

**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**



**ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΔΟΜΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΙΝΩΝ
ΥΑΛΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ
ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ**

ΤΟΜΟΣ 1

**ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ / ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**Επιστημονικός Υπεύθυνος:
Χρήστος Ζέρης**

ΑΘΗΝΑ 2004

**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**



**ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΔΟΜΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΙΝΩΝ
ΥΑΛΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ
ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ**

ΤΟΜΟΣ 1

**ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ / ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**Επιστημονικός Υπεύθυνος:
Χρήστος Ζέρης**

ΑΘΗΝΑ 2004

**ΤΟΜΟΣ 1: ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ / ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

0. ΠΕΡΙΛΗΨΗ (ελ.6)

0. EXECUTIVE SUMMARY

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ (ελ.24)

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ (ελ.26)

2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩ-
ΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ / ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠ

2.2 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ (ελ.38)

3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΗ

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

3.3 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4. Α ΦΑΣΗ: ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΘΕΝΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ (ελ.71)

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.3 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ301

4.4 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ302

4.5 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ303

4.6 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ304

4.7 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ305

4.8 ΔΟΚΙΜΙΟ ΥΠ301

4.9 ΔΟΚΙΜΙΟ ΥΠ302

4.10 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

5. Β ΦΑΣΗ: ΕΠΙΣΚΕΥΗ, ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ (βλ. 111)

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ,
ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ/Ή ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

5.3 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ302ΕΝ

5.4 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ303ΕΝ

5.5 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ304ΕΠ

5.6 ΔΟΚΙΜΙΟ ΧΠ305ΕΠ

5.7 ΔΟΚΙΜΙΟ ΥΠ301ΑΠ

5.8 ΔΟΚΙΜΙΟ ΥΠ302ΑΠ

6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (βλ. 233)

6.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ
ΔΙΑΤΟΜΩΝ

6.2 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

6.3 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΩΝ

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ (βελ.254)

- 7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΟΣ
ΤΕΤΡΑΓΩΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ, ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ,
ΥΠΟ ΧΑΜΗΛΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ
- 7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΟΣ ΣΕ
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΑΙ/Η
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ, ΥΠΟ ΧΑΜΗΛΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ
ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ
- 7.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΟΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ
ΧΑΜΗΛΟ ΑΝΗΓΜΕΝΟ ΑΞΟΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ, ΣΕ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ
ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ 1^{οο} ΤΟΜΟΥ (βελ.259)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ (βελ.267)

- I) ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ
ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ (βελ.269)
- II) ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (βελ.299)

Volume 1: Repair / Strengthening of Reinforced Concrete Columns Using Fiber Reinforced Polymers

Table of Contents

0. Executive Summary

1. Introduction

1.1 Statement of the Problem

1.2 Scope

1.3 Objective and Methodology of the Project

2. Literature Review

2.1 Experimental Investigation of the Response of RC Columns
Repaired / Strengthened With FRPs

2.2 Dissemination of the Project Results

3. Columns Specimen Tests

3.1 Geometrical Characteristics and Reinforcing Details

3.2 Description of the Test Setup

3.3 Material Mechanical Characteristics

4. Phase One: Virgin Column Specimen Tests

4.1 Introduction

4.2 Description of the Experimental Results

4.3 Specimen **XΠ301**

4.4 Specimen **XΠ302**

4.5 Specimen **XΠ303**

4.6 Specimen **XΠ304**

4.7 Specimen **XΠ305**

4.8 Specimen **ΥΠ301**

4.9 Specimen **ΥΠ302**

4.10 Comparative Results for the Response and the Failure Mode

5. Phase Two: Repaired and/or Strengthened Column Specimen Tests

5.1 Description of the Specimens and the Test Setup

5.2 Description of the Repair, Retrofit and/or Strengthening Procedure

5.3 Specimen **XΠI302EN**

5.4 Specimen **XΠI303EN**

5.5 Specimen **XΠI304EΠ**

5.6 Specimen **XΠI305EΠ**

5.7 Specimen **YΠI301AΠ**

5.8 Specimen **YΠI302AΠ**

6. Numerical Predictions of the Specimen Response

6.1 Numerical Prediction of the Section Behavior

6.2 Comparative Analysis of the Section Characteristics

6.3 Prediction of the Specimen Global Response

7. Conclusions

7.1 Experimental Testing of Square RC Columns in Existing Buildings,
Under Low Axial Loads and Biaxial Excitation

7.2 Experimental Testing of Retrofitted and/or Strengthened Square
RC Columns in Existing Buildings, Under Low Axial Loads and
Biaxial Excitation

7.3 Numerical Prediction of the Response of RC Columns in Existing
Buildings, Under Low Axial Loads and Biaxial Excitation

8. References of Volume 1

Appendices

I) Section Analysis Models and Modeling Assumptions

0. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη της τεχνογνωσίας, την πειραματική μελέτη και τη διερεύνηση της αξιοπιστίας πρόβλεψης της συμπεριφοράς στοιχείων φυσικής κλίμακας δοκών και υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ) τα οποία είχαν οπλιστεί βάσει παλαιότερων Κανονισμών, ενισχυμένων ή επισκευασμένων με χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΝΟΠ). Το Πρόγραμμα εκτελέστηκε εξ ολοκλήρου στο Εργαστήριο ΟΣ του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΟΣ ΕΜΠ).

Η ανάγκη για το Πρόγραμμα αυτό προέκυψε με την αθρόα εισαγωγή των ΙΝΟΠ στις δομικές επεμβάσεις μετά το σεισμό της Πάρνηθας, το 1999. Γενικά, η χρήση των ΙΝΟΠ για δομικές επεμβάσεις σε δομικά στοιχεία κατασκευών από ΟΣ έχει βρει εφαρμογή:

1. στην αποκατάσταση και/ή ενίσχυση λόγω ανασχεδιασμού, της αντοχής και πλαστιμότητας στον φέροντα οργανισμό (ΦΟ) υφιστάμενων κατασκευών, λόγω ακραίας καταπόνησης του από σεισμικό φορτίο ή κρούση και
2. στην ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών λόγω ανάγκης για αύξηση της φέρουσας ικανότητας τους, είτε λόγω αλλαγής χρήσης (ιδίως σε βιομηχανικά έργα) είτε λόγω των αυξημένων απαιτήσεων που επιβάλλει η εφαρμογή του νέου Αντισεισμικού Κανονισμού.

Απώτερος σκοπός του Ερευνητικού Προγράμματος, είναι η ανάπτυξη οδηγιών και Κανονιστικών διατάξεων, σχετικά με την επισκευή και ενίσχυση υφισταμένων κτιρίων από ΟΣ με τη χρήση ΙΝΟΠ, σε συνδυασμό και με άλλα σχετικά Ερευνητικά Προγράμματα που ασχολούνται με αυτό το θέμα υπό την γενική καθοδήγηση του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), οι οποίοι και χρηματοδότησαν το Πρόγραμμα.

Για τη διερεύνηση του παραπάνω προβλήματος, σύμφωνα και με την υποβληθείσα Πρόταση, η έρευνα διεξάγεται σε δύο τμήματα: στο πρώτο μέρος σχεδιάζονται και κατασκευάζονται επτά δοκίμια αμφιέριστων

υποστυλωμάτων τετράγωνης διατομής ενώ στο δεύτερο μέρος οκτώ δοκίμια συνεχών δοκών δύο ανοιγμάτων, παραλληλόγραμμης διατομής, σε φυσική κλίμακα. Σε κάθε περίπτωση εφαρμόζονται οι απαιτήσεις που ίσχυαν σε παλαιότερους Κανονισμούς Σχεδιασμού Έργων από Σκυρόδεμα σε σεισμό (ΥΔΕ, 1954 και 1959), ενώ χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες διατάξεις οπλισμού και κατηγορίες δομικών υλικών. Για λόγους πληρότητας, τόσο για τα υποστυλώματα όσο και για τις δοκούς, θεωρήθηκαν δοκίμια με διαφορετικούς ανηγμένους λόγους διάτμησης (M/Vd , όπου M και V η δρώσα ροπή και διάτμηση στην κρίσιμη διατομή και d το στατικό ύψος του στοιχείου), για τον έλεγχο της επιρροής της παραμέτρου αυτής στην απόκριση και τη μορφή αστοχίας τόσο των παρθένων όσο και των επισκευασμένων / ενισχυμένων στοιχείων.

Όλα τα παραπάνω δοκίμια, σε ομάδες όμοια οπλισμένων στοιχείων ανά δύο, καταπονούνται έως την οριακή παρεχόμενη πλαστιμότητά τους, ως εξής:

Μέρος 1^ο : Υποστυλώματα

Ο έλεγχος των υποστυλωμάτων στο 1^ο Μέρος του Ερευνητικού περιλαμβάνει δύο φάσεις:

1. Αρχικά γίνεται η πειραματική αποτίμηση της συμπεριφοράς των παρθένων δοκιμίων, με σταθερό αξονικό φορτίο σε ανακυκλιζόμενη εγκάρσια φόρτιση μέχρι την αστοχία.
2. Ακολουθεί σε δεύτερη φάση η αποκατάσταση των δοκιμίων, ενώ επί πλέον γίνεται περαιτέρω ενίσχυσή τους: είτε κατά την εγκάρσια διεύθυνση μόνο με περίσφιγξη από ΙΝΟΠ ινών υάλου για αύξηση της πλαστιμότητάς τους, είτε κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση, με ΙΝΟΠ ινών άνθρακα και υάλου, αντίστοιχα, για αύξηση της αντοχής τους σε κάμψη και διάτμηση.

Και στις δύο φάσεις, λόγω του κρίσιμου της εντατικής κατάστασης στα γωνιακά υποστυλώματα χαμηλής περίσφιγξης, ο έλεγχος εφαρμόζεται σε καταπόνηση κατά μήκος της διαγωνίου του υποστυλώματος, υπό σταθερό αξονικό φορτίο περίπου ίσο με το 10% της ανηγμένης αξονικής αντοχής

(φορτίο που αντιστοιχεί σε ένα γωνιακό υποστυλώμα ενός πενταόροφου κτιρίου της δεκαετίας του 60 με σχετικά μικρά ανοίγματα).

Αποτέλεσμα της έρευνας αυτής είναι η πειραματική αποτίμηση και η αναλυτική πρόβλεψη της παρεχόμενης αντοχής, δυσκαμψίας, οριακής σχετικής μετατόπισης ορόφου, μέγιστης πλαστικής στροφής και ολικής / τοπικής πλαστιμότητας. Λόγω του ευρέως πειραματικού αντικειμένου τα αποτελέσματα αφορούν τόσο επισκευασμένα / ενισχυμένα όσο και παρθένα τετράγωνα υποστυλώματα υφιστάμενων κατασκευών από ΟΣ, συγκρινόμενα με αντίστοιχα υποστυλώματα που έχουν οπλιστεί κατά ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2000).

Μέρος 2^ο : Δοκοί

Ο πειραματικός έλεγχος των δοκών στο 2^ο Μέρος του Ερευνητικού γίνεται σε μία φάση η οποία περιλαμβάνει τον έλεγχο δοκιμίων συνεχών δοκών δύο ανοιγμάτων που έχουν ενισχυθεί σε κάμψη και διάτμηση, με χρήση ΙΝΟΠ. Πέραν από το λόγο διάτμησης, βασική παράμετρος των πειραμάτων αυτών αποτελεί η μέθοδος και το είδος των ΙΝΟΠ καμπτικής ενίσχυσης. Για τα πειράματα θεωρήθηκαν ζεύγη δοκών που ελέγχονται είτε σε μονοτονική είτε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ως εξής:

1. Δύο δοκοί ενισχύονται με διαμήκη ΙΝΟΠ ινών άνθρακα εφαρμογής άνω και κάτω και εγκάρσια ΙΝΟΠ ινών υάλου,
2. Δύο δοκοί ενισχύονται με ΙΝΟΠ ινών υάλου εφαρμοσμένα στις παρειές κατά τη διαμήκη διεύθυνση και εγκάρσια ΙΝΟΠ ινών υάλου,
3. Δύο δοκοί ενισχύονται με ράβδους ΙΝΟΠ ινών άνθρακα εφαρμοσμένες στις παρειές κατά τη διαμήκη διεύθυνση και εγκάρσια ΙΝΟΠ ινών υάλου,
4. Δύο δοκοί μη ενισχυμένες, οπλισμένες για πλάστιμη συμπεριφορά κατά ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2000), θεωρούμενα ως δοκίμια ελέγχου.

Αποτέλεσμα της έρευνας στις δοκούς είναι η πειραματική αποτίμηση και αριθμητική πρόβλεψη της αντοχής, δυσκαμψίας, πλαστικής στροφής και ολικής / τοπικής πλαστιμότητας ενισχυμένων δοκιμίων δοκών, με εναλλακτικούς τρόπους ενίσχυσης, είτε μεταξύ τους αλλά και σε σύγκριση με αντίστοιχα συμβατικά δοκίμια οπλισμένα βάσει ΕΑΚ χωρίς ενίσχυση, όσον

αφορά την υπεραντοχή και την ενεργειακή απορρόφηση σε ανακυκλιζόμενη απόκριση.

Από τα πειράματα και τις αναλυτικές προβλέψεις που έγιναν στο Πρόγραμμα, παρέχονται παρατηρήσεις και συμπεράσματα που αφορούν γενικά την τεχνολογία των ΙΝΟΠ όπως:

- Τη συμπεριφορά και τη δυνατότητα αποκατάστασης επισκευασμένων στοιχείων υποστυλωμάτων σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Τη συνεισφορά των μεθόδων αποκατάστασης στην αντοχή και δυσκαμψία των υποστυλωμάτων, πριν την εφαρμογή της οποιασδήποτε ενίσχυσης.
- Τη δυνατότητα παροχής πλάστιμης συμπεριφοράς από υφιστάμενους φορείς οπλισμένους με παλαιότερους Κανονισμούς κατά τα απαιτούμενα από τους ισχύοντες Κανονισμούς, με δομική επέμβαση σχετικά μικρής όχλησης με ΙΝΟΠ.
- Τον τρόπο αστοχίας υφιστάμενων δομικών στοιχείων από ΟΣ (δοκών ή υποστυλωμάτων) πριν και μετά από την εφαρμογή ΙΝΟΠ ενίσχυσης.
- Την επιρροή της διάτμησης σε δοκούς και υποστυλώματα με διαφορετικό λόγο M/Vd .
- Την επάρκεια και αξιοπιστία των θεωρητικών προσομοιωμάτων σχεδιασμού δοκών και υποστυλωμάτων υφισταμένων κτιρίων από ΟΣ, ενισχυμένων / επισκευασμένων με ΙΝΟΠ.
- Την αξιοπιστία πρόβλεψης με αριθμητικές αναλύσεις της συμπεριφοράς δοκών και υποστυλωμάτων υφισταμένων φορέων από ΟΣ, ενισχυμένων / επισκευασμένων με ΙΝΟΠ, με αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην πράξη, καθώς και πλέον λεπτομερή προσομοιώματα ερευνητικού επιπέδου.
- Των τεχνολογικών προβλημάτων που τυχόν να προκύψουν κατά την εφαρμογή των ΙΝΟΠ.

Συνοπτικά συμπεράσματα

Μέρος 1^ο

Στο πρώτο μέρος, έγινε πειραματικός έλεγχος τετράγωνων υποστυλωμάτων με λόγους M/Vd ίσους προς πέντε και οκτώ, υπό σταθερή ανηγμένη αξονική. Περιληπτικά, τα κύρια συμπεράσματα που διεξήχθησαν έχουν ως εξής:

1. Τα υφιστάμενα δοκίμια παρέχουν πλαστιμότητα περίπου 1,50 και ουσιαστική απομείωση της καμπτικής τους αντοχής μετά από μικρό αριθμό ανακυκλίσεων, λόγω λυγισμού των γωνιακών οπλισμών, σε φόρτιση κατά τη διαγώνιο. Το φαινόμενο είναι υπαρκτό σε μικρότερο βαθμό και στα δοκίμια που οπλίστηκαν κατά ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2000), σε πλαστιμότητα περίπου 3,0.

2. Η επισκευή των υποστυλωμάτων οπλισμένων κατά ΕΚΟΣ / ΕΑΚ (ΟΑΣΠ, 2000) μετά από σημαντική βλάβη λόγω σεισμικής καταπόνησης, με επισκευαστικό σκυρόδεμα, επαναφέρει τα στοιχεία αυτά στην προτέρα αντοχή, με μείωση της δυσκαμψίας του κατά 20%. Εφόσον ακολουθηθεί σωστή εφαρμογή της επισκευής, ο τρόπος αστοχίας δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη διεπιφάνειας υλικών διαφορετικής ηλικίας και αντοχής.

3. Η επισκευή με επισκευαστικό σκυρόδεμα και εφαρμογή ΙΝΟΠ υάλου εγκαρσίως στα υφιστάμενα υποστυλώματα μετά από σημαντική βλάβη λόγω σεισμικής καταπόνησης, απέδωσε πλήρως την προτέρα αντοχή τους με μικρή μείωση της δυσκαμψίας, αυξάνοντας δε την πλαστιμότητα κατά τη διαγώνιο βάσει κριτηρίου απομείωσης στο 85% της μέγιστης, σε περίπου 4,60, τιμή μεγαλύτερη αυτής που απαιτείται από τον ισχύοντα Κανονισμό, για πλέον αυξημένες όμως απαιτήσεις σχεδιασμού (συναρτήσει της ζώνης επικινδυνότητας). Η επάρκεια άρα αυτής της πλαστιμότητας σε επίπεδο κατασκευής δέον να ερευνηθεί περαιτέρω με ανελαστικές μεθόδους ανάλυσης.

4. Η επισκευή με επισκευαστικό σκυρόδεμα και, κατόπιν, ενίσχυση ΙΝΟΠ διαμήκως και εγκαρσίως, στα υφιστάμενα υποστυλώματα που είχαν υποστεί σημαντική σεισμική βλάβη, απέδωσε την θεωρητικά προβλεπόμενη αυξημένη αντοχή, πλην όμως με μειωμένη πλαστιμότητα και παραμορφωσιμότητα. Η παραμένουσα αντοχή μετά την αστοχία της ενίσχυσης, λόγω διάρρηξης των

ΙΝΟΠ ή απώλεια πρόσφυσης ΙΝΟΠ/σκυροδέματος ήταν ίση με την προτέρα μέχρι πλαστιμότητες παραμόρφωσης κατά τη διαγώνιο μεταξύ 1,80 και 2,50, βάσει του κριτηρίου της απομείωσης της αντοχής στο 85% της μέγιστης πειραματικής. Σημειώνεται όμως ότι οι πειραματικές αντοχές δεν απομειώθηκαν ποτέ στο επίπεδο της μέγιστης αντοχής του παρθένου δοκιμίου, έως και την επιβεβλημένη παραμόρφωση των 8,0 cm.

5. Δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα αστοχίας λόγω διάτμησης για τις τιμές του λόγου M/Vd και αξονικής που διερευνήθηκαν. Ο βασικός τρόπος αστοχίας στη διαξονική απόκριση ήταν ο λυγισμός των διαμήκων οπλισμών και η τοπική θλιπτική αστοχία μεγάλου ποσοστού της διατομής προς τη θλιβόμενη γωνία, με εντονότερη εμφάνιση στα δοκίμια με μικρότερο λόγο διάτμησης. Η εφαρμογή εγκάρσιου ΙΝΟΠ διόρθωσε επαρκώς τα συγκεκριμένα προβλήματα κατά τον επανέλεγχο της Β Φάσης, αποδίδοντας μεγάλες πλαστιμότητες στα στοιχεία αυτά.

6. Από τη σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, παρατηρείται ότι, γενικά, τα αριθμητικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην πράξη αλλά και πλέον σύνθετα ερευνητικού ακόμη επιπέδου, είναι σε θέση να προβλέψουν αξιόπιστα την πειραματική αντοχή αλλά όχι τη δυσκαμψία και την ενεργειακή απορρόφηση κατά την ανακύκλιση. Έτσι, αναλυτικές διερευνήσεις της σεισμικής τρωτότητας υφισταμένων κατασκευών με απλοποιημένα προσομοιώματα είτε τοπικής είτε κατανεμημένης βλάβης, πρέπει να αντιμετωπίζονται με τον δέοντα συντελεστή ασφαλείας και σημαντικού εύρους παραμετρική διερεύνηση για πιθανούς εναλλακτικούς μηχανισμούς αστοχίας και προσομοίωσης της δυσκαμψίας, για αξιόπιστη πρόβλεψη της τοπικής αστοχίας εκπεφρασμένη σε μεγέθη πλαστικών στροφών.

7. Η συνεισφορά (ϵ_f) των ΙΝΟΠ στην καμπτική ενίσχυση, λαμβάνοντας υπόψη και την αύξηση αντοχής λόγω του επισκευαστικού σκυροδέματος, ήταν μεταξύ 8 έως 14%. Η συντηρητικότερη από τις τιμές αυτές δέον όπως λαμβάνεται υπόψη στον ικανοτικό έλεγχο του υποστυλώματος υπό ενίσχυση.

Μέρος 2^ο

Στο δεύτερο μέρος, έγινε πειραματικός έλεγχος οκτώ συνεχών δοκών δύο ανοιγμάτων ορθογωνικής διατομής, με λόγους M/Vd ίσους προς 1,35, 2,70 και 3,20. Περιληπτικά, τα κύρια συμπεράσματα που διεξήχθησαν είναι τα εξής:

8. Από τους ελέγχους σε μονοτονική φόρτιση, το δοκίμιο με πλαϊνή ενίσχυση ΙΝΟΠ υάλου στη διαμήκη διεύθυνση (**G60 MONO**) παρουσιάζει μία αύξηση της αντοχής 130% μεγαλύτερη της προβλεπόμενης θεωρώντας παραμόρφωση του ΙΝΟΠ ίση με 0,8%. Η αντοχή αντιστοιχεί σε θεωρητική πρόβλεψη για παραμόρφωση του ΙΝΟΠ περίπου 16,0%. Το δοκίμιο απέδωσε μία μέγιστη πλαστιμότητα μετατοπίσεων (βάσει κριτηρίου μείωσης της αντοχής στο 85% της μέγιστης) ίση με 8,70, και σταθερή παραμένουσα αντοχή ως την παραμόρφωση των 85 mm, τουλάχιστον ίση με 115% της μέγιστης αντοχής που απέδωσε σε κράτυνση το δοκίμιο ελέγχου **NEAK MONO**, καθιστώντας το συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης ελκυστικό, συνυπολογίζοντας και το συγκριτικά χαμηλό κόστος του ΙΝΟΠ. Ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου ήταν λόγω σταδιακής αστοχίας σε διάρρηξη των ΙΝΟΠ σε τμήμα της εφελκούμενης ζώνης της κρίσιμης διατομής, μετά τη δημιουργία της δεύτερης άρθρωσης και, τελικά, η απώλεια πρόσφυσης.

9. Το δοκίμιο με συμβατική ενίσχυση ΙΝΟΠ άνθρακα άνω και κάτω (**C1-30 MONO**) απέδωσε τα φτωχότερα αποτελέσματα από όλες τις συγκρινόμενες μεθόδους, εμφανίζοντας αύξηση της αντοχής 117% της προβλεπόμενης για παραμόρφωση του ΙΝΟΠ ίση με 0,6%, που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση του ΙΝΟΠ περίπου 10,‰ και μέγιστη παρεχόμενη πλαστιμότητα (βάσει του κριτηρίου μείωσης της αντοχής στο 85% της μέγιστης καταγεγραμμένης) περίπου 2,30. Ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου ήταν εντελώς ψαθυρός, με αιότομη διάρρηξη του ΙΝΟΠ στην πρώτη πλαστική άρθρωση και περιορισμένη ανακατανομή.

10. Η μέθοδος ενίσχυσης με ράβδους οπλισμού ΙΝΟΠ στις παρειές (**MBAR MONO**) παρουσιάζει μια αύξηση της αντοχής 108% της προβλεπόμενης για παραμόρφωση του ΙΝΟΠ ίση με 0,6%, που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση του

ΙΝΟΠ περίπου 10,0‰ και πλαστιμότητα 6,40 βάσει του παραπάνω κριτηρίου. Ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου ήταν λόγω σταδιακής αστοχίας των ράβδων ΙΝΟΠ σε αγκύρωση, μετά τη δημιουργία της δεύτερης άρθρωσης.

11. Ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης με ΙΝΟΠ σε μορφή υφάσματος ή ράβδων τοποθετημένων κατά μήκος των πλαϊνών παρειών της δοκού, όπου αυτό είναι εφικτό, εμφανίζει ένα μεγάλο συγκριτικό πλεονέκτημα αφού όχι μόνο δεν καθιστά ψαθυρή τη συνολική συμπεριφορά και τοπική μορφή αστοχίας του εν λόγω στοιχείου αλλά διευκολύνει την ανακατανομή φορτίου προσφέροντας σημαντικά μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε σχέση με τον συμβατικό τρόπο ενίσχυσης άνω και κάτω που αστόχησε ψαθυρά.

12. Από τους ελέγχους σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, προκύπτει ότι η ενίσχυση στην άνω και κάτω παρειά του δοκιμίου (**C1-30 MONO**) προσδίδει μεγαλύτερη δυσκαμψία από ότι οι άλλες μορφές ενίσχυσης, λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας του ΙΝΟΠ. Αντίθετα, οι άλλες δυο μορφές ενίσχυσης, η πλαϊνή ενίσχυση (**G60 MONO**) και η ενίσχυση με ράβδους (**MBAR MONO**) έχουν την ίδια δυσκαμψία με το μη ενισχυμένο δοκίμιο **NEAK MONO**. Τα ίδια ποιοτικά ισχύουν και για την ισοδύναμο ποσοστό απορρόφησης ενέργειας όπου το δοκίμιο εμφάνισε τη μεγαλύτερη σταθερότητα βρόχου (**C1-30 MONO**).

13. Όλα τα δοκίμια **CYCLIC** (πλην του **NEAK CYCLIC**) αστόχησαν κατά την ανακυκλιζόμενη απόκριση σε διάτμηση, σε φορτίο μικρότερο της προβλεπόμενης αντοχής τους. Το δοκίμιο **NEAK CYCLIC**, παρά τον χαμηλό λόγο διάτμησης που το χαρακτηρίζει, έδωσε μια πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά με σταθερότητα απορρόφησης ενέργειας έως πλαστιμότητα 3,30.

14. Η μεγαλύτερη μείωση φέρουσας ικανότητας σε ανακύκλιση εμφανίζεται στο δοκίμιο **MBAR CYCLIC** ενώ στο **C1-30 CYCLIC** η μέγιστη φέρουσα (σε επίπεδα μικρότερα της μονοτονικής) απομειώνεται σε πλαστιμότητα κάτω του 2,0 σε σταθερό επίπεδο ίδιο με της μη ενισχυμένης διατομής. Το δοκίμιο **G60 CYCLIC** έχασε μεγάλο μέρος από τη φέρουσα ικανότητα του σε πλαστιμότητα 3,5 αλλά από εκεί και πέρα αυτή παρέμεινε

σχετικά σταθερή και σημαντικά μεγαλύτερη από ότι στα υπόλοιπα δοκίμια (σε μέσο ποσοστό 120 % της αντοχής του **NEAK MONO**).

15. Ο συμβατικός σχεδιασμός ενισχύσεων ΙΝΟΠ δοκών με μικρό διατμητικό μήκος (περίπου 1,00) δεν είναι επαρκής σε ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά, ακόμη και αν αγνοηθεί πλήρως κατά τον σχεδιασμό η συνισταμένη (V_c) (παραλαβή διατμητικού φορτίου από δευτερεύοντες μηχανισμούς στο σκυρόδεμα), η δε συνεισφορά του ΙΝΟΠ σε διάτμηση (V_f) τηρηθεί σε απόλυτα συντηρητικά επίπεδα, πάλι βάσει των ισχυουσών διατάξεων (FIB-TG 9.3, 2001 και ACI Committee 440, 2002). Αυτό δεν παρατηρήθηκε στη μονοτονική φόρτιση, όπου τα περιθώρια ασφαλείας ήταν σημαντικά χρησιμοποιώντας τα ίδια προσομοιώματα. Γενικά, η χρήση αθροιστικών προσομοιωμάτων τύπου δικτυώματος για τον σχεδιασμό σε διάτμηση δεν οδηγεί σε επιθυμητά αποτελέσματα σε ανακύκλιση.

16. Η παραδοχή κατά το σχεδιασμό για τον υπολογισμό της απαιτούμενης διατμητικής ενίσχυσης, ότι η συμμετοχή του ΙΝΟΠ αντιστοιχεί σε μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση της ενίσχυσης ίση με 0,6% είναι μακράν μη συντηρητική και κατά της ασφαλείας. Με βάση τις υπολογισθείσες αντοχές που επετεύχθησαν πειραματικά, η συμμετοχή του ΙΝΟΠ, κατά περίπτωση, έφτασε ως και το 1,6% σε πλαϊνή ενίσχυση, ή σε 1,0% σε άνω και κάτω ενίσχυση, τιμές που πρέπει να θεωρούνται εφικτές στον ικανοτικό σχεδιασμό.

17. Παράλληλα, η μέγιστη παραμόρφωση του ΙΝΟΠ στον υπολογισμό της προσφοράς του στην διατμητική αντοχή, μειώνεται και κάτω του 0,25%, σε επίπεδο παραμόρφωσης ίσης με την παραμόρφωση διαρροής του συμβατικού οπλισμού διάτμησης, τιμή που θεωρήθηκε στον σχεδιασμό της ενίσχυσης των δοκιμίων.

18. Σε αντίθεση με τα υποστυλώματα που ελέγχθηκαν στην Α φάση, η ανάγκη των εγκάρσιων ΙΝΟΠ να παραλάβουν ισχυρά διατμητικά φορτία κατά την κάμψη (άρα και σχετικά μεγαλύτερη διαγώνια θλίψη) δημιουργεί αδυναμία από τα ΙΝΟΠ να καθυστερήσουν πολύ περισσότερο δε να αναιρέσουν εντελώς τα φαινόμενα λυγισμού του διαμήκους οπλισμού

υφισταμένων στοιχείων με αραγή διάταξη συνδετήρων χαρακτηριστική των υφισταμένων κατασκευών. Η αδυναμία αυτή της ενίσχυσης έχει εμφανή αποτελέσματα στη φέρουσα ικανότητα τόσο σε καμπτικό όσο και σε διατμητικό επίπεδο.

19. Σε κάθε περίπτωση, ο σχεδιασμός των ΙΝΟΠ για εγκάρσια φορτία λόγω συγκράτησης του διαμήκους οπλισμού σε αυτή την περίπτωση, είναι επιβεβλημένος.

0. EXECUTIVE SUMMARY

The present Research Project is concerned with the development of application know how, the experimental investigation and the evaluation of the prediction reliability of the response of full size beams and columns, reinforced according to the requirements of past Greek seismic provisions, repaired and/or strengthened using synthetic fiber reinforced polymers (FRP). The Project has been executed at the Reinforced Concrete (RC) Laboratory, National Technical University of Athens.

The need for this Project has been mandated following the massive introduction of FRP materials for structural interventions, following the 1999 Athens earthquake. Generally, the use of FRPs for RC element structural intervention has been applied to:

- The reestablishment and increase, following redesign, of the strength and ductility of structural members of existing buildings, which have been degraded, due to extreme action (earthquake or blast) and
- The strengthening of the structural members in existing buildings due to an increase in their structural load bearing capacity, either due to change in occupancy (e.g. industrial works) or due to upgrades to currently enforced seismic provisions.

Objective of the Research Project is to develop, if possible, guidelines, or even normative rules, related to the rehabilitation or strengthening of existing RC buildings using FRP, in conjunction with other related Projects dealing with this topic, under the co-ordination of the Organization of Earthquake Planning and Protection (OASP), who sponsored this research.

For this purpose, in accordance with the proposal, eight full-size two span continuous rectangular beams and six full-size square simply supported columns, are designed and manufactured, using design and reinforcing provisions in accordance with the 1954 and 1959 Concrete and Seismic Design Codes. In both cases, different shear span to depth ratios have been

considered, in order to investigate the influence of this parameter to the virgin and repaired or strengthened specimen response.

All the above specimens, in groups of two, are subsequently tested to lateral load, either monotonically or cyclically, to their maximum lateral deformation ductility, as follows:

PART A) : REPAIRED OR STRENGTHENED COLUMN TESTS

Columns are tested in two phases:

1) Initially, the virgin specimens are tested under monotonic or cyclic lateral deformation and constant axial load, to failure.

2) At the second phase, follows the specimens are repaired, while some are further strengthened in flexure and shear or only in critical region confinement, using FRPs. The use of Glass FRP sheets for transverse and Carbon FRP sheets for longitudinal application is adopted.

In both phases, lateral deformation is applied to the columns along their diagonal, under a constant axial load equal to 10% of the axial load capacity of the bare concrete section (typically corresponding to the axial load of a corner column of a typical existing RC five story building). The experimentally measured and analytically predicted quantities in the test sequence include the supplied strength, stiffness, deformability, maximum plastic rotation, global and local ductility of the members, in both their virgin and their repaired or strengthened state, as these relate to a control set reinforced according to modern seismic provisions for ductility.

PART B): STRENGTHENED BEAM TESTS

For the beams, testing is performed in one phase, following the direct strengthening after casting of the virgin beam specimens, both in flexure and in shear, using FRP. Beyond the sear span to depth ratio, a basic parameter in these tests is the form or strengthening adopted. For this purpose, three alternative strengthening schemes are considered, under both monotonic and cyclic response as follows:

1. Two beams are strengthened using top and bottom longitudinal Carbon FRP sheets for flexure and glass FRP transversely.
2. Two beams are strengthened using side face applied longitudinal Glass FRP sheets for flexure and glass FRP transversely.
3. Two beams are strengthened using side face applied longitudinal Carbon FRP rods for flexure and glass FRP transversely.
4. Two beams are unstrengthened but are reinforced following current seismic provisions (NEAK), as control specimens.

The measured quantities in the test sequence include the experimental and analytical prediction of the supplied strength, stiffness, deformability, maximum plastic rotation, global and local ductility of strengthened beams using alternative strengthening schemes, as these also compare to a control set reinforced according to modern seismic provisions for ductility.

Following the experimental and analytical results, conclusions and observations are drawn related to the following:

- The reparability and the form of behavior of retrofitted RC columns under monotonic or cyclic loading.
- The contribution of the different retrofit methods to the retrofitted strength and stiffness, prior to any form of strengthening is applied.
- The possibility of increasing the ductility supply levels, required by current Codes, of existing RC members, reinforced with past regulations, with appropriate low level intervention in their critical regions using FRP.
- The form of failure of existing RC members before and after the application of FRPs.
- The influence of shear in the response of RC beams and columns, having different M/Vd ratios.
- The accuracy of the theoretical models underlying currently adopted design calculations for existing beams and columns repaired and strengthened using FRP.

- The accuracy of the analytical prediction models currently used in practice, as well as more detailed state-of-the-art models, for the analysis of FRP strengthened RC elements.
- The technological problems in the implementation of FRPs.

Results Summary

PART A) : REPAIRED OR STRENGTHENED COLUMN TESTS

During the first test sequence, square columns with M/Vd ratios equal to 5 or 7 were tested along their diagonal, under a normalized axial load (applied to axial load capacity of the concrete section) equal to 0.10. In summary, the main conclusions are as follows:

- Existing RC members are able to supply a global ductility of 1.50, with considerable, however, loss in their flexural capacity, after few cycles, due to longitudinal bar buckling. This phenomenon has been observed, to a lesser extent, to members detailed following current provisions for ductility, at a ductility level of 3.0.
- Repaired previously damaged RC elements, which had been reinforced according to current seismic provisions (EAK), are able to reach their previous flexural resistance; the post repair stiffness of these members is about 80% their original stiffness. The form of failure of the repaired member does not depend on the new/old concrete interface, provided the application procedure is as recommended by the manufacturer.
- Repairing these previously failed members using non shrink high strength grout and transverse Glass FRP sheets allowed them to reach fully their previous flexural capacity, with a small loss of stiffness, increasing however their ductility along the diagonal direction to 4.6, above currently required levels of performance, under increased, however, seismic demand levels. Their sufficiency therefore needs to be checked further using inelastic analyses.
- Repair and strengthening previously failed members using non shrink high strength grout, transverse and longitudinal FRP sheets allowed them

to reach the theoretically expected overstrength, with reduced, however, deformability. The remaining strength of these elements after failure of the FRP by tension rupture was equal to their pre-strengthening capacity, again reaching a deformation ductility along the diagonal direction to 2.6. Their residual strength, however, never dropped below the experimental maximum strength of their virgin counterparts up to deformation levels of 8.0cm reached during testing.

- For the M/Vd and axial loads investigated no significant influence of shear has been observed. The basic failure criterion under biaxial deformation of the columns was longitudinal bar buckling and local compression failure of a significant portion of the critical section concrete core area, towards the compression corner. The presence of transverse FRP corrected adequately these deficiencies in the post-repair response.
- In general, state-of-practice inelastic finite element models are able to predict the strength but not the stiffness and energy absorption under cyclic loading conditions. As a result, inelastic analyses for the prediction of the seismic vulnerability of existing RC buildings should be treated with an adequate factor of safety and a wide range of definition of the relevant parameters, both in magnitude and in terms of alternative controlling mechanisms at failure, for the establishment of the local failure levels in terms of plastic rotations.
- Taking into account the overstrength due to the high strength repair mortar, the contribution of the FRP during strengthening reached strain levels between 8‰ and 14‰.

PART B): STRENGTHENED BEAM TESTS

During the second testing sequence, two span rectangular continuous beams with M/Vd ratios equal to 1.35, 2.7 and 3.20 were tested. In summary, the main conclusions are as follows:

- Based on the monotonic test response, specimen **G60 MONO** having side application of longitudinal GFRP sheets exhibited an overstrength of 130% relative to the theoretical capacity using a flexural resistance at 0.8%

tensile strain contribution of the FRP, corresponding to an obtained FRP strain capacity of 16,0‰. The specimen provided a ductility of 8.7 (following an 85% strength drop criterion relative to the maximum recorded), making this method of strengthening very attractive, given the low cost of the material. The form of failure was by gradual tensile failure of the GFRP sheet over part of the tensile zone, after the formation of the second plastic hinge, and, eventually, the debonding of the FRP. The residual strength of the specimen, up to a deformation of 85 mm was at least 15% higher than the maximum recorded resistance of the unstrengthened control specimen.

- Specimen **C1-30 MONO** having conventional top and bottom application of longitudinal CFRP sheets behaved in the worst manner, yielding an overstrength of 117% relative to the theoretical capacity using a flexural resistance at 0.6% tensile strain contribution of the FRP, which corresponded to an obtained FRP strain capacity of 10.‰. The specimen provided a ductility of 2.3, following the 85% strength drop criterion. The form of failure was by sudden tensile failure of the CFRP sheet, after the formation of the second plastic hinge.
- Specimen **MBAR MONO** strengthened with side application of longitudinal eight CFRP rods (two rods each face, top and bottom) exhibited an overstrength of 108% relative to the theoretical capacity using a flexural resistance at 0.6% tensile strain contribution of the FRP, corresponding to an obtained FRP strain capacity of 10,0‰. The specimen provided a ductility of 6.4. The form of failure was gradual failure of the anchorage of the FRP bars, after the formation of the second plastic hinge.
- The method of strengthening using side FRP application, when possible, presents the relative advantage – compared to the conventional top and bottom application – of exhibiting a ductile form of failure, allowing for redistribution of forces and larger ductility.
- All specimens tested cyclically failed in shear, at different force levels, lower than the monotonic test recordings. The unstrengthened specimen

NEAK CYCLIC exhibited an ideal hysteretic behaviour with stable energy absorbing characteristics up to a cyclic ductility of 3.30.

- The largest loss of resistance under cyclic load was recorded in the **MBAR CYCLIC** specimen, while for specimen C1-30 CYCLIC the maximum resistance drops at a cyclic ductility of 1.9 to the unstrengthened specimen resistance, remaining practically constant from then on. The resistance of G60 CYCLIC, on the other hand, is retained up to a cyclic ductility of 3.50, subsequently dropping to a residual mean value which is 20% higher than the unstrengthened control specimen **NEAK MONO**.
- Based on the cyclic test response, the top and bottom CFRP specimen exhibited the highest change in stiffness, relative to the other two methods, which exhibited stiffness similar to that of the unstrengthened specimen **NEAK CYCLIC**. Similarly, the hysteretic energy absorption of this specimen was the most stable with cycling, unlike the other two specimens.
- All specimens (besides the unstrengthened specimen **NEAK CYCLIC**) tested under cyclic load, failed in shear, at a peak resistance well below the theoretically predicted strength using additive contributions of conventional truss analogy model design equations for the different resistive mechanisms. This holds true even if the concrete mechanisms term V_c is set to zero, while the contribution of the FRP in shear (V_f) is calculated conservatively based on the FIB-TG 9.3 (2001) equations. This type of unconservative behaviour was not observed under monotonic testing, where the safety factors obtained in shear failure, using the same equations, were high. Generally, the use of additive equations for shear does not lead to safe results under cyclic action.
- The assumption during shear capacity design that the maximum FRP contribution to flexural resistance is at a strain of 0.6% is way unconservative on the unsafe side. Based on the calculated flexural strengths using mean characteristics of the constituent materials, the FRP strain contribution reached levels of 1.6% for side strengthening and 1.0%

for top and bottom strengthening application, values which should therefore be considered as plausible for capacity design.

- Equally, the lateral FRP contribution may drop below the strain level of 0.25%, to strain values equal to the yield strain of the conventional transverse reinforcement, used herein for design.
- Unlike the column tests in Part A, the need for the FRPs in the beam tests to resist high shear forces due to bending (therefore high diagonal compression forces), did not allow them to delay and even completely inhibit the tendency of the longitudinal bars to buckle, under low lateral restrains from the widely spaced stirrups. This inability of the FRPs had obvious impact to the maximum resisting capacity of the critical regions in both flexure and shear.
- It is essential to design the FRP shear reinforcement for lateral forces due to buckling of the longitudinal bars, particularly for the case of application to existing construction which is characterised by low confinement conventional stirrup spacings.