

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ ΜΕ Ή ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η περιγραφή της πειραματικής ακολουθίας που διερεύνησε την επιρροή των συνδέσμων πόλου-εμπολίων στην συμπεριφορά δύο σφονδύλων κάτω από συνδυασμένη οριζόντια και κατακόρυφη φόρτιση. Όπως θα αναφερθεί λεπτομερώς στη συνέχεια το κατακόρυφο φορτίο διατηρούνταν σταθερό σε ένα συγκεκριμένο και προεπιλεγμένο επίπεδο ενώ ταυτόχρονα επιβάλλονταν μια συγκεκριμένης μορφής ανακυκλιζόμενη ακολουθία οριζοντίων μετακινήσεων συνεχώς αυξανόμενου εύρους από κύκλο σε κύκλο.

Αν και θα αναφερθούν λεπτομερώς στη συνέχεια όλες οι παράμετροι της πειραματικής ακολουθίας και οι μεταβολές τους, τα φυσικά ομοιώματα που εξετάστηκαν μπορεί να διαχωριστούν στις εξής δύο βασικές κατηγορίες.

A. Φυσικά ομοιώματα χωρίς πόλους-εμπόλια.

B. Φυσικά ομοιώματα με πόλους-εμπόλια.

Ένας πρόσθετος βασικός διαχωρισμός που επίσης μπορεί να γίνει είναι δοκίμια όπου οι σφόνδυλοι έχουν χαλύβδινες επιφάνειες επαφής-ολίσθησης (που θα ονομάζονται και χαλύβδινοι σφόνδυλοι) ή άλλως δοκίμια όπου έχουμε μαρμάρινους σφονδύλους με μαρμάρινες επιφάνειες επαφής-ολίσθησης (που θα ονομάζονται και μαρμάρινοι σφόνδυλοι). Η χρήση των χαλύβδινων σφονδύλων, η οποία γίνεται κατά συστηματικό τρόπο στα πλαίσια αυτού του προγράμματος, κρίθηκε επιβεβλημένη για τους λόγους που αναλύονται αμέσως παρακάτω.

Από την μελέτη των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων της απόκρισης σε σχετική ολίσθηση τόσο των χαλύβδινων όσο και των μαρμάρινων σφονδύλων (με ή χωρίς συνδέσμους) εξήχθησαν οι εξής βασικές παρατηρήσεις ως προς την συνολική συμπεριφορά της ολίσθησής τους.

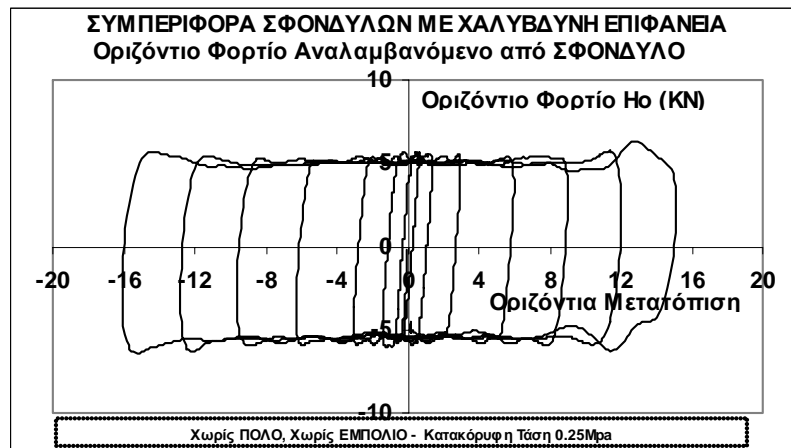
- 1) Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν σύνδεσμοι η δύναμη που αναπτύσσεται εξαρτάται από την φύση της επιφάνειας ολίσθησης και το επίπεδο του κατακόρυφου φορτίου που αυτή φέρει. Για σταθερό επίπεδο κατακόρυφου φορτίου η δύναμη αυτή είναι μεγαλύτερη για επιφάνειες που όταν ολισθαίνουν μεταξύ τους έχουν μεγαλύτερο συντελεστή τριβής, όπως συμβαίνει για τους μαρμάρινους σφονδύλους συγκρινόμενους με τους χαλύβδινους σφονδύλους.

- 2) Στην περίπτωση που υπάρχουν σύνδεσμοι, η δύναμη που αναπτύσσεται εξαρτάται τόσο από την φύση της επιφάνειας ολίσθησης και το επίπεδο του κατακόρυφου φορτίου που αυτή φέρει όσο και από την αντίσταση που αναπτύσσει ο σύνδεσμος αντιστεκόμενος στην ολίσθηση, και που εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συνθετικών στοιχείων του συνδέσμου (πόλος-εμπολία).
- 3) Με βάση αυτό το σκεπτικό η συμπεριφορά της ολίσθησης των δύο σφονδύλων με σύνδεσμο (πόλου-εμπολίων) μπορεί να θεωρηθεί ως επαλληλία δύο επί μέρους μηχανισμών. Πρώτον του μηχανισμού της τριβής-ολίσθησης της διεπιφάνειας επαφής-ολίσθησης των δύο σφονδύλων και δεύτερον από την συνεισφορά του συνδέσμου αυτού καθεαυτού. Η αντίσταση (φέρουσα ικανότητα) που προβάλλει ο πρώτος μηχανισμός εξαρτάται, όπως αναφέρθηκε, αφενός από τον συντελεστή τριβής αφετέρου από το επίπεδο της κατακόρυφης τάσης που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια επαφής. Κατά προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ότι η παρουσία του συνδέσμου δεν αλλοιώνει αυτόν τον μηχανισμό τριβής-ολίσθησης συνεπώς ούτε την αντίστοιχη αντίσταση που αυτός προβάλλει. Δηλαδή η συνεισφορά του μηχανισμού αυτού είναι περίπου η ίδια με αυτήν που αναπτύσσεται στους δύο ίδιους σφονδύλους που υφίστανται την τριβή-ολίσθηση χωρίς σύνδεσμο.
- 4) Με βάση την προηγούμενη θεώρηση η συνεισφορά του συνδέσμου μπορεί να βρεθεί ως εξής. Εκτελούνται δύο διακριτά πειράματα τριβής-ολίσθησης που έχουν ακριβώς τις ίδιες συνθήκες και τα ίδια δοκίμια. Στο πρώτο πείραμα οι ίδιοι σφόνδυλοι υποβάλλονται στο ίδιο κατακόρυφο φορτίο και ολισθαίνουν χωρίς συνδέσμους ενώ στο δεύτερο πείραμα στους ίδιους σφονδύλους και για το ίδιο κατακόρυφο φορτίο προστίθεται ο σύνδεσμος του οποίου η συνεισφορά και η συμπεριφορά επιθυμούμε να μελετηθεί. Ακολουθώντας την αφαιρετική διαδικασία, δηλαδή αφαιρώντας από την αναπτυσσόμενη δύναμη που καταγράφεται στο δεύτερο πείραμα με τον σύνδεσμο την δύναμη που καταγράφεται στο πρώτο πείραμα χωρίς τον σύνδεσμο (για το ίδιο επίπεδο μετακίνησης) μπορεί να βρεθεί η συνεισφορά-συμπεριφορά του συνδέσμου που ενυπάρχει μεταξύ των σφονδύλων του δεύτερου πειράματος (βλέπε σχηματική παράσταση στην επόμενη σελίδα).

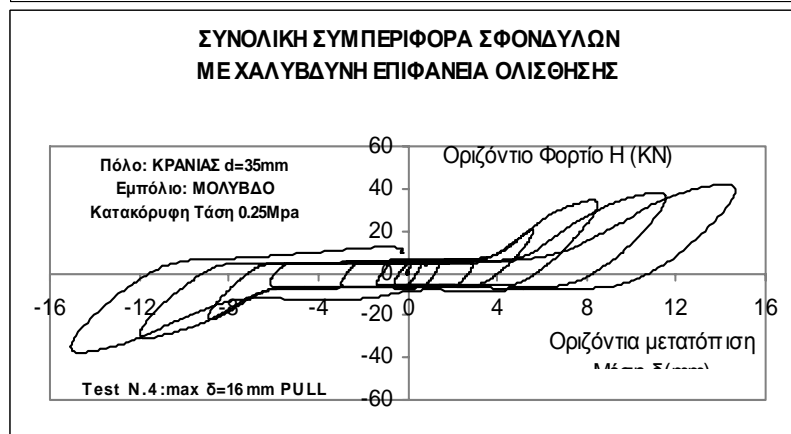
Η πειραματική ακολουθία που σχεδιάστηκε στο μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης βασίστηκε στο σκεπτικό που αναπτύσσεται στο 4) ανωτέρω (δες παράγραφο 4.2). Επειδή μέρος της διερεύνησης περιλαμβάνει την μελέτη της επιρροής παραμέτρων όπως το υλικό του πόλου, η διάμετρος του πόλου και το υλικό των εμπολίων θα έπρεπε για όλες αυτές τις παραμέτρους να εκτελεσθεί πληθώρα πειραμάτων με μαρμάρινους σφόνδylους και στη συνέχεια να αφαιρεθεί η καταγεγραμμένη συμπεριφορά των μαρμαρίνων σφονδύλων χωρίς συνδέσμους. Δυστυχώς αυτό δεν ήταν δυνατό να γίνει γιατί για τέτοιο μεγάλο αριθμό επαναλαμβανομένων πειραμάτων η επιφάνεια τριβής-ολίσθησης των μαρμαρίνων σφονδύλων θα υφίστατο τέτοιου βαθμού αλλοιώσεις που δεν θα ήτο δυνατόν να υποτεθεί ότι ο συντελεστής τριβής ανάμεσά τους παραμένει αναλλοίωτος ώστε να εφαρμοσθεί η αφαιρετική διαδικασία με βάση το πείραμα της ολίσθησης των μαρμαρίνων σφονδύλων χωρίς σύνδεσμο. Οι χαλύβδινοι σφόνδυλοι αντίθετα δεν παρουσίαζαν αυτή την επιπλοκή της αλλοίωσης και γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν ώστε με βάση την αφαιρετική διαδικασία που προαναφέρθηκε να γίνει δυνατή η καταγραφή της συνεισφοράς-

συμπεριφοράς του συνδέσμου αυτού καθαυτού (pure contribution) μελετώντας ταυτόχρονα την επιρροή του πλήθους των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν (δες πίνακα 4.3). Για να είναι καταγεγραμμένη η συνολική συμπεριφορά και με τους μαρμαρίνους σφονδύλους έγινε η εκτέλεση επιλεγμένων πειραμάτων (αλλά πολύ ολιγότερων σε αριθμό) με τους μαρμαρίνους σφονδύλους με ή χωρίς συνδέσμους (δες πίνακα 4.4).

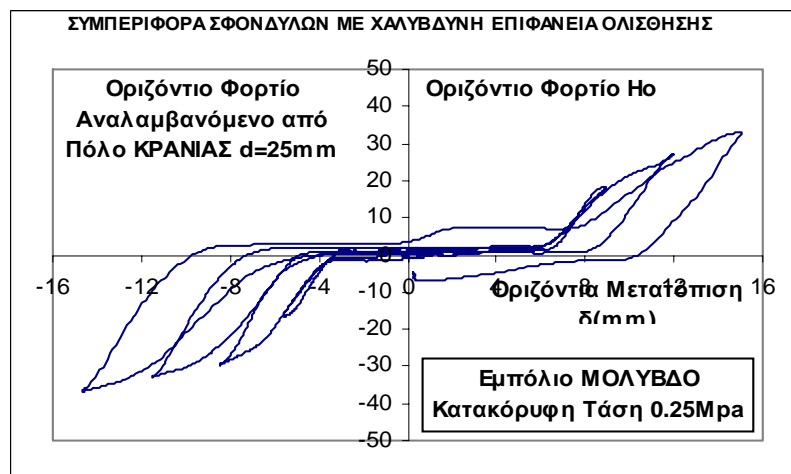
A



B

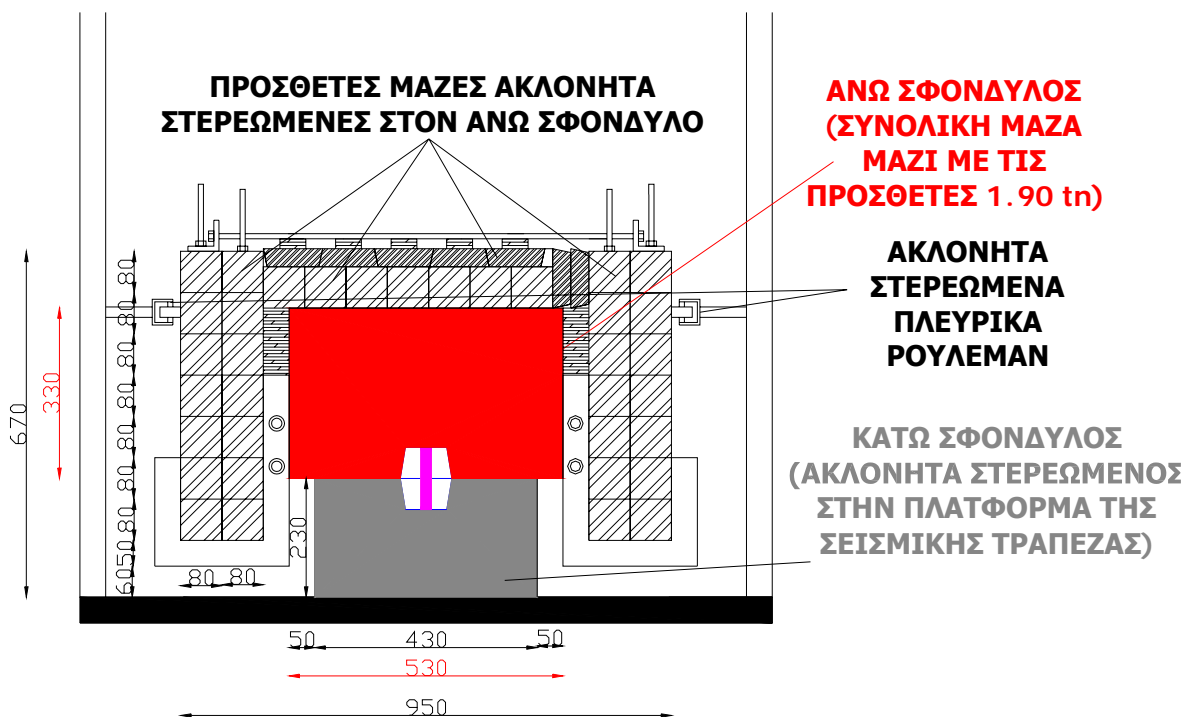


C=B-A



4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΜΑΡΜΑΡΙΝΩΝ Ή ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ ΜΕ Ή ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ ΩΣ ΒΑΣΗ ΕΔΡΑΣΗΣ

Έγινε μια πρώτη δοκιμαστική προσπάθεια διερεύνησης του εν λόγω προβλήματος, με τα ίδια φυσικά ομοιώματα στην αρχική τους μορφή και για μικρές ταχύτητες επιβολής (μικρότερες του 0.1Hz) του οριζόντιου φορτίου, χρησιμοποιώντας την μεταλλική πλατφόρμα της σεισμικής τράπεζας ως βάση έδρασης των δύο σφονδύλων. Στην περίπτωση αυτή το κατακόρυφο φορτίο επιβάλλονταν μέσα από την μάζα του άνω σφονδύλου καθώς και προσθήκες πρόσθετων μαζών στην εν λόγω αρχική μάζα.



Σχήμα 4.1. Πειραματική διάταξη σφονδύλων για στατική φόρτιση στη σεισμική τράπεζα.

Χαλύβδινοι Σφόνδυλοι.

Η συνολική μάζα του άνω χαλύβδινου σφονδύλου ήταν **320 kg** (μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης). Οι διαστάσεις του άνω σφονδύλου ήταν 530 mm x 530 mm x 330 mm. Ο κάτω χαλύβδινος σφόνδυλος είχε διαστάσεις 430 mm x 430 mm x 230 mm, συνολική μάζα **100 kg** (μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης) και ήταν ακλόνητα συνδεδεμένος με την μεταλλική πλατφόρμα της σεισμικής τράπεζας.

Μαρμάρيني Σφόνδυλοι.

Η συνολική μάζα του άνω μαρμαρίνου σφονδύλου ήταν **200 kg** (μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης). Οι διαστάσεις του άνω μαρμαρίνου σφονδύλου ήταν 500 mm x 500 mm x 300 mm.

Ο κάτω μαρμάρινος σφόνδυλος είχε διαστάσεις 400 mm x 400 mm x 200 mm, συνολική μάζα **100 kgf** .(μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης) και ήταν ακλόνητα συνδεδεμένος με την μεταλλική πλατφόρμα της σεισμικής τράπεζας. Στο ανωτέρω σχήμα φαίνονται οι εν λόγω σφόνδυλοι καθώς ενδεικτικά και οι συνδέσεις της πρόσθετης μάζας.

4.1.1. Σύνοψη Πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τα κατακόρυφα αυτά φορτία ήταν ποικίλου εύρους, όπως φαίνεται στους πίνακες που ακολουθούν τόσο για τους μαρμάρινους όσο και για τους χαλύβδινους σφονδύλους (Πίνακες 4.1 και 4.2). Το οριζόντιο φορτίο εφαρμοζόταν στον άνω σφόνδυλο μέσα από σύστημα χειροκίνητου κοχλία που είχε στην άκρη του συνδεδεμένο δυναμόμετρο για την καταγραφή του οριζόντιου φορτίου. Το μεγαλύτερο μέρος των πειραμάτων αφορούσε πειράματα ολίσθησης. Στη συνέχεια έγινε δοκιμαστικά ένας μικρός αριθμός πειραμάτων με συνδέσμους (πόλους-εμπόλια). Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν εμπόλια από οξιά ή ρόμπολο και πόλοι από κρανιά ή πεύκο με τους μαρμάρινους σφονδύλους. Παρά το γεγονός ότι οι πόλοι σε όλα αυτά τα πειράματα είχαν σχετικά μικρή διάμετρο (περίπου 10μμ) παρατηρήθηκε μια αξιοσημείωτη αύξηση του οριζόντιου φορτίου, παρά το γεγονός ότι το κατακόρυφο φορτίο κρατήθηκε σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (5.8 KN). Έτσι για μεγαλύτερα κατακόρυφα φορτία και μεγαλύτερους πόλους θα απαιτούνταν οριζόντια φορτία που το σύστημα χειροκίνητου κοχλία δεν θα μπορούσε να αναπτύξει. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε η πειραματική διερεύνηση να συνεχισθεί στο μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης όπου το αντίστοιχο σερβο-υδραυλικό έμβολο έχει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες επιβολής οριζοντίων φορτίσεων.

Πίνακας 4.1. Συνοπτική συμπεριφορά τριβής-ολίσθησης για τους μαρμάρινους σφονδύλους

	Κατακόρυφο Φορτίο (KN)				
	3.2	6.0	8.0	10.0	12.0
Τιμή του συντελεστού τριβής (μέσος όρος)	0.38	0.33	0.34	0.33	0.33

Πίνακας 4.2. Συνοπτική συμπεριφορά τριβής-ολίσθησης για τους χαλύβδινους σφονδύλους

	Κατακόρυφο Φορτίο (KN)							
	Αρχική Λίπανση			Πρόσθετη Λίπανση				
	3.2	7.2	22.0	3.2	7.2	12.0	22	46.5
Τιμή του συντελεστού τριβής (μέσος όρος)	0.09	0.07	0.07	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04

Τα πλήρη αποτελέσματα σε επίπεδο κύκλων υστέρησης καθώς και μεταβολής των παραμέτρων απόκρισης μέσα στο χρόνο δίδονται στα παραρτήματα 4.1α και 4.1β αρχικά για τα πειράματα χωρίς συνδέσμους και στη συνέχεια για τα πειράματα με συνδέσμους.

4.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΜΑΡΜΑΡΙΝΩΝ Ή ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ ΜΕ Η ΧΩΡΙΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΣΤΟ ΙΣΧΥΡΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Η συγκεκριμένη πειραματική ακολουθία έλαβε χώρα στο Ισχυρό Μεταλλικό Πλαίσιο Αντίδρασης του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών του Α.Π.Θ. και η ταχύτητα επιβολής των οριζοντίων μετακινήσεων-φορτίων που υιοθετήθηκε ήταν, όπως και πριν, σχετικά μικρή (μικρότερη του 0.1Hz) ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ως μια ψευδο-δυναμική φόρτιση. Το κατακόρυφο φορτίο και πάλι διατηρούνταν σταθερό, αλλά αυτή τη φορά μέσα από την διάταξη του κατακόρυφου σερβο-υδραυλικού εμβόλου με ηλεκτρονικό έλεγχο της σταθερότητας του φορτίου καθ' όλη τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Υιοθετήθηκαν δύο επίπεδα κατακόρυφου φορτίου. Για την πλειονότητα των πειραμάτων με τα μαρμάρινα δοκίμια (με ή χωρίς συνδέσμους) το κατακόρυφο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν περίπου 18KN, που μαζί με το ίδιο βάρος του άνω σφονδύλου και την επιφάνεια επαφής δίδουν μια τιμή κατακόρυφης τάσης περίπου 0.125Mpa.

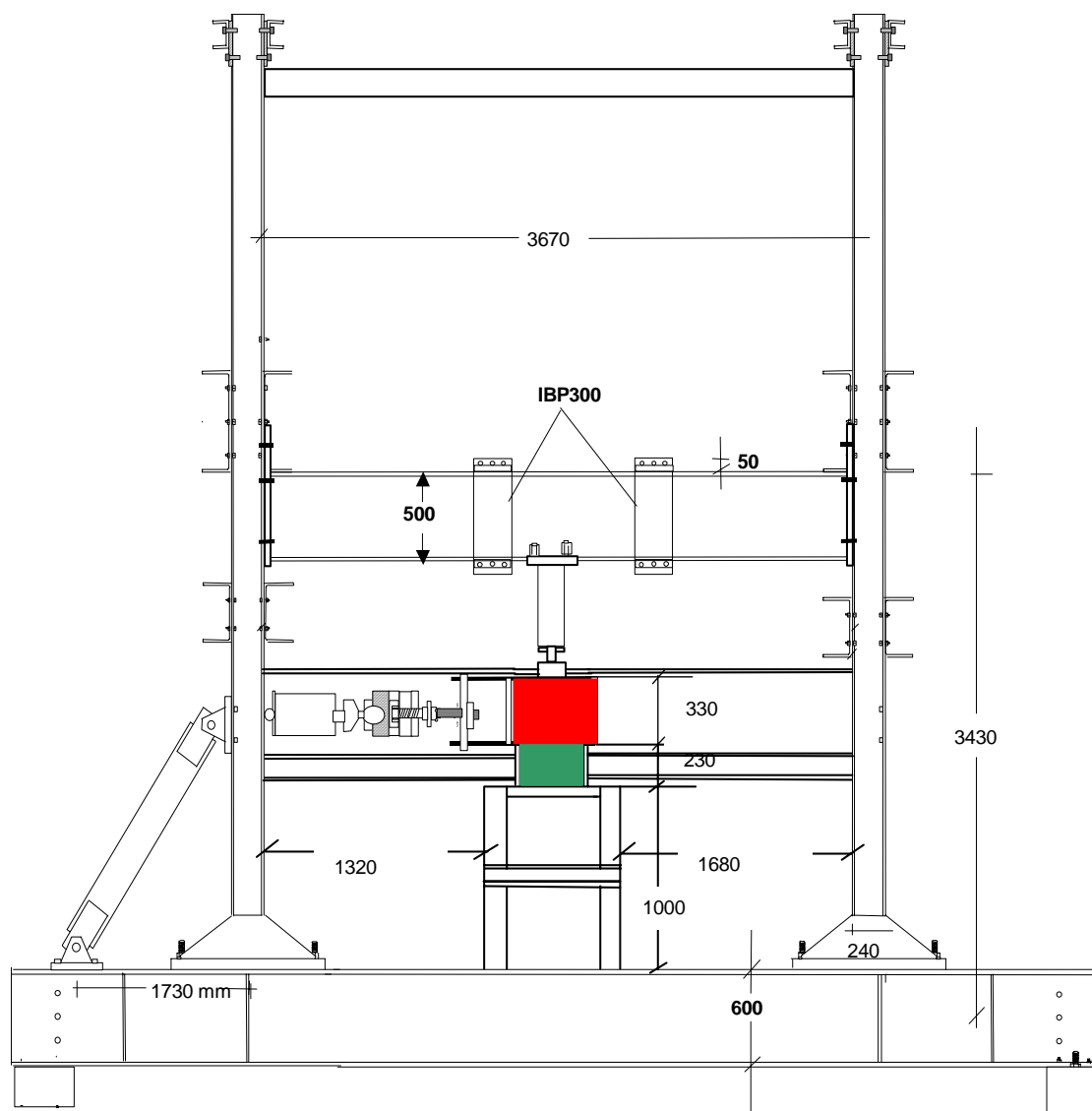
Για την πλειονότητα των πειραμάτων με τα χαλύβδινα δοκίμια (με ή χωρίς συνδέσμους) το κατακόρυφο φορτίο που επιβλήθηκε ήταν περίπου 37KN, που μαζί με το ίδιο βάρος του άνω σφονδύλου και την επιφάνεια επαφής δίδουν μια τιμή κατακόρυφης τάσης περίπου 0.25Mpa. Μεμονωμένα πειράματα έγιναν και για υψηλότερα επίπεδα κατακόρυφου φορτίου, από αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Αν και θα αναφερθούν λεπτομερώς στη συνέχεια όλες οι παράμετροι της πειραματικής ακολουθίας και οι μεταβολές τους, τα φυσικά ομοιώματα που εξετάστηκαν μπορεί να διαχωριστούν στις εξής δύο βασικές κατηγορίες:

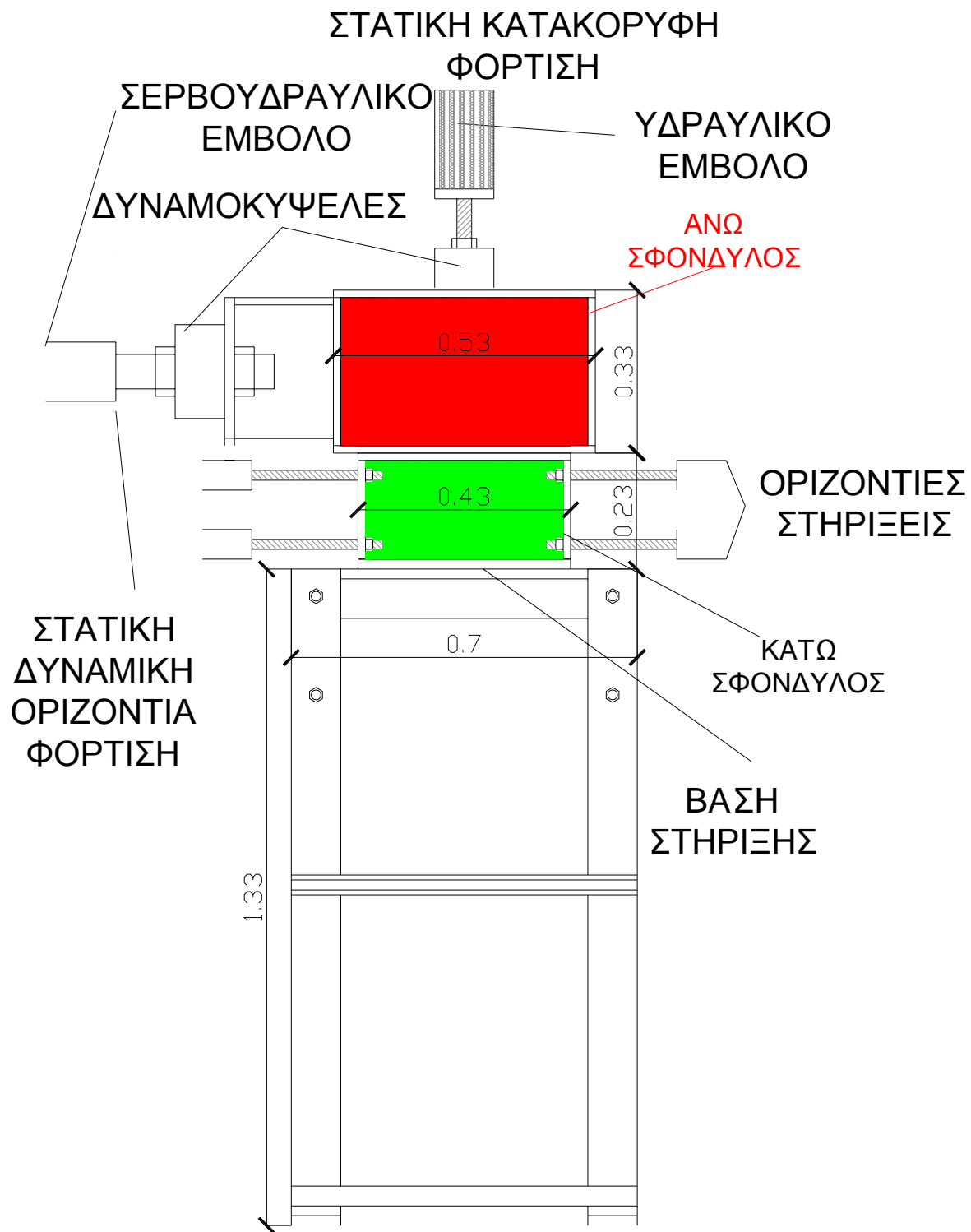
A. Φυσικά ομοιώματα χωρίς πόλους-εμπόλια.

B. Φυσικά ομοιώματα με πόλους-εμπόλια.

Ένας πρόσθετος βασικός διαχωρισμός που επίσης μπορεί να γίνει είναι δοκίμια όπου οι σφόνδυλοι έχουν χαλύβδινες επιφάνειες επαφής-ολίσθησης (που θα ονομάζονται και χαλύβδινοι σφόνδυλοι) ή άλλως δοκίμια όπου έχουμε μαρμάρινους σφονδύλους με μαρμάρινες επιφάνειες επαφής-ολίσθησης (που θα ονομάζονται και μαρμάρινοι σφόνδυλοι).



Σχήμα 4.2. Πειραματική διάταξη δύο σφονδύλων για στατικές φορτίσεις στο μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης.



Σχήμα 4.3. Λεπτομέρεια πειραματικής διάταξης δύο σφονδύλων για στατικές φορτίσεις στο μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης.

Οι διαστάσεις των σφονδύλων ήταν οι ίδιες με αυτές των ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική ακολουθία των ίδιων σφονδύλων (μαρμάρινων και χαλύβδινων) στη σεισμική τράπεζα που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο με διαστάσεις που δίδονται ξανά κατωτέρω:

Χαλύβδινοι Σφόνδυλοι.

Η συνολική μάζα του άνω χαλύβδινου σφονδύλου ήταν **320 kg** (μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης). Οι διαστάσεις του άνω σφονδύλου ήταν 530 mm x 530 mm x 330 mm. Ο κάτω χαλύβδινος σφόνδυλος είχε διαστάσεις 430 mm x 430 mm x 230 mm, συνολική μάζα **100 kg** (μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης) και ήταν ακλόνητα συνδεδεμένος με το μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης.

Μαρμάρيني Σφόνδυλοι.

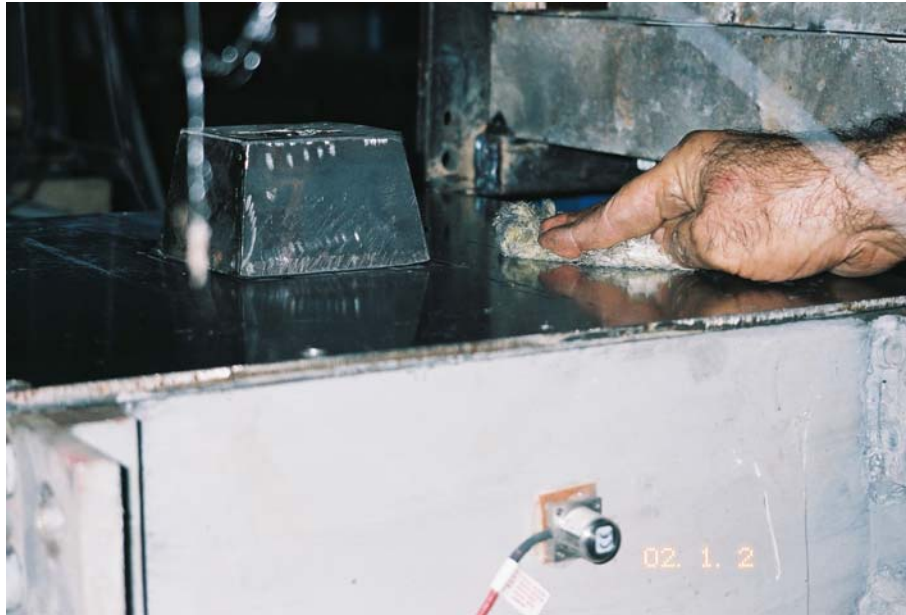
Η συνολική μάζα του άνω μαρμάρινου σφονδύλου ήταν **200 kg** (μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης). Οι διαστάσεις του άνω μαρμάρινου σφονδύλου ήταν 500 mm x 500 mm x 300 mm. Ο κάτω μαρμάρινος σφόνδυλος είχε διαστάσεις 400 mm x 400 mm x 200 mm, συνολική μάζα **100 kg** (μαζί με τις αρχικές πλάκες σύνδεσης) και ήταν ακλόνητα συνδεδεμένος με το μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης.

Τόσο οι μαρμάρινοι όσο και οι χαλύβδινοι σφόνδυλοι ήταν οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη πειραματική ακολουθία χωρίς καμιά σημαντική προσπάθεια επαναλείανσης πέραν του προσεκτικού καθαρισμού και της λίπανσης για τις χαλύβδινες επιφάνειες επαφής-ολίσθησης. Με βάση τα προηγούμενα, πιο συγκεκριμένα για την πειραματική ακολουθία που εκτελέστηκε στο μεταλλικό πλαίσιο, διακρίνουμε τα παρακάτω φυσικά ομοιώματα:

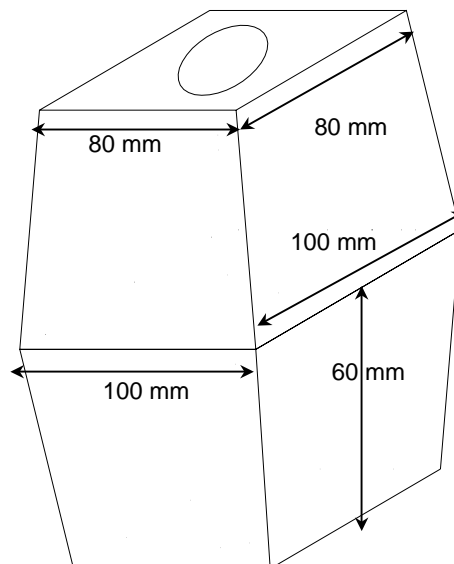
- i) Φυσικό ομοίωμα Σ1 δύο σφονδύλων με χαλύβδινη επιφάνεια ολίσθησης χωρίς πόλους και εμπόλια.
- ii) Φυσικό ομοίωμα Σ2 δύο σφονδύλων με χαλύβδινη επιφάνεια ολίσθησης και με πόλους διαφόρων υλικών και διαμέτρων, καθώς και εμπόλια διαφόρων υλικών, αλλά με διαστάσεις αυτές που φαίνονται στα σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6.
- iii) Φυσικό ομοίωμα Σ3 δύο σφονδύλων με μαρμάρινη επιφάνεια ολίσθησης χωρίς πόλους και εμπόλια.
- iv) Φυσικό ομοίωμα Σ4 δύο σφονδύλων με μαρμάρινη επιφάνεια ολίσθησης και με πόλους διαφόρων υλικών και διαμέτρων, καθώς και εμπόλια διαφόρων υλικών, αλλά με διαστάσεις αυτές που φαίνονται στο σχήμα 4.5.

Επισημαίνεται ότι είτε για τα φυσικά ομοιώματα με χαλύβδινη επιφάνεια επαφής είτε για τα φυσικά ομοιώματα με μαρμάρινη επιφάνεια επαφής οι διαστάσεις των αντιστοίχων σφονδύλων (άνω και κάτω) ήταν οι ίδιες, καθώς ίδιες ήταν και οι υποδοχές των πόλων – εμπολίων. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι για να αποφευχθούν έντονες εκτός επιπέδου παρασιτικές μετατοπίσεις του άνω σφονδύλου (στη διεύθυνση Ανατολής – Δύσης), αφού η κίνηση της σεισμικής τράπεζας ήταν μονοδιάστατη (οριζόντια κίνηση στη διεύθυνση Βορρά – Νότου), τοποθετήθηκαν τέσσερα πλευρικά ρουλεμάν, εμποδίζοντας με αυτόν τον

τρόπο αυτήν την ελευθερία κίνησης του άνω σφονδύλου χωρίς να γίνεται άλλη παρέμβαση σε οποιαδήποτε άλλη πιθανή απόκριση του φυσικού ομοιώματος. Η τυχόν εκτός επιπέδου μετακίνηση του δοκιμίου (προφανώς ανεπιθύμητη) ελεγχόταν σε όλα τα πειράματα από ειδικό αισθητήριο. Από τον έλεγχο των αποτελεσμάτων διακριβώθηκε ότι η διάταξη των ρουλεμάν που περιγράφηκε ήταν επιτυχής στο να διατήρηση την επιβαλλόμενη κίνηση κυρίαρχα εντός επιπέδου, αφού όλες οι μετρημένες εκτός επιπέδου μετακινήσεις κρατήθηκαν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ακόμη και όταν οι εντός επιπέδου μετακινήσεις έφθασαν την μέγιστη τιμή των $\pm 45\text{mm}$.



Σχήμα: 4.4. Λίπανση χαλύβδινων επιφανειών σφονδύλων.



Σχήμα: 4.5. Διαστάσεις εμπολίων που χρησιμοποιήθηκαν στα φυσικά ομοιώματα του μεταλλικού πλαισίου.

Πίνακας: 4.3. Πειραματικές δοκιμές που εκτελέστηκαν στα φυσικά ομοιώματα Σ1, Σ2, με χαλύβδινη επιφάνεια ολίσθησης, για τα διάφορα υλικά πόλων – εμπολίων και τις αντίστοιχες διαμέτρους.

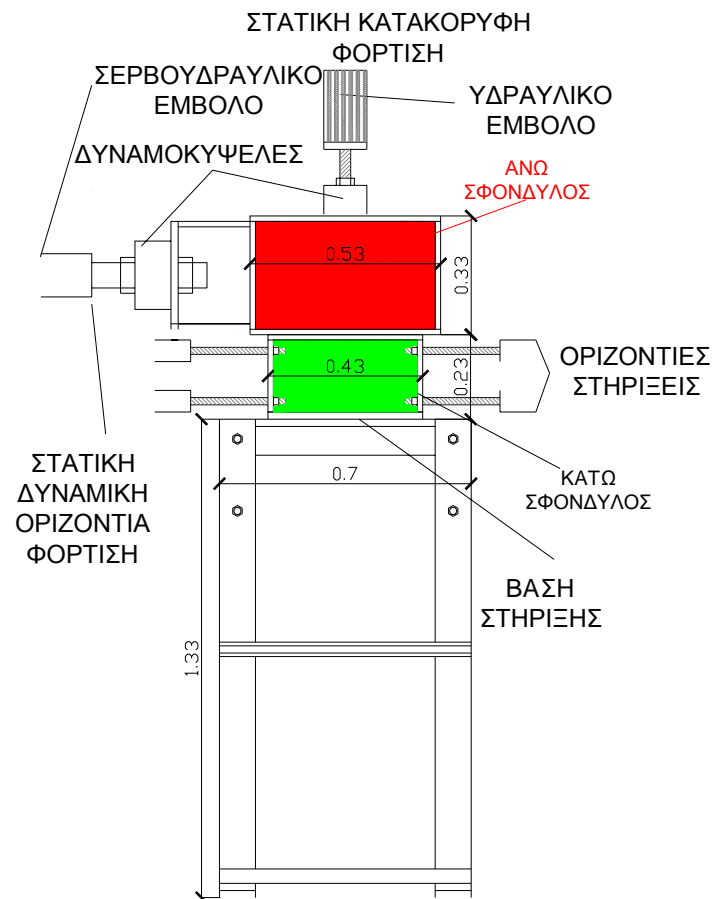
ΠΟΛΟΙ [mm]		ΕΜΠΟΛΙΑ				
		ΧΑΛΥΒΑΣ	ΟΞΙΑ	ΙΡΟΚΟ	ΡΟΜΠΟΛΟ	ΜΟΛΥΒΔΟΣ
ΜΟΛΥΒΔΟΣ	10	ST-PE-A4 (18/05/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=8 mm				
	15	1) ST-PE-A7 (26/05/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=16 mm. 2) ST-PE-A8 (01/06/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=20 mm	ST-PE-A12 (08/06/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=16 mm			
ΚΡΑΝΙΑ	10	ST-PE-A3 (17/05/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=8 mm				
	15	ST-PE-A6 (26/05/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=10 mm	ST-PE-A20 (23/06/04) Παραμορφωμένος πόλος, maxdisp=25 mm	ST-PE-A10 (07/06/04) Παραμορφωμένος πόλος, maxdisp=16 mm		
	20		ST-PE-A21 (23/06/04) Διατμητική αστοχία πόλου, θραυσθέντα εμπόλια, maxdisp=45 mm			ST-PE-A25 (23/06/04) Παραμορφωμένος πόλος Παραμορφωμένα εμπόλια maxdisp=45 mm
	25	ST-PE-A18 (21/06/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=35 mm	ST-PE-A19 (22/06/04) θραυσθέντα εμπόλια, maxdisp=25 mm	ST-PE-A17 (18/06/04) θραυσθέντα εμπόλια, maxdisp=35 mm	ST-PE-A16 (18/06/04) θραυσθέντα εμπόλια, maxdisp=35 mm	ST-PE-A26 (18/06/04) Παραμορφωμένα εμπόλια maxdisp=45 mm
	30		ST-PE-A22 θραυσθέντα εμπόλια, maxdisp=25 mm			ST-PE-A27 Παραμορφωμένα εμπόλια maxdisp=45 mm
	35		ST-PE-A23 θραυσθέντα εμπόλια, maxdisp=25 mm			ST-PE-A28 Παραμορφωμένα εμπόλια maxdisp=45 mm
	40		ST-PE-A24 θραυσθέντα εμπόλια, maxdisp=25 mm			ST-PE-A29 Παραμορφωμένα εμπόλια maxdisp=45 mm
ΙΡΟΚΟ	10	ST-PE-A5 (18/05/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=10 mm				
	15					
	20					
	25					
ΟΞΙΑ	10					
	15		1) ST-PE-A9 (04/06/04) Διατμητική αστοχία πόλου maxdisp=32 mm. 2) ST-PE-A11 (08/06/04) Παραμορφωμένος πόλος, maxdisp= 16 mm			
	20		ST-PE-A14 (15/06/04) Διατμητική αστοχία πόλου, maxdisp=16 mm			
	25		ST-PE-A15 (17/06/04) Παραμορφωμένος πόλος, maxdisp=35 mm			
Χωρίς Πόλους-Εμπόλια			ST-PE-A13 (14/06/04) ST-PE-15a ST-PE-19a ST-PE-19a			

Πίνακας: 4.4. Πειραματικές δοκιμές που εκτελέστηκαν στα φυσικά ομοιώματα Σ3, Σ4, με μαρμάρινη επιφάνεια ολίσθησης, για τα διάφορα υλικά πόλων – εμπολίων και τις αντίστοιχες διαμέτρους.

ΠΟΛΟΙ		ΕΜΠΟΛΙΑ	
		ΙΡΟΚΟ	ΡΟΜΠΟΛΟ
ΚΡΑΝΙΑ	d=15 mm	MA-PE-B1 (29/06/04) Παραμορφωμένος πόλος	
	d=20 mm	MA-PE-B2 (30/06/04) Παραμορφωμένος πόλος πάνω εμπόλιο Ανατολή-Δύση κύρια ρωγμή κάτω εμπόλιο Βορράς-Νότος κύρια ρωγμή	MA-PE-B5 (06/07/04) ελαφρώς παραμορφωμένος πόλος παραμορφωμένα εμπόλια
	d=25 mm	MA-PE-B3 (30/06/04) ελαφρώς παραμορφωμένος πόλος πάνω εμπόλιο Βορράς-Νότος κύρια ρωγμή κάτω εμπόλιο Ανατολή κύρια ρωγμή	MA-PE-B6 (06/07/04) ελαφρώς παραμορφωμένος πόλος πάνω εμπόλιο Βορράς-Νότος κύρια ρωγμή κάτω εμπόλιο Βορράς-Νότος κύρια ρωγμή
	d=30 mm		MA-PE-B7 (06/07/04) ελαφρώς παραμορφωμένος πόλος πάνω εμπόλιο Βορράς-Νότος κύρια ρωγμή κάτω εμπόλιο Βορράς-Νότος κύρια ρωγμή
	d=35 mm		MA-PE-B8 (06/07/04) ελαφρώς παραμορφωμένος πόλος πάνω εμπόλιο Βορράς-Νότος-Ανατολή-Δύση κύρια ρωγμή κάτω εμπόλιο Βορράς-Νότος κύρια ρωγμή
	d=40 mm		MA-PE-B9 (06/07/04) ελαφρώς παραμορφωμένος πόλος πάνω εμπόλιο Βορράς-Νότος-Ανατολή-Δύση κύρια ρωγμή κάτω εμπόλιο Βορράς-Νότος-Δύση κύρια ρωγμή
	ΧΩΡΙΣ ΠΟΛΟ & ΕΜΠΟΛΙΟ	MA-PE-B1a MA-PE-B4a MA-PE-B4 MA-PE-B9a	2 tn Αξονικό Φορτίο 2 tn Αξονικό Φορτίο 4 tn Αξονικό Φορτίο 2 tn Αξονικό Φορτίο



Σχήμα: 4.6. Εμπόλια μολύβδου.



Σχήμα 4.7. Λεπτομέρεια πειραματικής διάταξης δύο σφονδύλων για στατικές φορτίσεις στο μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης.

4.2.1. Περιγραφή κίνησης

Χρησιμοποιήθηκε μία ακολουθία επιβεβλημένης οριζόντιας μετακινήσεως που είχε τριγωνική μορφή, αποτελούμενη από εναλλασσόμενες κινήσεις επτά κύκλων συνεχώς αυξανόμενου εύρους. Στο σχήμα 4.8 φαίνεται η ακολουθία αυτή, η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- i) Η συνολική της διάρκεια ήταν 71.8 sec και τα σχετικά μέγιστα κάθε κύκλου σε σχέση με το τελικό μέγιστο, που ήταν και το μέγιστο όλης της φορτιστικής ακολουθίας, φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχ. 4.8).
- ii) Το βήμα εξέλιξης της ήταν $dt=0.02$ sec.
- iii) Αποτελούνταν από επτά εναλλασσόμενους κύκλους, συνεχώς αυξανόμενου εύρους μετακινήσεως.
- iv) Η συχνότητα της ακολουθίας ήταν $=1/(71,8/7)=0,098$ Hz.

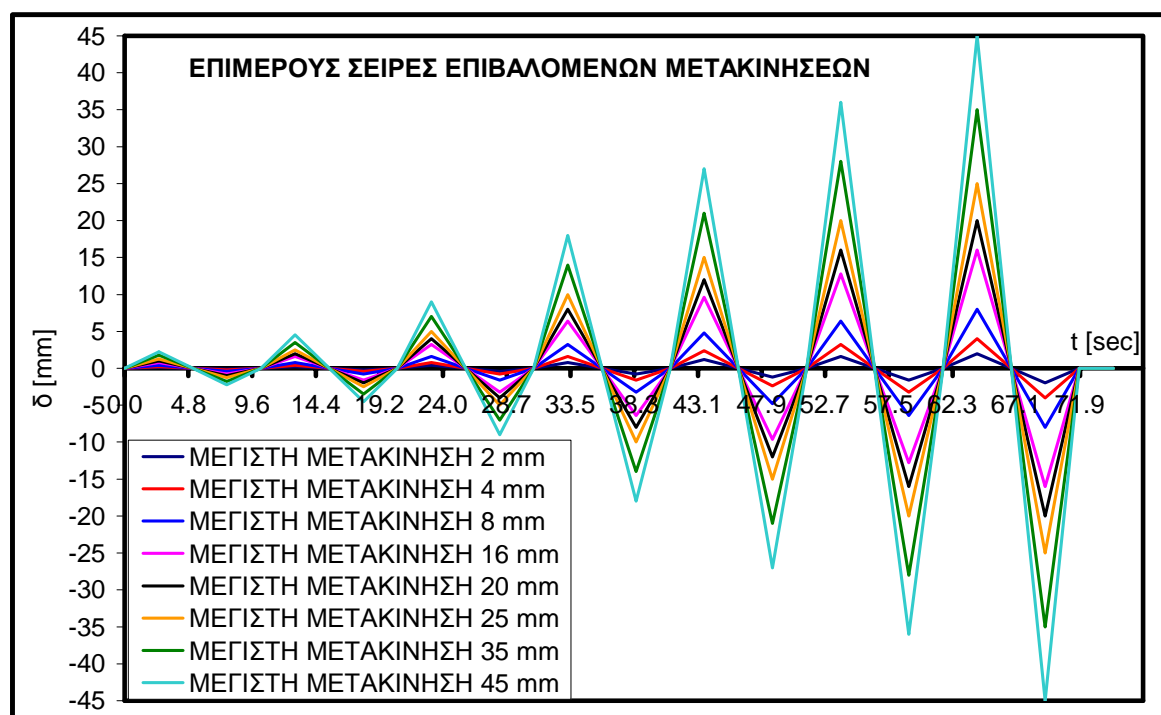


Σχήμα: 4.8. Πρότυπη τριγωνική ακολουθία μετακινήσεων, σε ομόλογες της οποίας υποβλήθηκαν τα δοκίμια της πειραματικής ακολουθίας του μεταλλικού πλαισίου.

Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη φορτιστική ακολουθία για τους παρακάτω λόγους:

- i) Σε αντίστοιχες πειραματικές ακολουθίες άλλων ερευνητών για αυτού του τύπου τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε αυτή η φορτιστική ακολουθία (Lourenko).
- ii) Λόγω της χαμηλής ταχύτητας των καταναγκασμένων μετακινήσεων ($<0.1\text{Hz}$) δεν έχει σημασία εάν πρόκειται για τριγωνικής ή ημιτονοειδούς μορφής ακολουθία.
- iii) Σε αντιδιαστολή με τα πειράματα που εκτελέστηκαν εδώ, στην σεισμική τράπεζα χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδούς μορφής ακολουθία γιατί η χρησιμοποίηση μίας αντίστοιχης τριγωνικής θα προκαλούσε υπερβολική μεγέθυνση των αδρανειακών δυνάμεων. Επιπλέον, στην σεισμική τράπεζα χρησιμοποιήθηκαν τρεις επάλληλοι κύκλοι σταθερής εντάσεως, για κάθε βήμα ανακύκλωσης ενώ εδώ η ακολουθία ήταν συνεχώς αύξουσας εντάσεως.
- iv) Τέλος, η ακολουθία των πειραμάτων στην σεισμική τράπεζα με το συχνοτικό περιεχόμενό της, επέβαλε μια καθαρά δυναμικής φύσεως φόρτιση ενώ η ακολουθία του μεταλλικού πλαισίου προσομοίωνε στατικής φύσεως φόρτιση λόγω της σχετικά πολύ μικρής ταχύτητας επιβολής της.

Από την πρότυπη αυτή φόρτιση ανακυκλιζόμενων μετακινήσεων, που παρουσιάστηκε στο σχήμα 4.8, στην πειραματική ακολουθία του μεταλλικού πλαισίου που περιγράφεται εδώ, χρησιμοποιήθηκαν ομόλογες μεταβολές με βάση τις μέγιστες τελικές μετατοπίσεις. Όλες αυτές οι μεταβολές απεικονίζονται στο σχήμα 4.9, όπου φαίνεται ότι σε ορισμένα πειράματα η τελική μέγιστη μετατόπιση ήταν 2mm σε άλλα 4mm, 8mm, 16mm, 25mm. Σε πολύ περιορισμένο αριθμό πειραμάτων η μέγιστη τελική μετατόπιση ήταν 35mm ή 45mm.



Σχήμα: 4.9. Ομόλογες τριγωνικές ακολουθίες μετακινήσεων, στις οποίες υποβλήθηκαν τα δοκίμια της πειραματικής ακολουθίας του μεταλλικού πλαισίου.

4.2.2. Ενοργάνωση πειραματικής διάταξης

Η μέτρηση της απόκρισης των φυσικών ομοιωμάτων που δοκιμάσθηκαν στην συγκεκριμένη πειραματική ακολουθία, έγινε με την χρησιμοποίηση δεκατεσσάρων ηλεκτρονικών μηχανοσυστημάτων και δύο δυναμοκυψελών.

Τα όργανα, οι θέσεις τους καθώς και το μέγιστο μέγεθος απόκρισης που μετρήθηκε φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και τους πίνακες που ακολουθούν (βλ. Σχ.: 4.10, Πιν.: 4.5).

Ειδικότερα είναι:

Μία δυναμοκυψέλη, για την μέτρηση του επιβαλλόμενου από το οριζόντιο σερβο-υδραυλικό έμβολο οριζόντιου φορτίου στην κατεύθυνση Ανατολής – Δύσης (Αυτή είναι και η κυρίαρχη διεύθυνση της επιβαλλόμενης οριζόντιας φόρτισης): CHANNEL00.

Μία δυναμοκυψέλη, για την μέτρηση του κατακόρυφα επιβαλλόμενου, από το κατακόρυφο σερβο-υδραυλικό έμβολο, φορτίου: CHANNEL01.

Επτά ηλεκτρονικά μηχανοσυστήματα, για την μέτρηση των οριζόντιων εντός επιπέδου μετατοπίσεων του άνω σφονδύλου ως προς τον κάτω, στην Δυτική πλευρά του: CHANNEL02, CHANNEL03, CHANNEL04 (καθ' ύψος στην Νοτιοδυτική πλευρά του), CHANNEL05, CHANNEL06, CHANNEL07 (καθ' ύψος στην Νοτιοανατολική πλευρά του), CHANNEL13 (στο κέντρο της Νότιας πλευράς και καθ' ύψος και κατά πλάτος).

Ένα ηλεκτρονικό μηχανοσυστήμα, για την μέτρηση των οριζόντιων εκτός επιπέδου μετατοπίσεων του άνω σφονδύλου ως προς τον κάτω, στη πλευρά του Νότια πλευρά: CHANNEL12 (πάνω μέρος Νοτιοδυτικής πλευράς). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενοργάνωση σκοπίμως ήταν περιορισμένη ως προς τις εκτός επιπέδου αποκρίσεις του άνω σφονδύλου, αφού όπως αναφέρθηκε η ύπαρξη των πλευρικών ρουλεμάν απαγόρευε ουσιαστικά αυτές τις ελευθερίες κίνησης.

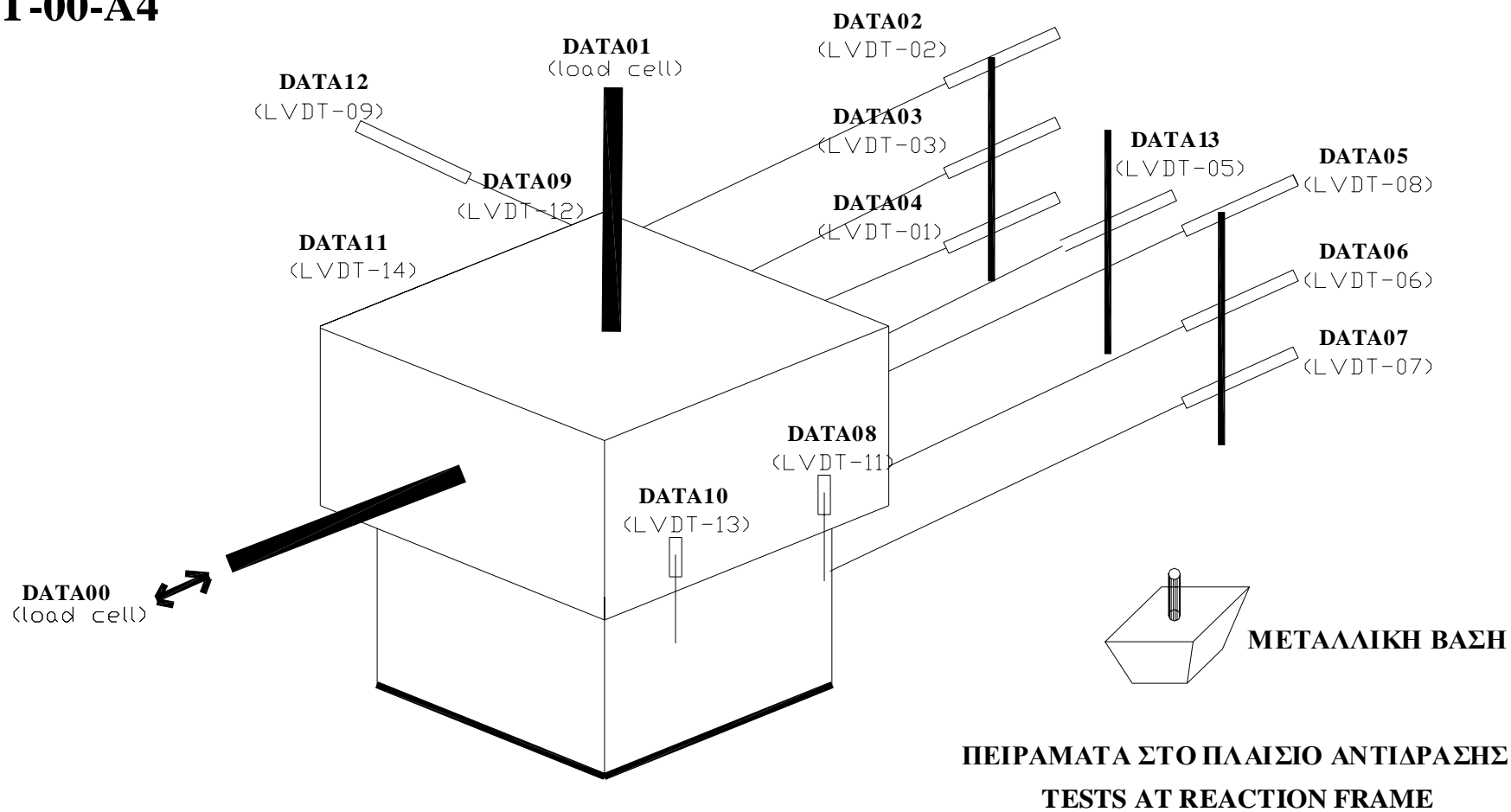
Τέσσερα ηλεκτρονικά μηχανοσυστήματα, για την μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων του άνω σφονδύλου ως προς τον κάτω: CHANNEL08 (στην βορειοδυτική πλευρά), CHANNEL10 (βορειοανατολική πλευρά), CHANNEL09 (στην νοτιοδυτική πλευρά) και CHANNEL11 (νοτιοανατολική πλευρά).

Η εν λόγω ενοργάνωση φαίνεται στο σχήμα 4.10, που ακολουθεί.

Πίνακας: 4.5. Ενοργάνωση πειραματικής ακολουθίας σφονδύλων με χαλύβδινη επιφάνεια ολίσθησης.

Θέση στον ενισχυτή	Όνομα οργάνου	Συντελεστής βαθμονόμησης	Πολικότητα
CH-00	HOR LOAD CELL (Mayfair)	0.215 V/tn	
CH-01	VERT LOAD CELL (MTS)	0.0065 V/KN	
CH-02	LVDTN-02	0.183 V/mm	INSIDE (+)
CH-03	LVDTN-03	0.187 V/mm	INSIDE (+)
CH-04	LVDTN-01	0.186 V/mm	INSIDE (+)
CH-05	LVDT-10	0.730 V/mm	INSIDE (+)
CH-06	LVDTN-06	0.187 V/mm	INSIDE (+)
CH-07	LVDTN-07	0.188 V/mm	INSIDE (+)
CH-08	LVDTN-11	1.053 V/mm	INSIDE (+)
CH-09	LVDTN-12	1.046 V/mm	INSIDE (+)
CH-10	LVDTN-13	1.050 V/mm	INSIDE (-)
CH-11	LVDTN-14	1.030 V/mm	INSIDE (+)
CH-12	LVDTN-09	-0.185 V/mm	INSIDE (+)
CH-13	LVDTN-05	0.184 V/mm	INSIDE (+)

ST-00-A4



Σχήμα: 4.10. Εντοργάνωση πειραματικής ακολουθίας σφονδύλων με χαλύβδινη και μαρμάρινη επιφάνεια ολίσθησης, στο μεταλλικό πλαίσιο.

4.2.3. Βασικές παράμετροι της πειραματικής ακολουθίας και η μεταβολή της

Στην πειραματική ακολουθία που εκτελέστηκε με τον τρόπο που περιγράφηκε συνοπτικά προηγουμένως στο μεταλλικό πλαίσιο αντίδρασης εξετάστηκε η μεταβολή των εξής παραμέτρων.

α) Είδος επιφάνειας επαφής ολίσθησης (μαρμάρινη ή χαλύβδινη) και μέγεθος επιβαλλόμενου φορτίου. Για την πλειονότητα των μαρμαρίνων δοκιμών με ή χωρίς συνδέσμους χρησιμοποιήθηκε κατακόρυφο φορτίο 20KN με μέση οριζόντια κατακόρυφη τάση στην επιφάνεια ολίσθησης 0.125Mpa. Για την πλειονότητα των χαλύβδινων δοκιμών με ή χωρίς συνδέσμους χρησιμοποιήθηκε κατακόρυφο φορτίο 40KN με μέση οριζόντια κατακόρυφη τάση στην επιφάνεια ολίσθησης 0.25Mpa. Η σταθερότητα του μεγέθους του κατακόρυφου φορτίου ελεγχόταν σερβο-υδραυλικά από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου του κατακόρυφου εμβόλου. Ταυτόχρονα με ανεξάρτητη δυναμοκυψέλη γινόταν η μέτρηση της μεταβολής του κατακόρυφου φορτίου και η επιβεβαίωση της επιθυμητής σταθερότητας. Πράγματι η επεξεργασία των μετρήσεων έδειξε ότι η σταθερότητα του κατακόρυφου φορτίου παρέμεινε σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα καθ' όλη την διάρκεια της πειραματικής ακολουθίας, ανεξαρτήτως του επιπέδου του κατακόρυφου φορτίου. Ο συντελεστής τριβής που προέκυψε από την συγκεκριμένη πειραματική ακολουθία ήταν 0.13 για την χαλύβδινη επιφάνεια ολίσθησης (συγκρινόμενος με τιμές 0.04 έως 0.07 που μετρήθηκαν στην αντίστοιχη στατική σειρά φορτίσεων στη σεισμική τράπεζα, όταν οι αντίστοιχες επιφάνειες των δοκιμών ήταν σχετικά καινούργιες). Αντίθετα, ο συντελεστής ολίσθησης για τις μαρμαρίνες επιφάνειες μετά από τρεις σειρές πειραμάτων (χωρίς πόλους-εμπόλια, με πόλο κρανιά εμπόλια ιρόκο, πόλο κρανιά εμπόλια ρόμπολο) βρέθηκε να έχει σημαντικά αυξηθεί. Αυτό πρέπει να αποδοθεί στην αλλοίωση των επιφανειών ολίσθησης μετά από επάλληλες σειρές πειραμάτων που για την τελική σειρά (αποτελέσματά της παρουσιάζονται εδώ για πόλο κρανιά εμπόλια ρόμπολο) βρέθηκε να έχει τιμή ίση με 0.906. Οι επιφάνειες αυτές έφεραν επίσης ορατά ίχνη από την προηγηθείσα φορτιστική διαδικασία. Τα αντίστοιχα ίχνη των χαλύβδινων επιφανειών ήταν πολύ μικρότερης έκτασης και εύρους. Αυτός είναι και ένας από τους βασικότερους λόγους γιατί προτιμήθηκαν οι χαλύβδινοι στην παραμετρική μελέτη της επιρροής των συνδέσμων λόγω της γεωμετρίας των πόλων και των υλικών πόλου-εμπολίου. Ο δεύτερος λόγος, είναι ότι όπως διαπιστώθηκε και από τα προηγούμενα στατικά πειράματα οι μαρμαρίνοι σφόνδυλοι και η παρατηρούμενη αύξηση του συντελεστή τριβής θα απαιτούσε μεγαλύτερου επιπέδου οριζόντιες δυνάμεις για να υπερνικηθεί η τριβή και να ενεργοποιηθεί η συνεισφορά των συνδέσμων, που είναι και το αντικείμενο της μελέτης μας.

β) Υπαρξη ή απουσία συνδέσμων, και επιρροή της γεωμετρίας του πόλου (μεταβολή της διαμέτρου) και του υλικού του πόλου και των εμπολίων. Στον πίνακα των πειραμάτων φαίνεται ότι έγινε τόσο για τα μαρμαρίνα όσο και για τα χαλύβδινα δοκίμια σειρά δοκιμών με ή χωρίς συνδέσμους. Θα εξειδικεύσουμε τώρα τις μεταβολές των συνδέσμων που εξετάστηκαν.

Για τους πόλους χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά μολυβδος, οξιά, ιρόκο και κρανιά με τιμές διαμέτρων που ποικίλουν από 10mm μέχρι 40mm με βήματα των 5 mm. Η γεωμετρία των εμπολίων παρέμεινε σταθερή αλλά ως προς το υλικό κατασκευάστηκαν εμπολία από χάλυβα, μολυβδο, οχιά, ιρόκο, ρόμπολο. Οι βασικές μηχανικές των εν λόγω υλικών (πλην του χάλυβα που θεωρούνται γνωστές) εξετάσθηκαν και παρουσιάστηκαν σε ειδική παράγραφο προηγούμενως.

Πίνακας:4.4. Μέγιστες τιμές οριζόντιου φορτίου και οριζόντιας μετατόπισης διαφόρων δοκιμών, για συγκεκριμένα επίπεδα επιβαλλόμενης μετατοπίσεως

	ΕΜΠΟΛΙΟ	ΠΟΛΟΣ	d _{ΠΟΛΟΥ} [mm]	σ _{ΚΑΤΑΚ} [MPa]	δ _{max} = 2 mm			δ _{max} = 4 mm			δ _{max} = 8 mm			δ _{max} = 16 mm			δ _{max} = 25 mm			δ _{max} = 35 mm		
					P [kN]	MO [kN]	δ [mm]	P [kN]	MO [kN]	δ [mm]	P [kN]	MO [kN]	δ [mm]	P [kN]	MO [kN]	δ [mm]	P [kN]	MO [kN]	δ [mm]	P [kN]	MO [kN]	δ [mm]
ΧΑΛΥΒΙΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΜΟΛΥΒΔΟΣ	10.00	0.25	9.12	8.98	3.52	7.46	8.29	7.61												
					-8.83		-3.81	-9.12		-7.77												
	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΜΟΛΥΒΔΟΣ	15.00	0.25				12.46	10.55	3.37	9.71	10.01	7.19									
								-8.63		-4.15	-10.30		-8.00									
	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΜΟΛΥΒΔΟΣ	15.00	0.25	12.81	12.39	1.67	20.29	19.12	3.47	29.70	27.07	7.12	29.90	29.74	15.54						
					-11.97		-1.73	-17.95		-3.63	-24.43		-7.64	-29.59		-16.02						
	ΟΞΙΑ	ΜΟΛΥΒΔΟΣ	15.00	0.25	8.24	8.19	1.79	9.03	9.22	3.66	11.58	10.15	7.48	13.15	11.13	15.72						
					-8.14		-1.66	-9.42		-3.62	-8.73		-7.54	-9.12		-15.73						
	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΚΡΑΝΙΑ	10.00	0.25				27.47	17.95	3.21	23.64	16.87	7.47	0.00								
								-8.44		-3.74	-10.10		-7.79	0.00								
	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΚΡΑΝΙΑ	15.00	0.25	8.14	9.17	1.76	14.91	13.19	3.41	16.78	14.42	6.92	0.00								
					-10.20		-1.60	-11.48		-3.48	-12.07		-8.16	0.00								
ΜΑΡΜΑΡΙΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΚΡΑΝΙΑ	25.00	0.25	12.85	12.41	1.67	20.31	19.13	3.47	29.72	27.08	7.12	33.45	31.54	15.54						
					-11.97		-1.73	-17.95		-3.63	-24.43		-7.64	-29.63		-16.02						
	ΙΡΟΚΟ	ΚΡΑΝΙΑ	15.00	0.25	9.12	7.75	1.55	15.50	12.75	3.61	12.75	11.28	3.55	22.76	15.99	7.23	20.31	15.84	15.50			
					-6.38		-1.87	-10.01		-3.54	-9.81		-3.69	-9.22		-7.62	-11.38		-15.77			
	ΙΡΟΚΟ	ΚΡΑΝΙΑ	25.00	0.25	7.75	8.24	1.78	13.24	11.82	3.56	17.46	14.91	7.42	20.99	18.74	15.11	20.50	19.62	24.09	20.99	20.21	33.54
					-8.73		-1.82	-10.40		-3.82	-12.36		-7.81	-16.48		-16.06	-18.74		-24.98	-19.42		34.82
	ΟΞΙΑ	ΚΡΑΝΙΑ	40.00	0.25	4.71	8.53	1.94	14.91	13.19	3.59	16.78	19.28	7.35	28.65	27.42	14.16	31.78	29.53	23.78			
					-12.36		-1.58	-11.48		-3.69	-21.78		-7.63	-26.19		-15.56	-27.27		-24.54			
	ΧΩΡΙΣ	ΧΩΡΙΣ	0.00	0.25	6.28	6.33	1.86	6.87	6.82	3.71	8.44	6.72	7.47	6.28	6.33	15.12	7.55	6.23	24.06			
					-6.38		-1.80	-6.77		-3.87	-5.00		-8.03	-6.38		-16.10	-4.91		-25.21			
ΜΑΡΜΑΡΙΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΙΡΟΚΟ	ΚΡΑΝΙΑ	15.00	0.125	7.65	14.52	1.76	17.66	18.05	3.58	20.21	20.55	7.27	23.64	23.54	14.88	24.23	24.33	24.04			
					-21.39		-1.30	-18.44		-3.28	-20.90		-7.21	-23.45		-15.37	-24.43		-24.33			
	ΙΡΟΚΟ	ΚΡΑΝΙΑ	20.00	0.125	16.97	16.68	1.60	16.97	19.42	3.49	23.45	22.37	7.10	26.98	24.92	14.83	26.68	25.11	23.98			
					-16.38		-1.40	-21.88		-3.22	-21.29		-7.17	-22.86		-15.26	-23.54		-24.19			
	ΙΡΟΚΟ	ΚΡΑΝΙΑ	25.00	0.125	14.52	15.94	1.58	20.60	19.47	3.42	26.98	24.57	7.07	32.08	27.81	14.83	27.37	25.75	23.92			
					-17.36		-1.39	-18.34		-3.23	-22.17		-7.17	-23.54		-15.24	-24.13		-24.27			
	Κεφ 4 ΧΩΡΙΣ	ΧΩΡΙΣ	-	0.125	12.26	16.24	1.58	19.23	18.15	3.42	23.01	18.49	7.07	20.99	19.28	14.83	22.07	19.23	23.92			
					-20.21		-1.39	-17.07		-3.23	-16.97		-7.17	-17.56		-15.24	-16.38		-24.27			

4.2.4. Επεξεργασία μετρήσεων και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Από το πλήθος των πειραμάτων που διενεργήθηκαν, όπως καταγράφονται στους πίνακες 4.3 και 4.4, έγινε σε βάθος επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίασή τους σε γραφική μορφή αυτών που είναι γραμμοσκιασμένοι. Από τα υπόλοιπα πειράματα πάρθηκαν τιμές μέγιστων οριζόντιων φορτίων για συγκεκριμένα επίπεδα μετατόπισης της ανακυκλιζόμενης φορτιστικής ακολουθίας και αυτά αναγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Οι επεξεργασμένες μετρήσεις και τα αντίστοιχα διαγράμματα περιλαμβάνουν:

- Κύκλους μεταβολών οριζόντιου φορτίου οριζόντιας μετατόπισης του άνω σφονδύλου, που περιλαμβάνει την επιρροή της τριβής ολίσθησης καθώς και την συνεισφορά των συνδέσμων όταν υπάρχουν. Αυτή ονομάζεται συνολική συμπεριφορά.
- Χρονική εξέλιξη των μετατοπίσεων του άνω σφονδύλου σε διάφορες θέσεις του κατά την διάρκεια της ανακυκλήσεως. Και αυτές αντιστοιχούν σε απόκριση της συνολικής συμπεριφοράς.
- Από την ανωτέρω συνολική συμπεριφορά είναι προφανώς επιθυμητό να εξαχθεί η συνεισφορά των συνδέσμων. Για τον σκοπό αυτό ακολουθήθηκε η εξής τεχνική. Για κάθε πειραματική ακολουθία δύο σφονδύλων με ένα τύπο συνδέσμου υπήρχε η αντίστοιχη πειραματική ακολουθία για τους ίδιους σφονδύλους χωρίς συνδέσμους (είτε επρόκειτο για τους μαρμαρίνους σφονδύλους είτε για τους χαλύβδινους σφονδύλους. Αφαιρώντας από την συνολική μετρημένη συμπεριφορά συγκεκριμένου συστήματος δύο σφονδύλων με ένα συγκεκριμένο τύπο συνδέσμου την μετρημένη συμπεριφορά του ίδιου συστήματος σφονδύλων χωρίς συνδέσμων υπολογίστηκε η συνεισφορά των συνδέσμων στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η τεχνική αυτή υποθέτει ότι ο μηχανισμός τριβής-ολίσθησης (ποιοτικά και ποσοτικά) κάτω από τα επιβαλλόμενα κατακόρυφα φορτία, που ενυπάρχει τόσο στο σύστημα χωρίς συνδέσμους (όπου κυριαρχεί) όσο και στο σύστημα με συνδέσμους (όπου αναπτύσσεται με τις υπόλοιπες συνεισφορές) δεν αλλοιώνεται λόγω των συνδέσμων και παραμένει (ποιοτικά και ποσοτικά) στα ίδια επίπεδα δυνάμεων για τις αυτές οριζόντιες συνολικές μετατοπίσεις του άνω σφονδύλου. Η υπόθεση αυτή, θεωρείται ότι έχει ικανοποιητική ισχύ εφόσον ο μηχανισμός τριβής ολίσθησης δεν διαταράσσεται σημαντικά. Ένα μέγεθος υποστηρικτικό αυτής της μη διαταραχής ήταν οι μετρήσεις της κατακόρυφης μετακίνησης του άνω σφονδύλου που κρατήθηκαν σε χαμηλά επίπεδα. Από αυτή την αφαιρετική διαδικασία προέκυψαν διαγράμματα φορτίου (αναλαμβανόμενου από τον ενυπάρχοντα στο δοκίμιο σύνδεσμο) και συνολικής μετατόπισης του άνω σφονδύλου, που ως ένα ορισμένο βαθμό ανταποκρίνεται στην μετατόπιση (ελαστική ή πλαστική) του συνδέσμου.
- Τέλος από το πλήθος των διαγραμμάτων υστερητικής συμπεριφοράς εξήχθησαν περιβάλλουσες καμπύλες αυτής της συμπεριφοράς καθώς και καμπύλες της συνολικής αποσβεσμένης ενέργειας. Αυτό έγινε για τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης ή για την αποσβεσθείσα ενέργεια τόσο για το σύνολο του συστήματος

των σφονδύλων-συνδέσμου, όσο και μονομερώς μόνο για τους σφονδύλους (χωρίς την συνεισφορά των συνδέσμων) ή μόνο για τους συνδέσμους (χωρίς την συνεισφορά των σφονδύλων). Τα διαγράμματα της αποσβεσμένης ενέργειας καθώς και οι περιβάλλουσες καμπύλες τις συνολικής συμπεριφοράς ακολουθούν αμέσως μετά ενώ τα λεπτομερειακά διαγράμματα της απόκρισης παρατίθενται στα παραρτήματα 4.2α και 4.2β..

4.2.5. Συμπερασματικές παρατηρήσεις από τη μετρηθείσα συμπεριφορά – μορφές απόκρισης και συνεισφορά των συνδέσμων.

Μέσω των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, που δίδονται στο παράρτημα Γ, καθώς και της εικόνας που παρουσίαζαν ο κάθε σύνδεσμος μετά το τέλος της πειραματικής ακολουθίας, οπότε απομακρύνονταν από τη διάταξη φόρτισης προς εξέταση (δες σχετικό φωτογραφικό υλικό και διαγράμματα στο παράρτημα Γ) μπορούν να εξαχθούν οι εξής παρατηρήσεις ως προς τις κυρίαρχες μορφές απόκρισης των σφονδύλων (με ή χωρίς συνδέσμους).

A) Σύστημα σφονδύλων χωρίς συνδέσμους.

- Τόσο οι μαρμάρيني όσο και οι χαλύβδινοι σφόνδυλοι δεν ολίσθαιναν για χαμηλές τιμές επιβεβλημένων μετακινήσεων (της τάξεως του 1mm έως 2mm).
- Αυξανόμενου του επιπέδου της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετατόπισης οι σφόνδυλοι άρχιζαν να ολισθαίνουν.
- Το επίπεδο της δύναμης που συνόδευε την απόκριση της ολίσθησης απεικονίζεται στα αντίστοιχα διαγράμματα και από εδώ έχουν εξαχθεί οι τιμές των συντελεστών τριβής που παρατέθηκαν προηγουμένως για τα διάφορα είδη επιφάνειας ολίσθησης (0.13 για τους χαλύβδινους σφονδύλους και 0.906 για τους μαρμάρινους σφονδύλους).

B) Σύστημα σφονδύλων με συνδέσμους.

- Και πάλι στα αρχικά στάδια, (της τάξεως του 1mm έως 2mm) το σύστημα συμπεριφέρεται ως ενιαίο.
- Αυξανόμενης της μετατοπίσεως γίνεται εμφανής η συνεισφορά των συνδέσμων που αντιστέκεται στην επιβεβλημένη μετακίνηση πέραν της αντίστασης που προβάλλεται από τις δυνάμεις τριβής.
- Αυτή η συνεισφορά αυξάνεται αυξανόμενης της μετατοπίσεως και της διαμέτρου του πόλου. εμφανίζονται σταδιακά σχετικές οριζόντιες μετατοπίσεις του άνω σφονδύλου ως προς τον κάτω. Οι σχετικές αυτές μετατοπίσεις περιλαμβάνουν αφενός ολίσθηση της επιφάνειας επαφής και ανάληψη δυνάμεων και παραμορφώσεων από τον πόλο και τα εμπόλια που βρίσκονται στις υποδοχές των δύο σφονδύλων.

Μέσα από τις επαναλαμβανόμενες φορτιστικές ανακυκλήσεις, η κάθε μία μεγαλύτερου εύρους μετατόπισης από την προηγούμενη, για τον ίδιο τύπο συνδέσμου και σφονδύλων αρχίζει να εμφανίζεται και ο εξής μηχανισμός:

- Η συνεισφορά του συνδέσμου παραμένει σε χαμηλά επίπεδα για το εύρος μετατοπίσεων του προηγούμενου πειράματος και αρχίζει να κάνει αισθητή την συνεισφορά της όταν η συγκεκριμένη ιστορία ανακυκλήσεις πλησιάσει ή ξεπεράσει

σε μετακινήσεις τις μέγιστες μετακινήσεις του προηγούμενου πειράματος. Αυτό είναι εμφανές τόσο από τα υστερικά διαγράμματα της συνολικής συμπεριφοράς όσο και από τα αντίστοιχα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των συνδέσμων, όπως αυτά προέκυψαν από την αφαιρετική διαδικασία που περιγράφηκε. Αυτό σε συνδυασμό με την εικόνα των πόλων και εμπολίων στο τέλος όλων των πειραμάτων για ένα συγκεκριμένο τύπο συνδέσμου μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτή η συμπεριφορά είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μη γραμμική συμπεριφορά των συνδέσμων. Αυτή μπορεί να έχει τις εξής μορφές:

- Πλαστικοποίηση του πόλου κυρίως στην περιοχή κοντά στην διεπιφάνεια ολίσθησης. Για τους πόλους που χρησιμοποιήθηκαν, αυτοί του μολύβδου και της οξιάς είχαν εικόνα καθαρής διάτμησης ενώ της κρανιάς είχαν μια ευρύτερη περιοχή με διατμητικο-καμπτικά σημάδια καταπόνησης. Οι πόλοι της κρανιάς αποδείχτηκαν οι ισχυρότεροι (για τις ίδιες τιμές διαμέτρων) και οδηγήθηκαν μεν σε μόνιμες παραμορφώσεις (για μεγάλα επίπεδα οριζοντίων μετακινήσεων) αλλά όχι σε πλήρεις θραύσεις όπως συνέβη για τους πόλους του μολύβδου (ασθενέστεροι) και της οξιάς (μεσαίοι).
- Πλαστικοποίηση της περιοχής του εμπολίου κοντά στον πόλο. Οι μορφές αυτής της πλαστικοποίησης ήταν περίπου ίδιες με σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις των εμπολίων (κάνοντας το τελικό σχήμα της οπής των εμπολίων κωνικό με γενέτειρα έλλειψη στην διεπιφάνεια των σφονδύλων, από το αρχικό κυλινδρικό τους σχήμα). Το μέγεθος του μεγάλου άξονα της έλλειψης, που συνέπιπτε με την διεύθυνση της επιβεβλημένης μετατόπισης, διέφερε από πείραμα σε πείραμα, εξαρτώμενο από το είδος (υλικό) του εμπολίου, την διάμετρο και το υλικό του πόλου και την μέγιστη επιβληθείσα οριζόντια μετατόπιση. Σημειώθηκαν τιμές για τον μεγάλο άξονα τις έλλειψης που από 30mm (στην αρχική του τιμή ως διάμετρος του αντίστοιχου πόλου) έφθασε τα 50mm στο τέλος του πειράματος με τις συσσωρευμένες παραμένουσες παραμορφώσεις.

4.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΘΕΙΣΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ - ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ

Με βάση τις προηγούμενες παρατηρήσεις ως προς την μορφή απόκρισης και την συνεισφορά των συνδέσμων σε κάθε μορφή απόκρισης θα γίνει εδώ η αποτίμηση της επιρροής του τύπου του συνδέσμου ως προς το μέγεθος (διάμετρο) και το υλικό του πόλου και ως προς το υλικό του εμπολίου. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι περιβάλλουσες καμπύλες φορτίου-μετατόπισης καθώς και οι καμπύλες της αποσβεσθείσης ενέργειας από κάθε τύπο συνδέσμου.

- Η αύξηση της διαμέτρου του πόλου επιφέρει μια αύξηση της συνεισφοράς τόσο της φέρουσας ικανότητας όσο και της αποσβεσμένης ενέργειας. Αυτό είναι πολύ φανερό για τους πόλους της κρανιάς και λιγότερο για τους πόλους της οξιάς και του μολύβδου επειδή αυτοί αστοχούν για μικρές διαμέτρους, όταν η επιβαλλόμενη μετακίνηση είναι σχετικά μεγάλη.
- Το προηγούμενο συμπέρασμα δεν έλαβε την επιρροή των εμπολίων. Δηλαδή για να επισυμβεί αυτή η αύξηση της φέρουσας ικανότητας πρέπει τα αντίστοιχα εμπολία να παρέχουν ικανή αντίσταση. Αν παρατηρήσουμε την συμπεριφορά των πόλων της κρανιάς σε συνδυασμό με τα εμπολία του ρόμπολου (σχετικά ασθενής συμπεριφορά), σε σύγκριση με τους πόλους της κρανιάς σε συνδυασμό με τα εμπολία του μολύβδου ή της οξιάς θα δούμε ξεκάθαρα της επιρροή του συνδυασμού διαμέτρου του πόλου και υλικού εμπολίου τόσο στη φέρουσα ικανότητα όσο και στην αποσβεσμένη ενέργεια.
- Το παραπάνω σκεπτικό δεν μπορεί να επεκταθεί ανεξέλεγκτα. Δηλαδή ένα πολύ ισχυρό εμπολίο, με απομακρυσμένη τη δυνατότητα πλαστικοποίησής του (χαλύβδινα εμπολία) δεν επιτρέπει την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του συνδέσμου, που αρχικά απορρέει από το υλικό και την διάμετρο του πόλου, ούτε οδηγεί σε αύξηση της ενέργειας απόσβεσης κατά τις αυξανόμενου εύρους ανακυκλήσεις. Αντίθετα οδηγώντας στην συγκέντρωση των μεγάλων τάσεων σε σχετικά στενή περιοχή του πόλου οδηγεί το σύνδεσμο σε συγκριτικά μικρότερες φέρουσες ικανότητες και μικρότερα ποσά αποσβεσθείσης ενέργειας για τα ίδια επίπεδα ανακυκλήσεων από ότι θα ανέπτυξε ένας σύνδεσμος με τον ίδιο πόλο αλλά με εμπολία σχετικά πιο παραμορφώσιμα και με όρια έναρξης των πλαστικών παραμορφώσεων σχετικά χαμηλότερα (μόλυβδος).