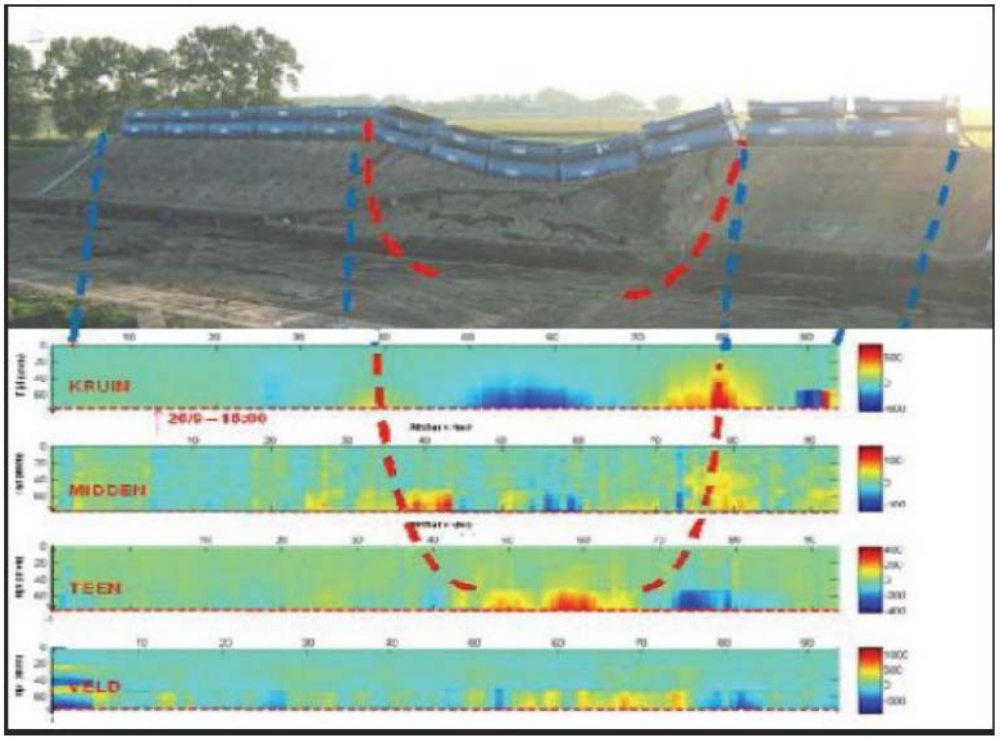
Brillouin – Παράδειγμα Εφαρμογής: Ευστάθεια Πρανούς

Προ-αστοχίας

- Ζώνη αστοχίας εντοπισμένη από μεγάλες παραμοφώσεις
- Μια αδύναμη περιοχή στο ανάχωμα ήταν δυνατόν να διακριθεί κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου εκσκαφής (42 ώρες πριν την αστοχία παρουσιάζονται στο σχήμα δεξιά)

Μετά-αστοχίας



Σύγκριση Οπτικών Τεχνικών

	Fiber Bragg Gratings (FBG)	Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA)	Rayleigh Optical Frequency Domain Reflectometry (ROFDR)
Technique	**FBG (Micron Optics Inc., 2012 & FBGS, 2015)**	**BOTDA (Omnisens, 2014)**	**ROFDR (Luna Innovation Inc., 2014)**
Max. sensing length	> 1000 m	> 1000 m	< 40 m
Measurement repeatability	± 0.1-10 με	± 1 με	± 5 με
Spacing of measurement (i.e. spatial resolution)	10 cm (practically)	0.5 – 1 m	1.25 mm
Max. number of measurement points	10 – 20 (practically)	> 1000	> 1000
Unit price (approximate USD)	$15,000 – $125,000	$100,000 - $250,000	$60,000 – $150,000
Sensor price (approximate USD)	~ $300 - $1000 per sensor	$0.10 per meter of fiber	$0.10 per meter of fiber
Max. number of connected sensors	> 10	2	1

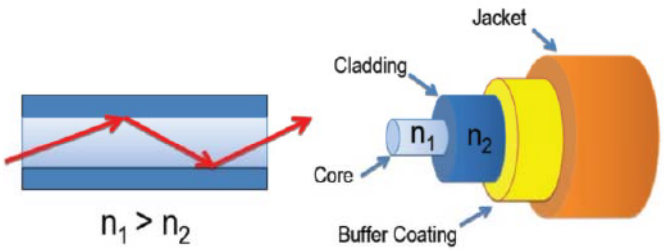
25,000 micro strain

Διανεμημένη Οπτική Ανίχνευση Καταπόνησης

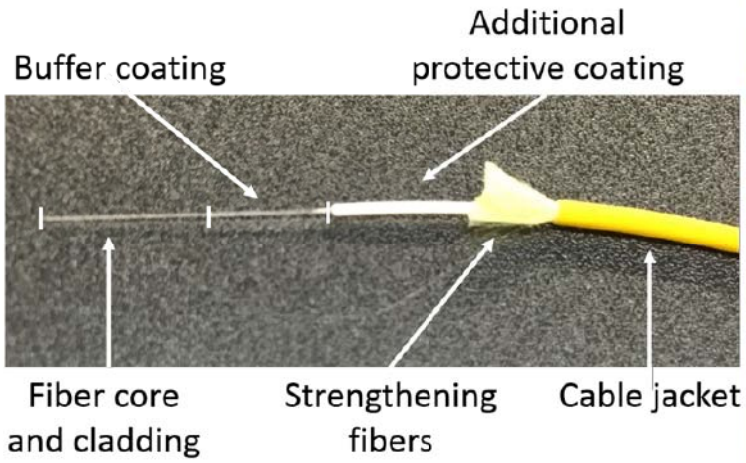
- Uses standard, low-cost, single mode optical fiber as the transducer and the lead
- Optical sensors are small (easy to embed/surface mount)
- Intrinsically safe and immune to EMI
- Very low signal loss (long lead lengths)
- Captures strain every 0.55mm along the optical fiber (one sensor captures an array of measurement points)

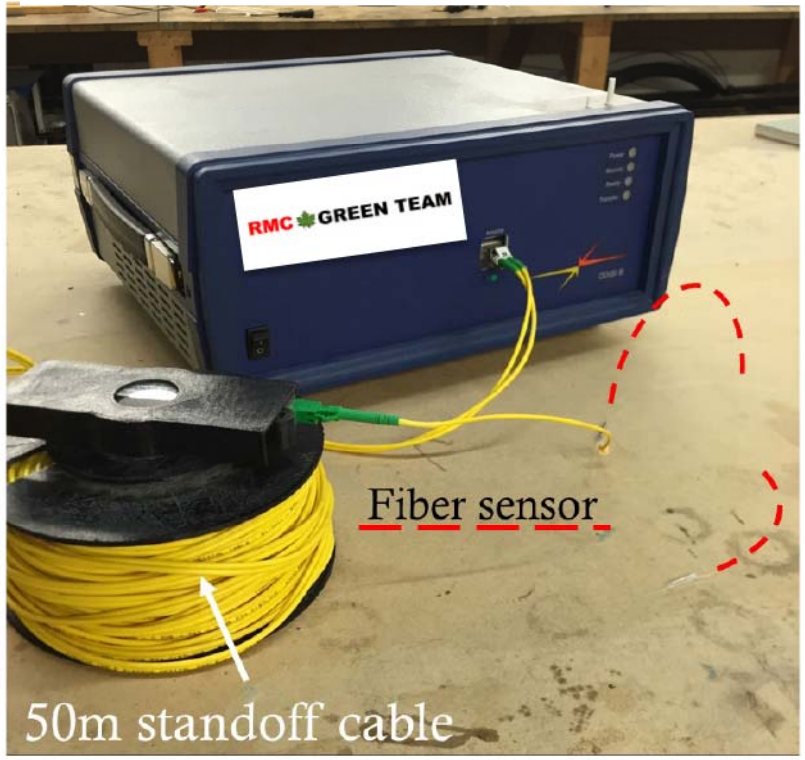
Διανεμημένη Οπτική Ανίχνευση με βάση τη διασπορά Rayleigh

- Χρήση τυπικής, χαμηλού κόστους, μονή ίνα ως μετασχηματιστή και lead
- Μικροί οπτικοί αισθητήρες (εύκολη ενσωμάτωσητοποθέτηση)
- Ιδιαίτερα ασφαλής και ανεπηρέαστη από EMI
- Πολύ χαμηλή απώλεια σήματος (long lead lengths)
- Καταγράφει καταπόνηση κάθε 0.55mm κατά μήκος της οτικής ίνας (ένας αισθητήρας καταγράφει ένα πλήθος μετρούμενων σημείων)

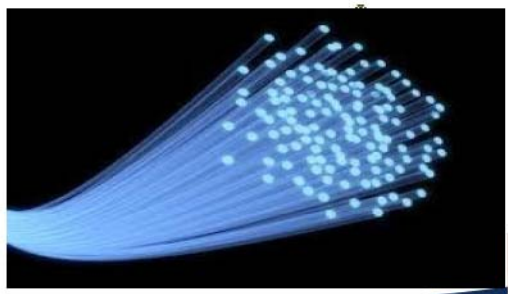


Σχηματική απεικόνιση οπτικής ίνας (National Instruments, 2011)

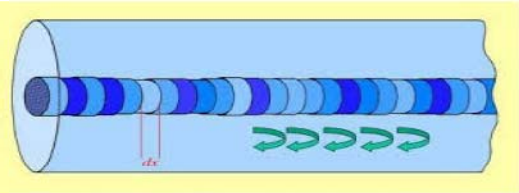




Συνεχής Παρακολούθηση Καταπόνησης



Διανεμημένη Οπτική Ανίχνευση (DOS)

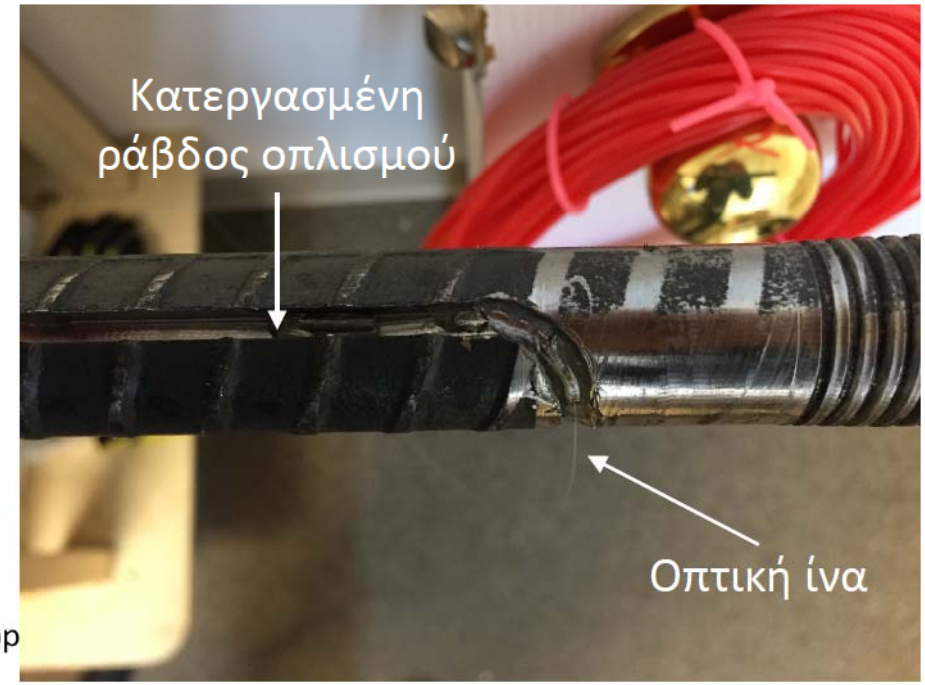


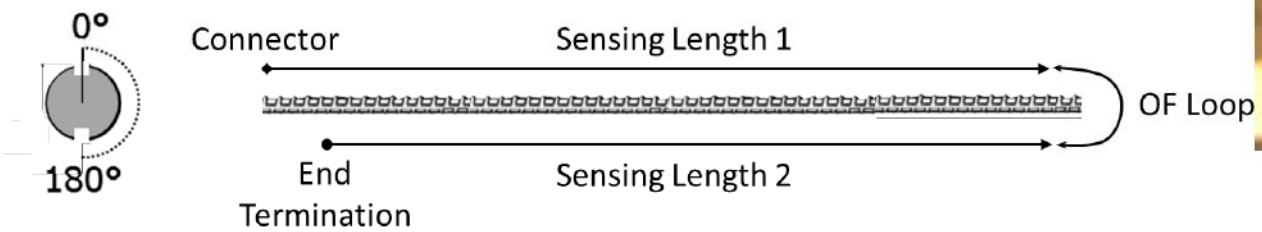
- Παρακολουθεί την επιστροφή
- Βάσει των Raman, Brillouin, and Ray-leigh ανάλυση της επιστρεφόμενης διαποράς κατά μήκος της οπτικής ίνας
- Ακτίβεια εύρους ±10με
- Βασισμένη σε χαμηλού κόστους, τυπική ίνα τηλεπικοινωνιών
- Ένας μετασχηματιστής για χιλιάδες σημεία μετρήσεων

- monitors back-scatter
- based upon Raman, Brillouin, and Ray-leigh analyze back-scatter over the entire length of fiber
- Operational accuracy is within ±10με
- Is based on low-cost, standard telecom fiber
- One transducer for thousands of measurement points

Διανεμημένη Οπτική Ανίχνευση

- Αντιδιαμετρικές εσωχές κατά μήκος της ράβδου οπλισμού
- Η οπτική ίνα ενσωματώνεται και εγκλωβίζεται με την χρήση εποξικής ρητίνης



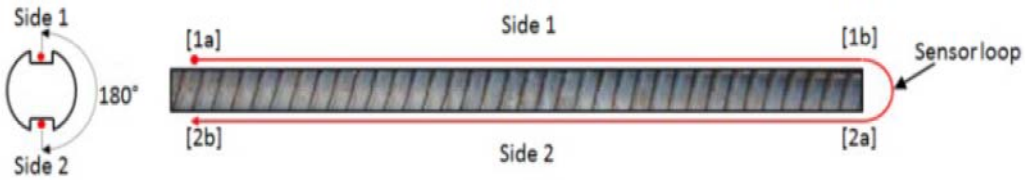


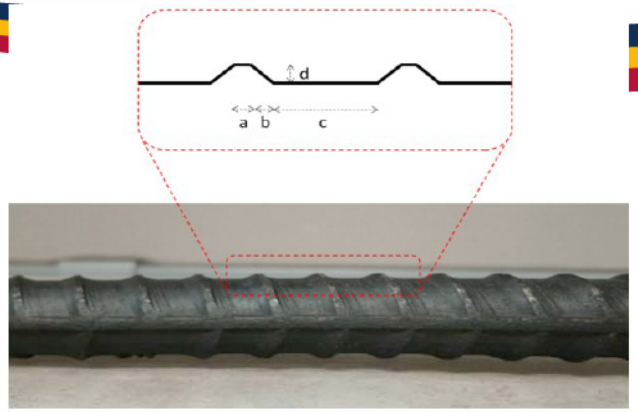
Προετοιμασία Δείγματος

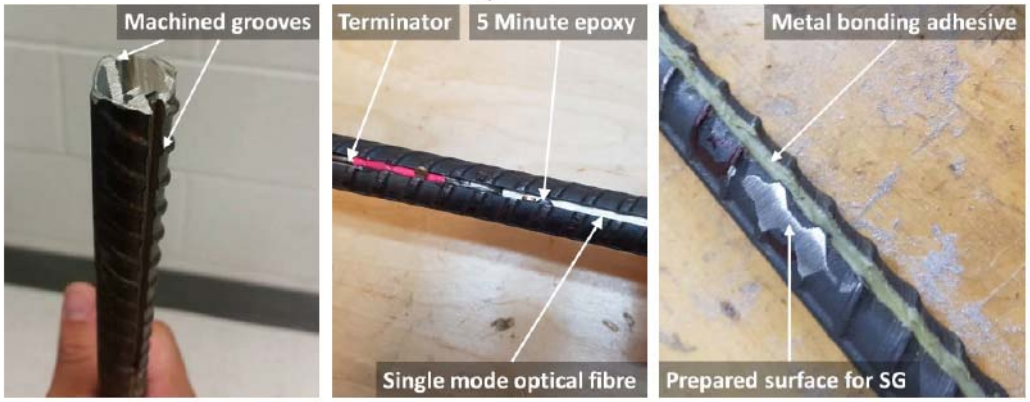
- Έλεγχος πλήρως ενσωματωμένων αγκυρίων υπό συνθήκες αξονικής φόρτισης στο εργαστήριο του RMC

- No. 6 Grade 60 δείγματα ράβδου οπλισμού εφοδιασμένα με DOS αισθητήρες εντός αντιδιαμετρικών εσωχών

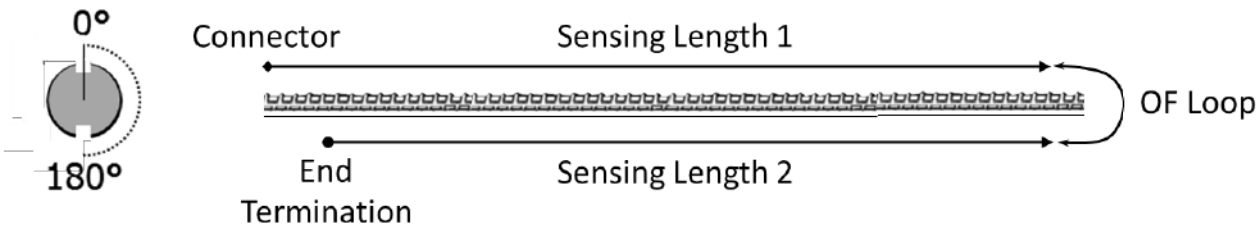
- Η οπτική ίνα και το μέταλλο ενώνονται με τη χρήση μεταλλικής κόλλας







Προετοιμασία Δείγματος



D-Bolt

Αγκύριο τριβής

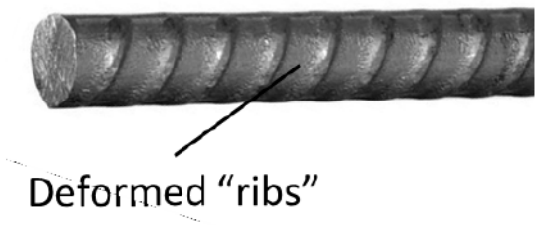
Καλωδιακό αγκύριο επτά σκελών

Πλήρως ενεματωμένη υποστήριξη

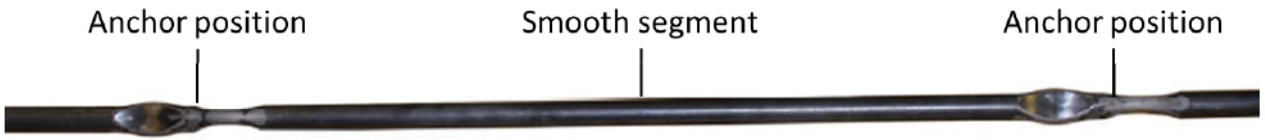
- Τα αγκύρια είναι στερεές παραμορφωμένες ράβδοι
- Τα καλωδιακά αγκύρια αποτελούνται από 7 μεταλλικά σκέλη (1 κεντρικό, ίσιο σκέλος και 6 εξωτερικά, περιτυλιγμένα σκέλη)
- Η φόρτιση μεταφέρεται στην διεπιφάνεια αγκυρίου-ενέματος μέσω:
  1) Συγκόλησης
  2) Μηχανικού αλληλοκληδώματος
  3) Τριβής

- Load is transferred at the support to grout interface through:
  1) Adhesion
  2) Mechanical Interlock
  3) Friction

Rebar



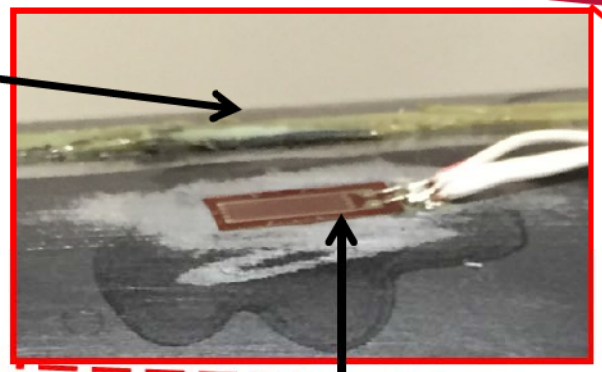
Cable bolt



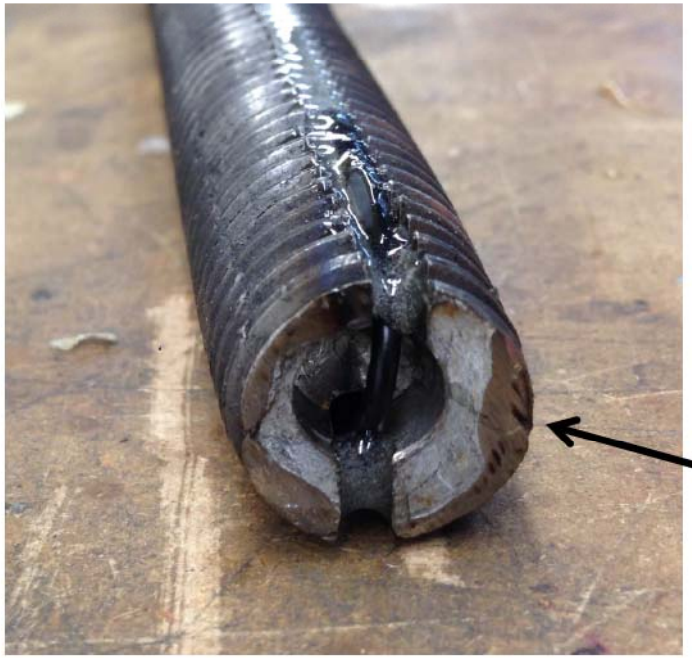
D-Bolt

Προετοιμασία Δείγματος

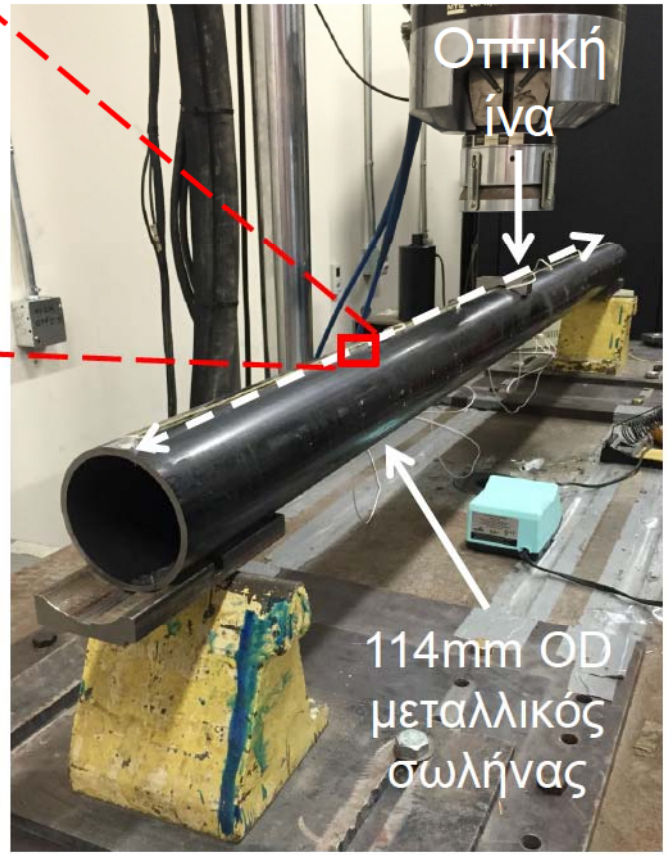
Οπτική ίνα τοποθετημένη επί επιφανείας



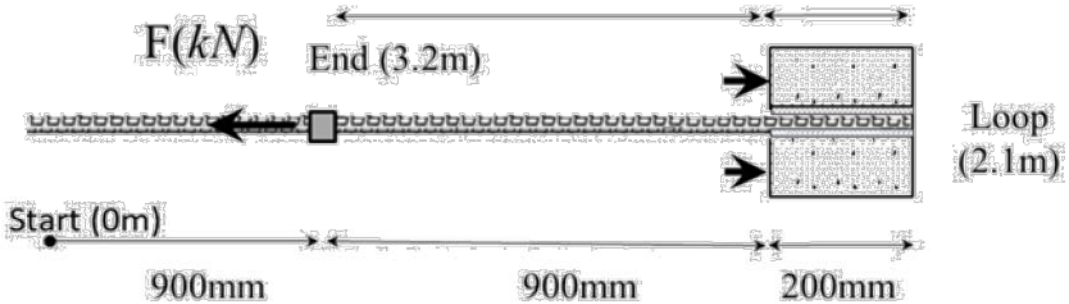
Μετρητής κατοπόνησης (προς επιβεβαίωση της DOS)



Οπτική ίνα ενσωματωμένη και εγκλωβισμένη στις εσωχές



Δοκιμή Αξονικής Απόκρισης: Ράβδος Οπλισμού

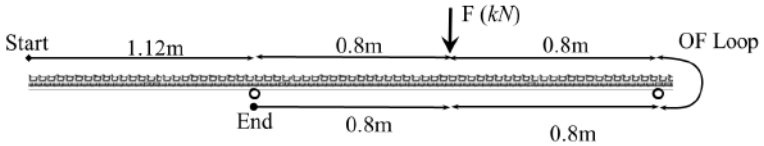


- 200mm τμήμα οπλισμού ρητίνης/μεταλλικού σωλήνα ενεματωμένο σε 31mm προσχεδιασμένη γεώτρηση
- Βρόγχος οπτικών οργάνων στο τέλος του ενεματωμένου τμήματος

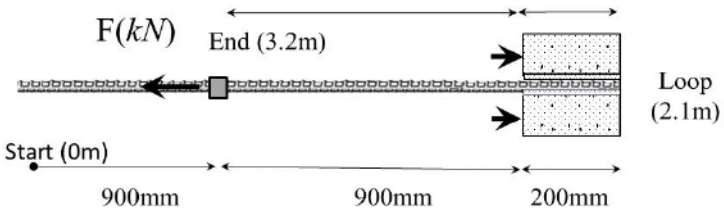
Όμοια με Benmokrane et al. (1995)

Επιλεγμένες Διατάξεις Δοκιμών

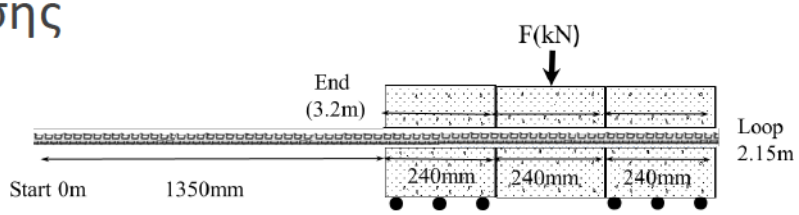
- Συμμετρική Σημειακή Φόρτιση Κάμψης



- Αξονική έλξη (Μικρό Ενσωματωμένο Μήκος)



- Διάταξη Διπλής Διάτμησης



Επιβεβαίωση της Προτεινόμενης Παρακολούθησης

Παρουσίαση της λύσης για:

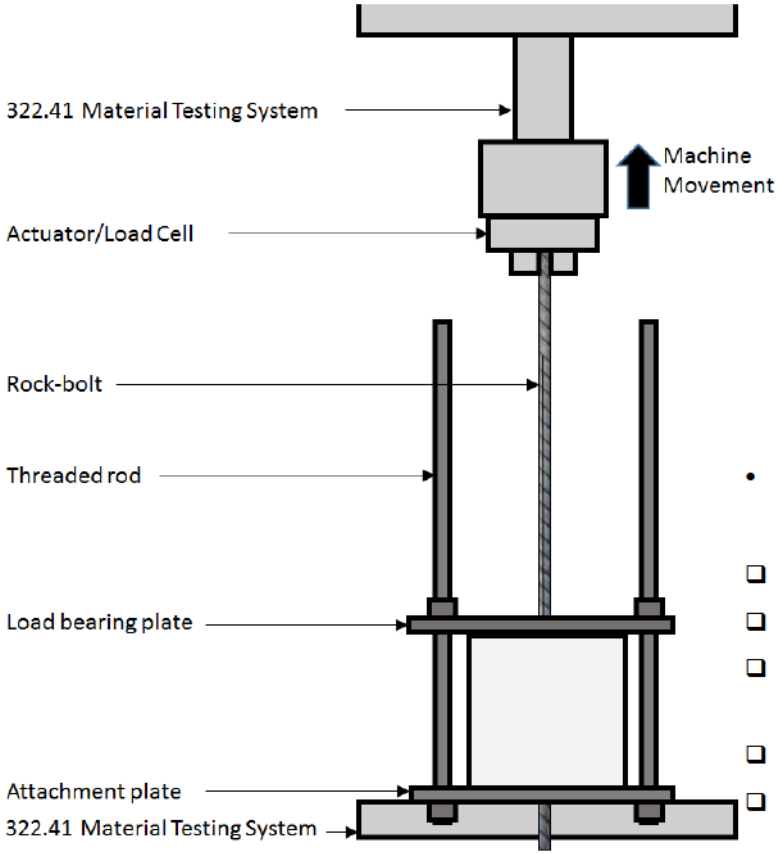
- Καταγραφή του διανύσματος εγκάρσιας καταπόνησης (μέγεθος και φορά)
- Διάκριση ομοαξονικών και εγκάρσιων συνιστωσών
- Καταγραφή διατμητικής συμπεριφοράς

Συμμετρική κάμψη

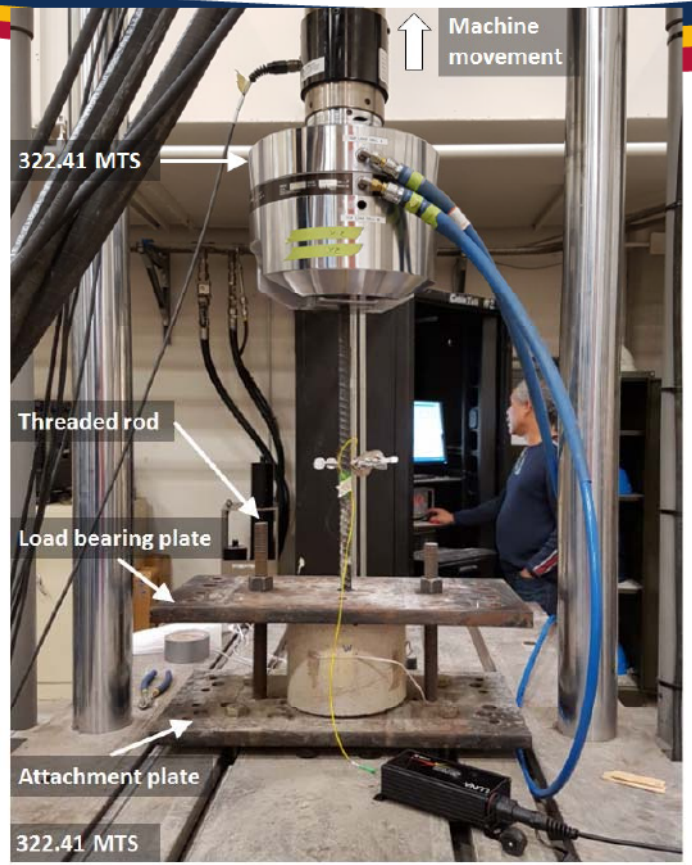
Συνδυασμένη αξονική και καμπτική φόρτιση

Διάταξη διπλής διάτμησης

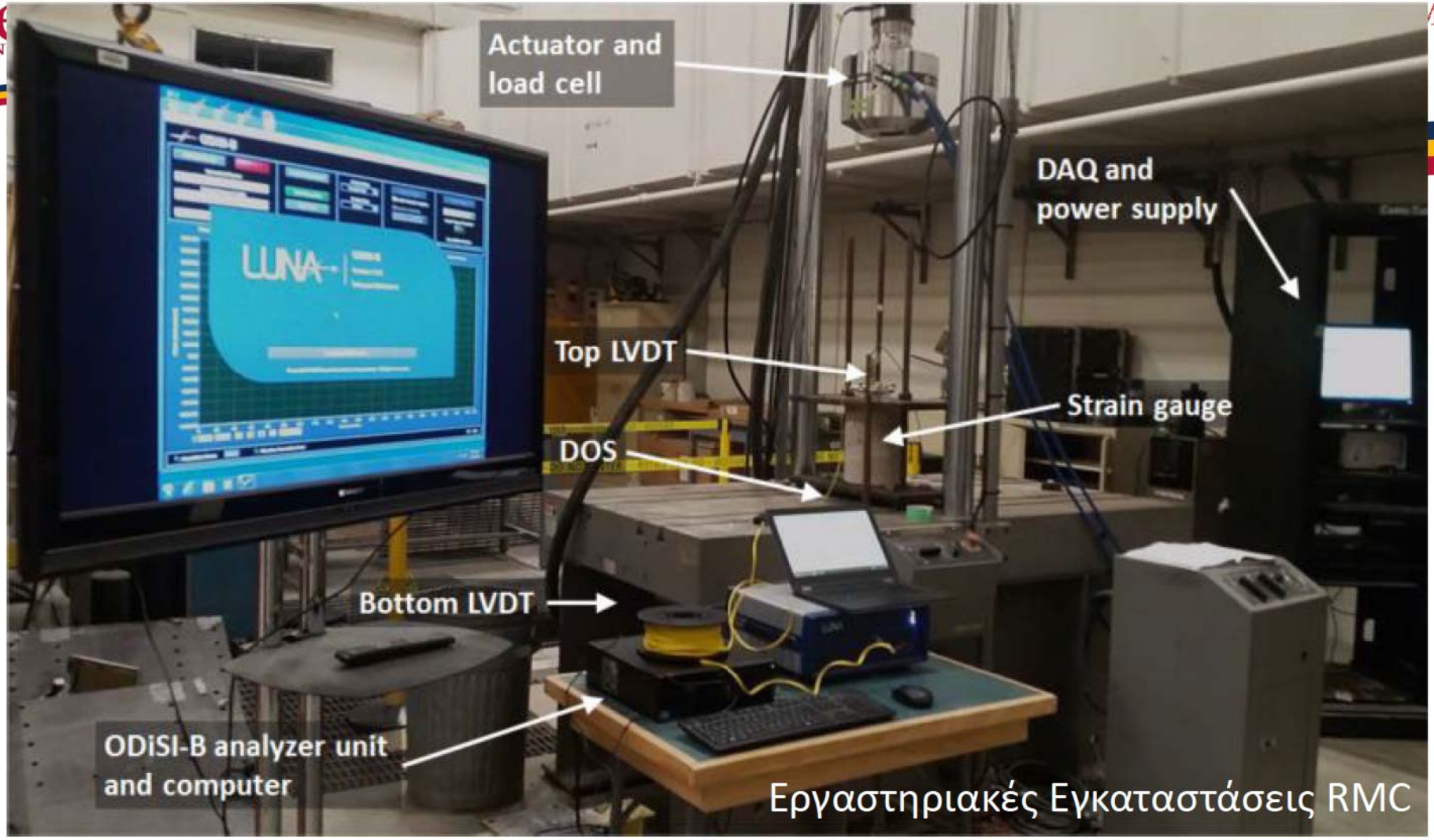
Συσκευή Δοκιμής Έλξης



- <u>Παράμετροι Δοκιμής</u>:
  - Ράβδος (19.05 mm Δ.)
  - Σκυρόδεμα (0.40 w:c)
  - Κύλινδρος σκυροδέματος 35 MPa
  - 31 mm διάμετρος γεώτρησης
  - Ενσωματωμένο μήκος που κυμάινεται έως 183 mm

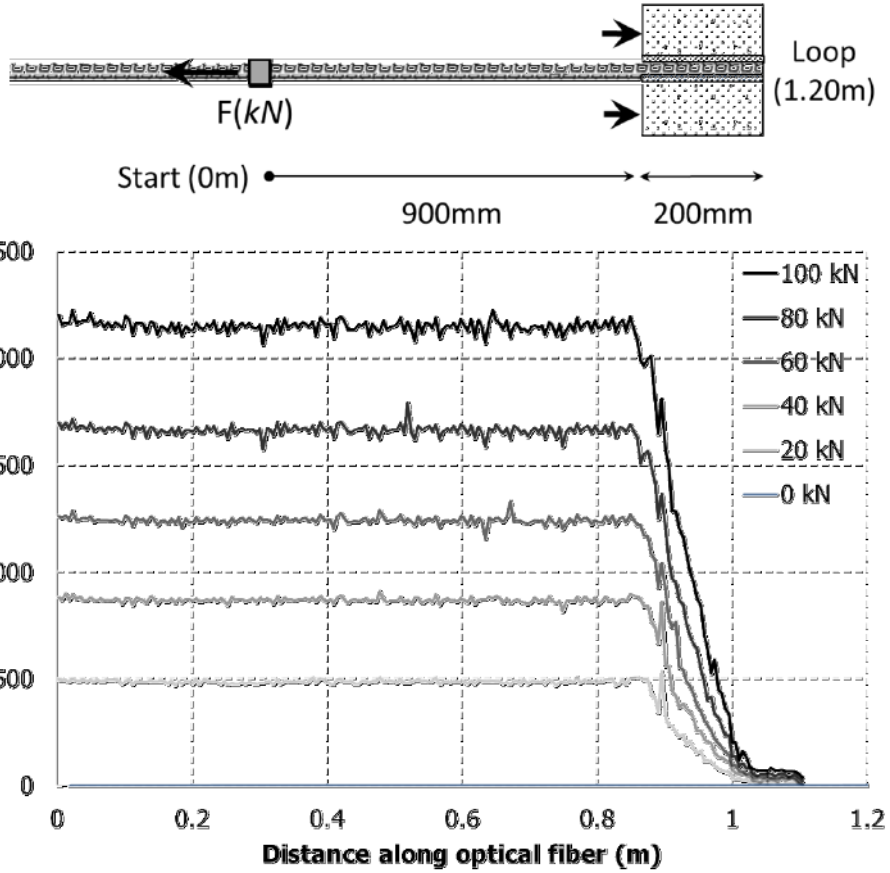


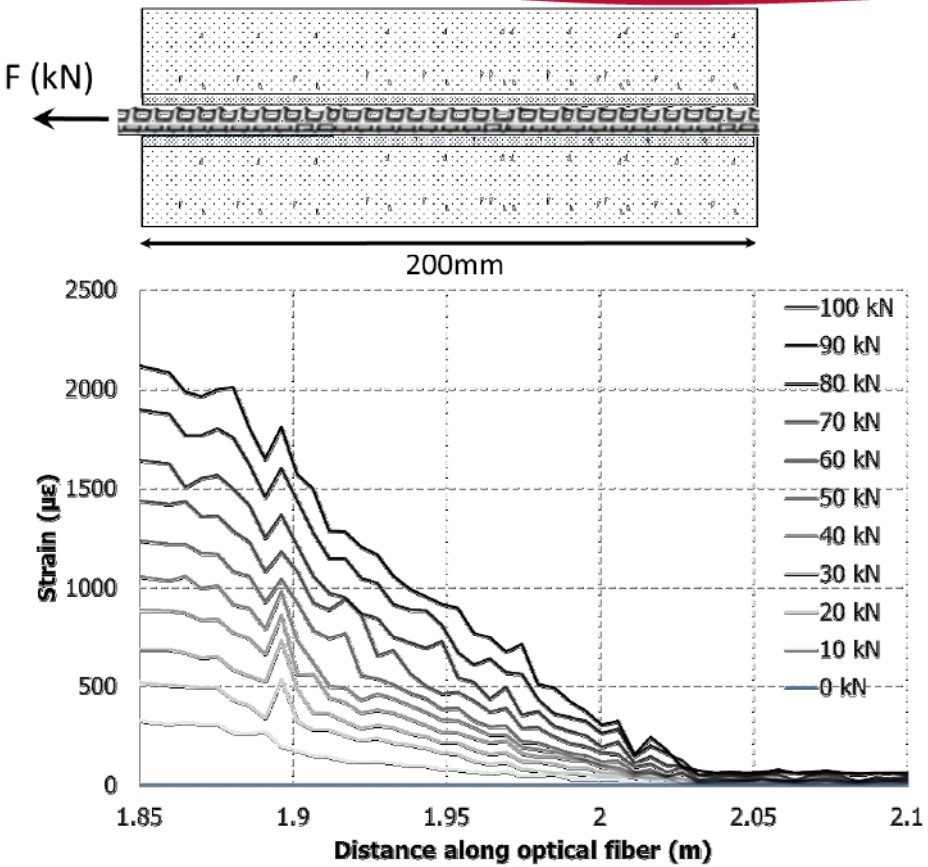
Συσκευή Δοκιμής Έλξης



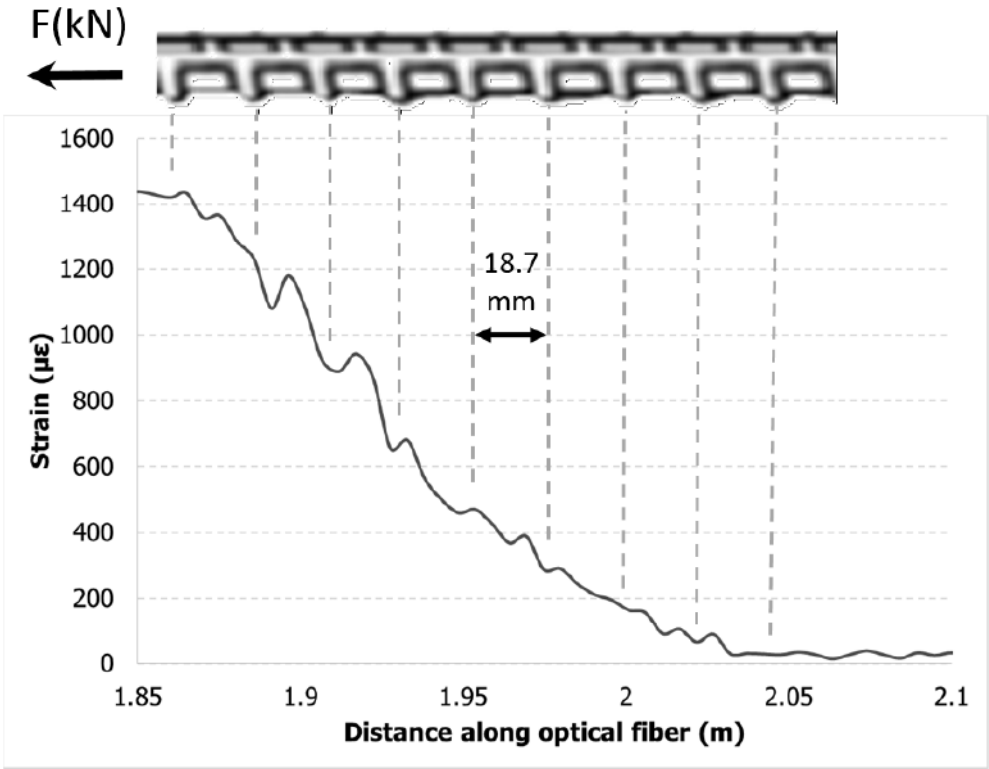
Εργαστηριακές Εγκαταστάσεις RMC

Δοκιμή Αξονικής Απόκρισης: Ράβδος Οπλισμού





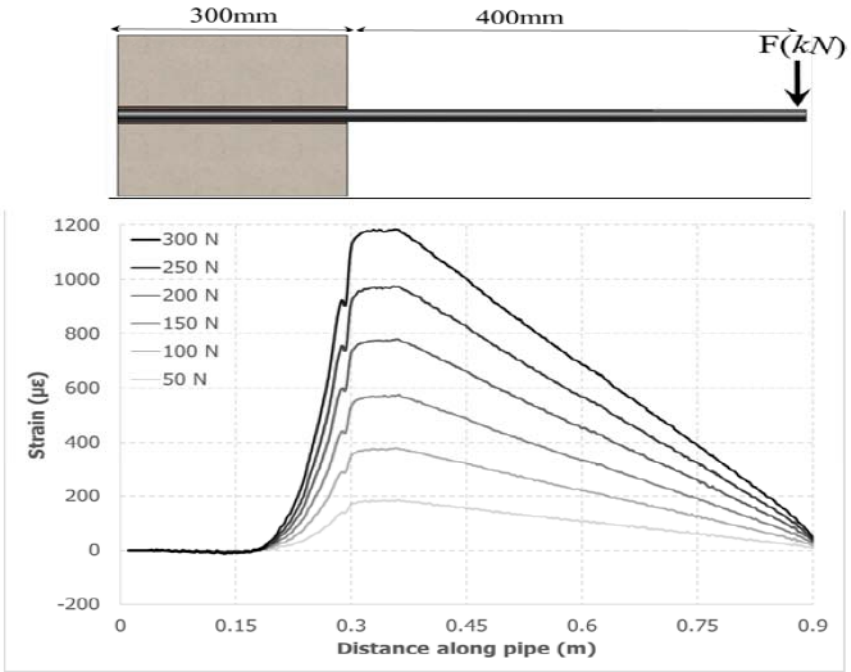
Δοκιμή Αξονικής Απόκρισης: Ράβδος Οπλισμού



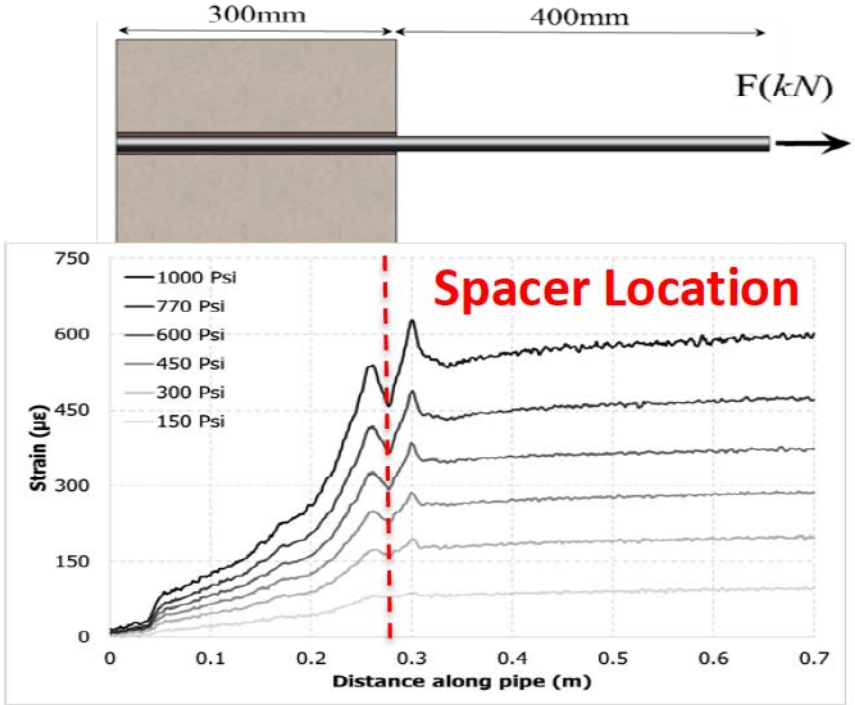
- Οι περιοδικές διαταράξεις ταιριάζουν με τις υποδιαιρέσεις της ράβδου.
- Ανταποκρίνονται στην επίδραση της αγκύρωσης των προεξοχών της ράβδου στο ένεμα.

Δοκιμή Επιμήκους Υποστήριξης

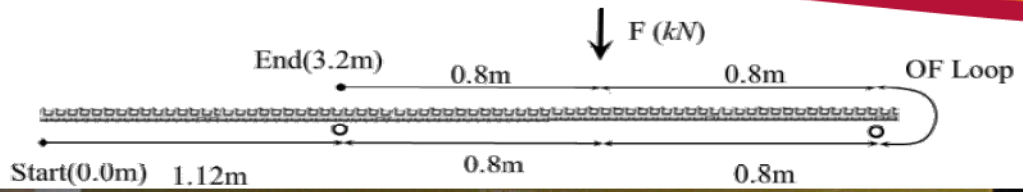
Cantilever loading – μέση απόλυτη καταπόνηση κατά μήκος της κορυφής και της βάσης τμήματος μεταλλικού σωλήνα



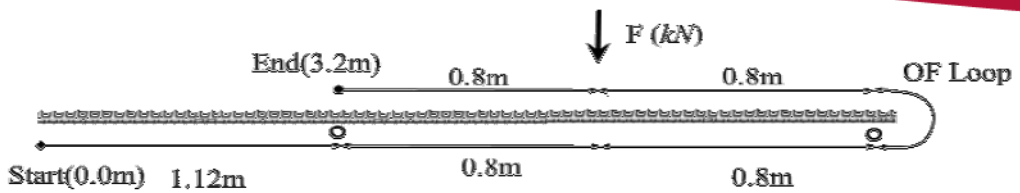
Αξονική έλξη – μέση καταπόνηση των αντίθετων πλευρών μεταλλικού σωλήνα

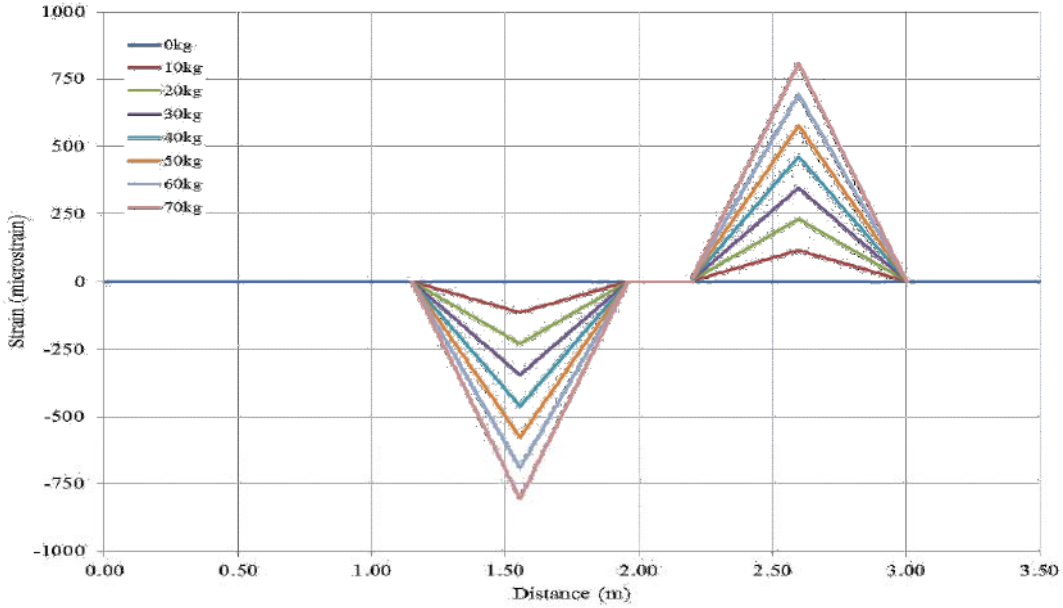


Συμμετρική Σημειακή Φόρτιση

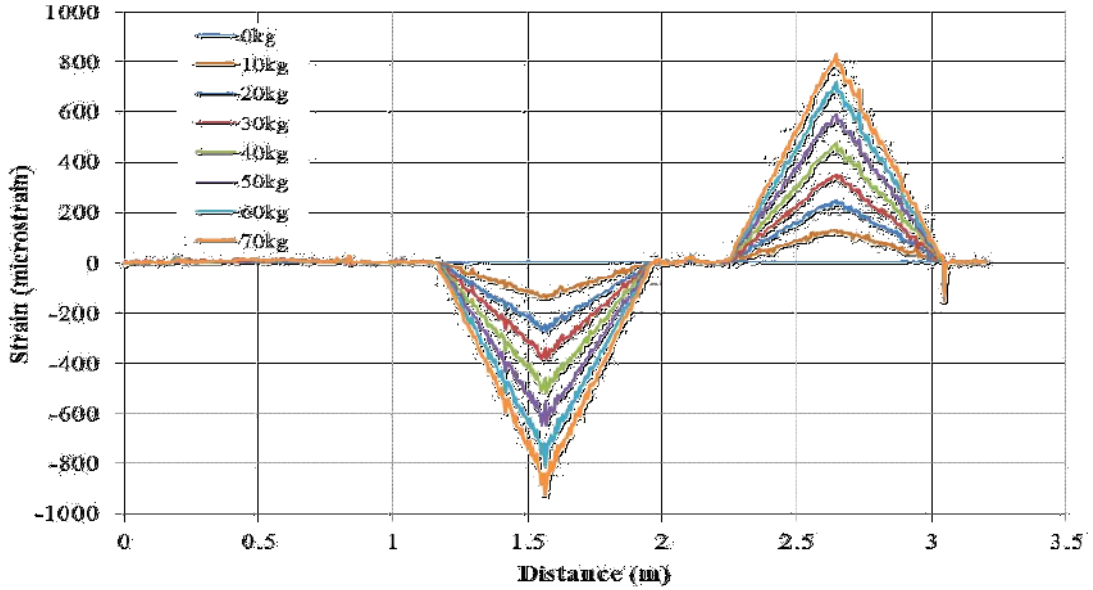


Συμμετρική Σημειακή Φόρτιση





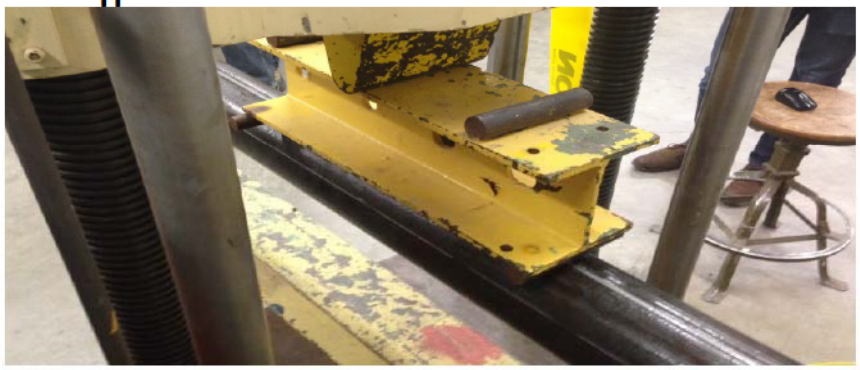
Θεωριτική Αποτύπωση



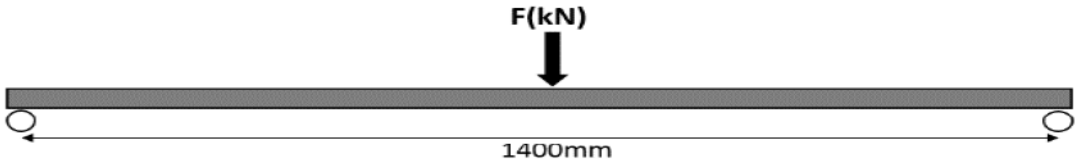
Πειραματική Αποτύπωση

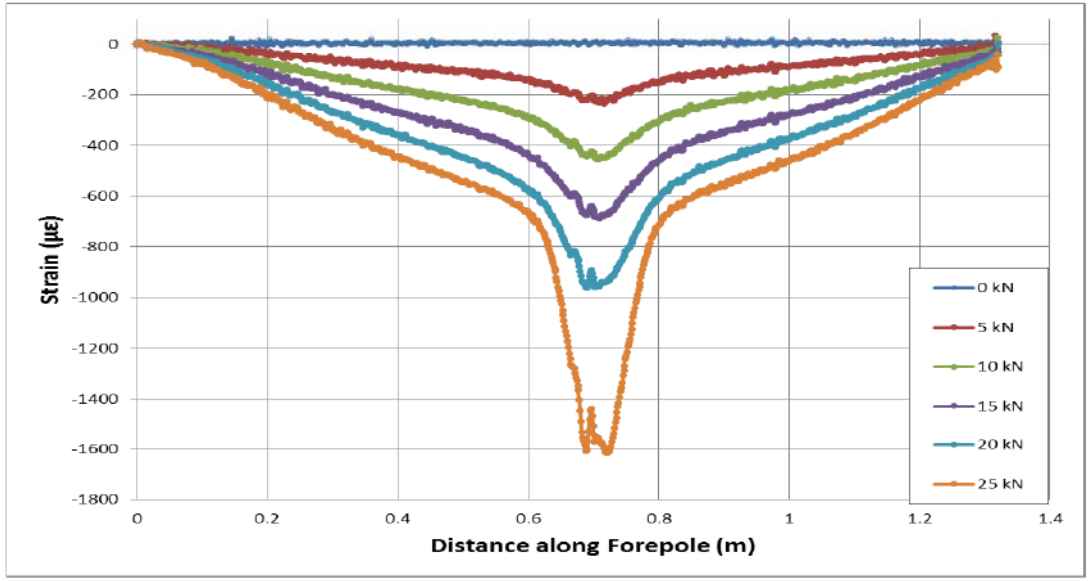
Δοκιμή σε Δοκούς Προπορείας

- Χρήση μεταλλικού σωλήνα 4 inch Schedule 40 (OD = 114mm, wall = 6mm)
- Αισθητήρας εγκατεστημένος εντός εσοχών
- Φόρτιση κάμψης Τριών & Τεσσάρων σημείων

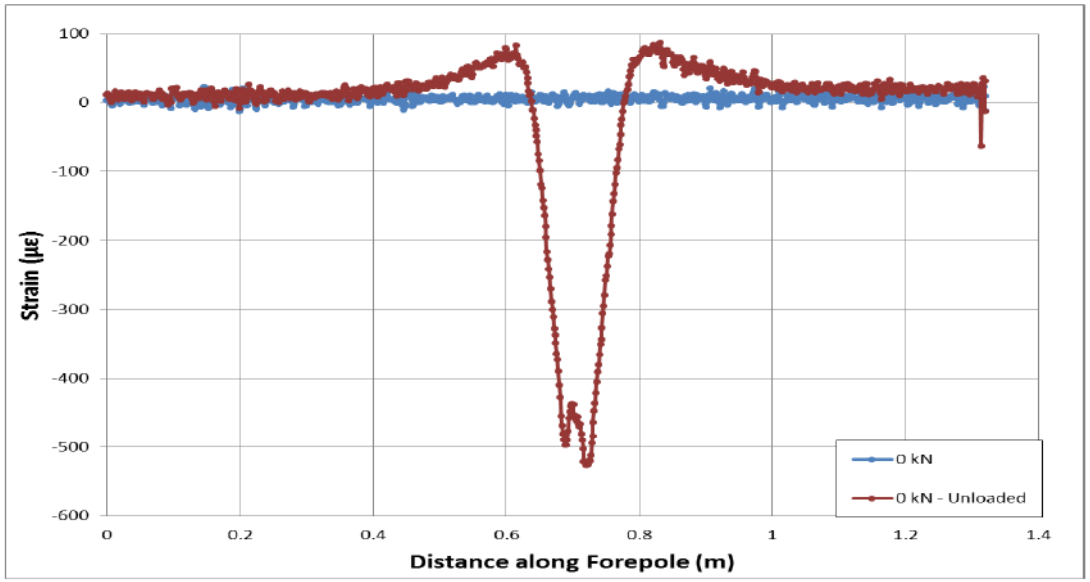


Δοκοί Προπορείας: Φόρτιση Κάμψης 3 σημείων



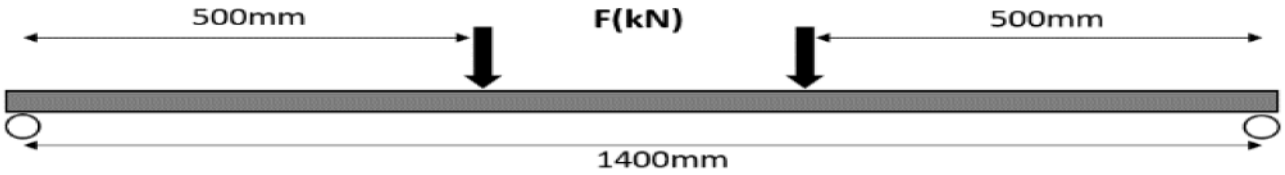


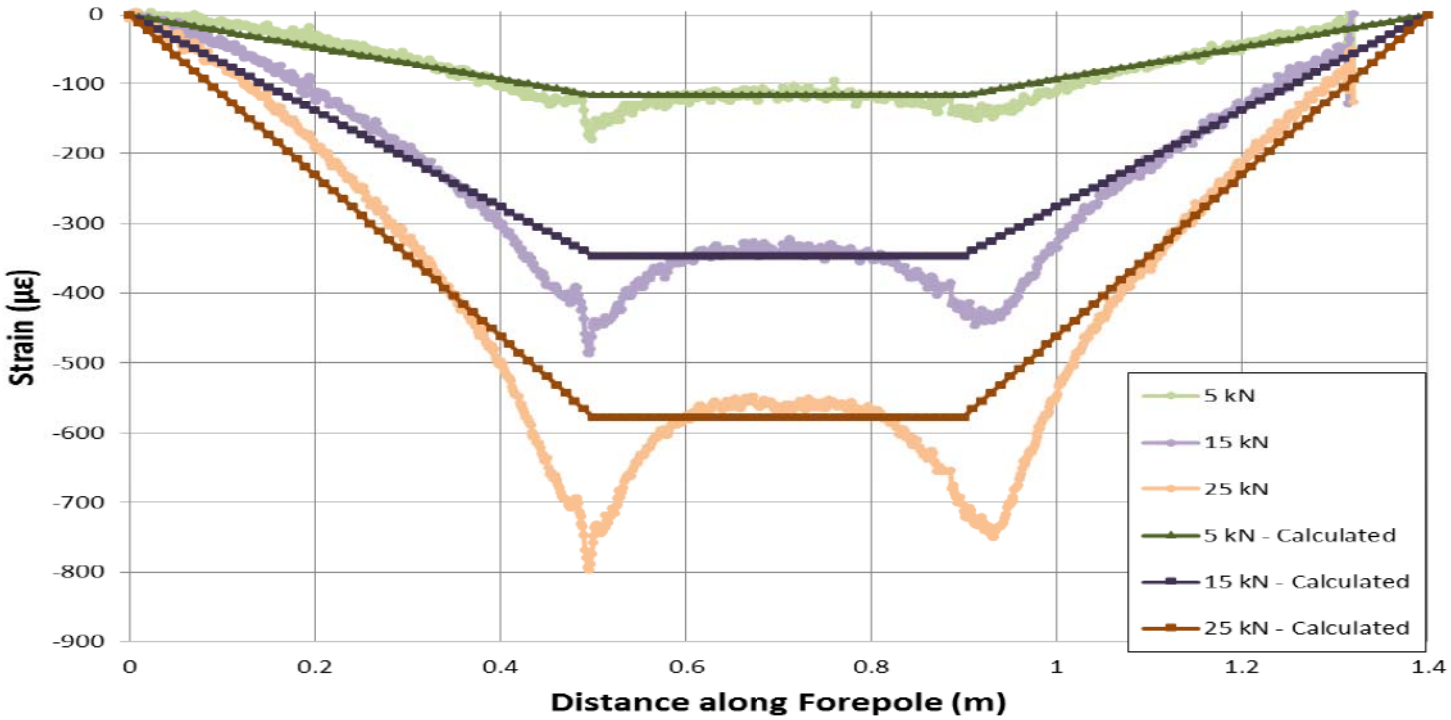
Πειραματική Αποτύπωση



Υπολλειματική Καταπόνηση

Δοκοί Προπορείας: Φόρτιση Κάμψης 4 σημείων

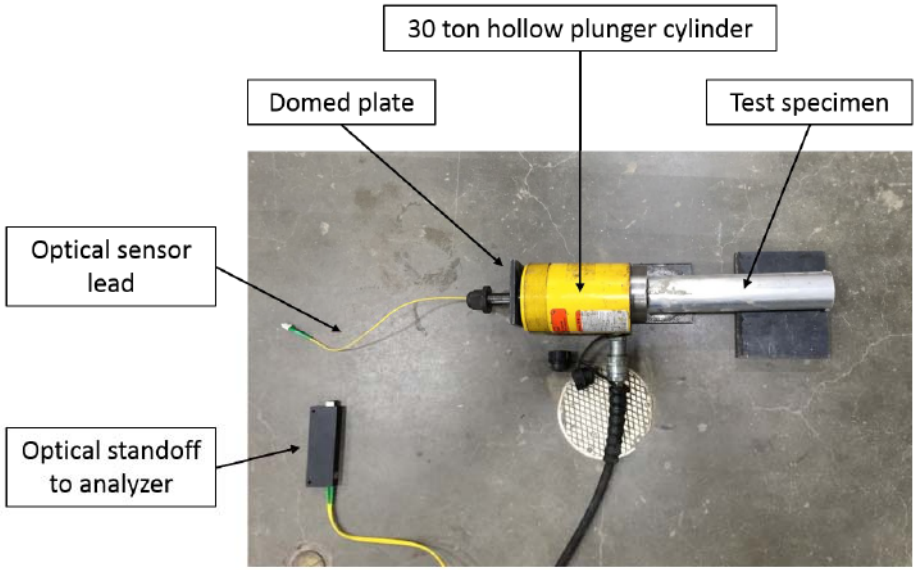


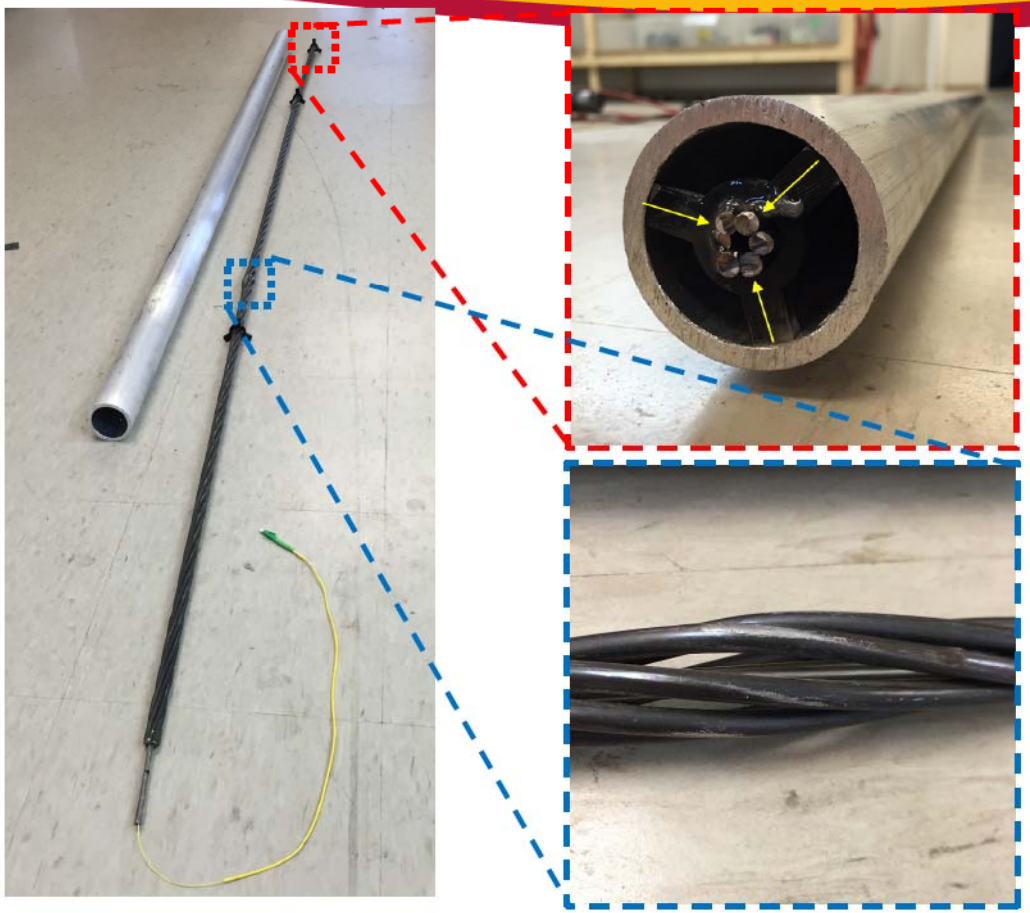


Επαλήθευση των Οπτικών Αγκυρίων

Παρουσίαση της λύσης για:

- Καταγραφή των εξαιρετικά μεταβαλλόμενων προφίλ καταπόνησης σε καλωδιακά και D-Αγκύρια υπό αξονική φόρτιση
- Μέτρηση της προοδευτικής αστοχίας καλωδιακών αγκυρίων με αυξανόμενη αξονική φόρτιση
- Διάκριση του μηχανισμού αγκύρωσης των D-Αγκυρίων



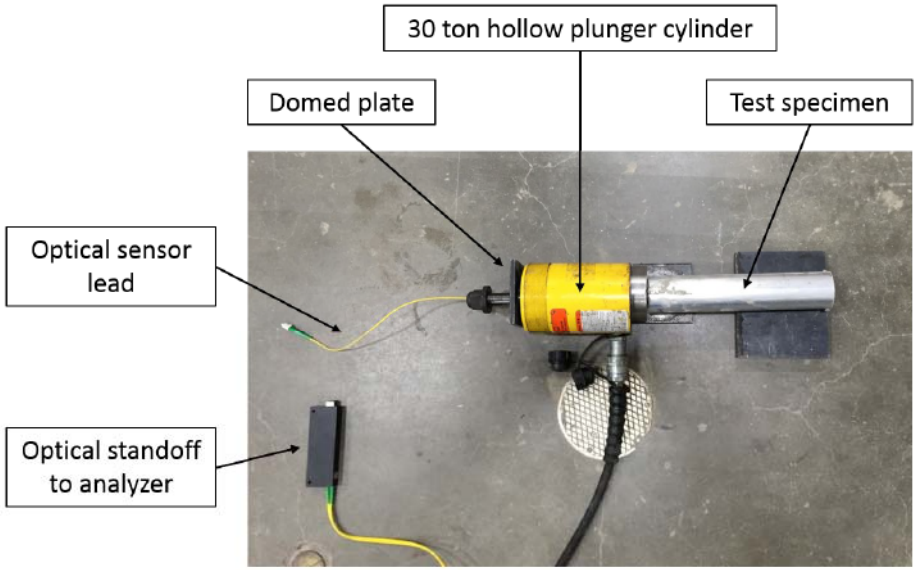


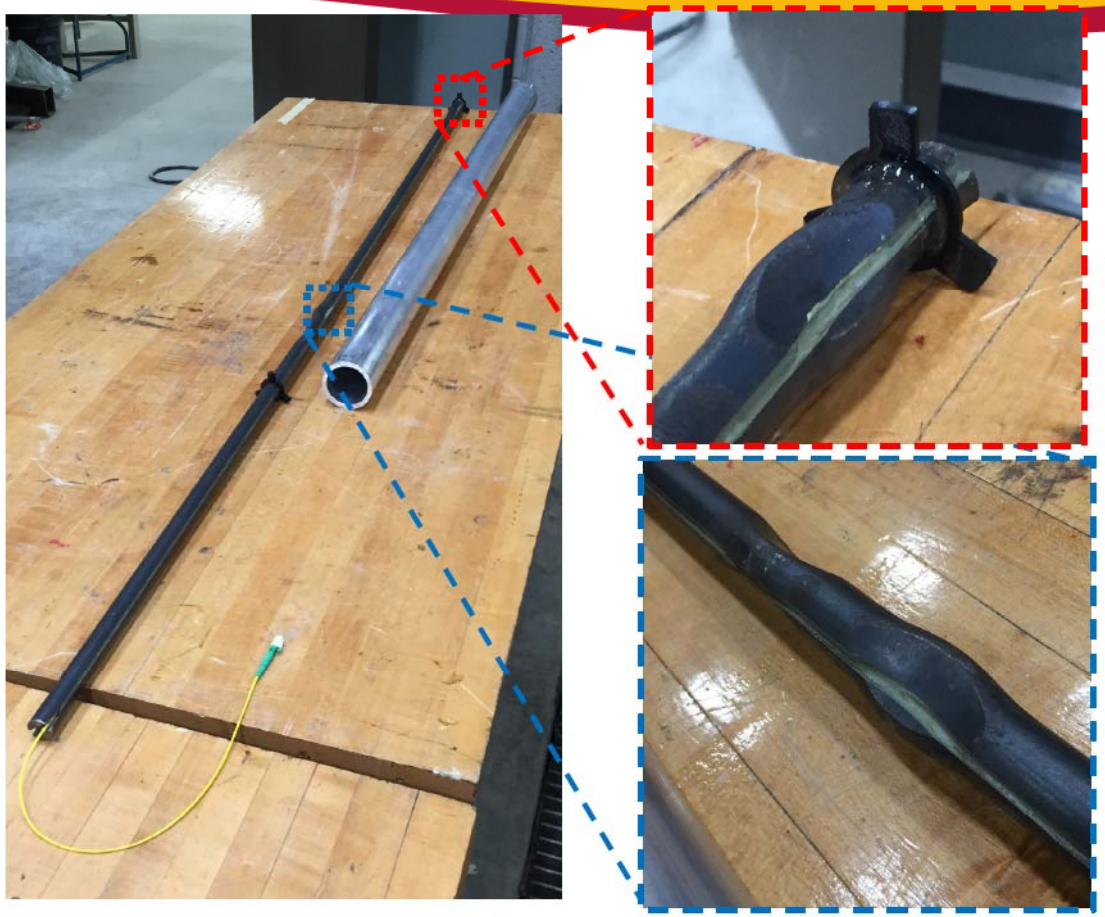
Επαλήθευση των Οπτικών Αγκυρίων

Capture the highly variable strain profile of cable bolt and D-Bolt elements under axial load

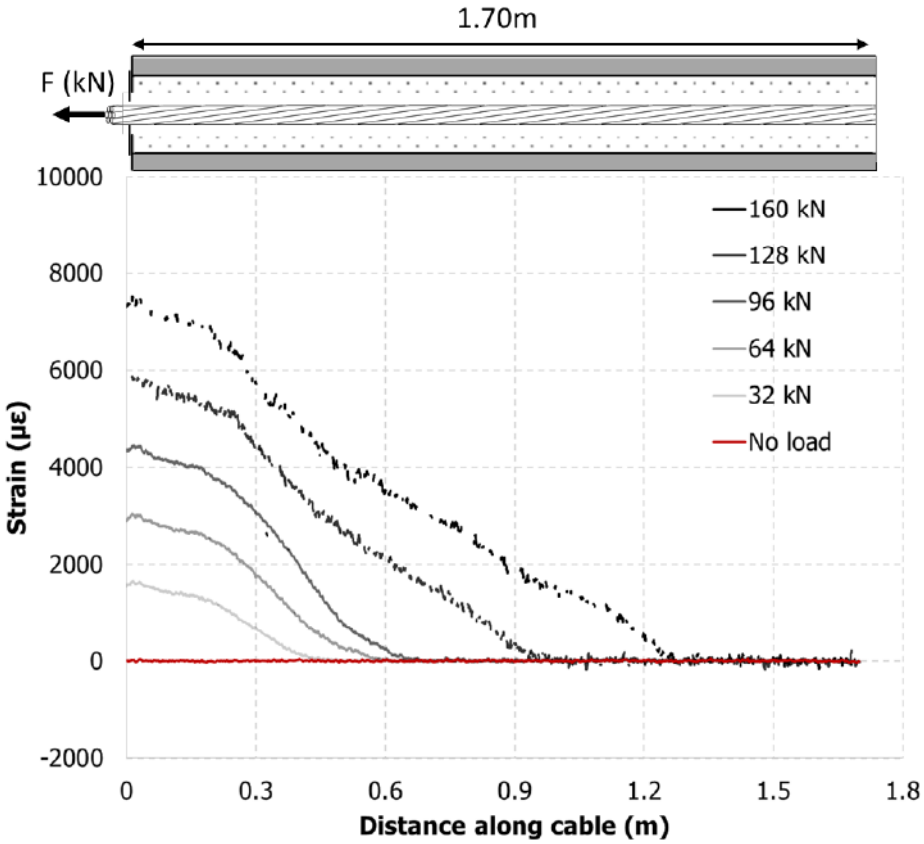
Παρουσίαση της λύσης για:

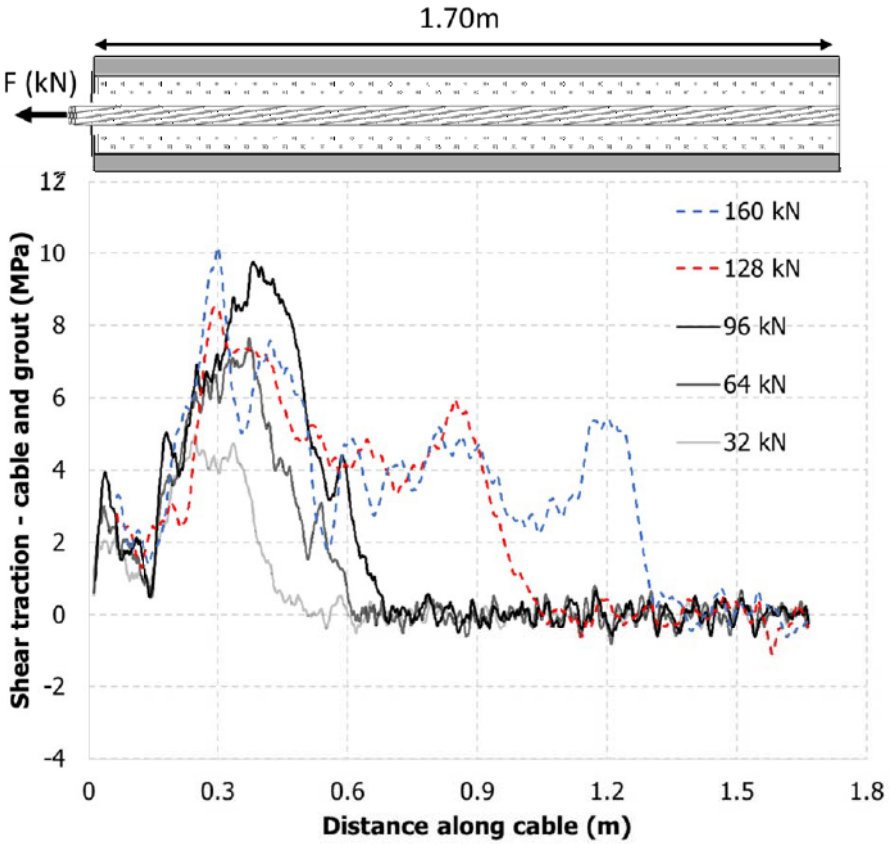
- Καταγραφή των εξαιρετικά μεταβαλλόμενων προφίλ καταπόνησης σε καλωδιακά και D-Αγκύρια υπό αξονική φόρτιση
- Μέτρηση της προοδευτικής αστοχίας καλωδιακών αγκυρίων με αυξανόμενη αξονική φόρτιση
- Διάκριση του μηχανισμού αγκύρωσης των D-Αγκυρίων





Αξονική Απόκριση Καλωδιακών Αγκυρίων





<u>Αριστερά:</u>
Κατανομή καταπόνησης

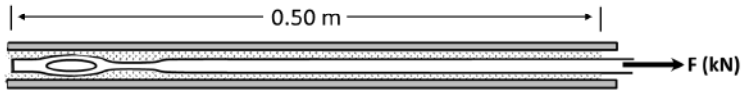
<u>Δεξιά:</u>
Κατανομή διάδοσης της διάτμησης

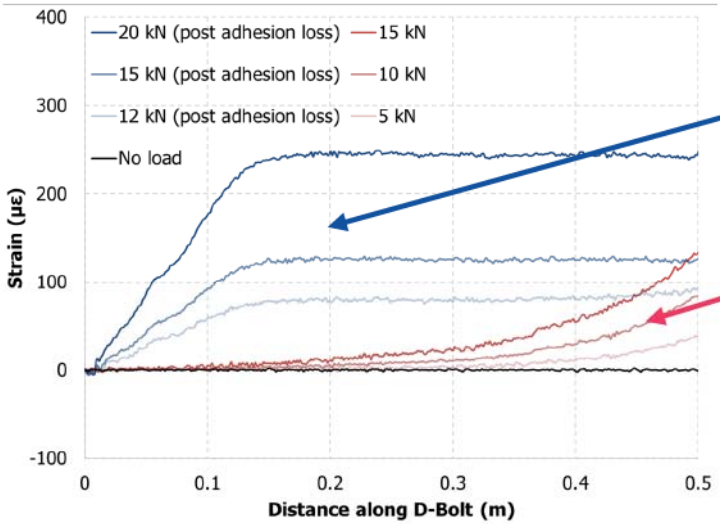
$$\tau_x = \frac{r_b E}{2}\left(\frac{\varepsilon_x^n - \varepsilon_x^{n-1}}{x^n - x^{n-1}}\right)$$

Δοκιμή Αξονικής Απόκρισης: D-bolt

Αξονική έλξη D-bolt

Προφίλ καταπόνησης

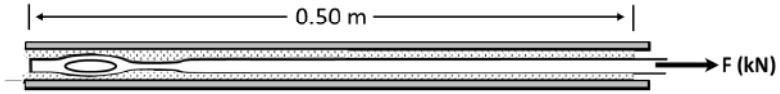


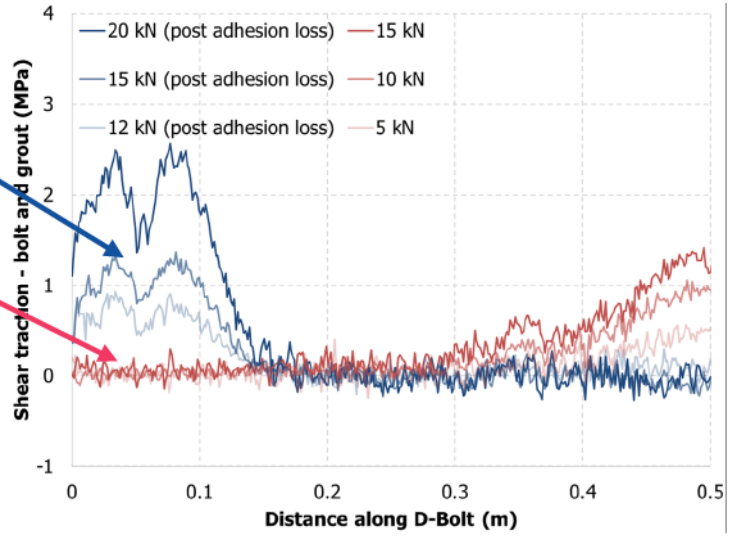


Φόρτιση μετά την αποκόλληση

Συγκόληση κατά μήκος λείου τμήματος (Αρχική φόρτιση)

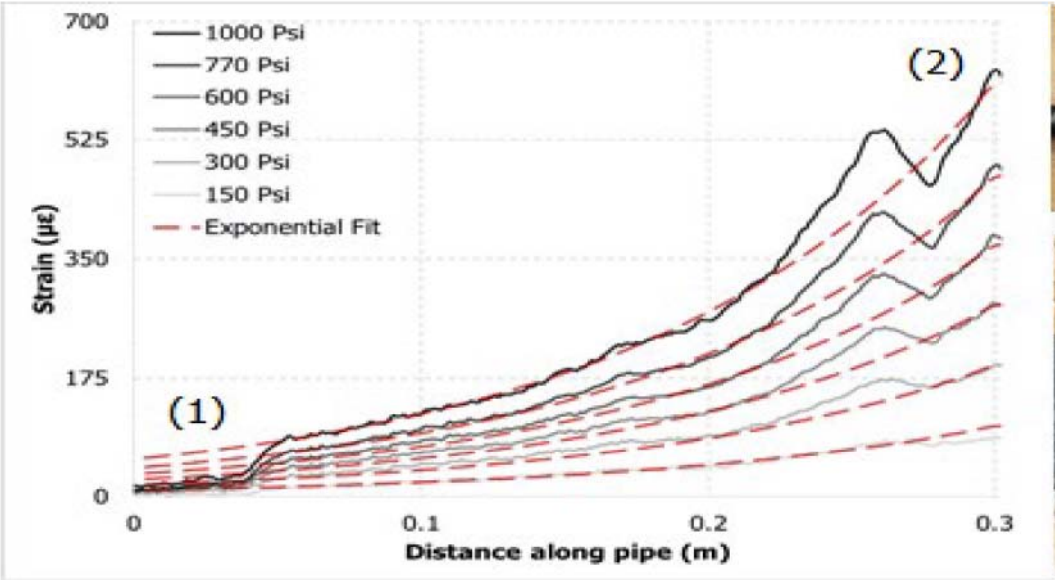
Προφίλ διάδοσης της διάτμησης



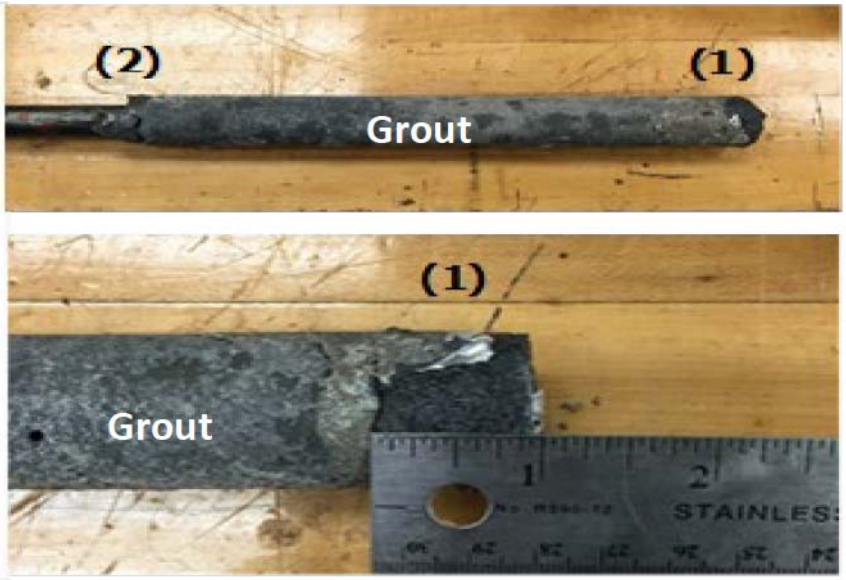


Δοκιμή Υποστήριξης Βράχου

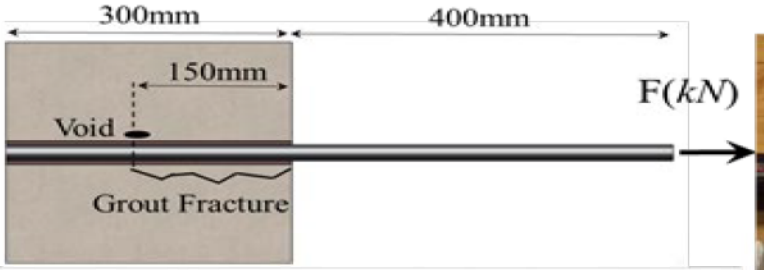
Ενσωματωμένο τμήμα μεταλλικού πασσάλου

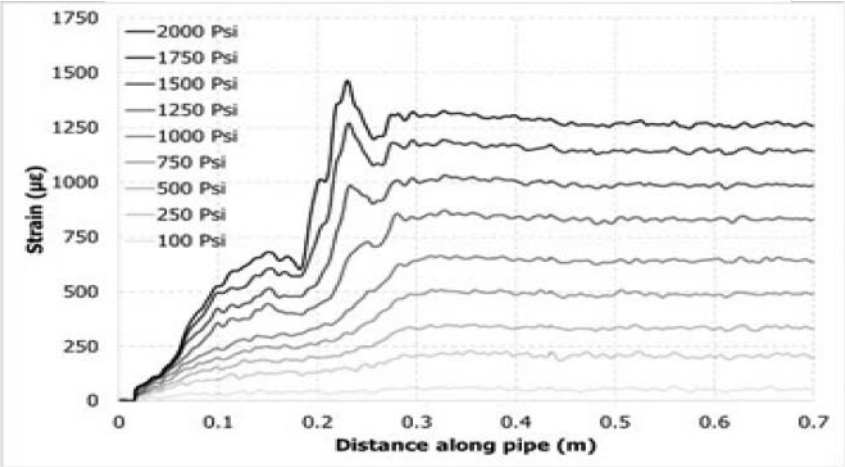


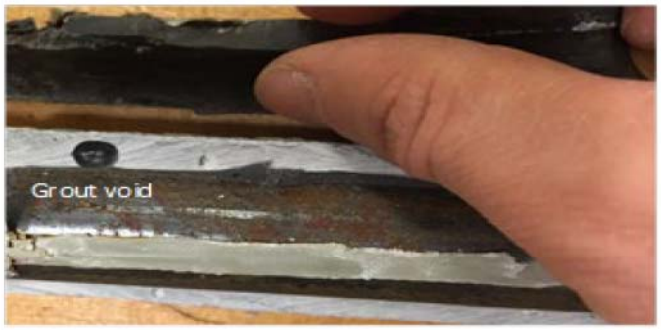
Εποπτεία ενεματωμένου τμήματος – αφαιρεμένο από το μπλόκ σκυροδέματος



Δοκιμή Υποστήριξης Βράχου

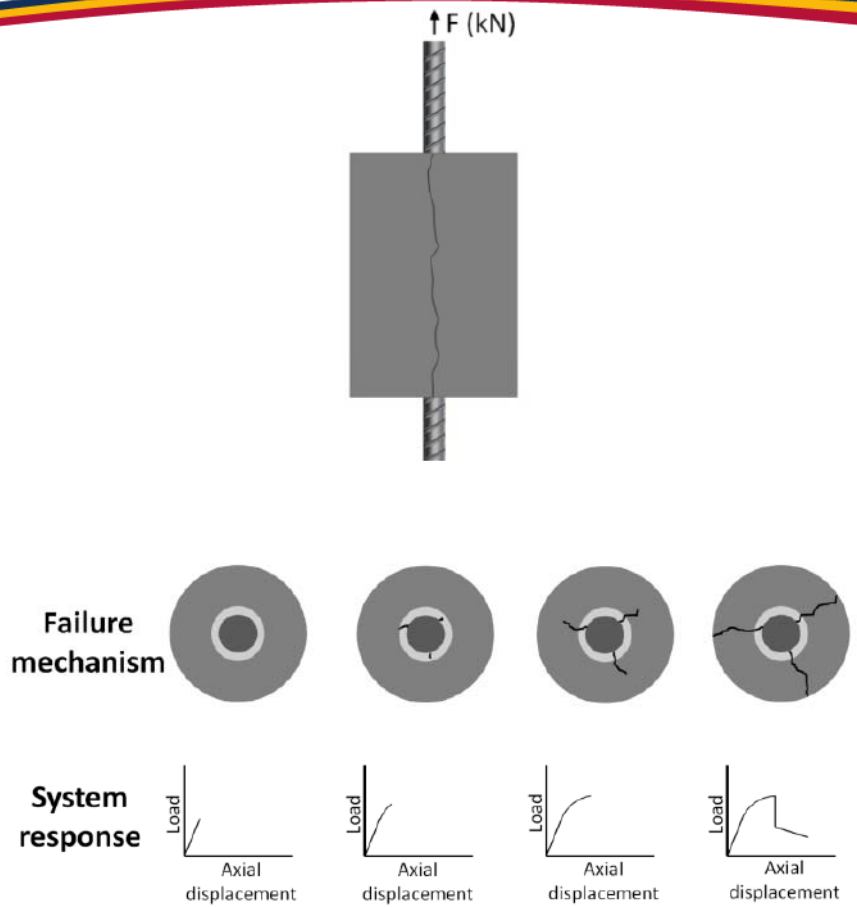




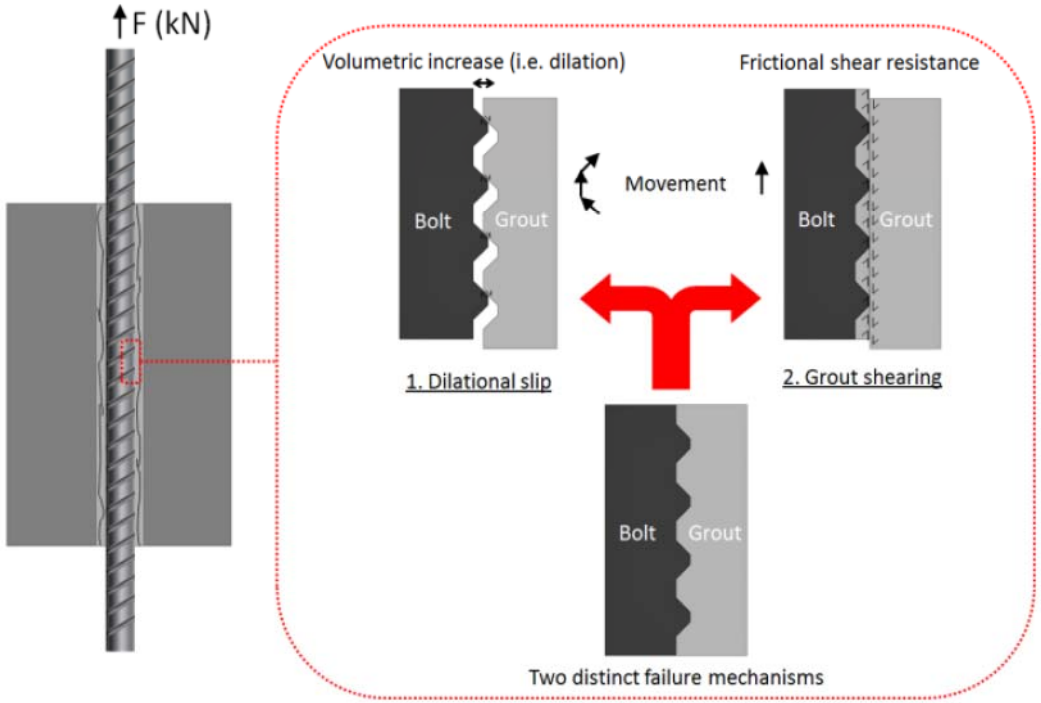


- Εποπτεία του ενεματωμένου τμήματος – αφαιρεμένο από το σκυρόδεμα
- Έλλειψη κενού και ενέματος που σχετίζεται με ανώμαλη φόρτωση εντός της ενεματωμένης περιοχής
- Πιθανότητα καταγραφής απροσδόκητης συμπεριφοράς – μη γνωστής εξ' αρχής

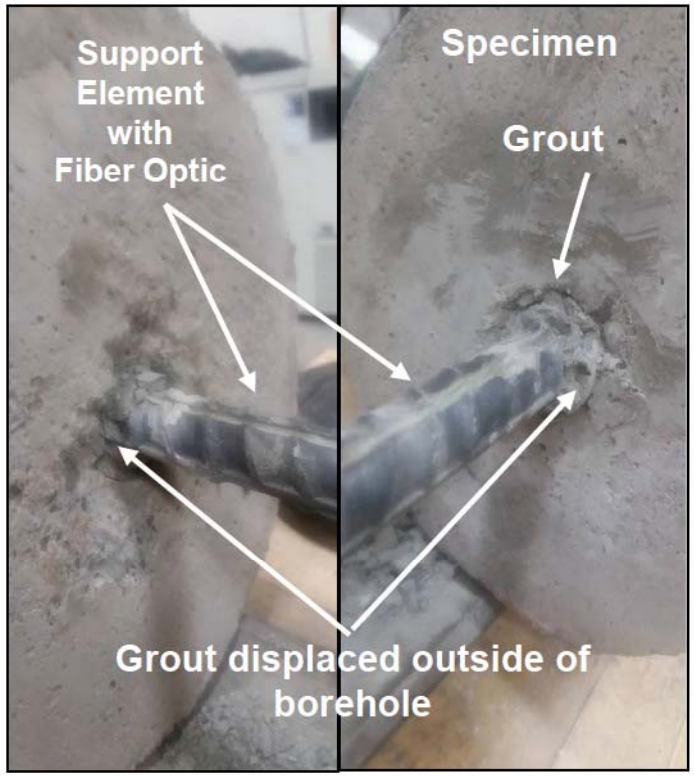
Δοκιμή Υποστήριξης Βράχου



Ακτινική δημιουργία ρωγμώσεων



Αστοχία στην διεπιφάνεια αγκυρίου-ενέματος

Rock Support Testing - Forensics

Pullout Testing