

Η επιρροή του φαινομένου της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης στον σχεδιασμό βάρων γεφυρών Ο/Σ

Σάββας Παπαδόπουλος

Υπ. Διδάκτορας Α.Π.Θ., savvaspp@civil.auth.gr

Αναστάσιος Σέξτος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και University of Bristol,

asextos@civil.auth.gr & a.sextos@bristol.ac.uk

Εκτενής περίληψη

Μία από τις ιδιαιτερότητες των γεφυρών συγκριτικά με τα συνήθη έργα πολιτικού μηχανικού είναι η διαφοροποίηση της σεισμικής κίνησης στην οποία υπόκεινται οι στηρίξεις τους, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το μήκος τους είναι σημαντικό ή όπου οι εδαφικές συνθήκες διαφοροποιούνται σημαντικά κατά μήκος αυτών. Η διαφορά αυτή μεταξύ των σεισμικών κινήσεων εντοπίζεται σε όρους πλάτους, συχνοτικού περιεχομένου, καθώς του χρόνου άφιξης των σεισμικών κυμάτων σε κάθε στήριξη. Οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται συνοψίζονται ως εξής (Der Kiureghian, 1996): (α) στην πεπερασμένη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, (β) στην απώλεια συγχρωτισμού της σεισμικής κίνησης λόγω των διαφόρων ανακλάσεων και διαθλάσεων των σεισμικών κυμάτων που συμβαίνουν κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, (γ) στις τοπικές εδαφικές συνθήκες, (δ) στη γεωμετρική εξασθένηση της σεισμικής κίνησης και (ε) στην δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους θεμελίωσης κατασκευής (A. G. Sextos, Karpos, & Pitilakis, 2003; A. G. Sextos, Pitilakis, & Karpos, 2003). Η διαφοροποίηση της σεισμικής κίνησης μεταξύ των βάρων συμβάλει καθοριστικά στην απόκριση της κατασκευής τόσο στη δυναμική (μέσω των συντελεστών ιδιομορφικής συμμετοχής Γ) όσο και στην ψευδοστατική συνιστώσα της απόκρισης (Πίνακας 1) του συζευγμένου συστήματος έδαφος-θεμελίωση-κατασκευή (Chopra, 2007).

Πίνακας 1. Σύγκριση απόκρισης υπό σύγχρονη και ασύγχρονη κίνηση.

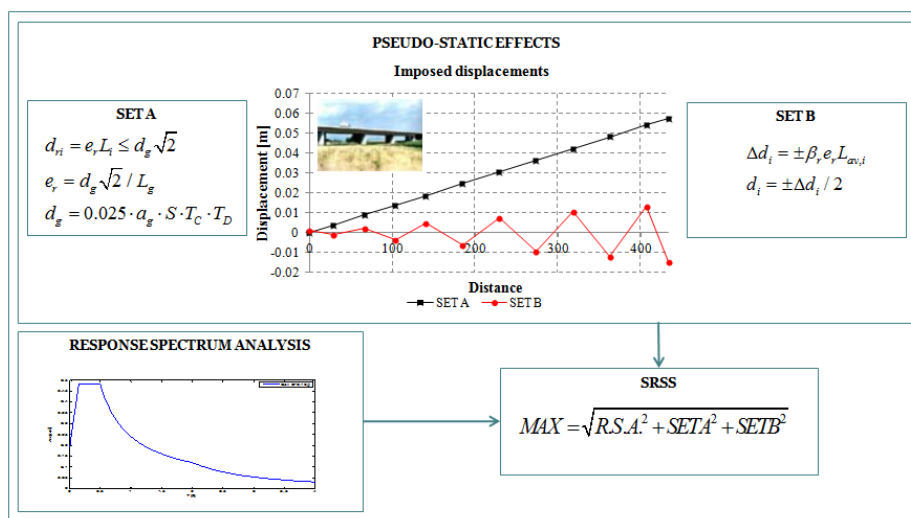
Σύγχρονη κίνηση	Ασύγχρονη κίνηση
$u(t) = \sum_{i=1}^N \Phi_i \cdot \Gamma_i \cdot D_i(t)$	$u^t(t) = \sum_{k=1}^M \{r_k\} u_{g,k}(t) + \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \Phi_i \cdot \Gamma_{i,k} \cdot D_{i,k}(t)$
$\Gamma_i = \frac{L_i}{M_i} = \frac{\Phi_i^T \mathbf{M} \mathbf{R}}{\Phi_i^T \mathbf{M} \Phi_i}$ <p>R: το διάνυσμα επιρροής {Nx1}</p>	$\Gamma_{i,k} = \frac{L_{i,k}}{M_i} = \frac{\Phi_i^T \mathbf{M} \{r_k\}}{\Phi_i^T \mathbf{M} \Phi_i}$ <p>{r_k}: η κ στήλη του [NxM] μητρώου επιρροής</p>

Για την εκτίμηση του βαθμού διαφοροποίησης της σεισμικής κίνησης από θέση σε θέση, πληθώρα μοντέλων απώλειας συγχρωτισμού έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία: (α) εμπειρικά μοντέλα (Harichandran & Vanmarcke, 1986; Harichandran, 1991; Loh & Lin, 1990), ημι-εμπειρικά μοντέλα (Der Kiureghian, 1996; Lucio & Wong, 1986) και αναλυτικά μοντέλα (Liao & Li, 2002; Zerva & Shinozuka, 1991). Επιπλέον πολλές τεχνικές προσομοίωσης σεισμικών κινήσεων έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή χωρικά μεταβλητών κινήσεων μέσω πιθανοτικών προσεγγίσεων. Η μέθοδος της φασματικής αντιπροσώπευσης για ομοιόμορφο έδαφος (Shinozuka, 1972; Zerva & Shinozuka, 1991)

ή και για διαφορετικές εδαφικές συνθήκες (Bi & Hao, 2012; Deodatis, 1996a, 1996b; Shinozuka, Saxena, & Deodatis, 2000) είναι από τις πλέον δημοφιλείς. Μέθοδοι που βασίζονται στην αποσύζευξη του μητρώου συνδυασποράς έχουν επίσης αναπτυχθεί (Hao, Oliveira, & Penzien, 1989; Katafygiotis, Zerva, & Pachakis, 1999) ενώ σε περιπτώσεις όπου καταγεγραμμένες σεισμικές κινήσεις είναι γνωστές σε μία ή περισσότερες θέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές που βασίζονται στην υπό συνθήκη προσομοίωση τυχαματικών πεδίων (Vanmarcke & Fenton, 1991).

Η ευαισθησία της απόκρισης διάφορων τύπων και μήκους γεφυρών θεμελιωμένων σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες, και υπό σεισμικές κινήσεις διαφορετικού συχνοτικού περιεχόμενου και βαθμού συσχέτισης έχει μελετηθεί. Η διερεύνηση της απόκρισης πραγματοποιείται είτε στο πεδίο των συχνοτήτων (Der Kiureghian, Keshishian, & Hakobian, 1997; Konakli & Der Kiureghian, 2011), είτε του χρόνου (Mwafy, Kwon, Elnashai, & Hashash, 2011; Soyluk & Sicacik, 2011). Τέλος πειραματικές εργασίες έχουν επίσης παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία εξετάζοντας την επιρροή της ασύγχρονης κίνησης σε ευθύγραμμες γέφυρες με τη χρήση σεισμικών τραπεζών (B. Li & Chouw, 2014; Norman, Virden, Crewe, & Wagg, 2006) ή με υβριδική προσομοίωση συνδυασμένη με την μέθοδο των υπό κατασκευών (J. Li, Spencer Jr, Elnashai, & Phillips, 2012; Pegon & Pinto, 2000).

Επομένως η πρόβλεψη της σεισμικής κίνησης κατά μήκος μιας γέφυρας με ντετερμινιστικό τρόπο καθίσταται αδύνατη λόγω της πολύ-παραμετρικότητας του φαινομένου της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής. Ταυτόχρονα η δημιουργία σύγχρονων σεναρίων κίνησης που διεγείρουν τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά της ασύγχρονης κίνησης, όπως η διέγερση των ανώτερων αντισυμμετρικών ιδιομορφών (Papadopoulos & Sextos, 2011; A. Sextos, Karakostas, Lekidis, & Papadopoulos, 2015; Tzanetos, Elnashai, Hamdan, & Antoniou, 2000), είναι ιδιαίτερα δύσκολη όπως συμβαίνει και με την εκ των προτέρων πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός φορέα γέφυρας υπό ασύγχρονη κίνηση.



Σχήμα 1. Η απλοποιημένη διαδικασία του EC8-2 για τη συνεκτίμηση της ασύγχρονης κίνησης.

Σε πρακτικό επίπεδο, οι περισσότεροι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί μολονότι αναγνωρίζουν τη σημασία των πιθανών επιπτώσεων του φαινομένου στην απόκριση των γεφυρών, προσπαθούν να το αντιμετωπίσουν έμμεσα μέσω της αύξησης του μήκους έδρασης του καταστρώματος επί των στηρίξεων. Εξάιρεση αποτελούν οι EC8-2 (CEN, 2004) και ο νέος Ιταλικός Αντισεισμικός κανονισμός (Ministero Infrastrutture, 2008) που προδιαγράφουν μία απλοποιημένη διαδικασία για τη συνεκτίμηση της επιρροής της ασύγχρονης κίνησης (ωστόσο μόνο στο επίπεδο της ψευδοστατικής

συνιστώσας), τα αποτελέσματα όμως της οποίας διαφοροποιούνται αρκετά συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα άλλων αναλυτικότερων και πιο αξιόπιστων μεθόδων (Papadopoulos, Lekidis, Sextos, & Karakostas, 2013; A. G. Sextos & Kappos, 2008).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων του φαινομένου της χωρικής μεταβλητότητας στο σχεδιασμό φορέων γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος όχι μόνο σε επίπεδο εντατικών μεγεθών ή μετακινήσεων όπως συνήθως συμβαίνει, αλλά και σε επίπεδο διαφοροποίησης του απαιτούμενου ποσοστού οπλισμού. Η μελέτη γίνεται στο πεδίο του χρόνου. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι ο τύπος του φορέα, το έδαφος και ο βαθμός συγχρωτισμού των σεισμικών κινήσεων. Τα ίδια σεισμικά σενάρια εξετάζονται και με τη χρήση της απλοποιημένης μεθόδου του EC8-2. Η εργασία ποσοτικοποιεί τη μεταβολή του απαιτούμενου ποσοστού οπλισμού στα βάρη των εξεταζομένων γεφυρών όταν ο σχεδιασμός πραγματοποιείται μέσω των απλοποιητικών διατάξεων του EC8-2 ή πιο σύνθετων μεθόδων.

Βιβλιογραφία

- Bi, K., & Hao, H. (2012). Non-linear 3D FEM Pounding Analysis of a Bridge Structure to Multi-Component Spatially Varying Ground Motions. In *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal.
- CEN. (2004). *European Standard EN1998-2. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 2: Bridges*. European Committee for Standardization. Brussels.
- Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (3rd ed.)*. Upper Saddle River, NJ: NJ: Prentice-Hal.
- Deodatis, G. (1996a). Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 11(3), 149–167. doi:10.1016/0266-8920(96)00007-0
- Deodatis, G. (1996b). Simulation of ergodic multivariate stochastic processes. *Journal of Engineering Mechanics*, 122(8), 778–787. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:8(778)
- Der Kiureghian, A. (1996). A coherency model for spatially varying ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 99–111.
- Der Kiureghian, A., Keshishian, P., & Hakobian, A. (1997). *Multiple Support Response Spectrum Analysis of Bridges Including the Site-Response Effect & the MSRS Code*.
- Hao, H., Oliveira, C. S., & Penzien, J. (1989). Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data. *Nuclear Engineering and Design*, 111, 293–310. doi:10.1016/0029-5493(89)90241-0
- Harichandran, R. S. (1991). Estimating the spatial variation of earthquake ground motion from dense array recordings. *Structural Safety*, 10, 219–233.
- Harichandran, R. S., & Vanmarcke, E. H. (1986). Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time. *Journal of Engineering Mechanics*, 112(2), 154–174.
- Katafygiotis, L. S., Zerva, A., & Pachakis, D. (1999). An efficient approach for the simulation of spatially variable motions for the seismic response of lifelines. In *Thirteenth Engineering Mechanics Conference*. Baltimore, MD.
- Konakli, K., & Der Kiureghian, A. (2011). Extended MSRS rule for seismic analysis of bridges subjected to differential support motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(12), 1315–1335. doi:10.1002/eqe.1090
- Li, B., & Chouw, N. (2014). Experimental investigation of inelastic bridge response under spatially varying excitations with pounding. *Engineering Structures*, 79, 106–116. doi:10.1016/j.engstruct.2014.08.012
- Li, J., Spencer Jr, B. F., Elnashai, A. S., & Phillips, B. M. (2012). Substructure Hybrid Simulation with Multiple-Support Excitation, (July), 867–876. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000394.
- Liao, S., & Li, J. (2002). A stochastic approach to site-response component in seismic ground motion coherency model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 813–820. doi:10.1016/S0267-7261(02)00103-3

- Loh, C. H., & Lin, S. G. (1990). Directionality and simulation in spatial variation of seismic waves. *Engineering Structures*, 12, 134–143.
- Luco, J. E., & Wong, H. L. (1986). Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, 891–908.
- Ministero Infrastrutture. (2008). *Norme Tecniche per le Costruzioni [Technical Standards for Construction]*. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*. 29:(S.O. 30) (in Italian). Rome, Italy: Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.
- Mwafy, A., Kwon, O., Elnashai, A., & Hashash, Y. (2011). Wave Passage and Ground Motion Incoherency Effects on Seismic Response of an Extended Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 16(3), 364–374.
- Norman, J., Virden, D., Crewe, A., & Wagg, D. (2006). Physical modelling of bridges subject to multiple support excitation. In *8th National Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, CA, USA.
- Papadopoulos, S. P., Lekidis, V., Sextos, A. G., & Karakostas, C. (2013). Assessment of EC8 procedures for the asynchronous excitation of bridges based on numerical analyses and recorded data. In *4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Kos Island, Greece.
- Papadopoulos, S. P., & Sextos, A. G. (2011). On the excitation of higher modes of long bridges due to spatial variability of earthquake ground motion. In *Innovations on Bridges and Soil-Bridge Interaction (IBSBI)*, Athens, October 13-15.
- Pegon, P., & Pinto, A. V. (2000). Pseudo-dynamic testing with substructuring at the ELSA Laboratory. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(7), 905–925.
- Sextos, A. G., & Kappos, A. J. (2008). Evaluation of seismic response of bridges under asynchronous excitation and comparisons with Eurocode 8-2 provisions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7, 519–545. doi:10.1007/s10518-008-9090-5
- Sextos, A. G., Kappos, A. J., & Pitilakis, K. D. (2003). 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(4), 629–652. doi:10.1002/eqe.242
- Sextos, A. G., Pitilakis, K. D., & Kappos, A. J. (2003). 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(4), 607–627. doi:10.1002/eqe.241
- Sextos, A., Karakostas, C., Lekidis, V., & Papadopoulos, S. (2015). Multiple support seismic excitation of the Evripos bridge based on free-field and on-structure recordings. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(April 2015), 1510–1523. doi:10.1080/15732479.2014.977302
- Shinozuka, M. (1972). Monte Carlo solution of structural Dynamics. *Computers & Structures*, 2, 855–874.
- Shinozuka, M., Saxena, V., & Deodatis, G. (2000). *Effect of Spatial Variation of Ground Motion on Highway Structures*.
- Soyluk, K., & Sicacik, E. A. (2011). Soil–structure interaction analysis of cable-stayed bridges for spatially varying ground motion components. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 35, 80–90. doi:10.1016/j.soildyn.2011.11.003
- Tzanetos, N., Elnashai, A. S., Hamdan, F. H., & Antoniou, S. (2000). Inelastic Dynamic Response of RC Bridges subjected to Non-Synchronous Earthquake Motion. *Advances in Structural Engineering*, 3(3).
- Vanmarcke, E. H., & Fenton, G. A. (1991). Conditioned simulation of local fields of earthquake ground motion. *Structural Safety*, 10, 247–264. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167473091900185>
- Zerva, A., & Shinozuka, M. (1991). Stochastic differential ground motion. *Structural Safety*, 10, 129–143. doi:10.1016/0167-4730(91)90010-7