



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΣΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΕΛΑΣΜΑΤΑ FRP: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ
ΔΟΚΙΜΗΣ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυρομίτης Δημήτριος

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Περίληψη

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

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

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

Κατά το σχεδιασμό των ενισχύσεων δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με ελάσματα FRP, πέρα των μηχανικών παραμέτρων των επιμέρους υλικών, θα πρέπει να είναι γνωστά τα παρακάτω:

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

Η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας περιγράφεται με την καμπύλη συνάφειας – ολίσθησης, που αποκτιέται πειραματικά. Στην βιβλιογραφία, περιγράφονται διάφορες πειραματικές δοκιμές, που έχουν εισαχθεί για τον προσδιορισμό της καμπύλης αυτής. Οι πειραματικές αυτές δοκιμές στηρίζονται στην επέκταση της γνωστής δοκιμής εξόλκευσης στην περίπτωση των ελασμάτων FRP με κατάλληλες τροποποιήσεις. Η καμπύλη συνάφειας –

ολίσθησης είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων που αναπτύσσονται στο ενισχυμένο δομικό στοιχείο.

Στο εργαστήριο δομικής μηχανικής και στοιχείων τεχνικών έργων του ΕΜΠ έχει αναπτυχθεί μία νέα δοκιμή δοκός για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης της διεπιφάνειας ελάσματος FRP-σκυροδέματος. Στον σχεδιασμό της δοκιμής αυτής έχουν εισαχθεί ορισμένες υποθέσεις σχετικά με την διανομή και μέγεθος των τάσεων και των μετατοπίσεων, τόσο στα δύο υλικά όσο και στη διεπιφάνειά τους. Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα των απλοποιητικών αυτών υποθέσεων, απαιτείται η θεωρητική και η πειραματική ανάλυση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο δοκίμιο δοκού που χρησιμοποιείται στην πειραματική δοκιμή για τα φορτία του πειράματος. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο θεωρητικός προσδιορισμός των τάσεων και μετατοπίσεων στην δοκό-δοκίμιο που χρησιμοποιείται στην πειραματική δοκό που έχει προταθεί, χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Επίσης, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρέχει η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία με αυτή που παρέχουν οι αναλυτικές σχέσεις που στηρίζονται στην μονοδιάστατη ανάλυση της εντατικής κατάστασης της δοκού-δοκιμίου.

Reinforcement of FRP Laminated Reinforced Concrete beams: ANALYSIS OF THE SPECIMEN VIA EXPERIMENTAL TEST WITH FINAL DATA

Abstract

The subject of the thesis

Exterior coatings of FRP slabs on reinforced concrete building blocks have become widespread practice in reinforcing or repairing existing structures. In the FRP grid reinforcement method, the critical parameter that determines the efficiency of the method is the surface between the plate and the structural element through which the forces are transmitted. One of the key types of failure is the disconnection of the interface in an intermediate position. The detachment of the interface starts from a large crack, which propagates along the interface of the two materials. In reinforced concrete beams reinforced with FRP brake bends, the above damage can start from a large vein, or even from a milling vein. In beams that are shear-reinforced with FRP plates, the slots may start from a shear of the building block. It is evident that the nearly superficial shape of the FRP plate, mounted as reinforcement on the structural element, introduces shear stresses to the surface and therefore the above type of injury is characterized by Type II vertebral fractures. When designing reinforcements for reinforced concrete components with FRP blades, in addition to the mechanical parameters of individual materials, the following must be known: the mechanical behavior of the FRP - concrete interface, and The type of interface failure. The mechanical behavior of the interface is described by the slope of the affinity-slip experimentally obtained. The literature describes various experimental tests introduced to determine this curve. These experimental tests are based on the extension of the known extrusion test in the case of FRP plates with appropriate modifications. The affinity-slip curve is necessary to determine the stresses and displacements developed in the reinforced structural element. A new test beam has been developed at the NTUA's Engineering and Technical Laboratory for the determination of the slip correlation-slope of the FRP-concrete separation plate. The design of this test has introduced some assumptions about the distribution and magnitude of trends and displacements in both materials and transparencies. In order to test the validity of these simplifying assumptions, a theoretical and experimental analysis of the developing trends in the test specimen used in the

pilot test for the load tests is required. The purpose of this thesis is to theoretically determine the trends and offsets in the essay used in the proposed experimental structure using three-dimensional finite elements. This thesis will also compare the results of the analysis with the finished data with that of the analytical relationships based on the one-dimensional analysis of the test beam intensity.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
Κεφάλαιο 1.....	7
Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ.....	7
1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	7
1.1.1 Η γεωμετρία της δοκού-δοκιμίου και η πειραματική διάταξη.....	7
1.1.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής.....	9
1.1.3 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού δοκιμίου.....	12
1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	13
1.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ.....	17
1.3.1 Ο προσδιορισμός τάσης συνάφειας.....	17
1.3.2 Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης.....	19
Κεφάλαιο 2.....	20
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	20
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
2.2 Η ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	21
2.3 Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	25
2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ.....	29
2.4.1 Ψαθυρή συμπεριφορά της διεπιφάνειας.....	29
2.4.2 Πλάστιμη συμπεριφορά της διεπιφάνειας.....	32
2.5 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	35
Κεφάλαιο 3.....	38
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	38
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	38
3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	39
Κεφάλαιο 4.....	48
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	Error! Bookmark not defined.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

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

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

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

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

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

Στο εργαστήριο δομικής μηχανικής και στοιχείων τεχνικών έργων του ΕΜΠ έχει αναπτυχθεί μία νέα δοκιμή δοκός για τον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης της διεπιφάνειας ελάσματος FRP-σκυροδέματος. Στον σχεδιασμό της δοκιμής αυτής έχουν εισαχθεί ορισμένες υποθέσεις σχετικά με την διανομή και μέγεθος των τάσεων και των μετατοπίσεων, τόσο στα δύο υλικά όσο και στη διεπιφάνειά τους. Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα των απλοποιητικών αυτών υποθέσεων, απαιτείται η θεωρητική και η πειραματική ανάλυση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο δοκίμιο δοκού που χρησιμοποιείται στην πειραματική δοκιμή για τα φορτία του πειράματος. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο θεωρητικός προσδιορισμός των τάσεων και μετατοπίσεων στην δοκό-δοκίμιο που χρησιμοποιείται στην πειραματική δοκό που έχει προταθεί, χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Επίσης, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρέχει η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία με αυτή που παρέχουν οι αναλυτικές σχέσεις που στηρίζονται στην μονοδιάστατη ανάλυση της εντατικής κατάστασης της δοκού-δοκίμιου.

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 αντιαβρωτικά, 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 επικολημένο 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 Taljsten, συμπεριλαμβάνοντας όμως σε αυτή, την επίδραση που έχουν τα πλάτη του ελάσματος και του στοιχείου σκυροδέματος.

Η δομή της εργασίας

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

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

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει την προσομοίωση της ενισχυμένης δοκού δοκιμίου που χρησιμοποιείται στη δοκιμή δοκού με πεπερασμένα στοιχεία και (β) του προσδιορισμού των τάσεων και μετατοπίσεων στην διεπιφάνεια ελάσματος FRP-σκυροδέματος.

Τέλος, στο κεφάλαιο 4 ,συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 1

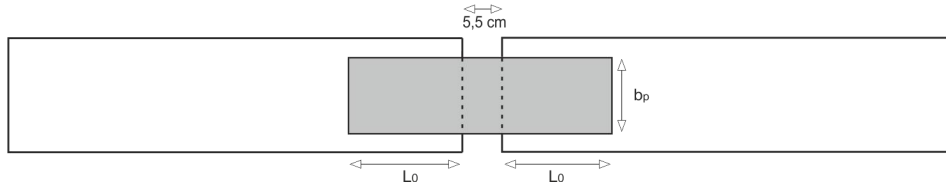
Η ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

1.1.1 Η γεωμετρία της δοκού-δοκιμίου και η πειραματική διάταξη

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

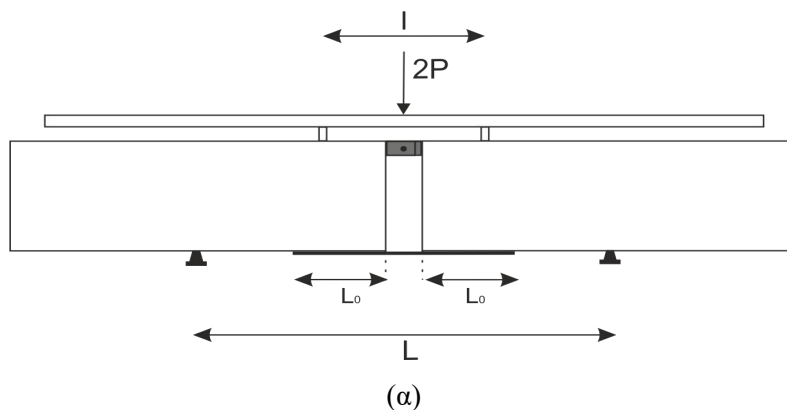
Το δοκίμιο της δοκιμής αποτελείται από μια δοκό που απαρτίζεται από δυο στοιχεία σκυροδέματος σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου διαστάσεων 15x20x60 εκατοστών. Τα δύο αυτά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με μια μηχανική άρθρωση από χάλυβα που τοποθετείται στο πάνω μέρος τους και με ένα έλασμα FRP επικολλημένο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

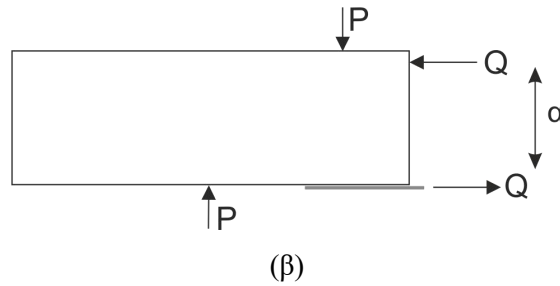


Σχήμα 1.1 Διαστασιολόγηση και θέση του ελάσματος (άνοψη)

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

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





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

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

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

όπου a ο μοχλοβραχίονας του ζεύγους δυνάμεων Q .

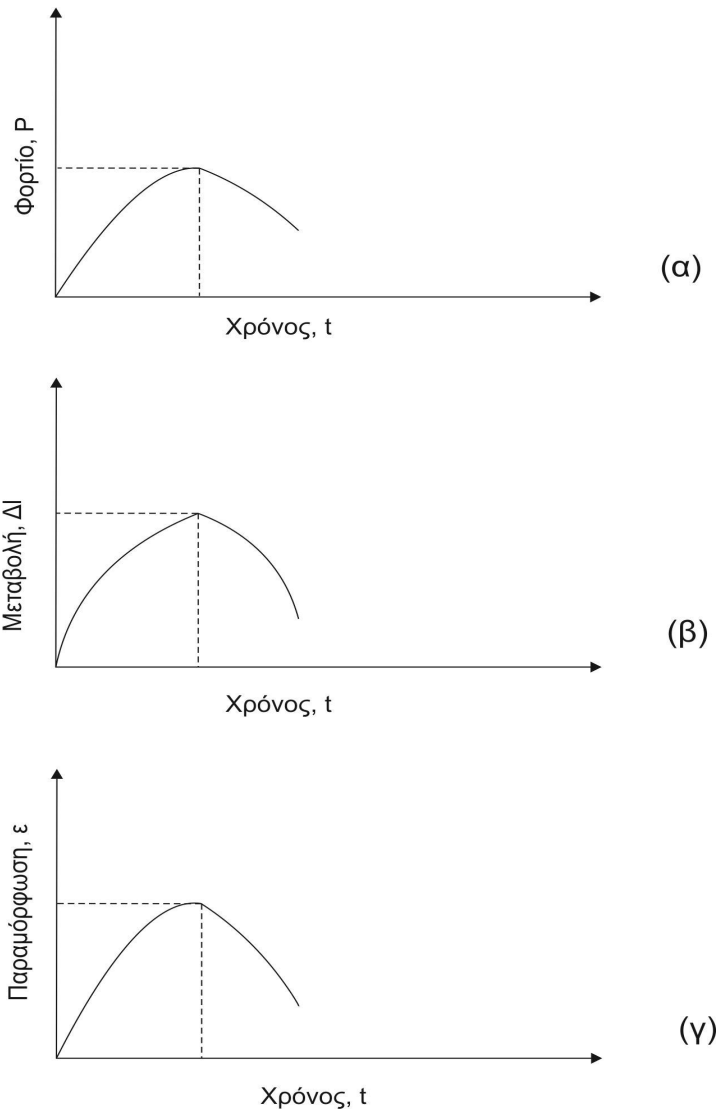
Η μεταβολή της οριζόντιας απόστασης των δυο στοιχείων του δοκιμίου μετρείται με δύο βελόμετρα που έχουν τοποθετηθεί στο μέσο της δοκού και συγκρατούνται στα δυο τμήματα της δοκού με σφιγκτήρες. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης του ελάσματος χρησιμοποιούνται μηκυσιόμετρα, τα οποία έχουν επικολληθεί σε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

1.1.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής

Η πειραματική δοκιμή εκτελείται ως εξής. Αφού η δοκός-δοκίμιο τοποθετηθεί στη μηχανή, έτσι ώστε οι δύο δυνάμεις της μηχανής να εφαρμόζονται εσωτερικά των στηρίξεων, αρχίζει η επιβολή των δυνάμεων στη δοκό-δοκίμιο. Η επιβολή των

δυνάμεων γίνεται σιγά-σιγά και αυξητικά, προκειμένου να αποφεύγονται δυναμικά φαινόμενα. Από την έναρξη επιβολής της δύναμης, και σε κάθε χρονική στιγμή από την έναρξη επιβολής της δύναμης, καταγράφονται:

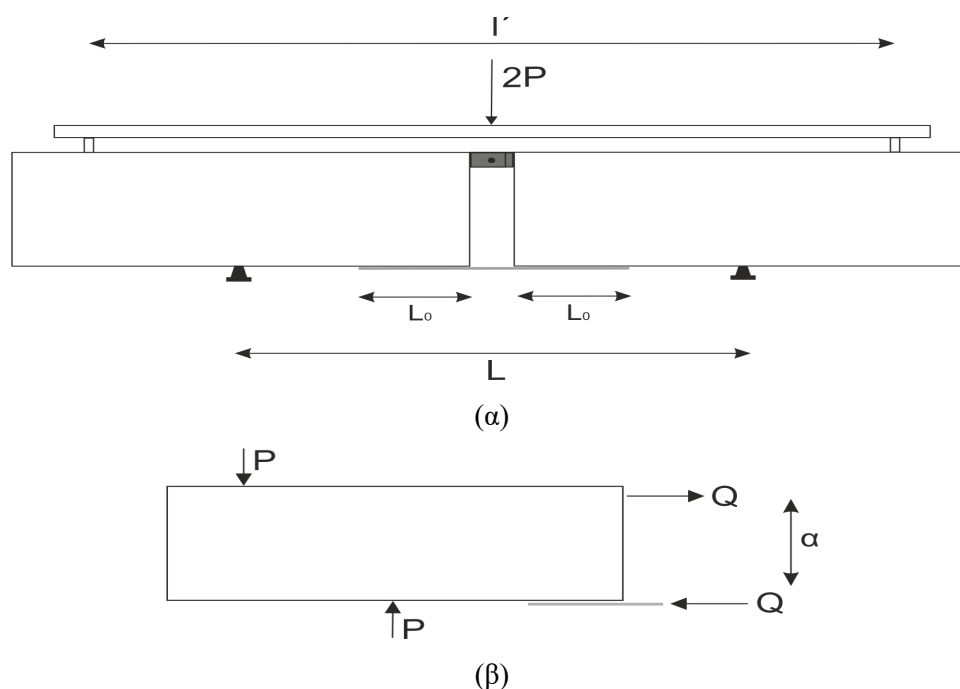
- Το επιβαλλόμενο φορτίο P της μηχανής στη δοκό από την έναρξη της επιβολής της φόρτισης.
- Οι οριζόντιες μετατοπίσεις Δl_u των εσωτερικών ακραίων διατομών των δύο ορθογωνίων στοιχείων της δοκού, από την αρχική τους θέση, στο ύψος του ελάσματος ενίσχυσης.
- Η παραμόρφωση $\varepsilon_{p,0}$ στα σημεία A του μη συγκολλημένου τμήματος του ελάσματος, που βρίσκεται στο ενδιάμεσο τμήμα της δοκού.
- Οι παραμορφώσεις $\varepsilon_{p,M}$ στα δύο σημεία M του συγκολλημένου τμήματος του ελάσματος.



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

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

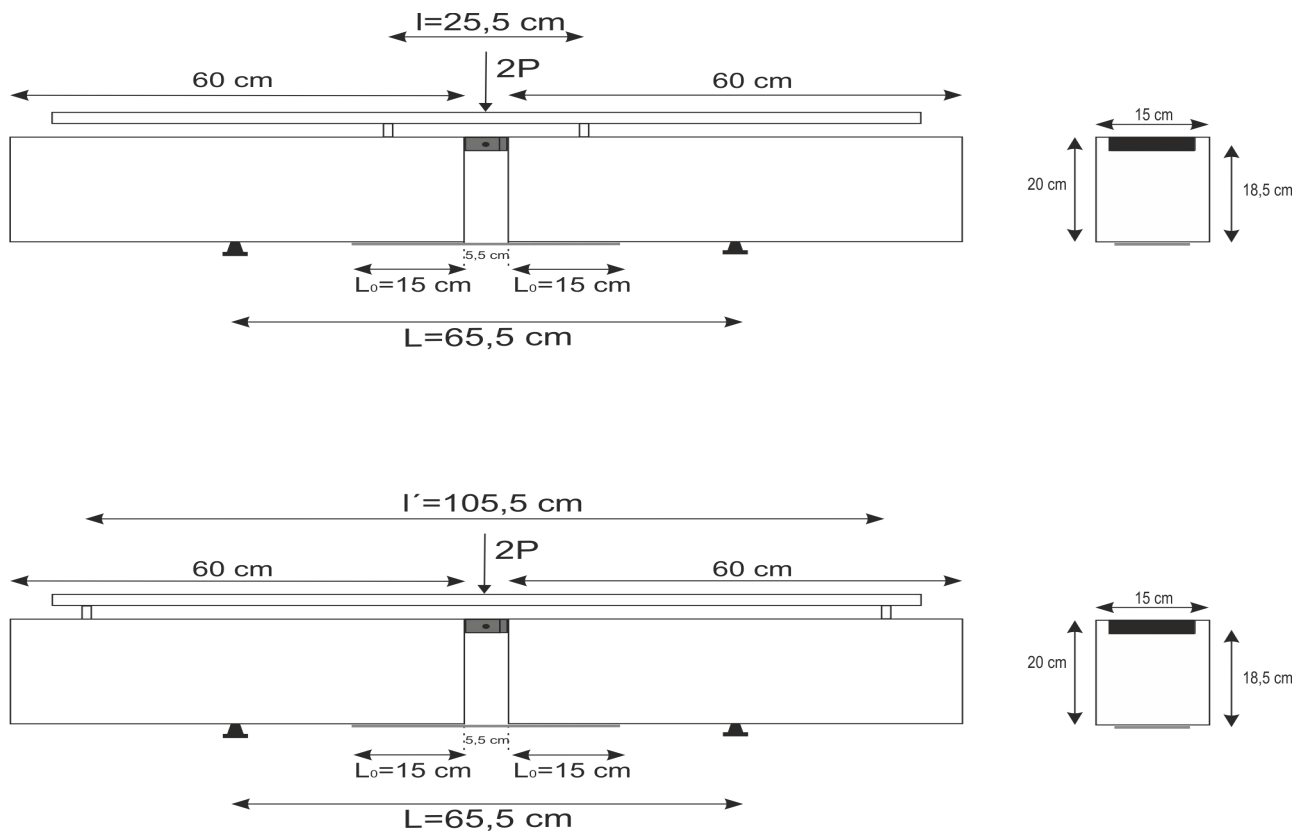
Μετά το μηδενισμό της φόρτισης, μπορεί να γίνει ανακύκλιση της φόρτισης. Για να πραγματοποιηθεί ανακύκλιση της φόρτισης, ρυθμίζεται η απόσταση των επιβαλλόμενων δυνάμεων να είναι ίση με l' , που είναι μεγαλύτερη από το άνοιγμα L του δοκιμίου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται πάλι μια κατάσταση καθαρής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



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

1.1.3 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού δοκιμίου

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



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

1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

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

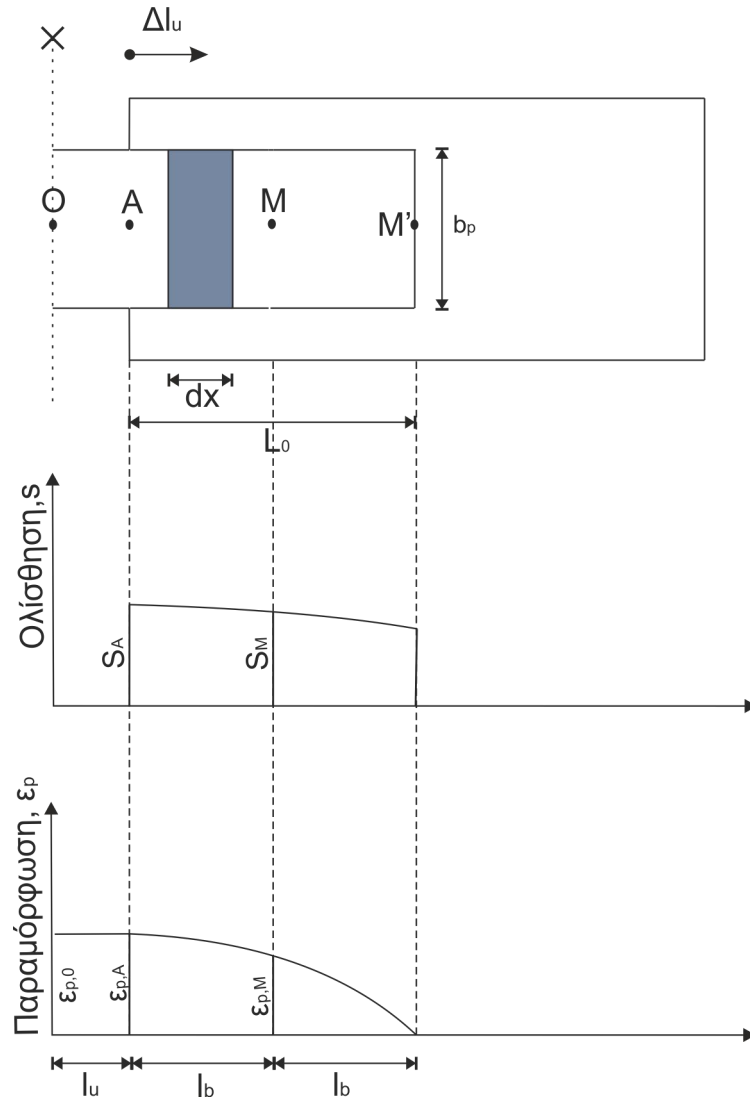
- από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων, που υφίσταται το έλασμα FRP στα σημεία A και M , και
- από τη μέτρηση της οριζόντιας μετακίνησης Δl_u των δύο ορθογωνίων τμημάτων της δοκού,

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

Για τον προσδιορισμό της ολίσθησης γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

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

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



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

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

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

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

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

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

Το αρχικό μήκος OM του ελάσματος ενίσχυσης είναι

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

Το μήκος αυτό μετά την παραμόρφωση θα είναι

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

Η ολίσθηση του σημείου M του ελάσματος θα είναι ίση με

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

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

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

Από τη σχέση αυτή προκύπτει

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

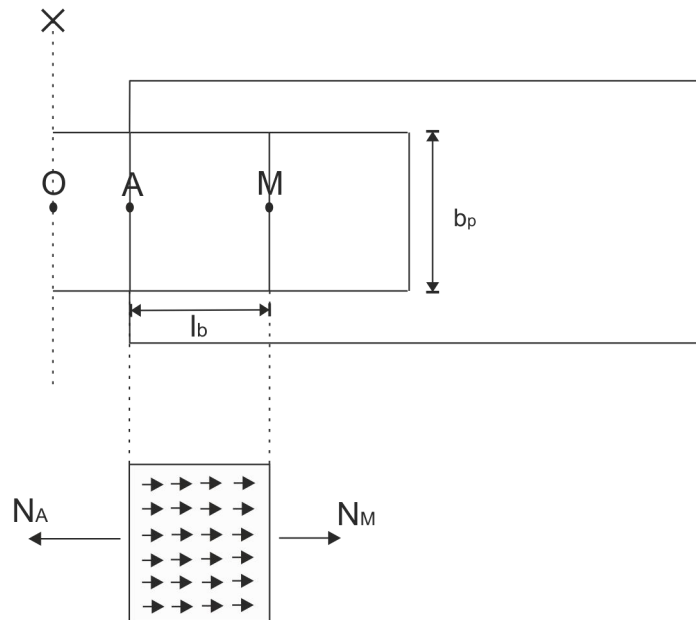
Έτσι από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) προκύπτει η μέση ολίσθηση του ελάσματος

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

1.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

1.3.1 Ο προσδιορισμός τάσης συνάφειας

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

Από την ισορροπία του τμήματος AM , προκύπτει η σχέση

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

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

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

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

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

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

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

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

1.3.2 Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης

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

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

Κεφάλαιο 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

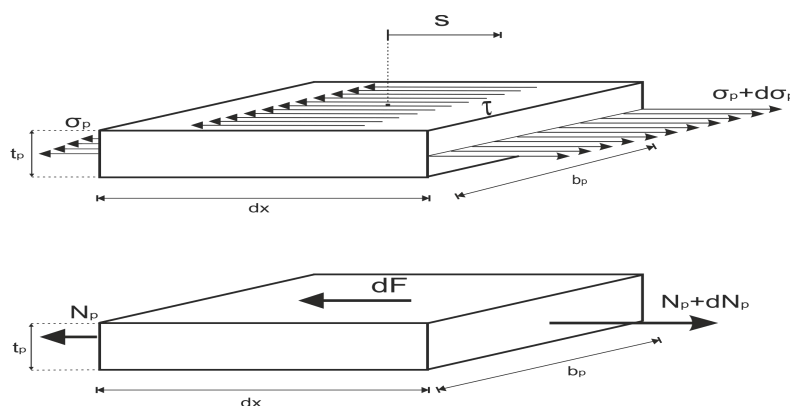
- Την ανάπτυξη της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την μηχανική συμπεριφορά του συστήματος έλασμα FRP – διεπιφάνεια - στοιχείο σκυροδέματος.
- Την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας.
- Την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης για δύο διακριτές συμπεριφορές της διεπιφάνειας: την ψαθυρή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

2.2 Η ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

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

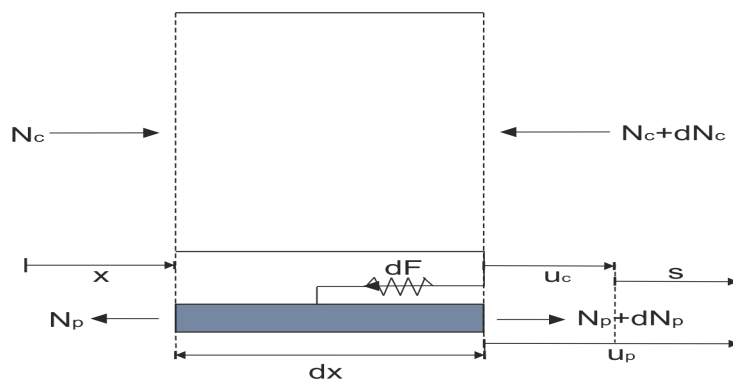
- Το έλασμα προσομοιώνεται με μια μεμβράνη, στην οποία αναπτύσσονται μόνο ορθές (μεμβρανικές) τάσεις.
- Η σύνδεση του ελάσματος με τη δοκό, που γίνεται με την εποξειδική ρητίνη, προσομοιώνεται με μια διανομή διατμητικών ελατηρίων αμελητέου πάχους. Η μηχανική συμπεριφορά της ελατηριακής σύνδεσης των δύο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

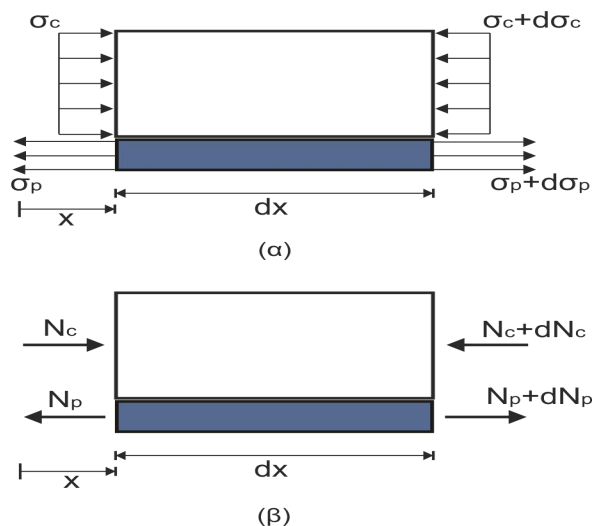
$$dF = \tau b_p dx . \quad (2.5)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

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

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

Για απλότητα, θα θεωρήσουμε ότι, στη διατομή x του ενισχυμένου στοιχείου του σκυροδέματος, τα εντατικά μεγέθη διατομής ανάγονται σε μια ομοιόμορφη διανομή τάσεων σ_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

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

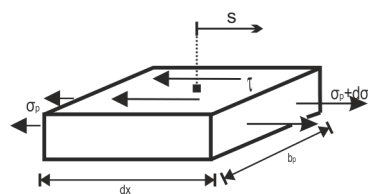
Αν, για παράδειγμα, θέσουμε $t_p = 1,2mm$, $E_p = 160MPa$, $E_c = 25MPa$, $h_c = 200mm$, $b_c = 150mm$ και $b_p = 100mm$, παρατηρούμε μετά τους σχετικούς υπολογισμούς ότι ο δεύτερος όρος, που υπεισέρχεται στην παρένθεση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης, είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους από τον πρώτο 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).



(α)

(β)

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

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

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

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

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

όπου έχει τεθεί

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

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

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

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

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

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

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

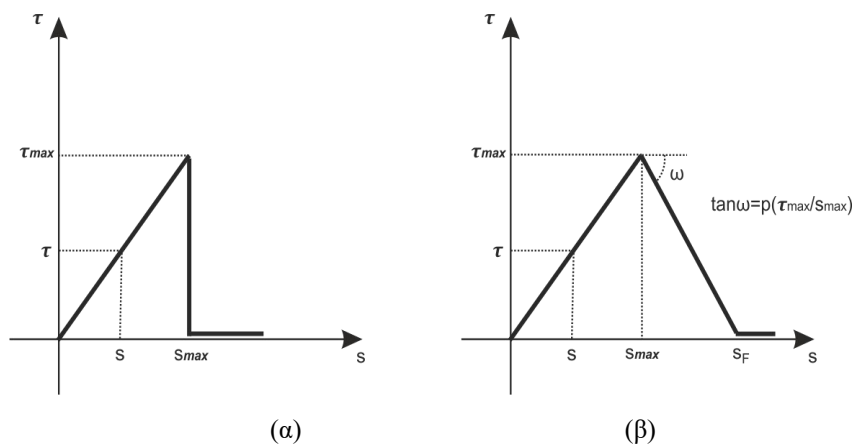
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ο νόμος συνάφειας-ολίσθησης προσομοιώνεται με τις παρακάτω διγραμμικές σχέσεις

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

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

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

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



Σχήμα 2.6 Οι δύο απλοποιημένες μορφές του νόμου συνάφειας-ολίσθησης

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

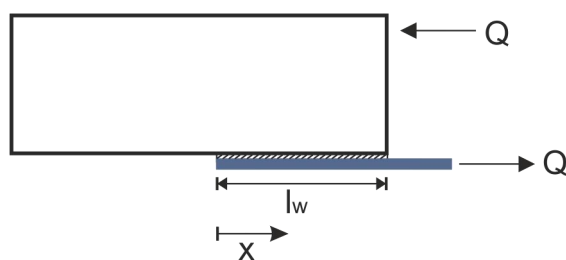
$$G_{c,II} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{\rho} \right] \tau_{max} s_{max} \quad (2.23)$$

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

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

2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ

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



Σχήμα 2.7

Στην περίπτωση, αυτή η εξίσωση (2.18) γράφεται

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

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

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

2.4.1 Ψαθυρή συμπεριφορά της διεπιφάνειας

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

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

όπου

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

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος αυτού, είναι

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

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

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

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

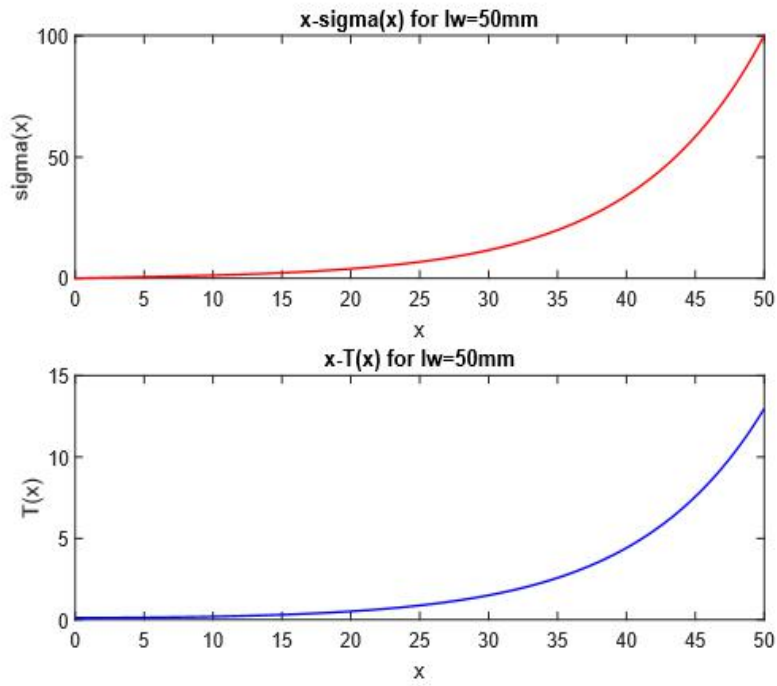
$$s(x) = \frac{\varepsilon_{p,0}}{\lambda} \frac{\cosh \lambda x}{\sinh \lambda l_w}. \quad (2.30)$$

Από την επίλυση της (2.30) με αριθμητικά δεδομένα $l_w = 50mm$ (α) και

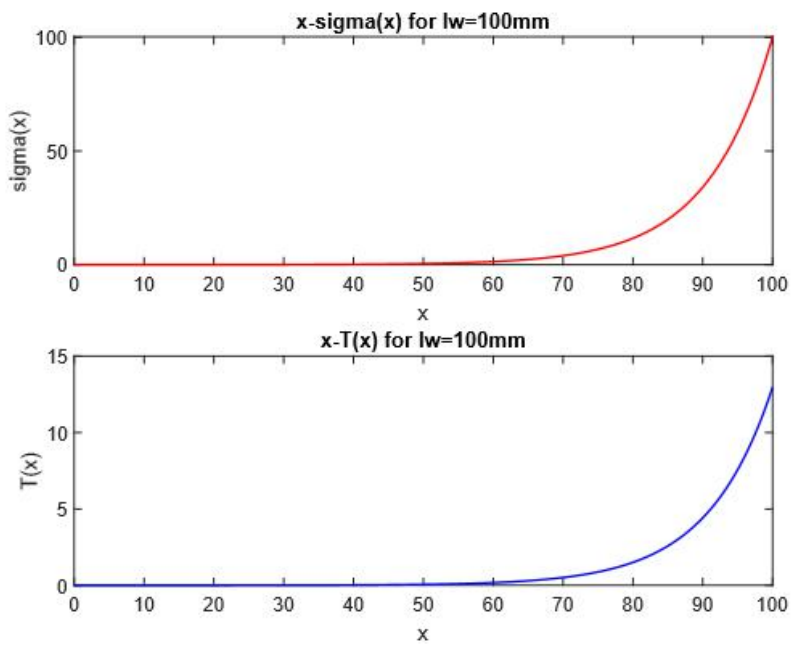
$$l_w = 100mm \text{ (β)}, E_p = 185000 N/mm^2, \frac{T_{\max}}{S_{\max}} = 2580, t_p = 1,2mm,$$

$$e_{p,0} = 0,541 \cdot 10^{-3}, \lambda = \sqrt{\frac{T_{\max} / S_{\max}}{E_p t_p}}, \text{ προκύπτουν τα τέσσερα διαγράμματα}$$

που δείχνονται στο σχήμα 2.8(α), και 2.8(β) αντίστοιχα



Σχήμα 2.8(α)



Σχήμα 2.8(β)

2.4.2 Πλάσטיμη συμπεριφορά της διεπιφάνειας

Όταν ο νόμος συνάφειας-ολίσθησης αντιστοιχεί στην πλάσטיμη διεπιφανειακή συμπεριφορά, για μεγάλες τιμές του φορτίου Q , δημιουργείται μια διεπιφανειακή ζώνη, πάνω στην οποία, οι αναπτυσσόμενες τάσεις συνάφειας έχουν περάσει στον κατερχόμενο κλάδο της καμπύλης τ - s . Η ζώνη αυτή, που ξεκινάει από το 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

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

όταν $l_w - a_d \leq x \leq l_w$

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

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

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

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

Επομένως, η γενική λύση II παίρνει την μορφή

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

όταν $l_w - a_d \leq x \leq l_w$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.5 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Οι ποσότητες που περιγράφουν πλήρως την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση σε κάθε σημείο της αδυνατισμένης διεπιφάνειας σκυροδέματος-ελάσματος FRP και προσδιορίζονται από την επίλυση του σχετικού συνοριακού προβλήματος είναι η ολίσθηση s και η αναπτυσσόμενη συνάφεια τ . Η σχέση των δύο αυτών ποσοτήτων, που χαρακτηρίζει την συμπεριφορά της διεπιφάνειας, είναι γενικά μη ελαστική και αποτελεί τον καταστατικό νόμο συνάφειας-ολίσθησης, που έχει συζητηθεί στην προηγούμενη ενότητα. Όπως προαναφέρθηκε, η διεπιφάνεια προσομοιώνει την μακροσκοπική συμπεριφορά του λεπτού στρώματος σύνδεσης των δύο υλικών. Η μη ελαστική συμπεριφορά της διεπιφάνειας οφείλεται κυρίως στις αναπτυσσόμενες μικρορηγματώσεις που δημιουργούνται κατά την φόρτιση στο λεπτό αυτό στρώμα. Η συμπεριφορά του λεπτού αυτού στρώματος προσομοιώνεται με μια συνεχή διανομή δεσμών τύπου ελατηρίου, με εξαφανιζόμενο πάχος, που επιδεικνύουν μια μη ελαστική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται με το νόμο συνάφειας-ολίσθησης τ - s . Η αποφόρτιση από μια στάθμη της τάσης συνάφειας τ (Σχήμα 2.9) παρέχει την ποσότητα ενέργειας παραμόρφωσης που μπορεί να αποδώσει το σύστημα ως ελαστική ενέργεια (σκιαγραμμισμένο τμήμα). Η ποσότητα της ελαστικής ενέργειας, που αποδίδεται κατά την αποφόρτιση, μειώνεται δραματικά, όταν η τάση συνάφειας έχει περάσει στον κατερχόμενο κλάδο. Η ενέργεια παραμόρφωσης που αποδίδεται από την διεπιφάνεια κατά την αποφόρτιση εξαφανίζεται, όταν η τάση συνάφειας τείνει να μηδενιστεί.

Σχήμα 2.9

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

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

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

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

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

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

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

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

Αποκόλληση θα συμβεί στη θέση αυτή, όταν

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

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

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

απ' όπου

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

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

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

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

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

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

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

Η οριακή δύναμη που αντιστοιχεί στο μήκος αυτό ισούται με

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

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

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

τότε το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης του ελάσματος υπολογίζεται από τη σχέση

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

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

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

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

Κεφάλαιο 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

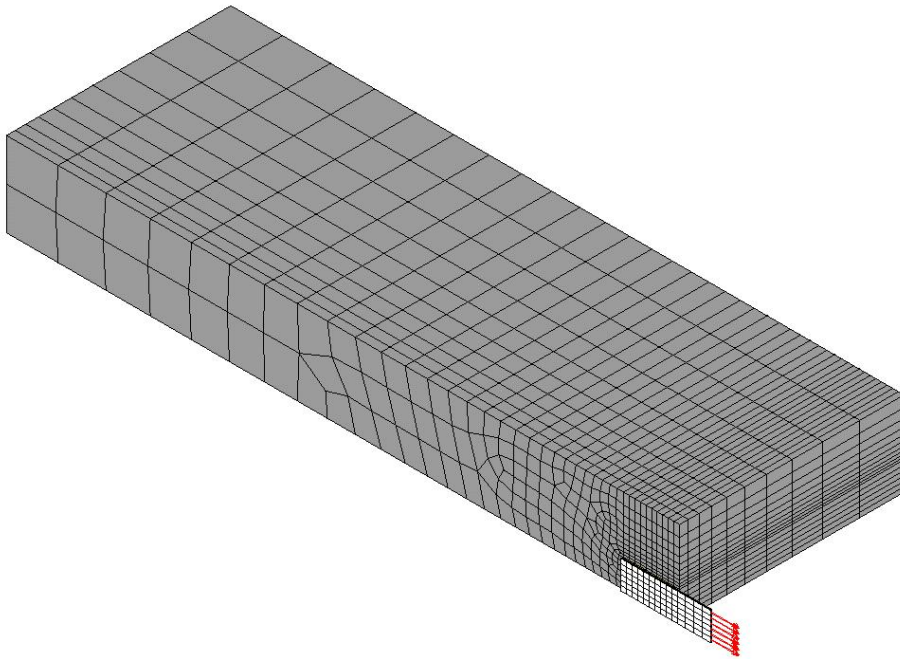
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση της παραμορφωσιακής και εντατικής κατάστασης της δοκού δοκιμίου της πειραματικής δοκού, που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο δομικής μηχανικής, προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα των απλοποιητικών παραδοχών που έχουν εισαχθεί σχετικά με τα μεγέθη παραμόρφωσης και έντασης που αναπτύσσονται σε αυτήν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Οι παραδοχές αυτές αφορούν την κατανομή των τάσεων συνάφειας κατά μήκος του επικολλημένου τμήματος του ελάσματος και των ορθών τάσεων στο έλασμα. Η ανάλυση θα γίνει για την τριδιάστατη γεωμετρία της δοκού δοκιμίου και για ελαστική συμπεριφορά των εμπλεκόμενων υλικών, δηλαδή, του σκυροδέματος, του ελάσματος FRP και της εποξειδικής ρητίνης (υλικού συγκόλλησης). Τα αποτελέσματα της τριδιάστατης ανάλυσης θα συγκριθούν με αυτά της μονοδιάστατης

ανάλυσης που θα παραχθούν από τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2. Ο σκοπός της τελευταίας ανάλυσης είναι να εκτιμηθεί η αξιοπιστία των αναλυτικών σχέσεων που χρησιμοποιούνται στην πράξη αντί των πεπερασμένων στοιχείων.

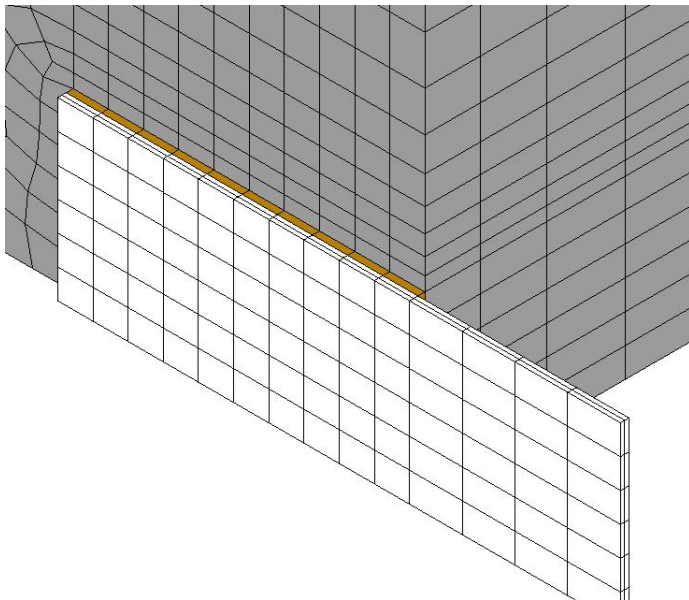
3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Λεπτομέρειες καννάβου και δεδομένα

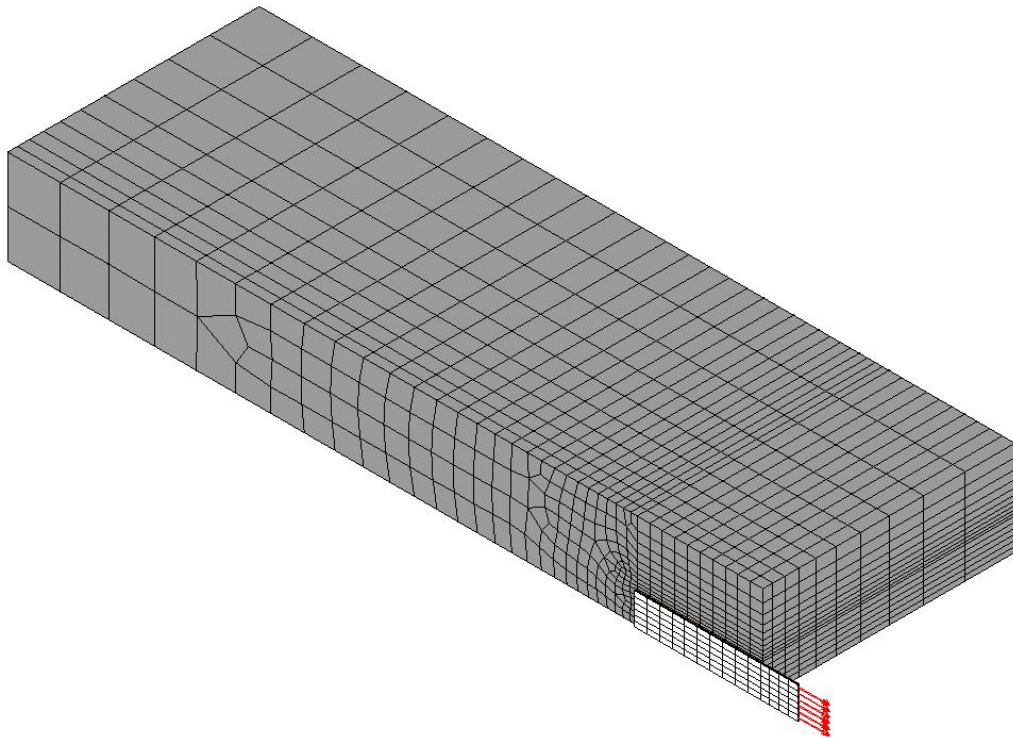
Για την ανάλυση της δοκού του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η κάναβος που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στα Σχήματα 3-1 έως 3.3. Στην ανάλυση της δοκού θεωρήθηκε ότι υπάρχει 'τέλεια' σύνδεση μεταξύ ράβδου FRP-σκυροδέματος, δηλαδή, δεν αναπτύσσεται σχετική ολίσθηση μεταξύ της ράβδου και του σκυροδέματος. Η δοκός δοκίμιο από σκυρόδεμα που μοντελοποιήθηκε είχε διαστάσεις 600X200X75 mm και το επικολημένο έλασμα πλάτος 25 mm (Σχ. 3-1). Να σημειωθεί ότι λόγω συμμετρίας, τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναφέρονται σε πλάτος ελάσματος 50 mm για πάχος δοκού 150 mm. Η κάναβος αποτελείται από 25765 τρισδιάστατα στοιχεία SOLID45 με οκτώ κόμβους και τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Στην Σχήμα 3.2 φαίνεται η λεπτομέρεια του μοντέλου με τα τρία μέρη του, έλασμα, κόλλα και σκυρόδεμα. Στο σύνορό της η δοκός πακτώθηκε και εφαρμόστηκε δύναμη εφελκυσμού στο ελεύθερο άκρο του ελάσματος που βρίσκεται 30 mm από την αρχή της κόλλησης. Η δύναμη αυτή αντιστοιχεί σε ονομαστική τάση 100 MPa. Τα μέτρα ελαστικότητας για το έλασμα FRP, την κόλλα και το σκυρόδεμα που θεωρήθηκαν ήταν αντίστοιχα 185, 6,45 και 20 GPa. Το πάχος του ελάσματος είναι 1,2 mm και της κόλλας 1 mm. Εκτός από το μήκος 50 mm, θεωρήθηκε και μήκος επικόλλησης 100 mm (Σχ. 3-3).



Σχ. 3-1 Μοντέλο στο ANSYS (μήκος επικόλλησης 50 mm)



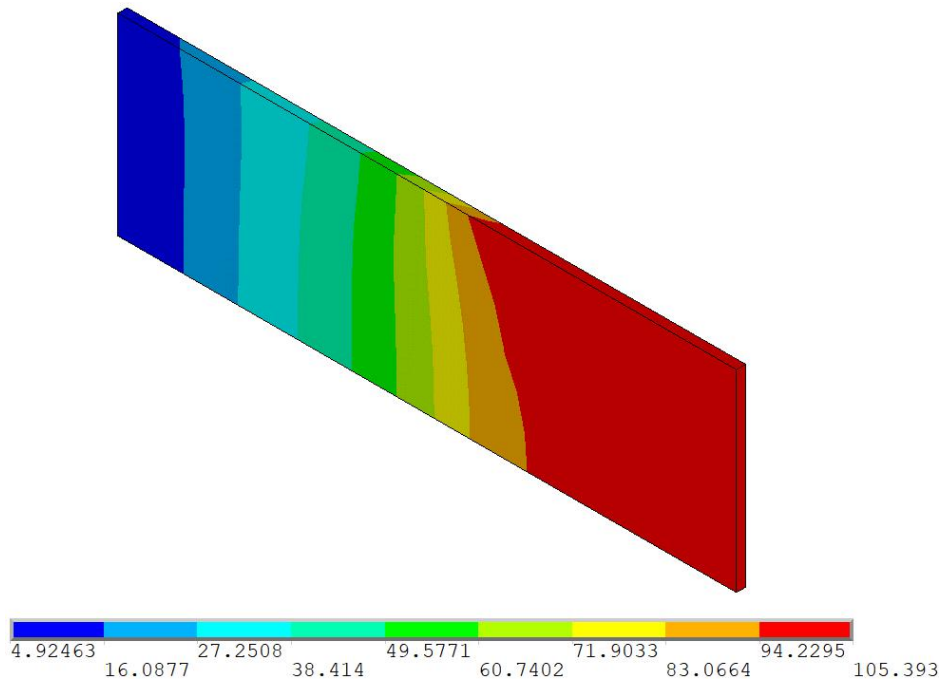
Σχ. 3-2 Λεπτομέρεια του μοντέλου (μήκος επικόλλησης 50 mm)



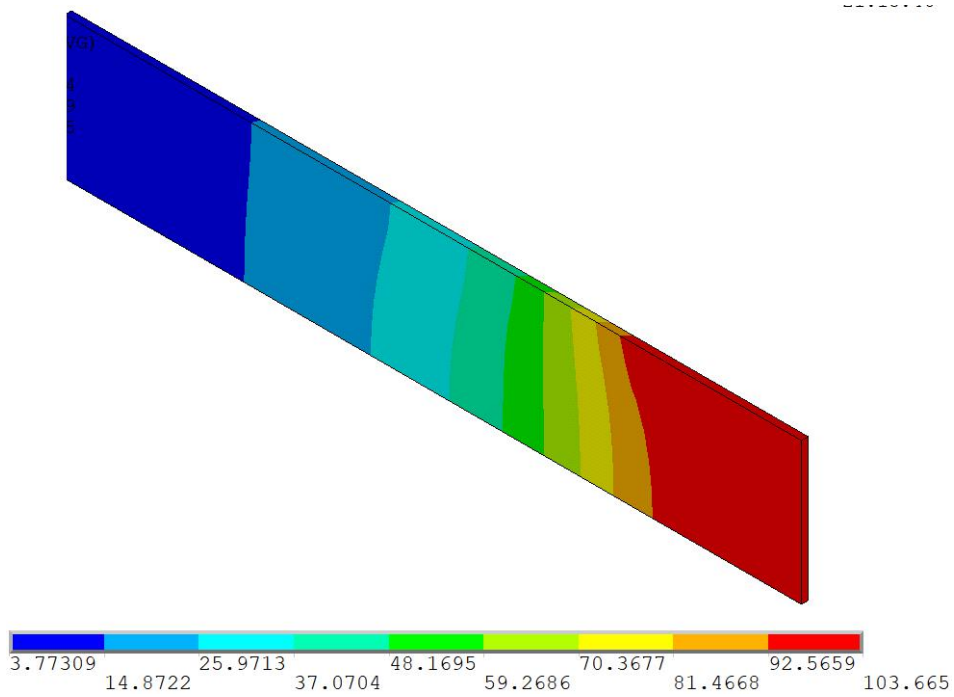
Σχ. 3-3 Μοντέλο στο ANSYS (μήκος επικόλλησης 100 mm)

Αποτελέσματα ανάλυσης

Στα Σχήματα 3-5 και 3-6 απεικονίζεται γραφικά η κατανομή των ορθών τάσεων σε όλη την γεωμετρία του ελάσματος για τα δύο μήκη που θεωρήθηκαν.

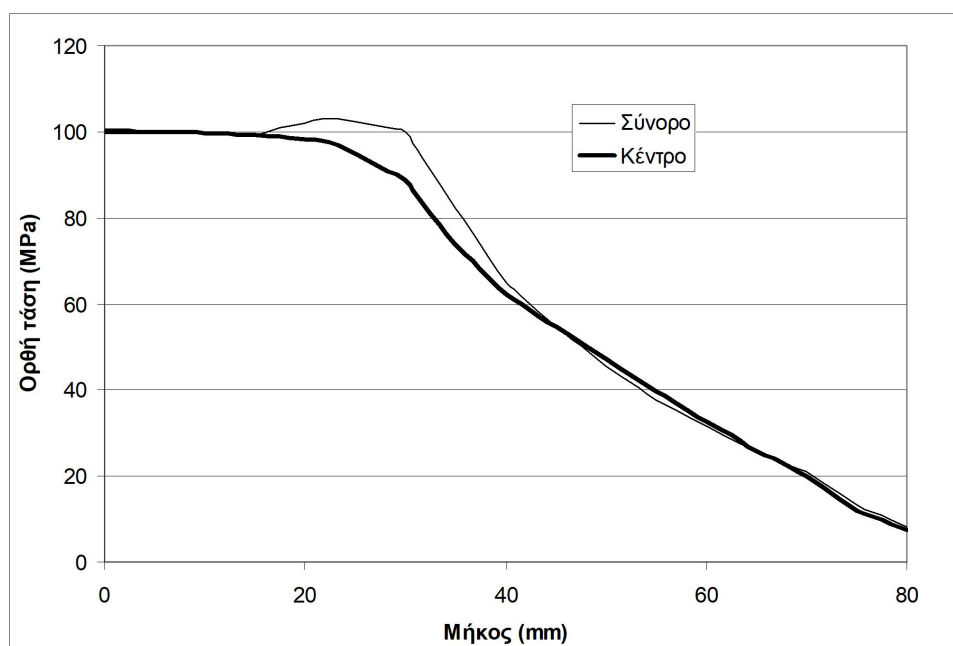


Εικ. 3-4 Κατανομή ορθών τάσεων στο έλασμα (μήκος επικόλλησης 50 mm)

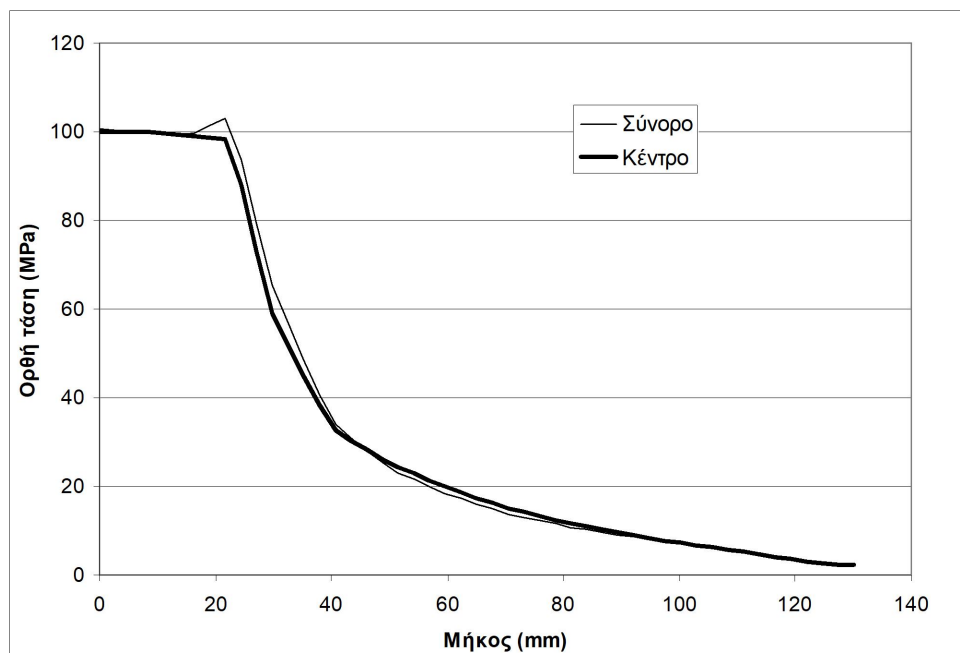


Σχημα. 3-5 Κατανομή ορθών τάσεων στο έλασμα (μήκος επικόλλησης 100 mm)

Η γραφικές αυτές απεικονήσεις δείχνουν ότι ο ορθες τάσεις μειώνονται σχετικά γρήγορα κατά μήκος του ελάσματος FRP . Οι τιμές αυτές ξεκινούν απο την τιμή της σταθερής τάσης, που επιβάλλεται εξωτερικά στο ένα άκρο του ελάσματος, και μειώνονται μονότονα μέχρι μια πολύ μικρή τιμή, στο άλλο άκρο του ελάσματος. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί κάτω από το 5% της εξωτερικά επιβαλλόμενης μέγιστης τιμής της ορθής τάσης. Η τιμή αυτή, στην παραδοχή που γίνεται στην πειραματική δοκό, θεωρείται μηδενική. Θα πρέπει να σημειωθεί οτι, η διανομή των ορθών τάσεων, με εξαίρεση μια μικρή περιοχή στα δύο άκρα του ελάσματος, ελάχιστα μεταβάλλεται στο πλάτος του ελάσματος (Σχ. 3-6 και Σχ. 3.7). Αυτό συμφωνεί με την βασική παραδοχή της ομοιομόρφης κατανομής των ορθών τάσεων στο πλάτος του ελάσματος που έχει εισαχθει στην δοκιμή δοκού.

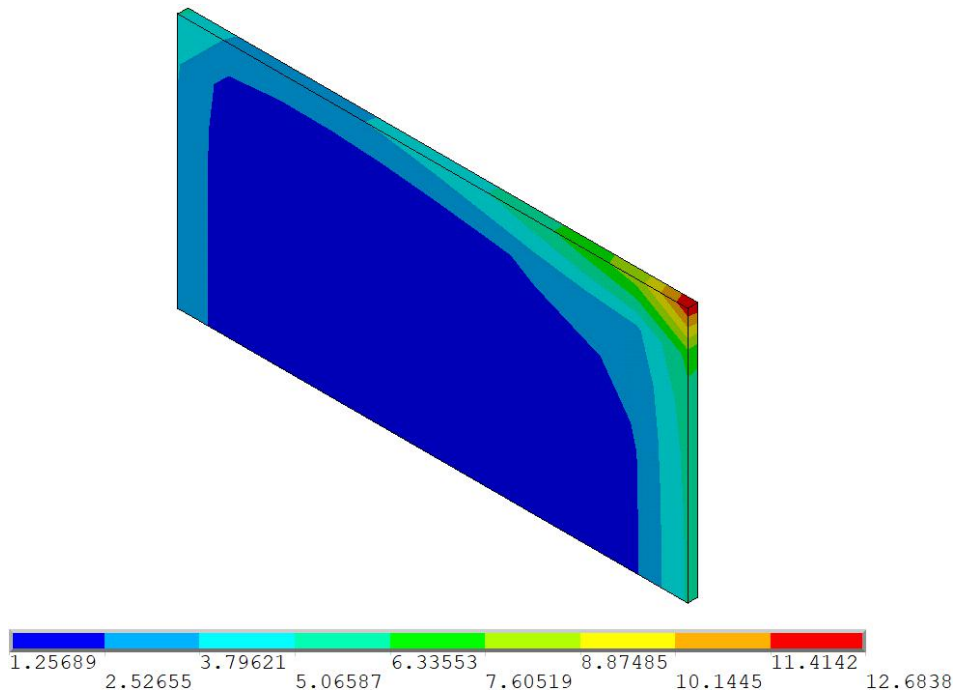


Σχ. 3-6 Ορθή τάση κατά μήκος του ελάσματος (μήκος επικόλλησης 50 mm)

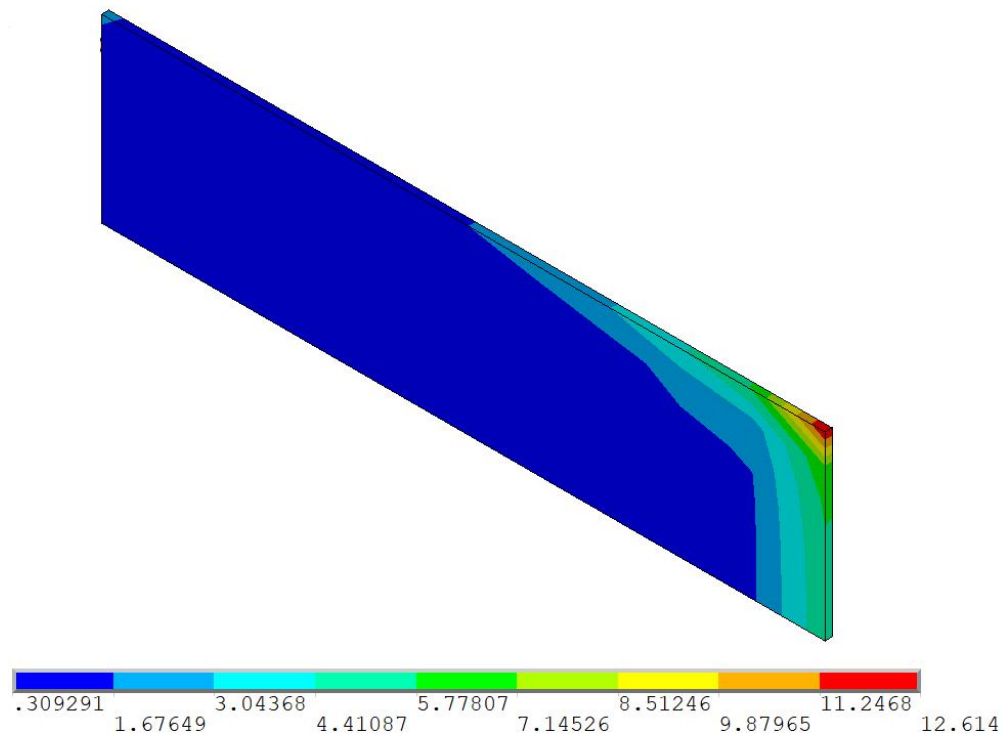


Σχ. 3-7 Ορθή τάση κατά μήκος του ελάσματος (μήκος επικόλλησης 100 mm)

Οι γραφικές απεικονίσεις των διατμητικών τάσεων στη ρητίνη, που περιγράφουν τις τάσεις συνάφειας, δείχνονται στα Σχήματα 3.8 και 3.9. Τα σχήματα αυτά δείχνουν ότι, στην μεγαλύτερη εκταση της επικόλλησης, οι διατμητικές τάσεις έχουν μια σχεδόν ομοιομορφη κατανομή. Ομως, σε μια περιμετρική στενη λωρίδα της επικόλλησης, οι διατμητικές τάσεις εχουν πολύ υψηλές τιμές. Οι τιμές αυτες γινονται πολύ μεγάλες στο εξωτερικό σύνορο της λωρίδας, που βρίσκεται στο ακρο της δοκου σκυροδέματος.

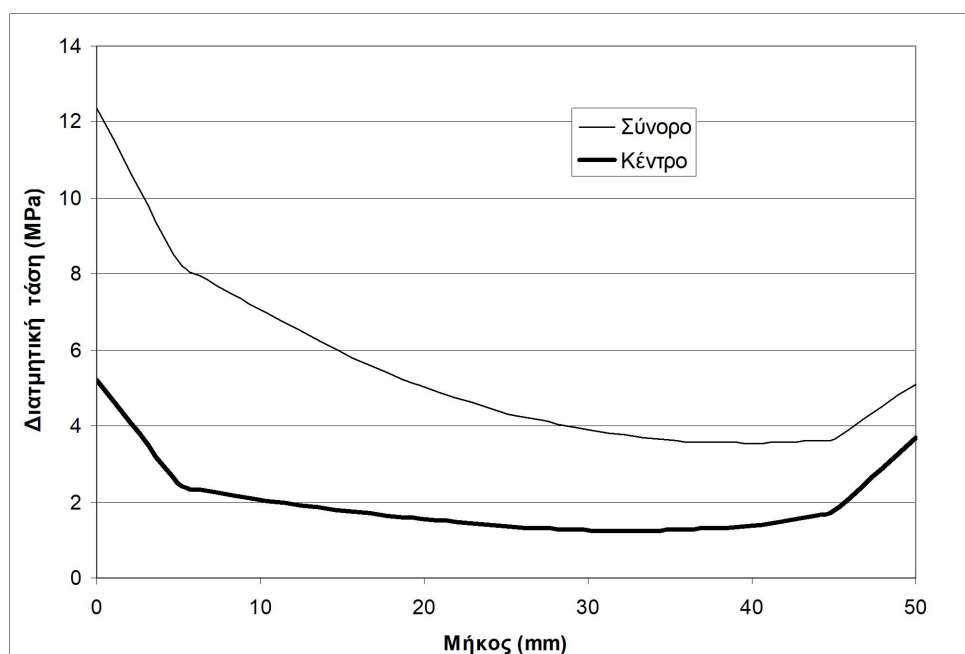


Σχ. 3-8 Κατανομή διατμητικών τάσεων στην κόλλα (μήκος επικόλλησης 50 mm)

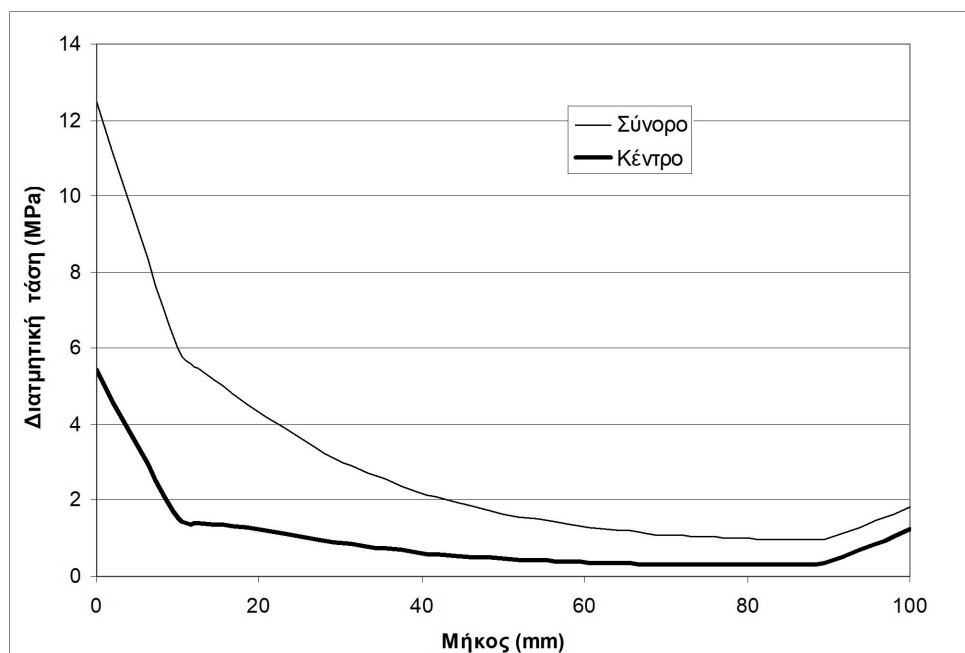


Σχ. 3-9 Κατανομή διατμητικών τάσεων στην κόλλα (μήκος επικόλλησης 100 mm)

Οι τιμές αυτές γίνονται ιδιαίτερα υψηλές ιδιαίτερα στις γωνίες του συνόρου (Σχ 3-10 και 3.11). Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την έναρξη της διατμητικής αστοχίας της επικόλλησης από τις περιοχές αυτές που συμβαίνει στην πράξη. Η σχεδόν ομοιομορφή διανομή των διατμητικών τάσεων στο σύνολο σχεδόν της επιφανείας της ρητίνης, με εξαίρεση την στενή περιμετρική λωρίδα, επιβεβαιώνει την παραδοχή των ομοιόμορφων τάσεων συνάφειας που έχει εισαχθεί στην δοκιμή δοκού για μικρά μήκη επικόλλησης.



Σχ. 3.10 Διατμητική τάση κατά μήκος της επικόλλησης (μήκος επικόλλησης 50 mm)



Σχ. 3-11 Διατμητική τάση κατά μήκος της επικόλλησης (μήκος επικόλλησης 100 mm)

Οι μεγάλες τιμές των τάσεων συνάφειας, που παρατηρούνται στις γωνίες της ορθογωνικής επιφάνειας επικόλλησης, υπαγορεύουν την ιδιαίτερη προσοχή που πρέπει να δοθεί στα σημεία αυτά κατά τον σχεδιασμό της ενίσχυσης.

Κεφάλαιο 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία του δοκιμίου της πειραματικής δοκιμής δοκού, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής του ΕΜΠ για τον πειραματικό προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης της διεπιφάνειας ελασμάτων FRP-σκυροδέματος.

Απο την ανάλυση που έγινε διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

- Οι ορθές τάσεις παραμένουν σχεδόν σταθερές στο πλάτος του ελάσματος. Αυτό επαληθεύει την παραδοχή που έχει γίνει αναφορικά με τις τάσεις αυτές κατά την κατασκευή του διαγράμματος συνάφειας-ολίσθησης από την πειραματική διαδικασία της δοκιμής δοκού.

Οι διατμητικές τάσεις συνάφειας που αναπτύσσονται στο υλικό επικόλλησης είναι σχεδόν ομοιόμορφες, στο σύνολο σχεδόν της διεπιφάνειας, με εξαίρεση μια στένη περιμετρική λωρίδα. Αυτό επιβεβαιώνει την παραδοχή των ομοιόμορφων τάσεων συνάφειας που έχει εισαχθεί στην δοκιμή δοκού για μικρά μήκη επικόλλησης.

Οι μεγάλες τιμές των τάσεων συνάφειας, που παρατηρούνται στις γωνίες της ορθογωνικής επιφάνειας επικόλλησης, υπαγορεύουν την ιδιαίτερη προσοχή που πρέπει να δοθεί στα σημεία αυτά κατά τον σχεδιασμό της ενίσχυσης.

Παρατηρείται μία σχετικά μεγάλη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της 1D θεωρητικής απλοποιημένης ανάλυσης και της 3D ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Αυτό ίσως οφείλεται στην μη ακριβή εκτίμηση της γραμμικής μορφής του διαγράμματος συνάφειας-ολίσθησης που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

