



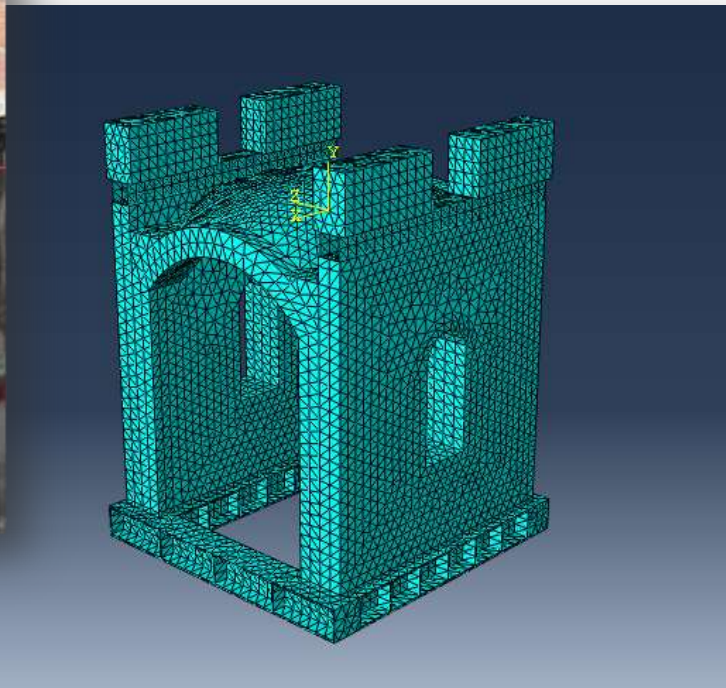
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών

Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών

**«Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς προσομοιώματος
κατασκευής από περικόλειστη τοιχοποιία και σταυροθόλιο
από οπτοπλινθοδομή »**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοντοπούλου Ειρήνη

Επιβλέπων : ΜΟΥΖΑΚΗΣ Χ.
Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών

Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών

ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

«Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς προσομοιώματος
κατασκευής από περίκλειστη τοιχοποιία και σταυροθόλιο
από οπτοπλινθοδομή»

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ:

Κοντοπούλου Ειρήνη

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Μουζάκης Χ. , Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:

2012-2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Μουζάκη Χ. για την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε.

Θερμές ευχαριστίες οφείλονται, επίσης, στην κα. Καραπίττα Λουτσία για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας, μέσω της ανάλυσης ενός προσομοιώματος περίκλειστης τοιχοποιίας και σταυροθολίου από οπτοπλινθοδομή. Στα πλαίσια των ερευνών για την αποκατάσταση της Ι.Μ. Δαφνίου μετά τις εκτεταμένες βλάβες που υπέστη μετά το σεισμό της Αθήνας το 1999, πραγματοποιήθηκε το ερευνητικό πρόγραμμα «Διερεύνηση μηχανικής συμπεριφοράς πλινθοπερίκλειστης βυζαντινής τοιχοποιίας με ή χωρίς εσωτερικό διάκοσμο και τρόπων επισκευής της, με εφαρμογή στο καθολικό της Ι.Μ.Δαφνίου» το οποίο εκπονήθηκε από τη Διεύθυνση Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης του Υπουργείου Πολιτισμού σε συνεργασία με το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος και το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το δοκίμιο που κατασκευάστηκε υποβλήθηκε σε σεισμικές καταπονήσεις ώστε να εξεταστεί η σεισμική του απόκριση. Καθώς αυξανόταν κλιμακωτά η ένταση της σεισμικής καταπόνησης το δοκίμιο παρουσίασε βλάβες, οι οποίες στη συνέχεια αποκαταστάθηκαν με τη χρήση υδραυλικών ενεμάτων. Το νέο δοκίμιο υποβλήθηκε εκ νέου σε σεισμικές δοκιμές ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά της τοιχοποιίας και του σταυροθολίου μετά την ενίσχυση.

Στην παρούσα εργασία, το δοκίμιο που είχε εξεταστεί πειραματικά, προσομοιώθηκε με τη χρήση ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να υπολογιστεί η σεισμική απόκριση του δοκιμίου πριν και μετά την αποκατάστασή του. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Abaqus 6.10 ώστε να υπολογιστούν οι ιδιοπερίοδοι της κατασκευής, οι σεισμικές επιταχύνσεις και οι μετακινήσεις μέσω ελαστικής ανάλυσης. Η επιλογή του προσομοιώματος και των δεδομένων που εισήχθησαν στο Abaqus έγινε με στόχο την ταύτιση των ιδιοπεριόδων του μοντέλου με τις αντίστοιχες του δοκιμίου. Οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας και του σταυροθολίου του αρχικού δοκιμίου προέκυψαν από τις δοκιμές που έλαβαν χώρα στα πλαίσια αυτού του ερευνητικού προγράμματος. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων της μεταπτυχιακής εργασίας:

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην τοιχοποιία. Περιγράφεται η δομή της και τα διάφορα είδη της τοιχοποιίας, καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της, όπως η αντοχή σε θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο σεισμικό προσομοιωτήρα. Περιγράφεται η δομή και η γεωμετρία του δοκιμίου, οι σεισμικές δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκε, πριν και μετά την ενίσχυσή του μέσω

ενεμάτων, και η σεισμική του απόκριση στο τέλος των δοκιμών.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο του δοκιμίου που εισήχθη στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η διαδικασία επιλογής του. Περιγράφεται η γεωμετρία και η δομή του, τα μηχανικά χαρακτηριστικά, οι συνοριακές συνθήκες κλπ που επιλέχτηκαν ώστε να προσεγγιστεί η πραγματική συμπεριφορά του προσομοιώματος.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης και γίνεται σύγκριση των τιμών των σεισμικών επιταχύνσεων και μετακινήσεων που υπολογίστηκαν, με τις αντίστοιχες τιμές που είχαν καταγραφεί από τα όργανα μετρήσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5^ο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν.

ABSTRACT

This postgraduate thesis intends to investigate the seismic response of masonry, through analysis of a specimen consisting of a cross-vault made of bricks which rests on two parallel piers, made of three-leaf stone masonry. Within the framework of a strategic plan for the conservation of Dafni Monastery, after the damages of Athens' 1999 earthquake, the research program «Investigation of mechanical behavior of three-leaf byzantine masonry, with or without mosaics, and ways of restoration: application on Dafni Monastery» was carried out by Hellenic Ministry of Culture in association with Laboratory of Concrete Structures and Laboratory of Earthquake Engineering at NTUA. A series of seismic tests was performed on the specimen in order to obtain its seismic response. Seismic load was increased gradually until the specimen appeared to be cracked. After this, the specimen was strengthened by using hydraulic grouts. New tests were performed on this specimen in order to investigate the seismic response of strengthened masonry and cross-vault.

In this work, the specimen was simulated using a finite elements analysis so that the seismic response could be computed. The finite elements package Abaqus 6.10 was chosen in order to compute the eigenvalue frequencies, the seismic accelerations and displacements of the specimen before and after strengthening using elastic analysis. The model and the input data in Abaqus were selected by checking if the eigenvalue frequencies were equal to those computed in the in situ tests. The mechanical properties of model's masonry and cross-vault were taken from the results of testing that had taken place within the framework of this research program. A brief description of each chapter of this work follows:

Chapter 1 is an introduction in masonry. Its structure, its different types and its mechanical properties, such compression strength and modulus of elasticity, are described.

Chapter 2 is a detailed description of the seismic tests that were carried out on the shaking table. Specimen's structure and geometry are presented, along with the description of the tests and their results, before and after strengthening.

Chapter 3 presents the model that was introduced in Abaqus and the procedure that was followed. The structure of the model, its mechanical properties, boundary conditions etc that were chosen in order to simulate the seismic response of the specimen, are described

In chapter 4, results of the elastic analysis are presented and are compared to the values of seismic accelerations and displacements measured by the instrumentation

during the specimen's tests.

Finally, chapter 5 contains the conclusions derived by the analysis and the comparison of its results with in situ seismic behavior of the specimen.

.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Είδη τοιχοποιιών	1
1.3 Μηχανική της τοιχοποιίας.....	5
1.3.1 Θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας	6
1.3.2 Ελαστικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Περιγραφή του πειράματος	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Περιγραφή δοκιμίου I.....	13
2.2.1 Γεωμετρία δοκιμίου.....	13
2.2.2 Υλικά δοκιμίου	15
2.2.2.1 Πειραματικό προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων τοιχοποιίας.....	16
2.2.3 Μετρητική διάταξη.....	18
2.2.4 Δυναμικές δοκιμές.....	22
2.2.4.1 Διέγερση λευκού θορύβου.....	22
2.2.4.2 Σεισμικές διεγέρσεις.....	22
2.2.5 Αποτελέσματα δοκιμών.....	24
2.2.5.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά.....	24
2.2.5.2 Καταγραφή μετακινήσεων και επιταχύνσεων.....	24
2.2.5.3 Καταγραφή ρωγμών	24
2.3 Περιγραφή δοκιμίου II	26
2.3.1 Μετρητική διάταξη.....	26
2.3.2 Δυναμικές δοκιμές.....	27
2.3.3 Αποτελέσματα δοκιμών.....	28
2.3.3.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά.....	28
2.3.3.2 Καταγραφή μετακινήσεων και επιταχύνσεων.....	28
2.3.3.3 Καταγραφή ρωγμών	28
2.4 Περιγραφή δοκιμίου III.....	30
2.4.1 Μετρητική διάταξη.....	30
2.4.2 Δυναμικές δοκιμές.....	31
2.4.3 Αποτελέσματα δοκιμών.....	32

2.4.3.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά.....	32
2.4.3.2 Καταγραφή μετακινήσεων και επιταχύνσεων.....	32
2.4.3.3 Καταγραφή ρωγμών.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Προσομοίωση της κατασκευής.....	35
3.1 Περιγραφή μοντέλου δοκιμίου I.....	35
3.1.1 Επιλογή μηχανικών χαρακτηριστικών μοντέλου.....	36
3.1.2 Διαδικασία επιλογής τελικού μοντέλου προσομοίωσης.....	37
3.2 Περιγραφή μοντέλου δοκιμίου II.....	46
3.2.1 Επιλογή μηχανικών χαρακτηριστικών μοντέλου.....	47
3.3 Περιγραφή μοντέλου δοκιμίου III.....	48
3.3.1 Επιλογή μηχανικών χαρακτηριστικών μοντέλου.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Αποτελέσματα αναλύσεων.....	51
4.1 Αποτελέσματα αναλύσεων δοκιμίου I.....	51
4.1.1 Δοκιμή 8 κατά X.....	51
4.1.1.1 Σεισμική διέγερση βάσης.....	51
4.1.1.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων.....	53
4.1.1.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων.....	56
4.1.1.4 Αποτελέσματα τάσεων.....	58
4.1.2 Δοκιμή 18 κατά X και Y.....	51
4.1.2.1 Σεισμική διέγερση βάσης.....	61
4.1.2.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων.....	61
4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων δοκιμίου II.....	65
4.2.1 Δοκιμή 4 κατά X.....	65
4.2.1.1 Σεισμική διέγερση βάσης.....	65
4.2.1.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων.....	67
4.2.1.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων.....	70
4.2.1.4 Αποτελέσματα τάσεων.....	73
4.3 Αποτελέσματα αναλύσεων δοκιμίου III.....	75
4.3.1 Δοκιμή 2 κατά X.....	76
4.3.1.1 Σεισμική διέγερση βάσης.....	76
4.3.1.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων.....	76

4.3.1.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων	80
4.3.1.4 Αποτελέσματα τάσεων.....	82
4.3.2 Δοκιμή 3 κατά X	85
4.3.2.1 Σεισμική διέγερση βάσης	85
4.3.2.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων.....	85
4.3.2.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων	89
4.3.2.4 Αποτελέσματα τάσεων.....	91
4.3.3 Δοκιμή 6 κατά X	94
4.3.3.1 Σεισμική διέγερση βάσης	94
4.3.3.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων.....	94
4.3.3.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων	98
4.3.3.4 Αποτελέσματα τάσεων.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Γενικά συμπεράσματα	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η τοιχοποιία αποτελεί το αρχαιότερο δομικό υλικό, το οποίο βρίσκει ευρεία εφαρμογή και στις σύγχρονες κατασκευές. Με τον όρο τοιχοποιία περιγράφεται το σύνθετο υλικό που αποτελείται από τοιχοσώματα (φυσικά ή τεχνητά) και συνδετικό κονίαμα. Μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα και την εμφάνιση του χάλυβα και του σκυροδέματος αποτέλεσε το κυριότερο δομικό υλικό των κατασκευών σε όλο τον κόσμο. Το βασικότερο χαρακτηριστικό της είναι η απλότητα που εμφανίζει στη δομή της: διαδοχικές στρώσεις λίθων ή πλίνθων, με χρήση ή όχι συνδετικού κονιάματος. Επιπλέον πλεονεκτεί σε θέματα αισθητικής, θερμομόνωσης, ηχομόνωσης και πυροπροστασίας. Ωστόσο, παρά την ευρεία χρήση της σε πολλές κατασκευές, οι γνώσεις σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά της και την απόκριση των κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία είναι σχετικά περιορισμένες. Αυτό οφείλεται κυρίως γεγονός ότι η τοιχοποιία είναι ένα υλικό πολυφασικό και πολύμορφο, με αποτέλεσμα να μην έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που να προβλέπουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά της.

Στην Ελλάδα μεγάλο ποσοστό του δομημένου πλούτου καλύπτεται από κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία. Αρκετά από αυτά, μάλιστα, έχουν χαρακτηριστεί ως μνημεία ή ως διατηρητέα κτίρια λόγω της ιδιαίτερης ιστορικής ή καλλιτεχνικής τους αξίας. Η ανάγκης συντήρησης και ενίσχυσης αυτών των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς έχει οδηγήσει στην εμφάνιση έντονου ερευνητικού ενδιαφέροντος για τη φέρουσα τοιχοποιία, τα τελευταία χρόνια. Η έρευνα αυτή ενισχύεται και από την ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων που επιτρέπουν τη μελέτη της ανισότροπης συμπεριφοράς του υλικού και της απόκρισης των κατασκευών από τοιχοποιία.

Στα πλαίσια αυτών των ερευνών αυτών, διεξήχθη στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο «Διερεύνηση μηχανικής συμπεριφοράς πλινθοπερίκλειστης βυζαντινής τοιχοποιίας με ή χωρίς εσωτερικό διάκοσμο και τρόπων επισκευής της, με εφαρμογή στο καθολικό της Ι.Μ. Δαφνίου» το οποίο εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

1.2 Είδη τοιχοποιιών

Οι τοιχοποιίες κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος των τοιχοσωμάτων από τα οποία αποτελούνται, τον τρόπο δόμησης και τη λειτουργία τους στο κτίριο. Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η κατάταξη των τοιχοποιιών.

α) Ανάλογα με το είδος των λιθοσωμάτων:

- Τοιχοποιίες από φυσικούς λίθους (Λιθοδομές): το υλικό τους είναι φυσικοί λίθοι προερχόμενοι τις περισσότερες φορές από ανθεκτικά πετρώματα, οι οποίοι μετά από μικρό ή μεγάλο βαθμό κατεργασίας αποκτούν κατάλληλο σχήμα.

Ανάλογα με τον αν έχουν ή όχι συνδετικό κονίαμα διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- Ξηρολιθοδομές (ξεροληθιές): είναι λιθοδομές που αποτελούνται από ακατέργαστους φυσικούς λίθους χωρίς τη χρήση συνδετικού κονιάματος.
- Λιθοδομές: είναι γενικότερα οι τοιχοποιίες που αποτελούνται από φυσικούς λίθους συγκολλημένους με τη χρήση κονιάματος.
- Χυτές τοιχοποιίες: είναι τοιχοποιίες κατασκευασμένες από πλαστικά μείγματα πηλού, κροκάλων και σκυροδέματος, τα οποία σκληρύνονται στη συνέχεια και αποτελούν έναν ενιαίο τοίχο.



(α) Ξηρολιθοδομή



(β) Αργολιθοδομή

Σχήμα 1.1: Τοιχοποιία από φυσικούς λίθους

Η πλειονότητα των νεότερων κατασκευών από λιθοδομή έχει κατασκευαστεί από αργολιθοδομή. Πρόκειται για λιθοδομή που αποτελείται από τελείως ακατέργαστους ή ελαφρώς κατεργασμένους λίθους.

Ανάλογα με την επεξεργασία που έχουν υποστεί οι λίθοι, οι λιθοδομές διακρίνονται σε:

- Ημιλαξεμένες: είναι οι λιθοδομές που αποτελούνται από λίθους που έχουν υποστεί ημιεπεξεργασία, δηλαδή έχουν λαξευτεί στις έδρες και στο πρόσωπο, ώστε να έχουν μάλλον κανονικό σχήμα παραλληλεπίπεδου και περίπου ίσες διαστάσεις.
- Λαξεμένες: είναι οι λιθοδομές που κατασκευάζονται από λίθους λαξευμένους σε όλες τους τις έδρες.

- Τοιχοποιίες από τεχνητούς λίθους (Πλινθοδομές):
 - Ωμοπλινθοδομές: είναι οι λιθοδομές στις οποίες τα τοιχοσώματα είναι ωμόπλινθοι, δηλαδή άψητες χωματόπλιθες.
 - Οπτοπλινθοδομές: είναι οι λιθοδομές στις οποίες τα τοιχοσώματα είναι ψημένες πλίνθοι (τούβλα).
 - Τσιμεντοπλινθοδομές: είναι οι λιθοδομές στις οποίες τα τοιχοσώματα είναι τσιμεντόλιθοι.



(α) Ωμοπλινθοδομή



(β) Οπτοπλινθοδομή



(γ) Τσιμεντοπλινθοδομή

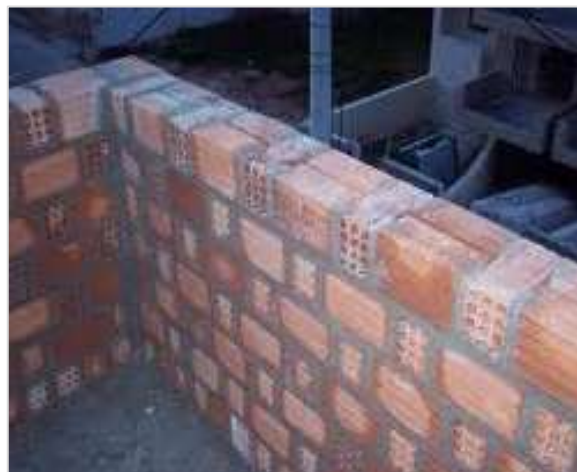
Σχήμα 1.2: Τοιχοποιίες από τεχνητούς λίθους

β) Ανάλογα με τον τρόπο δόμησης:

- Ανισόδομη τοιχοποιία
- Έμπλεκτες τοιχοποιίες
- Δρομική τοιχοποιία
- Μπατική τοιχοποιία
- Υπερμπατική τοιχοποιία
- Κοίλη ή Ψαθωτή τοιχοποιία (δύο στρώσεις με εσωτερικό διάκενο)
- Τοιχοποιία με αλυσοειδές ή σταυροειδές σύστημα πλέξης (English bond)
- Τοιχοποιία με μικτό σύστημα πλέξης (Flemish bond)
- Οπλισμένη τοιχοποιία



(α)



(β)

Σχήμα 1.3: (α) Δρομική τοιχοποιία, (β) Μπατική τοιχοποιία

γ) Ανάλογα με τη λειτουργία της τοιχοποιίας στην κατασκευή:

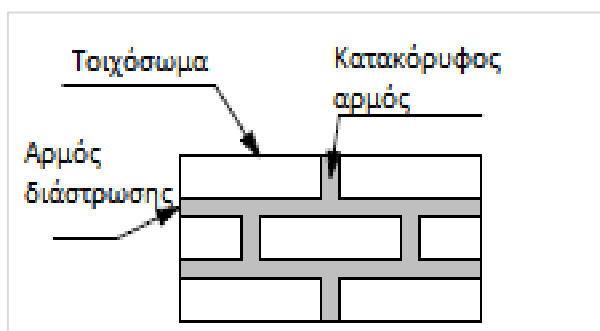
- Φέρουσα: είναι η τοιχοποιία που μεταφέρει στο έδαφος τα κατακόρυφα και οριζόντια φορτία της κατασκευής.
- Πληρώσεως: είναι η τοιχοποιία που δεν μεταφέρει φορτία αλλά κατασκευάζεται για να διαμορφωθούν οι χώροι σε ένα οικοδόμημα.
- Αντιστήριξης: είναι η τοιχοποιία που στηρίζει γαιώδη πρηνή.

- Επένδυσης: είναι η τοιχοποιία που κατασκευάζεται σε επαφή με τοίχους των παραπάνω κατηγοριών ή με στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, για διακοσμητικούς μόνο σκοπούς.

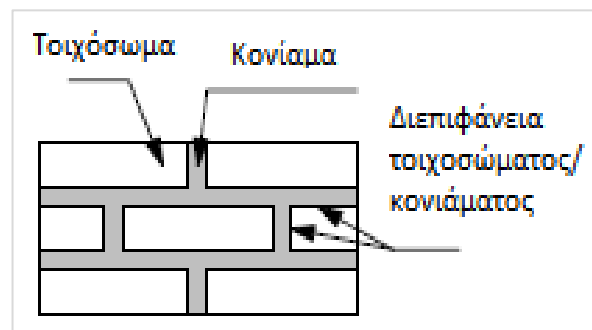
1.3 Μηχανική της τοιχοποιίας

Όπως προαναφέρθηκε, η τοιχοποιία αποτελεί ένα υλικό ανομοιογενές και ανισότροπο, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των τοιχοσωμάτων και του κονιάματος, καθώς και λόγω της επιρροής των αρμών που δημιουργούν ασθενή επίπεδα στο υλικό. Για αυτό το λόγο είναι δύσκολος ο προσδιορισμός με ακρίβεια των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας, Ανάλογα με την ακρίβεια αλλά και την απλότητα που απαιτείται στις αριθμητικές αναλύσεις, η τοιχοποιία μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση:

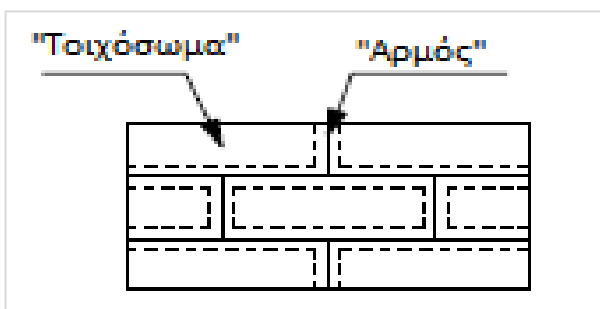
- *Μικρομοντέλων*: το κονίαμα και τα τοιχοσώματα προσομοιώνονται με συνεχή στοιχεία, ενώ οι διεπιφάνειες (αρμοί) με ασυνεχή.
- *Απλοποιημένων μικρομοντέλων*: τα τοιχοσώματα επεκτείνονται ώστε να περιλαμβάνουν και τμήμα του κονιάματος και προσομοιώνονται με συνεχή στοιχεία, ενώ οι διεπιφάνειες με ασυνεχή.
- *Μακρομοντέλων*: η τοιχοποιία προσομοιώνεται με ενιαίο σύνθετο υλικό αποτελούμενο από τοιχοσώματα, κονίαμα και αρμούς.



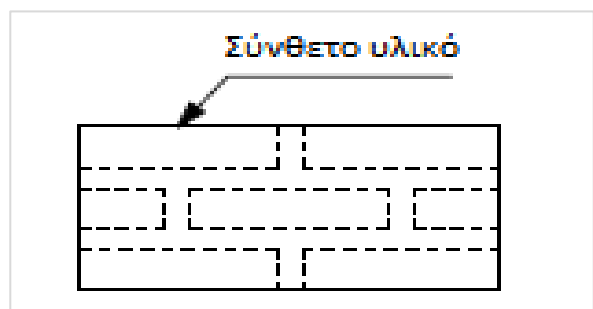
(α) Τοιχοποιία



(β) Μικρομοντέλο



(γ) Απλοποιημένο Μικρομοντέλο



(δ) Μακρομοντέλο

Σχήμα 1.4: Τρόποι προσομοίωσης τοιχοποιίας

Στην παρούσα εργασία η τοιχοποιία εξετάστηκε ως ένα ενιαίο υλικό με ενιαίες τιμές μηχανικών αντοχών και ελαστικών παραμέτρων.

1.3.1 Θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας είναι:

- Τα χαρακτηριστικά των τοιχοσωμάτων, δηλαδή η αντοχή, ο τύπος και η γεωμετρία τους και η υδατοαπορροφητικότητά τους.
- Τα χαρακτηριστικά του κονιάματος, δηλαδή η αντοχή και η σύνθεση του μείγματος, το σχετικό πάχος του κονιάματος σε σχέση με το πάχος του τοιχοσώματος και η σχετική παραμόρφωση των δύο υλικών.
- Οι συνθήκες που επικρατούν στην τοιχοποιία, δηλαδή ο τρόπος εμπλοκής των τοιχοσωμάτων, η διεύθυνση φόρτισης, οι τοπικές αυξήσεις τάσεων, ο τρόπος επιβολής του φορτίου κλπ.

Αν και υπάρχει διαθέσιμος μεγάλος αριθμός πειραματικών δεδομένων για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής τοίχων διαφόρων υλικών και τύπων, σπάνια μπορούν αυτά να αντιστοιχηθούν με τα στοιχεία μιας πραγματικής τοιχοποιίας. Επίσης, η αντοχή ενός τοίχου διαφέρει από την αντίστοιχη ενός δοκιμίου κατασκευασμένου από τα ίδια υλικά. Ο καλύτερος τρόπος για τον εργαστηριακό προσδιορισμό των μηχανικών αντοχών της τοιχοποιίας είναι ο έλεγχος ορισμένου αριθμού δοκιμίων από τα ίδια υλικά και κατασκευασμένα με τον ίδιο τρόπο όπως ο εξεταζόμενος τοίχος. Σύμφωνα με το πρότυπο EN1052-1, τα συνήθη δοκίμια για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής πρέπει να έχουν ύψος 3 έως 6 τοιχοσώματα και πλάτος 1 έως 4 τοιχοσώματα.

Εκτός από τις πειραματικές δοκιμές, ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής είναι η χρήση εμπειρικών σχέσεων. Ο Τάσιος το 1986 έχει προτείνει την παρακάτω ημιεμπειρική σχέση:

$$f_{wc} = \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - \alpha + \beta f_{mc}$$

όπου: f_{bc} η θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος

f_{mc} η θλιπτική αντοχή του κονιάματος

α μειωτικός συντελεστής για τοιχοποιία από φυσικούς λίθους που κυμαίνεται από 0.5 για λαξευμένες πέτρες μέχρι 2.5 για κροκάλες

β συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά του κονιάματος στην αντοχή και είναι $\beta=0.5$ για λιθοδομή και $\beta=0.1$ για οπτοπληθοδομή

Εάν το ποσοστό του κονιάματος είναι σημαντικό τότε η αντοχή μειώνεται με τη χρήση του συντελεστή ξ :

$$f'_{wc} \approx \xi f_{wc}$$

$$\text{όπου } \xi \approx \frac{1}{1+3.5(K-K_0)} \quad (1.3)$$

όπου: K το ποσοστό κατ' όγκον του κονιάματος στην τοιχοποιία
 K_0 το μέγιστο ποσοστό κονιάματος που θεωρείται ότι δεν προκαλεί μείωση στην αντοχή του τοίχου και εξαρτάται από το είδος της τοιχοποιίας ($K_0=0.3$ για αργολιθοδομή και οπτοπλινθοδομή, 0.2 για ημιλαξευτή, 0.1 για λαξευτή λιθοδομή)

Μια άλλη σχέση της αντοχής του τοίχου προς αυτής του τοιχοσώματος βασισμένη στη θεωρία του Francis (1971) είναι:

$$\frac{f_{wc}}{f_{bc}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha(v_m - \beta v_b)}{\lambda(1 + \alpha\beta - v_m - \alpha\beta v_b)}}$$

όπου : $\alpha = t_m/t_b$ ο λόγος πάχους αρμού προς ύψος τοιχοσώματος

$\beta = E_m/E_b$ ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας του κονιάματος προς το αντίστοιχο του τοιχοσώματος

$\lambda = f_{bt}/f_{bc}$ ο λόγος της εφελκυστικής προς τη θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος

ν ο συντελεστής Poisson ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\nu = 0.5 - 0.1\sqrt[4]{f_c}$$

όπου f_c η θλιπτική αντοχή του αντίστοιχου υλικού

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 6 (EN 1996-1-1) , η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή f_{wk} της άοπλης τοιχοποιίας από κονίαμα γενικής εφαρμογής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Για τοιχοποιία από κονίαμα γενικής εφαρμογής ή ελαφροκονίαμα

$$f_k = K f_b^{0.7} f_m^{0.3}$$

- Για τοιχοποιία από κονίαμα λεπτής στρώσης (πάχους 0.5-3mm) και αργιλικά τοιχοσώματα των ομάδων 1 και 4 (πίνακας 1.1) , ασβεστοπυριτικά, τσιμεντόλιθους και τοιχοσώματα από αυτόκλειστο κυψελωτό σκυρόδεμα χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$f_k = K f_b^{0.85}$$

- Για αργιλικά τοιχοσώματα ομάδων 2 και 3 χρησιμοποιείται η σχέση:

$$f_k = K f_b^{0.7}$$

όπου: K είναι συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο των τοιχοσωμάτων και του κονιάματος και δίνεται στον πίνακα 1.1

f_b είναι η ανηγμένη αντοχή των τοιχοσωμάτων

f_m είναι η μέση θλιπτική αντοχή του κονιάματος

Masonry Unit		General purpose mortar	Thin layer mortar (≤ 3 mm bed joint)	Lightweight mortar of density	
				$800 \leq \rho \leq 700 \text{ kg/m}^3$	$700 < \rho \leq 1500 \text{ kg/m}^3$
Clay	Group 1	0,50	0,75	0,30	0,40
	Group 2	0,45	0,55	0,30	0,40
	Group 3	0,35	0,25	0,20	0,25
	Group 4	0,30	not used	not used	not used
Calcium Silicate	Group 1	0,50	0,80	not used	not used
	Group 2	0,45	0,55	not used	not used
Aggregate Concrete	Group 1	0,50	0,80	0,45	not used
	Group 2	0,50	0,80	0,45	not used
	Group 3	0,30	not used	not used	not used
	Group 4	0,30	not used	not used	not used
Autoclaved Aerated Concrete	Group 1	0,50	0,85	0,45	not used
Manufactured Stone	Group 1	0,50	0,75	not used	not used
Dimensioned Natural Stone	Group 1	0,50	not used	not used	not used

Πίνακας 1.1: Τιμές του μειωτικού συντελεστή K

1.3.2 Ελαστικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας

Για το θεωρητικό προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας της τοιχοποιίας έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις, οι οποίες το ορίζουν ως πολλαπλάσιο της θλιπτικής αντοχής της. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 6, σε περίπτωση απουσίας πειραματικών δεδομένων το τέμνον μέτρο ελαστικότητας (δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας στην αστοχία) δίνεται από τη σχέση:

$$E = 1000f_{mk}$$

όπου f_{mk} είναι η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Για τον πειραματικό προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας ο Ευρωκώδικας 6 προτείνει το πρότυπο EN 1052-1 για τον προσδιορισμό της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων και τον υπολογισμό του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας για τιμή τάσης ίση με το 1/3 της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας f_{wc} .

Diagramma sel.97 filitsa

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Η Μονή Δαφνίου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μνημεία της Βυζαντινής περιόδου στην Ελλάδα, ενώ από το 1990 περιλαμβάνεται στον παγκόσμιο κατάλογο πολιτιστικής κληρονομιάς της UNESCO. Λόγω της βλάβης που υπέστη η μονή μετά το σεισμό της Αθήνας στις 7 Σεπτεμβρίου 1999 (έντασης $M_s=5.9$), το Ελληνικό Υπουργείο Πολιτισμού ξεκίνησε μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων ώστε να συλλεχθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για τη δυναμική συμπεριφορά του μνημείου και να ληφθούν τα απαιτούμενα μέτρα για την επισκευή του. Στα πλαίσια αυτών των ερευνών έλαβε χώρα το ερευνητικό πρόγραμμα «Διερεύνηση μηχανικής συμπεριφοράς πλινθοπερίκλειστης βυζαντινής τοιχοποιίας με ή χωρίς εσωτερικό διάκοσμο και τρόπων επισκευής της, με εφαρμογή στο καθολικό της Ι. Μ. Δαφνίου», το οποίο εκπονήθηκε από τη Διεύθυνση Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης του Υπουργείου Πολιτισμού σε συνεργασία με το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος και το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Σχήμα 2.1: Ιερά Μονή Δαφνίου

Σκοπός των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η διερεύνηση του τρόπου δόμησης της τοιχοποιίας της μονής, ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων της καθώς και ο προσδιορισμός της σεισμικής της συμπεριφοράς του μνημείου πριν και μετά την εφαρμογή ενεμάτων για την ενίσχυση της τοιχοποιίας.

Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε ένα δοκίμιο, που αποτελεί τμήμα της θολοδομίας της Μονής Δαφνίου, το οποίο υποβλήθηκε σε δυναμικές καταπονήσεις.

Το δοκίμιο αυτό αποτελεί ένα ομοίωμα σταυροθολίου, κατασκευασμένο από οπτόπλινθους βυζαντινού τύπου, το οποίο στηρίζεται περιμετρικά σε τοιχοποιία που έχει κατασκευαστεί βάσει του πλινθοπερίκλειστου συστήματος. Στο δοκίμιο είχε προστεθεί σε ορισμένα σημεία ψηφιδωτός διάκοσμος.



Σχήμα 2.2: Δοκίμιο πειράματος

Οι δοκιμές που έγιναν με τη χρήση του σεισμικού προσομοιωτήρα χωρίζονται σε τρεις φάσεις:

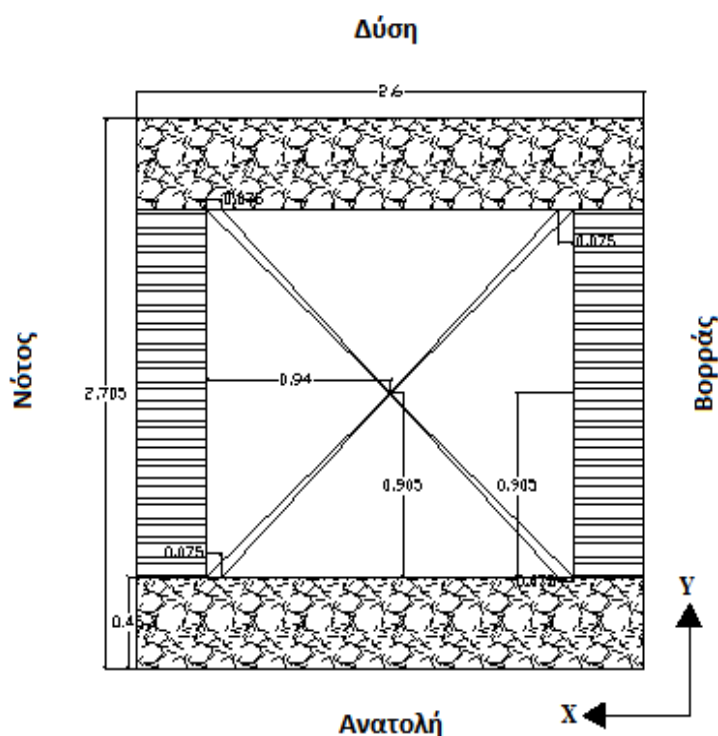
- **Φάση 1^η (Δοκίμιο I)** : Στο αρχικό δοκίμιο επιβάλλονται σεισμικές διεγέρσεις με αυξανόμενη ένταση κλιμακωτά, έως το δοκίμιο να φτάσει την αστοχία του.
- **Φάση 2^η (Δοκίμιο II)**: Το δοκίμιο επισκευάζεται με τοπική αποκατάσταση των ρωγμών και στη συνέχεια υποβάλλεται ξανά σε σεισμική καταπόνηση μέχρι να ρηγματωθεί.
- **Φάση 3^η (Δοκίμιο III)**: Το ρηγματωμένο δοκίμιο της προηγούμενης φάσης επισκευάζεται με καθολική εφαρμογή ενέματος υψηλής διεισδυτικότητας και υποβάλλεται εκ νέου σε σεισμική καταπόνηση έως την αστοχία του.

2.2 Περιγραφή δοκιμίου I

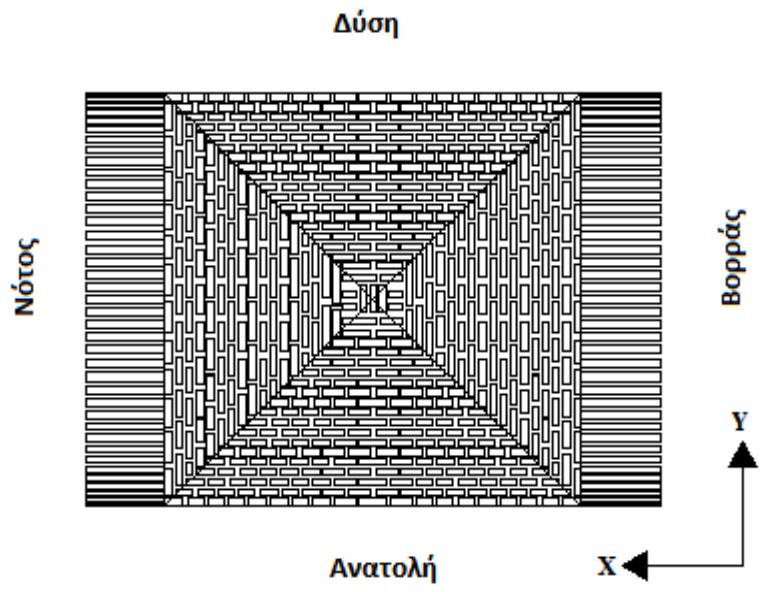
2.2.1 Γεωμετρία δοκιμίου

Το δοκίμιο κατασκευάστηκε σύμφωνα με τον τύπο και τις ιδιότητες της τοιχοποιίας που συναντάται στην Ι.Μ. Δαφνίου. Το αρχικό δοκίμιο, επομένως, αποτελείται από ένα σταυροθόλιο που στηρίζεται σε δύο παράλληλους τοίχους κατασκευασμένους από οπτόπλινθους σύμφωνα με το πλινθοπερίκλειστο σύστημα. Επειδή οι διαστάσεις του σεισμικού προσομοιωτήρα είναι περιορισμένες (4,00m x 4,00m), το δοκίμιο κατασκευάστηκε σε κλίμακα 2:3. Οι διαστάσεις της κάτοψης του δοκιμίου είναι 2,705m x 2.60m ενώ το συνολικό ύψος είναι περίπου 3,12m. Η τρίστρωτη τοιχοποιία έχει συνολικό πάχος 0,45m. Προκειμένου να στερεωθεί το δοκίμιο στο σεισμικό προσομοιωτήρα, κατασκευάστηκε πάνω σε μεταλλική βάση αποτελούμενη από μεταλλικές δοκούς διατομής HEB300. Η βάση αυτή στερεώθηκε στη σεισμική τράπεζα μέσω 36 κοχλιών M30 ποιότητας 8.8 ώστε να εξασφαλιστούν συνθήκες πάκτωσης.

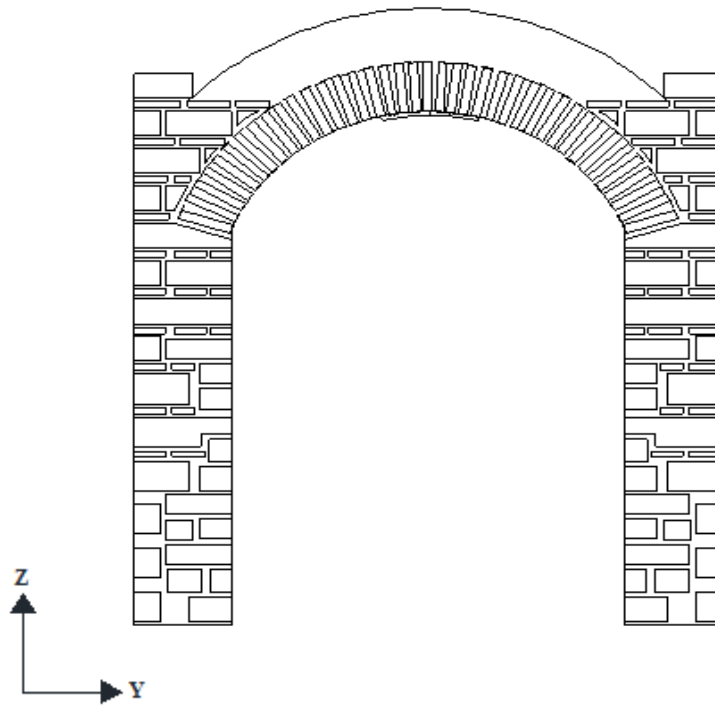
Στα παρακάτω σχέδια φαίνονται η κάτοψη και οι όψεις του δοκιμίου. Σημειώνεται ότι οι άξονες των σχεδίων συμπίπτουν με τους άξονες της σεισμικής τράπεζας στην οποία τοποθετήθηκε το δοκίμιο κατά τη διάρκεια των δυναμικών πειραμάτων



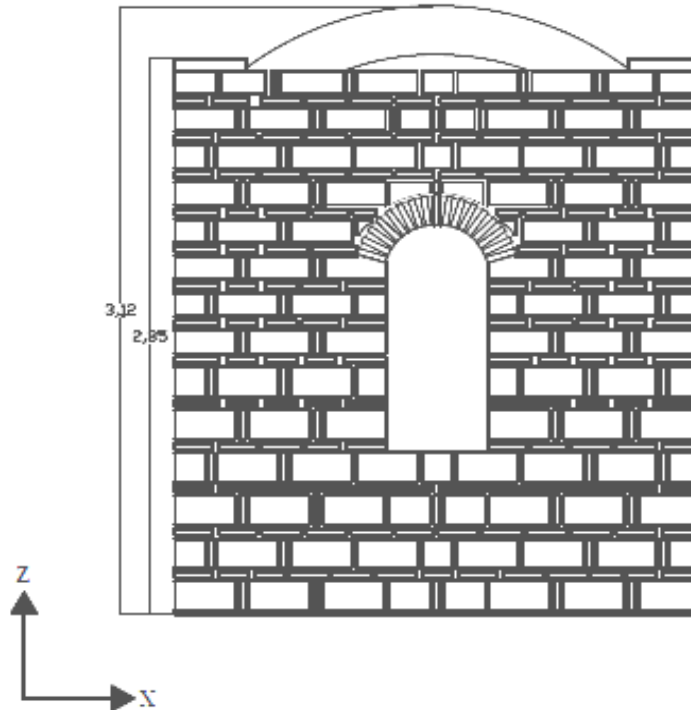
Σχήμα 2.3: Κάτοψη δοκιμίου



Σχήμα 2.4: Άνοψη οροφής δοκιμίου



Σχήμα 2.5: Βόρεια και νότια όψη δοκιμίου



Σχήμα 2.6: Ανατολική και δυτική όψη δοκιμίου

2.2.2 Υλικά δοκιμίου

Με χρήση ραδιογραφίας εξετάστηκε επί τόπου η τοιχοποιία στο καθολικό της Ι.Μ.Δαφνίου ώστε να διαπιστωθεί η γεωμετρία της σε βάθος. Προέκυψε ότι πρόκειται για τριστρωτη τοιχοποιία πάχους 0,60m με εσωτερική και εξωτερική στρώση μεταβλητού πάχους. Το μέσο πάχος κάθε στρώσης ήταν περίπου 0,18m για την εξωτερική και 0,24m για την εσωτερική. Η εξωτερική στρώση δεν είχε επίχρισμα και ήταν κατασκευασμένη από μεγάλους λίθους και από συμπαγή τούβλα, τοποθετημένα κατά τους οριζόντιους και κατακόρυφους αρμούς. Η εσωτερική είναι επίχρισμένη με μεγάλο τμήμα της καλυμμένο από μωσαϊκά, ενώ έχει κατασκευαστεί από μικρότερα λιθοσώματα σε σχέση με αυτά της εξωτερικής στρώσης. Η ενδιάμεση στρώση αποτελείται από λιθοσώματα μικρού μεγέθους, κομμάτια τούβλων και κονίαμα, ενώ το πάχος της είναι μεταβλητό.

Αν και στο μνημείο συναντώνται διάφοροι τύποι λιθοσωμάτων, οι πιο συχνοί είναι ο κογχλιάτης λίθος (fossiliferous marl limestone) και ο συμπαγής αμμόλιθος (solid sandy marl sandstone). Για το δοκίμιο επιλέχθηκε τραβερτίτης (travertine) γιατί έχει παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά με τους λίθους του μνημείου (πίνακας 2.1) και συμπαγή τούβλα μέσης θλιπτικής αντοχής 17MPa (τα τούβλα της τοιχοποιίας της μονής είχαν αντοχή 15MPa).

Τύπος λίθου	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)
Κογχλιάτης λίθος	23	1,97
Συμπαγής αμμόλιθος	21,8	1,93
Τραβερτίτης	25	2,1

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες λίθων τοιχοποιίας Ι.Μ.Δαφνίου και δοκιμίου

Για τη σύνδεση των λίθων της τοιχοποιίας του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα από ασβέστη-ποζολάνη με προσμίξεις από πυριτική ποταμίσια άμμο και γαρμπίλι από ασβέστη με μέγιστη διάμετρο 1,5-2cm. Η θλιπτική αντοχή και η αντοχή σε κάμψη του κονιάματος υπολογίστηκε πειραματικά μετά το πέρας 3,6,9 και 12 μηνών και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.2.

Μήνες	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)
1	3,59	1,17
3	4,35	1,58
6	4,74	1,96
9	4,77	1,83
12	3,61	1,54

Πίνακας 2.2: Μηχανικές αντοχές κονιάματος

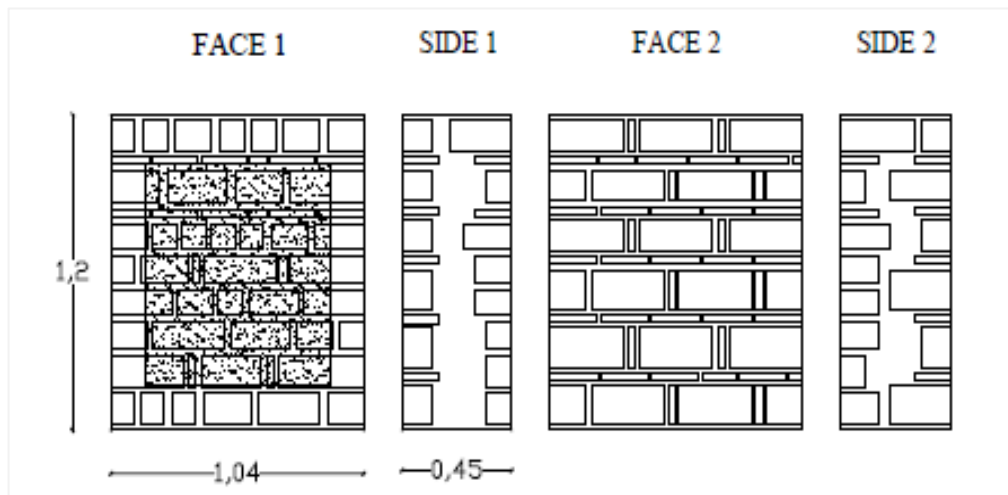
Ενώ η εσωτερική και η εξωτερική στρώση της τοιχοποιίας κατασκευάστηκε από μεγάλου μεγέθους λίθους τραβερτίτη, για το γέμισμά της τοιχοποιίας, επιλέχθηκαν λιθοσώματα μεγέθους 0,20 έως 0,50m και κονίαμα ίδιο με αυτό που περιγράφηκε παραπάνω.

2.2.2.1 Πειραματικός προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων τοιχοποιίας

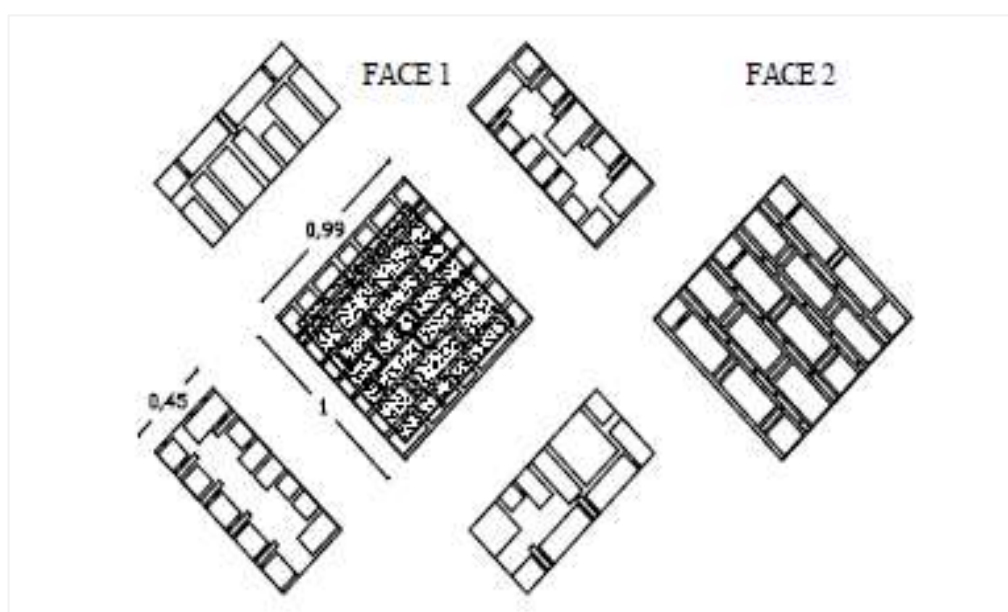
Προκειμένου να προσδιοριστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας που εξετάστηκε, διεξήχθησαν δοκιμές στο Εργ. Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν 3 δοκίμια διαστάσεων 1,04x1,20x0,45m³ τα οποία εξετάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη και 3 δοκίμια διαστάσεων 1,00x1,00x0,45m³ που εξετάστηκαν σε διαγώνια θλίψη για να προσδιοριστεί η εφελκυστική αντοχή.

Δοκίμιο	Μήκος (m)	Ύψος (m)	Πάχος (m)	Πάχος εξωτερικής στρώσης (m)	Πάχος εσωτερικής στρώσης (m)	Πάχος ενδιάμεσης στρώσης (m)
1-3	1,04	1,20	0,45	0,192	0,135	0,123
4-6	1,00	1,00	0,45	0,1825	0,129	0,1385

Πίνακας 2.3: Διαστάσεις δοκιμίων



Σχήμα 2.7: Γεωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν σε θλίψη



Σχήμα 2.8: Γεωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν σε διαγώνια θλίψη

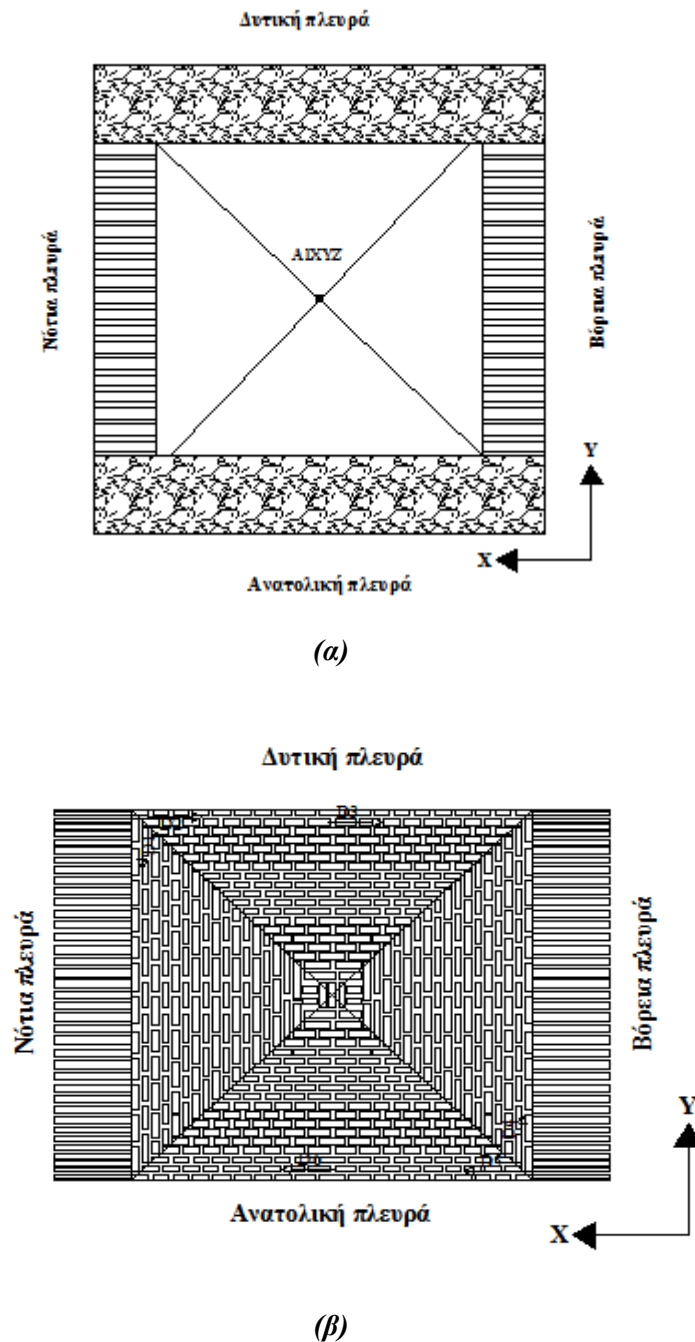
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4:

Δοκίμιο	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση (‰)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)
1	1,82	-	1,0	-
2	1,74	-1,6	1,44	-
3	2,26	-2,25	1,5	-
4-6	-	-	-	0,10

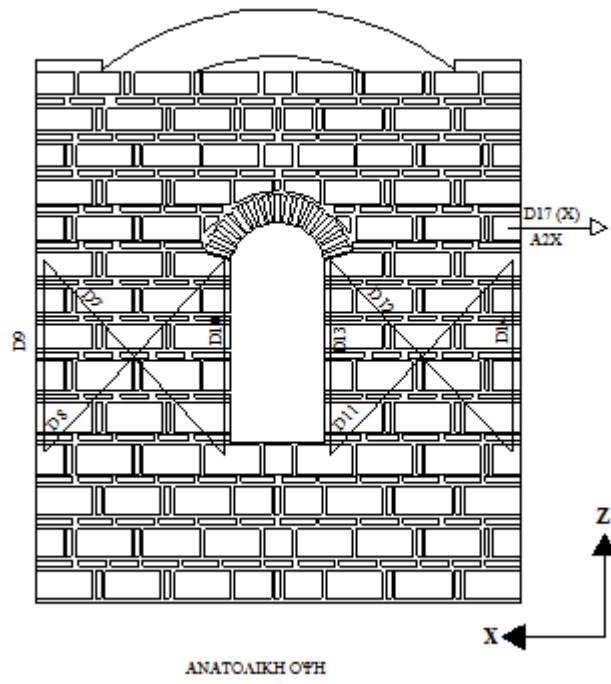
Πίνακας 2.4: Μηχανικές ιδιότητες τοιχοποιίας

2.2.3 Μετρητική διάταξη

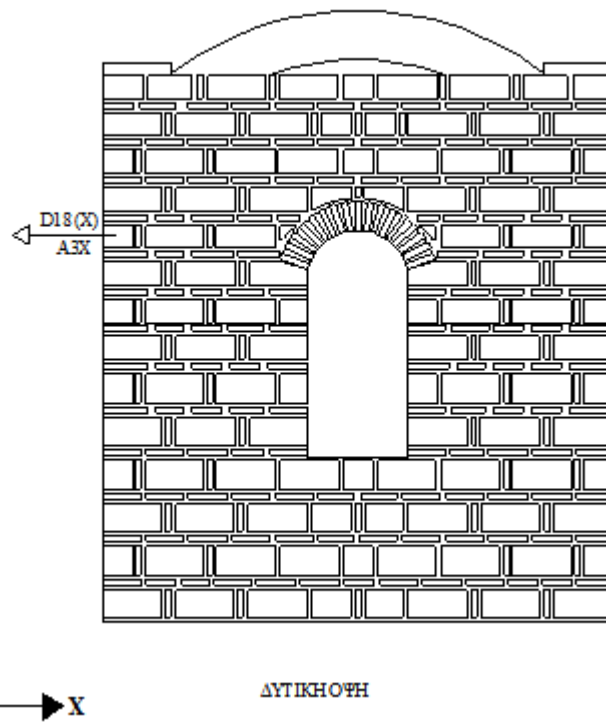
Για τη παρακολούθηση της σεισμικής απόκρισης του δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκαν επιταχυνσιόμετρα και βελόμετρα σε διάφορες θέσεις του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκε ένα τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο στην κορυφή του σταυροθολίου και επιταχυνσιόμετρα στο ύψος των τοξωτών παραθύρων. Μετρήθηκαν επίσης, σχετικές ή απόλυτες μετακινήσεις σε κρίσιμες θέσεις του σταυροθολίου και των πεσσών. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι θέσεις όπου τοποθετήθηκαν τα όργανα των μετρήσεων στο δοκίμιο I.



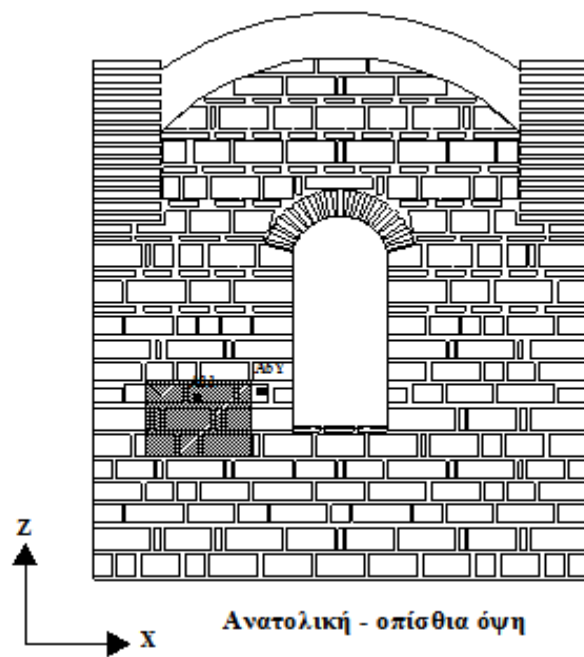
Σχήμα 2.9: (α) Κορυφή σταυροθολίου, (β) Άνοψη σταυροθολίου



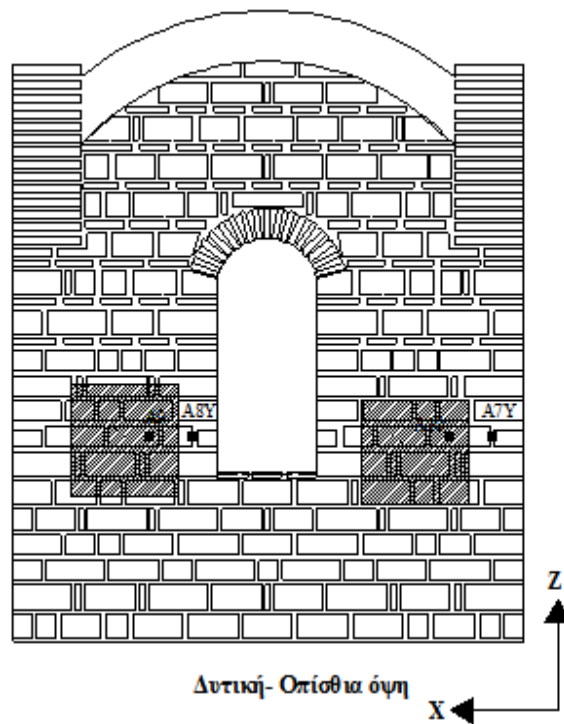
(a)



(b)

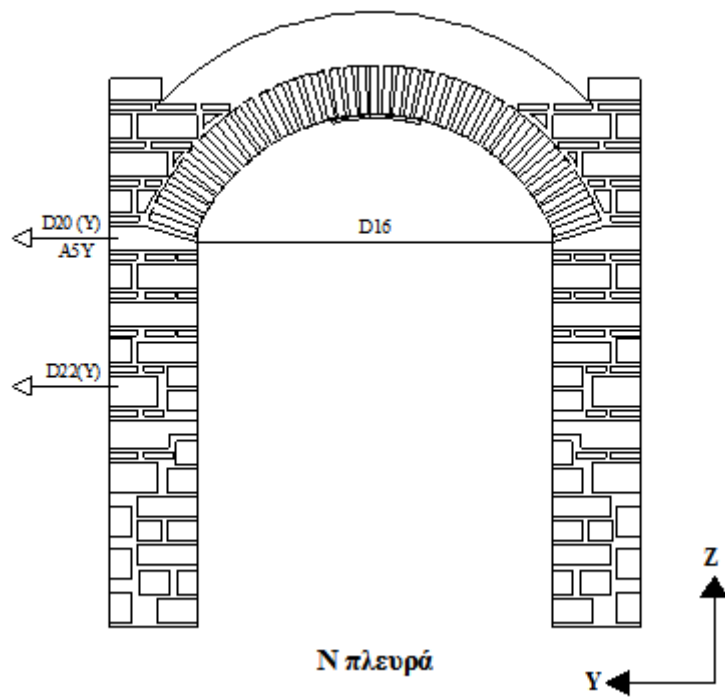


(γ)

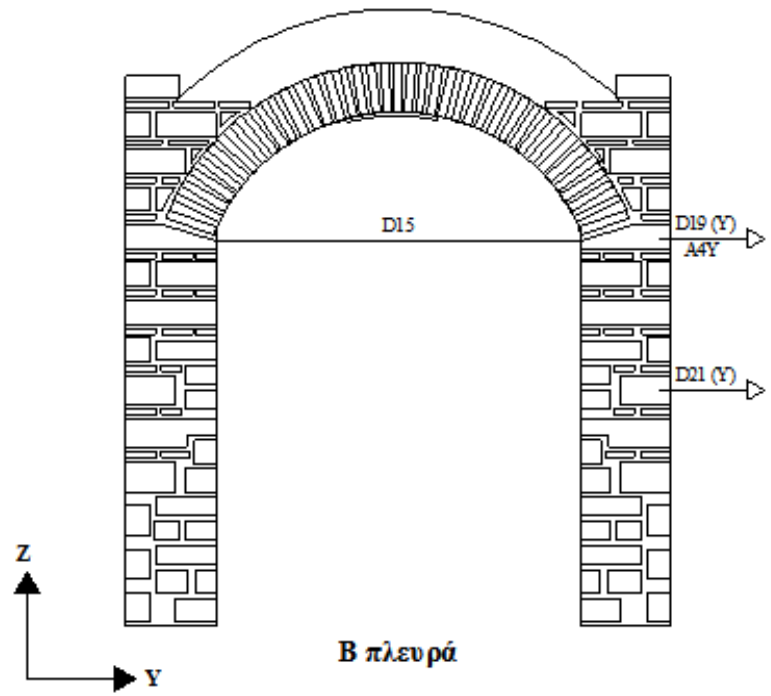


(δ)

Σχήμα 2.10: (α) Εξωτερική ανατολική όψη, (β) Εξωτερική δυτική όψη, (γ) Εσωτερική ανατολική όψη, (δ) Εσωτερική δυτική όψη



(α)



(β)

Σχήμα 2.11: (α) Εσωτερική νότια όψη (β) Εσωτερική βόρεια όψη

2.2.4 Δυναμικές δοκιμές

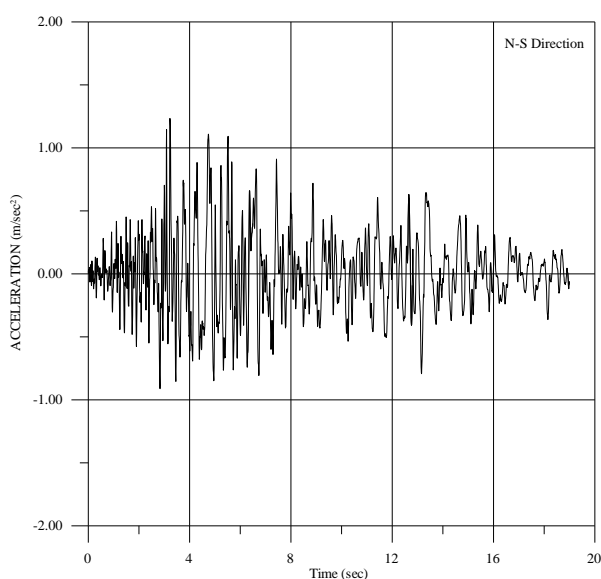
Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε δύο τύπους δυναμικών δοκιμών με τη χρήση του σεισμικού προσομοιωτήρα:

2.2.4.1 Διέγερση λευκού θορύβου

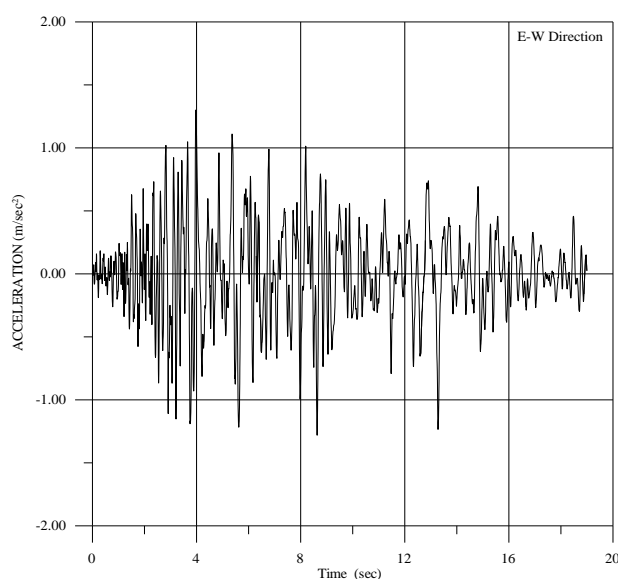
Προκειμένου να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, δηλαδή η ιδιοσυχνότητα f και ο λόγος απόσβεσης ζ σε κάθε διεύθυνση, το δοκίμιο διεγέρθηκε από μια χρονοϊστορία λευκού θορύβου με περιεχόμενο συχνοτήτων από DC-50Hz και σταθερής επιτάχυνσης 0,020g.

2.2.4.2 Σεισμικές διεγέρσεις

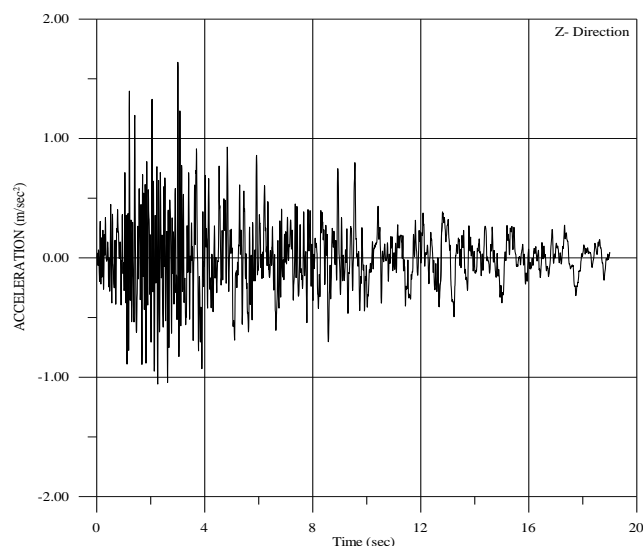
Για τους σκοπούς του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοϊστορίες του σεισμού Irpinia ($M_s=6,9$) ο οποίος χτύπησε την περιοχή Campano-Lucano-Arenines στη Νότια Ιταλία στις 23/11/1980. Χαρακτηριστικό του σεισμού ήταν η μεγάλη του διάρκεια (90sec). Για τις σεισμικές διεγέρσεις επιλέχθηκε το πρώτο τμήμα των χρονοϊστοριών (έως 40sec) και εισήχθη στο σεισμικό προσομοιωτήρα ως διέγερση βάσης με συχνότητα 200Hz και τελική διάρκεια περίπου 20sec. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι συνιστώσες του σεισμού Irpinia καθώς και οι χρονοϊστορίες που χρησιμοποιήθηκαν ως διέγερση βάσης.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2.12: Χρονοϊστορίες σεισμού Irpinia με συχνότητα 200Hz που χρησιμοποιήθηκαν ως διέγερση βάσης στη διεύθυνση (α) X, (β) Y, (γ) Z

Οι διαδοχικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5:

Αριθμός δοκιμής	Διεύθυνση διέγερσης	Περιγραφή διέγερσης
1	Y	Διέγερση λευκού θορύβου
2	X	Διέγερση λευκού θορύβου
3	Z	Διέγερση λευκού θορύβου
4	X	30% σεισμού Irpinia
5	X	50% σεισμού Irpinia
6	X	75% σεισμού Irpinia
7	X	100% σεισμού Irpinia
8	X	125% σεισμού Irpinia
9	X	150% σεισμού Irpinia
10	X	175% σεισμού Irpinia
11	X	200% σεισμού Irpinia
12	X	250% σεισμού Irpinia
13	X	300% σεισμού Irpinia
14	X	350% σεισμού Irpinia
15	X	400% σεισμού Irpinia
16	X	450% σεισμού Irpinia
17	X	500% σεισμού Irpinia
18	X/Y	50% σεισμού Irpinia
19	X/Y	100% σεισμού Irpinia
20	X/Y	150% σεισμού Irpinia
21	X	200% σεισμού Irpinia
22	X/Y	150% σεισμού Irpinia

Πίνακας 2.5 : Σεισμικές δοκιμές δοκιμίου I

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η μονοαξονική δοκιμή 8 και η διαξονική δοκιμή 18.

2.2.5 Αποτελέσματα δοκιμών

2.2.5.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά

Από τις δοκιμές λευκού θορύβου προέκυψαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου:

Διεύθυνση	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Απόσβεση (%)
X	11,80	2,1
Y	5,50	2,1

Πίνακας 2.6: Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμίου I

2.2.5.2 Καταγραφή μετακινήσεων και επιταχύνσεων

Οι καταγραφές μετακινήσεων και επιταχύνσεων για τις δοκιμές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4, όπου γίνεται η σύγκριση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

2.2.5.3 Καταγραφή ρωγμών

Οι πρώτες ρωγμές στο δοκίμιο εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής 10 και επιδεινώθηκαν καθώς αυξανόταν η ένταση της διέγερσης βάσης κατά τη διεύθυνση X. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν και διαζονικές διεγέρσεις με αποτέλεσμα το δοκίμιο να εμφανίσει εκτεταμένες βλάβες. Όταν ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές, το δοκίμιο είχε εμφανίσει οριζόντιες στην ανατολική και δυτική όψη, αποκόλληση του σταυροθολίου, ρωγμές στα τόξα της νότιας και βόρειας όψης και απόκλιση από την κατακόρυφο 15mm. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι βλάβες στο δοκίμιο:



Σχήμα 2.13: Οριζόντιες ρωγμές στην ανατολική και δυτική όψη



Σχήμα 2.14: Αποκόλληση σταυροθολίου στη νότια και βόρεια όψη



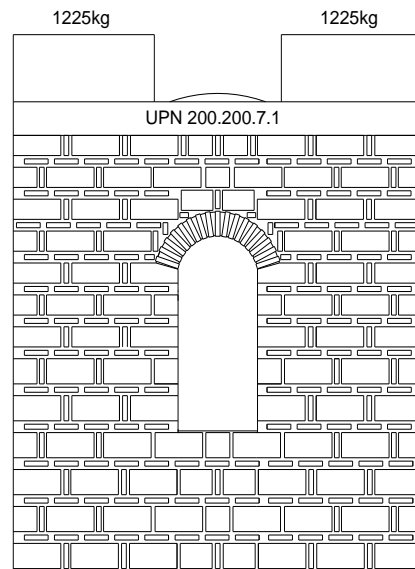
Σχήμα 2.15: Ρωγμές στο σταυροθόλιο εσωτερικά και εξωτερικά

2.3. Περιγραφή δοκιμίου II

Όταν ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές στο δοκίμιο I, αυτό επισκευάστηκε με τη χρήση τοπικών ενεμάτων για το κλείσιμο των ρωγμών και με τοποθέτηση μεταλλικών ελκυστήρων κατά την ασθενή διεύθυνση (Y). Το ενισχυμένο δοκίμιο ονομάζεται δοκίμιο II. Επιπλέον, στο δοκίμιο II τοποθετήθηκε πρόσθετη μάζα στους πεσσούς μέσω μεταλλικής κοιλοδοκού UPN 200.200.7.1. Σε κάθε πεσσοί τοποθετήθηκε πρόσθετη μάζα 2450kgr (συνολικά 2567kgr μαζί με το βάρος της δοκού).



(α)

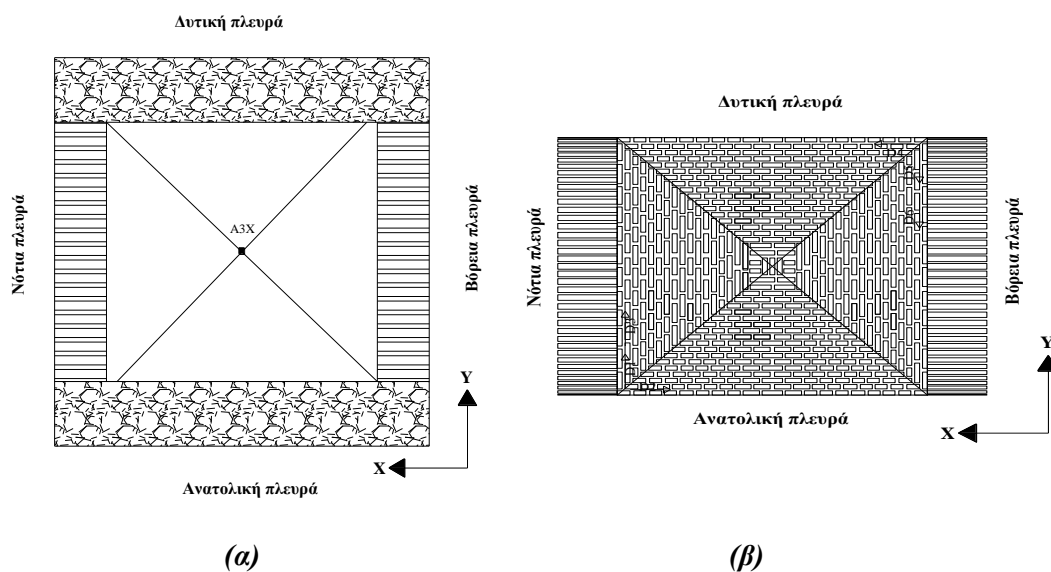


(β)

Σχήμα 2.16: (α) Δοκίμιο II, (β) Διάταξη πρόσθετης μάζας στην ανατολική και δυτική όψη

2.3.1. Μετρητική διάταξη

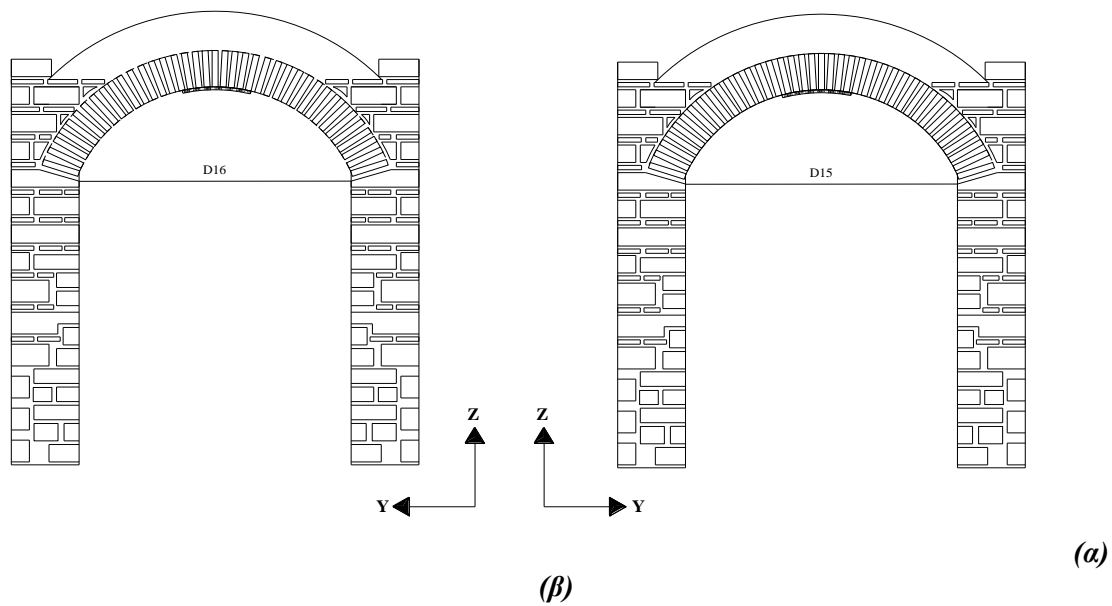
Οι θέσεις των οργάνων μέτρησης επιταχύνσεων και μετακινήσεων κατά τη διάρκεια των δοκιμών φαίνονται στα σχήματα 2.17-2.19:



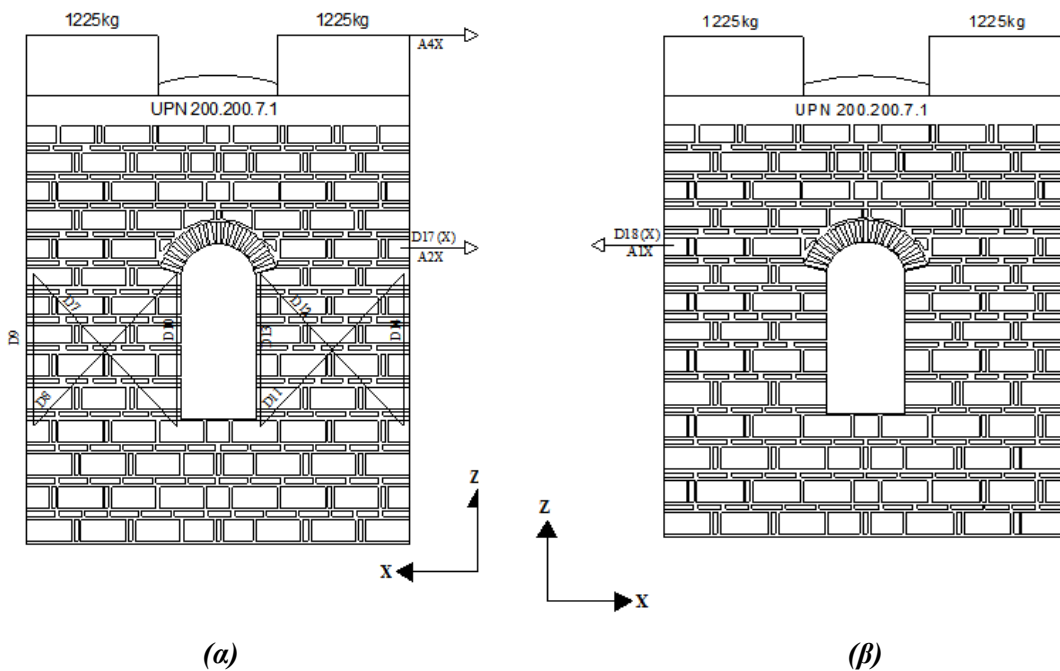
(α)

(β)

Σχήμα 2.17: (α) Κορυφή σταυροβολίου, (β) Άνοψη σταυροβολίου



Σχήμα 2.18: (α) Νότια όψη, (β) Βόρεια όψη



Σχήμα 2.19 (α) Εξωτερική ανατολική όψη, (β) Εξωτερική δυτική όψη

2.3.2 Δυναμικές δοκιμές

Το δοκίμιο αρχικά διεγέρθηκε από μια χρονοϊστορία λευκού θορύβου μόνο κατά τη διεύθυνση X, ώστε να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια διεγέρθηκε κατά τη διεύθυνση X με την E-W συνιστώσα του σεισμού Irpinia με κλιμακωτά αυξανόμενη ένταση. Συγκεντρωτικά, οι δοκιμές που εκτελέστηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός δοκιμής	Διεύθυνση διέγερσης	Περιγραφή διέγερσης
1	X	Διέγερση λευκού θορύβου
2	X	100% σεισμού Igrinia
3	X	150% σεισμού Igrinia
4	X	200% σεισμού Igrinia
5	X	250% σεισμού Igrinia
6	X	300% σεισμού Igrinia
7	X	350% σεισμού Igrinia
8	X	400% σεισμού Igrinia

Πίνακας 2.7: Σεισμικές δοκιμές δοκιμίου II

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάστηκε η δοκιμή 4.

2.3.3 Αποτελέσματα δοκιμών

2.3.3.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά

Από τις δοκιμές λευκού θορύβου προέκυψαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου:

Διεύθυνση	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Απόσβεση (%)
X	8,78	3,88

Πίνακας 2.8: Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμίου II

2.3.3.2 Καταγραφή μετακινήσεων και επιταχύνσεων

Οι καταγραφές μετακινήσεων και επιταχύνσεων για τις δοκιμές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4, όπου γίνεται η σύγκριση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

2.3.3.3 Καταγραφή ρωγμών

Μέχρι τη δοκιμή 4 (200% σεισμός Igrinia) δεν εμφανίστηκε καμία ρηγμάτωση. Οι πρώτες ρωγμές εμφανίστηκαν στο ύψος του τοξωτού παραθύρου της ανατολικής όψης κατά τη διάρκεια της δοκιμής 5. Καθώς αυξανόταν κλιμακωτά η ένταση της σεισμικής διέγερσης, παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές στο ύψος των τοξωτών παραθύρων της ανατολικής και δυτικής όψης, οι οποίες επεκτείνονταν σε όλο το μήκος και πάχος των πεσσών. Εμφανίστηκαν στις ίδιες όψεις και διαγώνιες ρωγμές που ακολουθούσαν τις διεπιφάνειες λιθοσώματος-κονιάματος. Τέλος, παρατηρήθηκαν και κάποιες ρωγμές στο τόξο της νότιας όψης.



Σχήμα 2.20: Ανατολική εξωτερική όψη



Σχήμα 2.21: Δυτική εξωτερική όψη



(α)

(β)

Σχήμα 2.22: (α) Ανατολική εσωτερική όψη, (β) Δυτική εσωτερική όψη

2.4 Περιγραφή δοκιμίου III

Όταν ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές στο δοκίμιο II, αυτό ενισχύθηκε με τη χρήση καθολικών υδραυλικών ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας. Το δοκίμιο αυτό ονομάστηκε δοκίμιο III.

Για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών της ενισχυμένης τοιχοποιίας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στους ρηγματωμένους τοιχίσκους 1 έως 6, που είχαν δοκιμαστεί σε θλίψη και διαγώνια θλίψη, προκειμένου να υπολογιστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας του δοκιμίου I. Για την ενίσχυση των δοκιμίων επιλέχθηκαν δύο τύποι ενεμάτων. Στα δοκίμια 2 και 4 εφαρμόστηκε το τριμελές ένεμα, ενώ στα υπόλοιπα χρησιμοποιήθηκε ένεμα τύπου NHL5. Τα δοκίμια 1,2 και 3 υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης, ενώ τα 4,5 και 6 σε διαγώνια θλίψη. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στον πίνακα 2.9:

Δοκίμιο	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)
1	3,00	1,20	-
2	3,75	1,55	-
3	3,73	1,30	-
4	-	-	0,21
5	-	-	0,33
6	-	-	0,22

Πίνακας 2.9: Μηχανικά χαρακτηριστικά ενισχυμένης τοιχοποιίας

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων προέκυψε ότι καταλληλότερο ήταν το ένεμα NHL5, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση του δοκιμίου. Η σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες αυτού του υδραυλικού ενέματος παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

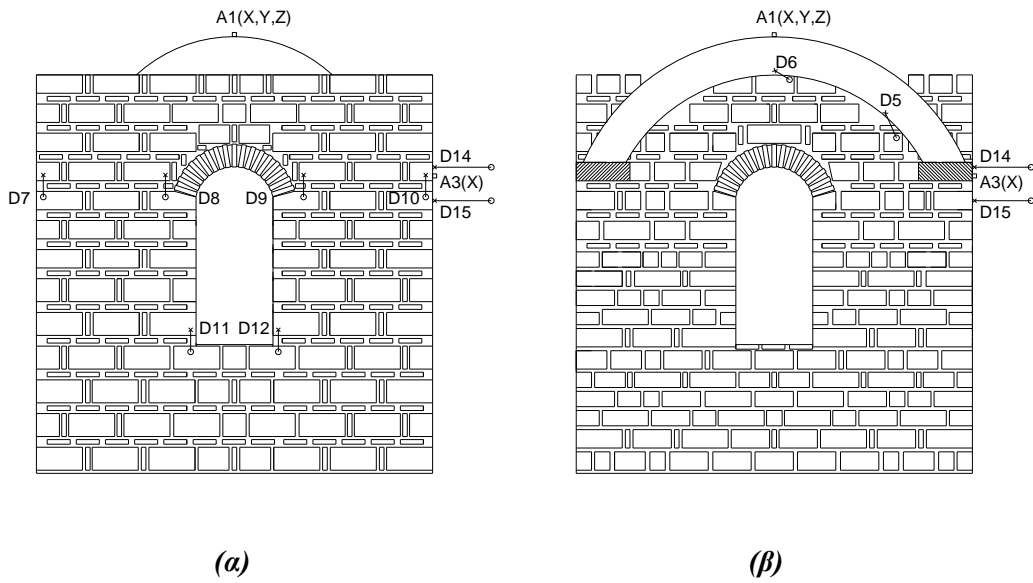
Αναλογία συστατικών (%)	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)
Lime		
100	4,5	2,5

Πίνακας 2.10: Μηχανικά χαρακτηριστικά υδραυλικού ενέματος NHL

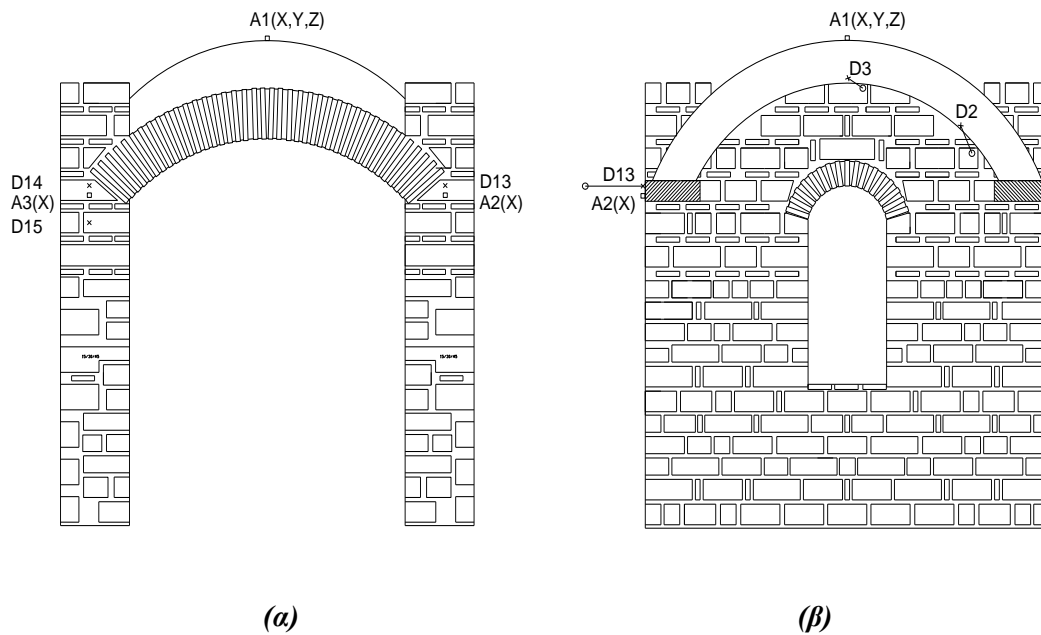
Η πειραματική διάταξη είναι ακριβώς ίδια με αυτή του δοκιμίου II.

2.4.1 Μετρητική διάταξη

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, τοποθετήθηκαν όργανα μετρήσεων ώστε να καταγραφούν οι επιταχύνσεις στην κορυφή του σταυροθολίου και στο ύψος των τοξοτών παραθύρων, απόλυτες μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση X και σχετικές μετακινήσεις σε κρίσιμες θέσεις του σταυροθολίου. Στα σχήματα 2.23-2.25 φαίνονται οι θέσεις των μετρήσεων:



Σχήμα 2.23: (α) Ανατολική εξωτερική όψη, (β) Ανατολική εσωτερική όψη



Σχήμα 2.24: (α) Βόρεια εξωτερική όψη, (β) Δυτική εσωτερική όψη

2.4.2 Δυναμικές δοκιμές

Το δοκίμιο αρχικά διεγέρθηκε από μια χρονοϊστορία λευκού θορύβου μόνο κατά τη διεύθυνση X, ώστε να προσδιοριστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια διεγέρθηκε κατά τη διεύθυνση X με την E-W συνιστώσα του σεισμού Irpinia με κλιμακωτά αυξανόμενη ένταση. Συγκεντρωτικά, οι δοκιμές που εκτελέστηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός δοκιμής	Διεύθυνση διέγερσης	Περιγραφή διέγερσης
1	X	Διέγερση λευκού θορύβου
2	X	100% σεισμού Igrinia
3	X	150% σεισμού Igrinia
4	X	200% σεισμού Igrinia
5	X	250% σεισμού Igrinia
6	X	300% σεισμού Igrinia
7	X	350% σεισμού Igrinia
8	X	400% σεισμού Igrinia
9	X	450% σεισμού Igrinia
10	X	500% σεισμού Igrinia
11	X	550% σεισμού Igrinia

Πίνακας 2.11: Σεισμικές δοκιμές δοκιμίου III

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάστηκαν η δοκιμή 2,3 και 6.

2.4.3 Αποτελέσματα δοκιμών

2.4.3.1 Δυναμικά χαρακτηριστικά

Για το δοκίμιο III υπολογίστηκε διαφορετική τιμή της ιδιοπεριόδου και της απόσβεσης σε κάθε δοκιμή, γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη ρωγμών καθώς υποβάλλεται σε σεισμικές δοκιμές αυξανόμενης έντασης. Στην ελαστική ανάλυση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία ελέγχθηκαν οι δοκιμές 2 (100% σεισμού Igrinia) ,3 (150% σεισμού Igrinia) και 6 (300% σεισμού Igrinia).

Δοκιμή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Απόσβεση (%)
2	9,50	10,8
3	9,20	14,7
6	8,50	21,2

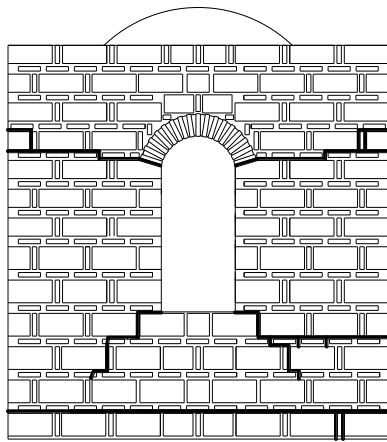
Πίνακας 2.12: Δυναμικά χαρακτηριστικά δοκιμίου III

2.4.3.2 Καταγραφή μετακινήσεων και επιταχύνσεων

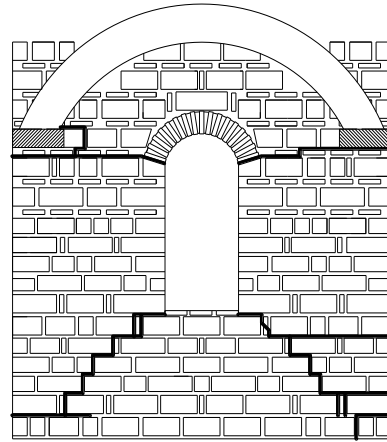
Οι καταγραφές μετακινήσεων και επιταχύνσεων για τις δοκιμές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4, όπου γίνεται η σύγκριση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

2.4.3.3 Καταγραφή ρωγμών

Το δοκίμιο δεν είχε παρουσιάσει ρηγμάτωση μέχρι και τη δοκιμή 7(350% σεισμού Igrinia). Οι πρώτες ρωγμές εμφανίστηκαν στο ύψος των τοξωτών παραθύρων της ανατολικής όψης κατά τη διάρκεια της δοκιμής 8(400% σεισμού Igrinia). Καθώς, αυξανόταν η ένταση της σεισμικής διέγερσης εμφανίστηκαν ρωγμές στο ύψος των τοξωτών παραθύρων της ανατολική και δυτικής όψης, εκτεινόμενες σε όλο το μήκος και πάχος των πεσσών, διαγώνιες ρωγμές στην ανατολική και νότια όψη, ρωγμές στο σταυροθόλιο και στο τόξο της νότιας όψης. Στα σχήματα 2.23-2.26 παρουσιάζονται οι θέσεις των ρηγματώσεων.

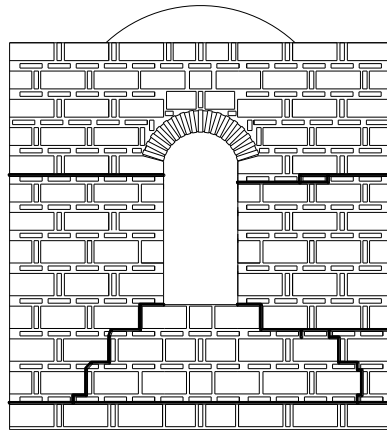


(α)

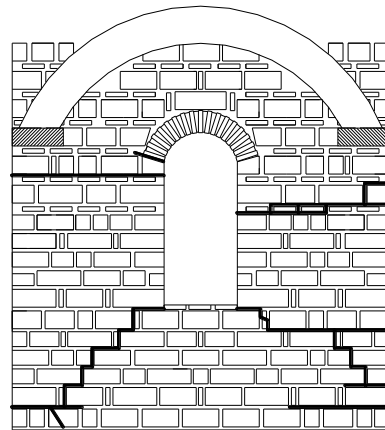


(β)

Σχήμα 2.25: (α) Ανατολική εξωτερική όψη, (β) Ανατολική εσωτερική όψη



(α)



(β)

Σχήμα 2.26: (α) Δυτική εξωτερική όψη, (β) Δυτική εσωτερική όψη



(α)



(β)

Σχήμα 2.27: (α) Ανατολική εσωτερική όψη, (β) Δυτική εξωτερική όψη



(α)



(β)

Σχήμα 2.28: (α) Νότια όψη, (β) Άνοψη σταυροθολίου

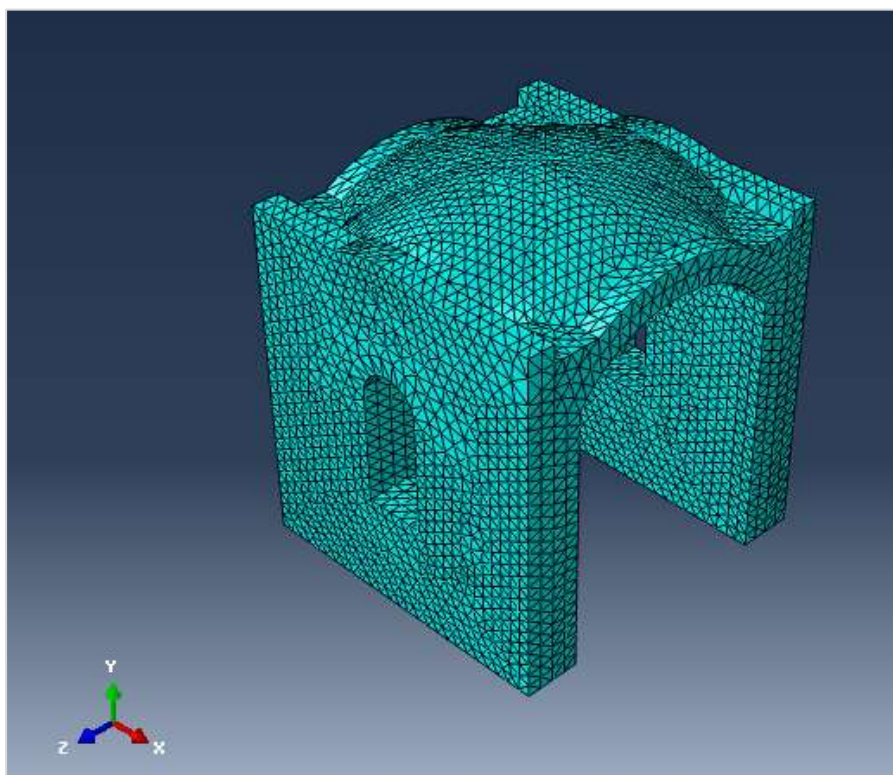
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

3.1 Περιγραφή μοντέλου δοκιμίου I

Η προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής έγινε με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.11. Αρχικά, προσομοιώθηκε το δοκίμιο του σταυροθολίου στην αρχική του μορφή, δηλαδή πριν τις ενισχύσεις (Δοκίμιο I). Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα του μοντέλου, έγινε προσπάθεια προσέγγισης των ιδιοσυχνοτήτων κατά τις διευθύνσεις X και Y όπως αυτές είχαν υπολογιστεί πειραματικά.

Η γεωμετρία του φορέα προσομοιώθηκε με χρήση τρισδιάστατων στοιχείων. Η διακριτοποίηση του φορέα (*mesh*) έγινε με τη χρήση τρισδιάστατων γραμμικών τετράεδρων στοιχείων, καθένα από τα οποία αποτελείται από 4 κόμβους (*tet elements*). Η μέση διάσταση που επιλέχθηκε για τη διακριτοποίηση της κατασκευής ήταν 0,10m.



Σχήμα 3.1: Διακριτοποίηση μοντέλου δοκιμίου I στο Abaqus

Σημειώνεται ότι η διεύθυνση X του μοντέλου ταυτίζεται με την διεύθυνση X της σεισμικής τράπεζας, ενώ η διεύθυνση Z του μοντέλου αντιστοιχεί στη διεύθυνση Y. Στο κείμενο που ακολουθεί θα ονομάζεται ως άξονας Y ο άξονας Z του μοντέλου, ενώ ως κατακόρυφος άξονας θα θεωρείται ο άξονας Z.

3.1.1 Επιλογή μηχανικών χαρακτηριστικών μοντέλου

Για το προσομοίωμα επιλέχθηκαν δύο τύποι υλικών:

- Τρίστρωτη τοιχοποιία από τραβερτίνη με την οποία προσομοιώθηκαν οι κατακόρυφοι τοίχοι
- Οπτοπλινθοδομή με την οποία προσομοιώθηκαν το σταυροθόλιο, τα τόξα κατά τη διεύθυνση Z, καθώς και τα τόξα των ανοιγμάτων στους τοίχους

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μετά από πειραματική διερεύνηση προέκυψαν για την τοιχοποιία από τραβερτίνη οι εξής τιμές μέτρου ελαστικότητας: 1GPa, 1,3GPa και 1,41GPa στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η τοιχοποιία είναι ένα ανισότροπο υλικό του οποίου το μέτρο ελαστικότητας είναι δύσκολο να υπολογιστεί σε όλες τις διευθύνσεις. Ωστόσο, στους υπολογισμούς που ακολουθούν έγινε η θεώρηση ενός ισότροπου ελαστικού υλικού με μέτρο ελαστικότητας $E=1\text{GPa}$ (δυσμενέστερη τιμή).

Για την οπτοπλινθοδομή του σταυροθολίου προέκυψε πειραματικά $E\approx 0,8\text{GPa}$, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στο προσομοίωμα.

Η τιμή του λόγου Poisson και για τα δύο υλικά επιλέχθηκε ίση με 0,2. Η πυκνότητα των υλικών επιλέχθηκε $1,9\text{Mgr/m}^3$ και $1,8\text{Mgr/m}^3$ για την τοιχοποιία από τραβερτίνη και τούβλο αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των ελαστικών ιδιοτήτων των υλικών του μοντέλου:

Υλικό	E (GPa)	ν	ρ (Mgr/m³)
<i>Τρίστρωτη τοιχοποιία</i>	1,0	0,2	1,9
<i>Οπτοπλινθοδομή</i>	0,8	0,2	1,8

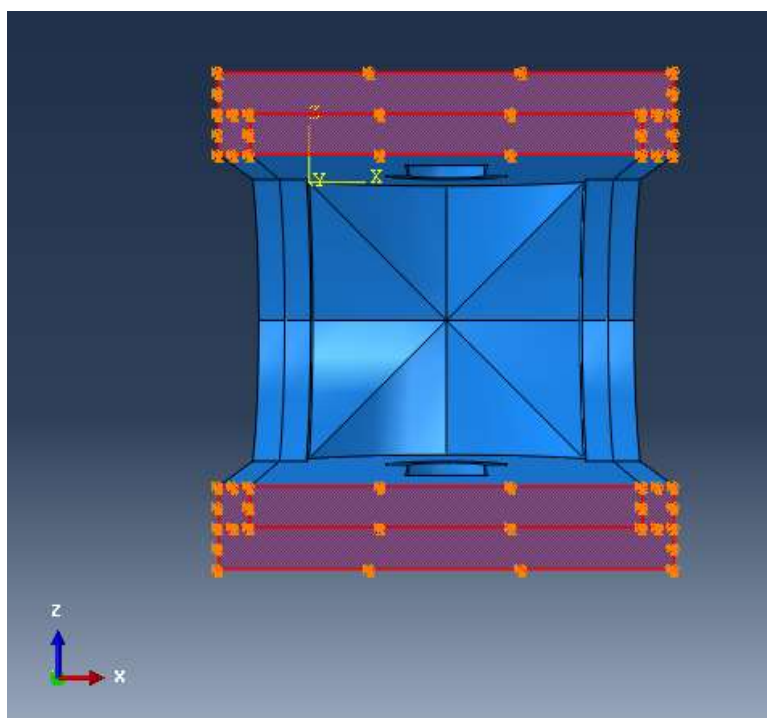
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες υλικών δοκιμίου I

3.1.2 Διαδικασία επιλογής τελικού μοντέλου προσομοίωσης

Ένας τρόπος για να θεωρηθεί αξιόπιστη η προσομοίωση της κατασκευής στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι ο έλεγχος των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων στις διευθύνσεις X και Y. Έγινε, επομένως, προσπάθεια να προσεγγιστούν οι τιμές ιδιοσυχνοτήτων του δοκιμίου I που είχαν προκύψει πειραματικά:

$$f_x=11,80\text{Hz και } f_y=5,50\text{Hz}$$

A) Αρχικά υπολογίστηκαν οι ιδιοσυχνότητες του μοντέλου που περιγράφηκε παραπάνω, θεωρώντας ότι η βάση του είναι πακτωμένη (θεωρήθηκαν δεσμευμένες μετακινήσεις και στις 3 διευθύνσεις).

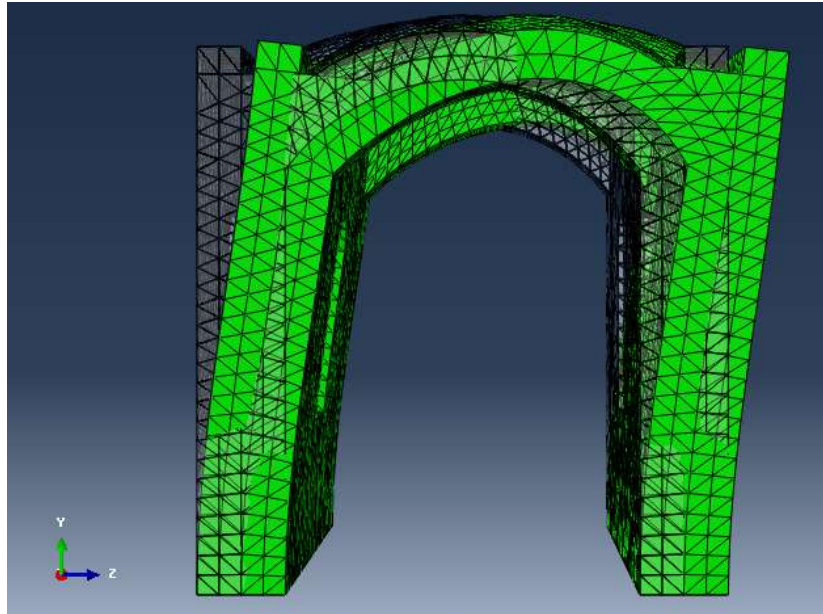


Σχήμα 3.2: Συνθήκες στήριξης προσομοιώματος

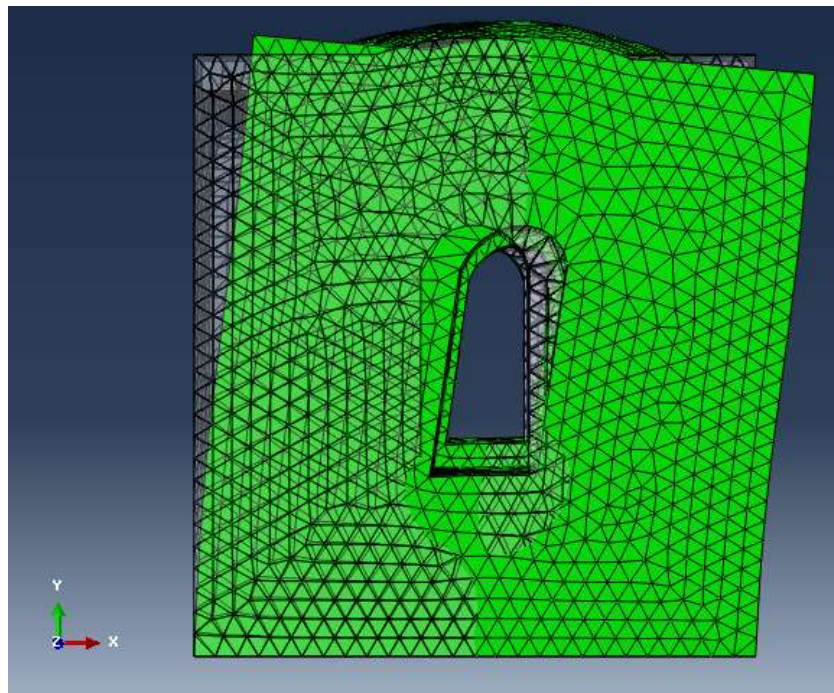
Υπολογίστηκαν οι 20 πρώτες ιδιομορφές του φορέα. Η μεγαλύτερη δρώσα μάζα κατά X συναντάται στην 3^η ιδιομορφή και κατά Y στην 1^η. Οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που υπολογίστηκαν ήταν:

$$f_x=18,12\text{Hz και } f_y=7,24\text{Hz}$$

δηλαδή αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο είναι πιο δύσκαμπτο από την πραγματική κατασκευή.

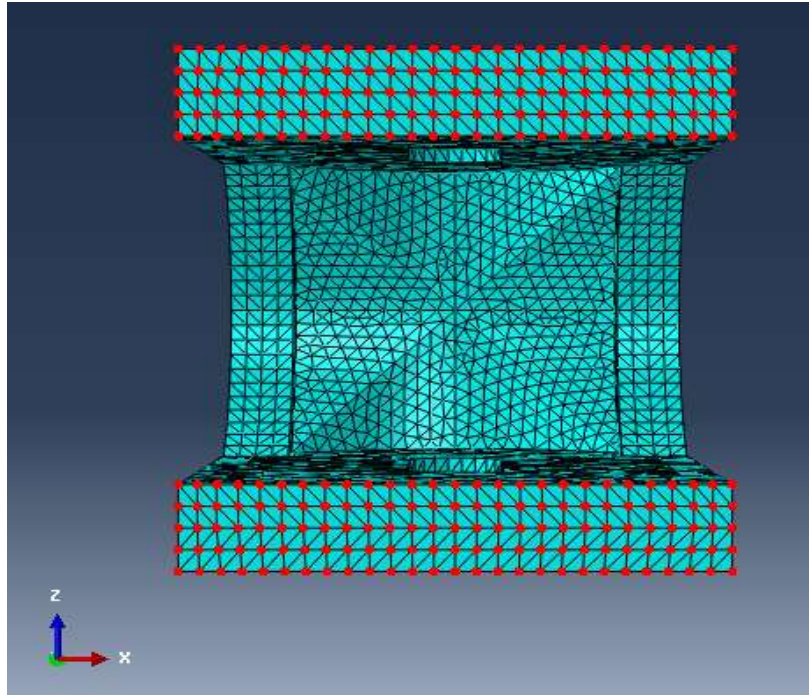


Σχήμα 3.3: 1^η ιδιομορφή – $f_y=7,24\text{Hz}$



Σχήμα 3.4: 3^η ιδιομορφή – $f_x=18,12\text{Hz}$

B) Στη συνέχεια ελευθερώθηκε η κατακόρυφη μετακίνηση στη βάση του μοντέλου και προστέθηκαν κατακόρυφα ελατήρια (*springs connecting points to ground*) στις θέσεις όπου υπάρχουν κόμβοι. Η δυσκαμψία των κατακόρυφων ελατηρίων επιλέχθηκε ώστε να επιτευχθεί η ιδιοσυχνότητα $f_x=11,80\text{Hz}$.

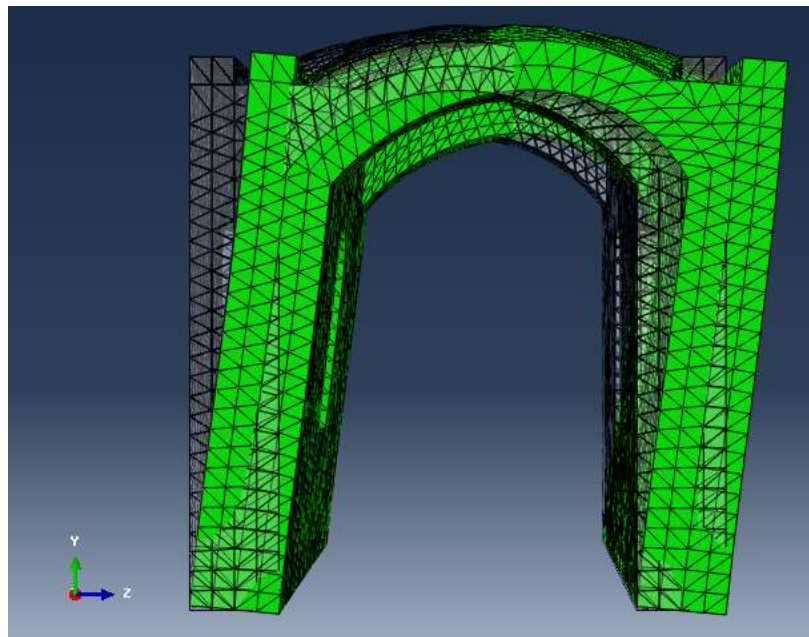


Σχήμα 3.5: Θέσεις κατακόρυφων ελατηρίων στη βάση του σταυροθολίου

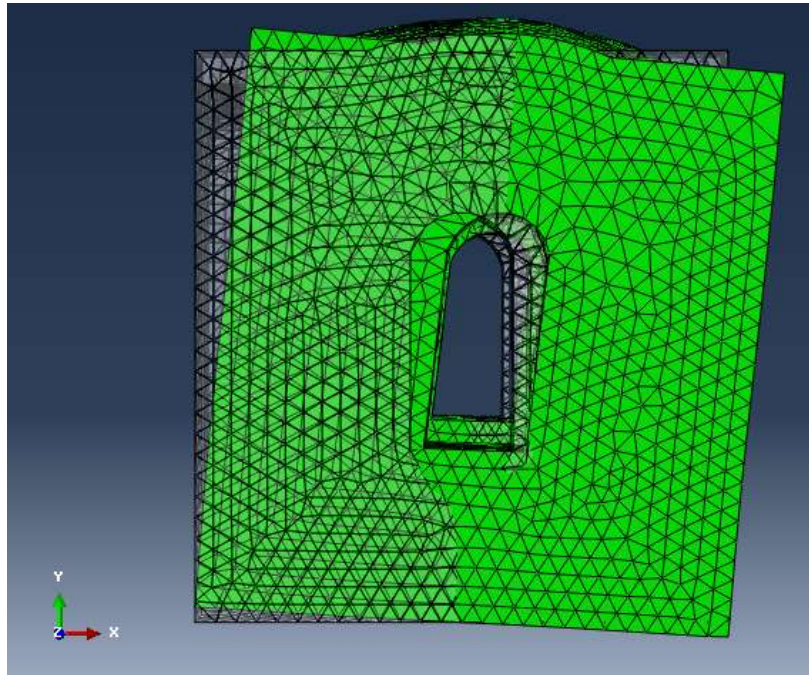
Για δυσκαμψία κατακόρυφων ελατηρίων $K_z=3300\text{kN/m}$ οι ιδιοσυχνότητες υπολογίστηκαν:

$$f_x=11,76\text{Hz και } f_y=4,51\text{Hz}$$

Επομένως, αν και στη διεύθυνση X η ιδιοσυχνότητα σχεδόν ταυτίζεται με την πραγματική, στη διεύθυνση Y το μοντέλο είναι πιο εύκαμπτο.



Σχήμα 3.6: 1^η ιδιομορφή – $f_y=4,51\text{Hz}$



Σχήμα 3.7: 2^η ιδιομορφή – $f_x=11,76\text{Hz}$

Γ) Έπειτα αντικαταστάθηκαν και οι οριζόντιες δεσμεύσεις στη βάση του δοκιμίου με ελατήρια. Τα μέτρα δυσκαμψίας των ελατηρίων και στις τρεις διευθύνσεις επιλέχθηκαν ώστε να προκύψουν περίπου οι ίδιες ιδιοσυχνότητες με αυτές του πειράματος. Οι τιμές που επιλέχθηκαν τελικά ήταν:

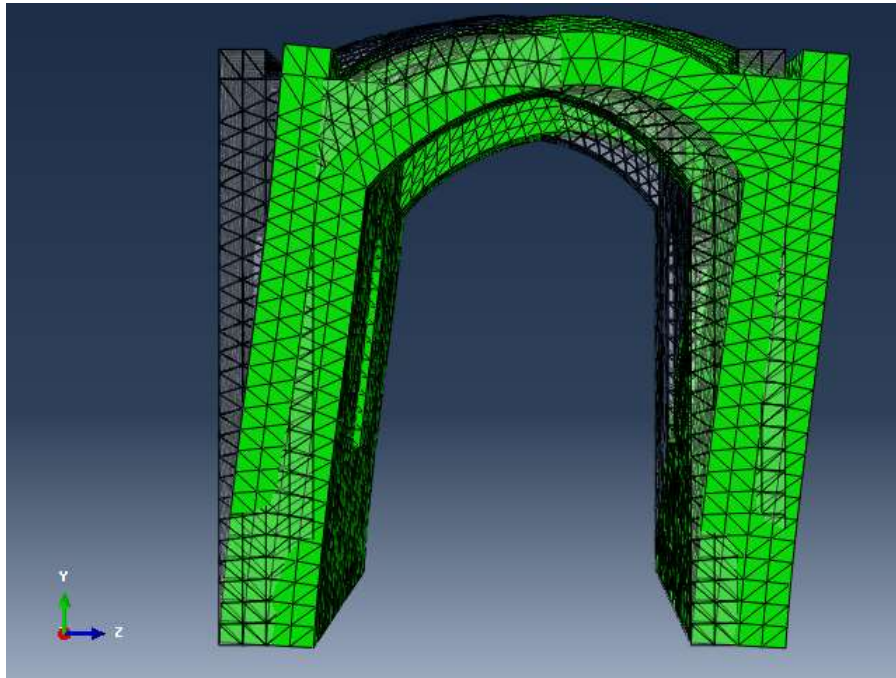
K_x (kN/m)	K_z (kN/m)	K_y (kN/m)
650	9300	10000

Πίνακας 3.2: Τιμές ελατηρίων στη βάση του μοντέλου

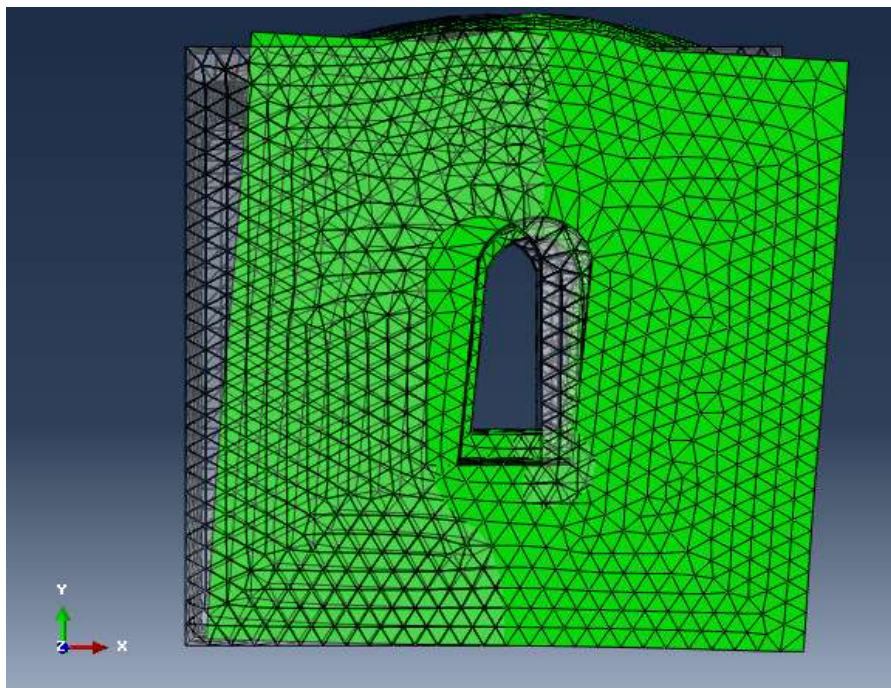
Σε αυτήν την περίπτωση οι ιδιοσυχνότητες προέκυψαν ως εξής:

$$f_x=11,76\text{Hz} \text{ και } f_y=5,54\text{Hz}$$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται η 1^η και 2^η ιδιομορφή κατά Z και X αντίστοιχα.



Σχήμα 3.8: 1^η ιδιομορφή – $f_y=5,54\text{Hz}$



Σχήμα 3.9: 2^η ιδιομορφή – $f_x=11,76\text{Hz}$

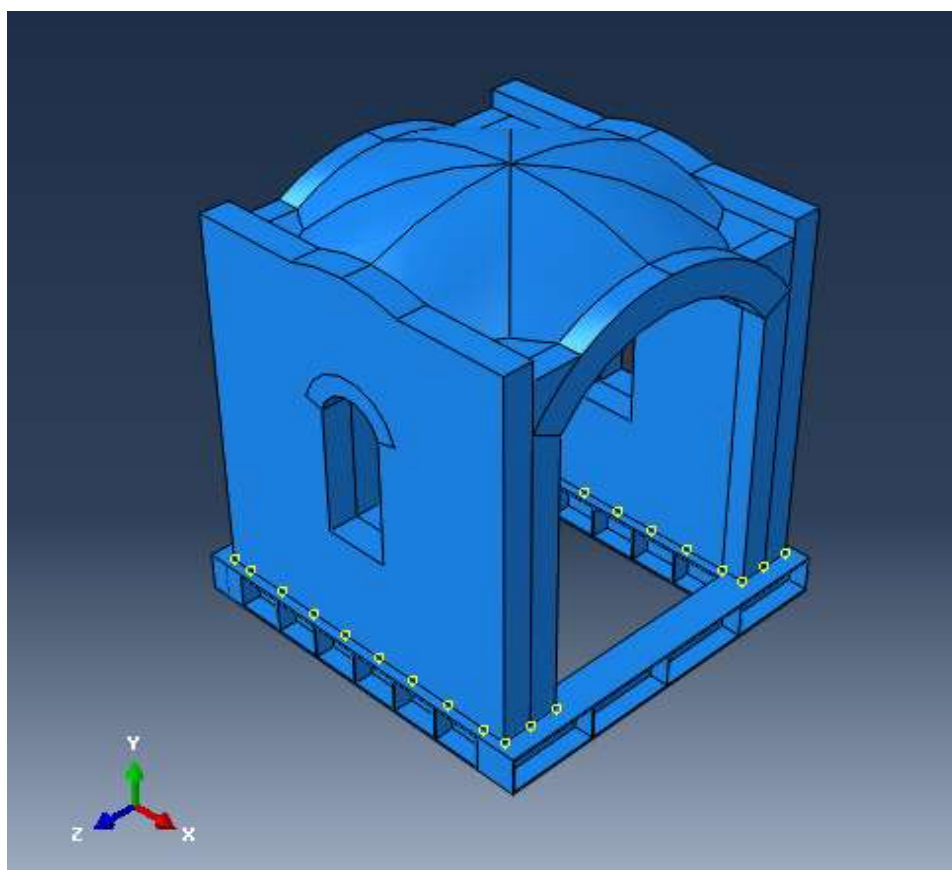
Δ) Κατά τη διάρκεια του πειράματος το δοκίμιο ήταν τοποθετημένο πάνω σε μια μεταλλική βάση, η οποία είχε στερεωθεί στη σεισμική τράπεζα. Η βάση αποτελούνταν από χαλύβδινες δοκούς διατομής HEB300 και ήταν συνδεδεμένη με το δοκίμιο μέσω ήλων τοποθετημένων ανά 30cm περίπου. Προσομοιώθηκε, επομένως, η μεταλλική βάση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και θεωρήθηκε ότι συνδέεται με το μοντέλο του σταυροθολίου σε σημεία κόμβων με απόσταση περίπου 30cm. Η μεταλλική βάση θεωρήθηκε πλήρως πακτωμένη στο έδαφος.

Οι ιδιότητες του χάλυβα της μεταλλικής βάσης είναι:

Υλικό	E (GPa)	ν	ρ (Mg/m ³)
Χάλυβας	210	0,25	7,8

Πίνακας 3.3: Τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών χάλυβα

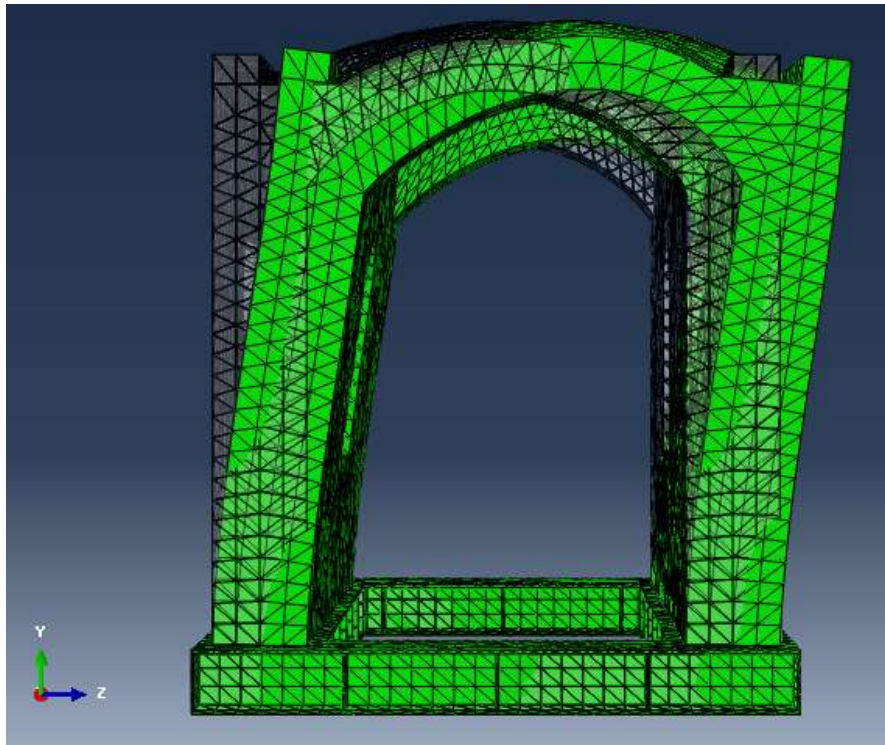
Στο σχήμα 3.10 φαίνεται το τελικό μοντέλο που περιλαμβάνει τη μεταλλική βάση καθώς και τα σημεία σύνδεσής της με το δοκίμιο.



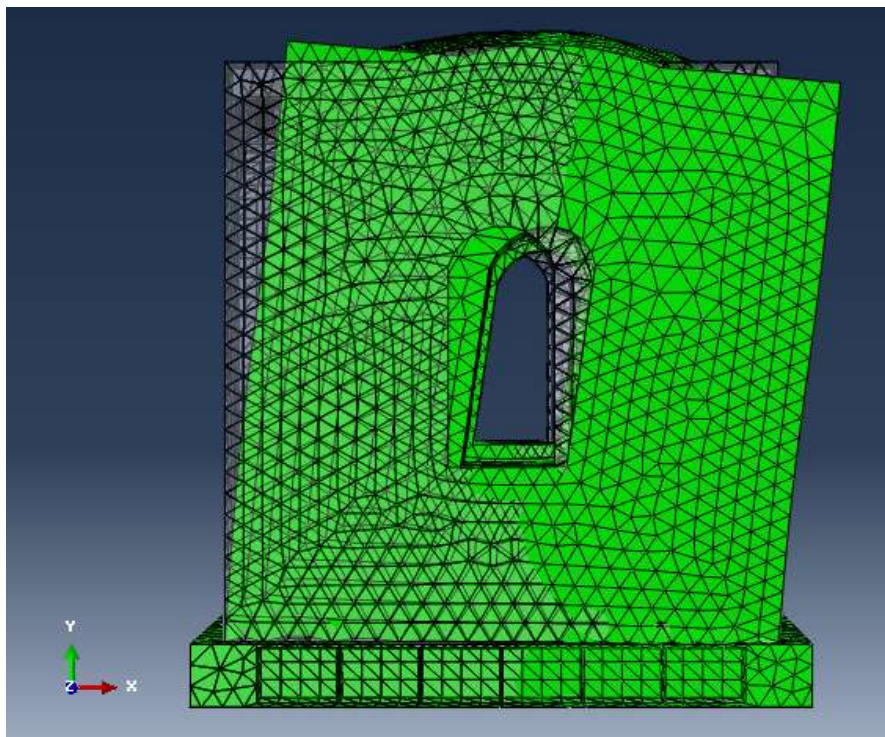
Σχήμα 3.10: Προσομοίωμα σταυροθολίου και μεταλλικής βάσης

Σε αυτήν την περίπτωση οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν ήταν:

$$f_x=15,78\text{Hz και } f_y=6,41\text{Hz}$$

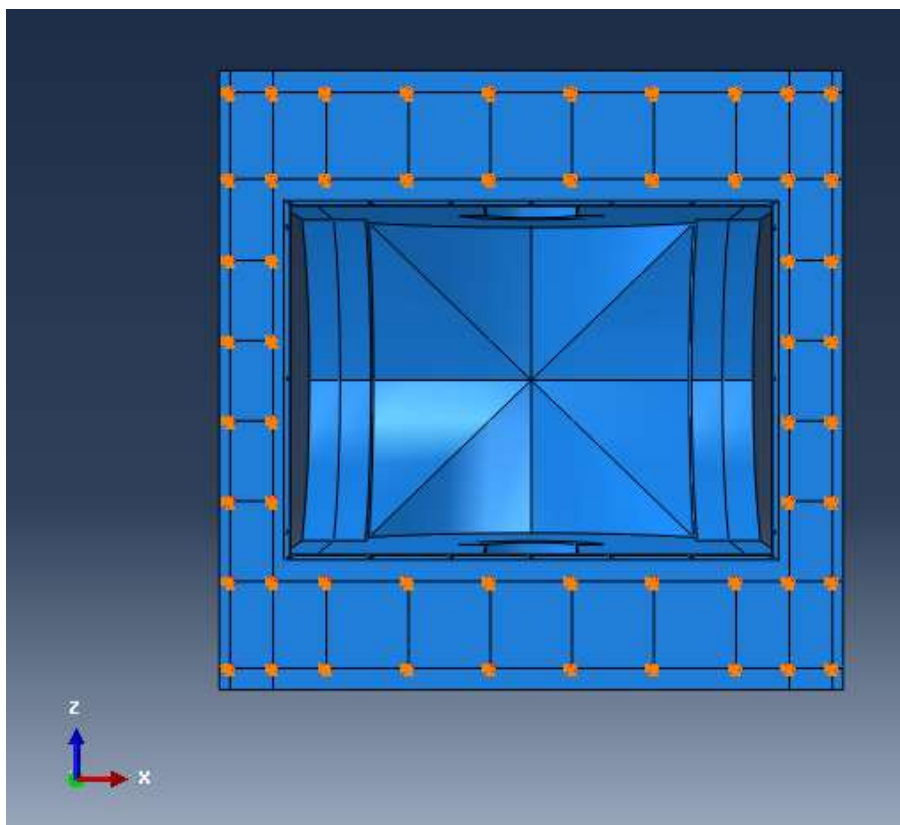


Σχήμα 3.11: 1^η ιδιομορφή – $f_y=6,41\text{Hz}$



Σχήμα 3.12: 2^η ιδιομορφή – $f_x=15,78\text{Hz}$

Ε) Η μεταλλική βάση ήταν συνδεδεμένη με τον σεισμικό προσομοιωτήρα μέσω κοχλιών M30 ποιότητας 8.8 τοποθετημένων ανά ορισμένη απόσταση. Προκειμένου, λοιπόν, να προσομοιωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνθήκες στήριξης του δοκιμίου, θεωρήθηκε ότι η βάση δεν είναι πακτωμένη στο σύνολο της, αλλά δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις μόνο στα σημεία των ηλώσεων. Τα σημεία αυτά φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.13: Θέσεις πάκτωσης μεταλλικής βάσης στο σεισμικό προσομοιωτήρα

Για αυτές τις συνθήκες στήριξης οι ιδιοσυχνότητες προέκυψαν:

$$f_x=15,77\text{Hz και } f_y=6,4\text{Hz}$$

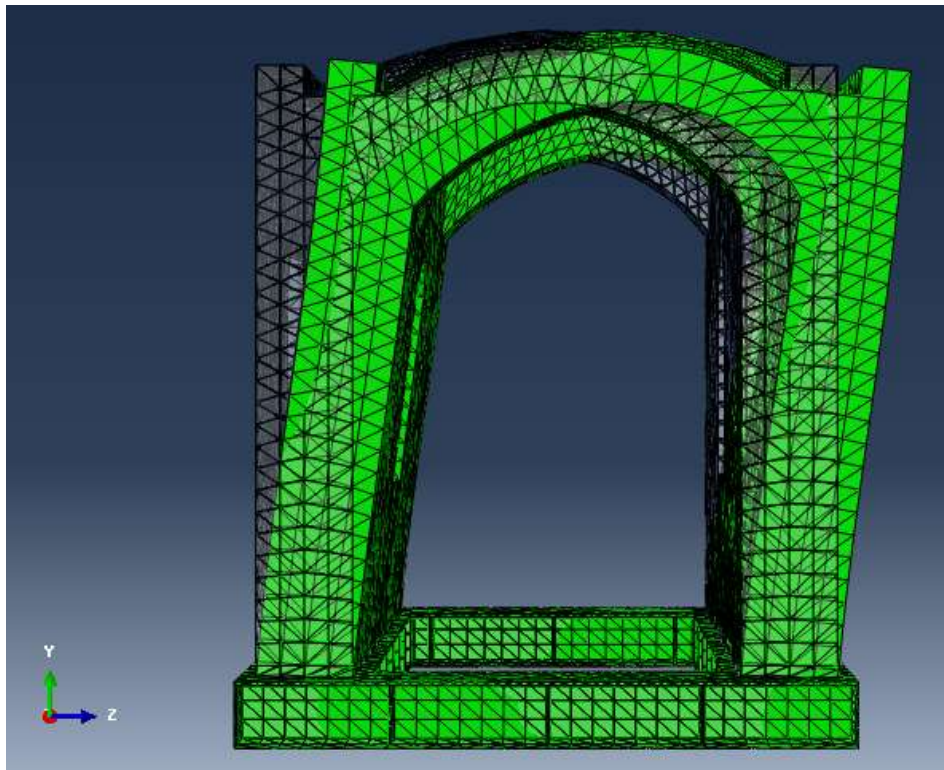
Επομένως, η επιρροή της σημειακής πάκτωσης της βάσης στις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων ήταν αμελητέα.

ΣΤ) Τέλος, προσομοιώθηκε η στρώση κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση του δοκιμίου στη μεταλλική βάση. Η στρώση αυτή θεωρήθηκε ότι έχει πάχος περίπου 5cm και μέτρο ελαστικότητας τέτοιο ώστε να προκύψουν οι ζητούμενες τιμές ιδιοσυχνοτήτων.

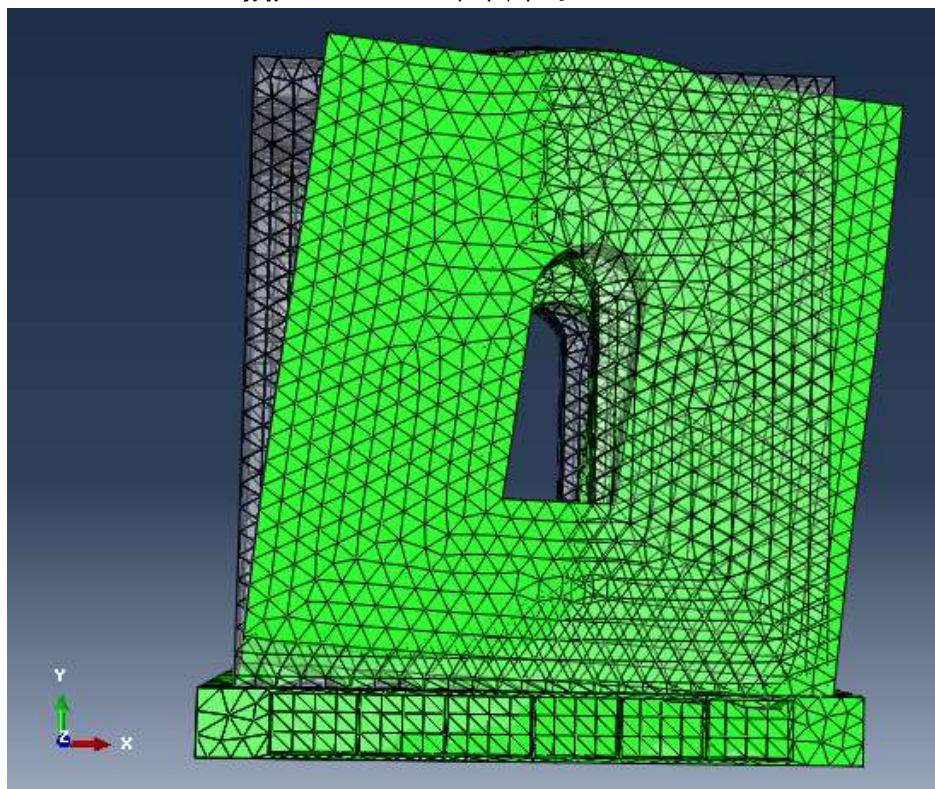
Τελικά για μέτρο ελαστικότητας κονιάματος $E=155\text{MPa}$, οι ιδιοσυχνότητες προσέγγισαν αρκετά τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές:

$$f_x=11,87\text{Hz και } f_y=5,28\text{Hz}$$

Επομένως, το δοκίμιο I, θεωρήθηκε ότι συνδέεται με ηλώσεις με τη μεταλλική βάση, αλλά και με μια «μαλακή» στρώση κονιάματος μέτρου ελαστικότητας 155MPa, ενώ η μεταλλική βάση θεωρήθηκε πακτωμένη στο σεισμικό προσομοιωτήρα στα σημεία ηλώσεων.



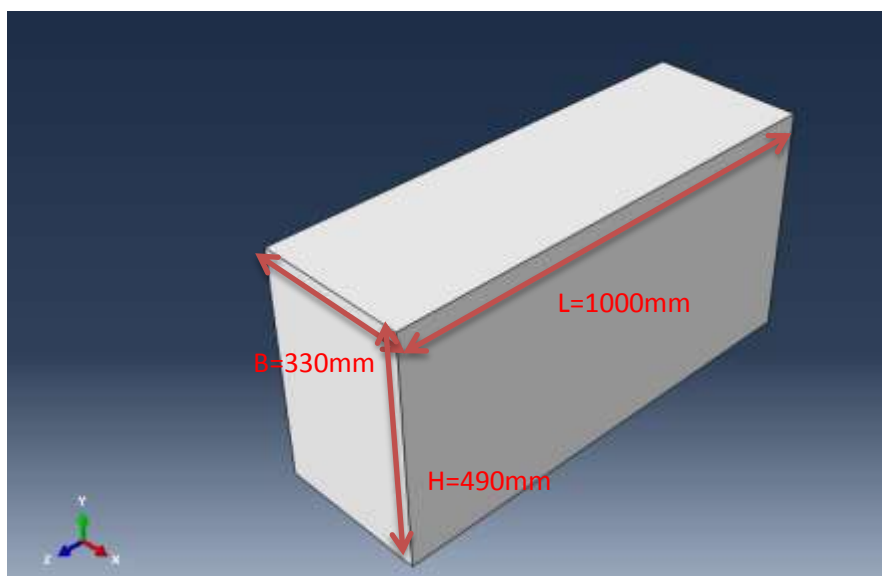
Σχήμα 3.14: 1^η ιδιομορφή – $f_Y=5,28\text{Hz}$



Σχήμα 3.15: 2^η ιδιομορφή – $f_X=11,87\text{Hz}$

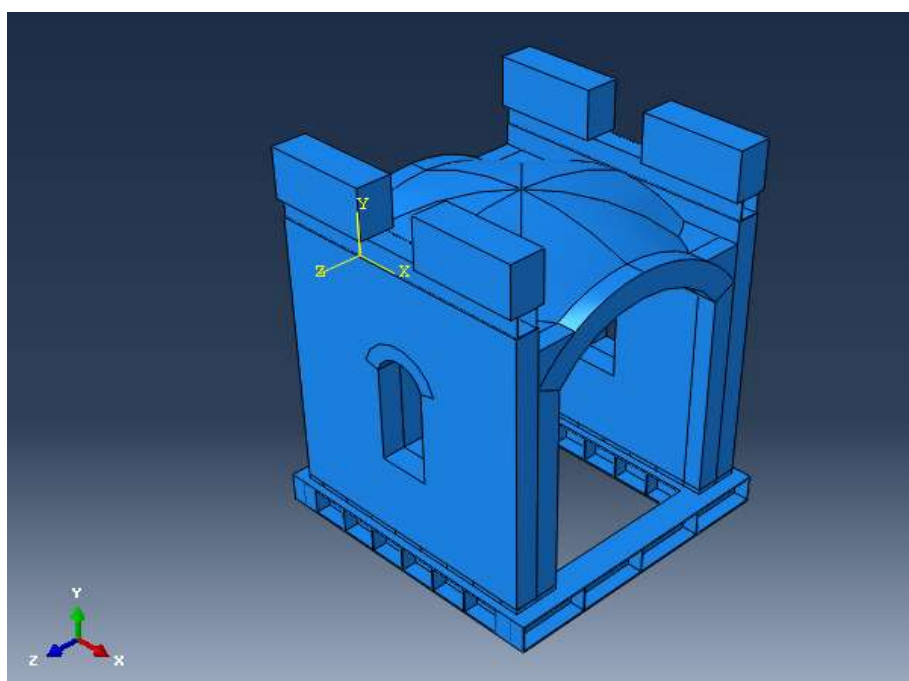
3.2 Περιγραφή μοντέλου δοκιμίου II

Για να προσομοιωθεί το ενισχυμένο δοκίμιο II, προστέθηκαν στο μοντέλο του δοκιμίου I οι πρόσθετες μάζες στους πεσσούς της ανατολικής και δυτικής όψης, καθώς και οι κοιλοδοκοί πάνω στις οποίες στηρίχθηκαν. Οι κοιλοδοκοί έχουν διατομή UPN200.200.7.1. Κάθε μια από τις τέσσερις μάζες είναι 1225kg και έχει διαστάσεις όπως φαίνονται στο σχήμα 3.16:



Σχήμα 3.16: Διαστάσεις πρόσθετης μάζας 1225kg

Οι κοιλοδοκοί πάνω στις οποίες στηρίζονται οι μάζες, συνδέθηκαν με τον άνω μέρος των πεσσών και η τελική γεωμετρία του δοκιμίου II στο Abaqus παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.17: Προσομοίωμα δοκιμίου II

3.2.1 Επιλογή μηχανικών χαρακτηριστικών μοντέλου

Επειδή ο πειραματικός προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών του προσομοιώματος μετά την τοπική εφαρμογή των υδραυλικών ενεμάτων, δεν ήταν εφικτός, η επιλογή του μέτρου ελαστικότητας έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η ιδιοσυχνότητα του μοντέλου να συμπίπτει με αυτήν που είχε υπολογιστεί με τη δοκιμή λευκού θορύβου, δηλαδή $f_x=8,78\text{Hz}$.

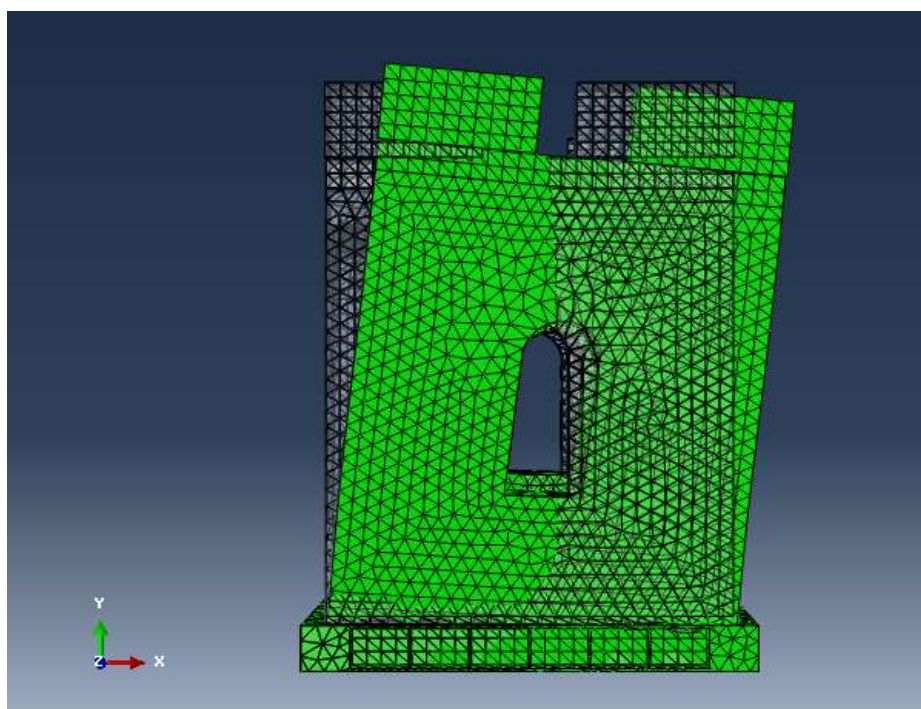
Θεωρήθηκε ότι η πυκνότητα της τοιχοποιίας και του σταυροθολίου δεν αυξήθηκε λόγω των τοπικών ενεμάτων, ενώ η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας θεωρήθηκε ίση με το 10% της αντίστοιχης τιμής. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι αυξήθηκε και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης του κονιάματος στη βάση του δοκιμίου. Για την πρόσθετη μάζα και την κοιλοδοκό επιλέχθηκε ως υλικό ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε και στη βάση, και έχει περιγραφεί στον πίνακα 3.3. Οι τιμές που επιλέχθηκαν, τελικά, για το προσομοίωμα του δοκιμίου II φαίνονται στον πίνακα 3.4:

Υλικό	E (GPa)	ν	ρ (Mgr/m ³)
Τρίστρωτη τοιχοποιία	1,100	0,2	1,9
Οπτοπλινθοδομή	0,880	0,2	1,8
Κονίαμα βάσης	0,195	0,2	1,9

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες υλικών δοκιμίου II

Για τις παραπάνω τιμές υπολογίστηκαν οι 20 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής. Στη δεύτερη ιδιομορφή συναντάται η μεγαλύτερη δρώσα μάζα κατά X και η ιδιοσυχνότητα που υπολογίστηκε ήταν:

$$f_x=8,77\text{Hz}$$



Σχήμα 3.18: 2^η ιδιομορφή – $f_x=8,77\text{Hz}$

3.3 Περιγραφή μοντέλου δοκιμίου III

3.3.1 Επιλογή μηχανικών χαρακτηριστικών μοντέλου

Στο δοκίμιο III η γεωμετρία του προσομοιώματος παρέμεινε όπως στο δοκίμιο II. Ωστόσο, μετά την εφαρμογή των καθολικών υδραυλικών ενεμάτων στο δοκίμιο, οι μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας, του σταυροθολίου και του κονιάματος σύνδεσης του δοκιμίου με τη βάση μεταβλήθηκαν. Η επιλογή του μέτρου ελαστικότητας έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η ιδιοσυχνότητα του μοντέλου να συμπίπτει με αυτήν που είχε υπολογιστεί για το δοκίμιο σε κάθε μια από τις δοκιμές 2,3 και 6.

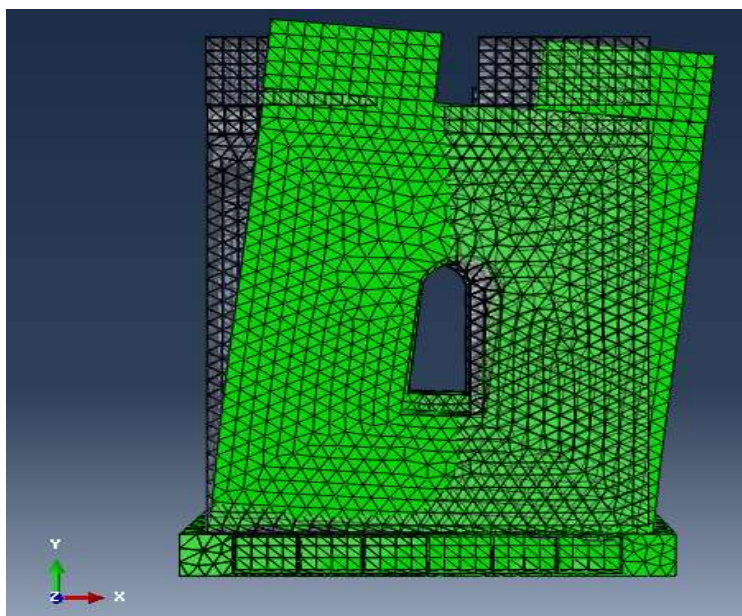
Λόγω της εφαρμογής ενεμάτων στο σύνολο της κατασκευής, η πυκνότητα της τοιχοποιίας και του σταυροθολίου θεωρήθηκε ότι αυξήθηκε κατά 0,1Mgr.. Οι τιμές που επιλέχθηκαν, τελικά, για το προσομοίωμα του δοκιμίου III φαίνονται στον πίνακα 3.5:

Υλικό	E (GPa)			ν	ρ (Mgr/m ³)
	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 6		
Τρίστρωτη τοιχοποιία	1,400	1,300	1,100	0,2	2,0
Οπτοπλινθοδομή	1,100	1,000	0,900	0,2	1,9
Κονίαμα βάσης	0,225	0,215	0,190	0,2	2,0

Πίνακας 3.5: Ιδιότητες υλικών δοκιμίου III

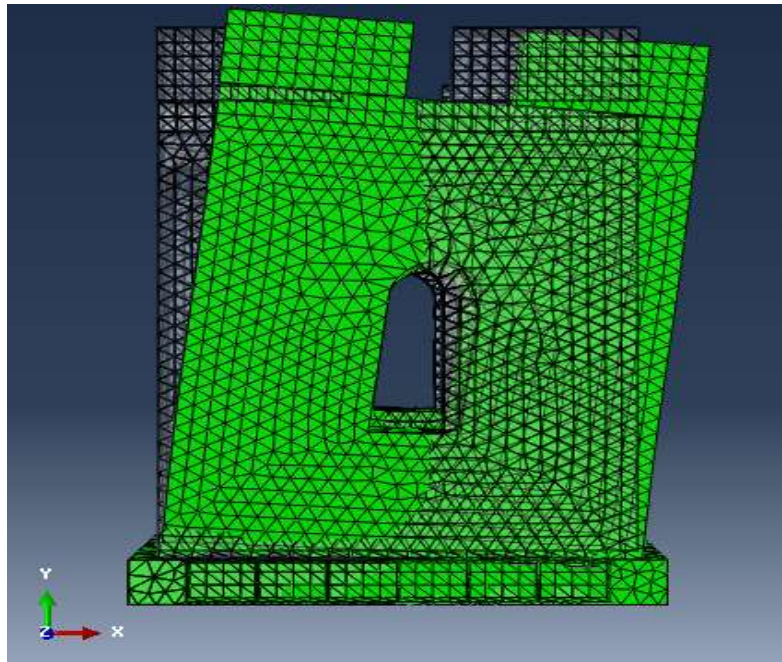
Για τις παραπάνω τιμές υπολογίστηκαν οι 20 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής. Στη δεύτερη ιδιομορφή συναντάται η μεγαλύτερη δρώσα μάζα κατά X και η ιδιοσυχνότητα για κάθε δοκιμή που υπολογίστηκε ήταν:

- Για τη δοκιμή 2: $f_x=9,50\text{Hz}$



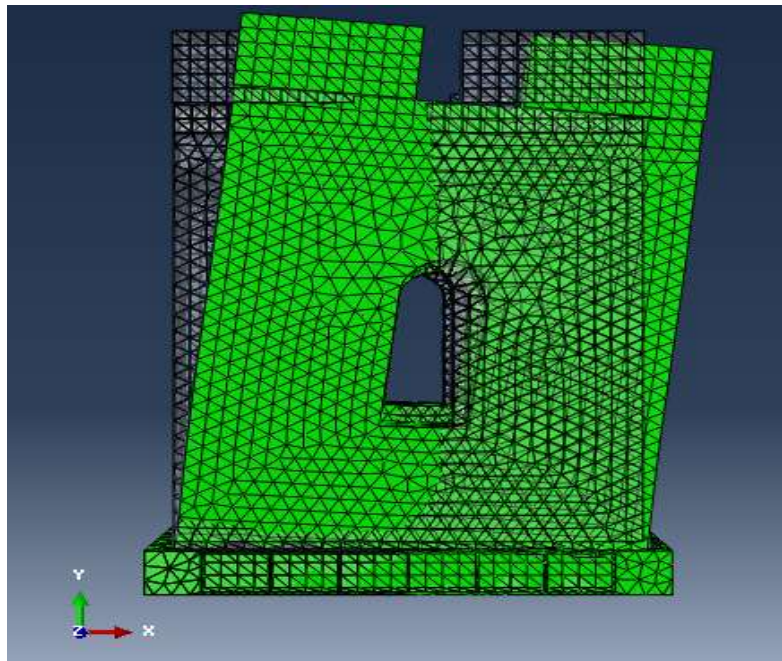
Σχήμα 3.19: 2^η ιδιομορφή – $f_x=9,50\text{Hz}$

- Για τη δοκιμή 3: $f_x=9,23\text{Hz}$



Σχήμα 3.20: 2^η ιδιομορφή – $f_x=9,23\text{Hz}$

- Για τη δοκιμή 6: $f_x=8,54\text{Hz}$



Σχήμα 3.21: 2^η ιδιομορφή – $f_x=8,54\text{Hz}$

Συνοπτικά οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο, καθώς και οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των αποσβέσεων, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6 και 3.7 αντίστοιχα:

		Δοκίμιο I	Δοκίμιο II	Δοκίμιο III		
				Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4
<i>Τρίστρωτη τοιχοποιία</i>	E(GPa)	1,0	1,1	1,4	1,3	1,1
	$\rho(\text{Mgr/m}^3)$	1,9	1,9	2,0		
	ν	0,2				
<i>Οπτοπλινθοδομή</i>	E(GPa)	0,8	0,88	1,1	1,0	0,9
	$\rho(\text{Mgr/m}^3)$	1,8	1,8	1,9		
	ν	0,2				
<i>Κονίαμα βάσης</i>	E(GPa)	0,155	0,195	0,225	0,215	0,19
	$\rho(\text{Mgr/m}^3)$	1,9	1,9	2		
	ν	0,2				
<i>Χάλυβας</i>	$\rho(\text{Mgr/m}^3)$	7,8				
	E(GPa)	210				
	ν	0,25				

Πίνακας 3.6: Ιδιότητες υλικών προσομοιωμάτων στο Abaqus

	Δοκίμιο I		Δοκίμιο II	Δοκίμιο III		
	X	Y	X	X		
				Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 6
f (Hz)	11,87	5,28	8,77	9,50	9,23	8,54
ζ (%)	2,1		3,88	10,8	14,7	21,2

Πίνακας 3.7: Τιμές ιδιοσυχνοτήτων και αποσβέσεων προσομοιωμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ελαστική ανάλυση του προσομοιώματος της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως, εξετάστηκε η σεισμική συμπεριφορά του δοκιμίου (πριν και μετά την ενίσχυση), πριν την ρηγματώσή του. Για αυτό το λόγο εξετάστηκαν ενδεικτικά κάποιες σεισμικές δοκιμές, οι οποίες, όμως, δεν είχαν οδηγήσει στην εμφάνιση ορατών ρωγμών.

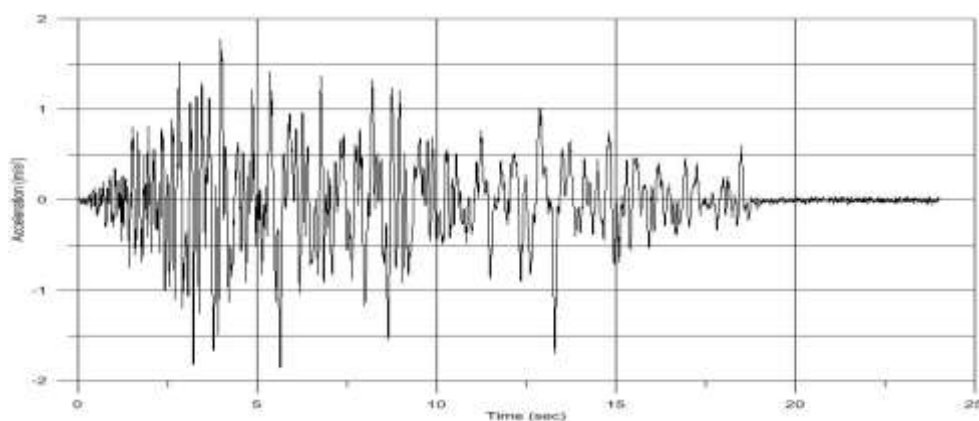
4.1 Αποτελέσματα αναλύσεων δοκιμίου I

Για το δοκίμιο I πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις. Η πρώτη αφορά τη δοκιμή 8 (125% σεισμού Ιρπίνια) που δεν είχε οδηγήσει στην εμφάνιση ρωγμών. Η σεισμική διέγερση σε αυτήν την περίπτωση ήταν μόνο κατά X. Η δεύτερη ανάλυση αφορά τη δοκιμή 18 (50% σεισμού Ιρπίνια), η οποία καταπονεί το δοκίμιο κατά τη διεύθυνση X και Y. Στην περίπτωση αυτή το δοκίμιο είχε ήδη ρηγματωθεί, οπότε η συμπεριφορά του δεν μπορεί να θεωρηθεί ελαστική. Για αυτό το λόγο, ενδεικτικά θα παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των επιταχύνσεων στην κορυφή του σταυροθολίου.

4.1.1 Δοκιμή 8 κατά X

4.1.1.1 Σεισμική διέγερση βάσης

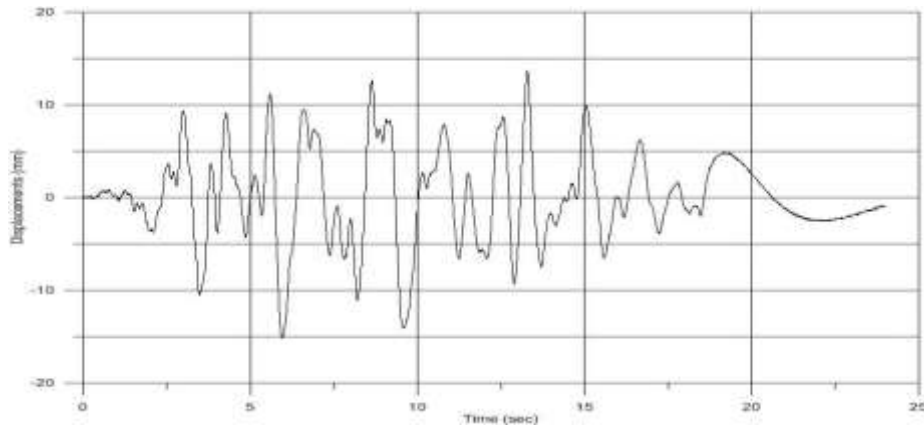
Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων της διέγερσης (125% σεισμού Ιρπίνια) που εφαρμόστηκε στην βάση του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.1: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσης δοκιμίου I για τη δοκιμή 8

Η μέγιστη επιτάχυνση βάσης ήταν $1,86\text{m/s}^2$

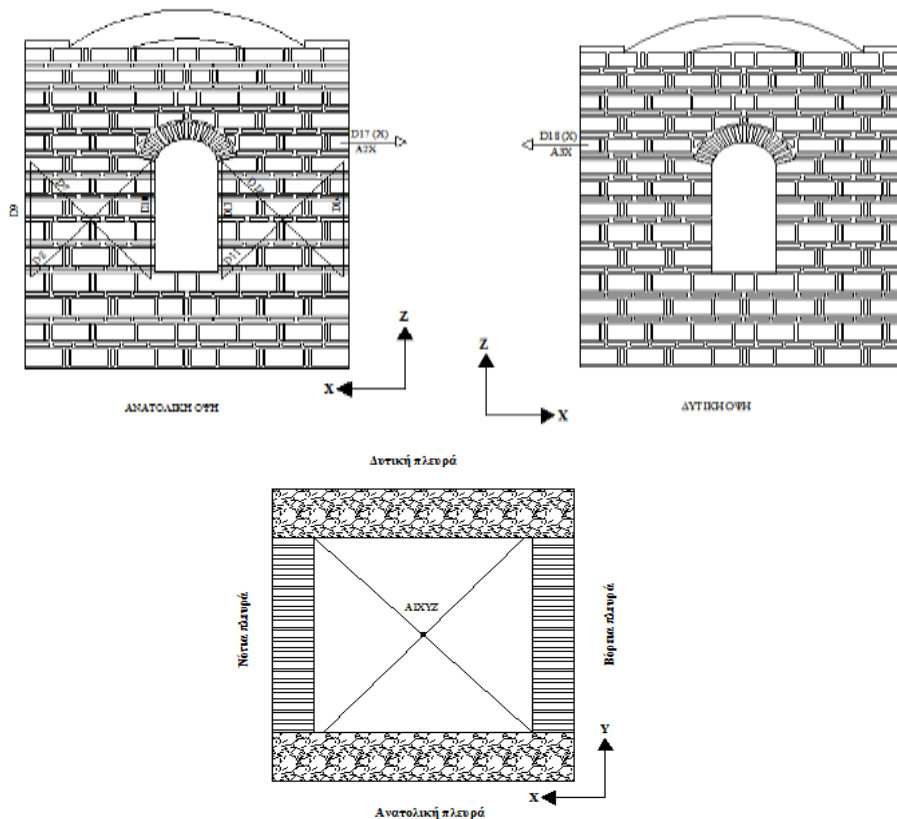
Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της μετακίνησης της βάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος:



Σχήμα 4.2: Χρονοϊστορία μετακινήσεων βάσης δοκιμίου I για τη δοκιμή 8

Η μέγιστη μετακίνησης βάσης που έχει καταγραφεί είναι 13,67mm.

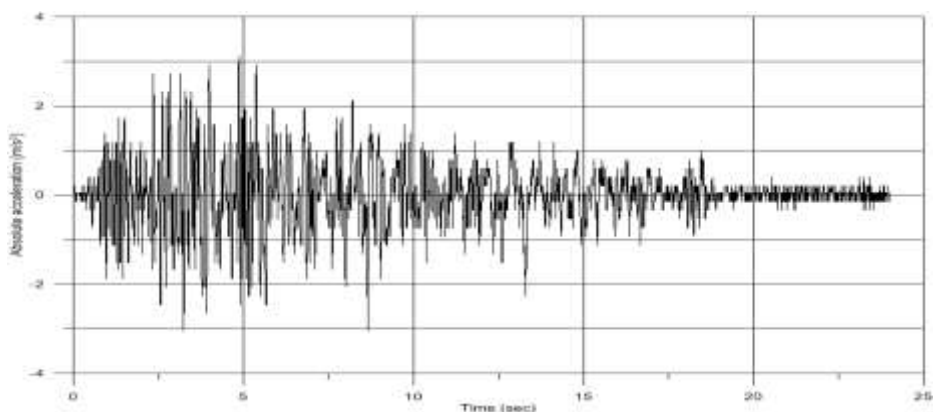
Για την παραπάνω σεισμική διέγερση υπολογίστηκαν οι επιταχύνσεις και οι μετακινήσεις του προσομοιώματος του δοκιμίου σε σημεία όπου είχαν τοποθετηθεί τα όργανα των μετρήσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Συγκριμένα, υπολογίστηκε η επιτάχυνση A1X της κορυφής του σταυροθλίου, η επιτάχυνση A2X στην ανατολική όψη και η A3X στη δυτική. Υπολογίστηκαν επίσης, οι σχετικές μετακινήσεις RD17 στην ανατολική όψη. Οι χρονοϊστορίες που προέκυψαν συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τις αντίστοιχες του πειράματος. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά οι κύριες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις τη χρονική στιγμή της μέγιστης επιτάχυνσης καθώς και η παραμόρφωση του φορέα.



Σχήμα 4.3: Θέσεις μετρήσεων επιταχύνσεων και μετακινήσεων δοκιμίου I

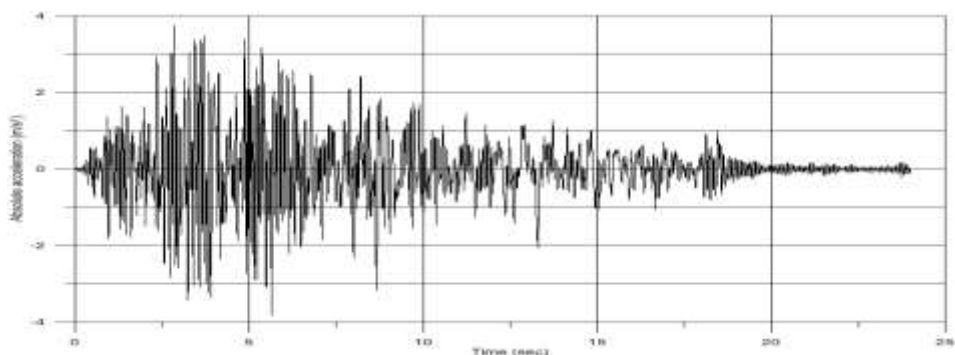
4.1.1.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης AIX στην κορυφή του δοκίμιου, όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.5 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.



*Σχήμα 4.4: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκίμιου I για τη δοκιμή 8
Πειραματικά αποτελέσματα*

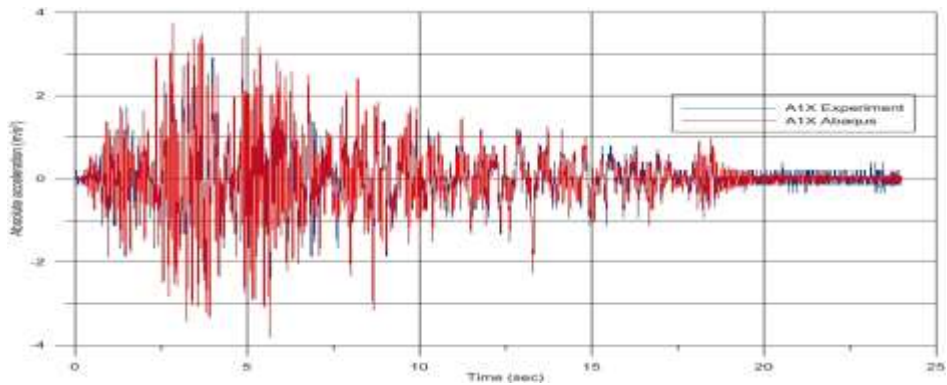
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $3,11\text{m/s}^2$.



*Σχήμα 4.5: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκίμιου I για τη δοκιμή 8
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus*

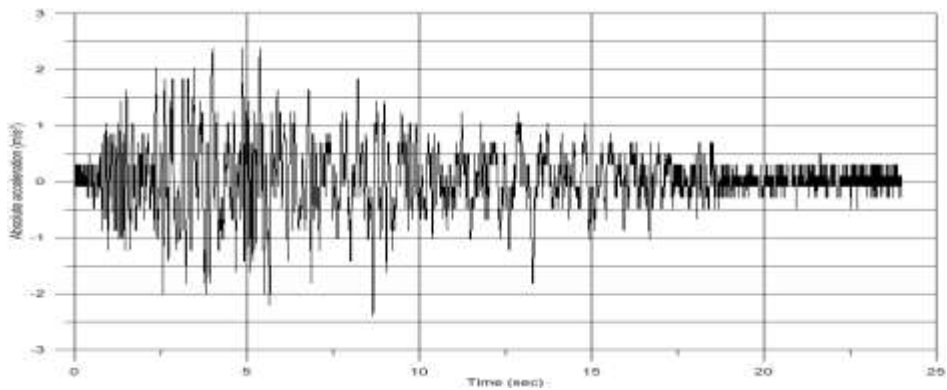
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $3,78\text{m/s}^2$.

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων από την οποία φαίνεται ότι το προσομοίωμα της ανάλυσης είχε περίπου την ίδια σεισμική απόκριση στην κορυφή του με το δοκίμιο του πειράματος, ενώ παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερη μέγιστη επιτάχυνση.

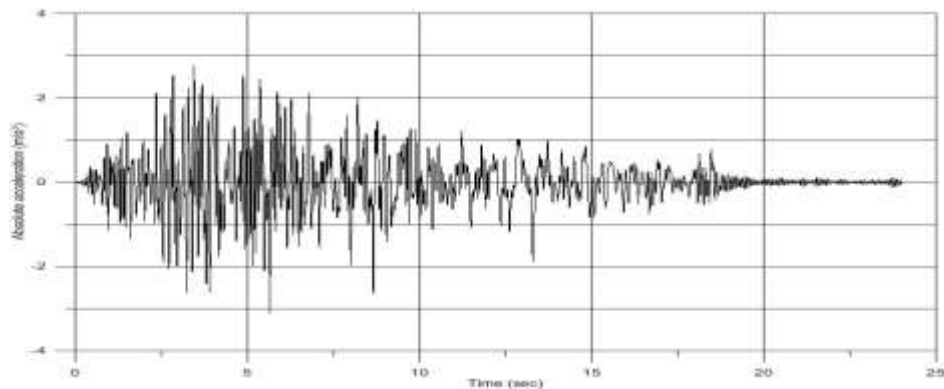


Σχήμα 4.6: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A1X δοκιμίου I για τη δοκιμή 8

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης A2X όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.8 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.

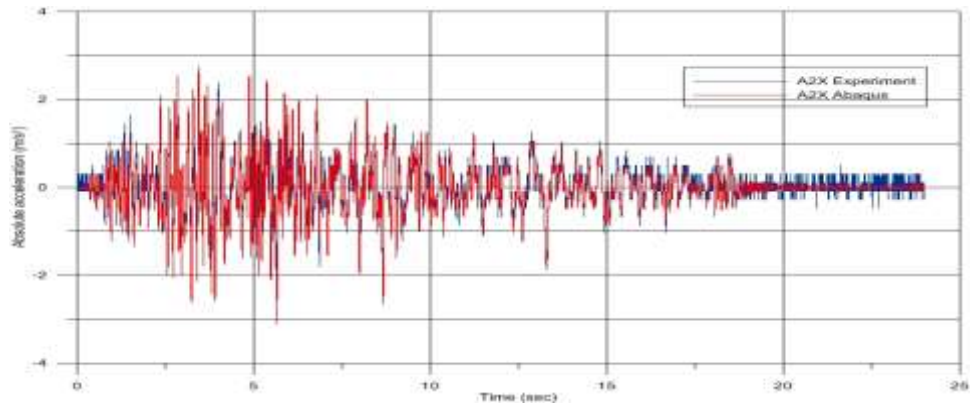


Σχήμα 4.7: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου I για τη δοκιμή 8
Πειραματικά αποτελέσματα



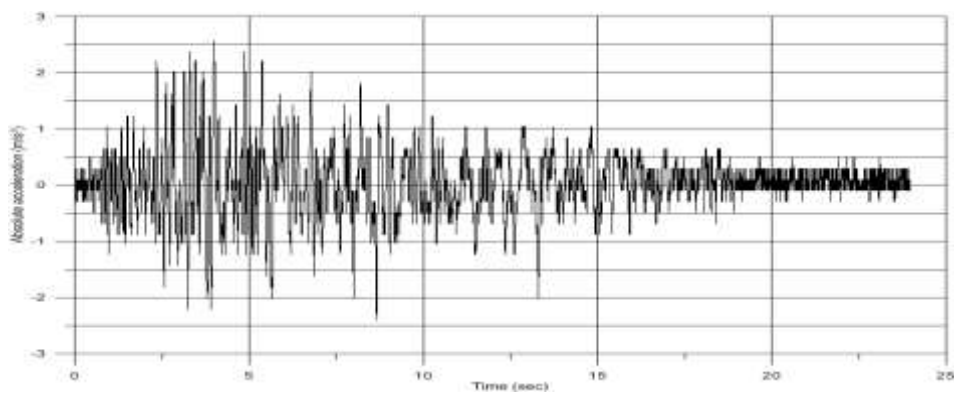
Σχήμα 4.8: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου I για τη δοκιμή 8
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

Στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων.

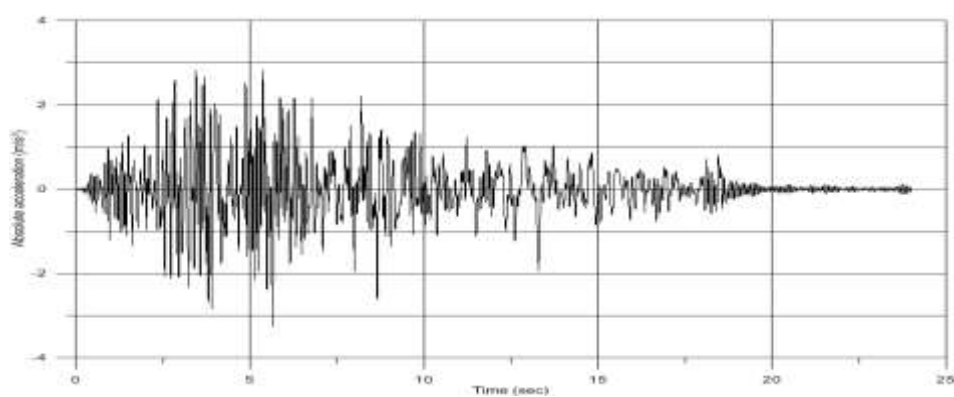


Σχήμα 4.9: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου I για τη δοκιμή 8

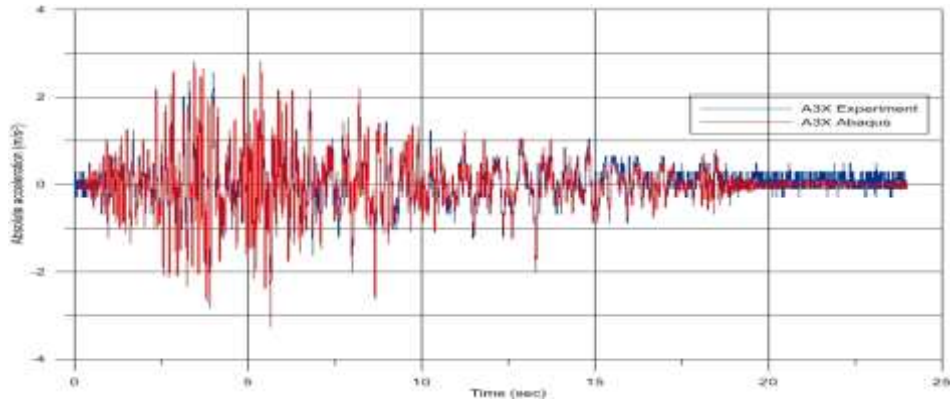
Τέλος, υπολογίστηκε η επιτάχυνση A3X στον πεσό της δυτικής όψης του δοκιμίου και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη χρονοϊστορία που προέκυψε από τα αποτελέσματα του πειράματος.



Σχήμα 4.10: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου I για τη δοκιμή 8
Πειραματικά αποτελέσματα



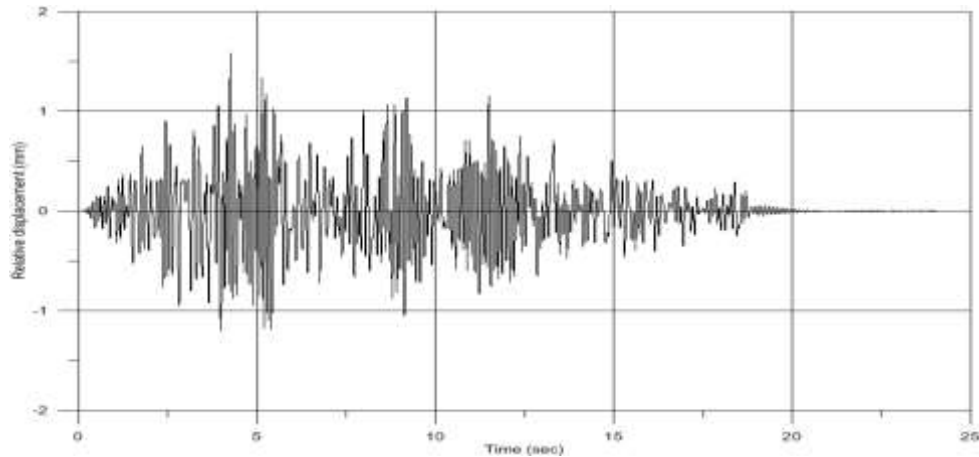
Σχήμα 4.11: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου I για τη δοκιμή 8
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus



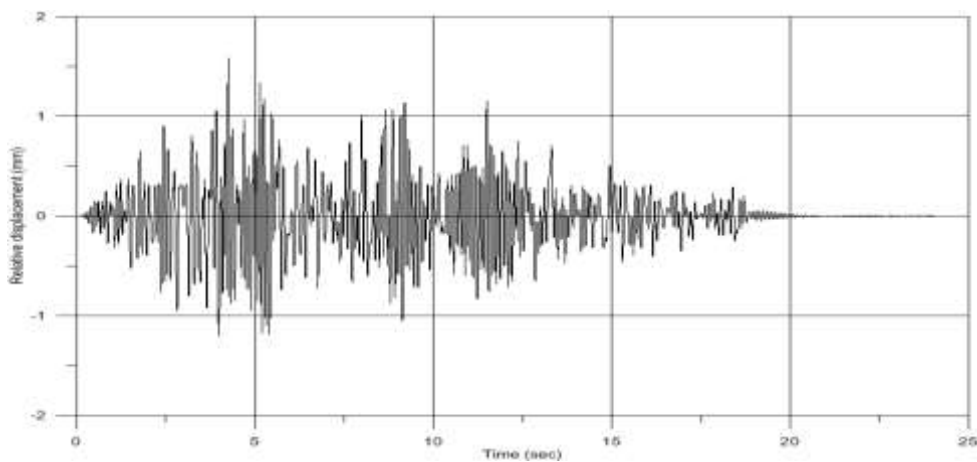
Σχήμα 4.12: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου I για τη δοκιμή 8

4.1.1.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων

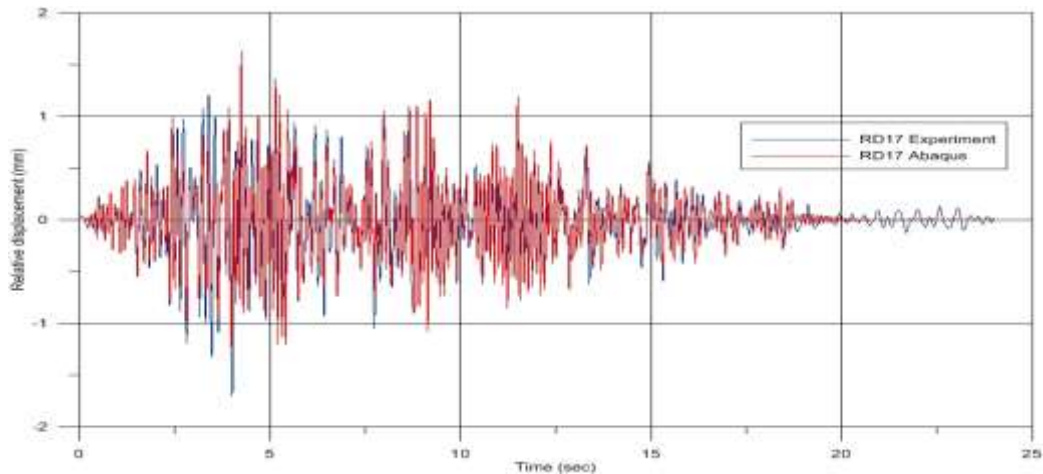
Ελέγχθηκε η σχετική μετακίνηση RD17 στον πεσσό της ανατολικής όψης. Σημειώνεται ότι κατά τη σεισμική δοκιμή είχε καταγραφεί η απόλυτη μετακίνηση D17. Επομένως, η σχετική μετακίνηση προέκυψε από τη διανυσματική αφαίρεση της μετακίνησης της βάσης από την απόλυτη μετακίνηση. **ΒΑΛΕ ΤΑ ΣΩΣΤΑ**



Σχήμα 4.13: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD17 δοκιμίου I για τη δοκιμή 8
Πειραματικά αποτελέσματα



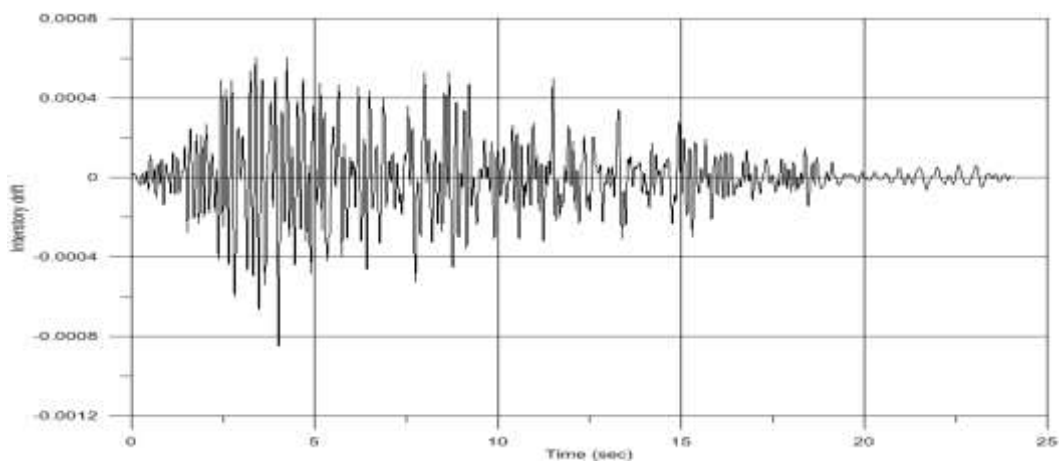
Σχήμα 4.14: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD17 δοκιμίου I για τη δοκιμή 8
Αποτελέσματα Abaqus



Σχήμα 4.15: Σύγκριση χρονιοιστοριών σχετικών μετακινήσεων RD17 δοκιμίου I για τη δοκιμή 8

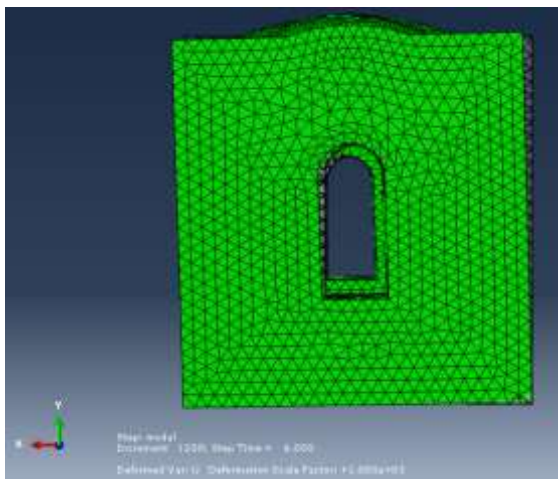
Υπολογίστηκε επίσης η οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) του δοκιμίου που είναι ίση με το λόγο της σχετικής μετακίνησης RD17 προς το ύψος του σημείου μέτρησης της, μετρούμενο από τη βάση του δοκιμίου.

$$\text{Συγκριμένα, } drift = \frac{RD17}{H=2000mm}$$

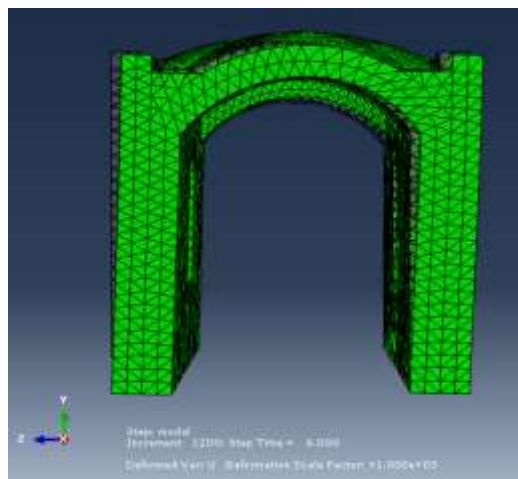


Σχήμα 4.16: Υπολογισμός interstory drift του δοκιμίου I για τη δοκιμή 8

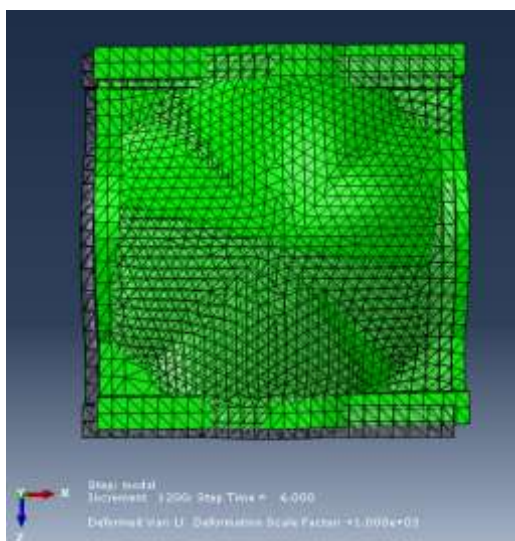
Ενδεικτικά, παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα ο παραμορφωμένος φορέας του δοκιμίου τη χρονική στιγμή $T=6\text{sec}$, όταν η επιτάχυνση της βάσης έπαιρνε περίπου τη μέγιστη τιμή της.



(α)



(β)

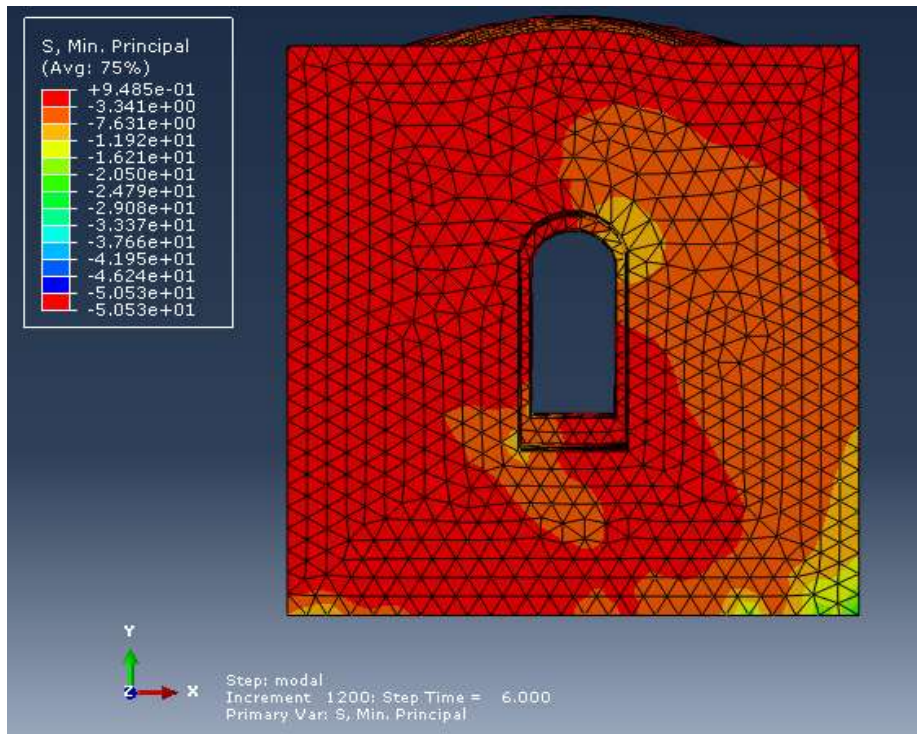


(γ)

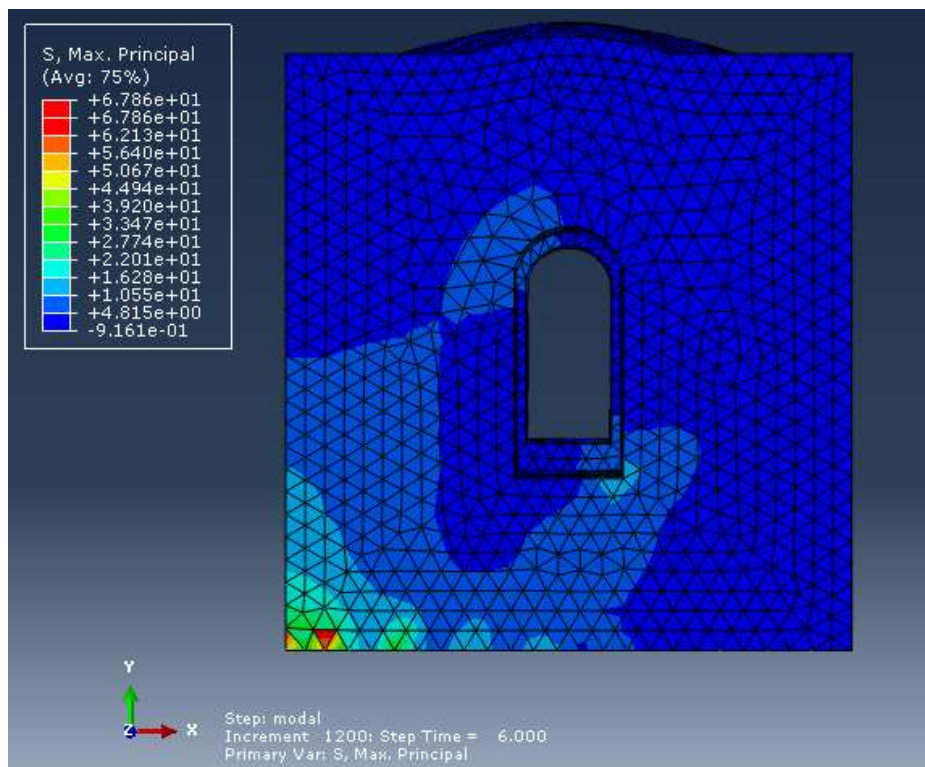
Σχήμα 4.17 : Παραμόρφωση δοκιμίου I τη χρονική στιγμή $T=6sec$ (α) ανατολική όψη, (β) νότια όψη, (γ) κάτοψη

4.1.1.4 Αποτελέσματα τάσεων

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων κυρίων τάσεων που αναπτύχθηκαν στο δοκίμιο I τη χρονική στιγμή $T=5sec$ και $T=6sec$, δηλαδή στην περιοχή των μέγιστων επιταχύνσεων.

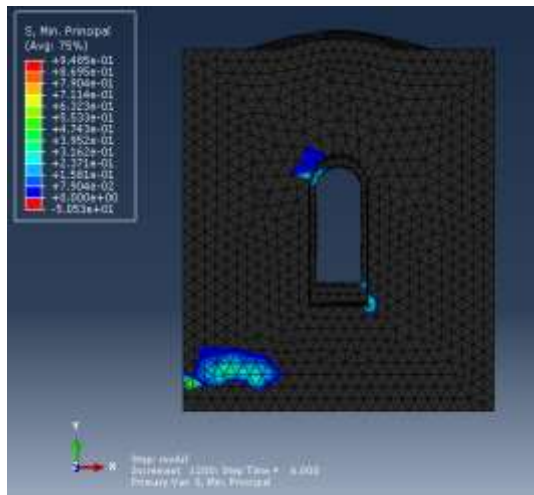


Σχήμα 4.18 :Κατανομή ελάχιστων κύριων τάσεων στην δυτική όψη του δοκιμίου I

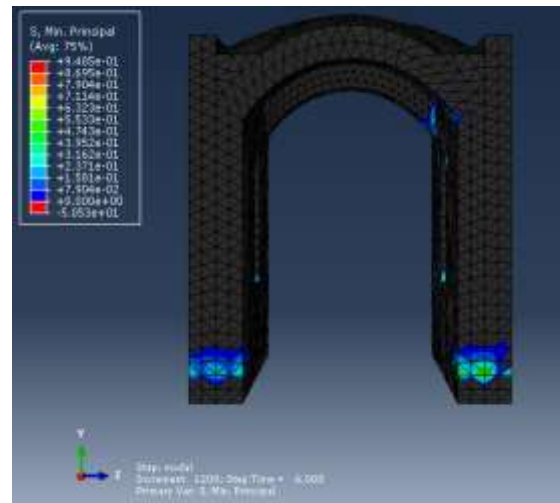


Σχήμα 4.19 :Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων στην δυτική όψη του δοκιμίου I

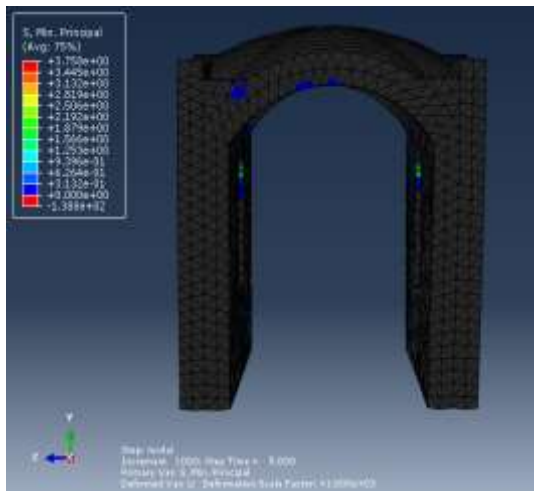
Προκειμένου να βρεθούν οι ζώνες πιθανής ανάπτυξης εφελκυστικών ρωγμών, επιλέχθηκαν στο διάγραμμα των ελάχιστων κύριων τάσεων οι περιοχές με τιμή μεγαλύτερη του μηδενός, δηλαδή οι περιοχές όπου εμφανίζεται τριαξονική ένταση.



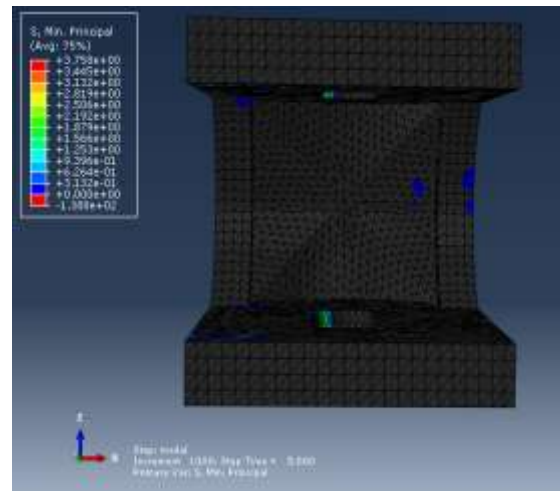
(α)



(β)



(γ)



(δ)

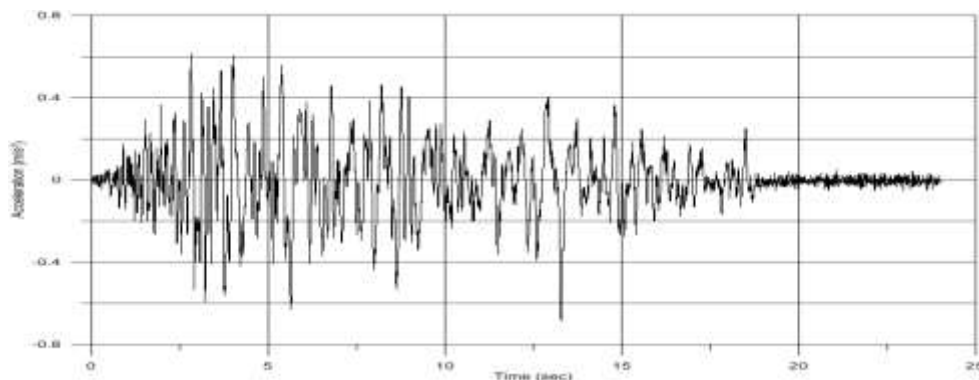
Σχήμα 4.20: Περιοχές πιθανής ανάπτυξης εφελκυστικών ρωγμών (α) δυτική όψη, (β) Βόρεια όψη, (γ) Νότια όψη, (δ) Άνοψη

Οι παραπάνω περιοχές συμπίπτουν με τα σημεία όπου εμφανίστηκαν ρωγμές στο δοκίμιο I κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

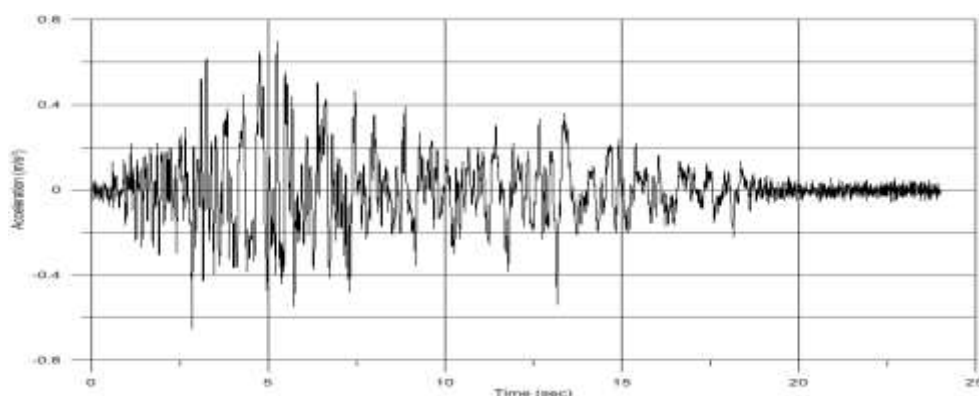
4.1.2 Δοκιμή 18 κατά X και Y

4.1.2.1 Σεισμική διέγερση βάσης

Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων της διέγερσης (50% σεισμού Igrinia) κατά X και κατά Y που εφαρμόστηκε στην βάση του προσομοιώματος παρουσιάζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν:



Σχήμα 4.21: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσης κατά X δοκιμίου I για τη δοκιμή 18

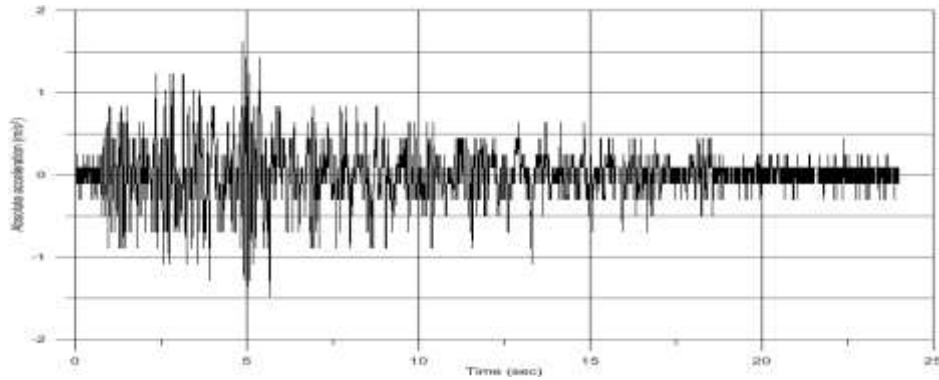


Σχήμα 4.22: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσης κατά Y δοκιμίου I για τη δοκιμή 18

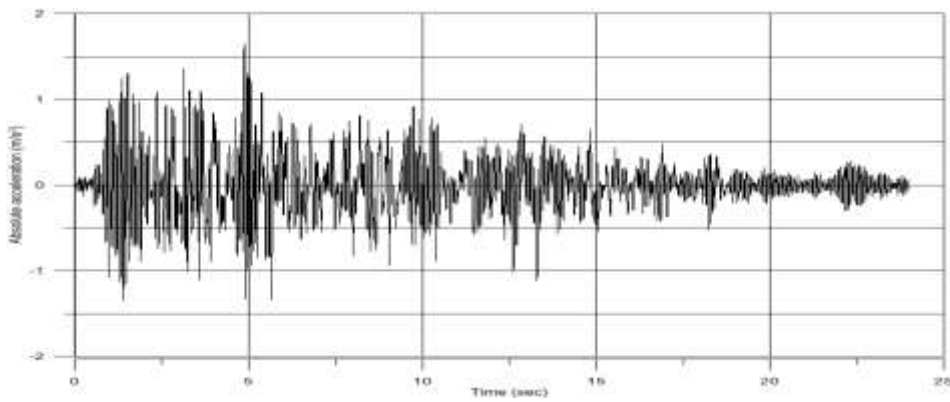
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης βάσης ήταν $0,62\text{m/s}^2$ κατά X και $0,70\text{m/s}^2$ κατά Y.

4.1.2.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων

Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης A1X στην κορυφή του δοκιμίου, όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.24 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.

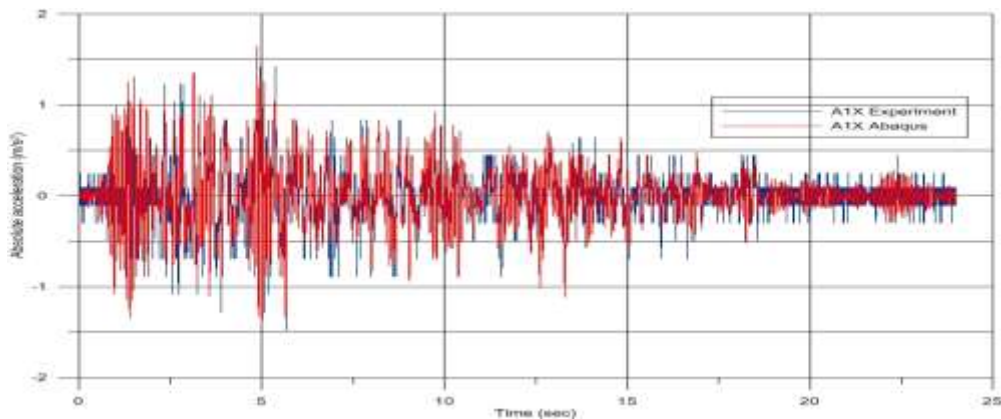


*Σχήμα 4.23: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου I για τη δοκιμή 18
Πειραματικά αποτελέσματα*



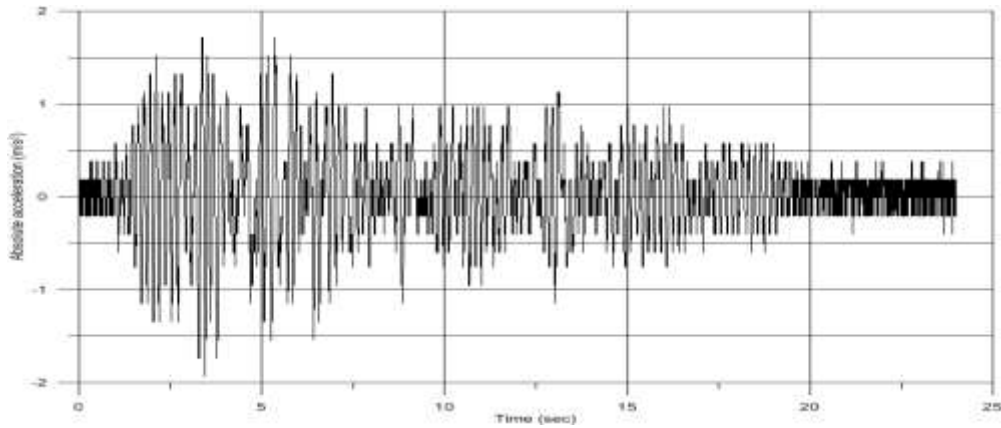
*Σχήμα 4.24: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου I για τη δοκιμή 18
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus*

Η μέγιστη επιτάχυνση AIX που υπολογίστηκε πειραματικά και αναλυτικά ήταν $1,62\text{m/s}^2$ και $1,65\text{m/s}^2$ αντίστοιχα. Ακολουθεί η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων που αποδεικνύει ότι η χρονοϊστορία του πειράματος προσεγγίζεται αρκετά από αυτήν της ελαστικής ανάλυσης.

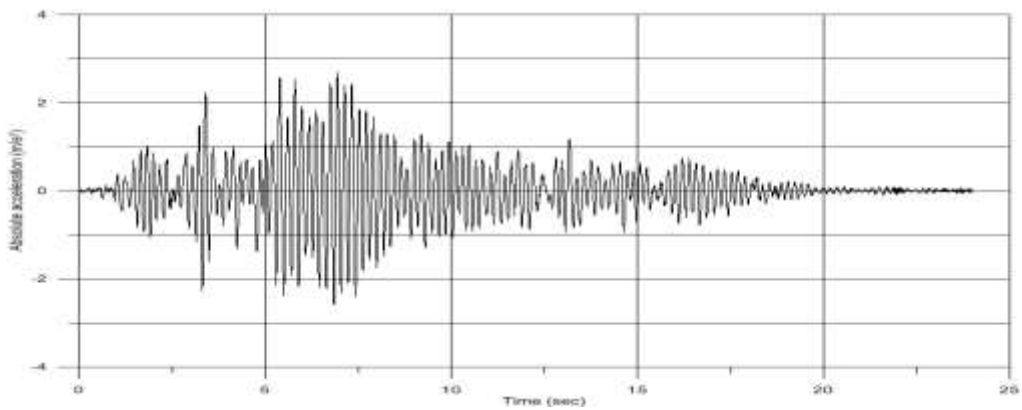


Σχήμα 4.25: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου I για τη δοκιμή 18

Στο σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης A1Y στην κορυφή του δοκιμίου, όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.27 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.

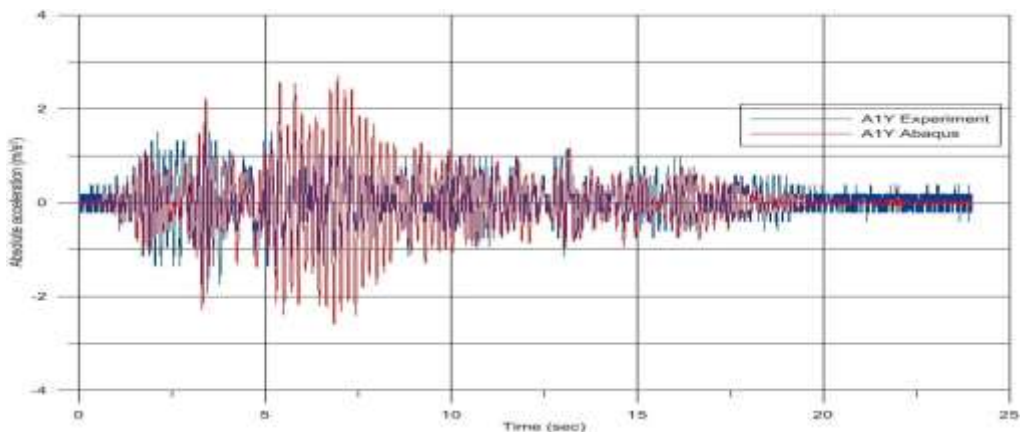


Σχήμα 4.26: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A1Y δοκιμίου I για τη δοκιμή 18 Πειραματικά αποτελέσματα



Σχήμα 4.27: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A1Y δοκιμίου I για τη δοκιμή 18 Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

Η μέγιστη επιτάχυνση A1X που υπολογίστηκε πειραματικά και αναλυτικά ήταν $1,72\text{m/s}^2$ και $2,69\text{m/s}^2$ αντίστοιχα.



Σχήμα 4.28: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A1Y δοκιμίου I για τη δοκιμή 18

Στη διεύθυνση Y παρατηρούμε ότι οι επιταχύνσεις που υπολογίστηκαν από την ανάλυση είναι μεγαλύτερες από αυτές της καταγραφής. Αν και στα πρώτα 2-2,5sec οι δύο χρονοϊστορίες φαίνονται να ταυτίζονται, καθώς συνεχίζεται η σεισμική διέγερση, παρουσιάζεται απόκλιση των δύο διαγραμμάτων. Το γεγονός ότι η σεισμική απόκριση του μοντέλου είναι μεγαλύτερη δικαιολογείται από την μη ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής. Η διαξονική διέγερση πραγματοποιήθηκε στο δοκίμιο I όταν αυτό είχε ήδη ρηγματωθεί, με αποτέλεσμα η απόσβεση της κατασκευής να είναι μεγαλύτερη από 2,1% (όπως είχε υπολογιστεί πειραματικά για το δοκίμιο I). Η παρουσία, επομένως, αυτής της υστερητικής απόσβεσης αποδεικνύει ότι η ελαστική ανάλυση είναι ακατάλληλη σε αυτήν τη δοκιμή. Για αυτό δεν συνεχίστηκε η ανάλυση

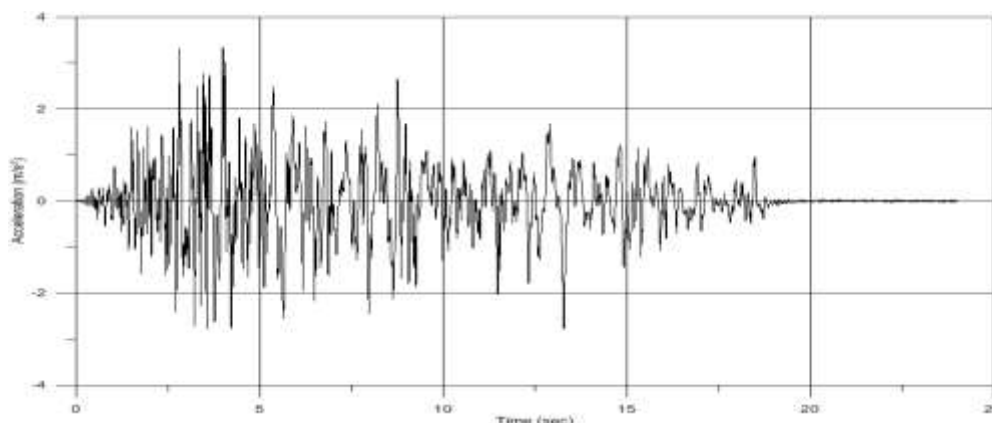
4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων δοκιμίου II

Για να εξεταστεί η σεισμική απόκριση του δοκιμίου II, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για τη δοκιμή 4 (200% σεισμού Iripinia). Η σεισμική διέγερση σε αυτή τη δοκιμή ήταν μονοαξονική, παράλληλα στη διεύθυνση των πεσσών (άξονας X). Επειδή μέχρι και τη δοκιμή 4 δεν είχαν εμφανιστεί ρωγμές στο δοκίμιο, θεωρείται ότι η ελαστική ανάλυση μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά της κατασκευής.

4.2.1 Δοκιμή 4 κατά X

4.2.1.1 Σεισμική διέγερση βάσης

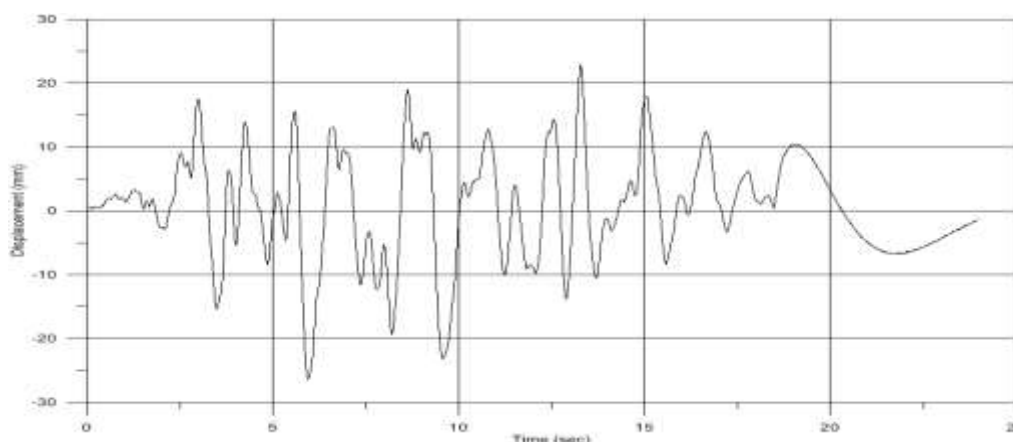
Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων της διέγερσης (200% σεισμού Iripinia) που εφαρμόστηκε στην βάση του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.29: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσης δοκιμίου II για τη δοκιμή 4

Η μέγιστη επιτάχυνση βάσης ήταν $3,34\text{m/s}^2$

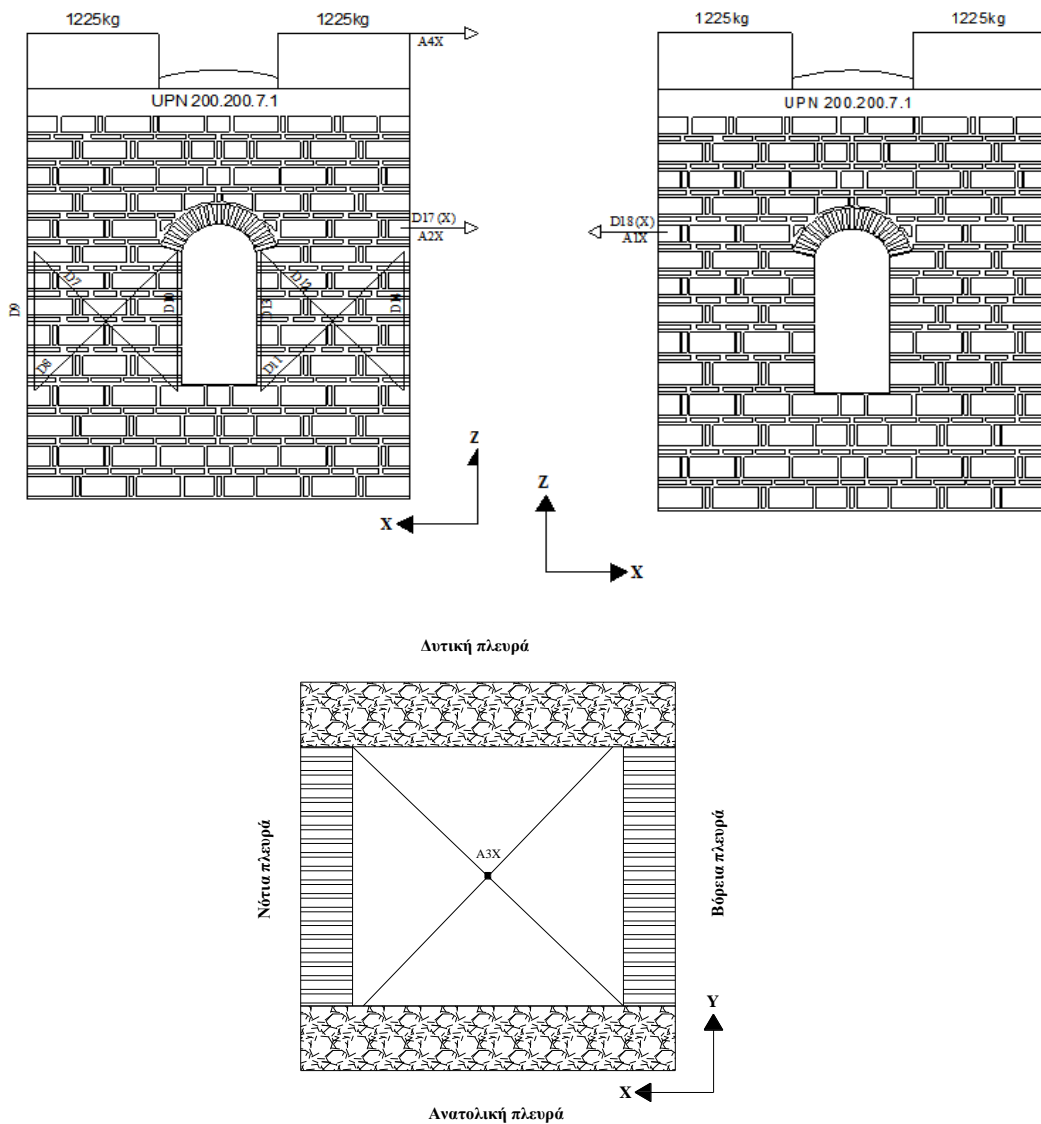
Στο σχήμα 4.30 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της μετακίνησης της βάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος:



Σχήμα 4.30: Χρονοϊστορία μετακινήσεων βάσης δοκιμίου I για τη δοκιμή 9

Η μέγιστη μετακίνησης βάσης που έχει καταγραφεί είναι 26,32mm.

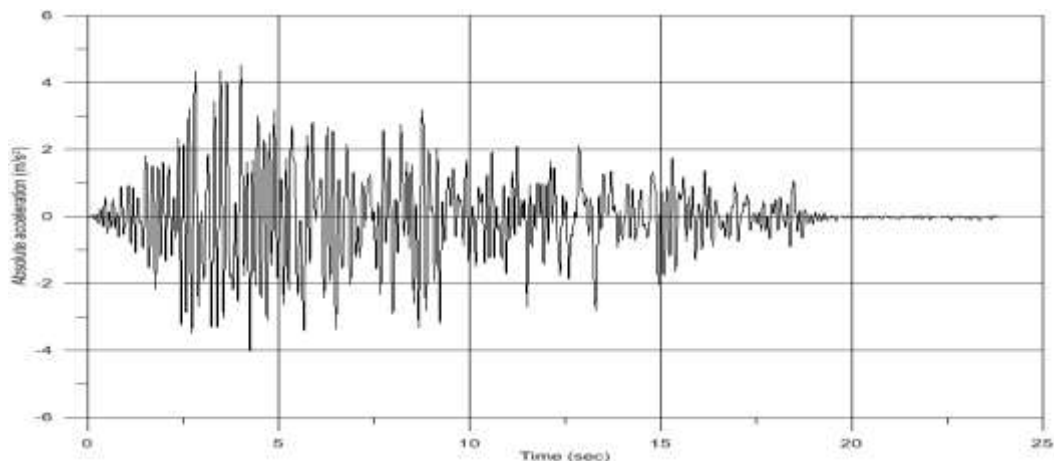
Για την παραπάνω σεισμική διέγερση υπολογίστηκαν οι επιταχύνσεις και οι μετακινήσεις του προσομοιώματος του δοκιμίου σε σημεία όπου είχαν τοποθετηθεί τα όργανα των μετρήσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Συγκριμένα, υπολογίστηκε η επιτάχυνση A3X της κορυφής του σταυροθολίου, η επιτάχυνση A2X στην ανατολική όψη και η A1X στη δυτική. Υπολογίστηκαν επίσης, οι σχετικές μετακινήσεις RD17 στην ανατολική όψη. Οι χρονοϊστορίες που προέκυψαν συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τις αντίστοιχες του πειράματος. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά οι κύριες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις τη χρονική στιγμή της μέγιστης επιτάχυνσης καθώς και η παραμόρφωση του φορέα.



Σχήμα 4.31: Θέσεις μετρήσεων επιταχύνσεων και μετακινήσεων δοκιμίου II

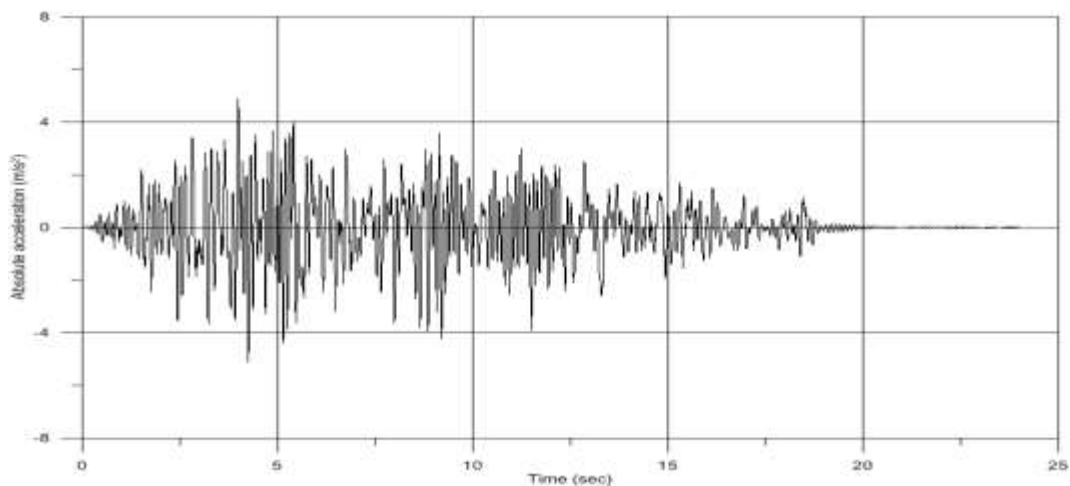
4.2.1.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων

Στο σχήμα 4.32 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης AIX στην κορυφή του δοκιμίου, όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.33 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.



*Σχήμα 4.32: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Πειραματικά αποτελέσματα*

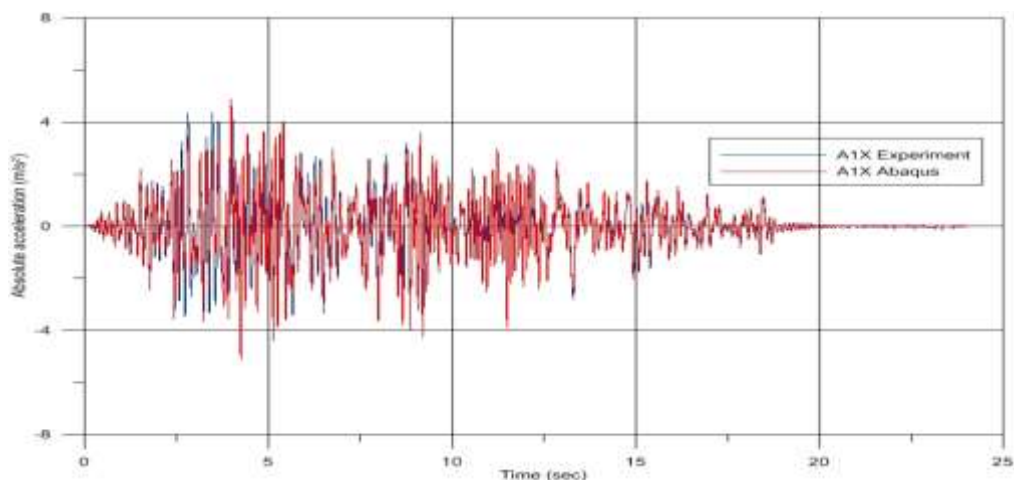
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $4,53\text{m/s}^2$.



*Σχήμα 4.33: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus*

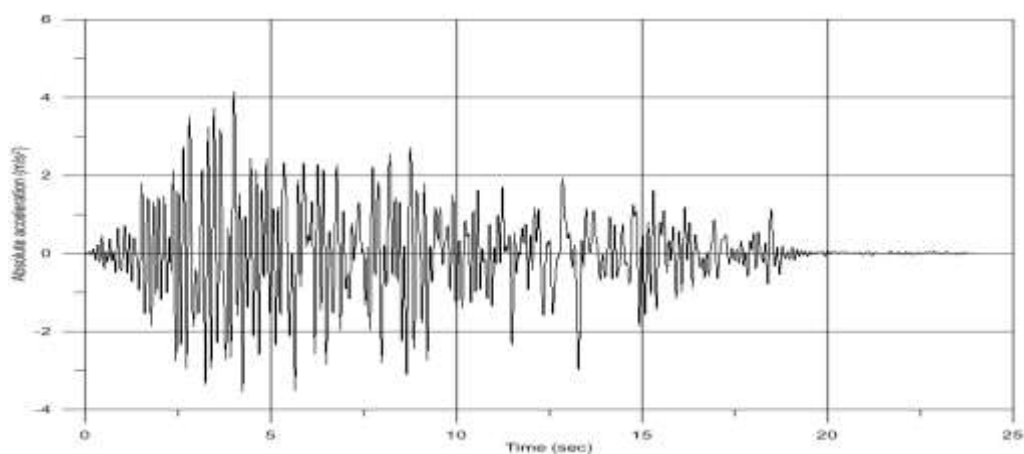
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $5,12\text{m/s}^2$.

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων από την οποία φαίνεται ότι το προσομοίωμα της ανάλυσης είχε περίπου την ίδια σεισμική απόκριση στην κορυφή του με το δοκίμιο του πειράματος, ενώ παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερη μέγιστη επιτάχυνση.

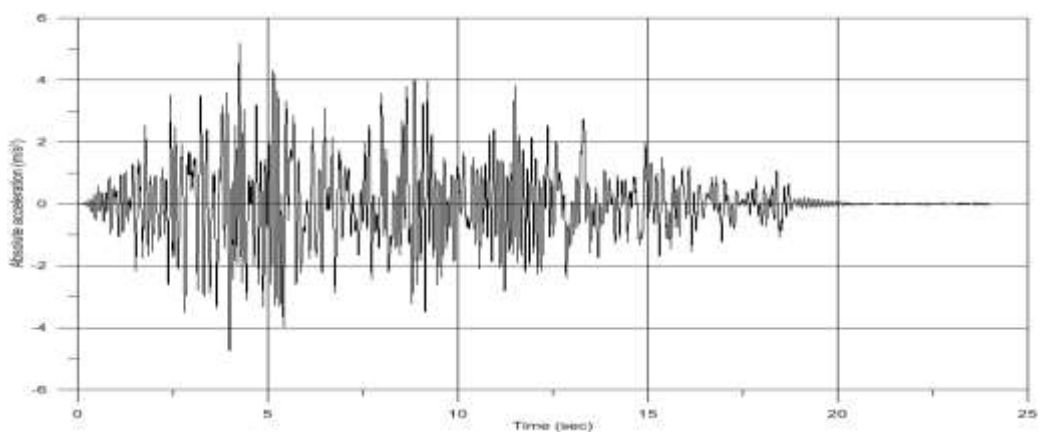


Σχήμα 4.34: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A1X δοκιμίου II για τη δοκιμή 4

Στο σχήμα 4.35 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης A2X όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.36 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.

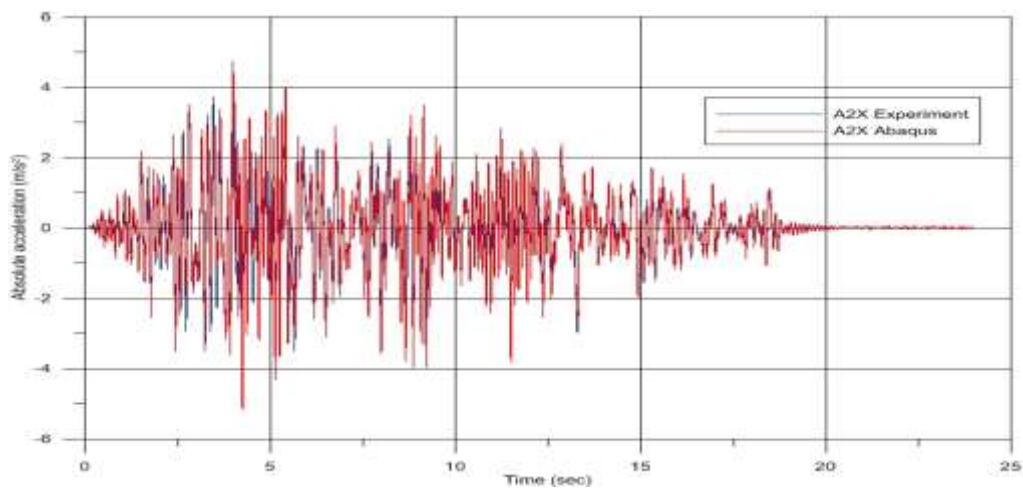


Σχήμα 4.35: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Πειραματικά αποτελέσματα



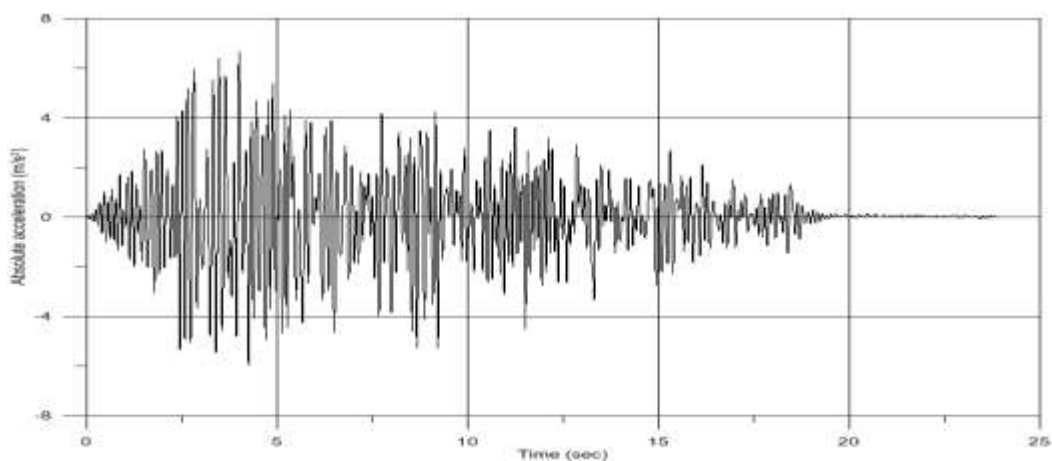
Σχήμα 4.36: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

Ακολουθεί η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων των επιταχύνσεων A2X.

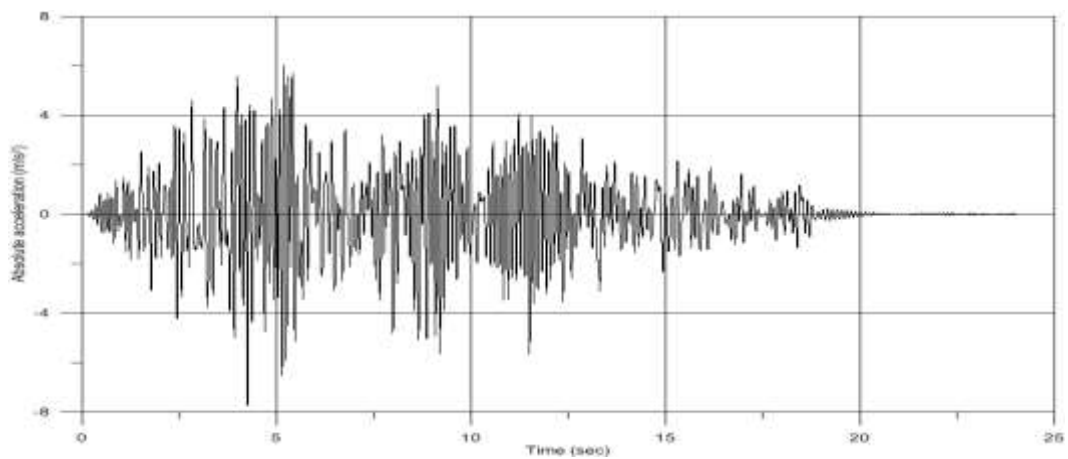


Σχήμα 4.37: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου II για τη δοκιμή 4

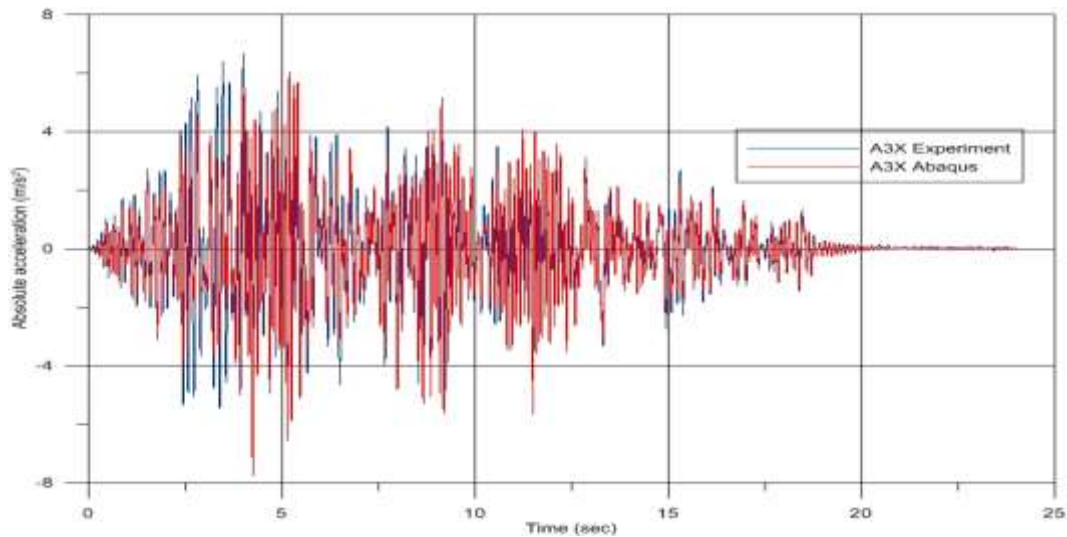
Τέλος, έγινε σύγκριση των επιταχύνσεων A3X στον πεσσό της δυτικής όψης.



*Σχήμα 4.38: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Πειραματικά αποτελέσματα*



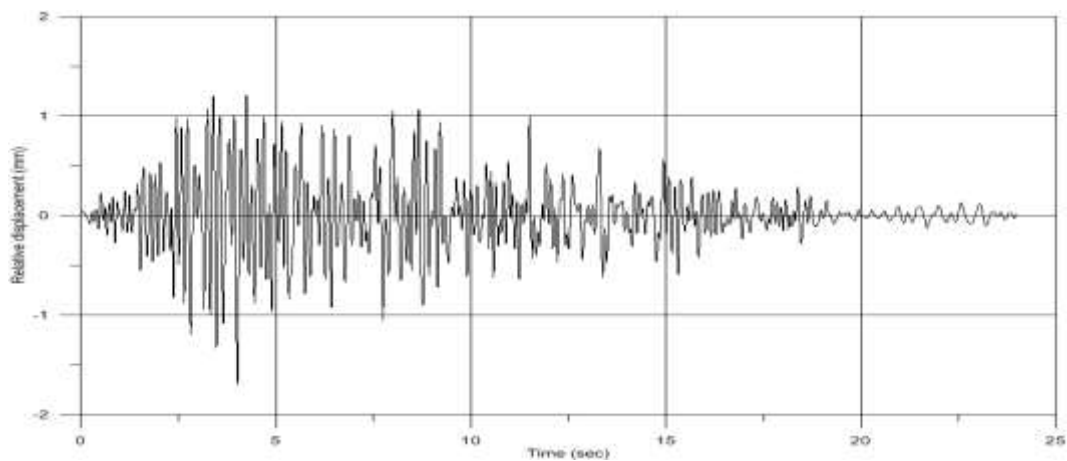
*Σχήμα 4.39: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus*



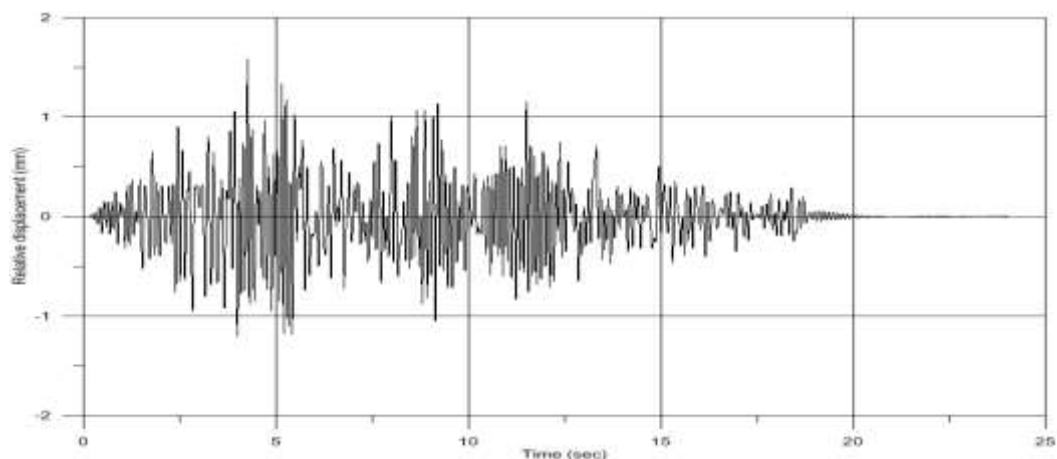
Σχήμα 4.40: Σύγκριση χρονιοιστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου II για τη δοκιμή 4

4.2.1.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων

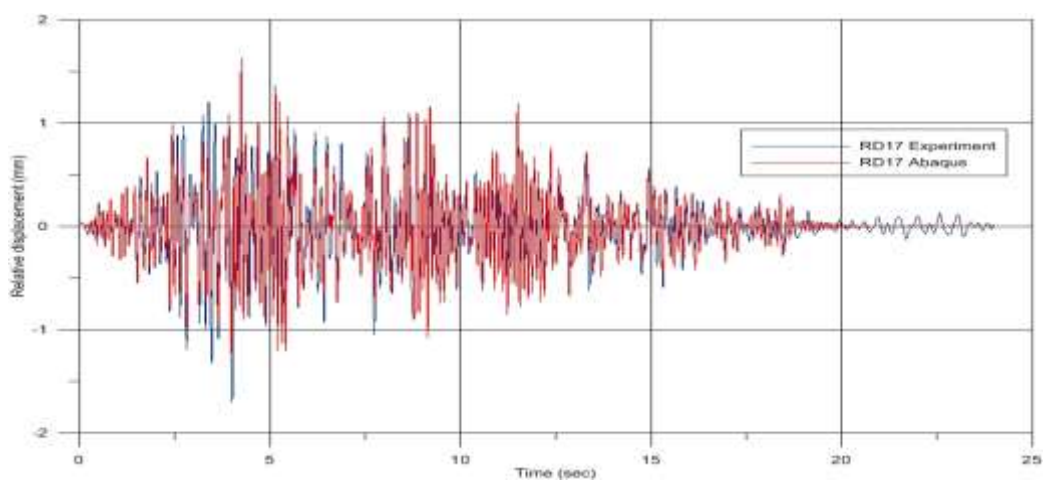
Ελέγχθηκε η σχετική μετακίνηση RD17 στον πεσσό της ανατολικής όψης. Σημειώνεται ότι κατά τη σεισμική δοκιμή είχε καταγραφεί η απόλυτη μετακίνηση D17. Επομένως, η σχετική μετακίνηση προέκυψε από τη διανυσματική αφαίρεση της μετακίνησης της βάσης από την απόλυτη μετακίνηση. Από τα γραφήματα που ακολουθούν φαίνεται ότι η μετακίνηση του δοκιμίου σχεδόν ταυτίζεται με αυτή του μοντέλου.



*Σχήμα 4.41: Χρονιοιστορία σχετικών μετακινήσεων RD17 δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Πειραματικά αποτελέσματα*



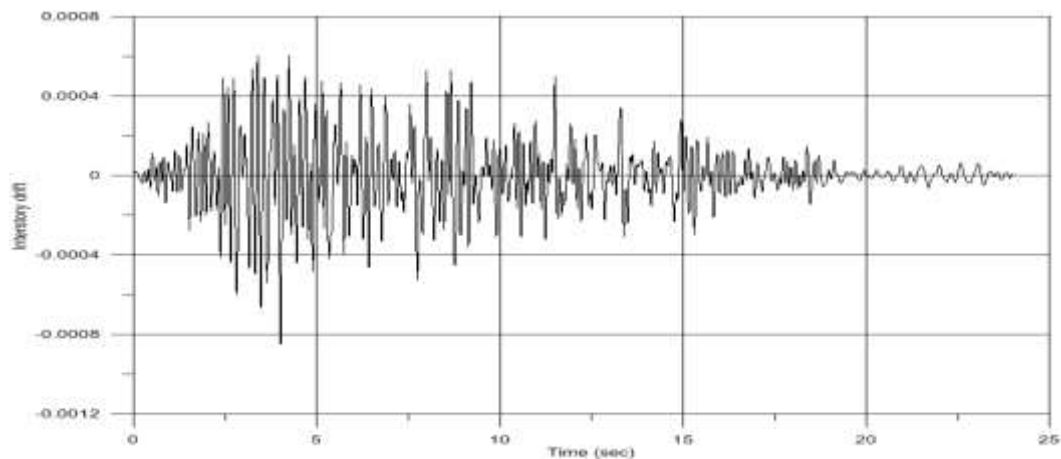
Σχήμα 4.42: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD17 δοκιμίου II για τη δοκιμή 4
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus



Σχήμα 4.43: Σύγκριση χρονοϊστοριών σχετικών μετακινήσεων RD17 δοκιμίου II για τη δοκιμή 4

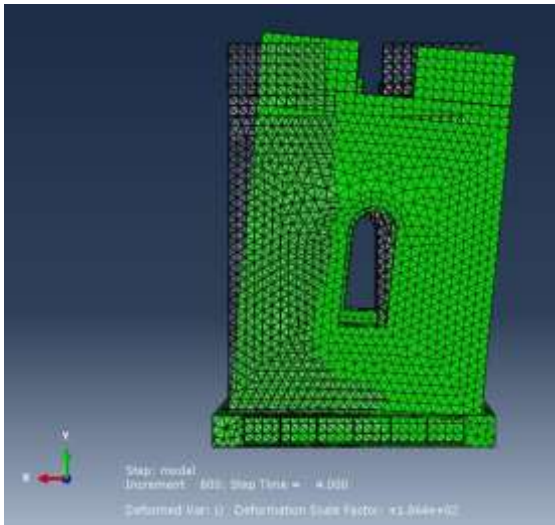
Υπολογίστηκε επίσης η οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) του δοκιμίου που είναι ίση με το λόγο της σχετικής μετακίνησης RD17 προς το ύψος του σημείου μέτρησης της, μετρούμενο από τη βάση του δοκιμίου.

$$\text{Συγκριμένα, } drift = \frac{RD17}{H=2000mm}$$

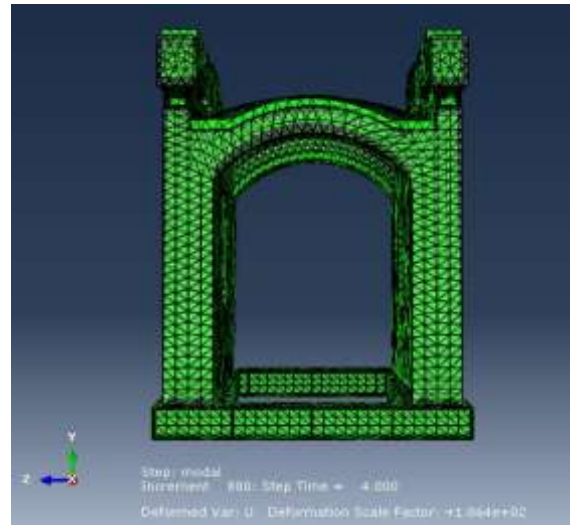


Σχήμα 4.44: Υπολογισμός interstory drift του δοκιμίου II για τη δοκιμή 4

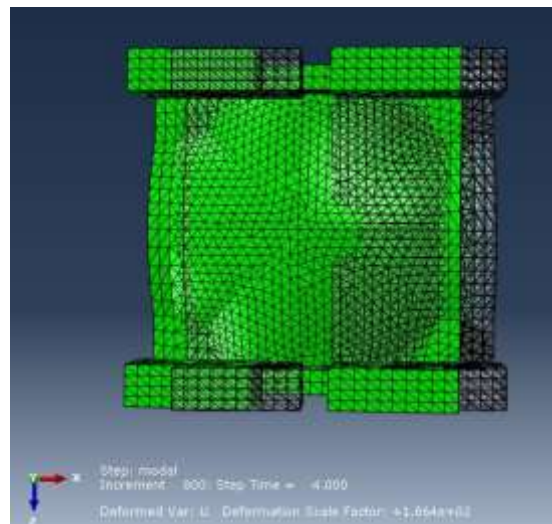
Ενδεικτικά παρατίθενται ορισμένες απεικονίσεις του παραμορφωμένου φορέα τη χρονική στιγμή $T=4\text{sec}$, όταν η σεισμική διέγερση της βάσης έπαιρνε περίπου μέγιστη τιμή της.



(α)



(β)

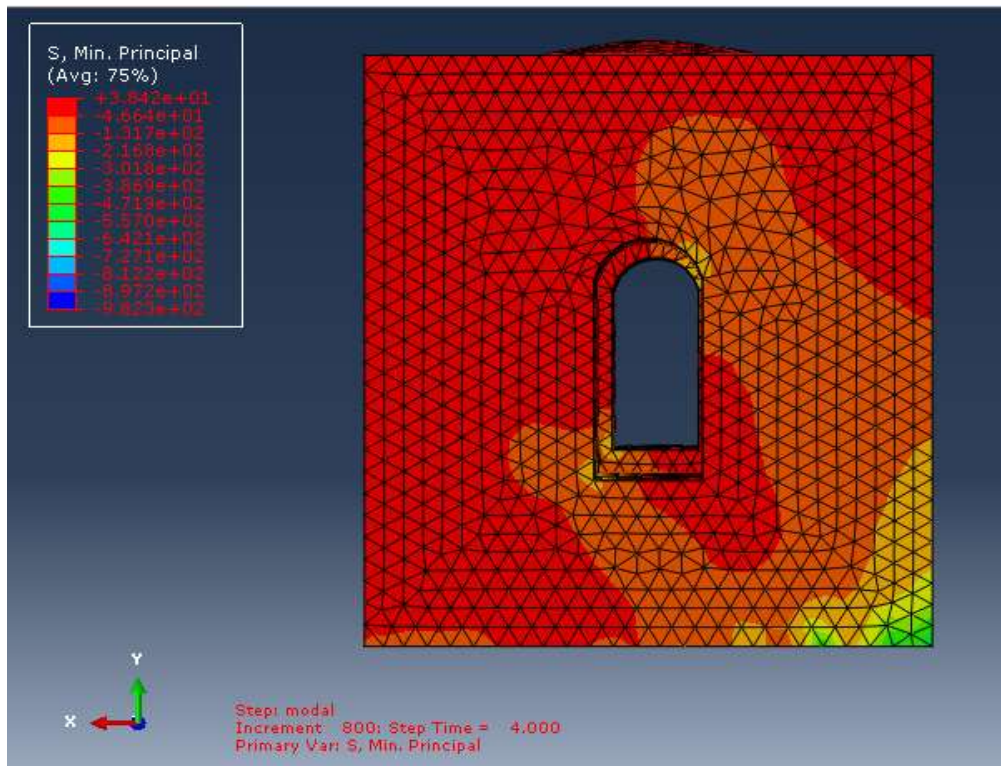


(γ)

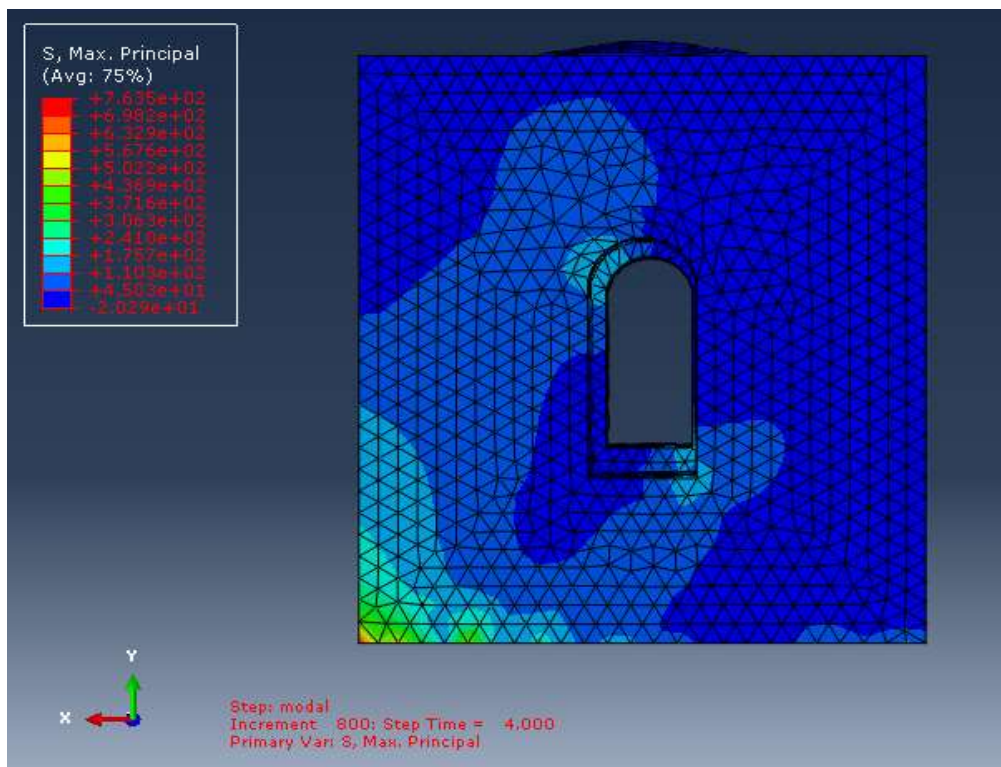
Σχήμα 4.45 : Παραμόρφωση δοκιμίου II τη χρονική στιγμή $T=4\text{sec}$ (α) ανατολική όψη, (β) νότια όψη, (γ) κάτοψη

4.2.1.4 Αποτελέσματα τάσεων

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων κυρίων τάσεων τη χρονική στιγμή $T=4\text{sec}$.

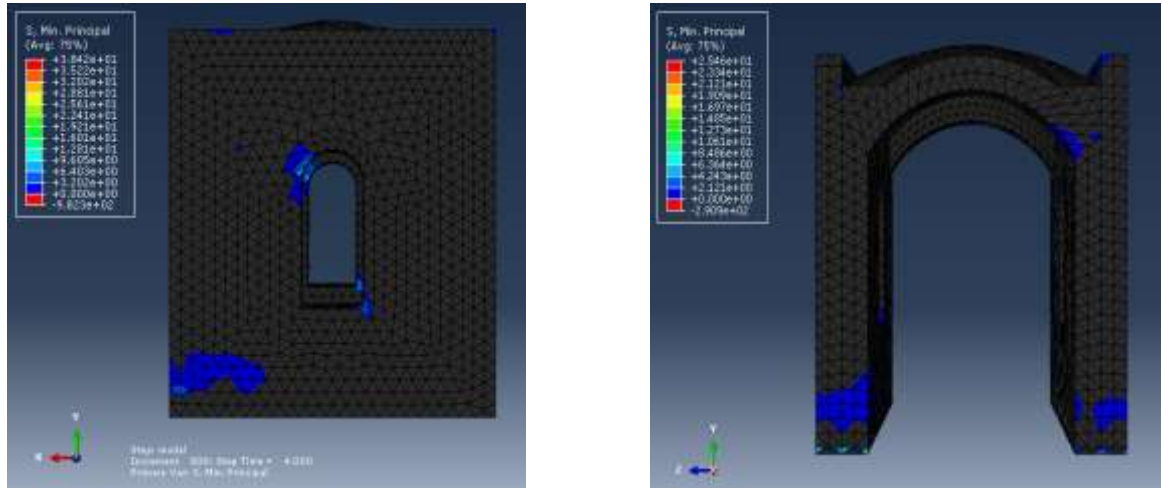


Σχήμα 4.46: Κατανομή ελάχιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου II



Σχήμα 4.47: Κατανομή μέγιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου II

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται στη βάση το δοκιμίου, αλλά και στο ύψος του τόξου των παραθύρων καθώς και στη γωνία του παραθύρου κάτω. Προκειμένου να φανούν οι περιοχές πιθανής ανάπτυξης των εφελκυστικών ρωγμών στο διάγραμμα των ελάχιστων κυρίων τάσεων εμφανίζονται μόνο οι περιοχές με τιμή άνω του μηδενός, όπου εμφανίζεται τριαξονική ένταση.



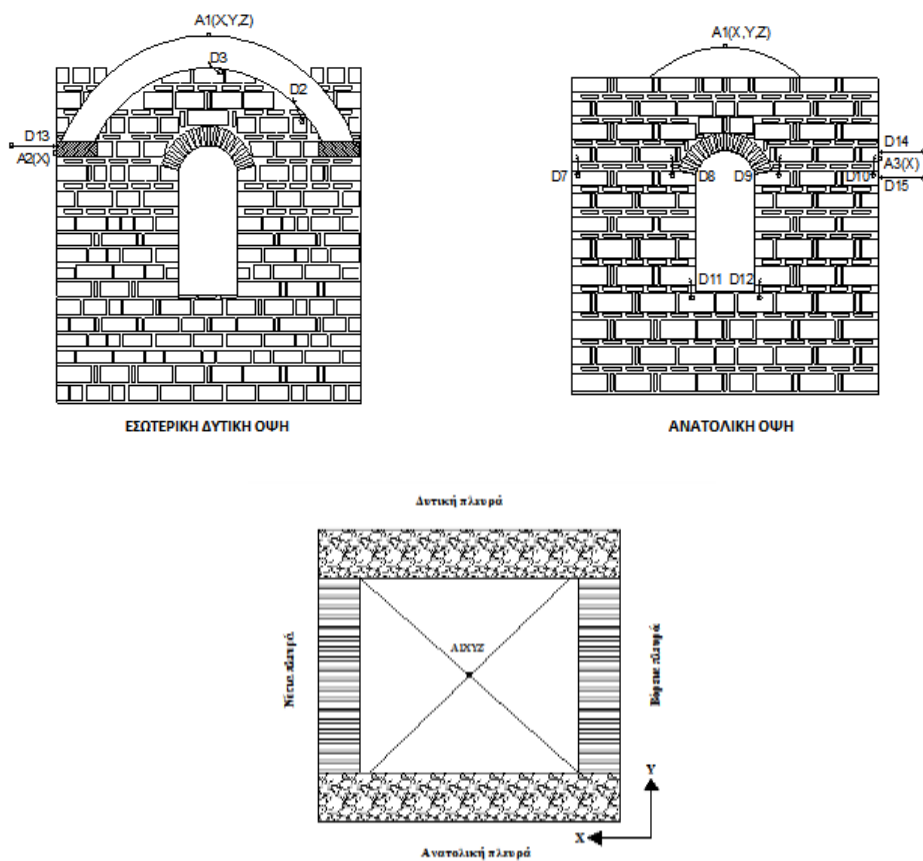
Σχήμα 4.48: Περιοχές πιθανής ανάπτυξης εφελκυστικών ρωγμών (α) Ανατολική όψη, (β) Νότια όψη

Οι περιοχές ανάπτυξης ρωγμών φαίνονται να συμπίπτουν με τις περιοχές που εμφανίστηκαν ρωγμές κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

4.3 Αποτελέσματα αναλύσεων δοκιμίου III

Για να εξεταστεί η σεισμική απόκριση του δοκιμίου III, πραγματοποιήθηκαν 3 αναλύσεις. Εξετάστηκαν τρεις δοκιμές σεισμικής διέγερσης κατά τη διεύθυνση X: δοκιμή 2 (100% σεισμού Igrinia), δοκιμή 3 (150% σεισμού Igrinia) και δοκιμή 6 (300% σεισμού Igrinia). Επειδή μέχρι και τη δοκιμή 7 δεν είχαν εμφανιστεί ρωγμές στο δοκίμιο, θεωρείται ότι η ελαστική ανάλυση μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά της κατασκευής και για τις 3 δοκιμές.

Για κάθε μια από τις παραπάνω αναλύσεις υπολογίστηκαν οι επιταχύνσεις και οι μετακινήσεις του προσομοιώματος του δοκιμίου σε σημεία όπου είχαν τοποθετηθεί τα όργανα των μετρήσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Συγκριμένα, υπολογίστηκε η επιτάχυνση A1X της κορυφής του σταυροθολίου, η επιτάχυνση A2X στην ανατολική όψη και η A3X στη δυτική. Υπολογίστηκαν επίσης, οι σχετικές μετακινήσεις RD13 στην δυτική όψη. Οι χρονοϊστορίες που προέκυψαν συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τις αντίστοιχες του πειράματος. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν ενδεικτικά οι κύριες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις τη χρονική στιγμή της μέγιστης επιτάχυνσης καθώς και η παραμόρφωση του φορέα.

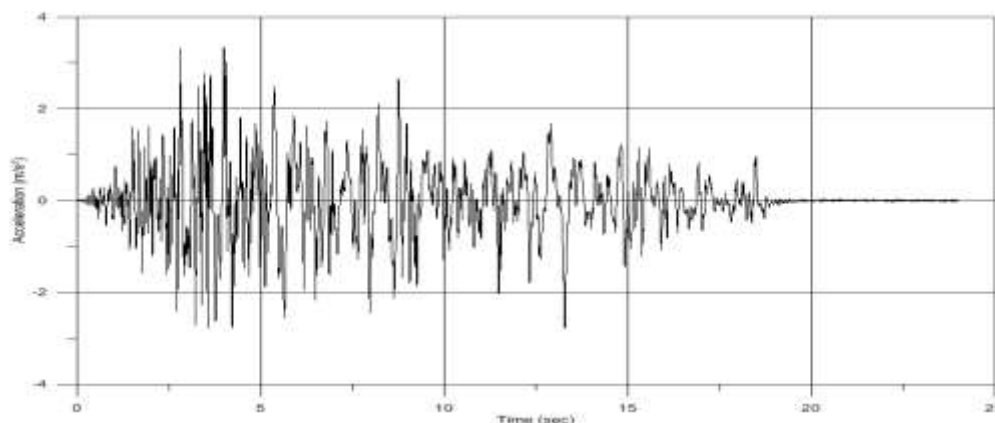


Σχήμα 4.49: Θέσεις μετρήσεων επιταχύνσεων και μετακινήσεων δοκιμίου III

4.3.1 Δοκιμή 2 κατά X

4.3.1.1 Σεισμική διέγερση βάσης

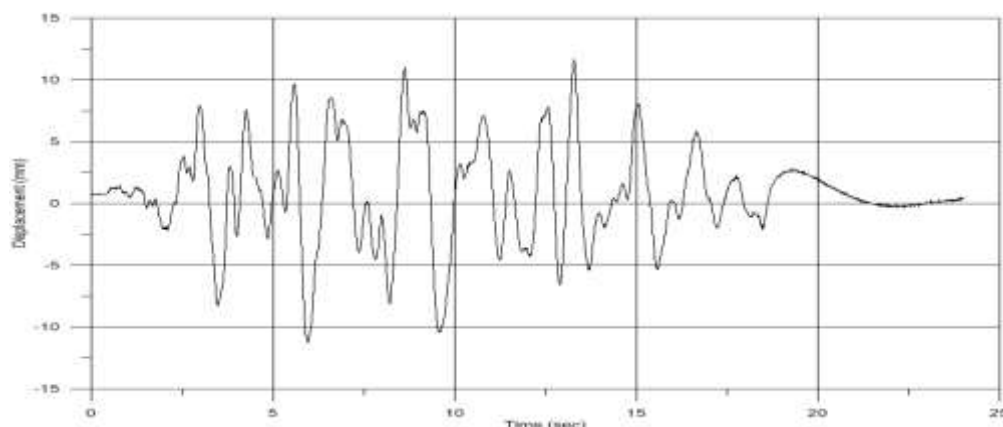
Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων της διέγερσης (100% σεισμού Irpinia) που εφαρμόστηκε στην βάση του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.50: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσης δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

Η μέγιστη επιτάχυνση βάσης ήταν $1,76\text{m/s}^2$

Στο σχήμα 4.51 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της μετακίνησης της βάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος:

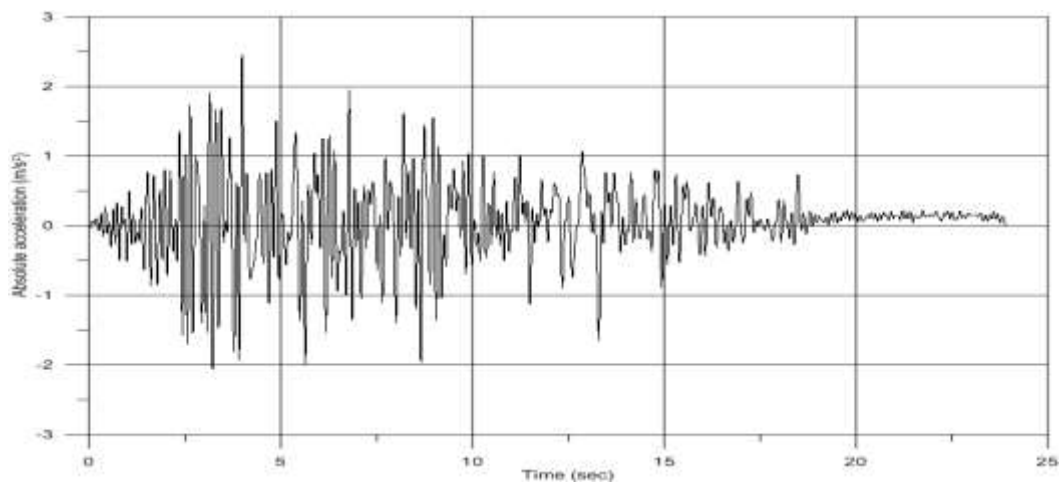


Σχήμα 4.51: Χρονοϊστορία μετακινήσεων βάσης δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

Η μέγιστη μετακίνησης βάσης που έχει καταγραφεί είναι 11,69mm.

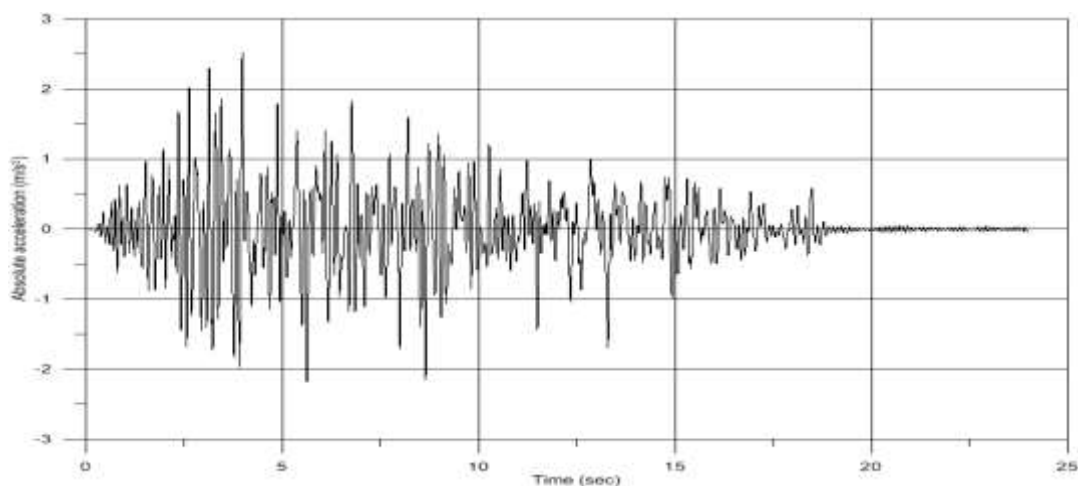
4.3.1.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων

Στο σχήμα 4.52 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης $A1X$ στην κορυφή του δοκιμίου, όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.53 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.



Σχήμα 4.52: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου III για τη δοκιμή 2
Πειραματικά αποτελέσματα

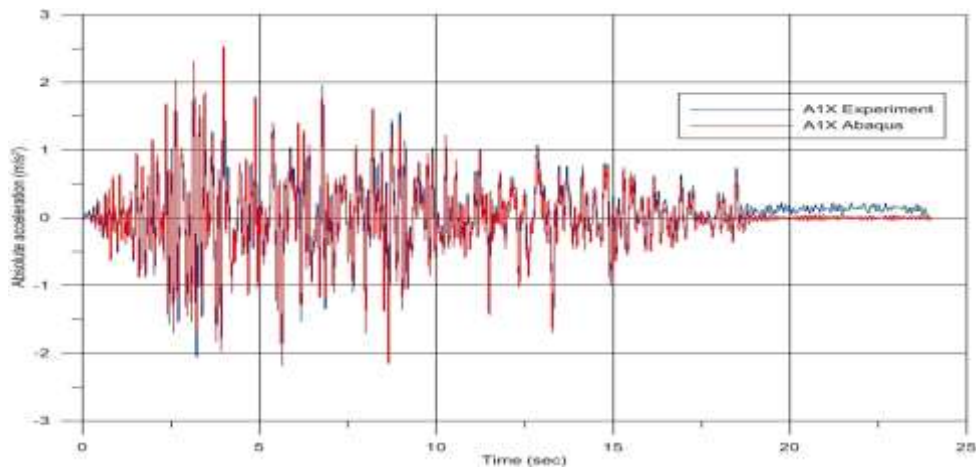
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $2,46\text{m/s}^2$.



Σχήμα 4.53: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου III για τη δοκιμή 2
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

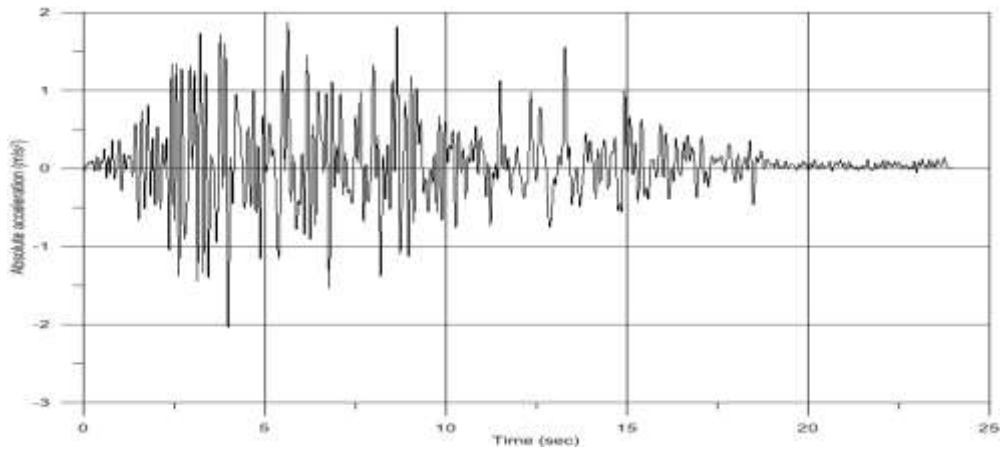
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $2,53\text{m/s}^2$.

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων από την οποία φαίνεται ότι το προσομοίωμα της ανάλυσης είχε περίπου την ίδια σεισμική απόκριση στην κορυφή του με το δοκίμιο του πειράματος..

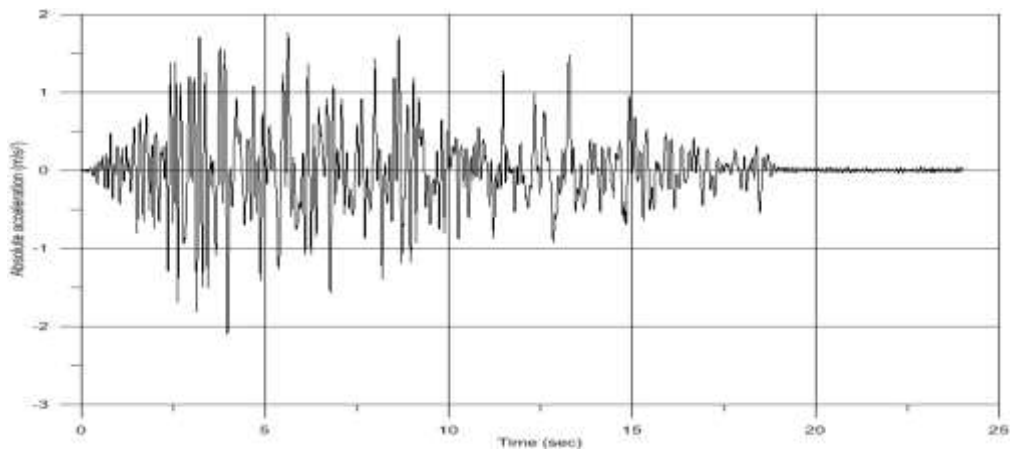


Σχήμα 4.54: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A1X δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

Στο σχήμα 4.55 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης A2X όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.56 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.

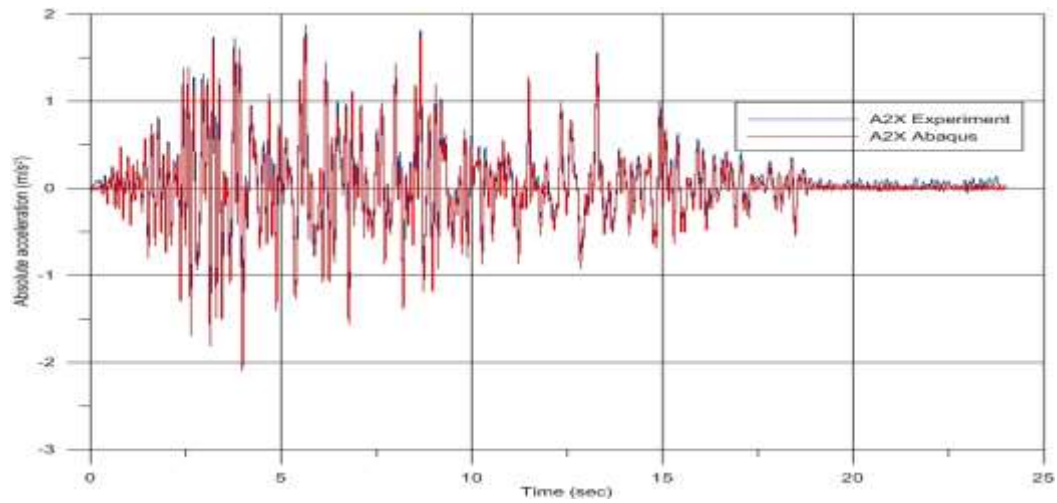


Σχήμα 4.55: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 2
Πειραματικά αποτελέσματα



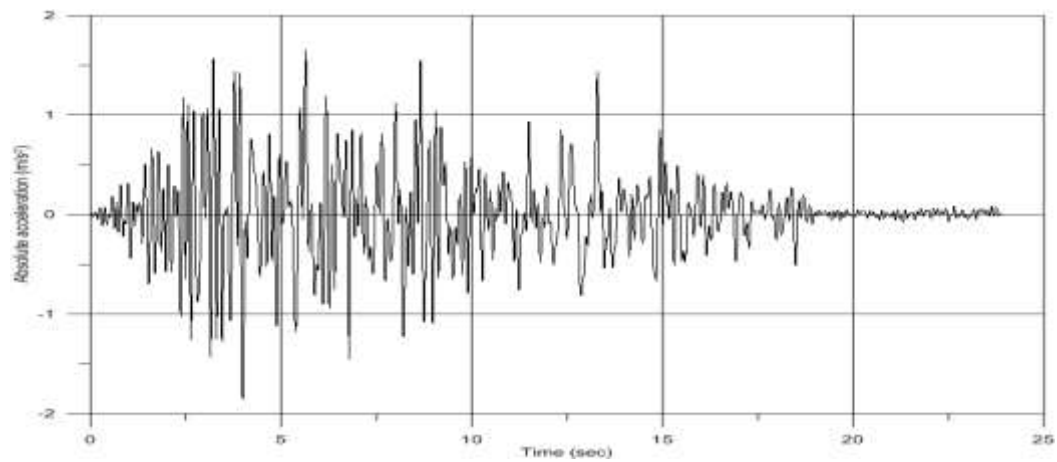
Σχήμα 4.56: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 2
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

Ακολουθεί η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων των επιταχύνσεων A2X

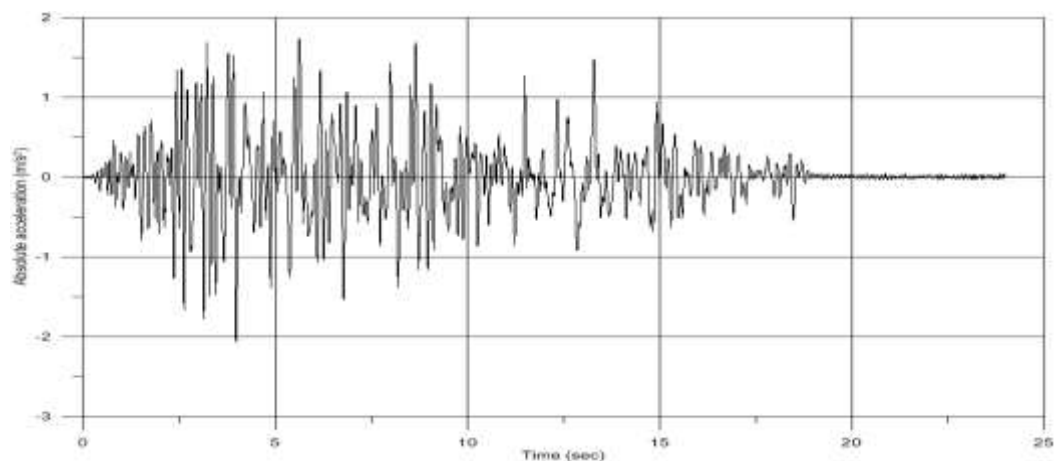


Σχήμα 4.57: Σύγκριση χρονιοιστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

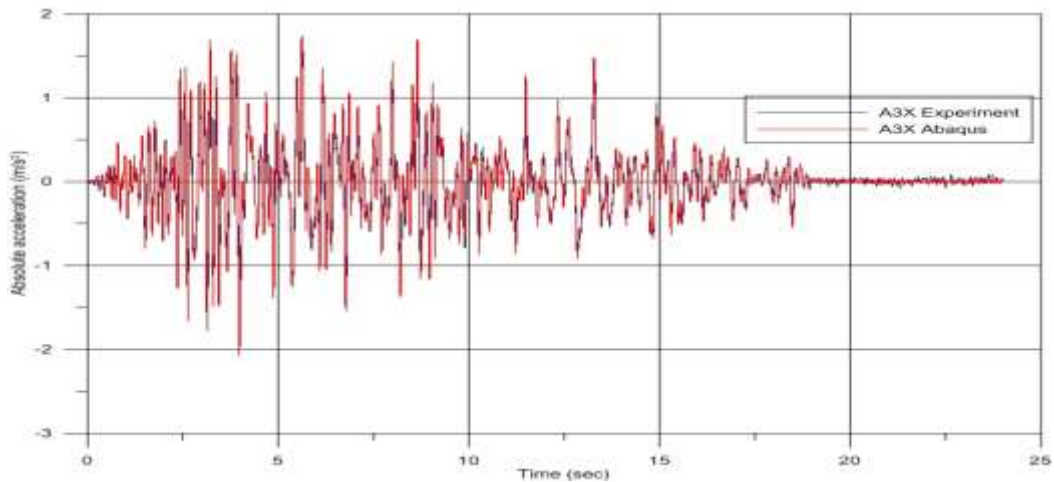
Τέλος, έγινε σύγκριση των επιταχύνσεων A3X.



Σχήμα 4.58: Χρονιοιστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 2 Πειραματικά αποτελέσματα



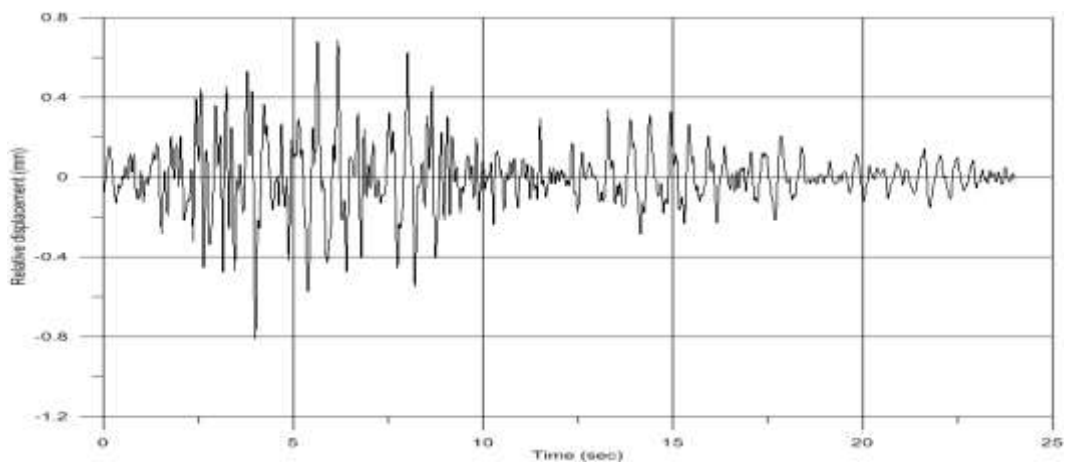
Σχήμα 4.59: Χρονιοιστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 2 Αποτελέσματα Abaqus



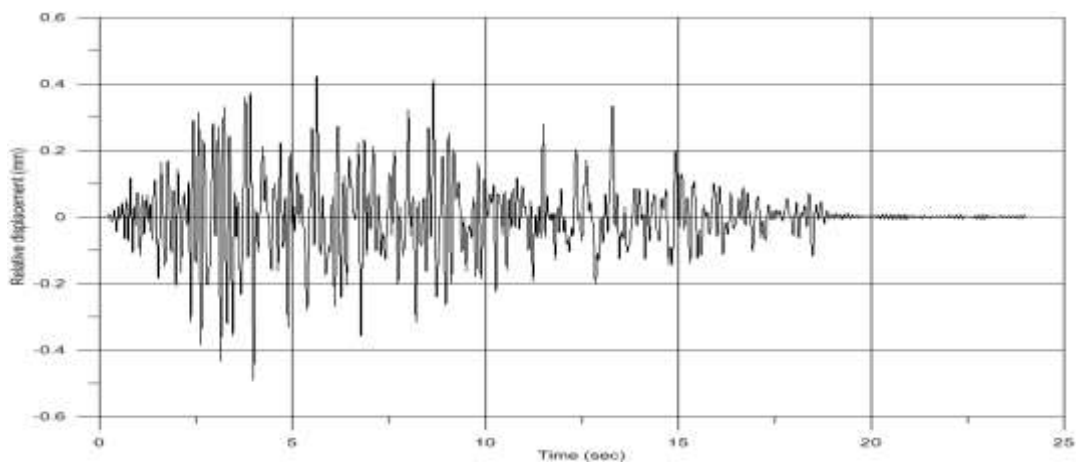
Σχήμα 4.60: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

4.3.1.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων

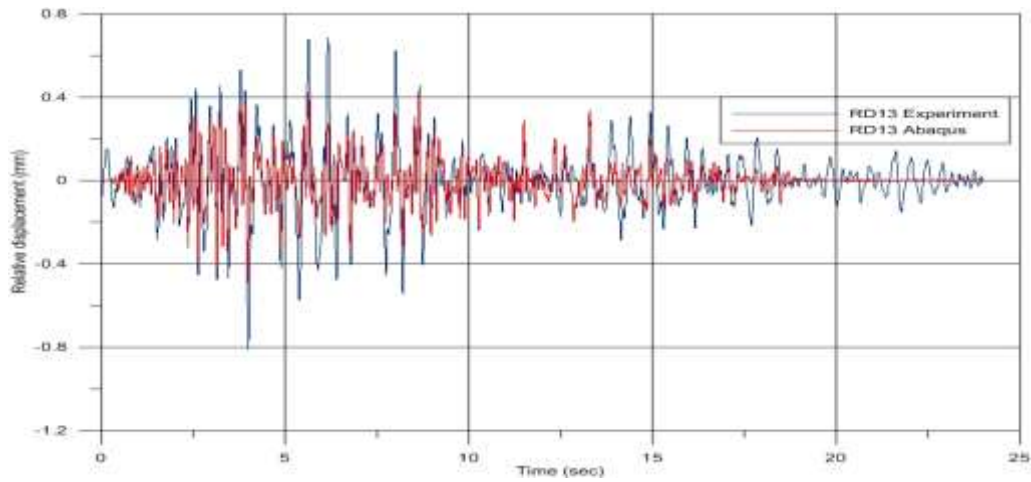
Ελέγχθηκε η σχετική μετακίνηση RD13 στον πεσσό της δυτικής όψης. Σημειώνεται ότι κατά τη σεισμική δοκιμή είχε καταγραφεί η απόλυτη μετακίνηση D13. Επομένως, η σχετική μετακίνηση προέκυψε από τη διανυσματική αφαίρεση της μετακίνησης της βάσης από την απόλυτη μετακίνηση.



Σχήμα 4.61: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 2
Πειραματικά αποτελέσματα



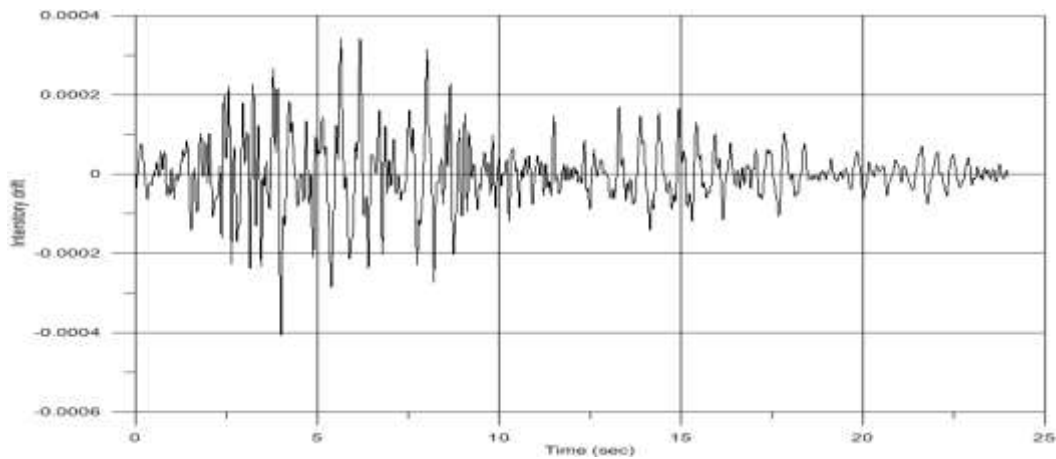
Σχήμα 4.62: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 2
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus



Σχήμα 4.63: Σύγκριση χρονιοιστοριών σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

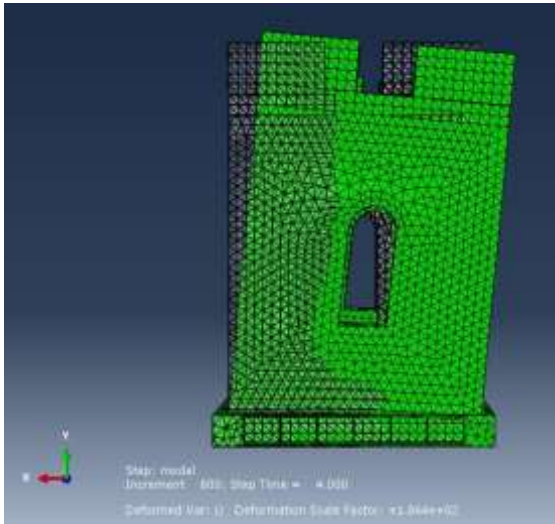
Υπολογίστηκε επίσης η οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) του δοκιμίου που είναι ίση με το λόγο της σχετικής μετακίνησης RD13 προς το ύψος του σημείου μέτρησης της, μετρούμενο από τη βάση του δοκιμίου.

$$\text{Συγκριμένα, } drift = \frac{RD13}{H=2000mm}$$

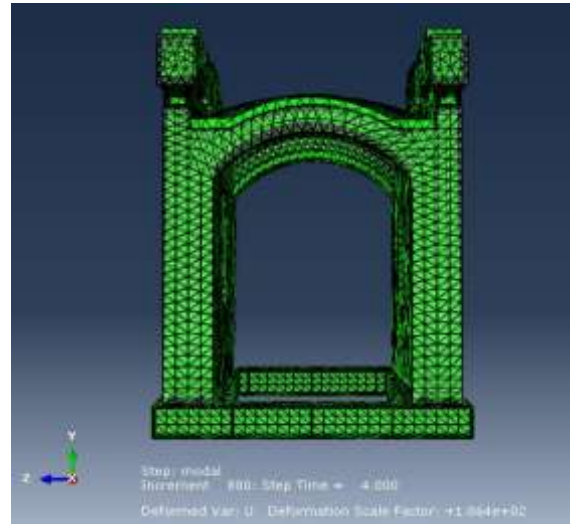


Σχήμα 4.64: Υπολογισμός interstory drift του δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

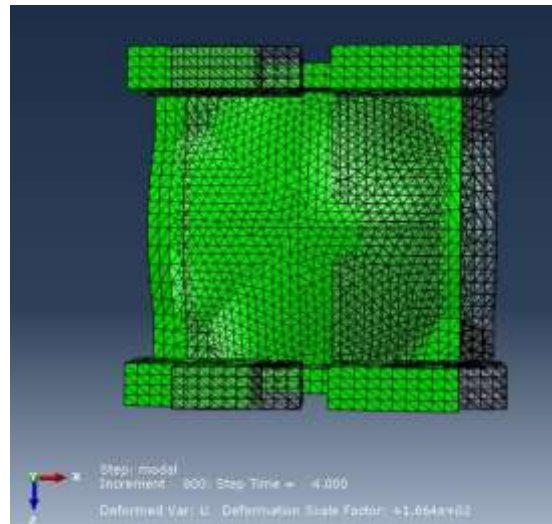
Ενδεικτικά παρατίθενται ορισμένες απεικονίσεις του παραμορφωμένου φορέα τη χρονική στιγμή $T=4\text{sec}$, όταν η σεισμική διέγερση της βάσης έπαιρνε περίπου μέγιστη τιμή της.



(α)



(β)

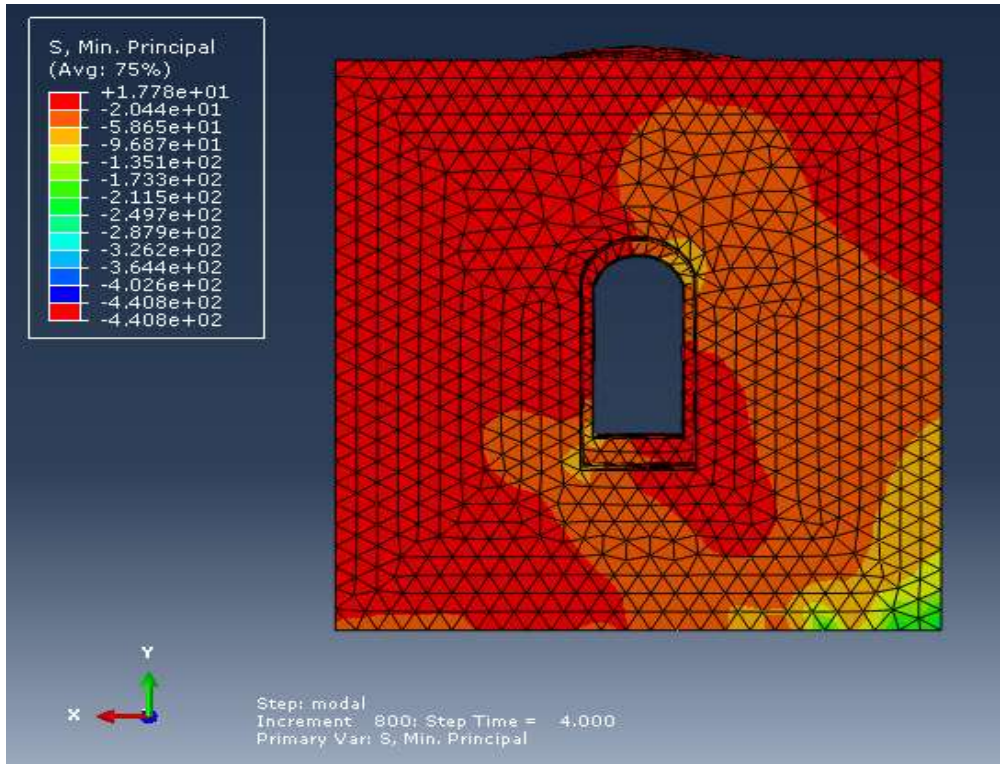


(γ)

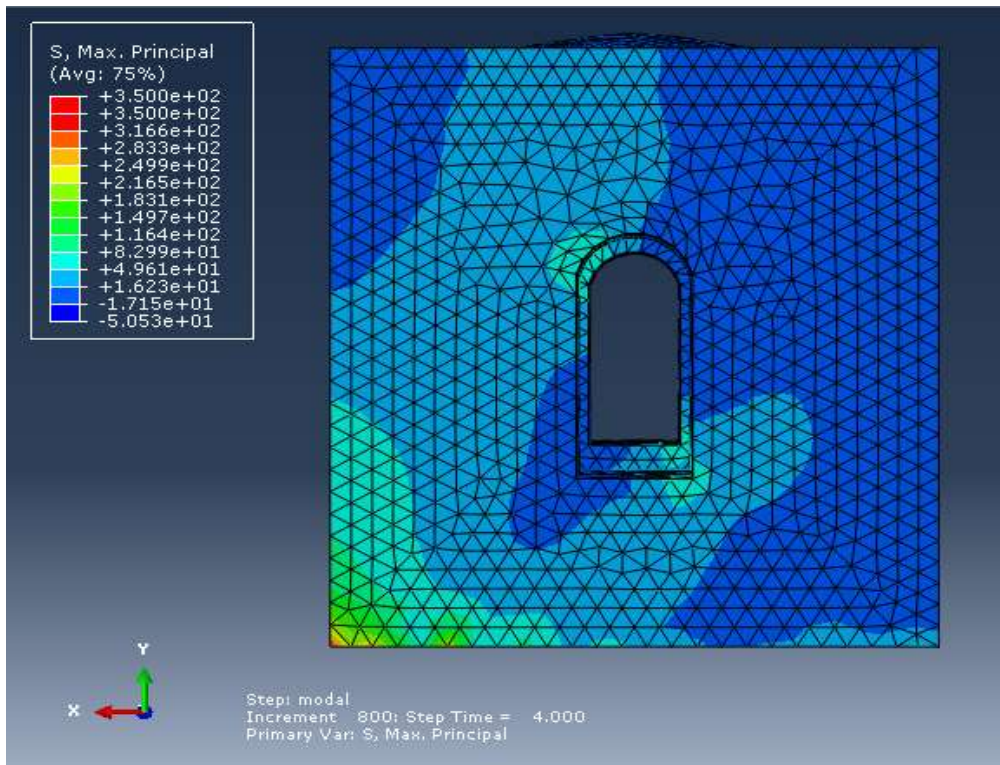
Σχήμα 4.65 : Παραμόρφωση δοκιμίου II τη χρονική στιγμή $T=4sec$ (α) ανατολική όψη, (β) νότια όψη, (γ) κάτωψη

4.3.1.4 Αποτελέσματα τάσεων

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων κυρίων τάσεων τη χρονική στιγμή $T=4sec$.



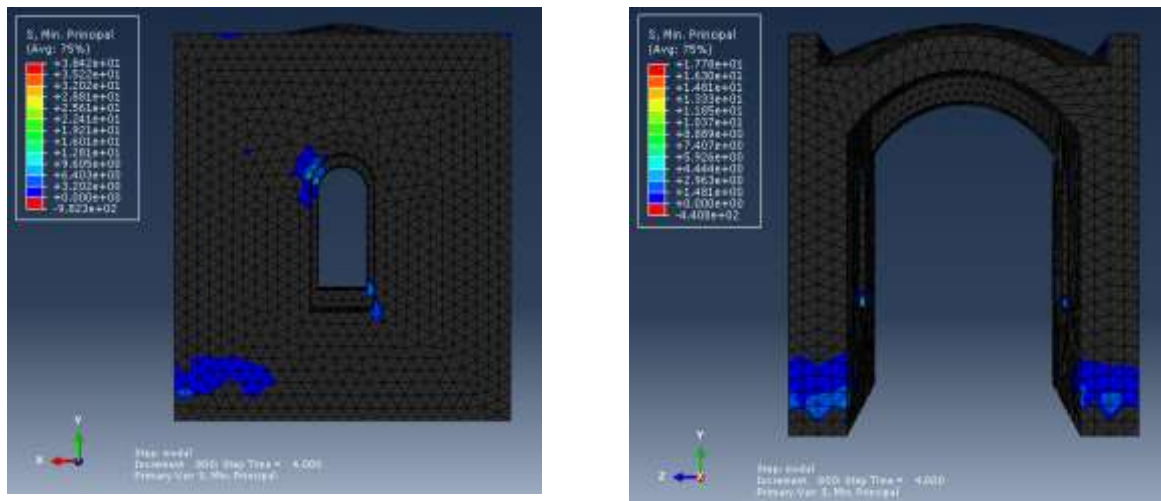
Σχήμα 4.66 :Κατανομή ελάχιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου III (δοκιμή 2)



Σχήμα 4.67 :Κατανομή μέγιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου III (δοκιμή 2)

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται στη βάση το δοκιμίου, αλλά και στο ύψος του τόξου των παραθύρων καθώς και στη γωνία του παραθύρου κάτω. Προκειμένου να φανούν οι περιοχές πιθανής ανάπτυξης των

εφελκυστικών ρωγμών στο διάγραμμα των ελάχιστων κυρίων τάσεων εμφανίζονται μόνο οι περιοχές με τιμή άνω του μηδενός, όπου εμφανίζεται τριαξονική ένταση.



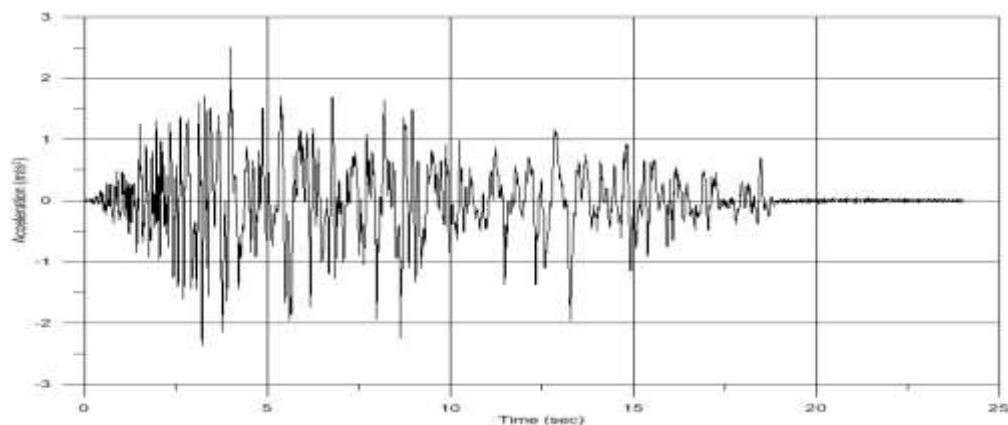
Σχήμα 4.68 : Περιοχές πιθανής ανάπτυξης εφελκυστικών ρωγμών (α) Ανατολική όψη, (β) Νότια όψη

Οι περιοχές ανάπτυξης ρωγμών φαίνονται να συμπίπτουν με κάποιες από τις περιοχές που εμφανίστηκαν ρωγμές κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

4.3.2 Δοκιμή 3 κατά X

4.3.2.1 Σεισμική διέγερση βάσης

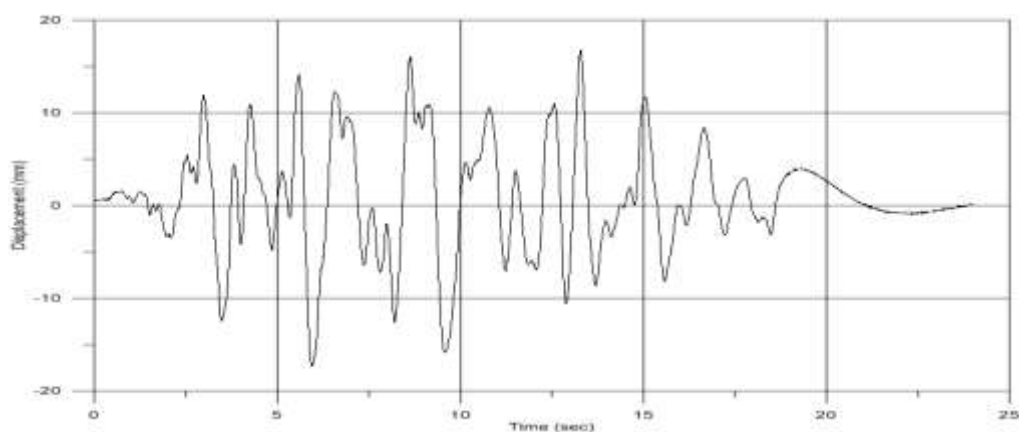
Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων της διέγερσης (150% σεισμού Irpinia) που εφαρμόστηκε στην βάση του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.69: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσης δοκιμίου III για τη δοκιμή 3

Η μέγιστη επιτάχυνση βάσης ήταν $2,51\text{m/s}^2$

Στο σχήμα 4.70 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της μετακίνησης της βάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος:

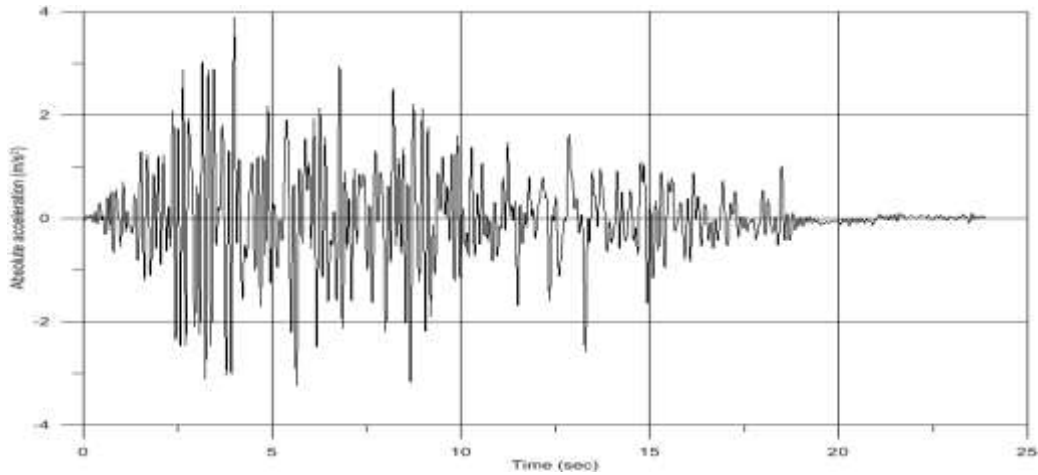


Σχήμα 4.70: Χρονοϊστορία μετακινήσεων βάσης δοκιμίου III για τη δοκιμή 3

Η μέγιστη μετακίνησης βάσης που έχει καταγραφεί είναι 17,36mm.

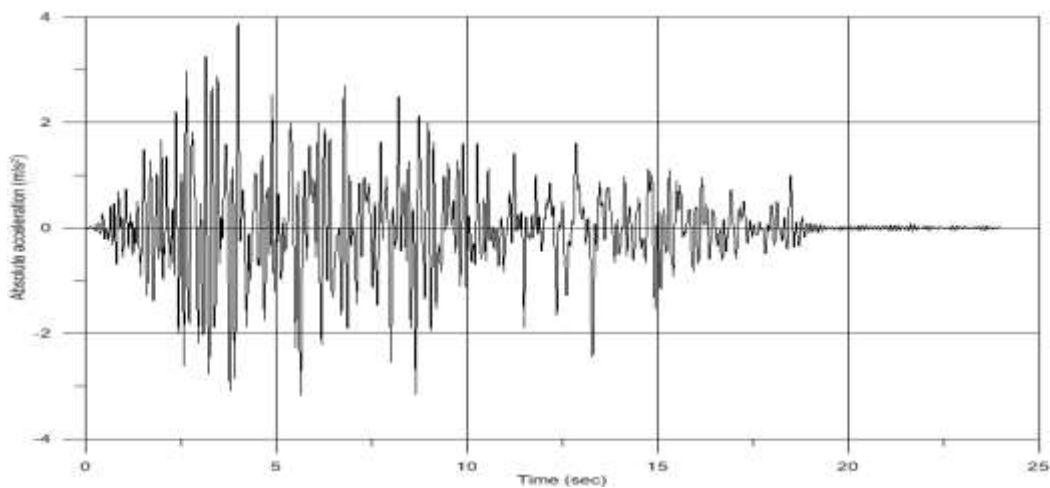
4.3.2.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων

Στο σχήμα 4.71 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης $A1X$ στην κορυφή του δοκιμίου, όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.72 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.



Σχήμα 4.71: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Πειραματικά αποτελέσματα

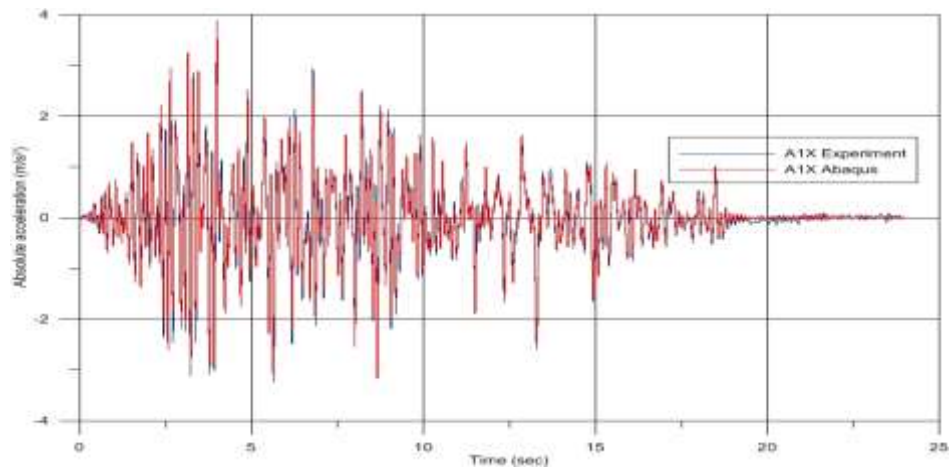
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $3,88\text{m/s}^2$.



Σχήμα 4.72: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

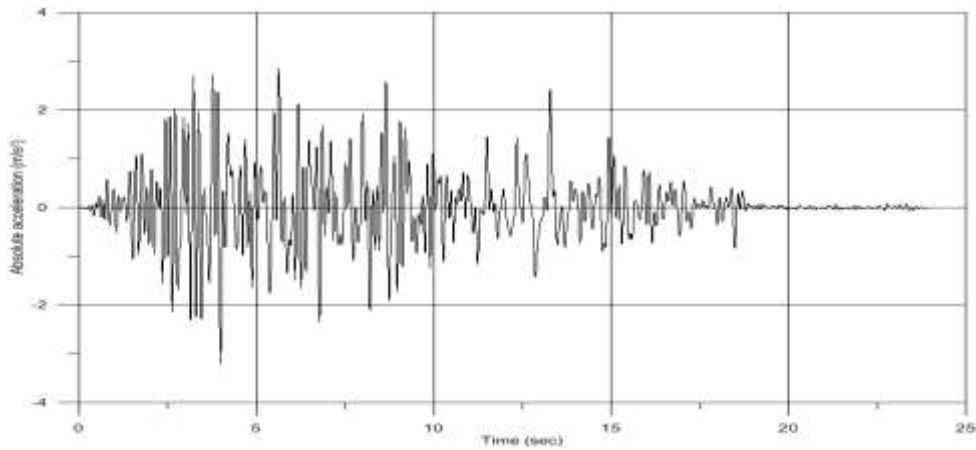
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $3,88\text{m/s}^2$.

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων από την οποία φαίνεται ότι το προσομοίωμα της ανάλυσης είχε περίπου την ίδια σεισμική απόκριση στην κορυφή του με το δοκίμιο του πειράματος..

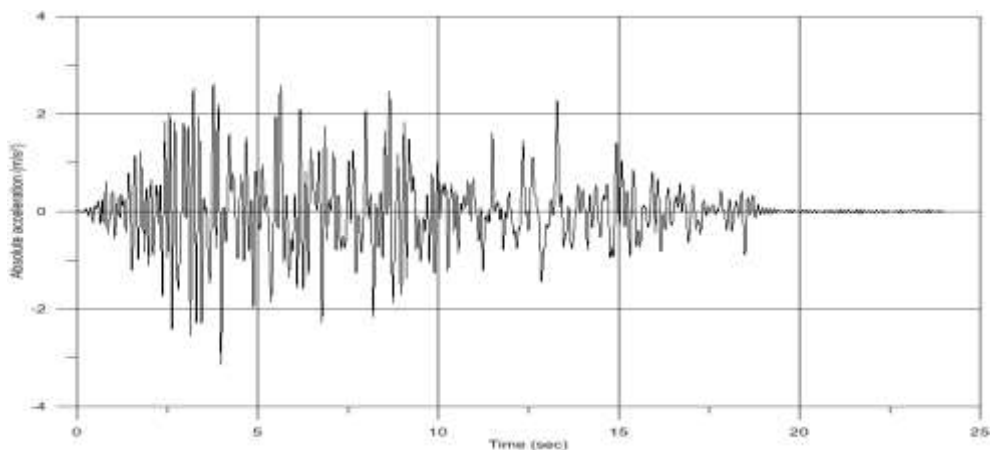


Σχήμα 4.73: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A1X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3

Στο σχήμα 4.74 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης A2X όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.75 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.

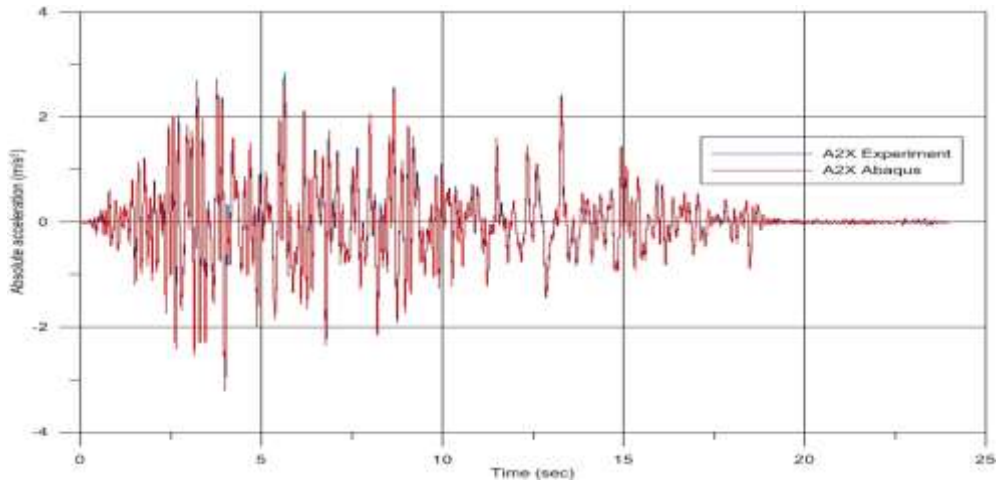


Σχήμα 4.74: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Πειραματικά αποτελέσματα



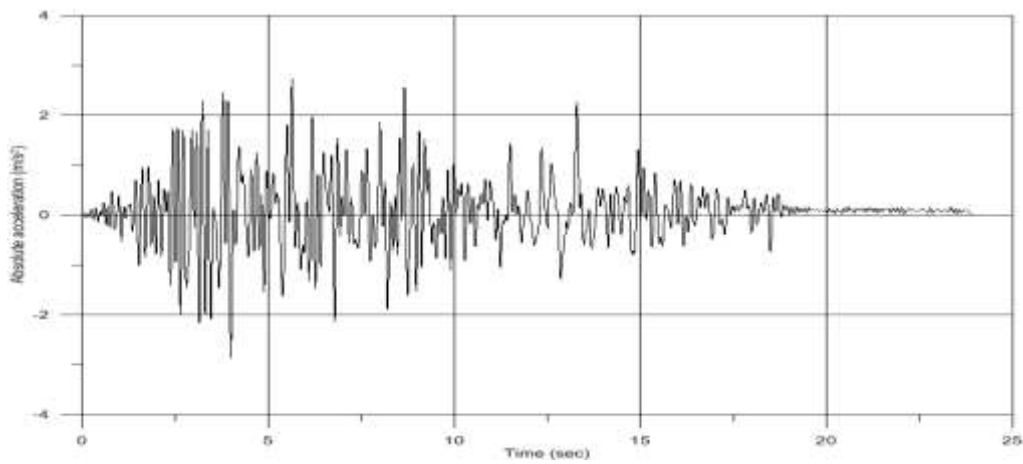
Σχήμα 4.75: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

Ακολουθεί η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων των επιταχύνσεων A2X

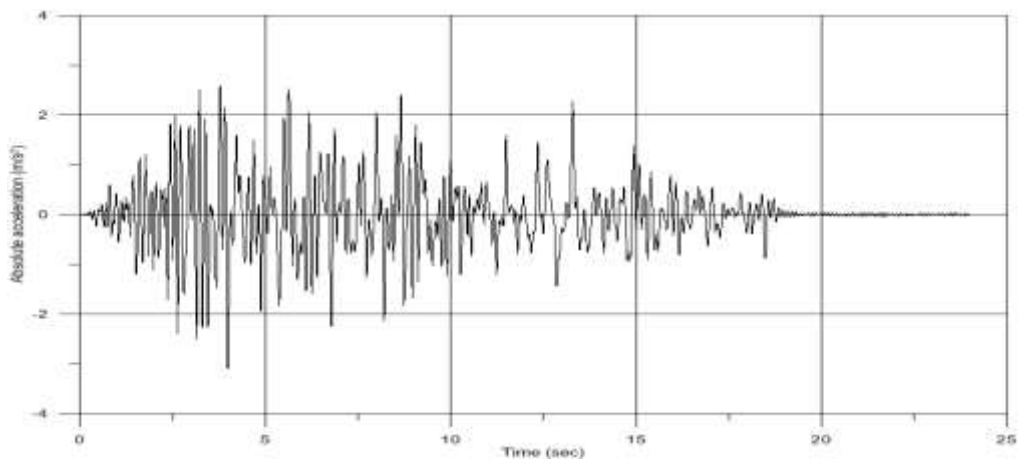


Σχήμα 4.76: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3

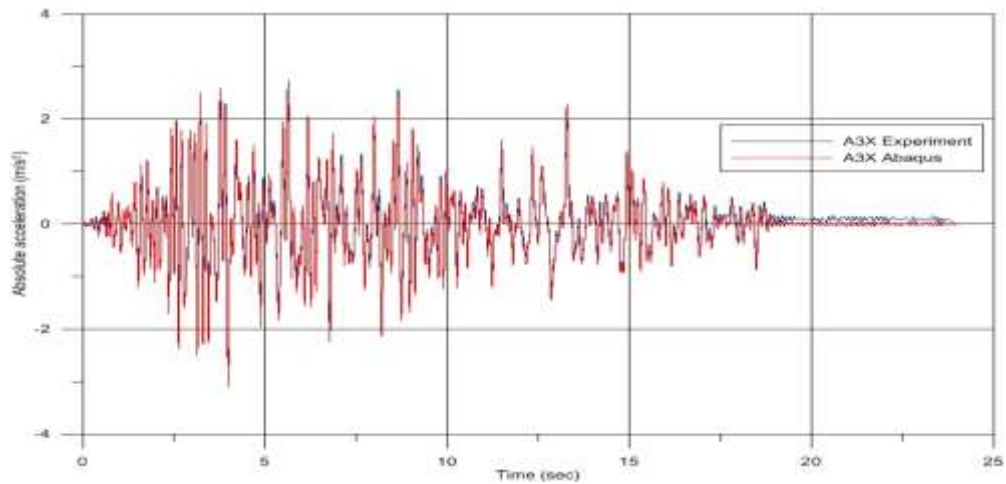
Τέλος, έγινε σύγκριση των επιταχύνσεων A3X.



Σχήμα 4.77: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Πειραματικά αποτελέσματα



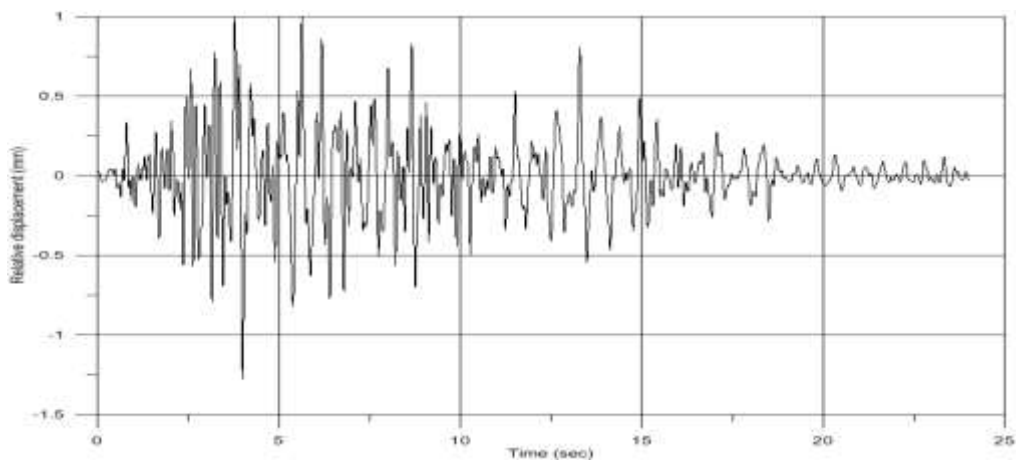
Σχήμα 4.78: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Αποτελέσματα Abaqus



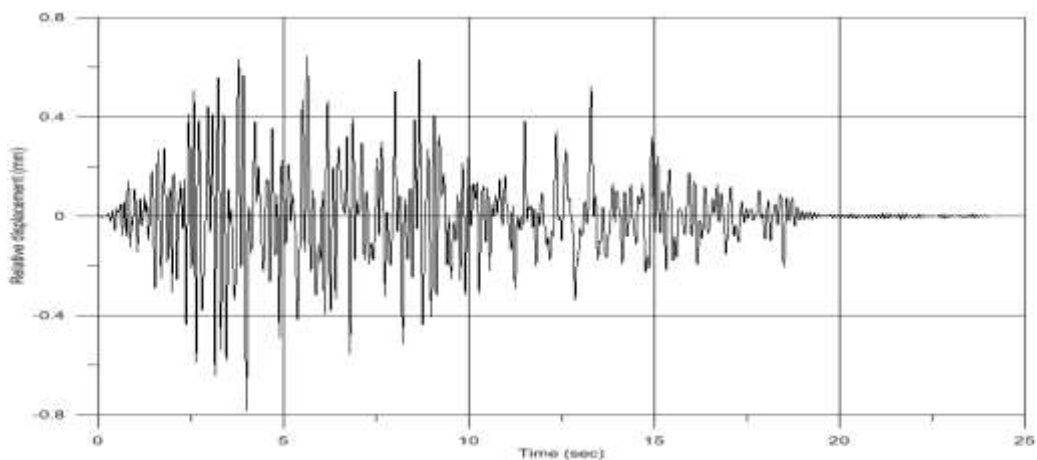
Σχήμα 4.79: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3

4.3.2.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων

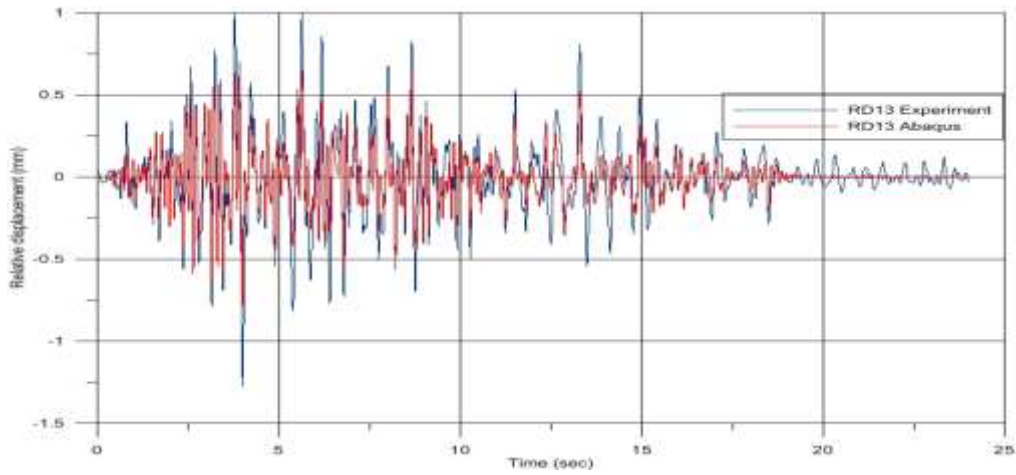
Ελέγχθηκε η σχετική μετακίνηση RD13 στον πεσσό της δυτικής όψης. Σημειώνεται ότι κατά τη σεισμική δοκιμή είχε καταγραφεί η απόλυτη μετακίνηση D13. Επομένως, η σχετική μετακίνηση προέκυψε από τη διανυσματική αφαίρεση της μετακίνησης της βάσης από την απόλυτη μετακίνηση.



Σχήμα 4.80: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Πειραματικά αποτελέσματα



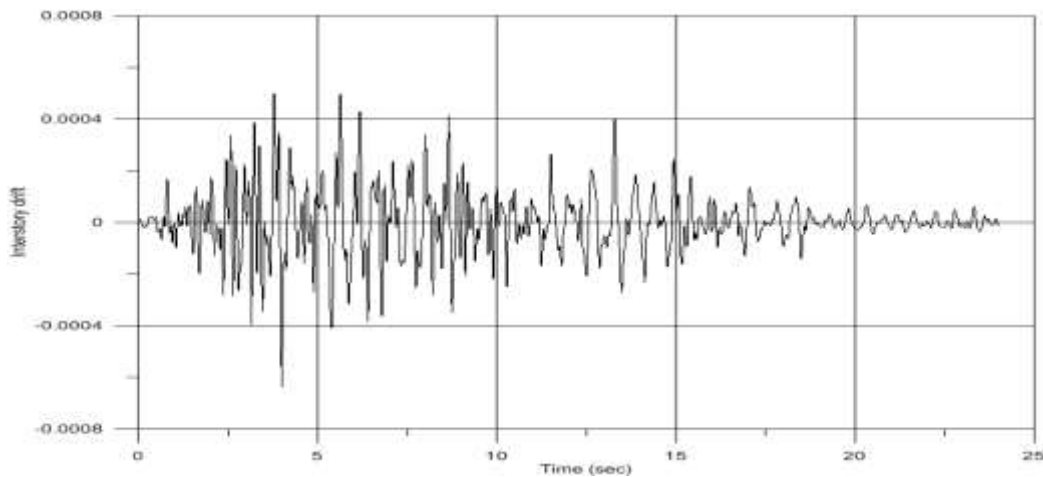
Σχήμα 4.81: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus



Σχήμα 4.82: Σύγκριση χρονοϊστοριών σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 3

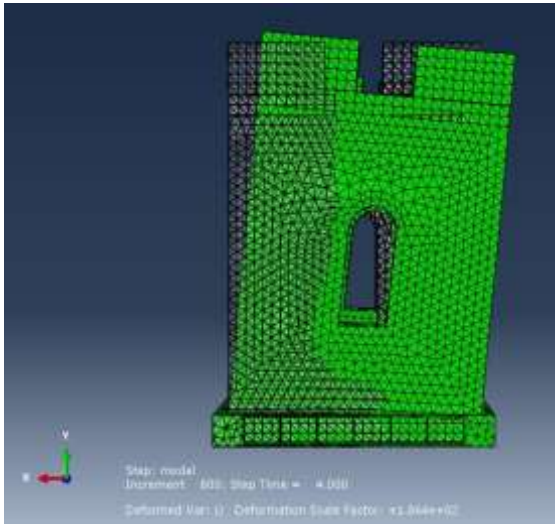
Υπολογίστηκε επίσης η οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) του δοκιμίου που είναι ίση με το λόγο της σχετικής μετακίνησης RD13 προς το ύψος του σημείου μέτρησης της, μετρούμενο από τη βάση του δοκιμίου.

$$\text{Συγκριμένα, } drift = \frac{RD13}{H=2000mm}$$

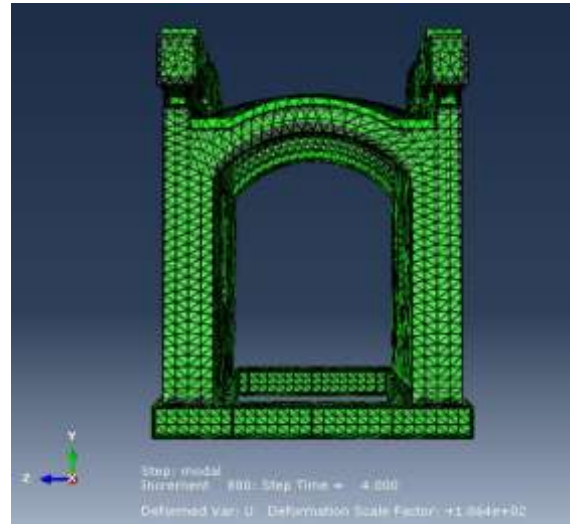


Σχήμα 4.83: Υπολογισμός interstory drift του δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

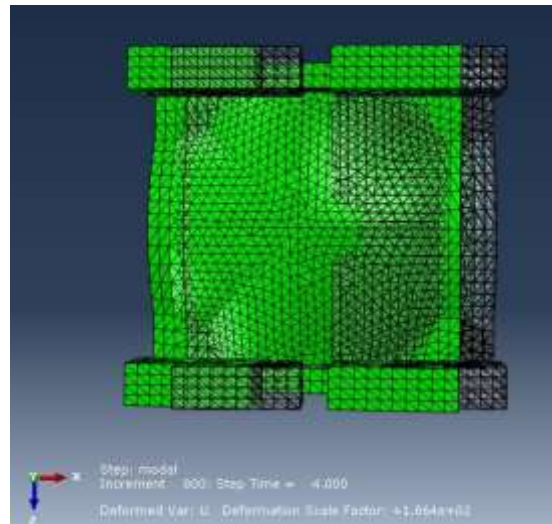
Ενδεικτικά παρατίθενται ορισμένες απεικονίσεις του παραμορφωμένου φορέα τη χρονική στιγμή $T=4\text{sec}$, όταν η σεισμική διέγερση της βάσης έπαιρνε περίπου μέγιστη τιμή της.



(α)



(β)

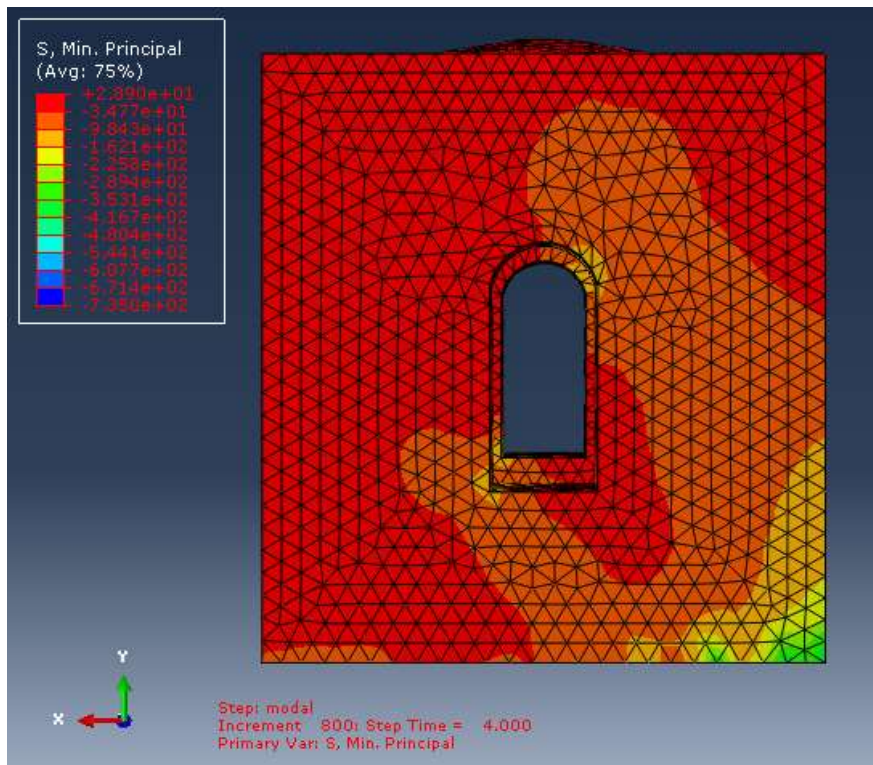


(γ)

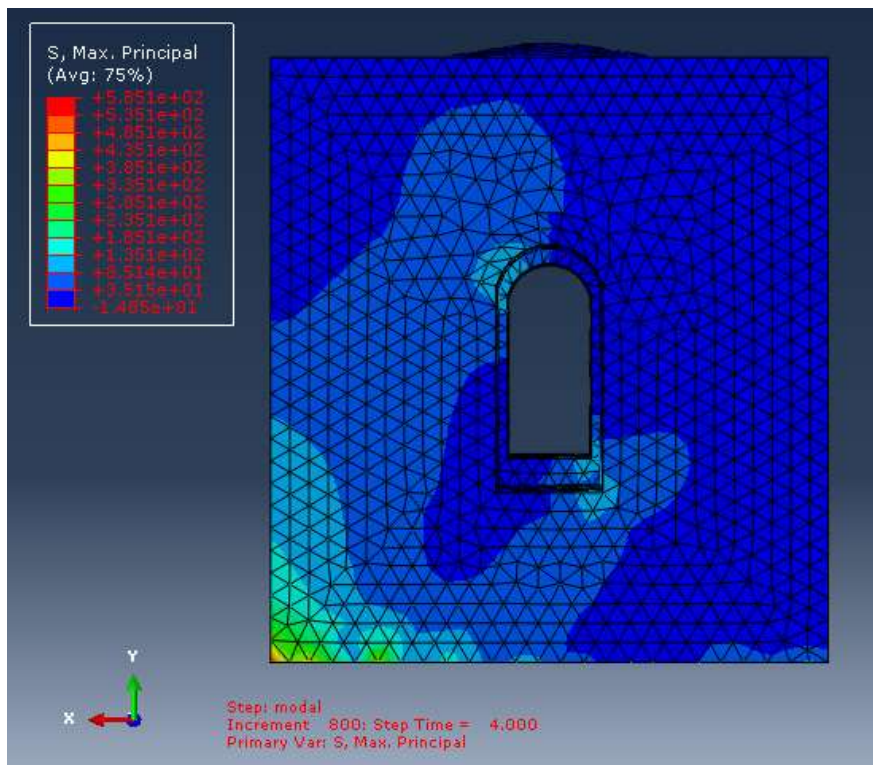
Σχήμα 4.84 : Παραμόρφωση δοκιμίου II τη χρονική στιγμή $T=4sec$ (α) ανατολική όψη, (β) νότια όψη, (γ) κάτωψη

4.3.2.4 Αποτελέσματα τάσεων

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων κυρίων τάσεων τη χρονική στιγμή $T=4sec$.



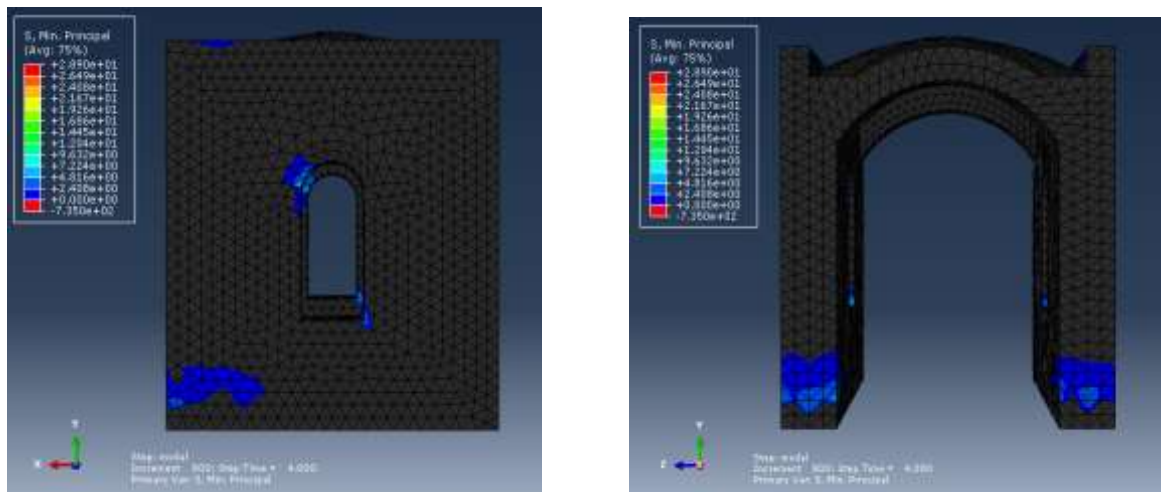
Σχήμα 4.85 :Κατανομή ελάχιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου III (δοκιμή 3)



Σχήμα 4.86 :Κατανομή μέγιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου III (δοκιμή 3)

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται στη βάση το δοκιμίου, αλλά και στο ύψος του τόξου των παραθύρων καθώς και στη γωνία του παραθύρου κάτω. Προκειμένου να φανούν οι περιοχές πιθανής ανάπτυξης των

εφελκυστικών ρωγμών στο διάγραμμα των ελάχιστων κυρίων τάσεων εμφανίζονται μόνο οι περιοχές με τιμή άνω του μηδενός, όπου εμφανίζεται τριαξονική ένταση.



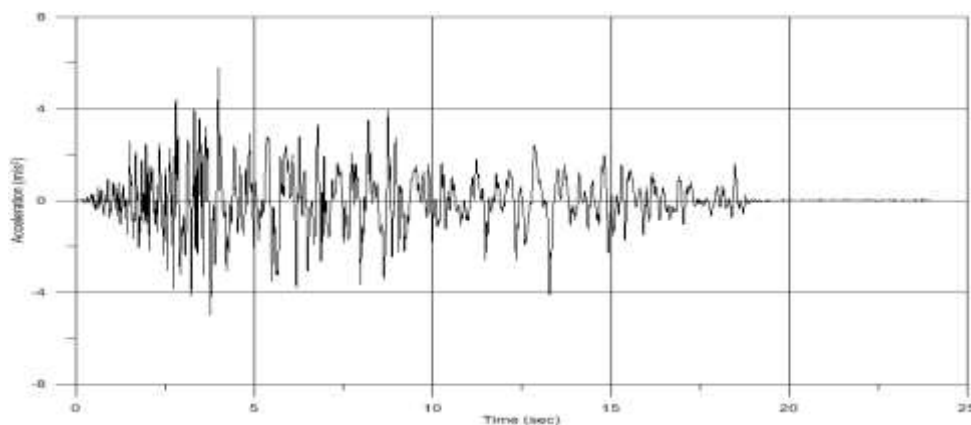
Σχήμα 4.87 : Περιοχές πιθανής ανάπτυξης εφελκυστικών ρωγμών (α) Ανατολική όψη, (β) Νότια όψη

Οι περιοχές ανάπτυξης ρωγμών φαίνονται να συμπίπτουν με κάποιες από τις περιοχές που εμφανίστηκαν ρωγμές κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

4.3.3 Δοκιμή 6 κατά X

4.3.3.1 Σεισμική διέγερση βάσης

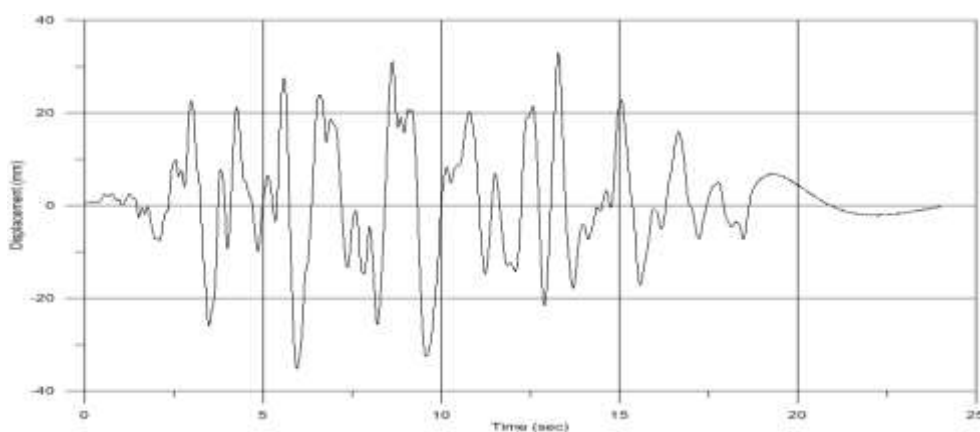
Η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων της διέγερσης (300% σεισμού Irpinia) που εφαρμόστηκε στην βάση του προσομοιώματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.88: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσης δοκιμίου III για τη δοκιμή 6

Η μέγιστη επιτάχυνση βάσης ήταν $5,78\text{m/s}^2$

Στο σχήμα 4.89 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της μετακίνησης της βάσης κατά τη διάρκεια του πειράματος:

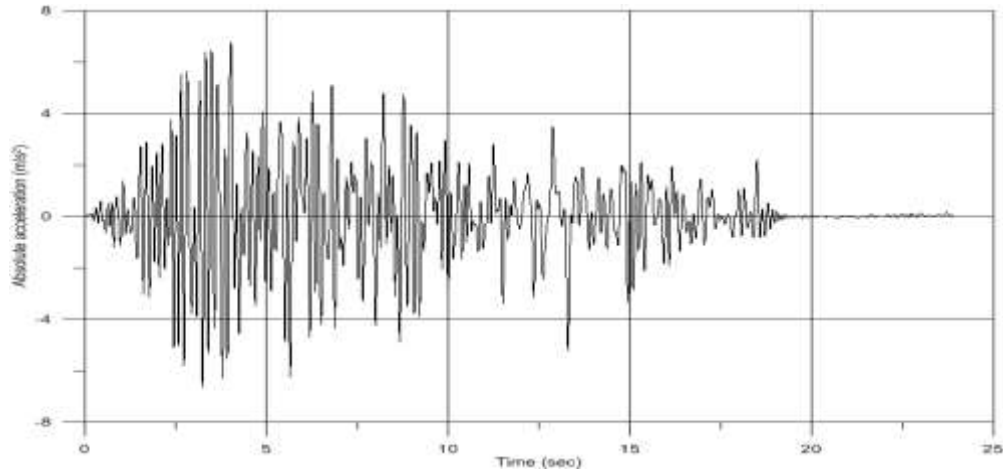


Σχήμα 4.89: Χρονοϊστορία μετακινήσεων βάσης δοκιμίου III για τη δοκιμή 6

Η μέγιστη μετακίνησης βάσης που έχει καταγραφεί είναι 35,33mm.

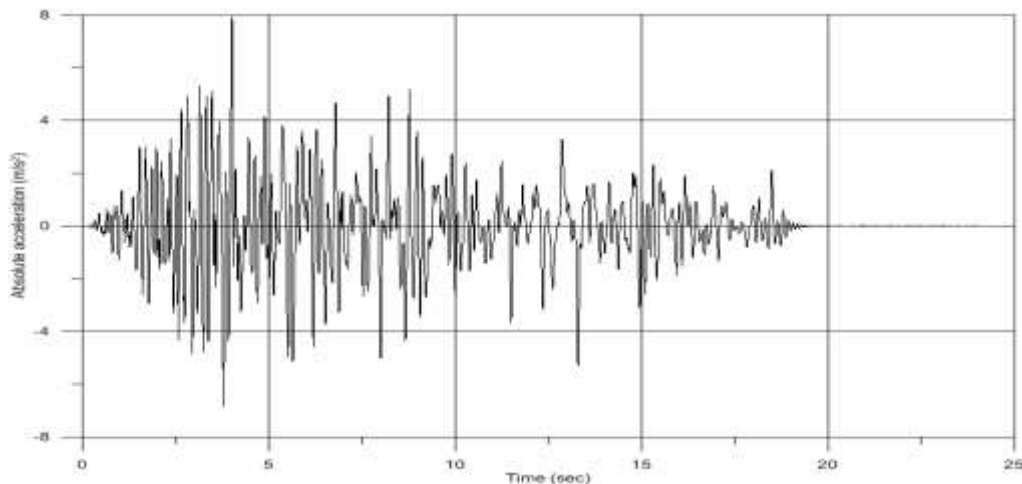
4.3.3.2 Αποτελέσματα επιταχύνσεων

Στο σχήμα 4.90 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης $A1X$ στην κορυφή του δοκιμίου, όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.91 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.



Σχήμα 4.90: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Πειραματικά αποτελέσματα

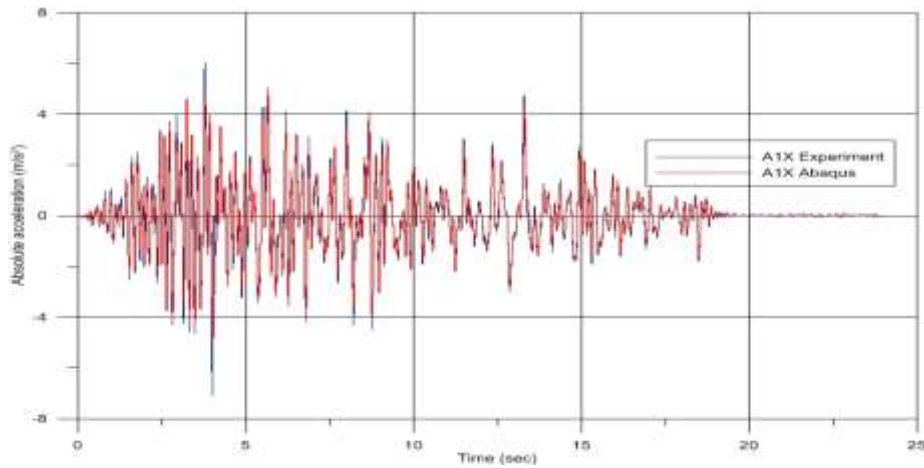
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $6,79\text{m/s}^2$.



Σχήμα 4.91: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων AIX δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

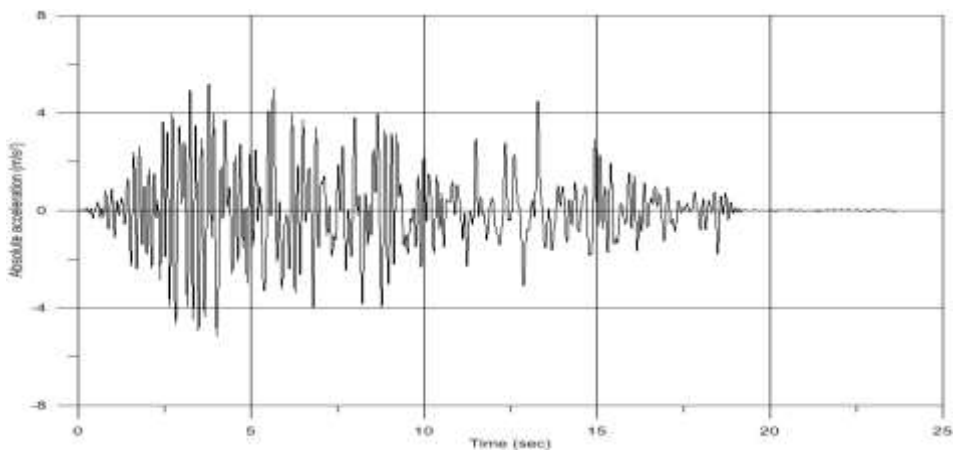
Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης κορυφής ήταν $7,93\text{m/s}^2$.

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων από την οποία φαίνεται ότι το προσομοίωμα της ανάλυσης είχε περίπου την ίδια σεισμική απόκριση στην κορυφή του με το δοκίμιο του πειράματος. Ωστόσο, οι επιταχύνσεις που υπολογίστηκαν αναλυτικά για απόσβεση $\zeta=21,2\%$ ήταν μεγαλύτερες από αυτές του πειράματος, γεγονός που σημαίνει ότι η απόσβεση ήταν μεγαλύτερη λόγω ανάπτυξης ρωγμών.

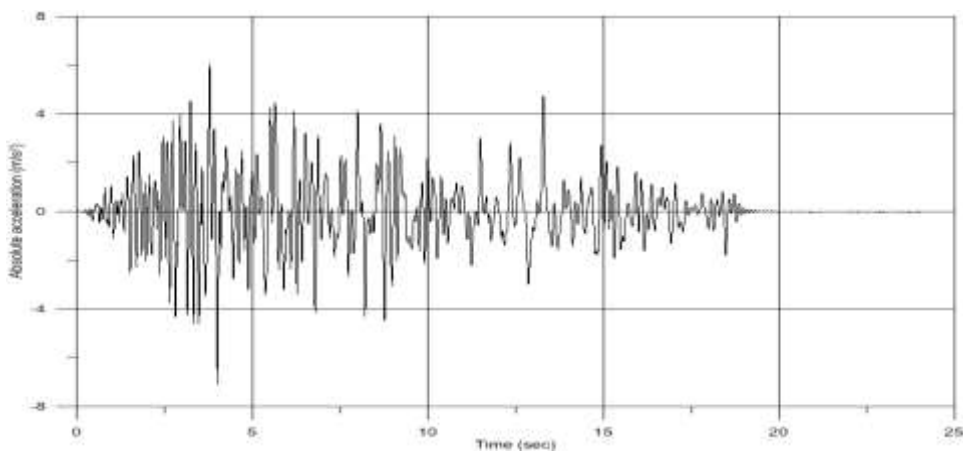


Σχήμα 4.92: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A1X δοκιμίου III για τη δοκιμή 6

Στο σχήμα 4.93 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της απόλυτης επιτάχυνσης A2X όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο σχήμα 4.94 φαίνεται η αντίστοιχη επιτάχυνση όπως υπολογίστηκε από την ελαστική ανάλυση στο Abaqus.

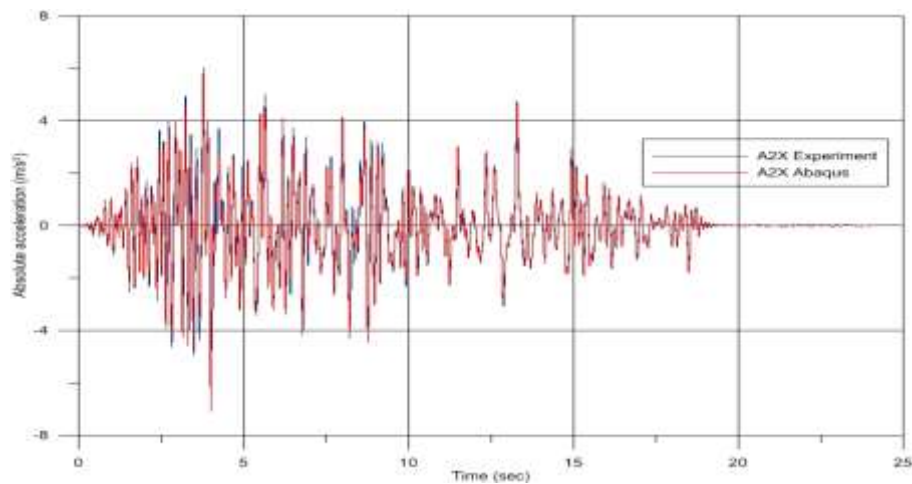


Σχήμα 4.93: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Πειραματικά αποτελέσματα

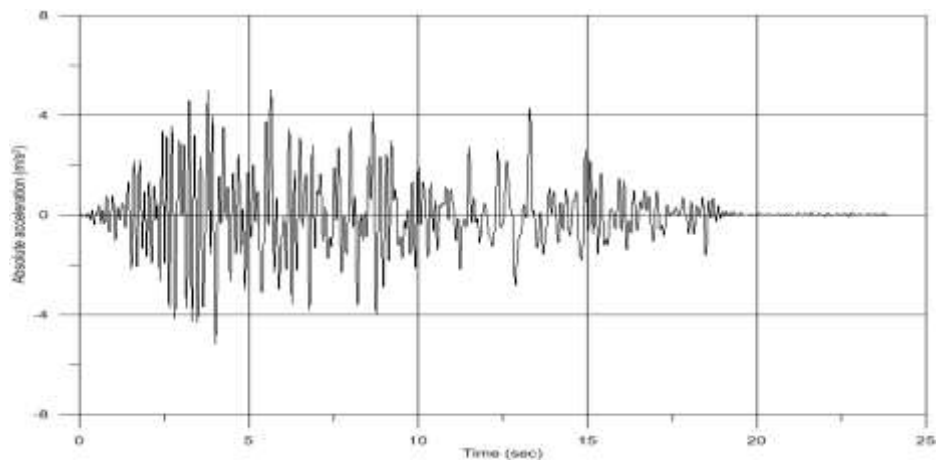


Σχήμα 4.94: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus

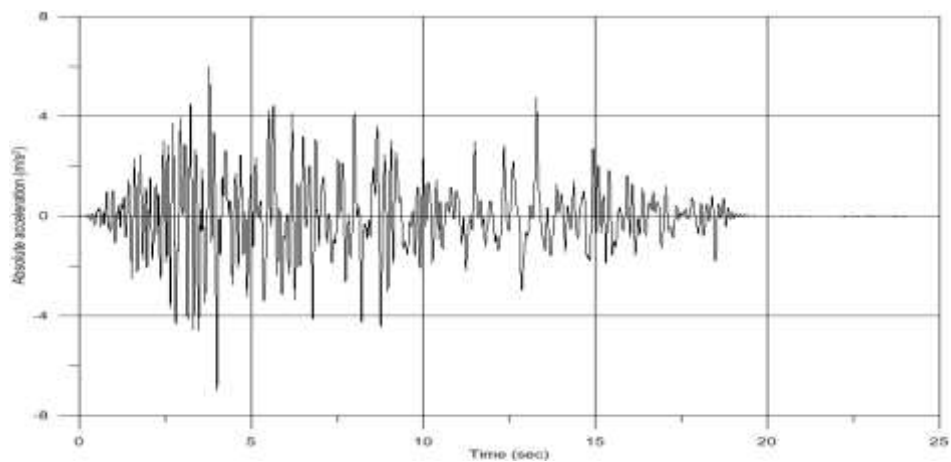
Ακολουθεί η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων των επιταχύνσεων A2X



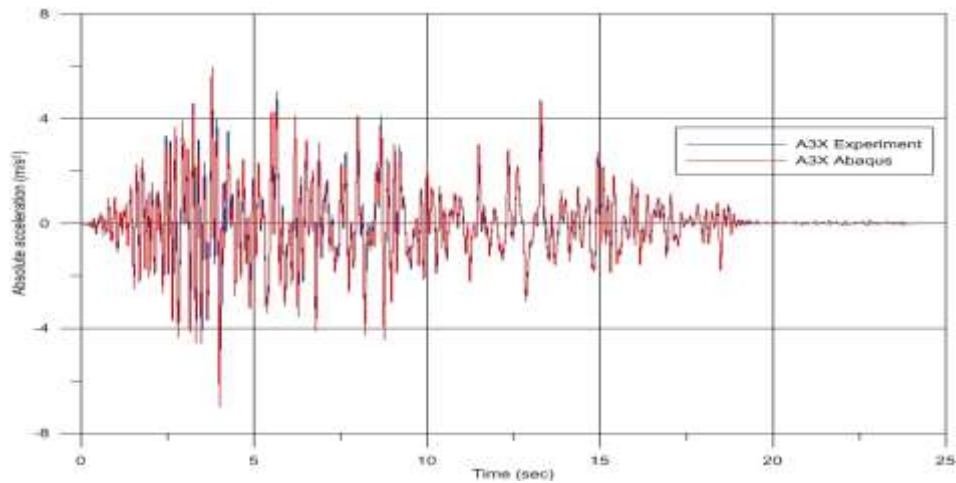
Σχήμα 4.95: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A2X δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Τέλος, έγινε σύγκριση των επιταχύνσεων A3X.



Σχήμα 4.96: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Πειραματικά αποτελέσματα



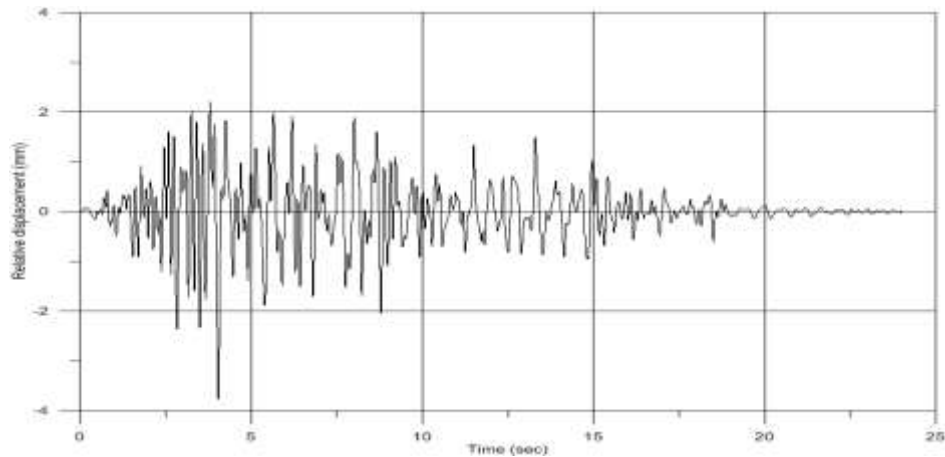
Σχήμα 4.97: Χρονοϊστορία απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 3
Αποτελέσματα Abaqus



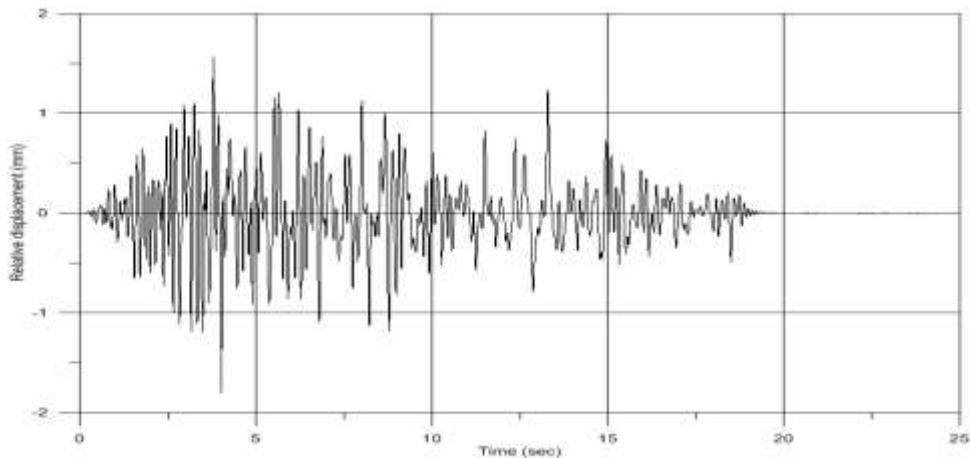
Σχήμα 4.98: Σύγκριση χρονοϊστοριών απόλυτων επιταχύνσεων A3X δοκιμίου III για τη δοκιμή 6

4.3.3.3 Αποτελέσματα μετακινήσεων

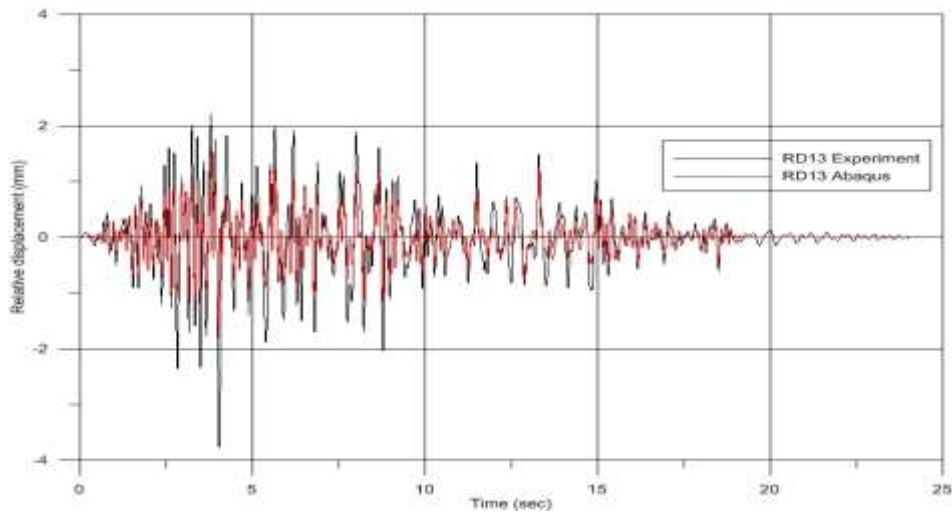
Ελέγχθηκε η σχετική μετακίνηση RD13 στον πεσσο της δυτικής όψης και η RD14 στην ανατολική. Σημειώνεται ότι κατά τη σεισμική δοκιμή είχε καταγραφεί η απόλυτη μετακίνηση D13 και D14. Επομένως, η σχετική μετακίνηση προέκυψε από τη διανυσματική αφαίρεση της μετακίνησης της βάσης από την απόλυτη μετακίνηση.



Σχήμα 4.99: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Πειραματικά αποτελέσματα



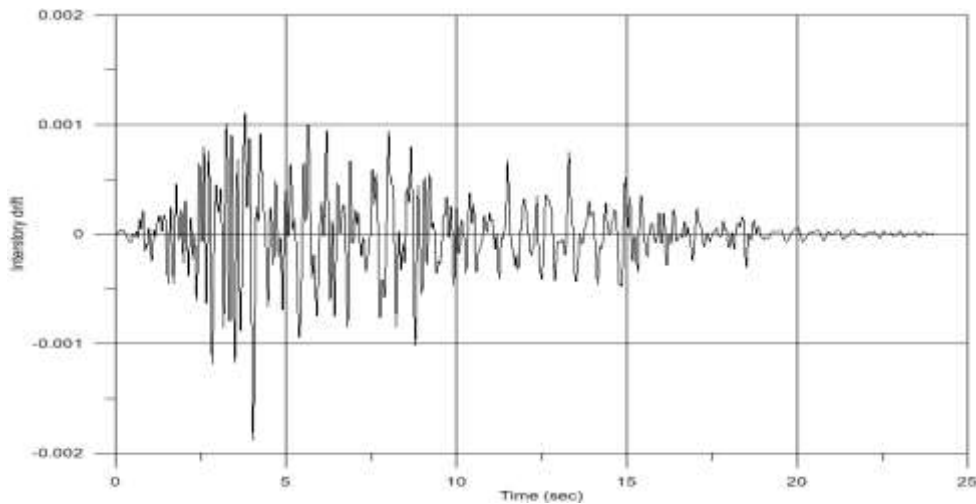
Σχήμα 4.100: Χρονοϊστορία σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 6
Αποτελέσματα ανάλυσης Abaqus



Σχήμα 4.101: Σύγκριση χρονιοιστοριών σχετικών μετακινήσεων RD13 δοκιμίου III για τη δοκιμή 3

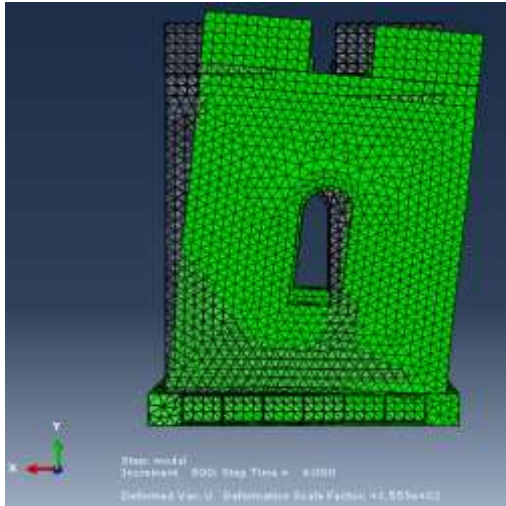
Υπολογίστηκε επίσης η οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) του δοκιμίου που είναι ίση με το λόγο της σχετικής μετακίνησης RD13 προς το ύψος του σημείου μέτρησης της, μετρούμενο από τη βάση του δοκιμίου.

$$\text{Συγκριμένα, } drift = \frac{RD13}{H=2000mm}$$

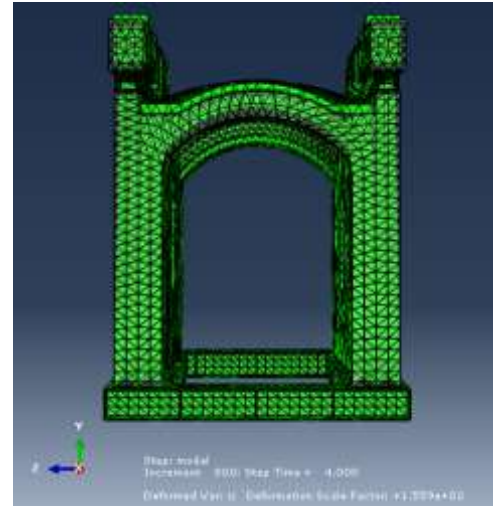


Σχήμα 4.102: Υπολογισμός interstory drift του δοκιμίου III για τη δοκιμή 2

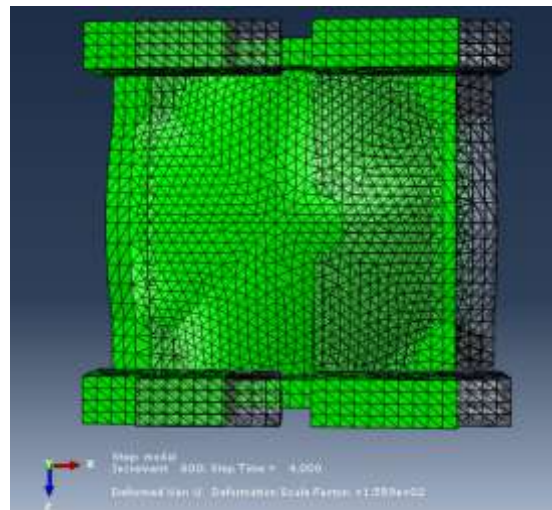
Ενδεικτικά παρατίθενται ορισμένες απεικονίσεις του παραμορφωμένου φορέα τη χρονική στιγμή $T=4\text{sec}$, όταν η σεισμική διέγερση της βάσης έπαιρνε τη μέγιστη τιμή της.



(α)



(β)

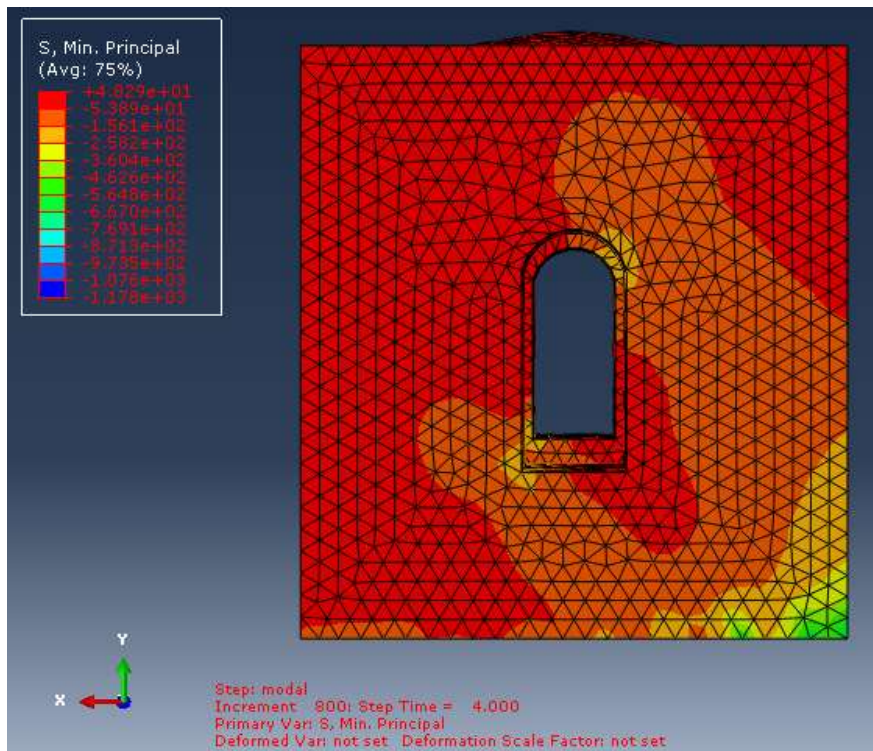


(γ)

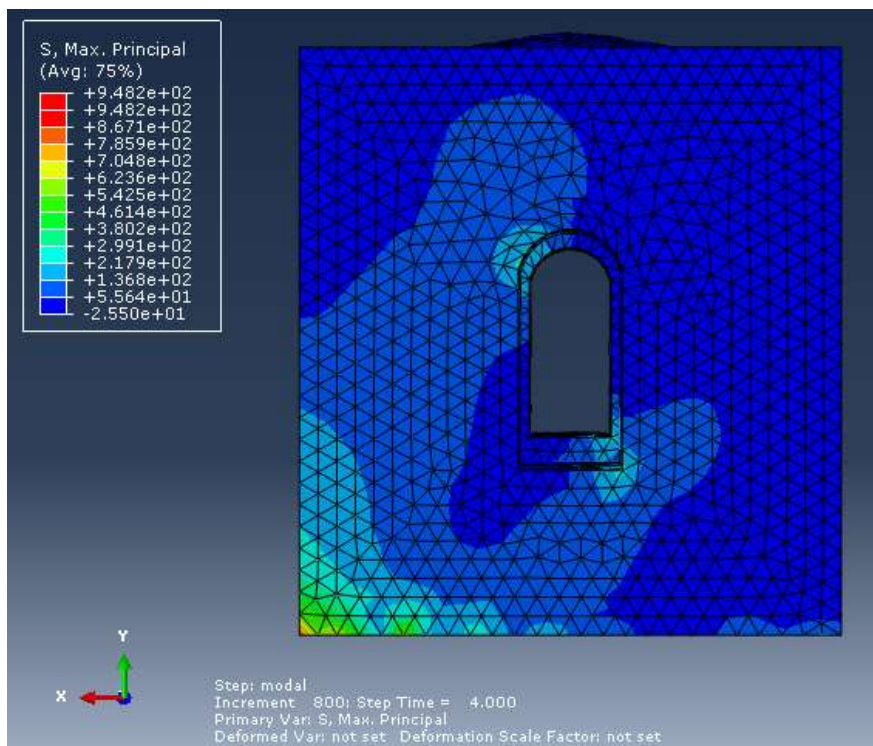
Σχήμα 4.103 : Παραμόρφωση δοκιμίου III τη χρονική στιγμή $T=4sec$ (α) ανατολική όψη, (β) νότια όψη, (γ) κάτωψη

4.3.3.4 Αποτελέσματα τάσεων

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων κυρίων τάσεων τη χρονική στιγμή $T=4sec$.



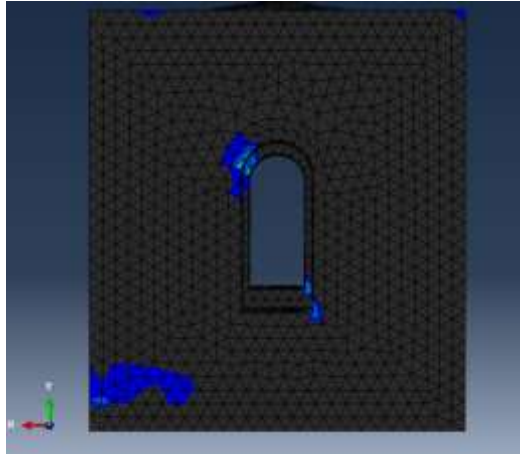
Σχήμα 4.104: Κατανομή ελάχιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου III (δοκιμή 6)



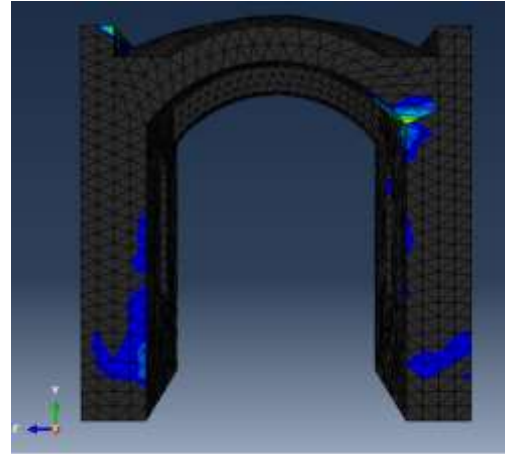
Σχήμα 4.105: Κατανομή μέγιστων κυρίων τάσεων στην ανατολική όψη του δοκιμίου III (δοκιμή 6)

Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται στη βάση το δοκιμίου, αλλά και στο ύψος του τόξου των παραθύρων καθώς και στη γωνία του

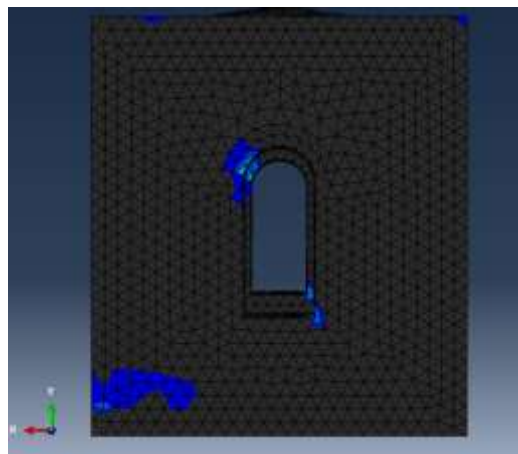
παραθύρου κάτω. Προκειμένου να φανούν οι περιοχές πιθανής ανάπτυξης των εφελκυστικών ρωγμών στο διάγραμμα των ελάχιστων κυρίων τάσεων εμφανίζονται μόνο οι περιοχές με τιμή άνω του μηδενός, όπου εμφανίζεται τριαξονική ένταση.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4.106 : Περιοχές πιθανής ανάπτυξης εφελκυστικών ρωγμών (α) Ανατολική όψη, (β) Νότια όψη, (γ) Άνοψη

Οι περιοχές ανάπτυξης ρωγμών φαίνονται να συμπίπτουν με κάποιες από τις περιοχές που εμφανίστηκαν ρωγμές κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σεισμική απόκριση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, έγιναν ορατές οι τρωτές περιοχές του δοκιμίου όπου και εμφανίστηκαν οι ρωγμές, πριν και μετά την ενίσχυση του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, στο αρχικό δοκίμιο εμφανίστηκαν οριζόντιες ρωγμές στην ανατολική και δυτική όψη, ενώ υπήρξαν και ρωγμές στο σταυροθόλιο και στα τόξα. Στο ενισχυμένο με ενέματα δοκίμιο εμφανίστηκαν οριζόντιες ρωγμές στο ύψος των πεσσών της ανατολικής και δυτικής όψης (εσωτερικά και εξωτερικά), διαγώνιες ρωγμές στη διεπιφάνεια των λιθοσωμάτων κοντά στη βάση των πεσσών, καθώς και κάποιες ρωγμές στα τόξα.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος για την τιμή της ιδιοσυχνότητας και της απόσβεσης του δοκιμίου, παρατηρείται ότι η εφαρμογή των καθολικών ενεμάτων προκάλεσε αύξηση της ιδιοσυχνότητας ($f_X=9,50\text{Hz}$), σε σχέση με την αντίστοιχη για το ενισχυμένο με τοπικά ενέματα δοκίμιο ($f_X=8,78\text{Hz}$). Ωστόσο, παρατηρήθηκε μείωση της ιδιοσυχνότητας και αύξηση της απόσβεσης του δοκιμίου ΙΙΙ (με καθολικά ενέματα), καθώς αυξανόταν η ένταση της σεισμικής φόρτισης.

Η ελαστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, έδειξε ότι η συμπεριφορά του δοκιμίου πριν την ανάπτυξη των ορατών ρωγμών μπορεί να προσεγγιστεί αρκετά ικανοποιητικά, τόσο πριν όσο και μετά την ενίσχυση του. Για να επιτευχθεί αυτό, έγινε προσπάθεια ώστε να συμπίπτει η ιδιοσυχνότητα του μοντέλου με αυτή της κατασκευής. Καθοριστική αποδείχθηκε σε αυτήν την περίπτωση η προσομοίωση της λεπτής στρώσης κονιάματος που συνδέει το δοκίμιο με τη μεταλλική βάση που χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθούν οι συνθήκες πάκτωσης του δοκιμίου στον προσομοιωτήρα.

Ο έλεγχος των επιταχύνσεων της κατασκευής απέδειξε την ορθότητα του προσομοιώματος της ανάλυσης, καθώς οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων εμφάνιζαν ομοιότητες και ως προς το μέγεθος των τιμών των επιταχύνσεων, όσο και ως προς τη φάση. Απέτυχε, ωστόσο, να προσομοιώσει τη συμπεριφορά του δοκιμίου Ι, σε διαξονική σεισμική καταπόνηση, λόγω του γεγονότος ότι σε αυτήν την περίπτωση το δοκίμιο είχε ήδη πλαστική συμπεριφορά.

Ομοίως και ο έλεγχος των μετακινήσεων έδειξε ότι το μοντέλο έχει την ίδια σεισμική απόκριση με αυτή του δοκιμίου. Η σεισμική μετακίνηση που υπολογίστηκε αναλυτικά ήταν ελάχιστα μικρότερη από αυτή των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Από τον υπολογισμό των τάσεων του προσομοιώματος εκτιμήθηκαν οι περιοχές που εμφανίζουν πιθανότητα ρηγμάτωσης λόγω της συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων, δηλαδή στο ύψος του τόξου των παραθύρων, στη βάση των πεσσών και σε σημεία του τόξου της βόρειας και νότιας όψης. Στις ίδιες περιοχές, όπως προαναφέρθηκε, είχαν παρουσιαστεί ρωγμές και στο δοκίμιο του πειράματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ευρωκώδικας 6, Σχεδιασμός Κατασκευών από Τοιχοποιία, ENV 1996 -1-1 :1995
- Τεχνική έκθεση δυναμικών δοκιμών για το δοκίμιο I
- Τεχνική έκθεση δυναμικών δοκιμών για το δοκίμιο II
- Τεχνική έκθεση δυναμικών δοκιμών για το δοκίμιο III
- Φυλλίτσα Β. Καραντώνη, «Κατασκευές από Φέρουσα Τοιχοποιία, Σχεδιασμός και Επισκευές», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2004
- ABAQUS User Manual v. 6.10-1. 2010. Dassault Systèmes, Simulia Corp., Providence, RI,USA
- Lourenco, P. «Computational strategies for masonry structures», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996
- Vintzileou E., «Grouting of three-leaf masonry: Experimental results and prediction of mechanical properties»
- Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A., Vrouva A., Anagnostopoulou S., « Mechanical properties of three-leaf stone masonry», Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006

