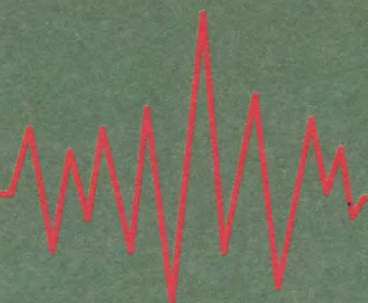




**ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ**



**2°**



**ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
& ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΤΟΜΟΣ Β'**

**Θ Ε Σ Σ Α Λ Ο Ν Ι Κ Η  
Μ Α Κ Ε Δ Ο Ν Ι Α Π Α Λ Λ Α Σ  
28 - 30, Νοεμβρίου, 2001**

**ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ**

**Ο.Α.Σ.Π. - Ι.Τ.Σ.Α.Κ. - Σ.Π.Μ.Ε.**



## Συμπεριφορά φέρουσας τοιχοποιίας από λιθοδομή επισκευασμένης και ενισχυμένης με ινοπλισμένο υλικό σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Low cyclic tests of stone masonry walls repaired and strengthened with use of Fiber-Reinforced Premixed material

ΚΑΡΥΔΗΣ, Π. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
ΜΟΥΖΑΚΗΣ, Χ. Δρ Γεωτεχνικός Μηχανικός, ΕΤΕΠ Ε.Μ.Π.  
ΚΑΡΑΠΙΤΤΑ, Λ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οκτώ τοίχοι από λιθοδομή και κονίαμα χαμηλής αντοχής, υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενες οριζόντιες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις με ταυτόχρονη δράση αξονικού φορτίου σε δύο φάσεις. Κατά τη Φάση Ι τα δοκίμια ρηγματώθηκαν έντονα, χωρίς όμως να αστοχήσουν, ενώ στη Φάση ΙΙ μετά την επισκευή τους καταπονήθηκαν μέχρι αστοχίας. Έξι από τα δοκίμια επισκευάστηκαν με ινοπλισμένο υλικό FRM (Fiber Reinforced Premixed Material) ενώ τα υπόλοιπα επισκευάστηκαν με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίπτωση του υλικού FRM στην αντοχή και πλαστικότητα των επισκευασμένων τοίχων από λιθοδομή.

**ABSTRACT:** Eight stone masonry walls with low quality of mortar, were tested with recycling horizontal imposed displacements and were loaded with vertical load into main phases. In Phase I, the walls were tested up to a certain level of damage while in Phase II the walls were repaired and tested again. Six of the walls were repaired using Fiber Reinforced Premixed Material (FRM) and two of them were repaired with shotcrete, in order to estimate the effectiveness of FRM to the strength and ductility of the repaired walls.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ινοπλισμένα υλικά χρησιμοποιούνται περισσότερο από τριάντα χρόνια στην αεροπορική βιομηχανία, ενώ εδώ και δέκα περίπου χρόνια άρχισαν να εφαρμόζονται στα έργα του πολιτικού μηχανικού, τόσο για την επισκευή ή ενίσχυση κατασκευών από σπλισμένο σκυρόδεμα και ξύλο όσο και στην τοιχοποιία από λιθοδομή. Για την τελευταία περίπτωση η επιλογή των υλικών αυτών ως υλικών ενίσχυσης ή επισκευής είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς δεν αυξάνουν το ίδιο βάρος της κατασκευής και η διαδικασία επέμβασης είναι πλήρως αντιστρέψιμη.

Για να διερευνηθεί πειραματικά η επίδραση στη αντοχή και στην πλαστικότητα τοίχων από λιθοδομή πριν και μετά την επισκευή τους με μανδύες από ινοπλισμένο υλικό FRM (Fiber Reinforced Premixed Material), κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν οκτώ

τοίχοι σε στατική ανακυκλιζόμενη οριζόντια μετακίνηση υπό ταυτόχρονη δράση κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου. Τα δοκίμια μετά την πρώτη καταπόνηση υπέστησαν σοβαρές βλάβες, χωρίς όμως να φτάσουν σε οριακή κατάσταση αστοχίας. Στη συνέχεια τα δοκίμια επισκευάστηκαν και καταπονήθηκαν μέχρι αστοχίας. Η συμπεριφορά των δοκιμίων συγκρίνεται με τη συμπεριφορά δοκιμίου επισκευασμένου με μανδύα εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

### 2. ΔΟΚΙΜΙΑ

Τα οκτώ δοκίμια ήταν τοίχοι από λιθοδομή τα οποία κατασκευάστηκαν όλα την ίδια περίοδο τα οποία καταπονήθηκαν κατά ζεύγη και κωδικοποιούνται με τα ονόματα A1 και A2, B1 και B2, C1 και C2 και D1 και D2. Οι φυσικοί λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθικοί, με αρκετά ψηλή αντοχή

(μεγαλύτερη από 50MPa) και είχαν γενικά ψαθυρή συμπεριφορά. Τα δοκίμια είχαν διαστάσεις 1.00m x 1.50m x 0.30m. Οι φυσικοί λίθοι είχαν πρισματική μορφή με διαστάσεις περίπου 0.15 x 0.20 x 0.30 m, ή μικρότερα. Το κονίαμα ήταν χαμηλής αντοχής, με την ακόλουθη κατά βάρος σύνθεση: Υδράσβεστος: Υδραυλική Άσβεστος: Άμμος: Νερό 1: 1: 20: 4.

### 3. ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Μετά την πρώτη σειρά δοκιμών, τα δοκίμια επισκευάστηκαν και ενισχύθηκαν. Κάθε τύπος επισκευής εφαρμόστηκε σε δύο δοκίμια. Κατά αντιστοιχία με τα αρχικά δοκίμια τα επισκευασμένα δοκίμια κωδικοποιήθηκαν με τα ονόματα A1R και A2R, B1R και B2R, C1R και C2R και D1R και D2R, όπου στο πρώτο γράμμα αντιστοιχεί επίσης και ο τύπος επισκευής τους. Οι τύποι επισκευής που εφαρμόστηκαν ήταν οι ακόλουθοι:

Τύπος επισκευής A: επισκευή με μανδύες από ινοπλισμένα υλικά FRM πάχους 1-1.5cm στις δύο όψεις του δοκιμίου, χωρίς να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους.

Τύπος επισκευής B: επισκευή με μανδύες από ινοπλισμένα υλικά FRM πάχους 1-1.5cm στις δύο όψεις του δοκιμίου. Οι μανδύες συνδέθηκαν μεταξύ τους μέσω δέκα ράβδων Φ6, οι οποίες αγκυρώθηκαν σε μεταλλικές λάμες 250.50.5. Οι μεταλλικές λάμες ισοκατανεμήθηκαν σ' όλη την επιφάνεια του τοίχου.

Τύπος επισκευής C: επισκευή με μανδύες από ινοπλισμένα υλικά FRM πάχους 1-1.5cm στις δύο όψεις του δοκιμίου. Οι μανδύες συνδέθηκαν μεταξύ τους μέσω έξι ράβδων Φ6, οι οποίες αγκυρώθηκαν σε μεταλλικές λάμες 250.50.5. Οι μεταλλικές λάμες ισοκατανεμήθηκαν σ' όλη την επιφάνεια του τοίχου.

Τύπος επισκευής D: Επισκευή με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στις δύο όψεις του τοίχου. Ως οπλισμός χρησιμοποιήθηκαν δύο πλέγματα Φ4/80 St-IV το οποίο τοποθετήθηκε στις όψεις του τοίχου και συνδέθηκαν μεταξύ τους με έξι ράβδους Φ6, σ' όλο το ύψος του τοίχου και αγκυρώθηκαν σε μεταλλικές λάμες 250.50.5.

### 4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ

Για την επισκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο υλικά: το ινοπλισμένο υλικό FRM και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Για όλα τα δοκίμια, η γενική διαδικασία επισκευής και ενίσχυσης με τη χρήση του υλικού FRM που εφαρμόστηκε ήταν η ακόλουθη:

- (α) Αφαίρεση του κονιάματος στην περιοχή της βλάβης, γύρω από τις ρωγμές και τις πέτρες.
- (β) Σχολαστικός καθαρισμός της προς επισκευή ή ενίσχυση επιφάνειας με συμπατόβουρτσες και πλύση των επιφανειών με νερό.
- (γ) Παρασκευή του κονιάματος και διάστρωση του σε βρεγμένες και όχι κορεσμένες επιφάνειες του τοίχου σε δύο στρώσεις.
- (δ) Πλήρωση των ρωγμών με το ίδιο κονίαμα και στις δύο επιφάνειες της τοιχοποιίας.
- (ε) Εφαρμογή του υλικού FRM σε λεπτές στρώσεις 1- 1.5 cm και στις δύο επιφάνειες του τοίχου.

Αντίστοιχη ήταν και η διαδικασία επισκευής και ενίσχυσης με μανδύες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στην περίπτωση αυτή, μετά την πλήρωση των ρωγμών με κονίαμα (στάδιο δ), τοποθετήθηκαν στις όψεις των δοκιμών πλέγματα και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν και στις δύο επιφάνειες του τοίχου οι μανδύες εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους περίπου 3cm.

### 5. ΥΛΙΚΑ

Η μέση θλιπτική αντοχή του κονιάματος των αρχικών τοίχων που μετρήθηκε ήταν 0.62MPa, του ινοπλισμένου υλικού 56.87MPa και του σκυροδέματος 20.03MPa.

### 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

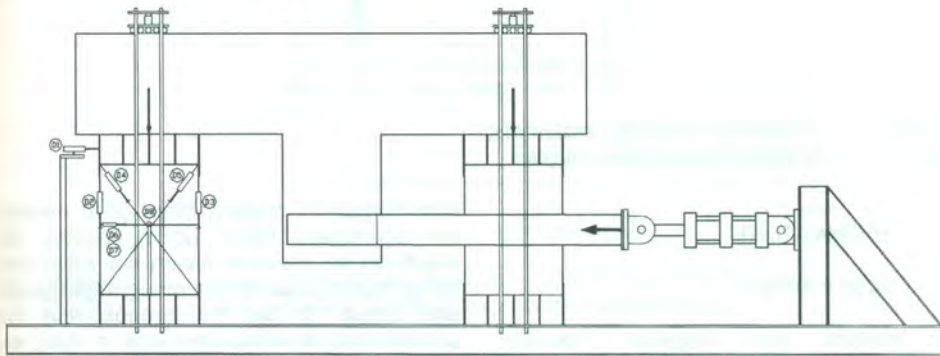
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 1. Οι τοίχοι δοκιμάστηκαν ανά ζεύγος μέσα σε ένα ισχυρό μεταλλικό πλαίσιο φόρτισης. Η πάκτωση της μεταλλικής δοκού θεμελίωσης HEB300 των δοκιμών εξασφαλίστηκε μέσω κοχλίων M30, οι οποίοι βιδώθηκαν στο δάπεδο του πλαισίου φόρτισης. Για την επιβολή του κατακόρυφου φορτίου χρησιμοποιήθηκαν δύο υδραυλικά έμβολα ENERPAC, ικανότητας 500kN το



καθένα. Για την ελεύθερη παραμόρφωση των τοίχων στις θέσεις επιβολής του κατακόρυφου φορτίου χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις με κύλιση. Η επιβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων έγινε μέσω ενός υδραυλικού εμβόλου MTS244. Το έμβολο ήταν ικανότητας  $\pm 500\text{kN}$  με μέγιστη διαδρομή εμβόλου  $\pm 200\text{mm}$ .

Η διάταξη των οργάνων μέτρησης φαίνεται επίσης στο Σχήμα 1. Εκτός από την καταγραφή της επιβαλλόμενης μετακίνησης

(μετακίνηση εμβόλου) και την αναπτυσσόμενη δύναμη στα δύο δοκίμια, καταγράφηκαν οι οριζόντιες, οι κατακόρυφες μετακινήσεις και οι μετακινήσεις κατά τη διαγώνιο. Τα βελόμετρα μέσω των οποίων έγιναν οι μετρήσεις, τοποθετήθηκαν πάνω σε μηχανισμό μεταλλικών βάσεων, οι οποίες πατώθηκαν πάνω στο δοκίμιο.



Σχήμα 1. Πειραματική και μετρητική διάταξη  
Figure 1. Experimental and instrumentation set-up.

## 7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δύο Φάσεις. Κατά την πρώτη Φάση (Φάση I) τα δοκίμια, ρηγματώθηκαν έντονα, χωρίς όμως να αστοχήσουν. Το κατακόρυφο φορτίο ήταν σταθερό για κάθε τοίχο.

Κατά τη δεύτερη Φάση (Φάση II) τα επισκευασμένα δοκίμια καταπονήθηκαν μέχρι αστοχίας. Το κατακόρυφο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν αρχικά  $45\text{kN}$  για κάθε τοίχο ενώ στη συνέχεια μεταβαλλόταν λόγω του ότι η οριζόντια δύναμη ήταν συνάρτηση του κατακόρυφου φορτίου. Η σχέση οριζόντιας δύναμης και κατακόρυφου φορτίου για κάθε τοίχο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

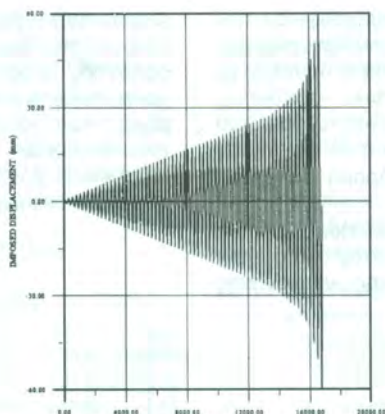
$$\frac{H}{2}h \leq V \leq \frac{1}{2}, H \leq \frac{V}{1.50} \quad (1)$$

όπου  $H$  είναι το οριζόντιο φορτίο,  $V$  το κατακόρυφο,  $l=1.00\text{m}$  το μήκος του δοκίμιου και  $h=1.50\text{m}$  το ύψος του.

Το διάγραμμα επιβολής μετατόπισης στην οποία υποβλήθηκαν τα δοκίμια στη Φάση II φαίνεται στο Σχήμα 2.

## 7. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης ως μέσος όρος του ζεύγους δοκίμιων για τα αρχικά δοκίμιο D, ενώ στα Σχήματα 4 – 7 τα διαγράμματα δύναμης μετακίνησης για τα επισκευασμένα δοκίμια. Οι μέγιστες και ελάχιστες αναπτυσσόμενες δυνάμεις και μετακινήσεις σε κάθε περίπτωση φαίνονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 2. Διάγραμμα επιβολής μετακίνησης  
Figure 2. Imposed displacement diagram

## 8. ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ

### 8.1. Αρχικά Δοκίμια

Η αστοχία των αρχικών δοκιμίων χαρακτηριζόταν από την ανάπτυξη διαγώνιων εφελκυστικών ρωγμών περι το κέντρο των δοκιμίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Οι αστοχίες που παρατηρήθηκαν και στα δύο δοκίμια του κάθε ζεύγους για όλα τα αρχικά δοκίμια ήταν της ίδιας μορφής.

### 8.2. Επισκευασμένα Δοκίμια

Σε όλα τα επισκευασμένα δοκίμια, η πρώτη ένδειξη αστοχίας ήταν η δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών στο πάνω και κάτω μέρος του τοίχου σε διεύθυνση παράλληλη προς τη διεύθυνση φόρτισης όπως φαίνεται στο Σχήμα 9. Μερικά από τα δοκίμια που αποτελούσαν το ζεύγος δοκιμίου δεν παρουσίασαν την ίδια αστοχία. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο υψηλό επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα οι αστοχίες που εμφάνισαν τα επισκευασμένα δοκίμια είναι οι ακόλουθες:

Το Δοκίμιο Α1 αστόχησε διαμητικά με το σχηματισμό διαγώνιας ρωγμής και την αποκόλληση των μανδύων λόγω της μη μεταξύ σύνδεσής τους.

Το δοκίμιο Β1 αστόχησε διαμητικά με διαγώνια ρωγμή και αστοχία των λιθοσωμάτων.

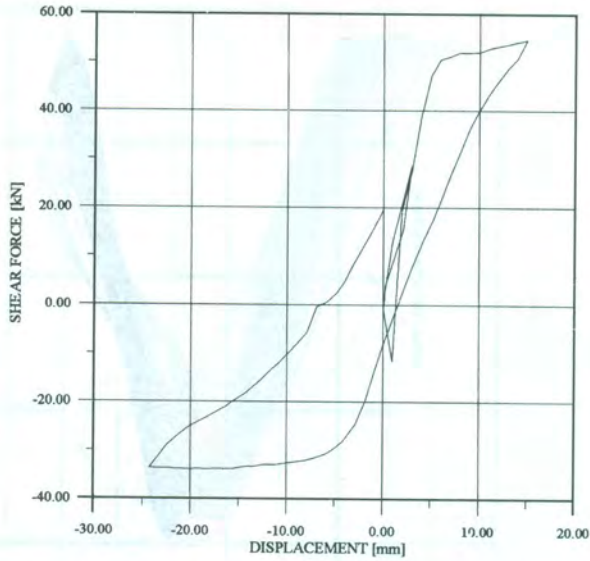
Το δοκίμιο C1 αστόχησε διαμητικά με τη δημιουργία διαγώνιας ρωγμής.

Στο δοκίμιο D1 παρατηρήθηκε μόνο αστοχία του εσωτερικού τοίχου με τη θραύση, την ολίσθηση και την αποκόλληση των λίθων ενώ το κονίαμα θρυμματίστηκε όπως παρατηρείται στα Σχήμα 10. Με την απομάκρυνση του μανδύα από τα λιθοσώματα μετά το τέλος του πειράματος παρατηρήθηκε θραύση των λίθων ενώ παράμεναν κολλημένα σ' αυτόν όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.

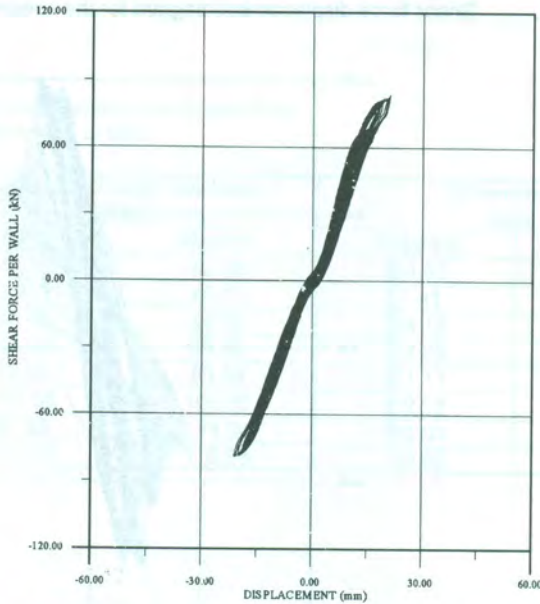
## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ακόλουθες παρατηρήσεις προκύπτουν από τα πειράματα

1. Τα ινοπλισμένα υλικά FRM μπορούν να εφαρμοστούν σε λεπτές στρώσεις 1 με 1.5cm και να βελτιώσουν τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας.
2. Με τη χρήση FRM επιτυγχάνεται πολύ καλή συνάφεια μεταξύ λιθοσωμάτων και του μανδύα παρά την επιβολή ισχυρών δυνάμεων και μετακινήσεων. Μετά το πέρας των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η απομάκρυνση του μανδύα από τα λιθοσώματα συνοδεύονταν από τη θραύση των λίθων ενώ παράμεναν κολλημένα σ' αυτόν, σε αντίθεση με τη συνάφεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του τοίχου.
3. Η αντοχή των επισκευασμένων τοίχων αυξήθηκε περίπου τρεις φορές με την αύξηση της μετακίνησης διαρροής.

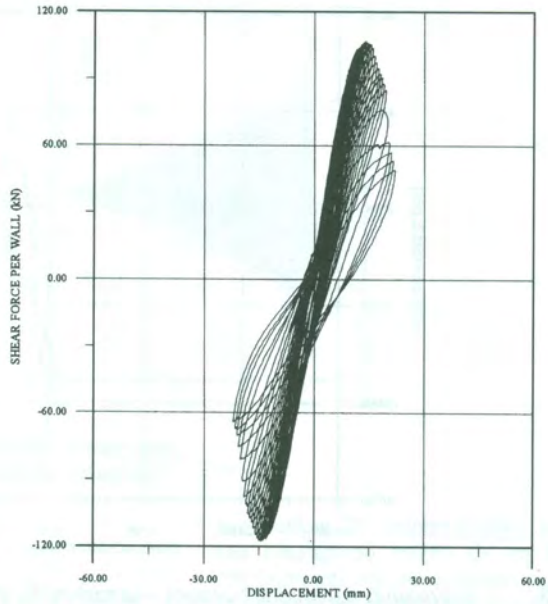


Σχήμα 3. Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – μετακίνησης για το δοκίμιο D  
 Figure 3. Shear force-displacement diagram for the specimen D

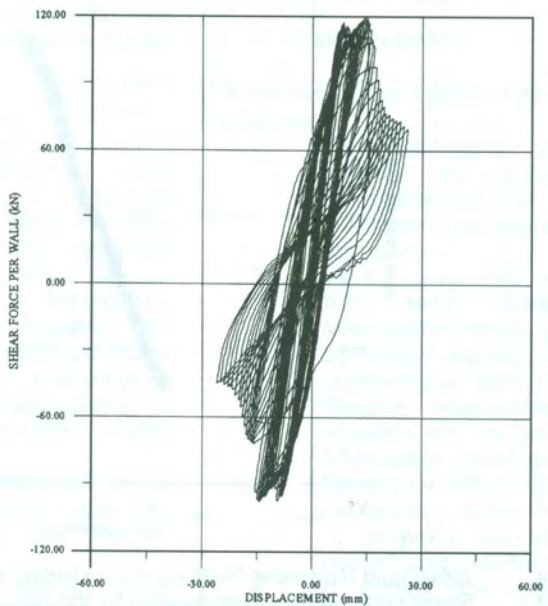


Σχήμα 4. Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – μετακίνησης για το δοκίμιο AR  
 Figure 4. Shear force-displacement diagram for the specimen AR

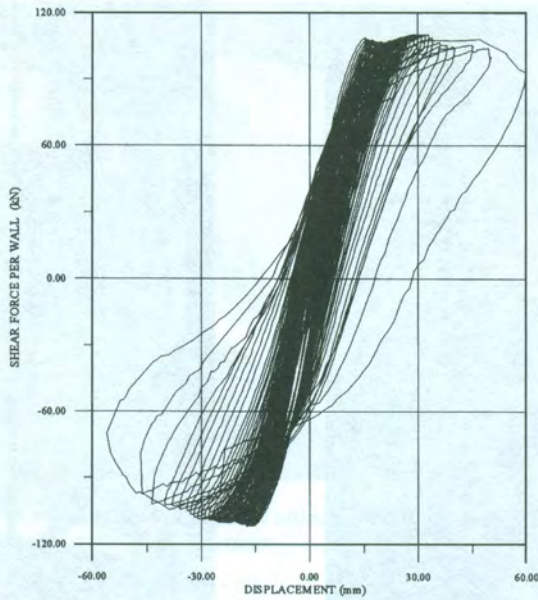




Σχήμα 5. Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – μετακίνησης για το δοκίμιο BR  
 Figure 5. Shear force-displacement diagram for the specimen BR



Σχήμα 6. Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – μετακίνησης για το δοκίμιο CR  
 Figure 6. Shear force-displacement diagram for the specimen CR



Σχήμα 7. Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – μετακίνησης για το δοκίμιο DR  
 Figure 7. Shear force-displacement diagram for the specimen DR

Πίνακας 1. Συνοπτικά αποτελέσματα των πειραμάτων  
 Table 1. Summarized results of tests

Δοκίμιο	Τέμνουσα δύναμη ανά τοίχο (kN)		Μετατόπιση (mm)	
	Ελάχιστη	Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέγιστη
A (A1ή A2)	-28.50	42.03	-14.53	9.60
B (B1ή B2)	-24.13	46.13	-7.41	12.02
C (C1ή C2)	-36.00	44.30	-14.13	10.00
D (D1ή D2)	-33.95	54.58	-24.29	14.99
AR (AR1ή AR2)	-79.08	83.59	-21.11	21.02
BR (BR1ή BR2)	-117.65	106.86	-22.12	22.02
CR (CR1ή CR2)	-97.83	119.94	-26.03	26.07
DR (DR1ή DR2)	-111.97	110.33	-59.98	59.08





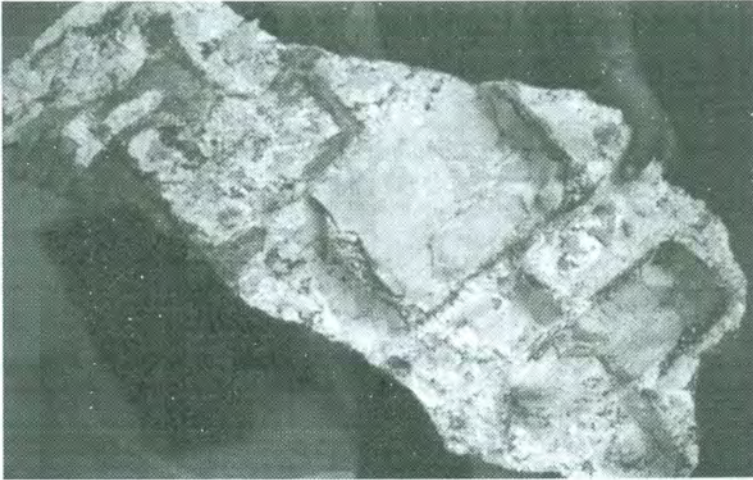
Σχήμα 8. Ρηγματωμένο δοκίμιο C1  
Figure 8. Crack pattern of specimen C1



Σχήμα 9. Ρηγματωμένο δοκίμιο CR1  
Figure 9. Crack pattern of specimen CR1



Σχήμα 10. Ολίσθηση, θραύση και αποκόλληση των λίθων  
Figure 10. Slipping, failure and spalling out of stones



Σχήμα 11. Θραύση των λίθων ενώ παρέμεναν κολλημένα στο μανδύα  
Figure 11. Bonded stone on FRM were broken

4. Το ζεύγος δοκιμίων το οποίο επισκευάστηκε με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, παρουσίασε μεγαλύτερη αντοχή και πλασιμότητα από τα δοκίμια τα οποία επισκευάστηκαν με FRM. Οι θραύσεις όμως που παρατηρήθηκαν στους εσωτερικούς λίθους των δοκιμίων D1R και D2R ήταν πολύ περισσότερες συγκρινόμενες με τα άλλα δοκίμια.
5. Στην έρευνα που διεξήχθη δεν λήφθηκε υπόψη το μήκος των ινών. Όταν οι εφελκυστικές τάσεις υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή των ινών ή τη συνάφεια μεταξύ των ινών και του κονιάματος εμφανίζονται ρωγμές. Ο χάλυβας

παρουσίασε πολύ μεγαλύτερη ικανότητα παραμορφωσιμότητας σε εφελκυστικές τάσεις.

6. Η διαφορά στην απόκριση του Δοκιμίου Β και C δεν ήταν σημαντική.
7. Για το δοκίμιο D που παρατηρήθηκε αστοχία στη λιθοδομή, το επισκευαστικό κονίαμα συνέχισε να συμπεριφέρεται ελαστικά στις σχετικά μεγάλες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις. Η λιθοδομή δεν μπορεί να ακολουθήσει την ελαστική απόκριση των μανδουλών. Η παρατήρηση αυτή, μπορεί να αποτελέσει κρίσιμη παράμετρο στο σχεδιασμό των επισκευών σε κτήρια από φέρουσα τοιχοποιία.