



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΛΑΦΡΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ
ΔΟΚΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ**



Φοιτητής: Μυλωνάκος Σταύρος
ΑΜ: cw6628

Επιβλέπων

Κωνσταντίνος Δημάκος
Καθηγητής
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Diploma Thesis

TORSIONAL STRENGTH OF A LIGHTLY REINFORCED BEAM OF RECTANGULAR SECTION



Student: Stavros Mylonakos
Registration Number: cw6628

Supervisor

Demakos Constantinos
Dr. Civil Engineer NTUA

ATHENS-EGALEO, July 2022

Επιτροπή Εξέτασης

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Ρεπαλής Κωνσταντίνος Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑΔΑ	Βρυζίδης Ισαάκ Επίκουρος Καθηγητής ΠΑΔΑ	Κωνσταντίνος Δημάκος Καθηγητής ΠΑΔΑ
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Μυλωνάκος Σταύρος, Ιούλιος 2023

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μυλωνάκος Σταύρος του Λεωνίδα, με αριθμό μητρώου 44366280226 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών
Μυλωνάκος Σταύρος



Ευχαριστίες

Ευχαριστίες δίνονται στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κ. Δημάκο για την επίβλεψη και βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων της εργασίας μου.

Επίσης ευχαριστίες εκφράζονται στους κ. Δημήτρη Δρίβα υποψήφιο διδάκτορα του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και κ. Κωνσταντίνο Ρεπαπή αναπληρωτή καθηγητή, για τη βοήθειά τους στη διεκπεραίωση της εργασίας μου.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η είναι η διερεύνηση της στρεπτικής αντοχής ελαφρά οπλισμένης δοκού ορθογωνικής διατομής από Ο.Σ.. Για τον σκοπό αυτόν έγινε μια σειρά πειραμάτων στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΠΑΔΑ. Συνολικά, κατασκευάστηκαν δύο ελαφρά οπλισμένες δοκοί ορθογωνικής διατομής από Ο.Σ. και υποβλήθηκαν η κάθε μια ξεχωριστά σε δοκιμή άμεσης στρέψης. Οι δοκοί αυτοί δεν διέθεταν επαρκή οπλισμό στρέψεως και η αστοχία τους έγινε λόγω λοξής θλίψης του σκυροδέματος, οπότε και συμπεριφέρθηκαν ψαθυρά. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα που προέκυψαν πειραματικά συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά όπως υπολογίζονται από τον Ευρωκώδικα 2. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι οι θεωρητικοί υπολογισμοί του κανονισμού είναι υπέρ της ασφαλείας, ενώ με κατάλληλη προσέγγιση οι θεωρητικοί υπολογισμοί επιβεβαιώνουν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά

Δοκός, ορθογωνική διατομή, οπλισμένο σκυρόδεμα, στρέψη, αντοχή, πείραμα.

Abstract

The subject of this thesis is the investigation of the torsional strength of a lightly reinforced beam that has a rectangular cross-section and is made of Reinforced Concrete (RC). For this purpose, a series of experiments was carried out at the ΠΑΔΑ Reinforced Concrete Laboratory. In total, two lightly reinforced rectangular cross-section RC beams were constructed and individually subjected to a direct torsion test. These beams did not have sufficient torsional reinforcement and their failure was due to oblique compression of the concrete, therefore their behavior was brittle. Then, the results obtained experimentally were compared with the corresponding theoretical ones as calculated by Eurocode 2. The conclusions reached are that the theoretical calculations of the regulation are in favor of safety, while by adopting an appropriate approach, the theoretical calculations confirm the experimental results.

Keywords

Beam, rectangular cross-section, reinforced concrete, torsion, strength, experiment.

Περιεχόμενα

Επιτροπή Εξέτασης.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1 Γενικό πλαίσιο.....	9
1.3 Παρουσίαση της πειραματικής διάταξης	9
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	12
2.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	12
2.1.1 Τάσεις και παραμορφώσεις	12
2.1.2 Εντατικές καταστάσεις- Είδη εντάσεως.....	13
2.2 Το Οπλισμένο Σκυρόδεμα	14
2.1.1 Σκυρόδεμα.....	14
2.1.2 Χάλυβας οπλισμού.....	17
2.3 Θεωρία στρέψης.....	20
2.3.1 Γενικά	20
2.3.2 Η στρέψη με βάση τη μηχανική των υλικών	20
2.3.3 Η στρέψη στον Ευρωκώδικα 2 (ΕΚ2)	22
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	26
3.1 Έλεγχοι ποιότητας υλικών	26
3.1.1 Έλεγχος θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.....	26
3.1.2 Έλεγχος σε εφελκυσμό δείγματος χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος.	28
3.2 Διάταξη δοκιμής στρέψης.....	29
3.3 Δοκιμή στρέψης ελαφρά οπλισμένων δοκών Ο.Σ.....	37
4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	44
4.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί με βάση τον ΕΚ2.....	44
4.2 Πειραματικά αποτελέσματα.....	47
5. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	48
5.1 Παρατηρήσεις.....	48
5.2 Συμπεράσματα	51
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικό πλαίσιο

Μέλη τα οποία καταπονούνται σε στρέψη συναντώνται σε πολλές εφαρμογές της επιστήμης του μηχανικού όπως η αεροναυπηγική, η μηχανολογία και οι κατασκευές πολιτικού μηχανικού.

Ο Coulomb το 1784 ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε την θεωρία της στρέψης, εξετάζοντας την απλούστερη περίπτωση, μια ράβδο κυκλικής κοίλης διατομής. Αργότερα, ο Saint Venant το 1855 διατύπωσε το πρόβλημα της ομοιόμορφης στρέψης, κάνοντας όλες τις κατάλληλες και αναγκαίες τροποποιήσεις για την εφαρμογή της θεωρίας του Coulomb και σε μη κυκλικές διατομές. Για τον λόγο αυτόν, η ομοιόμορφη στρέψη ονομάζεται επίσης στρέψη κατά Saint Venant. Στη συνέχεια, η ομοιόμορφη στρέψη παρουσιάστηκε και πάλι από τον Prandtl το 1903 με βάση το ανάλογο της μεμβράνης. Τέλος, η διατύπωση του προβλήματος της μη ομοιόμορφης στρέψης, πραγματοποιήθηκε αρχικά με τη μελέτη λεπτότοιχων διατομών. Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με το πρόβλημα αυτό ήταν ο Wagner το 1929, ο Kappus το 1937, και ο Marguerre το 1940.

Στα κτιριακά έργα, το φαινόμενο της στρέψης εμφανίζεται κατά κύριο λόγο σε οριζόντια δομικά στοιχεία, όπως οι δοκοί. Τυπικές περιπτώσεις είναι οι δοκοί στις οποίες στηρίζονται άλλες δοκοί, δοκοί που στηρίζονται με μονολιθική σύνδεση η οποία αντιτίθεται στην στροφή περί τον άξονά τους, καθώς και δοκοί με μονόπλευρη φόρτιση.

Για τα δομικά μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ.), η στρεπτική επιπόνηση μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις στα μέλη οι οποίες επηρεάζουν τη στατική επάρκεια καθώς και την ανθεκτικότητά τους. Επιπλέον, η διαστασιολόγηση σε στρέψη προβλέπεται από τους κανονισμούς, όπως π.χ. τον Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-1: 2004 [1]). Επομένως, η μελέτη της συμπεριφοράς δοκών από Ο.Σ. υπό στρέψη είναι σημαντική ώστε να αποφευχθούν ή περιοριστούν τα προβλήματα που προκαλούνται από το φαινόμενο αυτό.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της στρεπτικής αντοχής ελαφρά οπλισμένης δοκού ορθογωνικής διατομής από Ο.Σ.. Για τον σκοπό αυτόν έγινε μια σειρά πειραμάτων στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΠΑΔΑ. Η εργασία διαρθρώνεται σε δύο βασικούς άξονες:

- 1) Το θεωρητικό μέρος, στο οποίο παρουσιάζονται οι βασικοί ορισμοί και έννοιες, η θεωρία της στρέψης καθώς και οι θεωρητικοί υπολογισμοί.
- 2) Το πειραματικό μέρος, στο οποίο περιγράφεται η πειραματική διάταξη και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Οι κύριοι στόχοι και τα συμπεράσματα που καλείται να εξάγει η εργασία είναι:

- 1) Η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τους θεωρητικούς υπολογισμούς και ειδικότερα οι υπολογισμοί της ροπής στρέψης δοκών ορθογωνικής διατομής. Ζητούμενο είναι το κατά πόσον τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις θεωρητικές λύσεις.
- 2) Η επιρροή του διαμήκους και του εγκάρσιου οπλισμού στη στρεπτική αντοχή δοκών ορθογωνικής διατομής.

1.3 Παρουσίαση της πειραματικής διάταξης

Συνολικά, κατασκευάστηκαν δύο ελαφρά οπλισμένες δοκοί ορθογωνικής διατομής από Ο.Σ. και υποβλήθηκαν ξεχωριστά σε δοκιμή άμεσης στρέψης στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΠΑΔΑ. Τα υλικά των δοκών παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1 και η σύνθεση του σκυροδέματος στον πίνακα 1.2.

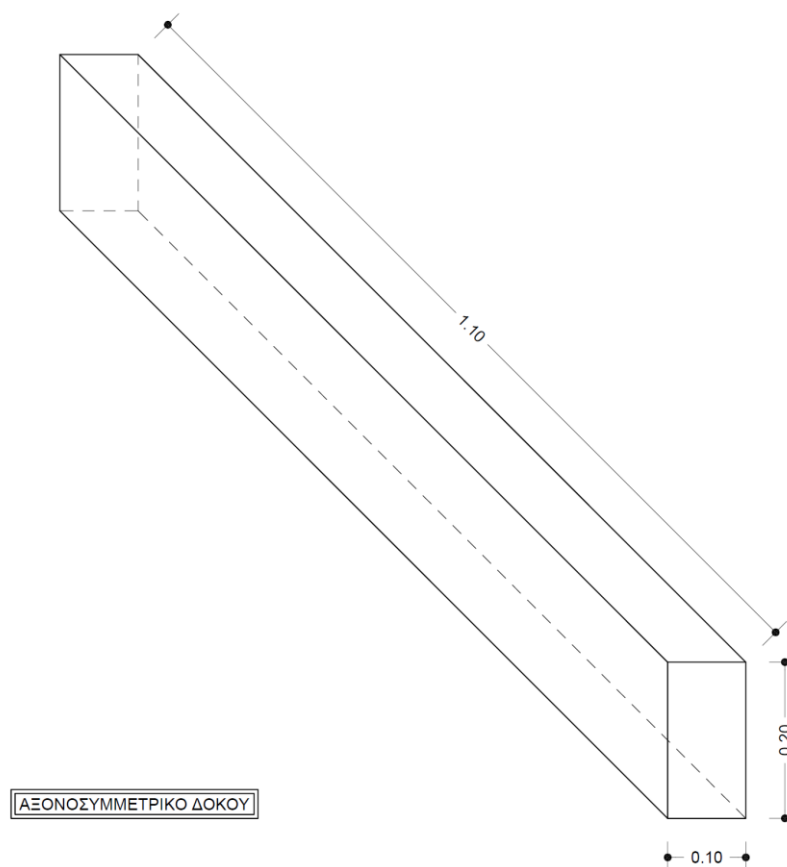
Πίνακας 1.1: Τα υλικά των δοκών της εργασίας.

Όνομασία δοκού	Κατηγορία σκυροδέματος	Κατηγορία χάλυβα διαμήκους οπλισμού	Κατηγορία χάλυβα εγκάρσιου οπλισμού
V1	C16/20	B500C	B500C
V2	C16/20	B500C	B500C

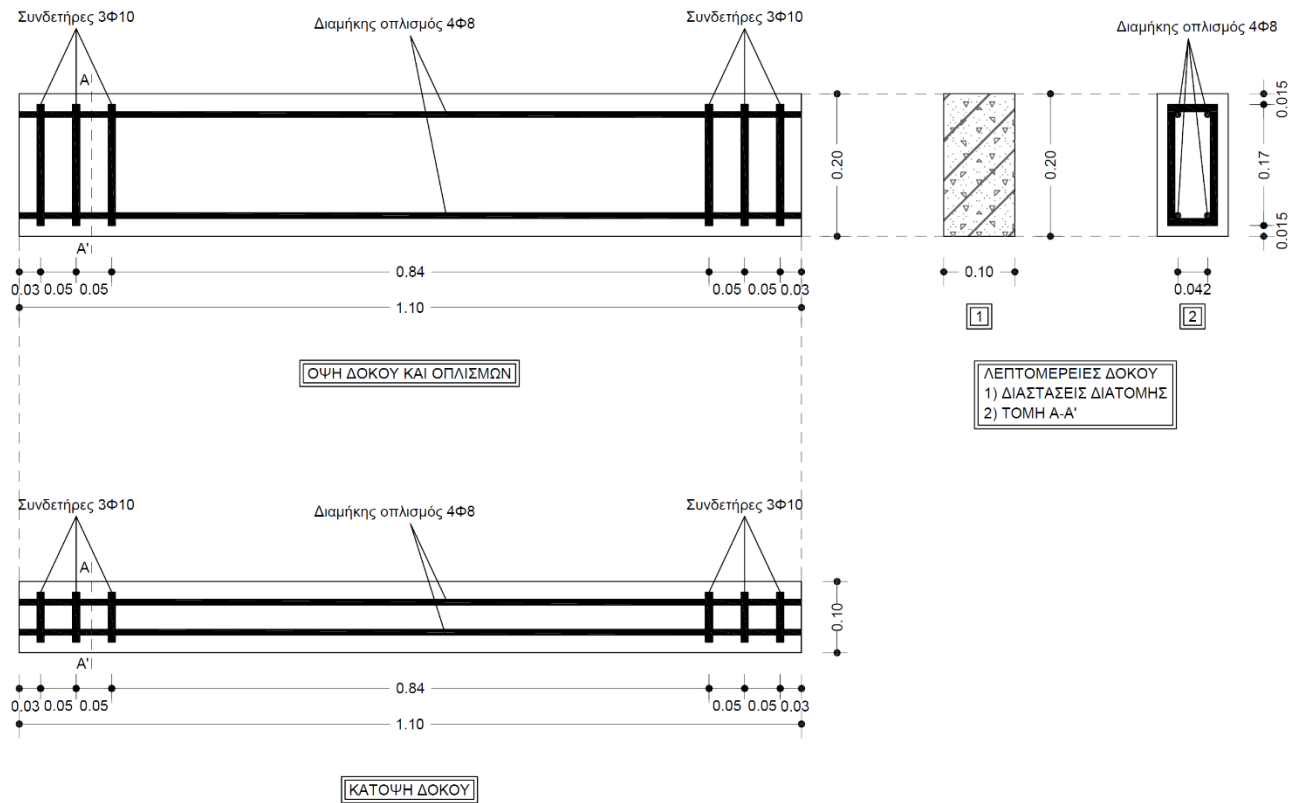
Πίνακας 1.2: Η σύνθεση του σκυροδέματος των δοκών.

	ΑΜΜΟΣ	ΓΑΡΜΠΙΑΙ	ΧΑΛΙΚΙ	ΤΣ.Π.42.5	ΤΣ.Π32.5	ΝΕΡΟ	ΣΥΝΟΛΟ
C16/20 κάθιση S3	185.30	30.6	108.80	24.65	21.25	32.30	402.90

Οι δύο δοκοί έχουν την ίδια γεωμετρία και οπλισμό. Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται οι διαστάσεις των δοκών και στο Σχήμα 1.2 φαίνονται οι οπλισμοί και η διάταξή τους στις δοκούς. Οι δοκοί έχουν μήκος 1.10m και διαστάσεις διατομής 0.10m x 0.20m. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός 4Φ8 (2 ράβδοι πάνω, 2 κάτω) σε όλο το μήκος των δοκών, ωστόσο εγκάρσιος οπλισμός (3Φ10) τοποθετήθηκε μόνο στα άκρα τους.



Σχήμα 1.1 Οι διαστάσεις και η γεωμετρία των ορθογωνικών δοκών.



Σχήμα 1.2 Ο οπλισμός των δοκών και η διάταξή τους σε αυτές.

Οι δοκοί αυτοί υποβάλλονται στο πείραμα στρέψεως που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, τα πειραματικά αποτελέσματά τους συγκρίνονται με τα αντίστοιχα θεωρητικά στο Κεφάλαιο 4 και τέλος, στο Κεφάλαιο 5 διατυπώνονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

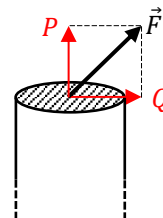
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι ορισμοί μερικών βασικών εννοιών της Μηχανικής και της Αντοχής των υλικών, απαραίτητων για την ανάπτυξη της εργασίας.

2.1.1 Τάσεις και παραμορφώσεις

Τάσεις: Η δύναμη ανά μονάδα εμβαδού μιας διατομής ονομάζεται *τάση* (*stress*). Έστω μία δύναμη \vec{F} , τυχαίας διεύθυνσης και φοράς η οποία ασκείται ομοιόμορφα σε μια επιφάνεια εμβαδού A , βλ. Σχήμα 2.1. Η δύναμη \vec{F} αναλύεται σε δύο συνιστώσες P και Q από τις οποίες η P (αξονική) είναι κάθετη στην επιφάνεια A , ενώ η Q είναι εφαπτομενική (εγκάρσια).



Σχήμα 2.1 Δύναμη \vec{F} η οποία ασκείται ομοιόμορφα σε μια επιφάνεια εμβαδού A και οι συνιστώσες της P και Q .

Η δύναμη P προκαλεί μέση ορθή τάση σ :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Ενώ η δύναμη Q προκαλεί μέση διατμητική τάση τ :

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

Παραμορφώσεις: Θεωρώντας τις κατασκευές παραμορφώσιμες, οι διάφορες δυνάμεις που ασκούνται σε αυτές μπορούν να προκαλέσουν μεταβολή των διαστάσεών τους.

Η ορθή τροπή ή ανηγμένη παραμόρφωση ϵ σε ένα μέλος, προκαλείται λόγω της συνιστώσας P και είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο ορίζεται ως η παραμόρφωση του μέλους ανά μονάδα μήκους.

Υπό την επίδραση της συνιστώσας Q , η αρχική διατομή A θα παραμορφωθεί. Ορίζεται η διατμητική τροπή γ σε μια διατομή ως η μεταβολή των γωνιών που σχηματίζουν τα σημεία της διατομής στις τελικές τους θέσεις ως προς τις αρχικές τους.

Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων:

Η εντατική και η παραμορφωσιακή κατάσταση των μελών είναι αλληλένδετες και η μεταξύ τους σχέση εξαρτάται από το εξεταζόμενο υλικό. Το διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση των τάσεων με τις παραμορφώσεις σε ένα δεδομένο υλικό, και διακρίνεται σε δύο βασικές περιοχές:

1. Την ελαστική περιοχή. Για τα περισσότερα υλικά υπάρχει μια συγκεκριμένη περιοχή, σχετικά μικρών παραμορφώσεων, όπου παρατηρείται αναλογία μεταξύ τροπών και τάσεων. Αυτή αποτελεί την ελαστική περιοχή και όλες οι παραμορφώσεις που προκαλούνται είναι πλήρως αναστρέψιμες, δηλαδή το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά.
2. Την ανελαστική περιοχή. Σηματοδοτείται από το όριο διαρροής, όπου πλέον οι παραμορφώσεις παύουν να είναι αναστρέψιμες, αλλά είναι μόνιμες (ή πλαστικές).

Νόμος του Hooke:

Η ελαστική περιοχή έχει το χαρακτηριστικό ότι οι τάσεις είναι ανάλογες ως προς τις παραμορφώσεις, δηλαδή ισχύει ο νόμος του Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.3)$$

$$\tau = G\gamma \quad (2.4)$$

όπου η παράμετρος E ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young, ενώ η παράμετρος G ονομάζεται μέτρο διάτμησης. Και οι δύο παράμετροι είναι χαρακτηριστική ιδιότητα του θεωρούμενου υλικού.

2.1.2 Εντατικές καταστάσεις- Είδη εντάσεως

Στη παρούσα εργασία μελετώνται ευθύγραμμες δοκοί, οι οποίες είναι επιμήκη στοιχεία με (συνήθως) σταθερή διατομή της οποίας η μεγαλύτερη εγκάρσια διάσταση δεν ξεπερνά $\sim 1/5$ του μήκους τους. Η δοκός μπορεί να καταπονείται από αξονικά και εγκάρσια φορτία. Οι εντατικές καταστάσεις ενός στοιχείου καθορίζονται από τον τρόπο φόρτισής του, σε σχέση με τους άξονες αναφοράς του.

Οι άξονες αυτοί για ένα γραμμικό μέλος (δοκός) σε τοπικό επίπεδο ορίζονται ως εξής:

1. Ο διαμήκης άξονας x . Τυπικά συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα του μέλους.
2. Ο εγκάρσιος άξονας y . Είναι κάθετος στον άξονα x και τυπικά αντιστοιχεί στον «ισχυρό άξονα αδρανείας» της διατομής.
3. Ο εγκάρσιος άξονας z . Είναι κάθετος στους άξονες x , y και τυπικά αντιστοιχεί στον «ασθενή άξονα αδρανείας» της διατομής.

Εντατικές καταστάσεις: Σε ένα σώμα στο οποίο ασκούνται ένα σύνολο δυνάμεων F_i κατά διάφορες διευθύνσεις, εμφανίζονται ορθές και διατμητικές τάσεις κατά τη διεύθυνση και των τριών αξόνων αναφοράς, δηλαδή βρίσκεται σε τριαξονική εντατική κατάσταση. Αν σε ένα στοιχείο ασκείται ένα σύνολο δυνάμεων F_i , των οποίων οι διευθύνσεις είναι παράλληλες σε έναν μόνο από τους άξονες αναφοράς (τυπικά τον x), τότε βρίσκεται σε μονοαξονική εντατική κατάσταση.

Είδη εντάσεως: Μια δοκός μπορεί να καταπονείται στα εξής είδη εντάσεως:

1. Εφελκυσμός. Ένα σώμα καταπονείται σε εφελκυσμό όταν του ασκούνται δυο ίσες και αντίθετες δυνάμεις παράλληλα στον διαμήκη άξονά του, οι οποίες τείνουν να το επιμηκύνουν. Πρόκειται για μονοαξονική εντατική κατάσταση, η οποία προκαλείται από αξονικά φορτία.
2. Θλίψη. Ένα σώμα καταπονείται σε θλίψη όταν του ασκούνται δυο ίσες και αντίθετες δυνάμεις παράλληλα στον διαμήκη άξονά του, οι οποίες τείνουν να το συνθλίψουν. Πρόκειται για μονοαξονική εντατική κατάσταση, η οποία προκαλείται από αξονικά φορτία.
3. Διάτμηση. Ένα σώμα καταπονείται σε διάτμηση όταν του ασκούνται δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις με διεύθυνση παράλληλη σε κάποιον από τους εγκάρσιους άξονες.
4. Κάμψη. Ένα σώμα καταπονείται σε κάμψη, όταν του ασκούνται δυνάμεις κάθετα στον διαμήκη άξονα του (δηλαδή παράλληλα στους διαμήκους άξονες). Αναπτύσσονται τότε ροπές κάμψης και προκαλούν καμπύλωση της δοκού. Υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ των ροπών και των τεμνουσών.
5. Λυγισμός. Ο λυγισμός είναι η απώλεια της ευθυγραμμίας τους διαμήκους άξονα ενός μέλους λόγω θλιπτικών αξονικών φορτίων. Επειδή είναι μια απότομη μορφή αστοχίας, είναι πολύ επικίνδυνη για τις κατασκευές.
6. Στρέψη. Ένα σώμα καταπονείται σε στρέψη όταν του ασκούνται εγκάρσιες δυνάμεις οι οποίες αποτελούν ζεύγος με επίπεδο κάθετο στον άξονα του το οποίο τείνουν να περιστρέφουν.
7. Συνδυασμός. Ένα σώμα μπορεί να καταπονείται με έναν συνδυασμό των προαναφερθέντων ειδών εντάσεως. Αυτή είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση στις κατασκευές.

2.2 Το Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ.) ως υλικό καθώς και οι βασικοί ορισμοί αντοχών του με βάση τους Ευρωκώδικες. Το Ο.Σ. είναι το σκυρόδεμα το οποίο έχει ενσωματωμένο χάλυβα με τη μορφή ράβδων ή πλεγμάτων, τα οποία αποτελούν τον οπλισμό του. Σε δομικά στοιχεία τα οποία καταπονούνται σε κάμψη ή εφελκυσμό, ο οπλισμός παραλαμβάνει τις εφελκυστικές τάσεις, τις οποίες δεν μπορεί να παραλάβει το σκυρόδεμα, καθώς έχει μικρή αντοχή σε εφελκυσμό. Ωστόσο, τις θλιπτικές τάσεις κάμψεως ή θλίψης τις παραλαμβάνει το σκυρόδεμα το οποίο έχει υψηλή αντοχή σε θλίψη.

2.1.1 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι τεχνητός λίθος ο οποίος προκύπτει μετά την σκλήρυνση ενός μίγματος από αδρανή, τσιμέντο και νερό. Το τσιμέντο αποτελεί τη συνδετική κονία και επιπλέον κατά την ανάμειξη μπορεί να προστεθούν σε μικρές ποσότητες διάφορα συστατικά φυσικής ή τεχνητής προέλευσης για την πρόσδοση ορισμένων φυσικών ιδιοτήτων.

Τα αδρανή υλικά είναι η άμμος, το χαλίκι, το γαρμπίλι ή τα σκύρα και καθορίζουν κυρίως το βάρος, το μέτρο ελαστικότητας και τη μεταβολή όγκου του σκυροδέματος (βλ. Πίνακα 1.2). Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες για τις ιδιότητες του σκυροδέματος αποτελούν το πορώδες, το σχήμα και η υφή των αδρανών.

Το τσιμέντο είναι προϊόν οπτήσεως ασβεστολιθικής μάργας (ασβεστόλιθος και άργιλος) σε υψηλή θερμοκρασία. Μετά την όπτηση το υλικό αλέθεται λεπτά. Το προϊόν που προκύπτει πρόκειται για υδραυλική κονία η οποία έχει την ιδιότητα μετά την αντίδραση με νερό (ενυδάτωση) να σκληρύνεται και να παραμένει εν τέλει στερεά ακόμη και κάτω από το νερό. Το τσιμέντο επηρεάζει αποφασιστικά την αντοχή του σκυροδέματος.

Με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα τα οποία έχουν υιοθετηθεί σαν Ελληνικά Πρότυπα από τον ΕΛΟΤ, το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 ορίζει και δίνει τις προδιαγραφές 27 διακριτών τύπων τσιμέντων και των συστατικών τους (βλ. Πίνακα 2.1). Το κάθε τσιμέντο χαρακτηρίζεται από τον τύπο και από έναν αριθμό που χαρακτηρίζει την αντοχή. Επίσης το πρότυπο προδιαγράφει και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή τους σε θλίψη σε κονίαμα πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής (βλ. Πίνακα 1.2). Αν πρόκειται για τσιμέντο είναι υψηλής πρώιμης αντοχής, στα προηγούμενα προστίθεται το γράμμα R, αλλιώς προστίθεται το γράμμα N (κανονικής πρώιμης αντοχής).

Όλα τα υλικά του σκυροδέματος πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις που προδιαγράφονται από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-2016) και τις κατά καιρούς δημοσιευμένες διατάξεις του ΕΚ2.

Το σκυρόδεμα αστοχεί σε θλίψη λόγω ανάπτυξης και επέκτασης ρωγμών στη μάζα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Το σκυρόδεμα ως υλικό έχει σχετικά μεγάλη αντοχή σε θλίψη, αλλά σχετικά με αυτήν πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό. Επομένως η αντοχή και η κατηγοριοποίησή του γίνεται με βάση την θλιπτική αντοχή του η οποία ελέγχεται στο σκληρυμένο σκυρόδεμα 28 ημέρες μετά την ημέρα παρασκευής του. Η συντήρηση των δοκιμίων στο χρονικό αυτό διάστημα γίνεται σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές.

Συμπεριφορά σε Μονοαξονική Θλίψη

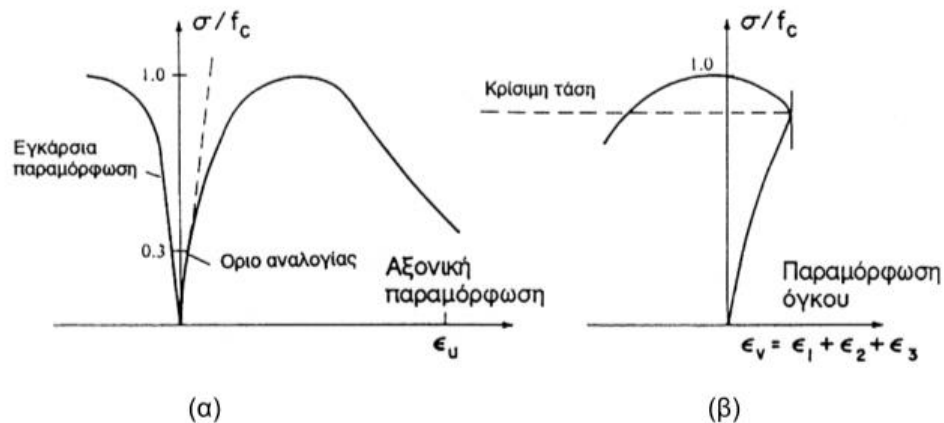
Τα δοκίμια ελέγχου της θλιπτικής αντοχής σύμφωνα με τον ΕΚ2 είναι είτε κυβικά με διαστάσεις 150x150x150mm είτε κυλινδρικά με ύψος 300mm και κυκλική επιφάνεια βάσης με διάμετρο 150mm. Παλαιότερες προδιαγραφές (DIN 1045) προέβλεπαν κυβικά δοκίμια με διαστάσεις 200x200x200mm.

Πίνακας 2.1: Τύποι τσιμέντου και τα 27 προϊόντα τους σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 197-1.

Κύριοι τύποι	Ονομασία των 27 προϊόντων (τύποι κοινών τσιμεντών)	Σύνθεση (επί της % κατά μάζα) ^{α)}											Δευτερεύοντα συστατικά			
		Κλίση κ K	Σκορία υφαιμένου S	Πορτική πατάλη D ^{β)}	Κόκκοι συστατικά			Επιμέγεθος τσόνος W	Ψημένος σχετολόφος T	Λεβετολόφος						
					Ποζολάνη P	Q	V			L	LL					
CEM I	Τσιμέντο Πορτλαντ	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Τσιμέντο Πορτλαντ με Σκορία Υφαιμένου	CEM I/A-S	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-S	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πορτλαντ με πορτική πατάλη	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Τσιμέντο Πορτλαντ με ποζολάνη	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Τσιμέντο Πορτλαντ με υπέρμενη τέφρα	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Τσιμέντο Πορτλαντ με ασβεστολόφο	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	CEM II/A-M	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM IV/A	65-89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM IV/B	45-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	CEM V/A	40-64	18-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM V/B	20-38	31-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Συνθετο τσιμέντο ^{γ)}															

α) Οι τιμές που πίνονται αναφέρονται στο σύνολο των κερών και δευτερευόντων συστατικών
 β) Το ποσοστό της πορτικής πατάλης περιορίζεται στο 10%
 γ) Στα τσιμεντά Πορτλαντ-συνθετά CEM II/A-M και CEM II/B-M, στο ποζολανικά τσιμεντά CEM IV/A και CEM IV/B και στα σύνθετα τσιμεντά CEM V/A και CEM V/B τα κύρια συστατικά πλην του κόνερ πρέπει να δηλώνονται στην ονομασία του τσιμέντου (για παράδειγμα βλέπε κεφάλαιο 8).

Η θλιπτική αντοχή f_c του σκυροδέματος υπολογίζεται από τη μέγιστη θλιπτική δύναμη σε μονοαξονική επιπόνηση, την οποία μπορούν να παραλάβουν τα δοκίμια ελέγχου μέχρι τη θραύση τους. Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης του υλικού (βλ. Σχήμα 2.2) περιγράφει γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι το 30% περίπου της αντοχής του f_c . Για τάσεις μεταξύ 30% και 50% της f_c εμφανίζονται και αυξάνονται σταδιακά ρωγμές σε μήκος, πλάτος και αριθμό, ενώ η καμπύλη σ - ϵ γίνεται όλο και περισσότερο μη-γραμμική. Για μεγαλύτερες τάσεις και μέχρι $0.75f_c$, που ονομάζεται και κρίσιμη τάση, η ρηγμάτωση επεκτείνεται με αυξανόμενους ρυθμούς. Μετά την κρίσιμη τάση το σύστημα γίνεται ασταθές, δηλαδή οι παραμορφώσεις αυξάνονται σχετικά απότομα, ενώ οι επιφάνειες θραύσης τείνουν να γίνουν συνεχείς. Τέλος, για τάσεις 0.75 - $0.9f_c$ η σχέση σ - ϵ εμφανίζει βαθμιαία αύξηση καμπυλότητας, ενώ για ακόμα μεγαλύτερες τάσεις γίνεται σχεδόν οριζόντια και ακολούθως αποκτά αρνητική κλίση μέχρι την τελική θραύση του υλικού.



Σχήμα 2.2 Τυπικά διαγράμματα θλιπτικής τάσης σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει (α) αξονικής και εγκάρσιας παραμόρφωσης, και (β) παραμόρφωσης όγκου. (Πηγή Τριανταφύλλου, 2013).

Προτυποποίηση

Αβεβαιότητες κατά την θεώρηση των υλικών, λόγω π.χ. πιθανών τοπικών μικροατελειών των υλικών, διάφορες ανακρίβειες κλπ. Έχει οδηγήσει στον σχεδιασμό με μια αντοχή μικρότερη της μέσης, που λέγεται χαρακτηριστική αντοχή. Συγκεκριμένα για το σκυρόδεμα, αβέβαιοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των υλικών, τυχόν διαφορές στην αναλογία τους στο ανάμιγμα, αλλά και στον τρόπο διάστρωσης, συμπύκνωσης και συντήρησης, καθιστούν το σκυρόδεμα ανομοιογενές υλικό. Λαμβάνοντας αυτές τις αβεβαιότητες υπόψη για την ασφάλεια ενός έργου από σκυρόδεμα, ο σχεδιασμός του χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} .

Χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου f_{ck} ή κυβικού δοκιμίου $f_{ck,cube}$ ορίζεται θεωρώντας την θλιπτική αντοχή f_c τυχαία μεταβλητή που περιγράφεται από κανονική κατανομή, και τη χαρακτηριστική αντοχή εκείνη την αντοχή η οποία στο σύνολο των πειραματικών τιμών έχει 5% πιθανότητα να υποσκελιστεί από την αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου του δείγματος σκυροδέματος. Με άλλα λόγια αν θεωρηθεί ότι ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρέπεται σε δοκίμια, μόνο το 5% αυτών θα είχαν αντοχή μικρότερη της χαρακτηριστικής.

Οι κατηγορίες του σκυροδέματος στην κατασκευή των δομικών έργων από Ο.Σ. ορίζονται σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016 με βάση τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή f_{ck} κυλινδρικού δοκιμίου (ύψος 300mm, D=150mm) ή κυβικού δοκιμίου (150x150x150mm) $f_{ck,cube}$. Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Στην ονοματολογία της κάθε κατηγορίας πρώτα είναι η τιμή της χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής f_{ck} κυλινδρικού δοκιμίου και ακολουθεί του κυβικού δοκιμίου.

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες σκυροδέματος (Πίνακας Α1-1, ΚΤΣ-2016)

Κατηγορία αντοχής σε θλίψη	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου $f_{ck,cyl}$ N/mm ²	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυβικού δοκιμίου $f_{ck,cube}$ N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Θλιπτική αντοχή σχεδιασμού με βάση τον ΕΚ2

Κατά τον ΕΚ2 η τιμή της θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού, f_{cd} , ορίζεται ως:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.5)$$

όπου:

$\gamma_c = 1.5$ είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα,

$\alpha_{cc} = 0.85$ είναι συντελεστής που συνεκτιμά μακροχρόνιες επιδράσεις στην θλιπτική αντοχή και δυσμενείς επιρροές που προκύπτουν από τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται το φορτίο.

Σημείωση: Ο συντελεστής α_{cc} λαμβάνει την τιμή 0.85 μόνο για ορθή ένταση (κάμψη ή/και αξονική δύναμη) στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Σε όλες τις άλλες εντάσεις (διάτμηση, στρέψη κλπ) λαμβάνει την τιμή 1.00. Επίσης τιμή ίση με 1.00 λαμβάνει και για ορθή ένταση στον σεισμικό συνδυασμό.

2.1.2 Χάλυβας οπλισμού

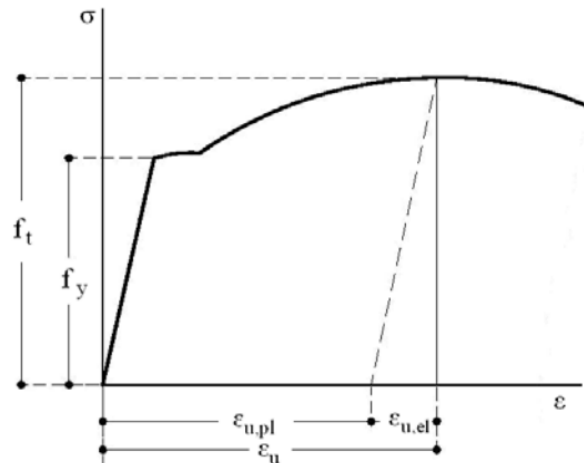
Όπως προαναφέρθηκε, το σκυρόδεμα είναι υλικό με πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή, για αυτό και η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων στις κατασκευές σκυροδέματος γίνεται από τον χάλυβα οπλισμού. Στο Ο.Σ. χρησιμοποιούνται οπλισμοί από χάλυβα με μορφή μεμονωμένων ράβδων κυκλικής διατομής, πλεγμάτων ή δικτυωμάτων. Οι μεμονωμένες ράβδοι έχουν γενικά ονομαστική διάμετρο από 5 έως 40mm. Τα πλέγματα αποτελούνται από πολυάριθμες ράβδους με διάμετρο από 5 έως 12mm οι οποίες είναι συγκολλημένες μεταξύ τους σχηματίζοντας έναν ορθογωνικό ή τετραγωνικό κάναβο.

Τα μηχανικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά του χάλυβα καθορίζονται από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων (ΚΤΧ-2008). Η αντοχή του καθορίζεται από τον ΚΤΧ-2008 με βάση την εφελκυστική αντοχή η οποία ελέγχεται με τη δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού.

Συμπεριφορά σε Μονοαξονικό Εφελκυσμό

Ο χάλυβας παρουσιάζει σε μονοαξονικό εφελκυσμό συμπεριφορά που εμφανίζεται στα μέταλλα. Το αρχικό τμήμα του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων (σ - ϵ) είναι ευθύγραμμο και ακολουθείται από την περιοχή ή πλατώ διαρροής, όπου εμφανίζεται ανάπτυξη παραμορφώσεων υπό σταθερή τάση.

Η τάση αυτή αποτελεί το όριο διαρροής f_y . Ακολουθεί η περιοχή κράτυνσης, όπου εμφανίζεται μικρή αύξηση των τάσεων μέχρι τη μέγιστη τιμή (εφελκυστική αντοχή), πέρα από την οποία αρχίζει η στένωση της διατομής του μετάλλου (δημιουργία τοπικού «λαιμού») μέχρι τη θραύση. Η εφαπτομένη του διαγράμματος στην αρχή της κράτυνσης ονομάζεται μέτρο κράτυνσης. Η συνολική παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο της καμπύλης σ-ε βρίσκεται προσθέτοντας στην ελαστική παραμόρφωση (αυτή που ανακτάται κατά την αποφόρτιση) την πλαστική παραμόρφωση (παραμένουσα ή μόνιμη). Οι χάλυβες θερμής έλασης έχουν διακριτό όριο διαρροής και μεγάλη περιοχή κράτυνσης, ενώ στους χάλυβες ψυχρής κατεργασίας δεν υπάρχει διακριτό όριο διαρροής και παρουσιάζουν γενικά πιο ψαθυρή συμπεριφορά. Το Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για χάλυβα οπλισμού που προβλέπεται από τον ΚΤΧ-2008. Η συμπεριφορά του χάλυβα σε θλίψη θεωρείται γενικά ταυτόσημη με αυτήν του εφελκυσμού.



Υπόμνημα

$\epsilon_{u,pl}$: πλαστική παραμένουσα παραμόρφωση υπό το μέγιστο φορτίο

ϵ_u : συνολική παραμόρφωση υπό το μέγιστο φορτίο

$\epsilon_{u,el}$: ελαστική παραμόρφωση αντιστοιχούσα στο μέγιστο φορτίο

Σχήμα 2.3 Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για χάλυβα με διακριτό όριο διαρροής.
(Πηγή ΚΤΧ-2008)

Προτυποποίηση

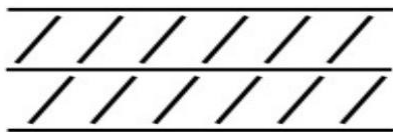
Όπως και στο σκυρόδεμα, έτσι και για τους χάλυβες ορίζεται η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή f_{yk} . Το όριο διαρροής f_{yk} των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, σύμφωνα με τον ΚΤΧ-2008, πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο των 500 ΜΡα.

Οι χάλυβες μπορεί να είναι λείοι ή να φέρουν επιφανειακές νευρώσεις. Στην Ελλάδα στις κατασκευές από Ο.Σ. επιτρέπονται μόνο ράβδοι με νευρώσεις, καθώς βελτιώνουν τη συνάφεια (πρόσφυση) με το σκυρόδεμα μέσω μηχανικής αλληλοεμπλοκής για την αντισεισμική συμπεριφορά.

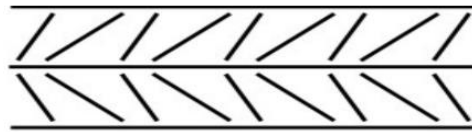
Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται στο Ο.Σ. συμβολίζονται με το γράμμα Β ακολουθούμενο από τη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής σε ΜΡα και το γράμμα Α, Β, C, που υποδηλώνει την κατηγορία ολκιμότητας (χαμηλή Α, μέση Β, υψηλή C). Επομένως, οι ποιότητες-κατηγορίες κοινών χαλύβων οπλισμού κατασκευών σκυροδέματος είναι Β500Α, Β500Β, Β500C και περιλαμβάνουν μόνο συγκολλησίμους χάλυβες. Οι χάλυβες κατηγορίας Β500Α προορίζονται αποκλειστικά για την κατασκευή πλεγμάτων και δικτυωμάτων. Στην Ελλάδα για τα δομικά στοιχεία από Ο.Σ. χρησιμοποιούνται μόνο οι χάλυβες κατηγορίας Β500C καθώς καλύπτουν τις αυξημένες απαιτήσεις για αντισεισμική συμπεριφορά των κατασκευών κατά τον ΕΚ8.

Η σήμανση για την αναγνώριση της κατηγορίας ποιότητας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος γίνεται με το διαφορετικό τρόπο διάταξης των πλάγιων νευρώσεων στην επιφάνεια της ράβδου. Οι χάλυβες κατηγορίας Β500Α φέρουν στην επιφάνειά τους τουλάχιστον δύο σειρές πλάγιων ΠΑΔΑ, Τμήμα ΠΟΛ.ΜΗΧ., Διπλωματική Εργασία, Σταύρος Μυλωνάκος

διαδοχικών νευρώσεων της ίδιας φοράς, και παράλληλες μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Οι χάλυβες κατηγορίας B500C φέρουν στην επιφάνειά τους τουλάχιστον δύο σειρές πλάγιων διαδοχικών νευρώσεων αντίθετης κλίσης. Σε κάθε σειρά, οι διαδοχικές νευρώσεις έχουν εναλλασσόμενες γωνίες κλίσης ως προς τον διαμήκη άξονα της ράβδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4 Διάταξη νευρώσεων χάλυβα κατηγορίας B500A (Πηγή KTX-2008).



Σχήμα 2.5 Διάταξη νευρώσεων χάλυβα κατηγορίας B500C (Πηγή KTX-2008).

Εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού με βάση τον ΕΚ2

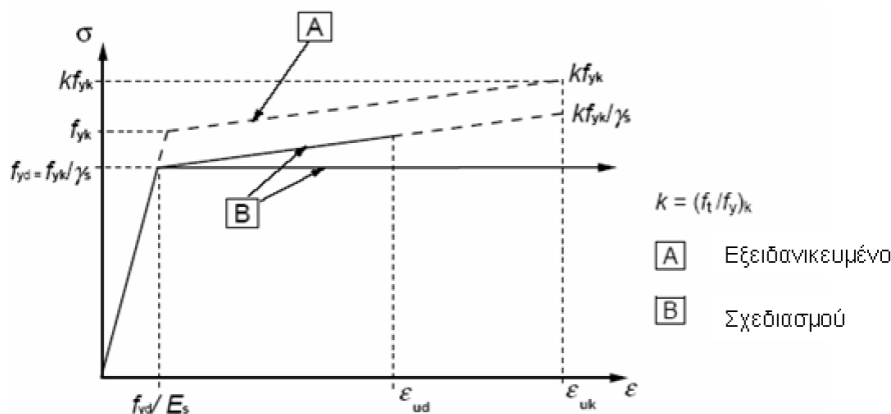
Ο ΕΚ2 ορίζει ένα διγραμμικό, εξιδανικευμένο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού (για εφελκυσμό και θλίψη), βλ. Σχήμα 2.6. Στο διάγραμμα σ - ϵ , ορίζεται και το μέτρο ελαστικότητας E_s , το οποίο είναι σταθερό για Κάθε κατηγορία χάλυβα οπλισμού και ίσο με 200 GPa. Ο λόγος του Poisson είναι ίσος με $\nu = 0.3$, επομένως το μέτρο διάτμησης $G = E_s/[2(1 + \nu)]$ είναι περίπου ίσο με 80 GPa.

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής σχεδιασμού, f_{yd} , ορίζεται ως:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (2.6)$$

όπου:

$\gamma_s = 1.15$ είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τον χάλυβα οπλισμού.



Σχήμα 2.6 Εξιδανικευμένο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων και διάγραμμα σχεδιασμού χάλυβα οπλισμού (για εφελκυσμό και θλίψη) (Πηγή ΕΚ2).

2.3 Θεωρία στρέψης

2.3.1 Γενικά

Το είδος της καταπόνησης που τείνει να περιστρέψει ένα δομικό στοιχείο περί το διαμήκη άξονά του ονομάζεται στρέψη. Διακρίνονται δύο κατηγορίες στρεπτικής εντάσεως:

1. Η άμεση στρέψη, η οποία είναι απαραίτητη για τη στατική ισορροπία του φορέα. Προκύπτει από τη δράση εξωτερικών φορτίων που προκαλούν άμεσες στρεπτικές ροπές, π.χ. πλακοδοκός Ο.Σ μορφής Γ στην οποία στηρίζεται πρόβολος. Για αυτό το είδος στρέψης ο ΕΚ2 δίνει σαφείς οδηγίες για τη διαστασιολόγηση μελών που υποβάλλονται σε αυτήν.
2. Η έμμεση στρέψη, η οποία δεν είναι απαραίτητη για τη στατική ισορροπία του φορέα, αλλά εμφανίζεται λόγω του συμβιβαστού των παραμορφώσεων. Ειδικότερα, οφείλεται στην παρεμπόδιση της γωνιακής παραμορφώσεως ενός μέλους από ένα άλλο μέλος που είναι συνδεδεμένο με αυτό, π.χ. δοκός πάνω στην οποία στηρίζεται άλλη δοκός που φέρει φορτίο. Για αυτό το είδος στρέψης ο ΕΚ2 προβλέπει ότι ο έλεγχος μπορεί να παραλειφθεί.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο αναλαμβάνονται από τη διατομή οι στρεπτικές ροπές, η στρέψη μπορεί να χαρακτηριστεί και ως:

1. Καθαρή στρέψη (στρέψη Saint Venant). Δεν υφίσταται ταυτόχρονη δράση τεμνουσών, αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψεως. Η ισορροπία εξασφαλίζεται μέσω κλειστής ροής διατμητικού φορτίου.
2. Στρέψη με παρεμποδιζόμενη στρέβλωση. Λόγω της παρεμποδίσεως της διαμήκουσ παραμορφώσεως, ο φορέας αντιστέκεται στις επιβαλλόμενες στρεπτικές ροπές με αποτέλεσμα την ανάπτυξη αξονικών ορθών και πρόσθετων διατμητικών τάσεων.

Η αστοχία ενός στοιχείου λόγω στρέψης εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο. Στοιχεία από ψαθυρό υλικό (π.χ. σκυρόδεμα) παρουσιάζουν ελικοειδή ρωγμή στις 45°, ενώ στοιχεία από όλκιμο υλικό (π.χ. χάλυβας) αστοχούν κάθετα στον άξονα της στρέψης.

2.3.2 Η στρέψη με βάση τη μηχανική των υλικών

Ένα μέλος καταπονείται σε στρέψη, όταν επάνω σε αυτό ενεργούν ζεύγη δυνάμεων ίσων μέτρων και αντίθετων φορών που τα επίπεδα τους είναι κάθετα στον κεντροβαρικό του άξονα. Τα ζεύγη των δυνάμεων αυτών προκαλούν σε κάθε διατομή του στοιχείου διάνυσμα ροπής, η οποία ονομάζεται ροπή στρέψης, συμβολιζόμενη με M_T . Η ροπή αυτή έχει διάνυσμα ίδιας διεύθυνσης με τον διαμήκη άξονα x του μέλους, οπότε συχνά συμβολίζεται και ως M_x .

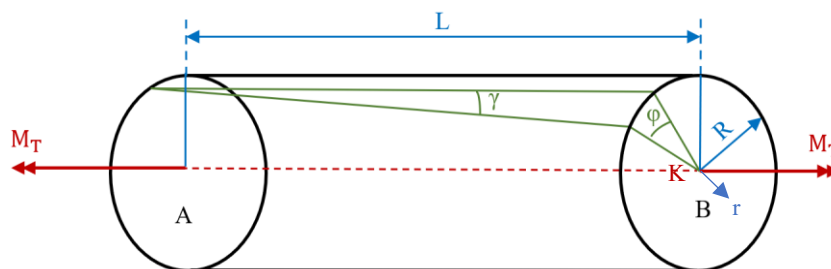
Η ύπαρξη της ροπής στρέψης M_T δημιουργεί ένα σύστημα θλιβομένων και εφελκυσμένων ζωνών προκαλώντας διατμητικές τάσεις, που είναι μεγαλύτερες στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου. Αποτέλεσμα της ροπής στρέψης είναι η παραμόρφωση του στοιχείου μέσω της δημιουργίας μιας στροφής των διατομών μεταξύ τους κατά μήκος του, η οποία ονομάζεται γωνία στροφής. Επομένως, η μελέτη ενός δομικού στοιχείου από Ο.Σ. σε στρέψη επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των διατμητικών τάσεων στρέψεως, της γωνίας στροφής των διατομών και του διαγράμματος στρέψεως (ροπές στρέψεως-γωνίες στροφής).

Στην στρέψη καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των τάσεων και των παραμορφώσεων, παίζει η μορφή της διατομής. Στα επόμενα παρουσιάζονται οι περιπτώσεις της κυκλικής και της ορθογωνικής διατομής.

Κυκλική διατομή: Τα προβλήματα της στρέψεως είναι εν γένει πολύπλοκα. Η απλούστερη περίπτωση είναι η κυλινδρική ράβδος η οποία καταπονείται σε στρέψη υπό τη φόρτιση με μία στρεπτική ροπή M_T . Για τη μελέτη του προβλήματος γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Η ράβδος αποτελείται από ομογενές και ισότροπο υλικό, ώστε οι ιδιότητες του υλικού να είναι ομοιόμορφες σε κάθε σημείο και διεύθυνση.
- Κατά τη στρέψη, όλες οι διατομές της δοκού παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον διαμήκη άξονα της ράβδου, δηλαδή δεν υφίστανται στρέβλωση.
- Κάθε διατομή στρέφεται σαν απόλυτα στερεός δίσκος. Επομένως οι ακτίνες των διατομών παραμένουν ευθύγραμμες κατά τη στρέψη.
- Η σχετική γωνία στροφής των διατομών κατά μήκος της ράβδου είναι σταθερή.
- Η ράβδος καταπονείται σε καθαρή στρέψη.

Έστω η ράβδος AB, μήκους L και ακτίνας R, η οποία παραμορφώνεται λόγω της στρεπτικής ροπής M_T , σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές. Αν θεωρηθεί το άκρο A ακίνητο, τότε οι διατομές περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονα της ράβδου και η διατομή B θα έχει στραφεί κατά φ (βλ. Σχήμα 2.7). Η γωνία φ είναι η σχετική γωνία στροφής των διατομών A και B.



Σχήμα 2.7 Στρέψη κυλινδρικής ράβδου.

Ελαστική περιοχή. Κάθε γενέτειρα της ράβδου μετατρέπεται σε έλικα σταθερού βήματος και σταθερής σχετικής στροφής. Για μικρές γωνίες στρέψης, μπορεί να θεωρηθεί ότι η γενέτειρα παραμένει ευθεία γραμμή. Ορίζεται η γωνία στροφής ανά μονάδα μήκους η $\theta = \varphi/L$. Η διατμητική παραμόρφωση κατά την στρέψη τότε θα είναι ίση με $\gamma = R\theta$. Στην ελαστική περιοχή ισχύει η εξίσωση 2.4, επομένως η διατμητική τάση λόγω στρέψης κυκλικής διατομής μπορεί να υπολογιστεί ως $\tau = GR\theta$. Θεωρώντας σημεία που ανήκουν σε τυχαία ακτίνα r, με $0 \leq r \leq R$, ισχύει η ανάλογη σχέση για τη διατμητική τάση λόγω στρέψης κυκλικής διατομής:

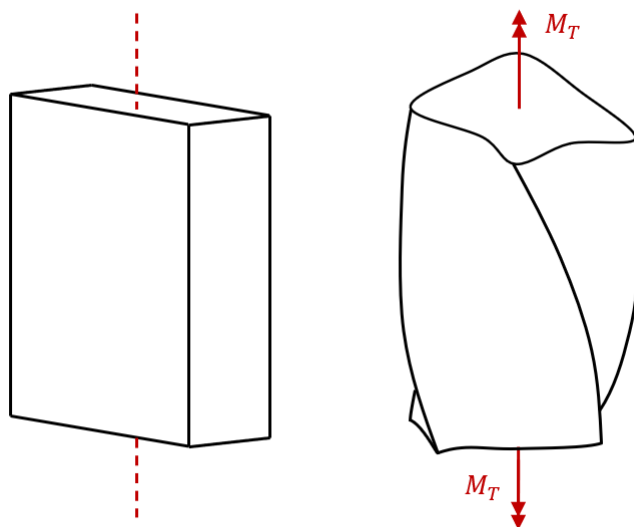
$$\tau = Gr\theta \quad (2.7)$$

Από την εξίσωση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η διατμητική τάση λόγω στρέψης κυκλικής διατομής αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση από το κέντρο K της ράβδου. Επομένως, η μέγιστη διατμητική τάση λόγω στρέψης τ_{max} βρίσκεται στην περίμετρο της διατομής, ενώ το κέντρο K παραμένει ακίνητο.

Ανελαστική περιοχή. Η υπό μελέτη ράβδος φορτίζεται με προοδευτικά αυξανόμενη στρεπτική ροπή M_T . Για όσο η M_T βρίσκεται στην ελαστική περιοχή ισχύουν τα προαναφερθέντα. Όταν η M_T φτάσει την κρίσιμη τιμή στην οποία αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, τότε η διατμητική τάση λόγω στρέψης εξισούται με το όριο διαρροής σε καθαρή διάτμηση, τ_y . Αφού η μέγιστη διατμητική τάση τ_{max} βρίσκεται στην περίμετρο της διατομής, τότε τα σημεία της περιμέτρου θα μπου πρώτα στη πλαστική περιοχή. Με την αύξηση της ροπής, η πλαστική περιοχή επεκτείνεται από την περίμετρο προς το κέντρο της ράβδου και τείνει να καλύψει όλη την επιφάνεια της διατομής.

Ορθογωνική συμπαγής διατομή: Σε ράβδους μη κυκλικής διατομής, οι διατομές δεν παραμένουν επίπεδες και απαραμόρφωτες, αλλά στρεβλώνονται, καθώς καμπυλώνονται οι παράπλευρες επιφάνειες των ράβδων (βλ. Σχήμα 2.8). Επομένως οι παραδοχές που έγιναν για τις κυκλικές διατομές

και οι αντίστοιχες εξισώσεις δεν μπορούν να εφαρμοστούν. Επιπλέον, για τις ορθογωνικές διατομές, οι διατμητικές τάσεις λόγω στρέψεως στην ελαστική περιοχή δεν έχουν γραμμική κατανομή πλέον, όπως συνέβαινε στις κυκλικές, αλλά η κατανομή τους είναι ανομοιόμορφη. Η μέγιστη διατμητική τάση εμφανίζεται στο μέσον των δύο μεγάλων πλευρών του ορθογωνίου, ενώ η ελάχιστη, που ισούται με μηδέν, εμφανίζεται στις άκρες των πλευρών του (κορυφές).



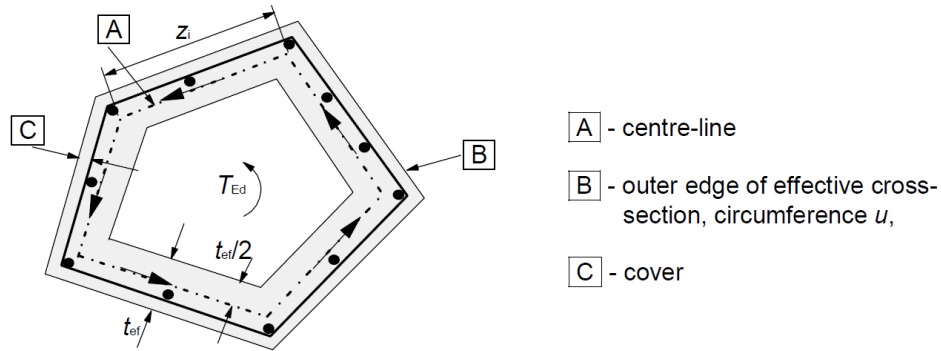
Σχήμα 2.8 Παραμόρφωση ράβδου ορθογωνικής διατομής λόγω στρεπτικής ροπής M_T .

2.3.3 Η στρέψη στον Ευρωκώδικα 2 (EK2)

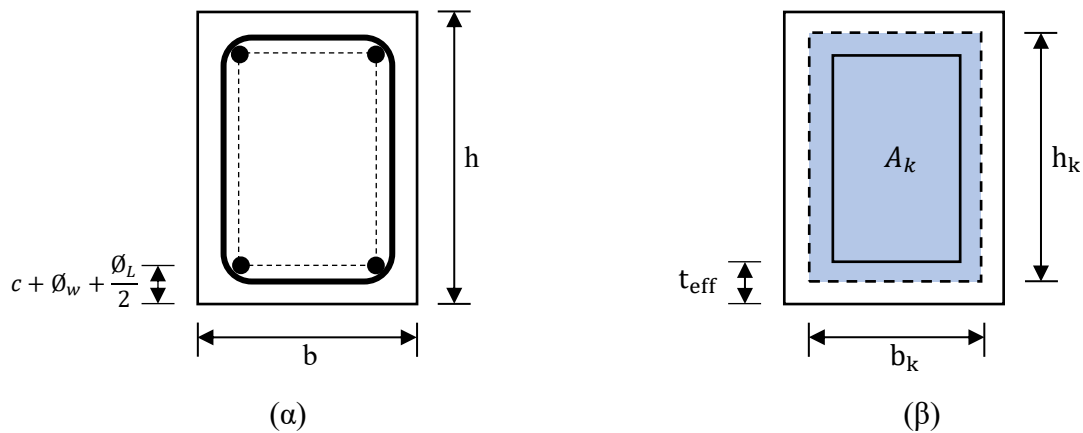
Καθαρή στρέψη, κατά Saint Venant, χωρίς ταυτόχρονη δράση τεμνουσών, αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψεως δεν εμφανίζεται κατά κανόνα στις ολόσωμες κατασκευές. Ωστόσο, η διαστασιολόγηση ενός μέλους σε στρέψη κατά τον EK2, γίνεται με τη θεώρηση της άμεσης στρέψης. Για την έμμεση στρέψη δεν γίνεται ιδιαίτερος έλεγχος, αλλά τοποθετούνται ο ελάχιστος διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός. Η ταυτόχρονη δράση από στρέψη, ροπή κάμψεως, αξονική δύναμη και τέμνουσα διεξάγεται χωριστά. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση των διαφόρων δράσεων λαμβάνεται υπόψη με πρόσθετες διατάξεις. Στα επόμενα παρουσιάζεται η προσομοίωση της στρέψης στοιχείων από Ο.Σ. με ορθογωνικές διατομές, κατά τον EK2.

Ισοδύναμη διατομή: Από σχετικές πειραματικές έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι όταν η διατομή του εξεταζόμενου μέλους είναι συμπαγής, η στρεπτική ροπή παραλαμβάνεται μόνο από έναν λεπτό φλοιό σκυροδέματος στην εξωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου και τον οπλισμό (εγκάρσιο και διαμήκη οπλισμό στρέψεως). Επομένως, η λειτουργία της πλήρους διατομής προσεγγίζει εκείνη της κιβωτοειδούς. Οπότε, η αντίσταση μιας συμπαγούς διατομής σε στρέψη, γίνεται με την θεώρηση μιας ισοδύναμης λεπτότοιχης διατομής, της οποίας η διατμητική ροή πληροί τη συνθήκη ισορροπίας. Η ισοδύναμη διατομή (βλ. Σχήματα 2.9 και 2.10) ορίζεται ως εξής:

- Η εξωτερική περίμετρός της συμπίπτει με αυτήν της αρχικής (πραγματικής) διατομής.
- Το πάχος του τοιχώματός της παίρνει τιμή $t_{eff} = \max\left(\frac{A}{u}, 2\left(c + \varnothing_w + \frac{\varnothing_L}{2}\right)\right)$, όπου A είναι η συνολική επιφάνεια της διατομής εντός της εξωτερικής περιμέτρου, u είναι η εξωτερική περίμετρος, ίση με $u = 2(b + h)$ (βλ. σχήμα 2.10), c είναι η επικάλυψη των διαμήκων ράβδων οπλισμού, \varnothing_w είναι η διάμετρος των συνδετήρων και \varnothing_L είναι η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού.



Σχήμα 2.9 Ορισμός της ισοδύναμης διατομής όπως παρουσιάζεται στον ΕΚ2. (Πηγή ΕΚ2- EN 1992-1-1).



Σχήμα 2.10 Ορισμός της ισοδύναμης διατομής για την περίπτωση ορθογωνικής διατομής: (α) Αρχική διατομή, (β) Ισοδύναμη διατομή.

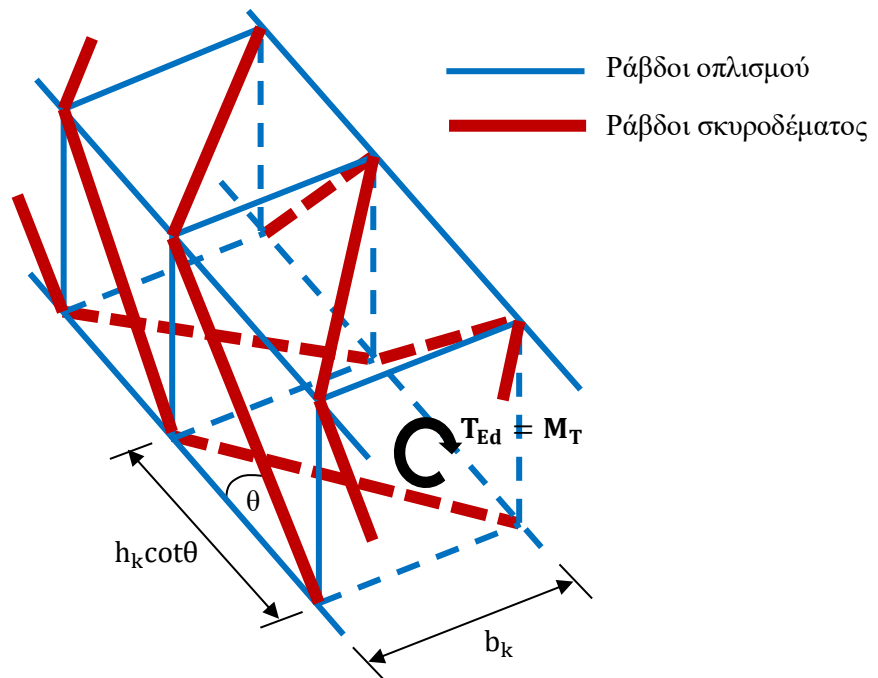
Οπλισμός στρέψεως: Σε ένα δομικό στοιχείο από Ο.Σ. το οποίο καταπονείται σε στρέψη, η δράση αυτή προκαλεί τη στροφή του περί τον διαμήκη άξονά του. Η στροφή αυτή δημιουργεί ένα σύστημα λοξών κυρίων θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων υπό γωνία 45° και 135° , που κατανέμονται ελικοειδώς γύρω από το δομικό στοιχείο.

Όταν στο επιπονούμενο σε στρέψη στοιχείο οι εφελκυστικές τάσεις υπερβούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, εμφανίζονται διαγώνιες ρηγματώσεις οι οποίες κατανέμονται ελικοειδώς στο δομικό στοιχείο, το οποίο συνήθως είναι δοκός. Συνεπώς, ο καταλληλότερος οπλισμός για την ανάληψη της καθαρής στρέψεως θα ήταν ελικοειδής, με διεύθυνση εκείνη των διανυσμάτων των εφελκυστικών τάσεων. Αυτό όμως δεν εφαρμόζεται στην πράξη, τόσο επειδή στους φορείς συνήθως υπάρχει συνδυασμός διαφόρων δράσεων, ή οι στρεπτικές ροπές ασκούνται με εναλλασσόμενο πρόσημο, όσο και λόγω κινδύνου λανθασμένης τοποθέτησης των περιελίξεων του οπλισμού στο εργοτάξιο.

Επομένως οι διατομές οπλίζονται με κατακόρυφους κλειστούς συνδετήρες και διαμήκεις ράβδους, σχηματίζοντας ένα πλέγμα ορθογωνίως τεμνόμενων οπλισμών. Αυτό το πλέγμα παραλαμβάνει δυνάμεις λόγω αυξημένης στρεπτικής ροπής στο φορέα μετά τη ρηγματώση του σκυροδέματος, επομένως αστοχία μπορεί να προκύψει με την υπέρβαση του ορίου διαρροής του.

Το χωρικό μοντέλο δικτυώματος: Σε ένα δομικό στοιχείο από Ο.Σ. (π.χ. δοκός) κατά την επιπόνηση σε στρέψη, θεωρείται ότι δημιουργείται ένα εσωτερικό φέρων σύστημα, που μπορεί να προσομοιωθεί αρκετά ικανοποιητικά με μια γενίκευση του μοντέλου του δικτυώματος Moersch στον χώρο. Το

δικτύωμα αυτό αποτελείται από θλιβόμενες διαγωνίους σκυροδέματος και εφελκόμενες ράβδους, που αντιστοιχούν στους συνδετήρες και τους διαμήκεις οπλισμούς στρέψης που είναι κατανομημένοι στην περίμετρο ή τις γωνίες της διατομής αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 2.11). Η κλίση θ των θλιβομένων διαγωνίων σκυροδέματος σε σχέση με τον διαμήκη άξονα της δοκού παίρνει τιμές $22^\circ < \theta \leq 45^\circ$.



Σχήμα 2.11 Το χωρικό μοντέλο δικτυώματος για τον υπολογισμό σε στρέψη κατά ΕΚ2.

Η αντοχή ενός γραμμικού μέλους σε καθαρή στρέψη T_{Ed} καθορίζεται με βάση ποιά από τα δύο υλικά (το σκυροδέμα ή οι ράβδοι) θα αστοχήσει πρώτο. Επομένως διακρίνεται σε στρεπτική ροπή αντοχής λόγω της αστοχίας του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη T_{Rd1} , και σε στρεπτική ροπή αντοχής λόγω αστοχίας του οπλισμού στρέψεως. Αυτή η ροπή αντοχής υπολογίζεται είτε με βάση τη ποσότητα των συνδετήρων που θα παραλάβουν τις διατμητικές τάσεις που προκαλεί η στρεπτική καταπόνηση T_{Rd2} είτε με τη ποσότητα των διαμήκων ράβδων που συνεισφέρουν σε στρέψη T_{Rd3} .

Η στρεπτική ροπή αντοχής σε καθαρή στρέψη, λόγω της αστοχίας του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη ορίζεται ως:

$$T_{Rd1} = 2v_1 a_{cw} f_{cd} t_{eff} A_k \sin \theta \cos \theta \quad (2.8)$$

όπου

v_1 είναι ο δείκτης μείωσης της αντοχής σκυροδέματος ρηγματωμένου λόγω διάτμησης. Η συνιστώμενη τιμή από τον ΕΚ2 είναι $v_1 = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$.

$a_{cw} = 1.00$,

f_{cd} = η τιμή της θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού, με $a_{cc} = 1.00$,

t_{eff} είναι το πάχος της ισοδύναμης λεπτότοιχης διατομής,

A_k είναι το εμβαδόν που περικλείεται από τη μέση γραμμή των επιμέρους τοιχωμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των (όποιων) εσωτερικών κενών,

θ είναι η γωνία των λοξών θλιπτήρων.

Η στρεπτική ροπή αντοχής σε καθαρή στρέψη λόγω αστοχίας των συνδετήρων ορίζεται ως:

$$T_{Rd2} = 2A_k \left(\frac{A_{sw}}{s_w} \right) f_{ywd} \cot\theta \quad (2.9)$$

όπου

A_{sw} είναι το συνολικό εμβαδόν των σκελών των συνδετήρων

s_w είναι η απόσταση των συνδετήρων

Η στρεπτική ροπή αντοχής σε καθαρή στρέψη λόγω αστοχίας του διαμήκους οπλισμού ορίζεται ως:

$$T_{Rd3} = 2 \left(\frac{\sum A_{sl}}{u_k} \right) A_k f_{yd} \cot\theta \quad (2.10)$$

Όπου

$\sum A_{sl}$ είναι το συνολικό εμβαδόν των ράβδων του διαμήκους οπλισμού στρέψης,

u_k είναι η περίμετρος της περιοχής με εμβαδόν A_k .

Υπολογισμός της γωνίας θ :

Τα προτεινόμενα όρια από τον ΕΚ2 είναι $22^\circ < \theta \leq 45^\circ$. Τυπικά η γωνία θ λαμβάνεται ίση με 45° , καθώς αυτή η τιμή οδηγεί στην μεγιστοποίηση της T_{Rd1} και την ελαχιστοποίηση του συνολικού απαιτούμενου οπλισμού (Grasser). Η μόνη περίπτωση που θα μπορούσε να ληφθεί $\theta \neq 45^\circ$ είναι αν οι συνδετήρες που προκύπτουν είναι πυκνοί και είναι επιθυμητή η μείωσή τους, αυξάνοντας τον διαμήκη οπλισμό. Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι μειώνοντας τη θ , μειώνεται το A_{sw} και αυξάνεται το A_{sl} .

Κατασκευαστικές διατάξεις οπλισμών

- Ο διαμήκης οπλισμός στρέψεως θα πρέπει να αποτελείται από μία τουλάχιστον ράβδο σε κάθε γωνία της εγκάρσιας διατομής του φορέα, ενώ οι υπόλοιπες πρέπει να είναι κατανομημένες εντός της εσωτερικής περιμέτρου των συνδετήρων και ανά αποστάσεις $s_l \leq 350mm$.
- Η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού στις γωνίες συνιστάται, όπως έχει αποδειχτεί βάσει σχετικών ερευνών (Mitchel et al, 1971), να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το 1/16 της απόστασης των συνδετήρων s_w , ώστε να αποφευχθεί τυχόν θραύση των ακμών του δομικού στοιχείου λόγω στρέψεως.
- Οι συνδετήρες στρέψεως θα πρέπει να είναι κλειστοί και καλά αγκυρωμένοι με υπερκάλυψη ή άγκιστρα άκρων, τοποθετημένοι κάθετα στον άξονα του δομικού στοιχείου ανά αποστάσεις μικρότερες ή ίσες της τιμής $u_k/8$ ή της μικρότερης διάστασης της διατομής του.
- Ως ελάχιστο ποσοστό οπλισμού στρέψεως για κάθε περίπτωση, δηλαδή, διαμήκους οπλισμού $\rho_l = a_{sl}/t_k$ και συνδετήρων $\rho_w = a_{sw}/t_k$ ορίζεται το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού διάτμησης δοκών $\rho_{min} = 0.08\sqrt{f_{ck}/f_{yk}}$.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στη γενική περίπτωση, η δοκιμή της στρέψης έχει ως σκοπό την μελέτη στις συμπεριφοράς των δοκιμίων σε στρεπτική καταπόνηση και των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της δοκιμής. Αυτά περιλαμβάνουν τις τάσεις διαρροής και θραύσης, καθώς και την κατασκευή του διαγράμματος στρέψης (ροπές στρέψης–γωνίες στροφής), από το οποίο υπολογίζεται το μέτρο διάτμησης G του υλικού.

Πιο συγκεκριμένα όμως στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η δοκιμή της στρέψης έχει ως σκοπό τη διερεύνηση της στρεπτικής αντοχής ελαφρά οπλισμένης δοκού ορθογωνικής διατομής από Ο.Σ.. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίνονται με τους θεωρητικούς υπολογισμούς και ειδικότερα τους υπολογισμούς της ροπής αντοχής σε στρέψη δοκών ορθογωνικής διατομής. Ζητούμενο είναι το κατά πόσον τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις θεωρητικές λύσεις. Επιπλέον διερευνάται και η επιρροή του διαμήκους και του εγκάρσιου οπλισμού στη στρεπτική αντοχή δοκών ορθογωνικής διατομής.

3.1 Έλεγχοι ποιότητας υλικών

Στην πράξη, θα πρέπει πάντοτε πριν από κάθε πείραμα να γίνει ο έλεγχος ποιότητας των υλικών του, προκειμένου να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα.

3.1.1 Έλεγχος θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος υπολογίζεται από τη μέγιστη θλιπτική δύναμη σε μονοαξονική επιπόνηση, την οποία μπορούν να παραλάβουν τα δοκίμια ελέγχου μέχρι τη θραύση τους. Η δοκιμή πραγματοποιείται με τη μηχανή κεντρικής θλίψης (βλ. Εικόνα 3.1) όπου εφαρμόζεται μέσω μεταλλικών πλακών ειδικής πρέσας δύναμη F κάθετα στην επιφάνεια A του δοκιμίου. Η φόρτιση αυξάνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι τη θραύση και ολοκληρώνεται συνήθως σε 1 με λεπτά περίπου για να χαρακτηριστεί ως βραχυχρόνια.

Η προκύπτουσα πειραματικά θλιπτική αντοχή f_c του σκυροδέματος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Μεταξύ των θλιπτικών αντοχών κυβικών δοκιμίων ακμής 200mm ($f_{ck,200}$) και κυβικών δοκιμίων ακμής 150mm ($f_{ck,cube}$) ισχύει η σχέση:

$$f_{ck,200} = 0.95 f_{ck,cube} \quad (3.2)$$

Υπολογισμοί για το δοκίμιο του πειράματος

Για τον έλεγχο ποιότητας του σκυροδέματος της δοκού, δοκιμάζεται σε μονοαξονική θλίψη ένα κυβικό δοκίμιο ποιότητας C16/20, διαστάσεων 200x200x200mm, συντήρησης 28 ημερών στη μηχανή κεντρικής θλίψης στο Εργαστήριο Σκυροδέματος ΠΑΔΑ (βλ. Εικόνα 3.1).

Τα αποτελέσματα θραύσης κυβικού δοκιμίου 200x200x200mm σκυροδέματος φαίνονται στην Εικόνα 3.2 από όπου προκύπτει ότι η δύναμη αντοχής είναι $F = 705 \text{ kN}$. Το εμβαδόν του δοκιμίου είναι $A = 200 \times 200 \text{ mm}^2$. Σύμφωνα με την εξίσωση 3.1, η προκύπτουσα πειραματικά θλιπτική αντοχή f_c του σκυροδέματος είναι ίση με:

$$f_c = \frac{F}{A} = \frac{705 \text{ kN}}{200 \times 200 \text{ mm}^2} = \frac{705000 \text{ N}}{200 \times 200 \text{ mm}^2} = 17.63 \text{ MPa}$$



Εικόνα 3.1 Η μηχανή κεντρικής θλίψης για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος, Εργαστήριο Σκυροδέματος ΠΑΔΑ.



Εικόνα 3.2 Αποτελέσματα θραύσης κυβικού δοκιμίου 200x200x200mm, F 00705 KN, S 01.10mm, Εργαστήριο Σκυροδέματος ΠΑΔΑ.

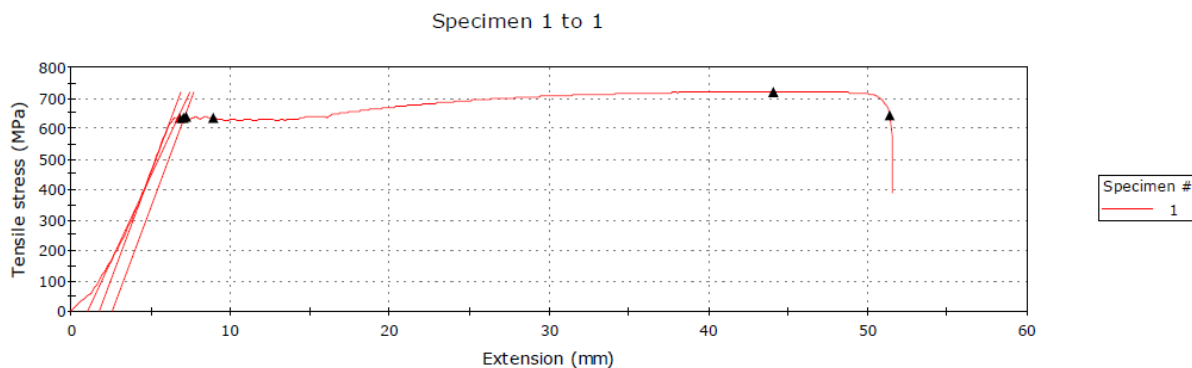
Το σκυρόδεμα των δοκών είναι κατηγορίας C16/20, επομένως, $f_{ck,cube} = 20$ MPa. Επειδή το δοκίμιο που ελέγχθηκε είναι κυβικό δοκίμιο διαστάσεων 200x200x200mm, σύμφωνα με την εξίσωση 3.2 θα είναι $f_{ck,200} = 0.95f_{ck,cube} = 0.95 \cdot 20$ MPa = 19 MPa. Επομένως η πειραματική τιμή $f_c = 17.63$ MPa και η χαρακτηριστική τιμή $f_{ck,200} = 19$ MPa είναι πολύ κοντά. Βασιζόμενοι σε ένα δοκίμιο μόνο (παραδοχή) ο έλεγχος ποιότητας για το σκυρόδεμα καλύπτεται.

3.1.2 Έλεγχος σε εφελκυσμό δείγματος χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος.

Η εφελκυστική αντοχή του χάλυβα υπολογίζεται από την εφελκυστική τάση διαρροής του σε μονοαξονική επιπόνηση. Αφού το δοκίμιο στερεοποιείται στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, αυτή επιβάλλει προγραμματισμένη τόσο σε εύρος όσο και ρυθμό μετακίνηση, ενώ καταγράφονται ταυτοχρόνως τα φορτία και οι μετακινήσεις και αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με την μηχανή.

Για τον έλεγχο ποιότητας του χάλυβα οπλισμού, δοκιμάζεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό μία ράβδος οπλισμού Φ8, ποιότητας B500C με νευρώσεις. Ο έλεγχος έγινε στο εργαστήριο ΚΕΔΕ σύμφωνα με τον ΚΤΧ 2008 και τα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080 και ΕΛΟΤ 1421-3. Της δοκιμής εφελκυσμού προηγήθηκε η μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμίου για τον υπολογισμό της μάζας ανά μήκος και της πραγματικής διατομής.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 (διάγραμμα σ-ε) και στον Πίνακα 3.1.



Specimen label	Mass in gram (gr)	Length (mm)	Mass/Length (gr/mm)	Real Specimen Area (mm ²)	Nominal Diameter (mm)	Nominal Specimen Area (mm ²)	Tensile stress at Yield (MPa)	Max. Tensile stress (MPa)	Maximum Load (kN)	Modulus (E-modulus) (GPa)	fst/fy	Ag (%)	Agt (%)	
1	X.O.Σ. B500C	236	589	0.401	51.0	8	50.3	628	716	36	45	1.14	-	-

Παρατήρηση: Η επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο, Agt, μετρήθηκε με το χέρι μετά τη δοκιμή εφελκυσμού

Σχήμα 3.1 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του δοκιμίου χάλυβα οπλισμού και ο πίνακας των μετρούμενων ιδιοτήτων του.

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού κατά ΕΛΟΤ EN ISO 15630-1:2019.

	Όνομ. D (mm)	Μάζα ανά μήκος (gr/mm)	Όνομ. μάζα ανά μήκος (gr/mm)	Πραγμ. A (mm ²)	Όνομ. A (mm ²)	fy (MPa)	ft (MPa)	ft/fy	fy/fy, nom	Agt (%)
1	8	0.401	0.395	51.0	50.3	628	716	1.14	1.26	14

Όπως προκύπτει, η πειραματική τιμή της τάσης διαρροής είναι $f_y = 628$ MPa, η οποία είναι κοντά με την ονομαστική τιμή της $f_y = 500$ MPa. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1, οι πειραματικές

τιμές της μάζας ανά μήκος, του εμβαδού διατομής A και του λόγου τάσης διαρροής προς την εφελκυστική αντοχή f_y/f_t είναι πολύ κοντά με τις αντίστοιχες ονομαστικές.

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται στην τάση διαρροής ως το όριο στο οποίο ισχύει ο νόμος του Hooke. Δηλαδή, από το διάγραμμα σ - ε (βλ. Σχήμα 3.1), στη διαρροή είναι τάση $\sigma = f_y = 628 \text{ MPa}$ και επιμήκυνση $\Delta l \approx 8 \text{ mm}$. Το αρχικό μήκος του δοκιμίου είναι $l_0 = 589 \text{ mm}$. Προκύπτει μέτρο ελαστικότητας $E_s = 45 \text{ GPa}$, το οποίο απέχει σημαντικά από το αναμενόμενο $E_s = 200 \text{ GPa}$. Ωστόσο αβεβαιότητες κατά τη διάρκεια του πειράματος υπάρχουν, καθώς και υπάρχει η περίπτωση το δοκίμιο να έχει κάποιο ελάττωμα. Στην πράξη για τον έλεγχο ποιότητας γίνεται με περισσότερα του ενός δοκίμια και αξιολογούνται στατιστικά ο μέσος και η τυπική απόκλισή τους. Επομένως το ένα δοκίμιο που ελέγχθηκε δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό, αλλά στα πλαίσια της εργασίας αυτής θεωρείται ότι ο οπλισμός ικανοποιεί τους ελέγχους ποιότητας.

3.2 Διάταξη δοκιμής στρέψης

Η διάταξη με την οποία πραγματοποιείται το πείραμα της στρέψης φαίνεται στην Εικόνα 3.3 και περιλαμβάνει:

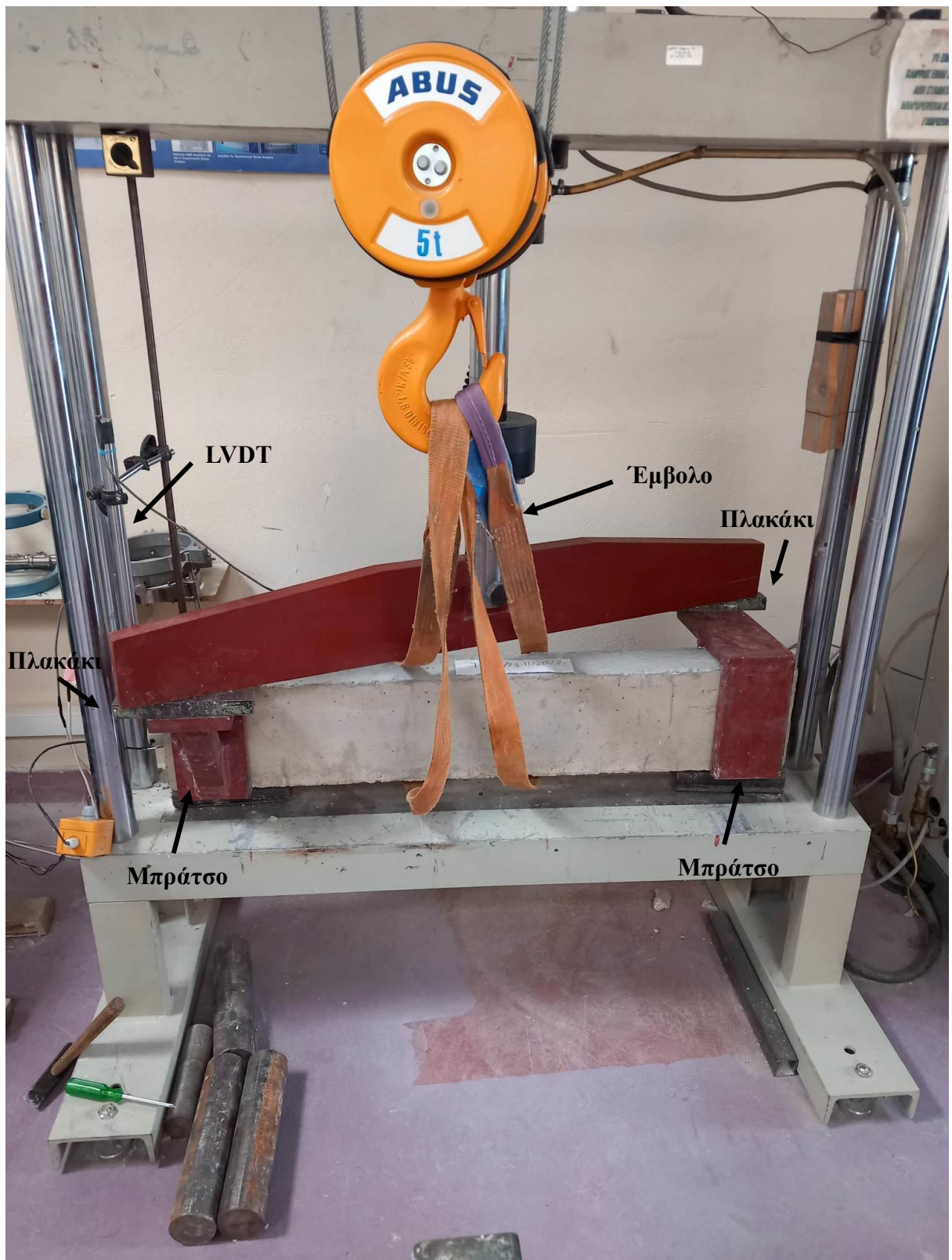
- Έμβολο άσκησης δύναμης
- Πλακάκια
- Μπράτσα
- Αισθητήρα μετατόπισης: Γραμμικό μεταβλητό διαφορικό μετασχηματιστή (LVDT)

Αρχικά στην ορθογωνική δοκό τοποθετούνται στα άκρα της τα 2 μπράτσα, των οποίων τα πτερύγια είναι τοποθετημένα σε αντίθετες πλευρές, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.4. και 3.5. Στη συνέχεια η δοκός μεταφέρεται και τοποθετείται στο έμβολο. Πάνω στα πτερύγια των μπράτσων τοποθετούνται τα πλακάκια και σε ένα εξ αυτών τοποθετείται και η μετρητική διάταξη LVDT όπως διακρίνεται στην Εικόνα 3.6. Σε αυτό το σημείο, το πείραμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει.

Το έμβολο είναι τοποθετημένο έκκεντρα ως προς το γεωμετρικό κέντρο της δοκού και έχει ενσωματωμένους 2 κλάδους οι οποίοι εφαρμόζονται πάνω στα πλακάκια. Η διάταξη αυτή του πειράματος της στρέψης λειτουργεί εφαρμόζοντας μία γνωστή δύναμη F μέσω του εμβόλου, η οποία διαμοιράζεται μέσω των 2 κλάδων του και ασκείται ως $F/2$ σε κάθε πλακάκι. Αυτή η δύναμη μεταφέρεται ομοιόμορφα από κάθε πλακάκι στο πτερύγιο του κάθε μπράτσου, με αποτέλεσμα την κατακόρυφη μετακίνησή του, δημιουργώντας στρεπτική ροπή M_x στα άκρα της δοκού.

Η μηχανή του εμβόλου είναι αυτόματη και επιβάλει προγραμματισμένη τόσο σε εύρος όσο και ρυθμό μετακίνηση, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται τα φορτία και αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με την μηχανή. Ομοίως, η κατακόρυφη μετακίνηση καταγράφεται ταυτόχρονα με τη δύναμη, μέσω του LVDT (Linear Variable Displacement Transducer).

Τα σχέδια της πειραματικής διάταξης με τις αντίστοιχες διαστάσεις φαίνονται στα Σχήματα 3.2-3.5, όπου το Σχήμα 3.2 είναι ένα τρισδιάστατο σχέδιο της διάταξης με την οποία πραγματοποιείται το πείραμα της στρέψης, τα Σχήματα 3.3 και 3.4 δείχνουν τις όψεις, κατόψεις και διατομές του πλακιδίου και του μπράτσου αντίστοιχα και τέλος, το Σχήμα 3.5 δείχνει τις όψεις και την κάτοψη της πειραματικής διάταξης στρέψεως.



Εικόνα 3.3 Η διάταξη με την οποία πραγματοποιείται το πείραμα της στρέψης.



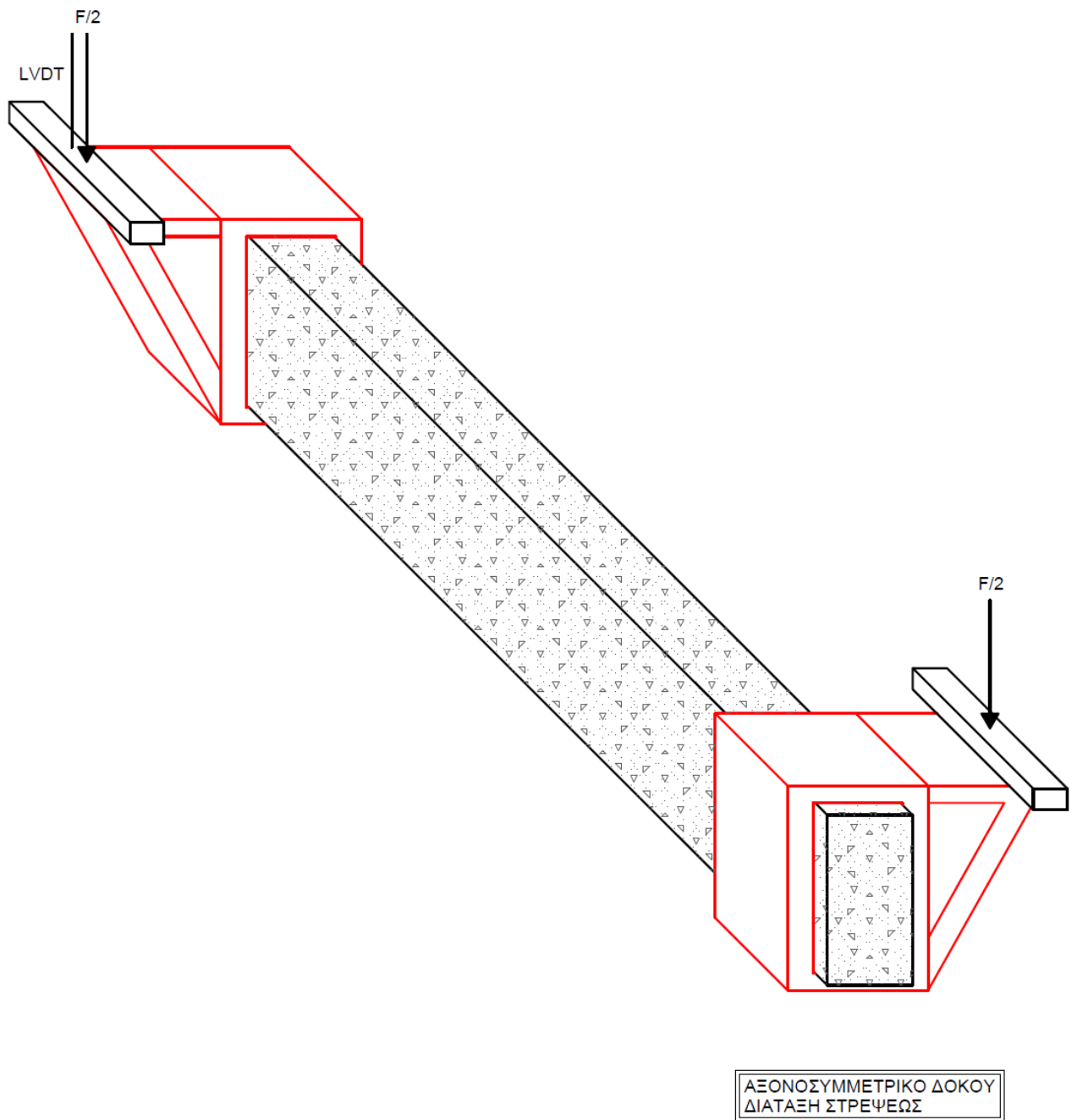
Εικόνα 3.4 Η τοποθέτηση των 2 μπράτσων στις δοκούς. Στο βάθος διακρίνεται και το έμβολο που χρησιμοποιείται στη διάταξη της στρέψης.



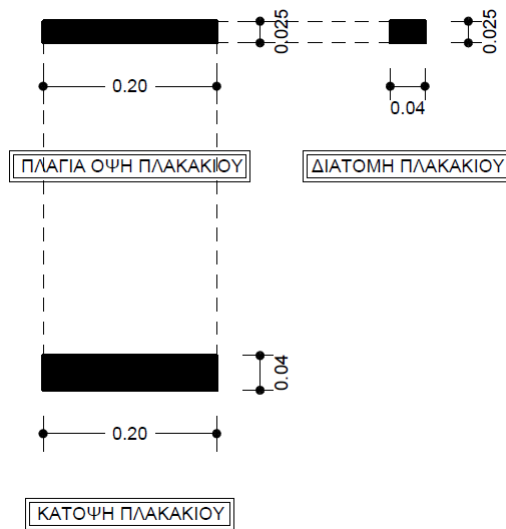
Εικόνα 3.5 Όψη του ενός άκρου της δοκού με το μπράτσο τοποθετημένο σε αυτήν.



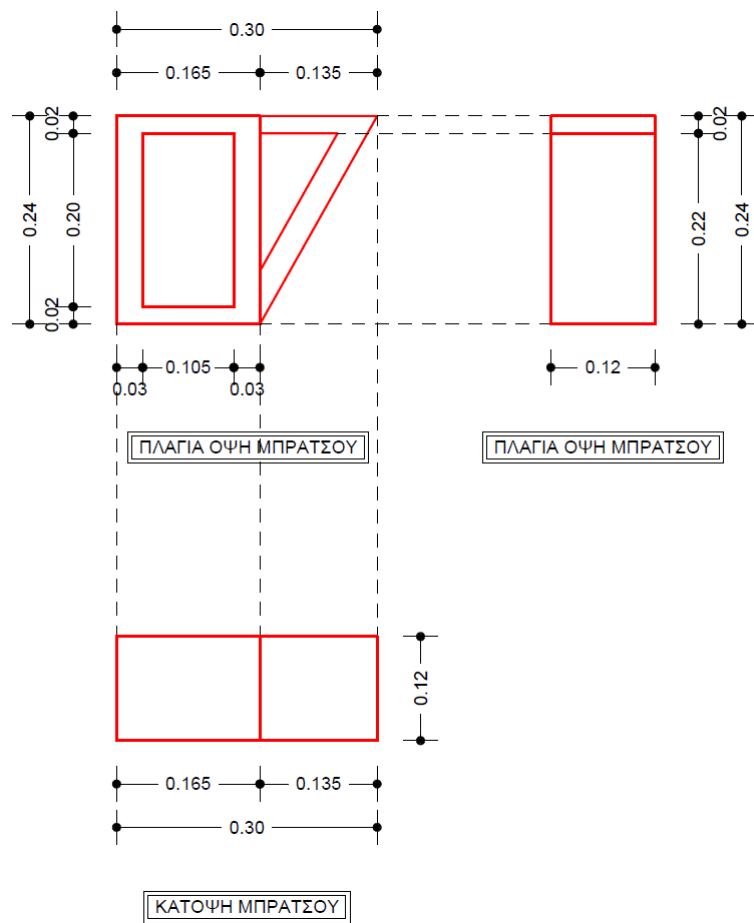
Εικόνα 3.6 Λεπτομέρεια της πειραματικής διάταξης. Διακρίνονται το μπράτσο, το πλακάκι, ο ένας κλάδος του εμβόλου και ο αισθητήρας LVDT.



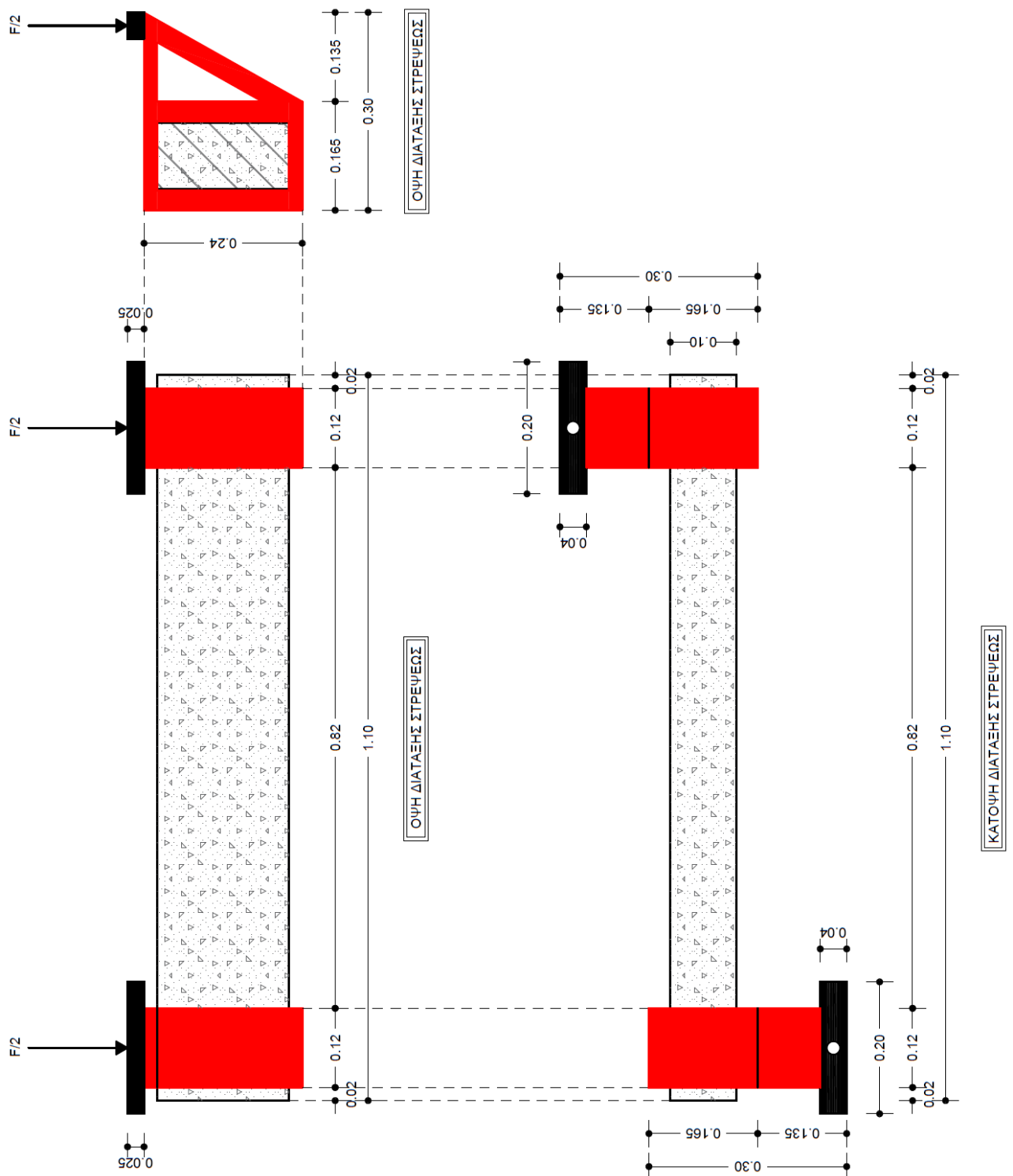
Σχήμα 3.2 Τρισδιάστατο σχέδιο της διάταξης με την οποία πραγματοποιείται το πείραμα της στρέψης.



Σχήμα 3.3 Οι διαστάσεις του πλακακιού.



Σχήμα 3.4 Οι διαστάσεις του μπράτσου.



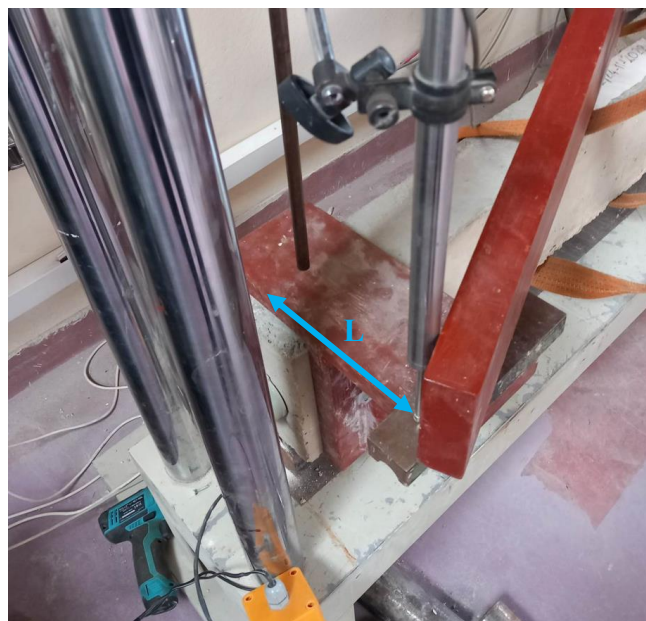
Σχήμα 3.5 Η διάταξη της στρέψης με τις διαστάσεις της και την εφαρμογή της στη δοκό του πειράματος.

3.3 Δοκιμή στρέψης ελαφρά οπλισμένων δοκών Ο.Σ.

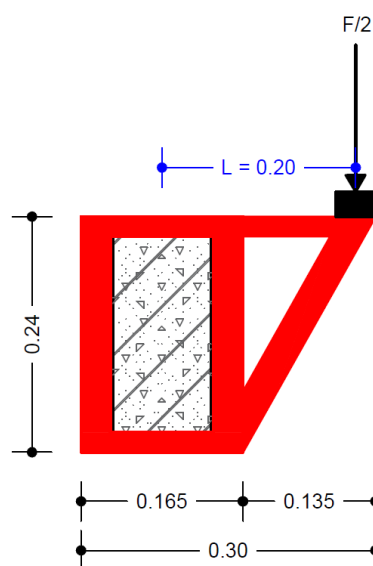
Οι 2 δοκοί που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1.3 υποβάλλονται στη δοκιμή στρέψεως με τη διάταξη που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.2 και υπολογίζονται τα διαγράμματα ροπής-στροφής τους, $M_x - \varphi$.

Μέτρηση μεγεθών και υπολογισμός της στρεπτικής ροπής και της γωνίας στροφής.

Όπως αναφέρθηκε, τα μεγέθη τα οποία υπολογίζονται από τη διάταξη στρέψεως είναι η δύναμη που ασκείται από το έμβολο και η κατακόρυφη μετατόπιση του πτερυγίου του μπράτσου. Από αυτά τα 2 μεγέθη υπολογίζονται η ροπή στρέψης M_x και η γωνία στροφής φ . Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με βάση τη γεωμετρία της διάταξης και τις θέσεις των μηχανημάτων. Προσεγγιστικά θεωρείται ότι το σημείο εφαρμογής της δύναμης συμπίπτει με τη θέση μέτρησης του LVDT. Επομένως, υπολογίζεται ο μοχλοβραχίονας της δύναμης ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της δοκού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7 και το Σχήμα 3.6, $L = 0.20m$.



Εικόνα 3.7 Ο μοχλοβραχίονας L στην πράξη.



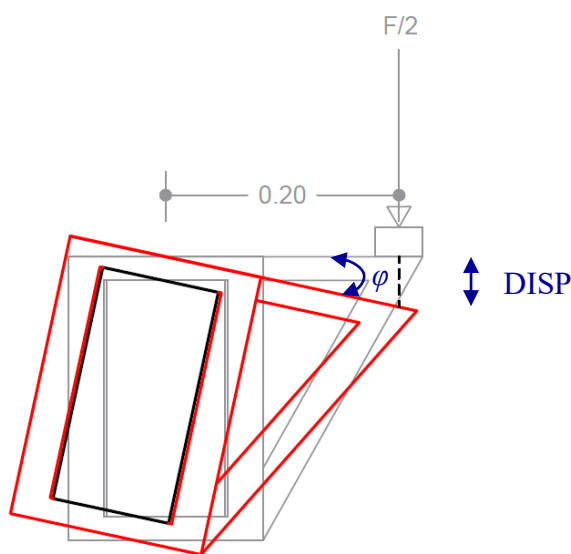
Σχήμα 3.6 Ο μοχλοβραχίονας L όπως υπολογίζεται με βάση τις διαστάσεις της διάταξης.

Με βάση την Εικόνα 3.7 και το Σχήμα 3.6, η ροπής στρέψης υπολογίζεται ως:

$$M_x = \frac{F}{2}L$$

Κατά τη διάρκεια του πειράματος το μπράτσο στρέφει τη διατομή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 και καταγράφεται η κατακόρυφη μετακίνηση DISPL. Το μπράτσο δεν παραμορφώνεται από τη δύναμη, επομένως και στην κατάσταση στην οποία έχει περιστραφεί η δοκός, ο μοχλοβραχίονας μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένει ίσος με $L = 0.20m$. Επομένως η γωνιάς στροφής φ μπορεί να υπολογιστεί γεωμετρικά ως:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{DISP}{L}\right)$$



Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Η κάθε δοκός φορτίζεται με σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία της και καταγράφονται ο πειραματικός χρόνος (elapsed time sec), το φορτίο ανα μονάδα χρόνου (Load kN) και η παραμόρφωση (Display mm) η οποία μετρείται με τη συσκευή LVDT.

Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.8-3.10 και στα Σχήματα 3.8-3.11. Η Εικόνα 3.8 δείχνει την αρχή της αστοχίας με την εμφάνιση ρωγμών κοντά στο αριστερό άκρο της δοκού κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η Εικόνα 3.9 δείχνει την αστοχία της δοκού με θραύση του σκυροδέματος κοντά στο αριστερό άκρο της και η Εικόνα 3.10 δείχνει τη δοκό μετά την αστοχία της.

Μετά από κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτουν για κάθε δοκό τα διαγράμματα δύναμης-γωνιάς στροφής, $F - \varphi$ και στρεπτικής ροπής-γωνιάς στροφής, $M_x - \varphi$. Τα Σχήματα 3.8 και 3.9 δείχνουν τα διαγράμματα $F - \varphi$ και $M_x - \varphi$ αντίστοιχα για τη δοκό V1 (βλ. Πίνακας 1.1), ενώ Τα Σχήματα 3.10 και 3.11 δείχνουν τα διαγράμματα $F - \varphi$ και $M_x - \varphi$ αντίστοιχα για τη δοκό V2 (βλ. Πίνακας 1.1).



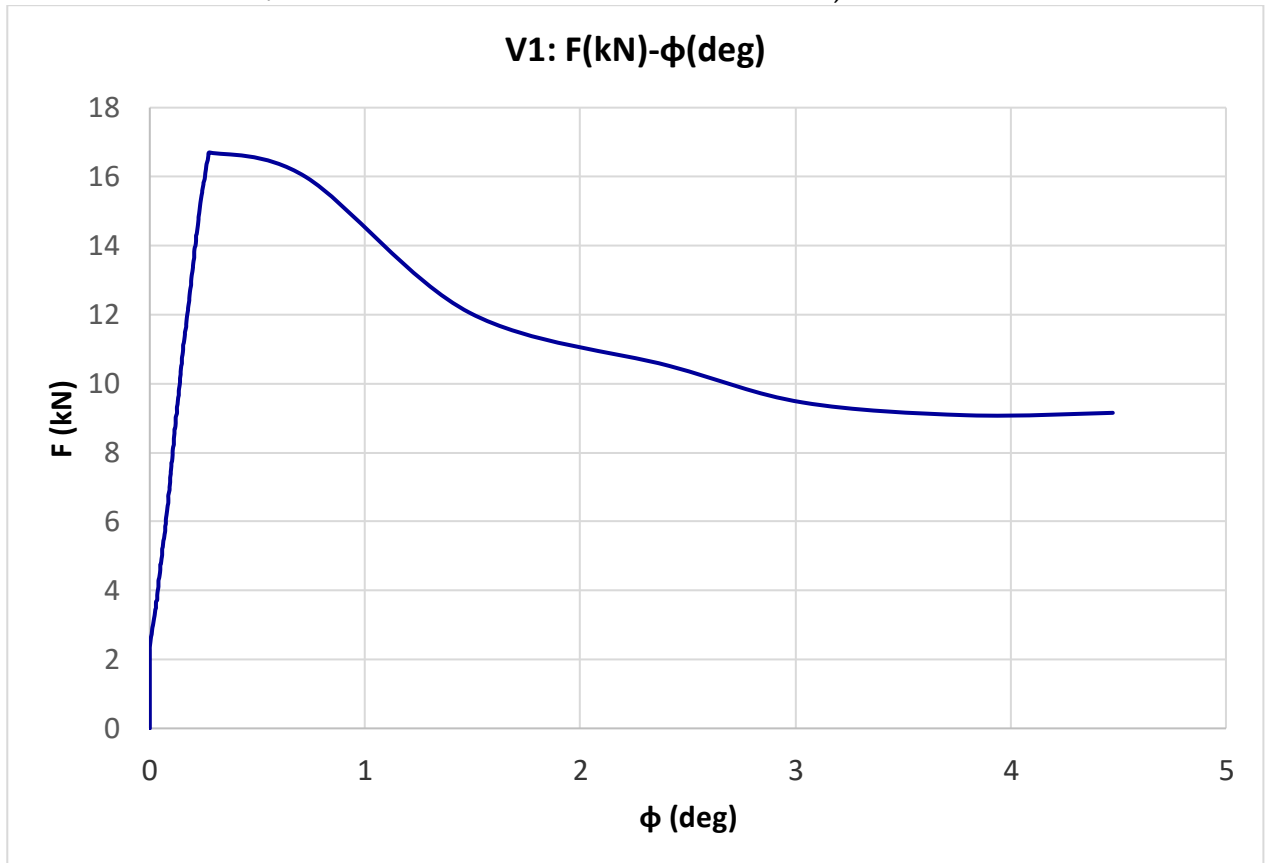
Εικόνα 3.8 Εμφάνιση ρωγμών κοντά στο αριστερό άκρο της δοκού κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



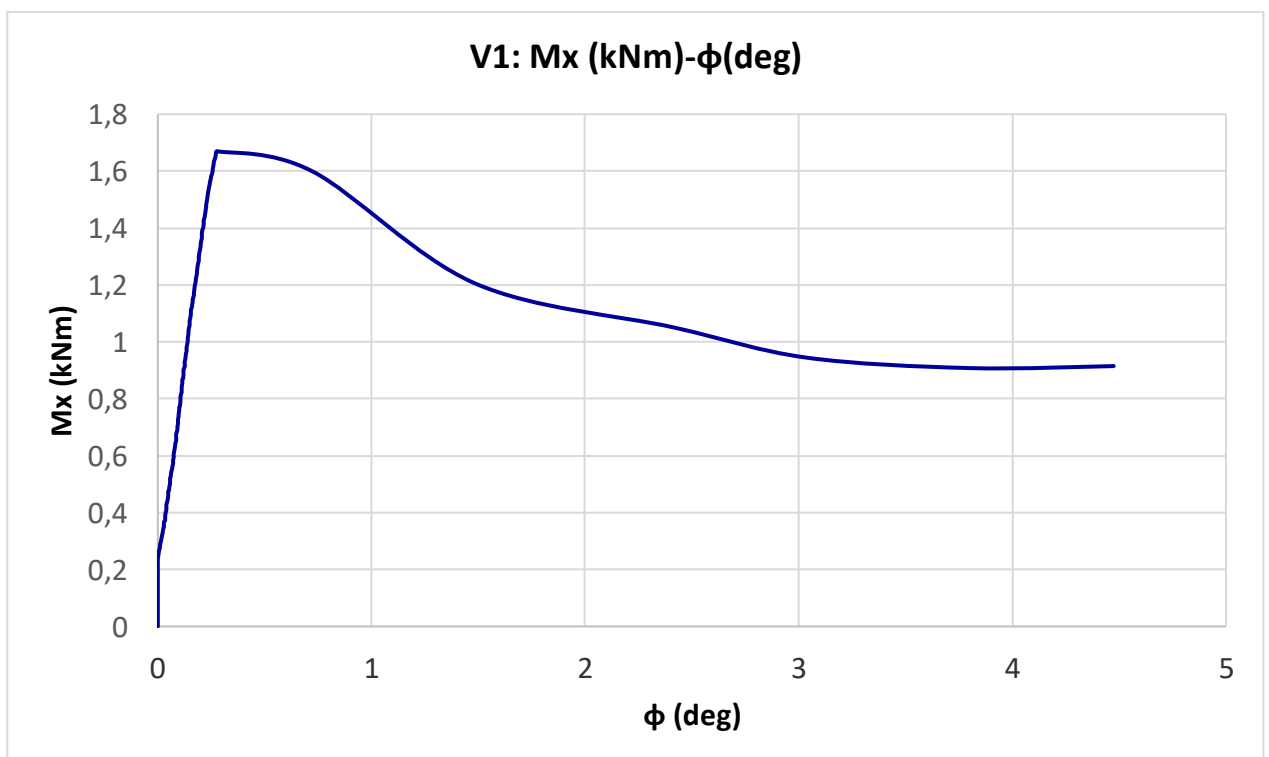
Εικόνα 3.9 Αστοχία της δοκού με θραύση του σκυροδέματος κοντά στο αριστερό άκρο της.



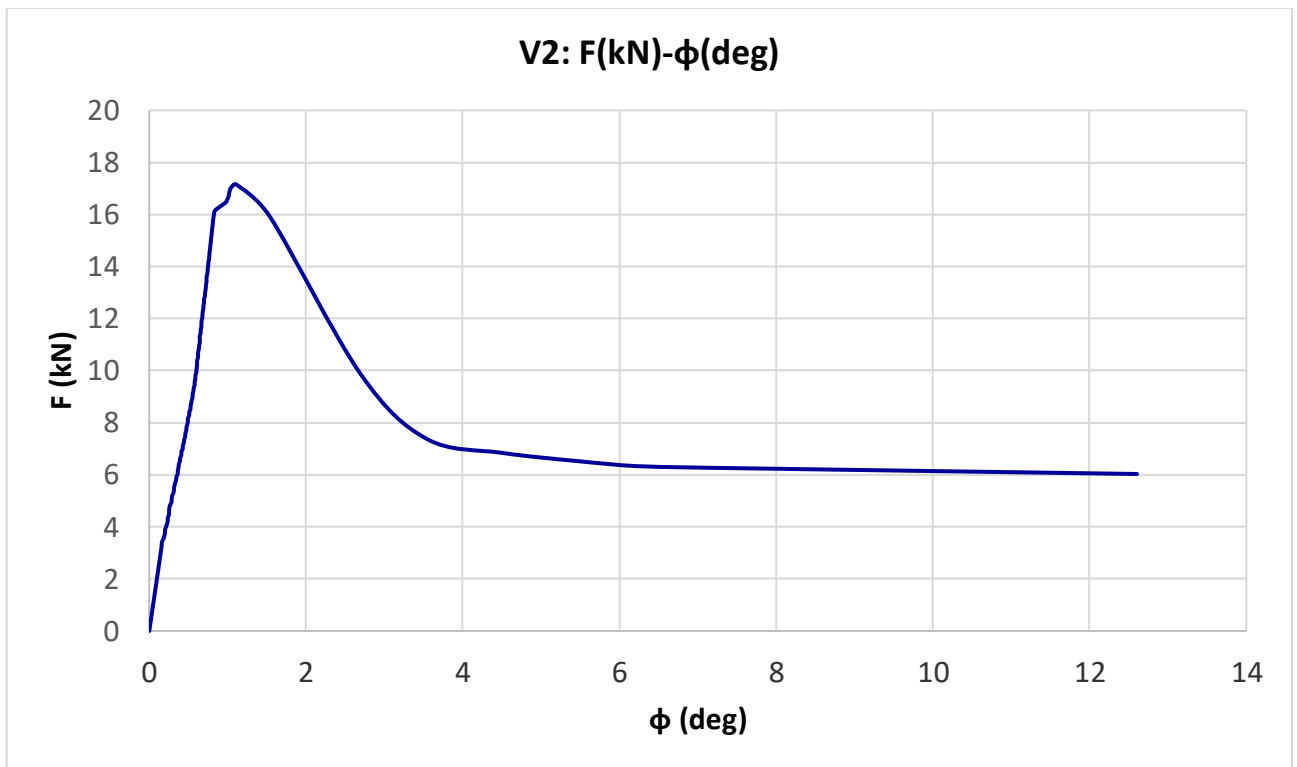
Εικόνα 3.10 Η δοκός μετά την αστοχία της.



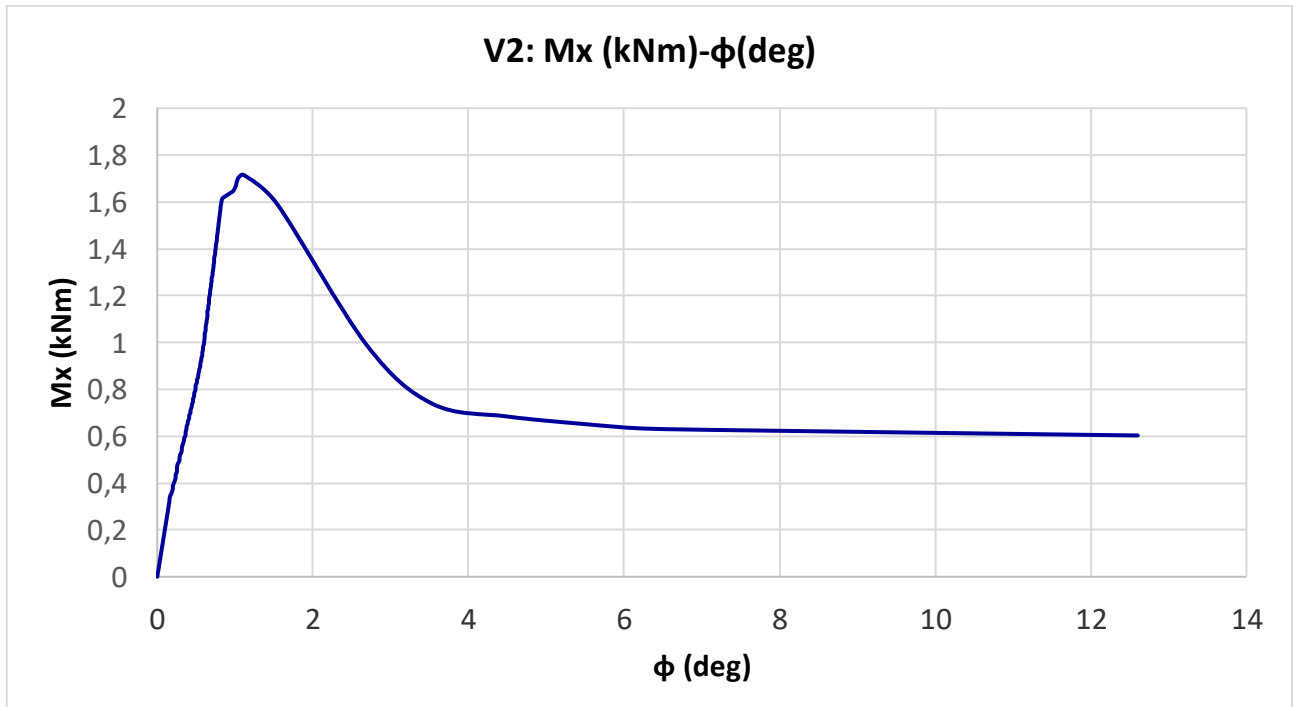
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα δύναμης-γωνίας στρώσης $F - \varphi$ για τη δοκό V1.



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα ροπής-γωνίας στρώσης $M_x - \varphi$ για τη δοκό V1.



Σχήμα 3.10 Διάγραμμα δύναμης-γωνίας στρωφής $F - \varphi$ για τη δοκό V2.



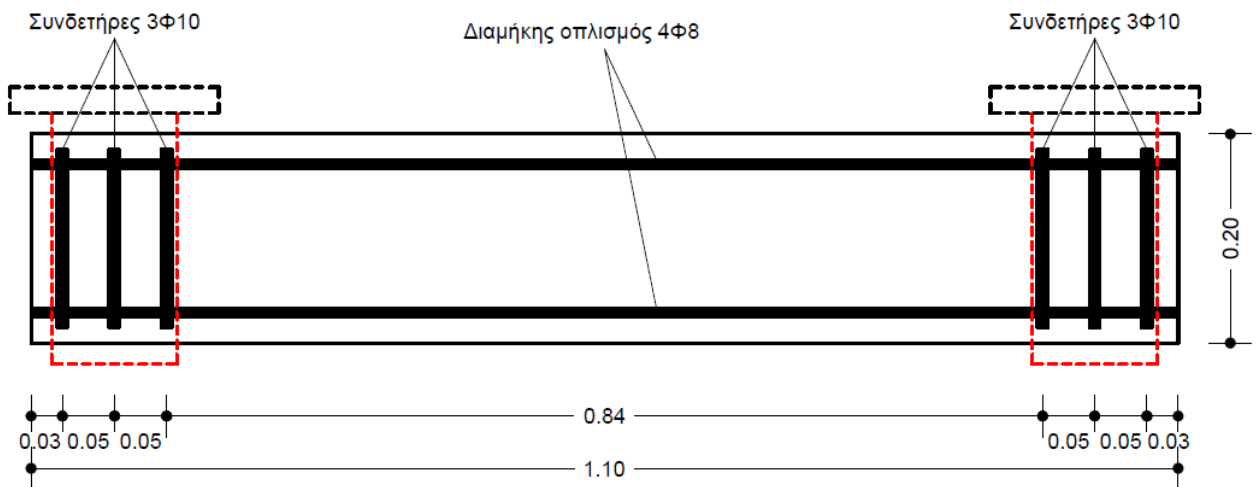
Σχήμα 3.11 Διάγραμμα ροπής-γωνίας στρωφής $M_x - \varphi$ για τη δοκό V2.

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

4.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί με βάση τον ΕΚ2

Ο θεωρητικός υπολογισμός της ροπής αντοχής γίνεται με τις εξισώσεις 2.8-2.10. Ωστόσο, λόγω της διάταξης του οπλισμού στην δοκό (βλ. Σχήμα 4.1) προκύπτουν οι εξής παραδοχές:

- Ο εγκάρσιος οπλισμός (συνδετήρες) εκτείνεται μόνο μέσα στα μπράτσα. Επομένως το τμήμα της δοκού το οποίο υποβάλλεται σε καθαρή στρέψη δεν έχει συνδετήρες και η T_{Rd2} δεν μπορεί να θεωρηθεί ροπή αντοχής σε στρέψη.
- Ο διαμήκης οπλισμός δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο, με αποτέλεσμα να μην λειτουργεί αποδοτικά στη στρέψη. Επομένως δεν θεωρείται ότι συμβάλει στην αντοχή (είναι ουσιαστικά κατασκευαστικός) και η T_{Rd3} δεν μπορεί να θεωρηθεί ροπή αντοχής σε στρέψη.



Σχήμα 4.1 Διάταξη των οπλισμών στη δοκό σε σχέση με τα τοποθετημένα μπράτσα.

Επομένως, η θεωρητική τιμή ροπής αντοχής της δοκού θα θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε αστοχία του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη και θα υπολογιστεί με βάση την εξίσωση 2.8:

$$T_{Rd1} = 2v_1\alpha_{cw}f_{cd}t_{eff}A_k \sin \theta \cos \theta$$

όπου

- $v_1 = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ (Κατά ΕΚ2). Για σκυρόδεμα C 16/20, $f_{ck} = 16$ MPa. Οπότε θα είναι

$$v_1 = 0.6 \left(1 - \frac{16}{250}\right) = 0.6 \left(1 - \frac{16}{250}\right) = 0.5616$$

- θ είναι η γωνία των λοξών θλιπτήρων
- $\alpha_{cw} = 1.00$,
- f_{cd} = η τιμή της θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού, με $\alpha_{cc} = 1.00$. Όμως, επειδή η θεωρητική τιμή υπολογίζεται ώστε να συγκριθεί με πειραματικά αποτελέσματα και όχι για διαστασιολόγηση, δεν εφαρμόζεται η εξίσωση 2.5 με τον συντελεστή ασφαλείας $\gamma_c = 1.5$, αλλά τίθεται

$$f_{cd} = f_{ck} = 16 \text{ MPa.}$$

- t_{eff} είναι το πάχος της ισοδύναμης λεπτότοιχης διατομής,

- A_k είναι το εμβαδόν που περικλείεται από τη μέση γραμμή των επιμέρους τοιχωμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των (όποιων) εσωτερικών κενών,

Ισοδύναμη διατομή:

Η εξωτερική περίμετρος της ισοδύναμης διατομής συμπίπτει με αυτήν της αρχικής (πραγματικής) διατομής, δηλ.

$$u_k = u = 2 \cdot 0.10m + 2 \cdot 0.20m = 0.6m$$

Το πάχος του τοιχώματος της ισοδύναμης διατομής παίρνει τιμή:

$$t_{eff} = \max\left(\frac{A}{u}, 2\left(c + \varnothing_w + \frac{\varnothing_L}{2}\right)\right)$$

όπου

A η συνολική επιφάνεια της διατομής εντός της εξωτερικής περιμέτρου (βλ. Σχήμα 4.2(α)), οπότε

$$A = 0.10m \cdot 0.20m = 0.02m^2$$

u είναι η εξωτερική περίμετρος, ίση με $u = 0.6m$

c είναι η επικάλυψη των διαμήκων ράβδων οπλισμού, ίση με $c = 0.015m = 15mm$,

\varnothing_w είναι η διάμετρος των συνδετήρων, ίση με $\varnothing_w = 10mm$

\varnothing_L είναι η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού, ίση με $\varnothing_L = 8mm$ βλ. Σχήμα 4.2(β), οπότε

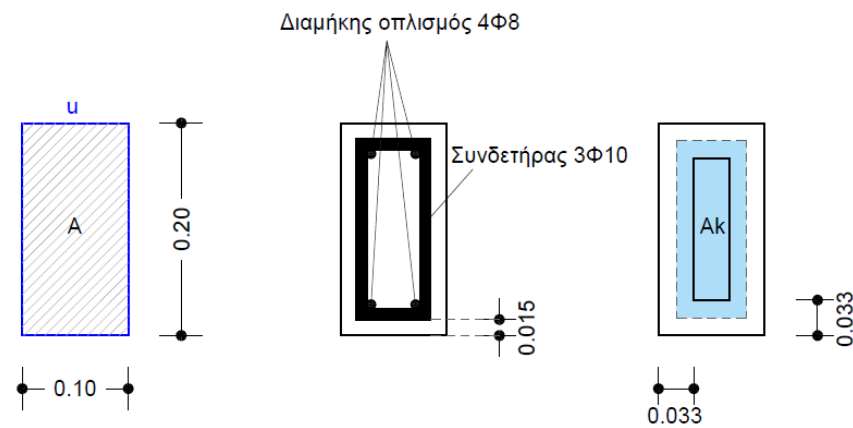
$$t_{eff} = \max\left(\begin{array}{l} \frac{A}{u} = \frac{0.02m^2}{0.6m} = 0.0333m = 33.3mm, \\ 2\left(c + \varnothing_w + \frac{\varnothing_L}{2}\right) = 2\left(15mm + 10mm + \frac{8mm}{2}\right) = 58mm \end{array}\right)$$

Επομένως, θεωρητικά, προκύπτει πάχος $t_{eff} = 58mm$. Όμως ένα τέτοιο πάχος δεν είναι εφικτό για τη διατομή, καθώς η ίδια η διατομή έχει πλάτος $b = 0.10m$. Οπότε και επιλέγεται η τιμή:

$$t_{eff} = \frac{A}{u} = 0.0333m = 33.3mm$$

Επομένως, το εμβαδόν που περικλείεται από τη μέση γραμμή των επιμέρους τοιχωμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των (όποιων) εσωτερικών κενών θα είναι βλ. Σχήμα 4.2(γ):

$$A_k = (b - t_{eff}) \cdot (h - t_{eff}) = (0.10m - 0.0333m) \cdot (0.20m - 0.0333m) = 0.01111m^2$$



Σχήμα 4.2 Η διατομή στα στάδια υπολογισμού: (α) Αρχική διατομή, (β) Οπλισμοί διατομής και επικάλυψη, (γ) Ισοδύναμη διατομή.

Η θεωρητική τιμή της στρεπτικής ροπής αντοχής κατά ΕΚ2 της δοκού θα είναι:

Για $\theta = 45^\circ$:

$$T_{Rd1} = 2v_1 a_{cw} f_{cd} t_{eff} A_k \sin \theta \cos \theta$$

$$= 2 \cdot 0.5616 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 \frac{kN}{m^2} \cdot 0.0333m \cdot 0.01111m^2 \cdot \sin 45^\circ \cos 45^\circ$$

$$T_{Rd1} = 3.32 \text{ kNm}$$

Για $\theta = 22^\circ$:

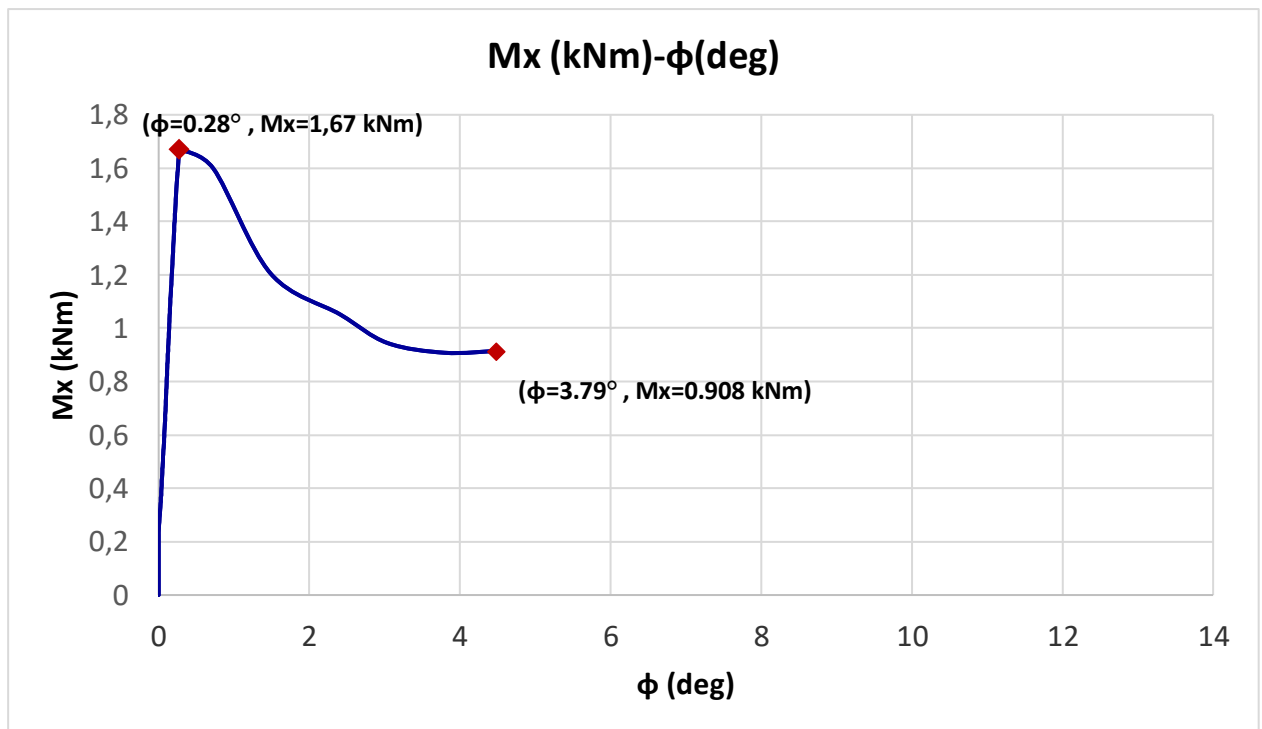
$$T_{Rd1} = 2v_1 a_{cw} f_{cd} t_{eff} A_k \sin \theta \cos \theta$$

$$= 2 \cdot 0.5616 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 \frac{kN}{m^2} \cdot 0.0333m \cdot 0.01111m^2 \cdot \sin 22^\circ \cos 22^\circ$$

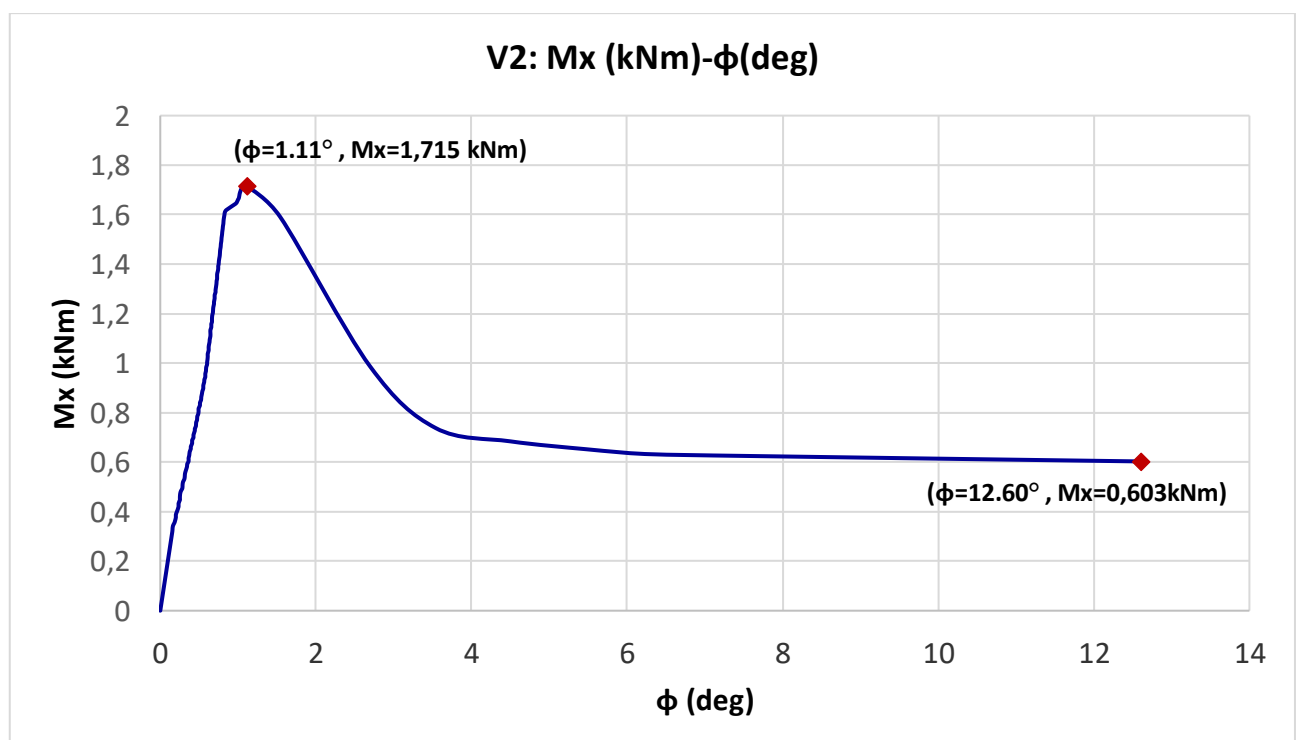
$$T_{Rd1} = 2.31 \text{ kNm}$$

4.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Η πειραματική στρεπτική ροπή αντοχής βρίσκεται από τα διαγράμματα ροπών-στροφών. Η μέγιστη τιμή της ροπής αντιστοιχεί στη ροπή αντοχής για την κάθε δοκό.



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ροπής-γωνίας στροφής $M_x - \varphi$ για τη δοκό V1 με τη γωνία στροφής αστοχίας και τη στρεπτική ροπή αντοχής $\max(M_x)$ αλλά και τη γωνία στροφής κατά τη θραύση.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροπής-γωνίας στροφής $M_x - \varphi$ για τη δοκό V2 με τη γωνία στροφής αστοχίας και τη στρεπτική ροπή αντοχής $\max(M_x)$ αλλά και τη γωνία στροφής κατά τη θραύση.

5. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Παρατηρήσεις

- Γενική συμπεριφορά των δοκιμών στη δοκιμή της στρέψης

Όπως παρατηρείται στα Σχήματα 3.8-3.11, και παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.3 και 4.4, η συμπεριφορά και των 2 δοκών έχει ως εξής:

Αρχικά το διάγραμμα έχει ένα σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα με μεγάλη κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα των γωνιών στρόφης, που αντιστοιχεί σε ελαστική συμπεριφορά. Παρατηρείται ότι οι δοκοί παραμορφώνονται πολύ λίγο, ενώ η στρεπτική ροπή αυξάνει πολύ γρήγορα. Αυτή η αύξηση φτάνει μέχρι σε ένα σημείο, στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη στρεπτική ροπή, μετά το οποίο το διάγραμμα αλλάζει κλίση. Αυτή η μέγιστη ροπή θα είναι η στρεπτική ροπή αντοχής.

Από αυτό το σημείο και μετά, η δοκός μπαίνει στην πλαστική περιοχή, όπου η στρεπτική ροπή μειώνεται με σταθερό ρυθμό, αλλά η δοκός αρχίζει και παίρνει πολύ μεγάλες παραμορφώσεις. Λίγο πριν τη θραύση, το διάγραμμα τείνει να γίνει ευθύγραμμο και παράλληλο προς τον άξονα των γωνιών στρόφης.

Το σκυρόδεμα είναι γενικά ψαθυρό υλικό και αυτό παρατηρείται και στο πείραμα: Η θραύση των δοκιμών επέρχεται απότομα και χωρίς σημαντικές τιμές της γωνίας φ , καθώς η τελευταία φτάνει μόνο μερικές μοίρες. Είναι φανερή στη συμπεριφορά η απουσία κατάλληλου οπλισμού.

- Σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκιμών στη δοκιμή της στρέψης

Παρατηρώντας τα Σχήματα 4.3 και 4.4, οι δύο δοκοί αστοχούν για σχετικά ίδιες τιμές της στρεπτικής ροπής για της γωνίας στρόφης:

$$V1 \rightarrow \varphi = 0.28^\circ, M_x = 1.67 \text{ kNm}$$

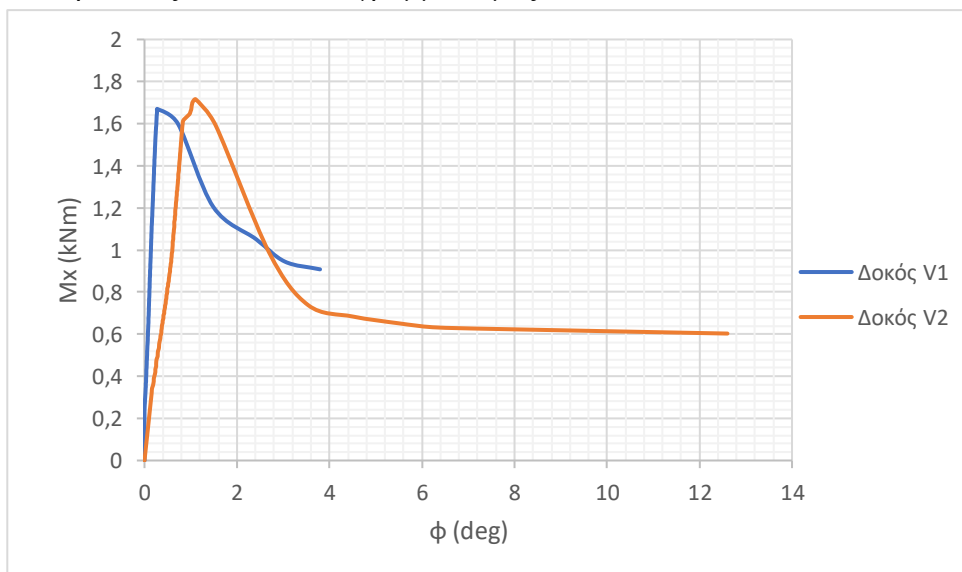
$$V2 \rightarrow \varphi = 1.11^\circ, M_x = 1.72 \text{ kNm}$$

Ωστόσο, η δοκός V2 συνεχίζει να παραμορφώνεται για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας στρόφης θραύεται για πολύ μεγαλύτερη γωνία σε σχέση με τη δοκό V1, ενώ οι τιμές της στρεπτικής ροπής είναι αρκετά κοντά:

$$V1 \rightarrow \varphi = 3.79^\circ, M_x = 0.908 \text{ kNm}$$

$$V2 \rightarrow \varphi = 12.60^\circ, M_x = 0.603 \text{ kNm}$$

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα 2 διαγράμματα μαζί.



Σχήμα 4.5 Διαγράμματα ροπής-γωνίας στρόφης $M_x - \varphi$ των δοκών V1 και V2.

- Θραύση του δοκιμίου στη δοκιμή της στρέψης

Αναλύεται η μορφή της αστοχίας των Εικόνων 3.8-3.10.

Στην Εικόνα 4.6 φαίνονται οι ρωγμές που έχουν σχηματιστεί κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η εμφάνιση των ρωγμών είναι αποτέλεσμα των λοξών θλιπτήρων που αναπτύσσονται στο σκυροδέμα και οδηγούν στην αστοχία του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η γωνία της ρωγμής ξεκινάει με μια κλίση 45° με τον οριζόντιο άξονα στο άνω πέλμα της δοκού, μειώνεται όσο αυτή προχωράει στο μέσο της και ξαναγίνεται περίπου 45° με τον οριζόντιο άξονα στο κάτω πέλμα της δοκού.



Εικόνα 4.6 Θραύση του σκυροδέματος κοντά στο αριστερό άκρο της δοκού λόγω λοξής θλίψης.

Η Εικόνα 4.7 δείχνει τη δοκό μετά τη θραύση της. Παρατηρείται ότι η τελική επιφάνεια θραύσης σχηματίζει γωνία κυρίως 45° με τον οριζόντιο άξονα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο διαμήκης οπλισμός δεν έχει αστοχήσει.



Εικόνα 4.7 Η δοκός μετά την αστοχία της. Διακρίνεται η επιφάνεια θραύσης και οι διαμήκεις οπλισμοί της.

- Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Η θεωρητική τιμή της στρεπτικής ροπής αστοχίας υπολογίστηκε ίση με $T_{Rd1} = 3.32 \text{ kNm}$ για γωνία λοξών θλιπτήρων $\theta = 45^\circ$ και $T_{Rd1} = 2.31 \text{ kNm}$ για γωνία λοξών θλιπτήρων $\theta = 22^\circ$.

Οι πειραματικές τιμές των 2 δοκών είναι

$$V1 \rightarrow Mx_1 = 1.67 \text{ kNm}$$

$$V2 \rightarrow Mx_2 = 1.72 \text{ kNm}$$

Παρατηρείται ότι υπάρχει μία σχετική υπερεκτίμηση της στρεπτικής ροπής αστοχίας κατά τον θεωρητικό υπολογισμό κατά ΕΚ2 σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο ότι στον θεωρητικό υπολογισμό υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις. Αν θεωρηθεί ο δείκτης v_1 όχι κατά ΕΚ2 $\left(v_1 = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)\right)$ αλλά κατά τον ΝΕΚΩΣ (Νέος Ελληνικός Κανονισμός Σκυροδέματος) ως:

$$v_1 = 0.7 \left(0.7 - \frac{f_{ck}}{200}\right) \geq 0.35$$

τότε θα είναι:

$$v_1 = 0.7 \left(0.7 - \frac{16}{200}\right) = 0.434$$

Για $\theta = 45^\circ$:

$$\begin{aligned} T_{Rd1} &= 2v_1 a_{cw} f_{cd} t_{eff} A_k \sin \theta \cos \theta \\ &= 2 \cdot 0.434 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0.0333\text{m} \cdot 0.01111\text{m}^2 \cdot \sin 45^\circ \cos 45^\circ \end{aligned}$$

$$T_{Rd1} = 2.56 \text{ kNm}$$

Για $\theta = 22^\circ$:

$$\begin{aligned} T_{Rd1} &= 2v_1 a_{cw} f_{cd} t_{eff} A_k \sin \theta \cos \theta \\ &= 2 \cdot 0.434 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0.0333\text{m} \cdot 0.01111\text{m}^2 \cdot \sin 22^\circ \cos 22^\circ \end{aligned}$$

$$T_{Rd1} = 1.78 \text{ kNm}$$

Επομένως παρατηρούνται τα εξής:

- Η τιμή που προσεγγίζει πιο καλά τα πειραματικά αποτελέσματα είναι για γωνία λοξών θλιπτήρων $\theta = 22^\circ$.
- Ο υπολογισμός του δείκτη v_1 κατά τον ΝΕΚΩΣ ως $v_1 = 0.7 \left(0.7 - \frac{f_{ck}}{200}\right)$ προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές.

5.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που αντλούνται από την παρούσα εργασία συνοψίζονται παρακάτω:

- Η κατάλληλη όπλιση των δοκών έναντι στρέψης είναι πολύ σημαντική για την πλάσιμη συμπεριφορά τους. Χωρίς τον κατάλληλο διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό οι δοκοί αστοχούν απότομα, ψαθυρά και για πολύ μικρές παραμορφώσεις.
- Σε μια διατομή που δεν έχει κατάλληλο οπλισμό στρέψης η αντοχή της καθορίζεται από την αστοχία του σκυροδέματος σε λοξή θλίψη. Η βιβλιογραφία και οι κανονισμοί θεωρούν ότι κατά την επιπόνηση σε στρέψη δημιουργείται ένα εσωτερικό φέρων σύστημα, που μπορεί να προσομοιωθεί αρκετά ικανοποιητικά με μια γενίκευση του μοντέλου του δικτύωματος Moersch στον χώρο. Το δίκτυωμα αυτό αποτελείται από θλιβόμενες διαγωνίους σκυροδέματος και εφελκυσόμενες ράβδους, που αντιστοιχούν στους συνδετήρες και τους διαμήκεις οπλισμούς στρέψης που είναι κατανομημένοι στην περίμετρο ή τις γωνίες της διατομής αντίστοιχα. Θεωρούν ότι η κλίση θ των θλιβομένων διαγωνίων σκυροδέματος σε σχέση με τον διαμήκη άξονα της δοκού θα πρέπει να παίρνει τιμές $22^\circ < \theta \leq 45^\circ$.
- Κατά τη σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τους θεωρητικούς υπολογισμούς της ροπής στρέψης δοκών ορθογωνικής διατομής. Προκύπτει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις θεωρητικές λύσεις υπό τις εξής παρατηρήσεις:
 - Η τιμή που προσεγγίζει πιο καλά τα πειραματικά αποτελέσματα είναι για γωνία λοξών θλιπτήρων $\theta = 22^\circ$.
 - Ο υπολογισμός του δείκτη v_1 κατά τον ΝΕΚΩΣ ως $v_1 = 0.7 \left(0.7 - \frac{f_{ck}}{200} \right)$ προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές από τον αντίστοιχο τύπο του ΕΚ2.
 - Θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτές οι παρατηρήσεις στηρίζονται στον υπολογισμό της θεωρητικής τιμής της στρεπτικής ροπής με σκοπό τη σύγκρισή της με τις πραγματικές που μετρήθηκαν στα πειράματα. Οι κανονισμοί όμως παρέχουν τις εξισώσεις αυτές με σκοπό τον σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των μελών, όπου επικρατεί η φιλοσοφία του περιθωρίου ασφαλείας λόγω αβεβαιοτήτων. Οι τιμές που δίνονται με τους υπολογισμούς βάση τον ΕΚ2 είναι πιο μεγάλες από τις πραγματικές, επομένως είναι υπέρ της ασφαλείας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. EN 1992-1-1, Ευρωκώδικας 2, «Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα», Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, Δεκέμβριος 2004.
2. Ανδριανόπουλος Ν., Κυριαζή Ε., Λιακόπουλος Κ. (1991). «Πειραματική Αντοχή των Υλικών», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
3. Κωνσταντέλλος Β.Δ. (2009), «Πειραματική Αντοχή των Υλικών», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
4. Πρασιανάκης Ι.Ν., Κουρκουλής Σ.Κ. (2012). «Πειραματική αντοχή των Υλικών – Θεωρία και Εργαστήριο», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
5. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-2016). ΦΕΚ/1561/Β/2-6-16, ΦΕΚ/1839/Β/25.5.2017.
6. Κανονισμός Τεχνολογίας Χάλυβα (ΚΤΧ-2008). ΦΕΚ 1416Β' / 17-07-2008.
7. Καραβεζύρογλου-Βέμπερ Μ. (2016). «Στοιχεία υπολογισμού και διαμόρφωσης ολόσωμων κατασκευών», 3^η έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
8. Τάσιος Θ.Π., Γιαννόπουλος Π.Ι., Τρέζος Κ.Γ., Τσουκάντας Σ.Γ. (2005). «Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με βάση τον Νέο Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος», Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα.
9. Τριανταφύλλου Α.Χ., (2013). “Δομικά Υλικά”, 10^η έκδοση, Πάτρα.
10. Beer F.P., Johnston E.R., De Wolf J.T., Mazurek D.F. (2014). «Μηχανική των υλικών», Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
11. Coulomb, C.A., (1784). “Recherches theoriques et experimentales sur la force de torsion, et sur l’elasticite des files de metal”, Mémoires de l’Academie Royal des Sciences, 229-269.
12. Cowan H. J. (1964). “Reinforced and prestressed concrete in torsion”, Published by Edward Arnold (Publishers) Ltd, London.
13. Hsu, T.T.C (1984). “Torsion of reinforced concrete”, Van Nostrad Reinhold , New York.
14. Kappus, R., (1937). “Drillknicken zentrisch gedrückter Stäbe mit offenem Profil im elastischen” Bereich, Luftfahrtforschung, 14, s.444–457.
15. Mitchel, D., Lampert, P., Collins, M.P, (1971). “The effects of stirrup spacing and longitudinal restraint on the behaviour of reinforced concrete beams subjected to pure torsion”, Publication 71-72, University of Toronto, Toronto.
16. Mosley B, Bungey J., Hulse R. (2016). «Μελέτη κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα», 7^η αγγλική έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
17. Subramanian, K. V., Popovits, J. S. and Shah S. P. (1998). “Testing concrete in torsion : In stability analysis and experiments” , J.Eng. Mech., ASCE , 124 (11) 1258 – 1268.
18. Wagner, H., (1929). “Verdrehung und Knickung von offenen Profilen”, Technische Hochschule Danzig, Festschrift 25 Jahre.