

## **Η μικρορηγματώση στο μικροσκόπιο. Μια εφαρμογή της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας κηλίδων (ESPI). Microcracks under the microscope. An application of the Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI).**

**Παναγιώτης ΣΠΥΡΙΔΗΣ<sup>1</sup>, Andreas UNTERWEGER<sup>2</sup>, Ronald MIHALA<sup>3</sup>  
Konrad BERGMEISTER<sup>4</sup>**

*Λέξεις κλειδιά: ESPI, Αγκυρώσεις, Σημειακή Φόρτιση, Ηλ. συμβολομετρία κηλίδων*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Η ηλεκτρονική συμβολομετρία κηλίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI) χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων διαφόρων υλικών. Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται μια καινοτόμος εφαρμογή της ESPI. Η καινοτομία έγκειται στο γεγονός ότι κατέστη δυνατή η αναγνώριση παραμορφώσεων και ρηγματώσεων της τάξης του νανομέτρου (nm) για σημειακή φόρτιση, μία παγκοσμίως πρώτη εφαρμογή στο σκυρόδεμα.

Στόχο αποτελεί ο εντοπισμός πολύ μικρών παραμορφώσεων και μικρορηγματώσεων στο σκυρόδεμα που προκαλούνται από συγκεντρωμένα φορτία. Συγκεκριμένα, έρχεται να συνδράμει την έρευνα για τη συμπεριφορά των αγκυρίων κοντά στην ακμή ενός στοιχείου σκυροδέματος υπό αξονική ή εγκάρσια φόρτιση. Τα αποτελέσματα πειραμάτων με χρήση της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας κηλίδων μπορούν να περιγράψουν με μεγάλη ακρίβεια την εντατική κατάσταση του δοκιμίου ακόμη και για πολύ μικρά φορτία, αλλά και να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για την έναρξη και την εξέλιξη της ρηγματώσης καθώς και για το μηχανισμό αστοχίας των αγκυρίων.

**ABSTRACT:** Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), is used to identify material properties. In the present paper a novel application of ESPI is demonstrated. Novelty lies in the fact that it has been possible to identify strains (cracks) in the order of nanometers induced by nodal loading, a world first application on concrete.

This application refers to the recognition of minute deformations and microcracks in concrete induced by concentrated loading. Particularly, it comes to support the

---

<sup>1</sup> Επιστ. Συνεργάτης, email: spyridis.panagiotis@boku.ac.at

<sup>2</sup> Επιστ. Συνεργάτης, email: andreas.unterweger@boku.ac.at

<sup>3</sup> Επιστ. Συνεργάτης, Υπεύθυνος Εργαστηρίου, email: ronald.mihala@boku.ac.at

<sup>4</sup> Καθηγητής, email: konrad.bergmeister@boku.ac.at

BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna  
Department of Civil Engineering and Natural Hazards  
Institute of Structural Engineering

research on fastenings close to a free edge of a concrete member. The results of experiments with use of ESPI can accurately describe the strain state of the specimen already at a very low load level, while it can give valuable information on the crack initiation and propagation as well as the failure process for single anchors close to an edge under shear or axial loading.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστοχία μεταλλικών αγκυρίων σκυροδέματος κοντά στο όριο χαρακτηρίζεται σε πολλές περιπτώσεις από τη διάρρηξη του υλικού καθώς και από την απόσχιση πρίσματος του δομικού στοιχείου συμπαρασυρόμενου από το αγκύριο. Τετοιού τυπου αστοχίες σχετίζονται με πολύ μικρές παραμορφώσεις και περιγράφονται από νόμους της θραυστομηχανικής. Κατά συνεπεια, η διαγνωση των μικρορηγματώσεων ήδη από τα πρώτα στάδια της φόρτισης είναι κρίσιμη για τη διάγνωση αυτών των μορφών αστοχίας.

Η Ηλεκτρονική Συμβολομετρία Κηλίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI) παρέχει σημαντική βοήθεια στην ταυτοποίηση της μικρορηγματώσης και περαιτέρω στη μελέτη της αστοχίας σκυροδέματος λόγω σημειακής φόρτισης από το αγκύριο. Η μέθοδος ESPI έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για την έρευνα των φυσικών ιδιοτήτων διαφόρων δομικών υλικών. Εντούτοις, η εφαρμογή της τεχνικής που παρουσιάζεται στο παρόν, είναι η πρώτη παγκοσμίως αναφορικά με την εξέλιξη των παραμορφώσεων και των ρηγματώσεων που προκαλούνται στο σκυρόδεμα από τη δράση συγκεντρωμένου φορτίου και ειδικά μεταλλικών αγκυρίων. Παρουσιάζονται οι τεχνικές λεπτομέρειες των πειραμάτων, καθώς και σημαντικά ευρήματα για τη συμπεριφορά των αγκυρώσεων στο σκυρόδεμα υπό αξονικά και εγκάρσια φορτία. Η μελέτη επικεντρώνεται σε μεμονωμένα αγκύρια τοποθετημένα αρκετά κοντά στην ακμή του δομικού στοιχείου, όπου η επιρροή του ορίου είναι κρίσιμη για το μηχανισμό αστοχίας της σύνδεσης.

## ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΓΚΥΡΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Όλες οι μορφές αστοχίας για ένα μεμονωμένο αγκύριο που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία, καθώς και στις οδηγίες σχεδιασμού (επί παραδείγματι Eligehausen, Malleé & Silva 2006 και ΕΟΤΑ 1997) παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 και είναι οι εξής:

### Υπό εφελκυστικό φορτίο

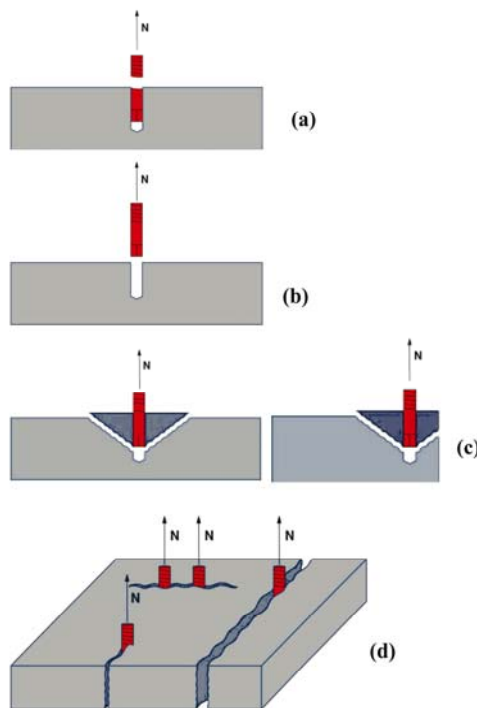
- (a) Αστοχία Χάλυβα
- (b) Εξόλκευση Αγκυρίου

- (c) Αστοχία Κώνου Σκυροδέματος και Απομειωμένου Κώνου λόγω κοντινού άκρου
- (d) Αστοχία Διάρρηξης Σκυροδέματος.

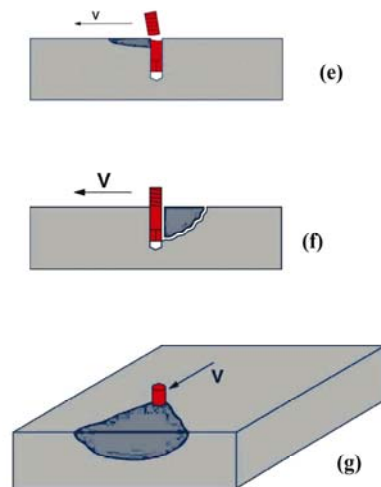
Υπό εγκάρσιο φορτίο

- (e) Αστοχία Χάλυβα
- (f) Εκμόγλευση<sup>1</sup> Σκυροδέματος (απόσχιση πρίσματος αστοχίας σε κατεύθυνση αντίθετη με αυτή της φόρτισης)
- (g) Απόσχιση Πλευρικού Κώνου Σκυροδέματος

Αστοχία λόγω αξονικών φορτίων



Αστοχία λόγω εγκάρσιων φορτίων



**Σχήμα 1.** Όλα τα είδη αστοχίας για μεμονωμένο αγκύριο. Το σχήμα προέρχεται από το (Mallée 2005)

<sup>1</sup> Ο όρος εκμόγλευση αποτελεί μετάφραση του γερμανικού Aushebeln και του αντίστοιχου αγγλικού pry-out. Η ορθότητα του όρου έχει διαπιστωθεί από τους συγγραφείς, ωστόσο αναγνωρίζεται ότι είναι λέξη που συναντάται πολύ σπάνια στα ελληνικά

Όταν ένα αγκύριο είναι τοποθετημένο κοντά στην ακμή του δομικού στοιχείου, η ανάπτυξη και διάχυση των τάσεων από το αγκύριο στο υλικό που το περιβάλλει περιορίζεται, με αποτέλεσμα την μειωμένη φέρουσα ικανότητα της αγκύρωσης και την αστοχία του σκυροδέματος με διάρρηξη ή αποκόλληση πρίσματος αστοχίας.

Ο σχεδιασμός μιας αγκύρωσης πρέπει να εξασφαλίσει ότι οι δράσεις σχεδιασμού δεν θα υπερβούν τις αντοχές σχεδιασμού για καθένα από τα μοντέλα αστοχίας. Κάθε μορφή αστοχίας εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως είναι η ποιότητα του χάλυβα του αγκυρίου, η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το βάθος αγκύρωσης, ή η απόσταση του αγκυρίου από το ελεύθερο άκρο. Ωστόσο, στην πράξη είναι πιθανό να εμφανιστεί κάποια επαλληλία των κρίσιμων για κάθε μορφή αστοχίας παραμέτρων άρα και των επιμέρους μηχανισμών, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται αντίστοιχα και εικόνες μεικτής αστοχίας. Για εφελκυστικά φορτία, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στις περιπτώσεις αστοχίας σκυροδέματος τύπου απόσχισης απομειωμένου κώνου με επιρροή του ορίου (c) σε συνδυασμό με διάρρηξη σκυροδέματος (d). Στην περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης μελετάται η αστοχία απόσχισης πλευρικού κώνου (g).

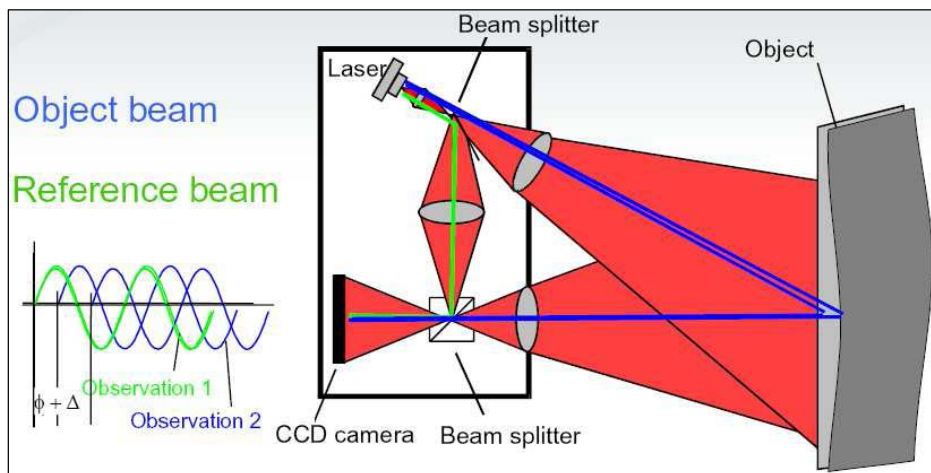
## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΚΗΛΙΔΩΝ (ESPI)

### Προηγούμενες χρήσεις της μεθόδου ESPI

Η μέθοδος ηλεκτρονικής συμβολομετρίας κηλίδων ESPI κατέστη δυνατή μετά την εφεύρεση του λέιζερ στη δεκαετία του 1960 και από τότε έχει εξελιχθεί παράλληλα με την πρόοδο της οπτικής επιστήμης και της τεχνολογίας υπολογιστών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά, μεταξύ άλλων, ως ένα εργαλείο για τον προσδιορισμό των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, ρεολογικές ιδιότητες), τον έλεγχο εξαρτημάτων και πρωτοτύπων βιομηχανικών προϊόντων και την αναβάθμιση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Είναι μια μέθοδος που δεν απαιτεί επαφή ή επέμβαση στο δοκίμιο, γι' αυτό συνήθως κατατάσσεται στις μη καταστρεπτικές μεθόδους. Στην μελέτη του σκυροδέματος, η μέθοδος ESPI έχει χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο απομακρυσμένης οπτικής μέτρησης από πολλούς ερευνητές. Η παρούσα πειραματική μελέτη στηρίχθηκε στη συγκεκριμένη τεχνική ESPI που αναπτύχθηκε από τον Ettemeyer (1988), καθώς και στην έρευνα του Eberhardsteiner (2002) για τις μηχανικές ιδιότητες του ξύλου ερυθρελάτης. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή (Dantec Dynamics), η συγκεκριμένη τεχνική συμβολομετρίας κηλίδων χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στον προσδιορισμό της μικρορηγμάτωσης σκυροδέματος. Παράλληλα αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου ESPI σε αγκύρια σκυροδέματος και την πιο σαφή μέχρι σήμερα αποτύπωση της συγκέντρωσης τάσεων και της ρηγμάτωσης για αγκυρώσεις υπό αζονικά και εγκάρσια φορτία.

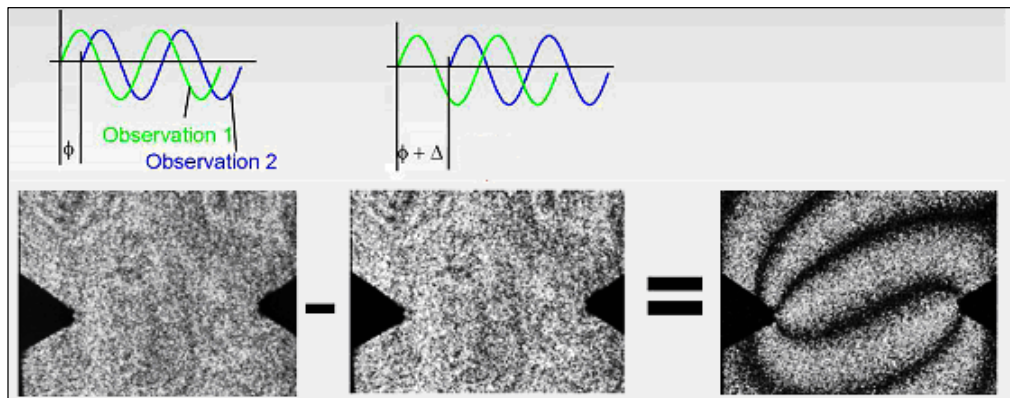
### Προσδιορισμός παραμορφώσεων και μικρορηγματώσεων με τη μέθοδο ESPI

Η ηλεκτρονική συμβολομετρία κηλίδων βασίζεται στη συσχέτιση των αποτυπώσεων μια επιφάνειας, στην οποία προσπίπτουν δέσμες ακτινών laser, ενώ αυτή παραμορφώνεται στη διάρκεια του χρόνου. Οι αποτυπώσεις γίνονται με βιντεοσκόπηση σε κάμερα CCD. Η γενική διάταξη του συμβολόμετρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η δέσμη laser που πηγάζει από το σημείο Α, διέρχεται από έναν διαχωριστή δέσμης (ημιδιαφανές κάτοπτρο) όπου χωρίζεται σε μια «δέσμη αναφοράς» και σε μία «δέσμη αποτύπωσης αντικειμένου». Η δέσμη αναφοράς οδηγείται με κατάλληλη διάταξη κατόπτρων στο φιλμ αποτύπωσης ενώ η δέσμη αντικειμένου ανακλάται στην επιφάνεια του δοκιμίου μελέτης και μαγνητοσκοπείται από την κάμερα CCD. Κατά τη δίοδό τους από το διαχωριστή δέσμης, τα μήκη κύματος των δύο δεσμών αντικειμένου και αναφοράς έχουν κοινή φάση. Με κατάλληλους φακούς οι δέσμες εστιάζονται ή διευρύνονται ώστε να έχουν το ίδιο μέγεθος όταν συμβάλλουν στο φιλμ αποτύπωσης. Κατά τη συμβολή των δύο δεσμών στο φιλμ αποτύπωσης δημιουργείται μια διάταξη κηλίδων (speckle pattern, Σχήμα 3 αριστερά και στο κέντρο). Αυτό συμβαίνει επειδή η δέσμη αντικειμένου διαθλάται λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας ανάκλασης και η φάση της αλλοιώνεται. Κάθε διάταξη κηλίδων αποτελεί ένα μοναδικό χαρακτηριστικό αποτύπωμα της μορφής της επιφάνειας του δοκιμίου μελέτης. Όταν το δοκίμιο μελέτης φορτιστεί, οι παραμορφώσεις μπορούν να εξαχθούν από τη συσχέτιση των διατάξεων κηλίδων της αρχικής, απαραμόρφωτης φάσης και της παραμορφωμένης φάσης σε κάθε στιγμή αποτύπωσης. Με κατάλληλο συνδυασμό περισσότερων δεσμών ακτινών βάσει της τεχνικής 3D ESPI (Dantec Dynamics), μπορούν να υπολογισθούν οι παραμορφώσεις της επιφάνειας που μελετάται και στις τρεις διευθύνσεις.



Σχήμα 2. Γενική διάταξη συμβολόμετρου ESPI (Dantec Dynamics)

Από την υπέρθεση των αποτυπώσεων δύο διαφορετικών φάσεων παραμόρφωσης προκύπτει μια εικόνα κροσσών συμβολής των κηλίδων (Σχήμα 3 δεξιά). Αυτή η εικόνα ονομάζεται συμβολόγραμμα. Οι κροσσοί συμβολής αντιπροσωπεύουν καμπύλες που ενώνουν σημεία της επιφάνειας του δοκιμίου με ίση σχετική μετατόπιση σε μία διεύθυνση. Αν θεωρηθεί το απαραμόρφωτο στάδιο ως εικόνα αναφοράς, με επεξεργασία των εικόνων κροσσών συμβολής υπολογίζονται οι παραμορφώσεις της επιφάνειας που μελετάται. Η ρηγμάτωση σε ένα συμβολόγραμμα διακρίνεται ως λεπτό όριο μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικής απόχρωσης, οι οποίες απεικονίζουν τα χείλη της ρωγμής. Καθώς η ακριβής τιμή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού δεν είναι γνωστή, η συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή αγκύρωσης μπορεί να προσδιορισθεί μόνο προσεγγιστικά μέσω των παραμορφώσεων. Πιο λεπτομερείς περιγραφές της μεθόδου περιέχονται στα (Eberhardsteiner 2002, Mix 2005, Unterweger 2008)



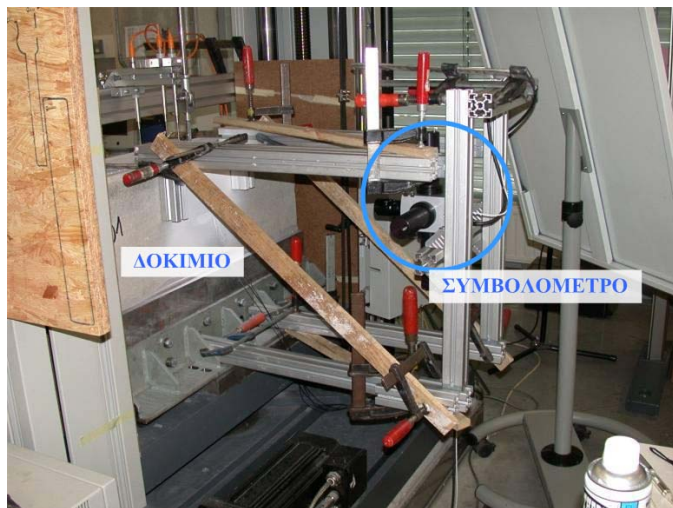
**Σχήμα 3.** Δεξιά: Δημιουργία διάταξης κηλίδων στην αφόρτιστη φάση, Κέντρο: Δημιουργία διάταξης κηλίδων για παραμόρφωση κατακόρυφη  $\Delta$ , Δεξιά: Συμβολόγραμμα από τη συσχέτιση των δυο διατάξεων κηλίδων. (Dantec Dynamics)

Λόγω της ευαισθησίας της μεθόδου, το πείραμα πρέπει να πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον προστατευόμενο ακόμη και από πολύ ασθενείς εξωγενείς δονήσεις και μετατοπίσεις (Σχήμα 4) καθώς και από εξωτερικές πηγές φωτός ενώ οι παραμορφώσεις μεταξύ δύο σταδίων φόρτισης πρέπει να είναι πολύ μικρές. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξεως των 10 nm. Η περιοχή εξέτασης στα πειράματα που περιγράφονται παρακάτω είναι περίπου 140x120 mm για τα πειράματα αξονικής φόρτισης και 300x200 mm για τα πειράματα εγκάρσιας φόρτισης. Η επιθυμητή ταχύτητα επιβολής του φορτίου εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του υλικού και από τη θέση του συμβολόμετρου. Στα πειράματα που παρουσιάζονται η ταχύτητα επιβολής είχε τιμές από 0,3 έως 0,03 mm/min.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

### Συσκευή φόρτισης Zwick Z100

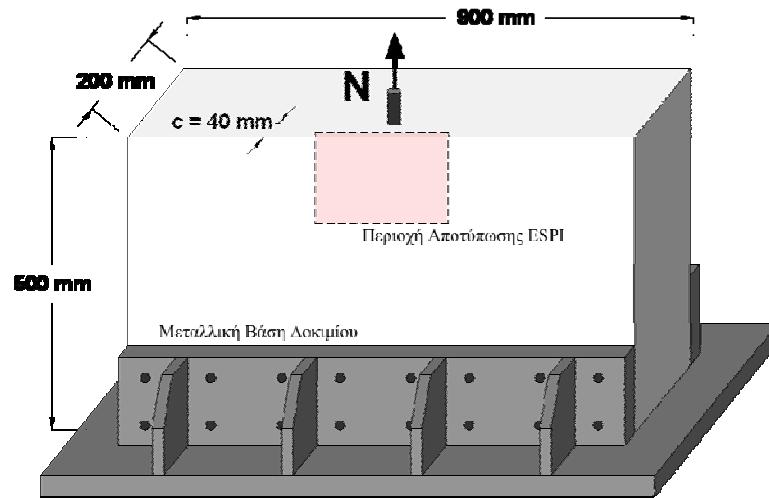
Για να επιτευχθεί η φόρτιση του αγκυρίου σύμφωνα με τις απαραίτητες προϋποθέσεις (μικρή ταχύτητα, μικρές δονήσεις), επιλέχθηκε η συσκευή Zwick Z100. Στη συσκευή αυτή, η μετάδοση κίνησης στον άξονα επιβολής φορτίου γίνεται από ηλεκτρομηχανικό έμβολο αντί υδραυλικού με αποτέλεσμα να αποφεύγονται ανεπιθύμητοι κραδασμοί. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να μεταδώσει αυτό το σύστημα περιορίζεται στα 100 kN περίπου, αλλά η ταχύτητα επιβολής μπορεί να πάρει τιμές από  $0.5 \cdot 10^{-3}$  έως 300 mm/min.



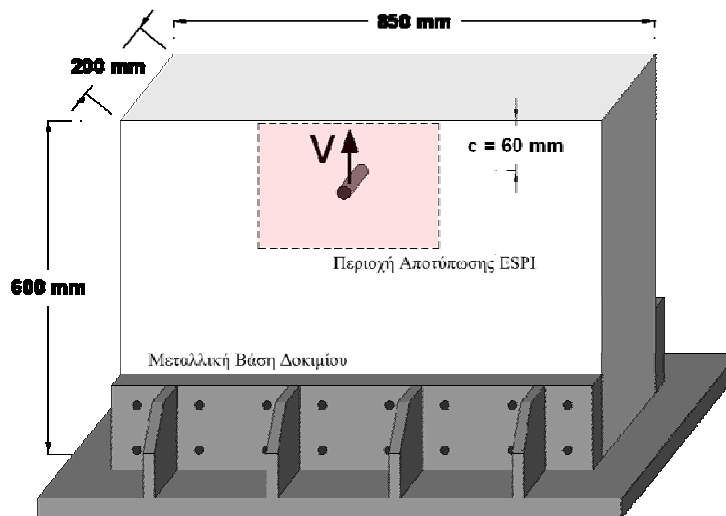
Σχήμα 4. Πραγματική διάταξη πειράματος με τη συσκευή Zwick Z100

### Δοκίμια υπό αξονική φόρτιση

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 5. Το δοκίμιο αποτελείται από άοπλο σκυρόδεμα κλάσης C20/25. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η στήριξη του δοκιμίου στο σταθερό δάπεδο υλοποιήθηκε μέσω σύνδεσής του σε μεταλλική βάση. Με αυτή τη διάταξη το δοκίμιο υπόκειται αποκλειστικά σε εφελκυστικές τάσεις. Τα αγκύρια πακτώθηκαν με χρήση εποξεικής ρητίνης δύο συστατικών μέσα σε τρύπες σε σκληρυμένο σκυρόδεμα που διανοίχθηκαν με κρουστικό δρέπανο. Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε είναι εμπορικό προϊόν κατάλληλο για πάκτωση αγκυρίων ή ράβδων οπλισμού σε στερεά δομικά υλικά όπως σκυρόδεμα, πέτρα, πλίνθο. Το αγκύριο ήταν τμήμα χαλύβδινης ράβδου οπλισμού τύπου BSt 500 Φ12. Η απόσταση από το άκρο είναι  $c = 40$  mm και το βάθος αγκύρωσης  $h_{ef} = 40$  mm



Σχήμα 5. Ανω: Σκαρίφημα του δοκιμίου για αξονική φόρτιση, Κάτω: Διάταξη στήριξης του δοκιμίου στο σταθερό δάπεδο





### **Σχήμα 6. Σκαρίφημα του δοκιμίου για εγκάρσια φόρτιση Δοκίμια υπό εγκάρσια φόρτιση**

Οι διαστάσεις του δοκιμίου φαίνονται στο Σχήμα 6. Όπως και για τα εφελκόμενα αγκύρια, η σύνδεση του δοκιμίου με το δάπεδο έγινε μέσω μεταλλικής βάσης. Χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την περίπτωση άοπλο σκυροδέμα κλάσης C20/25 και εποξεική ρητίνη δύο συστατικών για την πάκτωση του αγκυρίου. Το αγκύριο ήταν τμήμα μεταλλικού σπειρώματος τύπου M12 8.8. Η απόσταση από το άκρο ήταν  $c = 90 \text{ mm}$  και το βάθος αγκύρωσης  $h_{ef} = 70 \text{ mm}$ .

## **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

### **Αξονική φόρτιση**

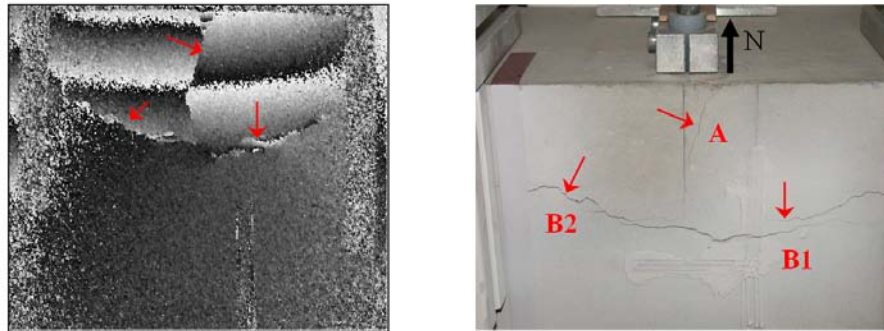
Το πείραμα εφελκυσμού απέδειξε την έναρξη της ρηγμάτωσης από πολύ χαμηλές τιμές φόρτισης. Η πρώτη ρηγμάτωση αποτυπώθηκε από το συμβολόμετρο όταν το φορτίο ήταν περίπου 25 – 30% του φορτίου αστοχίας και ξεκινούσε από την περιοχή κοντά στην επιφάνεια που βρισκόταν το αγκύριο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, (περιοχή Α). Το Σχήμα 8 παρουσιάζει ένα παράδειγμα υπολογισμού οριζόντιας παραμόρφωσης και αντίστοιχα του υπολογισμού του εύρους ρωγμής. Η παρακολούθηση της ρωγμής ήταν δυνατή τόσο κατά την έναρξή της μικρορηγμάτωσης, όσο και στην φάση αστοχίας του αγκυρίου. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης η αρχική ρωγμή εξελισσόταν προς τα κάτω. Λίγο πριν την αστοχία παρατηρήθηκε διακλάδωση της ρωγμής σε οριζόντια διεύθυνση, ενώ το εύρος συνέχισε να αυξάνεται (Σχήμα 7, περιοχές Β1 και Β2). Αυτή η διακλάδωση δημιούργησε δύο τμήματα που είχαν συμπεριφορά παρόμοια με προβόλου. Με περαιτέρω εξέλιξη του φαινομένου η κατακόρυφη ρωγμή διευρύνθηκε τόσο ώστε να επιτρέψει την απώλεια επαφής μεταξύ της ράβδου και του περιβάλλοντος υλικού με τελική συνέπεια την εξόλκευση του αγκυρίου και την αστοχία του συστήματος.

Οι αγκυρώσεις με ράβδους από χάλυβα οπλισμού παρουσιάζουν συνήθως αστοχία με απόσχιση ή διάρρηξη του σκυροδέματος. Η απόσχιση σκυροδέματος παρουσιάζεται κυρίως για μικρά βάθη αγκύρωσης και αποστάσεις από το άκρο. Όταν οι τιμές αυτών των παραμέτρων αυξηθούν, εμφανίζεται εντονότερα η μορφή αστοχίας με διάρρηξη του σκυροδέματος. Λεπτομερέστερη περιγραφή της ρηγμάτωσης και της αστοχίας παρουσιάζεται στα (Mihala 2007a, Mihala 2007b).

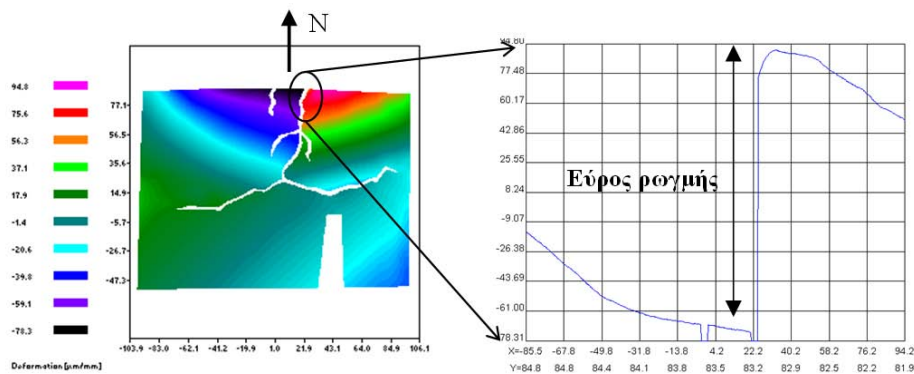
### **Εγκάρσια φόρτιση**

Στην αγκύρωση υπό εγκάρσια φόρτιση, η ρηγμάτωση που ξεκινάει στην επιφάνεια παρακολουθείται από τη μέθοδο ESPI καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Κατά την έναρξη της φόρτισης παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις που ξεκινούν από το αγκύριο και επεκτείνονται ακτινικά. Η αιτία αυτών των ρηγματώσεων είναι από τη μία πλευρά οι πιέσεις που ασκούνται από το ίδιο το αγκύριο ενώ από την άλλη προκαλούνται συχνά και από τις μικρές βλάβες που προξενεί το κρουστικό δράπανο στη στέψη της τρύπας. Με αύξηση του φορτίου,

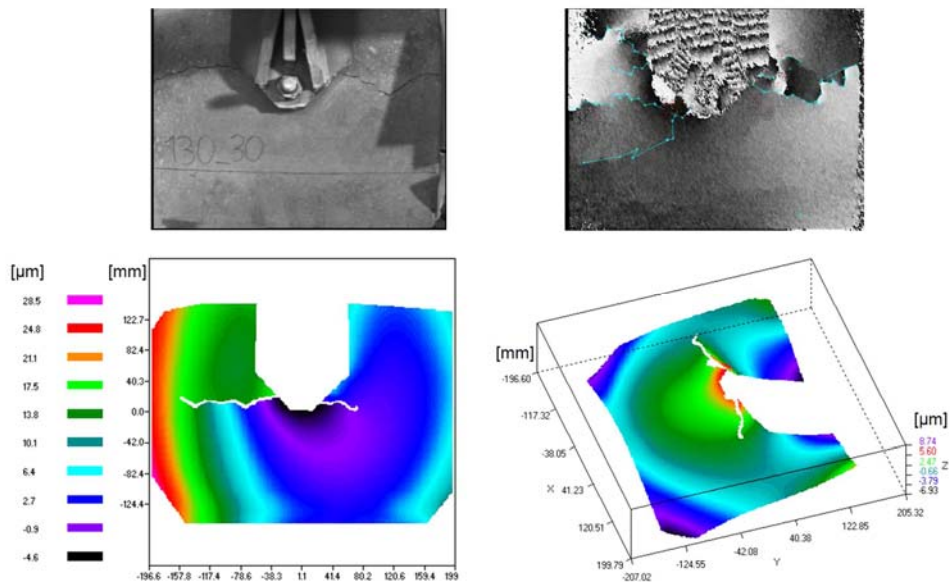
επέρχεται μια δεύτερη σειρά ρωγμών με κατεύθυνση κάθετη προς τη σειρά της φόρτισης, λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (Σχήμα 9). Στη συνέχεια, αυτές οι ρωγμές αποκτούν κλίση προς το ελεύθερο άκρο του σκυροδέματος με παράλληλη απόσχιση του κώνου αστοχίας. Στην περίπτωση αυτή η αποτύπωση των παραμορφώσεων εκτός επιπέδου αποδίδει ακριβέστερο προσδιορισμό της ρηγμάτωσης. Η ακριβής διαδικασία της αστοχίας παρουσιάζεται στα (Unterweger 2008a, 2008b, 2008c)



**Σχήμα 7.** Εικόνα ρηγμάτωσης λίγο πριν την αστοχία εφελκόμενου αγκυρίου. Αριστερά; Οπτική αποτύπωση της ρηγμάτωσης με τη μέθοδο ESPI. Δεξιά: Φωτογραφική αποτύπωση της ρηγμάτωσης



**Σχήμα 8.** Επεξεργασία των αποτελεσμάτων από ESPI μέσω υπολογιστή. Κατάστρωση φάσματος παραμόρφωσης (αριστερά) και υπολογισμός της ρηγμάτωσης για ένα στάδιο ρηγμάτωσης (δεξιά)



**Σχήμα 9.** Επεξεργασία των αποτελεσμάτων από ESPI για αγκύριο υπό εγκάρσια φόρτιση και αντιπαράθεση της πραγματικής εικόνας ρηγμάτωσης και της συμβολογραφικής αποτύπωσης. (ΑΑ: φωτογραφική απεικόνιση της ρηγμάτωσης, ΑΔ: Συμβολόγραμμα με ESPI, ΚΑ: Παραμορφώσεις εντός επιπέδου, ΚΔ: Παραμορφώσεις εκτός επιπέδου

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η πρώτη χρήση της μεθόδου 3D ESPI για τη μελέτη αγκυρίων υπό αξονικά και εγκάρσια φορτία. Η χρησιμότητα της τεχνικής αυτής στη μελέτη φαινομένων με έντονη συγκέντρωση τάσεων και κρίσιμες μικρορηγματώσεις αναδεικνύεται στα αποτελέσματα της έρευνας. Παράλληλα διακρίνονται μηχανισμοί οι οποίοι, παρόλο που συνοδεύονται από πολύ μικρές παραμορφώσεις, συμβάλλουν ουσιαστικά στη διάγνωση της αστοχίας των αγκυρίων.

Η συνέχεια αυτής της μελέτης περιλαμβάνει ταυτοποίηση αυτών των μηχανισμών σε υπολογισμούς με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ η ανάλυση ενός ευρύτερου φάσματος παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει στην καλύτερη κατανόηση της φέρουσας συμπεριφοράς των αγκυρώσεων στο σκυρόδεμα, στη σαφέστερη διαφοροποίηση των μηχανισμών αστοχίας και σε ασφαλέστερα μοντέλα διαστασιολόγησης των αγκυρώσεων.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Dantec Dynamics, <http://www.dantecdynamics.com> (25.04.2009)
- Eberhardsteiner, J. “Mechanisches Verhalten von Fichtenholz - Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften” (Μηχανική συμπεριφορά του ξύλου ερυθρελάτης – Πειραματικός προσδιορισμός των ιδιοτήτων διαξονικής αντοχής), Springer, Vienna (2002)
- Eligehausen, R., Malleé, R., Silva, J., “Anchorage in Concrete Construction”, Ernst & Sohn, Berlin (2006)
- Ettemeyer, A. “Ein neues holografisches Verfahren zur Verformungs- und Dehnungsbestimmung” (Μια νέα ολογραφική μέθοδος για τον προσδιορισμό τάσεων και παραμορφώσεων) Staatliche Materialprüfungsanstalt Stuttgart, Universität Stuttgart, Τεχνική Έκθεση (1988)
- European Organization for Technical Approvals – EOTA. “ETAG 001: Metal Anchors for Use in Concrete” (1997), [www.eota.be](http://www.eota.be)
- Mallée R., Befestigungstechnik (Τεχνική στερεώσεων). Σημειώσεις μαθήματος. University of Natural resources and Applied Life Sciences - Vienna, Department of Civil Engineering and Natural Hazards, Vienna (2005)
- Mihala, R., “Randnahe Befestigungen unter Zuglast” (Αγκύρια κοντά στο άκρο υπό εφελκυστικό φορτίο), Institute of Structural Engineering (IKI), Vienna Μη δημοσιευμένη εσωτερική έκθεση Nr.875-07-002 (2007a)
- Mihala R., Unterweger, A., Bergmeister, K., “Behaviour and Design of Anchorages in Concrete Close to the Edge”, in Proceedings of the 2nd International Symposium on Connections between Steel and Concrete (Stuttgart, September 4- 7, 2007), Ibidem, Stuttgart (2007b)
- Mix, P.E., “Introduction to nondestructive testing: A Training Guide”, John Wiley & Sons, New Jersey (2005)
- Unterweger, A., “Randnahe Anker unter Querlast” (Αγκύρια κοντά στο άκρο υπό εγκάρσια φόρτιση) Διδακτορική διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. K. Bergmeister), Institute of Structural Engineering, BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna (2008a)
- Unterweger, A, Spyridis, P., Mihala, R., Bergmeister, K., “Randnahe Vierfachbefestigungen unter Querlast – Experimentelle und numerische Untersuchung” (Ομάδα τεσσάρων αγκυρίων κοντά στο άκρο – Πειραματική και Αριθμητική διερεύνηση). Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 103, Issue 11, (November 2008b), 741-747
- Zwick, [www.zwick.de](http://www.zwick.de) (03.04.2007)