

Σεισμική τρωτότητα ενισχυμένων γεφυρών από Ο/Σ και διερεύνηση επιρροής διαφορετικών μεθόδων ενίσχυσης και αναβάθμισης

Σωτηρία Π. Στεφανίδου

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., ssotiria@civil.auth.gr

Ανδρέας Ι. Κάππος

Καθηγητής Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. και City, University of London, ajkap@civil.auth.gr

Εκτενής περίληψη

Η ανάγκη προσεισμικής ενίσχυσης γεφυρών προέκυψε λόγω των σημαντικών βλαβών που καταγράφηκαν στο τέλος του προηγούμενου αιώνα μετά από ισχυρούς σεισμούς, όπως του Whittier Narrows το 1987, της Loma Prieta το 1989, του Northridge το 1994, κ.α., σε υφιστάμενες αλλά και σε ενισχυμένες γέφυρες. Οι βλάβες γεφυρών, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές άμεσες και έμμεσες οικονομικές απώλειες, οφείλονταν σε διαφορετικές μορφές αστοχίας επιμέρους κρίσιμων συνιστωσών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στο σεισμό της Loma Prieta το 1989 προκλήθηκαν περισσότεροι από 40 θάνατοι λόγω βλαβών στις γέφυρες του οδικού δικτύου, ενώ το κόστος των έμμεσων απωλειών ήταν περίπου \$1.8 δισεκατομμύρια (Zhang et al., 1999).

Οι διαθέσιμες μέθοδοι ενίσχυσης γεφυρών ποικίλλουν, ανάλογα και με την εκάστοτε κρίσιμη δομική συνιστώσα, ενώ μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που έχουν ως στόχο τον έλεγχο των μετακινήσεων (ανασχετήρες, διατμητικοί σύνδεσμοι) την αύξηση της αντοχής και πλαστιμότητας (μανδύες Ο/Σ, μεταλλικοί, ή ΙΟΠ) (Σχήμα 1) και στην αύξηση της δυνατότητας απόσβεσης σεισμικής ενέργειας (αποσβεστήρες, εφένδρανα υψηλής απόσβεσης). Η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης βασίζεται στα αποτελέσματα ανάλυσης σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών, τα οποία ενσωματώνονται σε μία γενικότερη ανάλυση κόστους-ωφέλειας, ενώ είναι αποτέλεσμα πολυπαραμετρικής ανάλυσης και βελτιστοποίησης με βάση το εκάστοτε επιλεγμένο κριτήριο.



Σχ. 1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Γεφυρών από Ο/Σ

Πρωταρχικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τη ‘μαζική’ αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς και τον υπολογισμό σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών από Ο/Σ, η οποία βασίζεται στην επέκταση μεθοδολογίας που διαμορφώθηκε και προτάθηκε από τους συγγραφείς για υφιστάμενες γέφυρες (Stefanidou & Karpos, 2016). Στη συνέχεια, διερευνάται η επιρροή διαφορετικών μεθόδων ενίσχυσης και σεισμικής μόνωσης στη σεισμική τρωτότητα γεφυρών με διαφορετικό στατικό σύστημα καθώς και η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης, εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μεθοδολογία μέσω του *ad-hoc* λογισμικού που έχει αναπτυχθεί.

Βασικό στοιχείο της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο προσδιορισμός εξατομικευμένων καμπυλών σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών, λαμβάνοντας υπόψη τις επιμέρους (ενισχυμένες ή μη) κρίσιμες για την αντισεισμική συμπεριφορά δομικές συνιστώσες (βάθρα, εφένδρανα, ακρόβαθρα), καθώς και διαφορετικές μορφές αστοχίας αυτών. Για τον υπολογισμό της σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών, ήτοι της πιθανότητας η σεισμική απαίτηση να είναι μεγαλύτερη από τη διαθέσιμη αντίσταση για διάφορες στάθμες σεισμικής έντασης, είναι απαραίτητος ο ποσοτικός προσδιορισμός της διαθέσιμης αντίστασης (τιμές κατωφλίου σταθμών βλάβης), της σεισμικής απαίτησης, καθώς και των σχετικών αβεβαιοτήτων σε επίπεδο κρίσιμης συνιστώσας και συστήματος γέφυρας, θεωρώντας και τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών.

Στις διαθέσιμες μεθόδους υπολογισμού σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών οι τιμές κατωφλίων βλάβης για τα βάθρα δεν διαφοροποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο ενίσχυσης, τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά αυτής. Με δεδομένο ότι η επιλεγόμενη μέθοδος ενίσχυσης, η γεωμετρία και οι ιδιότητες των υλικών ενίσχυσης και της αρχικής διατομής επηρεάζουν την αντοχή, την πλαστιμότητα και κατά συνέπεια τη διαθέσιμη αντίσταση, δημιουργείται βάση δεδομένων ενισχυμένων βάρων με στόχο την παραμετρική διερεύνηση και την πρόταση νέων, εμπειρικών σχέσεων γενικής εφαρμογής για τον υπολογισμό τιμών κατωφλίων σταθμών βλάβης σε όρους τοπικών και καθολικών παραμέτρων (καμπυλότητες $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ και μετακινήσεις $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$). Στη βάση δεδομένων συμπεριλαμβάνονται βάθρα γεφυρών διαφορετικής γεωμετρίας, ποσοστών οπλισμού, ποιότητας υλικών και φόρτισης, ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ ή ΙΟΠ με μεταβαλλόμενες παραμέτρους. Για όλα τα βάθρα της βάσης δεδομένων πραγματοποιείται ανάλυση διατομής και στη συνέχεια, για ένα εύρος υψών, ανελαστική στατική ανάλυση του βάρου. Οι τιμές κατωφλίου υπολογίζονται με βάση την καμπύλη αντίστασης (pushover), λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές πιθανές μορφές αστοχίας (καμπτική και διατμητική) καθώς και τις διαφορετικές συνοριακές συνθήκες με βάση προτεινόμενη απλοποιητική σχέση η οποία προκύπτει από τη συσχέτιση του μητρώου ελαστικής δοκού προβόλου και δοκού με συνοριακές συνθήκες. Οι προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις προκύπτουν από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων ανελαστικής στατικής ανάλυσης και συγκεκριμένα με βάση ανάλυση παλινδρόμησης και τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με περιορισμούς. Τέλος, οι αβεβαιότητες στον υπολογισμό της διαθέσιμης αντίστασης ενισχυμένων βάρων και τον ορισμό των σταθμών βλάβης συνεκτιμώνται με βάση όσα αναφέρονται στην εργασία των Stefanidou & Karpos (2016).

Για τα εφένδρανα, τόσο τα ελαστομεταλλικά συνήθους απόσβεσης όσο και τα εφένδρανα υψηλής απόσβεσης και με πυρήνα μολύβδου, οι τιμές κατωφλίου προσδιορίζονται σε όρους διατμητικής παραμόρφωσης ($\gamma = \delta/h$) με βάση πειραματικά αποτελέσματα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία. Αντίστοιχα, οι τιμές κατωφλίου για το σύστημα ακροβάθρου-επιχώματος προσδιορίζονται σε όρους μετακίνησης με βάση τιμές διαθέσιμες στη βιβλιογραφία οι οποίες συσχετίζουν την αναπτυσσόμενη μετακίνηση στο σημείο ελέγχου με τις παραμορφώσεις του εδάφους και τις αναπτυσσόμενες βλάβες. Σημειώνεται ότι για τον ποσοτικό προσδιορισμό της πρώτης στάθμης βλάβης του συστήματος ακροβάθρου-επιχώματος, πραγματοποιείται ανελαστική στατική ανάλυση για τη συσχέτιση της μετακίνησης του σημείου ελέγχου με την αρχή πλαστικοποίησης ($\mu_\varphi = 1,5$) στη βάση του θωρακίου.

Η σεισμική απαίτηση, ήτοι η αναπτυσσόμενη μετακίνηση στα σημεία ελέγχου των κρίσιμων δομικών συνιστωσών για διάφορες στάθμες σεισμικής έντασης, υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης ιστορικού της απόκρισης ή ελαστικής δυναμικής ανάλυσης του τρισδιάστατου λεπτομερούς προσομοιώματος της γέφυρας, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών. Η μέθοδος ανάλυσης επιλέγεται ανάλογα με τον

αριθμό των υπό μελέτη γεφυρών (απόθεμα γεφυρών δικτύου ή μεμονωμένη γέφυρα). Οι αβεβαιότητες στον υπολογισμό της σεισμικής απαίτησης ποσοτικοποιούνται για αντιπροσωπευτικές κατηγορίες γεφυρών με βάση τα αποτελέσματα μαζικών ανελαστικών αναλύσεων (τροποποιημένη μικραυξητική δυναμική ανάλυση IDA, (Stefanidou & Kappos, 2016)) αξιόπιστου στατιστικού δείγματος, το οποίο προκύπτει με βάση τη στρωματοποιημένη μέθοδο δειγματοληψίας Latin Hypercube, λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα στην επιλογή σεισμικής διέγερσης.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε γέφυρες με διαφορετικό στατικό σύστημα και διαφορετικές μεθόδους ενίσχυσης, με στόχο την ανάδειξη της επιρροής τους στη σεισμική τρωτότητα και την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ανάλογα με το επιλεγόμενο κριτήριο επιτελεστικότητας. Σημειώνεται ότι, οι ιδιότητες των εξεταζόμενων μεθόδων ενίσχυσης επιλέγονται με κριτήριο την 'ισοδύναμη σεισμική αναβάθμιση' και η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου βασίζεται στην ποσοτική εκτίμηση της μείωσης της σεισμικής τρωτότητας για διάφορες στάθμες σεισμικής έντασης. Συγκεκριμένα εξετάζεται η εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων ενίσχυσης βάρων (μανδύας Ο/Σ και ΙΟΠ) σε γέφυρα με πλάστιμα βάρθρα μονολιθικά συνδεδεμένα με το κατάστρωμα, και η αντικατάσταση εφεδράνων (ελαστομεταλλικά εφέντρανα υψηλής απόσβεσης ή εφέντρανα με πυρήνα μολύβδου) σε γέφυρα με βάρθρα συνδεδεμένα με το κατάστρωμα μέσω συνήθων ελαστομεταλλικών εφεδράνων χαμηλής απόσβεσης. Οι γέφυρες στις οποίες εφαρμόζονται οι παραπάνω μέθοδοι ενίσχυσης είναι μία τυπική Άνω Διάβαση (Τ7) καθώς και μία τυπική γέφυρα με προκατασκευασμένες δοκούς, η γέφυρα του ρέματος Καλογήρου (Τ5). Επιπλέον, διερευνάται η επιρροή του πάχους μανδύα και του ποσοστού οπλισμού μανδύα Ο/Σ στη σεισμική τρωτότητα, καθώς και το είδος των ινών ΙΟΠ (άνθρακα ή υάλου), ενώ σχολιάζεται η επιρροή του νόμου συμπεριφοράς περισφιγμένου σκυροδέματος στα αποτελέσματα και στο κριτήριο ισοδύναμης αποτελεσματικότητας (διερεύνηση καταλληλότερου μοντέλου μεταξύ των προτεινόμενων στον ΚΑΝΕΠΕ και τη διεθνή βιβλιογραφία).

Η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης είναι πολυπαραμετρικό πρόβλημα και πρέπει να πραγματοποιείται μετά από συνεκτίμηση και του κόστους της εκάστοτε μεθόδου ή στρατηγικής ενίσχυσης. Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι τόσο η αύξηση της αντοχής όσο και η αύξηση της αντοχής και παράλληλα της δυσκαμψίας βελτιώνουν την αντισεισμική συμπεριφορά, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης βλαβών. Η σεισμική τρωτότητα των ενισχυμένων με μανδύα Ο/Σ βάρθρων είναι μικρότερη από την αντίστοιχη πριν την ενίσχυση για όλες τις στάθμες βλάβης εκτός από την πρώτη, ενώ η ενίσχυση με μανδύα ΙΟΠ προκύπτει αποτελεσματικότερη για την τελευταία στάθμη βλάβης. Σημειώνεται ότι η επιρροή των μεθόδων ενίσχυσης είναι εν γένει διαφορετική στις δύο διευθύνσεις, ενώ εξαρτάται από το στατικό σύστημα και από την κρίσιμη δομική συνιστώσα για την κάθε στάθμη βλάβης, η οποία ενδέχεται να διαφέρει πριν και μετά την ενίσχυση. Σε ό,τι αφορά στη σεισμική αναβάθμιση με εφέντρανα υψηλής απόσβεσης ή εφέντρανα με πυρήνα μολύβδου, προέκυψε ότι οδηγούν σε μείωση της σεισμικής τρωτότητας και στις δύο διευθύνσεις, ενώ αποτελεσματικότερα για όλες τις στάθμες βλάβης προέκυψαν τα εφέντρανα με πυρήνα μολύβδου.

Βιβλιογραφία

- Stefanidou, S.P. and Kappos, A.J. (2016), "Methodology for the development of bridge-specific fragility curves", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, DOI : 10.1002/eqe.2774
- Zhang, Y., Cofer, W. F., & Mclean, D. I. (1999), "Analytical Evaluation of Retrofit Strategies for Multicolumn Bridges", *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, Vol. 4, No. 2, pp. 143–150.