



University of Patras
Laboratory of Technology &
Strength of Materials

ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ Μειωμένης Ανθεκτικότητας στο οπλισμένο σκυρόδεμα

Apostolopoulos Charis
Dr.-Ing Civil Engineer Associate Professor

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ως **Ανθεκτικότητα** μιας κατασκευής στο χρόνο, **εννοούμε την ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ** να αντιστέκεται σε περιβαλλοντικές επιδράσεις **ΧΩΡΙΣ Η ΑΠΟΔΟΣΗ** της (Επιτελεστικότητα) **ΝΑ ΥΠΟΧΩΡΕΙ** κάτω από ένα ελάχιστο αποδεκτό όριο.

Σημαντικοί παράγοντες καθορισμού της ανθεκτικότητας και εν γένει της Μηχανικής απόδοσης της Κατασκευής σε βάθος χρόνου, μπορεί να αναφερθούν :

Η ποιότητα σύνθεσης του σκυροδέματος και η ποιότητα της σκυροδέτησης.

Η αντοχή του σιδηροοπλισμού έναντι διάβρωσης.

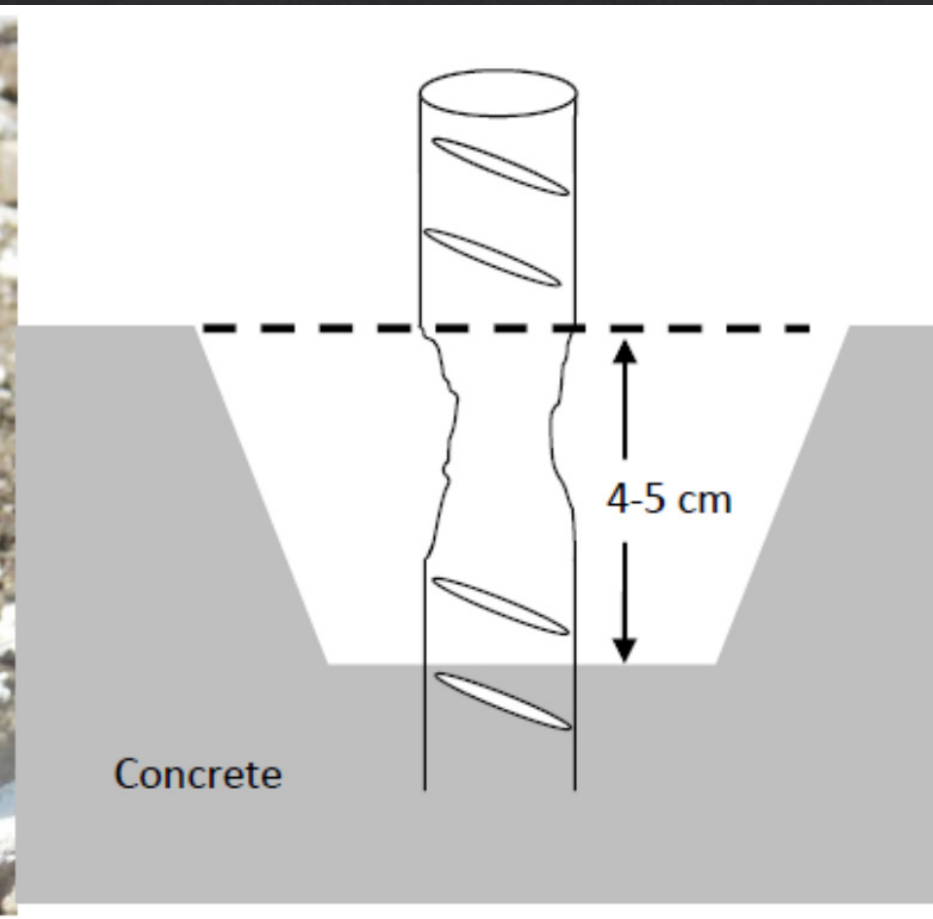
Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση διαρκούς συντήρησης της κατασκευής.

Τεχνολογικό Πρόβλημα

Η πρόωρη υποβάθμιση της ανθεκτικότητας (Durability) του σκυροδέματος των κατασκευών οδηγεί στην διάβρωση του σιδηροπλισμού.

Ανάλογης σημασίας θέματα, ώθησαν την Ευρωπαϊκή Ένωση για λύσεις μέσω καθιέρωσης χαλύβων ανθεκτικών όπως οι διφασικοί χάλυβες υψηλής αντοχής και ολκιμότητας (B400c, B450c, B500c). **ΠΑΡΟΛΑ ΑΥΤΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΕΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΤΗΚΕ.**

Έντονοι
βελονισμοί
στη θέση
της
ανάδυσης
ράβδου
παράκτιας
κατασκευής



Η Ανησυχία στην Ευρωπαϊκή Ένωση

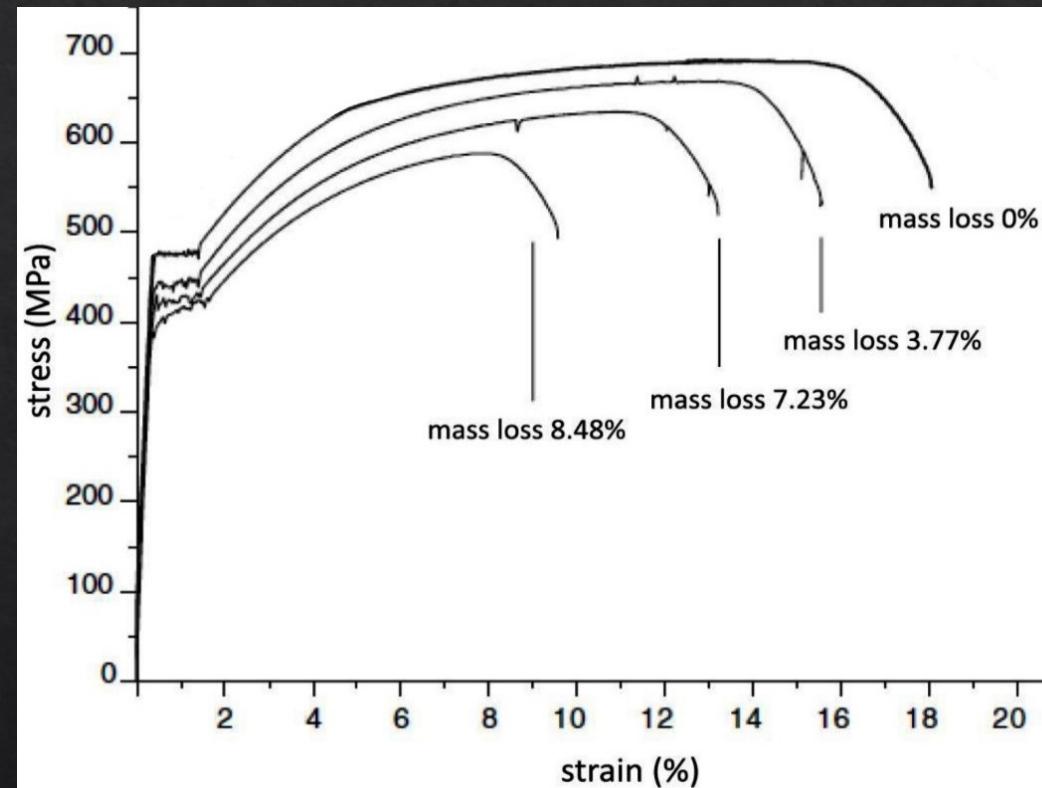
- ❖ Στο πλαίσιο Εξέλιξης και Βελτίωσης των Υλικών, στην Ευρωπαϊκή Ένωση υλοποιείται ήδη εντατική προσπάθεια, όπως πρόσφατα ερευνητικά έργα για τους Χάλυβες Σιδηρού Οπλισμού.
- ❖ Με βάση το γεγονός ότι οι τελευταίως εισαχθέντες στην αγορά χάλυβες υψηλής αντοχής, εμφανίζουν μειωμένη αντοχή στη διάβρωση, πρόσφατο ερευνητικό πρόγραμμα με το ακρωνύμιο **RUSTEEL**, επικεντρώθηκε στη μηχανική απόδοση των χαλύβων αυτής της κατηγορίας σε παράκτιο περιβάλλον.
- ❖ Τα αποτελέσματα της εκτεταμένης αυτής έρευνας, επιβεβαίωσαν την μειωμένη τους αντίσταση στη διάβρωση, την δραματική πτώση της ολκιμότητας τους με τον χρόνο και κάτω από ισχυρά σεισμικά συμβάντα. Συνεπακόλουθο αυτού είναι η επιβεβαίωση (από την πράξη) πρόωρης υποβάθμισης της φέρουσας ικανότητας ιδίως (παράκτιων) κατασκευών. Δύο σημαντικά στοιχεία στα οποία αποδόθηκε η μειωμένη αντίσταση σε διάβρωση και μηχανική απόδοση με τον χρόνο, ήταν η χημική σύσταση και η μικροδομή του χάλυβα.
- ❖ Με βάση τα συμπεράσματα αυτά (στην συνέχεια και στην ίδια κατεύθυνση) ήδη εξελίσσεται νεώτερο ερευνητικό πρόγραμμα με ακρωνύμιο **NEWREBAR**, στόχος του οποίου είναι, η παραγωγή μιας κατηγορίας χάλυβα με υψηλή αντίσταση στην διάβρωση.

Τεχνολογικό Πρόβλημα

Σύμφωνα με την *ASCE* (*American Society Civil Engineering*, 2010), οι δαπάνες αποκατάστασης έργων υποδομής λόγω διάβρωσης του χάλυβα, υπολογίστηκαν 18 φορές υψηλότερες από τις αντίστοιχες δαπάνες λόγω σεισμικών συμβάντων.

Παρότι όμως τα φαινόμενα διάβρωσης του σιδηροοπλισμού συνδέονται με την γενική υποβάθμιση του οπλισμένου σκυροδέματος (*mechanical performance bonding*) και η βλάβη είναι έννοια χρονικά εξαρτημένη, εν τούτοις, ακόμη δεν έχει εισαχθεί στον ΚΑΝΕΠΕ.

Η χρονική δε εξάρτηση της μηχανικής υποβάθμισης, εισήχθη στο *Modal Code 2010* (ως οδηγία μόνον).



Τεχνολογικό Πρόβλημα

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟ ΑΣΥΜΒΙΒΑΣΤΟ



Προτίμηση σε χάλυβες της ίδια βιομηχανικής μονάδας και του ίδιου χρόνου παραγωγής

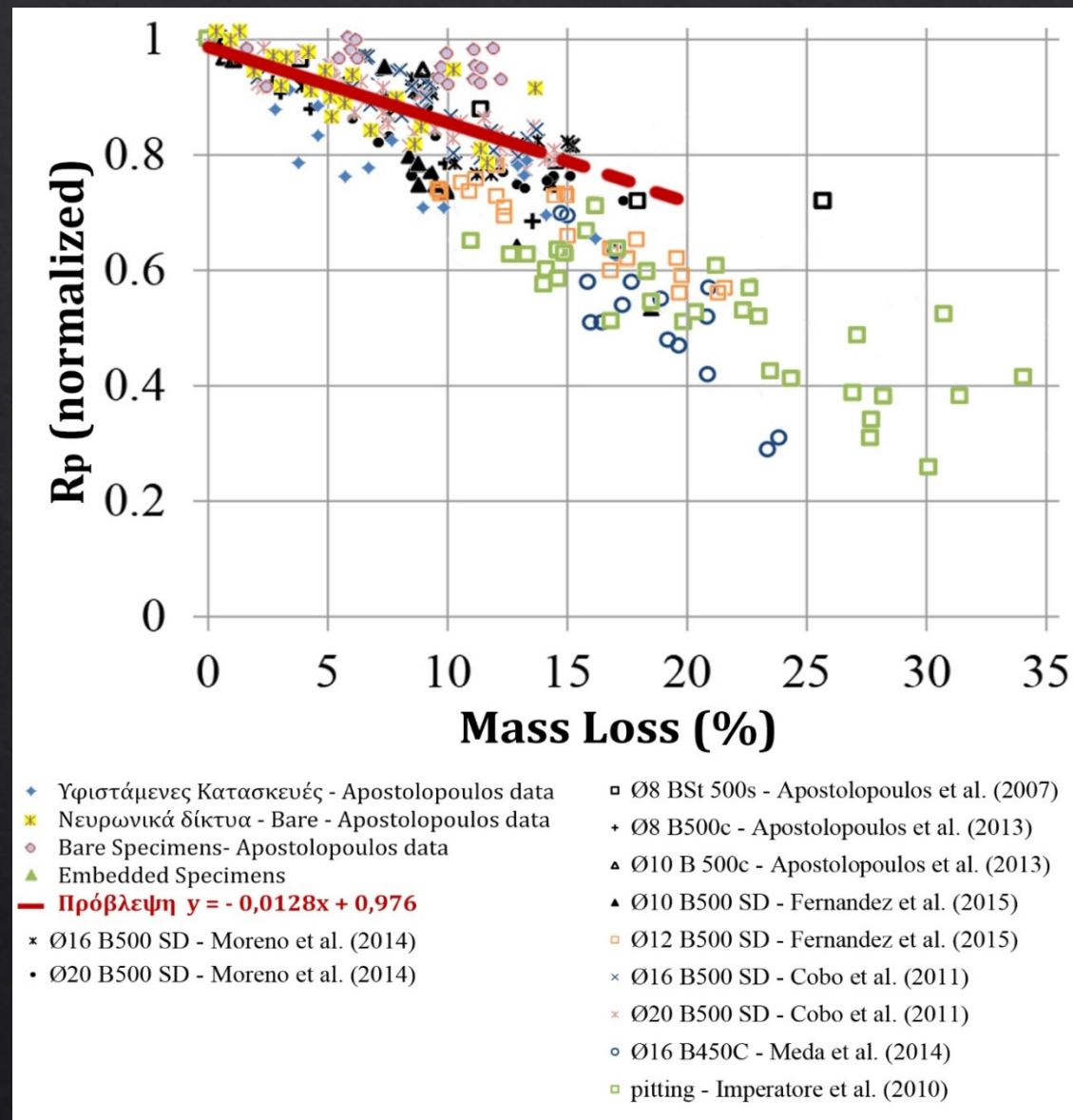
Τεχνολογικό Πρόβλημα



Έκτακτη είδηση απετέλεσε η Γέφυρα I-70 Washington County Pennsylvania καθώς την 28^η Δεκεμβρίου 2005 κατέρρευσε υπό το ίδιο της το βάρος.

Ερευνητικά Αποτελέσματα

Πρόταση Μεταβολής του ορίου Διαρροής (R_p)



Degradation laws of mechanical properties of corroded steel bar of existing structures on coastal areas

Charis Apostolopoulos et al,

International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, pp. 153-159, 2018 ,Springer, Cham

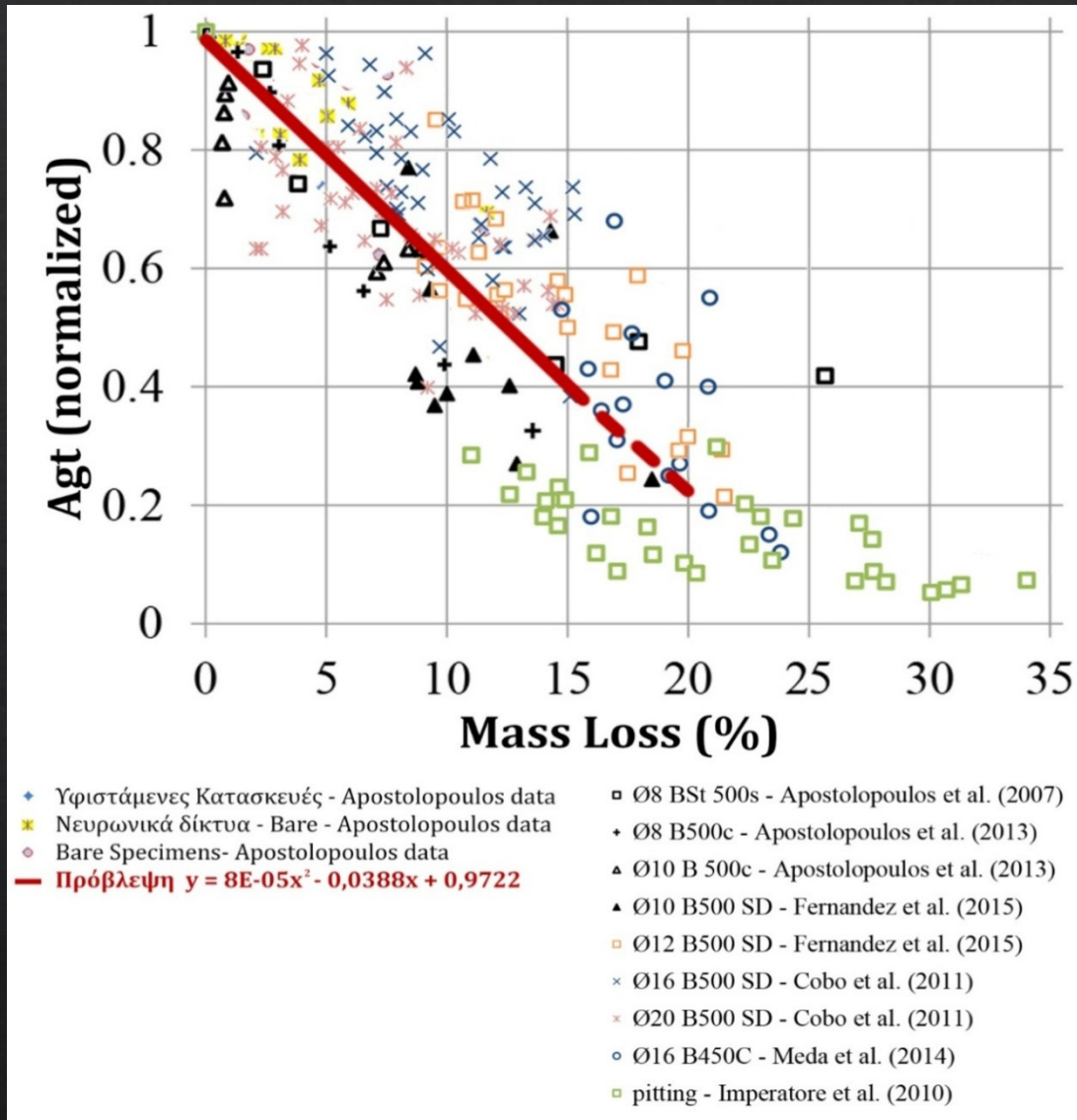
Ερευνητικά Αποτελέσματα

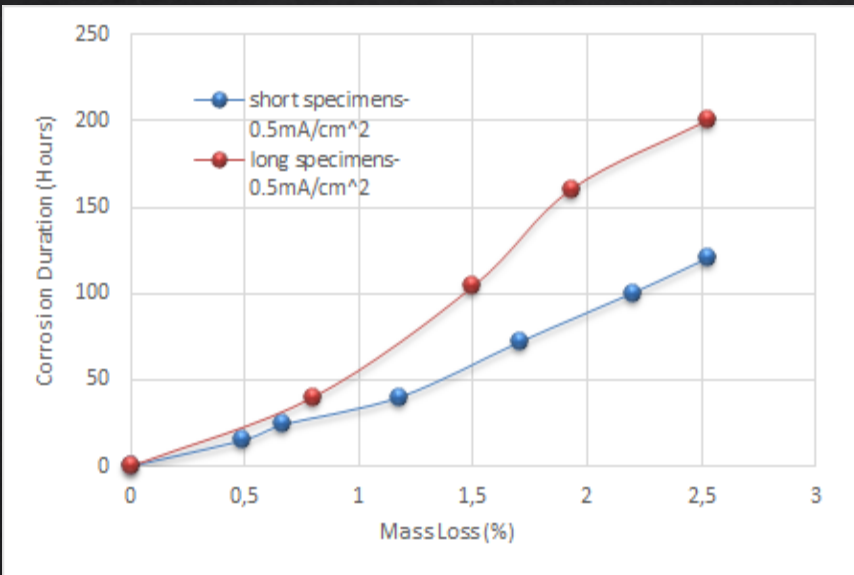
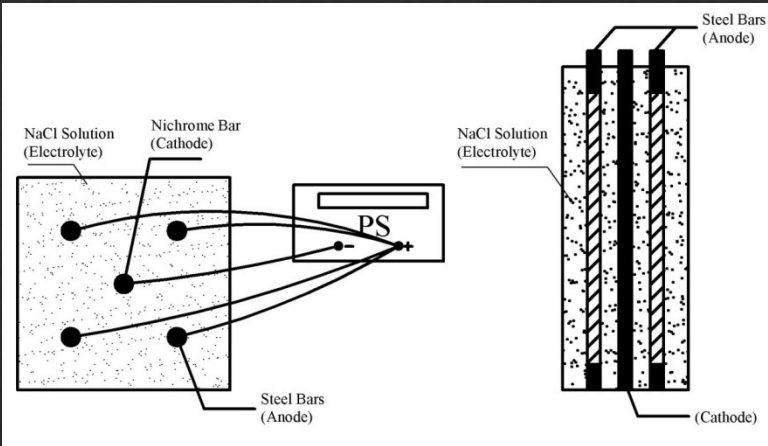
Degradation laws of mechanical properties of corroded steel bar of existing structures on coastal areas

Charis Apostolopoulos et al,

International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, pp. 153-159, 2018, Springer, Cham

Πρόταση Μεταβολής Παραμόρφωσης στη μέγιστη αντοχή (Agt)





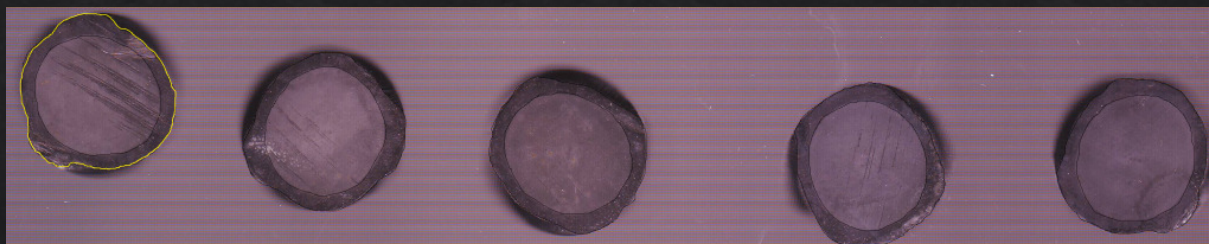
Correlation Between the Electrochemical Corrosion Parameters and the Corrosion Damage, on B500c Dual-Phase Steel

Charis Apostolopoulos, Arg. Drakakaki ,

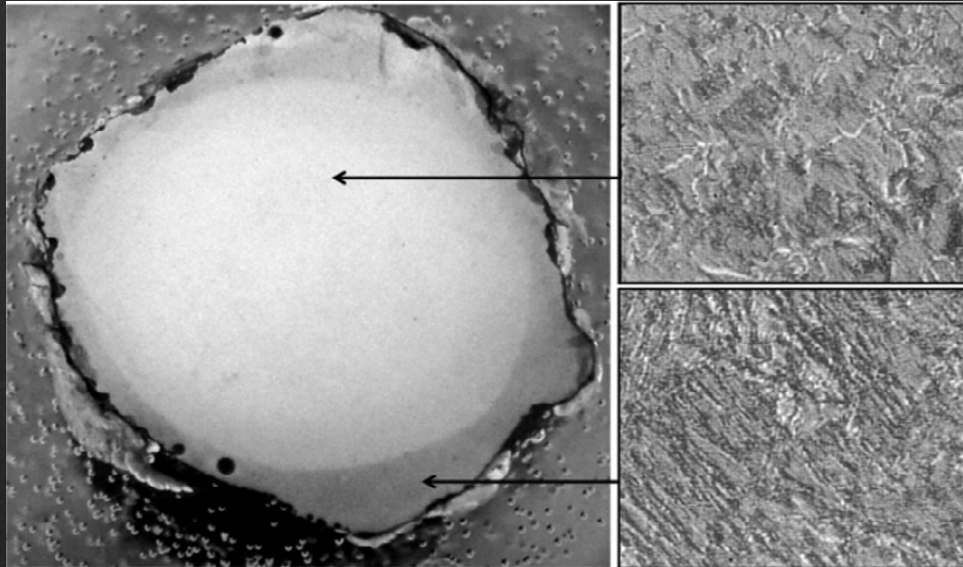
Innovations in Corrosion and Materials Science (Formerly Recent Patents on Corrosion Science), V(8), 1, pp42-52, 2018.

Ερευνητικά Αποτελέσματα

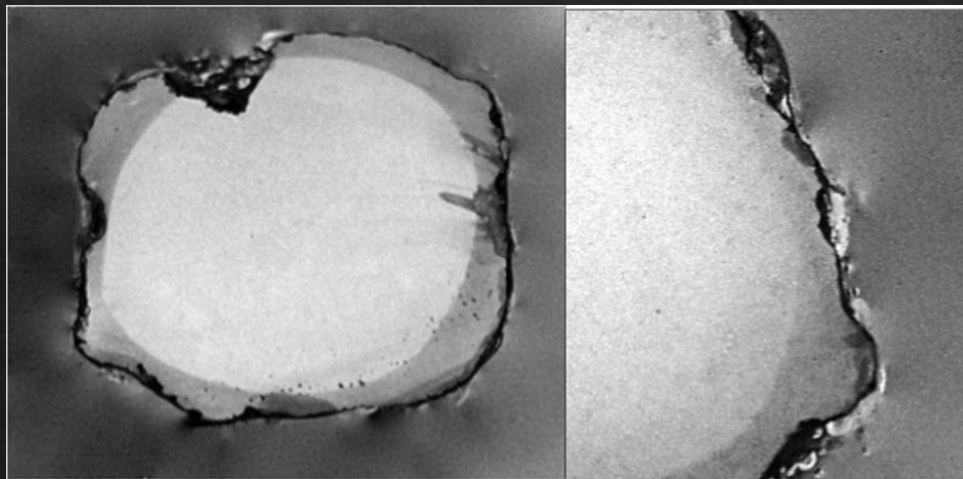
Ερευνητικά Αποτελέσματα



Ερευνητικά Αποτελέσματα



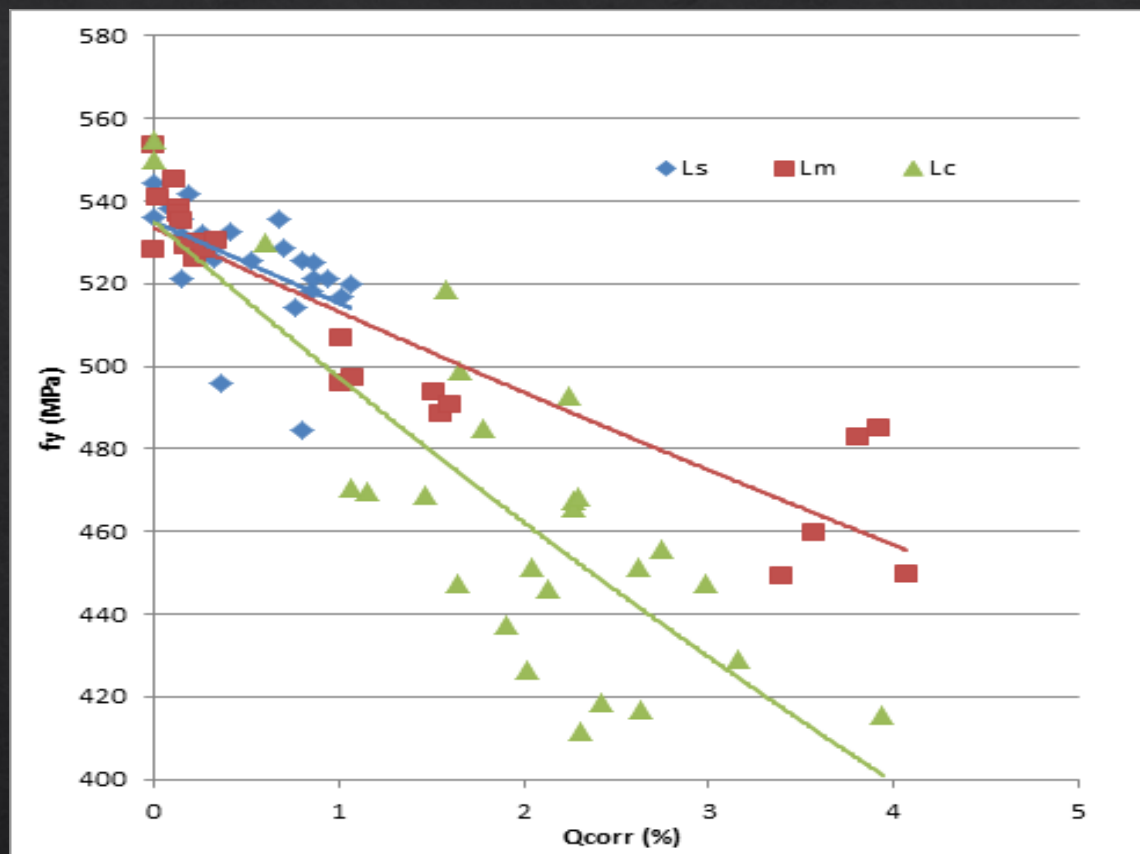
Μικροδομή διφασικού ΜΗ διαβρωμένου χάλυβα - Διάκριση μαρτενσίτη-φερριτοπερλίτη.



Μικροδομή διφασικού διαβρωμένου χάλυβα- Mass Loss = 1.91%.

Ερευνητικά Αποτελέσματα

Σχέση εκτεθειμένου μήκους (σε διάβρωση) και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα

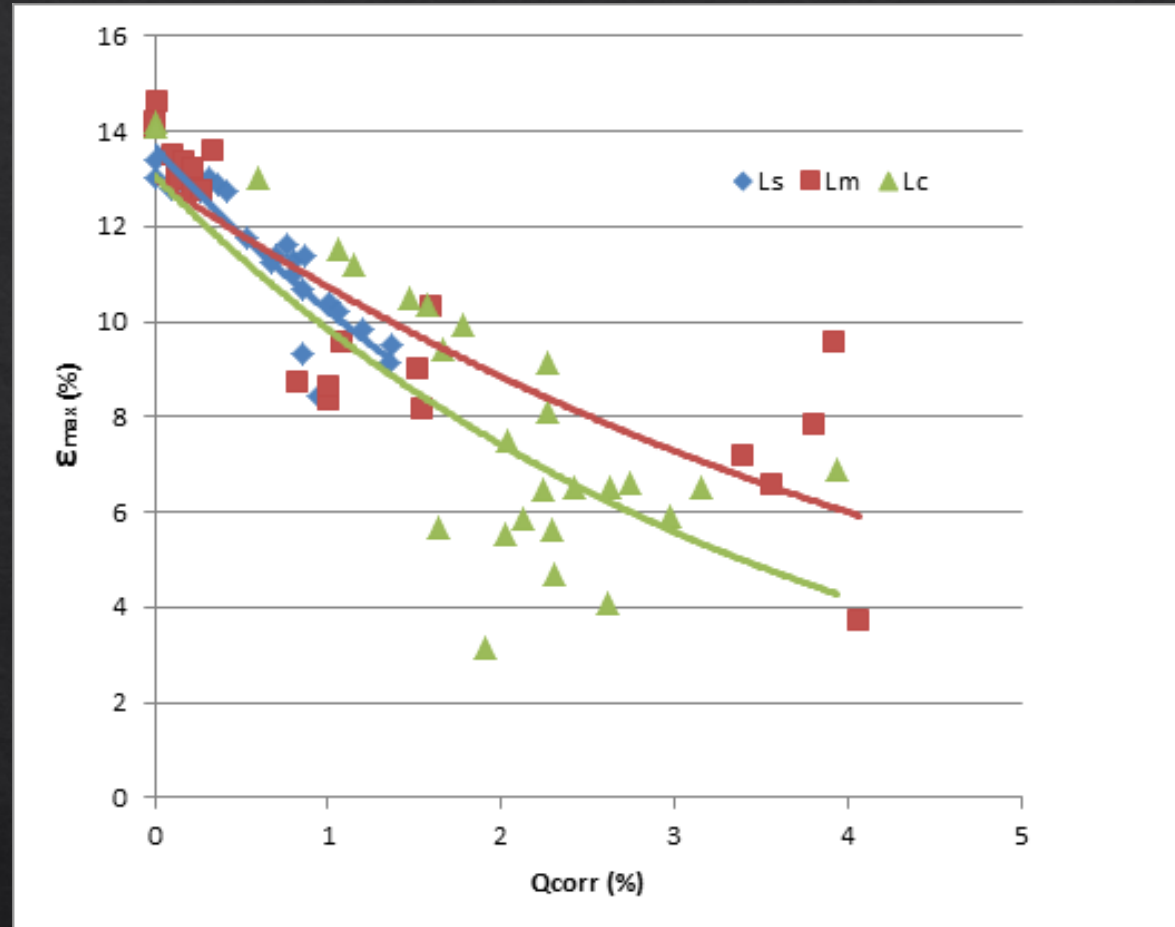


Πτώση ορίου διαρροής σε σχέση με το ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟ μήκος δοκιμίων : 140mm / 70mm / 28mm.

Ερευνητικά Αποτελέσματα

Σχέση εκτεθειμένου μήκους (σε διάβρωση) και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα

Πτώση του ορίου μέγιστης παραμόρφωσης (ιδιότητες ολκιμότητας) σε σχέση με το βαθμό διάβρωσης δοκιμίων εκτεθειμένου μήκους: 140mm, 70mm και 28mm.



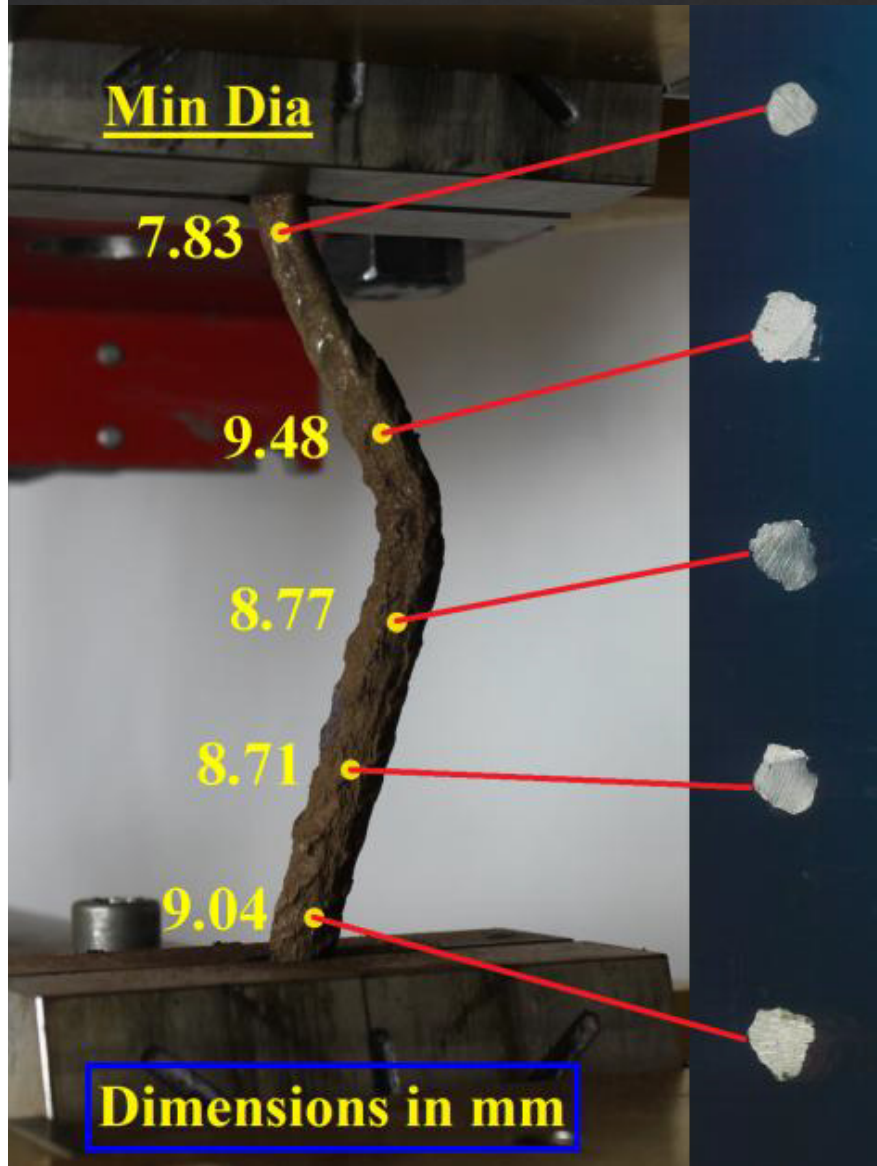
ΟΣΟ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ ΤΟ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΧΑΛΥΒΑ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ, ΤΟΣΟ ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΗ ΕΙΝΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ (περίπτωση δοκιμίων σταθερού μήκους).

Ερευνητικά Αποτελέσματα



ο εγκιβωτισμένος
χάλυβας
λειτουργεί σύμφωνα
με το ανάλογο του
μικρού εκτιθέμενου
μήκους
προκαλώντας
σοβαρή σημειακή
βλάβη .

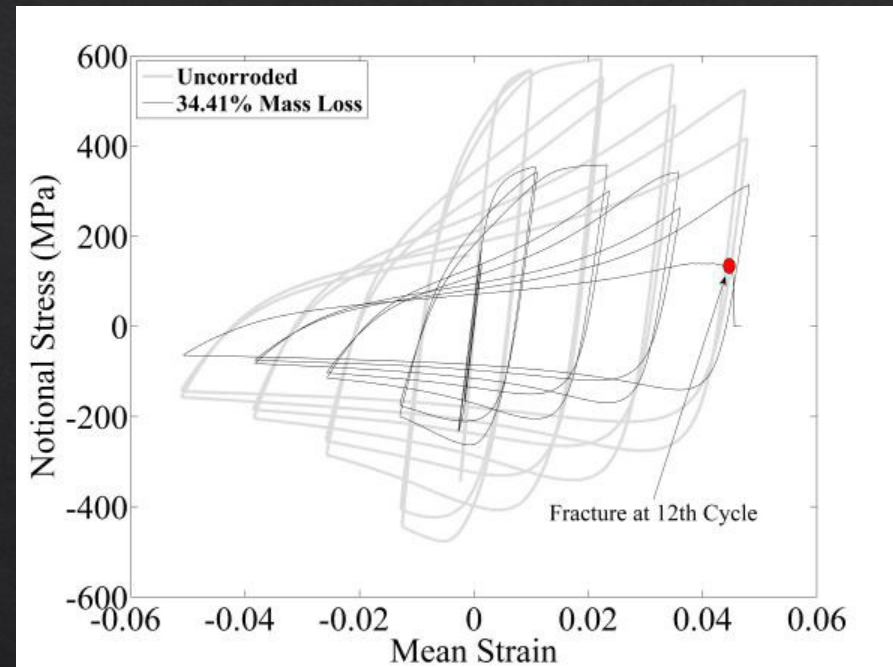
Ερευνητικά Αποτελέσματα



Φορτία ανακύκλισης (σεισμικά φορτία), προκαλούν απρόβλεπτα λυγισμικά φαινόμενα και γρήγορη αστοχία.

Η ΑΠΡΟΒΛΕΠΤΗ ΑΥΤΉ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ, πιστώνεται στην κατά μήκος μεταβλητότητα της διατομής της διαβρωμένης ράβδου λόγω βελονισμών.

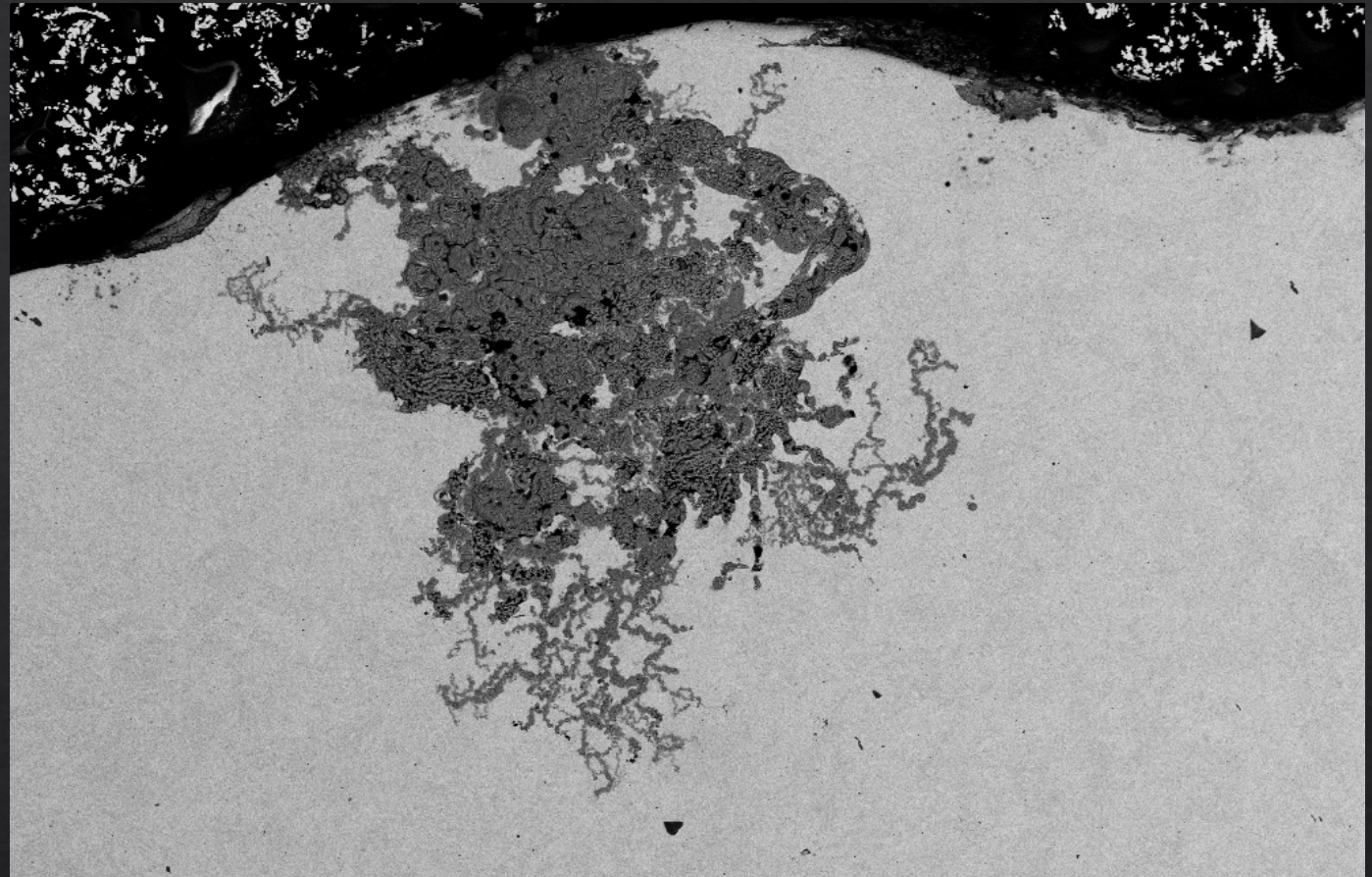
Ερευνητικά Αποτελέσματα



Ερευνητικά Αποτελέσματα

Πέραν των ανωτέρω, σε μη διαβρωμένη ράβδο ανιχνεύτηκαν διαδρομές εύκολης διείσδυσης (corrosion paths).

Καταστάσεις που ευνοούν εμφάνιση τόσο εξωτερικών όσον και εσωτερικών βελονισμών.



Mag = 123 X
100μm

EHT = 10.00 kV
WD = 9 mm
Signal A = RBSD

Date :8 Jul 2011
Time :12:41:11
Noise Reduction = Line Avg

FORTH/ICE-HT
Zeiss SUPRA 35VP

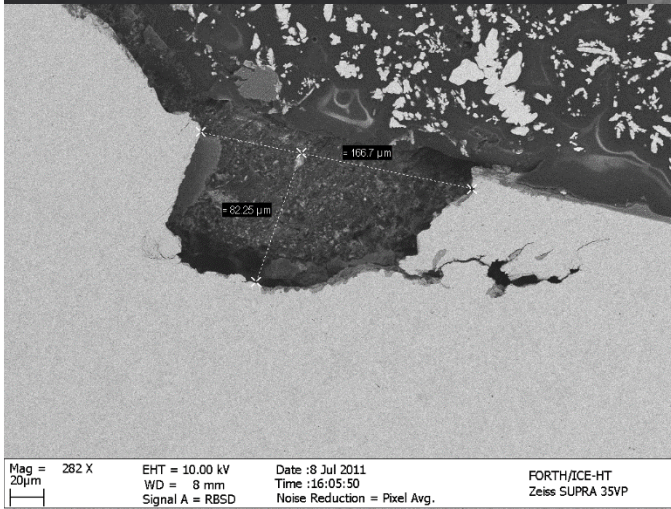
CHARACTERISTIC DEFECTS-CORROSION DAMAGE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF DUAL PHASE REBAR.

Charis Apostolopoulos, et al, Journal Materials Physics & Mechanics 30 (1), 2017

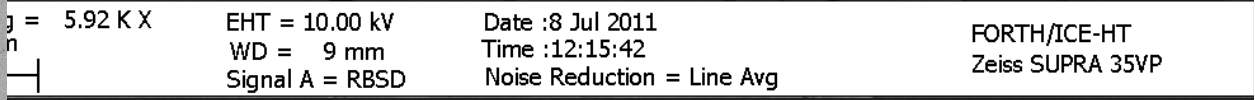
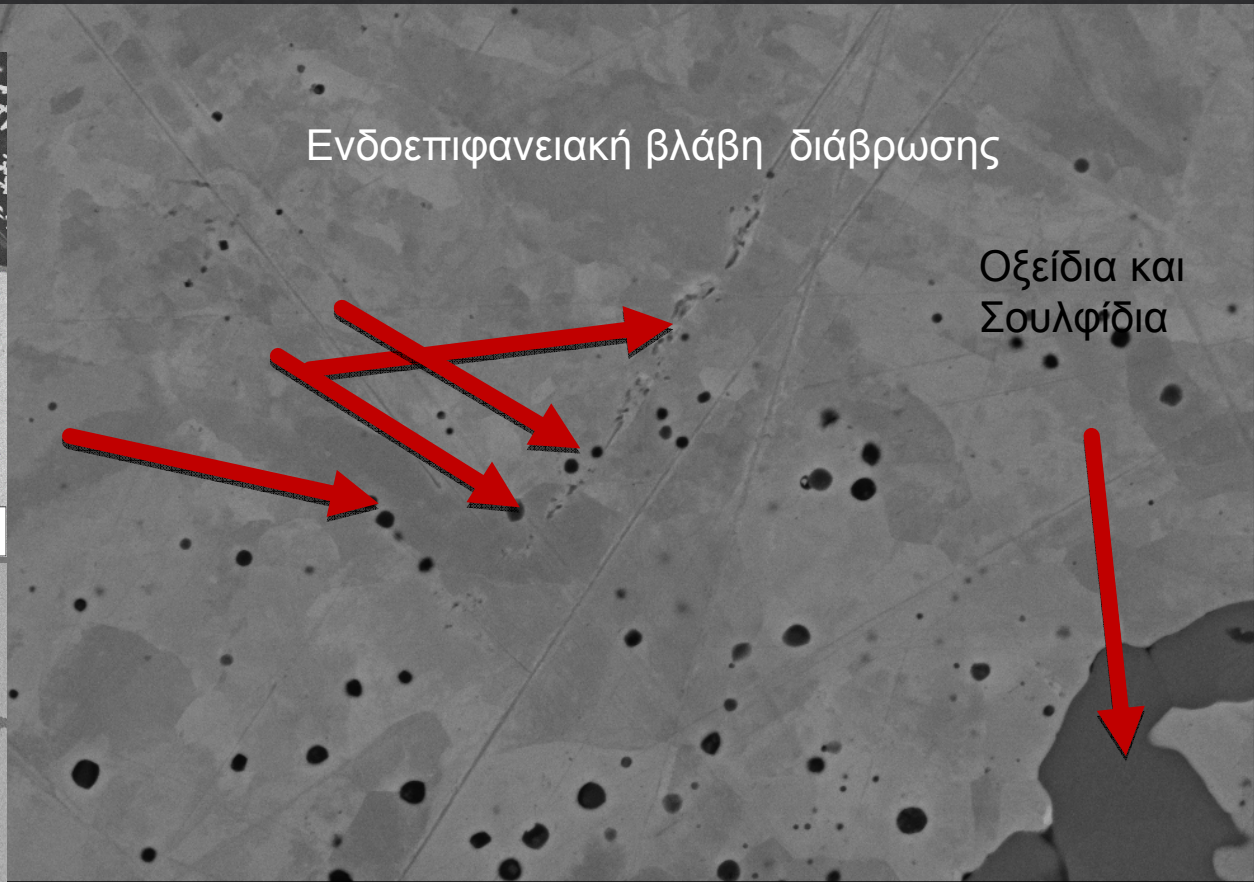
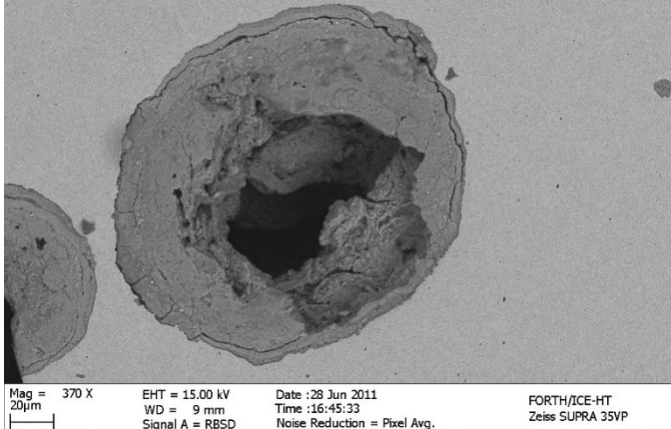
Τομή σε διαβρωμένη ράβδο.

Ερευνητικά Αποτελέσματα

Επιφανειακή βλάβη διάβρωσης



Ενδοεπιφανειακή βλάβη διάβρωσης



Ερευνητικά Αποτελέσματα

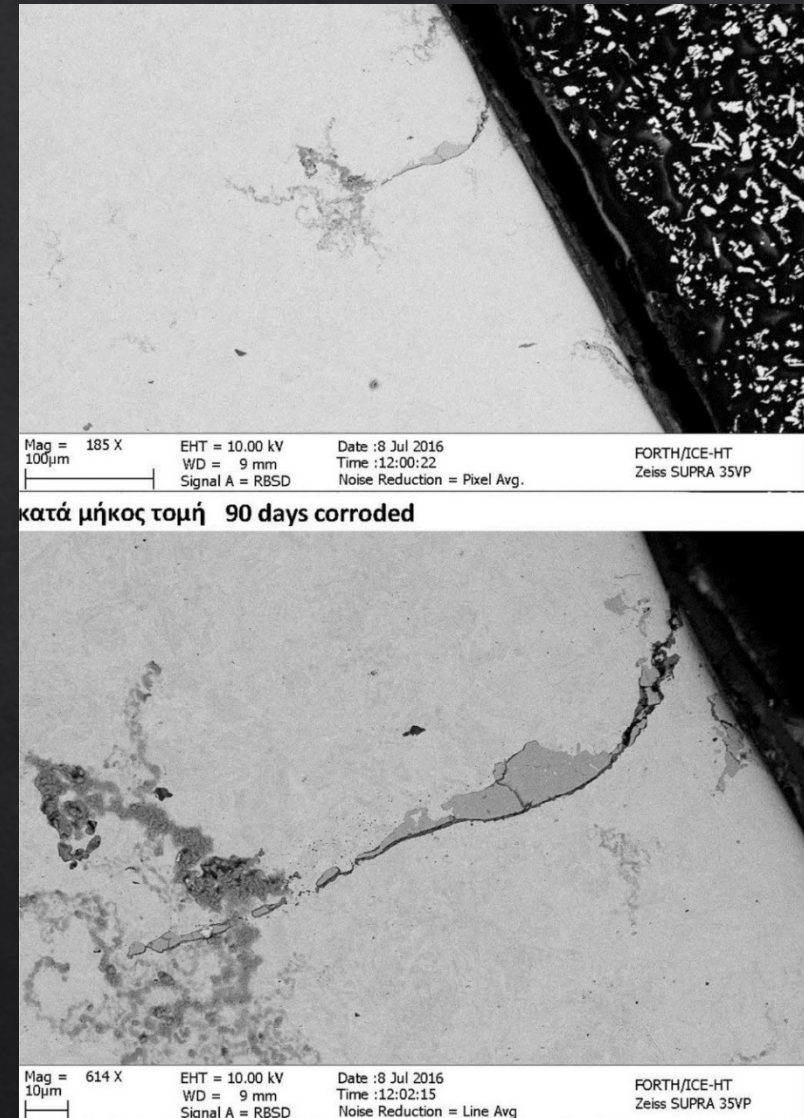
Τομή σε διαβρωμένη ράβδο

Στους διφασικούς χάλυβες, μετά από διάβρωση, συχνά παρατηρείται μηχανική συνέργεια εσωτερικής και εξωτερικής βλάβης.

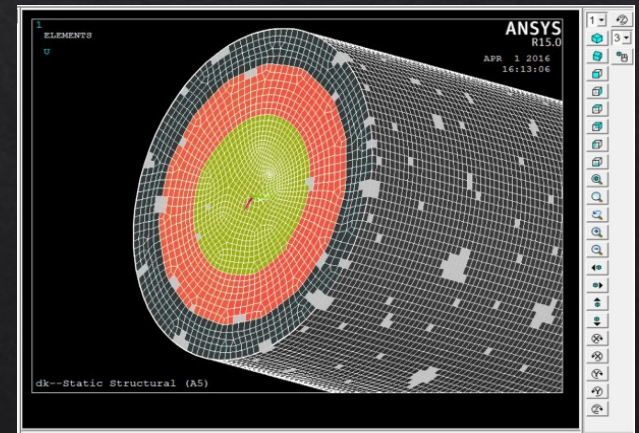
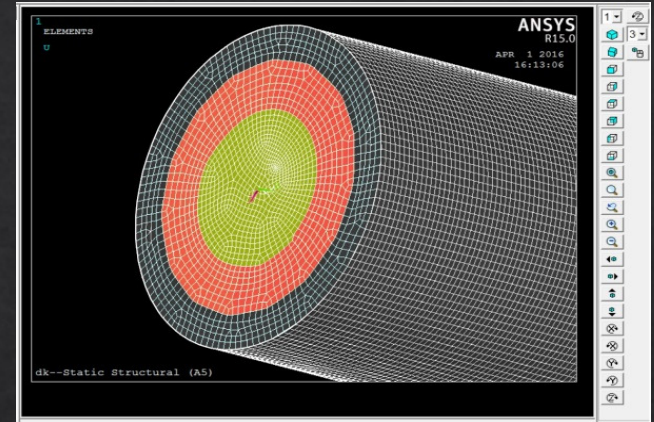
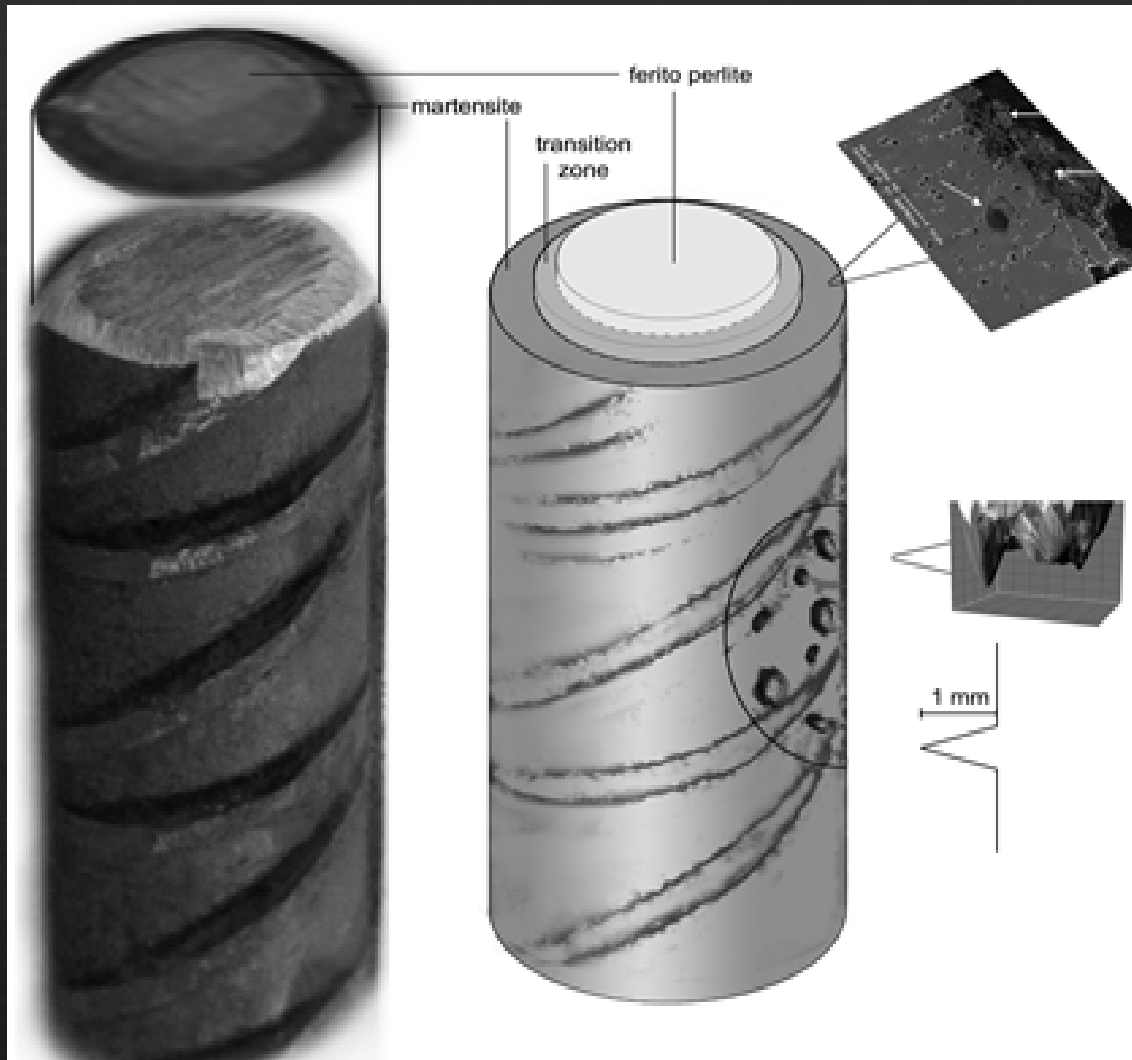
Στην διάρκεια σεισμικών φορτίσεων, το γεγονός αυτό, ευνοεί την ανάπτυξη - εξέλιξη φαινομένων (multiple cracking phenomena) και την γρήγορη αστοχία του υλικού.

CHARACTERISTIC DEFECTS-CORROSION DAMAGE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF DUAL PHASE REBAR.

Charis Apostolopoulos, et al, Journal Materials Physics & Mechanics V (30),(1), 2017.



Ερευνητικά Αποτελέσματα

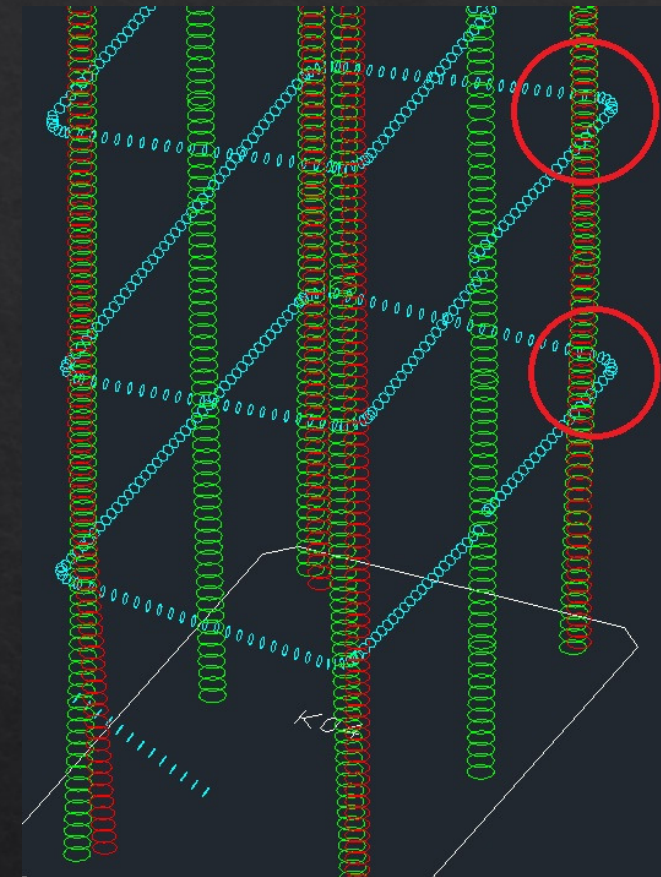
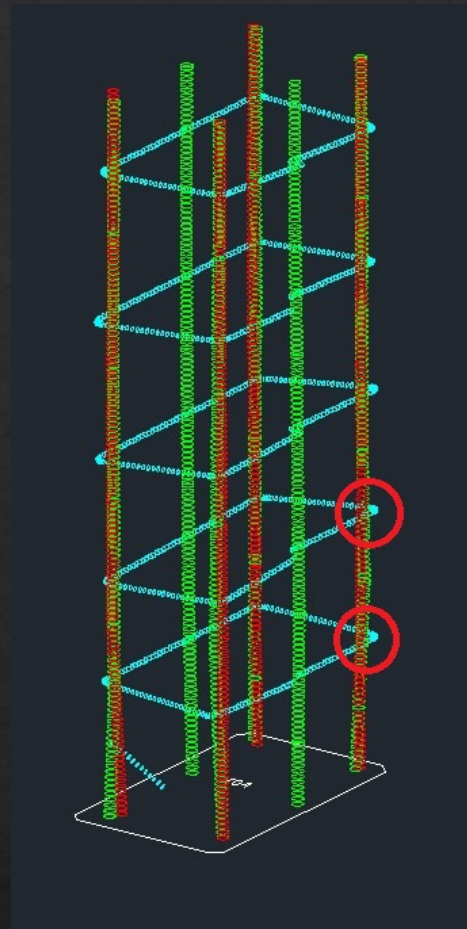


"CHARACTERISTIC DEFECTS-CORROSION DAMAGE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF DUAL PHASE REBAR",
 Apostolopoulos, et al, Journal of Mechanics Physics Materials, V(30), (1), 2017.

Μετρήσεις / Τεχνολογικό Πρόβλημα

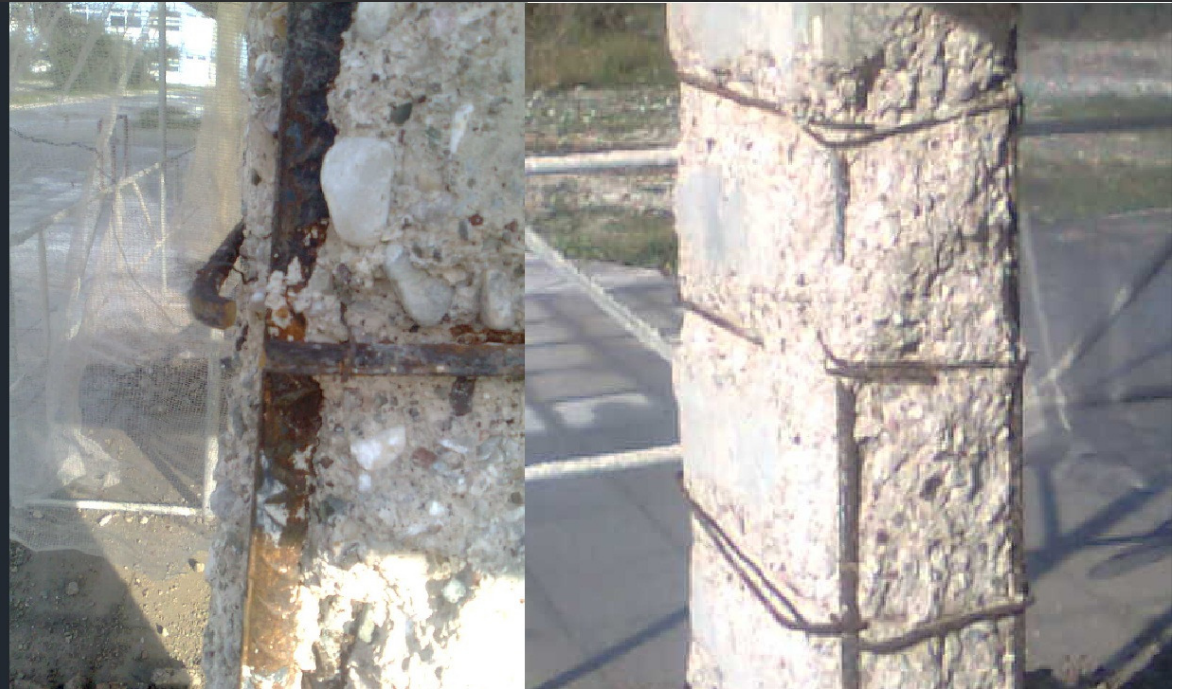
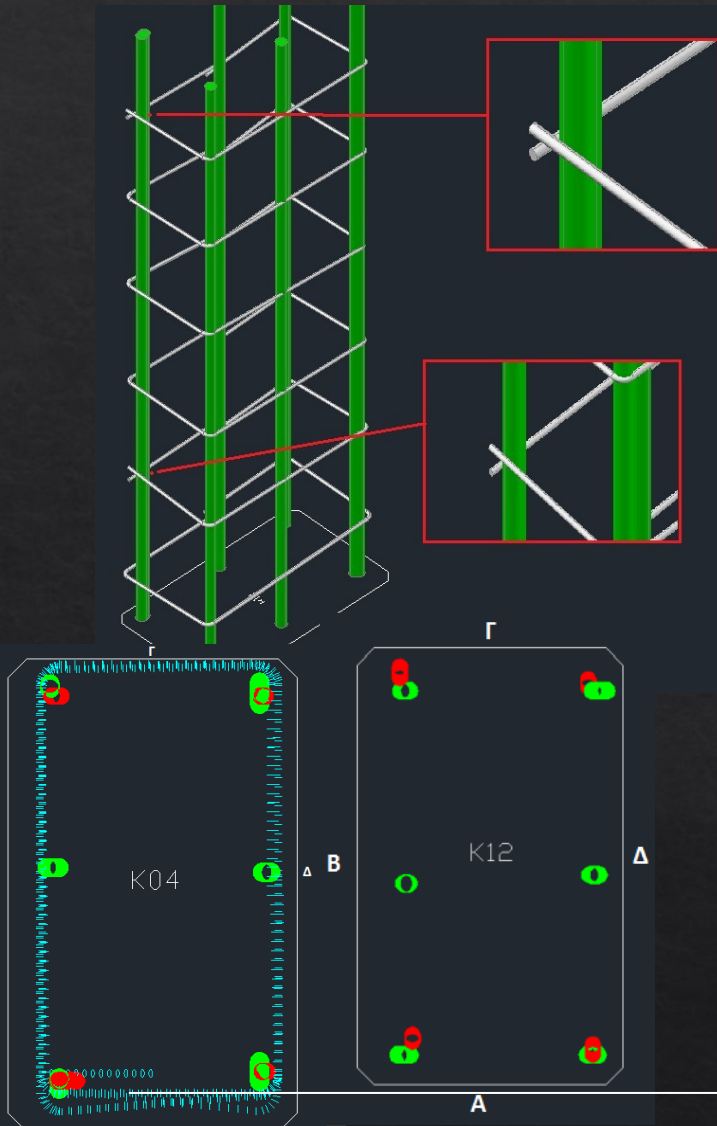


Χρήση μεθόδου επαγωγικού
ελέγχου μέτρηση με
PROFOMETER 5



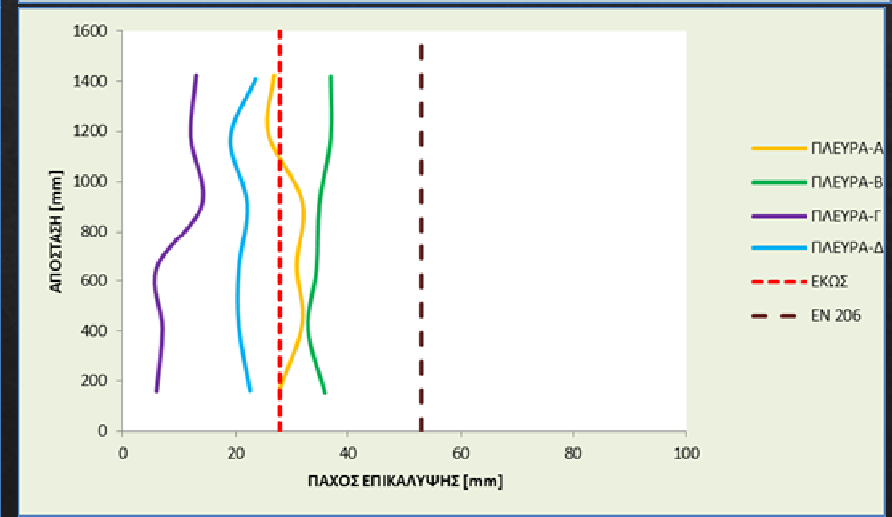
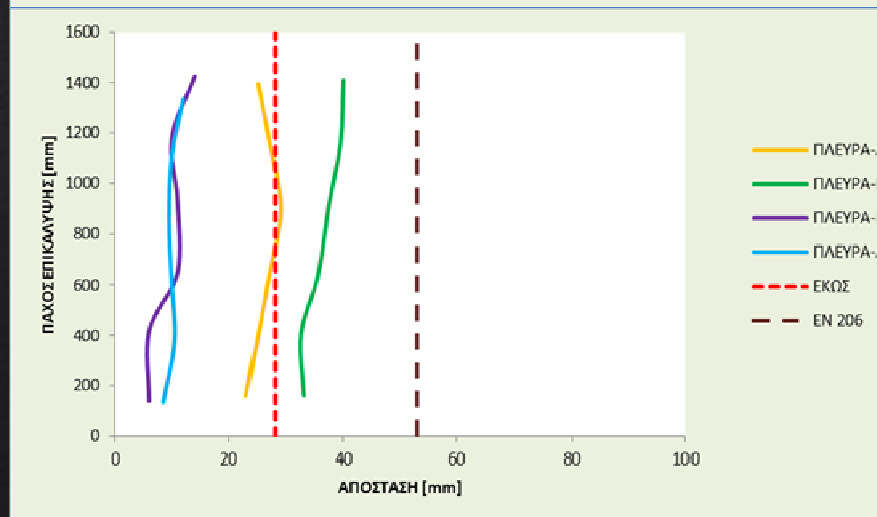
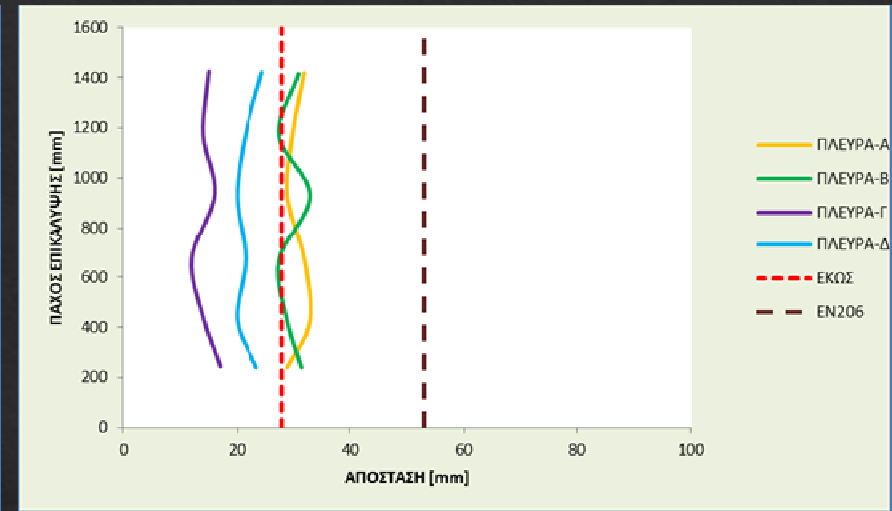
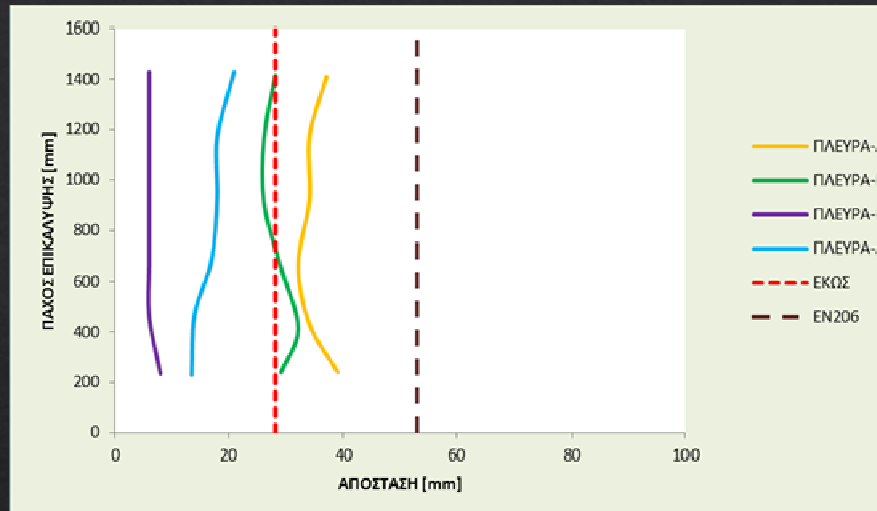
Χαρτογραφήθηκαν ανοικτοί συνδετήρες, απουσία επαφής τους με τον κατακόρυφο οπλισμό: Ευρήματα που προβληματίζουν και αυξάνουν την αβεβαιότητα.

Μετρήσεις / Τεχνολογικό Πρόβλημα



Οι μετρήσεις συγκρίθηκαν με τα στοιχεία της βάσης δεδομένων του εργαστηρίου μας και επιβεβαιώθηκαν πλήρως

Μετρήσεις και Αποτελέσματα



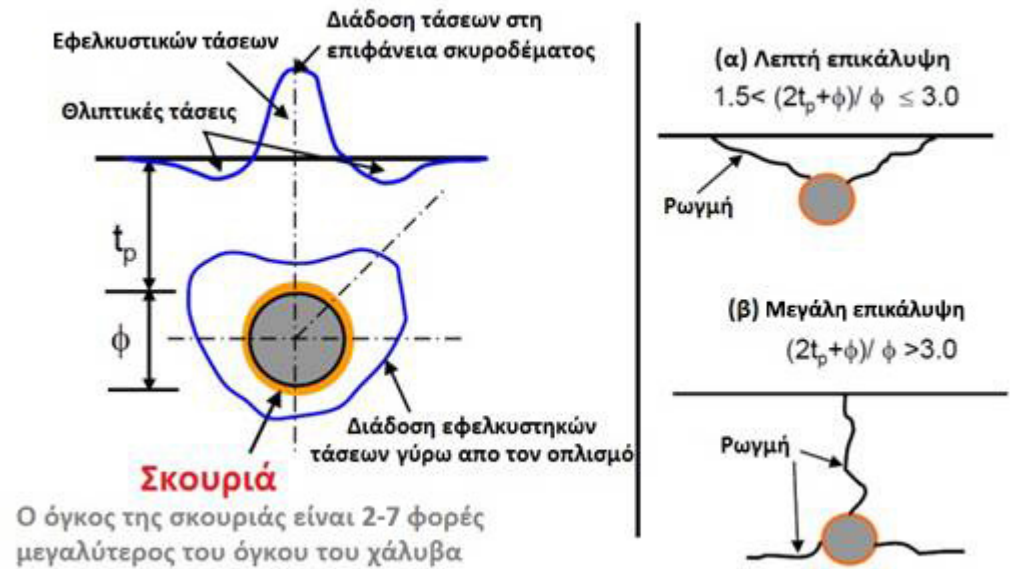
Η ανεπαρκής επικάλυψη του χάλυβα, συνδέεται στενά με την ανάπτυξη ταχύτερων ρυθμών διάβρωσης

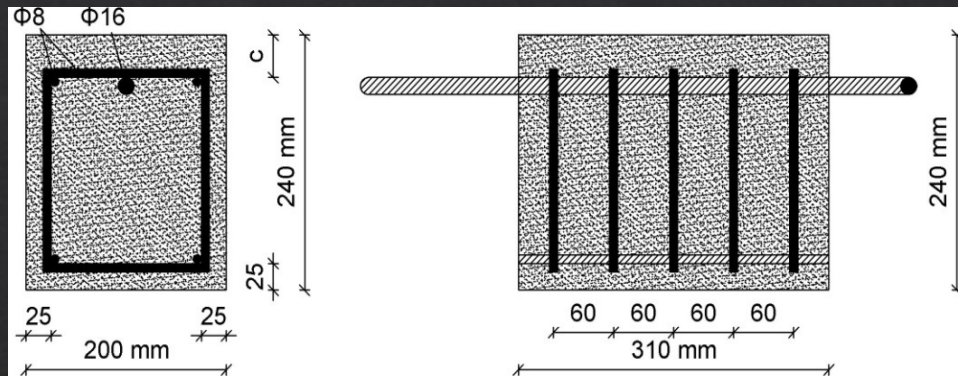
24

Ανάπτυξη Επιφανειακών Ρωγμών

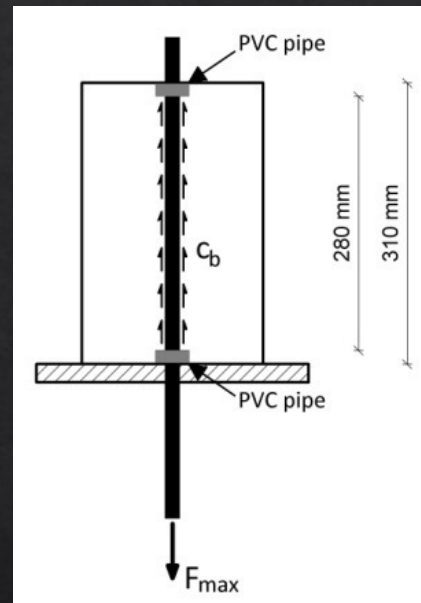
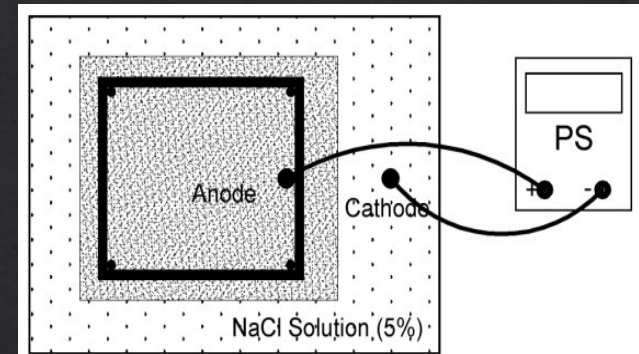


Ρωγμές του σκυροδέματος λόγω διάβρωσης





Ερευνητικά Αποτελέσματα

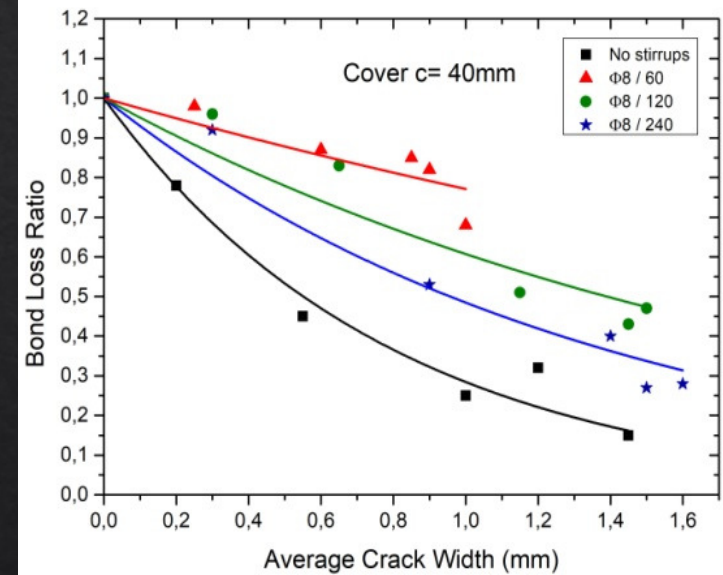
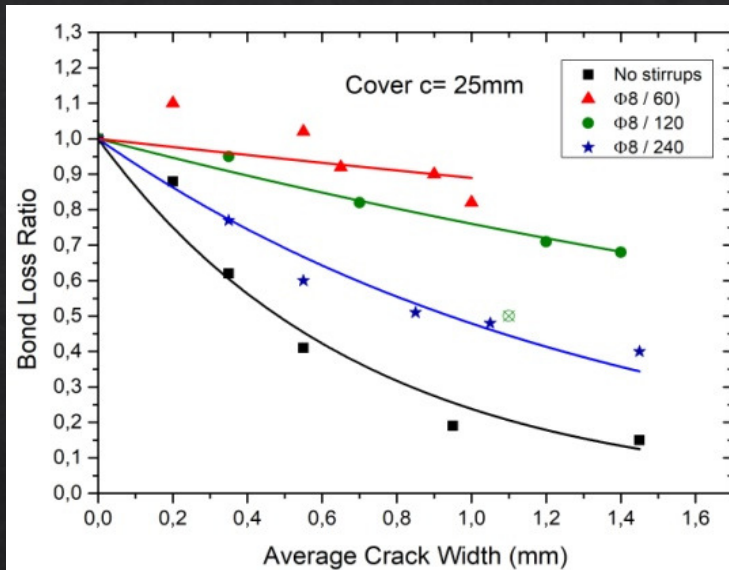
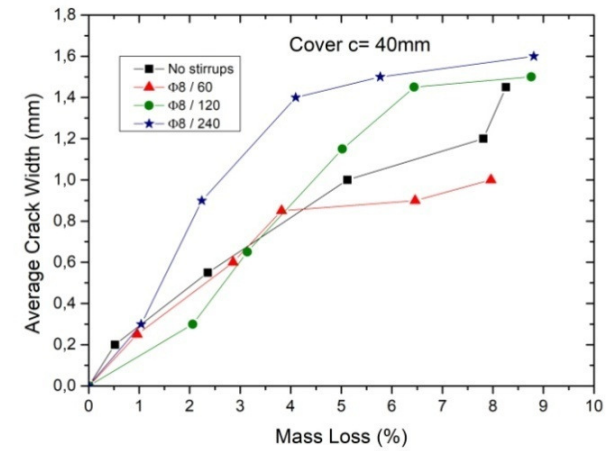
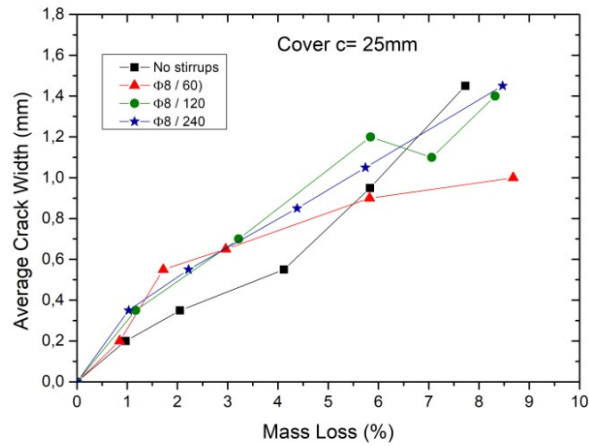


ASTM C234-91a



Correlation of Surface Cracks of Concrete due to Corrosion and Bond Strength (between Steel Bar and Concrete)
 Charis Apostolopoulos, K.Koulouris, Alk. Apostolopoulos, Journal Advances in Civil Engineering, 2019.

Ερευνητικά Αποτελέσματα



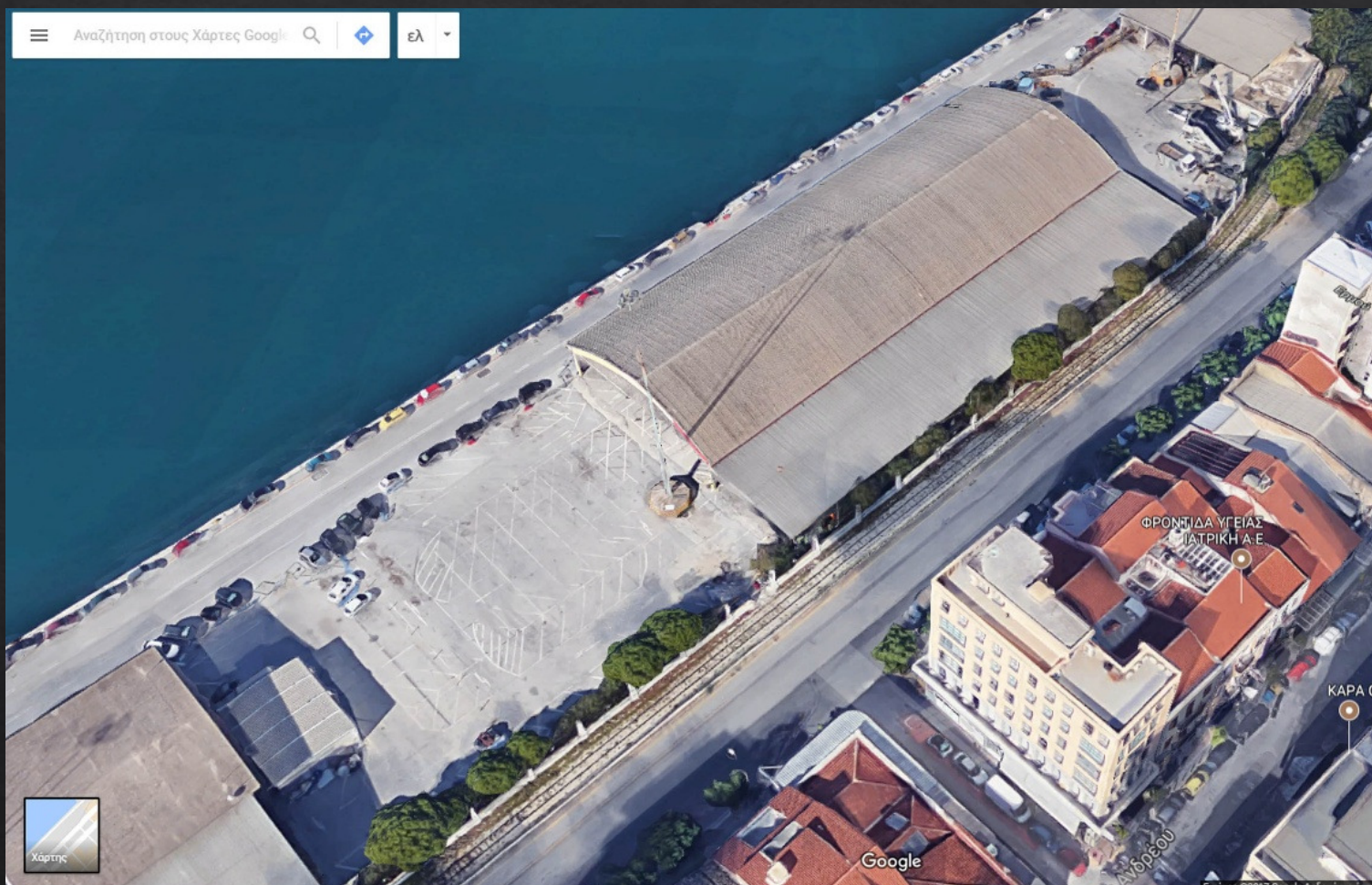
Correlation of Surface Cracks of Concrete due to Corrosion and Bond Strength (between Steel Bar and Concrete)
 Charis Apostolopoulos, K.Koulouris, Alk, Apostolopoulos, Journal Advances in Civil Engineering, 2019.

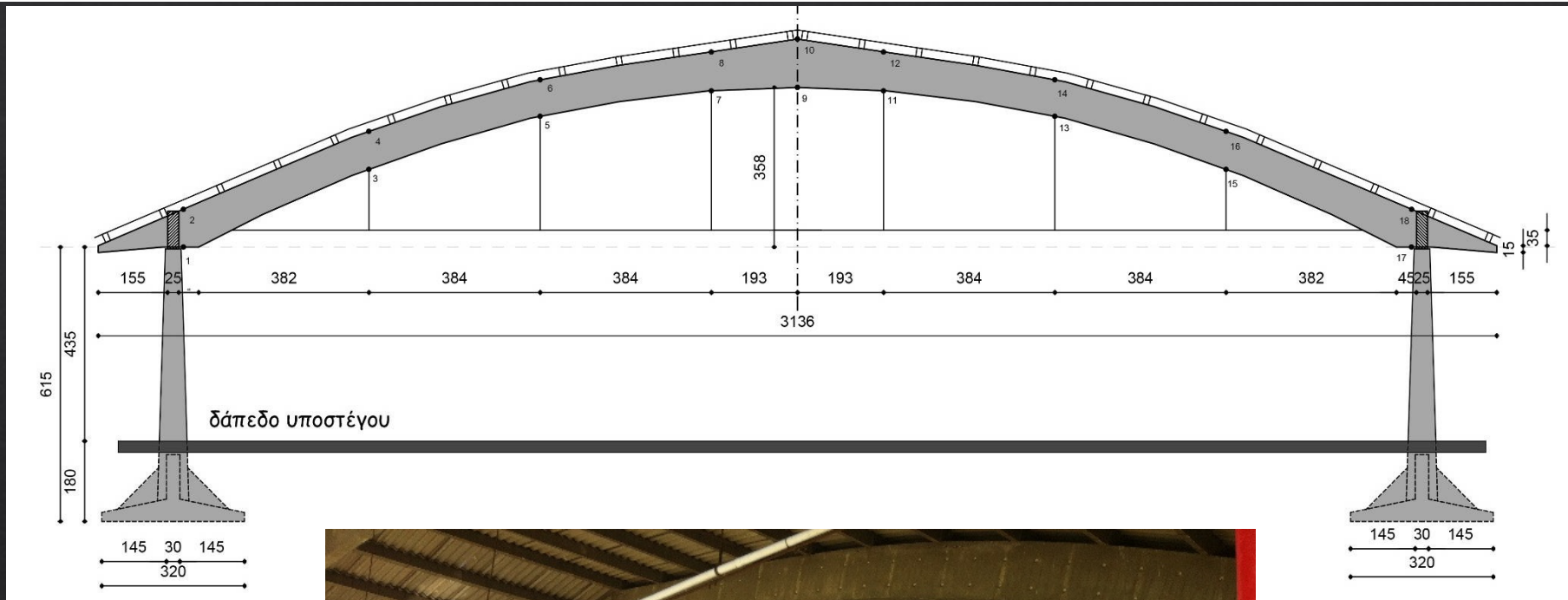
Ερευνητικά Αποτελέσματα

- Το εύρος των επιφανειακών ρηγματώσεων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος λόγω οξείδωσης του σιδηροοπλισμού, συνδέεται στενά **τόσον** με την ύπαρξη και την πυκνότητα συνδετήρων, **όσον** και με το πάχος επικάλυψης
- Η χρήση συνδετήρων $\Phi 8 / 60 \text{ mm}$ και πάχους επικάλυψης $c = 25 \text{ mm}$, αυξάνει την αντοχή της συνάφειας έναντι των μη διαβρωμένων μέχρι ποσοστού διάβρωσης 1.5% - 2%
- Η ανάπτυξη επιφανειακών ρωγμών εύρους έως 1.60 mm, συνδέεται με μία εκθετική μείωση της δύναμης συνάφειας χάλυβα σκυροδέματος.
- Στις περιπτώσεις επικάλυψης 25 mm και 40 mm, η παρουσία συνδετήρων $\Phi 8 / 60 \text{ mm}$, συνδυάστηκε με περιορισμό του εύρους της επιφανειακής ρηγματώσης μέχρι το εύρος 0.90 mm γεγονός που είχε αντιστοιχία σε μία μέση απώλεια μάζας σιδηροοπλισμού της τάξης 8.5% - 9%.
- Η πύκνωση των συνδετήρων (περίσφιγξη), πρόσφερε θετικά στον περιορισμό της απώλειας της συνάφειας.

Correlation of Surface Cracks of Concrete due to Corrosion and Bond Strength (between Steel Bar and Concrete)
Charis Apostolopoulos, K.Koulouris, Alk, Apostolopoulos, Journal Advances in Civil Engineering, 2019.

Τον Αύγουστο 2017 ένα παράκτιο Υπόστεγο κατέρρευσε Γενική άποψη του υπόστεγου πριν την κατάρρευση





Θέμα της Πραγματογνωμοσύνης :

Διερεύνηση / Εξέταση / Αίτια Πτώσης του Υφιστάμενου Συγκροτήματος Αποθηκών εκτάσεως 2500 m²

(8 μήνες πριν το γεγονός, είχαμε πραγματοποιήσει Τεχνική Επιθεώρηση).

«Προκατασκευασμένες» Τοξωτές δοκοί με τεγίδωση, οπλισμένου σκυροδέματος. Επικάλυψη από φύλλα αμιαντοτσιμέντου.

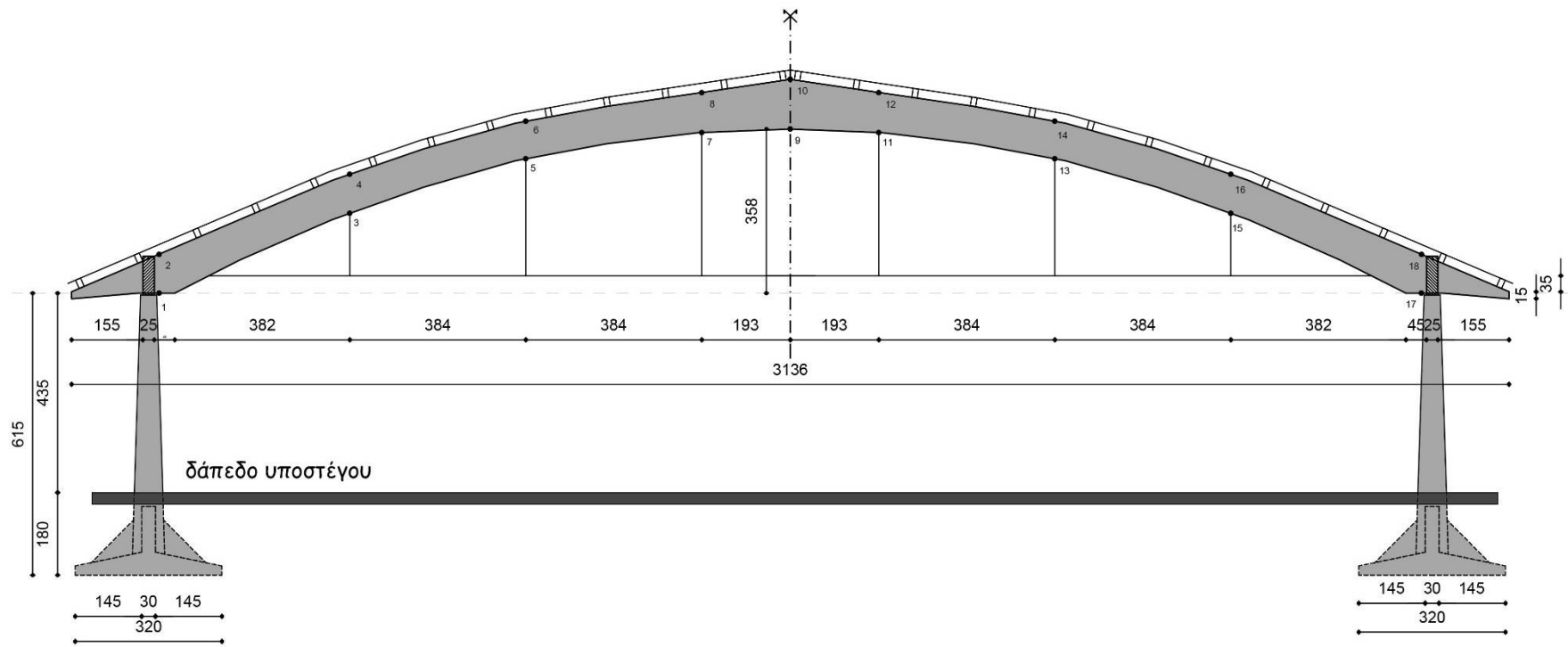
Μεταλλικός ελκυστήρας κατά μήκος της «χορδής» έκαστου τόξου.

Έδραση των τοξωτών δοκών επί εφεδράνων εντός κατάλληλα προετοιμασμένων υποδοχών (θηκών), στην κεφαλή των υποστυλωμάτων μεταξύ των περιμετρικών δοκών, με δομική ασυνέχεια προς τα υποστυλώματα.

Τα περιμετρικά υποστυλώματα και τα στοιχεία θεμελίωσής του, ήταν κατασκευασμένα από έγχυτο σκυρόδεμα όμοια και οι περιμετρικές δοκοί.

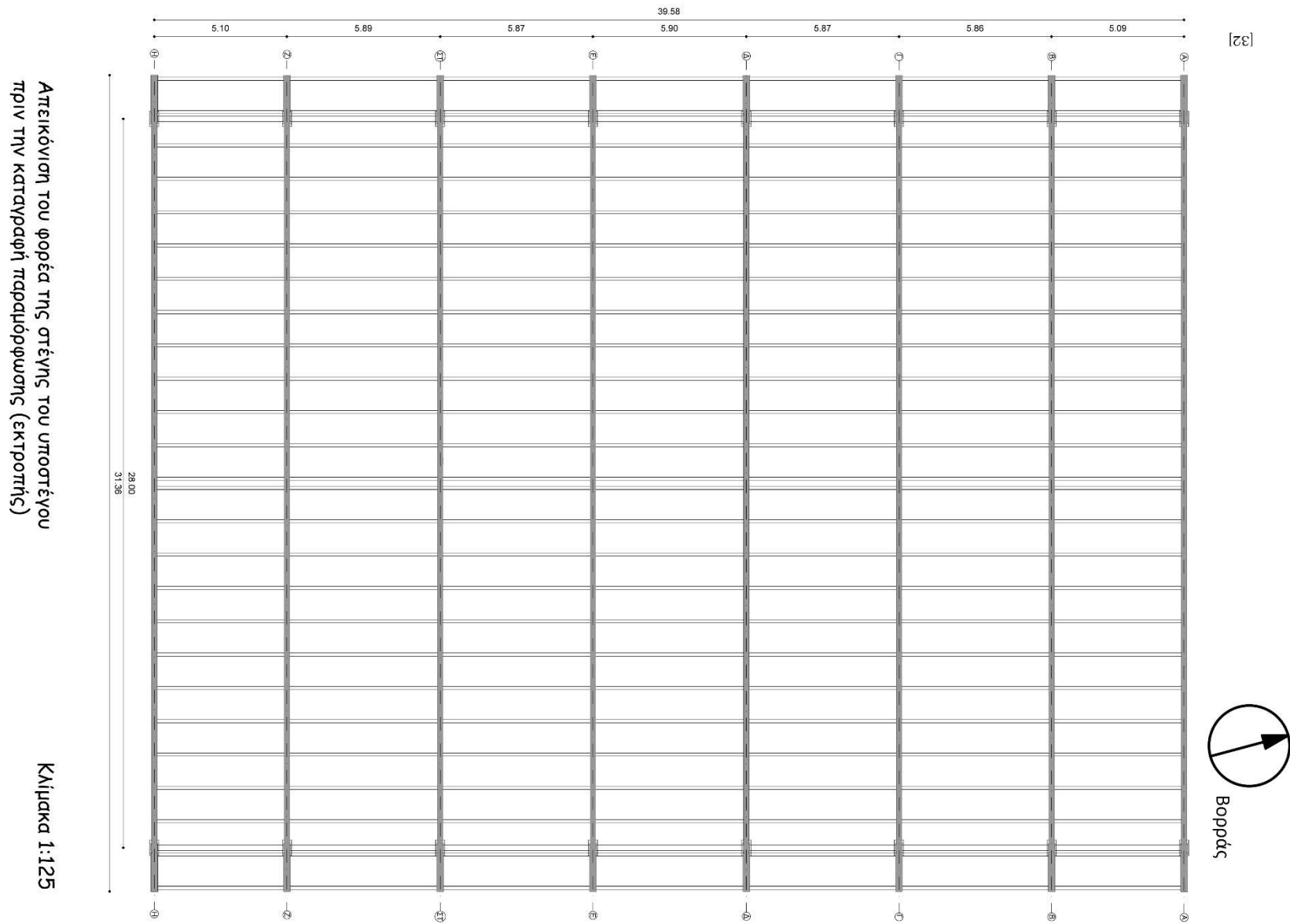
Η μελέτη, συντάχθηκε περί τον Νοέμβριο μήνα του έτους 1970 και η υλοποίηση του έργου πραγματοποιήθηκε περίπου πριν 47 έτη.

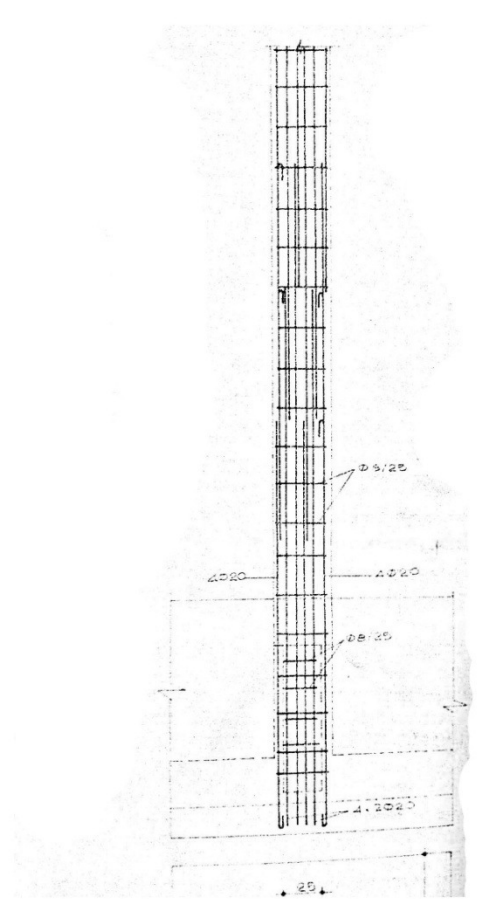
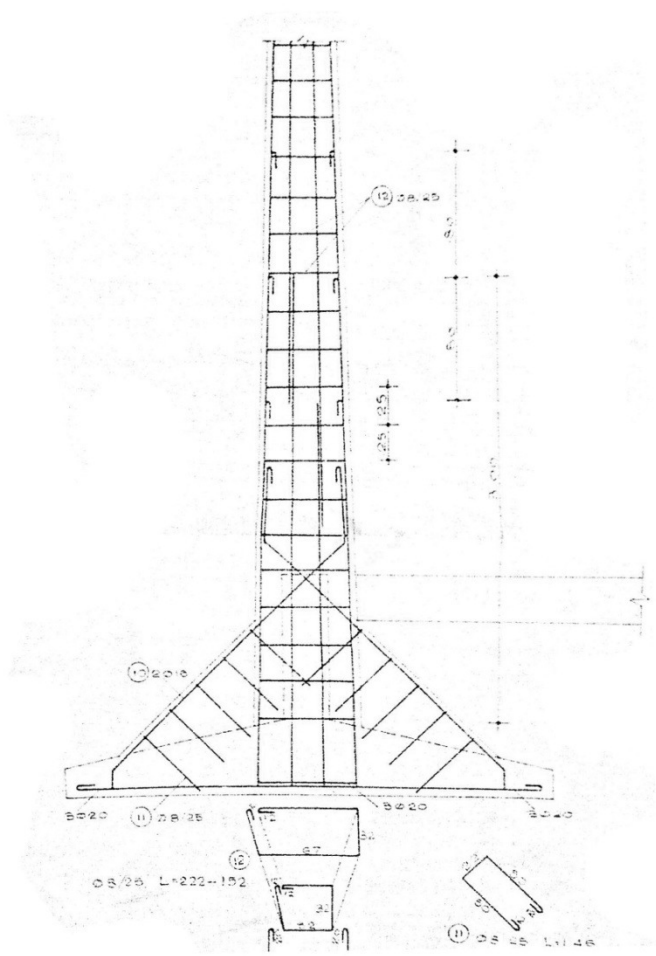
Τα επιστημονικά ευρήματα πριν και μετά την κατάρρευση, απετέλεσαν βασικούς οδηγούς της Πραγματογνωμοσύνης όσον αφορά στις θέσεις επιλογής για διεξαγωγή ενόργανων μετρήσεων - καταγραφής δεικτών, με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου.



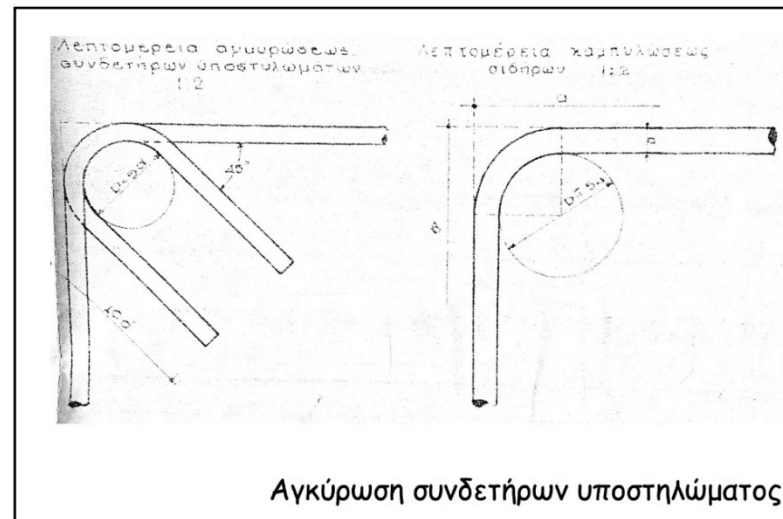
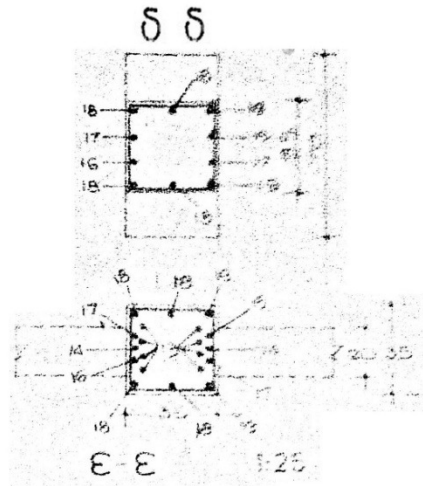
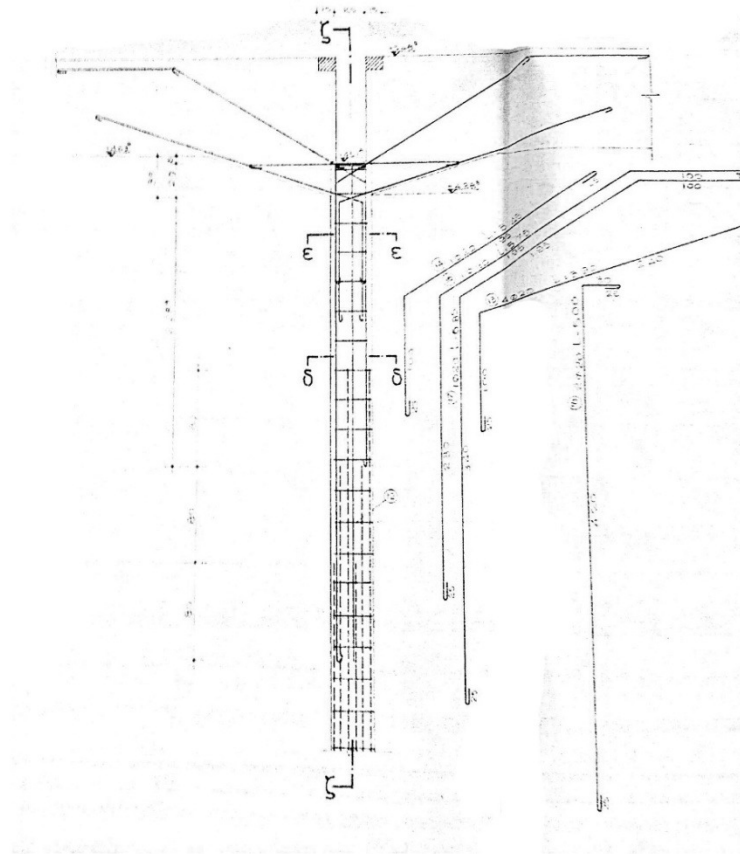
Οψοτομή της τοξωτής δοκού του υποστέγου

Κλίμακα 1:100





Οπλισμός υποστυλώματος



Οπλισμός υποστηλώματος

Αγκύρωση συνδετήρων υποστηλώματος

Άποψη πριν την κατάρρευση

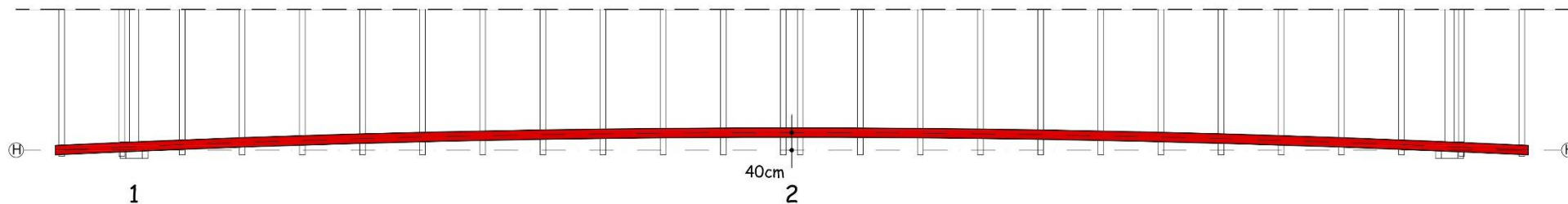
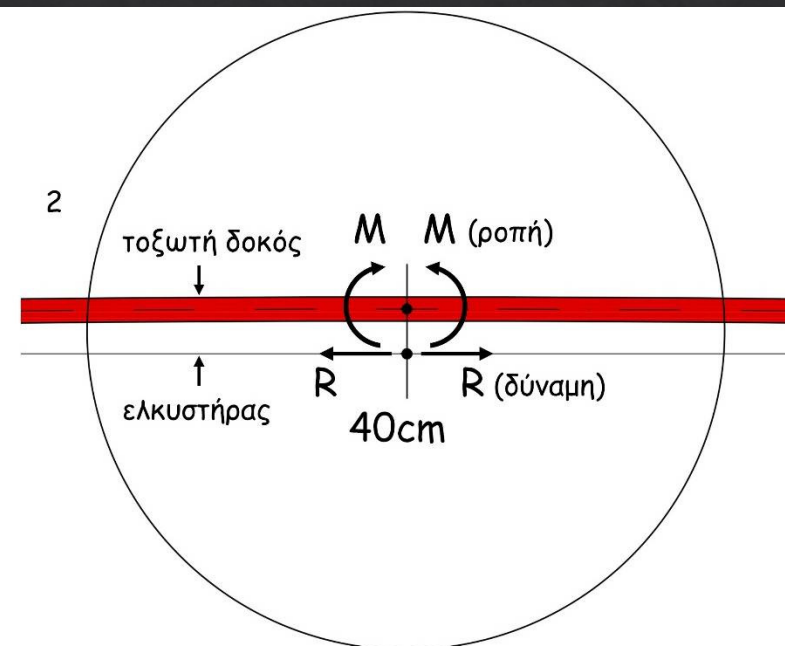
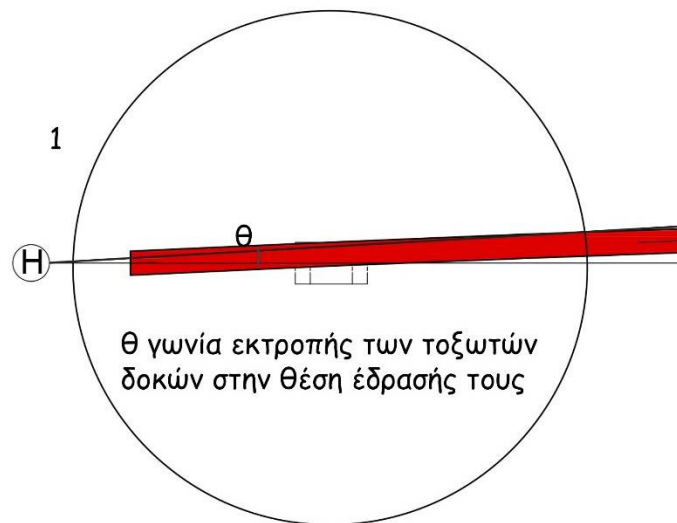
Η εκτροπή τοξωτών δοκών προκάλεσε φόρτιση εκτός επιπέδου λειτουργίας τους.



Νότια



Βόρεια



Σχεδιαστική απεικόνιση της εκτροπής (μετατόπισης) της τοξωτής δοκού

Κλίμακα 1:80



Άποψη πριν την κατάρρευση

Άποψη μετά την κατάρρευση



Η διαμόρφωση της υποδοχής ανάντη στα γωνιακά υποστυλώματα δεν παρείχε εγγυήσεις εξασφάλισης της κατακορυφότητας των ακραίων τοξωτών δοκών σε βάθος χρόνου και εχέγγυα για αποφυγή ολίσθησης τους προς τα ελεύθερα αυτά άκρα.

Από τις μετρήσεις πριν την κατάρρευση, είχαν παρουσιαστεί φαινόμενα κατά μήκος μετατόπισης της κορυφογραμμής του τοξωτού υποστέγου, με κατεύθυνση αρκτική.

Ειδικότερα, είχαν καταγραφεί εμφανείς παραμορφώσεις των υψίκορμων προκατασκευασμένων τοξωτών δοκών σε διεύθυνση εκτός του επιπέδου λειτουργίας τους, με σοβαρά ζητήματα ελαστικής ευστάθειας του φέροντα οργανισμού της στέγης.

Πριν την κατάρρευση είχε καταγραφεί εκτροπή (μετατόπιση) της κορυφογραμμής των τοξωτών δοκών (από την αρχική τους θέση) μεταξύ των τιμών 29cm και 40cm καθώς και αντίστοιχη απόκλιση από την κατακορυφότητα: 2cm έως και 5cm.

Η απόκλιση από την κατακορυφότητα, επιβάρυνε τις ήδη καταπονημένες υψίκορμες δοκούς περαιτέρω, με στρεπτικά φορτία και άλλα λυγισμικά φαινόμενα.

Σημαντικό περιορισμό αυτών των επιπρόσθετων φαινομένων και της αυξημένης εκτροπής, θα μπορούσε να διαδραματίσει η υλοποίηση αξιόπιστης αρθρωτής σύνδεσης τόσο των ακραίων τοξωτών δοκών όσον και των τεγίδων.

Σχεδιαστική Αδυναμία



Η ακραία αντιστήριξη
πριν και μετά την κατάρρευση



Μετρήσεις και στοιχεία πριν την κατάρρευση

Το σκυρόδεμα των υποστυλωμάτων, παρουσιάστηκε κατά τόπους σαθρό, αντίθετα με το εσωτερικό του, όπου παρά τις διακυμάνσεις του αντιστοιχήθηκε σε τιμές ανάλογες της κατηγορίας **C12/15** πλησιέστερα (ως προς την θλιπτική αντοχή) στην κατηγορία σκυροδέματος **B160** σύμφωνα με παλαιότερο πρότυπο.

Από μακροσκοπική άποψη, η τοξωτή δοκός φερόταν περισσότερο συμπαγής, με αραιά φαινόμενα επιφανειακής βλάβης. Η διαφοροποίηση αυτή, φαινόταν να συμβαδίζει τόσο με την προδιαγραφείσα από την μελέτη (ανώτερη) ποιότητα σκυροδέματος **B300** που αντιστοιχεί περισσότερο στην κατηγορία **C20/25**, όσο και με τις εγγυήσεις που έδινε η βιομηχανική παραγωγή "προχυτευμένων" στοιχείων σκυροδέματος.

Η συμπαγής εξωτερική εικόνα των τοξωτών δοκών ωστόσο, δε σχετίζεται απαραίτητα με την πιθανότητα μη "τρωθέντος" σκυροδέματος (από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις) αλλά με το χαμηλό πορώδες, το χαμηλό ποσοστό του περιεχόμενου σιδηροοπλισμού και την εκ του λόγου αυτού χαμηλή ένταση ρεύματος διάβρωσης (i_{cor}).

Μετρήσεις και στοιχεία πριν την κατάρρευση

Μέτρηση pH σκυροδέματος

Η μέτρηση του pH πραγματοποιήθηκε με την χρήση ειδικού δείκτη (οξέος - βάσης) και χρωματικά βαθμονομημένου πίνακα.

- Οι μετρήσεις pH του σκυροδέματος κοντά στον χάλυβα οπλισμού, έδειξαν τιμές μεταξύ **7-8 μονάδων**. Το γεγονός αυτό δείχνει πως η παθητικότητα που προσφέρει το σκυρόδεμα στον χάλυβα έχει απωλεσθεί πλήρως.

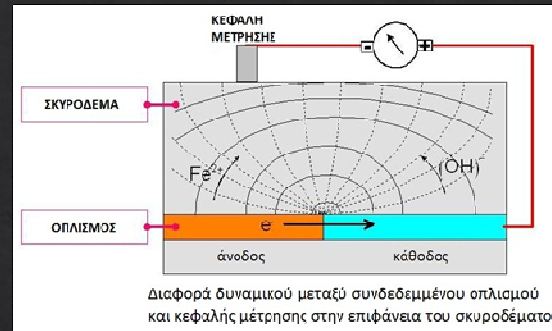


Το **βάθος ενανθράκωσης** του σκυροδέματος με ψεκασμό φαινολοφθαλείνης μετρήθηκε σε βάθη από **30mm** έως και **45mm**. Με ψεκασμό διαλύματος Νιτρικού Αργύρου (AgNO_3) ανιχνεύτηκαν ιόντα χλωρίου στα όρια του επιτρεπομένου.

Μετρήσεις και στοιχεία πριν την κατάρρευση

- Μέτρηση μικροδυναμικού

Η μέτρηση **μικροδυναμικού** έγινε κατά μήκος του κατακόρυφου οπλισμού των υποστρωμάτων, όπου καταγράφηκαν τιμές από **-300 mV** έως και **-600 mV** (**ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ**).



Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε τοπική αποκάλυψη του χάλυβα στις βάσεις τεσσάρων υποστρωμάτων.



Χρήσιμα Σχόλια

Table 3. Mass loss percentages of S400 and S500s steel bars, after their exposure to corrosion in salt spray chamber, for various exposure periods.

S400		S500s	
Exposure periods (days)	Mass Loss (%)	Exposure periods(days)	Mass Loss (%)
0	0	0	0
10	1.44	10	1.50
20	2.27	20	2.00
30	3.43	30	3.03
45	4.71	45	4.89
60	6.57	60	6.65
90	7.71	90	10.4

Σε ισόχρονη διάβρωση θαλάσσιου περιβάλλοντος (έκθεση 20 ετών σε φυσικό περιβάλλον), ο γνωστός μας Sτ III, εμφανίζεται ανθεκτικότερος του S500s και του B500c (περίπου 25%) έναντι της διάβρωσης.

Drakakaki-Apostolopoulos, «Comparison of the mechanical response of dual and single phase steel bar category», Structural Integrity Procedia , 10, pp59-65, 2018.

Χρήσιμα Σχόλια

Τομή ενανθρακωμένου



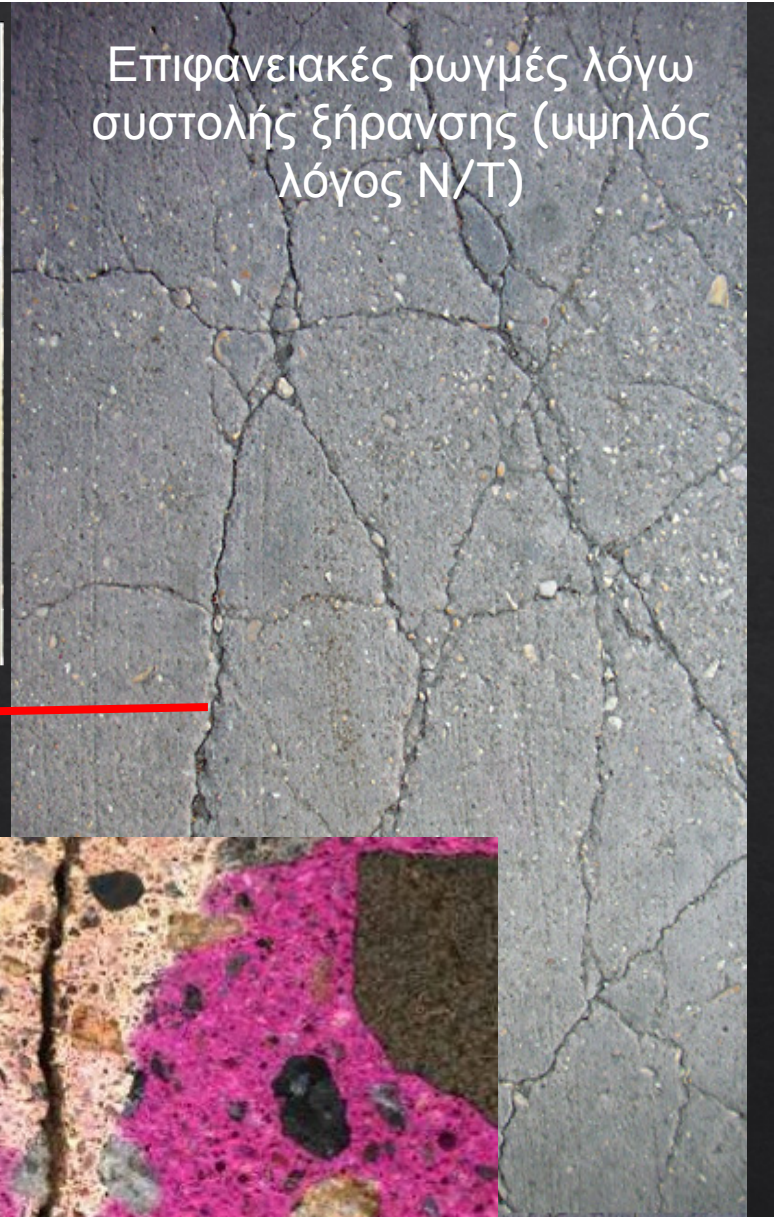
Η ενανθράκωση προκαλεί έντονο πορώδες που ευνοεί την διάχυση και την υδατοπερατότητα.

Οι συνεχείς κύκλοι wet/dry και ο παγετός επιτείνουν την επιφανειακή βλάβη (severe crack network) .

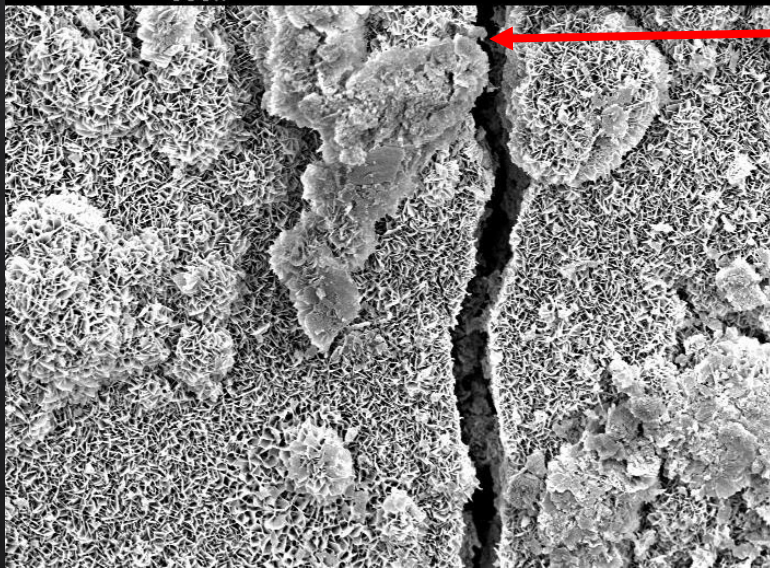
Τα προβλήματα αρχίζουν με τη σκυροδέτηση.
Προστασία EN 1504 (με μειωτές νερού)



Επιφανειακές ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης (υψηλός λόγος N/T)

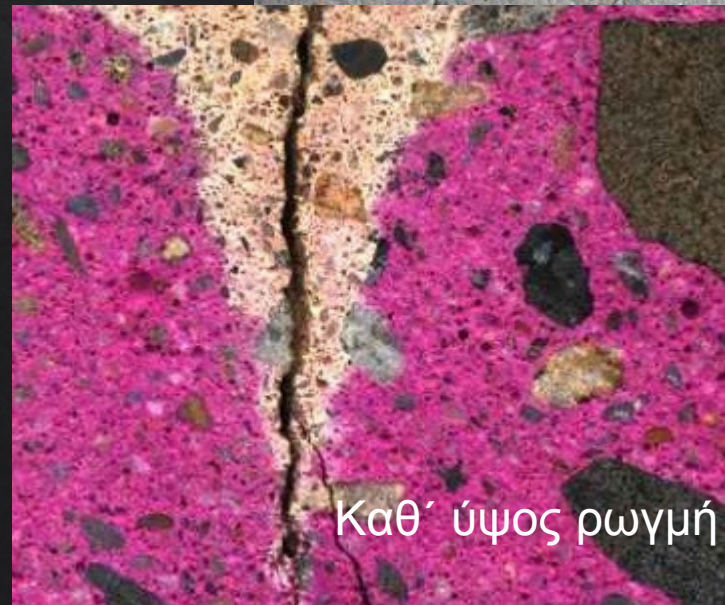


Χρήσιμα Σχόλια



Επιφανειακή ρωγή

Η ενανθράκωση και η διάχυση χλωριόντων αυξάνονται εκθετικά με το μέγεθος των επιφανειακών πόρων και ρωγμών.

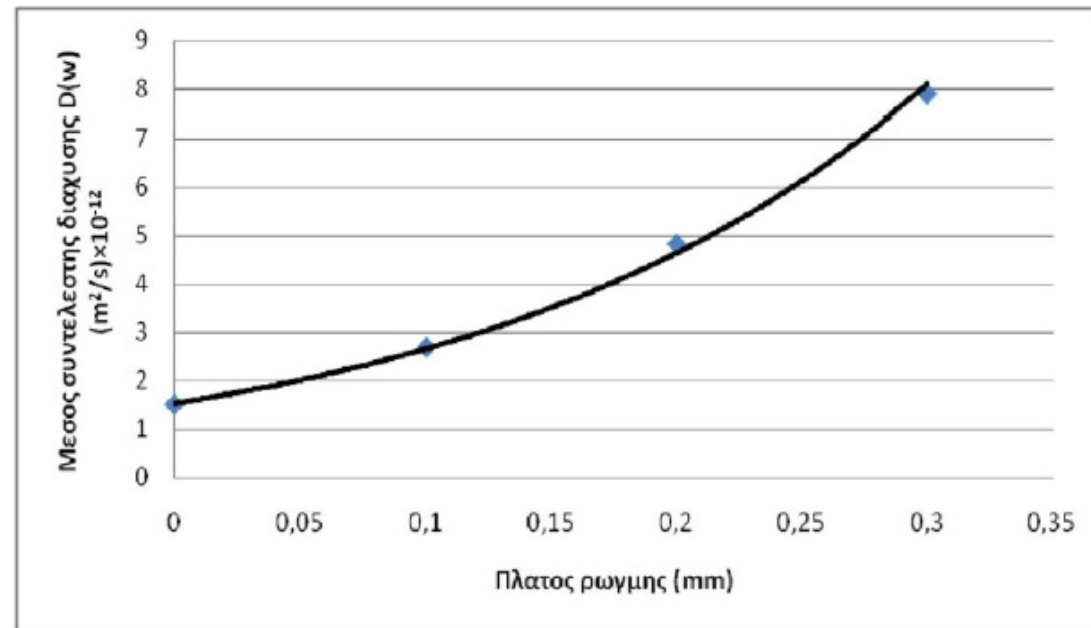


Καθ' ύψος ρωγή

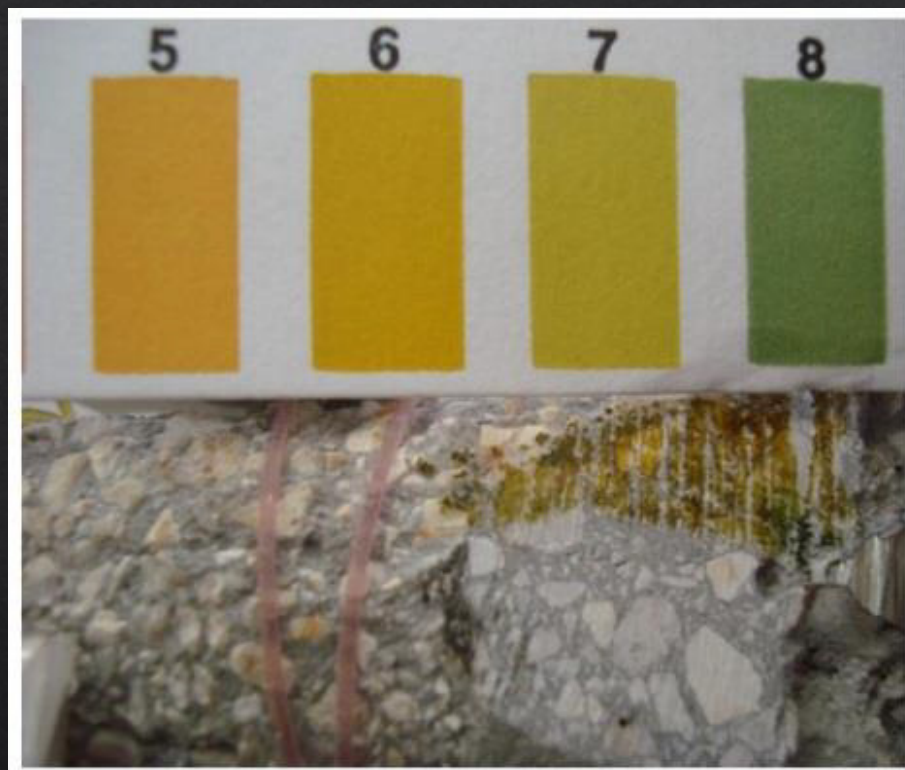
Χρήσιμα Σχόλια

D_m	Εύρος ρωγμής [mm]	$f(w)=(31,61w^2+4,73w+1)$	$D(w)=f(w)*D_m$
1,5E-12	0	1	1,5E-12
1,5E-12	0,2	3,2104	4,8156E-12
1,5E-12	0,1	1,7891	2,68365E-12
1,5E-12	0,3	5,2639	7,89585E-12
1,5E-12	3	299,68	4,4952E-10
1,5E-12	4	525,68	7,8852E-10
1,5E-12	5	814,9	1,22235E-09
1,5E-12	6	1167,34	1,75101E-09

Πίνακας 1.



Μετρήσεις και στοιχεία πριν την κατάρρευση



Μετρήσεις και στοιχεία πριν την κατάρρευση

Κατηγοριοποίηση Περιβαλλοντικής Έκθεσης / Ρυθμοί Διάβρωσης

Με βάση τον EN 206, η περιβαλλοντική έκθεση από πλευράς Δραστηκότητας, ανήκει στην κατηγορία **XS3**, αναλόγως δε του μέσου θερμοκρασιακού εύρους: $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 40^{\circ}\text{C}$, ο Ρυθμός Διάβρωσης I_{cor} κυμαίνεται μεταξύ $23.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ και $232.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ και ο αντίστοιχος Ρυθμός Απώλειας Διαμέτρου (Φ) Οπλισμού, μεταξύ $69.6 \mu\text{m}/\text{year}$ και $696 \mu\text{m}/\text{year}$.

• Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μέσης απώλειας διαμέτρου τόσο των συνδετήρων όσον και του κύριου οπλισμού, ευρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία, εάν ως χρόνος αποπαθητικοποίησης των υποστυλωμάτων τεθούν τα 10 έτη (B160, EUCON 2005) και τα 35 έτη συνεχούς διαβρωτικής δράσης με μέση απώλεια διαμέτρου $120 \mu\text{m}/\text{year}$.

• **Μετρήθηκε Απώλεια μάζας Συνδετήρων έως 62% και του Κύριου σιδηροοπλισμού έως 40%.**



ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ

ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΑΠΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

$$CDI(\text{Corrosion Damage Indicator}) = \sum_{i=1}^n \frac{\text{ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ}}{n}$$

ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ EN 206-1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΕΣ, ΕΑ

Κατηγορία	X0	XC1	XC2	XC3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
Βαρύτητα	0	1	1	2	2	3	4	2	2	3	4	3	4	4	2	2	3

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ

ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΑΠΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

ΣΤΑΘΜΗ I

ΣΤΑΘΜΗ II

ΣΤΑΘΜΗ III

ΣΤΑΘΜΗ IV

No	ΔΕΙΚΤΗΣ ΒΛΑΒΗΣ	Στάθμη I	Στάθμη II	Στάθμη III	Στάθμη IV
1	Βάθος Ενανθράκωσης/ Πάχος Επικάλυψης	≤0.2	≤0.5	≤0.7	>1.0
2	Κρίσιμο Βάθος Συγκέντρωσης Χλωριόντων * / Πάχος Επικάλυψης	0-0.1	0.1-0.7	0.7-1	>1.0
3	Ηλεκτρική Αντίσταση Σκυροδέματος (KOhmcm)	>20	10-20	5-10	<5
4	Τιμή Ημι-δυναμικού SHE (-mV)	180-220	220-290	290-350	350-450
5	Ρυθμός Διάβρωσης (μΑ/cm ²)	<0.1	0.1-0.5	0.5-1	>1
6	Μέση Αντοχή Σκυροδέματος (MPa)	>30	25-30	20-25	<20
7	Σχετική Υγρασία Περιβάλλοντος (%)	0-40	>72	40-50	50-72
8	Αριθμός Ημερών Κρίσιμης Θερμοκρασίας (°C) **	0	10-20	30-50	>50
9	Ph Σκυροδέματος	10-12.5	8.5-10	7.2-8.5	<7.2
10	Αριθμός Ημερών Διαβροχής >2mm	0-10	10-30	30-50	>50
11	Πλάτος ρωγμών (mm)	0	0.1-0.3	0.3-0.5	>0.5 (spalling)
12	Απώλεια Διατομής Οπλισμού (%)	0-2	2-5	5-10	>10

* (>0.18% κ.β. σκυροδέματος), ** > 29°C

Μετρήσεις και στοιχεία πριν την κατάρρευση

Τα αποτελέσματα μετρήσεων (και τα Μετεωρολογικά Δεδομένα – EMY) κατηγοριοποίησαν τους σχετικούς Δείκτες Βλάβης απο Διάβρωση (CDI) των υποστυλωμάτων κατά αύξοντα αριθμό ως ακολούθως:

1 σε βλάβη Στάθμης IV, 2 σε βλάβη Στάθμης III, 3 σε βλάβη Στάθμης II, 4 σε βλάβη Στάθμης IV, 5 σε βλάβη Στάθμης IV, 6 σε βλάβη Στάθμης IV, 7 σε βλάβη Στάθμης IV, 8 σε βλάβη Στάθμης III, 9 σε βλάβη Στάθμης III, 10 σε βλάβη Στάθμης III, 11 σε βλάβη Στάθμης IV, 12 σε βλάβη Στάθμης IV.

Μέσω δε του απλοποιημένου Δείκτη Διάβρωσης SCI και του συντελεστή βαρύτητας EA, προκύπτει σαφέστατα δυσμενέστατος Δείκτης Δομικής Ακεραιότητας των υποστυλωμάτων.

Η κατηγοριοποίηση βλαβών στις περιμετρικές δοκούς και στις τοξωτές δοκούς κατατάσσουν τα συγκεκριμένα αυτά στοιχεία σε Δείκτες Δομικής Ακεραιότητας ολιγότερο δυσμενείς από τους αντίστοιχους των υποστυλωμάτων.

Άποψη μετά την κατάρρευση



Άποψη μετά την κατάρρευση



Η απώλεια της συνεπιπεδότητας τοξωτών δοκών με την διεύθυνση της ανάπτυξης των ελκυστήρων, εκτιμάται ότι έλαβε χώρα σε συνέργεια διαφόρων παραγόντων. Κυριότερος εξ αυτών εκτιμάται ότι προήλθε αφενός από την ελεγχόμενης αξιοπιστίας έδραση των ακραίων τοξωτών δοκών στην κεφαλή των (τεσσάρων) γωνιακών υποστυλωμάτων και αφετέρου από την συντελεσθείσα απώλεια δυνάμεων δεσμού συνάφειας του σιδηροοπλισμού των υποστυλωμάτων στην σύνδεσή του με τις κατά μήκος του υποστέγου περιμετρικές δοκούς. Στις θέσεις έδρασης (ιδιαίτερα) μετά από σεισμικές δράσεις αναπτύσσεται αρχικά γωνία στροφής θ .

54

Νοτιοδυτική άποψη του παλαιού υποστέγου πριν την κατάρρευση



Οκτώ μήνες πριν την κατάρρευση (πραγματογνωμοσύνη - σελίδα 6) είχαμε αναφέρει: *Το φαινόμενο της επιμήκους μετατόπισης (του κορφιά), αποτελεί πρόβλημα ελαστικής ευστάθειας και εγκυμονεί κινδύνους καθώς μπορεί να οδηγήσει σε θραύση «άνευ προειδοποιήσεως» (εννοώντας ψαθυρό τρόπο θραύσης δίχως εκδήλωση περαιτέρω προειδοποιητικής παραμόρφωσης).* Στην ίδια τεχνική πραγματογνωμοσύνη (σελίδα 13), συμπερασματικά, είχε αναφερθεί ότι: *Η κατάσταση αυτή, χαρακτηρίζει σαφέστατα το υπόστεγο ως επικινδύνως ετοιμόρροπο και η διατήρησή του, εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για τους πολίτες.*

Παράλληλα δε με την ποικίλη χαλάρωση των συνδέσεων μεταξύ τοξωτών δοκών - τεγίδων, εκτιμάται ότι έδρασαν σε συνέργεια αρνητικά πολλοί παράγοντες, ενθαρρύνοντας την αρχικά μικρή κατά μήκος μετατόπιση της κορυφογραμμής των τοξωτών δοκών του υποστέγου (αρκτικά) η οποία σταδιακά κατέστη μη διαχειρίσιμη και καταστροφική. Η μακροσκοπικά παγιωμένη εκτροπή των υψίκορμων τοξωτών δοκών (σε θέσεις εκτός επιπέδου λειτουργίας τους), στην πραγματικότητα ήταν απολύτως φαινομενική. Στην πραγματικότητα, η κατάσταση αυτή επιβαρυνόταν σταδιακά πέραν των δυνατοτήτων της τοξωτής δοκού με καμπτικές φορτίσεις (M-εκτός επιπέδου λειτουργίας τους) λόγω της σταθερά ασκούμενης τάνυσης (R) των μεταλλικών ελκυστήρων.



Η καταγραφείσα συστηματική ρηγμάτωση στην περιοχή της γωνίας, επιβεβαίωσε αφενός την ανάπτυξη ισχυρής λοξής κάμψης επί των υποστυλωμάτων (κατά την κατάρρευση του φέροντος οργανισμού της στέγης) και αφετέρου την απώλεια συνάφειας και ολίσθηση του διαβρωμένου σιδηροοπλισμού (bonding slip).



Ζητήματα αξιοπιστίας της αρθρωτής σύνδεσης τεγίδων και τοξωτών δοκών (απουσία κλείδας) ακύρωσαν το ολόσωμο της σύνδεσης των τεγίδων με τις τοξωτές δοκούς επιτείνοντας τα φαινόμενα εκτροπής της κορυφογραμμής.

ΤΕΛΙΚΟ ΠΟΡΙΣΜΑ

Σε απάντηση του ερωτήματος που τέθηκε για τα αίτια της κατάρρευσης, αναφέρθηκε ότι:

Η επιθετική δράση του θαλάσσιου μετώπου και τα κατά καιρούς σεισμικά συμβάντα οδήγησαν στη χρόνια συσσώρευση βλαβών στο οπλισμένο σκυρόδεμα.

Τα ανωτέρω, σε συνδυασμό με την ανυπαρξία ουσιαστικών παρεμβάσεων συντήρησης – αποκατάστασης κατά το παρελθόν, προκάλεσαν ραγδαία υποβάθμιση της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος.

Η ραγδαία υποβάθμιση της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος, ανέδειξε αδύναμα σημεία του στατικού φορέα όπως οι υποδοχές (θήκες) στην κεφαλή των ακρογωνιαίων υποστυλωμάτων όπως αναφέρονται αναλυτικά ανωτέρω.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ, η απάντηση (στα ερωτήματα περί της κατάρρευσης) είναι σύνθετη καθώς αποτελεί συνέργεια των ανωτέρω παραγόντων.



Ευχαριστώ για
την προσοχή σας

