

### **ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ ΠΟΥ ΥΠΟΒΑΛΛΟΝΤΑΙ ΣΕ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ**

#### **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στόχος αυτού του κεφαλαίου της παρούσας φάσης είναι η υπολογιστική διερεύνηση της ολίσθησης μεταξύ δύο σφονδύλων όταν αυτοί υποβάλλονται σε δυναμικές ή σεισμικές διεγέρσεις. Η υπολογιστική αυτή διερεύνηση έχει ως επιμέρους στόχους:

1. Τη σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων της δυναμικής ολίσθησης μεταξύ δύο σφονδύλων με αντίστοιχα αποτελέσματα από υπολογιστική διερεύνηση.
2. Την παραμετρική υπολογιστική διερεύνηση του προβλήματος.

Για την υλοποίηση του πρώτου στόχου έγινε μια σειρά πειραματικών δοκιμών δυναμικής διέγερσης δύο σφονδύλων. Μέσα από αυτές τις δοκιμές αφενός έχουν εκτιμηθεί οι τιμές των συντελεστών τριβής στην επιφάνεια επαφής των δύο σφονδύλων και αφετέρου έχουν καταγραφεί η απόκριση των επιταχύνσεων και των μετακινήσεων λόγω ολίσθησης. Ταυτόχρονα δε έχουν καταγραφεί οι επιταχύνσεις και οι μετακινήσεις της δυναμικής διέγερσης οι οποίες περιγράφουν την κίνηση της σεισμικής τράπεζας. Ωστόσο, για τις οποιοσδήποτε υπολογιστικές επιλύσεις του προβλήματος απαιτείται γνώση του ιστορικού της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετακίνησης της διέγερσης. Δεδομένου λοιπόν ότι κατά η διάρκεια των πειραμάτων δεν γινόταν καταγραφή της ταχύτητας, αυτή υπολογίστηκε με βάση τις καταγραφές της επιτάχυνσης και στη συνέχεια ελέγχθηκε κατά πόσον κρίνεται αξιόπιστη. Οι πιο πάνω εργασίες περιγράφονται στην παράγραφο 2 αυτού του κεφαλαίου.

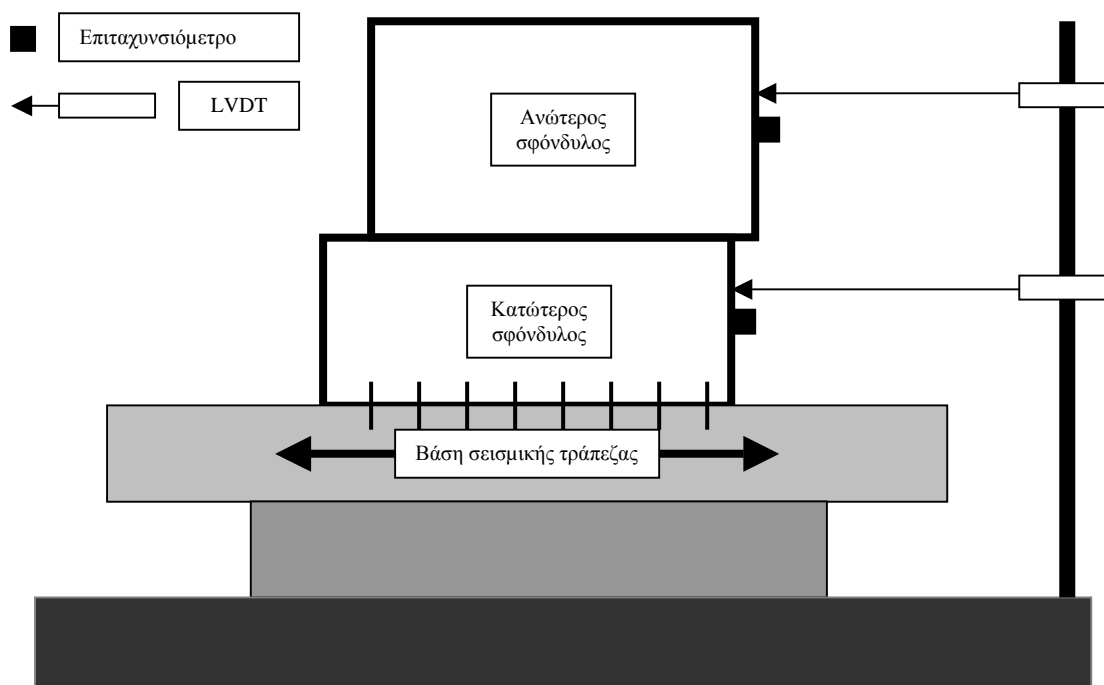
Ακολούθως έγινε μια σειρά υπολογιστικών επιλύσεων του προβλήματος κάνοντας χρήση τις παραμέτρους της διέγερσης όπως αυτές προκύπτουν από την πειραματική ακολουθία. Στόχος αυτών των επιλύσεων ήταν η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων της απόκρισης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπολογιστικών διερευνήσεων και η εκτίμηση κατά πόσο το συγκεκριμένο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε κρίνεται ως αξιόπιστο για την πρόβλεψη της απόκρισης της ολίσθησης μεταξύ δύο σφονδύλων. Για τις επιλύσεις αυτές έγινε χρήση των συντελεστών τριβής όπως αυτοί αποτιμήθηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα αυτών των εργασιών περιγράφονται στην παράγραφο 3 αυτού του κεφαλαίου.

Τέλος, έγινε μια σειρά υπολογιστικών παραμετρικών διερευνήσεων του προβλήματος της δυναμικής ολίσθησης μεταξύ δύο σφονδύλων. Στόχος αυτών των διερευνήσεων ήταν η οριοθέτηση του προβλήματος και ο βαθμός επιρροής της κάθε παραμέτρου που υπεισέρχεται στο πρόβλημα (συντελεστές τριβής, μορφές, συχνοτικό περιεχόμενο και πλάτη του σήματος διέγερσης). Τα αποτελέσματα αυτών των παραμετρικών διερευνήσεων περιγράφονται στην παράγραφο 4 αυτού του κεφαλαίου.

## 2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

### 2.1. Δοκίμια και Πειραματική Διάταξη

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου εξετάστηκε η ολίσθηση μεταξύ δύο μεταλλικών σφονδύλων στη σεισμική τράπεζα λόγω οριζόντιων δυναμικών διεγέρσεων. Οι διαστάσεις των σφονδύλων ήσαν 40cmX40cmX40cm και το βάρος του ανώτερου σφονδύλου μαζί με τα πρόσθετα βάρη που τοποθετήθηκαν για λόγους πειραματικής προσομοίωσης ήταν 1900 Kg. Ο κατώτερος σφόνδυλος ήταν ακλόνητα συνδεδεμένος με τη βάση της σεισμικής τράπεζας και παρακολουθούσες πλήρως την κίνησή της. Ο ανώτερος σφόνδυλος ήταν ελεύθερα εδραζόμενος επί του κατωτέρου και ελεύθερος να αναπτύξει δυναμική ολίσθηση λόγω της διέγερσης της σεισμικής τράπεζας. Τόσο στον κατώτερο όσο και στον ανώτερο σφόνδυλο είχαν προσαρμοστεί από ένα επιταχυνσιόμετρο και ένας μετρητής μετακινήσεων (LVDT). Τα δύο LVDT ήταν σταθερά συνδεδεμένα σε ένα άξονα εκτός της σεισμικής τράπεζας και ως εκ τούτου κατέγραφαν απόλυτες μετακινήσεις ως προς αυτό τον άξονα. Και τα τέσσερα ηλεκτρονικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήσαν συνδεδεμένα με μια καταγραφική μονάδα. Οι καταγραφές από τον κατώτερο σφόνδυλο προφανώς περιγράφουν την οριζόντια κίνηση της σεισμικής τράπεζας, λόγω της ακλόνητης σύνδεσης που αναφέρθηκε πιο πάνω, και αποτελούν το σήματα διέγερσης, ενώ οι μετρήσεις από τα όργανα που προσαρμόστηκαν στον ανώτερο σφόνδυλο καταγράφουν την απόκριση των επιταχύνσεων και τον μετακινήσεων αυτού του σφονδύλου λόγω ολίσθησης (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη και ενοργάνωση των σφονδύλων στη σεισμική τράπεζα.

## 2.2. Πειραματική ακολουθία και επεξεργασία μετρήσεων

Τα πειραματικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε έντεκα (11) οριζόντιες δυναμικές διεγέρσεις της βάσης τους. Οι διεγέρσεις αυτές ήταν ημιτονοειδούς μορφής και σταθερής συχνότητας διέγερσης. Το πλάτος της διέγερσης ήταν προοδευτικά αυξανόμενο, λόγω του τρόπου απόκρισης της σεισμικής τράπεζας σε τέτοια σήματα. Το μέγιστο πλάτος μετακίνησης της σεισμικής τράπεζας σε κάθε περίπτωση καθορίζεται από την παράμετρο SPAN, η οποία προδιαγράφει συγκεκριμένο πλάτος κίνησης της τράπεζας. Τα χαρακτηριστικά της κίνησης της σεισμικής τράπεζας των έντεκα (11) δυναμικών διεγέρσεων δίνονται στον πίνακα 1. Στον ίδιο πίνακα αναγράφεται επίσης αν ο ανώτερος σφονδύλος έχει αναπτύξει ολίσθηση (sliding) κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Κάθε πειραματική δοκιμή είχε διάρκεια κίνησης της σεισμικής τράπεζας περίπου 15 - 20sec (πλην περιπτώσεων με συχνότητα διέγερσης 1Hz) ενώ το συνολικό σήμα που καταγραφόταν είχε διάρκεια 49.5sec. Το βήμα της δειγματοληψίας των μετρήσεων ήταν  $dt=0.01sec$ . Τα τέσσερα ηλεκτρονικά όργανα που κατέγραφαν τόσο την κίνηση του κατώτερου σφονδύλου (που ταυτίζεται με τη κίνηση της σεισμικής τράπεζας) και της απόκρισης του ανώτερου σφονδύλου, ήταν συνδεδεμένα με καταγραφική μονάδα σε H/Y. Τα αρχεία (files) κάθε οργάνου και κάθε πειραματικής δοκιμής (Test) υποβλήθηκαν σε σχετική επεξεργασία με ειδικά φίλτρα κατά τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να απομακρύνονται από κάθε σήμα ανεπιθύμητοι θόρυβοι και αφετέρου να μην αλλοιώνεται το σήμα και να χάνεται η χρήσιμη πληροφορία που περιέχει. Η αναγνώριση των φίλτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί φαίνεται στην κατάληξη κάθε αρχείου (FL1, FL2 για τις μετακινήσεις του ανώτερου και κατώτερου σφονδύλου καθώς και για τις επιταχύνσεις του κατώτερου σφονδύλου και FL4 για την απόκριση των επιταχύνσεων του ανώτερου σφονδύλου). Επίσης σε κάθε αρχείο δόθηκαν ειδικοί κωδικοί ώστε να αναγνωρίζονται τόσο τα χαρακτηριστικά της κίνησης της σεισμικής τράπεζας όσο και τα χαρακτηριστικά του οργάνου. Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται όλα τα αρχεία των δοκιμών ενώ κάθε αρχείο αναγνωρίζεται ως εξής:

AABBCC.XXX

AA: προσδιορίζει το SPAN της πειραματικής δοκιμής π.χ. 3S σημαίνει SPAN 3.

BB: προσδιορίζει τη συχνότητα διέγερσης π.χ. 2H σημαίνει 2 Hz.

CC: προσδιορίζει το όργανο όπως σημειώνεται πιο κάτω:

00: επιταχυνσιόμετρο κατώτερου σφονδύλου

01: επιταχυνσιόμετρο ανώτερου σφονδύλου

03: μετακινήσεις κατώτερου σφονδύλου

06: μετακινήσεις ανώτερου σφονδύλου

XXX: προσδιορίζει το φίλτρο επεξεργασίας (FL1 ή FL2 ή FL4).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά κίνησης της σεισμικής τράπεζας και αρχεία επεξεργασμένων (φιλτραρισμένων) καταγραφών των οργάνων.

Πειραματική Δοκμή	Συχνότητα Διέγερσης	Πλάτος Διέγερσης	Αρχείο Οργάνου	Τύπος Οργάνου	Παρατηρήσεις
Test 1	1 Hz	SPAN 4	4S1H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	No sliding
			4S1H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			4S1H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			4S1H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 2	1 Hz	SPAN 6	6S1H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	No sliding
			6S1H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			6S1H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			6S1H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 3	1 Hz	SPAN 9	9S1H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	Sliding
			9S1H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			9S1H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			9S1H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 4	2 Hz	SPAN 1	1S2H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	No sliding
			1S2H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			1S2H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			1S2H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 5	2 Hz	SPAN 2	2S2H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	No Sliding
			2S2H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			2S2H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			2S2H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 6	2 Hz	SPAN 3	3S2H00.FL2	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	Sliding
			3S2H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			3S2H03.FL2	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			3S2H06.FL2	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 7	2 Hz	SPAN 4	4S2H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	Sliding
			4S2H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			4S2H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			4S2H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 8	2 Hz	SPAN 5	5S2H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	Sliding
			5S2H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			5S2H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			5S2H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 9	3 Hz	SPAN 1	1S3H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	Sliding
			1S3H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			1S3H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			1S3H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 10	3 Hz	SPAN 2	2S3H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	Sliding
			2S3H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			2S3H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			2S3H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	
Test 11	3 Hz	SPAN 3	3S3H00.FL1	Επιταχ. Κατώτερου Σφονδύλου	Sliding
			3S3H01.FL4	Επιταχ. Ανώτερου Σφονδύλου	
			3S3H03.FL1	Μετακ. Κατώτερου Σφονδύλου	
			3S3H06.FL1	Μετακιν. Ανώτερου Σφονδύλου	

### 2.3. Σήματα διέγερσης

Όπως έχει αναφερθεί οι σφόνδυλοι υποβλήθηκαν σε δυναμικά σήματα ημιτονοειδούς μορφής με σταθερή συχνότητα διέγερσης καθ' όλη τη διάρκεια της διέγερσης αλλά προοδευτικά με το χρόνο αυξανόμενο το πλάτος της διέγερσης. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι ο χρόνος κίνησης της σεισμικής τράπεζας είχε διάρκεια περίπου από 15-20sec, κυμαινόμενη από πείραμα σε πείραμα. Πριν από οποιαδήποτε αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και πριν από την εκτέλεση οποιοδήποτε υπολογιστικών διερευνήσεων, οι καταγραφές τις διέγερσης (επιταχύνσεις και μετακινήσεις) υποβλήθηκαν σε ειδική μελέτη στοχεύοντας στα εξής:

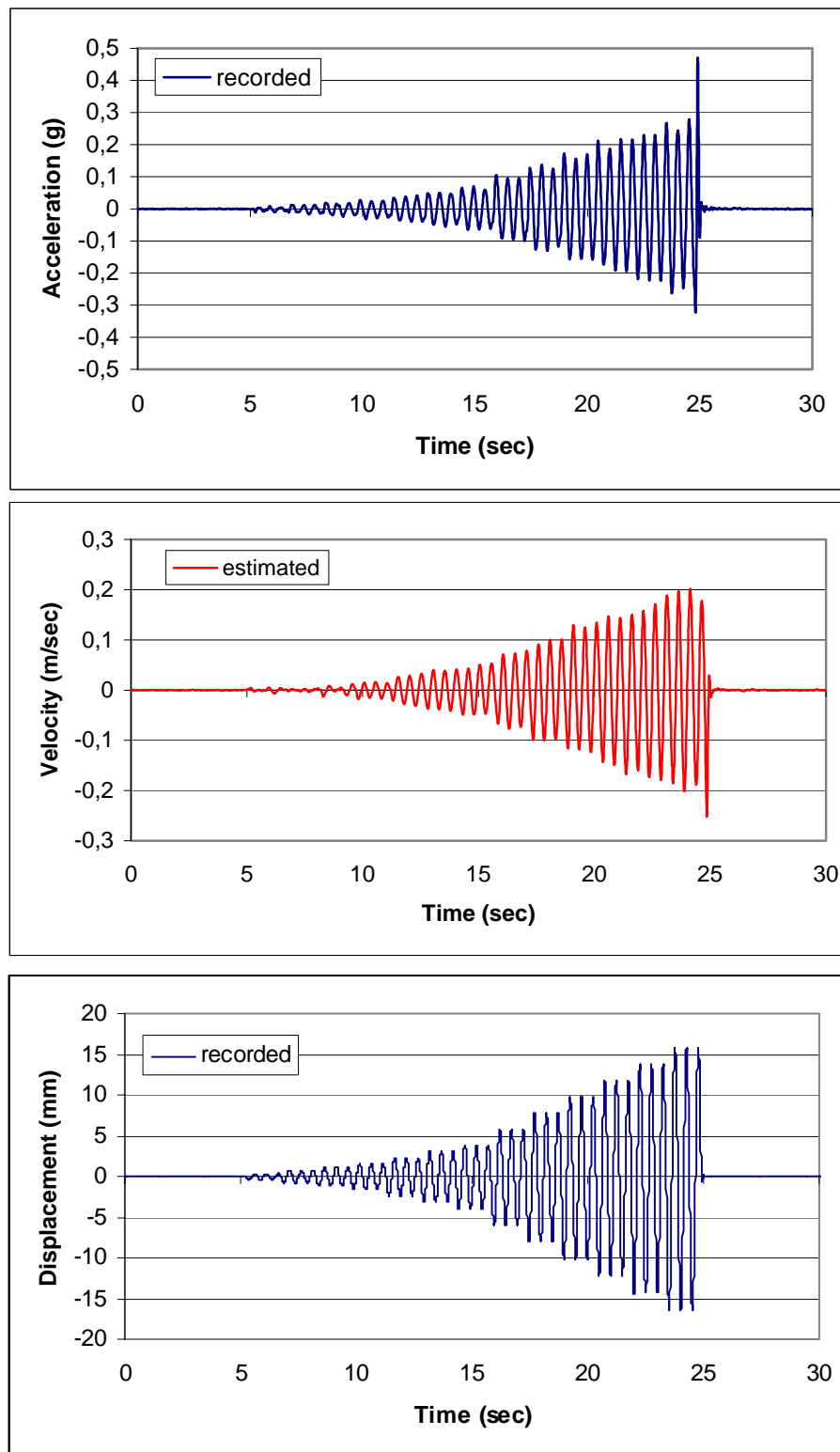
- Τον προσδιορισμό του πραγματικού χρόνου διέγερσης σε κάθε πείραμα ώστε να έχουν ουσιαστικό νόημα οι οποιεσδήποτε συγκρίσεις μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων (συγκρίσεις για ίδιο χρόνο διέγερσης). Υπογραμμίζεται ιδιαίτερα ότι, μεταξύ άλλων, η απόκριση σε ολίσθηση του ανώτερου

σφονδύλου επηρεάζεται σημαντικά από τη χρονική διάρκεια της δυναμικής διέγερσης.

- Τον προσδιορισμό των μέγιστων τιμών της επιτάχυνσης και της μετακίνησης της διέγερσης σε κάθε πείραμα για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Από τις τιμές αυτές εξαιρούνται οι μέγιστες τιμές του τελευταίου παλμού κάθε σήματος όπου παρατηρείται μια απότομη αύξηση λόγω της απότομης ακινητοποίησης της σεισμικής τράπεζας.
- Την αποσαφήνιση κατά πόσον η προσήμανση (polarity) των επιταχύνσεων και των μετακινήσεων που καταγράφηκαν είναι συμβατές μεταξύ τους, κατά πως προκύπτει από τη θεωρητική λύση των ημιτονοειδών κινήσεων (διαφορά φάσης  $\varphi=1/2f$ , όπου  $f$  η συχνότητα της διέγερσης).
- Την υπολογιστική εκτίμηση του ιστορικού της ταχύτητας της διέγερσης. Το ιστορικό αυτό απαιτείται για τις υπολογιστικές διερευνήσεις που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο. Το ιστορικό της ταχύτητας έχει υπολογιστή μετά από ολοκλήρωση του ιστορικού της καταγραφής των επιταχύνσεων, ενώ με μια δεύτερη ολοκλήρωση προκύπτει το ιστορικό των μετακινήσεων. Αυτό, συγκρινόμενο με το αντίστοιχο ιστορικό των μετακινήσεων όπως καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος θα πρέπει να είναι σε πολύ καλή συμφωνία τόσο στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων όσο και σε μέγιστες τιμές. Η σύγκριση αυτή αποτελεί και κριτήριο αξιολόγησης της ορθότητας των αριθμητικών ολοκληρώσεων και κατ' αυτό τον τρόπο βαθμονομείται η όλη υπολογιστική διαδικασία που εφαρμόστηκε. Ένα δεύτερο κριτήριο αξιολόγησης των τελικών αποτελεσμάτων της αριθμητικής ολοκλήρωσης αποτελεί η σχέση μεταξύ του μέγιστου πλάτους της ταχύτητας και του μέγιστου πλάτους της επιτάχυνσης σε κάθε κύκλο διέγερσης η οποία θα πρέπει να συμφωνεί με τις θεωρητικές λύσεις για ημιτονοειδείς κινήσεις (πλάτος ταχύτητας/ πλάτος επιτάχυνσης =  $1/2\pi f$ ). Τέλος, ένα τρίτο κριτήριο αξιολόγησης αυτών των αποτελεσμάτων αποτελεί η διαφορά φάσης μεταξύ επιταχύνσεων και ταχύτητας η οποία θα πρέπει να είναι  $\varphi=1/4f$ .

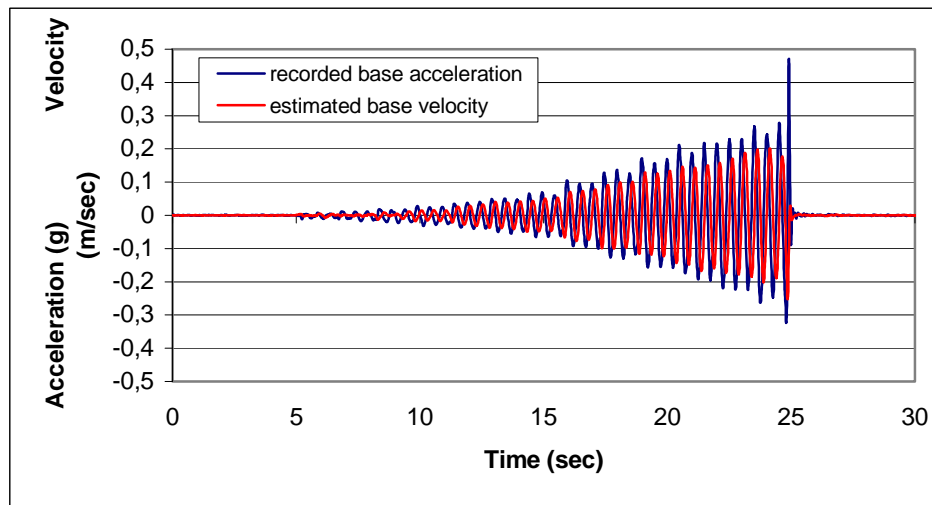
Στο σχήμα 2 φαίνονται τα ιστορικά της επιτάχυνσης και της μετακίνησης της διέγερσης για το TEST 6 όπως καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος (μπλε γραμμή). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται το ιστορικό της ταχύτητας (κόκκινο χρώμα) όπως έχει προκύψει από την αριθμητική ολοκλήρωση. Στο σχήμα 3 φαίνονται μαζί το ιστορικό της επιτάχυνσης (μπλε γραμμή) και της ταχύτητας (κόκκινη γραμμή). Παρατηρούμε ότι τα δύο σήματα είναι σε πολύ καλή συμφωνία όσον αφορά τη διαφορά φάσης μεταξύ τους κατά πως ορίζεται από τις θεωρητικές λύσεις ( $1/4f$ ). Επίσης σε πολύ καλή συμφωνία βρίσκονται και τα μέγιστα πλάτη σε κάθε κύκλο διέγερσης, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Τέλος, στο σχήμα 4 δίνεται το ιστορικό της μετακίνησης της διέγερσης όπως αυτή καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του ίδιου πειράματος (μπλε γραμμή) και το ιστορικό των μετακινήσεων όπως έχει υπολογιστή από την αριθμητική ολοκλήρωση (κόκκινη γραμμή). Παρατηρούμε ότι και τα δύο ιστορικά είναι σε απόλυτη συμφωνία στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων και σχεδόν σε απόλυτη συμφωνία όσον αφορά τις μέγιστες τιμές σε κάθε κύκλο διέγερσης. Επίσης, και τα δύο σήματα παρουσιάζουν την ίδια προσήμανση στο χρόνο (polarity) και ως εκ τούτου καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η προσήμανση των καταγραφών της μετακίνησης και της επιτάχυνσης της διέγερσης είναι σε πλήρη συμφωνία. Ανάλογη διαδικασία έχει εφαρμοστεί για όλα τα σήματα διέγερσης.

**TEST 6: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=3.0**

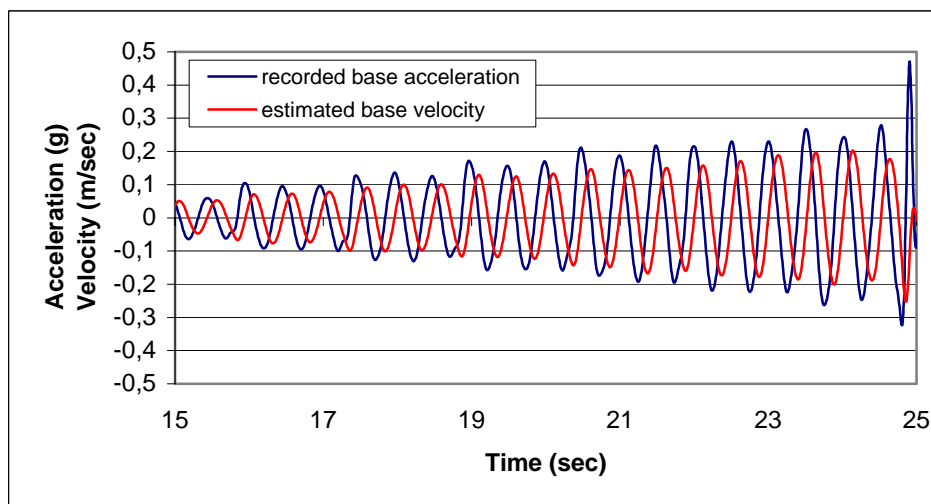


**Σχήμα 2. Σήματα κίνησης κατώτερου σφονδύλου (σεισμικής τράπεζας) κατά το πείραμα Test 6.**

**TEST 6: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=3.0**

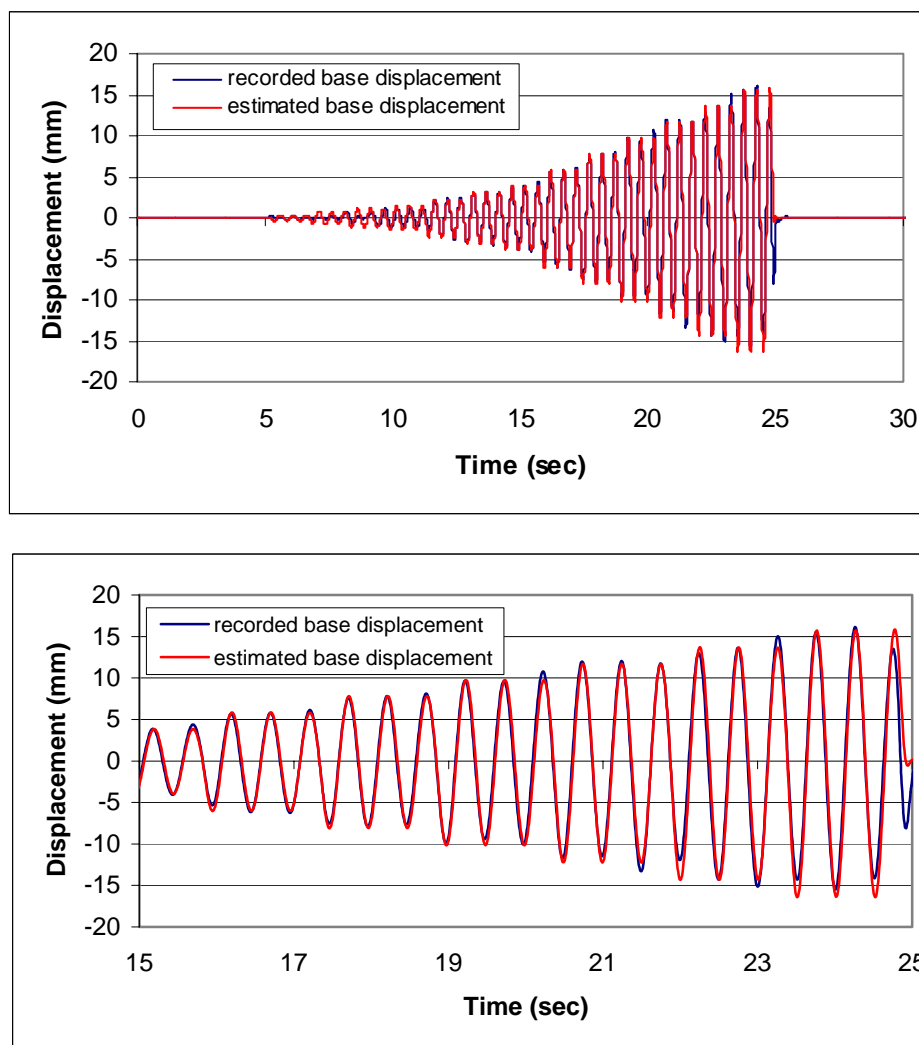


**Σχήμα 3. Ιστορικό επιτάχυνσης (καταγραφή) και ταχύτητας (αριθμητική ολοκλήρωση)**



**του κατώτερου σφονδύλου (σεισμική τράπεζα) κατά το πείραμα Test 6.**

**TEST 6: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=3.0**



**Σχήμα 4. Σύγκριση καταγραφών (μπλε γραμμή) και αποτελεσμάτων αριθμητικής ολοκλήρωσης (κόκκινη γραμμή) των ιστορικών μετακίνησης του κατώτερου σφονδύλου (σεισμικής τράπεζας) κατά το πείραμα Test 6.**

Όπως φαίνεται στα πιο πάνω σήματα διέγερσης της πειραματικής δοκιμής Test 6, και όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χρόνος διάρκειας της διέγερσης είναι πολύ μικρότερος από το χρόνο καταγραφής του σήματος. Σε όλες τις περιπτώσεις, το σύστημα καταγραφής ετίθετο σε λειτουργία πριν ξεκινήσει η κίνηση της σεισμικής τράπεζας. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις η κίνηση της σεισμικής τράπεζας σταματούσε πριν ολοκληρωθεί η δειγματοληψία της καταγραφής. Για το λόγο αυτό τα σήματα της διέγερσης υποβλήθηκαν σε σχετική περαιτέρω επεξεργασία ώστε να απομακρυνθεί το αρχικό τμήμα του σήματος το οποίο δεν περιέχει κίνηση της σεισμικής τράπεζας καθώς επίσης και να προσδιοριστεί ο πραγματικός χρόνος διάρκειας κάθε πειράματος. Τα τελικώς επεξεργασμένα σήματα διέγερσης για τις πειραματικές δοκιμές που παρουσιάστηκε ολίσθηση (Test 3, 6, 7, 8,9 10 και 11) δίνονται στο παράρτημα Α. Σε ανάλογη επεξεργασία έχουν υποβληθεί και οι καταγραφές της



ολίσθησης (επιταχύνσεις και μετακινήσεις) του ανώτερου σφονδύλου ώστε να υπάρχει πλήρη αντιστοίχιση καταγραφών διέγερσης και απόκρισης στο πεδίο του χρόνου. Επιπλέον, σε κάθε πείραμα βρέθηκαν εκτός από τη διάρκεια διέγερσης της σεισμικής τράπεζας, οι μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετακίνησης του κατώτερου σφονδύλου που ισοδυναμούν με τα χαρακτηριστικά της κίνησης της σεισμικής τράπεζας. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι συνήθως στα σήματα επιτάχυνσης της διέγερσης παρατηρείται κάποια έξαρση (peak) στην τιμή της επιτάχυνσης λόγω απότομης διακοπής της λειτουργίας της σεισμικής τράπεζας. Σε αρκετές επίσης περιπτώσεις ανάλογη έξαρση παρατηρείται και στα σήματα της ταχύτητας τα οποία, όπως έχει αναφερθεί, έχουν προκύψει από ολοκλήρωση των σημάτων επιτάχυνσης. Οι τιμές αυτές, αν και εμφανίζονται στο σήμα δεν επηρεάζουν την εξέλιξη της ολίσθησης, αφενός λόγω μικρής διάρκειας αφετέρου δε λόγω του χρόνου εμφάνισής τους (τέλος του σήματος). Τουναντίον, πέρα από αυτές τις τιμές, για κάθε πειραματική δοκιμή (Test) ενδιαφέρον αποτελούν οι μέγιστες τιμές (max) που αναπτύσσονται συνήθως στους τελευταίους κύκλους του σήματος διέγερσης και αντανακλούν το πραγματικό πλάτος της περιοδικής κίνησης. Όλα τα χαρακτηριστικά στοιχεία των σημάτων διέγερσης αναγράφονται στον πίνακα 2.

*Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά στοιχεία σημάτων διέγερσης*

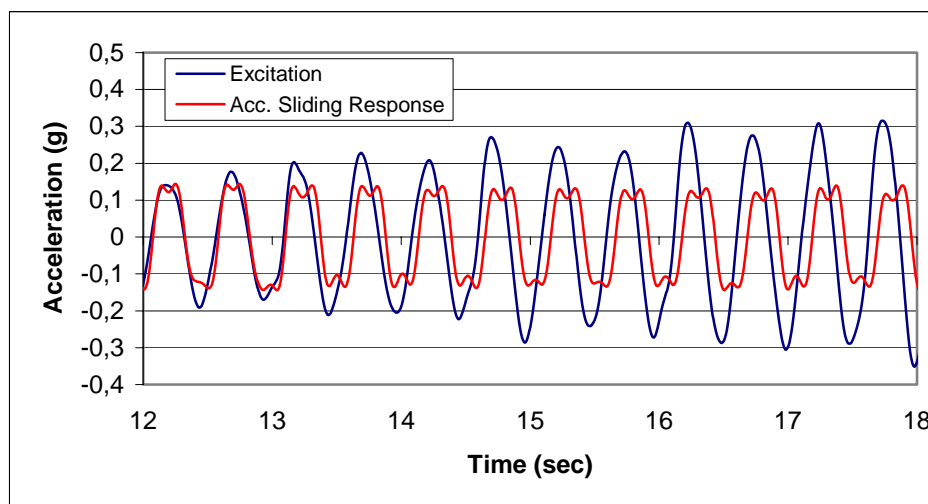
Πειραματική Δοκιμή	Συχνότητα Διέγερσης  (Hz)	Πλάτος Διέγερσης  (SPAN)	Διάρκεια Διέγερσης  (sec)	Μέγιστες τιμές σήματος διέγερσης				
				Επιταχύνσεις		Ταχύτητες		Μετακινήσεις  (mm)  Max.
				(g)		(m/sec)		
				Peak	Max.	Peak	Max.	
Test 1	1	4	38.1	0.238	0.103	0.169	-	21.28
Test 2	1	6	40.66	0.358	0.121	0.280	-	32.42
Test 3	1	9	40.35	0.245	0.245	0.289	-	48.28
Test 4	2	1	21.18	0.091	0.091	0.069	0.069	5.29
Test 5	2	2	20.65	0.278	0.152	0.135	0.135	10.38
Test 6	2	3	20.85	0.471	0.273	0.202	0.202	15.83
Test 7	2	4	20.14	0.376	0.352	0.280	0.280	21.47
Test 8	2	5	15.62	0.282	0.282	0.220	0.220	26.15
Test 9	3	1	13.62	0.231	0.231	0.131	0.131	5.15
Test 10	3	2	13.34	0.434	0.434	0.207	0.207	10.46
Test 11	3	3	13.34	0.601	0.601	0.344	0.344	15.78

## 2.4. Απόκριση επιταχύνσεων ολισθαίνοντα σφονδύλου

Η μελέτη της απόκρισης των επιταχύνσεων του ολισθαίνοντα σφονδύλου που υποβάλλεται σε δυναμικές διεγέρσεις σαν αυτές που περιγράφηκαν πιο πάνω, έχουν ως κύριους στόχους τον προσδιορισμό του συντελεστή δυναμικής τριβής μεταξύ των επιφανειών των σφονδύλων ( $\mu_d$ ) και του προσδιορισμού των μορφών απόκρισης που αναπτύσσει κατά τη διάρκεια της ολίσθησης.

### 2.4.1. Συντελεστής δυναμικής τριβής.

Με την έναρξη της διέγερσης και για σχετικά χαμηλές τιμές της επιτάχυνσης, ο ανώτερος σφόνδυλος παρακολουθεί πλήρως την κίνηση του κατώτερου σφονδύλου. Όταν η επιτάχυνση υπερβεί την τιμή  $\mu_{st} \cdot g$  (όπου  $\mu_{st}$  ο συντελεστής στατικής τριβής) τότε ο ανώτερος σφόνδυλος τίθεται σε ολίσθηση. Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης οι επιταχύνσεις του ανώτερου σφονδύλου διατηρούν σταθερή τιμή και το σήμα της απόκρισης λαμβάνει τη μορφή τετραγωνικών παλμών με συχνότητα ίδια με αυτή της διέγερσης αλλά με μια διαφορά φάσης ως προς αυτή. Η τιμή της επιτάχυνσης του ανώτερου σφονδύλου κατά τη διάρκεια της ολίσθησης διαιρεμένη με την επιτάχυνση της βαρύτητας προσδιορίζει το **συντελεστή δυναμικής τριβής** ( $\mu_d = \max \text{acc.}/g$ ). Συνήθως, λόγω ανωμαλιών στην επιφάνεια ή λόγω προβλημάτων στην επεξεργασία των μετρήσεων ο οριζόντιος κλάδος των επιταχύνσεων της απόκρισης παρουσιάζει σχετική ανωμαλία γι' αυτό λαμβάνεται μια σχετική τιμή. Στο σχήμα 5 φαίνεται ένα τμήμα του ιστορικού της διέγερσης και της απόκρισης των επιταχύνσεων κατά την πειραματική δοκιμή Test 7 ενώ στον πίνακα 3 δίνονται οι τιμές του συντελεστή δυναμικής η τριβής που έχουν προκύψει από κάθε πειραματική δοκιμή. Αν και παρουσιάζουν κάποια μικρή διακύμανση αυτές οι τιμές μεταξύ τους, ωστόσο δεν φαίνεται να επηρεάζονται από τις μέγιστες τιμές και τις συχνότητες τις διέγερσης.



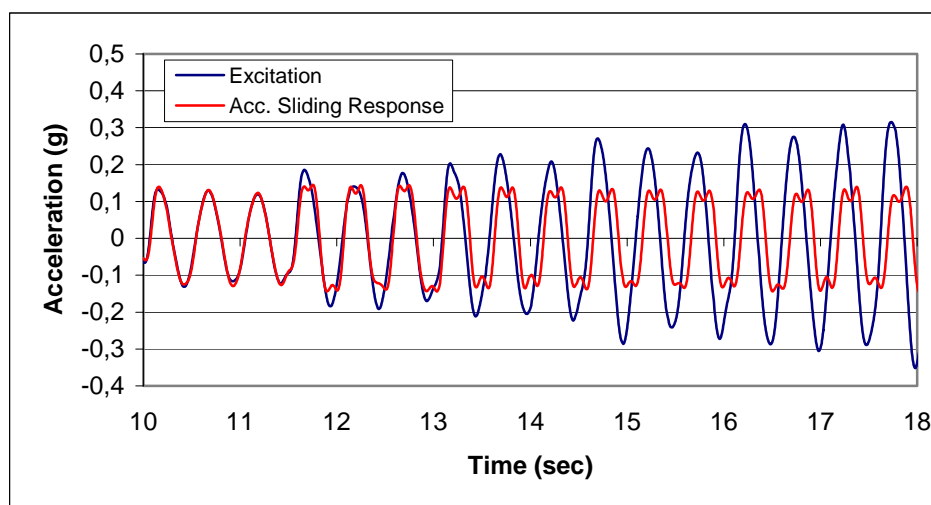
Σχήμα 5. Διέγερση και απόκριση επιταχύνσεων ολισθαίνοντα σφονδύλου (Test 7).

Πίνακας 3. Τιμές συντελεστών δυναμικής τριβής από κάθε πειραματική δοκιμή.

Πειραματική Δοκιμή	Συχνότητα Διέγερσης Hz	Μέγιστες τιμές σήματος Διέγερσης			Συντελεστής Δυναμικής Τριβής μd
		Επιτάχυνση (g)	Ταχύτητα (m/sec)	Μετακίνηση (mm)	
Test 3	1	0.245	-	48.28	0.120
Test 6	2	0.273	0.202	15.83	0.135
Test 7	2	0.352	0.280	21.47	0.120
Test 8	2	0.282	0.220	26.15	0.145
Test 9	3	0.231	0.131	5.15	0.120
Test 10	3	0.434	0.207	10.46	0.110
Test 11	3	0.601	0.344	15.78	0.110
Μέση τιμή					<b>0.123</b>

#### 2.4.2. Μορφές απόκρισης

Κατά την διάρκεια της ολίσθησης ο ολισθαίνοντας μπορεί να εμφανίσει δύο μορφές απόκρισης: Ολίσθηση – προσαρμογή (sliding – reattachment): Μέσα σε μια περίοδο διέγερσης για κάποιο χρονικό διάστημα ο ολισθαίνοντας σφόνδυλος (ανώτερος) είναι σε πλήρη επαφή με τον κατώτερο παρακολουθώντας πλήρως την κίνησή του (οι δύο σφόνδυλοι αναπτύσσουν τις ίδιες επιταχύνσεις). Για κάποιο άλλο χρονικό διάστημα ο ολισθαίνοντας σφόνδυλος αναπτύσσει ολίσθηση και τότε οι επιταχύνσεις των δύο σφονδύλων διαφοροποιούνται. Ολίσθηση – Ολίσθηση (sliding – sliding): καθ' όλη τη διάρκεια μιας περιόδου ο ολισθαίνοντας σφόνδυλος δεν παρουσιάζει προσαρμογή με τον κατώτερο σφόνδυλο και ως εκ τούτου είναι σε συνεχή ολίσθηση αναπτύσσοντας διαφορετικές τιμές επιτάχυνσης. Η μορφή της απόκρισης που θα εμφανιστεί επηρεάζεται από το μέγιστο πλάτος της επιτάχυνσης της διέγερσης. Για σχετικά χαμηλές τιμές αναπτύσσεται η μορφή sliding – reattachment και σχετικά μεγάλες η μορφή sliding – sliding. Για περιπτώσεις όπου  $\mu st = \mu d$ , το όριο αυτό δίνεται από τη σχέση: Πλάτος διέγερσης επιταχύνσεων =  $(\mu * g / 0.537)$ . Σε όλες τις πειραματικές δοκιμές που αναπτύχθηκε ολίσθηση, εμφανίστηκαν και οι δύο μορφές απόκρισης. Λόγω προοδευτικής αύξησης του πλάτους της διέγερσης, αρχικά εμφανίζεται η μορφή sliding – reattachment και μετά η μορφή sliding – sliding όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα (Test 7).



Σχήμα 6. Μορφές απόκρισης σε ολίσθηση (Test 7).

## 2.5. Απόκριση μετακινήσεων ολισθαίνοντα σφονδύλου

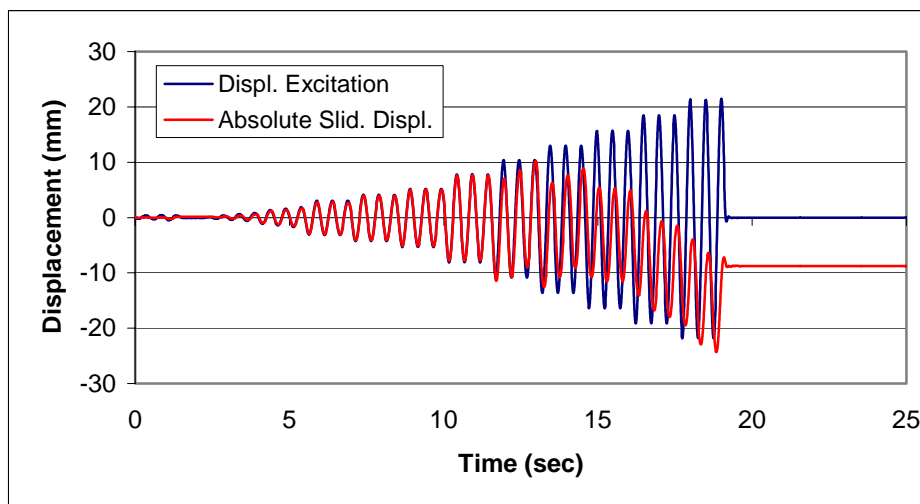
Χαρακτηριστικά της απόκρισης των μετακινήσεων του ολισθαίνοντα σφονδύλου είναι τα εξής:

- Η απόκριση των μετακινήσεων συντελείται όταν πληρείται το κριτήριο των επιταχύνσεων που αναφέρθηκε πιο πάνω.
- Για περιοδικές διεγέρσεις όπως αυτές που εξετάζονται εδώ, οι μετακινήσεις του ολισθαίνοντα σφονδύλου συντελούνται επίσης κατά περιοδικό τρόπο με περίοδο απόκρισης ίδιο με αυτό της διέγερσης.
- Το πλάτος της ολίσθησης αυξάνει συναρτήσει του πλάτους της διέγερσης.
- Η δυναμική αυτή ολίσθηση συντελείται γύρω από ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο άξονα.
- Η συνολική μετακίνηση του ολισθαίνοντα σφονδύλου σε κάθε χρονική στιγμή προσδιορίζεται από το πλάτος της δυναμικής ταλάντωσης και τη θέση του μεταβαλλόμενου άξονα.
- Με τη λήξη της διέγερσης παρατηρείται μια παραμένουσα μετάθεση του ολισθαίνοντα σφονδύλου ως προς την αρχική του θέση.

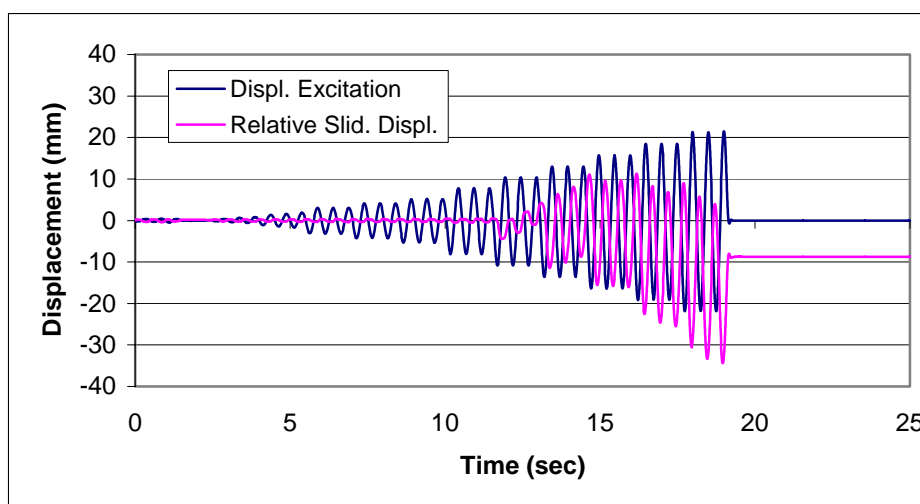
Τα πιο πάνω χαρακτηριστικά της απόκρισης των μετακινήσεων του ολισθαίνοντα σφονδύλου έχουν καταγραφεί και παρατηρηθεί σε όλες τις πειραματικές δοκιμές που έχουν αναπτύξει ολίσθηση. Στα πλαίσια αυτής της αναφοράς δεν γίνεται ιδιαίτερη παρουσίαση αυτών των καταγραφών εδώ δεδομένου ότι ο κύριος στόχος είναι η σύγκρισή του με αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα (βλέπε επόμενη παράγραφο).

Όπως έχει αναφερθεί κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταγραφόταν η απόλυτη μετακίνηση του ολισθαίνοντα σφονδύλου ως προς ένα σταθερό άξονα εκτός της σεισμικής τράπεζας. Από τον ίδιο άξονα καταγραφόταν και η μετακίνηση του κατώτερου σφονδύλου που ήταν ακλόνητα προσαρμοσμένος στη σεισμική τράπεζα και κατά αυτό τον τρόπο κατέγραφε την μετακίνηση της διέγερσης. Από την αφαίρεση των δύο σημάτων προκύπτει η σχετική μετακίνηση του ολισθαίνοντα (άνωτερου) σφονδύλου ως προς τον κατώτερο σφόνδυλο. Η μελέτη των σχετικών μετακινήσεων μεταξύ των δύο σφονδύλων αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι για σχετικά μεγάλες τιμές είναι ενδεχόμενο να υποβοηθηθεί η ανάπτυξη του λικνισμού ή ακόμα και της ανατροπής του ανώτερου σφονδύλου από τον κατώτερο.

Στο σχήμα 7 δίνεται το ιστορικό των μετακινήσεων της διέγερσης και των απόλυτων μετακινήσεων του ολισθαίνοντα σφονδύλου όπως καταγράφηκαν κατά την πειραματική δοκιμή 7 (Test 7). Επίσης στο σχήμα 8 δίνονται οι αντίστοιχες σχετικές μετακινήσεις του ολισθαίνοντα σφονδύλου από το ίδιο πείραμα.



Σχήμα 7. Διέγερση και απόκριση απόλυτων μετακινήσεων ανώτερου σφονδύλου (Test 7).



Σχήμα 8. Διέγερση και απόκριση σχετικών μετακινήσεων ανώτερου σφονδύλου ως προς τον κατώτερο σφόνδυλο (Test 7).

### 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου καταβλήθηκε προσπάθεια υπολογιστικής προσομοίωσης των πειραματικών αποτελεσμάτων κάνοντας χρήση ειδικό λογισμικό. Στόχος ήταν η αξιολόγηση της ικανότητας αυτού του λογισμικού ώστε να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για σειρά παραμετρικών διερευνήσεων του προβλήματος της ολίσθησης του σφονδύλου.

Για το σκοπό αυτό προσομοιώθηκαν κατ' αρχάς τα χαρακτηριστικά της διέγερσης από κάθε πειραματική δοκιμή όπου αναπτύχθηκε ολίσθηση του σφονδύλου (Test 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11). Συνεκτιμήθηκαν η διάρκεια και το σχήμα της διέγερσης, η συχνότητα και το μέγιστο πλάτος, όπως αυτά διερευνήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον λήφθηκαν υπόψη οι τιμές του συντελεστή δυναμικής τριβής ( $\mu_d$ ) όπως αυτός μετρήθηκε σε κάθε πείραμα από την απόκριση των επιταχύνσεων.

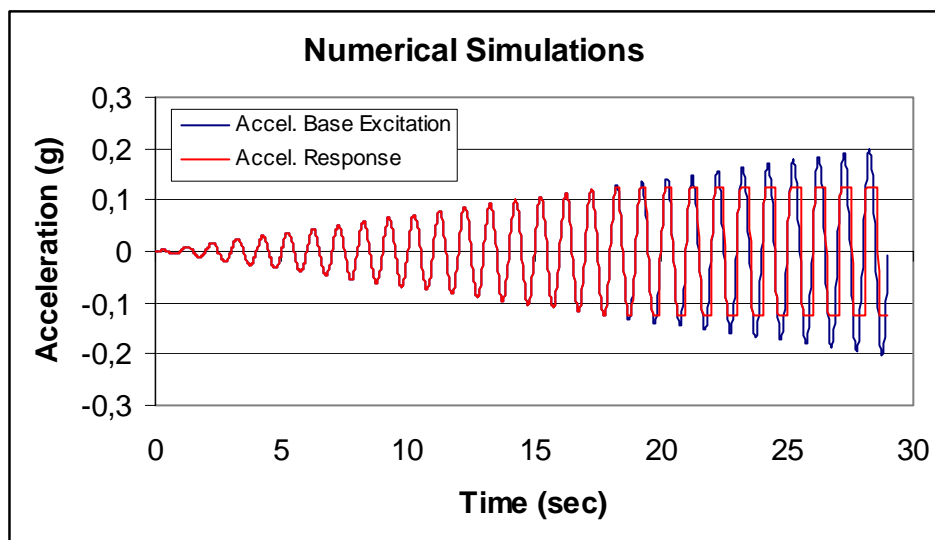
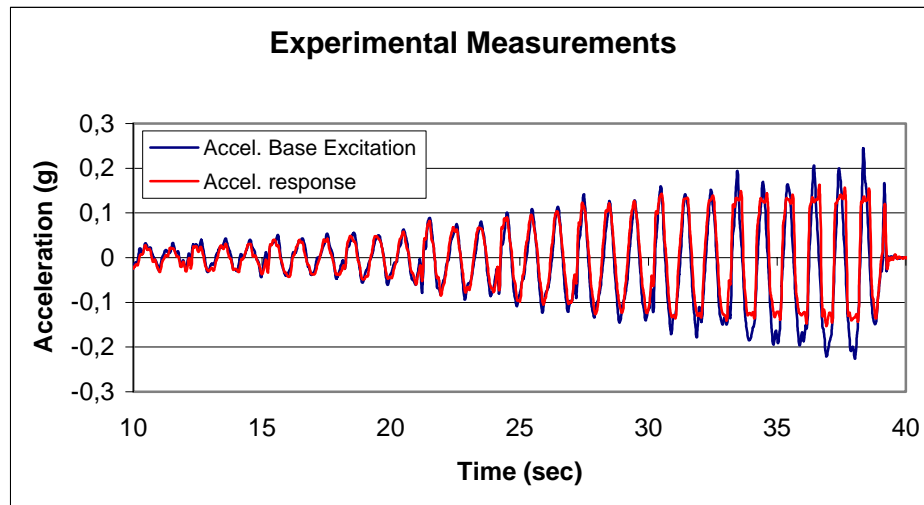
Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές με τα αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα στο πεδίο του χρόνου. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στα ιστορικά των επιταχύνσεων της απόκρισης του σφονδύλου και των σχετικών του μετακινήσεων ως προς τον κατώτερο σφόνδυλο. Παρατίθενται επίσης σε κάθε διάγραμμα και τα αντίστοιχα ιστορικά της διέγερσης.

Παρατηρούμε ότι οι πειραματικές μετρήσεις της απόκρισης των επιταχύνσεων είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα, τόσο στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων όσο και σε μέγιστες τιμές. Επιπλέον σε κάθε περίπτωση, μέσα από τα ιστορικά των επιταχύνσεων υπάρχει πλήρη συμφωνία όσον αφορά τις μορφές απόκρισης σε ολίσθηση (no sliding, sliding – reattachment, sliding – sliding).

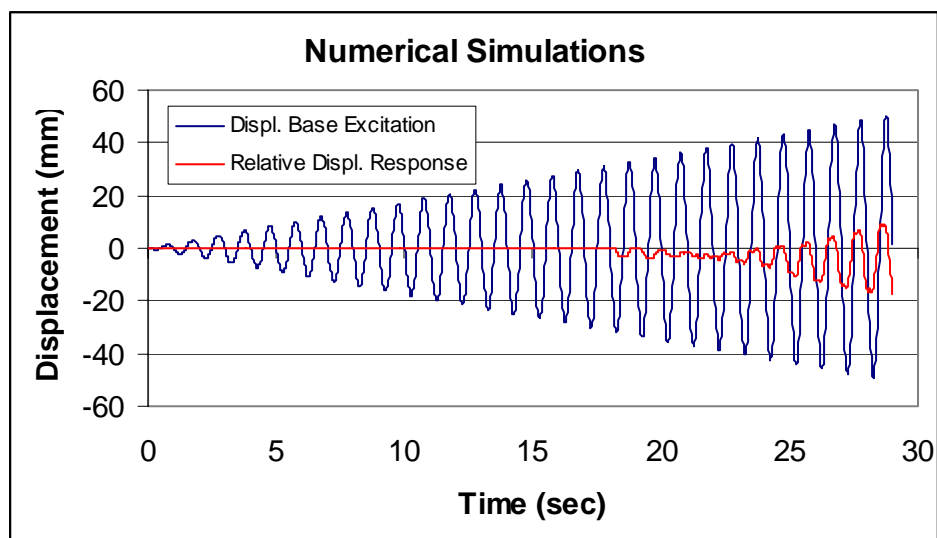
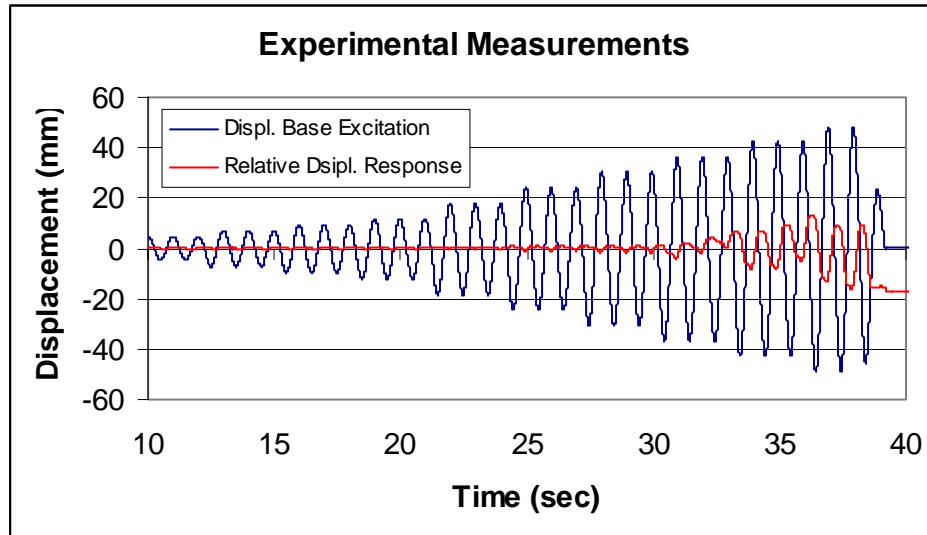
Για αρκετά πειράματα είναι σε εξίσου καλή συμφωνία και τα αποτελέσματα των σχετικών μετακινήσεων. Παρατηρούμε χαρακτηριστικά ότι όσο αυξάνει η συχνότητα της διέγερσης τόσο τα αποτελέσματα αυτά είναι σε καλύτερη συμφωνία. Η σύγκλιση εδώ των πειραματικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα επικεντρώνεται τόσο στις μέγιστες τιμές και την εξέλιξη στο χρόνο των σχετικών μετακινήσεων όσο και στη τελική τιμή της παραμένουσας μετακίνησης μετά την ολοκλήρωση του σήματος διέγερσης.

Από τις πιο πάνω παρατηρήσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το εν λόγω λογισμικό κρίνεται αξιόπιστο και μπορεί να οδηγήσει, τουλάχιστον ποιοτικά, σε ασφαλή συμπεράσματα μέσα από σειρά παραμετρικών επιλύσεων.

TEST 3: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 1.0Hz, SPAN=9.0

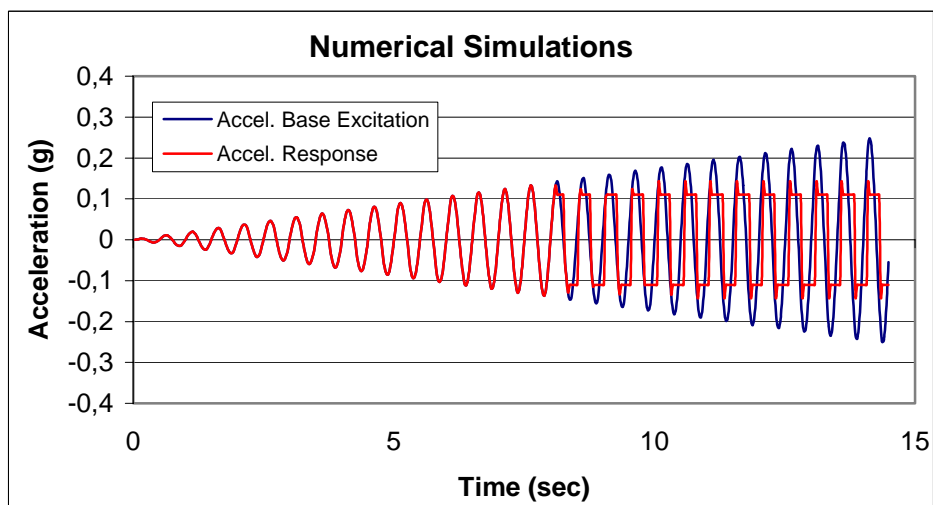
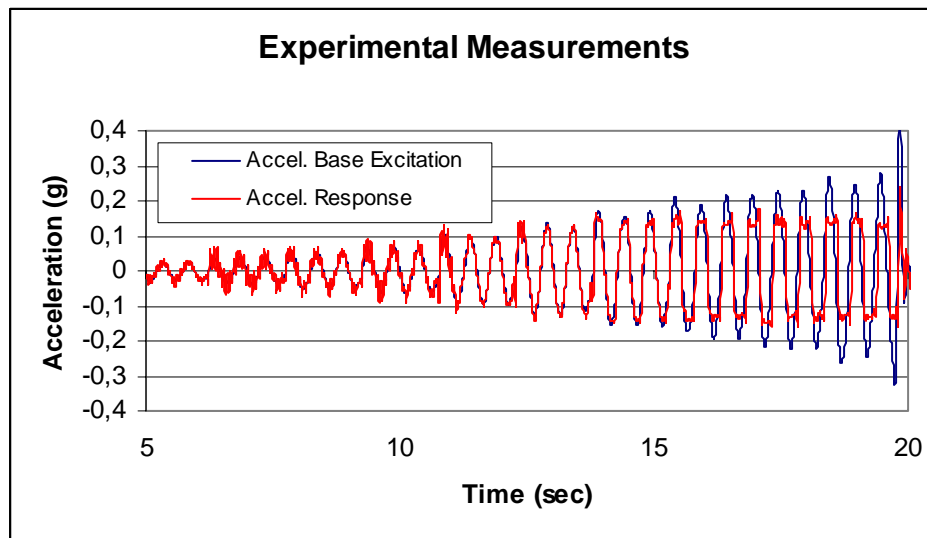


TEST 3: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 1.0Hz, SPAN=9.0

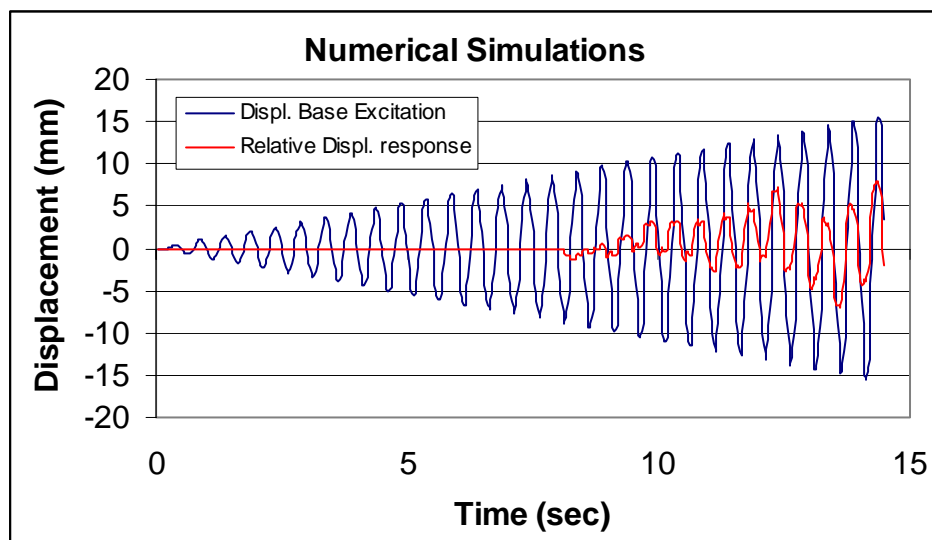
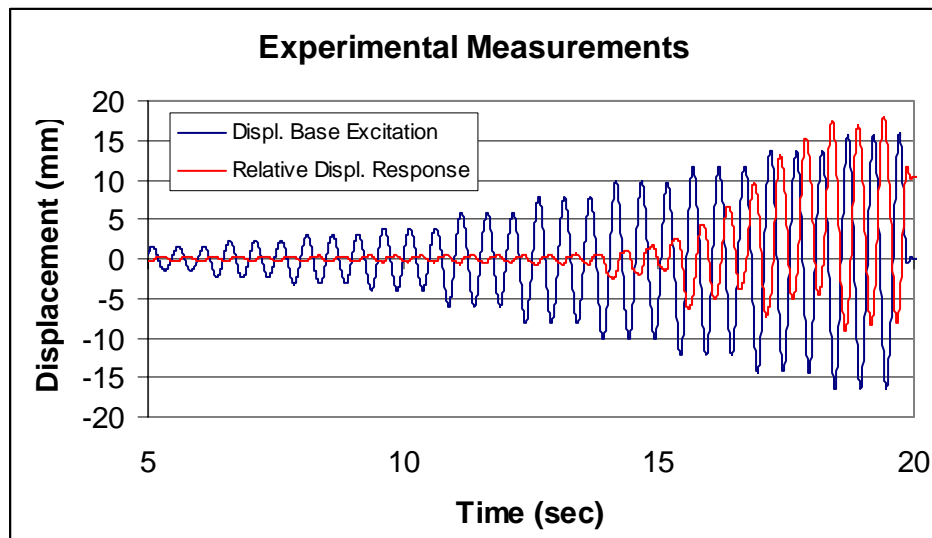




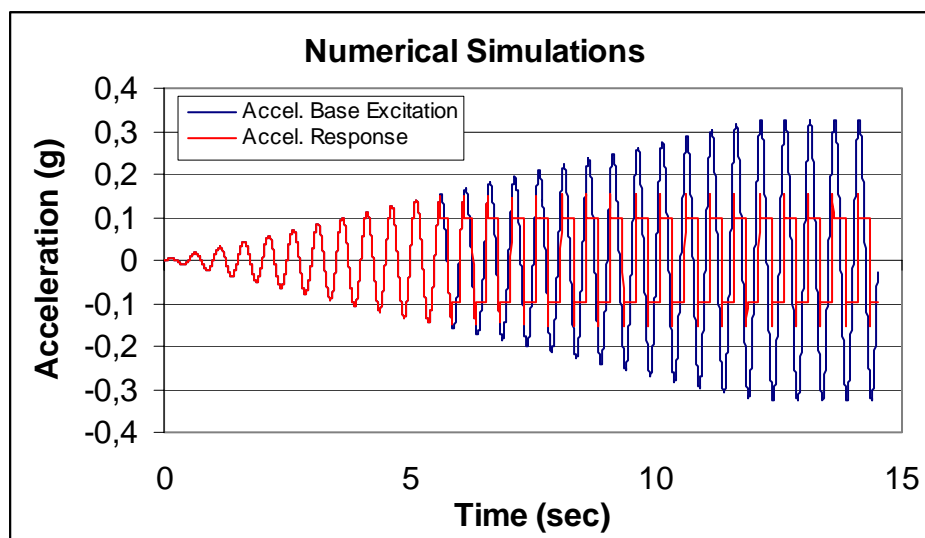
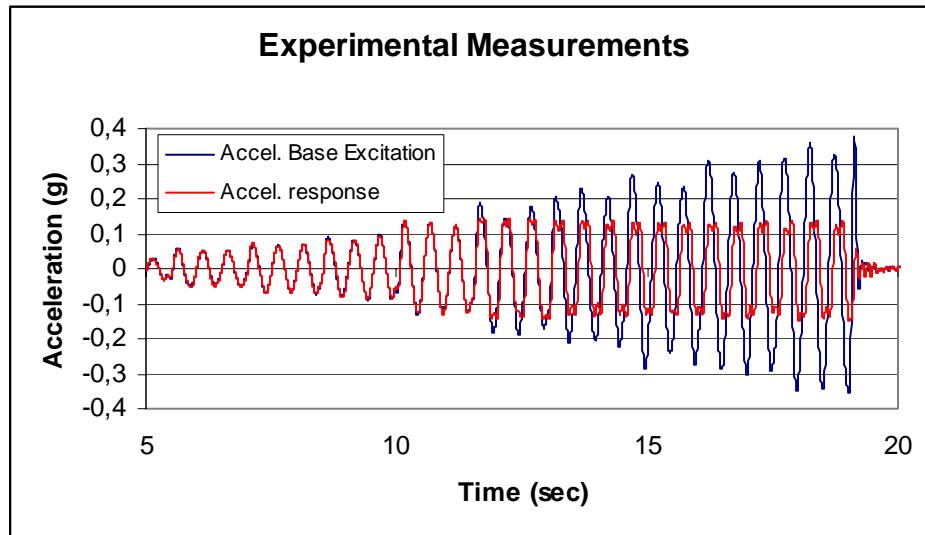
TEST 6: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=3.0



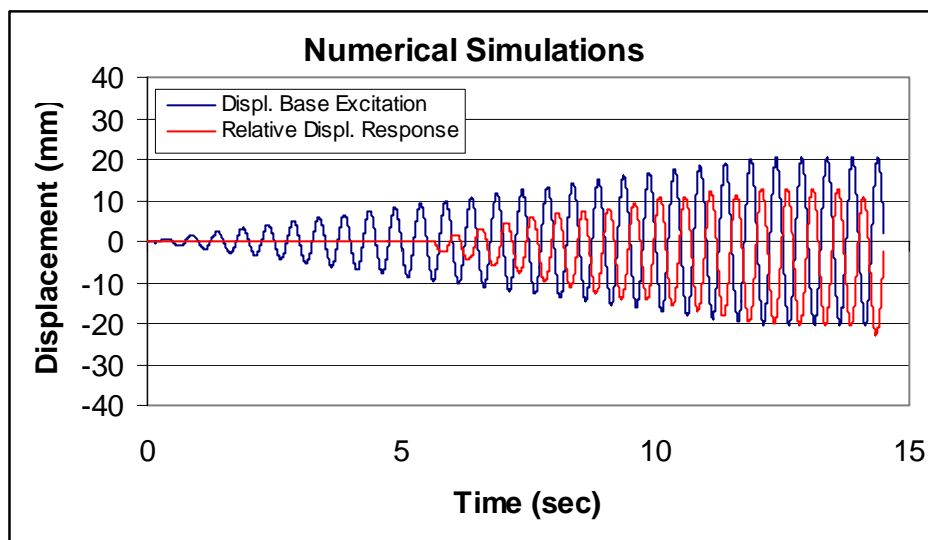
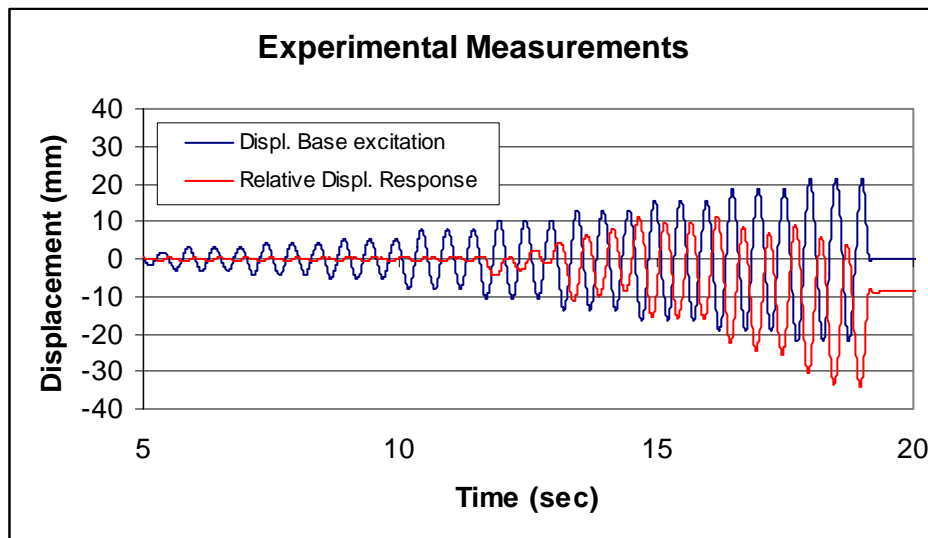
TEST 6: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=3.0



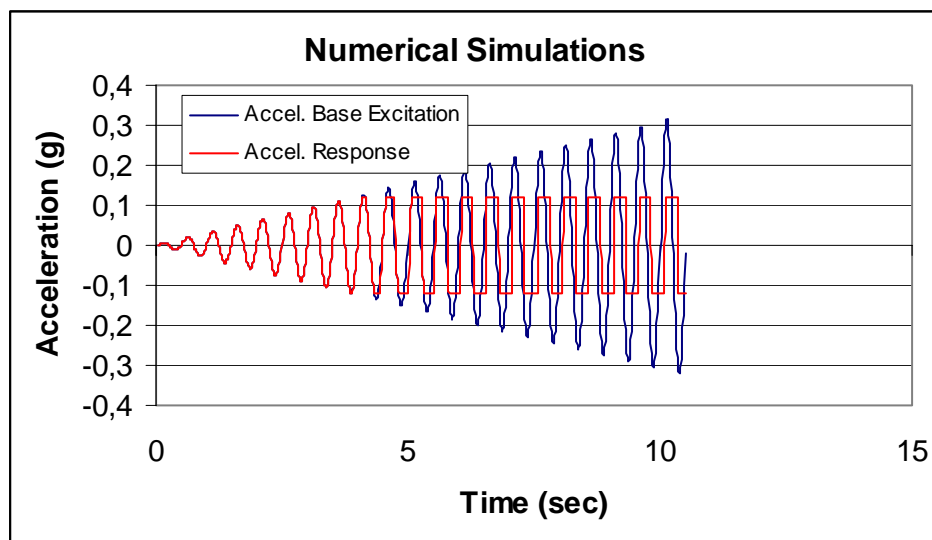
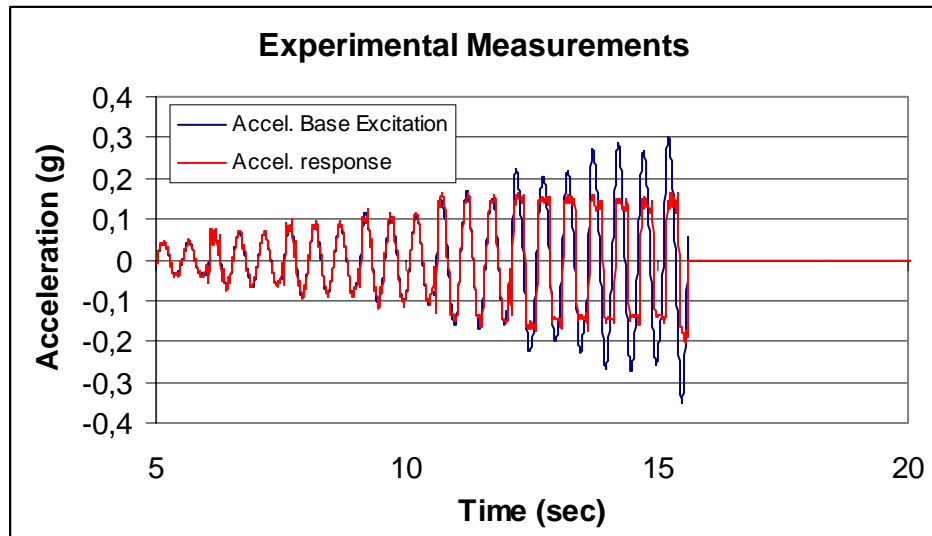
TEST 7: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=4.0



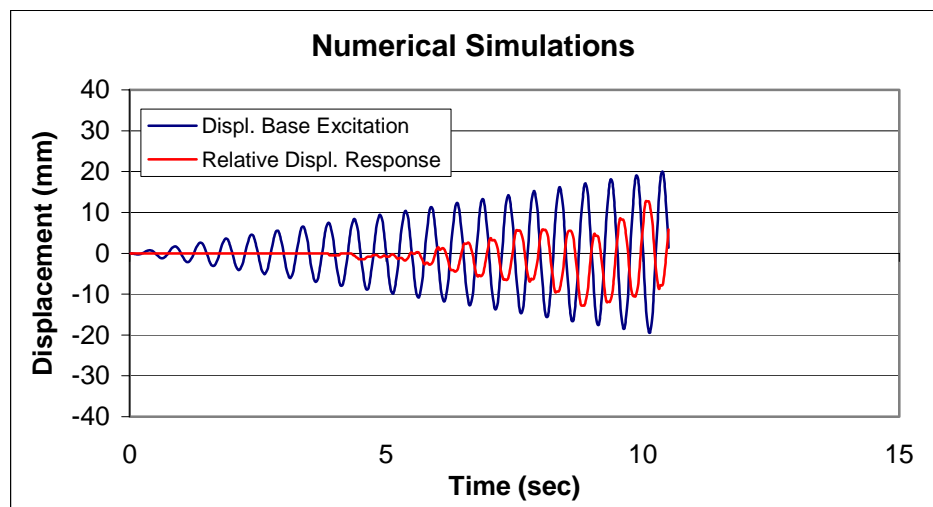
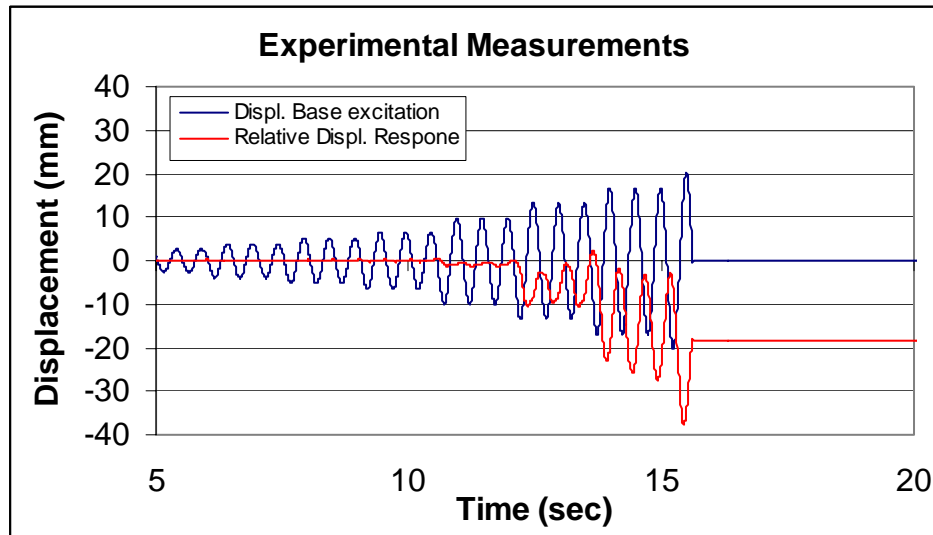
TEST 7: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=4.0



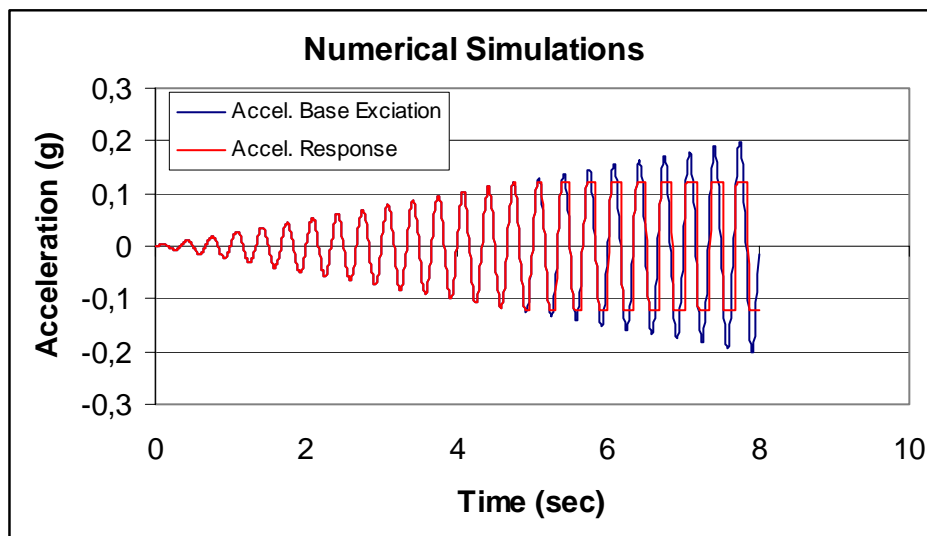
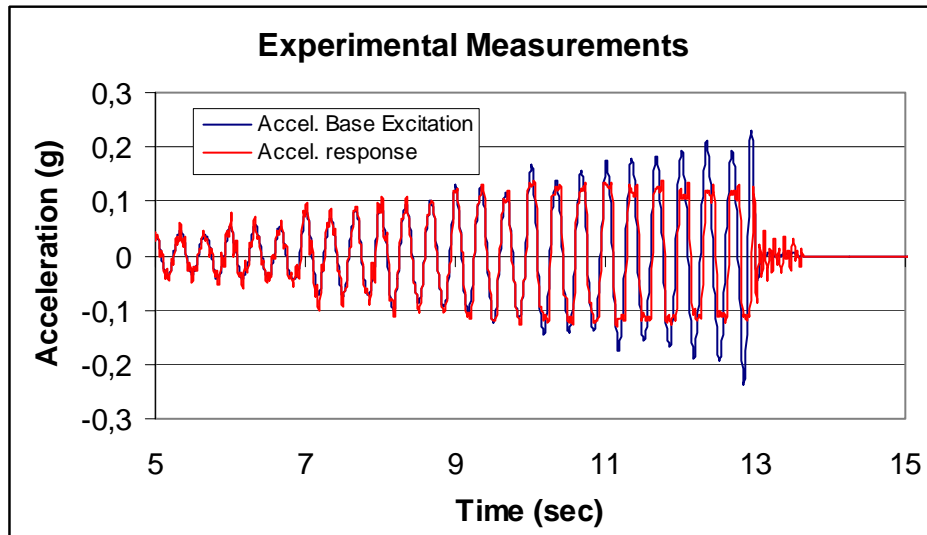
TEST 8: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=5.0



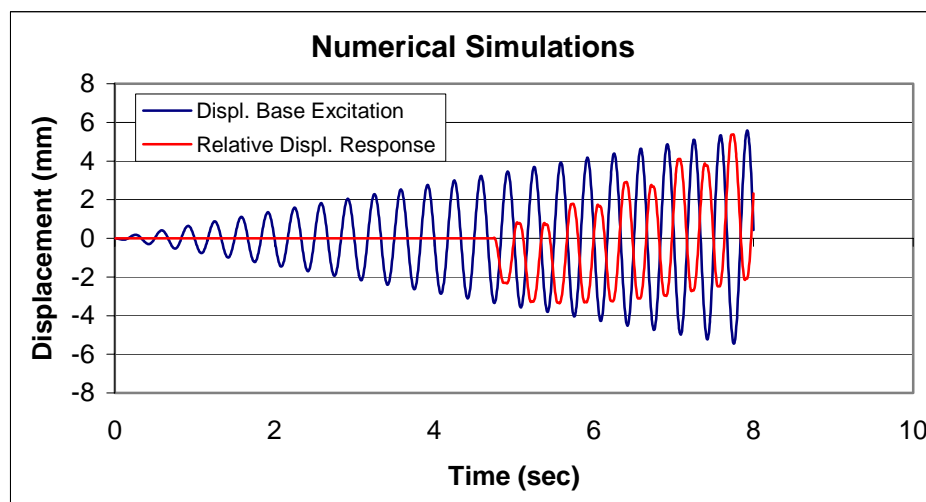
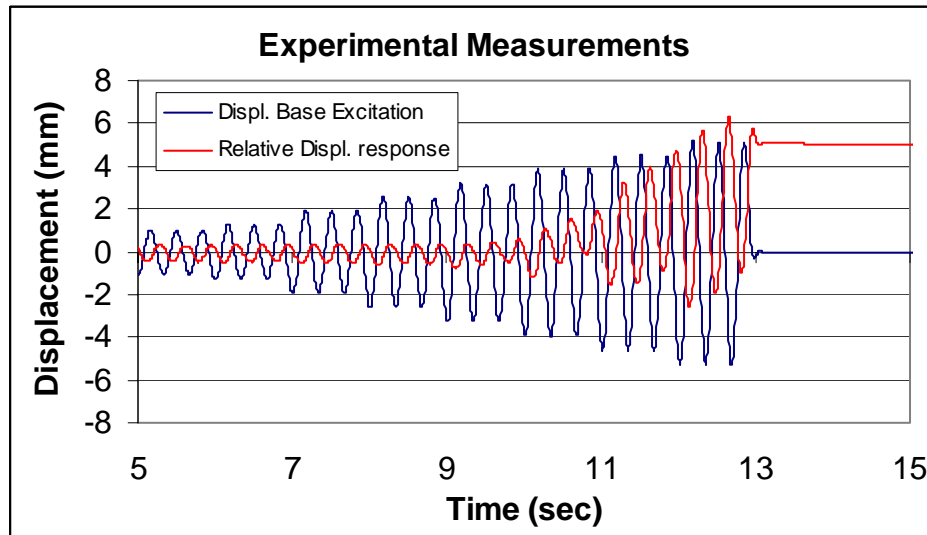
TEST 8: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 2.0Hz, SPAN=5.0



TEST 9: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 3.0Hz, SPAN=1.0

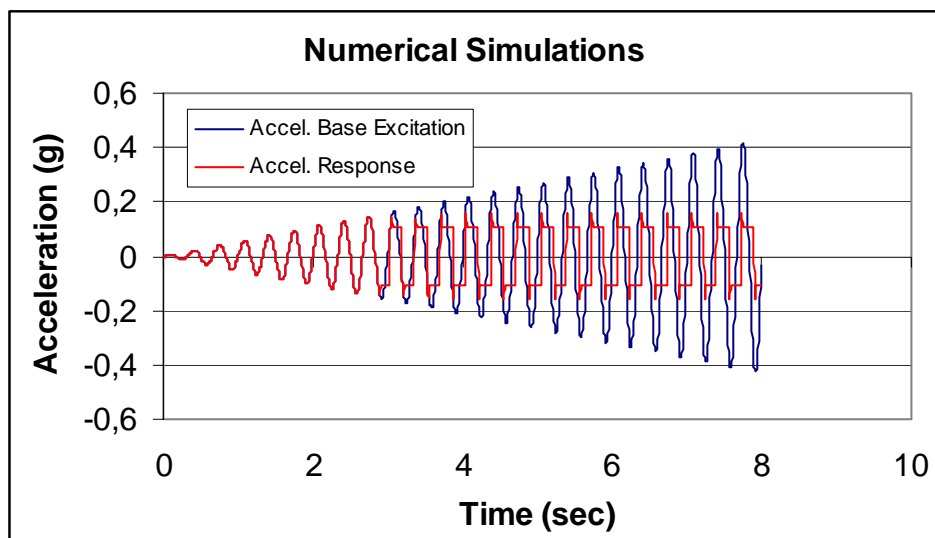
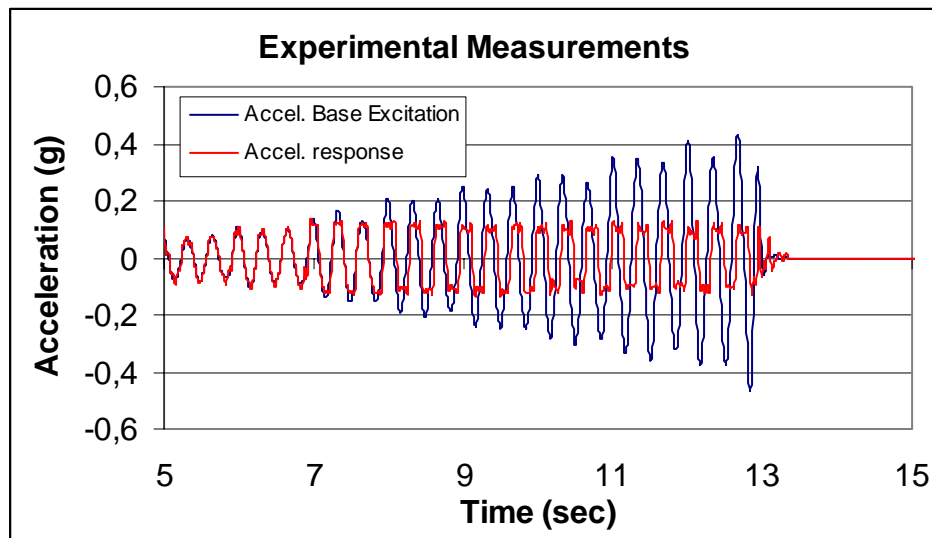


TEST 9: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 3.0Hz, SPAN=1.0

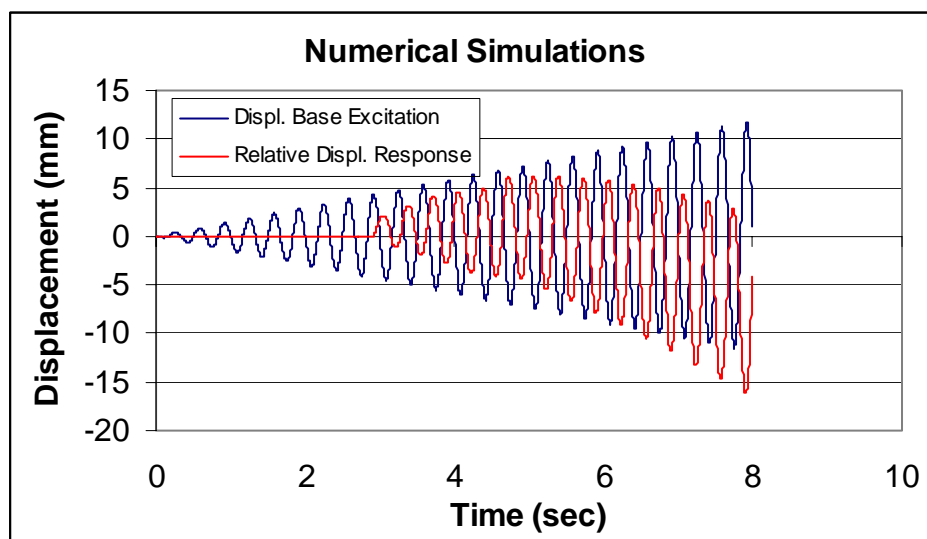
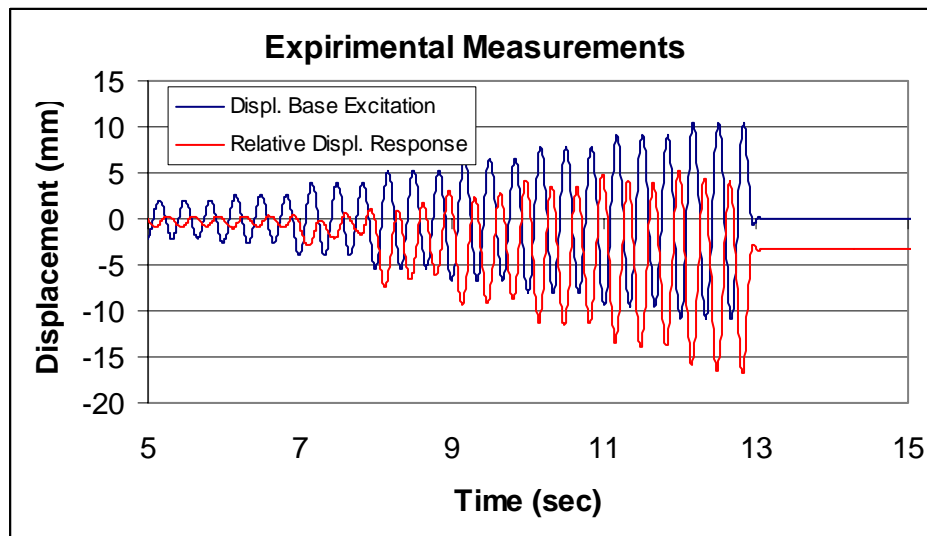




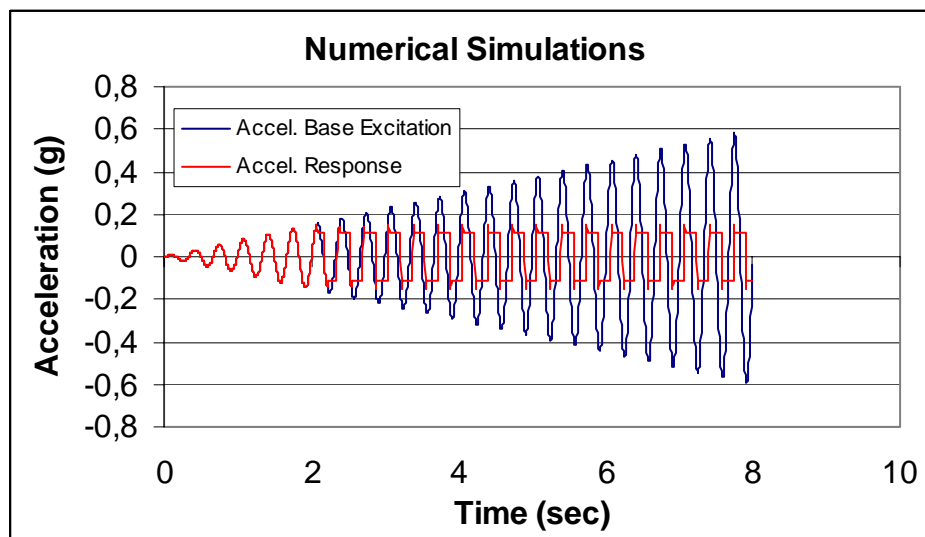
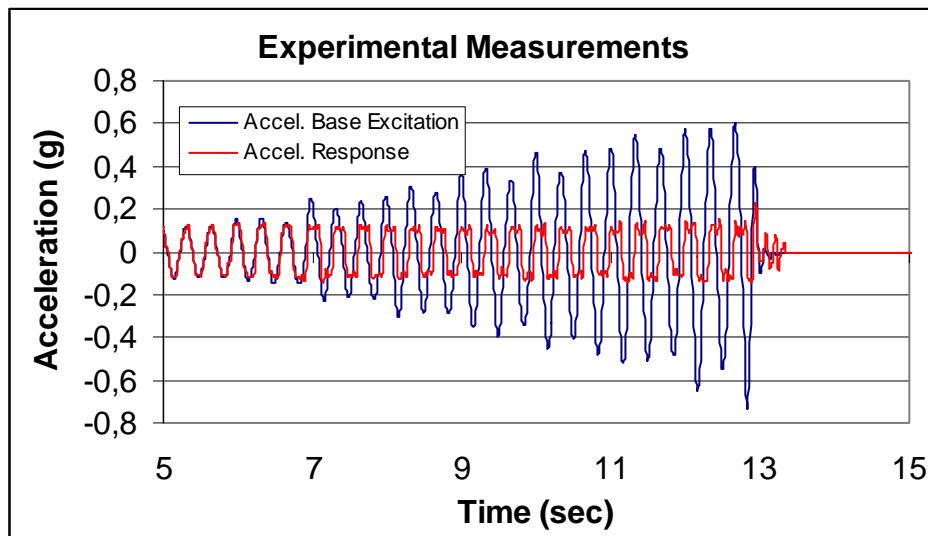
TEST 10: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 3.0Hz, SPAN=2.0



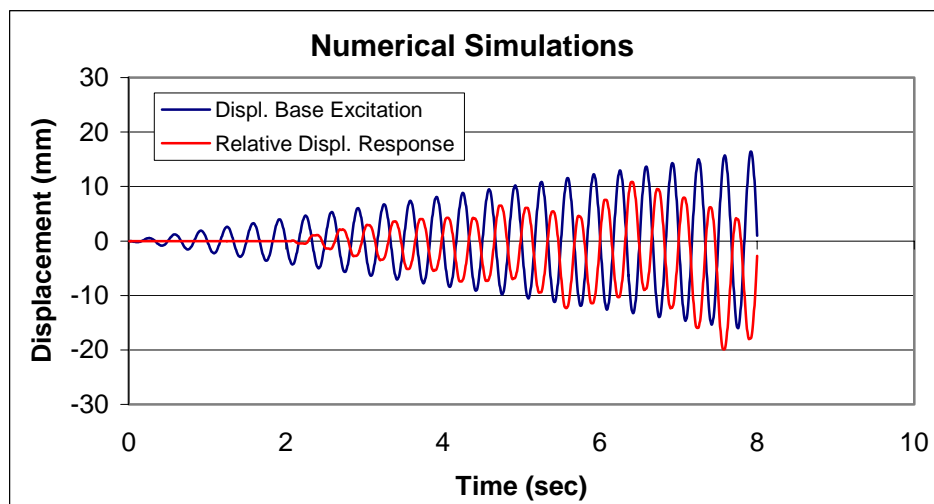
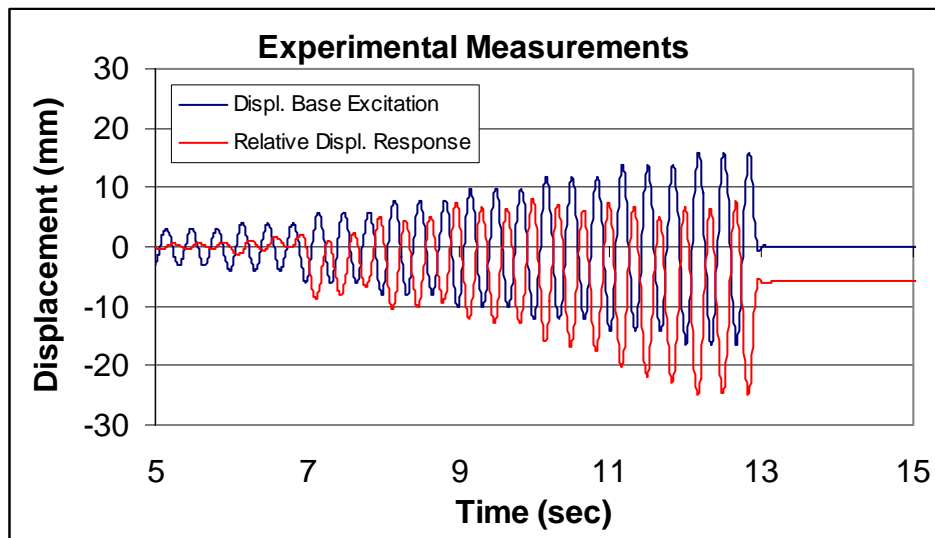
TEST 10: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 3.0Hz, SPAN=2.0



TEST 11: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 3.0Hz, SPAN=3.0



TEST 11: Sinusoidal Base Excitation, Freq. Excitation = 3.0Hz, SPAN=3.0



#### **4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΕΔΡΑΖΟΜΕΝΟΥ ΣΦΟΝΔΥΛΟΥ**

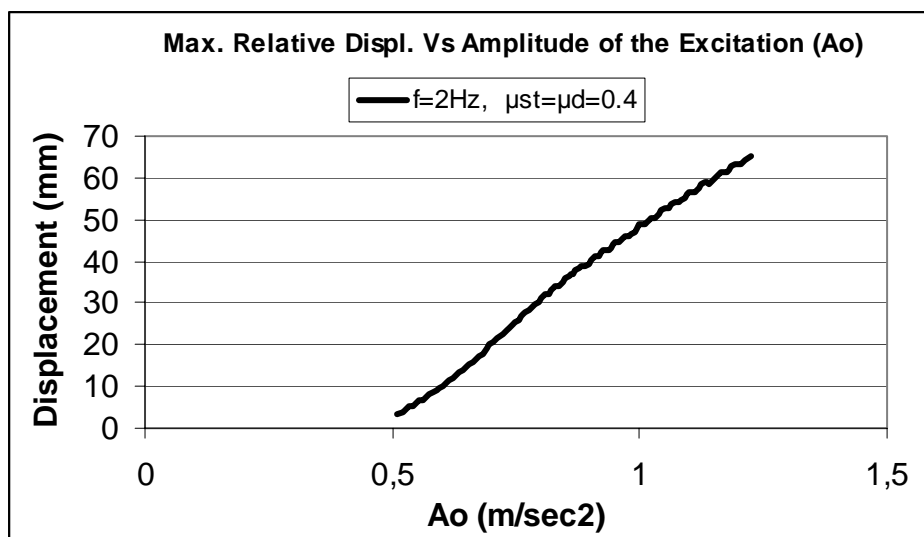
Από τις μέχρι τώρα πειραματικές και υπολογιστικές διερευνήσεις έχει γίνει προφανές ότι σε ημιτονοειδείς διεγέρσεις το μέγιστο πλάτος της επιτάχυνσης διέγερσης (Αο) επηρεάζει την απόκριση σε ολίσθηση. Αυξανόμενου του πλάτους της διέγερσης αυξάνονται οι σχετικές μετατοπίσεις του ολισθαίνοντα σφονδύλου ως προς των κατώτερο σφόνδυλο στον οποίο εδράζεται.

Αν και δεν έχει διερευνηθεί η επιρροή των συντελεστών τριβής (στατικού και δυναμικού) στην εξέλιξη και τις μέγιστες τιμές των σχετικών μετακινήσεων, εύκολα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αυτές αυξάνουν όσο μειώνονται οι τιμές αυτών των συντελεστών.

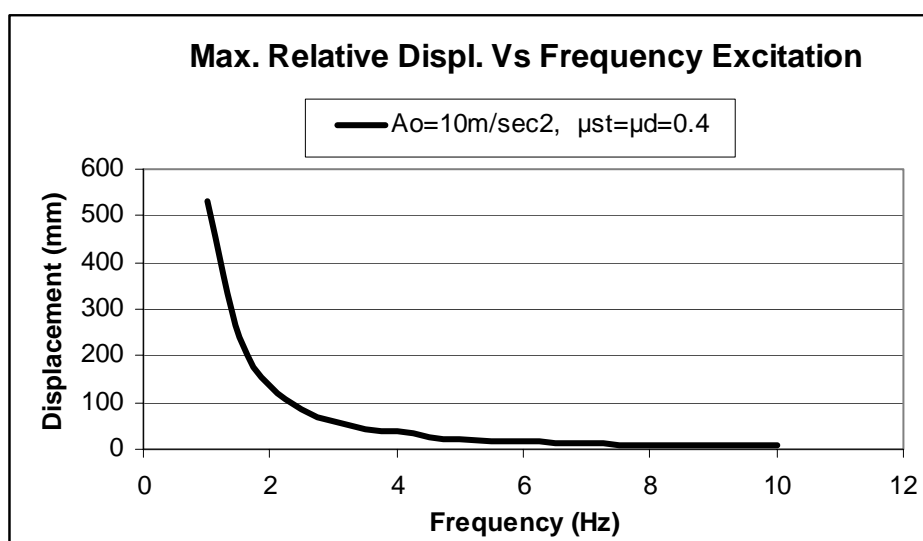
Εκείνο που αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον και εξετάζεται στη συνέχεια είναι η επιρροή της συχνότητας της διέγερσης στην ανάπτυξη των σχετικών μετακινήσεων. Για το λόγο αυτό κάνουμε χρήση του ίδιου λογισμικού. Για επιβεβαίωση της αξιοπιστίας πριν από τη διερεύνηση αυτή επιχειρούμε μια πρόσθετη διερεύνηση εξέτασης των μέγιστων τιμών της σχετικής μετακίνησης για σταθερή συχνότητα διέγερσης και μεταβαλλόμενο το μέγιστο πλάτος. Τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης δίνονται στο σχήμα 9. Παρατηρούμε λοιπόν, όπως αναμενόταν, ότι αυξανόμενου του πλάτους της διέγερσης αυξάνονται οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις.

Με το ίδιο λογισμικό εκτελούμε λοιπόν τη διερεύνηση της μεταβολής των μέγιστων σχετικών μετακινήσεων συναρτήσει της συχνότητας της διέγερσης διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος σταθερές (σχήμα 10). Όπως φαίνεται στο σχήμα 10, για συχνοτικό περιεχόμενο 1 – 10Hz, αυξανόμενης της συχνότητας της διέγερσης μειώνονται δραστικά οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις.

Το πιο πάνω συμπέρασμα μπορεί να επιβεβαιωθεί και από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων συγκρίνοντας τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των πειραμάτων Test 3, Test 6 και Test 9. Και στα τρία αυτά πειράματα η μέγιστη επιτάχυνση ήταν περίπου η ίδια (0.23g-0.27g) ενώ η συχνότητα ήταν αντίστοιχα 1, 2 και 3Hz. Επίσης οι συντελεστές τριβής παρέμεινα ουσιαστικά αναλλοίωτοι. Η μέγιστη σχετική μετακίνηση στο Test 1 (1Hz) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στο Test 6 (2Hz) και πολύ μεγαλύτερη από αυτή που καταγράφηκε στο Test 9 (3Hz).



Σχήμα 9. Μεταβολή σχετικών μετακινήσεων συναρτήσει του μέγιστου πλάτους ημιτονοειδούς διέγερσης



Σχήμα 10. Μεταβολή σχετικών μετακινήσεων συναρτήσει της συχνότητας ημιτονοειδούς διέγερσης