

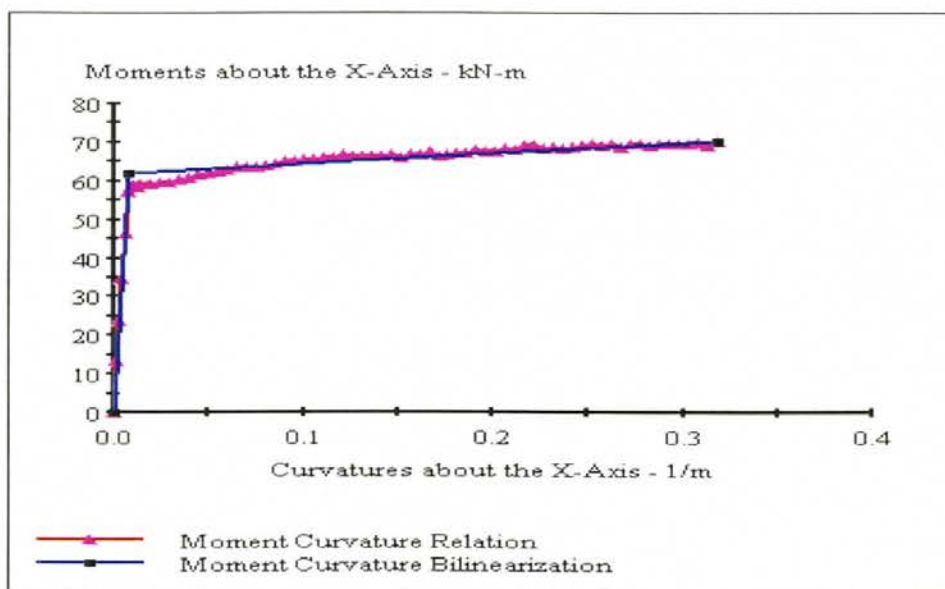
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

6.1 ΔΟΚΙΜΙΟ # 1: NEAK MONO

6.1.0 Πρόβλεψη της αντοχής των δοκιμίων NEAK

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανελαστικής ανάλυσης διατομών XTRACT (Chadwell, 2002), υπολογίστηκε το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του Σχήματος 6.1.0. για την κρίσιμη διατομή των **NEAK MONO** και **NEAK CYCLIC**. Σύμφωνα με τις παραδοχές του λογισμικού το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν σε πλήρη συνάφεια και ακολουθείται γραμμική κατανομή παραμορφώσεων στη διατομή για δεδομένη καμπυλότητα, ώστε η τελική αξονική αντίσταση στη διατομή (N) να ισούται με 0,00.

Οι παραδοχές και αποτελέσματα της ανάλυσης των διατομών δίνονται στο Κεφάλαιο 7 συγκεντρωτικά, ενώ τα προσομοιώματα γεωμετρίας και υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις αναλύσεις περιγράφονται στο Παράρτημα Ι. Για απευθείας σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα του παρόντος, σημειώνεται ότι η υπολογισθείσα ροπή πρώτης διαρροής του εφελκούμενου χάλυβα (M_y) είναι $M_y = 57,2$ kNm, ενώ η οριακή ροπή αντοχής (M_u) ισούται με $M_u = 70,3$ kNm, θεωρώντας οριακή ανηγμένη παραμόρφωση του χάλυβα ίση με 10%.

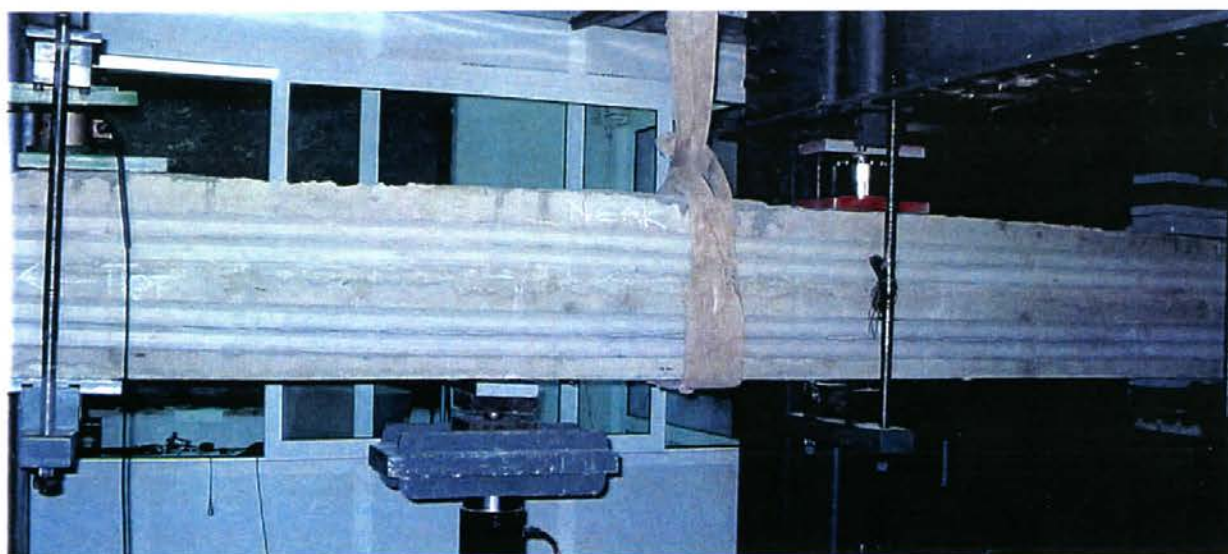


Σχήμα 6.1.0 Διάγραμμα ροπών-καμπυλότητας της διατομής των δοκιμίων **NEAK MONO**, **NEAK CYCLIC**.

Στο Σχήμα 6.1.0 σημειώνεται επί πλέον και το ισοδύναμο διγραμμικό διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας ($M-\varphi$) του οποίου η χάραξη βασίζεται στην ισότητα των εμβαδών πάνω και κάτω από το διάγραμμα που προέκυψε από τη βήμα προς βήμα ανελαστική ανάλυση της διατομής. Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται στην αριθμητική ανάλυση του δοκιμίου που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7.

6.1.1 Έλεγχος της διάταξης και του στατικού προσομοιώματος

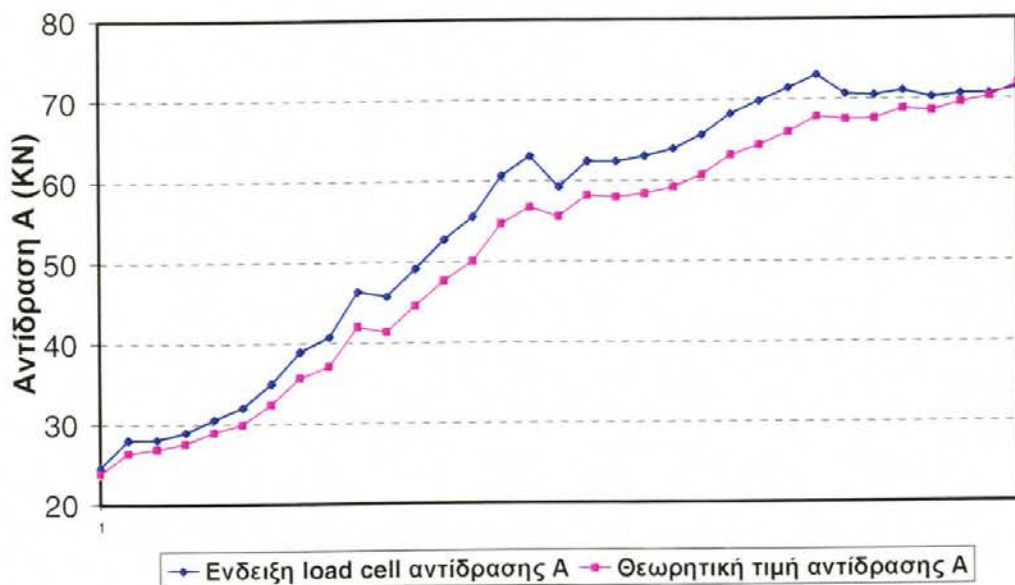
Το δοκίμιο **NEAK MONO** καταπονήθηκε με επιβεβλημένη εγκάρσια παραμόρφωση δ με διεύθυνση προς τα άνω, αυξανόμενη με σταθερό ρυθμό. Ως κριτήριο τερματισμού της φόρτισης θεωρήθηκε η επίτευξη ολικής πλαστιμότητας παραμορφώσεων μεγαλύτερη του τέσσερα ή η μείωση της αντοχής του δοκιμίου στο 85% της μέγιστης αντοχής του. Στη συγκεκριμένη δοκό, η οποία απετέλεσε και το πρώτο ουσιαστικά δοκίμιο που ελέγχθηκε στη διάταξη, τοποθετήθηκαν



Φωτογραφία 6.1.1 Το δοκίμιο **NEAK MONO** στη θέση του. Διακρίνονται οι κυψέλες φορτίου (*load cells*) στις στηρίξεις Α (αριστερά του φορτίου, εξωτερική) και Β (μεσαία στηρίξη, δεξιά του φορτίου) – Όψη Α.

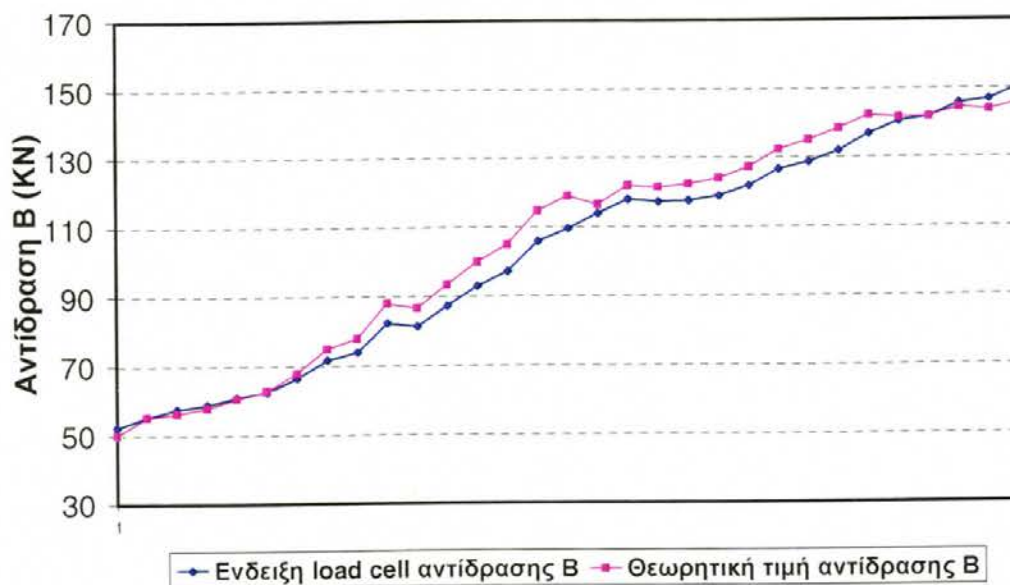
δύο κυψέλες φορτίου (*load cells*) μετρητικής ικανότητας 300 kN στην ακραία και μεσαία στηρίξη, εκατέρωθεν της θέσης εφαρμογής της φόρτισης P (Φωτογραφία 6.1.1).

Ελεγχος load cell A για τιμές φόρτισης 60-180 KN



Σχήμα 6.1.1 Σύγκριση της μέτρησης *load cell* στην ακραία στήριξη με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή.

Ελεγχος load cell B για τιμές φόρτισης 60-180 KN



Σχήμα 6.1.2 Σύγκριση της μέτρησης *load cell* στη μεσαία στήριξη με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή.

Σκοπός των εν λόγω καταγραφών ήταν η βαθμονόμηση της διάταξης μέσω του ελέγχου των θεωρητικά προβλεπόμενων τιμών από τα διαγράμματα στατικής ισορροπίας ενός ανένδοτα πακτωμένου υπερστατικού φορέα, με πειραματικά μέσα. Η χρήση των κυψελών φορτίου στα επόμενα πειράματα δεν ήταν δυνατή λόγω του μεγέθους των αντιδράσεων στα ενισχυμένα στοιχεία και για λόγους ευστάθειας του δοκιμίου επάνω στη διάταξη.

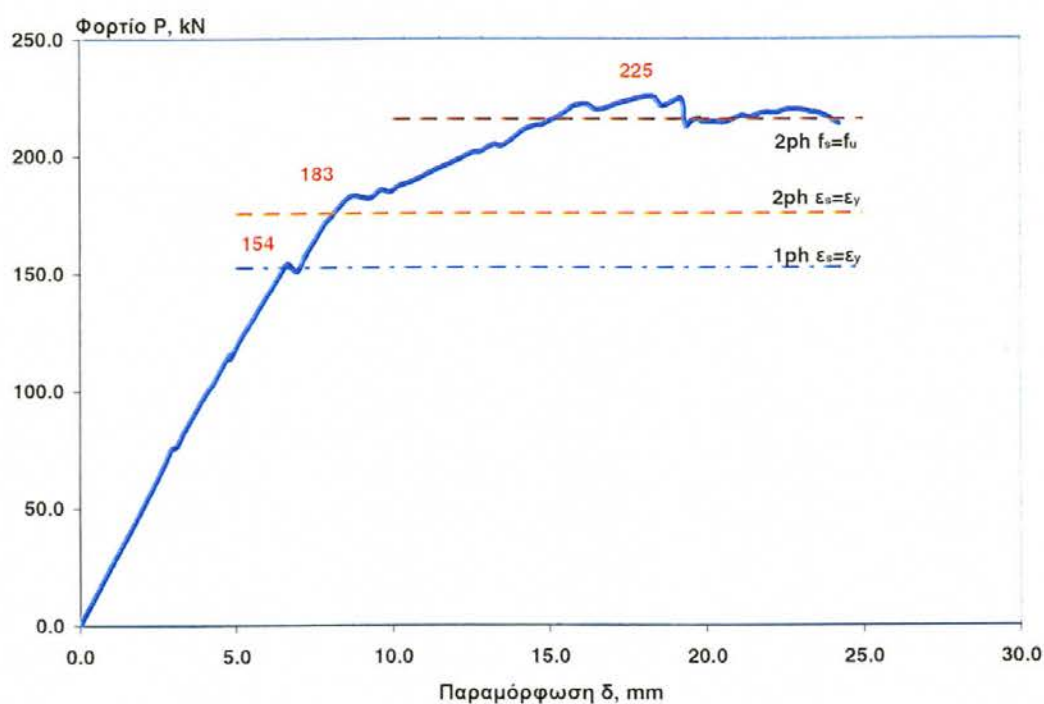
Στα Σχήματα 6.1.1 και 6.1.2 συγκρίνονται η καταγεγραμμένη αντίδραση στην κάθε μία κυψέλη με τη θεωρητική πρόβλεψη, υπολογισμένη βάσει της παραδοχής ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς (όπως παρατίθεται στο Κεφάλαιο 4), για ένα ενδεικτικό εύρος του φορτίου ως τα 180 kN. Οι συγκρίσεις των θεωρητικών τιμών των αντιδράσεων στις θέσεις Α και Β με τις αντίστοιχες ενδείξεις των καταγραφών πιστοποίησαν την ορθή λειτουργία της διάταξης καθώς και τη δυνατότητα πρόβλεψης των εσωτερικών εντατικών μεγεθών βάσει των εξισώσεων που δόθηκαν στα Σχήματα 4.7 και 4.8.

Η ύπαρξη των κυψελών αυτών δεν επέτρεψε για το συγκεκριμένο πείραμα την εκτίμηση της μέγιστης παραμόρφωσης αστοχίας δ_{max} , στη θέση του P : λόγω της μεγάλης στροφής στην σημειακή κύλιση της εξωτερικής στήριξης αριστερά του P , δημιουργήθηκε εκκεντρότητα μεταξύ του σημείου έδρασης της κυψέλης φορτίου και του κυλίνδρου κύλισης που στερεώνεται στη διάταξη, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να φύγει από τη θέση του όταν η μετατόπιση δ στη θέση φόρτισης είχε φθάσει περίπου στα 25 mm. Αυτό το γεγονός δημιούργησε πρόωρο τερματισμό του πειράματος, παρόλο που τόσο η αντοχή του δοκιμίου ήταν σταθερή, πολύ πάνω από το κριτήριο τερματισμού του 85% της μέγιστης.

6.1.2 Περιγραφή του πειράματος

Μετά από σύντομο χρόνο από την εκκίνηση επιβολής του φορτίου, εμφανίστηκαν οι πρώτες κατακόρυφες ρωγμές γύρω από τη θέση του σημείου εφαρμογής του, καθαρά καμπτικής μορφής. Με την περαιτέρω αύξηση παραμόρφωσης, παρατηρήθηκαν νέες καμπτικές ρωγμές χωρίς όμως μεγάλη

διασπορά στο μεσαίο τμήμα, καθώς και έντονη διεύρυνση στη διαμπερή ρωγμή η οποία ξεκινούσε λίγο πάνω από τη θέση επιβολής του φορτίου και της οποίας το άνοιγμα αυξανόταν με μια μικρή κλίση προς τη μεριά της πλησιέστερης προς το φορτίο ακραίας στήριξης. Καθώς η φόρτιση πλησίαζε τη τιμή των 180 kN περίπου, παρατηρήθηκε ο σχηματισμός ρωγμών γύρω από τη μεσαία στήριξη του δοκιμίου, γεγονός που υποδήλωνε την αρχή σχηματισμού και της 2^{ης} πλαστικής άρθρωσης σε αυτό το σημείο. Η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου εξαντλήθηκε στα 225,6 kN, οπότε καταγράφεται μικρή πτώση και η αντοχή παραμένει πρακτικά σταθερή, ίση προς 217 kN, μέχρι την απώλεια στήριξης στο σημείο Α, που αποτέλεσε και τον τερματισμό του πειράματος.



Σχήμα 6.1.3 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, δοκίμιο NEAK MONO.

Η καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του εμβόλου έδωσε το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης ‘P-δ’ του Σχήματος 6.1.3. Στο διάγραμμα σημειώνονται και οι θεωρητικές τιμές του φορτίου στις οποίες

αναμένονταν ο σχηματισμός της πρώτης και της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με το θεωρητικό προσομοίωμα της συνεχούς δοκού του Κεφαλαίου 4.4, καθώς και η μέγιστη αντοχή θεωρώντας πλήρη ανάπτυξη της οριακής καμπτικής αντοχής (κατά τον Πίνακα 7.1) στις δύο αρθρώσεις, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της αντοχής λόγω κράτυνσης του οπλισμού, ίση, κατά μέσον όρο και στις δύο αρθρώσεις.

Σύμφωνα με το διάγραμμα, αναγνωρίζονται τρεις οριακές καταστάσεις στη δοκό:

1. η συμπεριφορά του φορέα είναι πρακτικά γραμμική ως τη δημιουργία της πρώτης πλαστικής άρθρωσης ($P_{1ph|εs=εy}$), η οποία οριοθετείται στα **154 kN** (πρακτικά ίση με τη θεωρητική τιμή $P_{εs=εy} = 2,67 \cdot 57,2 \text{ kNm} = 152,7 \text{ kN}$), σε παραμόρφωση **6,6 mm**,
2. η δημιουργία της δεύτερης άρθρωσης ($P_{2ph|εs=εy}$) παρατηρείται στα **183 kN** (4,6% υψηλότερα της θεωρητικής $P_{2ph|εs=εy} = 3,07 \cdot 57,2 \text{ kNm} = 175,6 \text{ kN}$), σε παραμόρφωση **8,7 mm**,
3. ενώ, τελικά, η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου εξαντλήθηκε στα **225,6 kN** (P_{max}), τιμή η οποία είναι κατά 9,8 kN μεγαλύτερη από τη θεωρητική οριακή αντοχή της δοκού βάσει του θεωρητικού προσομοιώματος ισορροπίας $P_u = 3,07 \cdot 70,3 \text{ kNm} = 215,8 \text{ kN}$ (Σχήμα 6.1.3), σε παραμόρφωση **18,2 mm**.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί εδώ ότι η καταγεγραμμένη τιμή των 183 kN στο σημείο 2. παραπάνω, είναι 1,7% υψηλότερη από τη θεωρητική τιμή που αντιστοιχεί στην περίπτωση καμμιάς ανακατανομής λόγω της πρώτης διαρροής, με πλήρη κράτυνση στη θέση του φορτίου P ($M_p = 70,3 \text{ kNm}$) και περίπου σταθερή ροπή στην εσωτερική στήριξη B ($M_B = 0,61 \cdot 57,2 = 35 \text{ kNm}$), οπότε $P = 70,3/0,975 + (70,3+35)/0,975 = 180,1 \text{ kN}$. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να μεσολαβήσει και ένα ακόμη ενδιάμεσο οριακό σημείο, όπου η ροπή στην

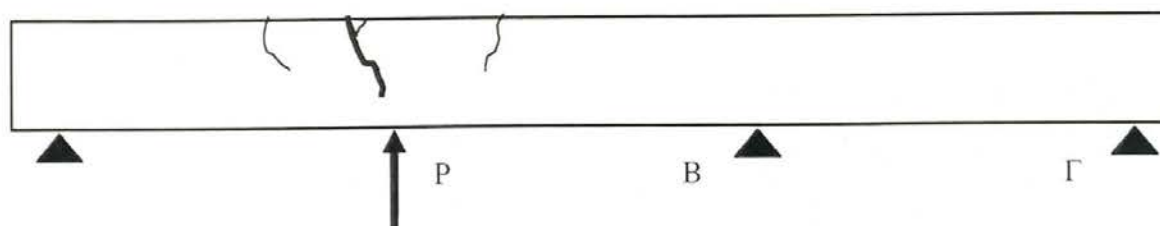
εσωτερική στήριξη B λαμβάνει πλέον την τιμή διαρροής της $M_B = 57,2 \text{ kNm}$, με τη ροπή στο P να παραμένει οριακά σταθερή, που αντιστοιχεί σε φορτίο $P = 70,3/0,975 + (70,3+57)/0,975 = 202,7 \text{ kN}$.

Όπως φαίνεται και παρακάτω, οι μετρήσεις των βελομέτρων στην εσωτερική στήριξη B δείχνουν ότι ήδη από τα 175 kN εμφανίστηκαν αυξήσεις των πλαστικών στροφών, άρα και ανακατανομή στη μεσαία στήριξη. Η υπόθεση, άρα, της ελαστικής συμπεριφοράς στο B δεν θεωρείται πιθανή. Είναι άρα πλέον πιθανό ότι πρώτα διέρρευσε η δοκός στο B και κατόπιν το ταμήμα της δοκού στη θέση του P να εισήλθε στην κρίση.

Ανεξάρτητα από την ενδιάμεση διαδρομή προς την οριακή αντοχή, το **NEAK MONO** εμφανίζει υπεραντοχή λόγω κρίσης του χάλυβα ίση με 123% , σε σχέση με τη οριακή αντοχή $P_{2ph|es=ey}$ κατά την οποία δημιουργήθηκε πλήρης μηχανισμός, και μια πλαστιμότητα ως το σημείο αυτό της τάξεως του $2,80$ από την εμφάνιση της πρώτης διαρροής στο P . Η μέγιστη παραμόρφωση που κατεγράφη πειραματικά ήταν $24,2 \text{ mm}$, τιμή που αποτελεί και τη μέγιστη παρεχόμενη παραμόρφωση του δοκιμίου, λόγω του ότι η αντοχή του δεν έπεσε ποτέ κάτω από το συμβατικό όριο του $0,85 P_{max}$. τιμή που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα $3,70$ ως προς τη δημιουργία της πρώτης άρθρωσης ή $2,70$ κατά την ισοδύναμη ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

6.1.3 Περιγραφή των βλαβών και τρόπος αστοχίας

Ακολουθούν χαρακτηριστικές Φωτογραφίες του δοκιμίου **NEAK MONO** μετά τη λήξη του πειράματος, οι οποίες είναι ενδεικτικές της τελικής ρηγμάτωσης του δοκιμίου, καθώς και τα απαραίτητα σκαριφήματα που αποτυπώνουν τη τελική κατάσταση των δύο όψεων του. Ουσιαστικά η βλάβη στο δοκίμιο είναι περιορισμένη και χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση δύο διακριτών καμπτικών

ΑΨΗ

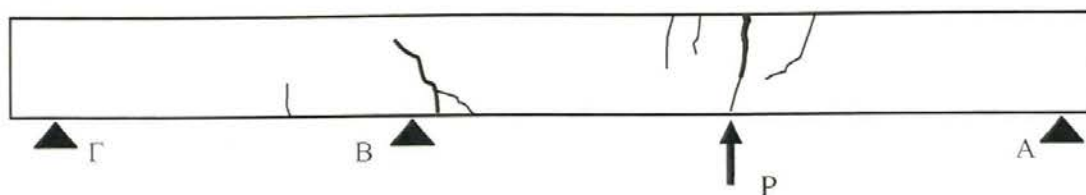
Σχήμα 6.1.4 Σκαρίφημα τελικής κατάστασης ρωγμών του NEAK MONO, Όψη Α.



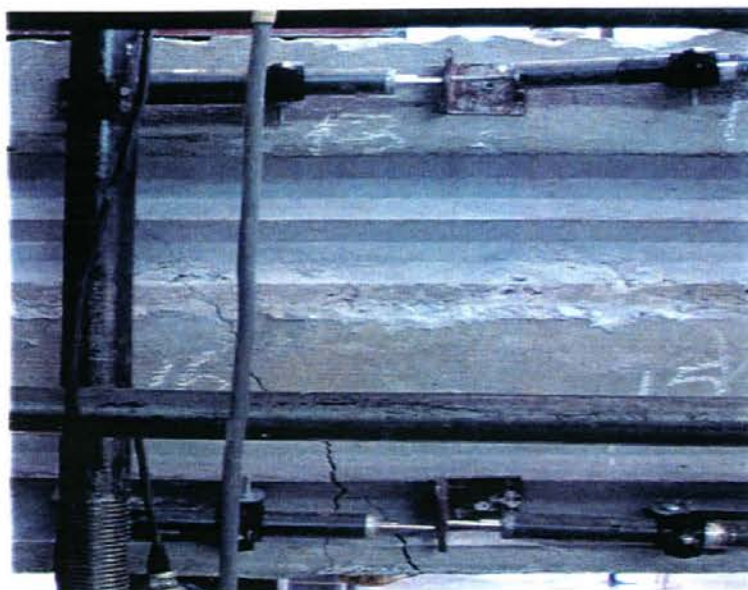
Φωτογραφία 6.1.2 Άποψη της τελικής κατάστασης δοκιμίου NEAK MONO – Όψη Α. Διακρίνεται το παραμένον βέλος του δοκιμίου.



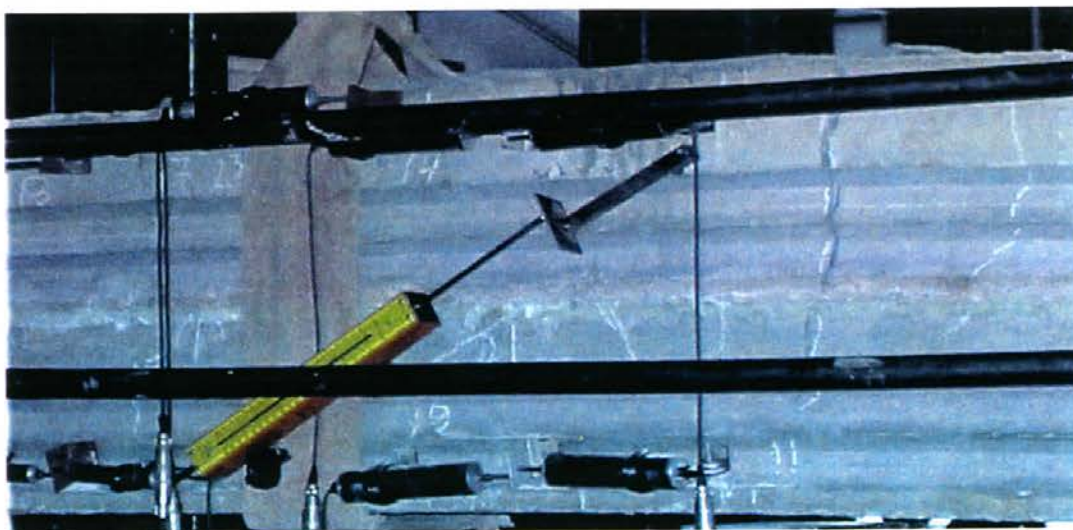
Φωτογραφία 6.1.3 Λεπτομέρεια στη θέση φόρτισης P, Όψη Α: Διακρίνεται μία χαρακτηριστική κατακόρυφη διαμπερής ρωγμή στη θέση επιβολής του φορτίου και μικρή θραύση του δοκιμίου στην άνω παρειά.

Β' ΟΨΗ

Σχήμα 6.1.5 Σκαρίφημα τελικής κατάστασης ρωγμών δοκιμίου NEAK MONO – Όψη Β.



Φωτογραφία 6.1.4
Λεπτομέρεια στη
στήριξη Β, Όψη Β:
Διακρίνονται
χαρακτηριστικές
ρωγμές.



Φωτογραφία 6.1.5 Λεπτομέρεια 1 στη θέση φόρτισης P, Όψη Β: Φαίνεται η χαρακτηριστική διαμπερή ρωγμή στη θέση επιβολής του φορτίου πριν από την αστοχία, εκτός της ζώνης μέτρησης του LVDT.

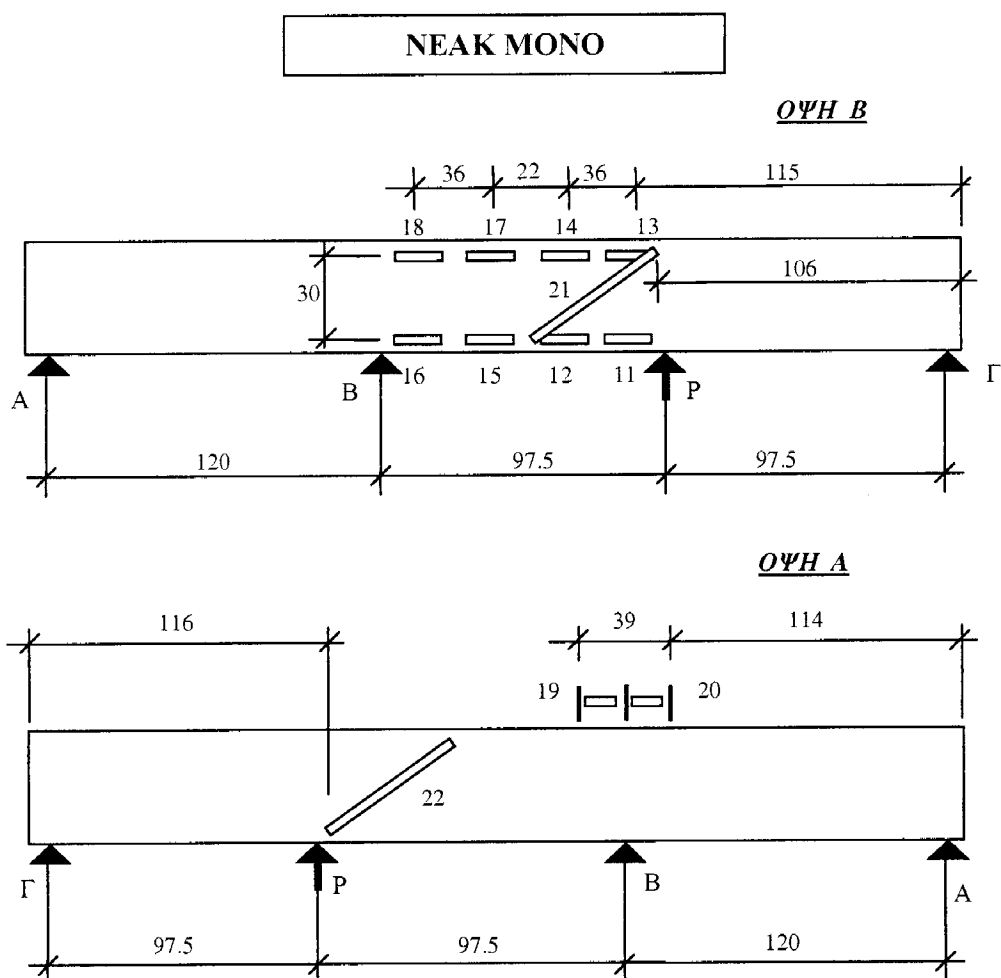


Φωτογραφία 6.1.6 Λεπτομέρεια 2 στη θέση φόρτισης P , Όψη Β: διακρίνεται η διαμπερής ρωγμή στη θέση επιβολής του φορτίου, μετά το πέρας της φόρτισης. Σημειώνεται η μεταβολή του εύρους της ρωγμής σε σχέση με τη λεπτομέρεια 1.

κυρίως ρωγμών στις θέσεις του φορτίου P και της εσωτερικής στήριξης B , όπως φαίνονται στα Σχήματα 6.1.4 και 6.1.5 και στις Φωτογραφίες 6.1.2 ως 6.1.6, όπου δημιουργήθηκαν οι δύο πλαστικές αρθρώσεις, με συνεπακόλουθη μόνιμη παραμένουσα παραμόρφωση μετά το πέρας της διαδικασίας.

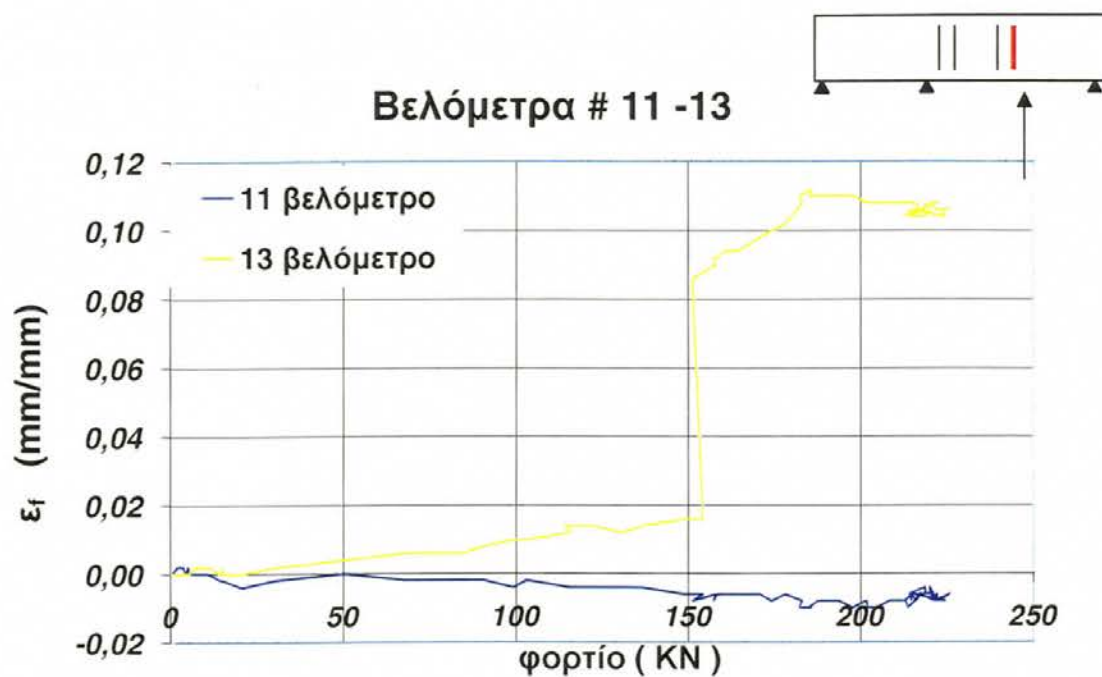
6.1.4 Ανάλυση των καταγραφών LVDT

Στο δοκίμιο τοποθετήθηκαν δώδεκα επαγωγικά βελόμετρα (LVDT) σε συγκεκριμένες θέσεις, όπως δείχνεται στο Σχήμα 6.1.7. Τα βελόμετρα Αρ. 11-12, 12-14, 15-17 και 16-18 τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη στην ίδια απόσταση από την άκρη του δοκιμίου και σε μια απόσταση καθ' ύψος μεταξύ τους ίση με 30 cm, για να μετρήσουν την πλαστική στρόφη και τη μέση καμπυλότητα του τμήματος μεταξύ του P και της μεσαίας στήριξης, σε κάθε μία από τις τέσσερις διατομές που αντιστοιχούν στην κάθε ζώνη. Τα βελόμετρα Αρ. 21 και 22 τοποθετήθηκαν για τη μέτρηση διατμητικών παραμορφώσεων στο τμήμα της δοκού με τον μικρότερο λόγο M/Vd , ενώ τα βελόμετρα Αρ. 19 και 20 χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της στρόφης του δοκιμίου εκατέρωθεν της μεσαίας στήριξης. Δεν τοποθετήθηκαν ηλεκτρονικά μηχανοστάσια σε αυτό το δοκίμιο.



Σχήμα 6.1.7 Δοκίμιο NEAK MONO : διάταξη βελομέτρων για τις 2 όψεις του NEAK MONO.

Ακολουθούν, στα Σχήματα 6.1.8 έως 6.1.13, τα γραφήματα των καταγραφών των βελομέτρων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, χωρίς να υποστούν κάποια αριθμητική επεξεργασία. Στο κάθε διάγραμμα δείχνεται σε σκαρίφημα η θέση του μετρητικού οργάνου σε σχέση με το P .



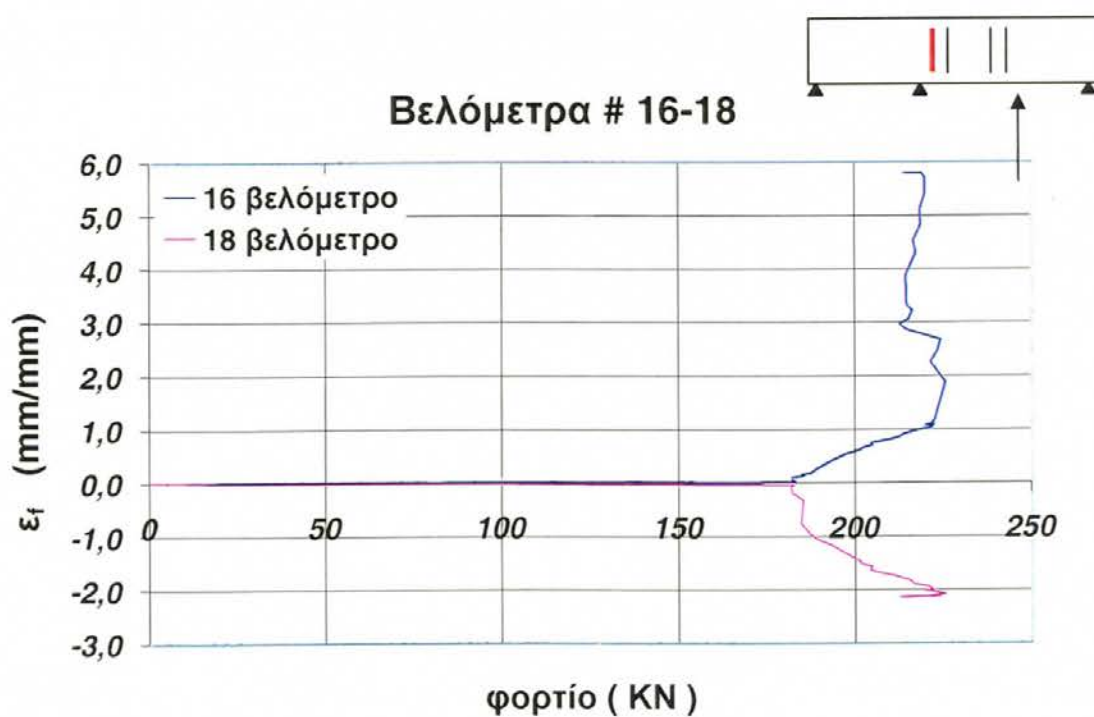
Σχήμα 6.1.8 Διάγραμμα των ενδείξεων των βελομέτρων 11-13 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.1.9 Διάγραμμα των ενδείξεων των βελομέτρων 12-14 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.1.10 Διάγραμμα των ενδείξεων των βελομέτρων 15-17 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.1.11 Διάγραμμα των ενδείξεων των βελομέτρων 16-18 συναρτήσει του φορτίου.



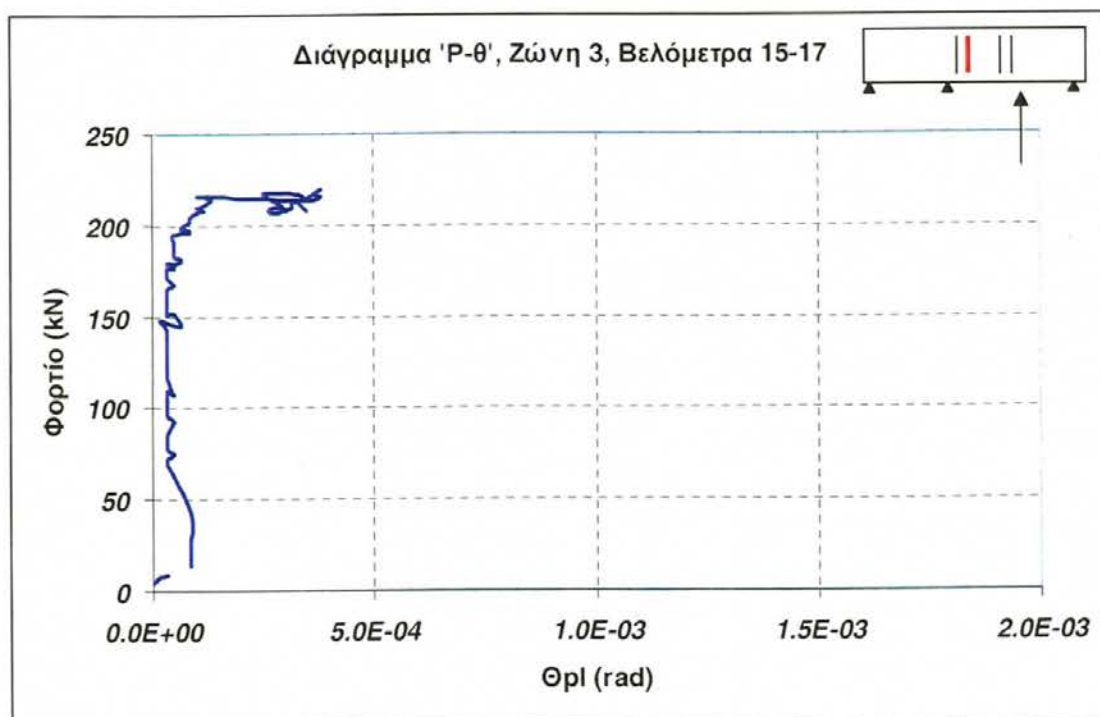
Σχήμα 6.1.12 Διάγραμμα των ενδείξεων των βελομέτρων 19-20 συναρτήσει του φορτίου.



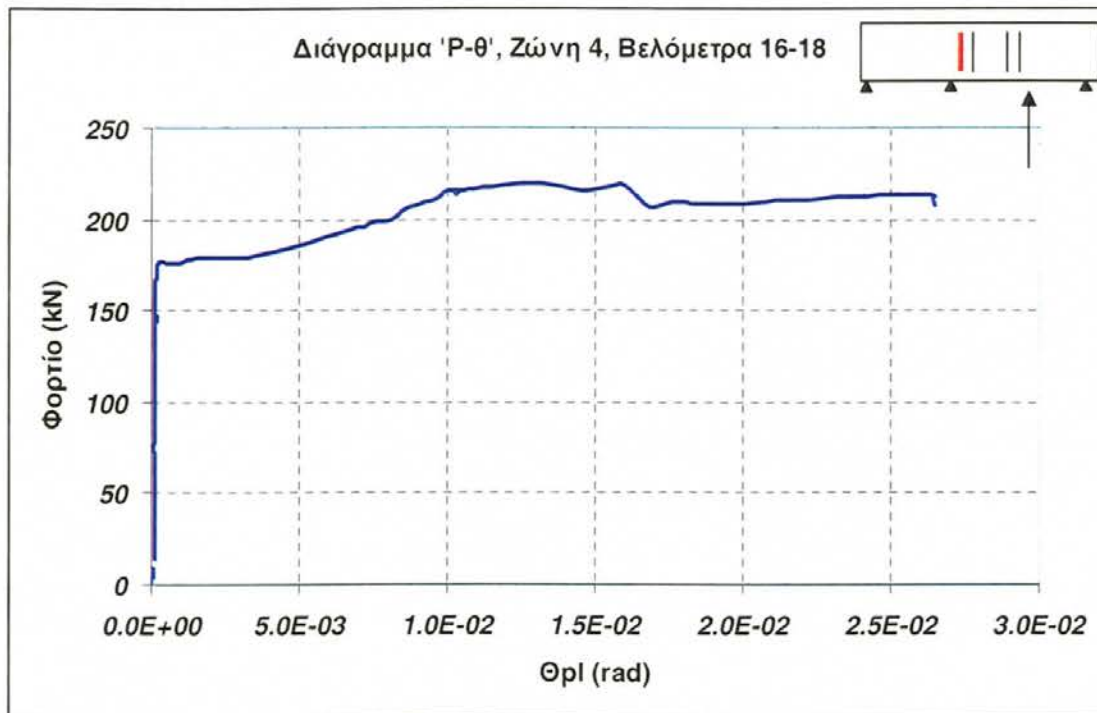
Σχήμα 6.1.13 Διάγραμμα των ενδείξεων των βελομέτρων 21-22 συναρτήσει του φορτίου.

Από τα Σχήματα 6.1.10 και 6.1.11 παρατηρείται ότι τα LVDT #13 και 14, τα οποία ευρίσκονται κοντά στη θέση επιβολής του φορτίου στην εφελκόμενη περιοχή των αντίστοιχων διατομών, παρουσιάζουν μια απότομη αύξηση της τιμής της ένδειξης τους όταν το φορτίο άρχισε να ξεπερνά τα 150 kN, όταν δηλαδή αρχίζει να σχηματίζεται η πρώτη πλαστική άρθρωση στην περιοχή του P , γεγονός που αναμενόταν άλλωστε από τη λειτουργία της συνεχούς δοκού, σε τιμή της καταγεγραμμένης αντοχής πολύ κοντά στην θεωρητική πρόβλεψη.

Αντιστοίχως, τα LVDT #16-18 που ήταν τοποθετημένα πλησίον της θέσης εμφάνισης της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης, εμφάνισαν παρόμοια συμπεριφορά με απότομη αύξηση της τιμής των ενδείξεων τους όταν το φορτίο ξεπέρασε τα 180 kN (Σχήμα 6.1.11), την ώρα δηλαδή που η δοκός διέρρευσε στο σημείο της εσωτερικής στήριξης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης, που μετέτρεψε το φορέα σε μηχανισμό.



Σχήμα 6.1.14 Διάγραμμα φορτίου-στρέψης στη ζώνη 3.



Σχήμα 6.1.15 Διάγραμμα φορτίου-στροφής στη ζώνη 4.

Λόγω του ότι η διακριτή ρωγμή στο P δεν πέρασε μέσα από τα LVDT #11-13, οι καταγραφές στο σημείο της φόρτισης είναι μικρές. Όμως, από τα ζεύγη των LVDT #15,17 και 16,18, τα οποία κατέγραψαν ικανοποιητικά, υπολογίσθηκαν βάσει της επιπεδότητας των διατομών τα διαγράμματα φορτίου – μέσης στροφής ($'P-\theta'$) στις ζώνες στις οποίες ήταν στερεωμένα τα ζεύγη αυτά, άνω και κάτω. Τα διαγράμματα υπολογίζονται από τις σχέσεις:

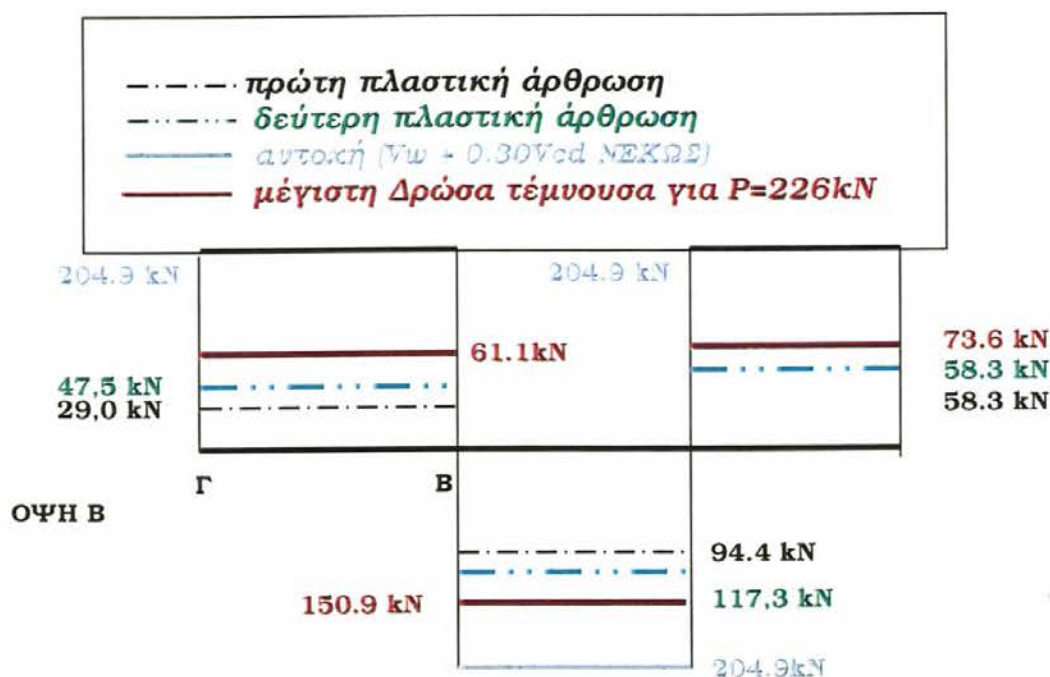
$$\theta_3 = \frac{\delta_{15} - \delta_{17}}{300} \quad \text{και} \quad \theta_4 = \frac{\delta_{16} - \delta_{18}}{300}$$

όπου δ οι καταγραφές των βελομέτρων σε mm (Σχήματα 6.1.14 και 6.1.15). Η αντίστοιχη μέση καμπυλότητα φ στο εκάστοτε τμήμα μέτρησης ισούται με την καταγεγραμμένη στροφή δια της απόστασης μεταξύ των LVDT (περίπου $d/4$).

Παρατηρείται ότι για τιμές φορτίου μεγαλύτερες από 220 kN το διάγραμμα γίνεται πρακτικά ευθύγραμμο, με την αντίσταση του δοκιμίου να φθάνει την

οριακή της αντοχή, πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή βάσει της οριακής ροπής κράτυνσης στις δύο πλαστικές αρθρώσεις. Η μέγιστη πλαστική στροφή σε απόσταση σχεδόν $d/4$ από τη στήριξη είναι $0,026$ rad, η δε συνολική ανελαστική παραμόρφωση είναι συγκεντρωμένη εξ ολοκλήρου στη ζώνη 4 (βλ. Σχήμα 6.1.14), σύμφωνα άλλωστε και με την πειραματική παρατήρηση.

6.1.5 Ανάλυση της διατμητικής αντοχής



Σχήμα 6.1.20 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσης και αντοχής του φορέα.

Παρά το μικρό διατμητικό μήκος του δοκιμίου (πρακτικά, για το μεσαίο τμήμα της δοκού ο λόγος M/Vd ισούται με 1,0) στο δοκίμιο δεν εμφανίστηκαν ρωγμές διατμητικού τύπου και αποφεύχθηκε ψαθυρή αστοχία. Τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα δίνονται στο Σχήμα 6.1.20 με βάση τις τιμές εντατικών μεγεθών της συνεχούς δοκού της Ενότητας 4.4 (Σχήμα 4.8), για το σχηματισμό μίας και δύο πλαστικών αρθρώσεων ($M_p = 57,2$ kNm) και στην οριακή αντοχή ($M_p = 70,3$ kNm, βλ. Πίνακα 7.1). Οι αντίστοιχοι

υπολογισμοί της διατμητικής απαίτησης και αντοχής δίδονται στο Παράρτημα II.

Η μέση πειραματική αντοχή των συνδετήρων (μανδύας Φ8/100 κατηγορίας S500) έναντι τέμνουσας δύναμης, ίση με 190.8 kN, υπολογιζόμενη χωρίς τη συνεισφορά των δευτερευόντων μηχανισμών του σκυροδέματος, που προβλέπεται από τον Κανονισμό (ΕΑΚ, 2000) είναι αρκετή για να παραλάβει τη μέγιστη δρώσα τέμνουσα σε οποιοδήποτε σημείο του φορέα. Η πρόσθετη συνεισφορά του σκυροδέματος σε ποσοστό 30%, είναι περίπου 10% της αντοχής του κλωβού.

6.2 ΔΟΚΙΜΙΟ # 2: NEAK CYCLIC



Φωτογραφία 6.2.1 Το δοκίμιο NEAK CYCLIC στην πειραματική διάταξη, ενοργανωμένο.

6.2.1 Περιγραφή του πειράματος

Το δοκίμιο NEAK CYCLIC (Φωτογραφία 6.2.1) ήταν παρόμοιο με το NEAK MONO, τόσο σε διαστάσεις όσο και σε οπλισμό. Κατά συνέπεια έχει και παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά. Το δοκίμιο καταπονήθηκε συνολικά με οκτώ κύκλους εναλλασσόμενης φόρτισης. Από την καταγραφή του φορτίου και της μετατόπισης του εμβόλου προέκυψαν οι βρόχοι υστερήσεως του Σχήματος 6.2.1. Στο ίδιο Σχήμα παραβάλλονται για σύγκριση και το διάγραμμα $P-\delta$ του δοκιμίου NEAK MONO, καθώς και οι θεωρητικές τιμές αντοχής (βάσει ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της δοκού στις αρθρώσεις), χρησιμοποιώντας τις ροπές αντοχής στη διαρροή M_y και οριακά, M_p του Πίνακα 7.1.

επιβαλλόμενης μετατόπισης δ ίσης προς $0.8\delta_y$, $1.0 \delta_y$, $2\delta_y$ κ.ο.κ. μέχρις ότου η αντοχή του δοκιμίου πέσει κάτω από το 85% της μέγιστης τιμής της. Ως εκ τούτου, το πείραμα σταμάτησε σε μέγιστη παραμόρφωση της δοκού ίση προς 27,6 mm οπότε και το κριτήριο αυτό ενεργοποιήθηκε. Στα πειραματικά αποτελέσματα του παραπάνω Πίνακα περιλαμβάνονται :

- οι μέγιστες /ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}), με τις αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο και η μέση παραμόρφωση δ_{mean} , όπου $\delta_{mean} = (\delta_{min} + \delta_{max})/2$
- οι παραμορφώσεις στις αντίστοιχες ακραίες δυνάμεις (δ/P_{min} και δ/P_{max}),
- το ποσοστό της μέγιστης δύναμης του κύκλου, σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή του **NEAK MONO**
- η μέση δυσκαμψία \bar{K} του βρόχου, που δίδεται από την εξίσωση

$$\bar{K} = \frac{P_{max} - P_{min}}{\delta / P_{max} - \delta / P_{min}} \cdot 1000 \text{ kN / m}$$

- η ενεργειακή απορρόφηση που περικλείεται από το υστερετικό διάγραμμα του κάθε κύκλου και , τέλος,
- οι αντίστοιχες πλαστιμότητες μέσης παραμόρφωσης μ_δ και υστερετικής ενέργειας μ_E , όπου E η απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του βρόχου (σε εύρος δ_{mean}) και

$$\mu_\delta = \delta_{mean} / \delta_y$$

$$\mu_E = E / E_y, \quad E_y = P_y \delta_y / 2$$

και P_y , δ_y οι δύναμη και η παραμόρφωση διαρροής (πειραματικά μετρούμενη).

Το δοκίμιο **NEAK CYCLIC** δεν μπόρεσε να αποδώσει κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση την ίδια περιβάλλουσα αντίστασης παραμόρφωσης όπως το **NEAK MONO**, εμφανίζοντας ένα έλλειμμα αντοχής της τάξης του 10%, σε παρόμοια μετατόπιση όμως όπως το μονοτονικό πείραμα. Ουσιαστικά, ούτε η αρχική δυσκαμψία της δοκού είναι ίδια με αυτή στο μονοτονικό πείραμα στις αρχικές ανακυκλίσεις μικρού εύρους μετατοπίσεων, όπως θα αναμενόταν.

Κατά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές ρωγμές στη δοκό. Κατά τον ανοδικό κλάδο του πέμπτου κύκλου έφτασε η φόρτιση τις μέγιστες τιμές της και έκαναν την εμφάνιση τους σημαντικές καμπτικές ρωγμές και μερική αποφλοιώση του σκυροδέματος γύρω από τη θέση επιβολής της φόρτισης. Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου ήταν 202,6 kN σε μετατόπιση του εμβόλου ίση με 18,2 mm, στον πέμπτο κύκλο. Βάσει των πρότερων υπολογισμών, ο σχηματισμός της πρώτης πλαστικής άρθρωσης αναμενόταν σε τιμή αντοχής $P \approx 154$ kN, ενώ της δεύτερης για τιμή $P' \approx 183$ kN.

Η πειραματική αντοχή διαρροής ήταν 149 kN, πλησίον της παραπάνω τιμής, σε μετατόπιση 8,4 mm (Σχήμα 6.2.1). Στην αντίστοιχη ροπή διαρροής ($149/2,67 = 55,8$ kNm) αντιστοιχεί μια αντοχή 171,3 kN για τη δημιουργία της δεύτερης άρθρωσης, επομένως, στο δοκίμιο δημιουργήθηκαν δύο πλαστικές αρθρώσεις στον 5^ο κύκλο, οπότε και εισήλθε στην κρίση. Κατά τον επόμενο κύκλο φόρτισης παρατηρήθηκε πτώση της αντοχής του δοκιμίου στα 178 kN, σε σχέση με την μέγιστη του προηγούμενου κύκλου, γεγονός αναμενόμενο αφού το δοκίμιο είχε προηγουμένως ξεπεράσει την οριακή του αντοχή. Κατά την επαναφόρτιση μετά τον έβδομο κύκλο, σε μετατόπιση ίση με 27,6 mm και πλαστιμότητα ίση με 3,30, η φέρουσα ικανότητα έπεσε κάτω από το 85% της προτέρας μέγιστης, οπότε ουσιαστικά το δοκίμιο θεωρήθηκε ότι αστόχησε.

6.2.2 Περιγραφή της συμπεριφοράς, βλαβών και του τρόπου αστοχίας

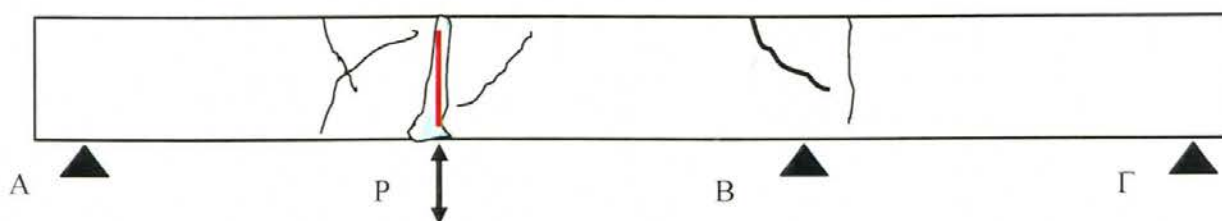
Ακολουθούν χαρακτηριστικές φωτογραφίες (6.2.2 έως 6.2.9), ενδεικτικές της διαδικασίας δημιουργίας και εξέλιξης των ρωγμών, μέχρι την τελική ρηγμάτωση αστοχίας του δοκιμίου, η οποία δείχνεται στα σκαριφήματα των δύο όψεων του στα Σχήματα 6.2.2 και 6.2.3, τα οποία και αποτυπώνουν τη τελική κατάσταση βλαβών όπως προέκυψε μετά τη λήξη του πειράματος.

Όπως και στη μονοτονική φόρτιση, παρατηρήθηκε αρχικά η δημιουργία μιας κατακόρυφης καμπτικής ρωγμής στο σημείο εφαρμογής του φορτίου

(Φωτογραφίες 6.2.2, 6.2.3). Σταδιακά, επήλθε αποφλοιώση του επιφανειακού σκυροδέματος και σταδιακή αποκάλυψη του διαμήκων οπλισμών άνω και κάτω καθώς και του συνδετήρα, στη θέση αυτή, λόγω διαρροής του οπλισμού (Φωτογραφίες 6.2.4 έως 6.2.6). Παρά την ανακύκλιση, η πυκνή διάταξη των συνδετήρων δεν επέτρεψε να παρατηρηθεί κανένα φαινόμενο λυγισμού του οπλισμού σε καμία φάση της φόρτισης.

Σε αντίθεση με το **NEAK MONO**, το δοκίμιο **NEAK CYCLIC** εμφάνισε διαγώνιες ρωγμές εκατέρωθεν του σημείου φόρτισης P και στη μεσαία στήριξη, προς το P , παρά τη διαφορά του ανηγμένου διατμητικού μήκους μεταξύ των εκατέρωθεν περιοχών (Φωτογραφίες 6.2.7, 6.2.9). Αν και οι ρωγμές στο P προς τη μεριά της ακραίας στήριξης, με το μεγαλύτερο σχετικά διατμητικό μήκος, διασταυρώθηκαν (Φωτογραφία 6.2.8), λόγω και της υψηλής αντοχής των συνδετήρων δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες παραμορφώσεις στην εγκάρσια διεύθυνση, που θα δημιουργούσαν μεγάλες ανοιχτές ρωγμές, και διατηρήθηκε η σταθερότητα στην υστερητική συμπεριφορά. Εν τούτοις, το δοκίμιο συμπεριφέρθηκε μετά τον 7^ο κύκλο με κακή ενεργειακή απορρόφηση, εμφανίζοντας σημαντική πτώση της δυσκαμψίας του. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μέση δυσκαμψία στον 8^ο κύκλο είναι 28% της αρχικής.

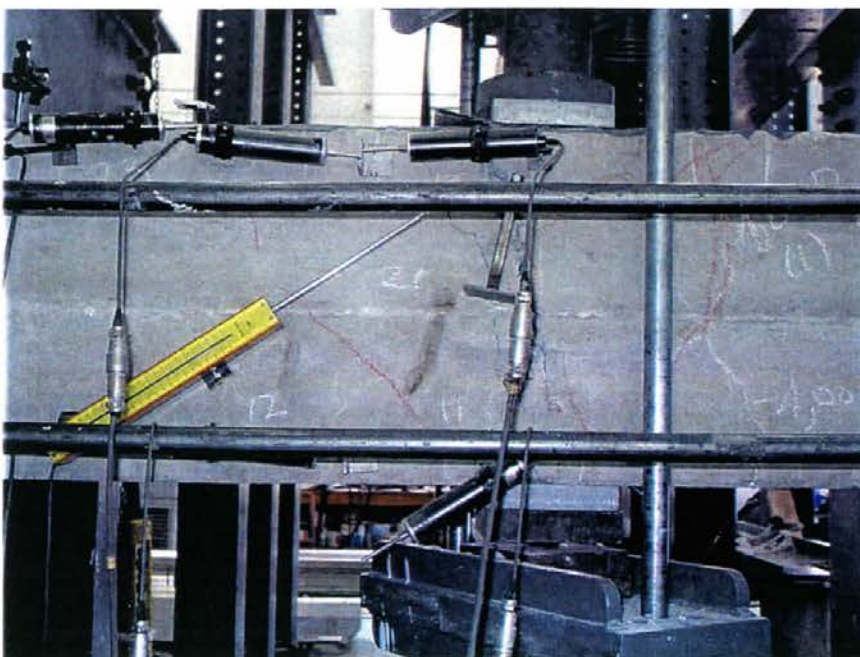
ΑΏΨΗ



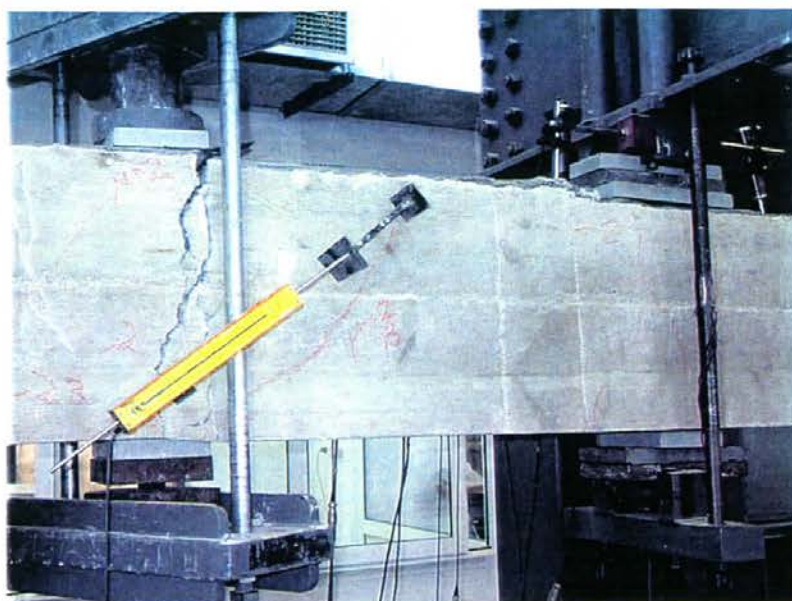
Σχήμα 6.2.2 Σκαρίφημα τελικής κατάστασης ρωγμών δοκιμίου **NEAK CYCLIC** – Όψη Α



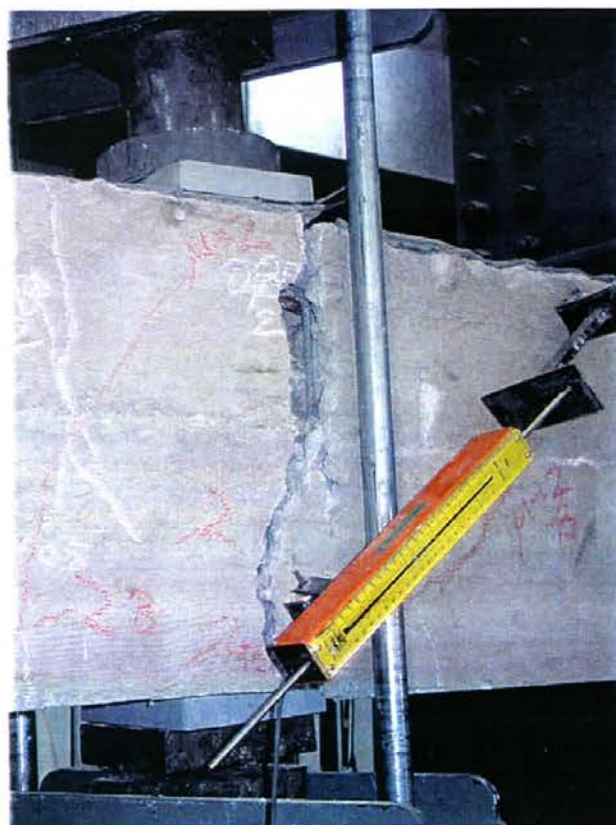
Φωτογραφία
6.2.2 Αρχική
ρηγμάτωση στη
θέση επιβολής
του φορτίου,
Όψη Α.



Φωτογραφία
6.2.3 Αρχική
ρηγμάτωση στη
θέση επιβολής
του φορτίου,
Όψη Β.
Διακρίνεται η
θέση των LVDT
(Το LVDT #11
έχει αστοχήσει).



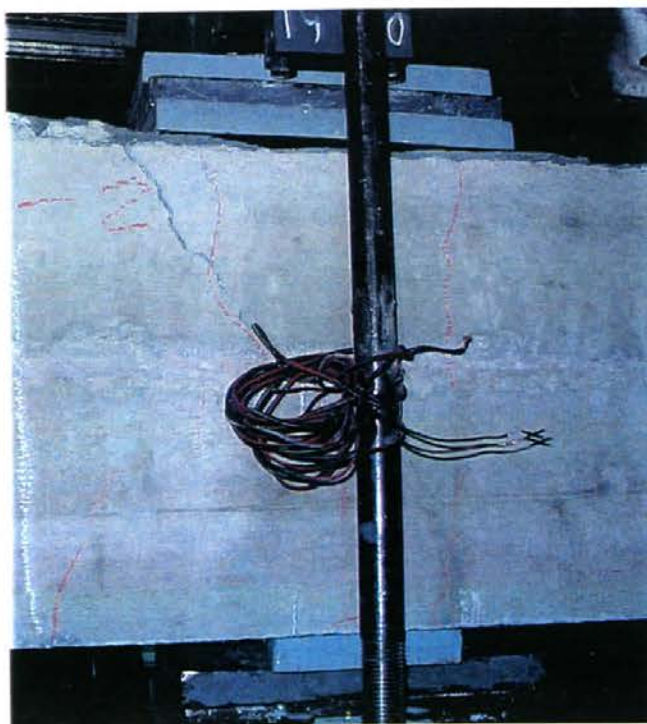
Φωτογραφία 6.2.4
Διεύρυνση της
αρχικής ρωγμής στη
θέση επιβολής του
φορτίου, Όψη Α.



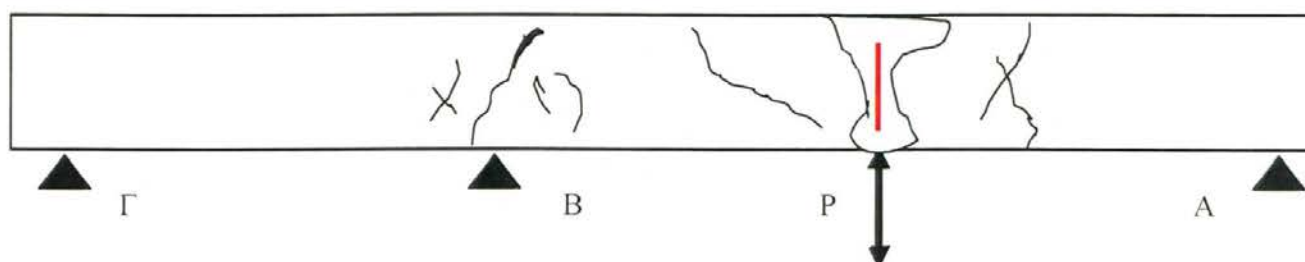
Φωτογραφία 6.2.5 Τελική
ρηγμάτωση στη θέση επιβολής του
φορτίου, Όψη Β.



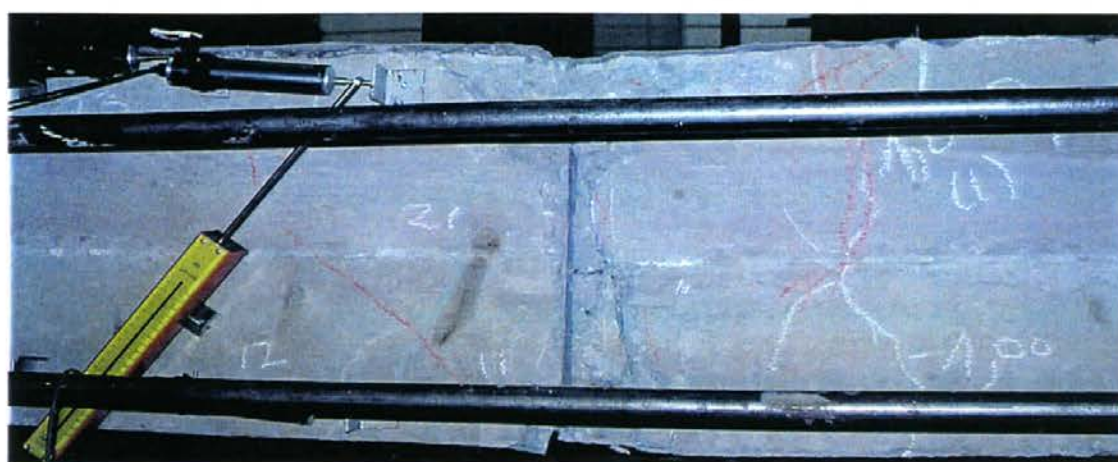
Φωτογραφία 6.2.6 Λεπτομέρεια στη θέση φόρτισης P , Όψη Α : Τελική άποψη της ρηγματώσης. Διακρίνεται και το αποφλοιωμένο τμήμα όπου φαίνεται ο διαμήκης οπλισμός και οι διαδοχικοί συνδετήρες.



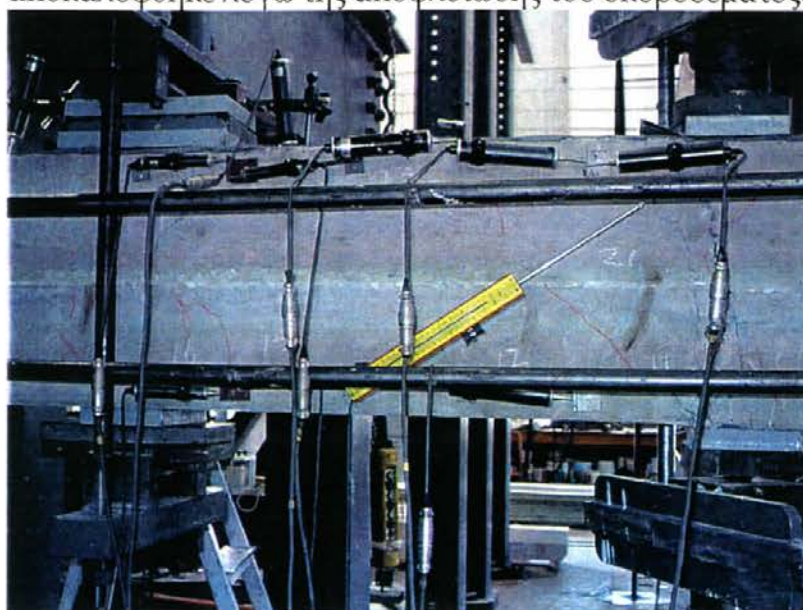
Φωτογραφία 6.2.7
Λεπτομέρεια στη
στήριξη Β, Όψη Α :
Παρατηρούνται οι
διαγώνιες ρωγμές
μικρού εύρους γύρω
από τη μεσαία
στήριξη.

Β' ΟΨΗ

Σχήμα 6.2.5 Σκαρίφημα τελικής κατάστασης ρωγμών δοκιμίου NEAK CYCLIC – Όψη Β.



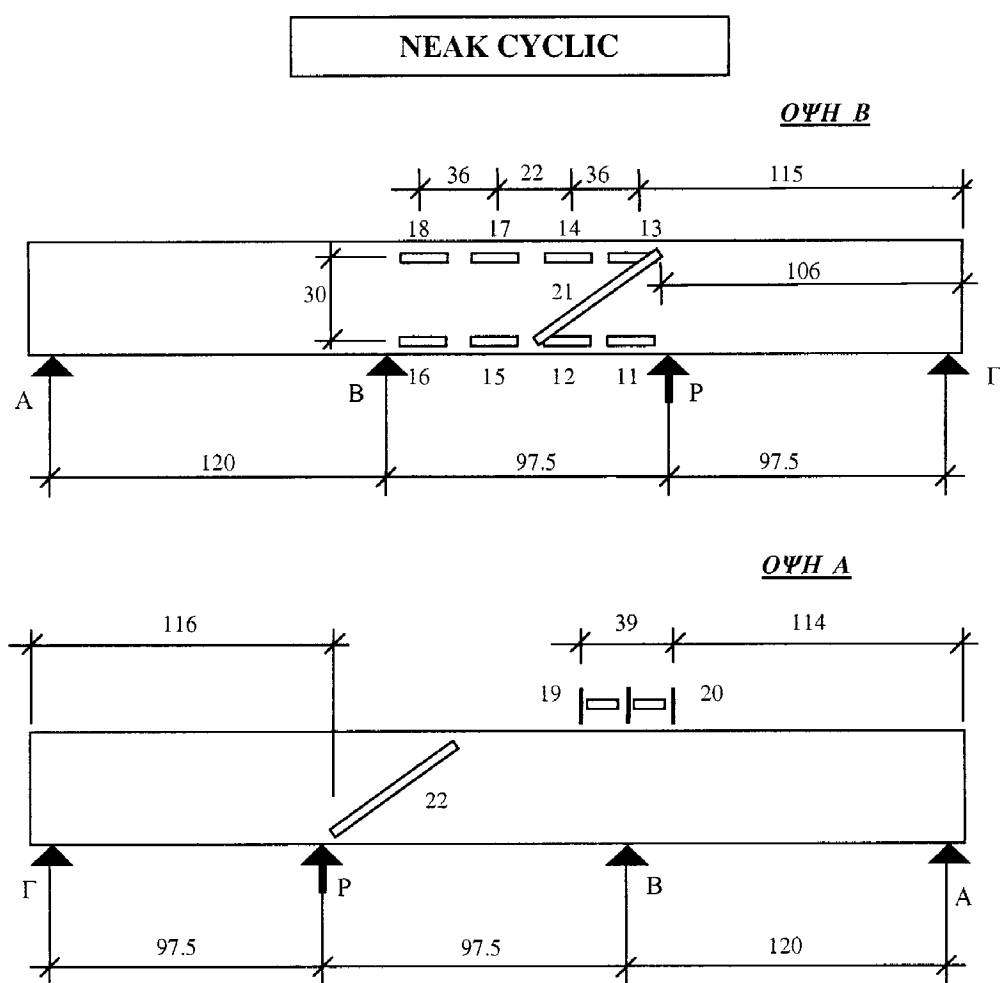
Φωτογραφία 6.2.8 Τελική άποψη ρηγματώσης και αποφλοιώσης πλησίον της θέσης επιβολής της φόρτισης – Όψη Β : Διακρίνεται ο συνδετήρας που αποκαλύφθηκε λόγω της αποφλοιώσης του σκυροδέματος.



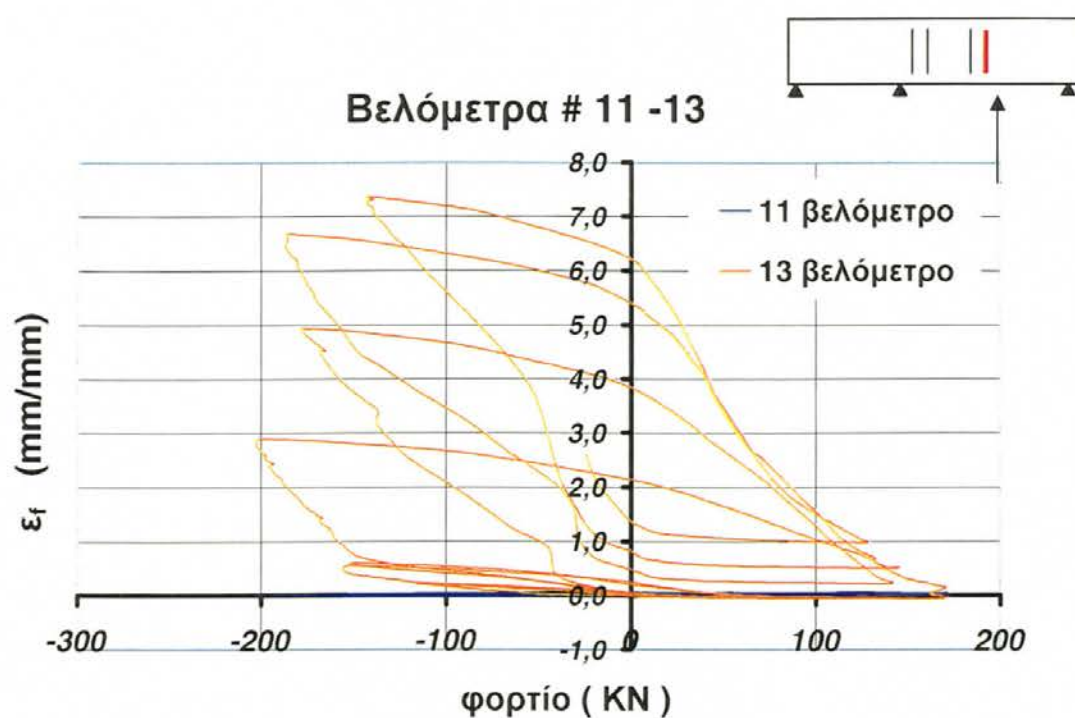
Φωτογραφία 6.2.9
Λεπτομέρεια της
στήριξης Β, Όψη Β :
Διακρίνονται μικρού
εύρους ρωγμές.

6.2.3 Ανάλυση των καταγραφών

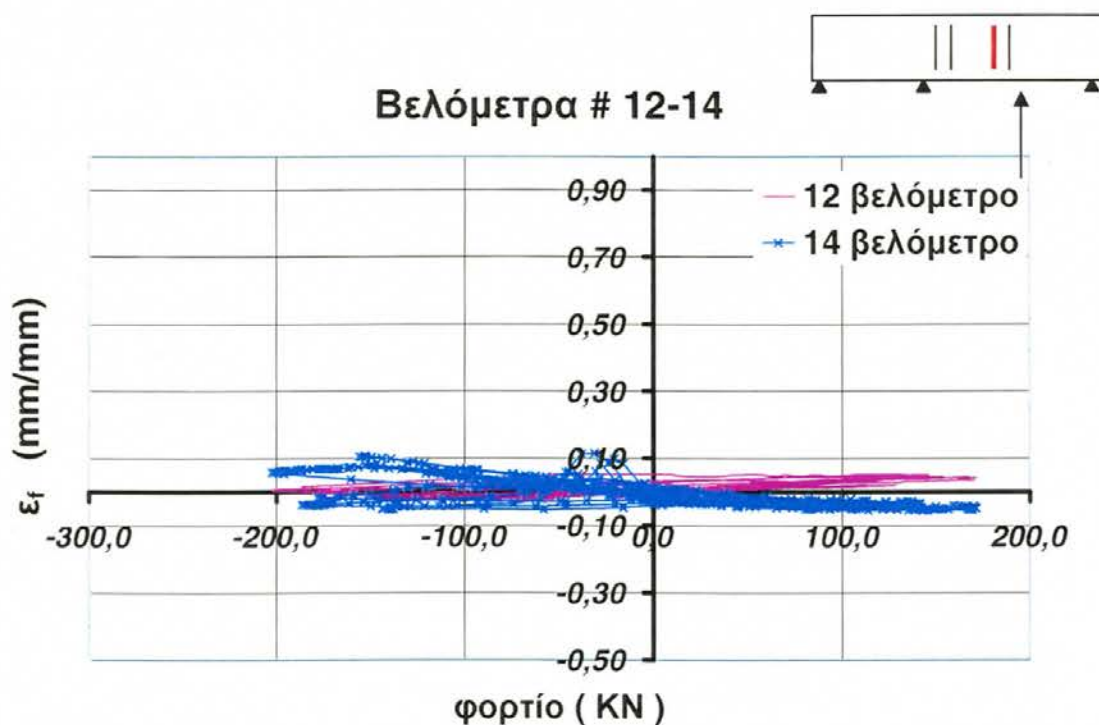
Η θέση και αρίθμηση των επαγωγικών βελομέτρων του δοκιμίου **NEAK CYCLIC** δίδεται στο Σχήμα 6.2.4. Οι αντίστοιχες καταγραφές, δίδονται στα επόμενα Σχήματα 6.2.5 έως 6.2.11, συγκρινόμενες ανά δύο στην ίδια διατομή, συναρτήσει του φορτίου P . Για ευκολότερη παρακολούθηση της απόκρισης, στα σκαριφήματα δείχνεται ενδεικτικά η θέση του ζεύγους των LVDT, ως προς το σημείο φόρτισης και τις στηρίξεις.



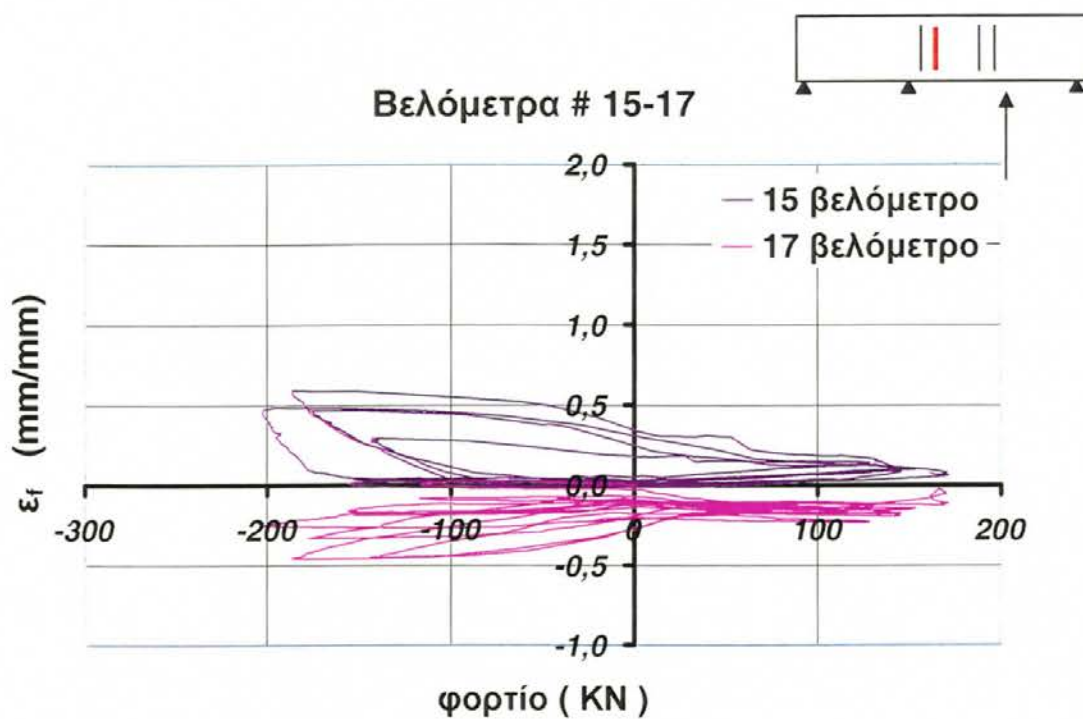
Σχήμα 6.2.4 Θέση και αρίθμηση των καταγραφικών LVDT, δοκίμιο **NEAK CYCLIC**.



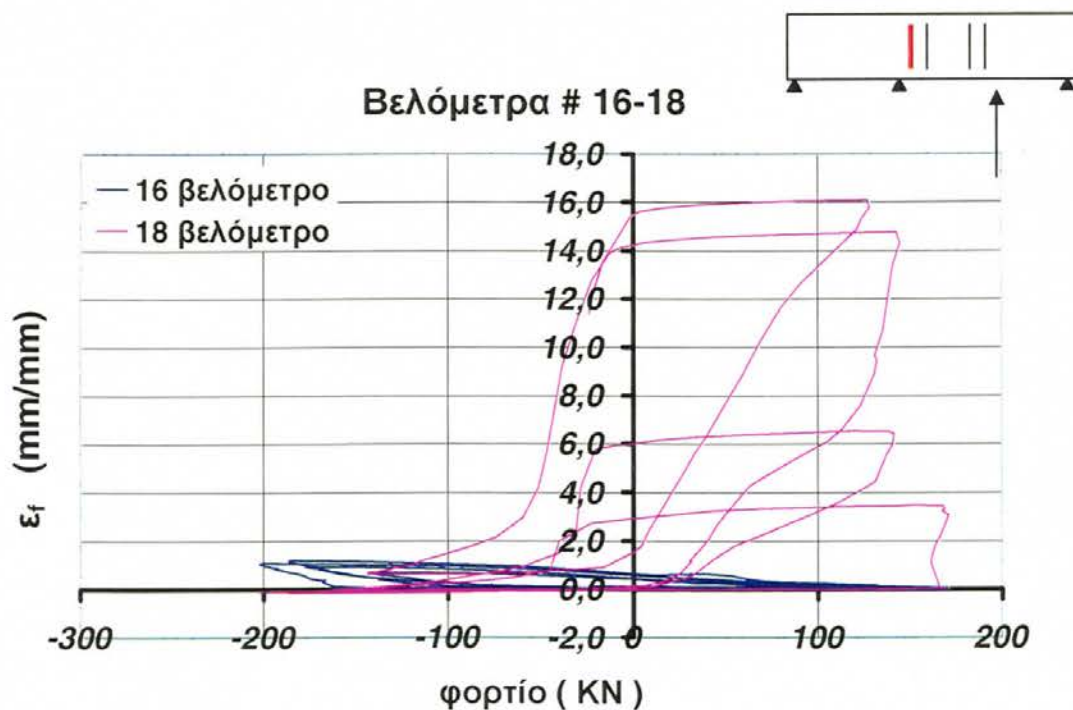
Σχήμα 6.2.5 Διάγραμμα ενδείξεων βελομέτρων 11-13 συναρτήσει του φορτίου.



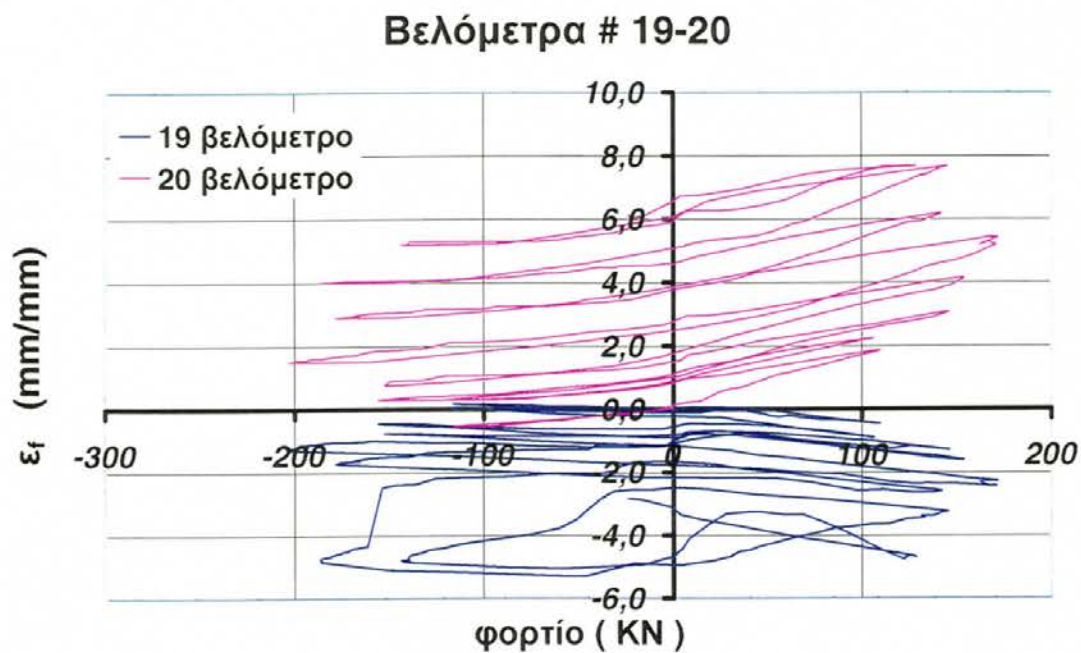
Σχήμα 6.2.6 Διάγραμμα ενδείξεων βελομέτρων 12-14 συναρτήσει του φορτίου.



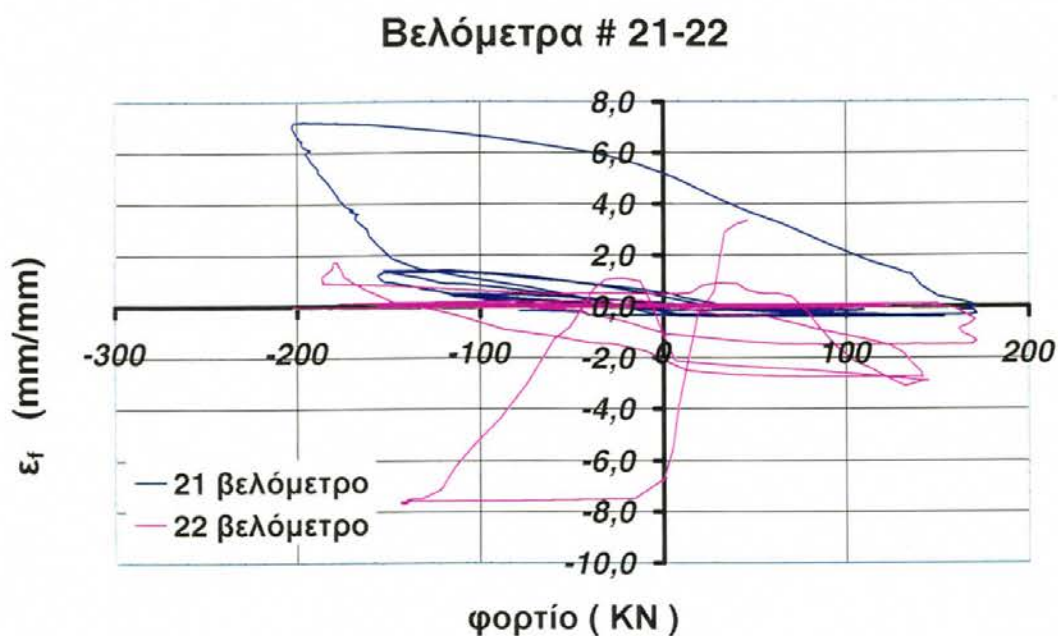
Σχήμα 6.2.7 Διάγραμμα ενδείξεων βελομέτρων 15-17 συναρτήσει του φορτίου.



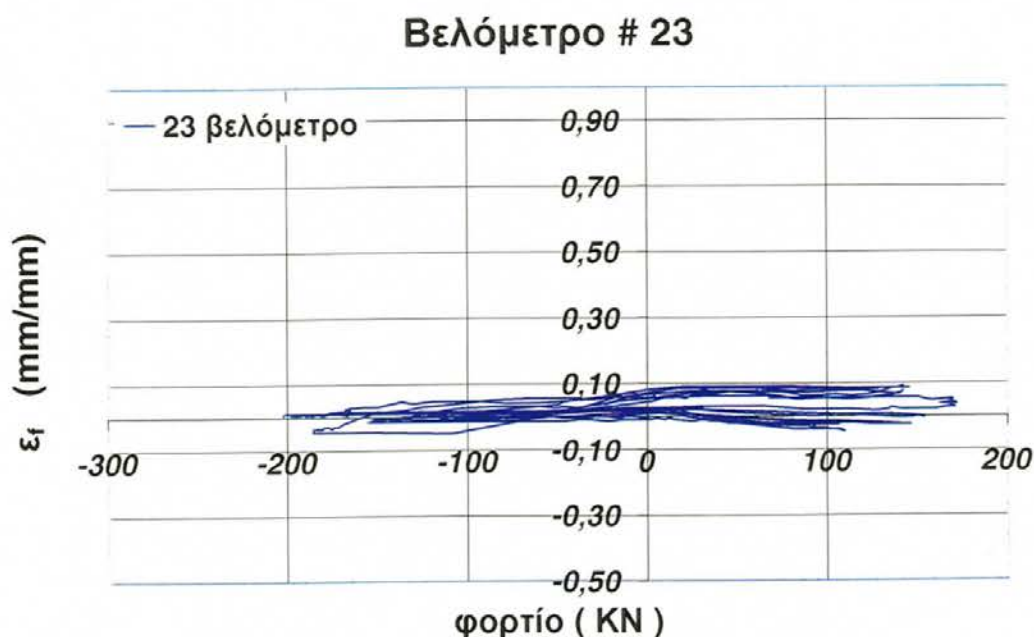
Σχήμα 6.2.8 Διάγραμμα ενδείξεων βελομέτρων 16-18 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.2.9 Διάγραμμα ενδείξεων βελομέτρων 19-20 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.2.10 Διάγραμμα ενδείξεων βελομέτρων 21-22 συναρτήσει του φορτίου.

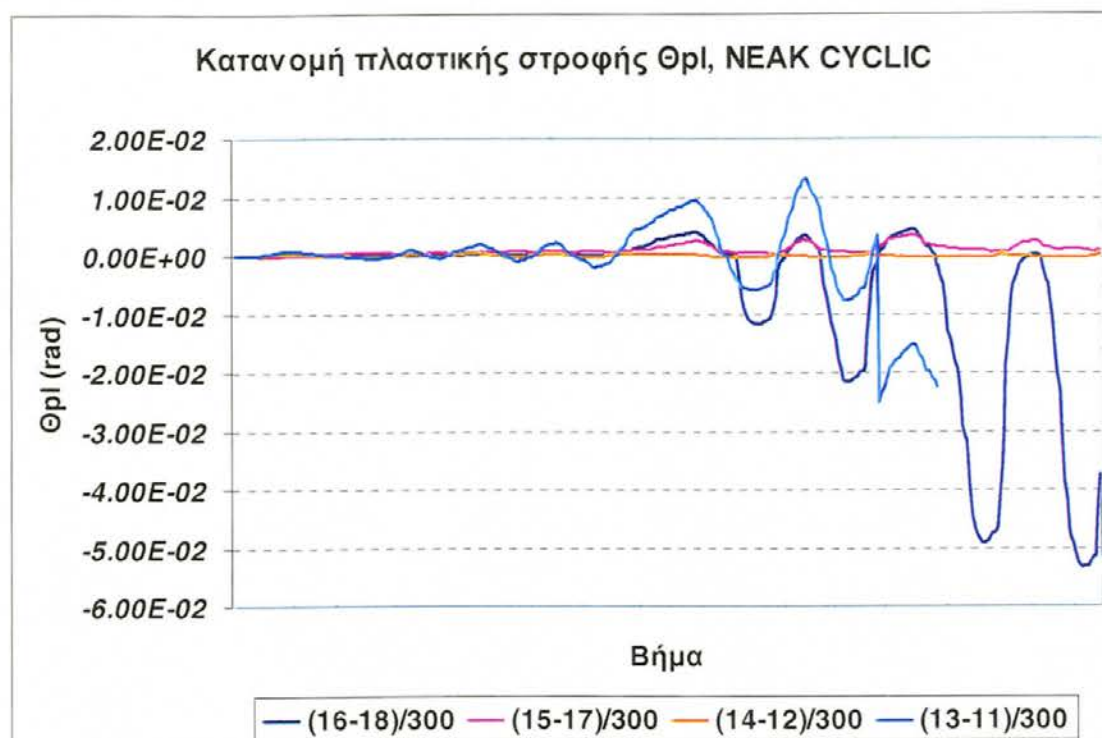


Σχήμα 6.2.11 Διάγραμμα ενδείξεων βελομέτρου 23 συναρτήσει του φορτίου.

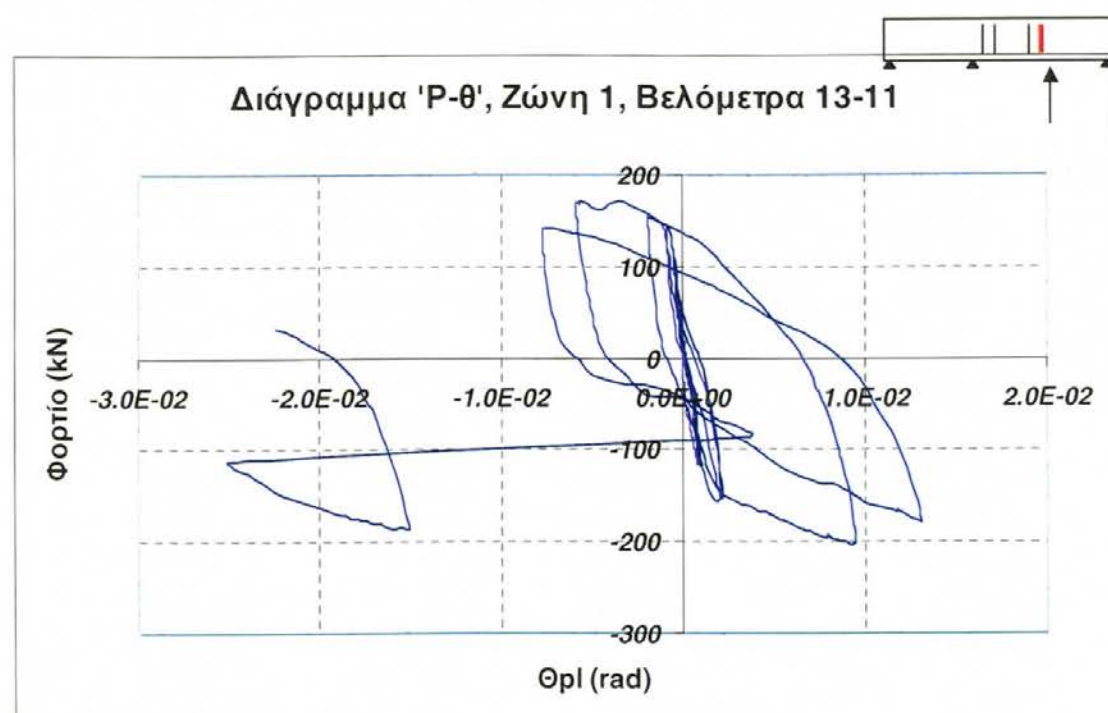
Από τα ζεύγη των LVDT (#15,#17), (#16,#18), (#14-#12) και (#13-#11) υπολογίσθηκαν βάσει της επιπεδότητας των διατομών τα διαγράμματα φορτίου – μέσης στροφής ($P-\theta$) στις ζώνες καταμέτρησης των LVDT, τοποθετημένων άνω και κάτω σε απόσταση 300 mm. Τα διαγράμματα υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\theta_1 = \frac{\delta_{13} - \delta_{11}}{300}, \theta_2 = \frac{\delta_{14} - \delta_{12}}{300}, \theta_3 = \frac{\delta_{15} - \delta_{17}}{300} \text{ και } \theta_4 = \frac{\delta_{16} - \delta_{18}}{300}$$

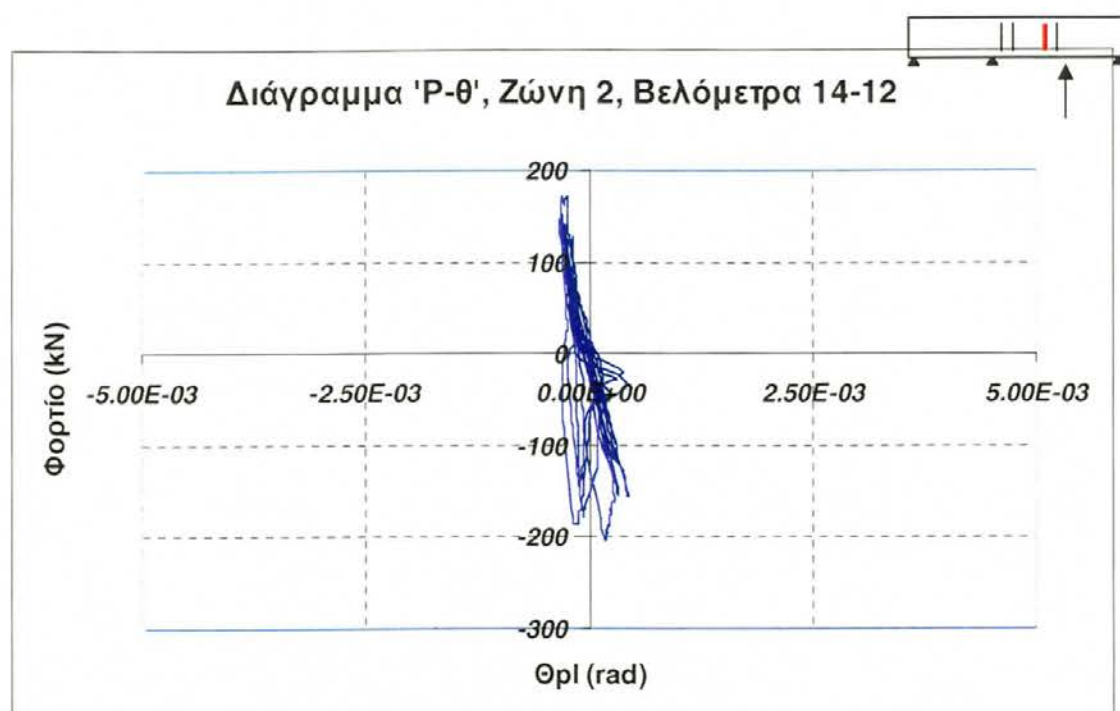
όπου δ οι καταγραφές των βελομέτρων σε mm. Στο Σχήμα 6.2.12 δείχνονται οι σχετικές απαιτήσεις θ στη διάρκεια του πειράματος, ενώ στα Σχήματα 6.2.13 έως 6.2.16 παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου πλαστικής στροφής για τις τέσσερις ζώνες (με αντίστοιχο σκαρίφημα). Η αντίστοιχη μέση καμπυλότητα φ στο εκάστοτε τμήμα μέτρησης ισούται με την καταγεγραμμένη στρόφη δια της απόστασης μεταξύ των LVDT (περίπου $d/4$).



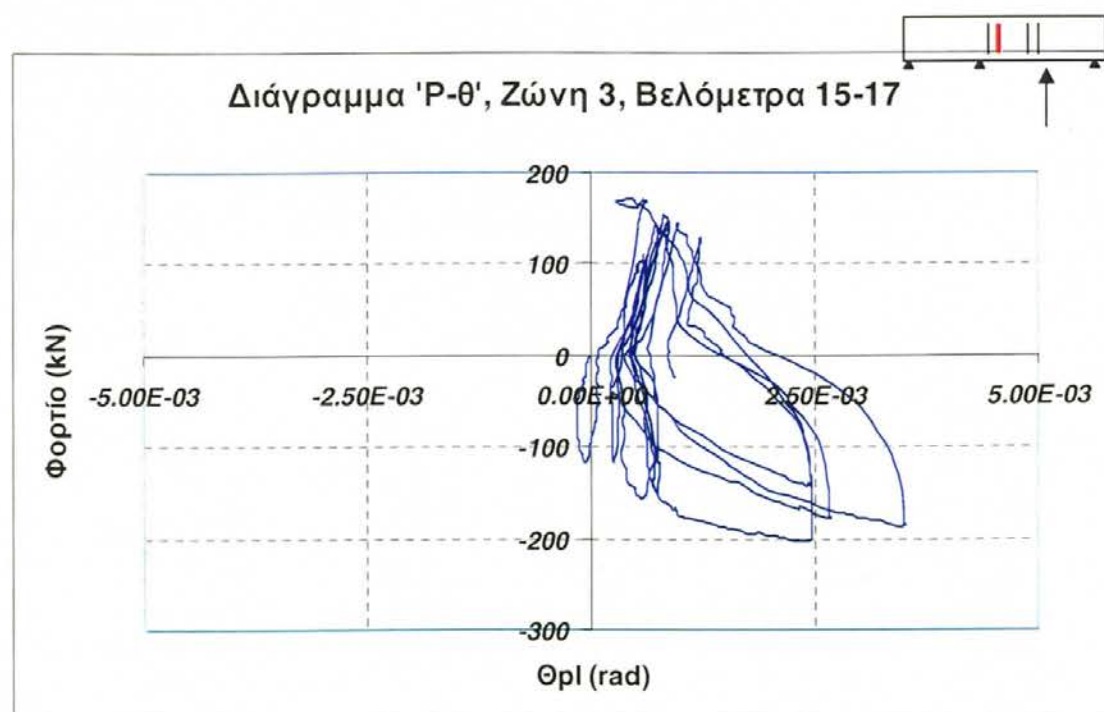
Σχήμα 6.2.12 Διάγραμμα ιστορίας πλαστικών στροφών, NEAK CYCLIC.



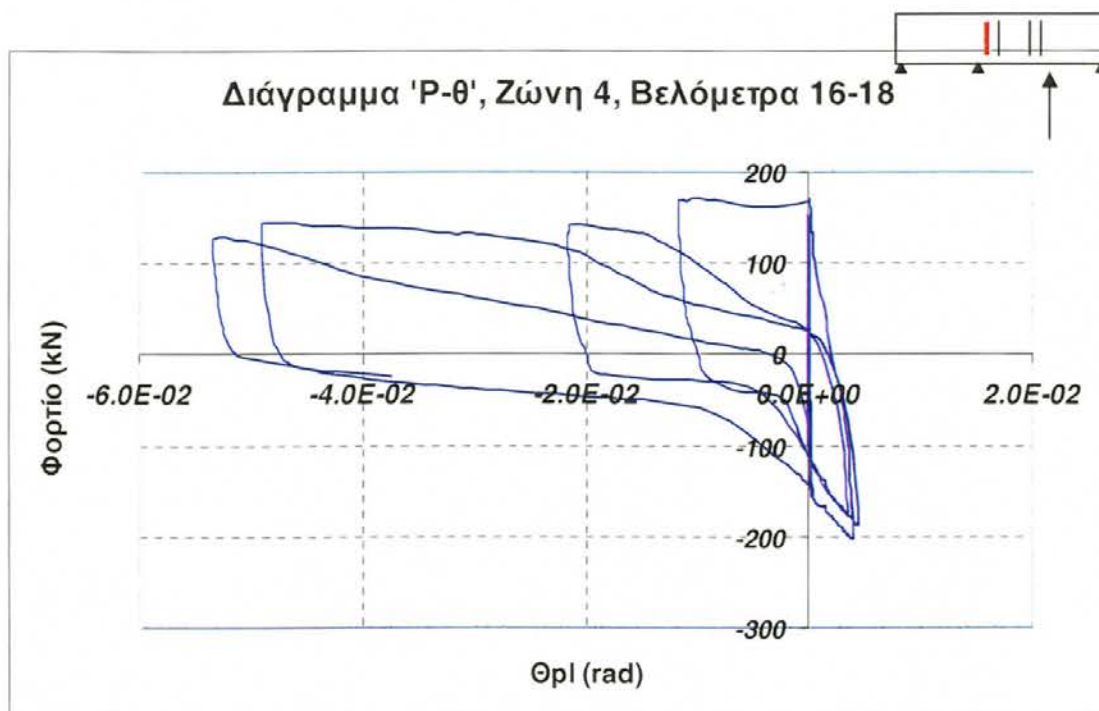
Σχήμα 6.2.13 Διάγραμμα φορτίου-στροφής στη ζώνη 1.



Σχήμα 6.2.14 Διάγραμμα φορτίου-στροφής στη ζώνη 2.



Σχήμα 6.2.15 Διάγραμμα φορτίου-στροφής στη ζώνη 3.



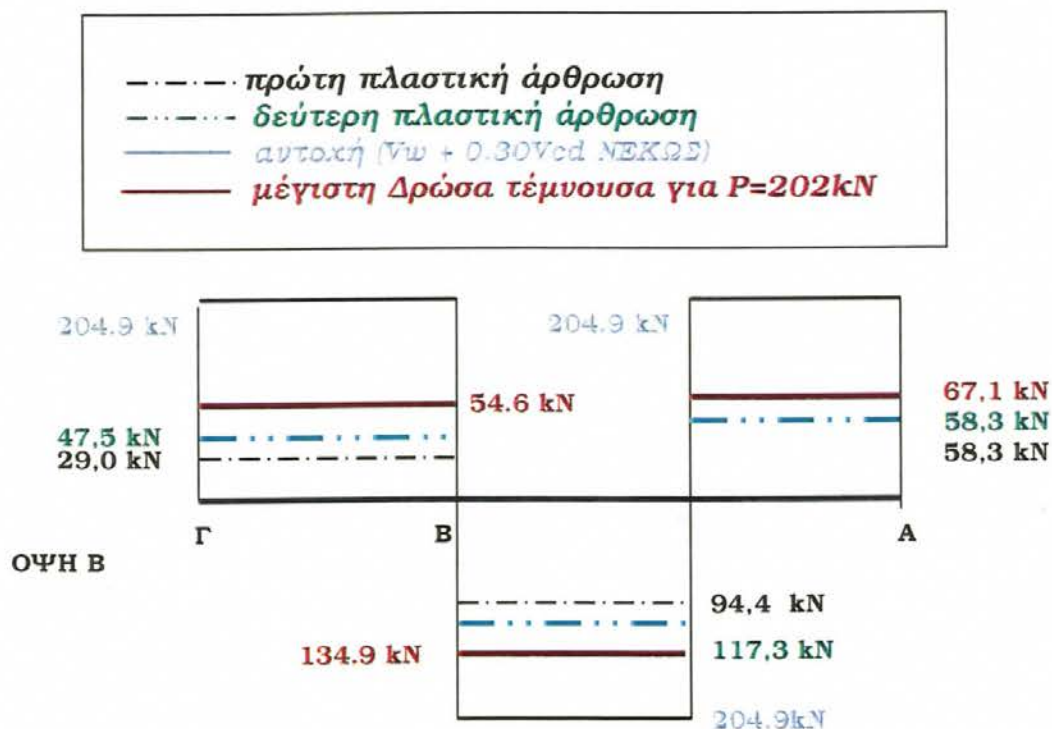
Σχήμα 6.2.16 Διάγραμμα φορτίου-στροφής στη ζώνη 4.

Παρατηρείται ότι η ζώνη 1 παύει να καταγράφεται σε πλαστική στροφή $0,023 \text{ rad}$, λόγω αστοχίας του βελομέτρου #11. Την ίδια στιγμή, η απαίτηση στη ζώνη 4 ήταν παρόμοια σε μέγεθος, ενώ εμφανίζει μια έντονη ασυμμετρία από την ευθεία ($\theta=0$) με αυξανόμενο ρυθμό, κάτι που δεν παρατηρείται στη ζώνη 1 στον ίδιο βαθμό. Η μέγιστη πλαστική στροφή σε απόσταση $d/4$ από τη μεσαία στήριξη είναι $0,054 \text{ rad}$, κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη απαίτηση στη διπλανή ζώνη, όπου, παρ' όλα αυτά, εμφανίζεται και εδώ ανελαστική απόκριση (βλ. Σχ. 6.2.15).

6.2.4 Ανάλυση της διατμητικής αντοχής

Στο δοκίμιο NEAK CYCLIC εμφανίστηκαν ρωγμές διατμητικού τύπου μικρού εύρους αλλά αποφεύχθηκε μια ψαθυρού τύπου αστοχία. Τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα δίνονται στο Σχήμα 6.2.17 ενώ οι αντίστοιχοι υπολογισμοί υπάρχουν στο Παράρτημα II.

Σύμφωνα με την ανάλυση φορτίων και εντατικών μεγεθών σε σχέση με τη μέση αντοχή σε διάτμηση της δοκού, η αντοχή των συνδετήρων έναντι τέμνουσας δύναμης (190,8 kN) είναι αρκετή να παραλάβει τη μέγιστη δρώσα τέμνουσα που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, σε οποιοδήποτε σημείο του φορέα επιτρέποντας δε τη δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων. Το γεγονός αυτό εξηγεί το λόγο που δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες εγκάρσιες παραμορφώσεις ατά την απόκριση. Ακόμα και αν αγνοηθεί πλήρως η συμβολή του σκυροδέματος στην ανάληψη τέμνουσας, δε θα μπορούσε να υπάρξει (θεωρητικά) αστοχία από διάτμηση.



Σχήμα 6.2.17 Διαγράμματα των τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και της αντοχής του φορέα στις οριακές του καταστάσεις.

Σε κάθε περίπτωση, όμως, αξίζει να τονισθεί ότι παρά το μεγάλο συντελεστή ασφαλείας σε πραγματικούς όρους αντοχής και φόρτισης ($= 204,9/134,9 = 1,52$), η μεν παρεχόμενη πλαστιμότητα παραμόρφωσης (με βάση το κριτήριο απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου) έφτασε οριακά τη τιμή 3,0, η δε ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά του δοκιμίου ήταν ικανοποιητική, από πλευράς

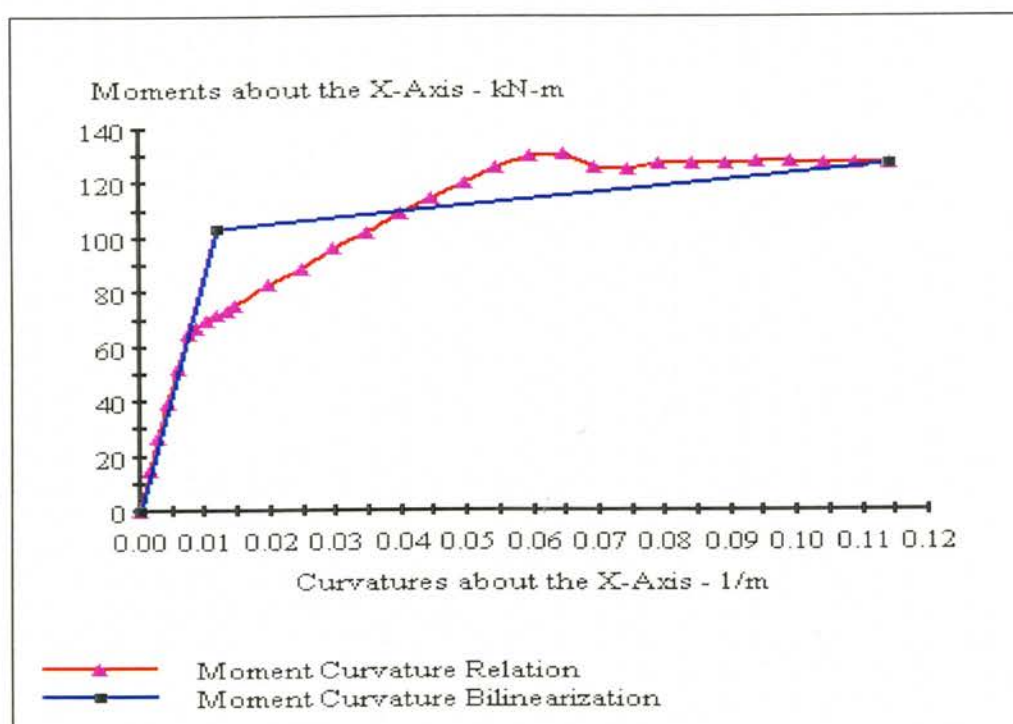
απορρόφησης ενέργειας σε επαναλαμβανόμενες ανακυκλίσεις υπό σταθερό εύρος πλαστιμότητας μεγαλύτερης του 2,0, αλλά μη ικανοποιητική από πλευράς παρεχόμενης αντοχής μεταξύ διαδοχικών κύκλων.

6.3 ΔΟΚΙΜΙΟ # 3: G60 MONO

6.3.0 Αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής των δοκιμών G60

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανελαστικής ανάλυσης διατομών XTRACT (Chadwell, 2002), υπολογίσθηκε το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του Σχήματος 6.3.0 για την ενισχυμένη διατομή. Σύμφωνα με τις παραδοχές του λογισμικού το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν με πλήρη συνάφεια και ακολουθείται γραμμική κατανομή παραμορφώσεων στη διατομή για δεδομένη καμπυλότητα ώστε η τελική αξονική αντίσταση στη διατομή (N) να ισούται με 0,00.

Οι παραδοχές και αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στο Κεφάλαιο 7. Για την απευθείας σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, η προβλεπόμενη ροπή αντοχής (M_p) της διατομής των **G60 MONO**, **G60 CYCLIC** ισούται με $M_p|_{\varepsilon_f=0.8\%} = 88.9 \text{ kNm}$, θεωρώντας οριακή ανηγμένη παραμόρφωση νήματος G60-AR ίση με $\varepsilon_f = 0.8\%$.

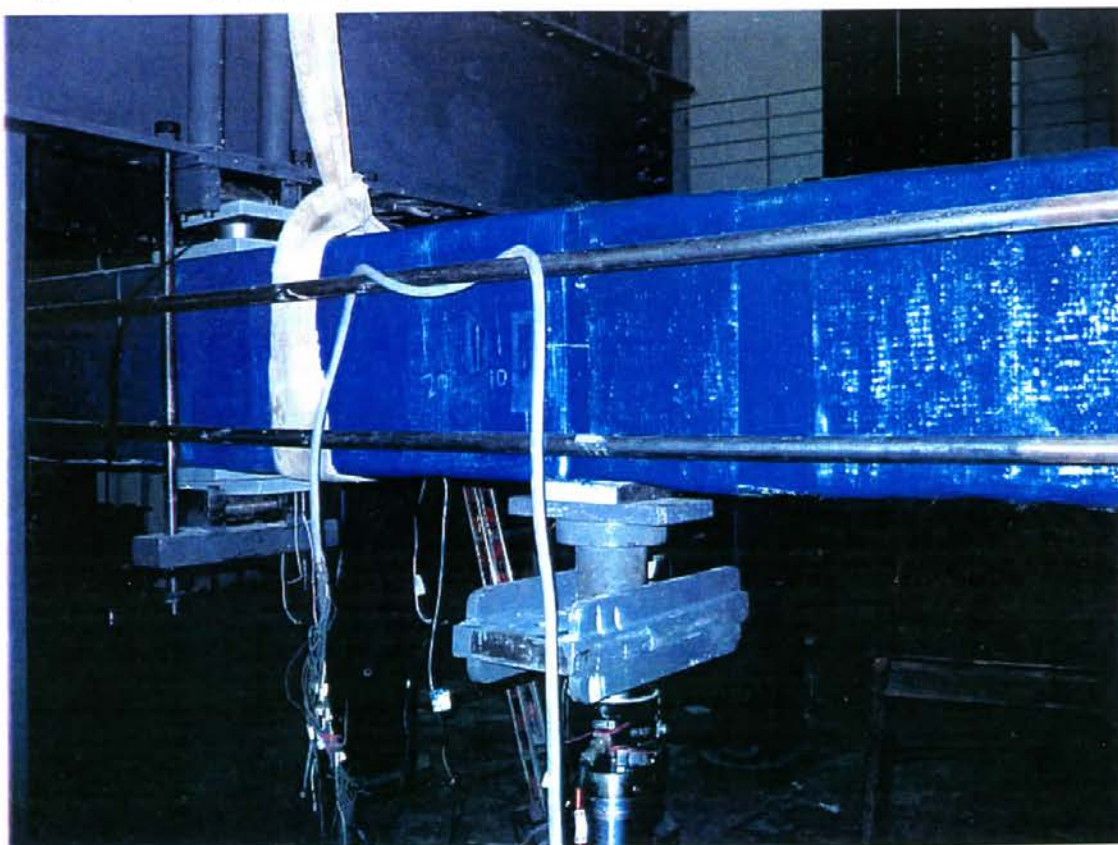


Σχήμα 6.3.0 Διάγραμμα ροπών-καμπυλότητας της διατομής των δοκιμών **G60 MONO** και **G60 CYCLIC**.

Σημειώνεται ότι η μέγιστη καμπυλότητα ορίζεται στην εφελκυστική αστοχία λόγω διάρρηξης του ΙΝΟΠ στην ακρότατη ίνα, δηλαδή σε ανηγμένη παραμόρφωση του G60-AR ίση προς την ονομαστική τιμή του 2,8% (βλ. και Κεφάλαιο 7). Στο παραπάνω διάγραμμα, σημειώνεται εκτός από το διάγραμμα ροπής – καμπυλότητας ($M-\varphi$) και το διγραμμοποιημένο διάγραμμα, του οποίου η χάραξη βασίζεται στην ισότητα των εμβαδών των δύο διαγραμμάτων απόκρισης της διατομής. Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για την ανελαστική ανάλυση του δοκιμίου, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7.

6.3.1 Περιγραφή του πειράματος

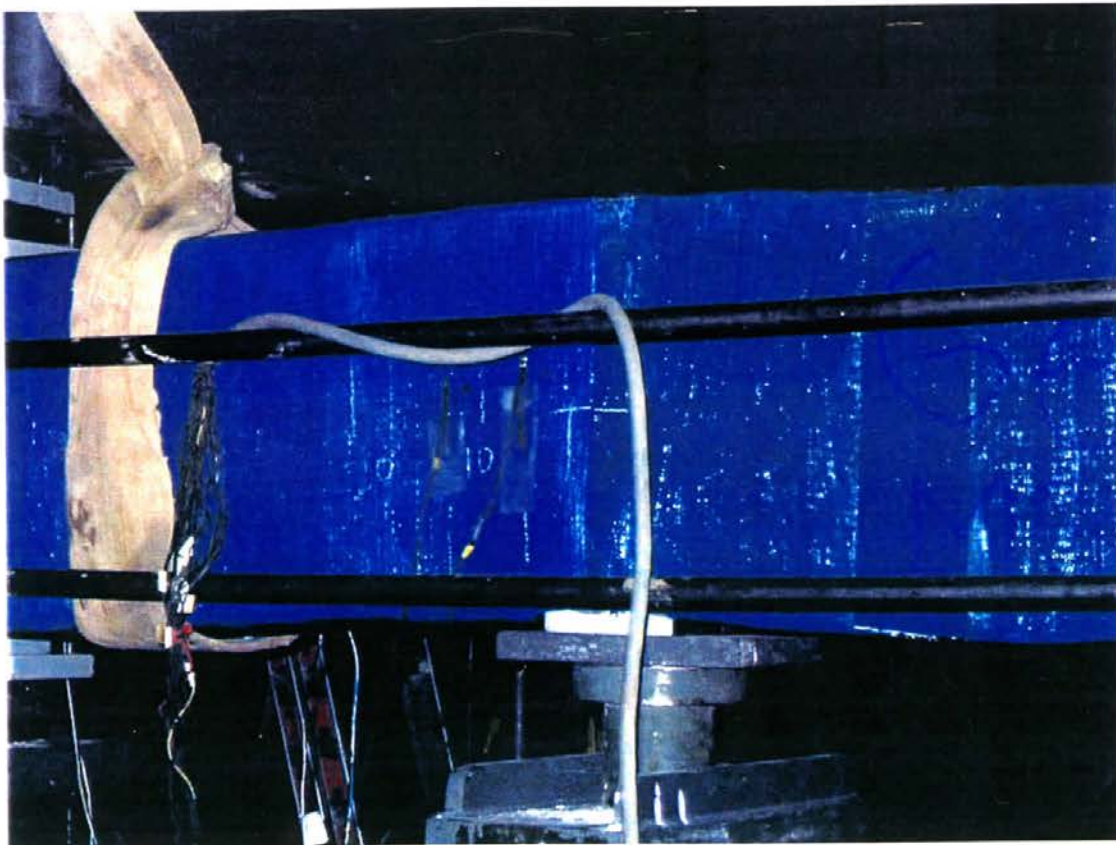
Το δοκίμιο G60 MONO (Φωτογραφία 6.3.1) καταπονήθηκε με εγκάρσια παραμόρφωση προς τα πάνω, η οποία αυξανόταν με σταθερό ρυθμό. Ως κριτήριο τερματισμού της φόρτισης θεωρήθηκε η επίτευξη ολικής πλαστιμότητας



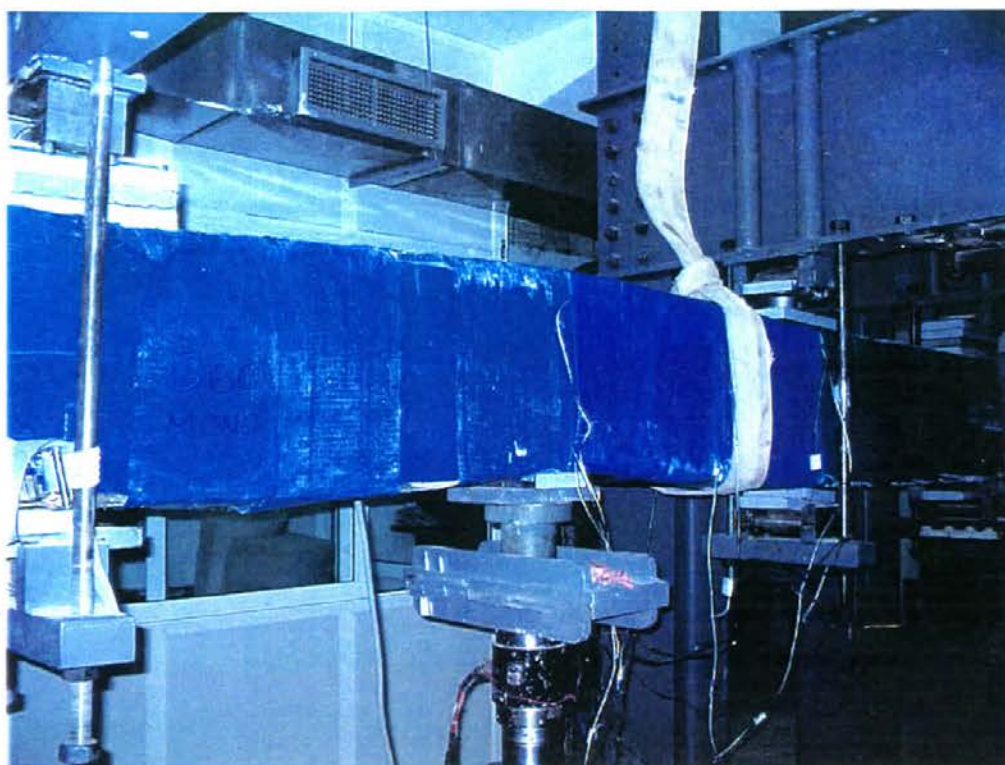
Φωτογραφία 6.3.1 Το δοκίμιο G60 MONO στη θέση του, Όψη Β.

παραμορφώσεων μεγαλύτερη του τέσσερα ή η μείωση της αντοχής του δοκιμίου στο 85% της μέγιστης αντοχής του.

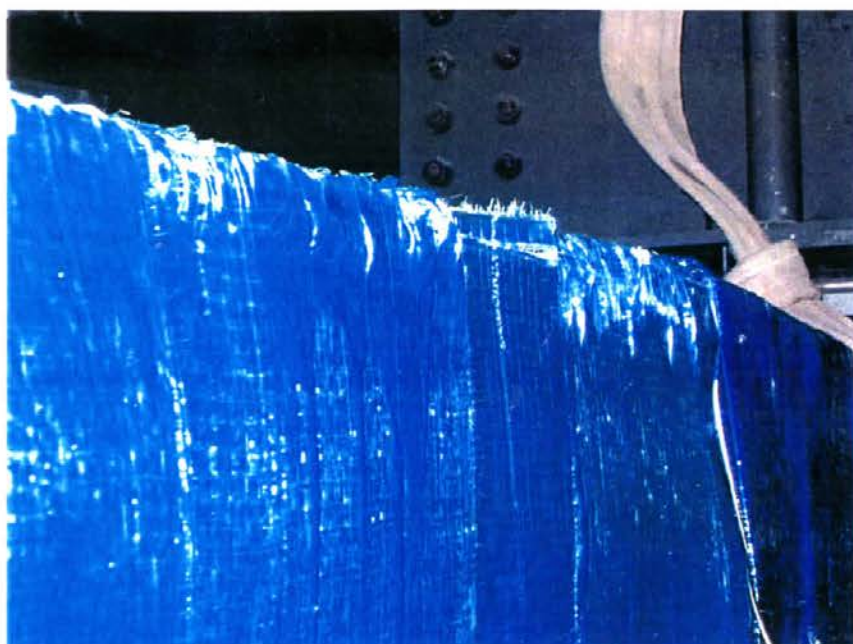
Αρχικά η αστοχία σε διάρρηξη παρατηρήθηκε στο εφελκόμενο τμήμα, επάνω από το σημείο φόρτισης (Φωτογραφία 6.3.2), στο τμήμα του πέλματος μεταξύ των εγκαρσίων ΙΝΟΠ και στην ενισχυμένη παρειά, σε πολύ περιορισμένο τμήμα καθ' ύψος της διατομής (Φωτογραφίες 6.3.3, 6.3.4 και 6.3.5). Με την αύξηση του βέλους δ , σταδιακά διαρρηγνυόταν κατά τη διαμήκη (άοπλη) διεύθυνση και το εγκάρσιο ΙΝΟΠ, μόνο στο αριστερό όμως τμήμα του δοκιμίου προς την ακραία στήριξη, λόγω του ότι σε αυτό το τμήμα του δοκιμίου είχε εφαρμοσθεί μόνον ένα φύλλο εγκάρσιου υφάσματος. Σημειώνεται ότι παρά την ύπαρξη συνδετήρων



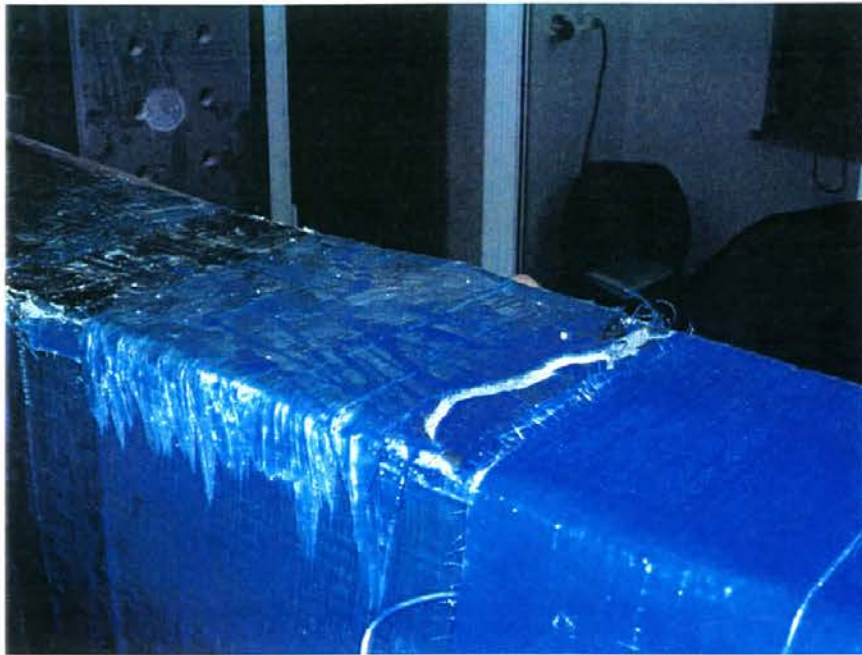
Φωτογραφία 6.3.2 Έναρξη περιορισμένης αστοχία του ΙΝΟΠ σε διάρρηξη στη θέση Ρ, Όψη Β.



Φωτογραφία 6.3.3 Περιορισμένη αστοχία του ΙΝΟΠ σε διάρρηξη στη θέση P : διακρίνεται η σταδιακή διαμήκης αστοχία του εγκάρσιου ΙΝΟΠ στο άνω τμήμα ΑΡ. Το ίδιο δεν παρατηρείται στο τμήμα ΡΒ λόγω της διπλής στρώσης ΙΝΟΠ.



Φωτογραφία
6.3.4
Λεπτομέρεια της
αστοχίας του
ΙΝΟΠ σε
διάρρηξη στη
θέση P προς την
ΡΑ.



Φωτογραφία

6.3.5

Λεπτομέρεια εκ των άνωθεν της αστοχίας της δοκού στην εφελκυστική περιοχή και του ΙΝΟΠ σε διάρρηξη στη θέση P προς την PA .

ΙΝΟΠ σε αυτό το τμήμα του δοκιμίου (PA), δεν παρατηρήθηκε αστοχία τύπου διαγώνιας διατμητικής ρωγμής στο τμήμα μεταξύ των συνδετήρων ΙΝΟΠ, λόγω της συνεργασίας του διαμήκους ΙΝΟΠ σε κάμψη και σε διάτμηση. Αυτή η βελτιωμένη συμπεριφορά δεν παρατηρήθηκε στο δοκίμιο **C1-30 MONO**, το οποίο είχε παρόμοια διάταξη εγκάρσιων συνδετήρων ΙΝΟΠ αλλά ήταν άνω και κάτω οπλισμένο, το οποίο αστόχησε νωρίς σε αυτό το σημείο (βλέπε και Κεφάλαιο 6.5).

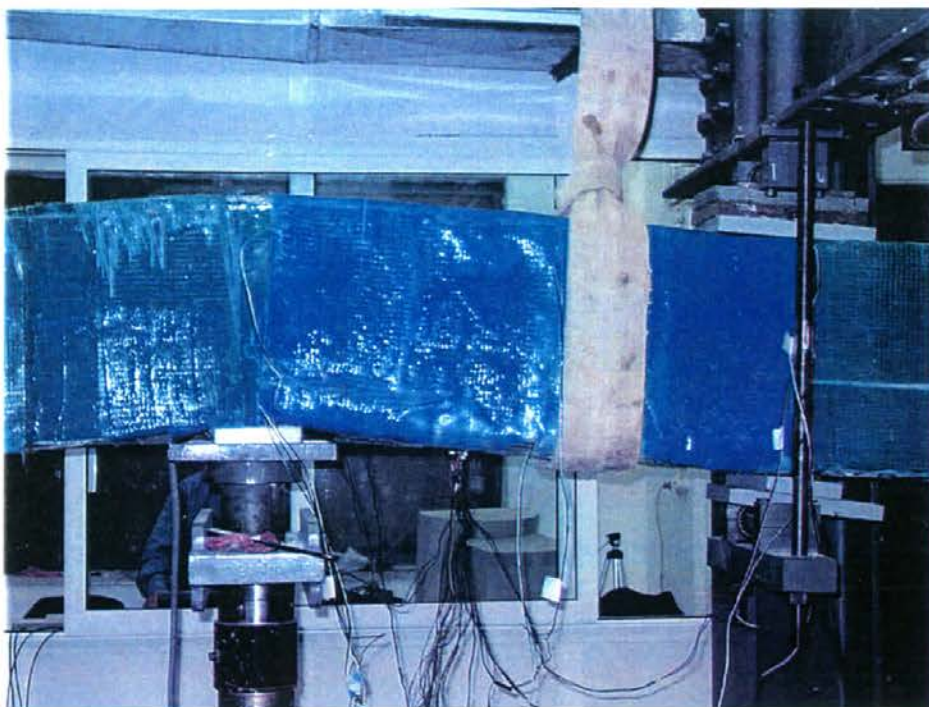
Το δοκίμιο φαίνεται στη Φωτογραφία 6.3.6 στη φάση της μέγιστης παραμόρφωσής του δ_{max} , μετά το πέρας του πειράματος. Χαρακτηριστικό είναι ότι η διάρρηξη των πλαϊνών ΙΝΟΠ/υπόβασης έχει περιοριστεί στο 1/2 του ύψους της διατομής, προς την εφελκυστική πλευρά (Φωτογραφίες 6.3.7 και 6.3.8). Σημειώνεται, επί πλέον, ότι καθώς η αντοχή πλησίαζε τη μέγιστη τιμή της, παρατηρήθηκε αντίστοιχη αστοχία σε διάρρηξη του ΙΝΟΠ και στην εφελκυστική περιοχή της μεσαίας στήριξης, με δημιουργία μίας δεύτερης πλαστικής άρθρωσης σε αυτό το σημείο (Φωτογραφία 6.3.8).



Φωτογραφία 6.3.6 Απεικόνιση του δοκιμίου G60 MONO στην τελική αστοχία, μετά το πέρας του πειράματος, Όψη Α, στο μέγιστο δ .

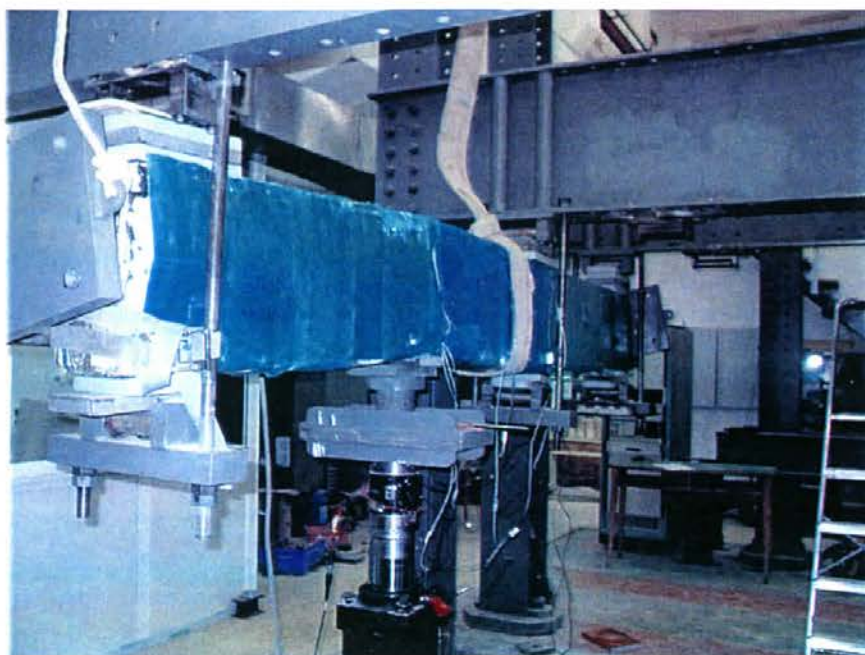


Φωτογραφία 6.3.7
Λεπτομέρεια στη θέση
φόρτισης P Όψη Β:
Παρατηρείται διάρρηξη του
ΙΝΟΠ/σκυροδέματος στο
εφελκνόμενο άνω άκρο της
δοκού, σε ενεργό ύψος
περίπου 50% του ύψους του
κορμού.



**Φωτογραφία
6.3.8**

Λεπτομέρεια στη θέση φόρτισης P : Όψη Α. Εκτός από την αστοχία του ΙΝΟΠ στην άνω παρειά είναι εμφανής και η διόγκωση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη παρειά στο τμήμα ΡΒ προς τη μεσαία στήριξη, με μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις.



**Φωτογραφία
6.3.9**

Λεπτομέρεια στη στήριξη Α: Σημειώνεται η αποκόλληση του διαμήκους υφάσματος ΙΝΟΠ λόγω αστοχίας σε αγκύρωση στο τμήμα μεταξύ φορτίου και εξωτερικής στήριξης, που είναι εγκάρσια οπλισμένη με συνδετήρες ΙΝΟΠ.

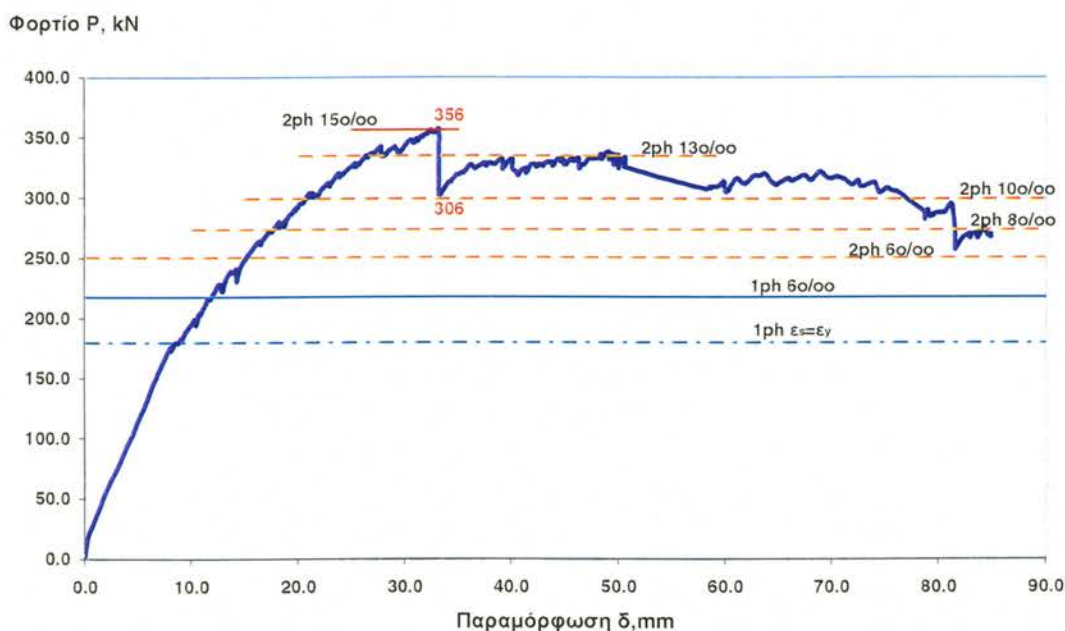


Φωτογραφία 6.3.10 Λεπτομέρεια στη στήριξη Β: Σημειώνεται η αποκόλληση του διαμήκους υφάσματος ΙΝΟΠ λόγω αστοχίας σε αγκύρωση στο τμήμα μεταξύ εσωτερικής και δεξιάς εξωτερικής στήριξης,

Σε αυξημένες παραμορφώσεις μετά από τη δημιουργία της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης, παρατηρήθηκε τελικά αποκόλληση του διαμήκους ΙΝΟΠ λόγω αστοχίας σε αγκύρωση, πρώτα στην εξωτερική στήριξη Α, αριστερά του σημείου φόρτισης P , παρά την παρουσία σε αυτό το τμήμα της δοκού και διατμητικής ενίσχυσης από εγκάρσιο ΙΝΟΠ, γύρω από το διαμήκες, (Φωτογραφία 6.3.9). Ακολούθως, σε παραμόρφωση γύρω στα 80 mm, επήλθε παρόμοιου τύπου αστοχία και δεξιά από τη μεσαία στήριξη, προς την ακραία στήριξη Γ, οπότε και τερματίστηκε το πείραμα (Φωτογραφία 6.3.10).

Η καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του εμβόλου έδωσε το διάγραμμα ' $P-\delta$ ' του Σχήματος 6.3.1. Στο διάγραμμα σημειώνονται και οι τιμές του φορτίου στις οποίες αναμένονταν σχηματισμός της

πρώτης και της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με το θεωρητικό προσομοίωμα για μέγιστη παραμόρφωση του νήματος G60-AR ίση προς 0.8%. Για λόγους σύγκρισης, αναφέρεται ότι ο σχηματισμός της δεύτερης άρθρωσης στο δοκίμιο **NEAK MONO** έγινε σε φορτίο 225 kN. Παρατηρείται ότι η αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής σε διαρροή του χάλυβα βάσει επιπεδότητας των διατομών προβλέπεται σε φορτίο 171 kN, σύμφωνα με την αντίστοιχη ροπή πρώτης διαρροής $171/2.67 = 64,2$ kNm (βλ. Κεφ. 7), τιμή πολύ κοντά στην πειραματική τιμή διαρροής των 179 kN, σε παραμόρφωση 8,7 mm.



Σχήμα 6.3.1 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης $P-\delta$, δοκίμιο **G60 MONO**.

Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου που επετεύχθη κατά το πείραμα ήταν 356 kN, τιμή κατά 208 % μεγαλύτερη της πρώτης διαρροής ή 160% υψηλότερη από την πειραματική οριακή αντοχή του δοκιμίου **NEAK MONO** που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.1. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το δοκίμιο δεν έχασε ποτέ εντελώς την επιπρόσθετη αυτή υπεραντοχή του ενίσχυσης, ούτε μειώθηκε ποτέ η αντοχή του στα επίπεδα αντοχής του μη ενισχυμένου **NEAK MONO** (με

ελάχιστη καταγραφή 15% υψηλότερη της μέγιστης αντοχής του δοκιμίου ελέγχου), ακόμη και όταν η μέγιστη παραμόρφωση έφτασε στα 84,9 mm οπότε και το πείραμα τερματίστηκε λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που είχαν παραληφθεί από τον φορέα και την αστοχία του ΙΝΟΠ σε αγκύρωση στο τμήμα ΒΓ. Το ίδιο δεν συνέβη με το δοκίμιο **C1-30 MONO**, που ενισχύθηκε άνω και κάτω, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.5.

Κατά την εφελκυστική αστοχία του πλαϊνού ΙΝΟΠ σε παραμόρφωση 32 παρατηρείται μια πτώση της αντοχής στα 306 kN (ποσοστό 87% της P_{max}) με περαιτέρω αύξηση της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου, ένδειξη ότι υπήρξε ανακατανομή της ροπής, λόγω αύξησης της αντοχής στη μεσαία στήριξη. Η αντοχή του δοκιμίου σε ποσοστό 85% της P_{max} ($= 302,6$ kN) καταγράφεται σε παραμόρφωση 76 mm, αποδίδοντας μια πλαστιμότητα στο δοκίμιο ίση με 8,70 ως προς την πρώτη διαρροή.

Από την πειραματική καταγραφή (διάγραμμα $P-\delta$) προκύπτει ότι στο προβλεπόμενο φορτίο που αντιστοιχεί σε ροπή στην πρώτη πλαστική άρθρωση ίση με την καμπτική αντοχή σε παραμόρφωση του ΙΝΟΠ $\varepsilon_f = 8\text{‰}$ ($2,67 \cdot 88,9$ kNm $= 237,6$ kN), δεν εμφανίζεται στη συμπεριφορά κάποια αντίστοιχη εμφανής αλλαγή στην απόκριση. Επί πλέον, όσον αφορά τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα, η μέγιστη αντοχή υπερβαίνει σε ποσοστό 128 % τη θεωρητική αντοχή ($= 3,07 \cdot 88,9$ kNm $= 273,2$ kN) που αντιστοιχεί στη δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων (με αντοχή $M_{p|\varepsilon_f=0,8\text{‰}}$).

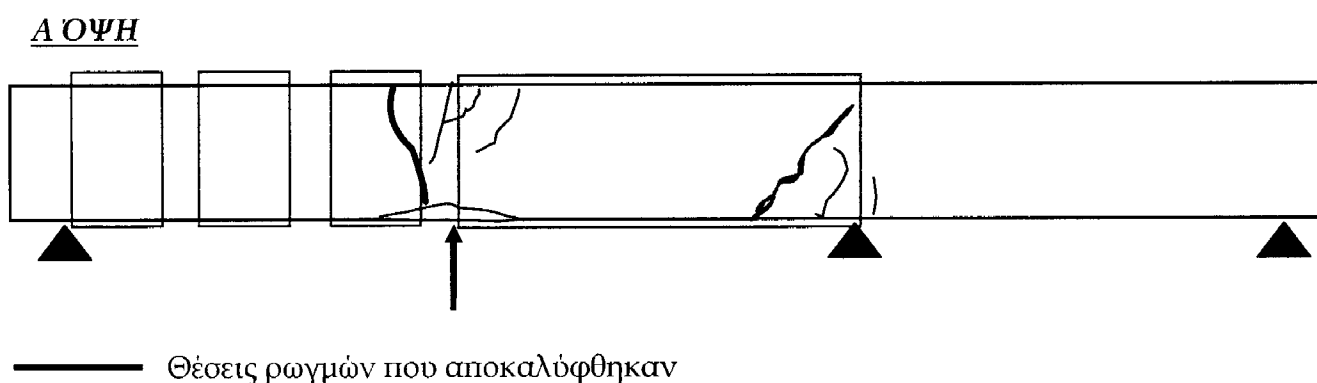
Το γεγονός ότι η δοκός ανέπτυξε αυξημένη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με την πρόβλεψη αποδίδεται σε μικρό μόνο ποσοστό σε πιθανή περαιτέρω κράτυνση του συμβατικού εφελκυσμένου χάλυβα, αλλά κυρίως στο ότι το ΙΝΟΠ παρέχει συμμετοχή σε εφελκυστική αντίσταση κατά πολύ μεγαλύτερη από τις θεωρούμενες συμβατικές δυνάμεις σχεδιασμού, οι οποίες αντιστοιχούν σε ροπές περίπου στο $\varepsilon_f = 0,6\%$ έως $0,8\%$. Σύμφωνα με την ελαστοπλαστική προσομοίωση και τις μέσες πειραματικές αντοχές του σκυροδέματος και χάλυβα, η μέση πειραματική καμπτική αντοχή στις δύο αρθρώσεις στη μέγιστη αντοχή είναι M_p

= $356/3,07 = 116 \text{ kNm}$, που αντιστοιχεί σε εφελκυστική παραμόρφωση του ΙΝΟΠ ίση με **16%**, χρησιμοποιώντας τα πειραματικά χαρακτηριστικά των υλικών.

Είναι άρα εμφανές ότι η δυνατότητα εφαρμογής μίας σταδιακής ανακατανομής στην αστοχία του ΙΝΟΠ λόγω κάμψης – σε αντίθεση με την πλέον ψαθυρή μορφή που απαντάται στην ενίσχυση άνω και κάτω, σε συνδυασμό με τη χαμηλή δυσκαμψία του ΙΝΟΠ, επιτρέπει στο υλικό ενίσχυσης να αποδώσει έως την ονομαστική εφελκυστική του αντοχή στη μέγιστη τιμή της P . Αντίθετα, με τη μέθοδο ενίσχυσης με υφάσματα ΙΝΟΠ τοποθετημένα άνω και κάτω, οι οριακές αντοχές ενίσχυσης είναι ψαθυρότερης μορφής και άρα υπόκεινται σε μεγαλύτερη διασπορά. Όπως παρουσιάζεται και στο Κεφάλαιο 6.5, στην περίπτωση αυτού του είδους ενίσχυσης, μετά τη διάρρηξη του διαμήκους ΙΝΟΠ μειώνεται απότομα η φέρουσα ικανότητα του στοιχείου.

6.3.2 Περιγραφή των βλαβών και τρόπος αστοχίας

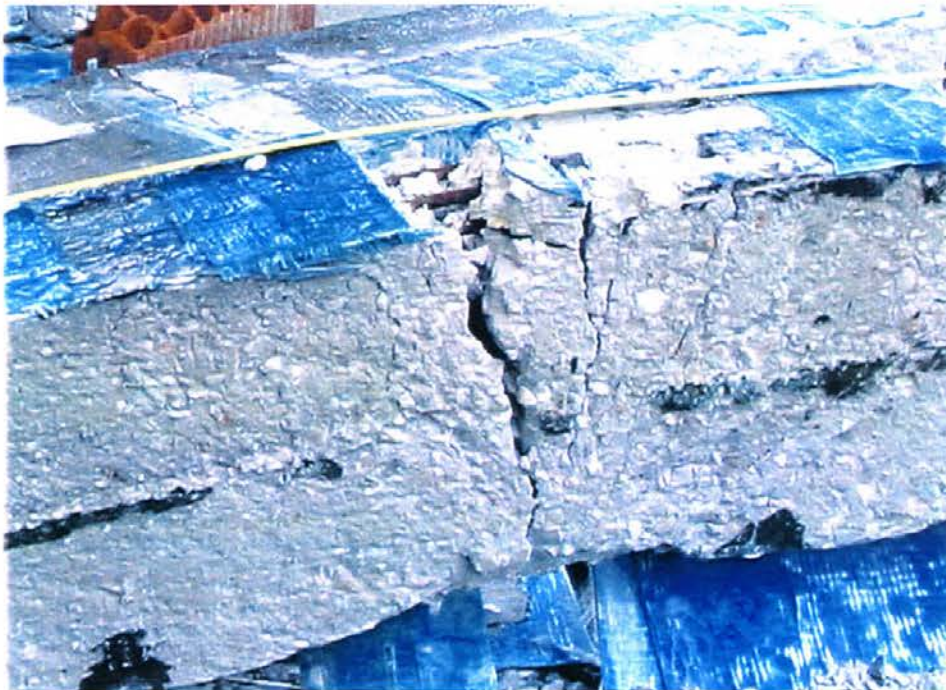
Ακολουθούν χαρακτηριστικές φωτογραφίες που είναι ενδεικτικές της τελικής ρηγμάτωσης του δοκιμίου καθώς και τα απαραίτητα σκαριφήματα και αντίστοιχες φωτογραφίες, οι οποίες αποτυπώνουν τη τελική κατάσταση του σε κάθε μία όψη, όπως προέκυψαν μετά την αφαίρεση των υφασμάτων με χρήση τροχού και κρουστικών μέσων, μετά την απομάκρυνση του δοκιμίου από τη πειραματική διάταξη (Σχήματα 6.3.2 και 6.3.3 και Φωτογραφίες 6.3.11 έως 6.3.17).



Σχήμα 6.3.2 Σκαρίφημα της τελικής κατανομής ρωγμών δοκιμίου **G60 MONO** – Όψη Α.

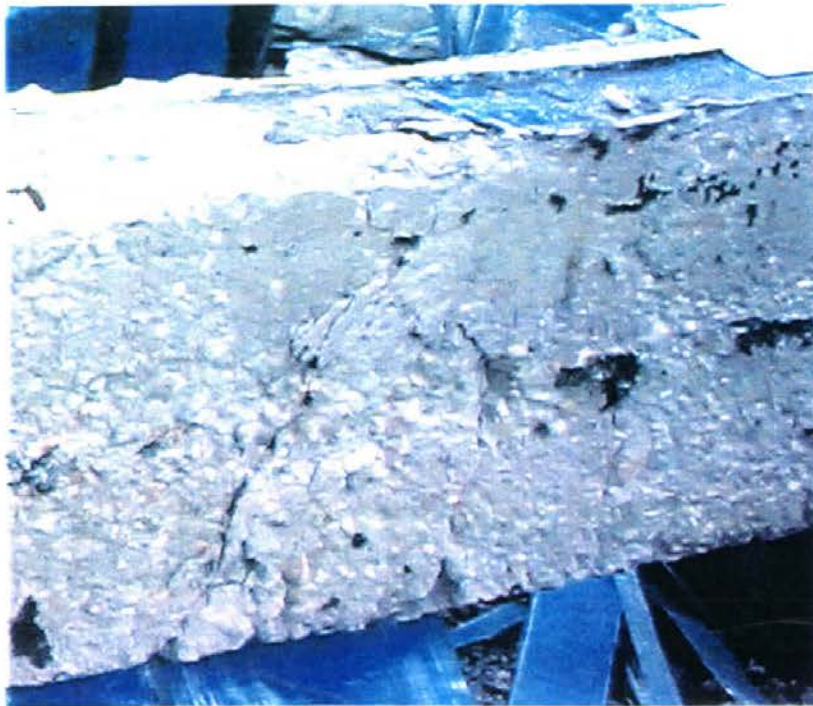


Φωτογραφία 6.3.11 Άποψη τελικής κατάστασης δοκιμίου G60 MONO – Όψη Α.



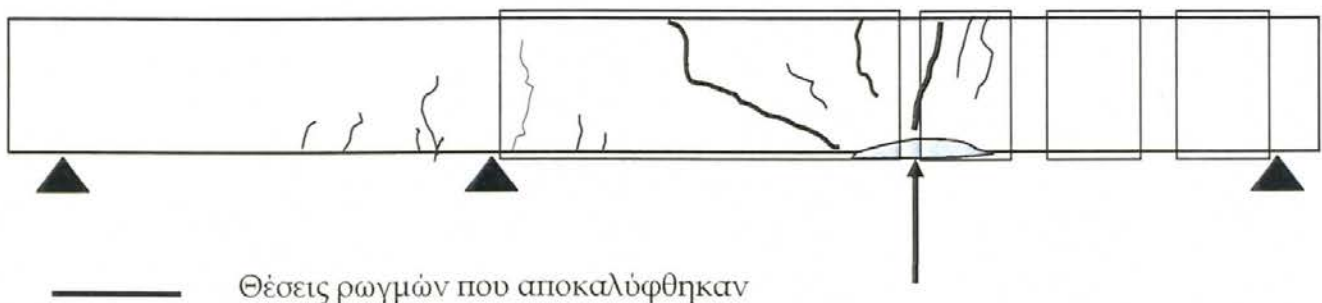
Φωτογραφία 6.3.12 Λεπτομέρεια στο σημείο φόρτισης *P*. Διακρίνονται:

- οι χαρακτηριστικές καμπτικές ρωγμές,
- η αστοχία της διεπιφάνειας στη διαμήκη διεύθυνση καθώς και
- το παραμένον βέλος του δοκιμίου.



Φωτογραφία 6.3.13 Λεπτομέρεια στην εσωτερική στήριξη Β, Όψη Α :
Διακρίνονται σημαντικού εύρους διατμητικές ρωγμές.

Β ΟΨΗ



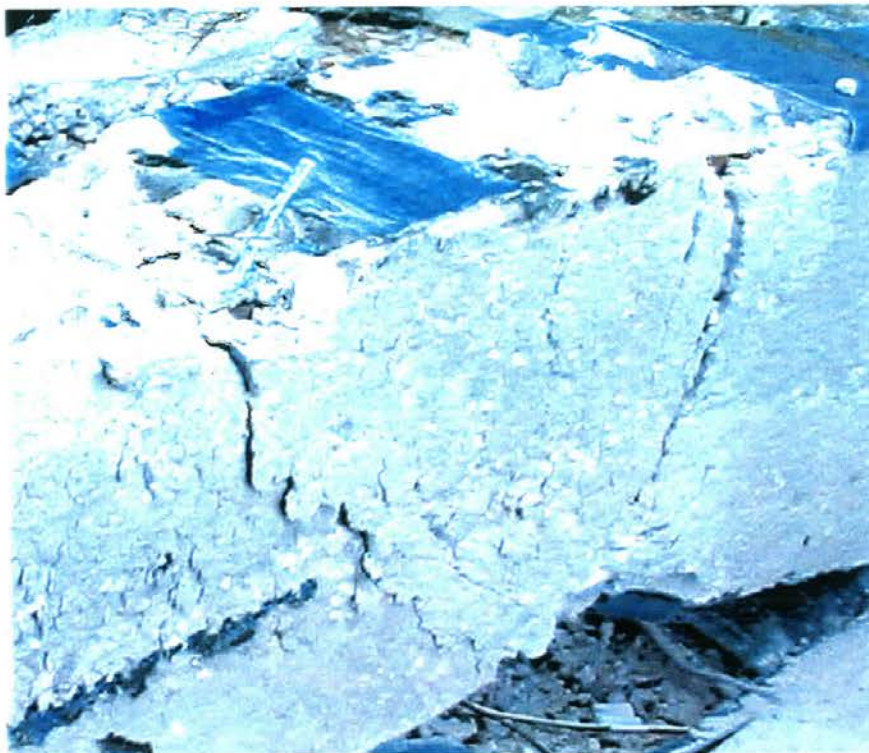
Σχήμα 6.3.3 Σκαρίφημα της τελικής κατανομής ρωγμών δοκιμίου G60 MONO,
Όψη Β



Φωτογραφία 6.3.14 Άποψη τελικής κατάστασης δοκιμίου G60 MONO – Όψη Β.



Φωτογραφία 6.3.15 Λεπτομέρεια στήριξης Β , Όψη Β: Φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές καμπτικές ρωγμές και η καταπόνηση της διεπιφάνειας ΙΝΟΠ/σκυροδέματος δοκού.



Φωτογραφία 6.3.16 Λεπτομέρεια στη θέση φόρτισης P , Όψη Β: Παρατηρούνται μεγάλου εύρους διατμητικές ρωγμές με κλίση μεγαλύτερη από 45° .



Φωτογραφία 6.3.17 Λεπτομέρεια 2 στη θέση φόρτισης P , Όψη Β: Διακρίνεται ο διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός που έχει αποκαλυφθεί, χαρακτηριστικές καμπτικές και διατμητικές ρωγμές καθώς και το παραμένον βέλος του δοκιμίου.

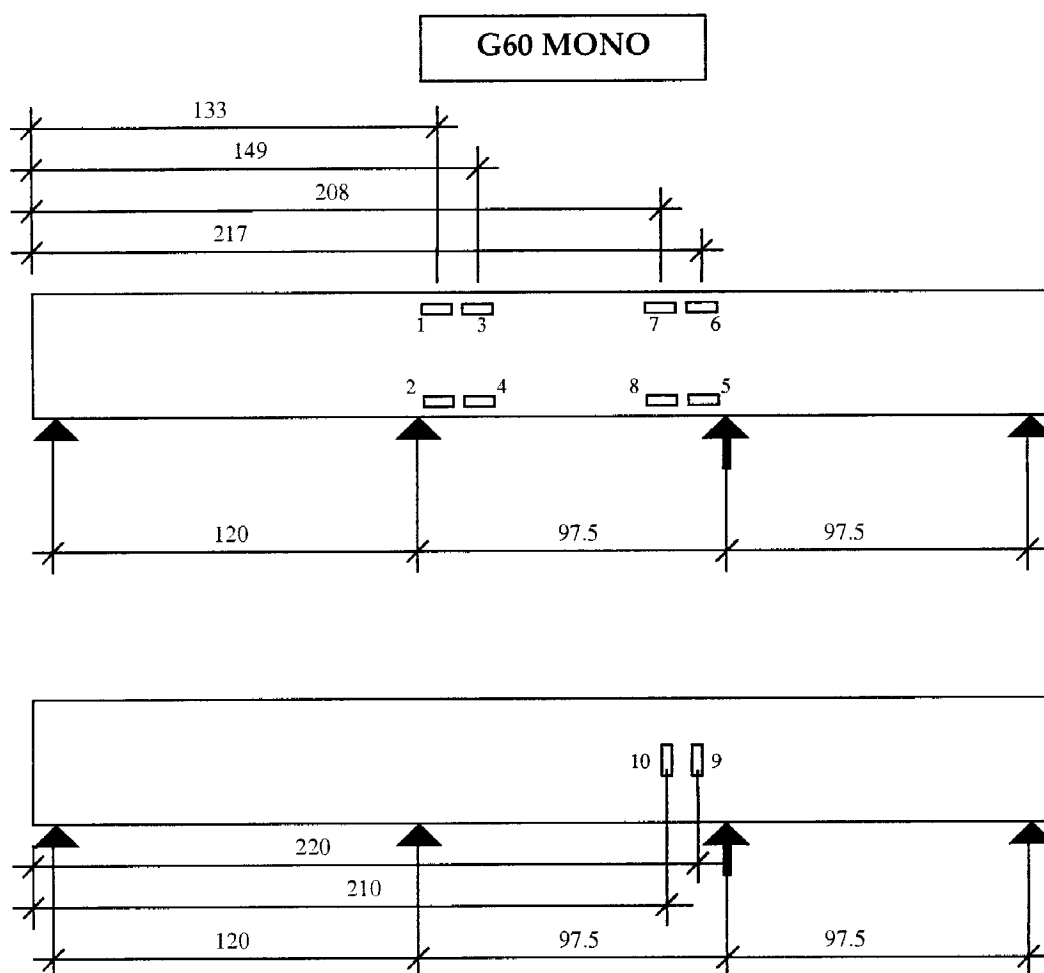
Το δοκίμιο εμφανίζει καμπτοδιατμητικές ρωγμές μεγάλου εύρους εκατέρωθεν του P και στη μεσαία στήριξη. Στη θέση του P έχουν αποκαλυφθεί οι εφελκόμενοι οπλισμοί, ενώ το το θλιβόμενο σκυρόδεμα έχει αποδιοργανωθεί εκατέρωθεν του σημείου φόρτισης στην περιοχή επαφής. Σε όλο το μήκος του δοκιμίου, στις κατακόρυφες παρειές, έχει αποσαθρωθεί το σκυρόδεμα της διεπιφάνειας, με τεμάχια αδρανών να έχουν μείνει επικολλημένα στο ΙΝΟΠ μετά την αφαίρεσή του.

Όπως φαίνεται στις παραπάνω Φωτογραφίες, οι χαρακτηριστικές διατμητικές ρωγμές που εμφανίσθηκαν είχαν κλίση διάφορη των 45° . Αυτό το μέγεθος της κλίσης αποδεικνύει τη συνεργασία του εγκάρσια τοποθετημένου υφάσματος G60-AR με το οριζόντιο ύφασμα στην ανάληψη της τέμνουσας. Όπως διαφαίνεται και από άλλες έρευνες (Kachlakev, Green and Barnes, 1999), η συνεργασία μεταξύ του ΙΝΟΠ υάλου (GFRP) που τοποθετείται για καμπτική ενίσχυση και του ΙΝΟΠ υάλου (GFRP) που τοποθετείται σαν διατμητική ενίσχυση επηρεάζει τόσο την παρεχόμενη καμπτική αντοχή στα ενισχυμένα δοκίμια όσο και τον τρόπο με τον οποίο εμφανίζονται οι διατμητικές ρωγμές.

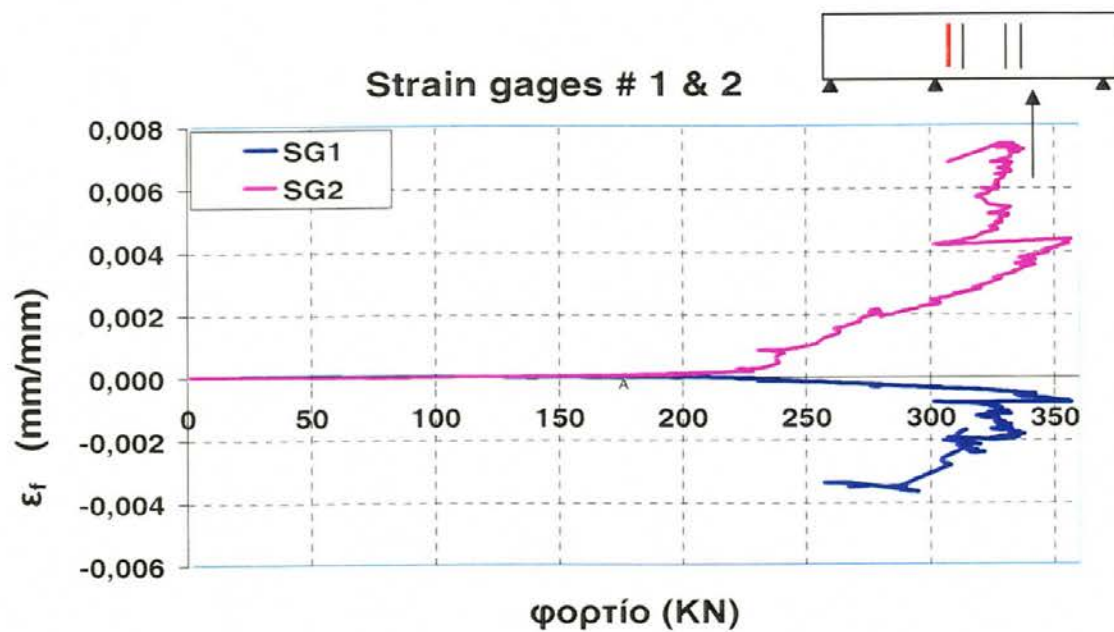
Όταν οι διατμητικές δυνάμεις οδηγούν στην εμφάνιση κεκλιμένων ρωγμών στο σκυρόδεμα, μεγάλες εφελκυστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται στα τμήματα του υφάσματος (GFRP) που γεφυρώνουν το άνοιγμα των ρωγμών. Η κατανομή της παραμόρφωσης μέσα στο ΙΝΟΠ κατά μήκος μιας ρωγμής καθορίζεται από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων (Stratford and Burgoyne, 2004). Οι τάσεις εκατέρωθεν της ρωγμής μεταφέρονται στην ενίσχυση μέσω δεσμού. Όταν συνυπάρχουν οριζόντια και εγκάρσια τοποθετημένα υφάσματα, στη μεταφορά αυτών των τάσεων συμμετέχουν και τα δύο, επηρεάζοντας τον τρόπο με τον οποίο τελικά επεκτείνεται η ρωγμή. Σαν αποτέλεσμα, η αλληλεπίδραση μεταξύ οριζόντια και εγκάρσια τοποθετούμενων ενισχύσεων από ΙΝΟΠ δεν θεωρείται ακόμη πλήρως κατανοητή και άρα απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση (Khalifa, 1998), ώστε να διευκρινιστεί ο τρόπος αστοχίας.

6.3.3 Ανάλυση μετρήσεων

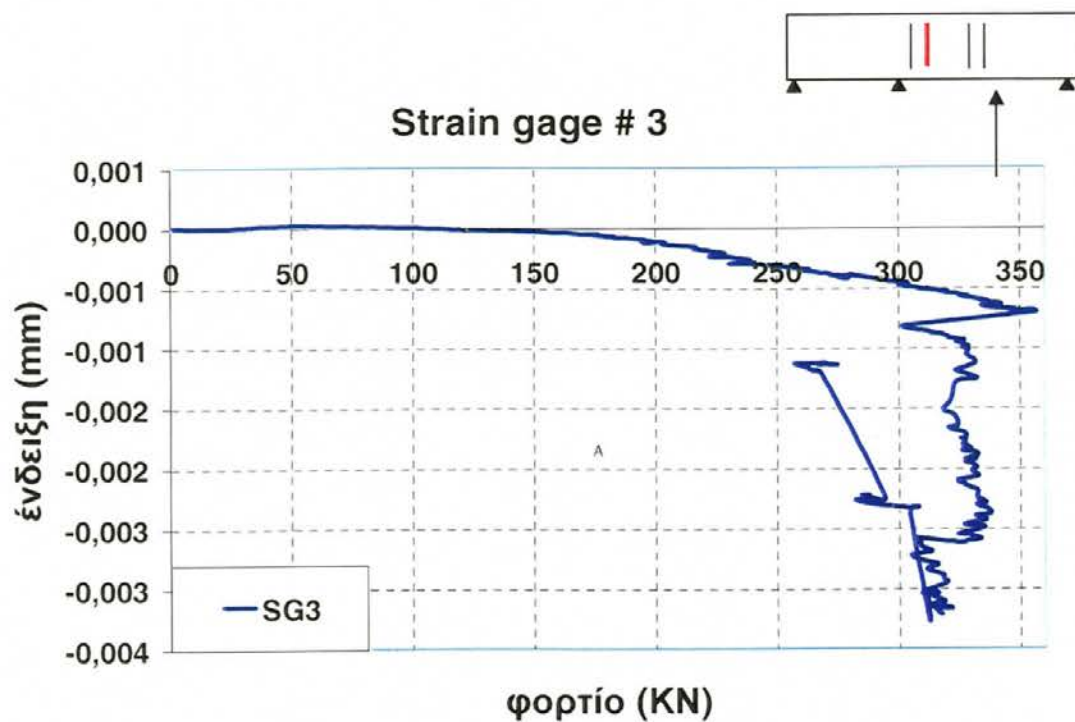
Η διαδικασία ενοργάνωσης των δοκιμών περιγράφηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Η θέση των καταγραφικών ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων (SG) και η αρίθμηση τους για το δοκίμιο **G60 MONO** δίδονται στο Σχήμα 6.3.4. Οι αντίστοιχες ψηφιακές καταγραφές των ηλεκτρονικών μηχανοσυστημάτων (SG) συναρτήσει της αντοχής του δοκιμίου δείχνονται στα Σχήματα 6.3.5 έως 6.3.10, που παραθέτονται ακολούθως. Στο κάθε διάγραμμα, δείχνεται και η θέση του ζεύγους των μηχανοσυστημάτων ως προς τις στηρίξεις και το σημείο επιβολής φορτίου. Λόγω δυσλειτουργίας του SG, η καταγραφή # 4 δεν απέδωσε καμία μέτρηση.



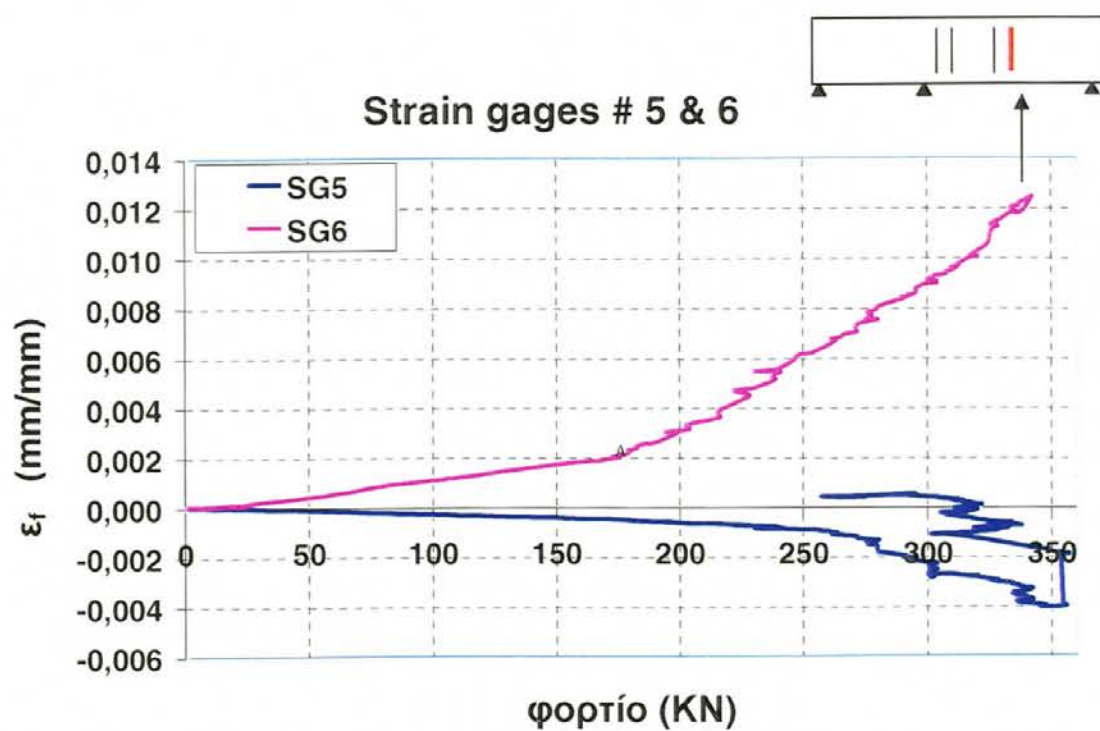
Σχήμα 6.3.4 Δοκίμιο **G60 MONO**: Διάταξη ηλεκτρονικών μηχανοσυστημάτων.



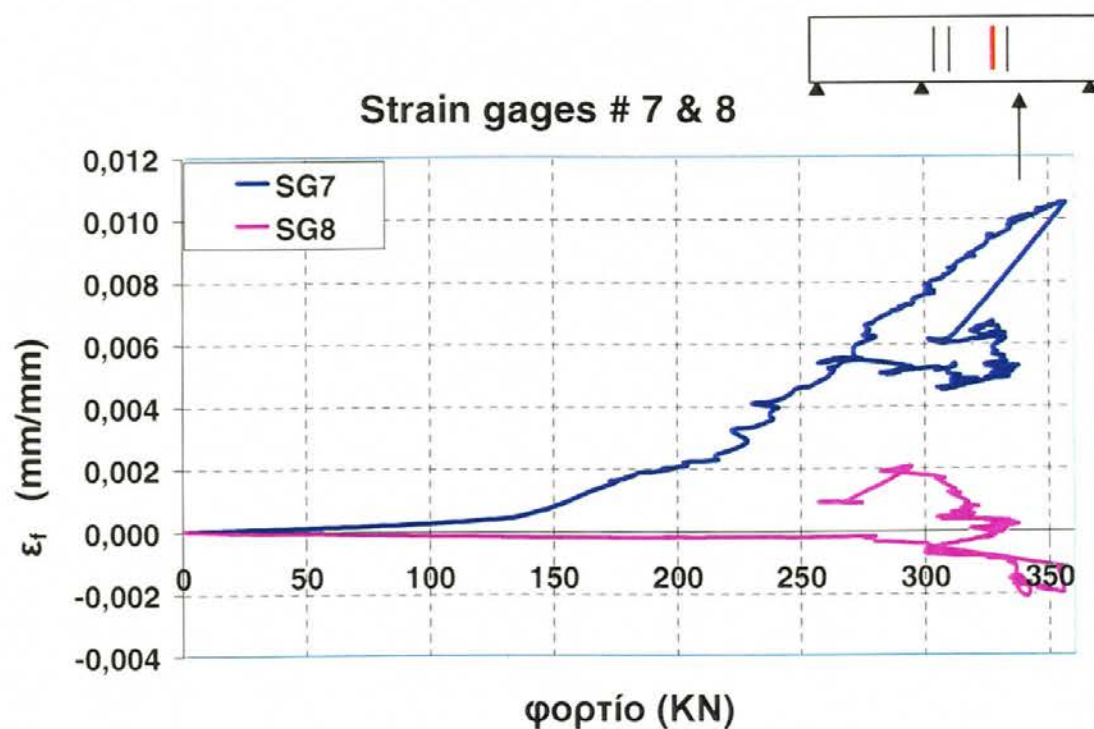
Σχήμα 6.3.5 Ένδειξη SG αρ. 1-2 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.3.6 Ένδειξη SG αρ. 3 συναρτήσει του φορτίου. Το SG αρ. 4 δεν λειτουργήσε.



Σχήμα 6.3.7 Ένδειξη SG αρ. 5-6 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.3.8 Ένδειξη SG αρ. 7-8 συναρτήσει του φορτίου.

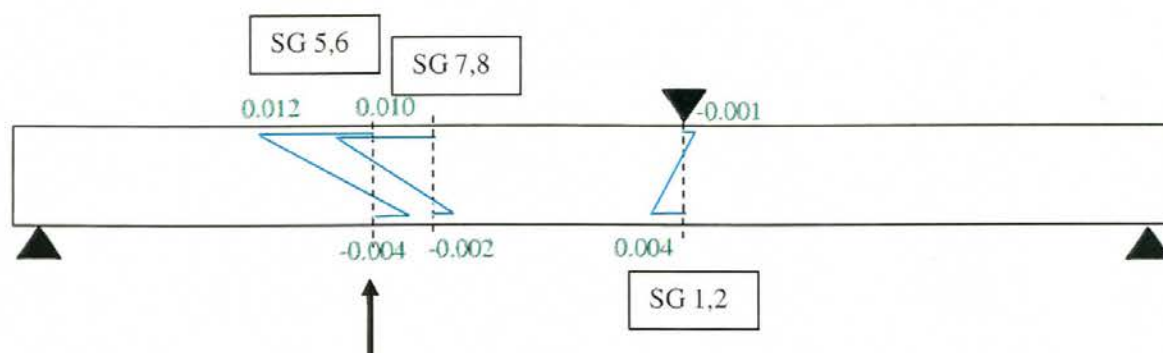
Από τα διαγράμματα στα Σχήματα 6.3.7 και 6.3.8 – των SG #5 και SG #7 - επαληθεύεται ανεξάρτητα και από τα SG η προηγούμενη παρατήρηση, ότι δηλαδή το φορτίο πρώτης διαρροής είναι περί τα 179 kN. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.3.7, η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στην τιμή που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα, η οποία λαμβάνεται ίση με 0,18% (βάσει της πειραματικής αντοχής σε διαρροή του υλικού). Και στις δύο παραπάνω καταγραφές, η διαρροή του οπλισμού φαίνεται να συνοδεύεται και από μια εμφανή αλλαγή στην κλίση του διαγράμματος $P - \epsilon_f = \epsilon_s$. Παρατηρείται δε ότι η αντίστοιχη παραμόρφωση στην εσωτερική στήριξη σε αυτή τη χρονική στιγμή είναι σχεδόν μηδενική (Σχήμα 6.3.5).

Πλην όμως, στο ίδιο Σχήμα, φαίνεται ότι και σε ότι αφορά την εσωτερική στήριξη, η παραμόρφωση διαρροής σε εφελκυσμό (μέτρηση στη θέση του SG #2) υπερβαίνεται σε φορτίο 271,8 kN (σε παραμόρφωση 17,6mm), η δε αντίστοιχη ϵ_f στο SG #6 να καταγράφει 0,65%. Παρατηρείται άρα ότι το παραπάνω φορτίο, στο οποίο θεωρείται ότι ενεργοποιείται η δεύτερη πλαστική άρθρωση, βάσει των καταγραφών των SG είναι περίπου ίσο με τη θεωρητική πρόβλεψη των 273 kN, τιμή που αντιστοιχεί σύμφωνα με την ελαστοπλαστική θεώρηση σε δύο πλαστικές αρθρώσεις με καμπτική αντοχή $M_{p| \epsilon_f = 0,8\%}$ (Πίνακας 7.1). Ο λόγος για αυτή την απόκλιση έχει να κάνει α) αφενός με τις αποκλίσεις του ελαστοπλαστικού και του διγραμμικά κρατυνόμενου προσομοιώματος (ειδικά στην περίπτωση των ενισχυμένων, όπου οι κρατυνώσεις είναι σημαντικές), και β) αφετέρου με τις ενδεχόμενες διορθώσεις μεταξύ της καταγραφής του INOΠ και της θέσης του οπλισμού άνω, στη στήριξη Β.

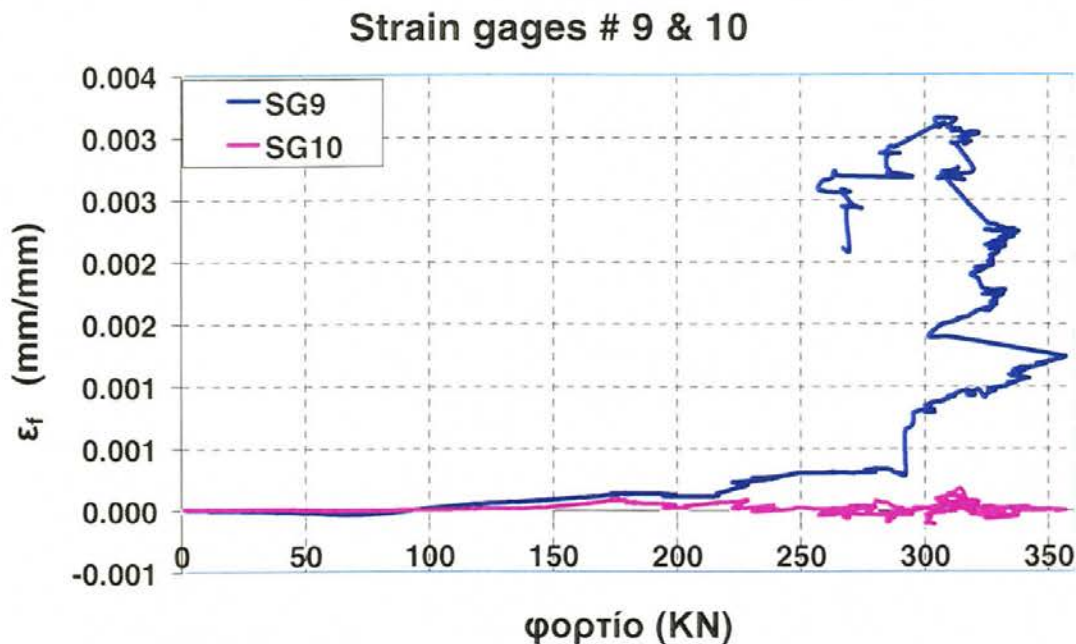
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι τα μηκυνσιόμετρα υπ' αριθμόν 5, 6, 7 και 8, τα οποία βρίσκονταν κοντά στη θέση επιβολής του φορτίου, αρχίζουν να καταγράφουν ενδείξεις παραμόρφωσης από την έναρξη του επιβολής του φορτίου, μέχρι το σημείο που το φορτίο πλησιάζει τα 350 kN, οπότε οι μετρήσεις παρουσιάζουν μια απότομη πτώση, ενδεικτικό ότι το INOΠ αστοχεί και υπάρχει

πτώση της αντοχής με αποφόρτιση, ή αστοχία του ΙΝΟΠ/μηκυνσιομέτρων στη θέση καταγραφής. Οι ανηγμένες εφελκυστικές παραμορφώσεις στα σημεία εφαρμογής του φορτίου P και στην εσωτερική στήριξη Β, ήταν 11,60 ‰ και 3,60 ‰ για τα SG #6 και SG #2, αντίστοιχα, σε φορτίο $P = 341$ kN οπότε και το SG #6 αστόχησε. Η μέγιστη καταγραφή στο SG #2 ήταν ίση με 4,2 ‰ στα 355,1 kN, με τα υπόλοιπα SG να απεικονίζουν την κατανομή παραμορφώσεων του Σχήματος 6.3.9 (θεωρούνται επίπεδες διατομές).

Αντιστοίχως τα SG υπ' αριθμόν 1,2 και 3, τα οποία ήταν τοποθετημένα πλησίον της πιθανής θέσης εμφάνισης της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης, άρχισαν να δίνουν ενδείξεις όταν το φορτίο άρχισε να ξεπερνά τα 200 kN. Όταν το P έφτασε τα 355 kN, υπήρξε και η αντίστοιχη απότομη αύξηση στις τιμές που έδωσαν τα εν λόγω μηκυνσιόμετρα μιας και σχηματιζόταν η δεύτερη πλαστική άρθρωση. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, τα SG 5, 6, 7 και 8 (στο βαθμό που λειτούργησαν), απομείωσαν τις καταγεγραμμένες τους παραμορφώσεις ευθύς αμέσως μετά τη μέγιστη αντοχή, αλλάζοντας πρόσημο του ρυθμού μεταβολής τους.



Σχήμα 6.3.9 Κατανομές παραμόρφωσης στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου στο σημείο της μέγιστης αντοχής $P_{max} = 355$ kN.

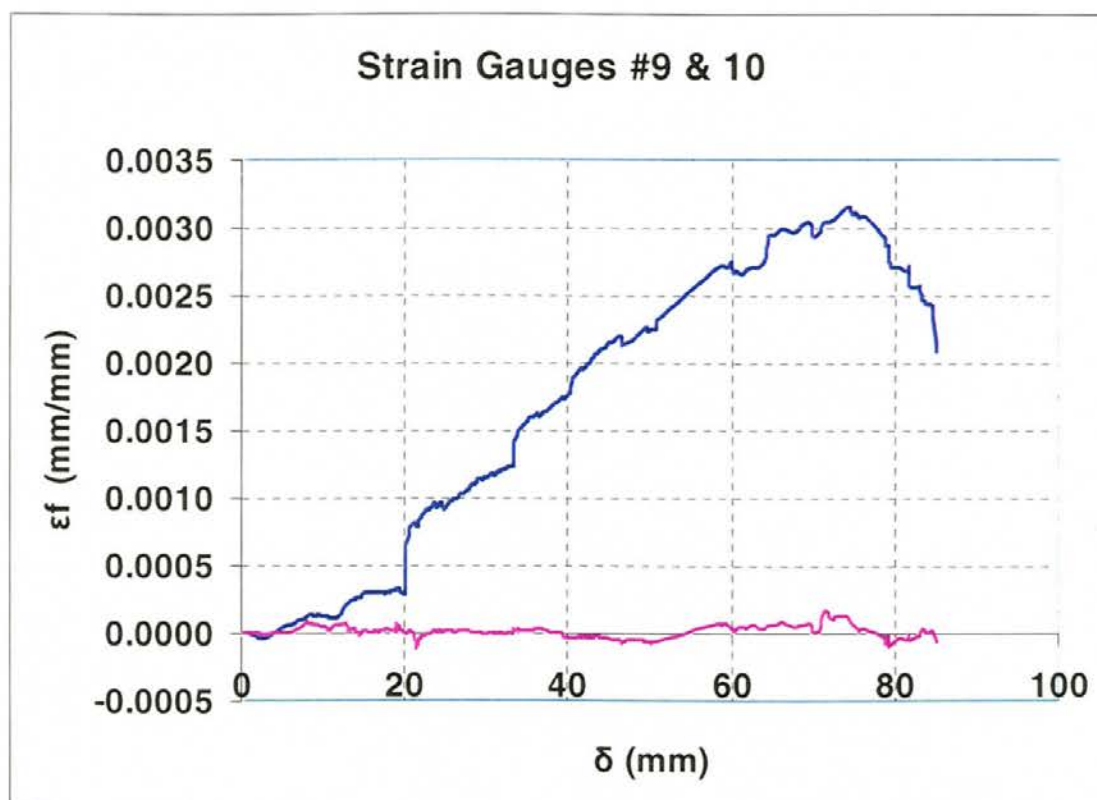


Σχήμα 6.3.10 Ένδειξη SG αρ. 9-10 συναρτήσει του φορτίου.

Οι εγκάρσιες ανηγμένες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν στα σημεία που τοποθετήθηκαν πάνω στο ΙΝΟΠ τα SG #9 & 10, εμφανίζονται να είναι κατά πολύ μικρότερες από το ανώτατο όριο παραμόρφωσης του ΙΝΟΠ ως προς τη διατμητική ενίσχυση, με μέγιστη διαμήκη ανηγμένη παραμόρφωση το 3.0 ‰, στο SG #9. Παρόλο που τα δύο μηκυνσιόμετρα ήταν τοποθετημένα σε γειτονικές περιοχές που απείχαν μόνο 10 cm μεταξύ τους, οι ενδείξεις που κατέγραψαν ήταν πολύ διαφορετικές. Αυτό εξηγείται πιθανότατα από την τοπικότητα της παραμόρφωσης του υφάσματος επάνω από την εκάστοτε διακριτή διατμητική ρωγμή που δημιουργείται κατά την αστοχία του δοκιμίου, κάτι που γίνεται ευκολότερα κατανοητό μετά από την απογύμνωση του δοκιμίου από τα ΙΝΟΠ και συσχέτιση της θέσης καταγραφής με τη θέση της ρωγμής αυτής (βλ. και Σχήματα 6.3.2 και 6.3.3 και Φωτογραφία 6.3.16).

Από τη σύγκριση των μετρήσεων των δύο SG (το SG #10 δεν κατέγραψε ουσιαστικές ανηγμένες παραμορφώσεις στη θέση που βρίσκεται, χωρίς όμως να έχει αστοχήσει) συναρτήσει της παραμόρφωσης δ (Σχήμα 6.3.11), συμπεραίνεται

ότι κάποιου είδους διαγώνια ρωγμή δημιουργήθηκε περί το SG # 9 όταν η παραμόρφωση έφθασε τα 19,9 mm, που αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενο φορτίο τα 290 kN. Αντίστοιχα φαινόμενα διαδοχικής ολίσθησης δημιουργούνται στο ΙΝΟΠ λόγω αστοχίας της διεπιφάνειας ΙΝΟΠ / σκυροδέματος ή διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού ή και των δύο ταυτόχρονα, σε διαδοχικούς συνδετήρες πλησίον του SG. Το εγκάρσιο ΙΝΟΠ φαίνεται ότι παραλαμβάνει φορτίο διατμητικό ήδη πριν τη διαρροή του συμβατικού εγκάρσιου χάλυβα (0,18%), αστοχεί δε σε $\varepsilon_f = 0,31\%$.

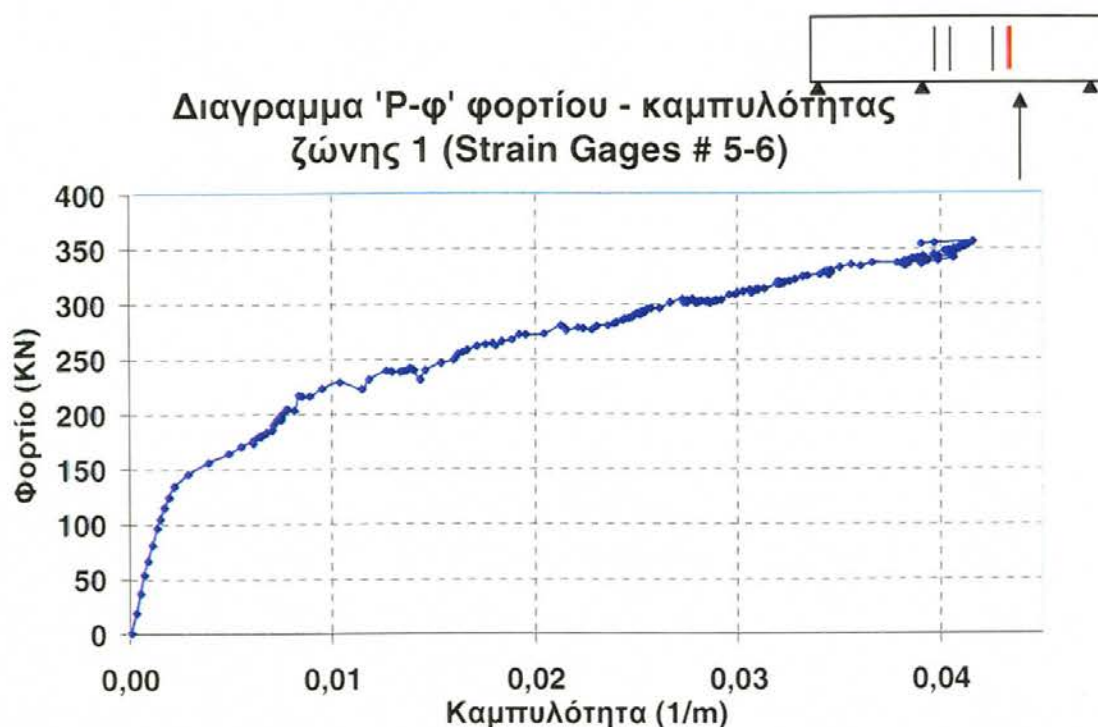


Σχήμα 6.3.11 Ένδειξη των SG αρ. 9-10 συναρτήσει της παραμόρφωσης.

6.3.4 Παράγωγες μετρήσεις

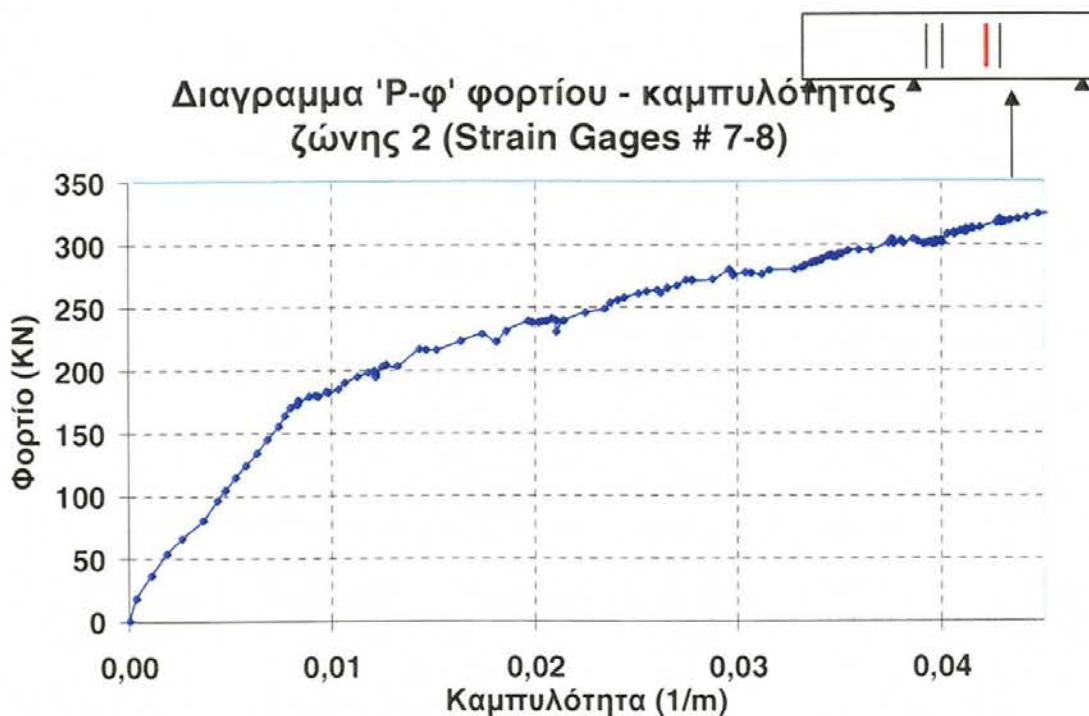
Από τα ζεύγη των μηκυνσιομέτρων υπ' αριθμόν 5-6 και 7-8 διαιρεμένα δια της μεταξύ τους απόστασης, 0,30m, υπολογίσθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα Αντοχής – μέσης καμπυλότητας ($P-\varphi$), στις διατομές στις οποίες ήταν

τοποθετημένα τα ζεύγη αυτά (Σχ. 6.3.12 και 6.3.13). Αν και η έλλειψη μετρήσεων με κυψέλλες φορτίου δεν επιτρέπει την απευθείας μέτρηση των εσωτερικών δυνάμεων – άρα και εσωτερικών ροπών – στο δεδομένο τμήμα, είναι εμφανής η διγραμμική συμπεριφορά του ενισχυμένου με ΙΝΟΠ εκάστοτε τμήματος, παρόμοιας μορφής με τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων που προέκυψαν από την ανάλυση διατομών και στοιχείων, στο Κεφάλαιο 7.



Σχήμα 6.3.12 Γράφημα Φορτίου-Καμπυλότητας στη ζώνη 1.

Ποσοτικά, οι μέσες καμπυλότητες που μετρήθηκαν σε απόσταση $d/4$ ως προς το σημείο εφαρμογής του φορτίου είναι ίσες με 0,04 1/m (λόγω αστοχίας του μηχανοσιόμετρου) στη θέση $d/4$ και 0,054 στη θέση $d/2$ αντίστοιχα, που αντιστοιχεί σε μέγιστη καμπτική αντοχή M_p (βάσει της θεωρητικής πρόβλεψης στο Σχήμα 6.3.0) 120 kNm, ή $P_{max}/2,92$, που είναι πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή ($P/3,06$, του στατικού προσομοιώματος στο Κεφάλαιο 4). Σημειώνεται ότι η προβλεπόμενη ϕ σε πρώτη διαρροή του χάλυβα και το αντίστοιχο φορτίο



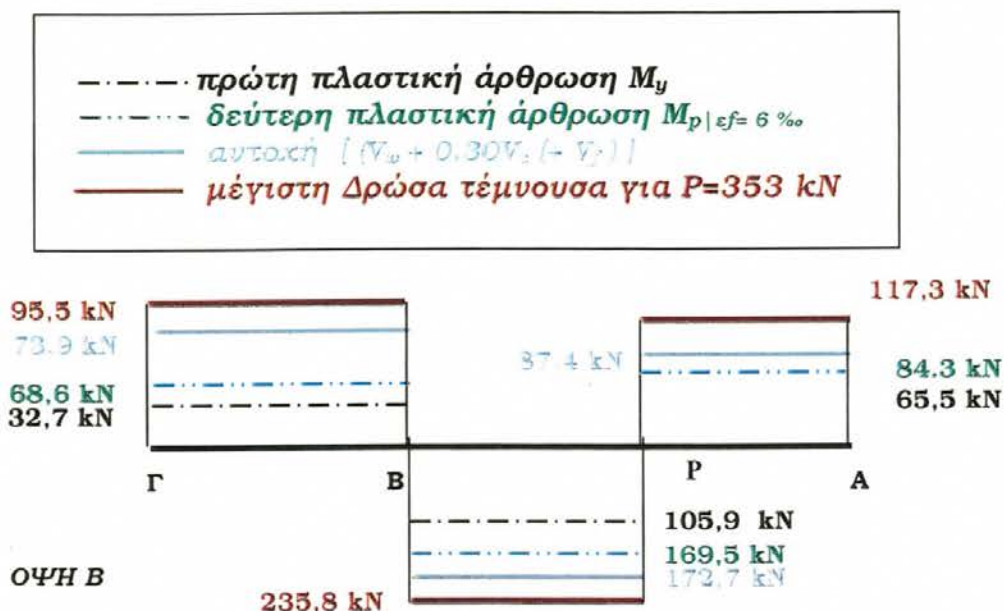
Σχήμα 6.3.13 Γράφημα Φορτίου-Καμπυλότητας στη ζώνη 2.

(ϕ_y, P_y) υπολογίστηκαν σε $7,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}$ και 171 kN ($=2,67 \cdot 64,2 \text{ kNm}$) αντίστοιχα (Κεφ.7), γεγονός που επαληθεύεται απόλυτα από τις παράγωγες πειραματικές μετρήσεις στο Σχήμα 6.3.13. Άρα, η επακόλουθη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων που επετεύχθη στο πείραμα στη θέση $d/2$ που κατέγραψε περαιτέρω, ήταν 7,40, ενώ η μέγιστη πλαστική στροφή που επετεύχθη στο τμήμα από το P ως το σημείο καμψής της δοκού ήταν περίπου 0,044 rad.

6.3.5 Ανάλυση της διατμητικής αντοχής

Στο δοκίμιο, παρόλο που εμφανίστηκαν ρωγμές διατμητικού τύπου μέσου εύρους, αποφύγαμε την ψαθυρή αστοχία. Τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσης και αντοχής του φορέα δίνονται στο Σχήμα 6.3.14 ενώ οι αντίστοιχοι υπολογισμοί παρέχονται στο Παράρτημα II. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης είχε ληφθεί υπόψη ως η μέγιστη

αντοχή του δοκιμίου θεωρώντας μέγιστη αναμενόμενη ανηγμένη παραμόρφωση του διαμήκους ΙΝΟΠ G60-AR ίση με $\varepsilon_f = 0.6\%$, με προβλεπόμενη ροπή αντοχής ίση με $M_p = 82,7 \text{ kNm}$ (άρα $P = 3,07 \cdot 82,7 \text{ kNm} = 253,9 \text{ kN}$).



Σχήμα 6.3.14 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής φορέα. Στο Σχήμα 6.3.14 συγκρίνεται η απαίτηση του εσωτερικού διατμητικού φορτίου στην πειραματική μέγιστη $P_{max} = 353 \text{ kN}$, με τα μεγέθη αντοχής σχεδιασμού και δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Παρόλο που το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο ξεπέρασε κατά πολύ την πρόβλεψη (περίπου κατά 100 kN) η δε μέγιστη δρώσα τέμνουσα ξεπέρασε σε όλο το μήκος της δοκού τη θεωρητική διατμητική αντοχή ακόμα και του ενισχυμένου δοκιμίου, φαίνεται ότι:

α) Στα μεν τμήματα ΓΒ και ΡΑ δεν υπήρξε διατμητική αστοχία, λόγω του ότι διατμητικές ρωγμές δεν εμφανίστηκαν στα τμήματα ΓΒ και ΡΑ.

β) Στο τμήμα ΒΡ όμως όπου η δρώσα τέμνουσα ξεπέρασε κατά 86 kN την αναμενόμενη ανάπτυξη αντοχής¹ αναπτύχθηκαν διατμητικές ρωγμές και

¹ Η αντοχή υπολογίστηκε για μέγιστη παραμόρφωση του εγκάρσιου ΙΝΟΠ $\varepsilon_f = 0.18\%$, θεώρηση συντηρητική. Ενδεικτικά, ο προμηθευτής προτείνει τιμές έως $\varepsilon_f = 0.50\%$ ενώ αρκετά σύνηθες είναι να θεωρείται $\varepsilon_f = 0.30\%$ (ACI 440-2R.02, 2002). Οι διαφορές δρώσας τέμνουσας-θεωρητικής

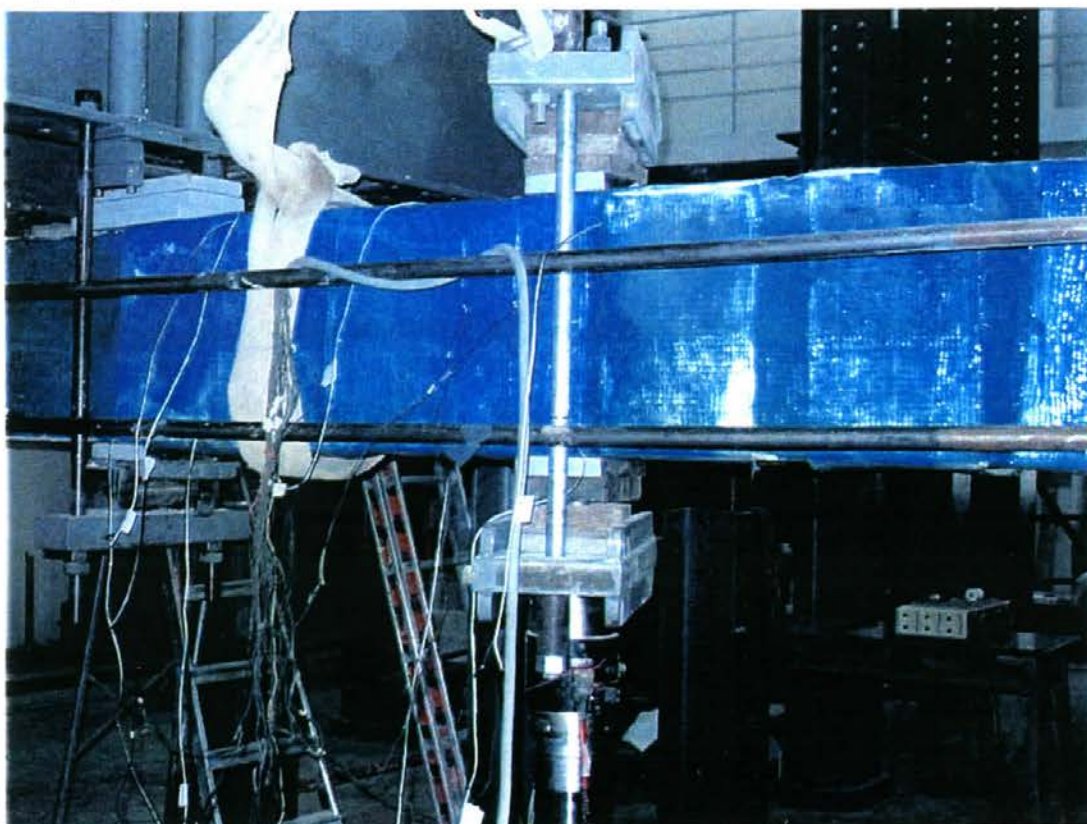
μάλιστα μία ήταν μεγάλου εύρους και διαμπερή, όπως κατεγράφη και από το αντίστοιχο SG #9. Εν τούτοις, η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου ήταν κατά πολύ μεγαλύτερη της προβλεπόμενης στο σχεδιασμό. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι οι δευτερεύοντες μηχανισμοί συνέβαλαν πέραν του 30% της V_c που ελήφθη υπόψη (λόγω μη ανακύκλισης) αλλά και ότι η προσφορά του ΙΝΟΠ στη διατμητική αντοχή ήταν στην πραγματικότητα μεγαλύτερη από την υπολογισμένη στο σχεδιασμό.

αντοχής θα ήταν συνεπώς μικρότερες για μεγαλύτερο ε_f . Το θέμα αναπτύσσεται περαιτέρω στην Ενότητα 8.7.

6.4 ΔΟΚΙΜΙΟ # 4: G60 CYCLIC

6.4.1 Περιγραφή του πειράματος

Το δοκίμιο **G60 CYCLIC** ήταν όμοιο με το **G60 MONO** και σε διαστάσεις και στο συμβατικό οπλισμό και ενίσχυση, άρα και με παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως αυτά υπολογίζονται στο Κεφάλαιο 7. Όπως και το μονοτονικό δοκίμιο, η δοκός αυτό δεν απαιτήθηκε (βάσει των υπολογισμών του Παραρτήματος II) να ενισχυθεί έναντι διατμήσεως στο τρίτο τμήμα της (μεταξύ

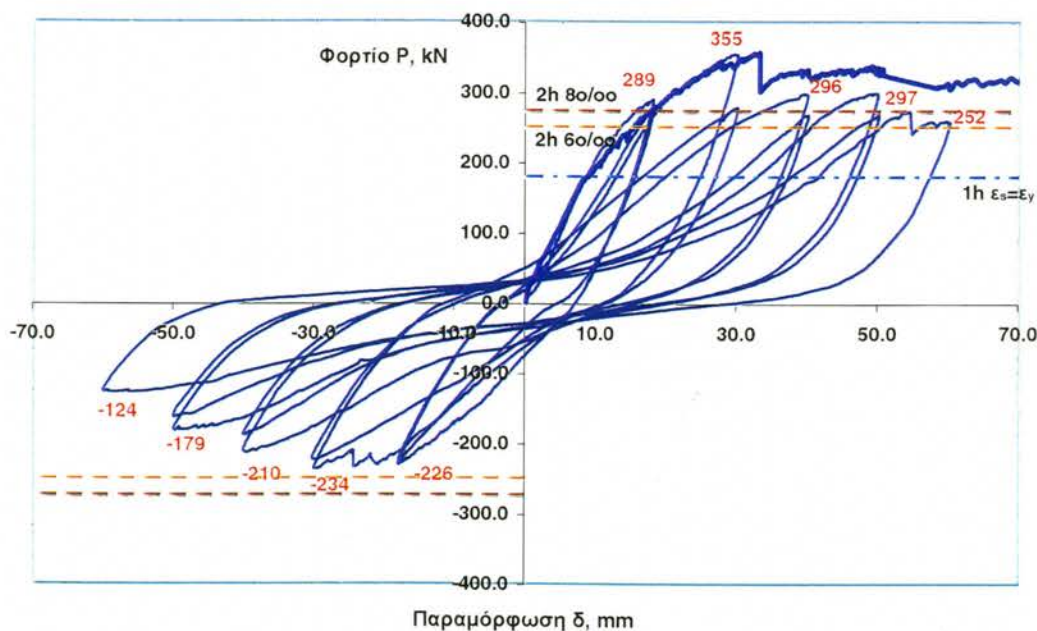


Φωτογραφία 6.4.1 Το δοκίμιο **G60 CYCLIC** στην πειραματική διάταξη ενοργανωμένο.

εσωτερικής και ακραίας στήριξης) με εγκάρσια ΙΝΟΠ (Φωτογραφία 6.4.1). Οι θεωρητικά προβλεπόμενες ροπές αντοχής, θεωρώντας μέγιστη ακραία παραμόρφωση του ΙΝΟΠ G60-AR ίση με 0,6% και 0,8% στην κάθε διατομή, είναι $M_{p|ε_f=0.6\%} = 82,7 \text{ kNm}$ και $M_{p|ε_f=0.8\%} = 89,0 \text{ kNm}$, αντίστοιχα (Πίνακας 7.1).

Από την καταγραφή του φορτίου - μετατόπισης του εμβόλου προέκυψαν οι βρόχοι υστερήσεως του Σχήματος 6.4.1. Στο ίδιο Σχήμα παραβάλλονται για σύγκριση και το αντίστοιχο διάγραμμα P - δ του δοκιμίου **G60 MONO**, καθώς και οι προβλεπόμενες οριακές τιμές αντοχής της δοκού (βάσει ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς), χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές αντοχών των υλικών (ονομαστικές για τα ΙΝΟΠ). Θεωρούνται οι οριακές καταστάσεις:

- Πρώτης διαρροή στο χάλυβα ($M_y = M_{p| \varepsilon_s=0,18\%}$) και δημιουργία της πρώτης πλαστικής άρθρωσης στη θέση του P ,
- Δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή για παραμόρφωση στο ΙΝΟΠ ίση με 0,6% ($= M_{p| \varepsilon_f=0,6\%, P = 253 \text{ kN}$) και
- Δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή για παραμόρφωση στο ΙΝΟΠ ίση με 0,8% ($= M_{p| \varepsilon_f=0,8\%, P = 273 \text{ kN}$) στις δύο πλαστικές αρθρώσεις.



Σχήμα 6.4.1 Δοκίμιο **G60 CYCLIC** : Πειραματικοί βρόχοι υστερήσης.

Το δοκίμιο καταπονήθηκε συνολικά με εννέα κύκλους εναλλασσόμενης φόρτισης, φθάνοντας σε μέγιστη επιβαλλόμενη παραμόρφωση 60,1 mm. Το μέγιστο φορτίο του πειράματος μετρήθηκε κατά τον 3^ο κύκλο ίσο με 354,6 kN, σε μετατόπιση 30 mm. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητά του δοκιμίου ξεπέρασε τις οριακές θεωρητικές τιμές αφενός για το διατμητικό σχεδιασμό (θεωρώντας δύο πλαστικές αρθρώσεις αντοχής $M_{p|εf=0,6\%}$) κατά 40% καθώς και για δημιουργία δύο αρθρώσεων αντοχής $M_{p|εf=0,8\%}$ κατά 28%.

Το δοκίμιο **G60 CYCLIC** εμφάνισε παρόμοια συμπεριφορά με το μονοτονικό πείραμα, τείνοντας ουσιαστικά μεταξύ ανακυκλίσεων σε μια τελικά παραμένουσα αντοχή ίση με 252 kN, κατά τι μικρότερη της αντίστοιχης του δοκιμίου **G60 MONO**, μετά την αστοχία του δοκιμίου αυτού στα ΙΝΟΠ ενίσχυσης. Όπως και στο μονοτονικό πείραμα, και σε αυτή την περίπτωση η παραμένουσα αντοχή της δοκού στην μέγιστη παραμόρφωση δεν μειώθηκε σε καμία περίπτωση κάτω από τη μέγιστη αντοχή του παρθένου δοκιμίου **NEAK MONO** χωρίς ενίσχυση ($P = 225$ kN). Η ελάχιστη παραμένουσα αντοχή του δοκιμίου στα 252 kN ήταν 112% της παραπάνω τιμής ελέγχου.

Η καμπτική δυσκαμψία του δοκιμίου είναι όμοια με αυτή του **G60 MONO**, μέχρι τον τρίτο κύκλο, με την περιβάλλουσα να παρακολουθεί στενά την καταγεγραμμένη μονοτονική φόρτιση. Η μέση δυσκαμψία μεταξύ ανακυκλίσεων τηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα έως το σημείο αυτό, ενώ από την παραμόρφωση αυτή και εξής η συμπεριφορά εμφανίζεται με σταδιακά φθίνουσα δυσκαμψία σε κάθε ανακύκλιση, με έντονα φαινόμενα στένωσης των βρόχων (*pinching*) και σταδιακό μηδενισμό της περί το σημείο μηδενικού φορτίου, λόγω αστοχίας των οπλισμών (ολίσθηση και λυγισμός). Και στο μονοτονικό πείραμα, σε αυτή την παραμόρφωση παρατηρήθηκε έναρξη της αστοχίας σε διάρρηξη του ΙΝΟΠ ενίσχυσης στις παρειές, στην περιοχή της φόρτισης, με μια χαρακτηριστική πτώση της αντοχής.

Συνοπτικά, οι πειραματικοί δείκτες απόκρισης των καταγραφών για τον κάθε κύκλο δίδονται στον Πίνακα 6.4.1. Στα αποτελέσματα του Πίνακα 6.4.1 περιλαμβάνονται :

Πίνακας 6.4.1 Σημεία εναλλαγής κύκλων μετατόπισης και δείκτες συμπεριφοράς ανά κύκλο του δοκιμίου **G60 CYCLIC**.

Αρ.	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	% P_{max} NEAK	% P @ δ_{max} G60 MONO	K kN/m	E kN/mm	μ_{δ}	μ_E
1	18,1	18,1	18,1	231	18,1	289	18,1	1,28	1,05	14399	3461	2,1	4,5
2	18,1	18,0	18,0	226	18,1	272	18,0	1,20	0,98	13793	2274	2,1	3,0
3	30,0	30,0	30,0	236	30,0	355	29,6	1,57	1,03	9917	7685	3,5	10,0
4	30,3	30,0	30,2	224	29,8	275	30,0	1,22	0,80	8339	6507	3,5	8,5
5	40,0	39,9	40,0	214	39,5	297	39,0	1,31	0,89	6499	8835	4,6	11,5
6	40,0	40,1	40,1	188	39,8	266	39,6	1,18	0,80	5719	5924	4,7	7,7
7	50,0	50,0	50,0	182	49,7	299	49,8	1,32	0,94	4828	9453	5,8	12,3
8	50,1	50,1	50,1	163	49,9	266	50,1	1,18	0,84	4287	7593	5,8	9,9
9	59,9	60,1	60,0	128	59,0	271	54,5	1,20	0,83	3519	10752	7,0	14,0

- οι μέγιστες /ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}), με τις αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο και η μέση παραμόρφωση δ_{mean} , όπου $\delta_{mean} = (\delta_{min} + \delta_{max})/2$
- οι παραμορφώσεις στις αντίστοιχες ακραίες δυνάμεις (δ/P_{min} και δ/P_{max}),
- το ποσοστό της μέγιστης δύναμης του κύκλου, σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή του **NEAK MONO**, καθώς και το ποσοστό της αντοχής στη μέγιστη παραμόρφωση του κάθε κύκλου, σε σχέση με την αντοχή του **G60 MONO** στην ίδια παραμόρφωση.
- η μέση δυσκαμψία \bar{K} του βρόχου, που δίδεται από την εξίσωση

$$\bar{K} = \frac{P_{max} - P_{min}}{\delta/P_{max} - \delta/P_{min}} \cdot 1000 \text{ kN / m}$$

- η ενεργειακή απορρόφηση που περικλείεται από το υστερετικό διάγραμμα του κάθε κύκλου και , τέλος,

- οι αντίστοιχες πλαστιμότητες μέσης παραμόρφωσης μ_δ και υστερετικής ενέργειας μ_E , όπου E η απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του βρόχου (σε εύρος δ_{mean}) και

$$\mu_\delta = \delta_{mean} / \delta_y$$

$$\mu_E = E / E_y, \quad E_y = P_y \delta_y / 2$$

και P_y, δ_y οι δύναμη και η παραμόρφωση διαρροής (πειραματικά μετρούμενη).

6.4.2 Περιγραφή συμπεριφοράς, βλαβών και του τρόπου αστοχίας

Κατά τον πρώτο και δεύτερο κύκλο φόρτισης δεν παρουσιάστηκαν φαινόμενα διάρρηξης του υφάσματος. Από τον 3^ο κύκλο και έπειτα, οπότε αρχίζει η διάρρηξη του ΙΝΟΠ, παρατηρήθηκε μια σημαντική πτώση της δυσκαμψίας του δοκιμίου κατά την επαναφόρτιση. Κατά τον ανοδικό κλάδο του τέταρτου κύκλου η φέρουσα ικανότητα της δοκού έπεσε σε επίπεδα χαμηλότερα του 85% της μέγιστης αντοχής, όμως, κατά την επαναφόρτιση και για τον ανοδικό κλάδο του εβδόμου κύκλου, αυξήθηκε πάλι, πλησιάζοντας την τιμή $0,85P_{max}$, λόγω ανακατανομής.

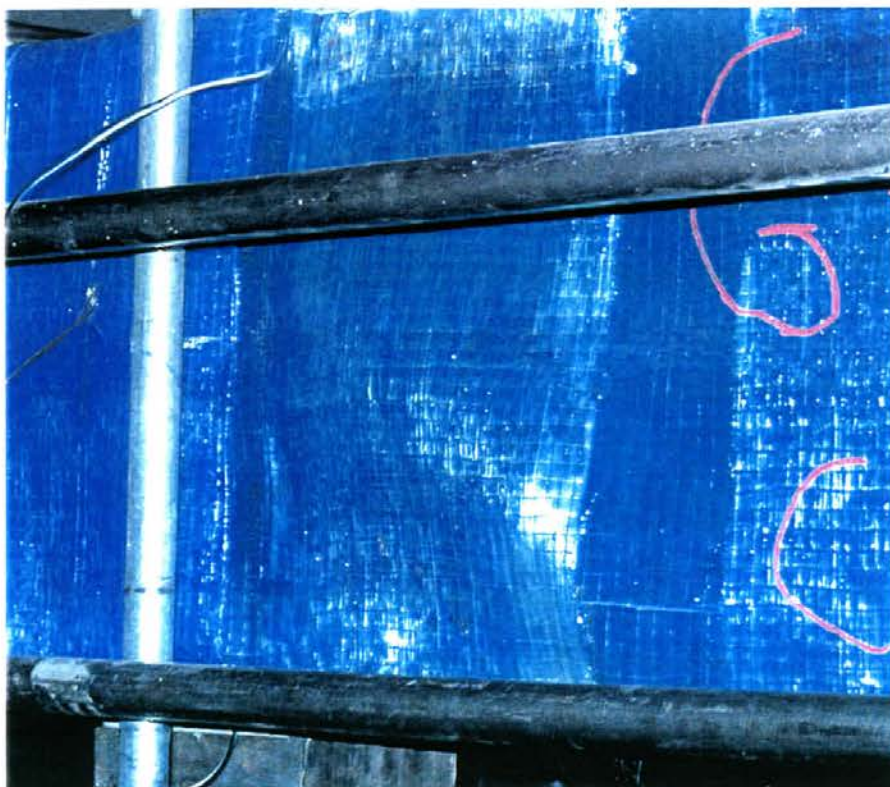
Η επιβολή της εγκάρσιας παραμόρφωσης συνεχίστηκε μέχρι τον ένατο κύκλο, σε εύρος μετατόπισης 60,1 mm. Ήδη από τον τρίτο κύκλο παρατηρήθηκε ουσιαστική διάρρηξη του ΙΝΟΠ (Φωτογραφία 6.4.2) καθώς και εμφανής διόγκωση του ΙΝΟΠ τόσο στη θέση επιβολής της φόρτισης P – στη θλιβόμενη παρειά – όσο και στην ακραία στήριξη αριστερά του P , στο πρώτο τμήμα της δοκού (Φωτογραφίες 6.4.3 και 6.4.4). Με βάση την πειραματική μέτρηση, η παραμόρφωση διαρροής του συμβατικού οπλισμού στο δοκίμιο τοποθετείται στα 8,9 mm, σε φορτίο 176 kN, τιμή πολύ κοντά στη θεωρητική πρόβλεψη (= $2,67 \cdot 64,2 = 171,4$ kN).

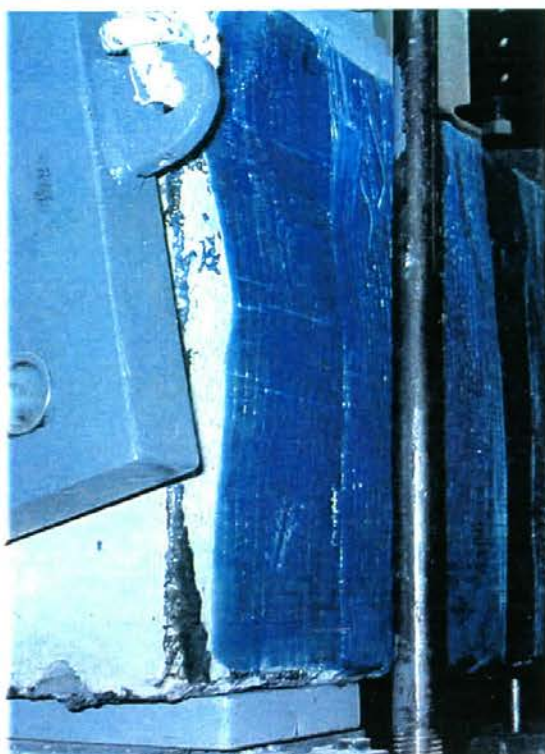
Κατά τον 6^ο κύκλο αστόχησε εγκάρσια η ενίσχυση της δοκού, με διάρρηξη στην άνω ορθή γωνία της περιτύλιξης, σε όλο το πλάτος του, του πρώτου



Φωτογραφία
6.4.2
Διάρρηξη του
υφάσματος
ΙΝΟΠ γύρω
από την
περιοχή
επιβολής του
φορτίου P .

Φωτογραφία
6.4.3
Διόγκωση του
ΙΝΟΠ και
διατμητική
παραμόρφωση
κοντά στη
θέση επιβολής
της φόρτισης
 P , στο
αριστερό
τμήμα της
δοκού, προς
την ακραία
στήριξη

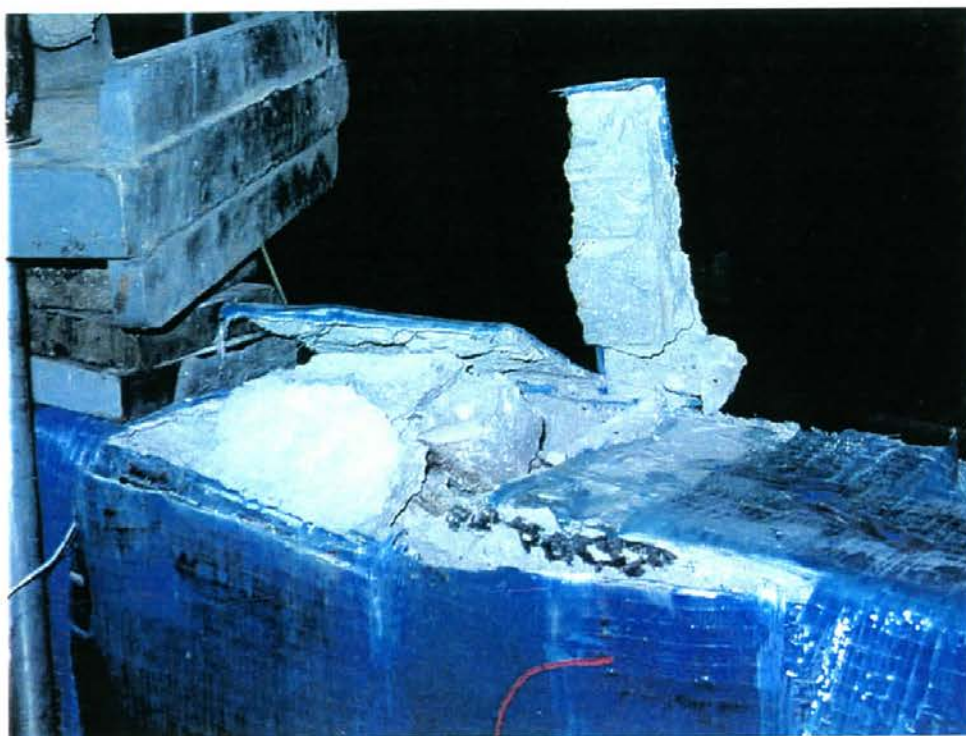




Φωτογραφία 6.4.4 Διόγκωση του ΙΝΟΠ στη στήριξη Α και σταδιακή αποκόλληση του ΙΝΟΠ λόγω αστοχίας του υποβάθρου από τάσεις αγκύρωσης.

Φωτογραφία 6.4.5 Διόγκωση της δοκού, λυγισμός των άνω ράβδων και αποκόλληση ΙΝΟΠ υάλου με τμήματα σκυροδέματος στη θέση επιβολής της φόρτισης P προς την ακραία στήριξη Α, Όψη Β.



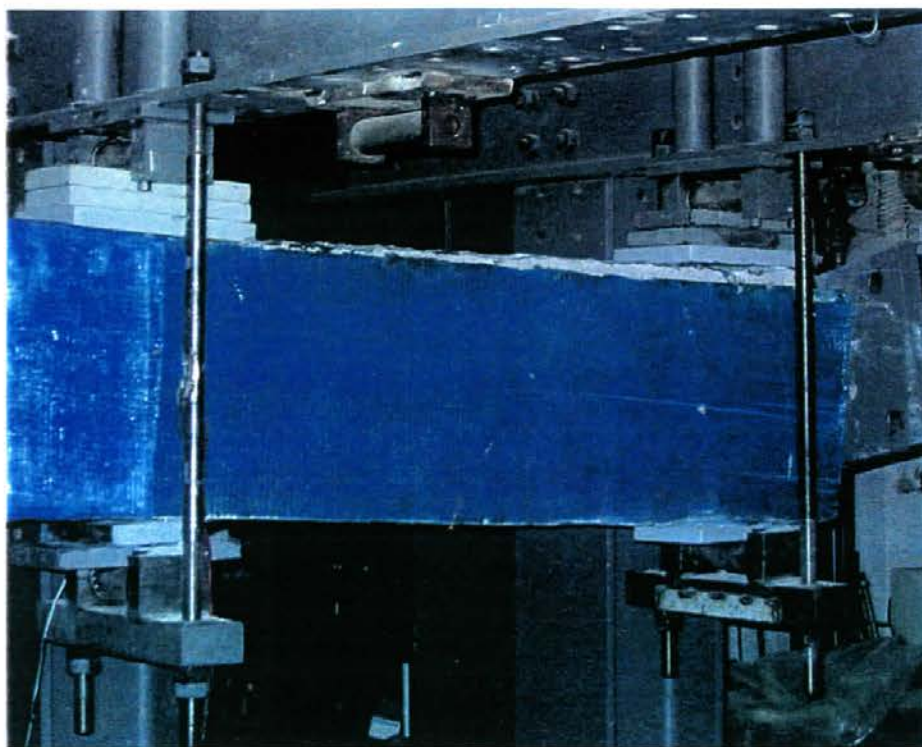


Φωτογραφία 6.4.6 Λεπτομέρεια εκ των άνω της εγκάρσιας διόγκωσης της δοκού, του λυγισμού του συμβατικού οπλισμού και της επακόλουθης διάρρηξης των ΙΝΟΠ υάλου στη θέση P προς την στήριξη Α, Όψη Β. Διακρίνεται και η πλήρης έλλειψη πρόσφυσης των συμβατικών διαμήκων οπλισμών μετά τη διαρροή τους, στο τμήμα της επικάλυψης που αστόχησε. Η πολλαπλή λειτουργία του εγκάρσιου ΙΝΟΠ στην παρειά είναι εμφανής.

εγκάρσιου συνδετήρα ΙΝΟΠ, ευρισκόμενου από το σημείο φόρτισης P και προς τη μεριά της ακραίας στήριξης Α, και κατά συνέπεια, αποκόλληση τμήματος του διαμήκους ΙΝΟΠ μαζί με τμήμα της επικάλυψης του σκυροδέματος ακριβώς στην άνω παρειά της δοκού, στην περιοχή όπου ασκούσαν το φορτίο P με αποτέλεσμα και συγχρόνως λόγω των εντάσεων λυγισμού των άνω ράβδων (Φωτογραφίες 6.4.5 και 6.4.6). Όμως, δεν αστόχησε ο συμβατικός συνδετήρας οπλισμού. Η αστοχία του εγκάρσιου ΙΝΟΠ σε αυτό το σημείο και η μετέπειτα συμπεριφορά της δοκού καθιστά προφανή την ταυτόχρονη λειτουργία του εγκάρσιου ΙΝΟΠ στη θλιβόμενη παρειά του δοκιμίου, να παραλαμβάνει τάσεις αγκύρωσης διαμήκως λόγω διατμητικής καταπόνησης της δοκού και,

ταυτόχρονα, να καταπονείται λόγω παρεμποδισμού του εγκάρσιου λυγισμού του διαμήκους συμβατικού οπλισμού, λόγω έλλειψης συμβατικών συνδετήρων.

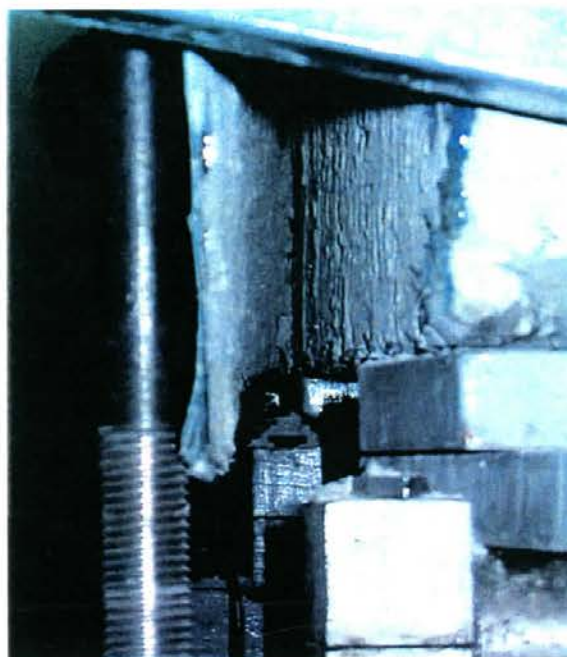
Στους τελευταίους τρεις κύκλους παρατηρήθηκε, όπως και για το δοκίμιο **G60 ΜΟΝΟ**, πλήρης απώλεια της πρόσφυσης μεταξύ ΙΝΟΠ και σκυροδέματος και συνακόλουθη αποκόλληση ολόκληρου του διαμήκους ΙΝΟΠ στο τμήμα της δοκού μεταξύ μεσαίας στήριξης Β και της ακραίας δεξιάς στήριξης Γ, στο τμήμα με το μεγαλύτερο διατμητικό μήκος (Φωτογραφίες 6.4.7 και 6.4.8), που δεν έφερε εγκάρσια ενίσχυση. Από τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών, μπορεί να εκληφθεί σα συμπέρασμα ότι η αστοχία της πρόσφυσης μεταξύ του σκυροδέματος και του ΙΝΟΠ συνήθως ξεκινά εκεί όπου υπάρχει μια σημαντική διατμητική μετατόπιση κατά μήκος διαγώνιων ή εγκάρσιων ρωγμών. Αυτό φαίνεται να αποδεικνύεται και στη προκειμένη περίπτωση, αφού, όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 6.4.3, εμφανίστηκε μια εγκάρσια ρωγμή μέσου εύρους



Φωτογραφία 6.4.7

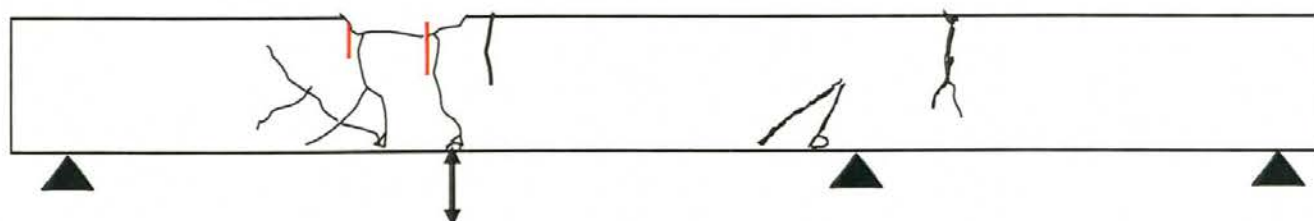
Διακρίνεται η πλήρης αποκόλληση του διαμήκους ΙΝΟΠ σε όλο το μήκος του τρίτου τμήματος ΒΓ του φορέα (μεσαία προς ακραία εξωτερική στήριξη).

Φωτογραφία 6.4.8 Διακρίνεται η ολοσχερής απώλεια συνάφειας μεταξύ υφάσματος και σκυροδέματος στο τρίτο τμήμα ΒΓ της δοκού.



στο τμήμα εν λόγω ΒΓ, η οποία πιθανόν να ευθύνεται και για την έναρξη της αποκόλλησης του διαμήκους ΙΝΟΠ. Λόγω του ότι η αστοχία αυτή παρατηρήθηκε και στα δύο δοκίμια G60 – σε ακραίες παραμορφώσεις και αφού είχε μειωθεί ουσιαστικά η φέρουσα ικανότητά τους, συμπεραίνεται ότι, παρόλο που οι υπολογισμοί έδειξαν ότι δεν ήταν αναγκαίο να τοποθετηθεί εγκάρσια ΙΝΟΠ για διατμητική ενίσχυση στο τμήμα ΒΓ, εν τούτοις, αν είχε τοποθετηθεί, να είχε αποφευχθεί η αποκόλληση του διαμήκους ΙΝΟΠ. Η περιτύλιξη του ΙΝΟΠ εγκαρσίως, στα άκρα του οριζόντια τοποθετημένου υφάσματος ή η τοποθέτηση κάποιου τύπου αγκύρωσης (λόγω παρουσίας της πλάκας, στην περίπτωση των πλακοδοκών κατά Micelli, Raghu και Nanni, 2002), θα αποτελούσε μία λύση σε τέτοιας φύσης προβλήματα.

Ακολουθούν χαρακτηριστικές φωτογραφίες που είναι ενδεικτικές της τελικής ρηγματώσης του δοκιμίου καθώς και τα αντίστοιχα σκαριφήματα που αποτυπώνουν τη τελική κατάσταση των δύο όψεων του δοκιμίου, όπως προέκυψαν μετά την αφαίρεση των ΙΝΟΠ με χρήση τροχού και κρουστικών μέσων έπειτα από την απομάκρυνση του δοκιμίου από τη πειραματική διάταξη.

ΑΨΗ

- Θέσεις συνδετήρων που αποκαλύφθηκαν
 — Θέσεις ρωγμών που αποκαλύφθηκαν

Σχήμα 6.4.2 Σκαρίφημα τελικής κατανομής των ρωγμών του δοκιμίου G60 CYCLIC – Όψη Α.



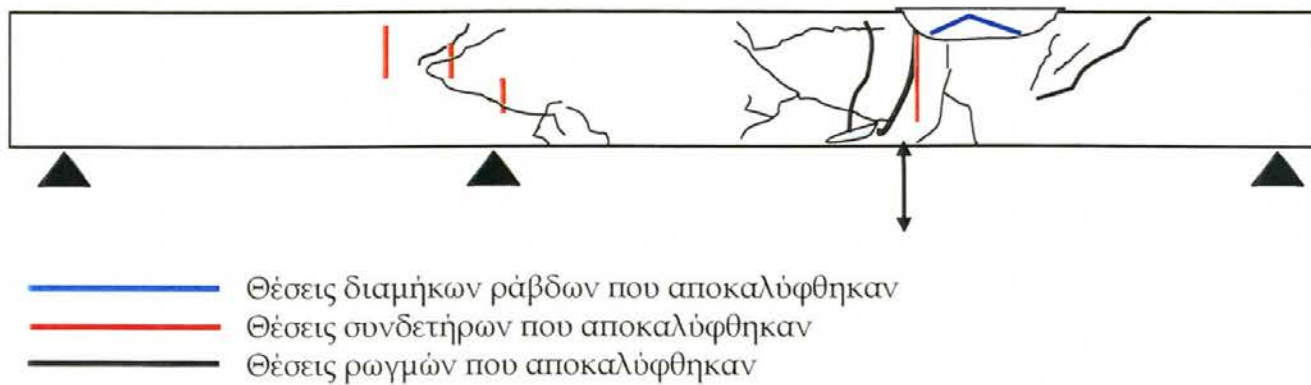
Φωτογραφία 6.4.8 Άποψη της τελικής κατάστασης βλαβών του δοκιμίου G60 CYCLIC – Όψη Α, από τη μεριά του σημείου επιβολής του φορτίου P .



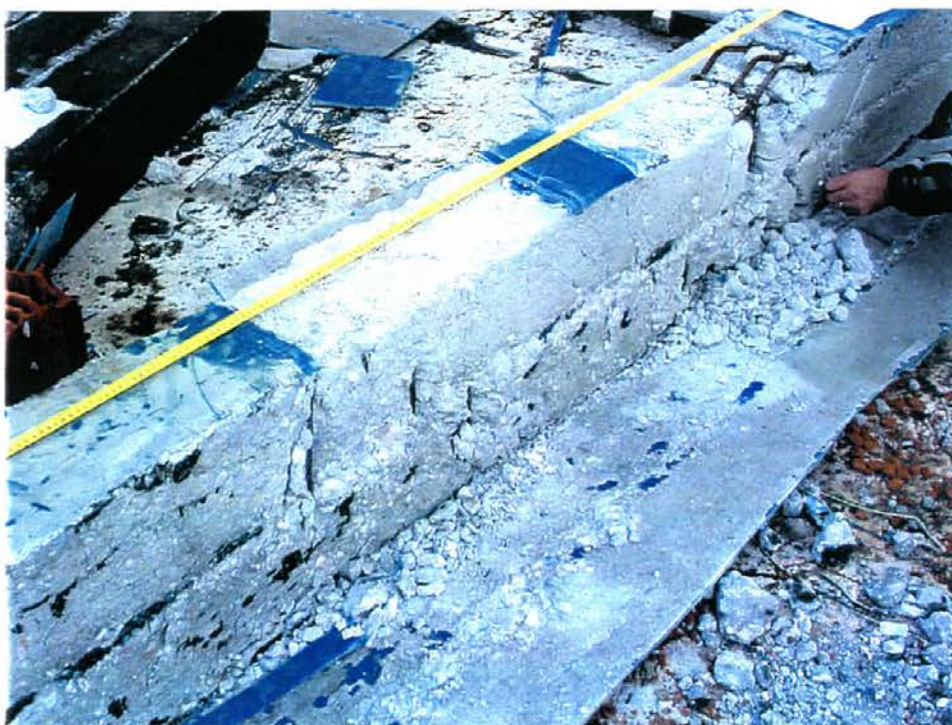
Φωτογραφία 6.4.9 Λεπτομέρεια στο σημείο φόρτισης *P*, Όψη Α : Παρουσιάζεται η τελική άποψη ρηγματώσης και αποφλοιώσης του σκυροδέματος. Διακρίνεται η έντονη παραμόρφωση λόγω λυγισμού του διαμήκους χάλυβα προς τα δεξιά του φορτίου, προς την εξωτερική στήριξη, ενώ έχουν αποκαλυφθεί και δύο συνδετήρες, χωρίς όμως να ανοίξουν ούτε και να κοπούν.



Φωτογραφία 6.4.10 Λεπτομέρεια στη στήριξη Β, Όψη Α : Διακρίνονται χαρακτηριστικές διαγώνιες ρωγμές.

ΒΏΨΗ

Σχήμα 6.4.3 Σκαρίφημα τελικής κατανομής των ρωγμών δοκιμίου G60 CYCLIC – Όψη Β.



Φωτογραφία 6.4.11 Άποψη τελικής κατάστασης δοκιμίου G60 CYCLIC – Όψη Β.



Φωτογραφία 6.4.12 Λεπτομέρεια στη στήριξη Β, Όψη Β :Παρατηρούνται μικρές ρωγμές και έχουν αποκαλυφθεί μικρά τμήματα τριών συνδετήρων επάνω στη διακριτή διατμητική ρωγμή που φαίνεται.

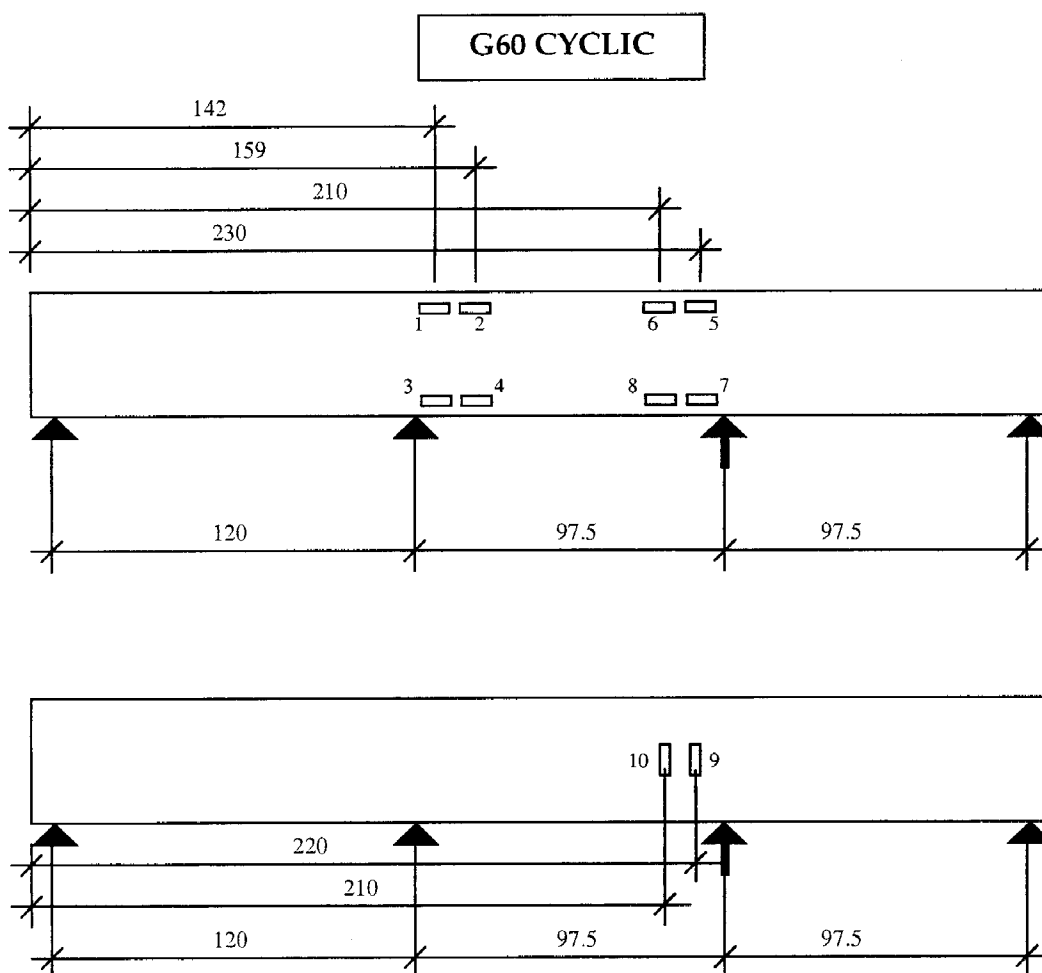


Φωτογραφία 6.4.13 Λεπτομέρεια στο σημείο φόρτισης Ρ, Όψη Β :Είναι φανερός ο κατακερματισμός του σκυροδέματος, η παραμόρφωση του εφελκυσμένου χάλυβα και έχει αποκαλυφθεί μεγάλο μέρος ενός συνδετήρα.

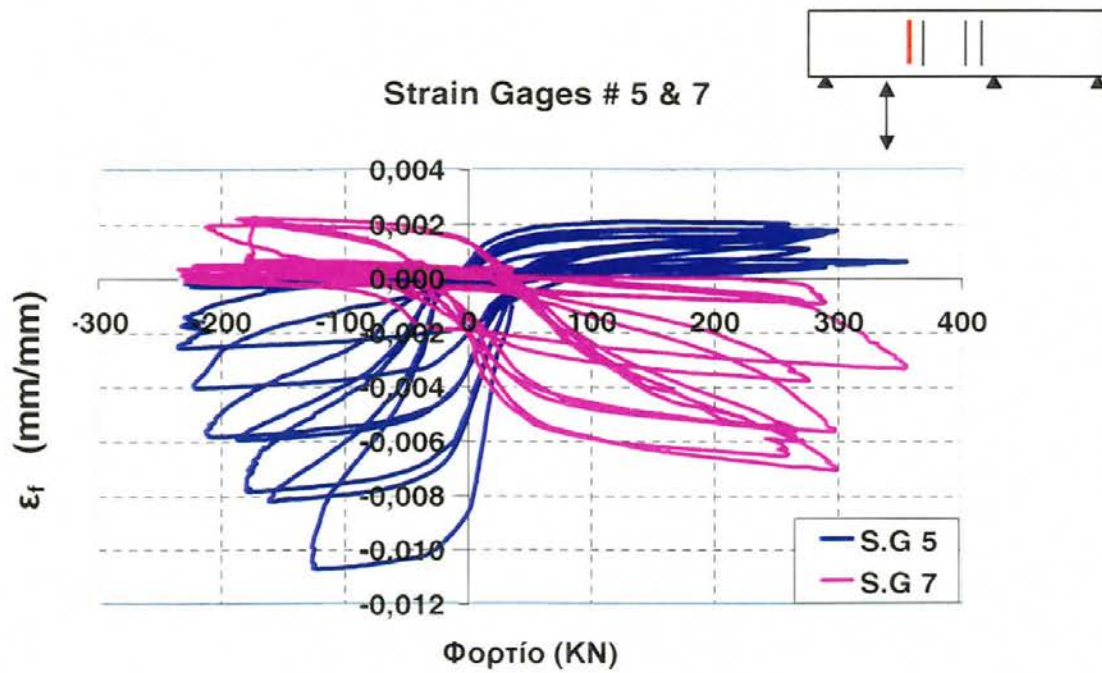
6.4.3 Ανάλυση των καταγραφών SG

Η διαδικασία ενοργάνωσης των δοκιμών περιγράφηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Η τελική θέση των καταγραφικών ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων (SG) και η αρίθμησή τους για το δοκίμιο **G60 CYCLIC** δίδεται στο Σχήμα 6.4.4.

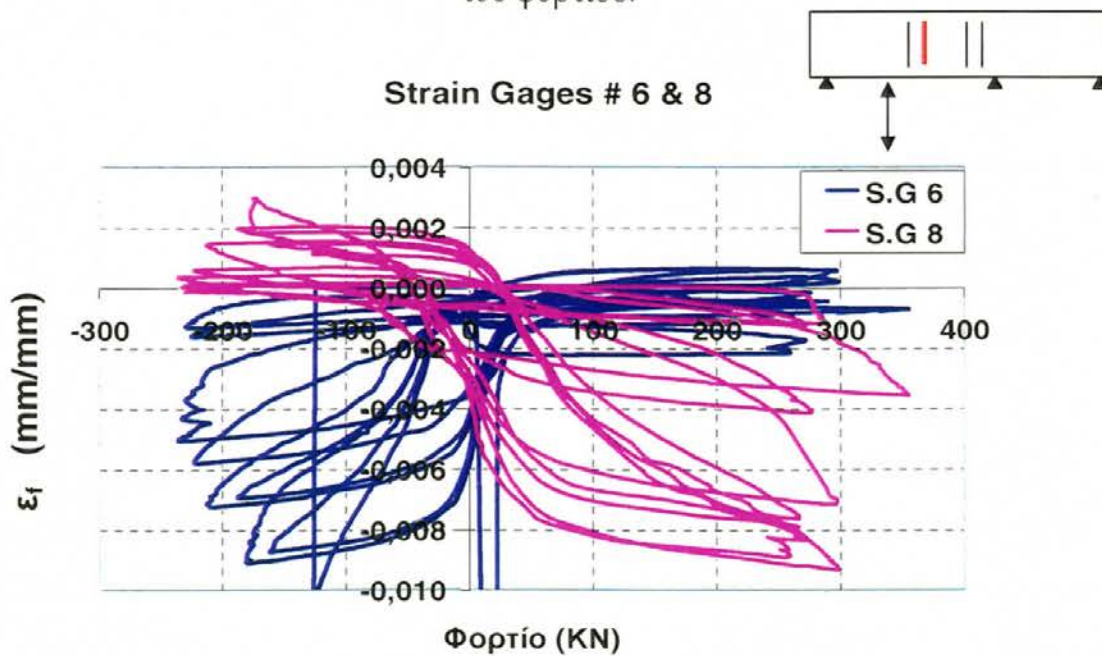
Οι αντίστοιχες καταγραφές των SG, δίδονται στα επόμενα Σχήματα 6.4.5 έως 6.4.9, συγκρινόμενες ανά δύο στην ίδια διατομή, συναρτήσει του φορτίου P . Για ευκολότερη παρακολούθηση της απόκρισης, στα σκαριφήματα δείχνεται ενδεικτικά η θέση του ζεύγους των SG, ως προς το σημείο φόρτισης και τις στηρίξεις. Σημειώνεται ότι το μηχανοσύστημα αρ. 3 δεν λειτούργησε.



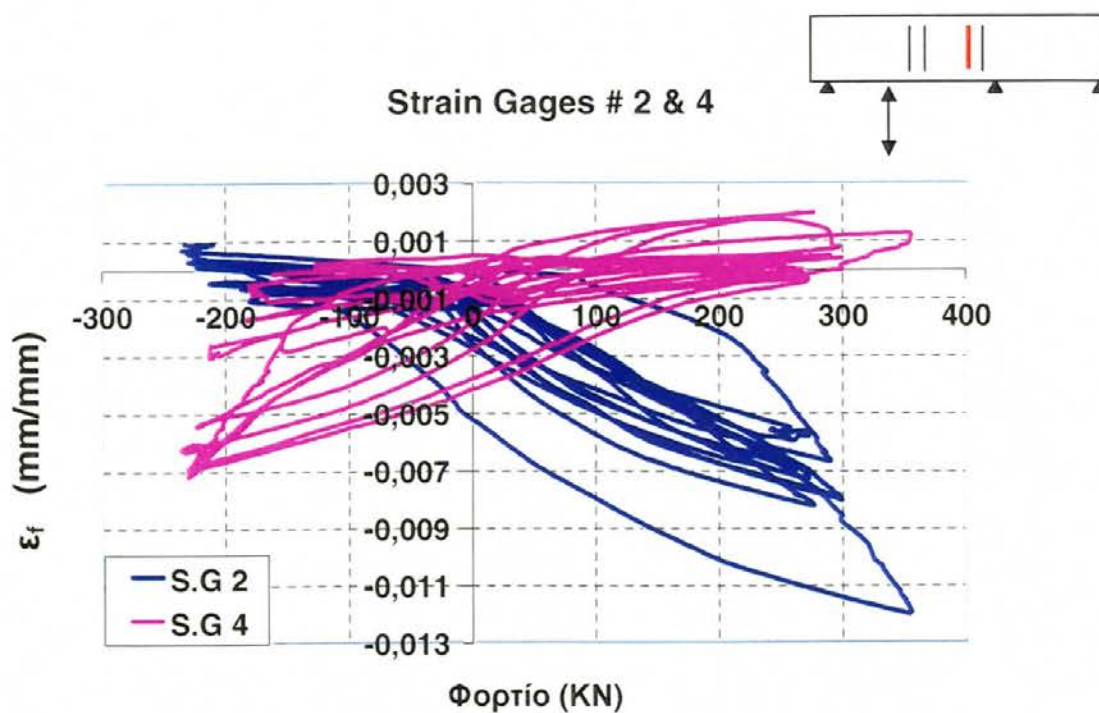
Σχήμα 6.4.4 Θέση και αρίθμηση των καταγραφών SG, δοκίμιο **G60 CYCLIC**.



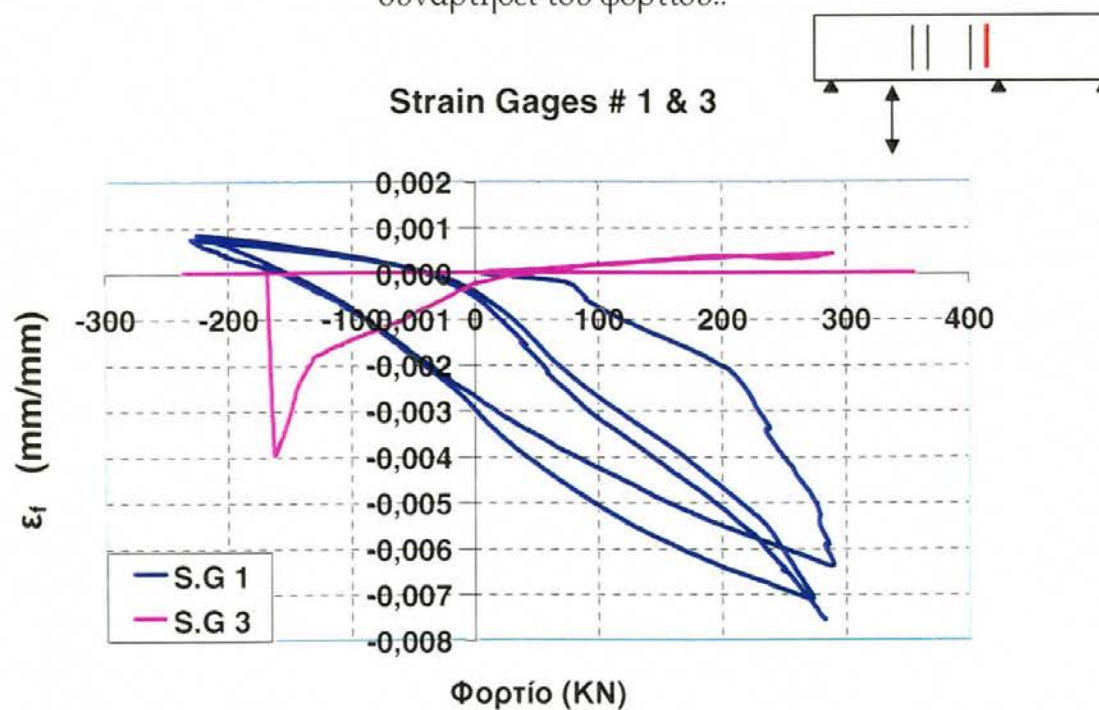
Σχήμα 6.4.5 Γράφημα ενδείξεων ηλεκτρονικών μηχανομετρών #5-7 συναρτήσει του φορτίου.



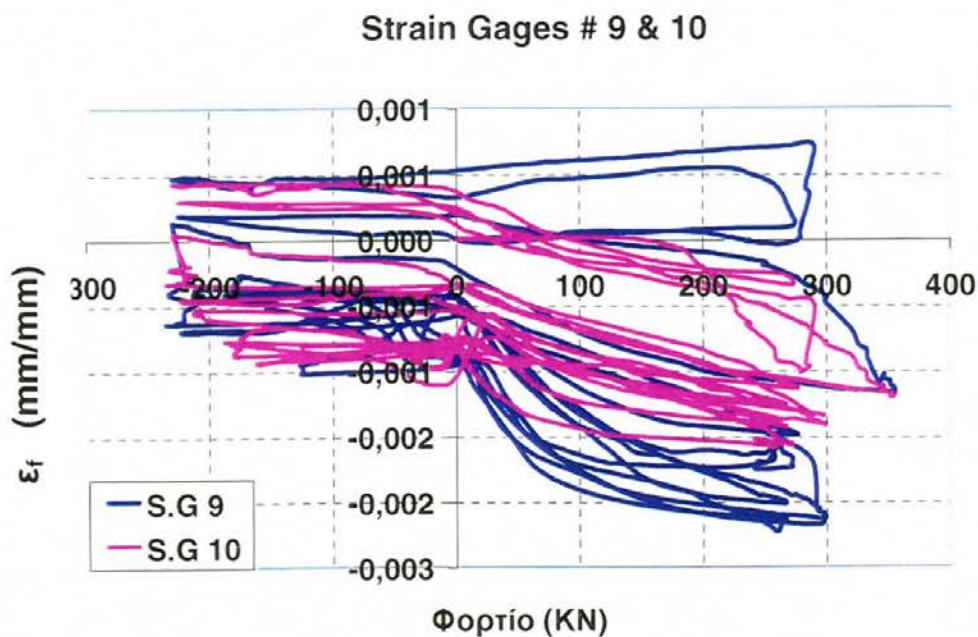
Σχήμα 6.4.6 Γράφημα ενδείξεων ηλεκτρονικών μηχανομετρών #6-8 συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 6.4.7 Γράφημα ενδείξεων ηλεκτρονικών μηχανομετρών # 2-4 συναρτήσει του φορτίου..



Σχήμα 6.4.8 Γράφημα ενδείξεων ηλεκτρονικών μηχανομετρών # 1-3 συναρτήσει του φορτίου (Το #3 αστόχησε στην επαναφόρτιση του 2^{ου} κύκλου).



Σχήμα 6.4.9 Γράφημα ενδείξεων ηλεκτρονικών μηχανοσυστημάτων # 9-10 συναρτήσει του φορτίου.

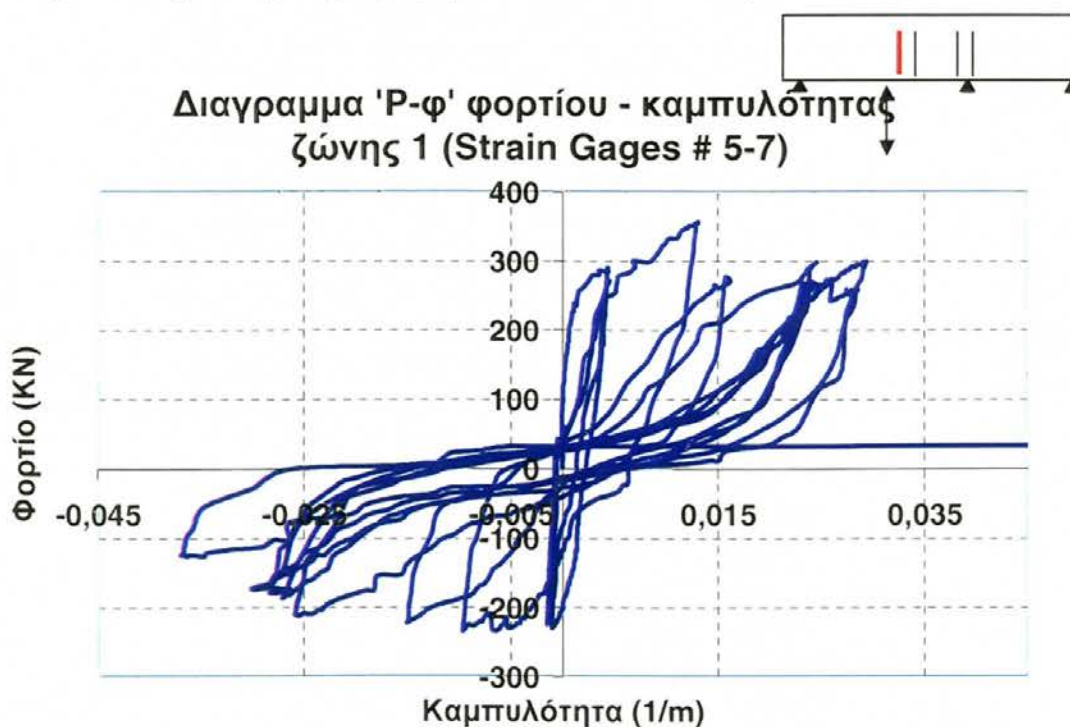
Οι διαμήκεις ανηγμένες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τα SG # 1 έως 8 στα σημεία που τοποθετήθηκαν πάνω στο ΙΝΟΠ ξεπέρασαν τη διαρροή του διαμήκους οπλισμού σε κάθε διατομή, αποδίδοντας στις μέγιστες καταγραφές του Πίνακα 6.4.2. Παρατηρείται ότι το SG # 3 αστόχησε αμέσως μετά τη διαρροή του οπλισμού, στην επαναφόρτιση του 2^{ου} κύκλου, μετά από τη μέγιστη $\delta = 18,1$

Πίνακας 6.4.2 Μέγιστες καταγεγραμμένες ανηγμένες παραμορφώσεις στα ΙΝΟΠ, G60 CYCLIC.

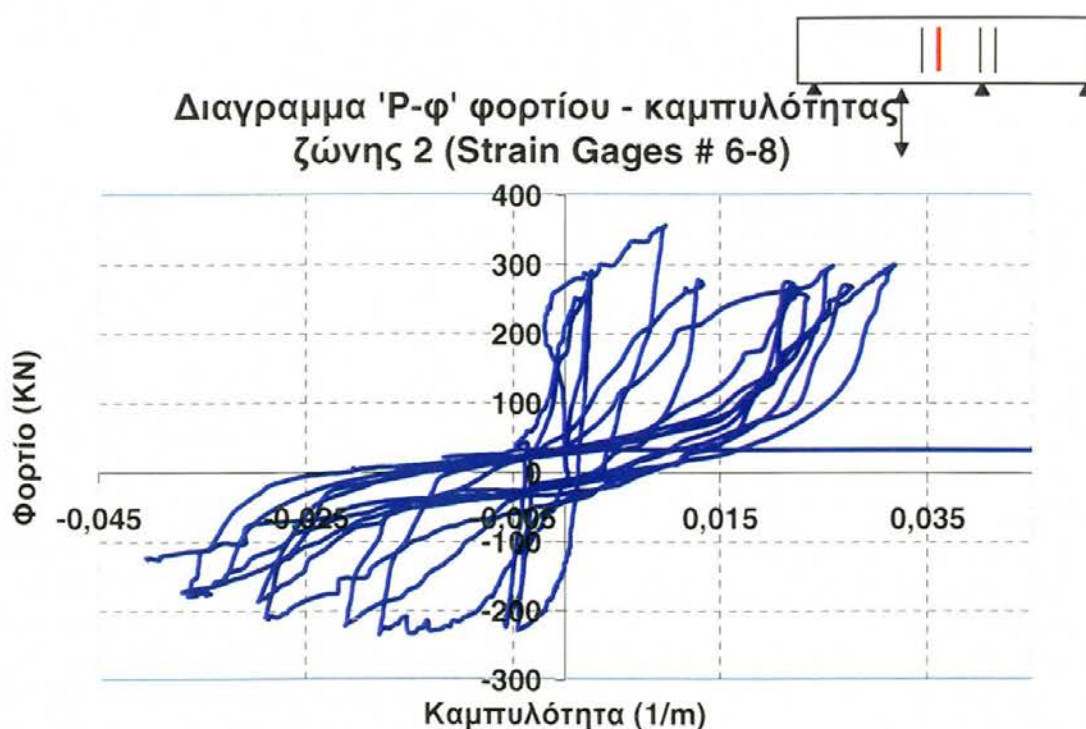
	SG #									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varepsilon_{f \min}$ ‰	-7,56	-12,02	-3,95	-7,23	-10,70	-	-7,11	-9,35	-2,23	-1,58
$\varepsilon_{f \max}$ ‰	0,83	0,89	-	1,94	2,06	0,65	2,21	2,95	0,72	0,44

mm, αφού το SG # 1 διέρρευσε κατά τον 1^ο κύκλο φόρτισης. Ομοίως, το SG # 6 βγήκε εκτός εύρους μετρήσεων. Η τιμή του P που αντιστοιχεί στην πρώτη διαρροή του δοκιμίου, με τη διαρροή του SG # 1 είναι ίση με 183 kN, που αντιστοιχεί σε ροπή $183/2,67 = 68,5$ kNm, τιμή 6% μεγαλύτερη της θεωρητικής πρόβλεψης.

Στην εγκάρσια διεύθυνση, παρατηρείται ότι οι ανηγμένες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν στα σημεία που τοποθετήθηκαν πάνω στο ΙΝΟΠ τα SG # 9 και 10, ξεπερνούν και στα δύο SG τα όρια διαρροής του συμβατικού οπλισμού (όπου και σταθεροποιούνται), ήταν δε μικρότερες σε κάθε περίπτωση από το ανώτατο όριο αστοχίας του εγκάρσιου ΙΝΟΠ. Ενδιαφέρον είναι ότι παρά το γεγονός ότι τα δύο μηκυνσιόμετρα ήταν τοποθετημένα σε γειτονικές περιοχές που απείχαν μόνο 10 cm μεταξύ τους, οι ενδείξεις που κατέγραψαν ήταν πολύ διαφορετικές. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα πρέπει να αποδοθεί στην ανισοτροπία της ολικής συμπεριφοράς του ΙΝΟΠ, που οφείλεται στην



Σχήμα 6.4.10 Γράφημα Φορτίου-Καμπυλότητας ζώνης 1 (SG 5 & 7).



Σχήμα 6.4.11 Γράφημα Φορτίου-Καμπυλότητας ζώνης 2 (SG 6 & 8).

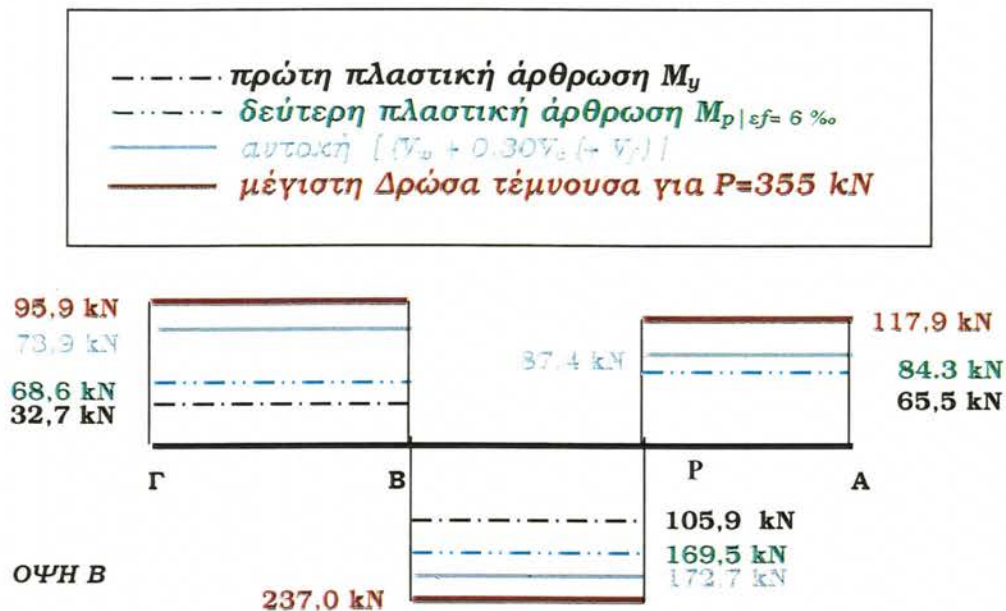
τοπική ύπαρξη ρωγμών στην περιοχή μέτρησης, αφού διαφοροποιεί το πεδίο των τάσεων ακόμα και σε κοντινές επιφάνειες του ΙΝΟΠ. Το πρόβλημα αυτό στο σχεδιασμό λόγω διάτμησης έχει συζητηθεί και από άλλους ερευνητές, δεδομένης και της ψαθυρότητας των ΙΝΟΠ (Stratford and Burgoyne, 2003).

Από τα ζεύγη των βελομέτρων # 5-7 και 6-8 παρήχθησαν τα διαγράμματα 'P-φ' (Φορτίου - Μέσης Καμπυλότητας) για τις διατομές στις οποίες ήταν τοποθετημένα τα ζεύγη αυτά, τα οποία δείχνονται στα Σχήματα 6.4.10 και 6.4.11.

6.4.4 Ανάλυση της διατμητικής αντοχής

Στο δοκίμιο εμφανίστηκαν μικρού εύρους ρωγμές διατμητικού τύπου και απεφεύχθη η ψαθυρή αστοχία. Τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα δίνονται στο Σχήμα 6.4.12 ενώ οι αντίστοιχοι υπολογισμοί υπάρχουν στο Παράρτημα II. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης είχε ληφθεί υπόψη η αντοχή του δοκιμίου

θεωρώντας αναμενόμενη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ ίση με 0.6%, οπότε η ροπή αντοχής ήταν ίση με $M_{p\ 6\%} = 82,7 \text{ kNm}$.



Σχήμα 6.4.12 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής φορέα.

Η φέρουσα ικανότητα του **G60 CYCLIC** ήταν ακριβώς ίδια με αυτήν του **G60 MONO** και επομένως τα διαγράμματα τεμνουσών δράσεων και αντοχής είναι όμοια. Ισχύουν άρα οι ίδιες αναφορές σχετικά με την παρεχόμενη αντοχή όπως για το δοκίμιο **G60 MONO**. Στην περίπτωση αυτού του δοκιμίου, ρωγμές διατμητικής μορφής εμφανίστηκαν τόσο στο τμήμα ΒΡ, όπου η δρώσα τέμνουσα ξεπέρασε κατά 64,3 kN την αναμενόμενη αντοχή², αλλά και στο τμήμα ΡΑ, μεγαλύτερου διατμητικού μήκους, όπου η αντίστοιχη υπέρβαση της αντοχής ήταν 30,5 kN. Η συνεισφορά του ΙΝΟΠ σε διάτμηση αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 8, συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια.

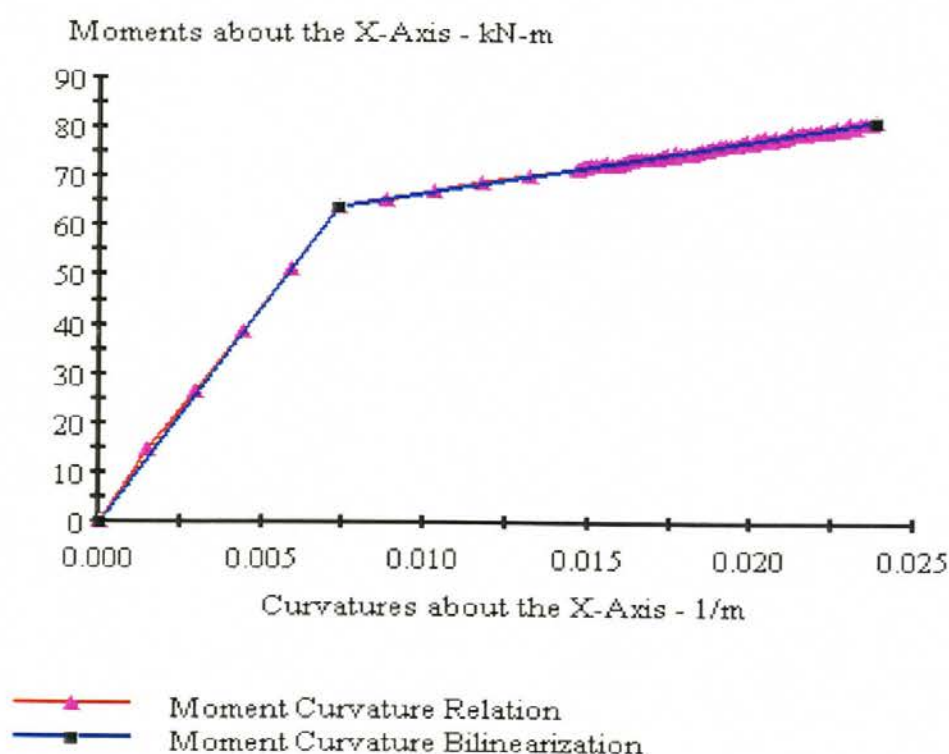
² Σημειώνεται ότι η διατμητική αντοχή υπολογίσθηκε στο σχεδιασμό, θεωρώντας μία μέγιστη παραμόρφωση εγκάρσιου υφάσματος $\epsilon_f = 0.18\%$ ίση με τη διαρροή του συμβατικού συνδετήρα. Μικρότερες διαφορές δρώσας τέμνουσας-θεωρητικής αντοχής προκύπτουν συνεπώς για άλλη θεώρηση της ϵ_f , μεγαλύτερη της παραπάνω συντηρητική τιμής (βλ. και Κεφάλαιο 8).

6.5 ΔΟΚΙΜΙΟ # 5: C1-30 ΜΟΝΟ

6.5.0 Πρόβλεψη της αντοχής των δοκιμίων C1-30

Το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του Σχήματος 6.5.0 για την ενισχυμένη διατομή αναλύθηκε υπό μηδενική αξονική, χρησιμοποιώντας το λογισμικό XTRACT (Chadwell, 2002). Το πρόγραμμα βασίζεται στο προσομοίωμα ινών μίας διατομής. Βάσει της επιπεδότητας των διατομών πριν και μετά την κάμψη, το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν με πλήρη συνάφεια.

Οι παραδοχές και τα αποτελέσματα της ανάλυσης διατομών δίνονται στο Κεφάλαιο 7 και στο Παράρτημα Ι. Για την απευθείας σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, η υπολογισθείσα ροπή αντοχής (M_p) της τυπικής διατομής των δοκιμίων C1-30 ισούται με $M_p|_{\epsilon_f=0,6\%} = 75,1 \text{ kNm}$ και $M_p|_{\epsilon_f=0,8\%} = 80,7 \text{ kNm}$ (ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ $\epsilon_f = 0,6\%$ και $0,8\%$ αντίστοιχα) η δε πρώτη διαρροή προβλέπεται σε ροπή $M_{es=cy} = 59,7 \text{ kNm}$ (Πίνακας 7.1).

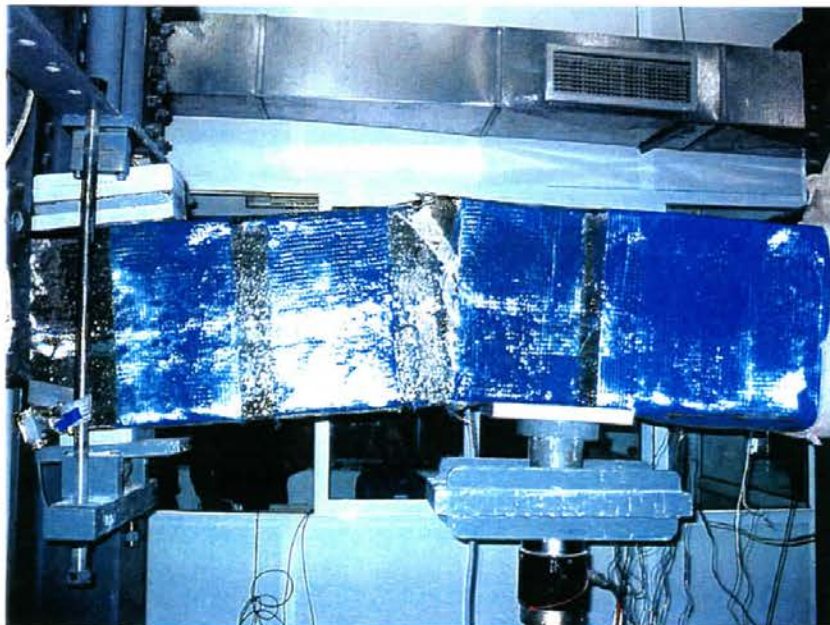


Σχήμα 6.5.0. Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας της κρίσιμης διατομής των δοκιμίων C1-30 ΜΟΝΟ και C1-30 CYCLIC.

Το διάγραμμα του Σχήματος 6.5.0 τερματίζει στην καμπυλότητα αστοχίας του ΙΝΟΠ για ανηγμένη παραμόρφωση του C1-30 ίση με $\varepsilon_f = 0,8\%$. Το ισοδύναμο διγραμμικό διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας ($M-\varphi$) του Σχήματος, βασίζεται στην ισότητα των εμβαδών πάνω και κάτω από το διάγραμμα που προέκυψε από τη βήμα προς βήμα ανελαστική ανάλυση της διατομής και χρησιμοποιείται στην αριθμητική ανάλυση του δοκιμίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στο Κεφάλαιο 7.

6.5.1 Περιγραφή του πειράματος

Το δοκίμιο C1-30 MONO καταπονήθηκε με εγκάρσια επιβαλλόμενη παραμόρφωση προς τα άνω, αυξανόμενη με σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Ως κριτήριο τερματισμού της φόρτισης θεωρήθηκε η επίτευξη ολικής πλαστιμότητας παραμορφώσεων μεγαλύτερη του τέσσερα ή η μείωση της αντοχής του δοκιμίου στο 85% της μέγιστης αντοχής του. Η ύπαρξη του ΙΝΟΠ υάλου G60-AR γύρω από το δοκίμιο δεν επέτρεπε την άμεση παρακολούθηση της δημιουργίας των ρωγμών. Εντούτοις, σύντομα μετά την έναρξη του πειράματος άρχισαν να διαφαίνονται καμπτικές ρωγμές γύρω από το σημείο επιβολής του φορτίου P .



Φωτογραφία 6.5.1 Εμφάνιση διαμπερούς ρωγμής κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου.

Συνεχίζοντας την αύξηση του φορτίου, παρατηρήθηκε διεύρυνση μίας ρωγμής κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου, μέσα στην κρίσιμη ζώνη, στο

τμήμα προς την ακραία αριστερή στήριξη Α, η οποία εξελίχθηκε σταδιακά σε διαμπερή ρωγμή με μικρή κλίση προς την θλιβόμενη ζώνη, όπως δείχνεται στη Φωτογραφία 6.5.1 (λεπτομέρεια στη Φωτογραφία 6.5.3, μετά την αστοχία, για περισσότερη ευκρίνεια).

Η δημιουργία της διαμπερούς καμπτικής αυτής ρωγμής τοποθετείται στο τμήμα αριστερά του φορτίου P , προς την εξωτερική στήριξη και όχι στο μεσαίο τμήμα, που χαρακτηρίζεται από μικρότερο λόγο διάτμησης M/Vd . Είναι χαρακτηριστικό ότι η ρωγμή εμφανίζεται στο πλησιέστερο τμήμα των 10cm που δεν είχε οπλιστεί τοπικά εγκάρσιως από συνδετήρα ΙΝΟΠ, πέρασε δε και κάτω από το εγκάρσιο ΙΝΟΠ προς τη θλιβόμενη ζώνη.



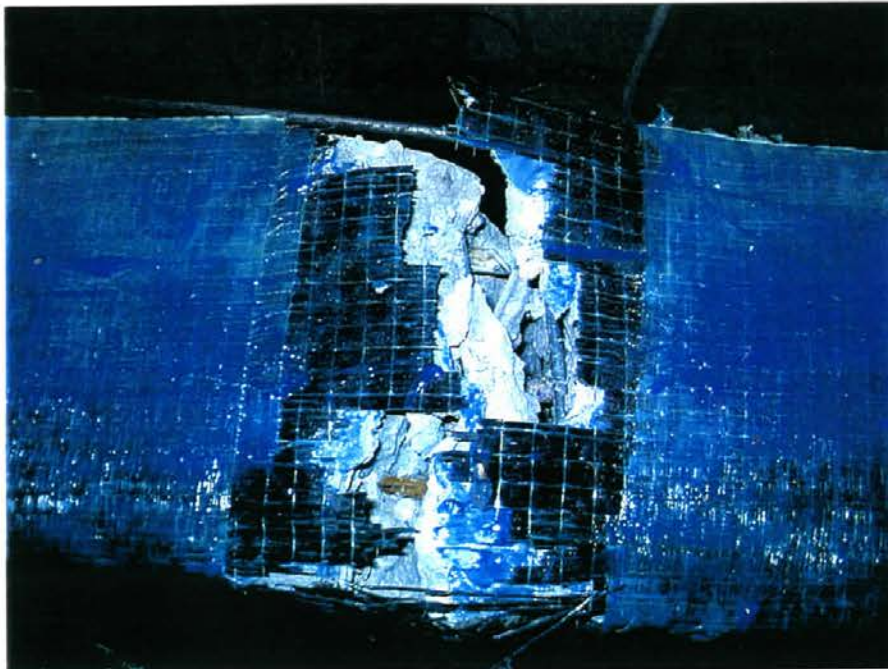
Φωτογραφία 6.5.2
Εμφάνιση ρωγμής στην
μεσαία στήριξη.

Σε φορτίο P περίπου 200kN, εμφανίζονται ρωγμές εκατέρωθεν πλέον της μεσαίας στήριξης που επέβαλαν εγκάρσιο εφελκυσμό στο ΙΝΟΠ, το οποίο ως εκ τούτου άρχισε να σκίζεται σε αυτή τη διεύθυνση λόγω του ότι είναι άοπλο, όπως δείχνεται στη Φωτογραφία 6.6.2. Η ύπαρξη αυτής της αστοχίας υποδήλωνε εφελκυστική διαρροή του οπλισμού άρα σχηματισμού και της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης κάτω από τη στήριξη Β, ενώ συσχετίζεται με

μια εμφανή μείωση στην ολική δυσκαμψία του δοκιμίου που καταγράφηκε στο χρονικό αυτό σημείο.



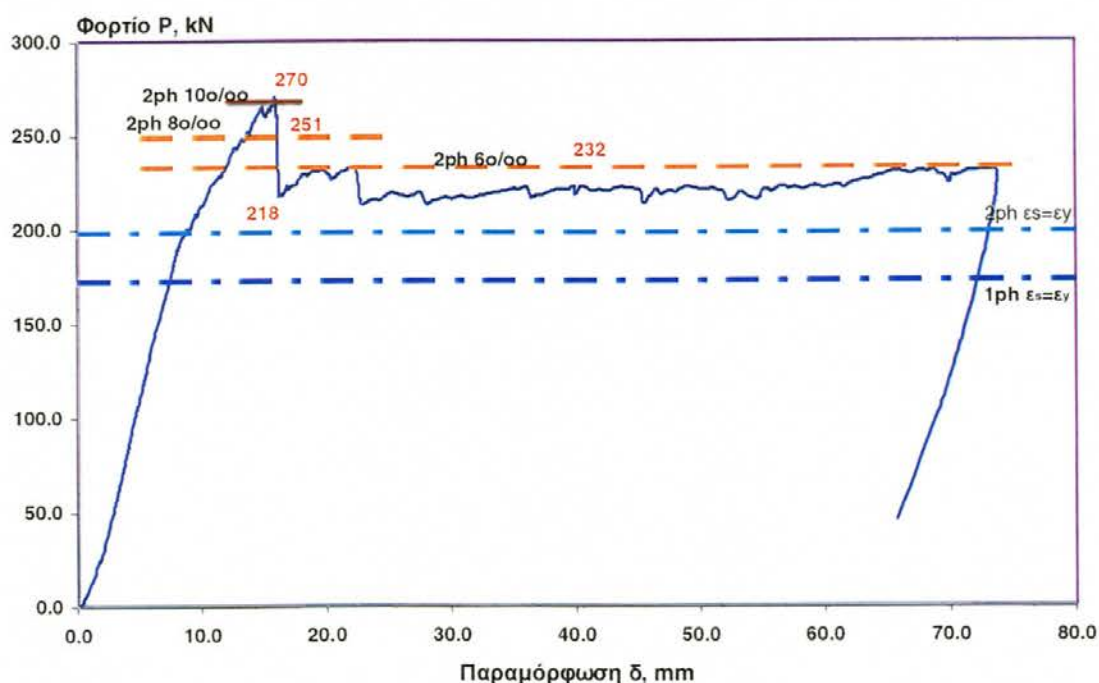
Φωτογραφία 6.5.3 Αστοχία ΙΝΟΠ ινών άνθρακα του δοκιμίου **C1-30 MONO** και τελική μορφή της διαμπερούς ρωγμής. Ο συνδετήρας δεν έχει κοπεί αλλά έχει ανοίξει.



Φωτογραφία 6.5.4 Κάτοψη δοκιμίου **C1-30 MONO** στο σημείο αστοχίας του ΙΝΟΠ από άνθρακα.

Η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου συνέχισε να αυξάνεται πέραν από την τιμή αυτή, μέχρι που το διαμήκες ΙΝΟΠ από άνθρακα αστόχησε ψαθυρά σε εφελκυστική διάρρηξη, χωρίς καμία προηγούμενη προειδοποίηση μεγάλης παραμόρφωσης. Η αστοχία του ΙΝΟΠ έγινε σε φορτίο **270,2 kN** και είχε τη μορφή που φαίνεται στις Φωτογραφίες 6.5.3 και 6.5.4 (Σχήμα 6.5.1). Η αστοχία του ΙΝΟΠ ήταν ακαριαία, απόλυτα ψαθυρή και περίπου εκρηκτικής μορφής.

Αν και η εγκάρσια παραμόρφωση συνέχισε να αυξάνεται, παρόμοια αστοχία σε διάρρηξη, στην εσωτερική στήριξη δεν παρατηρήθηκε, υπήρξε όμως απώλεια πρόσφυσης ΙΝΟΠ σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η μορφή της αστοχίας στο σημείο κάτω από το φορτίο δεν επέτρεψε την πλήρη ανακατανομή του φορτίου στην εσωτερική στήριξη, ώστε να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της αντοχής του ΙΝΟΠ και στις δύο αρθρώσεις. Κατόπιν αυτού, το δοκίμιο συνέχισε να παραμορφώνεται με ολοένα μεγαλύτερο άνοιγμα των υπάρχουσών ρωγμών του στις δύο αρθρώσεις, διατηρώντας μία σταθερή παραμένουσα αντοχή περίπου **220 kN**.



Σχήμα 6.5.1 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, δοκίμιο C1-30 MONO.

Η καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του εμβόλου (διάγραμμα 'P-δ') δείχνεται στο Σχήμα 6.5.1. Στο διάγραμμα σημειώνονται και οι τιμές του φορτίου P στις οποίες αναμένεται ο σχηματισμός της πρώτης και της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης σύμφωνα με το θεωρητικό προσομοίωμα της ελαστοπλαστικής συνεχούς δοκού, για δύο οριακές τιμές καμπτικής αντοχής M_p : θεωρώντας $\varepsilon_f = 0.6 \%$ και 0.8% μέγιστη παραμόρφωση του διαμήκους ΙΝΟΠ, όπου οι παραπάνω τιμές υπολογίζονται βάσει επιπεδότητας των διατομών με τα πειραματικά μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και τις ονομαστικές τιμές των ΙΝΟΠ (Πίνακας 7.1). Σημειώνεται, για λόγους σύγκρισης ότι η οριακή αντοχή του μη ενισχυμένου δοκιμίου **NEAK MONO**, έφτασε τα 225 kN.

Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου που επετεύχθη κατά το πείραμα ήταν **270,2** kN, τιμή κατά 120% υψηλότερη από την πειραματική οριακή αντοχή του δοκιμίου **NEAK MONO** που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.1. Η μέγιστη παραμόρφωση στην οποία υπεβλήθη το δοκίμιο, έως το τέλος του πειράματος, έφτασε τα **73,8** mm. Λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς του το δοκίμιο πέφτει στιγμιαία (σε $\Delta\delta = 0,3$ mm) χάνει 52 kN σε παραμόρφωση **16,4** mm, ποσοστό που αντιστοιχεί σε 19% της μέγιστης αντοχής του. Πέραν αυτού του σημείου, μετά από μια μικρή αύξηση στα **233** kN σε παραμόρφωση **22,4** mm λόγω μερικής ανακατανομής στη μεσαία στήριξη, το δοκίμιο διατηρεί μια σταθερή προς απομειούμενη αντοχή. Αγνοώντας την πρώτη ψαθυρή απομείωση της αντοχής, σε αυτό το σημείο ($\delta_u = 22,4$ mm) θεωρείται ότι ικανοποιείται το κριτήριο υπέρβασης προς τα κάτω της παραμένουσας αντοχής σε ποσοστό 85% της P_{max} (= 229,5 kN).

Η προβλεπόμενη αντοχή σε πρώτη διαρροή του εφελκυόμενου χάλυβα θεωρώντας μέσες τιμές των υλικών) τοποθετείται (βάσει των μηχανικών χαρακτηριστικών του Πίνακα 7.1) σε φορτίο ίσο με $2,67 \cdot 59,7 \text{ kNm} = 159,3 \text{ kN}$. Λόγω της σχετικά μεγάλης δυσκαμψίας του **C1-30 MONO**, στο διάγραμμα του Σχήματος 6.5.1 δεν είναι εμφανής κάποια τροποποίηση στην καταγραφή που να συνηγορεί για διαρροή του χάλυβα σε αυτό το φορτίο. Με βάση όμως

τις καταγραφές των μηκυνσιομέτρων επάνω στη δοκό, που παραθέτονται παρακάτω, παρατηρείται μια εμφανής αλλαγή στην σχέση επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και ανηγμένης παραμόρφωσης στο P σε φορτίο 165,8 kN και παραμόρφωσης 7,2 mm, που θεωρείται το σημείο διαρροής του οπλισμού (σε %4 μεγαλύτερο από την πρόβλεψη). Ως εκ τούτου, το δοκίμιο απέδωσε υπεραντοχή ίση με 163% μεγαλύτερη της αντοχής του σε πρώτη διαρροή και μια πλαστιμότητα μετατοπίσεων ίση μεταξύ 2,30 και 3,10 ως προς την πρώτη διαρροή, ανάλογα με το πού τοποθετείται η αστοχία του κριτηρίου αντοχής.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος (Σχήμα 6.5.1) προκύπτει επίσης ότι η προβλεπόμενη τιμή φορτίου για τη δημιουργία της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης βάσει της παραπάνω M_y ($=3,07 \cdot 59,7 \text{ kNm} = 183,3 \text{ kN}$) προσεγγίζει σε ακρίβεια 8% το σημείο αλλαγής της ολικής δυσκαμψίας του δοκιμίου στα 198,1 kN (παραμόρφωση 8,7 mm), γεγονός που συνηγορεί για την αξιοπιστία της παραπάνω πρόβλεψης λαμβάνοντας υπόψη και τις κρατύνσεις.

Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα από την πειραματική καταγραφή (διάγραμμα $P-\delta$) υπερβαίνει το προβλεπόμενο φορτίο που αντιστοιχεί στη δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων με μέση αντοχή ίση με την καμπτική αντοχή σε παραμόρφωση του ΙΝΟΠ $\varepsilon_f = 6$ και 8‰ ($3,07 \cdot 75,1 \text{ kNm} = 230,6 \text{ kN}$ και 247,7 kN αντίστοιχα), κατά 17% και 9% αντίστοιχα. Θεωρώντας το παραπάνω στατικό προσομοίωμα η P_{max} , αντιστοιχεί σε μέση καμπτική αντοχή στις δύο αρθρώσεις, ίση με 88,0 kNm, που ισοδυναμεί κατά τα δεδομένα της προηγούμενης ανάλυσης σε συμμετοχή του ΙΝΟΠ C1-30 ίση με $\varepsilon_f = 10$ ‰ ακριβώς, πριν την αστοχία¹.

6.5.2 Περιγραφή των βλαβών και τρόπος αστοχίας

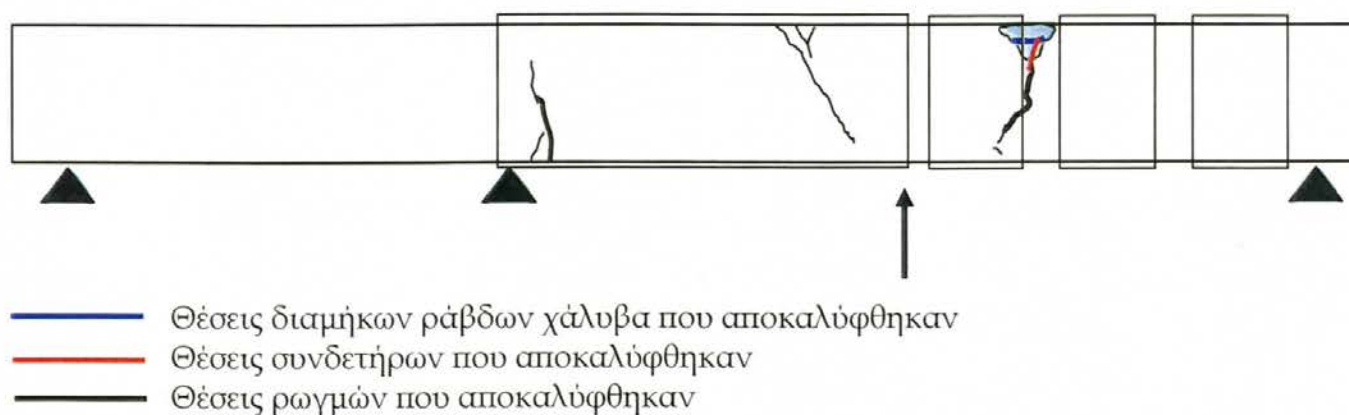
Ακολουθούν χαρακτηριστικές φωτογραφίες που είναι ενδεικτικές της τελικής ρηγματώσης του δοκιμίου καθώς και το σκαρίφημα της Β όψης, που αποτυπώνει τη τελική κατάσταση όπως προέκυψε μετά την αφαίρεση των

¹ Η τιμή αυτή θεωρείται σαν μέση τιμή λόγω των περιορισμών του στατικού ελαστοπλαστικού προσομοιώματος, και αποδίδει περισσότερο την ικανοτική διάτμηση που παραλαμβάνεται κατά την καμπτική αστοχία, που είναι και το ζητούμενο. Θεωρείται δεδομένο, βάσει της μικρής ανακατανομής που παρατηρήθηκε, ότι η απαίτηση στο σημείο P ήταν πολύ μεγαλύτερη.

ΙΝΟΠ με χρήση τροχού και κρουστικών μέσων, έπειτα από την απομάκρυνση του δοκιμίου από τη πειραματική διάταξη (Σχήμα 6.5.2 και Φωτογραφίες 6.5.5 έως 6.5.8).

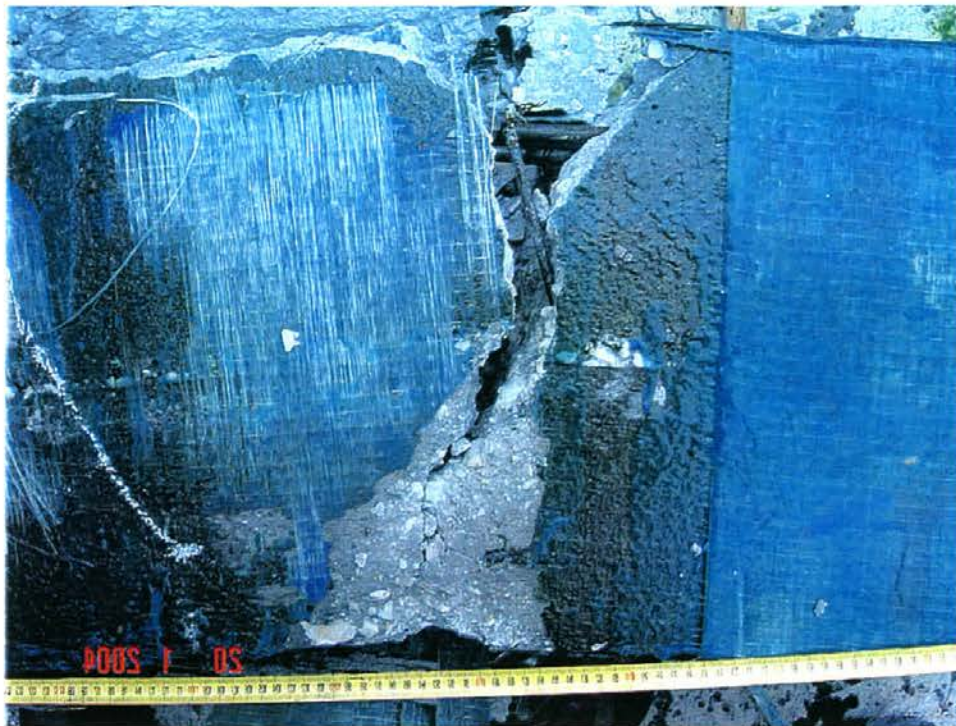
Μετά την αφαίρεση των ΙΝΟΠ, πέραν από τις ήδη προαναφερθείσες καμπτικές ρωγμές στις αρθρώσεις παρατηρήθηκε και μια επί πλέον διατμητική ρωγμή, στο μεσαίο τμήμα του δοκιμίου, κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου P , εντός της κρίσιμης ζώνης και προς την εσωτερική στήριξη. Η ρωγμή αυτή είχε κλίση μεγαλύτερη των 45° και ήταν μικρού εύρους σε σχέση με τις άλλες, ενώ δεν χαρακτηριζόταν ούτε από αποδιοργάνωση του σκυροδέματος τοπικά στη ρωγμή ούτε και από κάποια αστοχία της πρόσφυσης του ΙΝΟΠ με την υπόβαση από σκυρόδεμα (Φωτογραφία 6.5.6) εκατέρωθεν της ρωγμής, κάτι που ήταν σύνηθες σε αυτό το δοκίμιο, στα σημεία P και B , καθώς και σε όλα τα άλλα δοκίμια, σε μεγάλες διατμητικές καταπονήσεις.

Β Ο Ψ Η

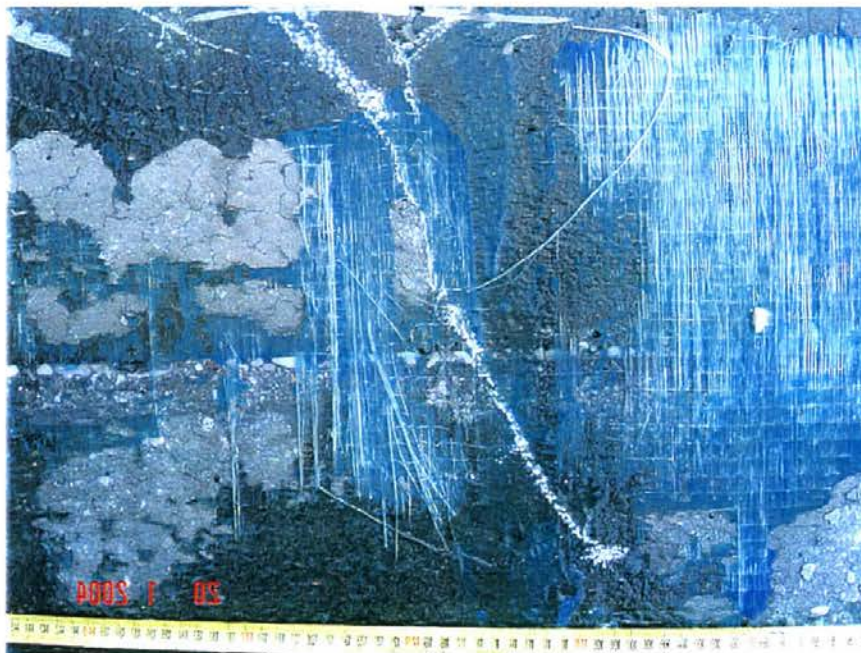


Σχήμα 6.5.2 Σκαρίφημα της τελικής κατανομής των ρωγμών σε σχέση με τους συνδετήρες ΙΝΟΠ, στο δοκίμιο **C1-30 MONO**, Όψη Β, μετά την αστοχία.

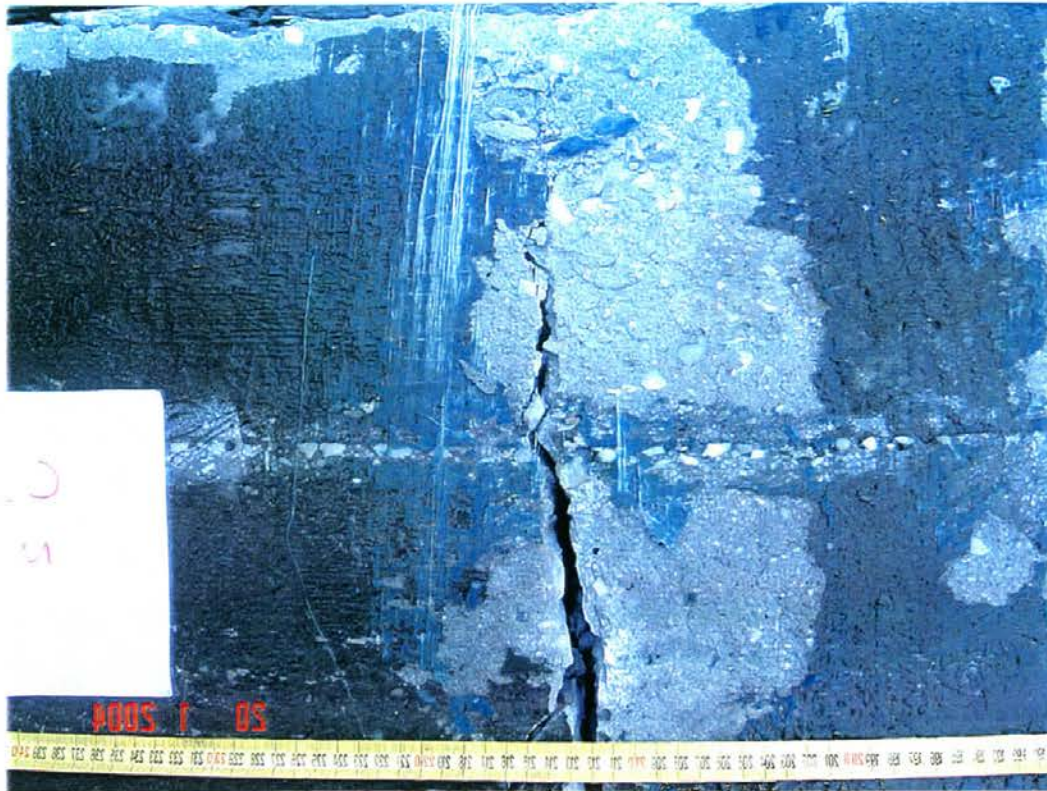
Είναι πιθανόν η διεύρυνση αυτής της ρωγμής να έμεινε σε σταθερά επίπεδα λόγω του περιορισμού της διατμητικής απαίτησης στο μεσαίο τμήμα, μετά από την αστοχία του ΙΝΟΠ και την απότομη πτώση της αντοχής.



Φωτογραφία 6.5.5 Λεπτομέρεια κοντά στη θέση φόρτισης P προς την εξωτερική στήριξη, Όψη Β: Παρατηρείται μεγάλου εύρους διαμπερής καμποδοδιατμητική ρωγμή και αστοχία της διεπιφάνειας στη θλιβόμενη παρειά (κάτω) λόγω της ρωγμής.



Φωτογραφία 6.5.6 Λεπτομέρεια κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου, προς την εσωτερική στήριξη, Όψη Β: Παρατηρείται μικρού εύρους διατμητική ρωγμή με κλίση μεγαλύτερη των 45° .



Φωτογραφία 6.5.7 Λεπτομέρεια στη στήριξη Β, Όψη Β: Παρατηρείται μεγάλου εύρους κατακόρυφη καμπτική ρωγμή, με αστοχία του διαμήκους ΙΝΟΠ κάτω και αποκόλληση του εγκάρσιου ΙΝΟΠ προς τη μεριά του φορτίου.

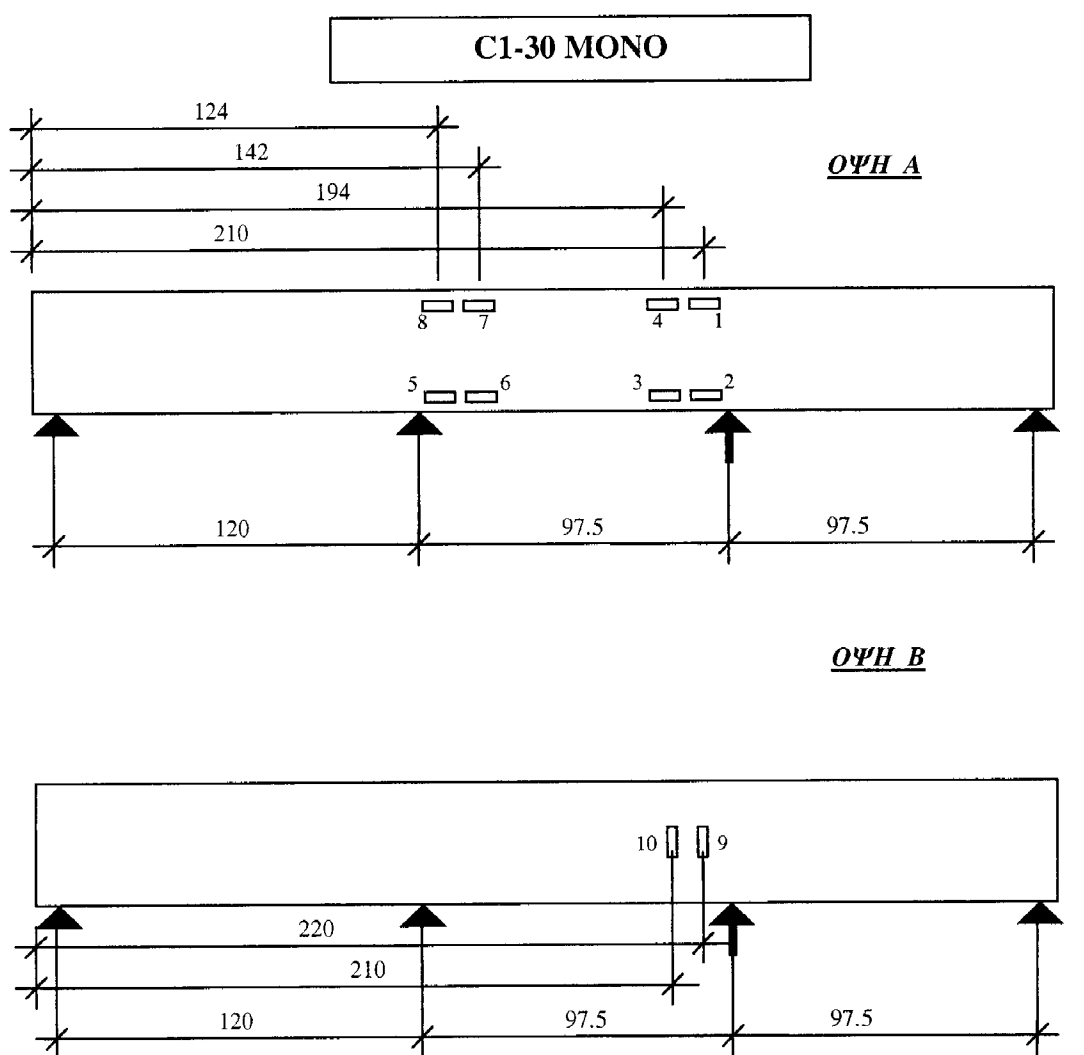


Φωτογραφία 6.5.8 Κάτοψη - λεπτομέρεια επάνω από το σημείο φόρτισης P , όπου διακρίνεται αστοχία του ΙΝΟΠ και η συνεπακόλουθο άνοιγμα του συμβατικού συνδετήρα.

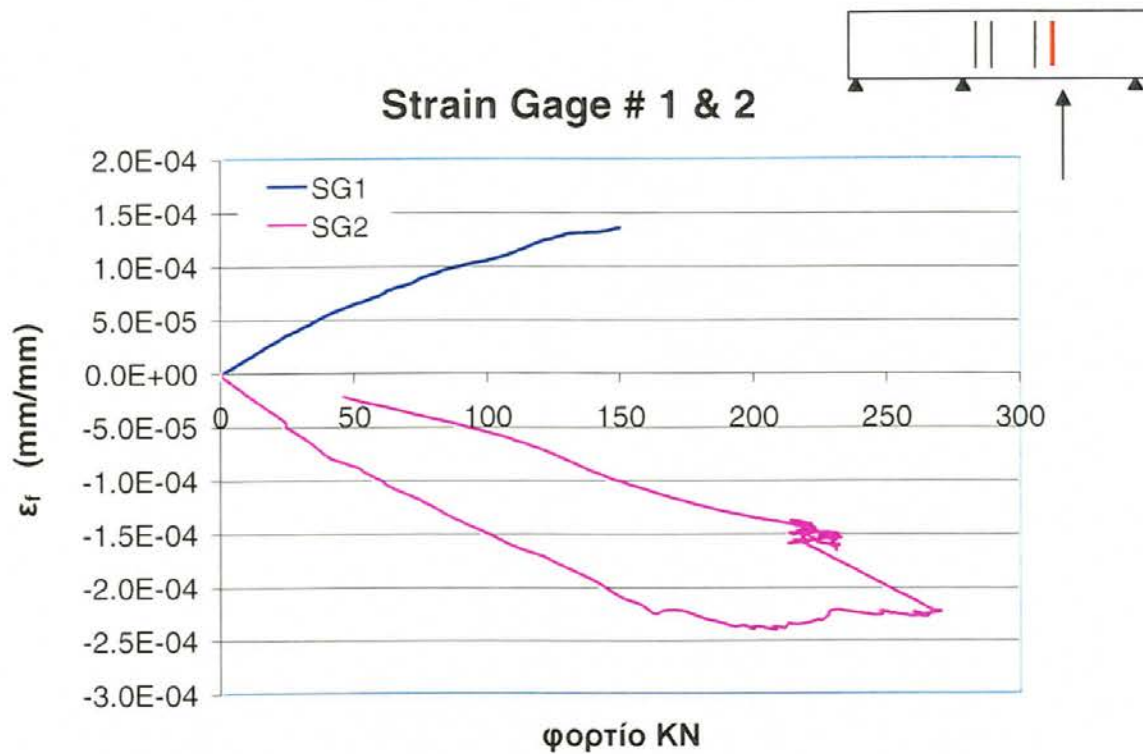
6.5.3 Ανάλυση των καταγραφών SG

Η διαδικασία ενοργάνωσης των δοκιμών περιγράφηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Η τελική θέση των καταγραφικών ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων (SG) και η αρίθμηση τους για το δοκίμιο **C1-30 MONO** δίδεται στο Σχήμα 6.5.3.

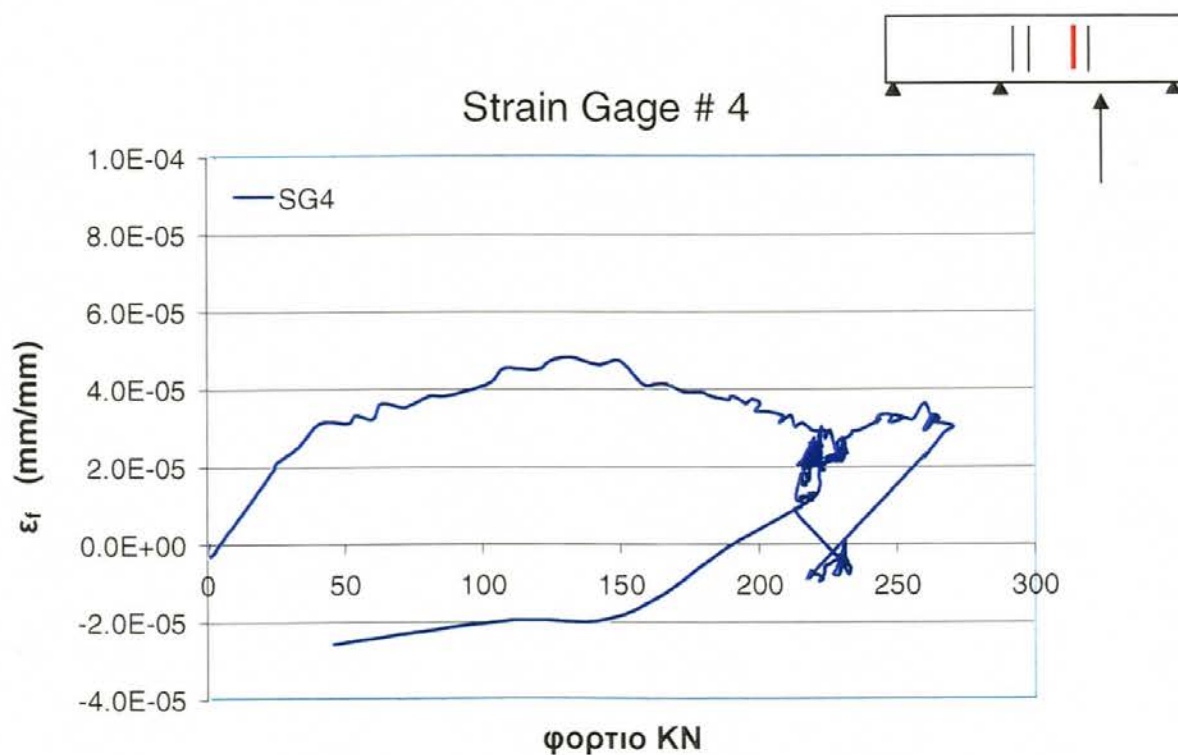
Οι αντίστοιχες καταγραφές των SG, δίδονται στα επόμενα Σχήματα 6.5.4 έως 6.5.8, συγκρινόμενες ανά δύο στην ίδια διατομή, συναρτήσει του φορτίου P . Για ευκολότερη παρακολούθηση της απόκρισης, στα σκαριφήματα δείχνεται ενδεικτικά η θέση του ζεύγους των SG, ως προς το σημείο φόρτισης και τις στηρίξεις. Σημειώνεται ότι το μηχανοσύστημα # 3 δεν λειτουργήσε.



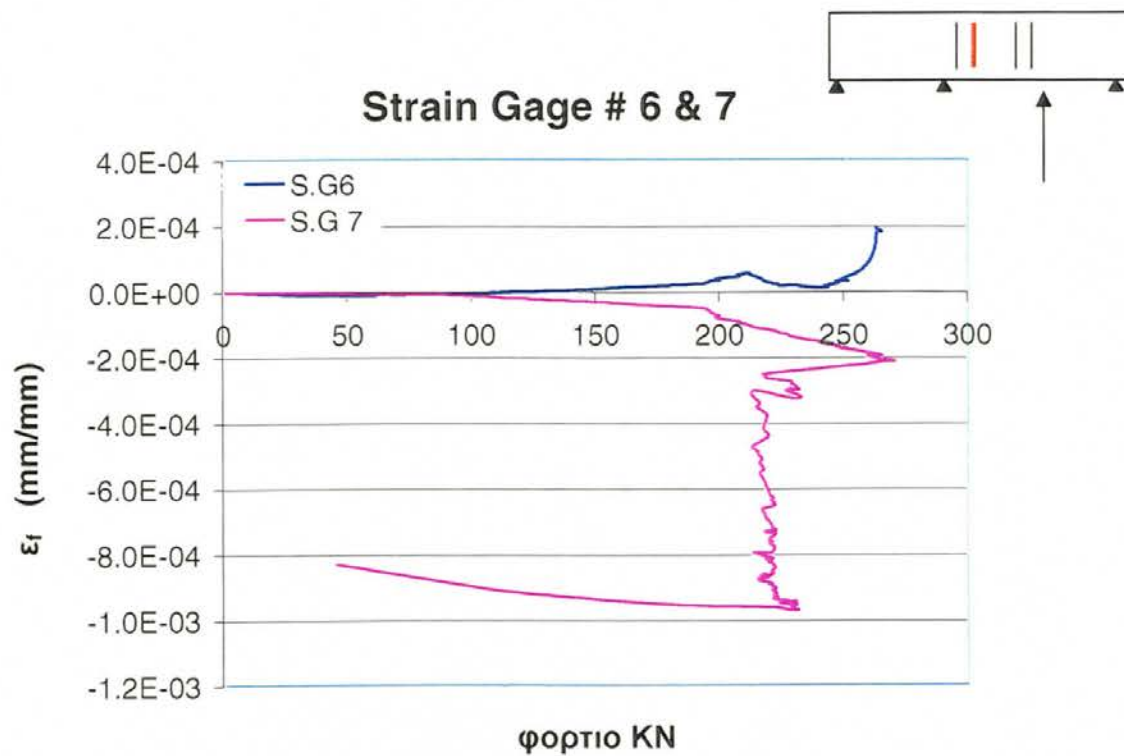
Σχήμα 6.5.3 Θέση και αρίθμηση των καταγραφών SG, δοκίμιο **C1-30 MONO**.



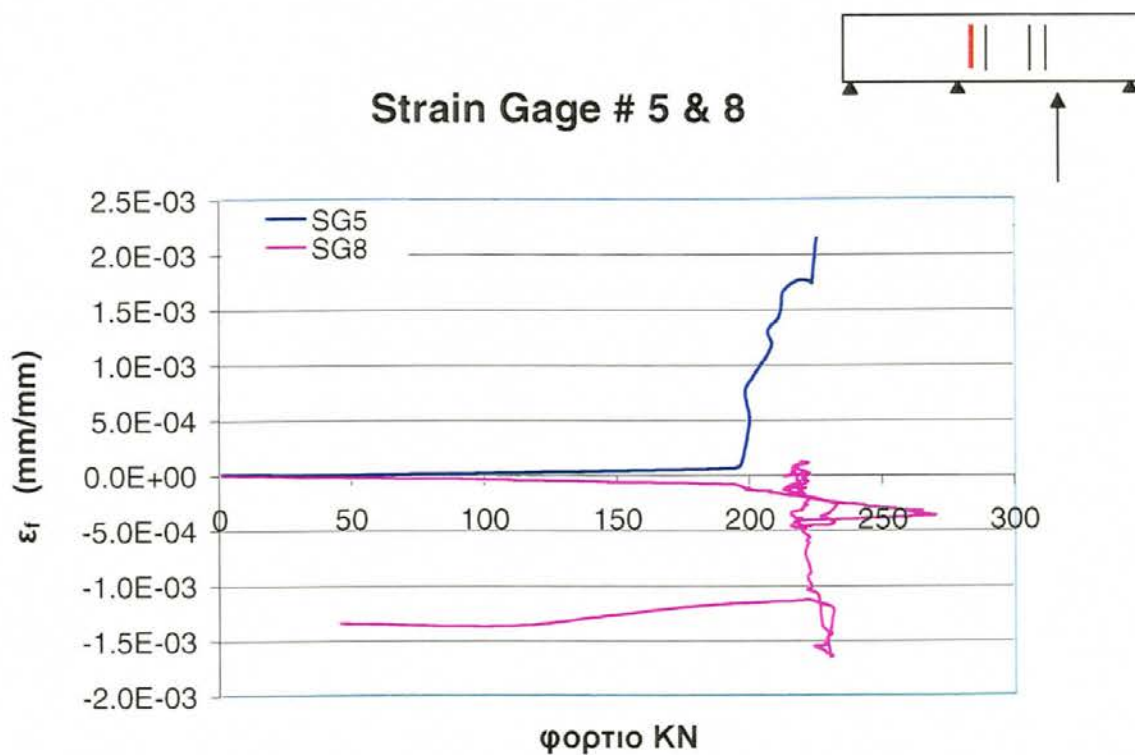
Σχήμα 6.5.4 Γράφημα των καταγραφών SG # 1 & 2 (Ζώνη 1).



Σχήμα 6.5.5 Γράφημα των καταγραφών SG # 4
(Το # 3 δεν λειτουργήσε) (Ζώνη 2).

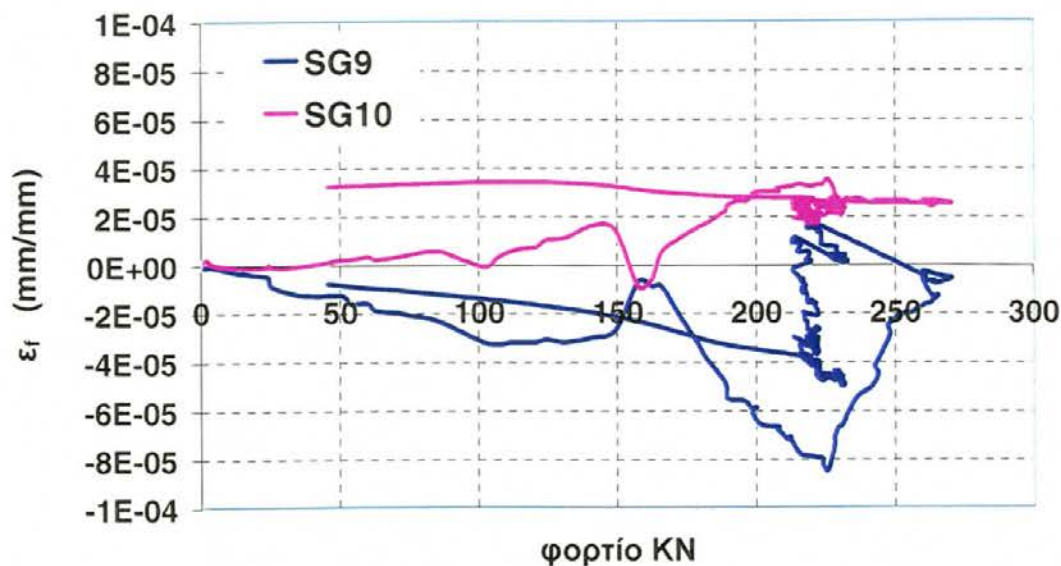


Σχήμα 6.5.6 Γράφημα των καταγραφών SG # 6 & 7 (Ζώνη 3).



Σχήμα 6.5.7 Γράφημα των καταγραφών SG # 5 & 8 (Ζώνη 4).

Strain Gage νήματος #9 &10



Σχήμα 6.5.8 Γράφημα των καταγραφών SG #9 & 10 που βρίσκονται πάνω στην τελική επιφάνεια του εγκάρσιου ΙΝΟΠ.

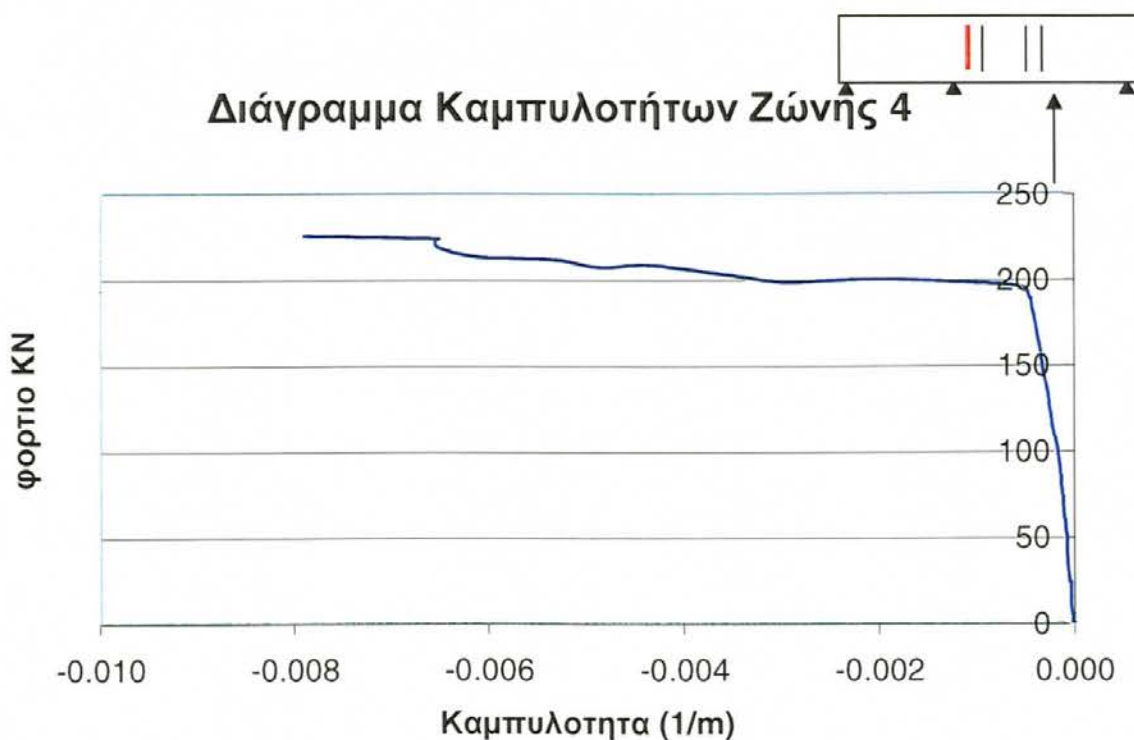
Τα καταγραφικά SG τοποθετήθηκαν απευθείας επάνω στο σκυρόδεμα (εκτός από τα #9 και 10), ως εκ τούτου οι δυνατότητες καταγραφής τους είναι πλέον ευαίσθητες στη θέση του SG ως προς τη ρηγμάτωση της δοκού.

Από τις καταγραφές παρατηρείται ότι τα SG #1 & 2 ξεκινούν από την αρχή της φόρτισης να παρουσιάζουν αύξηση της καταγραφής τους. Όμως, πιθανό πέρασμα της ρωγμής μέσα από το SG #1, το οποίο βρισκόταν στην εφελκυσμένη ζώνη, είχε ως αποτέλεσμα την αδυναμία καταγραφής μετρήσεων για τιμές επιβαλλόμενης φόρτισης πέραν των 148 kN, πολύ νωρίς στο πείραμα. Το γεγονός ότι το αντίρροπο SG #2, στη θλιβόμενη παρειά, το οποίο συνεχίζει να καταγράφει, αλλάζει ρυθμό καταγραφής στα 165,8 kN, συνηγορεί στην άποψη ότι σε αυτό το επίπεδο φόρτισης γίνεται η πρώτη πλαστική άρθρωση του δοκιμίου, λόγω διαρροής του εφελκυσμένου χάλυβα στη θέση SG #1. Έκτοτε, το SG #2 σταθεροποιεί τη μέτρησή του στη μέγιστη τιμή μέχρι το σημείο αστοχίας του ΙΝΟΠ στα 270 kN, οπότε και αποφορτίζεται.

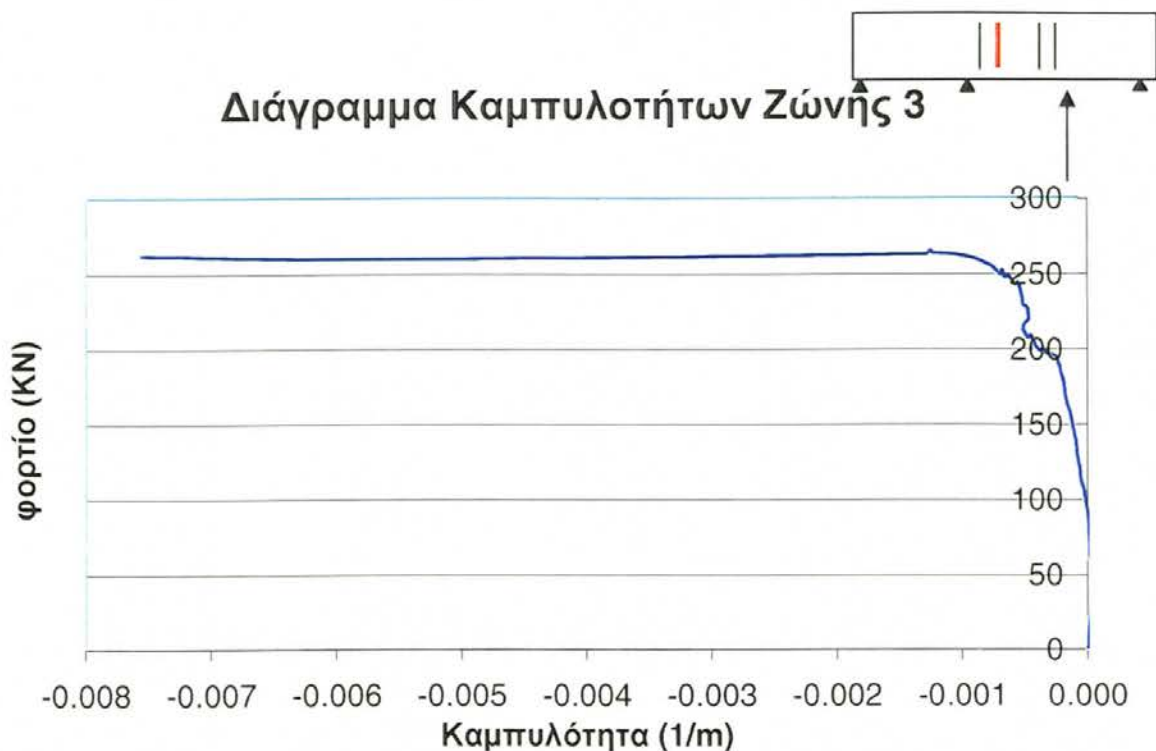
Δεν λειτούργησε καθόλου το SG #3 που βρισκόταν στην εφελκυσμένη περιοχή της ζώνης 2. Αντιθέτως, τα υπόλοιπα SG της ζώνης 3 και 4

καταγράφουν μία απότομη αύξηση της ανηγμένης παραμόρφωσης όταν το φορτίο φθάνει τα 196,6 kN, κάτι που αναμενόταν και από την ανάλυση του θεωρητικού προσομοιώματος μιας και σε εκείνο το σημείο δημιουργήθηκε η δεύτερη πλαστική άρθρωση.

Τέλος, οι ανηγμένες παραμορφώσεις, που καταγράφηκαν στα σημεία που τοποθετήθηκαν πάνω στο ΙΝΟΠ τα SGs # 9 και 10, επάνω στο εγκάρσιο ΙΝΟΠ υάλου, ήταν πολύ μικρότερες από το ανώτατο όριο παραμόρφωσης του ΙΝΟΠ (1,90‰) που θεωρήθηκε συμβατικά για τον υπολογισμό της διατμητικής ενίσχυσης. Παρατηρείται ότι παρόλο που τα δύο μηχανοσκόπια ήταν τοποθετημένα σε γειτονικές περιοχές που απείχαν μόνο 10 cm μεταξύ τους οι ενδείξεις που κατέγραψαν ήταν κατά πολύ διαφορετικές. Αυτό εξηγείται πιθανότατα από την ανισοτροπία του υφάσματος το οποίο παραμορφώνεται διαφορετικά ανάλογα με τη διεύθυνση των εφαρμοζόμενων τάσεων. Έτσι, μπορεί να υποθεθεί ότι η τυχόν παρουσία ρωγμών κάτω από το ΙΝΟΠ, μπορεί να είναι υπεύθυνη για τις διαφορές στις καταγραφές των δύο strain gages αφού διαφοροποιεί το πεδίο των τάσεων ακόμα και σε κοντινές επιφάνειες του υφάσματος.



Σχήμα 6.5.9 Διάγραμμα φορτίου-καμπυλότητας ζώνης 4.

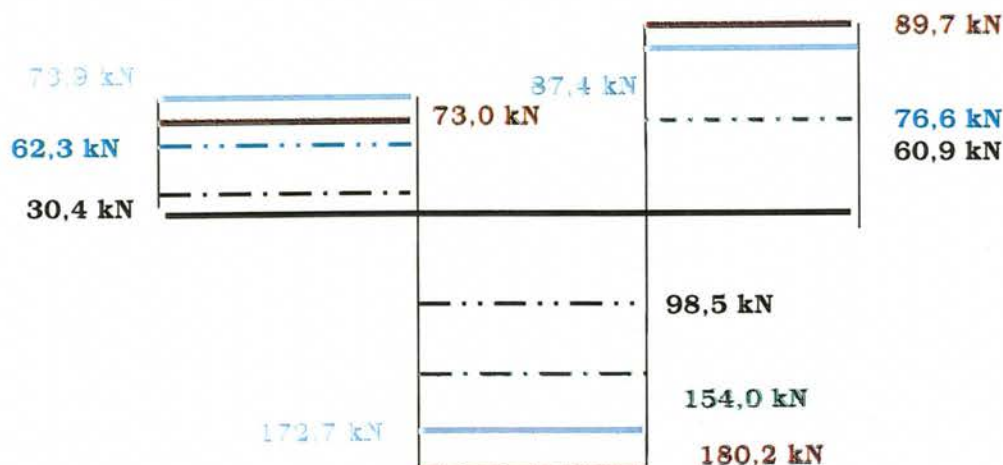
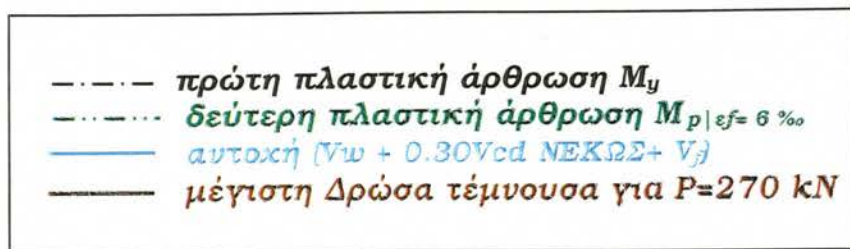


Σχήμα 6.5.10 Διάγραμμα φορτίου-καμπυλότητας ζώνης 3.

Από τα ζεύγη των SG της ζώνης 3 και 4 εξήχθησαν τα παρακάτω διαγράμματα φορτίου-καμπυλότητας 'P-φ' που δείχνονται στα Σχήματα 6.5.9 και 6.5.10. Και από τα δύο γραφήματα διαφαίνεται ο σχηματισμός της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης με την σταθεροποίηση της απόκρισης, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 'P-δ' κοντά στην τιμή των 196 kN εκεί που σχηματίστηκε η δεύτερη πλαστική άρθρωση στη ζώνη 4.

6.5.4 Ανάλυση της διατμητικής αντοχής

Στο δοκίμιο εμφανίστηκε μία μικρού εύρους διαγώνια ρωγμή διατμητικού τύπου, στο τμήμα δεξιά του P προς την εσωτερική στήριξη, κοντά στο σημείο καμψής. Τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα δίνονται στο Σχήμα 6.5.11 ενώ οι αντίστοιχοι υπολογισμοί δίδονται στο Παράρτημα II. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης είχε ληφθεί υπόψη η αντοχή του δοκιμίου θεωρώντας μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του διαμήκους ΙΝΟΠ G60-AR ίση με 0.6% , οπότε η ροπή αντοχής ήταν ίση με $M_{p|sf=0,6\%} = 75,1 \text{ kNm}$.



Σχήμα 6.5.11 Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων και θεωρητικής αντοχής του φορέα για ανοιγμένη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ C1-30 ίση με 6‰.

Η αντοχή² σχεδιασμού σε τέμνουσα του δοκιμίου βασίζεται στην αθροιστική συμβολή των αντοχών του κλωβού, των πρόσθετων μηχανισμών αντίστασης του σκυροδέματος (V_c) σε ποσοστό 30% και της προσφορά του εγκάρσιου ΙΝΟΠ, λειτουργώντας σε παραμόρφωση ίση με τη διαρροή του συμβατικού εγκάρσιου χάλυβα, 1,8‰. Όπως φαίνεται και στις κατανομές εσωτερικής τέμνουσας, στην περίπτωση του C1-30 ΜΟΝΟ η δρώσα τέμνουσα στην αστοχία του διαμήκους ΙΝΟΠ ξεπέρασε την αντοχή σχεδιασμού στα δύο τμήματα της δοκού εκατέρωθεν του P, σε ποσοστό 2- 4%. Εν τούτοις, παρά το συντηρητισμό στον υπολογισμό της αντοχής, δημιουργήθηκε διατμητική ρηγμάτωση στο μεσαίο τμήμα, που, όπως αναφέρθηκε, δεν επεκτάθηκε λόγω αστοχίας του διαμήκους ΙΝΟΠ και περιορισμού της μέγιστης αντοχής.

² Σημειώνεται ότι η διατμητική αντοχή προέκυψε για μέγιστη παραμόρφωση υφάσματος $\varepsilon_f = 0.18\%$, θεώρηση αρκετά συντηρητική αφού ο προμηθευτής δίνει $\varepsilon_f = 0.50\%$ ενώ αρκετά σύνηθες διεθνώς είναι να θεωρείται $\varepsilon_f = 0.30\%$ (βλέπε και Triantafyllou, 1998, ACI 440-2R.02, 2002). Οι διαφορές δρώσας τέμνουσας-θεωρητικής αντοχής, όπως μετρήθηκαν, και η παρεχόμενη ε_f αναλύονται στο Κεφάλαιο 8.

6.6 ΔΟΚΙΜΙΟ # 6: C1-30 CYCLIC



Φωτογραφία 6.6.1 Το δοκίμιο C1-30 CYCLIC στην πειραματική διάταξη ενοργανωμένο.

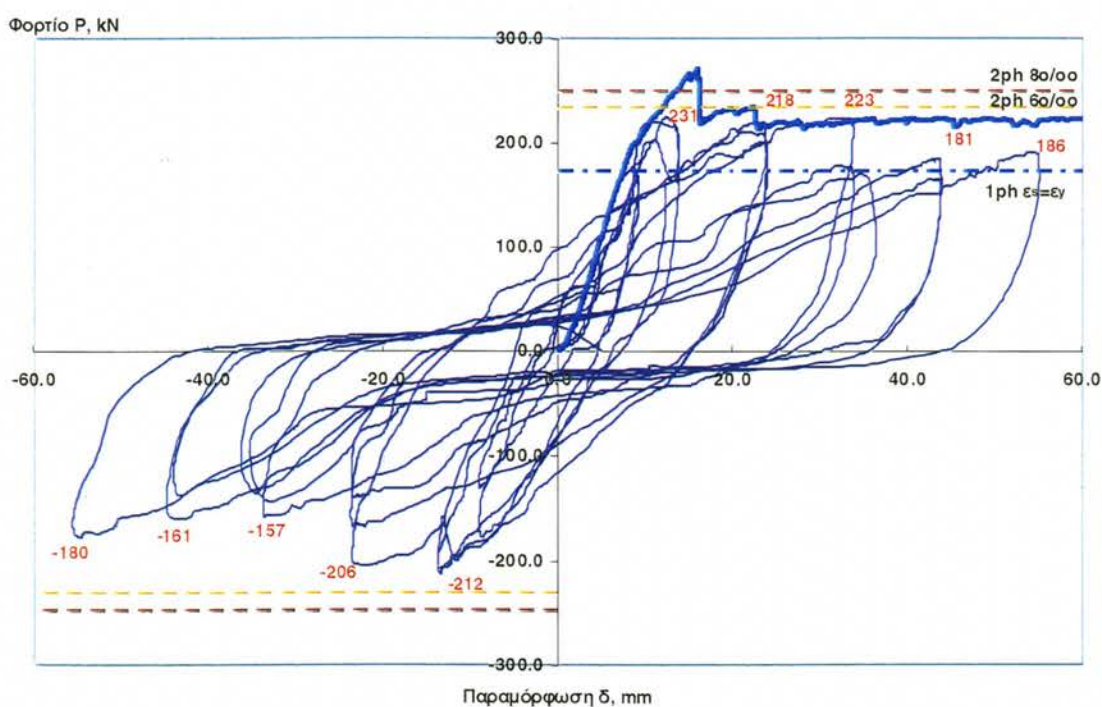
6.6.1 Περιγραφή του πειράματος

Το δοκίμιο C1-30 CYCLIC είναι ίδιο με το C1-30 MONO τόσο σε διαστάσεις όσο και σε οπλισμό άρα κατά συνέπεια και με παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά (Φωτογραφία 6.6.1). Οι θεωρητικά προβλεπόμενες ροπές αντοχής, θεωρώντας μέγιστη ακραία παραμόρφωση του ΙΝΟΠ C1-30 ίση με 0,6% και 0,8% στην κάθε διατομή, είναι $M_{p|ε_f=0.6\%} = 73,1 \text{ kNm}$ και $M_{p|ε_f=0.8\%} = 81,6 \text{ kNm}$, αντίστοιχα (Πίνακας 7.1). Οι παραδοχές και τα αποτελέσματα της ανάλυσης, δίνονται στο Κεφάλαιο 7 και στο Παράρτημα Ι.

Από την καταγραφή του φορτίου και της μετατόπισης τους εμβόλου προέκυψαν οι βρόχοι υστερήσεως του Σχήματος 6.6.1. Στο ίδιο Σχήμα παραβάλλονται για σύγκριση και το διάγραμμα $P-\delta$ του δοκιμίου C1-30 MONO, καθώς και οι προβλεπόμενες τιμές αντοχής (βάσει ελαστοπλαστικής

συμπεριφοράς της δοκού στις δύο πλαστικές αρθρώσεις), στις παρακάτω οριακές συνθήκες:

- Διαρροή στο χάλυβα ($M_y = M_p|_{\varepsilon_s=0,18\%}$) και δημιουργία της πρώτης πλαστικής άρθρωσης στη θέση του P ,
- Δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή για παραμόρφωση στο ΙΝΟΠ ίση με 0,6% ($= M_p|_{\varepsilon_f=0,6\%}$, $P = 224,4$ kN) και
- Δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή για παραμόρφωση στο ΙΝΟΠ ίση με 0,8% ($= M_p|_{\varepsilon_f=0,8\%}$, $P = 250,5$ kN) στις δύο αρθρώσεις.



Σχήμα 6.6.1 Δοκίμιο C1-30 CYCLIC : Βρόχοι υστέρησης.

όπου η καμπτική αντοχή M_p υπολογίζεται με μέσες τιμές αντοχών των υλικών και προσομοίωμα επιπεδότητας της διατομής.

Το δοκίμιο καταπονήθηκε συνολικά με δεκατρείς κύκλους εναλλασσόμενης φόρτισης. Το πείραμα σταμάτησε σε μέγιστη παραμόρφωση του δοκιμίου ίση προς 55,3 mm. Το μέγιστο φορτίο του πειράματος μετρήθηκε κατά τον 3^ο κύκλο ίσο με 223 kN, σε μετατόπιση 12,5 mm. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητά της δοκού δεν έφτασε ούτε τη θεωρητική τιμή θεωρώντας δύο πλαστικές αρθρώσεις, με $M_p = M_p|_{\varepsilon_f=0,6\%}$.

Πίνακας 6.6.1 Σημεία εναλλαγής κύκλων μετατόπισης και δείκτες συμπεριφοράς ανά κύκλο του δοκιμίου **C1-30 CYCLIC**.

Αρ.	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	% P_{max} NEAK	% P @ δ_{max} C1-30 MONO	K kN/m	E kNmm	μ_{δ}	μ_E
1	9,1	9,1	9,1	132	9,0	168	9,0	0,74	0,82	16726	728	1,3	1,2
2	9,1	9,1	9,1	178	8,6	163	9,1	0,79	0,81	19326	1221	1,3	2,0
3	13,8	13,7	13,8	209	13,5	223	12,5	0,99	0,88	16589	3389	1,9	5,7
4	13,8	13,8	13,8	213	13,4	216	13,4	0,95	0,86	16003	2769	1,9	4,6
5	23,7	23,8	23,7	206	22,4	218	23,0	0,97	1,01	9341	7880	3,3	13,2
6	23,7	23,9	23,8	168	23,6	209	21,9	0,93	0,97	8301	7246	3,3	12,1
7	23,8	23,7	23,8	141	23,5	199	23,5	0,88	0,92	7233	5785	3,3	9,7
8	33,8	33,7	33,7	159	33,6	223	32,3	0,98	1,02	5785	8680	4,7	14,5
9	35,2	33,8	34,5	140	34,0	177	31,9	0,78	0,81	4816	6614	4,8	11,1
10	36,4	36,3	36,3	136	34,9	169	34,5	0,75	0,78	4382	6455	5,0	10,8
11	44,8	43,7	44,3	161	43,6	184	43,5	0,81	0,83	3959	8155	6,1	13,6
12	44,0	43,7	43,9	137	43,7	164	42,4	0,73	0,74	3493	6838	6,1	11,4
13	55,5	55,0	55,3	178	54,6	190	54,3	0,84	0,86	3376	10418	7,7	17,4

Αναλυτικά, οι δε πειραματικοί δείκτες απόκρισης των καταγραφών κατά τον κάθε κύκλο δίδονται στον Πίνακα 6.6.1. Στα πειραματικά αποτελέσματα του παραπάνω Πίνακα περιλαμβάνονται :

- οι μέγιστες /ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}), με τις αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο και η μέση παραμόρφωση δ_{mean} , όπου $\delta_{mean} = (\delta_{min} + \delta_{max})/2$
- οι παραμορφώσεις στις αντίστοιχες ακραίες δυνάμεις (δ/P_{min} και δ/P_{max}),
- το ποσοστό της μέγιστης δύναμης του κύκλου, σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή του **NEAK MONO**, καθώς και το ποσοστό της αντοχής στη μέγιστη παραμόρφωση του κάθε κύκλου, σε σχέση με την αντοχή του **C1-30 MONO** στην ίδια παραμόρφωση.
- η μέση δυσκαμψία \bar{K} του βρόχου, που δίδεται από την εξίσωση

$$\bar{K} = \frac{P_{max} - P_{min}}{\delta/P_{max} - \delta/P_{min}} \cdot 1000 \text{ kN / m}$$

- η ενεργειακή απορρόφηση που περικλείεται από το υστερετικό διάγραμμα του κάθε κύκλου και, τέλος,
- οι αντίστοιχες πλαστιμότητες μέσης παραμόρφωσης μ_δ και υστερετικής ενέργειας μ_E , όπου E η απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του βρόχου (σε εύρος δ_{mean}) και

$$\mu_\delta = \delta_{mean} / \delta_y$$

$$\mu_E = E / E_y, \quad E_y = P_y \delta_y / 2$$

και P_y , δ_y οι δύναμη και η παραμόρφωση διαρροής (πειραματικά μετρούμενη).

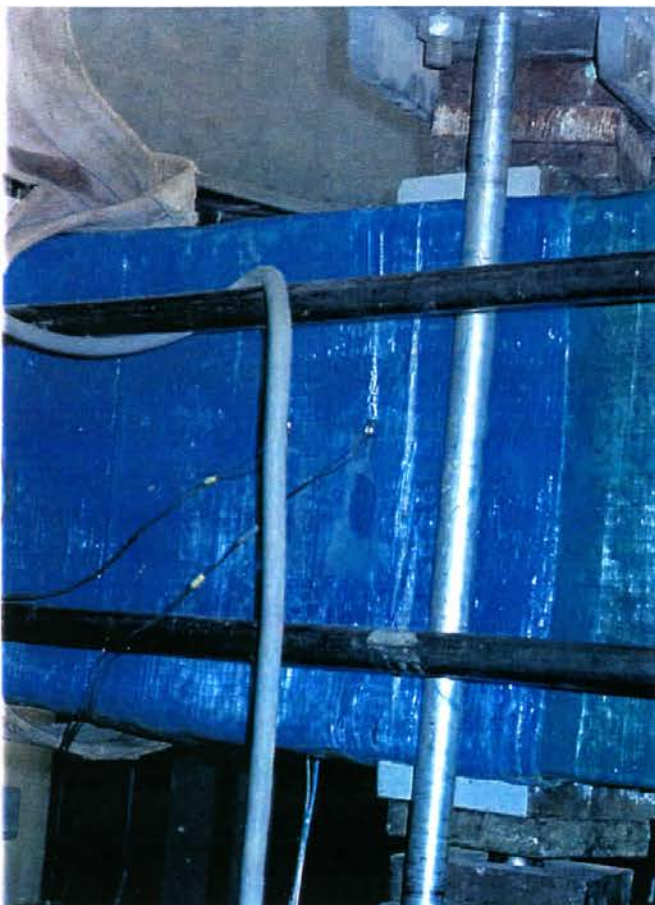
Βάσει της καταγραφής P - δ του Σχήματος 6.6.1, είναι εμφανές ότι το δοκίμιο **C1-30 CYCLIC** δεν κατάφερε ποτέ να αποδώσει την υπεραντοχή λόγω της ενίσχυσής του, αντίστοιχη με αυτήν η οποία καταγράφηκε κατά τη μονότονη φόρτιση, τείνοντας ουσιαστικά κατά τις αρχικές ανακυκλίσεις σε μία μέγιστη αντοχή ίση με την παραμένουσα αντοχή που απέδωσε το **C1-30 MONO** μετά την αστοχία του ΙΝΟΠ, τιμή η οποία ισούται με την μέγιστη αντοχή του παρθένου δοκιμίου **NEAK MONO** χωρίς ενίσχυση ($P = 225$ kN). Στους μετέπειτα κύκλους, μετά τον 8^ο κύκλο ο οποίος αντιστοιχεί στον πρώτο κύκλο με αύξηση της παραμόρφωσης στα 33 mm, η μέγιστη αυτή αντοχή του στοιχείου μειώνεται περαιτέρω και οριοθετείται πλέον από μια σταθερή μέγιστη μέση τιμή $P_{max} = 185$ kN.

Η καμπτική δυσκαμψία του δοκιμίου είναι όμοια με αυτή του **C1-30 MONO**, μέχρι τον τρίτο κύκλο. Η μέση δυσκαμψία τηρείται σταθερή μεταξύ ανακυκλίσεων έως ένα εύρος παραμορφώσεων $\delta = \pm 10$ mm, από αυτό το σημείο δε και εξής η συμπεριφορά εμφανίζεται με σταδιακά φθίνουσα δυσκαμψία, σε κάθε ανακύκλιση, με έντονα φαινόμενα στένωσης των βρόχων (*pinching*) και μηδενισμό της δυσκαμψίας περί το σημείο μηδενικού φορτίου. Το δοκίμιο εμφανίζει σταδιακά αυξανόμενο εύρος ολίσθησης με μηδενική δυσκαμψία περί την ευθεία, φαινόμενο που σχετίζεται με τη δημιουργία μηχανισμού που χαρακτηρίζεται από αστοχία σε διάτμηση του σκυροδέματος της κρίσιμης διατομής και χαλάρωση των οπλισμών λόγω ολίσθησης και/ή λυγισμού. Η έλλειψη αυτή δυσκαμψίας κατά την επαναφορά από την

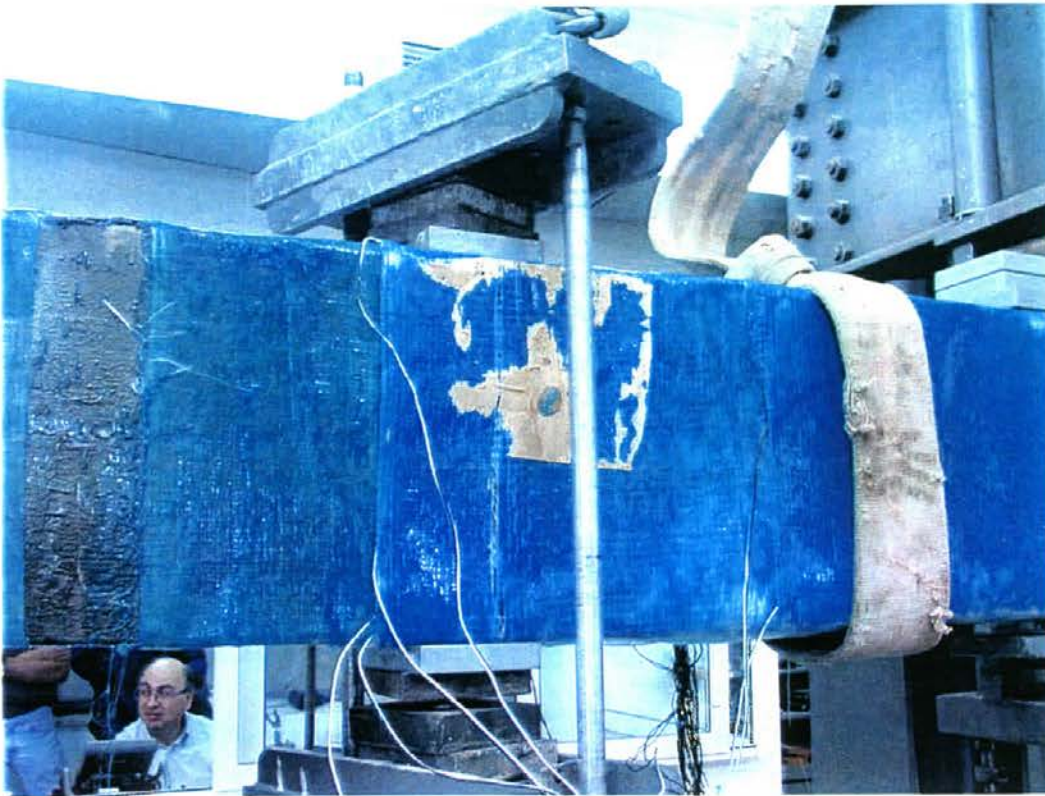
οριζόντια ήταν χαρακτηριστική κατά τη διάρκεια της μετάβασης της δοκού εκατέρωθεν της ευθείας, με πλήρη αδυναμία του δοκιμίου να κατανείμει οιαδήποτε παραμόρφωση από το σημείο εφαρμογής του φορτίου προς την εσωτερική στήριξη.

6.6.2 Περιγραφή συμπεριφοράς, βλαβών και του τρόπου αστοχίας

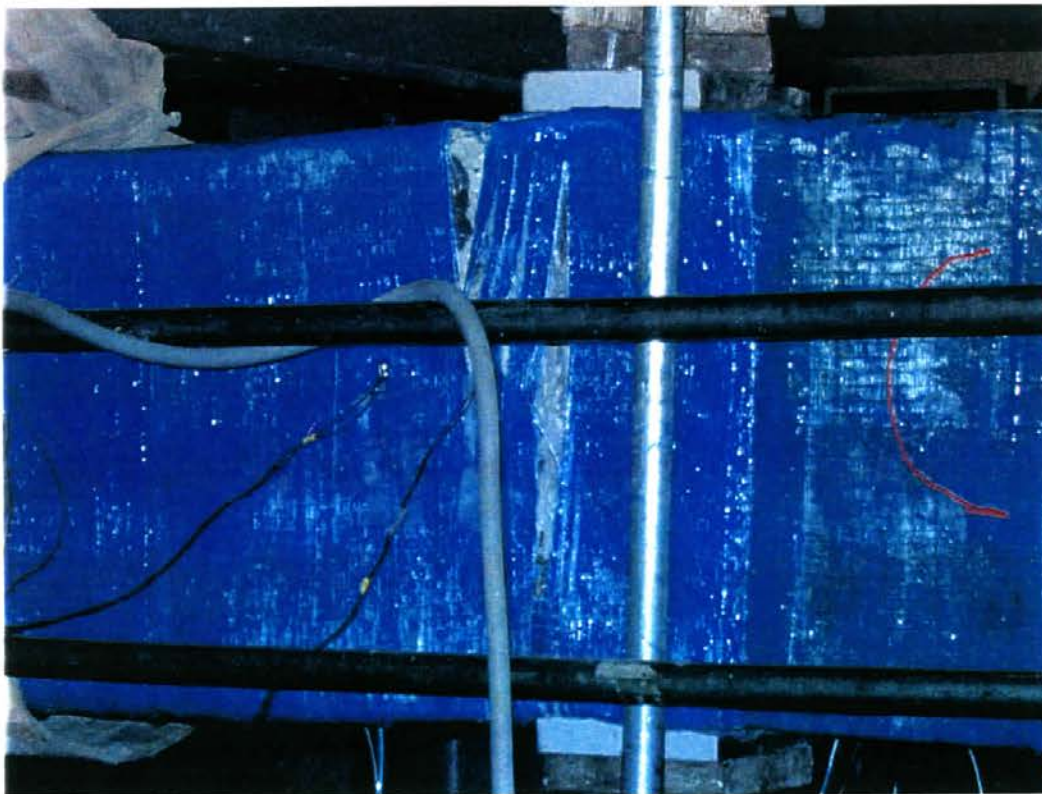
Κατά τους πρώτους δύο κύκλους δεν παρατηρήθηκε καμία διάρρηξη του ΙΝΟΠ. Μετά από τον τέταρτο κύκλο, άρχισε να δημιουργείται μία εγκάρσια κατακόρυφη ρωγμή κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου και διόγκωση του ΙΝΟΠ στη θλιβόμενη παρειά, εντός της κρίσιμης περιοχής στο τμήμα πλησίον του φορτίου P , προς τη μεριά της μεσαίας στήριξης (Φωτογραφίες 6.6.2 και 6.6.3). Στη συνέχεια, η ρηγμάτωση συνεχίστηκε στην



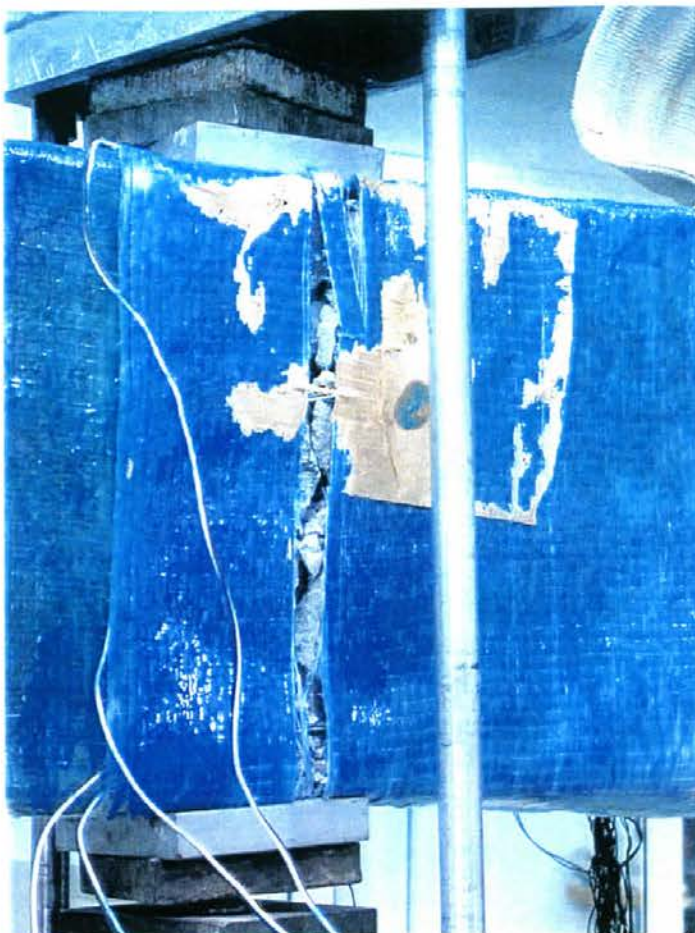
Φωτογραφία. 6.6.2 Εμφάνιση καμπτικής ρωγμής στο σημείο εφαρμογής του φορτίου (P), Όψη Β.



Φωτογραφία. 6.6.3 Εμφάνιση της καμπτικής ρωγμής στο σημείο εφαρμογής του φορτίου (P), Όψη Α.



Φωτογραφία 6.6.4 Αποκόλληση ΙΝΟΠ και ένδειξη σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης στο σημείο επιβολής του φορτίου P , όψη Β.



Φωτογραφία 6.6.5
Αποκόλληση του ΙΝΟΠ και σχηματισμός της πρώτης πλαστικής άρθρωσης στο σημείο επιβολής του φορτίου P , όψη Α.

ίδια περιοχή χωρίς να προκληθεί οποιαδήποτε εμφανής αλλαγή της κατάστασης στο υπόλοιπο τμήμα του δοκιμίου, εκτός από τη μορφή της ελαστικής γραμμής, η οποία σταδιακά έτεινε στην ευθεία γραμμή, με συγκέντρωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στην ανελαστική καμπτική άρθρωση που δημιουργήθηκε στο σημείο φόρτισης.

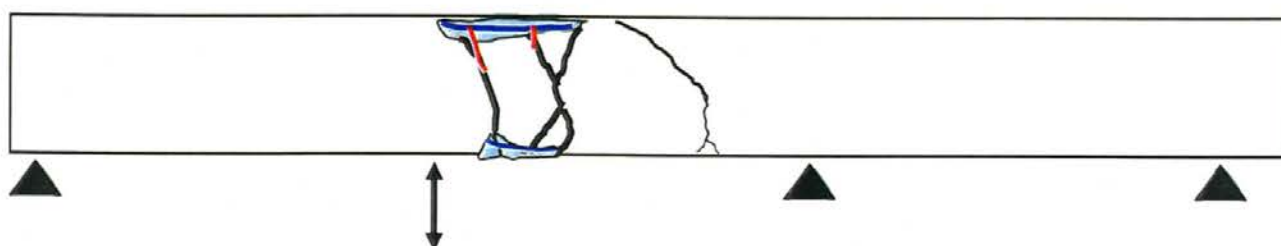
Η άρθρωση αυτή παρελάμβανε το οιοδήποτε επιβαλλόμενο βέλος δ , με σταδιακή ευθυγράμμιση των υπολοίπων τμημάτων του δοκιμίου. Η διατμητική αυτή αστοχία προκλήθηκε από σημαντική αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στην περιοχή επιβολής του φορτίου και, όπως φάνηκε μετά την απομάκρυνση των ΙΝΟΠ, λυγισμό των διαμήκων οπλισμών (Φωτογραφίες 6.6.4 και 6.6.5). Το δοκίμιο εμφάνισε σημαντική παραμένουσα παραμόρφωση μετά το πέρας του πειράματος (Φωτογραφία 6.6.6).



Φωτογραφία 6.6.6
Διατμητική αστοχία και παραμένουσα παραμόρφωση στο σημείο σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου P , όψη Β.

Ακολουθούν πρόσθετες χαρακτηριστικές φωτογραφίες που είναι ενδεικτικές της τελικής ρηγματώσης του δοκιμίου καθώς και τα σκαριφήματα των δύο όψεων του στα Σχήματα 6.6.2 και 6.6.3, τα οποία αποτυπώνουν τη τελική κατάσταση των βλαβών, όπως προέκυψε μετά την αφαίρεση των ΙΝΟΠ, μετά την απομάκρυνση του δοκιμίου από την πειραματική διάταξη.

Α Ο Ψ Η

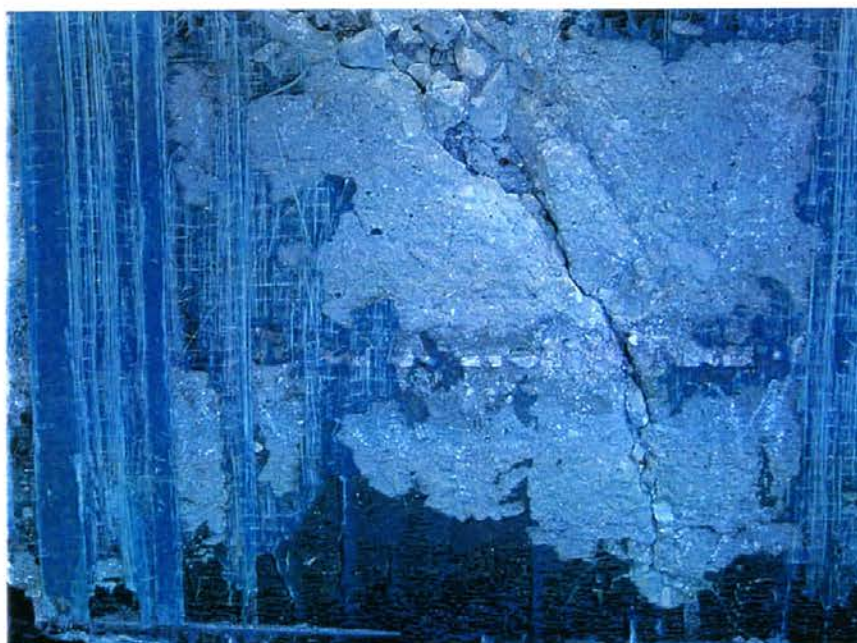


- Θέσεις διαμήκων ράβδων που αποκαλύφθηκαν
- Θέσεις συνδετήρων που αποκαλύφθηκαν
- Θέσεις ρωγμών που αποκαλύφθηκαν

Σχήμα 6.6.2 Σκαρίφημα τελικής κατανομής των ρωγμών του δοκιμίου **C1-30 CYCLIC** – Όψη Α



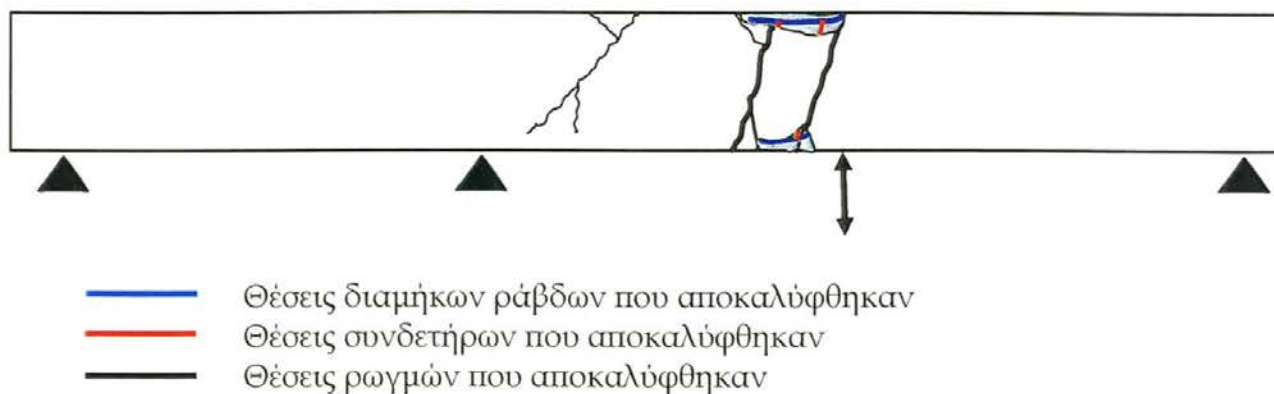
Φωτογραφία 6.6.7 Λεπτομέρεια κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου, Όψη Α : Διακρίνονται χαρακτηριστικές ρωγμές.



Φωτογραφία 6.6.8 Λεπτομέρεια στο μέσον του τμήματος μεταξύ του σημείου επιβολής του φορτίου και της στήριξης Β, στην Όψη Α: Διακρίνεται μεσαίου εύρους διατμητική ρωγμή με αποδιοργάνωση του υποβάθρου στη θλιβόμενη

παρειά και αποκόλληση του ΙΝΟΠ υάλου εκατέρωθεν αυτής. Κλίση μεγαλύτερη των 45° .

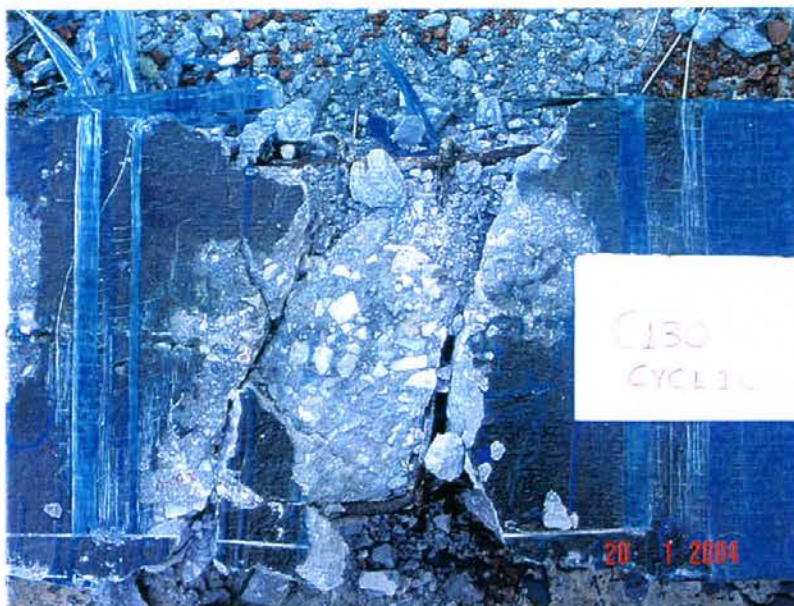
Β' ΟΨΗ



Σχήμα 6.6.3 Σκαρίφημα τελικής κατανομής των ρωγμών του δοκιμίου C1-30 CYCLIC – Όψη Β

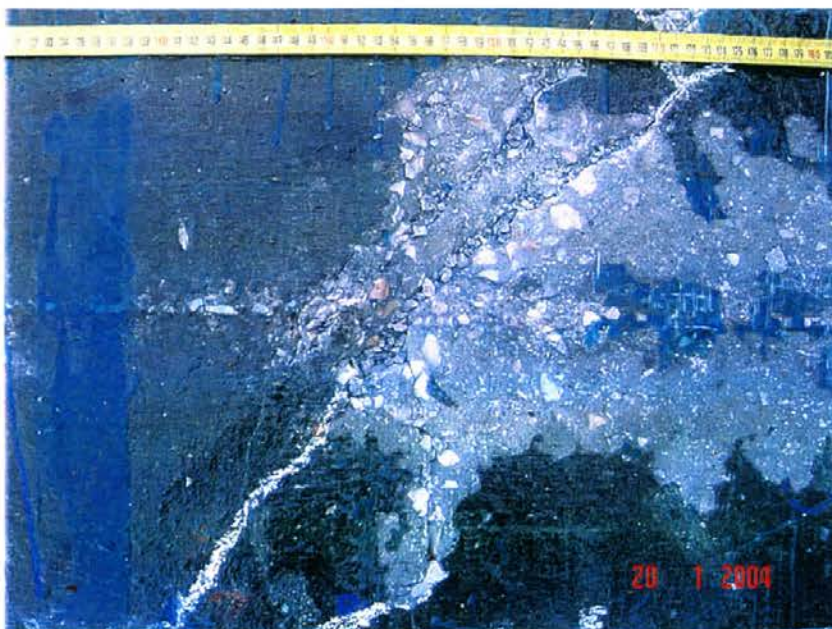


Φωτογραφία 6.6.9 Άποψη τελικής κατάστασης δοκιμίου C1-30 CYCLIC – Όψη Β.



Φωτογραφία 6.6.10 Λεπτομέρεια στο σημείο επιβολής του φορτίου, Όψη Β : Διακρίνονται:

- οι χαρακτηριστικές καμποδιατμητικές ρωγμές που οριοθετούν το 'δόντι' του θλιπτήρα μεταξύ τριών συνδετήρων,
- η εγκάρσια παραμόρφωση λόγω δράσης βλήτρου του διαμήκους μαλακού χάλυβα και
- η αστοχία της διεπιφάνειας στο 'δόντι' και εκατέρωθεν των ρωγμών, με τοπική συγκέντρωση των παραμορφώσεων του εγκάρσιου ΙΝΟΠ στις ρωγμές.
- Η διατμητική ολίσθηση στις ρωγμές.



Φωτογραφία 6.6.11
Λεπτομέρεια προς τη στήριξη Β, Όψη Β : Διακρίνεται η κλειστή διατμητική ρωγμή με κλίση περίπου 45° με αστοχία της διεπιφάνειας δεξιά της ρωγμής, προς το σημείο

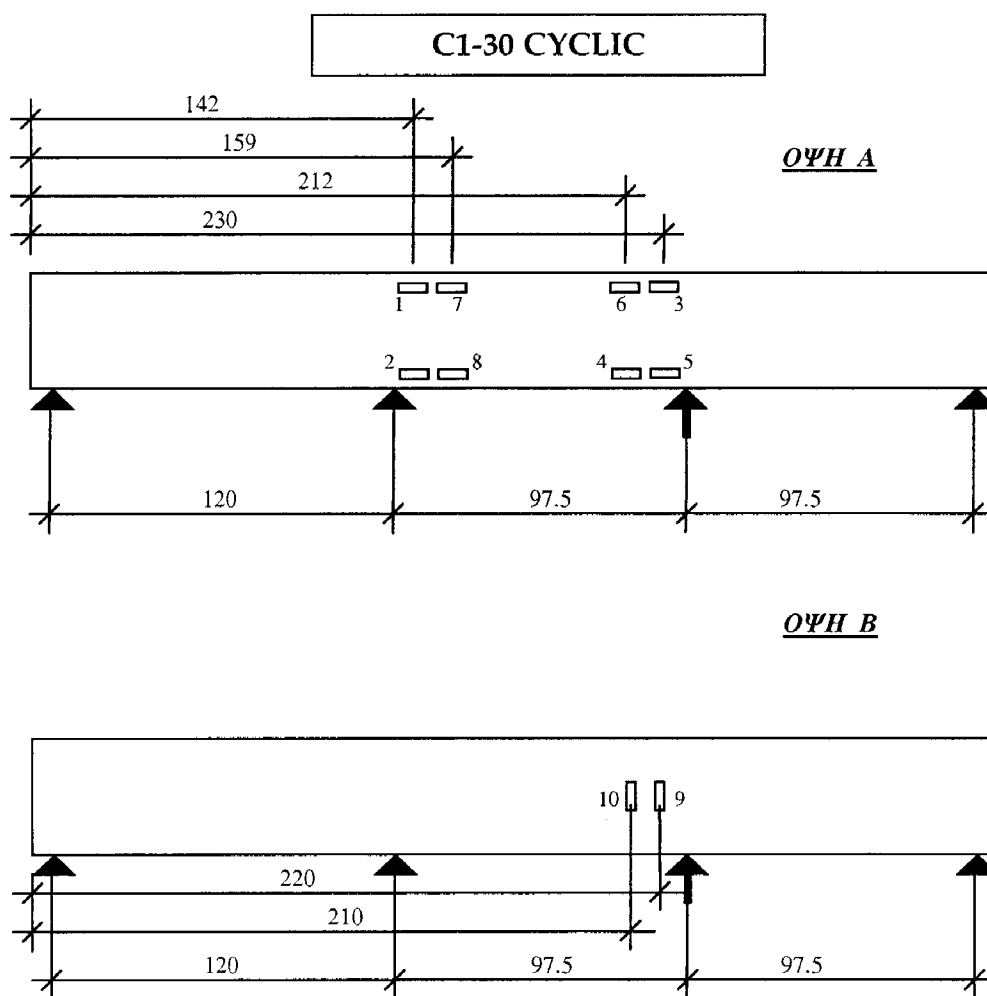
μηδενισμού της ροπής. Σημειώνεται η αποδιοργάνωση του υλικού εντός της ρωγμής λόγω τριβών.

Η μόνη πρόσθετη ρωγμή που αποκαλύφθηκε, μετά την αφαίρεση των ΙΝΟΠ, ήταν μια διαγώνια διατμητική ρωγμή μέσου μεγέθους στο μεσαίο τμήμα του δοκιμίου (PB) στο σημείο μηδενισμού των ροπών, με κλίση περίπου απότομη των 45° (Φωτογραφία 6.6.11). Δεν παρατηρήθηκε θραύση των συνδετήρων, λόγω του μικρού σχετικά φορτίου εκτροπής που δημιουργούν οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού.

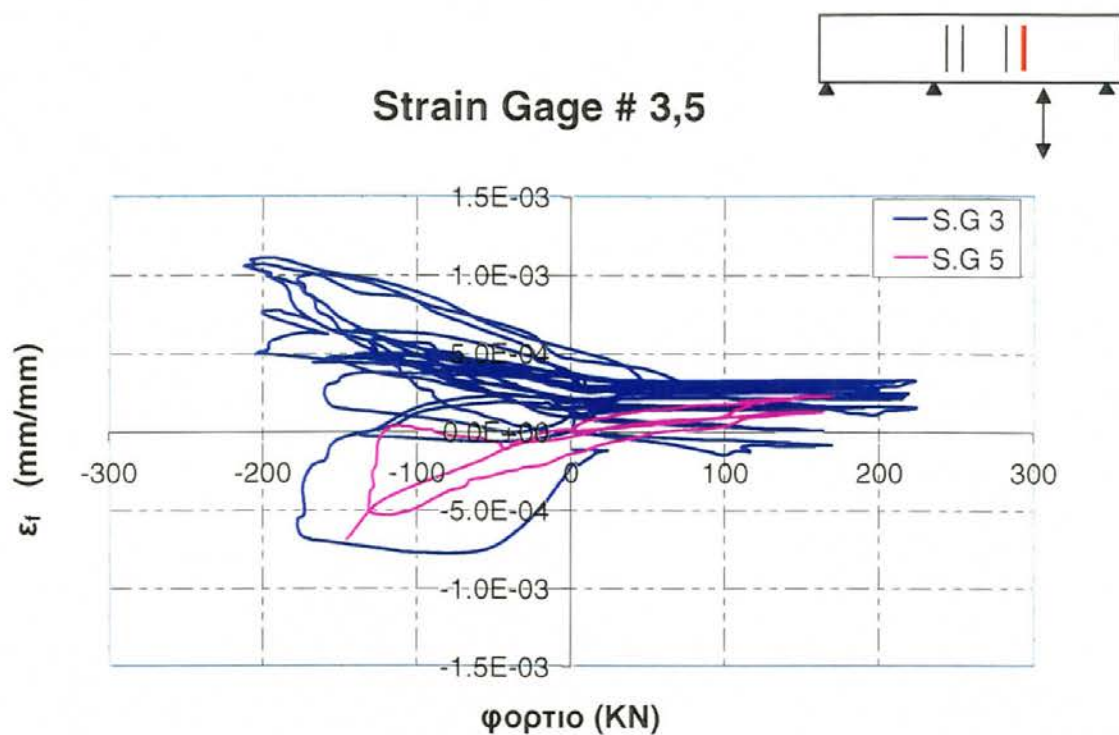
6.6.3 Ανάλυση των καταγραφών SG

Η διαδικασία ενοργάνωσης των δοκιμών περιγράφηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Η τελική θέση των καταγραφικών ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων (SG) και η αρίθμηση τους για το δοκίμιο **C1-30 CYCLIC** δίδεται στο Σχήμα 6.6.4. Τα καταγραφικά SG τοποθετήθηκαν απευθείας επάνω στο σκυρόδεμα, ως εκ τούτου οι δυνατότητες καταγραφής τους είναι πλέον ευαίσθητες στη θέση του SG ως προς τη ρηγμάτωση της δοκού.

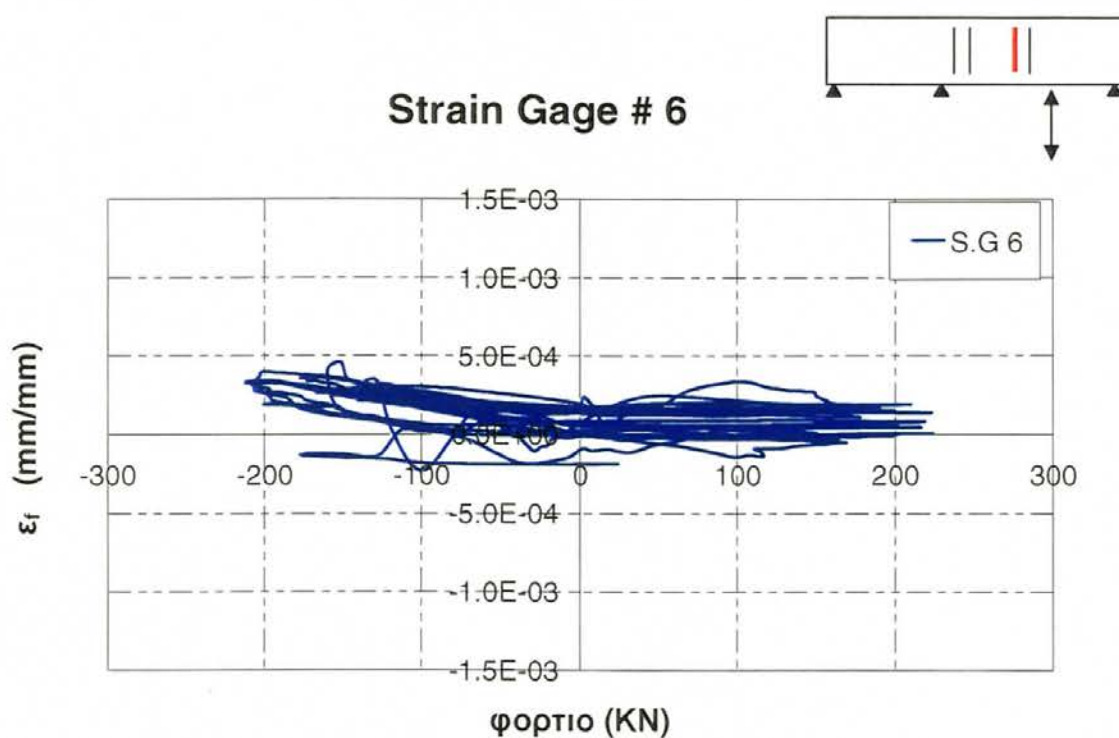
Οι αντίστοιχες καταγραφές των SG, δίδονται στα επόμενα Σχήματα 6.6.5 έως 6.6.9, συγκρινόμενες ανά δύο στην ίδια διατομή, συναρτήσει του φορτίου P . Για ευκολότερη παρακολούθηση της απόκρισης, στα σκαριφήματα δείχνεται ενδεικτικά η θέση του ζεύγους των SG, ως προς το σημείο φόρτισης και τις στηρίξεις. Σημειώνεται ότι το μηχανοσύστημα αρ. 4 δεν λειτούργησε.



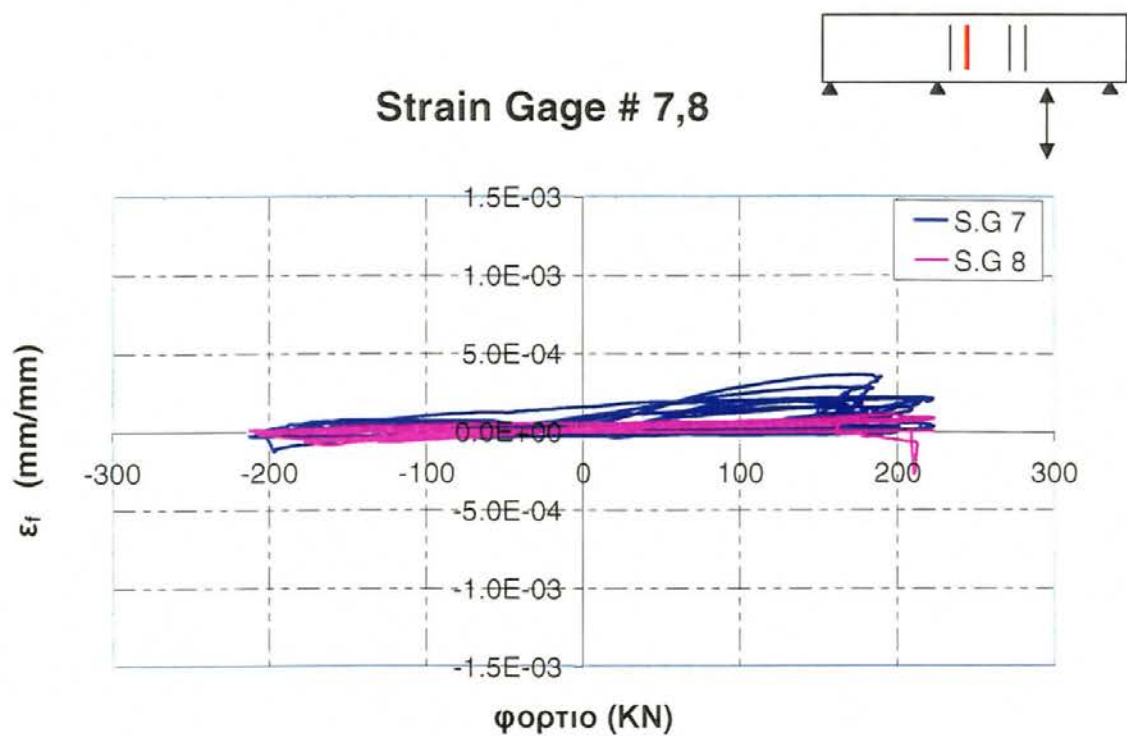
Σχήμα 6.6.4 Θέση και αρίθμηση των SG στο δοκίμιο **C1-30 CYCLIC**.



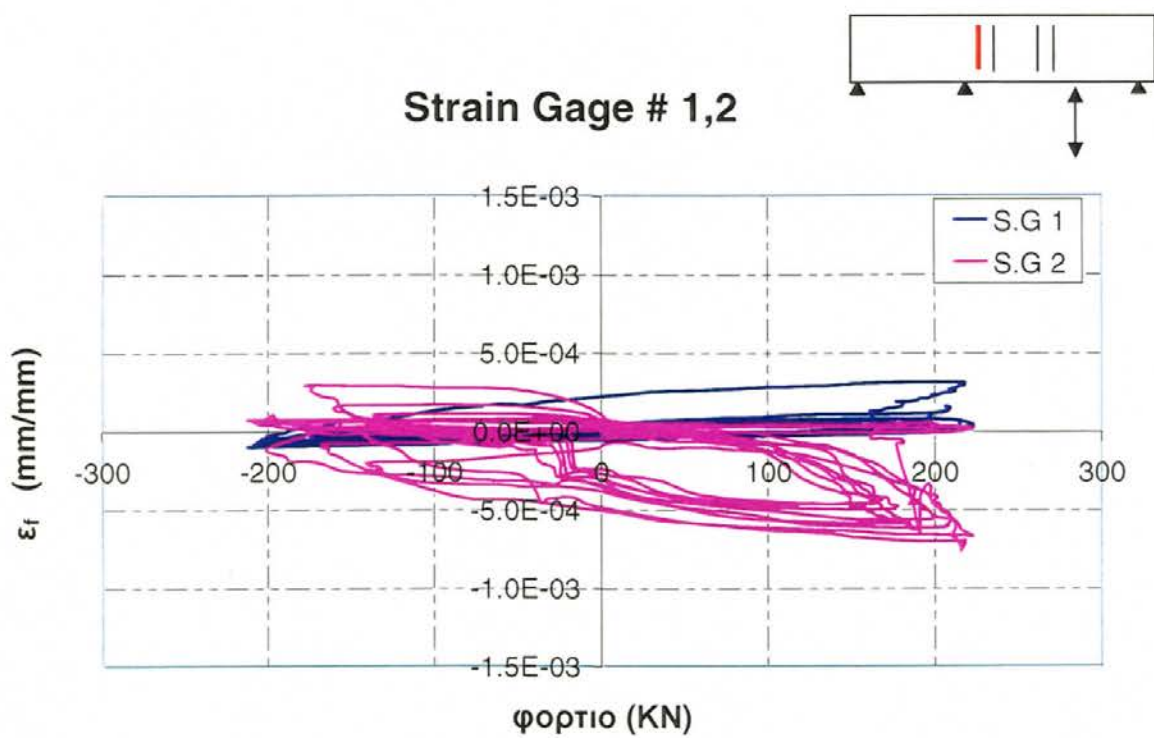
Σχήμα 6.6.5 Διάγραμμα των καταγραφών SG #3,5 (Ζώνη 1).



Σχήμα 6.6.6 Διάγραμμα της καταγραφής SG # 6 (το #4 δεν λειτουργήσε) (Ζώνη 2)



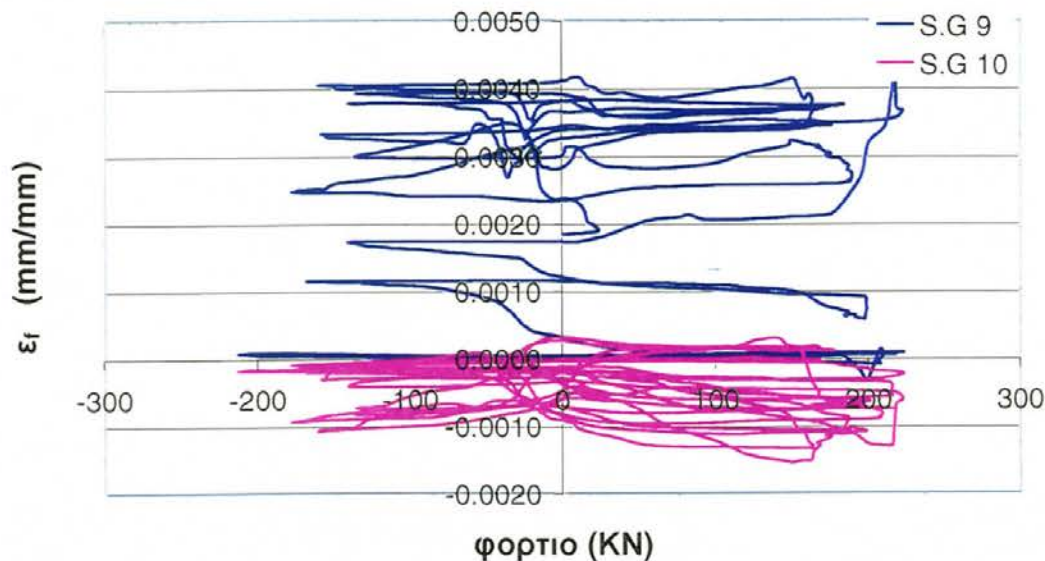
Σχήμα 6.6.7 Διάγραμμα των καταγραφών SG #7,8 (Ζώνη 3).



Σχήμα 6.6.8 Διάγραμμα των καταγραφών SG #1,2 (Ζώνη 4).

Από τα παραπάνω γραφήματα προκύπτει ότι αξιόλογες ανηγμένες παραμορφώσεις καταγράφηκαν μόνο στην περιοχή γύρω από το σημείο επιβολής του φορτίου (Ζώνη 1). Στις υπόλοιπες ζώνες δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές παραμορφώσεις και αυτό εξηγεί και την απουσία ρωγμών σε αυτές τις ζώνες.

Strain Gages Νήματος



Σχήμα 6.6.9 Διάγραμμα των καταγραφών SG # 9 & 10 που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του εγκάρσιου ΙΝΟΠ.

Το SG # 9 κατέγραψε μέγιστες διατμητικές παραμορφώσεις μέχρι περίπου 0,3%, οπότε και ετέθη εκτός λειτουργίας λόγω αστοχίας του ΙΝΟΠ / υποβάθρου. Η μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή (μειωμένης όμως αξιοπιστίας) είναι 0,4% (Φωτογραφία 6.6.12) που επιβεβαιώνει την υπέρβαση ου ορίου διαρροής εγκαρσίως στην περιοχή μεταξύ φορτίου και μεσαίας στήριξης και την επακόλουθη διατμητική αστοχία.. Η καταγραφή του SG #10, αντίθετα, σε απόσταση $d/4$ προς το μέσον, διατηρεί σταθερή συμπεριφορά και δεν υπερέβη σε καμία περίπτωση την τιμή σχεδιασμού 0,180%, ίση με την παραμόρφωση διαρροής του συμβατικού συνδετήρα.

Είναι χαρακτηριστικό όμως να τονισθεί ότι, παρόλο που το δοκίμιο **C1-30 CYCLIC** ουσιαστικά αστόχησε σε διάτμηση, οι ανηγμένες παραμορφώσεις

που καταγράφηκαν στα δύο SG, τα οποία ήταν τοποθετημένα σε γειτονικές περιοχές που απέιχαν μόνο 10 cm μεταξύ τους, ήταν κατά πολύ διαφορετικές, ακόμη και σε μικρά φορτία, πριν την αστοχία των μετρήσεων στο #9. Είναι



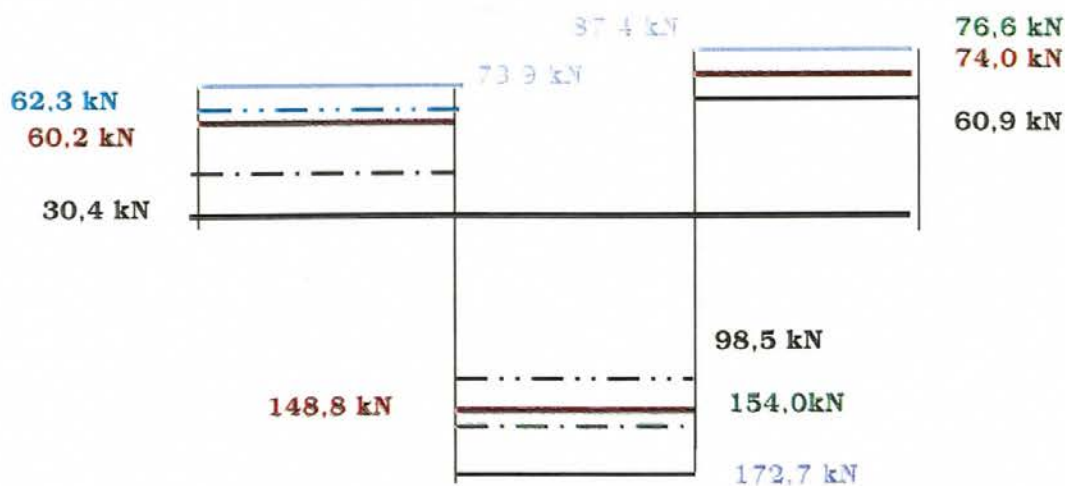
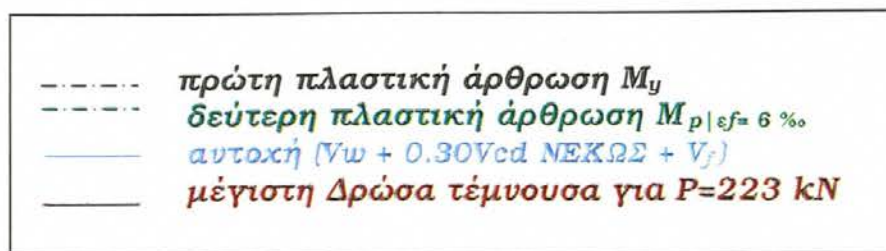
Φωτογραφία 6.6.12 Λεπτομέρεια κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου P, βλέποντας προς την εσωτερική στήριξη B, Όψη B: Διακρίνεται η αστοχία τοπικά του INOΠ λόγω αστοχίας της διεπιφάνειας, με την αντίστοιχη χωροθέτηση των SGs # 9 και 10 ως προς τη θέση της αστοχίας.

εμφανής λοιπόν η επιρροή της παρουσίας ρωγμών κάτω από το INOΠ, που διαφοροποιεί το πεδίο των τάσεων ακόμα και σε κοντινές περιοχές του INOΠ και είναι υπεύθυνη για τις διαφορές στις καταγραφές των δύο SG. Η σημασία αυτής της συμπεριφοράς στο προσομοίωμα σχεδιασμού έναντι διάτμησης των εγκάρσιων INOΠ είναι προφανής.

6.6.4 Ανάλυση της διατμητικής αντοχής

Το δοκίμιο **C1-30 CYCLIC** αστόχησε διατμητικά στο τμήμα πλησίον του εφαρμογής του φορτίου P, προς την εσωτερική στήριξη B. Αντίθετα, το αντίστοιχο δοκίμιο **C1-30 MONO**, αστόχησε καμπτικά εκτός αυτής της περιοχής, προς την εξωτερική στήριξη A, στην περιοχή όπου είχε οπλισθεί με εγκάρσιους συνδετήρες INOΠ.

Τα διαγράμματα των τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα δίνονται στο Σχήμα 6.6.10 ενώ οι αντίστοιχοι υπολογισμοί δίδονται



Σχήμα 6.6.10 Διαγράμματα κατανομής εσωτερικών τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα.

στο Παράρτημα II. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης είχε ληφθεί υπόψη η αντοχή του δοκιμίου θεωρώντας μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του νήματος C1-30 ίση με 0.6%, οπότε η ροπή αντοχής ήταν ίση με $M_p = 75,1 \text{ kNm}$.

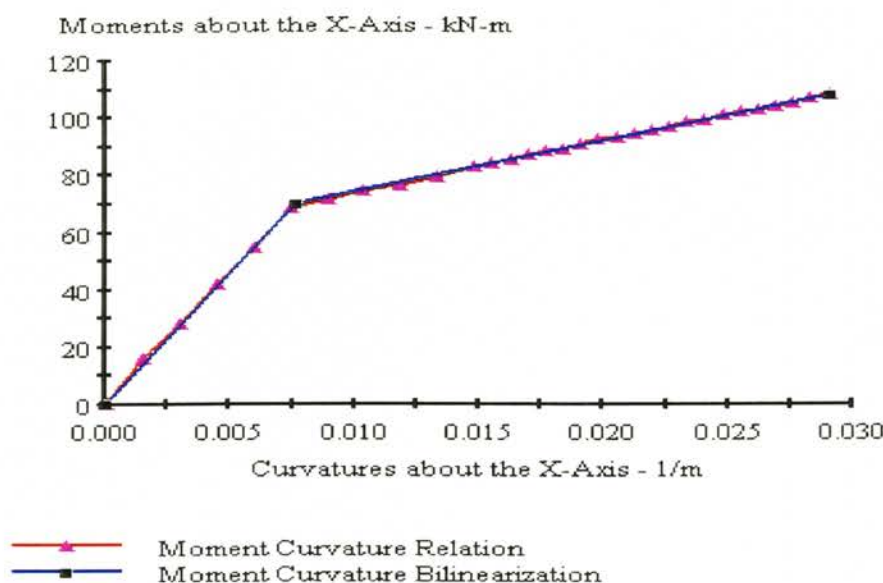
Η μέγιστη δρώσα τέμνουσα που αναπτύχθηκε στο C1-30 CYCLIC στο μεσαίο τμήμα έφθασε τα 148,8 kN, 82% της αντίστοιχης τιμής που παρέλαβε με επιτυχία το δοκίμιο C1-30 MONO, μονοτονικά. Η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου ήταν σε κάθε τμήμα μεγαλύτερη από την απαιτούμενη, σε ποσοστό 116% στο μεσαίο τμήμα όπου υπήρξε αστοχία, με συντηρητικές παραδοχές. Παρόλα αυτά, το δοκίμιο αστόχησε διατμητικά, χωρίς να καταφέρει να φτάσει στο επίπεδο της μέγιστης αντοχής του C1-30 MONO, κάτω και από την αντοχή του μη ενισχυμένου δοκιμίου NEAK MONO. Θεωρώντας ότι κατά την αστοχία, το σύνολο της δρώσας τέμνουσας παρελήφθη μόνο από τον κλωβό (119,9 kN) και το εγκάρσιο ΙΝΟΠ, η παραμόρφωση αστοχίας του εγκάρσιου ΙΝΟΠ, στο μεσαίο τμήμα, αποτιμάται ίση προς $\varepsilon_f = 1,3\%$.

6.7 ΔΟΚΙΜΙΟ # 7: MBAR MONO

6.7.0 Αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής των δοκιμών G60

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανελαστικής ανάλυσης διατομών XTRACT (Chadwell, 2002), υπολογίστηκε το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του Σχήματος 6.7.0 για την ενισχυμένη διατομή. Σύμφωνα με τις παραδοχές του λογισμικού το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν με πλήρη συνάφεια ενώ γίνεται η παραδοχή της επιπεδότητας των διατομών, άρα η κατανομή παραμορφώσεων της διατομής για δεδομένη καμπυλότητα είναι γραμμική. Στην ανάλυση θεωρήθηκε ότι το αξονικό ισούται με μηδέν.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις που δίνονται στο Κεφάλαιο 7, η υπολογισθείσα ροπή αντοχής (M_p) των **MBAR MONO** και **MBAR CYCLIC** ισούται με $M_{p|ε_f=0,6\%} = 95,0$ kNm και $M_{p|ε_f=0,8\%} = 107,8$ kNm θεωρώντας μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση των ράβδων Mbar, ίση προς 0.6% και 0.8% αντίστοιχα, η δε πρώτη διαρροή προβλέπεται σε ροπή $M_{es=ey} = 67,2$ kNm (Πίνακας 7.1).



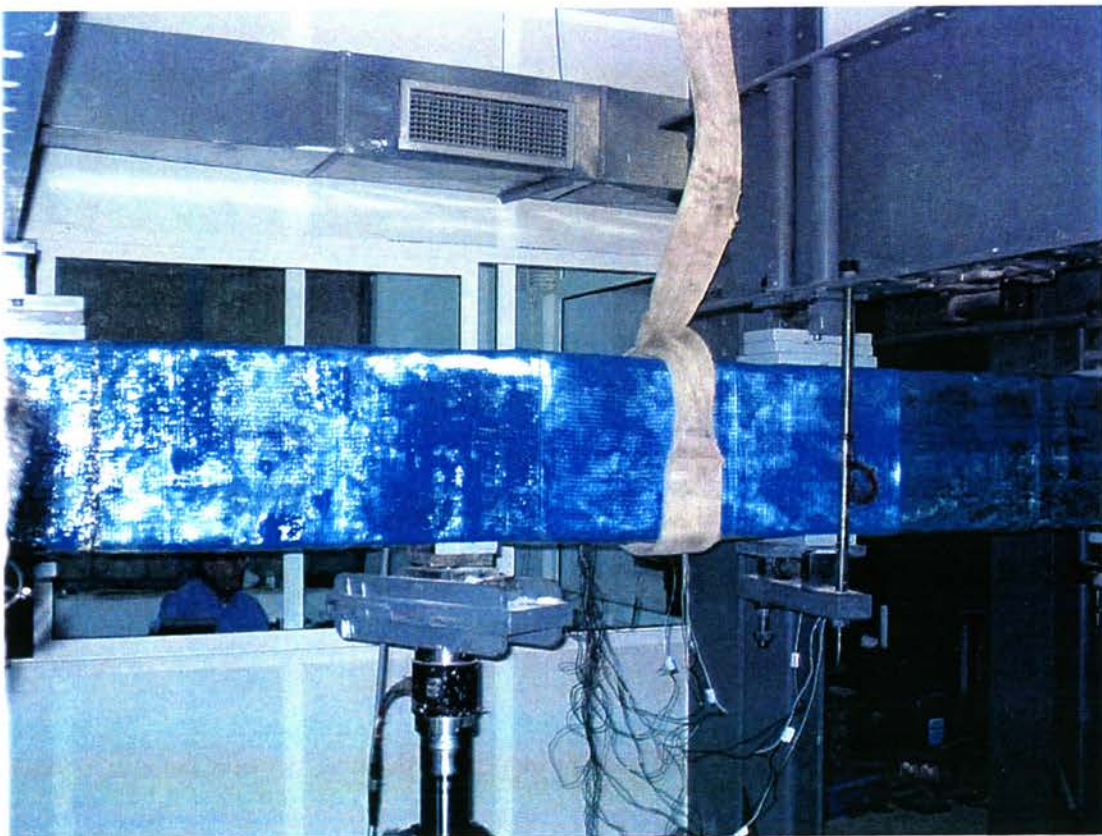
Σχήμα 6.7.0 Διάγραμμα ροπών-καμπυλότητας της διατομής των δοκιμών **MBAR MONO**, **MBAR CYCLIC**.

Η ανάλυση στο Σχήμα 6.7.0 σταμάτησε σε καμπυλότητα 0,028 1/m, όταν η ανηγμένη παραμόρφωση σε εφελκυσμό, των ράβδων Mbar έφτασε το 0.8%. Στο παραπάνω διάγραμμα δίδεται και το ισοδύναμο διγραμμικό διάγραμμα

ροπής - καμπυλότητας ($M-\varphi$) βάσει ισότητας των εμβαδών, το οποίο χρησιμοποιείται στην αριθμητική πρόβλεψη της απόκρισης του δοκιμίου που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7.

6.7.1 Περιγραφή του πειράματος

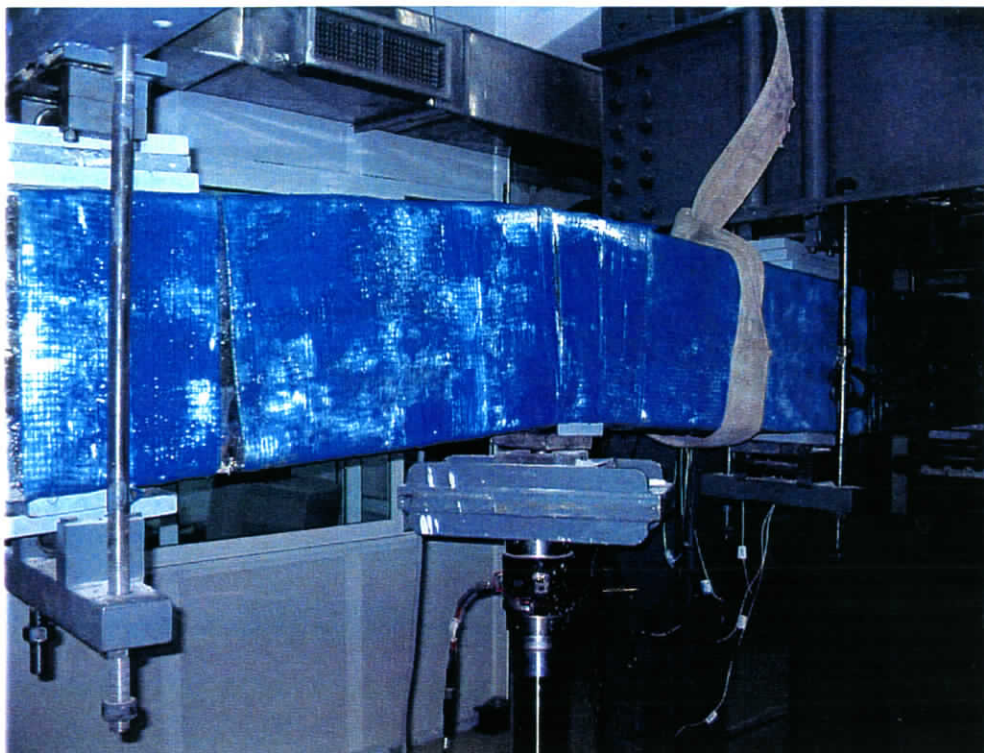
Το δοκίμιο **MBAR MONO** (Φωτογραφία 6.7.1) καταπονήθηκε με αύξουσα εγκάρσια παραμόρφωση με διεύθυνση προς τα πάνω. Ως κριτήριο τερματισμού της φόρτισης θεωρήθηκε η επίτευξη ολικής πλαστιμότητας παραμορφώσεων μεγαλύτερη του τέσσερα ή η μείωση της παραμένουσας αντοχής του δοκιμίου στο 85% της μέγιστης αντοχής του. Η ύπαρξη του ΙΝΟΠ περιτύλιξης G60-AR γύρω από το δοκίμιο σε όλο το μήκος του, δεν επέτρεπε την άμεση παρακολούθηση της δημιουργίας των ρωγμών.



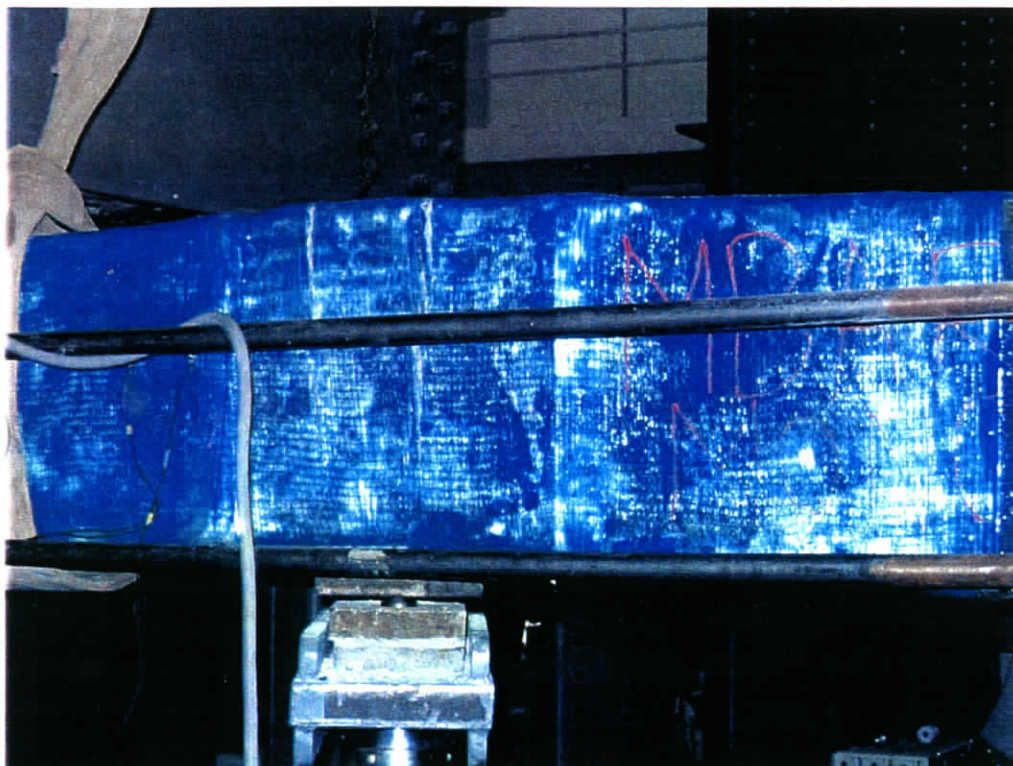
Φωτογραφία 6.7.1 Το δοκίμιο **MBAR MONO** στη θέση του, Όψη Α.

Η πρώτη καμπτική ρωγμή έγινε εμφανής όταν προκλήθηκε εγκάρσια διάρρηξη του εγκάρσιου ΙΝΟΠ κατά τη μη κύρια διεύθυνση των ινών του, σε δύο σημεία, εντός της κρίσιμης ζώνης της δοκού, στην περιοχή του σημείου

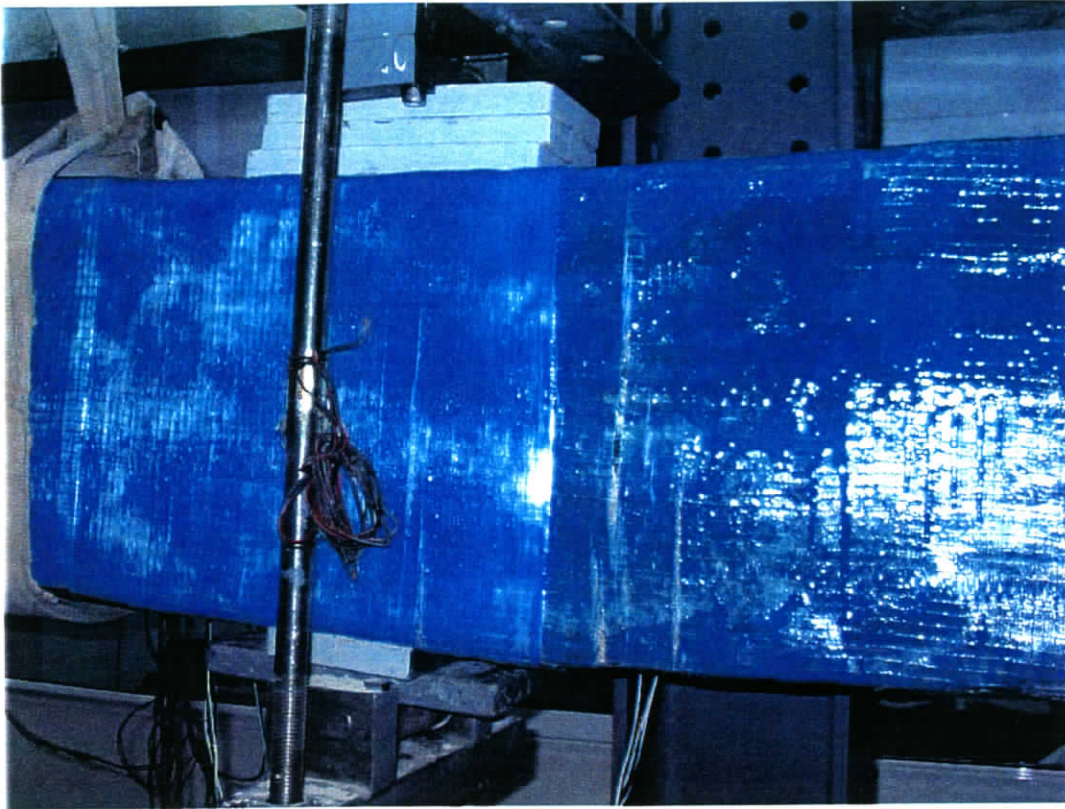
επιβολής του φορτίου P (Φωτογραφίες 6.7.2 και 6.7.3). Οι δυο αυτές ρωγμές διευρύνονταν σταδιακά, οριοθετώντας έτσι το σχηματισμό της πρώτης



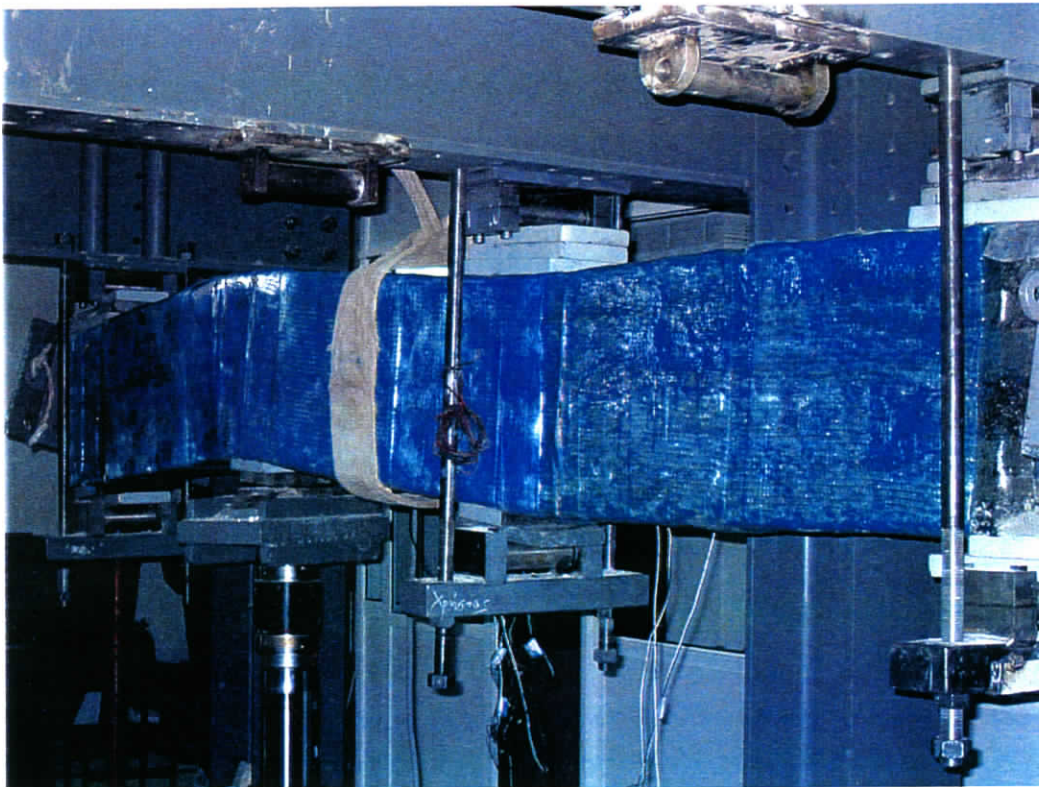
Φωτογραφία 6.7.2 Διάρρηξη του εγκάρσιου ΙΝΟΠ και εμφάνιση καμπτικών ρωγμών στην περιοχή επιβολής του φορτίου.



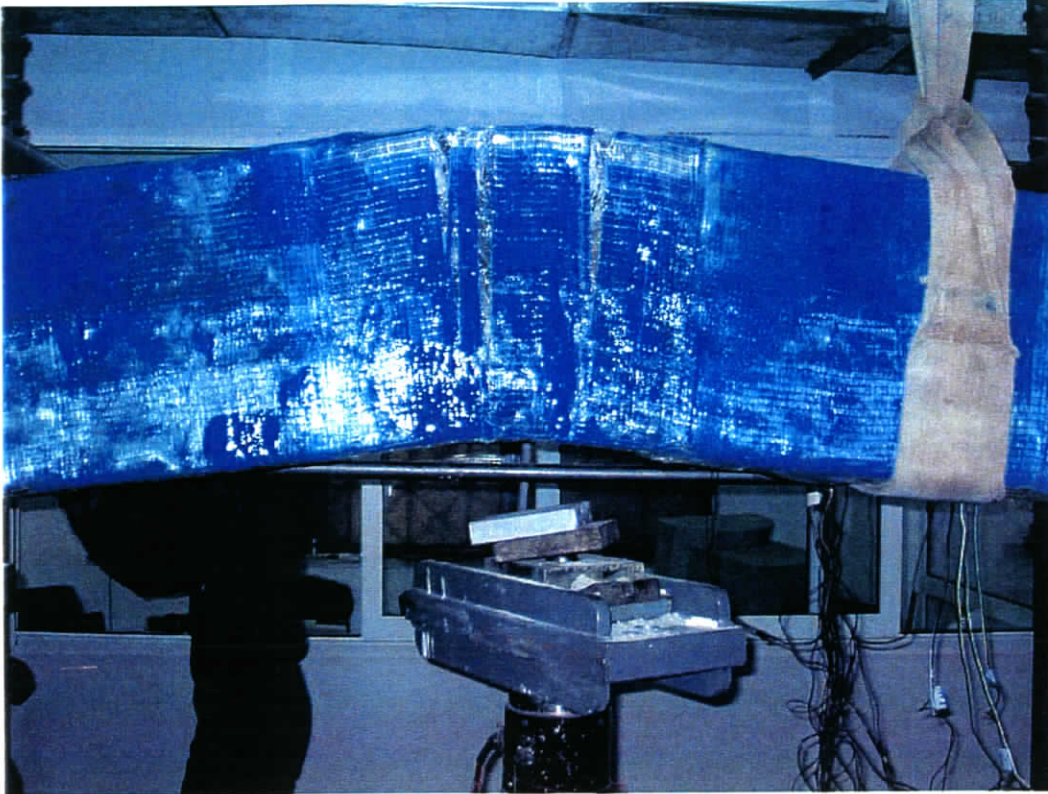
Φωτογραφία 6.7.3 Λεπτομέρεια στη θέση φόρτισης P : Παρατηρείται διάρρηξη του εγκάρσιου ΙΝΟΠ υάλου στο εφελκυόμενο άκρο.



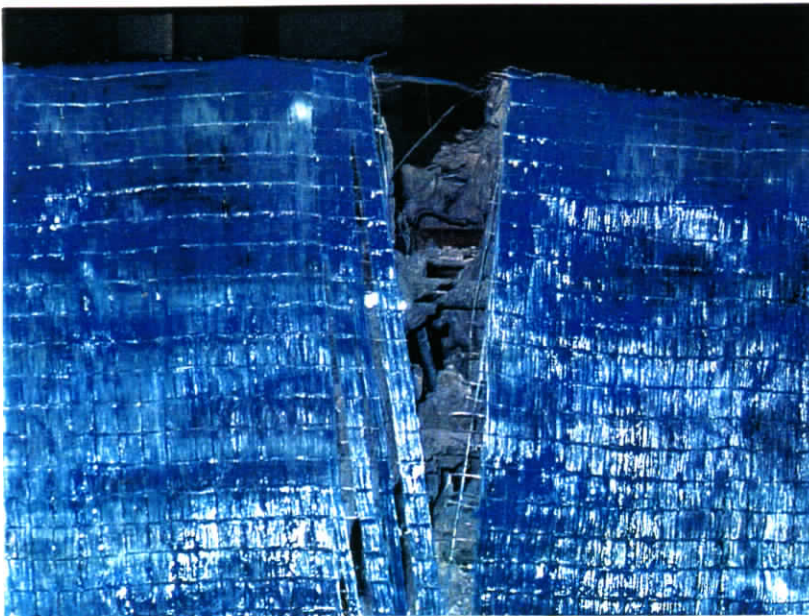
Φωτογραφία 6.7.4 Διάρρηξη του εγκάρσιου ΙΝΟΠ και εμφάνιση καμπτικών ρωγμών στην περιοχή της εσωτερικής στήριξης.



Φωτογραφία 6.7.5 Μορφή ελαστικής γραμμής δοκιμίου κοντά στη φέρουσα ικανότητα της δοκού.



Φωτογραφία 6.7.6 Λεπτομέρεια παραμένουσας παραμόρφωσης του δοκιμίου στο P μετά το πέρας του πειράματος.



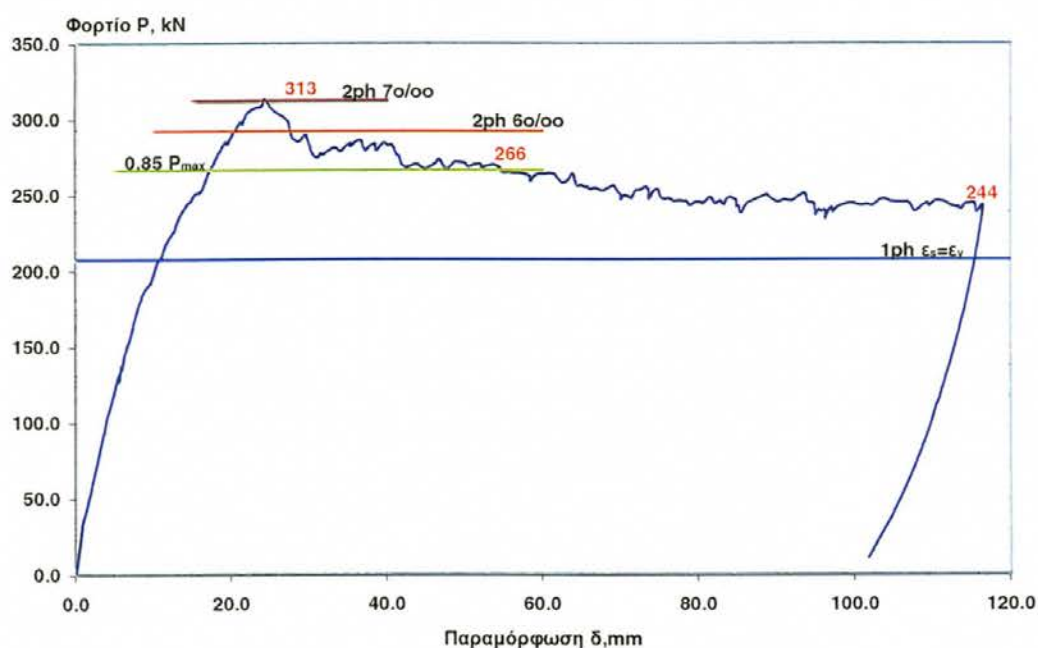
Φωτογραφία 6.7.7

Λεπτομέρεια της εφελκυστικής ρωγμής στο σημείο P , μετά το πέρας του πειράματος. Διακρίνονται οι ράβδοι INOP και οι συμβατικοί οπλισμοί, στο άνοιγμα λόγω αστοχίας του εγκάρσιου INOP.

πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή του σημείου επιβολής του φορτίου.

Πριν ακόμη ολοκληρωθεί ο σχηματισμός της πρώτης πλαστικής άρθρωσης, ρωγμές άρχισαν να γίνονται διακριτές κοντά στην μεσαία στήριξη, οι οποίες υποδήλωναν τη δημιουργία της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης (Φωτογραφία

6.7.4) λόγω ανακατανομής του φορτίου. Οι μεγάλες παραμορφώσεις εγκαρσίως στο ΙΝΟΠ της στήριξης εμφανίζονται σε επιβαλλόμενο φορτίο περίπου 300 kN, τιμή που πλησιάζει τη θεωρητική πρόβλεψη της αντοχής για δύο πλαστικές αρθρώσεις, με ανηγμένη παραμόρφωση των ΙΝΟΠ ράβδων 0.6%. Το δοκίμιο έκτοτε συνέχισε να παραλαμβάνει παραμόρφωση με σταδιακά φθίνουσα αντοχή, με μόνη ένδειξη καταπόνησης το σταδιακό άνοιγμα των συγκεκριμένων ρωγμών στα προαναφερθέντα σημεία. Δεν σημειώθηκε κανενός είδους άλλη αστοχία είτε στα εγκάρσια ΙΝΟΠ είτε στο σκυρόδεμα, εκτός από μικρή διόγκωση (σε σχέση με προηγούμενα πειράματα) στη θλιβόμενη παρειά, στη θέση της φόρτισης προς τη μεσαία στήριξη. Το τελικό παραμορφωμένο τμήμα και η αστοχία του δοκιμίου δείχνεται στις Φωτογραφίες 6.7.5 έως 6.7.7.



Σχήμα 6.7.1 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης $P-\delta$, δοκίμιο MBAR MONO.

Η καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του εμβόλου έδωσε το διάγραμμα ' $P-\delta$ ' του Σχήματος 6.7.1. Στο διάγραμμα σημειώνονται και οι προβλεπόμενες οριακές τιμές του P : α) στη διαρροή του χάλυβα εφελκυσμού, β) στον αναμενόμενο σχηματισμό δύο πλαστικών αρθρώσεων σύμφωνα με το θεωρητικό προσομοίωμα (Κεφάλαιο 7) σε μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση των ΙΝΟΠ ράβδων Mbar 0.6% και 0.7%,

αντίστοιχα. Για λόγους σύγκρισης, αναφέρεται ότι ο σχηματισμός της δεύτερης άρθρωσης στο δοκίμιο **NEAK MONO** έγινε στα 225 kN. Παρατηρείται ότι η αριθμητική πρόβλεψη βάσει της ανάλυσης επιπεδότητας των διατομών της πρώτης διαρροής του χάλυβα (φορτίο 179,4 kN, που αντιστοιχεί σε ροπή πρώτης διαρροής $179,4/2,67 = 67,2$ kNm -βλ. Πίνακα 7.1) είναι πολύ κοντά στην πειραματική τιμή διαρροής που καταγράφηκε, ίση με **185,5 kNm** (σε ποσοστό 3,4%), σε εγκάρσια μετατόπιση (δ_y) **8,7 mm**.

Η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου που επετεύχθη κατά το πείραμα ήταν **312,7 kN**, τιμή κατά 69% μεγαλύτερη της πρώτης διαρροής ή 139% υψηλότερη από την πειραματική οριακή αντοχή του μη ενισχυμένου δοκιμίου ελέγχου **NEAK MONO**, που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.1. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι σε αντίθεση με το **C1-30 MONO** (Κεφάλαιο 6.5), το δοκίμιο αυτό δεν έχασε ποτέ πλήρως την υπεραντοχή λόγω της ενίσχυσής του, αφού δεν απομείωσε ποτέ – στο εύρος των παραμορφώσεων που υποβλήθηκε στο πείραμα – την παραμένουσα αντίστασή του στα επίπεδα αντοχής του μη ενισχυμένου δοκιμίου ελέγχου **NEAK MONO**. Η μέγιστη παραμόρφωση στην οποία υπεβλήθη το δοκίμιο έφθασε τα **110 mm** οπότε και το πείραμα τερματίστηκε λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που είχαν παραληφθεί από τον φορέα. Σύμφωνα με την πειραματική συμπεριφορά (Σχήμα 6.7.1), η πτώση της αντοχής στο 85% της P_{max} ($0,85 * 313 = 266,0$ kN) καταγράφεται σε παραμόρφωση **56 mm**, αποδίδοντας μια πλαστιμότητα στο δοκίμιο ίση με **6,40** ως προς την πρώτη διαρροή (δ_y).

Επίσης, αντίθετα με τα δοκίμια ενισχυμένα με ΙΝΟΠ υφασμάτων, η απόκριση του δοκιμίου δεν παρουσιάζει τις απότομες μεταπτώσεις στην αντοχή που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά σε μονοτονικό φορτίο τα δοκίμια αυτά. Μετά την μέγιστη αντίσταση του δοκιμίου στα **25 mm**, παρατηρείται μια σταδιακή πτώση της αντίστασης στα **244 kN** σε σταθερό ρυθμό απομείωσης, ως τα **80 mm** (ποσοστό μείωσης 22%). Η παραμένουσα αυτή αντοχή του δοκιμίου παρέμεινε πρακτικά σταθερή έως ως τα **110 mm**, οπότε και τερματίστηκε το πείραμα.

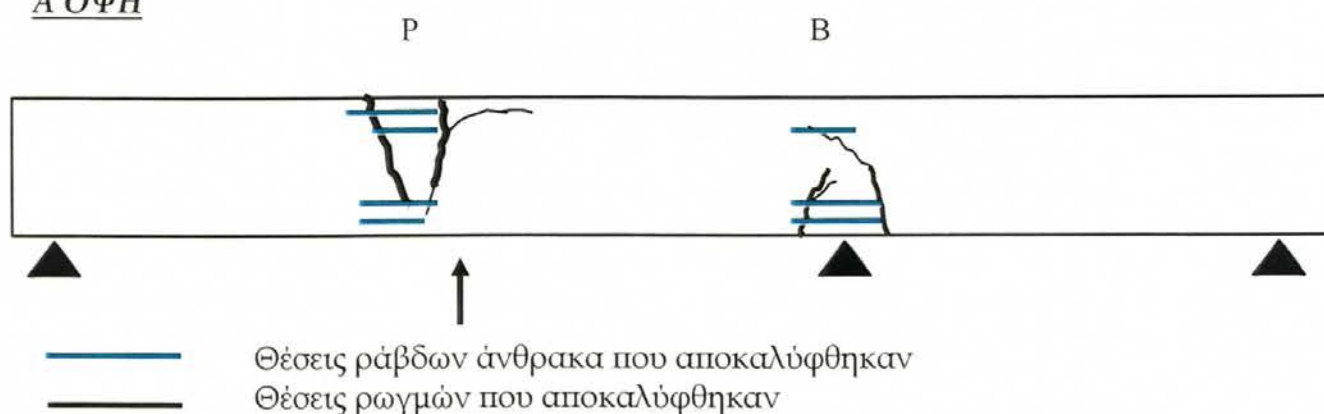
Η δοκός ανέπτυξε αντοχή κατά 21,4 kN μεγαλύτερη (ποσοστό 8%) από την τιμή σχεδιασμού έναντι διάτμησης, για $\varepsilon_f=0,6\%$. Η μέγιστη πειραματική αντοχή προσεγγίζεται από τη θεωρητική αντοχή P_{max} ($=3,07 * 101,6 \text{ kNm} = 311,9 \text{ kN}$) σε εμφάνιση δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή M_p για ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_f=0,7\%$ στην ακρότατη ράβδο ΙΝΟΠ. Η τιμή αυτή, αντιστοιχεί ουσιαστικά σε μέσες τιμές της M_p , λόγω της σημαντικής κράτυνσης της ενισχυμένης διατομής (Σχήμα 6.7.0).

Είναι χαρακτηριστικό ότι μετά την υπέρβαση της P_{max} η απομείωση της φέρουσας ικανότητας δεν έγινε απότομα όπως στο δοκίμιο **C1-30 MONO** (και εν μέρει το **G60 MONO**), αλλά σταδιακά, κάτι που επαληθεύθηκε και μετά το πέρας του πειράματος από το γεγονός ότι δεν υπήρξε θραύση ράβδου ΙΝΟΠ, χάλυβα ή συνδετήρα.

6.7.2 Περιγραφή των βλαβών και τρόπος αστοχίας

Ακολουθούν χαρακτηριστικές φωτογραφίες που είναι ενδεικτικές της τελικής ρηγμάτωσης του δοκιμίου καθώς και τα απαραίτητα σκαριφήματα που αποτυπώνουν τη τελική κατάσταση των δύο όψεων του, όπως προέκυψαν μετά την αφαίρεση των υφασμάτων έπειτα από την απομάκρυνση του δοκιμίου από τη διάταξη. (Σχήματα 6.7.2 και 6.7.3 και Φωτογραφίες 6.7.8 έως 6.7.11).

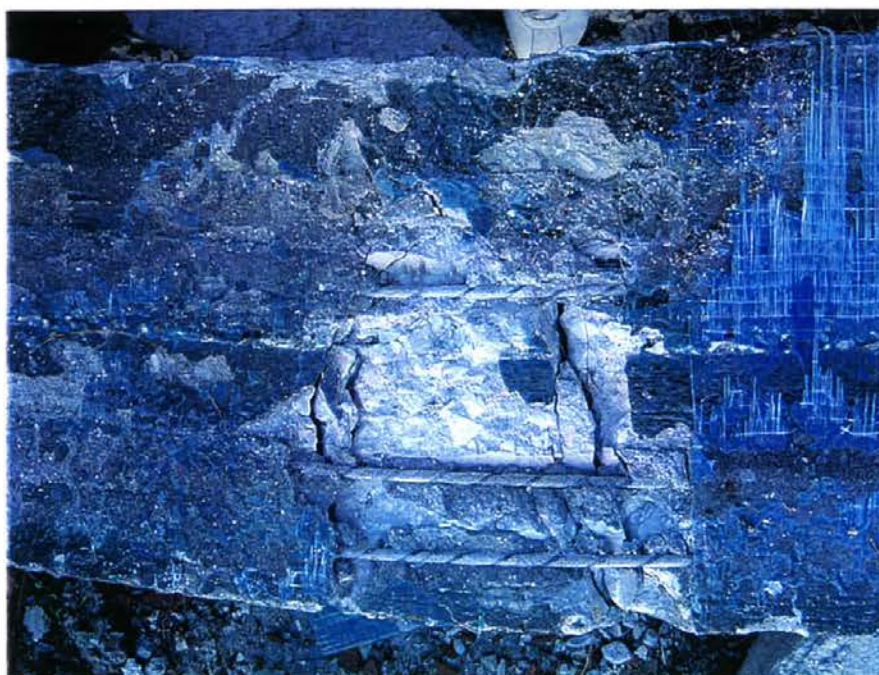
Α' ΟΨΗ



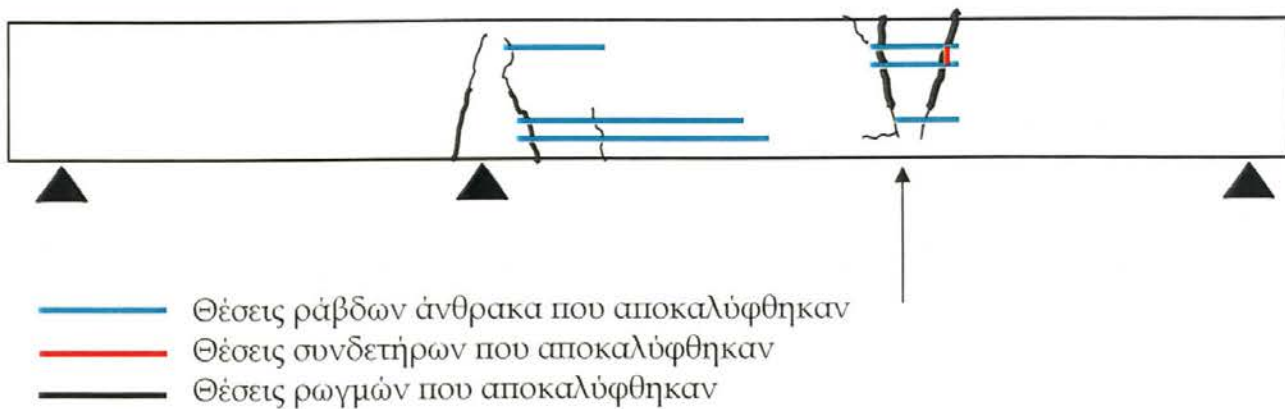
Σχήμα 6.7.2. Σκαρίφημα τελικής κατάστασης των ρωγμών μετά το πέρας του πειράματος, του δοκιμίου **MBAR MONO** – Όψη Α.



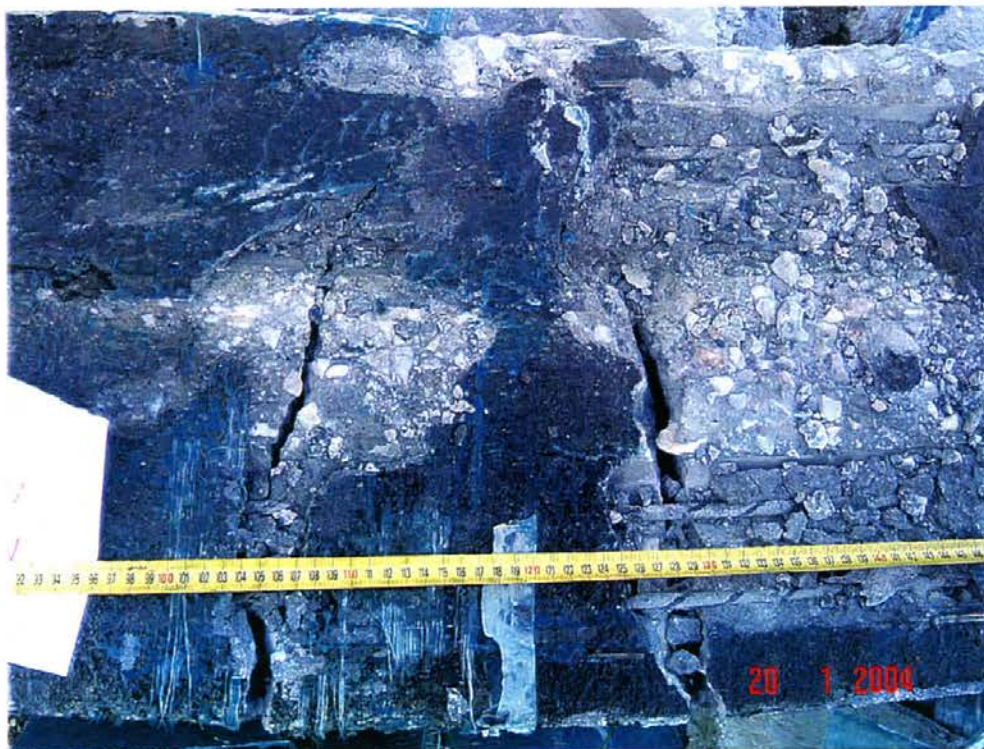
Φωτογραφία 6.7.8 Λεπτομέρεια στο σημείο φόρτισης P , Όψη Α: Φαίνονται χαρακτηριστικές καμπτικές ρωγμές καθώς και οι ράβδοι Mbar που αποκαλύφθηκαν. Διακρίνεται η καταστροφή της πρόσφυσής τους μεταξύ και εκατέρωθεν των ρωγμών.



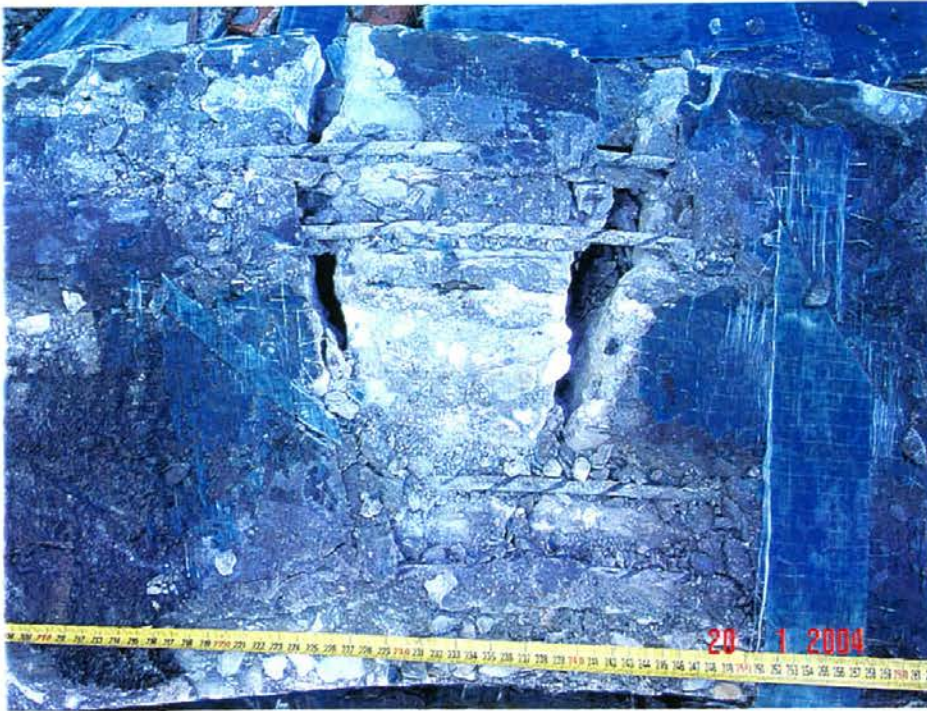
Φωτογραφία 6.7.9 Λεπτομέρεια στο σημείο στήριξης Β, Όψη Α: Φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπτικές ρωγμές καθώς και οι ράβδοι Mbar που αποκαλύφθηκαν με πλήρη απώλεια της συνάφειας μεταξύ των δύο ρωγμών.

Β' ΟΨΗ

Σχήμα 6.7.3 Σκαρίφημα τελικής κατανομής των βλαβών στο δοκίμιο MBAR MONO – Όψη Β, μετά το πέρας του πειράματος.



Φωτογραφία 6.7.10 Λεπτομέρεια στο σημείο στήριξης Β, Όψη Β: Φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπτικές ρωγμές και το εύρος της θλιβόμενης ζώνης της κρίσιμης διατομής καθώς οι ράβδοι Mbar που αποκαλύφθηκαν.



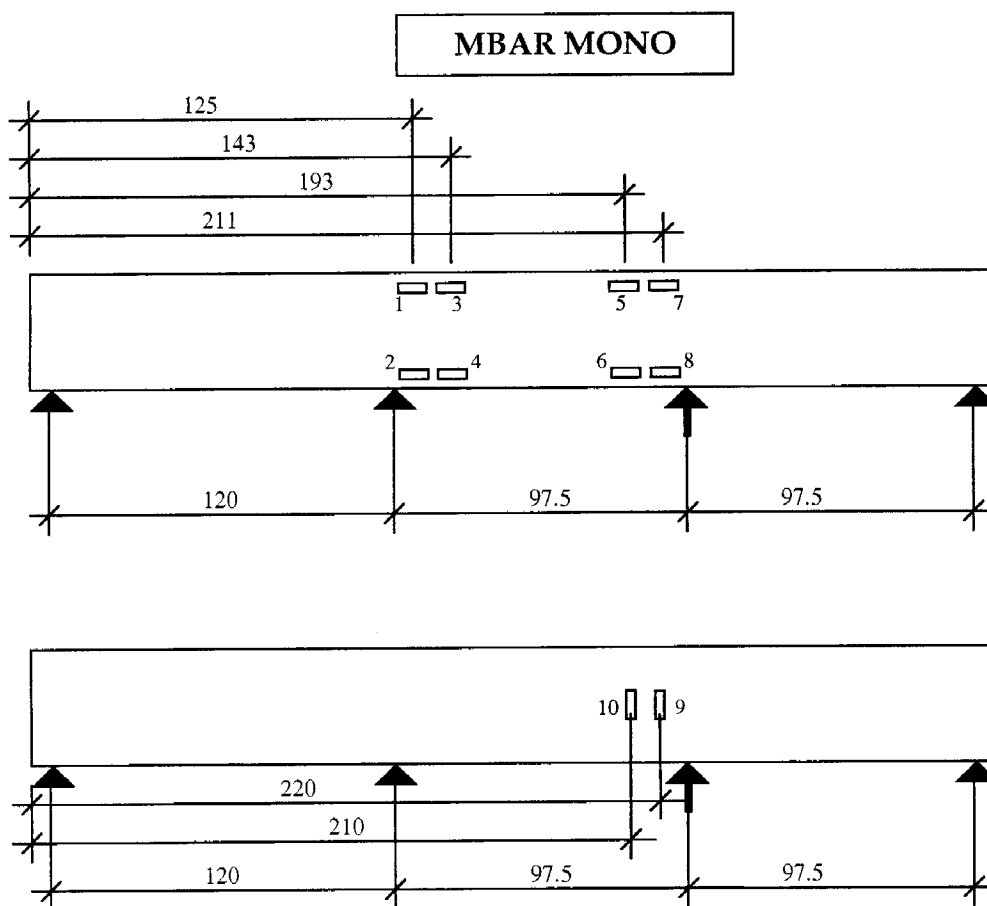
Φωτογραφία 6.7.11 Λειπομέρεια στο σημείο επιβολής του φορτίου P , Όψη Β:
Φαίνονται χαρακτηριστικές καμπτικές ρωγμές καθώς οι ράβδοι Mbar που
αποκαλύφθηκαν.

Το δοκίμιο εμφανίζει καμπτικές ρωγμές μεγάλου εύρους εκατέρωθεν του P και στη μεσαία στήριξη. Οι εφελκόμενοι οπλισμοί έχουν αποκαλυφθεί και στις δύο πλαστικές αρθρώσεις, ενώ το το θλιβόμενο σκυρόδεμα έχει μερικώς αποδιοργανωθεί εκατέρωθεν του σημείου φόρτισης στην περιοχή επαφής. Σε εύρος $1,0d$ εκατέρωθεν του P και της μεσαίας στήριξης, στις παρειές, το σκυρόδεμα της διεπιφάνειας έχει διατριβεί πλήρως, με τεμάχια αδρανών να έχουν μείνει επικολλημένα στις ράβδους INOP, υποδηλώνοντας αστοχία της διεπιφάνειας μεταξύ εγκάρσιου INOP και υπόβασης της δοκού. Στις περιοχές αυτές, οι διαμήκεις ράβδοι ενίσχυσης έχουν αποκαλυφθεί στη διεπιφάνεια με ουσιαστική αποδιοργάνωση της εποξειδικής πάστας που τις περιβάλλει, εμφανίζοντας έτσι μια μορφή αστοχίας της ενίσχυσης σε πρόσφυση. Χαρακτηριστικό είναι, πάντως, ότι δεν έχουν αποκαλυφθεί οι προμορφωμένες αύλακες τοποθέτησης των Mbar σε όλο τους το βάθος, ούτε υπήρξε εφελκυστική αστοχία των οπλισμών αυτών. Όπως φαίνεται στις παραπάνω Φωτογραφίες, δεν εμφανίζονται κεκλιμένες διατμητικές ρωγμές στο δοκίμιο. Το μέγεθος της μικρής κλίσης των καμπτικών ρωγμών αποδεικνύει τη

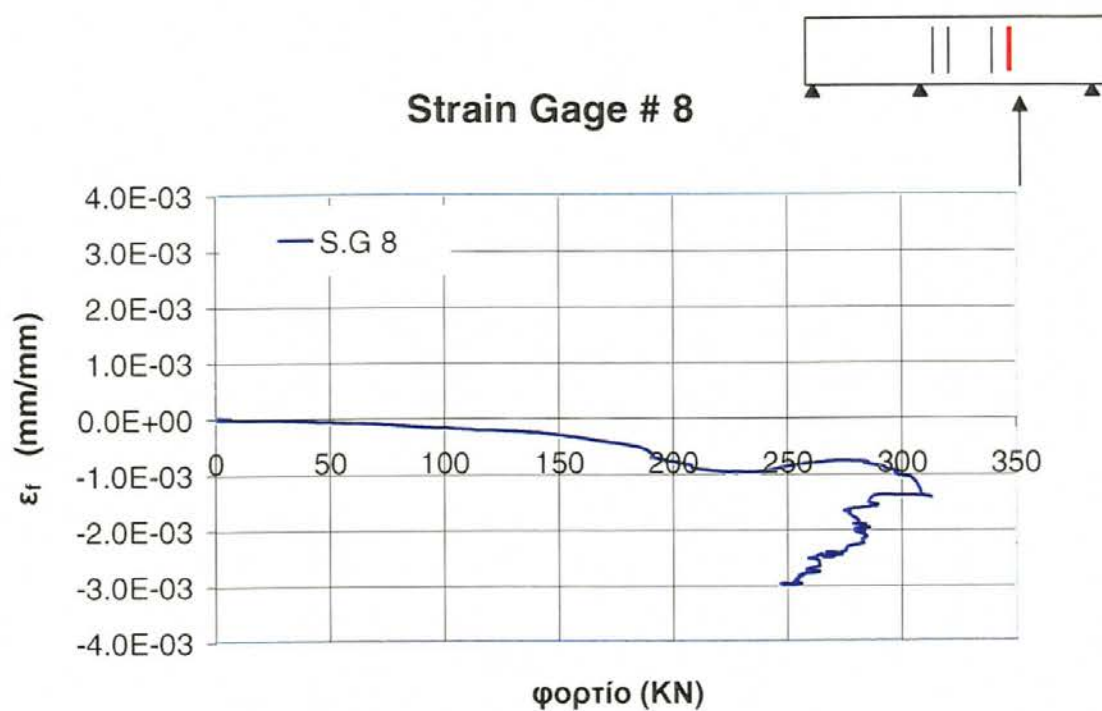
συνεργασία του εγκάρσια τοποθετημένου υφάσματος G60-AR με τις διαμήκειες ράβδους Mbar, στην ανάληψη της τέμνουσας.

6.7.3 Ανάλυση των καταγραφών SG

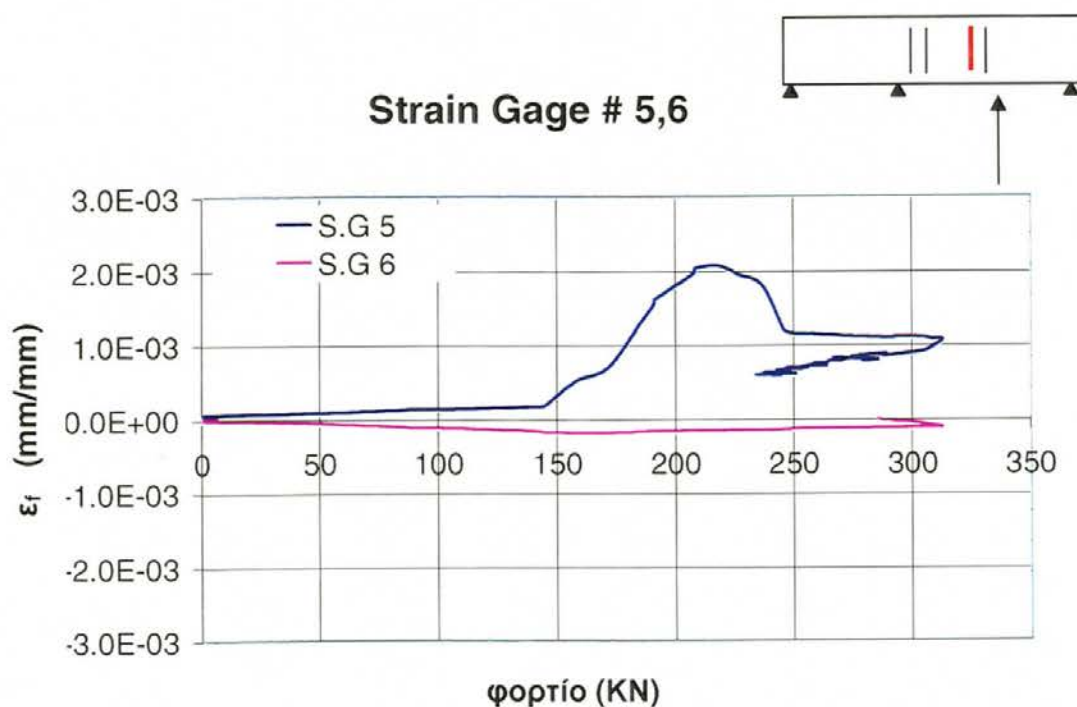
Η διαδικασία ενοργάνωσης των δοκιμών περιγράφηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Η τελική θέση των καταγραφικών ηλεκτρικών μηχανομετρών (SG) και η αρίθμησή τους για το δοκίμιο **MBAR MONO** δίδεται στο Σχήμα 6.7.4. Οι αντίστοιχες ψηφιακές καταγραφές των ηλεκτρονικών μηχανομετρών (SG) συναρτήσει της αντίστασης του δοκιμίου δίνονται στα Σχήματα 6.7.5 έως 6.7.9. Στο κάθε διάγραμμα δείχνεται και η θέση του ζεύγους των μηχανομετρών ως προς τις στηρίξεις και το σημείο επιβολής παραμόρφωσης του εμβόλου. Λόγω δυσλειτουργίας του SG, η καταγραφή αριθμός 7 δεν απέδωσε καμία μέτρηση.



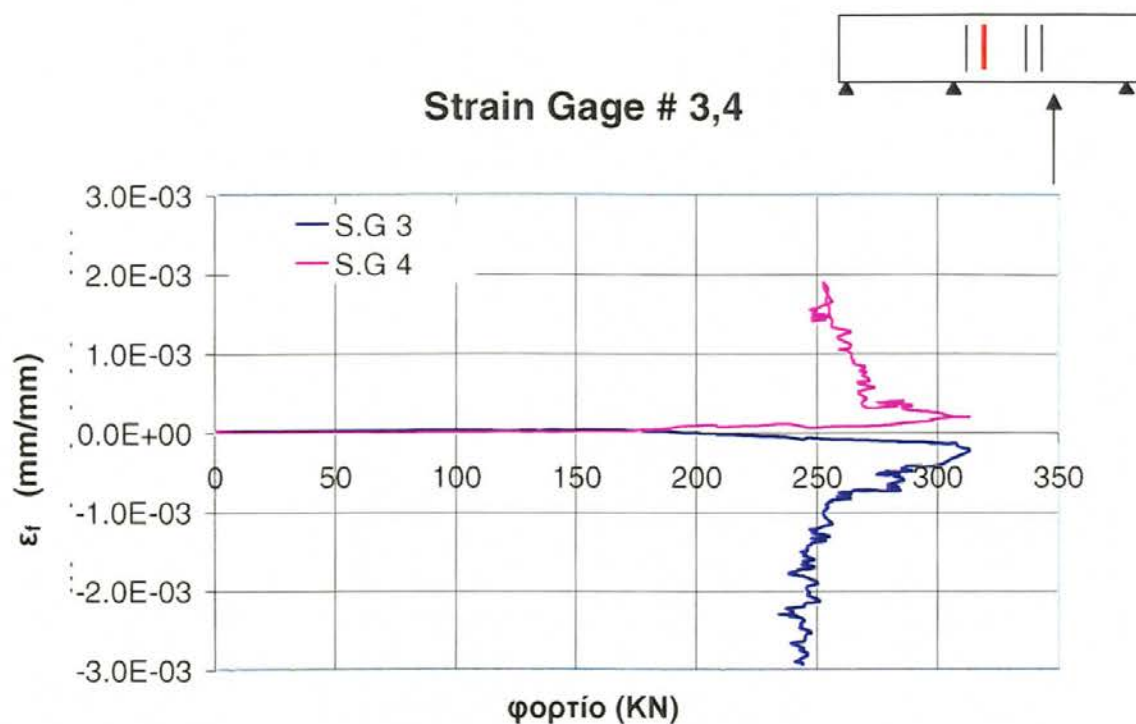
Σχήμα 6.7.4 Δοκίμιο **MBAR MONO**: Διάταξη ηλεκτρονικών μηχανομετρών (SG).



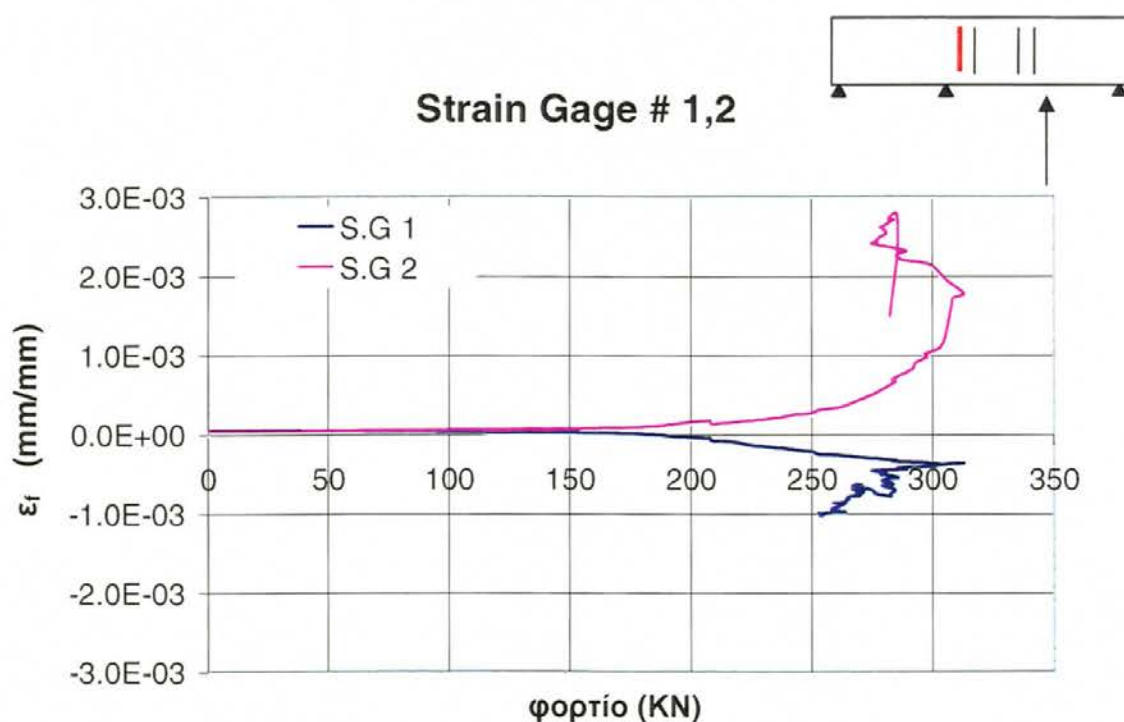
Σχήμα 6.7.5 Διάγραμμα ενδείξεων SG #8 συναρτήσει του φορτίου, (το SG #7 δεν λειτουργήσε) (Ζώνη 1).



Σχήμα 6.7.6 Διάγραμμα ενδείξεων SG #5,6 συναρτήσει του φορτίου (Ζώνη 2).

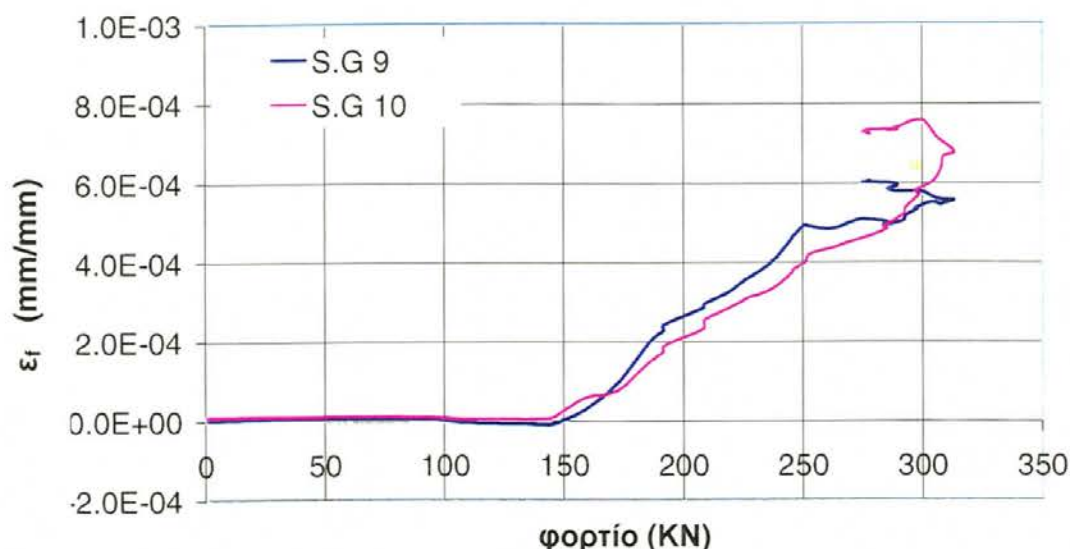


Σχήμα 6.7.7 Διάγραμμα καταγραφών των SG #3,4 συναρτήσει του φορτίου (Ζώνη 3).



Σχήμα 6.7.8 Διάγραμμα καταγραφών των SG #1,2 Συναρτήσει του φορτίου (Ζώνη 4).

Strain Gage νήματος # 9,10

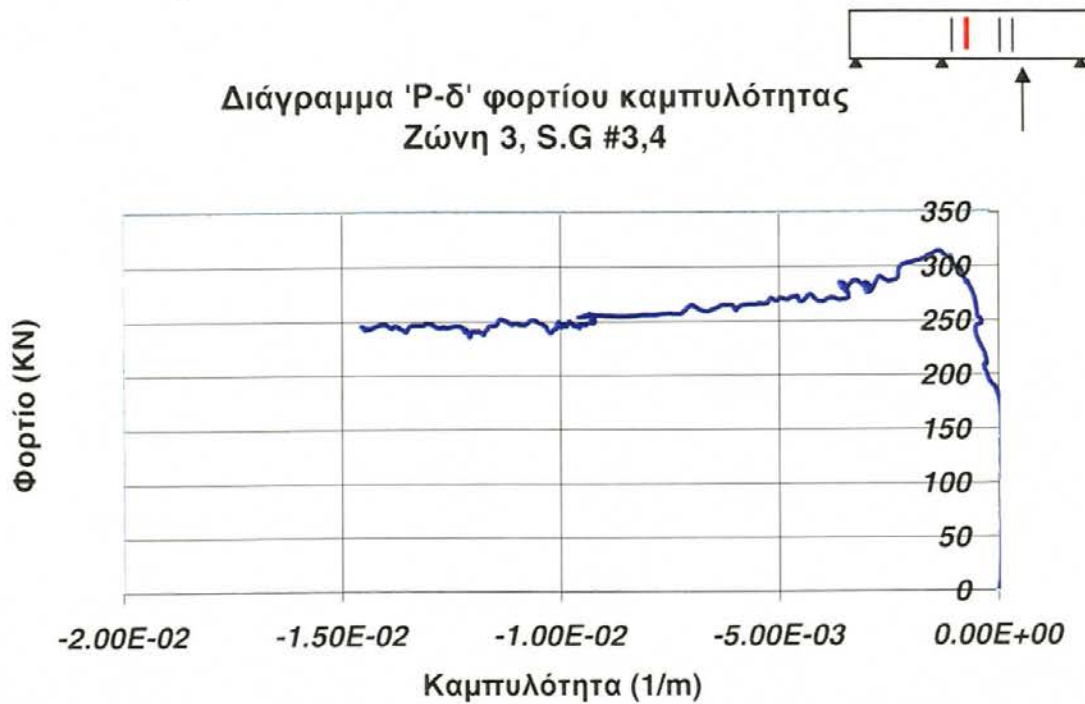


Σχήμα 6.7.9 Διάγραμμα καταγραφών των SG #9,10 συναρτήσει του φορτίου(επιφάνεια νήματος).

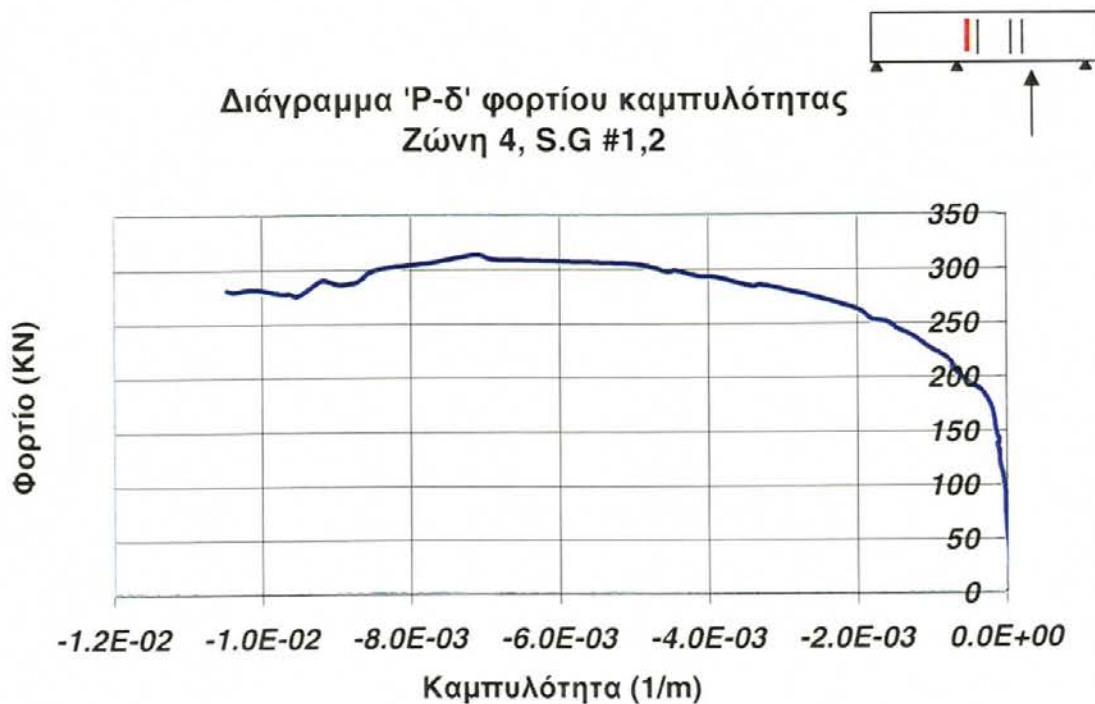
Παρατηρείται από τα παραπάνω ότι για στο SG #5, που βρίσκεται στην εφελκόμενη περιοχή κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου P , αρχίζει να αυξάνεται η ένδειξη ανηγμένης παραμόρφωσης σε φορτίο P 150 kN και κατόπιν 170 kN, εκεί δηλαδή που τοποθετείται ο σχηματισμός της πρώτης πλαστικής άρθρωσης θεωρητικά (179 kN). Όταν το φορτίο φτάνει τα 215 kN (η τιμή 206,3 kN αντιστοιχεί θεωρητικά στη δημιουργία της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης) παρατηρείται αποφόρτιση στην ανηγμένη παραμόρφωση («κλείσιμο» πρώτης πλαστικής άρθρωσης) και στεθεροποίηση της παραμόρφωσης ως το μέγιστο φορτίο. Η απομείωση της παραμόρφωσης του S.G. #5 οφείλεται στο γεγονός ότι το Mbar, δρώντας εξωτερικά και παραμένοντας ελαστικό, απομείωσε σε κάποιο βαθμό τις ανελαστικές παραμορφώσεις μετά την ενεργοποίηση της δεύτερης άρθρωσης (κάτι που δεν παρατηρήθηκε στα άλλα δοκίμια).

6.7.4 Παράγωγες μετρήσεις

Από τα ζεύγη των μηχανομετρώων # 1-2 και 3-4 εξήχθησαν τα παρακάτω διαγράμματα αντοχής – μέσης καμπυλότητας ($P-\varphi$), στις διατομές στις οποίες ήταν τοποθετημένα τα ζεύγη αυτά (Σχ. 6.7.10 και 6.7.11). Αν και η έλλειψη



Σχήμα 6.7.10 Διάγραμμα φορτίου-καμπυλότητας ζώνη 3.



Σχήμα 6.7.11 Γράφημα φορτίου-καμπυλότητας ζώνης 4

μετρήσεων με κυψέλλες φορτίου δεν επιτρέπει την απευθείας μέτρηση των εσωτερικών δυνάμεων – άρα και ροπών – στο δεδομένο τμήμα, είναι εμφανής η διγραμμική συμπεριφορά του ενισχυμένου με ΙΝΟΠ εκάστοτε τμήματος, παρόμοιας μορφής με τα διαγράμματα ροπών καμπυλοτήτων που προέκυψαν από την ανάλυση διατομών και στοιχείων, στο Κεφάλαιο 7.

Οι μέσες καμπυλότητες που μετρήθηκαν σε απόσταση $d/4$ από το σημείο εφαρμογής του φορτίου έδωσαν μία μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή φ_{max} ίση προς $1,47 \cdot 10^{-2} \text{ 1/m}$, στη Ζώνη 3, που είναι μικρότερη της θεωρητικής. Σε επίπεδο αντοχών όμως, η θεωρητική τιμή πρώτης διαρροής του χάλυβα υπολογίστηκε σε $179,4 \text{ kN}$ ($=2,67 \cdot 67,2 \text{ kNm}$) (Πίνακας 7.1), τιμή που επαληθεύεται πλήρως από τα πειραματικά δεδομένα στα δύο διαγράμματα. Η πλαστιμότητα καμπυλοτήτων που επετεύχθη στο πείραμα, είναι περίπου 30,0. Παρατηρώντας τα γραφήματα ροπών-καμπυλότητας για τις ζώνες 3 και 4, διαφαίνεται ότι για τιμές φορτίου λίγο μεγαλύτερες από 300 kN οι αντοχές σταθεροποιούνται, σε συμφωνία και με τα πειραματικά $P-\delta$.

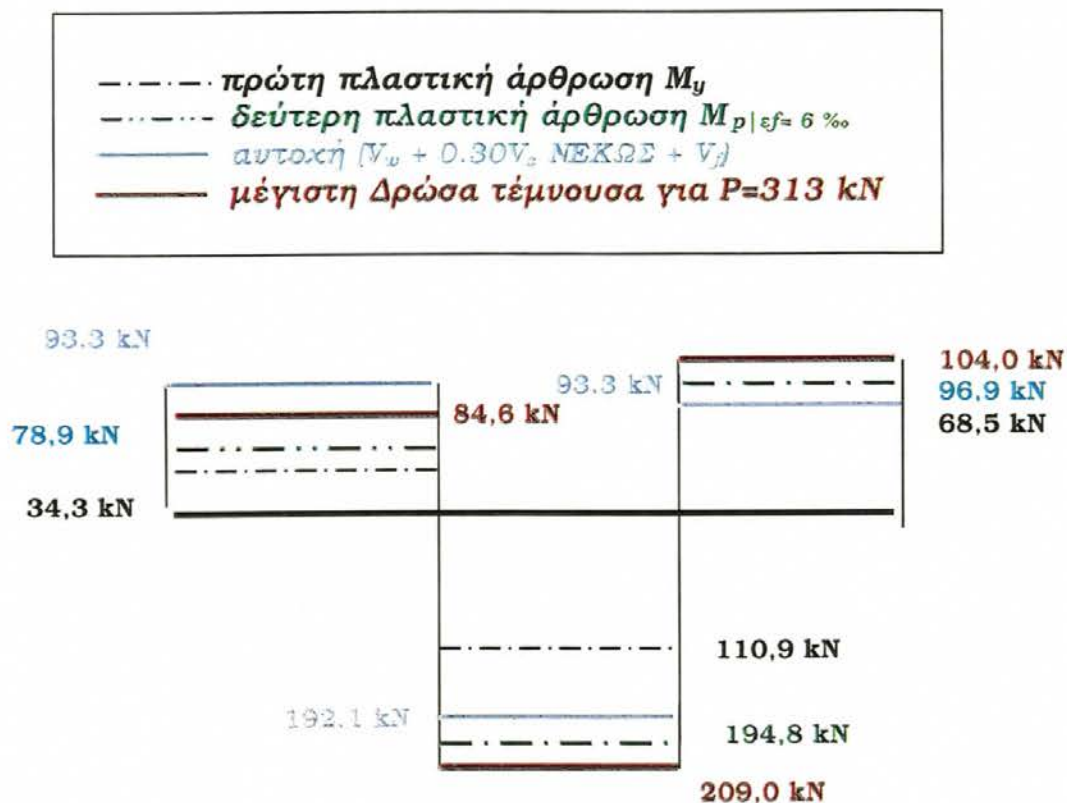
6.7.5 Ανάλυση της διατμητικής αντίστασης

Στο δοκίμιο δεν εμφανίστηκαν ρωγμές διατμητικού τύπου και αποφεύχθηκε η ψαθυρή αστοχία. Τα διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα δίνονται στο σχήμα 6.7.12 ενώ οι αντίστοιχοι υπολογισμοί υπάρχουν στο Παράρτημα II. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης είχε ληφθεί υπόψη η αντοχή του δοκιμίου θεωρώντας μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ 0,6%, οπότε η ροπή αντοχής σχεδιασμού υπολογίστηκε ως $M_{p|\varepsilon_f=0,6\%} = 95,0 \text{ kNm}$. Για τον υπολογισμό της αντοχής των ΙΝΟΠ, θεωρήθηκε η μέγιστη συνεισφορά του ΙΝΟΠ σε παραμόρφωση διαρροής του συμβατικού χάλυβα των συνδετήρων¹.

Το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο ξεπέρασε την πρόβλεψη σχεδιασμού βάσει των παραπάνω παραδοχών 14 kN. Η μέγιστη δρώσα τέμνουσα ξεπέρασε την αντοχή σχεδιασμού θεωρώντας 30% συνεισφορά της V_{cd} , όμως

¹ Σημειώνεται ότι η εν λόγω αντοχή προέκυψε για μέγιστη παραμόρφωση υφάσματος $\varepsilon_f = 0.18\%$, θεώρηση συντηρητική σε σχέση με την τιμή $\varepsilon_f = 0.30\%$ που υιοθετείται σε οδηγίες σχεδιασμού. Οι διαφορές δρώσας τέμνουσας-θεωρητικής αντοχής είναι συνεπώς μικρότερες για άλλη θεώρηση ε_f (Βλ Κεφάλαιο 8).

δεν ξεπέρασε την προβλεπόμενη διατμητική αντοχή του ενισχυμένου δοκιμίου σε κανένα τμήμα της δοκού, θεωρώντας συνεισφορά της V_{cd} σε ποσοστό 100%, σύμφωνα και με τη μορφή της (μονοτονικής) φόρτισης (Παράρτημα II).



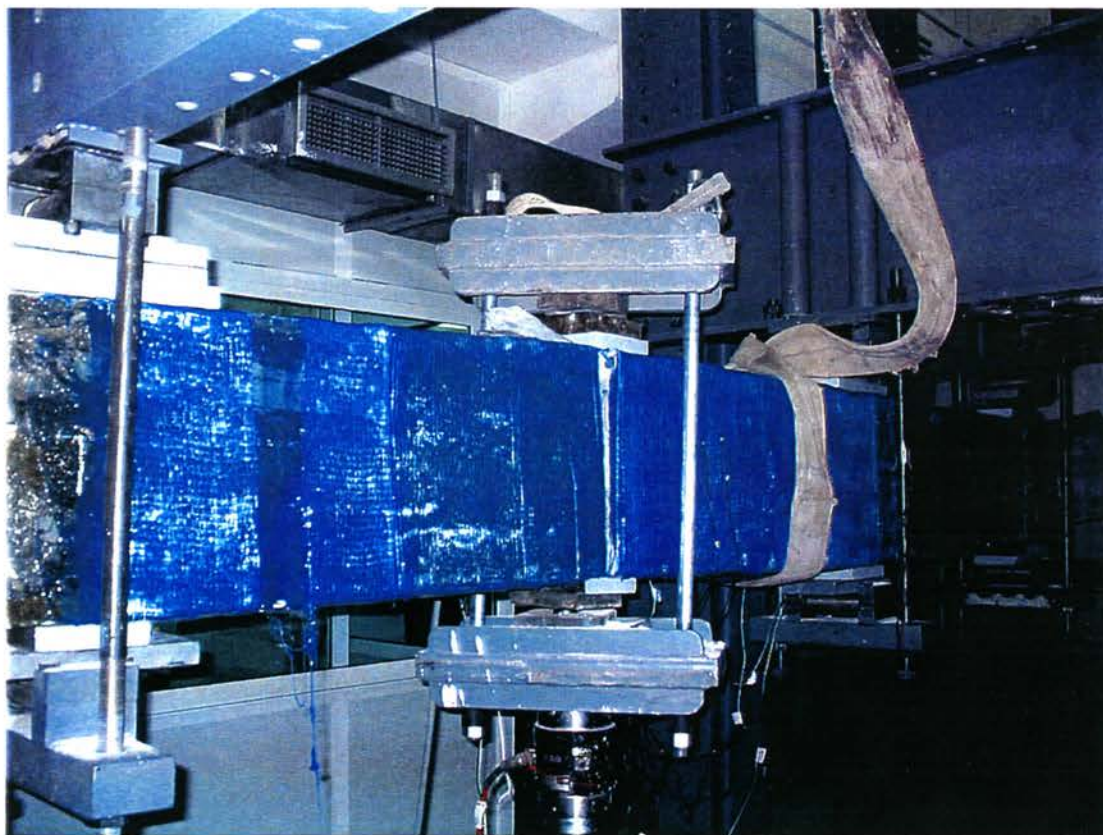
Σχήμα 6.7.12 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής φορέα

Συμπεραίνεται ότι για την παραλαβή της τέμνουσας, οι δευτερεύοντες μηχανισμοί συνέβαλαν πέραν του 30% της V_{cd} που ελήφθη υπόψη και η προσφορά του ΙΝΟΠ στην αντοχή έναντι διατμήσεως ήταν στην πραγματικότητα μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα.

6.8 ΔΟΚΙΜΙΟ #8: MBAR CYCLIC

6.8.1 Περιγραφή του πειράματος

Το δοκίμιο **MBAR CYCLIC** ήταν όμοιο με το **MBAR MONO** και σε διαστάσεις και στον εσωτερικό οπλισμό και ενίσχυση, άρα και με παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά. Όπως και το προηγούμενο, το δοκίμιο αυτό δεν απαιτήθηκε βάσει των υπολογισμών του Παραρτήματος II να ενισχυθεί έναντι διατμήσεως στο δεξιό τμήμα μεταξύ μεσαίας και ακραίας στήριξης με ΙΝΟΠ υάλου, όμως, για λόγους περιορισμού σε εγκάρσια παραμόρφωση λόγω λυγισμού των ΙΝΟΠ ράβδων MBar κοντά στην επιφάνεια του κορμού, όλο το δοκίμιο περιτυλίχθηκε με συνεχές ΙΝΟΠ G60-AR (Φωτογραφία 6.8.1).

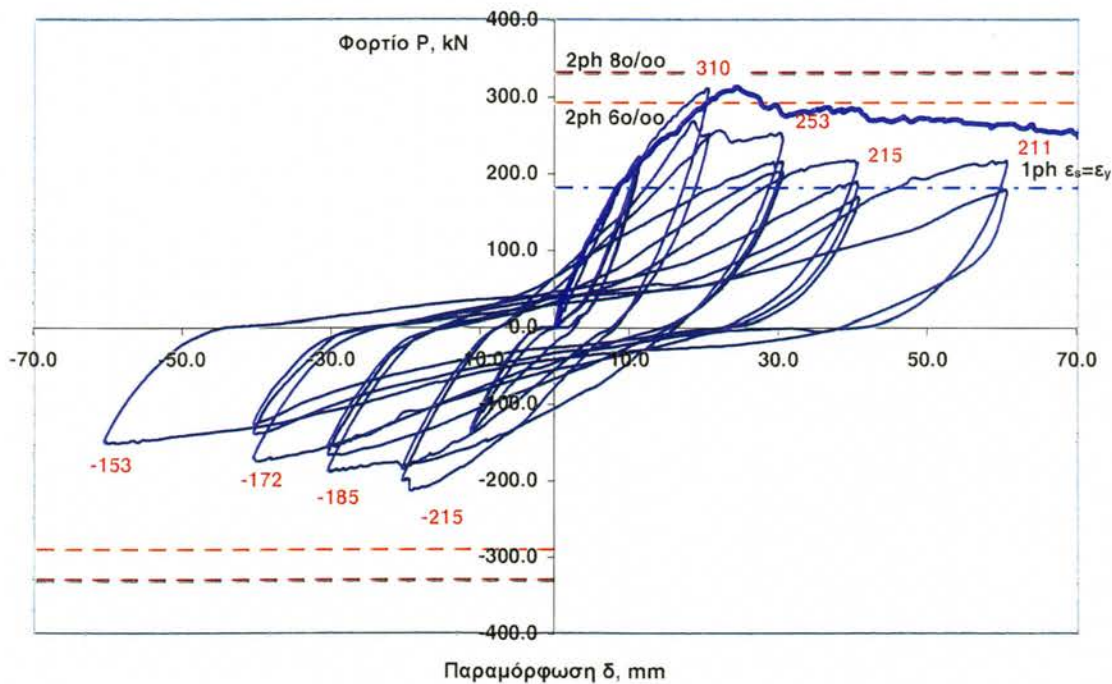


Φωτογραφία 6.8.1 Το δοκίμιο **MBAR CYCLIC** στην πειραματική διάταξη ενοργανωμένο.

Η θεωρητικά προβλεπόμενη ροπή αντοχής της κάθε διατομής είναι $M_{p|\varepsilon_f=0,6\%} = 95,0 \text{ kNm}$, $M_{p|\varepsilon_f=0,8\%} = 107,8 \text{ kNm}$ και $M_{p|\varepsilon_f=1,1\%} = 126,1 \text{ kNm}$, θεωρώντας μέγιστη παραμόρφωση των ράβδων Mbar ίση με 0.6%, 0.8% και 1.1%, αντίστοιχα. Το δοκίμιο καταπονήθηκε συνολικά με ένδεκα πλήρεις κύκλους εναλλασσόμενης φόρτισης. Το πείραμα σταμάτησε σε μέγιστη παραμόρφωση

δ_{max} ίση προς 61 mm, με μέγιστη καταγεγραμμένη αντοχή του δοκιμίου ίση προς 311 kN. Η παραπάνω τιμή δεν έφτασε ποτέ τη θεωρητική τιμή θεωρώντας δύο πλαστικές αρθρώσεις με $M_p = M_{p|_{\epsilon_f=0,8\%}}$ ($=3,07 \cdot 107,8 \text{ kNm} = 331 \text{ kN}$), όπως και το δοκίμιο **MBAR MONO**, που απέδωσε παραπλήσια αντοχή (313 kN).

Από την καταγραφή του φορτίου και της μετατόπισης του εμβόλου προέκυψαν οι βρόχοι υστερήσεως του Σχήματος 6.8.1. Στο ίδιο Σχήμα παραβάλλονται για σύγκριση και το διάγραμμα $P-\delta$ του δοκιμίου **MBAR MONO**, καθώς και οι προβλεπόμενες οριακές τιμές της αντοχής (βάσει ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της δοκού στις δύο πλαστικές αρθρώσεις), για



Σχήμα 6.8.1 Δοκίμιο **MBAR CYCLIC** : Βρόχοι υστερήσεως.

- Πρώτη διαρροή στο χάλυβα ($M_y = M_{p|_{\epsilon_s=0,18\%}}$)
- Σχηματισμός δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή $M_p = M_{p|_{\epsilon_f=0,6\%}}$ και
- Σχηματισμός δύο πλαστικών αρθρώσεων με καμπτική αντοχή $M_p = M_{p|_{\epsilon_f=0,8\%}}$,

όπου η M_p υπολογίζεται με μέσες τιμές αντοχών των υλικών (ονομαστικές για τα ΙΝΟΠ) και επιπεδότητα της διατομής, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 6.8.1 Σημεία εναλλαγής κύκλων μετατόπισης και δείκτες συμπεριφοράς ανά κύκλο του δοκιμίου **MBAR CYCLIC**.

Αρ.	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	% P_{max} NEAK	% P @ δ_{max} MBAR MONO	K kN/m	E KNmm	μ_δ	μ_E
1	11,3	11,3	11,3	140	11,3	221	11,3	0,98	1,04	15962	966	1,3	1,3
2	11,4	11,3	11,3	135	11,4	213	11,3	0,94	1,01	15334	376	1,3	0,5
3	20,6	20,6	20,6	215	19,5	311	20,3	1,37	1,06	13187	4598	2,4	6,3
4	20,6	20,6	20,6	187	20,6	268	18,4	1,18	0,91	11640	4249	2,5	5,8
5	30,6	30,6	30,6	191	30,2	255	21,6	1,13	0,84	8598	9288	3,6	12,7
6	30,5	30,6	30,5	169	30,5	215	30,1	0,95	0,70	6333	7117	3,6	9,7
7	30,6	30,5	30,6	158	30,6	202	30,4	0,89	0,66	5900	5411	3,6	7,4
8	40,6	40,5	40,5	176	40,0	216	40,0	0,96	0,76	4907	8931	4,8	12,2
9	40,6	40,6	40,6	140	40,4	188	40,4	0,83	0,67	4074	6577	4,8	9,0
10	40,6	40,7	40,6	128	40,5	168	40,5	0,74	0,59	3651	5163	4,8	7,1
11	60,6	60,6	60,6	153	60,3	216	60,5	0,95	0,82	3049	12677	7,2	17,3

Οι πειραματικοί δείκτες απόκρισης των καταγραφών για τον κάθε κύκλο δίδονται στον Πίνακα 6.8.1. Στα αποτελέσματα του Πίνακα 6.4.1 περιλαμβάνονται :

- οι μέγιστες /ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}), με τις αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο και η μέση παραμόρφωση δ_{mean} , όπου $\delta_{mean} = (\delta_{min} + \delta_{max})/2$
- οι παραμορφώσεις στις αντίστοιχες ακραίες δυνάμεις (δ/P_{min} και δ/P_{max}),
- το ποσοστό της μέγιστης δύναμης του κύκλου, σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή του **NEAK MONO**, καθώς και το ποσοστό της αντοχής στη μέγιστη παραμόρφωση του κάθε κύκλου, σε σχέση με την αντοχή του **MBAR MONO** στην ίδια παραμόρφωση.
- η μέση δυσκαμψία \bar{K} του βρόχου, που δίδεται από την εξίσωση

$$\bar{K} = \frac{P_{max} - P_{min}}{\delta/P_{max} - \delta/P_{min}} \cdot 1000 \text{ kN / m}$$

- η ενεργειακή απορρόφηση που περικλείεται από το υστερετικό διάγραμμα του κάθε κύκλου και, τέλος,
- οι αντίστοιχες πλαστιμότητες μέσης παραμόρφωσης μ_δ και υστερετικής ενέργειας μ_E , όπου E η απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του βρόχου (σε εύρος δ_{mean}) και

$$\mu_\delta = \delta_{mean} / \delta_y$$

$$\mu_E = E / E_y, \quad E_y = P_y \delta_y / 2$$

και P_y , δ_y οι δύναμη και η παραμόρφωση διαρροής (πειραματικά μετρούμενη).

Το δοκίμιο **MBAR CYCLIC** εμφάνισε διαφορετική συμπεριφορά από το μονοτονικό πείραμα, τείνοντας ουσιαστικά μεταξύ ανακυκλίσεων αυξανόμενου εύρους σε μέγιστες αντοχές κατά πολύ μικρότερες των αντοχών του **MBAR MONO** κάτω και από την αντοχή του μη ενισχυμένου δοκιμίου ελέγχου **NEAK MONO** (225 kN). Ήδη από τον 6^ο κύκλο, που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 30,5 mm, το δοκίμιο σταθεροποιείται σε μία παραμένουσα αντοχή P_{res} ίση με 210 kN περίπου, 14% μικρότερη από την ελάχιστη παραμένουσα αντοχή του **MBAR MONO**, κάτω και από την αντοχή του **NEAK MONO**. Συμπερασματικά, η συνεισφορά σε ενίσχυση των ράβδων ΙΝΟΠ παύει να υφίσταται πριν από τα 30,5 mm, πλέον πιθανά (βάσει και του τρόπου αστοχίας του δοκιμίου, όπως αναπτύσσεται παρακάτω) λόγω απώλειας της πρόσφυσης σε μεγάλο τμήμα του μήκους τους στις κρίσιμες ζώνες, καθώς και αστοχίας σε διάτμηση εκατέρωθεν του P .

Η καμπτική δυσκαμψία του δοκιμίου είναι όμοια με αυτή του **MBAR MONO** μέχρι τον 3^ο κύκλο μόνο, οπότε η παραμόρφωση έφθασε για πρώτη φορά πολύ κοντά στην παραμόρφωση αστοχίας της υπόβασης των ράβδων ΙΝΟΠ κατά το μονοτονικό πείραμα, που τοποθετείται κοντά στο 0,6%. Από αυτό το σημείο και εξής η μέση δυσκαμψία μειώνεται σταθερά μεταξύ ανακυκλίσεων, εμφανίζοντας έντονα φαινόμενα στένωσης των βρόχων (*pinching*) και σταδιακό μηδενισμό της περί το σημείο μηδενικού φορτίου.

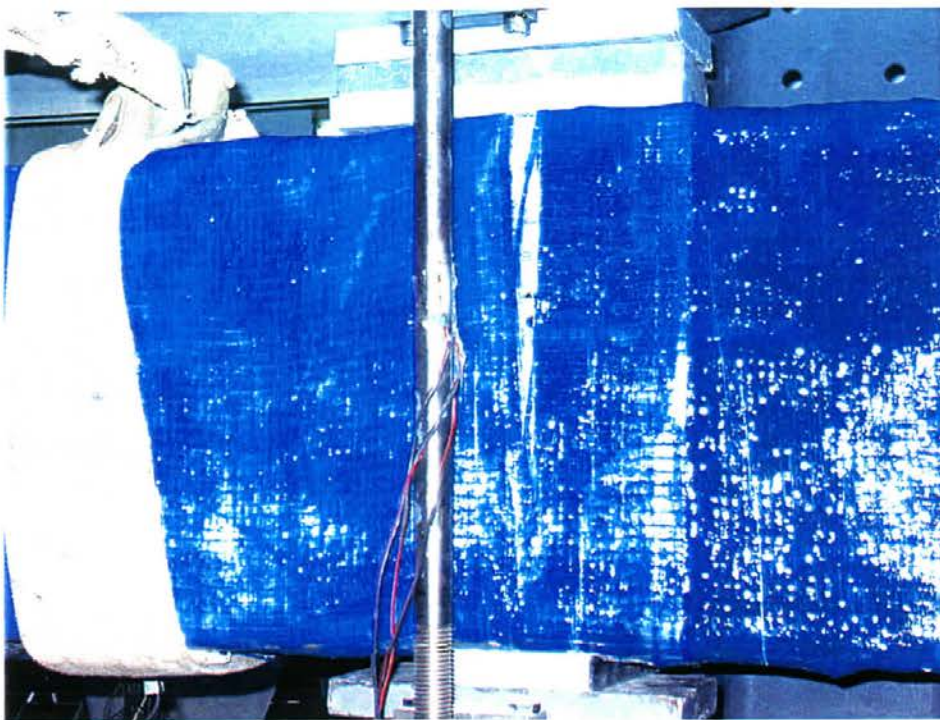
μηδενική πρακτικά δυσκαμψία της, κατά τις εναλλαγές πρόσημου παραμόρφωσης, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 6.8.1.

**Φωτογραφία
6.8.2**
Διάρρηξη του
εγκάρσιου
ΙΝΟΠ στο
πέλμα της
δοκού.



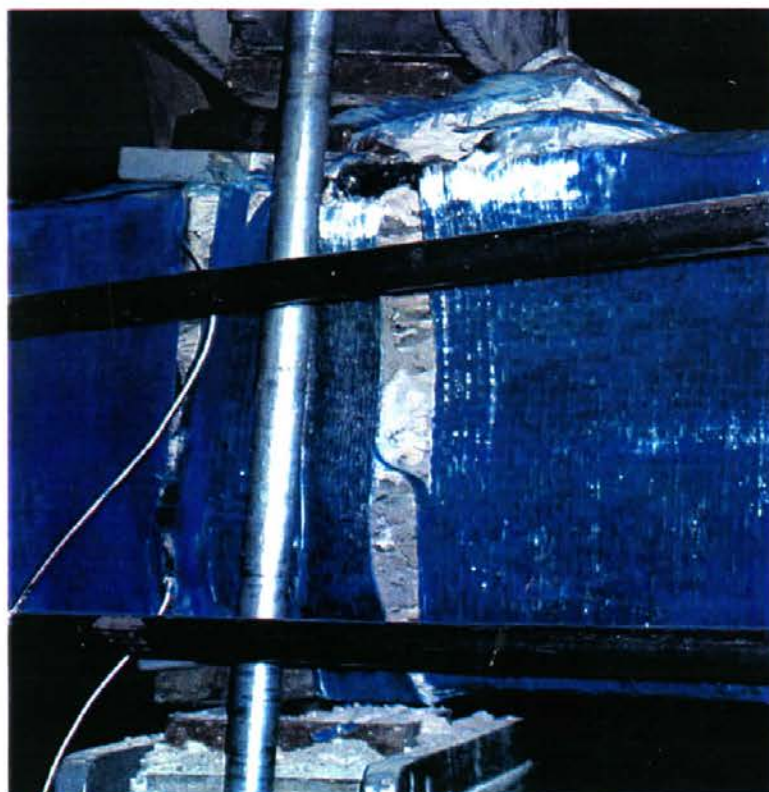
Κατά τους επόμενους κύκλους, στη συνέχεια του πειράματος, εμφανίστηκαν μικρού εύρους καμπτικές ρωγμές και στη μεσαία στήριξη (Φωτογραφία 6.8.3), υποδηλώνοντας τη δημιουργία δεύτερης πλαστικής άρθρωσης, χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται μία αύξηση ή έστω διατήρηση σε σταθερό επίπεδο της αντοχής του δοκιμίου στο σύνολό του – αντίθετα με ότι συνέβη σε άλλα ανακυκλιζόμενα δοκίμια – γεγονός που αποδεικνύει ότι δεν υπήρχαν περιθώρια ανακατανομής στη δοκό.

Το δοκίμιο συνέχισε να αποδιοργανώνεται και το εγκάρσιο ΙΝΟΠ υάλου G60-AR συνέχισε να αποκολλάται σε διάφορες θέσεις στην περιοχή του P προς την ακραία στήριξη (Φωτογραφία 6.8.4), μέχρι και το τέλος του πειράματος. Από πλευράς απόκρισης, ουσιαστικά όλη η επιβαλλόμενη παραμόρφωση στο P παραλαμβάνονταν τοπικά με διατμητικής μορφής παραμόρφωση εκατέρωθεν του φορτίου, με το υπόλοιπο τμήμα της δοκού να μην συμμετέχει καθόλου, με το δοκίμιο να έχει πρακτικά σχηματίσει μία καθαρά διατμητική άρθρωση μήκους $0,5 d$ (Φωτογραφία 6.8.5).

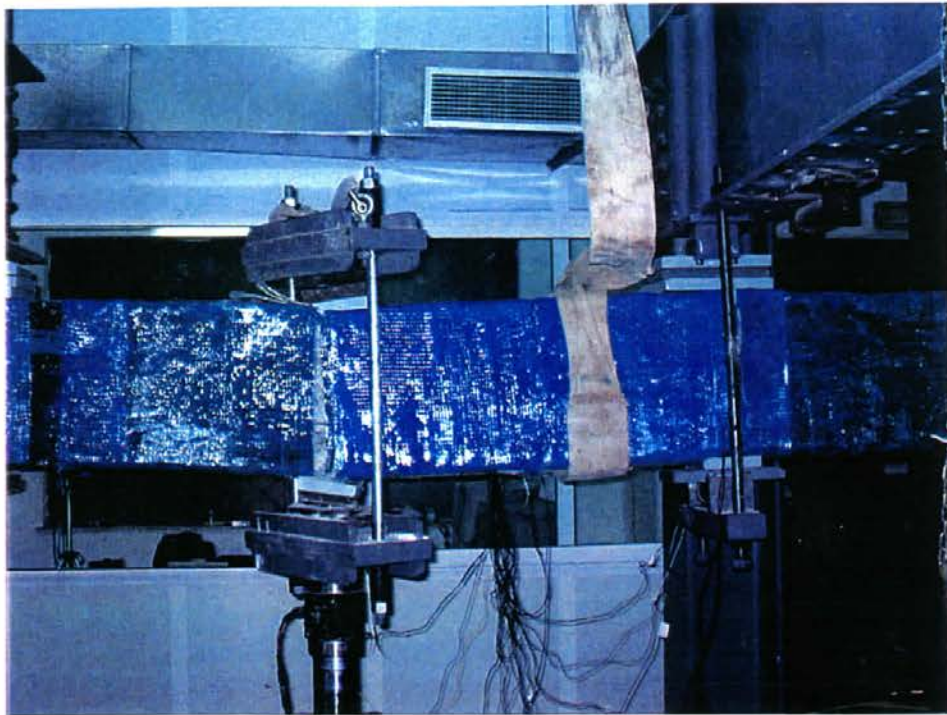


Φωτογραφία
6.8.3
Εμφάνιση
καμπτικών
ρωγμών στη
μεσαία στη-
ριξη.

Φωτογραφία 6.8.4
Αποδιοργάνωση
του δοκιμίου και
αποκόλληση του
εγκάρσιου ΙΝΟΠ
αριστερά από το
φορτίο P , προς την
ακραία στήριξη Α.



Φωτογραφία
6.8.5 Καμπτο-
διατμητική
παραμόρφωση
δοκιμίου κατά
την αστοχία,
Όψη Α.



Φωτογραφία 6.8.6 Αποκάλυψη της περιοχής αστοχίας του εγκάρσιου ΙΝΟΠ
στα αριστερά του P , προς PA , Όψη Α.

Κατά την τελική αστοχία, απομακρύνθηκε το εγκάρσιο ΙΝΟΠ που είχε αστοχήσει από τη δοκό (το οποίο πλέον δεν είχε καμία πρόσφυση με το υπόβαθρο και αφαιρέθηκε αμέσως), οπότε και εμφανίστηκε αριστερά από το

φορτίο P , στο τμήμα PA , από το φορτίο προς την ακραία στήριξη A , διαμπερής διατμητική ρωγμή, με σημαντική σχετική μετατόπιση των δύο τμημάτων της δοκού εκατέρωθεν της ρωγμής (Φωτογραφίες 6.8.6 έως 6.8.9).



Φωτογραφία 6.8.7

Λεπτομέρεια λυγισμού της συμβατικής ράβδου οπλισμού λόγω εγκάρσιας δράσης βλήτρου και ταυτόχρονης θλίψης.



Φωτογραφία 6.8.8

Λεπτομέρεια αστοχίας του ΙΝΟΠ ράβδου άνθρακα επάνω από τη διέλευση της ρωγμής.



**Φωτογραφία
6.8.9**

Λεπτομέρεια της αποδιοργάνωσης των ινών άνθρακα στη ράβδο και διάρρηξη τμήματος της ράβδου ΙΝΟΠ.

Η αποκάλυψη του τμήματος της κρίσιμης ζώνης, σε μήκος περίπου $d/2$ από το σημείο εφαρμογής του P εμφάνισε:

- την ύπαρξη των ράβδων ΙΝΟΠ ανέπαφων στις αύλακες, πλην μίας.
- η δεύτερη από επάνω ράβδος ΙΝΟΠ, προς τα δεξιά, αστόχησε σε δράση βλήτρου, στο σημείο διέλευσης της διαγώνιας ρωγμής (Φωτογραφίες 6.8.6, 6.8.8 και 6.8.9) και
- παρατηρήθηκε λυγισμός όλων των συμβατικών οπλισμών στο κάτω άκρο – οι οπλισμοί είναι θλιβόμενοι κατά τον εκάστοτε πρώτο κύκλο αυξανόμενου εύρους –
- Ο συνδετήρας που συγκρατούσε τους οπλισμούς αυτούς δεν έχει διαρραγεί.
- Όλες οι εν λόγω ράβδοι στη θλιβόμενη παρειά έχουν λυγίσει σε σχήμα δεύτερης ιδιομορφής κατά Euler (Φωτογραφίες 6.8.6 και 6.8.7).

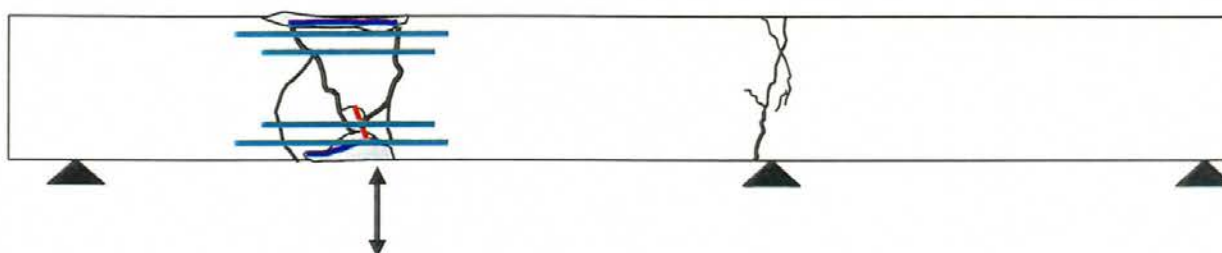
Σημειώνεται ότι στο εν λόγω τμήμα της δοκού δεν απαιτήθηκε συνεχής εγκάρσιος οπλισμός ΙΝΟΠ (Παράρτημα ΙΙ), η δε πρόσθετη διατμητική απαίτηση σε σχέση με την αντοχή σχεδιασμού ήταν μόνο 5 kN, ποσοστό 6% της διάτμησης που παραλάμβαναν οι υφιστάμενοι συνδετήρες και το 30% της V_{cd} . Εν τούτοις, τοποθετήθηκε συνεχές ΙΝΟΠ για λόγους, όπως προαναφέρθηκε, προστασίας των διαμήκων ΙΝΟΠ ράβδων. Πέραν αυτού, το τμήμα αυτό είχε μικρότερη διατμητική απαίτηση από το μεσαίο τμήμα ΡΒ, Εργ.ΟΣ ΕΜΠ

που γενικά είναι πλέον βεβαρημένο σε διάτμηση. Εν τούτοις, η δοκός τελικά αστόχησε σε αυτό το τμήμα της.

Ακολουθούν πρόσθετες χαρακτηριστικές φωτογραφίες που είναι ενδεικτικές της τελικής αστοχίας του δοκιμίου καθώς και τα απαραίτητα σκαριφήματα (Σχήματα 6.8.2 και 6.8.3), που αποτυπώνουν τη τελική κατάσταση των δύο όψεων του, όπως αυτά προέκυψαν μετά την αφαίρεση των ΙΝΟΠ έπειτα από την απομάκρυνση του δοκιμίου από τη πειραματική διάταξη.

Η αποκάλυψη των ρωγμών επαληθεύει ότι η ανακυκλιζόμενη απόκριση της δοκού επήλθε λόγω διατμητικής αστοχίας στο τμήμα του δοκιμίου αριστερά του P προς την ακραία στήριξη, με επακόλουθη εμφάνιση φαινομένων λυγισμού των διαμήκων συμβατικών οπλισμών λόγω ταυτόχρονης δράσης βλήτρου και καμπτοδιατμητικής θλίψης, καθώς και πλήρους αστοχίας της αγκύρωσης των M_{bar} στο τμήμα αυτό, σε απόσταση τουλάχιστον d προς τη μεσαία στήριξη και $d/2$ προς την αριστερή ακραία στήριξη (Φωτογραφίες 6.8.5, 6.8.6 και 6.8.10).

Α' ΟΨΗ



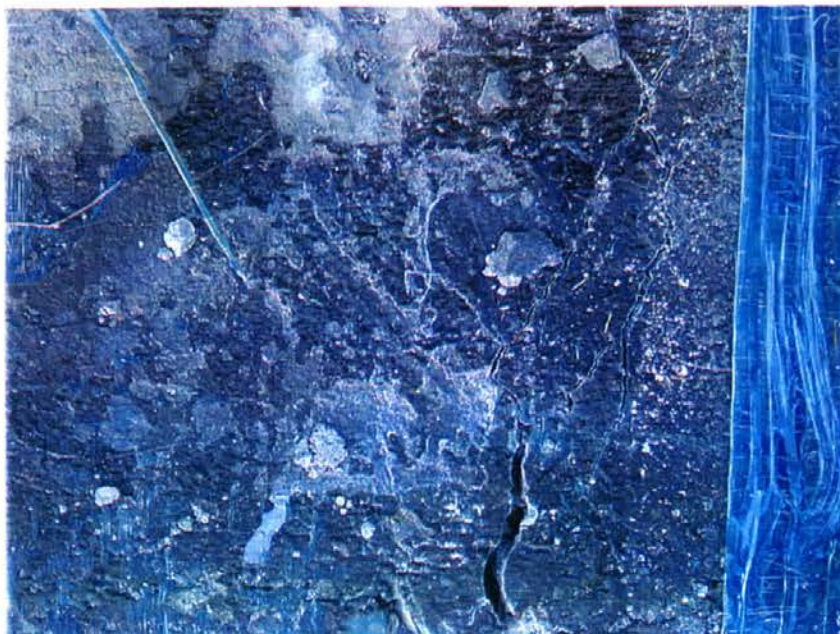
- Θέσεις ράβδων άνθρακα που αποκαλύφθηκαν
- Θέσεις διαμήκων ράβδων που αποκαλύφθηκαν
- Θέσεις συνδετήρων που αποκαλύφθηκαν
- Θέσεις ρωγμών που αποκαλύφθηκαν

Σχήμα 6.8.2 Σκαρίφημα τελικής κατανομής ρωγμών δοκιμίου
MBAR CYCLIC – Όψη Α.



Φωτογραφία 6.8.10 Πρόσοψη της δοκού στο σημείο επιβολής του φορτίου (*P*), Όψη Α : Διακρίνονται:

- οι χαρακτηριστικές διαμπερείς ρωγμές,
- η παραμένουσα διατμητική παραμόρφωση δεξιά του σημείου *P*,
- ο λυγισμός των διαμήκων συμβατικών οπλισμών σε δράση βλήτρου και
- η αστοχία των ΙΝΟΠ ράβδου ινών άνθρακα σε δύο σημεία.
- Σημειώνεται η καθαρότητα της επιφάνειας της ράβδου ΙΝΟΠ.



Φωτογραφία 6.8.11 Λεπτομέρεια στη στήριξη Β , Όψη Α : Διακρίνονται χαρακτηριστικές καμπτικές ρωγμές λόγω διαρροής του συμβατικού οπλισμού.

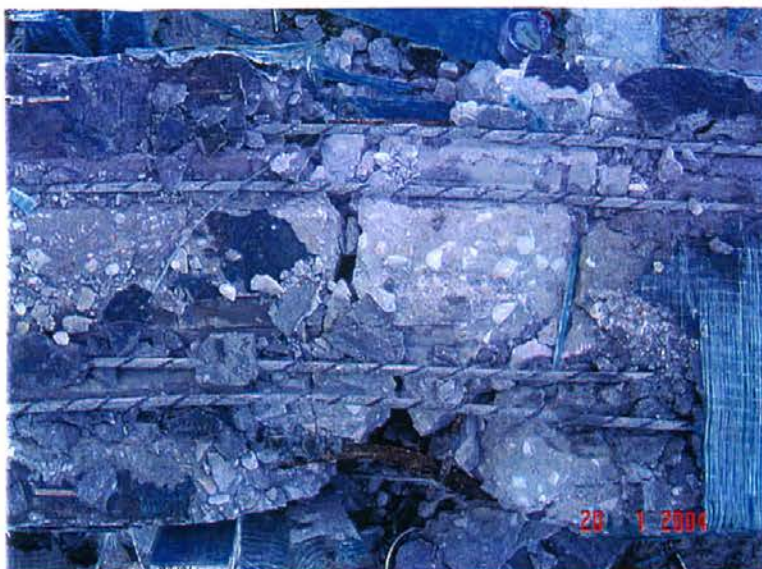
Οι ράβδοι ΙΝΟΠ άνθρακα εμφάνισαν αστοχία λόγω εγκάρσιας διάτμησης σε δύο σημεία καθ' ύψος της δοκού, επάνω από την διερχόμενη διαπλατυσμένη ρωγμή (Φωτογραφίες 6.8.8 – 6.8.10 και 6.8.12). Αποτέλεσμα της αστοχίας ήταν να καταστραφεί η σύνδεση των ινών και να διαρραγεί τμήμα της διατομής της ράβδου. Παρατηρείται ότι η επιφάνεια της ράβδου ΙΝΟΠ είναι καθαρή από σκυρόδεμα, κάτι που συνηγορεί στην αλλοίωση της πρόσφυσης της ράβδου με το περιβάλλον υλικό. Βέβαια, λόγω της διαφορετικής μορφής συμπεριφοράς, το φαινόμενο αυτό είναι πολύ πιο ορατό και εκτενές από ότι στο δοκίμιο **MBAR MONO**, γεγονός που σημαίνει ότι η ολίσθηση των ράβδων ενίσχυσης έπαιξε σημαντικό ρόλο στην αστοχία. Επίσης, σε τμήμα εκατέρωθεν της διακριτής ρωγμής που δημιουργήθηκε, παρατηρείται και εδώ πλήρης αποκόλληση του τσιμεντοειδούς υλικού σύνδεσης με τις διεπιφάνειες του προμορφωμένου αύλακα τοποθέτησης των ράβδων (Φωτογραφία 6.8.10), κάτι που δεν παρατηρείται πουθενά αλλού κατά μήκος των ράβδων ΙΝΟΠ, ούτε και στο δοκίμιο **MBAR MONO**, αν και το δοκίμιο αυτό καταπονήθηκε σε παραμόρφωση 110 mm. Αντίθετα στην περίπτωση του **MBAR MONO**, υπολείμματα του συνδετικού υλικού έχουν παραμείνει στα αυλάκια (Φωτογραφίες 6.8.10, 6.8.12 και 6.8.13).

Σημειώνεται πάντως ότι λόγω της συγκέντρωσης των παραμορφώσεων στην περιοχή του P και τη δημιουργία ης διατμητικής άρθρωσης, δεν υπήρξαν μεγάλες καμπτικές απαιτήσεις στην περιοχή της δεύτερης πλαστικής άρθρωσης. Σαν αποτέλεσμα, αν και εμφανίστηκε περιορισμένη καμπτική ρηγμάτωση² και σε αυτή τη θέση, όμως, οι ράβδοι ΙΝΟΠ δεν εμφάνισαν πρόβλημα πρόσφυσης στη διεπιφάνεια (Φωτογραφίες 6.8.11, 6.8.13) μετά την αποκάλυψή τους.

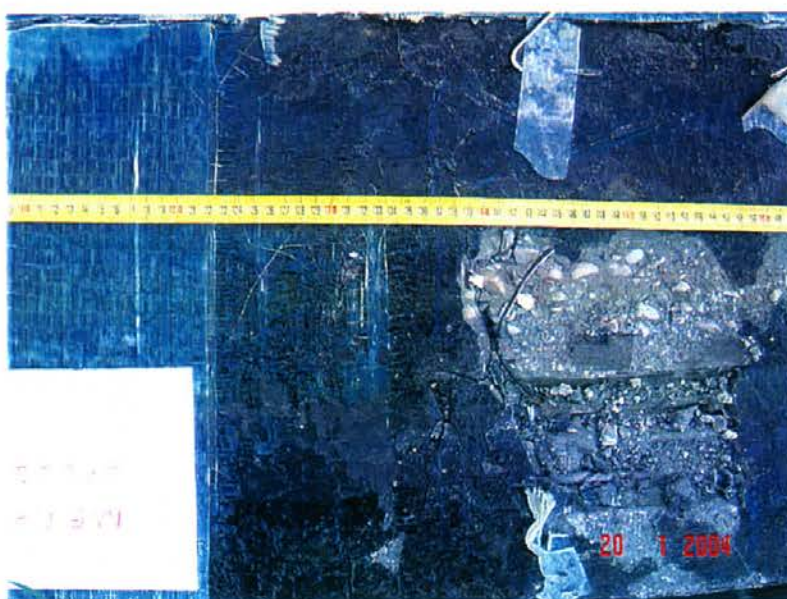
² Από τις μετρήσεις παραμόρφωσης που αναφέρονται παρακάτω, συμπεραίνεται ότι και σε αυτή τη θέση δημιουργήθηκε πλαστική άρθρωση.

Β' ΟΨΗ

Σχήμα 6.8.3 Σκαρίφημα τελικής κατανομής ρωγμών δοκιμίου MBAR CYCLIC – Όψη Β.



Φωτογραφία 6.8.12
 Λεπτομέρεια στο σημείο επιβολής του φορτίου (P), Όψη Β: Διακρίνονται χαρακτηριστικές διαμπερείς ρωγμές και λυγισμός του συμβατικού οπλισμού λόγω δράσης βλήτρου.

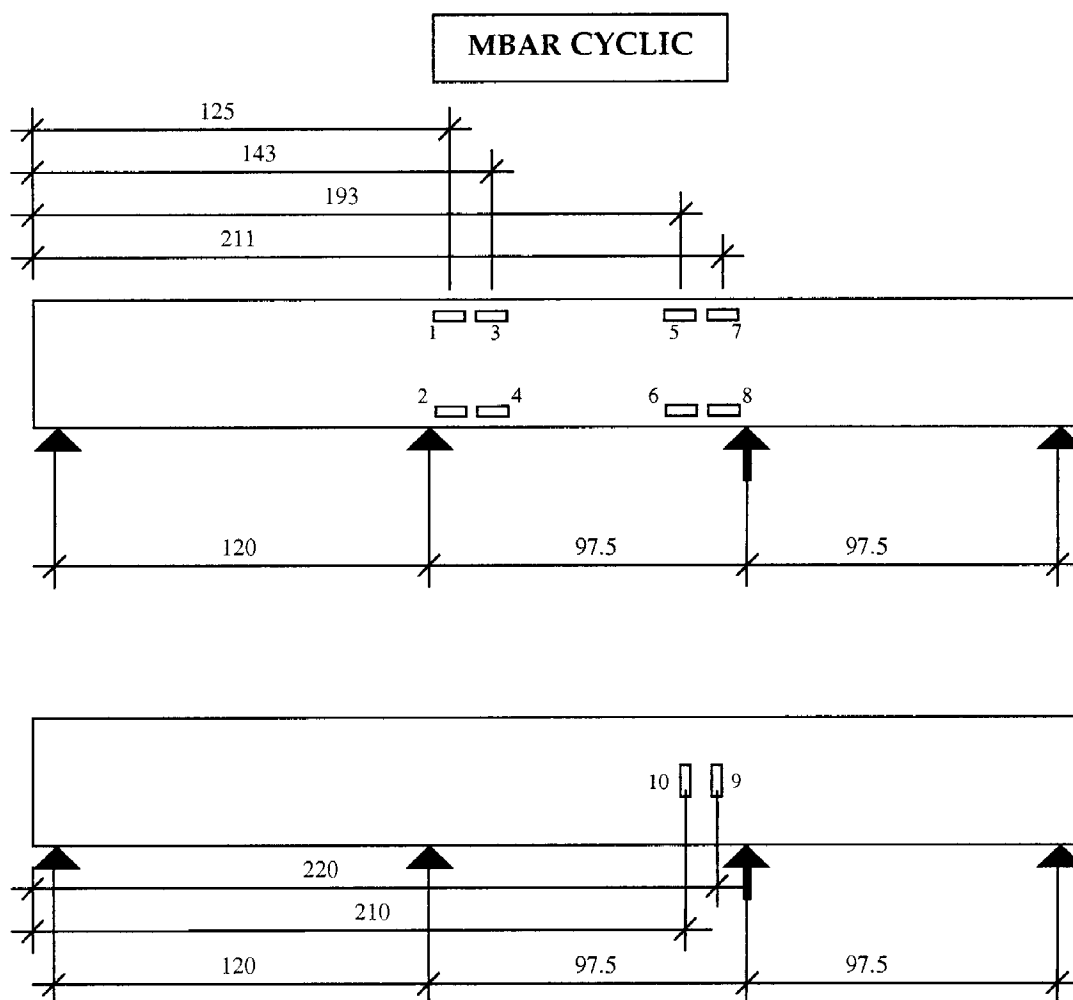


Φωτογραφία 6.8.13
 Λεπτομέρεια στη στήριξη Β, Όψη Β: Διακρίνονται χαρακτηριστικές ρωγμές και αστοχία της συνάφειας σκυροδέματος και ΙΝΟΠ ράβδου άνθρακα.

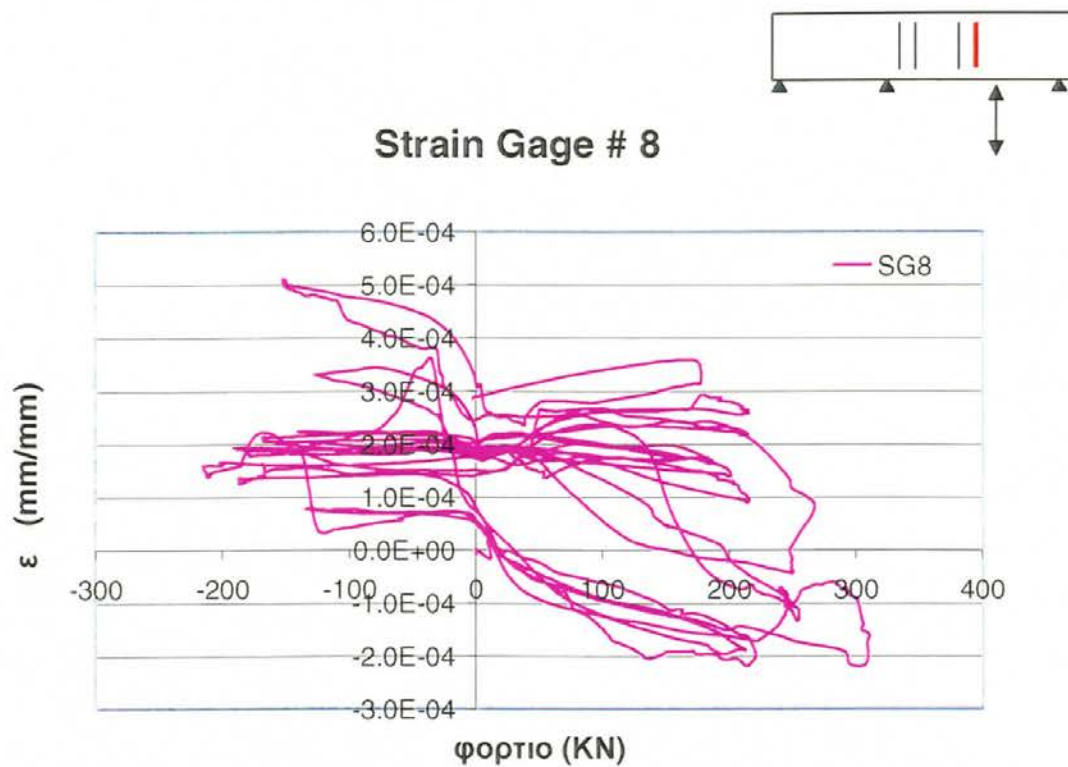
6.8.3 Ανάλυση των καταγραφών SG

Η διαδικασία ενοργάνωσης των δοκιμών περιγράφηκε στα Κεφάλαια 4 και 5. Η τελική θέση των καταγραφικών ηλεκτρικών μηχανομετρών (SG) και η αρίθμηση τους για το δοκίμιο **MBAR CYCLIC** δίδεται στο Σχήμα 6.8.4.

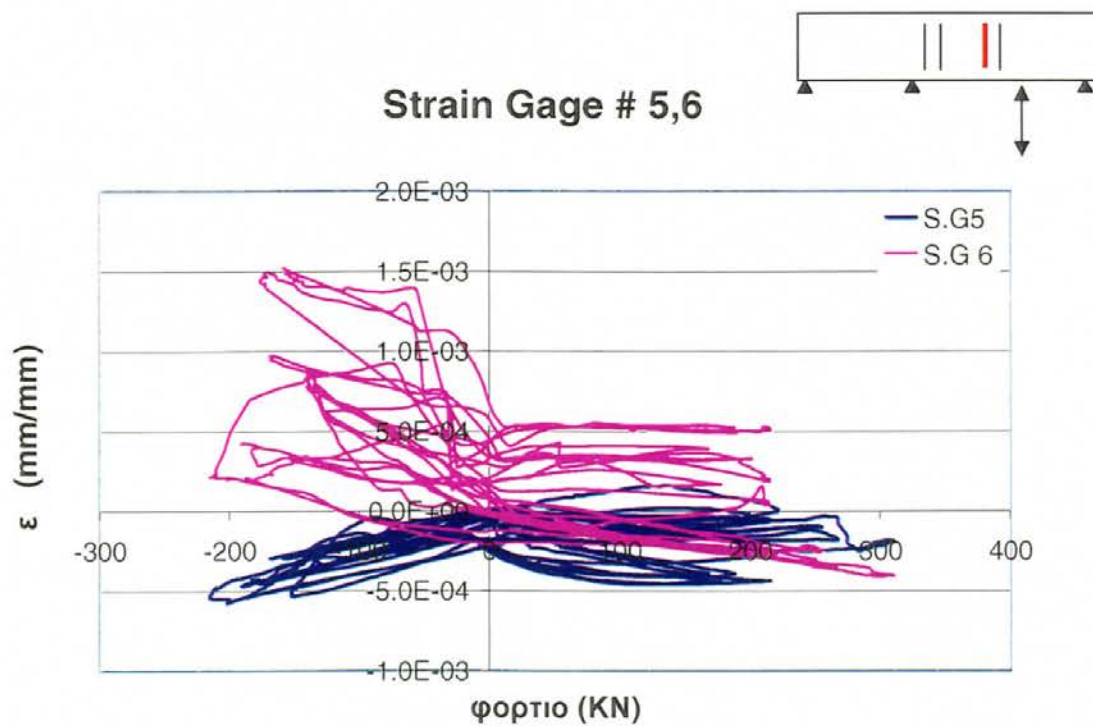
Οι αντίστοιχες καταγραφές των SG, δίδονται στα Σχήματα 6.8.5 έως 6.8.9, συγκρινόμενες ανά δύο στην ίδια διατομή, συναρτήσει του φορτίου P . Για ευκολότερη παρακολούθηση της απόκρισης, στα σκαριφήματα δείχνεται ενδεικτικά η θέση του ζεύγους των SG, ως προς το σημείο φόρτισης και τις στηρίξεις. Σημειώνεται ότι τα SG αρ. 2, 4 και 7 δεν λειτούργησαν.



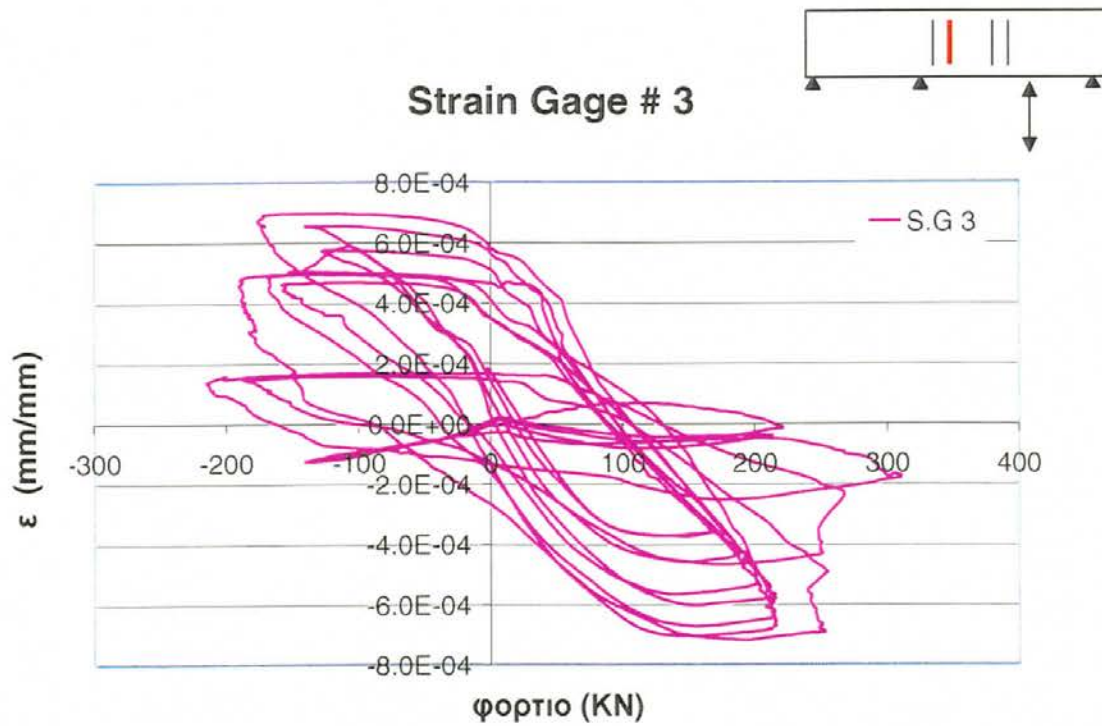
Σχήμα 6.8.4 Θέση και αρίθμηση των καταγραφών SG, δοκίμιο **MBAR CYCLIC**.



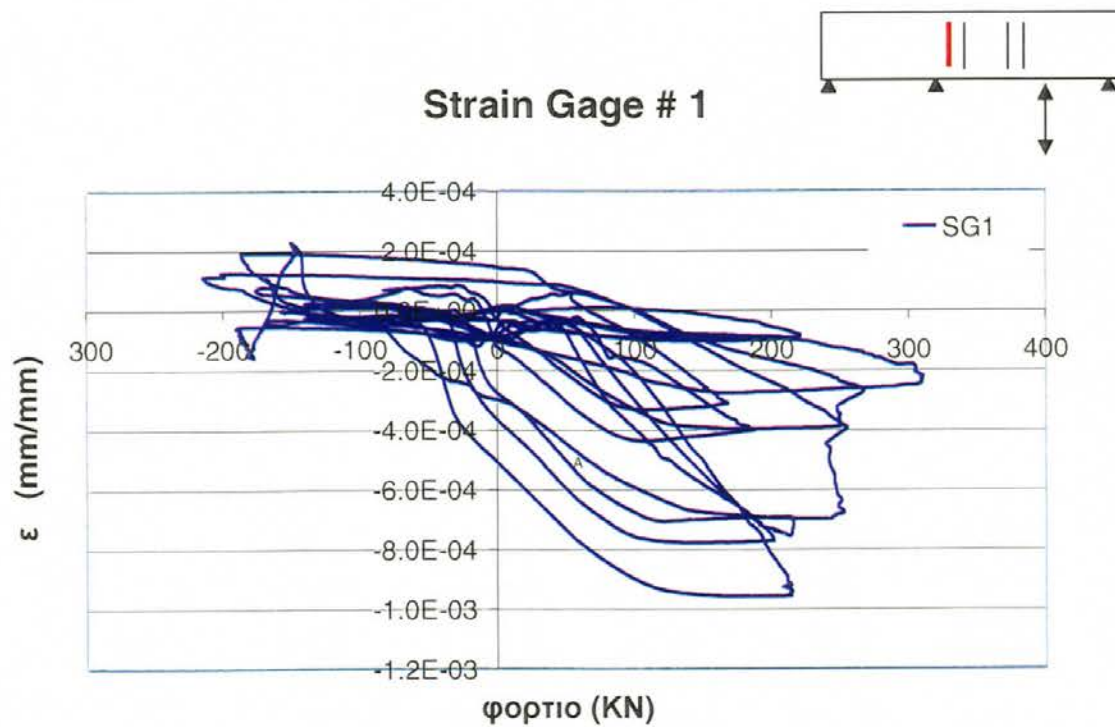
Σχήμα 6.8.5 Γράφημα ενδείξεων ηλεκτρονικού SG #8 (το SG 7 δεν λειτουργήσε), (Ζώνη 1).



Σχήμα 6.8.6 Γράφημα ενδείξεων SG #5,6 (Ζώνη 2)

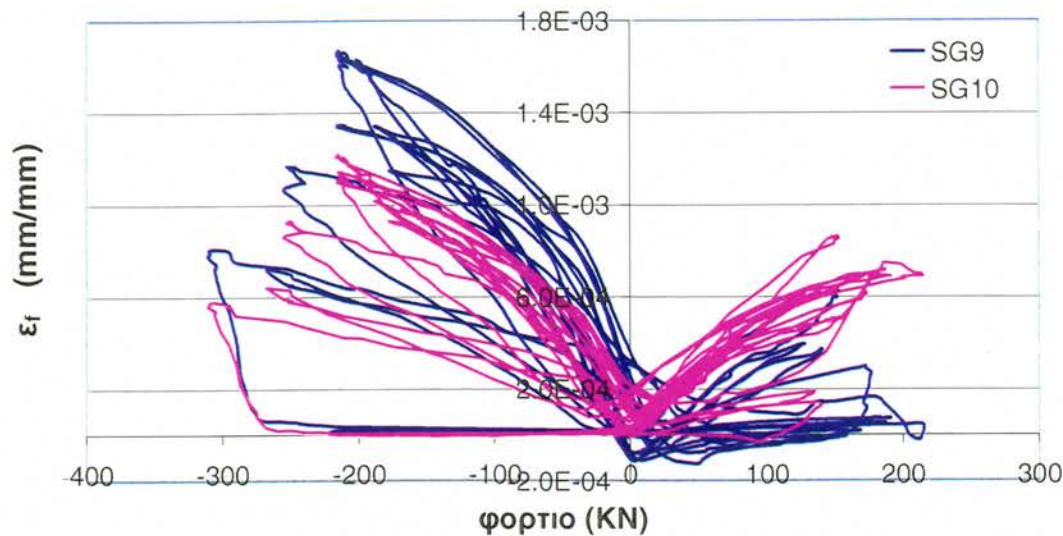


Σχήμα 6.8.7 Γράφημα ενδείξεων SG #3 (το SG 4 δεν λειτουργήσε), (Ζώνη 2).



Σχήμα 6.8.8 Γράφημα ενδείξεων SG #1 (το SG 2 δεν λειτουργήσε), (Ζώνη 1).

Strain Gage Νηματος # 9,10



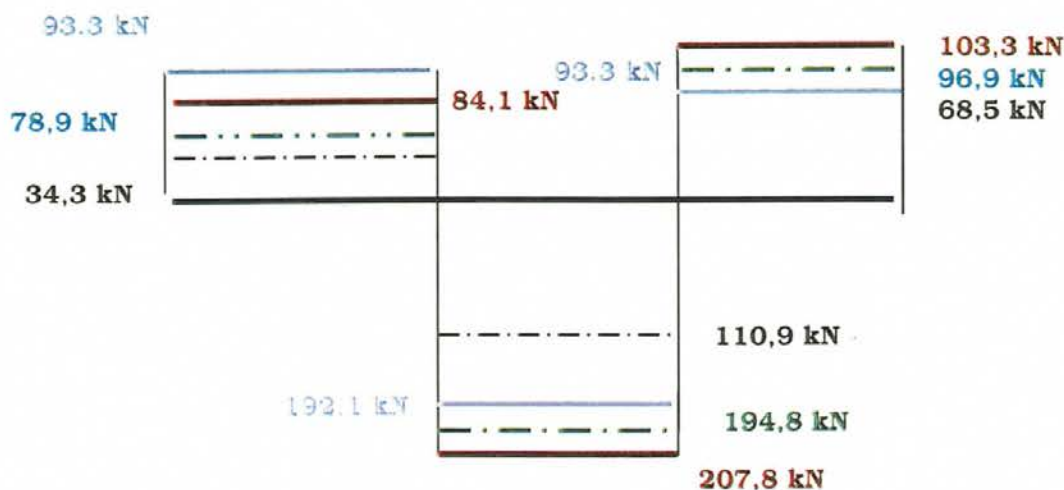
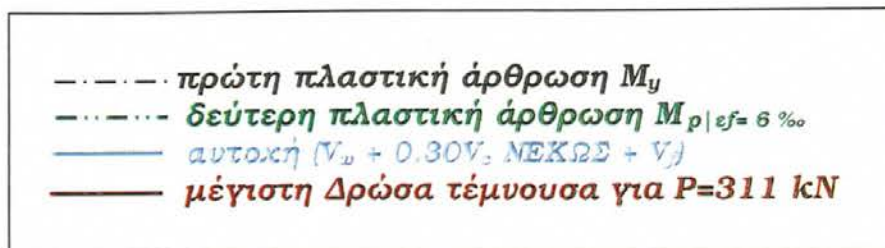
Σχήμα 6.8.9 Γράφημα ενδείξεων SG #9,10.

6.8.4 Ανάλυση της διατμητικής αντοχής

Τα διαγράμματα τέμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.8.10 ενώ οι υπολογισμοί δίδονται στο Παράρτημα II. Για την εύρεση της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης λήφθηκε υπόψη η αντοχή του δοκιμίου για μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση στις ράβδους ίση προς 6‰ και αντίστοιχη ροπή αντοχής $M_p = 95.0 \text{ kNm}$.

Η φέρουσα ικανότητα για το ανακυκλιζόμενο **MBAR CYCLIC** ήταν ίδια με αυτή του μονοτονικού. Λόγω του πρακτικώς ίδιου μέγιστου φορτίου που επετεύχθη, η δρώσα τέμνουσα που αναπτύχθηκε στο δοκίμιο είναι ίδια με την δρώσα διατμητική απαίτηση, όπως και στο δοκίμιο **MBAR MONO**. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Παρατήματος II, η απαιτούμενη τέμνουσα, είναι μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα αντοχή θεωρώντας ωφέλιμη συνεισφορά του εγκάρσιου ΙΝΟΠ $\varepsilon_f = 1,8\%$ ³ στο δεύτερο (PB) και τρίτο (PA) άνοιγμα του δοκιμίου, κατά 16kN και 10 kN αντίστοιχα, ξεπερνώντας την τιμή σχεδιασμού κατά 12 kN και 6 kN αντιστοίχως.

³ Σημειώνεται ότι η εν λόγω αντοχή προέκυψε για μέγιστη εγκάρσια παραμόρφωση υφάσματος $\varepsilon_f = 0.18\%$, θεώρηση αρκετά συντηρητική σε σχέση με την τιμή σχεδιασμού που υιοθετείται κανονιστικά, $\varepsilon_f = 0.30\%$. Οι διαφορές δρώσας τέμνουσας - θεωρητικής αντοχής είναι συνεπώς μικρότερες για άλλη θεώρηση ε_f .



Σχήμα 6.8.10 Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων δράσεων και αντοχής του φορέα.

Στο τμήμα που αστόχησε, άρα, και για θεώρηση σχεδιασμού $\varepsilon_f = 0.18\%$, η παρεχόμενη διατμητική αντοχή στο μεσαίο τμήμα PB ξεπεράστηκε από την πειραματική απόκριση κατά 6%, ποσοστό που θεωρείται αμελητέο αν ληφθεί υπόψη ο βαθμός συντηρητικότητας της παραπάνω παραδοχής. Σε κάθε περίπτωση, το δοκίμιο αστόχησε διατμητικά, εμφανίζοντας έντονα φαινόμενα λόγω της αστοχίας σε όλους τους μηχανισμούς παραλαβής διάτμησης. Συμπεραίνεται άρα ότι

1. η αρχική συντηρητική παραδοχή $\varepsilon_f = 0.18\%$ είναι ανεπαρκής και
2. η παραδοχή σχεδιασμού ότι 30% των δευτερευόντων μηχανισμών δύνανται να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό είναι μη συντηρητική.

Σαν αποτέλεσμα, η συνεισφορά των δευτερευόντων μηχανισμών πρέπει να αγνοείται πλήρως.