

**Πειραματική διερεύνηση του μήκους αγκύρωσης στην
αποτίμηση της συνάφειας Ινοπλέγματος Ανόργανης
Μήτρας (IAM) με τοιχοποιία**
The effect of bond length on the Textile Reinforced Mortar
(TRM)-to-masonry bond

Παρασκευή ΑΣΚΟΥΝΗ-Δ.¹, Αικατερίνη (Κορίνα) ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ-Γ.²

Λέξεις κλειδιά: IAM, Τοιχοποιία, Μήκος αγκύρωσης, Φωτογραμμετρία
Keywords: TRM, Masonry, Bond length, Digital Image Correlation

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα εκτενές πρόγραμμα δοκιμών για την αποτίμηση της συνάφειας εξωτερικά επικολλούμενης στρώσης πλέγματος μη επικαλυμμένων ινών υάλου και τοιχοποιίας με τη χρήση τσιμεντοειδούς κονιάματος. Τα αποτελέσματα προέρχονται από 20 δοκιμές με παράμετρο διερεύνησης το μήκος αγκύρωσης της στρώσης IAM. Ο τρόπος αστοχίας οφείλεται σε ολίσθηση των ινών του πλέγματος εντός του κονιάματος, με ταυτόχρονη θραύση μερικών από αυτές, χωρίς να παρατηρείται αποκόλληση της στρώσης IAM από το υπόστρωμα. Η απόκριση των δοκιμών απεικονίζεται μέσω καμπυλών φορτίου-σχετικής μετακίνησης, οι οποίες δύναται να προσεγγιστούν ως διγραμμικές έως το μέγιστο φορτίο, ακολουθούμενες από γραμμικά κατερχόμενο κλάδο που καταλήγει σε παραμένον φορτίο για ανεπαρκή μήκη αγκύρωσης. Τέλος, επιχειρείται η παρακολούθηση των αναπτυσσόμενων ρωγμών στην επιφάνεια του IAM, μέσω χρήσης φωτογραμμετρικής μεθόδου.

ABSTRACT : An experimental program involving double-lap/double-prism shear bond tests is presented aiming to assess the bond characteristics of interfaces comprising uncoated alkali-resistant (AR) glass fiber textile reinforced cementitious mortars applied as overlays on unreinforced masonry substrates. In total, 20 test results are presented with the bond length being the parameter under investigation. Failure is due to textile slippage within the mortar and simultaneous partial fibers' rupture; detachment of the entire TRM strip from the substrate was not evidenced. The load-relative displacement response curves can be

¹ Υποψήφια Διδάκτορας, Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: askounip@upatras.gr

² Επίκουρη Καθηγήτρια, Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: kpapanic@upatras.gr

approximated as bilinear up to the maximum load with a linear post-peak descending branch leveling off at a residual load, for inadequate bond lengths only. Finally, data on DIC-enabled crack width evolution are also presented.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (IAM) (Textile Reinforced Mortar – TRM στη διεθνή ορολογία) είναι σύνθετα υλικά που εφαρμόζονται σε έργα Πολιτικού Μηχανικού, τόσο για την ενίσχυση υφιστάμενων δομικών στοιχείων όσο και την προκατασκευή νέων. Τα ινοπλέγματα αποτελούνται από κλώνους ινών [άνθρακα, υάλου, αραμιδίου, βασάλτη ή PBO (poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole))] διατεταγμένων ανά αποστάσεις σε (συνήθως) δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, ενώ το ανόργανο συγκολλητικό μέσο αποτελείται από κονίαμα με βάση το τσιμέντο, την άσβεστο, κάποιο γεωπολυμερικό υλικό ή συνδυασμό αυτών. Το πεδίο εφαρμογών των IAM ως υλικών εξωτερικής ενίσχυσης είναι ευρύ και ειδικά στην περίπτωση κατασκευών από άοπλη τοιχοποιία, που σε πολλές περιπτώσεις είναι και μνημειακού χαρακτήρα, τα υλικά αυτά μπορούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες φυσικο-μηχανικής και χημικής συμβατότητας με την υπάρχουσα κατασκευή και να αποτελέσουν μία αναστρέψιμη μέθοδο επέμβασης.

Ωστόσο, η αποτελεσματική χρήση των IAM ως υλικών ενίσχυσης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη συνάφεια των εξωτερικά επικολλούμενων (με κονίαμα) ινοπλεγμάτων με το υπάρχον υπόστρωμα, αφού η αποκόλλησή τους μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία του ενισχυμένου μέλους και, επομένως, σε χαμηλό ποσοστό αξιοποίησης του ινώδους οπλισμού. Στη βιβλιογραφία, προκειμένου για τη διερεύνηση της συνάφειας IAM-υποστρώματος απαντώνται οι διατάξεις αμφίπλευρου μανδύα/διπλού πρίσματος (D' Ambrisi et al., 2013; Malena. & De Felice, 2014; Askouni & Papanicolaou, 2017), αμφίπλευρου μανδύα/μονού πρίσματος (Carozzi and Roggi, 2015) και μονόπλευρου μανδύα/μονού πρίσματος (Carozzi et al., 2016). Η παρούσα εργασία αφορά σε δοκιμές συνεπίπεδης άμεσης διάτμησης ινοπλεγμάτων υάλου εντός τσιμεντοκονιάματος επικολλημένα σε υπόστρωμα τοιχοποιίας από λεία συμπαγή κεραμικά τούβλα και αρμούς ασβεστοτσιμεντοκονιάματος. Η χρησιμοποιούμενη διάταξη είναι τύπου αμφίπλευρου-μανδύα/διπλού-πρίσματος. Η προς διερεύνηση παράμετρος είναι το μήκος ακύρωσης της στρώσης IAM.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Υλικά

Τα πρίσματα τοιχοποιίας αποτελούνται από μονή σειρά λείων συμπαγών κεραμικών τούβλων με αρμούς από ασβεστοτσιμεντοκονίαμα. Η θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των τοιχίσκων κάθετα στους αρμούς προσδιορίζονται βάσει της οδηγίας RILEM TC 76-LUM και είναι ίσα με 26.43 MPa και 12.54 MPa, αντίστοιχα. Τα τούβλα έχουν θλιπτική αντοχή 20 MPa και διαστάσεις

200×100×50 mm, σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Οι αρμοί της τοιχοποιίας έχουν πάχος, περίπου, 15 mm και κατασκευάζονται από κονίαμα γενικής εφαρμογής ποιότητας M5, βάσει της κατηγοριοποίησης του Ευρωκώδικα 6, το οποίο αποτελείται από τσιμέντο (CEM IV 32.5N), άσβεστο και άμμο σε αναλογία 1:2:6, κατ' όγκον.

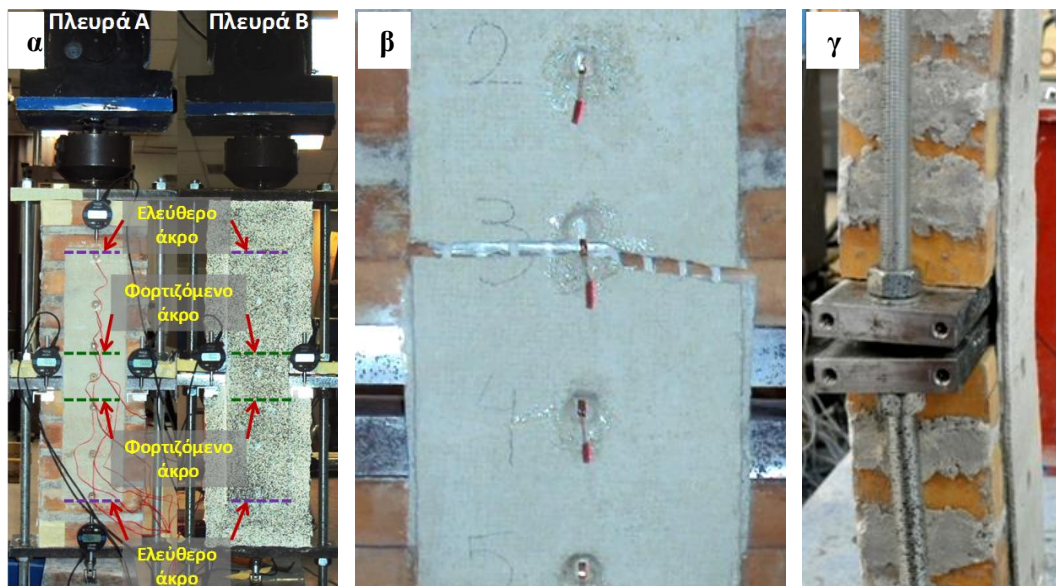
Το ινόπλεγμα αποτελείται από ξηρές ίνες υάλου ανθεκτικές σε αλκαλικό περιβάλλον, ισόποσα κατανεμημένες σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, με αξονική απόσταση κλώνων 12 mm και μάζα ανά μονάδα επιφάνειας 320 g/m². Οι μηχανικές ιδιότητες του πλέγματος έχουν προσδιοριστεί πειραματικά (βάσει EN ISO 13934-1999) χρησιμοποιώντας λωρίδες αποτελούμενες από 9 διαμήκεις κλώνους: μέτρο ελαστικότητας 71 GPa, εφελκυστική αντοχή 822 MPa και παραμόρφωση στην αστοχία 1.36 %. Το κονίαμα είναι τσιμεντοειδούς βάσης (με μικρό ποσοστό πολυμερικών πρόσμικτων και διακριτές ίνες πολυπροπυλενίου) με θλιπτική και καμπτική αντοχή 21 ημερών 22.9 MPa και 5.43 MPa, αντίστοιχα (βάσει EN 1015-11), ενώ το μέτρο ελαστικότητάς του ισούται με 7.6 GPa (σύμφωνα με τον παραγωγό). Η εφελκυστική αντοχή του IAM στις 21 ημέρες προσδιορίζεται βάσει του προτύπου AC434 ICC-ES και ισούται με 546 MPa.

Πειραματική διάταξη - Δοκίμια

Κριτήριο επιλογής της πειραματικής διάταξης είναι η καλύτερη προσομοίωση του φαινομένου ανάπτυξης διατμητικών τάσεων στις διεπιφάνειες σύνθετου υλικού-υποστρώματος & ινοπλέγματος-μήτρας. Η διάταξη αμφίπλευρου-μανδύα/διπλού-πρίσματος, κατά την οποία η μεταφορά των τάσεων συνάφειας γίνεται από το υπόστρωμα στο σύνθετο υλικό, κρίνεται ότι προσομοιώνει ακριβέστερα την πραγματικότητα από τις υπόλοιπες διατάξεις, κατά τις οποίες ο μηχανισμός συνάφειας ενεργοποιείται μέσω εξόλκευσης του πλέγματος από το κονίαμα.

Κάθε δοκίμιο αποτελείται από 2 τοιχίσκους συνδεόμενους μέσω αμφίπλευρης στρώσης IAM, **Σχήμα 1α**. Κάθε στρώση IAM περιλαμβάνει 1 λωρίδα ινοπλέγματος κεντρικά τοποθετημένης ως προς το πάχος της στρώσης, ίσο με 8 mm. Η στρώση IAM τοποθετείται κεντρικά στους τοιχίσκους κατά τη διάσταση του πλάτους τους. Το συνολικό μήκος της στρώσης IAM ισούται με το άθροισμα του αγκυρωμένου μήκους της (bond length – BL) επί έκαστου τοιχίσκου συν το μη αγκυρωμένο τμήμα της (unbonded length – UL), που περιλαμβάνει την απόσταση μεταξύ των 2 τοιχίσκων (50 mm) και το αρχικό (μη αγκυρωμένο) τμήμα της στην αρχή κάθε τοιχίσκου (25 mm), το οποίο εισάγεται προς αποφυγή φαινομένων συγκέντρωσης τάσεων. Το πλάτος της στρώσης είναι 120 mm και σε αυτό περιλαμβάνονται 9 διαμήκεις κλώνοι ινών (παράλληλοι στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου). Μετά την εφαρμογή τους, οι στρώσεις IAM καλύπτονται για 7 ημέρες με βρεγμένες λινάτσες και συντηρούνται για 14 ημέρες σε συνθήκες εργαστηρίου (22°C, 65% RH), έως τη δοκιμή (σε 21 ημέρες). Πριν τη δοκιμή ο κάθε τοιχίσκος εμφαννώνεται σε μεταλλικό πλαίσιο και, ακολούθως, το δοκίμιο τοποθετείται σε μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης κλειστού τύπου, προσαρμόζοντας το επάνω τμήμα του σε σερβο-υδραυλικό έμβολο και το κάτω στη βάση του πλαισίου αντίδρασης. Η ενεργοποίηση του μηχανισμού συνάφειας

πραγματοποιείται μέσω της απομάκρυνσης των δύο τοιχίσκων. Για την αυτοευθυγράμμιση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή, στα σημεία προσαρμογής του στο πλαίσιο αντίδρασης, παρεμβάλλονται καθολικές αρθρώσεις. Για τη διεξαγωγή των δοκιμών, επιβάλλεται στατική φόρτιση με ελεγχόμενη ποσότητα τη μετακίνηση του εμβόλου που πραγματοποιείται με ρυθμό 0.005 mm/s. Μεταξύ του εμβόλου και του επάνω τμήματος του δοκιμίου παρεμβάλλεται δυναμοκυψέλη δυναμικότητας 50 kN. Οι αισθητήρες καταγραφής μετακινήσεων και παραμορφώσεων παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1α** και είναι: (i) 2 ψηφιακά μικρόμετρα (DDG) τοποθετημένα κοντά στο φορτιζόμενο άκρο της στρώσης της κάθε πλευράς του δοκιμίου για την καταγραφή της απομάκρυνσης μεταξύ των δύο τοιχίσκων (DDGLE), (ii) 2 ψηφιακά μικρόμετρα τοποθετημένα κοντά στα ελεύθερα άκρα της στρώσης της μίας πλευράς (πλευρά Α) για την καταγραφή της ολίσθησης του εξέχοντος πλέγματος εκεί (DDGFE), (iii) ηλεκτρομηκνυσίόμετρα τοποθετημένα στον κεντρικό κλώνο του πλέγματος στις θέσεις του φορτιζόμενου άκρου (SGLE), του μέσου του μήκους αγκύρωσης (SGM) κατά περίπτωση, του ελεύθερου άκρου (SGFE) και του μέσου του μη αγκυρωμένου μήκους (SGUL), για την καταγραφή της παραμόρφωσης του πλέγματος σε αυτές τις θέσεις. Επιπλέον, στην πλευρά Β δημιουργείται ένα μοτίβο από τυχαία διασπαρμένες μαύρες κηλίδες πάνω σε λευκό φόντο, τόσο στο υπόστρωμα όσο και στη στρώση IAM, προκειμένου να διενεργηθεί ανάλυση φωτογραμμετρίας μετά τη δοκιμή. Παρουσιάζονται 20 δοκιμές τύπου αμφίπλευρου μανδύα/διπλού πρίσματος, σε δοκίμια με μονή στρώση IAM και μήκη αγκύρωσης αυτής 50 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 200 mm και 250 mm. Η ονοματολογία των δοκιμών έχει τη μορφή BLx_n, όπου x το μήκος αγκύρωσης της στρώσης IAM σε mm, και n ο αύξων αριθμός του δοκιμίου σε μία ομάδα όμοιων δοκιμών.



Σχήμα 1. (α) Πειραματική διάταξη, (β) Τρόπος αστοχίας δοκιμίων, (γ) στροφή των τοιχίσκων μετά την αστοχία.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Τρόπος αστοχίας

Ο κυρίαρχος τρόπος αστοχίας των δοκιμίων είναι η ολίσθηση του πλέγματος εντός του κονιάματος (**Σχήμα 1β**). Η ολίσθηση αυτή συνδυάζεται με την εμφάνιση ρωγμών στο μη αγκυρωμένο μήκος έως και τα φορτιζόμενα άκρα. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αστοχία περιορισμένου πλήθους ινών στην περίμετρο των κλώνων. Δεν παρουσιάζονται αποκολλήσεις του IAM από το υπόστρωμα ή της άνω στρώσης κονιάματος από το πλέγμα. Μετά την αστοχία, το δοκίμιο χάνει τη συμμετρία του και οι τοιχίσκοι στρέφονται εκτός επιπέδου (**Σχήμα 1γ**).

Απόκριση δοκιμίων

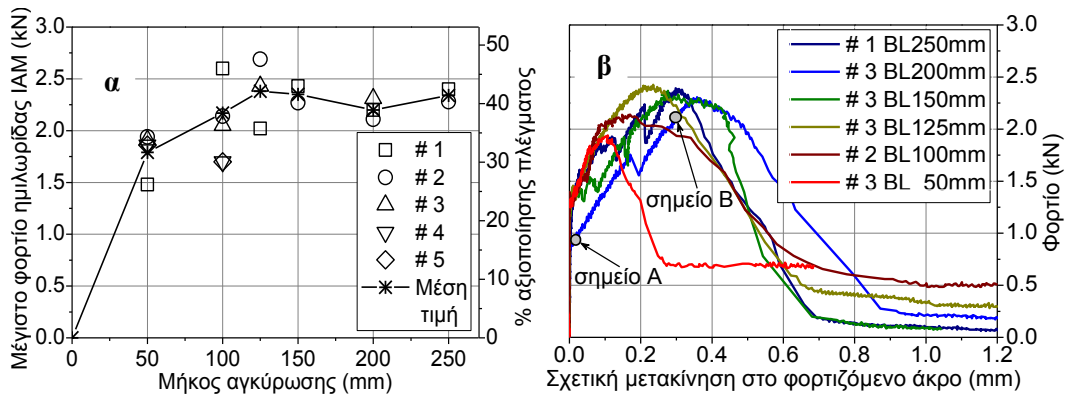
Το φορτίο του εμβόλου θεωρείται ισόποσα κατανεμημένο μεταξύ των 2 στρώσεων IAM, έως το μέγιστο. Στην εργασία των Askouni & Papanicolaou, 2017, η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται από τον υπολογισμό της εκτός επιπέδου στροφής των τοιχίσκων, βάσει των εξισώσεων που παρέχονται από τους Sneed et al., 2015. Τα αποτελέσματα που περιγράφουν την απόκριση των δοκιμίων δίνονται στον “Πίνακα 1”, που περιλαμβάνει: (i) το μέγιστο φορτίο εκάστης στρώσης IAM, F_{max} , (ii) την αντιστοιχούσα στο μέγιστο φορτίο τιμή της σχετικής μετακίνησης της εν επαφή με το υπόστρωμα στρώσης IAM κάθε πλευράς και κάθε τοιχίσκου (ημιλωρίδα IAM) ως προς το υπόστρωμα, $d_{r,max}$, που ισούται με το ήμισυ του μέσου όρου των DDGLE μείον το ήμισυ της επιμήκυνσης του μη αγκυρωμένου μήκους κάθε πλευράς, e_{UL} , (ίσο με την καταγραφή του SGUL επί το UL), (iii) την αντιστοιχούσα στο μέγιστο φορτίο τιμή της ολίσθησης των ινών της ημιλωρίδας IAM, s_{exp} , που ισούται με το μέσο όρο των ενδείξεων των DDGFE, (iv) τη μέγιστη αξονική τάση του πλέγματος, σ_{max} , που υπολογίζεται διαιρώντας το F_{max} με το εμβαδό διατομής των διαμήκων κλώνων και (v) το ποσοστό αξιοποίησης του πλέγματος ($100 \times$ μέγιστη αξονική τάση πλέγματος/εφελκυστική αντοχή πλέγματος). Σημειώνεται ότι τόσο η σχετική μετακίνηση, όσο και η ολίσθηση των δύο ημιλωρίδων IAM της κάθε πλευράς θεωρούνται ίσες (βλέπε επίσης D’Ambrisi et al., 2013, Sneed et al., 2015).

Το γράφημα του μέγιστου φορτίου συναρτήσει του μήκους αγκύρωσης δίνεται στο **Σχήμα 2α**. Το F_{max} αυξάνεται έως μήκος αγκύρωσης 125 mm και σχεδόν σταθεροποιείται εντεύθεν. Υποθέτοντας πως το γράφημα του **Σχήματος 2α** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό του ενεργού μήκους αγκύρωσης, L_{eff} – βάσει της υπόθεσης που υιοθετείται από άλλους ερευνητές (π.χ. D’Ambrisi et al., 2013) ότι το μήκος αγκύρωσης από το οποίο και μετά παρατηρείται σταθεροποίηση του φορτίου σηματοδοτεί το L_{eff} – αυτό μπορεί να ληφθεί περίπου ίσο με 125 mm. Στο γράφημα του **Σχήματος 2α** παρουσιάζεται, ταυτόχρονα, και το ποσοστό αξιοποίησης του πλέγματος, το οποίο κυμαίνεται από 30% έως 47% (αυξάνεται με την αύξηση του μήκους αγκύρωσης), υποδεικνύοντας πως σχεδόν το μισό της εφελκυστικής αντοχής του πλέγματος παραμένει αναξιοποίητο.

Πίνακας 1. Πειραματικά αποτελέσματα για διαφορετικά μήκη αγκύρωσης.

Δοκίμιο	F_{max} (kN)	$d_{r,max}$ (mm)	$s_{exp.}$ (mm)	σ_{max} (MPa)	σ_{max}/f_t (%)
BL250_1	2.40	0.31	0.009	347.91	42.33
BL250_2	2.28	0.26	-	330.25	40.18
BL200_1	2.20	0.14	0.005	317.56	38.63
BL200_2	2.11	0.29	-	305.27	37.14
BL200_3	2.31	0.37	-	333.79	40.61
BL150_1	2.43	0.33	0.098	351.56	42.77
BL150_2	2.27	0.23	-	328.41	39.95
BL150_3	2.37	0.27	0.048	342.88	41.71
BL125_1	2.02	0.40	-	291.52	35.46
BL125_2	2.69	0.20	-	388.53	47.27
BL125_3	2.43	0.24	-	351.45	42.76
BL100_1	2.60	0.38	-	376.16	45.76
BL100_2	2.14	0.17	0.114	308.88	37.58
BL100_3	2.05	-	-	296.59	36.08
BL100_4	1.70	0.13	-	245.48	29.86
BL100_5	2.39	0.31	-	346.15	42.11
BL50_1 ^a	1.48	-	-	213.40	25.96
BL50_2	1.94	0.11	-	280.67	34.14
BL50_3	1.91	0.37	0.174	275.61	33.53
BL50_4	1.86	0.11	0.067	268.44	32.66

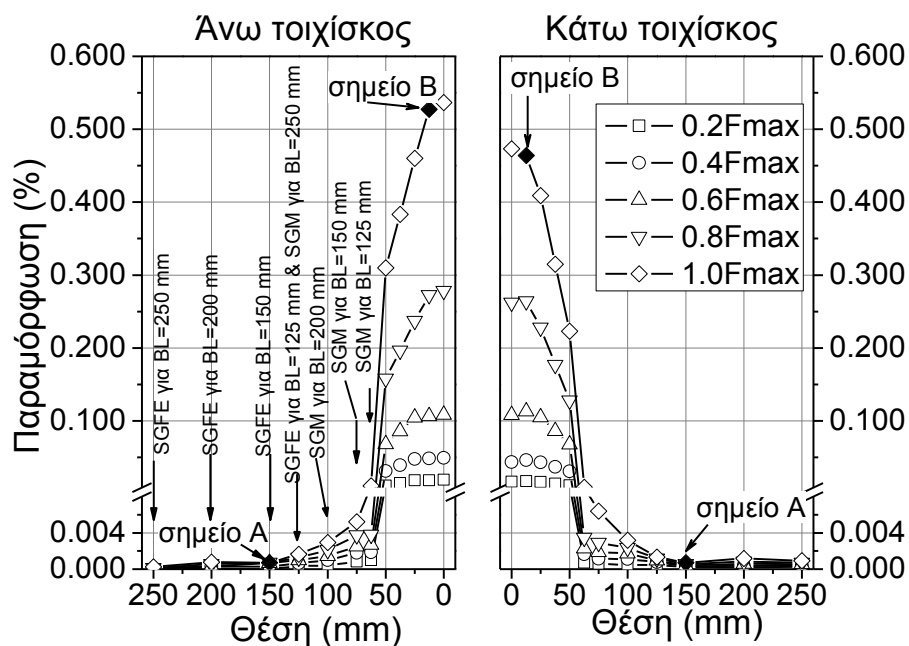
^a Ρωγμή αστοχίας εντός του μήκους αγκύρωσης



Σχήμα 2. (α) Μέγιστο φορτίο (αριστερός άξ.) και % αξιοποίησης πλέγματος (δεξιός άξ.) συναρτήσεως του μήκους αγκύρωσης, (β) καμπύλες φορτίου-σχετικής μετακίνησης για τα εξεταζόμενα μήκη αγκύρωσης.

Για τον προσδιορισμό του L_{eff} , μία πιο ενδεδειγμένη διαδικασία, που βασίζεται στην κατανομή των παραμορφώσεων του πλέγματος κατά το μήκος αγκύρωσης της στρώσης IAM (Strain Profile – SP, **Σχήμα 3**), παρουσιάζεται από τους D' Antino et al., 2014 (στηριζόμενοι στους Subramaniam et al., 2007). Σύμφωνα με αυτή, το L_{eff} μπορεί να οριστεί ως η απόσταση μεταξύ δύο σημείων του SP στα

οποία η παράγωγος είναι ίση με το μηδέν κοντά στο ελεύθερο άκρο (FE) και σταθερή κοντά στο φορτιζόμενο άκρο (LE). Πιο συγκεκριμένα και με φορά από το FE προς το LE, το πρώτο σημείο (σημείο A, **Σχήμα 3**) αντιστοιχεί σε αυτό πίσω από το οποίο η παράγωγος μηδενίζεται και το δεύτερο σημείο (σημείο B, **Σχήμα 3**) αντιστοιχεί σε αυτό μπροστά από το οποίο η παράγωγος σταθεροποιείται. Το γράφημα του **Σχήματος 3** παρουσιάζει το SP του πλέγματος, που είναι αγκυρωμένο στον επάνω και τον κάτω τοιχίσκο σε διάφορες στάθμες φόρτισης (ως % F_{max}), οι τιμές του οποίου έχουν υπολογιστεί όπως περιγράφεται στην εργασία των Askouni & Papanicolaou, 2017. Από την κατανομή των παραμορφώσεων, που αντιστοιχεί στο F_{max} , φαίνεται ότι η απόσταση μεταξύ των σημείων A και B (μέσος όρος από επάνω και κάτω τοιχίσκο) ισούται με 137.5 mm. Ωστόσο, αν πρόκειται για συστάσεις σχεδιασμού, το προτεινόμενο μήκος αγκύρωσης θα στρογγυλοποιηθεί στο επόμενο πολλαπλάσιο των 50 mm οπότε θα προκύψει ίσο με 150 mm. Επισημαίνεται ότι οι D' Antino et al., 2014 προτείνουν τα σημεία A και B να λαμβάνονται επί της καμπύλης που αντιστοιχεί στο εκτιμώμενο φορτίο αποκόλλησης (φορτίο που σηματοδοτεί την απώλεια συνάφειας πλέγματος-κονιάματος). Στην παρούσα εργασία, υποθέτοντας πως αποκόλλησης μπορεί να ορισθεί ως αυτό που αντιστοιχεί στην τελευταία αλλαγή κλήσης της καμπύλης απόκρισης φορτίου-σχετικής μετακίνησης – όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω – το φορτίο αυτό εκτιμάται μεγαλύτερο από $0.8F_{max}$ για όλα τα θεωρούμενα μήκη αγκύρωσης (≥ 125 mm).



Σχήμα 3. Κατανομή παραμορφώσεων σε διαφορετικές στάθμες φορτίου για μήκη αγκύρωσης ≥ 125 mm (Θέση – άξονας X = ονομαστική απόσταση του μηκυσιομέτρου από το φορτιζόμενο άκρο).

Η απόκριση κάθε δοκιμίου κατά τη διάρκεια φόρτισης δίνεται από την καμπύλη φορτίου-σχετικής μετακίνησης ($F-d_r$). Αντιπροσωπευτικές καμπύλες από κάθε ομάδα δοκιμίων με διαφορετικό μήκος αγκύρωσης δίνονται στο **Σχήμα 2β** και έως την αστοχία αποτελούνται από τους ακόλουθους κλάδους: (i) γραμμικός ανερχόμενος κλάδος πριν το σχηματισμό ρωγμών (σηματοδοτούμενος από την πρώτη πτώση φορτίου), που αντιστοιχεί στη γραμμικά ελαστικά συμπεριφορά των συστατικών του IAM (πλέγμα και κονίαμα) και στην απουσία σχετικής ολίσθησης μεταξύ τους, (ii) ανερχόμενος κλάδος που αντιστοιχεί στη φάση σχηματισμού των ρωγμών, κατά τη διάρκεια του οποίου η συνάφεια μεταξύ ινών και μήτρας απομειώνεται σταδιακά από το φορτιζόμενο άκρο έως μήκος ίσο με το ενεργό, εφόσον αυτό είναι διαθέσιμο, (iii) ανερχόμενος κλάδος, που εκτείνεται από την τελευταία ρωγή (τελευταία πτώση φορτίου) έως την αστοχία του δοκιμίου (κατά το διάστημα αυτό, οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές διευρύνονται κατά πλάτος, ενώ από το φορτιζόμενο άκρο της ημιλωρίδας IAM εκκινά η αποκόλληση του πλέγματος από το κονίαμα και η προοδευτική αστοχία των περιμετρικών ινών κλώνων). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μεταβολή της κλίσης μεταξύ του κλάδου (ii) και του κλάδου (iii) είναι δυσδιάκριτη, οπότε η καμπύλη $F-d_r$ θα μπορούσε να εξιδανικευτεί ως διγραμμική (με γραμμική ψευδο-κράτυνση) έως την αστοχία. Μετά την αστοχία των δοκιμίων, οι καμπύλες $F-d_r$ παρουσιάζουν έναν γραμμικό κατερχόμενο κλάδο ακολουθούμενο από έναν οριζόντιο, που αντιστοιχεί στο παραμένον φορτίο, το οποίο κατά μέσο όρο ισούται με 7.5% και 26% του μέγιστου για επαρκή ($\geq L_{eff}$) και ανεπαρκή ($< L_{eff}$) μήκη αγκύρωσης, αντίστοιχα. Το παραμένον φορτίο δηλώνει ολίσθηση του πλέγματος από το κονίαμα με ταυτόχρονη ολίσθηση των περιμετρικών ινών (sleeve fibers) του εκάστοτε κλώνου σε σχέση με τους κεντρικούς (core fibers). Αυτό το φαινόμενο επιβεβαιώνεται και μέσω οπτικής παρατήρησης του εξέχοντος πλέγματος στο ελεύθερο άκρο μετά την αστοχία δοκιμίων με μήκη αγκύρωσης < 125 mm. Επομένως, για επαρκή μήκη αγκύρωσης μόνο ένα μικρό ποσοστό ινών συνεχίζει να ολισθαίνει μετά την αστοχία, αφού οι περισσότερες από αυτές έχουν ήδη θραυστεί, ενώ για ανεπαρκή μήκη αγκύρωσης περισσότερες ίνες συνεχίζουν να ολισθαίνουν, λόγω της ελλιπούς αγκύρωσής τους. Από τη σχέση παραμένοντος φορτίου-μήκους αγκύρωσης, προκύπτει ότι η ποσότητα των ινών που αστοχούν αυξάνεται καθώς το μήκος αγκύρωσης αυξάνεται και σχεδόν σταθεροποιείται για επαρκή μήκη. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να εξηγήσει περαιτέρω τη σταθεροποίηση του μέγιστου φορτίου των δοκιμίων με επαρκή μήκη αγκύρωσης, εφόσον ένα σχεδόν σταθερό ποσοστό ινών αυτών αστοχούν (σε παραμόρφωση ίση με το 35% της εφελκυστικής παραμόρφωσης του πλέγματος).

Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο τοιχίσκων (ολική μετακίνηση, d_t) είναι το αποτέλεσμα της επιμήκυνσης των ινών του πλέγματος της στρώσης IAM και της ολίσθησής τους από το κονίαμα – θεωρώντας μηδενική σχετική ολίσθηση της κάτω στρώσης κονιάματος ως προς το υπόστρωμα. Ως συνεπακόλουθο, η σχετική μετακίνηση του πλέγματος ως προς το υπόστρωμα, $d_{r,max}$, οφείλεται στην επιμήκυνση των ινών του αγκυρωμένου μήκους της ημιλωρίδας IAM (e_{BL}) και στην ολίσθησή τους από το κονίαμα, “Εξίσωση 1”. Δεομένου ότι η e_{BL} μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ολοκλήρωσης της κατανομής των παραμορφώσεων κατά το μήκος αγκύρωσης, “Εξίσωση 2”, η ολίσθηση μπορεί να υπολογιστεί από τη

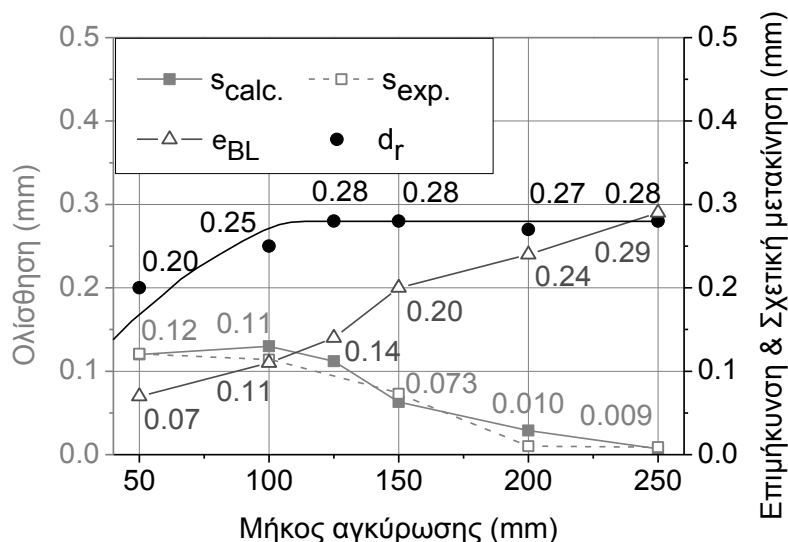
διαφορά μεταξύ της σχετικής μετακίνησης και της επιμήκυνσης των ινών στο αγκυρωμένο μήκος, “Εξίσωση 3”. Επισημαίνεται ότι αυτές οι ποσότητες αφορούν την κάθε ημιλωρίδα IAM, υποθέτοντας απόλυτη συμμετρία. Οι μέσες τιμές της e_{BL} (στο μέγιστο φορτίο) παρουσιάζονται στο γράφημα του **Σχήματος 4** για κάθε μήκος αγκύρωσης. Στο ίδιο γράφημα, εμπεριέχονται οι αντίστοιχες μέσες τιμές της ολίσθησης των ινών – μετρημένες ($s_{exp.}$) και υπολογισμένες ($s_{calc.}$) – και της σχετικής μετακίνησης, $d_{r,max}$. Όπως αναμενόταν, οι τιμές της επιμήκυνσης αυξάνονται καθώς το μήκος αγκύρωσης αυξάνεται (με αναλογικό τρόπο), ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τις τιμές της ολίσθησης. Η καλή συμφωνία μεταξύ των $s_{exp.}$ και $s_{calc.}$ δείχνει ότι οι αισθητήρες μέτρησης της ολίσθησης στα ελεύθερα άκρα θα μπορούσαν να παραληφθούν. Από το **Σχήμα 4** γίνεται επίσης φανερό ότι για μήκη αγκύρωσης ≥ 125 mm η επιμήκυνση των ινών υπερέρχει της ολίσθησής τους, ενώ – αντιθέτως – για μήκη αγκύρωσης < 125 mm οι τιμές της επιμήκυνσης και της ολίσθησης είναι συγκρίσιμες. Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι η διάκριση των συνιστωσών των τιμών της σχετικής μετακίνησης για κάθε μήκος αγκύρωσης θα μπορούσε να παρέχει μία ένδειξη για το ενεργό μήκος αγκύρωσης, που θα ορίζεται πλέον ως το μήκος πέραν του οποίου η τιμή της επιμήκυνσης των ινών καθίσταται μεγαλύτερη από εκείνη της ολίσθησής τους.

$$d_{r,max} = d_t - e_{UL} \quad (1)$$

$$e_{BL} = 0.5 \times (SGFE + SGM) \times l_{FE-M} + 0.5 \times (SGM + SGLE) \times l_{M-LE} \quad (2)$$

$$s_{calc.} = d_r - e_{BL} \quad (3)$$

όπου l_{FE-M} & l_{M-LE} οι αποστάσεις μεταξύ των αντίστοιχων μηκυνσιομέτρων.

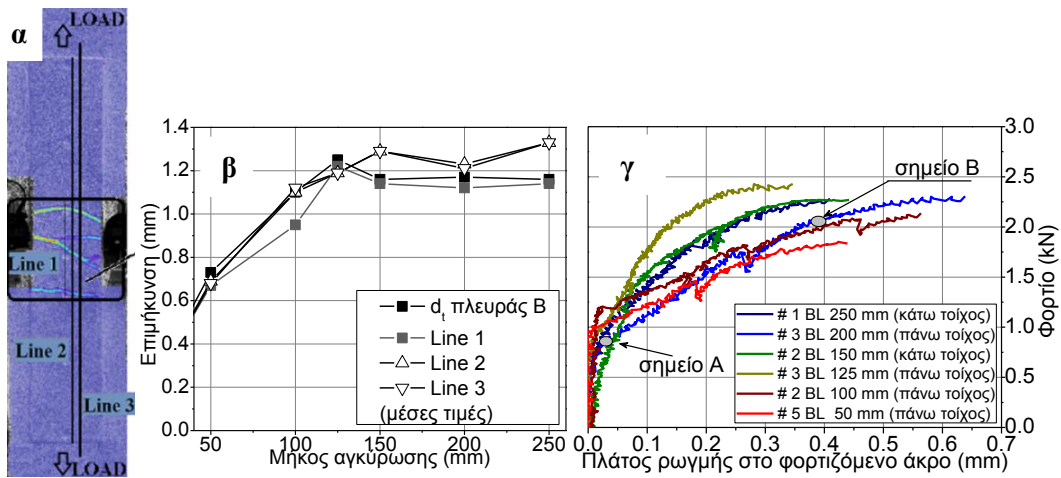


Σχήμα 4. Επιμήκυνση ινών της ημιλωρίδας IAM (e_{BL}), μετρημένη ($s_{exp.}$) & υπολογισμένη ($s_{calc.}$) ολίσθηση ινών στο ελεύθερο άκρο και σχετική μετακίνηση ημιλωρίδας IAM ($d_{r,max}$) συναρτήσει του μήκους αγκύρωσης.

Μετρήσεις από την ανάλυση DIC (οπτική μέθοδος) χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση των μετρήσεων των DDG (συμβατική ενόργανη μέθοδος) που είναι τοποθετημένα κοντά στα LE της πλευράς Β. Η σύγκριση των δύο μεθόδων γίνεται για όλα τα μήκη αγκύρωσης και αφορά συγκεκριμένα στην ολική μετακίνηση, d_t , στην πλευρά Β. Η μετακίνηση από την ανάλυση DIC υπολογίζεται ως η αύξηση του μήκους μίας εικονικής γραμμής που εκτείνεται σε όλο το ρηγματωμένο μήκος κάθε δοκιμίου (Line 1, **Σχήμα 5α**), ενώ η μετακίνηση βάσει των DDG υπολογίζεται από το μέσο όρο των καταγραφών τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο συγκριτικό διάγραμμα του **Σχήματος 5β**, όπου παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των οπτικά και μηχανικά ορισμένων τιμών της d_t . Επιπλέον, υπολογίζεται η επιμήκυνση της στρώσης IAM μέσω της παρακολούθησης μίας εικονικής γραμμής που εκτείνεται σε όλο το μήκος της (Line 2, **Σχήμα 5α**) αλλά και η επιμήκυνση μίας γραμμής μεγαλύτερης του μήκους του IAM (Line 3, **Σχήμα 5α**) που τα άκρα της εκτείνονται έως ένα σημείο του εξέχοντος του IAM τμήματος των τοιχίσκων. Η αύξηση του μήκους των γραμμών Line 2 και Line 3 που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο φαίνεται στα διαγράμματα του **Σχήματος 5β**. Παρατηρείται ότι για όλα τα μήκη αγκύρωσης οι τιμές επιμήκυνσης των δύο γραμμών είναι ουσιαστικά ίδιες, γεγονός που αποδεικνύει ότι η ολίσθηση της στρώσης IAM ως προς το υπόστρωμα είναι μηδενική. Επιπλέον, σε μία προσπάθεια εκτίμησης της αξονικής παραμόρφωσης της άνω στρώσης κονιάματος, αξιοποιούνται οι εικονικές γραμμές Line 1 και Line 2. Συγκριμένα, από την επιμήκυνση της στρώσης IAM αφαιρείται η επιμήκυνση του ρηγματωμένου μήκους (υποθέτοντας μηδενική παραμόρφωση του υποστρώματος τοιχοποιίας) και το αποτέλεσμα διαιρείται με το συνολικό μήκος της στρώσης. Ο μέσος όρος των τιμών που προκύπτουν για κάθε ομάδα δοκιμίων στο μέγιστο φορτίο υπολογίζεται κοντά στην τιμή της παραμόρφωσης ρηγμάτωσης του όπλου κονιάματος υπό εφελκυσμό (περίπου 0.035%), για όλα τα μήκη αγκύρωσης. Ο μέσος όρος των ίδιων τιμών στο φορτίο πρώτης ρηγμάτωσης (55% του F_{max}) εκτιμάται περίπου ίσος με 0.02%, επιβεβαιώνοντας το γεγονός πως όλες οι ημιλωρίδες IAM παραμένουν αρηγμάτωτες. Αυτές οι έμμεσα προσδιορισμένες τιμές αξονικής παραμόρφωσης της άνω στρώσης κονιάματος συνηγορούν στο συμπέρασμα των Carloni et al. 2014 περί διαφοροποίησης του ρόλου των δύο στρώσεων κονιάματος στο μηχανισμό μεταφοράς διατμητικών τάσεων στο ινόπλεγμα και επιβεβαιώνουν ότι δεν μπορούν να αντιπροσωπεύσουν την παραμορφωσιακή κατάσταση του ινοπλέγματος.

Επιπρόσθετα, μέσω της ανάλυσης DIC παρακολουθείται η διεύρυνση των ρωγμών του IAM. Στο **Σχήμα 5γ** περιλαμβάνονται καμπύλες που παρουσιάζουν την εξέλιξη του πλάτους των ρωγμών αστοχίας συναρτήσει του φορτίου (μία ενδεικτική για κάθε μήκος αγκύρωσης). Το πλάτος των ρωγμών της πλευράς Β στο μέγιστο φορτίο κυμαίνεται από 0.20 mm έως 0.65 mm, ενώ δεν προκύπτει διακριτή σχέση μεταξύ αυτού και του μήκους αγκύρωσης. Από το **Σχήμα 5γ** παρατηρείται ότι οι τιμές του πλάτους ρωγμών που καταγράφονται πριν το φορτίο πρώτης ρηγμάτωσης είναι μη μηδενικές (βλ. σημείο Α στις καμπύλες φορτίου-σχετικής μετακίνησης και φορτίου-πλάτους ρωγμής του δοκιμίου BL200_03 στα **Σχήματα 2β & 5γ**, αντίστοιχα) και αντιστοιχούν στο άνοιγμα της ρωγμής

αστοχίας μόνο στην άνω στρώση κονιάματος. Μετά τη διάδοση της ρωγμής αστοχίας και στην κάτω στρώση κονιάματος, οι τιμές του πλάτους της αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με το φορτίο έως το πέρας της φάσης ανάπτυξης ρωγμών (crack saturation – σημείο Β στις καμπύλες φορτίου-σχετικής μετακίνησης και φορτίου-πλάτους ρωγμής του δοκιμίου BL200_03 στα Σχήματα 2β & 5γ, αντίστοιχα). Μετά το πέρας της φάσης ανάπτυξης ρωγμών, το πλάτος τους συνεχίζει να αυξάνεται με το φορτίο επαληθεύοντας ότι η ολίσθηση των ινών είναι το κυρίαρχο φαινόμενο στη τελευταία φάση απόκρισης του δοκιμίου πριν την αστοχία.



Σχήμα 5. (α) Στιγμιότυπο στο F_{max} από την ανάλυση DIC για δοκίμιο με μήκος αγκύρωσης 250 mm, (β) Επμήκυνση των Line 1, 2, & 3 και d_t πλευράς Β συναρτήσει του μήκους αγκύρωσης, (γ) καμπύλες εξέλιξης του πλάτους ρωγμής συναρτήσει του φορτίου για κάθε μήκος αγκύρωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το ενεργό μήκος αγκύρωσης, L_{eff} , για το χρησιμοποιούμενο σύστημα IAM προσδιορίζεται μέσω δύο εναλλακτικών μεθόδων και προτείνεται, για πρακτικές εφαρμογές, να λαμβάνεται ίσο με 150 mm.
- Η καμπύλη απόκρισης φορτίου-σχετικής μετακίνησης έως την αστοχία μπορεί να εξιδανικευτεί ως διγραμμική. Μετά την αστοχία των δοκιμίων, οι καμπύλες $F-d_r$ παρουσιάζουν έναν γραμμικό κατερχόμενο κλάδο ακολουθούμενο από έναν οριζόντιο, που αντιστοιχεί στο παραμένον φορτίο, το οποίο κατά μέσο όρο ισούται με 7.5% και 26% του μέγιστου για επαρκή ($\geq L_{eff}$) και ανεπαρκή ($< L_{eff}$) μήκη αγκύρωσης,
- Μέσω ανάλυσης φωτογραμμετρίας, επιβεβαιώνεται ότι η ολίσθηση της στρώσης IAM ως προς το υπόστρωμα είναι μηδενική και παρακολουθείται το άνοιγμα των ρωγμών τα εύρη των οποίων κυμαίνονται από 0.2 mm έως 0.65 mm στην αστοχία.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Askouni, P.D., & Papanicolaou, C.G., “Experimental investigation of bond between glass textile reinforced mortar overlays and masonry: the effect of bond length.” *Mater. Struct.*, Vol. 50(2), 164, (2017) doi:10.1617/s11527-017-1033-7

D’Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F., “Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry”. *Compos. Part B.*, Vol. 46 (2013), 15-20

Carloni C., D’Antino, T., Sneed, L.H. & Pellegrino C., “Role of the Matrix Layers in the Stress-Transfer Mechanism of FRCM Composites Bonded to a Concret, Substrate”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 141, No 6 (2014) 04014165

Carozzi, F.G. & Poggi, C., “Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening”. *Compos. Part B.*, Vol. 70 (2015) 215-230

Carozzi, F.G., Colombi, P., Fava, G., & Poggi, C., “A cohesive interface crack model for the matrix–textile debonding in FRCM composites”. *Compos. Struct.*, Vol. 143, (2016) 230-241

D’Antino, T., Carloni, C., Sneed, L.H., Pellegrino, C., “Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach”. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 117, (2014) 94-111

Malena. M. & De Felice, G., “Debonding of composites on a curved masonry substrate: Experimental results and analytical formulation”. *Compos. Struct.*, Vol. 112, (2014) 194-206

Sneed L.H., D’Antino T., Carloni, C. & Pellegrino, C., “A comparison of the bond behavior of PBO-FRCM composites determined by double-lap and single-lap shear tests”. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 64, (2015) 37-48

Subramaniam, K.V., Carloni, C. & Nobile, L., “Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete”. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, No4 (2007) 578-594

Πρότυπα (standards)

AC434: Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems, ICC-Evaluation Service, Whittier (CA) (2013)

EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, European Committee for Standardization (1993)

EN ISO 13934-1: Textiles-Tensile properties of fabrics – Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method, British Standard (1999)

RILEM TC 76: Technical recommendations for testing and use of constructions materials: LUMB1 - Compressive strength of small walls and prisms. Chapman & Hall, UK (1991)