

Σεισμική συμπεριφορά κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μετά από σεισμική καταπόνηση κατά τις πρώτες ώρες έως δύο ημέρες από τη σκυροδέτηση Seismic response of reinforced concrete structures subjected to earthquake excitation during setting or hardening of concrete

Χάρης ΜΟΥΖΑΚΗΣ¹, Παναγιώτης ΚΑΡΥΔΗΣ², Λουσία ΚΑΡΑΠΙΤΤΑ³, Βασίλης
ΚΑΛΟΙΔΑΣ⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η μελέτη των επιπτώσεων του σεισμού σε κατασκευές από σκυρόδεμα, όταν η σεισμική δράση εμφανίζεται τις πρώτες ώρες μετά την σκυροδέτηση και ενόσω το καλουπωμένο σκυρόδεμα είναι στο στάδιο της πήξης ή στην αρχή της σκλήρυνσης. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν πειράματα μεγάλης κλίμακας σε 7 πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος (κατηγορίας C20/25) διαστάσεων 3.30x3.30x3.00 m³ τα οποία κατά τα στάδια της πήξης ή της αρχικής σκλήρυνσης του σκυροδέματος έχουν υποστεί σεισμική διέγερση σε σεισμικό προσομοιωτήρα (Εργ. Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ). Η δυναμική συμπεριφορά των δοκιμών εξετάστηκε σε δύο φάσεις. Κατά την Φάση Ι, πραγματοποιήθηκαν σεισμικές διεγέρσεις σε δοκίμια με ξυλότυπο μετά την παρέλευση 2, 4, 8, 12, και 24 (2 δοκίμια) από την σκυροδέτηση. Σε κάθε διαφορετική ηλικία του σκυροδέματος αντιστοιχούσε ένα δοκίμιο. Κατά την Φάση ΙΙ, μετά από παρέλευση τουλάχιστον 28 ημερών από την σκυροδέτηση (και απομάκρυνση των ξυλοτύπων) τους πραγματοποιήθηκαν σεισμικές δοκιμές μέχρι την αστοχία τους. Τα αποτελέσματα και των δύο φάσεων συγκρίνονται με εκείνα ενός δοκιμίου αναφοράς το οποίο δεν δέχθηκε σεισμική διέγερση κατά τη Φάση Ι.

ABSTRACT : In this paper the effects of an earthquake, that takes place during the early age of concrete, on the response of reinforced concrete structures are been studied. Seven frames of reinforced concrete (quality C20/25) with dimensions διαστάσεων 3.30x3.30x3.00 m³ were subjected to earthquake base excitation during setting or hardening of concrete. Tests were performed using the shaking table facility of Laboratory for Earthquake Engineering. The test procedure was divided in two phases. In phase I base excitation happened 2, 4, 8, 12, και 24 hours after concrete casting, while for each concrete age a separate specimen was examined. In phase II each tested specimen was reexamined, after 28 days from concrete casting, up to failure. The results of both phases are compared with the response of a specimen that was not excited by an earthquake during phase I.

¹ Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, email: harrismo@central.ntua.gr

² Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, email: pcarydis@central.ntua.gr

³ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, email: klucia@central.ntua.gr

⁴ Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία έχουν υποστεί σεισμική διέγερση λίγες ώρες μετά την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης (2, 4, 8 12 και 24 ώρες) και τα επακόλουθα της καταπόνησης αυτής, στην τελική συμπεριφορά του πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος σε σεισμική καταπόνηση, πραγματοποιήθηκαν δυναμικές δοκιμές με τη χρήση του σεισμικού προσομοιωτήρα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δύο φάσεις. Η πρώτη Φάση (Φάση I) συμπεριλάμβανε την κατασκευή του δοκιμίου πάνω στο σεισμικό προσομοιωτήρα, την σκυροδέτηση του και την πραγματοποίηση σεισμικών δοκιμών σε προκαθορισμένες ώρες μετά τη σκυροδέτηση του. Ο ξυλότυπος ήταν ίδιος για όλα τα δοκίμια με εξαίρεση το πρώτο δοκίμιο το οποίο ήταν διαφορετικό από τα υπόλοιπα. Μετά τις δοκιμές, το δοκίμιο παρέμενε στο σεισμικό προσομοιωτήρα για 8 μέρες έτσι ώστε το σκυρόδεμα να αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή. Στη συνέχεια απομακρύνονταν οι ξυλότυποι και το δοκίμιο μεταφερόταν από το σεισμικό προσομοιωτήρα σε χώρο δίπλα σ' αυτόν. Μετά τη διέλευση 28 ημερών και την απόκτηση των αντοχών του σκυροδέματος ακολουθούσε η δεύτερη Φάση (Φάση II) κατά την οποία πραγματοποιούνταν σεισμικές δοκιμές μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η διαδικασία αυτή ήταν ίδια και για τις δύο φάσεις για όλα τα δοκίμια.

Συνολικά εξετάστηκαν 7 δοκίμια. Εξετάστηκαν δοκίμια τα οποία καταπονήθηκαν 2 (Δοκίμιο I), 4 (Δοκίμιο II), 8 (Δοκίμιο III) 12 (Δοκίμιο IV) και 24 (Δοκίμιο V) ώρες μετά την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης. Ένα δοκίμιο (Δοκίμιο VI) διεγέρθηκε μετά την ανάπτυξη των επιθυμητών αντοχών του σκυροδέματος και αποτελούσε το Δοκίμιο Αναφοράς, ενώ η δοκιμή μετά την ολοκλήρωση 12 ωρών από τη σκυροδέτηση έδωσε τα δυσμενέστερα αποτελέσματα και επαναλήφθηκε (Δοκίμιο VII). Η κωδικοποίηση των δοκιμών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Τα δοκίμια τα οποία εξετάστηκαν κατά τη φάση ωρίμανσης του σκυροδέματος (Φάση I) έχουν στην ονομασία τους το χαρακτηριστικό γράμμα Α, ενώ τα δοκίμια τα οποία εξετάστηκαν μετά την απόκτηση των τελικών αντοχών του σκυροδέματος (Φάση II) έχουν στην ονομασία τους το χαρακτηριστικό γράμμα Β. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των καταγραφών, και η απόκριση των δοκιμών, περιγράφοντας τις βλάβες που παρουσιάστηκαν σε κάθε δοκίμιο (Τεχνική Έκθεση, ΕΑΤ/ΕΜΠ, 2003).

ΔΟΚΙΜΙΑ

Τα δοκίμια ήταν μονώροφα πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα σε φυσική κλίμακα. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν πάνω στο σεισμικό προσομοιωτήρα και είχαν διαστάσεις κάτοψης $3.300 \times 3.300 \text{ m}^2$ και ύψος 3.00m. Τα υποστυλώματα ήταν διατομής 0.30x0.30 και τα δοκάρια διατομής 0.30/0.50. Η πλάκα είχε πάχος 0.15m. Τα δοκίμια παγιώθηκαν στο σεισμικό προσομοιωτήρα μέσω μεταλλικών βάσεων διαστάσεων 0.70m x0.70m x0.02m. Η συνολική μάζα του κάθε δοκιμίου ήταν 10Mgr. Η πειραματική διάταξη των δοκιμών στο σεισμικό προσομοιωτήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1(α) και 1(β) κατά τη Φάση I και II αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Κωδικοποίηση δοκιμών.

Δοκίμιο	Φάση I	Δοκίμιο	Δοκίμιο
I-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 2 ώρες μετά τη σκυροδέτηση του	I-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 52 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I
II-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 4 ώρες μετά τη σκυροδέτηση του	II-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I
III-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 8 ώρες μετά τη σκυροδέτηση του	III-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I
IV-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση του	IV-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I
V-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 24 ώρες μετά τη σκυροδέτηση του	V-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I
VI	Δοκίμιο Αναφοράς	VI	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 44 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I
VII-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση του	VII-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 66 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I

Ο διαμήκης οπλισμός των υποστυλωμάτων αποτελείτο από 4Φ20+4Φ10 και ο εγκάρσιος από συνδετήρες υπό μορφή μανδύα Φ8/120. Στα δοκάρια του ισογείου και στα συνδετήρια δοκάρια είχε τοποθετηθεί διαμήκης οπλισμός αποτελούμενος από 4Φ12 άνω και 4Φ12 κάτω και εγκάρσιος οπλισμός αποτελούμενος από συνδετήρες υπό μορφή μανδύα Φ8/110. Ο οπλισμός της πλάκας ήταν Φ8/150. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ποιότητας S500 και το σκυρόδεμα ποιότητας C20/25. Κατά την όπλιση του κάθε δοκιμίου, λήφθηκε μέριμνα για τη σωστή αγκύρωση των οπλισμών των υποστυλωμάτων στους κόμβους σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος. Επίσης, οι οπλισμοί στους κάτω κόμβους των υποστυλωμάτων συγκολλήθηκαν στις μεταλλικές πλάκες παγίωσης του δοκιμίου σύμφωνα με τις διατάξεις συγκόλλησης δομικών χαλύβων. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ο ξυλότυπος και οι οπλισμοί των πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος.

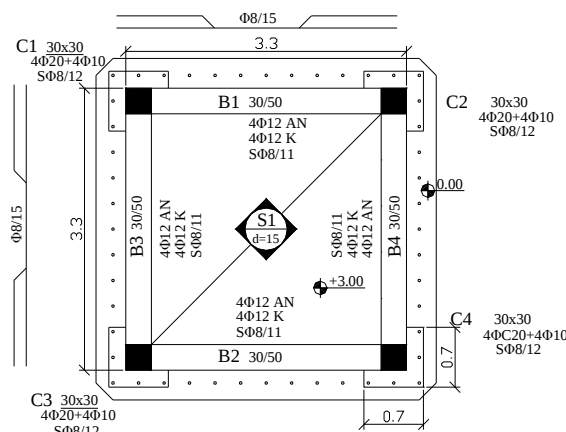


α)



β)

Σχήμα 1. Γενική πειραματική διάταξη δοκιμών: α) Φάση I, β): Φάση II.



Σχήμα 2. Ξυλότυπος οροφής δοκιμίου: Λεπτομέρειες όπλισης.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω στο σεισμικό προσομοιωτήρα μέσω τεσσάρων μεταλλικών βάσεων διαστάσεων 0.70m x 0.70m x 0.02m οι οποίες παγιώθηκαν στο σεισμικό προσομοιωτήρα. Η παγίωση τους εξασφαλίστηκε μέσω 8 κοχλιών M30 ποιότητας 8.8.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν σε κάθε δοκίμιο οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στη στάθμη οροφής κάθε δοκιμίου κατά τις τρεις διευθύνσεις X, Y και Z καθώς επίσης και οι επιταχύνσεις του σεισμικού προσομοιωτήρα. Κατά τη Φάση I η αναπτυσσόμενη επιτάχυνση καταγραφόταν τόσο στο νωπό σκυρόδεμα όσο και στον ξυλότυπο. Κατά τη Φάση II, εκτός από τις προαναφερόμενες επιταχύνσεις καταγράφονταν και οι αναπτυσσόμενες σχετικές μετακινήσεις μέσω διαγώνιων βελομέτρων.

ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

Αρχικά το κάθε δοκίμιο διεγέρθηκε σε κάθε διεύθυνση από μια χρονοϊστορία ημιτονικής μορφής σταθερής επιτάχυνσης 0.05g με λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων από 1-30Hz για τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του (ιδιοπερίοδος και λόγος απόσβεσης). Ο εντοπισμός των δυναμικών χαρακτηριστικών του κάθε δοκιμίου έγινε και στις δύο φάσεις. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σεισμικές δοκιμές κατά τις οποίες κάθε δοκίμιο διεγέρθηκε από χρονοϊστορίες επιτάχυνσης στις διευθύνσεις X, Y και Z. Οι χρονοϊστορίες αυτές αποτελούσαν τις συνιστώσες ενός τεχνητού σεισμού. Το φάσμα επιταχύνσεων κάθε συνιστώσας του τεχνητού σεισμού περιβάλλει το φάσμα απόκρισης του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ, 1999) με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.40g, χαρακτηριστικές ιδιοπεριόδους $T_1=0.10\text{sec}$ και $T_2=0.80\text{sec}$, απόσβεση 5%, συντελεστή θεμελίωσης $\theta=1.00$ και κατηγορία σπουδαιότητας Σ_2 .

Κατά τη Φάση I τα δοκίμια υπέστησαν διαδοχικές κλιμακωτές σεισμικές διεγέρσεις σε ποσοστό 25%, 50%, 100% και σε ορισμένες περιπτώσεις σε ποσοστό 150% του τεχνητού σεισμού.

Κατά τη Φάση II τα δοκίμια διεγέρθηκαν από τον ίδιο τεχνητό σεισμό με διαδοχικές κλιμακωτές διεγέρσεις μέχρι την αστοχία τους. Επίσης κατά τη Φάση I τα Δοκίμια I-A και II-A διεγέρθηκαν με σεισμική διέγερση οι χρονοϊστορίες της οποίας προσομοίαζαν τον κύριο σεισμό της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 που έπληξε την περιοχή των Αθηνών.

Μετά το πέρας των σεισμικών δοκιμών στο τέλος κάθε Φάσης, πραγματοποιούνταν ημιτονικές διεγέρσεις σταθερής επιτάχυνσης 0.05g με λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων από 1–8Hz. Οι διεγέρσεις αυτές εκτελέστηκαν για να υπολογιστούν οι μεταβολές στα δυναμικά χαρακτηριστικά των δοκιμών μετά τις σεισμικές δοκιμές.

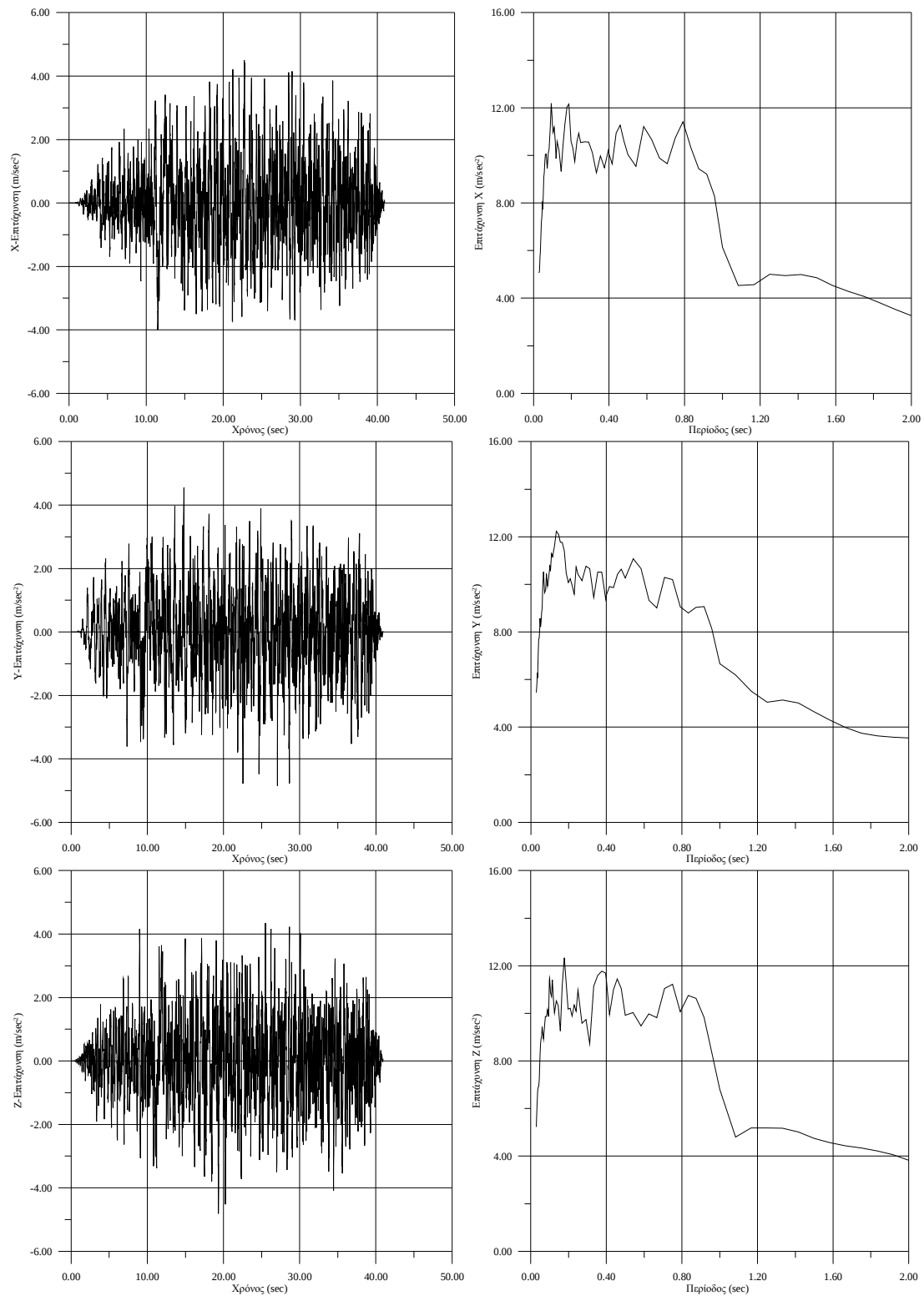
Η παραγωγή των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων έγινε σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ, 1999). Η συνολική διάρκεια των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων ήταν 4098sec με χρονικό βήμα 0.01sec. Για τον υπολογισμό της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης στην κατακόρυφη διεύθυνση δεν λήφθηκε υπόψη η μείωση του φάσματος του Ελληνικού Κανονισμού στα 2/3 του αντίστοιχου φάσματος στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Στα Σχήματα 3 και 4 φαίνονται οι συνιστώσες και τα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων των δύο προαναφερόμενων σεισμών. Όλα τα φάσματα υπολογίστηκαν για 1/18 της οκτάβας και ποσοστό απόσβεσης 5%.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι σεισμικές διεγέρσεις που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο κατά τη Φάση I και τη Φάση II.

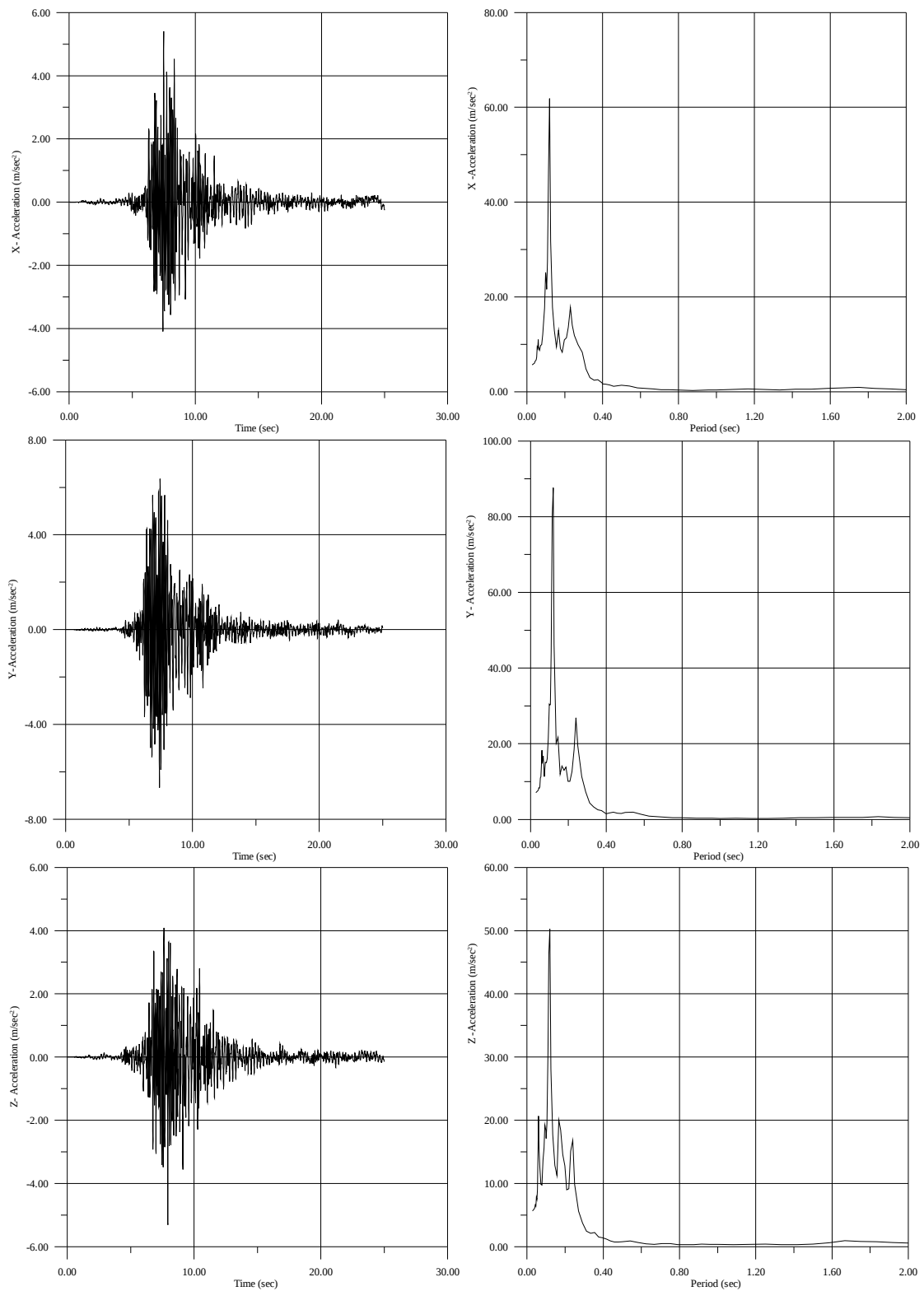
Πίνακας 2. Σεισμικές δοκιμές Φάσης I και II.

Δοκίμιο	Φάση I- Ποσοστό τεχνητού σεισμού (%)					Φάση II- Ποσοστό τεχνητού σεισμού (%)								
	25	50	100	150	10	25	50	100	125	140	180	200	250	
I	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
II	x	x	x	x		x	x	x ²						
III	x	x	x			x	x	x		x				
IV	x	x	x			x	x	x		x				
V	x	x	x			x	x	x		x		x ²	x	
VI	Δοκίμιο Αναφοράς					x	x	x		x	x		x	
VII	x ²					x	x	x						

² Επαναλαμβανόμενη δοκιμή



Σχήμα 3. Τεχνητός σεισμός: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης και αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων.



Σχήμα 4. Σεισμός 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης και αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Υπολογισμός δυναμικών χαρακτηριστικών δοκιμίων

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων προσδιορίζονται από τη δοκιμή σταθερής επιτάχυνσης λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων. Ο λόγος απόσβεσης ζ υπολογίστηκε με τη μέθοδο της μισής ισχύος πλάτους λωρίδας (Clough and Penzien, 1975). Στον Πίνακα 3 δίνονται για όλα τα δοκίμια οι τιμές της ιδιοσυχνότητας/ιδιοπερίοδος και του λόγου απόσβεσης οι οποίες αντιστοιχούν στον συντονισμό της πρώτης κανονικής μορφής τόσο στη αρχή όσο και στο τέλος κάθε Φάσης.

Κατά τη Φάση I, ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας - απόσβεσης έγιναν από μετρήσεις τόσο στον ξυλότυπο όσο και στο νωπό σκυρόδεμα. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν στο ξυλότυπο είχαν μικρή διαφορά από αυτά που υπολογίστηκαν στο νωπό σκυρόδεμα. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων της Φάσης I τα οποία υπολογίστηκαν από την απόκριση των επιταχυνσιομέτρων στο ξυλότυπο.

Στα δοκίμια I-A και II-A, η διέγερση σταθερής επιτάχυνσης πραγματοποιήθηκε και στη διεύθυνση Z. Η ιδιοσυχνότητα στη διεύθυνση αυτή υπολογίστηκε στα 20 Hz και για τα δύο δοκίμια, με λόγο απόσβεσης 5.89% για το Δοκίμιο I-A και 6.40% για το Δοκίμιο I-B.

Καταγραφή ρωγμών

Δοκίμιο I-A/ Δοκίμιο I-B

Το Δοκίμιο I-A διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5), 100% (Δοκιμή 6) και 150% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου μετά τη διέλευση 2 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων, παρατηρήθηκαν μια οριζόντια ρωγμή στον Α.Ν. κόμβο και μια κεκλιμένη ρωγμή στον Α.Β. κόμβο, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι του δοκιμίου δεν παρουσίασαν ρωγμές.

Το Δοκίμιο I-B διεγέρθηκε σε ποσοστό 10% (Δοκιμή 3), 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5) 100% (Δοκιμή 6) και 125% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι ρηγματώσεις του δοκιμίου μετά το τέλος των δοκιμών. Γενικά παρουσιάστηκαν οριζόντιες και διαγώνιες ρωγμές σε όλους τους κόμβους καθώς επίσης και θραύση του σκυροδέματος.

Δοκίμιο II-A/ Δοκίμιο II-B

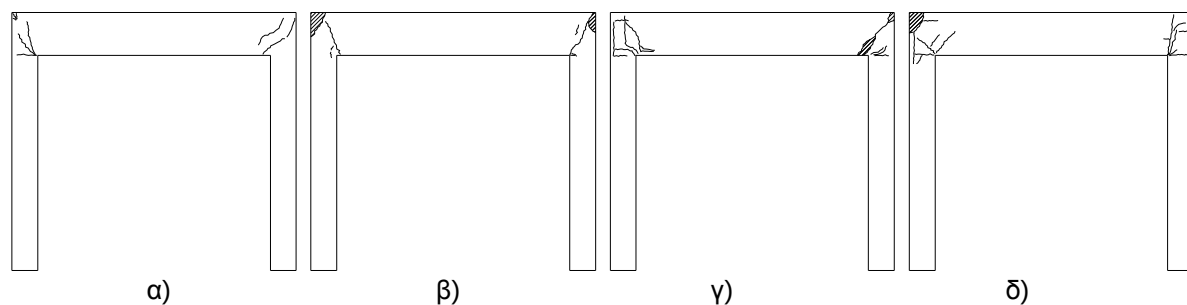
Το Δοκίμιο II-A διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5), 100% (Δοκιμή 6) και 150% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου μετά τη διέλευση 4 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Γενικά παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου. Επίσης παρατηρήθηκαν ρωγμές εγκάρσια σε όλους τους κόμβους.

Το Δοκίμιο II-B διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4) και 100% (Δοκιμή 5 και Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση I, ενώ ελάχιστες καινούργιες ρωγμές εμφανίστηκαν. Μετά το τέλος των δοκιμών παρατηρήθηκαν επίσης θραύση του σκυροδέματος στους κάτω κόμβους

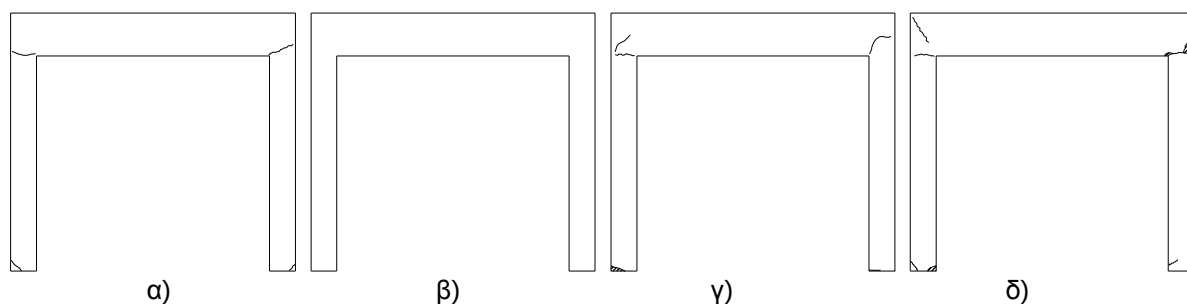
των υποστυλωμάτων καθώς επίσης αστοχία των συγκολλήσεων του διαμήκη οπλισμού στις μεταλλικές βάσεις. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

Πίνακας 3. Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμών Φάσης I και II.

Αρ. Δοκιμίου		Φάση I				Φάση II			
		Χ		Υ		Χ		Υ	
		f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)
I	Αρχή	2.94 0.34	2.60	2.17 0.46	5.33	4.35 0.23	2.40	4.17 0.24	4.80
	Τέλος	-	-	-	-	-	-	-	-
II	Αρχή	1.64 0.61	3.86	1.75 0.57	5.21	3.50 0.29	1.40	3.45 0.29	3.40
	Τέλος	-	-	-	-	2.05 0.49	4.04	2.13 0.47	6.73
III	Αρχή	2.78 0.36	2.64	3.17 0.32	2.82	2.40 0.42	2.49	3.24 0.31	2.46
	Τέλος	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	Αρχή	3.63 0.28	2.47	4.07 0.25	2.56	1.72 0.58	6.20	1.86 0.54	4.90
	Τέλος	-	-	1.57 0.64	19.70	-	-	-	-
V	Αρχή	6.28 0.16	1.70	5.95 0.17	6.30	3.95 0.25	3.72	4.00 0.25	5.13
	Τέλος	3.40 0.29	4.17	3.43 0.29	8.54	-	-	-	-
VI	Αρχή	ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ				6.38 0.16	3.40	6.25 0.16	4.76
	Τέλος					1.41 0.71	8.15	1.21 0.83	9.92
VII	Αρχή	5.22 0.20	2.25	5.37 0.19	4.42	1.43 0.70	7.70	1.64 0.61	5.60
	Τέλος	1.20 0.83	6.12	1.47 0.68	9.21	-	-	-	-



Σχήμα 5. Δοκίμιο I-B: Ρωγμές στην α) Ανατολική και β) Δυτική όψη, γ): Βόρεια όψη και δ): Νότια όψη.



Σχήμα 6. Δοκίμιο II-B: Ρωγμές στην α) Ανατολική και β) Δυτική όψη, γ): Βόρεια όψη και δ): Νότια όψη.

Πίνακας 4. Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμών Φάσης I-Υπολογισμοί από μετρήσεις στο ξυλότυπο.

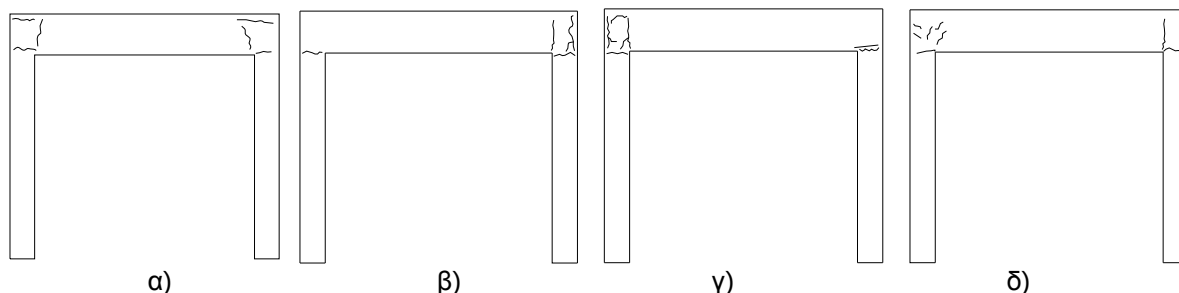
Αρ. Δοκιμίου		Φάση I			
		X		Y	
		f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)
I	Αρχή	2.94 0.34	2.60	2.17 0.46	5.33
	Τέλος	-	-	-	-
II	Αρχή	1.64 0.61	3.86	1.75 0.57	5.21
	Τέλος	-	-	-	-
III	Αρχή	2.78 0.36	2.64	3.17 0.32	2.82
	Τέλος	-	-	-	-
IV	Αρχή	3.63 0.28	2.47	4.07 0.25	2.56
	Τέλος	-	-	1.57 0.64	19.70
V	Αρχή	6.28 0.16	1.70	5.95 0.17	6.30
	Τέλος	3.40 0.29	4.17	3.43 0.29	8.54
VI	ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ				
VII	Αρχή	5.22 0.20	2.25	5.37 0.19	4.42
	Τέλος	1.20 0.83	6.12	1.47 0.68	9.21

Δοκίμιο III-A/ III-B

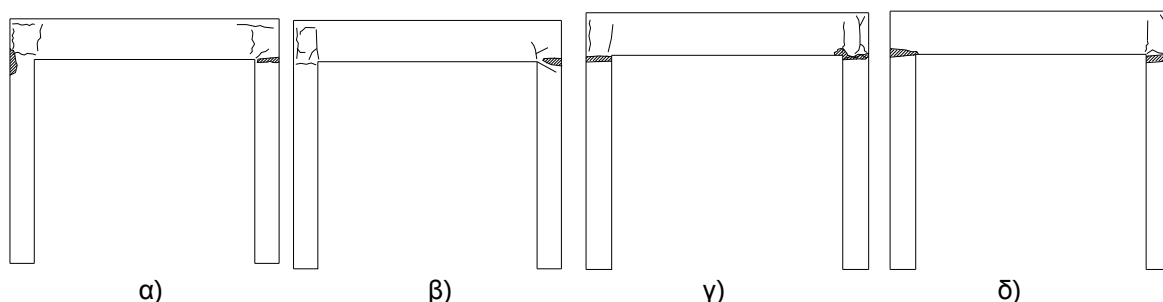
Το Δοκίμιο III-A διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5) και 100% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 8 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι ρωγμές που αποκαλύφθηκαν μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων. Γενικά παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού – υποστυλώματος.

Το Δοκίμιο III-B διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5) και 140% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν

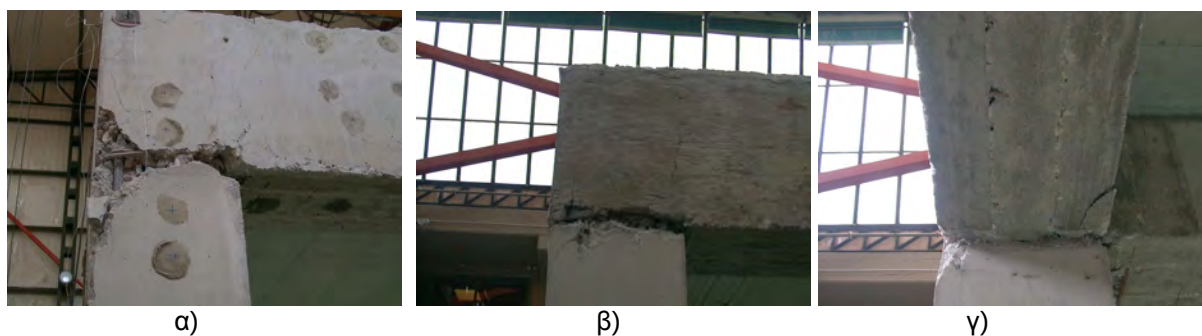
κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν κατά τη Φάση Ι και κυρίως οι ρωγμές στη διεπιφάνεια δοκού – υποστυλώματος. Παράλληλα εμφανίστηκαν καινούργιες ρωγμές στους κόμβους ενώ παρατηρήθηκε επίσης θραύση του σκυροδέματος στους κάτω κόμβους των υποστυλωμάτων. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών αναπτύχθηκαν και εγκάρσιες ρωγμές σε όλους τους κόμβους. Η έντονη ρηγματώση του δοκιμίου παρατηρήθηκε κατά τη Δοκιμή 5. Στα Σχήματα 8 και 9 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης ΙΙ.



Σχήμα 7. Δοκίμιο ΙΙΙ-Α: Ρωγμές στην α) Ανατολική και β) Δυτική όψη, γ): Βόρεια όψη και δ): Νότια όψη.



Σχήμα 8. Δοκίμιο ΙΙΙ-Α: Ρωγμές στην α) Ανατολική και β) Δυτική όψη, γ): Βόρεια όψη και δ): Νότια όψη.



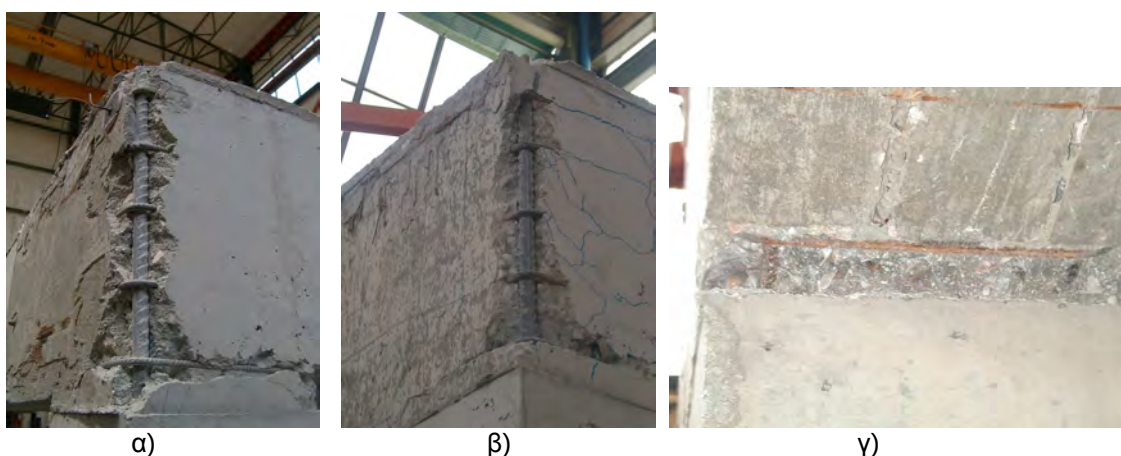
Σχήμα 9. Δοκίμιο ΙΙΙ-Β: α) Ανατολική όψη, β): Δυτική όψη, γ): Εγκάρσια ρωγμή.

Δοκίμιο ΙV-Α/ ΙV-Β

Το Δοκίμιο ΙV-Α διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5) και 100% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 12 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων, παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους

τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού – υποστυλώματος, όμοιες με τις ρωγμές που εμφανίστηκαν και στα προηγούμενα δοκίμια κατά Φάση Ι.

Το Δοκίμιο IV-B διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5) και 140% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση Ι, ενώ εμφανίστηκαν και μερικές καινούργιες ρωγμές στους κόμβους. Στην τελευταία δοκιμή παρατηρήθηκε θραύση του σκυροδέματος και αποκάλυψη του κύριου οπλισμού των υποστυλωμάτων στον Ν-Α και Δ-Ν κόμβο. Οι κόμβοι αυτοί υπέστησαν και τις μεγαλύτερες ζημιές. Επίσης παρατηρήθηκαν εγκάρσιες ρωγμές σε κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης ΙΙ.

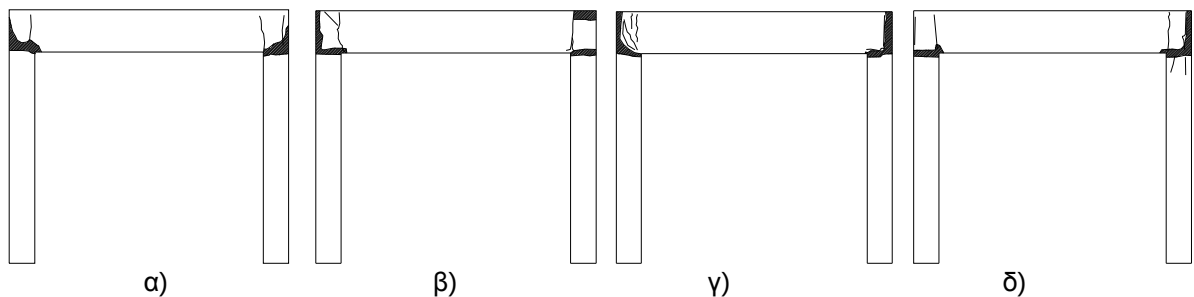


Σχήμα 10. Δοκίμιο IV-B: α) Ν-Α κόμβος, β) Ν-Δ κόμβος, γ) Εγκάρσια ρωγμή.

Δοκίμιο V-A/ V-B

Το Δοκίμιο V-A διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5) και 100% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 24 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων, παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού – υποστυλώματος.

Το Δοκίμιο V-B διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5), 140% (Δοκιμή 6) και 200% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού. Οι δύο επόμενες δοκιμές σε ποσοστό 250% (Δοκιμή 8) και επανάληψη της διέγερσης σε ποσοστό 200% (Δοκιμή 9) δεν ολοκληρώθηκαν λόγω ανάπτυξης μεγάλων μετακινήσεων του δοκιμίου με κίνδυνο κατάρρευσης του. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση Ι, ενώ εμφανίστηκαν και μερικές καινούργιες ρωγμές στους κόμβους. Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης ΙΙ.



Σχήμα 11. Δοκίμιο V-A: Ρωγμές στην α) Ανατολική και β) Δυτική όψη, γ): Βόρεια όψη και δ): Νότια όψη.

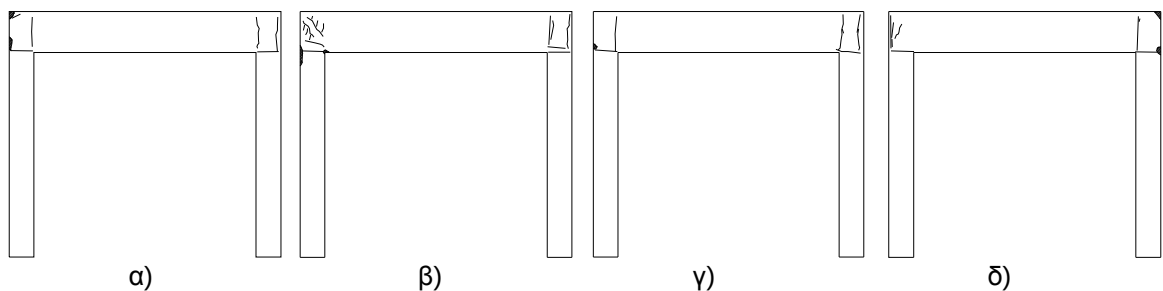
Δοκίμιο VI-Δοκίμιο αναφοράς

Το Δοκίμιο VI αποτελεί το δοκίμιο αναφοράς και διεγέρθηκε μόνο μετά την απόκτηση των τελικών αντοχών του σκυροδέματος. Το δοκίμιο διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5), 140% (Δοκιμή 6) και 180% (Δοκιμή 7) και 250% (Δοκιμή 8) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών εμφανίστηκαν ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου. Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

Δοκίμιο VII-A/ Δοκίμιο VII-B

Το Δοκίμιο VII-A διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3 και 4) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 12 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων, παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού – υποστυλώματος.

Το Δοκίμιο VII-B διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4) και 100% (Δοκιμή 5) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση I, το εύρος των οποίων διευρυνόταν με την αύξηση της επιτάχυνσης βάσης. Επίσης δημιουργήθηκαν και λίγες καινούργιες ρωγμές στους κόμβους. Στην τελευταία δοκιμή παρατηρήθηκε εκτεταμένη ζημιά σε όλους τους κόμβους δοκών – υποστυλωμάτων, θραύση του σκυροδέματος και αποκάλυψη του κύριου οπλισμού. Στο Σχήμα 13 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.



Σχήμα 12. Δοκίμιο Αναφοράς: Ρωγμές στην α) Ανατολική και β) Δυτική όψη, γ): Βόρεια όψη και δ): Νότια όψη.



Σχήμα 13. Δοκίμιο VII-B: Ρωγμές στην α) Ανατολική και β) Βόρεια όψη, γ): Δυτική όψη και δ): Νότια όψη.

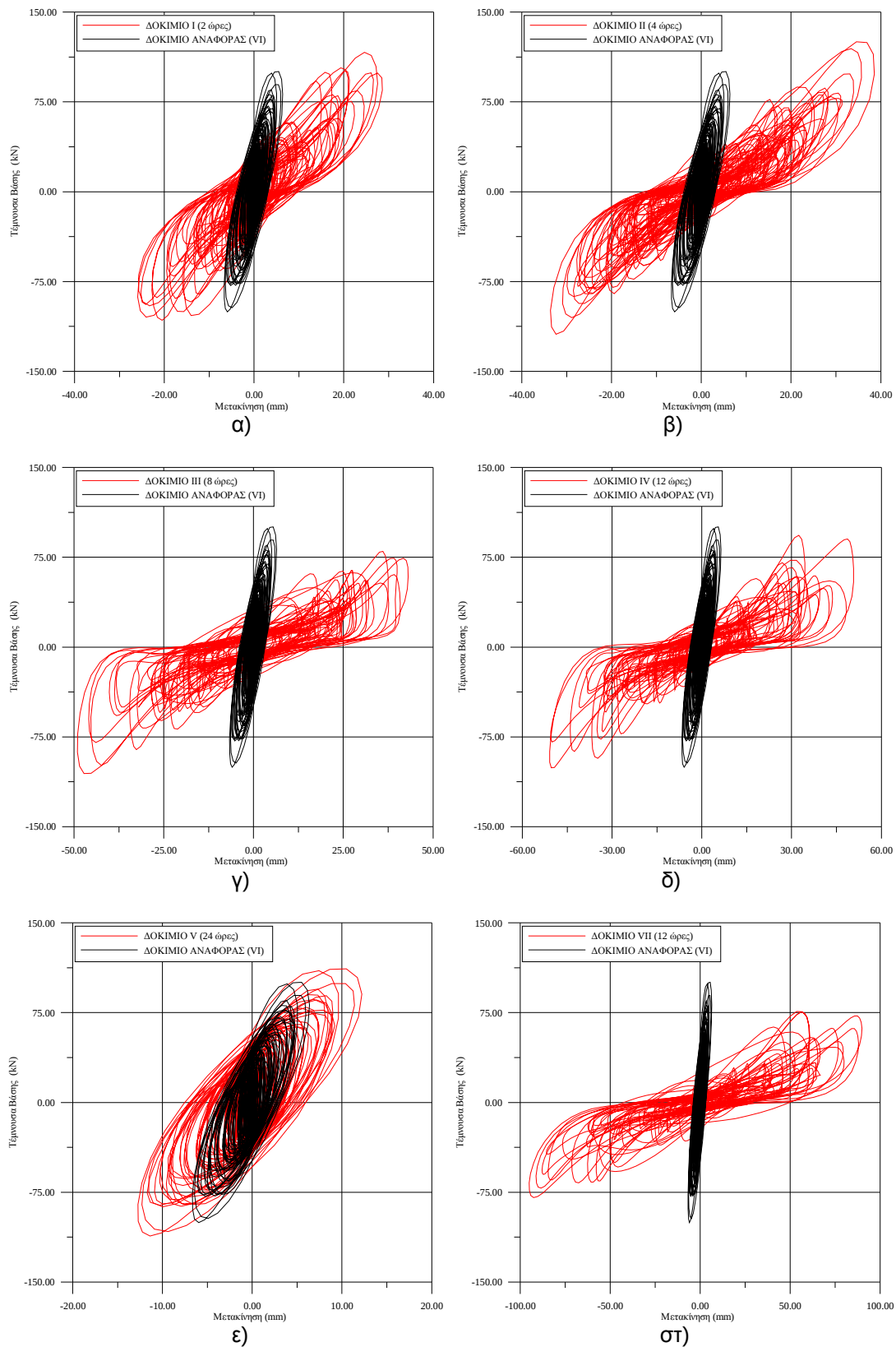
Βρόχοι Υστέρησης

Στο Σχήμα 14 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων τέμνουσας βάσης - μετακίνησης στη διεύθυνση Χ όλων των δοκιμίων με το Δοκίμιο αναφοράς (Δοκίμιο VI) για σεισμική διέγερση σε ποσοστό 100% του τεχνητού σεισμού, ενώ στο Σχήμα 15 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων τέμνουσας βάσης – μετακίνησης όλων των εξεταζόμενων δοκιμίων για το ίδιο ποσοστό σεισμικής διέγερσης. Η τέμνουσα κατά τη διεύθυνση Χ προέκυψε από το μέσο όρο των καταγεγραμμένων επιταχύνσεων στην διεύθυνση αυτή. Οι σχετικές μετακινήσεις στη διεύθυνση Χ προέκυψαν από την αναγωγή των μεταβολών των διαγώνιων βελομέτρων στις οριζόντιες διευθύνσεις.

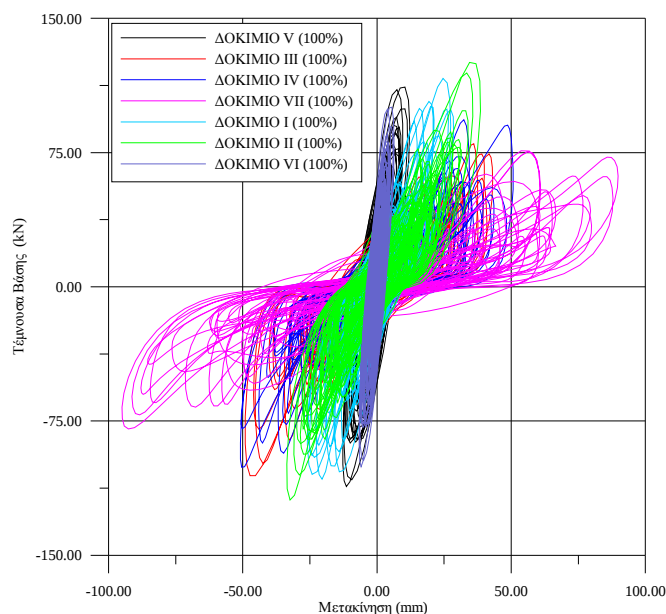
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τις εν λόγω δοκιμές γίνεται συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των διαφόρων δοκιμίων σε σχέση με το χρόνο σκυροδέτησής τους. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στις 2, 4, 8, 12 και 24 ώρες μετά τη σκυροδέτηση των δοκιμίων και τις μετέπειτα δοκιμές τους μετά το πέρας τουλάχιστον 30 ημερών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στην κορυφή ενός δοκιμίου από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σεισμική διέγερση κατά τη φάση ωρίμανσής του είναι μειωμένες σε σχέση με την αντίστοιχη κατασκευή όπου το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει την τελική του αντοχή.
- Τα δοκίμια στη Φάση I (διεγέρσεις κατά τη φάση ωρίμανσης του δοκιμίου) παρουσίασαν διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά από τη Φάση II (διεγέρσεις όταν το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει αντοχή). Τα δυναμικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν στο ξυλότυπο είχαν μικρή διαφορά από αυτά που υπολογίστηκαν στο νωπό σκυρόδεμα κατά τις δοκιμές στη Φάση I.



Σχήμα 14. Σύγκριση διαγράμματα τέμνουσας βάσης – μετακίνησης δοκιμών με δοκίμιο αναφοράς για ποσοστό 100% του τεχνητού σεισμού (διεύθυνση X): α) Δοκίμιο I-B και β) Δοκίμιο II-B, γ): Δοκίμιο III-B και δ): Δοκίμιο IV-B, ε) Δοκίμιο V-B και στ) Δοκίμιο VII-B.



Σχήμα 15. Σύγκριση διαγραμμάτων τέμνουσας βάσης – μετακίνησης δοκιμίων για ποσοστό 100% του τεχνητού σεισμού (διεύθυνση Χ).

- Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν στα δυναμικά χαρακτηριστικά κάθε δοκιμίου στις διευθύνσεις Χ και Υ οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι ο ξυλότυπος δεν είναι συμμετρικά τοποθετημένος και απόλυτα στερεωμένος, κάτι το οποίο παρατηρείται και σε πραγματικές συνθήκες εργοταξίου. Από τον Πίνακα 3 παρατηρείται επίσης ότι η ιδιοσυχνότητα των δοκιμίων αυξάνει με την αύξηση του χρόνου δοκιμής από τη λήξη της σκυροδέτησης λόγω της συμμετοχής του σκυροδέματος στην ακαμψία του δοκιμίου. Από τον ίδιο Πίνακα παρατηρείται επίσης ότι η απόσβεση η οποία υπολογίστηκε στο τέλος της Φάσης Ι για τα Δοκίμια II – IV και VII αυξάνει λόγω των ρηγματώσεων που υπέστησαν τα δοκίμια.
- Από τα Σχήματα 14 και 15 στα οποία γίνεται η σύγκριση των διαγραμμάτων τέμνουσας βάσης – μετακίνησης του κάθε δοκιμίου με το δοκίμιο αναφοράς κατά τη Φάση II καθώς επίσης και η σύγκριση όλων των δοκιμίων, η μεγαλύτερη μείωση της ακαμψίας παρατηρείται στο Δοκίμιο IV (διέγερση 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση). Αντίστοιχη μείωση παρατηρείται και στην ακαμψία του Δοκιμίου VII (διέγερση 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση - επανάληψη) το οποίο επισημαίνεται ότι κατά τη Φάση Ι διεγέρθηκε μόνο σε ποσοστό 25% του τεχνητού σεισμού. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται επίσης μια βαθμιαία μείωση της ακαμψίας των δοκιμίων όσο αυξάνει ο χρόνος δοκιμής από τη λήξη της σκυροδέτησης.
- Μετά το τέλος της Φάσης Ι και την απομάκρυνση των ξυλοτύπων παρατηρήθηκαν ρωγμές σε όλα τα δοκίμια (κόμβους δοκών –υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού –υποστυλώματος Γενικά οι ρωγμές αυτές ήταν μικρού εύρους, δύσκολα διακρινόμενες, οι οποίες συχνά κρίνονται ασήμαντες. Τα δοκίμια I-A (2 ώρες) και V-A (24 ώρες) παρουσίασαν τις λιγότερες ρωγμές σε σχέση με τα Δοκίμια II-A (4 ώρες), III-A (8 ώρες), IV-A και VII-A (12 ώρες). Μετά το τέλος της Φάσης II τα δοκίμια I-B (2 ώρες), V-B (24 ώρες) παρουσίασαν μεγάλου εύρους ορατές ρωγμές, διαρροή του χάλυβα οπλισμού στους κόμβους, στα δοκάρια και τα υποστυλώματα, όπου ήταν

εμφανής η μεγάλη καταπόνηση τους. Αντίστοιχες βλάβες παρουσίασε και το Δοκίμιο VI - Δοκίμιο Αναφοράς. Στα δοκίμια II-B (4 ώρες), III-B (8 ώρες) και IV-B/ VII-B (12 ώρες), κατά τη Φάση II ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές που δημιουργήθηκαν στη Φάση I και μόνο ελάχιστες καινούργιες ρωγμές παρουσιάστηκαν. Οι τελικές ρωγμές των δοκιμίων αυτών και κυρίως των δοκιμίων IV-B και VII-B (δοκιμές μετά από 12 ώρες), δεν πρόβαλλαν ούτε τις μεγάλες μετακινήσεις που αναπτύχθηκαν στα δοκίμια αυτά ούτε τη μικρή παραμένουσα αντοχή τους. Η δυσαναλογία αυτή ρωγμών - παραμένουσας αντοχής δημιουργεί πολύ μεγάλο πρόβλημα.

- Σεισμική διέγερση σε δοκίμιο με νωπό σκυρόδεμα προκαλεί πιθανή μετακίνηση του οπλισμού από την αρχική του θέση. Το πρόβλημα μπορεί να περιοριστεί με καλό δέσιμο του οπλισμού και στερέωση του ξυλοτύπου.
- Μετά το τέλος των δοκιμών της Φάσης II και την αφαίρεση τμήματος σκυροδέματος από τους κόμβους των δοκιμίων II-B (4 ώρες), III-B (8 ώρες), IV-B (12 ώρες) και VII-B (12 ώρες) προέκυψε ότι υπήρχε κινητικότητα του οπλισμού (αποκόλληση του οπλισμού από το σκυρόδεμα) και ύπαρξη κενών γύρω από τον κύριο οπλισμό του υποστυλώματος (Σχήμα 16). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί εν μέρει η συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος.

Μετά το τέλος των δοκιμών, αφαιρέθηκε με τη μέθοδο της αδιατάραχτης κοπής από τμήματα των δοκών των δοκιμίων όπως φαίνεται στα Σχήματα 17(α)-(β). Από τα Σχήματα αυτά μπορεί να παρατηρήσει κανείς μια οριζόντια ρωγμή σε κάθε άκρο στη θέση αγκύρωσης του κεκαμένου οπλισμού της δοκού η οποία διέρχεται κατά μήκος του χάλυβα οπλισμού της πλάκας. Η ρωγμή αυτή κρίνεται πολύ επικίνδυνη γιατί είναι βλάβη η οποία δεν εμφανίζεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξακριβωθεί η ύπαρξη της επί τόπου και άμεσα. Η λεπτομερής ερμηνεία και ο μηχανισμός ανάπτυξη των εν λόγω ρωγμών είναι αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.



Σχήμα 16. Φάση II: Ο κύριος οπλισμός δεν περιβάλλεται από σκυρόδεμα.



Σχήμα 17. Φάση II: Οριζόντια ρωγμή στη θέση αγκύρωσης του κεκαμένου οπλισμού της δοκού και κατά μήκος των διατομών του οπλισμού της πλάκας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το ερευνητικό αυτό έργο χρηματοδοτήθηκε στο σύνολό του από τον Οργανισμό Αντισεισμικής Προστασίας και Σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός -ΕΑΚ, (1999), Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).
 Τεχνική Έκθεση, (2003) «Μελέτη της συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος μετά από σεισμική καταπόνηση κατά τις πρώτες ώρες καθώς και 2-3 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
 Clough R.W. and Penzien J., (1975) 'Dynamic of Structures', McGraw Hill, New York.