

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ:

**ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΝΕΕΣ ΚΑΙ
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ Η ΕΝΙΣΧΥΣΗ**

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

**ΑΝΑΘΕΣΗ:
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
(ΟΑΣΠ)**

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ:
ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ,
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ,
ΕΜΠ**

Μάιος 2002

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΝΕΕΣ ΚΑΙ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ Η ΕΝΙΣΧΥΣΗ

ΑΝΑΘΕΣΗ- ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Μ.Δ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

Μ.Δ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ
Φ. ΠΕΡΔΙΚΑΡΗΣ
Ε. ΒΟΥΓΙΟΥΚΑΣ
Γ. ΚΩΤΣΟΒΟΣ
Α. ΠΑΝΑΓΟΣ
Ε. ΤΕΓΚΟΥ
Μ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΕΛΟΥ
Σ. ΚΟΡΟΜΗΛΙΑΣ
Ν. ΚΑΤΩΠΟΔΗΣ

ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ

Δ. ΠΑΤΣΕΛΗΣ
Π. ΠΑΠΑΝΔΡΕΟΥ
Γ. ΤΣΟΤΡΑΣ
+ Ε. ΚΟΥΚΟΥΛΑΣ

ΕΚΘΕΣΗ Νο 1-02 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΜΠ – ΜΑΙΟΣ 2002

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	4
1.1 Αντικείμενο	4
1.2 Σκοπιμότητα	5
1.3 Συμβολή στην παραγωγή νέας γνώσης	7
1.4 Μεθοδολογία – Πρόγραμμα πειραμάτων	11
1.5 Αποτελέσματα	16

Σειρά Α: Δοκίμια σχεδιασμένα με τη λογική των οριακών καταστάσεων αστοχίας

A1 Μέθοδοι σχεδιασμού	19
A2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων	20
A3 Ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα	22
A4 Πειραματικά αποτελέσματα	23
A5 Σχόλια	23
<u>Δοκίμιο A1-ΤΘΔ</u>	23
<u>Δοκίμιο A2-Δ</u>	27
<u>Δοκίμιο A3-Δ</u>	30
<u>Δοκίμιο A4-ΤΘΔ</u>	
A5 Συμπεράσματα	36

Σειρά Β: Επισκευή και ενίσχυση δοκιμίων σχεδιασμένων με τη λογική των οριακών καταστάσεων αντοχής

B1 Διαδικασία επισκευής	38
B2 Διαδικασία ενίσχυσης	38
B3 Σχεδιασμός ενίσχυσης	39
B4 Πειραματικά αποτελέσματα	41
B5 Σχόλια	41
<u>Δοκίμιο A1-ΤΘΔ-ΕΕ</u>	41
<u>Δοκίμιο A4-ΤΘΔ-ΕΕ</u>	45
<u>Δοκίμιο A2-Δ-ΕΕ</u>	48
<u>Δοκίμιο A3-Δ-ΕΕ</u>	51
B6 Συμπεράσματα	55

Σειρά Γ: Ενίσχυση δοκιμών σχεδιασμένων με τη λογική των οριακών καταστάσεων αντοχής

Γ1 Διαδικασία ενίσχυσης	57
Γ2 Σχεδιασμός ενίσχυσης	57
Γ3 Πειραματικά αποτελέσματα	59
Γ4 Σχόλια	59
<u>Δοκίμιο Γ1-ΤΘΔ-Ε</u>	59
<u>Δοκίμιο Γ2-Δ-Ε</u>	63
<u>Δοκίμια Γ3-ΤΘΔ-Ε και Γ4-Δ-Ε</u>	66
<u>Δυσκαμψία δοκιμίων</u>	71
Γ5 Συμπεράσματα	71

Σειρά Δ: Ενίσχυση δοκιμών σχεδιασμένων με τη λογική των επιτρεπόμενων τάσεων

Δ1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων	73
Δ2 Ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα	75
Δ3 Διαδικασία ενίσχυσης	76
Δ4 Σχεδιασμός Ενίσχυσης	76
Δ5 Πειραματικά αποτελέσματα	78
Δ6 Σχόλια	78
<u>Δοκίμιο Δ1-Ε-ΤΘΔ</u>	78
<u>Δοκίμιο Δ2-Ε-ΤΘΔ</u>	81
<u>Δοκίμια Δ3-Ε-Δ</u>	84
<u>Δοκίμιο Δ4-Ε-Δ</u>	87
Δ7 Συμπεράσματα	91
 Γενικά Συμπεράσματα	 92
 Βιβλιογραφία	 94

1.1 Αντικείμενο

Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα εκπονήθηκε στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος (ΕΟΣ) του ΕΜΠ και είχε ως αντικείμενο την ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας σχεδιασμού που να εξασφαλίζει τις απαιτήσεις του αντισεισμικού σχεδιασμού για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ.) με δεδομένη φέρουσα ικανότητα και επαρκή πλαστιμότητα. Στόχος αυτού του προγράμματος ήταν επίσης η μεθοδολογία αυτή να μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για το σχεδιασμό νέων, όσο και για την επισκευή ή ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών.

Παρά τις συνεχείς αναθεωρήσεις των υφιστάμενων κανονισμών σχεδιασμού από Ο.Σ., η ανάγκη για την ανάπτυξη μιας τέτοιας μεθοδολογίας εξακολουθεί να υπάρχει σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσφάτων ερευνητικών προγραμμάτων που εκπονήθηκαν μετά τους καταστροφικούς σεισμούς στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και κατέληξαν σε συμπεράσματα που επαλήθευσαν οι αστοχίες που προκάλεσε ο μεταγενέστερος σεισμός στο Κόμπε της Ιαπωνίας και, κυρίως, ο πρόσφατος σεισμός της Αθήνας.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε νέες αντιλήψεις για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο κατασκευής, που διαμορφώθηκαν σε διεθνείς επιστημονικές επιτροπές όπως, π.χ., η RILEM 148 SSC, η μεικτή ACI/ASCE 447, κ.ά. Οι νέες αυτές αντιλήψεις αφορούν κυρίως την μορφή του φθιτού κλάδου της καμπύλης τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος,

ο οποίος περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού μετά την εμφάνιση ρωγμών. Από τη μορφή του φθιτού κλάδου εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, τόσο η αναλυτική πρόβλεψη της εντατικής κατάστασης κατασκευών από Ο.Σ., όσο και η επιλογή του φυσικού προσομοιώματος της συμπεριφοράς τους, το οποίο συνήθως αποτελεί την βάση των μεθόδων σχεδιασμού τους.

Ο έλεγχος της μεθοδολογίας σχεδιασμού που αναπτύχθηκε είναι πειραματικός. Η μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε τόσο για το σχεδιασμό νέων δομικών στοιχείων από Ο.Σ., όσο και για την επισκευή και ενίσχυση ή μόνο για την ενίσχυση στοιχείων στα οποία προκλήθηκαν βλάβες με προεπιλεγμένες ιστορίες φόρτισης. Τα στοιχεία αυτά υποβλήθηκαν στη δράση μονότονης και ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Η μελέτη των αποτελεσμάτων αποτελεί τη βάση για τη διερεύνηση της εγκυρότητας της μεθοδολογίας που προτείνεται.

1.2 Σκοπιμότητα

Η αμφισβήτηση της εγκυρότητας του θεωρητικού υπόβαθρου των κανονισμών σχεδιασμού κατασκευών από Ο.Σ. έχει ξεκινήσει από τις αρχές της δεκαετίας του 80.¹⁻⁹ Παρόμοια αμφισβήτηση διατυπώθηκε και από μέλη επιτροπών συγγραφής κανονισμών μόλις το 1993,¹⁰ μετά τη δημοσίευση πειραματικών στοιχείων που έδειχναν ότι οι προβλέψεις των κανονισμών είναι δυνατόν, σε ορισμένες περιπτώσεις, να υποεκτιμούν την φέρουσα ικανότητα δομικών στοιχείων με απόκλιση μεγαλύτερη των 300%, ενώ σε άλλες να την υπερεκτιμούν περισσότερο από 50%.^{11,12} Προσφάτως, η αμφισβήτηση έτυχε ευρείας αποδοχής με την βράβευση και αναδημοσίευση της δημοσίευσης 10 σε διεθνές περιοδικό ευρύτατης κυκλοφορίας.¹³

Η διερεύνηση της εγκυρότητας των αντισεισμικών διατάξεων των κανονισμών για το σχεδιασμό κατασκευών από Ο.Σ. αποτέλεσαν το αντικείμενο ερευνητικών προγραμμάτων που εκπονήθηκαν στο πρόσφατο παρελθόν και στην Ελλάδα με χρηματοδότηση του Ο.Α.Σ.Π. Τα αποτελέσματα των ερευνητικών αυτών

προγραμμάτων έδειξαν ότι η τοποθέτηση πρόσθετων συνδετήρων στα ονομαζόμενα “κρίσιμα μήκη” δομικών στοιχείων, σύμφωνα με τον ισχύοντα νέο Ελληνικό Κανονισμό,¹⁴ είναι δυνατόν να προκαλέσει ψαθυρή, αντί να εξασφαλίζει (όπως είναι γενικά αναμενόμενο) πλάστιμη, αστοχία.¹⁵⁻²¹

Παρόμοια ήσαν τα αποτελέσματα ενός ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος συνεργασίας, με στόχο τη βαθμονόμηση του Ευρωκώδικα EC8,²² στο οποίο διάφοροι πλαισιακοί φορείς υποβλήθηκαν σε σεισμική δράση στη σεισμική τράπεζα του ΕΜΠ.²³ Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, σε αντίθεση με τα αναμενόμενα, η φέρουσα ικανότητα των δοκιμίων που ήταν σχεδιασμένα για υψηλή πλαστιμότητα ήταν μικρότερη από τη φέρουσα ικανότητα των αντίστοιχων στοιχείων που ήταν σχεδιασμένα για χαμηλή πλαστιμότητα, χωρίς να καταγραφούν ουσιαστικές διαφορές στην πλαστιμότητα των δοκιμίων.

Σε αντίθεση με τους ισχύοντες κανονισμούς, η τοποθέτηση εγκάρσιου οπλισμού σύμφωνα με μια εναλλακτική μεθοδολογία σχεδιασμού, που βασίζεται σε νέες αντιλήψεις της συμπεριφοράς του σκυροδέματος και περιγράφεται συνοπτικά σε επόμενη ενότητα, εξασφάλισε πλάστιμη συμπεριφορά των ιδίων κατά τα λοιπά δομικών στοιχείων, παρά το γεγονός ότι ο συνολικός εγκάρσιος οπλισμός στα “κρίσιμα μήκη” ήταν σημαντικά λιγότερος αυτού που απαιτεί ο νέος Ελληνικός Κανονισμός.¹⁸⁻²¹

Τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα επαληθεύτηκαν σε πρόσφατο ερευνητικό πρόγραμμα²⁴ που εκπονήθηκε στη Μ. Βρετανία με αντικείμενο τη διερεύνηση της εγκυρότητας των αντισεισμικών διατάξεων του νέου Ευρωπαϊκού Κανονισμού για το σχεδιασμό κατασκευών από Ο.Σ.²⁵ Επιπλέον, τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες η εφαρμογή των κανονιστικών διατάξεων για επίτευξη πλαστιμότητας κατηγορίας III (υψηλής) οδηγεί σε συμπεριφορά υποδεέστερη αυτής που προέκυψε από την εφαρμογή των διατάξεων για επίτευξη πλαστιμότητας κατηγορίας I (χαμηλής).

Τέλος, είναι γνωστά τα καταστρεπτικά αποτελέσματα προσφάτων σεισμών, όπως αυτοί της Καλιφόρνια (Northridge) των ΗΠΑ, του Κόμπε της Ιαπωνίας και της ΒΔ περιοχής της Αθήνας. Και ενώ στο Κόμπε οι καταστροφές οφείλονταν στην κατά πολύ μεγαλύτερη της αναμενόμενης έντασης της σεισμικής δράσης,²⁶ η ένταση του σεισμού στην Καλιφόρνια ήταν η προβλεπόμενη και, επιπλέον, οι καταστροφές είναι δύσκολο να αποδοθούν σε κατασκευαστικά σφάλματα ή κακή εφαρμογή των κανονισμών. Επίσης, εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι στην πληγείσα από το σεισμό ΒΔ περιοχή της Αθήνας ο φέρων οργανισμός ενός σημαντικού αριθμού κτιρίων, οι οποίες κατασκευάστηκαν σχετικά πρόσφατα (την τελευταία δεκαετία αν όχι πενταετία), υπέστη βλάβες τις οποίες οι ισχύοντες κανονισμοί θεωρούνται ικανοί να αποτρέψουν.

1.3 Συμβολή στην παραγωγή νέας γνώσης

Η υιοθέτηση της λογικής των “οριακών καταστάσεων αστοχίας” από τους ισχύοντες κανονισμούς σχεδιασμού κατασκευών από Ο.Σ. οφείλεται στην πεποίθηση ότι η λογική αυτή οδηγεί σε ασφαλέστερες και οικονομικότερες κατασκευές. Πράγματι, ο σχεδιασμός του φέροντος οργανισμού μιας κατασκευής, στην οριακή κατάσταση αστοχίας του, βασίζεται στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του, γεγονός το οποίο επιτρέπει την επιλογή ενός επαρκούς περιθωρίου ασφαλείας έναντι αστοχίας της κατασκευής. Ταυτόχρονα, οι υψηλές εσωτερικές τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται στον φέροντα οργανισμό όταν ευρίσκεται στην οριακή αυτή κατάσταση, είναι αναπόφευκτο να οδηγούν στην επιλογή των ελαχίστων δυνατών διατομών και του ελαχίστου απαιτούμενου οπλισμού για την ανάληψη των εσωτερικών δράσεων. (Ασφαλώς, τόσο η ασφάλεια όσο και η οικονομία συναρτώνται και με τους συντελεστές ασφαλείας. Η ακριβέστερη όμως εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας μειώνει τις αβεβαιότητες οι οποίες επηρεάζουν την επιλογή συντελεστών ασφαλείας και έτσι καθιστά ευχερέστερη την επιλογή καταλληλότερων τιμών.)

Σε αντίθεση όμως με τις παραπάνω ευνοϊκές προοπτικές τις οποίες δημιούργησε η υιοθέτηση της λογικής των “οριακών καταστάσεων αστοχίας” για τη βελτίωση του

σχεδιασμού κατασκευών από Ο.Σ., ο πειραματικός έλεγχος της εγκυρότητας του τρόπου με τον οποίο η λογική αυτή εφαρμόζεται από τους ισχύοντες κανονισμούς δεν έχει, μέχρι του παρόντος, δικαιώσει την προσδοκία για μεγαλύτερη ασφάλεια και οικονομία. Υπάρχουν δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός ευρέως φάσματος δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα (όπως, π.χ., δοκών, υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων, πλακών, κλπ.) για τα οποία οι ισχύουσες μέθοδοι υπολογισμού καταλήγουν σε προβλέψεις με σημαντική απόκλιση από την πραγματική συμπεριφορά, όπως αυτή προσδιορίζεται πειραματικά.^{6,11,12,15,16}

Θα πρέπει μάλιστα να τονιστεί ότι, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις οι προβλέψεις υποεκτιμούν σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα μιας κατασκευής ή ενός δομικού στοιχείου - πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχουν σημαντικά περιθώρια για οικονομικότερες λύσεις σχεδιασμού - σε άλλες περιπτώσεις οι προβλέψεις είναι ανασφαλείς, διότι υπερεκτιμούν τη δυνατότητα της κατασκευής ή του στοιχείου να έχει την αναμενόμενη φέρουσα ικανότητα και πλαστιμότητα, γεγονός που συνηγορεί υπέρ της θέσης ότι δεν έχει ακόμα επιτευχθεί ούτε η στοιχειώδης επιδίωξη των κανονισμών για λύσεις σχεδιασμού που θα εξασφαλίζουν ένα επαρκές περιθώριο ασφάλειας.

Η παραπάνω θέση επίσης ενισχύεται και από το γεγονός ότι στο πρόσφατο παρελθόν υπήρξε ένας μικρός, αλλά ανησυχητικός αριθμός περιπτώσεων κατασκευών που κατέρρευσαν. Έχει ενδιαφέρον να μνημονευθούν ορισμένες περιπτώσεις για τις οποίες οι καταρρεύσεις δεν φαίνεται να οφείλονται ούτε σε κακοτεχνίες ή κακή εφαρμογή των κανονισμών, ούτε σε υπέρβαση του φορτίου σχεδιασμού. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι τα ακόλουθα:

(α) Υπέργειοι αυτοκινητόδρομοι και τετραόροφος σταθμός στάθμευσης αυτοκινήτων που κατέρρευσαν στο Northridge της Καλιφόρνια των ΗΠΑ κατά τους πρόσφατους σεισμούς,²⁷

(β) Νορβηγική πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου που συνθλίφθηκε από την πίεση του ύδατος κατά τη βύθισή της στη Βόρεια θάλασσα σε βάθος 65 m, ενώ επρόκειτο να τοποθετηθεί σε βάθος 140 m,²⁸

(γ) Πολυώροφος σταθμός στάθμευσης αυτοκινήτων στην Μ. Βρετανία που κατέρρευσε (κατά ευτυχή σύμπτωση) “εν κενώ”.²⁹

Η διερεύνηση των αιτίων των αποκλίσεων μεταξύ προβλέψεων και πραγματικής συμπεριφοράς που προαναφέρθηκαν, έχει οδηγήσει στη διαπίστωση ότι οι αποκλίσεις οφείλονται στην ανεπάρκεια της θεωρητικής βάσης των ισχυουσών μεθόδων υπολογισμού (μέσω των οποίων εφαρμόζεται η λογική των οριακών καταστάσεων αστοχίας) και όχι στο ανέφικτο της επίτευξης των στόχων της μεθοδολογίας σχεδιασμού.^{30,31} Πράγματι, για τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν αποδείχθηκε ότι θεμελιώδεις παραδοχές των μεθόδων σχεδιασμού, που περιγράφουν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και το μηχανισμό αντοχής δομικών στοιχείων, έχουν υιοθετηθεί μετά από λανθασμένη ερμηνεία πειραματικών δεδομένων ή από τη χρησιμοποίηση υποθέσεων οι οποίες, αν και ενδεχομένως ισχύουν για άλλα υλικά (όπως π.χ. ο χάλυβας) με διαφορετική συμπεριφορά (όπως π.χ. η ελαστική συμπεριφορά), δεν είναι συμβιβαστές με τη συμπεριφορά κατασκευών από σκυρόδεμα, όταν το ασκούμενο φορτίο πλησιάσει τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Γίνεται φανερό λοιπόν ότι για να βελτιωθούν οι μέθοδοι σχεδιασμού απαιτείται μια ριζική αναθεώρηση του θεωρητικού τους υπόβαθρου.

Μια τέτοια αναθεώρηση αποτέλεσε το αντικείμενο εκτεταμένης και συστηματικής έρευνας την τελευταία 15ετία, που διεξάχθηκε ταυτοχρόνως προς δύο κατευθύνσεις. Στη μια κατεύθυνση, η αναθεώρηση βασίστηκε στην ανάλυση κατασκευών από σκυρόδεμα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έχοντας ως ακρογωνιαίο λίθο τη χρησιμοποίηση μιας ρεαλιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού.³⁰ Από τα αποτελέσματα της ερευνητικής αυτής προσπάθειας γίνεται φανερό ότι, παρόλο που το χρησιμοποιηθέν προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα εργαλείο κατάλληλο τόσο για το σχεδιασμό και την αποτίμηση της συμπεριφοράς νέων κατασκευών, όσο και για τον ανασχεδιασμό και την ενίσχυση υπαρχουσών κατασκευών από σκυρόδεμα, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για νέες, απλές μεθόδους υπολογισμού, οι οποίες να περιγράφουν με σαφήνεια

τη φυσική διάσταση του προβλήματος, επιτυγχάνοντας ταυτοχρόνως τους στοιχειώδεις στόχους για ασφάλεια και οικονομία, τους οποίους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι κανονισμοί δεν φαίνεται να εξασφαλίζουν.

Στην άλλη κατεύθυνση, με στόχο την ικανοποίηση της παραπάνω ανάγκης για νέες μεθόδους υπολογισμού, διερευνήθηκε πειραματικώς η συμπεριφορά ενός ευρέως φάσματος δομικών στοιχείων και τα πειραματικά στοιχεία τα οποία προέκυψαν, μαζί με όλα τα σχετικά πειραματικά στοιχεία τα οποία ευρέθησαν στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας σχεδιασμού.³¹ Η νέα αυτή μεθοδολογία, η εφαρμογή της οποίας γίνεται μέσα στο πλαίσιο της λογικής των “οριακών καταστάσεων αστοχίας”, αντικαθιστά το κλασικό προσομοίωμα του δικτυώματος (Δ) το οποίο στηρίζει τις ισχύουσες μεθόδους σχεδιασμού, με φυσικά προσομοιώματα τα οποία προκύπτουν αφ' ενός μεν από την αναγνώριση των τμημάτων ενός φορέα μέσω των οποίων τα εξωτερικά φορτία μεταφέρονται στις στηρίξεις, αφ' ετέρου δε από την ανάγκη να ενισχυθούν τα τμήματα αυτά με ένα τρόπο ο οποίος να προσδίδει στον φορέα την επιθυμητή φέρουσα ικανότητα και ικανοποιητική πλαστιμότητα. Επειδή δε τα παραπάνω τμήματα περιβάλλουν τις τροχιές των εσωτερικών θλιπτικών δράσεων, η μεθοδολογία ονομάστηκε μεθοδολογία της “τροχιάς της θλιπτικής δύναμης” (ΤΘΔ). Σε αντίθεση με το προσομοίωμα Δ και την αντίστοιχη μεθοδολογία σχεδιασμού που έχουν ενσωματωθεί στους ισχύοντες κανονισμούς, το φυσικό προσομοίωμα ΤΘΔ και η αντίστοιχη μεθοδολογία είναι απολύτως συμβιβαστά με τη συμπεριφορά του σκυροδέματος (όπως αυτή περιγράφεται από έγκυρα πειραματικά αποτελέσματα) τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και σε επίπεδο κατασκευής.

Η μεθοδολογία ΤΘΔ αποτελεί τη βάση της παρούσας εργασίας. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε με κύριο στόχο την εξασφάλιση επιθυμητών δεικτών πλαστιμότητας τόσο σε νέα όσο και υφιστάμενα μέλη κατασκευών για τα οποία απαιτείται επισκευή ή ενίσχυση.

1.4 Μεθοδολογία – Πρόγραμμα πειραμάτων

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η εφαρμογή της μεθόδου ΤΘΔ για το σχεδιασμό φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα βασίζεται στη χρήση ενός φυσικού προσομοιώματος το οποίο προκύπτει από τον προσδιορισμό των περιοχών του φορέα μέσω των οποίων το εξωτερικό φορτίο μεταφέρεται στις στηρίξεις. Με κατάλληλη ενίσχυση των περιοχών αυτών επιτυγχάνονται οι στόχοι του αντισεισμικού σχεδιασμού για δεδομένες τιμές φέρουσας ικανότητας και η πλαστιμότητας.

Για την περίπτωση ενός πλαισιακού φορέα, το φυσικό προσομοίωμα αποτελείται από επιμέρους προσομοιώματα των τμημάτων του φορέα μεταξύ διαδοχικών σημείων καμψής, όπου τα επιμέρους αυτά προσομοιώματα συνδέονται μεταξύ τους. Ως περιοχές σύνδεσης των επιμέρους προσομοιωμάτων, οι περιοχές των σημείων καμψής έχουν μια ουσιαστική συμβολή στη μεταφορά των εξωτερικών φορτίων στις στηρίξεις και, συνεπώς, απαιτείται έλεγχος της επάρκειας της αντοχής τους. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη της μεθοδολογίας η οποία αποτέλεσε το αντικείμενο του παρόντος ερευνητικού προγράμματος, θεωρείται αναγκαίο να προκύψει από τη μελέτη συμπεριφοράς ραβδωτών δομικών στοιχείων στα οποία το ασκούμενο φορτίο προκαλεί τη δημιουργία σημείων καμψής. Τέτοιου τύπου είναι εξάλλου η συμπεριφορά των πραγματικών δομικών στοιχείων τα οποία υπόκεινται σε έντονες σεισμικές καταπονήσεις.

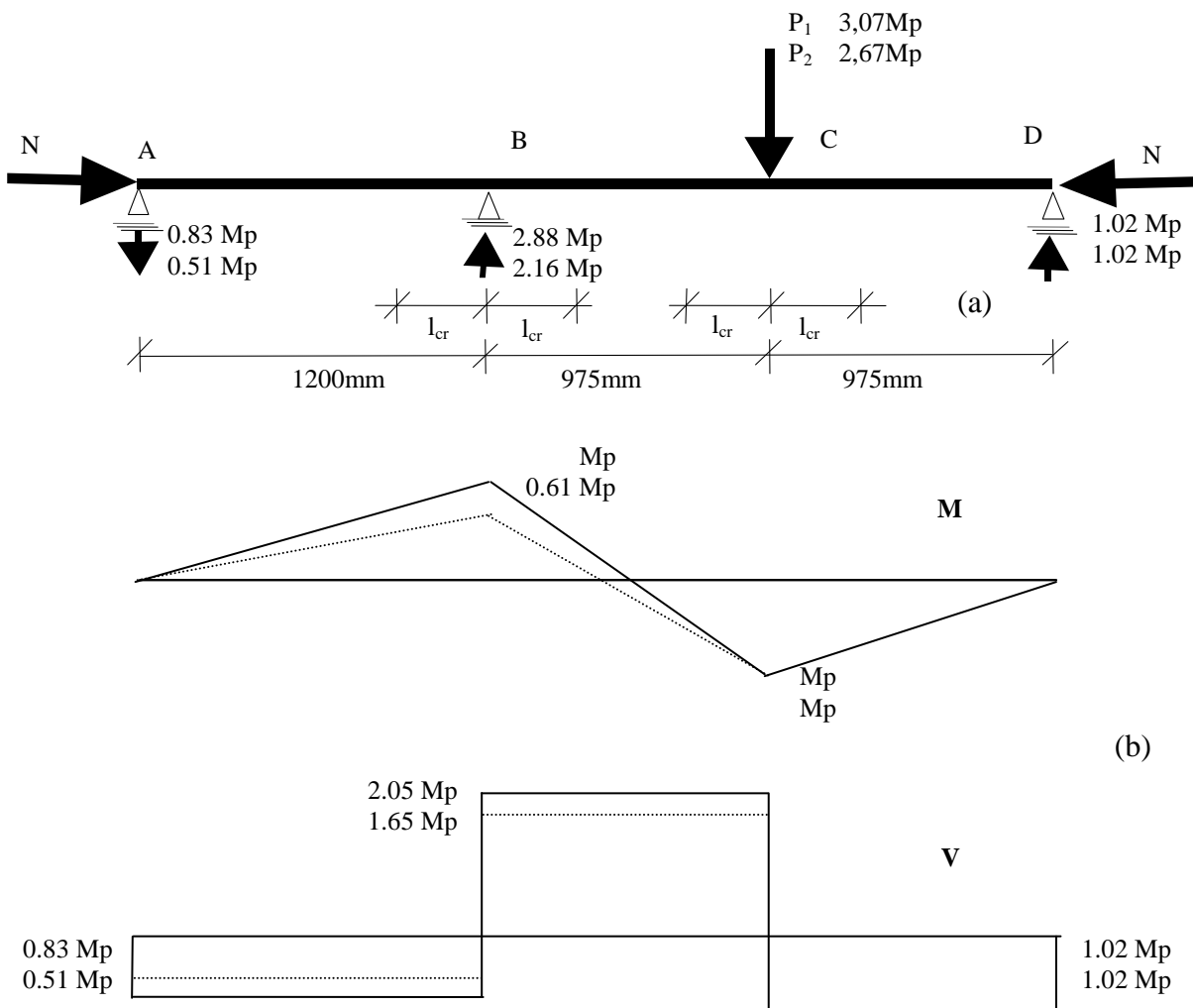
Η σημασία του ελέγχου επάρκειας της αντοχής της περιοχής ενός ραβδωτού φορέα ο οποίος περιέχει σημείο καμψής αναδείχθηκε και από τα αποτελέσματα πειραμάτων σε πολυώροφους πλαισιακούς φορείς, τα οποία είχαν εκτελεσθεί στη σεισμική τράπεζα του ΕΜΠ, στα πλαίσια ενός συντονισμένου ερευνητικού προγράμματος με στόχο τη διερεύνηση της εγκυρότητας των αντισεισμικών διατάξεων των υφιστάμενων κανονισμών σχεδιασμού κατασκευών από Ο.Σ.^{31,32} Η μορφή αστοχίας των πλαισιακών φορέων είχε βρεθεί να χαρακτηρίζεται από έντονη, μη αναμενόμενη από τους ισχύοντες κανονισμούς, περίπου κατακόρυφη ρηγματώση στις περιοχές των σημείων

καμπής ορισμένων κατακόρυφων στοιχείων. Κατακόρυφη ρηγμάτωση στην περιοχή των σημείων καμπής εμφανίστηκε και στα υποστυλώματα κτιρίων τα οποία, αν και σχεδιασμένα σύμφωνα με τις διατάξεις των νέων κανονισμών, υπέστησαν σημαντικές βλάβες κατά τον πρόσφατο σεισμό της Αθήνας.³⁴

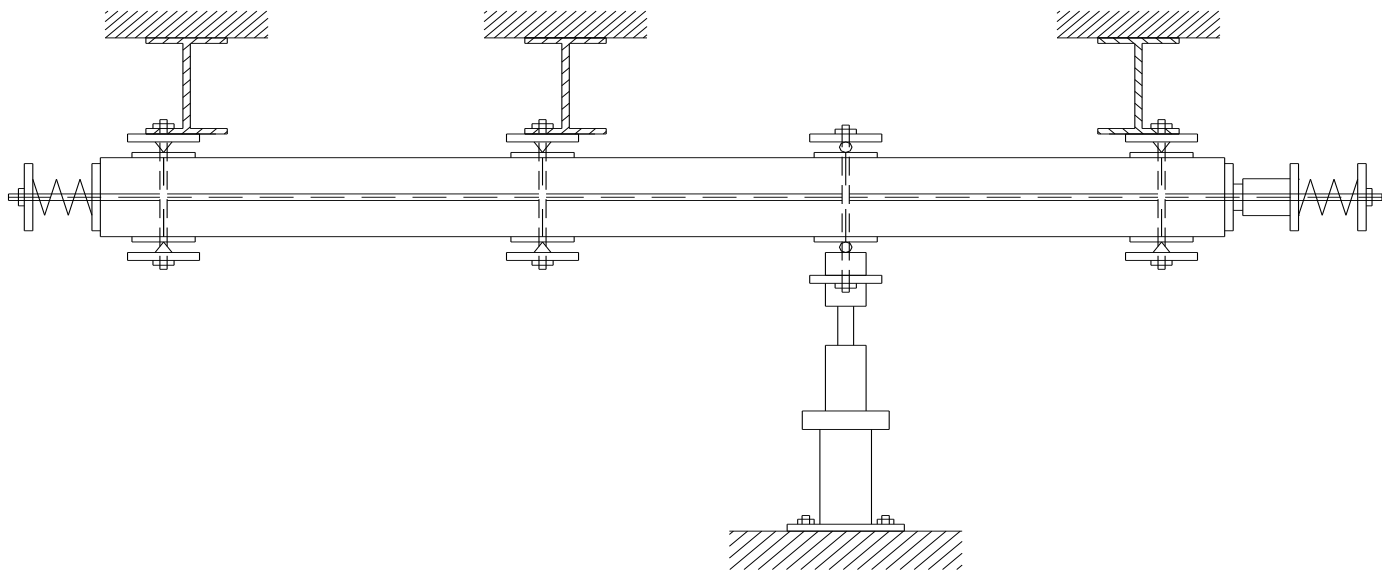
Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, τα δοκίμια που επιλέγηκαν για το πειραματικό σκέλος της εργασίας ήταν απλά εδραζόμενα ραβδωτά στοιχεία, σταθερής διατομής, δύο ανοιγμάτων. Υποβλήθηκαν σε ένα συνδυασμό αξονικά επιβαλλόμενης σταθερής θλιπτικής δύναμης και εγκάρσιας μεταβαλλόμενης δύναμης, όπως παριστάνεται στα σχήματα 1 και 2. Η μορφή των δοκιμίων και ο τρόπος επιβολής του εγκάρσιου φορτίου επιλέχθηκαν έτσι ώστε, με χρήση απλής σχετικά εργαστηριακής διάταξης, να προκύπτουν σε επιμέρους τμήματα του φορέα διαγράμματα εντατικών μεγεθών αντίστοιχα με αυτά που προκαλούνται από το σεισμό. Στο σχήμα 1 παριστάνονται επίσης η καμπτική ροπή και η τέμνουσα δύναμη που αντιστοιχούν στις τιμές P1 και P2 της εγκάρσιας δύναμης που προκαλεί τον σχηματισμό μιας και δύο, αντίστοιχα, πλαστικών αρθρώσεων στις περιοχές που η καμπτική ροπή φτάνει στην μέγιστη δυνατή τιμή της M_p . Η πρώτη πλαστική άρθρωση σχηματίζεται στη θέση επιβολής του εγκάρσιου φορτίου, ενώ η δεύτερη στη θέση της μεσαίας στήριξης. Όταν σχηματισθεί η δεύτερη πλαστική άρθρωση, το δοκίμιο μετασχηματίζεται σε μηχανισμό και επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι φτάνει στο όριο αστοχίας του. Σημειώνεται εδώ ότι, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα των καμπτικών ροπών, το μεσαίο τμήμα του δοκιμίου, που ευρίσκεται μεταξύ των δύο πιθανών θέσεων των πλαστικών αρθρώσεων, αντιστοιχεί (υπό κλίμακα περίπου 1:3) με ένα υποστύλωμα μεταξύ δύο διαδοχικών ορόφων, ενός κτιρίου που υπόκειται σε εγκάρσια φόρτιση. Επίσης τα ακραία τμήματα του δοκιμίου (υπό κλίμακα περίπου 1:1,5) με το «ήμισυ» του υποστυλώματος, κατά τα ανωτέρω.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές απεικονίζεται στο Σχ. 2. Τρεις μεταλλικές δοκοί, ισχυρής διατομής διπλού T, ακλόνητα συνδεδεμένες με το εργαστηριακό δάπεδο, παράλληλες μεταξύ τους και εγκάρσια τοποθετημένες ως προς την διαμήκη διεύθυνση των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκαν για τις εδράσεις των δοκιμίων, μέσω καταλλήλων παρεμβλημάτων που εξασφαλίζουν την λειτουργία

αρθρώσεων ή απλών εδράσεων, ανεξάρτητα από την φορά της φόρτισης και των αντιδράσεων. Το εγκάρσιο φορτίο επιβαλλόταν με τη χρήση υδραυλικού γρύλου της MTS, με δυνατότητα επιβολής φορτίου ± 500 kN. Το απαιτούμενο αξονικό φορτίο επιβαλλόταν με τη χρήση κοινού γρύλλου μέσω δύο σιδερένιων ράβδων υψηλής αντοχής, πλακών έδρασης και συστήματος ελατηρίων, με ακρίβεια της τάξης του ± 1 kN.



Σχήμα 1 Δοκίμια από Ο.Σ. (α) Διάταξη φορτίων. (β) Διαγράμματα ροπών κάμψεως και τεμνουσών δυνάμεων που αντιστοιχούν στο σχηματισμό μιας και δύο πλαστικών αρθρώσεων.



Σχήμα 2 Πειραματική διάταξη.

Η φόρτιση ήταν μονότονη ή ανακυκλιζόμενη, υπό την ταυτόχρονη επιβολή αξονικής δύναμης $N = 315 \text{ kN}$. Πρώτα επιβαλλόταν η N , η οποία παρέμενε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, και στη συνέχεια η εγκάρσια δύναμη P . Η P αύξανε σταθερά μέχρι τη θραύση, προκειμένου για μονότονη φόρτιση (βλ. σχήμα 3α) ή μεταβαλλόταν έτσι ώστε να επιβάλλονται προκαθορισμένες εγκάρσιες μετακινήσεις, διαδοχικά αυξανόμενες, μέχρι τη θραύση, προκειμένου για εναλλασσόμενη φόρτιση (βλ. σχήμα 3β).

Οι πειραματικές δοκιμές εντάχθηκαν σε τρεις σειρές πειραμάτων, ως ακολούθως:

Σειρά Α - Δοκίμια σχεδιασμένα σύμφωνα με το προσομοίωμα Δ , στο οποία στηρίζονται οι ισχύοντες κανονισμοί ή με τη μέθοδο ΤΘΔ φορτίστηκαν μέχρις αστοχίας και η συμπεριφορά τους συγκρίθηκε με αυτή που προβλέπουν οι μεθοδολογίες σχεδιασμού.

Ο στόχος των πειραμάτων ήταν διπλός. Αφ' ενός μεν να ερευνηθεί η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η νέα μεθοδολογία ως βάση για την αποτίμηση της συμπεριφοράς, και κυρίως της φέρουσας ικανότητας, υφιστάμενων κατασκευών, αφ' ετέρου δε να τεκμηριωθούν τα συμπεράσματα μίας προγενέστερης σειράς πειραμάτων^{15,16} σύμφωνα με τα οποία ο σχεδιασμός με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει ενσωματωθεί στους ισχύοντες κανονισμούς, όχι μόνο δεν εξασφαλίζει πλαστιμότητα, αλλά είναι δυνατό να οδηγήσει σε ψαθυρή αστοχία.

Σειρά Β - Τα δοκίμια της σειράς Α επισκευάστηκαν και ενισχύθηκαν με χρήση ινοϋφασμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ και δοκιμάστηκαν εκ νέου υπό συνθήκες φόρτισης παρόμοιες με αυτές με τις οποίες δοκιμάστηκαν αρχικά.

Στόχος της σειράς αυτής των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της αξιοπιστίας τόσο

της μεθόδου ΤΘΔ, όσο και της τεχνολογίας των ινοϋφασμάτων, όταν χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό επισκευής και ενίσχυσης δομικών στοιχείων με βλάβες.

Σειρά Γ - Δοκίμια παρόμοια με αυτά της σειράς Α ενισχύθηκαν με χρήση ινοϋφασμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ και δοκιμάστηκαν σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέχρις αστοχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.

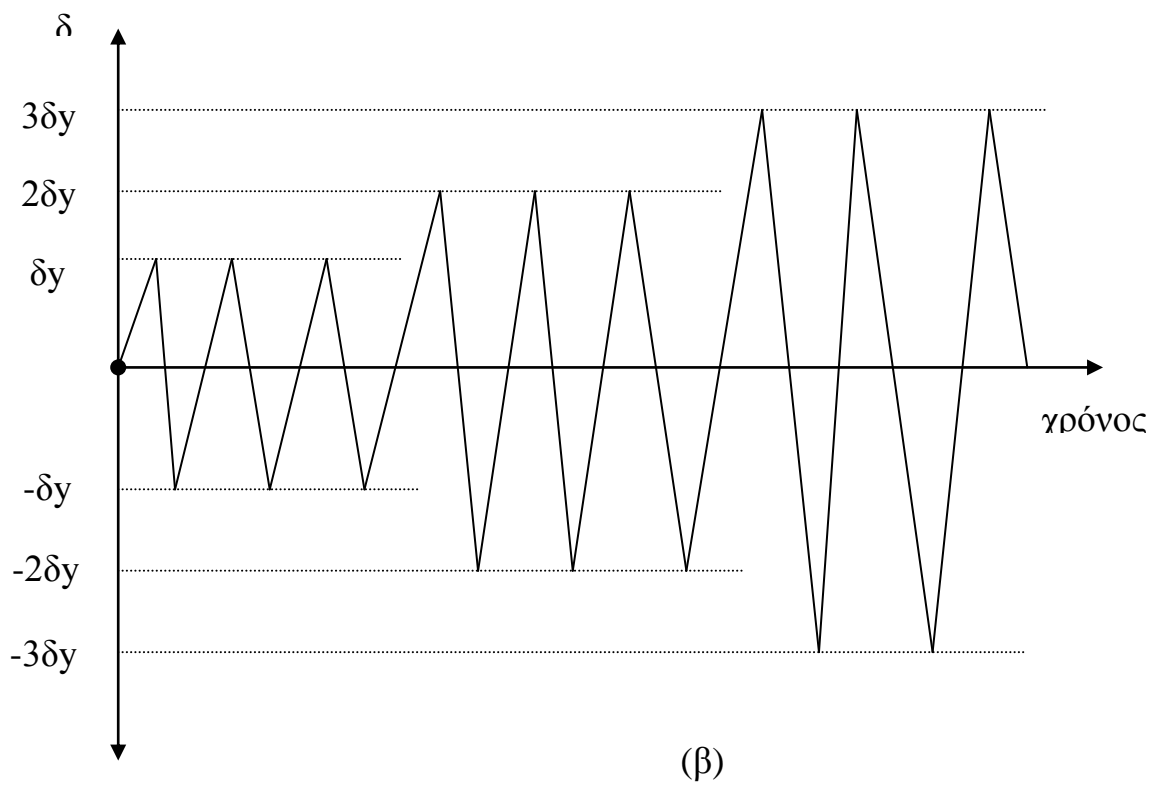
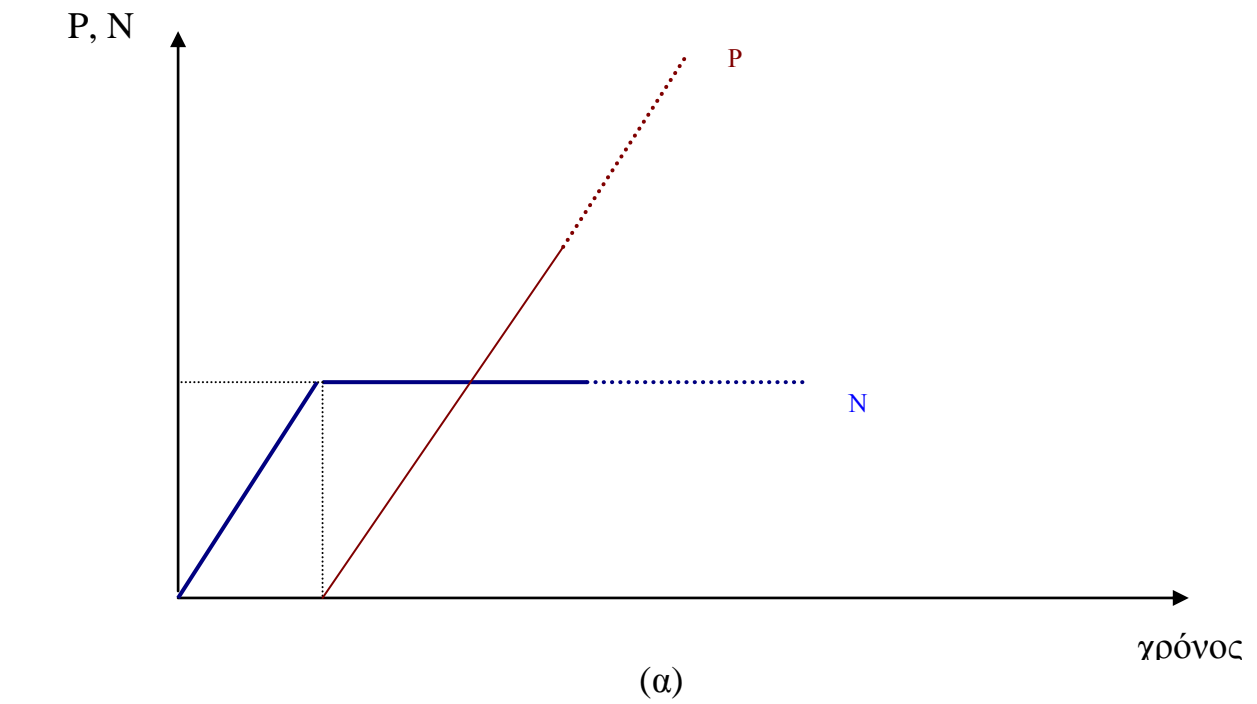
Στόχος της σειράς αυτής των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της αξιοπιστίας τόσο της μεθόδου ΤΘΔ, όσο και της τεχνολογίας των ινοϋφασμάτων, όταν χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό ενίσχυσης δομικών στοιχείων αρχικά σχεδιασμένων για χαμηλότερη φέρουσα ικανότητα.

Σειρά Δ - Δοκίμια σχεδιασμένα με τους προγενέστερους κανονισμούς - που βασίζονταν στη λογική των επιτρεπόμενων τάσεων - ενισχύθηκαν με χρήση ινοϋφασμάτων σύμφωνα με τις μεθόδους Δ και ΤΘΔ και δοκιμάστηκαν σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέχρις αστοχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Με τη σύγκριση της προβλεπόμενης με την πειραματική συμπεριφορά ελέγχθηκε η εγκυρότητα της εφαρμογής των μεθόδων σχεδιασμού για την ενίσχυση κατασκευών σχεδιασμένων με προγενέστερους κανονισμούς.

1.5 Αποτελέσματα

Εις τα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται συνοπτικώς τα κύρια αποτελέσματα μαζί με τα αρχικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω σειρές πειραμάτων.

Εντελεχής επεξεργασία και μελέτη των αποτελεσμάτων ευρίσκεται σε εξέλιξη και αποτελεί τη βάση διδακτορικής διατριβής στην οποία θα παρουσιαστούν τα τελικά συμπεράσματα και θα υπάρξει πλήρης περιγραφή της μεθοδολογίας σχεδιασμού η οποία τελικά θα προταθεί.



Σχήμα 3 Ιστορία φόρτισης. (α) Μονότονη φόρτιση. (β) Ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Δοκίμια σχεδιασμένα με τη λογική των οριακών καταστάσεων αστοχίας

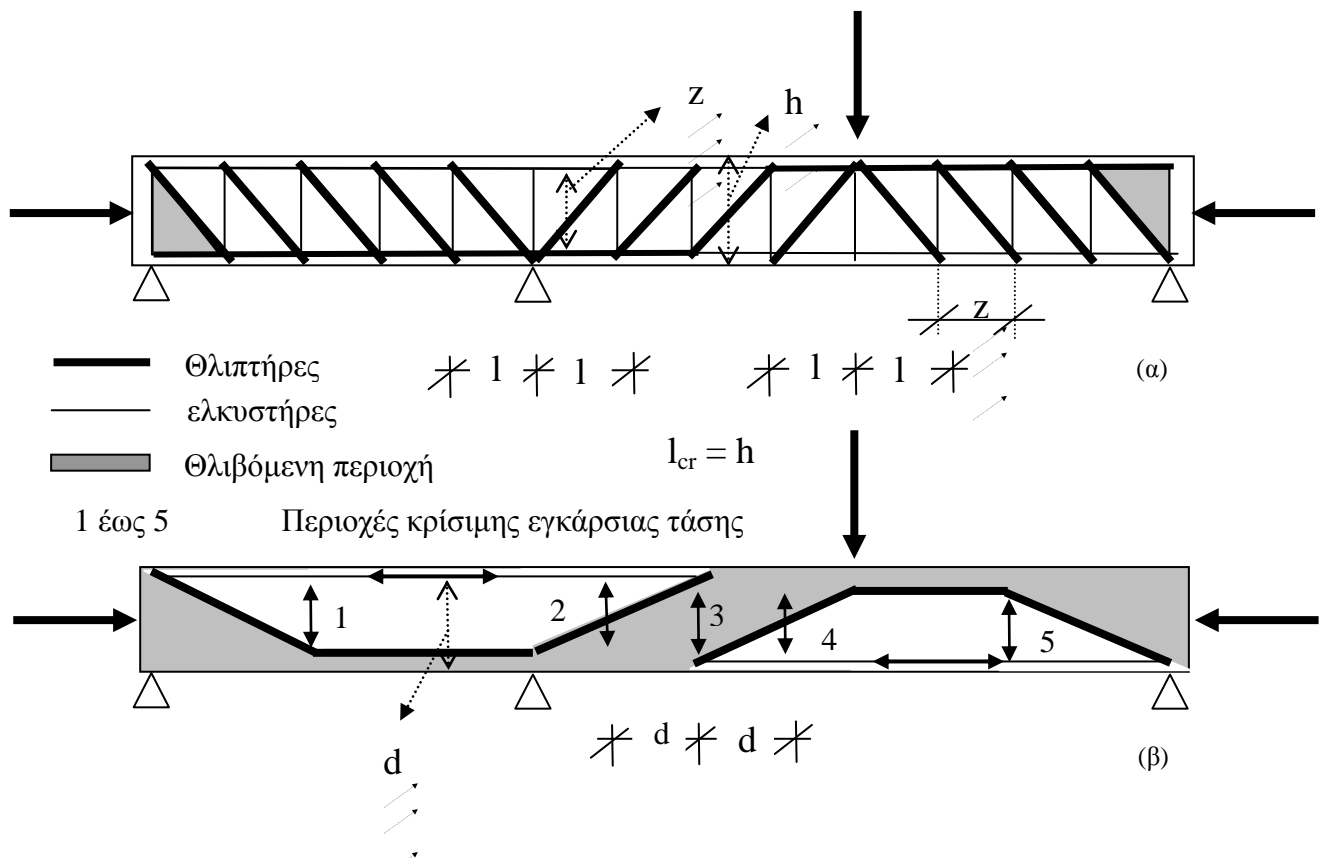
Δοκίμια σχεδιασμένα με τη μέθοδο Δ (η οποία είναι ενσωματωμένη στους ισχύοντες κανονισμούς) ή με τη μέθοδο ΤΘΔ φορτίστηκαν μέχρις αστοχίας και η συμπεριφορά τους συγκρίθηκε με τις προβλέψεις των μεθόδων σχεδιασμού.

Ο στόχος των πειραμάτων ήταν διπλός. Αφ' ενός μεν να ερευνηθεί η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η νέα μεθοδολογία ως βάση για την αποτίμηση της συμπεριφοράς - και κυρίως της φέρουσας ικανότητας - υφιστάμενων κατασκευών, αφ' ετέρου δε να ελεγχθεί η εγκυρότητα μίας προγενέστερης σειράς πειραμάτων^{15,16,35} σύμφωνα με τα οποία η πύκνωση των συνδετήρων στα κρίσιμα μήκη όχι μόνο δεν εξασφαλίζει πλαστιμότητα, αλλά είναι δυνατό να προκαλέσει ψαθυρή αστοχία.

Τα δοκίμια αναφέρονται ως Α1-ΤΘΔ, Α2-Δ, Α3-Δ και Α4-ΤΘΔ, όπου ΤΘΔ και Δ δηλώνουν τη μέθοδο σχεδιασμού των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια Α1-ΤΘΔ και Α4-ΤΘΔ σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο ΤΘΔ, ενώ τα δοκίμια Α2-Δ και Α3-Δ με τη μέθοδο Δ. Δύο δοκίμια κατασκευάστηκαν από κάθε είδος. Το ένα δοκιμάστηκε στην παρούσα σειρά και το άλλο στη σειρά Γ με τον τρόπο που περιγράφεται στο σχετικό κεφάλαιο.

A1 Μέθοδοι σχεδιασμού

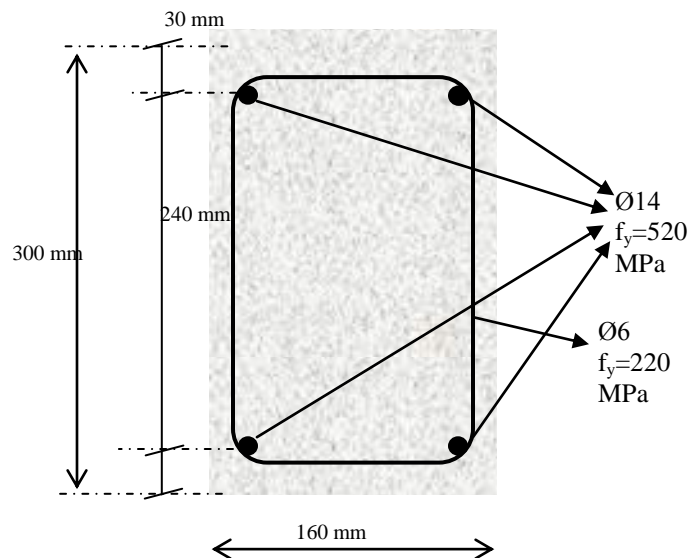
Στο σχήμα A1 φαίνονται τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των δοκιμίων στην οριακή κατάσταση αστοχίας τους: το δικτύωμα στο οποίο βασίζεται ο ισχύων ελληνικός κανονισμός,¹⁴ αλλά και οι περισσότεροι κανονισμοί παγκοσμίως, και το προσομοίωμα της μεθόδου ΤΘΔ.



Σχήμα A1 Φυσικά προσομοιώματα δοκιμίων. (α) Προσομοίωμα δικτύωματος. (β) Προσομοίωμα μεθόδου ΤΘΔ.

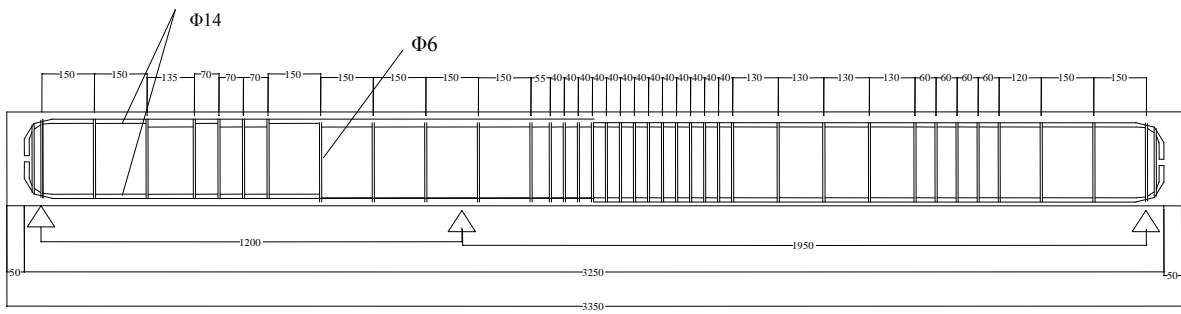
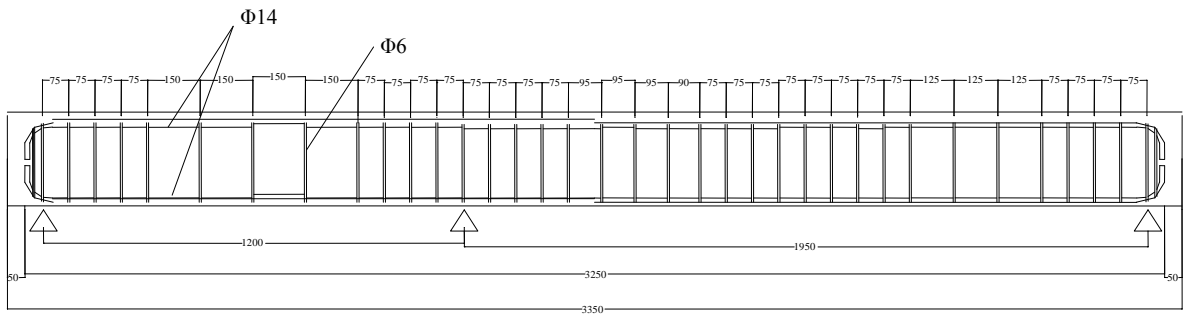
A2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων

Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από τέσσερις ράβδους χάλυβα $\Phi 14$ που τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στα σχήματα A2 και A3. Το ύψος της διατομής είναι 300 mm, ενώ η κατακόρυφη απόσταση των διαμηκών οπλισμών είναι 240 mm. Το πλάτος της διατομής είναι 160 mm. (Όμως, λόγω κατασκευαστικών ατελειών (κυρίως των καλουπιών) η τιμή του πλάτους σε ορισμένες περιπτώσεις ευρέθηκε να αποκλίνει από την παραπάνω τιμή. Όπου αυτό συμβαίνει, αναφέρεται και λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών.)



Σχήμα A2 Διατομή δοκιμίων

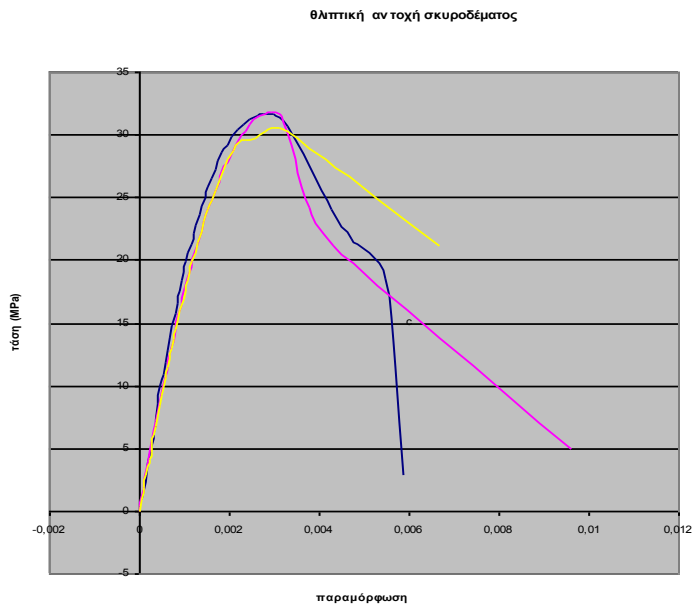
Στο σχήμα A3 φαίνονται επίσης και οι λεπτομέρειες του εγκάρσιου οπλισμού των δοκιμίων της σειράς A. Όπως προαναφέρθηκε, τα δοκίμια A2-Δ και A3-Δ σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο Δ, ενώ τα δοκίμια A1-TΘΔ και A4-TΘΔ σύμφωνα με τη μέθοδο TΘΔ. Η διαφορά σχεδιασμού έγκειται (όπως προαναφέρθηκε) στον εγκάρσιο οπλισμό.



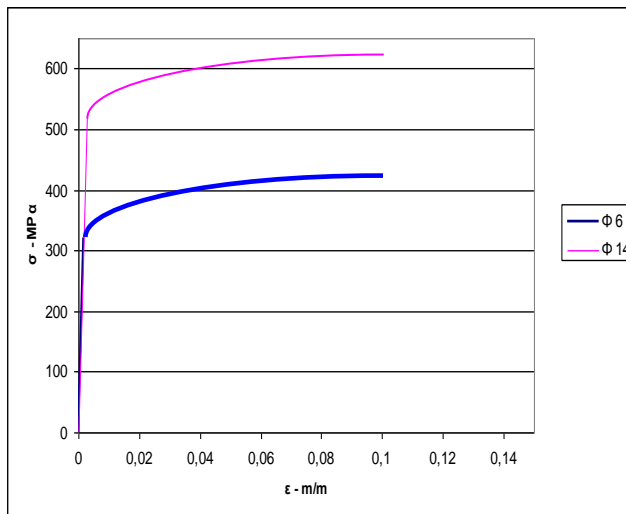
Σχήμα Α3 Λεπτομέρειες εγκάρσιου οπλισμού

A3 Ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με ετοιμοπαράδοτο σκυρόδεμα του οποίου οι καμπύλες τάσεων (σ) – ανηγμένων παραμορφώσεων (ϵ) φαίνονται στο σχήμα 4α. Προέκυψαν από δοκιμές σε κυλίνδρους υπό μονοαξονική θλίψη. Οι καμπύλες σ - ϵ των ράβδων του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στο σχήμα 4β. Προέκυψαν από δοκιμές σε εφελκυσμό.



Σχήμα A4α Καμπύλη σ - ϵ σκυροδέματος



Σχήμα A4β Καμπύλη σ - ϵ χάλυβα

A4 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα A5 έως A16. Στα σχήματα A5, A8, A11 και A14 δίδονται οι καμπύλες εγκάρσιου φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων A1-ΤΘΔ, A2-Δ, A3-Δ και A4-ΤΘΔ, αντίστοιχα, ενώ οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων αυτών φαίνονται στα σχήματα A6, A9, A12 και A15.

Στα σχήματα A7, A10, A13 και A16 δίδονται τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων που αντιστοιχούν στη μέγιστη πειραματική τιμή του εγκάρσιου φορτίου που ασκήθηκε στα δοκίμια. Τα σχήματα αυτά περιέχουν όχι μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και τις τιμές των τεμνουσών δυνάμεων που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των δοκιμίων.

A5 Σχόλια

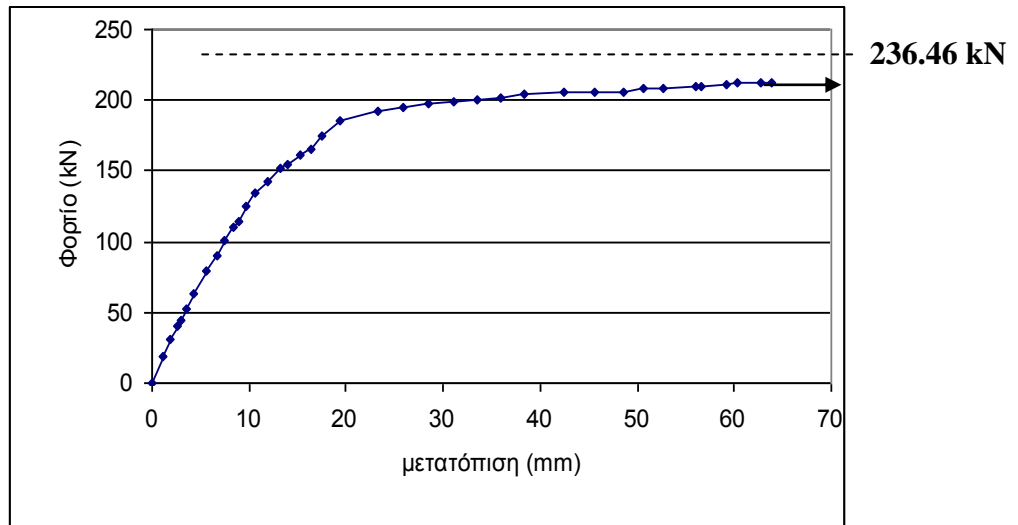
Δοκίμιο A1-ΤΘΔ

Από το σχήμα A5 φαίνεται ότι η πειραματική τιμή (212 kN) της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου είναι μικρότερη από την τιμή σχεδιασμού (235.9 kN), η οποία προκύπτει από το σχήμα 1 του εισαγωγικού κεφαλαίου με βάση την παραδοχή σχηματισμού δύο πλαστικών αρθρώσεων. Όμως, τόσο από τις μετρήσεις φορτίου και αντιδράσεων, όσο και από ανάλυση των αποτελεσμάτων που λαμβάνει υπόψη το παραμορφωμένο σχήμα του φορέα υπό το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο, προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του φορτίου επιτεύχθηκε μετά το σχηματισμό δύο πλαστικών αρθρώσεων.

Ο σχηματισμός δύο πλαστικών αρθρώσεων διαπιστώνεται και από τη μορφή της αστοχίας του φορέα που φαίνεται στο σχήμα A6.

Από το σχήμα A5 επίσης διαπιστώνεται ότι ο στόχος του δομοστατικού σχεδιασμού για πλάστιμη συμπεριφορά επιτεύχθηκε, δεδομένου ότι η διακοπή του πειράματος έγινε όταν η τιμή της διατιθέμενης από το δοκίμιο πλαστιμότητας είχε λάβει τιμή της τάξεως του 4 που υπερβαίνει την ελάχιστη αποδεκτή, 3 ή 3,5.

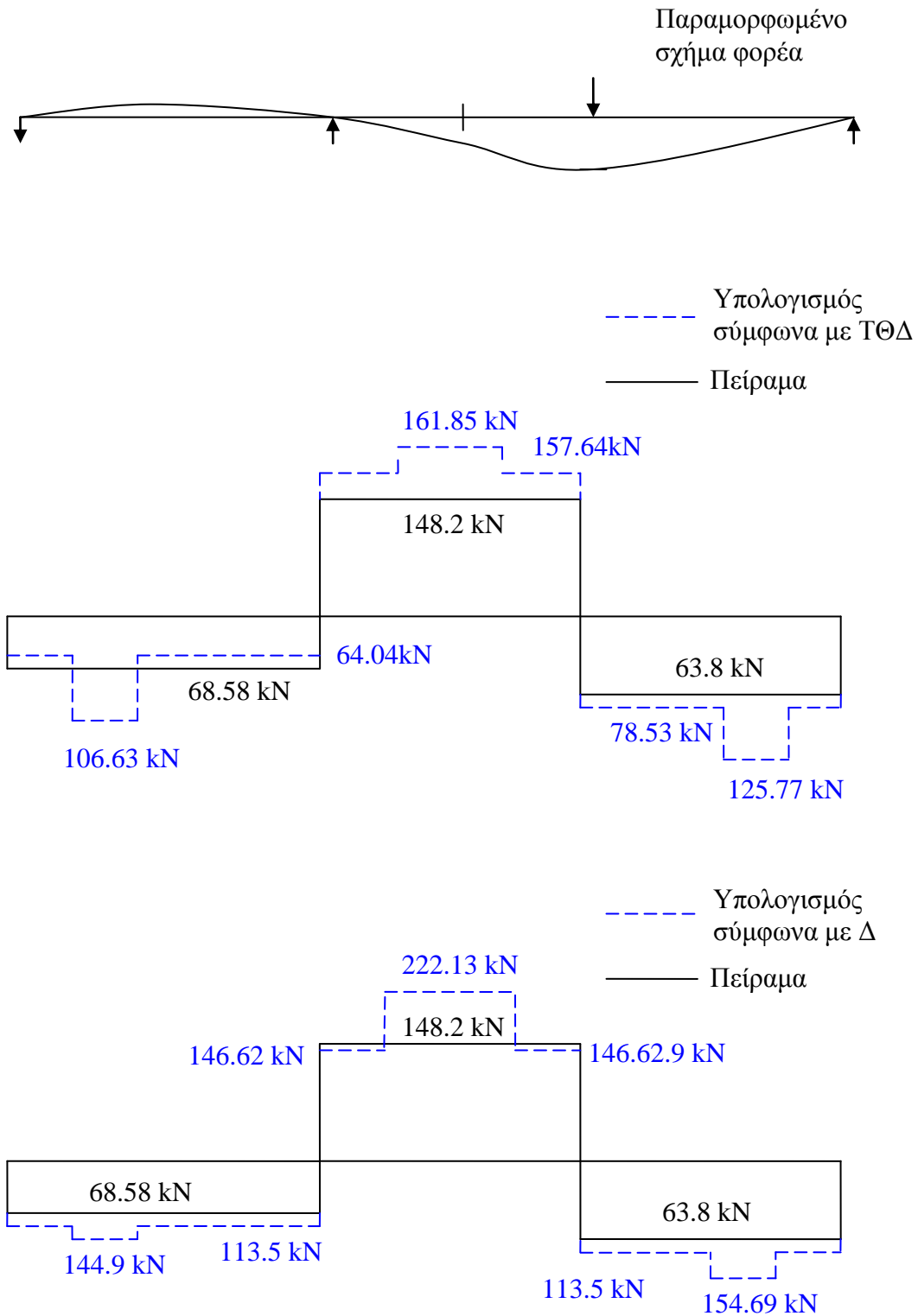
Τέλος, από το σχήμα A7 φαίνεται ότι ο εγκάρσιος σπλισμός, στο τμήμα μεταξύ εσωτερικής στήριξης και σημείου φόρτισης, παρά το γεγονός ότι σύμφωνα με τη μέθοδο Δ υπολείπεται σημαντικά εκείνου που εξασφαλίζει έναντι αστοχίας σε τέμνουσα απέτρεψε τελικά μη-καμπτικής μορφής αστοχίες.



Σχήμα Α5 Καμπύλη φορτίου (P) – μετατόπισης (δ) δοκιμίου Α1-ΤΘΔ υπό μονότονη φόρτιση .



Σχήμα Α6 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Α1-ΤΘΔ. (Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στις θέσεις 1 (θέση άσκησης εγκάρσιου φορτίου) και 2 (μεσαία στήριξη).)

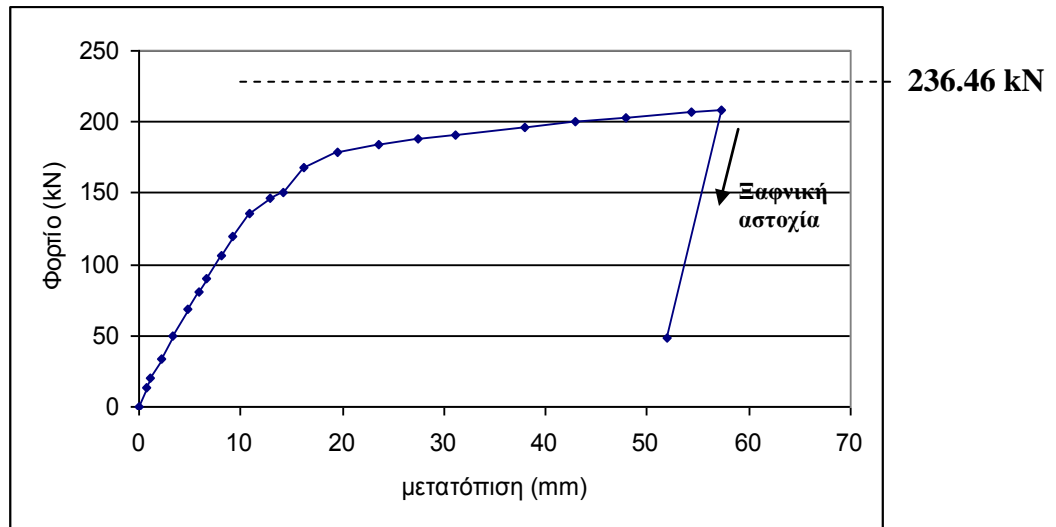


Σχήμα Α7 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Α1-ΤΘΔ υπό το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο Α2-Δ

Όπως και στην περίπτωση του δοκιμίου Α1-ΤΘΔ, έτσι και στην περίπτωση του δοκιμίου Α2-Δ, η μέγιστη τιμή του φορτίου επιτεύχθηκε μετά το σχηματισμό δύο πλαστικών αρθρώσεων. Όμως, στην περίπτωση του δοκιμίου Α2-Δ η απώλεια της φέρουσας ικανότητας συνέβη ξαφνικά για μια τιμή της πλαστιμότητας ίση με περίπου 3.5, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί την ελάχιστη αποδεκτή τιμή (βλ. σχήμα Α8). Τα αίτια της ξαφνικής αυτής αστοχίας συνδέονται με τη μορφή της αστοχίας η οποία, όπως φαίνεται στο σχήμα Α9, χαρακτηρίζεται από έντονη ρηγμάτωση στην περιοχή του σημείου καμψής.

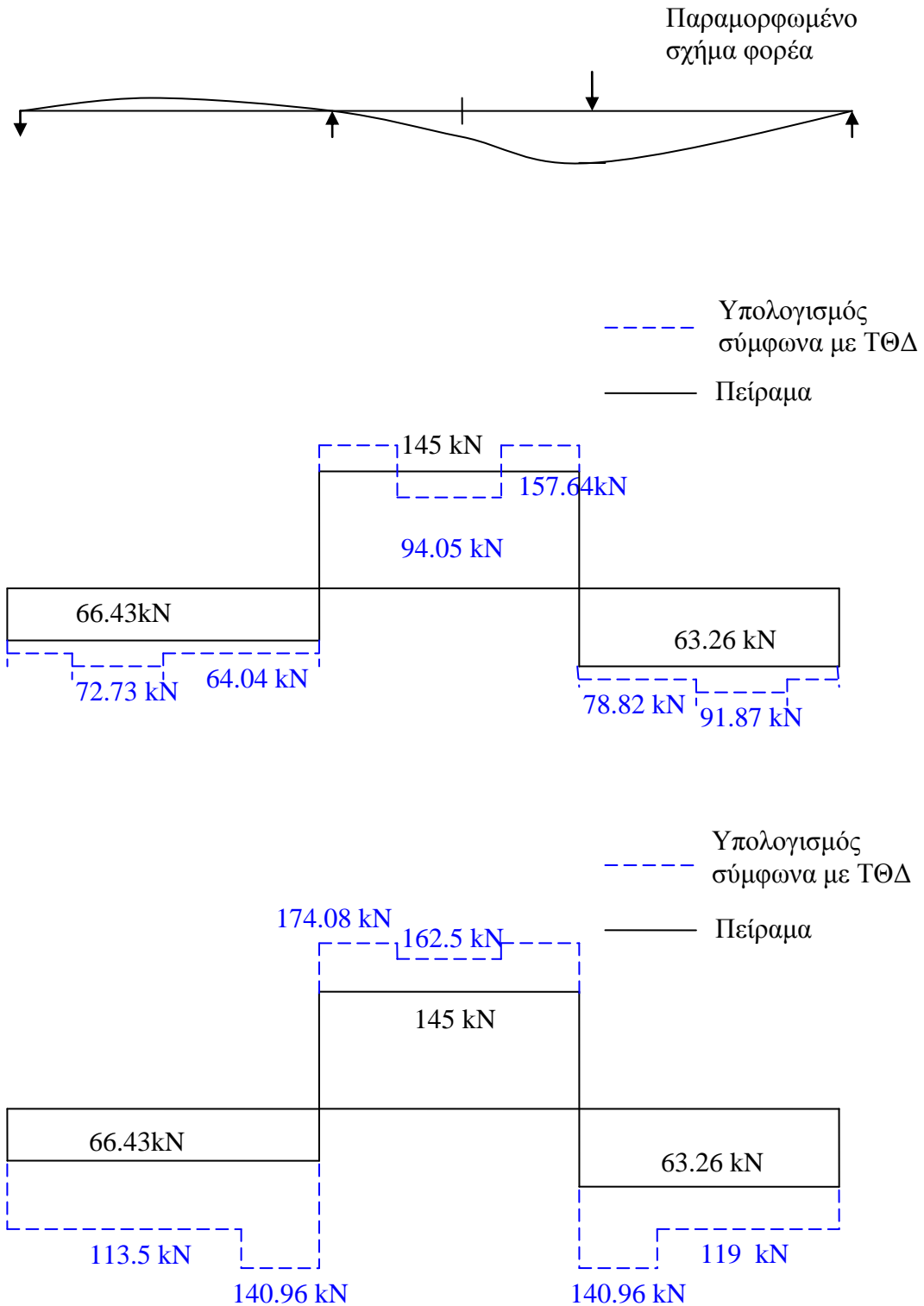
Από το σχήμα Α10 διαπιστώνεται ότι η αστοχία περί το σημείο καμψής συνέβη παρά το γεγονός ότι σύμφωνα με τη μέθοδο Δ υπάρχει επάρκεια αντοχής σε τέμνουσα στην περιοχή αυτή. Αντίθετα, σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ η αντοχή της περιοχής του σημείου καμψής υπολείπεται της απαιτούμενης για εξασφάλιση καμπτικής αστοχίας.



Σχήμα Α8 Καμπύλη φορτίου (P) – μετατόπισης (δ) δοκιμίου Α2-Δ υπό μονότονη φόρτιση.



Σχήμα Α9 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Α2-Δ. (Ξαφνική αστοχία στη θέση 1 (θέση σημείου καμπής).)

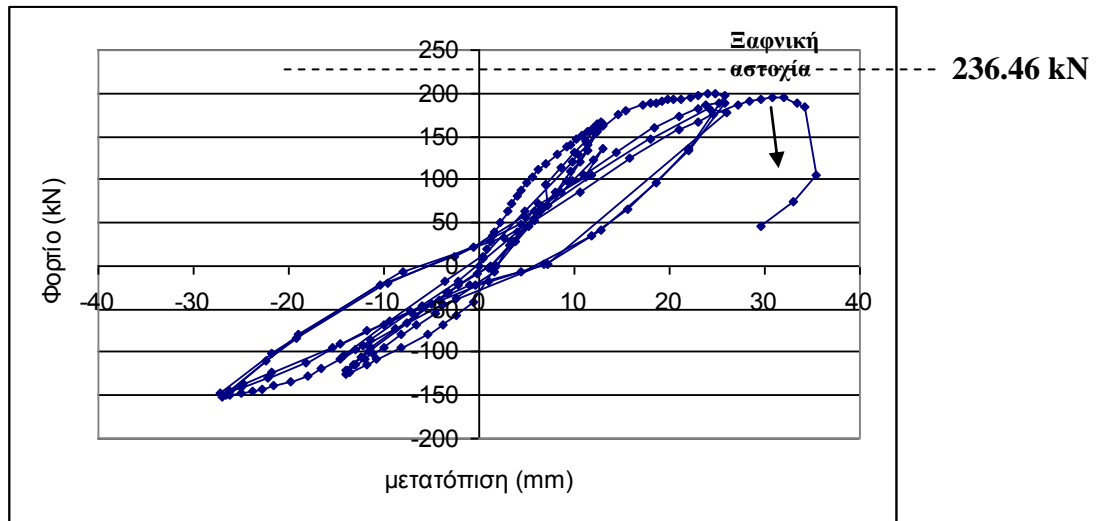


Σχήμα Α10 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Α2-Δ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο A3-Δ

Όπως και στην περίπτωση του δοκιμίου A2-Δ, το δοκίμιο A3-Δ αστόχησε ξαφνικά στην περιοχή του σημείου καμπής (βλ. σχήμα A12), πριν η τιμή της πλαστιμότητας να φθάσει την ελάχιστη επιδιωκόμενη τιμή 3.5 (βλ. σχήμα A11).

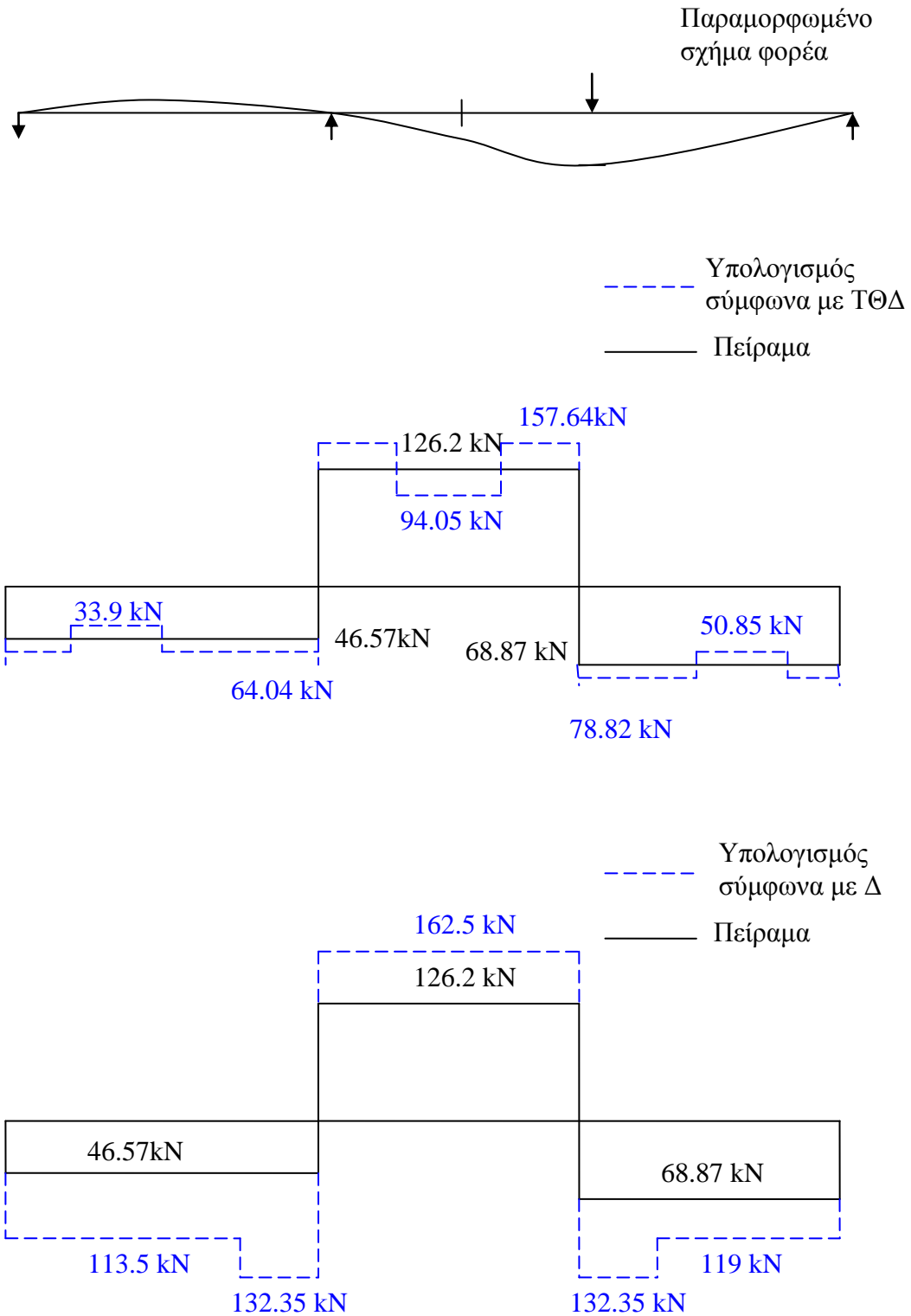
Από το σχήμα A13 φαίνεται ότι η μορφή αυτή της αστοχίας δεν εμποδίστηκε από την υπερεπάρκεια αντοχής σε τέμνουσα στην περιοχή του σημείου καμπής σύμφωνα με τη μέθοδο Δ. Αντίθετα, σύμφωνα με τη μέθοδο TΘΔ η αντοχή της περιοχής του σημείου καμπής υπολείπεται αυτής που απαιτείται για να αποφευχθεί αυτή η μορφή αστοχίας.



Σχήμα A11 Καμπύλη φορτίου (P) – μετατόπισης (δ) δοκιμίου A3-Δ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχήμα A12 Μορφή αστοχίας δοκιμίου A3-Δ. (Ξαφνική αστοχία στη θέση 1 (θέση σημείου καμπής).)

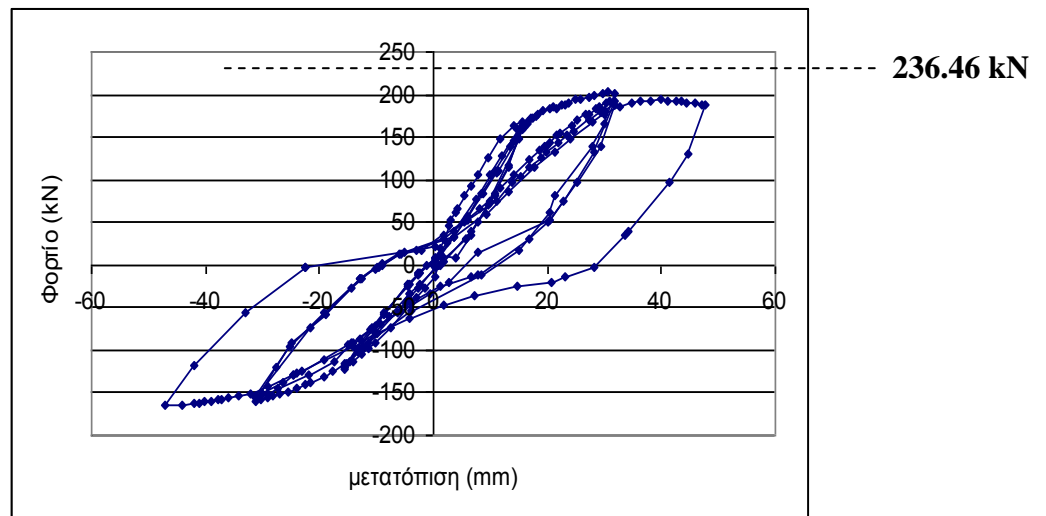


Σχήμα Α13 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Α3-Δ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο A4-TΘΔ

Αντίθετα με το δοκίμιο A3-Δ, η ανακυκλιζόμενη φόρτιση του δοκιμίου A4-TΘΔ διακόπηκε μετά την εμφάνιση έντονης καμπτικής ρηγματώσης στις περιοχές όπου αναμενόταν ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων (βλ. σχήμα A15) και ενώ η τιμή της πλαστιμότητας έφθασε την οριακή τιμή 3.5 (βλ. σχήμα A14).

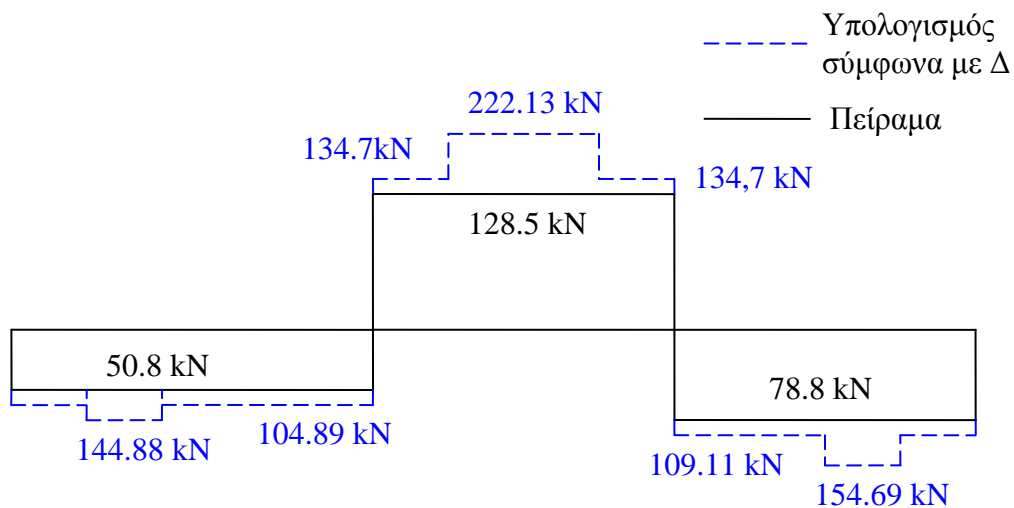
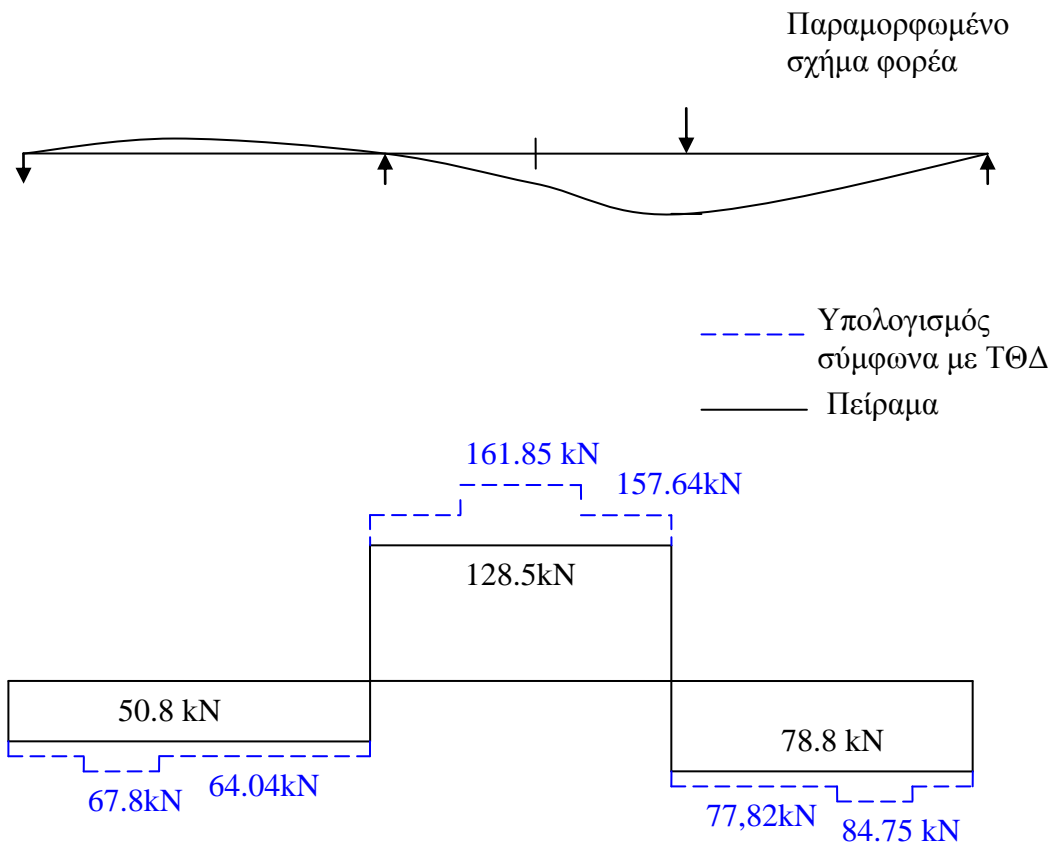
Στην περίπτωση αυτή οι τέμνουσες δυνάμεις σχεδιασμού είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές σε όλο το μήκος του δοκιμίου (βλ. σχήμα A16).



Σχήμα A14 Καμπύλη φορτίου (P) – μετατόπισης (δ) δοκιμίου A4 –ΤΘΔ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχήμα A15 Μορφή αστοχίας δοκιμίου A4-ΤΘΔ. (Σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στις θέσεις 1 (θέση άσκησης εγκάρσιου φορτίου) και 2 (μεσαία στήριξη).)



Σχήμα A16 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο A4-ΤΘΔ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

A5 Συμπεράσματα

1. Επιτεύχθηκε η αναπαραγωγή στο εργαστήριο των μορφών αστοχίας οι οποίες παρατηρήθηκαν σε κατακόρυφα στοιχεία τα οποία, ανεξάρτητα από τη μέθοδο σχεδιασμού τους, αστόχησαν στην περιοχή του σημείου καμπής κατά το σεισμό της 7/9/99 στην Αθήνα.
2. Η μέθοδος Δ δεν εξασφαλίζει έναντι της παραπάνω μορφής αστοχίας, η οποία είναι ξαφνική και δεν δίνει επαρκή προειδοποίηση.
3. Αντίθετα με τη μέθοδο Δ , η μέθοδος $T\Theta\Delta$ επιτυγχάνει τους στόχους του δομοστατικού σχεδιασμού για δεδομένη φέρουσα ικανότητα και επαρκή πλαστιμότητα.

Επισκευή και ενίσχυση δοκιμίων σχεδιασμένων με τη λογική των οριακών καταστάσεων αντοχής

Τα δοκίμια (Α1-ΤΘΔ, Α2-Δ, Α3-Δ και Α4-ΤΘΔ) της σειράς Α επισκευάστηκαν και ενισχύθηκαν με χρήση ινοϋφασμάτων και δοκιμάστηκαν εκ νέου με τρόπο παρόμοιο με αυτό που δοκιμάστηκαν αρχικά.

Η επισκευή των δοκιμίων είχε ως στόχο την κατά το δυνατόν αποκατάσταση των δοκιμίων στην αρχική τους κατάσταση, ενώ η ενίσχυση απέβλεπε στην αύξηση της φέρουσας ικανότητάς τους ώστε να ικανοποιούνται οι στόχοι του δομοστατικού σχεδιασμού για δεδομένη τιμή φέρουσας ικανότητας και επαρκή πλαστιμότητα.

Στην παρούσα σειρά τα δοκίμια αναφέρονται ως Α1-ΤΘΔ-ΕΕ, Α2-Δ-ΕΕ, Α3-Δ-ΕΕ και Α4-ΤΘΔ-ΕΕ, όπου ΤΘΔ και Δ δηλώνουν την μέθοδο σχεδιασμού των αρχικών δοκιμίων (Α1-ΤΘΔ, Α2-Δ, Α3-Δ και Α4-ΤΘΔ) και ΕΕ σημαίνει «επισκευασμένα / ενισχυμένα».

B1 Διαδικασία επισκευής

Αρχικά απομακρύνθηκαν, με τη βοήθεια αεροσυμπιεστή, τα σαθρά τμήματα και η αποδιοργανωμένη ζώνη του σκυροδέματος μεταξύ εκτεταμένων ρωγμών, που δε μπορούσαν να αποκατασταθούν με ρητινενέσεις. Ταυτόχρονα, αποκαταστήθηκε το ευθύγραμμο σχήμα των δοκιμίων και των διαμηκών ράβδων του οπλισμού τους στις περιοχές όπου είχαν αποκαλυφθεί μετά την απομάκρυνση του σαθρού υλικού. Επίσης, αντικαταστάθηκαν οι συνδετήρες που ήταν δύσκολο να αποκατασταθούν στην αρχική τους μορφή.

Στη συνέχεια εντοπίστηκαν οι επισκευάσιμες ρωγμές, καθαρίστηκαν με πεπιεσμένο αέρα και ανοίχθηκαν κατά μήκος τους οπές βάθους 3 cm για την υποδοχή ακροφυσίων, μέσω των οποίων έγινε η κάλυψη των οπών με εποξειδική πάστα. Μετά τη σκλήρυνση της πάστας, σε περίπου δύο έως τρεις ώρες από την τοποθέτησή της, έγινε υπό πίεση η τοποθέτηση της ρητίνης στις ρωγμές.

Μετά την πάροδο ολίγων ωρών που απαιτήθηκαν για τη σκλήρυνση της ρητίνης ακολούθησε η αποκατάσταση της διατομής με επισκευαστικό, μη συρρικνούμενο κονίαμα με την εμπορική επωνυμία EMACO S66. Προηγουμένως τα δοκίμια είχαν τοποθετηθεί σε καλούπια για να διατηρηθούν οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμίων.

B2 Διαδικασία ενίσχυσης

Για την ενίσχυση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν διαμήκεις και εγκάρσιες λωρίδες ανθρακούφασματος με την επωνυμία C1-30 της εταιρίας MBRACE (βλ. σχήματα B1 και B2) και τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

μέτρο ελαστικότητας :	230 000 MPa
μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση :	1,5%
χαρακτηριστική αντοχή σχεδιασμού :	3430 MPa
ενεργό πάχος υφάσματος :	0,165 mm

Η ενίσχυση των δοκιμίων έγινε σε δύο φάσεις :

- Προετοιμασία δοκιμίων

Περιλαμβάνει (α) λείανση των επιφανειών και στρογγύλευση των γωνιών με βουρτσάκι και τροχό και (β) επάλειψη των επιφανειών με αστάρι που προέκυψε από την ανάμειξη με μηχανικό αναδευτήρα δύο συστατικών Α και Β της MBRACE Primer σε κατ' όγκον αναλογία Α=75% και Β=25%. Η εφαρμογή του ασταριού έγινε σε μια στρώση με ρολό.

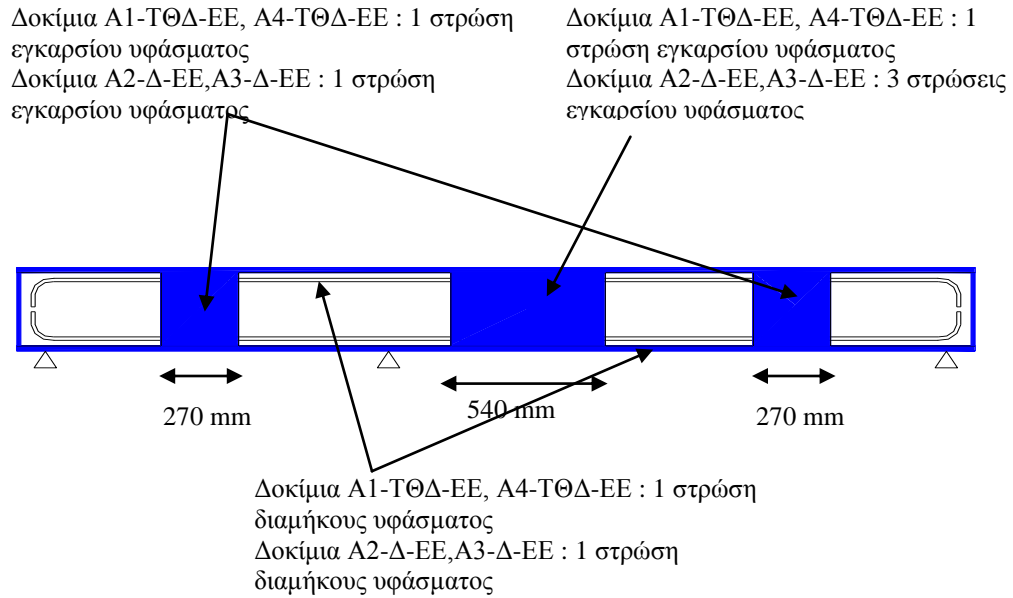
- Εφαρμογή ανθρακοϋφάσματος

Η εφαρμογή των ανθρακοϋφασμάτων έγινε μετά την παρέλευση 24 ωρών και πριν συμπληρωθούν 48 ώρες από την τοποθέτηση του ασταριού. Προηγήθηκε επάλειψη της επιφάνειας των δοκιμίων με ρητίνη, με την εμπορική ονομασία MBRACE saturant, που προέκυψε από την ανάμειξη δύο συστατικών Α και Β σε κατ' όγκου αναλογία Α=75% και Β=25%. Η στρώση και εφαρμογή των ανθρακοϋφασμάτων έγινε με την βοήθεια ρολού ενώ η ρητίνη ήταν νωπή (χρόνος εργασιμότητας ρητίνης περίπου 25 λεπτά). Μετά την στρώση του υφάσματος τοποθετήθηκε μία στρώση ρητίνης ανεξάρτητα από την τοποθέτηση νέας στρώσης υφάσματος.

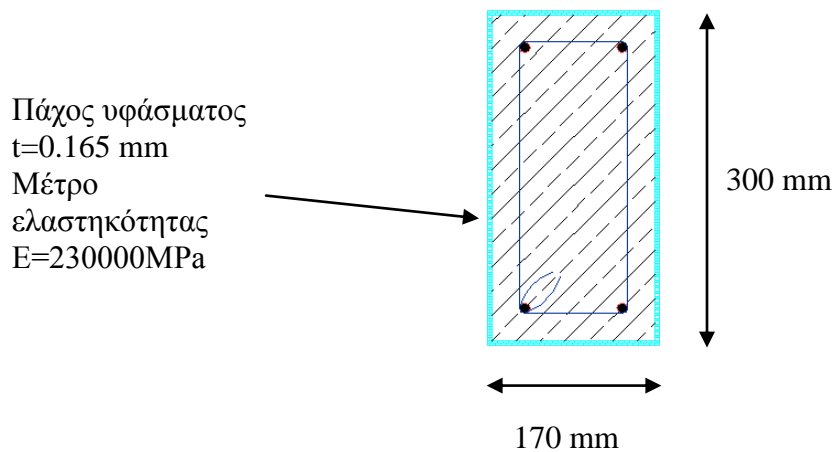
B3 Σχεδιασμός ενίσχυσης

Η αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων προέκυψε από την τοποθέτηση μίας στρώσης διαμήκους υφάσματος σε όλο το μήκος του άνω και κάτω πέλματος των δοκιμίων. Για την αποτροπή μη-καμπτικής αστοχίας τοποθετήθηκε ο αναγκαίος αριθμός λωρίδων εγκάρσιου υφάσματος σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ (βλ. σχήματα Β1 και Β2).

Από τα σχήματα φαίνονται ότι οι στρώσεις του εγκάρσιου υφάσματος ποικίλουν ανάλογα με τη μέθοδο σχεδιασμού του αρχικού δοκιμίου.



Σχήμα B1 Θέση εγκαρσίων ανθρακονημάτων.



Σχήμα B2 Διατομή δοκιμίων.

B4 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα B3 έως B15. Στα σχήματα B3, B6, B9 και B12 δίδονται οι καμπύλες εγκάρσιου φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων A1-ΤΘΔ-ΕΕ, A4-ΤΘΔ-ΕΕ, A2-Δ-ΕΕ και A3-Δ-ΕΕ, αντίστοιχα, ενώ οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων αυτών φαίνονται στα σχήματα B4, B7, B10, B13 και B14.

Στα σχήματα B5, B8, B11 και B15 δίδονται τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων που αντιστοιχούν στη μέγιστη πειραματική τιμή του εγκάρσιου φορτίου που ασκήθηκε στα δοκίμια. Τα σχήματα αυτά περιέχουν όχι μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και τα αποτελέσματα των υπολογισμών σύμφωνα με τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των δοκιμίων.

B5 Σχόλια

Δοκίμιο A1-ΤΘΔ-ΕΕ

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όπως περιγράφεται στο σχήμα 3 του εισαγωγικού κεφαλαίου, αντί της μονοτονικής φόρτισης στην οποία είχε υποβληθεί αρχικά (βλ. σειρά Α) και σχεδιαζόταν να επαναληφθεί σ' αυτή τη σειρά των πειραμάτων. Η απόκλιση από το πρόγραμμα των δοκιμών επιβλήθηκε για το λόγο που περιγράφεται στα σχόλια για το δοκίμιο (A4-ΤΘΔ-ΕΕ) (βλ. κατωτέρω).

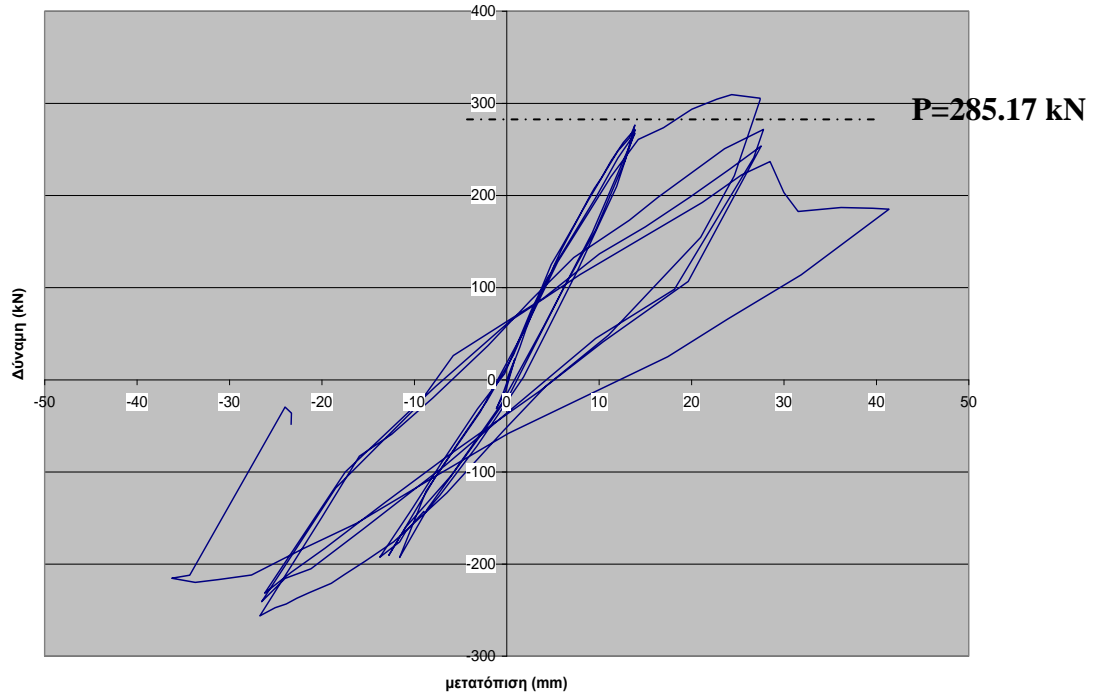
Από το σχήμα B3 φαίνεται ότι στην πρώτη από τις ανακυκλίσεις μεταξύ μετατοπίσεων που αντιστοιχούν σε τιμές του δείκτη πλαστιμότητας ίσες με ± 2 , η μέγιστη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου υπερέβη την τιμή του φορτίου σχεδιασμού. Πτώση της φέρουσας ικανότητας συνέβη μετά την συμπλήρωση τριών ανακυκλίσεων μεταξύ των παραπάνω μετατοπίσεων, όταν επιχειρήθηκε να αυξηθεί το βέλος κάμψης ώστε να αντιστοιχεί σε δείκτη πλαστιμότητας ίσο με 3. Την πτώση αυτή προκάλεσε η θραύση μιας από τις διαμήκειες ράβδους στην περιοχή της 1^{ης} πλαστικής άρθρωσης (περιοχή

επιβαλλόμενου φορτίου). Αυτή η μορφή αστοχίας δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην αρχική του μορφή το δοκίμιο είχε υποβληθεί σε μονότονη φόρτιση που προκάλεσε τιμές του βέλους κάμψης πολύ μεγαλύτερες από αυτή που αντιστοιχεί σε δείκτη πλαστιμότητας ίσο με 3,5 (βλ σχήμα A5). Για τις τιμές αυτές των βελών κάμψης απαιτούνται μεγάλες τιμές καμπυλοτήτων στην περιοχή της 1^{ης} πλαστικής άρθρωσης και συνεπώς σημαντική καταπόνηση του διαμήκους οπλισμού. Υπενθυμίζεται ότι κατά τις διαδικασίες επισκευής και ενίσχυσης των δοκιμίων (βλ. ενότητες B1 και B2, αντίστοιχα) η μόνη επέμβαση που έγινε στις διαμήκεις ράβδους του χάλυβα ήταν η αποκατάσταση του ευθύγραμμου σχήματός του.

Παρά το γεγονός ότι η τοποθέτηση των διαμηκών λωρίδων των ινοϋφασμάτων φάνηκε να επιτρέπει τη συνέχιση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης μεταξύ ακραίων τιμών των βελών κάμψης που αντιστοιχούν σε τιμές του δείκτη πλαστιμότητας ίσες με ± 3 (με μειωμένη όμως φέρουσα ικανότητα των δοκιμίων), το πείραμα διακόπηκε μετά τη συμπλήρωση της πρώτης από αυτές τις ανακυκλίσεις για λόγους ασφαλείας.

Κατά την δοκιμή αυτή, όπως φαίνεται από την ρηγμάτωση των δοκιμίων (βλ σχήμα B4), επιτεύχθηκε ο σχηματισμός δύο πλαστικών αρθρώσεων κατά την ανακύκλιση μεταξύ ακραίων μετατοπίσεων που αντιστοιχούν σε τιμές του δείκτη πλαστιμότητας ίσες με ± 2 .

Τέλος από το σχήμα B5 φαίνεται ότι ο εγκάρσιος οπλισμός, στο τμήμα μεταξύ εσωτερικής στήριξης και σημείου φόρτισης ήταν ικανός να αποτρέψει μη-καμπτική μορφή αστοχίας, παρά το γεγονός ότι σύμφωνα με τη μέθοδο Δ υπολείπεται σημαντικά εκείνου που εξασφαλίζει έναντι αστοχίας σε τέμνουσα.

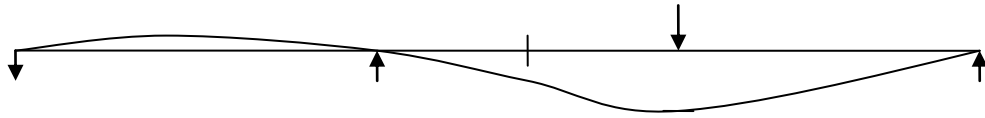


Σχήμα Β3 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Α1-ΤΘΔ-ΕΕ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



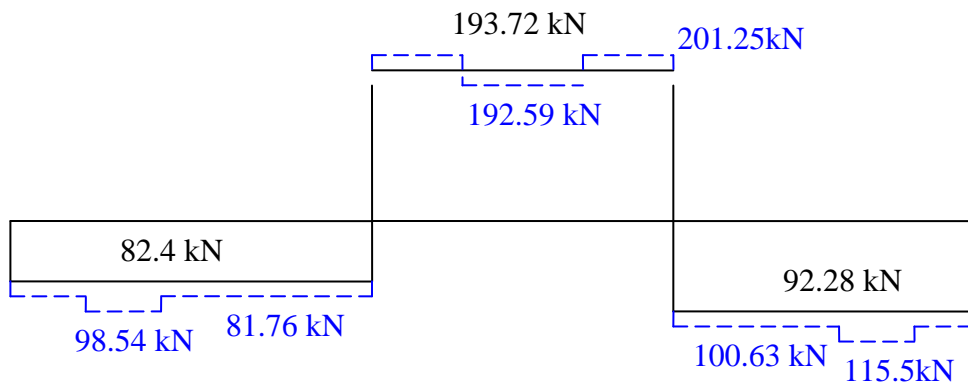
Σχήμα Β4 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Α1-ΤΘΔ-ΕΕ. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου και στη μεσαία στήριξη, αστοχία εφελκυσμένου χάλυβα.)

Παραμορφωμένο
σχήμα φορέα



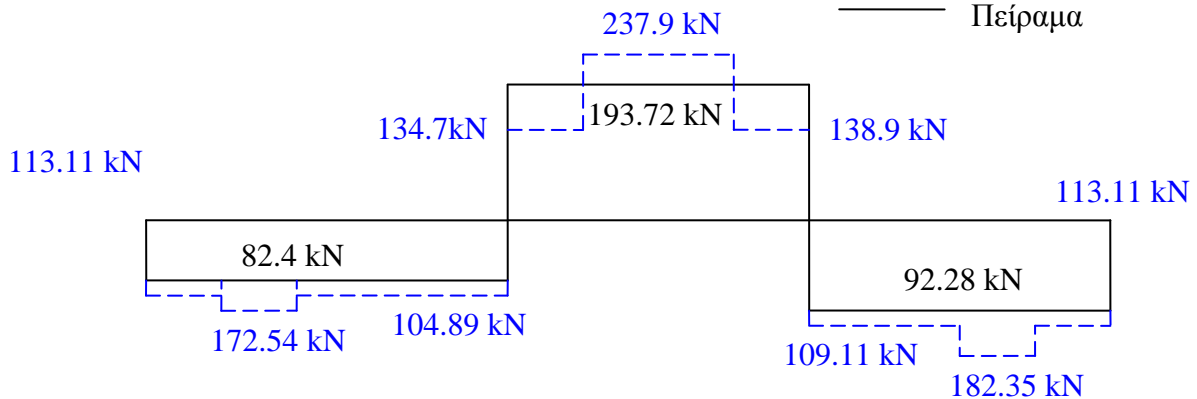
----- Υπολογισμός
σύμφωνα με ΤΘΔ

———— Πείραμα



----- Υπολογισμός
σύμφωνα με Δ

———— Πείραμα

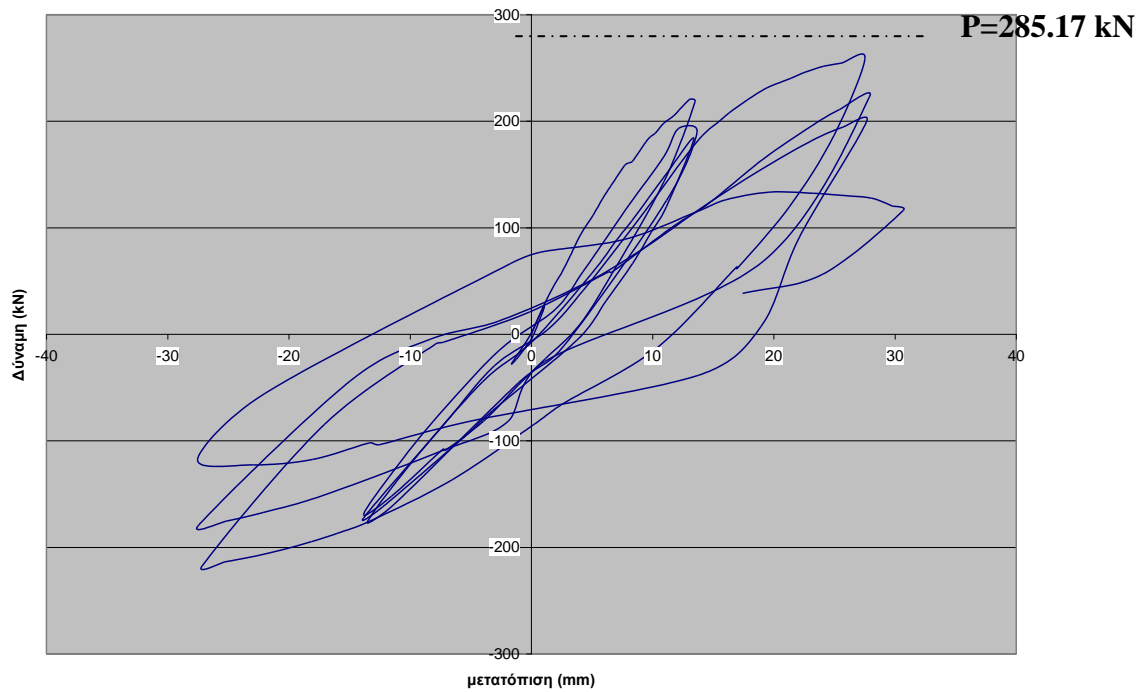


Σχήμα Β5 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Α1-ΤΘΔ-ΕΕ υπό το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο A4-TΘΔ-EE

Το δοκίμιο αυτό υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση όπως και στην σειρά A των πειραμάτων. Αστόχησε όταν επιχειρήθηκε να αυξηθεί το βέλος κάμψης πέραν της τιμής που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα 2 (βλ. Σχήμα B6). Παρατηρήθηκε ξαφνική αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στον κορμό του δοκιμίου περί την περιοχή της πρώτης πλαστικής άρθρωσης (περιοχή επιβολής φορτίου) (βλ. Σχήμα B7). Εκ των υστέρων, μετά από εξέταση των δοκιμίων, διαπιστώθηκε ότι αστοχία οφειλόταν στην παρουσία σαθρού υλικού το οποίο δεν είχε απομακρυνθεί κατά την επισκευή του δοκιμίου. Παρά ταύτα, από το σχήμα B8 φαίνεται ότι, σύμφωνα με τη μέθοδο Δ, το δοκίμιο αυτό θα έπρεπε να είχε ήδη αστοχήσει σε τέμνουσα για πολύ μικρότερο φορτίο.

Το πείραμα αυτό αποφασίστηκε να επαναληφθεί χρησιμοποιώντας το δοκίμιο A1-TΘΔ-EE που πρόκειται αρχικά να υποβληθεί σε μονότονη φόρτιση.

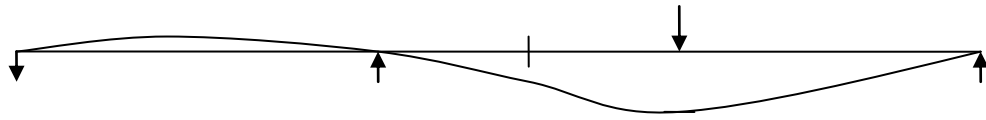


Σχήμα Β6 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Α4-ΤΘΔ-ΕΕ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

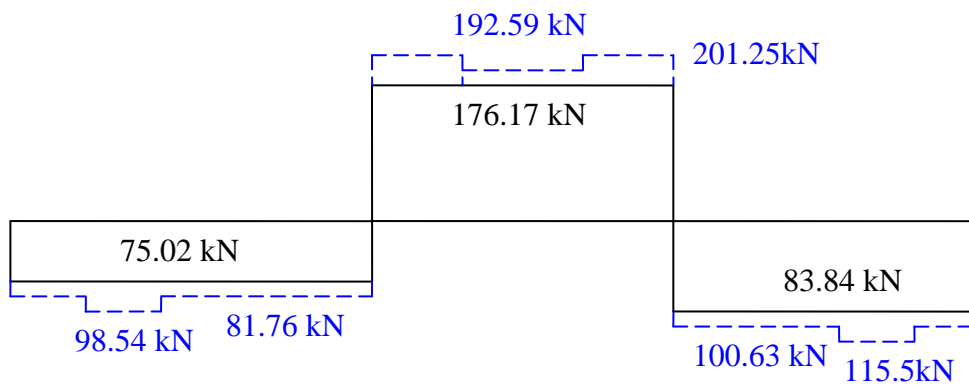


Σχήμα Β7 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Α4-ΤΘΔ-ΕΕ. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου, σύνθλιψη θλιβόμενης ζώνης.)

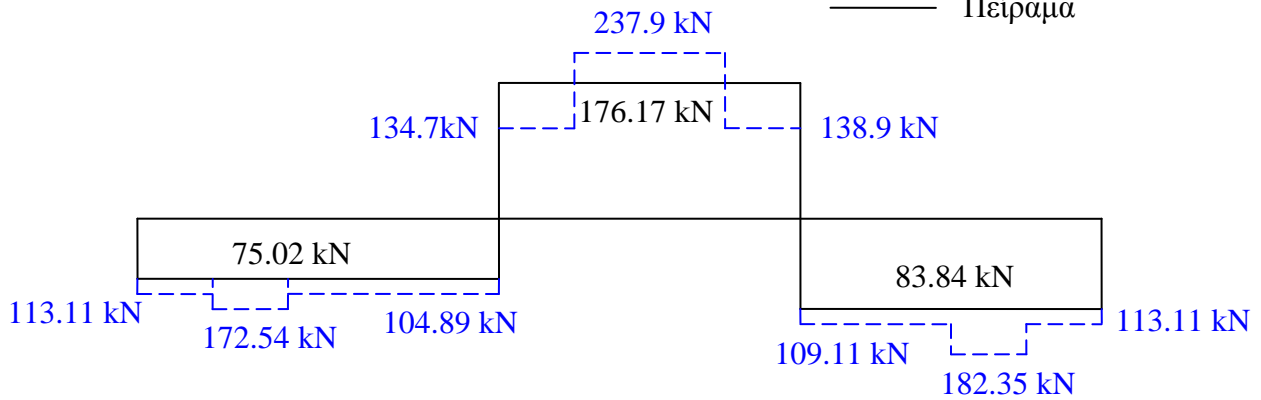
Παραμορφωμένο
σχήμα φορέα



----- Υπολογισμός
σύμφωνα με ΤΘΔ
———— Πείραμα



----- Υπολογισμός
σύμφωνα με Δ
———— Πείραμα



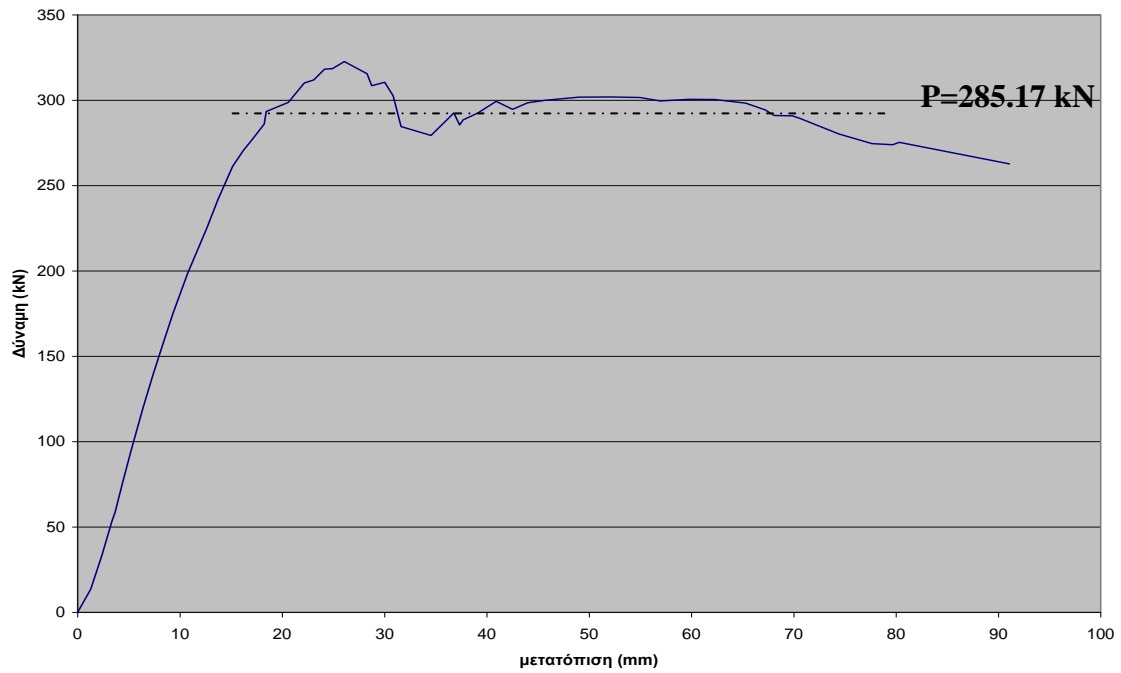
Σχήμα Β8 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Α4-ΤΘΔ-ΕΕ υπό το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο A2-Δ-EE

Όπως και στην σειρά A, το δοκίμιο αυτό υποβλήθηκε σε μονότονη φόρτιση. Σε αντίθεση όμως με την προηγούμενη φόρτιση (βλ. σχήμα A8), από το σχήμα B9 φαίνεται ότι η φέρουσα ικανότητα του επισκευασμένου/ ενισχυμένου δοκιμίου ήταν μεγαλύτερη από την τιμή σχεδιασμού.

Η συμπεριφορά του δοκιμίου χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό δύο πλαστικών αρθρώσεων (βλ. σχήμα B10) και από μία σχετικά μικρή απώλεια, ακολουθούμενη από μερική αποκατάσταση, της φέρουσας ικανότητας του, μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής του επιβαλλόμενου φορτίου (βλ. σχήμα B9). Βαθμιαία πτώση του φορτίου παρατηρήθηκε όταν το βέλος κάμψης υπερέβη τα 90 mm, που αντιστοιχούν σε τιμή του δείκτη πλαστιμότητας περίπου ίση με 3,5, οπότε και διακόπηκε η δοκιμή.

Όπως και στα προηγούμενα δοκίμια, από το σχήμα B11 φαίνεται ότι ο εγκάρσιος οπλισμός, μεταξύ εσωτερικής στήριξης και σημείου φόρτισης ήταν ικανός να αποτρέψει μη-καμπτικής μορφής αστοχίες, παρά το γεγονός ότι σύμφωνα με τη μέθοδο Δ υπολείπεται σημαντικά της τιμής εκείνης που εξασφαλίζει έναντι αστοχίας σε τέμνουσα.

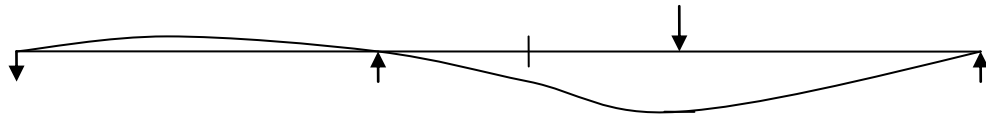


Σχήμα Β9 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Α2-Δ-ΕΕ υπό μονοτονική φόρτιση.

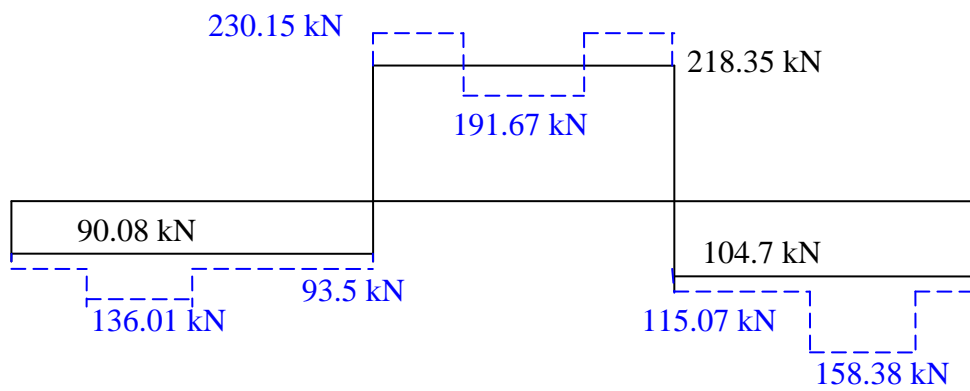


Σχήμα Β10 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Α2-Δ-ΕΕ. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου και στη μεσαία στήριξη.)

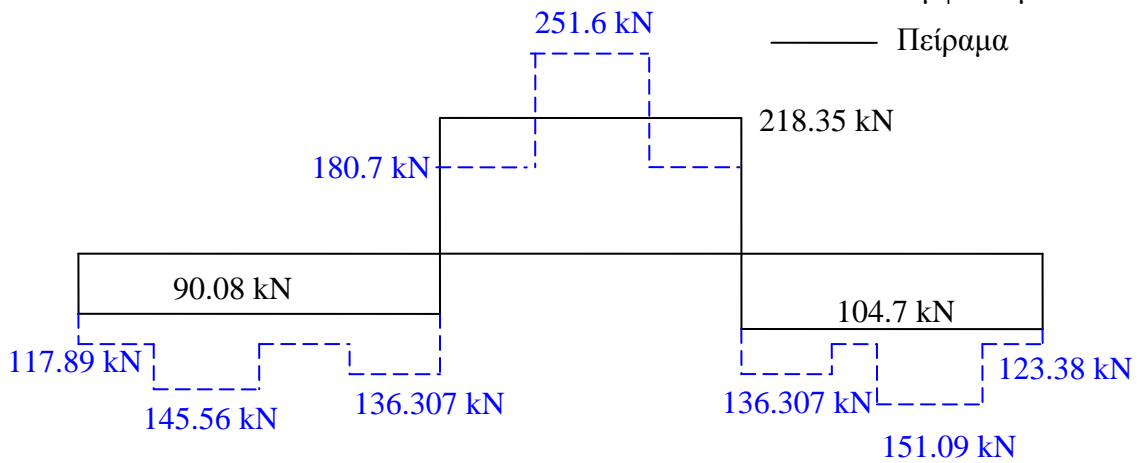
Παραμορφωμένο
σχήμα φορέα



--- Υπολογισμός
σύμφωνα με ΤΘΔ
— Πείραμα



--- Υπολογισμός
σύμφωνα με Δ
— Πείραμα



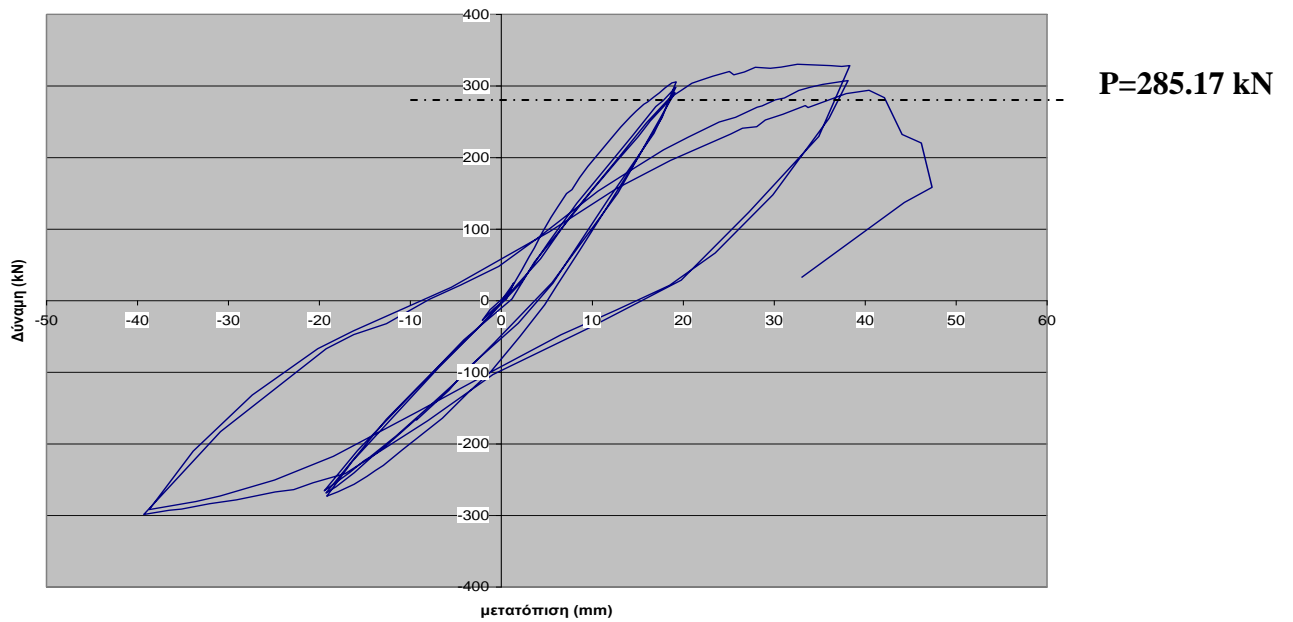
Σχήμα Β11 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Α2-Δ-ΕΕ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο A3-Δ-ΕΕ

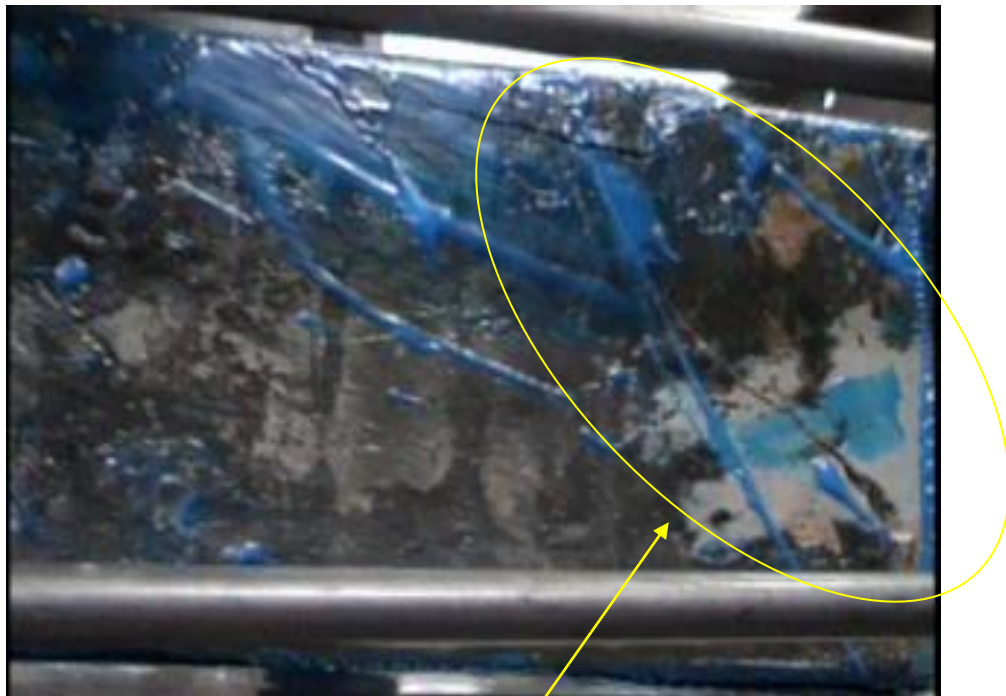
Όπως και στη σειρά A, το δοκίμιο αυτό υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση όπως φαίνεται στο σχήμα 3 του εισαγωγικού κεφαλαίου. Παρά το γεγονός ότι η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου υπερέβη την τιμή σχεδιασμού (βλ. σχήμα B12), το δοκίμιο απώλεσε την φέρουσα ικανότητά του ξαφνικά, αμέσως μόλις επιχειρήθηκε να αυξηθεί το βέλος κάμψης πέραν της τιμής που αντιστοιχεί σε δείκτη πλαστιμότητας 2. Την αστοχία προκάλεσε ο σχηματισμός μίας κεκλιμένης ρωγμής στο «κρίσιμο μήκος» του μικρότερου ανοίγματος του δοκιμίου (βλ σχήμα B13).

Από το σχήμα B14 φαίνεται ότι η κεκλιμένη αυτή ρωγμή εμφανίστηκε σε περιοχή όπου, όπως φαίνεται στο σχήμα B15, η τιμή της δρώσας τέμνουσας σύμφωνα με τη μέθοδο Δ υπολείπεται σημαντικά της αντοχής σε τέμνουσα, και όχι στη παράπλευρη περιοχή, όπου συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή η αντοχή σε τέμνουσα υπολείπεται σημαντικά της τιμής της δρώσας τέμνουσας. Αυτή η μη αναμενόμενη από τους κανονισμούς μορφή αστοχίας σε περιοχές «κρίσιμων μηκών» έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενες εργασίες.^{15,16,30,31} Θα πρέπει πάντως να σημειωθεί ότι η αστοχία αυτή συνέβη μετά το σχηματισμό δύο πλαστικών αρθρώσεων (βλ. σχήμα B14), χωρίς όμως ο δείκτης πλαστιμότητας να υπερβεί το 2 (βλ. σχήμα B12).

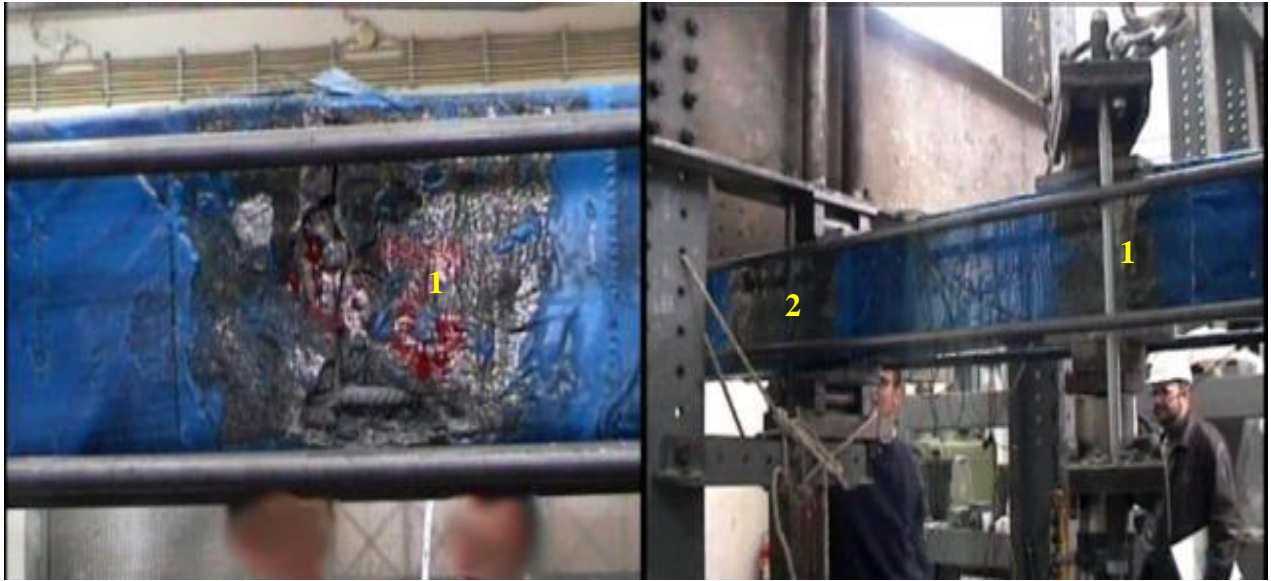
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος TΘΔ θα μπορούσε να αποτρέψει τη μορφή αυτή της αστοχίας μέσω μεγαλύτερης αύξησης της καμπτικής αντοχής. Αυτό όμως ήταν ανεύφικτο να επιτευχθεί στην παρούσα σειρά των πειραμάτων λόγω αδυναμίας της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές να επιβάλει μεγαλύτερο εγκάρσιο φορτίο.



Σχήμα Β12 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Α3-Δ-ΕΕ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

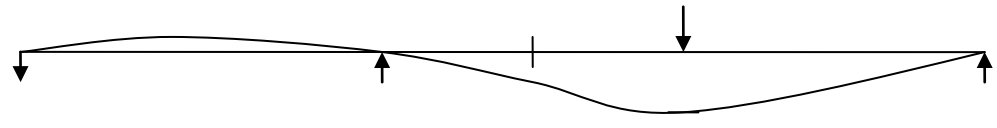


Σχήμα Β13 Αστοχία δοκιμίου Α3-Δ-ΕΕ λόγω σχηματισμού κεκλιμένης ρωγμής.

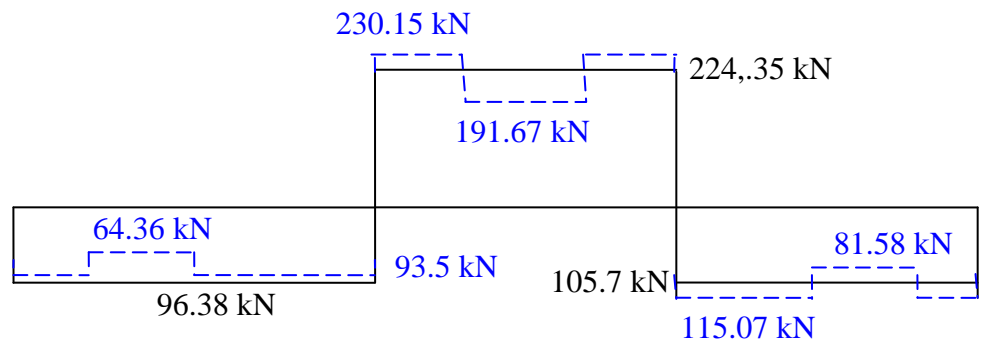


Σχήμα Β14 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Α3-Δ-ΕΕ. (Σχηματισμός πλαστικής αρθρωσης στη θέση ασκήσης του φορτίου (1) και στη μεσαία στήριξη (2).)

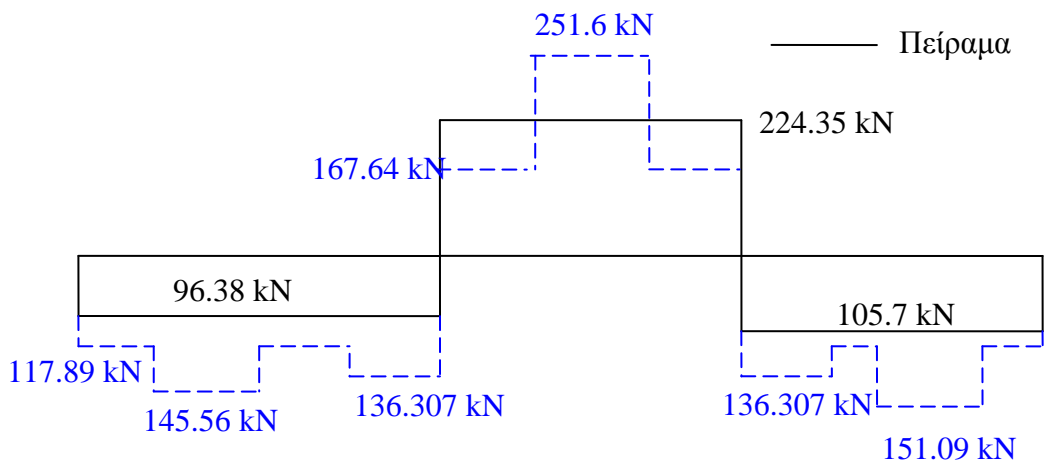
Παραμορφωμένο
σχήμα φορέα



----- Υπολογισμός
σύμφωνα με ΤΘΔ
———— Πείραμα



----- Υπολογισμός
σύμφωνα με Δ
———— Πείραμα



Σχήμα Β15 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Α3-Δ-ΕΕ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

B6 Συμπεράσματα

1. Για τα δοκίμια που αρχικά σχεδιάστηκαν με την μέθοδο TΘΔ, η επισκευή και ενίσχυση σύμφωνα με την ίδια μέθοδο βρέθηκε ότι εξασφαλίζει
 - φέρουσα ικανότητα μεγαλύτερη του φορτίου σχεδιασμού,
 - τιμές του δείκτη πλαστιμότητας μεγαλύτερες του 2. (Η τιμή 2 αντιστοιχεί σε προγενέστερη επιπόνηση ικανή να προκαλέσει βέλος κάμψης με δείκτη πλαστιμότητας 5.)

2. Για τα δοκίμια που αρχικά σχεδιάστηκαν με την μέθοδο Δ, διαπιστώθηκε ότι η επισκευή και ενίσχυση σύμφωνα με την μέθοδο TΘΔ
 - είναι ικανή να αποτρέψει αστοχία στην περιοχή του σημείου καμπής που συνέβη κατά την προγενέστερη επιπόνηση των δοκιμίων
 - δεν βρέθηκε ικανή να αποτρέψει αστοχία που προκλήθηκε από έντονη ρηγματώση εντός ενός των «κρίσιμων μηκών» του δοκιμίου.

Ενίσχυση δοκιμών σχεδιασμένων με τη λογική των οριακών καταστάσεων αντοχής

Το δεύτερο από τα ζεύγη των δοκιμών που κατασκευάστηκαν, αλλά δε δοκιμάστηκαν στη σειρά Α ενισχύθηκαν με ινοϋφάσματα σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ και υποβλήθηκαν σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέχρις αστοχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3 του εισαγωγικού κεφαλαίου.

Κύριος στόχος της σειράς αυτής των πειραμάτων ήταν η περαιτέρω διερεύνηση της αξιοπιστίας τόσο της μεθόδου ΤΘΔ, όσο και της τεχνολογίας των ινοϋφασμάτων, όταν χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση δομικών στοιχείων αρχικά σχεδιασμένων για χαμηλότερη φέρουσα ικανότητα. Δευτερευόντως, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτής της σειράς με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προγενέστερης, διερευνήθηκε και η επίδραση της διαδικασίας επισκευής στη συμπεριφορά των δοκιμών, η οποία αποτελεί και την κύρια διαφορά μεταξύ των δύο σειρών πειραμάτων.

Στην παρούσα σειρά τα δοκίμια αναφέρονται ως Γ1-ΤΘΔ-Ε, Γ2-Δ-Ε, Γ3-ΤΘΔ-Ε και Γ4-Δ-Ε, όπου ΤΘΔ και Δ δηλώνουν τη μέθοδο σχεδιασμού των αρχικών δοκιμών και Ε σημαίνει «ενισχυμένα». Συγκεκριμένα, τα δοκίμια Γ1-ΤΘΔ-Ε και Γ3-ΤΘΔ-Ε είχαν αρχικά σχεδιαστεί με τη μέθοδο ΤΘΔ, ενώ τα δοκίμια Γ2-Δ-Ε και Γ4-Δ-Ε με τη μέθοδο Δ. Η ενίσχυση των δοκιμών σχεδιάστηκε σε όλες τις περιπτώσεις με τη μέθοδο ΤΘΔ.

Γ1 Διαδικασία ενίσχυσης

Όπως και στη σειρά B, για την ενίσχυση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν διαμήκεις και εγκάρσιες λωρίδες ινοϋφασμάτων. Όμως, για μεν τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μονότονη φόρτιση τα ινοϋφάσματα περιείχαν ίνες υάλου, για δε τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση τα ινοϋφάσματα ήταν αυτά που χρησιμοποιήθηκαν και στη σειρά B, δηλαδή περιείχαν ίνες άνθρακα.

Η εμπορική επωνυμία των υαλοϋφασμάτων ήταν G-60 AR της εταιρίας McBRACE με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

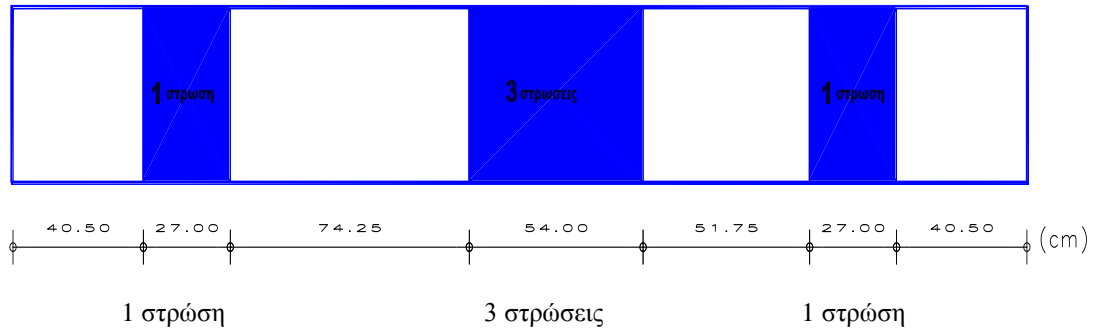
μέτρο ελαστικότητας :	65 000 MPa
μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση :	2,8%
χαρακτηριστική αντοχή σχεδιασμού :	1820 MPa
ενεργό πάχος υφάσματος :	0,23 mm

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανθρακοϋφασμάτων εδόθησαν στην ενότητα B2.

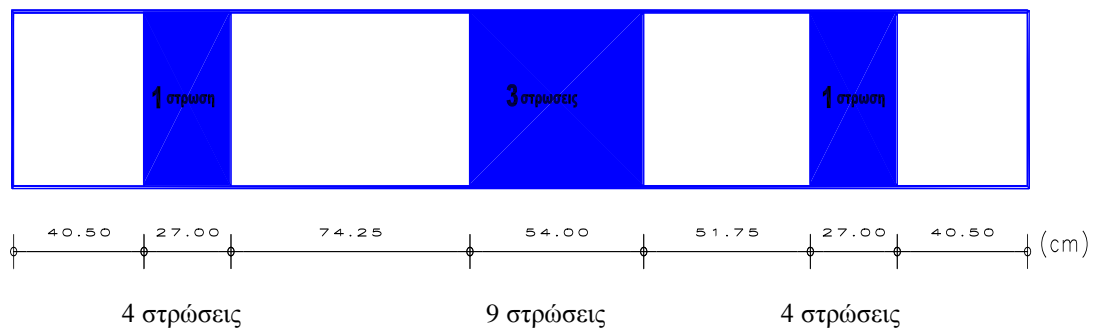
Γ2 Σχεδιασμός ενίσχυσης

Για την περίπτωση επισκευής με χρήση υαλοϋφασμάτων, η αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων προέκυψε από την τοποθέτηση τριών στρώσεων διαμήκους υφάσματος σε όλο το μήκος του άνω και κάτω πέλματος των δοκιμίων, ενώ για την περίπτωση επισκευής με χρήση ανθρακοϋφασμάτων, τοποθετήθηκε μία στρώση, όπως και για τα δοκίμια της σειράς B.

Για την αποτροπή μη-καμπτικής αστοχίας τοποθετήθηκε ο αναγκαίος αριθμός λωρίδων εγκάρσιου υφάσματος σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ (βλ. σχήματα Γ1 και Γ2). Από τα σχήματα φαίνονται ότι οι στρώσεις του εγκάρσιου υφάσματος ποικίλουν ανάλογα με τη μέθοδο σχεδιασμού του αρχικού δοκιμίου και τον τύπο υφάσματος.



Σχήμα Γ1 Εγκάρσια όπλιση με ινοϋφάσματα σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ για τα δοκίμια Ο.Σ. που ήταν σχεδιασμένα με την ίδια μέθοδο.



Σχήμα Γ2 Εγκάρσια όπλιση με ινοϋάσματα σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ για τα δοκίμια που ήταν σχεδιασμένα με τη μέθοδο Δ

Γ3 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα Γ3 έως Γ15. Στα σχήματα Γ3, Γ6, Γ9 και Γ12 δίδονται οι καμπύλες εγκάρσιου φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων Γ1-ΤΘΔ-Ε, Γ2-Δ-Ε, Γ3-ΤΘΔ-Ε και Γ4-Δ-Ε, αντίστοιχα, ενώ οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων αυτών φαίνονται στα σχήματα Γ4, Γ7, Γ10 και Γ13.

Στα σχήματα Γ5, Γ8, Γ11 και Γ14 δίδονται τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων που αντιστοιχούν στη μέγιστη πειραματική τιμή του εγκάρσιου φορτίου που ασκήθηκε στα δοκίμια. Τα σχήματα αυτά περιέχουν όχι μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και τα αποτελέσματα των υπολογισμών σύμφωνα με τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των δοκιμίων.

Γ4 Σχόλια

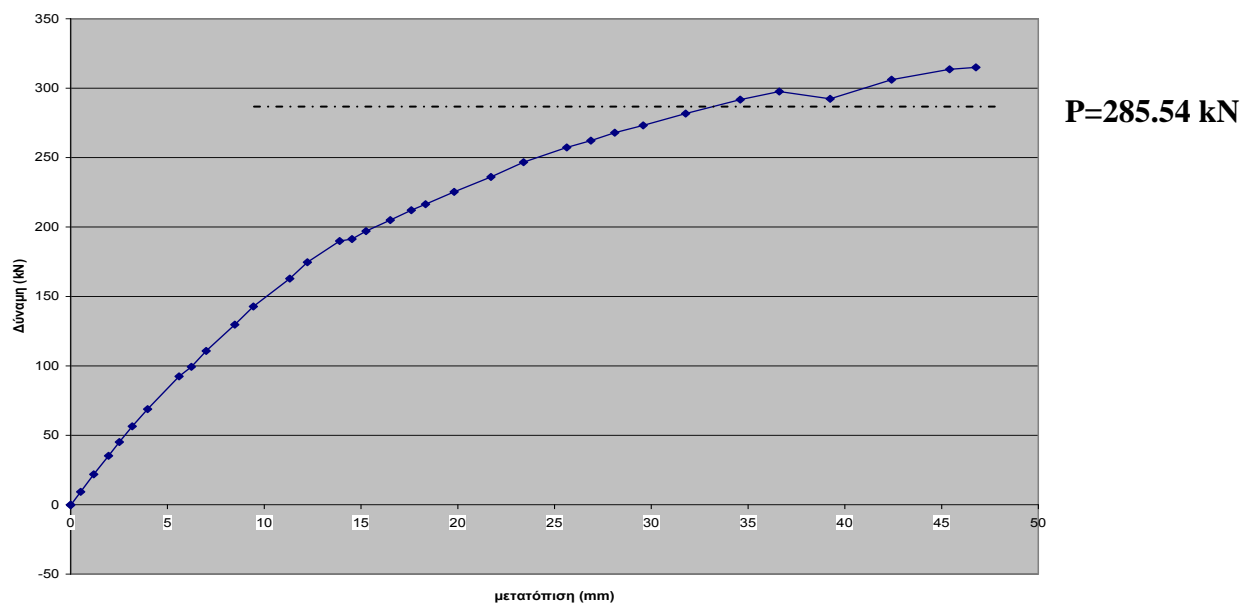
Δοκίμιο Γ1-ΤΘΔ-Ε

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε μονότονη φόρτιση, όπως περιγράφεται στο σχήμα 3 του εισαγωγικού κεφαλαίου. Από το σχήμα Γ3 φαίνεται ότι η πειραματική τιμή (315 kN) της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από την τιμή σχεδιασμού (285.54 kN), η οποία προκύπτει από το σχήμα 1 του εισαγωγικού κεφαλαίου με βάση την παραδοχή σχηματισμού δύο πλαστικών αρθρώσεων.

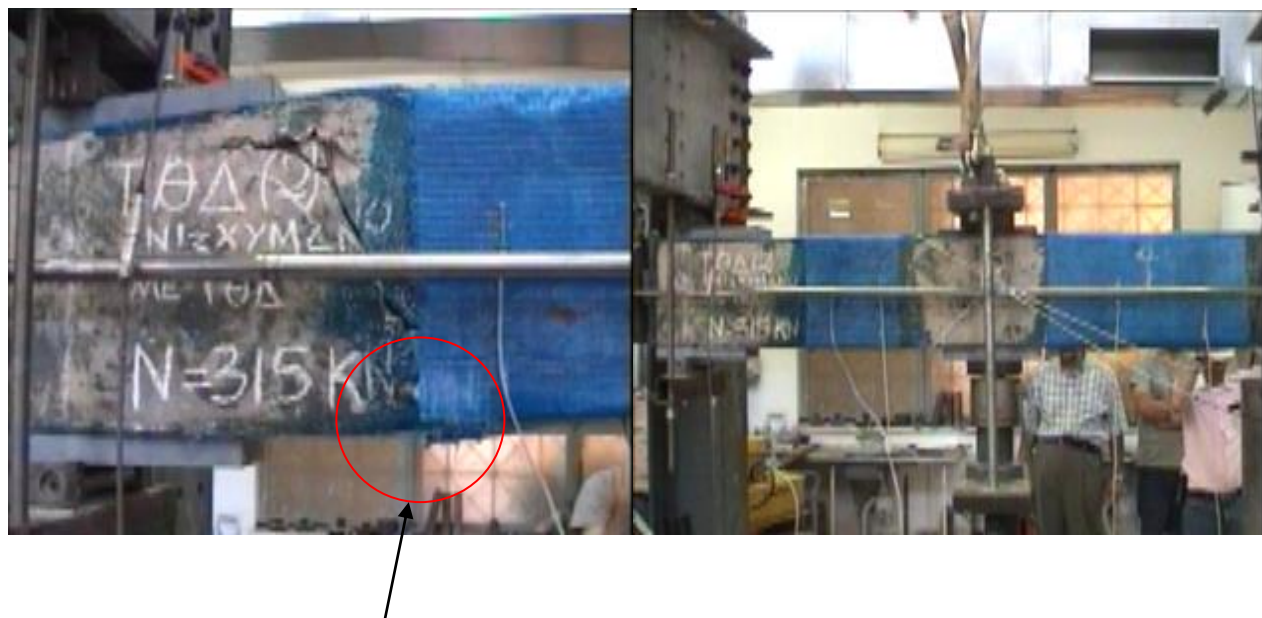
Όμως, η αστοχία ήταν ψαθυρή, συνέβη πριν το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων και προκλήθηκε από μια κεκλιμένη ρωγμή που προεκτάθηκε στην περιοχή της λωρίδας του υφάσματος που ήταν τοποθετημένη στο τμήμα του δοκιμίου μεταξύ της θέσης του φορτίου

και της εξωτερικής στήριξης (βλ. σχήμα Γ4). Η αδυναμία συγκράτησης της προέκτασης της κεκλιμένης ρωγμής οφείλεται στη διάρρηξη της μιας και μοναδικής στρώσης υαλοϋφάσματος που ήταν τοποθετημένη στην περιοχή αυτή το δοκιμίου (βλ. σχήμα Γ1). Η διάρρηξη αυτή προκλήθηκε κατά τη μεταφορά του δοκιμίου από το χώρο επισκευής στην πειραματική διάταξη.

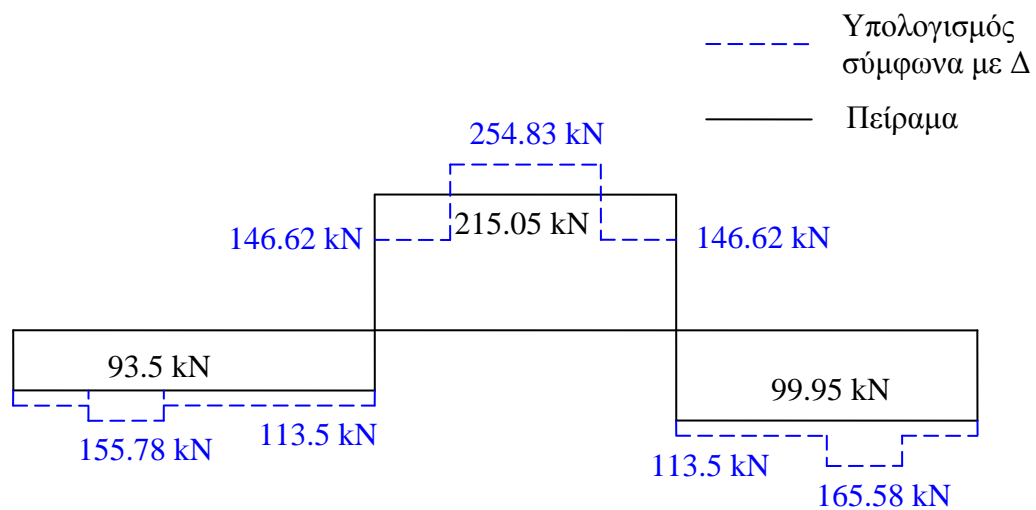
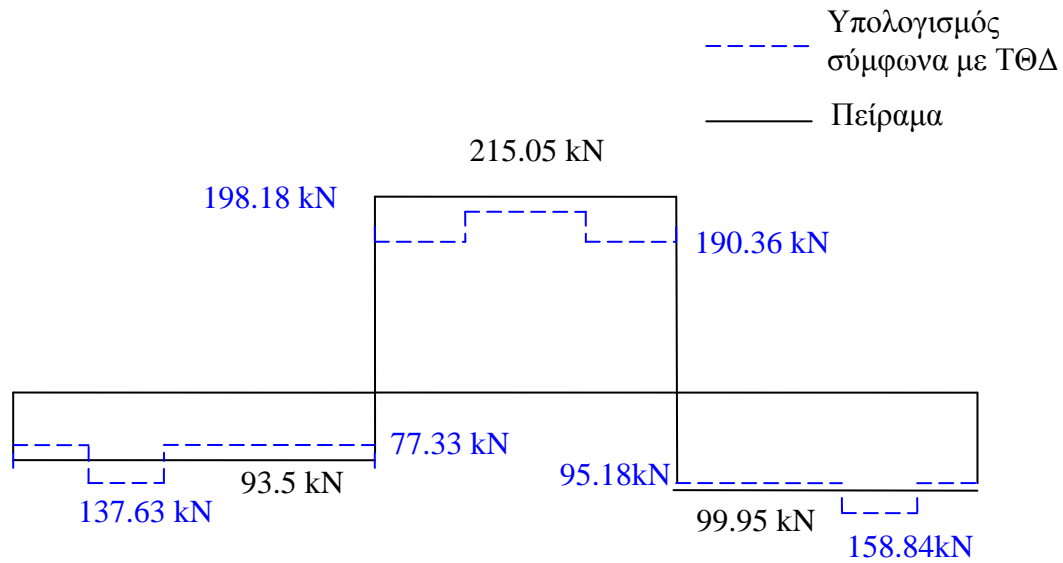
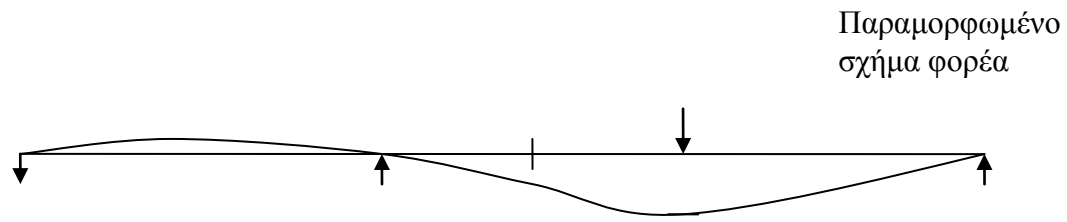
Παρά την πρόωγη αστοχία του δοκιμίου, από το σχήμα Γ5 φαίνεται ότι ο εγκάρσιος οπλισμός, στο τμήμα μεταξύ εσωτερικής στήριξης και σημείου φόρτισης, ήταν ικανός να αποτρέψει μη-καμπτικής μορφής αστοχίες, παρά το γεγονός ότι σύμφωνα με τη μέθοδο Δ υπολείπεται σημαντικά εκείνου που εξασφαλίζει έναντι αστοχίας σε τέμνουσα.



Σχήμα Γ3 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Γ1-ΤΘΔ-Ε υπό μονοτονική φόρτιση.



Σχήμα Γ4 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Γ1-ΤΘΔ-Ε (αστοχία υφάσματος στην ακμή του δοκιμίου, στην περιοχή ανάμεσα στο φορτίο και στην ακραία στήριξη).

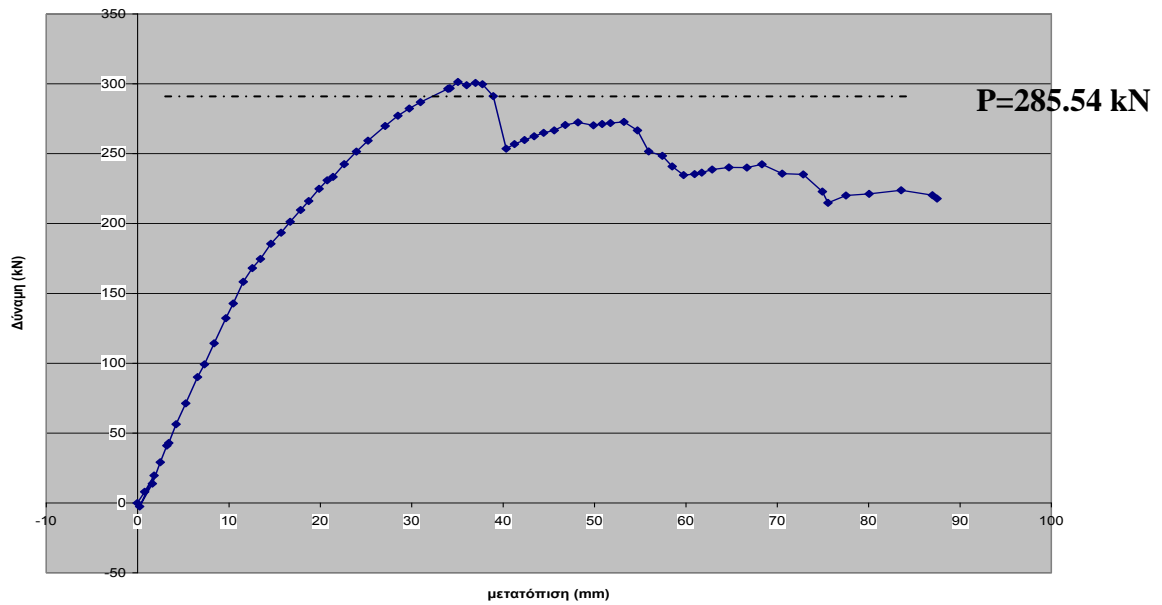


Σχήμα Γ5 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Γ1-ΤΘΔ-Ε υπό το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο Γ2-Δ-E

Από το σχήμα Γ6 φαίνεται ότι η πειραματική τιμή (301.32 kN) της φέρουσας ικανότητας υπερέβη την τιμή σχεδιασμού (285.54 kN). Όμως μετά την επίτευξη αυτής της τιμής ακολούθησε, κατά τους κύκλους φόρτισης, μια αργή μεν, αλλά συνεχής απώλεια της φέρουσας ικανότητας. Η δοκιμή διακόπηκε όταν η απώλεια έφθασε περίπου το 25% και ενώ το βέλος κάμψης υπερέβη το 3πλάσιο της τιμής που αντιστοιχούσε στο μέγιστο φορτίο.

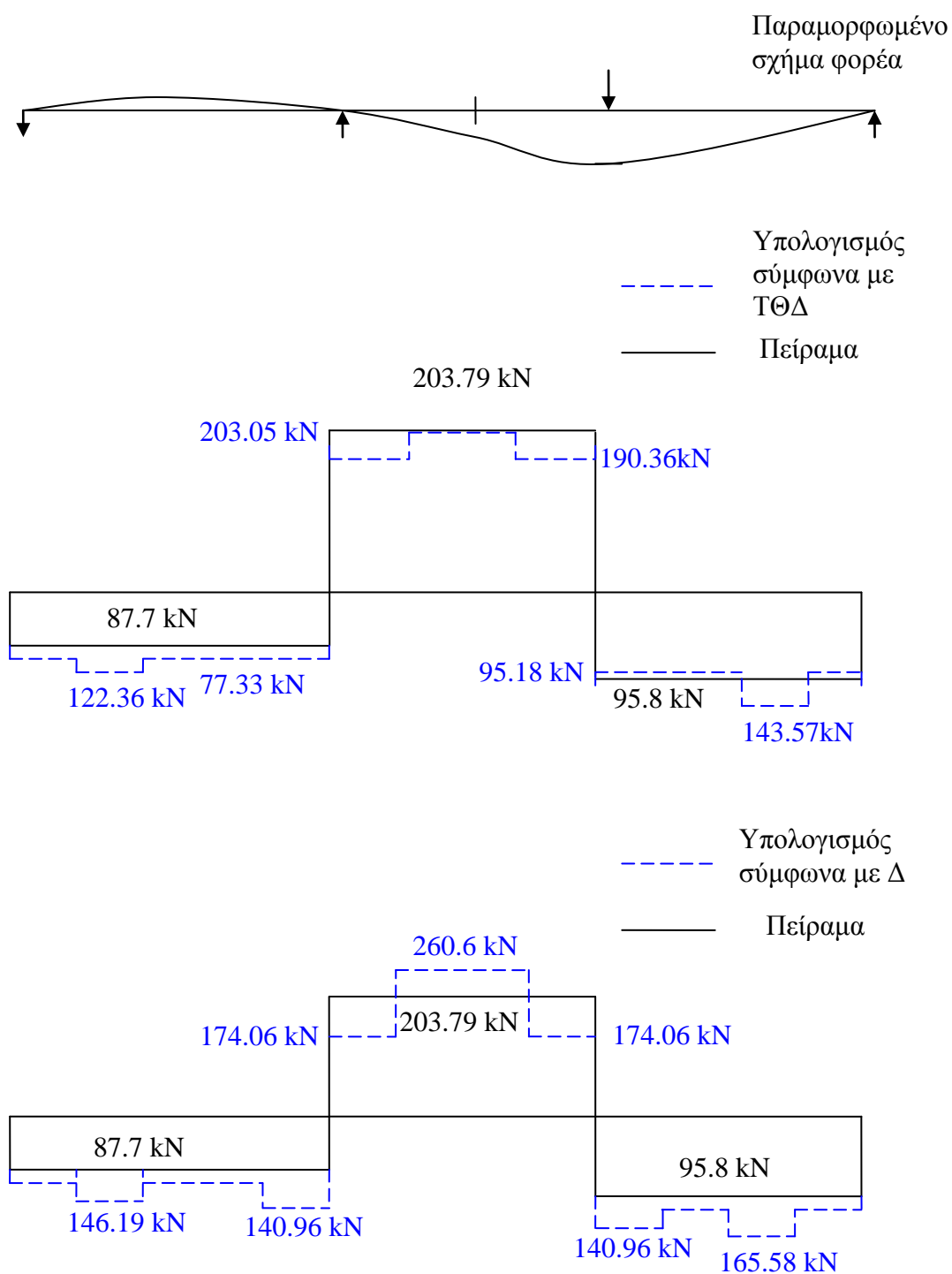
Από το σχήμα Γ7 φαίνεται ότι στο δοκίμιο αναπτύχθηκαν δύο πλαστικές αρθρώσεις στη θέση της εσωτερικής στήριξης και στη θέση εφαρμογής του φορτίου. Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που αναπτύχθηκε στο τμήμα μεταξύ σημείου φόρτισης και εσωτερικής στήριξης υπερέβη περισσότερο από 15% την αντοχή σε τέμνουσα όπως αυτή υπολογίζεται με την μέθοδο Δ (βλ. σχήμα Γ8).



Σχήμα Γ6 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Γ2-Δ-E υπό μονότονη φόρτιση.



Σχήμα Γ7 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Γ2-Δ-E. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου (1) και στη μεσαία στήριξη (2).)



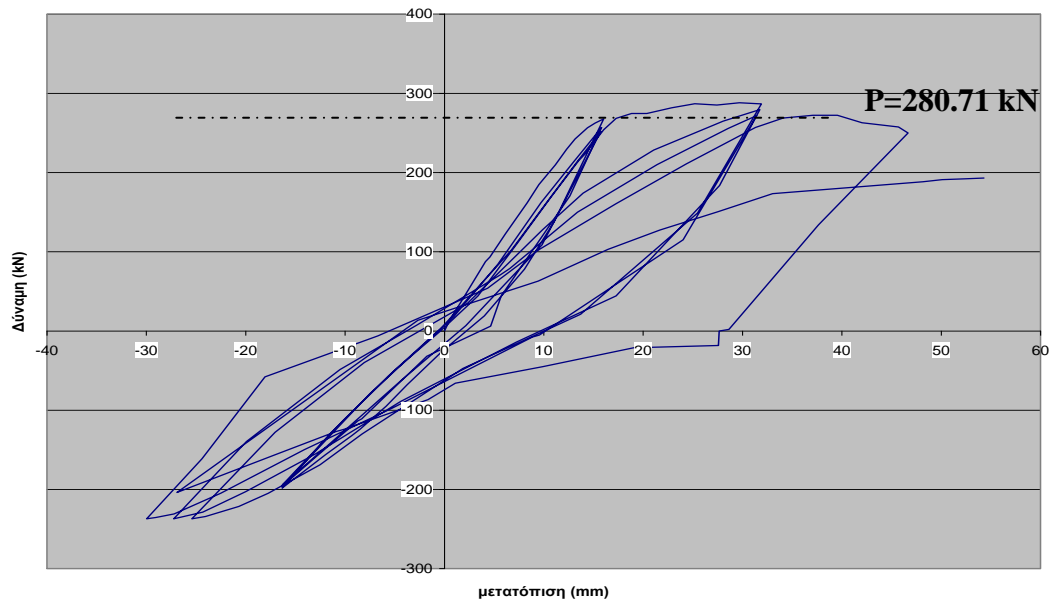
Σχήμα Γ8 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Γ2-Δ-Ε υπό το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμια Γ3-ΤΘΔ-Ε και Γ4-Δ-Ε

Από τα σχήματα Γ9 και Γ12 φαίνεται ότι και στα δύο δοκίμια το ασκούμενο φορτίο υπερέβη το φορτίο σχεδιασμού.

Οι δοκιμές διεκόπησαν μετά την τρίτη ανακύκλιση σε ακραίες μετατοπίσεις που αντίστοιχούν σε τιμές του δείκτη πλαστιμότητας ίσες με ± 3 (βλ. Σχήματα Γ9 και Γ12) και ενώ είχαν σχηματιστεί πλαστικές αρθρώσεις στις θέσεις του ασκούμενου φορτίου και της εσωτερικής στήριξης (βλ. Σχήματα Γ10 και Γ13).

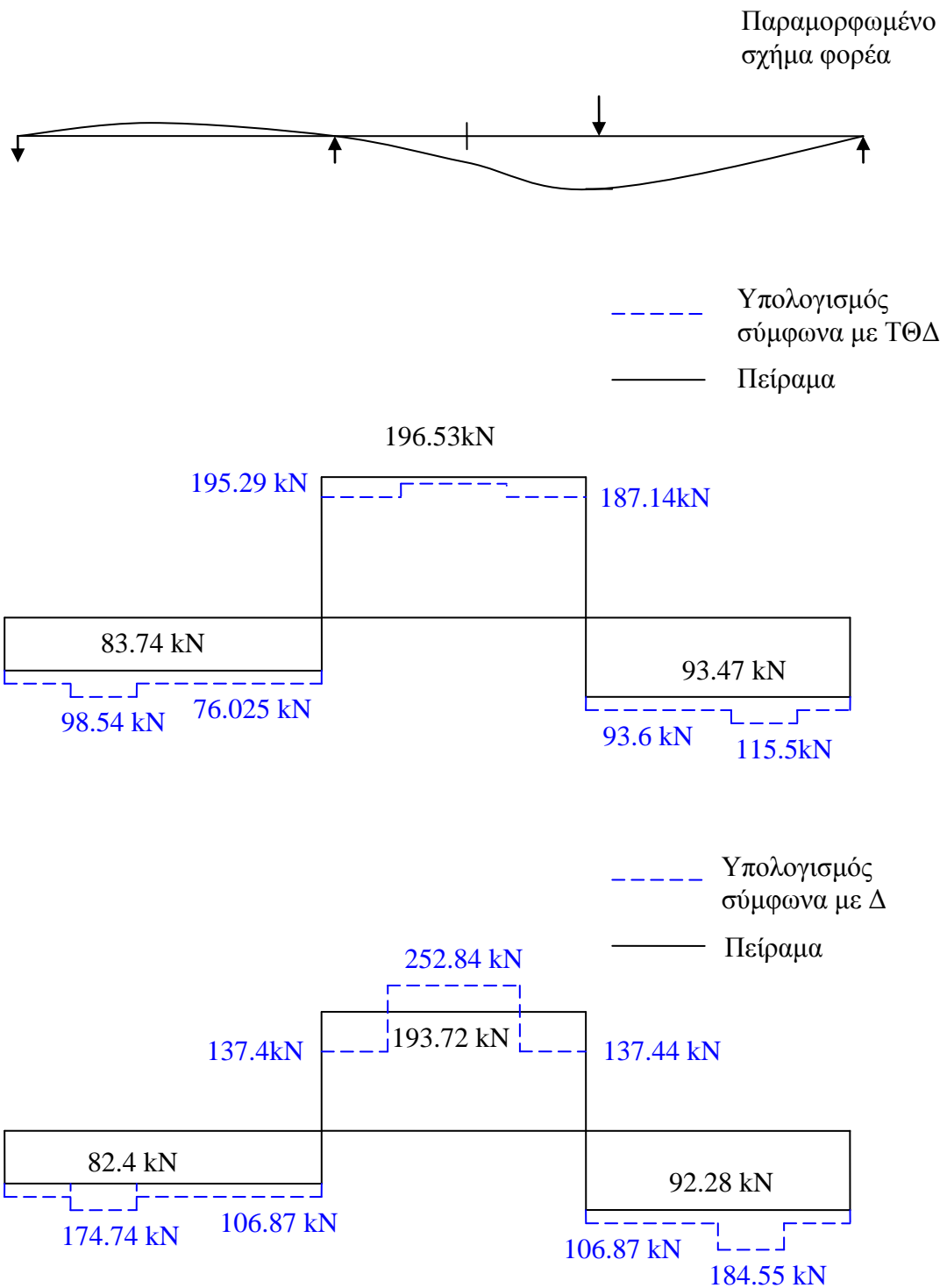
Όπως και στα δοκίμια Γ1-ΤΘΔ-Ε και Γ2-Δ-Ε οι τέμνουσες δυνάμεις που αναπτύχθηκαν στα δοκίμια Γ3-ΤΘΔ-Ε και Γ4-Δ-Ε ήταν μεγαλύτερες από τις τιμές της αντοχής σε τέμνουσα σύμφωνα με τη μέθοδο Δ (βλ. Σχήματα Γ11 και Γ14).



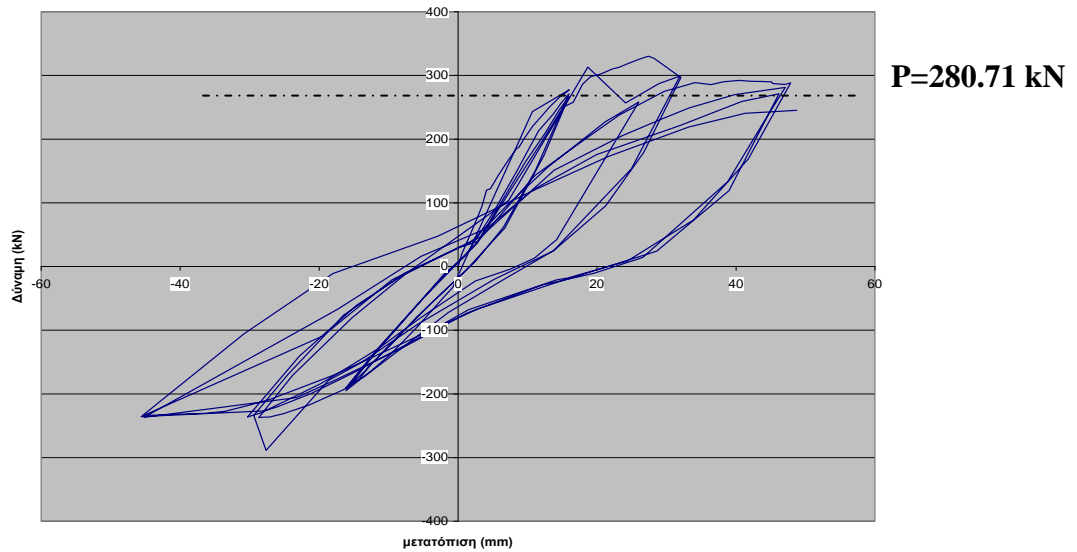
Σχήμα Γ9 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Γ3-ΤΘΔ-Ε υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχήμα Γ10 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Γ3-Δ-ΤΘΔ-Ε. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου (1) και στη μεσαία στήριξη(2).)



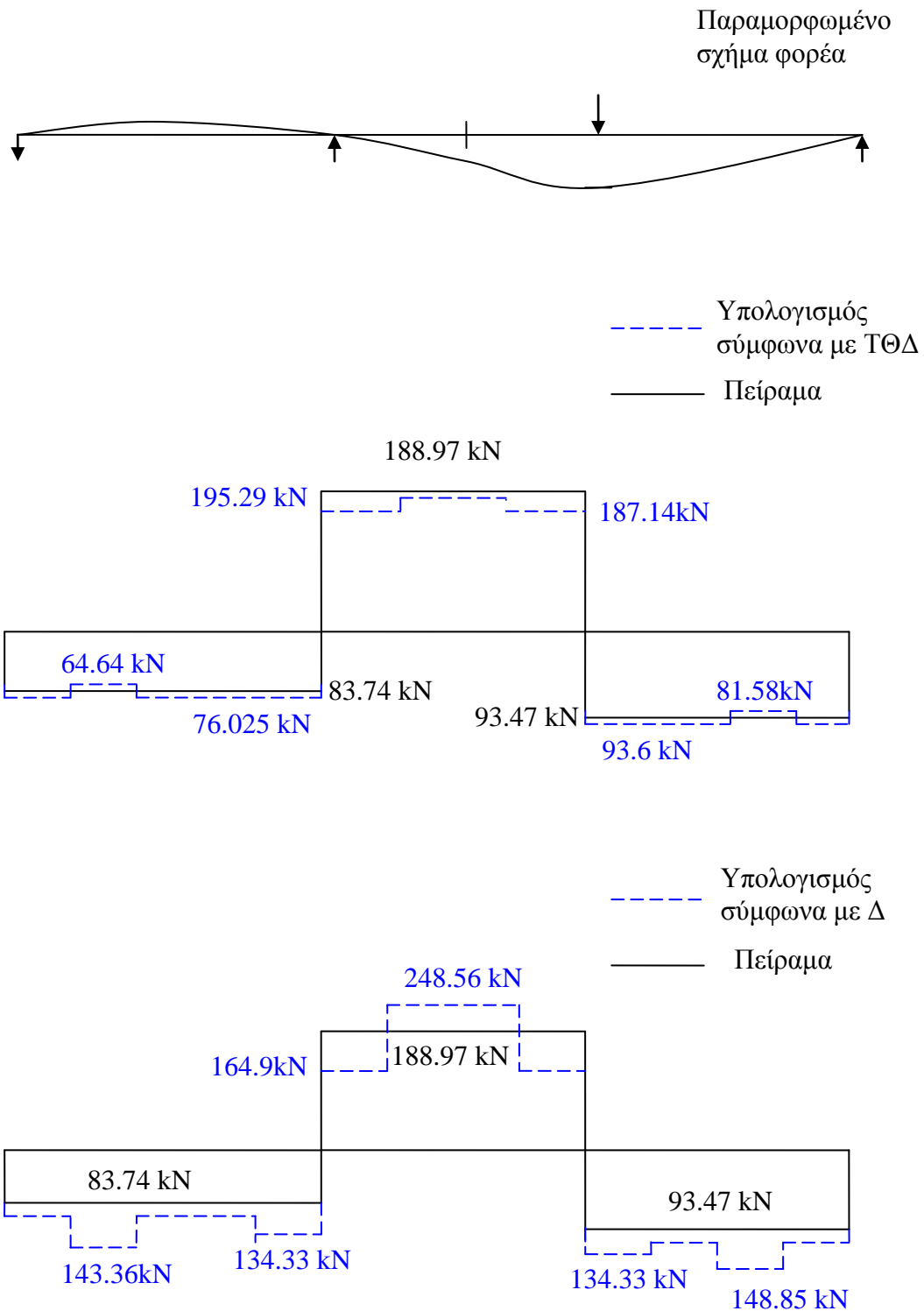
Σχήμα Γ11 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Γ3-ΤΘΔ-Ε ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.



Σχήμα Γ12 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Γ4-Δ-Ε υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχήμα Γ13 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Γ4-Δ-Ε. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου (1) και στη μεσαία στήριξη (2).)



Σχήμα Γ14 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Γ4-Δ-Ε ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δυσκαμψία δοκιμίων

Συγκρίνοντας τις τιμές της δυσκαμψίας (κλίση τέμνουσας διαγραμμάτων P-δ για $\delta=10 \text{ mm}$) των δοκιμίων των σειρών Α, Β και Γ προκύπτει ότι η χρήση ινοϋφασμάτων για την ενίσχυση των δοκιμίων προκαλεί αύξηση της δυσκαμψίας κατά περίπου 15% για την περίπτωση χρήσης υαλοϋφασμάτων και περίπου 54% για την περίπτωση χρήσης ανθρακοϋφασμάτων.

Γ5 Συμπεράσματα

1. Το αποτέλεσμα των πειραμάτων επιβεβαιώνουν ότι ο σχεδιασμός της ενίσχυσης με τη μέθοδο ΤΘΔ ικανοποιεί τις απαιτήσεις του δομοστατικού σχεδιασμού για δεδομένη φέρουσα ικανότητα και επαρκή πλαστιμότητα.
2. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των σειρών Β και Γ προκύπτει ότι η επίδραση της επισκευής στη συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκιμίων εξαρτάται από τον βαθμό καταπόνησης των διαμήκων ραβδών κατά την προγενέστερη επιπόνηση των δοκιμίων.
3. Η ενίσχυση με ινοϋφάσματα αυξάνει τη δυσκαμψία κατά περίπου 55% όταν γίνεται χρήση υφασμάτων με ίνες άνθρακα, ενώ η αύξηση είναι 15% όταν γίνεται χρήση υφασμάτων με ίνες υάλου.

Ενίσχυση δοκιμίων σχεδιασμένων με τη λογική των επιτρεπόμενων τάσεων

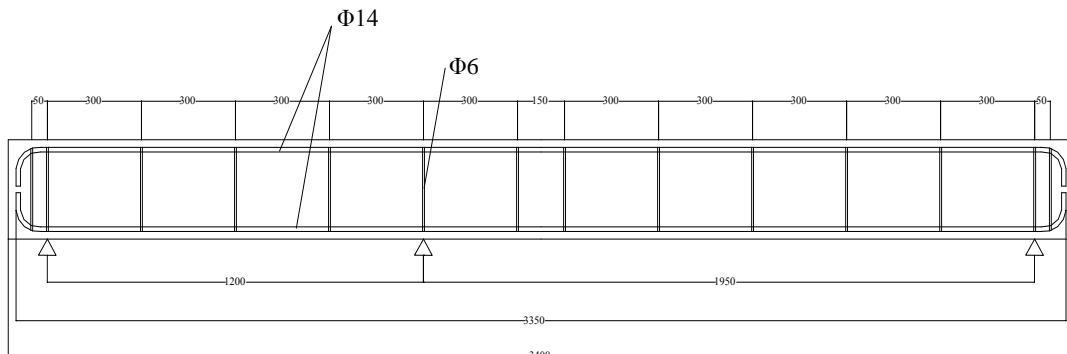
Στην παρούσα σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια που σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τους προγενέστερους κανονισμούς, με βάση τη λογική των επιτρεπόμενων τάσεων. Για το δοκίμια αυτά χρησιμοποιήθηκαν λείες ράβδοι χάλυβα St I τόσο για το διαμήκη όσο και για τον εγκάρσιο οπλισμό. Τα δοκίμια ενισχύθηκαν με χρήση ινοϋφασμάτων σύμφωνα με τις μεθόδους Δ και ΤΘΔ και δοκιμάστηκαν σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέχρις αστοχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.

Κύριος στόχος των πειραμάτων ήταν ο έλεγχος της εγκυρότητας της μεθόδου ΤΘΔ όταν εφαρμόζεται για την ενίσχυση υπαρχουσών κατασκευών σχεδιασμένων με προγενέστερους κανονισμούς. Ο έλεγχος της εγκυρότητας βασίστηκε στη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού.

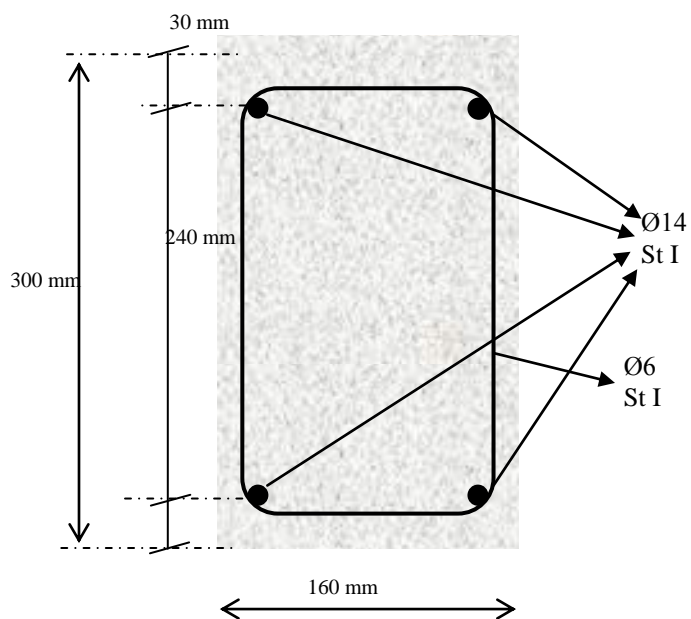
Στην παρούσα σειρά τα δοκίμια αναφέρονται ως Δ1-Ε-ΤΘΔ, Δ2-Ε-ΤΘΔ, Δ3-Ε-Δ και Δ4-Ε-Δ, όπου ΤΘΔ και Δ δηλώνουν τη μέθοδο σχεδιασμού της ενίσχυσης και Ε σημαίνει «ενισχυμένα».

Δ1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων

Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από τέσσερις ράβδους χάλυβα Φ14 που τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στα σχήματα Δ1 και Δ2. Οι διαστάσεις της διατομής είναι παρόμοιες με τις διαστάσεις των δοκιμίων της σειράς Α. Συγκεκριμένα, το ύψος της διατομής είναι 300 mm, ενώ η κατακόρυφη απόσταση των διαμηκών οπλισμών είναι 240 mm. Το πλάτος της διατομής είναι 160 mm. (Όμως, λόγω κατασκευαστικών ατελειών (κυρίως των καλουπιών) η τιμή του πλάτους σε ορισμένες περιπτώσεις ευρέθηκε να αποκλίνει από την παραπάνω τιμή. Όπου αυτό συμβαίνει, αναφέρεται και λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών.)



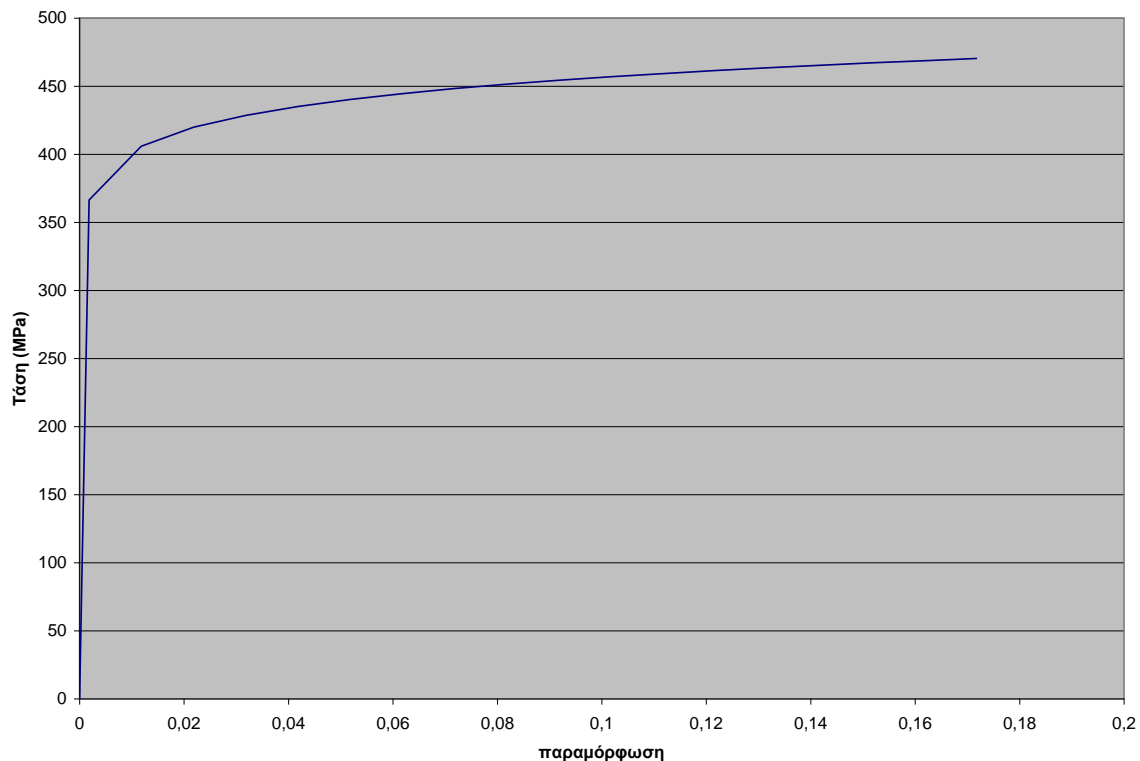
Σχήμα Δ1 Λεπτομέρειες οπλισμού.



Σχήμα Δ2 Διατομή δοκιμίων.

Δ2 Ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα

Το δοκίμια κατασκευάστηκαν με ετοιμοπαράδοτο σκυρόδεμα, παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια των σειρών Α και Γ. Η μονοαξονική αντοχή του σε θλίψη ήταν 30 MPa κατά την περίοδο των δοκιμών των ραβδόμορφων στοιχείων, δύο περίπου μήνες μετά τη σκυροδέτηση. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων του διαμήκη χάλυβα, που χρησιμοποιήθηκαν, προκύπτουν εύκολα από τα διαγράμματα τάσεων (σ) - ανηγμένων παραμορφώσεων (ε) που δίδονται στο σχήμα Δ3. Οι συνδετήρες ήταν παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια των σειρών Α και Γ (βλ. σχήμα Α4β).



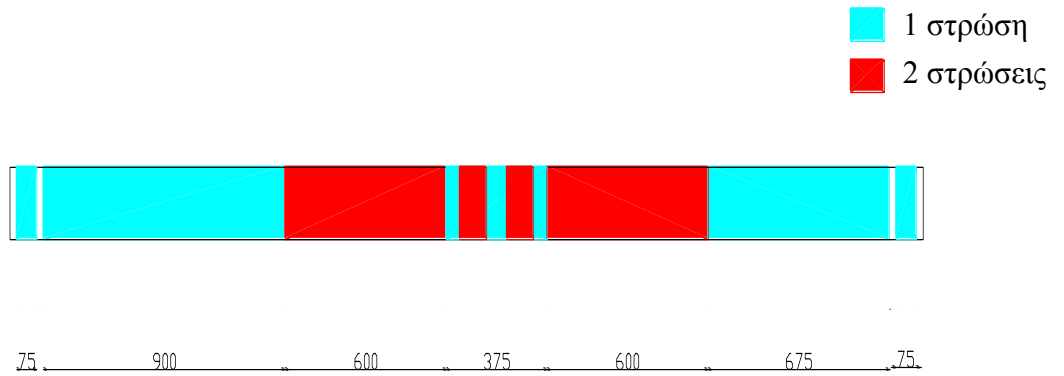
Σχήμα Δ3 Καμπύλη σ - ε διαμηκών ράβδων χάλυβα.

Δ3 Διαδικασία ενίσχυσης

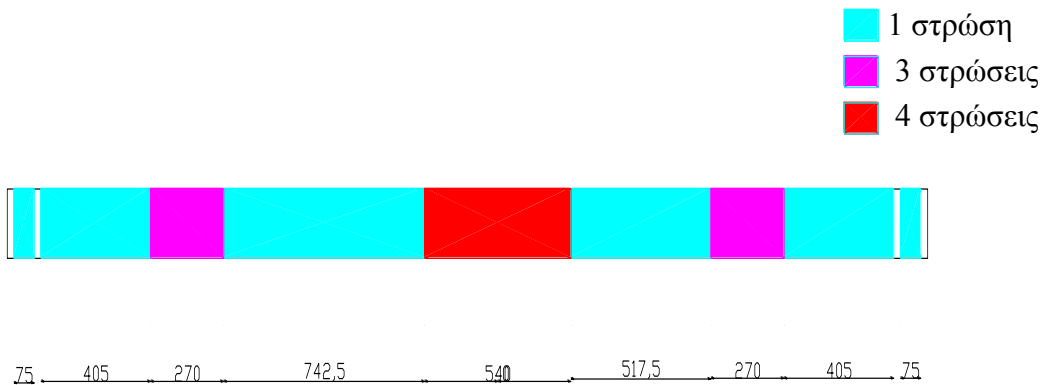
Η διαδικασία ενίσχυσης ήταν παρόμοια με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ενίσχυση των δοκιμίων των σειρών Β και Γ. Χρησιμοποιήθηκαν διαμήκεις και εγκάρσιες λωρίδες υφασμάτων με ίνες άνθρακα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται στην ενότητα Β2. Η χρησιμοποίηση υφασμάτων με ίνες υάλου δεν ήταν εφικτή στη σειρά αυτή διότι ο αριθμός των απαιτούμενων στρώσεων εγκάρσιων λωρίδων ήταν μεγαλύτερος του ανώτερου επιτρεπτού από τον προμηθευτή.

Δ4 Σχεδιασμός Ενίσχυσης

Η αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων προέκυψε από την τοποθέτηση μίας στρώσης διαμήκους υφάσματος σε όλο το μήκος του άνω και κάτω πέλματος των δοκιμίων. Για την αποτροπή μη-καμπτικής αστοχίας τοποθετήθηκε ο αναγκαίος αριθμός λωρίδων εγκάρσιου υφάσματος σύμφωνα με τις μεθόδους Δ και ΤΘΔ (βλ. σχήματα Δ4 και Δ5). Από τα σχήματα φαίνονται ότι οι στρώσεις του εγκάρσιου υφάσματος ποικίλουν ανάλογα με τη μέθοδο σχεδιασμού της ενίσχυσης. Ένα κύριο χαρακτηριστικό των ενισχυμένων δοκιμίων είναι ότι καλύπτονται με εγκάρσιες λωρίδες υφασμάτων σε όλο το μήκος τους. Επίσης, λόγω της πολύ αραιής διάταξης των υπαρχόντων συνδετήρων, ο υπολογισμός των απαιτούμενων στρώσεων εγκάρσιου υφάσματος βασίστηκε στην υπόθεση ότι οι συνδετήρες έχουν μηδαμινή συμβολή στη φέρουσα ικανότητα των δοκιμίων.



Σχήμα Δ4 Εγκάρσια όπλιση με ινοϋφάσματα σύμφωνα με τη μέθοδο Δ για τα δοκίμια Ο.Σ. που ήταν σχεδιασμένα με τους προγενέστερους κανονισμούς.



Σχήμα Δ5 Εγκάρσια όπλιση με ινοϋφάσματα σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ για τα δοκίμια Ο.Σ. που ήταν σχεδιασμένα με τους προγενέστερους κανονισμούς.

Δ5 Πειραματικά αποτελέσματα

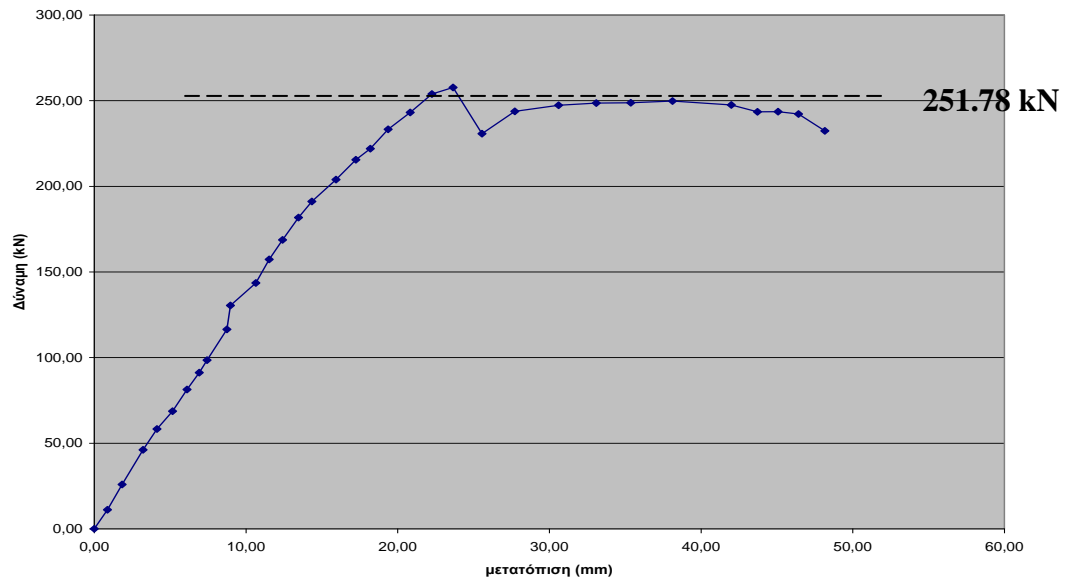
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στα σχήματα Δ6 έως Δ17. Στα σχήματα Δ6, Δ9, Δ12 και Δ15 δίδονται οι καμπύλες εγκάρσιου φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων Δ1-E-TΘΔ, Δ2-E-TΘΔ, Δ3-E-Δ και Δ4-E-Δ, αντίστοιχα. Οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων αυτών φαίνονται στα σχήματα Δ7, Δ10, Δ13 και Δ16.

Τέλος, στα σχήματα Δ8, Δ11, Δ14 και Δ17 δίδονται τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων που αντιστοιχούν στη μέγιστη πειραματική τιμή του εγκάρσιου φορτίου που ασκήθηκε στα δοκίμια. Τα σχήματα αυτά περιέχουν όχι μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και τα αποτελέσματα των υπολογισμών σύμφωνα με τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των δοκιμίων.

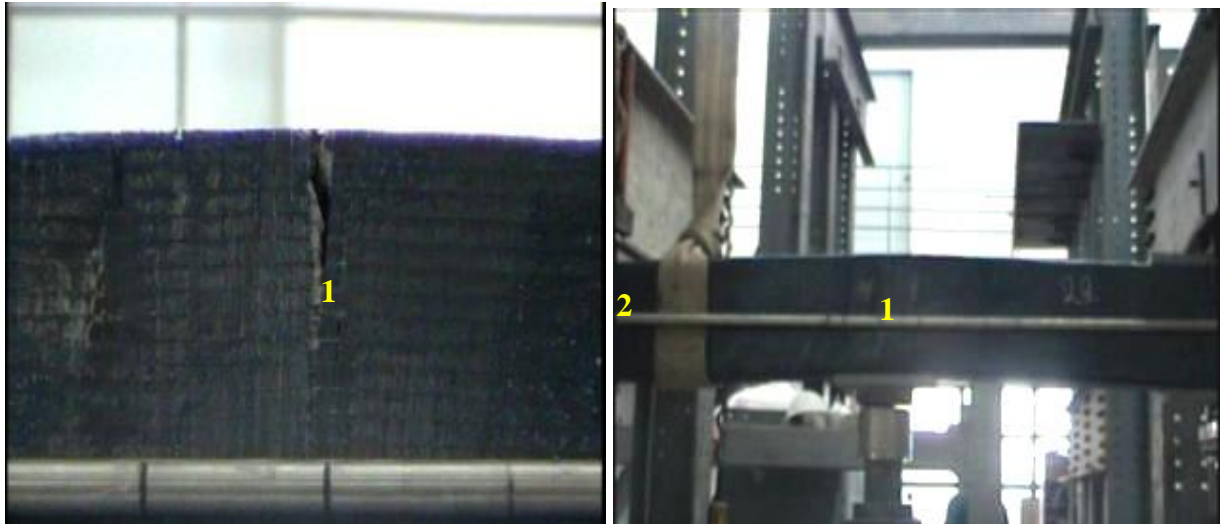
Δ6 Σχόλια

Δοκίμιο Δ1-E-TΘΔ

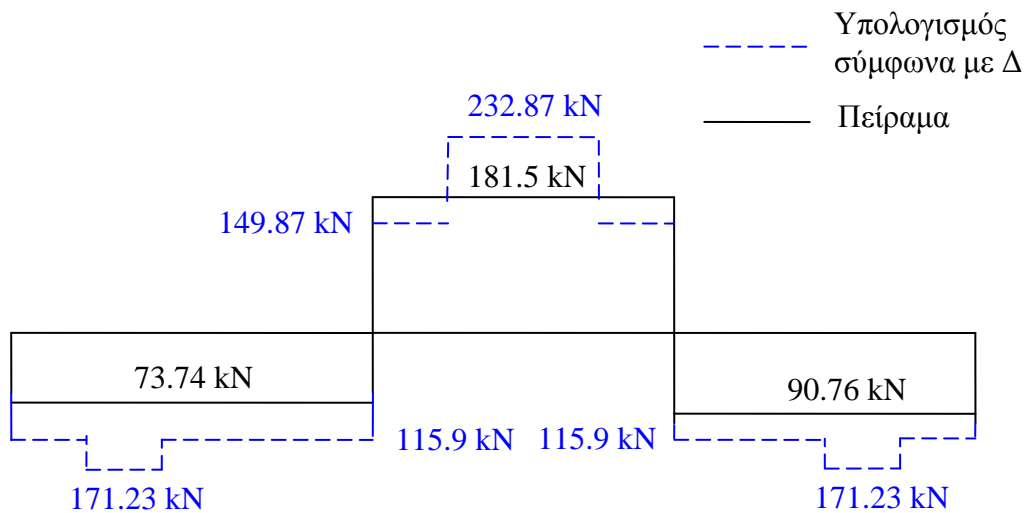
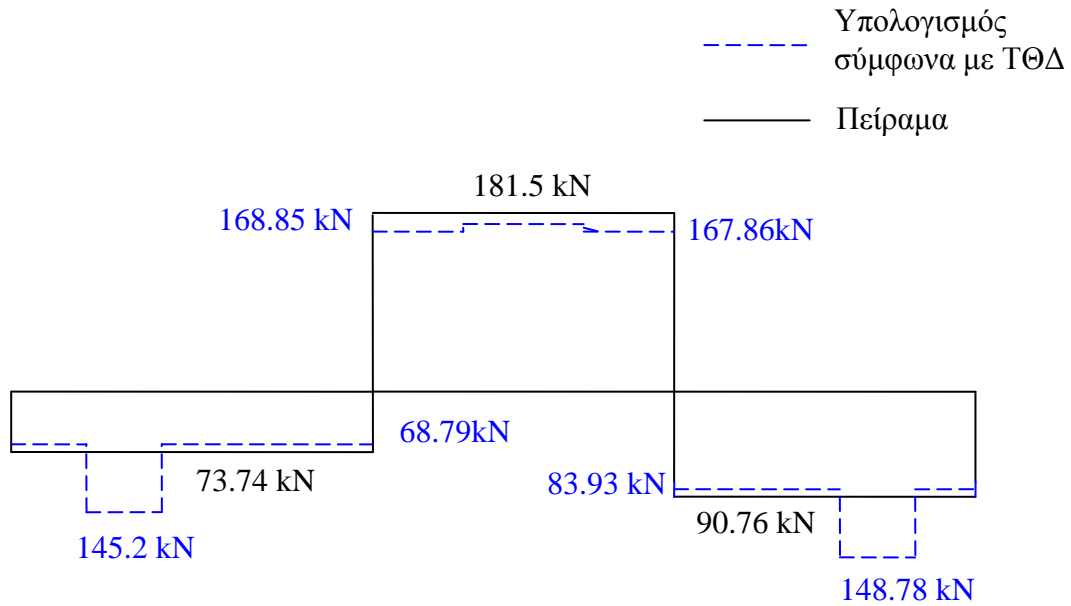
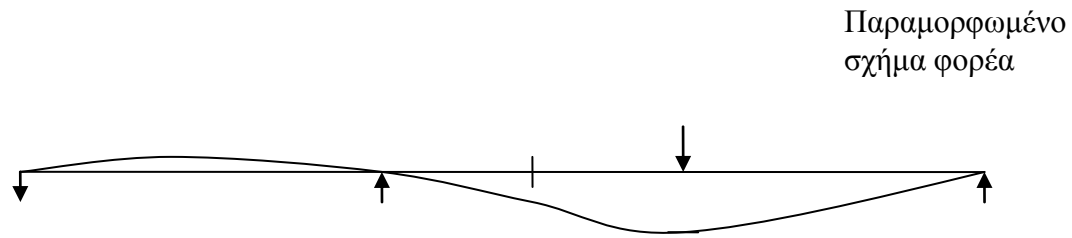
Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε μονότονη φόρτιση, όπως περιγράφεται στο σχήμα 3 του εισαγωγικού κεφαλαίου. Από το σχήμα Δ6 φαίνεται ότι η πειραματική τιμή (~265 kN) της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από την τιμή σχεδιασμού (251.78 kN), παρά το γεγονός ότι η αντοχή σε τέμνουσα σύμφωνα με μέθοδο Δ υπολείπεται σημαντικά από την τιμή της δρώσας τέμνουσας στο «κρίσιμο μήκος» (σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς) του τμήματος του δοκιμίου μεταξύ εσωτερικής στήριξης και θέσης ασκούμενου φορτίου (βλ. σχήμα Δ8). Η συμπεριφορά του δοκιμίου ήταν πλάστιμη, αν και υπήρξε μια μικρή πτώση της φέρουσας ικανότητάς του, μόλις το φορτίο έλαβε τη μέγιστη τιμή του, η οποία σχεδόν αμέσως αποκαταστάθηκε μερικώς και παρέμεινε περίπου σταθερή με την αύξηση του βέλους κάμψης. Τα μηκυνσιόμετρα απομακρύνθηκαν όταν η τιμή του βέλους κάμψης έγινε περίπου 50 mm και ενώ, όπως φαίνεται στο σχήμα Δ7, είχαν ήδη σχηματισθεί δύο πλαστικές αρθρώσεις.



Σχήμα Δ6 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Δ1-E-TΘΔ υπό μονοτονική φόρτιση.



Σχήμα Δ7 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Δ1-E-TΘΔ. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου (1) και στη μεσαία στήριξη (2).)



Σχήμα Δ8 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Δ1-Ε-ΤΘΔ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

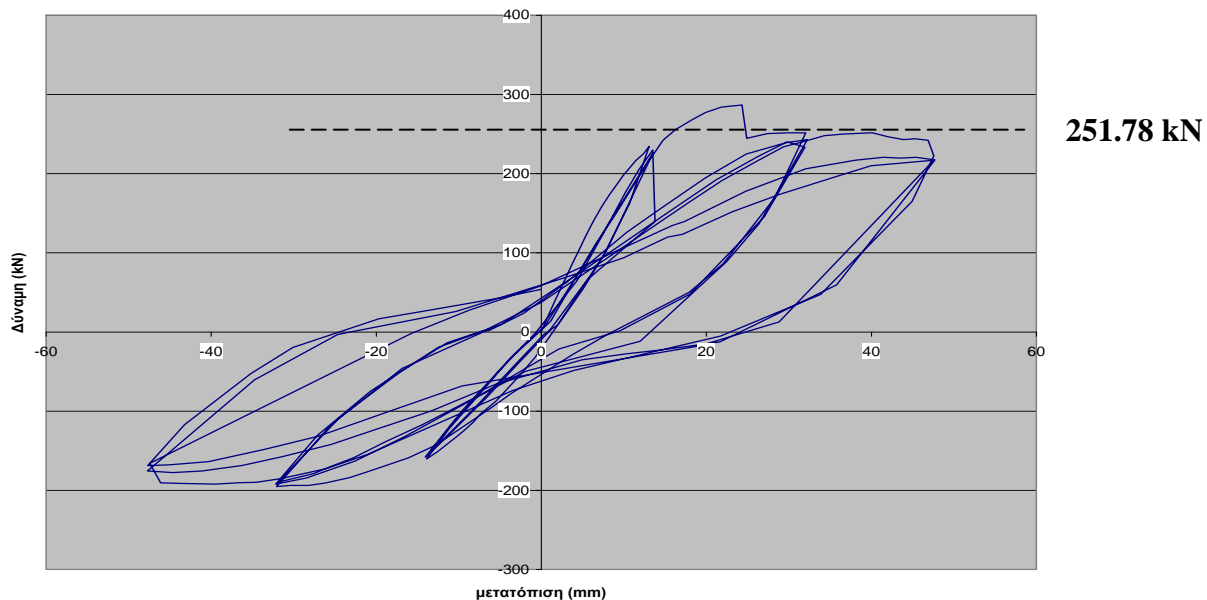
Δοκίμιο Δ2-E-TΘΔ

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όπως περιγράφεται στο σχήμα 3 του εισαγωγικού κεφαλαίου.

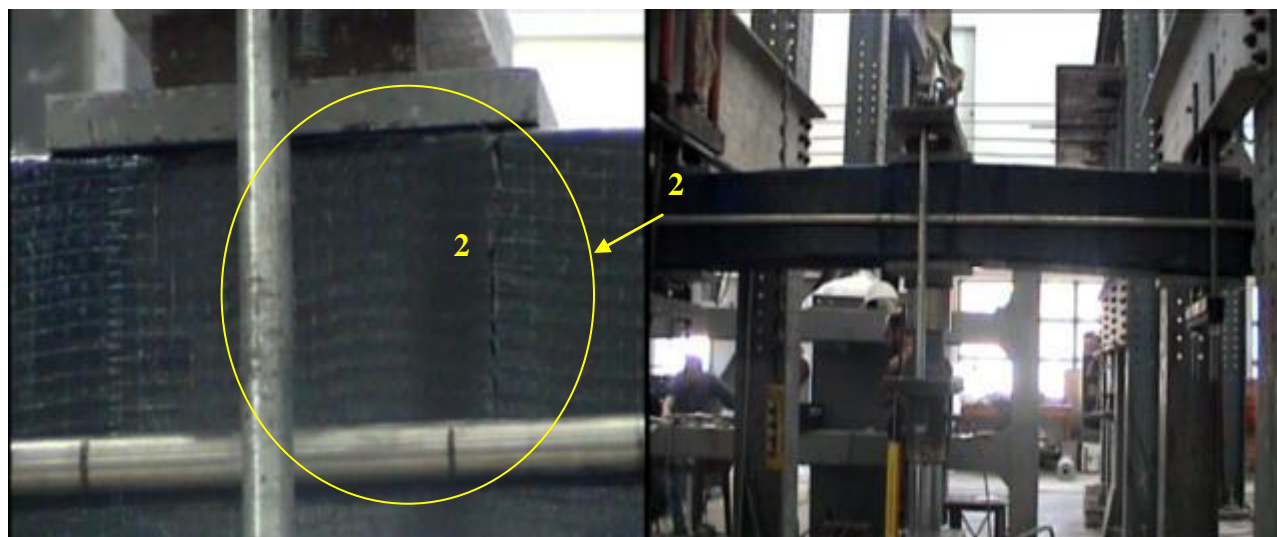
Όπως και στην περίπτωση της μονότονης φόρτισης, από το σχήμα Δ9 φαίνεται ότι η πειραματική τιμή (286.6 kN) του μέγιστου φορτίου που ανέλαβε το δοκίμιο είναι μεγαλύτερη από την τιμή σχεδιασμού (251.78 kN). Και τούτο παρά το γεγονός ότι η αντοχή σε τέμνουσα σύμφωνα με μέθοδο Δ υπολείπεται σημαντικά από την τιμή της δρώσας τέμνουσας στο «κρίσιμο μήκος» του τμήματος του δοκιμίου μεταξύ εσωτερικής στήριξης και θέσης ασκούμενου φορτίου (βλ. σχήμα 11).

Η συμπεριφορά του δοκιμίου ήταν πλάστιμη, αν και υπήρξε μια μικρή πτώση της φέρουσας ικανότητάς του, μόλις το φορτίο έλαβε τη μέγιστη τιμή του. Όμως, όπως και στην περίπτωση του δοκιμίου Δ1-E-TΘΔ υπό μονότονη φόρτιση, σχεδόν αμέσως υπήρξε μια μερική αποκατάσταση της φέρουσας ικανότητας, η οποία και παρέμεινε περίπου σταθερή για ανακυκλίσεις του φορτίου που προκάλεσαν ακραίες τιμές του βέλους κάμψης που αντιστοιχούν σε τιμές του δείκτη πλαστιμότητας ± 2 και ± 3 .

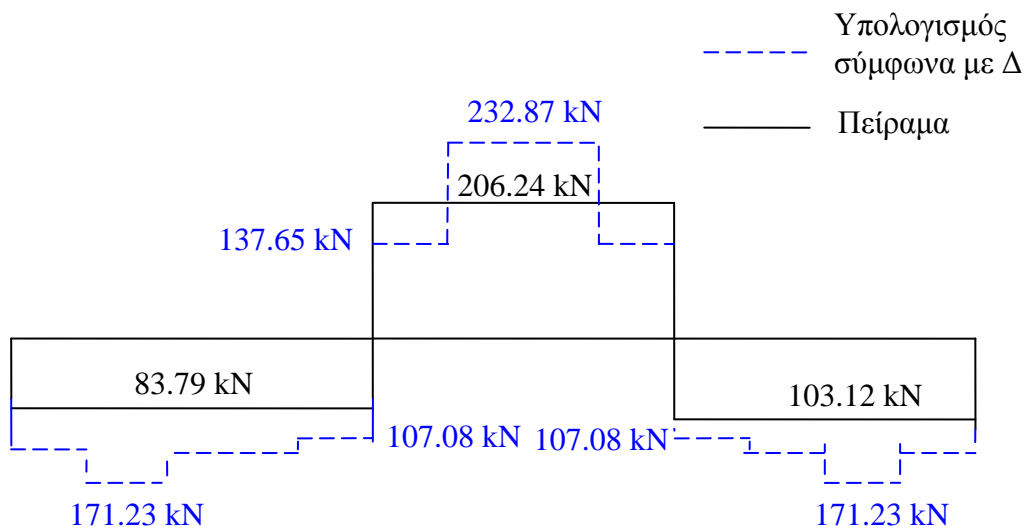
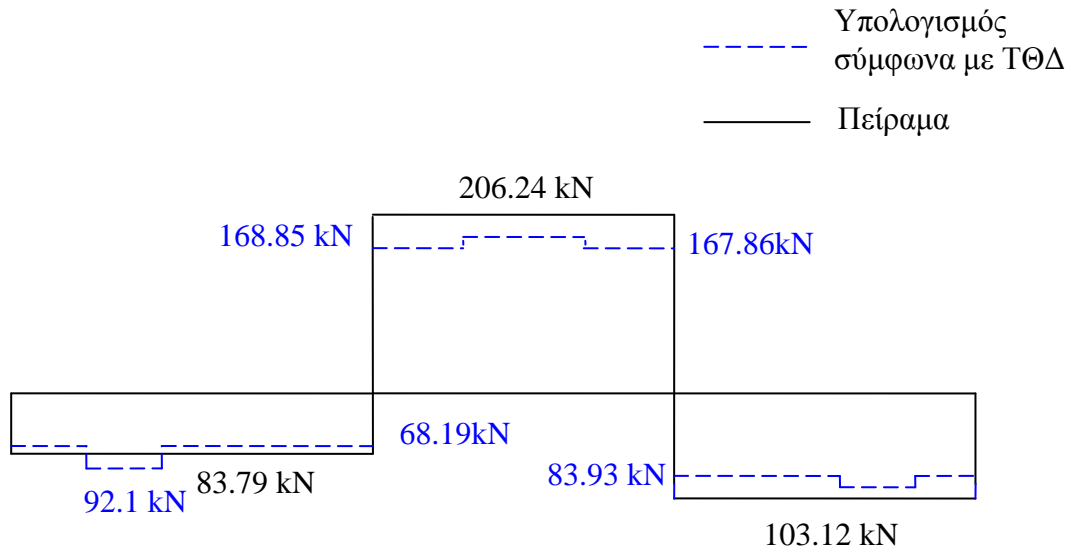
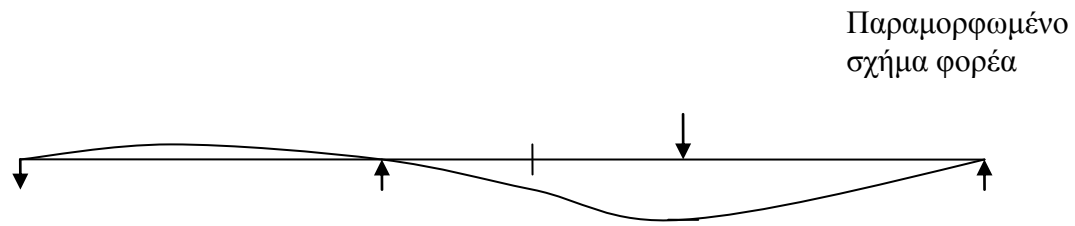
Τα μηκυνσιόμετρα απομακρύνθηκαν όταν η τιμή του βέλους κάμψης έγινε περίπου 50 mm και ενώ είχαν συμπληρωθεί τρεις ανακυκλίσεις του φορτίου με ακραίες μετατοπίσεις που αντιστοιχούσαν σε δείκτες πλαστιμότητας ίσους με ± 3 (βλ. σχήμα Δ9) και σχηματισθεί δύο πλαστικές αρθρώσεις (βλ. σχήμα Δ10).



Σχήμα 9 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Δ2-E-TΘΔ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχήμα 10 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Δ2-E-TΘΔ. (Σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στη θέση άσκησης του φορτίου (1) και στη μεσαία στήριξη (2).)



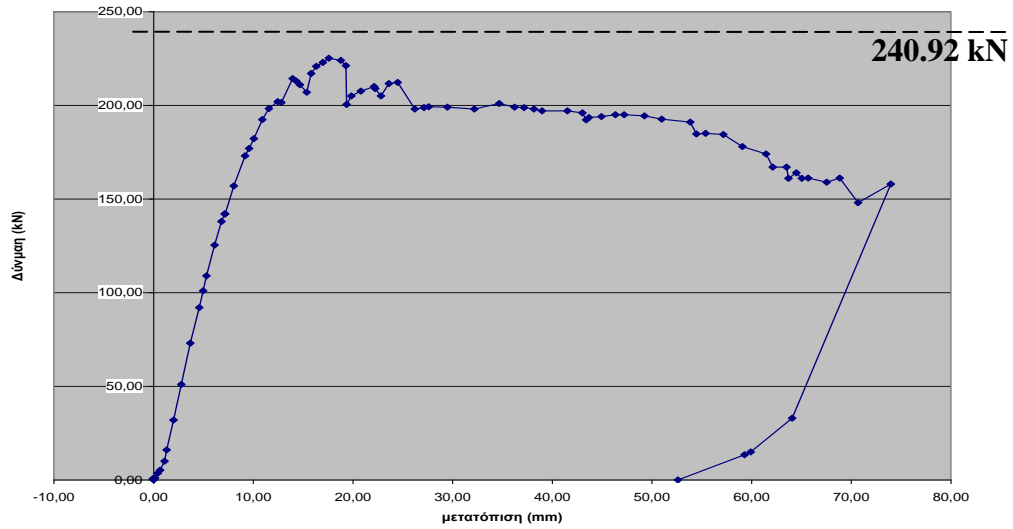
Σχήμα Δ11 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Δ2-E-ΤΘΔ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμια Δ3-E-Δ

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε μονότονη φόρτιση, όπως περιγράφεται στο σχήμα 3 του εισαγωγικού κεφαλαίου. Σε αντίθεση με το δοκίμιο Δ1-E-TΘΔ που ενισχύθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο TΘΔ, από το σχήμα Δ12 φαίνεται ότι η πειραματική τιμή (225.15 kN) της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου Δ3-E-Δ είναι μικρότερη από την τιμή σχεδιασμού (240.92 kN). Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά των δοκιμίων Δ1-E-TΘΔ και Δ3-E-Δ, έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι, ενώ το δοκίμιο Δ1-E-TΘΔ ανέλαβε φορτίο μεγαλύτερο από το φορτίο σχεδιασμού (παρά το γεγονός ότι η αντοχή του σε τέμνουσα, σύμφωνα με μέθοδο Δ, υπολειπόταν σημαντικά από την τιμή της δρώσας τέμνουσας στο «κρίσιμο μήκος» του τμήματός του μεταξύ εσωτερικής στήριξης και θέσης ασκούμενου φορτίου (βλ. σχήμα Δ8)), η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου Δ3-E-Δ ήταν μικρότερη του φορτίου σχεδιασμού (παρά το γεγονός ότι σε όλο το τμήμα του μεταξύ εσωτερικής στήριξης και θέσης ασκούμενου φορτίου η αντοχή του σε τέμνουσα, σύμφωνα με τη μέθοδο Δ, ήταν μεγαλύτερη από την πειραματική τιμή της τέμνουσας (βλ. σχήμα Δ14)). Αντίθετα, η αντοχή του δοκιμίου στην περιοχή του σημείου καμπής σύμφωνα με τη μέθοδο TΘΔ ήταν σημαντικά μικρότερη της πειραματικής τιμής της τέμνουσας δύναμης που αναπτύχθηκε στην περιοχή αυτή (βλ. σχήμα Δ14).

Όμως, από την εξέταση του δοκιμίου τόσο πριν, όσο και μετά την απομάκρυνση των ίνο-υφασμάτων, δεν κατέστη δυνατό να ευρεθούν ευκρινή ίχνη μη-καμπτικών ρωγμών, στα οποία να αποδοθεί η μείωση της φέρουσας ικανότητας.

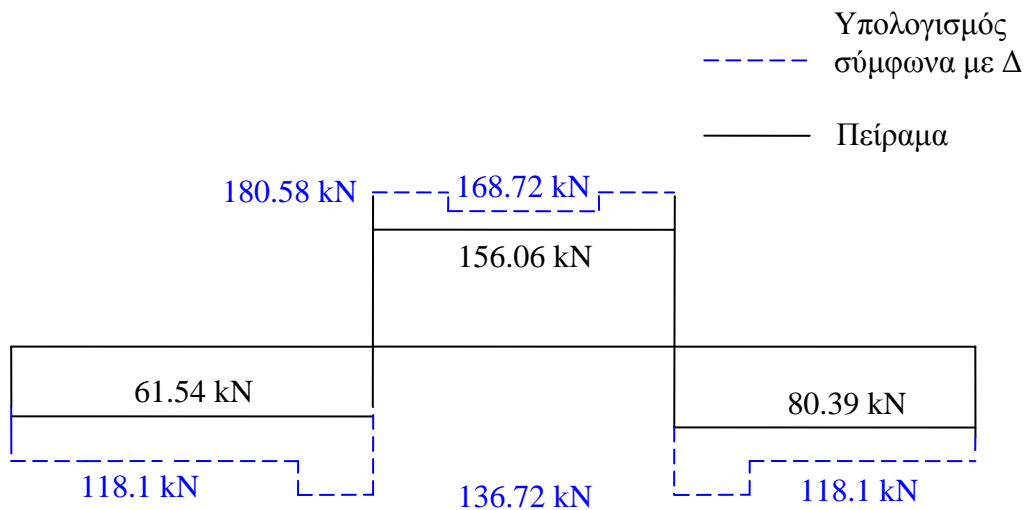
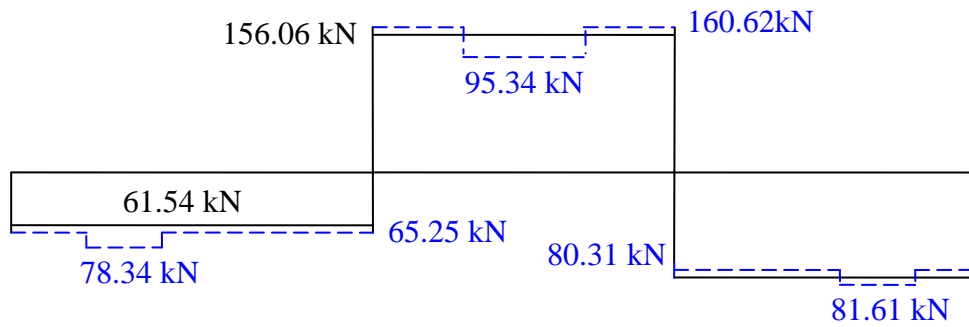
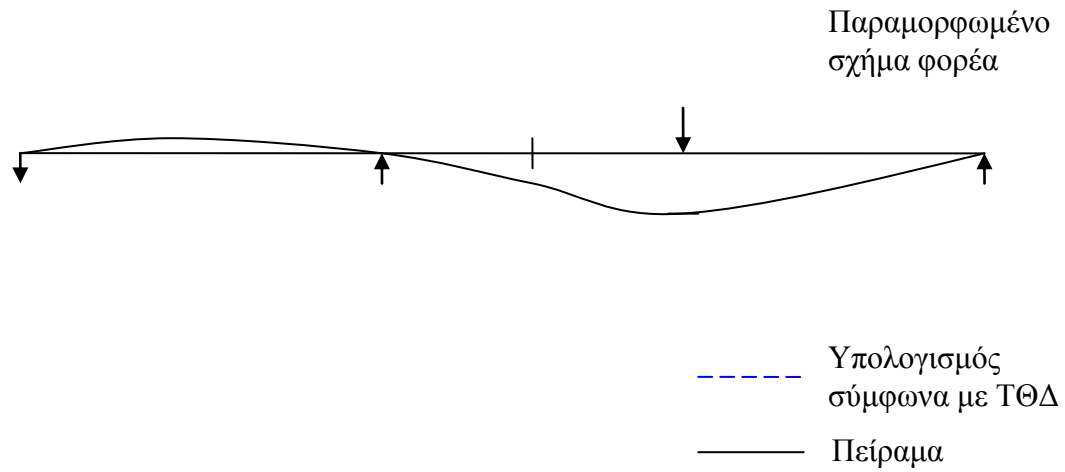
Παρά τη μειωμένη φέρουσα ικανότητά του, το δοκίμιο έδειξε μερικά χαρακτηριστικά πλαστικής συμπεριφοράς όταν, μετά από μια απότομη περαιτέρω πτώση της φέρουσας ικανότητας μόλις το φορτίο ανέλαβε τη μέγιστη τιμή του, ακολούθησε ελεγχόμενη απώλεια της φέρουσας ικανότητας (βλ. σχήμα Δ12). Τα μηκυνσιόμετρα απομακρύνθηκαν όταν η τιμή του βέλους κάμψης έγινε περίπου 50 mm και ενώ, όπως φαίνεται στο σχήμα Δ13, είχαν σχηματισθεί εμφανείς καμπτικές ρωγμές στις θέσεις όπου αναμενόταν ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων.



Σχήμα Δ12 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Δ3-E-Δ υπό μονοτονική φόρτιση.



Σχήμα Δ13 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Δ3-E-Δ. (Θέσεις αναμενόμενων πλαστικών αρθρώσεων: (1) θέση άσκησης του φορτίου και (2) μεσαία στήριξη.)



Σχήμα Δ14 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Δ2-E-TΘΔ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δοκίμιο Δ4-E-Δ

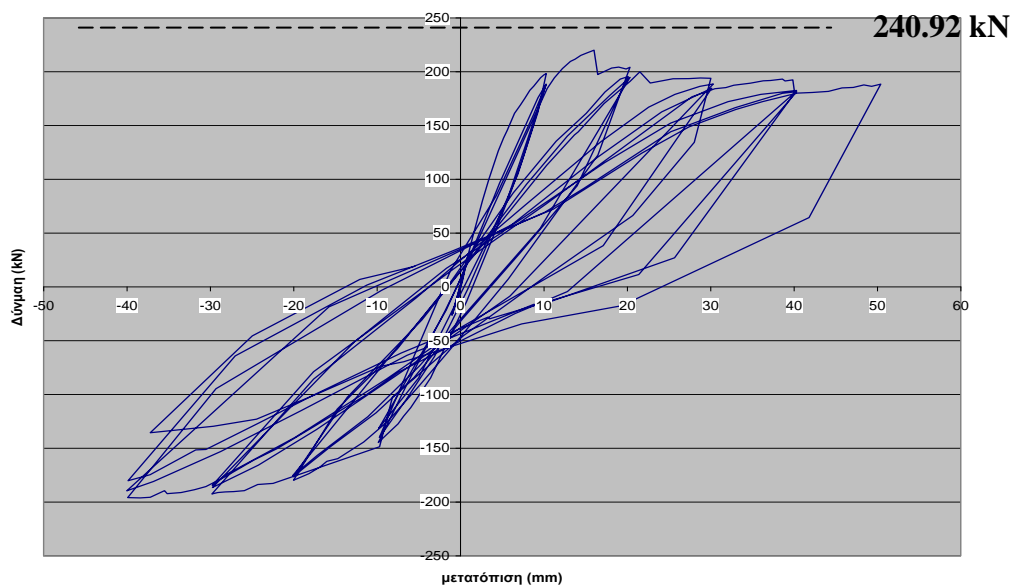
Το δοκίμιο αυτό υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, παρόμοια με αυτή που ασκήθηκε στο δοκίμιο Δ2-E-TΘΔ.

Οι διαφορές που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των δοκιμίων Δ1-E-TΘΔ και Δ3-E-Δ χαρακτηρίζουν και τα δοκίμια Δ2-E-TΘΔ και Δ4-E-Δ. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με το δοκίμιο Δ2-E-TΘΔ που ενισχύθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο TΘΔ, από το σχήμα Δ15 φαίνεται ότι η πειραματική τιμή (219.96 kN) της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου είναι μικρότερη από την τιμή σχεδιασμού (240.92 kN). Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά των δοκιμίων Δ2-E-TΘΔ και Δ4-E-Δ, έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι, ενώ το δοκίμιο Δ2-E-TΘΔ ανέλαβε φορτίο μεγαλύτερο από το φορτίο σχεδιασμού (παρά το γεγονός ότι η αντοχή του σε τέμνουσα, σύμφωνα με μέθοδο Δ, υπολειπόταν σημαντικά από την τιμή της δρώσας τέμνουσας στο «κρίσιμο μήκος» του τμήματός του μεταξύ εσωτερικής στήριξης και θέσης ασκούμενου φορτίου (βλ. σχήμα Δ11)), η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου Δ4-E-Δ ήταν μικρότερη του φορτίου σχεδιασμού (παρά το γεγονός ότι σε όλο το τμήμα του μεταξύ εσωτερικής στήριξης και θέσης ασκούμενου φορτίου η αντοχή σε τέμνουσα σύμφωνα με τη μέθοδο Δ ήταν μεγαλύτερη από την πειραματική τιμή της τέμνουσας (βλ. σχήμα Δ17)). Αντίθετα, η αντοχή του δοκιμίου στην περιοχή του σημείου καμπής σύμφωνα με τη μέθοδο TΘΔ ήταν σημαντικά μικρότερη της πειραματικής τιμής της τέμνουσας δύναμης που αναπτύχθηκε στην περιοχή αυτή (βλ. σχήμα Δ17).

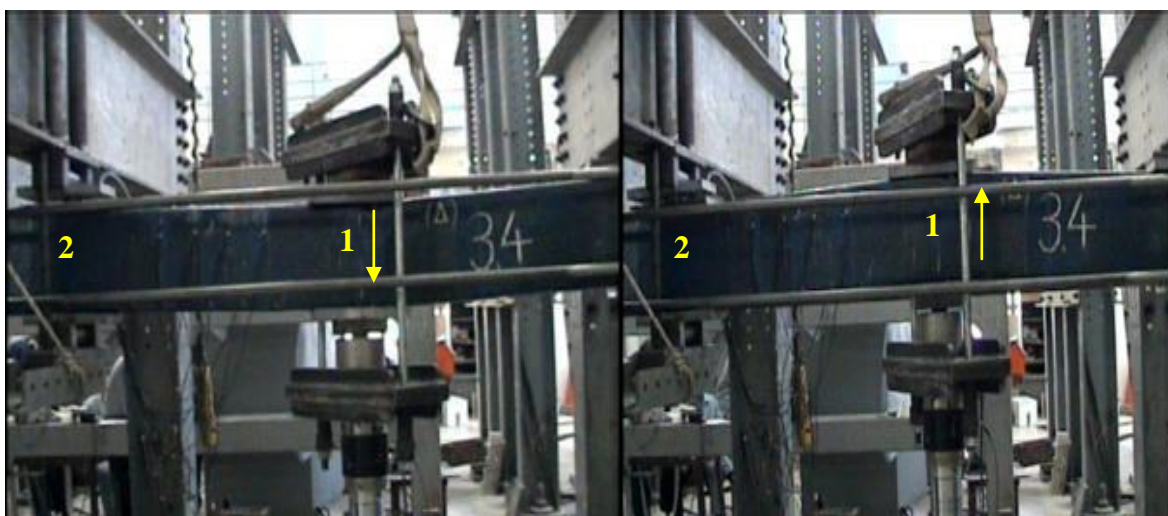
Όμως, όπως και στην περίπτωση του δοκιμίου Δ3-E-Δ, από την εξέταση του δοκιμίου Δ4-I-E-Δ τόσο πριν, όσο και μετά την απομάκρυνση των ίνο-υφασμάτων, δεν κατέστη δυνατό να ευρεθούν ευκρινή ίχνη μη-καμπτικών ρωγμών, στα οποία να αποδοθεί η μείωση της φέρουσας ικανότητας.

Επίσης, παρά τη μειωμένη φέρουσα ικανότητά του, το δοκίμιο Δ4-E-Δ, όπως και το δοκίμιο Δ3-E-Δ, έδειξε μερικά χαρακτηριστικά πλαστικής συμπεριφοράς όταν, μετά από μια απότομη περαιτέρω πτώση της φέρουσας ικανότητας μόλις το φορτίο ανέλαβε τη μέγιστη τιμή του, ακολούθησε ελεγχόμενη απώλεια της φέρουσας ικανότητας (βλ. σχήμα

Δ15). Τα μηκυνσιόμετρα απομακρύνθηκαν όταν η τιμή του βέλους κάμψης έγινε περίπου 50 mm και ενώ, όπως φαίνεται στο σχήμα Δ16, είχαν σχηματισθεί εμφανείς καμπτικές ρωγμές στις θέσεις όπου αναμενόταν ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων.

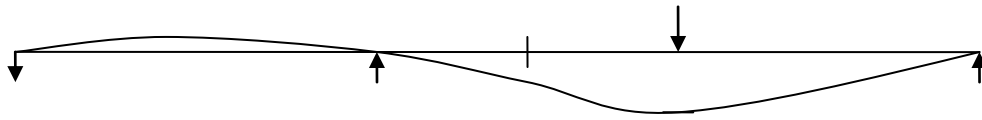


Σχήμα Δ15 Καμπύλη φορτίου (P)-μετατόπισης (δ) δοκιμίου Δ4 – Ε-Δ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

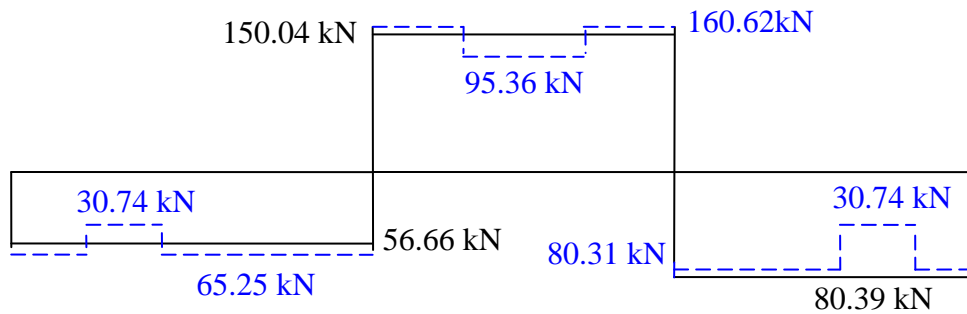


Σχήμα Δ16 Μορφή αστοχίας δοκιμίου Δ4-Ε-Δ. (Θέσεις αναμενόμενων πλαστικών αρθρώσεων: (1) θέση άσκησης του φορτίου και (2) θέση μεσαίας στήριξης.)

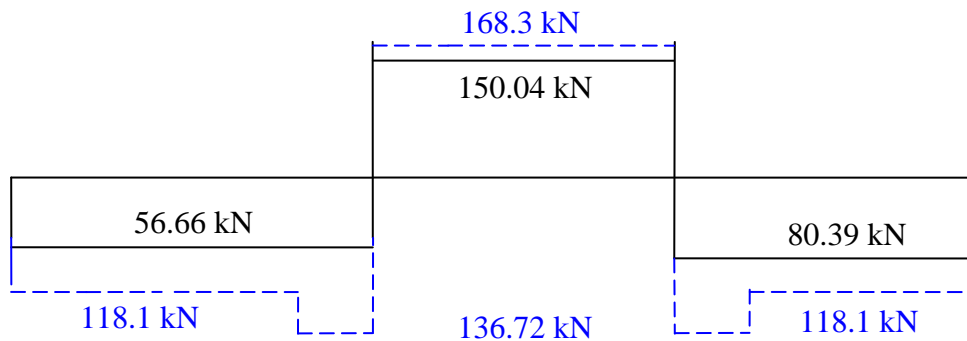
Παραμορφωμένο
σχήμα φορέα



--- Υπολογισμός
σύμφωνα με ΤΘΔ
— Πείραμα



--- Υπολογισμός
σύμφωνα με Δ
— Πείραμα



Σχήμα Δ17 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων για το δοκίμιο Δ4-Ε-Δ ύπο το μέγιστο εγκάρσιο φορτίο. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με ΤΘΔ και Δ.

Δ7 Συμπεράσματα

1. Η τοποθέτηση ινο-υφασμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ για την ενίσχυση των δοκιμίων επέτυχε τους στόχους του δομοστατικού σχεδιασμού δεδομένη αύξηση της φέρουσας ικανότητας και επαρκή πλαστιμότητα.
2. Αντίθετα, η τοποθέτηση ινο-υφασμάτων σύμφωνα με την μέθοδο Δ για την ενίσχυση των δοκιμίων δεν επέτυχε την επιδιωκόμενη αύξηση της φέρουσας ικανότητας

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Νέα δοκίμια

1. Η χρησιμοποίηση της μεθόδου Δ, με τον τρόπο που χρησιμοποιείται από τους ισχύοντες κανονισμούς για την εφαρμογή της λογικής των οριακών καταστάσεων αστοχίας στην πράξη, οδήγησε σε λύσεις σχεδιασμού που βρέθηκε ότι δεν εξασφαλίζουν τις απαιτήσεις του δομοστατικού σχεδιασμού για καμπτική μορφή αστοχίας με επαρκή πλαστιμότητα.
2. Αντίθετα, η μέθοδος ΤΘΔ εξασφάλισε την επιδιωκόμενη μορφή αστοχίας και πλαστιμότητα.

Υφιστάμενα δοκίμια σχεδιασμένα με τη μέθοδο Δ

3. Επισκευή και ενίσχυση των δοκιμίων σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ βρέθηκε ότι εξασφαλίζει έναντι πρόωρης, ψαθυρής μορφής αστοχίας στην περιοχή του σημείου καμψής.
4. Αντίθετα, στις περιπτώσεις που παρά την αύξηση της φέρουσας ικανότητας (λόγω της ενίσχυσης) ο εγκάρσιος οπλισμός στα (σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς) «κρίσιμα μήκη» των δοκιμίων παραμένει υψηλός σε σχέση με τον απαιτούμενο για αποφυγή αστοχίας σε τέμνουσα, βρέθηκε ότι το αυξημένο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού όχι μόνο δεν δημιουργεί συνθήκες περίσφιξης, αλλά είναι δυνατό να προκαλέσει, αντί να αποτρέψει ψαθυρή αστοχία στα κρίσιμα μήκη.
5. Ενίσχυση σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ δοκιμίων για τα οποία δεν απαιτήθηκε προηγουμένως επισκευή βρέθηκε ότι εξασφαλίζει τιμές της φέρουσας ικανότητας και πλαστιμότητας μεγαλύτερες από τις τιμές σχεδιασμού.

Υφιστάμενα δοκίμια σχεδιασμένα με τη μέθοδο ΤΘΔ

6. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δοκίμια, ενίσχυση και επισκευή ή μόνο ενίσχυση σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ βρέθηκε ότι εξασφαλίζει φέρουσα ικανότητα μεγαλύτερη του φορτίου σχεδιασμού και επαρκή πλαστιμότητα. (Ακόμα και σε περιπτώσεις που η προγενέστερη φόρτιση είχε προκαλέσει

σημαντική επιπόνηση του διαμήκη χάλυβα, βρέθηκε ότι ο δείκτης πλαστιμότητας λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 2.)

7. Από τη σύγκριση της συμπεριφοράς υφιστάμενων δοκιμίων για τα οποία απαιτήθηκε επισκευή, πριν την ενίσχυση, με τη συμπεριφορά των αντίστοιχων δοκιμίων για τα οποία δεν απαιτήθηκε επισκευή, διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της επισκευής στη συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκιμίων εξαρτάται από τον βαθμό καταπόνησης των διαμηκών ράβδων κατά την προγενέστερη επιπόνηση των δοκιμίων.
8. Η ενίσχυση με ινουφάσματα βρέθηκε ότι αυξάνει τη δυσκαμψία κατά περίπου 55% όταν γίνεται χρήση υφασμάτων με ίνες άνθρακα, ενώ η αντίστοιχη αύξηση είναι 15% όταν γίνεται χρήση υφασμάτων με ίνες υάλου.
9. Η τεχνολογία οπλισμένων με ίνες άνθρακα ή υάλου «υφασμάτων», που χρησιμοποιήθηκαν για την επισκευή και ενίσχυση των δοκιμίων, βρέθηκε ότι είναι αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προμηθευτή. (Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία δεν ερευνήθηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων σε βάθος χρόνου.)

Υφιστάμενα δοκίμια σχεδιασμένα με τη λογική των επιτρεπόμενων τάσεων

10. Η τοποθέτηση ινο-υφασμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο ΤΘΔ για την ενίσχυση των δοκιμίων επέτυχε τους στόχους του δομοστατικού σχεδιασμού για δεδομένη αύξηση της φέρουσας ικανότητας και επαρκή πλαστιμότητα.
11. Αντίθετα, η τοποθέτηση ινο-υφασμάτων σύμφωνα με την μέθοδο Δ για την ενίσχυση των δοκιμίων δεν επέτυχε την επιδιωκόμενη αύξηση της φέρουσας ικανότητας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kotsovos M.D., "A Fundamental Explanation of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams in Flexure Based on the Properties of Concrete under Multiaxial Stress," *Materials & Structures, RILEM*, Vol. 15, No. 90, November-December 1982, pp. 529-537.
2. Kotsovos M.D., "Effect of Testing Techniques on the Post-Ultimate Behaviour of Concrete in Compression," *Materials & Structures, RILEM*, Vol. 16, No. 91, January-February 1983, pp. 3-12.
3. Kotsovos M.D., "Behaviour of Reinforced Concrete Beams with a Shear Span to Depth Ratio between 1.0 and 2.5," *ACI Journal, Proceedings* Vol. 81, No. 3, May-June 1984, pp. 279-286.
4. Kotsovos M.D., "Behaviour of RC beams with shear span to depth ratios greater than 2.5," *ACI Journal, Proceedings* Vol. 83, No. 115, Nov.-Dec. 1986 pp.1026-1034.
5. Kotsovos M.D., "Shear failure of RC beams," *Engineering Structures*, Vol. 9, No. 1, January 1987, pp.32-38.
6. Kotsovos M.D., Bobrowski J. and Eibl J., "Behaviour of RC T-beams in Shear,"*The Structural Engineer*, Vol. 65B, No. 1, March 1987, pp.1-9.
7. Kotsovos M.D., "Shear failure of RC Beams : A Reappraisal of Current Concepts," *CEB Bulletin* No. 178/179, March 1987, pp.103-111.
8. Kotsovos M.D., "Consideration of Triaxial Stress Conditions in Design: A Necessity," *ACI Structural Journal, Proceedings* Vol. 84, No. 3, May-June 1987, pp. 266-273.

9. Kotsovos M.D., "Compressive Force Path Concept : Basis for Reinforced Concrete Ultimate Limit State Design," ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 1, Jan-Feb 1988, pp.68-75.
10. Priestley M.J.N., "Myths and Fallacies in Earthquake Engineering - Conflicts between Design and Reality". ACI Special Publication 157, 1995, pp. 231-254. (Presented at the Thomas Paulay Symposium "Recent Developments in lateral force Transfer in Buildings" held in La Jolla, California in September 1993.)
11. Kotsovos M. D. and Masui N. "Towards unifying structural concrete design." Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, Vol. 18, No. 460, February 1993, pp. 139-149.
12. Kotsovos M.D. and Bobrowski J. "A Design Model Based on the Concept of the Compressive Force Path." ACI Structural Journal , Vol. 90, No. 1, Jan.-Feb., 1993, pp. 12 - 20.
13. Priestley M.J.N., "Myths and Fallacies in Earthquake Engineering - Conflicts between Design and Reality". Concrete International, February 1997, pp. 54-63.
14. Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων. "Κανονισμός για τη μελέτη και κατασκευή έργων από σκυρόδεμα". Αθήνα, 1998, 159 σελ. (Προγενέστερες εκδόσεις: Ενημερωτικό Δελτίο ΤΕΕ, Μάιος 1987 (Αρ. 1416α), Σεπτέμβριος 1991, Μάιος 1995.)
15. Κωτσοβός Μ. Δ., Μπαζής Σ. και Λέφας Ι. Δ. "Συμβολή στην διερεύνηση της εγκυρότητας του νέου Ελληνικού κανονισμού σχεδιασμού κατασκευών από σκυρόδεμα." Πρακτικά, 11ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κέρκυρα, 1994, Τόμος III, σελ. 136-150.

16. Κωτσοβός Μ. Δ. “Κανονισμοί σχεδιασμού κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα: Πόσο έγκυρο είναι το θεωρητικό τους υπόβαθρο.” Πρακτικά, 12ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Λεμεσός, Κύπρος, 1996, Τόμος III, σελ. 194-205.
17. Kotsovos M.D. reply to Discussion by Frank Mbakogu to “Behaviour of Structural Concrete Elements designed to the Concept of the Compressive-Force Path” by Kotsovos M.D. and Michelis P. (ACI Structural Journal, July-August 1996, p. 428), ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 3, May-June 1997, pp. 338-341.
18. Kotsovos M.D and Spiliopoulos K.V. “Finite element modelling of cracking processes in structural concrete under load.” Proceedings of the 2nd National Congress in Computational Mechanics, Chania, June 1996, Vol. I, pp. 423-430.
19. Kotsovos M.D. and Spiliopoulos K.V. “Modelling of crack closure for finite-element analysis of structural concrete.” Computers and Structures, Vol. 69, 1998, pp. 383-398.
20. Kotsovos M.D. and Spiliopoulos K.V. “Evaluation of structural-concrete design-concepts based on finite-element analysis.” Computational Mechanics, Vol. 21, No. 4/5, May 1998, pp. 330-338.
21. Kotsovos M.D. and Michelis P. “Behavior of Structural Concrete Elements Designed to the Concept of the Compressive Force Path.” ACI Structural Concrete Journal, Vol. 93, No. 4, July-August 1996, pp. 428-437.
22. Comite Europeen de Normalisation, ENV-1998-1-4. “Eurocode No. 8. Design Provisions for earthquake resistance of structures”. Bruxelles, 1994.

23. Carydis P.; Mouzakis H.; and Lu Y. "Shake-table testing of two-storied RC frames designed for different ductility classes using different types of reinforcement". Presented at the 11th ECEE.
24. Jelic I. "Shortcomings of current methods of reinforced-concrete design and proposed solutions". PhD. Thesis, University of London (Imperial College), London, 2002.
25. Comite Europeen de Normalisation, ENV-1992-1. "Eurocode No. 2. Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules of building". Bruxelles, Oct., 1991.
26. Μιχαηλίδης Ο. και Γκαζέτας Γ. "Δυναμική ανάλυση της αστοχίας των βάθρων της γέφυρας Higashi-Nada στο σεισμό του Κόμπε". 12ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Λεμεσός, 29-31 Οκτωβρίου 1996, σελ. 236-247.
27. Carpaer K. L. "Current structural safety topics in North America". The Structural Engineer, Vol. 76, No. 12, 16 June 1998, pp. 233-239.
28. Collins M.P., Vecchio F.J., Selby R.G., Gupta P.R. "The Failure of an Offshore Platform". Concrete International, August 1997, pp. 28-34.
29. "Shock collapse sparks lift slab fears" and "Safety experts urge carpark review". New Civil Engineer, 27 March/3 April 1997, pp. 3-4.
30. Kotsovos M. D. and Pavlovic M. N. "Structural concrete: Finite-element analysis for limit-state design". Thomas Telford, 1995, 550pp.
31. Kotsovos M. D. and Pavlovic M. N. "Ultimate Limit-State Design of Concrete Structures: A New Approach". Thomas Telford (London), 1999, 164 pp.

32. Lu Y.; Tassios T.P.; Zhang G.F.; and Vintzileou E. "Seismic response of r/c frames with strength and stiffness irregularities". ACI Structural Journal (forthcoming)
33. Lu Y. and Vintzileou E. "Some aspects of seismic behaviour of irregular RC frames tested on earthquake simulator". Presented at the 11th ECEE.
34. Kotsovos M. D. and Pavlovic M. N. "The 7/9/99 Athens earthquake: Causes of damage not predicted by structural-concrete design methods". The Structural Engineer, Vol. 79, No. 15, August 2001, pp. 23-29.
35. Κωτσοβός Μ. Δ., Μπάκα Α. Και Βουγιούκας Ε. "Πειραματικός Έλεγχος Μεθόδων Σχεδιασμού Οπλισμένου Σκυροδέματος". ΔΣΠΜΕ, Τεύχος 282, Φεβρουάριος 2001, σελ. 22-33.