

Ασύγχρονη σεισμική διέγερση γεφυρών στην πράξη Asynchronous seismic excitation practice

Αναστάσιος ΣΕΞΤΟΣ¹, Ανδρέας ΚΑΠΠΟΣ²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρείται η αξιολόγηση των τρεχουσών κανονιστικών διατάξεων και η αξιοποίηση της εμπειρίας που αποκτήθηκε από τη διεξοδική αναλυτική μελέτη 27 διαφορετικών γεφυρών (5 από τις οποίες είναι πραγματικές και ήδη κατασκευασμένες) υπό 270 διαφορετικά σενάρια ασύγχρονης σεισμικής διέγερσης, ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα διατύπωσης απλοποιημένων μεθόδων, κριτηρίων και σχέσεων με τα οποία να καθιστάται δυνατό ο μελετητής μηχανικός: (α) να αποφανθεί περί της αναγκαιότητας συνεκτίμησης της χωρικής μεταβλητότητας και κυρίως, (β) να εκτιμήσει προσεγγιστικά, αλλά ποσοτικά, την επιρροή του φαινομένου στις αναμενόμενες μετακινήσεις και εντατικά μεγέθη του υπό μελέτη φορέα.

ABSTRACT: The scope of the present study is to review and evaluate the current seismic code provisions based on the experience gained from the detailed analytical study of 27 different bridges (5 of which are actual, already constructed ones) under 270 scenarios of asynchronous seismic excitation, in order to investigate the applicability of simplified methods, criteria and relationships through which the designer would be able to: (a) decide on the necessity to account for spatial variability and (b) estimate approximately, but quantitatively, the effect of the particular phenomenon on the action effects and displacements of the bridge under study.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ισχυροί σεισμοί της τελευταίας δεκαπενταετίας (Loma Prieta, 1989, Northridge, 1994, Kobe, 1995, Imit, 1999) έχουν αναδείξει το ζήτημα της ευαισθησίας των γεφυρών στην ισχυρή εδαφική κίνηση, καθώς παρά το (συχνά) σχετικά απλό, σε σχέση με τα κοινά οικοδομικά έργα, στατικό τους σύστημα, η έκταση και η πολυμορφία των βλαβών που παρατηρήθηκαν είναι πραγματικά ευρεία. Αν και δεν είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθεί, υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι, τουλάχιστον μέχρι ενός βαθμού, η δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών επιδεινώνεται εξαιτίας του γεγονότος ότι η σεισμική κίνηση διαφοροποιείται μεταξύ των βάθρων της κατασκευής με αποτέλεσμα να διεγείρει ψευδοστατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της που συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό, κυρίως εξαιτίας της έλλειψης επαρκούς κανονιστικού πλαισίου. Πρόκειται για ένα πρόβλημα εξόχως πολυπαραμετρικό και πολύπλοκο (fib, 2006) καθώς άπτεται ταυτοχρόνως των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, του εδάφους θεμελίωσης και του τυχηματικού χαρακτήρα της σεισμικής διέγερσης η οποία διαφοροποιείται σημαντικά κατά μήκος του άξονα της

¹ Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ. email: asextos@civil.auth.gr

² Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: ajkap@civil.auth.gr

γέφυρας από άποψη πλάτους, συχνотικού περιεχομένου και χρόνου άφιξης. Οι χωρικές και χρονικές αυτές διαφοροποιήσεις της σεισμικής κίνησης οφείλονται σε τρεις παράγοντες: (α) η προσπίπτουσα σεισμική κίνηση χάνει τον συγχρωτισμό της δηλαδή την «ομοιότητά» της, εξαιτίας διαδοχικών ανακλάσεων, διαθλάσεων και επαλληλιών εντός των εδαφικών στρωμάτων ως συνάρτηση της συχνότητας και της απόστασης ('incoherence effect'), (β) τα σεισμικά κύματα αφικνούνται σε κάθε θέση στήριξης με διαφορά φάσης καθώς διαδίδονται με πεπερασμένη ταχύτητα ('wave passage effect'), (γ) οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μεταβάλλουν το πλάτος και το συχνотικό περιεχόμενο της κίνησης, ειδικά όταν το εδαφικό προφίλ δια μέσου του οποίου αυτή διαδίδεται διαφοροποιείται με την απόσταση ('local site effect'). Ταυτόχρονα, η αδυναμία της θεμελίωσης να ακολουθήσει το επιβαλλόμενο προφίλ έδαφικών μετακινήσεων ('kinematic interaction', Gazetas, 1991, Makris & Gazetas, 1992) αλλοιώνει την εισερχόμενη κίνηση και μάλιστα με διαφορετικό τρόπο σε κάθε θέση αποτελώντας έτσι έναν πρόσθετο παράγοντα χωρικής μεταβλητότητας (Sextos et al., 2003a).

Το αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες προκαλούνται σημαντικές δυνάμεις και κυρίως σημαντικές σχετικές μετακινήσεις στην κατασκευή οι οποίες δεν θα είχαν αναπτυχθεί υπό το πρίσμα της θεώρησης σύγχρονης διέγερσης (Hao, 1989, Zerva, 1990, Shinozuka et al., 2000, Sextos et al., 2003a, Nuti & Vanzi, 2005, Lupo et al., 2005, Lou & Zerva, 2005) και συνεπώς δε θα ήταν δυνατό να προβλεφθούν μέσω της «κλασικής» προσέγγισης της πλήρως πακτωμένης στη βάση των βάθρων κατασκευής, η οποία μελετάται στο πεδίο του χρόνου με τη χρήση τουλάχιστον πέντε ομοιόμορφα επιβεβλημένων χρονοϊστοριών επιτάχυνσης σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8, του ΕΑΚ2000 και της Ε/39. Από την άλλη, παρά το γεγονός ότι σημαντική έρευνα έχει διεξαχθεί ως προς τις επιμέρους ανωτέρω κατευθύνσεις, οι επιστημονικές εργασίες που επιχειρούν τη συνδυαστική αντιμετώπιση του προβλήματος (χωρικής μεταβλητότητας και αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής) είναι σχετικά ολιγάριθμες (Der Kiureghian & Keshishian, 1997, Simeonov et al., 1997, Monti et al., 1994, Sextos et al., 2003a, Sextos et al., 2003b), ενώ είναι λίγες οι αριθμητικές (Romanelli et al., 2004, Sextos et al., 2004, Lou and Zerva, 2005) ή πειραματικές (Norman et al., 2006) μελέτες ευαισθησίας πραγματικών γεφυρών στη ασύγχρονη κίνηση, υπό το πρίσμα και της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Για την συνεκτίμηση των φαινομένων αυτών έχει αναπτυχθεί ειδική μεθοδολογία και λογισμικό (Sextos et al., 2003a,b) με το οποίο επιτυγχάνεται η σύνθεση κατάλληλα τροποποιημένων χρονοϊστοριών σε κάθε θέση στήριξης και ο υπολογισμός των δυναμικών σταθερών ελατηρίων και αποσβεστήρων, ως δεδομένα εισαγωγής για την ανάλυση γεφυρών στο πεδίο του χρόνου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας λοιπόν, επιχειρείται η αξιοποίηση της εμπειρίας που αποκτήθηκε από τη διεξοδική αναλυτική μελέτη 27 διαφορετικών γεφυρών (5 από τις οποίες είναι πραγματικές και ήδη κατασκευασμένες) υπό 270 διαφορετικά σενάρια ασύγχρονης σεισμικής διέγερσης, ώστε να καταστεί δυνατή:

- η διεξοδική επισκόπηση όλων των σύγχρονων διατάξεων των αντισεισμικών κανονισμών διεθνώς αναφορικά με τη συνεκτίμηση της χωρικής μεταβλητότητας κατά το σχεδιασμό, με έμφαση στις νέες διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 2 (CEN, 2005) οι οποίες και αποτελούν το περισσότερο λεπτομερές (κανονιστικό) πλαίσιο αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος.
- η ποσοτική αποτίμηση της αξιοπιστίας των διατάξεων αυτών, μέσω συγκριτικών επιλύσεων των 27 υπό μελέτη φορέων με βάση τις προτεινόμενες από τους Κανονισμούς μεθοδολογίες και την ολοκληρωμένη μεθοδολογία που έχει προταθεί.

- η διατύπωση απλών κριτηρίων αναφορικά με τη διακρίβωση των περιπτώσεων εκείνων όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το φαινόμενο της χωρικής μεταβλητότητας να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη δυναμική συμπεριφορά μιας γέφυρας.
- η διατύπωση απλών κριτηρίων για την εφαρμογή της καταλληλότερης (από τις διαθέσιμες σήμερα) μεθόδου συνεκτίμησης του ασύγχρονου χαρακτήρα της διέγερσης.
- η πρόταση απλών μαθηματικών εκφράσεων μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση του άνω φράγματος της πιθανής επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης σε εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις.
- η διατύπωση συστάσεων αναφορικά με τον προσδιορισμό συγκεκριμένων δομικών στοιχείων γεφυρών των οποίων η σεισμική απαίτηση αναμένεται να αυξηθεί εξαιτίας της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης.

ΓΕΦΥΡΕΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Περιγραφή φορέων που μελετήθηκαν

Στο πλαίσιο της σχετικής έρευνας συνολικά εξετάστηκαν 27 γέφυρες (πραγματικές και ιδεατές) με διαφορετικό στατικό σύστημα, τα χαρακτηριστικά των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Η απλούστερη εκ των ανωτέρω γεφυρών (Γέφυρα 01) έχει μήκος 152m και ελαφρά καμπυλότητα καταστρώματος, ενώ η Γέφυρα 02 έχει μήκος 292m και επιλέγεται διότι έχει μελετηθεί διεξοδικά στη διεθνή βιβλιογραφία (Der Kiureghian and Keshishian, 1997). Η Γέφυρα 03 (Talübergang Warth) είναι μια πραγματική κοιλαδογέφυρα η οποία βρίσκεται επί του αυτοκινητοδρόμου A2, σε απόσταση 63 km από τη Βιέννη στην Αυστρία, και επιλέγεται όχι μόνο εξαιτίας του σχετικά μεγάλου μήκους της (459m) αλλά κυρίως επειδή έχει επίσης μελετηθεί στο παρελθόν τόσο αναλυτικά (Romanelli et al, 2004, Sokol and Flesch, 2005) όσο και πειραματικά (Flesch et al., 1999, Pinto et al., 2002), συμπεριλαμβανομένων φαινομένων χωρικής μεταβλητότητας. Η Γέφυρα 04 από την άλλη, βρίσκεται στη θέση Γ11 Πολύμυλος-Λευκόπετρα της Εγνατίας Οδού και αποτελεί έναν συμμετρικό φορέα συνολικού μήκους 246.2m και τριών ανοιγμάτων, το μεγαλύτερο εκ των οποίων έχει μήκος 118m. Παράλληλα, μελετάται και η Γέφυρα της Κρυσταλλοπηγής (Γέφυρα 05), επίσης ανήκουσα στις γέφυρες της Εγνατίας Οδού, η οποία αποτελεί ίσως τον συνθετότερο φορέα που εξετάζεται στο πλαίσιο του παρόντος προγράμματος. Πρόκειται για μια καμπύλη κατασκευή επί εφεδράνων, 12 συνολικά ανοιγμάτων, συνολικού μήκους 488m, το ύψος των βάθρων της οποίας κυμαίνεται από 11-27m. Η στατική και δυναμική καθώς και η ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά της συγκεκριμένης γέφυρας έχει επίσης μελετηθεί διεξοδικά (Paraskeva et al, 2006), ενώ ειδικές αναλύσεις περί της επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας έχουν επίσης πραγματοποιηθεί από τους συγγραφείς (Sextos et al., 2004). Η τέταρτη πραγματική γέφυρα η οποία εξετάζεται στο πλαίσιο της ερευνητικής εργασίας είναι η 2^η Χαραδρογέφυρα της Καβάλας (Γέφυρα 06), επί της Εγνατίας Οδού, η οποία έχει συνολικό μήκος 180m. Αν και σχετικά μικρού μήκους, η εν λόγω γέφυρα επιλέγεται ακριβώς προκειμένου να διερευνηθεί το κάτω όριο συνολικού μήκους πέραν του οποίου η ασύγχρονη κίνηση μπορεί να αγνοηθεί κατά το σχεδιασμό. Αντίστοιχα ενδιαφέρουσα (αλλά και ειδική) περίπτωση αποτελεί η γέφυρα του Λίσσου (Γέφυρα 07) η οποία είναι σεισμικά μονωμένη σε όλα της τα βάθρα και τα ακρόβαθρα. Τα αποτελέσματα από τη μελέτη των ανωτέρω 7 γεφυρών αξιοποιούνται υπό το πρίσμα και της συνολικής εμπειρίας που αποκτήθηκε κατά τη μελέτη της ανελαστικής συμπεριφοράς 19 διαφορετικών γεφυρών (Γέφυρες 09-27, Sextos et al. 2003b) οι οποίες

διαφέρουν ως προς τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά και τις παραδοχές προσομοίωσης και σχεδιασμού κατά τρόπο που περιγράφεται στον Πίνακα 1.

Σενάρια σύγχρονης και ασύγχρονης σεισμικής διέγερσης

Προκειμένου να διερευνηθεί η σχετική επιρροή της διαφοράς φάσης, της απώλειας συγχρωτισμού, της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής στη δυναμική συμπεριφορά γεφυρών, διεξήχθη μια εκτεταμένη σειρά αναλύσεων οι οποίες περιγράφονται διεξοδικά στον Πίνακα 2. Σημειώνεται ότι οι προαναφερθείσες γέφυρες οι οποίες εξετάζονται, υπόκεινται σε σημαντικά διαφοροποιημένες σεισμικές κινήσεις (ως προς την ένταση και το συχνοτικό τους περιεχόμενο) προκειμένου να διερευνηθεί η ευαισθησία διαφορετικών γεφυρών σε διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις (Γέφυρες 01-27) ως επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται η απόκριση της γέφυρας υπό σύγχρονη διέγερση (περιπτώσεις TH01, TH06, TH11, TH16, TH24, TH38-41, TH53, TH56 και TH63-TH81). Συνεπώς, οι παράμετροι απόκρισης που εξετάζονται (είτε πρόκειται για μετακινήσεις του καταστρώματος είτε για ροπές κάμψης των βάθρων) εκφράζονται με τη σχέση:

$$\rho = \frac{\text{απόκριση (ροπές κάμψης ή μετακινήσεις) υπό ασύγχρονη κίνηση}}{\text{απόκριση (ροπές κάμψης ή μετακινήσεις) υπό σύγχρονη κίνηση}} \quad (1)$$

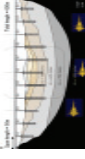
Για τις τέσσερις πρώτες γέφυρες (01-04), η ανάλυση υπό σύγχρονη κίνηση αντιπαραβάλλεται με αναλύσεις όπου συνεκτιμάται η χωρική μεταβλητότητα κατά αύξουσα πολυπλοκότητα μοντέλου ασύγχρονης κίνησης. Συγκεκριμένα, μελετάται η περίπτωση διέγερσης με ενιαία σεισμική κίνηση η οποία ταξιδεύει με πεπερασμένη ταχύτητα εντός του εδαφικού μέσου (TH02, TH07, TH12, TH17), η οποία ακολουθείται από μια ομάδα σεισμικών κινήσεων διαφορετικών επιπέδων συγχρωτισμού (TH03, TH08, TH13, TH18-20) καθώς και συνδυασμό των δύο ανωτέρω περιπτώσεων (TH04, TH09, TH14, TH21-23). Όλα τα σενάρια της σεισμικής κίνησης που λαμβάνουν υπόψη τη διαφορά φάσης και την απώλεια συγχρωτισμού παράγονται με τη χρήση του προγράμματος ASING (Sextos et al., 2003b), ενώ πρόσθετα σενάρια δημιουργούνται με το ειδικό πρόγραμμα SIMQKE-II (Vanmarcke et al, 1997) για λόγους σύγκρισης. Επιπλέον μελετήθηκε η σεισμική συμπεριφορά των 19 γεφυρών (TH63-270) για διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας σε ό,τι αφορά τη συνεκτίμηση του φαινομένου της χωρικής μεταβλητότητας (Sextos et al., 2003).

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Επιρροή της διαφοράς φάσης των σεισμικών κυμάτων

Η εκτίμηση της καθυστερημένης άφιξης μιας σταθερής κυματομορφής στα διάφορα βάθρα μιας γέφυρας αποτελεί την πλέον διαδεδομένη στην πράξη διαδικασία συνυπολογισμού των φαινομένων της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης. Για το λόγο αυτόν, η εν λόγω προσέγγιση, αν και αναντίρρητα απλουστευτική, υιοθετήθηκε και στις 25 (από τις 27) περιπτώσεις ευθύγραμμων γεφυρών προκειμένου να συγκριθεί η απόκριση των γεφυρών υπό κινήσεις που αφικνούνται με διαφορά φάσης, τόσο με την περίπτωση της σύγχρονης διέγερσης όσο και με περισσότερο σύνθετες και ακριβείς προσεγγίσεις.

Πίνακας 1. Σύνοψη των χαρακτηριστικών των υπό εξέταση γεφυρών

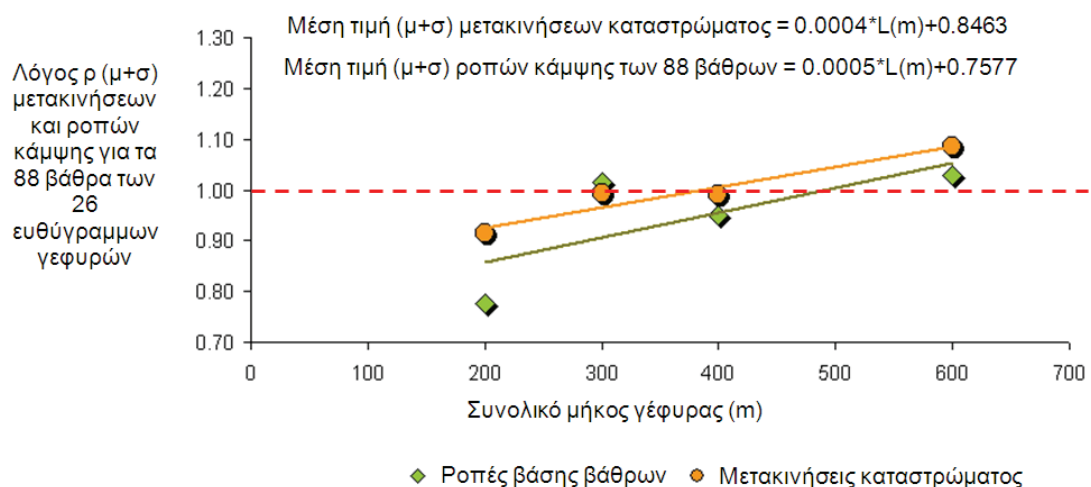
Περιγραφή φορέα και ανάλυσης								20 εναλλακτικές γέφυρες
A/A Γέφυρας #	Γέφυρα 01	Γέφυρα 02	Γέφυρα 03 (Warth)	Γέφυρα 04 (Πολύμυλος)	Γέφυρα 05 (Κρυσταλοπηγή)	Γέφυρα 06 (Καβάλα)	Γέφυρα 07 (Λίσσου)	Γέφυρες 09-27*
Θέση Γέφυρας	Ιδεατή	Ιδεατή	Βιέννη, Αυστρία	ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ	ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ	ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ	Ιδεατή	Ιδεατές
Αριθμός ανοιγμάτων	04	04	07	03	12	04	11	4, 6, 8
Μήκος ανοιγματος	30.5m	36.6-73.1m	62-67m	2x63.9 and 118.4m	44-54m	45m	26.5-44.3m	50m, 100m, 150m
Συνολικό μήκος	152.4m	292.6m	459m	246.2m	638m	180m	433m	200m, 400m, 600m
Συνόδεση βέθρου-καταστρώματος	Μονολιθική	Μονολιθική	Μονολιθική/Εφέδρανα	Μονολιθική/Εφέδρανα	Μονολιθική/Εφέδρανα	Μονολιθική/Εφέδρανα	Εφέδρανα	Μονολιθική/Εφέδρανα
Καμπυλότητα	Καθ' ύψος	Όχι	Όχι	Μικρή καμπυλότητα σε κάτοψη	Ομάδα πασσάλων	Όχι	Όχι	Όχι
Θεμελίωση	Πάκτωση	Πάκτωση	Πέδιλα	Φρέατα	Ομάδα πασσάλων	Φρέατα	Ομάδα πασσάλων	Ομάδα πασσάλων
Απώλεια συγχρωτισμού	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Διαφορά φάσης	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Εδαφική απόκριση	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι
SSI	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Κινηματική / Αδρανειακή	Όχι	Κινηματική / Αδρανειακή	Κινηματική / Αδρανειακή
Σύνολο αναλύσεων	8	8	8	8	16	7	4	207
Είδος ανάλυσης	LTHA RS**	LTHA RS**	LTHA RS**	LTHA**	LTHA NLTHA**	LTHA**	TH, NLTH RS**	LTHA NLTHA**
Διεύθυνση σεισμικής διέγερσης	Εγκάρσια	Εγκάρσια	Εγκάρσια (σε μια περίπτωση διαμήκης)	Εγκάρσια	6 γωνίες πρόσπτωσης	Εγκάρσια	Εγκάρσια	Εγκάρσια (σε μια περίπτωση διαμήκης)
Σεισμική διέγερση αναφοράς	EC8 συνθετική	EC8 συνθετική	EC8 συνθετική	Καταγραφή Gilroy	EC8 συνθετική & καταγραφή Κοζάνης	ΕΑΚ2000 Συνθετική	EC8 συνθετική	Καταγραφή Αθηνάς & Loma Prieta
Βιβλιογραφία (περιγραφή φορέα)	Kateris (2003), Sextos et al. (2005)	Kateris (2003), Der Kiureghian (1996)	Romanelli et al. (2004) Sokol & Flesch (2005)	-	Sextos et al., (2004)	Lekidis et al., (2004), Sextos et al., (2006b)	Karpos, Moschonas, et al. (2006)	Sextos et al., (2003b) al., (2003b)

Σημειώσεις: * Οι γέφυρες 09-27 αντιπροσωπεύουν μια σταδιακή τροποποίηση του φορέα της Γέφυρας 09 (μήκους 200m) από άποψη μείωσης της δυσκαμψίας λόγω ρηγματώσεως (Γέφυρες 10-13), συμμετρία και κανονικότητα (Γέφυρες 14-18), αλληλεπίδρασης ακροβάρου-επιχώματος (Γέφυρες 19-21), γωνίας πρόσπτωσης και συχνοτικού περιεχομένου σεισμού (Γέφυρες 22-23), συνολικού μήκους (400, 600m) και μήκους ανοιγματος (50, 100, 150m) καθώς και δυναμικών χαρακτηριστικών (Γέφυρες 24-27). (Sextos et al., 2003b). ** RS : Response Spectrum Analysis-Φασματική ανάλυση TH : Linear Time History Analysis – Γραμμική Δυναμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας, NLTH : Nonlinear Time History Analysis- Μη- Γραμμική Δυναμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας

Πίνακας 2. Σύνοψη των σεναρίων (χωρικά μεταβλητής) σεισμικής κίνησης

Γέφυρα	Αναλύσεις
 Γέφυρα 01	TH01: Σύγχρονη διέγερση. TH02: Μόνο διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH03: Μόνο απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH04: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$) & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου TH05: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$, Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (χρήση πρόσθετου λογισμικού προσομοίωσης υπό συνθήκες). RS01: Φασματική ανάλυση. RS02: Φασματική ανάλυση με ισοδύναμο μέσο φάσμα απόκρισης. RS03: Φασματική ανάλυση με ισοδύναμο μέσο φάσμα απόκρισης – Σημαντική διαφοροποίηση εδαφικών συνθηκών.
 Γέφυρα 02	TH06: Σύγχρονη διέγερση. TH07: Μόνο διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH08: Μόνο απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH09: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$) & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH10: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$, Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (χρήση πρόσθετου λογισμικού προσομοίωσης υπό συνθήκες). RS04: Φασματική ανάλυση. RS05: Φασματική ανάλυση με ισοδύναμο μέσο φάσμα απόκρισης. RS06: Φασματική ανάλυση με ισοδύναμο μέσο φάσμα απόκρισης – Σημαντική διαφοροποίηση εδαφικών συνθηκών.
 Γέφυρα 03	TH11: Σύγχρονη διέγερση. TH12: Μόνο διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH13: Μόνο απώλεια συγχρωτισμού, Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH14: Απώλεια συγχρωτισμού & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH15: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$, Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (χρήση πρόσθετου λογισμικού προσομοίωσης υπό συνθήκες). RS07: Φασματική ανάλυση. RS08: Φασματική ανάλυση με ισοδύναμο μέσο φάσμα απόκρισης. RS09: Φασματική ανάλυση με ισοδύναμο μέσο φάσμα απόκρισης – Σημαντική διαφοροποίηση εδαφικών συνθηκών.
 Γέφυρα 04	TH16: Σύγχρονη διέγερση. TH17: Μόνο διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH18-20: Μόνο απώλεια συγχρωτισμού (3 περιπτώσεις απώλειας συγχρωτισμού), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH21-23: Απώλεια συγχρωτισμού (3 διαφορετικές συναρτήσεις απώλειας συγχρωτισμού) & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου.
 Γέφυρα 05	TH24: Σύγχρονη διέγερση. TH25: Απώλεια συγχρωτισμού & Διαφορά φάσης ($V_s=400\text{m/sec}$ κατά μήκος χορδής), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH26: Απώλεια συγχρωτισμού & Διαφορά φάσης ($V_s=400\text{m/sec}$ υπό γωνία 30°), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH27: Απώλεια συγχρωτισμού & Διαφορά φάσης ($V_s=400\text{m/sec}$ υπό γωνία 45°), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH28: Απώλεια συγχρωτισμού & Διαφορά φάσης ($V_s=400\text{m/sec}$ υπό γωνία 60°), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH29: Απώλεια συγχρωτισμού & Διαφορά φάσης ($V_s=400\text{m/sec}$ υπό γωνία 75°), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH30: Απώλεια συγχρωτισμού & Διαφορά φάσης ($V_s=400\text{m/sec}$ υπό γωνία 90°), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH31-37: Παρόμοια σειρά αναλύσεων με τις TH24-TH30 με τη χρήση του φάσματος του Ευρωκώδικα 8 ως συχνοτικό περιεχόμενο αναφοράς.
 Γέφυρα 06	TH38-41: Σύγχρονη διέγερση για 4 διαφορετικές (ομοιόμορφες) εδαφικές συνθήκες (A, B, C, D). TH42-45: Μόνο διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου για 4 διαφορετικές (ομοιόμορφες) εδαφικές συνθήκες (A, B, C, D). TH46-49: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$) & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου για 4 διαφορετικές (ομοιόμορφες) εδαφικές συνθήκες (A, B, C, D). TH50-52: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$) & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου για πλήρως ασυσχέτιστες σεισμικές κινήσεις των οποίων το συχνοτικό περιεχόμενο αντιστοιχεί σε διαφορετικά σε κάθε βάθρο φάσματα απόκρισης.
 Γέφυρα 07	TH53: Σύγχρονη διέγερση. TH54: Μόνο διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$). TH55: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$) & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$).
 Γέφυρα 08	TH56: Σύγχρονη διέγερση. Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH57: Μόνο διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH58: Απώλεια συγχρωτισμού ($V_s/a=600\text{m/sec}$) & Διαφορά φάσης ($V_{app}=1000\text{m/sec}$), Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH59: Απώλεια συγχρωτισμού, Διαφορά φάσης and Τοπικές εδαφικές συνθήκες, Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH60: Απώλεια συγχρωτισμού, Διαφορά φάσης, Τοπικές εδαφικές συνθήκες και κινηματική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH61: Απώλεια συγχρωτισμού, Διαφορά φάσης, Τοπικές εδαφικές συνθήκες και κινηματική & αδρανειακή αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH62: Σύγχρονη διέγερση, κινηματική & αδρανειακή αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου.
Γέφυρες 09-27	TH63-81: Σύγχρονη διέγερση. Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. TH82-270: Διαφορετικοί συνδυασμοί απώλειας συγχρωτισμού, διαφοράς φάσης, Τοπικών εδαφικών συνθηκών, κινηματικής & αδρανειακής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής, Μη-Γραμμική δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου.

Σημειώνεται ότι ειδικά για τις Γέφυρες 05 και 07, εξαιτίας της καμπυλότητας και της σύνδεσης βάθρου-καταστρώματος αντίστοιχα, επιλέγεται διαφορετική προσέγγιση ανάλυσης όπως περιγράφεται παρακάτω. Τα αποτελέσματα από το σύνολο των 25 ευθύγραμμων γεφυρών καταδεικνύει το Σχήμα 1 όπου παρουσιάζεται η μέση τιμή (συν μια τυπική απόκλιση) του λόγου των μετακινήσεων καταστρώματος υπό διαφορά φάσης προς τις αντίστοιχες μετακινήσεις υπό σύγχρονη διέγερση (για τα 88 βάθρα των 25 γεφυρών) σε σχέση με το συνολικό τους μήκος. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι για γέφυρες μικρού μήκους ($L \leq 200\text{m}$), η επιρροή της υπόθεσης της διαφοράς φάσης είναι γενικά ευμενής αφού οδηγεί σε (μέση συν μια τυπική απόκλιση) μείωση των μετακινήσεων καταστρώματος κατά 10%. Από την άλλη, για περιπτώσεις γεφυρών συνολικού μήκους 200-400m, η απόκριση δεν διαφοροποιείται ιδιαίτερα σε σχέση με την σύγχρονη διέγερση (ο λόγος ρ ισούται περίπου με 1), ενώ απαιτείται σχετικά μεγάλο συνολικό μήκος γέφυρας ($L \geq 600\text{m}$) προκειμένου να παρατηρηθεί (μέση συν μια τυπική απόκλιση) αύξηση 10% στις μετακινήσεις σε σχέση με την περίπτωση σύγχρονης διέγερσης. Επισημαίνεται ότι ασφαλώς, σε ακραίες περιπτώσεις, παρατηρούνται σημαντικές μεμονωμένες αυξήσεις των μετακινήσεων (π.χ.. 22% στη Γέφυρα 24, 31% στη Γέφυρα 17 και 41% στη Γέφυρα 27), όμως το γεγονός αυτό εν πολλοίς αμβλύνεται εάν εκτιμηθεί η συνολική συμπεριφορά όλων των βάθρων των αντίστοιχων γεφυρών. Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και αναφορικά με τις ροπές κάμψης των βάθρων αν και σε μικρότερο, κατά κανόνα, βαθμό. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι όταν μια γέφυρα διεγείρεται σεισμικά με την υπόθεση της διαφοράς φάσης, τότε η συνολική της απόκριση από άποψη μετακινήσεων και έντασης αναμένεται να είναι γενικά μικρότερη, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία (Hao, 1989; Monti et al., 1996, Mylonakis et al., 2001) αλλά και πρόσφατες πειραματικές μελέτες (Norman et al., 2006). Από την άλλη, είναι φανερό ότι η ανωτέρω παρατήρηση, αν και εκ πρώτης όψεως ευμενής για το σχεδιασμό, δεν είναι δυνατό να γενικευτεί καθώς είναι αυτονόητο ότι η υπόθεση μιας σταθερής κυματομορφής η οποία ταξιδεύει αναλλοίωτη εντός του εδαφικού μέσου αποτελεί απλώς παραδοχή που απέχει σημαντικά από την (ιδιαίτερα πολύπλοκη) πραγματική κατάσταση της διάδοσης σεισμικών κυμάτων εντός του εδαφικού μέσου. Για το σκοπό αυτόν κρίθηκε σκόπιμη η επιπρόσθετη σύγκριση με ακριβέστερες προσεγγίσεις, οι οποίες και παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 1. Διαφορά φάσης: Μέση τιμή συν μια τυπική απόκλιση (μ+σ) του λόγου των μετακινήσεων του καταστρώματος και των ροπών στη βάση των βάθρων υπό ασύγχρονη προς σύγχρονη διέγερση για τα 88 βάθρα των 25 ευθύγραμμων γεφυρών που μελετήθηκαν, ως συνάρτηση του συνολικού μήκους του φορέα.

Επιρροή της απώλειας συγχρωτισμού

Επιπροσθέτως της ανωτέρω απλοποιητικής προσέγγισης (διαφοράς φάσης), μελετήθηκε η δυναμική συμπεριφορά των 27 γεφυρών με την υπόθεση της μερικής διασυσχέτισης των σεισμικών κυμάτων τόσο σε συνδυασμό με τη διαφορά φάσης, όσο και ως μεμονωμένο σενάριο διέγερσης (αγνοώντας τη διαφορά φάσης). Υπενθυμίζεται ότι η συνάρτηση αμοιβαίας φασματικής ισχύος $S_{jk}(\omega)$ των χωρικά μεταβλητών σεισμικών κινήσεων εκφράζεται ως συνάρτηση του φάσματος ισχύος (power spectral density) $S_{jj}(\omega)$ και $S_{kk}(\omega)$, το οποίο περιγράφει το στοχευόμενο συχνοτικό περιεχόμενο σε δύο διαδοχικές θέσεις j και k αντίστοιχα (συχνά εκπεφρασμένο σε όρους φάσματος Kanai-Tajimi), του συγχρωτισμού (coherency) $\gamma_{jk}(\omega)$ που περιγράφει τη χωρική διασυσχέτιση και ενός μιγαδικού όρου $e^{[i \cdot \theta_{jk}(\omega)]}$ που περιγράφει τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων με φαινόμενη ταχύτητα εντός του εδαφικού μέσου. Σε γενικές γραμμές είναι αποδεκτό ότι η διασυσχέτιση των σεισμικών κινήσεων μειώνεται όσο αυξάνει η συχνότητα και η απόσταση, γεγονός που συνήθως αποτυπώνεται με διάφορα προτεινόμενα μοντέλα απώλειας συγχρωτισμού (Hindy and Novak, 1980, Harichandran and Vanmarcke, 1986, Luco and Wong, 1986, Abrahamson, 1991, Loh and Yeh, 1988, Oliveira et al., 1991, Menke et al., 1991, Riepl et al., 1997, Zerva and Harada, 1997, Zerva & Zhang, 1997 και Laouami and Labbe, 2001).

Από τις εκτενείς παραμετρικές αναλύσεις των 27 υπό μελέτη γεφυρών προκύπτει ότι, σε αντίθεση με τη μεμονωμένη θεώρηση της διαφοράς φάσης, τόσο οι μετακινήσεις όσο και οι ροπές κάμψης στη βάση των βάθρων επηρεάζονται σημαντικά υπό ορισμένες συνθήκες, ιδιαίτερα όταν το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι μεγάλο. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε τοπική αύξηση της έντασης της τάξης του 20-40% για γέφυρες μεσαίου μήκους ($L < 400$ m), αλλά και πολύ μεγάλες αυξήσεις (έως και 350%) για περιπτώσεις μεγάλου συνολικού μήκους ($L \geq 600$ m), για τις οποίες υπολογίστηκε μέση αύξηση της απαίτησης πλαστιμότητας κατά 25% (με ακραία αύξηση κατά 300% σε μια συγκεκριμένη θέση). Κατά συνέπεια, σε γενικές γραμμές μπορεί να θεωρηθεί ότι η δυναμική συμπεριφορά γεφυρών υπό σεισμικές κινήσεις που συνεκτιμούν τη διαφορά φάσης και την απώλεια συγχρωτισμού, είναι δυνατόν να διαφοροποιηθεί σημαντικά αν και η τελική (τοπική) αύξηση ή μείωση των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών παρουσιάζει μεγάλη διασπορά και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, η κυριότερη εκ των οποίων είναι η ανταγωνιστική αύξηση των ψευδοστατικών δυνάμεων σε σχέση με την πιθανή μείωση της δυναμικής συνιστώσας του συστήματος όπως έχει επισημανθεί και στη διεθνή βιβλιογραφία (Hao, 1989; Der Kiureghian & Keshishian, 1997; Price & Eberhard, 1998).

Επιρροή της επιλεγόμενης συνάρτησης συγχρωτισμού

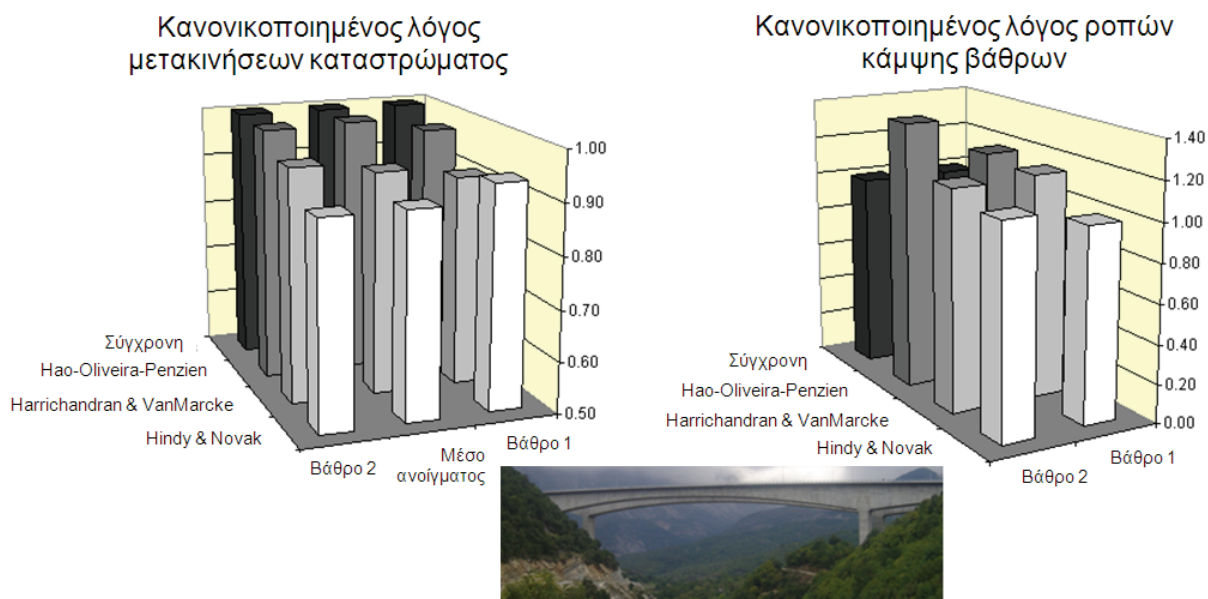
Αναμφίβολα, από την παρατήρηση σχετικά με τη μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων όταν συνεκτιμάται η απώλεια συγχρωτισμού των σεισμικών κυμάτων προκύπτει το ερώτημα περί της πρόσθετης πιθανής ευαισθησίας της συνολικής δυναμικής απόκρισης ανάλογα με το μοντέλο συγχρωτισμού το οποίο κάθε φορά επιλέγεται. Όπως έχει ήδη σημειωθεί, υπάρχει πληθώρα διαφορετικών (κυρίως εμπειρικών) σχέσεων για την περιγραφή της απώλειας στατιστικής διασυσχέτισης μεταξύ των σεισμικών κινήσεων ανάμεσα σε δύο θέσεις, όμως αυτές είναι άμεσα εξαρτώμενες από το σεισμοτεκτονικό και γεωτεχνικό περιβάλλον για το οποίο έχουν εξαχθεί, καθώς στη συντριπτική τους πλειοψηφία στηρίζονται σε επεξεργασία

καταγραφών. Συνεπώς, σε μεγάλο βαθμό απηχούν τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του σεισμικού κραδασμού (ένταση, συχνотικό περιεχόμενο, συνθήκες διάρρηξης), και των τοπικών εδαφικών συνθηκών που χαρακτηρίζουν τη χρονική στιγμή και τη θέση των καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπρόσθετα, έχει αποδειχθεί (Zerva & Beck, 2003) ότι ακόμη και η διαδικασία φιλτραρίσματος και ομαλοποίησης των καταγραφών επιδρά στην εξαγόμενη σχέση απώλειας συγχρωτισμού καθιστώντας επιπροσθέτως πολύπλοκη τη διαδικασία επιλογής της «κατάλληλης» κάθε φορά εμπειρικής σχέσης (Harichandran & Vanmarcke, 1986). Στο πλαίσιο αυτό λοιπόν, κρίθηκε σκόπιμη η ποσοτικοποίηση της επιρροής της επιλογής του μοντέλου απώλειας συγχρωτισμού στην τελική συνολική δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών ώστε εντέλει να αποτιμηθεί η ευαισθησία των γεφυρών σε φαινόμενα διάδοσης, ανάκλασης, διάθλασης και επαλληλίας των σεισμικών κυμάτων (που συνοψίζονται στην πρόταση μιας σχέσης απώλειας συγχρωτισμού) ανεξάρτητα από το μοντέλο που κάθε φορά χρησιμοποιείται. Για το σκοπό αυτόν επιλέγεται η Γέφυρα 04 (θέση Γ11, Πολύμυλος-Λευκόπετρα) μήκους 242m, η οποία διεγείρεται σε χωρικά μεταβλητές σεισμικές κινήσεις που με τη σειρά τους συνεκτιμούν μεν το φαινόμενο της απώλειας συγχρωτισμού, μέσω όμως διαφορετικών μοντέλων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα μοντέλα των Oliveira-Hao-Penzien (1991), Harichandran & VanMarcke (1986) και Hindy & Novak (1980) καθώς περιγράφουν αντίστοιχα σχετικά αργή, μέση και ταχεία μείωση του συγχρωτισμού με τη συχνότητα της διέγερσης (περιπτώσεις ανάλυσης TH18-20).

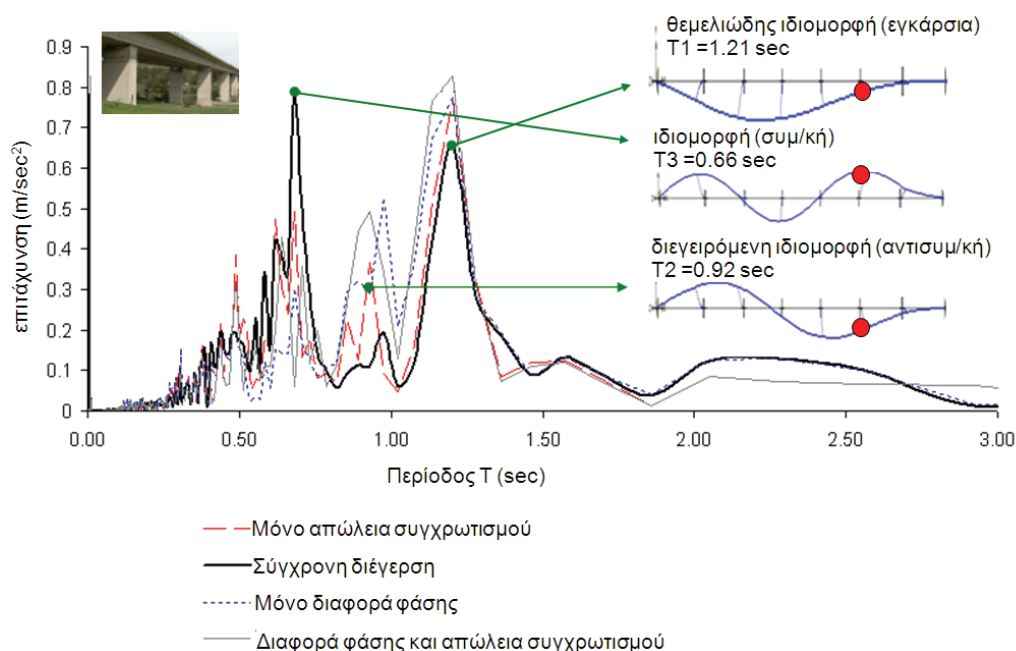
Από τη μελέτη του Σχήματος 2 προκύπτει ότι ο λόγος των μετακινήσεων καταστρώματος και των ροπών κάμψης στη βάση των βάθρων υπό ασύγχρονη προς σύγχρονη διέγερση επηρεάζεται κατά τρόπο όχι αμελητέο από την επιλογή της σχέσης απώλειας συγχρωτισμού: ο συντελεστής διακύμανσης (C.O.V.) για τις μεν μετακινήσεις στη θέση των δύο βάθρων και στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος είναι 3%, 5% και 5% αντίστοιχα, για τις δε ροπές στη βάση των δύο βάθρων είναι 9% και 13%. Η παρατήρηση αυτή βρίσκεται σε γενική συμφωνία με προηγούμενες έρευνες (π.χ. Zerva & Zervas, 2002) οι οποίες καταδεικνύουν σημαντική αύξηση της διασποράς της (ψευδο-δυναμικής) απόκρισης ιδιαίτερα ως προς τις σχετικές μετακινήσεις. Πρόσθετες αναλύσεις (TH17 και TH21-23) επιβεβαίωσαν ότι το συμπέρασμα αυτό δεν αναιρείται όταν συνεκτιμάται και η διαφορά φάσης κατά τη δημιουργία των χωρικά μεταβλητών σεισμικών κινήσεων. Από την άλλη, είναι γεγονός ότι η διαφορά στην απόκριση που παρατηρείται όταν κανείς επιλέξει το μοντέλο που αντιστοιχεί στην πλέον ταχεία ή στην πλέον αργή απώλεια συγχρωτισμού είναι μικρότερη από τη διαφορά που προκύπτει όταν πραγματοποιήσει ανάλυση ασύγχρονης διέγερσης με ένα μοντέλο «μέσης» πτώσης συγχρωτισμού σε σχέση με το να αγνοήσει το πρόβλημα τελείως (σύγχρονη διέγερση). Με άλλα λόγια, διαφαίνεται ότι είναι μάλλον προτιμότερο να πραγματοποιείται ασύγχρονη διέγερση με τη χρήση σχέσεων «μέσης» πτώσης συγχρωτισμού (π.χ. Harichandran & Vanmarcke, 1986 ή Menke et al., 1991 ή Zerva & Zhang, 1997 ή Laouami & Labbe, 2001), παρά να αγνοείται το φαινόμενο τελείως εξαιτίας της δυσκολίας τεκμηρίωσης της επιλογής της κατάλληλης συνάρτησης συγχρωτισμού.

Επιρροή του δομικού συστήματος (διέγερση ανώτερων ιδιομορφών)

Ένα άλλο στοιχείο που προέκυψε από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν υπό ασύγχρονη κίνηση, αφορά τη διέγερση ανώτερων ιδιομορφών όπως καταδεικνύουν τα αντίστοιχα φάσματα Fourier της απόκρισης (επιτάχυνση καταστρώματος) του Σχήματος 3 (ενδεικτικά) για τη Γέφυρα 03 (Talübergang Warth). Προκύπτει ότι υπό χωρικά μεταβλητή σεισμική διέγερση, αυξάνεται έως και κατά 20% η ένταση στα ακραία βάθρα (P1, P4 και P5) ακριβώς επειδή έχει ενισχυθεί σημαντικά η συμμετοχή της αντισυμμετρικής ιδιομορφής (στη συχνότητα 1.08Hz, ή $T=0.92\text{sec}$).



Σχήμα 2. Επιρροή της επιλογής συνάρτησης απώλειας συγχρωτισμού στις μετακινήσεις καταστρώματος (αριστερά) και τις ροπές κάμψης στη βάση των βάθρων (δεξιά) για τη Γέφυρα 04 (θέση Γ11, Πολύμυλος-Λευκόπετρα)



Σχήμα 3. Επιρροή της ασύγχρονης κίνησης στις αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις του καταστρώματος της Γέφυρας 03.

Είναι αξιοσημείωτο ότι το φαινόμενο της διέγερσης ανώτερων ιδιομορφών και της συνακόλουθης αύξησης των εντατικών μεγεθών σε δομικά στοιχεία των οποίων η ταλάντωση σχετίζεται με τις αντίστοιχες ιδιομορφές, έχει παρατηρηθεί σε 18 από τις 27 γέφυρες οι οποίες συνολικά μελετήθηκαν, ενώ έχει καταγραφεί και στη διεθνή βιβλιογραφία (Harichandran et al., 1999, για τη Γέφυρα Golden Gate στην Καλιφόρνια και Price et al., 1998, Tzanetos et al., 2001, Sextos et al., 2003b). Είναι συνεπώς δυνατό να οδηγηθεί κανείς στο συμπέρασμα ότι όταν μια γέφυρα διεγείρεται ασύγχρονα, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα να επιπονηθούν επιπρόσθετα όχι το σύνολο των βάθρων, αλλά μόνο, ή κυρίως, εκείνα των οποίων η ταλάντωση επηρεάζεται περισσότερο από ανώτερες ιδιομορφές. Το ζήτημα αυτό ασφαλώς χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, καθώς εφόσον τεκμηριωθεί παρέχει δυνητικά ορισμένες πρόσθετες δυνατότητες στον μελετητή, όπως σχολιάζεται στην ενότητα των τελικών συμπερασμάτων.

Επιρροή της καμπυλότητας του φορέα σε κάτοψη και της διεύθυνσης διάδοσης των σεισμικών κυμάτων

Σημαντικό αποδεικνύεται και το ζήτημα που σχετίζεται με την επιρροή της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης σε γέφυρες μεγάλου μήκους με καμπυλότητα σε κάτοψη όπου προκύπτει ως πιθανή η πρόσθετη ευαισθησία του συστήματος στη γωνία πρόσπτωσης των σεισμικών κυμάτων. Το ερώτημα αυτό σχετίζεται με την επιλογή της διεύθυνσης διέγερσης σε συστήματα όπου εξαιτίας της καμπυλότητας τους, δεν είναι προφανής η «κρίσιμη» γωνία για την οποία τα εντατικά μεγέθη και οι μετακινήσεις της γέφυρας μεγιστοποιούνται. Προκειμένου να επιτευχθεί η ποσοτική διερεύνηση του βαθμού σύζευξης της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης και της διεύθυνσης διέγερσης, μελετήθηκε διεξοδικά η Γέφυρα 05 της Κρυσταλλοπηγής μήκους 638m και ακτίνας καμπυλότητας $R=488m$ υπό σειρά διαφορετικών σεναρίων. Αποδεικνύεται (Sextos et al., 2004, Sextos & Karpos, 2008, Σέξτος και Τασκάρη, 2008) ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολο να οριστεί η «κρίσιμη» εκείνη γωνία διέγερσης καμπύλων γεφυρών για την οποία η επιρροή της χωρικής μεταβλητότητας μεγιστοποιείται. Παρόλα αυτά όμως και ασφαλώς σημειώνοντας ότι η Γέφυρα 05 ήταν η μόνη έχουσα καμπυλότητα, μεταξύ των 27 γεφυρών που μελετήθηκαν, μπορεί να θεωρηθεί πως γενικά οι καμπύλες γέφυρες είναι περισσότερο ευαίσθητες στις παραδοχές της ασύγχρονης κίνησης αλλά και ενγένει στο συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης και λιγότερο στη διεύθυνση πρόσπτωσης των σεισμικών κυμάτων.

Επιρροή της ταυτόχρονης συνεκτίμησης της διαφοράς φάσης, απώλειας συγχρωτισμού και τοπικών εδαφικών συνθηκών

Στην πλειονότητα των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν μέχρι στιγμής, η έμφαση δόθηκε στην ποσοτικοποίηση της επιρροής δύο σημαντικών συνιστωσών της χωρικής μεταβλητότητας (διαφορά φάσης και απώλεια συγχρωτισμού των σεισμικών κυμάτων). Παρόλα αυτά, η επιρροή των τοπικών συνθηκών αποτελεί έναν εξίσου σημαντικό παράγοντα διαφοροποίησης της κίνησης εισαγωγής κατά μήκος του άξονα της γέφυρας καθώς είναι δυνατό να μεταβάλλει σημαντικά (και με διαφορετικό τρόπο σε κάθε θέση) το πλάτος, τη φάση και το συχνοτικό περιεχόμενο των σεισμικών κινήσεων στο επίπεδο της θεμελίωσης, να οδηγήσει σε συνακόλουθη μεταβολή της δυναμικής απόκρισης του συστήματος (Saxena et al., 2000, Mylonakis et al., 2001, Ates et al., 2006). Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε

σειρά παραμετρικών αναλύσεων (TH57-TH270), όπου παρατηρείται ότι η σταδιακή συνεκτίμηση της απώλειας συγχρωτισμού των σεισμικών κυμάτων, των (διαφορετικών σε κάθε θέση) τοπικών εδαφικών συνθηκών και της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής είναι δυνατό να οδηγήσει σε σημαντικές τοπικού χαρακτήρα αυξήσεις των εντατικών μεγεθών και των μετακινήσεων καταστρώματος οι οποίες προκύπτουν έως και κατά 50% μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες που υπολογίστηκαν όταν η ενίσχυση (και διαφοροποίηση) της σεισμικής κίνησης εντός του εδαφικού μέσου δεν ελήφθη υπόψη. Ομοίως, οι ροπές κάμψης στη βάση των βάθρων που προέκυψαν μέσω της εφαρμογής της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας (Sextos et al., 2003a) ήταν αυξημένες κατά 40% σε σχέση με την ανάλυση όπου λαμβάνονται μεν υπόψη φαινόμενα αλληλεπίδρασης, χωρίς όμως την κατάλληλη προσομοίωση της επιρροής της εδαφικής απόκρισης στη σεισμική κίνηση εισαγωγής. Η σημαντική αυτή διαφορά μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι, καθώς η ανωδομή εμφανίζει μεγαλύτερη ιδιοπερίοδο εξαιτίας της ενδοσιμότητας της θεμελίωσης, το συνολικό σύστημα καθίσταται περισσότερο ευαίσθητο σε μακροπερίόδους παλμούς οι οποίοι συχνά ενισχύονται σημαντικά εξαιτίας της ύπαρξης μαλακών εδαφικών σχηματισμών. Κρίνεται συνεπώς απαραίτητοι, πριν από την προσομοίωση της δυναμικής αλληλεπίδρασης του εδάφους με τη θεμελίωση και την κατασκευή, ο κατά το δυνατόν ρεαλιστικός υπολογισμός της σεισμικής κίνησης εισαγωγής και η αποτίμηση της ανελαστικής, δυναμικής απόκρισης των πολυστρωματικών εδαφών θεμελίωσης. Από όλα τα παραπάνω συνεπώς προκύπτει ότι το πρόβλημα της δυναμικής απόκρισης γεφυρών είναι σε τέτοιο βαθμό σύνθετο και πολυπαραμετρικό, ώστε όχι μόνο δεν αρκεί η μεμονωμένη μελέτη των τριών σημαντικών φαινομένων που εμπλέκονται (χωρική μεταβλητότητα, τοπικές εδαφικές συνθήκες, αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής) αλλά αντίθετα είναι δυνατό να οδηγήσει σε μια εσφαλμένη αίσθηση «ακρίβειας» η οποία τελικά διαψεύδεται σημαντικά όταν το πρόβλημα ειδωθεί στο σύνολό του.

Επιρροή της θεώρησης πλήρως ασυσχέτιστων χρονοϊστοριών εισαγωγής

Σημειώνεται εδώ ότι όλα τα ανωτέρω συμπεράσματα έχουν προκύψει με την υπόθεση ότι οι σεισμικές κινήσεις εισαγωγής είναι είτε μερικώς είτε πλήρως συσχετισμένες. Ενδιαφέρουσα εναλλακτική των προαναφερθεισών μεθόδων αποτελεί η διέγερση της κατασκευής με διαφορετικές (στατιστικά πλήρως ασυσχέτιστες) σε κάθε θέση χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των οποίων το φάσμα απόκρισης ταυτίζεται με το (επίσης διαφορετικό σε κάθε θέση) ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού. Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στην άποψη (fib, 2006) ότι: (α) όταν οι εδαφικές συνθήκες μεταβάλλονται απότομα ανάμεσα στις θέσεις στήριξης των βάθρων, τότε οι σεισμικές κινήσεις εισαγωγής μπορούν να ληφθούν ως ασυσχέτιστες χωρίς σοβαρό σφάλμα ενώ (β) σε περιπτώσεις μικρού μήκους γεφυρών (μικρότερου των 200m) η εδαφική απόκριση αναμένεται να έχει πολύ μεγαλύτερη επιρροή στη δυναμική απόκριση της κατασκευής από ό,τι η διαφοροποίηση της σεισμικής κίνησης εξαιτίας του (έτσι κι αλλιώς μικρού) μήκους. Προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου αυτής, επιλέγεται η 2^η χαραδρογέφυρα της Καβάλας, η οποία αν και σχετικά μικρού μήκους (180m), παρουσιάζει ωστόσο έντονη υψομετρική διαφορά μεταξύ των βάθρων, ενώ οι εδαφικές συνθήκες επίσης διαφοροποιούνται σημαντικά (Lekidis et al., 2004, Karakostas et al., 2006). Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αποτίμησης που πραγματοποιείται περιγράφονται στην εργασία των Σέξτου και συν. (2007). Κρίνεται ότι σε περιπτώσεις γεφυρών μικρού μήκους, όπου οι εδαφικές συνθήκες μεταβάλλονται σημαντικά

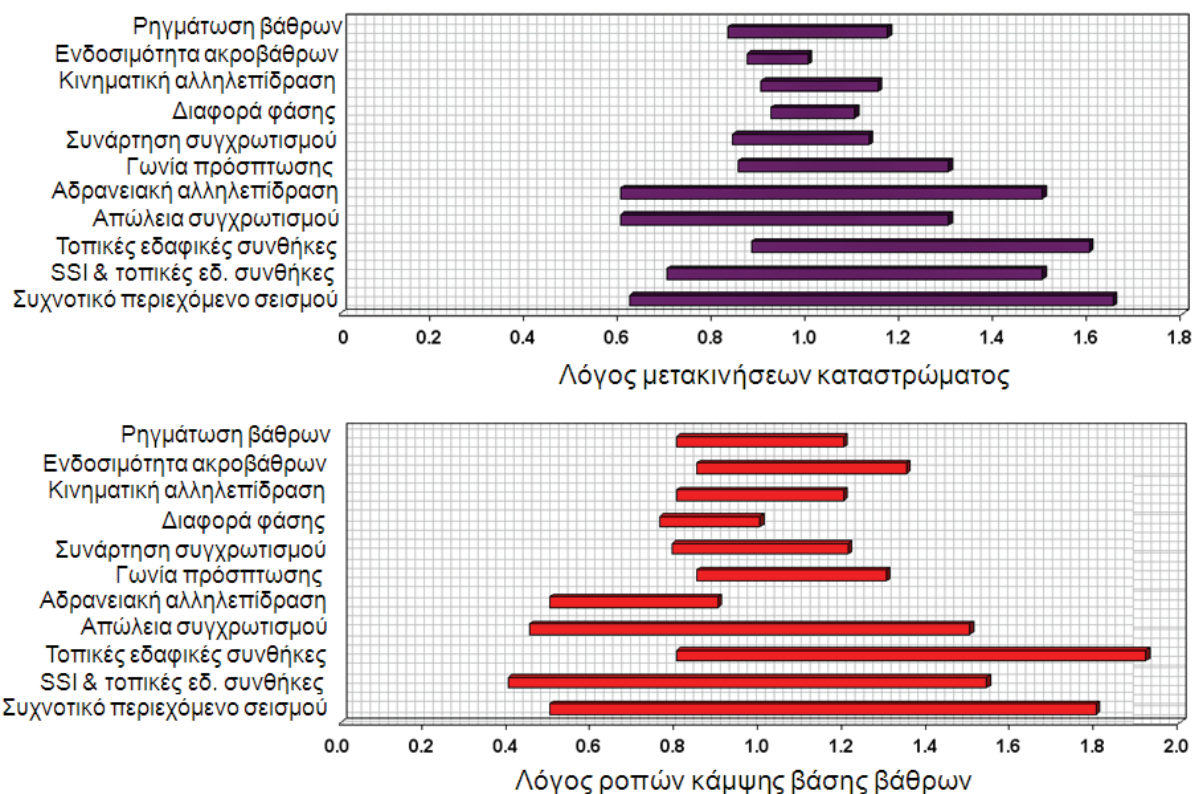
κατά το μήκος αυτών, η θεώρηση απολύτως ασυσχέτιστων σεισμικών κινήσεων (συμβατών με το διαφορετικό σε κάθε θέση εδαφικό προφίλ) είναι μεν μια τεχνικώς απλούστερη μέθοδος, οδηγεί όμως σε ένα συντηρητικό άνω όριο εκτίμησης της επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας στη δυναμική συμπεριφορά γεφυρών.

Σχετική επιρροή παραμέτρων της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης

Με βάση τις αναλύσεις και τις παρατηρήσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες έγινε μια προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί η σχετική επιρροή φαινομένων, παραμέτρων και παραδοχών προσομοίωσης στην τελική απόκριση των γεφυρών. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής του δείκτη ρ (Εξ. 1) για διάφορους συνδυασμούς υποθέσεων ανάλυσης. Εν προκειμένω, πραγματοποιώντας κάθε φορά μια παραδοχή ή λαμβάνοντας υπόψη ένα μεμονωμένο φαινόμενο (π.χ. διαφορά φάσης, κινηματική αλληλεπίδραση θεμελίωσης-εδάφους, μεταβολή του συχνотικού περιεχομένου της διέγερσης αναφοράς) πραγματοποιείται ανάλυση χωρικής μεταβλητότητας και εξάγονται τα εντατικά μεγέθη στη βάση των βάθρων, καθώς και οι μετακινήσεις του καταστρώματος. Τα αποτελέσματα αυτά κατόπιν συγκρίνονται με αυτά της ανάλυσης αναφοράς όπου το σύνολο των παραδοχών και των φαινομένων αυτών δεν είχαν ληφθεί υπόψη. Με τον τρόπο αυτόν υπολογίζονται οι τιμές του δείκτη ρ για κάθε βάθρο, για κάθε γέφυρα και για κάθε φαινόμενο που εξετάζεται. Ως εκ τούτου, κάθε γέφυρα χαρακτηρίζεται από τη μέση, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του δείκτη ρ (για κάθε υπό εξέταση φαινόμενο που μελετάται ή παραδοχή που γίνεται). Στο Σχήμα 4 συνεπώς παρουσιάζεται η περιβάλλουσα που προκύπτει εάν σχεδιαστεί το εύρος ($\mu-\sigma$, $\mu+\sigma$) του δείκτη ρ για όλες τις γέφυρες (δεδομένου του φαινομένου ή της παραδοχής υπό εξέταση). Θα πρέπει ασφαλώς να σημειωθεί ότι αυστηρώς μιλώντας, οι 27 γέφυρες που μελετώνται δεν είναι δυνατόν να συγκριθούν ευθέως καθώς διαφέρουν σημαντικά σε ό,τι αφορά το στατικό τους σύστημα, τις εδαφικές συνθήκες αλλά και τις μεθόδους προσομοίωσης της χωρικής μεταβλητής σεισμικής κίνησης.

Επιπροσθέτως, το στατιστικό δείγμα δεν είναι εξίσου μεγάλο για όλες τις περιπτώσεις των φαινομένων που εξετάστηκαν (για παράδειγμα, η επιρροή της γωνίας πρόσπτωσης σε συνδυασμό με την ασύγχρονη κίνηση έχει εξεταστεί για μια γέφυρα μόνο σε αντίθεση με τη διαφορά φάσης που έχει μελετηθεί για όλες τις γέφυρες). Συνεπώς το Σχήμα 4 μπορεί να εκληφθεί περισσότερο ως μια απολύτως προσεγγιστική, ποιοτική, ένδειξη περί της σχετικής επιρροής των διαφορετικών παραδοχών ανάλυσης για ένα εξόχως πολυπαραμετρικό πρόβλημα για το οποίο όμως, από την άλλη, είναι εξαιρετικά δύσκολη η δημιουργία απολύτως συγκρίσιμων δεδομένων (τα οποία άλλωστε δεν είναι διαθέσιμα). Προκειμένου συνεπώς να αξιοποιηθεί η πληθώρα των (έστω μη άμεσα συγκρίσιμων) δεδομένων και συνεκτιμώντας την ανωτέρω αβεβαιότητα, τρεις είναι οι βασικές παρατηρήσεις που απορρέουν από το Σχήμα 4: (α) φαίνεται ότι η επιρροή της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης είναι περισσότερο ευαίσθητη σε αποφάσεις που σχετίζονται με την επιλογή των χαρακτηριστικών του σεισμού αναφοράς, την εκτίμηση της εδαφικής ενίσχυσης και της απώλειας συγχρωτισμού, καθώς και της σύζευξης των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της αλληλεπίδρασης εδάφους-ανωδομής από ό,τι σε αποφάσεις που σχετίζονται με την επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης συγχρωτισμού, το βαθμό ρηγμάτωσης των διατομών Ο/Σ ή την ευκαμψία των ακροβάθρων, (β) υπάρχει η ένδειξη ότι οι αναλύσεις χωρικής μεταβλητότητας παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλη αβεβαιότητα εάν πρώτα δεν έχει αποτιμηθεί

σωστά το ευρύτερο σεισμοτεκτονικό περιβάλλον από όπου είναι δυνατός ο περισσότερος ακριβής προσδιορισμός των επιθυμητών χαρακτηριστικών της στοχευόμενης σεισμικής κίνησης εισαγωγής και τέλος, (γ) διαφάνεται η τάση οι ροπές κάμψης στη βάση των βάθρων να παρουσιάζουν ενγένει μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τις μετακινήσεις καταστρώματος για την ίδια υπό εξέταση παραδοχή ή φαινόμενο που μελετάται κάθε φορά, γεγονός με ιδιαίτερη σημασία κατά το σχεδιασμό.



Σχήμα 4. Σχετική επιρροή των διαφόρων παραδοχών προσομοίωσης επί της δυναμικής απόκρισης 27 γεφυρών υπό τη συνδυασμένη συνεκτίμηση χωρικής μεταβλητότητας, εδαφικών συνθηκών και φαινομένων αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής (άνω: μετακινήσεις καταστρώματος, κάτω: ροπές κάμψης στη βάση των βάθρων). Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης (λόγος) ρ ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (1).

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Το νέο κανονιστικό πλαίσιο του Ευρωκώδικα 8

Όπως ήδη αναφέρθηκε, παρά την ιδιαίτερη χρησιμότητα της σύνθεσης συνθετικών (χωρικώς μεταβλητών) σεισμικών κινήσεων για τον αντισεισμικό σχεδιασμό γεφυρών και την εκτεταμένη έρευνα που έχει συντελεστεί διεθνώς και που εν πολλοίς περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, η πολυπλοκότητα και η πολυπαραμετρικότητα του φαινομένου αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για την περισσότερο ενδελεχή προσέγγιση του προβλήματος σε επίπεδο κανονισμών. Για τον λόγο αυτόν, το ζήτημα της χωρικής μεταβλητότητας συχνά τίθεται αδρομερώς ή και καθόλου. Είναι χαρακτηριστικό ότι στο πλαίσιο των αντισεισμικών κανονισμών σε Ηνωμένες Πολιτείες και Ιαπωνία (US Standard

Specifications for Highways and Transportation Bridges - AASHTO 1996, ATC-32, 1996, Japanese Design Specifications for Highway Bridges, 2002) το ζήτημα αντιμετωπίζεται αποκλειστικά μέσω διατάξεων που αφορούν την αύξηση του πλάτους έδρασης του καταστρώματος, όπως περιγράφεται διεξοδικά αλλού (Sextos and Karpos, 2008). Από την άλλη, ο Ευρωκώδικας 8 (ειδικά στην πρόσφατη αναθεώρηση του Μέρους 2 που αφορά γέφυρες, CEN, 2005) παρέχει το πλέον λεπτομερές πλαίσιο εκτίμησης της επιρροής των φαινομένων χωρικής μεταβλητότητας. Εν προκειμένω, κατ' αρχάς προδιαγράφει αυξημένες απαιτήσεις ελάχιστου πλάτους έδρασης καταστρώματος στη θέση των ακροβάθρων (§6.6.4) προκειμένου να διασφαλίσει τη λειτουργία του καταστρώματος υπό το πιο δυσμενές σενάριο σχετικών μετακινήσεων καταστρώματος υπό ασύγχρονη κίνηση. Συγκεκριμένα, το ελάχιστο πλάτος έδρασης (overlap length κατά Ευρωκώδικα) προκύπτει από τη σχέση:

$$l_{ov} = l_m + d_{eg} + d_{es} \quad (2)$$

όπου l_m είναι το ελάχιστο πλάτος έδρασης που εξασφαλίζει τη μεταφορά των κατακορύφων δυνάμεων, d_{eg} η σχετική μετακίνηση δύο σημείων εξαιτίας της χωρικής μεταβλητότητας, ίση προς:

$$d_{eg} = \frac{2d_g}{L_g} \cdot L_{eff} < 2d_g \quad (3)$$

όπου d_{es} η δρώσα σεισμική μετακίνηση όπως ορίζεται στην (§2.3.6.3), d_g η σεισμική μετακίνηση σχεδιασμού κατά Ευρωκώδικα (§3.3.2.4), L_g είναι το κρίσιμο μήκος πέραν του οποίου οι σεισμικές κινήσεις εισαγωγής μπορούν να θεωρηθούν ως πλήρως ασυσχέτιστες, ενώ το L_{eff} είναι το «ενεργό μήκος» του καταστρώματος που λαμβάνεται ίσο προς την απόσταση του ενλόγω σημείου μέχρι την επόμενη μονολιθική σύνδεση βάθρου καταστρώματος (όταν ακολουθεί μόνο μία τέτοια) ή το κέντρο βάρους αυτών (όταν ακολουθούν περισσότερες από μία).

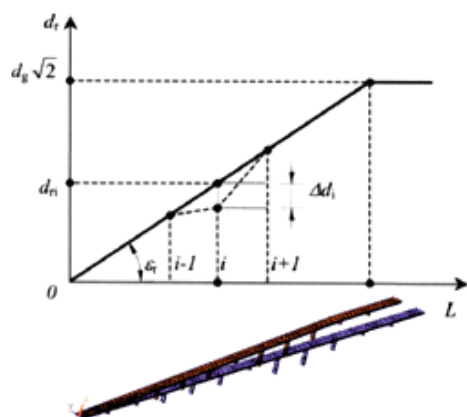
Πλέον των ανωτέρω, ο Ευρωκώδικας 8 στο Μέρος 2 αναγνωρίζει με σαφήνεια ότι η σεισμική δράση δεν θα πρέπει να στηρίζεται στην εκτίμηση μιας μεμονωμένης κίνησης σε κάποιο σημείο της κατασκευής, κατά συνέπεια το φαινόμενο της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης θα πρέπει να συνεκτιμάται όταν ισχύει κάποια από τις παρακάτω συνθήκες:

- οι εδαφικές ιδιότητες κατά μήκος του άξονα της γέφυρας διαφέρουν σε τέτοιο βαθμό ώστε να αντιστοιχούν σε περισσότερες από μια εδαφικές κατηγορίες (όπως αυτές περιγράφονται στο Μέρος 1 του Ευρωκώδικα 8).
- οι εδαφικές ιδιότητες κατά μήκος του άξονα της γέφυρας μπορούν μεν να θεωρηθούν προσεγγιστικά ομοιόμορφες πλην όμως το μήκος του συνεχούς καταστρώματος υπερβαίνει ένα προδιαγεγραμμένο όριο L_{lim} του οποίου η συνιστώμενη τιμή είναι ίση $L_{lim}=L_g/1.5$, όπου το μήκος L_g όπως προαναφέρθηκε είναι η απόσταση πέρα από την οποία οι σεισμικές κινήσεις μπορούν να ληφθούν ως απολύτως ασυσχέτιστες (το κρίσιμο μήκος L_{lim} δίνεται στον Πίνακα 3 ως συνάρτηση των εδαφικών κατηγοριών).

Στη γενική περίπτωση, οι πιθανώς μέγιστες τιμές των σεισμικών μετακινήσεων και εντατικών μεγεθών μπορούν να υπολογιστούν μέσω μιας προσεγγιστικής διαδικασίας η οποία περιγράφεται παρακάτω. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις εκτός και αν είναι δυνατή η εφαρμογή ακριβέστερων μεθόδων - σημειώνεται ότι η μέθοδος

Υπολογισμός των αδρανειακών μεγεθών της γέφυρας μέσω ελαστικής δυναμικής ανάλυσης (φασματικής ή χρονοϊστορίας) ή μη-γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας (Ανάλυση Αναφοράς). Όταν απαιτείται εισαγωγή διέγερσης στο πεδίο του χρόνου, αυτή λαμβάνεται ως ενιαία (σύγχρονη).

Υπολογισμός Ομάδας Α ψευδοστατικών μετακινήσεων

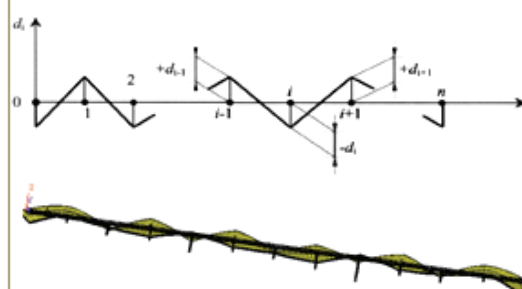


$$d_{ni} = \varepsilon_r L_i \leq d_g \sqrt{2} \quad \varepsilon_r = d_g \sqrt{2} / L_g$$

Επιβολή μετακινήσεων (στατικών καταναγκασμών) d_{ni} σε όλες τις στηρίξεις (1 έως n) με το ίδιο πρόσημο (+ ή -), όπου:

- $i = a/a$ της στήριξης
- $d_g = \eta$ εδαφική μετακίνηση σχεδιασμού (κατά EC8-1) στη θέση στήριξης i $\eta = 0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_c \cdot T_D$
- $L_i = \eta$ απόσταση (προβολή στο οριζόντιο επίπεδο) μεταξύ της στήριξης i και του σημείου αναφοράς με συντεταγμένες $i = 0$

Υπολογισμός Ομάδας Β ψευδοστατικών μετακινήσεων



Επιβολή μετακινήσεων (στατικών καταναγκασμών) Δd_i :

$$\Delta d_i = \pm \beta_r \varepsilon_r L_{\alpha i} \quad \text{όπου:}$$

- $L_{\alpha i} = 0$ μέσος όρος των αποστάσεων $L_{i-1,i}$ και $L_{i,i+1}$ της ενδιάμεσης στήριξης i από τις εκατέρωθεν στηρίξεις $i-1$ και $i+1$ αντίστοιχα.
- $\beta_r = 0.5$ όταν όλες οι στηρίξεις θεμελιώνονται επί του ιδίου εδάφους
- $\beta_r = 1.0$ όταν οι στηρίξεις θεμελιώνονται επί μη-ομοιόμορφου εδάφους
- $\varepsilon_r = d_g \sqrt{2} / L_g$

Υπολογισμός μέγιστων εντατικών μεγεθών εξαιτίας της Ομάδας Α

Υπολογισμός μέγιστων εντατικών μεγεθών εξαιτίας της Ομάδας Β

Συνδυασμός (SRSS) μεγεθών: Ομάδας Α, Ομάδας Β και Ανάλυσης Αναφοράς

Σχήμα 5. Συνοπτική επισκόπηση της απλοποιημένης μεθόδου συνεκτίμησης της ασύγχρονης κίνησης σύμφωνα με τις νέες διατάξεις του Ευρωκώδικα 8

Πίνακας 3: Οριακή τιμή συνολικού μήκους γέφυρας για τη συνεκτίμηση φαινομένων χωρικής μεταβλητότητας ως συνάρτηση των εδαφικών συνθηκών.

Κατηγορία Εδάφους	A	B	C	D	E
L_g (m)	600	500	400	300	500
L_{lim} (m)	400	333	266	200	333

των Der Kiureghian και Neuenhofer (1992) που προτείνεται στο πληροφοριακό παράρτημα του Ευρωκώδικα αποτελεί μια πολύ καλά τεκμηριωμένη θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος, εφαρμόζεται όμως για την αποτίμηση της επιρροής της ασύγχρονης κίνησης στη δυναμική συμπεριφορά γεφυρών στο πεδίο των συχνοτήτων μόνο. Η κεντρική ιδέα της απλοποιημένης μεθόδου (όπως τέθηκε από την Επιτροπή Σύνταξης του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 2) είναι απλή και πρακτική: εφόσον η σεισμική κίνηση σε κάθε σημείο του εδάφους (άρα και στις θέσεις θεμελίωσης των βάθρων) είναι διαφορετική, τα βάθρα υπόκεινται σε διαφορετικές σεισμικές επιταχύνσεις ή καταναγκασμούς σεισμικών μετακινήσεων οι οποίες είναι μερικώς συσχετισμένες (ανάλογα με τη σχετική θέση των βάθρων) και οδηγούν στην ανάπτυξη ψευδο-στατικών δυνάμεων. Από τους διάφορους δυνατούς συνδυασμούς σχετικών μετακινήσεων μεταξύ των βάθρων, η μέθοδος διακρίνει δύο ως τις πλέον κρίσιμες: είτε (α) όλα τα βάθρα υπόκεινται σε σεισμικές μετακινήσεις του ίδιου προσήμου (αλλά προφανώς διαφορετικού πλάτους), είτε (β) δύο διαδοχικά βάθρα μετακινούνται προς αντίθετες κάθε φορά διευθύνσεις. Με την επιβολή των δύο αυτών ομάδων καταναγκασμών (που ονομάζονται Set A και Set B), η κατασκευή ουσιαστικά υποβάλλεται σε ψευδο-στατικές δυνάμεις, και τα προκύπτοντα εντατικά μεγέθη επαλληλίζονται με τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης της γέφυρας (υπό σύγχρονη κίνηση) με τη χρήση του κανόνα της τετραγωνικής επαλληλίας (SRSS). Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιγράφεται διεξοδικά αλλού (Sextos et al., 2006, Sextos and Kappos, 2008), σύνοψη δε αυτής δίδεται στο Σχ 5.

Ποσοτική αποτίμηση των νέων διατάξεων του Ευρωκώδικα 8

Έχοντας αναπτύξει τη συνολική μεθοδολογία που περιγράφηκε διεξοδικά στις προηγούμενες ενότητες, κρίθηκε ιδιαίτερα ενδιαφέρον να επιχειρηθεί η αξιολόγηση της προσεγγιστικής μεθοδολογίας που προδιαγράφει ο Ευρωκώδικας 8 προκειμένου να διερευνηθούν τα όρια εφαρμογής της ως αποτέλεσμα της σύγκρισης με ακριβέστερες μεθόδους. Έτσι, με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8, αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό EC8-SSVAB (Sextos, 2005) με τη χρήση του οποίου μελετήθηκαν οι Γέφυρες 08, 07 και 05 μήκους 200m, 600m και 638m αντίστοιχα καθώς και διαφορετικά μήκη ανοίγματος, σύνδεσης βάθρου-καταστρώματος και καμπυλότητας σε κάτοψη. Για τις γέφυρες αυτές πραγματοποιήθηκε η πλήρης δυναμική ανάλυση ακολουθώντας την προτεινόμενη ολοκληρωμένη μεθοδολογία (Sextos et al., 2003a) και η συνολική συμπεριφορά της κάθε γέφυρας συγκρίνεται με αυτήν που προκύπτει από την εφαρμογή της απλοποιημένης μεθοδολογίας του Ευρωκώδικα 8. Η πλήρης σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσεγγιστικής αυτής μεθόδου με την ακριβέστερη ανάλυση της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι διαθέσιμη αλλού (Sextos & Kappos, 2008). Από τη συνολική σύγκριση που περιγράφηκε ανωτέρω, οι νέες διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 για τη συνεκτίμηση φαινομένων χωρικής μεταβλητότητας αξιολογούνται ως ακολούθως:

Πλεονεκτήματα

- Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 αποτελούν σαφώς ένα σημαντικό βήμα προς τη σωστή κατεύθυνση του περισσότερο αξιόπιστου σχεδιασμού γεφυρών υπό σεισμικά

φορτία, όχι μόνο σε σύγκριση με τις προγενέστερες διατάξεις, αλλά και σε σχέση με τους νέους Αντισεισμικούς Κανονισμούς διεθνώς. Οι αιτίες της χωρικής μεταβλητότητας περιγράφονται σαφώς και παρέχονται εργαλεία τόσο για την ποιοτική όσο και για την ποσοτική εκτίμηση της επιρροής τους.

- Αναλύσεις χωρικής μεταβλητότητας απαιτείται πλέον να πραγματοποιούνται και για γέφυρες συνολικού μήκους μικρότερου των 600m, μήκος που αποτελούσε το προηγούμενο όριο απαίτησης συνεκτίμησης του φαινομένου. Το γεγονός αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Sextos et al., 2003).
- Η σύνδεση του οριακού μήκους συνεχούς καταστρώματος για την υποχρεωτική εκτίμηση της ασύγχρονης διέγερσης με τις εδαφικές συνθήκες ακόμα και για γέφυρες μεσαίου μήκους βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.
- Στο Παράρτημα του Κανονισμού, πλέον παρέχεται μια τεκμηριωμένη μέθοδος υπολογισμού της επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας (Der Kiureghian & Neuenhofer, 1992) στο πλαίσιο δυναμικών αναλύσεων στο πεδίο των συχνοτήτων.
- Η προτεινόμενη προσεγγιστική μέθοδος είναι απλή στη σύλληψη και στη χρήση.
- Η εν λόγω προσεγγιστική μέθοδος προβλέπει αξιόπιστα την επιρροή της χωρικής μεταβλητότητας σε περιπτώσεις γεφυρών μικρού συνολικού μήκους ή/και ομοιόμορφων εδαφικών συνθηκών.
- Ορθώς, η προβλεπόμενη μέγιστη αύξηση είναι μεγαλύτερη για γέφυρες μεγαλύτερου μήκους ή θεμελιωμένων επί χωρικά μεταβλητών εδαφικών συνθηκών.

Μειονεκτήματα

- Η νέα προσεγγιστική μέθοδος του Ευρωκώδικα 8 είναι αναπόφευκτα μια ψευδο-στατική μέθοδος. Ως τέτοια, δεν είναι δυνατό να συνεκτιμήσει την επιρροή της δυναμικής συνιστώσας στη συνολική απόκριση της γέφυρας υπό ασύγχρονη διέγερση. Επιπλέον, η πιθανή διέγερση ανώτερων ιδιομορφών δεν λαμβάνεται υπόψη, ενώ η κατανομή της σεισμικής απαίτησης στα βάθρα δεν μπορεί να προβλεφθεί.
- Παρά το γεγονός ότι στο πλαίσιο του Κανονισμού η μέθοδος παρουσιάζεται ως γενικής εφαρμογής (για γέφυρες με και χωρίς καμπυλότητα) στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις σε σύγκριση με ακριβέστερες μεθόδους και συνεπώς η χρήση της δεν ενδείκνυται.
- Οι ομάδες καταναγκασμένων μετακινήσεων A και B που προδιαγράφονται στη μέθοδο είναι ουσιαστικά ανεξάρτητες από το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμικού κραδασμού. Ως εκ τούτου, κατά την επαλληλία των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τους προβλεπόμενους καταναγκασμούς και τη δυναμική ανάλυση υπό σύγχρονη διέγερση, η επιλογή των χαρακτηριστικών του σεισμικού κραδασμού για την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου καθορίζει ουσιαστικά και τη σχετική βαρύτητα της σχετικής επαύξησης που προκύπτει δια της προσεγγιστικής λύσης.
- Η μέθοδος δεν εφαρμόζεται απευθείας για την εκτίμηση της αύξησης των μετακινήσεων εξαιτίας ασύγχρονης διέγερσης. Επισημαίνεται βέβαια ότι κατά Ευρωκώδικα 8 λαμβάνεται πρόνοια για το ελάχιστο πλάτος έδρασης του καταστρώματος σύμφωνα με όσα διατυπώθηκαν στην ενότητα που προηγήθηκε.
- Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος είναι απλή στην κατανόηση και τη χρήση, ο υπολογισμός των στατικών καταναγκασμών της ομάδας A και B είναι χρονοβόρος για την περίπτωση γεφυρών με μεγάλο αριθμό ανοιγμάτων (άρα και στηρίξεων) ή για την επιτέλεση παραμετρικών αναλύσεων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ

Έχοντας εξετάσει διεξοδικά στο πλαίσιο της ευρύτερης ερευνητικής προσπάθειας που συνοψίσθηκε στην παρούσα εργασία τη δυναμική συμπεριφορά 27 διαφορετικών γεφυρών υπό ασύγχρονη κίνηση και έχοντας αξιολογήσει τις διατάξεις των σύγχρονων κανονισμών περί της χωρικής μεταβλητότητας (με έμφαση στις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8) προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Πότε θα πρέπει να συνεκτιμώνται τα φαινόμενα χωρικής μεταβλητότητας: Όρια συνολικού μήκους – στατικό σύστημα

- Αναφορικά με τη γενική οριακή τιμή συνολικού μήκους της γέφυρας, πέραν της οποίας θα πρέπει να συνεκτιμώνται οι επιπτώσεις του ασύγχρονου χαρακτήρα της σεισμικής διέγερσης, εκτιμάται ότι οι τιμές που προτείνονται από τον Ευρωκώδικα 8 (Πίνακας 3) βρίσκονται σε συμφωνία με τις τάσεις που ανέδειξαν οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και με το όριο μήκους που έχει προταθεί από τους Saxena et al. (2000) των 300-500m (1000-1500ft).
- Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των 27 γεφυρών και προδιαγράφεται σε σύγχρονους κανονισμούς (Ευρωκώδικα 8 αλλά και MCEER/ATC-49) το φαινόμενο της χωρικής μεταβλητότητας θα πρέπει να συνεκτιμάται ακόμη και στην περίπτωση μικρού μήκους γεφυρών (π.χ. της τάξης των 200m) όταν οι εδαφικές συνθήκες διαφέρουν σημαντικά κατά μήκος της γέφυρας.
- Παρατηρείται επίσης ότι η συνολική (ακριβέστερη) εκτίμηση της ασύγχρονης κίνησης, της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής έχει βαρύνουσα σημασία. Εν προκειμένω, η μεμονωμένη αντιμετώπιση των ανωτέρω φαινομένων είναι δυνατό να υποεκτιμήσει την απαιτούμενη πλαστιμότητα στροφών των βάθρων κατά περίπου 50% κατά μέσο όρο (στην ακραία περίπτωση και σε συγκεκριμένα βάθρα, η υποεκτίμηση της πλαστιμότητας στροφών αγγίζει τον συντελεστή 3.0).
- Γέφυρες με καμπυλότητα σε κάτοψη, βρέθηκαν να είναι περισσότερο ευαίσθητες στην ασύγχρονη σεισμική διέγερση, γεγονός που επιτείνεται όσο το συνολικό μήκος τους είναι μεγαλύτερο. Κατά συνέπεια, καμπύλες γέφυρες κρίνεται ότι θα πρέπει να σχεδιάζονται συνεκτιμώντας τη χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης και μάλιστα με τη χρήση μεθόδων ακριβέστερων από αυτή που προτείνεται ως προσεγγιστική από τον Ευρωκώδικα 8.

Τρόποι υπολογισμού της χωρικής μεταβλητότητας: επιλογή μεθόδων και διαχείριση της αβεβαιότητας

- Από την αξιολόγηση των διατάξεων των διεθνών αντισεισμικών κανονισμών προκύπτει ότι σήμερα δεν υπάρχει απλή διαδικασία εκτίμησης της πιθανής αύξησης των μετακινήσεων του καταστώματος εξαιτίας του ασύγχρονου χαρακτήρα της σεισμικής κίνησης, καθώς η προσεγγιστική μέθοδος του Ευρωκώδικα 8, αυστηρά μιλώντας, αφορά τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών. Μέριμνα έναντι μετακινήσεων ουσιαστικά λαμβάνεται έμμεσα, δια των διατάξεων που αφορούν το πλάτος έδρασης και οι οποίες προδιαγράφονται σε Αμερικανικούς και Ιαπωνικούς κανονισμούς, αλλά και στον Ευρωκώδικα 8.

- Δεδομένης της πολυπλοκότητας του προβλήματος και των πρακτικώς άπειρων συνδυασμών των δυναμικών χαρακτηριστικών των γεφυρών, του σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος, της θεμελίωσης και των εδαφικών συνθηκών, είναι εξαιρετικά δύσκολη η διατύπωση γενικών κανόνων αναφορικά με τη συνεκτίμηση της χωρικής μεταβλητότητας κατά το σχεδιασμό. Για τον σκοπό αυτόν, στις περιπτώσεις όπου πράγματι εκτιμάται ότι η ασύγχρονη κίνηση πρέπει να ληφθεί υπόψη (όπως αυτές προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα) προτείνεται η εκτέλεση κατάλληλων παραμετρικών αναλύσεων. Σύμφωνα με τους Saxena et al. (2000), απαιτούνται τουλάχιστον 20 δυναμικές αναλύσεις στο πεδίο του χρόνου προκειμένου να διαμορφώσει ο μηχανικός μια αξιόπιστη εκτίμηση των αναμενόμενων εντατικών μεγεθών και μετακινήσεων, πρόταση που σε γενικές γραμμές κρίνεται εύλογη. Σημειώνεται όμως ότι όπως έδειξε η πληθώρα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης του προβλήματος, η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της ανάλυσης (φαινομένων που συνεκτιμώνται) φαίνεται να έχει μεγαλύτερη σημασία από τον αριθμό των αναλύσεων που εκτελούνται.
- Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων των 27 γεφυρών που εξετάστηκαν προκύπτει ότι η επιλογή του σεισμικού κραδασμού αναφοράς και η συνολική συνεκτίμηση της απώλειας συγχρωτισμού, των τοπικών εδαφικών συνθηκών και της ενδοσιμότητας της θεμελίωσης, αναμένεται να αποκαλύψει περισσότερες πτυχές της συνολικής απόκρισης του συστήματος σε σχέση με τη μεμονωμένη προσομοίωση της διεύθυνσης διέγερσης και της διαφοράς φάσης των σεισμικών κυμάτων, τουλάχιστον για γέφυρες μικρού ως μεσαίου μήκους.
- Στην περίπτωση γεφυρών μικρού συνολικού μήκους ειδικότερα ($L \leq 200\text{m}$), όπου οι εδαφικές συνθήκες διαφοροποιούνται απότομα ανάμεσα στα βάθρα παρά τη μικρή απόσταση, η διέγερση με χωρικά μεταβλητές (αλλά πλήρως ασυσχέτιστες μεταξύ τους) σεισμικές κινήσεις των οποίων το συχνотικό περιεχόμενο ταυτίζεται σε κάθε θέση με το αντίστοιχο (διαφορετικό) ελαστικό φάσμα του κανονισμού όπως προτείνεται στο κείμενο της *fib* (2006), φαίνεται να είναι μια εξίσου απλή μέθοδος ανάλυσης η οποία εμφανίζει καλύτερη συμφωνία με ακριβέστερες λύσεις, πλην όμως αποτελεί οπωσδήποτε ένα συντηρητικό άνω όριο της επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας στη δυναμική απόκριση των γεφυρών.
- Το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής είναι σε μεγάλο βαθμό συζευγμένο με το συχνотικό περιεχόμενο της σεισμικής κίνησης εισαγωγής στο επίπεδο της θεμελίωσης του κάθε βάθρου και ως εκ τούτου, άμεσα συνδεδεμένο τόσο με την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών όσο και με το ζήτημα της χωρικής μεταβλητότητας. Κατά συνέπεια, κρίνεται ότι ειδικά για τις περιπτώσεις γεφυρών θεμελιωμένων επί μαλακών εδαφικών σχηματισμών, η προσομοίωση της ενδοσιμότητας και της απόσβεσης στο επίπεδο της θεμελίωσης είναι άνευ αντικειμένου χωρίς την ταυτόχρονη αξιόπιστη εκτίμηση του (χωρικώς μεταβλητού) σεισμικού κραδασμού

Κρίσιμες θέσεις: προσδιορισμός περισσότερο ευαίσθητων δομικών στοιχείων

- Παρά το γεγονός ότι το πρόβλημα είναι κατεξοχήν πολυπαραμετρικό και σύνθετο, υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι η αύξηση της μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης

κατά μήκος μιας γέφυρας είναι δυνατό να οδηγήσει στη διέγερση ανώτερων ιδιομορφών. Κατά συνέπεια, εκείνα τα δομικά στοιχεία των οποίων η ταλάντωση εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις ενλόγω ανώτερες ιδιομορφές λογικά έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να παρουσιάσουν μεγαλύτερη ευαισθησία στην ασύγχρονη διέγερση και ως εκ τούτου κρίνεται σκόπιμο οι αναλύσεις που εκτελούνται να εστιάζουν κατά κύριο λόγο σε αυτά.

- Εάν με βάση τις παραπάνω σκέψεις και υπό την προϋπόθεση περισσότερο εκτεταμένης έρευνας, ο μηχανισμός διέγερσης ανώτερων ιδιομορφών εξαιτίας της ασύγχρονης κίνησης καταστεί κατανοητός σε μεγαλύτερο βάθος, τότε ενδεχομένως η δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών θα μπορούσε να προβλεφθεί καλύτερα ή ακόμη και να ελεγχθεί μέσω κατάλληλης μορφολογίας, χρήσης της συμμετρίας ή/και εφαρμογή σεισμικής μόνωσης.
- Εναλλακτικά των ανωτέρω σύνθετων αναλύσεων ή της εφαρμογής της προτεινόμενης ολοκληρωμένης μεθοδολογίας και με βάση τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των 27 γεφυρών, προτείνεται η παρακάτω προσεγγιστική μέθοδος εκτίμησης της προσαύξησης των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο ασύγχρονος χαρακτήρας της σεισμικής διέγερσης: (α) κατ' αρχάς εκτελείται μια ιδιομορφική ανάλυση για τον προσδιορισμό των κύριων ιδιομορφών και των συντελεστών συμμετοχής αυτών (β) προσδιορίζονται οι ανώτερες ιδιομορφές που είναι πιθανό να διεγερθούν εξαιτίας της ασύγχρονης κίνησης και τα αντίστοιχα δομικά στοιχεία των οποίων η ταλάντωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από αυτές (γ) πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου με την παραδοχή της σύγχρονης διέγερσης και τελικά (δ) προσαυξάνονται οι προκύπτουσες μετακινήσεις και ροπές κάμψης των βάρων *μόνο στις κρίσιμες θέσεις που προσδιορίστηκαν να εξαρτώνται από τις ανώτερες ιδιομορφές* πολλαπλασιάζοντας αυτές με έναν συντελεστή ενίσχυσης R ο οποίος προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$R = \frac{0.0005 \cdot L}{a \cdot b \cdot c} + 1.0 < 2.0 \quad (4)$$

όπου L είναι το συνολικό μήκος της γέφυρας, και a, b και c παράμετροι ενίσχυσης οι οποίες λαμβάνουν τις παρακάτω τιμές:

$$a = \begin{cases} 1.3 & \text{όταν υπολογίζονται μετακινήσεις καταστρώματος} \\ 1.0 & \text{όταν υπολογίζονται εντατικά μεγέθη βάρων} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 1.0 & \text{για ομοιόμορφο έδαφος (1 εδαφική κατηγορία)} \\ 0.8 & \text{για εδαφικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε 2 εδαφικές κατηγορίες} \\ 0.5 & \text{για εδαφικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε > 2 εδαφικές κατηγορίες} \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 1.0 & \text{για γέφυρες χωρίς καμπυλότητα} \\ 0.6 & \text{για καμπύλες γέφυρες} \end{cases}$$

- Για τη (συνήθη) περίπτωση όπου το κατάστρωμα απλώς εδράζεται επί δύο μεσοβάρων, προτείνεται η εκτέλεση ειδικών αναλύσεων για τη εκτίμηση της

επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας επί των σχετικών μετακινήσεων μεταξύ των διαδοχικών βάθρων.

- Παρά την εκτεταμένη έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί διεθνώς κρίνεται απαραίτητη η διεύρυνση των αναλύσεων και των αποτελεσμάτων με αριθμητικό και πειραματικό τρόπο με έμφαση σε πραγματικές κατασκευές, καθώς και ο εμπλουτισμός των παρατηρήσεων με τη χρήση καταγραφών πεδίου επί και πέριξ της γέφυρας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ερευνητική αυτή εργασία περιλαμβάνει αποτελέσματα που προέκυψαν από προηγούμενες μελέτες των συγγραφέων οι οποίες είχαν υποστηριχθεί οικονομικά από διάφορους φορείς, ωστόσο το μεγαλύτερο και πλέον πρόσφατο τμήμα των αναλύσεων αυτών έγινε στο πλαίσιο του Ερευνητικού Προγράμματος «Αντισεισμική Προστασία Γεφυρών» (2004-2007) που χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας. Οι συγγραφείς θα ήθελαν επίσης να ευχαριστήσουν την ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟ Α.Ε. και ιδιαίτερα τον κ. Π. Πανέτσο για την παροχή πληθώρας δεδομένων που αφορούν τις γέφυρες Κρυσταλλοπηγής, Καβάλας και Πολυμύλου, τους συναδέλφους τους από το ΙΤΣΑΚ κ.κ. Χ. Καρακώστα, Β. Λεκίδη και Ν. Θεοδουλίδη για τη συνεργασία στη μελέτη της συμπεριφοράς της 2^{ης} Χαραδρονέφυρας της Καβάλας, καθώς και τον κ. Β. Κόλλια για τις πολύτιμες διευκρινήσεις που παρέσχε στο πλαίσιο της αξιολόγησης των νέων διατάξεων του Ευρωκώδικα 8 περί χωρικής μεταβλητότητας (στη θέσπιση των οποίων είχε, άλλωστε, σημαντική συμβολή).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Applied Technology Council and Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, ATC/MCEER (2003) "Recommended LRFD Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges", California, Report No. MCEER/ATC-49.
- CEN (2005) "Eurocode 8: Design provisions of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges (prEN1998-2, Final Draft)", CEN, Brussels.
- Der Kiureghian, A. & A. Neuenhofer (1992) "Response Spectrum method for multiple support excitations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 713-740.
- Der Kiureghian, A. & Keshishian P.E (1997) "Effects of incoherence, wave passage and spatially varying site conditions on bridge response", Proc. FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Motion, Report 97-0010, NY, 393-407.
- fib (2006) [federation international du beton] "Structural Solutions for Bridge Seismic Design and Retrofit - A State of the Art", fib T.G. 7.4 (forthcoming).
- Flesch, R. G., Kirkegaard, P. H., Kramer, C., Brughmans, M., Roberts G. P. y Gorozzo M. (1999) "Dynamic in-situ test of bridge WARTH/Austria", Reporte T?cnico, TU-Graz, TUG TA 99/0125.
- Gazetas, G. (1991) Formulas & Charts for impedance functions of surface and embedded foundation, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 177, No. 9, pp.1363-1381.
- Hao H. (1989) "Effects of spatial variation of ground motions on large multiply-supported structures", UBC/EERC-89/06, Berkeley: EERC, University of California.
- Harichandran, R.S. and Vanmarcke, E. H. (1986) "Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time", Journal of Engineering Mech. Division, 112, 154-174.
- Hindy, A., and Novak, M. (1980) "Pipeline response to random ground motions", ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 106, 339-360.
- Kappos, A. & Sextos, A. (2001) 'Effect of foundation type and compliance on the lateral load response of R/C bridges', Jrl of Bridge Engineering, ASCE., Vol. 6, 120-130.

- Karakostas, C.Z., Lekidis, V.A., Papadimitriou, C., Karamanos, S., Salonikios, T., Makarios, T., Sous, I., Panetsos, P. & Christodoulou, K. (2006) "Structural Identification of Bridges based on Ambient Vibration Measurements", 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva.
- Κατέρης, Ι. (2003) «Επιρροή της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης στη δυναμική απόκριση γεφυρών Ο/Σ», Διπλωματική Εργασία, ΜΠΣ «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Lekidis, V., Karakostas, C., Christodoulou, K., Karamanos, S., Papadimitriou, K. Panetsos, P. 2004. Investigation of dynamic response and model updating of instrumented R/C bridges, Paper no. 2591, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver.
- Loh, C.H. & Yeh, Y. (1988) Spatial Variation and Stochastic Modeling of Seismic Differential Ground Movement, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 583-596.
- Lou, L., & Zerva, A. (2005) "Effects of spatially variable ground motions on the seismic response of a skewed, multi-span, RC highway bridge", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 25(7-10), 729-740.
- Luco, J.E. & Wong, H.L. 1986. Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 4, 891-908.
- Lupoi, A., Franchin, P., Pinto, P. E., & Monti, G. (2005) "Seismic design of bridges accounting for spatial variability of ground motion", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(4-5), 327-348.
- Makris, N. & Gazetas, G. (1992) Dynamic pile-soil-pile interaction. Part II: Lateral and seismic response, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21 (2), 145-162.
- Monti G., Nuti C. & Pinto P.E. (1996) "Nonlinear response of bridges under multi-support excitation", *Journal of Structural Engineering*, 122(10), 1147-1159.
- Mylonakis, G., Papastamatiou, D., Psycharis, J. and Mahmoud, K. (2001) "Simplified modeling of bridge response on soft soil to nonuniform seismic excitation", *ASCE, Journal of Bridge Engineering*, 587-597.
- Norman, J.A., Virden, D.W., Crewe, A.J. and Wagg, D.J. (2006) "Physical Modelling of bridges subject to multiple support excitation", 8th National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, U.S, Paper No. 373.
- Nuti, C. & Vanzi, I. (2005) "Influence of earthquake spatial variability on differential soil displacements and SDF system response", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(11), 1353-1374.
- Oliveira, C. S.; Hao, H.; Penzien, J. (1991) "Ground motion modeling for multiple-input structural analysis", *Structural Safety*, 10, 79-93.
- Paraskeva, T., Kappos, A. and Sextos, A (2006) "Extension of modal pushover analysis to seismic assessment of bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 1269-1293.
- Pinto, A., Pegon, P. Magonette, & Tsionis, G. (2002) "Pseudo-dynamic testing of bridges using non-linear substructuring", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(11), 1125 - 1146.
- Price, T.E. & Eberhard, M.O. (1998) "Effects of Spatially Varying Ground Motions on Short Bridges", *Journal of Structural Engineering*, 124(8), 948-955.
- Riepl, J., Oliveira, C.S. & P.-Y. Bard (1997) "Spatial Coherence of seismic wave fields across an alluvial valley (weak motion)", *Journal of Seismology*, 1, 253-268.
- Romanelli, F, Panza, G. and F. Vaccari (2004) "Realistic Modelling of the Effects of Asynchronous Motion at the Base of Bridge Piers", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 6(2), 9-28.
- Saxena, V., Deodatis, G. & Shinozuka, M. (2000) "Effect of Spatial Variation of Earthquake Ground Motion on the nonlinear dynamic response of highway bridges", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No 2227.
- Sextos, A., Pitilakis, K. and Kappos, A. (2003a) 'Inelastic dynamic analysis of RC bridges accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil-structure interaction phenomena. Part 1: Methodology and analytical tools', *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 32, 607-629.

- Sextos A., Kappos A. & Pitilakis K. (2003b) 'Inelastic dynamic analysis of RC bridges accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil-structure interaction phenomena. Part 2: Parametric study', *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 32, 629-652.
- Sextos, A., Kappos, A. and Mergos P. (2004) 'Effect of Soil-Structure Interaction and Spatial Variability of Ground Motion on Irregular Bridges: The Case of the Krystallopigi Bridge', 13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 2298.
- Sextos, A. (2005) 'A computer interface for the asynchronous seismic excitation of bridges simulated in ANSYS', 23rd CADFEM Users' Meeting 2005, International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, Bonn, Germany.
- Sextos, A., Kappos, A. and Pitilakis, K. (2005) 'Recent developments on the effect of asynchronous earthquake excitation on the dynamic response of soil-foundation-superstructure bridge systems', 1st Greece - Japan Workshop: Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations, 211-228.
- Sextos, A., Kappos, A. and Kollias, V. (2006) 'Computing a 'reasonable' spatially variable earthquake input for extended bridge structures', 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Paper No. 1601.
- Sextos, A. and Kappos, A.J. (2008) "Seismic response of bridges under asynchronous excitation and comparison with EC8 design rules", *Bulletin of Earthquake Engineering Engineering* (έγινε καταρχήν δεκτό για δημοσίευση).
- Σέξτος, Α. , Καρακώστας, Χ. , Λεκίδης, Β. και Κάππος, Α. (2006) «Δυναμική συμπεριφορά της ενοργανωμένης χαραδρογέφυρας της Καβάλας υπό ασύγχρονη σεισμική κίνηση», 15^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 18-20 Οκτωβρίου.
- Σέξτος, Α. και Τασκάρη, Ο. (2008) «Διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας σεισμικής διέγερσης σε περιπτώσεις καμπύλων γεφυρών μεγάλου μήκους», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5–7 Νοεμβρίου, Αθήνα.
- Shinozuka M, Saxena V & Deodatis, G. (2000) "Effect of Spatial Variation of Ground Motion on Highway Structures", MCEER-00-0013, MCEER, NY.
- Simeonov V, Mylonakis G, Reinhorn & Buckle, I. (1997) "Implications of spatial variation of ground motion on the seismic response of bridges: Case study", Proc. FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Motion, Tech. Rept, 97-0010, NY, 359-392.
- Sokol, M. and Flesch, R. (2005) "Assessment of Soil Stiffness Properties by Dynamic Tests on Bridges" ASCE, *Journal of Bridge Engineering*, 10(1), 77-86.
- Tzanetos N., Elnashai A. S., Hamdan F. H., Antoniou S. (2000) "Inelastic Dynamic Response of RC Bridges Subjected to Spatial Non-Synchronous Earthquake Motion", *Advances in Structural Engineering*, 3(3), 191-214.
- Vanmarcke, E. (1999) "SIMQKE-II, conditioned earthquake ground motion simulator: user's manual, version 2.1.", Princeton, N.J.
- Zerva, A. & Beck, J.L. (2003) 'Identification of parametric ground motion random fields from spatially recorded seismic data', *Earthquake Engng Structural Dynamics*, 32, 771-791.
- Zerva, A. & Harada, T. (1997) "Effect of surface layer stochasticity on seismic ground motion coherence and strain estimates", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(7-8), 445-457.
- Zerva, A. (1990) "Response of multi-span beams to spatially incoherent seismic ground motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(6), 819-832.
- Zerva, A. and Zervas, V. (2002) "Spatial variation of seismic ground motions: An overview", *ASME, Applied Mechanics Review*, 55(3), 271-297.
- Zerva, A. and Zhang, O. (1997) "Correlation patterns in characteristics of spatially variable ground motion", *Journal of Structural Engineering*, 112, 1147-1159.