

**Συμπεριφορά ελαστομεταλλικών εφεδράνων και
λογισμικό προεπιλογής τους για γέφυρες Ο/Σ άνω
διαβάσεων εθνικών οδών.**

**Behavior of Elasto-metallic Bearings and Software for their
Pre-design in R/C Bridge-overpasses in National Roads.**

**Γεώργιος Χ. ΜΑΝΟΣ¹, Αναστάσιος ΣΕΞΤΟΣ², Στέργιος ΜΗΤΟΥΛΗΣ³,
Μάρθα ΓΕΡΑΚΗ³, Βλαδίμηρος ΚΟΥΡΤΙΔΗΣ³, Πέτρος ΣΚΑΛΚΟΣ⁴**

Λέξεις κλειδιά: Ελαστο-μεταλλικά εφεδρανα, γέφυρες, άνω διαβάσεις.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή αρχικά, παρουσιάζονται αποτελέσματα εργαστηριακών ελέγχων δειγμάτων ελαστο-μεταλλικών εφεδράνων, τα οποία παρήχθησαν από μια Ελληνική εταιρεία, στην προσπάθεια μέτρησης των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι το εύρος της διατμητικής παραμόρφωσης, η συχνότητα της φόρτισης καθώς και το επίπεδο της έντασης που επενεργεί κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο των στρώσεων των εφεδράνων. Παρουσιάζονται επίσης οι δυνατότητες λογισμικού που δημιουργήθηκε επί τη βάση της απλοποιητικής προσέγγισης του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή, ώστε να είναι δυνατή η εύκολη προεπιλογή τέτοιου τύπου εφεδράνων για συγκεκριμένους «τυπικούς» φορείς γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος που αποτελούν άνω διαβάσεις εθνικών οδών. Η αξιοπιστία του εν λόγω λογισμικού προεπιλογής ελέγχθηκε χρησιμοποιώντας ποιά σύνθετες αριθμητικές προσομοιώσεις.

ABSTRACT : Summary results of laboratory tests are presented that aimed to study the basic characteristics of elasto-metallic bearings produced by a Greek industry. The parameters that are examined are the amplitude of the applied shear strain, the frequency of loading and the compressive stress level normal to the elastomeric layers of the bearing. The capabilities of a specific software are also presented that was produced on the simple assumption of single-degree-of-freedom response in order to facilitate the pre-selection of such bearings within reinforced concrete bridge-overpasses that represent typical structures for the Greek national road network.

¹ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ. Εργ. Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών, email: gcmayos@civil.auth.gr

² Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

³ Επιστημονικός Συνεργάτης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

⁴ Διευθύνων Σύμβουλος, Εταιρεία Λογισμικού CyberArts

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο μέρος της παρούσης εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικής μελέτης όπου εξετάζονται δείγματα από ελαστο-μεταλλικά εφεδράνα κάτω από συγκεκριμένους εργαστηριακούς ελέγχους στην προσπάθεια μέτρησης των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι διεξήχθησαν στο εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. και υπέβαλλαν τα εν λόγω δείγματα σε στατικές ή ανακυκλιζόμενες δυναμικές φορτίσεις (**Σχήμα 1**). Τα δείγματα αυτά παρήχθησαν από μια εταιρεία που δραστηριοποιείται στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (Αφοί Δ. Καλουσίου ΑΒΕΕ “*Κένταυρος*”) και εξειδικεύεται στην παραγωγή προϊόντων ελαστομερούς. Οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι το εύρος της διατμητικής παραμόρφωσης, η συχνότητα της φόρτισης καθώς και το επίπεδο της έντασης που επενεργεί κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο των στρώσεων του ελαστομερούς. Σε ορισμένα από τα δείγματα αυτά εξετάστηκε η επιρροή του χρόνου βουλκανισμού μέσα από την φόρτισή τους για μεγάλα επίπεδα διατμητικών παραμορφώσεων μέχρι αστοχίας. Με τον τρόπο αυτόν έγινε προσπάθεια διερεύνησης της βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας που ακολουθεί η εν λόγω βιοτεχνία. Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα συμπεράσματα της πειραματικής διερεύνησης.

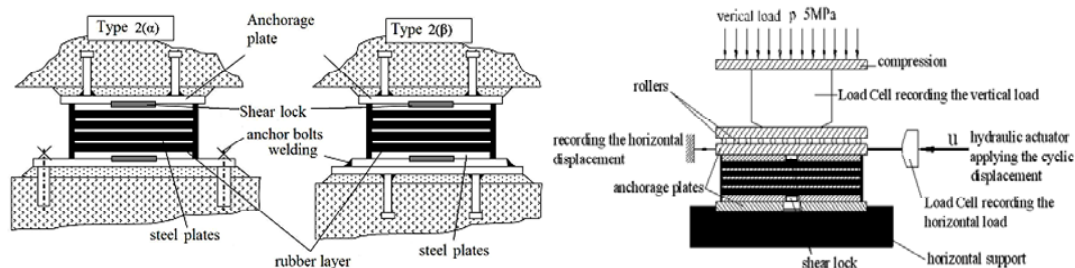
Πέραν των εργαστηριακών ελέγχων, στο δεύτερο μέρος της παρούσης εργασίας παρουσιάζεται η προσπάθεια να δημιουργηθεί κατάλληλο λογισμικό επί τη βάση της απλοποιητικής προσέγγισης της συμπεριφοράς της γέφυρας ως μονοβάθμιου ταλαντωτή ώστε να είναι δυνατή η μέσω αυτού εύκολη προεπιλογή τέτοιου τύπου εφεδράνων για συγκεκριμένους «τυπικούς» φορείς γεφυρών που αποτελούν άνω διαβάσεις εθνικών οδών στην Ελλάδα. Ο κυρίαρχος έλεγχος που οδηγεί στην προεπιλογή αυτή είναι η σεισμική συμπεριφορά του φορέα ο οποίος θεωρείται ότι εδράζεται επί (των προεπιλεγμένων) εφεδράνων κατά την διαμήκη έννοια, καθώς η εγκάρσια μετακίνηση αποτρέπεται μέσω κατάλληλων διατάξεων (stoppers). Τα επιτυχώς προεπιλεγμένα εφεδράνα ικανοποιούν τις σχετικές κανονιστικές απαιτήσεις. Για την υποστήριξη της ανωτέρω διαδικασίας επιλογής δημιουργήθηκε κατάλληλη βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει μια σειρά ορθογωνικών και κυλινδρικών εφεδράνων με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους, βάση των οποίων γίνεται η προεπιλογή. Πέραν της επιλογής ενός από τέσσερις τύπους φορέων άνω διαβάσεων και της γεωμετρίας του εφεδράνου το σύστημα προεπιλογής παρέχει την επιλογή της σεισμικής καταπόνησης, όπως αυτή προσδιορίζεται από τον ΕΑΚ2000. Η αξιοπιστία του εν λόγω λογισμικού προεπιλογής ελέγχθηκε χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα συνδυασμών φορτίσεων που περιλαμβάνουν την φασματική σεισμική απόκριση δισδιάστατων αριθμητικών ομοιωμάτων όπου προσομοιώνεται με διακριτό τρόπο το κατάστρωμα, τα εφεδράνα και τα βάρη.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ

Ο στόχος της πλήρους φορτιστικής ακολουθίας μπορεί να περιγραφεί μέσω των εξής δύο διακριτών σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, αντικείμενο της πειραματικής διερεύνησης ήταν η εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων εφεδράνων όταν αυτά υποβάλλονταν στις κυρίαρχες εντάσεις που προσδιορίζονται από το πρότυπο *ISO 22762-1*. Στο δεύτερο στάδιο επιλέχθηκαν συγκεκριμένες μεταβολές στην παραγωγική διαδικασία ως προς το χρόνο και τη θερμοκρασία βουλκανισμού και επαναλήφθηκε η πειραματική διερεύνηση του πρώτου σταδίου. Από την σύγκριση των επιμέρους αποτελεσμάτων έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης της διαδικασίας παραγωγής. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα από τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των δύο αυτών σταδίων.

Δοκίμια που ελέγχθηκαν για την εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Στο **Σχήμα 1** απεικονίζονται ενδεικτικά οι βασικές λεπτομέρειες ενός τυπικού ελαστο-μεταλλικού εφεδράνου καθώς και η τυπική φορτιστική διαδικασία για τον έλεγχο της διατμητικής του συμπεριφοράς (σε οριζόντια φορτία) με την ταυτόχρονη επιβολή κατακόρυφης θλιπτικής έντασης κάθετης στο επίπεδο των στρώσεων του ελαστομερούς.



Σχήμα 1. Ενδεικτικές λεπτομέρειες ελαστομεταλλικών εφεδράνων και τυπική φορτιστική διαδικασία.

Επιλέχθηκαν προς τον σκοπό αυτό δοκίμια που να είναι αντιπροσωπευτικά τόσο των δοκιμών για δοκιμές διατμητικής συνάφειας του ελαστομερούς υλικού όσο και πιλοτικών ελαστο-μεταλλικών εφεδράνων όπως αυτά απεικονίζονται στα **Σχήματα 2α και 2β** σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο *ISO 22762-1*. Προς τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν οι εξής δύο τύποι δοκιμών:

- Δύο φέτες ελαστομερούς, που έχουν η κάθε μία από αυτές δύο χαλύβδινες πλάκες πάχους 7.62 mm ως άνω και κάτω όρια. Το σχήμα των δοκιμών αυτών ήταν τετραγωνικό με διαστάσεις 200mm x 200mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2α που ακολουθεί.
- Δύο φέτες ελαστομερούς, που έχουν η κάθε μία από αυτές, όπως και προηγουμένως, δύο χαλύβδινες πλάκες πάχους 7.62 mm ως άνω και κάτω όρια.

Το σχήμα των δοκιμίων αυτών ήταν κυλινδρικό με διάμετρο 250mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2β που ακολουθεί.



Σχήμα 2α. Τετραγωνικά δοκίμια με διαστάσεις 200mm x 200mm .



Σχήμα 2β. Κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 250mm

Τυπική πειραματική ακολουθία

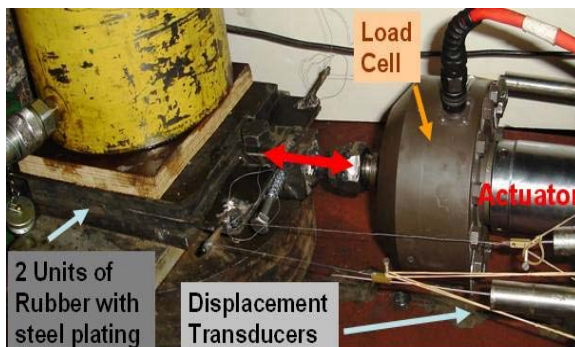
α1. Μεταβολή του επιπέδου της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης εκφρασμένης με τα ποσοστά 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 100%, που θεωρούνται ως διατμητικές παραμορφώσεις μικρού έως μέσου εύρους. Τα ανωτέρω επίπεδα διατμητικών παραμορφώσεων επιβλήθηκαν με ανακυκλιζόμενο τρόπο όπου η συχνότητα της ταχύτητας επιβολής της φόρτισης διατηρούνταν σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της φορτιστικής διαδικασίας με αυξανόμενο εύρος διατμητικών παραμορφώσεων. Η συχνότητα αυτών των κύκλων ήταν 0.2Hz, 0.5Hz, ή 1.0Hz κατά περίπτωση.

α2. Μεταβολή του συχνοτικού περιεχομένου της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης κρατώντας σταθερό το μέγεθός της. Προς τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ως σήματα εισαγωγής ημιτονοειδείς πλήρεις κύκλοι με το συχνοτικό περιεχόμενο 0.09Hz, 0.2Hz and 1.0Hz, 1.5Hz. Στις δοκιμές αυτές το εύρος της διατμητικής καταπόνησης διατηρούνταν σταθερό και ίσο με 75% έως 110%, δηλαδή για μέσο εύρος διατμητικής καταπόνησης.

α3. Μεταβολή του επιπέδου της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης με ποσοστά 100%, 150%, 250% και 300%, που θεωρούνται ως διατμητικές παραμορφώσεις μέσου έως μεγάλου εύρους. Τα ανωτέρω επίπεδα διατμητικών παραμορφώσεων επιβλήθηκαν είτε με ανακυκλιζόμενο τρόπο όπως και προηγουμένως στις δοκιμές α1 και α2, είτε με μονότονα αυξανόμενα τρόπο για την περίπτωση των δοκιμών αστοχίας για διατμητικές παραμορφώσεις μεγάλου εύρους.

Στα **Σχήματα 3α και 3β** που ακολουθούν φαίνονται οι φορτιστικές διατάξεις των πειραματικών δοκιμών στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του ΑΠΘ. για την μελέτη της διατμητικής συμπεριφοράς μικρού έως μέσου εύρους διατμητικής παραμόρφωσης, που μπορούν να

υποδεχθούν τα δοκίμια με διαστάσεις τόσο $\Phi 250 \times 250 \times 14 \text{mm}$ όσο και $200 \times 200 \times 250 \times 14 \text{mm}$. Στις φορτιστικές αυτές διατάξεις μπορούν να εκτελεστούν οι δοκιμές $\alpha 1$, $\alpha 2$, και $\alpha 3$ που περιγράφηκαν με ταυτόχρονη επιβολή ανακυκλιζόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (με το επιθυμητό συχνοτικό περιεχόμενο) με την ταυτόχρονη επιβολή εντατικού πεδίου κάθετου στις στρώσεις του ελαστομερούς. Η διάταξη του σχήματος 3β έχει την δυνατότητα σταθεροποίησης του θλιπτικού αυτού εντατικού πεδίου στο επιθυμητό επίπεδο με καλύτερο τρόπο, μέσω της ενεργοποίησης ενός δεύτερου δυναμικού εμβόλου (actuator) πέραν αυτού που δημιουργεί και ελέγχει την οριζόντια διατμητική παραμόρφωση, σε σχέση με αυτόν του σχήματος 3α.



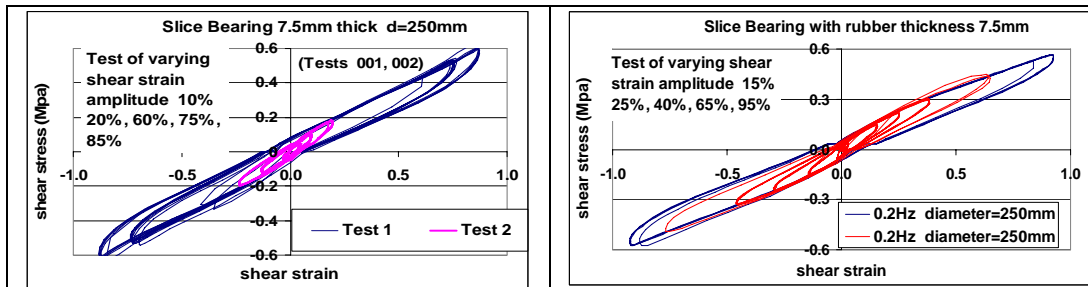
Σχήμα 3α. Επιβολή ανακυκλιζόμενης διατμητικής παραμόρφωσης με την ταυτόχρονη επιβολή εντατικού πεδίου κάθετου στο επίπεδο της διατμητικής παραμόρφωσης (μέσω του κίτρινου γρύλου).



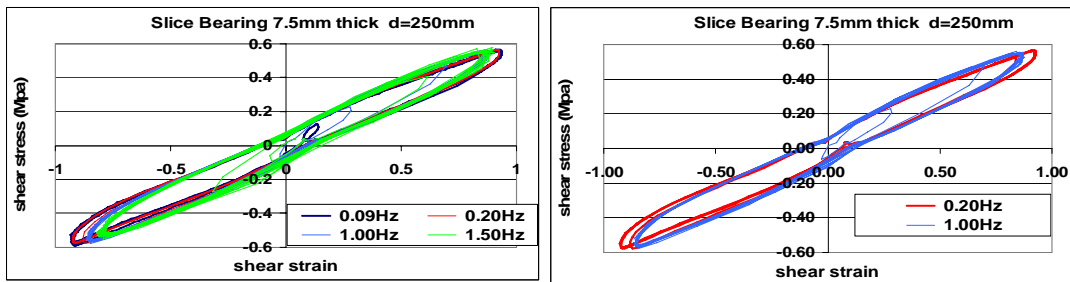
Σχήμα 3β. Επιβολή ανακυκλιζόμενης διατμητικής παραμόρφωσης με την ταυτόχρονη επιβολή ελεγχόμενου σταθερού εντατικού πεδίου κάθετου στο επίπεδο των στρώσεων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

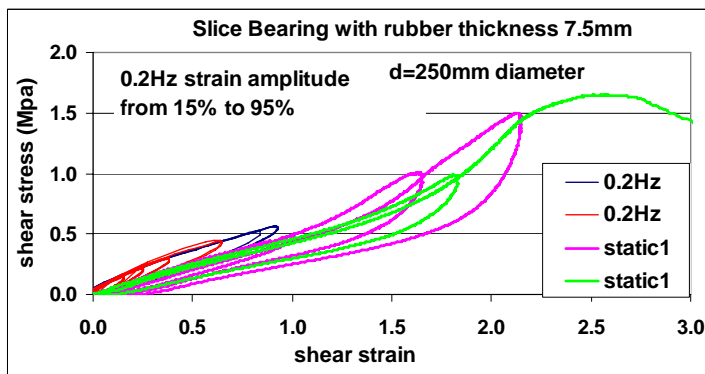
Στο **Σχήμα 4** απεικονίζεται η απόκριση του δοκιμίου (διατμητική τάση-διατμητική παραμόρφωση, *shear stress-shear strain*) μέσω της μεταβολής του επιπέδου της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης, θεωρούμενης μικρού έως μέσου εύρους, στα επίπεδα του 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 100%. Το συχνοτικό περιεχόμενο της φόρτισης παραμένει σταθερό και ίσο με 0.2Hz. Δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή της δυστημσίας με την αύξηση του εύρους της διατμητικής παραμόρφωσης. Στο **Σχήμα 5** απεικονίζεται η απόκριση των δοκιμίων μέσω της μεταβολής του συχνοτικού περιεχομένου της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης, κρατώντας σταθερό το μέγεθός της. Προς τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ως σήματα εισαγωγής ημιτονοειδείς πλήρεις κύκλοι με το συχνοτικό περιεχόμενο 0.1Hz, 0.2Hz and 1.0Hz, 1.5Hz ενώ το επίπεδο της διατμητικής παραμόρφωσης κρατήθηκε σταθερό και ίσο με 90%. Δεν παρατηρήθηκε και εδώ καμιά ουσιαστική επιρροή της δυστημσίας με την μεταβολή του συχνοτικού περιεχομένου της φόρτισης από 0.1Hz έως 1.50Hz.



Σχήμα 4. Κυλινδρικό δοκίμιο με διάμετρο 250mm . Μεταβολή του επιπέδου της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης 5% , 10% , 25% , 50%.



Σχήμα 5. Κυλινδρικό δοκίμιο με διάμετρο 250mm . Μεταβολή του συχνοτικού περιεχομένου επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης 0.1Hz, 0.2Hz and 1.0Hz, 1.5Hz.



Σχήμα 6α. Κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 250mm. Σύγκριση ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς επιπέδου διατμητικής παραμόρφωσης έως 160% (0.2 Hz) με αντίστοιχη δοκιμή. μονότονης φόρτισης μεγάλου εύρους (static) έως την αστοχία.

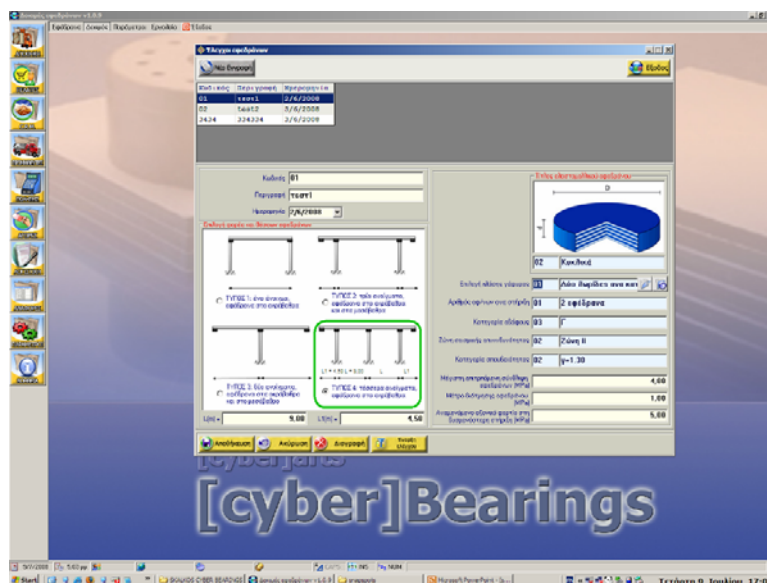
Σχήμα 6β. Αστοχία κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 250mm.

Στο **Σχήμα 6α** απεικονίζεται η απόκριση του δοκιμίου μέσω της μεταβολής του επιπέδου της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης, θεωρούμενης ως μεγάλου εύρους, στα επίπεδα 100% , 150% , 250% , 300%. Τα ανωτέρω επίπεδα διατμητικών παραμορφώσεων επιβλήθηκαν με μονότονα αυξανόμενο τρόπο μέχρι αστοχίας του δοκιμίου (**Σχήμα 6β**) για διατμητικές παραμορφώσεις μεγάλου εύρους (> 250%). Από την σύγκριση της απόκρισης της φορτιστικής

διαδικασίας $\alpha 1$ (0.2Hz) με αυτή της $\alpha 3$ για το ίδιο κυλινδρικό δοκίμιο (**Σχήμα 6α**) φαίνεται ότι η δυσστησία κατά την ανακυκλιζόμενη επιβολή της διατμητικής παραμόρφωσης μέσω εύρους είναι μεγαλύτερη από αυτή της δοκιμής $\alpha 3$, δηλαδή μεγάλου εύρους. Επιπλέον, κατά την διάρκεια του τελικού κύκλου μονότονης φόρτισης και για μεγάλα επίπεδα διατμητικής παραμόρφωσης το κυλινδρικό δοκίμιο επέδειξε περαιτέρω σημαντική πτώση της δυσστησίας για επίπεδα διατμητικής παραμόρφωσης μεγαλύτερα του 200%.

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ

Περιγράφονται στην συνέχεια όλα τα βήματα τα οποία έχουν προγραμματιστεί να επιτελούνται μέσα από το αναπτυχθέν λογισμικό προδιαστασιολόγησης εφεδράνων. Στο λογισμικό αυτό έχουν ενσωματωθεί όλοι οι έλεγχοι επάρκειας, όπως θα αναπτυχθεί στην συνέχεια. Επίσης, επιλέχθηκαν και ενσωματώθηκαν στο λογισμικό βασικές παράμετροι του φυσικού προβλήματος, πέραν των διαστάσεων - τύπων εφεδράνων, όπως: ζώνη σεισμικότητας, - κατηγορία εδάφους, σπουδαιότητα κατασκευής, κατηγορία οδικής γέφυρας και βασικά χαρακτηριστικά γεωμετρίας της γέφυρας. Αναπτύχθηκε επίσης ένα διαδραστικό περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη (CyberArts) με βασικές οδηγίες για την εύκολη επιλογή των τιμών των βασικών παραμέτρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7. Διαδραστικό περιβάλλον του λογισμικού.

Όλα τα βήματα του λογισμικού, που θα περιγραφούν στην συνέχεια, περιλαμβάνουν την άντληση πληροφοριών σχετικών με την γεωμετρία και τις υπόλοιπες ιδιότητες πρωτότυπων εφεδράνων, είτε ορθογωνικού είτε κυλινδρικού σχήματος, που είναι καταχωρημένες σε βάση δεδομένων διασυνδεδεμένης με το

λογισμικό. Η βάση αυτή δεδομένων έχει την δυνατότητα να εμπλουτισθεί με αντίστοιχες πληροφορίες και άλλων πρωτότυπων εφεδράνων. Οι πληροφορίες σχετικές με τον τύπο του φορέα και τη γεωμετρία εισάγονται μέσα από το αριστερό τμήμα της φόρμας εισαγωγής δεδομένων του λογισμικού (Σχήμα 7) ενώ τα σχετικά με τον τύπο, τη γεωμετρία των εφεδράνων καθώς και τη ζώνη σεισμικότητας, την κατηγορία εδάφους και τη σπουδαιότητα της κατασκευής, εισάγονται μέσα από το δεξιό πλαίσιο επιλογών.

Προεκλογή διατομής εφεδράνου.

Ως ένα πρώτο κριτήριο για την προεκλογή των εφεδράνων θεωρήθηκε η μέγιστη αξονική σύνθλιψη του εφεδράνου η οποία κανονιστικώς αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο επίπεδο διατμητικής παραμόρφωσης του εφεδράνου, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της στρώσης του ελαστομερούς και των χαλύβδινων πλακών. Η προεκλογή των εφεδράνων πραγματοποιείται με αυτοματοποιημένο τρόπο από το πρόγραμμα βάσει του περιορισμού ότι η αξονική θλιπτική τάση που αναπτύσσεται λόγω των κατακόρυφων οιονεί μονίμων φορτίσεων θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 3MPa ως 5MPa. Τα όρια αυτά επελέγησαν μετά από αναζήτηση σχετικών πληροφοριών στη βιβλιογραφία (Abe et.al, 2004). Πρέπει να σημειωθεί ότι το όριο που θέτει ο κανονισμός (εξ. 1), πρακτικώς επιτρέπει πολύ μεγάλες τάσεις αξονικής σύνθλιψης.

$$\sigma_e \leq \frac{2b_{\min}}{3\sum t_i} G_b S \quad (1)$$

Η επιλογή της διατομής των εφεδράνων γίνεται με βάση το υποτιθέμενο όριο θλιπτικής τάσεως σ_e , δηλαδή το κρίσιμο (μέγιστο) φορτίο σύνθλιψης που δέχεται ένα από τα εφάδρανα της γέφυρας. Αποδεικνύεται παρακάτω ότι το εφάδρανο που έχει τη μέγιστη σύνθλιψη είναι και το κρισιμότερο δεδομένου ότι:

α) όλα τα εφάδρανα θεωρείται ότι διαθέτουν την ίδια διατομή και το ίδιο ύψος καθαρού ελαστικού καθώς στις γέφυρες άνω διαβάσεως, οι οποίες ενδιαφέρουν την παρούσα έρευνα, δεν γίνεται διαβάθμιση των εφεδράνων που χρησιμοποιούνται, και η διαβάθμιση, (του πάχους ή και των διατομών των εφεδράνων) συνήθως εφαρμόζεται σε γέφυρες μεγαλύτερου μήκους στις οποίες υπάρχει δυνατότητα μείωσης του κόστους του συστήματος μόνωσης μέσω της προαναφερθείσας διαβαθμίσεως. Η παραπάνω παραδοχή προκύπτει βάσει της κατασκευαστικής πρακτικής.

β) Στην διαμήκη διεύθυνση όλα τα εφάδρανα δέχονται την ίδια σεισμική μετακίνηση, καθώς το αξονικώς απαραμόρφωτο κατάστρωμα, το οποίο αποκρίνεται χάρη στην προένταση που του επιβάλλεται με δυσκαμψία Σταδίου Ι (οιονεί αρηγμάτωτο), λειτουργεί πρακτικώς ως ένα διαμήκες διάφραγμα.

γ) Στην εγκάρσια διεύθυνση, η συνήθης λειτουργία τόρμων-εντορμιών (κοινώς stoppers) δεν επιτρέπει τη σεισμική παραμόρφωση των εφεδράνων.

Μετά την παραπάνω τεκμηρίωση και με δεδομένο το μικρό μήκος του φορέα καταστρώματος, το οποίο συνεπάγεται την αμελητέα επιρροή των λειτουργικών παραμορφώσεων του φορέα επί της παραμόρφωσης των εφεδράνων, η επιλογή των εφεδράνων με βάση το εφέδρανο που δέχεται τη μέγιστη αξονική σύνθλιψη κρίνεται εύλογη.

Μετά την επίλυση του φορέα για τα οιονεί μόνιμα κατακόρυφα φορτία, (συνδυασμός φορτίσεως $G+0.2Q$), όπως προβλέπεται από τις κανονιστικές διατάξεις, λαμβάνεται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην κεφαλή του μεσόβαθρου. Στην τιμή αυτή προστίθεται και η δύναμη από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού και προκύπτει έτσι η συνολική αξονική καταπόνηση των εφεδράνων.

Έλεγχοι επάρκειας των προεκλεγμένων εφεδράνων (Ισοδύναμο Μονοβάθμιο Σύστημα)

Στο πλαίσιο της διαδικασίας επιλογής, τα εφέδρανα τα οποία πληρούν τον πρώτο έλεγχο υποβάλλονται περαιτέρω σε ελέγχους επάρκειας. Η επιλογή των ελαστομεταλλικών εφεδράνων LDRB (low damping rubber bearings) βασίζεται στον κανονιστικώς προβλεπόμενο έλεγχο της επάρκειας των εφεδράνων. Συγκεκριμένα οι ΟΣΜ2007 προδιαγράφουν ότι ο έλεγχος των εφεδράνων θα πρέπει να γίνεται για τη συνολική δράση σχεδιασμού η οποία, συνοπτικώς περιλαμβάνει:

β1) την ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση του εφεδράνου ($\epsilon_{s,d}$) λόγω της σεισμικής δράσης: (ΟΣΜ2007 §6.2.1(2)),

β2) την ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω θλίψεως $\epsilon_{c,d}$ του εφεδράνου

β3) και την ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω στροφών ($\epsilon_{a,d}$).

Από τις ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στα ως άνω β1, β2, β3 οι δύο πρώτες (β1, β2) είναι αυτές που κυρίως καταπονούν το ελαστομεταλλικό εφέδρανο, καθώς η τρίτη (β3), δηλαδή η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω στροφών, έχει μικρή ως και μηδενική επιρροή (ΟΣΜ2007 §6.2.1(2)). Δεδομένου του φορέα της ανωδομής, και πριν την σεισμική ανάλυση του συστήματος, είναι δυνατή η εκτίμηση με ικανοποιητική προσέγγιση της διατμητικής παραμόρφωσης $\epsilon_{c,d}$ του εφεδράνου, υπό τον οιονεί μόνιμο συνδυασμό φορτίσεως της γέφυρας ($G+0,2Q$).

Έχει καθοριστεί από την προεκλογή του εφεδράνου, ότι η αξονική σύνθλιψη του εφεδράνου βρίσκεται εντός του ορίου $\sigma_e=3-5\text{MPa}$, (Abe et.al, 2004). Με βάση το παραπάνω όριο προκύπτει ότι η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση $\epsilon_{c,d}$ είναι της τάξεως του $\epsilon_{c,d} < 50\%$. Ο κανονισμός ΟΣΜ 2007 επιτρέπει μέχρι $\epsilon_{c,d}=300\%$ (για $\sigma_e=25\text{MPa}$), ($\sigma_e \leq [2b_{\min}/3 \sum t_i] G_b S$). Επίσης επιβάλλει $\epsilon_{s,d} < 200\%$ και επιπλέον προκύπτει ότι $\epsilon_a < 100\%$. Οπότε ο τελικός έλεγχος $\epsilon_{b,d}=\epsilon_{c,d}+\epsilon_{s,d}+\epsilon_{a,d} < 7 / 1.15$ δεν είναι ποτέ κρίσιμος στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ. Άρα ο κρίσιμος έλεγχος είναι λόγω της σεισμικής δράσης $\epsilon_{s,d} < 200\%$.

Για τον πρώτο έλεγχο επάρκειας θα πρέπει να γίνουν τα βήματα β1, β2, β3 που αναφέρθηκαν παραπάνω, που όπως επεξηγήθηκε επικεντρώνεται στο βήμα β1, το οποίο οδηγεί στο βασικό έλεγχο επάρκειας του εφεδράνου ως προς την διατμητική του παραμόρφωση από την σεισμική δράση. Σε πρώτη φάση

εφαρμόζεται η μέθοδος του Ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος για την εκτίμηση αυτής της ανηγμένης διατμητικής παραμόρφωσης του εφεδράνου λόγω της σεισμικής δράσης ($\epsilon_{s,d}$). Για τον σκοπό αυτόν ακολουθούνται τα κατωτέρω επίμερους βήματα, που είναι ενσωματωμένα στο λογισμικό:

- εκτίμηση της συνολικής μάζας της ανωδομής.
- εκτίμηση του συνολικού αριθμού των εφεδράνων.
- εκτίμηση της συνολικής δυσκαμψίας και της ιδιοπεριόδου του συστήματος της γέφυρας μετά των εφεδράνων.
- προσδιορισμός της μετακίνησης του Ισοδύναμου Μονοβάθμιου Ταλαντωτή (d_{ED}).
- έλεγχος επάρκειας του επιλεγμένου ελαστο-μεταλλικού εφεδράνου ως προς την διατμητική του παραμόρφωση $\epsilon_{s,d} < 200\%$.

Η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω της μετακίνησης $\epsilon_{s,d}$ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\epsilon_{s,d} = \frac{d_{Ed}}{\sum t_i} \quad (2)$$

όπου:

d_{Ed} η συνολική μέγιστη σεισμική μετακίνηση σχεδιασμού του εφεδράνου

$$d_{bi,a} = \gamma_{is} d_{bi,d} \quad , \quad \gamma_{is} = 1.50$$

$$d_{Ed} = \sqrt{d_{Edx}^2 + d_{Edy}^2} \quad \text{οι σύγχρονες συνιστώσες της } d_{Ed}$$

$$\sum t_i \quad \text{το συνολικό πάχος του ελαστομερούς.}$$

Θα πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη απαίτηση: $\epsilon_{s,d} < 2.0$

Τελική επιλογή του εφεδράνου

Για την τελική επιλογή διατομής εφεδράνου καταστρώνεται ένα συνδυασμένο κριτήριο. Μέσω του κριτηρίου αυτού, επιλέγεται από όλα τα εφέδρανα που ικανοποιούν τους ελέγχους επάρκειας εκείνο το εφέδρανο (ή εφέδρανα) το οποίο παρουσιάζει το μικρότερο δυνατό κόστος και την μεγαλύτερη δυνατή επάρκεια, η οποία προκύπτει από τους ελέγχους που υπαγορεύονται από τους κανονισμούς και παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής ασφάλειας (SF, safety factor) για τις διατομές των εφεδράνων που πληρούν τους ελέγχους σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$SF_i = \frac{\epsilon_s^{\text{limit}}}{\epsilon_{si}} \quad (3)$$

όπου ϵ_{si} η ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω μετακίνησης για κάθε εφέδρανο.

$\varepsilon_s^{\text{limit}}$ η απαίτηση η οποία πρέπει να ικανοποιείται σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω και είναι $\varepsilon_{si} < 2$. Επομένως $\varepsilon_s^{\text{limit}}=2$. Τελικά η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$SF_i = \frac{2}{\varepsilon_{si}} \quad (4)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το κριτήριο κόστους (CC_i) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$CC_i = \frac{FC_i}{\min FC_i} \quad (5)$$

όπου FC_i το κόστος σε € το οποίο προκύπτει από μια μέση τιμή ανά μονάδα όγκου (σε dm³) του εφεδράνου (i), πολλαπλασιασμένο επί τον όγκο του εφεδράνου που προσεγγίζεται από την σχέση:

$$FC=200+V_{bearing} \cdot c_v \quad (\text{€}) \quad (6)$$

minFC_i το ελάχιστο κόστος το οποίο προκύπτει από το σύνολο των (i) διατομών των εφεδράνων τα οποία εξετάζονται στην παρούσα φάση. Τελικά προσδιορίζεται το συνδυασμένο κριτήριο επιλογής εφεδράνων OP (optimal performance) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$OP = \frac{SF_i}{CC_i} \quad (7)$$

όπου SF_i ο συντελεστής ασφαλείας όπως υπολογίστηκε προηγούμενα, CC_i το κριτήριο κόστους όπως υπολογίστηκε προηγούμενα.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Όλα τα βήματα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο ενσωματώθηκαν στο λογισμικό προδιαστασιολόγησης των εφεδράνων που ελέγχθηκε ως εξής:

- τα αποτελέσματα του υπολογισμού της μετακίνησης του Ισοδύναμου Μονοβάθμιου Ταλαντωτή (IMT) για την σεισμική δράση συγκρίθηκαν αυτά του υπολογισμού της εν λόγω μετακίνησης μέσω φασματικής ανάλυσης. Η σύγκριση αυτή έδειξε ότι η προσέγγιση της απόκρισης μέσω του IMT είναι ικανοποιητική.

- η εφαρμογή της φασματικής ανάλυσης έγινε επιλεκτικά για φορείς που αντιστοιχούν και στους τέσσερις τύπους γεφυρών που μπορεί να αντιμετωπισθούν από το λογισμικό και για κάποιες «μέσες» γεωμετρικές διαστάσεις. Στην περίπτωση αυτή το αριθμητικό προσομοίωμα της άνω διάβασης της γέφυρας ήταν ένα πλήρες δισδιάστατο (2D) αριθμητικό προσομοίωμα που περιλάμβανε την προσομοίωση του καταστρώματος, των βάθρων καθώς και των εφεδράνων μεταξύ των βάθρων και του καταστρώματος.

- με τον ίδιο τρόπο ελέγχθηκε η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στα εφεδράνα καθώς και η παραδοχή ότι η αντίστοιχη θλιπτική τάση των εφεδράνων βρίσκεται εντός του ορίου $\sigma_e=3-5\text{MPa}$, στο οποίο βασίσθηκε η προεπιλογή των εφεδράνων. Και εδώ, η σύγκριση των αποτελεσμάτων ήταν εν γένει ικανοποιητική. Ως αποτέλεσμα της σύγκρισης προέκυψε η διεύρυνση του εν λόγω ορίου σε $\sigma_e=2-6\text{MPa}$. Σε κάθε περίπτωση, συνιστάται στον τελικό σχεδιασμό του φορέα με τα εφεδράνα που θα έχουν επιλεγεί με βάση το εν λόγω λογισμικό προδιαστασιολόγησης να γίνεται επανέλεγχος του αξονικού φορτίου κάθε εφεδράνου προς αποφυγή της εμφάνισης τυχόν ελκυσμού. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας των εφεδράνων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- μια σειρά από ελαστο-μεταλλικά εφεδράνα ή τμήματά τους που παρήχθησαν από Ελληνική εταιρεία και ελέγχθηκαν στις φορτιστικές διατάξεις του εργαστηρίου Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Α.Π.Θ. Μέσω αυτών των ελέγχων έγινε δυνατή η μέτρηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και η πιστοποίησή τους καθώς και η βελτιστοποίησή της παραγωγής τους.

- δημιουργήθηκε λογισμικό προεπιλογής εφεδράνων που ελέγχθηκε ότι λειτουργεί ικανοποιητικά εφαρμόζοντας ένα συνδιασμένο κριτήριο ασφάλειας-κόστους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το παρόν έργο έγινε στα πλαίσια του Πόλου Καινοτομίας Κεντρικής Μακεδονίας με την εν μέρει οικονομική υποστήριξη της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Ανάπτυξης. Τέλος, οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την εταιρεία Κένταυρος για την συνεργασία στην παραγωγή των δοκιμίων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

M.Abe, Yoshida, J., Fujino, Y. “Multiaxial Behaviors of Laminated Rubber Bearings and Their Modeling. I: Experimental Study”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 8, August 1, 2004.

CEN, Comité Européen de Normalisation TC250/SC8, Eurocode 8: Design provisions of structures for earthquake resistance, Brussels, (2003).

Naeim, F., Kelly, J. “Design of Seismic Isolated Structures- from theory to practice”, John Wiley & Sons (1999).

Trevor E. Kelly S.E., “Base Isolation of Structures”, Holmes Consulting Group Ltd (2001).

Όργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, «Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός ΕΑΚ 2000», Αθήνα (2000).

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.), «Οδηγίες για την σεισμική μόνωση των γεφυρών», Γεν. Διεύθυνση Δ.Ε., Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας (2007).