

Καινοτόμο Σύστημα Συνδυασμένης Αντισεισμικής και Ενεργειακής Αναβάθμισης Κτηρίων

An Innovative System for Combined Seismic and Energy Retrofitting of Buildings

Κυριάκος ΚΑΡΛΟΣ¹, Αθανάσιος ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ²

Λέξεις κλειδιά: αντισεισμική ενίσχυση, αντίσταση σε φωτιά, θερμομόνωση, ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, τοιχοποιία

Keywords: fire resistance, masonry, seismic retrofitting, textile reinforced mortar, thermal insulation

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Προτείνεται και μελετάται πειραματικά ένα καινοτόμο σύστημα συνδυασμένης αντισεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης κτηρίων, το οποίο προκύπτει από τη συνδυασμένη εφαρμογή ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (IAM) και θερμομονωτικών πλακών. Το προτεινόμενο σύστημα εφαρμόζεται με πυράντοχα ή μή υλικά, μονόπλευρα ή αμφίπλευρα σε τοιχίσκους, οι οποίοι μελετώνται πειραματικά υπό ανακυκλιζόμενη εντός ή εκτός επιπέδου φόρτιση. Γίνονται συγκρίσεις ως προς τη βέλτιστη διάταξη των υλικών του συστήματος αλλά και της συμπεριφοράς τους στη φωτιά και συμπεραίνεται ότι η συνδυασμένη χρήση IAM και θερμομονωτικών πλακών αυξάνει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα, προσφέροντας ταυτόχρονα θερμομόνωση. Εξάγονται λεπτομερή συμπεράσματα για εντός και εκτός επιπέδου φόρτιση.

ABSTRACT: The application of a new system is proposed and investigated, which combines textile reinforced mortars (TRM) and thermal insulation as a means of combined seismic and energy retrofitting of masonry walls. Medium scale tests were carried out on masonry walls subjected to out-of-plane and in-plane cyclic loading. Several parameters were investigated, including the use of fire-resistant versus polymer-based insulating material, one-sided versus two-sided insulation and/or TRM jacketing, placement of the TRM outside the insulation or in a sandwich form (over and under the insulation) and the displacement amplitude of the loading cycles. From the results obtained in this study the authors believe that TRM jacketing may be combined effectively with thermal insulation, which can be fire-resistant too.

¹ Υποψ. Διδάκτορας, Τμ. Πολιτ. Μηχανικών, Πανεπ. Πατρών, email: karloskyriakos@gmail.com

² Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: triant@upatras.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

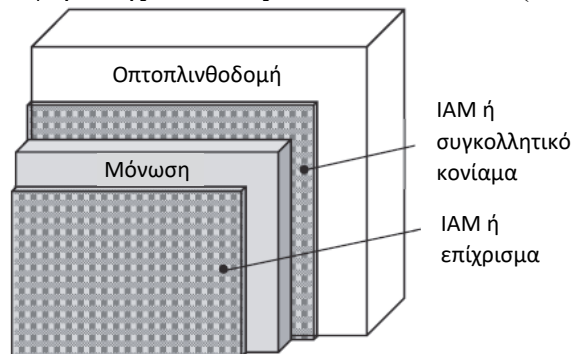
Αρκετές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί με στόχο την αύξηση της αντοχής και/ή της ικανότητας παραμόρφωσης τοιχοδομών, όπως π.χ. η χρήση ενισχυμένων επιχρισμάτων, η κατασκευή μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος, η προένταση, η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) και – κατά την τελευταία δεκαετία – η εφαρμογή μανδύα μικρού πάχους ο οποίος προκύπτει από το συνδυασμό ινοπλεγμάτων και κονιάματος (ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα – IAM). Οι λύσεις βασισμένες στα IAM έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των ΙΟΠ (υψηλή αντοχή, εξαιρετική ικανότητα παραμόρφωσης, μικρό βάρος, ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, αμελητέες αλλαγές στη γεωμετρία κλπ) ενώ ταυτόχρονα λύνουν τα προβλήματα που αφορούν στις εποξειδικές ρητίνες (π.χ. Triantafillou et al. 2006).

Το σύστημα IAM (γνωστό στην Αγγλική βιβλιογραφία και ως TRM ή TRC – textile reinforced mortar ή concrete, ή FRCM – fabric reinforced cementitious matrix) απαρτίζεται από πλέγματα ινών (π.χ. υάλου, άνθρακα, χάλυβα, βασάλτη, πολυπροπυλενίου) σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις και μια μήτρα από ανόργανο κονίαμα. Η διάσταση των βροχίδων εξαρτάται από την απόσταση και διατομή των κλώνων και επομένως είναι δυνατό να διαφέρει σε κάθε διεύθυνση, γεγονός που επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πλέγματος και το βαθμό διεύθυνσης του κονιάματος μέσα από την πλέξη του. Συστήματα IAM σε τοιχοδομές χρησιμοποιήθηκαν από τους Faella et al. (2004) και Prota (2006) για την αύξηση της αντοχής τοιχίσκων υπό διαγώνια θλίψη, από τους Κρεβάικα (2005) και Nurchi (2005) ως μανδύας περίσφιγξης σε μικρής κλίμακας υποστυλώματα οπτοπλινθοδομής υπό κεντρική θλίψη, και από τους Papanicolaou et al. (2007, 2008) ως μέσο ενίσχυσης άοπλης τοιχοποιίας σε εντός και εκτός επιπέδου ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Πιο πρόσφατες μελέτες επικεντρώθηκαν σε δοκιμές συνάφειας (π.χ. De Felice et al. 2014, Alecci et al. 2016, Askouni and Papanicolaou 2016), σε εντός επιπέδου (Parisi et al. 2011) και εκτός επιπέδου φόρτιση τοιχίσκων (Babaeidarabad et al. 2014), στην ενίσχυση τόξων (Garmendia 2011) και στη σεισμική αναβάθμιση τοιχοπληρώσεων (Koutas et al. 2015α,β).

Πλέον της απαίτησης για αντισεισμική αναβάθμιση, τα παλαιά κτίρια συχνά απαιτούν και ταυτόχρονη ενεργειακή αναβάθμιση (θερμομόνωση), καθότι παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση η οποία αυξάνει το ενεργειακό τους αποτύπωμα και το κόστος χρήσης, ενώ μειώνει τη θερμική άνεση των χρηστών. Από τις λύσεις που έχουν προταθεί η εξωτερική ή/και εσωτερική θερμομόνωση («θερμοπρόσοψη») φαίνεται να κερδίζει έδαφος λόγω της υψηλής θερμομονωτικής ικανότητας και της εύκολης και γρήγορης εφαρμογής με σχετικά μικρό κόστος (π.χ. Bomberg et al. 1997, Anastaselos et al. 2009). Τα κυριότερα χρησιμοποιούμενα υλικά για κατασκευή θερμομονωτικών πλακών σήμερα είναι η διογκωμένη και η εξηλασμένη πολυστερίνη, η εξηλασμένη πολυουρεθάνη και ο πετροβάμβακας. Τα παραπάνω υλικά συνήθως επικολλώνται ή και στηρίζονται μηχανικά στην επιφάνεια των κατασκευών (π.χ. τοιχοποιία ή και πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος) και στη συνέχεια επικαλύπτονται από πολυμερικά ή μη επιχρίσματα. Επιπλέον, προσφάτως έχουν γίνει προτάσεις για χρήση

καινοτόμων υλικών (π.χ. πλάκες με κενό αέρος, πλάκες μονωτικού αερίου, πλάκες αερογέλης) με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας έως και 10 φορές μικρότερο από τις παραπάνω τυπικές θερμομονωτικές πλάκες.

Οι μανδύες από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM) προσφέρουν αμελητέα θερμική μόνωση ενώ η εσωτερική ή εξωτερική θερμομόνωση έχει εξαιρετικά περιορισμένη ικανότητα παραλαβής φορτίων. Σε αυτή την εργασία προτείνεται ο συνδυασμός των δύο συστημάτων σε ένα, το οποίο θα προσφέρει ταυτόχρονη αντισεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση. Το νέο αυτό σύστημα (Σχ. 1) συνδυάζει το IAM με θερμομονωτικό υλικό, σε μορφή προκατασκευασμένων πλακών ή επί τόπου παραγωγής. Ανάλογα με τα φορτία, τις αρχιτεκτονικές και τις κατασκευαστικές απαιτήσεις, το σύστημα είναι δυνατόν να τοποθετηθεί μονόπλευρα ή και αμφίπλευρα (συστήνεται στην περίπτωση εκτός επιπέδου φόρτισης) σε υφιστάμενες τοιχοδομές. Το IAM μπορεί να τοποθετηθεί έξω ή μέσα από την μόνωση στη μία ή και στις δύο πλευρές του τοίχου. Όλα τα παραπάνω ερευνώνται πειραματικά για εντός και εκτός επιπέδου φόρτιση, ενώ παράλληλα κάποια από τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε δοκιμές πυρός πριν τις δοκιμές μηχανικής αντοχής. Περισσότερες λεπτομέρειες για την περίπτωση εκτός επιπέδου φόρτισης δίνονται από τους Triantafillou et al. (2017) και για την περίπτωση εντός επιπέδου φόρτισης από τους Triantafillou et al. (2018).



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση του προτεινόμενου συστήματος αντισεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης στη μία πλευρά τοιχοποιίας.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ονοματολογία και μεθοδολογία για εντός επιπέδου φόρτιση

Σκοπός της πειραματικής διερεύνησης είναι η κατανόηση της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής IAM σε συνδυασμό με θερμομονωτικές πλάκες για τη συνδυασμένη αντισεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση τοιχοποιίας σε εντός επιπέδου ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε τρεις σειρές δοκιμών δρομικής τοιχοποιίας μεσαίας κλίμακας, κατασκευασμένα από οπτόπλινθους και χωριζόμενα στις εξής κατηγορίες: Σειρά Α (τοίχοι

διάτμησης) με διαστάσεις 1300 mm στο ύψος και 1000 mm στο πλάτος. Σειρά Β (πεσσοί με καμπτική εντός επιπέδου καταπόνηση σε συνδυασμό με αξονικό φορτίο) με διαστάσεις 1300 mm στο ύψος και 400 mm στο πλάτος. Σειρά C (δοκοί – ανώφλια, χωρίς αξονικό φορτίο) με διαστάσεις 400 mm στο ύψος και 1300 mm στο μήκος. Η κατεύθυνση της ανακυκλιζόμενης δύναμης ήταν παράλληλη στους οριζόντιους αρμούς για τις Σειρές Α και Β και κάθετη σε αυτούς για τα δοκίμια της Σειράς C. Όλα τα δοκίμια μονώθηκαν με διογκωμένη πολυστερίνη πυκνότητας 29 kg/m³, αντοχής 200 kPa (σε παραμόρφωση 10%) και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda_p = 0.032$ W/mK.

Σε όλα τα δοκίμια έγινε εφαρμογή της ίδιας ποσότητας πλέγματος ενίσχυσης (δύο στρώσεις υαλοπλέγματος δύο διευθύνσεων συνολικού βάρους 560 g/m²) και πάχους θερμομόνωσης (συνολικό πάχος θερμομονωτικών πλακών 40 mm), ενώ έγινε διαφοροποίηση ως προς τη διάταξη των υλικών ως εξής: Θερμομόνωση και ενίσχυση με IAM από τη μία πλευρά, θερμομόνωση και ενίσχυση με IAM από τις δύο πλευρές, τοποθέτηση των IAM έξω από τις θερμομονωτικές πλάκες, τοποθέτηση των IAM μεταξύ της θερμομόνωσης και της τοιχοποιίας.

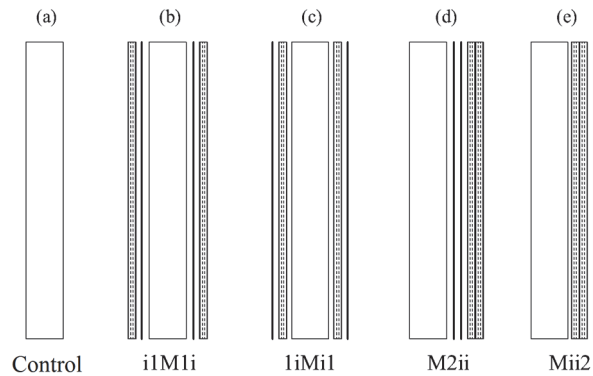
Τύποι δοκιμίων εντός επιπέδου φόρτισης

Όλα τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με εξάοπα τούβλα διαστάσεων 185x85x60 mm στο Εργαστήριο από έμπειρο κτίστη. Η θλιπτική αντοχή των τούβλων μετρήθηκε ίση με 18.11 MPa και 4.43 MPa παράλληλα και κάθετα στις οπές, αντιστοίχως. Το κονίαμα είχε θλιπτική αντοχή 9.2 MPa και εφελκυστική αντοχή από κάμψη 2.3 MPa. Το πάχος αρμών της τοιχοποιίας ήταν περίπου 10 mm ενώ η μέση θλιπτική αντοχή της ήταν 11 MPa και 3.71 MPa σε διεύθυνση παράλληλα και κάθετα στους οριζόντιους αρμούς, αντιστοίχως.

Ένα δοκίμιο από κάθε σειρά χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο ελέγχου χωρίς καμία δομητική ή θερμομονωτική ενίσχυση (Σχ. 2a), ενώ κάθε σειρά δοκιμίων περιελάμβανε τέσσερις διαφορετικές διατάξεις: Δοκίμιο i1M1i ενισχυμένο και από τις δύο πλευρές με μία στρώση IAM σε επαφή με την τοιχοποιία και με μονωτική πλάκα πολυστερίνης πάχους 20 mm τοποθετημένη εξωτερικά και στις δύο πλευρές (Σχ. 2b). Δοκίμιο 1iM1i ενισχυμένο και από τις δύο πλευρές με μία στρώση IAM επικολλημένη στην εξωτερική πλευρά των θερμομονωτικών πλακών οι οποίες με την σειρά τους είναι επικολλημένες στην οπτοπλινθοδομή (Σχ. 2c). Δοκίμιο M2ii ενισχυμένο από την μία πλευρά με δύο στρώσεις IAM και δύο θερμομονωτικές πλάκες συνολικού πάχους 40 mm επικολλημένες στην εξωτερική πλευρά (Σχ. 2d). Δοκίμιο Mii2 ενισχυμένο από τη μία πλευρά με δύο στρώσεις IAM στην εξωτερική πλευρά δύο στρώσεων θερμομόνωσης (συνολικού πάχους 40 mm), οι οποίες ήταν επικολλημένες στην τοιχοποιία (Σχ. 2e).

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 15 δοκιμές (τρεις σειρές από 5 δοκίμια η κάθε μία). Η ονοματολογία των δοκιμίων περιλαμβάνει: τα γράμματα Α, Β και C στην αρχή του κάθε ονόματος, που παραπέμπουν στις τρεις σειρές δοκιμίων, τους αριθμούς 1 ή 2 που δηλώνουν τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος, το γράμμα i που δηλώνει την ύπαρξη θερμομόνωσης πάχους 20 mm και το γράμμα

Μ που δηλώνει την τοιχοποιία. Η σειρά των γραμμάτων και αριθμών δηλώνει τη σειρά με την οποία έχουν εφαρμοστεί τα διάφορα υλικά στο κάθε δοκίμιο. Για παράδειγμα, το δοκίμιο A_1iMi1 είναι Σειράς Α με τα εξής υλικά σε επάλληλες στρώσεις: μία στρώση ΙΑΜ, θερμομονωτική πλάκα πάχους 20 mm, τοιχοποιία, θερμομονωτική πλάκα 20 mm, μια στρώση ΙΑΜ.



Σχήμα 2. (a) Δοκίμιο ελέγχου, (b)-(e) ενισχυμένα δοκίμια.

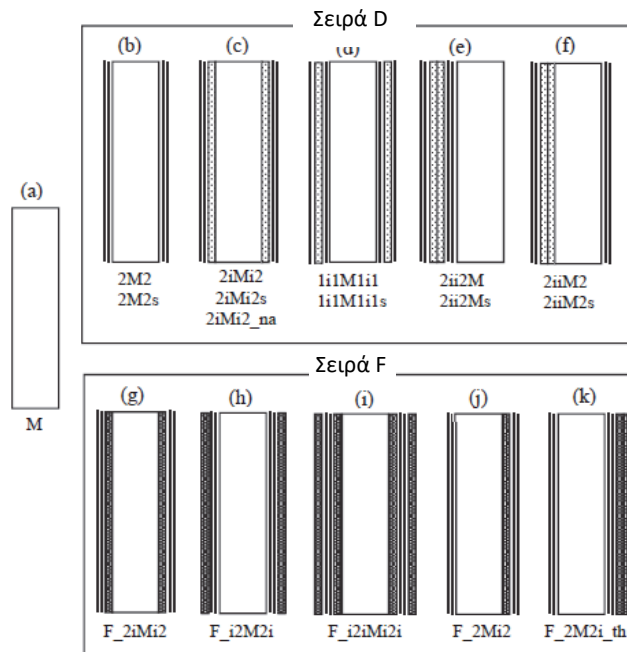
Ονοματολογία και μεθοδολογία για εκτός επιπέδου φόρτιση

Για τις δοκιμές εκτός επιπέδου παρασκευάστηκαν 17 τοιχίσκοι όπως και στην προηγούμενη ενότητα, με διαστάσεις 1500 mm στο μήκος, 400 mm στο πλάτος και 85 mm στο πάχος. Τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε εκτός επιπέδου κάμψη τριών σημείων έτσι οι ορθές τάσεις να είναι παράλληλες στους οριζόντιους αρμούς (όπως συμβαίνει π.χ. στο άνω τμήμα κατακόρυφων τοίχων σε εκτός επιπέδου φόρτιση). Για τη διερεύνηση της αντίστασης σε φωτιά τα δοκίμια μονώθηκαν με δύο ειδών μονωτικά υλικά. Τα δοκίμια Σειράς D μονώθηκαν με διογκωμένη πολυστερίνη πυκνότητας 29 kg/m^3 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda_p = 0.029 \text{ W/mK}$, ενώ τα δοκίμια Σειράς F μονώθηκαν με μια πυράντοχη μόνωση από αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα πυκνότητας 115 kg/m^3 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda_c = 0.045$. Τα δοκίμια αυτού του τύπου υπεβλήθησαν σε δοκιμή πυρός πριν την δοκιμή μηχανική αντοχής.

Τα δοκίμια της Σειράς D περιλαμβάνουν 6 διαφορετικές διατάξεις (Σχ. 3b-f): Τα δοκίμια 2M2 και 2M2s, ενισχυμένα και στις δύο πλευρές με δύο στρώσεις ΙΑΜ σε κάθε πλευρά και καθόλου θερμομόνωση. Τα δοκίμια 2iMi2 και 2iMi2s ενισχυμένα και στις δύο πλευρές με δύο στρώσεις ΙΑΜ και μια στρώση μονωτικού υλικού σε κάθε πλευρά με το μονωτικό υλικό να τοποθετείται μεταξύ του ΙΑΜ και της τοιχοποιίας. Τα δοκίμια 1i1M1i1 και 1i1M1i1s ενισχυμένα και στις δύο πλευρές με δύο στρώσεις ΙΑΜ στην κάθε πλευρά, ενδιάμεσα των οποίων παρεμβάλλεται μία στρώση μονωτικού υλικού. Τα δοκίμια 2ii2M και 2ii2Ms ενισχυμένα μονόπλευρα με τέσσερις στρώσεις ΙΑΜ και δύο στρώσεις μονωτικού υλικού στο ενδιάμεσο τους. Τα δοκίμια 2iiM2 και 2iiM2s ενισχυμένα με δύο στρώσεις ΙΑΜ, δύο στρώσεις μονωτικού υλικού στη μια πλευρά και δύο στρώσεις ΙΑΜ στη δεύτερη πλευρά. Το δοκίμιο 2iMi2_να αναφέρεται σε διάταξη

όμοια με αυτή του 2iMi2 με την διαφορά ότι ο μανδύας ενίσχυσης δεν έχει συνθήκες επαρκούς αγκύρωσης (διακόπτεται πριν από τις στηρίξεις).

Τα δοκίμια της Σειράς F περιλαμβάνουν 5 διαφορετικές διατάξεις (Σχ. 3g-k): Ένα δοκίμιο (F_2iMi2) ενισχυμένο αμφίπλευρα με δύο στρώσεις IAM πάνω σε μια στρώση πυράντοχου θερμομονωτικού υλικού σε κάθε πλευρά (Σχ. 3g). Ένα δοκίμιο (F_i2M2i) ενισχυμένο αμφίπλευρα με δύο στρώσεις IAM σε επαφή με τον τοίχο και μία στρώση πυράντοχης μόνωσης σε κάθε πλευρά (Σχ. 3h). Ένα δοκίμιο (F_i2iMi2i) ενισχυμένο αμφίπλευρα με δύο στρώσεις IAM τοποθετημένες ενδιάμεσως δύο στρώσεων πυράντοχης μόνωσης σε κάθε πλευρά (Σχ. 3i). Ένα δοκίμιο (F_2Mi2) με πυράντοχη μόνωση στη μία μόνο πλευρά και αμφίπλευρη ενίσχυση δύο στρώσεων IAM σε κάθε πλευρά εξωτερικά (Σχ. 3j). Ένα δοκίμιο (F_2M2i_th) ενισχυμένο αμφίπλευρα με δύο στρώσεις IAM σε κάθε πλευρά και πυράντοχη θερμομόνωση μεγάλου πάχους (“th” = thick) από τη μία μόνο πλευρά (Σχ. 3k).



Σχήμα 3. (a) Δοκίμιο ελέγχου, (b)-(f) δοκίμια Σειράς D, (g)-(k) δοκίμια Σειράς F.

Η ονοματολογία των δοκιμίων περιλαμβάνει: Τον αριθμό 1 ή 2 που δηλώνει τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος, το γράμμα i που δηλώνει την ύπαρξη θερμομόνωσης πάχους 20 mm και το γράμμα M που δηλώνει την τοιχοποιία. Επιπροσθέτως, η σειρά των γραμμάτων και αριθμών δηλώνει τη σειρά (επαλληλία στρώσεων) με την οποία έχουν εφαρμοστεί τα διάφορα υλικά στο κάθε δοκίμιο. Το γράμμα F στην αρχή του ονόματος των δοκιμίων παραπέμπει σε δοκιμές πυρός (fire) και το γράμμα s στο τέλος του ονόματος υποδεικνύει μικρό (small) βήμα αυξανόμενης μετατόπισης στους κύκλους φόρτισης (1 mm). Το δοκίμιο ελέγχου δεν έχει ενίσχυση από IAM ή μόνωση και συμβολίζεται με M

(Σχ. 3a) ενώ τα γράμματα να αναφέρονται σε δοκίμιο μη αγκυρωμένου μανδύα (non-anchored). Για όλα τα δοκίμια της Σειράς D πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε ζεύγη δοκιμίων, με βήματα μετατόπισης ανά κύκλο φόρτισης 1 mm και 2 mm.

Μέθοδος κατασκευής

Για την διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων το κονίαμα ενίσχυσης των IAM αποτέλεσε και κονίαμα επικόλλησης των μονωτικών πλακών. Η τυπική διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων περιλαμβάνει τα εξής βήματα. (1) Καθαρισμός της επιφάνειας του τοίχου από σαθρά και προεξέχοντα τμήματα κονιάματος δόμησης. (2) Διαβροχή του τοίχου για απομάκρυνση σκόνης και ρύπων. (3) Γέμισμα των εσοχών των τούβλων, αλλά και γενικότερα της τοιχοποιίας, με κονίαμα ενίσχυσης κάνοντας χρήση λείας σπάτουλας έτσι ώστε να επιτευχθούν όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες συνάφειας μεταξύ τοίχου και θερμομονωτικών πλακών ή IAM. (4) Επικόλληση θερμομονωτικών πλακών ή πλέγματος ενίσχυσης στη νωπή επιφάνεια του κονιάματος του προηγούμενου βήματος. Στην περίπτωση του πλέγματος έγινε εφαρμογή δύο στρώσεων κονιάματος εκατέρωθεν του πλέγματος, έτσι ώστε το τελευταίο να περιβάλλεται και καλύπτεται πλήρως από κονίαμα. Το πλέγμα τοποθετήθηκε ευθυγραμμισμένο, γεγονός το οποίο προϋποθέτει την επιπεδότητα των στρώσεων νωπού κονιάματος. Στην περίπτωση της τοποθέτησης θερμομονωτικών πλακών η επικόλληση γίνεται σε όλη τους την επιφάνεια με την χρήση οδοντωτής σπάτουλας, με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην εγκλωβίζεται αέρας. (5) Συντήρηση των δοκιμίων με διαβροχή για 28 ημέρες.

Δοκιμές υλικών δόμησης και ενίσχυσης

Τα δοκίμια ενισχύθηκαν με πλέγμα του εμπορίου από επικαλυμμένες ίνες υάλου με κλώνους δύο διευθύνσεων και βάρος 135 g/m^2 (ενδιάμεση απόσταση 18.1 mm στη μία διεύθυνση (υφάδι) και 145 g/m^2 (ενδιάμεση απόσταση 14.2 mm στην άλλη διεύθυνση (στημόνι). Το συνολικό βάρος του ακατέργαστου πλέγματος, χωρίς την ανθεκτική σε αλκάλια πρόσθετη επίστρωση, είναι 280 g/m^2 , ενώ το συνολικό βάρος μαζί με την επικάλυψη ανέρχεται σε 360 g/m^2 . Η επιλογή αυτού του πλέγματος έγινε λόγω της διαθεσιμότητάς του στο Εργαστήριο. Το ονομαστικό πάχος ανά διεύθυνση ήταν 0.052 mm στο υφάδι και 0.056 mm στο στημόνι με την εγγυημένη εφελκυστική αντοχή (σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή) ίση με 1460 MPa και 1360 MPa, αντιστοίχως. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών είναι 74 GPa.

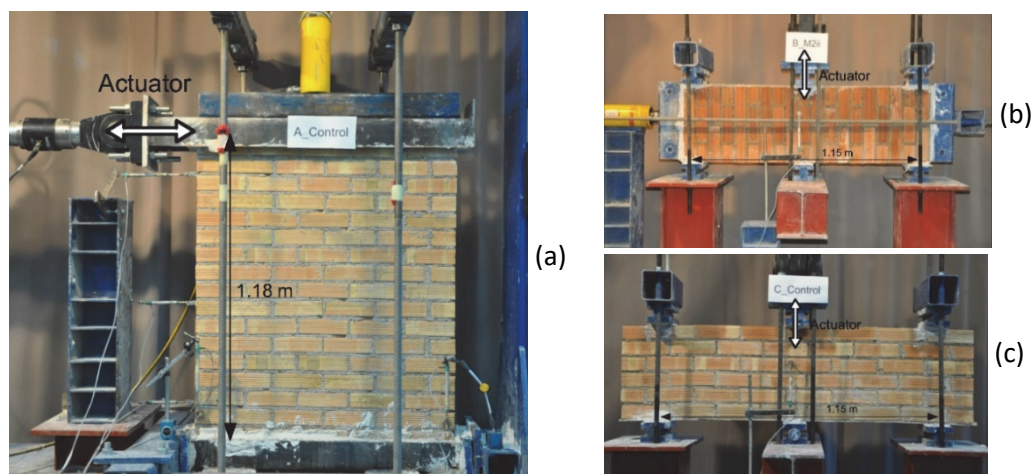
Ως συνδετικό υλικό του IAM χρησιμοποιήθηκε ένα κονίαμα βασισμένο στο τσιμέντο και πολυμερή σε προσεγγιστική αναλογία 15:1 κατά βάρος. Ο λόγος νερού προς τσιμεντοκονία ήταν 4:1 κατά βάρος δίνοντας καλή πλαστικότητα και εργασιμότητα, με χρόνο εργασιμότητας περίπου 30 min σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($20 \text{ }^\circ\text{C}$). Η εφελκυστική αντοχή από κάμψη και η θλιπτική αντοχή του κονιάματος ενίσχυσης (4.5 MPa και 12 MPa, αντιστοίχως) προέκυψαν από δοκιμές δειγμάτων που λήφθηκαν την ημέρα της εφαρμογής με διαδικασία δοκιμής όμοια με αυτή του κονιάματος δόμησης των οπτοπλινθοδομών (τριπλές δοκιμίων σε κάμψη τριών σημείων και μονοαξονική θλίψη των θραυσμάτων).

Ο χαρακτηρισμός της μηχανικής συμπεριφοράς των IAM έγινε μέσω δοκιμών εφελκυσμού επί δοκιμίων («κουπόνια») πλάτους 120 mm και πάχους 5 mm ή 8 mm με μία ή δύο στρώσεις πλέγματος, αντιστοίχως (ένα ζεύγος δοκιμίων ανά περίπτωση). Τα αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή ήταν 9 MPa και 8.92 MPa για δοκίμια με μία και δύο στρώσεις πλέγματος, αντιστοίχως. Οι αντίστοιχες τιμές οριακής παραμόρφωσης ήταν 2.46% και 2.93%.

Για τον χαρακτηρισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας στις δύο διευθύνσεις (κάθετα και παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς) έγιναν δοκιμές θλίψης επί 6 τοιχίσκων με εξωτερικές διαστάσεις 410x85x390 mm (μήκος x πλάτος x ύψος). Οι μέσες τιμές θλιπτικής αντοχής, τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας (μεταξύ 5% και 33% της μέγιστης τάσης) και παραμόρφωσης αστοχίας ήταν 11.00 MPa, 3.16 GPa και 0.43% για διεύθυνση φόρτισης παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς, και 3.71 MPa, 3.77 GPa και 0.22% για διεύθυνση φόρτισης κάθετα στους οριζόντιους αρμούς.

Πειραματική διάταξη, διαδικασία και μετρήσεις για εντός επιπέδου φόρτιση

Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση με την βοήθεια ενός ισχυρού μεταλλικού πλαισίου και υδραυλικών εμβόλων. Τα δοκίμια Σειράς A (Σχ. 4a) δοκιμάστηκαν ως κατακόρυφοι πρόβολοι με οριζόντια συγκεντρωμένη δύναμη στο ελεύθερο άκρο σε ύψος 1.18 m από την βάση, ενώ τα δοκίμια των Σειρών B (Σχ. 4b) και C (Σχ. 4c) δοκιμάστηκαν ως οριζόντιες δοκοί σε κάμψη τριών σημείων με άνοιγμα 1.15 m.



Σχήμα 4. Πειραματική διάταξη για τα δοκίμια της Σειράς (a) A, (b) B, (c) C.

Παράλληλα με την εγκάρσια φόρτιση τα δοκίμια της Σειράς A και B έφεραν αξονικό φορτίο που αντιστοιχούσε στο 10% της θλιπτικής αντοχής. Η επιβολή της αξονικής δύναμης έγινε μέσω υδραυλικού εμβόλου. Στα δοκίμια της Σειράς A η οριζόντια μετατόπιση των τοιχίσκων μετρήθηκε μέσω ποτενσιομετρικών

γραμμικών αισθητήρων σε απόσταση 0.15 m, 0.55 m και 1.05 m από τη βάση. Οι πειραματικές δοκιμές έγιναν με ελεγχόμενη ανακυκλιζόμενη μετατόπιση στην οποία ο ρυθμός φόρτισης ήταν 0.1 mm/s και το βήμα 1 mm.

Αποτελέσματα εντός επιπέδου φόρτισης

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1, όπου δίνονται οι μέγιστες τιμές φορτίου για τις δύο διευθύνσεις ώθησης και έλξης (P_{max}^+ or P_{max}^-), η μετατόπιση στην αστοχία, (δ_u^+ και δ_u^-) (όπου παρατηρείται πτώση του φορτίου κατά 20% ως προς το μέγιστο), η συνολική απορροφούμενη ενέργεια και οι παρατηρούμενες μορφές αστοχίας όλων των δοκιμών.

Πίνακα 1. Περίληψη πειραματικών αποτελεσμάτων εντός επιπέδου φόρτισης.

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (kN)		Μετατόπιση αστοχίας (mm)		Συνολική απορροφ. ενέργεια (kNmm) στον κύκλο:		Μορφή αστοχίας (φορά εμφάνισης αστοχίας)
	Ωθηση	Έλξη	Ωθηση	Έλξη	5	10	
Σειρά Α							
A_Control	19.9	17.3	>12	11.9	94.08	471.03	Λικνισμός, σύνθλιψη γωνίας βάσης (έλξη)
A_i1M1i	31.5	30.5	12.0	11.0	139.31	622.68	Θραύση ινών (έλξη)
A_1iMi1	34.7	40.8	15.5	12.4	129.28	545.20	Θραύση ινών (έλξη)
A_M2ii	39.3	33.1	13.2	10.2	112.02	674.90	Σύνθλιψη τοιχοποιίας (έλξη)
A_Mii2	37.5	35.6	18.5	10.9	113.24	627.47	Σύνθλιψη τοιχοποιίας (έλξη)
Σειρά Β							
B_Control	20.0	24.0	6.0	6.1	31.06	345.54	Καμπτική (ώθηση)
B_i1M1i	37.1	32.6	8.3	7.0	28.59	355.11	Θραύση ινών (ώθηση)
B_1iMi1	35.2	33.2	10.8	10.1	33.21	384.07	Θραύση ινών (ώθηση)
B_M2ii	31.4	30.9	8.9	7.5	42.48	386.32	Θραύση ινών (ώθηση)
B_Mii2	29.2	27.2	8.6	9.4	36.58	359.19	Σύνθλιψη τοιχοποιίας (ώθηση)
Σειρά C							
C_Control	12.2	12.4	1.8	0.7	8.71	*	Κάμψη (έλξη)
C_i1M1i	33.9	18.9	6.2	4.8	5.77	267.01	Θραύση ινών (έλξη)
C_1iMi1	36.8	25.8	6.8	5.8	9.43	247.63	Θραύση ινών (έλξη)
C_M2ii	35.5	20.3	6.8	6.4	5.38	279.64	Θραύση ινών (έλξη)
C_Mii2	24.3	14.6**	8.4	10.3**	9.56	228.06	Συνδυασμός εντός και εκτός επιπέδου κάμψης (ώθηση)

* Αστόχησε στον 2^ο κύκλο. ** Τοπική αστοχία μίας εκ των στηρίξεων, επομένως η τιμή πρέπει να ληφθεί με επιφύλαξη.

Βασικό συμπέρασμα από όλες τις δοκιμές και για τις τρεις σειρές δοκιμών είναι ότι τα ενισχυμένα – και με θερμομόνωση – δοκίμια αστόχησαν σε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές φορτίου, επέδειξαν μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και εν γένει μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης. Η αύξηση αντοχής ήταν για τη

Σειρά A 60-100% στην ώθηση και 75-135% στην έλξη, για τη Σειρά B 45-85% στην ώθηση και 15-40% στην έλξη, και για τη Σειρά C 100-200% στην ώθηση και 55-110% στην έλξη. Γενικό συμπέρασμα είναι ότι η διάταξη των στρώσεων του μανδύα ενίσχυσης/ θερμομόνωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει συστηματικά την απόκριση των δοκιμών, γεγονός που δεν προκαλεί έκπληξη, δεδομένου ότι η συνολική ποσότητα ινών ήταν η ίδια σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια.

Πειραματική διάταξη, διαδικασία και μετρήσεις για εκτός επιπέδου φόρτιση

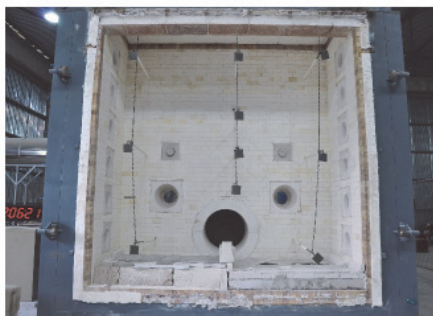
Όλα τα δοκίμια της Σειράς D υπεβλήθησαν σε εκτός επιπέδου ανακυκλιζόμενη καμπτική καταπόνηση τριών σημείων με καμπτικό άνοιγμα 1.30 m. Οι πειραματικές δοκιμές έγιναν με ελεγχόμενη μετατόπιση στην οποία ο ρυθμός φόρτισης ήταν 0.1 mm/s και το βήμα 1 mm ή 2 mm.

Πειραματική διάταξη δοκιμών πυρός, διαδικασία και μετρήσεις

Τα δοκίμια της Σειράς F υπεβλήθησαν σε μονόπλευρη δοκιμή πυρός για 90 min μέσα σε κλίβανο διαστάσεων 3x3x1.2 m (Σχ. 5) σύμφωνα με το Πρότυπο EN 1363-1 στη Μονάδα Δοκιμών Πυρός του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, έτσι ώστε η μέση θερμοκρασία T (σε °C) στο εσωτερικό του κλιβάνου συναρτήσει του χρόνου t (σε min) να ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

Η μέση θερμοκρασία στον κλίβανο έφτασε τους 1006 °C, ενώ οι θερμοκρασίες των IAM στην εκτεθειμένη στη φωτιά επιφάνεια μετρήθηκε (με τη βοήθεια θερμοζευγών) ίση με 870 °C για τα δοκίμια F_2iMi2 και F_2Mi2, 340 °C για τα δοκίμια F_i2M2i και F_i2iMi2i, και 90 °C για το δοκίμιο F_2M2i_th.



Σχήμα 5. Ο κλίβανος που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές πυρός.

Η φωτιά προκάλεσε ολική ή μερική καταστροφή του IAM στην εκτεθειμένη πλευρά κάθε τοιχίσκου, ανάλογα με την προστασία που του παρείχε το μονωτικό υλικό. Στα δοκίμια F_2iMi2 και F_2Mi2, με τη μόνωση μεταξύ του IAM και του τοίχου, η στρώση ενίσχυσης του IAM καταστράφηκε ολοσχερώς, με το δεύτερο δοκίμιο να παρουσιάζει τόση βλάβη ώστε να καταστραφεί κατά την μεταφορά. Στα δοκίμια F_i2M2i και F_i2iMi2i, με πάχος πυράντοχου μονωτικού 20 mm, παρατηρήθηκε ρηγμάτωση του τελευταίου και μερική βλάβη του μανδύα IAM. Τέλος στο δοκίμιο F_2M2i_th, με σημαντικό πάχος πυράντοχου μονωτικού

υλικού 75 mm, η βλάβη στο IAM ήταν σχεδόν μηδενική. Τα δοκίμια αφού κρύωσαν υπεβλήθησαν σε μηχανική δοκιμή.

Αποτελέσματα δοκιμών εκτός επιπέδου

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 2, όπου δίνονται οι μέγιστες τιμές φορτίου για τις δύο διευθύνσεις ώθησης και έλξης (P_{max}^+ or P_{max}^-), η μετατόπιση στην αστοχία, (δ_u^+ και δ_u^-) (όπου παρατηρείται πτώση του φορτίου κατά 20% ως προς το μέγιστο), η συνολική απορροφούμενη ενέργεια και οι παρατηρούμενες μορφές αστοχίας όλων των δοκιμίων.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών Σειράς D συμπεραίνεται ότι το νέο σύστημα ενίσχυσης είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό στην περίπτωση εκτός επιπέδου φόρτισης. Σε όρους αντοχής και ικανότητας παραμόρφωσης, η συνδυασμένη χρήση IAM με θερμομονωτικές πλάκες είναι προτιμότερη από τη μεμονωμένη χρήση IAM. Ο μανδύας IAM χωρίς θερμομόνωση (δοκίμιο 2M2) αύξησε την αντοχή της τοιχοποιίας κατά περίπου 170% [$(9.28 \text{ kN} - 3.42 \text{ kN}) / 3.42 \text{ kN} = 1.71$], ενώ η αντίστοιχη αύξηση για τα δοκίμια με θερμομόνωση και αμφίπλευρη ενίσχυση κυμάνθηκε από 200% [$(10.25 - 3.42) / 3.42 = 1.99$] έως 340%, λόγω του μεγαλύτερου στατικού ύψους της διατομής. Οι αντίστοιχες τιμές για τα δοκίμια με μικρό βήμα μετατόπισης κύκλων φόρτισης (δοκίμια με δείκτη s) είναι 135% [$(8.06 - 3.42) / 3.42 = 1.36$], 190% [$(10.01 - 3.42) / 3.42 = 1.93$] και 285% [$(13.18 - 3.42) / 3.42 = 2.85$]. Όπως ήταν αναμενόμενο, το δοκίμιο με τις δυσμενέστερες συνθήκες αγκύρωσης (2iMi2_na) παρουσίασε μικρότερη ποσοστιαία αύξηση της αντοχής, ίση περίπου με 200%, ενώ στο αντίστοιχο δοκίμιο με ευνοϊκές συνθήκες αγκύρωσης (2iMi2) η αύξηση ήταν 235% [$(11.47 - 3.42) / 3.42 = 2.35$].

Σε όρους ικανότητας παραμόρφωσης, εκφρασμένης από το βέλος κάμψης στην αστοχία, ο συνδυασμός IAM και θερμομόνωσης ήταν συστηματικά πιο αποτελεσματικός από την εφαρμογή μεμονωμένων IAM κατά 140-145%.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων με βήμα κύκλων φόρτισης 1 mm και αυτών με 2 mm φαίνεται ότι δεν υπάρχει επιρροή του βήματος στην απόκριση των δοκιμίων.

Σχετικώς με την απόκριση των τοιχίσκων μετά τις δοκιμές πυρός, σημειώνεται ότι το δοκίμιο F_2iMi2 παρουσίασε πτωχή συμπεριφορά στη φορά της έλξης, καθώς ο μανδύας IAM στην εφελκυστική περιοχή είχε προηγουμένως καταστραφεί λόγω της δοκιμής πυρός. Η αστοχία στη φορά της έλξης εκδηλώθηκε με καμπτική ρηγματώση της τοιχοποιίας στο μέσον του ανοίγματος, ενώ στη φορά της ώθησης προκλήθηκε λόγω αποκόλλησης της διεπιφάνειας μόνωσης – τοίχου. Το δοκίμιο F_i2M2i αστόχησε λόγω εφελκυστικής θραύσης του μανδύα από IAM και στις δύο φορές φόρτισης με την εμφάνιση μιας καμπτικής ρωγμής στο μέσον του ανοίγματος. Μερική βλάβη του μανδύα από την φωτιά οδήγησε σε μειωμένη αποτελεσματικότητα κατά τον εφελκυσμό του στη φορά της έλξης. Η αστοχία του δοκιμίου F_i2iMi2i οφείλεται στην αποκόλληση του μονωτικού υλικού από τον τοίχο. Η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου στη φορά της ώθησης μειώθηκε λόγω της βλάβης κατά τη δοκιμή πυρός. Τέλος, το δοκίμιο F_2M2i_th αστόχησε σε

υψηλό φορτίο με την δημιουργία κάθετης ρωγμής στη μεσαία διατομή και θραύση του μανδύα και στις δύο φορές φόρτισης.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμών εκτός επιπέδου κάμψης.

Δοκίμια	Μέγιστο Φορτίο (kN)		Βέλος κάμψης (mm)		Συνολική απορροφ. ενέργεια (kNmm) στον κύκλο:		Μορφή αστοχίας (φορά εμφάνισης κατά την αστοχία)
	Ωθηση	Έλξη	Ωθηση	Έλξη	4 (8 [*])	7 (14 [*])	
Σειρά D							
M	3.42	--	0.72	--	--	--	Καμπτική ρωγμή
2M2	9.28	9.28	13.78	15.69	154.29	421.19	Θραύση ινών (συμμετρικά)
2iMi2	11.47	12.45	33.68	22.44	95.77	283.47	Αποκόλληση (ώθηση), θραύση ινών (έλξη)
2iMi2 na	10.50	10.25	>28.23	27.48	80.23	221.12	Αποκόλληση (έλξη)
1i1M1i1	12.70	12.21	19.66	20.17	104.80	326.91	Θραύση ινών (συμμετρικά)
2ii2M	20.26	3.66	25.97	24.20	75.06	250.09	Θραύση ινών (ώθηση), σύνθλιψη τοιχοποιίας (έλξη)
2iiM2	13.92	15.14	17.14	24.70	146.71	470.77	Θραύση ινών (ώθηση), αποκόλληση (έλξη)
2M2s	8.06	9.28	12.31	14.15	208.39	626.35	Θραύση ινών (συμμετρικά)
2iMi2s	12.97	12.17	23.49	23.49	144.79	461.72	Θραύση ινών (συμμετρικά)
1i1M1i1s	10.01	10.01	16.30	15.12	114.48	419.46	Θραύση ινών (συμμετρικά)
2ii2Ms	20.26	3.66	29.64	1.00	121.86	402.59	Θραύση ινών (ώθηση)
2iiM2s	11.96	13.18	17.26	18.91	194.51	657.37	Θραύση ινών (ώθηση), αποκόλληση (έλξη)
Σειρά F							
F_2iMi2	5.37	2.44	8.57	5.80	66.52	140.66	Αποκόλληση (άπωση), Σύνθλιψη τοίχου (έλξη)
F_i2M2i	10.25	5.62	15.60	2.81	140.89	381.81	Θραύση ινών (συμμετρικά)
F_i2iMi2i	6.01	2.93	15.63	0.80	71.58	185.35	Αποκόλληση (άπωση), Σύνθλιψη τοίχου (έλξη)
F_2Mi2	--	--	--	--	--	--	Καταστράφηκε κατά τη μεταφορά
F_2M2i th	10.74	9.52	15.90	17.70	159.21	447.77	Θραύση ινών (συμμετρικά)

* Για της δοκιμές με μικρό εύρος μετατόπισης (1 mm).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα καινοτόμο σύστημα συνδυασμένης αντισεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης τοιχοδομών, βασισμένο στο συνδυασμό ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (IAM) και υλικών θερμομόνωσης.

Για φόρτιση εντός επιπέδου και χρήση συγκεκριμένης ποσότητας ινοπλέγματος, φαίνεται ότι η διάταξη των στρώσεων IAM και θερμομόνωσης δεν παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση της τοιχοδομής. Εντούτοις, για φόρτιση εκτός επιπέδου η προτεινόμενη λύση για επικόλληση των IAM εξωτερικά της

θερμομόνωσης είναι συνολικά αποτελεσματικότερη τόσο σε όρους αντοχής όσο και σε όρους ικανότητας παραμόρφωσης σε σχέση με την επικόλληση των IAM πάνω στην τοιχοποιία χωρίς να μεσολαβεί θερμομονωτικό υλικό.

Στην περίπτωση φωτιάς συμπεραίνεται ότι εάν το IAM προστατεύεται από πυράντοχο μονωτικό υλικό κατάλληλου πάχους αποτελεί μια εξαιρετική λύση για τη συνδυασμένη αντισεισμική ενίσχυση και ενεργειακή αναβάθμιση τοιχοδομών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην εργασία συνέβαλαν οι μεταπτυχιακοί φοιτητές Ε. Αργυροπούλου, Λ. Γεωργίου, Π. Καψάλης και Κ. Κεφάλου, καθώς και οι προπτυχιακοί φοιτητές Αικ. Βερροίου και Α. Πετροπούλου. Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης και στην εταιρεία SIKA Hellas ABEE για την δωρεάν διάθεση σημαντικής ποσότητας ινοπλέγματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Alecci, V., De Stefano, M., Luciano, R., Rovero, L. & Stipo, G. (2016) “Experimental investigation on bond behaviour of cement-matrix composites for strengthening masonry structures”, *Journal of Composites for Construction*, 20(1): 04015041.

Anastaselos, D., Giama, E. & Papadopoulos, A.M. (2009) “An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions”, *Energy and Buildings*, 41(11), 1165-1171.

Babaeidarabad, S., De Caso, F. & Nanni, A. (2014) “Out-of-plane behavior of URM walls strengthened with fabric-reinforced cementitious matrix composite”, *Journal of Composites for Construction*, 18(4):04013057.

Bomberg, M., Lstiburek, J. & Nabhan, F. (1997) “Long-term, hydrothermal performance of exterior insulation and finish systems (EIFS)”, *Journal of Building Physics*, 20(3), 223-248.

De Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Ghiassi, B., Larrinaga, P., Lourenco, P.B., Oliveira, D.V., Paolacci, F. & Papanicolaou, C.G. (2014) “Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry”, *Materials and Structures*, 47, 2021-2037.

Garmendia, L., San-Jose, J.T. & Larrinaga, P. (2011) “Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material”, *Construction and Building Materials*, 25, 4374-4385.

Koutas, L., Triantafillou, T.C. & Bousias, S.N. (2015a) “Analytical modeling of masonry infilled RC frames retrofitted with textile reinforced mortar”, *Journal of Composites for Construction*, 19(5), 04014082.

Koutas, L., Bousias, S.N. & Triantafillou, T.C. (2015b) “Seismic strengthening of masonry infilled RC frames with TRM: Experimental study”, *Journal of Composites for Construction*, 19(2), 04014048-1.

Papanicolaou, C.G., Triantafyllou, T.C., Karlos, K. & Papathanasiou, M. (2007) "Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: In-plane cyclic loading Materials and Structures", 40(10), 1081-1097.

Papanicolaou, C.G., Triantafyllou, T.C., Papathanasiou, M. & Karlos, K. (2008) "Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: Out-of-plane cyclic loading", Materials and Structures, 41(1), 143-157.

Parisi, F., Lignola, G.P., Augenti, N., Prota, A. & Manfredi, G. (2011) "Nonlinear behaviour of a masonry subassemblage before and after strengthening with inorganic matrix-grid composites", Journal of Composites for Construction, 15(5), 821-832.

Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G. & Aldea, C. (2006) "Experimental in plane behaviour of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites", Journal of Composites for Construction, 10(3), 223-233.

Triantafyllou, T.C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos & Laourdekis, T. (2006) "Concrete confinement with textile reinforced mortar (TRM) jackets", ACI Structural Journal 103(1), 28-37.

Triantafyllou, T. C., Karlos, K., Kefalou, K. & Argyropoulou, E. (2017) "An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior", Construction and Building Materials, 133, 1-13.

Triantafyllou, T. C., Karlos, K., Kapsalis, P. & Georgiou, L. (2018) Innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behaviour", Journal of Composites for Construction, submitted.

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια (δημοσιευμένα σε πρακτικά)

Askouni, P.D. & Papanicolaou, C.G. (2016) "Experimental investigation of bond between TRM overlay and masonry", in Proceedings of the 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC2016).

Faella, C., Martinelli, E., Nigro, E. & Paciello, S. (2004) "Tuff masonry walls strengthened with a new kind of C-FRP sheet: experimental tests and analysis", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper no. 923.

Nurchi, A. & Valdes, M. (2005) "Strengthening of stone masonry columns by means of cement-based composite wrapping", in Proceedings of the 3rd International Conference on Composites in Construction, Lyon, France, 1189-1196.

Διδακτορικές διατριβές

Κρεβάικας, Θ. (2005), "Συμβολή στην αναλυτική και πειραματική μελέτη φέρουσας τοιχοποιίας ενισχυμένης με σύνθετα υλικά", Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πρότυπα (standards)

EN 1363-1 (1999), Fire resistance tests – Part 1: General requirements, European Committee for Standardization, Brussels.