπυλοτήτων του δοκιμίου D100

Όπως και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, έτσι και στην καμπύλη ροπών καμπυλοτήτων, βλέπουμε κατά αντιστοιχία τα καθοριστικά σημεία 1,2,3,4 και 5. Φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα, η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η πτώση της αντοχής (4) και η κράτυνση του δοκιμίου (5) λίγο πριν την αστοχία.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από αυτό το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά πως μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου (σημείο 3), η τιμή της καμπυλότητας δε μεταβάλλεται σημαντικά παρά μόνο όταν το δοκίμιο αστοχεί. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 5.2.2.2, όπου η κλίση του διαγράμματος παραμορφώσεων για τα σημεία 3 και 5 φαίνεται να είναι περίπου η ίδια. Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από την καμπύλη $M - \varphi$ είναι μια προσέγγιση της ροπής αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής, εφόσον το μέτρο ελαστικότητας E_c του συγκεκριμένου δοκιμίου έχει εκτιμηθεί από τα αποτελέσματα του κυλινδρικού δοκιμίου ίση με 30.97 GPa (Κεφάλαιο 3.2). Είναι γνωστό πως η κλίση του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων μετά τη ρηγμάτωση, είναι ίση με το γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας E_c επί τη ροπή αδράνειας της διατομής I_{cr} . Στο διάγραμμα μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία το κομμάτι της καμπύλης μεταξύ των σημείων 1 και 2 (μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή). Στον Πίνακα 5.2.2.2 δίνονται οι τιμές ροπής και καμπυλότητας για κάθε ένα από τα 5 σημεία:

	M (kNm)	φ (1/m)
Σημείο 1	23.274	0.00075
Σημείο 2	142.657	0.01223
Σημείο 3	149.386	0.01518
Σημείο 4	123.876	0.01484
Σημείο 5	147.884	0.01546

Πίνακας 5.2.2.2: Ροπή και καμπυλότητα στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Η κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων 1 και 2 είναι ίση με $(142.657-23.274)/(0.01223-0.00075) = 10399.216 \text{ kNm}^2 = E_c I_{cr}$. Άρα, η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής προκύπτει ίση με $I_{cr} = 10399.216/30970000 = 3.3578 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 = 33578 \text{ cm}^4$. Η ροπή αδράνειας της αρηγμάτωτης διατομής του δοκιμίου (Κωτσοβός, 2000) είναι ίση με

$$I_g = bh^3/12 + bh(x-h/2)^2 + \alpha_e A_s (d-x)^2,$$

όπου x προκύπτει από τη σχέση:

$$A_c(x-h/2) = \alpha_e A_s (d-x)$$

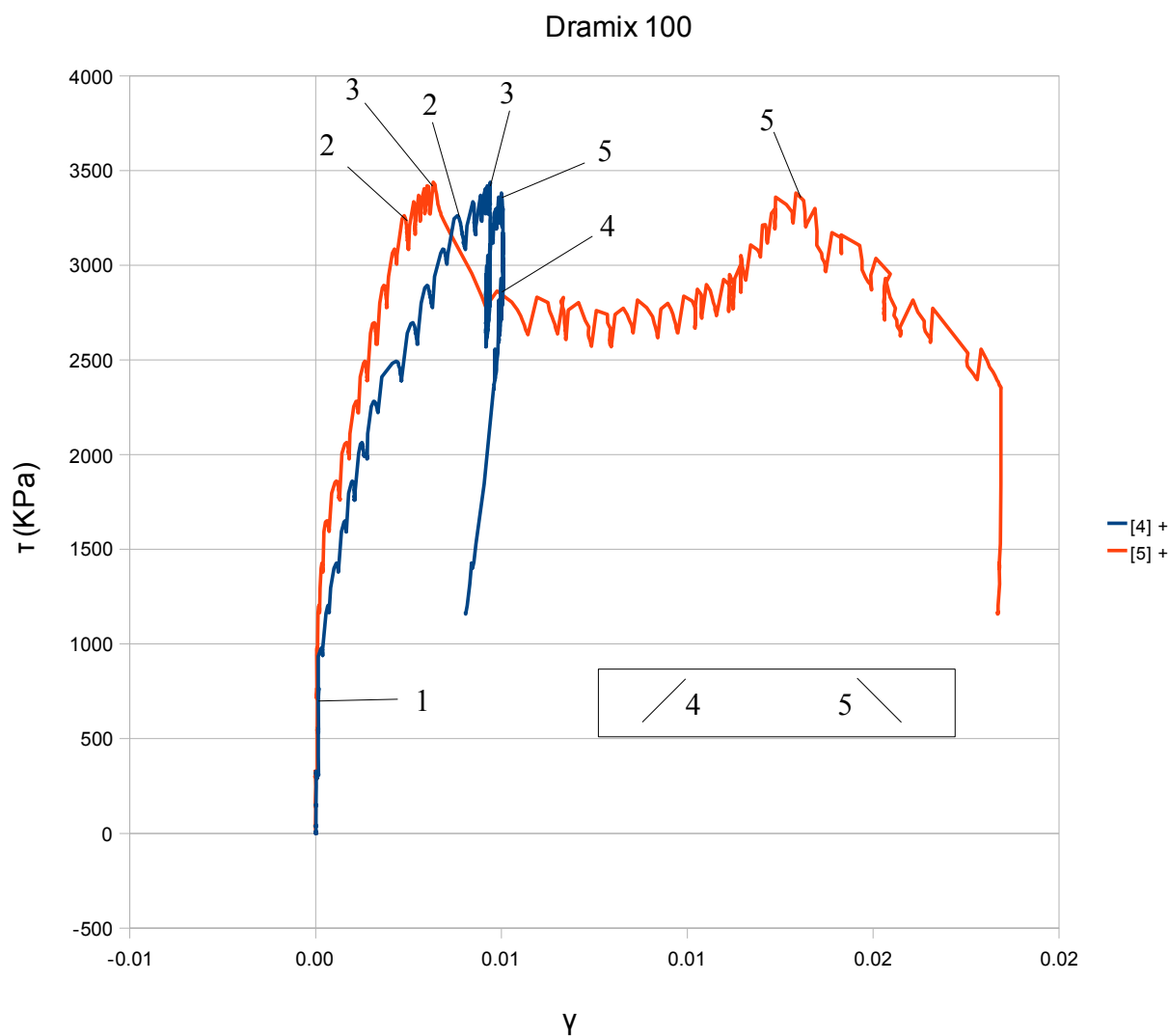
και $\alpha_e = E_s/E_c$, με E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 200 GPa και E_c το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος ίσο με 30.97 GPa για το δοκίμιο D100.

Από τους υπολογισμούς προκύπτει $I_g = 37776 \text{ cm}^4$. Εκτιμάται, δηλαδή ότι η ροπή αδρανείας του ινοπλισμένου σκυροδέματος D100 δε μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη ρηγμάτωση, καθώς μειώνεται κατά 11.1 % μόλις, ενώ στο συμβατικό σκυρόδεμα παρατηρούμε μία μείωση της τάξης του 50 %.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης $\tau - \gamma$:

Για το δοκίμιο D100 και τον έλεγχο της διατμητικής συμπεριφοράς αυτού στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας (βλ. Σχήμα 5.2.2.3) τοποθετήθηκαν δύο αναλογικά βελομέτρα σε γωνία 45° κάθετα στις αναμενόμενες διατμητικές ρωγμές (κανάλια 4 και 5). Από τη συνεχή καταγραφή του φορτίου μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή να εξάγουμε τη διατμητική τάση που ασκείται σε κάθε μία από τις δύο περιοχές $\tau = V/bd$, όπου $V = P/2$, b το πλάτος της δοκού που είναι 15 cm και d το στατικό ύψος της δοκού ίσο με 27 cm. Για την τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετατοπίσεις των διατμητικών βελομέτρων διαιρούμενες με τη αρχική απόσταση της διαγωνίου του κάθε βελομέτρου, όπως απεικονίζεται στην πειραματική διάταξη (Σχήμα 4.2.2). Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα $\tau - \gamma$ και για τις δύο διαγώνιες ρωγμές, όπως φαίνεται στην Σχήμα 5.2.2.5:



Σχήμα 5.2.2.5: Καμπύλη διατμητικής τάσης - γωνιακής παραμόρφωσης για το δοκίμιο D100

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην Σχήμα 5.2.2.5 φαίνεται η καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης και για τις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας του δοκιμίου. Από το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά, πως η ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία είναι η ρωγμή δεξιά, όπως βλέπουμε το δοκίμιο στην πειραματική διάταξη (κανάλι 5), καθώς οδήγησε σε πολύ μεγαλύτερες γωνιακές παραμορφώσεις. Αυτό έχει ήδη γίνει φανερό και από τις φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπου η δεξιά ρωγμή είναι αυτή η οποία μετά από μία στάθμη φορτίου ανοίγει σταδιακά και προκαλεί την αστοχία του δοκιμίου. Τα κρίσιμα σημεία, όπως έχουν οριστεί και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης φαίνονται στο διάγραμμα $\tau - \gamma$.

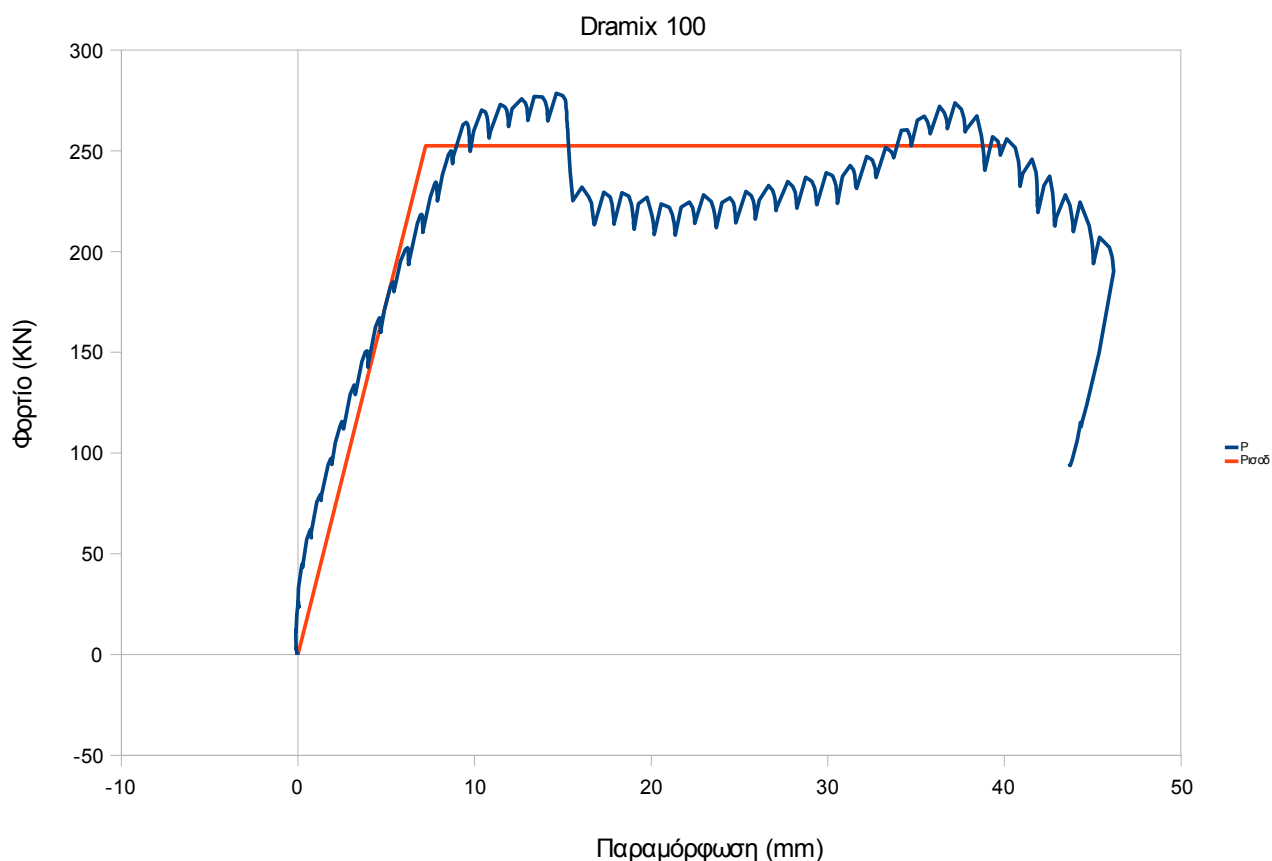
Αυτό που αξίζει να εξεταστεί στις δύο παραπάνω καμπύλες είναι οι κλίσεις αυτών, και η σύγκριση μεταξύ τους. Παρατηρούμε, πως όσο οι δύο διατομές είναι αρηγμάτωτες (αρχική κλίση των δύο καμπυλών) έχουν την ίδια κλίση, από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου σκυροδέματος G_{gr} . Μετά τη ρηγμάτωση, παρατηρείται διαφορετική κλίση της κάθε καμπύλης, το οποίο οφείλεται στη διαφορετική μορφή ρηγμάτωσης των δύο περιοχών όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στην αριστερή περιοχή (κανάλι 4) παρατηρείται μία κύρια ρωγμή, η οποία όμως συνοδεύεται από διάσπαρτες ρωγμές (Εικόνα 5.2.1.3), μερικές από τις οποίες δεν τις καλύπτει η καταγραφή του βελομέτρου. Από την άλλη πλευρά του δοκιμίου παρατηρείται μία μόνο κύρια ρωγμή, η οποία σταδιακά “ανοίγει” μέχρι που προκαλεί τη διατμητική αστοχία της δοκού. Η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{max} του δοκιμίου D100 είναι ίση με $3419.4 \text{ kPa} = 3.42 \text{ MPa}$

Το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου ινοπλισμένου σκυροδέματος υπολογίζεται από το σημείο 1 της καμπύλης και ισούται με το πηλίκο της διατμητικής τάσης τ προς τη γωνιακή παραμόρφωση γ . Για το δοκίμιο D100, το σημείο 1 έχει διατμητική τάση ίση με 706.05 kPa και γωνιακή παραμόρφωση γ (λήφθηκε η μέση τιμή των δύο τιμών των δύο καναλιών) ίση με 0.000061 . Οπότε το μέτρο διάτμησης εκτιμάται ίσο με $G_{gr} = 706.05 / 0.000061 = 11574590.16 \text{ KPa} = 11.575 \text{ GPa}$. Από αυτή την τιμή και τη σχέση $G = E/2(1+\nu)$ μπορούμε να πάρουμε μία ακόμα εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του δοκιμίου. Θεωρώντας το $\nu = 0.2$ (τιμή αποδεκτή για το οπλισμένο σκυρόδεμα), προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου ίσο με 27.8 GPa , τιμή όχι μακριά από την τιμή που προέκυψε από τη δοκιμή θλίψης ($E = 30.97 \text{ GPa}$).

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Υπολογισμός ισοδύναμης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Το δοκίμιο D100 συμπεριφέρθηκε πλάστιμα κατά την αστοχία, παρόλο που αστόχησε διατμητικά χάνοντας προσωρινά σημαντικό μέρος της αντοχής, αλλά επανακτώντας το λίγο πριν την αστοχία. Για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του υλικού σε πλαστιμότητα, χρήσιμο είναι να καθοριστεί το ισοδύναμο διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης, που αντιστοιχεί σε μία τιμή φορτίου $P_{ισοδ}$, που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη διαρροή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Για την κατασκευή του διαγράμματος, υπολογίστηκε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης και βρέθηκε ίσο με 9182 kNmm. Αυτό το εμβαδόν είναι και ένας δείκτης της απορρόφησης ενέργειας του υλικού. Το ιδεατό ελαστοπλαστικό διάγραμμα κατασκευάζεται έτσι ώστε να έχει αυτό το εμβαδόν και ο ελαστικός κλάδος του να διέρχεται από το σημείο $0.6P_{max} = 170.89$ kN, για το δοκίμιο D100. Ως αστοχία θεωρήθηκε η στιγμή που το δοκίμιο έχασε περίπου το 15 % της αντοχής του οριστικά. Έτσι προκύπτει το διάγραμμα:



Σχήμα 5.2.2.6: Προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου D100 με ελαστοπλαστική

Η αντοχή διαρροής που προέκυψε για το ελαστοπλαστικό διάγραμμα είναι $P_{ισοδ} = 252.5$ kN. Η ισοδύναμη παραμόρφωση διαρροής είναι $\epsilon_y = 7.23$ mm και η παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u = 40$ mm. Άρα, προκύπτει μια ισοδύναμη πλαστιμότητα ίση με $\mu_{ισοδ} = 40/7.23 = 5.53$. Ο βαθμός αξιοπιστίας του υλικού δίνεται από την τιμή $P_{ισοδ}/P_{max} = 252.5/278.56 = 0.906$. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι αυτή η τιμή τόσο πιο σωστή είναι η προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου με ελαστοπλαστική. Για το δοκίμιο D100 κρίνεται ικανοποιητική.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

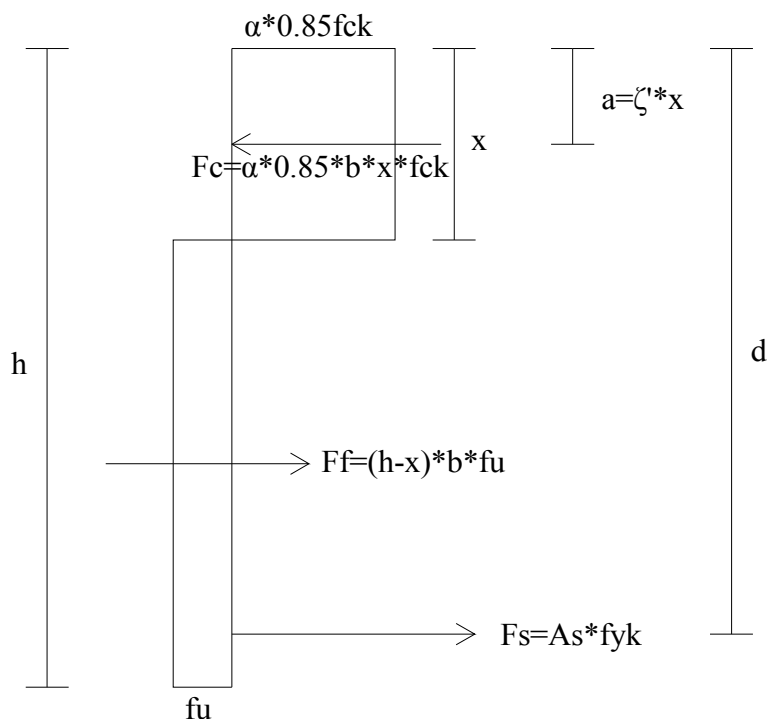
- Εκτίμηση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου δοκιμίου σε κάμψη:

Για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος D100, θα χρησιμοποιηθούν οι καταγραφές των βελομέτρων στη μεσαία διατομή (κανάλια 6,7,8,9 και 10) κατά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου του δοκιμίου $P_{\max} = 278.56$ kN (σημείο 3), που συμπίπτει και με την επίτευξη της μέγιστης ροπής $M_{\max} = 149.386$ kNm. Οι τιμές των βελομέτρων καθ ύψος σε αυτή τη χρονική στιγμή δίνονται από τον πίνακα 5.2.2.3:

Κανάλια	Παραμόρφωση ε (%)	Απόσταση από ακραία εφελκυστική ίνα (cm)
6	-3.957	2.5
7	-2.368	8
8	-1.094	14.5
9	0.155	21
10	1.472	27.5

Πίνακας 5.2.2.3: Καταγραφές βελομέτρων μεσαίας διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής

Στον παραπάνω πίνακα ο εφελκυσμός συμβολίζεται με μείον και η θλίψη με συν. Από τις καταγραφές των βελομέτρων 8 και 9, παρατηρείται ότι ο ουδέτερος άξονας της διατομής βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίζουν τα παραπάνω δύο βελομέτρα (αλλαγή προσήμου). Από την επίλυση των όμοιων τριγώνων βρίσκουμε ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται κοντά στο κανάλι 9 κατά 0.81 cm. Άρα, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης θα είναι ίσο με $2.5 + 6.5 + 0.81 = 9.81$ cm. Η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας, που βρίσκεται σε απόσταση 2.5 cm από το βελομέτρο 10 βρίσκεται επίσης με όμοια τρίγωνα, δεδομένου ότι γνωρίζουμε το πάχος θλιβόμενης ζώνης ως $\varepsilon_c = 1.472 \cdot (6.5 + 2.5 + 0.81) / (6.5 + 0.81) = 1.975\%$. Το διάγραμμα θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος θα ληφθεί, όπως λαμβάνεται και στο συμβατικό σκυρόδεμα με οδηγό την ακραία θλιπτική παραμόρφωση (παραδοχή όχι άστοχη, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφική αναφορά), ο χάλυβας οπλισμού έχει διαρρεύσει (παραμόρφωση του καναλιού 6 μεγαλύτερη της παραμόρφωσης διαρροής $\varepsilon_y = 2.5\%$), οπότε μπορεί να ληφθεί η τάση διαρροής του ίση με 520 MPa και για την κατανομή εφελκυστικών τάσεων θα ληφθεί η παραδοχή παραλληλόγραμμου σε όλο το εφελκυστικό τμήμα της διατομής, που προσομοιάζει την εφελκυστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη με μία παραμένουσα εφελκυστική τάση f_{t0} , όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία. Η εντατική κατάσταση της διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής φαίνεται στην Σχήμα 5.2.2.7.



Σχήμα 5.2.2.7: Κατανομή των τάσεων καθ ύψος της μεσαίας διατομής

Για την ισορροπία της διατομής θα πρέπει οι δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτή να εξισορροπούν την εξωτερική ροπή $M_{\max} = 149.39 \text{ kNm}$. Για τη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος με ακραία παραμόρφωση 1.975‰, ο συντελεστής πληρώσεως α προκύπτει ίσος με 0.66 και ο συντελεστής κέντρου βάρους ζ' ίσος με 0.367 (Τάσιος, 2005). Δεδομένου ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος D100 είναι ίση με $f_{ck} = 34.66 \text{ MPa}$ (από τη δοκιμή θλίψης), η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος θα είναι ίση με

$$F_c = \alpha \cdot 0.85 \cdot f_{ck} \cdot x \cdot b = 0.66 \cdot 0.85 \cdot 34660 \cdot 0.0981 \cdot 0.15 = 286.12 \text{ kN}$$

Η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα οπλισμού είναι

$$F_s = A_s \cdot f_{yk} = 4.62 \cdot 10^{-4} \cdot 520000 = 240.24 \text{ kN}$$

Οπότε, η εφελκυστική κατανομή λόγω των ινών του σκυροδέματος δίνει μία συνισταμένη δύναμη $F_f = F_c - F_s = 45.88 \text{ kN}$. Με την παραδοχή παραλληλόγραμμης κατανομής βρίσκουμε μία απομένουσα εφελκυστική τάση ίση με

$$f_u = F_f / (b \cdot (h-x)) = 1514.94 \text{ kPa} = 1.52 \text{ MPa}$$

5.2.3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πειράματος του δοκιμίου D100 όσον αφορά τη διατμητική αντοχή με τις προτεινόμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση που έχει προτείνει ο Sharma (1986), η διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών υπολογίζεται ως:

$$v_u = k f_t' (d/a)^{0.25} \quad (MPa) \quad (1)$$

όπου,

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$$k = 2/3$$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_t' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $f_t' = 0.79(f_c')^{0.5}$ [MPa]

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου [MPa]

Λόγω έλλειψης εφελκυστικής δοκιμής διάρρηξης, θα χρησιμοποιηθεί η τιμή της θλιπτικής αντοχής του κυλίνδρου ίση με 34.66 MPa για το δοκίμιο D100. Προκύπτει $f_t' = 4.65$ MPa. Για το λόγο $a/d = 2.0$ του πειράματος, προκύπτει διατμητική αντοχή ίση με $v_u = 2606.78$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 105.57$ kN, τιμή κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (139.28 KN) κατά 24.2%.

Οι Al-Ta'an και Al-Feel (1990) έχουν προτείνει μία σχέση για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες στο δοκίμιο. Η διατμητική αντοχή που προσφέρει το σκυρόδεμα στο δοκίμιο προκύπτει από τη σχέση

$$V_c = 2 * f_{ctm} * b_w * d / 3$$

όπου $f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 3188.4$ kPa για θλιπτική αντοχή 34.66 MPa. Άρα, προκύπτει $V_c = 86.09$ kN για τη δοκό του πειράματος. Η προτεινόμενη σχέση για την προσφορά των ινών στη διάτμηση είναι:

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (7)$$

όπου, $\kappa = 1.2$ για ίνες με άγκιστρα, όπως του πειράματος, V_f το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ίσο με 1.2% για το δοκίμιο D100 και $L_f/D_f = 65$ για την ίνα DRAMIX που χρησιμοποιήθηκε. Οπότε προκύπτει, $v_f = 884$ KPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 35.8$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 121.89$ kN, τιμή μικρότερη από την τιμή που προέκυψε από το πείραμα κατά 12.5%, πλησιέστερη, δηλαδή, από την τιμή του Sharma (1986).

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι Swamy et al (1993). έχουν προτείνει μία σχέση ακόμα για τη συνεισφορά της ίνας στη διατμητική αντοχή, η οποία είναι:

$$v_f = 0.37\tau V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (8)$$

όπου τ η διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος, οποία έχει προταθεί να λαμβάνεται ίση με 4.15 MPa ελλείψει δοκιμών εξόλκευσης. Αντικαθιστώντας τις υπόλοιπες τιμές όπως παραπάνω, προκύπτει $v_f = 1197.69$ kPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 48.51$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 134.6$ kN, τιμή που σχεδόν ταυτίζεται με τη διατμητική αντοχή, όπως προέκυψε από το πείραμα (139.28 kN).

Οι Ashour, Hasanain και Wafa (1992) έχουν προτείνει δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών. Η πρώτη είναι:

Για $a/d \geq 2.5$,

$$v_u = (2.11\sqrt{f'_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (MPa) \quad (5a)$$

Για $a/d < 2.5$,

$$v_u = [Eq. (5a)] \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (MPa) \quad (5b)$$

όπου $F = (L_f/D_f)V_f/d_f$, $d_f = 0.75$ για ίνες με άγκιστρα, ρ το ποσοστό διαμήκους οπλισμού, ίσο με 1.14% για τις δοκούς του πειράματος και $v_b = 0.41\tau F$, όπου $\tau = 4.15$ MPa, όπως λήφθηκε παραπάνω. Για αντοχή σε θλίψη $f'_c = 34.66$ MPa και $a/d = 2.0$, προκύπτει $v_u = 2952.22$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 119.56$ kN, τιμή κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (139.28 kN) κατά 14.2%. Η δεύτερη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa είναι:

$$v_u = (0.7\sqrt{f'_c} + 7F) \frac{d}{a} + 17.2\rho \frac{d}{a} \quad (MPa) \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας ως παραπάνω προκύπτει $v_u = 4206.1$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 170.35$ kN, τιμή πάνω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (139.28 kN) κατά 22.3%. Η δεύτερη σχέση, δηλαδή υπερεκτιμά την αντοχή του ινοπλισμένου δοκιμίου σε διάτμηση.

5.2.4. Εύρεση ανάλογου ποσοστού διατμητικού οπλισμού (συνδετήρων)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5.2.2, για τη σύνθεση του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ($f_{ck} = 25 \text{ MPa}$) η αντοχή του άοπλου σκυροδέματος σε διάτμηση είναι ίση με $V_c = 70.2 \text{ kN}$. Η αντοχή του πειραματικού δοκιμίου D100 έφτασε την τιμή των 139.28 kN . Ενδιαφέρον είναι να υπολογιστεί το ανάλογο ποσοστό συνδετήρων που αντιστοιχεί στην επιπλέον αντοχή που δίνουν οι χαλύβδινες ίνες DRAMIX σε ποσοστό κ.ό. 1.2%.

Η επιπλέον αντοχή της δοκού, λόγω της προσθήκης των ιών είναι ίση με $139.28 - 70.2 = 69.08 \text{ kN}$. Αυτή την επιπλέον αντοχή μπορούν να εξασφαλίσουν συνδετήρες $\Phi 10$ δίτμητοι με $A_{sw} = 1.57 \text{ cm}^2$ αν τοποθετηθούν ανά απόσταση s , οποία βρίσκεται από τη σχέση:

$$V_{wd} = 0.9d * A_{sw} * f_{yw} / s$$

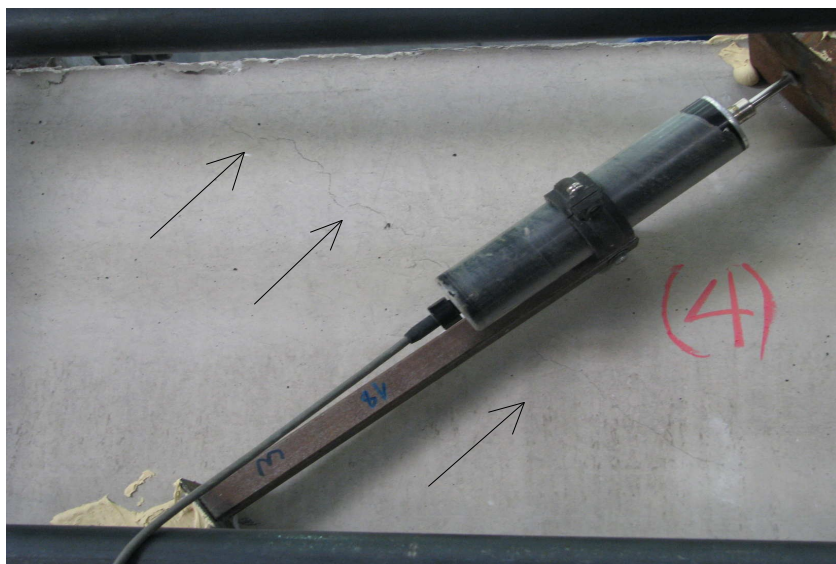
όπου $V_{wd} = 69.08 \text{ kN}$ και $f_{yw} = 520 \text{ MPa}$ για χάλυβα συνδετήρων ποιότητας B500C.

Από τη σχέση προκύπτει απόσταση $s = 28.7 \text{ cm}$. Δηλαδή το ισοδύναμο των συνδετήρων για το δοκίμιο D100, προκύπτει ότι είναι να τοποθετηθούν $\Phi 10/28$ και αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $\rho_w = A_{sw} / (b_w s) = 0.0037$. Καλό θα ήταν, βέβαια, να τονιστεί η πολύ πιο πλάστιμη συμπεριφορά των ινοπλισμένων δοκιμίων στη διατμητική αστοχία, έναντι των δοκών με συμβατικό διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες).

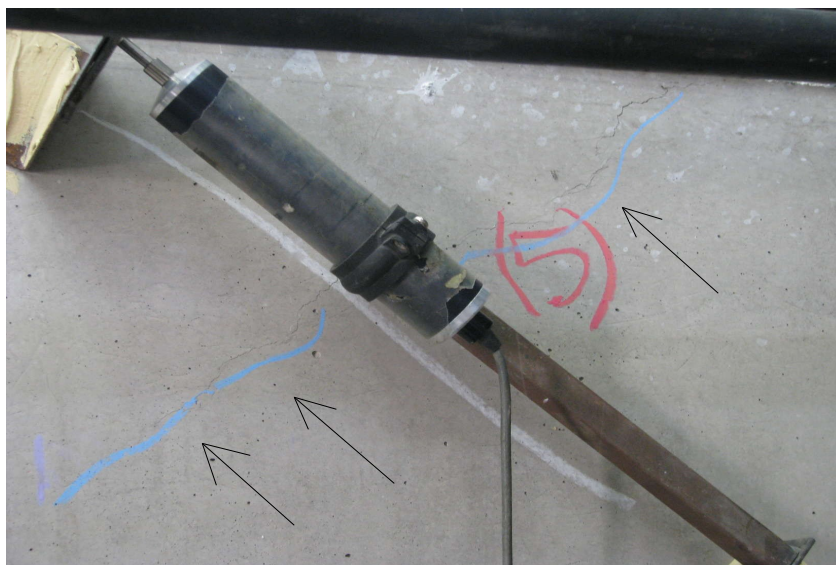
5.3. Δοκίμιο D150

5.3.1 Συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος

Το δοκίμιο D150 σε χαμηλή στάθμη φορτίου εμφάνισε διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας δύναμης (Εικόνες 5.3.1.1 και 5.3.1.2), οι οποίες δεν άνοιξαν αμέσως, βοηθώντας το δοκίμιο να παραλαμβάνει συνεχώς περισσότερη φέρουσα δύναμη και ενέργεια. Στη μία πλευρά του δοκιμίου (αυτή στην οποία επήλθε η αστοχία) παρατηρήθηκε η συνεχής επέκταση της ρωγμής, πιθανόν λόγω ασυμμετρίας της πειραματικής διάταξης (Εικόνα 5.3.1.3).



Εικόνα 5.3.1.1: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής αριστερά



Εικόνα 5.3.1.2: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής δεξιά



Εικόνα 5.3.1.3: Επέκταση αριστερά διατμητικής ρωγμής σε χαμηλή στάθμη φορτίου

Όσο το φορτίο (όπου φορτίο ονομάζουμε το συνολικό φορτίο P με το οποίο φορτίζουμε τη σιδηρά δοκό, η οποία στηρίζεται σε 2 κυλίνδρους που φορτίζουν το δοκίμιο σε 2 σημεία συμμετρικά) ανεβαίνει, οι ρωγμές δεν ανοίγουν ισόποσα, καθώς η δεξιά διατμητική ρωγμή διευρύνεται συνεχώς (Εικόνα 5.3.1.4), σε αντίθεση με την αριστερά που παραμένει σχετικά σταθερή (Εικόνα 5.3.1.5).



Εικόνα 5.3.1.4: Ταχεία επέκταση της διατμητικής ρωγμής στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου



Εικόνα 5.3.1.5: Εικόνα διατμητικής ρωγμής στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου, τη στιγμή που η αριστερά έχει επεκταθεί σημαντικά

Στη συνέχεια, εμφανίστηκε και μία κατακόρυφη καμπτική ρωγή στην περιοχή σταθερής ροπής, ανάμεσα στα σημεία εφαρμογής του φορτίου στο δοκίμιο (Εικόνα 5.3.1.6), η οποία όμως, όπως φαίνεται και στο σχήμα, δεν βρίσκεται εντός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων, οπότε χάθηκε σημαντική πληροφορία για την τοπική καμπύλωση της δοκού.

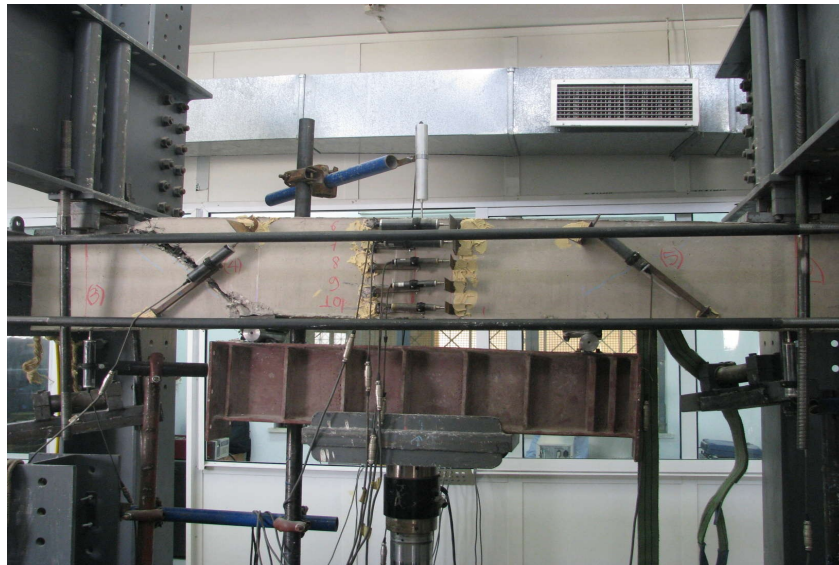


Εικόνα 5.3.1.6: Εμφάνιση καμπτικής ρωγμής στην περιοχή σταθερής ροπής

Σε αυτή τη φάση, η δοκός έχει χάσει ήδη σημαντική από τη φέρουσα ικανότητά της και η διατμητική ρωγή αριστερά ανοίγει περισσότερο σε πλάτος και σε μήκος, καθώς μπαίνει και στη θλιβόμενη ζώνη Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε ότι λυγίζουν τα διαμήκη σίδερα (Εικόνα 5.3.1.7), ενώ πλέον η ρωγή επεκτείνεται οριζόντια κατά μήκος του εφελκυσμένου οπλισμού προς τη στήριξη (απώλεια συνάφειας). Στο σημείο αυτό, οι ίνες είναι καθοριστικές στην τήρηση της επικάλυψης στη θέση της. Η γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία φαίνεται στην Εικόνα 5.3.1.8.



Εικόνα 5.3.1.7: Εικόνα διατμητικής ρωγμής που προκάλεσε την αστοχία

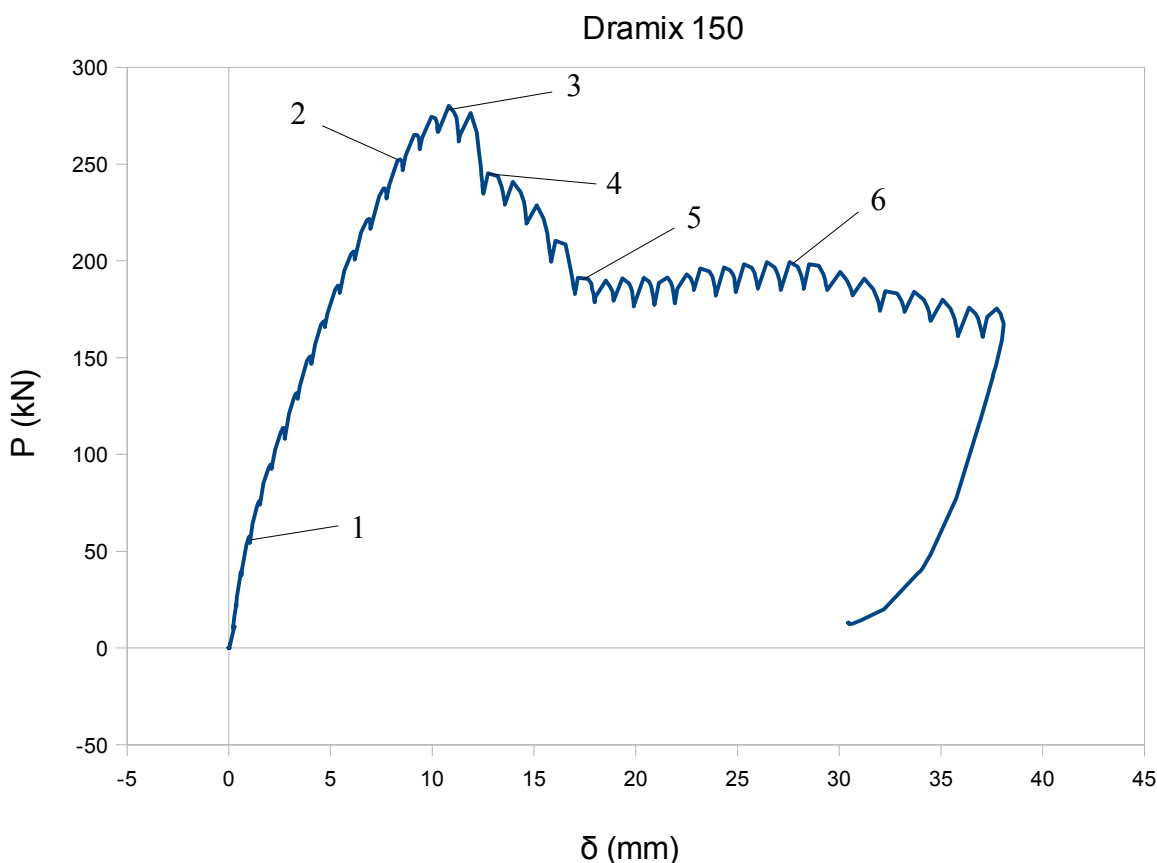


Εικόνα 5.3.1.8: Γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία

5.3.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των καταγραφών του πειράματος

- Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης $P - \delta$:

Η τιμή του φορτίου και των λοιπών καταγραφών παραμόρφωσης και μετατόπισης καταγράφονται συνεχώς ταυτόχρονα. Η τιμή του καμπτικού βέλους της δοκού για κάθε στιγμή θα δίνεται αν από την τιμή του κατακόρυφου βελομέτρου που βρίσκεται στο μέσον (κανάλι 1) αφαιρέσουμε τη μέση τιμή των καταγραφών των βελομέτρων που βρίσκονται κάτω από τις στηρίξεις (κανάλια 2 και 3). Έτσι, προκύπτει η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης $P - \delta$ (Σχήμα 5.3.2.1).



Σχήμα 5.3.2.1: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης του δοκιμίου D150

	P (kN)	δ (mm)
Σημείο 1	64.06	1.163
Σημείο 2	252.42	8.431
Σημείο 3	280.18	10.812
Σημείο 4	245.32	12.746
Σημείο 5	191.28	17.164
Σημείο 6	199.42	27.566

Πίνακας 5.3.2.1: Φορτίο και παραμόρφωση στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης το δοκίμιο αν και αστόχησε διατμητικά παρουσίασε μια πλαστική συμπεριφορά, με μία σημαντική, όμως απώλεια της αντοχής του. Η ρηγμάτωση του δοκιμίου φαίνεται να πραγματοποιείται όντως σε χαμηλή στάθμη φορτίου ($P_{cr} = 64.6$ kN), όπου και αλλάζει η κλίση του διαγράμματος (σημείο 1). Το δοκίμιο φαίνεται να διαρρέει σε στάθμη φορτίου 252.4 kN με παραμόρφωση 8.4 mm (σημείο 2), στη συνέχεια αυξάνεται για λίγο η αντοχή του με μικρότερη κλίση στα 280.2 kN (σημείο 3), όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου. Μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, η καμπύλη πέφτει στα 245.3 kN με παραμόρφωση 12.5 mm (σημείο 4) και στη συνέχεια πέφτει ακόμα πιο πολύ (190 kN) στο σημείο 5, χάνει, δηλαδή, το 1/3 της αντοχής της σε παραμόρφωση 17.2 mm. Σε αυτό το φορτίο η καμπύλη παραμένει περίπου οριζόντια μέχρι την αστοχία που παρατηρείται σε παραμόρφωση 37 mm. Η τιμή της πλαστιμότητας για αυτό το δοκίμιο είναι περίπου $q_d = 37/8.4 = 4.4$. Οι ακαμψίες του δοκιμίου για τις τρεις αρχικές κλίσεις του διαγράμματος υπολογίζονται παρακάτω:

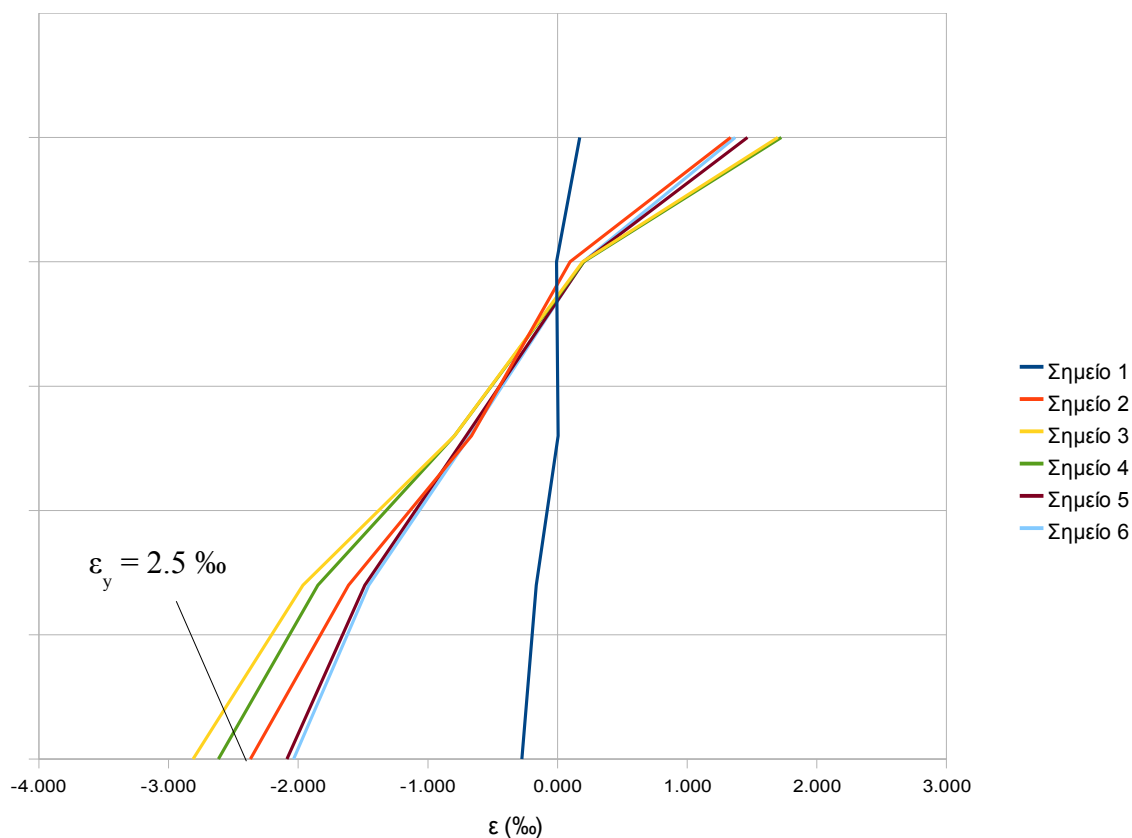
Αρηγμάτωτος κλάδος: $K_{gr} = P_1/\delta_1 = 55.08$ kN/mm

Ρηγματομένος κλάδος: $K_y = (P_2 - P_1)/(\delta_2 - \delta_1) = 25.92$ kN/mm

Κλάδος κράτυνσης: $K_h = (P_3 - P_2)/(\delta_3 - \delta_2) = 11.66$ kN/mm

Η μέγιστη συνολική δύναμη που έφτασε το έμβολο είναι ίση με $P_{max} = 280.18$ kN και εφόσον το δοκίμιο αστόχησε διατμητικά μπορούμε να πούμε ότι η οριακή διατμητική του αντοχή είναι ίση με $P_{max}/2 = 140.09$ kN. Εφόσον η κατηγορία του άοπλου σκυροδέματος (βάσει μελέτης σύνθεσης) είναι αντοχής C25/30, μία αντίστοιχη δοκός από το ίδιο σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη ίνας και χωρίς διατμητικό οπλισμό θα είχε διατμητική αντοχή ίση με $V_c = 70.2$ kN (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5.2.2), δηλαδή παρατηρούμε αύξηση της τάξης του 99.56 % στη διατμητική αντοχή του δοκιμίου D150, καθώς και μία πλαστική διατμητική συμπεριφορά, σε αντίθεση με την ψαθυρή αστοχία του συμβατικού δοκιμίου.

Αξίζει να παρατηρηθεί λόγω της διάταξης των βελομέτρων στη μεσαία διατομή, η συμπεριφορά της μεσαίας διατομής σε κρίσιμα σημεία της καμπύλης. Για όλα αυτά τα σημεία ακολουθούν τα διαγράμματα παραμορφώσεων στη μεσαία διατομή (Σχήμα 5.3.2.2).



Σχήμα 5.3.2.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ ύψος της μεσαίας διατομής για τα σημεία του διαγράμματος 1,2,3,4,5 και 6

Να σημειωθεί ότι με θετικό πρόσημο απεικονίζεται η θλίψη στο παραπάνω διάγραμμα. Αναλυτικά, παρατίθενται στον Πίνακα 5.3.2.1 τα κρίσιμα σημεία της καμπύλης όπως επιλέχθηκαν το φορτίο και η παραμόρφωση για το κάθε σημείο.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα παραμορφώσεων της μεσαίας διατομής για τα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος $P - \delta$, η παραδοχή Bernoulli – Euler για την επιπεδότητα της διατομής σε κάθε χρονική στιγμή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης, παρατηρείται πως από τη στιγμή της διαρροής του δοκιμίου (σημείο 2) αυξάνεται η καμπυλότητα λόγω της κράτυνσης φτάνοντας στο μέγιστο φορτίο (σημείο 3) και μετά με την πτώση του φορτίου παρατηρείται μία διαρκής μείωση της μέσης καμπυλότητας (κλίσης του διαγράμματος), μέχρι το σημείο 5 που με την απομένουσα αντοχή του το δοκίμιο διατηρεί σταθερή τη μέση καμπυλότητα (σημείο 6) μέχρι τη στιγμή της αστοχίας.

Αξίζει να σημειωθεί η καμπτική συμπεριφορά της δοκού, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα παραμορφώσεων. Μία πρώτη παρατήρηση είναι πως ο ουδέτερος άξονας της δοκού σε όλα τα σημεία που φαίνονται στο σχήμα είναι κάτω από το ύψος του δεύτερου βελομέτρου μετρώντας από τη θλιβόμενη ίνα. Από την Σχήμα 4.2.3, βλέπουμε ότι το βελόμετρο αυτό (κανάλι 9) βρίσκεται σε απόσταση 9.5 cm από τη θλιβόμενη ακραία ίνα της διατομής. Οπότε μπορούμε να εξάγουμε συμπέρασμα για το πάχος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής καθ όλη τη διάρκεια της φόρτισης, είναι

μεγαλύτερο των 9.5 cm. Ένα άλλο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει, είναι από το βελομέτρο που βρίσκεται στην άκρη της εφελκυσόμενης περιοχής, δηλαδή περίπου στο ύψος του χάλυβα οπλισμού (2.5 cm από την ακραία ίνα), παρόλο που το δοκίμιο αστοχεί σε διάτμηση, ο διαμήκης χάλυβας έχει διαρρεύσει μετά τη διαρροή του δοκιμίου (σημείο 2). Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι οι παραμορφώσεις του “κάτω” βελομέτρου όπως φαίνεται στην Σχήμα 5.3.2.2 είναι μεγαλύτερες από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα S500 ($\epsilon_y = 2.5\%$). Το τελευταίο συμπέρασμα, βέβαια, είναι ορατό και από τις φωτογραφίες της δοκού κατά τη διάρκεια του πειράματος και την κατακόρυφη καμπτική ρωγμή που έχει εμφανιστεί εντός της περιοχής σταθερής ροπής της δοκού.

- Καμπύλη ροπών – καμπυλοτήτων $M - \varphi$:

Από τις συνεχείς μετρήσεις του φορτίου P μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος να εξάγουμε μία τιμή της ροπής M στο μέσον, καθώς όπως προκύπτει από το διάγραμμα ροπών της αμφιέρειστης δοκού που φορτίζεται σε ίσες αποστάσεις a από τις στηρίξεις (Σχήμα 5.2.2.3) η ροπή στο μέσον ισούται με το γινόμενο της δύναμης P επί το διατμητικό μήκος a , που είναι ίσο με 54 cm για το πείραμα που διεξάγεται.

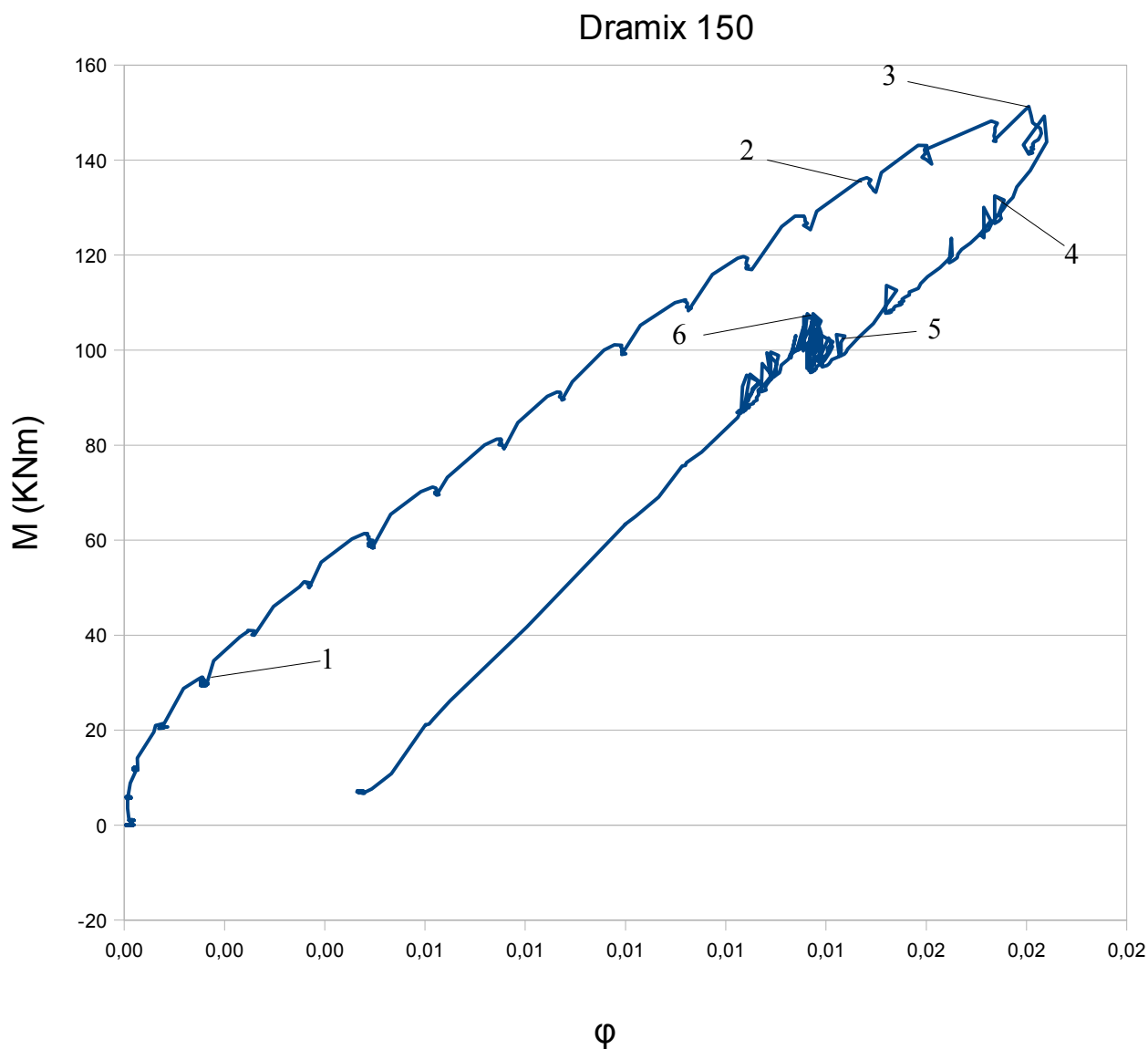
Για τις τιμές της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής, εφόσον έχει ήδη αποδειχθεί παραπάνω ότι η κατανομή των παραμορφώσεων της διατομής δεν απέχει πολύ από την ευθεία για διάφορες χρονικές στιγμές (παραδοχή Bernoulli – Euler), αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των παραμορφώσεων των δύο ακραίων βελομέτρων καθ ύψος. Το άθροισμα των απόλυτων τιμών των παραμορφώσεων αυτών διαιρούμενο με την υψομετρική τους απόσταση H δίνει τη μέση τιμή της κλίσης του διαγράμματος για κάθε χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς αρχικές αποστάσεις βελομέτρων για το δοκίμιο όπως δίνονται στο κεφάλαιο της πειραματικής διάταξης (Σχήμα 4.2.3).

Αναλυτικά, η μέση καμπυλότητα της μεσαίας διατομής υπολογίστηκε ως:

$$\varphi = \frac{(|\epsilon(6)| + |\epsilon(10)|)}{H}$$

όπου $\epsilon(6)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου πάνω βελομέτρου όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη, $\epsilon(10)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου κάτω βελομέτρου και H η υψομετρική απόσταση των δύο βελομέτρων, που για το δοκίμιο D150 είναι 250 mm (Σχήμα 4.2.3).

Υπολογίζοντας τις τιμές της ροπής και της καμπυλότητας για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει η καμπύλη $M - \varphi$ (Σχήμα 5.3.2.3):



Σχήμα 5.3.2.3: Καμπύλη ροπών - καμπυλοτήτων του δοκιμίου D150

Όπως και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, έτσι και στην καμπύλη ροπών καμπυλοτήτων, βλέπουμε κατά αντιστοιχία τα καθοριστικά σημεία 1,2,3,4,5 και 6. Φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα, η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η πρώτη πτώση της αντοχής (4) και η πτώση στην απομένουσα αντοχή του δοκιμίου (5) μέχρι την αστοχία. Το σημείο 6 δείχνει τη στιγμή της μεγαλύτερης απομένουσας αντοχής του δοκιμίου.

Από αυτό το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά πως μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου (σημείο 3), η τιμή της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής μειώνεται σταδιακά μέχρι τη στιγμή που το δοκίμιο αποκτά την απομένουσα αντοχή του (σημείο 5), όπου στη συνέχεια μένει σχετικά σταθερή μέχρι την αστοχία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την Σχήμα 5.3.2.2, όπου η κλίση του διαγράμματος παραμορφώσεων μικραίνει σταδιακά από το σημείο 3 μέχρι το σημείο 5, ενώ για τα σημεία 5 και 6 φαίνεται να είναι η ίδια. Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από την καμπύλη $M - \varphi$ είναι μια προσέγγιση της ροπής αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής, εφόσον το μέτρο ελαστικότητας E_c του συγκεκριμένου δοκιμίου έχει εκτιμηθεί από τα αποτελέσματα του κυλινδρικού δοκιμίου ίση με 30.19 GPa (Κεφάλαιο 3.2). Είναι γνωστό πως η κλίση του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων μετά τη ρηγμάτωση, είναι ίση με το γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας E_c επί τη ροπή αδράνειας της διατομής I_{cr} . Στο διάγραμμα μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία το κομμάτι της καμπύλης μεταξύ των σημείων 1 και 2 (μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή). Στον Πίνακα 5.3.2.2 δίνονται οι τιμές ροπής και καμπυλότητας για κάθε ένα από τα 6 σημεία:

	M (kNm)	φ (1/m)
Σημείο 1	34.592	0.00178
Σημείο 2	136.307	0.01481
Σημείο 3	151.297	0.01804
Σημείο 4	132.473	0.01737
Σημείο 5	103.291	0.01421
Σημείο 6	107.687	0.01362

Πίνακας 5.3.2.2: Ροπή και καμπυλότητα στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Η κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων 1 και 2 είναι ίση με $(136.307-34.592)/(0.01481-0.00178) = 7806.216 \text{ kNm}^2 = E_c I_{cr}$. Άρα, η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής προκύπτει ίση με $I_{cr} = 7806.216/30190000 = 2.5857 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 = 25857 \text{ cm}^4$. Η ροπή αδράνειας της αρηγμάτωτης διατομής του δοκιμίου (Κωτσοβός, 2000) είναι ίση με

$$I_g = bh^3/12 + bh(x-h/2)^2 + \alpha_e A_s (d-x)^2$$

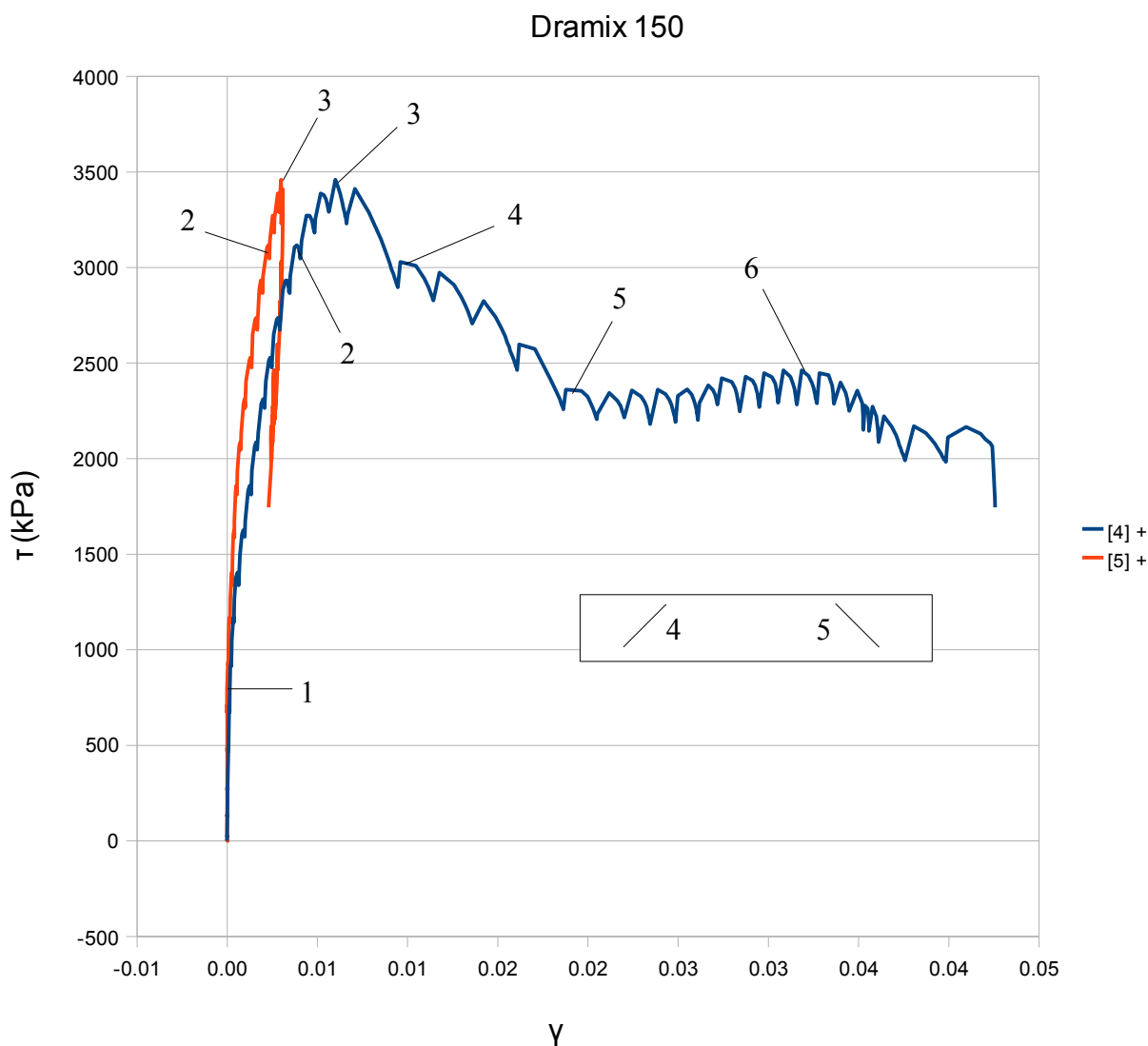
όπου x προκύπτει από τη σχέση:

$$A_c(x-h/2) = \alpha_e A_s (d-x)$$

και $\alpha_e = E_s/E_c$, με E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 200 GPa και E_c το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος ίσο με 30.19 GPa για το δοκίμιο D150. Από τους υπολογισμούς προκύπτει $I_g = 37876 \text{ cm}^4$. Εκτιμάται, δηλαδή ότι η ροπή αδρανείας του ινοπλισμένου σκυροδέματος D150 μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη ρηγμάτωση, καθώς μειώνεται κατά 31.7 %, τιμή μικρότερη, όμως, από αυτή που συναντάμε στο συμβατικό σκυρόδεμα (μείωση της τάξης του 50 %).

- Καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης $\tau - \gamma$:

Για το δοκίμιο D150 και τον έλεγχο της διατμητικής συμπεριφοράς αυτού στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας (βλ. Σχήμα 5.2.2.3) τοποθετήθηκαν δύο αναλογικά βελομέτρα διαγώνια σε γωνία 45° κάθετα στις αναμενόμενες διατμητικές ρωγμές (κανάλια 4 και 5). Από τη συνεχή καταγραφή του φορτίου μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή να εξάγουμε τη διατμητική τάση που ασκείται σε κάθε μία από τις δύο περιοχές $\tau = V/bd$, όπου $V = P/2$, b το πλάτος της δοκού που είναι 15 cm και d το στατικό ύψος της δοκού ίσο με 27 cm. Για την τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετατοπίσεις των διατμητικών βελομέτρων διαιρούμενες με τη αρχική απόσταση της διαγωνίου του κάθε βελομέτρου, όπως απεικονίζεται στην πειραματική διάταξη (Σχήμα 4.2.3). Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα $\tau - \gamma$ και για τις δύο διαγώνιες ρωγμές, όπως φαίνεται στην Σχήμα 5.3.2.4:



Σχήμα 5.3.2.4: Καμπύλη διατμητικής τάσης - γωνιακής παραμόρφωσης για το δοκίμιο D150

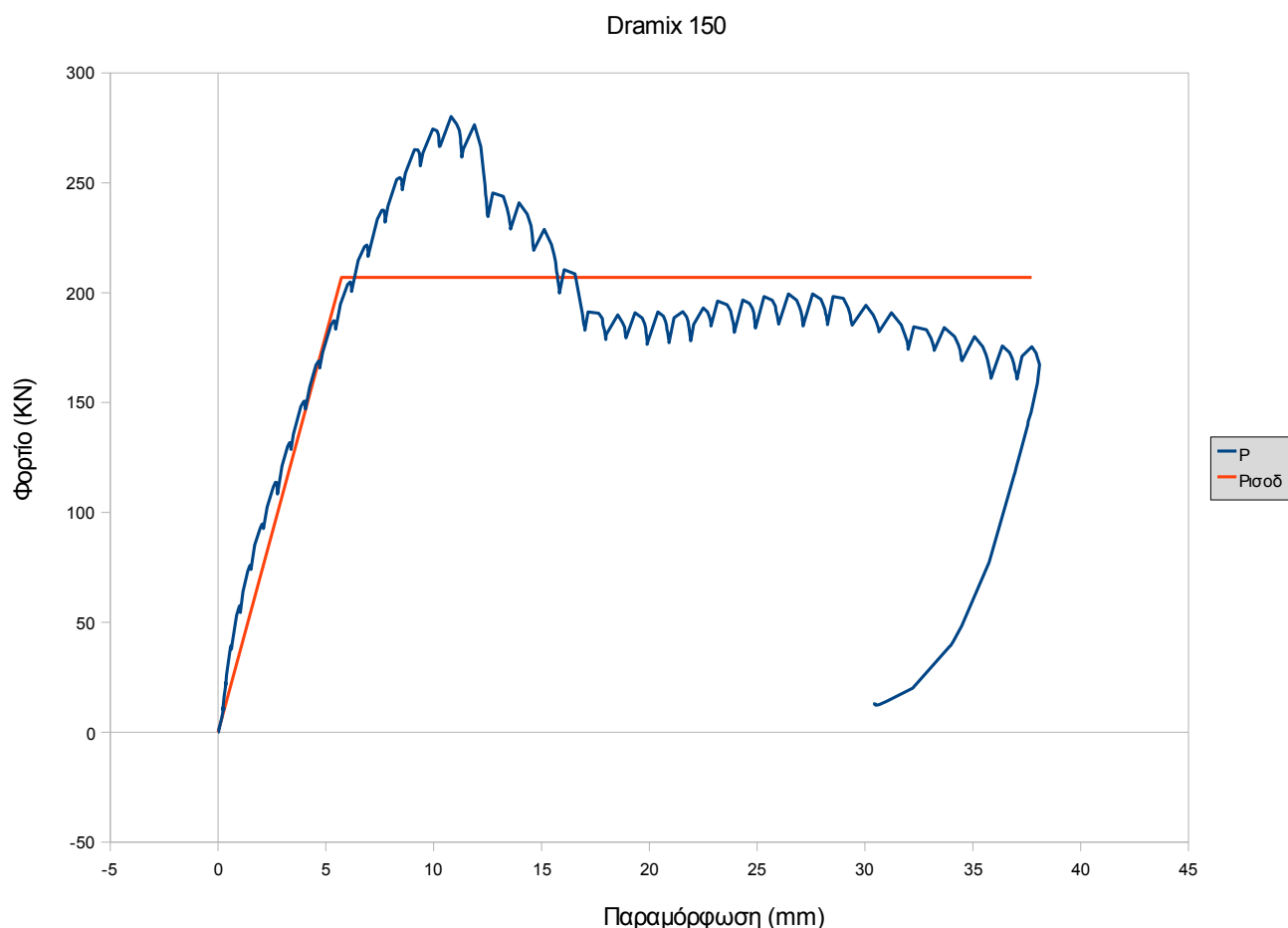
Στην Σχήμα 5.3.2.4 φαίνεται η καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης και για τις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας του δοκιμίου. Από το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά, πως η ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία είναι η ρωγμή αριστερά, όπως βλέπουμε το δοκίμιο στην πειραματική διάταξη (κανάλι 4), καθώς οδήγησε σε πολύ μεγαλύτερες γωνιακές παραμορφώσεις. Αυτό έχει ήδη γίνει φανερό και από τις φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπου η αριστερά ρωγμή είναι αυτή η οποία μετά από μία στάθμη φορτίου ανοίγει σταδιακά και προκαλεί την αστοχία του δοκιμίου. Τα κρίσιμα σημεία, όπως έχουν οριστεί και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης φαίνονται στο διάγραμμα, δηλαδή η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η πρώτη πτώση της αντοχής (4) και η πτώση στην απομένουσα αντοχή του δοκιμίου (5) μέχρι την αστοχία..

Αυτό που αξίζει να εξεταστεί στις δύο παραπάνω καμπύλες είναι οι κλίσεις αυτών, και η σύγκριση μεταξύ τους. Παρατηρούμε, πως όσο οι δύο διατομές είναι αρηγμάτωτες (αρχική κλίση των δύο καμπυλών) έχουν την ίδια κλίση, από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου σκυροδέματος G_{gr} . Στη συνέχεια, τα δύο διαγράμματα διαφοροποιούνται ως προς την κλίση, το οποίο είναι λογικό, καθώς η ρωγμή αριστερά (κανάλι 4) ανοίγει συνεχώς (πιο μικρή κλίση), τη στιγμή που η ρωγμή δεξιά (κανάλι 5) παραμένει σχετικά σταθερή. Αυτό φαίνεται στη διαφοροποίηση της κλίσης που είναι πιο μικρή στο διάγραμμα του καναλιού 4. Στη συνέχεια το διάγραμμα ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτή του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης. Η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{max} του δοκιμίου D150 είναι ίση με $3459 \text{ kPa} = 3.46 \text{ MPa}$

Το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου ινοπλισμένου σκυροδέματος G_{gr} υπολογίζεται από το σημείο 1 της καμπύλης και ισούται με το πηλίκο της διατμητικής τάσης τ προς τη γωνιακή παραμόρφωση γ . Για το δοκίμιο D150, το σημείο 1 έχει διατμητική τάση ίση με 465.31 kPa και γωνιακή παραμόρφωση γ (λήφθηκε η μέση τιμή των δύο τιμών των δύο καναλιών) ίση με 0.000035 . Οπότε το μέτρο διάτμησης εκτιμάται ίσο με $G_{gr} = 465.31 / 0.000035 = 13294571.43 \text{ kPa} = 13.295 \text{ GPa}$. Από αυτή την τιμή και τη σχέση $G = E/2(1+\nu)$ μπορούμε να πάρουμε μία ακόμα εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του δοκιμίου. Θεωρώντας το $\nu = 0.2$ (τιμή αποδεκτή για το οπλισμένο σκυρόδεμα), προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου ίσο με 31.9 GPa , τιμή όχι μακριά από την τιμή που προέκυψε από τη δοκιμή θλίψης ($E = 30.19 \text{ GPa}$).

- Υπολογισμός ισοδύναμης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Το δοκίμιο D150 συμπεριφέρθηκε πλάστιμα κατά την αστοχία, παρόλο που αστόχησε διατμητικά χάνοντας, όμως, σημαντικό μέρος της αντοχής του. Για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του υλικού σε πλαστιμότητα, χρήσιμο είναι να καθοριστεί το ισοδύναμο διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης, που αντιστοιχεί σε μία τιμή φορτίου $P_{ισοδ}$, που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη διαρροή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Για την κατασκευή του διαγράμματος, υπολογίστηκε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης και βρέθηκε ίσο με 7210 kNmm. Αυτό το εμβαδόν είναι και ένας δείκτης της απορρόφησης ενέργειας του υλικού. Το ιδεατό ελαστοπλαστικό διάγραμμα κατασκευάζεται έτσι ώστε να έχει αυτό το εμβαδόν και ο ελαστικός κλάδος του να διέρχεται από το σημείο $0.6P_{max} = 168.85$ kN για το δοκίμιο D150. Έτσι προκύπτει το διάγραμμα:



Σχήμα 5.3.2.5: Προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου D150 με ελαστοπλαστική

Η αντοχή διαρροής που προέκυψε για το ελαστοπλαστικό διάγραμμα είναι $P_{ισοδ} = 207$ kN. Η ισοδύναμη παραμόρφωση διαρροής είναι $\epsilon_y = 5.72$ mm και η παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u = 37.73$ mm. Άρα, προκύπτει μια ισοδύναμη πλαστιμότητα ίση με $\mu_{ισοδ} = 37.73/5.72 = 6.6$. Ο βαθμός αξιοπιστίας του υλικού δίνεται από την τιμή $P_{ισοδ}/P_{max} = 207/280.18 = 0.74$. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι αυτή η τιμή τόσο πιο σωστή είναι η προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου με ελαστοπλαστική. Για το δοκίμιο D150 δεν κρίνεται ικανοποιητική.

- Εκτίμηση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου δοκιμίου σε κάμψη:

Για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος D150, θα χρησιμοποιηθούν οι καταγραφές των βελομέτρων στη μεσαία διατομή (κανάλια 6,7,8,9 και 10) κατά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου του δοκιμίου $P_{\max} = 280.18$ kN (σημείο 3), που συμπίπτει και με την επίτευξη της μέγιστης ροπής $M_{\max} = 151.3$ kNm. Οι τιμές των βελομέτρων καθ ύψος σε αυτή τη χρονική στιγμή δίνονται από τον πίνακα 5.3.2.3:

Κανάλια	Παραμόρφωση ϵ (‰)	Απόσταση από ακραία εφελκυστική ίνα (cm)
6	-2.812	2.5
7	-1.965	9.5
8	-0.796	15.5
9	0.194	22.5
10	1.699	27.5

Πίνακας 5.3.2.3: Καταγραφές βελομέτρων μεσαίας διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής

Στον παραπάνω πίνακα ο εφελκυσμός συμβολίζεται με μείον και η θλίψη με συν. Από τις καταγραφές των βελομέτρων 8 και 9, παρατηρείται ότι ο ουδέτερος άξονας της διατομής βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίζουν τα παραπάνω δύο βελόμετρα (αλλαγή προσήμου). Από την επίλυση των όμοιων τριγώνων βρίσκουμε ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται κοντά στο κανάλι 9 κατά 1.37 cm. Άρα, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης θα είναι ίσο με $2.5 + 5 + 1.37 = 8.87$ cm. Η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας, που βρίσκεται σε απόσταση 2.5 cm από το βελόμετρο 10 βρίσκεται επίσης με όμοια τρίγωνα, δεδομένου ότι γνωρίζουμε το πάχος θλιβόμενης ζώνης ως $\epsilon_c = 1.699 \cdot (5 + 2.5 + 1.37) / (5 + 1.37) = 2.366\%$. Το διάγραμμα θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος θα ληφθεί, όπως λαμβάνεται και στο συμβατικό σκυρόδεμα με οδηγό την ακραία θλιπτική παραμόρφωση (παραδοχή όχι άστοχη, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφική αναφορά), ο χάλυβας οπλισμού έχει διαρρεύσει (παραμόρφωση του καναλιού 6 μεγαλύτερη της παραμόρφωσης διαρροής $\epsilon_y = 2.5\%$), οπότε μπορεί να ληφθεί η τάση διαρροής του ίση με 520 MPa και για την κατανομή εφελκυστικών τάσεων θα ληφθεί η παραδοχή παραλληλόγραμμου σε όλο το εφελκυστικό τμήμα της διατομής, που προσομοιάζει την εφελκυστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη με μία παραμένουσα εφελκυστική τάση f_u , όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία. Η εντατική κατάσταση της διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής φαίνεται στο Σχήμα 5.2.2.7.

Για την ισορροπία της διατομής θα πρέπει οι δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτή να εξισορροπούν την εξωτερική ροπή $M_{\max} = 151.3 \text{ kNm}$. Για τη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος με ακραία παραμόρφωση 2.366‰, ο συντελεστής πληρώσεως α προκύπτει ίσος με 0.72 και ο συντελεστής κέντρου βάρους ζ' ίσος με 0.383 (Τάσιος, 2005). Δεδομένου ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος D150 είναι ίση με $f_{ck} = 32.1 \text{ MPa}$ (από τη δοκιμή θλίψης), η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος θα είναι ίση με

$$F_c = \alpha * 0.85 * f_{ck} * x * b = 0.72 * 0.85 * 32100 * 0.0887 * 0.15 = 259.32 \text{ kN}$$

Η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα οπλισμού είναι

$$F_s = A_s * f_{yk} = 4.62 * 10^{-4} * 520000 = 240.24 \text{ kN}$$

Οπότε, η εφελκυστική κατανομή λόγω των ινών του σκυροδέματος δίνει μία συνισταμένη δύναμη $F_f = F_c - F_s = 19.08 \text{ KN}$. Με την παραδοχή παραλληλόγραμμης κατανομής βρίσκουμε μία απομένουσα εφελκυστική τάση ίση με

$$f_u = F_f / (b * (h - x)) = 300.99 \text{ KPa} = 0.301 \text{ MPa}.$$

5.3.3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πειράματος του δοκιμίου D150 όσον αφορά τη διατμητική αντοχή με τις προτεινόμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση που έχει προτείνει ο Sharma (1986), η διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών υπολογίζεται ως:

$$v_u = k f_t' (d/a)^{0.25} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

όπου,

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$k = 2/3$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_t' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $f_t' = 0.79 (f_c')^{0.5} [\text{MPa}]$

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου $[\text{MPa}]$

Λόγω έλλειψης εφελκυστικής δοκιμής διάρρηξης θα χρησιμοποιηθεί η τιμή της θλιπτικής αντοχής του κυλίνδρου ίση με 32.1 MPa για το δοκίμιο D150. Προκύπτει $f_t' = 4.48 \text{ MPa}$. Για το λόγο $a/d = 2.0$ του πειράματος, προκύπτει διατμητική αντοχή ίση με $v_u = 2511.48 \text{ kPa}$. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 101.71 \text{ kN}$, τιμή αρκετά κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (140.09 kN) κατά 27.4%.

Οι Al-Ta'an και Al-Feel (1990) έχουν προτείνει μία σχέση για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες στο δοκίμιο. Η διατμητική αντοχή που προσφέρει το σκυρόδεμα στο δοκίμιο προκύπτει από τη σχέση

$$V_c = 2 \cdot f_{ctm} \cdot b_w \cdot d / 3$$

όπου $f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 3029.4 \text{ kPa}$ για θλιπτική αντοχή 32.1 MPa . Άρα, προκύπτει $V_c = 81.79 \text{ kN}$ για τη δοκό του πειράματος. Η προτεινόμενη σχέση για την προσφορά των ινών στη διάτμηση είναι:

$$v_f = \frac{8.5}{9} \kappa V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (7)$$

όπου, $\kappa = 1.2$ για ίνες με άγκιστρα, όπως του πειράματος, V_f το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ίσο με 1.8% για το δοκίμιο D150 και $L_f/D_f = 65$ για την ίνα DRAMIX που χρησιμοποιήθηκε. Οπότε προκύπτει, $v_f = 1326 \text{ kPa}$, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 53.7 \text{ kN}$. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 135.49 \text{ kN}$, τιμή πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε από το πείραμα (140.09 kN).

Οι Swamy et al. (1993) έχουν προτείνει μία σχέση ακόμα για τη συνεισφορά της ίνας στη διατμητική αντοχή, η οποία είναι:

$$v_f = 0.37 \tau V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (8)$$

όπου τ η διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος, οποία έχει προταθεί να λαμβάνεται ίση με 4.15 MPa , ελλείψει δοκιμών εξόλκευσης. Αντικαθιστώντας τις υπόλοιπες τιμές όπως παραπάνω, προκύπτει $v_f = 1796.54 \text{ kPa}$, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 72.76 \text{ kN}$. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 154.54 \text{ kN}$, τιμή μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή, η οποία προέκυψε από το πείραμα (140.09 kN) κατά 10.3% .

Οι Ashour, Hasanain και Wafa (1992) έχουν προτείνει δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών. Η πρώτη είναι:

Για $a/d \geq 2.5$,

$$v_u = (2.11 \sqrt{f_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (\text{MPa}) \quad (5a)$$

Για $a/d < 2.5$,

$$v_u = [\text{Eq. (5a)}] \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (5b)$$

όπου $F = (L_f/D_f)V_f d_f$, $d_f = 0.75$ για ίνες με άγκιστρα, ρ το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ίσο με 1.14% για τις δοκούς του πειράματος και $v_b = 0.41\tau F$, όπου $\tau = 4.15$ MPa, όπως λήφθηκε παραπάνω. Για αντοχή σε θλίψη $f_c' = 32.1$ MPa και $a/d = 2.0$, προκύπτει $v_u = 3621.6$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 146.68$ kN, τιμή πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε στο πείραμα (140.09 kN). Η δεύτερη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa (1992) είναι:

$$v_u = (0.7\sqrt{f_c'} + 7F)\frac{d}{a} + 17.2\rho\frac{d}{a} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας ως παραπάνω προκύπτει $v_u = 5154$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα του δοκαριού είναι $V_u = v_u b d = 208.74$ kN, τιμή πολύ πάνω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (140.09 kN) κατά 49%. Η δεύτερη σχέση, δηλαδή υπερεκτιμά σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του ινοπλισμένου δοκιμίου σε διάτμηση.

5.3.4. Εύρεση ανάλογου ποσοστού διατμητικού οπλισμού (συνδετήρων)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5.3.2, για τη σύνθεση του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ($f_{ck} = 25$ MPa) η αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση είναι ίση με $V_c = 70.2$ kN. Η αντοχή του πειραματικού δοκιμίου D150 έφτασε την τιμή των 140.08 kN. Ενδιαφέρον είναι να υπολογιστεί το ανάλογο ποσοστό συνδετήρων που αντιστοιχεί στην επιπλέον αντοχή που δίνουν οι χαλύβδινες ίνες DRAMIX σε ποσοστό κ.ό. 1.8%.

Η επιπλέον αντοχή της δοκού, λόγω της προσθήκης των ινών είναι ίση με $140.08 - 70.2 = 69.88$ kN. Αυτή την επιπλέον αντοχή μπορούν να εξασφαλίσουν συνδετήρες $\Phi 10$ δίτμητοι με $A_{sw} = 1.57$ cm² αν τοποθετηθούν ανά απόσταση s , οποία βρίσκεται από τη σχέση:

$$V_{wd} = 0.9d * A_{sw} * f_{yw} / s$$

όπου $V_{wd} = 69.88$ kN και $f_{yw} = 520$ MPa για χάλυβα συνδετήρων ποιότητας B500C.

Από τη σχέση προκύπτει απόσταση $s = 28.4$ cm. Δηλαδή το ισοδύναμο των συνδετήρων για το δοκίμιο D150, προκύπτει ότι είναι να τοποθετηθούν $\Phi 10/28$ και αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $\rho_w = A_{sw}/(b_w s) = 0.0037$. Καλό θα ήταν, βέβαια, να τονιστεί η πολύ πιο πλάστιμη συμπεριφορά των ινοπλισμένων δοκιμίων στη διατμητική αστοχία, έναντι των δοκών με συμβατικό διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες).

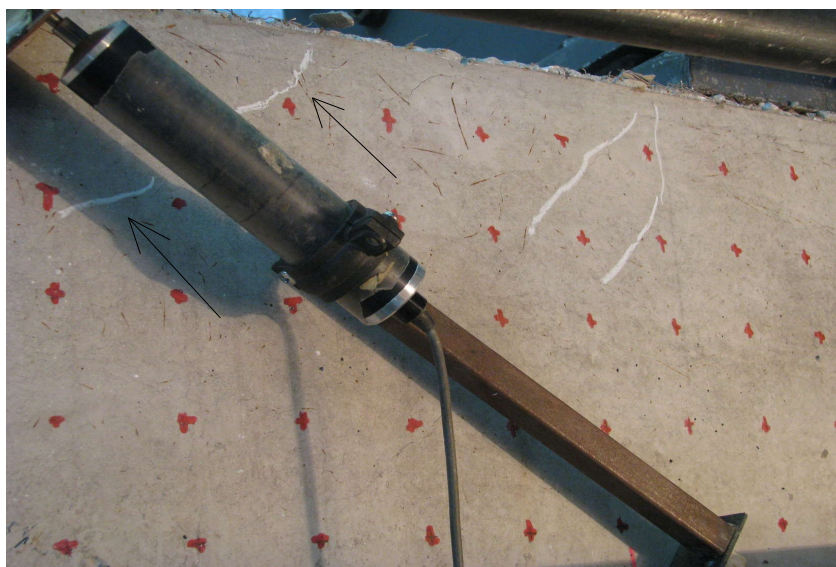
5.4. Δοκίμιο D200

5.4.1 Συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος

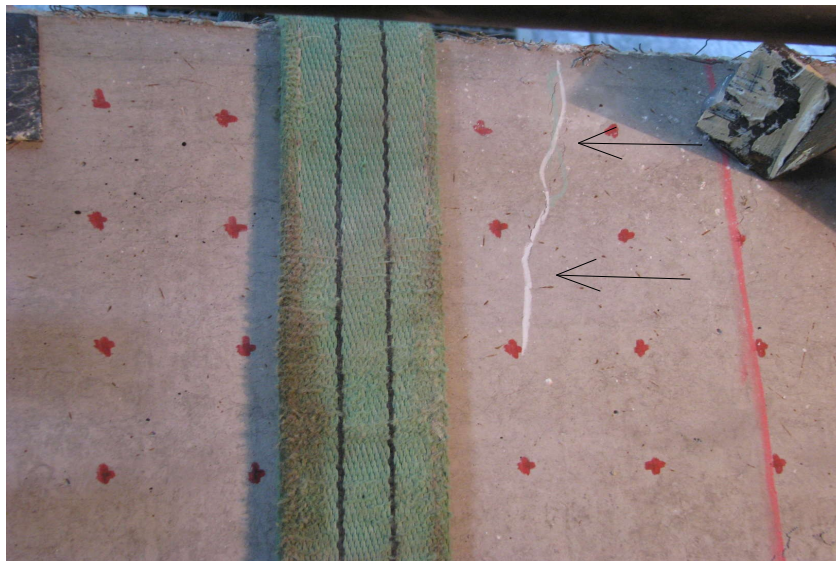
Το δοκίμιο D200 σε χαμηλή στάθμη φορτίου εμφάνισε διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας δύναμης (Εικόνες 5.4.1.1 και 5.4.1.2), οι οποίες δεν άνοιξαν αμέσως, βοηθώντας το δοκίμιο να παραλαμβάνει συνεχώς περισσότερη φέρουσα δύναμη και ενέργεια. Στη συνέχεια παρατηρείται η δημιουργία μίας κατακόρυφης καμπτικής ρωγμής εντός της περιοχής σταθερής ροπής, δυστυχώς εκτός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων (Εικόνα 5.4.1.3).



Εικόνα 5.4.1.1: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής αριστερά



Εικόνα 5.4.1.2: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής δεξιά



Εικόνα 5.4.1.3: Εμφάνιση καμπτικής ρωγμής εντός της περιοχής σταθερής ροπής του δοκιμίου

Όσο το φορτίο (όπου φορτίο ονομάζουμε το συνολικό φορτίο P με το οποίο φορτίζουμε τη σιδηρά δοκό, η οποία στηρίζεται σε 2 κυλίνδρους που φορτίζουν το δοκίμιο σε 2 σημεία συμμετρικά) ανεβαίνει, οι διατμητικές ρωγμές φαίνεται να σταθεροποιούνται, ενώ η καμπτική επεκτείνεται διαρκώς (Εικόνα 5.4.1.4) και στη συνέχεια εντοπίζονται ρωγμές και στη θλιβόμενη ζώνη της δοκού (Εικόνα 5.4.1.5).

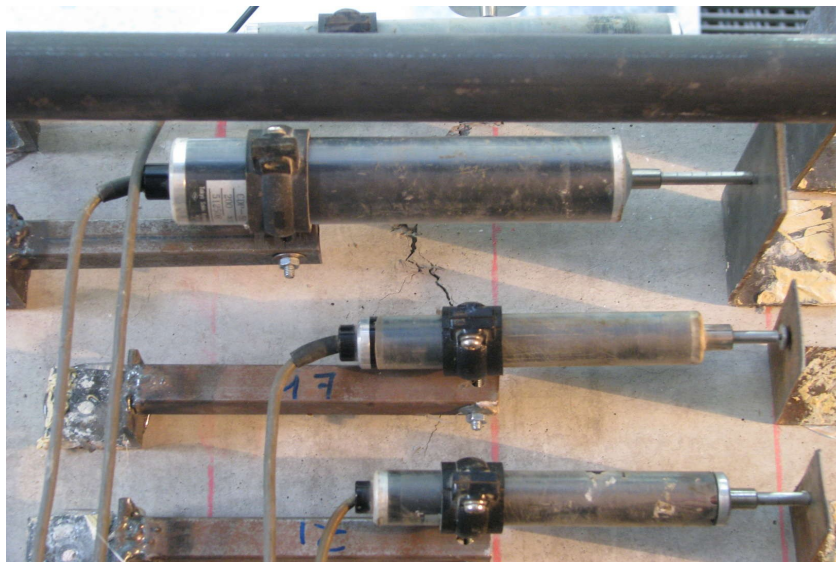


Εικόνα 5.4.1.4: Επέκταση καμπτικής ρωγμής



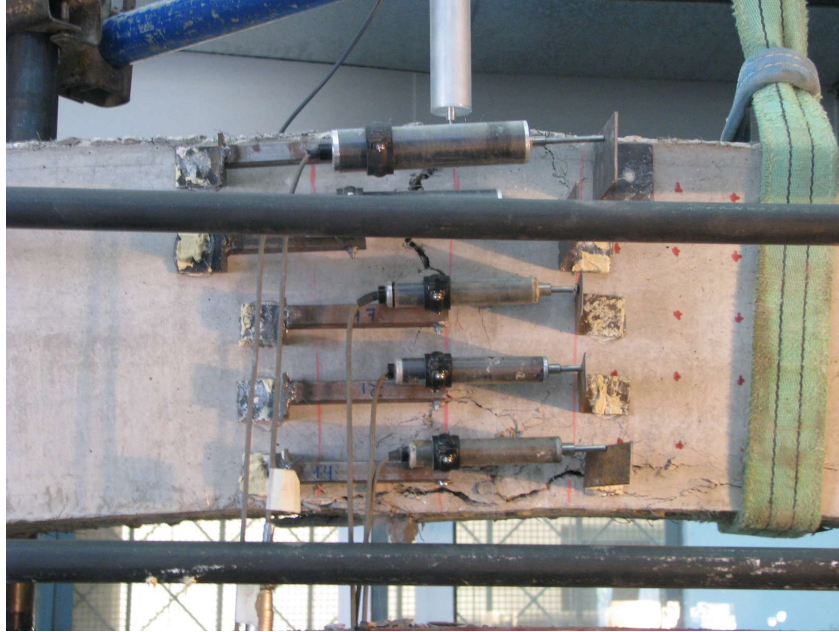
Εικόνα 5.4.1.5: Επέκταση καμπτικής ρωγμής και δημιουργία θλιπτικών ρωγμών λόγω κάμψης

Στη συνέχεια, εμφανίστηκε μία διακριτή καμπτική ρωγμή κατακόρυφη στην περιοχή σταθερής ροπής (Εικόνα 5.4.1.6), η οποία, όπως φαίνεται και στο σχήμα, βρίσκεται εντός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων, οπότε δημιουργήθηκε σημαντική πληροφορία για την καμπτική παραμόρφωση της δοκού.

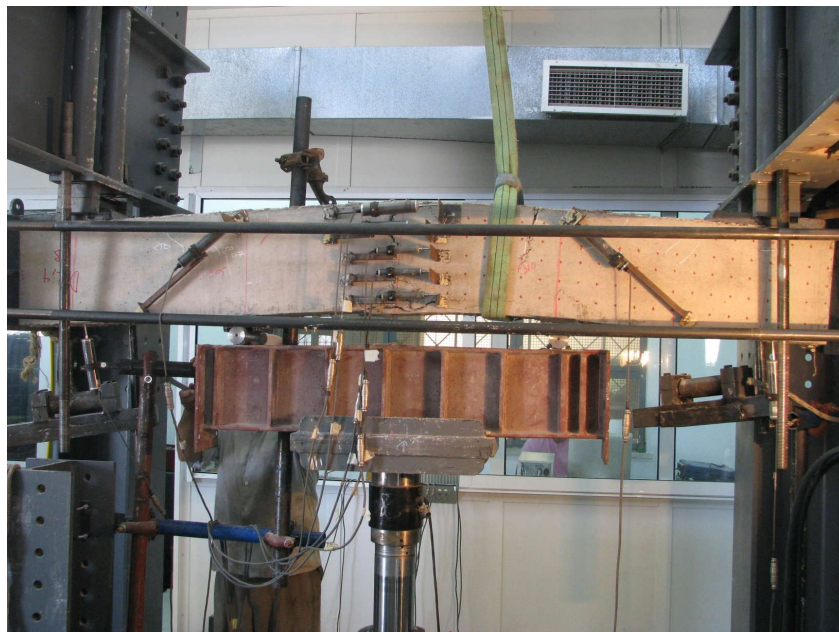


Εικόνα 5.4.1.6: Εμφάνιση καμπτικής ρωγμής εντός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων

Η δοκός παρουσιάζει μία πλάστιμη συμπεριφορά (όπως είναι λογικό, καθώς η αστοχία προέκυψε από κάμψη) διατηρώντας τη φέρουσα ικανότητά της σε μεγάλες παραμορφώσεις. Η ρωγμή που προκαλεί την αστοχία (πλαστική άρθρωση) είναι η ρωγμή εντός της καταγραφής των βελομέτρων (Εικόνα 5.4.1.7). Η γενική εικόνα της δοκού κατά την αστοχία φαίνεται στην Εικόνα 5.4.1.8.



Εικόνα 5.4.1.7: Εικόνα καμπτικής ρωγμής που προκάλεσε την αστοχία

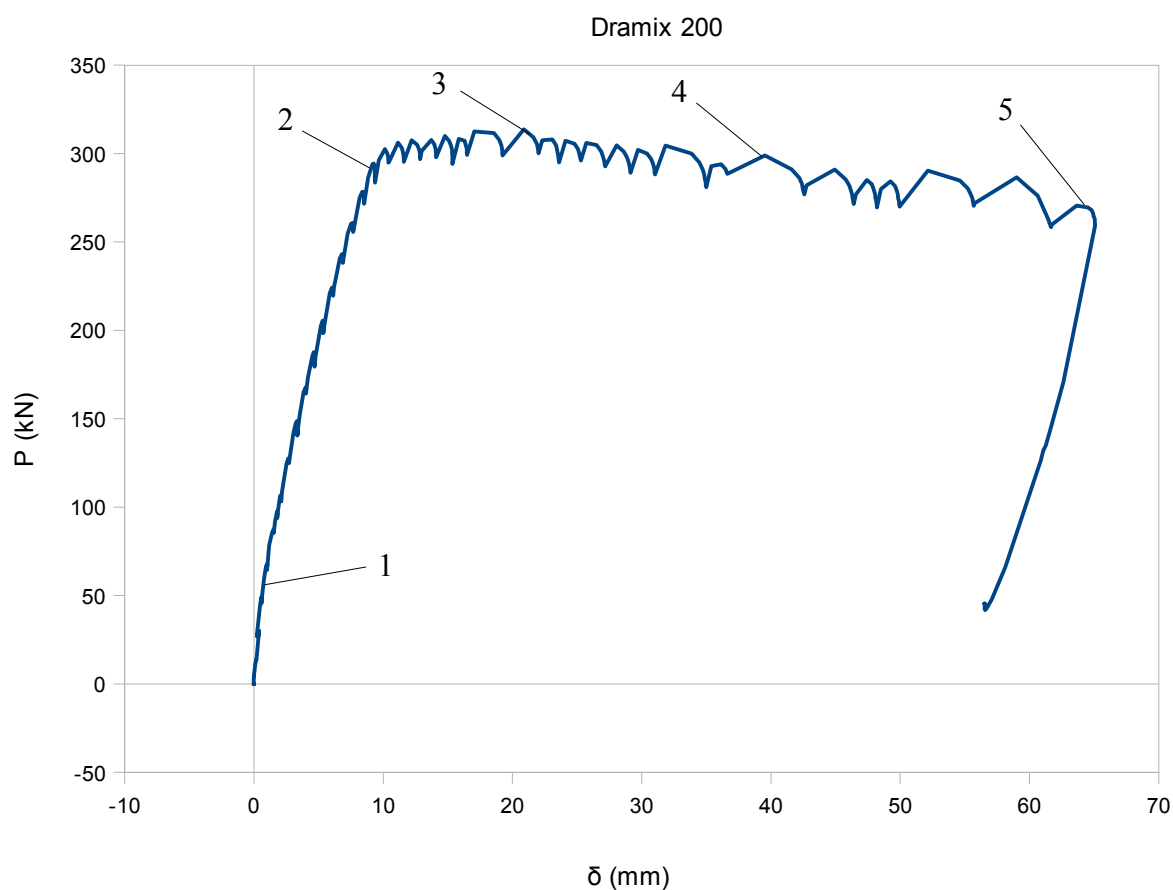


Εικόνα 5.4.1.8: Γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία

5.4.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των καταγραφών του πειράματος

- Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης $P - \delta$:

Η τιμή του φορτίου και των λοιπών καταγραφών παραμόρφωσης και μετατόπισης καταγράφονται συνεχώς ταυτόχρονα. Η τιμή του καμπτικού βέλους της δοκού για κάθε στιγμή θα δίνεται αν από την τιμή του κατακόρυφου βελομέτρου που βρίσκεται στο μέσον (κανάλι 1) αφαιρέσουμε τη μέση τιμή των καταγραφών των βελομέτρων που βρίσκονται κάτω από τις στηρίξεις (κανάλια 2 και 3). Έτσι, προκύπτει η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης $P - \delta$ (Σχήμα 5.4.2.1)



Σχήμα 5.4.2.1: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης του δοκιμίου D200

	P (kN)	δ (mm)
Σημείο 1	59.86	0.781
Σημείο 2	294.41	9.275
Σημείο 3	313.64	20.887
Σημείο 4	298.93	39.534
Σημείο 5	270.51	63.652

Πίνακας 5.4.2.1: Φορτίο και παραμόρφωση στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης το δοκίμιο παρουσίασε μια πλάσטיμη συμπεριφορά αστοχώντας καμπτικά και έφτασε σε υψηλότερες παραμορφώσεις σε σχέση με τα προηγούμενα χάνοντας πολύ μικρό μέρος της αντοχής του. Η ρηγμάτωση του δοκιμίου φαίνεται να πραγματοποιείται όντως σε χαμηλή στάθμη φορτίου ($P_{cr} = 59.9$ kN), όπου και αλλάζει η κλίση του διαγράμματος (σημείο 1). Το δοκίμιο φαίνεται να διαρρέει σε στάθμη φορτίου 294.4 kN με παραμόρφωση 9.28 mm (σημείο 2), στη συνέχεια παρουσιάζει μία μικρή κράτυνση επιτυγχάνοντας μέγιστη αντοχή στο σημείο 3 (313.64 kN) και τέλος φθίνει με αργό ρυθμό μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας στα 63 mm (σημείο 5). Η τιμή της πλαστιμότητας για αυτό το δοκίμιο είναι $q_d = 63/9.28 = 6.79$. Οι ακαμψίες του δοκιμίου για τις τρεις αρχικές κλίσεις του διαγράμματος υπολογίζονται παρακάτω:

Αρηγμάτωτος κλάδος: $K_{gr} = P_1/\delta_1 = 76.65$ kN/mm

Ρηγματωμένος κλάδος: $K_y = (P_2 - P_1)/(\delta_2 - \delta_1) = 27.61$ kN/mm

Κλάδος κράτυνσης: $K_h = (P_3 - P_2)/(\delta_3 - \delta_2) = 1.66$ kN/mm

Η μέγιστη συνολική δύναμη που έφτασε το έμβολο είναι ίση με $P_{max} = 313.64$ kN, αλλά εφόσον το δοκίμιο αστόχησε σε κάμψη μπορούμε να πούμε ότι η οριακή διατμητική του αντοχή είναι μεγαλύτερη από την $P_{max}/2 = 156.82$ kN. Εφόσον η κατηγορία του άοπλου σκυροδέματος (βάσει μελέτης σύνθεσης) είναι αντοχής C25/30, μία αντίστοιχη δοκός από το ίδιο σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη ίνας και χωρίς διατμητικό οπλισμό θα είχε διατμητική αντοχή ίση με $V_c = 70.2$ kN (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5.2.2), δηλαδή εκτιμούμε αύξηση μεγαλύτερη της τάξης του 123.4 % στη διατμητική αντοχή του δοκιμίου D200. Αξίζει να συγκριθεί η ροπή αντοχής της ινοπλισμένης διατομής με τη διατομή συμβατικού σκυροδέματος με την ίδια σύνθεση. Για το συμβατικό σκυρόδεμα ισχύει

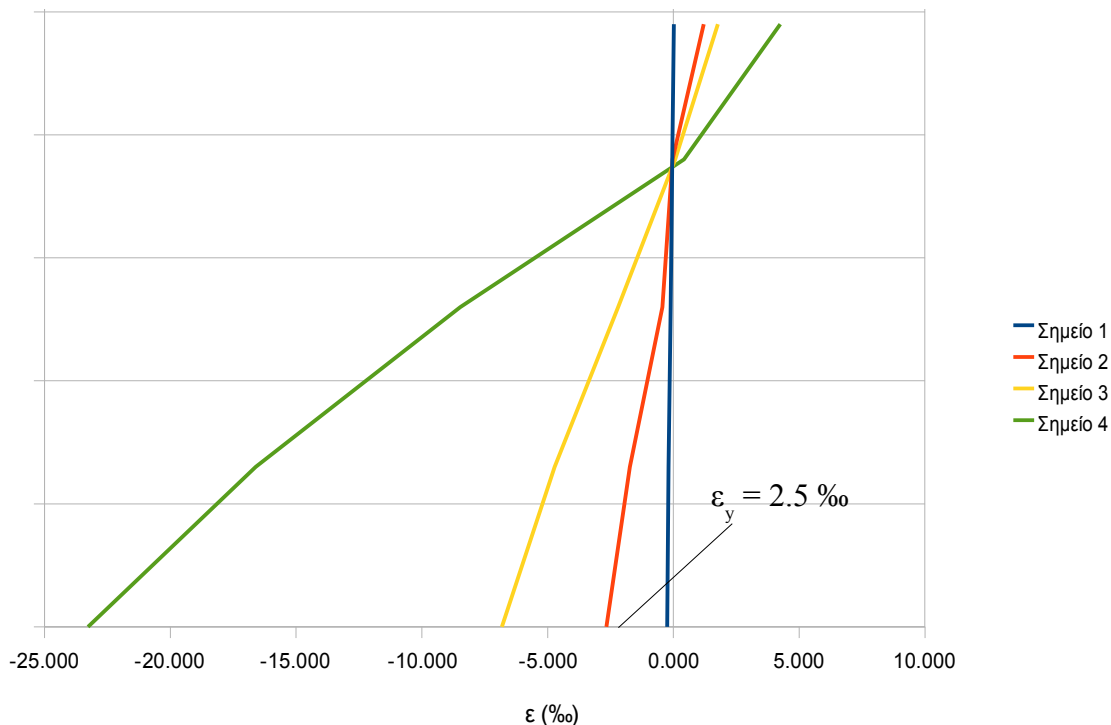
$$A_s * f_{yk} = 0.68 * b * x * f_{ck}$$

όπου $A_s = 3\Phi 14 = 4.62$ cm², $f_{yk} = 510$ MPa, $b = 0.15$ m, $f_{ck} = 25$ MPa για την πειραματική διάταξη. Λύνοντας ως προς x , βρίσκουμε $x = 0.0924$ m. Η ροπή αντοχής του συμβατικού σκυροδέματος θα είναι

$$M_{Rd} = A_s * f_y (d - 0.4 * x) = 54.91$$
 kNm = $P * a$.

Άρα $P = 54.91/0.54 = 101.69$ kN και το ολικό φορτίο είναι $2P = 203.37$ kN. Παρατηρείται, δηλαδή, μία αύξηση της αντοχής σε κάμψη της τάξης του 54.2 %.

Αξίζει να παρατηρηθεί λόγω της διάταξης των βελομέτρων στη μεσαία διατομή, η συμπεριφορά της μεσαίας διατομής σε κρίσιμα σημεία της καμπύλης (Σχήμα 5.4.2.2).



Σχήμα 5.2.2.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ ύψος της διατομής για τα σημεία του διαγράμματος 1,2,3 και 4

Το διάγραμμα παραμορφώσεων για το σημείο 5 του διαγράμματος δεν είναι δυνατό να αποτυπωθεί, καθώς το κάτω βελόμετρο της διάταξης έχει φύγει από τη θέση του, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.4.1.7, οπότε δεν απεικονίζεται για την καθαρότητα του σχήματος. Να σημειωθεί ότι με θετικό πρόσημο απεικονίζεται η θλίψη στο παραπάνω διάγραμμα. Αναλυτικά, παρατίθενται στον Πίνακα 5.4.2.1 τα κρίσιμα σημεία της καμπύλης όπως επιλέχθηκαν, το φορτίο και η παραμόρφωση για το κάθε σημείο.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα παραμορφώσεων της μεσαίας διατομής για τα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος P – δ, η παραδοχή Bernoulli – Euler για την επιπεδότητα της διατομής σε κάθε χρονική στιγμή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης, παρατηρείται πως από τη στιγμή της διαρροής του δοκιμίου (σημείο 2) αυξάνεται η καμπυλότητα συνεχώς, προκαλώντας μεγάλες παραμορφώσεις στη θέση του χάλυβα οπλισμού (στο σημείο 4 φτάνει μέχρι το 23‰).

Αξίζει να σημειωθεί η καμπτική συμπεριφορά της δοκού, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα παραμορφώσεων. Μία πρώτη παρατήρηση είναι πως ο ουδέτερος άξονας της δοκού σε όλα τα σημεία που φαίνονται στο σχήμα είναι περίπου στο ύψος του δεύτερου βελομέτρου μετρώντας από τη θλιβόμενη ίνα. Από το Σχήμα 4.2.2, βλέπουμε ότι το βελόμετρο αυτό (κανάλι 9) βρίσκεται σε απόσταση 9.5 cm από τη θλιβόμενη ακραία ίνα της διατομής. Οπότε μπορούμε να εξάγουμε συμπέρασμα για το πάχος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής, ότι είναι περίπου 9.5 cm. Ένα άλλο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει, είναι από το βελόμετρο που βρίσκεται στην άκρη της εφελκόμενης

περιοχής, δηλαδή περίπου στο ύψος του χάλυβα οπλισμού (2.5 cm από την ακραία ίνα), ο διαμήκης χάλυβας διαρρέει σχεδόν ταυτόχρονα με τη διαρροή του δοκιμίου (σημείο 2). Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι η παραμόρφωση του “κάτω” βελομέτρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.2.2 είναι σχεδόν ίση με την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα S500 ($\varepsilon_y = 2.5\%$). Το τελευταίο συμπέρασμα, βέβαια, είναι ορατό και από τις φωτογραφίες της δοκού κατά τη διάρκεια του πειράματος, τις κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές που έχουν εμφανιστεί, καθώς και το λυγισμό του χάλυβα οπλισμού εντός της περιοχής σταθερής ροπής της δοκού.

- Καμπύλη ροπών – καμπυλοτήτων $M - \varphi$:

Από τις συνεχείς μετρήσεις του φορτίου P μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος να εξάγουμε μία τιμή της ροπής M στο μέσον, καθώς όπως προκύπτει από το διάγραμμα ροπών της αμφίεριστης δοκού που φορτίζεται σε ίσες αποστάσεις a από τις στηρίξεις (Σχήμα 5.2.2.3) η ροπή στο μέσον ισούται με το γινόμενο της δύναμης P επί το διατμητικό μήκος a , που είναι ίσο με 54 cm για το πείραμα που διεξάγεται.

Για τις τιμές της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής, εφόσον έχει ήδη αποδειχθεί παραπάνω ότι η κατανομή των παραμορφώσεων της διατομής δεν απέχει πολύ από την ευθεία για διάφορες χρονικές στιγμές (παραδοχή Bernoulli – Euler), αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των παραμορφώσεων των δύο ακραίων βελομέτρων καθ ύψος. Το άθροισμα των απόλυτων τιμών των παραμορφώσεων αυτών διαιρούμενο με την υψομετρική τους απόσταση H δίνει τη μέση τιμή της κλίσης του διαγράμματος για κάθε χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς αρχικές αποστάσεις βελομέτρων για το δοκίμιο όπως δίνονται στο κεφάλαιο της πειραματικής διάταξης (Σχήμα 4.2.4).

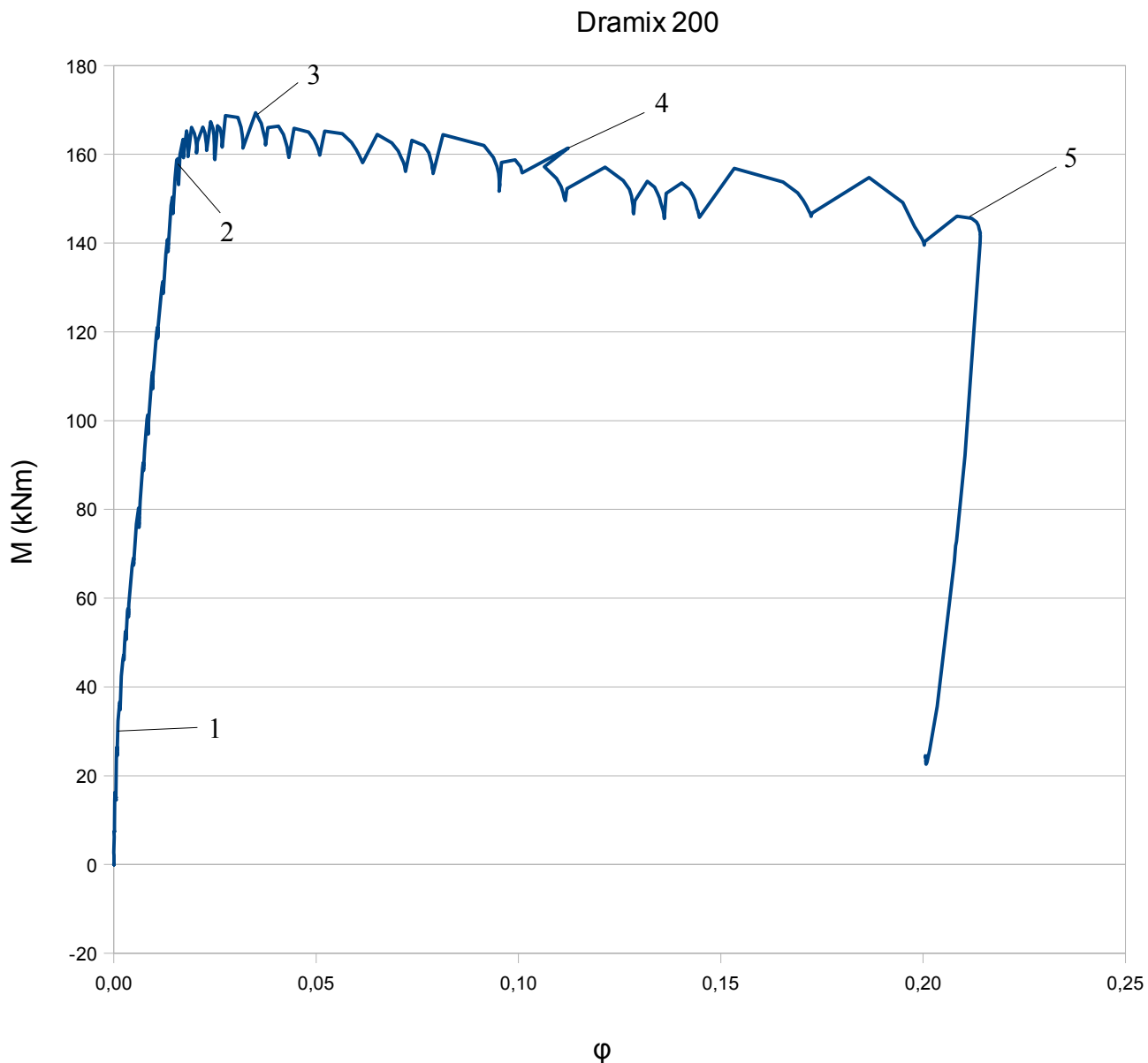
Αναλυτικά, η μέση καμπυλότητα της μεσαίας διατομής υπολογίστηκε ως:

$$\varphi = \frac{(|\varepsilon(6)| + |\varepsilon(10)|)}{H}$$

όπου $\varepsilon(6)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου πάνω βελομέτρου όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη, $\varepsilon(10)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου κάτω βελομέτρου και H η υψομετρική απόσταση των δύο ακραίων βελομέτρων, που για το δοκίμιο D200 είναι 245 mm (Σχήμα 4.2.4).

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Υπολογίζοντας τις τιμές της ροπής και της καμπυλότητας για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει η καμπύλη $M - \varphi$ (Σχήμα 5.4.2.3):



Σχήμα 5.4.2.3: Καμπύλη ροπών - καμπυλοτήτων του δοκιμίου D200

Όπως και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, έτσι και στην καμπύλη ροπών καμπυλοτήτων, βλέπουμε κατά αντιστοιχία τα καθοριστικά σημεία 1,2,3,4 και 5. Φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα, η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η μικρή πτώση της αντοχής (4) και η στιγμή λίγο πριν την αστοχία (5). Να σημειωθεί, ότι μετά τη βλάβη του κάτω βελομέτρου (κανάλι 10) χρησιμοποιήθηκε η παραμόρφωση του πιο πάνω βελομέτρου (κανάλι 9) για τον υπολογισμό της μέσης καμπυλότητας.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από αυτό το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά πως μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου (σημείο 3), η τιμή της καμπυλότητας αυξάνεται διαρκώς μέχρι το δοκίμιο να φτάσει στην αστοχία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 5.4.2.2, όπου η κλίση του διαγράμματος παραμορφώσεων για τα σημεία 1,2,3 και 4 αυξάνεται συνεχώς. Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από την καμπύλη $M - \varphi$ είναι μια προσέγγιση της ροπής αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής, εφόσον το μέτρο ελαστικότητας E_c του συγκεκριμένου δοκιμίου έχει εκτιμηθεί από τα αποτελέσματα του κυλινδρικού δοκιμίου ίση με 31.25 GPa (Κεφάλαιο 3.2). Είναι γνωστό πως η κλίση του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων μετά τη ρηγμάτωση, είναι ίση με το γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας E_c επί τη ροπή αδράνειας της διατομής I_{cr} . Στο διάγραμμα μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία το κομμάτι της καμπύλης μεταξύ των σημείων 1 και 2 (μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή). Στον Πίνακα 5.2.2.2 δίνονται οι τιμές ροπής και καμπυλότητας για κάθε ένα από τα 5 σημεία:

	M (kNm)	φ (1/m)
Σημείο 1	32.324	0.00107
Σημείο 2	158.981	0.01581
Σημείο 3	169.366	0.03504
Σημείο 4	161.422	0.11231
Σημείο 5	146.075	0.20840

Πίνακας 5.4.2.2: Ροπή και καμπυλότητα στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Η κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων 1 και 2 είναι ίση με $(158.981-32.324)/(0.01581-0.00107) = 8592.74 \text{ kNm}^2 = E_c I_{cr}$. Άρα, η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής προκύπτει ίση με $I_{cr} = 8592.74/31250000 = 2.7497 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 = 27497 \text{ cm}^4$. Η ροπή αδράνειας της αρηγμάτωτης διατομής του δοκιμίου (Κωτσοβός, 2000) είναι ίση με

$$I_g = bh^3/12 + bh(x-h/2)^2 + \alpha_e A_s (d-x)^2$$

όπου x προκύπτει από τη σχέση:

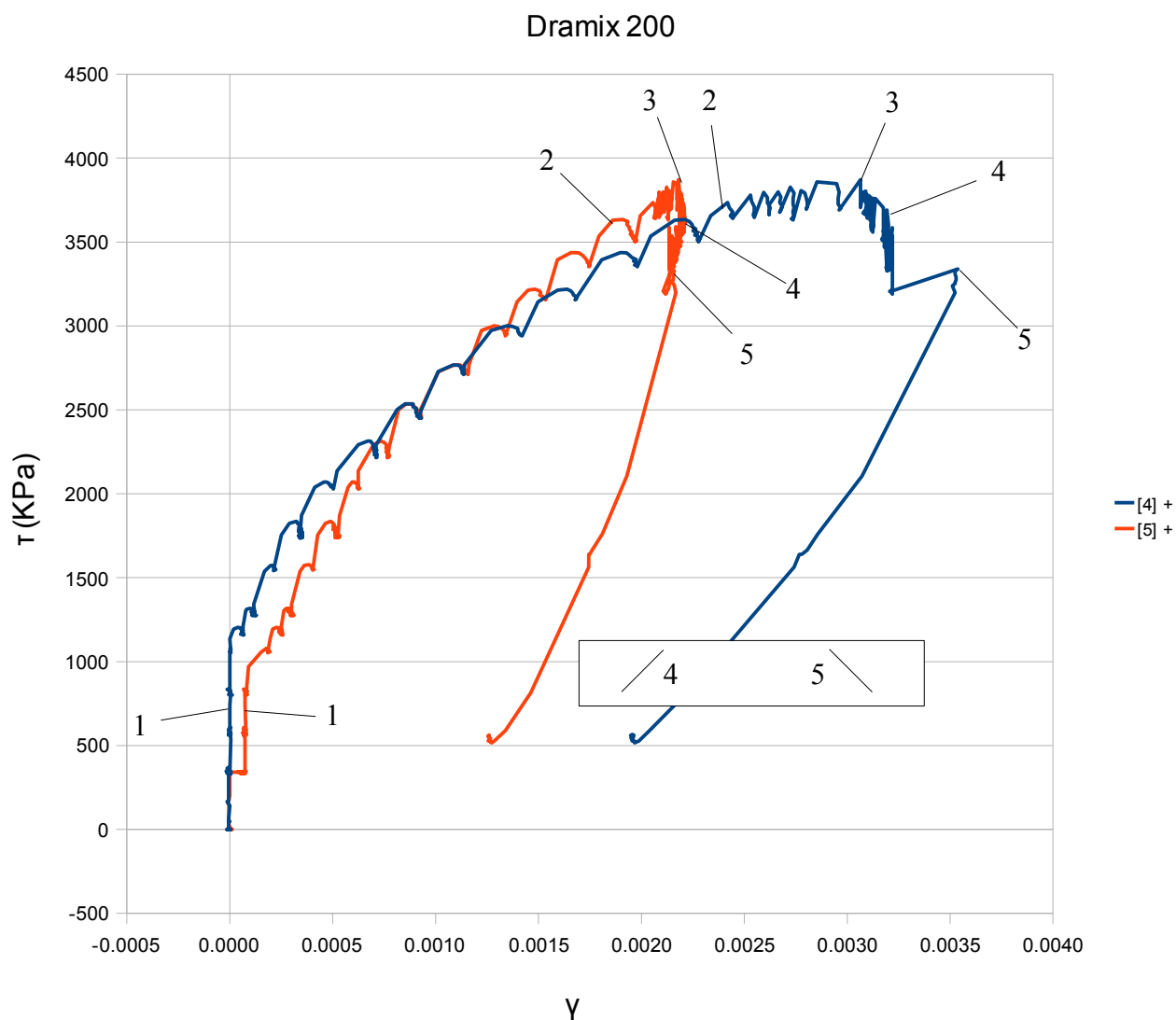
$$A_c(x-h/2) = \alpha_e A_s (d-x)$$

και $\alpha_e = E_s/E_c$, με E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 200 GPa και E_c το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος ίσο με 31.25 GPa για το δοκίμιο D200. Από τους υπολογισμούς προκύπτει $I_g = 37745 \text{ cm}^4$. Εκτιμάται, δηλαδή ότι η ροπή αδρανείας του ινοπλισμένου σκυροδέματος D200 μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη ρηγμάτωση, καθώς μειώνεται κατά 27.15 %, τιμή μικρότερη, όμως, από αυτή που συναντάμε στο συμβατικό σκυρόδεμα (μείωση της τάξης του 50 %).

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης $\tau - \gamma$:

Για το δοκίμιο D200 και τον έλεγχο της διατμητικής συμπεριφοράς αυτού στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας (βλ. Σχήμα 5.2.2.3) τοποθετήθηκαν δύο αναλογικά βελομέτρα σε γωνία 45° κάθετα στις αναμενόμενες διατμητικές ρωγμές (κανάλια 4 και 5). Από τη συνεχή καταγραφή του φορτίου μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή να εξάγουμε τη διατμητική τάση που ασκείται σε κάθε μία από τις δύο περιοχές $\tau = V/bd$, όπου $V = P/2$, b το πλάτος της δοκού που είναι 15 cm και d το στατικό ύψος της δοκού ίσο με 27 cm. Για την τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετατοπίσεις των διατμητικών βελομέτρων διαιρούμενες με τη αρχική απόσταση της διαγωνίου του κάθε βελομέτρου, όπως απεικονίζεται στην πειραματική διάταξη (Σχήμα 4.2.4). Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα $\tau - \gamma$ και για τις δύο διαγώνιες ρωγμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.2.4:



Σχήμα 5.4.2.4: Καμπύλη διατμητικής τάσης - γωνιακής παραμόρφωσης για το δοκίμιο D200

Στο Σχήμα 5.4.2.4 φαίνεται η καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης και για τις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας του δοκιμίου. Στις δύο καμπύλες των καναλιών 4 και 5, φαίνονται και τα καθοριστικά σημεία, όπως έχουν επιλεγθεί από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, δηλαδή η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η μικρή πτώση της αντοχής (4) και η στιγμή λίγο πριν την αστοχία (5).

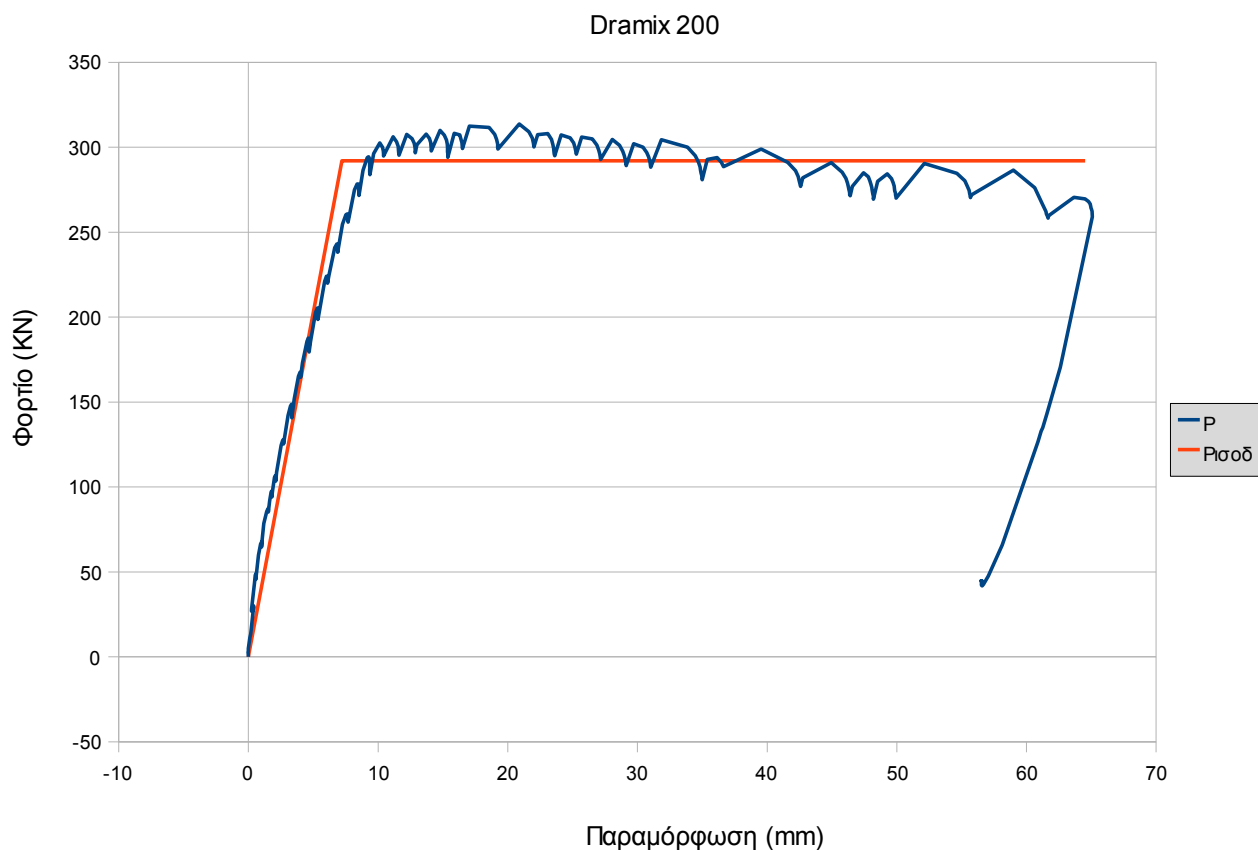
Αυτό που αξίζει να εξεταστεί στις δύο παραπάνω καμπύλες είναι οι κλίσεις αυτών, και η σύγκριση μεταξύ τους. Παρατηρούμε, πως όσο οι δύο διατομές είναι αρηγμάτωτες (αρχική κλίση των δύο καμπυλών) έχουν την ίδια κλίση, από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου σκυροδέματος G_{gr} . Στη συνέχεια, τα δύο διαγράμματα διαφοροποιούνται ως προς την κλίση, με την καμπύλη του καναλιού 4 να φτάνει σε μεγαλύτερες γωνιακές παραμορφώσεις στην επίτευξη του μέγιστου φορτίου (σημείο 3), αλλά μετά από αυτό το σημείο οι ρωγμές φαίνεται να μένουν σταθερές χωρίς ιδιαίτερη αύξηση των παραμορφώσεων. Η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{max} του δοκιμίου D200 είναι ίση με $3872.1 \text{ kPa} = 3.87 \text{ MPa}$

Το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου ινοπλισμένου σκυροδέματος G_{gr} υπολογίζεται από το σημείο 1 της καμπύλης και ισούται με το πηλίκο της διατμητικής τάσης τ προς τη γωνιακή παραμόρφωση γ . Για το δοκίμιο D200, το σημείο 1 έχει διατμητική τάση ίση με 560.37 kPa και γωνιακή παραμόρφωση γ (λήφθηκε η μέση τιμή των δύο τιμών των δύο καναλιών) ίση με 0.00004 . Οπότε το μέτρο διάτμησης εκτιμάται ίσο με $G_{gr} = 560.37 / 0.00004 = 14009250 \text{ kPa} = 14.009 \text{ GPa}$. Από αυτή την τιμή και τη σχέση $G = E/2(1+\nu)$ μπορούμε να πάρουμε μία ακόμα εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του δοκιμίου. Θεωρώντας το $\nu = 0.2$ (τιμή αποδεκτή για το οπλισμένο σκυρόδεμα), προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου ίσο με 33.62 GPa , τιμή όχι μακριά από την τιμή που προέκυψε από τη δοκιμή θλίψης ($E = 31.25 \text{ GPa}$).

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Υπολογισμός ισοδύναμης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Το δοκίμιο D200 συμπεριφέρθηκε πλάστιμα κατά την αστοχία, αστοχώντας σε κάμψη και οδήγησε σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις μη χάνοντας σημαντικό ποσοστό της φέρουσας ικανότητάς του. Για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του υλικού σε πλαστιμότητα, χρήσιμο είναι να καθοριστεί το ισοδύναμο διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης, που αντιστοιχεί σε μία τιμή φορτίου $P_{ισοδ}$, που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη διαρροή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Για την κατασκευή του διαγράμματος, υπολογίστηκε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης και βρέθηκε ίσο με 17883 kNmm. Αυτό το εμβαδόν είναι και ένας δείκτης της απορρόφησης ενέργειας του υλικού. Το ιδεατό ελαστοπλαστικό διάγραμμα κατασκευάζεται έτσι ώστε να έχει αυτό το εμβαδόν και ο ελαστικός κλάδος του να διέρχεται από το σημείο $0.6P_{max} = 187.54$ kN για το δοκίμιο D200. Ως αστοχία θεωρήθηκε η στιγμή που το δοκίμιο έχασε περίπου το 15 % της αντοχής του. Έτσι προκύπτει το διάγραμμα:



Σχήμα 5.4.2.5: Προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου D200 με ελαστοπλαστική

Η αντοχή διαρροής που προέκυψε για το ελαστοπλαστικό διάγραμμα είναι $P_{ισοδ} = 292$ kN. Η ισοδύναμη παραμόρφωση διαρροής είναι $\epsilon_y = 7.2$ mm και η παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u = 64.52$ mm. Άρα, προκύπτει μια ισοδύναμη πλαστιμότητα ίση με $\mu_{ισοδ} = 64.52/7.2 = 8.96$. Ο βαθμός αξιοπιστίας του υλικού δίνεται από την τιμή $P_{ισοδ}/P_{max} = 292/313.64 = 0.931$. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι αυτή η τιμή τόσο πιο σωστή είναι η προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου με ελαστοπλαστική. Για το δοκίμιο D200 κρίνεται απολύτως ικανοποιητική.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Εκτίμηση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου δοκιμίου σε κάμψη:

Για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος D200, θα χρησιμοποιηθούν οι καταγραφές των βελομέτρων στη μεσαία διατομή (κανάλια 6,7,8,9 και 10) κατά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου του δοκιμίου $P_{max} = 313.64$ kN (σημείο 3), που συμπίπτει και με την επίτευξη της μέγιστης ροπής $M_{max} = 169.37$ kNm. Οι τιμές των βελομέτρων καθ ύψος σε αυτή τη χρονική στιγμή δίνονται από τον πίνακα 5.4.2.3:

Κανάλια	Παραμόρφωση ϵ (%)	Απόσταση από ακραία εφελκυσόμενη ίνα (cm)
6	-6.815	3
7	-4.717	9.5
8	-2.196	16
9	0.065	22
10	1.77	27.5

Πίνακας 5.4.2.3: Καταγραφές βελομέτρων μεσαίας διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής

Στον παραπάνω πίνακα ο εφελκυσμός συμβολίζεται με μείον και η θλίψη με συν. Από τις καταγραφές των βελομέτρων 8 και 9, παρατηρείται ότι ο ουδέτερος άξονας της διατομής βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίζουν τα παραπάνω δύο βελόμετρα (αλλαγή προσήμου). Από την επίλυση των όμοιων τριγώνων βρίσκουμε ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται κοντά στο κανάλι 9 κατά 0.17 cm. Άρα, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης θα είναι ίσο με $2.5 + 5.5 + 0.17 = 8.17$ cm. Η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας, που βρίσκεται σε απόσταση 2.5 cm από το βελόμετρο 10 βρίσκεται επίσης με όμοια τρίγωνα, δεδομένου ότι γνωρίζουμε το πάχος θλιβόμενης ζώνης ως $\epsilon_c = 1.77 * (5.5 + 2.5 + 0.17) / (5.5 + 0.17) = 2.55\%$. Το διάγραμμα θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος θα ληφθεί, όπως λαμβάνεται και στο συμβατικό σκυρόδεμα με οδηγό την ακραία θλιπτική παραμόρφωση (παραδοχή όχι άστοχη, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφική αναφορά), ο χάλυβας οπλισμού έχει διαρρεύσει (παραμόρφωση του καναλιού 6 πολύ μεγαλύτερη της παραμόρφωσης διαρροής $\epsilon_y = 2.5\%$), οπότε μπορεί να ληφθεί η τάση διαρροής του ίση με 520 MPa και για την κατανομή εφελκυστικών τάσεων θα ληφθεί η παραδοχή παραλληλόγραμμου σε όλο το εφελκυστικό τμήμα της διατομής, που προσομοιάζει την εφελκυστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη με μία παραμένουσα εφελκυστική τάση f_u , όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία. Η εντατική κατάσταση της διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής φαίνεται στο Σχήμα 5.2.2.7.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για την ισορροπία της διατομής θα πρέπει οι δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτή να εξισορροπούν την εξωτερική ροπή $M_{max} = 169.37 \text{ kNm}$. Για τη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος με ακραία παραμόρφωση 2.55%, ο συντελεστής πληρώσεως α προκύπτει ίσος με 0.72 και ο συντελεστής κέντρου βάρους ζ' ίσος με 0.386 (Τάσιος, 2005). Δεδομένου ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος D200 είναι ίση με $f_{ck} = 35.6 \text{ MPa}$ (από τη δοκιμή θλίψης), η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος θα είναι ίση με

$$F_c = \alpha * 0.85 * f_{ck} * x * b = 0.72 * 0.85 * 35600 * 0.0817 * 0.15 = 267 \text{ kN}$$

Η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα οπλισμού είναι

$$F_s = A_s * f_{yk} = 4.62 * 10^{-4} * 520000 = 240.24 \text{ kN}$$

Οπότε, η εφελκυστική κατανομή λόγω των ινών του σκυροδέματος δίνει μία συνισταμένη δύναμη $F_f = F_c - F_s = 26.76 \text{ kN}$. Με την παραδοχή παραλληλόγραμμης κατανομής βρίσκουμε μία απομένουσα εφελκυστική τάση ίση με

$$f_u = F_f / (b * (h - x)) = 817.29 \text{ kPa} = 0.817 \text{ MPa}.$$

5.4.3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πειράματος του δοκιμίου D200 όσον αφορά τη διατμητική αντοχή με τις προτεινόμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση που έχει προτείνει ο Sharma (1986), η διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών υπολογίζεται ως:

$$v_u = k f_t' (d/a)^{0.25} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

όπου,

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$$k = 2/3$$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_t' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $f_t' = 0.79 (f_c')^{0.5}$ [MPa]

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου [MPa]

Λόγω έλλειψης εφελκυστικής δοκιμής διάρρηξης θα χρησιμοποιηθεί η τιμή της θλιπτικής αντοχής του κυλίνδρου ίση με 35.6 MPa για το δοκίμιο D200. Προκύπτει $f_t' = 4.71 \text{ MPa}$. Για το λόγο $a/d = 2.0$ του πειράματος, προκύπτει διατμητική αντοχή ίση με $v_u = 2640.41 \text{ KPa}$. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 106.94 \text{ kN}$, τιμή αρκετά κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (156.82 kN) κατά 31.8%.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι Al-Ta'an και Al-Feel (1990) έχουν προτείνει μία σχέση για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες στο δοκίμιο. Η διατμητική αντοχή που προσφέρει το σκυρόδεμα στο δοκίμιο προκύπτει από τη σχέση

$$V_c = 2 \cdot f_{ctm} \cdot b_w \cdot d / 3$$

όπου $f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 3245.77 \text{ kPa}$ για θλιπτική αντοχή 35.6 MPa . Άρα, προκύπτει $V_c = 87.64 \text{ kN}$ για τη δοκό του πειράματος. Η προτεινόμενη σχέση για την προσφορά των ινών στη διάτμηση είναι:

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (7)$$

όπου, $\kappa = 1.2$ για ίνες με άγκιστρα, όπως του πειράματος, V_f το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ίσο με 2.4% για το δοκίμιο D200 και $L_f/D_f = 65$ για την ίνα DRAMIX που χρησιμοποιήθηκε. Οπότε προκύπτει, $v_f = 1768 \text{ kPa}$, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 71.6 \text{ kN}$. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 159.24 \text{ kN}$, τιμή πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε από το πείραμα (156.82 kN).

Οι Swamy et al. (1993) έχουν προτείνει μία σχέση ακόμα για τη συνεισφορά της ίνας στη διατμητική αντοχή, η οποία είναι:

$$v_f = 0.37 \tau V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (8)$$

όπου τ η διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος, οποία έχει προταθεί να λαμβάνεται ίση με 4.15 MPa , ελλείψει δοκιμών εξόλκευσης. Αντικαθιστώντας τις υπόλοιπες τιμές όπως παραπάνω, προκύπτει $v_f = 2395.38 \text{ kPa}$, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 97 \text{ kN}$. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 184.64 \text{ kN}$, τιμή που υπερεκτιμά τη διατμητική αντοχή, όπως προέκυψε από το πείραμα (156.82 kN) κατά 17.7% .

Οι Ashour, Hasanain και Wafa (1992) έχουν προτείνει δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών. Η πρώτη είναι:

Για $a/d \geq 2.5$,

$$v_u = (2.11 \sqrt{f_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (\text{MPa}) \quad (5a)$$

Για $a/d < 2.5$,

$$v_u = [\text{Eq. (5a)}] \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (5b)$$

όπου $F = (L_f/D_f) V_f d_f$, $d_f = 0.75$ για ίνες με άγκιστρα, ρ το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ίσο με 1.14% για τις δοκούς του πειράματος και $v_b = 0.41 \tau F$, όπου $\tau = 4.15 \text{ MPa}$, όπως λήφθηκε παραπάνω. ~~Γ26~~-την

τιμή $f_c' = 35.6$ MPa και $a/d = 2.0$, προκύπτει $v_u = 4379.46$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 177.36$ kN, τιμή πάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (156.82 kN) κατά 13.1%. Η δεύτερη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa είναι:

$$v_u = (0.7\sqrt{f_c'} + 7F)\frac{d}{a} + 17.2\rho\frac{d}{a} \text{ (MPa)} \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας ως παραπάνω προκύπτει $v_u = 6281.34$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 254.39$ kN, τιμή πολύ πάνω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (156.82 kN) κατά 62.2%. Η δεύτερη σχέση, δηλαδή υπερεκτιμά σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του ινοπλισμένου δοκιμίου σε διάτμηση.

5.4.4. Εύρεση ανάλογου ποσοστού διατμητικού οπλισμού (συνδετήρων)

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5.4.2, για τη σύνθεση του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ($f_{ck} = 25$ MPa) η αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση θα είναι ίση με $V_c = 70.2$ kN. Η αντοχή του πειραματικού δοκιμίου D200 έφτασε την τιμή των 156.82 kN. Ενδιαφέρον είναι να υπολογιστεί το ανάλογο ποσοστό συνδετήρων που αντιστοιχεί στην επιπλέον αντοχή που δίνουν οι χαλύβδινες ίνες DRAMIX σε ποσοστό κ.ό. 2.4%.

Η επιπλέον αντοχή της δοκού, λόγω της προσθήκης των ινών είναι ίση με $156.82 - 70.2 = 86.62$ kN. Αυτή την επιπλέον αντοχή μπορούν να εξασφαλίσουν συνδετήρες $\Phi 10$ δίτητοι με $A_{sw} = 1.57$ cm² αν τοποθετηθούν ανά απόσταση s , οποία βρίσκεται από τη σχέση:

$$V_{wd} = 0.9d * A_{sw} * f_{ywk} / s$$

όπου $V_{wd} = 86.62$ kN και $f_{ywk} = 520$ MPa για χάλυβα συνδετήρων ποιότητας B500C.

Από τη σχέση προκύπτει απόσταση $s = 22.9$ cm. Δηλαδή το ισοδύναμο των συνδετήρων για το δοκίμιο D200, προκύπτει ότι είναι να τοποθετηθούν $\Phi 10/22$ και αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $\rho_w = A_{sw} / (b_w s) = 0.0048$. Καλό θα ήταν, βέβαια, να τονιστεί η πολύ πιο πλάστιμη συμπεριφορά των ινοπλισμένων δοκιμίων στη διατμητική αστοχία, έναντι των δοκών με συμβατικό διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες).

5.5. Δοκίμιο M100

5.5.1 Συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος

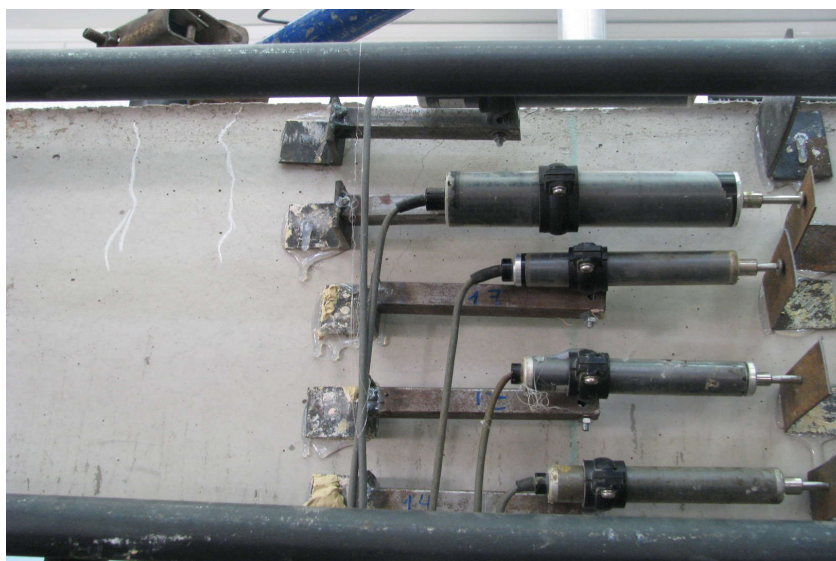
Το δοκίμιο M100 σε χαμηλή στάθμη φορτίου εμφάνισε διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας δύναμης (Εικόνες 5.5.1.1 και 5.5.1.2), οι οποίες δεν άνοιξαν αμέσως, βοηθώντας το δοκίμιο να παραλαμβάνει συνεχώς περισσότερη φέρουσα δύναμη και ενέργεια. Στη συνέχεια παρατηρείται η δημιουργία κατακόρυφων καμπτικών ρωγμών εντός της περιοχής σταθερής ροπής, εντός και εκτός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων (Εικόνα 5.5.1.3).



Εικόνα 5.5.1.1: Εμφάνιση διατμητικών ρωγμών αριστερά



Εικόνα 5.5.1.2: Εμφάνιση διατμητικών ρωγμών δεξιά



Εικόνα 5.5.1.3: Εμφάνιση καμπτικών ρωγμών εντός της περιοχής σταθερής ροπής του δοκιμίου

Όσο το φορτίο (όπου φορτίο ονομάζουμε το συνολικό φορτίο P με το οποίο φορτίζουμε τη σιδηρά δοκό, η οποία στηρίζεται σε 2 κυλίνδρους που φορτίζουν το δοκίμιο σε 2 σημεία συμμετρικά) ανεβαίνει, οι διατμητικές ρωγμές φαίνεται να σταθεροποιούνται, ενώ η καμπτικές επεκτείνονται διαρκώς (Εικόνα 5.5.1.4) και στη συνέχεια εντοπίζονται ρωγμές και στη θλιβόμενη ζώνη της δοκού (Εικόνα 5.5.1.5).

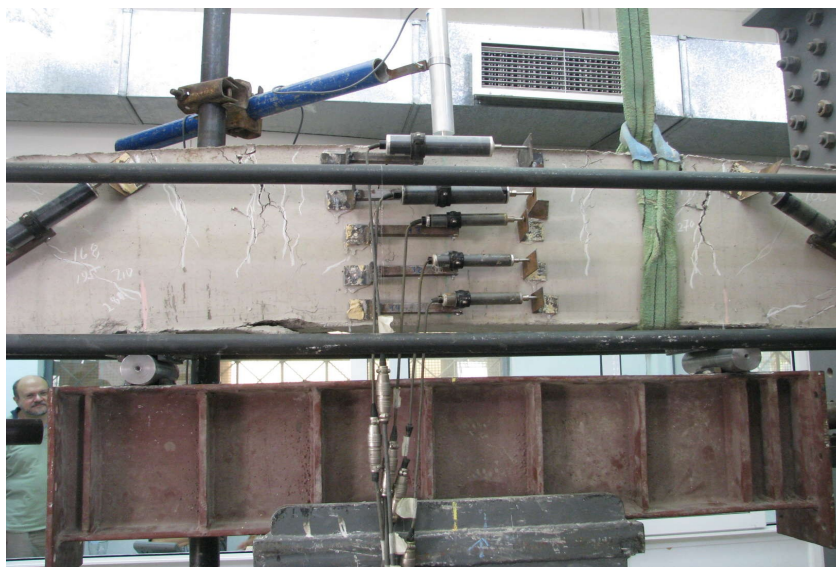


Εικόνα 5.5.1.4: Επέκταση καμπτικών ρωγμών



Εικόνα 5.5.1.5: Δημιουργία θλιπτικών ρωγμών λόγω κάμψης

Οι καμπτικές ρωγμές συνέχισαν να ανοίγουν κατανεμημένες μέσα στην περιοχή σταθερής ροπής (Εικόνα 5.5.1.6), βοηθώντας το δοκίμιο να παραλαμβάνει συνεχώς όλο και περισσότερη ενέργεια. Σε αυτή τη φάση δεν έχει ακόμα αναγνωριστεί ποια ρωγμή θα προκαλέσει την αστοχία.

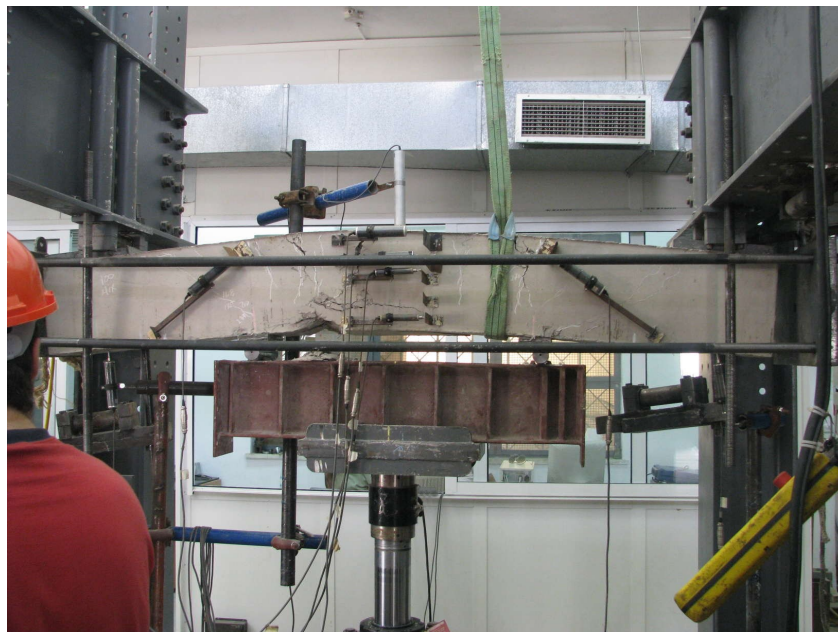


Εικόνα 5.5.1.6: Απεικόνιση καμπτικών ρωγμών κατανεμημένων εντός της περιοχής σταθερής ροπής του δοκιμίου

Η δοκός παρουσιάζει μία πλάστιμη συμπεριφορά (όπως είναι λογικό, καθώς η αστοχία προέκυψε από κάμψη) διατηρώντας τη φέρουσα ικανότητά της σε μεγάλες παραμορφώσεις. Η ρωγμή που προκαλεί την αστοχία (πλαστική άρθρωση) είναι μία ρωγμή εκτός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων (Εικόνα 5.5.1.7) Εδώ, αξίζει να προσθέσουμε, ότι το δεύτερο βελόμετρο όπως βλέπουμε από κάτω (κανάλι 9) έχει ξεκολλήσει λίγο πριν την αστοχία. Η γενική εικόνα της δοκού κατά την αστοχία φαίνεται στην Εικόνα 5.5.1.8.



Εικόνα 5.5.1.7: Εικόνα καμπτικής ρωγμής που προκάλεσε την αστοχία αριστερά από την περιοχή των βελομέτρων

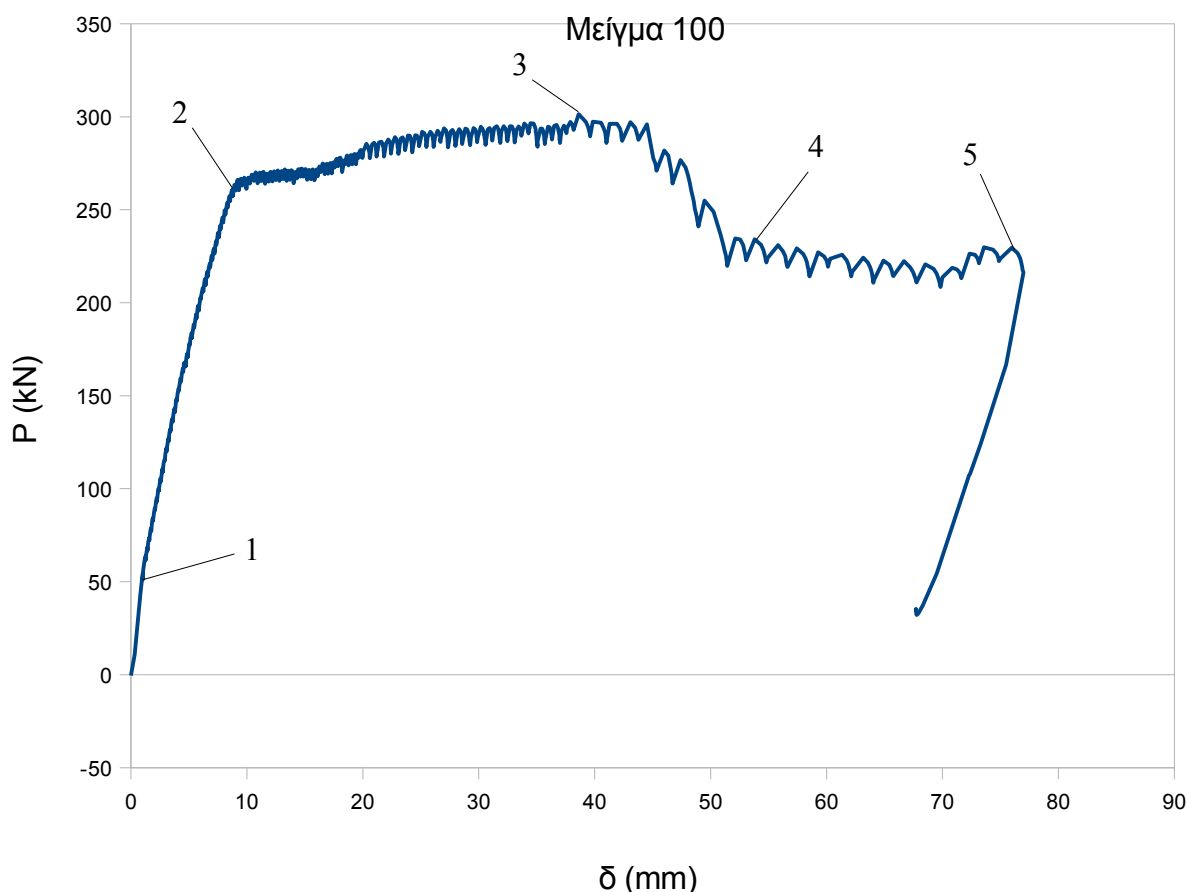


Εικόνα 5.5.1.8: Γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία

5.5.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των καταγραφών του πειράματος

- Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης $P - \delta$:

Η τιμή του φορτίου και των λοιπών καταγραφών παραμόρφωσης και μετατόπισης καταγράφονται συνεχώς ταυτόχρονα. Η τιμή του καμπτικού βέλους της δοκού για κάθε στιγμή θα δίνεται αν από την τιμή του κατακόρυφου βελομέτρου που βρίσκεται στο μέσον (κανάλι 1) αφαιρέσουμε τη μέση τιμή των καταγραφών των βελομέτρων που βρίσκονται κάτω από τις στηρίξεις (κανάλια 2 και 3). Έτσι, προκύπτει η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης $P - \delta$ (Σχήμα 5.2.2.1)



Σχήμα 5.5.2.1: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης του δοκιμίου M100

	P (kN)	δ (mm)
Σημείο 1	56.28	1.065
Σημείο 2	259.04	8.751
Σημείο 3	301.29	38.609
Σημείο 4	230.91	55.816
Σημείο 5	229.5	75.971

Πίνακας 5.5.2.1: Φορτίο και παραμόρφωση στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης το δοκίμιο παρουσίασε μια πλάσטיμη συμπεριφορά αστοχώντας καμπτικά και έφτασε σε υψηλότερες παραμορφώσεις σε σχέση με τα προηγούμενα χάνοντας μικρό μέρος της αντοχής του. Η ρηγμάτωση του δοκιμίου φαίνεται να πραγματοποιείται όντως σε χαμηλή στάθμη φορτίου ($P_{cr} = 56.3 \text{ kN}$), όπου και αλλάζει η κλίση του διαγράμματος (σημείο 1). Το δοκίμιο φαίνεται να διαρρέει σε στάθμη φορτίου 259 kN με παραμόρφωση 8.75 mm (σημείο 2), στη συνέχεια παρουσιάζει μία μικρή κράτυνση επιτυγχάνοντας μέγιστη αντοχή στο σημείο 3 (301.29 kN), πέφτει η αντοχή του σε παραμόρφωση περίπου 55.8 mm σε 230.9 kN (σημείο 4), όπου και παραμένει μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας του στα 75.97 mm (σημείο 5). Η τιμή της πλαστιμότητας για αυτό το δοκίμιο είναι περίπου $q_d = 75.97/8.75 = 8.68$. Οι ακαμψίες του δοκιμίου για τις τρεις αρχικές κλίσεις του διαγράμματος υπολογίζονται παρακάτω:

Αρηγμάτωσης κλάδος: $K_{gr} = P_1/\delta_1 = 752.85 \text{ kN/mm}$

Ρηγματωμένος κλάδος: $K_y = (P_2 - P_1)/(\delta_2 - \delta_1) = 26.38 \text{ kN/mm}$

Κλάδος κράτυνσης: $K_h = (P_3 - P_2)/(\delta_3 - \delta_2) = 9.58 \text{ kN/mm}$

Η μέγιστη συνολική δύναμη που έφτασε το έμβολο είναι ίση με $P_{max} = 301.29 \text{ kN}$, αλλά εφόσον το δοκίμιο αστόχησε σε κάμψη μπορούμε να πούμε ότι η οριακή διατμητική του αντοχή είναι μεγαλύτερη από την $P_{max}/2 = 150.65 \text{ kN}$. Εφόσον η κατηγορία του άοπλου σκυροδέματος (βάσει μελέτης σύνθεσης) είναι αντοχής C25/30, μία αντίστοιχη δοκός από το ίδιο σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη ίνας και χωρίς διατμητικό οπλισμό θα είχε διατμητική αντοχή ίση με $V_c = 70.2 \text{ kN}$ (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5.2.2), δηλαδή εκτιμούμε αύξηση μεγαλύτερη της τάξης του 114.6 % στη διατμητική αντοχή του δοκιμίου M100. Αξίζει να συγκριθεί η ροπή αντοχής της ινοπλισμένης διατομής με τη διατομή συμβατικού σκυροδέματος με την ίδια σύνθεση. Για το συμβατικό σκυρόδεμα ισχύει:

$$A_s * f_{yk} = 0.68 * b * x * f_{ck}$$

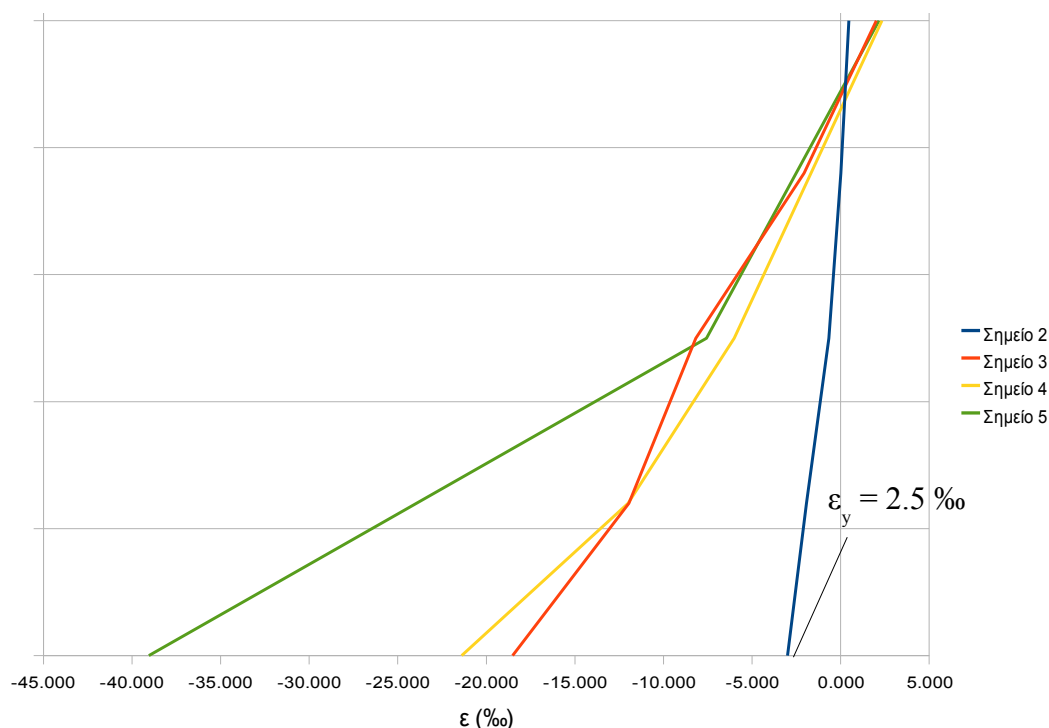
όπου $A_s = 3\Phi 14 = 4.62 \text{ cm}^2$, $f_{yk} = 510 \text{ MPa}$, $b = 0.15 \text{ m}$, $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ για την πειραματική διάταξη.

Λύνοντας ως προς x βρίσκουμε $x = 0.0924 \text{ m}$. Η ροπή αντοχής του συμβατικού σκυροδέματος θα είναι

$$M_{Rd} = A_s * f_y * (d - 0.4 * x) = 54.91 \text{ kNm} = P * a.$$

Άρα $P = 54.91/0.54 = 101.69 \text{ kN}$ και το ολικό φορτίο είναι $2P = 203.37 \text{ kN}$. Παρατηρείται, δηλαδή, μία αύξηση της αντοχής σε κάμψη της τάξης του 48.15 %.

Αξίζει να παρατηρηθεί λόγω της διάταξης των βελομέτρων στη μεσαία διατομή, η συμπεριφορά της μεσαίας διατομής σε κρίσιμα σημεία της καμπύλης (Σχήμα 5.5.2.2).



Σχήμα 5.5.2.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ ύψος της διατομής για τα σημεία του διαγράμματος 2,3,4 και 5

Το διάγραμμα παραμορφώσεων για το σημείο 1 του διαγράμματος δεν είναι δυνατό να αποτυπωθεί, καθώς τα βελόμετρα σε πολύ χαμηλή στάθμη φορτίου δεν έχουν πραγματοποιήσει ικανές παραμορφώσεις για την ακρίβειά τους, οπότε δεν απεικονίζεται για την καλύτερη ευκρίνεια του σχήματος. Να σημειωθεί ότι με θετικό πρόσημο απεικονίζεται η θλίψη στο παραπάνω διάγραμμα. Αναλυτικά, παρατίθενται στον Πίνακα 5.5.2.1 τα κρίσιμα σημεία της καμπύλης όπως επιλέχθηκαν, το φορτίο και η παραμόρφωση για το κάθε σημείο.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα παραμορφώσεων της μεσαίας διατομής για τα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος $P - \delta$, η παραδοχή Bernoulli – Euler για την επιπεδότητα της διατομής σε κάθε χρονική στιγμή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης, παρατηρείται πως από τη στιγμή της διαρροής του δοκιμίου (σημείο 2) αυξάνεται η καμπυλότητα συνεχώς, προκαλώντας μεγάλες παραμορφώσεις στη θέση του χάλυβα οπλισμού (στο σημείο 5 φτάνει μέχρι το 40%).

Αξίζει να σημειωθεί η καμπτική συμπεριφορά της δοκού, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα παραμορφώσεων. Μία πρώτη παρατήρηση είναι πως ο ουδέτερος άξονας της δοκού σε όλα τα σημεία που φαίνονται στο σχήμα είναι πάνω από το ύψος του δεύτερου βελομέτρου μετρώντας από τη θλιβόμενη ίνα. Από την Σχήμα 4.2.2, βλέπουμε ότι το βελόμετρο αυτό (κανάλι 9) βρίσκεται σε απόσταση 8.5 cm από τη θλιβόμενη ακραία ίνα της διατομής. Οπότε μπορούμε να εξάγουμε

συμπεράσμα για το πάχος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής, ότι είναι μικρότερη των 8 cm. Ένα άλλο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει, είναι από το βελομέτρο που βρίσκεται στην άκρη της εφελκόμενης περιοχής, δηλαδή περίπου στο ύψος του χάλυβα οπλισμού (2.5 cm από την ακραία ίνα), ο διαμήκης χάλυβας διαρρέει σχεδόν ταυτόχρονα με τη διαρροή του δοκιμίου (σημείο 2). Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι η παραμόρφωση του “κάτω” βελομέτρου όπως φαίνεται στην Σχήμα 5.5.2.2 είναι σχεδόν ίση με την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα S500 ($\varepsilon_y = 2.5\%$). Το τελευταίο συμπέρασμα, βέβαια, είναι ορατό και από τις φωτογραφίες της δοκού κατά τη διάρκεια του πειράματος, τις κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές που έχουν εμφανιστεί, καθώς και το λυγισμό του χάλυβα οπλισμού εντός της περιοχής σταθερής ροπής της δοκού.

- Καμπύλη ροπών – καμπυλοτήτων $M - \varphi$:

Από τις συνεχείς μετρήσεις του φορτίου P μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος να εξάγουμε μία τιμή της ροπής M στο μέσον, καθώς όπως προκύπτει από το διάγραμμα ροπών της αμφιέριστης δοκού που φορτίζεται σε ίσες αποστάσεις a από τις στηρίξεις (Σχήμα 5.2.2.3) η ροπή στο μέσον ισούται με το γινόμενο της δύναμης P επί το διατμητικό μήκος a , που είναι ίσο με 54 cm για το πείραμα που διεξάγεται.

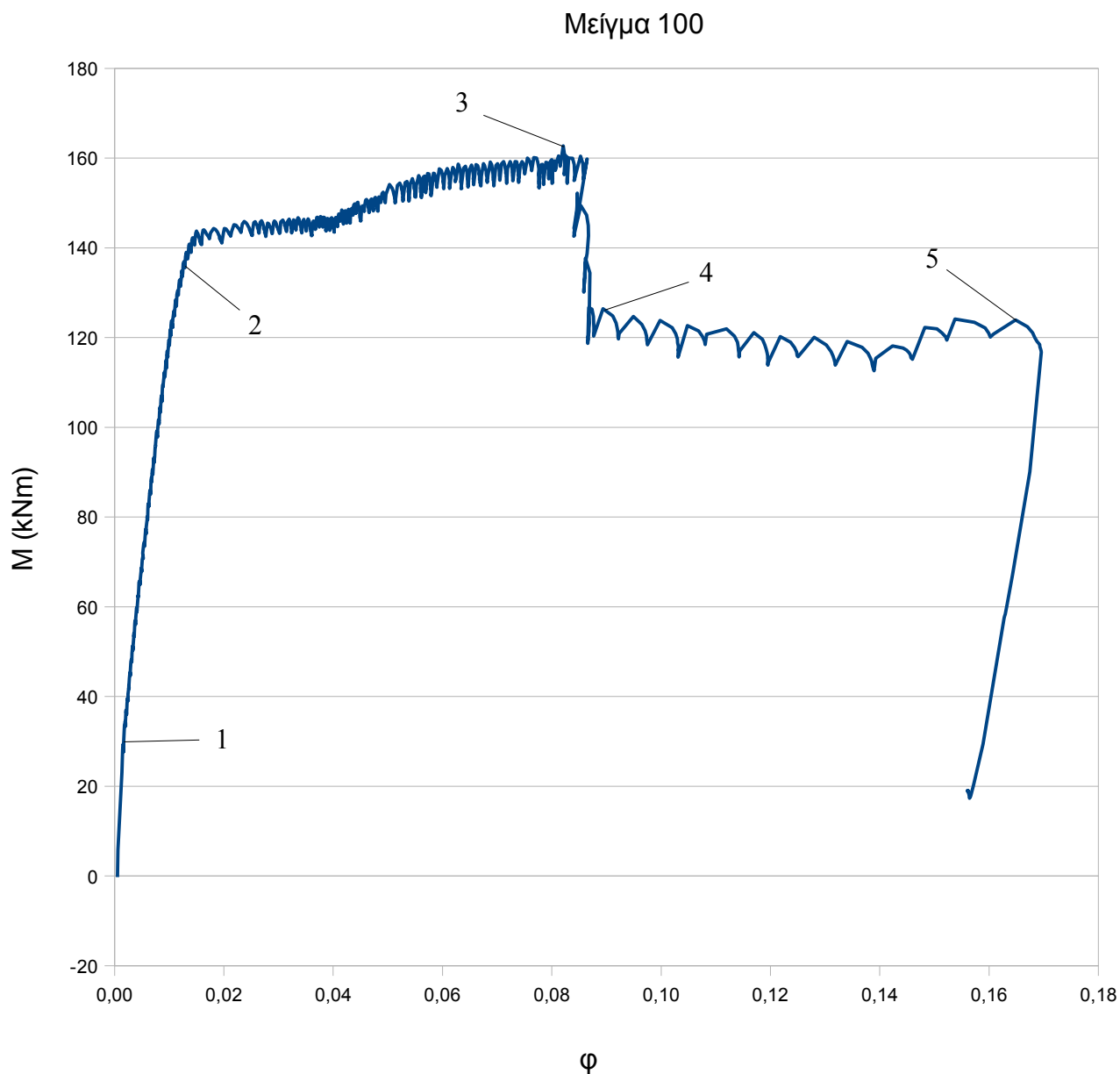
Για τις τιμές της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής, εφόσον έχει ήδη αποδειχθεί παραπάνω ότι η κατανομή των παραμορφώσεων της διατομής δεν απέχει πολύ από την ευθεία για διάφορες χρονικές στιγμές (παραδοχή Bernoulli – Euler), αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των παραμορφώσεων των δύο ακραίων βελομέτρων καθ ύψος. Το άθροισμα των απόλυτων τιμών των παραμορφώσεων αυτών διαιρούμενο με την υψομετρική τους απόσταση H δίνει τη μέση τιμή της κλίσης του διαγράμματος για κάθε χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς αρχικές αποστάσεις βελομέτρων για το δοκίμιο όπως δίνονται στο κεφάλαιο της πειραματικής διάταξης (Σχήμα 4.2.5).

Αναλυτικά, η μέση καμπυλότητα της μεσαίας διατομής υπολογίστηκε ως:

$$\varphi = \frac{(|\varepsilon(6)| + |\varepsilon(10)|)}{H}$$

όπου $\varepsilon(6)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου πάνω βελομέτρου όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη, $\varepsilon(10)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου κάτω βελομέτρου και H η υψομετρική απόσταση των δύο ακραίων βελομέτρων, που για το δοκίμιο M100 είναι 250 mm (Σχήμα 4.2.5).

Υπολογίζοντας τις τιμές της ροπής και της καμπυλότητας για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει η καμπύλη $M - \varphi$ (Σχήμα 5.5.2.3):



Σχήμα 5.5.2.3: Καμπύλη ροπών - καμπυλοτήτων του δοκιμίου M100

Όπως και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, έτσι και στην καμπύλη ροπών καμπυλοτήτων, βλέπουμε κατά αντιστοιχία τα καθοριστικά σημεία 1,2,3,4 και 5. Φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα, η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η μικρή πτώση της αντοχής (4) και η στιγμή λίγο πριν την αστοχία (5).

Από αυτό το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά πως μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου (σημείο 3), η τιμή της καμπυλότητας αυξάνεται διαρκώς μέχρι το δοκίμιο να φτάσει στην αστοχία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την Σχήμα 5.5.2.2, όπου η κλίση του διαγράμματος παραμορφώσεων για τα σημεία 2,3,4 και 5 αυξάνεται συνεχώς. Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από την καμπύλη $M - \varphi$ είναι μια προσέγγιση της ροπής αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής, εφόσον το μέτρο ελαστικότητας E_c του συγκεκριμένου δοκιμίου έχει εκτιμηθεί από τα αποτελέσματα του κυλινδρικού δοκιμίου ίση με 30.45 GPa (Κεφάλαιο 3.2). Είναι γνωστό πως η κλίση του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων μετά τη ρηγμάτωση, είναι ίση με το γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας E_c επί τη ροπή αδράνειας της διατομής I_{cr} . Στο διάγραμμα μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία το κομμάτι της καμπύλης μεταξύ των σημείων 1 και 2 (μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή). Στον Πίνακα 5.2.2.2 δίνονται οι τιμές ροπής και καμπυλότητας για κάθε ένα από τα 5 σημεία:

	M (KNm)	φ (1/m)
Σημείο 1	30.391	0.00167
Σημείο 2	139.882	0.01387
Σημείο 3	162.697	0.08212
Σημείο 4	124.691	0.09492
Σημείο 5	123.93	0.16484

Πίνακας 5.5.2.2: Ροπή και καμπυλότητα στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Η κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων 1 και 2 είναι ίση με $(139.882-30.391)/(0.01581-0.00167) = 7743.35 \text{ kNm}^2 = E_c I_{cr}$. Άρα, η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής προκύπτει ίση με $I_{cr} = 7743.35/30450000 = 2.5430 * 10^{-4} \text{ m}^4 = 25430 \text{ cm}^4$. Η ροπή αδράνειας της αρηγμάτωτης διατομής του δοκιμίου (Κωτσοβός, 2000) είναι ίση με

$$I_g = bh^3/12 + bh(x-h/2)^2 + \alpha_e A_s (d-x)^2$$

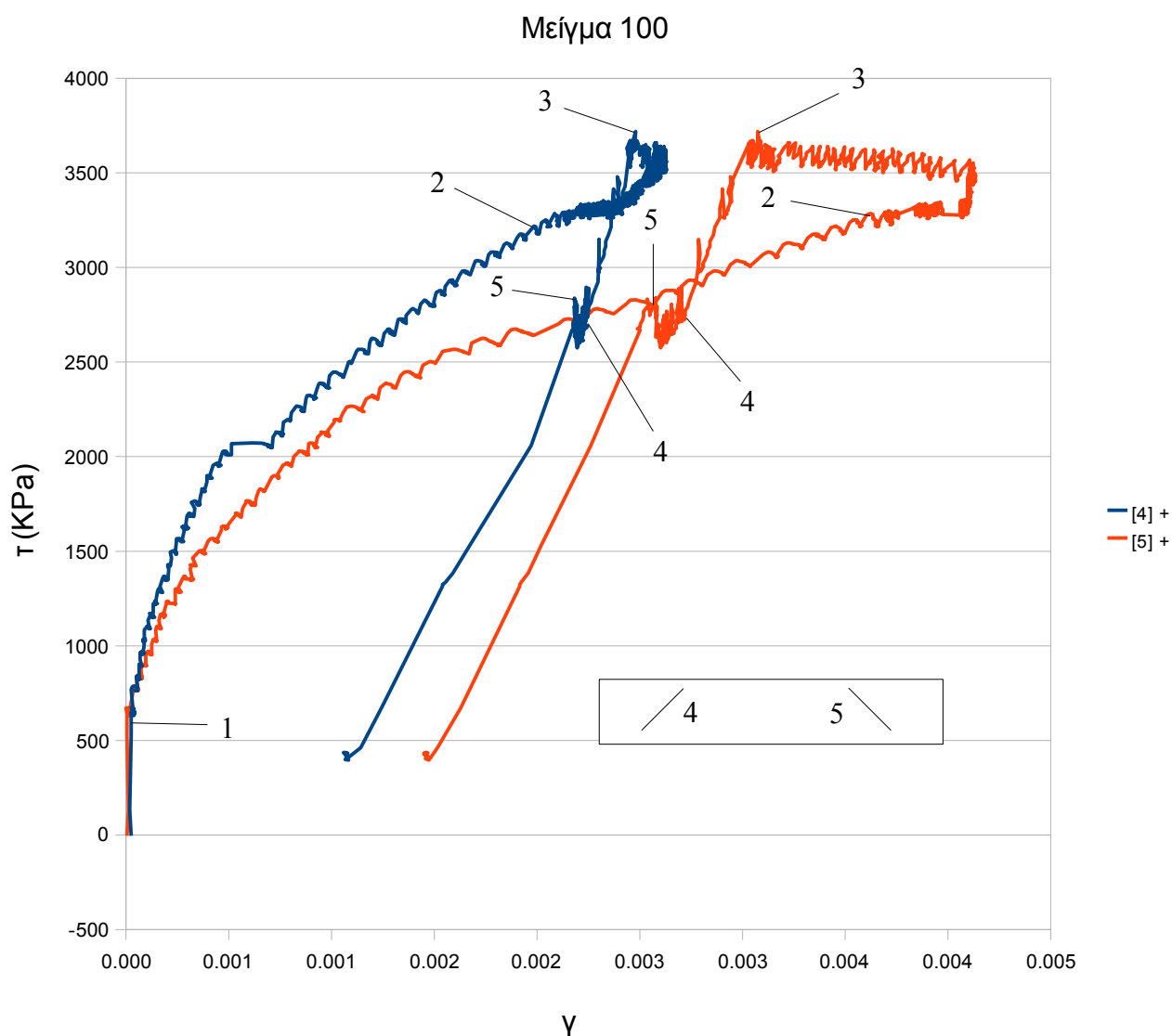
όπου x προκύπτει από τη σχέση:

$$A_c(x-h/2) = \alpha_e A_s (d-x)$$

και $\alpha_e = E_s/E_c$, με E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 200 GPa και E_c το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος ίσο με 30.45 GPa για το δοκίμιο M100. Από τους υπολογισμούς προκύπτει $I_g = 37844 \text{ cm}^4$. Εκτιμάται, δηλαδή ότι η ροπή αδρανείας του ινοπλισμένου σκυροδέματος M100 μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη ρηγμάτωση, καθώς μειώνεται κατά 32.8 %, τιμή μικρότερη, όμως, από αυτή που συναντάμε στο συμβατικό σκυρόδεμα (μείωση της τάξης του 50 %).

- Καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης $\tau - \gamma$:

Για το δοκίμιο M100 και τον έλεγχο της διατμητικής συμπεριφοράς αυτού στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας (Σχήμα 5.2.2.3) τοποθετήθηκαν δύο αναλογικά βελοόμετρα διαγώνια σε γωνία 45° κάθετα στις αναμενόμενες διατμητικές ρωγμές (κανάλια 4 και 5). Από τη συνεχή καταγραφή του φορτίου μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή να εξάγουμε τη διατμητική τάση που ασκείται σε κάθε μία από τις δύο περιοχές $\tau = V/bd$, όπου $V = P/2$, b το πλάτος της δοκού που είναι 15 cm και d το στατικό ύψος της δοκού ίσο με 27 cm. Για την τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετατοπίσεις των διατμητικών βελομέτρων διαιρούμενες με τη αρχική απόσταση της διαγωνίου του κάθε βελομέτρου, όπως απεικονίζεται στην πειραματική διάταξη (Σχήμα 4.2.5). Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα $\tau - \gamma$ και για τις δύο διαγώνιες ρωγμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.2.4:



Σχήμα 5.5.2.4: Καμπύλη διατμητικής τάσης - γωνιακής παραμόρφωσης για το δοκίμιο M100

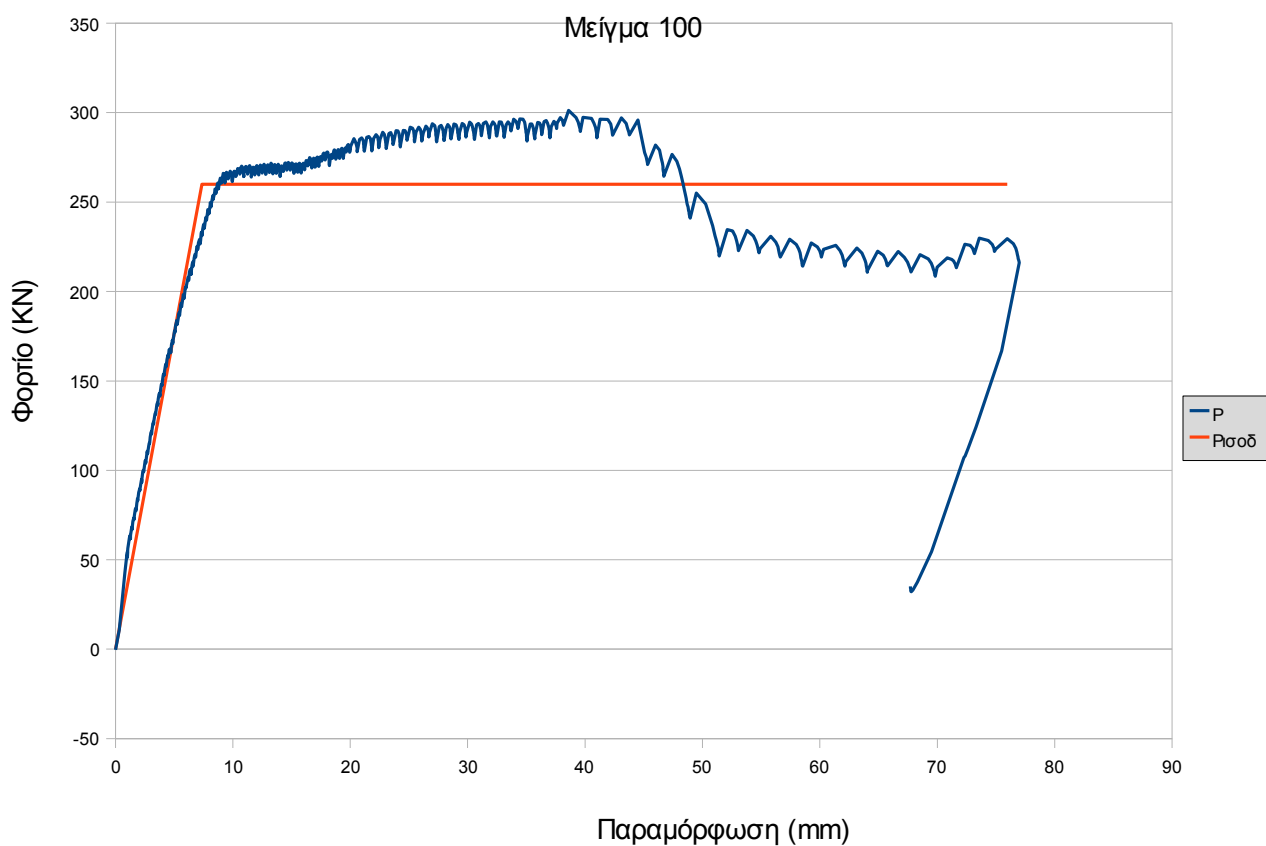
Στην Σχήμα 5.5.2.4 φαίνεται η καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης και για τις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας του δοκιμίου. Στις δύο καμπύλες των καναλιών 4 και 5, φαίνονται και τα καθοριστικά σημεία, όπως έχουν επιλεγθεί από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, δηλαδή η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η πτώση της αντοχής (4) και η στιγμή λίγο πριν την αστοχία (5).

Αυτό που αξίζει να εξεταστεί στις δύο παραπάνω καμπύλες είναι οι κλίσεις αυτών, και η σύγκριση μεταξύ τους. Παρατηρούμε, πως όσο οι δύο διατομές είναι αρηγμάτωτες (αρχική κλίση των δύο καμπυλών) έχουν την ίδια κλίση, από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου σκυροδέματος G_{gr} . Στη συνέχεια, τα δύο διαγράμματα διαφοροποιούνται ως προς την κλίση, με την καμπύλη του καναλιού 5 να φτάνει σε μεγαλύτερες γωνιακές παραμορφώσεις κατά τη διαρροή (σημείο 2), αλλά μετά από αυτό το σημείο οι ρωγμές φαίνεται να μειώνονται, καθώς στο σημείο 3 έχουμε μικρότερες γωνιακές παραμορφώσεις, που συνεχίζουν να μειώνονται μέχρι την αστοχία (σημείο 5). Η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{max} του δοκιμίου M100 είναι ίση με $3719.6 \text{ kPa} = 3.72 \text{ MPa}$

Το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου ινοπλισμένου σκυροδέματος G_{gr} υπολογίζεται από το σημείο 1 της καμπύλης και ισούται με το πηλίκο της διατμητικής τάσης τ προς τη γωνιακή παραμόρφωση γ . Για το δοκίμιο M100, το σημείο 1 έχει διατμητική τάση ίση με 764.32 kPa και γωνιακή παραμόρφωση γ (λήφθηκε η μέση τιμή των δύο τιμών των δύο καναλιών) ίση με 0.000055 . Οπότε το μέτρο διάτμησης εκτιμάται ίσο με $G_{gr} = 764.32 / 0.000055 = 13896727.27 \text{ kPa} = 13.897 \text{ GPa}$. Από αυτή την τιμή και τη σχέση $G = E/2(1+\nu)$ μπορούμε να πάρουμε μία ακόμα εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του δοκιμίου. Θεωρώντας το $\nu = 0.2$ (τιμή αποδεκτή για το οπλισμένο σκυρόδεμα), προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου ίσο με 33.35 GPa , τιμή όχι μακριά από την τιμή που προέκυψε από τη δοκιμή θλίψης ($E = 30.45 \text{ GPa}$).

- Υπολογισμός ισοδύναμης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Το δοκίμιο M100 συμπεριφέρθηκε πλάστιμα κατά την αστοχία, αστοχώντας σε κάμψη και οδήγησε σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις χάνοντας, όμως, κάποιο ποσοστό της φέρουσας ικανότητάς του μετά από κάποια παραμόρφωση. Για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του υλικού σε πλαστιμότητα, χρήσιμο είναι να καθοριστεί το ισοδύναμο διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης, που αντιστοιχεί σε μία τιμή φορτίου $P_{ισοδ}$, που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη διαρροή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Για την κατασκευή του διαγράμματος, υπολογίστηκε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης και βρέθηκε ίσο με 18788 kNmm. Αυτό το εμβαδόν είναι και ένας δείκτης της απορρόφησης ενέργειας του υλικού. Το ιδεατό ελαστοπλαστικό διάγραμμα κατασκευάζεται έτσι ώστε να έχει αυτό το εμβαδόν και ο ελαστικός κλάδος του να διέρχεται από το σημείο $0.6P_{max} = 180.77$ kN για το δοκίμιο M100. Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα:



Σχήμα 5.5.2.5: Προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου M100 με ελαστοπλαστική

Η αντοχή διαρροής που προέκυψε για το ελαστοπλαστικό διάγραμμα είναι $P_{ισοδ} = 260$ kN. Η ισοδύναμη παραμόρφωση διαρροής είναι $\epsilon_y = 7.38$ mm και η παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u = 75.97$ mm. Άρα, προκύπτει μια ισοδύναμη πλαστιμότητα ίση με $\mu_{ισοδ} = 75.97/7.38 = 10.29$. Ο βαθμός αξιοπιστίας του υλικού δίνεται από την τιμή $P_{ισοδ}/P_{max} = 260/301.29 = 0.86$. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι αυτή η τιμή τόσο πιο σωστή είναι η προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου με ελαστοπλαστική. Για το δοκίμιο M100 κρίνεται σχετικά ικανοποιητική.

- Εκτίμηση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου δοκιμίου σε κάμψη:

Για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος M100, θα χρησιμοποιηθούν οι καταγραφές των βελομέτρων στη μεσαία διατομή (κανάλια 6,7,8,9 και 10) κατά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου του δοκιμίου $P_{\max} = 301.29$ kN (σημείο 3), που συμπίπτει και με την επίτευξη της μέγιστης ροπής $M_{\max} = 162.7$ kNm. Οι τιμές των βελομέτρων καθ ύψος σε αυτή τη χρονική στιγμή δίνονται από τον πίνακα 5.5.2.3:

Κανάλια	Παραμόρφωση ϵ (%)	Απόσταση από ακραία εφελκυστική ίνα (cm)
6	-18.51	2.5
7	-11.952	8.5
8	-8.173	15
9	-2.063	21.5
10	2.019	27.5

Πίνακας 5.5.2.3: Καταγραφές βελομέτρων μεσαίας διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής

Στον παραπάνω πίνακα ο εφελκυσμός συμβολίζεται με μείον και η θλίψη με συν. Από τις καταγραφές των βελομέτρων 9 και 10, παρατηρείται ότι ο ουδέτερος άξονας της διατομής βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίζουν τα παραπάνω δύο βελόμετρα (αλλαγή προσήμου). Από την επίλυση των όμοιων τριγώνων βρίσκουμε ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται κοντά στο κανάλι 10 κατά 2.97 cm. Άρα, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης θα είναι ίσο με $2.5 + 2.97 = 5.347$ cm. Η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας, που βρίσκεται σε απόσταση 2.5 cm από το βελόμετρο 10 βρίσκεται επίσης με όμοια τρίγωνα, δεδομένου ότι γνωρίζουμε το πάχος θλιβόμενης ζώνης ως $\epsilon_c = 2.019 \cdot (2.5 + 2.97) / (2.97) = 3.63\%$. Το διάγραμμα θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος θα ληφθεί, όπως λαμβάνεται και στο συμβατικό σκυρόδεμα με οδηγό την ακραία θλιπτική παραμόρφωση (παραδοχή όχι άστοχη, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφική αναφορά), ο χάλυβας οπλισμού έχει διαρρεύσει (παραμόρφωση του καναλιού 6 πολύ μεγαλύτερη της παραμόρφωσης διαρροής $\epsilon_y = 2.5\%$), οπότε μπορεί να ληφθεί η τάση διαρροής του ίση με 520 MPa και για την κατανομή εφελκυστικών τάσεων θα ληφθεί η παραδοχή παραλληλόγραμμου σε όλο το εφελκυστικό τμήμα της διατομής, που προσομοιάζει την εφελκυστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη με μία παραμένουσα εφελκυστική τάση f_u , όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία. Η εντατική κατάσταση της διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής φαίνεται στην Σχήμα 5.2.2.7.

Για την ισορροπία της διατομής θα πρέπει οι δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτή να εξισορροπούν την εξωτερική ροπή $M_{\max} = 162.7 \text{ kNm}$. Για τη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος με ακραία παραμόρφωση 3.63%, ο συντελεστής πληρώσεως α προκύπτει ίσος με 0.8 και ο συντελεστής κέντρου βάρους ζ' ίσος με 0.48 (Τάσιος, 2005). Δεδομένου ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος M100 είναι ίση με $f_{ck} = 32.93 \text{ MPa}$ (από τη δοκιμή θλίψης), η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος θα είναι ίση με

$$F_c = \alpha * 0.85 * f_{ck} * x * b = 0.8 * 0.85 * 32930 * 0.0535 * 0.15 = 179.7 \text{ kN}$$

Η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα οπλισμού είναι

$$F_s = A_s * f_{yk} = 4.62 * 10^{-4} * 520000 = 240.24 \text{ kN},$$

δηλαδή μεγαλύτερη από τη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος. Οπότε για το δοκίμιο M100 δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για την εφελκυστική κατανομή των τάσεων, πιθανότατα λόγω κάποιου σφάλματος κατά την καταγραφή των δεδομένων, ή λόγω μη εγκυρότητας της προσομοίωσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος με μείγμα ινών στη θλιπτική συμπεριφορά με αυτής του συμβατικού σκυροδέματος.

5.5.3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πειράματος του δοκιμίου M100 όσον αφορά τη διατμητική αντοχή με τις προτεινόμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση που έχει προτείνει ο Sharma (1986), η διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών υπολογίζεται ως:

$$v_u = k f_t' (d/a)^{0.25} \quad (MPa) \quad (1)$$

όπου,

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$$k = 2/3$$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_t' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $f_t' = f_t' = 0.79(f_c')^{0.5}$ [MPa]

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου [MPa]

Λόγω έλλειψης εφελκυστικής δοκιμής διάρρηξης θα χρησιμοποιηθεί η τιμή της θλιπτικής αντοχής του κυλίνδρου ίση με 32.93 MPa για το δοκίμιο M100. Προκύπτει $f_t' = 4.53 \text{ MPa}$. Για το λόγο $a/d = 2.0$ του πειράματος, προκύπτει διατμητική αντοχή ίση με $v_u = 2539.5 \text{ kPa}$. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 102.85 \text{ kN}$, τιμή αρκετά κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (150.65 kN) κατά 31.7%.

Οι Al-Ta'an και Al-Feel (1990) έχουν προτείνει μία σχέση για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες στο δοκίμιο. Η διατμητική αντοχή που προσφέρει το σκυρόδεμα στο δοκίμιο προκύπτει από τη σχέση $V_c = 2 * f_{ctm} * b_w * d / 3$, όπου $f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 3081.4$ kPa για θλιπτική αντοχή 32.93 MPa. Άρα, προκύπτει $V_c = 83.2$ kN για τη δοκό του πειράματος. Η προτεινόμενη σχέση για την προσφορά των ινών στη διάτμηση είναι:

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (7)$$

όπου, $\kappa = 1.2$ για ίνες με άγκιστρα, όπως του πειράματος, V_f το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ίσο με 1.2% για το δοκίμιο M100 και $(L_f/D_f)_{ισοδ} = (2*40+60+80)/4 = 55$ για το μείγμα ινών της ΕΤΑΛ που χρησιμοποιήθηκε. Οπότε προκύπτει, $v_f = 748$ kPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 30.29$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 113.49$ kN, τιμή πιο κάτω από την τιμή που προέκυψε από το πείραμα (150.65 kN) κατά 24.7%.

Οι Swamy et al. (1993) έχουν προτείνει μία σχέση ακόμα για τη συνεισφορά της ίνας στη διατμητική αντοχή, οποία είναι:

$$v_f = 0.37 \tau V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (8)$$

όπου τ διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος, οποία έχει προταθεί να λαμβάνεται ίση με 4.15 MPa, ελλείψει δοκιμών εξόλκευσης. Αντικαθιστώντας τις υπόλοιπες τιμές όπως παραπάνω, προκύπτει $v_f = 1013.43$ kPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 41.04$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 124.24$ kN, τιμή που υποεκτιμά τη διατμητική αντοχή, όπως προέκυψε από το πείραμα (150.65 kN) κατά 17.5%.

Οι Ashour, Hasanain και Wafa (1992) έχουν προτείνει δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών. Η πρώτη είναι:

Για $a/d \geq 2.5$,

$$v_u = (2.11 \sqrt{f_c'} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (MPa) \quad (5a)$$

Για $a/d < 2.5$,

$$v_u = [\text{Eq. (5a)}] \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (MPa) \quad (5b)$$

όπου $F = (L_f/D_f)V_f d_f$, $d_f = 0.75$ για ίνες με άγκιστρα, ρ το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ίσο με 1.14% για τις δοκούς του πειράματος και $v_b = 0.41\tau F$, όπου $\tau = 4.15$ MPa, όπως λήφθηκε παραπάνω. Για αντοχή σε θλίψη $f'_c = 32.93$ MPa και $a/d = 2.0$, προκύπτει $v_u = 2708.77$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 109.71$ kN, τιμή πολύ κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (150.65 kN) κατά 27.2%. Η δεύτερη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa είναι:

$$v_u = (0.7\sqrt{f'_c} + 7F)\frac{d}{a} + 17.2\rho\frac{d}{a} \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας ως παραπάνω προκύπτει $v_u = 3839$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 155.48$ kN, τιμή πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε στο πείραμα (150.65 kN). Η δεύτερη σχέση, δηλαδή δείχνει να προσεγγίζει καλύτερα τη διατμητική αντοχή του δοκιμίου ενισχυμένου με μείγμα χαλύβδινων ινών σε διάτμηση.

5.5.4. Εύρεση ανάλογου ποσοστού διατμητικού οπλισμού (συνδετήρων)

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5.5.2, για τη σύνθεση του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ($f_{ck} = 25$ MPa) η αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση θα είναι ίση με $V_c = 70.2$ kN. Η αντοχή του πειραματικού δοκιμίου M100 έφτασε την τιμή των 150.65 kN. Ενδιαφέρον είναι να υπολογιστεί το ανάλογο ποσοστό συνδετήρων που αντιστοιχεί στην επιπλέον αντοχή που δίνει το μείγμα χαλύβδινων ινών της ΕΤΑΛ σε ποσοστό κ.ό. 1.2%.

Η επιπλέον αντοχή της δοκού, λόγω της προσθήκης των ινών είναι ίση με $150.65 - 70.2 = 80.45$ kN. Αυτή την επιπλέον αντοχή μπορούν να εξασφαλίσουν συνδετήρες Φ10 δίτητοι με $A_{sw} = 1.57$ cm² αν τοποθετηθούν ανά απόσταση s , οποία βρίσκεται από τη σχέση:

$$V_{wd} = 0.9d * A_{sw} * f_{ywk} / s$$

όπου $V_{wd} = 80.45$ kN και $f_{ywk} = 520$ MPa για χάλυβα συνδετήρων ποιότητας B500C.

Από τη σχέση προκύπτει απόσταση $s = 24.7$ cm. Δηλαδή το ισοδύναμο των συνδετήρων για το δοκίμιο M100, προκύπτει ότι είναι να τοποθετηθούν Φ10/24 και αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $\rho_w = A_{sw} / (b_w s) = 0.0042$. Καλό θα ήταν, βέβαια, να τονιστεί η πολύ πιο πλάσטיμη συμπεριφορά των ινοπλισμένων δοκιμίων στη διατμητική αστοχία, έναντι των δοκών με συμβατικό διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες).

5.6. Δοκίμιο M150

5.6.1 Συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος

Το δοκίμιο M150 σε χαμηλή στάθμη φορτίου εμφάνισε διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας δύναμης (Εικόνες 5.6.1.1 και 5.6.1.2), οι οποίες δεν άνοιξαν αμέσως, βοηθώντας το δοκίμιο να παραλαμβάνει συνεχώς περισσότερη φέρουσα δύναμη και ενέργεια. Στη μία πλευρά του δοκιμίου (αυτή στην οποία επήλθε η αστοχία) παρατηρήθηκε η συνεχής επέκταση της ρωγμής, πιθανόν λόγω ασυμμετρίας της πειραματικής διάταξης (Εικόνα 5.6.1.3).



Εικόνα 5.6.1.1: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής αριστερά

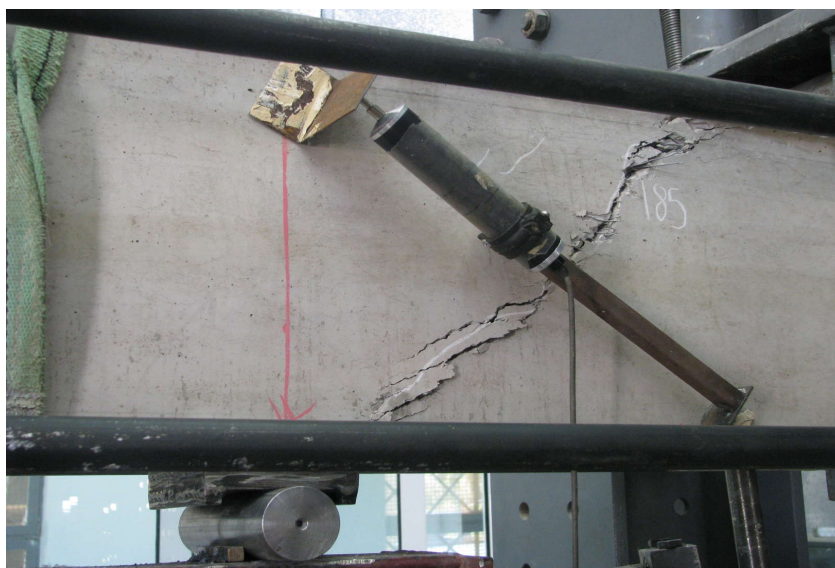


Εικόνα 5.6.1.2: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής δεξιά

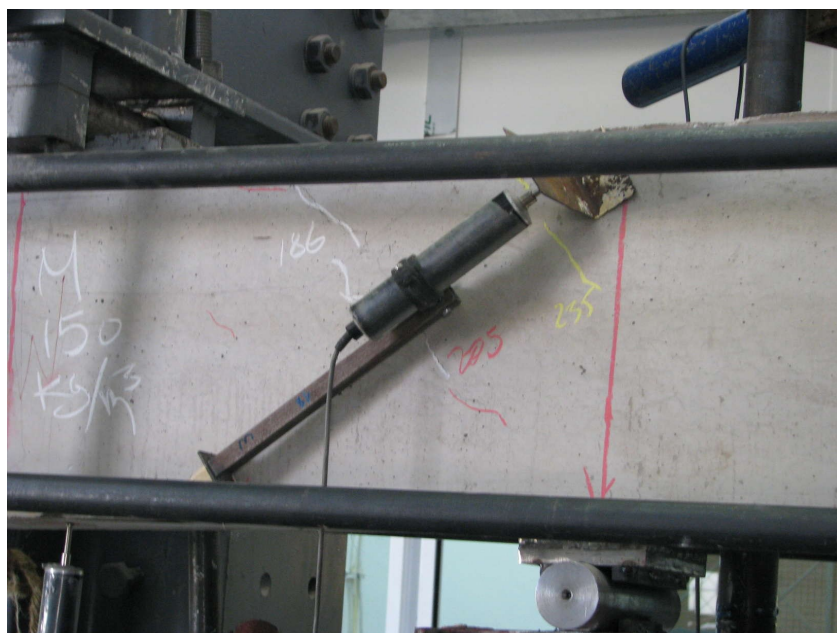


Εικόνα 5.6.1.3: Επέκταση δεξιά διατμητικής ρωγμής σε χαμηλή στάθμη φορτίου

Όσο το φορτίο (όπου φορτίο ονομάζουμε το συνολικό φορτίο P με το οποίο φορτίζουμε τη σιδηρά δοκό, η οποία στηρίζεται σε 2 κυλίνδρους που φορτίζουν το δοκίμιο σε 2 σημεία συμμετρικά) ανεβαίνει, οι ρωγμές δεν ανοίγουν ισόποσα, καθώς η δεξιά διατμητική ρωγή ανοίγει συνεχώς (Εικόνα 5.6.1.4), σε αντίθεση με την αριστερά που παραμένει σχετικά σταθερή (Εικόνα 5.6.1.5).



Εικόνα 5.6.1.4: Ταχεία επέκταση της διατμητικής ρωγμής στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου



Εικόνα 5.6.1.5: Εικόνα διατμητικής ρωγμής στην αριστερή πλευρά του δοκίμιου τη στιγμή που η δεξιά έχει επεκταθεί σημαντικά

Εντός της περιοχής σταθερής ροπής (ανάμεσα στα σημεία εφαρμογής του φορτίου στο δοκίμιο) (Εικόνα 5.6.1.6), δεν παρατηρείται εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών, όσο το φορτίο αυξάνεται. Αυτό δε μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε αν ο χάλυβας σπλισμού κατά την αστοχία έχει διαρρεύσει.



Εικόνα 5.6.1.6: Εμφάνιση καμπτικής ρωγμής στην περιοχή σταθερής ροπής

Η δοκός έχει χάσει ήδη σημαντική από τη φέρουσα ικανότητά της και η διατμητική ρωγμή δεξιά ανοίγει περισσότερο σε πλάτος και σε μήκος, καθώς μπαίνει και στη θλιβόμενη ζώνη και λυγίζει τα διαμήκη σίδερα χωρίς να πραγματοποιεί σταδιακή παραμόρφωση και ιδιαίτερη απορρόφηση ενέργειας (Εικόνα 5.6.1.7). Η γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία φαίνεται στην Εικόνα 5.6.1.8.



Εικόνα 5.6.1.7: Εικόνα διατμητικής ρωγμής που προκάλεσε την αστοχία

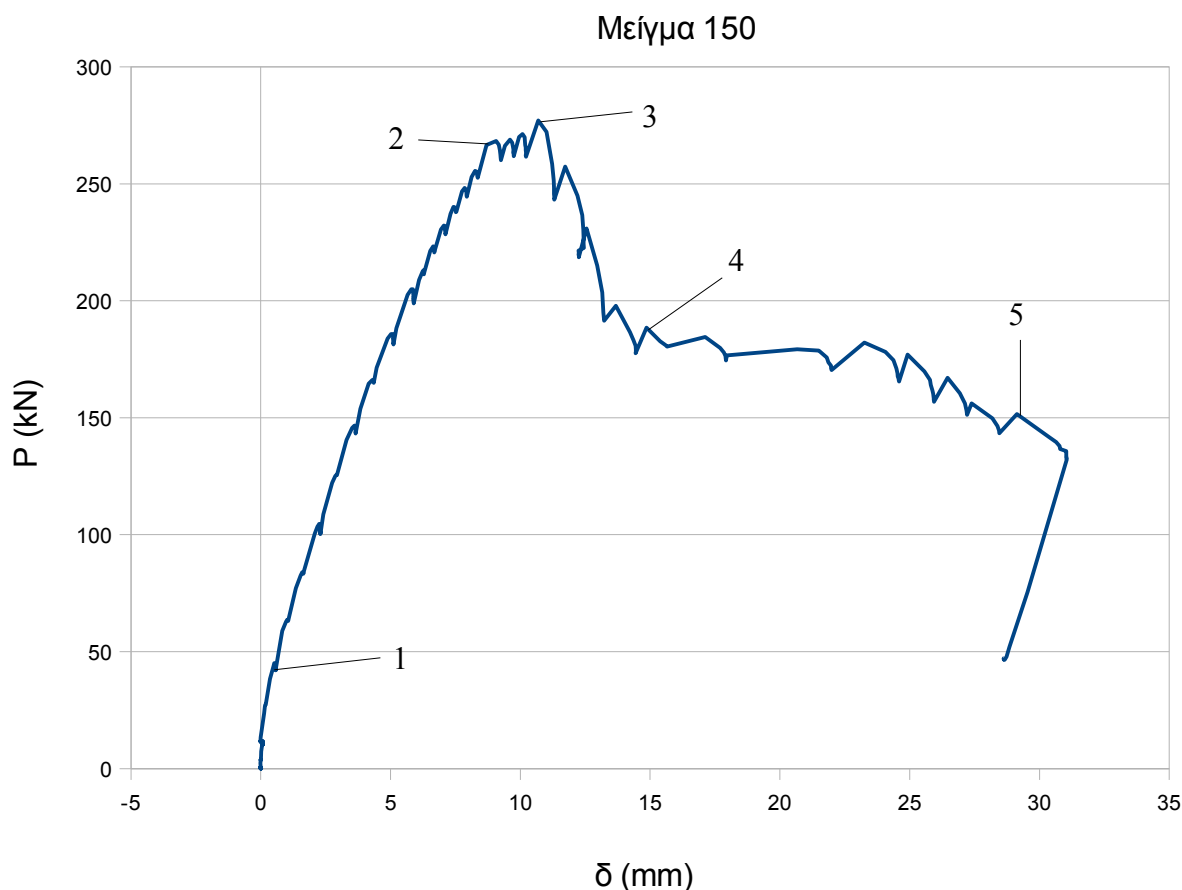


Εικόνα 5.3.1.8: Γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία

5.6.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των καταγραφών του πειράματος

- Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης $P - \delta$:

Η τιμή του φορτίου και των λοιπών καταγραφών παραμόρφωσης και μετατόπισης καταγράφονται συνεχώς ταυτόχρονα. Η τιμή του καμπτικού βέλους της δοκού για κάθε στιγμή θα δίνεται αν από την τιμή του κατακόρυφου βελομέτρου που βρίσκεται στο μέσον (κανάλι 1) αφαιρέσουμε τη μέση τιμή των καταγραφών των βελομέτρων που βρίσκονται κάτω από τις στηρίξεις (κανάλια 2 και 3). Έτσι, προκύπτει η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης $P - \delta$ (Σχήμα 5.6.2.1)



Σχήμα 5.6.2.1: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης του δοκιμίου M150

	P (kN)	δ (mm)
Σημείο 1	42.85	0.584
Σημείο 2	268.31	9.069
Σημείο 3	277.03	10.693
Σημείο 4	188.49	14.859
Σημείο 5	151.58	29.13

Πίνακας 5.6.2.1: Φορτίο και παραμόρφωση στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης το δοκίμιο αν και αστόχησε διατμητικά παρουσίασε μια πλάστιμη συμπεριφορά συγκρινόμενο με το συμβατικό σκυρόδεμα. Η ρηγμάτωση του δοκιμίου φαίνεται να πραγματοποιείται όντως σε χαμηλή στάθμη φορτίου ($P_{cr} = 42.85$ kN), όπου και αλλάζει η κλίση του διαγράμματος (σημείο 1). Το δοκίμιο φαίνεται να διαρρέει σε στάθμη φορτίου 268.3 kN με παραμόρφωση 9.1 mm (σημείο 2), στη συνέχεια αυξάνεται για λίγο η αντοχή του με διαφορετική κλίση στα 277 kN (σημείο 3), όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου. Μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, η καμπύλη πέφτει απότομα στα 188.5 kN με παραμόρφωση 14.86 mm (σημείο 4), δηλαδή χάνει περίπου το 1/3 της αντοχής της. Αξίζει να σημειωθεί, ότι και στο δοκίμιο D150 παρουσιάζεται η ίδια πτώση φορτίου σε ποσοστό, περίπου στην ίδια παραμόρφωση. Σε αυτό το φορτίο η καμπύλη παραμένει περίπου οριζόντια μέχρι την αστοχία (σημείο 5) που παρατηρείται σε παραμόρφωση 29.1 mm. Η τιμή της πλαστιμότητας για αυτό το δοκίμιο είναι περίπου $q_d = 29.1/9.1 = 3.2$. Οι ακαμψίες του δοκιμίου για τις τρεις αρχικές κλίσεις του διαγράμματος υπολογίζονται παρακάτω:

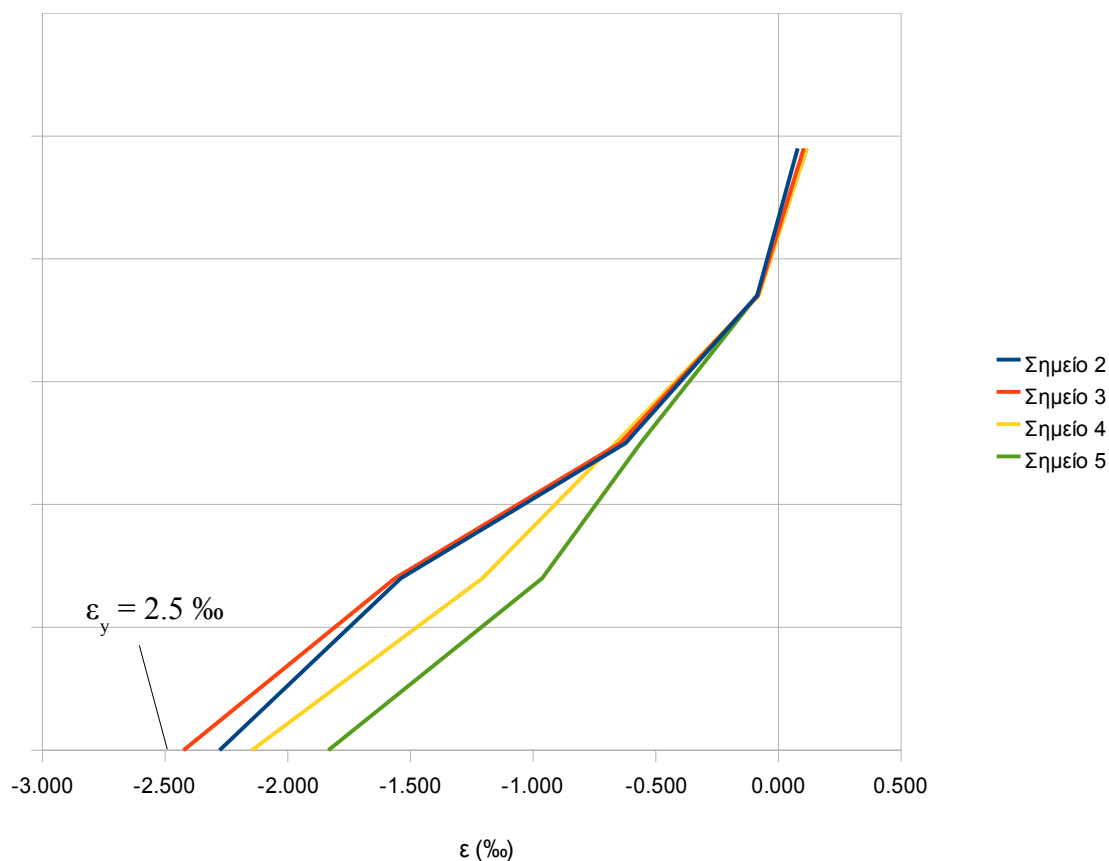
Αρηγμάτωτος κλάδος: $K_{gr} = P_1/\delta_1 = 73.37$ kN/mm

Ρηγματωμένος κλάδος: $K_y = (P_2 - P_1)/(\delta_2 - \delta_1) = 26.57$ kN/mm

Κλάδος κράτυνσης: $K_h = (P_3 - P_2)/(\delta_3 - \delta_2) = 5.37$ kN/mm

Η μέγιστη συνολική δύναμη που έφτασε το έμβολο είναι ίση με $P_{max} = 277.03$ kN και εφόσον το δοκίμιο αστόχησε διατμητικά μπορούμε να πούμε ότι η οριακή διατμητική του αντοχή είναι ίση με $P_{max}/2 = 138.52$ kN. Εφόσον η κατηγορία του άοπλου σκυροδέματος (βάσει μελέτης σύνθεσης) είναι αντοχής C25/30, μία αντίστοιχη δοκός από το ίδιο σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη ίνας και χωρίς διατμητικό οπλισμό θα είχε διατμητική αντοχή ίση με $V_c = 70.2$ kN (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5.2.2), δηλαδή παρατηρούμε αύξηση της τάξης του 97.32% στη διατμητική αντοχή του δοκιμίου M150, καθώς και μία κάπως πλάστιμη διατμητική συμπεριφορά, αντίθεση με την ψαθυρή αστοχία του συμβατικού δοκιμίου.

Αξίζει να παρατηρηθεί λόγω της διάταξης των βελομέτρων στη μεσαία διατομή, η συμπεριφορά της μεσαίας διατομής σε κρίσιμα σημεία της καμπύλης (Σχήμα 5.6.2.2).



Σχήμα 5.6.2.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ ύψος της μεσαίας διατομής για τα σημεία του διαγράμματος 2,3,4 και 5

Το διάγραμμα παραμορφώσεων για το σημείο 1 του διαγράμματος δεν είναι δυνατό να αποτυπωθεί, καθώς τα βελομέτρα σε πολύ χαμηλή στάθμη φορτίου δεν έχουν πραγματοποιήσει ικανές παραμορφώσεις για την ακρίβειά τους. Να σημειωθεί ότι με θετικό πρόσημο απεικονίζεται η θλίψη στο παραπάνω διάγραμμα. Αναλυτικά, παρατίθενται στον Πίνακα 5.6.2.1 τα κρίσιμα σημεία της καμπύλης όπως επιλέχθηκαν το φορτίο και η παραμόρφωση για το κάθε σημείο.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα παραμορφώσεων της μεσαίας διατομής για τα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος P – δ, η παραδοχή Bernoulli – Euler για την επιπεδότητα της διατομής σε κάθε χρονική στιγμή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης, παρατηρείται πως από τη στιγμή της διαρροής του δοκιμίου (σημείο 2) αυξάνει η καμπυλότητα λίγο λόγω της κράτυνσης φτάνοντας στο μέγιστο φορτίο (σημείο 3) και μετά με την πτώση του φορτίου παρατηρείται μία διαρκής μείωση της μέσης καμπυλότητας (κλίσης του διαγράμματος) στα σημεία 4 και 5, μέχρι τη στιγμή της αστοχίας.

Αξίζει να σημειωθεί η καμπτική συμπεριφορά της δοκού, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα παραμορφώσεων. Μία πρώτη παρατήρηση είναι πως ο ουδέτερος άξονας της δοκού σε όλα τα σημεία που φαίνονται στο σχήμα είναι πάνω από το ύψος του δεύτερου βελομέτρου μετρώντας από τη

θλιβόμενη ίνα. Από το Σχήμα 4.2.6, βλέπουμε ότι το βελομέτρο αυτό (κανάλι 9) βρίσκεται σε απόσταση 8.5 cm από τη θλιβόμενη ακραία ίνα της διατομής. Οπότε μπορούμε να εξάγουμε συμπέρασμα για το πάχος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής καθ όλη τη διάρκεια της φόρτισης είναι μικρότερο των 8.5 cm. Ένα άλλο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει, είναι από το βελομέτρο που βρίσκεται στην άκρη της εφελκυσόμενης περιοχής, δηλαδή περίπου στο ύψος του χάλυβα οπλισμού (3 cm από την ακραία ίνα), ο διαμήκης χάλυβας δεν έχει διαρρέψει μετά τη διαρροή του δοκιμίου (σημείο 2). Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι οι παραμορφώσεις του “κάτω” βελομέτρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.2.2 είναι μικρότερες από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα S500 ($\varepsilon_y = 2.5\%$). Το τελευταίο συμπέρασμα, βέβαια, είναι ορατό και από τις φωτογραφίες της δοκού κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπου δεν εμφανίζονται κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές εντός της περιοχής σταθερής ροπής της δοκού.

- Καμπύλη ροπών – καμπυλοτήτων $M - \varphi$:

Από τις συνεχείς μετρήσεις του φορτίου P μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος να εξάγουμε μία τιμή της ροπής M στο μέσον, καθώς όπως προκύπτει από το διάγραμμα ροπών της αμφιέρειστης δοκού που φορτίζεται σε ίσες αποστάσεις a από τις στηρίξεις (Σχήμα 5.2.2.3) η ροπή στο μέσον ισούται με το γινόμενο της δύναμης P επί το διατμητικό μήκος a , που είναι ίσο με 54 cm για το πείραμα που διεξάγεται.

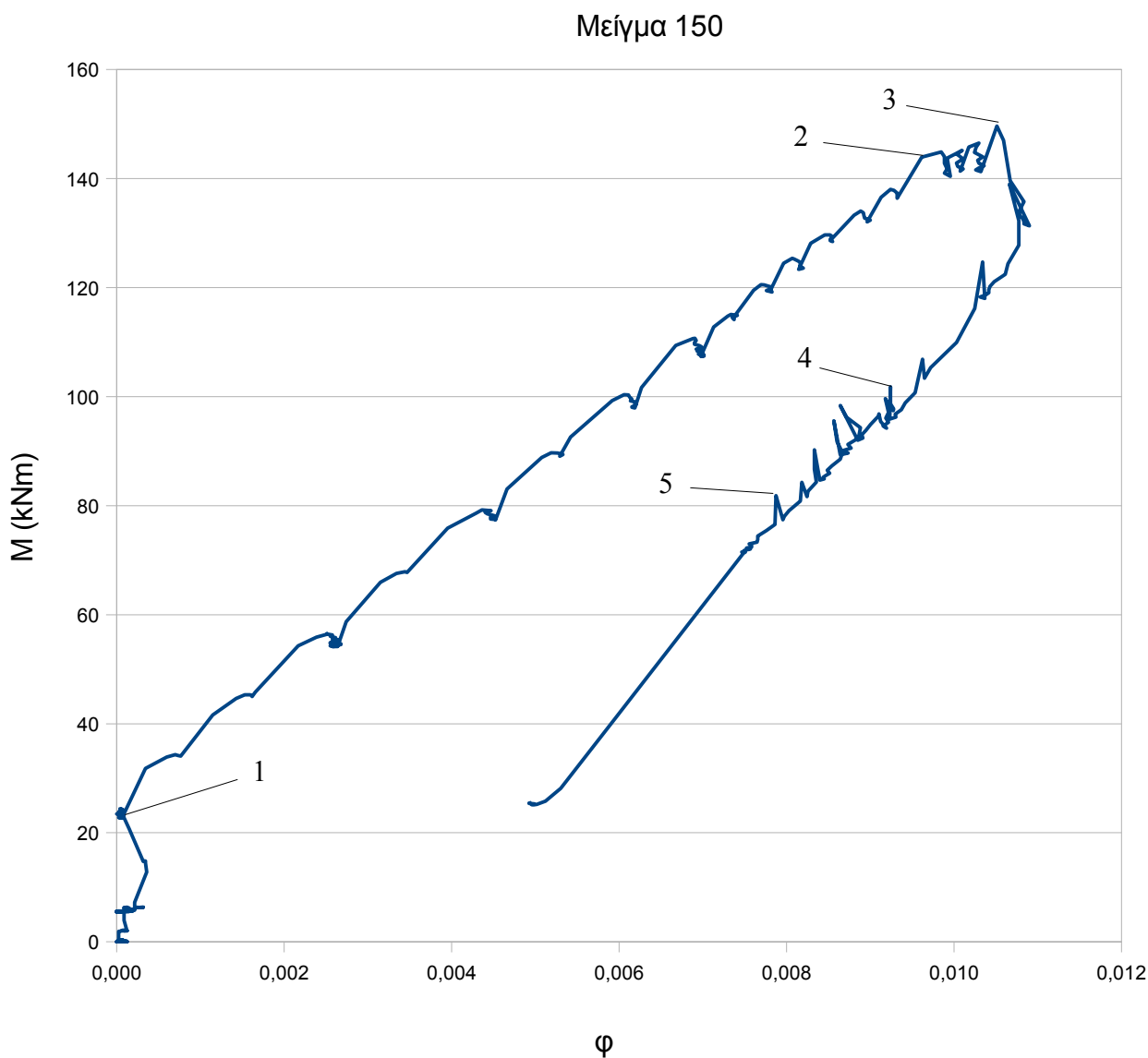
Για τις τιμές της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής, εφόσον έχει ήδη αποδειχθεί παραπάνω ότι η κατανομή των παραμορφώσεων της διατομής δεν απέχει πολύ από την ευθεία για διάφορες χρονικές στιγμές (παραδοχή Bernoulli – Euler), αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των παραμορφώσεων των δύο ακραίων βελομέτρων καθ ύψος. Το άθροισμα των απόλυτων τιμών των παραμορφώσεων αυτών διαιρούμενο με την υψομετρική τους απόσταση H δίνει τη μέση τιμή της κλίσης του διαγράμματος για κάθε χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς αρχικές αποστάσεις βελομέτρων για το δοκίμιο όπως δίνονται στο κεφάλαιο της πειραματικής διάταξης (Σχήμα 4.2.6)

Αναλυτικά, η μέση καμπυλότητα της μεσαίας διατομής υπολογίστηκε ως:

$$\varphi = \frac{(|\varepsilon(6)| + |\varepsilon(10)|)}{H}$$

όπου $\varepsilon(6)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου πάνω βελομέτρου όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη, $\varepsilon(10)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου κάτω βελομέτρου και H η υψομετρική απόσταση των δύο βελομέτρων, που για το δοκίμιο M150 είναι 245 mm (Σχήμα 4.2.6).

Υπολογίζοντας τις τιμές της ροπής και της καμπυλότητας για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει η καμπύλη $M - \varphi$ (Σχήμα 5.6.2.3):



Σχήμα 5.6.2.3: Καμπύλη ροπών - καμπυλοτήτων του δοκιμίου M150

Όπως και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, έτσι και στην καμπύλη ροπών καμπυλοτήτων, βλέπουμε κατά αντιστοιχία τα καθοριστικά σημεία 1,2,3,4 και 5. Φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα, η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η πτώση της αντοχής (4) και η στιγμή λίγο πριν την αστοχία (5).

Από αυτό το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά πως μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου (σημείο 3), η τιμή της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής μειώνεται σταδιακά μέχρι τη στιγμή της αστοχίας (σημείο 5). Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 5.6.2.2, όπου η κλίση του διαγράμματος παραμορφώσεων μικραίνει σταδιακά από το σημείο 3 μέχρι το σημείο 5. Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από την καμπύλη $M - \varphi$ είναι μια προσέγγιση της ροπής αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής, εφόσον το μέτρο ελαστικότητας E_c του συγκεκριμένου δοκιμίου έχει εκτιμηθεί από τα αποτελέσματα του κυλινδρικού δοκιμίου ίση με 30.39 GPa (Κεφάλαιο 3.2). Είναι γνωστό πως η κλίση του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων μετά τη ρηγμάτωση, είναι ίση με το γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας E_c επί τη ροπή αδρανείας της διατομής I_{cr} . Στο διάγραμμα μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία το κομμάτι της καμπύλης μεταξύ των σημείων 1 και 2 (μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή). Στον Πίνακα 5.2.2.2 δίνονται οι τιμές ροπής και καμπυλότητας για κάθε ένα από τα 5 σημεία:

	M (kNm)	φ (1/m)
Σημείο 1	31.79	0.00034
Σημείο 2	142.803	0.01030
Σημείο 3	149.596	0.01051
Σημείο 4	101.785	0.00924
Σημείο 5	81.853	0.00787

Πίνακας 5.6.2.2: Ροπή και καμπυλότητα στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Η κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων 1 και 2 είναι ίση με $(142.803-31.79)/(0.01030-0.00034) = 11145.88 \text{ kNm}^2 = E_c I_{cr}$. Άρα, η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής προκύπτει ίση με $I_{cr} = 11145.88/30390000 = 3.6676 * 10^{-4} \text{ m}^4 = 36676 \text{ cm}^4$. Η ροπή αδρανείας της αρηγμάτωτης διατομής του δοκιμίου (Κωτσοβός, 2000) είναι ίση με

$$I_g = bh^3/12 + bh(x-h/2)^2 + \alpha_e A_s (d-x)^2$$

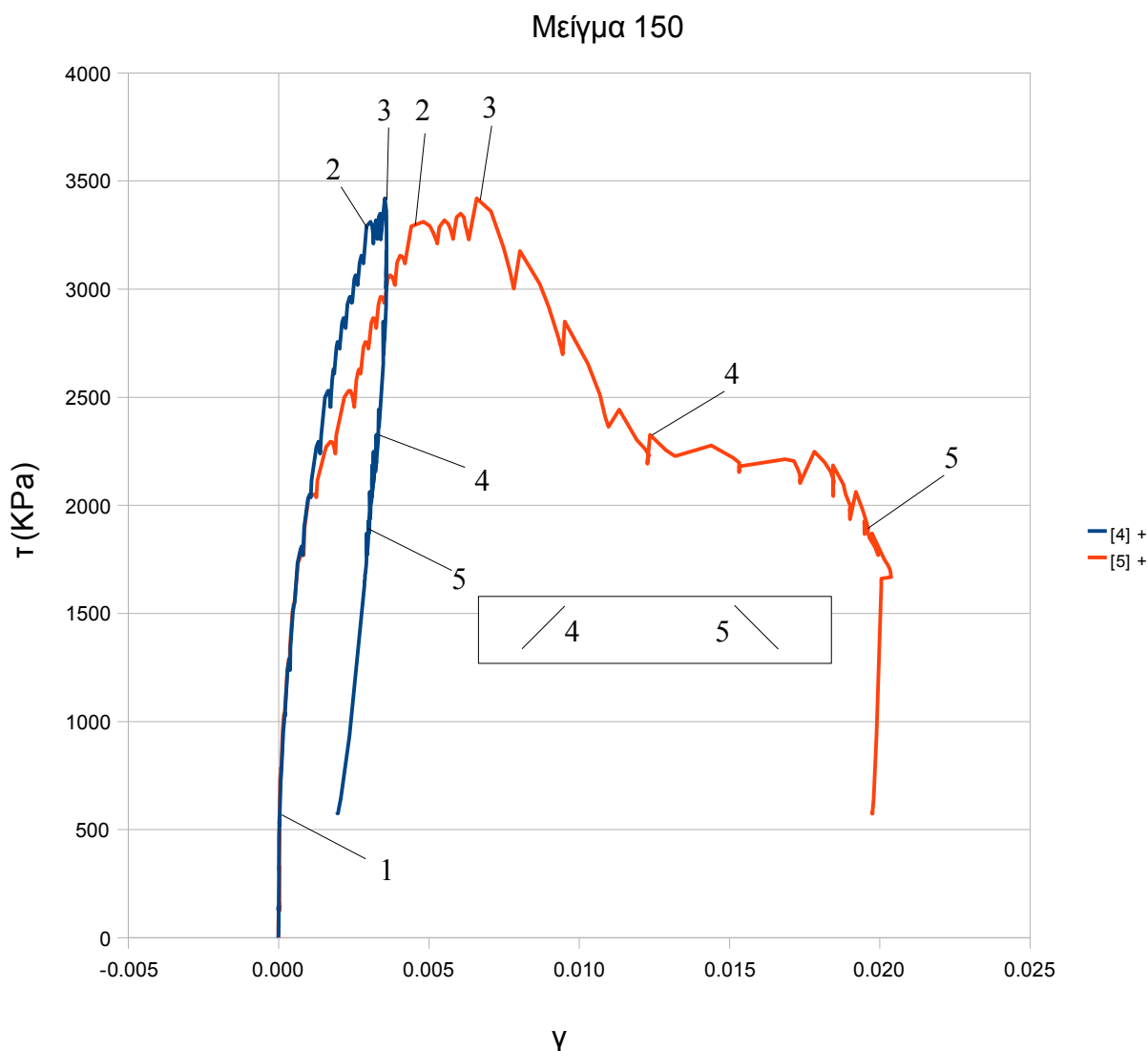
όπου x προκύπτει από τη σχέση:

$$A_c(x-h/2) = \alpha_e A_s (d-x)$$

και $\alpha_e = E_s/E_c$, με E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 200 GPa και E_c το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος ίσο με 30.39 GPa για το δοκίμιο M150. Από τους υπολογισμούς προκύπτει $I_g = 37851 \text{ cm}^4$. Εκτιμάται, δηλαδή ότι η ροπή αδρανείας του ινοπλισμένου σκυροδέματος M150 δε μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου κατά τη ρηγμάτωση, καθώς μειώνεται κατά 3.1 %, τιμή πολύ μικρότερη από αυτή που συναντάμε στο συμβατικό σκυρόδεμα (μείωση της τάξης του 50 %).

- Καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης $\tau - \gamma$:

Για το δοκίμιο M150 και τον έλεγχο της διατμητικής συμπεριφοράς αυτού στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας (βλ. Σχήμα 5.2.2.3) τοποθετήθηκαν δύο αναλογικά βελομέτρα σε γωνία 45° κάθετα στις αναμενόμενες διατμητικές ρωγμές (κανάλια 4 και 5). Από τη συνεχή καταγραφή του φορτίου μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή να εξάγουμε τη διατμητική τάση που ασκείται σε κάθε μία από τις δύο περιοχές $\tau = V/bd$, όπου $V = P/2$, b το πλάτος της δοκού που είναι 15 cm και d το στατικό ύψος της δοκού ίσο με 27 cm. Για την τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετατοπίσεις των διατμητικών βελομέτρων διαιρούμενες με τη αρχική απόσταση της διαγωνίου του κάθε βελομέτρου, όπως απεικονίζεται στην πειραματική διάταξη (Σχήμα 4.2.6). Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα $\tau - \gamma$ και για τις δύο διαγώνιες ρωγμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.2.4:



Σχήμα 5.6.2.4: Καμπύλη διατμητικής τάσης - γωνιακής παραμόρφωσης για το δοκίμιο M150

Στο Σχήμα 5.6.2.4 φαίνεται η καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης και για τις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας του δοκιμίου. Από το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά, πως η ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία είναι η ρωγμή δεξιά, όπως βλέπουμε το δοκίμιο στην πειραματική διάταξη (κανάλι 5), καθώς οδήγησε σε πολύ μεγαλύτερες γωνιακές παραμορφώσεις. Αυτό έχει ήδη γίνει φανερό και από τις φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπου η δεξιά ρωγμή είναι αυτή η οποία μετά από μία στάθμη φορτίου ανοίγει σταδιακά και προκαλεί την αστοχία του δοκιμίου. Τα κρίσιμα σημεία, όπως έχουν οριστεί και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης φαίνονται στο διάγραμμα, δηλαδή η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), η πτώση της αντοχής (4) και η στιγμή λίγο πριν την αστοχία (5).

Αυτό που αξίζει να εξεταστεί στις δύο παραπάνω καμπύλες είναι οι κλίσεις αυτών, και η σύγκριση μεταξύ τους. Παρατηρούμε, πως όσο οι δύο διατομές είναι αρηγμάτωτες (αρχική κλίση των δύο καμπυλών) έχουν την ίδια κλίση, από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου σκυροδέματος G_{gr} . Στη συνέχεια, τα δύο διαγράμματα διαφοροποιούνται ως προς την κλίση, το οποίο είναι λογικό, καθώς η ρωγμή δεξιά (κανάλι 5) ανοίγει συνεχώς, τη στιγμή που η ρωγμή αριστερά (κανάλι 4) παραμένει σχετικά σταθερή. Αυτό φαίνεται στη διαφοροποίηση της κλίσης που είναι πιο μικρή στο διάγραμμα του καναλιού 5. Στη συνέχεια το διάγραμμα ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτή του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης. Η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{max} του δοκιμίου M150 είναι ίση με $3420.1 \text{ kPa} = 3.42 \text{ MPa}$

Το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου ινοπλισμένου σκυροδέματος G_{gr} υπολογίζεται από το σημείο 1 της καμπύλης και ισούται με το πηλίκο της διατμητικής τάσης τ προς τη γωνιακή παραμόρφωση γ . Για το δοκίμιο M150, το σημείο 1 έχει διατμητική τάση ίση με 726.79 kPa και γωνιακή παραμόρφωση γ (λήφθηκε η μέση τιμή των δύο τιμών των δύο καναλιών) ίση με 0.000055 . Οπότε το μέτρο διάτμησης εκτιμάται ίσο με $G_{gr} = 726.79 / 0.000055 = 13214363.64 \text{ kPa} = 13.214 \text{ GPa}$. Από αυτή την τιμή και τη σχέση $G = E/2(1+\nu)$ μπορούμε να πάρουμε μία ακόμα εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του δοκιμίου. Θεωρώντας το $\nu = 0.2$ (τιμή αποδεκτή για το οπλισμένο σκυρόδεμα), προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου ίσο με 31.71 GPa , τιμή όχι μακριά από την τιμή που προέκυψε από τη δοκιμή θλίψης ($E = 30.39 \text{ GPa}$).

Το δοκίμιο D150 εμφάνισε ψαθυρή συμπεριφορά με δείκτη απορρόφησης ενέργειας μόλις 5493 KNmm , οπότε δεν είναι δυνατό να προσομοιαστεί η συμπεριφορά του με ελαστοπλαστική.

- Εκτίμηση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου δοκιμίου σε κάμψη:

Για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος M150, θα χρησιμοποιηθούν οι καταγραφές των βελομέτρων στη μεσαία διατομή (κανάλια 6,7,8,9 και 10) κατά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου του δοκιμίου $P_{\max} = 277.03$ kN (σημείο 3), που συμπίπτει και με την επίτευξη της μέγιστης ροπής $M_{\max} = 149.6$ kNm. Οι τιμές των βελομέτρων καθ ύψος σε αυτή τη χρονική στιγμή δίνονται από τον πίνακα 5.6.2.3:

Κανάλια	Παραμόρφωση ϵ (%)	Απόσταση από ακραία εφελκυόμενη ίνα (cm)
6	-2.425	3
7	-1.563	10
8	-0.645	15.5
9	-0.084	21.5
10	0.104	27.5

Πίνακας 5.6.2.3: Καταγραφές βελομέτρων μεσαίας διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής

Στον παραπάνω πίνακα ο εφελκυσμός συμβολίζεται με μείον και η θλίψη με συν. Από τις καταγραφές των βελομέτρων 9 και 10, παρατηρείται ότι ο ουδέτερος άξονας της διατομής βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίζουν τα παραπάνω δύο βελόμετρα (αλλαγή προσήμου). Από την επίλυση των όμοιων τριγώνων βρίσκουμε ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται κοντά στο κανάλι 9 κατά 2.68 cm. Άρα, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης θα είναι ίσο με $2.5 + 6 - 2.68 = 5.82$ cm. Η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας, που βρίσκεται σε απόσταση 2.5 cm από το βελόμετρο 10 βρίσκεται επίσης με όμοια τρίγωνα, δεδομένου ότι γνωρίζουμε το πάχος θλιβόμενης ζώνης ως $\epsilon_c = 0.104 * (2.5 + 6 - 2.68) / (6 - 2.68) = 0.182\%$. Η τιμή αυτή της ακραίας θλιβόμενης ίνας είναι πολύ μικρή, δεδομένου ότι ο χάλυβας σπλισμού έχει διαρρέψει, οπότε πιθανολογείται ότι το ακραίο βελόμετρο δεν έχει τοποθετηθεί σωστά, ώστε να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για την καμπτική συμπεριφορά του δοκιμίου.

5.6.3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πειράματος του δοκιμίου M150 όσον αφορά τη διατμητική αντοχή με τις προτεινόμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση που έχει προτείνει ο Sharma (1986), η διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών υπολογίζεται ως:

$$v_u = k f_t' (d/a)^{0.25} \quad (MPa) \quad (1)$$

όπου,

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$$k = 2/3$$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_t' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $f_t' = 0.79(f_c')^{0.5}$ [MPa]

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου [MPa]

Λόγω έλλειψης εφελκυστικής δοκιμής διάρρηξης θα χρησιμοποιηθεί η τιμή της θλιπτικής αντοχής του κυλίνδρου ίση με 32.73 MPa για το δοκίμιο M150. Προκύπτει $f_t' = 4.52$ MPa. Για το λόγο $a/d = 2.0$ του πειράματος, προκύπτει διατμητική αντοχή ίση με $v_u = 2533.9$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 102.62$ kN, τιμή αρκετά κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (138.52 kN) κατά 25.9%.

Οι Al-Ta'an και Al-Feel (1990) έχουν προτείνει μία σχέση για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες στο δοκίμιο. Η διατμητική αντοχή που προσφέρει το σκυρόδεμα στο δοκίμιο προκύπτει από τη σχέση

$$V_c = 2 * f_{ctm} * b_w * d / 3$$

όπου $f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 3068.9$ kPa για θλιπτική αντοχή 32.73 MPa. Άρα, προκύπτει $V_c = 82.86$ kN για τη δοκό του πειράματος. Η προτεινόμενη σχέση για την προσφορά των ινών στη διάτμηση είναι:

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (7)$$

όπου, $k = 1.2$ για ίνες με άγκιστρα, όπως του πειράματος, V_f το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ίσο με 1.8% για το δοκίμιο M150 και $(L_f/D_f)_{ισοδ} = (2*40+60+80)/4 = 55$ για το μείγμα ινών της ΕΤΑΛ που χρησιμοποιήθηκε. Οπότε προκύπτει, $v_f = 1122$ KPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 45.44$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 128.3$ kN, τιμή κοντά στην τιμή που προέκυψε από το πείραμα (138.52 kN).

Οι Swamy et al. (1993) έχουν προτείνει μία σχέση ακόμα για τη συνεισφορά της ίνας στη διατμητική αντοχή, η οποία είναι:

$$v_f = 0.37\tau V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (8)$$

όπου τ η διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος, οποία έχει προταθεί να λαμβάνεται ίση με 4.15 MPa, ελλείψει δοκιμών εξόλκευσης. Αντικαθιστώντας τις υπόλοιπες τιμές όπως παραπάνω, προκύπτει $v_f = 1520.15$ kPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 61.57$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 144.43$ kN, τιμή πολύ κοντά με τη διατμητική αντοχή, η οποία προέκυψε από το πείραμα (138.52 kN).

Οι Ashour, Hasanain και Wafa (1992) έχουν προτείνει δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών. Η πρώτη είναι:

Για $a/d \geq 2.5$,

$$v_u = (2.11\sqrt[3]{f'_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (MPa) \quad (5a)$$

Για $a/d < 2.5$,

$$v_u = [\text{Eq. (5a)}] \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (MPa) \quad (5b)$$

όπου $F = (L_f/D_f)V_f d_f$, $d_f = 0.75$ για ίνες με άγκιστρα, ρ το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ίσο με 1.14% για τις δοκούς του πειράματος και $v_b = 0.41\tau F$, όπου $\tau = 4.15$ MPa, όπως λήφθηκε παραπάνω. Για αντοχή σε θλιψη $f'_c = 32.73$ MPa και $a/d = 2.0$, προκύπτει $v_u = 3305$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 133.85$ kN, τιμή πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε στο πείραμα (138.52 kN). Η δεύτερη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa είναι:

$$v_u = (0.7\sqrt{f'_c} + 7F) \frac{d}{a} + 17.2\rho \frac{d}{a} \quad (MPa) \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας ως παραπάνω προκύπτει $v_u = 4700.9$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 190.39$ kN, τιμή πάνω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (138.52 kN) κατά 37.4%. Η δεύτερη σχέση, δηλαδή υπερεκτιμά την αντοχή του ινοπλισμένου δοκιμίου σε διάτμηση.

5.3.4. Εύρεση ανάλογου ποσοστού διατμητικού οπλισμού (συνδετήρων)

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5.6.2, για τη σύνθεση του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ($f_{ck} = 25$ MPa) η αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση θα είναι ίση με $V_c = 70.2$ kN. Η αντοχή του πειραματικού δοκιμίου M150 έφτασε την τιμή των 138.52 kN. Ενδιαφέρον είναι να υπολογιστεί το ανάλογο ποσοστό συνδετήρων που αντιστοιχεί στην επιπλέον αντοχή που δίνει το μείγμα χαλύβδινων ιών της ΕΤΑΛ σε ποσοστό κ.ό. 1.8%.

Η επιπλέον αντοχή της δοκού, λόγω της προσθήκης των ιών είναι ίση με $138.52 - 70.2 = 68.32$ kN. Αυτή την επιπλέον αντοχή μπορούν να εξασφαλίσουν συνδετήρες $\Phi 10$ δίτμητοι με $A_{sw} = 1.57$ cm² αν τοποθετηθούν ανά απόσταση s , οποία βρίσκεται από τη σχέση:

$$V_{wd} = 0.9d \cdot A_{sw} \cdot f_{ywk} / s$$

όπου $V_{wd} = 68.32$ kN και $f_{ywk} = 520$ MPa για χάλυβα συνδετήρων ποιότητας B500C.

Από τη σχέση προκύπτει απόσταση $s = 29$ cm. Δηλαδή το ισοδύναμο των συνδετήρων για το δοκίμιο M150, προκύπτει ότι είναι να τοποθετηθούν $\Phi 10/29$ και αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $\rho_w = A_{sw} / (b_w s) = 0.0036$. Καλό θα ήταν, βέβαια, να τονιστεί η πολύ πιο πλάστιμη συμπεριφορά των ινοπλισμένων δοκιμίων στη διατμητική αστοχία, έναντι των δοκών με συμβατικό διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες).

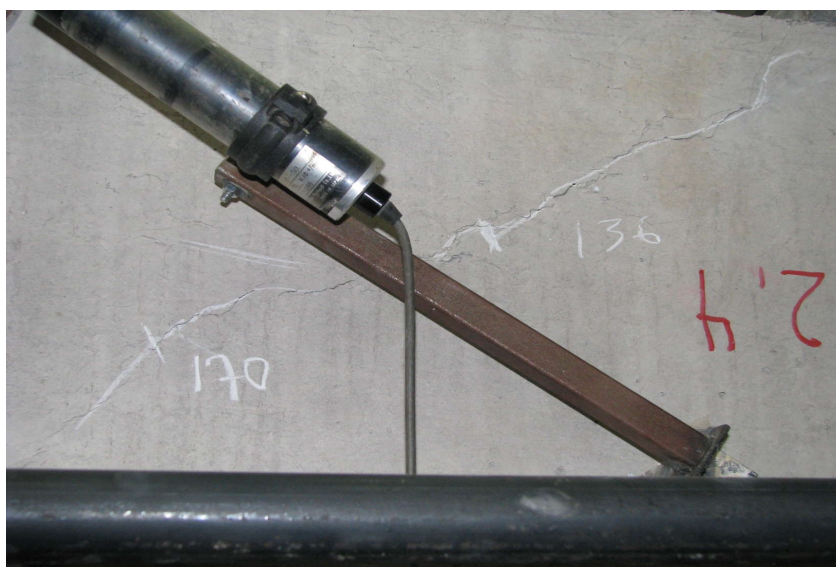
5.7. Δοκίμιο M200

5.7.1 Συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος

Το δοκίμιο M200 εμφάνισε μία ιδιότυπη συμπεριφορά. Σε χαμηλή στάθμη φορτίου εμφάνισε διαγώνιες διατμητικές ρωγμές και στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας δύναμης (Εικόνες 5.7.1.1 και 5.7.1.2), εκ των οποίων η μία (δεξιά) εμφάνισε μικρότερη κλίση από τις 45° , το οποίο αξίζει να σημειωθεί για τη συνέχεια του πειράματος. Η δεξιά ρωγμή επεκτείνεται περισσότερο, ώσπου εμφανίζεται μια νέα διαγώνια ρωγμή στην ίδια περιοχή με μεγαλύτερη κλίση κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου (Εικόνα 5.7.1.3).



Εικόνα 5.7.1.1: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής αριστερά



Εικόνα 5.7.1.2: Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής δεξιά



Εικόνα 5.7.1.3: Εμφάνιση δεύτερης διατμητικής ρωγμής κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου

Όσο το φορτίο (όπου φορτίο ονομάζουμε το συνολικό φορτίο P με το οποίο φορτίζουμε τη σιδηρά δοκό, η οποία στηρίζεται σε 2 κυλίνδρους που φορτίζουν το δοκίμιο σε 2 σημεία συμμετρικά) ανεβαίνει, η πρώτη διατμητική ρωγμή σταθεροποιείται και η δεύτερη ανοίγει συνεχώς (Εικόνα 5.7.1.4), ενώ παρατηρούνται και καμπτικές ρωγμές εντός της περιοχής σταθερής ροπής της δοκού (Εικόνα 5.7.1.5).



Εικόνα 5.7.1.4: Εικόνα διατμητικών ρωγμών στη δεξιά περιοχή σταθερής τέμνουσας



Εικόνα 5.5.1.5: Δημιουργία καμπτικής ρωγμής εντός της περιοχής καταγραφής των βελομέτρων

Οι καμπτικές ρωγμές, καθώς και η δεύτερη διατμητική συνέχισαν να ανοίγουν κατανεμημένες μέσα στην περιοχή σταθερής ροπής (Εικόνα 5.7.1.6), βοηθώντας το δοκίμιο να παραλαμβάνει συνεχώς όλο και περισσότερη ενέργεια. Σε αυτή τη φάση δεν έχει ακόμα αναγνωριστεί ποια ρωγμή θα προκαλέσει την αστοχία.

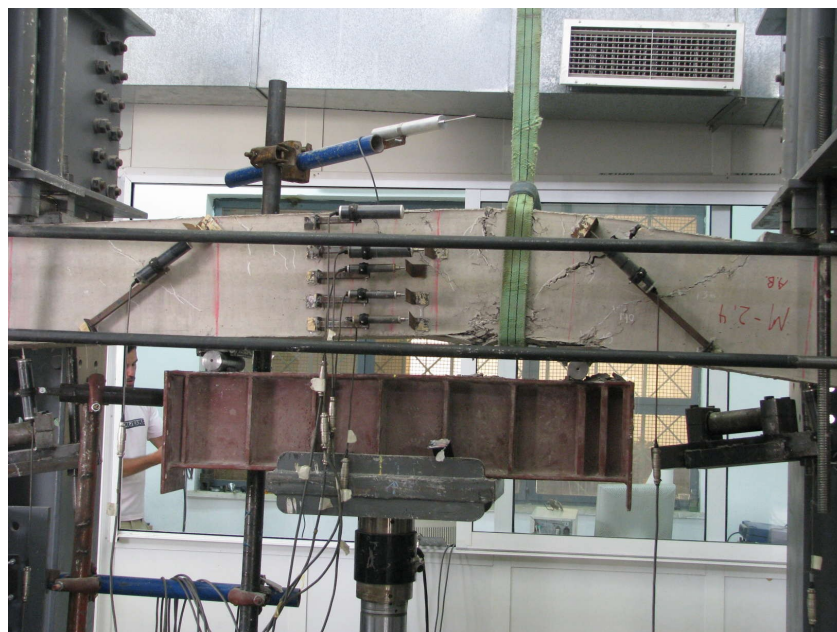


Εικόνα 5.7.1.6: Απεικόνιση καμπτικών και διατμητικών ρωγμών στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου

Η δοκός παρουσιάζει μία πλάστιμη συμπεριφορά διατηρώντας τη φέρουσα ικανότητά της σε μεγάλες παραμορφώσεις. Η ρωγμή που προκαλεί την αστοχία δεν είναι διακριτή (Εικόνα 5.7.1.7). Η αστοχία προήλθε από ένα συνδυασμό κάμψης και διάτμησης. Η γενική εικόνα της δοκού κατά την αστοχία φαίνεται στην Εικόνα 5.7.1.8.



Εικόνα 5.7.1.7: Συνδυασμός ρωγμών που προκάλεσαν την αστοχία

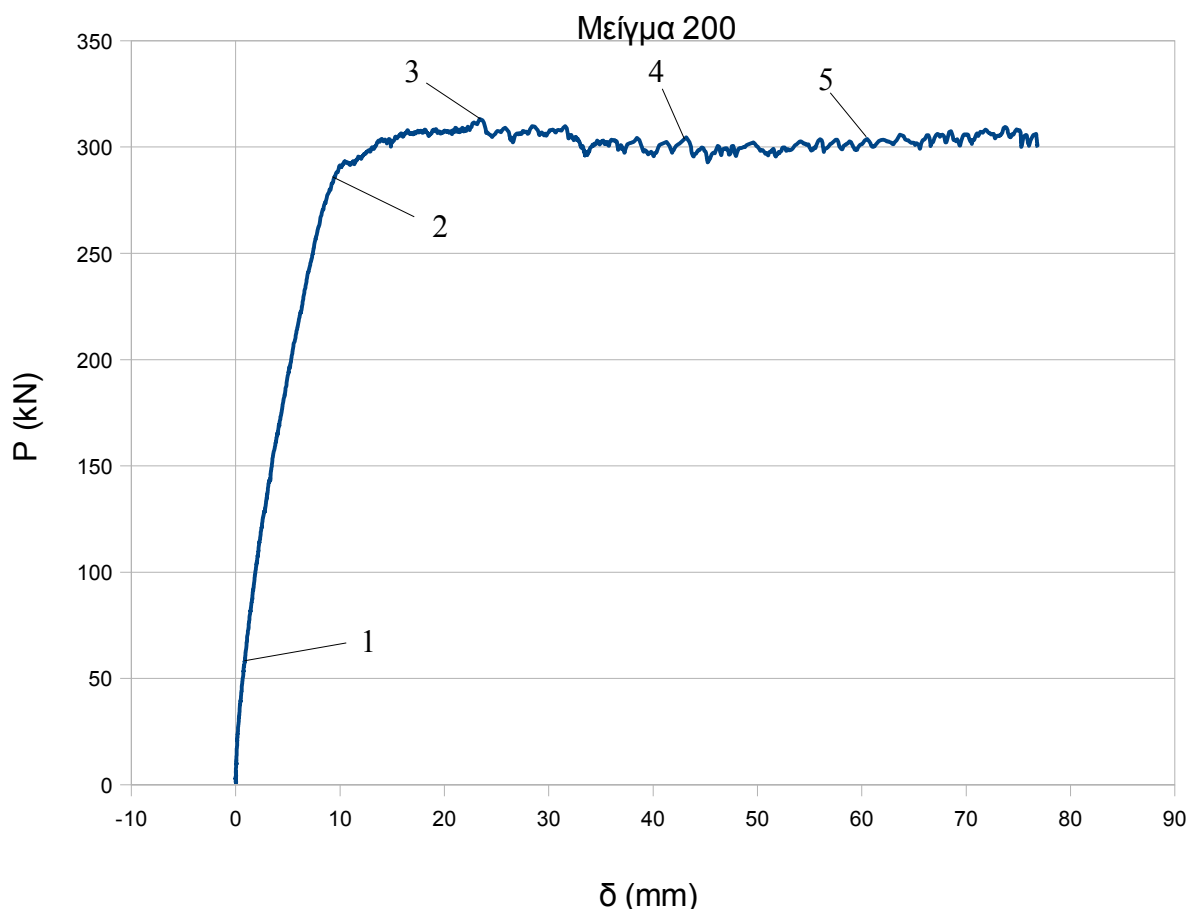


Εικόνα 5.7.1.8: Γενική άποψη της δοκού κατά την αστοχία

5.7.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων των καταγραφών του πειράματος

- Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης $P - \delta$:

Η τιμή του φορτίου και των λοιπών καταγραφών παραμόρφωσης και μετατόπισης καταγράφονταν συνεχώς ταυτόχρονα. Η τιμή του καμπτικού βέλους της δοκού για κάθε στιγμή θα δίνεται αν από την τιμή του κατακόρυφου βελομέτρου που βρίσκεται στο μέσον (κανάλι 1) αφαιρέσουμε τη μέση τιμή των καταγραφών των βελομέτρων που βρίσκονται κάτω από τις στηρίξεις (κανάλια 2 και 3). Έτσι, προκύπτει η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης $P - \delta$ (Σχήμα 5.7.2.1)



Σχήμα 5.7.2.1: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης του δοκιμίου M200

	P (kN)	δ (mm)
Σημείο 1	60.45	0.915
Σημείο 2	290.75	9.915
Σημείο 3	313.19	23.366
Σημείο 4	304.49	43.17
Σημείο 5	303.4	57.491

Πίνακας 5.7.2.1: Φορτίο και παραμόρφωση στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης το δοκίμιο παρουσίασε μια πλάστικη συμπεριφορά αστοχώντας καμπτικά και έφτασε σε υψηλότερες παραμορφώσεις σε σχέση με τα προηγούμενα μη χάνοντας καθόλου την αντοχή του σε μεγάλες παραμορφώσεις. Η ρηγμάτωση του δοκιμίου φαίνεται να πραγματοποιείται όντως σε χαμηλή στάθμη φορτίου ($P_{cr} = 60.45 \text{ kN}$), όπου και αλλάζει η κλίση του διαγράμματος (σημείο 1). Το δοκίμιο φαίνεται να διαρρέει σε στάθμη φορτίου 290.75 kN με παραμόρφωση 9.9 mm (σημείο 2), στη συνέχεια παρουσιάζει μία μικρή κράτυνση επιτυγχάνοντας μέγιστη αντοχή στο σημείο 3 (313.19 kN), και στη συνέχεια μένει συνέχεια πάνω από το φορτίο διαρροής μέχρι και την αστοχία σε παραμόρφωση 76.5 mm . Η τιμή της πλαστιμότητας για αυτό το δοκίμιο είναι $q_d = 76.5/9.9 = 7.73$. Οι ακαμψίες του δοκιμίου για τις τρεις αρχικές κλίσεις του διαγράμματος υπολογίζονται παρακάτω:

Αρηγμάτωσης κλάδος: $K_{gr} = P_1/\delta_1 = 66.07 \text{ kN/mm}$

Ρηγματωμένος κλάδος: $K_y = (P_2 - P_1)/(\delta_2 - \delta_1) = 25.59 \text{ kN/mm}$

Κλάδος κράτυνσης: $K_h = (P_3 - P_2)/(\delta_3 - \delta_2) = 1.08 \text{ kN/mm}$

Η μέγιστη συνολική δύναμη που έφτασε το έμβολο είναι ίση με $P_{max} = 313.19 \text{ kN}$ και εφόσον το δοκίμιο αστόχησε σε κάμψη και διάτμηση μπορούμε να πούμε ότι η οριακή διατμητική του αντοχή είναι περίπου ίση με $P_{max}/2 = 156.6 \text{ kN}$. Εφόσον η κατηγορία του άοπλου σκυροδέματος (βάσει μελέτης σύνθεσης) είναι αντοχής C25/30, μία αντίστοιχη δοκός από το ίδιο σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη ίνας και χωρίς διατμητικό οπλισμό θα είχε διατμητική αντοχή ίση με $V_c = 70.2 \text{ kN}$ (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5.2.2), δηλαδή παρατηρούμε αύξηση της τάξης του 123.1% στη διατμητική αντοχή του δοκιμίου M200. Αξίζει να συγκριθεί η ροπή αντοχής της ινοπλισμένης διατομής με τη διατομή συμβατικού σκυροδέματος με την ίδια σύνθεση. Για το συμβατικό σκυρόδεμα ισχύει:

$$A_s \cdot f_{yk} = 0.68 \cdot b \cdot x \cdot f_{ck}$$

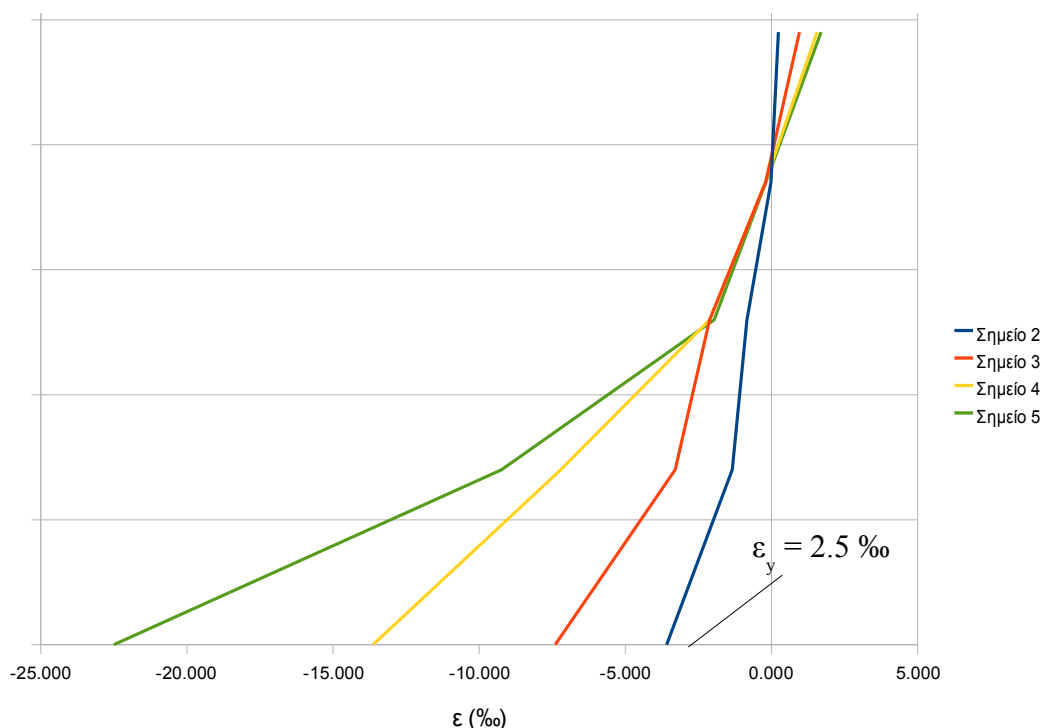
όπου $A_s = 3\Phi 14 = 4.62 \text{ cm}^2$, $f_{yk} = 510 \text{ MPa}$, $b = 0.15 \text{ m}$, $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ για την πειραματική διάταξη.

Λύνοντας ως προς x βρίσκουμε $x = 0.0924 \text{ m}$. Η ροπή αντοχής του συμβατικού σκυροδέματος θα είναι

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_y (d - 0.4 \cdot x) = 54.91 \text{ kNm} = P \cdot a.$$

Άρα $P = 54.91/0.54 = 101.69 \text{ kN}$ και το ολικό φορτίο είναι $2P = 203.37 \text{ kN}$. Παρατηρείται, δηλαδή, μία αύξηση της αντοχής σε κάμψη της τάξης του 54% .

Αξίζει να παρατηρηθεί λόγω της διάταξης των βελομέτρων στη μεσαία διατομή, η συμπεριφορά της μεσαίας διατομής σε κρίσιμα σημεία της καμπύλης (Σχήμα 5.7.2.2).



Σχήμα 5.7.2.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ ύψος της διατομής για τα σημεία του διαγράμματος 2,3,4 και 5

Το διάγραμμα παραμορφώσεων για το σημείο 1 του διαγράμματος δεν είναι δυνατό να αποτυπωθεί, καθώς τα βελόμετρα σε πολύ χαμηλή στάθμη φορτίου δεν έχουν πραγματοποιήσει ικανές παραμορφώσεις για την ακρίβειά τους, οπότε δεν απεικονίζεται για την καθαρότητα του σχήματος. Να σημειωθεί ότι με θετικό πρόσημο απεικονίζεται η θλίψη στο παραπάνω διάγραμμα. Αναλυτικά, παρατίθενται στον Πίνακα 5.7.2.1 τα κρίσιμα σημεία της καμπύλης όπως επιλέχθηκαν, το φορτίο και η παραμόρφωση για το κάθε σημείο.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα παραμορφώσεων της μεσαίας διατομής για τα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος P – δ, η παραδοχή Bernoulli – Euler για την επιπεδότητα της διατομής σε κάθε χρονική στιγμή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης, παρατηρείται πως από τη στιγμή της διαρροής του δοκιμίου (σημείο 2) αυξάνεται η καμπυλότητα συνεχώς, προκαλώντας μεγάλες παραμορφώσεις στη θέση του χάλυβα οπλισμού (στο σημείο 5 φτάνει μέχρι το 22%, δυστυχώς μετά το σημείο 5 το βελόμετρο παθαίνει βλάβη και δεν ξέρουμε μέχρι ποια παραμόρφωση έφτασε ο χάλυβας).

Αξίζει να σημειωθεί η καμπτική συμπεριφορά της δοκού, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα παραμορφώσεων. Μία πρώτη παρατήρηση είναι πως ο ουδέτερος άξονας της δοκού σε όλα τα σημεία που φαίνονται στο σχήμα είναι πάνω από το ύψος του δεύτερου βελομέτρου μετρώντας από τη θλιβόμενη ίνα. Από το Σχήμα 4.2.2, βλέπουμε ότι το βελόμετρο αυτό (κανάλι 9) βρίσκεται σε απόσταση 9 cm από τη θλιβόμενη ακραία ίνα της διατομής. Οπότε μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσμα

για το πάχος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής, ότι είναι μικρότερη των 9 cm. Ένα άλλο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει, είναι από το βελομέτρο που βρίσκεται στην άκρη της εφελκόμενης περιοχής, δηλαδή περίπου στο ύψος του χάλυβα οπλισμού (2.5 cm από την ακραία ίνα), ο διαμήκης χάλυβας διαρρέει λίγο πριν τη διαρροή του δοκιμίου (σημείο 2). Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός ότι η παραμόρφωση του “κάτω” βελομέτρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.2.2 είναι λίγο μεγαλύτερη από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα S500 ($\epsilon_y = 2.5\%$). Το τελευταίο συμπέρασμα, βέβαια, είναι ορατό και από τις φωτογραφίες της δοκού κατά τη διάρκεια του πειράματος, τις κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές που έχουν εμφανιστεί εντός της περιοχής σταθερής ροπής της δοκού.

- Καμπύλη ροπών – καμπυλοτήτων $M - \varphi$:

Από τις συνεχείς μετρήσεις του φορτίου P μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή του πειράματος να εξάγουμε μία τιμή της ροπής M στο μέσον, καθώς όπως προκύπτει από το διάγραμμα ροπών της αμφιέρειστης δοκού που φορτίζεται σε ίσες αποστάσεις a από τις στηρίξεις (Σχήμα 5.2.2.3) η ροπή στο μέσον ισούται με το γινόμενο της δύναμης P επί το διατμητικό μήκος a , που είναι ίσο με 54 cm για το πείραμα που διεξάγεται.

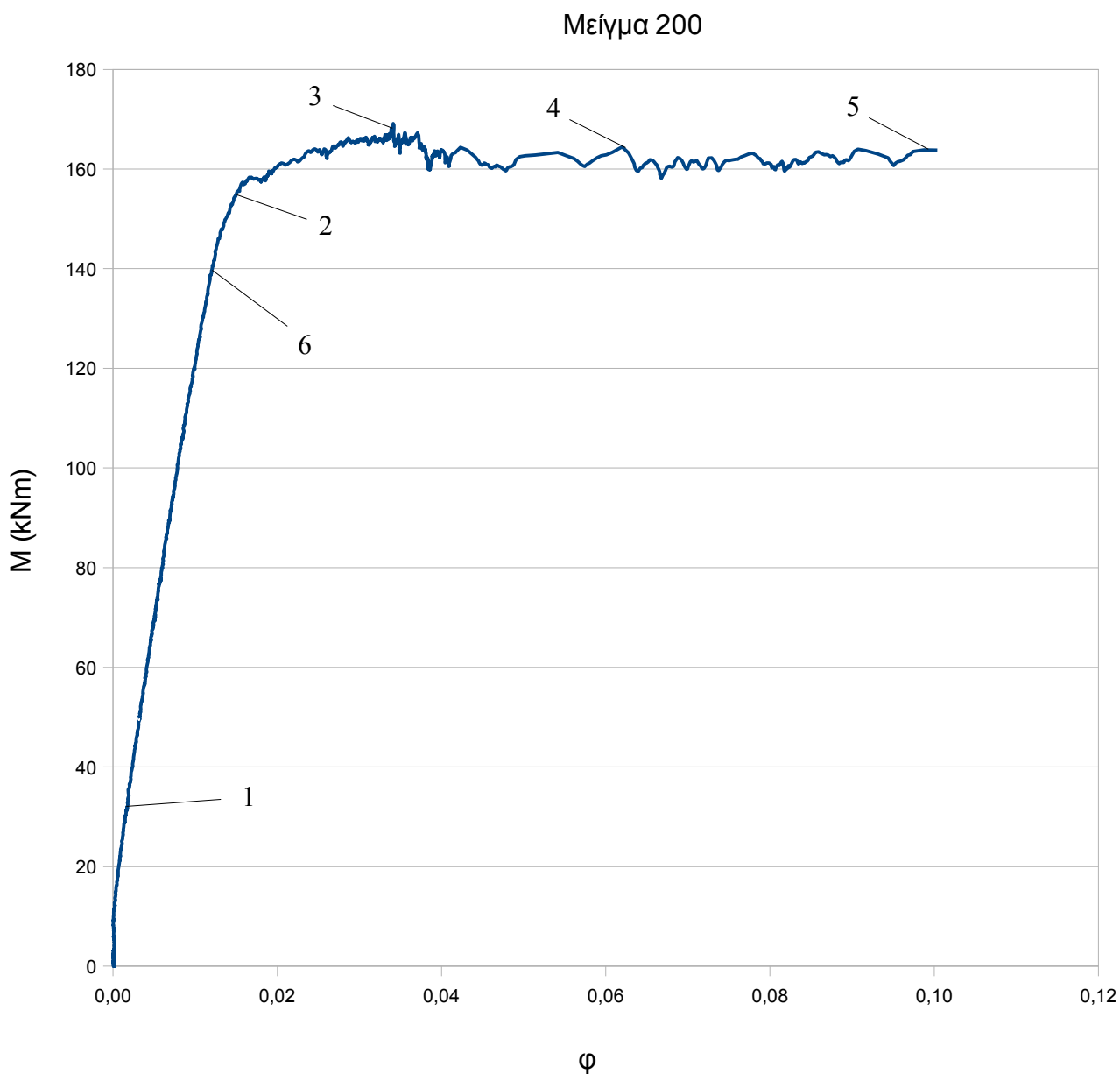
Για τις τιμές της μέσης καμπυλότητας της μεσαίας διατομής, εφόσον έχει ήδη αποδειχθεί παραπάνω ότι η κατανομή των παραμορφώσεων της διατομής δεν απέχει πολύ από την ευθεία για διάφορες χρονικές στιγμές (παραδοχή Bernoulli – Euler), αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των παραμορφώσεων των δύο ακραίων βελομέτρων καθ ύψος. Το άθροισμα των απόλυτων τιμών των παραμορφώσεων αυτών διαιρούμενο με την υψομετρική τους απόσταση H δίνει τη μέση τιμή της κλίσης του διαγράμματος για κάθε χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακριβείς αρχικές αποστάσεις βελομέτρων για το δοκίμιο όπως δίνονται στο κεφάλαιο της πειραματικής διάταξης (Κεφάλαιο 4).

Αναλυτικά, η μέση καμπυλότητα της μεσαίας διατομής υπολογίστηκε ως:

$$\varphi = \frac{(|\epsilon(6)| + |\epsilon(10)|)}{H}$$

όπου $\epsilon(6)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου πάνω βελομέτρου όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη, $\epsilon(10)$ η ορθή παραμόρφωση στη θέση του ακραίου κάτω βελομέτρου και H η υψομετρική απόσταση των δύο ακραίων βελομέτρων, που για το δοκίμιο M200 είναι 245 mm (Σχήμα 4.2.7).

Υπολογίζοντας τις τιμές της ροπής και της καμπυλότητας για κάθε χρονική στιγμή, προκύπτει η καμπύλη $M - \phi$ (Σχήμα 5.7.2.3):



Σχήμα 5.7.2.3: Καμπύλη ροπών - καμπυλοτήτων του δοκιμίου M200

Όπως και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης, έτσι και στην καμπύλη ροπών καμπυλοτήτων, βλέπουμε κατά αντιστοιχία τα καθοριστικά σημεία 1,2,3,4 και 5. Φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα, η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), μία ενδιάμεση τιμή με την ίδια αντοχή (4) και η στιγμή που το ένα ακραίο βελόμετρο παθαίνει βλάβη, οπότε μέχρι αυτό το σημείο έχουμε την καμπύλη (5).

Από αυτό το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά πως μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου (σημείο 3), η τιμή της καμπυλότητας αυξάνεται διαρκώς μέχρι το δοκίμιο να φτάσει στην αστοχία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 5.7.2.2, όπου η κλίση του διαγράμματος παραμορφώσεων για τα σημεία 2,3,4 και 5 αυξάνεται συνεχώς. Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από την καμπύλη $M - \varphi$ είναι μια προσέγγιση της ροπής αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής. Επειδή το μέτρο ελαστικότητας E_c του συγκεκριμένου δοκιμίου δεν ήταν δυνατόν να εκτιμηθεί από τα αποτελέσματα του κυλινδρικού δοκιμίου θα ληφθεί μία τιμή ίση με 31 GPa, παραδοχή όχι πολύ άστοχη καθώς όλα τα δοκίμια είχαν μικρή διακύμανση κοντά σε αυτή την τιμή (Κεφάλαιο 3.2). Είναι γνωστό πως η κλίση του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων μετά τη ρηγμάτωση, είναι ίση με το γινόμενο του μέτρου ελαστικότητας E_c επί τη ροπή αδράνειας της διατομής I_{cr} . Στο διάγραμμα μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία το κομμάτι της καμπύλης μεταξύ των σημείων 1 και 6 (μετά τη ρηγμάτωση και πριν τη διαρροή), καθώς στο σημείο 2 η κλίση έχει αλλάξει φανερά. Στον Πίνακα 5.7.2.2 δίνονται οι τιμές ροπής και καμπυλότητας για κάθε ένα από τα 6 σημεία:

	M (kNm)	φ (1/m)
Σημείο 1	32.643	0.00178
Σημείο 2	157.005	0.01561
Σημείο 3	169.123	0.03413
Σημείο 4	164.425	0.06198
Σημείο 5	163.836	0.09875
Σημείο 6	140.854	0.01220

Πίνακας 5.7.2.2: Ροπή και καμπυλότητα στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος

Η κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων 1 και 6 είναι ίση με $(140.854-32.643)/(0.01220-0.00178) = 10384.93 \text{ kNm}^2 = E_c I_{cr}$. Άρα, η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής προκύπτει ίση με $I_{cr} = 10384.93/31000000 = 3.35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 = 33500 \text{ cm}^4$. Η ροπή αδράνειας της αρηγμάτωτης διατομής του δοκιμίου (Κωτσοβός, 2000) είναι ίση με

$$I_g = bh^3/12 + bh(x-h/2)^2 + \alpha_e A_s (d-x)^2$$

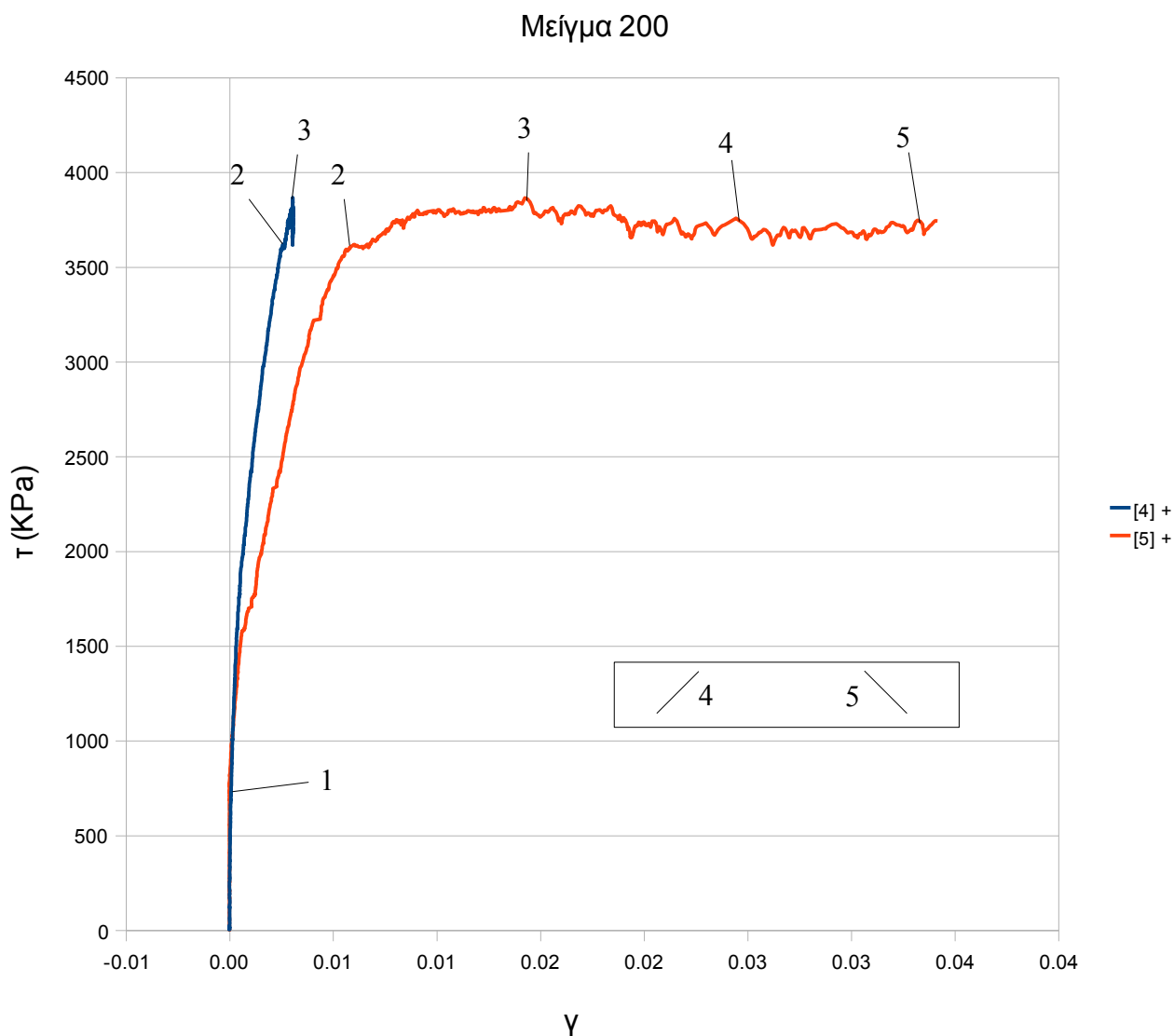
όπου x προκύπτει από τη σχέση:

$$A_c(x-h/2) = \alpha_e A_s (d-x)$$

και $\alpha_e = E_s/E_c$, με E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 200 GPa και E_c το μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος, που θεωρήθηκε ίσο με 31 GPa για το δοκίμιο M200. Από τους υπολογισμούς προκύπτει $I_g = 37776 \text{ cm}^4$. Εκτιμάται, δηλαδή, ότι η ροπή αδρανείας του ινοπλισμένου σκυροδέματος M200 μεταβάλλεται λίγο κατά τη ρηγμάτωση, καθώς μειώνεται κατά 11.3 %, μείωση μικρότερη από αυτή που συναντάμε στο συμβατικό σκυρόδεμα (της τάξης του 50 %).

- Καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης $\tau - \gamma$:

Για το δοκίμιο M200 και τον έλεγχο της διατμητικής συμπεριφοράς αυτού στις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας (Σχήμα 5.2.2.3) τοποθετήθηκαν δύο αναλογικά βελομέτρα σε γωνία 45° κάθετα στις αναμενόμενες διατμητικές ρωγμές (κανάλια 4 και 5). Από τη συνεχή καταγραφή του φορτίου μπορούμε για κάθε χρονική στιγμή να εξάγουμε τη διατμητική τάση που ασκείται σε κάθε μία από τις δύο περιοχές $\tau = V/bd$, όπου $V = P/2$, b το πλάτος της δοκού που είναι 15 cm και d το στατικό ύψος της δοκού ίσο με 27 cm. Για την τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετατοπίσεις των διατμητικών βελομέτρων διαιρούμενες με τη αρχική απόσταση της διαγωνίου του κάθε βελομέτρου, όπως απεικονίζεται στην πειραματική διάταξη (Σχήμα 4.2.7). Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα $\tau - \gamma$ και για τις δύο διαγώνιες ρωγμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.2.4:



Σχήμα 5.7.2.4: Καμπύλη διατμητικής τάσης - γωνιακής παραμόρφωσης για το δοκίμιο M200

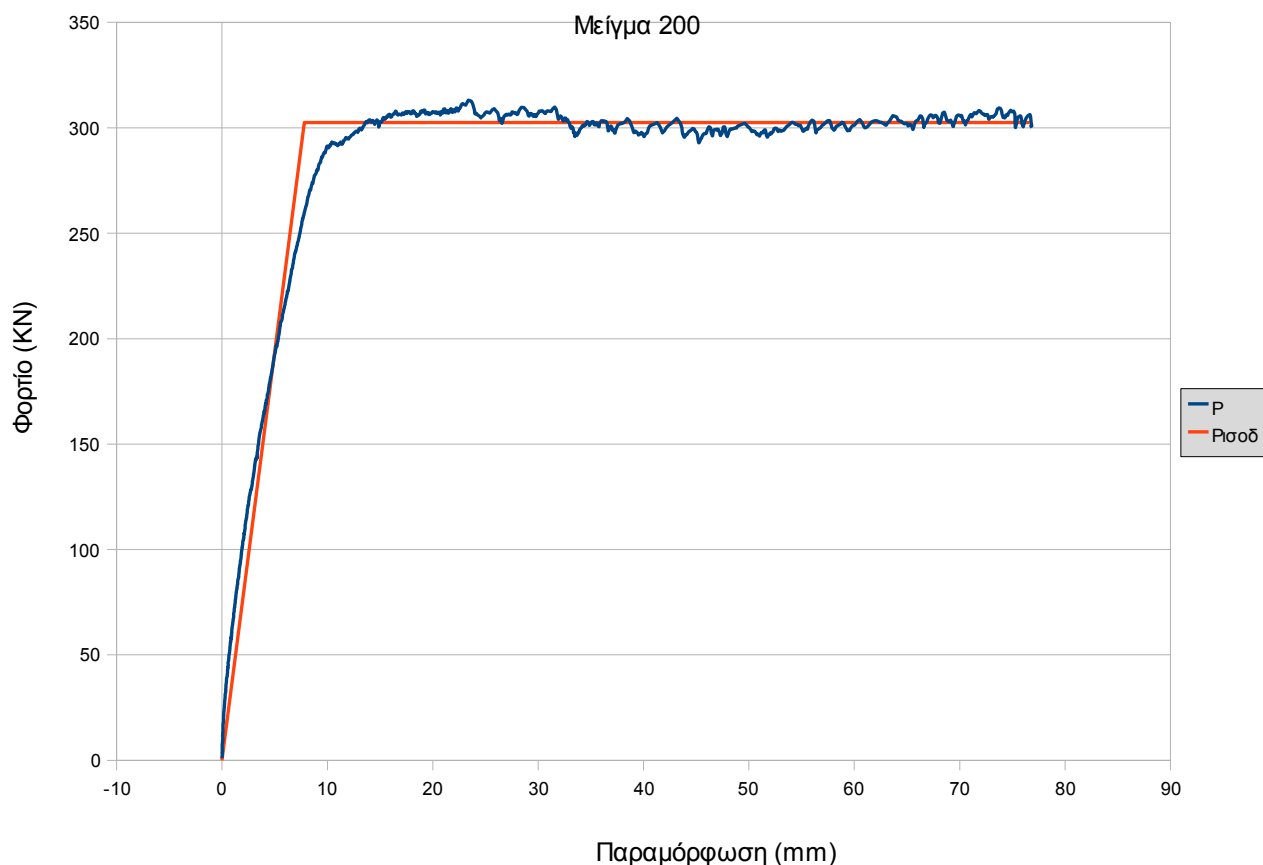
Στο Σχήμα 5.7.2.4 φαίνεται η καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης και για τις δύο περιοχές σταθερής τέμνουσας του δοκιμίου. Από το διάγραμμα, φαίνεται καθαρά, πως η ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία είναι η ρωγμή δεξιά, όπως βλέπουμε το δοκίμιο στην πειραματική διάταξη (κανάλι 5), καθώς οδήγησε σε πολύ μεγάλες γωνιακές παραμορφώσεις. Αυτό έχει ήδη γίνει φανερό και από τις φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπου η δεξιά ρωγμή είναι αυτή η οποία μετά από μία στάθμη φορτίου ανοίγει σταδιακά και προκαλεί την αστοχία του δοκιμίου. Τα κρίσιμα σημεία, όπως έχουν οριστεί και στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης φαίνονται στο διάγραμμα, δηλαδή η ρηγμάτωση (1), η διαρροή (2), η επίτευξη του μέγιστου φορτίου (3), μία ενδιάμεση τιμή με την ίδια αντοχή (4) και η στιγμή που το ένα ακραίο βελόμετρο παθαίνει βλάβη, οπότε μέχρι αυτό το σημείο έχουμε την καμπύλη (5).

Αυτό που αξίζει να εξεταστεί στις δύο παραπάνω καμπύλες είναι οι κλίσεις αυτών, και η σύγκριση μεταξύ τους. Παρατηρούμε, πως όσο οι δύο διατομές είναι αρηγμάτωτες (αρχική κλίση των δύο καμπυλών) έχουν την ίδια κλίση, από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου σκυροδέματος G_{gr} . Στη συνέχεια, τα δύο διαγράμματα διαφοροποιούνται ως προς την κλίση, το οποίο είναι λογικό, καθώς η ρωγμή δεξιά (κανάλι 5) ανοίγει συνεχώς, τη στιγμή που η ρωγμή αριστερά (κανάλι 4) παραμένει σταθερή. Αυτό φαίνεται στη διαφοροποίηση της κλίσης που είναι πιο μικρή στο διάγραμμα του καναλιού 5. Στη συνέχεια το διάγραμμα ακολουθεί παρόμοια πορεία με αυτή του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης παρουσιάζοντας την ίδια πλάστιμη συμπεριφορά. Η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{max} του δοκιμίου M200 είναι ίση με $3866.5 \text{ kPa} = 3.87 \text{ MPa}$

Το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου ινοπλισμένου σκυροδέματος G_{gr} υπολογίζεται από το σημείο 1 της καμπύλης και ισούται με το πηλίκο της διατμητικής τάσης τ προς τη γωνιακή παραμόρφωση γ . Για το δοκίμιο M200, το σημείο 1 έχει διατμητική τάση ίση με 746.3 KPa και γωνιακή παραμόρφωση γ (λήφθηκε η τιμή του καναλιού 4, καθώς το 5 έχει ακόμα αρνητική τιμή) ίση με 0.000063 . Οπότε το μέτρο διάτμησης εκτιμάται ίσο με $G_{gr} = 746.3 / 0.000063 = 11846031.75 \text{ KPa} = 11.846 \text{ GPa}$. Από αυτή την τιμή και τη σχέση $G = E/2(1+\nu)$ μπορούμε να πάρουμε μία ακόμα εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του δοκιμίου. Θεωρώντας το $\nu = 0.2$ (τιμή αποδεκτή για το σπλισμένο σκυρόδεμα), προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου ίσο με 28.43 GPa , τιμή όχι μακριά από την τιμή που εκτιμήθηκε από τη δοκιμή θλίψης ($E = 31 \text{ GPa}$).

- Υπολογισμός ισοδύναμης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Το δοκίμιο M200 συμπεριφέρθηκε πλάστιμα μετά τη διαρροή, αστοχώντας σε συνδυασμό κάμψης και διάτσης και οδήγησε σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις μη χάνοντας καθόλου τη φέρουσα ικανότητά του μέχρι την αστοχία. Για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του υλικού σε πλαστιμότητα, χρήσιμο είναι να βρεθεί ένα ισοδύναμο διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης, που αντιστοιχεί που θα μας δώσει μία τιμή φορτίου $P_{ισοδ}$, που αντιστοιχεί στη διαρροή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Για την κατασκευή του διαγράμματος, υπολογίστηκε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης και βρέθηκε ίσο με 22001 kNmm. Αυτό το εμβαδόν είναι και ένας δείκτης της απορρόφησης ενέργειας του υλικού. Το ιδεατό ελαστοπλαστικό διάγραμμα θα πρέπει να έχει αυτό το εμβαδόν και στον ελαστικό κλάδο του να διέρχεται από το σημείο $0.6P_{max} = 188.11$ kN για το δοκίμιο M200. Έτσι προκύπτει το διάγραμμα:



Σχήμα 5.7.2.5: Προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου M200 με ελαστοπλαστική

Η τιμή διαρροής που προέκυψε για το ελαστοπλαστικό διάγραμμα είναι $P_{ισοδ} = 302.5$ kN. Η ισοδύναμη παραμόρφωση διαρροής είναι $\varepsilon_y = 7.82$ mm και η παραμόρφωση αστοχίας $\varepsilon_u = 76.65$ mm. Άρα, προκύπτει μια ισοδύναμη πλαστιμότητα ίση με $\mu_{ισοδ} = 76.65/7.82 = 9.8$. Ο βαθμός αξιοπιστίας του υλικού δίνεται από την τιμή $P_{ισοδ}/P_{max} = 302.5/313.19 = 0.964$. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι αυτή η τιμή τόσο πιο σωστή είναι η προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου με ελαστοπλαστική. Για το δοκίμιο M200 κρίνεται απολύτως ικανοποιητική.

- Εκτίμηση της εφελκυστικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου δοκιμίου σε κάμψη:

Για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος M200, θα χρησιμοποιηθούν οι καταγραφές των βελομέτρων στη μεσαία διατομή (κανάλια 6,7,8,9 και 10) κατά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου του δοκιμίου $P_{\max} = 313.19$ kN (σημείο 3), που συμπίπτει και με την επίτευξη της μέγιστης ροπής $M_{\max} = 169.123$ kNm. Οι τιμές των βελομέτρων καθ ύψος σε αυτή τη χρονική στιγμή δίνονται από τον πίνακα 5.7.2.3:

Κανάλια	Παραμόρφωση ϵ (‰)	Απόσταση από ακραία εφελκυστική ίνα (cm)
6	-7.404	2.5
7	-3.302	9.5
8	-2.118	15.5
9	-0.2	21
10	0.958	27

Πίνακας 5.7.2.3: Καταγραφές βελομέτρων μεσαίας διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής

Στον παραπάνω πίνακα ο εφελκυσμός συμβολίζεται με μείον και η θλίψη με συν. Από τις καταγραφές των βελομέτρων 9 και 10, παρατηρείται ότι ο ουδέτερος άξονας της διατομής βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίζουν τα παραπάνω δύο βελομέτρα (αλλαγή προσήμου). Από την επίλυση των όμοιων τριγώνων βρίσκουμε ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται κοντά στο κανάλι 9 κατά 1.04 cm. Άρα, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης θα είναι ίσο με $3 + 6 - 1.04 = 7.96$ cm. Η παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας, που βρίσκεται σε απόσταση 2.5 cm από το βελομέτρο 10 βρίσκεται επίσης με όμοια τρίγωνα, δεδομένου ότι γνωρίζουμε το πάχος θλιβόμενης ζώνης ως $\epsilon_c = 0.958 \cdot (3 + 6 - 1.04) / (6 - 1.04) = 1.54\%$. Το διάγραμμα θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος θα ληφθεί, όπως λαμβάνεται και στο συμβατικό σκυρόδεμα με οδηγό την ακραία θλιπτική παραμόρφωση (παραδοχή όχι άστοχη, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία), ο χάλυβας οπλισμού έχει διαρρέυσει (παραμόρφωση του καναλιού 6 πολύ μεγαλύτερη της παραμόρφωσης διαρροής $\epsilon_y = 2.5\%$), οπότε μπορεί να ληφθεί η τάση διαρροής του ίση με 520 MPa και για την κατανομή εφελκυστικών τάσεων θα ληφθεί η παραδοχή παραλληλόγραμμου σε όλο το εφελκυστικό τμήμα της διατομής, που προσομοιάζει την εφελκυστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη με μία παραμένουσα εφελκυστική τάση f_u , όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία. Η εντατική κατάσταση της διατομής τη στιγμή μέγιστης ροπής φαίνεται στο Σχήμα 5.2.2.7.

Για την ισορροπία της διατομής θα πρέπει οι δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτή να εξισορροπούν την εξωτερική ροπή $M_{\max} = 169.123 \text{ kNm}$. Για τη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος με ακραία παραμόρφωση 1.54‰, ο συντελεστής πληρώσεως α προκύπτει ίσος με 0.62 και ο συντελεστής κέντρου βάρους ζ' ίσος με 0.363 (Τάσιος, 2005). Για τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος M200 είναι ίση με $f_{ck} = 35.6 \text{ MPa}$ (από τη δοκιμή θλίψης), η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος θα είναι ίση με

$$F_c = \alpha * 0.85 * f_{ck} * x * b = 0.62 * 0.85 * 35600 * 0.0796 * 0.15 = 224.01 \text{ kN}$$

Η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα οπλισμού είναι

$$F_s = A_s * f_{yk} = 4.62 * 10^{-4} * 520000 = 240.24 \text{ kN}$$

δηλαδή μεγαλύτερη από τη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος. Οπότε για το δοκίμιο M200 δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για την εφελκυστική κατανομή των τάσεων, πιθανότατα λόγω κάποιου σφάλματος κατά την καταγραφή των δεδομένων, ή λόγω μη εγκυρότητας της προσομοίωσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος με μείγμα ινών στη θλιπτική συμπεριφορά με αυτής του συμβατικού σκυροδέματος.

5.7.3. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πειράματος του δοκιμίου M200 όσον αφορά τη διατμητική αντοχή με τις προτεινόμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση που έχει προτείνει ο Sharma (1986), η διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών υπολογίζεται ως:

$$v_u = k f_t' (d/a)^{0.25} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

όπου,

v_u = μέση διατμητική τάση κατά τη διατμητική αστοχία

$$k = 2/3$$

a/d = λόγος διατμητικού μήκους προς στατικό ύψος

f_t' = εφελκυστική αντοχή διάρρηξης κυλίνδρου αν είναι γνωστή, αλλιώς $f_t' = 0.79(f_c')^{0.5}$ [MPa]

f_c' = θλιπτική αντοχή κυλίνδρου [MPa]

Λόγω έλλειψης εφελκυστικής δοκιμής διάρρηξης θα χρησιμοποιηθεί η τιμή της θλιπτικής αντοχής του κυλίνδρου του M200 ίση με 35.6 MPa, με την παραδοχή ότι δε διαφέρει αρκετά με του δοκιμίου D200. Προκύπτει $f_t' = 4.71 \text{ MPa}$. Για το λόγο $a/d = 2.0$ του πειράματος, προκύπτει διατμητική αντοχή ίση με $v_u = 2640.41 \text{ kPa}$. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 106.94 \text{ kN}$, τιμή αρκετά κάτω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (156.6 kN) κατά 31.7%.

Οι Al-Ta'an και Al-Feel (1990) έχουν προτείνει μία σχέση για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής που προσφέρουν οι ίνες στο δοκίμιο. Η διατμητική αντοχή που προσφέρει το σκυρόδεμα στο δοκίμιο προκύπτει από τη σχέση

$$V_c = 2 \cdot f_{ctm} \cdot b_w \cdot d / 3$$

όπου $f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 3245.77$ kPa για θλιπτική αντοχή 35.6 MPa. Άρα, προκύπτει $V_c = 87.64$ kN για τη δοκό του πειράματος. Η προτεινόμενη σχέση για την προσφορά των ινών στη διάτμηση είναι:

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (7)$$

όπου, $k = 1.2$ για ίνες με άγκιστρα, όπως του πειράματος, V_f το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ίσο με 2.4% για το δοκίμιο M200 και $(L_f/D_f)_{ισοδ} = (2 \cdot 40 + 60 + 80) / 4 = 55$ για το μείγμα ινών της ΕΤΑΛ που χρησιμοποιήθηκε. Οπότε προκύπτει, $v_f = 1496$ kPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 60.59$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 148.23$ kN, τιμή πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε από το πείραμα (156.6 kN)..

Οι Swamy et al. (1993) έχουν προτείνει μία σχέση ακόμα για τη συνεισφορά της ίνας στη διατμητική αντοχή, η οποία είναι:

$$v_f = 0.37 \tau V_f \frac{L_f}{D_f} \quad (8)$$

όπου τ η διατμητική τάση συνάφειας μεταξύ ινών και σκυροδέματος, οποία έχει προταθεί να λαμβάνεται ίση με 4.15 MPa, ελλείψει δοκιμών εξόλκευσης. Αντικαθιστώντας τις υπόλοιπες τιμές όπως παραπάνω, προκύπτει $v_f = 2026.86$ kPa, άρα συνολική δύναμη $V_f = v_f b d = 82.1$ kN. Άρα, η συνολική τέμνουσα του δοκιμίου θα είναι $V_u = V_c + V_f = 169.72$ kN, τιμή που υπερεκτιμά τη διατμητική αντοχή, όπως προέκυψε από το πείραμα (156.6 kN) κατά 8.4%.

Οι Ashour, Hasanain και Wafa (1992) έχουν προτείνει δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής ινοπλισμένων δοκών. Η πρώτη είναι:

Για $a/d \geq 2.5$,

$$v_u = (2.11 \sqrt{f'_c} + 7F) \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{0.333} \quad (MPa) \quad (5a)$$

Για $a/d < 2.5$,

$$v_u = [Eq. (5a)] \frac{2.5}{a/d} + v_b \left(2.5 - \frac{a}{d} \right) \quad (MPa) \quad (5b)$$

όπου $F = (L_f/D_f) V_f d_f$, $d_f = 0.75$ για ίνες με άγκιστρα, ρ το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ίσο με 1.14% για τις δοκούς του πειράματος και $v_b = 0.41 \tau F$, όπου $\tau = 4.15$ MPa, όπως λήφθηκε παραπάνω. Για την

τιμή $f_c' = 35.6$ MPa και $a/d = 2.0$, προκύπτει $v_u = 3944.63$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 159.76$ kN, τιμή πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε στο πείραμα (156.6 kN). Η δεύτερη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa είναι:

$$v_u = (0.7 \sqrt{f_c'} + 7F) \frac{d}{a} + 17.2 \rho \frac{d}{a} \text{ (MPa)} \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας ως παραπάνω προκύπτει $v_u = 5651.34$ kPa. Οπότε η συνολική τέμνουσα της δοκού είναι $V_u = v_u b d = 228.88$ kN, τιμή πολύ πάνω από την τιμή που προέκυψε στο πείραμα (156.6 kN) κατά 46.2%. Η δεύτερη σχέση, δηλαδή υπερεκτιμά σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του ινοπλισμένου δοκιμίου σε διάτμηση.

5.7.4. Εύρεση ανάλογου ποσοστού διατμητικού οπλισμού (συνδετήρων)

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5.7.2, για τη σύνθεση του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ($f_{ck} = 25$ MPa) η αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση θα είναι ίση με $V_c = 70.2$ kN. Η αντοχή του πειραματικού δοκιμίου M200 έφτασε την τιμή των 156.6 kN. Ενδιαφέρον είναι να υπολογιστεί το ανάλογο ποσοστό συνδετήρων που αντιστοιχεί στην επιπλέον αντοχή που δίνει το μείγμα χαλύβδινων ινών της ΕΤΑΛ σε ποσοστό κ.ό. 2.4%.

Η επιπλέον αντοχή της δοκού, λόγω της προσθήκης των ινών είναι ίση με $156.6 - 70.2 = 86.4$ kN. Αυτή την επιπλέον αντοχή μπορούν να εξασφαλίσουν συνδετήρες Φ10 δίτητοι με $A_{sw} = 1.57$ cm² αν τοποθετηθούν ανά απόσταση s , οποία βρίσκεται από τη σχέση:

$$V_{wd} = 0.9 d * A_{sw} * f_{yk} / s$$

όπου $V_{wd} = 86.4$ kN και $f_{yk} = 520$ MPa για χάλυβα συνδετήρων ποιότητας B500C.

Από τη σχέση προκύπτει απόσταση $s = 22.9$ cm. Δηλαδή το ισοδύναμο των συνδετήρων για το δοκίμιο M200, προκύπτει ότι είναι να τοποθετηθούν Φ10/22 και αντιστοιχεί σε ποσοστό οπλισμού $\rho_w = A_{sw} / (b_w s) = 0.0048$. Καλό θα ήταν, βέβαια, να τονιστεί η πολύ πιο πλάστιμη συμπεριφορά των ινοπλισμένων δοκιμίων στη διατμητική αστοχία, έναντι των δοκών με συμβατικό διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες).

Κεφάλαιο 6ο

*Συγκέντρωση και σύγκριση
πειραματικών αποτελεσμάτων*

6. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών:

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν από το Κεφάλαιο 5 για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, για την καλύτερη και πιο εποπτική σύγκριση μεταξύ τους καθώς και για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Στον Πίνακα 6.1.1 παρατηρούμε τις τιμές που προέκυψαν από το διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης, όπως το φορτίο ρηγμάτωσης P_{cr} , το φορτίο διαρροής P_y , το μέγιστο φορτίο P_{max} , καθώς και οι ακαμψίες (κλίσεις του διαγράμματος) των τριών κλάδων (αρηγμάτωσης K_{gr} , ρηγματωμένου K_y και κλάδου κράτυνσης K_h) και για τα 6 δοκίμια:

Δοκίμια	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	K_{gr} (kN/mm)	K_y (kN/mm)	K_h (kN/mm)
D100	43.10	264.18	278.56	163.23	23.88	3.33
D150	64.06	252.42	280.18	55.08	25.92	11.66
D200	59.86	294.41	313.64	76.65	27.61	1.66
M100	56.28	259.04	301.29	752.85	26.38	9.58
M150	42.85	268.31	277.03	73.37	26.57	5.37
M200	60.45	290.75	313.19	66.07	25.59	1.08

Πίνακας 6.1.1: Στοιχεία του διαγράμματος φορτίου - παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.1.1, το φορτίο ρηγμάτωσης δε φαίνεται να διαφοροποιείται σημαντικά για τις εναλλακτικές συνθέσεις του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Παρατηρείται, όμως, σημαντική διαφοροποίηση ως προς το μέγιστο φορτίο P_{max} , όπου φαίνεται να μην ακολουθεί ανάλογα την αύξηση της περιεκτικότητας των ινών στο σκυρόδεμα. Όπως παρατηρούμε, και για τα δύο είδη ίνας (DRAMIX και μείγμα ινών της ΕΤΑΛ) σε περιεκτικότητα 150 kg/m^3 πραγματοποιείται μία πτώση της αντοχής σε σχέση με των δοκιμών με 100 kg/m^3 , ενώ τα δοκίμια με περιεκτικότητα 200 kg/m^3 έδειξαν πολύ υψηλή αντοχή. Το τελευταίο οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ περιεκτικότητας σε ίνες και διατμητικής αντοχής, αλλά παρουσιάζεται μία πτώση για την ενδιάμεση τιμή των 150 kg/m^3 . Μία εξίσου σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από τα στοιχεία του Πίνακα 6.1.1 είναι ότι η χαμηλή περιεκτικότητα ινών (100 kg/m^3) παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη ακαμψία στον αρηγμάτωτο κλάδο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στον Πίνακα 6.1.2 παρατίθενται σύγκριση των τιμών, όπως η θλιπτική αντοχή κυλίνδρου f_{ck} , το μέτρο ελαστικότητας E_c όπως προέκυψε από υπολογισμό βασιζόμενο στην f_{ck} , ο λόγος της μέγιστης τέμνουσας του δοκιμίου προς την αντίστοιχη του διατμητικά άοπλου σκυροδέματος C25/30 V_{max}/V_c , το μέτρο διάτμησης του αρηγμάτωτου δοκιμίου G_{gr} όπως προέκυψε από την καμπύλη διατμητικής τάσης – γωνιακής παραμόρφωσης, καθώς και ο λόγος των ροπών αδρανείας ρηγματωμένης και αρηγμάτωτης διατομής I_{cr}/I_g όπως αυτός εκτιμήθηκε από το διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων.

Δοκίμια	f_{ck} (MPa)	E_c (GPa)	V_{max}/V_c	G_{gr} (GPa)	I_{cr}/I_g
D100	34.66	30.97	1.98	11.58	0.89
D150	32.10	30.19	2.00	13.30	0.68
D200	35.60	31.25	2.23	14.00	0.73
M100	32.93	30.45	2.15	13.90	0.67
M150	32.73	30.39	1.97	13.21	0.97
M200	35.60	31.00	2.23	11.85	0.89

Πίνακας 6.1.2: Χαρακτηριστικά του υλικού για κάθε δοκίμιο

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.1.2, τα χαρακτηριστικά των υλικών (f_{ck}, E_c, G_{gr}) των εναλλακτικών συνθέσεων δε παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με την περιεκτικότητα σε ίνες, αλλά ούτε και σε σχέση με το είδος της ίνας που χρησιμοποιήθηκε (DRAMIX ή μείγμα ινών της ΕΤΑΛ). Αξίζει να σημειωθεί, η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος στη ρηγμάτωση, καθώς όπως φαίνεται από το λόγο I_{cr}/I_g για όλες τις συνθέσεις, παρατηρείται σημαντικά μεγαλύτερος από το λόγο που συναντάται στο συμβατικό σκυρόδεμα (της τάξης του 0.5) με το μείγμα ινών της ΕΤΑΛ να δείχνει να διατηρεί τη ροπή αδρανείας κατά τη ρηγμάτωση στα ίδια επίπεδα με του αρηγμάτωτου ινοπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό προκύπτει από το γεγονός, ότι ενώ το δοκίμιο ρηγματώνεται οι ίνες (και κυρίως στο μείγμα ινών της ΕΤΑΛ οι μεγάλες σε μήκος) παρουσιάζουν αντίσταση στο άνοιγμα της ρωγμής μέχρι να εξολκευθούν αυξάνοντας ταυτόχρονα τη ροπή αδρανείας κατά τη ρηγμάτωση.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναλυθεί η συμπεριφορά των δοκιμίων σε σχέση με την απορρόφηση ενέργειας και την πλαστιμότητα που αναπτύχθηκε για κάθε σύνθεση. Στον Πίνακα 6.1.3, παρατίθενται οι τιμές της πραγματικής πλαστιμότητας που ανέπτυξε το δοκίμιο q_d , της ισοδύναμης πλαστιμότητας $\mu_{ισοδ}$ και του φορτίου διαρροής $P_{ισοδ}$ έπειτα από τον καθορισμό της ισοδύναμης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, του δείκτη απορρόφησης ενέργειας E (εμβαδόν του διαγράμματος φορτίου – παραμόρφωσης) καθώς και ο λόγος $P_{ισοδ}/P_{max}$, ο οποίος αποτελεί ένα δείκτη αξιοπιστίας του υλικού (όσο είναι πιο κοντά στη μονάδα, τόσο περισσότερο επιβεβαιώνεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού με την ιδεατή ελαστοπλαστική).

Δοκίμια	q_d	$\mu_{ισοδ}$	$P_{ισοδ}$ (kN)	E (kNmm)	$P_{ισοδ}/P_{max}$
D100	4.62	5.53	252.5	9182	0.91
D150	4.40	6.60	207.0	7210	0.74
D200	6.79	8.96	292.0	17883	0.93
M100	8.68	10.29	260.0	18788	0.86
M150	3.20			5493	
M200	7.73	9.80	302.5	22001	0.96

Πίνακας 6.1.3: Χαρακτηριστικά στοιχεία πλαστιμότητας κάθε δοκιμίου

Για το δοκίμιο M150, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5.6.2, επειδή εμφάνισε αστοχία ψαθυρής μορφής, χάνοντας απότομα τη φέρουσα ικανότητά του και μη οδηγώντας σε μεγάλες παραμορφώσεις, δεν ήταν δυνατό να προσομοιαστεί η συμπεριφορά του με ισοδύναμη ελαστοπλαστική. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.1.3, παρατηρείται ξανά η πτώση της ισοδύναμης αντοχής για τα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών 150 kg/m^3 , καθώς και μία σημαντική πτώση στην απορρόφηση ενέργειας των ίδιων δοκιμίων. Μπορούμε, δηλαδή, να συμπεράνουμε ότι η προσθήκη ινών σε περιεκτικότητα 150 kg/m^3 και 1.8% κ.ό. (δοκίμια D150, M150), δεν προσφέρει στο σκυρόδεμα την πλαστιμότητα, η οποία επιτεύχθηκε με τις άλλες συνθέσεις. Αντίθετα, η προσθήκη ινών σε περιεκτικότητα 100 kg/m^3 και 1.2% κ.ό. (δοκίμια D100, M100), δείχνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και σχετικά συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των δοκιμίων D200 και M200, που περιέχουν διπλάσια ποσότητα ινών. Σε αυτές τις περιεκτικότητες (100 και 200 kg/m^3) το μείγμα ινών της ΕΤΑΛ δείχνει να υπερισχύει αρκετά και σε ισοδύναμη αντοχή $P_{ισοδ}$ (κατά 3 και 3.6% αντίστοιχα) και σε απορρόφηση ενέργειας E (κατά 104.6 και 23% αντίστοιχα), παρόλο που ο ισοδύναμος λόγος μορφής ($L/D = 55$) είναι μικρότερος από αυτόν της ίνας DRAMIX ($L/D = 65$), ενώ, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία, αυξάνοντας το λόγο μορφής προκύπτουν πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ένα μόνο τύπο ινών.

6.2. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με σχέσεις της βιβλιογραφίας

Για την καλύτερη εποπτεία της συσχέτισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας, καταρτίζεται ο Πίνακας 6.2.1. Στον πίνακα παρατίθενται για κάθε δοκίμιο η πειραματική τιμή της τέμνουσας $V_{πειρ}$, οι τιμές που προκύπτουν από τις σχέσεις της βιβλιογραφίας $V_{προβλ}$, καθώς και ο λόγος $V_{προβλ}/V_{πειρ}$ για κάθε μία, καθώς και το αντίστοιχο ποσοστό διατμητικού οπλισμού που θα απαιτείτο στο συμβατικό σκυρόδεμα με την αντοχή της σύνθεσης για να επιτευχθεί η διατμητική αντοχή, που προέκυψε από το πείραμα.

Δοκίμια	D100	D150	D200	M100	M150	M200
$V_{πειρ}$	139.28	140.09	156.82	150.65	138.52	156.60
Sharma $V_{προβλ}$ ($V_{προβλ}/V_{πειρ}$)	105.57 (0.76)	101.71 (0.73)	106.94 (0.68)	102.85 (0.68)	102.62 (0.74)	106.94 (0.68)
Al Ta'an, Al Feel $V_{προβλ}$ ($V_{προβλ}/V_{πειρ}$)	121.89 (0.88)	135.49 (0.97)	159.24 (1.02)	113.49 (0.75)	128.30 (0.93)	148.23 (0.95)
Swamy $V_{προβλ}$ ($V_{προβλ}/V_{πειρ}$)	134.60 (0.97)	154.54 (1.10)	186.64 (1.19)	124.24 (0.82)	144.43 (1.04)	169.72 (1.08)
Ashour et al.α $V_{προβλ}$ ($V_{προβλ}/V_{πειρ}$)	119.56 (0.86)	146.68 (1.05)	177.36 (1.13)	109.71 (0.73)	133.85 (0.97)	159.76 (1.02)
Ashour et al.β $V_{προβλ}$ ($V_{προβλ}/V_{πειρ}$)	170.35 (1.22)	208.74 (1.49)	254.39 (1.62)	155.48 (1.03)	190.39 (1.37)	228.88 (1.46)
ρ_w	0.0037	0.0037	0.0048	0.0042	0.0036	0.0048

Πίνακας 6.2.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων σχέσεων της βιβλιογραφίας και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για τα δοκίμια D200 και M100 η πειραματική διατμητική αντοχή δίνει ένα κατώτατο όριο της πραγματικής διατμητικής αντοχής των δοκιμίων, καθώς και οι δύο δοκοί αστόχησαν καμπτικά. Από τις πέντε προτεινόμενες σχέσεις, η σχέση του Swamy (1993) δείχνει βάσει των παρόντων πειραματικών αποτελεσμάτων μεγαλύτερη αξιοπιστία. Η σχέση των Al-Ta'an και Al-Feel (1990) και η πρώτη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa (1992) βρίσκονται, επίσης, πολύ κοντά στα αποτελέσματα του πειράματος. Η σχέση του Sharma (1986) υποεκτιμά σε μεγάλο βαθμό (περίπου 40%) τη διατμητική αντοχή ινοπλισμένων δοκών, ενώ η δεύτερη σχέση των Ashour, Hasanain και Wafa (1992) υπερεκτιμά τη διατμητική αντοχή σε ποσοστό 37 % κατά μέσο όρο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- “ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – Εισαγωγή με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο των κανονισμών – Εκδόσεις Ε.Μ.Π.”, Μ. Δ. Κωτσοβός 2000
- “ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – με βάση τον νέο κανονισμό σκυροδέματος – Εκδόσεις Ε.Μ.Π.”, Θ. Τάσιος, Π. Γιαννόπουλος, Κ. Τρέζος, Σ. Τσουκαντάς 2005
- Rilem TC-162-TDF: “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”. Materials and Structures 2000
- Kani GNJ “Basic facts concerning shear failure”.. ACI Journal Proceedings, Vol. 63, No 6, 1966
- Russo G, Puleri G. “Stirrup effectiveness in reinforced concrete beams under flexure and shear”. ACI Structural Journal, Vol. 94, No 3, 1997
- Sharma AK. “Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams”. ACI Structural Journal Proceedings, Vol.83, No 4, 1986
- Narayanan R, Darwish IYS. “Use of steel fibers as shear reinforcement”. ACI Structural Journal, Vol. 84, No 3, 1987
- Al-Ta'an SA, Al-Feel JR. “Evaluation of shear strength of fibre-reinforced concrete beams”. Cement Concrete Composites, Vol. 12, No 2, 1990
- Ashour SA, Hasanain GS, Wafa FF. “Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams”. ACI Structural Journal, Vol. 89, No 2, 1992
- Swamy RN, Jones R, Chiam ATP. “Influence of steel fibres on the shear resistance of lightweight concrete T- beams”. ACI Structural Journal, Vol. 90, No 1, 1993
- Batson G, Jenkins E, Spatney R, “Steel fibers as shear reinforcement in beams”, ACI Journal, Proceedings Vol. 69, No 10, 1972

- Imam M, Vandewalle and Mortelmans F, “Shear capacity of steel fiber high-strength concrete beams”, High-Performance Concrete, SP-149, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1994
- J.A.O. Barros, V.M.C.F. Cunha, A.F. Ribeiro and J.A.B. Antunes. “Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete”, Rilem, Materials and Structures 38, 2005
- Calogero Cucchiara, Lidia La Mendola, Maurizio Papia, “Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement”, Cement Concrete Components 26, 2004
- Yoon-Keun Kwak, Marc O. Eberhard, Woo-Suk Kim, and Jubum Kim, “Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups”, ACI Structural Journal Vol. 99, No 4, 2002