

Πειραματική Επαλήθευση Σχεδιασμού Φορέα Ferrocement του Στεγάστρου της Λυρικής Σκηνής του Κέντρου Πολιτισμού «Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος»

Κωνσταντίνος Πασχαλίδης

Δρ Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, kp@penelis.com

Γεώργιος Πενέλης

Ομότιμος Καθηγητής ΑΠΘ, george@penelis.com

Γρηγόριος Πενέλης

Δρ Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, MSc DIC, penelis@penelis.com

Περιγραφή στεγάστρου ferrocement

Το στέγαστρο του κτιρίου της Λυρικής Σκηνής του Κέντρου Πολιτισμού «Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος» είναι τετράγωνο, φακοειδούς διατομής, με διαστάσεις 100m x 100m. Η άνω και η κάτω επιφάνεια του στεγάστρου διαμορφώνεται από μεμβράνες ferrocement διπλής καμπυλότητας με νευρώσεις. Η συνεργασία των δύο ινών επιτυγχάνεται μέσω εσωτερικής μεταλλικής δικτύωσης από διαγώνιες κοιλοδοκούς οι οποίες συνδέονται με τις μεμβράνες μέσω κόμβων ferrocement. Η υλοποίηση του έγινε με προκατασκευή 717 πανέλων τυπικής διάστασης 3.5m x 7.0m και με σύνδεση των πανέλων στην τελική τους θέση μέσω αρμών επιτόπου σκυροδέτησης.

Οι μεμβράνες ferrocement είναι στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος με πάχος μεμβράνης μεταξύ 27mm – 57mm, όπου το σκυρόδεμα είναι στην ουσία πολύ ισχυρή τσιμεντοκονία ($f_{cm} > 90\text{MPa}$) ενώ ο οπλισμός έχει τη μορφή επάλληλων στρώσεων πυκνών πλεγμάτων με διάμετρο συρμάτων $\varnothing 1.0\text{mm}$ έως $\varnothing 10.0\text{mm}$, με επικάλυψη $c_{min}=3\text{mm}$ (κατηγορία χάλυβα B430A έως B500A-B500C). Στην εσωτερική παρειά της κάθε μεμβράνης διατάσσονται νευρώσεις ferrocement διατομής 49/200 ανά 625mm, οι οποίες στηρίζονται επί δοκών διατομής 61/250 ανά 2.5m. Τέλος οι δοκοί συνδέονται ανά 5.0m με τους κόμβους στους οποίους συντρέχουν οι διαγώνιες μεταλλικές κοιλοδοκοί.

Περισσότερες λεπτομέρειες του φορέα παρέχονται στην υποβληθείσα δημοσίευση με τίτλο «Διαστασιολόγηση Φορέα Ferrocement του Στεγάστρου της Λυρικής Σκηνής του Κέντρου Πολιτισμού Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος».

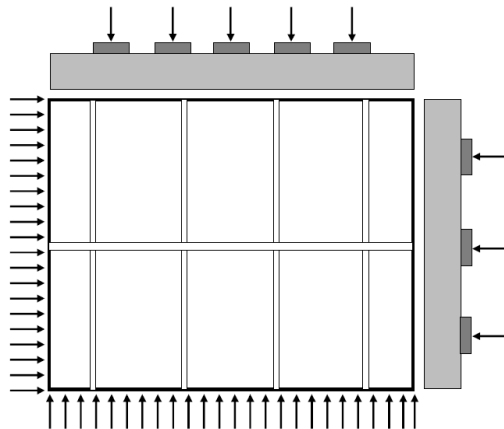
Η διαστασιολόγηση του φορέα έγινε βάσει των EN1992 και EN1998 με τη θεώρηση ότι το ferrocement μπορεί να διαστασιολογηθεί ως οπλισμένο σκυρόδεμα. Προς επαλήθευση της παραδοχής ισχύος της μηχανικής του Ο/Σ και στο ferrocement η αντοχή όλων των διατομών ελέγχθηκε με σειρά πειραμάτων full scale στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ² (αν. καθηγητής Σταύρος Κουρκουλής) τα οποία περιλάμβαναν τις παρακάτω δοκιμές:

- Δοκιμές διαξονικής θλίψης τυπικών διατομών της άνω και κάτω μεμβράνης.
- Δοκιμές φόρτισης τεσσάρων σημείων για έλεγχο σε κάμψη και σε διάτμηση full scale δοκιμίων των νευρώσεων και των δοκών σε διατομές πλακοδοκού.
- Δοκιμές διάτμησης και εξόλκευσης των αγκυρίων σύνδεσης των μεταλλικού δικτύωματος με τους κόμβους ferrocement.
- Δοκιμές διαξονικής φόρτισης των κόμβων ferrocement.
- Δοκιμές επάρκειας του προβλεπόμενου μήκους παράθεσης στις θέσεις σύνδεσης μεταξύ των προκατασκευασμένων πανέλων.
- Δοκιμές ελέγχου του αρμού εργασίας μεταξύ της κρέμασης των νευρώσεων και της μεμβράνης

Σε όλες τις περιπτώσεις επαληθεύτηκε η ακρίβεια των υιοθετημένων μεθόδων διαστασιολόγησης και η εκτιμώμενη αντοχή των διατομών.

Δοκιμές διαξονικής θλίψης άνω και κάτω μεμβράνης

Σε αυτή τη σειρά δοκιμών, full scale δοκίμια μεμβράνης μεγέθους 2.0m x 2.5m φορτίστηκαν στο επίπεδό τους με θλίψη σε δύο κάθετους άξονες (σχ. 1 & 2). Τα δοκίμια φορτίστηκαν στους δύο άξονες φόρτισης μέχρι τη θλιπτική αντοχή υπολογισμού ανά διεύθυνση και κατόπιν αυξήθηκε μονόπλευρα η φόρτιση της ισχυρής πλευράς μέχρι θραύσης.



Σχ. 1 Πειραματική διάταξη διαξονικής θλίψης μεμβράνης



Σχ. 2 Φωτογραφία πλαισίου φόρτισης

Όλα τα δοκίμια ξεπέρασαν τις προβλεπόμενες αντοχές και δεν παρουσίασαν αστάθεια 2^α τάξης.

Δοκιμές 4 σημείων κάμψης και διάτμησης νευρώσεων και δοκών

Σε αυτή τη σειρά δοκιμών, full scale δοκίμια διατομής πλακοδοκού των νευρώσεων και των δοκών φορτίστηκαν μέχρι αστοχίας με διάταξη φόρτισης τεσσάρων σημείων (σχ. 3). Σε όλα τα δοκίμια η προβλεπόμενη αντοχή θραύσης επετεύχθη με ακρίβεια 1-3%, ενώ η προβλεπόμενη αντοχή σε τέμνουσα ξεπεράστηκε κατά 58%.

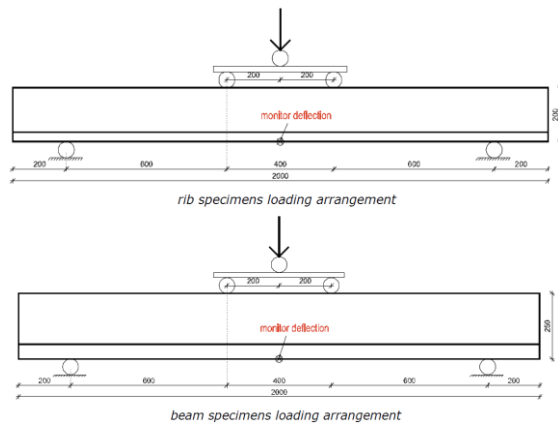
Δοκιμές διάτμησης και εξόλκευσης αγκυρίων κόμβων

Οι κόμβοι σύνδεσης του ferrocement συνδέονται με την εσωτερική μεταλλική δικτύωση μέσω κομβοελασμάτων, τα οποία στερεώνονται σε αγκύρια-κοχλίες M10(10.9) ενσωματωμένα κατά τη σκυροδέτηση των κόμβων. Τα αγκύρια ελέγχθηκαν τόσο σε διάτμηση όσο και σε εξόλκευση μέχρι θραύσεως τους. Σε όλες τις δοκιμές στο ferrocement εμφανίστηκαν μόνο μικρορηγματώσεις.

Δοκιμές διαξονικής θλίψης κόμβων

Οι κόμβοι σύνδεσης του ferrocement με την εσωτερική μεταλλική δικτύωση αποτελούν βραχείς προβόλους που προεξέχουν από τη μεμβράνη του ferrocement. Σε αυτή τη σειρά δοκιμών, full scale δοκίμια μεμβράνης με κόμβο, μεγέθους 1.25m x 1.25m φορτίστηκαν στο επίπεδό τους με θλίψη σε δύο κάθετους άξονες (σχ. 4). Οι δοκιμές έδειξαν ότι η διαμόρφωση της κάτω μεμβράνης του στεγάστρου, όπου νευρώσεις, δοκοί και κόμβοι ήταν τοποθετημένοι στην εσωτερική παρειά της μεμβράνης εμφάνισε σχεδόν διπλάσια υπεραντοχή από τη διαμόρφωση της άνω μεμβράνης του στεγάστρου, όπου οι νευρώσεις ήταν στην έξω παρειά και οι δοκοί με τους κόμβους στην έσω παρειά της μεμβράνης.

Ως αποτέλεσμα ανασχεδιάστηκε όλο το στέγαστρο ώστε οι νευρώσεις στην άνω μεμβράνη ferrocement να διαταχθούν στην εσωτερική παρειά της.



Σχ. 3 Δοκιμή σε κάμψη & διάτμηση πλακοδοκών



Σχ. 4 Δοκιμή διαξονικής θλίψης κόμβων

Δοκιμές επάρκειας μήκους παράθεσης στους αρμούς σύνδεσης των πανέλων

Τα προκατασκευασμένα πάνελα συνδέονται μεταξύ τους με αρμούς σκυροδέτησης πλάτους 576mm. Στο μήκος αυτό ματίζονται και οι έξι στρώσεις πλεγμάτων της μεμβράνης, με πλήρη πλέγματα να προεξέχουν από το ένα πάνελο και μόνο μεμονωμένα σύρματα χωρίς εγκάρσιες ράβδους να προεξέχουν από το άλλο ώστε να μην αυξηθεί το πάχος της διατομής στη ζώνη μάτισης. Το απαιτούμενο μήκος παράθεσης υπολογίστηκε αναλυτικά χρησιμοποιώντας όλες τις εξισώσεις και προβλέψεις του EN1992-1, με το πλάτος των 576mm να προκύπτει οριακό ή και μη επαρκές για πλήρη αποκατάσταση συνέχειας. Λόγω της κλίμακας των διατομών ferrocement σε σχέση με τις τυπικές διατομές Ο/Σ και λόγω της μη κάλυψης από το ferrocement διαφόρων απαιτήσεων του EN1992-1 περί ελαχίστων αποστάσεων και επικαλύψεων, διαμορφώθηκαν full scale δοκίμια της ζώνης παράθεσης, μορφής dogbone, τα οποία δοκιμάστηκαν σε εφελκυσμό. Σε όλες τις περιπτώσεις επήλθε θραύση των οπλισμών και όχι ολίσθηση στη ζώνη παράθεσης, άρα επιβεβαιώθηκε η πλήρης αποκατάσταση της συνέχειας στους αρμούς σκυροδέτησης.

Δοκιμές ελέγχου του αρμού εργασίας μεταξύ των νευρώσεων και της μεμβράνης

Η σκυροδέτηση των προκατασκευασμένων πανέλων γίνεται σε δύο φάσεις, όπου σε 1^η φάση σκυροδετείται η μεμβράνη και σε 2^η οι υπερκείμενες νευρώσεις. Κατά τη διαδικασία αυτή δημιουργείται ένας ψυχρός αρμός, με επιπτώσεις τόσο σε θέματα λειτουργικότητας όσο και σε θέματα αντοχής. Έλαβε χώρα σειρά δοκιμών αποκόλλησης της νευρώσεως από την μεμβράνη σε δοκίμια μονολιθικά και σε δοκίμια με αρμό εργασίας. Οι δοκιμές κατέδειξαν προβληματική συνεργασία μεταξύ της μεμβράνης και της νευρώσεως ανεξαρτήτως τρόπου σκυροδέτησης, κάτι που οδήγησε στην αλλαγή της διάταξης όπλισης έναντι διάτμησης. Η νέα διάταξη υιοθετήθηκε στις δοκιμές φόρτισης 4 σημείων όπου και επιβεβαιώθηκε η επάρκειά της.

Βιβλιογραφία

- [1] G & G Penelis Consulting Engineers SA (2013), SNFCC Solar Collector Redesign Technical Reports, Calculation Reports & Drawings
- [2] Kourkoulis, S. (2013), Series of Technical Reports regarding the laboratory testing of the SNFCC Ferroement Canopy