



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ FRP- ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ζαρκαδούλας Ιωάννης

Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
Κεφάλαιο 1.....	10
Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ	10
1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	10
1.1.1 Η γεωμετρία των δοκιμών και της διάταξης	10
1.1.2 Περιγραφή της δοκιμής	12
1.1.3 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού-δοκιμίου	15
1.2 ΟΛΙΣΘΗΣΗ.....	15
1.3 ΤΑΣΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ.....	18
Κεφάλαιο 2.....	22
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	22
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	22
2.2 Η ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	23
2.3 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	27
2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ	31
2.4.1 Ψαθυρή συμπεριφορά της διεπιφάνειας	32
2.4.2 Πλάστιμη συμπεριφορά της διεπιφάνειας	32
2.5 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	36
Κεφάλαιο 3.....	42
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	42
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	42
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	43
3.2.1 Η κατασκευή των δοκών-δοκιμών και οι μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών τους	43
3.2.2 Το σκυρόδεμα των δοκών-δοκιμών	47
3.2.3 Όργανα καταγραφής των μετρήσεων	50
3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	53
Κεφάλαιο 4.....	57
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	57
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57

4.2 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ FRP	57
4.3 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ – ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	60
Κεφάλαιο 5.....	64
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	69
ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ.....	69

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της εργασίας

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι επικολλήσεις ελασμάτων FRP στις εξωτερικές επιφάνειες δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος έχουν αποτελέσει μια διαδεδομένη πρακτική στην ενίσχυση ή επισκευή υφιστάμενων κατασκευών [1]-[5]. Στις ενισχύσεις με ελάσματα FRP, η κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της τεχνικής αυτής είναι η διεπιφάνεια μεταξύ ελάσματος και δομικού στοιχείου, μέσω της οποίας μεταβιβάζονται οι δυνάμεις. Ένας από τους βασικούς τύπους αστοχίας της ενίσχυσης είναι η αποκόλληση της διεπιφάνειας που 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. Είναι προφανές ότι, η σχεδόν επιφανειακή μορφή του ελάσματος FRP, που χρησιμοποιείται ως ενίσχυση, εισάγει διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια, και ως εκ τούτου, ο παραπάνω τύπος αστοχίας χαρακτηρίζεται ως αστοχία διατρητικού τύπου.

Κατά το σχεδιασμό των ενισχύσεων δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με ελάσματα FRP, πέρα των μηχανικών παραμέτρων των επιμέρους υλικών, θα πρέπει να είναι γνωστή, τόσο η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας FRP–σκυροδέματος, όσο και ο τύπος αστοχίας της διεπιφάνειας. Η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας περιγράφεται με την καμπύλη συνάφειας–ολίσθησης, που προσδιορίζεται πειραματικά. Στην βιβλιογραφία, περιγράφονται διάφορες πειραματικές δοκιμές, που χρησιμοποιούνται 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 τόσο για τον προσδιορισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων που αναπτύσσονται στο ενισχυμένο δομικό στοιχείο, όσο και για την πρόβλεψη της αστοχίας της διεπιφάνειας FRP-σκυροδέματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου ερευνητικού έργου, που διεξάγεται στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ, προκειμένου να αναπτυχθεί μια ολοκληρωμένη και αποτελεσματική μεθοδολογία για την πειραματική ανάλυση της καταστατικής συμπεριφοράς της συγκόλλησης των ενισχύσεων ελασμάτων FRP σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος που περιγράφεται με την καμπύλη συνάφειας–ολίσθησης. Το πειραματικό έργο που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει:

- Την κατασκευή τεσσάρων δοκών δοκιμών από σκυρόδεμα συγκεκριμένης ποιότητας, με τις τυποποιημένες διαστάσεις που έχουν προταθεί θεωρητικά να έχουν τα δοκίμια της δοκιμής δοκού, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων του ΕΜΠ. Σε κάθε δοκίμιο επικολλήθηκαν ελάσματα FRP συγκεκριμένης διατομής και ίδιας ποιότητας, αλλά διαφορετικών μηκών. Για τα δοκίμια αυτά εξήχθησαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος με τον προσδιορισμό της θλιπτικής τους αντοχής.
- Την εφαρμογή και την αξιολόγηση, για πρώτη φορά της δοκιμής δοκού που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής, για τον πειραματικό προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας ολίσθησης για μονότονη φόρτιση.

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 υποστυλωμάτων 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 υποστυλωμάτων 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 (Triantafillou 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, πέντε κεφάλαια και ένα παράρτημα.

Στο Κεφάλαιο 1, περιγράφεται η πειραματική δοκιμή-δοκού, για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης στην διεπιφάνεια σκυροδέματος, σε ενισχυμένα δομικά στοιχεία με ελάσματα. Συγκεκριμένα 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 ενισχυμένο δοκίμιο. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται η προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας του ενισχυμένου δοκιμίου, αναπτύσσεται και επιλύεται η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας, και διατυπώνεται ένα ενεργειακό κριτήριο αστοχίας της ενίσχυσης με βάση την καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης της διεπιφάνειας.

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 περιλαμβάνει την κατασκευή τεσσάρων δοκών-δοκιμίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, τον προσδιορισμό της θλιπτικής τους αντοχής και την καταγραφή των απαιτούμενων μετρήσεων για την κατασκευή της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης για μονότονη φόρτιση.

Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων και κατασκευάζονται οι σχετικές πειραματικές καμπύλες.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και γίνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο Παράρτημα παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την θεωρητική ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 1

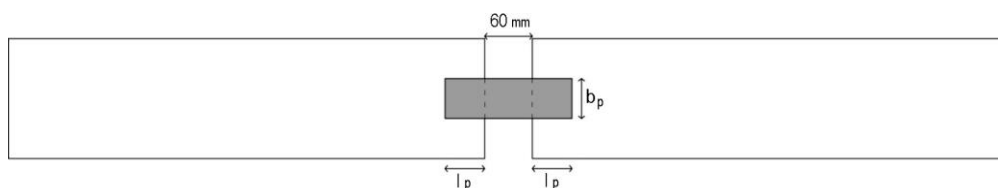
Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

1.1.1 Η γεωμετρία των δοκιμίων και της διάταξης

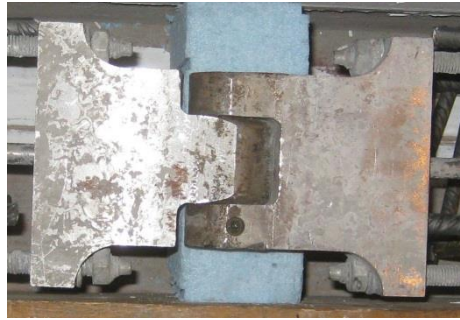
Για τον πειραματικό προσδιορισμό της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης σε διεπιφάνειες ελασμάτων FRP-σκυροδέματος, εφαρμόστηκε η εργαστηριακή δοκιμή που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ για οπλισμό με ράβδους FRP, σε μια τροποποιημένη μορφή που περιγράφεται παρακάτω.

Το δοκίμιο της δοκιμής αποτελείται από μια δοκό, η οποία απαρτίζεται από δύο στοιχεία σκυροδέματος σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου διαστάσεων 150x200x600 mm. Τα δύο αυτά στοιχεία βρίσκονται σε μια απόσταση 60 mm μεταξύ τους και συνδέονται, στο πάνω μέρος τους, με μια μηχανική άρθρωση από χάλυβα, και στο κάτω μέρος τους, με ένα έλασμα FRP το οποίο επικολλάται συμμετρικά στις κάτω δύο επιφάνειες των στοιχείων. Η επικόλληση του ελασματος FRP γίνεται με εποξειδική ρητίνη σε δύο επιφανειακά τμήματα διαστάσεων $l_p \times b_p$ (Σχήμα 1.1).



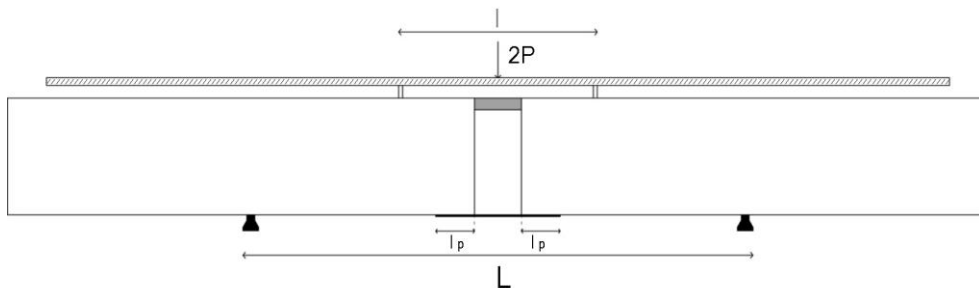
Σχήμα 1.1 Δοκίμιο και θέση του ελασματος (άνοψη)

Η μεταλλική άρθρωση είναι τυποποιημένων διαστάσεων και αγκυρώνεται με μεταλλικές ράβδους στα δύο στοιχεία του σκυροδέματος (Σχήμα 1.2).

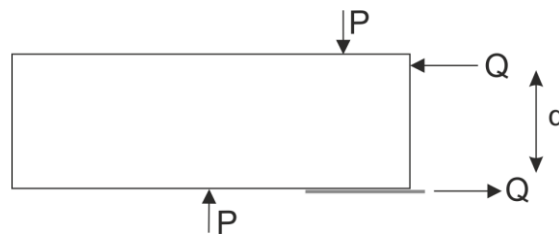


Σχήμα 1.2 Μεταλλική άρθρωση

Η δοκιμή πραγματοποιείται με μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων. Η δοκός-δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή και καταπονείται με δύο κατακόρυφες δυνάμεις επιβαλλόμενες από τη μηχανή. Η επιβολή των δυνάμεων αυτών γίνεται μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου, το οποίο διαθέτει μετακινούμενες θέσεις των σημείων εφαρμογής των δυνάμεων (Σχήμα 1.3).



(α)



(β)

Σχήμα 1.3 (α) Η προτεινόμενη πειραματική διάταξη στη φάση εφελκυσμού του ενισχυμένου με έλασμα (plate) FRP δοκμίου-δοκού, (β) Οι δυνάμεις P που εφαρμόζονται στη δοκό βρίσκονται μεταξύ των στηριγμάτων της δοκού.

Με το στοιχείο αυτό, η ολική δύναμης της μηχανής διαιρείται σε δύο ίσες δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στο καθένα από τα δύο στοιχεία της δοκού-δοκιμίου. Η απόσταση l 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 αμφιπροέχουσα αμφιέριστη δοκό με άνοιγμα L (Σχήμα 1.3α). Στη συνέχεια η δοκός φορτίζεται με δύο ίσες κατακόρυφες P , οι οποίες απέχουν μεταξύ τους μια επιλεγμένη απόσταση l η οποία είναι μικρότερη από το άνοιγμα της δοκού-δοκιμίου ($l < L$). Με τη διάταξη αυτή, δημιουργείται μια κατάσταση καθαρής κάμψης στο τμήμα της δοκού που βρίσκεται ανάμεσα στις δύο επιβαλλόμενες από τη μηχανή δυνάμεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην εσωτερική διατομή των δύο τμημάτων της δοκού-δοκιμίου να αναπτύσσεται ένα ζεύγος δυνάμεων Q το οποίο επενεργεί σε αυτά μέσω της άρθρωσης και του ελάσματος. Το ζεύγος αυτό έχει ροπή ίση με τη σταθερή καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στη δοκό μεταξύ των δύο επιβαλλόμενων δυνάμεων. Με τον τρόπο εφαρμογής των δυνάμεων P , όταν δηλαδή ισχύει $l < L$, η θλιπτική δύναμη Q ασκείται στην άρθρωση και η εφελκυστική δύναμη ασκείται στο έλασμα (Σχήμα 1.3β). Από την ισορροπία των τμημάτων της δοκού-δοκιμίου, προκύπτει:

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

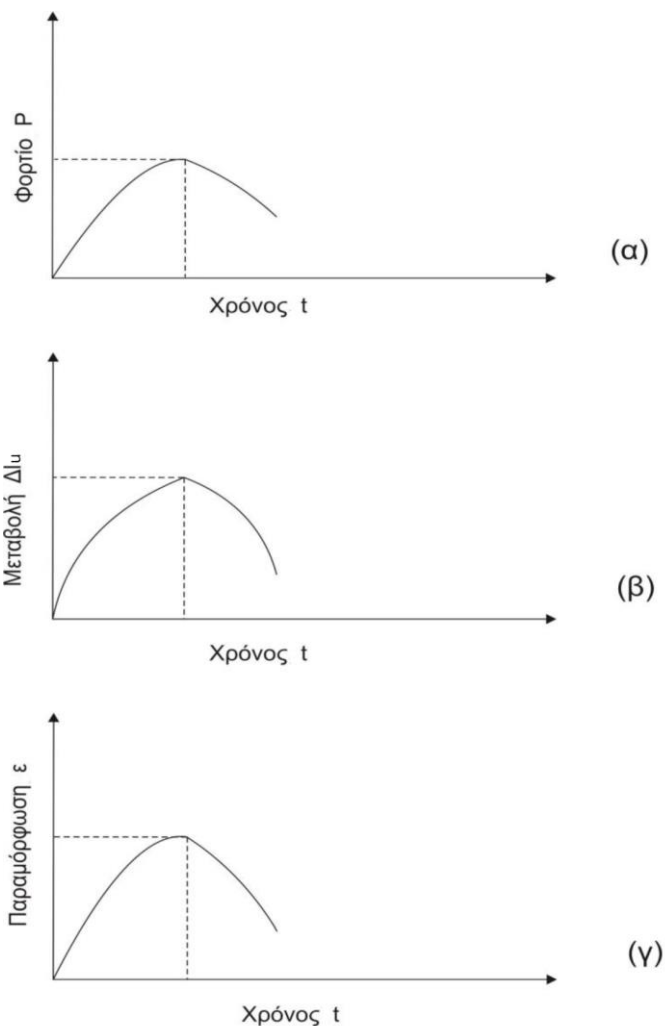
όπου a είναι ο μοχλοβραχίονας του ζεύγους δυνάμεων Q . Για τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η διάταξη περιλαμβάνει (i) ένα εξτενσιόμετρο που τοποθετείται οριζόντια στο κάτω μέρος του ενδιάμεσου τμήματος των 60 mm των δύο τμημάτων, (ii) μηκυνσιόμετρα, που τοποθετούνται σε επιλεγμένες θέσεις στην εξωτερική επιφάνεια του επικολλημένου ελάσματος.

1.1.2 Περιγραφή της δοκιμής

Η πειραματική δοκιμή διεξάγεται ως εξής: η δοκός-δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή έτσι ώστε οι δύο δυνάμεις της μηχανής να εφαρμόζονται εσωτερικά των στηρίξεων

($l < L$). Στη συνέχεια η επιβολή των δυνάμεων στη δοκό-δοκίμιο γίνεται σιγά σιγά και αυξητικά, προκειμένου να αποφεύγονται δυναμικά φαινόμενα. Από την έναρξη της επιβολής των δυνάμεων και σε κάθε χρονική στιγμή καταγράφονται:

- Το επιβαλλόμενο φορτίο P της μηχανής στη δοκό από την έναρξη της επιβολής της φόρτισης (Σχήμα 1.4α).
- Οι οριζόντιες μετατοπίσεις Δl_u των εσωτερικών ακραίων διατομών των δύο τμημάτων της δοκού, από την αρχική τους θέση, στο ύψος του ελάσματος ενίσχυσης. Η καταγραφή γίνεται με εξτενσιόμετρο (Σχήμα 1.4β).
- Η παραμόρφωση $\varepsilon_{p,A}$ στα δύο σημεία A του μη συγκολλημένου τμήματος του ελάσματος και η παραμόρφωση $\varepsilon_{p,M}$ στα δύο σημεία M του συγκολλημένου τμήματος του ελάσματος (Σχήμα 1.4γ)

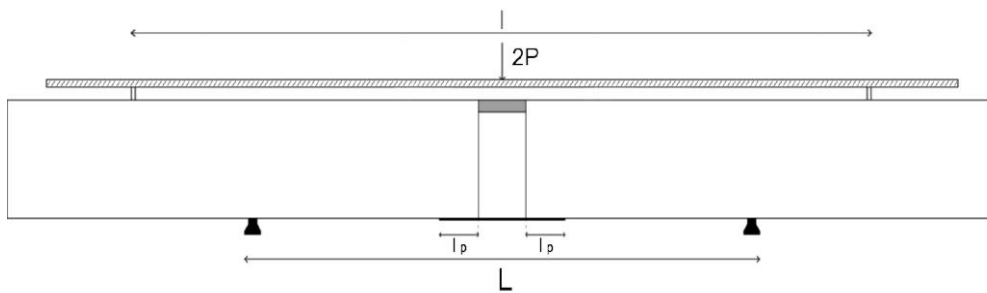


Σχήμα 1.4 Οι καμπύλες που λαμβάνονται κατά την δοκιμή ως συνάρτηση του χρόνου.

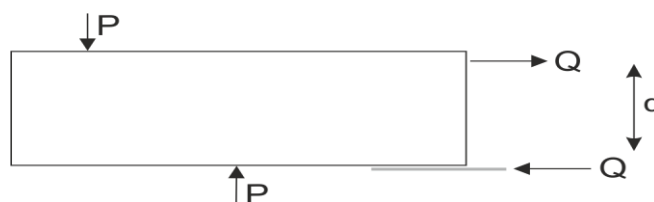
Οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε κάθε χρονική στιγμή εκτέλεσης του πειράματος. Αν η επιβαλλόμενη δύναμη μεταβάλλεται αξονικά, τότε έχουμε φόρτιση της δοκού και ο αντίστοιχος κλάδος της καμπύλης αποτελεί το κλάδο φόρτισης.

Κατά την εξέλιξη της μηχανής μπορούμε να πάρουμε κλάδους αποφόρτισης της δοκού ως εξής: σε κάποια χρονική στιγμή, που το φορτίο έχει πάρει μια 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 σχηματικά στις μορφές που δείχνονται στο Σχήμα 1.4.

Με το μηδενισμό της φόρτισης μπορεί να γίνει ανακύκλιση της φόρτισης. Για την πραγματοποίησή της, ρυθμίζεται η απόσταση των επιβαλλόμενων δυνάμεων να είναι ίση με l που να είναι μεγαλύτερη από το άνοιγμα L ($L < l$) (Σχήμα 1.5). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται πάλι μια κατάσταση καθαρής κάμψης μεταξύ των στηριγμάτων της δοκού-δοκιμίου. Οι ροπές έχουν αντίθετο πρόσημο από τις προηγούμενες, με συνέπεια οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην άρθρωση και στο έλασμα να έχουν αντίθετη φορά.



(α)

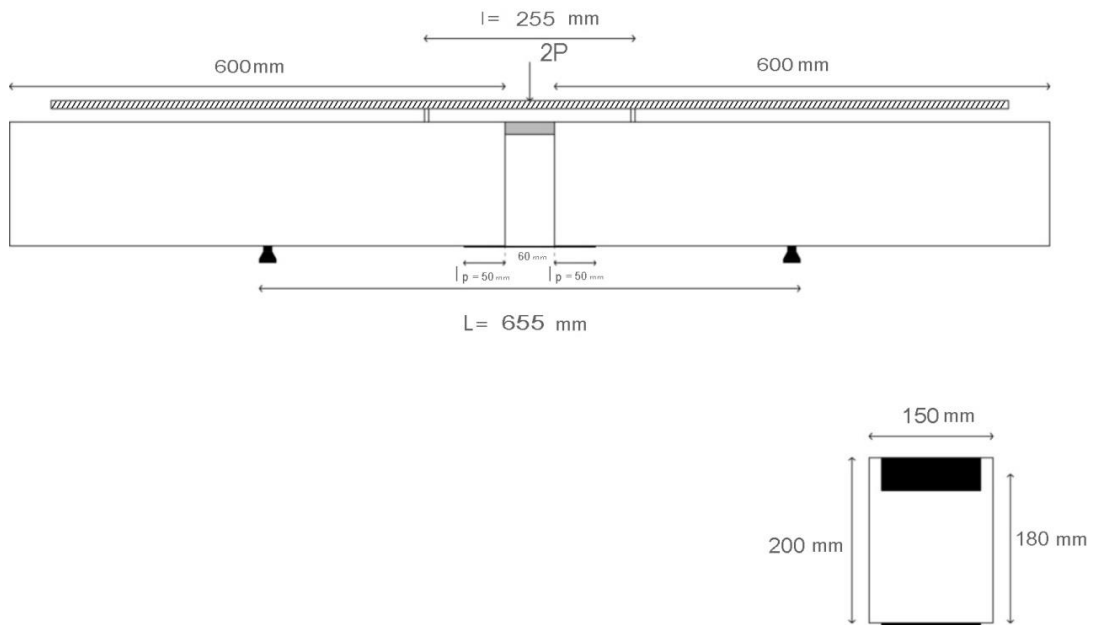


(β)

Σχήμα 1.5 (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

Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού-δοκιμίου που προτείνονται, δείχνονται στο Σχήμα 1.6. Οι διαστάσεις έχουν επιλεγθεί μετά από σχετική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία [6], ώστε να αποφευχθούν τοπικά φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων και επίδρασης ανεπιθύμητων φορτίσεων στο επικολημένο έλασμα.



Σχήμα 1.6 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της πειραματικής δοκού στην περίπτωση του εφελκυσμού

1.2 ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Από τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση της δοκιμής και συγκεκριμένα:

- από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων $\varepsilon_{p,A}$ και $\varepsilon_{p,M}$ που υφίσταται το έλασμα FRP στα σημεία A και M αντίστοιχα,
- 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 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-δοκιμίου από το σκυρόδεμα είναι αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί. Τα δύο στοιχεία της δοκού-δοκιμίου συμπεριφέρονται ως απόλυτα στερεά σώματα,
- το έλασμα παραμορφώνεται σύμφωνα με το νόμο του Hooke $\sigma_p = E_p \varepsilon_p$, δηλαδή γραμμικά ελαστικά. Στη σχέση αυτή το σ_p είναι η ορθή τάση που καταπονεί το έλασμα, ε_p είναι η αναπτυσσόμενη διαμήκης (ορθή) παραμόρφωση του ελάσματος και E_p το μέτρο ελαστικότητας.

Η μηχανική συμπεριφορά της σύνδεσης των δύο υλικών, δηλαδή του σκυροδέματος και του ελάσματος ενίσχυσης, προσομοιώνεται με μια συνεχή διανομή ελατηρίων 'διατμητικού τύπου', αμελητέου πάχους, τα οποία είναι διανεμημένα πάνω στη διεπιφάνεια. Για ένα απειροστό τμήμα dx του ελάσματος, αντιστοιχεί μια εξωτερική απειροστή επιφάνεια $dA = b_p dx$ (Σχήμα 1.7). Τα ελατήρια που είναι διανεμημένα πάνω σε αυτή την απειροστή επιφάνεια αναπτύσσουν μια δύναμη $dT = \tau dA$ και επιμηκύνονται όλα κατά s . Η επιμήκυνση s αντιπροσωπεύει την ολίσθηση στη θέση x του ελάσματος που βρίσκεται στο απειροστό τμήμα.

Η ολίσθηση υπολογίζεται από τη μέση τιμή των ολισθήσεων οι οποίες 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 1.7. Αν η διανομή της ολίσθησης στο τμήμα του ελάσματος μεταξύ των σημείων A και M προσεγγιστεί γραμμικά, τότε η μέση τιμή της ολίσθησης θα είναι ίση με

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

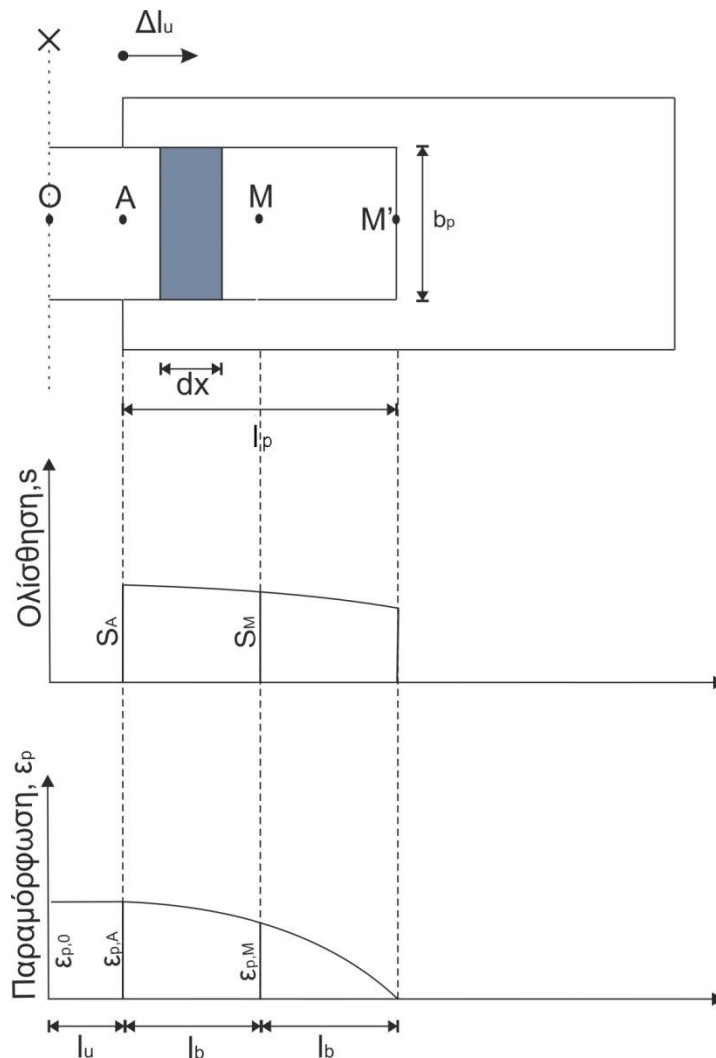
όπου s_A και s_M είναι ολισθήσεις των σημείων A και M αντίστοιχα.

Η μεταβολή της παραμόρφωσης κατά μήκος του ελάσματος δείχνεται στο Σχήμα 1.7. 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 και, αν η μεταβολή της μπορεί να προσεγγιστεί γραμμικά, τότε, η μέση τιμή της παραμόρφωσης του τμήματος AM είναι ίση με

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

όπου Δl_u είναι η οριζόντια μετακίνηση του δεξιού τμήματος του ελάσματος που αντιστοιχεί σε κίνηση απολύτως στερεού σώματος και έχει υπολογιστεί πειραματικά σε κάθε χρονική στιγμή της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 1.7 Η ολίσθηση και η παραμόρφωση κατά μήκος του επικολλημένου τμήματος του ελάσματος

Το αρχικό μήκος OM του ελάσματος ενίσχυσης είναι

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

Το μήκος αυτό μετά την παραμόρφωση θα είναι

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

Η ολίσθηση του σημείου M του ελάσματος θα είναι ίση με

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

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 $(l_u + \epsilon_{p,0}l_u)$ και της ολίσθησης s_A του σημείου A , δηλαδή θα ισχύει

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

Από τη σχέση αυτή προκύπτει

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

Έτσι από τις σχέσεις (1.2), (1.6) και (1.8) προκύπτει η μέση ολίσθηση του ελάσματος

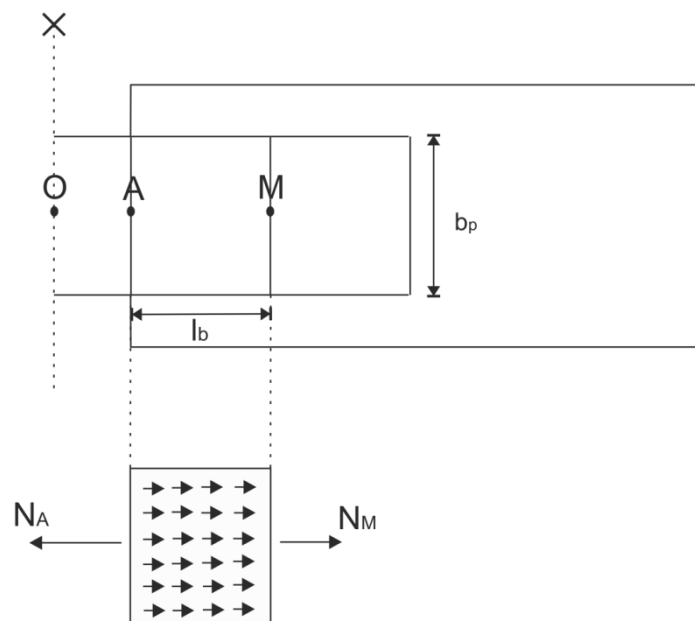
$$s_{ave} = \Delta l_u - \epsilon_{p,0}l_u - \frac{1}{2}\epsilon_{p,ave}l_b \quad (1.9)$$

1.3 ΤΑΣΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

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 (Σχήμα 1.8). Το έλασμα FRP που έχει επικολληθεί στα δύο στοιχεία της δικού παραλαμβάνει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτήν μέσω του συνδετικού υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί, την εποξειδική ρητίνη. Το υλικό αυτό αποτελεί το στοιχείο σύνδεσης μεταξύ του σκυροδέματος και του ελάσματος FRP και προσομοιώνεται ως μια 'ελατηριακή' διεπιφάνεια με ελατήρια διατμητικού τύπου. Η διεπιφάνεια αυτή μπορεί να ιδωθεί ως μια συνεχή διανομή ελατηρίων διατμητικού τύπου, όπου στην

απαραμόρφωτη κατάσταση έχει μηδενικό πάχος. Κατά την παραμόρφωση της δοκού-δοκιμίου, δύο απειροστά στοιχεία των δύο συνδεδεμένων επιφανειών σκυροδέματος και ελάσματος dS_C και dS_{FRP} , τα οποία στην απαραμόρφωτη κατάσταση συμπίπτουν ($dS_C = dS_{FRP} = dS$), υφίστανται μια σχετική μετατόπιση s χωρίς να διαχωρίζονται. Η σχετική αυτή μετατόπιση είναι η ολίσθηση και εκφράζει την ελατηριακή επέκταση της διεπιφάνειας στη θέση μέτρησης.

Οι δεσμοί που συνδέουν τα δύο αυτά στοιχεία, αναπτύσσουν μια ελατηριακή δύναμη dF_S η οποία αντιστοιχεί σε μια ομοιόμορφα διανεμημένη διατμητική τάση τ_{ave} πάνω στα στοιχεία dS_C και dS_{FRP} . Η διατμητική τάση τ_s σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διεπιφάνειας είναι συνάρτηση της ολίσθησης που αναπτύσσεται στο σημείο αυτό. Οι δεσμοί σύνδεσης των δύο υλικών, δηλαδή η εποξειδική ρητίνη, μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούν ένα δισδιάστατο συνεχές μέσο με τη δική του μηχανική συμπεριφορά, η οποία περιγράφεται από τη σχέση $\tau = \tau(s)$. Η σχέση αυτή αποτελεί τον καταστατικό νόμο της διεπιφάνειας ή διαφορετικά, του συνδετικού μέσου (εποξειδική ρητίνη). Η παραμόρφωση του δισδιάστατου αυτού μέσου περιγράφεται πλήρως με την ολίσθηση s , ενώ η εντατική του κατάσταση με τη διατμητική τάση τ . Επομένως κατά μήκος του ελάσματος η μεταβολή της ολίσθησης και της διατμητικής τάσης είναι μια συνάρτηση της θέσης. Η μέση αυτή διατμητική τάση είναι η (μέση) τάση συνάφειας του ελάσματος ενίσχυσης και δηλώνεται με τ_{ave} .



Σχήμα 1.8 Οι δυνάμεις N_A , N_M και οι τάσεις συνάφειας στο επικολημένο τμήμα AM

Για την εκτίμηση της τάσης αυτής θεωρείται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος του τμήματος AM του ελάσματος, που δείχνεται στο Σχήμα 1.8. 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 τη σχέση (1.12) η σχέση (1.14) 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

$$\tau_{ave} = \frac{t_p E_p}{l_b} (\varepsilon_{p,A} - \varepsilon_{p,M}). \quad (1.17)$$

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).

Παραπάνω παρουσιάστηκε, 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:

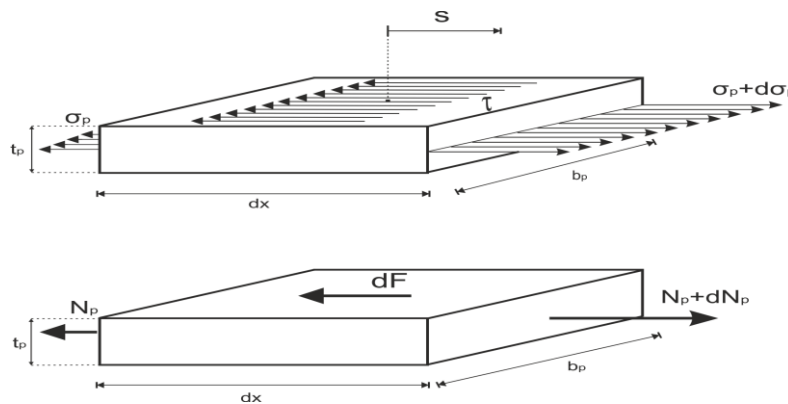
- Την ανάπτυξη της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την μηχανική συμπεριφορά του συστήματος έλασμα FRP – διεπιφάνεια - στοιχείο σκυροδέματος.
- Την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας.
- Την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης για δύο διακριτές συμπεριφορές της διεπιφάνειας: την ψαθυρή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

2.2 Η ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

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

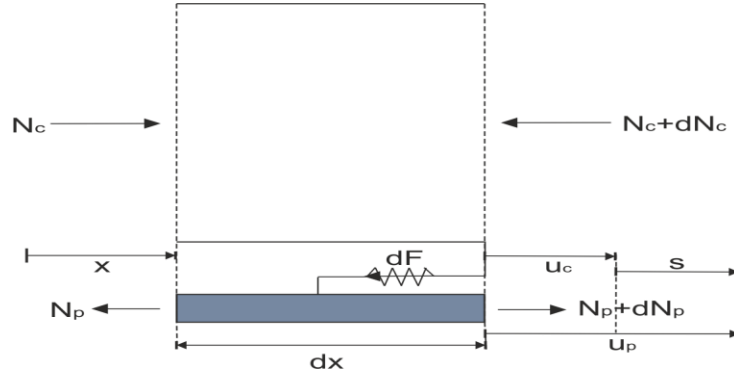
- Το έλασμα προσομοιώνεται με μια μεμβράνη, στην οποία αναπτύσσονται μόνο ορθές (μεμβρανικές) τάσεις.
- Η σύνδεση του ελάσματος με τη δοκό, που γίνεται με την εποξειδική ρητίνη, προσομοιώνεται με μια διανομή διατμητικών ελατηρίων αμελητέου πάχους. Η μηχανική συμπεριφορά της ελατηριακής σύνδεσης των δύο 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 $dF = \tau dA$, 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

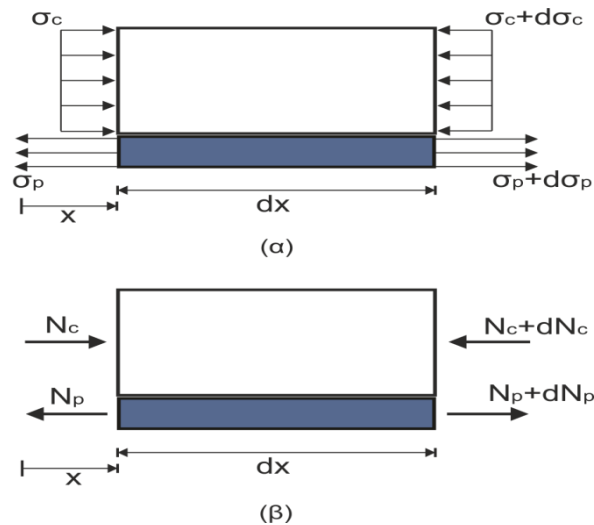
$$dF = t b_p dx . \quad (2.5)$$

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

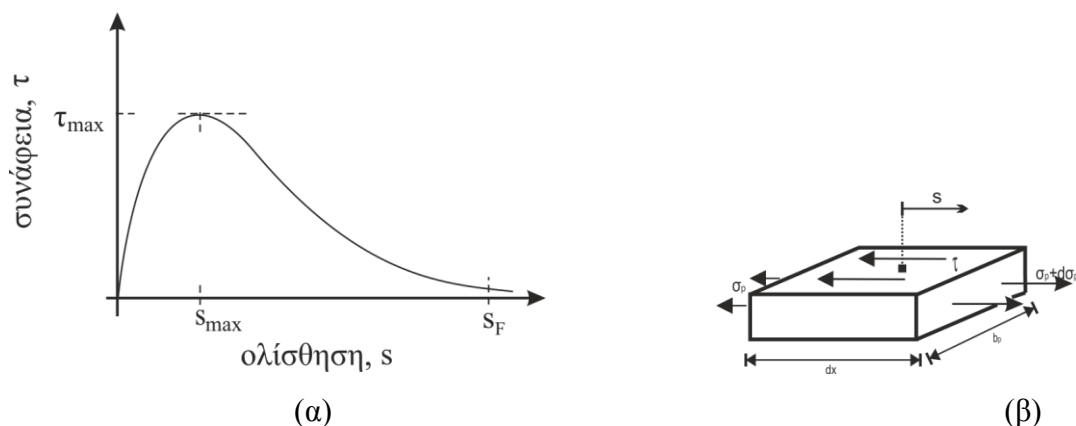
επομένως μπορεί να απαλειφθεί. Άρα η διαφορική εξίσωση της ολίσθησης, παίρνει την απλοποιημένη μορφή

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

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)).

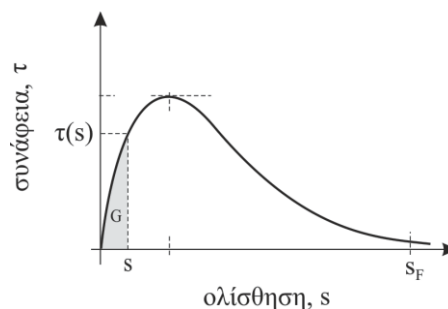
Όταν στο τμήμα αυτό, για μονότονες συνθήκες φόρτισης, η ολίσθηση φτάσει την τιμή s , η ενέργεια παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στο στοιχειώδες τμήμα dA της διεπιφάνειας είναι ίση με

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

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

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

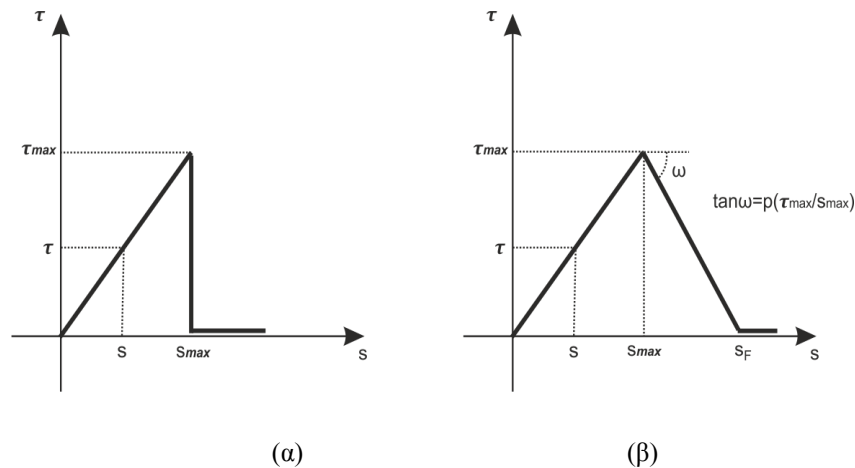
Η κρίσιμη αυτή παράμετρος εφοδιάζεται με τον επιπρόσθετο δείκτη II , προκειμένου να υπενθυμίζει τον διατμητικό χαρακτήρα (τύπου II) που έχει η διεπιφανειακή αστοχία.

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).



Σχήμα 2.6 Οι δύο απλοποιημένες μορφές του νόμου συνάφειας-ολίσθησης

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 πλάστιμη συμπεριφορά, η τάση συνάφειας, μετά την μέγιστη τιμή της τ_{max} συνεχώς 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 πλάστιμης συμπεριφοράς, η κρίσιμη τιμή της επιφανειακής πυκνότητας ενέργειας παραμόρφωσης υπολογίζεται από τις σχέσεις (2.21) και (2.22) στην μορφή:

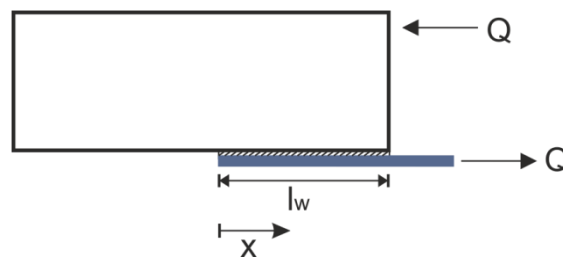
$$G_{c,II} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{p} \right] \tau_{\max} s_{\max} . \quad (2.23)$$

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

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

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 Πλάστιμη συμπεριφορά της διεπιφάνειας

Όταν ο νόμος συνάφειας-ολίσθησης αντιστοιχεί στην πλάστιμη 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 δεξί 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

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

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

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

$$\text{όταν } l_w - a_d \leq x \leq l_w,$$

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 (2.39) προσδιορίζονται οι σταθερές C και D στη μορφή

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

Επομένως, η γενική λύση II παίρνει την μορφή

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

$$\text{όταν } l_w - a_d \leq x \leq l_w.$$

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

$$\varepsilon_{p0} = \lambda_{II} (s_F - s_{\max}) \sin \lambda_{II} a_d + \lambda_I s_{\max} \cos \lambda_{II} a_d \tanh \lambda_I (l_w - a_d). \quad (2.44)$$

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

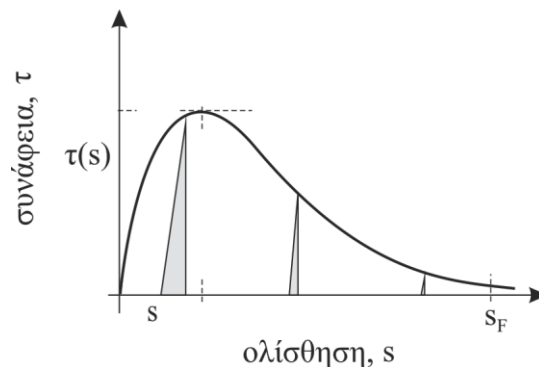
$$\varepsilon_{p,0,\max} = \lambda_{II} s_F \sin(\lambda_{II} a_{d,\max}). \quad (2.47)$$

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

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

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).



Σχήμα 2.8

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.

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 επικολημένου 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 ρωγμή 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 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης του ελάσματος ενίσχυσης για τους διάφορους τύπους ελασμάτων που κυκλοφορούν στο εμπόριο, χρησιμοποιώντας την πειραματική δοκιμή-δοκού που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής του ΕΜΠ. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται το πειραματικό έργο που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσης εργασίας και παρουσιάζονται τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα που αποκτήθηκαν. Επίσης παρουσιάζεται η επεξεργασία των αποκτηθέντων πειραματικών αποτελεσμάτων, που χρησιμοποιήθηκαν στην εξαγωγή των πειραματικών καμπύλων. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν τέσσερα δοκίμια από οπλισμένο σκυρόδεμα, που είχαν την ίδια γεωμετρία και την ίδια ποιότητα σκυροδέματος. Στα δοκίμια αυτά επικολλήθηκαν τα ελάσματα FRP ίδιας ποιότητας και ίδιας διατομής αλλά διαφορετικού μήκους. Από τα τέσσερα δοκίμια που κατασκευάστηκαν το ένα χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή της καμπύλης συνάφειας – ολίσθησης για μονότονες συνθήκες φόρτισης με τη διαδικασία που έχει περιγραφεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο 1. Τα υπόλοιπα δοκίμια θα χρησιμοποιηθούν για μελλοντική ερευνά πάνω στο ίδιο αντικείμενο.

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

3.2.1 Η κατασκευή των δοκών-δοκιμίων και οι μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών τους

Τα πειραματικά δοκίμια κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις τυποποιημένες διαστάσεις που απαιτεί η δοκιμή-δοκού, που δείχνονται στο Σχήμα 1.6. Η σκυροδέτηση τους πραγματοποιήθηκε μέσα σε ειδικά τυποποιημένα ξύλινα καλούπια από 'ΜΠΕΤΟΦΟΡΜ'. Για να αποφευχθεί η διατάραξη των δοκών-δοκιμίων κατά την μεταφορά τους, τα καλούπια έχουν κατασκευασθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν με ευκολία, αφού πρώτα η δοκός-δοκίμιο τοποθετηθεί στη μηχανή κάμψης, όπου θα εκτελεστεί το πείραμα. Για να δημιουργηθούν τα δύο τμήματα της δοκού, στο κέντρο του καλουπιού τοποθετήθηκε συμπιεσμένο χαρτί (φελιζόλ) πάχους 60 mm, όπως προβλέπεται από τις τυποποιημένες διαστάσεις των δοκών-δοκιμίων.



Σχήμα 3.1 Δοκίμιο πριν τη σκυροδέτηση με τον καμπτικό και διατμητικό οπλισμό

Για την αποφυγή διατμητικής και καμπτικής αστοχίας, στις δοκούς-δοκίμια τοποθετήθηκε ο κατάλληλος οπλισμός. Σε κάθε δοκό που κατασκευάστηκε τα δύο στοιχεία της οπλίστηκαν με δύο ράβδους οπλισμού Φ10 στο πάνω μέρος και δύο ράβδους οπλισμού Φ10 στο κάτω μέρος. Επίσης, οπλίστηκαν με συνδετήρες Φ8/10 που τοποθετήθηκαν κατά μήκος των δύο τμημάτων. Ο οπλισμός των δοκιμίων φαίνεται στα Σχήματα 3.1 και 3.2.



Σχήμα 3.2 Λεπτομέρειες καμπτικού και διατμητικού οπλισμού σε δοκίμιο

Στο πάνω μέρος των δύο τμημάτων των δοκών-δοκιμίων τοποθετήθηκαν οι μεταλλικές αρθρώσεις που αγκυρώθηκαν στα δυο τμήματα των δοκιμίων (Σχήμα 3.3). Οι αρθρώσεις είναι κατασκευασμένες από χάλυβα υψηλής αντοχής και έχουν τυποποιημένη γεωμετρία. Οι μεταλλικές αρθρώσεις έχουν κατασκευαστεί με τέτοιες διαστάσεις, έτσι ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις στις διεπιφάνειες κατά τη διάρκεια της δοκιμής να είναι μικρές προκειμένου να αποφευχθούν τοπικές αστοχίες.



Σχήμα 3.3 Η μηχανική άρθρωση

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. Η μεταλλική άρθρωση δείχνεται στο καλούπι της δοκού-δοκιμίου κατά το στάδιο πριν τη σκυροδέτηση.

Στο κάτω μέρος επικολλήθηκαν με εποξειδική ρητίνη τα ελάσματα FRP από ίνες άνθρακα γνωστής εμπορικής εταιρείας (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Το έλασμα FRP πριν την επικόλληση

Σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρίας, το έλασμα έχει ονομαστικό πλάτος 50 mm και πάχος 1.2 mm, ενώ η επιφάνεια ενεργής διατομής είναι ίση με 60 mm^2 . Τα ελάσματα της εταιρίας παράγονται με τη μέθοδο εξέλασης ινών άνθρακα σε πολυμερική μήτρα. Για την επικόλληση χρησιμοποιήθηκε εποξειδική ρητίνη. Τα ελάσματα FRP που επικολλήθηκαν στα τέσσερα δοκίμια έχουν μήκη επικόλλησης 50, 100, 150 και 200 mm αντίστοιχα, και κόπηκαν στο εργαστήριο σε μήκη 160, 260, 360 και 460 mm, ώστε να τοποθετηθούν συμμετρικά στο κάτω μέρος των δοκών-δοκιμίων. Στον Πινάκα 3.1 παρατίθενται η γεωμετρία και οι μηχανικές ιδιότητες των ελασμάτων FRP, όπως αυτές δίνονται από την εταιρεία που παράγει τα ελάσματα.

Πινάκας 3.1 Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες του ελάσματος FRP που χρησιμοποιήθηκε σύμφωνα με την εταιρία παραγωγής του

Ονομαστικό πλάτος (mm)	50
Ονομαστικό πάχος (mm)	1.2
Εμβαδό ενεργής διατομής (mm^2)	60
Εφελκυστική αντοχή (N/mm^2)	3100
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm^2)	165000
Περιεχόμενος όγκος ινών	>68%
Πυκνότητα (g/cm^3)	1.60

Τα ελάσματα επικολλήθηκαν στην επιφάνεια των δοκιμίων με εποξειδική ρητίνη γνωστής εμπορικής της εταιρίας. Σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρίας, η συγκεκριμένη ρητίνη είναι δύο συστατικών, με χαμηλό ιξώδες, χωρίς διαλύτες και αποτελείται από εποξειδικής βάσης ειδική, λεπτόρρευστη, αμιγής ρητίνη και από

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

σκληρυντή Ευρωπαϊκής προέλευσης. Είναι σχεδιασμένη για χρήση σε ελάχιστη θερμοκρασία $+4^{\circ}\text{C}$ και μέγιστη $+35^{\circ}\text{C}$, ενώ η σχετική υγρασία θα πρέπει να είναι κάτω του 80%. Για την παραγωγή της ρητίνης τα δύο συστατικά αναμείχθηκαν σε αναλογία 3:1 κατ' όγκο με χρήση αναδευτήρα για περίπου τρία λεπτά (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Ανάμιξη των δυο συστατικών της εποξειδικής ρητίνης

Στη συνέχεια η ρητίνη διαστρώθηκε στην επιφάνεια των δοκιμίων όπου και επικολλήθηκαν τα ελάσματα (Σχήμα 3.6). Από την κατασκευή και την επικόλληση των ελασμάτων μεσολάβησαν δυο περίπου μήνες μέχρι την διεξαγωγή της πειραματικής δοκιμής .



Σχήμα 3.6 Επικόλληση ελασμάτων με χρήση εποξειδικής ρητίνης

3.2.2 Το σκυρόδεμα των δοκών-δοκιμίων

Όλα τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν 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 3.7 και 3.8).



Σχήμα 3.7 Παρασκευή σκυροδέματος στον αναδευτήρα



Σχήμα 3.8 Δοκίμια κατά τη σκυροδέτηση

Για το σκυρόδεμα των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland, αδρανή με μέγιστη διάμετρο 12mm και λόγος νερού προς τσιμέντο 0,5. Η σύνθεση του σκυροδέματος των δοκιμίων έγινε με την αναλογία υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος που δείχνεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Αναλογία υλικών σκυροδέματος ανά m^3

Νερό	176 lit
Τσιμέντο	320 kg
Άμμος	600 kg
Χαλίκι (Γαρμπίλι)	1200 kg
Αέρας	2%

Οι παραπάνω αναλογίες χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιτευχθεί ποιότητα αντοχής σκυροδέματος C25/30.



Σχήμα 3.9 Δοκίμια αμέσως μετά τη σκυροδέτηση

Ύστερα από την σκυροδέτηση τους, οι δοκοί-δοκίμια καταβρέχονταν με νερό για μια εβδομάδα και διατηρήθηκαν σε συνθήκες θερμοκρασίας περίπου $20^{\circ}C$ και σχετικής υγρασίας που δεν ξεπερνούσε το 90%. Η χρονική διάρκεια που μεσολάβησε ανάμεσα στην κατασκευή των δοκιμίων και της εκτέλεσης του πειράματος ήταν έξι μήνες. Επίσης, ελήφθησαν έξι κυβικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων $150x150x150mm$ ώστε να γίνει έλεγχος της θλιπτικής αντοχής (Σχήμα 3.10).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχήμα 3.10 Κυβικά δοκίμια αμέσως μετά τη σκυροδέτηση

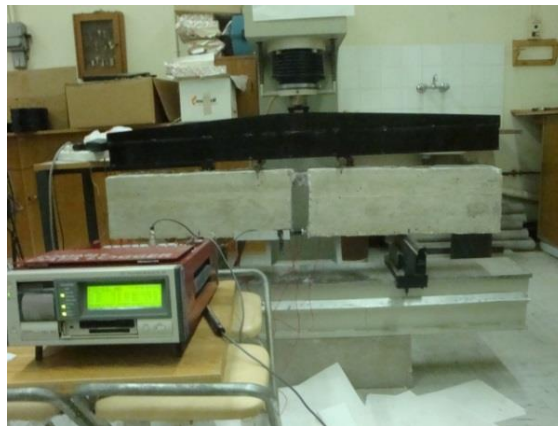
Μετά από την σχετική δοκιμή θλίψεως η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος για τη δοκό-δοκίμιο προσδιορίστηκε στην τιμή των 30 MPa (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11 Δοκιμή θλίψης κυβικού δοκιμίου

3.2.3 Όργανα καταγραφής των μετρήσεων

Έξι μήνες μετά την κατασκευή των δοκών-δοκιμίων, η δοκός στην οποία είχε επικολληθεί το έλασμα με μήκους 160 mm, τοποθετήθηκε καλουπωμένη στη μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων, όπου και ξεκαλουπάθηκε. Η μηχανή κάμψης έχει την δυνατότητα επιβολής μέγιστου φορτίου 100 KN. Όπως έχει αναφερθεί, οι δυνάμεις ασκούνται στη δοκό-δοκίμιο, μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου, που έχει κατασκευαστεί για το σκοπό αυτό. Με το στοιχείο αυτό, η συνολική δύναμη της μηχανής μοιράζεται σε δύο ίσες δυνάμεις, οι οποίες εξασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στα δύο τμήματα της δοκού. Επίσης, το παραπάνω μεταλλικό αυτό στοιχείο παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής της απόστασης των δύο ασκούμενων δυνάμεων. Με κατάλληλη μεταβολή της απόστασης αυτής επιτυγχάνεται η αντιστροφή της αξονικής δύναμης που καταπονεί τη δοκό-δοκίμιο. Το μεταλλικό αυτό στοιχείο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12, και το όργανο ανάγνωσης του επιβαλλόμενου φορτίου από τη μηχανή κάμψης στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.12 Η δοκός-δοκίμιο στη μηχανή κάμψης



Σχήμα 3.13 Το “καντράν” της μηχανής θλίψης για την ανάγνωση του επιβαλλόμενου φορτίου

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να μετρηθεί η ολίσθηση του ελάσματος σε σχέση με το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν μηχανοσυστοιχίες (strain gages), τα οποία επικολλήθηκαν στην επιφάνεια του ελάσματος FRP. Στο δοκίμιο επικολλήθηκαν τέσσερα μηχανοσυστοιχίες, τα δύο στο μέσο του τμήματος του ελάσματος που δεν έχει επικολληθεί και βρίσκεται ανάμεσα στα δύο στοιχεία του σκυροδέματος, ενώ τα άλλα δύο στο μέσο των επικολλημένων μερών του (Σχήμα 3.14).

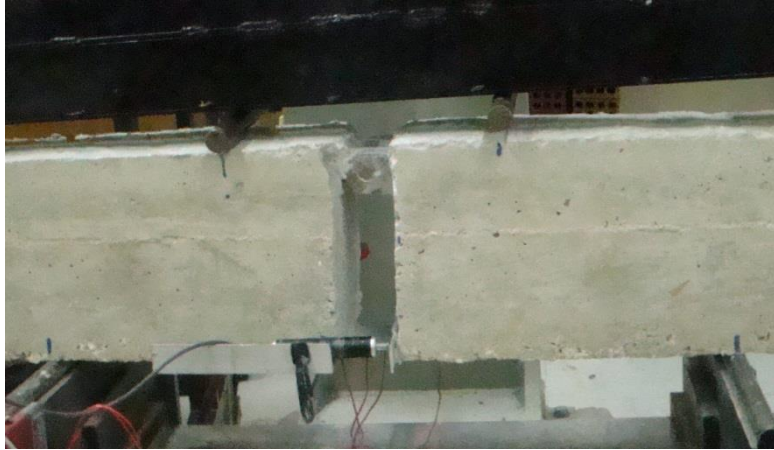


Σχήμα 3.14 Τα μηχανοσυστοιχίες επικολλημένα στο έλασμα

Τα μηχανοσυστοιχίες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μήκος 5 mm και αντίσταση 120 Ω, και επικολλήθηκαν με κυανοκρυλική κόλλα γνωστής εταιρίας. Για την προστασία τους από την υγρασία επικαλύφθηκαν με σιλικόνη.

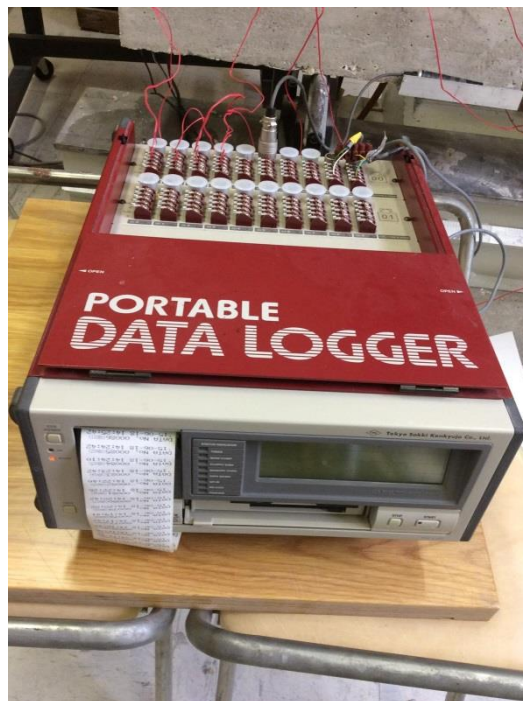
Για την μέτρηση της οριζόντιας μεταβολής της απόστασης μεταξύ των δυο στοιχείων της δοκού-δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε ένα μηχανικό βελόμετρο που τοποθετήθηκε στο μέσο της δοκού με τη βοήθεια μιας μεταλλικής διάταξης για να εξασφαλιστεί η παραλληλία του με το οριζόντιο επίπεδο, ενώ συγκρατήθηκε στο τμήμα της δοκού με σφιγκτήρα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχήμα 3.15 Το βελόμετρο τοποθετημένο στη δοκό-δοκίμιο

Οι ενδείξεις των μηκυνσιόμετρων, όπως και του βελόμετρου και του φορτίου που επιβάλλεται από τη μηχανή κάμψης, καταχωρήθηκαν σε ξεχωριστά κανάλια του ηλεκτρονικού καταγραφέα που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των μετρήσεων.



Σχήμα 3.16 Σύστημα καταγραφής μετρήσεων

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Για τον προσδιορισμό της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης της διεπιφάνειας ελάσματος-σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1. Το βελόμετρο και τα μηκυνσιόμετρα τοποθετηθήκαν πάνω στο δοκίμιο για την καταγραφή των μετρήσεων όπως περιγράφεται προηγούμενα. Σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία, για την απόκτηση των καμπύλων συνάφειας-ολίσθησης μετρήθηκαν οι εξωτερικές δυνάμεις P που επιβάλλονταν από τη μηχανή, η παραμόρφωση του ελάσματος σε κατάλληλα σημεία και η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δύο τμημάτων του δοκιμίου. Όλες αυτές οι τιμές, με την έναρξη της δοκιμής καταγράφονταν ταυτόχρονα από τον ηλεκτρονικό καταγραφέα, ως συνάρτηση του χρόνου.



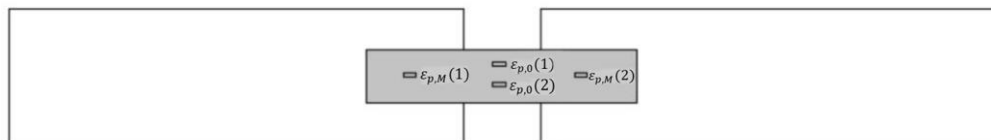
Σχήμα 3.17 Η δοκός-δοκίμιο στη μηχανή κάμψης

Τα μεταλλικά στοιχεία που ασκούν το φορτίο τοποθετηθήκαν σε απόσταση 10 cm από το κάθε άκρο του κάθε τμήματος σκυροδέματος, δηλαδή 13 cm από το μέσο της δοκού-δοκιμίου. Η δοκός φορτιζόταν βηματικά με αύξηση του φορτίου 2,5 kN σε κάθε βήμα. Τελικά, η αστοχία του δοκιμίου συνέβη για συνολική δύναμη της μηχανής ίση με 11 kN περίπου.



Σχήμα 3.18 Αστοχία δοκού

Οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν, έχουν καταχωρηθεί στον Πίνακα 3.3. Στην πρώτη στήλη του Πίνακα 3.3 έχουν καταχωρηθεί οι τιμές της συνολικής δύναμης της μηχανής κάμψης ($2P$) σε κάθε χρονική στιγμή των μετρήσεων. Στη δεύτερη στήλη έχουν καταχωρηθεί οι μετρήσεις ΔS του βελόμετρου που είχε τοποθετηθεί στο μέσο του δοκιμίου. Στις τέσσερις επόμενες στήλες έχουν καταχωρηθεί οι ενδείξεις των ηλεκτρονικών μηκυνσιομέτρων, τα οποία βρίσκονται στις θέσεις που φαίνονται στο σχήμα 3.19. Στην τελευταία στήλη υπολογίστηκε η απόσταση $2\Delta l_u$ που αντιστοιχεί στην μεταβολή της απόστασης των δύο στοιχείων του σκυροδέματος για κάθε χρονική στιγμή.



Σχήμα 3.19 Θέσεις μηκυνσιομέτρων

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πίνακας 3.3 Πειραματικές Μετρήσεις

1	2	3	4	5	6	7
$2P$	ΔS	$\varepsilon_{p,0}(1)$	$\varepsilon_{p,0}(2)$	$\varepsilon_{p,M}(1)$	$\varepsilon_{p,M}(2)$	$2\Delta l_u$
kN	mm	μm	μm	μm	μm	mm
0	0	0	0	0	0	0
1,72	-10,946	39	30	5	0	0,011
1,84	-10,94	44	65	31	20	0,017
1,95	-10,939	42	62	30	19	0,018
2,28	-10,935	68	97	45	36	0,022
2,95	-10,932	101	118	60	51	0,025
3,15	-10,932	104	125	62	51	0,025
4,57	-10,922	182	198	98	89	0,035
4,79	-10,92	194	209	106	97	0,037
5,14	-10,917	210	225	114	104	0,04
5,67	-10,914	239	251	127	117	0,043
5,97	-10,912	253	266	136	125	0,045
6,19	-10,91	265	277	141	131	0,047
6,35	-10,909	271	283	145	135	0,048
6,73	-10,907	284	294	152	142	0,05
6,8	-10,905	298	306	160	149	0,052
6,95	-10,904	306	313	165	151	0,053
7,11	-10,904	314	319	167	156	0,053
7,15	-10,903	316	322	169	158	0,054
8,02	-10,896	369	372	198	189	0,061
8,36	-10,894	380	383	206	197	0,063
8,6	-10,892	393	395	213	204	0,065
8,87	-10,89	404	406	221	212	0,067
8,97	-10,889	412	413	225	217	0,068
9,19	-10,887	424	425	233	225	0,07
9,28	-10,887	426	427	234	226	0,07
10,38	-10,887	481	479	274	258	0,07
10,59	-10,876	492	489	277	266	0,081
10,8	-10,874	499	495	278	271	0,083
10,99	-10,871	508	502	279	276	0,086
11,04	-10,87	511	504	278	277	0,087
11,11	-10,868	512	506	274	281	0,089

Κεφάλαιο 4

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, που αποκτήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειραματικού έργου, για την κατασκευή των σχέσεων συνάφειας-ολίσθησης, καθώς και της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων, που περιγράφει την συμπεριφορά του ελάσματος ενίσχυσης.

4.2 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ 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 επεξεργασμένες μετρήσεις που έχουν γίνει και βρίσκονται στον Πίνακα 4.1.

Στη στήλη 1 καταχωρήθηκε η δύναμη $2P$ που ασκείται από την μηχανή κάμψης, ενώ στη στήλη 2 η δύναμη P που εξασκείται σε κάθε τμήμα της δοκού-δοκιμίου ξεχωριστά. Η δύναμη Q , που καταχωρήθηκε στη στήλη 3, υπολογίζεται από την σχέση (1.1) για τις έξης γεωμετρικές παραμέτρους: $l = 255 \text{ mm}$, $L = 655 \text{ mm}$, $a = 180 \text{ mm}$. Η ορθή τάση σ της στήλης 4 υπολογίζεται από τη σχέση

$$\sigma = \frac{Q}{A_p}. \quad (4.1)$$

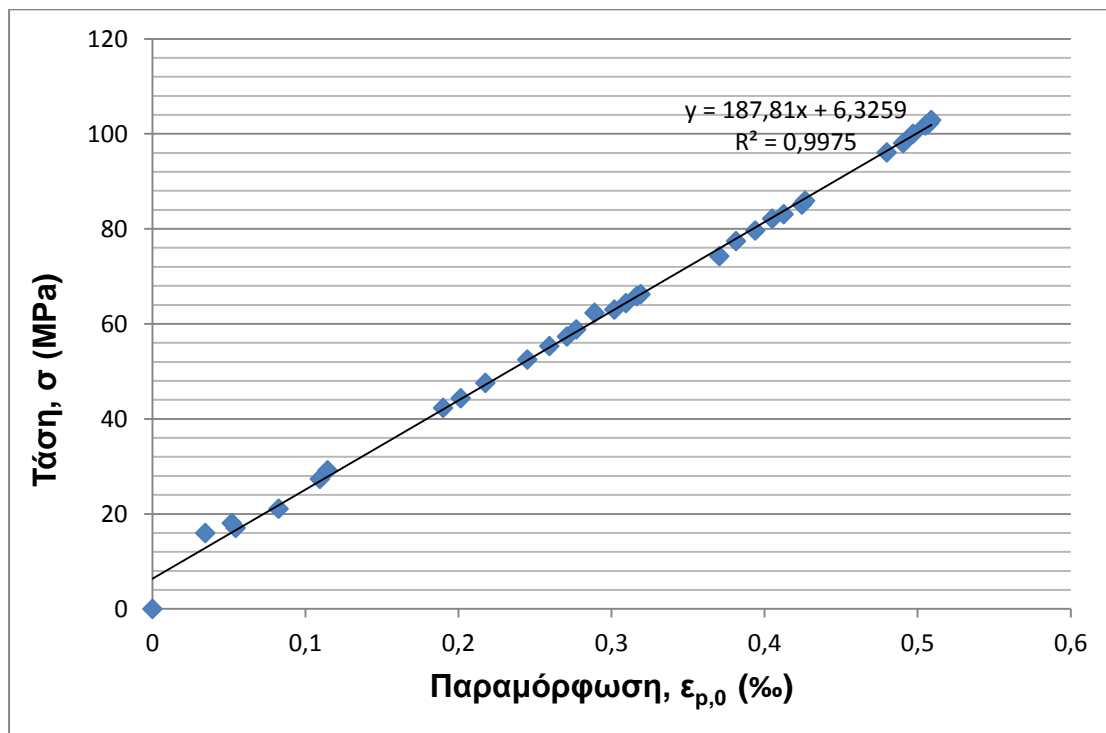
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Πίνακας 4.1 Επεξεργασία μετρήσεων για τη μεσαία θέση του ελάσματος

1	2	3	4	5	6	7
$2P$	P	Q	σ	$\varepsilon_{p,0}(1)$	$\varepsilon_{p,0}(2)$	$\varepsilon_{p,0}$
kN	kN	kN	Mpa	(‰)	(‰)	(‰)
0	0	0	0	0	0	0
1,72	0,86	0,95556	15,9259	0,039	0,03	0,0345
1,84	0,92	1,02222	17,037	0,044	0,065	0,0545
1,95	0,975	1,08333	18,0556	0,042	0,062	0,052
2,28	1,14	1,26667	21,1111	0,068	0,097	0,0825
2,95	1,475	1,63889	27,3148	0,101	0,118	0,1095
3,15	1,575	1,75	29,1667	0,104	0,125	0,1145
4,57	2,285	2,53889	42,3148	0,182	0,198	0,19
4,79	2,395	2,66111	44,3519	0,194	0,209	0,2015
5,14	2,57	2,85556	47,5926	0,21	0,225	0,2175
5,67	2,835	3,15	52,5	0,239	0,251	0,245
5,97	2,985	3,31667	55,2778	0,253	0,266	0,2595
6,19	3,095	3,43889	57,3148	0,265	0,277	0,271
6,35	3,175	3,52778	58,7963	0,271	0,283	0,277
6,73	3,365	3,73889	62,3148	0,284	0,294	0,289
6,8	3,4	3,77778	62,963	0,298	0,306	0,302
6,95	3,475	3,86111	64,3519	0,306	0,313	0,3095
7,11	3,555	3,95	65,8333	0,314	0,319	0,3165
7,15	3,575	3,97222	66,2037	0,316	0,322	0,319
8,02	4,01	4,45556	74,2593	0,369	0,372	0,3705
8,36	4,18	4,64444	77,4074	0,38	0,383	0,3815
8,6	4,3	4,77778	79,6296	0,393	0,395	0,394
8,87	4,435	4,92778	82,1296	0,404	0,406	0,405
8,97	4,485	4,98333	83,0556	0,412	0,413	0,4125
9,19	4,595	5,10556	85,0926	0,424	0,425	0,4245
9,28	4,64	5,15556	85,9259	0,426	0,427	0,4265
10,38	5,19	5,76667	96,1111	0,481	0,479	0,48
10,59	5,295	5,88333	98,0556	0,492	0,489	0,4905
10,8	5,4	6	100	0,499	0,495	0,497
10,99	5,495	6,10556	101,759	0,508	0,502	0,505
11,04	5,52	6,13333	102,222	0,511	0,504	0,5075
11,11	5,555	6,17222	102,87	0,512	0,506	0,509

Η διατομή A_p έχει υπολογιστεί για $t_p = 1,2 \text{ mm}$ και $b_p = 50 \text{ mm}$ και είναι $A_p = t_p b_p = 60 \text{ mm}^2$. Οι τιμές της παραμόρφωσης του ελάσματος $\varepsilon_{p,0}$ καταχωρούνται στη στήλη 7 του Πίνακα 4.1 και έχουν ληφθεί ως ο μέσος όρος των μετρήσεων $\varepsilon_{p,0}(1)$ και $\varepsilon_{p,0}(2)$ του πίνακα 3.3.

Με βάση τα στοιχεία του πίνακα 4.1 κατασκευάζεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στο μεσαίο τμήμα του ελάσματος.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα τάσης-παραμορφωσης

Το διάγραμμα αυτό αποτελεί τον νόμο τάσης-παραμόρφωσης του ελάσματος FRP. Η καμπύλη του διαγράμματος αυτού δείχνει ότι η συμπεριφορά του ελάσματος FRP, που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή, είναι γραμμική, όπως εξάλλου αναμενόταν. Από την κλίση του διαγράμματος προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος FRP στην τιμή $E_p = 185 \text{ GPa}$. Η τιμή αυτή δεν αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική τιμή $E_p = 165 \text{ GPa}$, που παρέχει η βιομηχανία που παράγει το συγκεκριμένο έλασμα FRP.

4.3 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ – ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης θα κατασκευασθεί με βάση όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1.9) και (1.17), με τα εξής δεδομένα: $l_u = 30 \text{ mm}$, $l_b = 25 \text{ mm}$, $t_p = 1,2 \text{ mm}$ και $E_p = 185 \text{ GPa}$. Για τις μετρήσεις που αφορούν το δεξιό τμήμα του ελάσματος συντάχθηκε ο Πίνακας 4.2.

Στη στήλη 1 καταχωρήθηκαν οι τιμές της μέσης τιμής της παραμόρφωσης που αναπτύσσεται στο κέντρο του μη επικολημένου τμήματος, στη στήλη 3, οι τιμές της παραμόρφωσης που καταγράφηκαν από το δεξί μηκυσιόμετρο, ενώ η μέση τιμή αυτών των παραμορφώσεων καταχωρήθηκε στη στήλη 4. Στη στήλη 2 καταχωρήθηκε η οριζόντια μετακίνηση του δεξιού στοιχείου της δοκού δοκιμίου ως προς τον άξονα συμμετρίας της πειραματικής διάταξης. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1.9) και (1.17), για κάθε μέτρηση, υπολογίστηκαν οι τιμές της μέσης ολίσθησης $s_{ave}(2)$ και της μέσης τάσης $\tau_{ave}(2)$ και καταχωρήθηκαν στις στήλες 5 και 6 αντίστοιχα.

Με την ίδια ακριβώς διαδικασία υπολογίστηκε ο Πίνακας 4.3, που αναφέρεται στο αριστερό τμήμα του ελάσματος.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Πίνακας 4.2 Επεξεργασία των μετρήσεων για το δεξιό τμήμα του ελάσματος

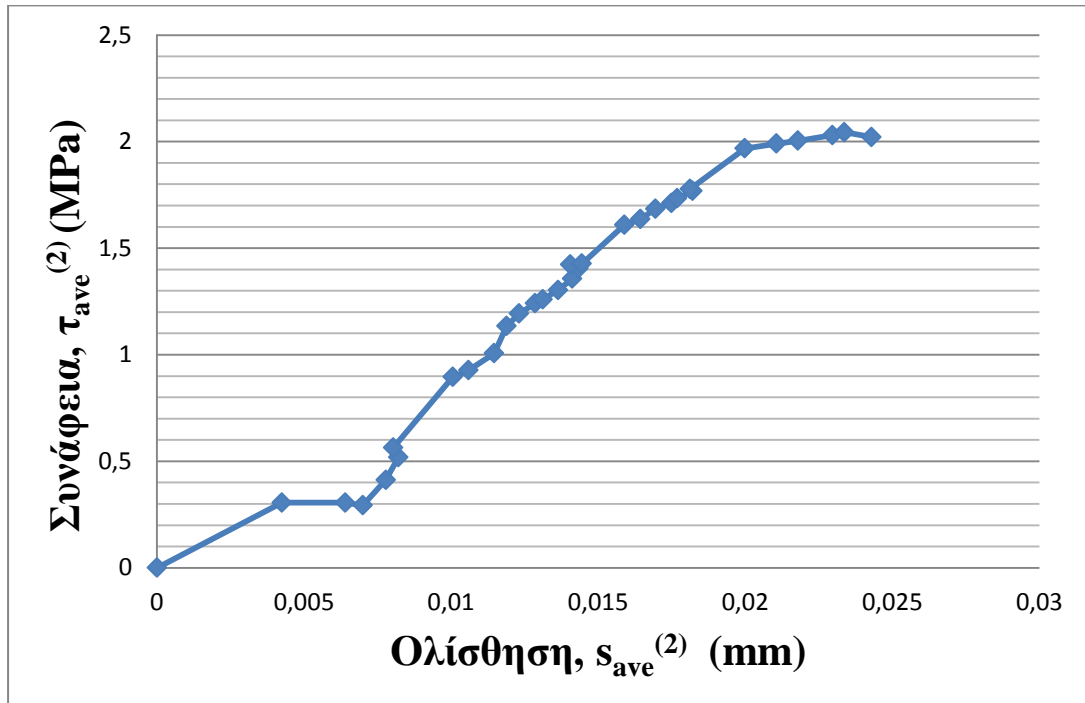
1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{p,0}$	Δlu	$\varepsilon_{p,M}(2)$	$\varepsilon_{p,ave}(2)$	$s_{ave}(2)$	$\tau_{ave}(2)$
(‰)	mm	(‰)	(‰)	mm	Mpa
0	0	0	0	0	0
0,0345	0,0055	0	0,01725	0,00425	0,30586
0,0545	0,0085	0,02	0,03725	0,0064	0,30586
0,052	0,009	0,019	0,0355	0,007	0,29256
0,0825	0,011	0,036	0,05925	0,00778	0,41225
0,1095	0,0125	0,051	0,08025	0,00821	0,51864
0,1145	0,0125	0,051	0,08275	0,00803	0,56297
0,19	0,0175	0,089	0,1395	0,01006	0,89543
0,2015	0,0185	0,097	0,14925	0,01059	0,92646
0,2175	0,02	0,104	0,16075	0,01147	1,00625
0,245	0,0215	0,117	0,181	0,01189	1,1348
0,2595	0,0225	0,125	0,19225	0,01231	1,19242
0,271	0,0235	0,131	0,201	0,01286	1,24118
0,277	0,024	0,135	0,206	0,01312	1,25892
0,289	0,025	0,142	0,2155	0,01364	1,30324
0,302	0,026	0,149	0,2255	0,01412	1,35644
0,3095	0,0265	0,151	0,23025	0,01434	1,4052
0,3165	0,0265	0,156	0,23625	0,01405	1,42293
0,319	0,027	0,158	0,2385	0,01445	1,42736
0,3705	0,0305	0,189	0,27975	0,01589	1,60911
0,3815	0,0315	0,197	0,28925	0,01644	1,6357
0,394	0,0325	0,204	0,299	0,01694	1,68446
0,405	0,0335	0,212	0,3085	0,01749	1,71106
0,4125	0,034	0,217	0,31475	0,01769	1,73322
0,4245	0,035	0,225	0,32475	0,01821	1,76869
0,4265	0,035	0,226	0,32625	0,01813	1,77755
0,48	0,035	0,258	0,369	0,01999	1,96816
0,4905	0,0405	0,266	0,37825	0,02106	1,99033
0,497	0,0415	0,271	0,384	0,02179	2,00363
0,505	0,043	0,276	0,3905	0,02297	2,03022
0,5075	0,0435	0,277	0,39225	0,02337	2,04352
0,509	0,0445	0,281	0,395	0,02429	2,02136

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

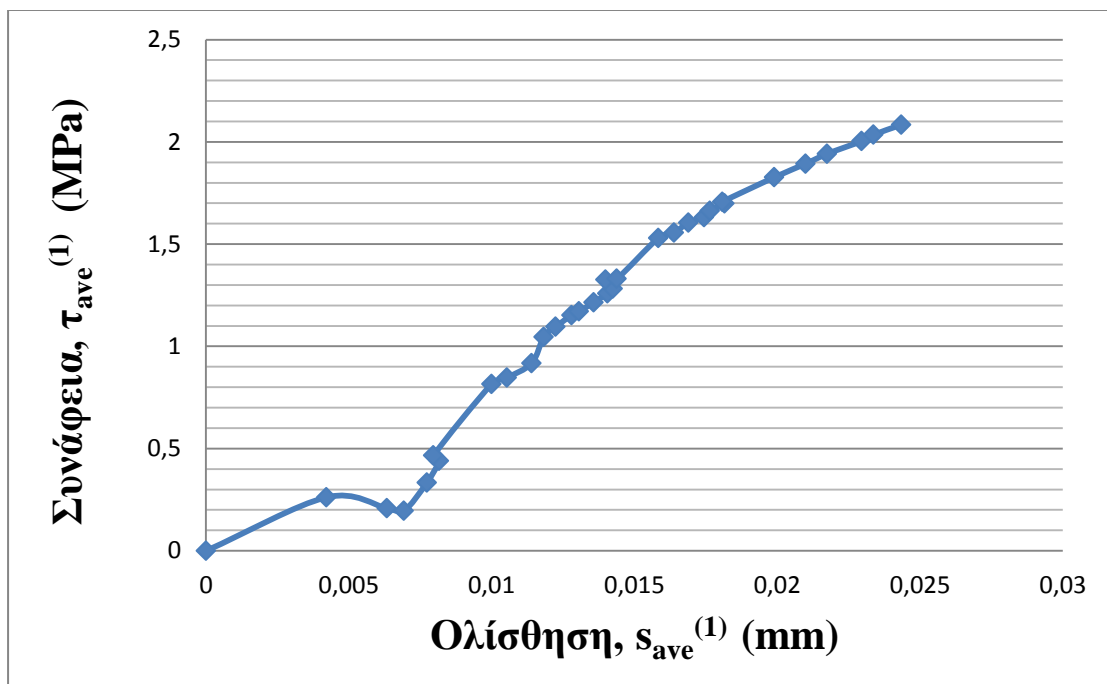
Πίνακας 4.3 Επεξεργασία των μετρήσεων για το αριστερό τμήμα του ελάσματος

1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{p,0}$	Δlu	$\varepsilon_{p,M}(1)$	$\varepsilon_{p,ave}(1)$	$s_{ave}(1)$	$\tau_{ave}(1)$
(‰)	mm	(‰)	(‰)	mm	Mpa
0	0	0	0	0	0
0,0345	0,0055	0,005	0,01975	0,00422	0,26154
0,0545	0,0085	0,031	0,04275	0,00633	0,20834
0,052	0,009	0,03	0,041	0,00693	0,19504
0,0825	0,011	0,045	0,06375	0,00773	0,33246
0,1095	0,0125	0,06	0,08475	0,00816	0,43885
0,1145	0,0125	0,062	0,08825	0,00796	0,46544
0,19	0,0175	0,098	0,144	0,01	0,81564
0,2015	0,0185	0,106	0,15375	0,01053	0,84666
0,2175	0,02	0,114	0,16575	0,0114	0,91759
0,245	0,0215	0,127	0,186	0,01183	1,04614
0,2595	0,0225	0,136	0,19775	0,01224	1,0949
0,271	0,0235	0,141	0,206	0,0128	1,15253
0,277	0,024	0,145	0,211	0,01305	1,17026
0,289	0,025	0,152	0,2205	0,01357	1,21459
0,302	0,026	0,16	0,231	0,01405	1,25892
0,3095	0,0265	0,165	0,23725	0,01425	1,28108
0,3165	0,0265	0,167	0,24175	0,01398	1,32541
0,319	0,027	0,169	0,244	0,01438	1,32984
0,3705	0,0305	0,198	0,28425	0,01583	1,52932
0,3815	0,0315	0,206	0,29375	0,01638	1,55591
0,394	0,0325	0,213	0,3035	0,01689	1,60467
0,405	0,0335	0,221	0,313	0,01744	1,63127
0,4125	0,034	0,225	0,31875	0,01764	1,6623
0,4245	0,035	0,233	0,32875	0,01816	1,69776
0,4265	0,035	0,234	0,33025	0,01808	1,70663
0,48	0,035	0,274	0,377	0,01989	1,82631
0,4905	0,0405	0,277	0,38375	0,02099	1,89281
0,497	0,0415	0,278	0,3875	0,02175	1,94157
0,505	0,043	0,279	0,392	0,02295	2,00363
0,5075	0,0435	0,278	0,39275	0,02337	2,03466
0,509	0,0445	0,274	0,3915	0,02434	2,08342

Από τις τιμές των στηλών 5 και 6 των παραπάνω πινάκων κατασκευάστηκαν οι καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης που δείχνονται Σχήματα 4.2 και 4.3.



Σχήμα 4.2 Καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης για το δεξιό τμήμα του ελάσματος



Σχήμα 4.3 Καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης για το αριστερό τμήμα του ελάσματος

Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

1. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν πέντε δοκοί-δοκίμια από οπλισμένο σκυρόδεμα, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τον πειραματικό προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης που χαρακτηρίζει την διεπιφανειακή σύνδεση ελασμάτων FRP σε σκυρόδεμα. Τα δοκίμια αυτά κατασκευάστηκαν ώστε να έχουν την ίδια ποιότητα σκυροδέματος και τις ίδιες διαστάσεις έτσι όπως αυτές έχουν προταθεί μετά από σχετική θεωρητική έρευνα που έχει γίνει στο παρελθόν στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής του ΕΜΠ για την δοκιμή δοκού. Τα δοκίμια αυτά διαφέρουν μόνο ως προς το μήκος του ελάσματος FRP που έχει επικολληθεί στο κάτω μέρος τους. Ένας από τους βασικούς σκοπούς της ερευνάς που διεξάγεται στο εργαστήριο είναι να διερευνηθεί η διανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά μήκος των ελασμάτων FRP κατά την εξέλιξη της δοκιμής προκειμένου να οριστεί το κατάλληλο μήκος επικόλλησης.
2. Στα πλαίσια του πειραματικού έργου της εργασίας, εφαρμόστηκε η δοκιμή δοκού που έχει προταθεί από το Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής του ΕΜΠ στη δοκό με το μικρότερο μήκος επικόλλησης, που ήταν 50 mm σε κάθε στοιχείο της δοκού-δοκιμίου. Για το στοιχείο αυτό αναπτύχθηκαν:
 - Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το μη επικολλημένο τμήμα του ελάσματος
 - Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης για τα δύο επικολλημένα τμήματα του ελάσματος FRP για μονότονες συνθήκες φόρτισης.

Η πειραματική διαδικασία που έγινε κατέγραψε τις παραπάνω καμπύλες για ένα μικρό εύρος τάσεων, καθότι υπήρξε πρόωμη αστοχία του υλικού του σκυροδέματος. Η πρόωμη αστοχία αυτή του υλικού φαίνεται ότι προήλθε από τις μεγάλες τοπικές τάσεις που αναπτύχθηκαν στην περιοχή της επικόλλησης, λόγω της συγκέντρωσης τάσεων στην ορθή γωνία των στοιχείων του σκυροδέματος. Αυτό σημαίνει, ότι στην διεπιφάνεια συγκόλλησης FRP-σκυροδέματος δεν πρόλαβε να αναπτυχθεί η μέγιστη

συνάφεια, που αναμενόταν να είναι της τάξης 5-10 MPa. Η τάση συνάφειας που αναπτύχθηκε κατά τη στιγμή της αστοχίας του σκυροδέματος, ήταν περίπου 2,1 MPa και αντιστοιχούσε σε μια ολίσθηση 0,025 mm. Το γεγονός της πρώιμης αστοχίας στη δόκιμη που έγινε, δείχνει ότι η επικόλληση των ελασμάτων δεν πρέπει να ξεκινάει από την αρχή των στοιχείων του σκυροδέματος. Ο προσδιορισμός της κατάλληλης απόστασης που πρέπει να απέχει η συγκολλημένη διεπιφάνεια από την άκρη των δύο στοιχείων του σκυροδέματος θα πρέπει να γίνει μετά από σχετική θεωρητική ανάλυση.

3. Όπως προαναφέρθηκε, οι δύο καμπύλες που κατασκευάστηκαν, δηλαδή η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης του ελάσματος και η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης, αντιστοιχούν σε ένα σχετικά μικρό εύρος τιμών των τάσεων. Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το υλικό FRP δείχνει την αναμενόμενη γραμμική μορφή της συμπεριφοράς του με μια κλίση που αντιστοιχεί σε μέτρο ελαστικότητας $E = 185 \text{ MPa}$. Η τιμή αυτή βρίσκεται κοντά στην ονομαστική τιμή που παρέχει η βιομηχανία παραγωγής τους ελάσματα αυτού. Η τάση που αναπτύχθηκε στο FRP, κατά τη στιγμή της αστοχίας του σκυροδέματος, ήταν μόλις της τάξης των 103 MPa, δηλαδή πολύ κάτω από την εφελκυστική αντοχή του. Αυτό σημαίνει ότι η αστοχία του ελάσματος από διάρρηξη είναι πρακτικά αδύνατο να συμβεί κατά τη διαδικασία του πειράματος. Αν εξαιρεθεί ένα πολύ μικρό αρχικό τμήμα της, η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης έχει την αναμενόμενη κυρτότητα, που δείχνει ότι, για την μονότονη φόρτιση, η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης οδεύει σε μια μέγιστη τιμή της συνάφειας.
4. Παρόλο, που κατά την πειραματική δοκιμή δεν εξαντλήθηκε όλο το εύρος της διατιθέμενης συνάφειας-επικόλλησης του FRP στη δοκό-δοκίμιο, τα αποτελέσματα που ελήφθησαν δείχνουν ότι η δοκιμή δοκού που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής του ΕΜΠ για ράβδους FRP, μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου αποτελεσματικά, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, σε ελάσματα FRP. Η μέθοδος αυτή έχει στηριχθεί σε θεωρητική βάση και με τις μετρήσεις που γίνονται απαλείφεται από τα εξαγόμενα η ελαστική μετατόπιση, πράγμα που δε μπορεί να συμβεί με άλλες μεθόδους.
5. Επίσης, σε αντιδιαστολή με τις άλλες δοκιμές που έχουν προταθεί, η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για την εξαγωγή της καμπύλης

συνάφειας-ολίσθησης της επικόλλησης FRP σε σκυρόδεμα για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η συμπεριφορά αυτή είναι που προσομοιώνει την σεισμική φόρτιση του ενισχυμένου στοιχείου σε σεισμό.

6. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε η θεωρητική διερεύνηση της μεταβολής της συνάφειας στη διεπιφάνεια επικόλλησης ενός μεγάλου σχετικά μήκους ελάσματος (βλέπε διαγράμματα Παραρτήματος). Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που παρουσιάζεται στις καμπύλες αυτές είναι η συνύπαρξη δύο διακριτών περιοχών στη επιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος FRP, που αντιστοιχούν στον ανερχόμενο και κατερχόμενο κλάδο της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης. Ο κατερχόμενος κλάδος της καμπύλης από μόνος του, προκαλεί ασταθή συμπεριφορά στην επικόλληση των FRP και δεν χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό. Όμως, η συνύπαρξη του με τον ανερχόμενο κλάδο φαίνεται θεωρητικά ότι προκαλεί την ανάπτυξη μηχανισμών για μεγαλύτερη αντίσταση στην 'εξόλκευση' του FRP. Αυτό το ενδιαφέρον φαινόμενο πρέπει να διερευνηθεί παραπέρα θεωρητικά και να επιβεβαιωθεί πειραματικά. Για την πειραματική επιβεβαίωση του, έχουν κατασκευαστεί τα απαραίτητα δοκίμια στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

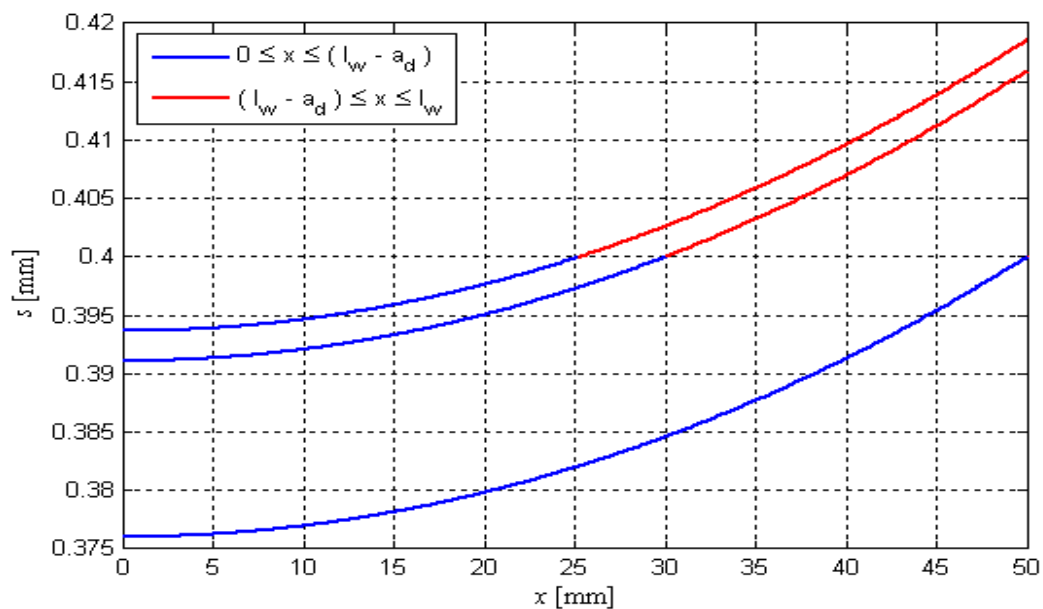
- [1] Brosens K., Van Gemert D., 2001, "Anchorage of externally bonded reinforcements subjected to combined shear/bending action", CICE2001, International conference on FRP composites in Civil Engineering, 12 - 14 December 2001, Hong Kong.
- [2] Chajes, M.J., Finch, W.W., Januszka, T.F., and Thomson, T.A., 1996, "Bond and Force Transfer of Composite-Material Plates Adhered to Concrete," Structural Journal, ACI, 93(2), pp. 208-217.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Καρατζαφέρης Βασίλειος, 2009, «Ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σκυροδέματος οπλισμένων με σύνθετες ράβδους», Διδακτορική διατριβή.
- [7] Malek A. M., Saadatmanesh H., Ehsani M. R., March-April 1998, "Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end", ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 2, pp. 142-152.
- [8] 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.

- [9] Saadatmanesh H. and Ehsani, M. R., 1991, "RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental Study." / *Struct. Engrg., ASCE*, 117(11).
- [10] Smith S. T., Teng J.G., 2002, "FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models", *Engineering Structures*, 24, pp. 397-427.
- [11] 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.
- [12] Taerwe L., ed., 1995, "Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete Structures", RILEM Pro 29, E & FN Spon, London.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Wu Z., Yin J., 2003, "Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, pp. 1339-1355.
- [17] 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.

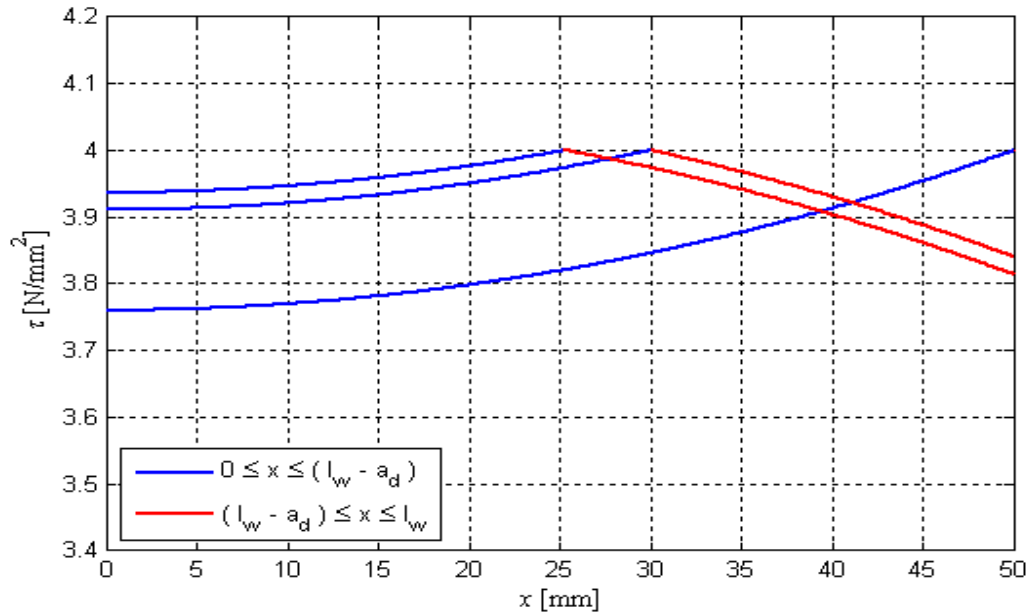
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

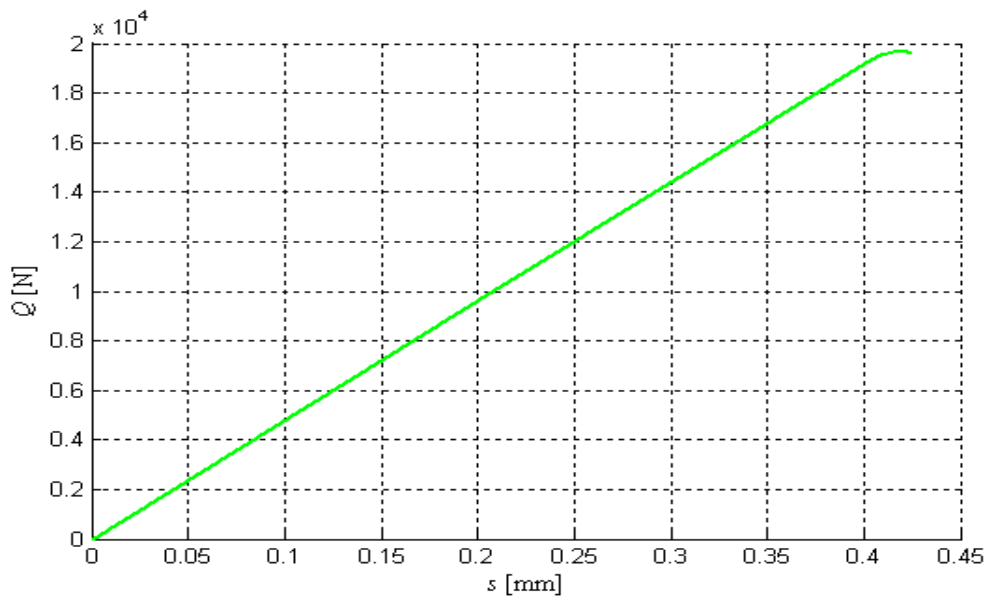
Στα σχήματα του παραρτήματος δείχνεται η μεταβολή της ολίσθησης και των τάσεων συνάφειας κατά μήκος ενός ελάσματος FRP για διάφορες τιμές των επιβαλλόμενων δυνάμεων Q .



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

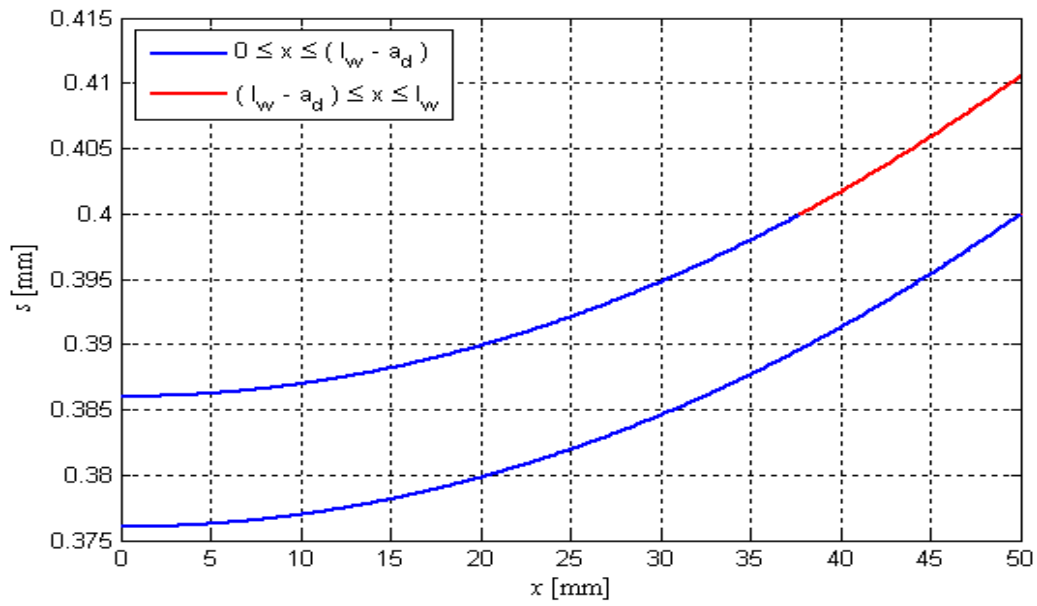


Σχήμα II.2 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w)

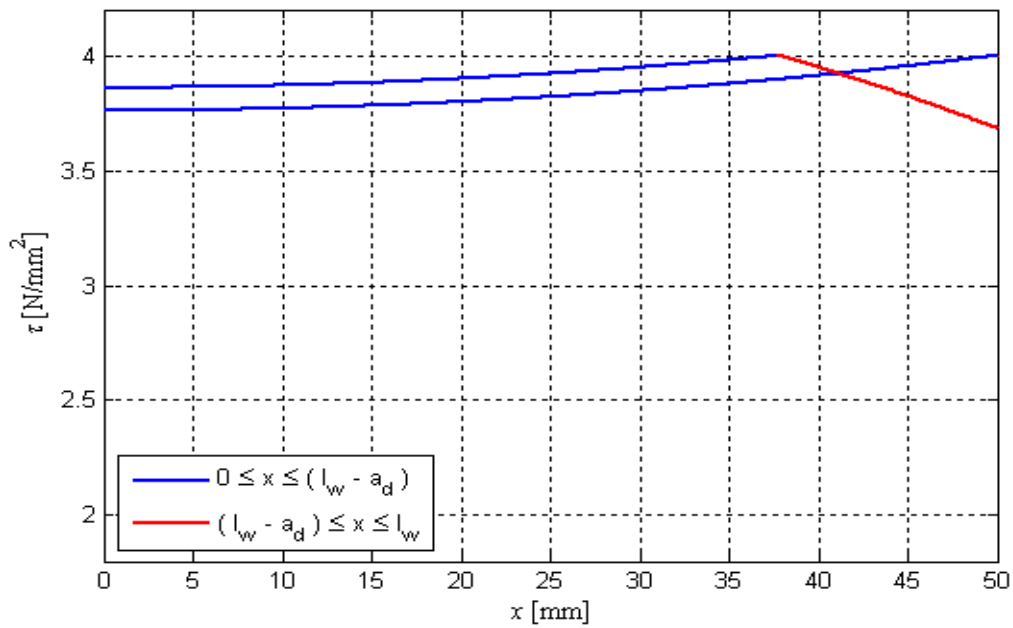


Σχήμα II.3 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) ($l_w=50$ mm)

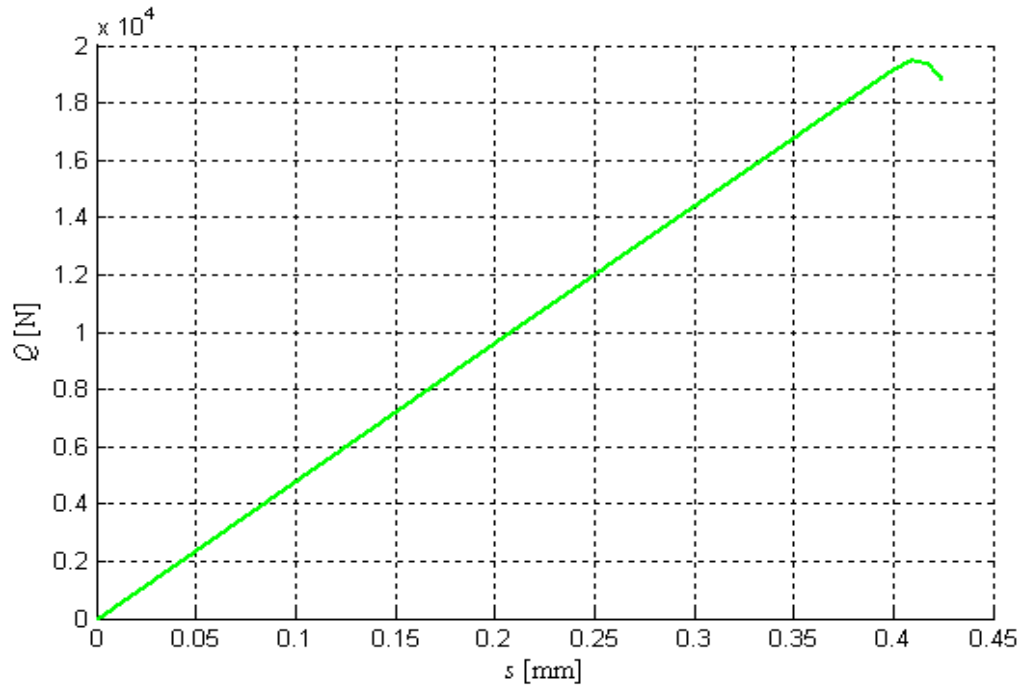
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα II.1 – Σχήμα II.3), δείχνονται οι μεταβολές των μεγεθών για: $t_p = 1,2$ mm, $E_p = 165000$ MPa και $l_w = 50$ mm. Οι παράμετροι του πλαστικού δι-γραμμικού νόμου συνάφειας – ολίσθησης είναι: $s_{\max} = 0,4$ mm, $\tau_{\max} = 4$ MPa, $p = 1$. Τα E_p , t_p , καθώς και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



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

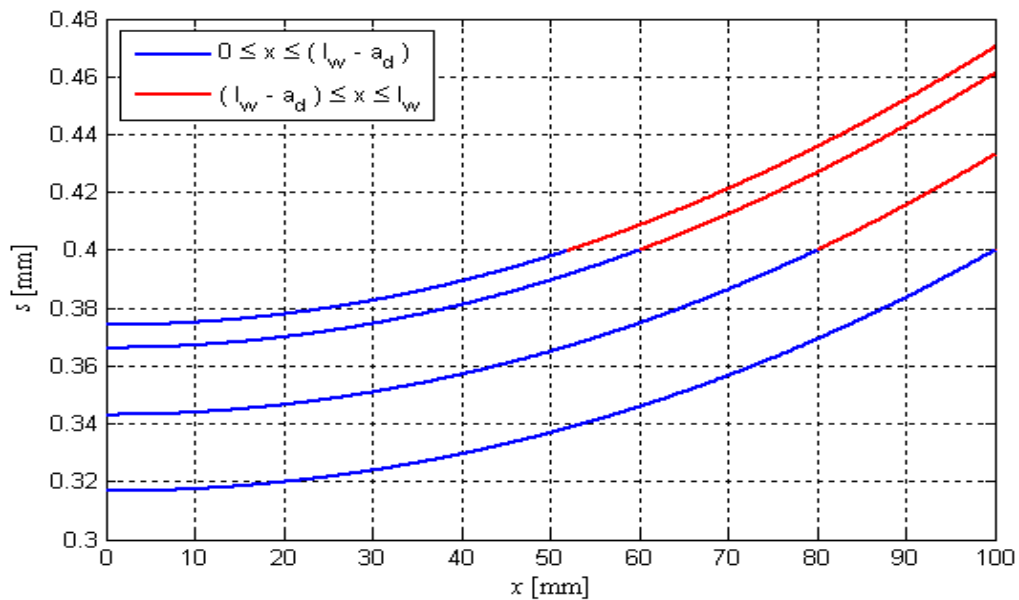


Σχήμα II.5 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) (ψαθυρή)

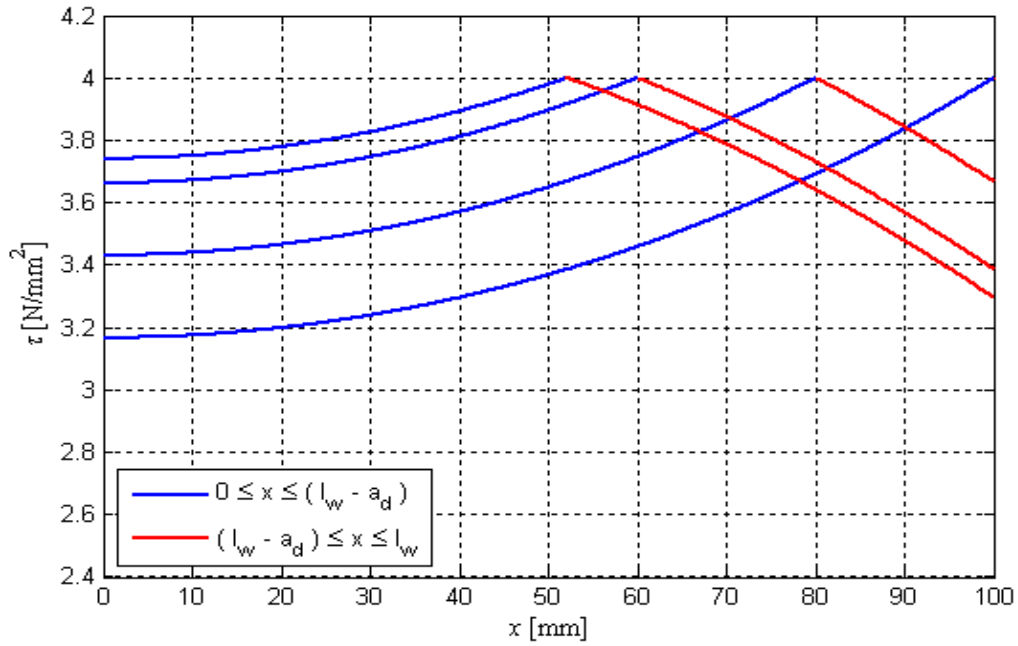


Σχήμα Π.6 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) (ψαθυρή) ($l_w=50$ mm)

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

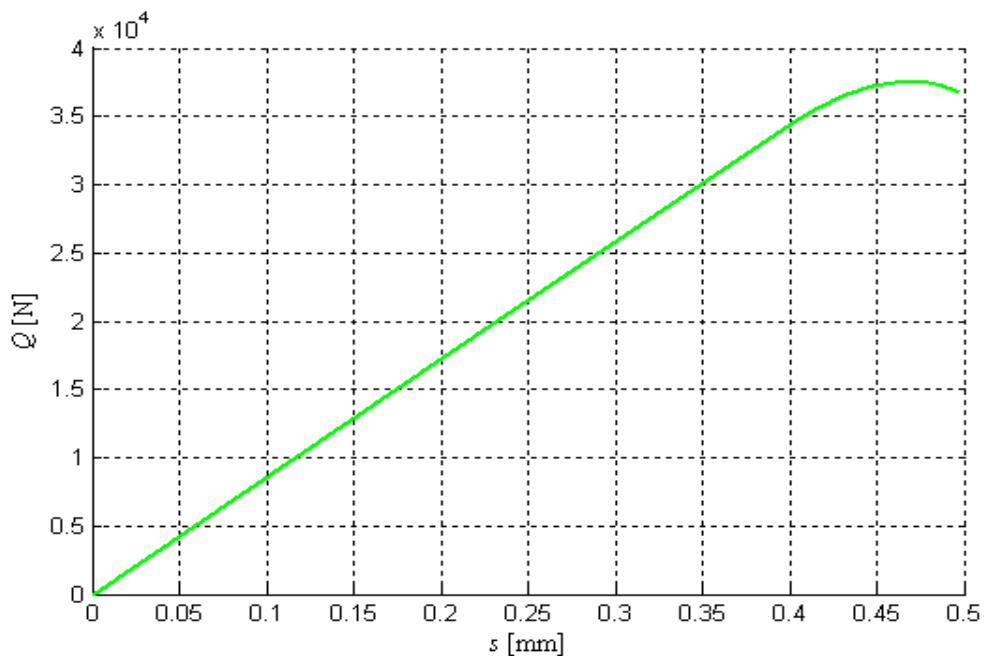


Σχήμα Π.7 Διάγραμμα ολίσθησης (s) – μήκους επικόλλησης (l_w) (πλάστιμη)



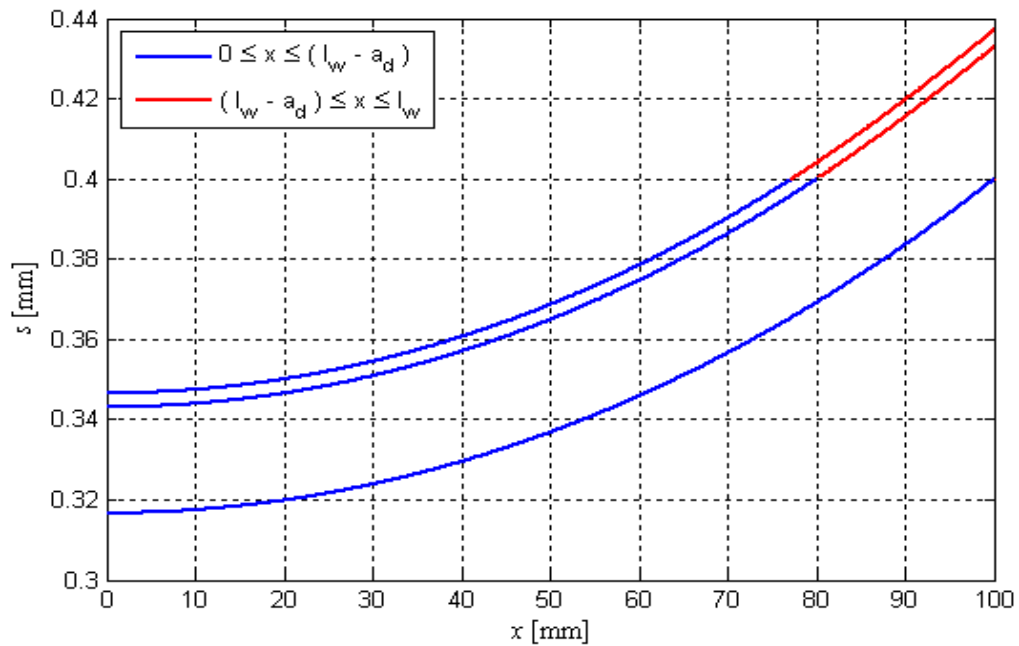
Σχήμα Π.8 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) (πλάστιμη)

Στα Σχήματα Π.7-Π.9, είναι $l_w = 100 \text{ mm}$ με τις προαναφερθείσες τιμές για τις παραμέτρους της πλάστιμης συμπεριφοράς.

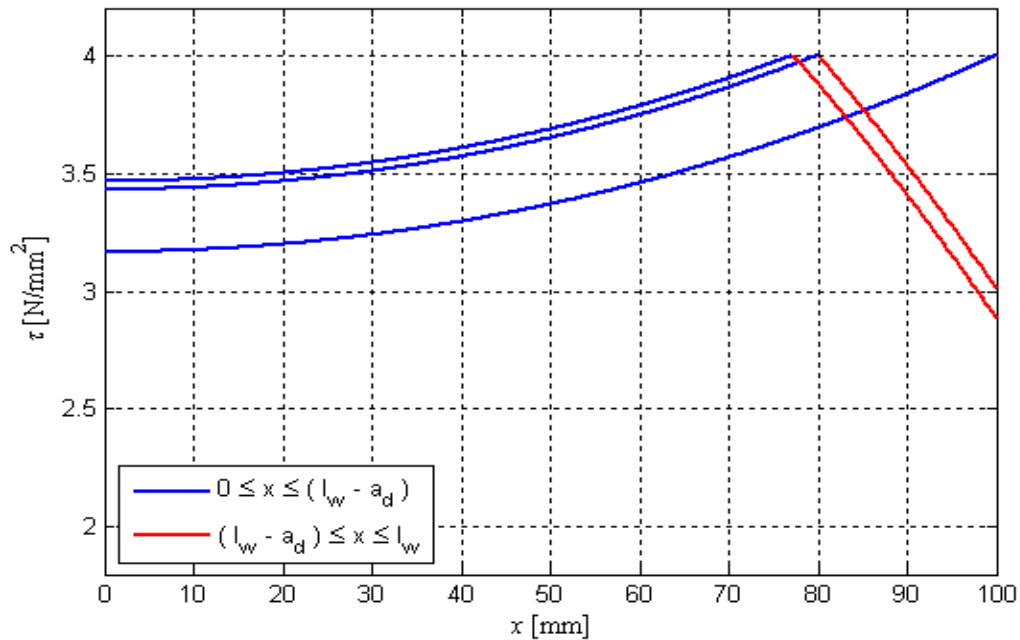


Σχήμα Π.9 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για πλάστιμη συμπεριφορά ($l_w=100 \text{ mm}$)

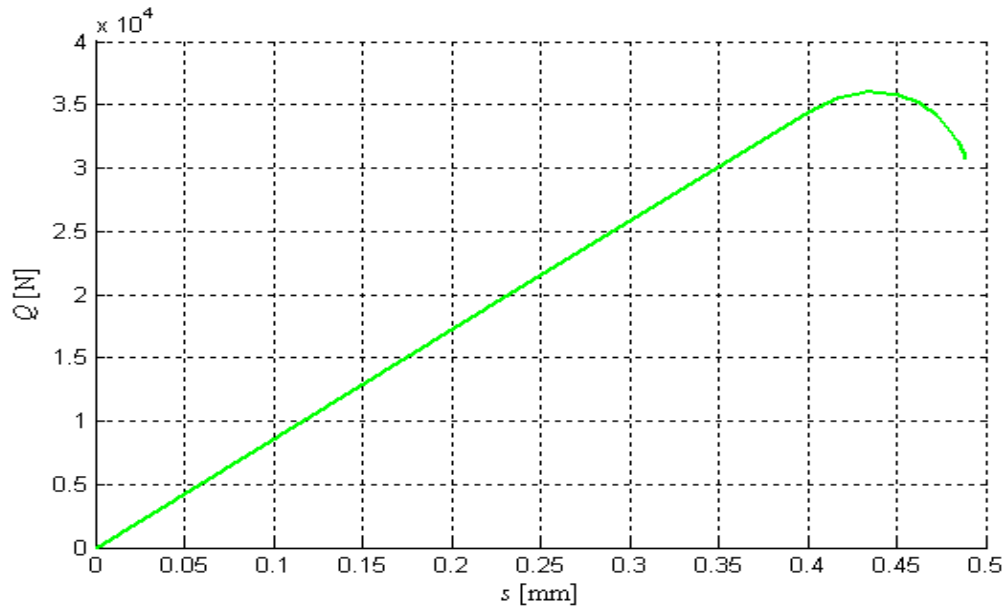
Στην ψαθυρή συμπεριφορά ($p = 3$) και για $l_w = 100$ mm, τα παραπάνω διαγράμματα γίνονται



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

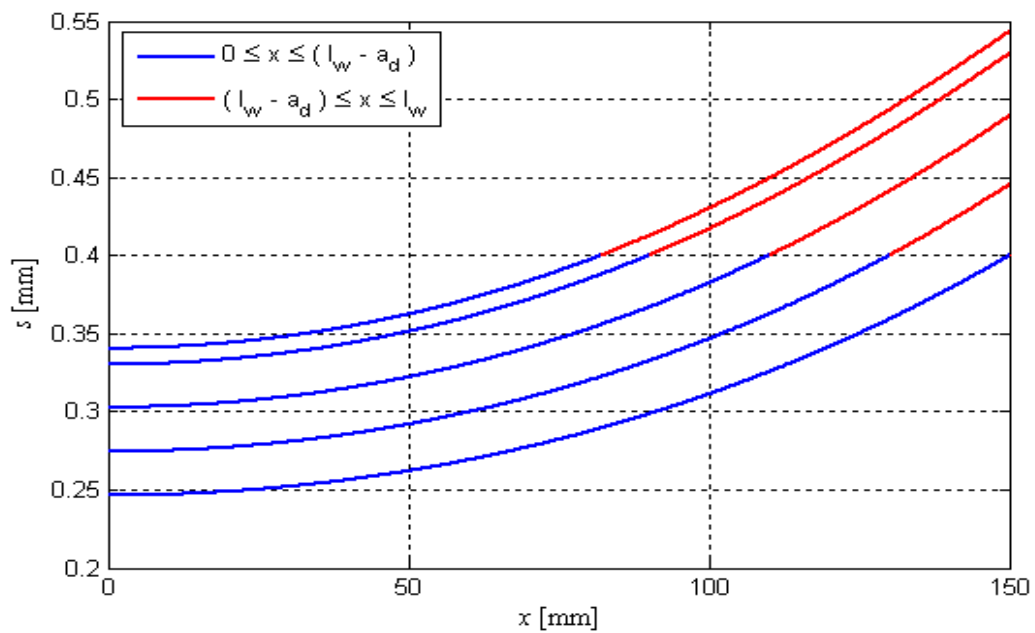


Σχήμα Π.11 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) για ψαθυρή συμπεριφορά

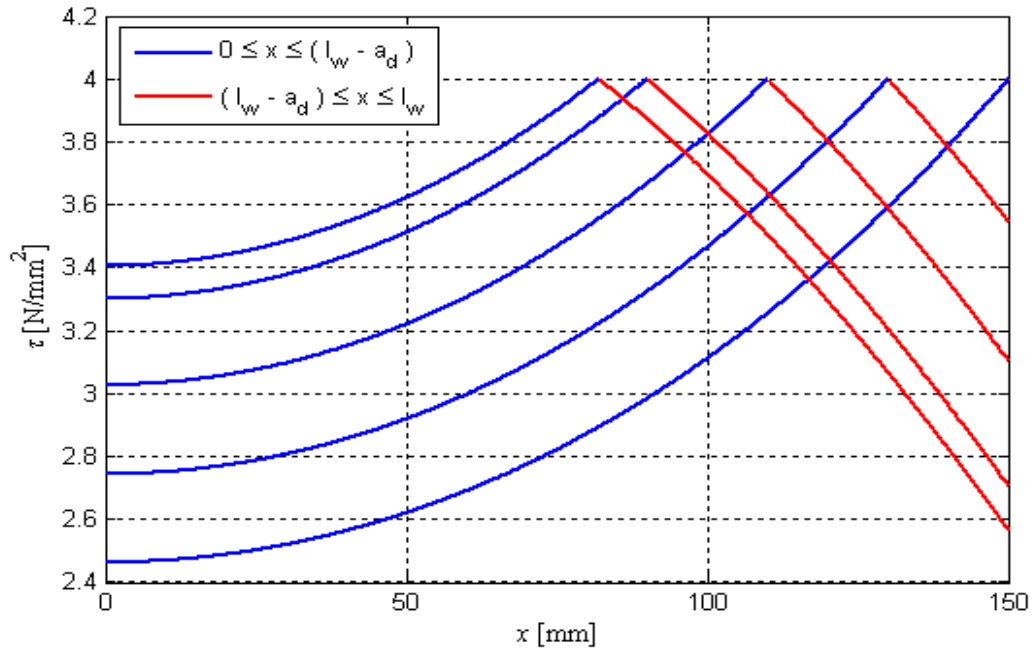


Σχήμα Π.12 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για ψαθυρή συμπεριφορά ($l_w=100$ mm)

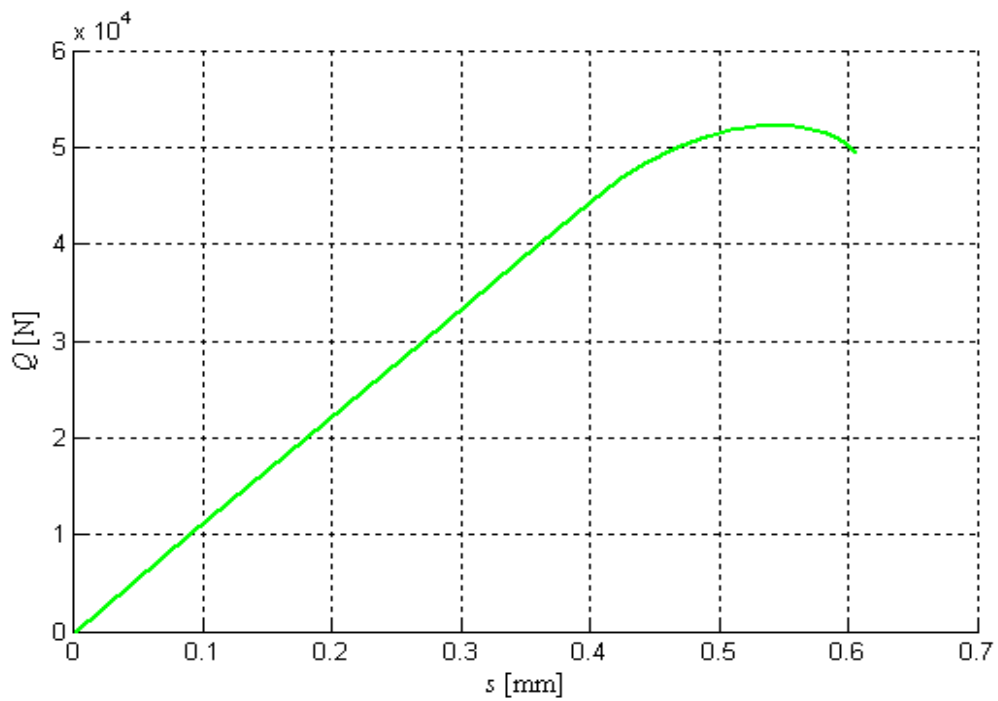
Τέλος για πλαστική συμπεριφορά και $l_w = 150$ mm, κατασκευάζονται τα διαγράμματα



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

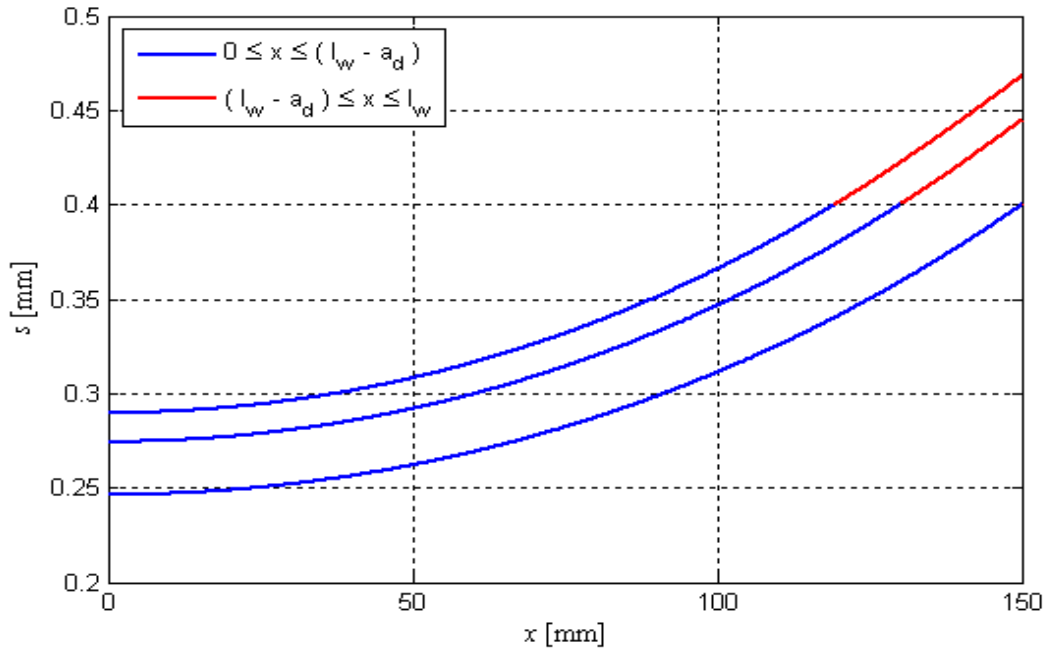


Σχήμα Π.14 Διάγραμμα τάσης συνάφειας (τ) – μήκους επικόλλησης (l_w) για πλαστική συμπεριφορά

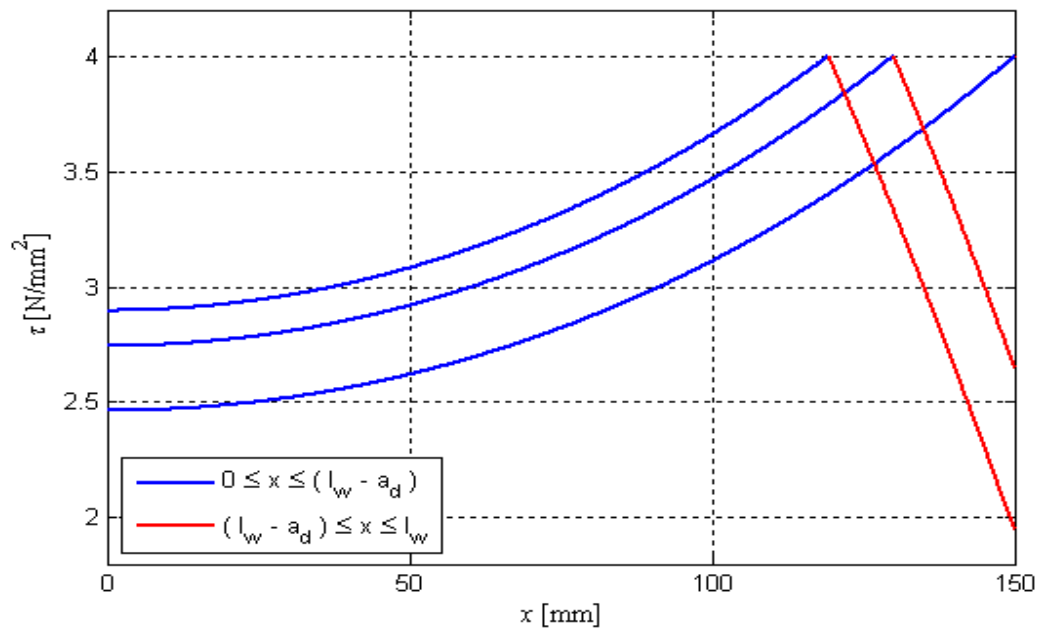


Σχήμα Π.15 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για πλαστική συμπεριφορά ($l_w=150$ mm)

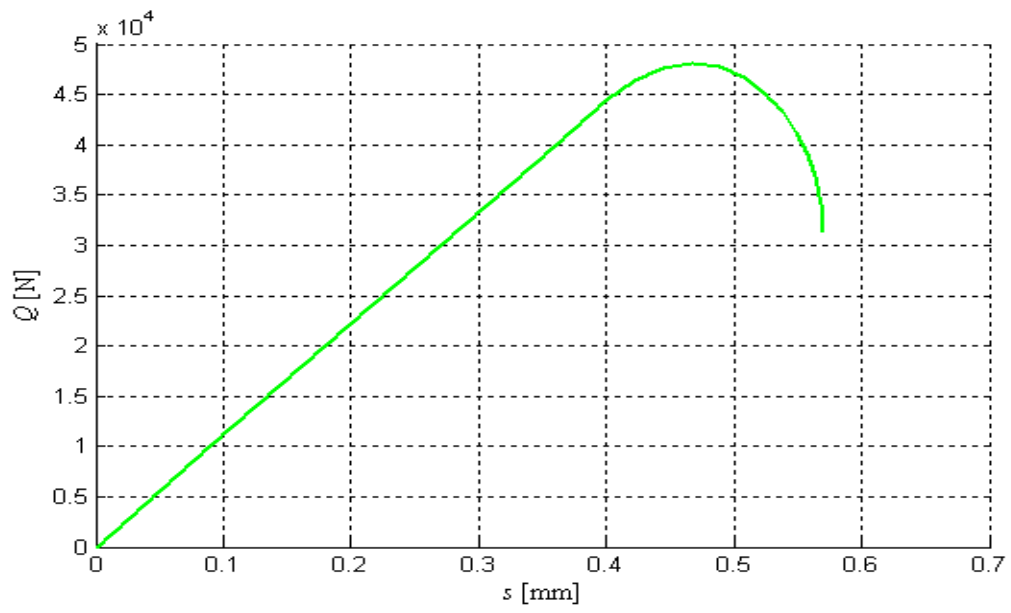
ενώ για ψαθυρή συμπεριφορά τα παραπάνω διαγράμματα γίνονται



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 Π.18 Διάγραμμα δύναμης (Q) – ολίσθησης (s) για ψαθυρή συμπεριφορά ($l_w=150 \text{ mm}$)

