



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΕ
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΛΑΣΜΑΤΑ FRP**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πάσχος Γεώργιος

**Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π**

Αθήνα, Μάιος 2013

Πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
Κεφάλαιο 1	9
Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ	9
1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	9
1.1.1 Η γεωμετρία της δοκού-δοκιμίου και η πειραματική διάταξη	9
1.1.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής.....	11
1.1.3 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού δοκιμίου	14
1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	15
1.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ	18
1.3.1 Ο προσδιορισμός τάσης συνάφειας	18
1.3.2 Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης	20
Κεφάλαιο 2	21
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	21
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
2.2 Η ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	22
2.3 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	26
2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ.....	30
2.4.1 Ψαθυρή συμπεριφορά της διεπιφάνειας	30
2.4.2 Πλάστικη συμπεριφορά της διεπιφάνειας	31
2.5 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ	34
Κεφάλαιο 3	39
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	39
3.1 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ-ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	39
3.2 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	45
3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	47

3.4	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	49
3.4.1	Η κατασκευή της καμπύλης συμπεριφοράς του ελάσματος FRP.....	50
3.4.2	Η κατασκευή της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση	52
Κεφάλαιο 4	.....	56
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ	.....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	.....	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	.....	63
I.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	63
I.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	.....	68
II .1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ	68

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Οι εξωτερικές επικολλήσεις ελασμάτων FRP σε δομικά στοιχεία κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έχουν αναδειχθεί ως μια διαδεδομένη πρακτική στην ενίσχυση ή επισκευή υφιστάμενων κατασκευών. Στη μέθοδο ενίσχυσης με ελάσματα FRP, η κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι η διεπιφάνεια μεταξύ του ελάσματος και του δομικού στοιχείου, μέσω της οποίας μεταβιβάζονται οι δυνάμεις.

Ένας από τους βασικούς τύπους αστοχίας της ενίσχυσης είναι η αποκόλληση της διεπιφάνειας σε μια ενδιάμεση θέση. Η αποκόλληση της διεπιφάνειας ξεκινάει από μια μεγάλη ρωγμή, που διαδίδεται κατά μήκος της διεπιφάνειας των δύο υλικών. Σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος, που έχουν ενισχυθεί καμπτικά με ελάσματα FRP, η παραπάνω αστοχία μπορεί να ξεκινάει από μια μεγάλη καμπτική ρωγμή, ή ακόμα και από μια καμπτική – διατμητική ρωγμή. Σε δοκούς που έχουν ενισχυθεί διατμητικά με ελάσματα FRP, οι ρωγμές ενδέχεται να ξεκινούν από μια διατμητική ρωγμή του δομικού στοιχείου. Είναι προφανές ότι η σχεδόν επιφανειακή μορφή του ελάσματος FRP, που τοποθετείται ως ενίσχυση στο δομικό στοιχείο, εισάγει διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια, και ως εκ τούτου, ο παραπάνω τύπος αστοχίας χαρακτηρίζεται με την ορολογία της μηχανικής των θραύσεων ως αστοχία Τύπου II. Κατά το σχεδιασμό των ενισχύσεων δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με ελάσματα FRP, πέρα των μηχανικών παραμέτρων των επιμέρους υλικών, θα πρέπει να είναι γνωστά τα παρακάτω:

- η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας FRP – σκυροδέματος, και
- ο τύπος αστοχίας της διεπιφάνειας.

Η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας περιγράφεται με την καμπύλη συνάφειας – ολίσθησης, που αποκτιέται πειραματικά. Στην βιβλιογραφία, περιγράφονται

διάφορες πειραματικές δοκιμές, που έχουν εισαχθεί για τον προσδιορισμό της καμπύλης αυτής. Οι πειραματικές αυτές δοκιμές στηρίζονται στην επέκταση της γνωστής δοκιμής εξόλκευσης στην περίπτωση των ελασμάτων FRP με κατάλληλες τροποποιήσεις. Η καμπύλη συνάφειας – ολίσθησης είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων που αναπτύσσονται στο ενισχυμένο δομικό στοιχείο.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η επέκταση της δοκιμής δοκού, που έχει αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης ράβδων FRP σε σκυρόδεμα, σε ελάσματα ενίσχυσης. Η επέκταση αυτή θα περιλαμβάνει:

- την εισαγωγή των κατάλληλων τροποποιήσεων της δοκιμής, προκειμένου να μπορεί να εφαρμοσθεί στην περίπτωση των ελασμάτων FRP.
- Τη θεωρητική ανάλυση της ενισχυμένης πειραματικής δοκού - δοκιμίου προκειμένου να εκτιμηθούν οι απαιτούμενες διαστάσεις του ελάσματος, που πρέπει να επικολληθεί σε αυτήν, για να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Την εφαρμογή της τροποποιημένης δοκιμής δοκού στον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης σε συγκεκριμένου τύπου ελάσματα FRP του εμπορίου.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Από τη δεκαετία του '60 μέχρι σήμερα, έχει διεξαχθεί ένα τεράστιο θεωρητικό και πειραματικό έργο πάνω στην ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Η γνώση, που έχει αναπτυχθεί στην περιοχή αυτή, έχει κωδικοποιηθεί και χρησιμοποιηθεί από πολλές χώρες στην ανάπτυξη μεθοδολογιών ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, που είναι συμβατές με τους υπάρχοντες κώδικες σχεδιασμού νέων κτιρίων στις χώρες αυτές.

Η ανάγκη ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα προκύπτει από πολλές αιτίες. Μια βασική αιτία είναι η υποβάθμιση της αντοχής που υφίστανται τα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής από τη διάβρωση. Άλλες αιτίες είναι οι βλάβες που έχουν υποστεί τα στοιχεία μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος από σεισμό ή πυρκαγιά. Η ενίσχυση του δομικού στοιχείου περιλαμβάνει την εισαγωγή

επιπρόσθετου κατάλληλου υλικού ή υλικών στο στοιχείο, με σκοπό την αύξηση της αντοχής του.

Κυρίως, σε υφιστάμενα κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, οι βασικές αντοχές που ενισχύονται είναι οι καμπτικές και οι διατμητικές αντοχές των δομικών στοιχείων. Η αύξηση της καμπτικής αντοχής ενός δομικού στοιχείου, όπως για παράδειγμα μιας δοκού, γίνεται με την προσθήκη επιπρόσθετου οπλισμού στην εφελκόμενη πλευρά του στοιχείου. Η προσθήκη αυτή μπορεί να γίνει, είτε με την κατασκευή ενός οπλισμένου μανδύα σκυροδέματος που περιβάλλει το στοιχείο, ή με την επικόλληση ελασμάτων εξωτερικά του στοιχείου. Η επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων αποτελεί μια παραδοσιακή αποτελεσματική πρακτική ενίσχυσης δοκών και υποστλωμάτων υφιστάμενων κτιρίων, παρά τα σημαντικά μειονεκτήματα που παρουσιάζει. Τα βασικά μειονεκτήματα μιας τέτοιας ενίσχυσης είναι η δυσκολία εφαρμογής του χαλύβδινου ελάσματος, η μεγάλη ακαμψία που έχει και προκαλεί αστοχία της επικόλλησης, η διάβρωση που μπορεί να υποστεί, κ.α..

Η είσοδος των υλικών FRP στην τεχνολογία τα τελευταία 20 χρόνια, έχει δώσει νέες λύσεις στον τομέα των ενισχύσεων των κατασκευών. Τα υλικά FRP παρουσιάζουν τεράστιες εφελκυστικές αντοχές, είναι αντιδιαβρωτικά, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα, είτε στη μορφή ελασμάτων ή στη μορφή φύλλων στην ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Έτσι, τα πρόσφατα χρόνια, τα ελάσματα FRP, έχουν σχεδόν αντικαταστήσει τα χαλύβδινα ελάσματα στις καμπτικές ενισχύσεις των δοκών και υποστλωμάτων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Παρόλο που η χρήση τους έχει γίνει δημοφιλής στη δομική βιομηχανία, λόγω των πλεονεκτημάτων που έχουν και του σχετικά χαμηλού κόστους τους, υπάρχουν ακόμα πολλά θέματα που πρέπει να διερευνηθούν σχετικά με τη συμπεριφορά τους. Ένα από τα θέματα αυτά είναι ο τύπος αστοχίας που παρατηρείται στις ενισχύσεις αυτές και εμφανίζεται στις ακραίες διατομές των ελασμάτων. Η αστοχία αυτή συνδέεται με τη μηχανική συμπεριφορά της συγκόλλησης των δύο υλικών. Η μηχανική αυτή συμπεριφορά αποτελεί ένα νέο καταστατικό νόμο στο δομικό στοιχείο και προσδιορίζεται πειραματικά. Πάνω στο θέμα αυτό έχει αναπτυχθεί μια εκτεταμένη πειραματική και θεωρητική έρευνα για την ανάπτυξη μοντέλων που περιγράφουν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας και για τον προσδιορισμό των σχετικών μηχανικών παραμέτρων. Η περιγραφή της μηχανικής

συμπεριφοράς της σύνδεσης των δύο υλικών γίνεται με την καμπύλη συνάφειας – ολίσθησης. Η προσομοίωση αυτή είναι το ανάλογο της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης στις ράβδους οπλισμού του δομικού στοιχείου. Οι πειραματικές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της καμπύλης αυτής, είναι τροποποιήσεις της δοκιμής εξόλκευσης που χρησιμοποιείται στις ράβδους οπλισμού, καθώς και τροποποιήσεις άλλων σχετικών δοκιμών που έχουν αναπτυχθεί για τις ράβδους οπλισμού. (Chajes et al.1995, 1996; Bizindavyi and Neale 1997, 1999; Täljsten 1997), δοκιμές διπλής διάτμησης (van Gemert 1980; Swamy et al. 1986; Kobatake et al. 1993; FORCA 1994; Brosens and van Gemert 1997; Fukuzawa et al. 1997; Hiroyuki and Wu 1997; Maeda et al. 1997; Neubauer and Rostasy 1997), και τροποποιημένες δοκιμές δοκού (van Gemert 1980; Ziraba et al. 1995).

Η θεωρητική έρευνα στην περιοχή περιλαμβάνει την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς της ενίσχυσης με FRP στα πλαίσια της μηχανικής των θραύσεων (Triantafyllou and Plevris 1992; Holzenkämpfer 1994; Täljsten 1994; Yuan and Wu 1999; Yuan et al. 2001), και την ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων που προσαρμόζονται σε πειραματικά αποτελέσματα και στηρίζονται σε απλοποιημένες υποθέσεις (van Gemert 1980; Chaallal et al. 1998; Khalifa et al. 1998). Ο Van Gemert (1980) προσδιόρισε τις τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα χαλύβδινο έλασμα, που είναι επικολλημένο σε ένα ορθογωνικό στοιχείο σκυροδέματος που καταπονείται σε διπλή διάτμηση. Η δύναμη εφελκυσμού στο χαλύβδινο έλασμα βρέθηκε ότι μειώνεται εκθετικά προς την κατεύθυνση της ακραίας διατομής του ελάσματος. Αυτό το φαινόμενο επιβεβαιώθηκε αργότερα από πολλές μελέτες πάνω στη σύνδεση χάλυβα - σκυροδέματος (Täljsten 1997) και FRP - σκυροδέματος (Maeda et al. 1997).

Η έννοια του ισοδύναμου μήκους συγκόλλησης ενός ελάσματος FRP αποτέλεσε το αντικείμενο πολλών πειραματικών ερευνών (Chajes et al. 1996; Maeda et al. 1997; Täljsten 1997) καθώς και αναλύσεων στα πλαίσια της μηχανικής των θραύσεων (Holzenkämpfer 1994; Yuan and Wu 1999; Yuan et al. 2001). Οι Hiroyuki και Wu (1997) διεξήγαγαν μια σειρά από πειράματα διπλής διάτμησης σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένα με φύλλα C-FRP. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ανέπτυξαν μια εμπειρική σχέση που συνδέει το μήκος συγκόλλησης με την τάση συνάφειας σε αστοχία. Οι Maeda et al. (1997) ανέπτυξαν ένα πληρέστερο μοντέλο που λαμβάνει υπόψη το κρίσιμο μήκος σύνδεσης.

Βασιζόμενοι σε μοντέλα της μηχανικής των θραύσεων, ο Holzenkämpfer (1994), όπως και ο Täljsten (1994), μελέτησαν την αντοχή συνάφειας μεταξύ ενός χαλύβδινου ελάσματος και σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας τη μη γραμμική μηχανική των θραύσεων. Οι Yuan και Wu (1999) και Yuan et al. (2001) μελέτησαν την τάση συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος χρησιμοποιώντας τη γραμμική ελαστική μηχανική των θραύσεων. Η έρευνά τους (Yuan and Wu 1999) κατέληξε στην ίδια εξίσωση με αυτή του Täljsten, συμπεριλαμβάνοντας όμως σε αυτή, την επίδραση που έχουν τα πλάτη του ελάσματος και του στοιχείου σκυροδέματος.

Η δομή της εργασίας

Η διπλωματική περιλαμβάνει την εισαγωγή, τέσσερα κεφάλαια και δύο παραρτήματα.

Στο Κεφάλαιο 1, περιγράφεται η τροποποιημένη δοκιμή-δοκού, για τον πειραματικό προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης του ελάσματος ενίσχυσης που επικολλήθηκε στο σκυρόδεμα. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η θεωρητική βάση της δοκιμής και περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής των καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης από τις πειραματικές μετρήσεις, που γίνονται κατά τη δοκιμή.

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση της πειραματικής δοκιμής με σκοπό τον προσδιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων στο έλασμα FRP και στη διεπιφάνεια. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται η προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, αναπτύσσεται και επιλύεται η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας, και διατυπώνεται ένα κριτήριο αστοχίας της ενίσχυσης. Το κριτήριο αυτό αποτελεί επέκταση στις επικολλήσεις ενός γνωστού κριτηρίου θραύσης της μηχανικής των θραύσεων.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται το πειραματικό έργο που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Το πειραματικό έργο έγινε στα πλαίσια ενός ευρύτερου ερευνητικού πειραματικού έργου που διεξήχθη στο εργαστήριο δομικής μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ και περιελάμβανε τον προσδιορισμό των καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης για ράβδους FRP και ελάσματα FRP. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, γίνεται

η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και κατασκευάζονται οι σχετικές πειραματικές καμπύλες.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και γίνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο Παράρτημα I παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η επεξεργασία τους. Τέλος, στο Παράρτημα II βρίσκονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της θεωρητικής έρευνας στη μορφή διαγραμμάτων, και έχει καταχωρηθεί ο σχετικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 1

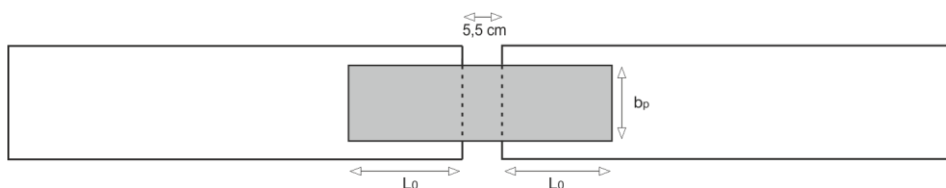
Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

1.1.1 Η γεωμετρία της δοκού-δοκιμίου και η πειραματική διάταξη

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης ενός ελάσματος από FRP για μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση, εφαρμόστηκε η εργαστηριακή δοκιμή που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ για οπλισμό με ράβδους FRP, σε μια τροποποιημένη μορφή που περιγράφεται παρακάτω.

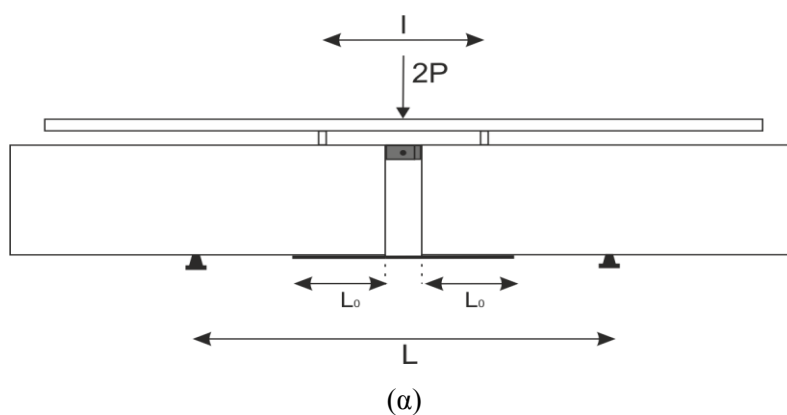
Το δοκίμιο της δοκιμής αποτελείται από μια δοκό που απαρτίζεται από δυο στοιχεία σκυροδέματος σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου διαστάσεων 15x20x60 εκατοστών. Τα δύο αυτά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με μια μηχανική άρθρωση από χάλυβα που τοποθετείται στο πάνω μέρος τους και με ένα έλασμα FRP επικολημένο στο κάτω μέρος των στοιχείων. Η μεταλλική άρθρωση είναι τυποποιημένων διαστάσεων και αγκυρώνεται με μεταλλικές ράβδους στα δυο στοιχεία του σκυροδέματος, με επαρκή μήκη αγκύρωσης. Το έλασμα FRP είναι επικολημένο στο κάτω μέρος των στοιχείων σκυροδέματος σε δύο επιφανειακά τμήματα διαστάσεων $L_0 \times b_p$. Η επικόλληση του ελάσματος γίνεται με εποξειδική ρητίνη.



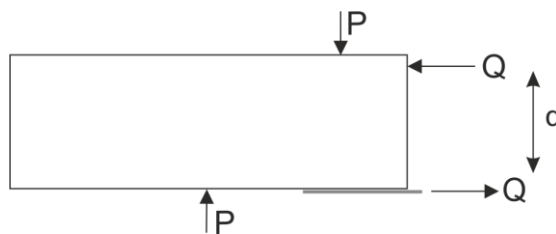
Σχήμα 1.1 Διαστασιολόγηση και θέση του ελάσματος (άνοψη)

Η δοκιμή πραγματοποιείται με μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων. Η δοκός-δοκίμιο, αφού τοποθετηθεί στη μηχανή, καταπονείται με δύο κατακόρυφες δυνάμεις που επιβάλλονται από τη μηχανή. Η επιβολή των δυνάμεων αυτών γίνεται μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου, που διαθέτει μετακινούμενες θέσεις των σημείων εφαρμογής των δυνάμεων (Σχήμα 1.2). Με το στοιχείο αυτό, η ολική δύναμη της μηχανής διαιρείται σε δυο ίσες δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στο καθένα από τα δυο στοιχεία της δοκού - δοκιμίου. Η απόσταση ανάμεσα στις θέσεις εφαρμογής των δύο δυνάμεων είναι δυνατό να μεταβάλλεται.

Η πειραματική δοκιμή εκτελείται ως εξής: η δοκός-δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή κάμψης σχηματίζοντας μια αμφι-προέχουσα αμφιέριστη δοκό με συγκεκριμένο άνοιγμα L (Σχήμα 1.2(α)). Στη συνέχεια, ρυθμίζοντας το μεταλλικό στοιχείο της μηχανής, η δοκός φορτίζεται με δυο ίσες κατακόρυφες δυνάμεις P , που απέχουν μεταξύ τους μια επιλεγμένη απόσταση l η οποία είναι μικρότερη από το άνοιγμα του δοκιμίου.



(α)



(β)

Σχήμα 1.2 (α) Η προτεινόμενη πειραματική διάταξη στη φάση εφελκυσμού του ενισχυμένου με έλασμα (plate) FRP δοκιμίου-δοκού, (β) Οι δυνάμεις P που εφαρμόζονται στη δοκό βρίσκονται μεταξύ των στηριγμάτων της δοκού.

Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια κατάσταση καθαρής κάμψης στο τμήμα της δοκού ανάμεσα στις δύο δυνάμεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στη μεσαία διατομή της δοκού, να αναπτύσσεται ένα ζεύγος δυνάμεων Q , που έχει ροπή ίση με την σταθερή καμπτική ροπή της δοκού. Επομένως στα δυο τμήματα της δοκού ασκούνται δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις Q . Η θλιπτική δύναμη Q ασκείται στην άρθρωση και η εφελκυστική δύναμη Q στο έλασμα (Σχήμα 1.2(β)). Από την ισορροπία των τμημάτων της δοκού, που δείχνεται στο Σχήμα 1.2(β), υπολογίζεται το μέγεθος των δύο αυτών δυνάμεων :

$$Q = P \frac{L-l}{2a}, \quad (1.1)$$

όπου a ο μοχλοβραχίονας του ζεύγους δυνάμεων Q .

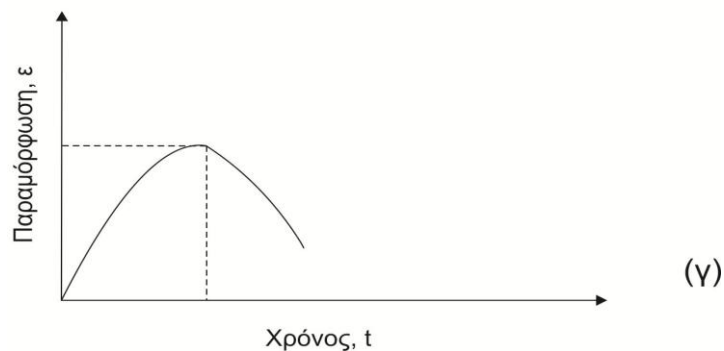
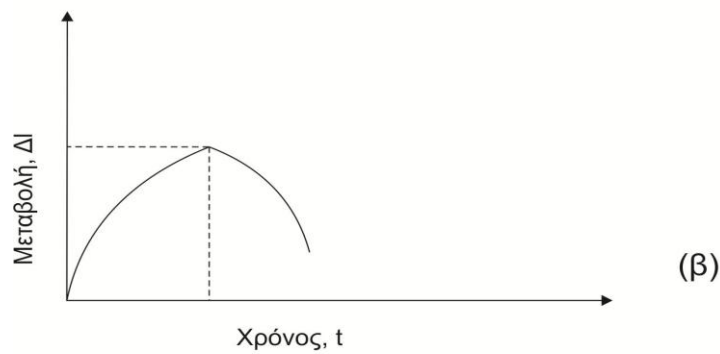
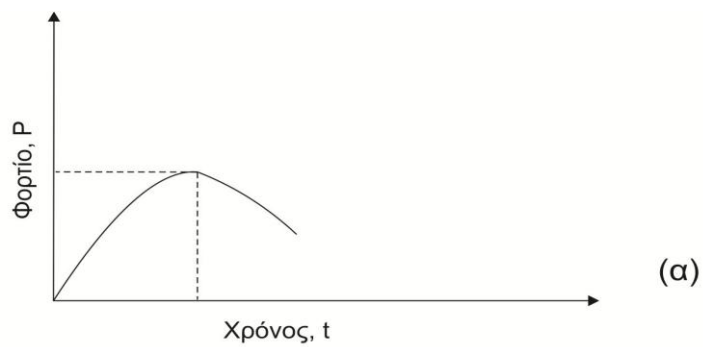
Η μεταβολή της οριζόντιας απόστασης των δυο στοιχείων του δοκιμίου μετριέται με δύο βελόμετρα που έχουν τοποθετηθεί στο μέσο της δοκού και συγκρατούνται στα δυο τμήματα της δοκού με σφιγκτήρες. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης του ελάσματος χρησιμοποιούνται μηκυνσιόμετρα, τα οποία έχουν επικολληθεί σε διάφορα εξωτερικά σημεία της επιφάνειάς του.

1.1.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής

Η πειραματική δοκιμή εκτελείται ως εξής. Αφού η δοκός-δοκίμιο τοποθετηθεί στη μηχανή, έτσι ώστε οι δύο δυνάμεις της μηχανής να εφαρμόζονται εσωτερικά των στηρίξεων, αρχίζει η επιβολή των δυνάμεων στη δοκό-δοκίμιο. Η επιβολή των δυνάμεων γίνεται σιγά-σιγά και αυξητικά, προκειμένου να αποφεύγονται δυναμικά φαινόμενα. Από την έναρξη επιβολής της δύναμης, και σε κάθε χρονική στιγμή από την έναρξη επιβολής της δύναμης, καταγράφονται:

- Το επιβαλλόμενο φορτίο P της μηχανής στη δοκό από την έναρξη της επιβολής της φόρτισης.

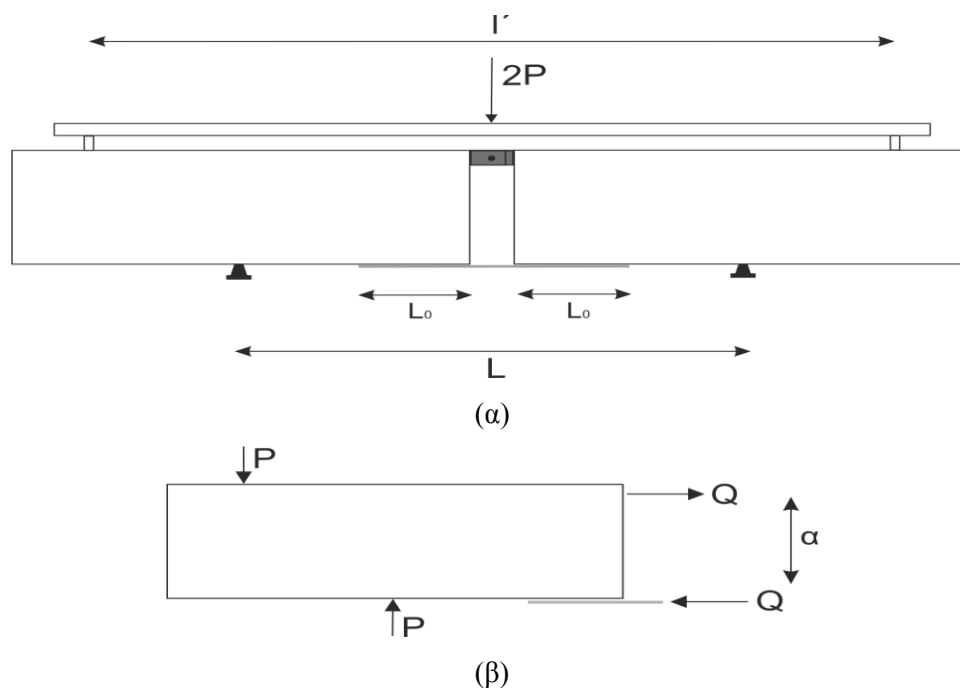
- Οι οριζόντιες μετατοπίσεις Δl_u των εσωτερικών ακραίων διατομών των δύο ορθογωνίων στοιχείων της δοκού, από την αρχική τους θέση, στο ύψος του ελάσματος ενίσχυσης.
- Η παραμόρφωση $\varepsilon_{p,0}$ στα σημεία Α του μη συγκολλημένου τμήματος του ελάσματος, που βρίσκεται στο ενδιάμεσο τμήμα της δοκού.
- Οι παραμορφώσεις $\varepsilon_{p,M}$ στα δύο σημεία Μ του συγκολλημένου τμήματος του ελάσματος.



Σχήμα 1.3 Οι καμπύλες που λαμβάνονται κατά την δοκιμή ως συνάρτηση του χρόνου.

Οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε κάθε χρονική στιγμή εκτέλεσης του πειράματος. Αν η επιβαλλόμενη δύναμη μεταβάλλεται αυξητικά, τότε έχουμε φόρτιση της δοκού, και ο αντίστοιχος κλάδος της καμπύλης αποτελεί το κλάδο φόρτισης. Κατά την εξέλιξη της δοκιμής μπορούμε να πάρουμε κλάδους αποφόρτισης της δοκού ως εξής. Σε κάποια χρονική στιγμή, που το φορτίο αντιστοιχεί σε μία τιμή P , αρχίζουμε να μειώνουμε το φορτίο της μηχανής, μέχρι τη μηδενική του τιμή. Κατά την αποφόρτιση, καταγράφονται οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών, έως ότου το φορτίο μηδενιστεί. Για μονότονες φορτίσεις, οι καμπύλες που λαμβάνονται κατά την πειραματική διαδικασία θα είναι της μορφής που δείχνεται στο Σχήμα 1.3.

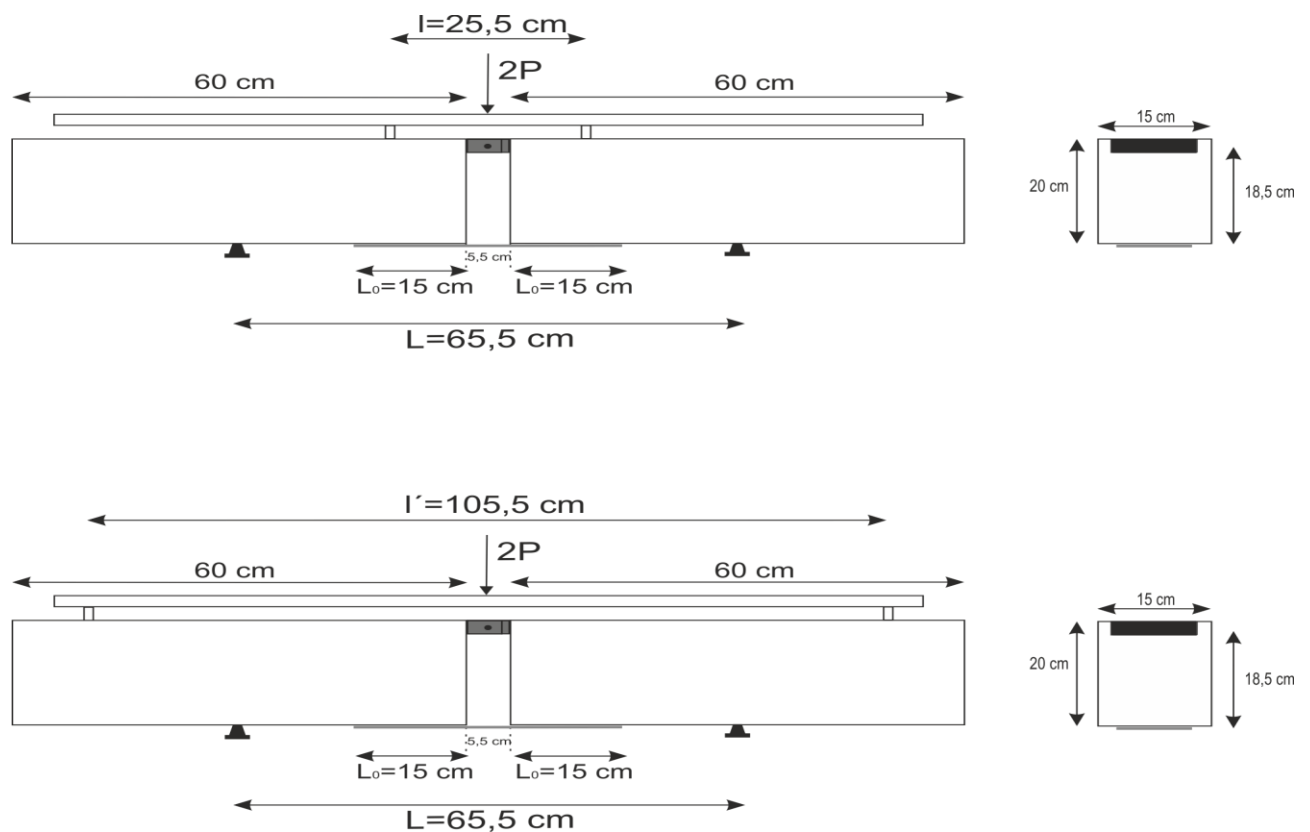
Μετά το μηδενισμό της φόρτισης, μπορεί να γίνει ανακύκλιση της φόρτισης. Για να πραγματοποιηθεί ανακύκλιση της φόρτισης, ρυθμίζεται η απόσταση των επιβαλλόμενων δυνάμεων να είναι ίση με l' , που είναι μεγαλύτερη από το άνοιγμα L του δοκιμίου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται πάλι μια κατάσταση καθαρής κάμψης μεταξύ των στηριγμάτων της δοκού. Οι ροπές έχουν αντίθετο πρόσημο από τις προηγούμενες, με συνέπεια οι δύο δυνάμεις που αναπτύσσονται στην άρθρωση και στη ράβδο να έχουν αντίθετη φορά.



Σχήμα 1.4 (α) Η πειραματική διάταξη στη φάση θλίψης του ενισχυμένου με έλασμα (plate) FRP δοκιμίου-δοκού, (β) Οι δυνάμεις P που εφαρμόζονται στη δοκό βρίσκονται έξω από τα στηρίγματα της δοκού

1.1.3 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού δοκιμίου

Από τη σχετική ανάλυση, που έχει γίνει από τον Καρατζαφέρη (2009), έχουν προταθεί οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού-δοκιμίου που δείχνονται στο Σχήμα 1.5. Οι διαστάσεις αυτές έχουν επιλεγθεί έτσι ώστε να αποφευχθούν τοπικά φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων και επίδρασης ανεπιθύμητων φορτίσεων στο επικολημένο έλασμα, σαν μια πρώτη προσέγγιση στο σχεδιασμό της τροποποιημένης πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 1.5 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της πειραματικής δοκού : (α) στην περίπτωση του εφελκυσμού και (β) στην περίπτωση θλίψης

1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Από τα πειραματικά στοιχεία που προκύπτουν από την εκτέλεση της δοκιμής, και συγκεκριμένα

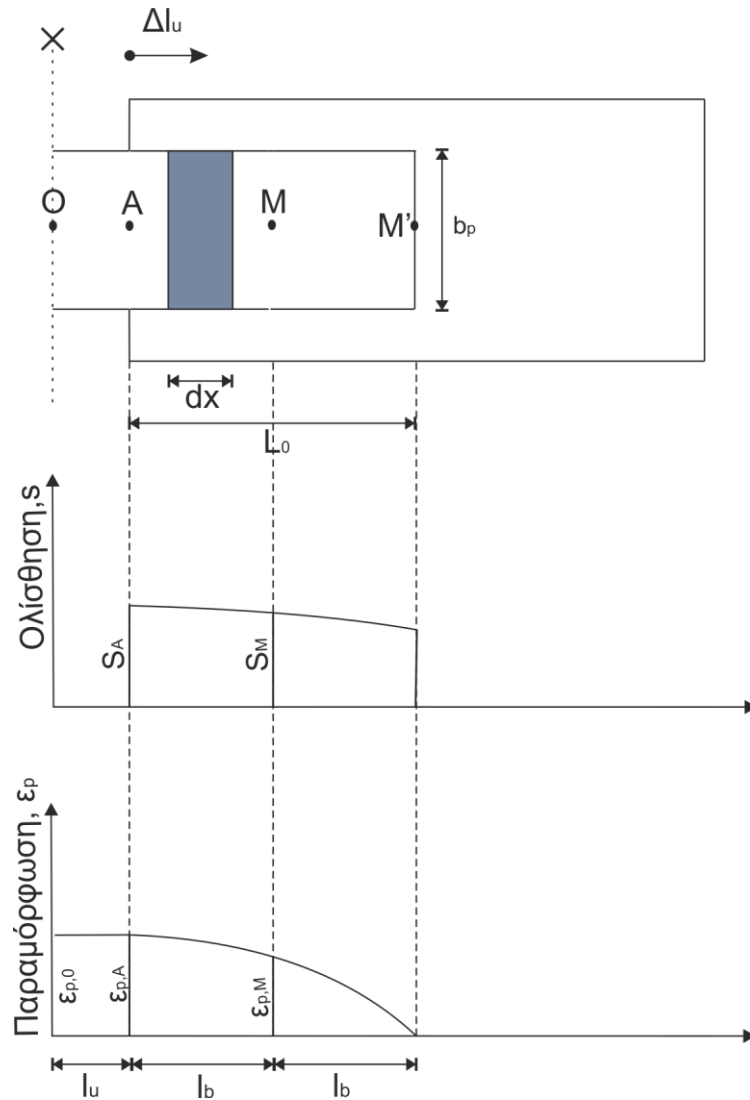
- από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων, που υφίσταται το έλασμα FRP στα σημεία A και M , και
- από τη μέτρηση της οριζόντιας μετακίνησης Δl_u των δύο ορθογωνίων τμημάτων της δοκού,

προσδιορίζονται οι ολισθήσεις των δύο τμημάτων του ελάσματος σε κάθε χρονική στιγμή t , ή διαφορετικά, για κάθε τιμή της εξωτερικής φόρτισης P .

Για τον προσδιορισμό της ολίσθησης γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Η παραμόρφωση που υφίστανται τα δύο στοιχεία της δοκού από σκυρόδεμα είναι αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί. Τα στοιχεία αυτά συμπεριφέρονται ως απόλυτα άκαμπτα σώματα.
- Το έλασμα παραμορφώνεται και η καταστατική συμπεριφορά του είναι γνωστή από σχετικές πειραματικές δοκιμές. Η συμπεριφορά αυτή είναι μια σχέση μεταξύ της ορθής τάσης σ_p , που το καταπονεί, και της ορθής παραμόρφωσης ε_p , δηλαδή μια σχέση $\sigma_p = f(\varepsilon_p)$. Στην περίπτωση της ενίσχυσης FRP, η σχέση αυτή θεωρείται γραμμική, δηλαδή $\sigma_p = E_p \varepsilon_p$, όπου E_p είναι το μέτρο ελαστικότητας.

Η μηχανική συμπεριφορά της σύνδεσης των δύο υλικών, δηλαδή του σκυροδέματος και του ελάσματος ενίσχυσης, προσομοιώνεται με μια συνεχή διανομή ελατηρίων, αμελητέου πάχους, που είναι διανεμημένα πάνω στη διεπιφάνεια. Για ένα απειροστό τμήμα dx του ελάσματος, αντιστοιχεί μια εξωτερική απειροστή επιφάνεια $dA = b_p dx$. Τα ελατήρια, που είναι διανεμημένα πάνω σε αυτήν την απειροστή επιφάνεια, αναπτύσσουν μια δύναμη $dT = \alpha dA$ και επιμηκύνονται όλα κατά s . Η επιμήκυνση s αντιπροσωπεύει την ολίσθηση στη θέση x του ελάσματος, που βρίσκεται το απειροστό τμήμα dx (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 1.6 Η ολίσθηση και η παραμόρφωση κατά μήκος του επικολλημένου τμήματος του ελάσματος

Η ολίσθηση υπολογίζεται από τη μέση τιμή των ολισθήσεων, που αναπτύσσονται μεταξύ των σημείων A και M των επικολλημένων τμημάτων του ελάσματος. Η μεταβολή της ολίσθησης κατά μήκος του τμήματος AM του ελάσματος δείχνεται στο Σχήμα 1.6. Αν η διανομή της ολίσθησης στο τμήμα του ελάσματος μεταξύ των σημείων A και M προσεγγισθεί γραμμικά, τότε η μέση τιμή της ολίσθησης θα είναι ίση με

$$s_{ave} = \frac{s_A + s_M}{2} \quad (1.2)$$

όπου s_A και s_M είναι οι ολισθήσεις των σημείων A και M, αντίστοιχα.

Μεταξύ των σημείων O και A , η παραμόρφωση που υφίσταται το έλασμα ενίσχυσης είναι σταθερή και ίση με $\varepsilon_{p,0}$. Αυτό συμβαίνει, επειδή η δύναμη που καταπονεί το έλασμα μεταξύ των σημείων αυτών είναι σταθερή. Μεταξύ των σημείων A και M , η παραμόρφωση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση. Η μεταβολή της παραμόρφωσης κατά μήκος του ελάσματος δείχνεται στο Σχήμα 1.6. Αν η μεταβολή της παραμόρφωσης στο τμήμα AM προσεγγισθεί γραμμικά, τότε η μέση παραμόρφωση στο τμήμα αυτό θα είναι

$$\varepsilon_{p,ave} = \frac{\varepsilon_{p,A} + \varepsilon_{p,M}}{2}. \quad (1.3)$$

Το αρχικό μήκος OM του ελάσματος ενίσχυσης είναι

$$OM = l_u + l_b \quad (1.4)$$

Το μήκος αυτό μετά την παραμόρφωση θα είναι

$$OM' = (l_u + \varepsilon_{p,0}l_u) + (l_b + \varepsilon_{p,ave}l_b) \quad (1.5)$$

Η ολίσθηση του σημείου M του ελάσματος θα είναι ίση με

$$s_M = (l_u + l_b + \Delta l_u) - OM' = \Delta l_u - \varepsilon_{p,0}l_u - \varepsilon_{p,ave}l_b \quad (1.6)$$

όπου Δl_u είναι η οριζόντια μετακίνηση του δεξιού τμήματος του ελάσματος, που αντιστοιχεί σε κίνηση απολύτως στερεού σώματος και έχει υπολογισθεί πειραματικά σε κάθε χρονική στιγμή της πειραματικής διαδικασίας. Η απόσταση του δεξιού τμήματος της δοκού από το κέντρο της θα είναι ίση με $l_u + \Delta l_u$. Το μήκος αυτό θα αντιστοιχεί στο άθροισμα του παραμορφωμένου ενδιάμεσου τμήματος του ελάσματος $(l_u + \varepsilon_{p,0}l_u)$ και της ολίσθησης s_A του σημείου A , δηλαδή θα ισχύει

$$l_u + \Delta l_u = (l_u + \varepsilon_{p,0}l_u) + s_A \quad (1.7)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει

$$s_A = \Delta l_u - \varepsilon_{p,0}l_u \quad (1.8)$$

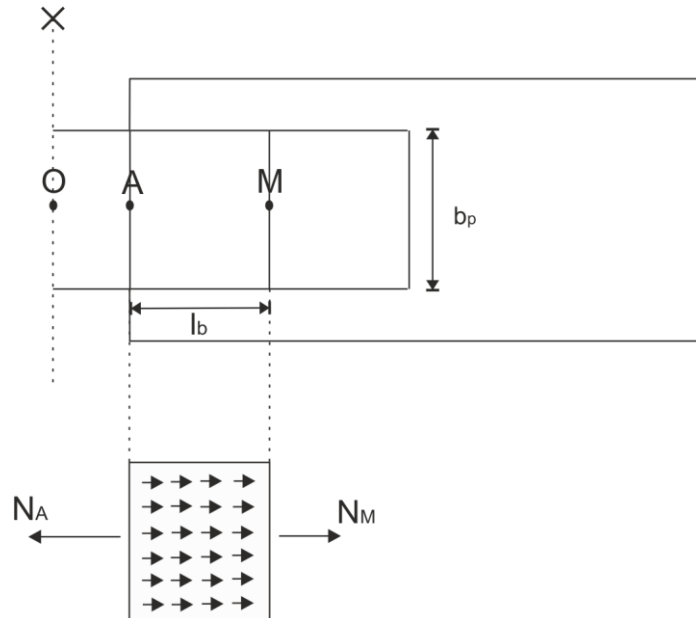
Έτσι από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) προκύπτει η μέση ολίσθηση του ελάσματος

$$s_{ave} = \Delta l_u - \varepsilon_{p,0}l_u - \frac{1}{2}\varepsilon_{p,ave}l_b \quad (1.9)$$

1.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

1.3.1 Ο προσδιορισμός τάσης συνάφειας

Στη συνέχεια, θα υπολογιστεί η μέση διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο τμήμα AM του επικολλημένου τμήματος του ελάσματος ενίσχυσης της δοκού-δοκιμίου, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t της πειραματικής διαδικασίας. Η μέση αυτή διατμητική τάση είναι η (μέση) τάση συνάφειας του ελάσματος ενίσχυσης και δηλώνεται με τ_{ave} .



Σχήμα 1.7 Οι δυνάμεις N_A , N_M και οι τάσεις συνάφειας στο επικολλημένο τμήμα AM

Για την εκτίμηση της τάσης αυτής θεωρείται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος του τμήματος AM του ελάσματος, που δείχνεται στο Σχήμα 1.7. Στο σχήμα αυτό επενεργούν οι δυνάμεις N_A και N_M στις διατομές A και M , που προέρχονται από τις ορθές τάσεις του ελάσματος $\sigma_{p,A}$ και $\sigma_{p,M}$ στις διατομές αυτές. Αν t_p το πάχος του ελάσματος και b_p το πλάτος του, οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$N_A = b_p t_p \sigma_{p,A}, \quad N_M = b_p t_p \sigma_{p,M} \quad (1.10)$$

Αν η συμπεριφορά του ελάσματος ενίσχυσης διέπεται από το γραμμικό νόμο του Hooke, τότε οι τάσεις $\sigma_{p,A}$ και $\sigma_{p,M}$ υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$\sigma_{p,A} = E_p \varepsilon_{p,A}, \quad \sigma_{p,M} = E_p \varepsilon_{p,M}. \quad (1.11)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις αυτές, οι δυνάμεις N_A και N_M παίρνουν τη μορφή

$$N_A = b_p t_p E_p \varepsilon_{p,A}, \quad N_M = b_p t_p E_p \varepsilon_{p,M} \quad (1.12)$$

Σε κάθε στοιχειώδες μήκος dx του τμήματος AM , αναπτύσσεται μια διατμητική τάση τ , που αντιστοιχεί σε μια δύναμη $dF = (\tau b_p) dx$, όπου ο όρος στην παρένθεση αντιπροσωπεύει την εξωτερική άνω επιφάνεια του στοιχειώδους τμήματος dx του ελάσματος που είναι επικολλημένο στο στοιχείο σκυροδέματος. Η δύναμη αυτή προέρχεται από τα διεπιφανειακά ελατήρια του τμήματος dx . Η συνολική δύναμη που αναπτύσσεται από τα ελατήρια που είναι διανεμημένα στο τμήμα AM του ελάσματος είναι

$$F = \int_A^M \tau b_p dx. \quad (1.13)$$

Από την ισορροπία του τμήματος AM , προκύπτει η σχέση

$$F = N_A - N_M \quad (1.14)$$

Παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις (1.13), (1.14) η δύναμη T γράφεται στη μορφή

$$F = b_p t_p E_p (\varepsilon_{p,A} - \varepsilon_{p,M}). \quad (1.15)$$

Η μέση διατμητική τάση τ_{ave} πάνω στο τμήμα AM ορίζεται με τη σχέση

$$\tau_{ave} = \frac{F}{b_p l_b}, \quad (1.16)$$

όπου η ποσότητα $b_p l_b$ αντιπροσωπεύει την εξωτερική επιφάνεια στο τμήμα AM του ελάσματος. Αντικαθιστώντας τη σχέση (1.15) στη (1.16), προκύπτει

$$\tau_{ave} = \frac{t_p E_p}{l_b} (\varepsilon_{p,A} - \varepsilon_{p,M}). \quad (1.16)$$

Έτσι, γνωρίζοντας τις τιμές της παραμόρφωσης στις θέσεις A και M του ελάσματος ενίσχυσης από τις πειραματικές μετρήσεις, η μέση τάση συνάφειας για τη χρονική στιγμή t , που αντιστοιχούν οι μετρήσεις αυτές, υπολογίζονται από τη σχέση (1.17).

1.3.2 Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης

Παρουσιάστηκε παραπάνω, πως από τις πειραματικές μετρήσεις που γίνονται κατά τη διαδικασία της πειραματικής δοκιμής-δοκού, υπολογίζονται η μέση ολίσθηση s_{ave} και η μέση διατμητική τάση (συνάφεια) τ_{ave} σε κάθε τιμή της δύναμης P της μηχανής. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει για κάθε επιβαλλόμενη φόρτιση P και να προσδιοριστούν οι καμπύλες $s_{ave} = s_{ave}(P)$ και $\tau_{ave} = \tau_{ave}(P)$, ως συναρτήσεις της δύναμης P .

Απαλείφοντας την παράμετρο της δύναμης από τις σχέσεις αυτές προκύπτει η καμπύλη $\tau_{ave} = f(s_{ave})$, που είναι η πειραματική καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης του συγκεκριμένου ελάσματος που χρησιμοποιήθηκε στην τροποποιημένη δοκιμή δοκού.

Κεφάλαιο 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση της πειραματικής δοκιμής, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1. Ο σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι να προσδιορισθούν θεωρητικά οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις στο έλασμα FRP και στη διεπιφάνεια ελάσματος FRP - σκυροδέματος, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση των κατάλληλων διαστάσεων που πρέπει να έχει το έλασμα FRP κατά τη δοκιμή, για την εξαγωγή αξιόπιστων πειραματικών καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης. Η θεωρητική ανάλυση περιλαμβάνει:

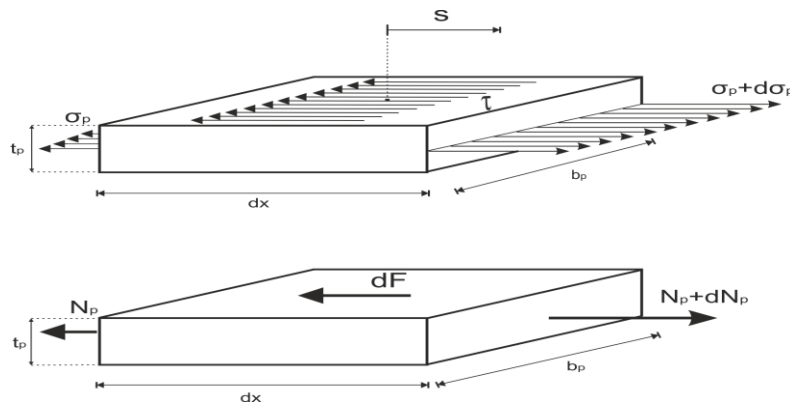
- Την ανάπτυξη της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την μηχανική συμπεριφορά του συστήματος έλασμα FRP – διεπιφάνεια - στοιχείο σκυροδέματος.
- Την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας.
- Την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης για δύο διακριτές συμπεριφορές της διεπιφάνειας: την ψαθυρή συμπεριφορά και την πλάστιμη συμπεριφορά.
- Την εισαγωγή ενός κριτηρίου αστοχίας της ενίσχυσης που στηρίζεται στη μηχανική των θραύσεων.

2.2 Η ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της ενισχυμένης δοκού γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

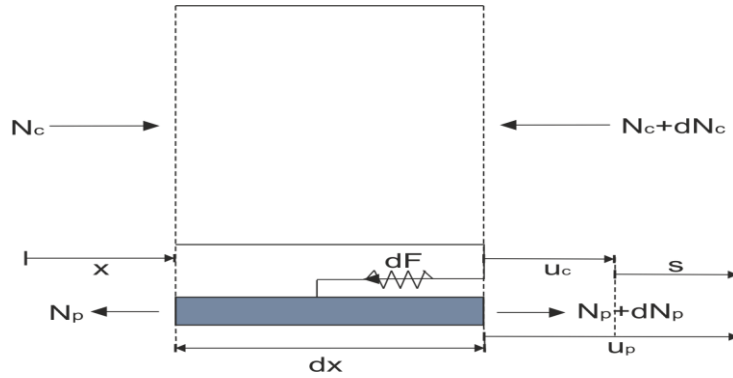
- Το έλασμα προσομοιώνεται με μια μεμβράνη, στην οποία αναπτύσσονται μόνο ορθές (μεμβρανικές) τάσεις.
- Η σύνδεση του ελάσματος με τη δοκό, που γίνεται με την εποξειδική ρητίνη, προσομοιώνεται με μια διανομή διατμητικών ελατηρίων αμελητέου πάχους. Η μηχανική συμπεριφορά της ελατηριακής σύνδεσης των δύο υλικών περιγράφεται με μια πειραματική σχέση $\tau = f(s)$, που αποτελεί έναν επιπρόσθετο καταστατικό νόμο στην ενισχυμένη δοκό.
- Η συμπεριφορά του ελάσματος ενίσχυσης είναι γραμμική μέχρι τη διάρρηξή του.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, θα εξαχθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν την εντατική κατάσταση της ενισχυμένης δοκού. Σε ένα διεπιφανειακό στοιχειώδες τμήμα του ελάσματος ενίσχυσης $dA = b_p dx$ (Σχήμα 2.1), αντιστοιχεί ένα διεπιφανειακό ελατήριο σύνδεσης. Όταν η δοκός φορτισθεί, στο στοιχείο αυτό θα αναπτυχθεί η ελατηριακή δύναμη $dF = \alpha dA$, η ελατηριακή επέκταση s και οι ορθές τάσεις σ_p και $\sigma_p + d\sigma_p$.



Σχήμα 2.1 Το διάγραμμα ενός ελεύθερου στοιχειώδους τμήματος του ελάσματος

Στο σχήμα αυτό, οι N_p και $N_p + dN_p$ είναι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις δύο διατομές του στοιχειώδους τμήματος του ελάσματος. Η ελατηριακή σύνδεση που αντιστοιχεί στο στοιχειώδες τμήμα της ενισχυμένης δοκού, δείχνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Η προσομοίωση της σύνδεσης με ελατήρια και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε ένα απειροστό τμήμα της ενισχυμένης δοκού

Κατά την παραμόρφωση της ενισχυμένης δοκού, αναπτύσσονται οι μετατοπίσεις u_p και u_c στο στοιχείο του ελάσματος και του σκυροδέματος αντίστοιχα (Σχήμα 2.2). Η ελατηριακή επιμήκυνση σημειώνεται με s και είναι ίση με

$$s = u_p - u_c . \quad (2.1)$$

Η ελατηριακή επιμήκυνση, που αντιστοιχεί στην ολίσθηση, αποτελεί την σχετική μετατόπιση των δύο υλικών. Από την ισορροπία του στοιχειώδους τμήματος του ελάσματος, προκύπτει

$$N_p + dF = N_p + dN_p \quad (2.2)$$

όπου

$$N_p = \sigma_p t_p b_p , \quad (2.3)$$

$$dN_p = d\sigma_p t_p b_p \quad (2.4)$$

και

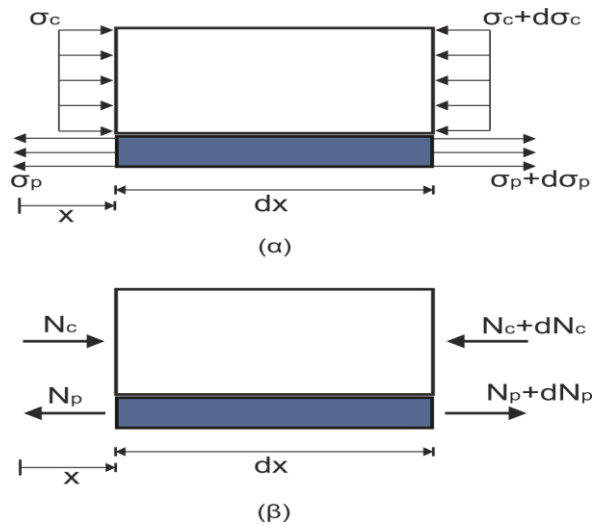
$$dF = \tau b_p dx . \quad (2.5)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$\tau = t_p \frac{d\sigma_p}{dx} . \quad (2.6)$$

Αυτή είναι η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την ισορροπία ενός απειροστού τμήματος του ελάσματος ενίσχυσης.

Για απλότητα, θα θεωρήσουμε ότι, στη διατομή x του ενισχυμένου στοιχείου του σκυροδέματος, τα εντατικά μεγέθη διατομής ανάγονται σε μια ομοιόμορφη διανομή τάσεων $\sigma_c (\equiv N_c / h_c b_c)$ πάνω στην επιφάνεια της διατομής $h_c b_c$ (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 (α) Οι ορθές τάσεις και (β) οι δυνάμεις στο στοιχειώδες τμήμα της ενισχυμένης δοκού

Η ορθή αυτή τάση θα υποθέσουμε ότι προκαλεί μια μέση παραμόρφωση στο στοιχειώδες μήκος dx του στοιχείου σκυροδέματος ίση με ε_c . Αν υποθέσουμε ελαστική συμπεριφορά για το σκυρόδεμα, θα ισχύει η σχέση

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad (2.7)$$

όπου E_c είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Η δύναμη που επενεργεί στο σκυρόδεμα είναι θλιπτική και ίση με

$$N_c = \sigma_c b_c h_c. \quad (2.8)$$

Από την ισορροπία των δυνάμεων έχουμε τη σχέση

$$N_c = N_p \quad (2.9)$$

και, επομένως,

$$\sigma_c b_c h_c = \sigma_p b_p t_p. \quad (2.10)$$

Οι διαμήκεις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα δύο υλικά είναι

$$\varepsilon_c = \frac{du_c}{dx}, \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_p = \frac{du_p}{dx}. \quad (2.12)$$

Από την ελαστική συμπεριφορά των υλικών, που περιγράφεται με το νόμο του Hooke, έχουμε

$$\sigma_c = E_c \frac{du_c}{dx}, \quad (2.13)$$

$$\sigma_p = E_p \frac{du_p}{dx}. \quad (2.14)$$

Από τις εξισώσεις (2.1),(2.10),(2.13-2.14), εύκολα εξάγονται οι σχέσεις των ορθών τάσεων, που αναπτύσσονται στα δύο υλικά, με την ολίσθηση s

$$\sigma_p = \frac{1}{\frac{1}{E_p} + \frac{b_p t_p}{b_c h_c E_c}} \frac{ds}{dx}, \quad (2.15)$$

$$\sigma_c = \frac{1}{\frac{b_c h_c}{b_p t_p E_p} + \frac{1}{E_c}} \frac{ds}{dx}. \quad (2.16)$$

Εισάγοντας την (2.6) στην (2.15), προκύπτει η διαφορική εξίσωση

$$\frac{d^2 s}{dx^2} - \left(\frac{1}{t_p E_p} + \frac{b_p t_p}{h_c b_c t_p E_c} \right) \tau = 0 \quad (2.17)$$

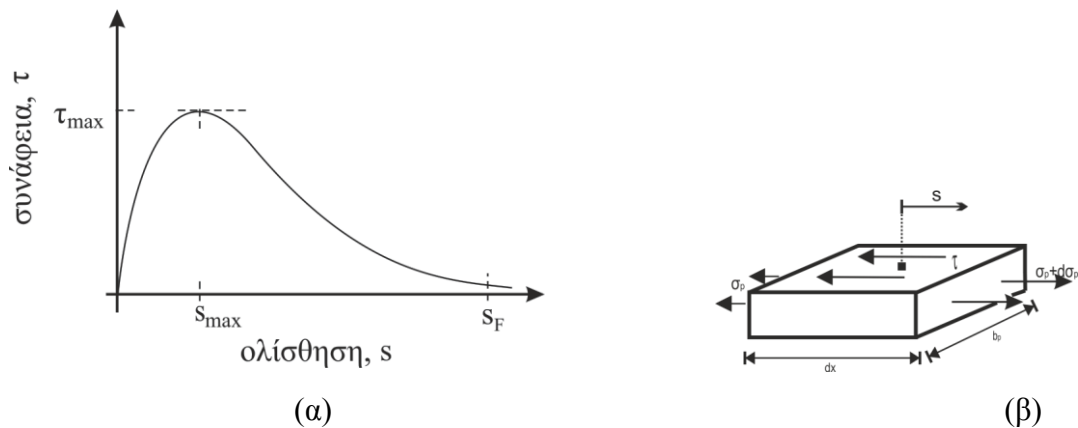
Αν, για παράδειγμα, θέσουμε $t_p = 1,2mm$, $E_p = 160MPa$, $E_c = 25MPa$, $h_c = 200mm$, $b_c = 150mm$ και $b_p = 100mm$, παρατηρούμε μετά τους σχετικούς υπολογισμούς ότι ο δεύτερος όρος, που υπεισέρχεται στην παρένθεση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης, είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους από τον πρώτο και επομένως μπορεί να απαλειφθεί. Άρα η διαφορική εξίσωση της ολίσθησης, παίρνει την απλοποιημένη μορφή

$$\frac{d^2 s}{dx^2} - \frac{1}{t_p E_p} \tau(s) = 0 \quad (2.18)$$

Η διαφορική αυτή εξίσωση μπορεί να επιλυθεί όταν είναι γνωστή η σχέση συνάφειας-ολίσθησης $\tau = \tau(s)$. Η σχέση αυτή προσδιορίζεται από πειραματικά αποτελέσματα.

2.3 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε, η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (2.18) απαιτεί την αναλυτική περιγραφή του νόμου συνάφειας-ολίσθησης $\tau = \tau(s)$. Η σχέση αυτή, που αποτελεί τον νόμο συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, εξάγεται πειραματικά με τη δοκιμή που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1. Από τη δοκιμή αυτή, μπορεί να αποκτηθεί η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης, τόσο για μονότονη, όσο και για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η πειραματική καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης προσομοιώνεται αναλυτικά προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις σχετικές αναλύσεις. Για μονότονες φορτίσεις, η πειραματική καμπύλη της σχέσης αυτής προσομοιώνεται με τη μορφή που δείχνεται στο Σχήμα 2.4 (α).



Σχήμα 2.4 (α) Η πειραματική μορφή της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης, (β) τάσεις συνάφειας, ορθές τάσεις στο απειροστό στοιχείο του ελάσματος

Η καμπύλη αυτή δείχνει ότι η τάση συνάφειας αυξάνει με την ολίσθηση μη γραμμικά μέχρι μια μέγιστη τιμή s_{\max} , που αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση συνάφειας τ_{\max} . Στην συνέχεια, ακολουθεί ένας κατερχόμενος κλάδος της καμπύλης, ο οποίος προσεγγίζει ασυμπτωτικά τον άξονα ολίσθησης καθώς αυξάνει η ολίσθηση. Ο κλάδος αυτός περιγράφει το προοδευτικό αδυνάτισμα των δεσμών, που συμβαίνει σε ένα

στοιχειώδες τμήμα της διεπιφάνειας, μέχρις ότου το τμήμα αυτό διασπαστεί σε δύο επιφάνειες, που πρακτικά, συμβαίνει για μεγάλες τιμές της ολίσθησης.

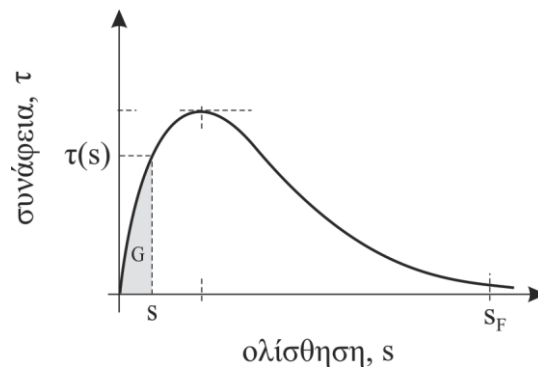
Θεωρούμε, τώρα, ένα απειροστό τμήμα του ελάσματος FRP με μήκος dx και εμβαδό εξωτερικής επιφάνειας (διεπιφάνειας) ίσο με $dA = b_p dx$ (Σχήμα 2.4(β)). Όταν στο τμήμα αυτό, για μονότονες συνθήκες φόρτισης, η ολίσθηση φτάσει την τιμή s , η ενέργεια παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στο στοιχειώδες τμήμα dA της διεπιφάνειας είναι ίση με

$$dU = \int_0^s [\tau(s)dA]ds = GdA, \quad (2.19)$$

όπου έχει τεθεί

$$G = \frac{dU}{dA} = \int_0^s \tau(s)ds. \quad (2.20)$$

Από την σχέση αυτή προκύπτει ότι το ολοκλήρωμα αυτό αντιπροσωπεύει την επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης στην θέση x του ελάσματος, που βρίσκεται το στοιχειώδες τμήμα dx . Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στους δεσμούς σύνδεσης των δύο υλικών, που αντιστοιχούν στο στοιχειώδες διεπιφανειακό τμήμα dA . Η ποσότητα αυτή G είναι συνάρτηση της ολίσθησης s , και ισούται με το εμβαδό του σκιαγραμμισμένου τμήματος που δείχνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας G στο διάγραμμα τ - s

Συγκεκριμένα, η παράμετρος G εκφράζει την ποσότητα ενέργειας παραμόρφωσης που αποθηκεύεται σε ένα επιφανειακό στοιχείο dA του σώματος. Κάθε επιφανειακό στοιχείο dA του σώματος έχει την ικανότητα να αποθηκεύει μια μέγιστη ποσότητα ενέργειας παραμόρφωσης, που αποτελεί την κρίσιμη ποσότητα θραύσης του υλικού

του σώματος. Η κρίσιμη αυτή ποσότητα, που θα δηλώνεται με G_c , εξαρτάται από το υλικό και προσδιορίζεται πειραματικά. Όταν είναι γνωστή η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης για μια διεπιφάνεια ελάσματος ενίσχυσης - σκυροδέματος, η κρίσιμη αυτή ποσότητα αντιστοιχεί στο εμβαδόν που περιορίζεται μεταξύ της καμπύλης και του άξονα ολίσθησης s . Αν θεωρηθεί ότι στην τιμή ολίσθησης s_F , έχει επέλθει ο πλήρης διαχωρισμός των δύο διεπιφανειών, τότε η κρίσιμη ποσότητα $G_{c,II}$ που αντιστοιχεί στην θραύση του στοιχείου είναι

$$G_{c,II} = \int_0^{s_F} \tau(s) ds \quad (2.21)$$

Η κρίσιμη αυτή παράμετρος εφοδιάζεται με τον επιπρόσθετο δείκτη II , προκειμένου να υπενθυμίζει τον διατμητικό χαρακτήρα (τύπου II) που έχει η διεπιφανειακή αστοχία.

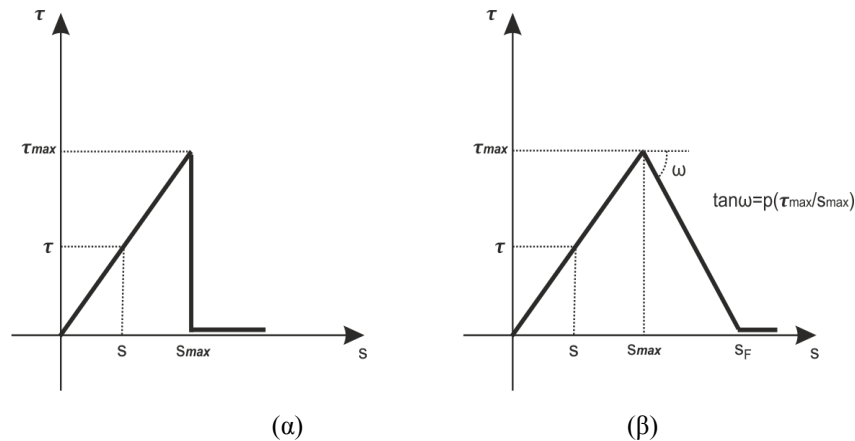
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ο νόμος συνάφειας-ολίσθησης προσομοιώνεται με τις παρακάτω διγραμμικές σχέσεις

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \begin{cases} \frac{s}{s_{\max}}, & \text{όταν } 0 < s < s_{\max} \\ 1 - (s - s_{\max}) \frac{p}{s_{\max}}, & \text{όταν } s_{\max} < s < s_F \\ 0, & \text{όταν } s > s_F \end{cases} \quad (2.22)$$

όπου το s_{\max} είναι η τιμή της ολίσθησης που αντιστοιχεί στην μέγιστη διατμητική τάση τ_{\max} , το s_F είναι η μέγιστη τιμή της ολίσθησης για την οποία επέρχεται αποκόλληση του ελάσματος και το p είναι μια παράμετρος που δείχνει την κλίση των κατερχόμενων κλάδων. Η γραφική παράσταση της απλοποιημένης μορφής του νόμου συνάφειας - ολίσθησης δείχνεται στο Σχήμα 2.6.

Στην ανάλυση που θα γίνει, θα εξετασθούν δύο διακριτές μορφές του νόμου αυτού: η μία μορφή αντιστοιχεί στην ψαθυρή συμπεριφορά της διεπιφάνειας και η άλλη στην πλάστιμη συμπεριφορά. Η πλάστιμη συμπεριφορά περιγράφεται με τη μορφή που δείχνεται στο Σχήμα 2.6(β), ενώ η ψαθυρή συμπεριφορά δείχνεται στο Σχήμα 2.6(α). Στην ψαθυρή συμπεριφορά, η τάση συνάφειας, μετά την μέγιστη τιμή τ_{\max} , μηδενίζεται ξαφνικά. Αυτό σημαίνει ότι οι διατμητικοί δεσμοί συνάφειας που

συγκρατούν τις επιφάνειες των δύο υλικών καταστρέφονται ολοσχερώς, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση της ενέργειας $G_{c,II} dA$. Στην πλαστική συμπεριφορά, η τάση συνάφειας, μετά την μέγιστη τιμή της τ_{max} συνεχώς



Σχήμα 2.6 Οι δύο απλοποιημένες μορφές του νόμου συνάφειας-ολίσθησης

μειώνεται καθώς αυξάνει η ολίσθηση, μέχρι μια τελική τιμή s_F . Στην τιμή αυτή, θεωρείται ότι συμβαίνει ο πλήρης διαχωρισμός της διεπιφάνειας, δηλαδή η αποκόλληση. Όταν η ολίσθηση στο διεπιφανειακό τμήμα dA αντιστοιχεί στον κατερχόμενο κλάδο, ένα μεγάλο ποσοστό των διατμητικών δεσμών του στοιχειώδους αυτού τμήματος dA έχει καταστραφεί. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια μεγάλη συσσώρευση βλάβης στο τμήμα αυτό. Οι βλάβες αυτές αυξάνονται με την αύξηση της ολίσθησης, μέχρι την ολοσχερή καταστροφή των δεσμών του στοιχείου dA , που συμβαίνει όταν η ολίσθηση πάρει την τιμή s_F . Για την περίπτωση της πλαστικής συμπεριφοράς, η κρίσιμη τιμή της επιφανειακής πυκνότητας ενέργειας παραμόρφωσης υπολογίζεται από τις σχέσεις (2.21) και (2.22) στην μορφή:

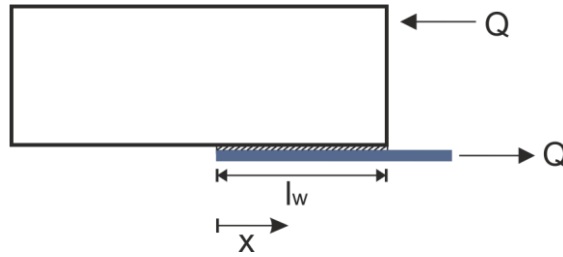
$$G_{c,II} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{\rho} \right] \tau_{max} s_{max} \quad (2.23)$$

Η ψαθυρή συμπεριφορά της διεπιφάνειας αντιστοιχεί στην περίπτωση κατά την οποία ο κατερχόμενος κλάδος γίνεται κάθετος στον άξονα ολίσθησης. Στην περίπτωση αυτή η ποσότητα $G_{c,II}$, παίρνει την μορφή

$$G_{c,II} = \frac{1}{2} \tau_{max} s_{max} \cdot \quad (2.24)$$

2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ

Στη συνέχεια, η διαφορική εξίσωση (2.18) θα επιλυθεί για το μοντέλο της ενισχυμένης δοκού δοκιμίου, που δείχνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7

Στην περίπτωση, αυτή η εξίσωση (2.18) γράφεται

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \frac{1}{t_p E_p} \tau(s). \quad (2.25)$$

Η ανάλυση θα γίνει, ξεχωριστά, για τις δύο περιπτώσεις του νόμου συνάφειας – ολίσθησης που προαναφέρθηκαν

- γραμμική μορφή του ανερχόμενου κλάδου με κατακόρυφο τον κατερχόμενο κλάδο ($p \rightarrow \infty$), Σχήμα 2.6(α) και
- γραμμική μορφή του ανερχόμενου κλάδου με κεκλιμένο τον κατερχόμενο κλάδο ($p \neq \infty$), Σχήμα 2.6(β).

2.4.1 Ψαθυρή συμπεριφορά της διεπιφάνειας

Στην περίπτωση αυτή, αντικαθιστώντας τη σχέση (2.22) στη (2.25), προκύπτει

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \lambda^2 s, \quad (2.26)$$

όπου

$$\lambda^2 = \frac{\tau_{\max}}{t_p E_p s_{\max}}. \quad (2.27)$$

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος αυτού, είναι

$$\varepsilon_p = \frac{ds}{dx} = 0, \text{ όταν } x = 0 \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_p = \frac{ds}{dx} = \varepsilon_{p,0}, \text{ όταν } x = l_w \quad (2.29)$$

Η πρώτη συνθήκη εκφράζει τον μηδενισμό των ορθών τάσεων στο αριστερό άκρο, ενώ η δεύτερη συνθήκη εκφράζει την ισότητα της ορθής παραμόρφωσης με την επιβαλλόμενη εξωτερική παραμόρφωση $\varepsilon_{p,0}$.

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.26), που ικανοποιεί τις παραπάνω συνοριακές συνθήκες, εύκολα εξάγεται στην μορφή

$$s(x) = \frac{\varepsilon_{p,0}}{\lambda} \frac{\cosh \lambda x}{\sinh \lambda l_w}. \quad (2.30)$$

2.4.2 Πλάσטיμη συμπεριφορά της διεπιφάνειας

Όταν ο νόμος συνάφειας-ολίσθησης αντιστοιχεί στην πλάσטיμη διεπιφανειακή συμπεριφορά, για μεγάλες τιμές του φορτίου Q , δημιουργείται μια διεπιφανειακή ζώνη, πάνω στην οποία, οι αναπτυσσόμενες τάσεις συνάφειας έχουν περάσει στον κατερχόμενο κλάδο της καμπύλης τ - s . Η ζώνη αυτή, που ξεκινάει από το δεξιό άκρο του ελάσματος και εκτείνεται σε ένα μήκος a_d , θα ονομασθεί ‘ζώνη συσσωρευμένης βλάβης’. Στην περιοχή αυτή έχουν εμφανιστεί βλάβες σε μεγάλο βαθμό, που έχουν οδηγήσει τις τάσεις συνάφειας στην κατερχόμενη μορφή της καμπύλης τ - s . Η περιοχή του επικολημένου τμήματος του ελάσματος, που αντιστοιχεί στον ανερχόμενο κλάδο της καμπύλης, θα ονομασθεί περιοχή I, η δε ζώνη της συσσωρευμένης βλάβης, περιοχή II. Στην συνέχεια, για διάκριση, οι ελαστικές παράμετροι των δύο αυτών περιοχών θα δηλώνονται με τους δείκτες I και II. Για τις δύο αυτές περιοχές, η διαφορική εξίσωση (2.25) γράφεται

$$\frac{d^2 s_I}{dx^2} - \lambda_I^2 s_I = 0, \text{ όταν } 0 \leq x \leq l_w - a_d, \quad (2.31)$$

και

$$\frac{d^2 s_{II}}{dx^2} + \lambda_{II}^2 s_{II} = \lambda_{II}^2 s_F, \quad \text{όταν } l_w - a_d \leq x \leq l_w, \quad (2.32)$$

όπου

$$\lambda_{II}^2 = p \lambda_I^2 = \frac{p \tau_{\max}}{t_p E_p s_{\max}}, \quad (2.33)$$

και

$$s_F = \left(1 + \frac{1}{p}\right) s_{\max} \quad (2.34)$$

Η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.31) έχει τη μορφή

$$s_I(x) = A \cosh \lambda_I x + B \sinh \lambda_I x, \quad \text{όταν } 0 \leq x \leq l_w - a_d, \quad (2.35)$$

όπου A και B σταθερές που θα προσδιορισθούν παρακάτω. Στο αριστερό άκρο της περιοχής I του ελάσματος η τάση είναι μηδέν, ενώ στο δεξιό άκρο η ολίσθηση έχει πάρει την τιμή s_{\max} . Οι συνθήκες αυτές διατυπώνονται με τις σχέσεις

$$\left[\frac{ds_I(x)}{dx} \right]_{x=0} = 0, \quad s_I(l_w - a_d) = s_{\max}. \quad (2.36)$$

Από τις σχέσεις αυτές και από την (2.35), προσδιορίζονται οι σταθερές A και B στην μορφή

$$A = \frac{s_{\max}}{\cosh \lambda_I (l_w - a_d)}, \quad B = 0. \quad (2.37)$$

Συνεπώς, η γενική λύση στην περιοχή I γράφεται

$$s_I(x) = s_{\max} \frac{\cosh \lambda_I x}{\cosh \lambda_I (l_w - a_d)}, \quad \text{όταν } 0 \leq x \leq l_w - a_d. \quad (2.38)$$

Στην περιοχή II, η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.32) είναι

$$s_{II}(x) = C \cos \lambda_{II} (x - l_w + a_d) + D \sin \lambda_{II} (x - l_w + a_d) + s_F, \quad (2.39)$$

όταν $l_w - a_d \leq x \leq l_w$

όπου C και D σταθερές που θα προσδιοριστούν. Οι συνθήκες που επικρατούν στα άκρα αυτής της περιοχής είναι:

$$s_{II}(l_w - a_d) = s_{\max}, \quad \left[\frac{ds_{II}(x)}{dx} \right]_{x=l_w} = \varepsilon_{p,0}. \quad (2.40)$$

Από τις συνθήκες αυτές και από την (1.39) προσδιορίζονται οι σταθερές C και D στη μορφή

$$C = s_{\max} - s_F, D = \frac{\varepsilon_{p,0} - (s_F - s_{\max})\lambda_{II} \sin \lambda_{II} a_d}{\lambda_{II} \cos \lambda_{II} a_d}. \quad (2.41)$$

Επομένως, η γενική λύση II παίρνει την μορφή

$$s_{II}(x) = (s_{\max} - s_F) \cos \lambda_{II} (x - l_w + a_d) + \frac{\varepsilon_{p,0} - (s_F - s_{\max})\lambda_{II} \sin \lambda_{II} a_d}{\lambda_{II} \cos \lambda_{II} a_d} \sin \lambda_{II} (x - l_w + a_d) + s_F, \quad (2.42)$$

όταν $l_w - a_d \leq x \leq l_w$.

Θα προσδιοριστεί τώρα το μήκος a_d της ζώνης συσσωρευμένης βλάβης, που υπεισέρχεται στις παραπάνω σχέσεις, χρησιμοποιώντας την συνθήκη συνέχειας των ορθών τάσεων του ελάσματος στην θέση $x = l_w - a_d$. Η συνθήκη αυτή εκφράζεται με την σχέση

$$\left[\frac{ds_I(x)}{dx} \right]_{x=l_w-a_d} = \left[\frac{ds_{II}(x)}{dx} \right]_{x=l_w-a_d}. \quad (2.43)$$

Έτσι από τις σχέσεις (2.38), (2.42), και από την παραπάνω συνθήκη, προκύπτει

$$\varepsilon_{p,0} = \lambda_{II} (s_F - s_{\max}) \sin \lambda_{II} a_d + \lambda_I s_{\max} \cos \lambda_{II} a_d \tanh \lambda_I (l_w - a_d) \quad (2.44)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί μια εξίσωση με άγνωστη παράμετρο το μήκος a_d . Από την επίλυση της εξίσωσης αυτής, προκύπτει το μήκος a_d της ζώνης συσσωρευμένης βλάβης.

Η σχέση (2.44) συνδέει την επιβαλλόμενη παραμόρφωση $\varepsilon_{p,0}$ με το μήκος της ζώνης συσσωρευμένης βλάβης a_d . Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η μέγιστη εξωτερική ορθή παραμόρφωση που μπορεί να επιβληθεί στο έλασμα αντιστοιχεί σε μια τιμή του μήκους a_d που προκύπτει από τη σχέση

$$\frac{d\varepsilon_{p,0}}{da_d} = 0 \quad (2.45)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει η παρακάτω αλγεβρική εξίσωση για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου μήκους a_d :

$$\tanh \lambda_I (l_w - a_d) = \sqrt{p} \tan(\sqrt{p} \lambda_I a_d) \quad (2.46)$$

Έχοντας υπολογίσει την τιμή της παραμέτρου a_d που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση, που θα την καλέσουμε $a_{d,\max}$, η μέγιστη τιμή της ορθής παραμόρφωσης προκύπτει στη μορφή

$$\varepsilon_{p,0,\max} = \lambda_{II} s_F \sin(\lambda_{II} a_{d,\max}) \quad (2.47)$$

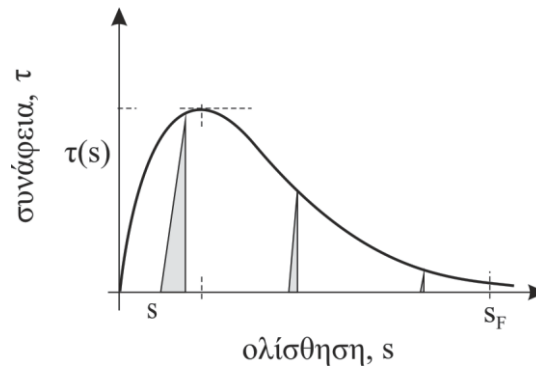
Για την τιμή αυτή της ζώνης συσσωρευμένης βλάβης, η μέγιστη ολίσθηση στην άκρη του αγκυρωμένου ελάσματος ενίσχυσης είναι

$$s_{II}(x=l_w) = \frac{1}{\cos \lambda_I \sqrt{p a_{d,\max}}} \left[-\frac{1}{p} + \left(1 + \frac{1}{p}\right) \sin^2 \lambda_I \sqrt{p a_{d,\max}} \right] + s_F \quad (2.48)$$

2.5 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Οι ποσότητες που περιγράφουν πλήρως την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση σε κάθε σημείο της αδυνατισμένης διεπιφάνειας σκυροδέματος-ελάσματος FRP και προσδιορίζονται από την επίλυση του σχετικού συνοριακού προβλήματος είναι η ολίσθηση s και η αναπτυσσόμενη συνάφεια τ . Η σχέση των δύο αυτών ποσοτήτων, που χαρακτηρίζει την συμπεριφορά της διεπιφάνειας, είναι γενικά μη ελαστική και αποτελεί τον καταστατικό νόμο συνάφειας-ολίσθησης, που έχει συζητηθεί στην προηγούμενη ενότητα. Όπως προαναφέρθηκε, η διεπιφάνεια προσομοιώνει την μακροσκοπική συμπεριφορά του λεπτού στρώματος σύνδεσης των δύο υλικών. Η μη ελαστική συμπεριφορά της διεπιφάνειας οφείλεται κυρίως στις αναπτυσσόμενες μικρορηγματώσεις που δημιουργούνται κατά την φόρτιση στο λεπτό αυτό στρώμα. Η συμπεριφορά του λεπτού αυτού στρώματος προσομοιώνεται με μια συνεχή διανομή δεσμών τύπου ελατηρίου, με εξαφανιζόμενο πάχος, που επιδεικνύουν μια μη ελαστική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται με το νόμο συνάφειας-ολίσθησης τ - s . Η αποφόρτιση από μια στάθμη της τάσης συνάφειας τ (Σχήμα 2.8) παρέχει την ποσότητα ενέργειας παραμόρφωσης που μπορεί να αποδώσει το σύστημα ως ελαστική ενέργεια (σκιαγραμμισμένο τμήμα). Η ποσότητα της ελαστικής ενέργειας, που αποδίδεται κατά την αποφόρτιση, μειώνεται δραματικά, όταν η τάση συνάφειας έχει περάσει στον κατερχόμενο κλάδο. Η ενέργεια

παραμόρφωσης που αποδίδεται από την διεπιφάνεια κατά την αποφόρτιση εξαφανίζεται, όταν η τάση συνάφειας τείνει να μηδενιστεί.



Σχήμα 2.8

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής: η ενέργεια, που δεν αποδίδεται ελαστικά κατά την αποφόρτιση, έχει απελευθερωθεί από το σύστημα με την καταστροφή δεσμών, που συνδέουν τα δύο μέσα. Όπως προαναφέρθηκε, η καταστροφή των δεσμών αυτών αντιπροσωπεύει την δημιουργία μικρορηγματώσεων στο λεπτό στρώμα σκυροδέματος, που προσομοιώνεται με την διεπιφάνεια. Όταν η διατμητική τάση συνάφειας τείνει να μηδενιστεί, η καταστροφή των δεσμών τείνει να γίνει ολοσχερής. Τότε, δημιουργείται η πλήρης αποκόλληση των δύο επιφανειών, δηλαδή η ρωγμή.

Η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στην διεπιφάνεια, περιγράφεται με την ποσότητα G_{II} που συζητήθηκε στην ενότητα 2.3. Η ποσότητα αυτή είναι μια συνάρτηση της ολίσθησης $s(x)$, που αποτελεί την βασική μεταβλητή πεδίου στο μοντέλο που συζητήθηκε προηγούμενα. Η κρίσιμη ποσότητα $G_{c,II}$ που αποτελεί την παράμετρο αντοχής της διεπιφάνειας, προσδιορίζεται από τον νόμο συνάφειας-ολίσθησης, όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.4. Η ποσότητα αυτή εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που πρέπει να ξοδευθεί προκειμένου να γίνει αποκόλληση ενός διεπιφανειακού τμήματος με μοναδιαίο εμβαδό.

Με βάση τα παραπάνω, εισάγεται το παρακάτω ενεργειακό κριτήριο για την τοπική αποκόλληση της διεπιφάνειας:

- Η αποκόλληση της διεπιφάνειας θα αρχίσει από το σημείο εκείνο στο οποίο μεγιστοποιείται η επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης G_{II} .
- Η έναρξη της αποκόλλησης (ρωγμή) θα συμβεί, όταν η πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης G στο σημείο αυτό φθάσει μια κρίσιμη τιμή $G_{c,II}$, που χαρακτηρίζει την αντοχή της διεπιφάνειας.

Αμέσως παρακάτω, το παραπάνω κριτήριο εφαρμόζεται για την μελέτη της έναρξης της διάδοσης της αποκόλλησης στο πρόβλημα του επικολλημένου ελάσματος που αναλύθηκε στο εδάφιο 2.4. Η λύση που αποκτήθηκε στο εδάφιο αυτό για την περίπτωση του νόμου συνάφειας-ολίσθησης με ανερχόμενο γραμμικό κλάδο και με κατερχόμενο γραμμικό κατακόρυφο κλάδο, παρέχεται με την σχέση (2.30). Από την σχέση αυτή και από την (2.21) προκύπτει

$$G_{II}(x) = \frac{Q^2 \tau_{\max}}{2\lambda^2 E_p^2 A_p^2 s_{\max}} \frac{\cos^2 h\lambda x}{\sin^2 h\lambda l_w} \quad (2.49)$$

Η μέγιστη τιμή της ποσότητας αυτής συμβαίνει στη θέση $x = l_w$, που αντιστοιχεί στην άκρη του ελάσματος, και είναι ίση με

$$\max G_{II} = G_{II}(l_w) = \frac{Q^2 \tau_{\max}}{2\lambda^2 E_p^2 A_p^2 s_{\max}} \frac{\cos^2 h\lambda l_w}{\sin^2 h\lambda l_w} \quad (2.50)$$

Αποκόλληση θα συμβεί στη θέση αυτή, όταν

$$\max G_{II} = G_{c,II} \quad (2.51)$$

Από τις σχέσεις (2.24), (2.50) και (2.51) προκύπτει

$$\frac{\cosh \lambda l_w}{\sinh \lambda l_w} \frac{Q}{\lambda E_p A_p} = s_{\max} \quad (2.52)$$

απ' όπου

$$Q = \lambda E_p A_p s_{\max} \tanh \lambda l_w \quad (2.53)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι υπάρχει μια οριακή τιμή της δύναμης εξόλκευσης Q , που θα δηλωθεί με Q_{\lim} και αντιστοιχεί σε ένα επικολλημένο μήκος $l_{w,\lim}$, για την οποία

$$\tanh \lambda l_{w,\lim} = 1. \quad (2.54)$$

Επειδή η τιμή του ορίσματος $\lambda l_{w,lim}$, που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση, απειρίζεται, αντί της (2.54) θα θεωρηθεί η σχέση

$$\tanh \lambda l_{w,lim} = 0.97. \quad (2.55)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει το οριακό μήκος $l_{w,lim}$

$$l_{w,lim} = \frac{1}{\lambda} \tanh^{-1}(0.97) = \frac{2.092}{\lambda}. \quad (2.56)$$

Η οριακή δύναμη που αντιστοιχεί στο μήκος αυτό ισούται με

$$Q_{lim} = 0.97 \lambda E_p A_p s_{max} \quad (2.57)$$

Όταν η δύναμή που πρέπει να μεταφερθεί στο σκυρόδεμα είναι μικρότερη από την Q_{lim} , δηλαδή

$$Q < Q_{lim}, \quad (2.58)$$

τότε το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης του ελάσματος υπολογίζεται από τη σχέση

$$l_{d,m} = \frac{1}{\lambda} \tanh^{-1} \left[\frac{Q}{\lambda E_p A_p s_{max}} \right] \quad (2.59)$$

Θεωρείται δεδομένο ότι η δύναμη αυτή δεν επιφέρει την διάρρηξη του ελάσματος. Αυτό συμβαίνει όταν, και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ικανοποιείται η σχέση

$$\varepsilon_{p0} = \frac{Q}{A_p E_p} \leq \varepsilon_{fu}, \quad (2.60)$$

όπου ε_{fu} είναι η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του ελάσματος FRP. Όταν γίνει έναρξη της αποκόλλησης, η δημιουργημένη διεπιφανειακή ρωγή διαδίδεται με ψαθυρό τρόπο σε όλο το μήκος του επικολλημένου ελάσματος, με αποτέλεσμα την πλήρη διάρρηξή του.

Στο Παράρτημα II, παρουσιάζονται οι θεωρητικές καμπύλες για διάφορες τιμές των παραμέτρων των δι-γραμμικών σχέσεων. Τα θεωρητικά διαγράμματα του Παραρτήματος απεικονίζουν καμπύλες ολίσθησης – μήκους επικόλλησης, τάσης συνάφειας – μήκους επικόλλησης και δύναμης Q - ολίσθησης.

Κεφάλαιο 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

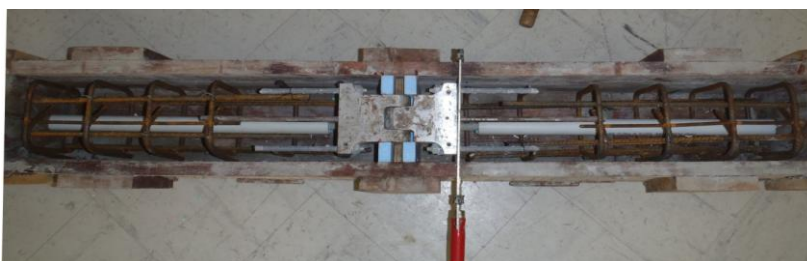
3.1 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ-ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ένας από τους στόχους της παρούσας εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης του ελάσματος ενίσχυσης για ένα συγκεκριμένο τύπο ελάσματος του εμπορίου, χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη πειραματική δοκιμή-δοκού, όπως αυτή τροποποιήθηκε στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας. Η εκτέλεση του απαιτούμενου πειραματικού έργου έγινε σε συλλογική βάση με ομάδα φοιτητών της Σχολής που διερευνούσε το αντίστοιχο πρόβλημα συνάφειας στις ράβδους οπλισμού FRP. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται το συλλογικό πειραματικό έργο που διεξήχθη και παρουσιάζονται τα ατομικά πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα που αφορούν τα ελάσματα FRP. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η επεξεργασία των αποκτηθέντων αποτελεσμάτων, που οδήγησαν στην εξαγωγή των πειραματικών καμπύλων που δείχνονται στην ενότητα 3.4.

Για την εκτέλεση του συνολικού πειραματικού έργου κατασκευάστηκαν πέντε δοκίμια σύμφωνα με τις τυποποιημένες διαστάσεις που απαιτούν οι δοκιμές. Όλα τα δοκίμια είχαν την ίδια γεωμετρία και την ίδια ποιότητα σκυροδέματος. Σε ένα από τα πέντε δοκίμια επικολλήθηκε το έλασμα FRP, έτσι όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.10. Το δοκίμιο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης με τη διαδικασία που θα περιγραφεί παρακάτω.

Ξυλότυποι του δοκιμίου

Για τη δημιουργία των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν ειδικά τυποποιημένα ξύλινα καλούπια από 'ΜΠΕΤΟΦΟΡΜ'. Τα καλούπια έχουν κατασκευασθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν αφού πρώτα η δοκός-δοκίμιο τοποθετηθεί στη μηχανή κάμψης. Αυτό γίνεται για την αποφυγή της διατάραξης της δοκού-δοκιμίου. Προκειμένου να δημιουργηθούν τα δύο τμήματα της δοκού, στο κέντρο του καλουπιού τοποθετήθηκε συμπιεσμένο χαρτί πάχους 5,5 cm, όπως προβλέπεται από την τυποποίηση της γεωμετρίας των δοκιμίων.



Σχήμα 3.17 Δοκίμιο πριν τη σκυροδέτηση

Κατασκευαστικός οπλισμός του δοκιμίου

Στις δοκούς-δοκίμια χρησιμοποιήθηκε κατασκευαστικός οπλισμός προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες αστοχίες από διάτμηση και κάμψη. Ο κατασκευαστικός οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα δύο τμήματα της δοκού δοκιμίου, ήταν συνδετήρες διαμέτρου 8 mm οι οποίοι τοποθετήθηκαν ανά 10 cm ($\Phi 8/10$ cm) κατά μήκος των δύο τμημάτων του. Ο κατασκευαστικός οπλισμός φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Οι συνδετήρες του δοκιμίου

Άρθρωση

Οι συνδέσεις των δύο τμημάτων των δοκών-δοκιμίων έγιναν με μεταλλικές αρθρώσεις που τοποθετήθηκαν στο πάνω μέρος τους. Οι αρθρώσεις που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τυποποιημένη γεωμετρία και έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα υψηλής αντοχής. Οι μεταλλικές αρθρώσεις έχουν κατασκευαστεί με τέτοιες διαστάσεις έτσι ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις στις διεπιφάνειες κατά τη διάρκεια της δοκιμής να είναι μικρές και να αποφευχθούν αστοχίες και φαινόμενα αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 3.3 Η μηχανική άρθρωση

Επίσης, οι αρθρώσεις αγκυρώθηκαν με μεταλλικές ράβδους στα δυο στοιχεία σκυροδέματος της δοκού-δοκιμίου με επαρκή μήκη αγκύρωσης, ώστε να μπορούν να παραλαμβάνουν με ασφάλεια τις εφελκυστικές δυνάμεις, που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της δοκιμής. Μια μεταλλική άρθρωση δείχνεται στο καλούπι της δοκού-δοκιμίου κατά το στάδιο πριν τη σκυροδέτηση.

Ενίσχυση FRP

Στη συγκεκριμένη δοκό-δοκίμιο, τοποθετήθηκε ένα έλασμα FRP από ίνες άνθρακα της εταιρείας Sika®.



Σχήμα 3.4 Το έλασμα Sika® CarboDur® S1012

Με βάση τα στοιχεία της εταιρίας, το έλασμα έχει ονομαστικό πλάτος 100 mm και πάχος 1.2mm, ενώ η επιφάνεια ενεργής διατομής είναι ίση με 120 mm². Τα ελάσματα της εταιρίας παράγονται με τη μέθοδο εξέλασης ινών άνθρακα σε πολυμερική μήτρα. Επικολλώνται πάνω στην κατασκευή ως εξωτερικός οπλισμός ή μέσα σε εγκοπές ως οπλισμός ενσωμάτωσης πλησίον της επιφάνειας. Για την επικόλληση χρησιμοποιείται εποξειδική ρητίνη. Το έλασμα FRP έχει μήκος επικόλλησης 15 εκατοστά και κόπηκε στο εργαστήριο σε ένα μήκος 35.5 cm για να τοποθετηθεί στο κεντρικό κάτω μέρος της δοκού-δοκιμίου. Στον Πινάκα 3.1 παρατίθενται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του ελάσματος FRP όπως αυτές δίνονται από την εταιρεία κατασκευής της.

Πινάκας 3.1 Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του ελάσματος FRP

Ονομαστικό πλάτος (mm)	100
Ονομαστικό πάχος (mm)	1.2
Εμβαδό ενεργής διατομής (mm ²)	120
Εφελκυστική αντοχή (N/mm ²)	3100
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	165000
Περιεχόμενος όγκος ινών	>68%
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.60

Ρητίνη

Όπως περιγράφεται στο συνοδευτικό φυλλάδιο της εταιρίας, η ρητίνη Sikadur[®] -30 είναι δύο συστατικών θιξοτροπικό υλικό δομητικών συγκολλήσεων, χωρίς διαλύτες, που βασίζεται σε συνδυασμό εποξειδικών ρητινών και ειδικών αδρανών, σχεδιασμένο για χρήση σε θερμοκρασίες από +8°C έως +35°C. Για την παραγωγή της ρητίνης έγινε ανάμειξη των δύο συστατικών σε αναλογία 3:1 κατ' όγκο. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του δοκιμίου όπου και επικολλήθηκε το έλασμα. Μεσολάβησαν τέσσερις μέρες μέχρι τη διεξαγωγή του πειράματος έτσι ώστε με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης να βελτιωθούν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του συγκολλητικού μείγματος.



Σχήμα 3.5 Τοποθέτηση εποξειδικής ρητίνης

Σύνθεση του σκυροδέματος και σκυροδέτηση

Η σκυροδέτηση όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε επί τόπου στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της σχολής ΣΑΤΜ. Η παρασκευή του σκυροδέματος έγινε με τη χρήση ηλεκτρικού αναδευτήρα (μπετονιέρα), ενώ η συμπύκνωσή του στα καλούπια έγινε χειρονακτικά με δόνηση μεταλλικής ράβδου.



Σχήμα 3.6 Δοκίμια κατά τη σκυροδέτηση

Για την κατασκευή του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland. Η μέγιστη διάμετρος αδρανών είναι 12mm και ο λόγος νερού προς τσιμέντο 0,5. Η σύνθεση του σκυροδέματος των δοκιμίων έγινε με αναλογία υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Αναλογία υλικών σκυροδέματος ανά m³

Νερό	118 kg
Τσιμέντο	236 kg
Άμμος	919 kg
Χαλίκι (Γαρμπίλι)	1249 kg
Αέρας	2%

Χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω αναλογίες προκειμένου να επιτευχθεί ποιότητα αντοχής σκυροδέματος C₃₀. Για τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λήφθηκε κυβικό δοκίμιο διαστάσεων 150x150x150mm στο οποίο πραγματοποιήθηκε δοκιμή θλίψης. Μετά από τον έλεγχο η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίστηκε στην τιμή των 36,4 MPa.

Η δοκός – δοκίμιο ύστερα από την σκυροδέτηση της, για μια εβδομάδα καταβρεχόταν με νερό ώστε να διατηρηθεί σε ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας περίπου 20°C και σχετικής υγρασίας η οποία δεν ξεπερνούσε το 90%. Η χρονική διάρκεια που μεσολάβησε ανάμεσα στην κατασκευή των δοκιμίων και της εκτέλεσης του πειράματος ήταν πέντε μήνες.



Σχήμα 3.7 Δοκιμή θλίψης κυβικού δοκιμίου

3.2 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Πέντε μήνες μετά την κατασκευή των δοκών-δοκιμίων, η δοκός τοποθετήθηκε καλουπωμένη, στη μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων όπου και ξεκαλουπώθηκε.

Οι δυνάμεις ασκούνται στη δοκό-δοκίμιο, μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου, που προσαρμόζεται για το σκοπό αυτό στη μηχανή κάμψης τριών σημείων.

Με αυτό το στοιχείο, η συνολική δύναμη της μηχανής διαιρείται σε δύο ίσες δυνάμεις, οι οποίες εξασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στα δύο τμήματα της δοκού.

Επίσης, το μεταλλικό αυτό στοιχείο παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής της απόστασης των δύο ασκούμενων δυνάμεων. Με κατάλληλη μεταβολή της απόστασης αυτής επιτυγχάνεται αντιστροφή της αξονικής δύναμης που καταπονεί τη δοκό-δοκίμιο. Το μεταλλικό αυτό στοιχείο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8 και το όργανο ανάγνωσης του επιβαλλόμενου φορτίου από τη μηχανή κάμψης στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.8 Το δοκίμιο στη μηχανή κάμψης



Σχήμα 3.9 Σύστημα ανάγνωσης επιβαλλόμενου φορτίου

Ηλεκτρομηκυσιόμετρα

Για να μετρηθεί η διαμήκης παραμόρφωση του ελάσματος έγινε χρήση ηλεκτρομηκυσιομέτρων (strain gages). Τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα κολλήθηκαν πάνω στην παραλληλόγραμμη επιφάνεια του ελάσματος και συγκεκριμένα σε δύο οριζόντιες διατάξεις ανά πέντε στο κάτω μέρος, αφού πρώτα καθαρίστηκε για καλύτερη εφαρμογή. Τοποθετήθηκαν συνολικά δέκα μηχανσιόμετρα από τα οποία μετρήθηκε η παραμόρφωση του ελάσματος. Η παραμόρφωση καταχωρήθηκε σε δέκα ξεχωριστά κανάλια του ηλεκτρονικού καταγραφέα για κάθε θέση των μηχανσιόμετρων (κοντά στην αρχή και στο πέρας του επικολλημένου τμήματος του ελάσματος και στο κέντρο του ενδιάμεσου τμήματος).



Σχήμα 3.10 Τα μηχανσιόμετρα επικολλημένα στο έλασμα

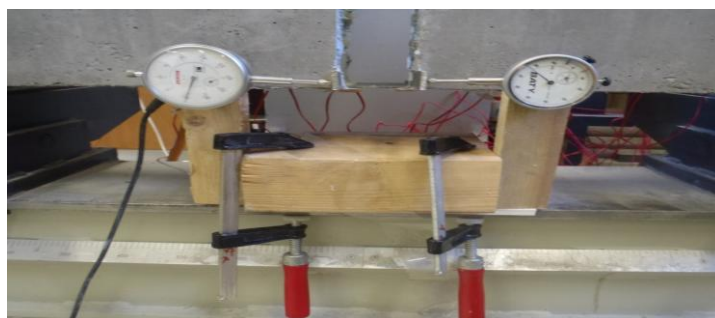
Τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα επικολλήθηκαν με κόλλα και επικαλύφθηκαν με σιλικόνη για την προστασία τους από την υγρασία. Τα μηχανσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας KYOWA, έχουν μήκος 5 mm και αντίσταση 120 Ω. Οι ενδείξεις των ηλεκτρομηκυσιομέτρων λαμβάνονταν μέσω ηλεκτρονικού καταγραφέα. Λόγω της πληθώρας των καταγραφών, συγκεντρώθηκε αρκετός όγκος δεδομένων. Αφού αξιολογήθηκαν τα παραπάνω δεδομένα, επιλέχθηκαν οι ενδείξεις τεσσάρων καναλιών για τον υπολογισμό των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς παρουσιάστηκαν σημαντικές αποκλίσεις στα υπόλοιπα κανάλια του καταγραφέα που δεν ήταν δυνατό να συσχετιστούν μεταξύ τους.



Σχήμα 3.11 Σύστημα καταγραφής μετρήσεων των ηλεκτρομηκυσιόμετρων

Βελόμετρα

Για την μέτρηση της οριζόντιας μεταβολής της απόστασης μεταξύ των δυο στοιχείων του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν δύο μηχανικά βελόμετρα που τοποθετήθηκαν στο μέσο της δοκού με τη βοήθεια μιας ξύλινης κατασκευής για να εξασφαλιστεί η παραλληλία τους με το οριζόντιο επίπεδο ενώ συγκρατήθηκαν στα δυο τμήματα της δοκού με σφιγκτήρες. Τοποθετήθηκαν στην ίδια διεύθυνση αλλά σε αντίθετη φορά, ανάλογη της μετακίνησης των δύο στοιχείων σκυροδέματος.



Σχήμα 3.12 Τα βελόμετρα τοποθετημένα στο δοκίμιο

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για να προσδιοριστεί η σχέση συνάφειας-ολίσθησης πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 1.1. Αρχικά τοποθετήθηκαν πάνω στο δοκίμιο τα βελόμετρα και τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα για την καταγραφή των μετρήσεων με τον τρόπο που αναφέρθηκε. Για τον υπολογισμό της ολίσθησης και της συνάφειας μετρήθηκαν οι εξωτερικές δυνάμεις P που επιβάλλονται από τη

μηχανή, η παραμόρφωση στο σημείο *A* στο μέσο του ελάσματος και η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δύο τμημάτων του δοκιμίου. Οι τιμές των μεγεθών αυτών καταγράφονταν ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 3.13 Η δοκός-δοκίμιο στη μηχανή κάμψης

Με τη τοποθέτηση του δοκιμίου πάνω στη μηχανή κάμψης, τοποθετήθηκαν τα μεταλλικά στοιχεία που ασκούν το φορτίο σε απόσταση 10 cm από το κάθε άκρο του κάθε τμήματος σκυροδέματος δηλαδή 12,75 cm από το μέσο του δοκιμίου. Η δοκός φορτίστηκε μέχρι τα 17,5 KN με εναλλασσόμενο βήμα αύξησης του φορτίου αντίστοιχα 5 και 2,5 KN. Σε αυτό το σημείο πραγματοποιήθηκε αποφόρτιση μέχρι την τιμή 0. Στη συνέχεια έγινε αντίστροφη της φόρτισης, με τις θέσεις επιβολής του φορτίου να μετακινούνται στα 50 cm από το κάθε άκρο του κάθε τμήματος. Η φόρτιση συνεχίστηκε με διαδοχική εναλλαγή βήματος 7,5 , 2,5 και 5 KN μέχρι να καταγραφεί τιμή 15 KN. Έγινε νέα αποφόρτιση μέχρι το μηδενισμό του φορτίου και νέα αντιστροφή της φόρτισης στην αρχική διάταξη. Μεγαλώνοντας κατά απόλυτη τιμή το βήμα επιβολής φορτίου, η δοκός φορτίστηκε μέχρι τα 27,5 KN και ακολούθησε νέα αποφόρτιση. Με την αντιστροφή της διάταξης διεξάχθηκε νέος κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης με μέγιστο καταγεγραμμένο φορτίο 17,5 KN.



Σχήμα 3.14 Αστοχία δοκού

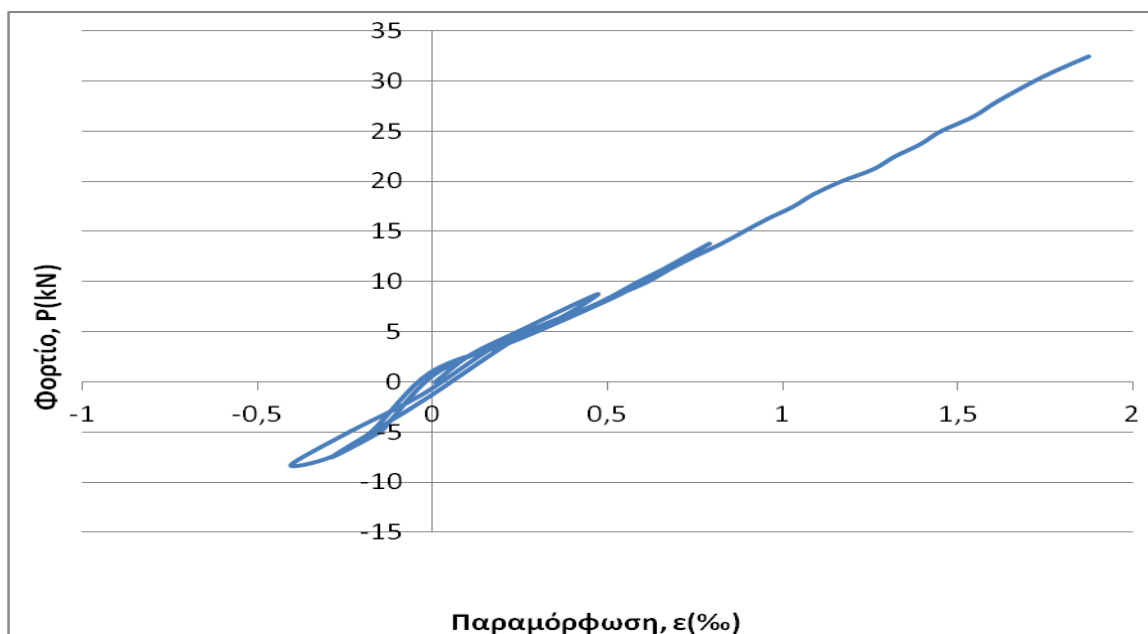
Ακολούθησε μια τρίτη επαναφορά των πειραματικών παραμέτρων στην αρχική διάταξη και πραγματοποιήθηκε φόρτιση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου, που συνέβη για δύναμη 70 KN για την οποία δεν υπάρχουν αξιόπιστες καταγεγραμμένες μετρήσεις. Οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν έχουν καταχωρηθεί στον Πίνακα I.1 του Παραρτήματος. Στην πρώτη στήλη του Πίνακα I.1 έχουν καταχωρηθεί οι τιμές των δυνάμεων $2P$ για κάθε χρονική στιγμή των μετρήσεων. Στη δεύτερη και τρίτη στήλη έχουν καταχωρηθεί οι μετρήσεις των βελομέτρων που είχαν τοποθετηθεί στις εσωτερικές άκρες των δυο στοιχείων σκυροδέματος. Στις δύο τελευταίες στήλες με ε_1 και ε_2 έχουν καταχωρηθεί οι ενδείξεις των ηλεκτρονικών μηκυνσιομέτρων.

3.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή, γίνεται η θεωρητική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, που αποκτήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειραματικού έργου, που παρουσιάστηκε στις παραπάνω ενότητες. Παρακάτω, θα κατασκευαστεί η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης με την διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1 καθώς και η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, που περιγράφει την συμπεριφορά του ελάσματος ενίσχυσης.

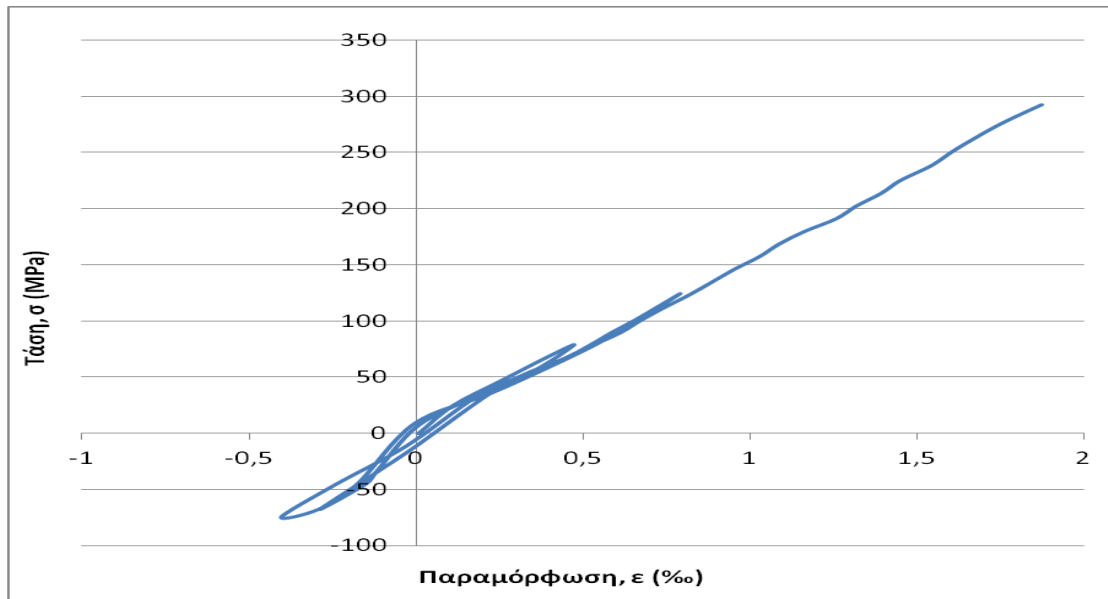
3.4.1 Η κατασκευή της καμπύλης συμπεριφοράς του ελάσματος FRP

Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του ελάσματος ενίσχυσης FRP στο μη επικολημένο τμήμα, δηλαδή σε αυτό που βρίσκεται μεταξύ των δυο στοιχείων σκυροδέματος, αντιπροσωπεύει τον καταστατικό νόμο του υλικού FRP. Η καμπύλη αυτή θα κατασκευαστεί από τις μετρήσεις της παραμόρφωσης που έχουν γίνει και βρίσκονται στον Πίνακα I.1 του Παραρτήματος I. Στο Σχήμα 3.15 δείχνεται η καμπύλη του επιβαλλόμενου φορτίου P σε κάθε τμήμα της πειραματικής δοκού συναρτήσει της μετρηθείσας παραμόρφωσης $\varepsilon_{p,0}$ στο κέντρο του μη επικολημένου τμήματος.



Σχήμα 3.15 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.16 δείχνεται η καμπύλη της ορθής τάσης που αναπτύσσεται στο μεσαίο τμήμα του ελάσματος συναρτήσει της παραμόρφωσης, που αντιστοιχεί στο ίδιο τμήμα.



Σχήμα 3.16 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

Η ορθή τάση σ υπολογίζεται από τη σχέση

$$\sigma = \frac{Q}{A_p}, \quad (3.1)$$

όπου η δύναμη Q υπολογίζεται από την σχέση (1.1) για $l = 25,5 \text{ cm}$, $L = 65,5 \text{ cm}$, $l' = 105,5 \text{ cm}$. Για το έλασμα που έχει χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο πείραμα, το πάχος είναι $t_p = 1,2 \text{ mm}$ και άρα το εμβαδό διατομής είναι $A_p = t_p b_p = 120 \text{ mm}^2$.

Οι τιμές των δυνάμεων Q και της ορθής τάσης σ που υπολογίζονται για κάθε μέτρηση καταχωρούνται στις στήλες 2 και 3 του Πίνακα I.2. Στη στήλη 1 καταχωρείται η δύναμη P που εξασκείται σε κάθε τμήμα της δοκού-δοκιμίου. Οι τιμές της παραμόρφωσης του ελάσματος $\varepsilon_{p,0}$ καταχωρούνται στη στήλη 4 του Πίνακα I.2 και έχουν ληφθεί ως ο μέσος όρος των μετρήσεων $\varepsilon_{p,0}^{(1)}$ και $\varepsilon_{p,0}^{(2)}$.

Το διάγραμμα αυτό αποτελεί πειραματικό προσδιορισμό του νόμου τάσης-παραμόρφωσης του ελάσματος FRP για συγκεκριμένο εύρος τιμών των δυο αυτών μεγεθών. Επειδή λόγω της φύσης του πειράματος, η συγκόλληση του ελάσματος αστοχεί πριν αστοχήσει η ίδια η δοκός, δεν έχουμε τη δυνατότητα προσδιορισμού του νόμου αυτού για όλο το εύρος τιμών της παραμόρφωσης του ελάσματος, δηλαδή μέχρι τη διάρρηξή του.

Το διάγραμμα του Σχήματος 3.16 δείχνει ότι η συμπεριφορά του ελάσματος ενίσχυσης FRP, που χρησιμοποιείται στη δοκό-δοκίμιο, είναι γραμμική και ότι οι κλάδοι φόρτισης και αποφόρτισης πρακτικά ταυτίζονται. Από την κλίση των διαγραμμάτων αυτών προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος FRP στην τιμή $E_p = 150 \text{ GPa}$. Η τιμή αυτή δεν αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική τιμή $E_p = 165 \text{ GPa}$ που παρέχει η βιομηχανία που παράγει το συγκεκριμένο έλασμα.

Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι το ενδιάμεσο τμήμα του ελάσματος, που έχει μήκος $5,5 \text{ cm}$ παραλαμβάνει, εκτός από εφελκυσμό κατά τη διάρκεια της δοκιμής και θλίψη στην οποία επιδεικνύει την ίδια γραμμική συμπεριφορά.

3.4.2 Η κατασκευή της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης για ανακυκλιζόμενη φόρτιση

3.4.2.1 Η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης των στοιχείων σκυροδέματος της δοκού-δοκιμίου

Σε όλη τη διάρκεια επιβολής των δυνάμεων στη δοκό, καταγράφονται οι ενδείξεις των βελόμετρων, που τοποθετήθηκαν μεταξύ των δύο στοιχείων του δοκιμίου, όπως δείχνεται στην εικόνα του Σχήματος 3.17.

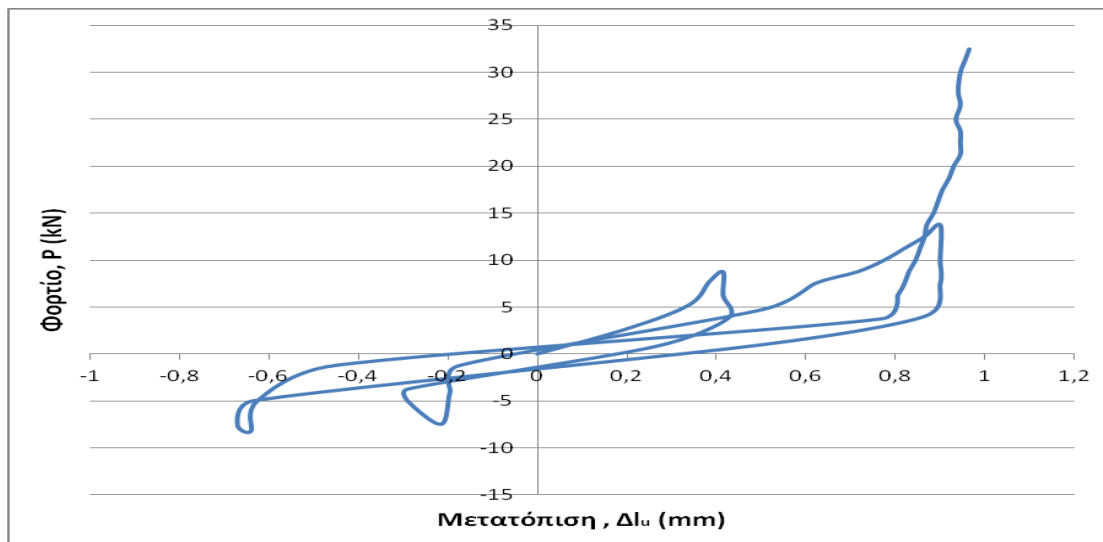


Σχήμα 3.17 Το δοκίμιο στη μηχανή κάμψης

Οι μετρήσεις αυτές αντιστοιχούν στη μεταβολή της απόστασης των δύο ορθογωνίων στοιχείων σκυροδέματος. Λόγω συμμετρίας της διάταξης, θεωρούμε ότι η μεταβολή αυτή οφείλεται σε ίση (κατ' απόλυτη τιμή) και αντίθετη μετατόπιση, για το κάθε

στοιχείο χωριστά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, για μεγαλύτερη ακρίβεια, η μέτρηση γίνεται στο χαμηλότερο σημείο του δοκιμίου, που αντιστοιχεί στη μέγιστη απόσταση από τον άξονα περιστροφής της άρθρωσης, όπου η μεταβολή της απόστασης των δύο στοιχείων είναι η μέγιστη. Οι τιμές των μετακινήσεων Δl_u για κάθε μέτρηση που έχει ληφθεί, έχουν καταχωρηθεί στη στήλη 6 του Πίνακα I.2 του Παραρτήματος I.

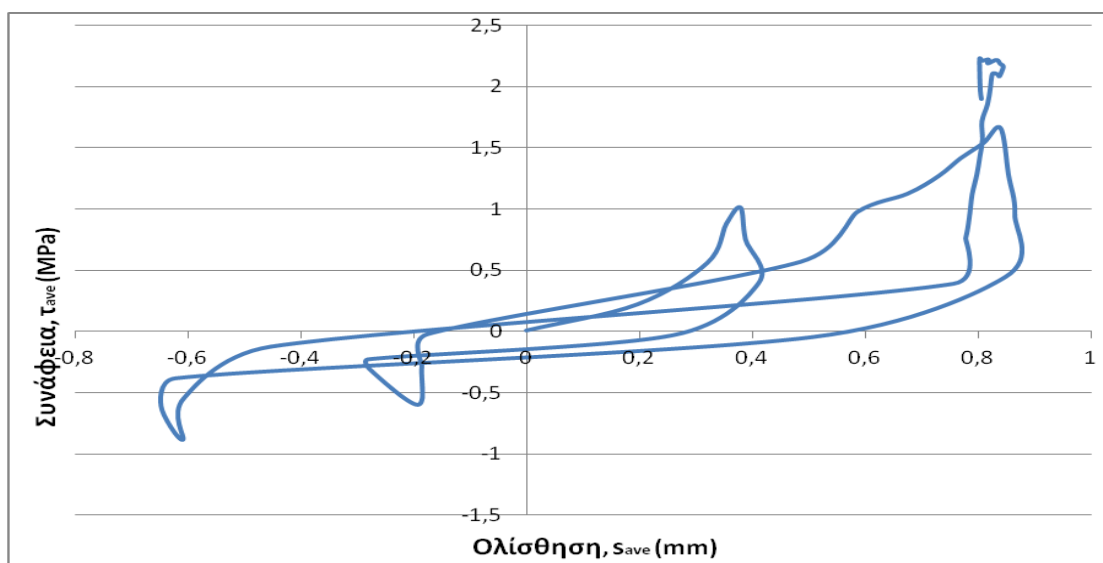
Μετά την καταγραφή των μετρήσεων, έχει σχηματιστεί μια ακολουθία τιμών $\Delta l_u(t)$, $P(t)$ (για κάθε χρονική στιγμή καταγραφής t). Στο διάγραμμα εισάγονται όλα τα ζεύγη τιμών Δl_u , P με τετημημένη τη μετατόπιση και τεταγμένη το φορτίο. Έτσι σε κάθε χρονική στιγμή παρατήρησης αντιστοιχεί ένα σημείο $(\Delta l_u, P)$ στο διάγραμμα. Η γραμμή που ενώνει τα σημεία είναι η ζητούμενη καμπύλη, η οποία ακολουθεί τη χρονική σειρά των μετρήσεων. Από την καμπύλη που σχηματίζεται, γίνεται φανερό πότε έχουμε φόρτιση, πότε αποφόρτιση και πότε αντίστροφη φόρτιση. Από το σύνολο των μετρήσεων προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3.18 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης

3.4.2.2 Η καμπύλη συνάφειας - ολίσθησης

Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης θα κατασκευασθεί με βάση όσα έχουν αναφερθεί στην ενότητα 1.2 και 1.3, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1.9) και (1.17). Οι τιμές της παραμόρφωσης στη θέση M του ελάσματος, έχουν ληφθεί από το μέσο όρο των τιμών $\varepsilon_{p,M}^{(1)}$ και $\varepsilon_{p,M}^{(2)}$ του Πίνακα I.1 και είναι καταχωρημένες στην στήλη 5 του Πίνακα I.2 (το διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για το σημείο M βρίσκεται στο Παράρτημα I). Από τις τιμές της στήλης 4 ($\varepsilon = \varepsilon_{p,0}$), της στήλης 6 (Δl_u) και για $l_u = 5,5 \text{ cm}$, $l_b = 7,5 \text{ cm}$, με τη σχέση (1.9) υπολογίσθηκε, για κάθε μέτρηση η μέση ολίσθηση s_{ave} . Οι τιμές αυτές έχουν καταχωρηθεί στη στήλη s_{ave} . Η τάση συνάφειας τ_{ave} υπολογίζεται από τη σχέση (1.17). Στη σχέση αυτή, η παραμόρφωση $\varepsilon_{p,A}$ παίρνεται ίση με τις τιμές ε της κάθε μέτρησης που έχει καταχωρηθεί στη στήλη 4 του Πίνακα I.2, ε_f , ενώ η παραμόρφωση $\varepsilon_{p,M}$ παίρνεται ίση με $\frac{\varepsilon_M}{2}$, με την παρατήρηση που έχει γίνει παραπάνω. Ο υπολογισμός της μέσης τάσης τ_{ave} χρησιμοποιεί τις τιμές $l_b = 7,5 \text{ cm}$, $t_p = 1,2 \text{ mm}$ και $E_p = 165 \text{ GPa}$. Οι τιμές που υπολογίσθηκαν για κάθε μέτρηση έχουν καταχωρηθεί στη στήλη 8. Από τις τιμές των στηλών 7 και 8 του Πίνακα I.2 κατασκευάστηκε η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης που δείχνεται στο διάγραμμα 3.18.



Σχήμα 3.18 Καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης

Στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση, οι καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης απαρτίζονται από διαδοχικούς κλάδους, που εμφανίζονται σε συγκεκριμένη φορά της επιβαλλόμενης φόρτισης και περιγράφουν τον βαθμό της διεπιφανειακής βλάβης που έχει τοπικά προξενηθεί. Οι κλάδοι των καμπυλών αυτών είναι κλάδοι φόρτισης, αποφόρτισης και τριβής.

Κεφάλαιο 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

1. Στην παρούσα εργασία, η δοκιμή δοκού που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης ράβδων FRP σε σκυρόδεμα για μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση, επεκτάθηκε και εφαρμόστηκε επιτυχώς για τον προσδιορισμό της αντίστοιχης σχέσης ελάσματος FRP – σκυροδέματος για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης.
2. Το πειραματικό έργο που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε με βάση την προεκτίμηση των διαστάσεων του ελάσματος FRP, και είχε ως σκοπό να διερευνήσει τη δυνατότητα επέκτασης της δοκιμής. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η δοκιμή δοκού μπορεί να εφαρμοσθεί επιτυχώς στην περίπτωση ελάσματος FRP, τόσο για μονότονη όσο και για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η πειραματική δοκιμή έδειξε ότι το έλασμα FRP μεταβιβάζει επιτυχώς και θλιπτικές τάσεις χωρίς να εμφανίζει φαινόμενα λυγισμού.
3. Με δεδομένη τη δυνατότητα τη χρήση της τροποποιημένης μεθόδου στην περίπτωση των ελασμάτων FRP, έγινε εκτεταμένη θεωρητική ανάλυση της δοκιμής δοκού χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο. Με βάση τη γεωμετρία της δοκού – δοκιμίου που χρησιμοποιείται στη δοκιμή και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, του ελάσματος FRP και της διεπιφανειακής σύνδεσης, αναπτύχθηκε η διαφορική εξίσωση του σχετικού τασικού προβλήματος, στα πλαίσια της τεχνικής θεωρίας της μηχανικής. Στη συνέχεια, η διαφορική αυτή εξίσωση επιλύθηκε αναλυτικά για τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες του σχετικού συνοριακού προβλήματος. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένας απλουστευμένος διγραμμικός νόμος συμπεριφοράς της διεπιφανειακής σύνδεσης ελάσματος – σκυροδέματος. Ο νόμος αυτός δίνει τη δυνατότητα διάκρισης της μηχανικής

συμπεριφοράς της διεπιφάνειας σε ψαθυρή συμπεριφορά και πλάστιμη συμπεριφορά. Με βάση το νόμο αυτό προσδιορίστηκαν οι τάσεις και οι ολισθήσεις, που αναπτύσσονται στη δοκό – δοκίμιο κατά την πειραματική διαδικασία.

4. Η πειραματική καμπύλη συνάφειας – ολίσθησης, που αποκτήθηκε για το συγκεκριμένο τύπο ελάσματος FRP του εμπορίου, παρουσιάζει μια ποιοτική διαφορά συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες καμπύλες που έχουν αποκτηθεί με την ίδια δοκιμή για ράβδους FRP. Οι κλάδοι φόρτισης που ακολουθούν τις αποφορτίσεις γίνονται σχεδόν παράλληλοι με τον άξονα ολίσθησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη διαφορετική φύση των διεπιφανειακών δεσμών που αναπτύσσονται στην περίπτωση του ελάσματος λόγω της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιείται για την επικόλληση. Η εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων για τις πειραματικές καμπύλες συνάφειας - ολίσθησης της επικόλλησης απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό πειραματικών δεδομένων, που μπορούν να αποκτηθούν με την προτεινόμενη δοκιμή.
5. Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα που προέκυψε από τη θεωρητική ανάλυση είναι ότι η συνύπαρξη ελαστικού και πλαστικού κλάδου στο νόμο συνάφειας – ολίσθησης δημιουργεί δυο διακριτές περιοχές τάσεων συνάφειας πάνω στη διεπιφάνεια των δύο υλικών της δοκού - δοκιμίου. Η μια περιοχή που αντιστοιχεί στον κατερχόμενο κλάδο της καμπύλης, παρουσιάζει μεγάλες ολισθήσεις με μικρές τάσεις συνάφειας. Η άλλη περιοχή που αντιστοιχεί στον ανερχόμενο κλάδο της καμπύλης, παρουσιάζει μικρές ολισθήσεις με μεγάλες τάσεις συνάφειας. Η πρώτη περιοχή, που χαρακτηρίζεται περιοχή συσσωρευμένης βλάβης, περιγράφει μια υποβαθμισμένη κατάσταση της διεπιφάνειας, όπου έχουν καταστραφεί οι περισσότεροι διατμητικοί δεσμοί που μεταφέρουν τις διατμητικές τάσεις μεταξύ των δύο υλικών. Όπως προέκυψε από σχετικές παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν, η περιοχή της συσσωρευμένης βλάβης συνεχώς αυξάνεται με την αύξηση του εξωτερικού φορτίου Q που αναπτύσσεται στο έλασμα. Όταν το μήκος επικόλλησης του ελάσματος είναι σχετικά μεγάλο, η διατμητική τάση, που εμφανίζεται στην περιοχή που αντιστοιχεί στον ανερχόμενο κλάδο, παραμένει σχετικά μικρή αλλά διανέμεται σε μια μεγάλη έκταση της περιοχής αυτής. Το γεγονός αυτό

έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα παραλαβής μεγάλης εξωτερικής δύναμης από το έλασμα, που μπορεί να προκαλέσει ακόμα και υπέρβαση της εφελκυστικής του αντοχής. Αντίθετα, όταν το μήκος επικόλλησης είναι μικρό, η διατμητική τάση στην περιοχή, που αντιστοιχεί στον ανερχόμενο κλάδο γίνεται σχεδόν ομοιόμορφη και ίση περίπου με τη μέγιστη τάση συνάφειας. Στην περίπτωση αυτή, με την αύξηση της δύναμης που καταπονεί το έλασμα, αυξάνει γρήγορα το μήκος της περιοχής της συσσωρευμένης βλάβης, με αντίστοιχη αύξηση της μέγιστης ολίσθησης, που αντιστοιχεί στην άκρη της επικόλλησης και βρίσκεται κοντά στην επιβαλλόμενη δύναμη. Η ραγδαία αυτή αύξηση της ολίσθησης επιφέρει μηδενική συνάφεια, που αντιστοιχεί στην εμφάνιση ρωγμής στην άκρη του ελάσματος. Η εμφάνιση της ρωγμής αντιστοιχεί στην αστοχία της σύνδεσης, που επέρχεται για σχετικά μικρές τιμές της δύναμης Q .

6. Από τη θεωρητική ανάλυση που έγινε προέκυψε ότι για πλάτη ελάσματος 10 cm, όπως είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε, το αποδεκτό εύρος μηκών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι μεταξύ 10 και 15cm. Η επιλογή ενός τέτοιου μήκους παρέχει την ανάπτυξη των τάσεων συνάφειας σε όλη την κλίμακα που εμφανίζονται, με παράλληλη ανάπτυξη στο μήκος αυτό και της ζώνης συσσωρευμένης βλάβης.
7. Η πειραματική καμπύλη συνάφειας – ολίσθησης που αποκτήθηκε για το συγκεκριμένο έλασμα παρουσιάζει, τοπικά, στις θέσεις αντιστροφής της φόρτισης, μια μορφή που δεν μπορεί να αποδοθεί στη συμπεριφορά αυτή καθαυτή της διεπιφάνειας. Η συμπεριφορά αυτή πρέπει να συνδέεται με τη χρονική στάση που γίνεται στη διαδικασία καταγραφής των μετρήσεων λόγω της έλλειψης συστήματος αυτόματης καταγραφής.
8. Για τη μελέτη της θραύσης της επικόλλησης του ελάσματος εισήχθη ένα ενεργειακό κριτήριο αστοχίας, δανεισμένο από τη μηχανική των θραύσεων. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, η επικόλληση θα αστοχήσει τοπικά σε μια θέση, όταν η διεπιφανειακή ενέργεια ανα μονάδα επιφάνειας που θα αποθηκευθεί στη θέση αυτή πάρει μια κρίσιμη τιμή. Η κρίσιμη αυτή τιμή είναι ίση με το εμβαδό επιφάνειας που περιορίζεται μεταξύ της καμπύλης και του άξονα ολίσθησης στο διάγραμμα συνάφειας – ολίσθησης. Η επιβεβαίωση

του κριτηρίου αυτού απαιτεί επιπρόσθετο πειραματικό έργο, που μπορεί να διεξαχθεί με βάση την τροποποιημένη δοκιμή δοκού.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brosens K., Van Gemert D., 2001, "Anchorage of externally bonded reinforcements subjected to combined shear/bending action", CICE2001, International conference on FRP composites in Civil Engineering, 12 - 14 December 2001, Hong Kong.

Chajes, M.J., Finch, W.W., Januszka, T.F., and Thomson, T.A., 1996, "Bond and Force Transfer of Composite-Material Plates Adhered to Concrete," *Structural Journal*, ACI, 93(2), pp. 208-217.

Chen J.F., Teng J.G., July 2001, "Anchorage Strength Models for FRP and Plates Bonded to Concrete", *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 127, No. 7, July, 2001, pp. 784-791.

Department of Transport (DTP). 1994, "Strengthening of concrete highway structures using externally bonded plates." BA 30/94, Vol. 3, Part 1, Her Majesty's Stationery Ofc., London.

Jones R., Swamy R. N., Charif A., March 1988, "Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates", *The Structural Engineer*, Vol. 66, No. 5, pp. 85-94.

Malek A. M., Saadatmanesh H., Ehsani M. R., March-April 1998, "Prediction of failure load of R/C beams strenghtened with FRP plate due to stress concentration at the plate end", *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, pp. 142-152.

Neubauer U., Rostasy F.S., September 1997, "Bond Behaviour of CFRP-Laminates for the Strengthening of Concrete Members", *Proceedings of Composite Construction – Conventional and Innovative*, Innsbuck (Austria), pp. 717-724.

Oehlers D. J., 1988, "Reinforced concrete beams with steel plates glued to their soffits: Prevention of plate separation induced by flexural peeling." Report No. R80, Dept. of Civil Engineering, University of Adelaide, Adelaide, Australia.

Roberts T. M., 1988, "Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams", *The Structural Engineer*, Vol. 66, No. 5, March 1988, pp. 85-94.

Saadatmanesh H. and Ehsani, M. R., 1991, "RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental Study." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 117(11).

Smith S. T., Teng J.G., 2002, "FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models", *Engineering Structures*, 24, pp. 397-427.

Swamy R. N., Jones R., and Bloxham J. W., 1987, "Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates." *The Struct. Engr.*, London, 65A(2), pp. 59-68.

Taerwe L., ed., 1995, "Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete Structures", RILEM Pro 29, E & FN Spon, London.

Täljsten B., 1997, "Strengthening of Beam by Plate Bonding" , *ACSE Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 9, No. 4, November 1997, pp. 206-212.

Triantafillou T. C., and Plevris N., 1990, "Flexural behaviour of concrete structures strengthened with epoxy-bonded fibre-reinforced plastics." *Proc., Int. Seminar on Plate Bonding Technique*, University of Sheffield, Sheffield, U.K.

Van Gemert D., and Maesschalck, 1983, "Structural repair of a reinforced concrete plate by epoxy bonded external reinforcement." *Int. J.Cement Compos. and Lightweight Concrete*, 5(4), pp. 247-255.

Wu Z., Yin J., 2003, “Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, pp. 1339-1355.

Ziraba Y. N., Baluch M. H., Basunbul I. A., Sharif A. M., Azad A. K., and Al-Sulaimani G. J., 1994, “Guidelines toward the design of reinforced concrete beams with external plates.” *ACI Struct. J.*, 91(6), pp. 639–646.

Καρατζαφέρης Βασίλειος, 2009, «Ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σκυροδέματος οπλισμένων με σύνθετες ράβδους», Διδακτορική διατριβή.

Τριανταφύλλου Αθανάσιος Χ., 2006 , “Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά,” Κεφ 2 και 10.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Ι.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Πίνακας Ι.1 Καταγραφή μετρήσεων

1	2	3	4		5	
2P (kN)	Βελόμετρο1 (μm)	Βελόμετρο2 (μm)	$\varepsilon_{p,0}^{(1)}$ (ppm)	$\varepsilon_{p,0}^{(2)}$ (ppm)	$\varepsilon_{p,M}^{(1)}$ (ppm)	$\varepsilon_{p,M}^{(2)}$ (ppm)
0	5980	5680	6	10	7	2
5,5	6190	5480	149	71	31	20
10,5	6320	5340	405	108	59	28
15,5	6360	5290	610	200	96	47
17,5	6390	5260	696	250	117	61
12,5	6390	5260	561	150	91	49
7,5	6400	5250	306	64	48	22
1,5	6240	5420	12	-1	20	13
-7,5	6260	5380	-57	-178	-39	-25
-10	6260	5380	-57	-245	-45	-26
-15	6200	5470	-243	-333	-87	-37
-8	6180	5490	-121	-130	-39	0
-2,5	6150	5500	-25	25	6	9
9,5	6480	5170	449	70	60	27
15	6590	5050	750	148	106	52
17,5	6680	4950	855	189	128	63
20	6740	4890	927	246	141	69

22,5	6790	4850	1000	316	160	82
25	6830	4800	1061	384	184	94
27,5	6870	4770	1110	466	209	108
20	6860	4760	921	288	164	75
15	6860	4760	759	159	135	57
8	6830	4800	404	49	83	33
2	6490	5180	-3	-5	21	5
-10	6620	5050	-179	-173	-49	-15
-15	6660	5020	-285	-299	-91	-35
-16,5	6640	5060	-475	-330	-101	-35
-10	6630	5080	-322	-155	-60	-5
-2,5	6450	5240	-45	-14	17	17
7,5	6730	4890	383	-9	60	18
12,5	6760	4850	673	41	102	34
15	6770	4830	814	99	129	53
17,5	6780	4820	912	153	152	67
20	6800	4810	1013	215	174	79
22,5	6810	4800	1087	267	187	84
25	6820	4800	1162	331	206	99
27,5	6830	4790	1235	408	230	113
30	6850	4780	1296	480	250	121
32,5	6860	4770	1350	559	274	135
35	6870	4760	1415	644	311	155
37,5	6890	4750	1453	724	413	174
40	6910	4750	1506	825	553	200
42,5	6930	4740	1577	942	647	235
45	6940	4750	1630	1009	743	240
47,5	6940	4770	1688	1099	844	263
50	6930	4780	1731	1169	950	292
53	6950	4780	1805	1284	1064	343
56	6950	4790	1846	1379	1158	392
60	6970	4800	1921	1512	1250	495
62,5	6990	4800	1993	1589	1407	685
65	7010	4800	2052	1696	1488	822

Στην στήλη 1 έχουν καταχωρηθεί οι τιμές της συνολικής επιβαλλόμενης δύναμης της μηχανής $2P$ σε kN .

Στην στήλη 2 έχουν καταχωρηθεί οι ενδείξεις του βελομέτρου 1 σε μm (Σχήμα Ι.1).

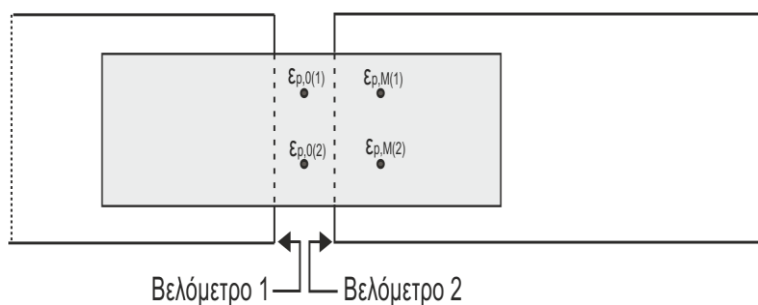
Στην στήλη 3 έχουν καταχωρηθεί οι ενδείξεις του βελομέτρου 2 σε μm (Σχήμα Ι.1).

Στην στήλη 4 έχουν καταχωρηθεί οι παραμορφώσεις $\varepsilon_{p,0}$ των

ηλεκτρομηκυσιομέτρων στις θέσεις 1 και 2 αντίστοιχα (αναφέρονται στο σημείο Ο του ελάσματος).

Στην στήλη 5 έχουν καταχωρηθεί οι παραμορφώσεις $\varepsilon_{p,M}$ των

ηλεκτρομηκυσιομέτρων στις θέσεις 1 και 2 αντίστοιχα (αναφέρονται στο σημείο Μ του ελάσματος).



Σχήμα Ι.1 Οι θέσεις των ληφθεισών μετρήσεων οριζόντιας μετατόπισης και παραμόρφωσης (άνοξη)

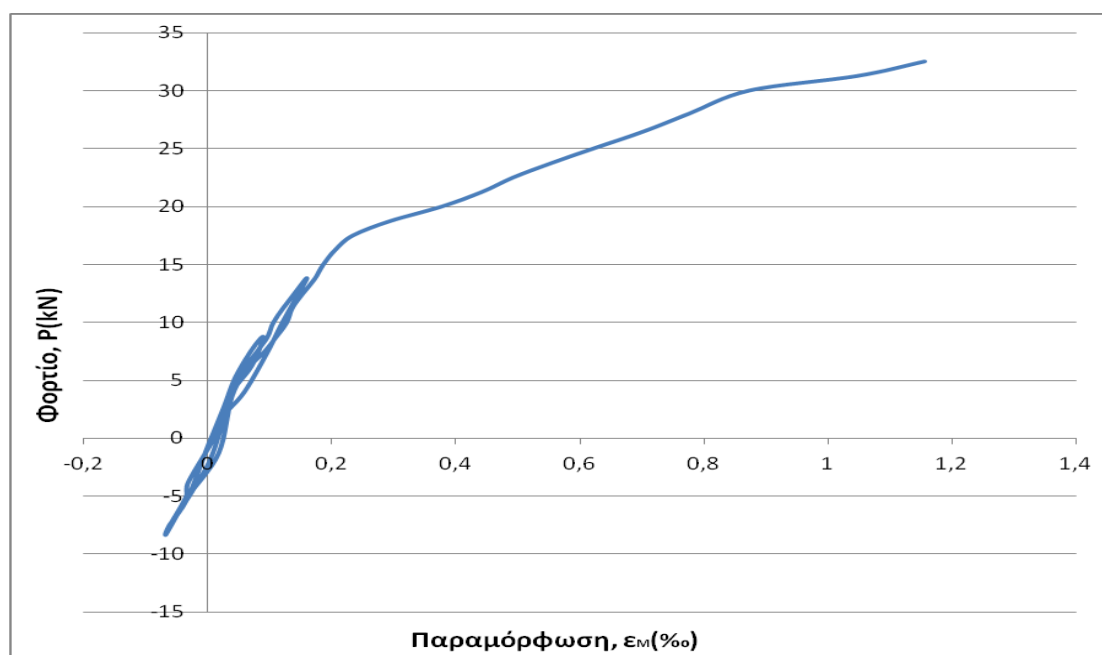
Ι.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1	2	3	4	5	6	7	8
P (kN)	Q (kN)	σ (MPa)	ε (‰)	ε_M (‰)	Δl_u (mm)	s (mm)	τ (MPa)
0	0	0	0,008	0,0045	0	-0,00067	0,00924
2,75	2,972973	24,77477	0,11	0,0255	0,205	0,196409	0,22308

5,25	5,675676	47,2973	0,2565	0,0435	0,34	0,320268	0,56232
7,75	8,378378	69,81982	0,405	0,0715	0,385	0,353791	0,88044
8,75	9,459459	78,82883	0,473	0,089	0,415	0,378448	1,01376
6,25	6,756757	56,30631	0,3555	0,07	0,415	0,387469	0,75372
3,75	4,054054	33,78378	0,185	0,035	0,425	0,4107	0,396
0,75	0,810811	6,756757	0,0055	0,0165	0,26	0,259285	-0,02904
-3,75	-4,05405	-33,7838	-0,1175	-0,032	-0,29	-0,28073	-0,22572
-5	-5,40541	-45,045	-0,151	-0,0355	-0,29	-0,2782	-0,30492
-7,5	-8,10811	-67,5676	-0,288	-0,062	-0,215	-0,1926	-0,59664
-4	-4,32432	-36,036	-0,1255	-0,0195	-0,195	-0,18538	-0,27984
-1,25	-1,35135	-11,2613	0	0,0075	-0,175	-0,17514	-0,0198
4,75	5,135135	42,79279	0,2595	0,0435	0,505	0,485046	0,57024
7,5	8,108108	67,56757	0,449	0,079	0,62	0,585405	0,9768
8,75	9,459459	78,82883	0,522	0,0955	0,715	0,674712	1,12596
10	10,81081	90,09009	0,5865	0,105	0,775	0,729777	1,27116
11,25	12,16216	101,3514	0,658	0,121	0,82	0,769204	1,41768
12,5	13,51351	112,6126	0,7225	0,139	0,865	0,809109	1,54044
13,75	14,86486	123,8739	0,788	0,1585	0,9	0,838913	1,66188
10	10,81081	90,09009	0,6045	0,1195	0,9	0,853178	1,2804
7,5	8,108108	67,56757	0,459	0,096	0,9	0,864349	0,95832
4	4,324324	36,03604	0,2265	0,058	0,865	0,847208	0,44484
1	1,081081	9,009009	-0,004	0,013	0,505	0,505051	-0,04488
-5	-5,40541	-45,045	-0,176	-0,032	-0,635	-0,62142	-0,38016
-7,5	-8,10811	-67,5676	-0,292	-0,063	-0,67	-0,64728	-0,60456
-8,25	-8,91892	-74,3243	-0,4025	-0,068	-0,64	-0,60904	-0,88308
-5	-5,40541	-45,045	-0,2385	-0,0325	-0,625	-0,6068	-0,54384
-1,25	-1,35135	-11,2613	-0,0295	0,017	-0,455	-0,45314	-0,12276
3,75	4,054054	33,78378	0,187	0,039	0,77	0,755478	0,39072
6,25	6,756757	56,30631	0,357	0,068	0,805	0,777396	0,76296
7,5	8,108108	67,56757	0,4565	0,091	0,82	0,784627	0,96492
8,75	9,459459	78,82883	0,5325	0,1095	0,83	0,788675	1,11672
10	10,81081	90,09009	0,614	0,1265	0,845	0,797346	1,287
11,25	12,16216	101,3514	0,677	0,1355	0,855	0,802531	1,42956
12,5	13,51351	112,6126	0,7465	0,1525	0,865	0,807086	1,56816

13,75	14,86486	123,8739	0,8215	0,1715	0,87	0,806199	1,716
15	16,21622	135,1351	0,888	0,1855	0,885	0,816032	1,8546
16,25	17,56757	146,3964	0,9545	0,2045	0,895	0,820771	1,98
17,5	18,91892	157,6577	1,0295	0,233	0,905	0,824706	2,10276
18,75	20,27027	168,9189	1,0885	0,2935	0,92	0,83422	2,0988
20	21,62162	180,1802	1,1655	0,3765	0,93	0,836985	2,08296
21,25	22,97297	191,4414	1,2595	0,441	0,945	0,843843	2,16084
22,5	24,32432	202,7027	1,3195	0,4915	0,945	0,838471	2,18592
23,75	25,67568	213,964	1,3935	0,5535	0,945	0,831851	2,2176
25	27,02703	225,2252	1,45	0,621	0,935	0,816419	2,18856
26,5	28,64865	238,7387	1,5445	0,7035	0,945	0,817903	2,22024
28	30,27027	252,2523	1,6125	0,775	0,94	0,806547	2,211
30	32,43243	270,2703	1,7165	0,8725	0,945	0,802049	2,22816
31,25	33,78378	281,5315	1,791	1,046	0,955	0,803301	1,9668
32,5	35,13514	292,7928	1,874	1,155	0,965	0,805136	1,89816

Από τη μέτρηση της παραμόρφωσης στο σημείο M και με καταγεγραμμένο το φορτίο P στην αντίστοιχη χρονική στιγμή προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα.

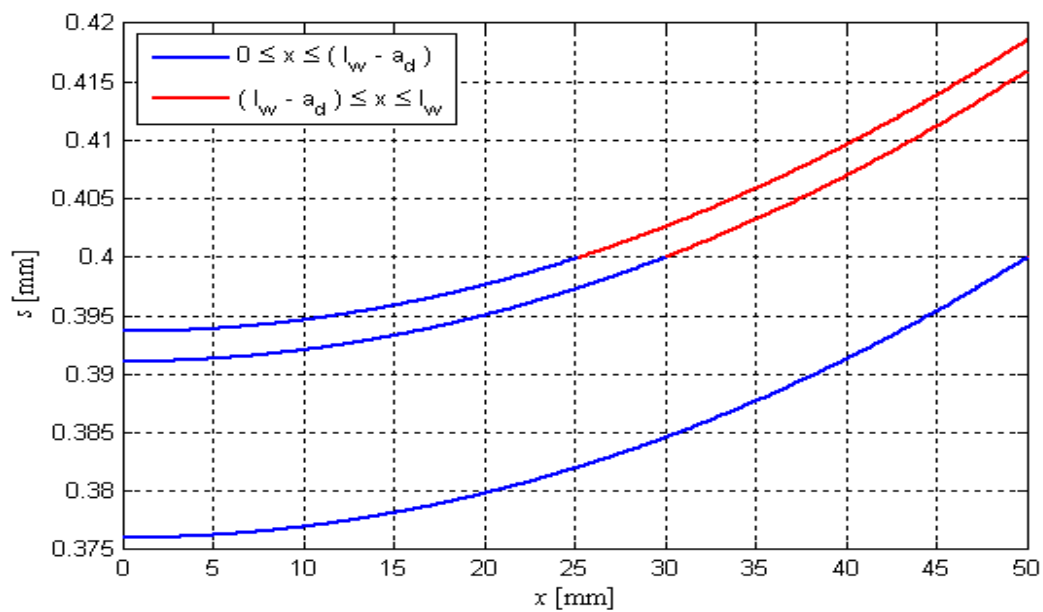


Σχήμα Ι.2 Φορτίο - Παραμόρφωση

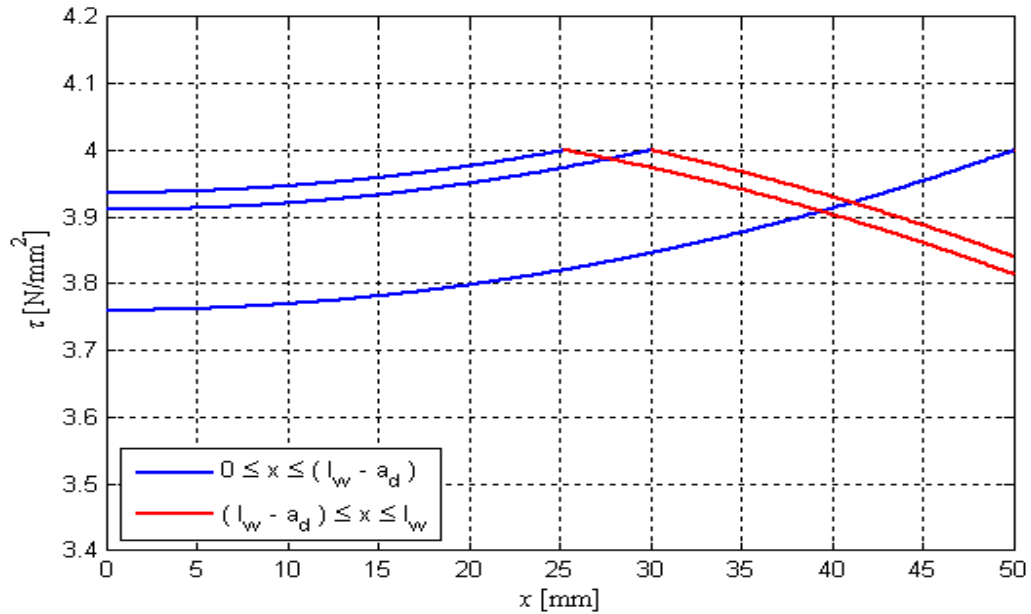
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΙΙ.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

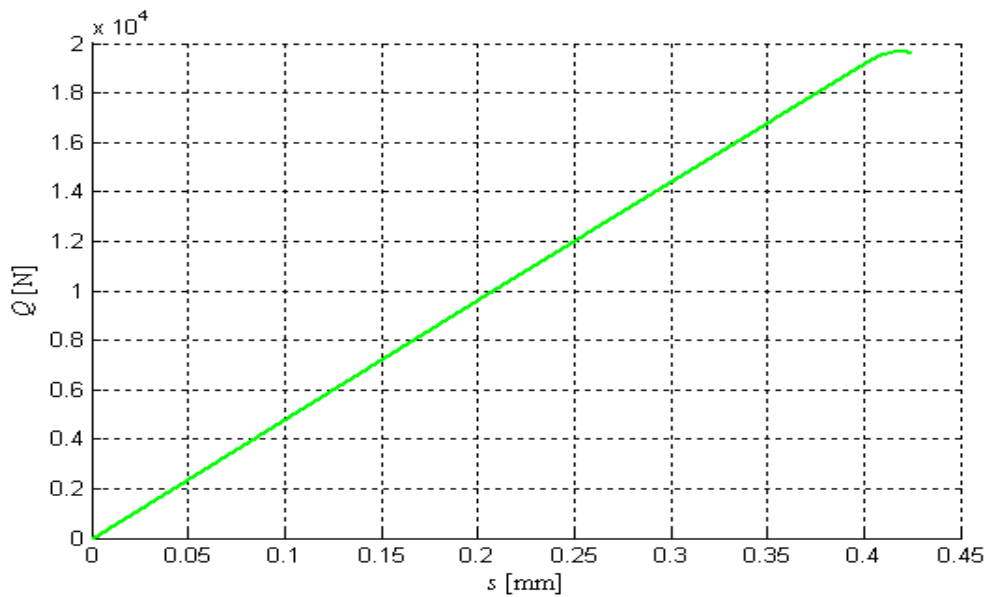
Στα σχήματα του παραρτήματος δείχνεται η μεταβολή της ολίσθησης και των τάσεων συνάφειας κατά μήκος ενός ελάσματος FRP για διάφορες τιμές των επιβαλλόμενων δυνάμεων Q .



Σχήμα ΙΙ.1 Διάγραμμα ολίσθησης (s) – μήκους επικόλλησης (l_w)

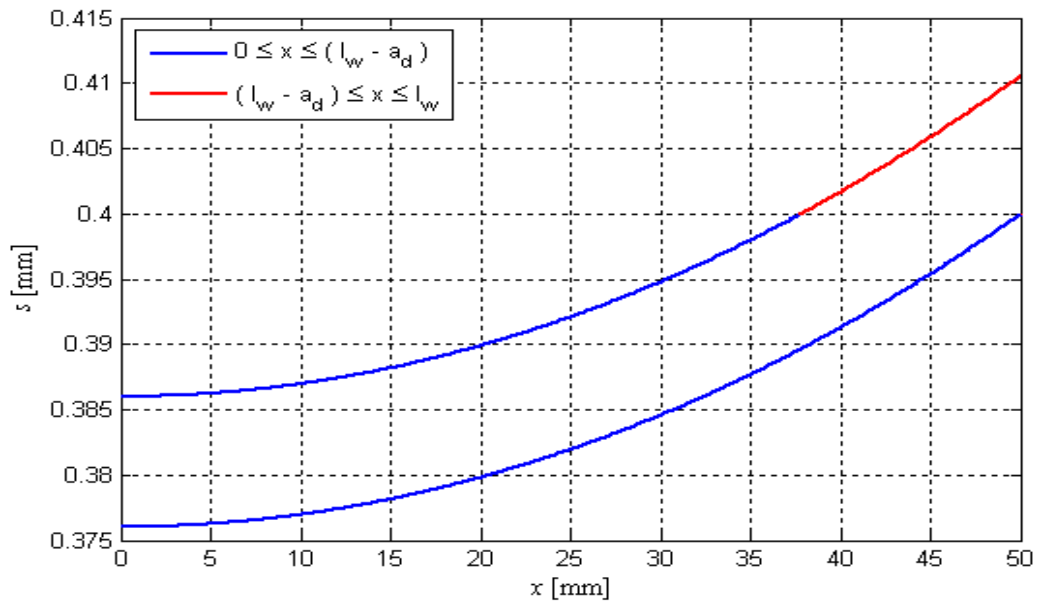


Σχήμα ΙΙ.2 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w)

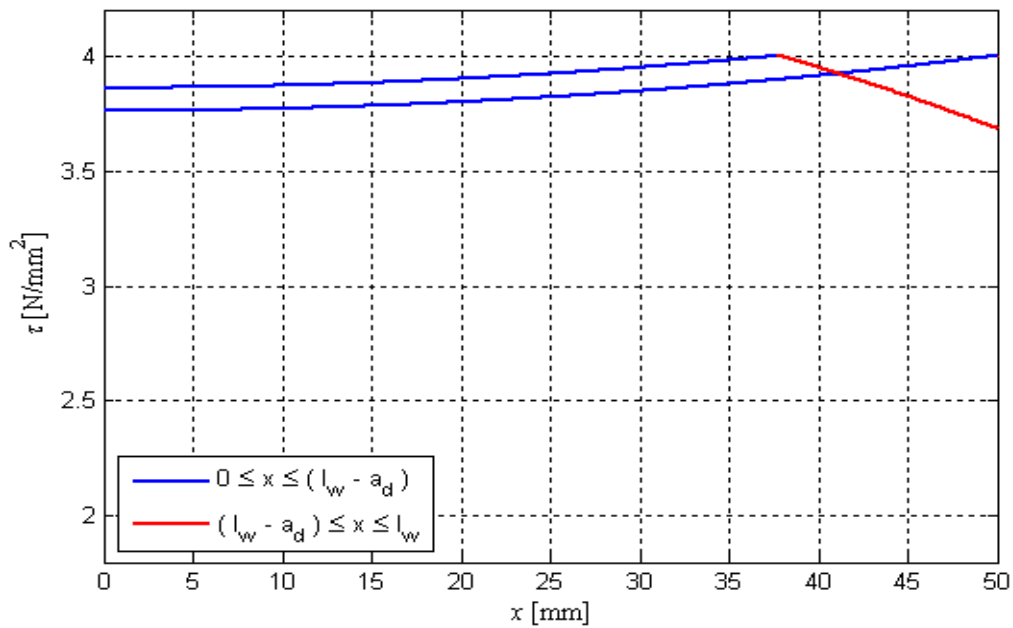


Σχήμα ΙΙ.3 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) ($l_w=50$ mm)

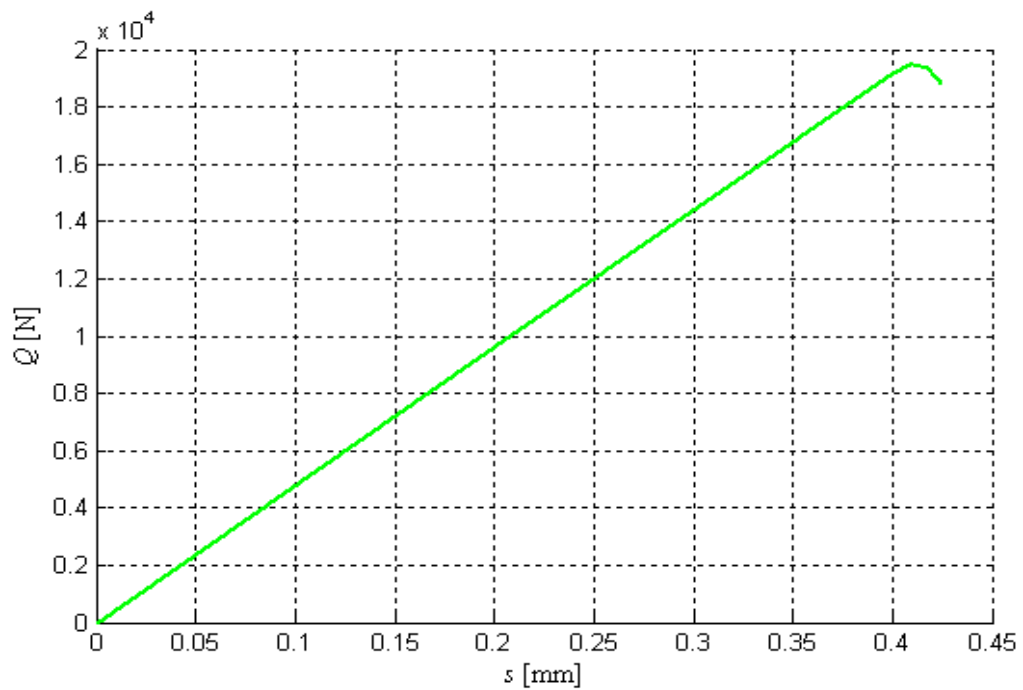
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα ΙΙ.1 – Σχήμα ΙΙ.3), δείχνονται οι μεταβολές των μεγεθών για: $t_p = 1,2$ mm, $E_p = 165000$ MPa και $l_w = 50$ mm. Οι παράμετροι του πλαστικού δι-γραμμικού νόμου συνάφειας – ολίσθησης είναι: $s_{\max} = 0,4$ mm, $\tau_{\max} = 4$ MPa, $p = 1$. Τα E_p , t_p , καθώς και τα s_{\max} , τ_{\max} , είναι σταθερά σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα II.4 Διάγραμμα ολίσθησης (s) – μήκους επικόλλησης (l_w) (ψαθυρή)

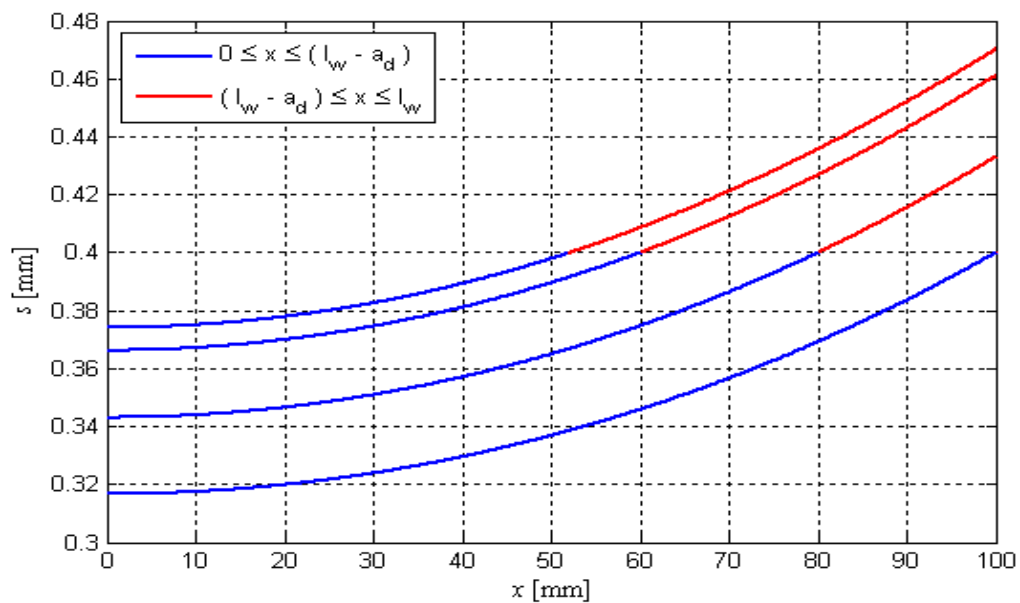


Σχήμα II.5 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) (ψαθυρή)

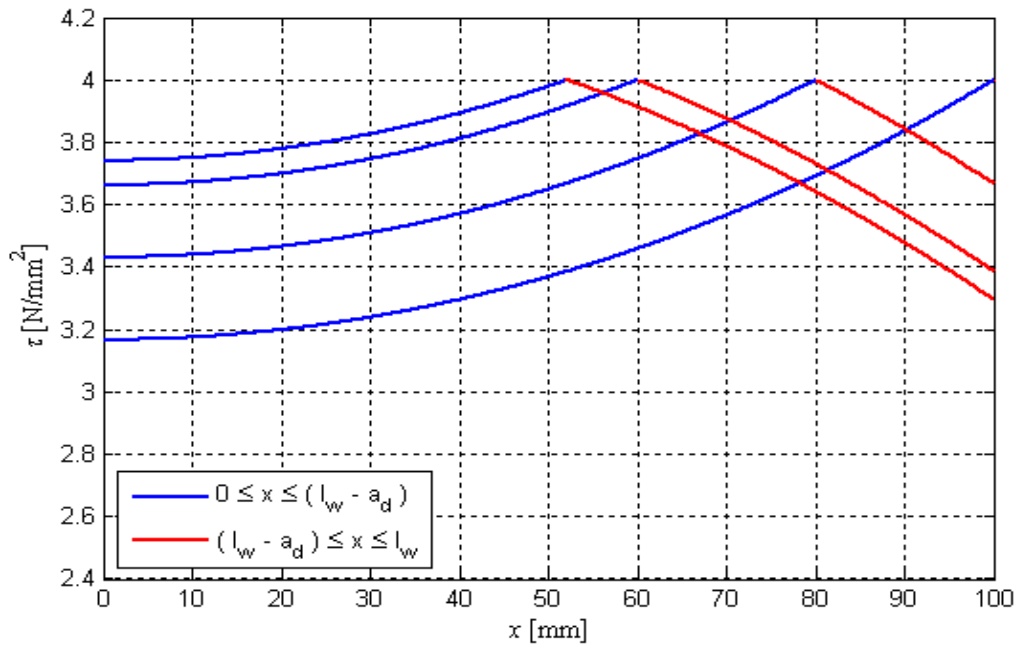


Σχήμα ΙΙ.6 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) (ψαθυρή) ($l_w=50$ mm)

Στα Σχήματα ΙΙ.4 – ΙΙ.6 , απεικονίζονται οι μεταβολές για $l_w = 50$ mm. Η παράμετρος p του ψαθυρού δι - γραμμικού νόμου συνάφειας ολίσθησης έχει ληφθεί ίση με 3.

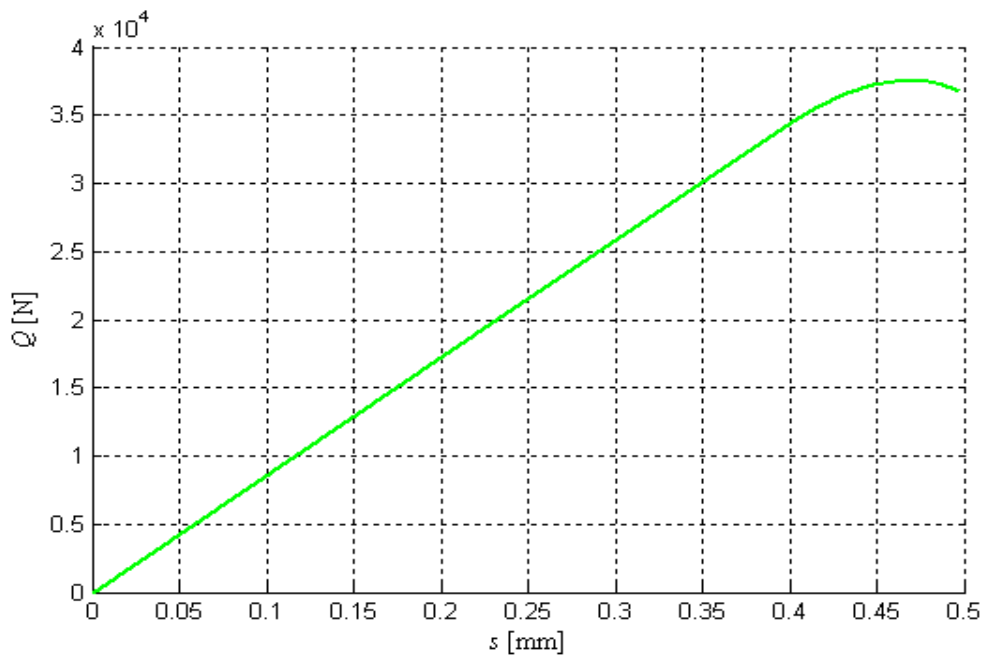


Σχήμα ΙΙ.7 Διάγραμμα ολίσθησης (s) – μήκους επικόλλησης (l_w) (πλάστιμη)



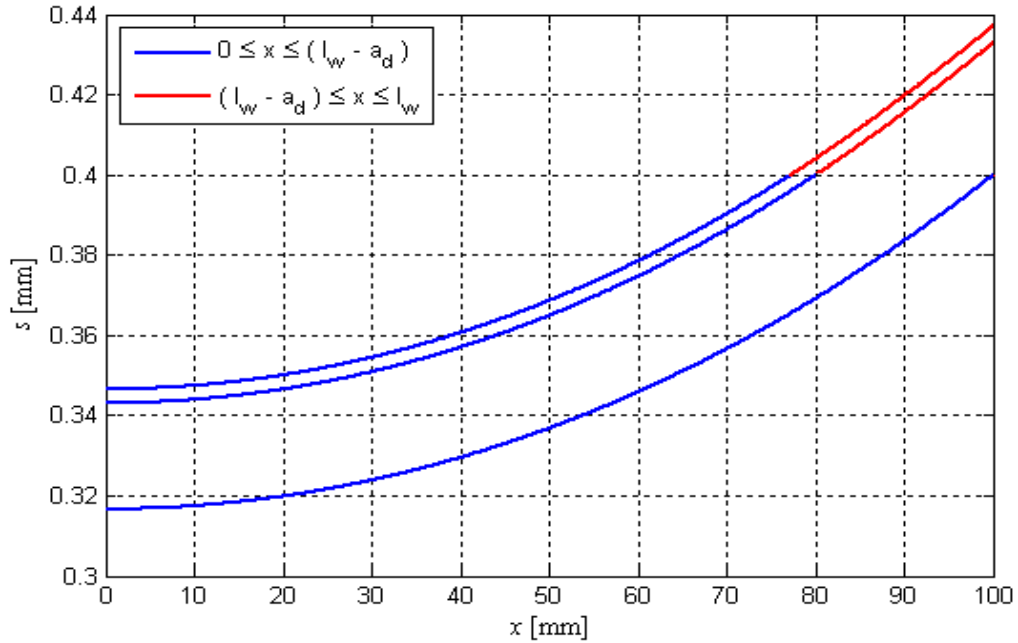
Σχήμα II.8 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) (πλάστιμη)

Στα Σχήματα II.7-II.9, είναι $l_w = 100$ mm με τις προαναφερθείσες τιμές για τις παραμέτρους της πλάστιμης συμπεριφοράς.

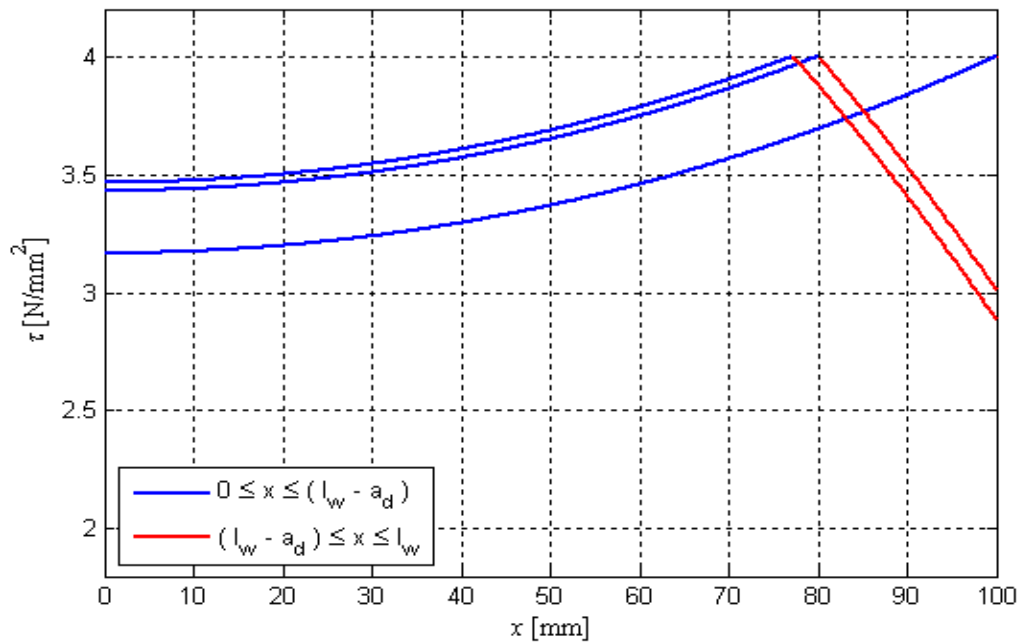


Σχήμα II.9 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για πλάστιμη συμπεριφορά ($l_w=100$ mm)

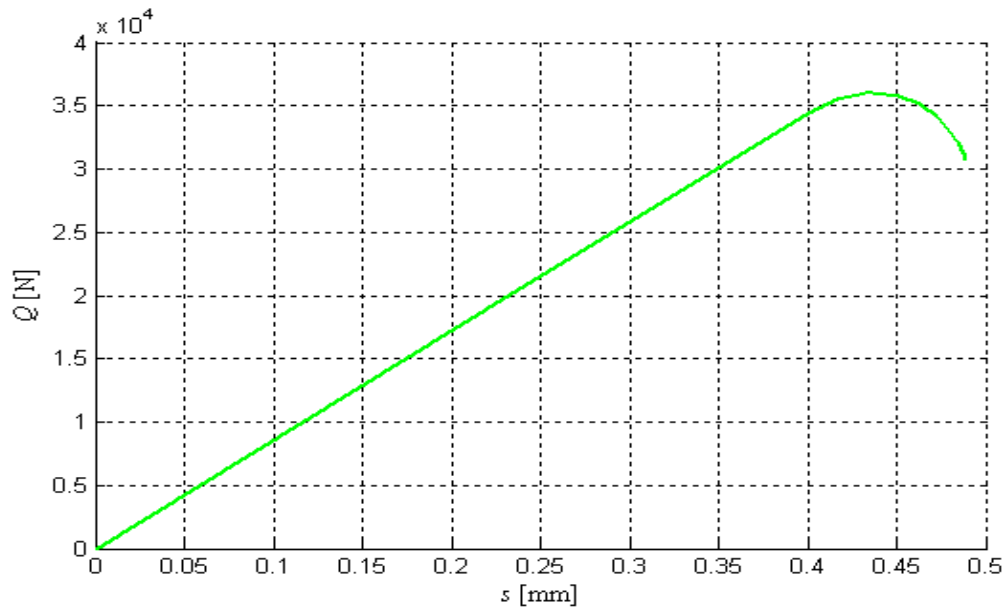
Στην ψαθυρή συμπεριφορά ($p = 3$) και για $l_w = 100$ mm, τα παραπάνω διαγράμματα γίνονται



Σχήμα Π.10 Διάγραμμα ολίσθησης (s) – μήκους επικόλλησης (l_w) για ψαθυρή συμπεριφορά

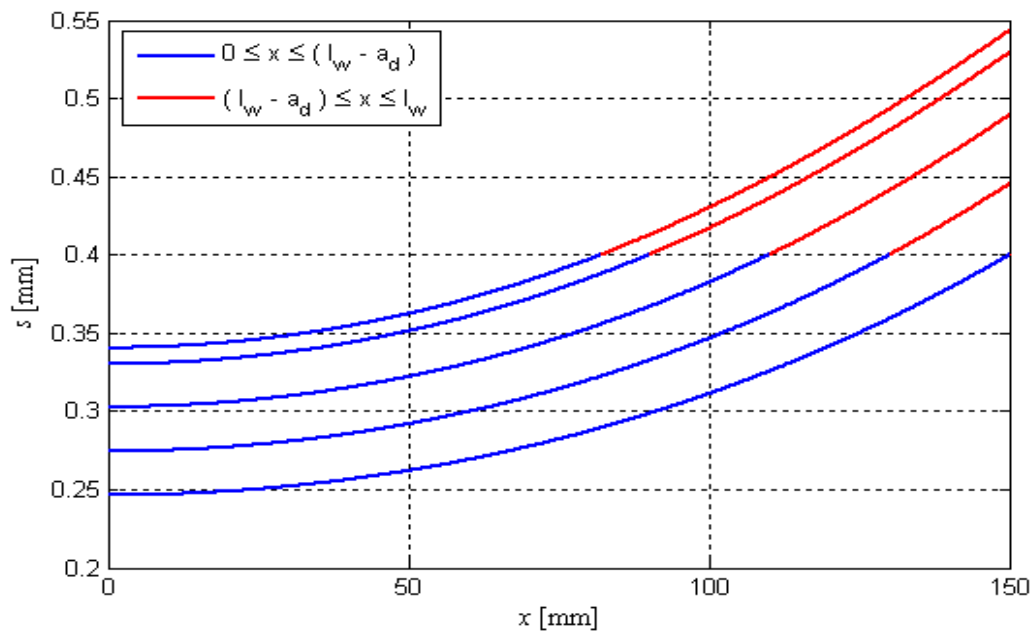


Σχήμα Π.11 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) για ψαθυρή συμπεριφορά

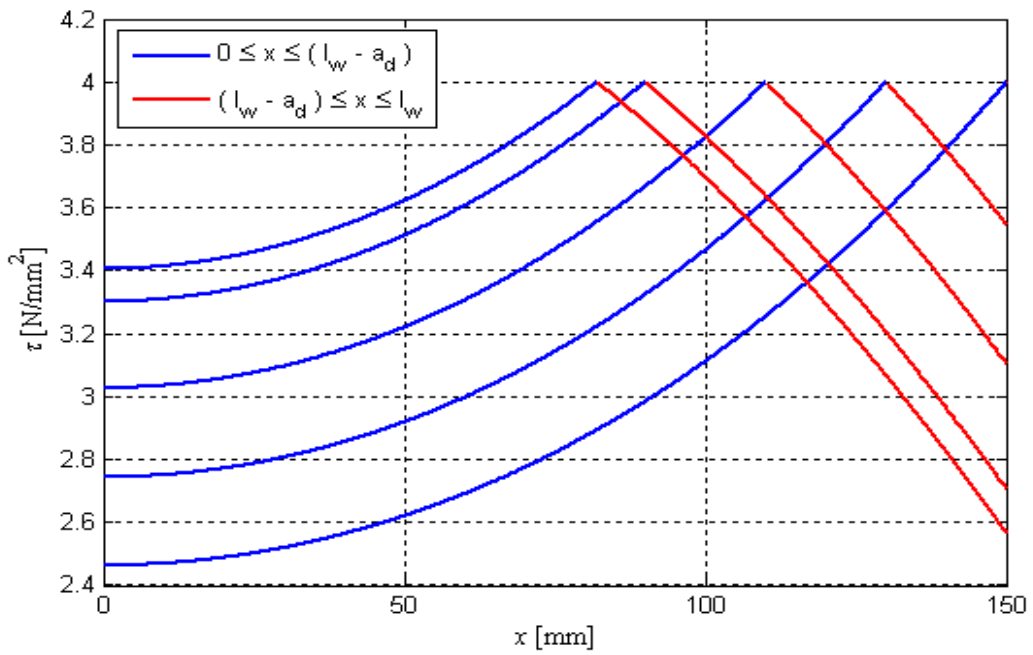


Σχήμα Π.12 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για ψαθυρή συμπεριφορά ($l_w=100$ mm)

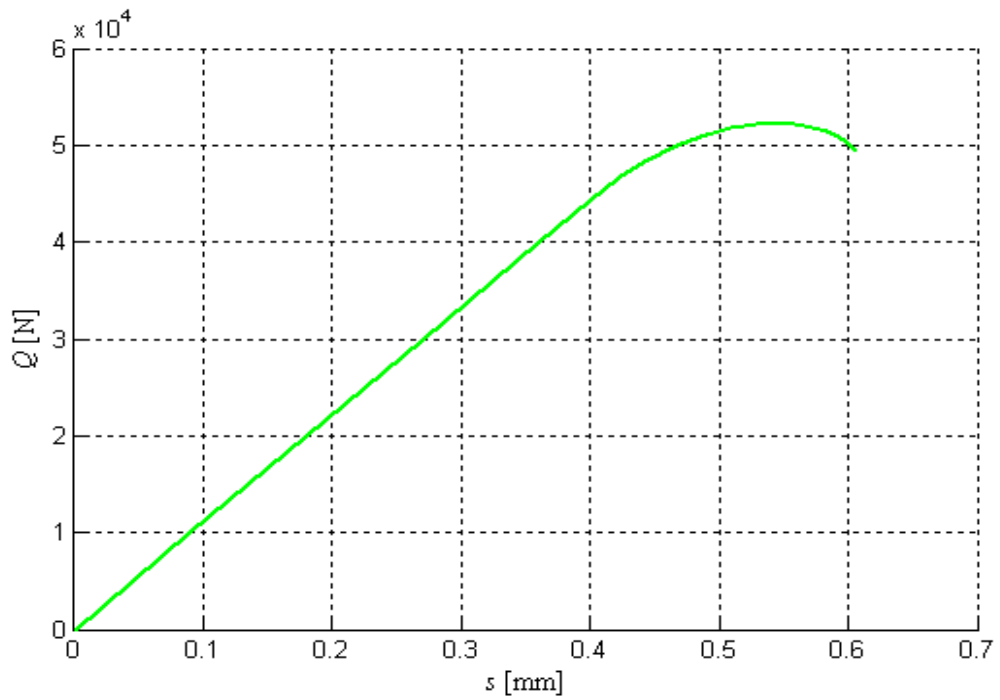
Τέλος για πλαστική συμπεριφορά και $l_w = 150$ mm, κατασκευάζονται τα διαγράμματα



Σχήμα Π.13 Διάγραμμα ολίσθησης (s) – μήκους επικόλλησης (l_w) για πλαστική συμπεριφορά

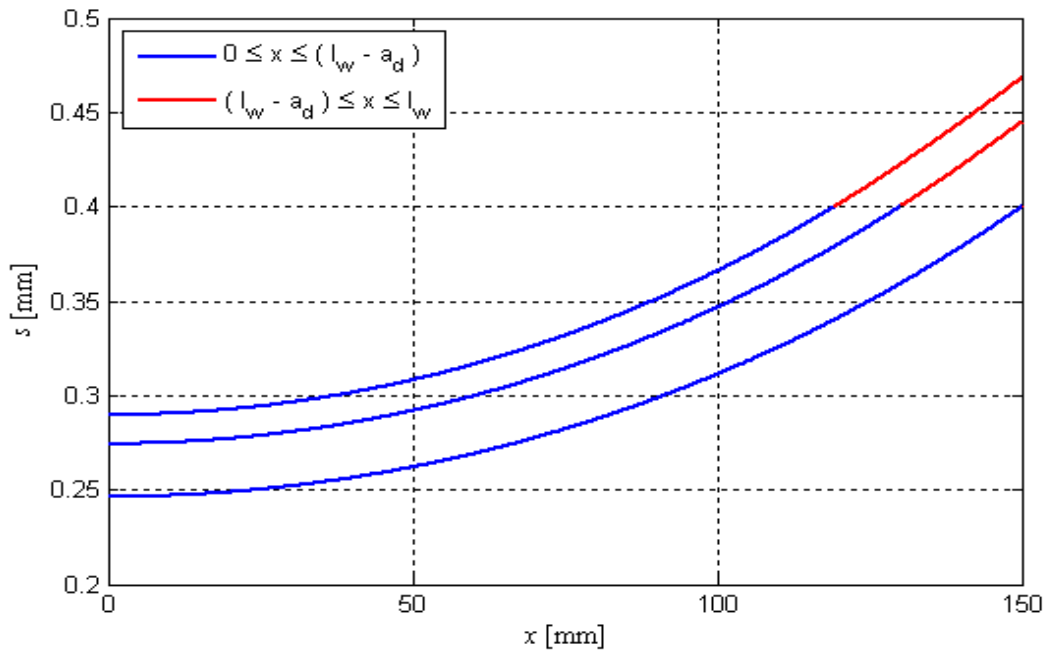


Σχήμα Π.14 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) για πλαστική συμπεριφορά

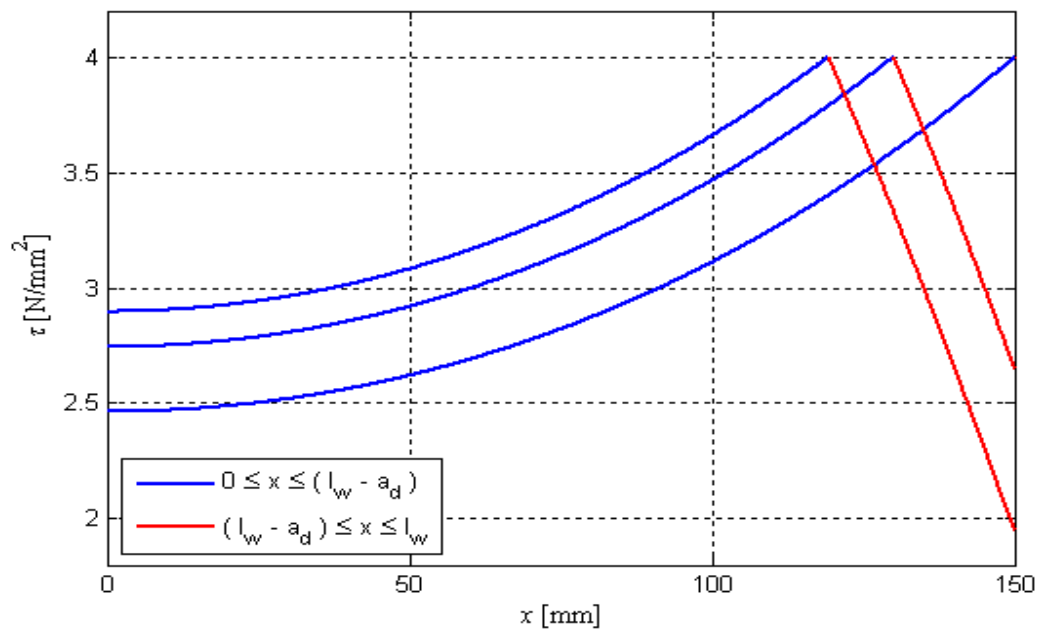


Σχήμα Π.15 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για πλαστική συμπεριφορά ($l_w=150$ mm)

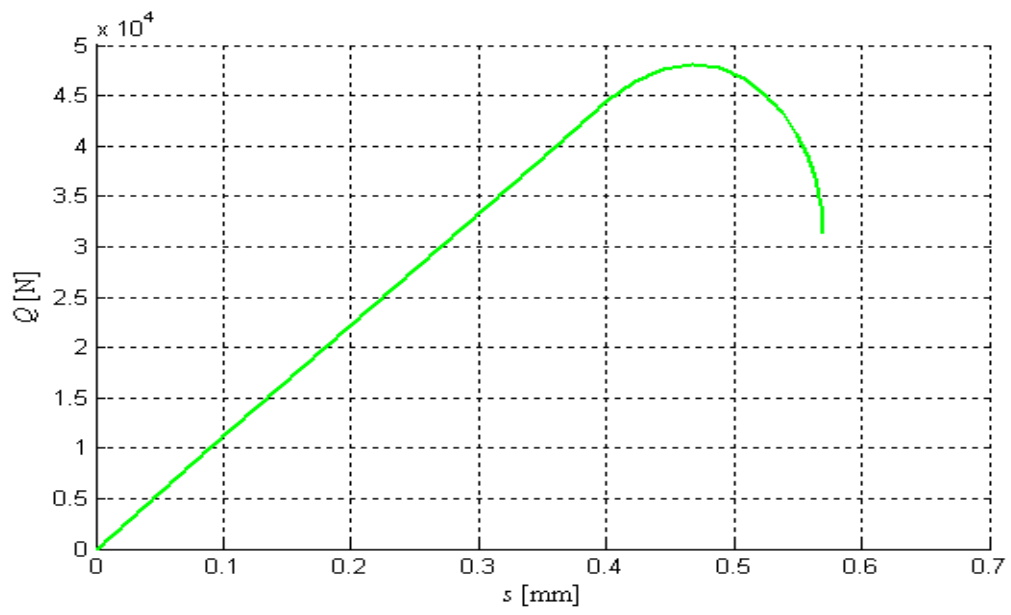
ενώ για ψαθυρή συμπεριφορά τα παραπάνω διαγράμματα γίνονται



Σχήμα Π.16 Διάγραμμα ολίσθησης (s) – μήκους επικόλλησης (l_w) για ψαθυρή συμπεριφορά



Σχήμα Π.17 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) (ψαθυρή)



Σχήμα ΙΙ.18 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για ψαθυρή συμπεριφορά ($l_w = 150$ mm)