

5. Β ΦΑΣΗ: ΕΠΙΣΚΕΥΗ, ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

5.1 Περιγραφή των δοκιμιών και της πειραματικής διαδικασίας

Με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας της πρώτης φάσης που παρουσιάστηκε παραπάνω, ακολουθεί αποκατάσταση των βλαβών στα έξι υποστυλώματα και επαναλαμβάνεται η πειραματική διαδικασία του Προγράμματος με την ίδια ακριβώς πειραματική διαδικασία και διάταξη, με σκοπό τον πειραματικό επανέλεγχο των επισκευασμένων και/ή ενισχυμένων τετράγωνων υποστυλωμάτων υφισταμένων κτιρίων από ΟΣ, τα οποία είχαν προηγουμένως αστοχήσει και αποκαταστάθηκαν ή/και ενισχύθηκαν, σε διαξονική ανακυκλιζόμενη καταπόνηση (Β φάση των πειραμάτων).

Στη Β Φάση των πειραμάτων που ακολουθούν, τα υποστυλώματα επισκευάζονται και/ή ενισχύονται με υφάσματα από σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΝΟΠ) με χρήση ινών υάλου (*Glass Fiber Reinforced Polymers - GFRP*) εγκάρσιως ή ινών άνθρακα (*Carbon Fiber Reinforced Polymers - CFRP*) διαμήκως και επανελέγχονται στο ΕΟΣ του ΕΜΠ, με επανάληψη της ιστορίας φορτίου /επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, όπως κατά την προηγούμενη φάση. Σε αυτή τη φάση όμως, μετά από εφαρμογή ανακυκλήσεων σε παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε πλαστιμότητα (προ της επέμβασης ίση με 2,50, ή 3,00 για τα ΥΠ30_), η επιπόνηση συνεχίζεται έως τα 10cm, υπό σταθερό φορτίο. Σύμφωνα με το στατικό προσομοίωμα της διάταξης, η παραμόρφωση αυτή αντιστοιχεί σε διπλάσια σχετική παραμόρφωση της οροφής ισογείου του πρωτοτύπου κτιρίου.

Όπως και στην Α φάση, η επιβαλλόμενη ιστορία φόρτισης σε όλα τα δοκίμια ακολουθεί παρόμοια βήματα εφαρμογής φορτίου και παραμόρφωσης (Σχήμα 4.1). Αρχικά επιβάλλεται το αξονικό φορτίο, και ακολούθως εγκάρσια παραμόρφωση με αυξανόμενο εύρος και ένδεκα ή δώδεκα ανακυκλήσεις, αυξουσας μορφής. Σε κάθε περίπτωση, η μετατόπιση διαρροής λαμβάνεται πειραματικά από το διάγραμμα αντοχής-παραμόρφωσης ($P-\delta$) που

καταγράφεται, ενώ το μέγεθος της τελικής παραμόρφωσης ποικίλει από δοκίμιο σε δοκίμιο.

Τα δοκίμια ενοργανώνονται στις ίδιες θέσεις που τοποθετήθηκαν μετρητικά και στην Α Φάση, με εγκάρσια επαγωγικά βελόμετρα (LVDT) τοποθετημένα στις κρίσιμες ζώνες των δύο ανοιγμάτων εκατέρωθεν του P . Κατά μήκος του δοκιμίου τοποθετούνται κατακόρυφα βελόμετρα στην ελεγχόμενη περιοχή όπου ο οπλισμός του δοκιμίου είναι μειωμένος, για να μετρηθεί η κατανομή της πλαστικής στροφής στην κρίσιμη περιοχή. Δύο οριζόντια βελόμετρα τοποθετούνται στον πύρο του οριζόντιου εγκάρσιου εμβόλου σε παρόμοια θέση για όλα τα δοκίμια, για την αποτίμηση της συνολικής πλαστικής στροφής στην θέση άσκησης της εγκάρσιας δύναμης P . Επίσης, χρησιμοποιείται ένα LVDT στη βάση του δοκιμίου παράλληλα με το αξονικό έμβολο, το οποίο μετράει την κατακόρυφη παραμόρφωση.

Εκτός από τα επαγωγικά βελόμετρα τοποθετείται και ένας αριθμός διαμήκων και εγκάρσιων ηλεκτρονικών μηχανομετρών (SG) επάνω στα υφάσματα INOPI για τον έλεγχο της ανηγμένης παραμόρφωσής τους, τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση. Τα SG τοποθετούνται στο ελεγχόμενο τμήμα του δοκιμίου, στην περιοχή της κρίσιμης ζώνης, σε αντιδιαμετρικές παρειές ως προς τον άξονα κάθετα στο επίπεδο καταπόνησης, κοντά στη γωνία της διατομής (διαμήκη) ή στο μέσον της παρειάς (εγκάρσια).

5.2 Περιγραφή της διαδικασίας αποκατάστασης, επισκευής και/ή ενίσχυσης

Χαρακτηριστικά αποκατάστασης – Τα χαρακτηριστικά αποκατάστασης με ή χωρίς ενίσχυση που εφαρμόστηκαν στο κάθε δοκίμιο δείχνονται στον Πίνακα 5.1. Ομοίως με την Α Φάση, το κάθε δοκίμιο χαρακτηρίζεται από :

- διαφορετικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού: τα δοκίμια **ΥΠ** οπλισμένα σύμφωνα με τον ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2000) και τα δοκίμια **ΧΠ** που είναι οπλισμένα σύμφωνα με παλαιότερους Κανονισμούς (ΥΔΕ, 1959).

- διαφορετικό μήκος του ελεγχόμενου τμήματος του δοκιμίου: ελέγχονται δοκίμια με λόγους M/Vd ίσους προς 3,10 και 5,20 κατά τη διαγώνιο. Επιλέγεται ένα από κάθε ομάδα για απλή αποκατάσταση (ΥΠ30_ΑΠ), εγκάρσια ενίσχυση περίσφιγξης (ΧΠ30_ΕΠ) ή καμπτοδιατμητική ενίσχυση (ΧΠ30_ΕΝ).

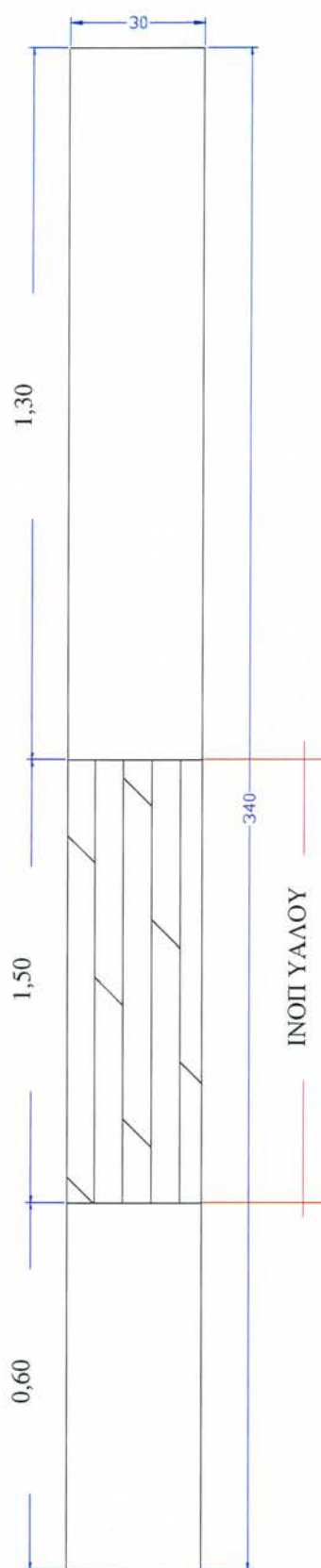
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά των επισκευασμένων και/ή ενισχυμένων δοκιμίων υποστυλωμάτων

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	Διατάξεις όπλισης πρωτοτύπου	Εφαρμογή ενίσχυσης ή επισκευής	Μήκος (m)	Λόγος διάτμησης
ΧΠ302ΕΝ	ΥΔΕ, 1959	GFRP, CFRP	1,95	7,80(5,50)
ΧΠ303ΕΝ	ΥΔΕ, 1959	GFRP, CFRP	1,20	4,80(3,40)
ΧΠ304ΕΠ	ΥΔΕ, 1959	GFRP	1,20	4,80(3,40)
ΧΠ305ΕΠ	ΥΔΕ, 1959	GFRP	1,95	7,80(5,50)
ΥΠ301ΑΠ	ΕΚΟΣ 2000	EMACO	1,95	7,80(5,50)
ΥΠ302ΑΠ	ΕΚΟΣ 2000	EMACO	1,20	4,80(3,40)

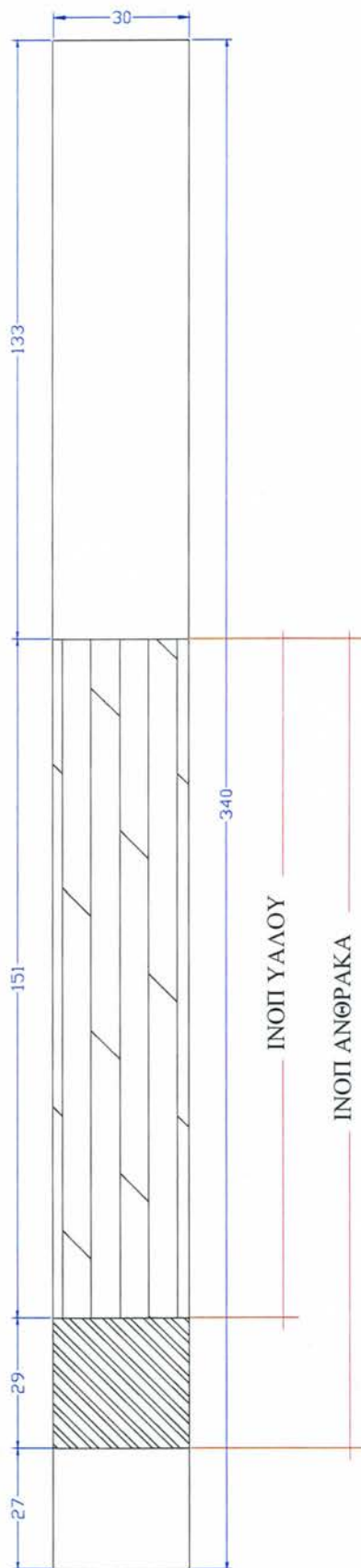
Εφαρμόζονται έτσι οι εξής τρεις διαφορετικοί τρόποι επέμβασης:

- Στα δοκίμια ΥΠ301ΑΠ και ΥΠ302ΑΠ αποκαταστάθηκε μόνον η βλάβη της κρίσιμης ζώνης και κατόπιν επανελέγχθηκαν πειραματικά, χωρίς χρήση ΙΝΟΠ. Πρόκειται ουσιαστικά για τα δοκίμια που είχαν οπλιστεί σύμφωνα με τους σημερινούς Κανονισμούς (ΕΑΚ, 2000), για τα οποία η ενίσχυσή τους σε κάμψη δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον¹.
- Τα δοκίμια ΧΠ304ΕΠ και ΧΠ305ΕΠ αρχικά επισκευάστηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία αποκατάστασης των παραπάνω, και κατόπιν ενισχύθηκε η εγκάρσια περίσφιγξη της κρίσιμης ζώνης τους με χρήση ΙΝΟΠ, ινών υάλου (GFRP). Στην περίπτωση τους τοποθετήθηκαν φύλλα ΙΝΟΠ υάλου σε πλάτος 0,50 m και συνολικού μήκους 2,70m, εκατέρωθεν του σημείου

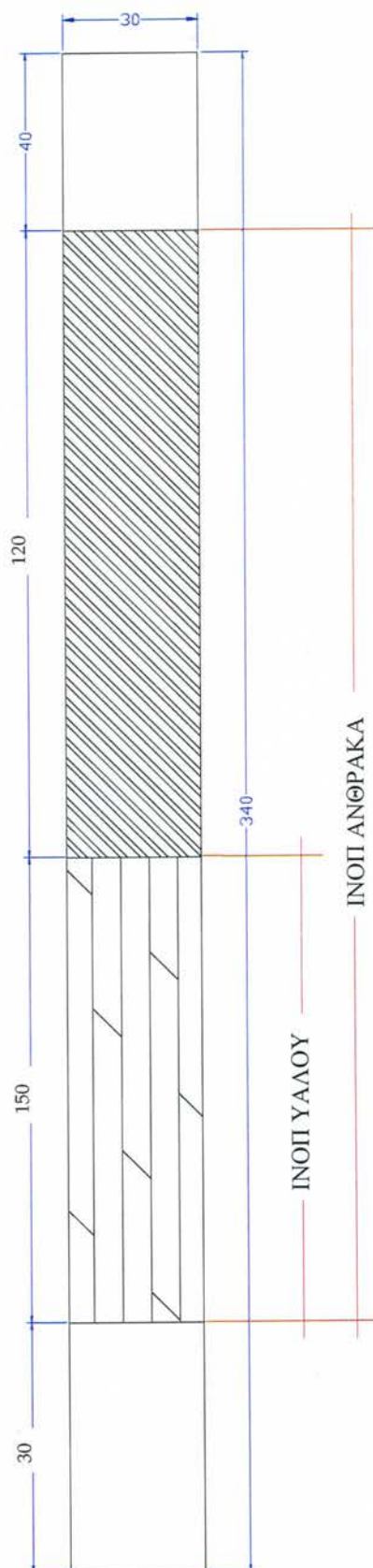
¹ Σημειώνεται ότι δεν είχε ακόμη εφαρμοσθεί ο νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας του ΟΑΣΠ για την Ανατολική Αττική. Στα κτίρια της περιοχής αυτής που έχουν μελετηθεί με τον ΝΕΑΚ, η αύξηση της αντοχής των δομικών τους στοιχείων παρουσιάζει πλέον και πρακτικό πειραματικό ενδιαφέρον λόγω της αύξησης του σεισμικού συντελεστή κατά 150%.



Σχήμα 5.1 Σχέδιο επισκευής δοκιμίων ΧΠ304ΕΠ και ΧΠ305ΕΠ.



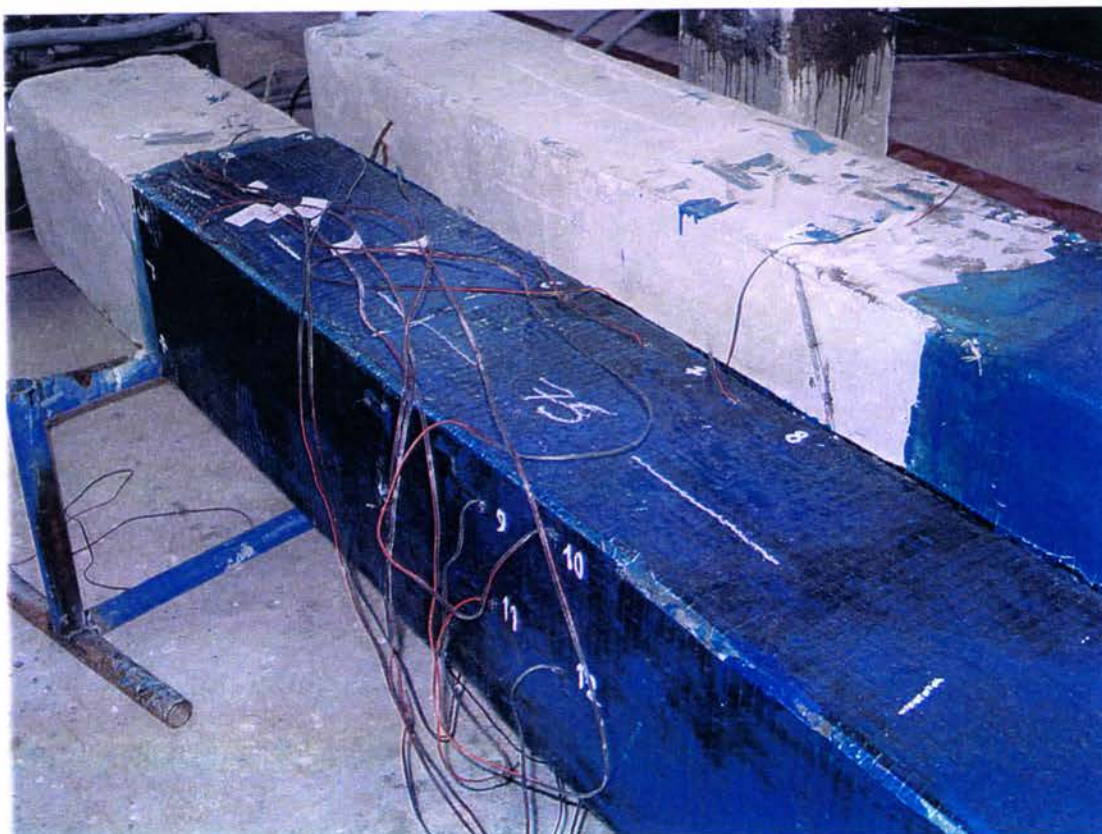
Σχήμα 5.2 Σχέδιο επισκευής ενίσχυσης δοκιμίου ΧΠ303ΕΝ.



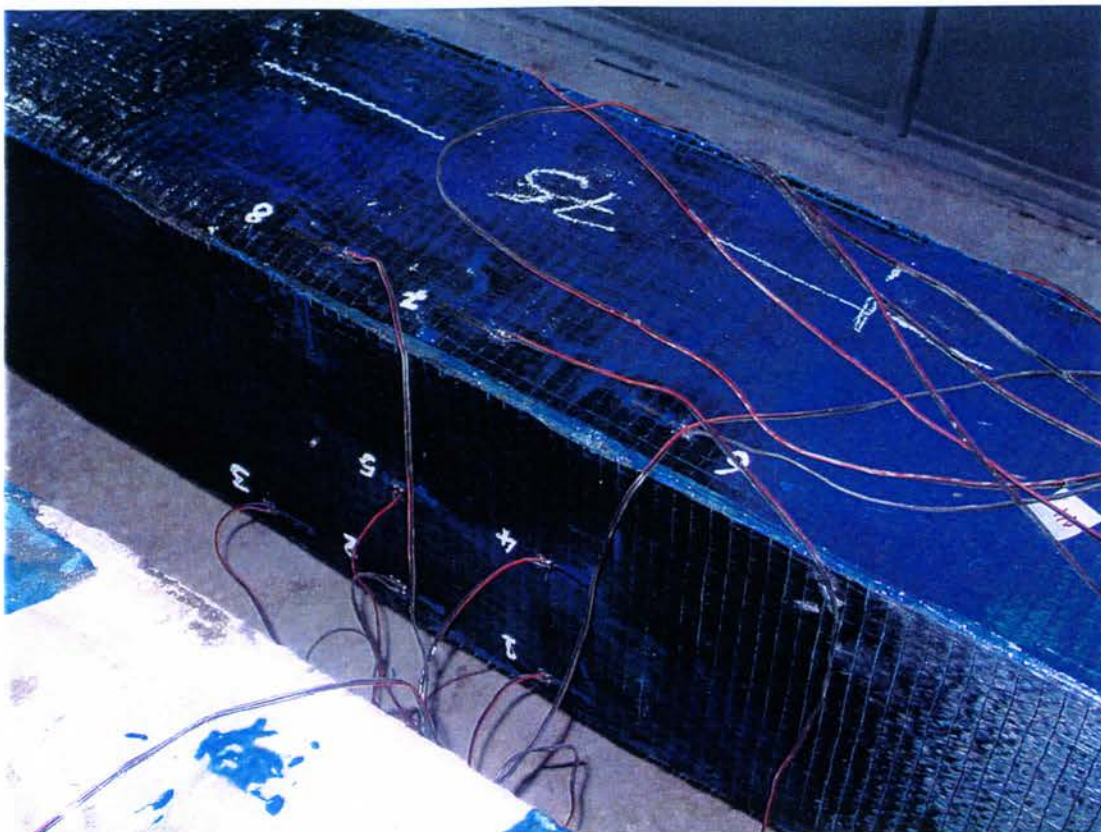
Σχήμα 5.3 Σχέδιο επισκευής / ενίσχυσης δοκιμίου ΧΠ302ΕΝ.

εφαρμογής του P , ώστε να εφαρμοσθούν δύο συνεχείς περιτυλίξεις με αλληλοεπικάλυψη μίας παρειάς (Σχήμα 5.1).

- Τα δοκίμια που χαρακτηρίζονται σαν ΧΠ302ΕΝ και ΧΠ303ΕΝ (Σχήματα 5.2 και 5.3) αρχικά επισκευάσθηκαν όπως και τα παραπάνω και κατόπιν ενισχύθηκαν πρώτα κατά τη διαμήκη διεύθυνση, καμπτικά, με χρήση μίας στρώσης υφάσματος ΙΝΟΠ ινών άνθρακα (*CFRP*) πλάτους 30cm σε κάθε παρειά του στοιχείου και κατόπιν εγκάρσια, με χρήση ΙΝΟΠ ινών υάλου (*GFRP*), σε δύο περιτυλίξεις συνεχούς περιέλιξης, με αλληλοεπικάλυψη μίας παρειάς, όπως προηγούμενως στα ΧΠ301ΕΠ και ΧΠ305ΕΠ.
- Μετά από την εφαρμογή των ΙΝΟΠ επικολλήθηκαν επάνω στο σκυρόδεμα και/ή στα ΙΝΟΠ ηλεκτρονικά μηχανοσκόμμετρα στη διαμήκη και / ή στην εγκάρσια διεύθυνση, στις θέσεις που περιγράφονται στο κάθε επί μέρους δοκίμιο, παρακάτω (Φωτογραφίες 5.1 και 5.2).



Φωτογραφία 5.1 Αποκατάσταση, ενίσχυση και ενοργάνωση του δοκιμίου ΧΠ302ΕΝ στο Εργαστήριο ΟΣ, ΕΜΠ.



Φωτογραφία 5.2 Λεπτομέρεια τοποθέτησης των ηλεκτρονικών μηχανοσυστημάτων.

Αποκατάσταση των βλαβών – Σε όλα τα δοκίμια ανεξαιρέτως έγινε αρχικά αποκατάσταση της αποδιοργανωμένης ζώνης του σκυροδέματος στην κρίσιμη περιοχή του δοκιμίου, με μη συρρικνούμενο γαρμπλοσκυρόδεμα υψηλής αντοχής τύπου Emaco S66 και S88 της Mac Beton / Degussa Hellas AE (2002). Η διαδικασία αποκατάστασης που ακολουθήθηκε είναι κοινή για όλα τα δοκίμια (διαφέρει ως προς το βαθμό αποκατάστασης της εκάστοτε βλάβης) και είναι η εξής:

- Καθαρισμός της αποδιοργανωμένης ζώνης από τα τεμάχια σκυροδέματος που βρίσκονται μεταξύ διαμπερών ρωγμών με κομπρεσέρ, έως να μην είναι δυνατόν να αφαιρεθεί περαιτέρω υλικό από την κρίσιμη ζώνη. Σημειώνεται ότι τα πειράματα στη φάση α άφησαν μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις στα δοκίμια που είναι αμελητέες.

- Τσιώμα των οπλισμών. Δεν υπήρξαν διαρρηκτικές αστοχίες οπλισμού είτε διαμήκους είτε εγκάρσιου κατά την προηγούμενη Φάση πειραμάτων.
- Αποκατάσταση της διατομής με έγχυτο μη συρρικνούμενο γαρμπλοσκυρόδεμα υψηλής αντοχής Emaco S66 με καλούπωμα και σκυροδέτηση από το πλάι. Δεν χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ούτε πρόσθετοι μανδύες
- Αποκατάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου μετά το ξεκαλούπωμα με τσιμεντοκονία Emaco S88 με σπάτουλα και μυστρί για ομαλοποίηση της επιφάνειας εφαρμογής του INOΠ, όπου αυτό θα εφαρμοσθεί.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας τα δοκίμια είναι έτοιμα για ενίσχυση με τα σύνθετα υλικά σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, όπως δείχνεται και στα Σχέδια επισκευής με ή χωρίς ενίσχυση (Σχ. 5.1 έως 5.3).

Εφαρμογή των INOΠ _ Η διαδικασία εφαρμογής των INOΠ ακολουθείται σύμφωνα με τις ρητές προδιαγραφές του προμηθευτή και είναι τυπικά η ακόλουθη:

- Προετοιμασία: Αφαιρούνται όλα τα σαθρά από την επιφάνεια που θα εφαρμοστούν τα INOΠ.
- Όπου είναι απαραίτητο , επισκευάζεται το στοιχείο με μη συρρικνούμενο γαρμπιλόδεμα ή κονίαμα της σειράς EMACO.
- Ανωμαλίες της επιφάνειας που ξεπερνούν το 1mm εξομαλύνονται με τροχό. Οι γωνίες στρογγυλεύονται με βουρτσάκι και τροχό εξομάλυνσης, ώστε η ακτίνα της καμπυλότητας να είναι τουλάχιστον 3cm.
- Εφαρμογή του ασταριού Mbrace Primer: Αναμιγνύονται τα δύο συστατικά του Mbrace Primer για δύο περίπου λεπτά με μηχανικό αναδευτήρα, σε αναλογία ανάμιξης των συστατικών (Α και Β) 75% και 25% κατά όγκο , ή 77% και 23% κατά βάρος αντιστοίχως. Το αστάρι εφαρμόζεται (σε όλες τις πλευρές) σε μία στρώση με ρολό.
- Εφαρμογή του INOΠ ινών άνθρακα διαμήκως (ΧΠ302ΕΝ και ΧΠ303ΕΝ):
Η εφαρμογή του INOΠ ινών άνθρακα ξεκινάει την επόμενη μέρα.

Κόβεται με ψαλίδι το ΙΝΟΠ ινών άνθρακα στις απαιτούμενες διαστάσεις (πλάτος 30cm και μήκος σύμφωνα με τα Σχέδια) ώστε να καλυφθούν οι πλευρές του δοκιμίου στο μήκος που εκτείνεται ο αραιός οπλισμός, με περαιτέρω αγκύρωση 60cm στο “ισχυρό” τμήμα του δοκιμίου (πέραν του σημείου φόρτισης).

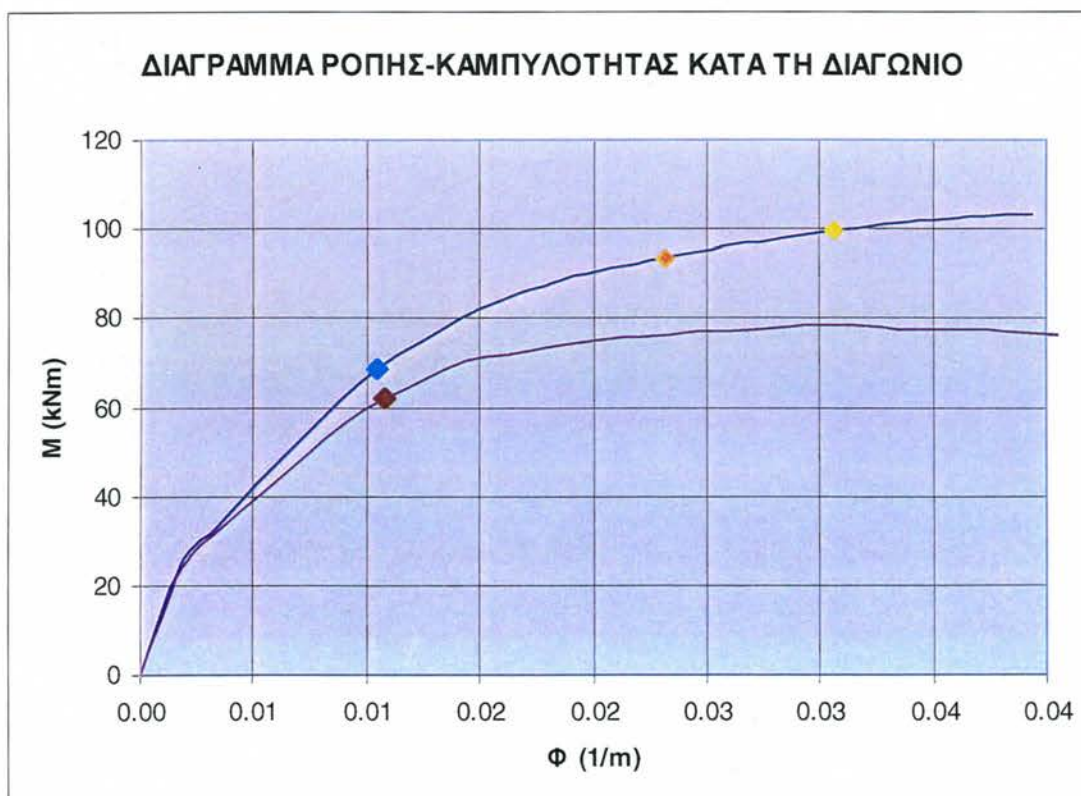
- Εφαρμογή ρητίνης Mbrace Saturant: Αναμιγνύονται για δύο λεπτά τα δύο συστατικά του Mbrace Saturant με μηχανικό αναδευτήρα, έως ότου επιτευχθεί ομοιογενές μίγμα. Η αναλογία ανάμιξης συστατικών (Α και Β) είναι 75% και 25% κατά όγκο, ή 76% και 24% κατά βάρος αντίστοιχα.
- Εφαρμόζεται το μείγμα ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια με ρολό. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το ΙΝΟΠ ινών άνθρακα (C1-30) πάνω στη νωπή ρητίνη.
- Η επιφάνεια του ΙΝΟΠ άνθρακα πιέζεται αρκετές φορές κατά τη διεύθυνση των ινών χρησιμοποιώντας ένα μεταλλικό ρολό ώστε να διεισδύσει η ρητίνη Mbrace Saturant και να απεγκλωβιστεί ο αέρας.
- Στην συνέχεια εφαρμόζεται και η δεύτερη στρώση της ρητίνης πάνω στο ύφασμα, ώστε να εμποτιστεί με ρητίνη και να κολλήσει καλύτερα στο δοκίμιο.
- Εφαρμογή του ΙΝΟΠ ινών υάλου εγκάρσιως (ΧΠ304ΕΠ, ΧΠ302ΕΝ, ΧΠ303ΕΝ, ΧΠ305ΕΠ): Διατίθεται σε φύλλα πλάτους 50εκ. Γενικά ακολουθείται η ίδια διαδικασία εφαρμογής όπως το ΙΝΟΠ άνθρακα, αλλά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Περιστρέφονται τρία κομμάτια υαλοϋφάσματος γύρω από το δοκίμιο με διαστάσεις 50cm πλάτος και 270cm μήκος, ώστε να καλύπτεται επιφάνεια μήκους 150cm περίπου γύρω από το σημείο που αλλάζει η διάταξη του οπλισμού, εκατέρωθεν του σημείου εφαρμογής του φορτίου *P*.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα για τα έξη επισκευασμένα / ενισχυμένα δοκίμια αναλύονται στα Κεφάλαια που ακολουθούν.

5.3 Δοκίμιο ΧΠ302ΕΝ

5.3.0 Αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής του δοκιμίου

Το δοκίμιο αυτό επισκευάσθηκε και ενισχύθηκε με την ίδια μέθοδο όπως το ΧΠ302ΕΝ, με το οποίο διαφέρει στο ότι έχει μεγαλύτερο διατμητικό μήκος. Η ενίσχυση έγινε χρησιμοποιώντας ένα φύλλο ΙΝΟΠ άνθρακα σε κάθε παρειά, διαμήκως, και, κατόπιν, ΙΝΟΠ υάλου εγκάρσιως σε μήκος 0,75m εκατέρωθεν του P , που τοποθετείται σε δύο συνεχείς στρώσεις, με μήκος υπερκάλυψης 30cm. Στο Σχήμα 5.3.0 δίδεται το θεωρητικό διάγραμμα ροπής – καμπυλότητας, κάθετα προς τον άξονα της διαγωνίου σε διαξονική καταπόνηση στη διαγώνιο, υπολογίσθηκε με το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών ΧTRACT (Chadwell, 2002), για την ενισχυμένη διατομή του. Στο ίδιο διάγραμμα δείχνονται τα σημεία της πρώτης διαρροής του συμβατικού



Σχήμα 5.3.0 Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας της κρίσιμης διατομής των ΧΠ302 και ΧΠ302ΕΝ σε διαξονική καταπόνηση κατά τη διαγώνιο.

γωνιακού χάλυβα ($M_y = 68,7$ kNm), καθώς και τα σημεία όπου η ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ άνθρακα έφθασε τις τιμές $\epsilon_f=0,6\%$ ($M_{p|\epsilon_f=6\%} = 93,3$ kNm) και $\epsilon_f=0,8\%$ ($M_{p|\epsilon_f=8\%} = 99,6$ kNm), αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές

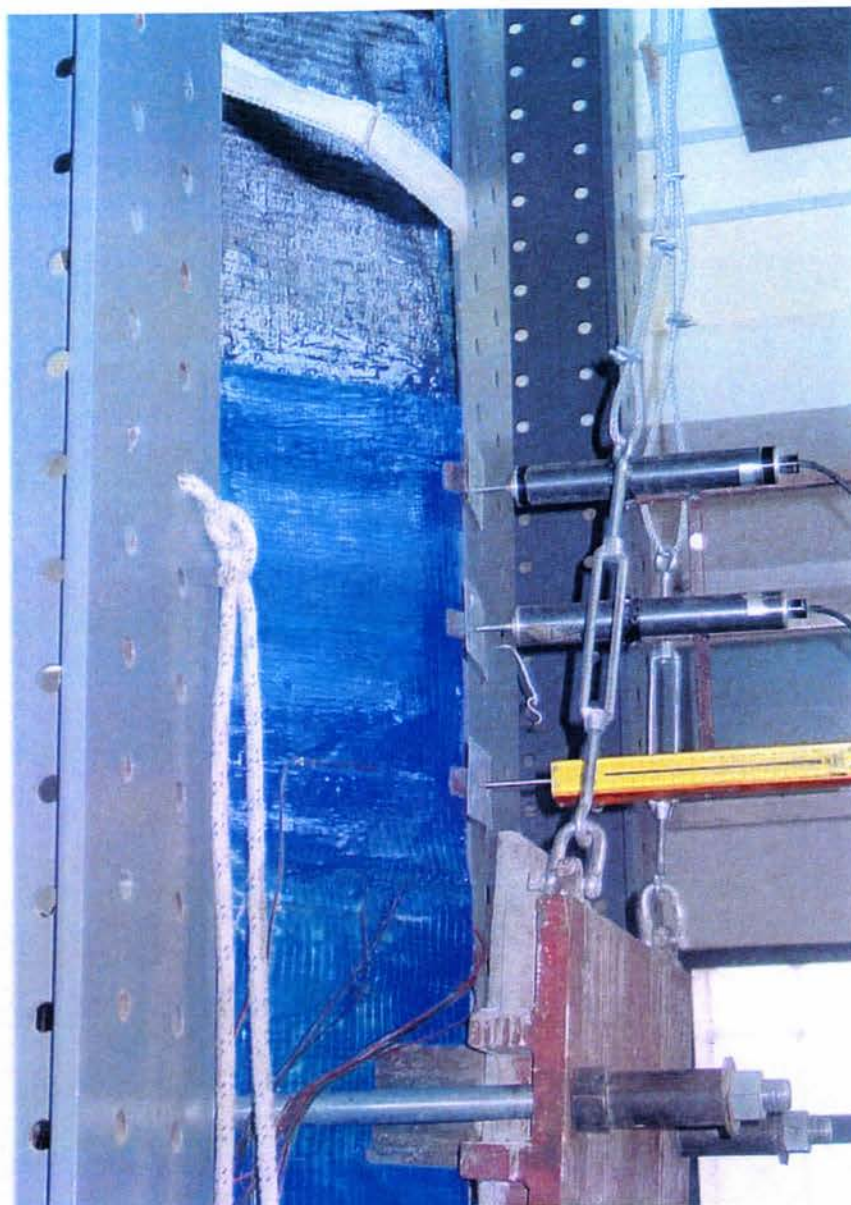
αντιστοιχούν σε θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές του φορτίου $P_y = 95,0$ kN, $P_{0,6\%} = 129,0$ kN και $P_{0,8\%} = 137,7$ kN, αντίστοιχα, χωρίς διόρθωση για τα φαινόμενα 2ας τάξης. Σύμφωνα με τις παραδοχές του λογισμικού, το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν με πλήρη συνάφεια ενώ γίνεται η παραδοχή της γραμμικής κατανομής παραμορφώσεων. Η ανάλυση αφορά το διάγραμμα ώστε η τελική αξονική αντίσταση στη διατομή (N) να ισούται με την εξωτερική $N=195$ kN. Όλες οι παραπάνω τιμές είναι υπολογισμένες χρησιμοποιώντας μέσες τιμές των πειραματικών μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών (Κεφάλαιο 2) και ονομαστικά χαρακτηριστικά για το ΙΝΟΠ. Οι παραδοχές της ανάλυσης και πλέον εκτενή αποτελέσματα από την ανάλυση διατομών και στοιχείων δίνονται στο Κεφάλαιο 6 και, συγκεντρωτικά, στο Παράρτημα Ι.

5.3.1 Ενοργάνωση του δοκιμίου

Στο δοκίμιο τοποθετούνται πέντε εγκάρσια LVDT στερεωμένα στο εξωτερικό σταθερό σύστημα αναφοράς (Αρ. 41 ως 45 στο Σχήμα Π5.3.1). Επί πλέον, επάνω στα διαμήκη και εγκάρσια ΙΝΟΠ επικολλούνται δεκαέξι ηλεκτρονικά μηχανοσκόπια (SG) κατά τη διαμήκη διεύθυνση (Αρ. 1 έως 16, Σχήματα Π5.3.2 ως Π5.3.5) και δέκα κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Αρ. 19 ως 28, Σχήματα Π5.3.6 ως Π5.3.9).

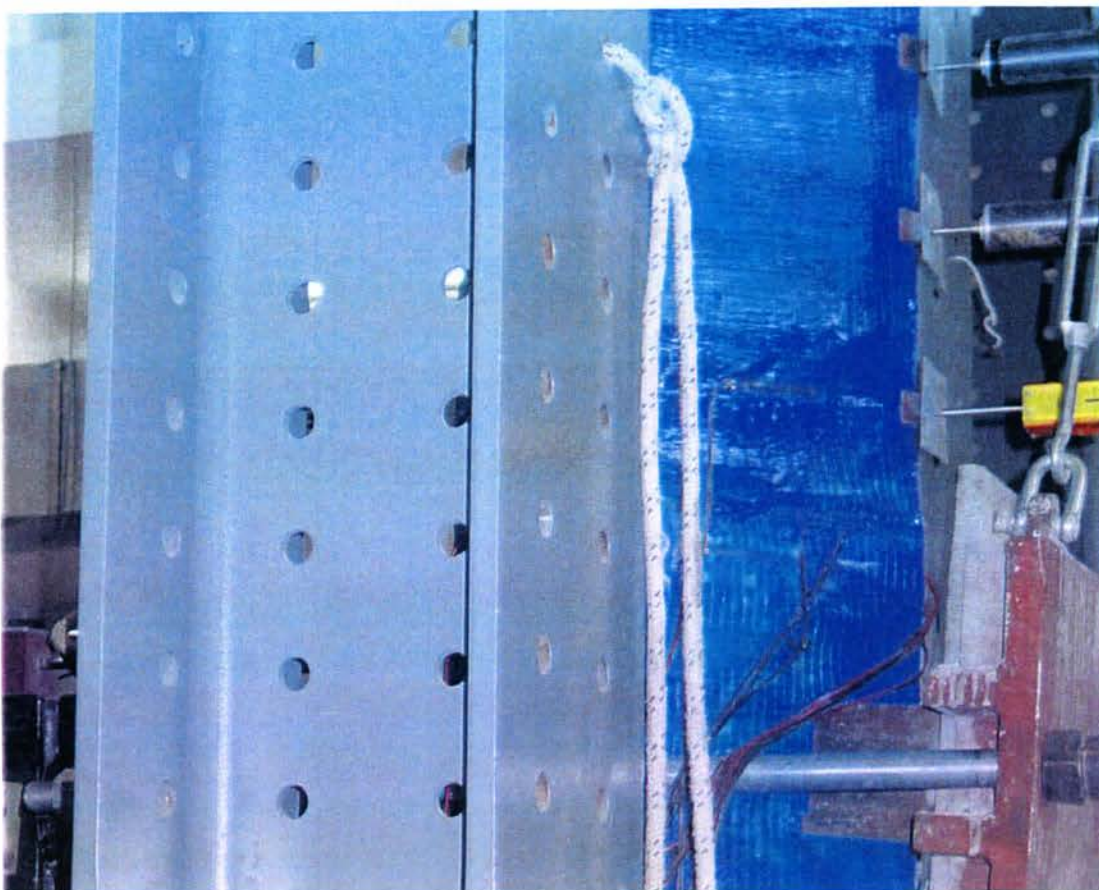
5.3.2 Περιγραφή του πειράματος

Το ΕΝισχυμένο δοκίμιο ΧΠ302ΕΝ τοποθετείται κατακόρυφα στη διάταξη (Φωτογραφία 5.3.1), σε διεύθυνση φόρτισης κατά μήκος της διαγωνίου του. Έχει συνολικό μήκος 3,40m και καθαρό άνοιγμα 3,15m μεταξύ στηρίξεων. Βάσει οπλισμών, το δοκίμιο έχει ένα ελεγχόμενο μήκος 1,95 m οπλισμένο με συνδετήρες S220 σε διάταξη Φ6/400, καθώς και μειωμένο διαμήκη οπλισμό 8Φ14 σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του, μήκους 1,20 m που είναι ισχυρά οπλισμένο. Το εγκάρσιο έμβολο τοποθετείται στο όριο διακοπής του πρόσθετου οπλισμού κάτω από το ελεγχόμενο τμήμα, σε απόσταση 1,25 m από την ακραία κάτω διατομή του υποστυλώματος προς το ισχυρό δάπεδο.



Φωτογραφία 5.3.1 Το δοκίμιο ΧΠ302ΕΝ τοποθετημένο στη διάταξη πριν την έναρξη του πειράματος

Στο δοκίμιο επιβάλλονται δώδεκα πλήρεις εναλλασσόμενοι κύκλοι φόρτισης και ένας ημιτελής, παρουσία σταθερής αξονικής θλιπτικής δύναμης $N=192,5$ kN. Η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν παρουσίασε κάποια ψαθυρή αστοχία. Αρχικά παρατηρήθηκε μικρή εγκάρσια διάρρηξη του ΙΝΟΠ υάλου επάνω και κάτω από το παρέμβλημα μεταφοράς φορτίου στο έμβολο, η οποία ακολουθήθηκε από μικρή διόγκωση σε τμήμα της θλιβόμενης παρειάς του δοκιμίου κάτω από το ΙΝΟΠ (Φωτογραφία 5.3.2).



Φωτογραφία 5.3.2 Διόγκωση του ΙΝΟΠ επάνω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Διακρίνονται τα αριθμημένα SG # 20 και 21.

5.3.3 Περιγραφή των βλαβών και τρόπος αστοχίας

Μετά το πέρας του πειράματος αποκολλήθηκαν τα ΙΝΟΠ περισφιγξης και ενίσχυσης, με χρήση τροχού και κρουστικού όπου απαιτείτο, οπότε και αποκαλύφθηκε η βλάβη του δοκιμίου στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου (Φωτογραφίες 5.3.3 έως 5.3.5). Επί πλέον, απομακρύνθηκε και το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα (παλαιό και νέο) όσο ήταν εφικτό, στην κρίσιμη ζώνη. Η κατανομή της βλάβης περιλαμβάνει καμπτικές ρωγμές στο σημείο του P και σε απόσταση d από το φορτίο, χωρίς καμία διαγώνια διατμητική ρωγμή (Φωτογραφία 5.3.3). Οι διαμήκεις ράβδοι στην αρχικά εφελκυόμενη γωνία έως το μέσον της παρειάς εκατέρωθεν έχουν αποκαλυφθεί σε απόσταση δύο διαδοχικών συνδετήρων που απέχουν, λόγω κατασκευής, περίπου $1,50d$ μεταξύ τους, με έντονα φαινόμενα λυγισμού και παραμένουσες παραμορφώσεις. Χαρακτηριστικό είναι ότι η παρουσία του ΙΝΟΠ εγκαρσίως στη γωνία, υποχρέωσε τη γωνιακή ράβδο να παραμορφωθεί προς το πλάι,

στην περιοχή της επικάλυψης, λαμβάνοντας το σχήμα S, που αντιστοιχεί σε δεύτερη ιδιομορφή παραμόρφωσης λυγισμού (Φωτογραφίες 5.3.4 και 5.3.5).



Φωτογραφία 5.3.3 Αστοχία της κρίσιμης ζώνης στην ελεγχόμενη περιοχή, από την εφελκυστική παρειά. Διακρίνεται το ίχνος των ΙΝΟΠ εκατέρωθεν του P .

Όσον αφορά το υλικό αποκατάστασης, παρατηρείται μεν αποδιοργάνωση του θλιβόμενου σκυροδέματος τόσο του νέου (αποκατάστασης) όσο και του παλαιού, εσωτερικά του πυρήνα του στύλου, στη θλιβόμενη παρειά, με έντονη ρηγματώση δια μέσου των δύο υλικών (παλιό και αποκατάστασης), σε πλήρη συνεργασία μεταξύ τους χωρίς αποκόλληση στη διεπιφάνεια (Φωτογραφίες 5.3.3 και 5.3.6).

Τέλος, παρατηρείται και αποκόλληση του ΙΝΟΠ με το οποίο είχε ενισχυθεί το δοκίμιο με αστοχία της διεπιφάνειας ΙΝΟΠ - σκυροδέματος, εκατέρωθεν του σημείου εφαρμογής του φορτίου P (Φωτογραφία 5.3.3). Είναι χαρακτηριστικό πάντως να τονισθεί ότι η αποκαλυφθείσα βλάβη μέσα στην κρίσιμη διατομή, η οποία θεωρείται χαρακτηριστική από πλευράς συμπεριφοράς ενός τυπικού υφιστάμενου υποστυλώματος, δεν κατέστη ορατή από την εξωτερική όψη των ΙΝΟΠ εγκιβωτισμού σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, αλλά έγινε εμφανής μετά από την απομάκρυνσή τους.



**Φωτογραφία
5.3.4**

Λεπτομέρεια του λυγισμού της γωνιακής ράβδου και των όμορων μεσαίων ράβδων στη θλιβόμενη παρειά, λόγω απόστασης του συνδετήρα.



**Φωτογραφία
5.3.5**

Λεπτομέρεια του λυγισμού της γωνιακής ράβδου και των όμορων μεσαίων ράβδων στη θλιβόμενη παρειά από άλλη γωνία.

Διακρίνεται η αστοχία του υλικού από κατάσταση και παλιού σκυροδέματος.

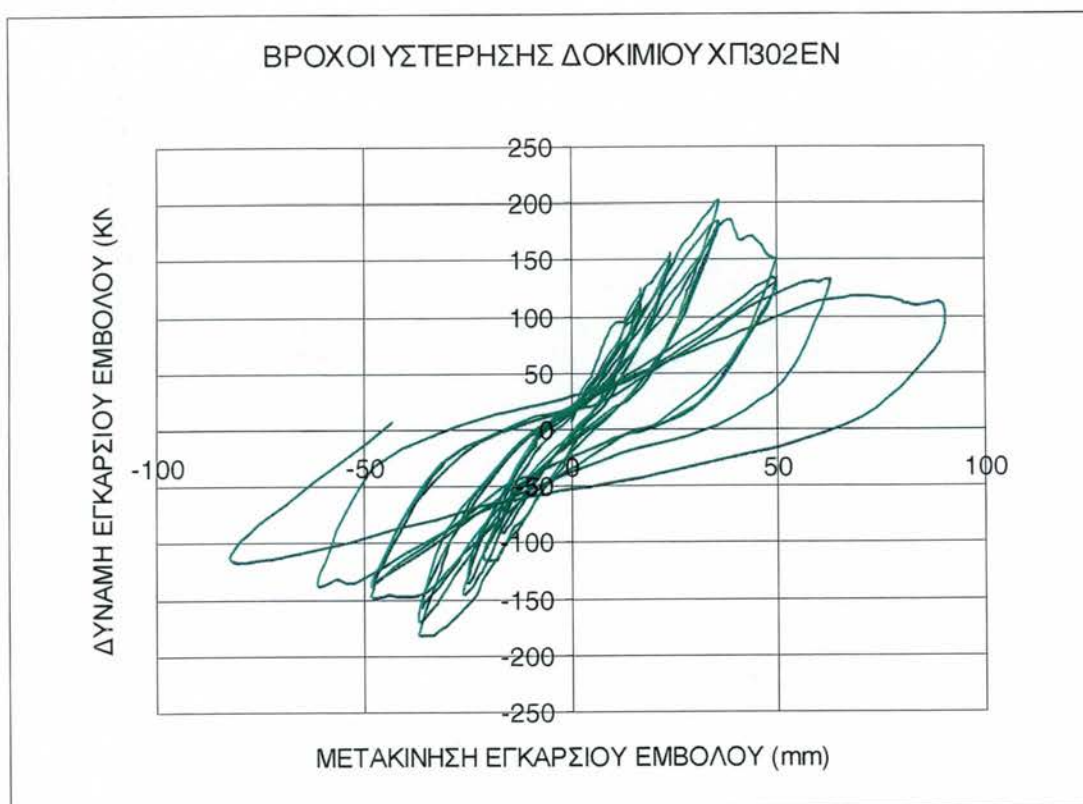


Φωτογραφία

5.3.6

Λεπτομέρεια του σκυροδέματος υψηλής αντοχής της αποκατάστασης, στην εφελκυστική παρειά, και διακριτές ρωγμές που διαπερνούν το παλιό και το νέο υλικό επισκευής.

5.3.4 Ανάλυση της καταγεγραμμένης συμπεριφοράς



Σχήμα 5.3.1 Βρόχοι υστέρησης δοκιμίου ΧΠ302ΕΝ.

Το καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης ($P-\delta$) του δοκιμίου δίνεται στο Σχήμα 5.3.1, χωρίς να έχει γίνει η διόρθωση της καταγεγραμμένης δύναμης για το ποσοστό της αντοχής που παραλαμβάνει

τη ροπή δευτέρας τάξεως. Τα αντίστοιχα διαγράμματα $P-\delta$ των μεμονωμένων κύκλων αναλύονται στο Σχήμα 5.3.2.

Πίνακας 5.3.1 Μετρήσεις πειραματικής απόκρισης του δοκιμίου ΧΠ302ΕΝ

Αρ. Κύκλου	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	K kN/m	E KNmm	μ_δ	μ_E
1	21	17	19	116	18	124	17	6857	1394	0,8	0,7
2	17	17	17	91	16	113	17	6182	760	0,7	0,4
3	26	24	25	146	26	156	24	6040	1446	1,0	0,8
4	25	24	24,5	136	25	149	24	5816	1111	1,0	0,6
5	37	36	36,5	182	35	200	36	5380	3911	1,5	2,1
6	37	36	36,5	168	37	184	36	4822	2669	1,5	1,4
7	36	36	36	158	36	178	36	4667	2268	1,5	1,2
8	48	50	49	147	40	185	38	4256	7195	2,0	3,8
9	48	50	49	139	48	133	50	2776	4981	2,0	2,7
10	48	50	49	134	48	126	50	2653	3800	2,0	2,0
11	61	63	62	136	52	131	63	2322	8645	2,6	4,6
12	82	90	86	116	82	118	72	1519	13939	3,6	7,4

Στον Πίνακα 5.3.1 δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ολικής συμπεριφοράς, που περιλαμβάνουν :

- μέγιστες /ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}),
- οι αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο,
- 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}),
- 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

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

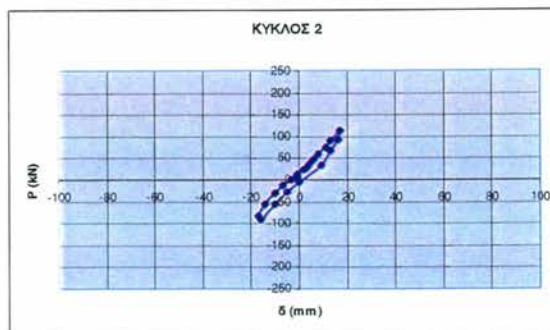
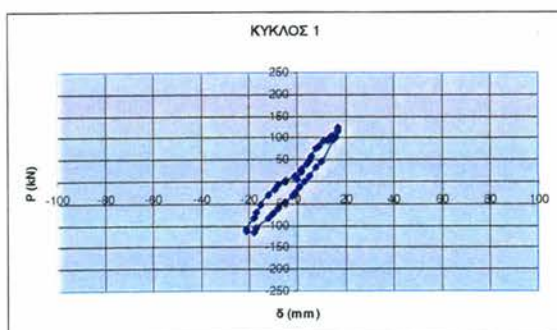
$$\mu_E = E / E_y, \quad E_y = P_y \delta_y / 2$$

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

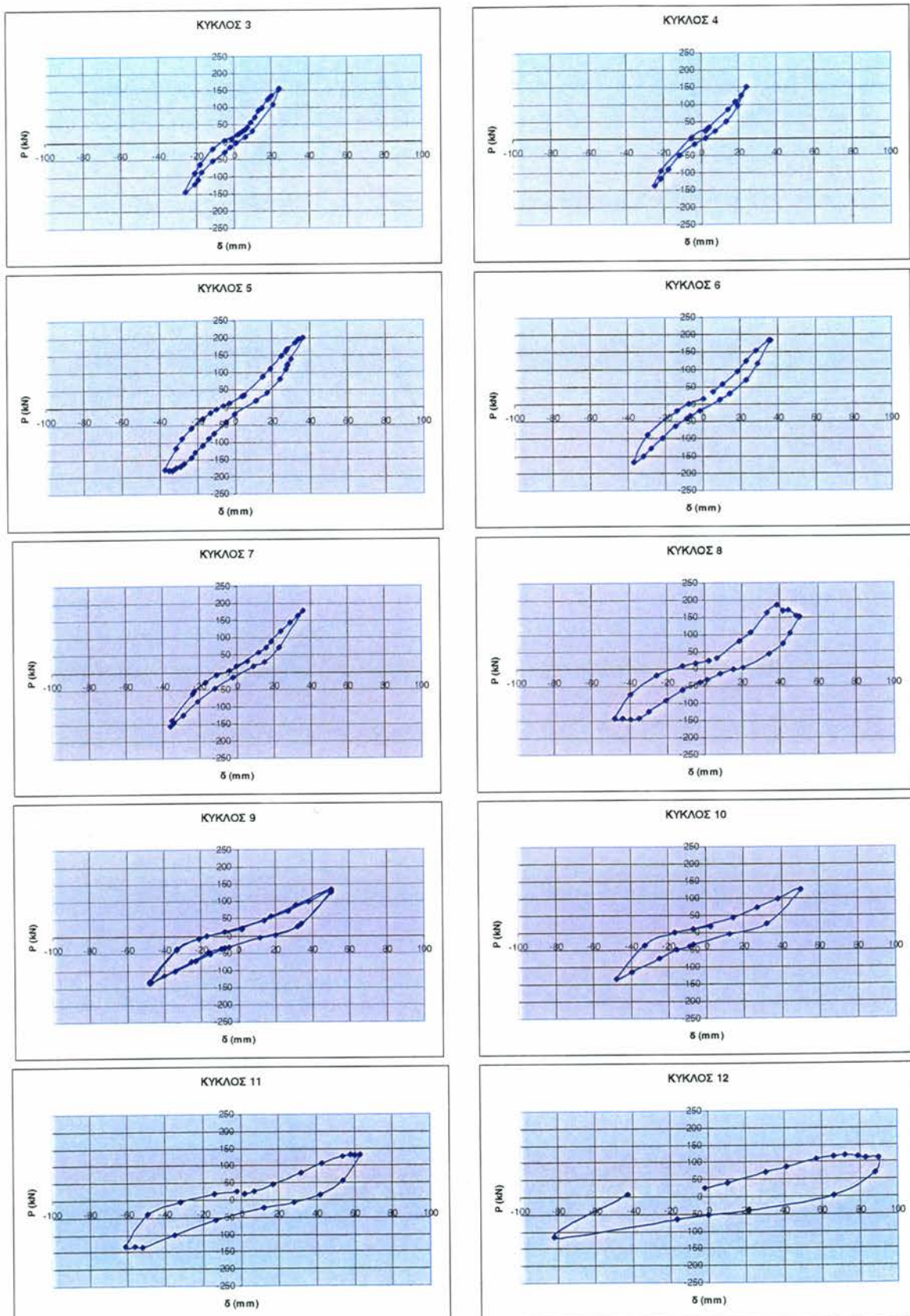
Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι η μέγιστη αντοχή του στύλου είναι **200 kN**, 168% σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή των 119 kN του παρθένου δοκιμίου **ΧΠ302**. Η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται στον 5^ο κύκλο φόρτισης, σε μετακίνηση $\delta = 36,0$ mm και αντιστοιχεί σε καμπτική αντοχή $M_u = 139,5$ kNm, μετά από διόρθωση για το ποσοστό που παραλαμβάνει την ροπή δευτέρας τάξης. Η τιμή αυτή είναι κατά 40% μεγαλύτερη από τη θεωρητική πρόβλεψη της καμπτικής αντοχής $M_{p|\varepsilon_f=8\%} = 99,6$ kNm, που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση του ΙΝΟΠ 8%, θεωρώντας τις μέσες τιμές της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Αντίστοιχα, η τιμή αυτή είναι ίση με τη θεωρητική πρόβλεψη της καμπτικής αντοχής με συμμετοχή του διαμήκους ΙΝΟΠ σε παραμόρφωση $\varepsilon_f = 14\%$, $M_{p|\varepsilon_f=14\%} = 139,8$ kNm, λαμβάνοντας υπόψη όμως, στον παραπάνω υπολογισμό, την πρόσθετη συνεισφορά στην αντοχή της διατομής από το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής που χρησιμοποιήθηκε για την αποκατάστασή της (Παράρτημα Ι)¹.

Κατά τη μέγιστη καταγραφή παραμόρφωσης των 90 mm (11^{ος} κύκλος), η μέγιστη πλαστική στροφή στην οποία υπόκειται η πλαστική άρθρωση είναι **0,124 rad (7,1°)**, η δε πλαστική στροφή στη μέγιστη αντοχή είναι **0,05 rad**.

Το πειραματικά μετρούμενο φορτίο διαρροής αντιστοιχεί σε αντοχή **156 kN**, το οποίο επιτυγχάνεται πειραματικά στον 3^ο κύκλο σε παραμόρφωση του δοκιμίου ίση με **24 mm**. Η πτώση της φέρουσας ικανότητας στο 85% της



¹ Κατά τον υπολογισμό, θεωρήθηκε συντηρητικά ότι ο πυρήνας και η επικάλυψη της θλιβόμενης παρειάς αποτελούνται από το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής EMACO, που χρησιμοποιήθηκε για την αποκατάσταση της διατομής, με αντοχή σε θλίψη $f_c = 40$ MPa,

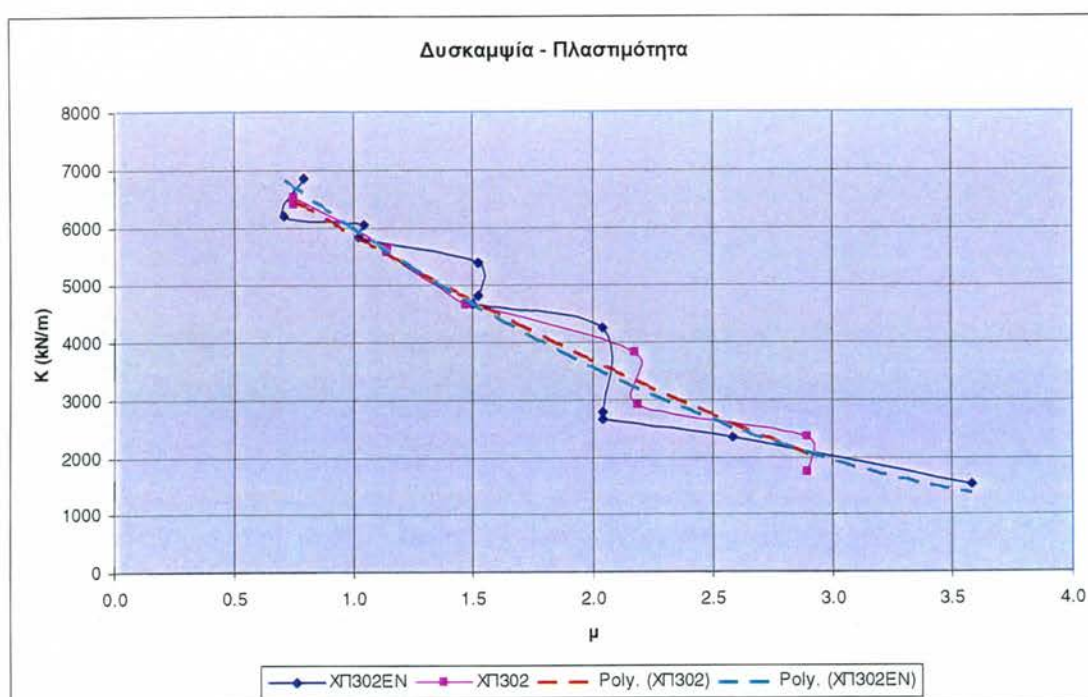


Σχήμα 5.3.2 Ανάλυση των μεμονωμένων κύκλων επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, δοκίμιο ΧΠΙ302ΕΝ.

μέγιστης τιμής (= 170 kN) εμφανίζεται σε τιμή μετακίνησης 44 mm στον 8^ο κύκλο στην περιβάλλουσα, οπότε και η αντίστοιχη τιμή πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων είναι 1,80 ως προς τη τιμή διαρροής.

Ο λόγος της μικρής σχετικά πλαστιμότητας μετατοπίσεων που παρέχει το δοκίμιο, είναι ότι η συμπεριφορά του μετά από την επίτευξη της μέγιστης αντοχής χαρακτηρίζεται από απότομη απομείωση. Παρατηρείται όμως ότι η τελική καμπτική αντοχή του στύλου, τείνει στην πρότερη καμπτική αντοχή του παρθένου δοκιμίου ΧΠ302, στα 115 kN, έως τη μέγιστη παραμόρφωση των 90mm, που απετέλεσε το όριο τερματισμού της πειραματικής διαδικασίας λόγω περιορισμών της διάταξης.

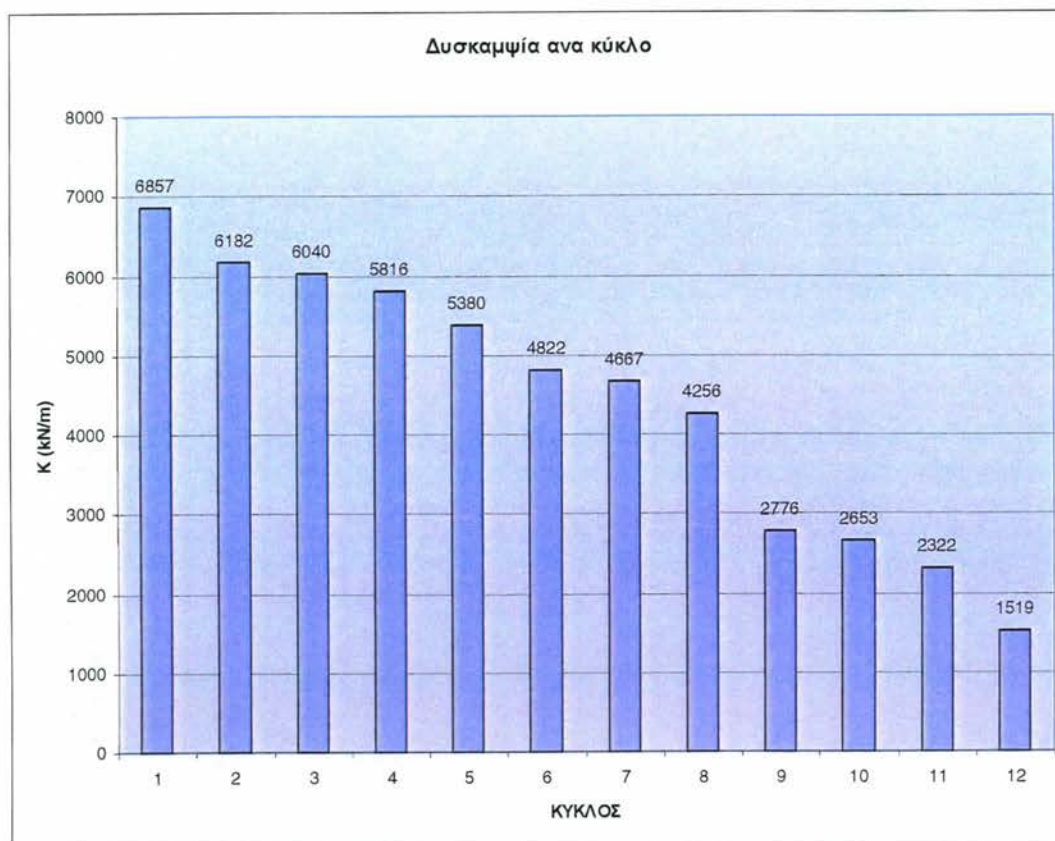
5.3.5 Παράγωγες μετρήσεις δυσκαμψίας και υστερετικής ενέργειας



Σχήμα 5.3.3 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ως προς τη πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΧΠ302ΕΝ.

Βάσει των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου υπολογίζεται η μέση δυσκαμψία μεταξύ ανακυκλώσεων του Πίνακα 5.3.1, η οποία απεικονίζεται για τη σειρά των δώδεκα ανακυκλώσεων στα Σχήματα 5.3.3 και 5.3.4 συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, σε απόλυτα μεγέθη ή σαν πλαστιμότητα. Παρατηρείται ότι ήδη, στο

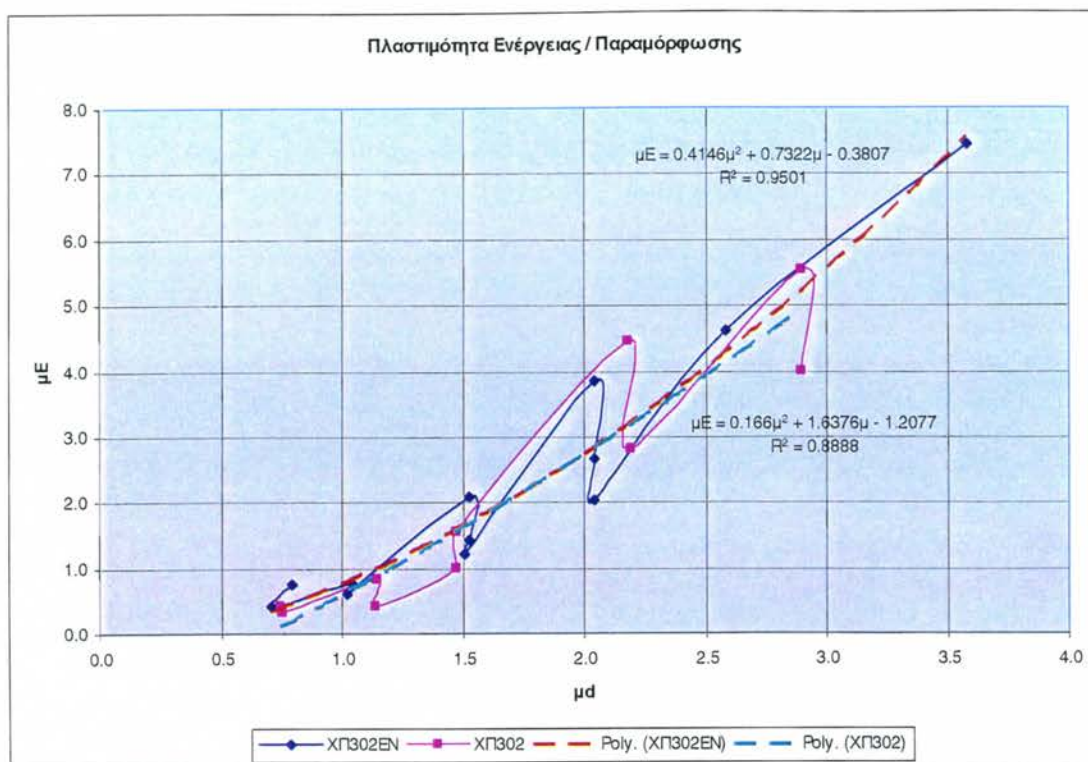
όριο της ωφέλιμης απόκρισης του δοκιμίου ως την πλαστιμότητα 2,00 (στον 8^ο κύκλο), η μέση δυσκαμψία του στοιχείου έχει μειωθεί στο 62% της αρχικής κατά τον 1^ο κύκλο, ενώ η πτώση της δυσκαμψίας σε αυτή την πλαστιμότητα,



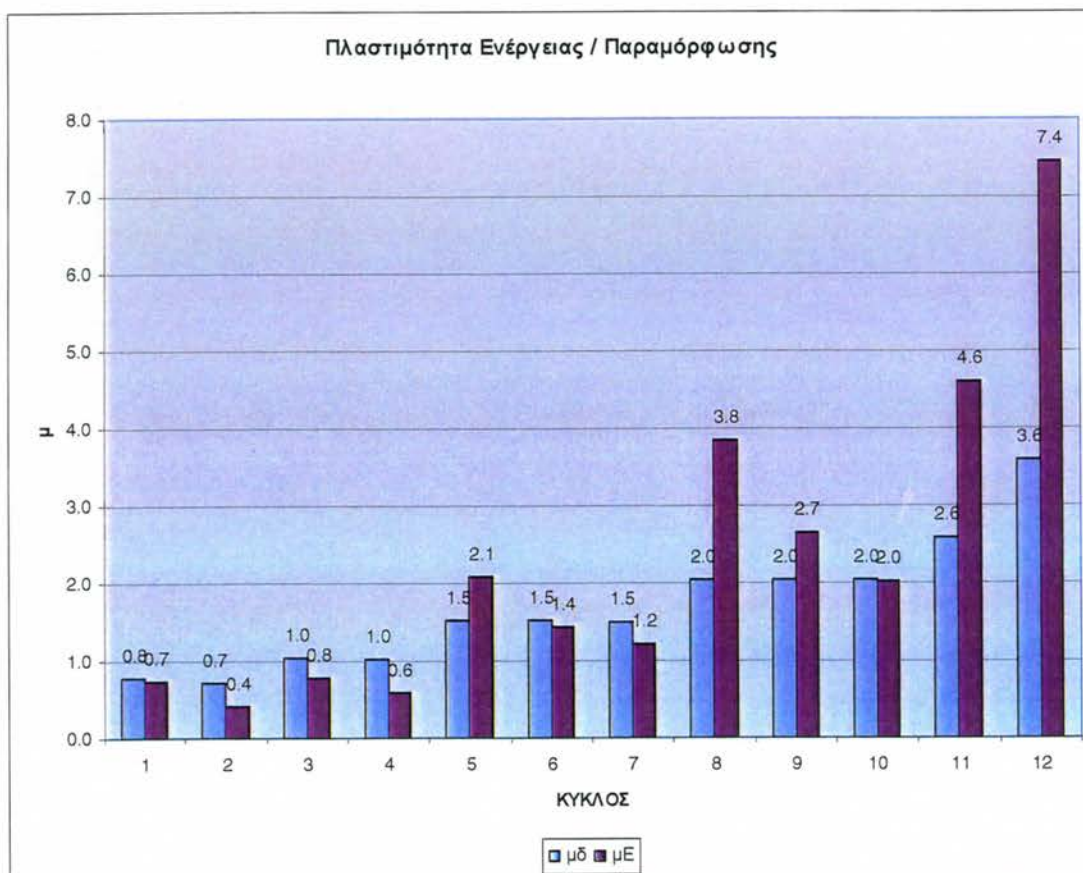
Σχήμα 5.3.4 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ανά κύκλο φόρτισης, δοκιμίου ΧΠ302ΕΝ.

μεταξύ ανακυκλίσεων σε ίδιο εύρος, είναι της τάξης του 43% μεταξύ τριών διαδοχικών κύκλων.

Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και στην απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του ενισχυμένου δοκιμίου, όπως αυτή υπολογίζεται σαν το εμβαδόν που περικλείεται από τον εκάστοτε βρόχο και δίδεται στον Πίνακα 5.3.1. Η υστερετική ενέργεια απεικονίζεται για τη σειρά των δώδεκα ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.3.5 και 5.3.6, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, (Σχήμα 5.3.5) καθώς και σε σύγκριση με την αντίστοιχη πλαστιμότητα παραμορφώσεων σε επαναλαμβανόμενους κύκλους σταθερού εύρους (Σχήμα 5.3.6). Παρατηρείται ότι σε διαδοχικές ανακυκλίσεις σε εύρος πλαστιμότητας 1,5 και 2, 0, το δοκίμιο μειώνει στο 55% (κατά μέσον) όρο την απορροφώμενη εκάστοτε ενέργεια μεταξύ τριών διαδοχικών κύκλων



Σχήμα 5.3.5 Σταδιακή μείωση της απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας ως προς της επιβαλλόμενη πλαστιμότητα παραμορφώσεων, ΧΠ302ΕΝ.



Σχήμα 5.3.6 Κατανομή πλαστιμότητας ενέργειας ως προς την πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΧΠ302ΕΝ.

σε σταθερό εύρος ανακύκλισης (κύκλοι 5-7 και 8-10), ενώ, σε μέγιστη πλαστιμότητα παραμόρφωσης ίση με 3,60, όπου το πείραμα τερματίστηκε, απορροφά στον πρώτο κύκλο 7πλάσια ενέργεια της ενέργειας που καταναλώνεται στην διαρροή του. Στο Σχήμα 5.3.5, δίδεται επίσης και η βέλτιστη συναρτησιακή προσέγγιση της απόκρισης σε παραμέτρους πλαστιμοτήτων, ορίζοντας τη βέλτιστη προσέγγιση με μια δευτεροβάθμια πολυωνυμική συνάρτηση της πλαστιμότητας ενέργειας, ως προς το δείκτη πλαστιμότητας των παραμορφώσεων.

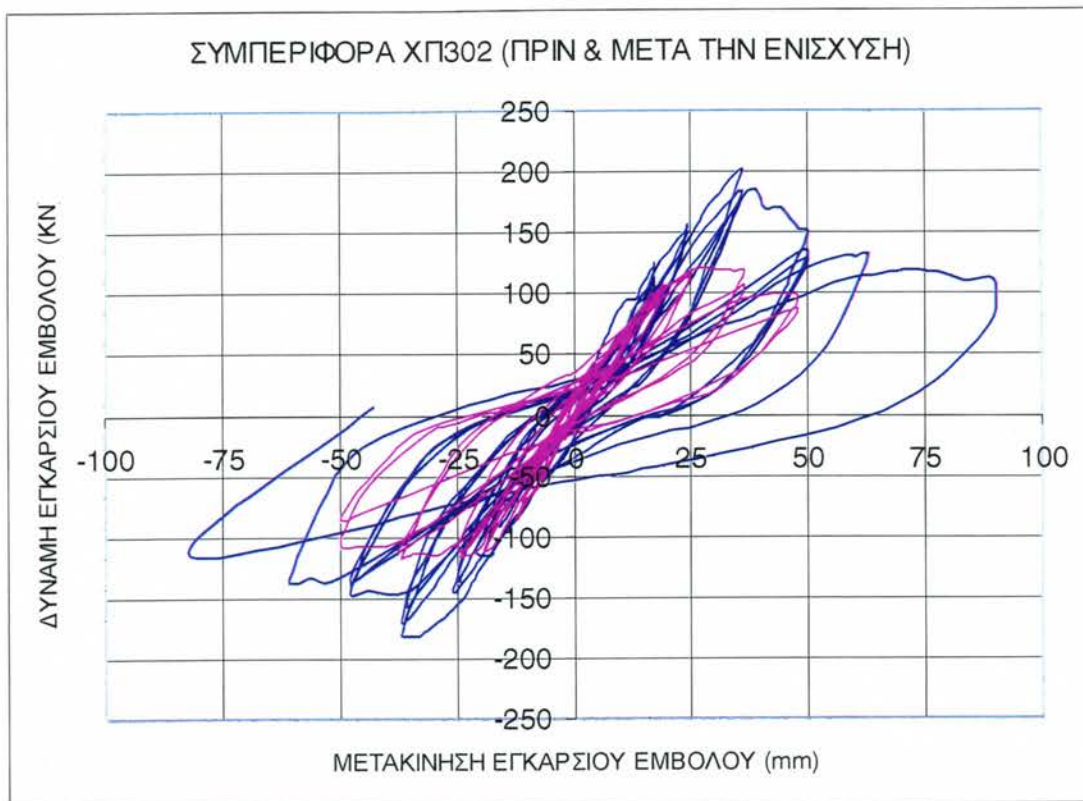
5.3.4 Σύγκριση πειραματικών καταγραφών ΧΠ302 και ΧΠ302ΕΝ

Τα διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης P - δ πριν και μετά τη διαδικασία αποκατάστασης και ενίσχυσης των ΧΠ302(ΕΝ) συγκρίνονται στο Σχήμα 5.3.7. Το δοκίμιο εμφανίζει την μέγιστη αντοχή των 200 kN, ίση με 168% της αντοχής του παρθένου δοκιμίου (119 kN). Λόγω λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων, το παρθένο δοκίμιο εμφανίζει τη χαρακτηριστική σταδιακή πτώση της αντοχής του σε ανακύκλιση, κάτω του 85%, ήδη σε απόκριση 44 mm, όπως ακριβώς και το ΕΝισχυμένο.

Το ΕΝισχυμένο δοκίμιο παρέχει ικανοποιητική συμπεριφορά έως και τη διπλάσια παραμόρφωση από το παρθένο στο πέρας του πειράματος, με αύξηση της υπεραντοχής λόγω της αποκατάστασης με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και της ενίσχυσής του με ΙΝΟΠ. Οι συγκρίσεις μεταξύ των δύο δοκιμίων όσον αφορά την απομειούμενη δυσκαμψία και απορροφώμενη ενέργεια ως προς την πλαστιμότητα παραμόρφωσης που επεβλήθη στο πείραμα, δίδονται στα Σχήματα 5.3.3 και 5.3.5.

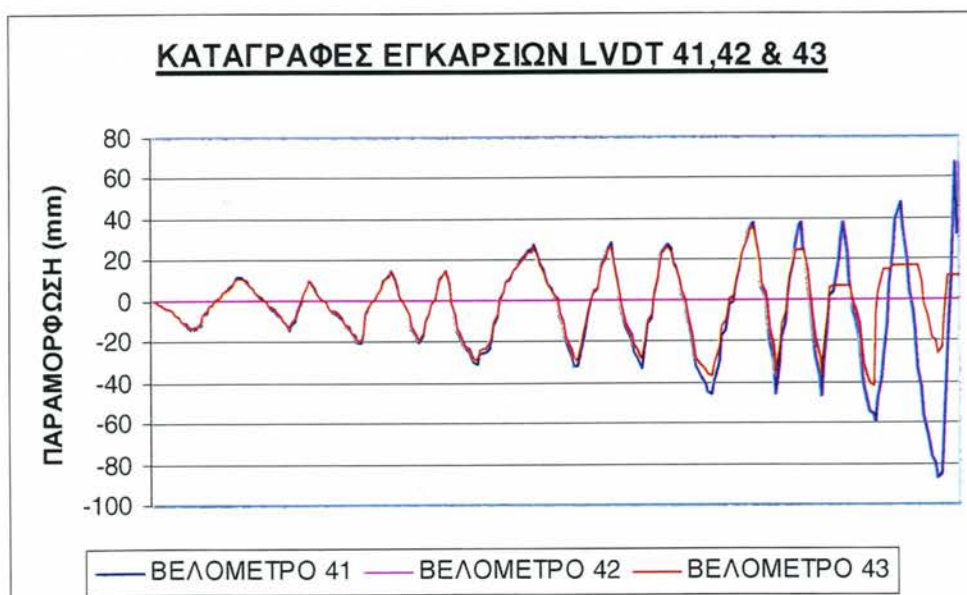
Από τα διαγράμματα σύγκρισης φαίνεται ότι αν και το ΕΝισχυμένο δοκίμιο απομειώνει γρήγορα την υπεραντοχή του, σε απόλυτα μεγέθη όμως, διατηρεί την αντοχή του μετά την απομείωση του 85% σε σταθερά επίπεδα ανώτερα ή ίσα με τη μέγιστη αντοχή που επετεύχθη στο δοκίμιο ΧΠ302. Αντίθετα, το παρθένο δοκίμιο έχει σημαντικά μειωμένη παραμορφωσιμότητα, αν και, σε όρους πλαστιμοτήτων, εμφανίζει ακριβώς ίδια συμπεριφορά τόσο

στην μείωση της \bar{K} όσο και στο ρυθμό αύξησης της μ_E σε σχέση με το ΧΠ302ΕΝ.



Σχήμα 5.3.7 Σύγκριση της συμπεριφοράς του δοκιμίου ΧΠ302 πριν και μετά την ενίσχυση.

5.3.5 Καταγραφές LVDT στην εγκάρσια διεύθυνση

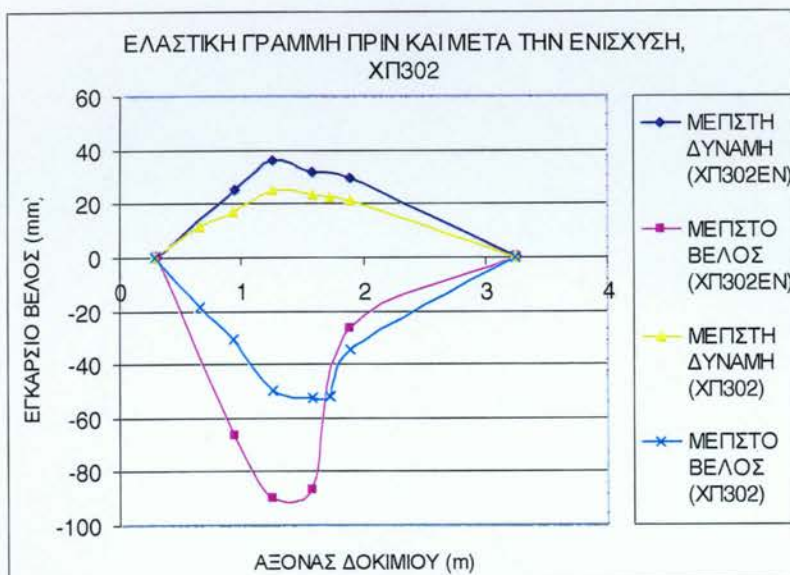


Σχήμα 5.3.8 Κατανομή της εγκάρσιας παραμόρφωσης σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 41,42 και 43.



Σχήμα 5.3.9 Κατανομή της εγκάρσιας παραμόρφωσης σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 44,45.

Οι καταγραφές των εγκάρσιων LVDT δίνονται στο Σχήμα 5.3.8 και 5.3.9. Στο Σχήμα 5.3.10 απεικονίζεται η εγκάρσια παραμόρφωση των δοκιμίων **ΧΠ302** και **ΧΠ302ΕΝ**, με βάση τις ενδείξεις των LVDT που είναι τοποθετημένα κάθετα στον αρχικό απαραμόρφωτο άξονα του δοκιμίου, με αριθμούς καταγραφής 41, 42, 43 και 44 (**ΧΠ302ΕΝ**). Στον οριζόντιο άξονα του



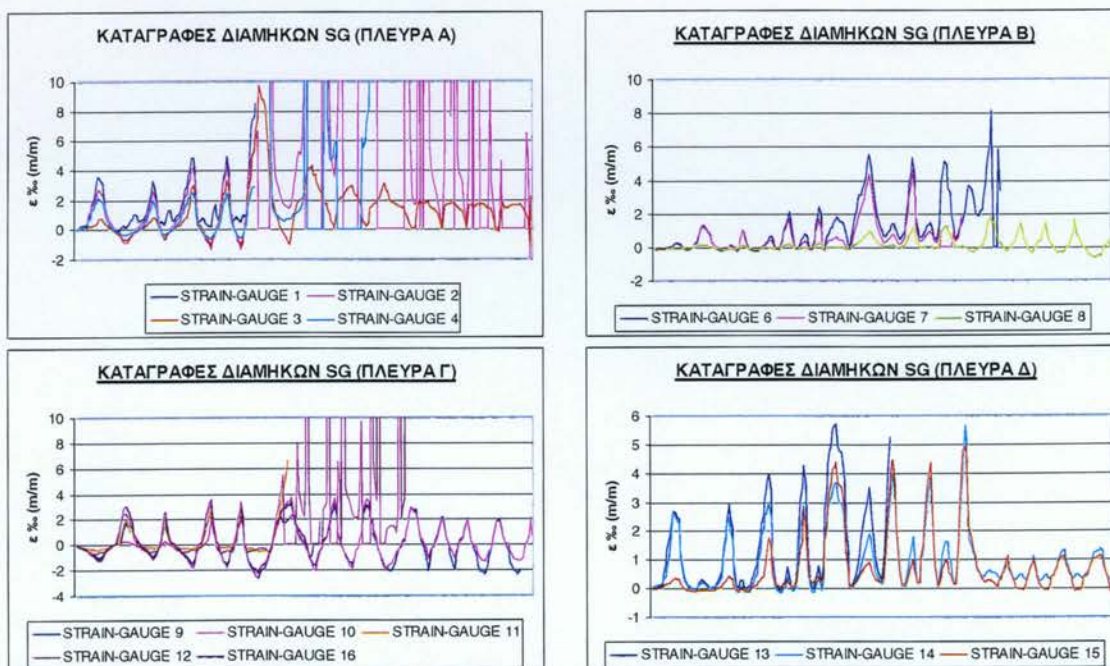
Σχήμα 5.3.10
Σύγκριση της ελαστικής γραμμής του δοκιμίου κατά την κατάγραφή της μέγιστης δύναμης P ή της μέγιστης μετατόπισης δ , πριν και μετά την ενίσχυση

Σχήματος απεικονίζεται ο διαμήκης άξονας του δοκιμίου με αφετηρία την κάτω στήριξη του δοκιμίου. Τα βέλη μηδενίζονται στα σημεία των δύο στηρίξεων. Συγκεκριμένα, στο σχήμα καταγράφεται η εικόνα του εκάστοτε

παραμορφωμένου φορέα όταν η δύναμη του εγκάρσιου εμβόλου παίρνει την μέγιστη τιμή της καθώς και όταν το βέλος στην θέση επιβολής της εγκάρσιας δύναμης γίνεται μέγιστο, για τις δύο περιπτώσεις των δοκιμών ΧΠ302 και ΧΠ302ΕΝ αντίστοιχα.

Ο λόγος της αρχικής δυσκαμψίας των ΧΠ302ΕΝ και ΧΠ302 είναι 1/1,08. Λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία αντοχών (1/1,70), η διαφορά αυτή αποτιμάται στην αντίστοιχη αύξηση του βέλους που αντιστοιχεί στη μέγιστη P , ενώ παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα του παραμορφωμένου σχήματος των δύο δοκιμών στην αρχική τους καταπόνηση του στην κάθε Φάση. Αντίθετα, στη μέγιστη παραμόρφωση, το ανελαστικά παραμορφωμένο τμήμα του ΕΝισχυμένου στύλου εμφανίζει μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα αφενός, αλλά και μεγαλύτερο ενεργό πλάτος ανελαστικής στροφής, αφετέρου. Το εύρος της πλαστικής άρθρωσης είναι πλέον ευκρινές από τις μετρήσεις των SG που αναπτύσσονται παρακάτω.

5.3.6 Καταγραφές SG στη διαμήκη διεύθυνση

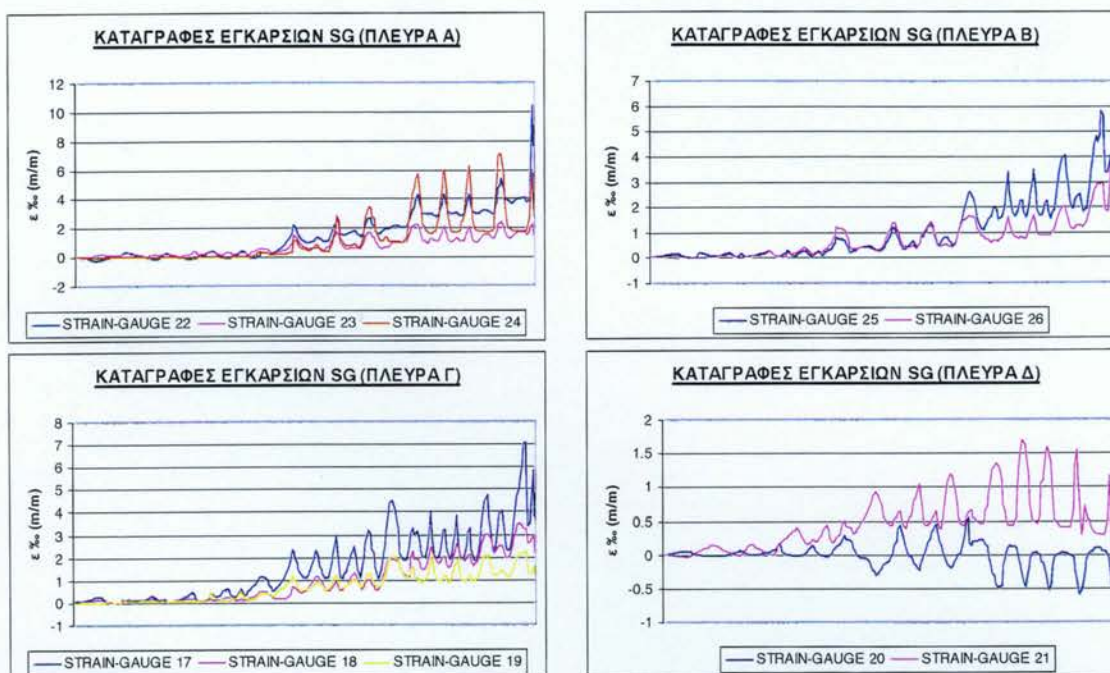


Σχήμα 5.3.11 Πειραματικές καταγραφές διαμήκων SG καμπτικής ενίσχυσης (Το SG# 11 δεν κατέγραψε καθόλου).

Οι καταγραφές των διαμήκων ηλεκτρονικών μηχανομετρώων (*Strain Gauges*) δείχνονται στο Σχήμα 5.3.11. Η θέση και αρίθμηση τους δείχνονται στα Σχήματα Π5.3.6 ως Π5.3.9. Τα διαμήκη SG τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις

περίπου 10 cm μεταξύ τους, είτε στο μέσον της παρειάς είτε στα άκρα, στη θέση του διαμήκους οπλισμού (επί του ΙΝΟΠ). Στο βαθμό που αυτά είναι σε θέση να καταγράψουν την παραμόρφωση του ΙΝΟΠ, στο οποίο είναι στερεωμένα, οι μέγιστες ανηγμένες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν, σε απόσταση περίπου 10 cm από το P (SG #1, 6, 16 και 13 διαδοχικά) στις τέσσερις παρειές αντίστοιχα, είναι 8.5, 8.1 και 3.6 και 5.7‰.

5.3.7 Καταγραφές SG στην εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5.3.12 Πειραματικές καταγραφές εγκάρσιων SG στο ΙΝΟΠ περίσφιγξης διατμητικής ενόχλησης.

Η θέση και αρίθμηση των ηλεκτρονικών μηχανομετρών (*Strain Gauges*) με τα οποία ενωργανώθηκε το δοκίμιο δείχνονται στα Σχήματα Π5.3.6 ως Π5.3.9. Οι καταγραφές των μηχανομετρών στο ΙΝΟΠ υάλου δείχνονται στο Σχήμα 5.3.12. Σημειώνεται ότι, από άποψη χωροθέτησης, τα SG # 17 ως 19, 25 και 26 (παρειές Β και Γ) τοποθετούνται στην παρειά που αρχικά θλίβεται κατά τον πρώτο κύκλο (προς την μεριά του εμβόλου δηλαδή) ενώ τα SG # 20 ως 24 (παρειές Α και Δ) προς την εφελκυστική παρειά, αντιδιαμετρικά αντίθετα (βλέπε και Φωτογραφίες 5.3.1 και 5.3.2).

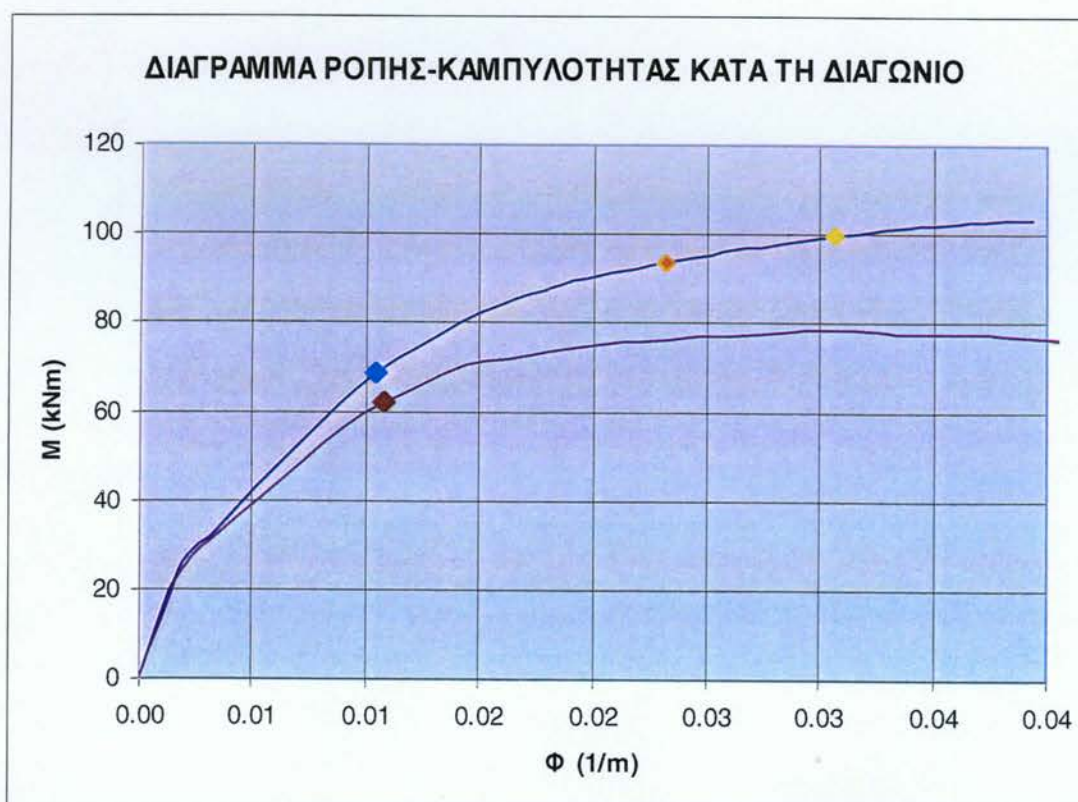
Με εξαίρεση την παρειά Δ (SG # 20 και 21), οι μέγιστες καταγραφές των εγκάρσιων SG κυμαίνονται ως το 5,8 – 7,0 ‰ στις άλλες τρεις παρειές,

ξεπερνώντας σε κάθε περίπτωση την τιμή διαρροής του εγκάρσιου συμβατικού οπλισμού (περίπου 1,9 %). Η μέγιστη καταγραφή φθάνει, για το SG #22 (παρειά Α, πλησίον της γωνιακής ράβδου), από τον 5^ο κύκλο και εξής, σταδιακά ως τη μέγιστη καταγραφή, στον τελευταίο κύκλο, ίση με 10,9 %. Η αύξηση στις τιμές των SG αποδίδεται στις σημαντικές δυνάμεις που παραλαμβάνει το εγκάρσιο ΙΝΟΠ στην κρίσιμη ζώνη, λόγω της δράσης περίσφιγξης του σκυροδέματος και της συγκράτησης του γωνιακού οπλισμού, ο οποίος έχει προφανώς εισέλθει σε ανακυκλιζόμενο λυγισμό αυξανόμενου εύρους, όπως έχει ήδη παρατηρηθεί στην περιγραφή των βλαβών.

5.4 Δοκίμιο ΧΠ303ΕΝ

5.4.0 Αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής του δοκιμίου

Το δοκίμιο αυτό επισκευάστηκε και ενισχύθηκε με την ίδια μέθοδο όπως το ΧΠ302ΕΝ χρησιμοποιώντας ένα φύλλο ΙΝΟΠ άνθρακα σε κάθε παρειά, διαμήκως και, κατόπιν, ΙΝΟΠ υάλου εγκάρσιως σε μήκος 0,75m εκατέρωθεν του P , που τοποθετείται σε δύο συνεχείς στρώσεις, με μήκος υπερκάλυψης 30cm. Το φορτίο P εφαρμόζεται σε απόσταση 1,36 m από την κάτω παρειά του υποστυλώματος. Στο Σχήμα 5.4.0 δίδεται το θεωρητικό διάγραμμα ροπής – καμπυλότητας, κάθετα προς τον άξονα της διαγωνίου σε διαξονική καταπόνηση στη διαγώνιο, υπολογίστηκε με το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών XTRACT (Chadwell, 2002), για την ενισχυμένη διατομή του. Στο ίδιο διάγραμμα δείχνονται τα σημεία της πρώτης διαρροής του συμβατικού γωνιακού χάλυβα ($M_y = 68,7$ kNm), καθώς και τα σημεία όπου η ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ άνθρακα έφθασε τις τιμές $\varepsilon_f=0,6\%$ ($M_{p|\varepsilon_f=6\%} = 93,3$ kNm) και $\varepsilon_f=0,8\%$ ($M_{p|\varepsilon_f=8\%} = 99,6$ kNm),



Σχήμα 5.4.0 Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας της κρίσιμης διατομής των ΧΠ303 και ΧΠ303ΕΝ σε διαξονική καταπόνηση κατά τη διαγώνιο.

αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές του φορτίου $P_y = 91,5 \text{ kN}$, $P_{0,6\%} = 124,4 \text{ kN}$ και $P_{0,8\%} = 132,8 \text{ kN}$, αντίστοιχα, χωρίς διόρθωση για τα φαινόμενα 2ας τάξης. Σύμφωνα με τις παραδοχές του λογισμικού, το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν με πλήρη συνάφεια ενώ γίνεται η παραδοχή της γραμμικής κατανομής παραμορφώσεων. Η ανάλυση αφορά το διάγραμμα ώστε η τελική αξονική αντίσταση στη διατομή (N) να ισούται με την εξωτερική $N=195 \text{ kN}$. Όλες οι παραπάνω τιμές είναι υπολογισμένες χρησιμοποιώντας μέσες τιμές των πειραματικών μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών (Κεφάλαιο 2) και ονομαστικά χαρακτηριστικά για το ΙΝΟΠ. Οι παραδοχές της ανάλυσης και πλέον εκτενή αποτελέσματα από την ανάλυση διατομών και στοιχείων δίνονται στο Κεφάλαιο 6 και, συγκεντρωτικά, στο Παράρτημα Ι.

5.4.1 Ενοργάνωση του δοκιμίου

Στο δοκίμιο τοποθετούνται πέντε εγκάρσια LVDT στερεωμένα στο εξωτερικό σταθερό σύστημα αναφοράς (Αρ. 41 ως 45 στο Σχήμα Π5.4.1) καθώς και επτά διαμήκη LVDT, έξη για τη μέτρηση της πλαστικής στροφής (Αρ. 49 ως 54, Σχήματα Π5.4.6 και Π5.4.8) στα γωνιακά άκρα της διατομής της κρίσιμης ζώνης και ένα για μέτρηση της διαμήκου παραμόρφωσης στον άξονα (Αρ. 48). Επί πλέον, επάνω στα διαμήκη και εγκάρσια ΙΝΟΠ επικολλούνται δεκαέξι ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (SG) κατά τη διαμήκη διεύθυνση (Αρ. 1 έως 16, Σχήματα Π5.4.2 ως Π5.4.5) και δέκα κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Αρ. 19 ως 28, Σχήματα Π5.4.6 ως Π5.4.9).

5.4.2 Περιγραφή του πειράματος

Το ΕΝισχυμένο δοκίμιο ΧΠ303ΕΝ τοποθετείται κατακόρυφα στη διάταξη (Φωτογραφία 5.4.1), σε διεύθυνση φόρτισης κατά μήκος της διαγωνίου του. Έχει συνολικό μήκος 3,40m και καθαρό άνοιγμα 3,15m μεταξύ στηρίξεων. Βάσει οπλισμών, το δοκίμιο έχει ένα ελεγχόμενο μήκος 1,20 m οπλισμένο με συνδετήρες S220 σε διάταξη Φ6/400, καθώς και μειωμένο διαμήκη οπλισμό 8Φ14 σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του, μήκους 1,95 m που είναι ισχυρά

οπλισμένο. Το εγκάρσιο έμβολο τοποθετείται στο όριο διακοπής του πρόσθετου οπλισμού επάνω από το ελεγχόμενο τμήμα, σε απόσταση 1,45 m

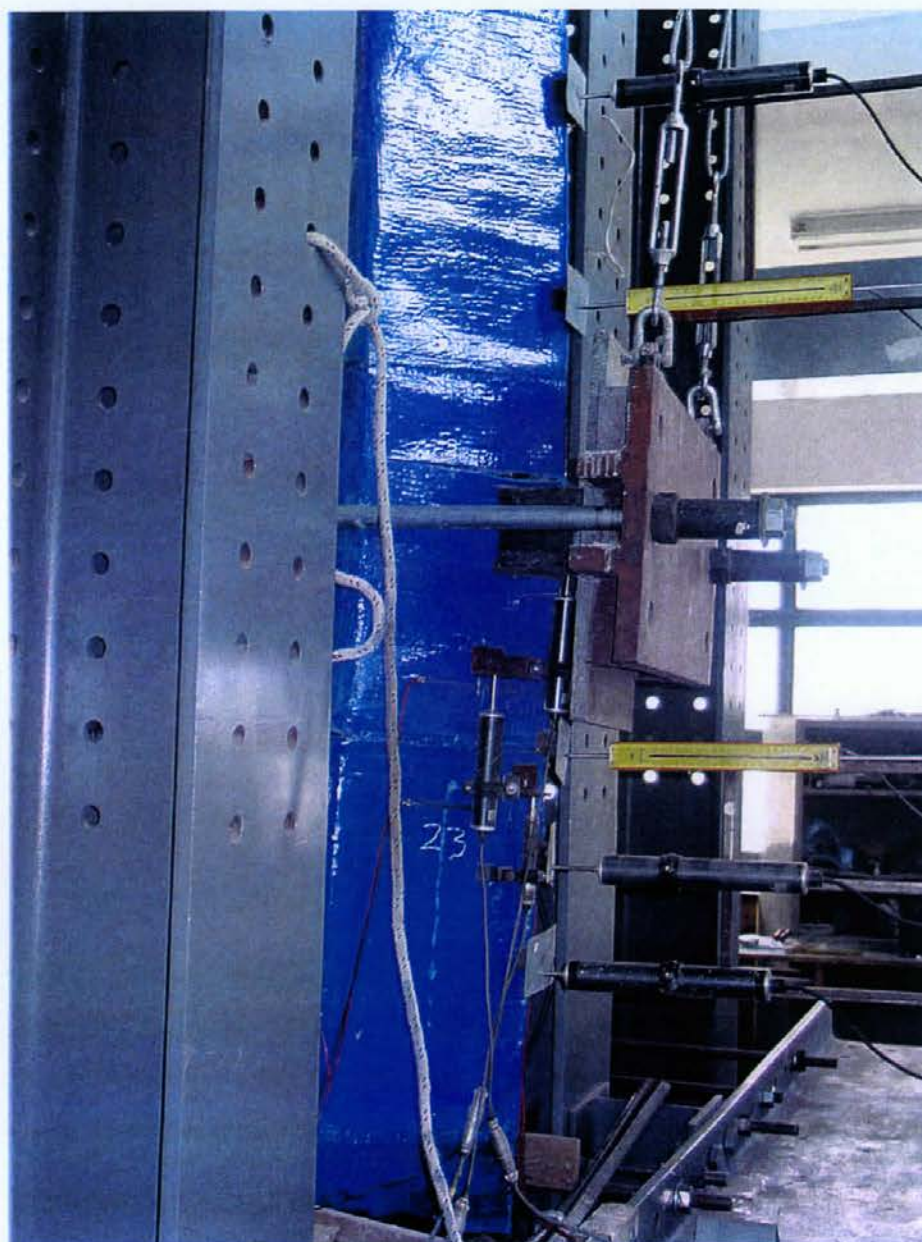


Φωτογραφία 5.4.1 Το δοκίμιο ΧΠ303ΕΝ τοποθετημένο στη διάταξη πριν την έναρξη του πειράματος

από την ακραία κάτω διατομή του υποστυλώματος προς το ισχυρό δάπεδο.

Στο δοκίμιο επιβάλλονται ένδεκα πλήρεις εναλλασσόμενοι κύκλοι φόρτισης και ένας ημιτελής, παρουσία σταθερής αξονικής θλιπτικής δύναμης $N=192,5$ kN. Η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν παρουσίασε κάποια ιδιαίτερα στοιχεία. Αρχικά παρατηρήθηκε μικρή εγκάρσια διάρρηξη του ΙΝΟΠ υάλου επάνω και κάτω από το παρέμβλημα μεταφοράς φορτίου στο έμβολο, η οποία ακολουθήθηκε από διόγκωση σε

τμήμα της θλιβόμενης παρειάς του δοκιμίου κάτω από το ΙΝΟΠ (Φωτογραφία 5.4.2).



Φωτογραφία 5.4.2 Διόγκωση του ΙΝΟΠ κάτω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου και διεύρυνση της ρωγμής στο ΙΝΟΠ. Διακρίνονται τα αριθμημένα SG # 22 και 23.

5.4.3 Περιγραφή των βλαβών και τρόπος αστοχίας

Μετά το πέρας του πειράματος απομακρύνθηκαν τα ΙΝΟΠ περισφιγξης και ενίσχυσης, με χρήση τροχού και κρουστικού όπου απαιτείτο, οπότε και αποκαλύφθηκε η βλάβη του δοκιμίου στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου (Φωτογραφίες 5.4.3 έως 5.4.5). Εμφανίζονται οριζόντιες ρωγμές στο σημείο

του P και σε απόσταση d από το φορτίο, καμπτικής μορφής, χωρίς καμία διαγώνια διατμητικού τύπου ρωγμή (Φωτογραφία 5.4.3). Οι αρχικά θλιβόμενες ράβδοι στη γωνία και στο μέσον της παρειάς εκατέρωθεν έχουν αποκαλυφθεί σε απόσταση δύο διαδοχικών συνδετήρων με έντονα φαινόμενα λυγισμού και παραμένουσες παραμορφώσεις. Χαρακτηριστικό είναι ότι η παρουσία του ΙΝΟΠ εγκαρσίως στη γωνία, υποχρέωσε τη γωνιακή ράβδο κατά την αστοχία να παραμορφωθεί σε σχήμα S, που αντιστοιχεί σε δεύτερη ιδιομορφή παραμόρφωσης λόγω λυγισμού (Φωτογραφίες 5.4.4 και 5.4.5).

Όσον αφορά το υλικό αποκατάστασης, παρατηρείται αποδιοργάνωση του θλιβόμενου σκυροδέματος τόσο του νέου (αποκατάστασης) όσο και του παλαιού, εσωτερικά του πυρήνα του στύλου, στη θλιβόμενη παρειά, με έντονη ρηγμάτωση, με πλήρη συνεργασία των δύο υλικών (παλαιό και αποκατάστασης), χωρίς αποκόλληση στη διεπιφάνεια (Φωτογραφίες 5.4.3 και 5.4.6).

Τέλος, παρατηρείται και αποκόλληση του ΙΝΟΠ με το οποίο είχε ενισχυθεί το δοκίμιο με αστοχία της διεπιφάνειας ΙΝΟΠ - σκυροδέματος, εκατέρωθεν του σημείου εφαρμογής του φορτίου P .



Φωτογραφία 5.4.3 Αστοχία της κρίσιμης ζώνης στην ελεγχόμενη περιοχή από τη θλιβόμενη παρειά. Διακρίνεται το ίχνος του διααμήκους ΙΝΟΠ εκατέρωθεν του P .



**Φωτογραφία
5.4.4**

Λεπτομέρεια του λυγισμού της γωνιακής ράβδου και των όμορων μεσαίων ράβδων στη θλιβόμενη παρειά.



**Φωτογραφία
5.4.5**

Λεπτομέρεια του λυγισμού της γωνιακής ράβδου και των όμορων μεσαίων ράβδων στη θλιβόμενη παρειά από άλλη γωνία. Διακρίνεται η μορφή λυγισμού της γωνιακής ράβδου.



Φωτογραφία

5.4.6

Λεπτομέρεια του σκυροδέματος υψηλής αντοχής της αποκατάστασης, και διακριτές ρωγμές που διαπερνούν το παλιό και το νέο υλικό επισκευής.

5.4.4 Ανάλυση της καταγεγραμμένης συμπεριφοράς



Σχήμα 5.4.1 Βρόχοι υστέρησης δοκιμίου ΧΠ303ΕΝ.

Το καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης (P - δ) του δοκιμίου δίνεται στο Σχήμα 5.4.1, χωρίς να έχει γίνει η διόρθωση της καταγεγραμμένης δύναμης για το ποσοστό της αντοχής που παραλαμβάνει τη ροπή δευτέρας τάξεως. Τα αντίστοιχα διαγράμματα P - δ των μεμονωμένων κύκλων αναλύονται στο Σχήμα 5.4.2.

Στον Πίνακα 5.4.1 δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ολικής συμπεριφοράς, που περιλαμβάνουν :

- μέγιστες /ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}),
- οι αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο,
- 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}),
- η μέση δυσκαμψία \bar{K} του βρόχου, που δίδεται από την εξίσωση

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

- 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).

Πίνακας 5.4.1 Μετρήσεις πειραματικής απόκρισης του δοκιμίου ΧΠ303ΕΝ

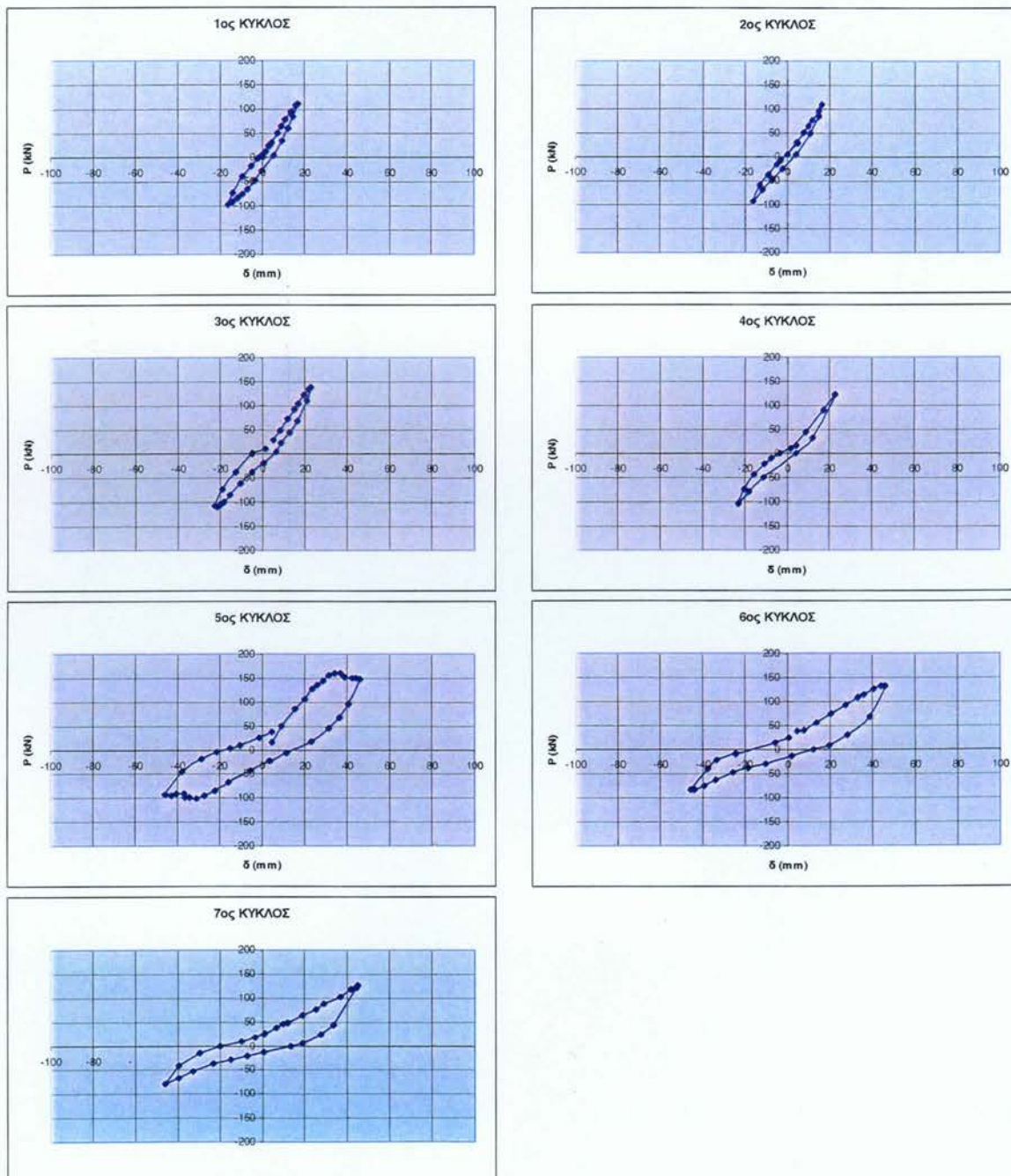
Αρ. Κύκλου	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	K kN/m	E kN/mm	μ_δ	μ_E
1	16	17	16	98	16	110	17	6347	912	0,7	0,8
2	16	16	16	93	16	108	16	6188	672	0,7	0,6
3	23	23	23	110	22	139	23	5594	1318	1,0	1,1
4	23	23	23	103	23	123	23	4953	1030	1,0	0,9
5	46	46	46	101	31	160	34	3994	6301	2,0	5,4
6	46	46	46	85	46	132	46	2361	3802	2,0	3,3
7	46	45	45	79	46	126	45	2258	3400	2,0	2,9
8	68	68	68	81	58	133	58	1855	9290	3,0	8,0
9	69	68	68	67	69	110	68	1296	6860	3,0	5,9
10	69	68	68	63	69	104	66	1240	6274	3,0	5,4
11	85	91	88	66	71	108	81	1140	10846	3,9	9,3
12	16	17	16	98	16	110	17	6347	912	0,7	0,8

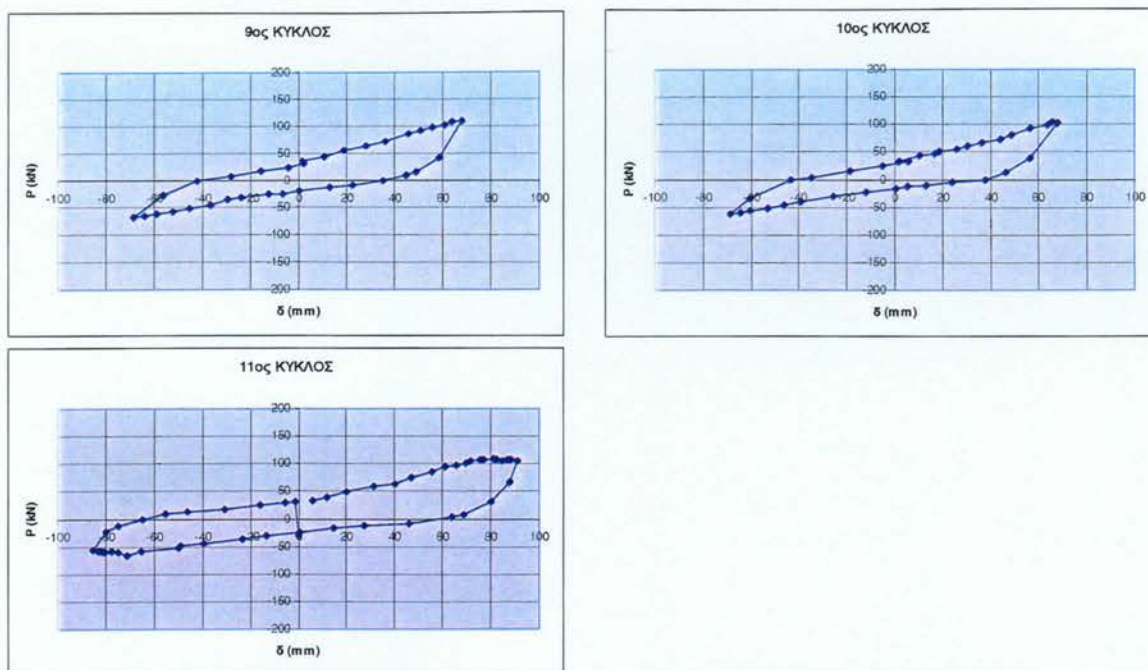
Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι η μέγιστη αντοχή του στύλου είναι 160 kN, 140% σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή των 114 kN του παρθένου δοκιμίου ΧΠ302. Η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται στον 5^ο κύκλο φόρτισης, σε μετακίνηση $\delta = 34,2$ mm και αντιστοιχεί σε καμπτική αντοχή $M_u = 115,2$ kNm, μετά από διόρθωση για το ποσοστό που παραλαμβάνει την ροπή δευτέρας τάξης. Η τιμή αυτή είναι κατά 16% μεγαλύτερη από τη θεωρητική πρόβλεψη της καμπτικής αντοχής $M_{p|ef=8\%} = 99,6$ kNm, που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση του ΙΝΟΠ 8%, θεωρώντας τις μέσες τιμές της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Αντίστοιχα, η τιμή αυτή είναι κατά 2% μικρότερη από τη θεωρητική πρόβλεψη της καμπτικής αντοχής $M_{p|ef=8\%} = 116,5$ kNm, λαμβάνοντας υπόψη όμως, στον παραπάνω υπολογισμό, την πρόσθετη συνεισφορά στην αντοχή της διατομής από το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής που χρησιμοποιήθηκε για την αποκατάσταση σε τμήμα της διατομής (Παράρτημα Ι)¹.

¹ Κατά τον υπολογισμό, θεωρήθηκε συντηρητικά ότι ο πυρήνας και η επικάλυψη της θλιβόμενης παρειάς αποτελούνται από το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής EMACO, που χρησιμοποιήθηκε για την αποκατάσταση της διατομής, με αντοχή σε θλίψη $f_c = 40$ MPa.

Κατά τη μέγιστη καταγραφή παραμόρφωσης των 91 mm (11^{ος} κύκλος), η μέγιστη πλαστική στροφή στην οποία υπόκειται η πλαστική άρθρωση είναι 0,121 rad (7,0°), η δε πλαστική στροφή στη μέγιστη αντοχή είναι 0,045 rad.

Το πειραματικά μετρούμενο φορτίο διαρροής αντιστοιχεί σε αντοχή 139 kN, το οποίο επιτυγχάνεται πειραματικά στον 3^ο κύκλο σε παραμόρφωση του δοκιμίου ίση με 22,9 mm. Η πτώση της φέρουσας ικανότητας στο 85% της μέγιστης τιμής (= 136 kN) εμφανίζεται σε





Σχήμα 5.4.2 Ανάλυση των μεμονωμένων κύκλων επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, δοκίμιο ΧΠ303ΕΝ.

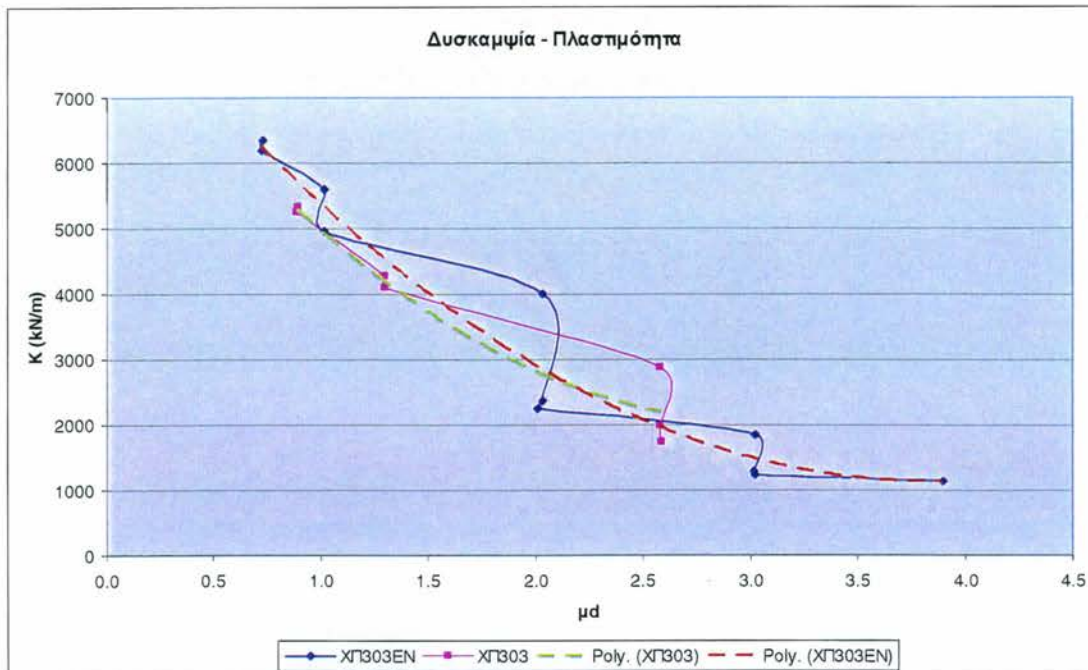
τιμή μετακίνησης 58 mm στον 8^ο κύκλο, οπότε και η αντίστοιχη τιμή πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων είναι **2,50** ως προς τη τιμή διαρροής.

Ο λόγος της μικρής σχετικά πλαστιμότητας μετατοπίσεων που παρέχει το δοκίμιο, είναι ότι η συμπεριφορά του μετά από την επίτευξη της μέγιστης αντοχής του χαρακτηρίζεται από απότομη απομείωση αυτής, σταδιακά, ενώ παρατηρείται ότι η τελική καμπτική αντοχή του στύλου, τείνει στην πρότερη καμπτική αντοχή του παρθένου δοκιμίου ΧΠ303. Σε αυτή την αντοχή φαίνεται να σταθεροποιείται το δοκίμιο κατά την ανακύκλωση ως τη μέγιστη παραμόρφωση των 91 mm που απετέλεσε το όριο τερματισμού της πειραματικής διαδικασίας λόγω περιορισμών της διάταξης.

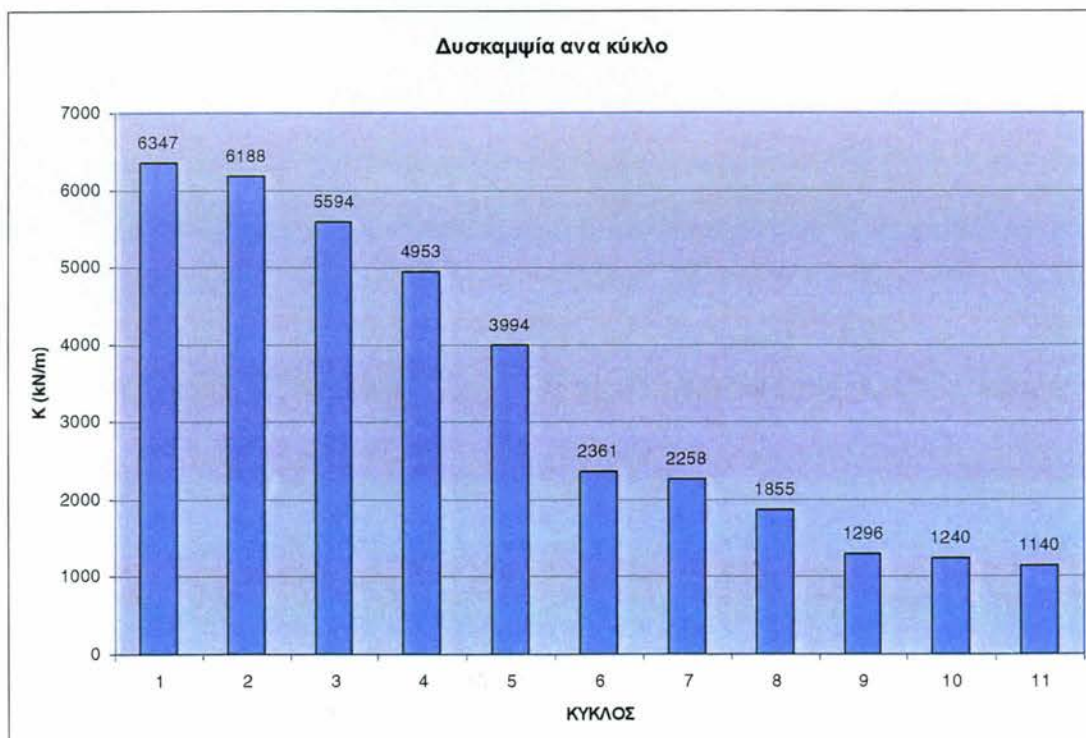
5.4.5 Παράγωγες μετρήσεις δυσκαμψίας και υστερετικής ενέργειας

Βάσει των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου υπολογίζεται η μέση δυσκαμψία μεταξύ ανακυκλίσεων του Πίνακα 5.4.1, η οποία απεικονίζεται για τη σειρά των ένδεκα ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.4.3 και 5.4.4, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, σε απόλυτα μεγέθη (Σχήμα 5.4.4) ή σαν πλαστιμότητα (Σχήμα 5.4.3). Παρατηρείται ότι ήδη, στο όριο της ωφέλιμης απόκρισης του δοκιμίου ως την

πλαστιμότητα 2,50 (στον 8^ο κύκλο), η μέση δυσκαμψία του στοιχείου έχει μειωθεί στο 29% της αρχικής. Ήδη, για πλαστιμότητα παραμόρφωσης ίση με



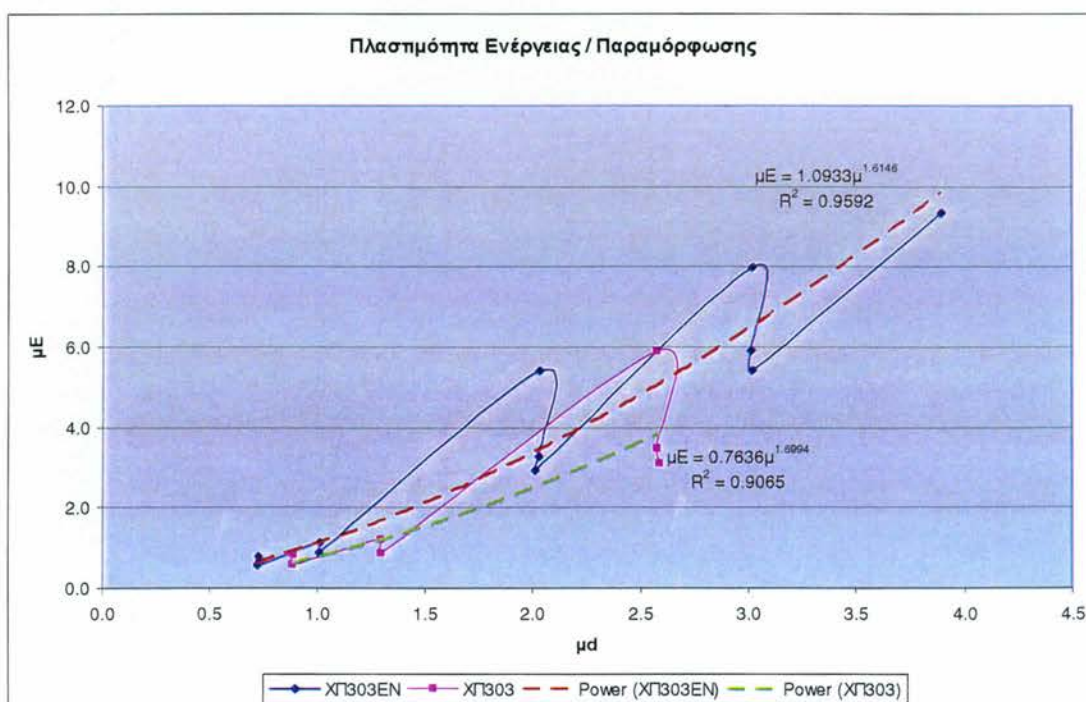
Σχήμα 5.4.3 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ως προς τη πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΧΠ303ΕΝ.



Σχήμα 5.4.4 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ανά κύκλο φόρτισης, δοκιμίου ΧΠ303ΕΝ.

2,0, η πτώση της δυσκαμψίας μεταξύ ανακυκλίσεων σε ίδιο εύρος είναι της τάξης του 46% μεταξύ διαδοχικών κύκλων.

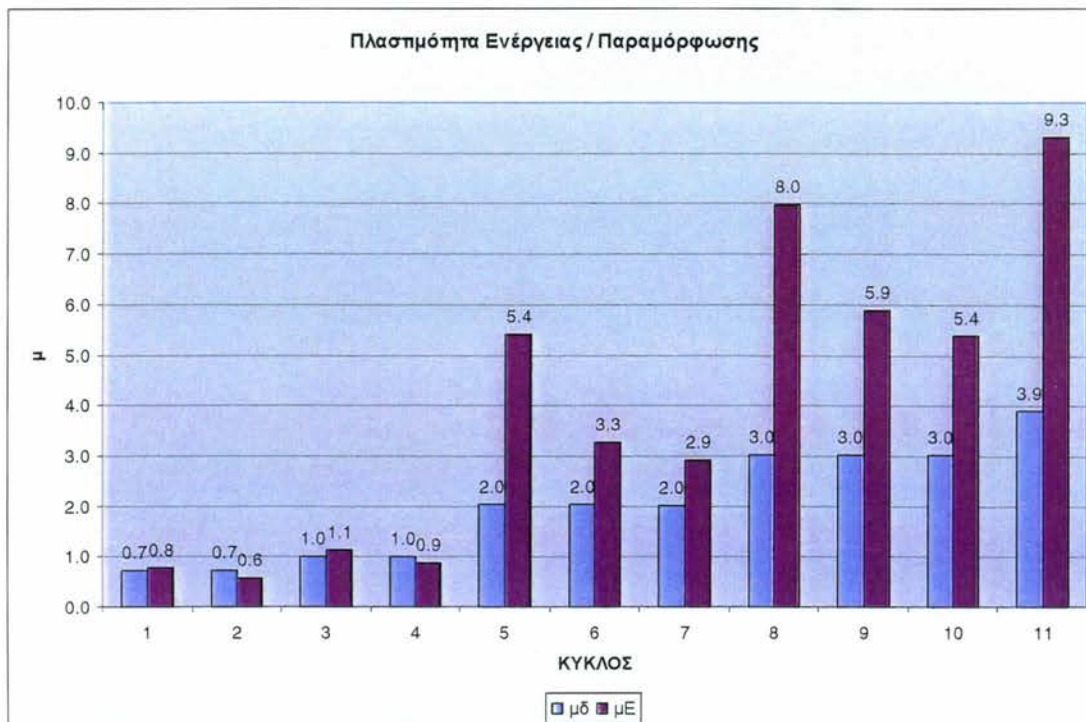
Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και στην απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του ενισχυμένου δοκιμίου, όπως αυτή υπολογίζεται σαν το εμβαδόν που περικλείεται από τον εκάστοτε βρόχο και δίδεται στον Πίνακα 5.4.1. Η υστερετική ενέργεια απεικονίζεται για τη σειρά των δώδεκα ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.4.5 και 5.4.6, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, (Σχήμα 5.4.5) καθώς και σε σύγκριση με την αντίστοιχη πλαστιμότητα παραμορφώσεων σε επαναλαμβανόμενους κύκλους σταθερού εύρους (Σχήμα 5.4.6). Παρατηρείται ότι από το όριο της πλαστιμότητας 2,50 και εξής, το δοκίμιο μειώνει στο 60% κατά μέσον όρο την απορροφώμενη εκάστοτε ενέργεια μεταξύ διαδοχικών κύκλων σε σταθερό εύρος ανακύκλισης (κύκλοι 5-7 και 8-10), ενώ, σε μέγιστη πλαστιμότητα παραμόρφωσης ίση με 3,90, απορροφά στον πρώτο κύκλο 9πλάσια ενέργεια



Σχήμα 5.4.5 Σταδιακή μείωση της απορροφούμενης υστερετικής ενέργειας ως προς της επιβαλλόμενη πλαστιμότητα παραμορφώσεων, ΧΠ303ΕΝ.

της διαρροής του. Στο Σχήμα 5.4.5, δίδεται επίσης ενδεικτικά και η βέλτιστη συναρτησιακή προσέγγιση της απόκρισης των πλαστιμοτήτων, ορίζοντας τη

βέλτιστη προσέγγιση με μια εκθετική συνάρτηση της πλαστιμότητας ενέργειας, ως προς το δείκτη πλαστιμότητας των παραμορφώσεων.



Σχήμα 5.4.6 Κατανομή πλαστιμότητας ενέργειας ως προς την πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΧΠ303ΕΝ.

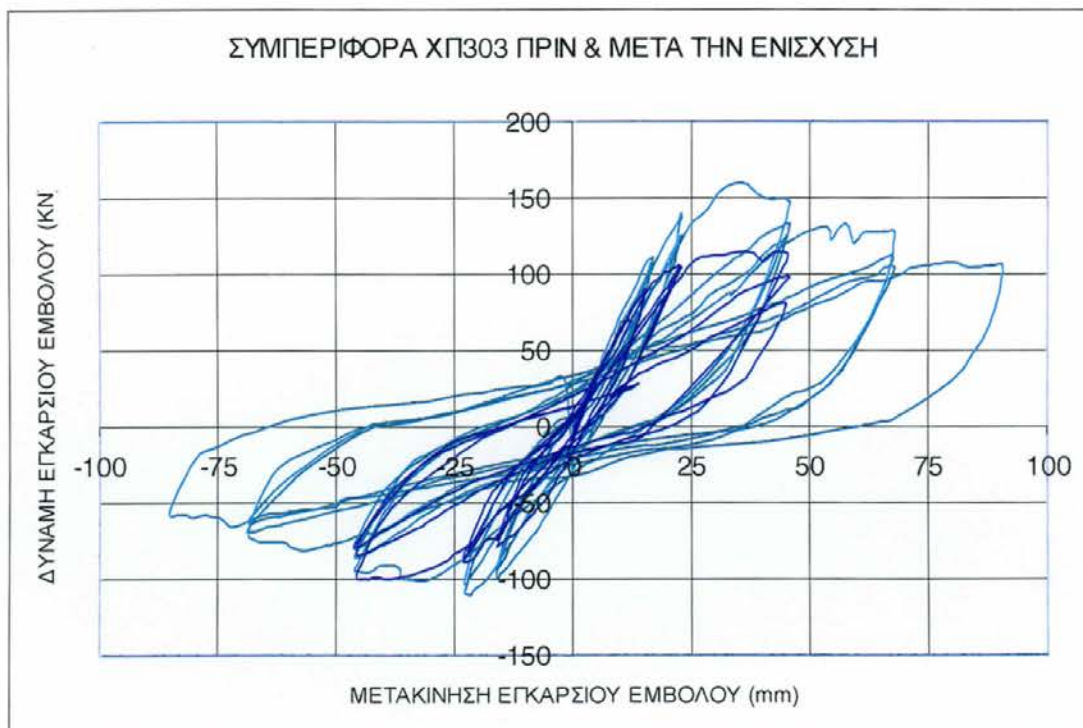
5.4.4 Σύγκριση πειραματικών καταγραφών ΧΠ303 και ΧΠ303ΕΝ

Τα διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης $P-\delta$ πριν και μετά τη διαδικασία αποκατάστασης και ενίσχυσης των ΧΠ303(ΕΝ) συγκρίνονται στο Σχήμα 5.4.7. Το δοκίμιο εμφανίζει την μέγιστη αντοχή των 160 kN, ίση με 140% της αντοχής του παρθένου δοκιμίου (114 kN). Λόγω λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων, το παρθένο δοκίμιο εμφανίζει τη χαρακτηριστική σταδιακή πτώση της αντοχής του σε ανακύκλιση, κάτω του 85%, ήδη σε απόκριση 45,3 mm, παρέχοντας συνολικά μικρότερο αριθμό ανακυκλίσεων από το ενισχυμένο δοκίμιο.

Το ΕΝισχυμένο δοκίμιο παρέχει ικανοποιητική συμπεριφορά έως και τη διπλάσια παραμόρφωση από το παρθένο, με αύξηση της υπεραντοχής λόγω της αποκατάστασης με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και της ενίσχυσής του με ΙΝΟΠ. Οι συγκρίσεις της απομειούμενης δυσκαμψίας και της

απορροφώμενης ενέργειας ως προς την πλαστιμότητα παραμόρφωσης που επεβλήθη κατά τον έλεγχο δίδονται στα Σχήματα 5.4.3 και 5.4.5.

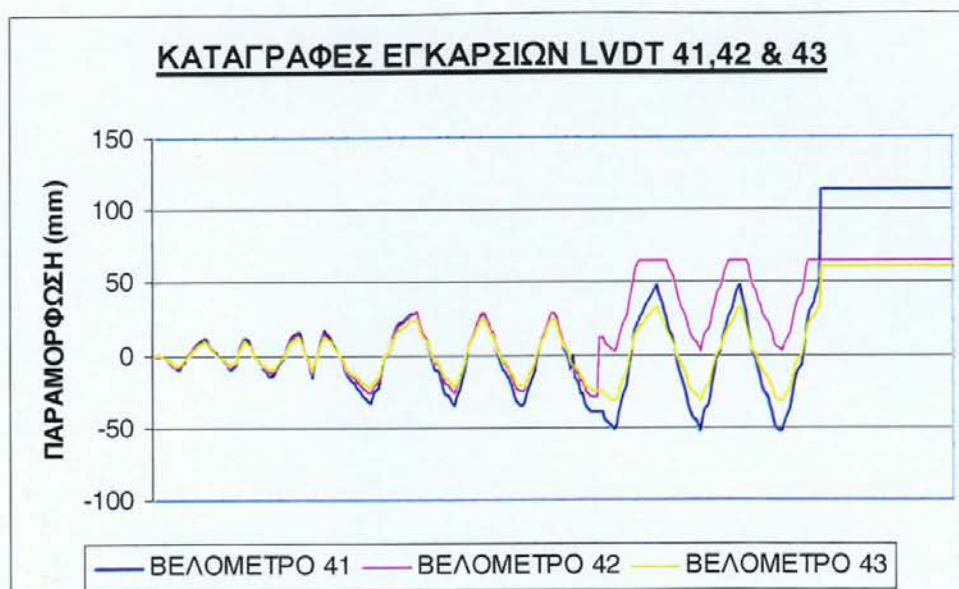
Από τα διαγράμματα σύγκρισης φαίνεται ότι αν και το ΕΝισχυμένο δοκίμιο απομειώνει γρήγορα την υπεραντοχή του, σε απόλυτα μεγέθη όμως, διατηρεί την αντοχή του μετά την απομείωση του 85% σε σταθερά επίπεδα επάνω ή ίσα προς την μέγιστη που επετεύχθη από το παρθένο δοκίμιο. Αντίθετα, το παρθένο δοκίμιο έχει σημαντικά μειωμένη παραμορφωσιμότητα, αν και, σε όρους πλαστιμοτήτων, εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά τόσο στην μείωση της \bar{K} όσο και στο ρυθμό αύξησης της μ_E σε σχέση με το ΧΠ304ΕΠ.



Σχήμα 5.4.7 Σύγκριση της συμπεριφοράς του δοκιμίου ΧΠ302 πριν και μετά την ενίσχυση.

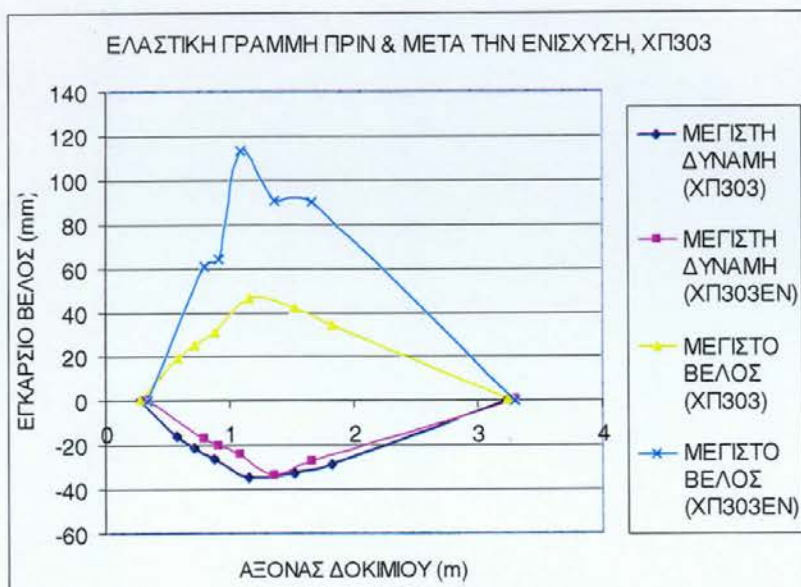
5.4.5 Καταγραφές LVDT στην εγκάρσια διεύθυνση

Οι καταγραφές των εγκάρσιων LVDT δίνονται στο Σχήμα 5.4.8.



Σχήμα 5.4.8 Κατανομή της εγκάρσιας παραμόρφωσης σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 41,42 και 43.

Στο Σχήμα 5.4.10 απεικονίζεται η εγκάρσια παραμόρφωση των δοκιμίων ΧΠ303 και ΧΠ303ΕΝ, με βάση τις ενδείξεις των LVDT που είναι τοποθετημένα κάθετα στον αρχικό απαραμόρφωτο άξονα του δοκιμίου, με αριθμούς καταγραφής 41, 42, 43, 44, 45 (ΧΠ303ΕΝ). Στον οριζόντιο άξονα του



Σχήμα 5.4.10

Σύγκριση της ελαστικής γραμμής του δοκιμίου κατά την κατάγραφή της μέγιστης δύναμης P ή της μέγιστης μετατόπισης δ , πριν και μετά την ενίσχυση

Σχήματος απεικονίζεται ο διαμήκης άξονας του δοκιμίου με αφετηρία την κάτω στήριξη του δοκιμίου. Τα βέλη μηδενίζονται στα σημεία των δύο στηρίξεων. Συγκεκριμένα, στο σχήμα καταγράφεται η εικόνα του εκάστοτε παραμορφωμένου φορέα όταν η δύναμη του εγκάρσιου εμβόλου παίρνει την

μέγιστη τιμή της καθώς και όταν το βέλος στην θέση επιβολής της εγκάρσιας δύναμης γίνεται μέγιστο, για τις δύο περιπτώσεις των δοκιμών ΧΠ303 και ΧΠ303ΕΝ αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία αντοχών (1/1,40) είναι εμφανής η σημαντική επιρροή της ενίσχυσης στην αρχική δυσκαμψία (παρόμοια βέλη παραμόρφωσης για διαφορά P_{max} 140%) καθώς και η ομοιότητα του παραμορφωμένου σχήματος του δοκιμίου στην αρχική καταπόνησή του στην κάθε Φάση. Αντίθετα, στη μέγιστη παραμόρφωση, το ανελαστικά παραμορφωμένο τμήμα του ΕΝισχυμένου στύλου εμφανίζει μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα αφενός, αλλά και μεγαλύτερο ενεργό πλάτος κατά την παραμόρφωση, αφετέρου. Το εύρος της πλαστικής άρθρωσης είναι πλέον ευκρινές από τις μετρήσεις των κατά μήκος LVDT και των SG που αναπτύσσονται παρακάτω.

5.4.6 Καταγραφές LVDT κατά τη διαμήκη διεύθυνση



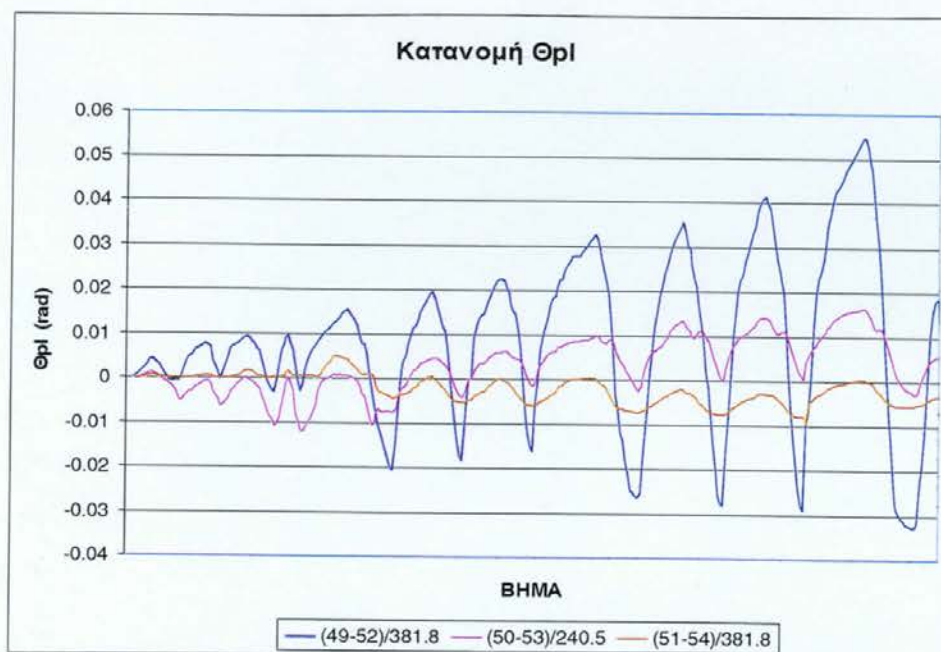
Σχήμα 5.4.11 Κατακόρυφη παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή σύμφωνα με τις καταγραφές των LVDT # 52,53,54.



Σχήμα 5.4.12 Κατακόρυφη παραμόρφωση σύμφωνα με τις καταγραφές των LVDT #49,50,51.

Οι καταγραφές των LVDT στην κρίσιμη περιοχή κατά τη διαμήκη διεύθυνση δείχνονται ανά ομάδες στα Σχήματα 5.4.11 και 5.4.12. Θεωρώντας την ακριβή θέση των LVDT είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι παράγωγες πλαστικές στροφές καθώς και οι μέσες καμπυλότητες του δοκιμίου, στο μήκος αναφοράς της μέτρησης, οι οποίες δείχνονται στο Σχήμα 5.4.13 για τα τρία διαδοχικά τμήματα της κρίσιμης ζώνης, αντίστοιχα.

Οι καταγραφές είναι κατανεμημένες σε μέση περίπου απόσταση 120mm μεταξύ τους. Η μέγιστη πλαστική στροφή που απαιτείται στο τμήμα πλησιέστερα στο φορτίο P είναι $0,054 \text{ rad}$, στη μέγιστη παραμόρφωση των 90,7 mm. Η παραπάνω τιμή είναι ίση με 340% της αντίστοιχης πλαστικής στροφής των $0,016 \text{ rad}$, στο δεύτερο διαδοχικό τμήμα της κρίσιμης ζώνης, ενώ το τρίτο τμήμα καταγράφει μηδαμινές τιμές ($0,0004 \text{ rad}$). Παρατηρείται άρα ότι η συνολική πλαστική στροφή – άθροισμα των τριών παραπάνω καταγραφών – ισούται με $0,07 \text{ rad}$, τιμή πολύ κοντά στην αντίστοιχη εξωτερική μέτρηση των εγκάρσιων LVDT ($90,7\text{mm} / 1335\text{mm} = 0,068 \text{ rad}$), σε ποσοστό 3%, γεγονός που ελέγχει την ακρίβεια της πειραματικής διαδικασίας και διάταξης.



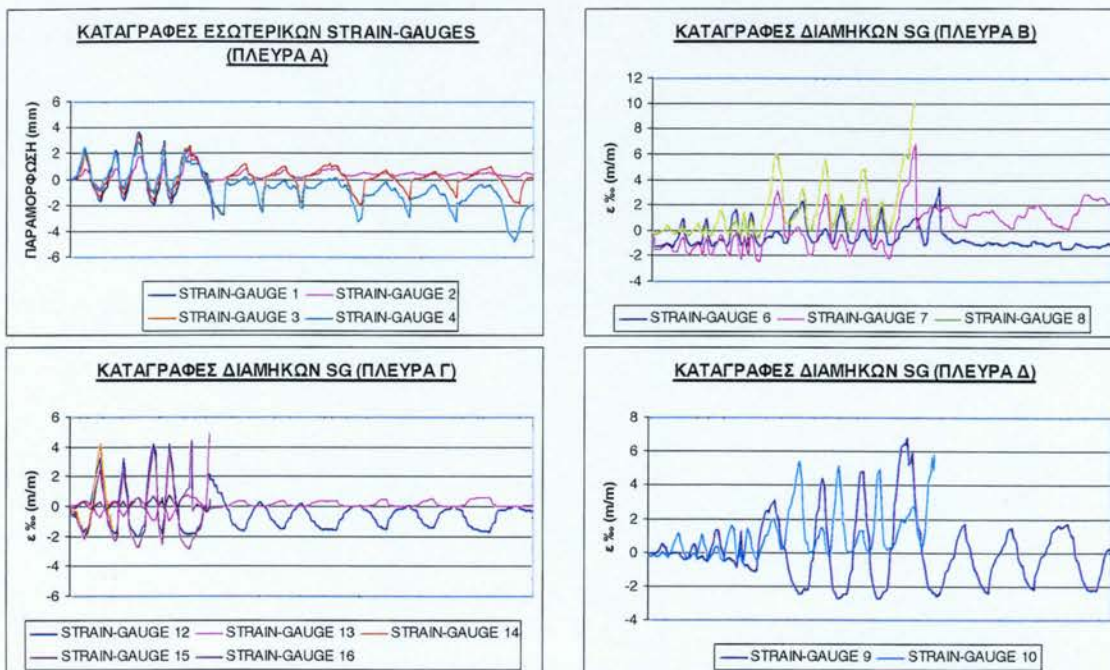
Σχήμα 5.4.13 Κατανομή απαιτήσεων πλαστικής στρώσης κατά μήκος της κρίσιμης ζώνης, βάσει των καταγραφών LVDT # 49 ως 54.

Τέλος, η διαμήκης καταγραφή στον άξονα, στη βάση του δοκιμίου, δίνεται στο Σχήμα 5.4.16 και ακολουθεί την επιβαλλόμενη στρώση του δοκιμίου ως προς το σημείο εφαρμογής του αξονικού φορτίου. Η μέγιστη και ελάχιστη καταγραφή του LVDT #48 είναι ίσες προς 9 και -2 mm αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4.16 Πειραματική καταγραφή αξονικού LVDT στη βάση του δοκιμίου.

5.4.7 Καταγραφές SG στη διαμήκη διεύθυνση



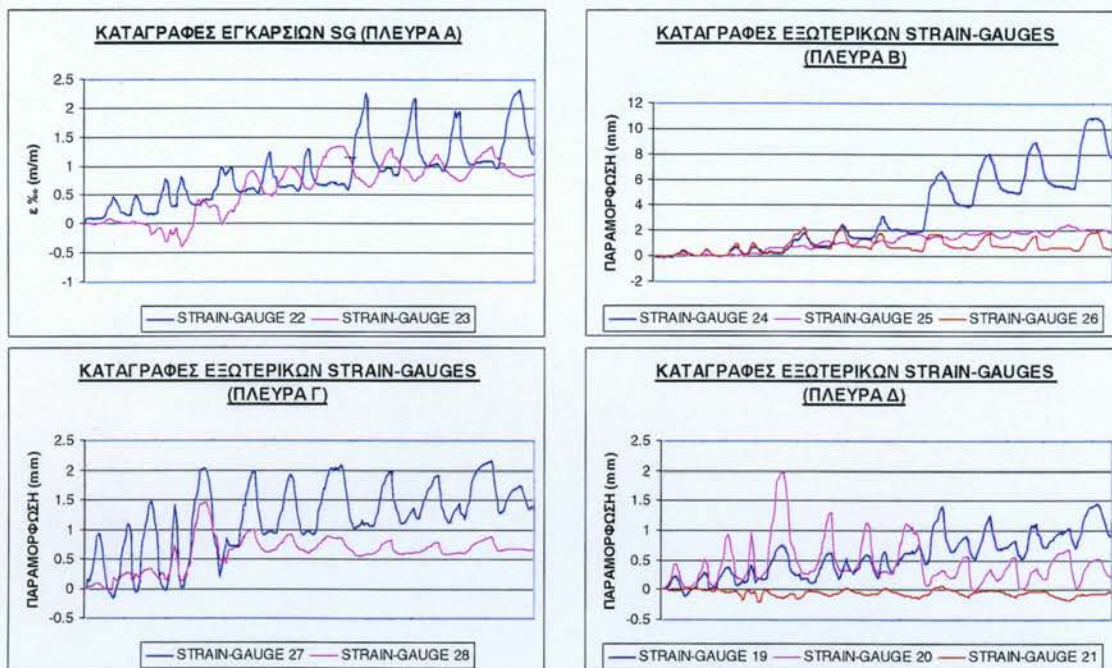
Σχήμα 5.4.14 Πειραματικές καταγραφές διαμήκων SG καμπτικής ενίσχυσης (Το SG# 11 δεν κατέγραψε καθόλου).

Η θέση και αρίθμηση των ηλεκτρονικών μηχανομετρών (*Strain Gauges*) με τα οποία ενωργανώθηκε το δοκίμιο δείχνονται στα Σχήματα Π5.4.6 ως Π5.4.9. Τα διαμήκη SG τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις περίπου 10 cm μεταξύ τους, είτε στο μέσον της παρειάς είτε στα άκρα, στη θέση του διαμήκους οπλισμού (επί του ΙΝΟΠ). Στο βαθμό που αυτά είναι σε θέση να καταγράψουν την παραμόρφωση του ΙΝΟΠ, στο οποίο είναι στερεωμένα, οι μέγιστες ανηγμένες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν, σε απόσταση περίπου 10 cm από το P (SG #4, 8 και 14) στις τέσσερις παρειές αντίστοιχα, είναι 4.4, 10.1 και 4.2 %.

5.4.8 Καταγραφές SG στην εγκάρσια διεύθυνση

Η θέση και αρίθμηση των ηλεκτρονικών μηχανομετρών (*Strain Gauges*) με τα οποία ενωργανώθηκε το δοκίμιο δείχνονται στα Σχήματα Π5.4.6 ως Π5.4.9. Οι καταγραφές των μηχανομετρών στο ΙΝΟΠ υάλου δείχνονται στο Σχήμα 5.4.15. Σημειώνεται ότι, από άποψη χωροθέτησης, τα SG # 19 ως 21, 27 και 28 (παρειές Γ και Δ) τοποθετούνται στην παρειά που αρχικά θλίβεται κατά τον πρώτο κύκλο (προς την μεριά του εμβόλου δηλαδή) ενώ τα SG # 22 ως 26 (παρειές Α και Β) προς την εφελκόμενη παρειά, αντιδιαμετρικά αντίθετα (βλέπε και Φωτογραφίες 5.4.1 και 5.4.2). Οι μέγιστες καταγραφές των

εγκάρσιων SG κυμαίνονται ως το 2,0 – 2,5 %, με εξαίρεση το SG#24 (παρειά Β, πλησίον της γωνιακής ράβδου), το οποίο από τον 5^ο κύκλο και εξής, σταδιακά αυξάνει από την τιμή διαρροής του εγκάρσιου συμβατικού οπλισμού (περίπου 1,9 %) ως τη μέγιστη καταγραφή του, στον τελευταίο κύκλο, ίση με 10,9 %, λόγω των εφελκυστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο εγκάρσιο ΙΝΟΠ από την αυξανόμενη δράση περισφίγξης του γωνιακού οπλισμού, ο οποίος έχει προφανώς εισέλθει σε ανακυκλιζόμενο λυγισμό αυξανόμενου εύρους, όπως έχει ήδη παρατηρηθεί στην περιγραφή των βλαβών.

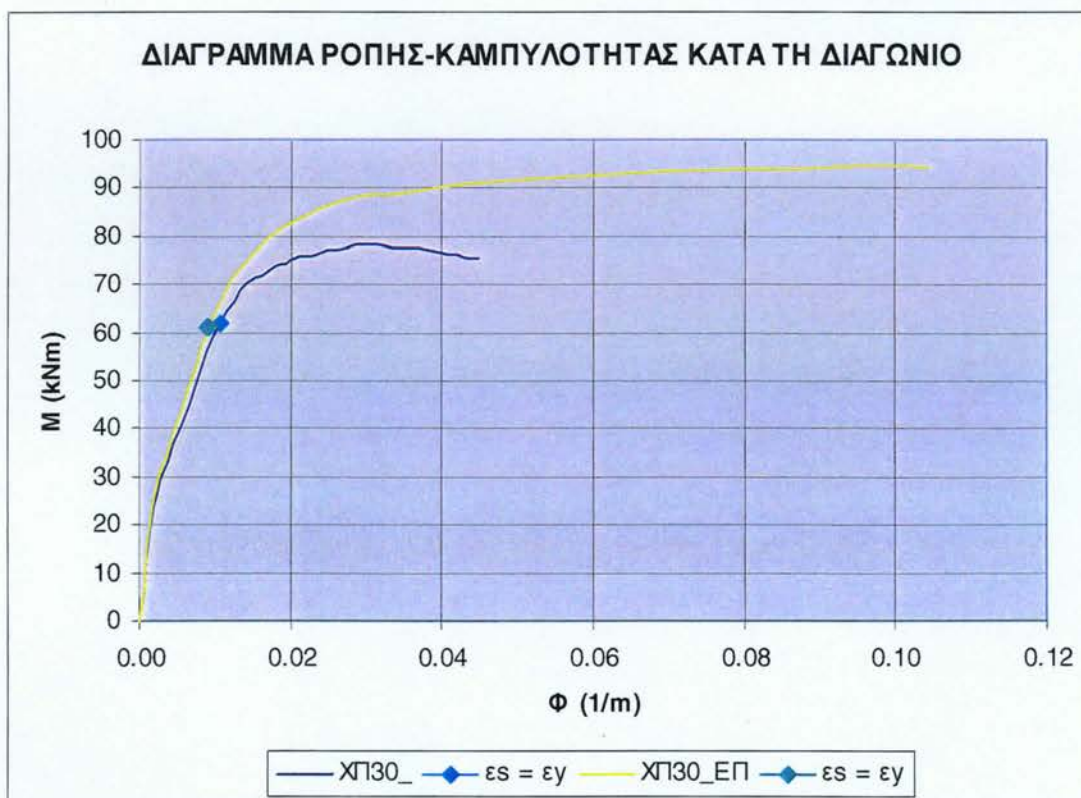


Σχήμα 5.4.15 Πειραματικές καταγραφές εγκάρσιων SG στο ΙΝΟΠ περισφίγξης / διατμητικής ενίσχυσης.

5.5 Δοκίμιο ΧΠ304ΕΠ

5.5.0 Αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής του δοκιμίου

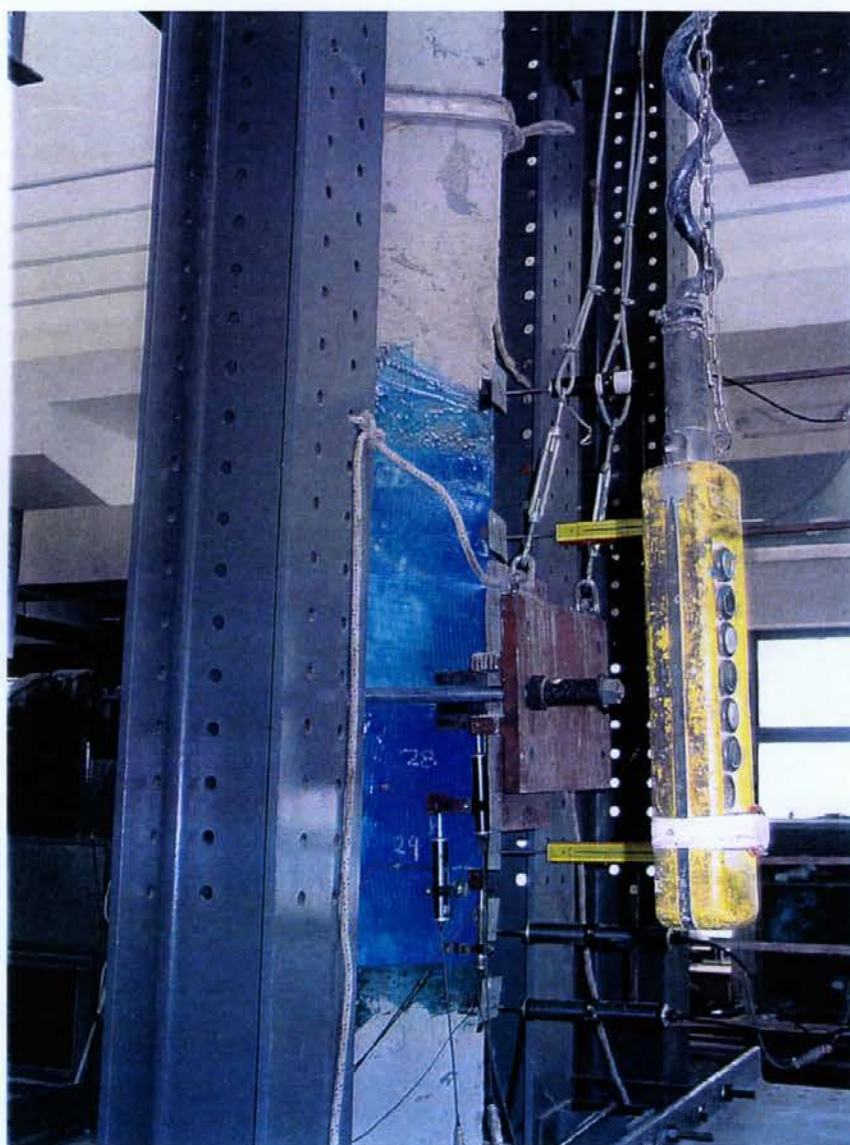
Το δοκίμιο ΧΠ304ΕΠ αποκαταστάθηκε και επισκευάσθηκε με εγκάρσια ΙΝΟΠ υάλου σε μήκος 0,75m εκατέρωθεν του P , που τοποθετείται σε απόσταση 1,35 m από την κάτω παρειά του υποστυλώματος. Το προβλεπόμενο διάγραμμα ροπής καμπυλότητας κάθετα προς τον άξονα της διαγωνίου της διαξονικής καταπόνησης του δοκιμίου υπολογίσθηκε με το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών XTRACT (Chadwell, 2002), για την παρθένα διατομή (Κεφάλαιο 4) και για τη διατομή αποκατεστημένη με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής 40 MPa¹ (Σχήμα 5.5.0). Σε κάθε γράφημα, δείχνεται και το προβλεπόμενο σημείο πρώτης διαρροής του γωνιακού εφελκόμενου χάλυβα. Κατά την ανάλυση θεωρείται ότι το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν με πλήρη



Σχήμα 5.5.0 Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας της διατομής του δοκιμίου ΧΠ304ΕΠ σε διαξονική καταπόνηση κατά τη διαγώνιο.

¹ Η θλιπτική αντοχή του υλικού αποκατάστασης είναι σκόπιμα χαμηλότερη από την προβλεπόμενη από τον προμηθευτή, για λόγους συντηρητικότητας της πρόβλεψης. Δεν έγιναν έλεγχοι δοκιμών του EMACO.

συνάφεια ενώ γίνεται η παραδοχή της γραμμικής κατανομής ανηγμένων παραμορφώσεων για δεδομένη καμπυλότητα ώστε η τελική αξονική αντίσταση στη διατομή (N) να ισούται με την αξονική N που εφαρμόσθηκε στο πείραμα. Οι παραδοχές και τα λεπτομερή αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στα Κεφάλαιο 6 και Παράρτημα Ι της παρούσης. Θεωρώντας τα μεγέθη σε διαξονική καταπόνηση κατά τη διαγώνιο, η θεωρητική καμπτική αντοχή κάθετα στη διεύθυνση κάμψης σε πρώτη διαρροή του γωνιακού χάλυβα, υπολογισμένη βάσει των πειραματικών μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και επιπεδότητας διατομών είναι $M_y = 57,2 \text{ kNm}$, ενώ η οριακή του αντοχή είναι $M_p = 93,4 \text{ kNm}$ (Σχήμα 5.5.0 και Πίνακας 6.1)). Οι τιμές



Φωτογραφία 5.5.1 Το δοκίμιο ΧΠ304ΕΠ τοποθετημένο στη διάταξη πριν την έναρξη του πειράματος. Διακρίνονται τα SG # 28 και 29.

αυτές αντιστοιχούν σε θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές του φορτίου $P_y = 74,5$ kN και $P_u = 121,7$ kN, αντίστοιχα (χωρίς διόρθωση για το ποσοστό της αντοχής που παραλαμβάνει τη ροπή δευτέρας τάξεως του αξονικού φορτίου).

5.5.1 Ενοργάνωση του δοκιμίου

Στο δοκίμιο τοποθετούνται πέντε εγκάρσια LVDT στερεωμένα στο εξωτερικό σταθερό σύστημα αναφοράς (Αρ.11-15), έξη διαμήκη LVDT μέτρησης της πλαστικής στροφής (Αρ. 19-24) στα γωνιακά άκρα της διατομής της κρίσιμης ζώνης καθώς και δέκα SG επικολλημένα στο ΙΝΟΠ υάλου περίσφιγξης, στην ελεγχόμενη ζώνη, κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Αρ. 25-34). Οι θέσεις και αποστάσεις όλων των μετρητικών δείχνονται στο Παράρτημα ΙΙ, στα Σχήματα Π5.5.1 έως Π5.5.5.

5.5.2 Περιγραφή του πειράματος

Το ΕΠισκευασμένο δοκίμιο τοποθετείται κατακόρυφα στη διάταξη (Φωτογραφία 5.5.1), σε διεύθυνση φόρτισης κατά μήκος της διαγωνίου του. Έχει συνολικό μήκος 3,40m και καθαρό άνοιγμα 3,15m μεταξύ στηρίξεων. Βάσει οπλισμών, το δοκίμιο έχει ένα ελεγχόμενο μήκος 1,20 m οπλισμένο με συνδετήρες S220 σε διάταξη Φ6/400, καθώς και μειωμένο διαμήκη οπλισμό 8Φ14 σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του, μήκους 1,95 m που είναι ισχυρά οπλισμένο. Το εγκάρσιο έμβολο τοποθετείται στο όριο διακοπής του πρόσθετου οπλισμού επάνω από το ελεγχόμενο τμήμα, σε απόσταση 1,45 m από την ακραία κάτω διατομή του υποστρώματος προς το ισχυρό δάπεδο.

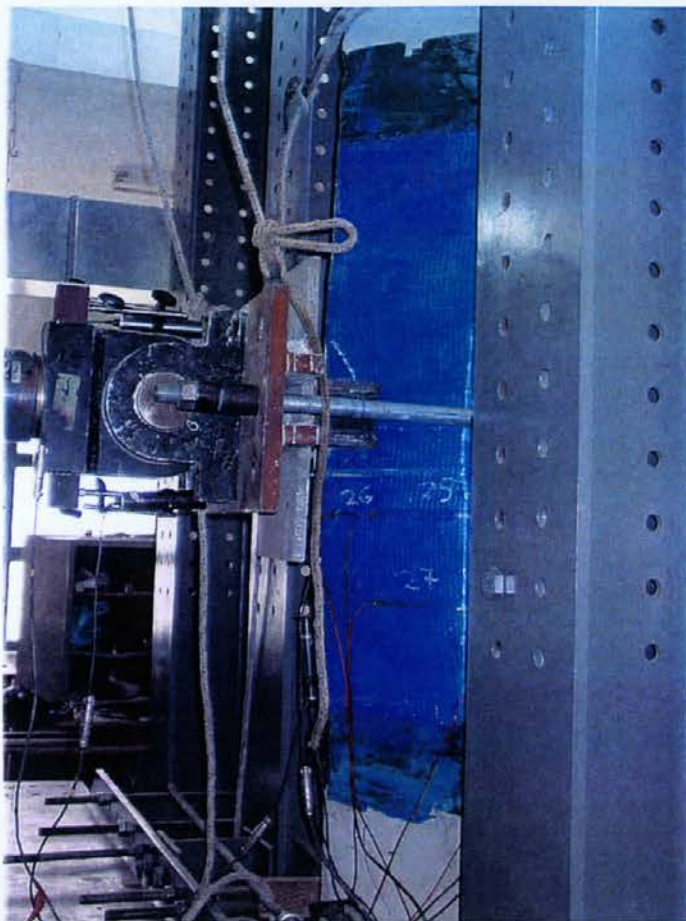
Στο δοκίμιο επιβάλλονται δεκατρείς συνολικά εναλλασσόμενοι κύκλοι φόρτισης, παρουσία αξονικής θλιπτικής δύναμης $N=192,5$ kN. Η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν παρουσίασε κάποια ιδιαίτερα στοιχεία. Αρχικά παρατηρήθηκε μικρή εγκάρσια διάρρηξη του ΙΝΟΠ υάλου κάτω από το παρέμβλημα μεταφοράς φορτίου στο έμβολο, η οποία ακολουθήθηκε από διόγκωση σε τμήμα της θλιβόμενης παρειάς του δοκιμίου κάτω από το ΙΝΟΠ (Φωτογραφία 5.5.2). Με την αύξηση των παραμορφώσεων, η διάρρηξη του ΙΝΟΠ διευρύνθηκε σε διακριτή ρωγμή η



Φωτογραφία 5.5.2
Διόγκωση του ΙΝΟΠ
κάτω από το σημείο
εφαρμογής του φορ-
τίου και διεύρυνση
της ρωγμής στο
ΙΝΟΠ. Διακρίνονται
τα αριθμημένα SG #
25, 26 και 27.

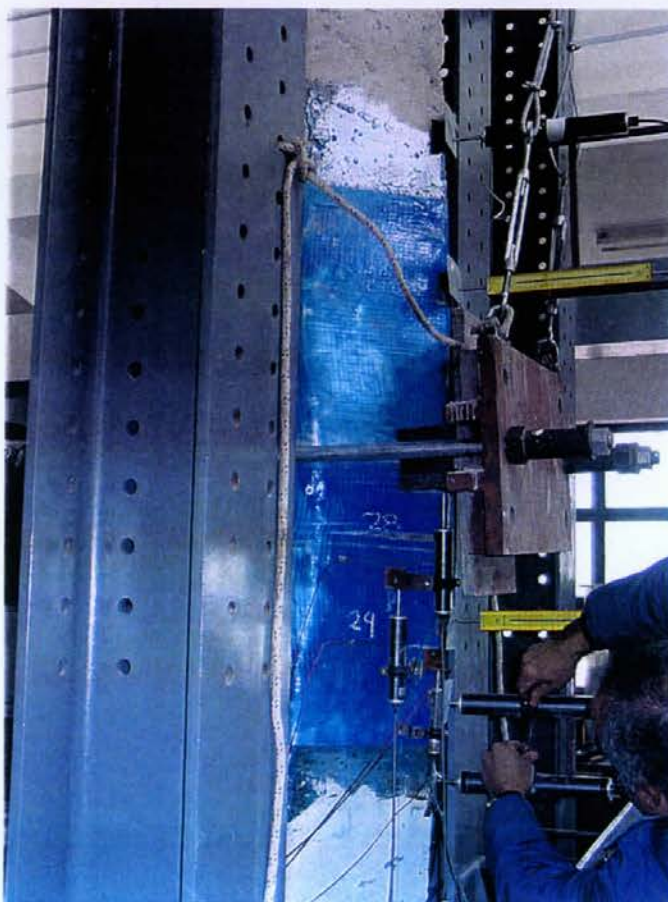


Φωτογραφία 5.5.3
Απεικόνιση της
αστοχίας του ΙΝΟΠ
υάλου σε διάρρηξη,
κάτω από το σημείο
εφαρμογής του φορ-
τίου, μετά το πέρας του
πειράματος.



Φωτογραφία 5.5.2

Διόγκωση του ΙΝΟΠ κάτω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου και διεύρυνση της ρωγμής στο ΙΝΟΠ. Διακρίνονται τα αριθμημένα SG # 25, 26 και 27.



Φωτογραφία 5.5.3

Απεικόνιση της αστοχίας του ΙΝΟΠ υάλου σε διάρρηξη, κάτω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου, μετά το πέρας του πειράματος.

οποία σταδιακά προχώρησε σχεδόν σε όλο το πλάτος της εφελκυστικής παρειάς (Φωτογραφία 5.5.3).

5.5.3 Περιγραφή των βλαβών και τρόπος αστοχίας

Μετά το πέρας του πειράματος απομακρύνθηκαν τα ΙΝΟΠ περίσφιγξης με χρήση τροχού και κρουστικού όπλου απαιτείτο, οπότε και αποκαλύφθηκε η βλάβη του δοκιμίου στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου (Φωτογραφίες 5.5.4 έως 5.5.6). Εμφανίζονται καμπτικές ρωγμές στο σημείο του P και σε απόσταση d από το φορτίο, καμπτικής μορφής, χωρίς καμία διαγώνια διατμητική αστοχία. Οι αρχικά θλιβόμενες ράβδοι στη γωνία και στο μέσον της παρειάς εκατέρωθεν έχουν αποκαλυφθεί σε απόσταση δύο διαδοχικών συνδετήρων με έντονα φαινόμενα λυγισμού και παραμένουσες παραμορφώσεις. Παρατηρείται και αποδιοργάνωση του θλιβόμενου σκυροδέματος τόσο του νέου (αποκατάστασης) όσο και του παλαιού με αποκόλληση του ΙΝΟΠ με το



Φωτογραφία 5.5.4 Αστοχία της κρίσιμης ζώνης στην ελεγχόμενη περιοχή από τη θλιβόμενη παρειά. Διακρίνεται το ίχνος του ΙΝΟΠ εκατέρωθεν του P .

οποίο είχαν περιτυλιχθεί. Λυγισμός ράβδων δεν παρατηρείται στην αντιδιαμετρική γωνιακή ακμή. Δεν υπήρξε εφελκυστική διάρρηξη του ΙΝΟΠ στην διεύθυνση των ινών.



Φωτογραφία 5.5.5
Λεπτομέρεια του λυγισμού της γωνιακής ράβδου και των όμορων μεσαίων ράβδων στη θλιβόμενη παρειά. Διακρίνεται τμήμα του σκυροδέματος υψηλής αντοχής της αποκατάστασης, και διακριτές ρωγμές που διαπερνούν το παλαιό και το νέο υλικό επισκευής.



Φωτογραφία 5.5.6 Όψη της εφελκυσμένης παρειάς. Διακρίνονται καμπτικές ρωγμές σε απόσταση d από το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Δεν εμφανίζεται λυγισμός ράβδων σε αυτή την παρειά.

5.5.4 Ανάλυση της καταγεγραμμένης συμπεριφοράς

Το καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης (P - δ) του δοκιμίου δίνεται στο Σχήμα 5.5.1, χωρίς να έχει γίνει διόρθωση της καταγεγραμμένης δύναμης για το ποσοστό της αντοχής που παραλαμβάνει τη ροπή δευτέρας τάξεως. Τα αντίστοιχα διαγράμματα P - δ των μεμονωμένων κύκλων αναλύονται στο Σχήμα 5.5.2.



Στον Πίνακα 5.5.1 δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ολικής συμπεριφοράς, που περιλαμβάνουν :

- μέγιστες / ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}),
- οι αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο,
- 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}),
- 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 από το διάγραμμα P - δ).

Πίνακας 5.5.1 Μετρήσεις πειραματικής απόκρισης του δοκιμίου ΧΠ304ΕΠΙ

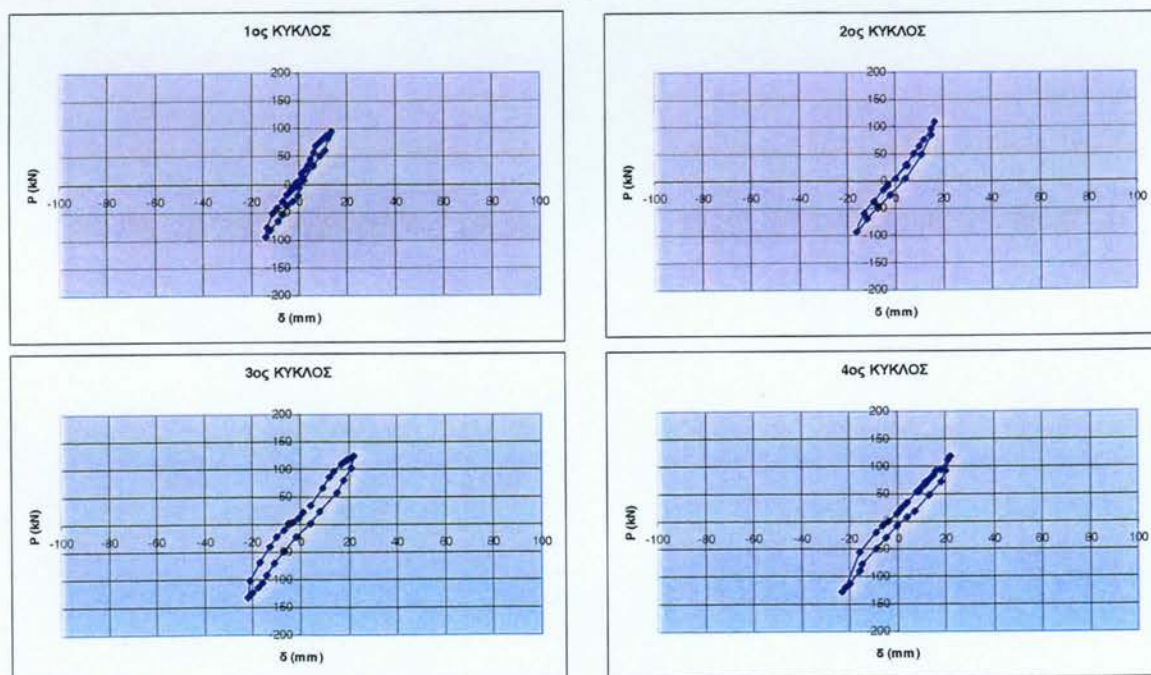
Αρ. Κύκλου	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	K kN/m	E kNmm	μ_{δ}	μ_E
1	14	13	14	96	14	95	13	6958	554	1,0	0,8
2	14	12	13	95	14	89	12	7077	420	1,0	0,6
3	22	22	22	132	22	124	22	5818	1476	1,6	2,2
4	23	22	23	128	22	119	22	5614	1157	1,7	1,7
5	35	33	34	159	35	142	33	4426	3634	2,5	5,5
6	35	34	35	152	35	132	34	4116	2673	2,6	4,0
7	47	45	46	164	43	142	40	3687	6097	3,4	9,1
8	47	45	46	157	47	130	45	3120	4872	3,4	7,3
9	47	45	46	153	47	125	45	3022	4758	3,4	7,1
10	58	56	57	163	56	130	52	2713	8237	4,2	12,4
11	57	56	57	151	57	120	56	2398	7519	4,2	11,3
12	57	56	57	147	57	114	56	2310	7286	4,2	10,9
13	82	83	83	154	79	110	61	1886	14785	6,1	22,2

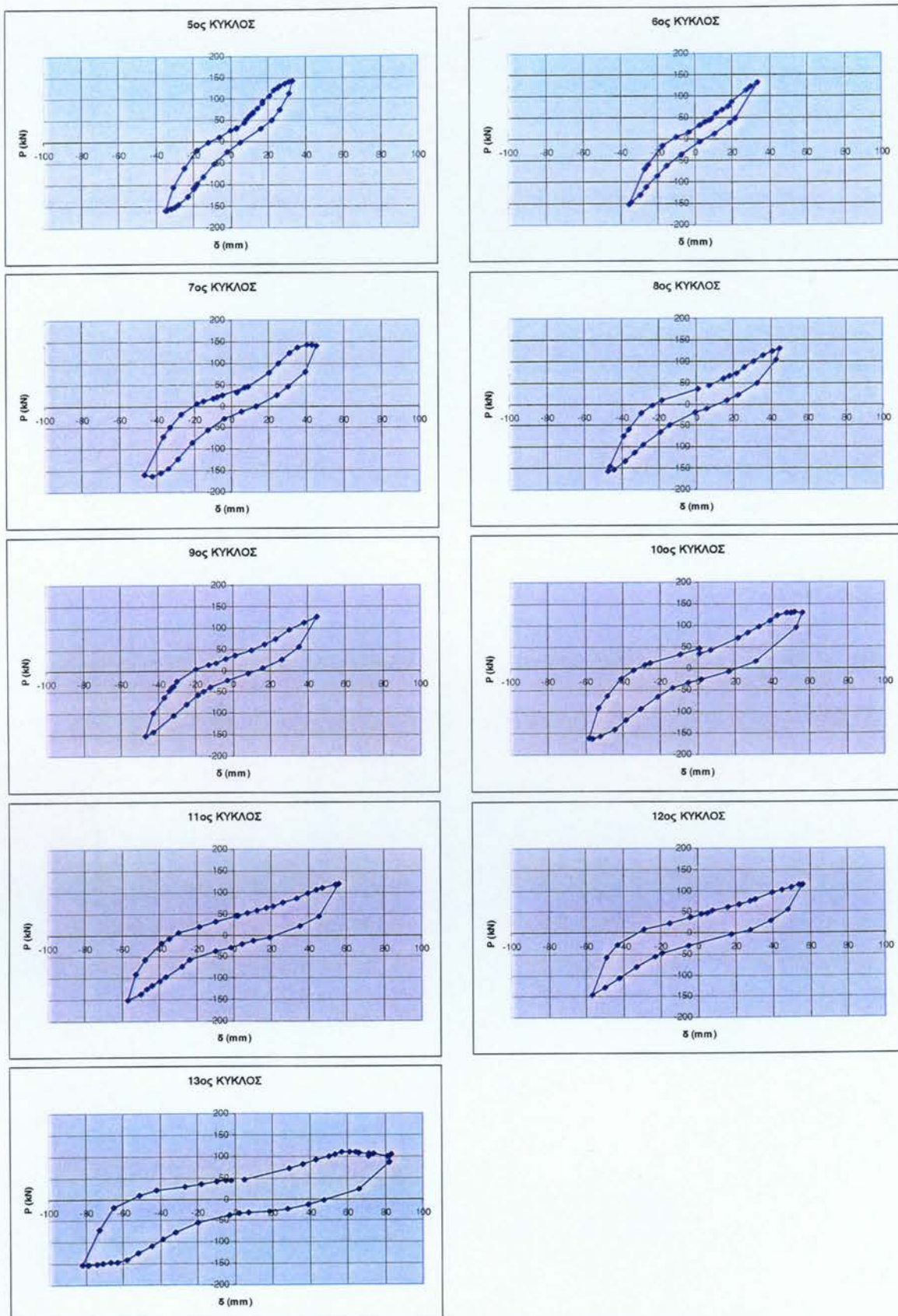
Από τα πειραματικά αποτελέσματα προσδιορίστηκε ότι η μέγιστη αντοχή του στύλου κατά τη διαγώνιο είναι **164 kN** σε παραμόρφωση **43mm**, ποσοστό 130% της μέγιστης καταγεγραμμένης αντοχής των 126 KN σε παραμόρφωση 34mm που απέδωσε το παρθένο δοκίμιο **ΧΠ304** στην αρχική του κατάσταση (Κεφάλαιο 4). Η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται στον 7^ο κύκλο φόρτισης, και

αντιστοιχεί (μετά από διόρθωση για τα φαινόμενα Β τάξης) σε φέρουσα ικανότητα 155,3 kN άρα μέγιστη ροπή σε διαξονική κάμψη ίση με 115,4 kNm.

Η εν λόγω τιμή είναι κατά 47,5% μεγαλύτερη από τη θεωρητική πρόβλεψη της οριακής καμπτικής αντοχής $M_u = 78,2$ kNm, αγνοώντας, όμως, στον παραπάνω υπολογισμό, την πρόσθετη συνεισφορά στην αντοχή της διατομής από το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής EMACO, που χρησιμοποιήθηκε για την αποκατάσταση της διατομής. Θεωρώντας ότι η διατομή αποτελείται από υλικό αντοχής $f_c = 40$ MPa, η μέγιστη καμπτική αντοχή αυξάνει στα 84,6 kNm (βλέπε και το διάγραμμα ροπής καμπυλότητας του Σχήματος 5.5.0). Από τη σύγκριση των παραπάνω τιμών παρατηρείται άρα ότι ένα σημαντικό τμήμα της υπεραντοχής του δοκιμίου κατά το πείραμα αποδίδεται στην υψηλή θλιπτική αντοχή του επισκευαστικού υλικού (συγκρίσιμο με αντίστοιχες υπεραντοχές στα απλά ΑΠοκατεστημένα ΥΠ30_ΑΠ, όπως περιγράφεται στα Κεφάλαια 5.7 και 5.8, στα οποία δεν χρησιμοποιήθηκε ΙΝΟΠ), ενώ ένα τμήμα αφορά αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω της περίσφιγξης του με ΙΝΟΠ.

Το πειραματικό φορτίο διαρροής είναι ίσο με 124 kN και αντιστοιχεί σε καμπτική ροπή σε πρώτη διαρροή 92 kNm, επιτυγχάνεται δε πειραματικά





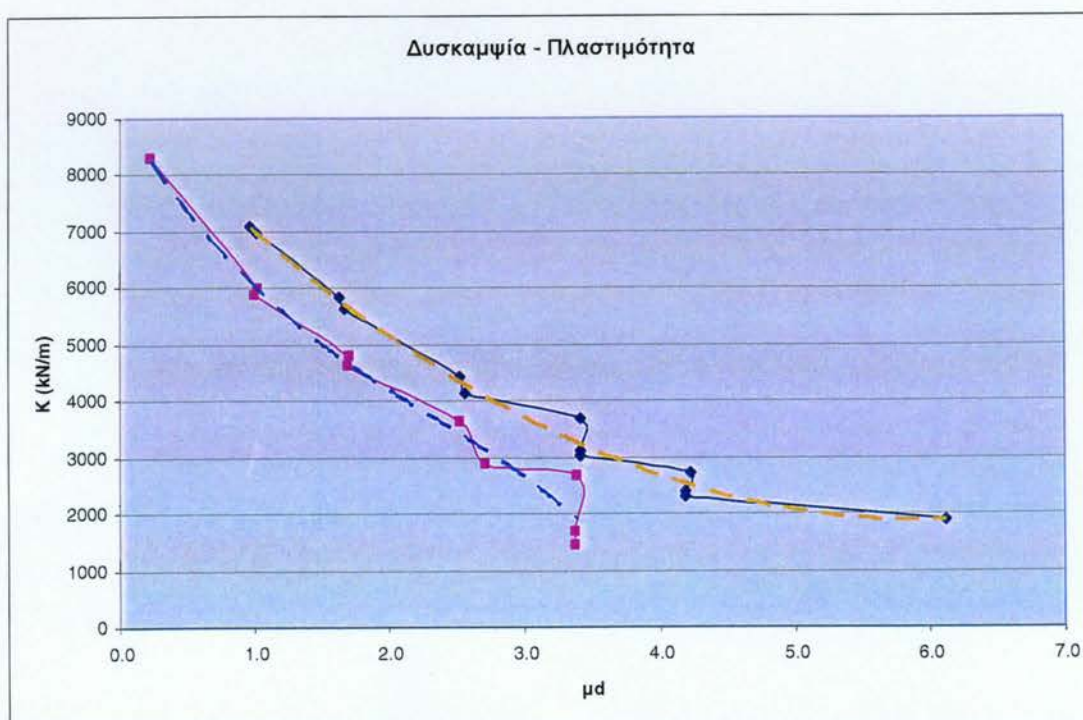
Σχήμα 5.5.2 Ανάλυση των μεμονωμένων κύκλων επιβαλλόμενης παραμόρφωσης.

πειραματικά στον 3^ο κύκλο, σε παραμόρφωση του δοκιμίου ίση με 22 mm.

Πέραν αυτού, η πτώση της φέρουσας ικανότητας στο 85% της μέγιστης τιμής, ίση με 139 kN και 121 kN αντίστοιχα σε αρνητική και θετική παραμόρφωση, για μεν την ελάχιστη δεν ενεργοποιείται ποτέ λόγω του ότι το δοκίμιο διατηρεί την αντοχή του σε όλο το πείραμα, για δε την θετική παραμόρφωση ενεργοποιείται σε τιμή μετακίνησης 56 mm στον 8^ο κύκλο, οπότε και η αντίστοιχη τιμή πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων είναι 2,60 ως προς τη τιμή διαρροής, η οποία θεωρείται ικανοποιητική.

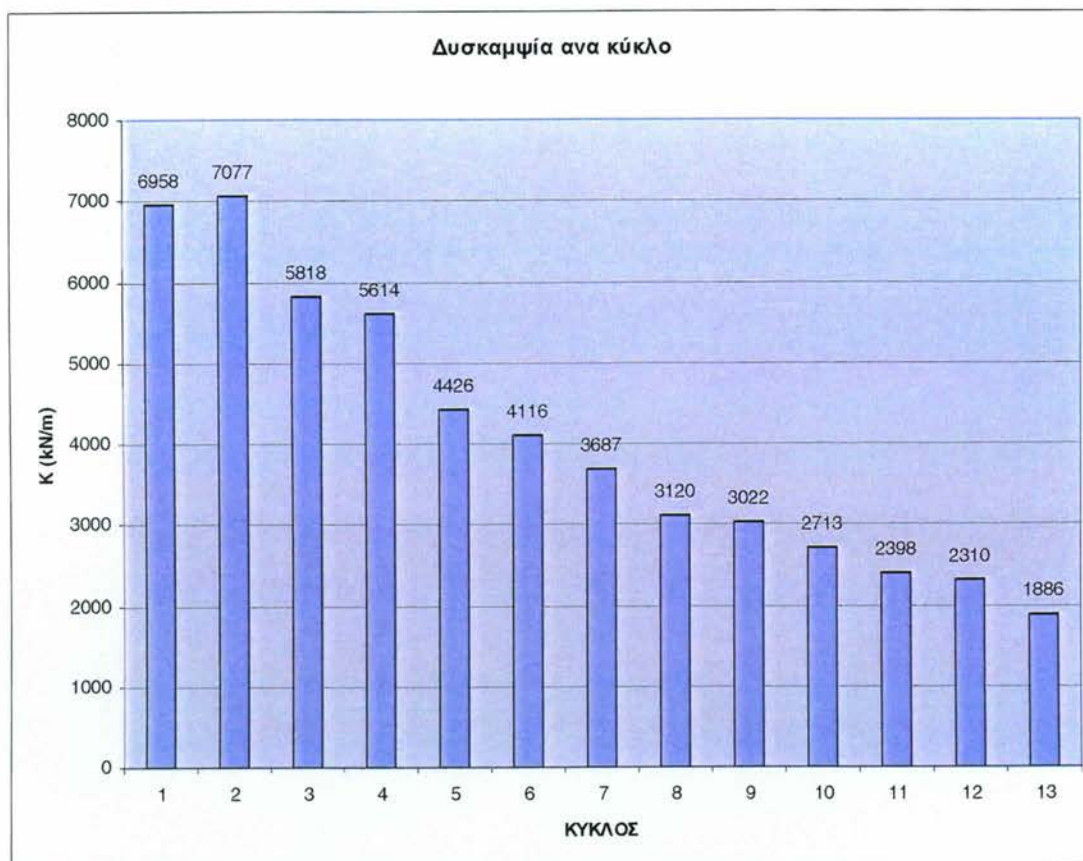
5.5.5 Παράγωγες μετρήσεις δυσκαμψίας και υστερετικής ενέργειας

Βάσει των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου υπολογίζεται η μέση δυσκαμψία μεταξύ ανακυκλίσεων του Πίνακα 5.5.1, η οποία απεικονίζεται για τη σειρά των δεκατριών ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.5.3 και 5.5.4, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, σε απόλυτα μεγέθη (Σχήμα 5.5.4) ή σαν πλαστιμότητα (Σχήμα 5.5.3).



Σχήμα 5.5.3 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ως προς τη πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΧΠ304ΕΠ και ΧΠ304.

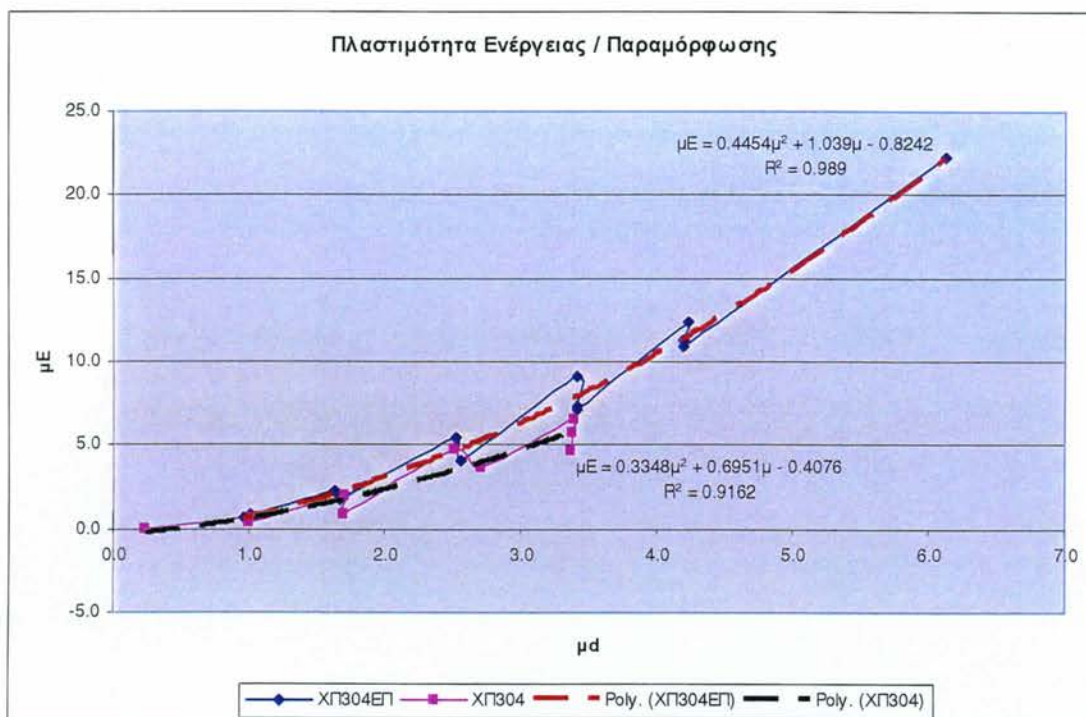
Παρατηρείται ότι ήδη, σε ένα όριο της απόκρισης του δοκιμίου ως την πλαστιμότητα 3,40 (μεταξύ 7^{ου} και 9^{ου} κύκλων), μικρότερης της παρεχόμενης πλαστιμότητας βάσει του κριτηρίου αντοχής, η μέση δυσκαμψία του στοιχείου έχει μειωθεί στο 50% της αρχικής. Πέραν από την ωφέλιμη παρεχόμενη πλαστιμότητα του δοκιμίου, η απομείωση της δυσκαμψίας μεταξύ διαδοχικών κύκλων ιδίου εύρους είναι περίπου 15% σε τρεις κύκλους.



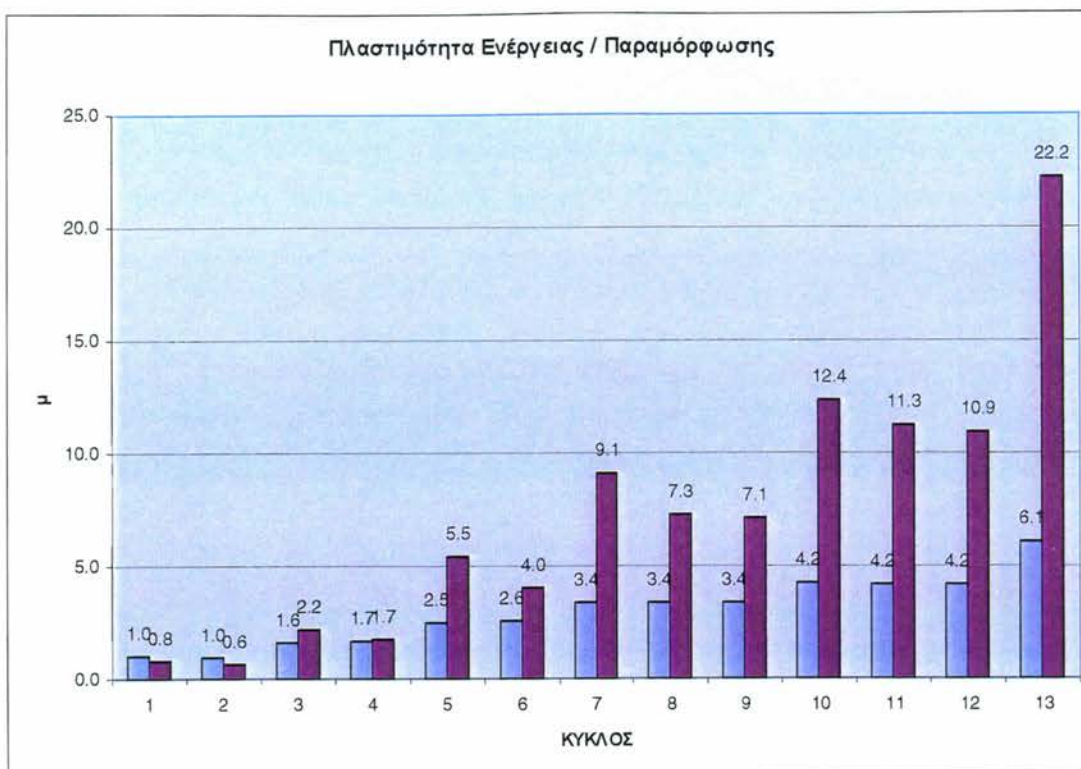
Σχήμα 5.5.4 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ανά κύκλο φόρτισης, δοκιμίου ΧΠ304ΕΠ.

Η συμπεριφορά όσον αφορά την απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του ενισχυμένου δοκιμίου, όπως αυτή υπολογίζεται σαν το εμβαδόν που περικλείεται από τον εκάστοτε βρόχο για τους δώδεκα κύκλους, δίδεται στον Πίνακα 5.5.1 και στα Σχήματα 5.5.5 και 5.5.6, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου (Σχήμα 5.5.5), ελέγχοντας έτσι τους επαναλαμβανόμενους κύκλους σταθερού εύρους, και του αριθμού κύκλων (Σχήμα 5.5.6). Σε αντίθεση με προηγούμενα δοκίμια, το ΧΠ403ΕΠ (υφιστάμενο αποκατεστημένο με περισφιγξη δύο στρώσεων ΙΝΟΠ υάλου)

διατηρεί πρακτικά σταθερή (μέχρι 10% μείωση στον τρίτο κύκλο) την απορροφώμενη εκάστοτε ενέργεια μεταξύ διαδοχικών ανακυκλίσεων υπό σταθερό εύρος (κύκλοι 3-5, 6-8 και 9-11), ενώ, εμφανίζει μία ιδεώδη αύξουσα συνάρτηση περιβάλλουσα συνάρτηση επιβαλλόμενης μ_d και απορροφώμενης μ_E , έως τη μέγιστη επιτευχθείσα πλαστιμότητα όπου σταμάτησε το πείραμα. Στο Σχήμα 5.5.5, δίδεται επίσης ενδεικτικά και η βέλτιστη συναρτησιακή προσέγγιση της απόκρισης των πλαστιμοτήτων, ορίζοντας πολυώνυμο δευτέρου βαθμού ως προς το δείκτη πλαστιμότητας των παραμορφώσεων.



Σχήμα 5.5.5 Σταδιακή μείωση της απορροφούμενης υστερετικής ενέργειας ως προς της επιβαλλόμενη πλαστιμότητα παραμορφώσεων, δοκίμια ΧΠ304ΕΠ και ΧΠ304.



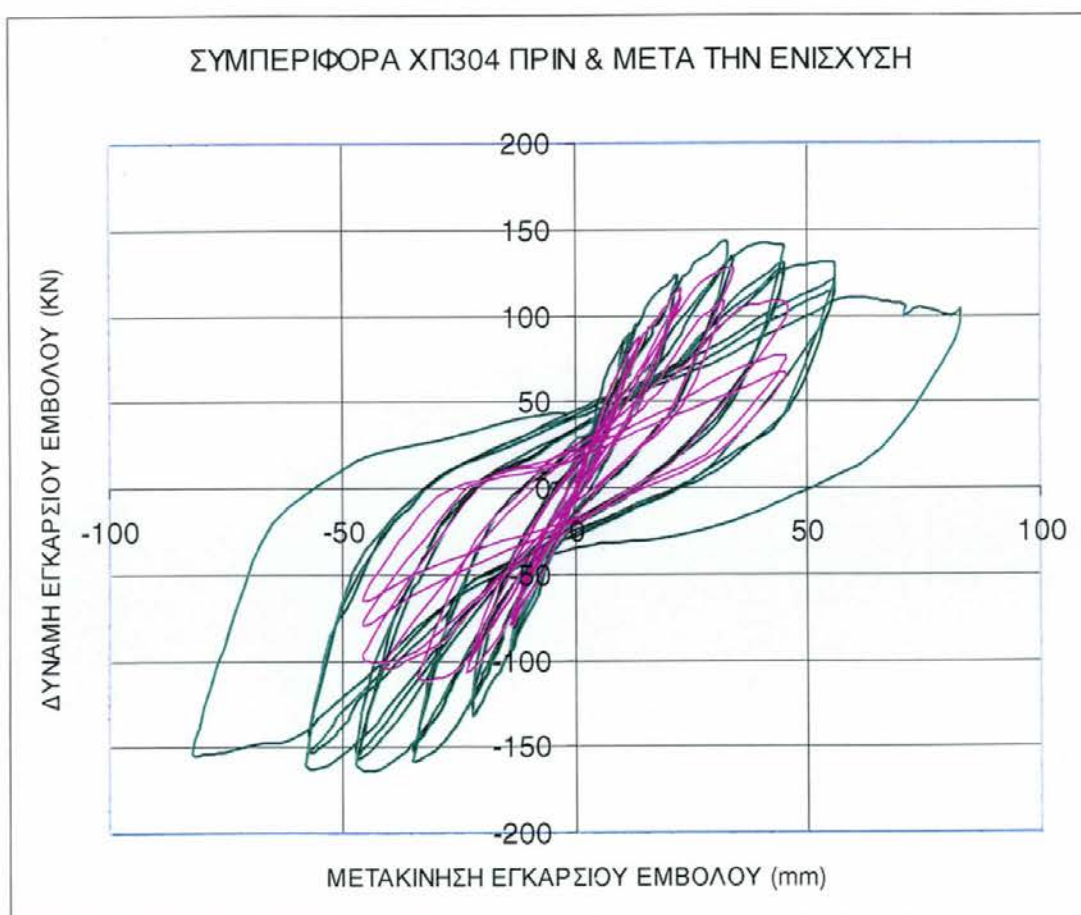
Σχήμα 5.5.6 Κατανομή πλαστιμότητας ενέργειας ως προς την πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΧΠ304ΕΠ.

5.5.6 Σύγκριση πειραματικών καταγραφών ΧΠ304 και ΧΠ304ΕΠ

Τα διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης $P-\delta$ πριν και μετά τη διαδικασία αποκατάστασης και ΕΠισκευής των ΧΠ304(ΕΠ) συγκρίνονται στο Σχήμα 5.5.7. Από την απόκριση των καταγραφών είναι εμφανής η παρατηρούμενη ασυμμετρία της καταγεγραμμένης αντοχής, γεγονός που συνηγορεί υπέρ της παραδοχής της συμμετοχής του EMACO αποκατάστασης (που δεν ήταν συμμετρικό) στην υπεραντοχή. Το δοκίμιο εμφανίζει την μέγιστη αντοχή των 164 kN, ίση με 130% της αντοχής του παρθένου δοκιμίου (126 kN). Λόγω λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων, το παρθένο δοκίμιο εμφανίζει τη χαρακτηριστική σταδιακή πτώση της αντοχής του σε ανακύκλιση, κάτω του 85% (107 kN) σε παραμόρφωση 20,8 mm, στον τρίτο κύκλο.

Το ΕΠισκευασμένο δοκίμιο παρέχει ικανοποιητική συμπεριφορά έως και τη διπλάσια παραμόρφωση από το παρθένο, με αύξηση της υπεραντοχής λόγω της επισκευής του με υψηλής αντοχής υλικά και σημαντικά μεγαλύτερη σταθερότητα στην ανακύκλιση και την ενεργειακή απορρόφηση. Οι συγκρίσεις της απομειούμενης δυσκαμψίας και της απορροφώμενης

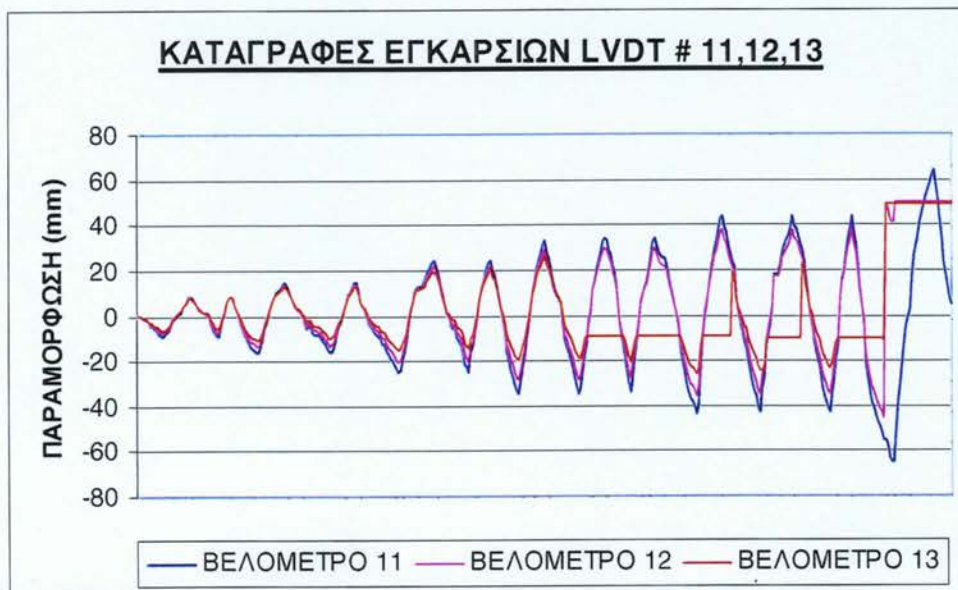
ενέργειας ως προς την πλαστιμότητα παραμόρφωσης που επεβλήθη κατά τον έλεγχο δίδονται στα Σχήματα 5.5.3 και 5.5.5, όπου είναι φανερό ότι εκτός του ότι το παρθένο δοκίμιο αστόχησε νωρίτερα άρα έχει μειωμένη σχετικά παραμορφωσιμότητα, ήδη παρουσιάζεται μια σταδιακή απόκλιση των διαγραμμάτων δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας από το ΕΠισκευασμένο, προς τις μικρότερες τιμές των \bar{K} και μ_E . Συγκεκριμένα, σε πλαστιμότητα 3,50, το παρθένο δοκίμιο εμφανίζει μια μέση δυσκαμψία ήδη 50% του ΕΠισκευασμένου, ενώ η ενεργειακή απορρόφηση (σε όρους πλαστιμότητας) είναι μειωμένη κατά 20%, ή, σε απόλυτα μεγέθη, 30%, λόγω της αύξησης της αντοχής του ΧΠ304ΕΠ.



Σχήμα 5.5.7 Σύγκριση της συμπεριφοράς του δοκιμίου ΧΠ304 πριν και μετά την ενίσχυση.

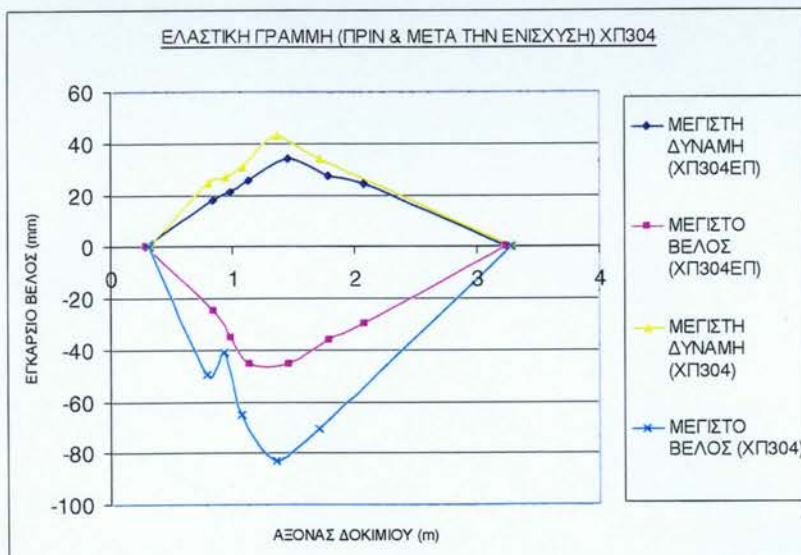
5.5.5 Καταγραφές LVDT στην εγκάρσια διεύθυνση

Οι καταγραφές των εγκάρσιων LVDT στο ελεγχόμενο τμήμα δίνονται στο Σχήμα 5.5.8.



Σχήμα 5.5.8 Κατανομή της εγκάρσιας παραμόρφωσης σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 11,12 και 13.

Στο Σχήμα 5.5.9 απεικονίζεται η εγκάρσια παραμόρφωση των δοκιμών ΧΠ304 και ΧΠ304ΕΠ, με βάση τις ενδείξεις των LVDT που είναι τοποθετημένα κάθετα στον αρχικό απαραμόρφωτο άξονα του δοκιμίου, με αριθμούς καταγραφής 11, 12, 13, 14, 15 (ΧΠ304ΕΠ). Στον οριζόντιο άξονα του



Σχήμα 5.5.9

Σύγκριση της ελαστικής γραμμής του δοκιμίου κατά την καταγραφή της μέγιστης δύναμης P ή της μέγιστης μετατόπισης δ , πριν και μετά την ενίσχυση

Σχήματος απεικονίζεται ο διαμήκης άξονας του δοκιμίου με αφετηρία την κάτω στήριξη του δοκιμίου. Τα βέλη μηδενίζονται στα σημεία των δύο

στηρίζων. Συγκεκριμένα, στο σχήμα καταγράφεται η εικόνα του εκάστοτε παραμορφωμένου φορέα όταν η δύναμη του εγκάρσιου εμβόλου παίρνει την μέγιστη τιμή της καθώς και όταν το βέλος στην θέση επιβολής της εγκάρσιας δύναμης γίνεται μέγιστο, για τις δύο περιπτώσεις των δοκιμών ΧΠ304 και ΧΠ304ΕΠ αντίστοιχα.

Από τη σύγκριση των ελαστικών είναι εμφανής η μικρή σχετικά επιρροή της ενίσχυσης στην αρχική δυσκαμψία μέχρι την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, καθώς και η ομοιότητα του παραμορφωμένου σχήματος του δοκιμίου στις δύο φάσεις καταπόνησής του. Αντίθετα, στην μέγιστη παραμόρφωση, το ανελαστικά παραμορφωμένο τμήμα του στύλου εμφανίζει μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα αφενός, αλλά και μεγαλύτερο ενεργό πλάτος κατά την παραμόρφωση, αφετέρου. Το εύρος της πλαστικής άρθρωσης είναι πλέον ευκρινές από τις μετρήσεις των κατά μήκος LVDT και των SG που αναπτύσσονται παρακάτω.

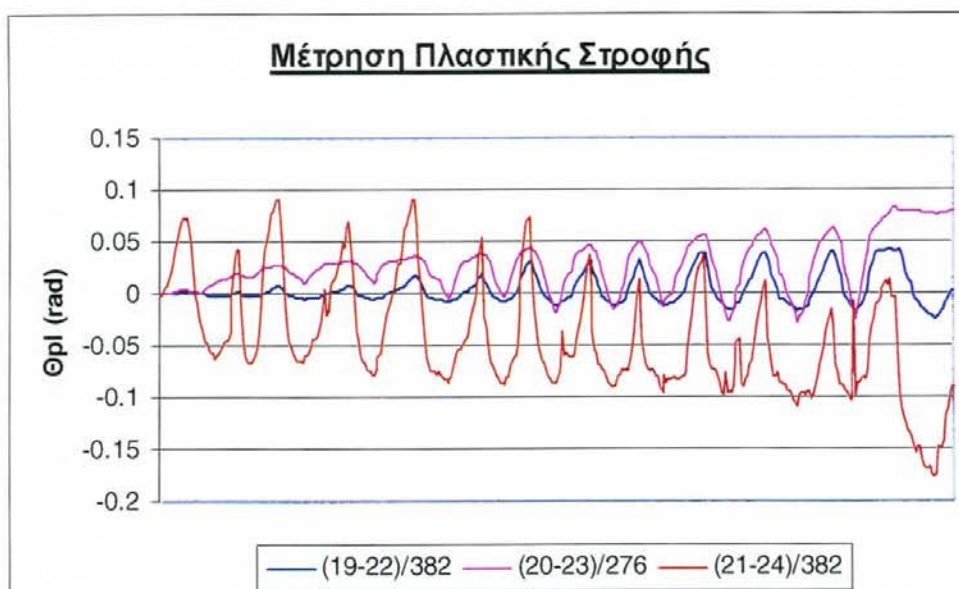
5.5.6 Καταγραφές LVDT κατά τη διαμήκη διεύθυνση



Σχήμα 5.5.11 Κατακόρυφη παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 19,20 και 21.



Σχήμα 5.5.12 Κατακόρυφη παραμόρφωση σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 22, 23 και 24.



Σχήμα 5.5.13 Κατανομή απαιτήσεων πλαστικής στροφής κατά μήκος της κρίσιμης ζώνης, βάσει των καταγραφών 19 ως 24.

Οι καταγραφές των βελομέτρων στην κρίσιμη περιοχή κατά τη διαμήκη διεύθυνση δείχνονται ανά ομάδες στα Σχήματα 5.5.11 και 5.5.12. Στο Σχήμα 5.5.14 δείχνεται η καταγεγραμμένη αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου στη θέση εφαρμογής του N . Θεωρώντας την ακριβή θέση των βελομέτρων είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι παράγωγες πλαστικές στροφές καθώς και οι μέσες καμπυλότητες του δοκιμίου, στο μήκος αναφοράς της μέτρησης, οι

οποίες δείχνονται στο Σχήμα 5.5.13 για τα τρία διαδοχικά τμήματα της κρίσιμης ζώνης, αντίστοιχα, όσο τα βελόμετρα κατέγραψαν της απόκριση.

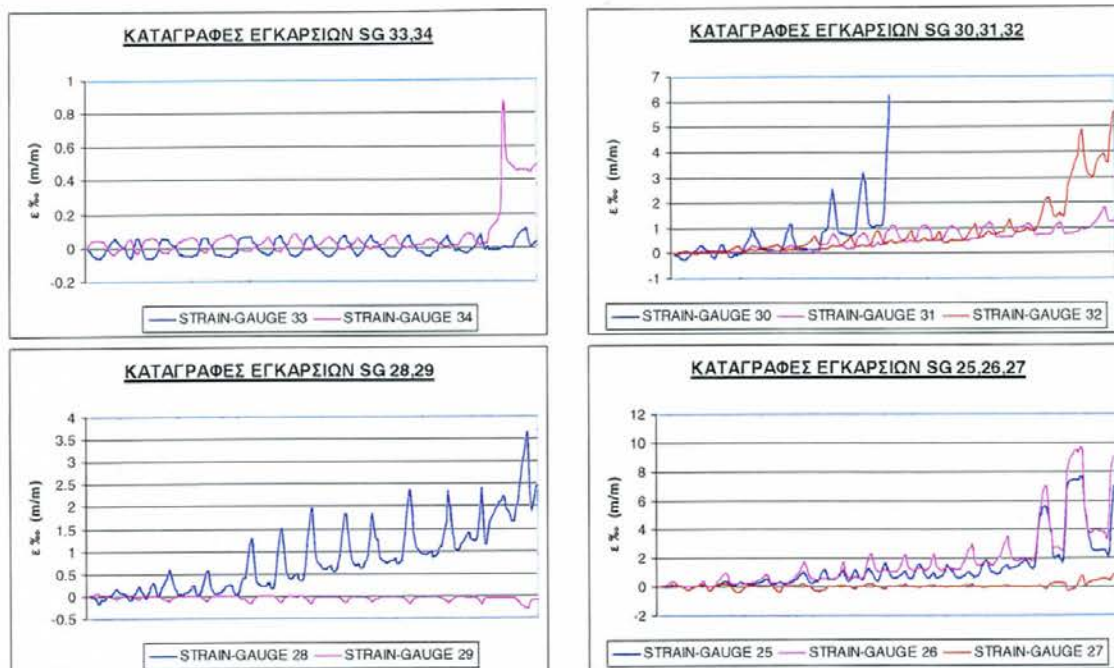
Οι καταγραφές είναι κατανεμημένες σε μέση περίπου απόσταση 120mm μεταξύ τους. Παρατηρείται άρα ότι η μέγιστη πλαστική στροφή που απαιτείται στο τμήμα πλησιέστερα στο φορτίο P είναι 0,177 rad, στη μέγιστη παραμόρφωση των 82 mm. Η παραπάνω τιμή είναι ίση με 233% της αντίστοιχης πλαστικής στροφής στο επόμενο τμήμα της κρίσιμης ζώνης (το οποίο εμφανίζει αντίθετη καμπυλότητα, λόγω παραμένουσας παραμόρφωσης).



Σχήμα 5.5.14 Πειραματική καταγραφή αξονικού LVDT στη βάση του δοκιμίου.

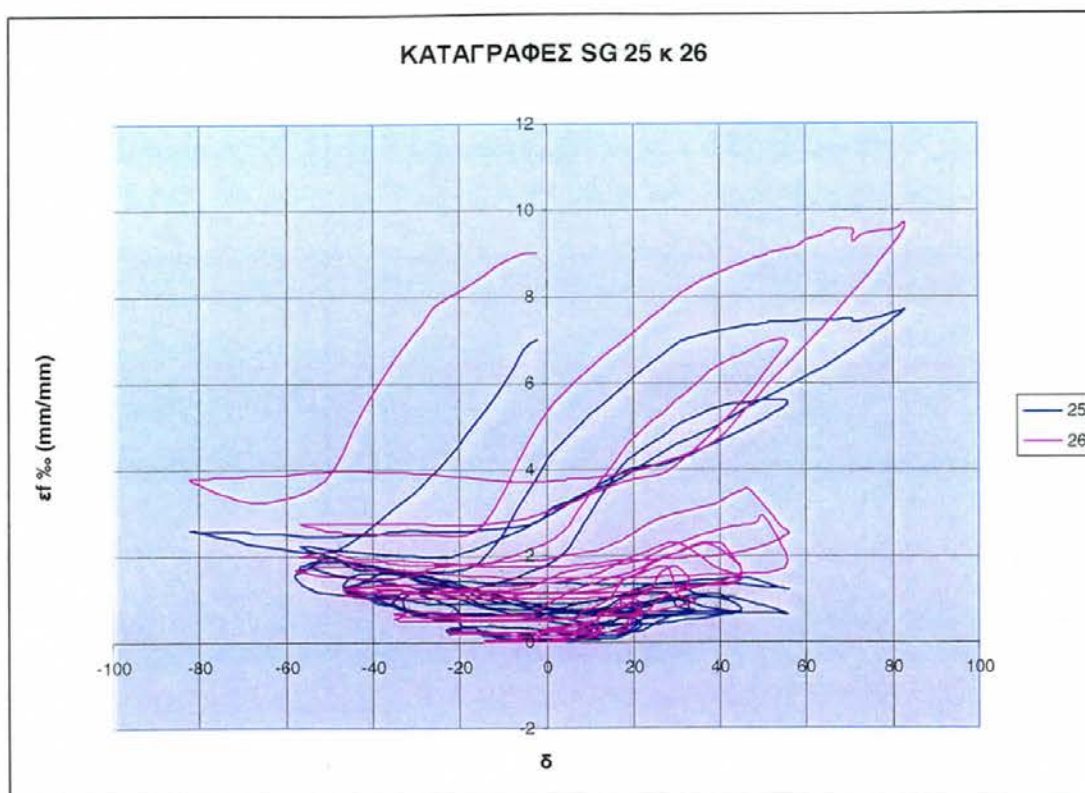
5.5.8 Καταγραφές SG στη διαμήκη διεύθυνση

Η θέση και αρίθμηση των ηλεκτρονικών μηχανομετρών (*Strain Gauges*) με τα οποία ενωργανώθηκε το δοκίμιο δείχνεται στο Παράρτημα. Οι καταγραφές των μηχανομετρών στο INOΠ υάλου δείχνονται στο Σχήμα 5.5.15. Σημειώνεται ότι, από άποψη χωροθέτησης, τα SG # 25, 26 και 27 τοποθετούνται στην παρειά που αρχικά θλίβεται κατά τον πρώτο κύκλο (προς την μεριά του εμβόλου δηλαδή) ενώ τα SG # 28 και 29 προς την εφελκόμενη παρειά, αντιδιαμετρικά αντίθετα (βλέπε και Φωτογραφίες 5.5.2 και 5.5.3). Συμπερασματικά, παρατηρούνται τα ακόλουθα:



Σχήμα 5.5.15 Πειραματικές καταγραφές εγκάρσιων SG στο ΙΝΟΠΙ περίσφιγξης / διατμητικής ενίσχυσης.

- Τα καταγεγραμμένα διαγράμματα – χρονοϊστορίες παρουσιάζουν μια ανομοιομορφία ως προς το μέγεθος της καταγραφής του ε_f στα ΙΝΟΠΙ της ίδιας παρειάς, με μεγαλύτερη καταπόνηση πλησιέστερα στο σημείο εφαρμογής του P και καταγραφή δραστικά μικρότερη σε απόσταση περίπου $d/2$ μακρύτερα (SG #27 σε σύγκριση με #25,26).



Σχήμα 5.5.16 Καταγραφή εγκάρσιου SG #25 και 26 του ΙΝΟΠ περίσφιγξης / διατμητικής ενίσχυσης, ως προς την επιβαλλόμενη παραμόρφωση.

- Αποδεικνύεται ότι οι μέσες μέγιστες καταγραφές των ανηγμένων παραμορφώσεων που παρέλαβαν τα ΙΝΟΠ στο πείραμα έφθασαν ως και το $\varepsilon_f = 7,6$ και $9,7\%$, στην περίπτωση των SG # 25 και 26 αντίστοιχα, τοποθετημένα στην θλιβόμενη γωνία και στο μέσον της διαγώνιας παρειάς αντιστοίχως της θλιβόμενης παρειάς, κάτω από το σημείο εφαρμογής του εμβόλου. Η συνεισφορά του ΙΝΟΠ σε περίσφιγξη της θλιβόμενης γωνίας της διατομής είναι άρα εμφανής.
- Οι μέγιστες καταγραφές των ανηγμένων παραμορφώσεων αυτών είναι δυσανάλογες των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων που επιβάλλονται στο δοκίμιο. Θεωρώντας την σχέση $\varepsilon_f - \delta$ στα Σχήματα 5.5.15(δ) και 5.5.16, φαίνεται ότι τα δύο SG # 25 και 26 τετραπλασιάζουν την απαίτηση παραμόρφωσης μετά από μια σταθερή ιστορία περί το 2,0 ως 3,0 ‰, σε παραμόρφωση $\delta=50\text{mm}$ και άνω, οπότε εμφανίζεται μεγάλη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ. Η αλλαγή στη συμπεριφορά αυτή οφείλεται μάλλον στο λυγισμό των θλιβόμενων ράβδων που συγκρατεί το ΙΝΟΠ.

- Οι αντίστοιχες παραμορφώσεις στις άλλες παρειές, σε απόσταση 15 cm από το σημείο εφαρμογής του P , είναι της τάξης του 30% των καταγραφών αυτών, και ακολουθούν την ανακύκλιση του δοκιμίου, ενίοτε δε, είναι και ετερόσημες.

5.6 Δοκίμιο ΧΠ305ΕΠ

5.6.0 Αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής του δοκιμίου

Το δοκίμιο ΧΠ305ΕΠ αποκαταστάθηκε και επισκευάστηκε με εγκάρσια ΙΝΟΠ υάλου σε μήκος 0,75m εκατέρωθεν του P , το οποίο τοποθετείται σε απόσταση 1,25 m από την κάτω παρειά του υποστυλώματος. Το ελεγχόμενο τμήμα του δοκιμίου είναι σε μήκος 1,95 m επάνω από το έμβολο. Το προβλεπόμενο διάγραμμα ροπής καμπυλότητας, κάθετα προς τον άξονα της διαγωνίου της διαξονικής καταπόνησης, του δοκιμίου ΧΠ305ΕΠ, υπολογίστηκε με το



Σχήμα 5.6.0 Διάγραμμα ροπών-καμπυλότητας της διατομής του δοκιμίου ΧΠ305ΕΠ σε διαξονική καταπόνηση κατά τη διαγώνιο.

πρόγραμμα ανάλυσης διατομών XTRACT (Chadwell, 2002), για την παρθένα διατομή (Κεφάλαιο 4) και για τη διατομή αποκατεστημένη με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής 40 MPa¹ (Σχήμα 5.6.0). Σύμφωνα με τις παραδοχές του λογισμικού το σύνολο των υλικών της διατομής συμμετέχουν με πλήρη

¹ Η θλιπτική αντοχή του υλικού αποκατάστασης είναι σκόπιμα χαμηλότερη από την προβλεπόμενη από τον προμηθευτή, για λόγους συντηρητικότητας της πρόβλεψης. Δεν έγιναν έλεγχοι δοκιμών του EMACO.

συνάφεια ενώ γίνεται η παραδοχή της γραμμικής κατανομής παραμορφώσεων για δεδομένη καμπυλότητα ώστε η τελική αξονική αντίσταση στη διατομή (N) να ισούται με την εξωτερική N του πειράματος. Οι παραδοχές και λεπτομερή αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στο Κεφάλαιο 6 και Παράρτημα I της παρούσης. Η θεωρητική καμπτική αντοχή της κρίσιμης διατομής σε πρώτη διαρροή του γωνιακού χάλυβα, υπολογισμένη βάσει των πειραματικών μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και της αρχής της επιπεδότητας των διατομών είναι $M_y = 57,2$ kNm, ενώ η οριακή του αντοχή είναι $M_p = 93,4$ kNm (Σχήμα 5.6.0 και Πίνακας 6.1)). Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές του φορτίου $P_y = 79$ kN και $P_u = 129$ kN, αντίστοιχα (χωρίς μείωση λόγω παραμορφώσεων Β τάξης).

5.3.1 Ενοργάνωση του δοκιμίου

Στο δοκίμιο τοποθετούνται τέσσερα εγκάρσια LVDT στερεωμένα στο εξωτερικό σταθερό σύστημα αναφοράς (Αρ. 11 ως 14), επτά διαμήκη LVDT μέτρησης της πλαστικής στρώσης (Αρ. 18 ως 24) στα γωνιακά άκρα της διατομής της κρίσιμης ζώνης και της διαμήκου παραμόρφωσης του στύλου καθώς και δύο SG επικολλημένα στα ΙΝΟΠ κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Αρ. 25 και 26). Οι θέσεις και αποστάσεις των εγκάρσιων μετρητικών δείχνονται στο Παράρτημα II, στο Σχήμα Π5.6.1.

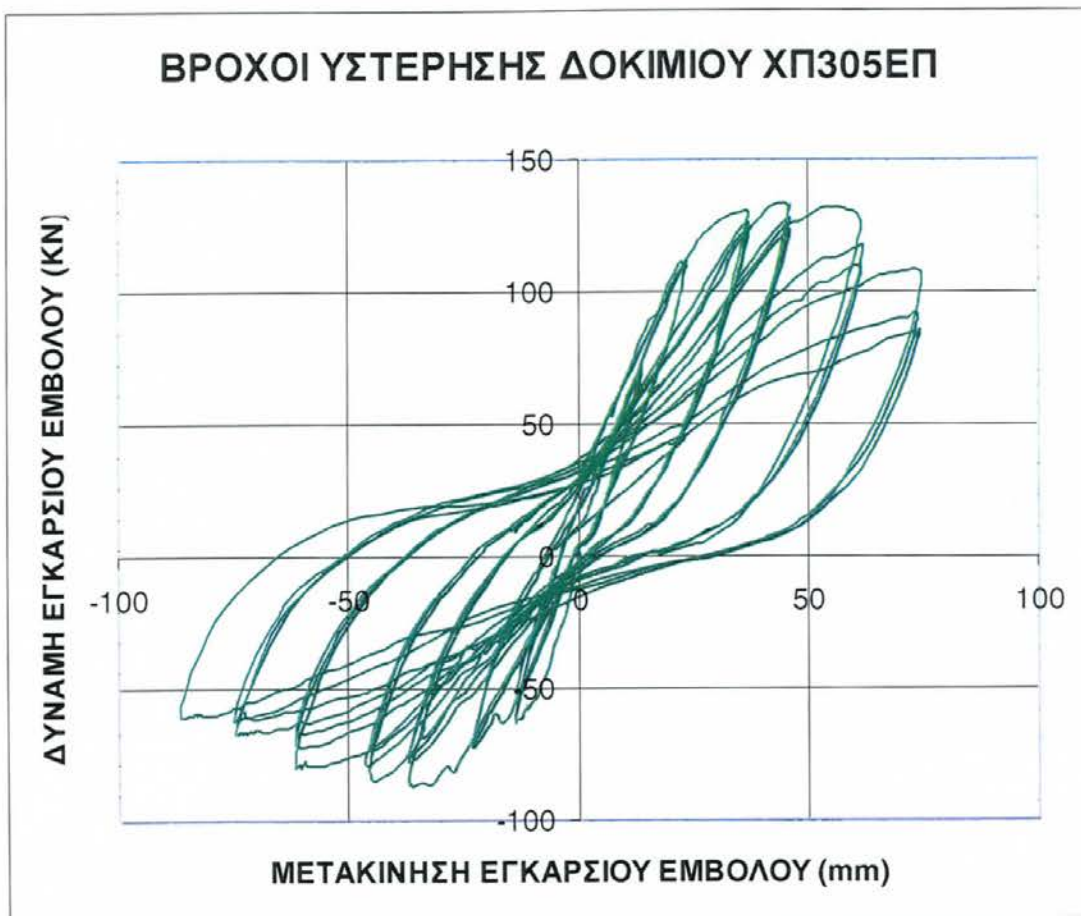
5.3.2 Περιγραφή του πειράματος

Το ΕΠισκευασμένο δοκίμιο τοποθετείται κατακόρυφα στη διάταξη (Φωτογραφία 5.6.1), σε διεύθυνση φόρτισης κατά μήκος της διαγωνίου του. Έχει μήκος 3,40m και καθαρό άνοιγμα 3,15m μεταξύ στηρίξεων. Βάσει οπλισμών, το δοκίμιο έχει ένα ελεγχόμενο μήκος 1,95m οπλισμένο με συνδετήρες S220 σε διάταξη Φ6/400, καθώς και μειωμένο διαμήκη οπλισμό 8Φ14 σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του, μήκους 1,20m που είναι ισχυρά οπλισμένο. Το εγκάρσιο έμβολο τοποθετείται στο όριο διακοπής του πρόσθετου οπλισμού επάνω από το ελεγχόμενο τμήμα, σε απόσταση 1,25 m από την ακραία κάτω διατομή του υποστρώματος προς το ισχυρό δάπεδο.



Φωτογραφία 5.6.1 Το δοκίμιο ΧΠ305ΕΠ τοποθετημένο στη διάταξη πριν την έναρξη του πειράματος με τη μετρητική διάταξη (διακρίνονται και τα SG #25 και 26).

Στο δοκίμιο επιβάλλονται δεκαεπτά συνολικά εναλλασσόμενοι κύκλοι φόρτισης, με την ίδια αξονική δύναμη όπως και στον αρχικό έλεγχο της Α Φάσης. Ο πειραματικός έλεγχος του εμβόλου έγινε με τον νέο ελεγκτή (*controller*) του επενεργητή του Εργαστηρίου ΟΣ, TestStar II, κατασκευής MTS™, με αυτόματη καταγραφή των μετρητικών δεδομένων δύναμης και παραμόρφωσης. Το καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης ($P-\delta$) του δοκιμίου δίνεται στο Σχήμα 5.6.1. Τα αντίστοιχα διαγράμματα $P-\delta$ των μεμονωμένων κύκλων αναλύονται στο Σχήμα 5.6.2.



Σχήμα 5.6.1 Βρόχοι υστέρησης δοκιμίου ΧΠ305ΕΠ.

Στον Πίνακα 5.6.1 δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ολικής συμπεριφοράς, τα οποία περιλαμβάνουν :

- μέγιστες / ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}),
- οι αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο,
- 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}),
- 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).

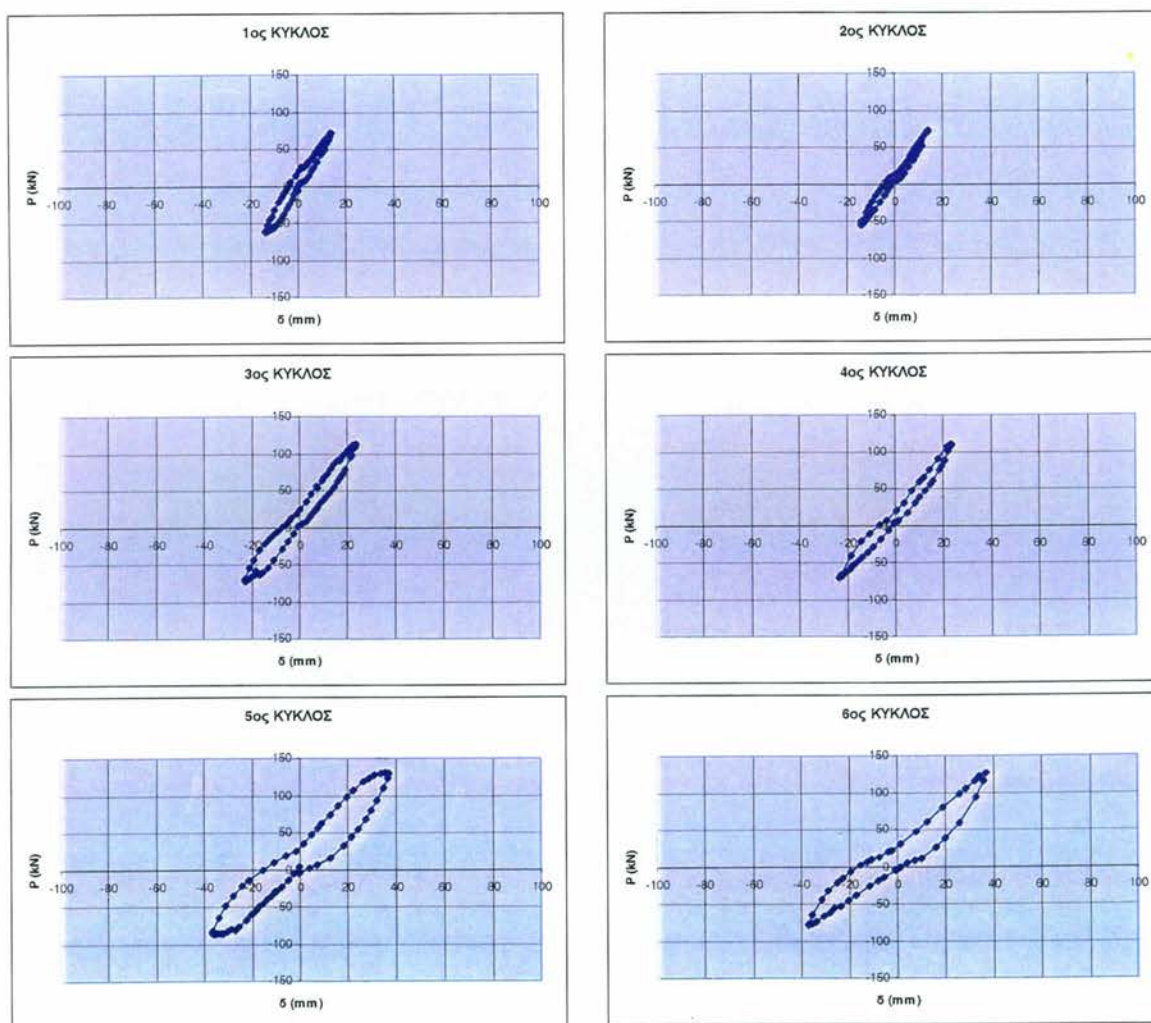
Πίνακας 5.6.1 Μετρήσεις πειραματικής απόκρισης του δοκιμίου ΧΠ305ΕΠ

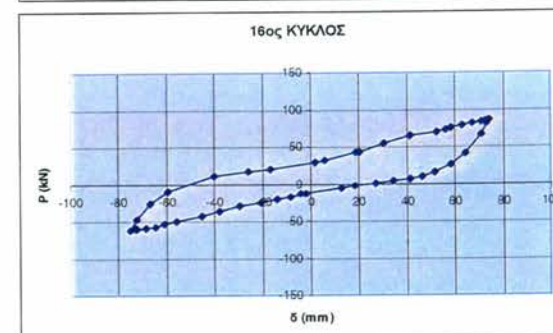
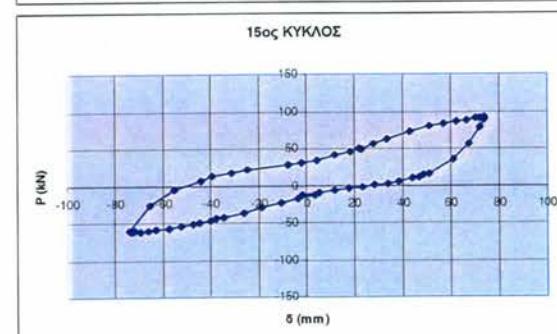
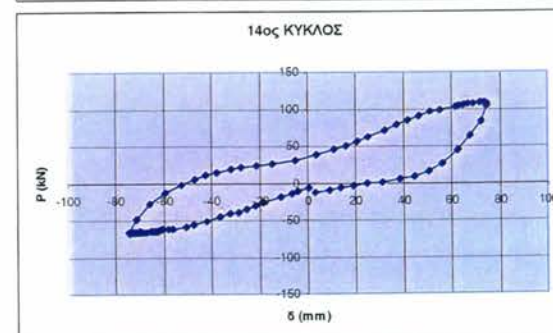
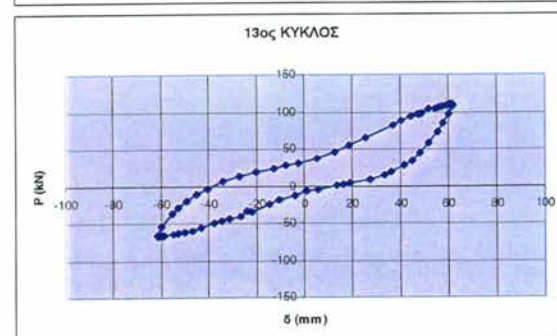
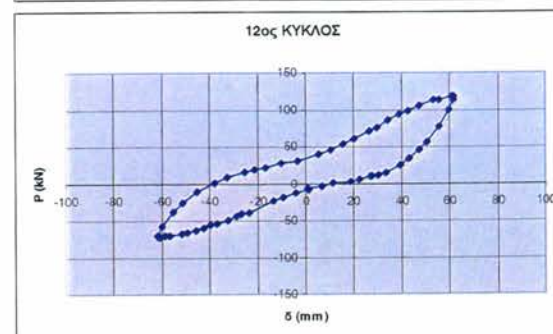
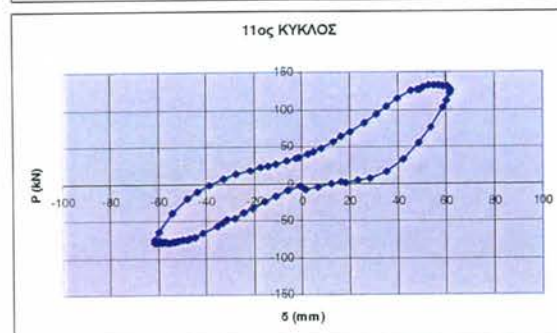
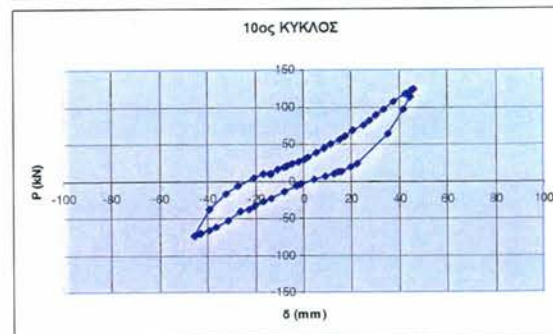
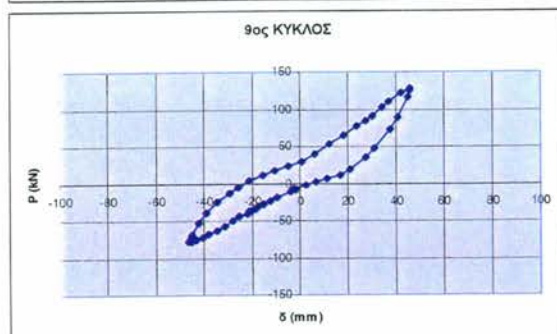
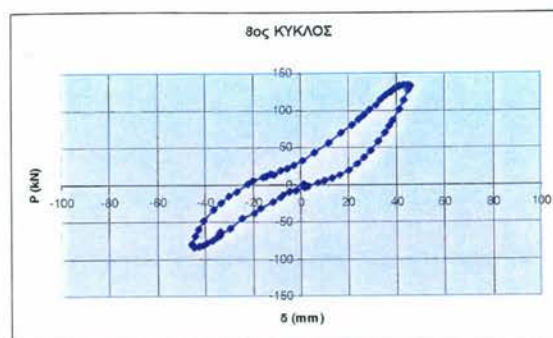
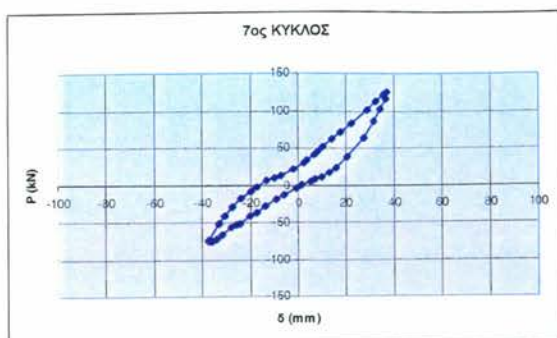
Αρ. Κύκλου	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	K kN/m	E KNmm	μ_δ	μ_E
1	14	14	14	63	14	72	14	4883	503	1,0	0,9
2	14	14	14	56	14	72	14	4621	326	1,0	0,6
3	23	23	23	72	23	112	23	3951	1172	1,8	2,2
4	23	23	23	71	23	110	23	3879	814	1,8	1,5
5	37	37	37	87	36	130	35	3035	3191	2,8	5,9
6	37	37	37	78	37	126	37	2775	2411	2,8	4,5
7	37	37	37	76	37	125	37	2698	2229	2,8	4,1
8	46	46	46	85	45	134	45	2426	3833	3,4	7,1
9	46	46	46	78	45	128	46	2270	3486	3,5	6,5
10	46	46	46	74	45	123	45	2179	3130	3,4	5,8
11	62	62	62	80	60	132	57	1818	6917	4,6	12,8
12	62	62	62	72	60	118	62	1554	6136	4,6	11,4
13	62	62	62	68	61	110	60	1462	5720	4,6	10,6
14	74	75	75	67	74	108	74	1188	8220	5,6	15,3
15	74	74	74	62	70	92	74	1077	7350	5,6	13,6
16	75	74	75	61	75	85	74	982	6463	5,6	12,0
17	87	23	55	61	86	45	23	962	3892	4,1	7,2

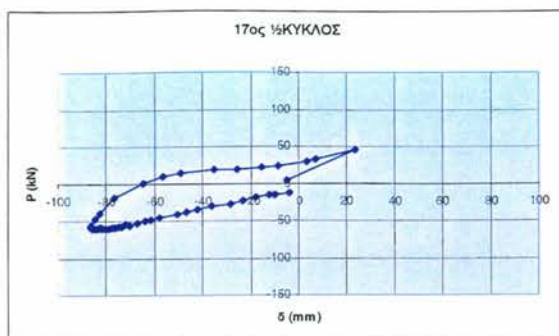
Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι η μέγιστη αντοχή του στόλου είναι 134 kN, 120% σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή των 112 kN του παρθένου δοκιμίου ΧΠ305, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.7. Η τιμή καταγράφεται κατά τον 8^ο κύκλο φόρτισης, σε μετακίνηση $\delta = 45$ mm και είναι κατά 11% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη θεωρητική πρόβλεψη, $P_u = 121$ kN, υπολογιζόμενη λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα Β τάξεως και θεωρώντας ότι το επισκευαστικό σκυρόδεμα έχει θλιπτική αντοχή 40 MPa. Η

μέγιστη πειραματική αντοχή αντιστοιχεί (μετά από διόρθωση για τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως) σε μέγιστη ροπή σε διαξονική κάμψη ίση με 90,7 kNm, τιμή που βρίσκεται κοντά στη θεωρητική πρόβλεψη. Κατά τη μέγιστη καταγραφή παραμόρφωσης, η μέγιστη πλαστική στροφή στην οποία υπόκειται η πλαστική άρθρωση είναι 0,054 rad (3,1°), η δε πλαστική στροφή στη μέγιστη αντοχή είναι 0,032 rad.

Το προβλεπόμενο φορτίο διαρροής (βάσει των παραπάνω παραδοχών) αντιστοιχεί σε αντοχή 79 kN, το οποίο επιτυγχάνεται πειραματικά στον 2^ο κύκλο σε παραμόρφωση του δοκιμίου ίση με 14,0 mm. Η πτώση της φέρουσας ικανότητας στο 85% της μέγιστης τιμής (= 114 kN) εμφανίζεται σε

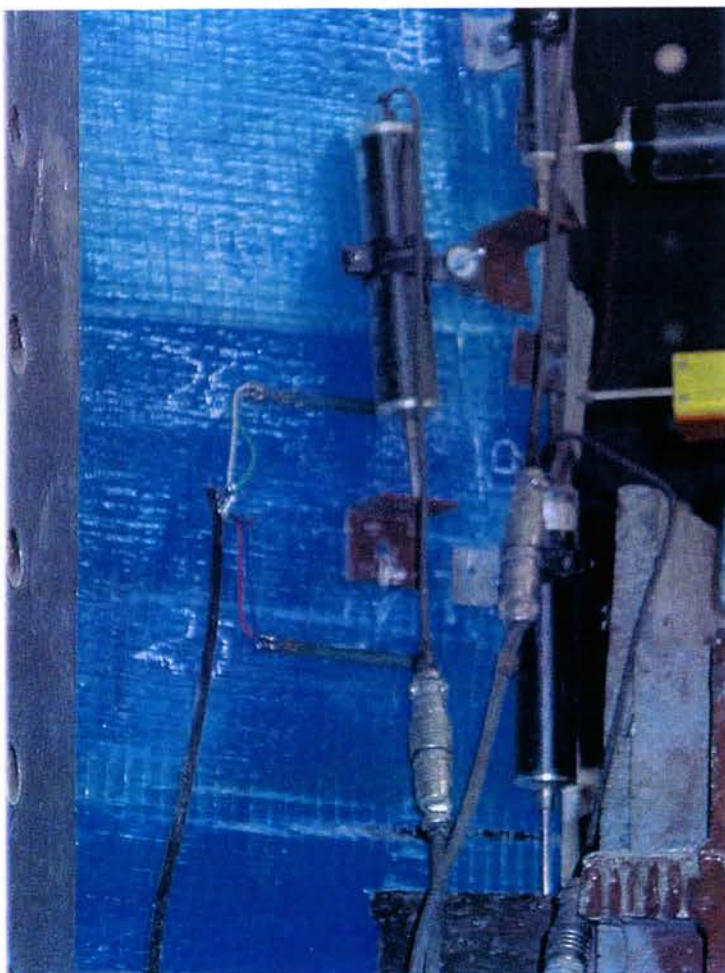






Σχήμα 5.6.2 Ανάλυση των μεμονωμένων κύκλων επιβαλλόμενης παραμόρφωσης.

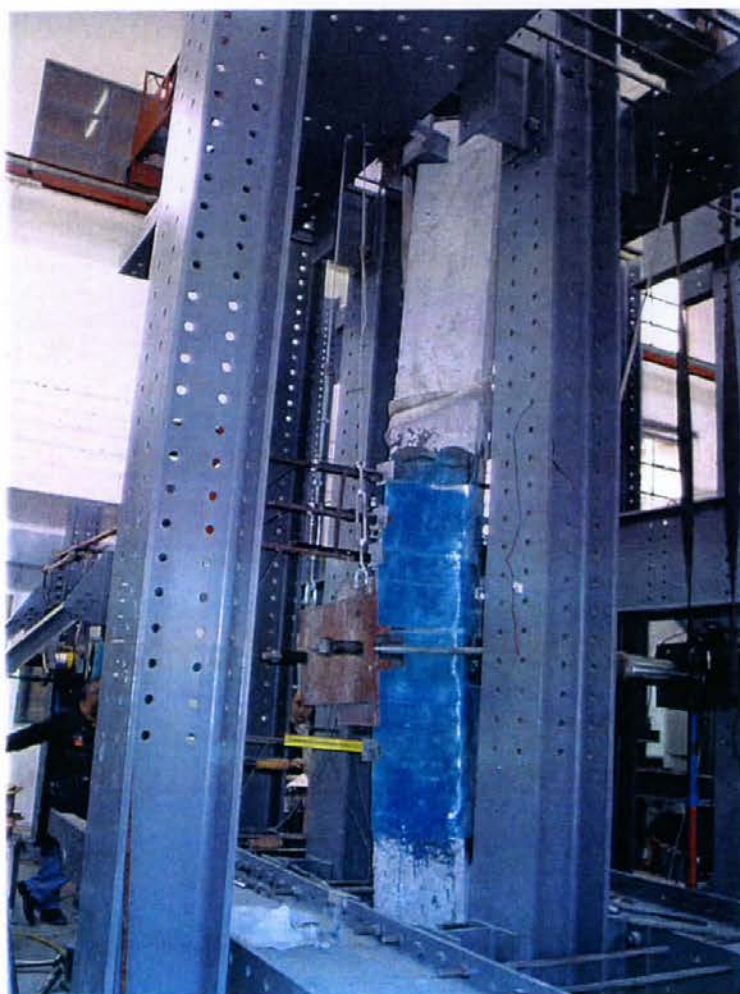
τιμή μετακίνησης **61,5 mm** στον 12^ο κύκλο κατά την ανακύκλιση. Ως εκ τούτου, η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων που απέδωσε το ΕΠισκευασμένο δοκίμιο είναι **4,60** σε όρους μετατόπισης, βάσει του παραπάνω κριτηρίου.



Φωτογραφία 5.6.2
Λεπτομέρεια της
σταδιακής ρηγμάτωσης
του ΙΝΟΠ εγκάρσιας
ενίσχυσης, δοκίμιο
ΧΠ305ΕΠ.



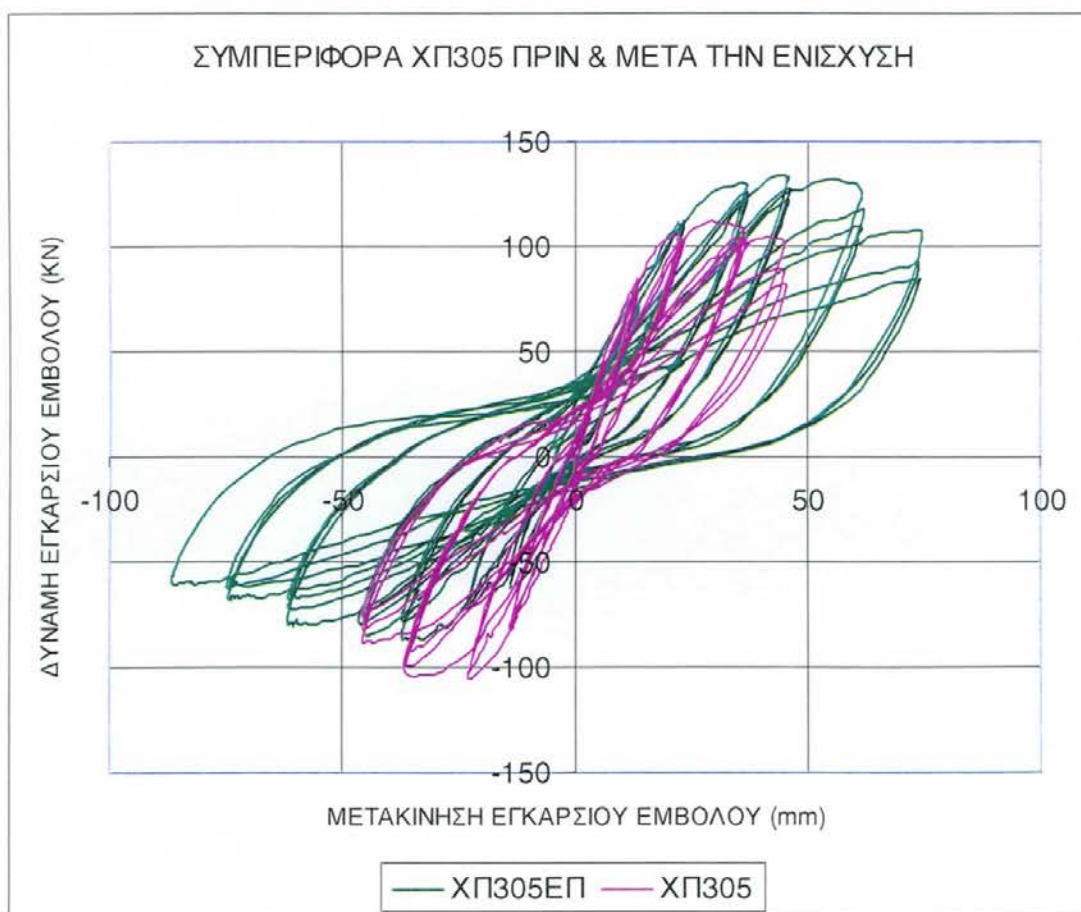
Φωτογραφία 5.6.3 Λεπτομέρεια της αστοχίας της κρίσιμης ζώνης με εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος και ΙΝΟΠ σε απόσταση $1,5d$ από το φορτίο με σχετική διατμητική μετατόπιση των τμημάτων του στύλου, δοκίμιο ΧΠ305ΕΠ.



Φωτογραφία 5.6.4 Τελική παραμένουσα παραμόρφωση του δοκιμίου στο τέλος του πειράματος, δοκίμιο ΧΠ305ΕΠ.

5.6.3 Σύγκριση πειραματικών καταγραφών ΧΡ305 και ΧΠ305ΕΠ

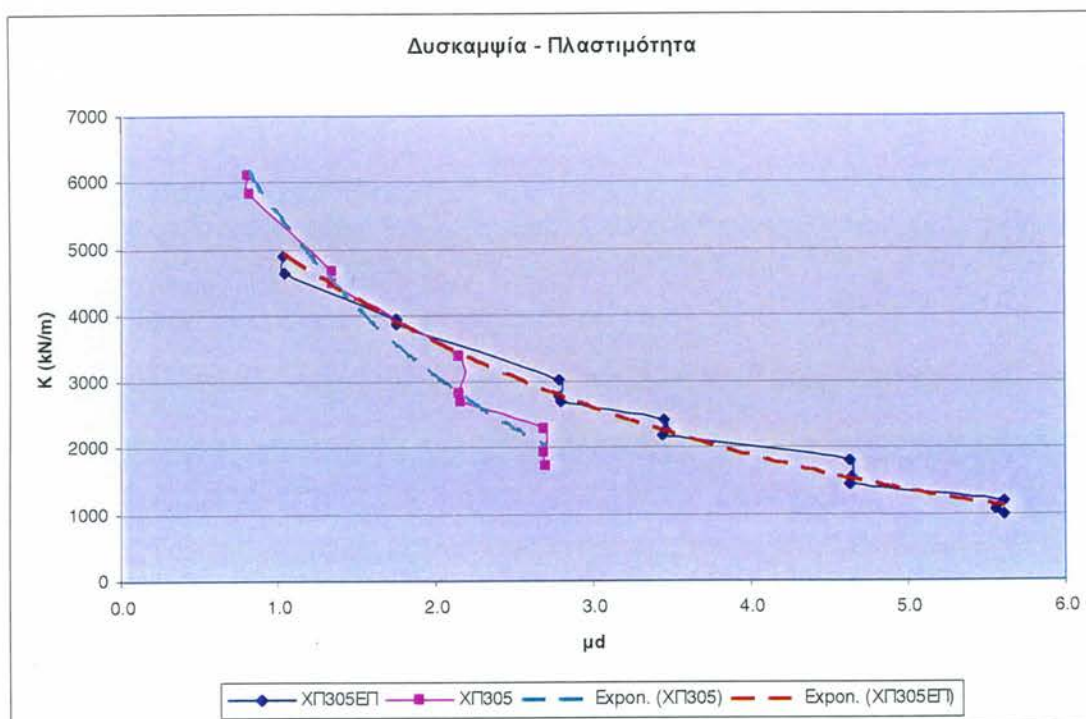
Τα διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης $P-\delta$ πριν και μετά τη διαδικασία αποκατάστασης και ενίσχυσης των ΧΡ305(ΕΠ) συγκρίνονται στο Σχήμα 5.6.3, ενώ οι τιμές της απόκρισης δίνονται στους Πίνακες 4.7.1 και 5.6.1 αντίστοιχα. Το δοκίμιο εμφανίζει την μέγιστη αντοχή των 134 kN, ίση με 120% της αντοχής του παρθένου δοκιμίου (112 kN). Λόγω λυγισμού των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων, το παρθένο δοκίμιο εμφάνισε τη χαρακτηριστική σταδιακή πτώση της αντοχής του σε ανακύκλιση κάτω του 85%, σε παραμόρφωση 44 mm, σε μικρότερο αριθμό ανακυκλίσεων από το ΕΠισκευασμένο, αλλά σε ίδια παραμόρφωση όπως αυτό.



Σχήμα 5.6.3 Σύγκριση της συμπεριφοράς του δοκιμίου ΧΠ305 πριν και μετά την ενίσχυση.

Το δοκίμιο εμφανίζει μία σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας του σε σχέση με το παρθένο (αύξηση 180% σε σύγκριση με τη πλαστιμότητα των 2,60 του ΧΠ305), ενώ εμφανίζει και μια αύξηση της αντίστοιχης παραμόρφωσης σε απόλυτα μεγέθη, από 44 σε 61 mm.

Πέραν αυτού, ο ρυθμός απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου σε σύγκριση με το παρθένο είναι μικρότερος: το παρθένο δοκίμιο έχασε στον 10^ο κύκλο ($\delta=45$ mm) το 26% της μέγιστης αντοχής του, ποσοστό που καταγράφεται στο παρόν ΕΠισκευασμένο πείραμα (99 kN) στον 15^ο κύκλο, σε παραμόρφωση 74 mm. Όπως και με το δοκίμιο ΧΠ304ΕΠ, η εφαρμογή του ΙΝΟΠ εγκαρσίως βελτιώνει την συμπεριφορά του δοκιμίου αποδίδοντας μεγαλύτερη ενεργειακή απορρόφηση και σταθερότητα στην απόκριση. Σε απόλυτα μεγέθη άρα, το ΕΠισκευασμένο δοκίμιο διατηρεί την αντοχή του μετά την απομείωση του 85% σε υψηλότερα επίπεδα από το παρθένο δοκίμιο, η δε απορροφούμενη ενέργεια του σε αντίστοιχες πλαστιμότητες είναι καταφανώς μεγαλύτερη και πλέον σταθερή.

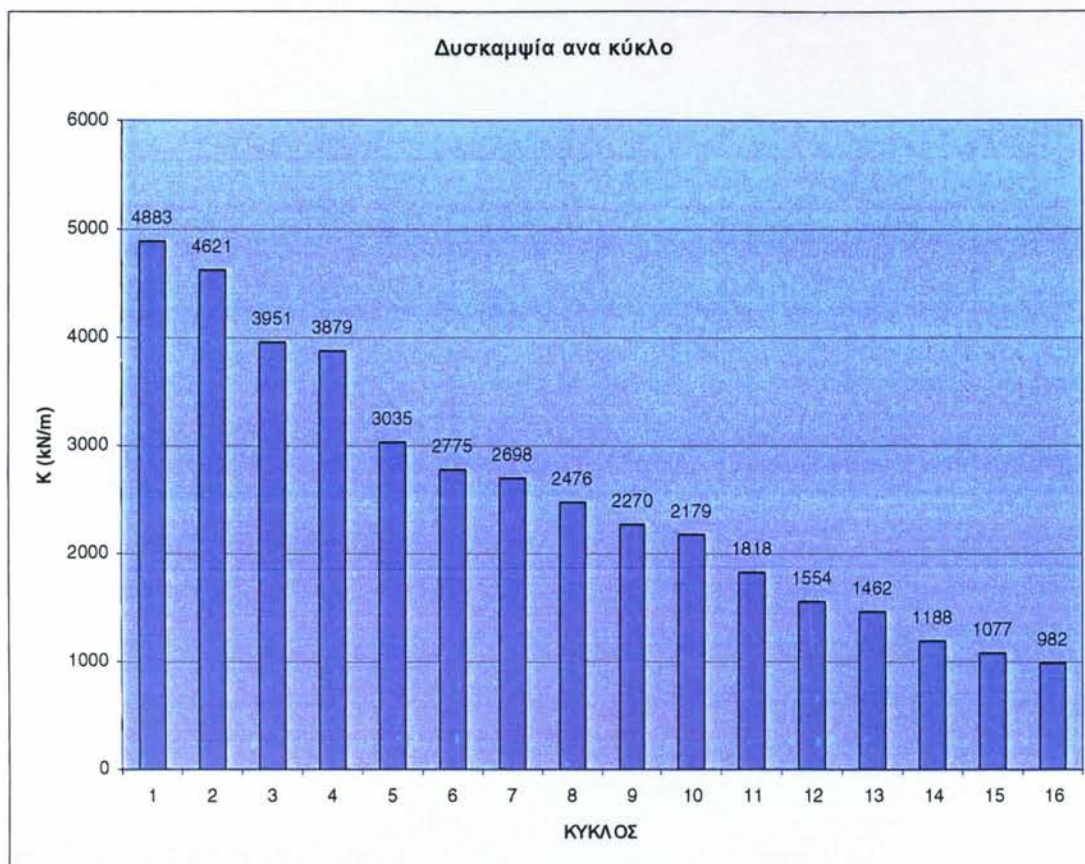


Σχήμα 5.6.4 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ως προς τη πλαστιμότητα παραμορφώσεων των δοκιμίων ΧΠ305 και ΧΠ305ΕΠ.

5.6.4 Παράγωγες μετρήσεις δυσκαμψίας και υστερετικής ενέργειας

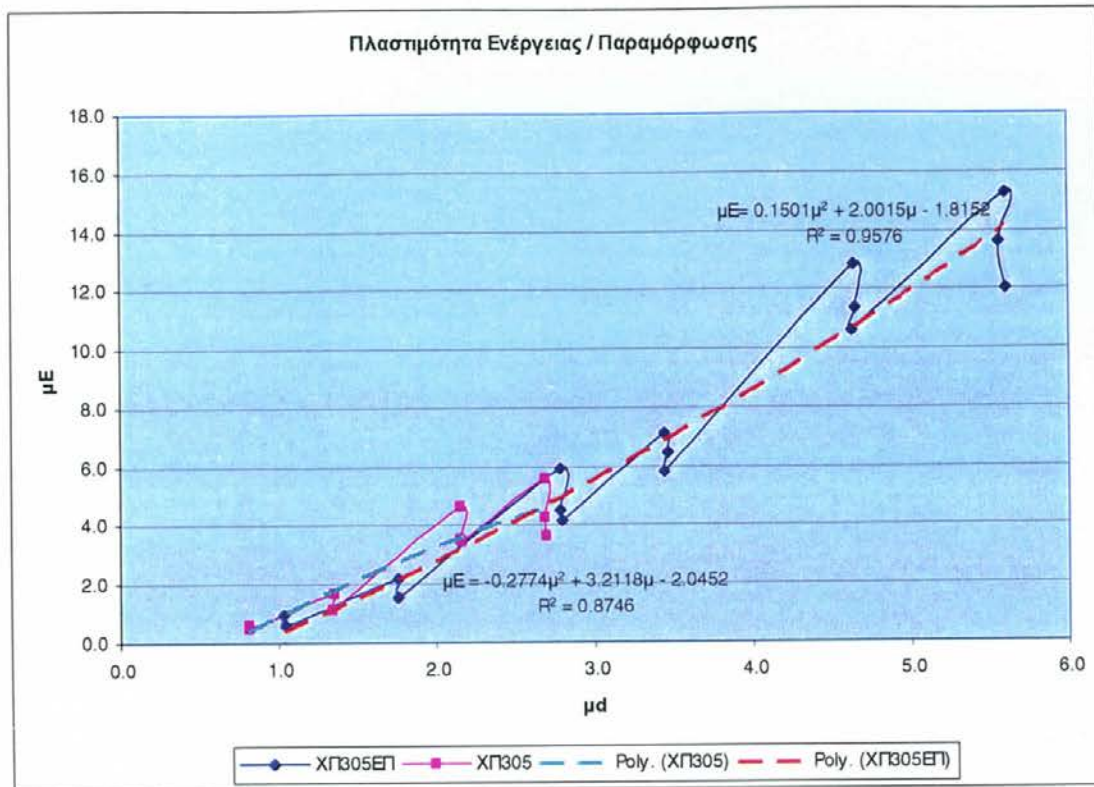
Βάσει των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου υπολογίζεται η μέση δυσκαμψία μεταξύ ανακυκλίσεων του Πίνακα 5.6.1, η οποία απεικονίζεται για τη σειρά των δεκαεπτά ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.6.4

και 5.6.5, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, σε απόλυτα μεγέθη (Σχήμα 5.6.5) ή σαν πλαστιμότητα (Σχήμα 5.6.4).

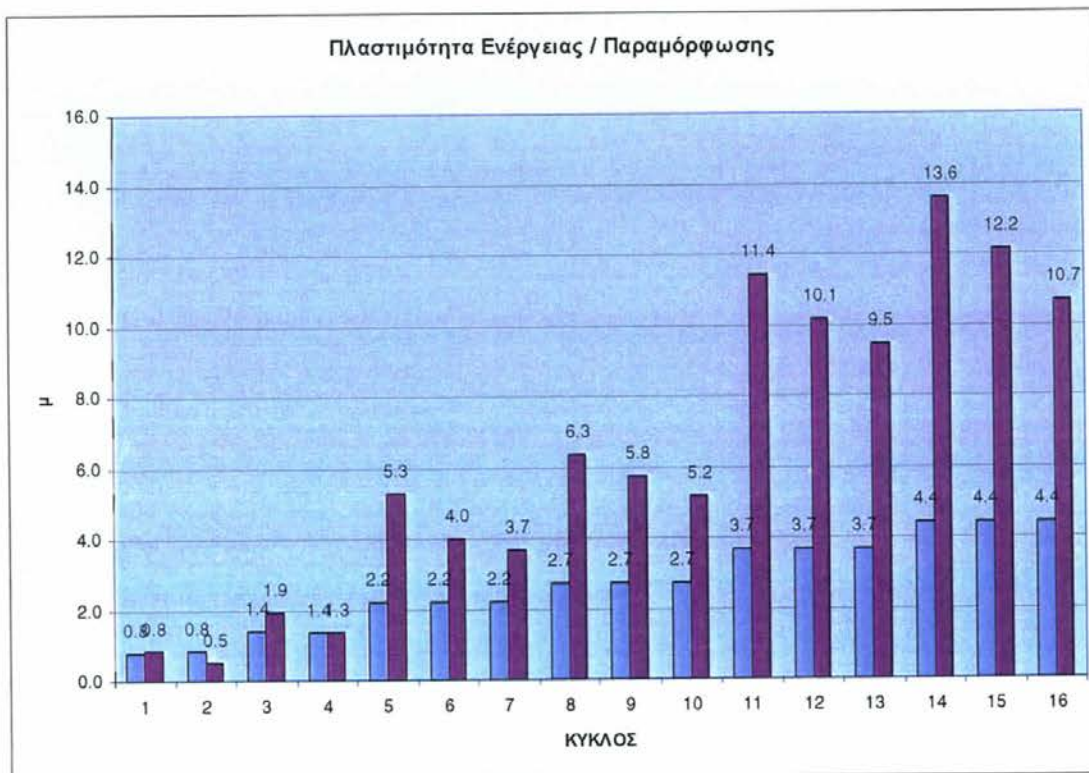


Σχήμα 5.6.5 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ανά κύκλο φόρτισης, δοκιμίου ΧΠ305ΕΠ.

Το δοκίμιο ΧΠ305ΕΠ εμφανίζει στην αρχική μικρού εύρους απόκριση μια αρχική δυσκαμψία περίπου 80% της δυσκαμψίας του παρθένου δοκιμίου ΧΠ305. Στο όριο της ωφέλιμης απόκρισης του δοκιμίου ως την πλαστιμότητα 4,60, κατά τον 12^ο κύκλο, σύμφωνα με το κριτήριο της μείωσης της αντοχής, η μέση δυσκαμψία του στοιχείου έχει μειωθεί πλέον στο 36% της αρχικής του πειράματος, σε επίπεδα περίπου ίδια με την τελική δυσκαμψία του ΧΠ305 σε πλαστιμότητα, όμως, 2,60. Χαρακτηριστικό είναι πάντως ότι για οποιοδήποτε εύρος παραμόρφωσης, η πτώση της δυσκαμψίας μεταξύ ανακυκλίσεων, σε σταθερό εύρος, είναι της τάξης του 20% μεταξύ διαδοχικών κύκλων, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στο ΧΠ305, το οποίο εμφάνισε μεταβολές της δυσκαμψίας (35% πτώση στον 8-10 κύκλο, σε $\mu_\delta = 2,70$).



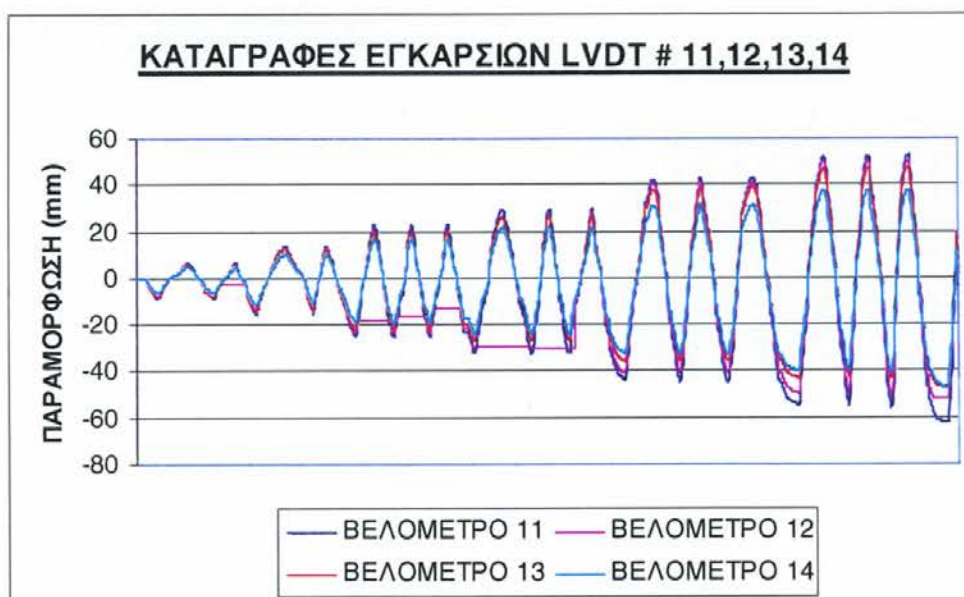
Σχήμα 5.6.6 Σταδιακή μείωση της απορροφούμενης υστερετικής ενέργειας ως προς της επιβαλλόμενη πλαστιμότητα παραμορφώσεων, δοκίμια ΧΠ305 και ΧΠ305ΕΠ.



Σχήμα 5.6.7 Κατανομή πλαστιμότητας ενέργειας ως προς την πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΧΠ305ΕΠ.

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται και στην απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του ενισχυμένου δοκιμίου, η οποία είναι ίση με το εμβαδόν που περικλείεται από τον εκάστοτε υστερετικό βρόχο του κάθε κύκλου, και δίδεται στον Πίνακα 5.6.1. Η υστερετική ενέργεια απεικονίζεται για τη σειρά των δεκαεπτά ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.6.6 και 5.6.7, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, (Σχήμα 5.6.6) καθώς και σε σύγκριση με την αντίστοιχη πλαστιμότητα παραμορφώσεων σε επαναλαμβανόμενους κύκλους σταθερού εύρους (Σχήμα 5.6.7). Παρατηρείται ότι, όπως και για τη δυσκαμψία, σε όλη τη διάρκεια του πειράματος το δοκίμιο μειώνει στο 80% την απορροφώμενη εκάστοτε ενέργεια μεταξύ *τριών* κύκλων υπό σταθερό εύρος ανακύκλισης (κύκλοι 11-13 και 14-16), ενώ, σε μέγιστη πλαστιμότητα παραμόρφωσης ίση με 5,60, απορροφά στον πρώτο κύκλο 15πλάσια ενέργεια της διαρροής του.

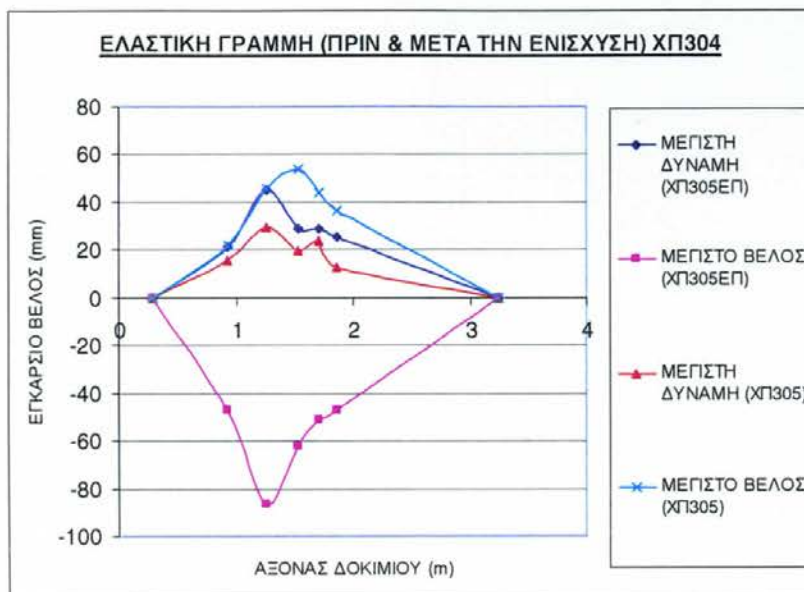
5.6.5 Καταγραφές LVDT στην εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5.6.8 Κατανομή της εγκάρσιας παραμόρφωσης σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 11,12,13 και 14.

Οι καταγραφές των εγκάρσιων LVDT του πειράματος δίνονται στο Σχήμα 5.6.8 (σημειώνεται ότι το καταγραφικό 12 δεν κατέγραψε ομαλά μεταξύ του 4^{ου} και 9^{ου} κύκλου). Στο Σχήμα 5.6.9 συγκρίνονται οι εγκάρσιες παραμορφώσεις των δοκιμίων ΧΡ305 και ΧΠ305ΕΠ, όπως αυτές συνάγονται

από τις στιγμιαίες καταγραφές των LVDT, που είναι τοποθετημένα κάθετα στον αρχικό απαραμόρφωτο άξονα του δοκιμίου, στα σημεία της μέγιστης δύναμης και της μέγιστης εγκάρσιας παραμόρφωσης που καταγράφηκε, στο



Σχήμα 5.6.9

Σύγκριση της παραμόρφωσης του δοκιμίου κατά την καταγραφή της μέγιστης δύναμης P_{max} και της μέγιστης μετατόπισης δ_{max} , πριν και μετά την ενίσχυση

εκάστοτε πείραμα. Στον οριζόντιο άξονα του Σχήματος απεικονίζεται ο διαμήκης άξονας του δοκιμίου με αφετηρία τη στήριξη.

Λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία μέγιστων αντοχών που καταγράφηκαν (1/1,20), και τα παραμορφωμένα σχήματα στη φάση της P_{max} , εμφανίζεται μια μείωση της αρχικής δυσκαμψίας καθώς και μία ομοιότητα του παραμορφωμένου σχήματος του δοκιμίου στις δύο φάσεις καταπόνησής του, πριν και μετά την ενίσχυση. Στη μέγιστη παραμόρφωση, το ανελαστικά παραμορφωμένο τμήμα του στύλου εμφανίζει μεν μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα αφενός, αλλά μικρότερο ενεργό πλάτος κατά την παραμόρφωση. Το εύρος της πλαστικής άρθρωσης είναι πλέον ευκρινές από τις μετρήσεις των κατά μήκος LVDT που αναπτύσσονται παρακάτω.

5.6.6 Καταγραφές LVDT κατά την διαμήκη διεύθυνση

Οι καταγραφές των LVDT στην κρίσιμη περιοχή κατά τη διαμήκη διεύθυνση δείχνονται ανά ομάδες στα Σχήματα 5.6.10 και 5.6.11. Θεωρώντας την ακριβή θέση των βελομέτρων είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι παράγωγες

πλαστικές στροφές καθώς και οι μέσες καμπυλότητες του δοκιμίου, στο μήκος αναφοράς της μέτρησης, οι οποίες δείχνονται στο Σχήμα 5.6.12 για τα τρία



Σχήμα 5.6.10 Κατακόρυφη παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 19,20 και 21.

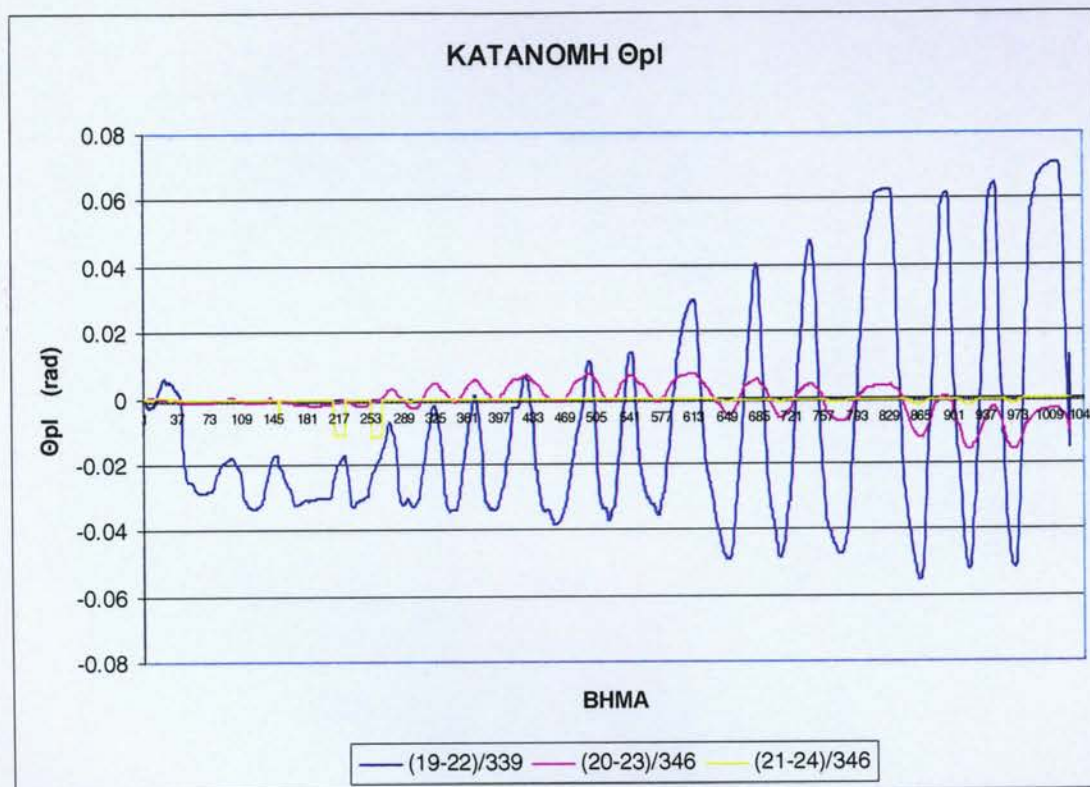


Σχήμα 5.6.11 Κατακόρυφη παραμόρφωση σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 22, 23 και 24.

διαδοχικά τμήματα της κρίσιμης ζώνης, αντίστοιχα, μετά από διόρθωση στον πρώτο κύκλο, στη ζώνη 1, λόγω της αρχικής ολίσθησης της καταγραφής 22.

Οι καταγραφές είναι κατανεμημένες σε μέση περίπου απόσταση 150mm μεταξύ τους. Παρατηρείται άρα ότι η μέγιστη πλαστική στροφή που απαιτείται στο τμήμα πλησιέστερα στο φορτίο P είναι $0,071$ rad, στη μέγιστη

παραμόρφωση των 86,7mm. Η παραπάνω στροφή συγκεντρώνεται ουσιαστικά εξ ολοκλήρου στο πρώτο τμήμα, με τα δύο επόμενα τμήματα της κρίσιμης ζώνης να εμφανίζουν αντίθετη καμπυλότητα, λόγω παραμένουσας



Σχήμα 5.6.12 Κατανομή απαιτήσεων πλαστικής στροφής κατά μήκος της κρίσιμης ζώνης, βάσει των καταγραφών 19 ως 24.

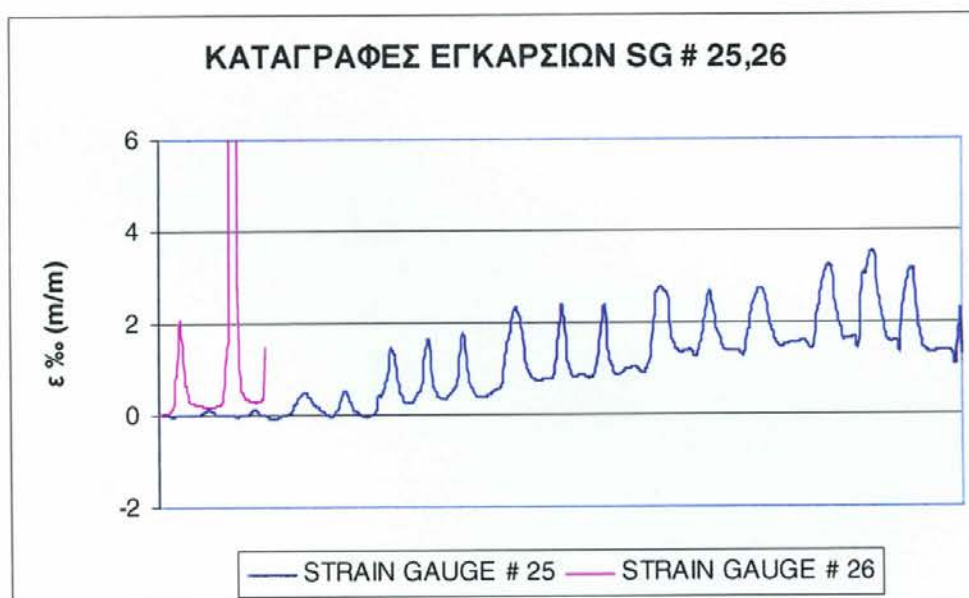


Σχήμα 5.6.13 Πειραματική καταγραφή αξονικού LVDT στη βάση του δοκιμίου.

παραμόρφωσης. Η συνολική πλαστική στροφή – ίση με το άθροισμα των τριών παραπάνω καταγραφών – ισούται με 0,067 rad, τιμή που πλησιάζει την αντίστοιχη εξωτερική μέτρηση των εγκάρσιων LVDT ($86,7\text{mm} / 1383\text{mm} = 0,063\text{ rad}$), σε ποσοστό 6%, γεγονός που αποδεικνύει την ορθότητα της επιλογής του άξονα 0,0 λόγω της ολίσθησης του καταγραφικού 22.

Η διαμήκης καταγραφή στον άξονα, στη βάση του δοκιμίου, δίνεται στο Σχήμα 5.6.13 και ακολουθεί την επιβαλλόμενη στροφή του δοκιμίου ως προς το σημείο εφαρμογής του αξονικού φορτίου, με μέγιστη και ελάχιστη καταγραφή ίσες προς 13 και -5 mm αντίστοιχα.

5.6.7 Καταγραφές εγκάρσιων SG



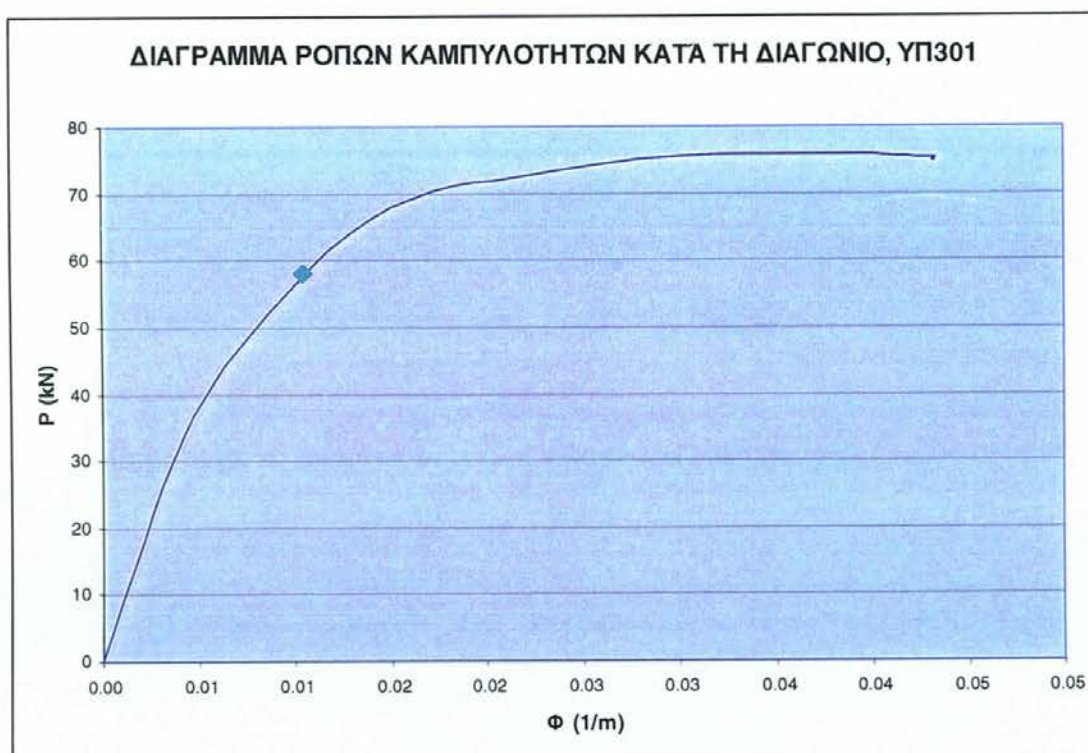
Σχήμα 5.6.14 Πειραματικές καταγραφές εγκάρσιων SG στο ΙΝΟΠ περίσφιγξης / διατμητικής ενίσχυσης.

Το SG #25 τοποθετείται σε απόσταση 10,5mm και το #26 σε απόσταση 23,5mm από το φορτίο, στο μέσον της παρειάς (Φωτογραφία 5.6.1). Από τις καταγραφές των μηχανοσυόμετρων φαίνεται ότι το πλησιέστερο προς το φορτίο Ρ καταγράφει μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ 3,26%, ενώ το ευρισκόμενο σε απόσταση 1:1 από το σημείο φόρτισης αστοχεί στον 3^ο κύκλο.

5.7 Δοκίμιο ΥΠ301ΑΠ

5.7.0 Αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής του δοκιμίου

Το δοκίμιο ΥΠ301ΑΠ μόνο αποκαταστάθηκε σε τμήμα της διατομής με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής στην κρίσιμη ζώνη και επανελέγχθηκε, αφού έγινε ευθυγράμμιση των γωνιακών οπλισμών του. Το ελεγχόμενο τμήμα του δοκιμίου είναι σε μήκος 1,95 m επάνω από το έμβολο. Το προβλεπόμενο διάγραμμα ροπής καμπυλότητας, κάθετα προς τον άξονα της διαγωνίου της



Σχήμα 5.7.0 Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας της διατομής του δοκιμίου ΥΠ301ΑΠ σε διαξονική καταπόνηση κατά τη διαγώνιο.

διαξονικής καταπόνησης του ΥΠ301ΑΠ, υπολογίστηκε με το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών XTRACT (Chadwell, 2002), για την παρθένα διατομή (Κεφάλαιο 4), στο Σχήμα 5.7.0, όπου σημειώνεται και το σημείο της πρώτης διαρροής του γωνιακού χάλυβα. Σύμφωνα με τις παραδοχές της ανάλυσης, η διατομή χωρίζεται σε ίνες υπό μονοαξονική απόκριση, όπου το σύνολο των ινών συμμετέχουν με πλήρη συνάφεια σε γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων, για δεδομένη καμπυλότητα. Σε κάθε σημείο που αποτιμάται, η αξονική αντίσταση στη διατομή (N) ισούται με την εξωτερική N

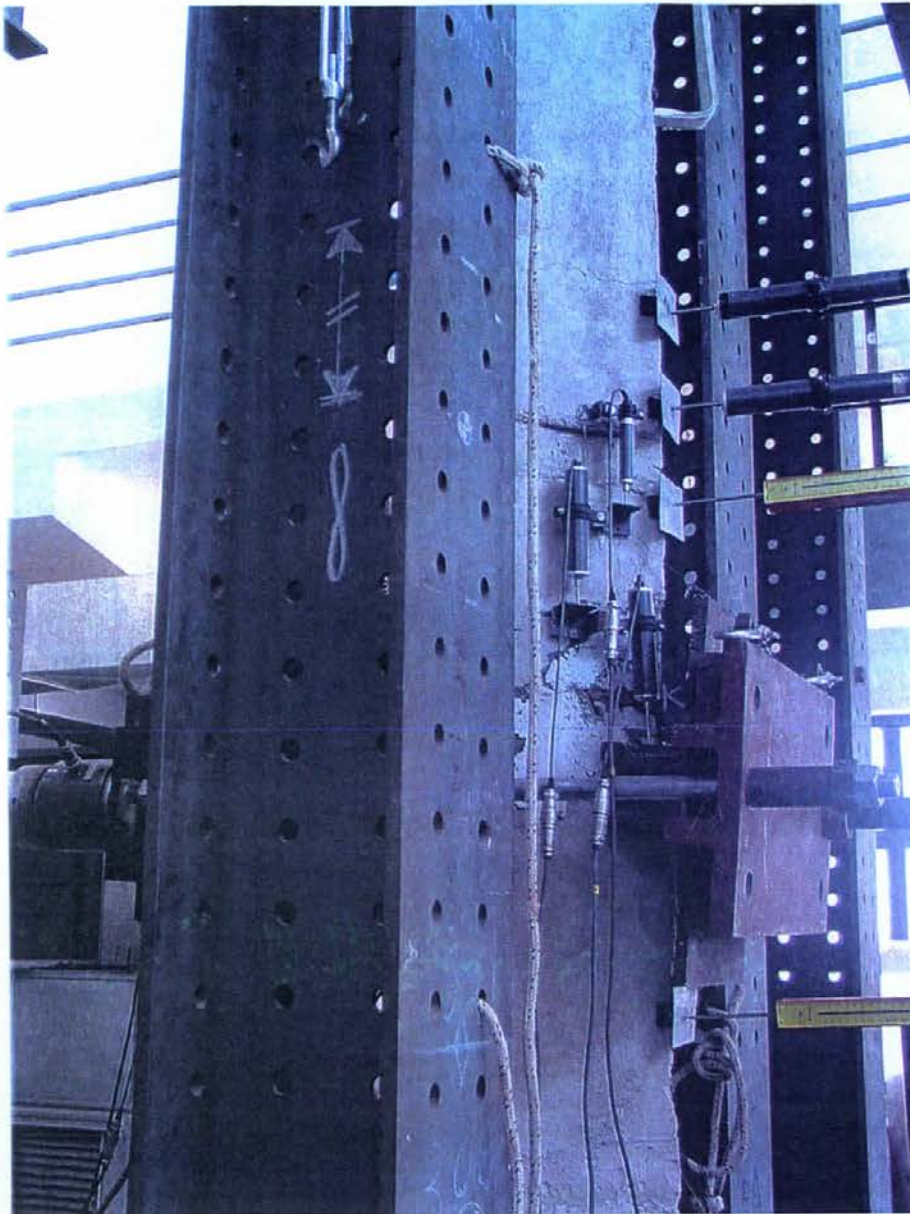
του πειράματος (198,5 kN). Οι παραδοχές και λεπτομερή αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στο Κεφάλαιο 6 και Παράρτημα Ι της παρούσης. Η θεωρητική καμπτική αντοχή σε πρώτη διαρροή του γωνιακού χάλυβα είναι $M_y = 58,0$ kNm, ενώ η οριακή αντοχή της διατομής είναι $M_p = 74,9$ kNm (Σχήμα 5.7.0 και Πίνακας 6.1). Βάσει γεωμετρίας, οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές του φορτίου $P_y = 80,2$ kN και $P_u = 103,6$ kN, αντίστοιχα (χωρίς να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα παραμόρφωσης 2ας τάξεως).

5.7.1 Ενοργάνωση του δοκιμίου

Στο δοκίμιο τοποθετούνται τέσσερα εγκάρσια LVDT στερεωμένα στο εξωτερικό σταθερό σύστημα αναφοράς (Αρ. 11 ως 14) και επτά διαμήκη LVDT μέτρησης της πλαστικής στροφής (Αρ. 18 ως 24), στη βάση του στύλου και στα γωνιακά άκρα της διατομής της κρίσιμης ζώνης κατά μήκος του δοκιμίου. Οι θέσεις και οι σχετικές αποστάσεις των LVDT δείχνονται στο Παράρτημα ΙΙ, στο Σχήμα Π5.7.1.

5.7.2 Περιγραφή του πειράματος

Το ΑΠοκατεστημένο δοκίμιο τοποθετείται κατακόρυφα στη διάταξη (Φωτογραφία 5.7.1), σε διεύθυνση φόρτισης κατά μήκος της διαγωνίου του. Έχει μήκος 3,40m και καθαρό άνοιγμα 3,15m μεταξύ στηρίξεων. Βάσει οπλισμών, το δοκίμιο έχει ένα ελεγχόμενο μήκος 1,95m οπλισμένο με συνδεδητές S500 σε διάταξη Φ10/100, καθώς και μειωμένο διαμήκη οπλισμό 8Φ14 σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του, μήκους 1,20m που είναι ισχυρά οπλισμένο με 16Φ14. Το εγκάρσιο έμβολο τοποθετείται στο όριο διακοπής του πρόσθετου οπλισμού κάτω από το ελεγχόμενο τμήμα, σε απόσταση 1,25 m από την ακραία κάτω διατομή του υποστρώματος, προς το ισχυρό δάπεδο.



Φωτογραφία 5.7.1 Το δοκίμιο ΥΠ301ΑΠ τοποθετημένο στη διάταξη πριν την έναρξη του πειράματος, και η μετρητική διάταξη. Διακρίνεται το ΑΠοκατεστημένο τμήμα της κρίσιμης διατομής με επισκευαστικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

Στο δοκίμιο επιβάλλονται εννέα συνολικά εναλλασσόμενοι κύκλοι φόρτισης, με την ίδια αξονική δύναμη όπως και στον αρχικό έλεγχο της Α Φάσης. Το καταγεγραμμένο διάγραμμα δύναμης – παραμόρφωσης ($P-\delta$) του δοκιμίου δίνεται στο Σχήμα 5.7.1. Τα αντίστοιχα διαγράμματα $P-\delta$ των μεμονωμένων κύκλων αναλύονται στο Σχήμα 5.7.2.



Σχήμα 5.7.1 Βρόχοι υστέρησης δοκιμίου ΥΠ301ΑΠ.

Στον Πίνακα 5.7.1 δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματα της ολικής συμπεριφοράς, τα οποία περιλαμβάνουν :

- μέγιστες /ελάχιστες τιμές της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης (δ_{min} , δ_{max}),
- οι αντίστοιχες μέγιστες – ελάχιστες δυνάμεις (P_{min} , P_{max}) ανά κύκλο,
- 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}),
- 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

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

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

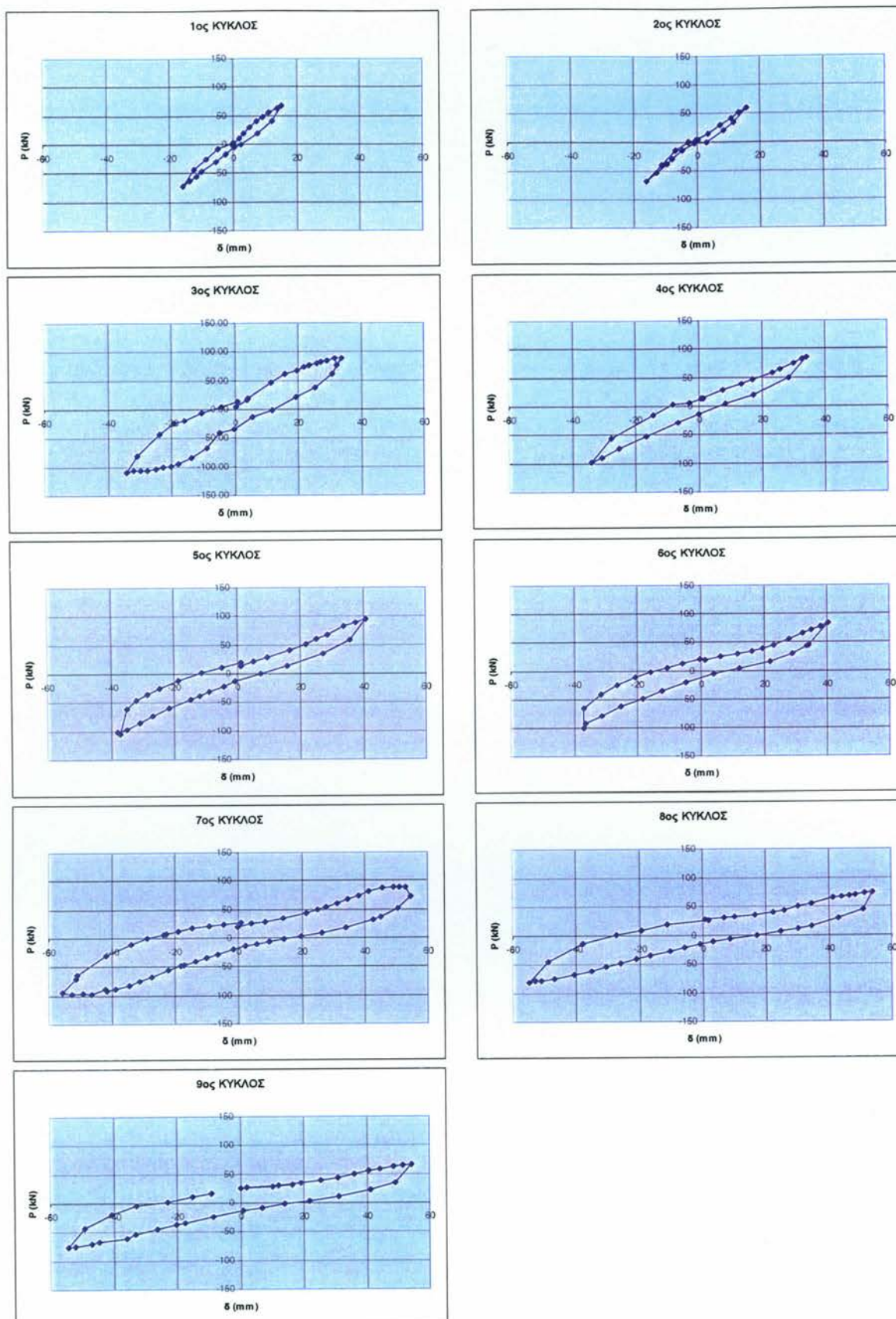
και P_y , δ_y οι δυνάμει και η παραμόρφωση διαρροής (πειραματικά μετρούμενη).

Πίνακας 5.7.1 Μετρήσεις πειραματικής απόκρισης του δοκιμίου ΥΠ301ΑΠ

Αρ. Κύκλου	δ_{min} mm	δ_{max} mm	δ_{mean} mm	P_{min} kN	δ/P_{min} mm	P_{max} kN	δ/P_{max} mm	K kN/m	E KNmm	μ_{δ}	μ_E
1	16	15	16	72	16	67	15	4441	456	1,0	0,6
2	16	16	16	68	16	60	16	4021	261	1,0	0,4
3	34	34	34	109	34	88	34	2897	3125	2,1	4,4
4	34	34	34	98	34	85	34	2688	1659	2,1	2,3
5	38	41	39	106	37	95	41	2565	2428	2,4	3,4
6	37	41	39	101	37	84	41	2386	2366	2,4	3,3
7	56	55	55	98	53	88	53	1757	5305	3,4	7,5
8	55	54	54	82	55	74	54	1430	4278	3,4	6,0
9	54	54	54	76	54	67	54	1311	4190	3,4	5,9

Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι η μέγιστη αντοχή του στύλου είναι 106 kN, 90% σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή των 117 kN του παρθένου δοκιμίου ΥΠ301 (Κεφάλαιο 4.7). Η τιμή καταγράφεται κατά τον 5^ο κύκλο φόρτισης, σε μετακίνηση $\delta = 37$ mm και είναι κατά 13% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη θεωρητική πρόβλεψη, $P_u = 93,8$ kN, βασισμένη στις θεωρητικές τιμές αλλά λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα Β τάξεως. Η μέγιστη πειραματική αντοχή αντιστοιχεί (μετά από διόρθωση για τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως) σε μέγιστη ροπή σε διαξονική κάμψη ίση με 83,7 kNm, τιμή που βρίσκεται κοντά στη θεωρητική πρόβλεψη (74,9 kNm). Κατά τη μέγιστη καταγραφή παραμόρφωσης, η μέγιστη πλαστική στροφή στην οποία υπόκειται η πλαστική άρθρωση είναι 0,039 rad (2,2°), η δε πλαστική στροφή στη μέγιστη αντοχή είναι 0,027 rad.

Το πειραματικό φορτίο διαρροής αντιστοιχεί σε αντοχή περίπου 88 kN, το οποίο επιτυγχάνεται πειραματικά στον 3^ο κύκλο σε παραμόρφωση του δοκιμίου ίση με 16,0 mm. Η πτώση της φέρουσας ικανότητας στο 85% της



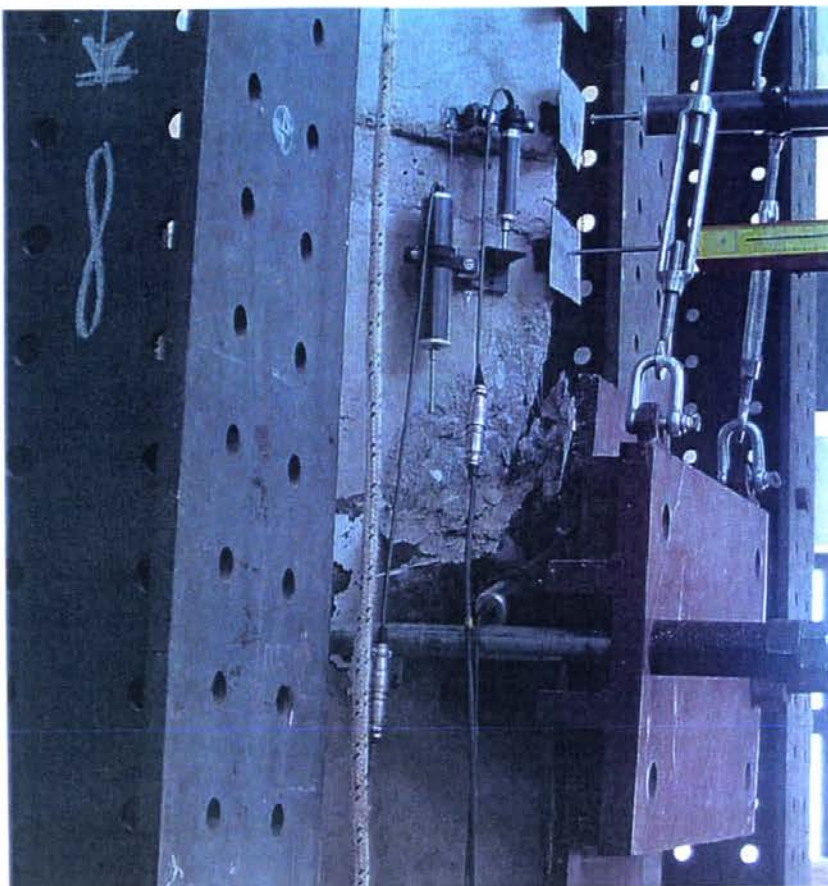
Σχήμα 5.7.2 Ανάλυση των μεμονωμένων κύκλων επιβαλλόμενης παραμόρφωσης.

μέγιστης τιμής ($= 90,1 \text{ kN}$) εμφανίζεται σε τιμή μετακίνησης $55,6 \text{ mm}$ στον 7^ο κύκλο κατά την ανακύκλιση. Ως εκ τούτου, η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων που απέδωσε το ΑΠοκατεστημένο δοκίμιο είναι **3,40** σε όρους μετατόπισης, βάσει του παραπάνω κριτηρίου.



**Φωτογραφία
5.7.2**

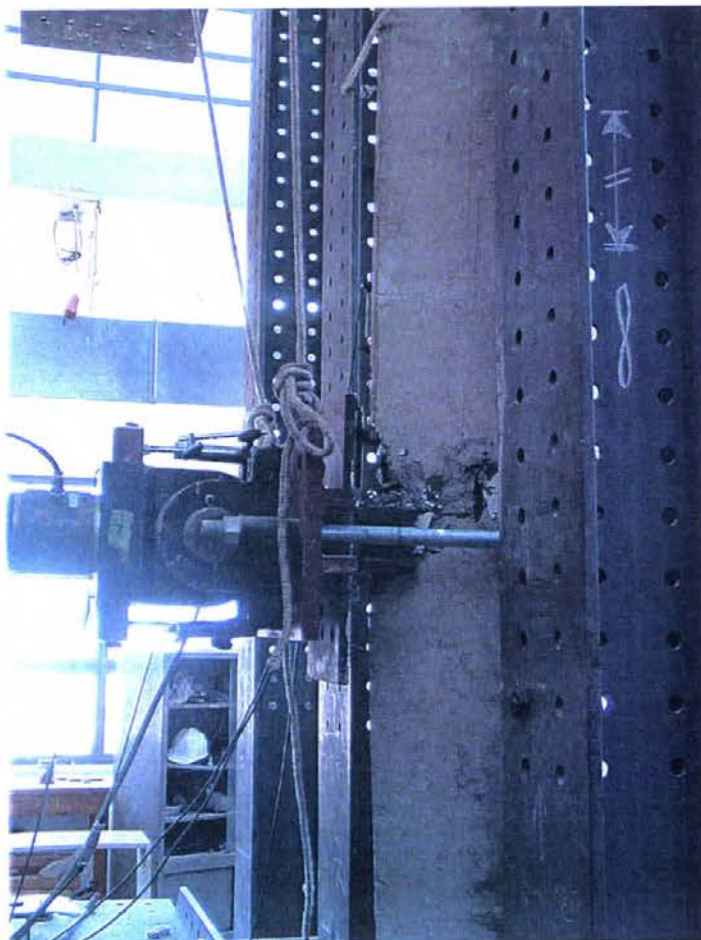
Λεπτομέρεια
της σταδιακής
ρηγμάτωσης
και στα δύο
τμήματα του
στύλου, δοκί-
μιο ΥΠ301ΑΠ.



Φωτογραφία

5.7.3

Λεπτομέρεια
της αστοχίας
της κρίσιμης
ζώνης, δοκίμιο
ΥΠ301ΑΠ.



Φωτογραφία

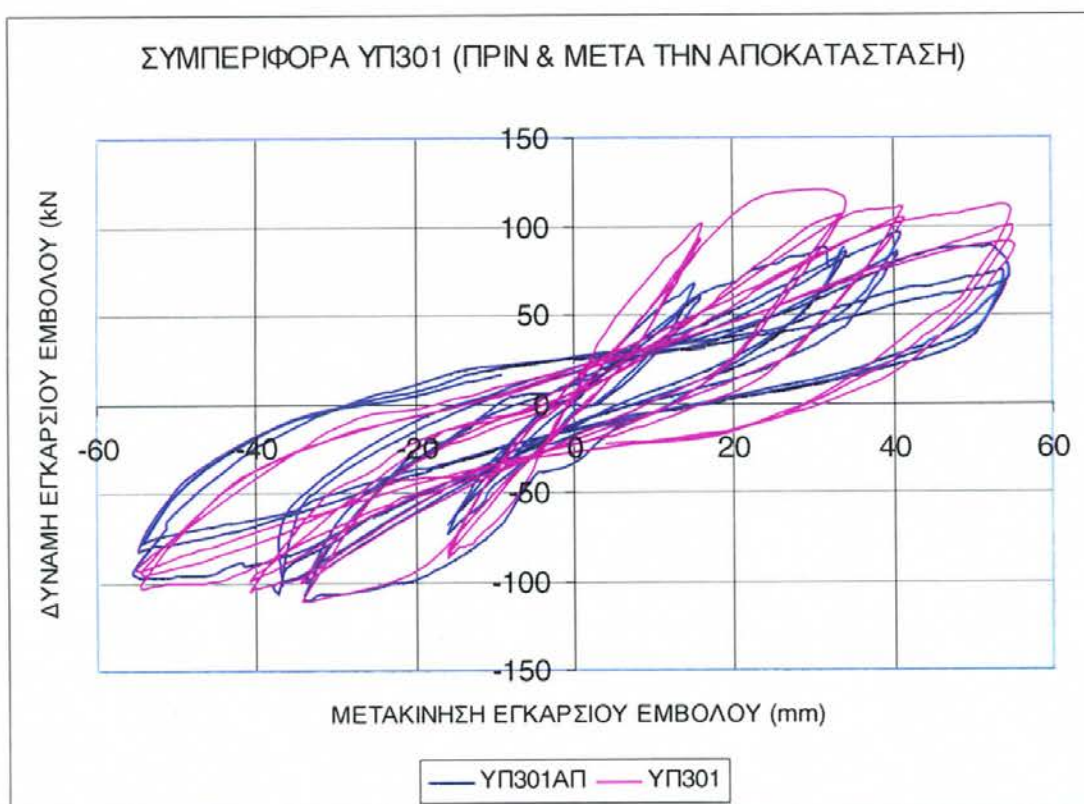
5.7.4

Τελική
κατάσταση αστο-
χίας του δοκιμί-
ου στο τέλος του
πειράματος,
ΥΠ301ΑΠ. Δια-
κρίνεται η αστο-
χία της θλιβό-
μενης ζώνης και
ο λυγισμός των
οπλισμών πλη-
σίον της γωνίας.

5.7.3 Σύγκριση πειραματικών καταγραφών ΧΡ305 και ΥΠ301ΑΠ

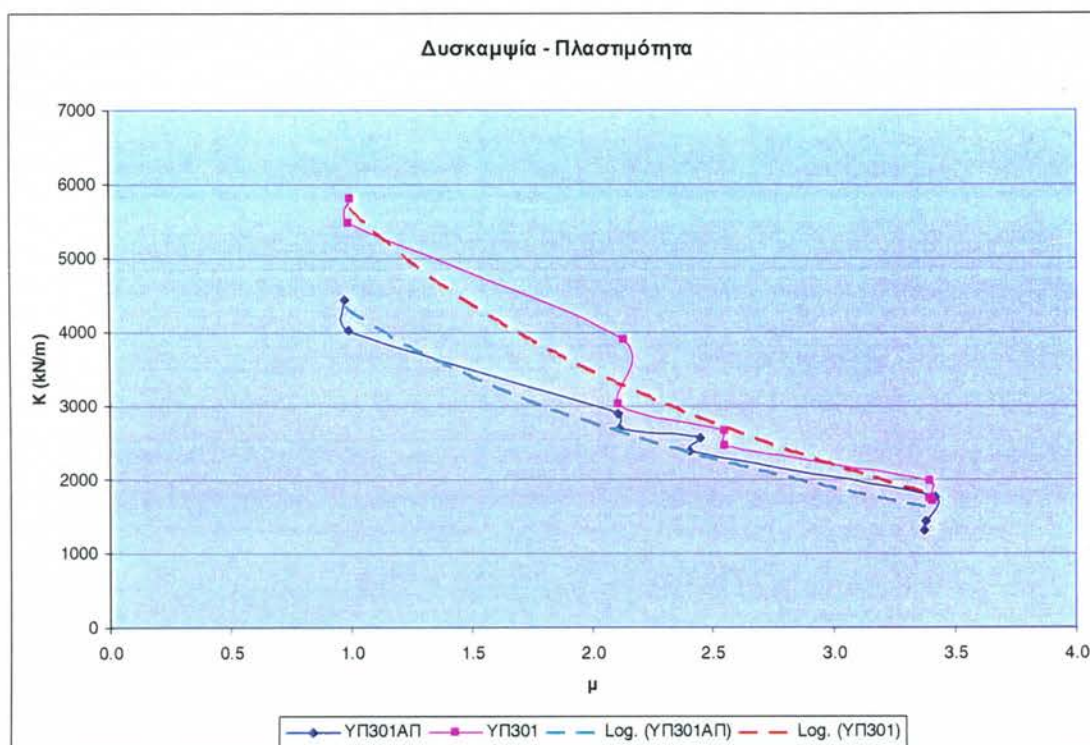
Τα διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης $P-\delta$ πριν και μετά τη διαδικασία αποκατάστασης και ενίσχυσης των ΥΠ301, ΥΠ301ΑΠ συγκρίνονται στο Σχήμα 5.7.3, ενώ οι τιμές της απόκρισης δίνονται στους Πίνακες 4.8.1 και 5.7.1 αντίστοιχα. Το δοκίμιο εμφανίζει την μέγιστη αντοχή των 106 kN, ίση με 90% της αντοχής του παρθένου δοκιμίου (117 kN). Το παρθένο δοκίμιο εμφάνισε τη χαρακτηριστική σταδιακή πτώση της αντοχής του σε ανακύκλιση κάτω του 85%, σε παραμόρφωση 55 mm, σε παρόμοια παραμόρφωση όπως και το ΑΠοκατεστημένο.

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο εμφανίζει έλλειψη σημαντική αντοχής κατά τη μία διεύθυνση ανακύκλισης, παρά την αποκατάσταση, κατά την οποία υπολείπεται της αντοχής του παρθένου δοκιμίου. Στην αντίθετη διεύθυνση (απόκριση με αρνητικό πρόσημο), οι δύο καταγραφές ταυτίζονται, πλην των αρχικών κύκλων μικρού εύρους οι οποίοι είναι πλέον εύκαμπτοι στο ΥΠ301ΑΠ.



Σχήμα 5.7.3 Σύγκριση της συμπεριφοράς του δοκιμίου ΥΠ301 πριν και μετά την αποκατάσταση.

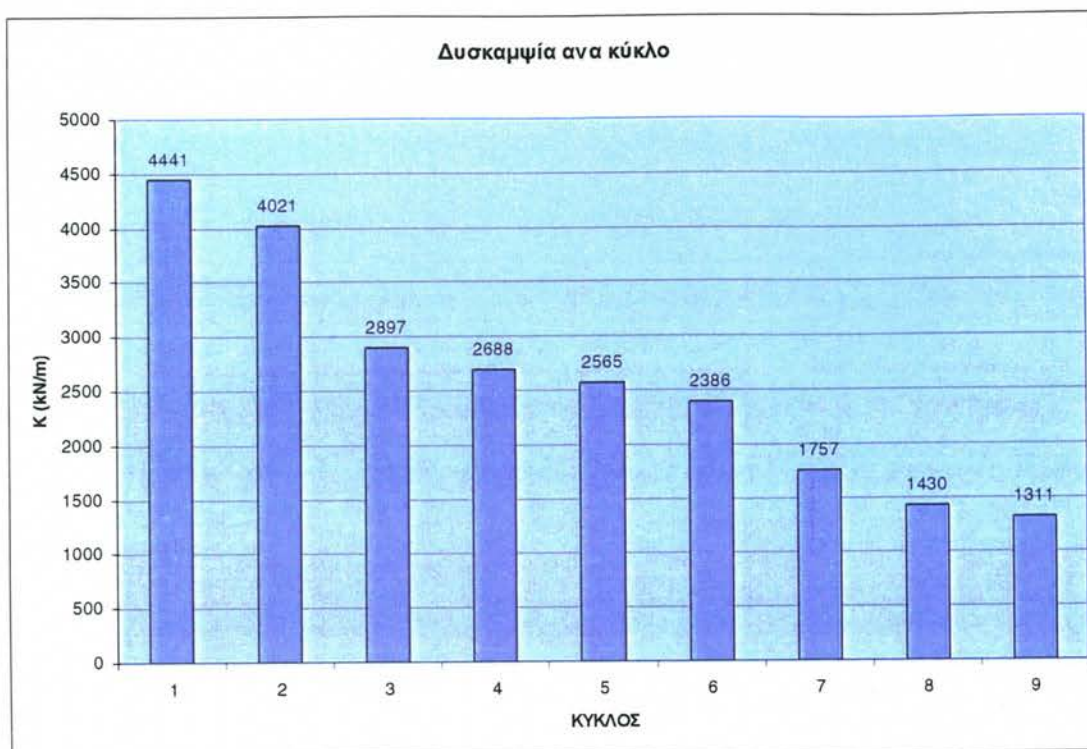
Πέραν αυτού, ο ρυθμός απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου σε σύγκριση με το παρθένο είναι ελάχιστα καλύτερος στην ανακύκλιση: το παρθένο δοκίμιο έχασε στον 9^ο κύκλο ($\delta=45$ mm) το 26% της μέγιστης αντοχής του, ποσοστό που καταγράφεται στο παρόν ΑΠοκατεστημένο πείραμα στον 8^ο κύκλο, αλλά σε παραμόρφωση 54 mm. Από άποψη ενεργειακής απορρόφησης, φαίνεται ότι η απορροφώμενη ενέργεια του δοκιμίου είναι υποδεέστερη του παρθένου, ειδικά σε ανακυκλίσεις πέραν της μέγιστης αντοχής.



Σχήμα 5.7.4 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ως προς τη πλαστιμότητα παραμορφώσεων των δοκιμίων ΥΠ301 και ΥΠ301ΑΠ.

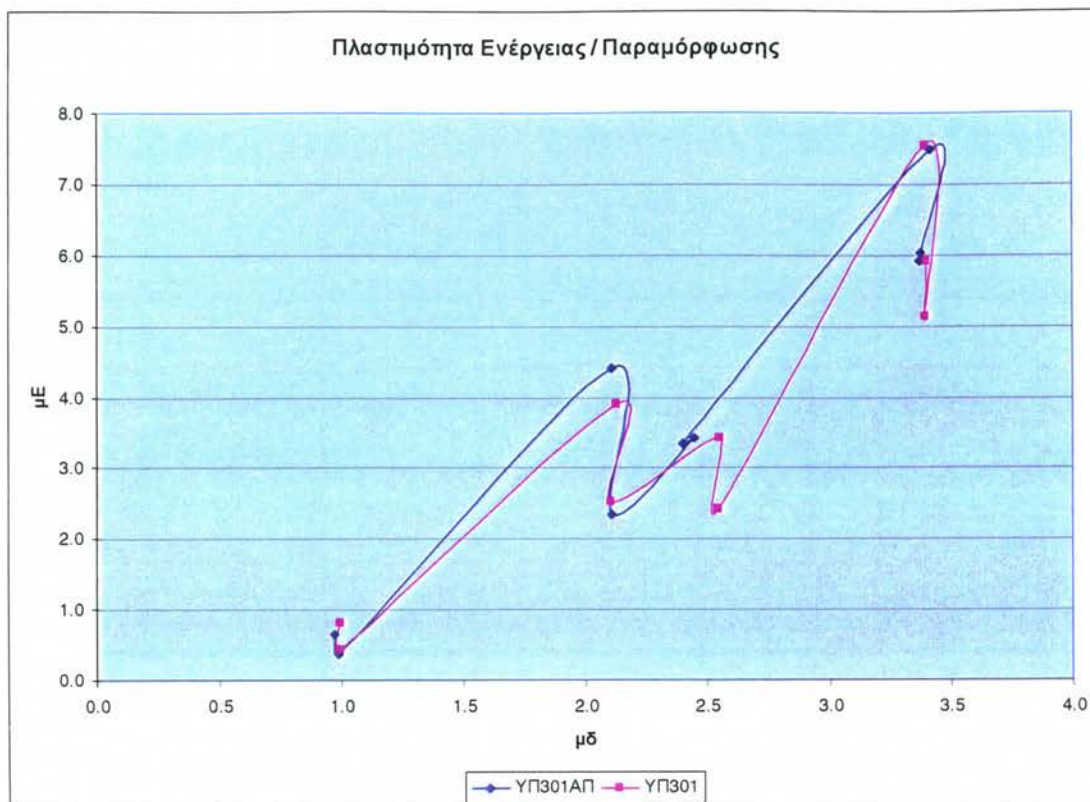
5.7.4 Παράγωγες μετρήσεις δυσκαμψίας και υστερετικής ενέργειας

Βάσει των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου υπολογίζεται η μέση δυσκαμψία μεταξύ ανακυκλίσεων του Πίνακα 5.7.1, η οποία απεικονίζεται για τη σειρά των εννέα ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.7.4 και 5.7.5, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, σε απόλυτα μεγέθη (Σχήμα 5.7.5) ή σαν πλαστιμότητα (Σχήμα 5.7.4).

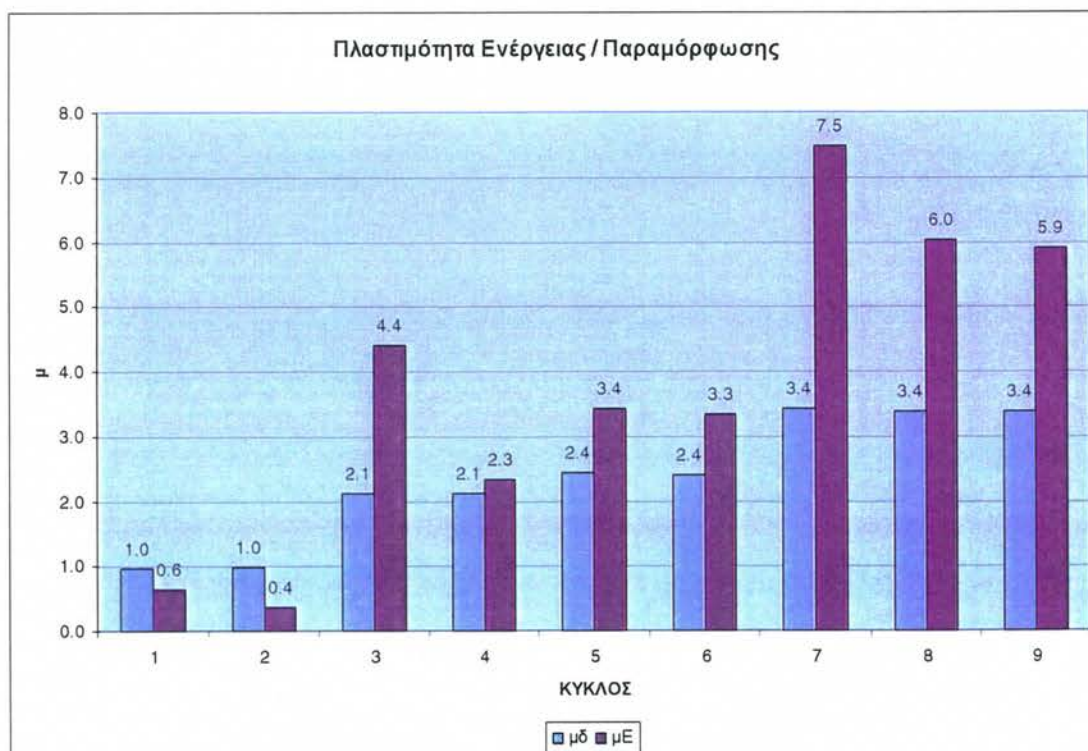


Σχήμα 5.7.5 Κατανομή μέσης δυσκαμψίας ανά κύκλο φόρτισης, δοκιμίου ΥΠ301ΑΠ.

Το δοκίμιο ΥΠ301ΑΠ εμφανίζει στην αρχική μικρού εύρους απόκριση μια αρχική δυσκαμψία περίπου 75% της δυσκαμψίας του παρθένου δοκιμίου ΥΠ301. Στο όριο της ωφέλιμης απόκρισης του δοκιμίου ως την πλαστιμότητα 3,50, κατά τον 7^ο κύκλο, σύμφωνα με το κριτήριο της μείωσης της αντοχής, η μέση δυσκαμψία του στοιχείου έχει μειωθεί πλέον στο 40% της αρχικής δυσκαμψίας στον πρώτο κύκλο του πειράματος, σε επίπεδα περίπου ίδια με την δυσκαμψία του ΥΠ301 σε αντίστοιχη παραμόρφωση και πλαστιμότητα. Χαρακτηριστικό είναι πάντως ότι για οποιοδήποτε εύρος παραμόρφωσης, η πτώση της δυσκαμψίας μεταξύ ανακυκλίσεων υπό σταθερό εύρος, είναι λιγότερο του 20% μεταξύ διαδοχικών κύκλων, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στο ΥΠ301, το οποίο εμφάνισε μεταβολές της δυσκαμψίας (35% πτώση στον 3-4 κύκλο, σε $\mu_\delta = 2,10$, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.7.6 και 5.7.7 και στον Πίνακα 4.8.1).



Σχήμα 5.7.6 Σταδιακή μείωση της απορροφούμενης υστερετικής ενέργειας ως προς της επιβαλλόμενη πλαστιμότητα παραμορφώσεων, δοκίμια ΥΠ301 και ΥΠ301ΑΠ.



Σχήμα 5.7.7 Κατανομή πλαστιμότητας ενέργειας ως προς την πλαστιμότητα παραμορφώσεων δοκιμίου ΥΠ301ΑΠ.

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται και στην απορροφώμενη υστερετική ενέργεια του ενισχυμένου δοκιμίου, η οποία είναι ίση με το εμβαδόν που περικλείεται από τον εκάστοτε υστερετικό βρόχο του κάθε κύκλου, και δίδεται στον Πίνακα 5.7.1. Η υστερετική ενέργεια απεικονίζεται για τη σειρά των εννέα ανακυκλίσεων στα Σχήματα 5.7.6 και 5.7.7, συναρτήσει της μέγιστης μέσης παραμόρφωσης του συγκεκριμένου κύκλου, (Σχήμα 5.7.6) καθώς και σε σύγκριση με την αντίστοιχη πλαστιμότητα παραμορφώσεων σε επαναλαμβανόμενους κύκλους σταθερού εύρους (Σχήμα 5.7.7). Παρατηρείται ότι, όπως και για τη δυσκαμψία, σε όλη τη διάρκεια του πειράματος το δοκίμιο μειώνει στο λιγότερο 80% της απορροφώμενης εκάστοτε ενέργειας μεταξύ τριών το πολύ κύκλων υπό σταθερό εύρος ανακύκλισης (κύκλοι 7-9), ενώ, σε μέγιστη πλαστιμότητα παραμόρφωσης ίση με 3,40, απορροφά στον πρώτο κύκλο 11-πλάσια ενέργεια της διαρροής του.

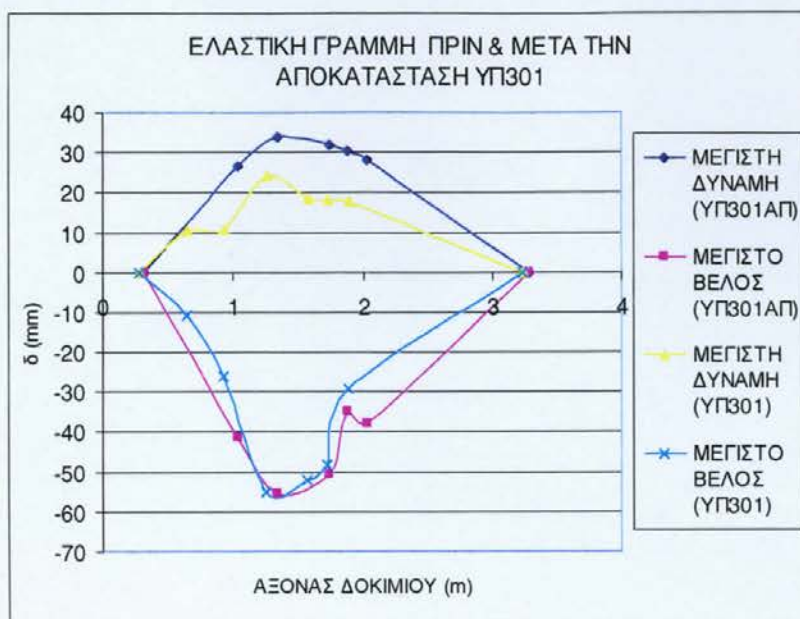
5.7.5 Καταγραφές LVDT στην εγκάρσια διεύθυνση



Σχήμα 5.7.8 Ιστορία της εγκάρσιας παραμόρφωσης σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 11,12,13 και 14.

Οι καταγραφές των εγκάρσιων LVDT του πειράματος δίνονται στο Σχήμα 5.7.8 (σημειώνεται ότι το καταγραφικό 12 δεν κατέγραψε ομαλά μετά τον 4ο κύκλο). Στο Σχήμα 5.7.9 συγκρίνονται οι εγκάρσιες παραμορφώσεις των δοκιμίων ΥΠ301 και ΥΠ301ΑΠ, όπως αυτές συνάγονται από τις στιγμιαίες

καταγραφές των εγκάρσιων LVDT στα σημεία της μέγιστης δύναμης και της μέγιστης εγκάρσιας παραμόρφωσης που καταγράφηκε, στο πείραμα. Στον



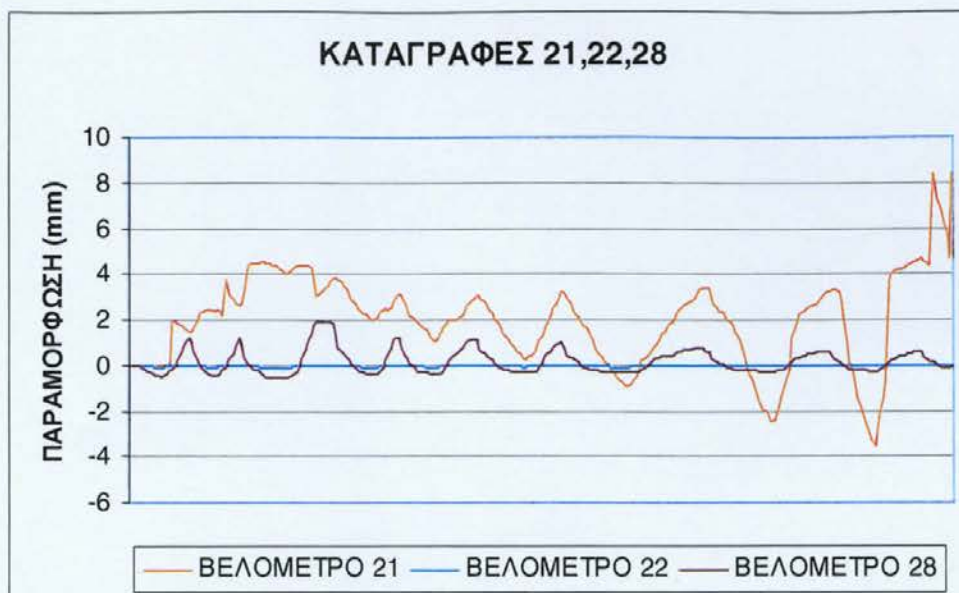
Σχήμα 5.7.9
Σύγκριση της παραμόρφωσης του δοκιμίου κατά την κατάγγραφή της μέγιστης δύναμης P_{max} και της μέγιστης μετατόπισης δ_{max} , πριν και μετά την ενίσχυση

οριζόντιο άξονα του Σχήματος απεικονίζεται ο διαμήκης άξονας του δοκιμίου με αφετηρία τη στήριξη.

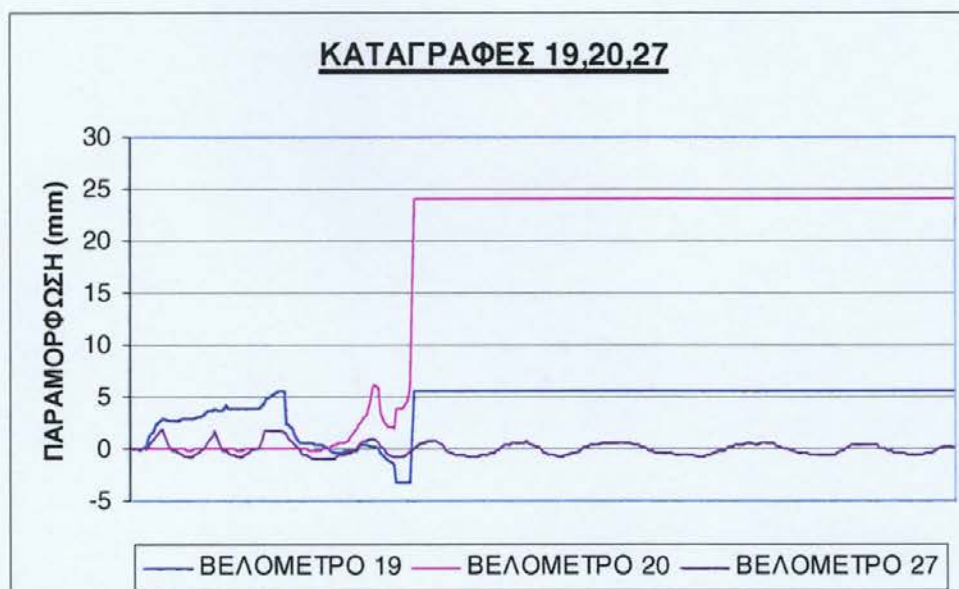
Λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία μέγιστων αντοχών που καταγράφηκαν (1/0,90), και τα παραμορφωμένα σχήματα στη φάση της P_{max} , επαληθεύεται και στο παραμορφωμένο σχήμα η σημαντική μείωση της αρχικής δυσκαμψίας καθώς και μία απόκλιση του παραμορφωμένου σχήματος του δοκιμίου στις δύο φάσεις καταπόνησής του, πριν και μετά την ενίσχυση, ιδίως μετά από την μέγιστη αντοχή. Στη μέγιστη παραμόρφωση, το ανελαστικά παραμορφωμένο τμήμα του στύλου εμφανίζει παρόμοια παραμορφωσιμότητα πριν και μετά από την αποκατάσταση, αλλά με μικρότερο ενεργό πλάτος στην ΑΠοκατεστημένη φάση.

5.7.6 Καταγραφές LVDT κατά την διαμήκη διεύθυνση

Οι καταγραφές των LVDT στην κρίσιμη περιοχή κατά τη διαμήκη διεύθυνση δείχνονται ανά ομάδες στα Σχήματα 5.7.10 και 5.7.11. Θεωρώντας την ακριβή θέση των βελομέτρων είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι παράγωγες πλαστικές στροφές καθώς και οι μέσες καμπυλότητες του δοκιμίου, στο μήκος αναφοράς της μέτρησης, οι οποίες δείχνονται στο Σχήμα 5.7.12 για τα τρία



Σχήμα 5.7.10 Κατακόρυφη παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 21,22 και 28.

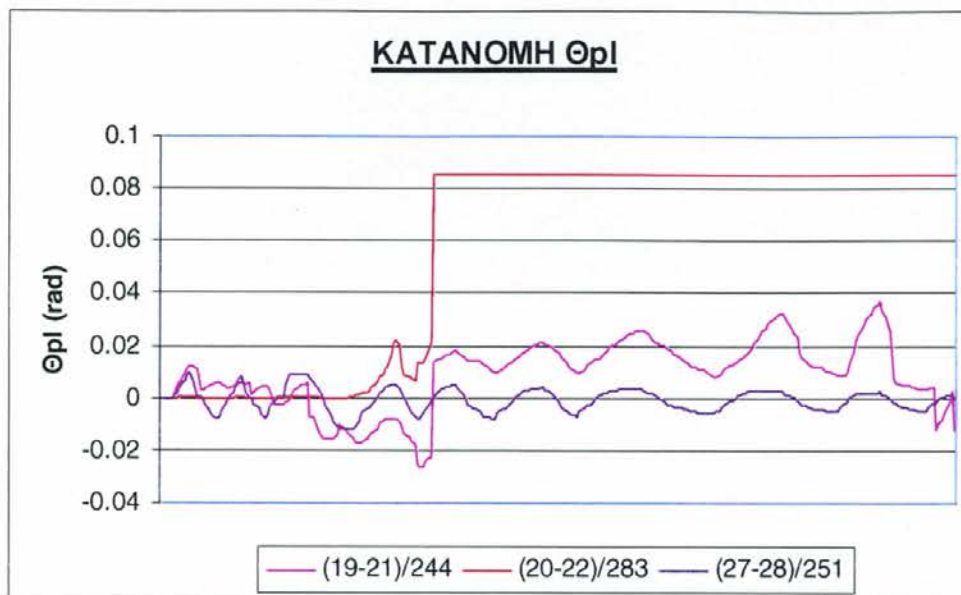


Σχήμα 5.7.11 Κατακόρυφη παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή σύμφωνα με τις καταγραφές των βελομέτρων 19, 20 και 27.

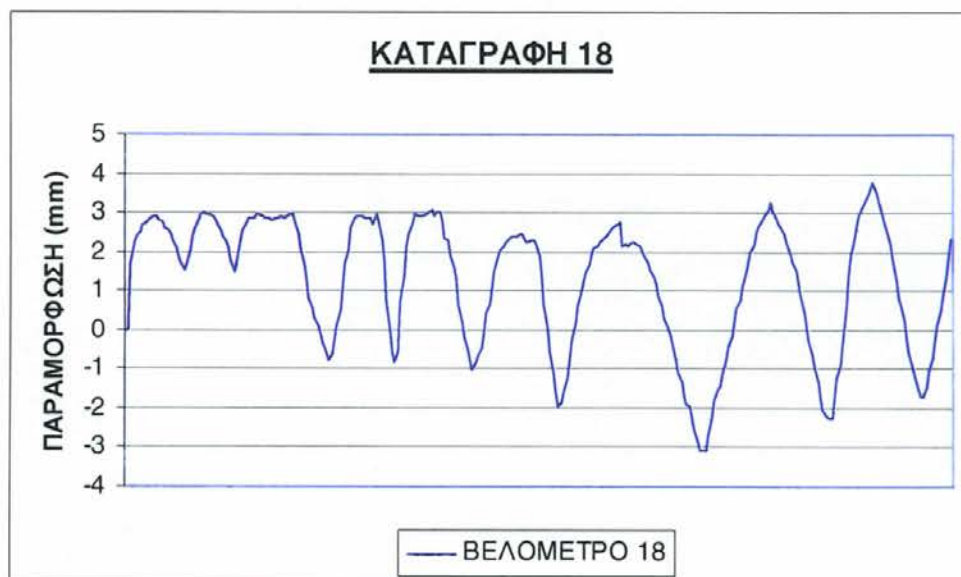
διαδοχικά τμήματα της κρίσιμης ζώνης, αντίστοιχα, μετά από διόρθωση στον πρώτο κύκλο, στη ζώνη 1, λόγω της αρχικής ολίσθησης της καταγραφής 22.

Οι καταγραφές είναι κατανεμημένες σε μέση περίπου απόσταση 150mm μεταξύ τους. Λόγω της αστοχίας της επικάλυψης του σκυροδέματος στην περιοχή που ήταν στερεωμένα τα των βελομέτρα 19 και 20 κατά τον 4^ο κύκλο, δεν κατέστη δυνατή η μέτρηση της πλαστικής στρώσης στο σύνολο του πειράματος. Η ανισοκατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στα τρία

τμήματα του δοκιμίου όμως είναι εμφανής, στη διάρκεια της καταγραφής, στο Σχήμα 5.7.12, με μέγιστη καταγραφή τα 0,026 rad σε παραμόρφωση 33,8mm.



Σχήμα 5.7.12 Κατανομή απαιτήσεων πλαστικής στρώσης κατά μήκος της κρίσιμης ζώνης, βάσει των καταγραφών 19 ως 24.



Σχήμα 5.7.13 Πειραματική καταγραφή αξονικού LVDT στη βάση του δοκιμίου.

Η διαμήκης καταγραφή στον άξονα, στη βάση του δοκιμίου, δίνεται στο Σχήμα 5.7.13 και ακολουθεί την επιβαλλόμενη στρώση του δοκιμίου ως προς το σημείο εφαρμογής του αξονικού φορτίου, με μέγιστη και ελάχιστη καταγραφή ίσες προς 3 και -3 mm αντίστοιχα.