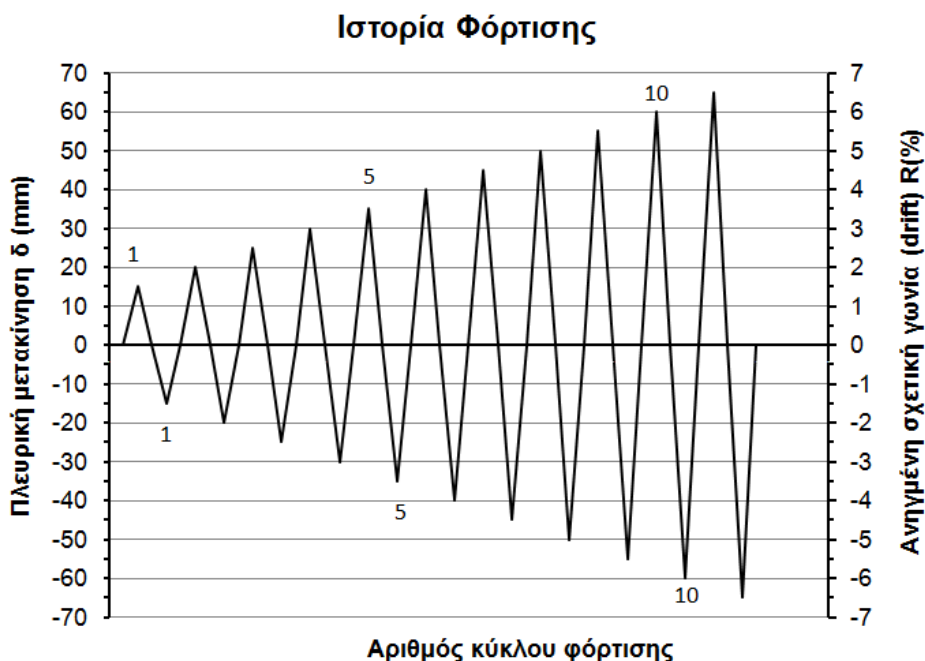


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Ιστορία Φόρτισης των Δοκιμίων Υποστυλωμάτων

Όλα τα δομικά υποσύνολα υποστυλωμάτων που εξετάστηκαν στο παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα υποβλήθηκαν σε εναλλασσόμενη, κυκλική πλευρική φόρτιση διαδοχικά αυξανόμενου εύρους μετατοπίσεων κατά 50mm σε κάθε κύκλο φόρτισης. Παράλληλα με την επιβολή του πλευρικού σεισμικού φορτίου στα δοκίμια ασκούσαν και σταθερό αξονικό φορτίο 150 kN. Η ιστορία της φόρτισης φαίνεται στο σχήμα Σχ.15. Στην πλειοψηφία τους τα υποστυλώματα υποβλήθηκαν σε ένδεκα κύκλους πλευρικής φόρτισης κατά τη διάρκεια των οποίων έγιναν μετρήσεις απαραίτητες για τη χάραξη των βρόχων υστερητικής απόκρισης των στύλων, τον έλεγχο των μηχανικών αντισεισμικών τους ιδιοτήτων (αντοχή, δυσκαμψία, ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) και την κατασκευή των αντίστοιχων διαγραμμάτων, καθώς και μετρήσεις για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων των ράβδων σπλισμού των δοκιμίων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται εις βάθος ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από τη σεισμική καταπόνηση των δοκιμίων και γίνεται σύγκριση της σεισμικής απόκρισης των υποστυλωμάτων και σχολιασμός της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια εικόνων αστοχίας των δοκιμίων και διαγραμμάτων αντοχής, δυσκαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.



Σχ.15 : Ιστορία φόρτισης δοκιμίων

Κύκλος φόρτισης	ΔL (mm)	Drift : $(\Delta L/L)$ % $L=980$ mm
1	15	1.53
2	20	2.04
3	25	2.55
4	30	3.06
5	35	3.57
6	40	4.08
7	45	4.59
8	50	5.10
9	55	5.61
10	60	6.12
11	65	6.63

Πίνακας Π.3.1.α

3.2 Απόκριση των δοκιμών σε σεισμό

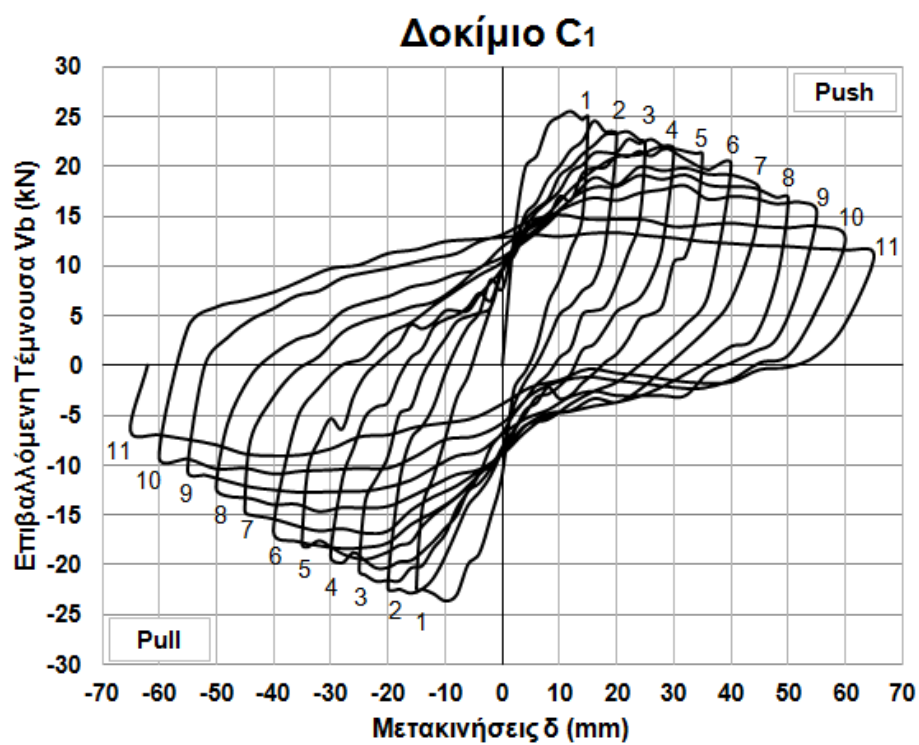
3.2.1 Σειρά δοκιμών Ι:

3.2.1.1 Δοκίμιο C_1

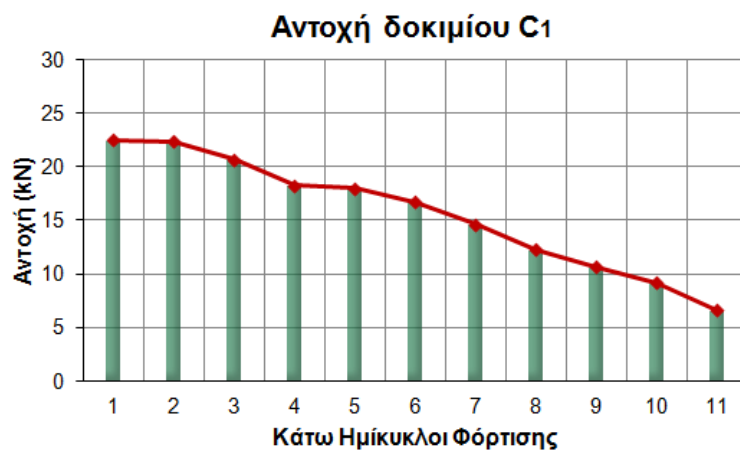
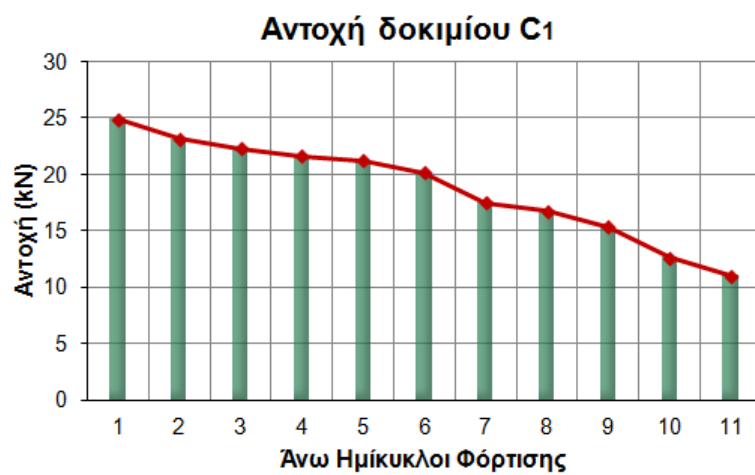
Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 §2.3 το δοκίμιο C_1 με τους συνεχείς διαμήκεις οπλισμούς υποστυλώματος αποτελεί δοκίμιο – στόχο, η συμπεριφορά του οποίου σε σεισμό είναι ιδανική για υποστύλωμα παλαιάς κατασκευής εξαιτίας της συνέχειας του διαμήκους οπλισμού και της απουσίας παραθέσεων. Το C_1 υποβλήθηκε σε ένδεκα (11) κύκλους εναλλασσόμενης κυκλικής φόρτισης. Η ιστορία φόρτισης του δοκιμίου φαίνεται στο σχήμα Σχ.15. Από τους βρόχους υστερητικής απόκρισης του δοκιμίου προκύπτει ότι το C_1 παρουσίασε ιδιαίτερα πλάστιμη συμπεριφορά με ομαλή και μικρή πτώση της αντοχής και της δυσκαμψίας του από κύκλο σε κύκλο της πλευρικής φόρτισης και αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας με την αύξηση των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων. Το μεγάλο εμβαδόν των βρόχων υστέρησης του δοκιμίου και η απουσία στενώσεων (pinching) γύρω από την αρχή των αξόνων ακόμα και στους τελευταίους κύκλους φόρτισης φανερώνουν την ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά του στύλου σε σεισμό. Κατά τους πρώτους κύκλους σχηματίστηκαν τριχοειδή καμπτικά ρήγματα κοντά στη βάση του υποστυλώματος τα οποία σταδιακά διευρύνθηκαν με την αύξηση της επιβαλλόμενης πλευρικής μετατόπισης και οδήγησαν στην απώλεια της επικάλυψης των οπλισμών. Όπως φαίνεται από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων των οπλισμών (Σχ.22) η αύξηση των μετατοπίσεων του υποστυλώματος προκάλεσε εντονότατη παραμόρφωση των καλά αγκυρωμένων διαμήκων ράβδων οπλισμού του στύλου, σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη που αντιστοιχεί στη διαρροή του λείου χάλυβα S220 ($f_y=374,33$ MPa, $\epsilon_y=1.87\%$). Για τιμές πλευρικής μετατόπισης μεγαλύτερες των 45mm παρουσιάστηκε αποδιοργάνωση των θλιβομένων ζωνών του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα σε

ακραίες τιμές ανηγμένης σχετικής γωνίας στροφής (drift) άνω του 5,10% να προκληθεί σταδιακά, λόγω και της αραιής διάταξης των συνδετήρων, λυγισμός των διαμήκων οπλισμών του υποστυλώματος. Η εικόνα της αστοχίας του δοκιμίου φαίνεται στο σχήμα Σχ.20. Από το διάγραμμα επιβαλλόμενης τέμνουσας V_b – αντίστοιχης μετατόπισης δ (Σχ.16) γίνεται φανερό πως μετά τον τέταρτο κύκλο φόρτισης το εμβαδόν των βρόχων του δοκιμίου C_1 αυξάνεται σημαντικά. Η είσοδος του χάλυβα στην πλαστική περιοχή παραμορφώσεων και η καλή αγκύρωσή του συντελούν στην απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η εμφάνιση οριζόντιων κλάδων στους βρόχους του C_1 από τον έβδομο κύκλο φόρτισης και μετά οφείλεται στο κλείσιμο των καμπτικών ρωγμών στη βάση του στύλου, σε μικροολισθήσεις των οπλισμών στη θέση της πλαστικής άρθρωσης καθώς και στον έντονο λυγισμό των διαμήκων ράβδων του υποστυλώματος που φαίνεται στη φωτογραφία του σχήματος (Σχ.20). Ο λυγισμός των ράβδων συνέβη για τιμές σχετικής ανηγμένης γωνίας άνω του 5,10% οπότε και παρατηρείται πτώση της αντοχής του δοκιμίου με εντονότερο ρυθμό. Συνολικά, στους δέκα κύκλους φόρτισης η αντοχή του δοκιμίου παραμένει υψηλότερη από το 60% και το 46% της αρχικής τιμής αντοχής στους άνω και κάτω ημίκυκλους αντίστοιχα. Η ομαλή πτώση της αντοχής του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης σεισμικής επιπόνησης στην οποία υποβλήθηκε φαίνεται στα διαγράμματα του σχήματος Σχ.17. Η μεγαλύτερη πτώση της δυσκαμψίας του δοκιμίου παρουσιάζεται από τον πρώτο στον δεύτερο κύκλο φόρτισης οπότε περιορίζεται κατά 27,68%. Από τον τρίτο κύκλο και μετά η δυσκαμψία του δοκιμίου μειώνεται με πιο ομαλό ρυθμό για να περιοριστεί στο 13,25% της αρχικής της τιμής κατά την έναρξη του πειράματος. Το διάγραμμα μεταβολής της δυσκαμψίας του δοκιμίου καθώς και ο τύπος υπολογισμού της παριστάνονται στο σχήμα (Σχ.18). Στο ραβδόγραμμα του σχήματος 19 δίνονται οι τιμές της ενέργειας που απορροφά το υποστύλωμα C_1 σε κάθε κύκλο φόρτισης. Παρατηρείται συνεχής αύξηση της ποσότητας ενέργειας που απορροφάται από το δοκίμιο με την αύξηση των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων καθώς οι βρόχοι έχουν μεγάλη επιφάνεια μέχρι και τον τελευταίο κύκλο φόρτισης. Η πλάστιμη συμπεριφορά που παρουσιάζει ο στύλος οφείλεται στην κατασκευή του με συνεχείς διαμήκεις οπλισμούς χωρίς παραθέσεις, οι οποίοι, λόγω της καλής αγκύρωσής, τους είναι σε θέση να αναπτύξουν σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις και να εξασφαλίσουν την απορρόφηση σημαντικών ποσών ενέργειας εντός της πλαστικής άρθρωσης.

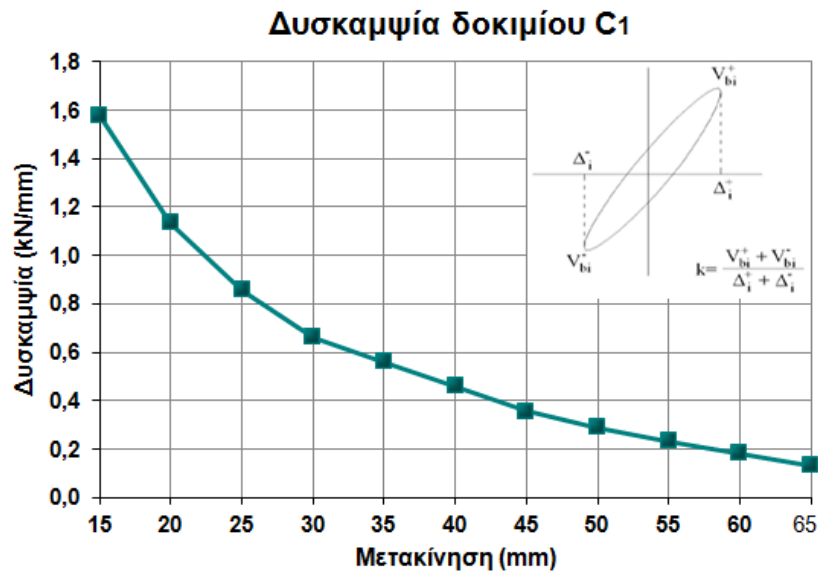
Στις διαμήκεις ράβδους οπλισμού του υποστυλώματος είχαν τοποθετηθεί ταινίες για τη μέτρηση των παραμορφώσεων του χάλυβα κατά την πλευρική σεισμική φόρτιση. Η θέση κάθε ταινίας φαίνεται στα σχέδια του σχήματος 21 καθώς και δίπλα από το αντίστοιχο διάγραμμα παραμόρφωσης στο σχήμα 22. Η τάση διαρροής του λείου χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στο υποστύλωμα υπολογίστηκε από πειράματα εφελκυσμού τριών δοκιμίων χάλυβα στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών του Α.Π.Θ. Προέκυψε $f_y=374,33\text{MPa}$ και επομένως η παραμόρφωση διαρροής ϵ_y προκύπτει ίση με 1,87‰. Από τα διαγράμματα των ταινιών (strain gages) είναι φανερό πως οι τιμές της παραμόρφωσης των ράβδων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα φθάνοντας μέχρι και 4‰. Οι μέγιστες τιμές της παραμόρφωσης των ράβδων (εφελκυστικής και θλιπτικής) παρουσιάζονται στα διαγράμματα του σχήματος Σχ.23. Η αύξηση των παραμορφώσεων των ράβδων, στις οποίες είναι τοποθετημένες οι ταινίες μέτρησης (strain gages), δείχνει έλλειψη ολισθήσεων, Ehsani and Wight (1985).



Σχ.16 : Βρόχοι υστερητικής απόκρισης του δοκιμίου C₁



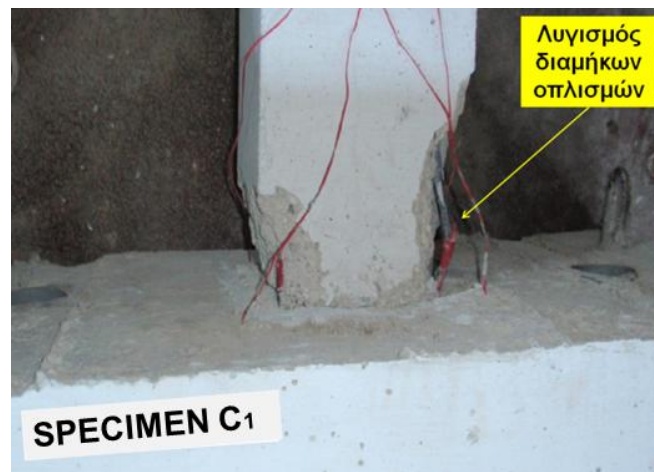
Σχ.17 : Διαγράμματα μεταβολής αντοχής του δοκιμίου C₁. Άνω και κάτω ημίκυκλοι φόρτισης



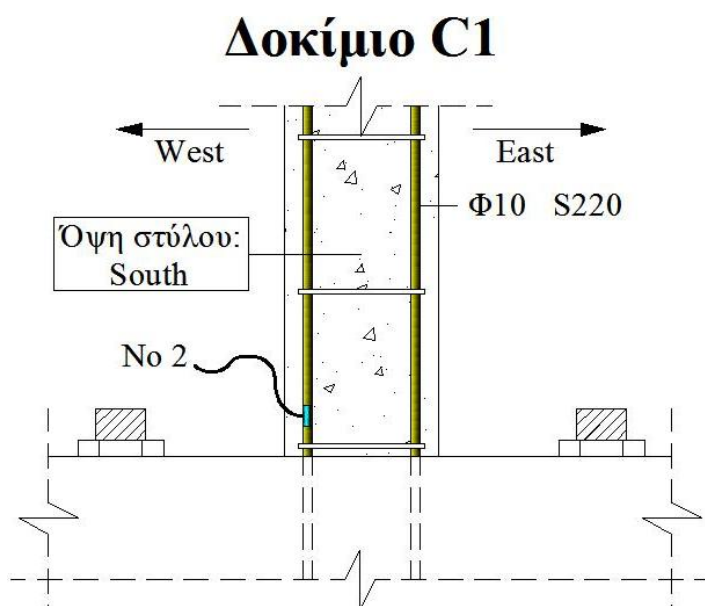
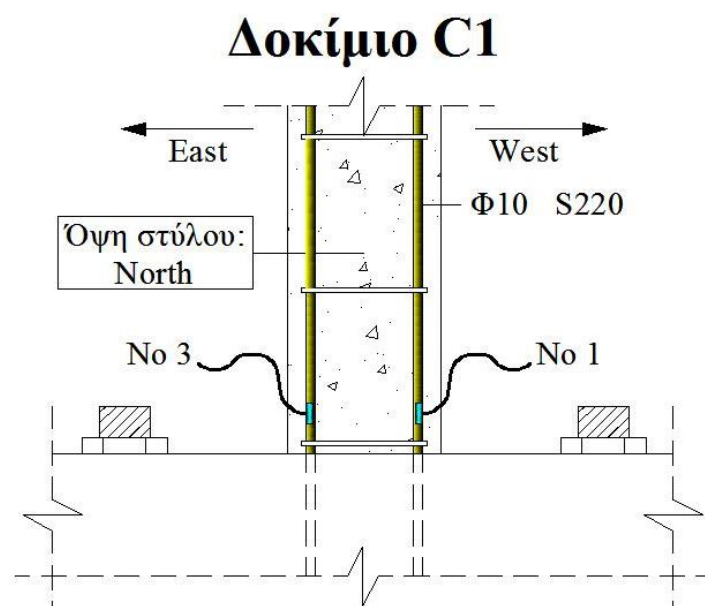
Σχ.18 : Διάγραμμα μεταβολής της δυσκαμψίας του δοκιμίου C₁



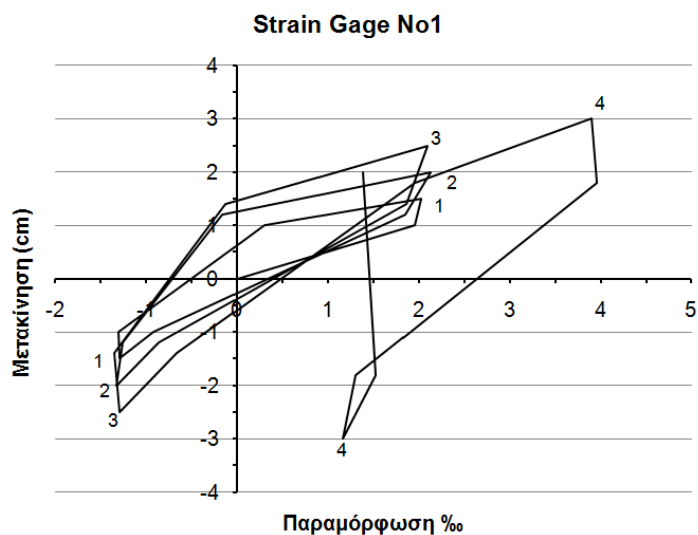
Σχ.19 : Απορρόφηση ενέργειας κατά τη σεισμική φόρτιση του δοκιμίου C₁



Σχ.20 : Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου C₁

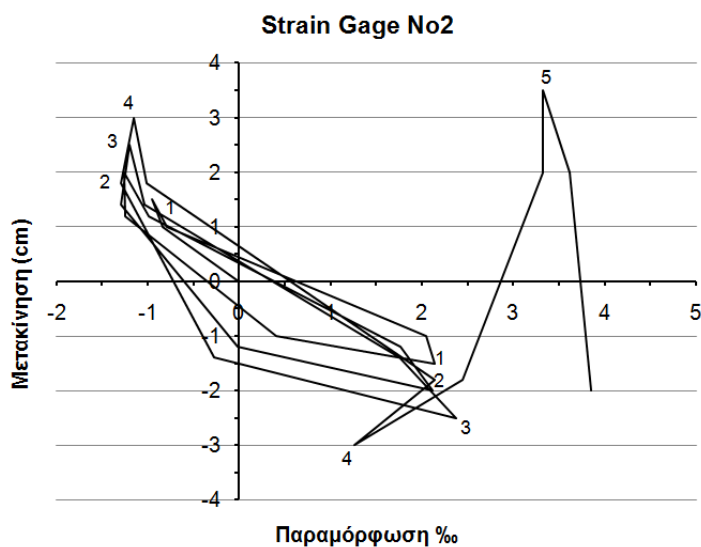


Σχ.21 : Θέσεις όπου τοποθετήθηκαν οι ταινίες μέτρησης των παραμορφώσεων των ράβδων στο δοκίμιο C₁



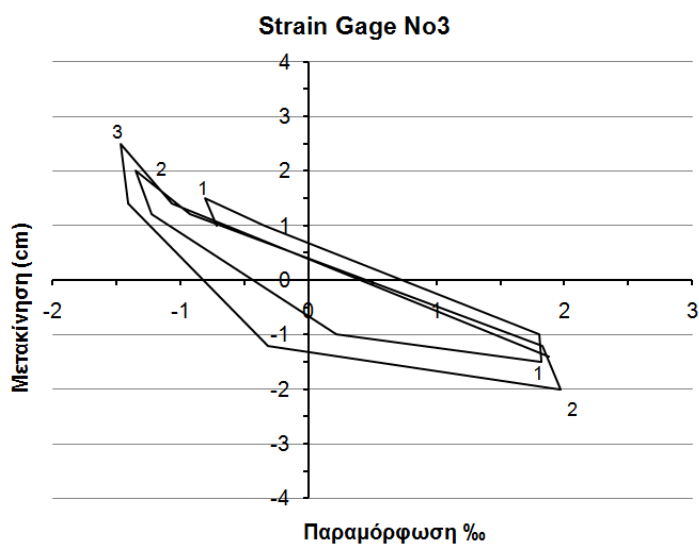
Strain Gage No1:

Τοποθετημένο επί της
διαμήκου λείας
ράβδου στην πλευρά
North-West του στύλου



Strain Gage No2:

Τοποθετημένο επί της
διαμήκου λείας
ράβδου στην πλευρά
South-West του στύλου

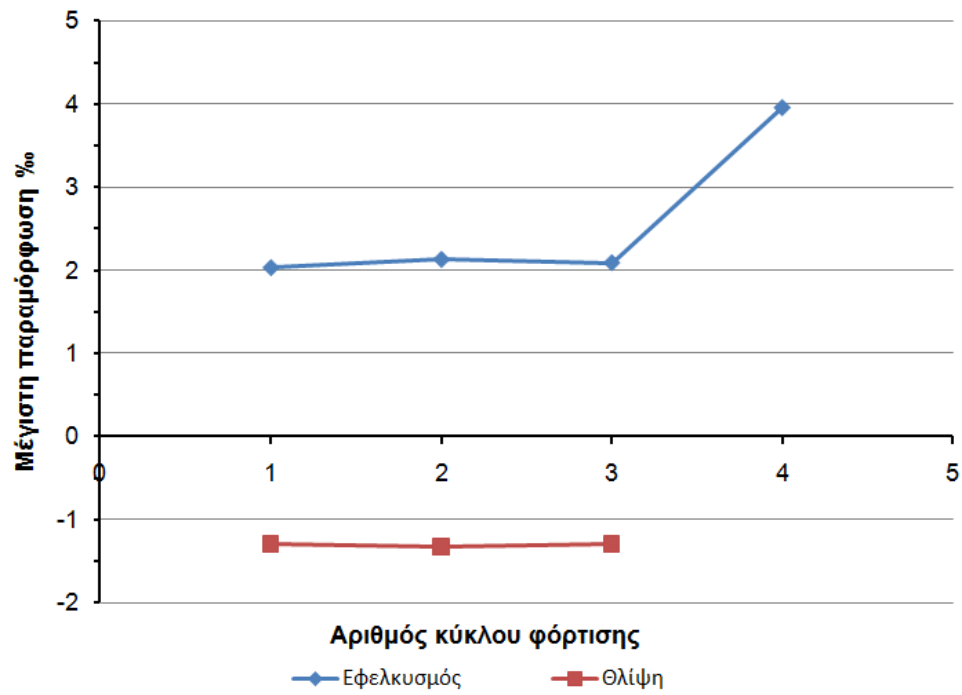


Strain Gage No3:

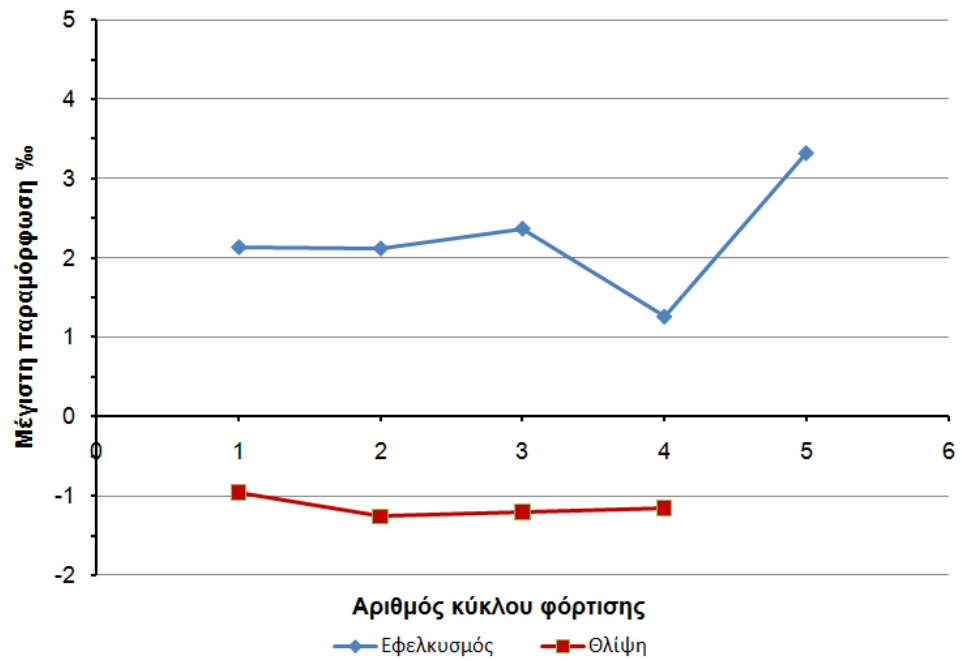
Τοποθετημένο επί της
διαμήκου λείας
ράβδου στην πλευρά
North-East του στύλου

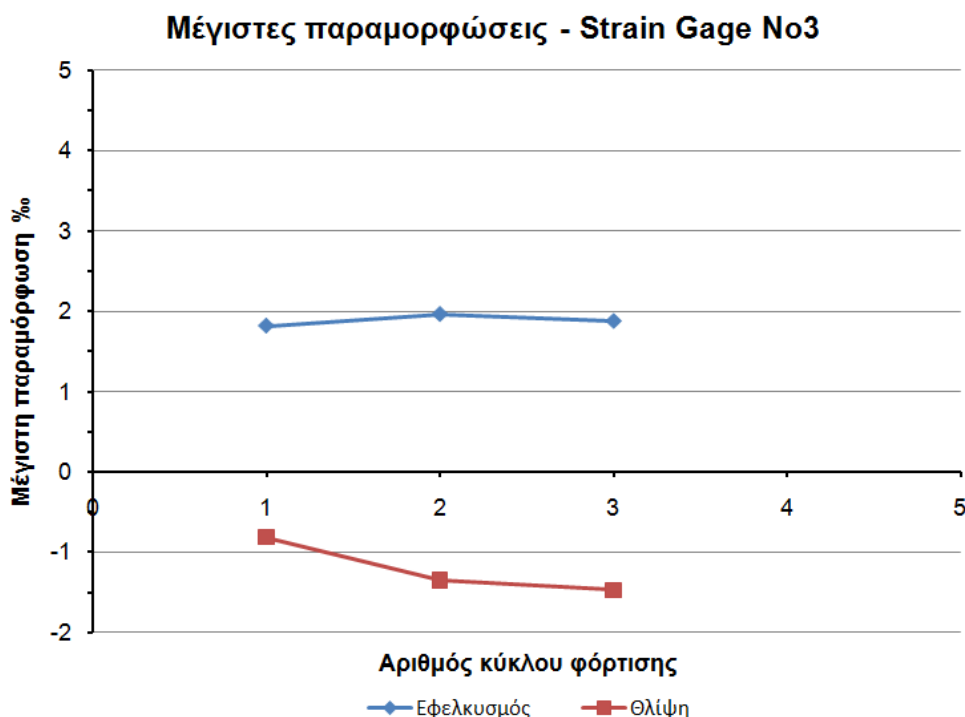
Σχ.22 : Παραμορφώσεις οπλισμών του δοκιμίου C₁

Μέγιστες παραμορφώσεις - Strain Gage No1



Μέγιστες παραμορφώσεις - Strain Gage No2





Σχ.23 : Μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων οπλισμών του δοκιμίου C₁

3.2.1.2 Δοκίμιο S₁L₁

Το δομικό υποσύστημα υποστυλώματος S₁L₁ διέθετε διαμήκεις ράβδους σε παράθεση στη βάση του στύλου με μήκος παράθεσης 20Φ=200mm, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (Πίνακας Π.2.1.α). Με την κατασκευή του χαλύβδινου μανδύα πάχους 1mm ο στύλος δέχθηκε περίσφιγξη προκειμένου να βελτιωθούν οι συνθήκες πρόσφυσης και μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ των παρατιθέμενων ράβδων και να αποφευχθεί η πρόωρη απώλεια της επικάλυψης των οπλισμών που θα οδηγούσε σε δραματική πτώση της αντοχής, της δυσκαμψίας και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας από τους πρώτους κύκλους της σεισμικής φόρτισης. Το πάχος του ελάσματος υπολογίστηκε βάσει της σχέσεως Σ6.14 που προτείνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ για τον υπολογισμό της απαιτούμενης περίσφιγξης όταν αυτή εφαρμόζεται μέσω ΙΟΠ ή λεπτών, κλειστών χαλύβδινων μανδυνών.

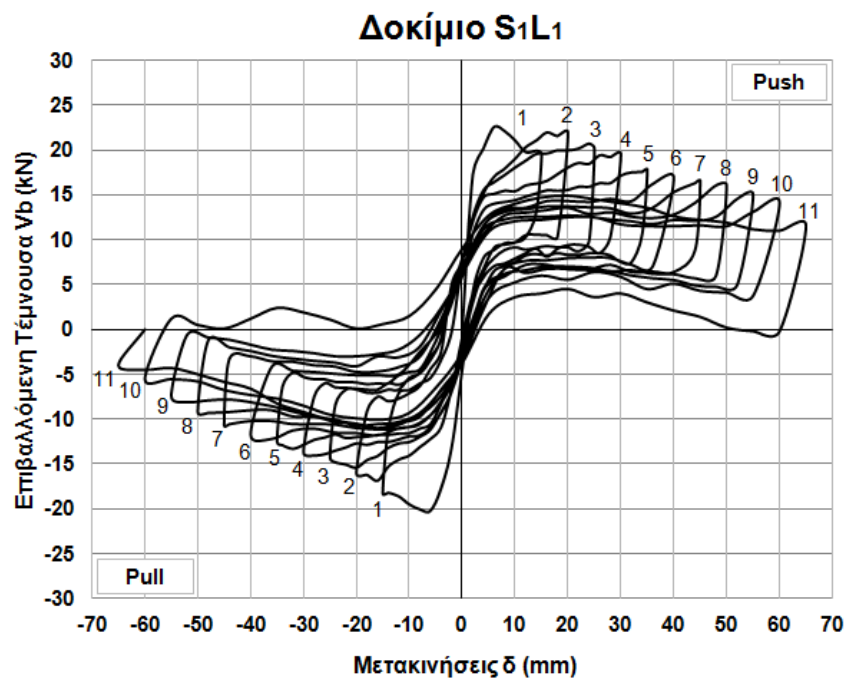
$$\frac{A_j}{s_w d_s} = \frac{t_j}{d_s} = 1.3 \left[\left(\frac{f_{sy}}{f_c} \right) / \left(2.2 \frac{s_d}{s_u} + 0.25 \right) \left(\frac{l_s}{d_s} \right) - 0.2 \left(\frac{c}{d_s} + 1.5 \right) \right]^2 / \left[\left(\frac{w_d}{d_s} \right) \left(\frac{E_j}{f_c} \right) \left(\frac{f_{cm}}{f_c} \right) \right]$$

Οι διάφορες παράμετροι που υπεισέρχονται στην ανωτέρω σχέση εξηγούνται στο Κεφάλαιο 2 §2.5.1. Μετά την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων του S₁L₁ πραγματοποιείται σύγκριση της σεισμικής απόκρισής του με το δοκίμιο – στόχο της Σειράς Δοκιμίων Ι που διαθέτει συνεχείς οπλισμούς προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης. Το δοκίμιο S₁L₁ υποβλήθηκε σε ένδεκα (11) κύκλους πλευρικής φόρτισης με σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο 150 kN. Η ιστορία της φόρτισής του φαίνεται στο σχήμα Σχ.15. Η μορφή των υστερητικών βρόχων φορτίου – μετατόπισης χαρακτηρίζεται από εντονότερες ολισθήσεις μετά τον πέμπτο

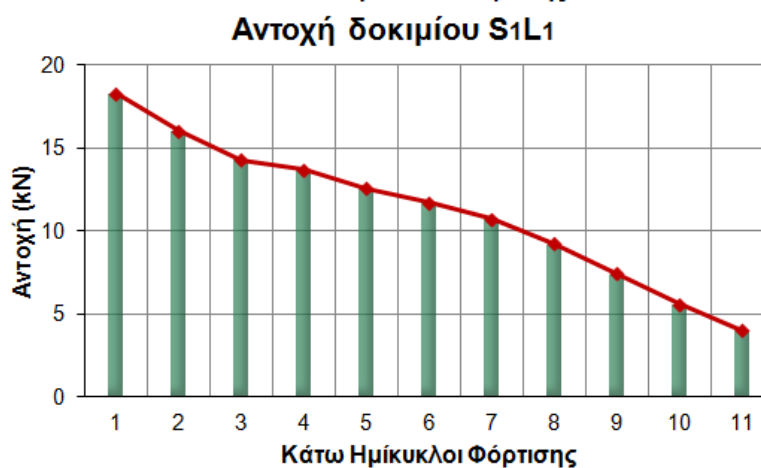
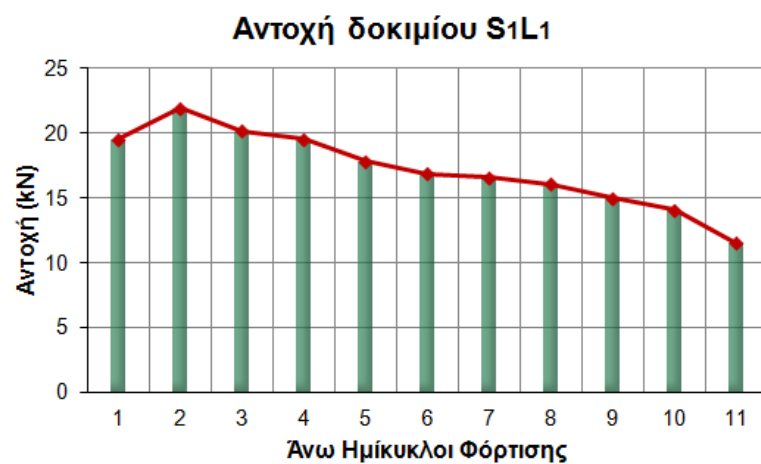
κύκλο φόρτισης (μετατόπιση 35mm) ενώ είναι σημαντική και η επιρροή του φαινομένου P-δ λόγω μεγάλης απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου, ειδικά στους ακραίους βρόχους μεγάλων μετατοπίσεων (Σχ.24). Η εμφάνιση φαινομένου P-δ οπτικά γίνεται αντιληπτή από την ιδιαίτερη μορφή που παρουσιάζουν οι βρόχοι, που στην περίπτωση μεγάλης μετατόπισης δίνουν την εικόνα “αυτιού”. Στη διεθνή βιβλιογραφία απαντώνται τέτοιες μορφές υστερητικών βρόχων στις εργασίες των Bertero and Popon (1977), Bertero (1979), Soleimani et al. (1979), Tsonos (2004), Uzumeri (1977). Η μορφή των βρόχων του S_1L_1 δείχνει και το μηχανισμό αστοχίας του δοκιμίου, που κυριαρχείται από τις εντονότερες ολισθήσεις των διαμήκων ράβδων οπλισμού του στύλου στις θέσεις της παράθεσης. Η επιρροή του φαινομένου P-δ στο στύλο S_1L_1 είναι πολύ ισχυρή. Με την επιβολή της πλευρικής μετατόπισης στο υποστύλωμα σχηματίστηκε από τον πρώτο κύκλο φόρτισης καμπτικό ρήγμα στη θέση πάκτωσης του υποστυλώματος στο πέδιλο θεμελίωσης. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετατόπισης προκάλεσε σταδιακή διεύρυνση του ρήγματος αυτού καθώς και προοδευτική ολίσθηση των διαμήκων ράβδων οπλισμού του στύλου στη θέση της πλαστικής άρθρωσης. Λόγω των ανωτέρω δύο αιτίων η αντοχή του δοκιμίου σε κάθε κύκλο εμφανίζεται μειωμένη στην περιοχή γύρω από την αρχή των αξόνων, γεγονός που δείχνει έντονες ολισθήσεις και κλείσιμο ρωγμών ενώ, λόγω της περισφιγξης με τον μεταλλικό μανδύα, οι ράβδοι επιτυγχάνουν μεν να αυξήσουν ελαφρά την αντοχή των βρόχων για τις μέγιστες τιμές παραμόρφωσης χωρίς όμως να την αυξάνουν από κύκλο σε κύκλο εν γένει και χωρίς να επιτευχθεί η διαρροή τους, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις παραμορφώσεων των οπλισμών που ελήφθησαν (Σχ.30). Οι θέσεις των ταινιών μέτρησης των παραμορφώσεων φαίνονται στα σχέδια του σχήματος 29.

Η αντοχή του δοκιμίου S_1L_1 , αρχικά ελαφρώς χαμηλότερη από εκείνη του στύλου C_1 , παρουσιάζει πτώση που είναι περισσότερο έντονη στους κάτω ημίκυκλους φόρτισης, όπως φαίνεται στα διαγράμματα του σχήματος 25. Το διάγραμμα δυσκαμψίας και ο τύπος υπολογισμού της φαίνονται στο σχήμα 26. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η δυσκαμψία του στύλου μειώνεται κατά 24,72% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο φόρτισης και περιορίζεται στο 7% της αρχικής της τιμής στο τέλος του πειράματος. Η μικρή επιφάνεια των βρόχων, που όπως έχει ήδη περιγραφεί παρουσιάζουν σημαντικές στενώσεις (pinching) γύρω από τους άξονες και οριζόντιους κλάδους λόγω ολισθήσεων, φανερώνει τη χαμηλή απορρόφηση ενέργειας στο υποστύλωμα (Σχ.27). Ο ρυθμός αύξησης της ενέργειας που αποσβένεται στο στύλο σε κάθε επόμενο κύκλο φόρτισης είναι μικρός. Οι έντονες ολισθήσεις των λείων ράβδων οπλισμού έχουν ως συνέπεια τη μη αξιοποίηση του χάλυβα που παραμορφώνεται ελάχιστα, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα παραμόρφωσης οπλισμού στα σχήματα Σχ.30 και Σχ.31. Μέγιστες παραμορφώσεις της τάξεως του 0,6‰ είναι κατά πολύ μικρότερες από την παραμόρφωση διαρροής του λείου χάλυβα (1,87‰) και αποδεικνύουν ότι η αστοχία του υποστυλώματος προκλήθηκε λόγω των έντονων ολισθήσεων των παρατιθέμενων ράβδων μετά το σχηματισμό του καμπτικού ρήγματος στη βάση του. Άλλωστε η διατήρηση ή η μείωση των τιμών των παραμορφώσεων δείχνουν την ύπαρξη ολισθήσεων των ράβδων στις οποίες είναι τοποθετημένες οι ταινίες μέτρησης (strain gages), Ehsani and Wight (1985). Το δοκίμιο S_1L_1 παρουσιάζει πτωχή υστερητική απόκριση και, όπως προκύπτει από τη σύγκριση με το C_1 (Κεφάλαιο 4 §4.2), η απόκρισή του απέχει σημαντικά από τη συμπεριφορά σε σεισμό του δοκιμίου – στόχου. Στο τέλος του πειράματος το

υποστύλωμα παρουσιάζει σημαντική παραμένουσα παραμόρφωση (60mm), η οποία φαίνεται και στο διάγραμμα των βρόχων και στην τελική εικόνα αστοχίας του δοκιμίου στις φωτογραφίες του σχήματος 28.

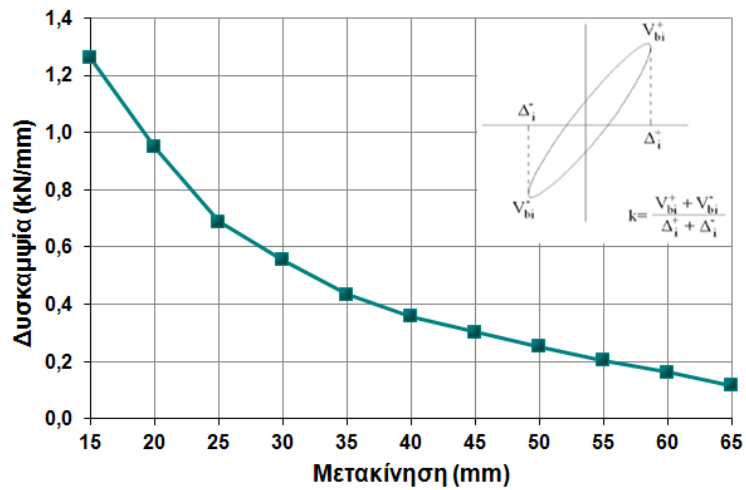


Σχ.24 : Βρόχοι υστερητικής απόκρισης του δοκιμίου S₁L₁



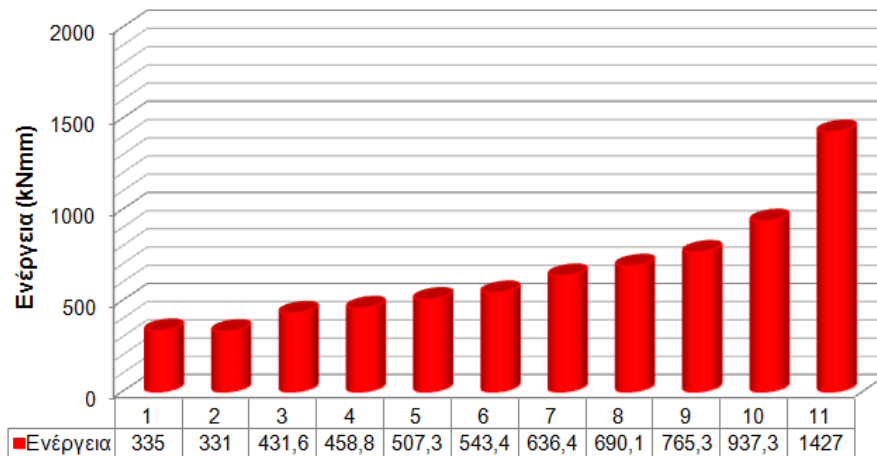
Σχ.25 : Διαγράμματα μεταβολής αντοχής του δοκιμίου S₁L₁. Άνω και κάτω ημίκυκλοι φόρτισης

Δυσκαμψία δοκιμίου S1L1

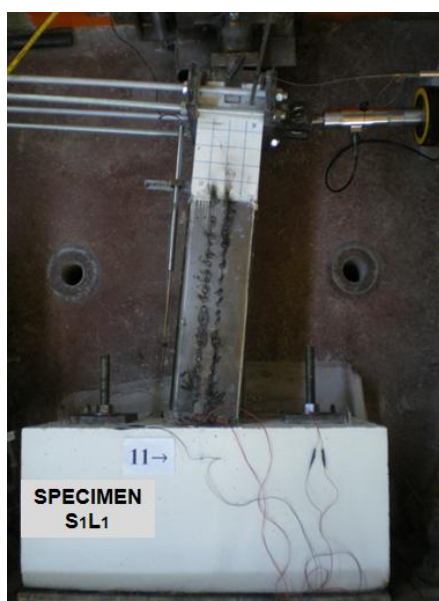


Σχ.26 : Διάγραμμα μεταβολής της δυσκαμψίας του δοκιμίου S₁L₁

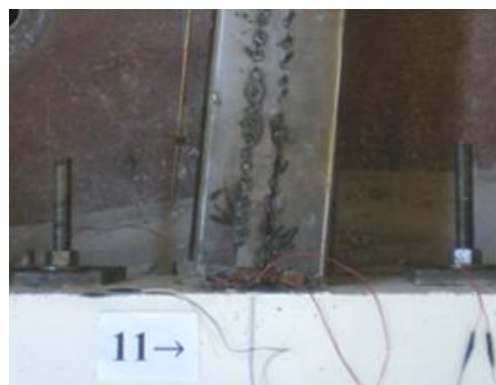
Απορρόφηση ενέργειας ανά κύκλο φόρτισης - Δοκίμιο S1L1



Σχ.27 : Απορρόφηση ενέργειας κατά τη σεισμική φόρτιση του δοκιμίου S₁L₁



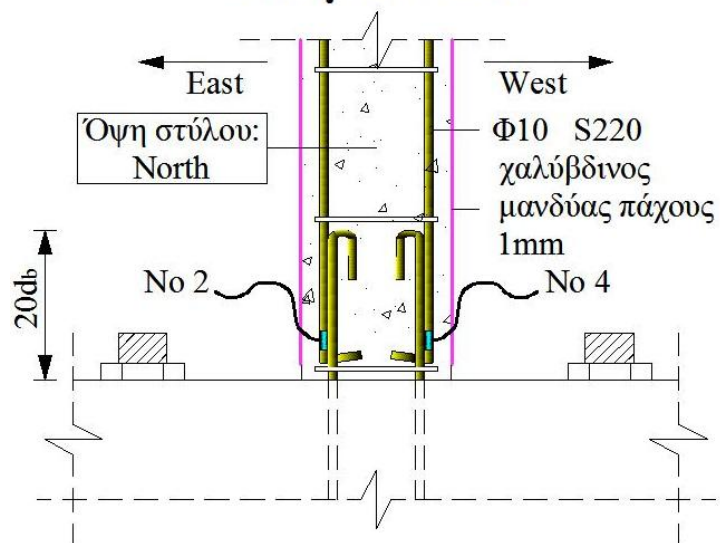
(α)



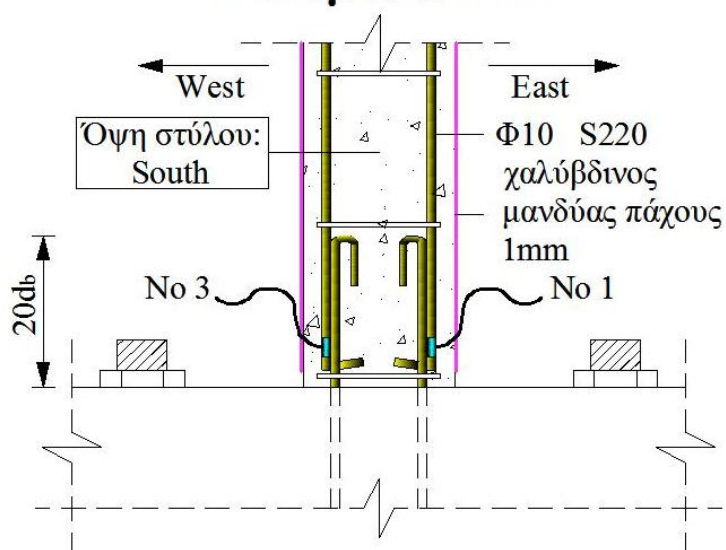
(β)

Σχ.28 : Εικόνες αστοχίας του δοκιμίου S₁L₁

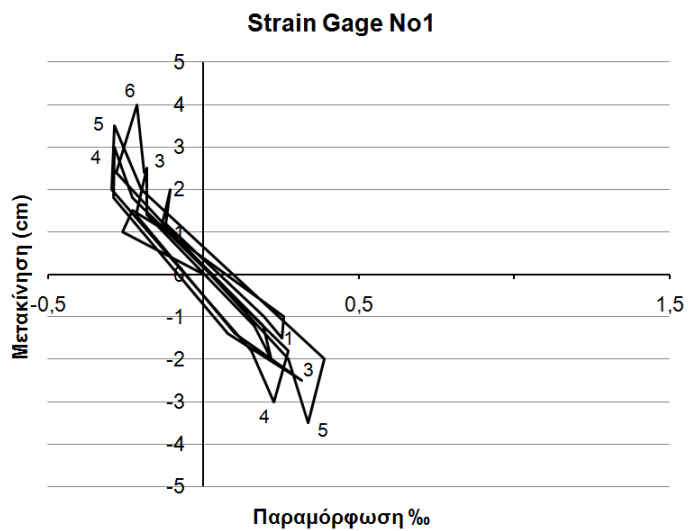
Δοκίμιο S1L1



Δοκίμιο S1L1

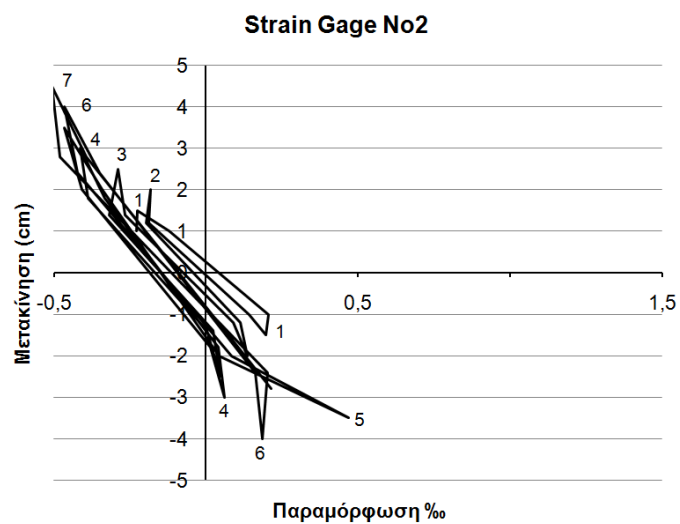


Σχ.29 : Θέσεις όπου τοποθετήθηκαν οι ταινίες μέτρησης των παραμορφώσεων των ράβδων στο δοκίμιο S₁L₁



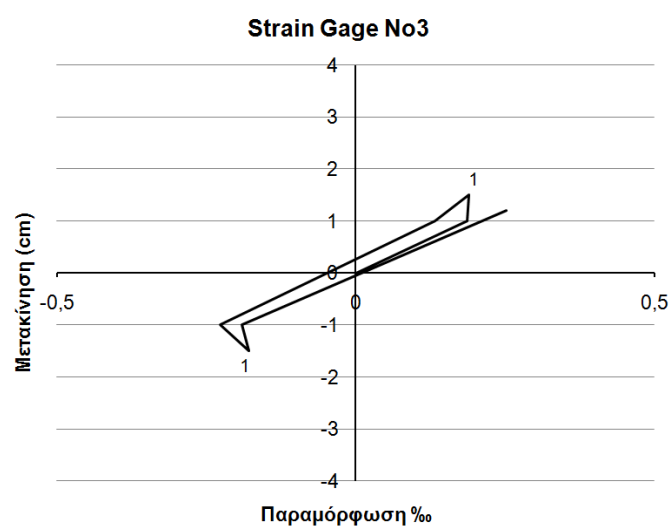
Strain Gage No1

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκους
ράβδου στην πλευρά
South-East του στύλου



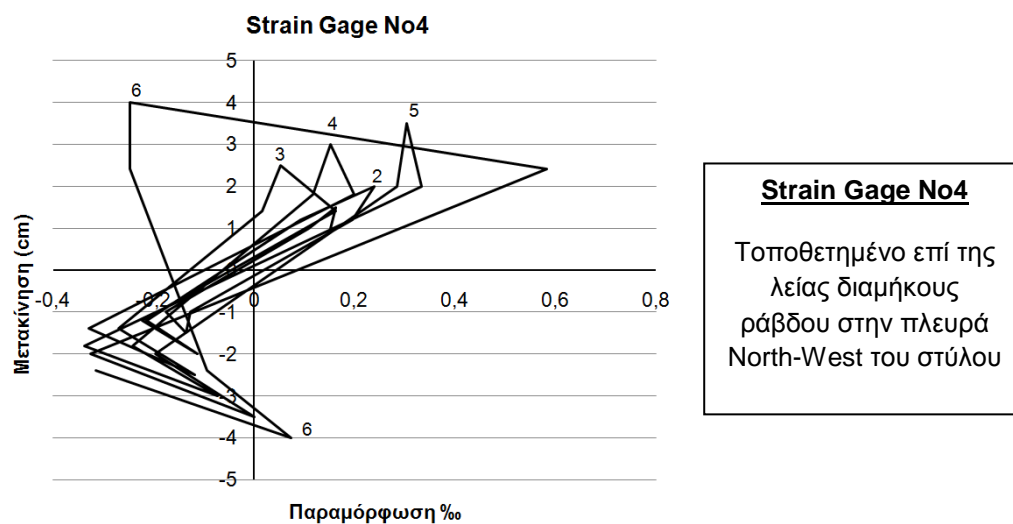
Strain Gage No2

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκους
ράβδου στην πλευρά
North-East του στύλου

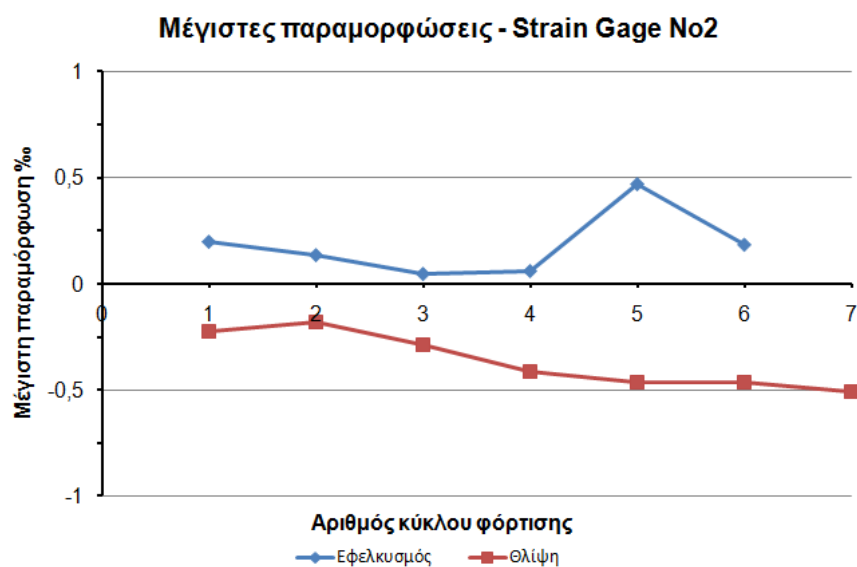
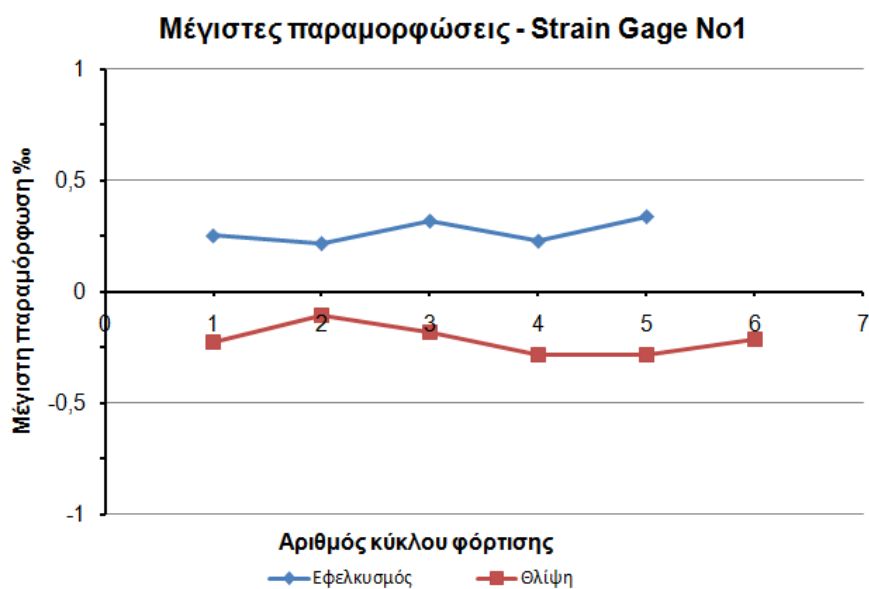


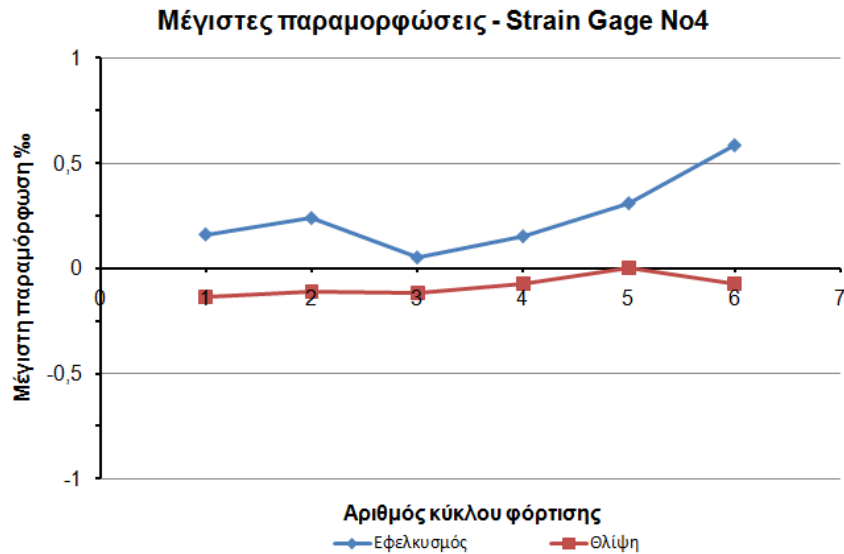
Strain Gage No3

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκους
ράβδου στην πλευρά
South-West του στύλου



Σχ.30 : Παραμορφώσεις οπλισμών του δοκιμίου S₁L₁





Σχ.31 : Μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων οπλισμών του δοκιμίου S₁L₁

3.2.1.3 Δοκίμιο S₂L₁

Οι λεπτομέρειες όπλισης του δοκιμίου S₂L₁ είναι, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ίδιες με του δοκιμίου S₁L₁ με μόνη διαφορά το πάχος του χαλύβδινου μανδύα περίσφιγξης. Στην περίπτωση του υποστυλώματος S₂L₁ ο μανδύας έχει πάχος 5mm το οποίο προέκυψε βάσει των υπολογισμών στην §2.5.1 και της σχέσεως Τάσιου:

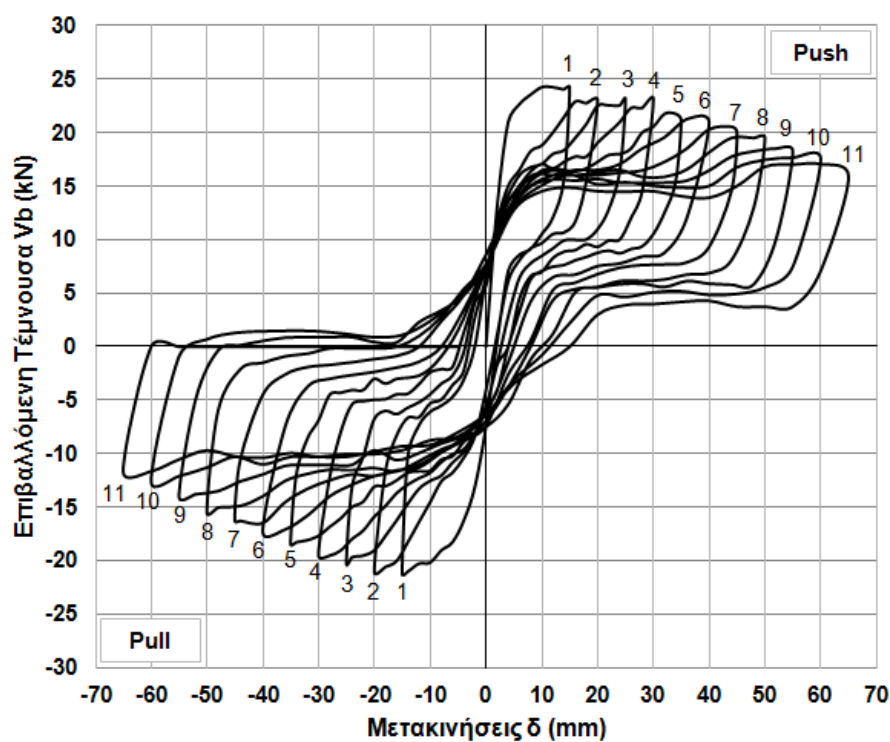
$$t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_s \cdot f_{ctm}}{f_{sy}^2} \cdot w$$

Το δοκίμιο S₂L₁ υποβλήθηκε σε ένδεκα (11) κύκλους πλευρικής φόρτισης με σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο 150 kN. Η ιστορία της φόρτισης του δοκιμίου φαίνεται στο σχήμα Σχ.15. Από την παρατήρηση των υστερητικών βρόχων του στύλου (Σχ.32) γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη φαινομένου P-δ που εμφανίζεται εντονότερο για σχετική ανηγμένη γωνία (drift) από 3,57% και μετά (μετατόπιση μεγαλύτερη από 35mm). Οι οριζόντιοι κλάδοι που εμφανίζουν οι βρόχοι μετά τον έκτο άνω ημίκυκλο (drift 4,08%) και έβδομο κάτω ημίκυκλο φόρτισης (drift 4,59%) οφείλονται στην ύπαρξη φαινομένων δευτέρας τάξεως ενώ φανερώνουν επίσης αυξημένες ολισθήσεις των διαμήκων ράβδων του στύλου καθώς και κλείσιμο των καμπτικών ρωγμών στη βάση του στύλου. Η μορφή των υστερητικών βρόχων του δοκιμίου S₂L₁ δείχνει το μηχανισμό αστοχίας του στύλου που κυριαρχείται από τις ολισθήσεις των διαμήκων ράβδων οπλισμού του υποστυλώματος στις θέσεις της παράθεσης. Η επιρροή του φαινομένου P-δ στη σεισμική συμπεριφορά του S₂L₁ είναι σημαντική. Βεβαίως, όπως παρατηρείται από συγκρίσεις μετρήσεων strain gages σε χαρακτηριστικές θέσεις καθώς και των αντίστοιχων υστερητικών βρόχων των δοκιμίων S₁L₁ και S₂L₁, λόγω της παρουσίας μεγαλύτερου πάχους μεταλλικού μανδύα στο S₂L₁, οι παρατηρούμενες ολισθήσεις στις θέσεις ανεπαρκών παραθέσεων μειώθηκαν. Αυτό σκιαγραφείται στους βελτιωμένους βρόχους που παρουσιάζει το δοκίμιο S₂L₁

συγκριτικά με το S_1L_1 αλλά προβλέπεται θεωρητικά και από τη σχέση Τάσιου που αναφέρθηκε ανωτέρω.

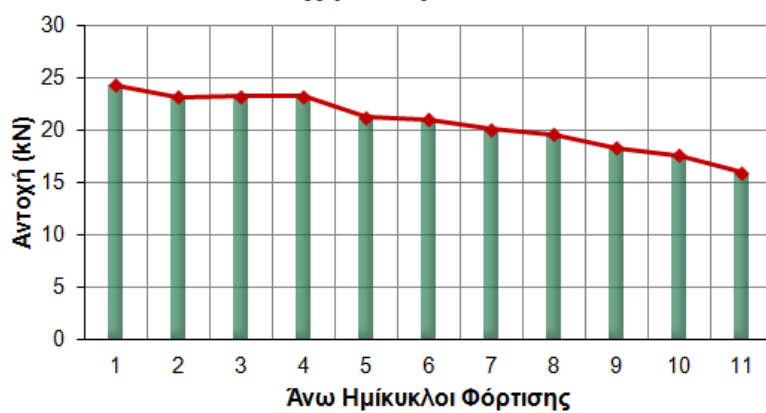
Η αντοχή του δοκιμίου παρουσιάζει ομαλή πτώση με την αύξηση της πλευρικής μετατόπισης και διατηρείται στο 65,43% της αρχικής της τιμής στους άνω ημίκυκλους φόρτισης (push) και στο 54,70% στους κάτω ημίκυκλους (pull). Η μεταβολή της αντοχής του S_2L_1 σε κάθε ημίκυκλο δίνεται στα διαγράμματα του σχήματος Σχ.33. Η δυσκαμψία του στύλου μειώνεται κατά 27,3% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο φόρτισης και συνεχίζει να ελαττώνεται σταδιακά καθώς διευρύνεται το καμπτικό ρήγμα στη θέση πάκτωσης του στύλου στη βάση του δοκιμίου. Στο τέλος του ενδέκατου κύκλου η δυσκαμψία του S_2L_1 περιορίστηκε στο 13,95% της αρχικής της τιμής. Το διάγραμμα δυσκαμψίας και ο τύπος υπολογισμού της φαίνονται στο σχήμα 34. Οι βρόχοι στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης παρουσιάζουν αύξηση του εμβαδού της επιφάνειάς τους με την αύξηση της πλευρικής μετατόπισης παρά την ύπαρξη στενώσεων γύρω από τους άξονες και οριζόντιων κλάδων λόγω ολισθήσεων των ράβδων. Η αύξηση του εμβαδού των βρόχων φανερώνει την ικανότητα του στύλου να απορροφά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας σε κάθε επόμενο κύκλο φόρτισης. Όπως προκύπτει από τις τιμές του διαγράμματος απορροφούμενης ενέργειας (Σχ.35) το υποστύλωμα απορροφά κατά τον ενδέκατο κύκλο φόρτισης 77,30% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τον πρώτο κύκλο. Στο τέλος του πειράματος το υποστύλωμα παρουσιάζει αυξημένη παραμένουσα παραμόρφωση περίπου 55mm, που είναι ωστόσο μικρότερη από εκείνη του δοκιμίου S_1L_1 (Σχ.36). Το υποστύλωμα του δοκιμίου S_2L_1 εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά σε σεισμό συγκρινόμενο με το S_1L_1 παρουσιάζοντας βελτιωμένες τις μηχανικές αντισεισμικές του ιδιότητες (αντοχή, δυσκαμψία, ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) σε σχέση με το τελευταίο. Η σύγκριση της σεισμικής απόκρισής του S_2L_1 με το δοκίμιο - στόχο της Σειράς δοκιμών I, C_1 , και το S_1L_1 πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 4 §4.2.

Δοκίμιο S₂L₁

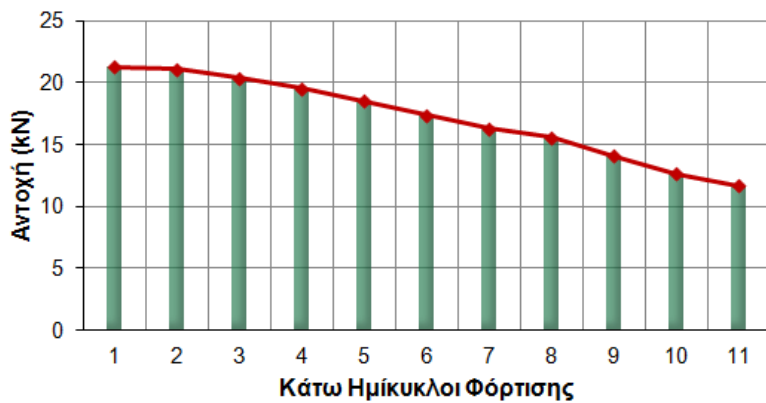


Σχ.32 : Βρόχοι υστερητικής απόκρισης του δοκιμίου S₂L₁

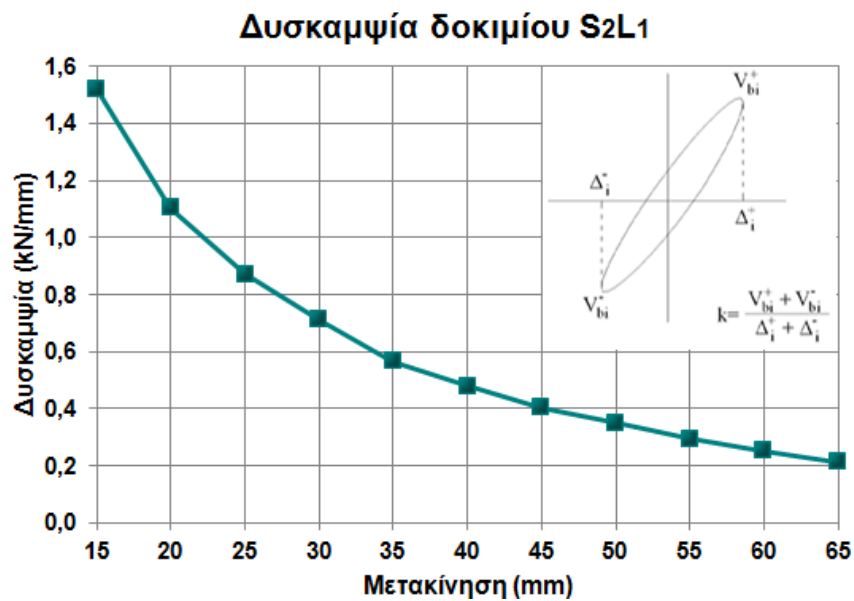
Αντοχή δοκιμίου S₂L₁



Αντοχή δοκιμίου S₂L₁



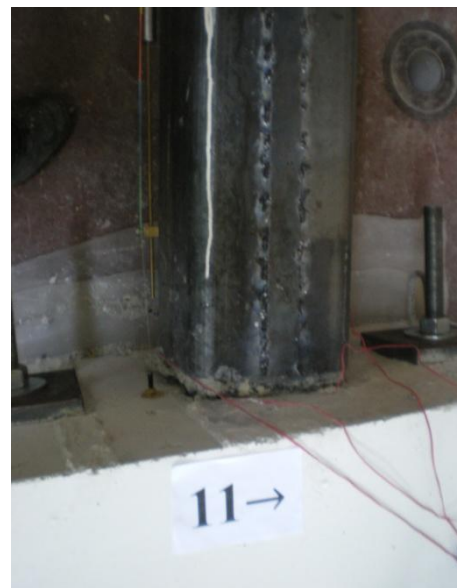
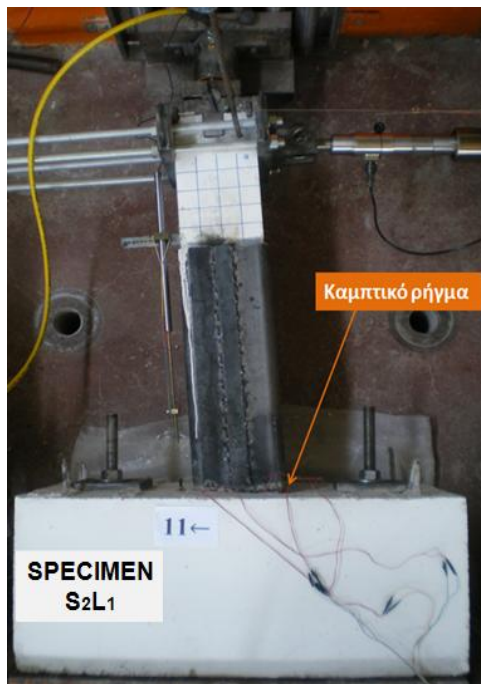
Σχ.33 : Διαγράμματα μεταβολής αντοχής του δοκιμίου S₂L₁. Άνω και κάτω ημίκυκλοι φόρτισης



Σχ.34 : Διάγραμμα μεταβολής της δυσκαμψίας του δοκιμίου S₂L₁



Σχ.35 : Απορρόφηση ενέργειας κατά τη σεισμική φόρτιση του δοκιμίου S₂L₁



(β)

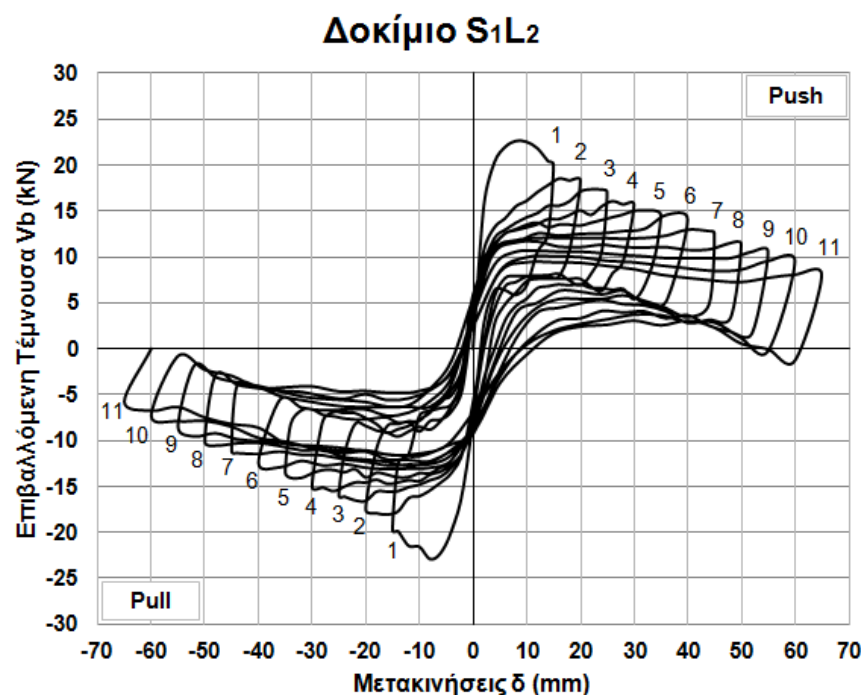
(α)

Σχ.36 : Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου S_{2L_1}

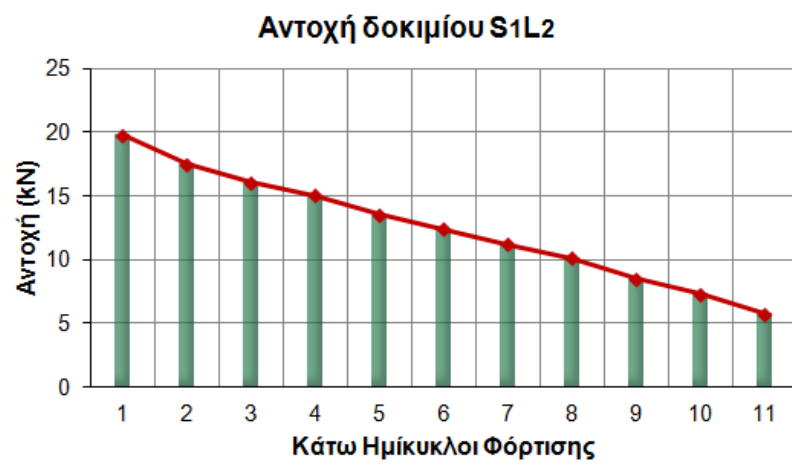
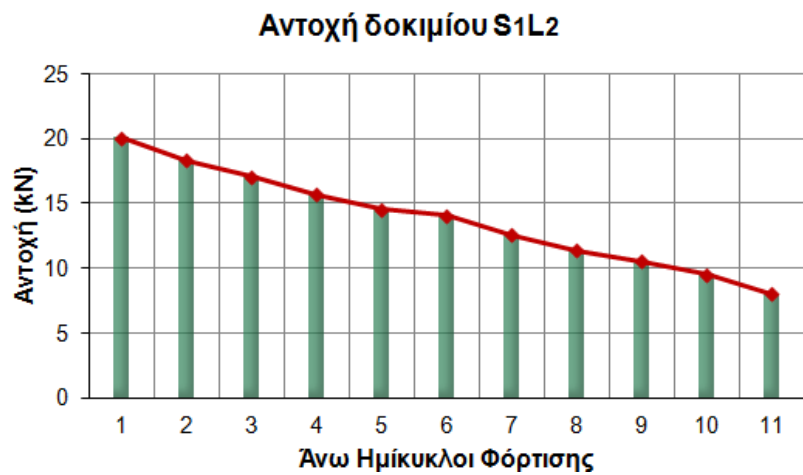
3.2.1.4 Δοκίμιο S_{1L_2}

Στο υποστύλωμα του δοκιμίου S_{1L_2} το μήκος στο οποίο παρατίθενται οι διαμήκειες ράβδοι είναι ίσο με 24 φορές τη διάμετρο του διαμήκους οπλισμού, δηλαδή 240mm. Ο χαλύβδινος μανδύας που εφαρμόστηκε προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά των παραθέσεων των οπλισμών είχε πάχος 1mm όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς (Κεφάλαιο 2 §2.5.1). Το δοκίμιο αυτό υποβλήθηκε σε ιστορία ένδεκα κύκλων πλευρικής φόρτισης με σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο 150 kN που φαίνεται στο σχήμα Σχ.15. Η μορφή των βρόχων υστερητικής απόκρισης του στύλου (Σχ.37) χαρακτηρίζεται από πολύ έντονες στενώσεις γύρω από την αρχή των αξόνων, μεγάλους οριζόντιους κλάδους ακόμη και για μικρά μήκη πλευρικής μετατόπισης (30mm) και εμφάνιση ιδιαίτερα έντονου φαινομένου P-δ από τους πρώτους κύκλους πλευρικής φόρτισης. Η επίδραση του φαινομένου δευτέρας τάξεως γίνεται όλο και μεγαλύτερη για τιμή σχετικής ανεπηρέστης γωνίας (drift) άνω του 4,08% στους άνω ημίκυκλους (push) και του 2,55% στους κάτω ημίκυκλους (pull) προκαλώντας το σχηματισμό βρόχων μορφής “αυτιού”. Ο μηχανισμός αστοχίας του δοκιμίου οφείλεται στις ιδιαίτερα μεγάλες ολισθήσεις των ανεπαρκώς παρατιθέμενων διαμήκων ράβδων οπλισμού του στύλου. Η επιρροή του φαινομένου P-δ είναι εντονότατη. Η αντοχή του δοκιμίου παρουσιάζει πιο έντονη μείωση από τον πρώτο στον δεύτερο κύκλο φόρτισης. Για μεγαλύτερες τιμές πλευρικής μετατόπισης μειώνεται με μικρότερο ρυθμό και στο τέλος του πειράματος περιορίζεται στο 35,4% της αρχικής μέγιστης τιμής στους άνω ημίκυκλους (push) και μόλις στο 25,11% στους κάτω ημίκυκλους φόρτισης (pull). Η μεταβολή της αντοχής του S_{1L_2} σε κάθε ημίκυκλο φαίνεται στα διαγράμματα του σχήματος Σχ.38. Η πτώση της δυσκαμψίας του δοκιμίου από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο φόρτισης αγγίζει το 32,62% και στο

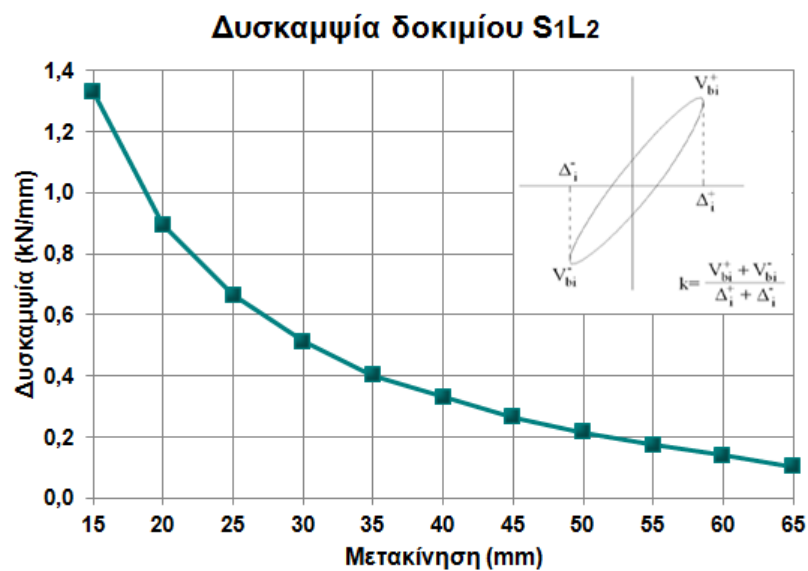
τέλος του πειράματος (65mm μετατόπιση) το 92,03%. Το διάγραμμα δυσκαμψίας και ο τύπος υπολογισμού της φαίνονται στο σχήμα 39. Το δομικό υποσύνολο υποστυλώματος S_1L_2 , παρά την περίσφιγξή του με το χαλύβδινο μανδύα πάχους 1mm, δεν ήταν σε θέση να απορροφήσει σημαντικά ποσά ενέργειας. Οι λείες διαμήκεις ράβδοι οπλισμού του στύλου παρουσίασαν ιδιαίτερα αυξημένες ολισθήσεις από την αρχή του πειράματος. Ως αποτέλεσμα, οι βρόχοι είχαν μεγάλους οριζόντιους κλάδους, σημαντική στένωση γύρω από την αρχή των αξόνων και συνεπώς μικρή επιφάνεια. Το δοκίμιο απορρόφησε χαμηλά ποσά ενέργειας και, όπως φαίνεται στο σχήμα 40, ο ρυθμός αύξησης της απορροφούμενης ενέργειας με την αύξηση των επιβαλλόμενων πλευρικών μετατοπίσεων είναι μικρός. Επίσης, στο τέλος του πειράματος το υποστύλωμα παρουσιάζει αυξημένη παραμένουσα παραμόρφωση της τάξεως των 60mm, η οποία φαίνεται στο διάγραμμα υστερητικών βρόχων καθώς και στην τελική εικόνα αστοχίας του δοκιμίου στη φωτογραφία του σχήματος 41. Οι μικρομετρήσεις των παραμορφώσεων των διαμήκων ράβδων οπλισμού του στύλου επαληθεύουν την προηγούμενη ανάλυση συμπεριφοράς του δοκιμίου. Οι ταινίες μέτρησης των παραμορφώσεων τοποθετήθηκαν στις θέσεις που φαίνονται στα σχέδια του σχήματος 42. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα παραμορφώσεων (Σχ.43 και Σχ.44) ο χάλυβας οπλισμού ανέπτυξε, λόγω των έντονων ολισθήσεων από την αρχή του πειράματος, παραμορφώσεις μέχρι περίπου 0,6‰, δηλαδή κατά πολύ μικρότερες από εκείνη που αντιστοιχεί στη διαρροή των λείων ράβδων (1,87‰). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η εφαρμοζόμενη περίσφιγξη με το χαλύβδινο μανδύα πάχους 1mm δεν αρκεί για να εξασφαλίσει τη διαρροή του οπλισμού, συνθήκη αναγκαία για την επιτυχία της πραγματοποιούμενης επέμβασης. Επομένως η ενίσχυση του στύλου κατά τα προβλεπόμενα βάσει της σχέσεως Σ6.14 του ΚΑΝ.ΕΠΕ δεν επέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα στη βελτίωση της συμπεριφοράς του στύλου σε σεισμό. Η σύγκριση της σεισμικής απόκρισης του δοκιμίου S_1L_2 με εκείνη του δοκιμίου – στόχου C_1 και των υπολοίπων δομικών υποσυνόλων της Σειράς I πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 4 §4.2.



Σχ.37 : Βρόχοι υστερητικής απόκρισης του δοκιμίου S_1L_2

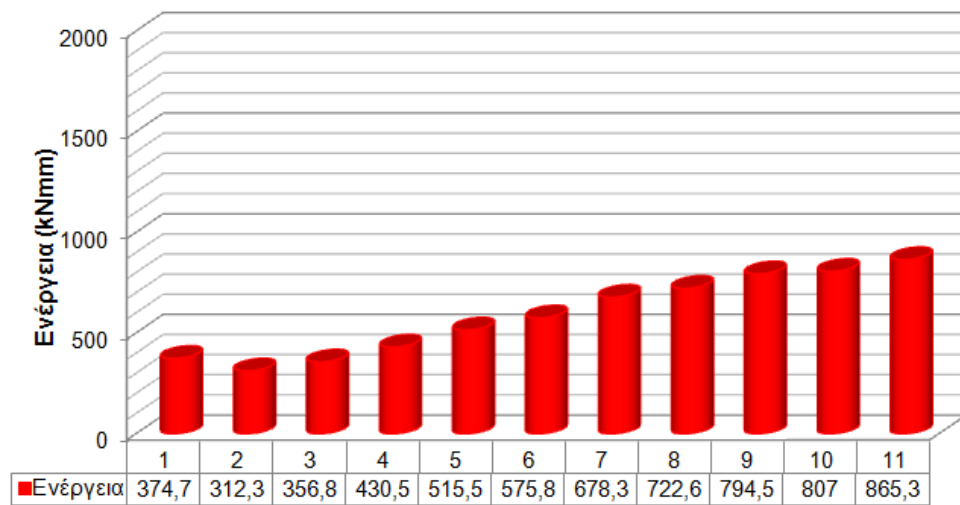


Σχ.38 : Διαγράμματα μεταβολής αντοχής του δοκιμίου S₁L₂. Άνω και κάτω ημίκυκλοι φόρτισης

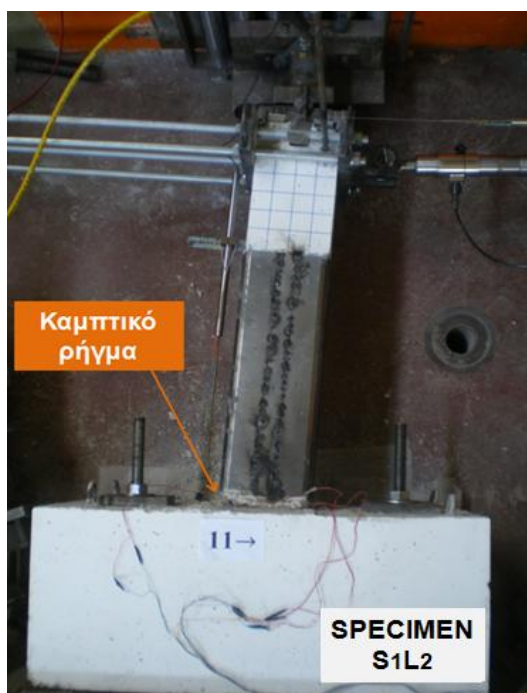


Σχ.39 : Διάγραμμα μεταβολής της δυσκαμψίας του δοκιμίου S₁L₂

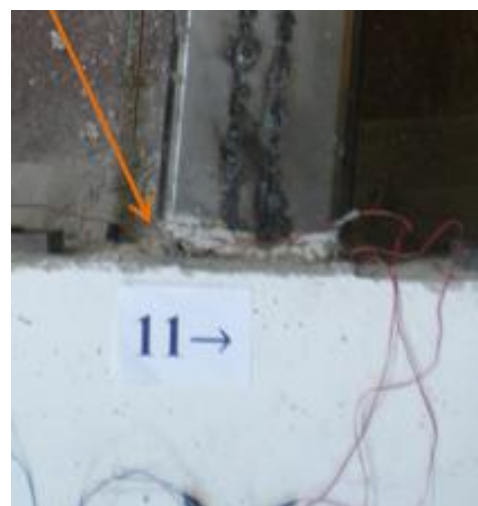
Απορρόφηση ενέργειας ανά κύκλο φόρτισης - Δοκίμιο S₁L₂



Σχ.40 : Απορρόφηση ενέργειας κατά τη σεισμική φόρτιση του δοκιμίου S₁L₂



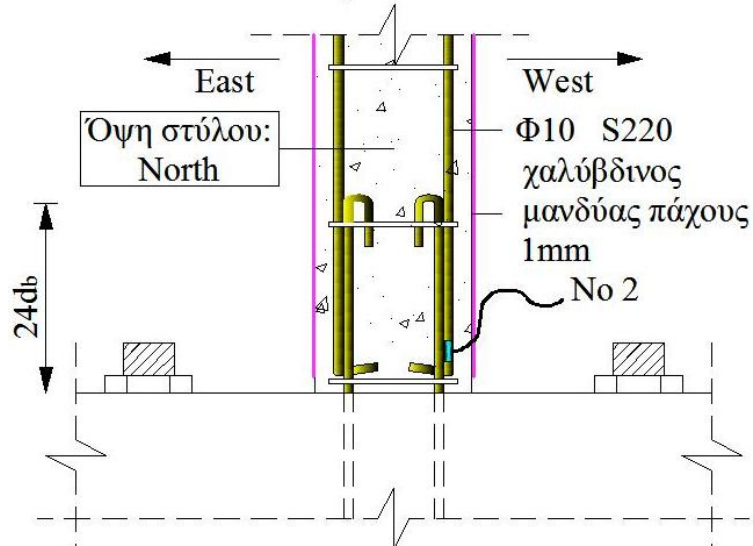
(α)



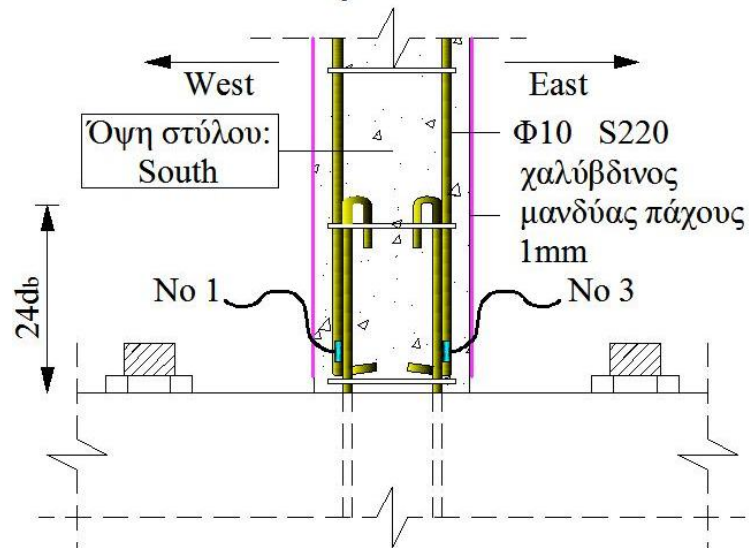
(β)

Σχ.41 : Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου S₁L₂

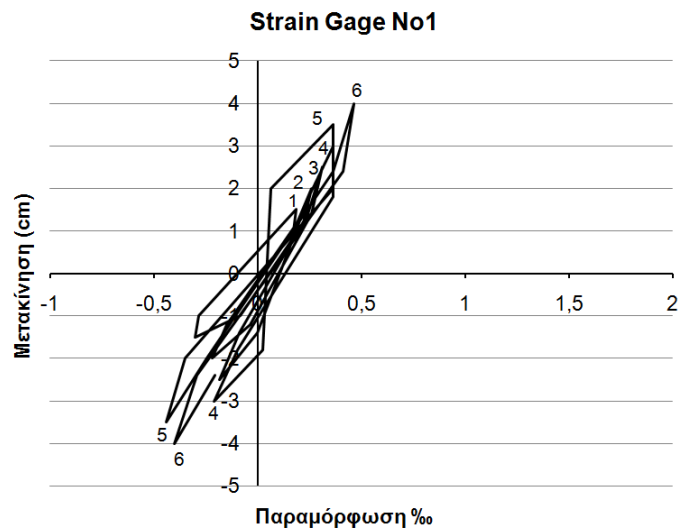
Δοκίμιο S1L2



Δοκίμιο S1L2

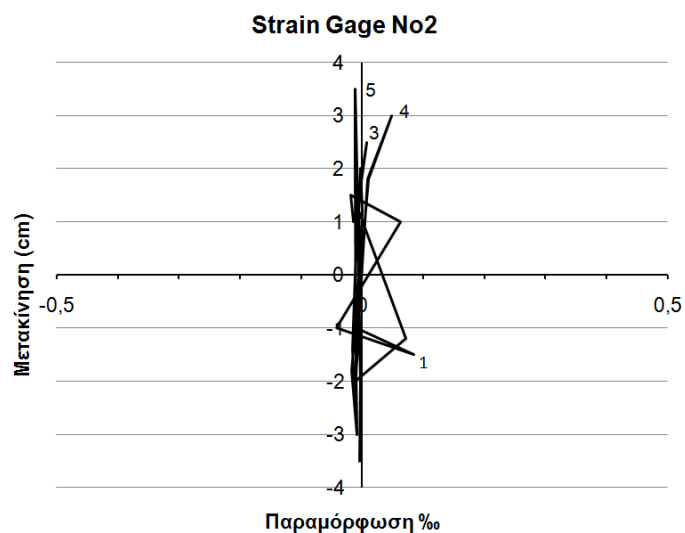


Σχ.42 : Θέσεις όπου τοποθετήθηκαν οι ταινίες μέτρησης των παραμορφώσεων των ράβδων στο δοκίμιο S₁L₂



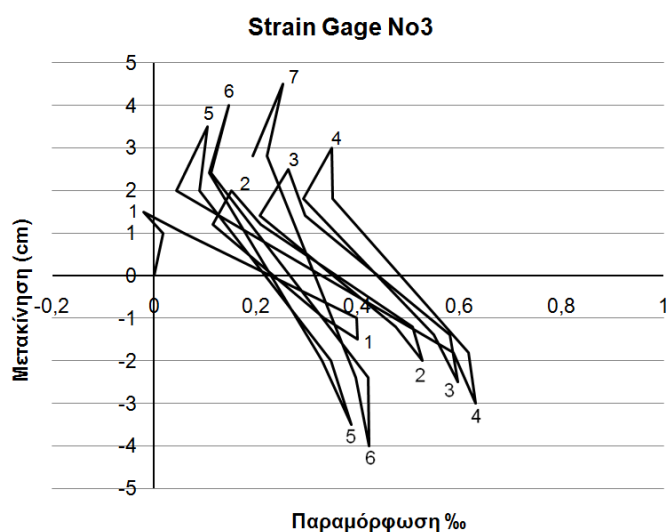
Strain Gage No1

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκους ράβδου
στην πλευρά South-West
του στύλου



Strain Gage No2

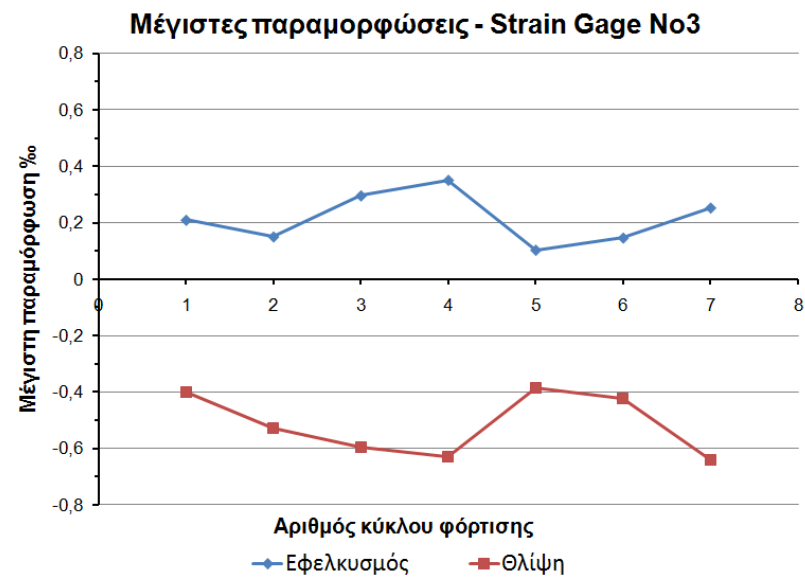
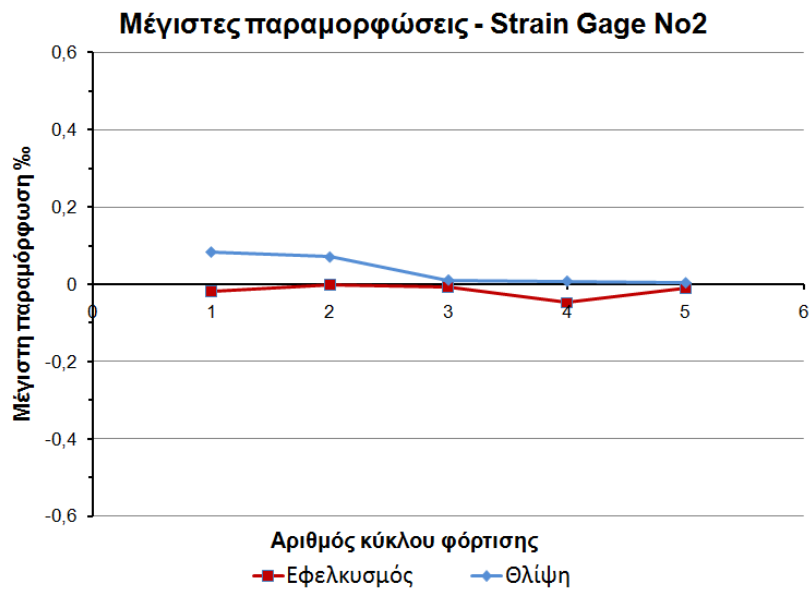
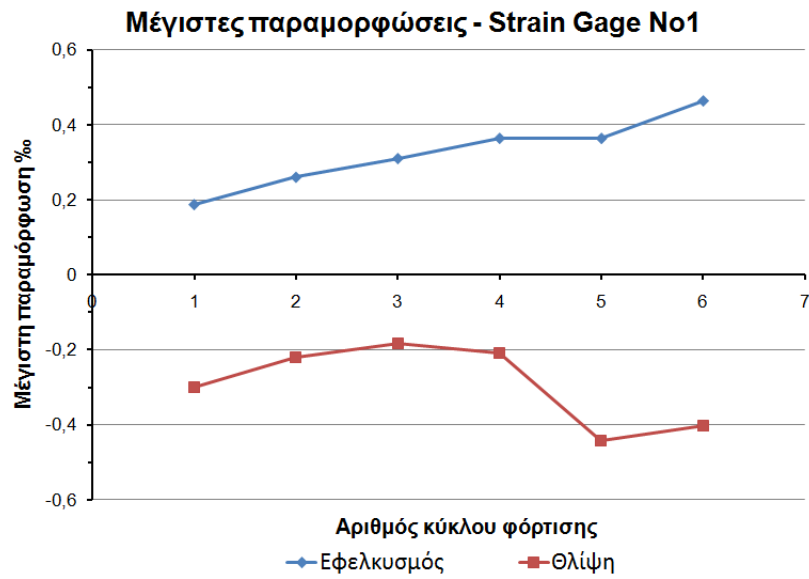
Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκους ράβδου
στην πλευρά North-West
του στύλου



Strain Gage No3

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκους ράβδου
στην πλευρά South-East
του στύλου

Σχ.43 : Παραμορφώσεις οπλισμών του δοκιμίου S₁L₂



Σχ.44 : Μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων οπλισμών του δοκιμίου S_1L_2

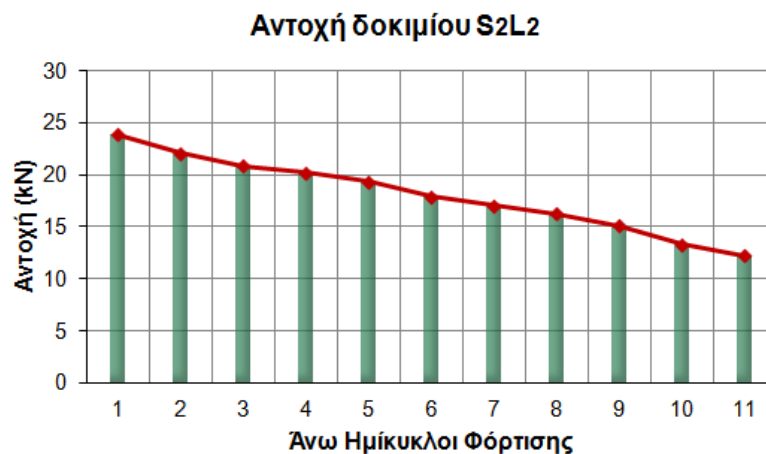
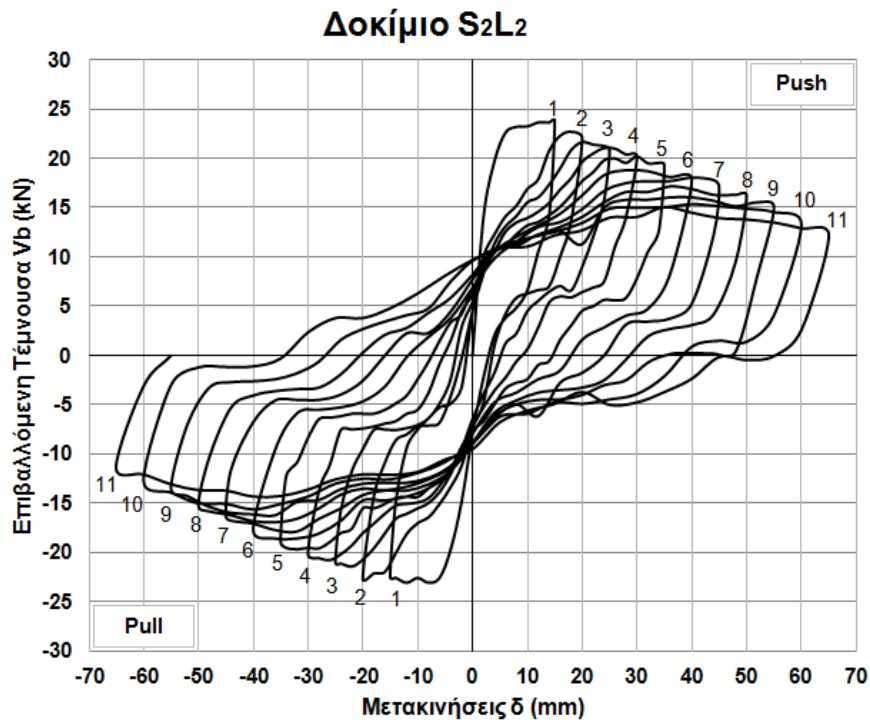
3.2.1.5 Δοκίμιο S_2L_2

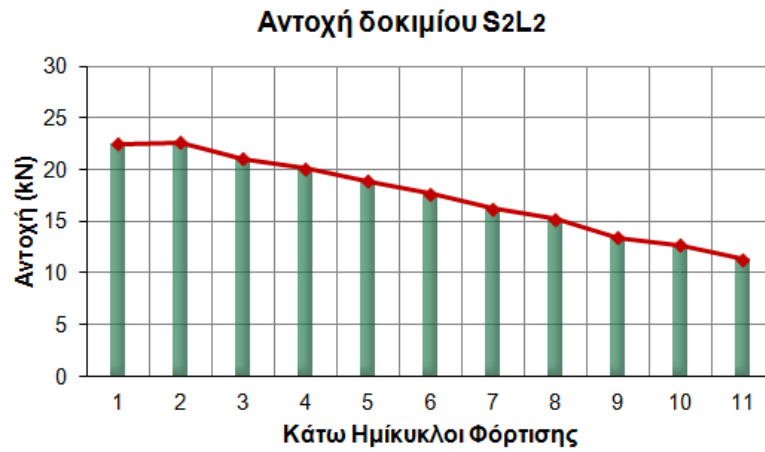
Στο δοκίμιο S_2L_2 το υποστύλωμα είχε τις ίδιες λεπτομέρειες όπλισης και το ίδιο μήκος παράθεσης ($24\Phi=240\text{mm}$) με εκείνο του δοκιμίου S_1L_2 , με μόνη διαφορά το πάχος του χαλύβδινου μανδύα, που στην περίπτωση του S_2L_2 ήταν 5mm. Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης περίσφιγξης στο δοκίμιο S_2L_2 χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Τάσιου (2009) για τους κλειστούς, λεπτούς, χαλύβδινους μανδύες. Οι σχετικοί υπολογισμοί υπάρχουν στο Κεφάλαιο 2 § 2.5.1. Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση ένδεκα κύκλων με ταυτόχρονη επιβολή σταθερού αξονικού θλιπτικού φορτίου 150kN. Η ιστορία φόρτισης του δοκιμίου δίνεται στο σχήμα Σχ.15. Όπως φαίνεται από την παρατήρηση του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης (Σχ.45) η επιρροή του φαινομένου P-δ στο υποστύλωμα του δοκιμίου S_2L_2 είναι πολύ μικρότερη απ’ ότι στα δοκίμια S_1L_1 , S_2L_1 και S_1L_2 και οι βρόχοι του δοκιμίου S_2L_2 έχουν μορφή παρόμοια με εκείνη των βρόχων του δοκιμίου – στόχου, C_1 , της Σειράς δοκιμών Ι. Η αντοχή του δοκιμίου μειώνεται σταδιακά και με ομαλό ρυθμό με την αύξηση των μετατοπίσεων ενώ και οι ολισθήσεις των διαμήκων οπλισμών είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες των λοιπών ενισχυμένων δοκιμών της Σειράς Ι και εμφανίζονται μετά τον έβδομο κύκλο πλευρικής φόρτισης (drift 4,59%). Οι βρόχοι έχουν μεγάλο εύρος και δεν παρουσιάζουν στενώσεις γύρω από τους άξονες, ενώ η επιφάνειά τους μεγαλώνει διαρκώς σε κάθε επόμενο κύκλο φόρτισης.

Η αντοχή του στύλου του δοκιμίου S_2L_2 (Σχ.46) παρουσιάζει ομαλή πτώση από κύκλο σε κύκλο φόρτισης και διατηρείται στο τέλος των ένδεκα κύκλων σε υψηλά επίπεδα, ίση με το 51,15% της αρχικής της τιμής στους άνω ημίκυκλους (push) και το 50,4% στους κάτω ημίκυκλους (pull). Η δυσκαμψία του υποστυλώματος μειώνεται κατά 27,7% από τον πρώτο στο δεύτερο κύκλο και στο τέλος του πειράματος περιορίζεται στο 11,72% της αρχικής της τιμής. Το διάγραμμα δυσκαμψίας και ο τύπος υπολογισμού της φαίνονται στην εικόνα (Σχ.47). Η μεγάλη επιφάνεια των υστερητικών βρόχων του δοκιμίου φανερώνει τα υψηλά ποσά ενέργειας που απορροφά το υποστύλωμα. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος Σχ.48 η ενέργεια που απορροφά ο στύλος αυξάνεται συνεχώς μετά τον τρίτο κύκλο και κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, αντίστοιχα με εκείνα του δοκιμίου – στόχου C_1 . Στο τέλος του δέκατου κύκλου (μετακίνηση 60mm) το S_2L_2 απορροφά 77,15% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Η παραμένουσα παραμόρφωση στο τέλος του πειράματος ήταν μικρότερη από εκείνη του δοκιμίου S_1L_2 με το ίδιο μήκος παράθεσης οπλισμών και χαλύβδινο μανδύα πάχους 1mm. Η τελική εικόνα αστοχίας του δοκιμίου και το καμπτικό ρήγμα που σχηματίστηκε στη θέση πάκτωσης του στύλου φαίνονται στις φωτογραφίες του σχήματος 49.

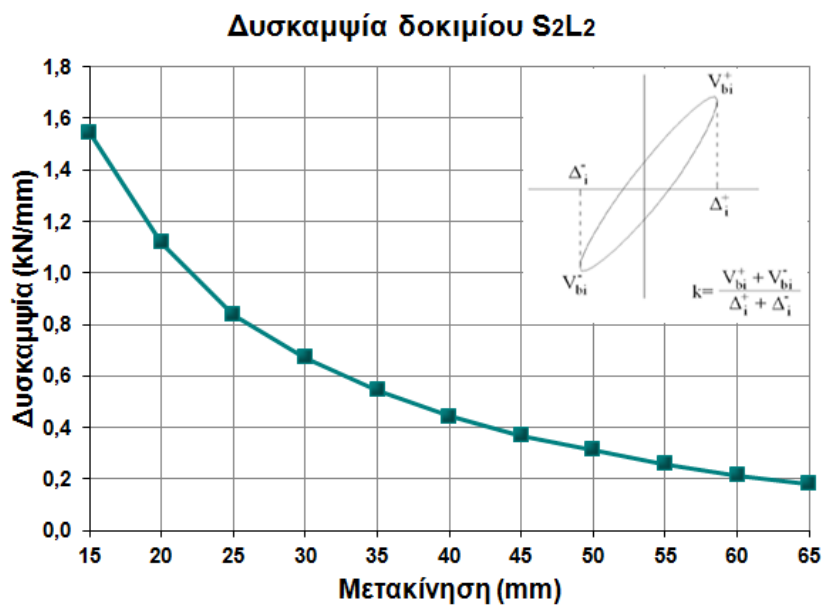
Από τα διαγράμματα παραμορφώσεων των διαμήκων ράβδων οπλισμού του υποστυλώματος (Σχ.51) γίνεται φανερό ότι σε δύο από τις διαμήκεις ράβδους του υποστυλώματος η παραμόρφωση έφθασε σε τιμές 2,95‰ και 3,28‰, δηλαδή σημαντικά μεγαλύτερες από την τιμή που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση διαρροής του λείου χάλυβα (1,87‰). Η εφαρμογή επομένως του χαλύβδινου μανδύα πάχους 5mm στο στύλο του δοκιμίου S_2L_2 εξασφάλισε τη διαρροή των ράβδων του

υποστυλώματος αποδεικνύοντας την επιτυχία της επέμβασης θεραπείας του προβλήματος ανεπαρκούς παράθεσης ράβδων του υποστυλώματος. Οι θέσεις των ταινιών μέτρησης των παραμορφώσεων των ράβδων και οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης δίνονται στα σχήματα Σχ.50 και Σχ.52 αντίστοιχα. Η σεισμική συμπεριφορά του δοκιμίου S_2L_2 συγκρίνεται στο Κεφάλαιο 4 §4.2 με τη συμπεριφορά σε σεισμό του δοκιμίου – στόχου C_1 και των υπολοίπων ενισχυμένων με χαλύβδινο μανδύα υποστυλωμάτων της Σειράς δοκιμών Ι.

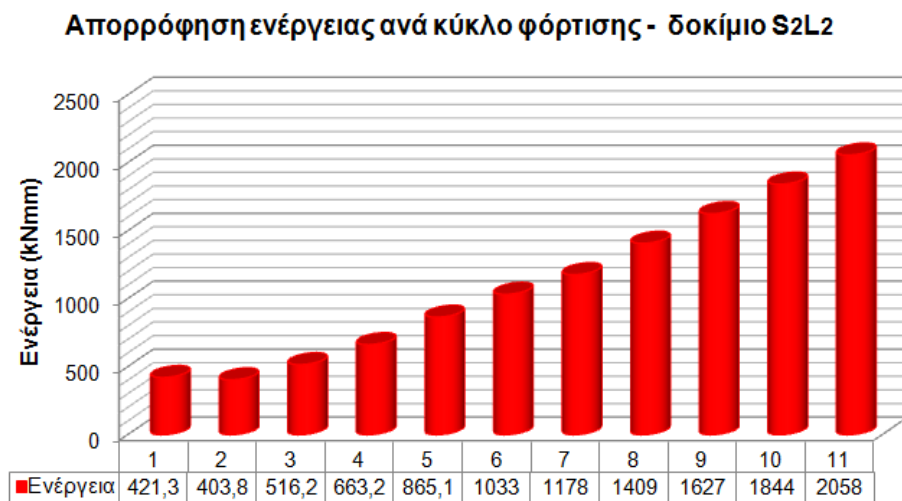




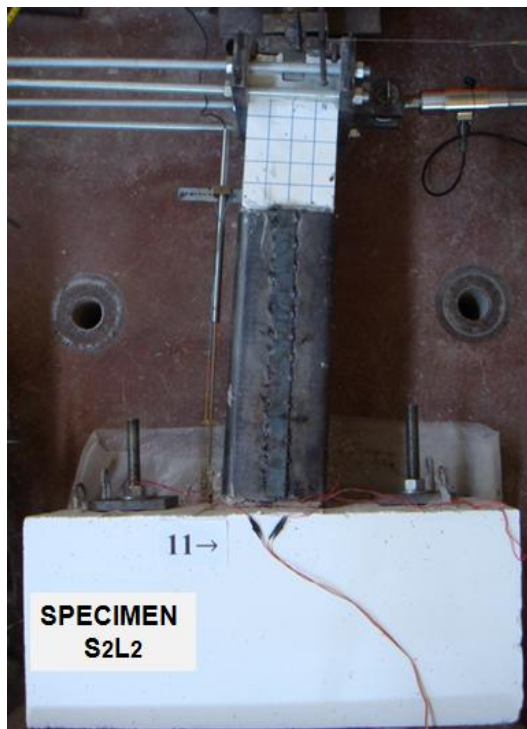
Σχ.46 : Διαγράμματα μεταβολής αντοχής του δοκιμίου S₂L₂. Άνω και κάτω ημίκυκλοι φόρτισης



Σχ.47 : Διάγραμμα μεταβολής της δυσκαμψίας του δοκιμίου S₂L₂



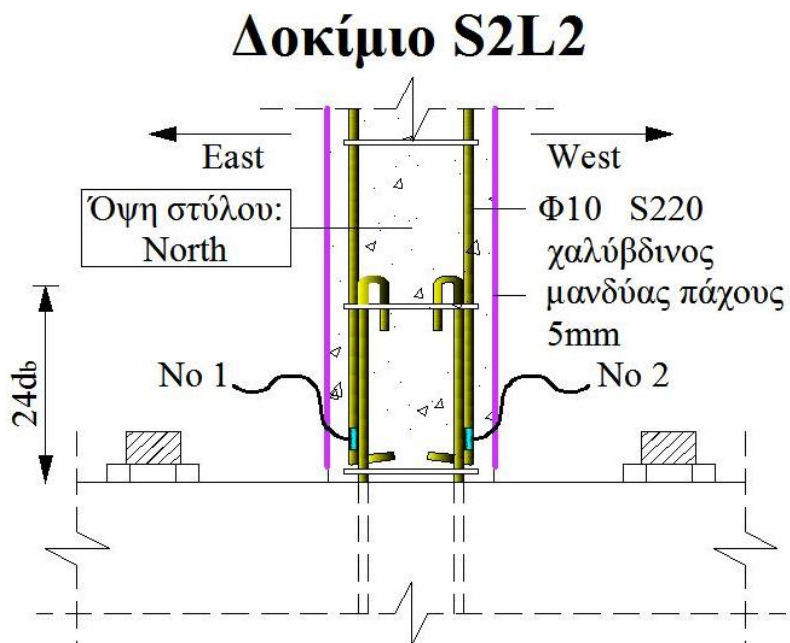
Σχ.48 : Απορρόφηση ενέργειας κατά τη σεισμική φόρτιση του δοκιμίου S₂L₂



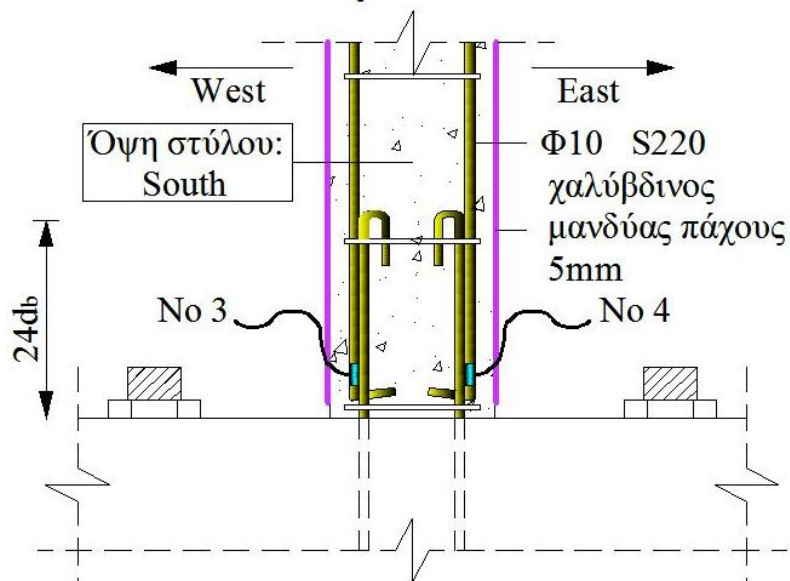
(α)

(β)

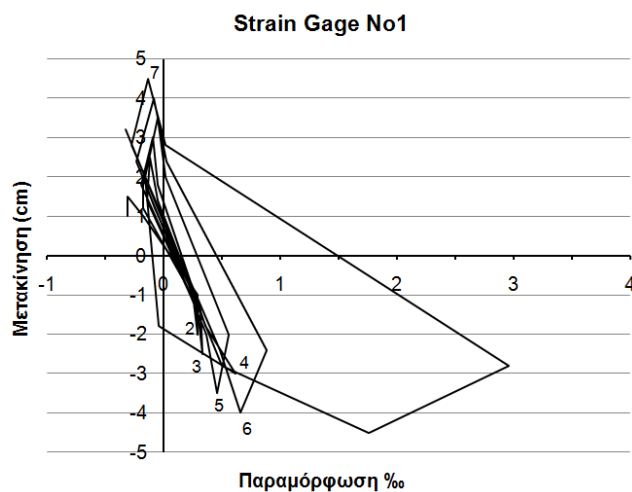
Σχ.49 : Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου S₂L₂



Δοκίμιο S2L2

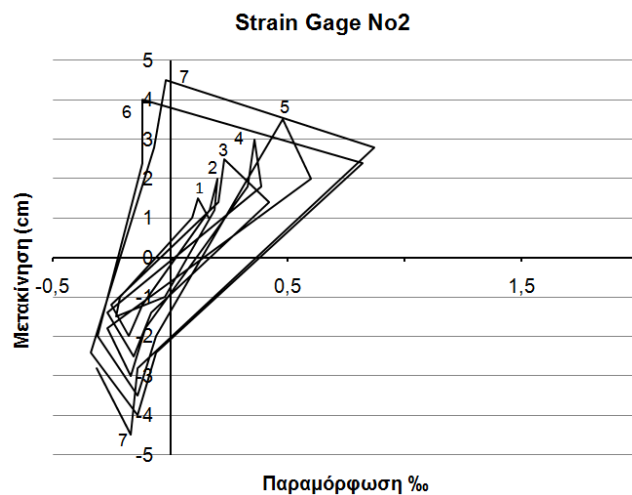


Σχ.50 : Θέσεις όπου τοποθετήθηκαν οι ταινίες μέτρησης των παραμορφώσεων των ράβδων στο δοκίμιο S₂L₂



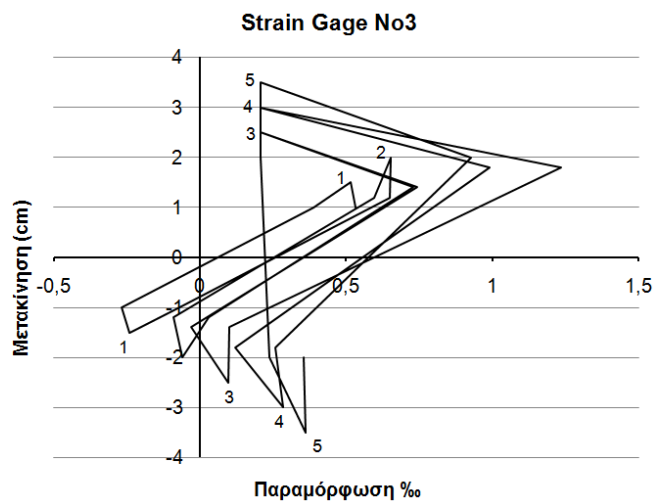
Strain Gage No1

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκου ράβδου
στην πλευρά North-East
του στύλου



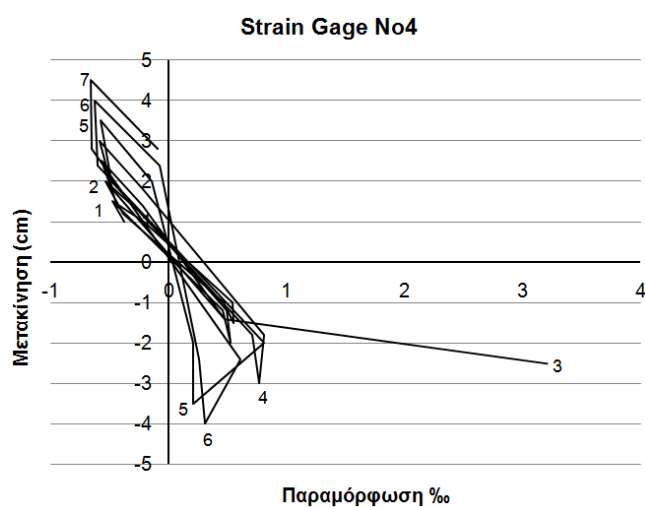
Strain Gage No2

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκου ράβδου
στην πλευρά North-West
του στύλου



Strain Gage No3

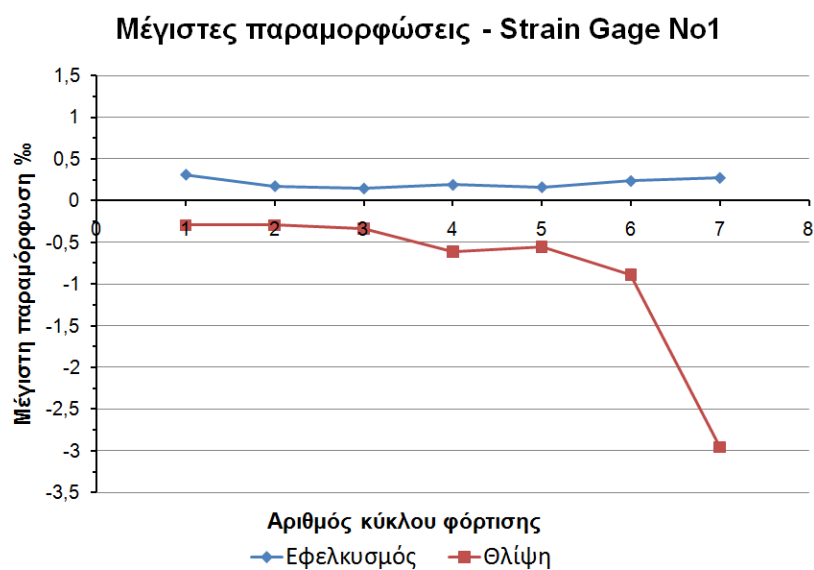
Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκου ράβδου
στην πλευρά South-West
του στύλου

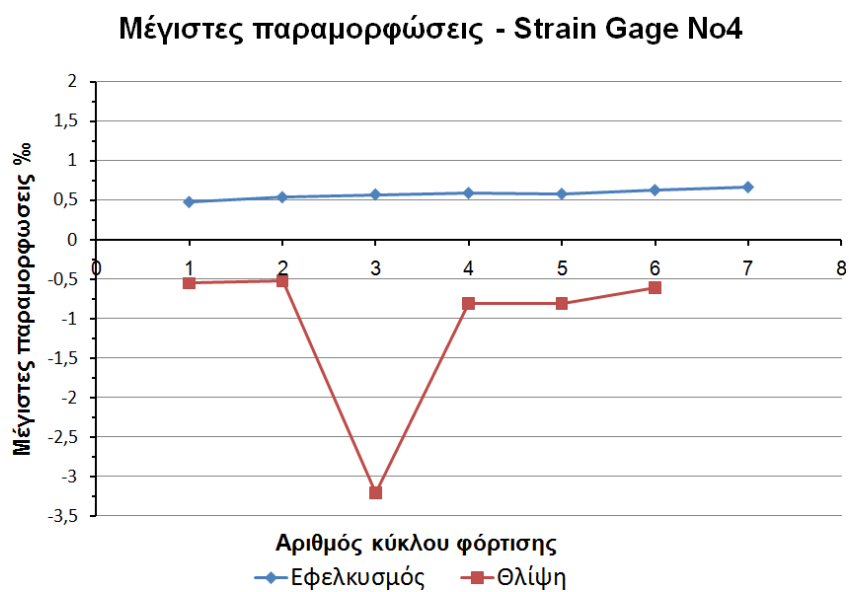
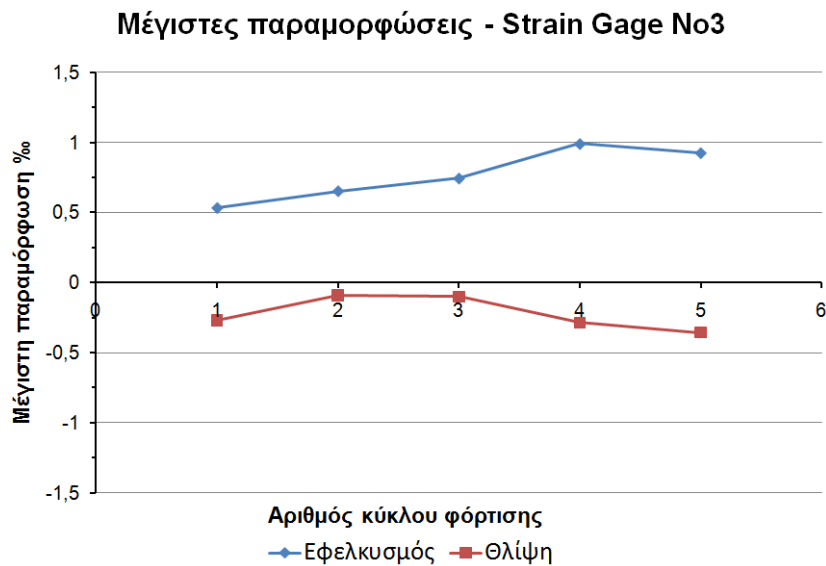
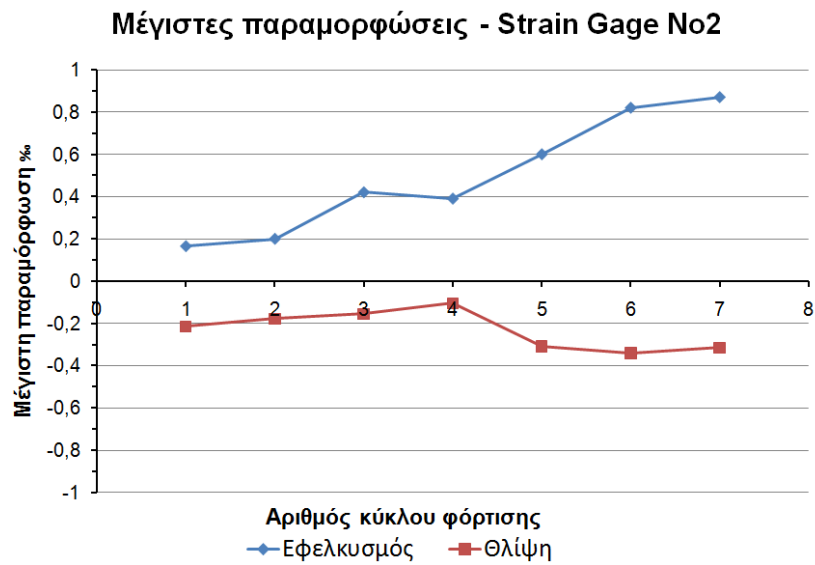


Strain Gage No4

Τοποθετημένο επί της
λείας διαμήκου ράβδου
στην πλευρά South-East
του στύλου

Σχ.51 : Παραμορφώσεις οπλισμών του δοκιμίου S_2L_2





Σχ.52 : Μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων οπλισμών του δοκιμίου S₂L₂