

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΚΩΝ ΒΑΘΡΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ FRP****ΣΥΝΟΔΙΝΟΣ - ΒΑΛΛΙΑΝΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ****Περίληψη**

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην ενίσχυση δοκών βάθρων γεφυρών με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών (FRP). Γίνεται αναφορά στα αίτια πρόκλησης βλαβών των γεφυρών καθώς και στη χρήση των FRP σήμερα.. Επίσης, παρουσιάζεται αναλυτικά η εφαρμογή τους στη γέφυρα του East Church και του Rensselaer County της Νέας Υόρκης. Τέλος, γίνεται αποτίμηση των ενισχύσεων αυτών βάσει των δοκιμών φόρτισης.

**1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα τελευταία χρόνια είναι επιτακτική η ανάγκη της ενίσχυσης των δομικών στοιχείων των γεφυρών για διάφορους λόγους:

- Υποσκαφή θεμελίων [2], δηλ. απομάκρυνση εδαφικού υλικού ή ακόμα και βράχου περιμετρικά και κάτω από τη θεμελίωση του βάθρου της γέφυρας λόγω της επίδρασης της ροής του νερού. Στη διεπιφάνεια νερού – εδάφους, δημιουργούνται διατμητικές τάσεις παράλληλα στη ροή. Οι τάσεις αυτές είναι σχετικά μικρές, αλλά μακροχρόνια δημιουργούν πρόβλημα στα θεμέλια των βάθρων. Χαρακτηριστικά, στις ΗΠΑ το 60% των καταρρεύσεων των γεφυρών, από το 1961 ως το 1991, οφείλεται σε υποσκαφή θεμελίων!
- Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος λόγω επίδρασης του θαλασσινού νερού ή για άλλους περιβαλλοντικούς λόγους[1]. Το φαινόμενο αυτό, συνδυάζει πολλές φυσικές και χημικές διεργασίες, όπως η υδροφθορά, η επίδραση αλάτων του θαλασσινού νερού, η επίδραση αλκαλίων, η δράση παγετού σε ψυχρά κλίματα και η επίδραση του CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας. Η επίδραση χλωριόντων δεν προκαλεί διάγκωση, αλλά απόπλυση και χαλάρωση της δομής του σκυροδέματος. Η μεγαλύτερη φθορά των κατασκευών παρουσιάζεται στην παλιρροιακή ζώνη, λόγω της ταυτόχρονης δράσης κυμάτων, αέρα, αλάτων και ενανθράκωσης κρυστάλλων αλάτων λόγω εξάτμισης νερού. Για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος προτείνονται η μείωση της διαπερατότητας του και η αύξηση επικάλυψης των οπλισμών.
- Η παλαιότητα κατασκευής των γεφυρών που έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη εναρμόνισης τους με σύγχρονους κανονισμούς και τη γήρανση του σκυροδέματος, που επιφέρει απώλεια της αντοχής του.
- Ο κακός υπολογισμός των κινητών φορτίων που κυρίως οφείλεται στην αύξηση της διέλευσης των οχημάτων πάνω από τη γέφυρα.
- Αύξηση των μόνιμων φορτίων (π.χ. προσθήκη διαχωριστικού διαζώματος, νέα στρώση σκυροδέματος στο κατάστρωμα της γέφυρας, διάφορες αισθητικές και αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις)
- Οι ζημιές που μπορούν να προκληθούν στη γέφυρα από έναν ισχυρό σεισμό.

## 2. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΦΥΛΛΑ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP)

Η χρήση φύλλων από ΙΟΠ αποτελεί σήμερα την πλέον σύγχρονη τεχνική στις ενισχύσεις των κατασκευών. Θεωρείται μια από τις πιο ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων 15 ετών στον κατασκευαστικό κλάδο. Ουσιαστικά, είναι η εξέλιξη της τεχνικής των χαλύβδινων επικολητών ελασμάτων, υπερκαλύπτοντας τις αδυναμίες αυτής της τεχνικής. Οι κυριότεροι τύποι ινών είναι: οι ίνες γυαλιού (υαλονήματα) και παρασκευάζονται από λιωμένο γυαλί, οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα) που παρασκευάζονται από θερμική κατεργασία πολυακρυλονιτριλίου (PAN) ή από απόσταξη κάρβουνου (pitch) και οι ίνες αραμιδίου που προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ, Twaron) ή από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora). [1]

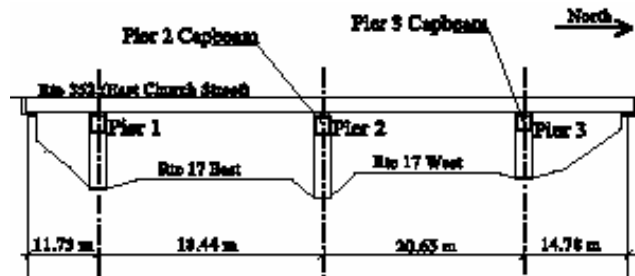
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των φύλλων FRP είναι: [1], [3],[6]

- Εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή.
- Γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι το όριο θραύσης τους.
- Μη διαβρωτικές ιδιότητες, ανθεκτικότητα σε δυσμενείς χημικές επιδράσεις.
- Ευκολία εφαρμογής και τοποθέτησης από το εξειδικευμένο προσωπικό.
- Όχι πάντα απαραίτητη διακοπή της κυκλοφορίας ή αν χρειαστεί, απαιτεί λίγο χρόνο. [5]
- Μικρό κόστος (ειδικά τα τελευταία χρόνια λόγω της αυξημένης εφαρμογής τους) σε σχέση με τον γαλβανισμένο χάλυβα ή ακόμα και με τον χάλυβα υψηλής αντοχής.
- Μικρό ίδιο βάρος (περίπου ίσο με 1/4 του βάρους του άνθρακα).

## 3. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΟΥ ΒΑΘΡΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ ΣΤΟ EAST CHURCH ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΥΟΡΚΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΑ ΦΥΛΛΑ FRP [4]

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η γέφυρα αυτή χτίστηκε το 1954 για τις οδούς 17 και 352 του προαστίου Elmira στη Νέα Υόρκη. Έχει 4 ανοίγματα συνολικού μήκους 67m, μεταλλικές δοκίδες για μεταφορά φορτίων από το κατάστρωμα στη δοκό, 2 λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3,66m και 2 πεζοδρόμια (ρείθρα) πλάτους 1,07m και ύψους 0,23m. Η μέση ημερήσια κυκλοφορία ανέρχεται σε 9.000 και 20.000 οχήματα για τις οδούς 17 και 352 αντίστοιχα. Μια όψη της γέφυρας φαίνεται στο Σχ.1.



Σχ.1 Τομή γέφυρας East Church.

### 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΛΑΒΗΣ

Κατά τη διάρκεια μιας συνηθισμένης επιθεώρησης γεφυρών παρατηρήθηκαν εκτεταμένες ρωγμές στη δοκό του βάθρου 3, όπως φαίνονται στο Σχ.2.



Σχ.2 Ρωγμές στο κεντρικό βάθρο.

Κάθε δοκός είναι τετραγωνικής διατομής διαστάσεων 1.1m x 1.1m και στηρίζεται σε 3 βάθρα κυκλικής διατομής 1.1m. Η αιτία πρόκλησης ρωγμών ήταν η αύξηση των μόνιμων φορτίων λόγω:

- της αύξησης του πάχους του καταστρώματος από 292mm σε 318mm
- στην προσθήκη διαχωριστικού διαζώματος από σκυρόδεμα, βάρους 12 kN/m.

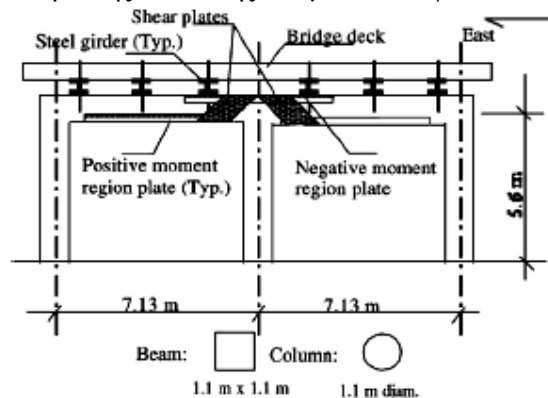
Μια πρώτη μελέτη επιβεβαίωσε την ανεπάρκεια της δοκού σε καμπτική και διατμητική αντοχή.

### 3.3 ΤΡΟΠΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Για τη δοκό του βάθρου 3, επιλέχθηκε από το υπουργείο Μεταφορών της Νέας Υόρκης να γίνει ενίσχυση με σύνθετα υλικά FRP (γυαλί/ άνθρακας), σε πειραματική βάση. Σκοπός της ενίσχυσης αυτής ήταν να αυξηθεί η διατμητική και καμπτική αντοχή της δοκού κατά 10% και 20% αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τα φύλλα FRP, όπως φαίνεται στο Σχ.3.

Παρακάτω εξετάζονται:

- η καμπτική συμπεριφορά της δοκού
- η θέση του ουδέτερου άξονα
- η αποτελεσματικότητα της σύνδεσης ανάμεσα στα φύλλα FRP και τη δοκό



### 3.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΦΥΛΛΩΝ

Για την ενίσχυση της δοκού χρησιμοποιήθηκαν καμπτικά και διατμητικά φύλλα FRP από άνθρακα και γυαλί (Σχ.4).



Καμπτικά φύλλα.



Διατμητικά φύλλα.

Σχ. 4

Τα καμπτικά φύλλα είχαν πάχος 13mm, πλάτος 254mm και μήκος 5,18m ενώ, τα διατμητικά πάχος 7mm, πλάτος 1,1m και μήκος 1,7m , όπως φαίνεται στο Σχ. 5.

Η δοκός καθαρίστηκε με νερό υπό πίεση ώστε να απομακρυνθούν χαλαροί κόκκοι σκυροδέματος που εμποδίζουν την καλή σύνδεση των φύλλων. Μετά, η επιφάνεια αφέρθηκε να στεγνώσει. Τη μέρα της τοποθέτησης, τα φύλλα τοποθετήθηκαν και ευθυγραμμίστηκαν στις πλευρές της δοκού, σηματοδεύτηκαν και έγιναν τρύπες στα φύλλα και το σκυρόδεμα, σε διάφορες θέσεις. Η εποξειδική ρητίνη επαλείφθηκε στα φύλλα και στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν μπουλόνια στις τρύπες ώστε να εξασφαλίζεται η σφιχτή σύνδεση μεταξύ των φύλλων και της επιφάνειας του σκυροδέματος. Η εποξειδική



Πριν την τοποθέτηση.



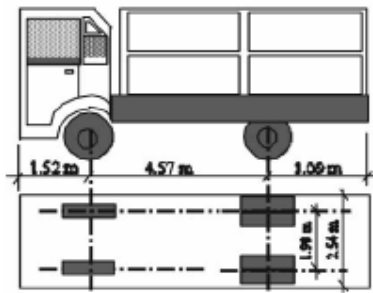
Μετά την τοποθέτηση.

Σχ. 5

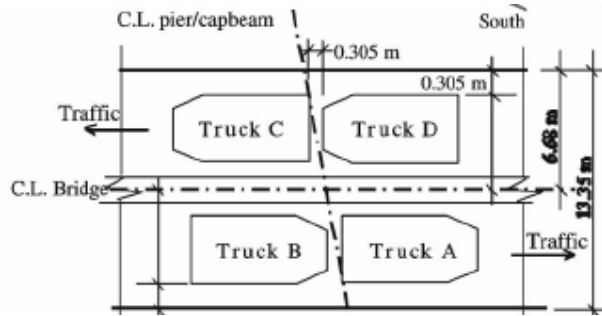
ρητίνη προετοιμάστηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Στη μια πλευρά της δοκού η εποξειδική ρητίνη επαλείφθηκε πρώτα στα φύλλα πριν συνδεθούν μηχανικά με το σκυρόδεμα. Στην άλλη πλευρά, η εποξειδική ρητίνη επαλείφθηκε πρώτα στο σκυρόδεμα και μετά τα φύλλα ‘κόλλησαν’ στη δοκό με ένα ξύλινο πλαίσιο. Μετά την τοποθέτηση των φύλλων, επαλείφθηκε στη δοκό μια στρώση πίσσας για προστασία από το νερό ανάμεσα στα φύλλα και το σκυρόδεμα, αν παρουσιαζόντουσαν κενά. Στη συνέχεια οι δοκοί βάρθηκαν για αισθητικούς λόγους αλλά και για προστασία από υπεριώδεις ακτινοβολίες. Η δοκιμή φόρτισης έγινε 14 μέρες μετά την ολοκλήρωση των εργασιών.

**3.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Ο κύριος σκοπός των δοκιμών φόρτισης ήταν να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με φύλλα FRP στη μείωση των τάσεων στη δοκό. Στη δοκιμή φόρτισης πριν και μετά την ενίσχυση μετρήθηκαν οι καμπτικές τάσεις της δοκού σε θετικές και αρνητικές περιοχές ροπής. Για τη δοκιμή φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν 4 φορτηγά σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Αμερικανικού Υπουργείου Συγκοινωνιών. Κάθε φορτηγό είχε βάρος περίπου 196 kN, όπως φαίνεται στο Σχ.6.



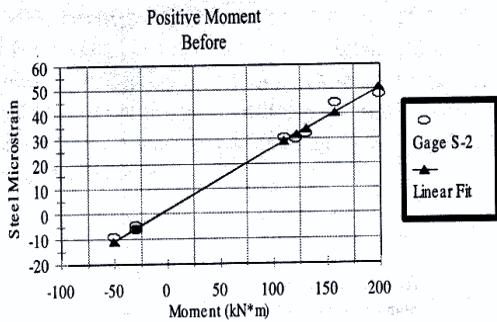
Τύπος φορτηγού.



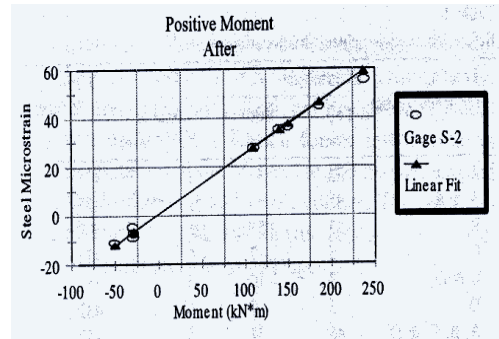
Θέσεις των φορτηγών στη γέφυρα.

Σχ. 6

Η ενίσχυση με σύνθετα φύλλα FRP στις αρνητικές περιοχές ροπής, μείωσε τις τάσεις λόγω κινητών φορτίων στον οπλισμό του σκυροδέματος κατά 10%. Ομοίως, για τις θετικές ροπές το σύστημα ενίσχυσης μείωσε ελάχιστα τις τάσεις στον οπλισμό κατά 6%. Αυτή η μικρή μείωση οφείλεται στο ότι η δυσκαμψία της δοκού, όπως μετρήθηκε από την κλίση της βέλτιστης ευθείας (Σχ.7, 8) δεν αλλάζει σημαντικά μετά την ενίσχυση.

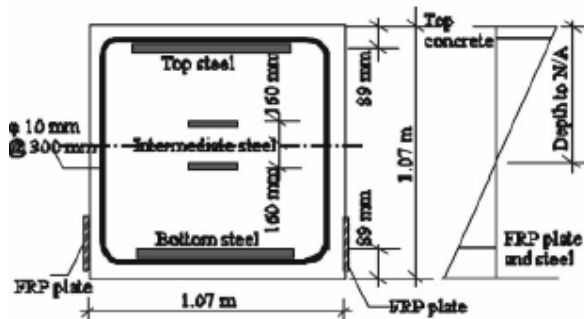


Σχ. 7 Παραμόρφωση  $\epsilon_{xx}$  πριν την ενίσχυση.



Σχ. 8 Παραμόρφωση  $\epsilon_{xx}$  μετά την ενίσχυση.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα. Από μετρήσεις η απόσταση της πιο θλιβόμενης ίνας από τον ουδέτερο άξονα ήταν πριν και μετά την ενίσχυση 478mm και 487mm αντίστοιχα. Δηλ. ο Ο.Α. μετατοπίστηκε λίγο προς τα κάτω μετά την εφαρμογή των FRP(Σχ. 9).



Σχ. 9 Τομή δοκού και θέση Ο.Α.

### 3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος ενίσχυσης με σύνθετα φύλλα FRP είναι:

- Προσιτή οικονομικά (18.000\$) σε σχέση με άλλες μεθόδους που υπολογίζονται σε 150.000\$ για την παρούσα ενίσχυση.
- Κατασκευαστικά, η ενίσχυση με φύλλα FRP δεν απαιτεί διακοπή της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια των εργασιών και είναι σχετικά εύκολη η τοποθέτηση από το συνεργείο.
- Η σύνδεση μεταξύ των φύλλων FRP και του σκυροδέματος είναι ικανοποιητική παρόλη τη διαφορά που προέκυψε μεταξύ των αναμενόμενων και των μετρηθέντων τάσεων.

## 4. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ RENSSELEAR COUNTY ΝΕΑΣ ΥΟΡΚΗΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ FRP [5]

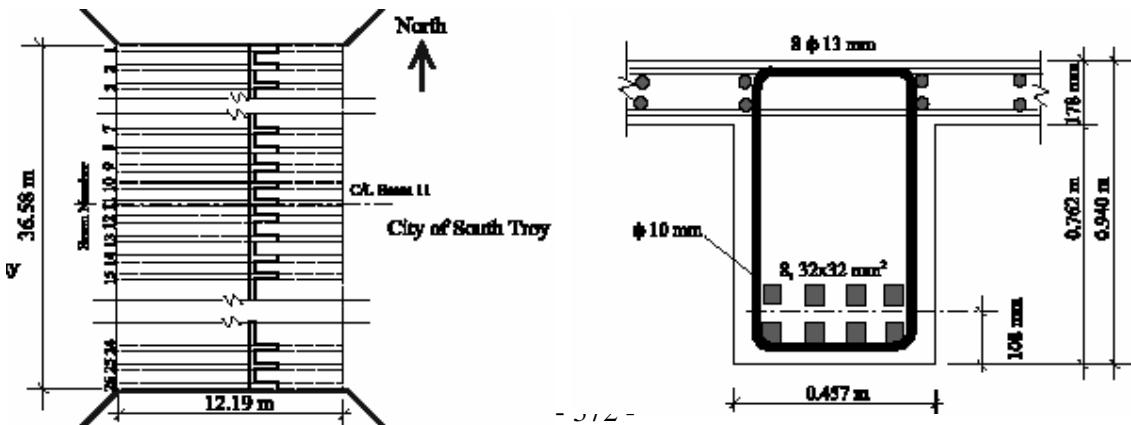
### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η συγκεκριμένη γέφυρα χτίστηκε το 1932 στο προάστιο RENSSELEAR COUNTY της Νέας Υόρκης και μεταφέρει την κυκλοφορία της οδού 378 στην πόλη South Troy. Έχει 1 μόνο άνοιγμα και διαστάσεις: μήκος 12,19m , πλάτος 36,58m και στηρίζεται σε 26 δοκούς διατομής T, που απέχουν 1,37m μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχ.8. Ο κύριος οπλισμός των δοκών αποτελείται από 8 ράβδους 32x32 mm<sup>2</sup>, όπως φαίνεται στο Σχ.9. Η γέφυρα έχει 5 λωρίδες κυκλοφορίας και μέση ημερήσια κυκλοφορία περίπου 30.000 οχήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει περιορισμός στη διέλευση των οχημάτων εξαιτίας του βάρους τους.

### 4.2 ΛΟΓΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Η ενίσχυση στην παρούσα γέφυρα ήταν επιβεβλημένη καθώς:

- εξαιτίας της διάβρωσης είχε παρατηρηθεί σημαντική μείωση του ποσοστού οπλισμού
- υπήρχαν ρωγμές λόγω παγετού
- η γέφυρα είχε κατασκευαστεί με παλιούς κανονισμούς.

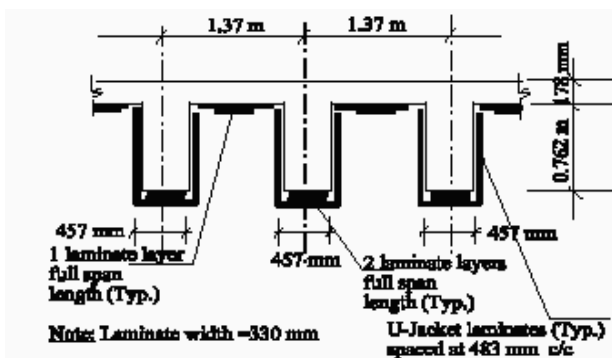


Σχ. 8 Κάτοψη της γέφυρας.

Σχ. 9 Τυπική διατομή της δοκού.

#### 4.3 ΤΡΟΠΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΜΕ FRP

Πριν την τοποθέτηση των φύλλων FRP η επιφάνεια καθαρίστηκε ώστε να απομακρυνθούν χαλαροί κόκκοι σκυροδέματος. Το σύστημα ενίσχυσης με επικολλητά φύλλα FRP φαίνεται στο Σχ.10 και Σχ.11. Γενικά, στην τοποθέτηση ακολουθήθηκε η διαδικασία που προτείνει ο κατασκευαστής.



Σχ. 10 Λεπτομέρεια συστήματος ενίσχυσης.



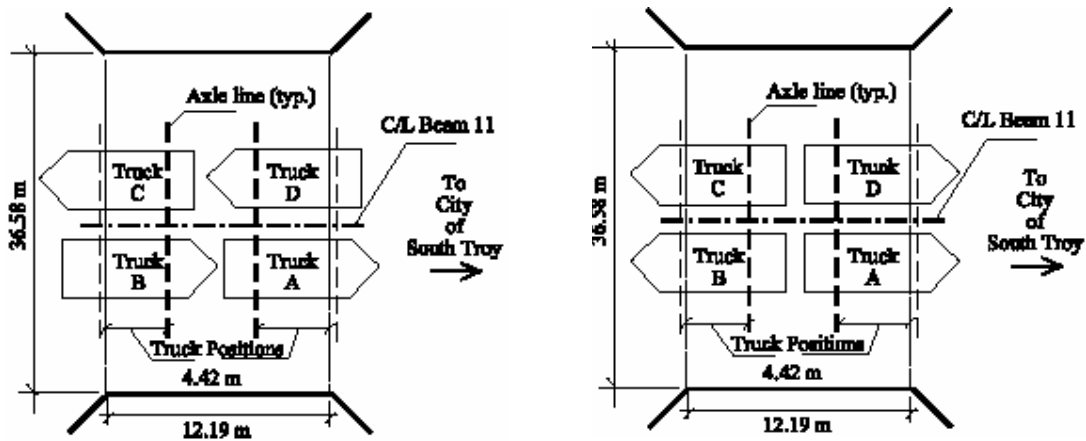
Σχ. 11 Τοποθετημένα φύλλα FRP.

Το σύστημα ενίσχυσης FRP αποτελείται από ίνες άνθρακα και 3 τύπους εποθερμικού υλικού: στόκος, ρητίνη και μίνιο (putty, resin, primer). Η μέγιστη αντοχή των φύλλων ενίσχυσης ήταν 3.400 MPa, σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Από το Σχ.10 τα φύλλα FRP βρίσκονται στη βάση της δοκού ενώ, ανάμεσα στα δοκάρια τα φύλλα τοποθετούνται παράλληλα. Τα φύλλα στο χείλος του διαζώματος ανάμεσα στις δοκούς έχουν προσανατολιστεί με δεξιά γωνία στις δοκούς. Οι μανδύες τύπου U των φύλλων FRP τοποθετήθηκαν στη βάση και στις πλευρές της δοκού, όπως φαίνεται στο Σχ.10.

#### 4.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

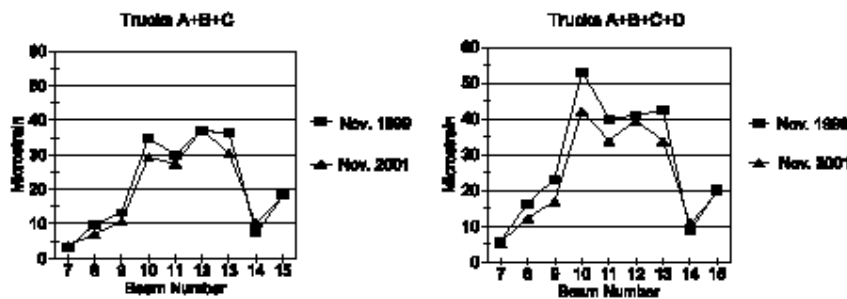
Οι δοκιμές φόρτισης έγιναν 2 χρόνια μετά την ενίσχυση. Στόχος ήταν να εξαχθούν συμπεράσματα για:

- την αποτελεσματικότητα ενίσχυσης με τα επικολλητά φύλλα ΙΟΠ και την αύξηση καμπτικών και διατμητικών τάσεων
- την σύνδεση μεταξύ των φύλλων και του σκυροδέματος
- την συμμετοχή της ενίσχυσης στην ανάληψη φορτίων. Οι δοκιμές φόρτισης έγιναν σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Χρησιμοποιήθηκαν 4 φορτηγά βάρους 196 kN (44 kips), όπως φαίνεται στα Σχ. 12 και Σχ.13.



Σχ. 12 & 13 Τυπικές θέσεις φορτηγών πάνω στη γέφυρα.

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα του Σχ. 14 οι τάσεις παρουσιάζουν σαφή μείωση που κυμαίνεται από 15-20%.

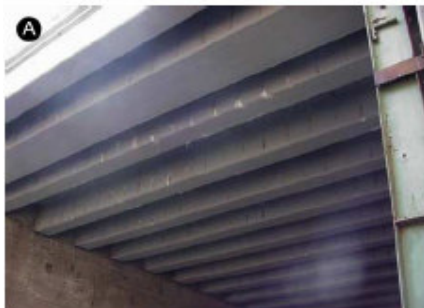


Σχ. 14 Διαγράμματα τάσεων.

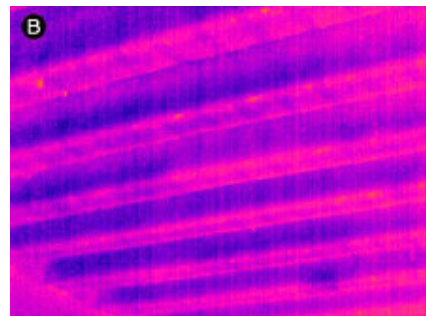
Όσο αφορά την ποιότητα σύνδεση των φύλλων ΙΟΠ και του σκυροδέματος δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή στο χρονικό διάστημα των 2 χρόνων μεταξύ της ενίσχυσης και των μετρήσεων. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την θερμογραφική ανάλυση που έγινε, Σχ. 15.

Συμπερασματικά, με την ενίσχυση της γέφυρας παρατηρήθηκε:

- μείωση των καμπτικών και διατμητικών τάσεων
- η σύνδεση των φύλλων FRP και του σκυροδέματος σε χρονικό διάστημα 2 ετών δεν παρουσίασε φαινόμενα ‘χαλάρωσης’.



A) Φωτογραφία.



B) Θερμογραφική ανάλυση.

Σχ.15



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Δομικά Υλικά**  
Αθ. Τριανταφύλλου, σελ.122-126 και 418-420, 4<sup>η</sup> έκδοση, 2001
- 2. Scour : No 1 Destroyer of Bridges**  
Jean-Luis Briaud, Περιοδικό Geostrata, 2004
- 3. Σύμμικτες Κατασκευές**  
Αθ. Τριανταφύλλου, σελ.173-177, 2004
- 4. Strengthening of a bridge pier capbeam using bonded FRP composite plates**  
Osman Hag-Elsafi, Ryan Lund, Sreenivas Alampalli, περιοδικό Composite Structures, 57,p.393-403, 2002
- 5. In-service evaluation of a reinforced concrete T-beam bridge FRP strengthening system,**  
Osman Hag-Elsafi, Sreenivas Alampalli, Jonathan Kunin,περιοδικό Composite Structures 64,p.179-188, 2003
- 6. Field performance of FRP bridge repairs,**  
J.M. Stallings,J.W. Tedesco, M. El- Mihilmy,M. McCauley, Journal of bridge Engineering,p.107-113, May 2000