

# Δυναμική συμπεριφορά της 2<sup>ης</sup> Χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας υπό ασύγχρονη σεισμική κίνηση

Α. Σέξτος

*Λέκτορας. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ*

Χ. Καρακώστας

*Δρ. Πολ. Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (Ι.Τ.Σ.Α.Κ.)*

Β. Λεκίδης

*Δρ. Πολ. Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (Ι.Τ.Σ.Α.Κ.)*

Α. Κάππος

*Καθηγητής. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ*

*Λέξεις κλειδιά: Γεφυροποιία, Χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης, Αντισεισμικός Σχεδιασμός*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Το αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η συνεκτίμηση της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης και της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών κατά τη σεισμική αποτίμηση γεφυρών από σκυρόδεμα. Για τη συνεκτίμηση των επιρροών αυτών έχει αναπτυχθεί ειδικό λογισμικό με το οποίο πραγματοποιείται η σύνθεση κατάλληλα τροποποιημένων χρονοϊστοριών σε κάθε θέση στήριξης, ως δεδομένα εισαγωγής για την ανάλυση γεφυρών στο πεδίο του χρόνου. Στο πλαίσιο των ανωτέρω, πραγματοποιείται μια υπόθεση εργασίας για τη μελέτη της επιρροής της ασύγχρονης κίνησης στη δυναμική συμπεριφορά της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας παράκαμψης της Καβάλας, η οποία αποτελεί ήδη τμήμα της Εγνατίας Οδού. Η γέφυρα αυτή, αν και σχετικά μικρού μήκους (180m) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφενός εξαιτίας της μορφολογίας του εδάφους, αφετέρου λόγω του γεγονότος ότι είναι ενοργανωμένη με ειδικό δίκτυο επιταχυνσιογράφων για την παρακολούθηση της δυναμικής της συμπεριφοράς, αλλά και λόγω του δομικού της τύπου, ο οποίος είναι αντιπροσωπευτικός μεγάλου αριθμού γεφυρών της Εγνατίας Οδού. Στο πλαίσιο αυτό διερευνάται, για διαφορετικά σενάρια εδαφικών συνθηκών και χαρακτηριστικών των προσπιπτόντων σεισμικών κυμάτων, η σχετική επιρροή των παραμέτρων χωρικής μεταβλητότητας και των (ενγένει διαφορετικών σε κάθε θέση) εδαφικών συνθηκών. Παράλληλα, πραγματοποιείται η σύγκριση με τις διατάξεις υφισταμένων αντισεισμικών κανονισμών και διερευνώνται οι συνθήκες υπό τις οποίες είναι δυνατή η αποφυγή συνεκτίμησης της ασύγχρονης κίνησης κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών είναι ιδιαίτερα σύνθετη υπό ασύγχρονη σεισμική διέγερση και πως αν και γενικά το φαινόμενο είναι περισσότερο περιορισμένο στις περιπτώσεις γεφυρών μικρού μήκους, εντούτοις, η έντονη διαφοροποίηση των εδαφικών συνθηκών μπορεί, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, να διαφοροποιήσει δυσμενώς τη σεισμική συμπεριφορά τους.

## 1 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 (συνά) 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 από Ο/Σ 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. Πρόκειται για ένα πρόβλημα εξόχως πολυπαραμετρικό και πολύπλοκο (fib, 2006) καθώς άπτεται ουσιαστικά του τυχηματικού χαρακτήρα της σεισμικής διέγερσης η οποία διαφοροποιείται σημαντικά κατά μήκος του άξονα της γέφυρας από άποψη πλάτους, συχνοτικού περιεχομένου και χρόνου άφιξης. Οι χωρικές και χρονικές αυτές διαφοροποιήσεις οφείλονται σε τέσσερις παράγοντες (Der Kiureghian et al., 1996): α) η προσπίπτουσα σεισμική κίνηση παρουσιάζει απώλεια του συγχρωτισμού της, δηλαδή της «ομοιότητάς» της, εξαιτίας διαδοχικών ανακλάσεων, διαθλάσεων και επαλληλιών, β) τα σεισμικά κύματα αφικνούνται σε κάθε θέση στήριξης με διαφορά φάσης καθώς διαδίδονται με πεπερασμένη ταχύτητα, γ) οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μεταβάλλουν το πλάτος και το συχνοτικό περιεχόμενο της κίνησης, ειδικά όταν το εδαφικό προφίλ δια μέσου του οποίου αυτή διαδίδεται διαφοροποιείται με την απόσταση, δ) η σεισμική κίνηση εξασθενεί λόγω της γεωμετρικής εξάπλωσης του μετώπου του κύματος και της απώλειας κυματικής ενέργειας.

Εκτός των παραπάνω σημαντικών ζητημάτων, ο σεισμικός κραδασμός διαφοροποιείται επιπρόσθετα εξαιτίας του γεγονότος ότι η θεμελίωση, ανάλογα με τη σχετική δυσκαμψία της προς το έδαφος, δεν μπορεί να αποδώσει το πεδίο μετακινήσεων που το τελευταίο εισάγει, φαινόμενο που είναι γνωστό ως κινηματική αλληλεπίδραση. 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., 1997, Sextos et al., 2003a, Nuti & Vanzi, 2005, Lupo et al., 2005, Lou & Zerva, 2005) και συνεπώς δεν 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 την 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 περιορισμένες (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.

Επιπλέον, είναι τέτοια η ανομοιομορφία των παραδοχών και των αποτελεσμάτων ώστε τα εξαγόμενα συμπεράσματα έχουν μόνο μερικώς υιοθετηθεί από τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς. Πράγματι, δεν υπάρχει σύγχρονος αντισεισμικός κανονισμός ο οποίος να προτείνει μια ενιαία μεθοδολογία όπου οι διαφορικές μετακινήσεις του καταστρώματος των γεφυρών ανωδομής να υπολογίζονται ως συνάρτηση φαινομένων χωρικής μεταβλητότητας, επιρροής τοπικών εδαφικών συνθηκών και αλληλεπίδρασης εδάφους-ανωδομής. Οι σύγχρονοι Κανονισμοί είτε αντιμετωπίζουν το πρόβλημα μέσω πρακτικών οδηγιών για το πλάτος έδρασης του καταστρώματος (AASHTO, 1996, ATC 32) είτε παρέχουν γενικόλογες συστάσεις (ATC/MCEER, 2003), είτε αγνοούν το πρόβλημα τελείως (Japanese Design Specifications of Highway Bridges, 2000). Εξάιρεση αποτελεί ο Ευρωκώδικας 8 – Μέρος 2 για γέφυρες (CEN, European Committee for Standardization, 2004) ο οποίος στην πρόσφατη αναθεώρησή του, παρέχει αναλυτικές και προσεγγιστικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των αναμενόμενων σχετικών μετακινήσεων μεταξύ γειτονικών βάθρων καθώς και ένα ενημερωτικό παράρτημα για την πραγματοποίηση αναλύσεων χωρικής μεταβλητότητας, Πέραν των προτεινόμενων διαδικασιών όμως, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον το γεγονός ότι μειώθηκε σε σημαντικό βαθμό η οριακή τιμή του συνολικού μήκους γέφυρας για την οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ζητήματα χωρικής μεταβλητότητας της

σεισμικής κίνησης, η οποία ήταν 600m (Sextos & Kappos, 2005, Sextos 2005). Εν προκειμένω, προδιαγράφεται ότι το ζήτημα θα πρέπει να συνεκτιμάται για συνεχείς γέφυρες, ακόμη και αν αυτές είναι σχετικά μικρού συνολικού μήκους ( $L_{lim} = L_g/1.5 > 200-400m$ ), ιδιαίτερα όταν το έδαφος θεμελίωσης είναι μαλακό (Πίνακας 1), ή σε περιπτώσεις όπου οι εδαφικές συνθήκες αντιστοιχούν σε περισσότερες από μια εδαφικές κατηγορίες. Σκοπός της παρούσας εργασίας συνεπώς και με βάση τις διατάξεις αυτές, είναι η μελέτη μιας *πραγματικής γέφυρας*, με συνολικό μήκος μικρότερο των 200m, προκειμένου:

α) να επαληθευθεί το γεγονός ότι για μικρού μήκους γέφυρες θεμελιωμένες επί ομοιόμορφου εδάφους, η διαφοροποίηση της κίνησης εξαιτίας της διαφοράς φάσης και της απώλειας συγχρωτισμού δεν επηρεάζει τη συνολική δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, και

β) να διερευνηθεί και να ποσοτικοποιηθεί ο βαθμός ευαισθησίας (από άποψη ασύγχρονης διέγερσης) των μικρών γεφυρών σε περιπτώσεις όπου το έδαφος διαφοροποιείται σημαντικά κατά μήκος του άξονά τους.

Για τον σκοπό αυτόν επιλέγεται η 2<sup>η</sup> χαραδρογέφυρα της Καβάλας, η οποία είναι μεν σχετικά μικρού της μήκους, παρουσιάζει ωστόσο έντονη υψομετρική διαφορά μεταξύ των βάθρων, και κυρίως, διότι ενόργανες μετρήσεις μικροθορύβου παρουσιάζουν ενδείξεις διαφοροποίησης της κίνησης μεταξύ της βάσης του κεντρικού βάθρου και του ακροβάθρου (Ν. Θεοδουλίδης, προσωπική επικοινωνία, 2006), γεγονός που αναμένεται να επιβεβαιωθεί με την μελλοντική καταγραφή και κάποιου σεισμικού συμβάντος. Το πρόγραμμα ενοργάνωσης γίνεται με την επίβλεψη του ΙΤΣΑΚ σε συνεργασία με την Εγνατία Οδό Α.Ε. στα πλαίσια σχετικού ερευνητικού προγράμματος που βρίσκεται υπό εξέλιξη. Σημειώνεται επίσης ότι ο δομικός τύπος της γέφυρας συναντάται σε μεγάλο αριθμό άλλων γεφυρών της Εγνατίας οδού, ενώ η εν λόγω γέφυρα έχει το μεγαλύτερο κατασκευασμένο μήκος ανοίγματος για το δεδομένο τύπο γέφυρας (με προεντεταμένες – προκατασκευασμένες δοκούς), καθιστώντας ιδιαίτερα ενδιαφέρονσα τη μελέτη της συμπεριφοράς της σε ασύγχρονη σεισμική κίνηση. Η μελέτη πραγματοποιείται αναλυτικά, για διαφορετικά σενάρια σεισμικής διέγερσης και μεθόδους σύνθεσης της ασύγχρονης κίνησης καθώς και για διαφορετικές (υποθετικές) περιπτώσεις εδαφικής διαστρωμάτωσης. Παράλληλα, η επιλογή της συγκεκριμένης γέφυρας δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης μελλοντικά της αναλυτικώς εκτιμώμενης σεισμικής απόκρισης, με πραγματικές μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο της ενδεδειγμένης ενοργάνωσης της ανωδομής και της θεμελίωσης (Lekidis et al., 1999, Lekidis et al., 2004, Karamanos et al., 2004, Karakostas et al., 2006). Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αποτίμησης που πραγματοποιείται περιγράφονται στις ενότητες που ακολουθούν.



Σχήμα 1. Γενική άποψη της 2ης Χαραδρογέφυρας παράκαμψης Καβάλας (Εγνατία Οδός)

## 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

### 2.1 Γενικά

Η 2η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας ανήκει στο Τμήμα 13.7 της Εγνατίας Οδού. Αποτελείται από δύο όμοιους, στατικά ανεξάρτητους κλαδους, έναν ανά κατεύθυνση. Το κατάστρωμα κάθε κλάδου αποτελείται από τέσσερα ανοίγματα, το καθένα από τα οποία διαμορφώνεται από 4 προκατασκευασμένες, προεντεταμένες δοκούς ανοίγματος 45 m, οι οποίες εδράζονται μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων σε τρία μεσόβαθρα (B1, B2, B3) κοίλης τετραγωνικής διατομής και στα δύο ακρόβαθρα (A1, A2). Οι δοκοί των ανοιγμάτων συνδέονται με επί τόπου σκυροδετούμενη πλάκα καταστρώματος η οποία συνεχίζει χωρίς αρμό άνωθεν των μεσοβάθρων, διαμορφώνοντας συνεχές κατάστρωμα πλάτους 13 m και μήκους περίπου 180 m. Τα μεσόβαθρα έχουν κατασκευασθεί με επιτόπου έγχυση (τεχνική ολισθαίνοντος ξυλοτύπου), ενώ θεμελιώνονται με φρέατα στο υπόβαθρο. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο νοτιότερος εκ των δύο κλάδων, ο οποίος και έχει εννοργανωθεί. Η γενική άποψη της γέφυρας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

### 2.2 Προσομοίωση της Γέφυρας

Η συνδεσμολογία του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η προσομοίωση έγινε από το ΙΤΣΑΚ με τη χρήση του λογισμικού SAP2000 Nonlinear (Λεκίδης et al., 2003) με τη θεώρηση της ενεργοποίησης των διατμητικών συνδέσμων και τη χρήση των 2/3 της δυσκαμψίας των βάθρων για την περίπτωση ανάλυσης σε σεισμό. Για την προσομοίωση των βάθρων χρησιμοποιήθηκαν κατακόρυφα στοιχεία δοκού, ενώ τα βάθρα θεωρήθηκαν (πρακτικώς) πακτωμένα στην θεμελίωση, με βάση τα δεδομένα της εδαφοτεχνικής μελέτης που χρησιμοποιεί ο μελετητής (θεμελίωση με φρέατα). Η ανωδομή προσομοιώθηκε με στοιχεία δοκού σε διάταξη εσχάρας (ισοδύναμη εσχάρα). Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκαν οι τέσσερις κύριες δοκοί καθώς και οι διαδοκίδες στα άκρα των ανοιγμάτων (Σχήμα 2). Τα ελαστομεταλλικά εφείδρανα προσομοιώθηκαν ως ισοδύναμες ράβδοι με γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να παρέχουν την ίδια διατμητική ακαμψία με τα πραγματικά, ενώ δεν λήφθηκε υπόψη η σχετικά μικρή στροφική τους δυσστησία (Σχήμα 3). Οι ράβδοι των εφεδράνων συνδέουν το κέντρο βάρους της ανωδομής με τη (θεωρούμενη ως άκαμπτη) δοκό έδρασης στην κεφαλή των βάθρων.

## 3 ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΩΡΙΚΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ

### 3.1 Σενάρια σεισμικής διέγερσης

Προκειμένου να διερευνηθεί ο βαθμός στον οποίο η δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών επηρεάζεται από την πολυπλοκότητα της ανάλυσης και τους διαφορετικούς συνδυασμούς συνεκτίμησης της χωρικής μεταβλητότητας της σεισμικής κίνησης και των τοπικών εδαφικών συνθηκών, διαμορφώνονται διαφορετικά σενάρια διέγερσης για την υπό εξέταση γέφυρα.

Πίνακας 1. Οριακές τιμές συνολικού μήκους γεφυρών για τις οποίες απαιτείται συνεκτίμηση της επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας κατά τις νέες διατάξεις του Ευρωκώδικα 8-2

Εδαφικές κατηγορίες κατά Ευρωκώδικα (EC) 8	A	B	C	D	E
Ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων $V_s$ εδαφικών κατηγοριών κατά EC8 (m/sec)	>800	360- 800	180- 360	<180	100- 360
Αντιστοιχία εδαφικών κατηγοριών κατά ΕΑΚ2000*	A-B	B	B-Γ	Δ-X	B-Γ
Οριακό μήκος $L_g$ (m) κατά EC8	600	500	400	300	500
Οριακό μήκος $L_{lim}$ (m) = $L_g/1.5$ κατά EC8	400	333	266	200	333

\* Εκτίμηση

Σημειώνεται ότι στόχος της παρούσης εργασίας είναι η παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων σε γέφυρες με παρόμοιο δομικό τύπο και γεωμετρία με την επιλεχθείσα αντιπροσωπευτική γέφυρα, παρά η εξέταση της συγκεκριμένης γέφυρας για τις επιτόπου επικρατούσες εδαφικές και λοιπές συνθήκες. Εν προκειμένω, τα σενάρια σεισμικής διέγερσης (θεωρούμενης κατά την εγκάρσια διεύθυνση) που θεωρούνται στην παρούσα εργασία έχουν ως ακολούθως:

α) *Απολύτως σύγχρονη σεισμική κίνηση (4 σενάρια)*: Για λόγους σύγκρισης και ως ένα μέτρο αναφοράς μεταξύ των διαφόρων αναλύσεων, ορίζεται η απλούστερη και πλέον διαδεδομένη στην πράξη προσέγγιση ανάλυσης η οποία θεωρεί πως η κατασκευή είναι πλήρως πακτωμένη στις βάσεις των βάρων και διεγείρεται με απολύτως ομοιόμορφο και σύγχρονο τρόπο. Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες λαμβάνονται έμμεσα υπόψη μέσω του (ενιαίου) ελαστικού φάσματος κατά ΕΑΚ2000. Κατά συνέπεια, συντίθενται με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού αναπτυχθέντος από το Α.Π.Θ. (ASING - Sextos et al., 2003a) τέσσερα βασικά επιταχυνσιογραφήματα αναφοράς, των οποίων το φάσμα απόκρισης προσεγγίζει το στοχευόμενο φάσμα του Κανονισμού (Σχήμα 4) για τις αντίστοιχες τέσσερις βασικές εδαφικές κατηγορίες (Α, Β, Γ, και Δ) που εξετάζονται παραμετρικά στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Σημειώνεται ότι το στοχευόμενο φάσμα που ελήφθη υπόψη στην παρούσα εργασία αντιστοιχεί σε τιμή μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης 0.24g και συντελεστή σπουδαιότητας 1.3.

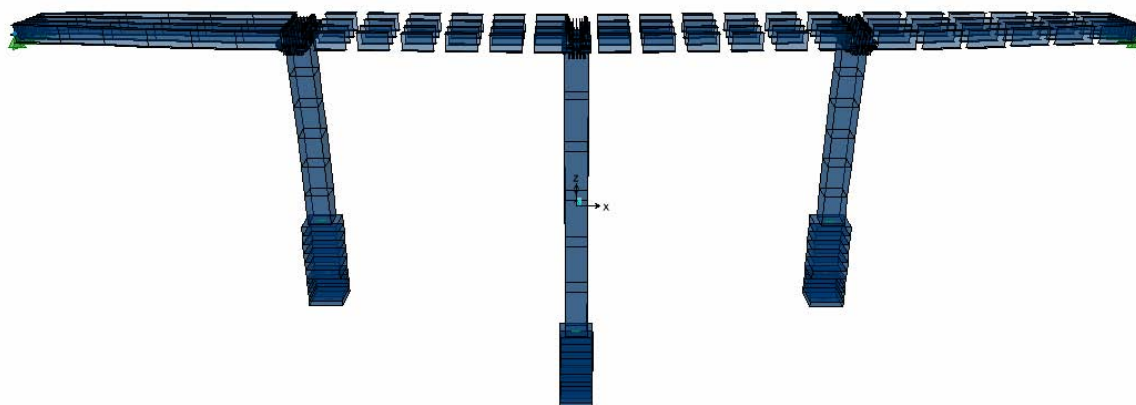
β) *Διάδοση σταθερής κυματομορφής με σταθερή ταχύτητα εντός ομοιόμορφου εδάφους (4 σενάρια)*: Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι τα ανωτέρω συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα που παρήχθησαν για τις τέσσερις διαφορετικές εδαφικές κατηγορίες διαδίδονται εντός του εδαφικού μέσου και κατά μήκος του άξονα της γέφυρας με σταθερή (φαινόμενη) ταχύτητα η οποία ισούται με 1000 m/sec, έτσι ώστε η χρονική στιγμή άφιξής τους στις θέσεις στήριξης να διαφέρει κατά μια διαφορά φάσης  $\Delta t = 45 \text{ (m)} / 1000 \text{ (m/sec)} = 0.045 \text{ sec}$ . Σημειώνεται βέβαια, ότι αν και η συγκεκριμένη προσέγγιση της ασύγχρονης κίνησης, ως η πλέον απλή, είναι διαδεδομένη στην πράξη, εντούτοις αγνοεί σημαντικές παραμέτρους της σεισμικής κίνησης του εδάφους και οδηγεί συχνά σε μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με περισσότερο ακριβέστερες λύσεις (Sextos et al., 2005). Επιπρόσθετα, είναι αυτονόητο πως εξαιτίας του μικρού μήκους της γέφυρας αναμένεται ότι η επιρροή της συγκεκριμένης θεώρησης θα είναι μικρή, παρά τη χρήση εδώ σχετικά χαμηλής τιμής φαινόμενης ταχύτητας (η οποία υπενθυμίζεται ότι είναι εξ' ορισμού πολύ μεγαλύτερη της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων). Παρόλα αυτά, η απλουστευτική αυτή προσέγγιση συμπεριλαμβάνεται στα σενάρια συγκριτικής διέγερσης της κατασκευής ακριβώς λόγω της εκτεταμένης χρήσης της σε πρακτικό επίπεδο. Ενδεικτική μεταβολή των διαφορετικών σε κάθε θέση στήριξης χρονοϊστοριών μετακίνησης για την περίπτωση θεώρησης ομοιόμορφου εδάφους Α κατά ΕΑΚ2000 δίνεται στο Σχήμα 5.

γ) *Διάδοση σεισμικής κίνησης συνεκτιμώντας ταυτόχρονα τη διαφορά φάσης και την απώλεια συγχρωτισμού (4 σενάρια)*: Αυξάνοντας σταδιακά την πολυπλοκότητα της ανάλυσης πραγματοποιείται η σύνθεση χωρικά μεταβλητών σεισμικών κινήσεων όπου εκτός της διαφοράς φάσης λαμβάνεται υπόψη η απώλεια του συγχρωτισμού των σεισμικών κυμάτων εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων, διακλάσεων και επαλληλιών που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοσή τους εντός του εδαφικού μέσου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, γίνεται η θεώρηση ότι οι σεισμικές κινήσεις παρουσιάζουν απώλεια της συνάφειας (συγχρωτισμού) τους με την απόσταση και τη συχνότητα σύμφωνα με το μοντέλο των Lucio & Wong (1986). Ενδεικτική μεταβολή των διαφορετικών σε κάθε θέση στήριξης χρονοϊστοριών μετακίνησης για την περίπτωση θεώρησης ομοιόμορφου εδάφους Β κατά ΕΑΚ2000 δίνεται στο Σχήμα 6.

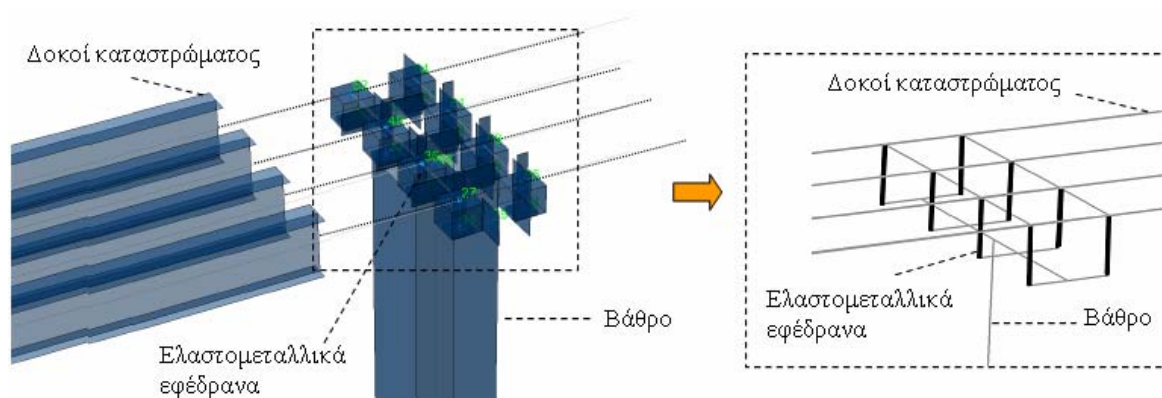
δ) *Σύνθεση χωρικά μεταβλητών σεισμικών κινήσεων διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου – Περίπτωση χωρικής μεταβολής των εδαφικών ιδιοτήτων (4 σενάρια)*: Πρόκειται για την περισσότερο ρεαλιστική υπόθεση ότι η γέφυρα δεν κατασκευάζεται επί του (ομοιόμορφου) εδάφους των περιπτώσεων α, β, και γ αλλά επί εδάφους που διαφοροποιείται κατά μήκος του

άξονα της γέφυρας. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται ακριβώς προκειμένου να διερευνηθεί ο βαθμός στον οποίον δυναμικά επηρεάζεται η ευαισθησία μικρού μήκους γεφυρών από την ασύγχρονη κίνηση όταν το έδαφος θεμελίωσης των βάθρων και των μεσοβάθρων είναι διαφορετικό. Σημειώνεται ότι για λόγους απλούστευσης αλλά και ευκολότερης αποτίμησης των αποτελεσμάτων, δεν ελήφθησαν τυχαίες περιπτώσεις εδαφικής διαφοροποίησης αλλά κατά ΕΑΚ2000 εδάφη κατηγορίας Α,Β,Γ και Δ, τα οποία θεωρήθηκε ότι διαφοροποιούνται κατά μήκος του άξονα της γέφυρας με βάση δύο εύλογες παραδοχές, ότι α) εντός 180m είναι δυνατή η ύπαρξη μιας, ή, ως ακραία περίπτωση, δύο διαφοροποιήσεων των εδαφικών κατηγοριών, και ότι β) το έδαφος θεμελίωσης είναι σκληρότερο στις θέσεις των ακροβάθρων και (σχετικά) μαλακότερο στα μεσόβαθρα, ειδικότερα δε, στο μεσόβαθρο Β2. Η διαδοχή συνεπώς των εδαφικών σχηματισμών μεταξύ των πέντε θέσεων στήριξης που εξετάστηκε αντιστοιχεί στις περιπτώσεις Α-Α-Β-Α-Α, Β-Β-Γ-Β-Β, Γ-Γ-Δ-Γ-Γ και Β-Γ-Δ-Γ-Β.

Επισημαίνεται επίσης πως στην περίπτωση ύπαρξης μαλακών σχηματισμών, συνεκτιμήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αποκλειστικά η επιρροή του εδάφους στο συχνοτικό περιεχόμενο της (χωρικά μεταβλητής) σεισμικής κίνησης και όχι το ζήτημα της αλληλεπίδρασης εδάφους-ανωδομής και της συνακόλουθης μεταβολής των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος διότι έχειδειχθεί (Sextos et al., 2003b) ότι υπάρχει μεγάλος βαθμός σύζευξης μεταξύ των δύο αυτών φαινομένων και συνεπώς θα καθίστατο δυσχερής η απομόνωση της σχετικής επιρροής της χωρικής μεταβλητότητας για την αποτίμηση των νέων διατάξεων του Ευρωκώδικα 8 περί της σημασίας της ύπαρξης διαδοχικών εδαφικών σχηματισμών κατά μήκος της γέφυρας.

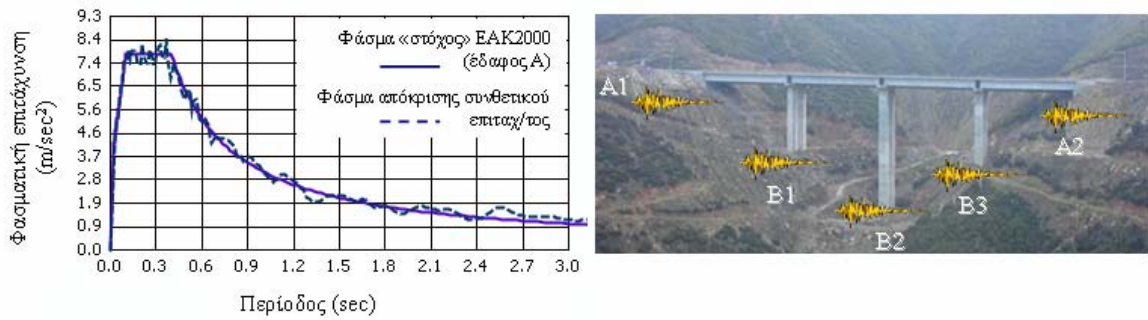


Σχήμα 2. Γενική μορφή διακριτοποίησης του φορέα



Σχήμα 3. Λεπτομέρεια προσομοίωσης σύνδεσης καταστρώματος με τα βάθρα μέσω εφεδράνων

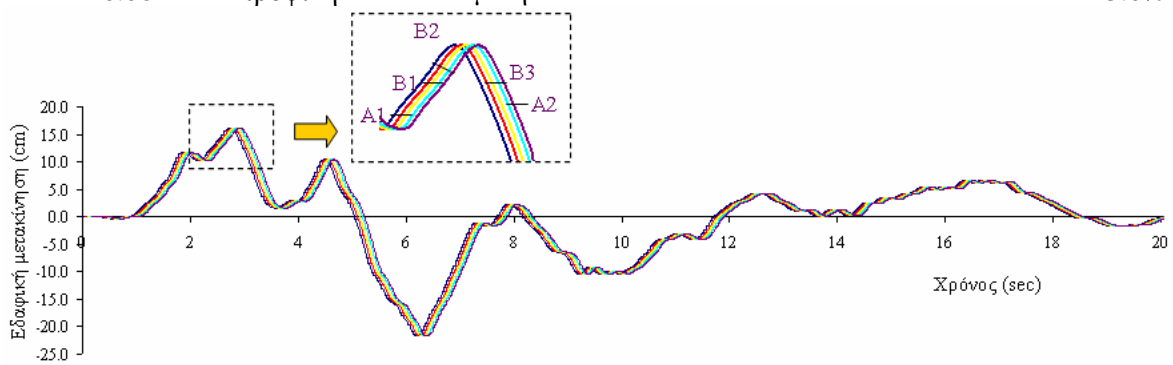




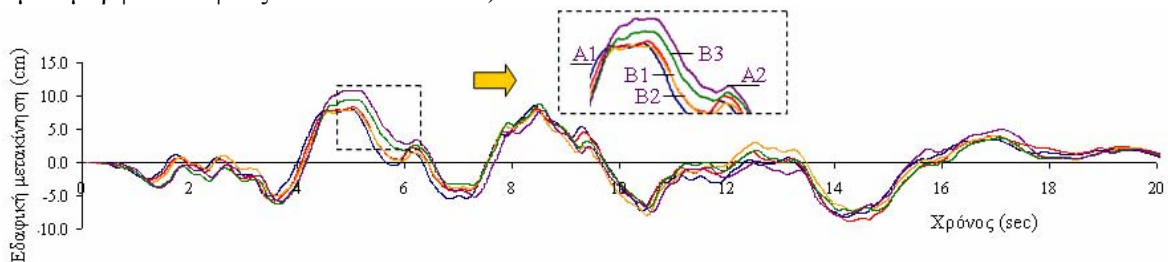
Σχήμα 4. Σύγκριση φάσματος απόκρισης συνθετικού επιταχυνσιογραφήματος με το φάσμα «στόχος» κατά ΕΑΚ2000, για την περίπτωση εδάφους κατηγορίας Α.

Πίνακας 2. Σημαντικές ιδιομορφές γέφυρας και συντελεστές συμμετοχής ανά διεύθυνση

A/A	T(sec)	Ταλάντωση	Συμμετρία	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	1.530	Εγκάρσια	Συμμετρική		34.9%		68.8%		
2	0.928	Εγκάρσια	Αντισυμ/κή						27.6%
3	0.768	Εγκάρσια	Συμμετρική		2.1%		4.3%		
4	0.214	Διαμήκης	Αντισυμ/κή	42.3%					
6	0.108	Κατακόρυφη	Συμμετρική			47.3%			
10	0.061	Εγκάρσια	Συμμετρική		4.9%		9.7%		5.1%
11	0.061	Στροφική	Αντισυμ/κή						23.0%



Σχήμα 5. Μεταβολή των εδαφικών μετακινήσεων με το χρόνο για την περίπτωση της απλουστευτικής θεώρησης διαφοράς φάσης στο χρόνο άφιξης της σεισμικής κίνησης (θεώρηση ομοιόμορφου εδάφους Α κατά ΕΑΚ2000)



Σχήμα 6. Μεταβολή των εδαφικών μετακινήσεων με το χρόνο για την περίπτωση της θεώρησης διαφοράς φάσης στον χρόνο άφιξης της σεισμικής κίνησης και απώλειας συγχρωτισμού των σεισμικών κυμάτων (θεώρηση ομοιόμορφου εδάφους Β κατά ΕΑΚ2000).

#### 4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με βάση τα σενάρια σεισμικής διέγερσης που περιγράφησαν παραπάνω, στους Πίνακες 3 ως 6 συνοψίζεται η σχετική επιρροή της θεώρησης των διαφόρων παραμέτρων της ασύγχρονης κίνησης (διαφορά φάσης, απώλεια συγχρωτισμού, τοπικές εδαφικές συνθήκες). Τα αποτελέσματα είναι ομαδοποιημένα και αντιστοίχως κανονικοποιημένα ως προς τις μετακινήσεις και τα εντατικά μεγέθη (ροπές κάμψης στη βάση των βάθρων) για τις τέσσερις περιπτώσεις ομοιόμορφου εδαφικού προφίλ (Α, Β, Γ και Δ) κατά ΕΑΚ2000 και τη θεώρηση της σύγχρονης κίνησης. Κατά συνέπεια, όταν ο λόγος της απόκρισης υπό ασύγχρονη προς την απόκριση υπό σύγχρονη σεισμική διέγερση, υπερβαίνει τη μονάδα, τότε η θεώρηση ασύγχρονης κίνησης κρίνεται δυσμενής ως προς το μέγεθος απόκρισης που εξετάζεται, αντίθετα, όταν ο λόγος είναι μικρότερος της μονάδας, τότε η θεώρηση της ασύγχρονης κίνησης κρίνεται ευμενής.

##### 4.1 *Επιρροή της ασύγχρονης κίνησης στις εγκάρσιες μετακινήσεις*

Από τη συγκριτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης προκύπτει ότι ανεξαρτήτως του (ομοιόμορφου) εδάφους, η επιρροή της διαφοράς φάσης στις εγκάρσιες μετακινήσεις των βάθρων είναι ελάχιστη (δεν υπερβαίνει το 3%), γεγονός που όπως προαναφέρθηκε είναι απόλυτα αναμενόμενο λαμβάνοντας υπόψη το μικρό μήκος της γέφυρας και την αναλόγως μικρή χρονική υστέρηση άφιξης του σεισμικού κραδασμού. Όταν όμως, εκτός της διαφοράς φάσης συνεκτιμάται και η απώλεια συγχρωτισμού των σεισμικών κυμάτων, τότε η συμπεριφορά της γέφυρας στη χωρικά μεταβλητή σεισμική κίνηση εξαρτάται από το είδος του ομοιόμορφου εδάφους. Εν προκειμένω, παρατηρείται είτε μείωση των εγκαρσίων μετακινήσεων των βάθρων (κατά 6% για έδαφος κατηγορίας Β) είτε αύξηση αυτών (έως και 14% για έδαφος κατηγορίας Α). Η διαφορά αυτή πάντως δεν κρίνεται σημαντική (στο πλαίσιο των γνωστών αβεβαιοτήτων του αντισεισμικού σχεδιασμού), γεγονός που επιβεβαιώνει τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 αναφορικά με τη δυνατότητα αγνόησης της χωρικής μεταβλητότητας σε γέφυρες μικρού μήκους (<200m) θεμελιωμένων επί οιοδήποτε εδάφους, αρκεί αυτό να είναι ομοιόμορφο.

Από την άλλη, όταν το εδαφικό προφίλ διαφοροποιείται μεταξύ των θέσεων στήριξης, τότε πράγματι, παρατηρείται σημαντική μεταβολή των εγκαρσίων μετακινήσεων της κεφαλής των τριών βάθρων σε σχέση με τις αντίστοιχες οι οποίες υπολογίστηκαν με την υπόθεση της ενιαίας (και σύγχρονης) σεισμικής διέγερσης. Συγκεκριμένα, οι μετακινήσεις είτε αυξήθηκαν έως και κατά 21% (έδαφος κατηγορίας Α) είτε μειώθηκαν έως κατά 40% (για έδαφος κατηγορίας Β). Αυτή η (μάλλον ευμενής) επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών επί της δυναμικής συμπεριφοράς ακόμα και μικρού μήκους γεφυρών, έχει παρατηρηθεί και στη διεθνή βιβλιογραφία (Simeonov et al., 1997, Tubino et al., 2003, Sextos et al., 2005) ερμηνεύεται δε φυσικά, ως παρεμπόδιση της κατασκευής να ταλαντωθεί στη θεμελιώδη της συχνότητα.

##### 4.2 *Επιρροή της ασύγχρονης κίνησης στα εντατικά μεγέθη*

Από τη μελέτη της επιρροής της ασύγχρονης κίνησης επί των εντατικών μεγεθών της γέφυρας της Καβάλας, όπως αυτή συνοψίζεται στους Πίνακες 3 ως 6, προκύπτει ότι αντίθετα προς ό,τι συμβαίνει από άποψη μετακινήσεων, η ύπαρξη ενός μαλακότερου εδαφικού προφίλ στο μέσο της χαραδρογέφυρας (κάτι που είναι σχετικά σύνηθες) είναι δυνατόν να οδηγήσει σε σημαντικές τοπικού χαρακτήρα εντάσεις. Εν προκειμένω, παρατηρείται μια συστηματική επιβάρυνση του κεντρικού βάθρου (το οποίο υποτίθεται σε όλες τις περιπτώσεις ότι είναι θεμελιωμένο επί του πλέον χαλαρού εδαφικού σχηματισμού) η οποία είναι 135%, 140%, 53% και 36% αντίστοιχα για τις τέσσερις βασικές κατηγορίες εδάφους (Α,Β,Γ και Δ). Η ύπαρξη πρόσθετων ψευδοστατικών (κυρίως) εντάσεων επί της κατασκευής, είναι ασφαλώς αναμενόμενη καθώς έχει παρατηρηθεί και σε άλλες περιπτώσεις (Zerva, 1990, Der Kiureghian, 1996, Price & Eberhard, 1998, Sextos et al., 2003b), αποκτά όμως ιδιαίτερη σημασία όταν παρατηρείται στο πλαίσιο μελέτης μιας πραγματικής



γέφυρας. Σημειώνεται πάντως ότι το είδος και το μέγεθος των ψευδοστατικών δυνάμεων που αναπτύσσονται καθώς και το εάν τελικώς αυτές θα υπερκεράσουν την (πιθανώς) μειωμένη ένταση εκ της δυναμικής ταλάντωσης του φορέα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ίδιο το στατικό σύστημα. Για παράδειγμα, σε ορισμένες περιπτώσεις (Lou & Zerva, 2005) έχει παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση ακόμη και του αξονικού φορτίου του καταστρώματος. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης κρίνεται ότι επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό για την περίπτωση μιας πραγματικής γέφυρας, όσα βιβλιογραφικώς έχουν παρατηρηθεί για πληθώρα εξιδανικευμένων αλλά και ορισμένων πραγματικών γεφυρών. Θα πρέπει τέλος να αναφερθεί ότι δεν υπήρξε ούτε μια περίπτωση από όσες εξετάστηκαν για την εν λόγω γέφυρα, για την οποία η υπόθεση της ασύγχρονης κίνησης να μετέβαλε με ενιαίο τρόπο όλες τις μετακινήσεις και όλα τα εντατικά μεγέθη που υπολογίστηκαν (είτε ευμενώς είτε δυσμενώς). Επιπρόσθετα, όπως έχει παρατηρηθεί και σε άλλες περιπτώσεις (Sextos et al., 2004) προκύπτει ότι η αυξημένη μεταβλητότητα της εισερχόμενης στην κατασκευή σεισμικής κίνησης δεν οδηγεί υποχρεωτικά στην κατ' αναλογία δυσμενή μεταβολή των μεγεθών έντασης και παραμόρφωσης.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας μελετάται η ευαισθησία της δυναμικής απόκρισης γεφυρών Ο/Σ μικρού σχετικά μήκους σε παραμέτρους που σχετίζονται με τη χωρική μεταβλητότητα της σεισμικής κίνησης και την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Με τον τρόπο αυτόν επιδιώκεται η αποτίμηση των νέων διατάξεων του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 2 για τις γέφυρες σε ό,τι αφορά τον προσδιορισμό της οριακής τιμής του συνολικού μήκους μιας γέφυρας πέραν της οποίας επιβάλλεται η προσεγγιστική ή διεξοδική αντιμετώπιση της ασύγχρονης κίνησης, για την περίπτωση τόσο ομοιόμορφου όσο και διαφορετικού σε κάθε θέση εδαφικού προφίλ κατά μήκος της γέφυρας. Για τη μελέτη του προβλήματος αυτού, επιλέγεται η 2<sup>η</sup> Χαραδρογέφυρα είναι μεν μικρού μήκους, εντούτοις παρουσιάζει σημαντική ανομοιομορφία ως προς το ύψος των βάθρων αλλά και τη γενικότερη μορφολογία του εδάφους.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάζονται εδώ, καταδεικνύουν ότι, πράγματι, για την περίπτωση γεφυρών παρόμοιου μήκους θεμελιωμένων επί ομοιόμορφου εδάφους, η συνεκτίμηση του ασύγχρονου χαρακτήρα της σεισμικής κίνησης έχει μικρή (και συνήθως ευνοϊκή) επιρροή στις εγκάρσιες μετακινήσεις του φορέα, ενώ ταυτόχρονα δεν οδηγεί σε ουσιαστικές αυξήσεις των εντατικών μεγεθών. Αντίθετα, και σε συμφωνία με τις νέες διατάξεις του Ευρωκώδικα 8, η εικόνα δείχνει να αντιστρέφεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες εδαφικής ανομοιομορφίας, οπότε και παρατηρείται σημαντική συγκέντρωση (κυρίως ψευδοστατικών) δυνάμεων σε ορισμένα δομικά στοιχεία του φορέα. Κατά συνέπεια συμπεραίνεται ότι ακόμη και στην περίπτωση μικρού μήκους γεφυρών, όταν συντρέχουν ειδικές συνθήκες τοπογραφίας και εδαφικής διαστρωμάτωσης κατά μήκος του άξονα της γέφυρας, θα πρέπει αυτή να σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη ζητήματα χωρικής διαφοροποίησης της σεισμικής κίνησης, τοπικών εδαφικών συνθηκών και αλληλεπίδρασης του εδάφους με τη θεμελίωση και την ανωδομή.

Πίνακας 3. Σύγκριση μετακινήσεων κεφαλής και ροπών κάμψης βάσης βάθρων για διάφορα σενάρια σεισμικής διέγερσης (Έδαφος Α)

Έδαφος Α	Μετακινήσεις κεφαλής βάθρου				Ροπές βάσης βάθρου				
	Κίνηση	B1	B2	B3	μ.ο.	M1	M2	M3	μ.ο.
Σύγχρονη	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
θ	0.97	0.99	1.02	0.99	1.06	0.99	0.90	0.98	
γ+θ	1.03	1.07	1.14	1.08	0.89	0.88	0.85	0.88	
A-A-B-A-A	1.11	1.16	1.21	1.16	1.07	2.35	1.11	1.51	

\* θ: μόνο διαφορά φάσης, γ+θ: διαφορά φάσης και απώλεια συγχρωτισμού, A-A-B-A-A: Διαδοχή εδαφικών συνθηκών κατά ΕΑΚ2000: Έδαφος Β στο μέσο της γέφυρας και ομοιόμορφα έδαφος Α κατά μήκος του υπολοίπου

Πίνακας 4. Σύγκριση μετακινήσεων κεφαλής και ροπών κάμψης βάσης βάθρων για διάφορα σενάρια σεισμικής διέγερσης (Έδαφος Β)

Έδαφος Β	Μετακινήσεις κεφαλής βάθρου				Ροπές βάσης βάθρου				
	Κίνηση	B1	B2	B3	μ.ο.	M1	M2	M3	μ.ο.
Σύγχρονη	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
θ	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
γ+θ	0.95	0.95	0.94	0.95	1.04	0.92	1.00	0.99	
B-B-Γ-B-B	0.67	0.61	0.74	0.67	0.85	2.40	0.88	1.38	

\* θ: μόνο διαφορά φάσης, γ+θ: διαφορά φάσης και απώλεια συγχρωτισμού, B-B-Γ-B-B: Διαδοχή εδαφικών συνθηκών κατά ΕΑΚ2000: Έδαφος Γ στο μέσο της γέφυρας και ομοιόμορφα έδαφος Β κατά μήκος του υπολοίπου

Πίνακας 5. Σύγκριση μετακινήσεων κεφαλής και ροπών κάμψης βάσης βάθρων για διάφορα σενάρια σεισμικής διέγερσης (Έδαφος Γ)

Έδαφος Γ	Μετακινήσεις κεφαλής βάθρου				Ροπές βάσης βάθρου				
	Κίνηση	B1	B2	B3	μ.ο.	M1	M2	M3	μ.ο.
Σύγχρονη	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
θ	0.97	0.99	1.03	1.00	0.96	1.00	1.01	0.99	
γ+θ	1.04	1.07	1.13	1.08	0.95	1.02	0.98	0.98	
Γ-Γ-Δ-Γ-Γ	1.06	1.13	1.16	1.11	0.85	1.53	0.88	1.09	

\*θ: μόνο διαφορά φάσης, γ+θ: διαφορά φάσης και απώλεια συγχρωτισμού, Γ-Γ-Δ-Γ-Γ: Διαδοχή εδαφικών συνθηκών κατά ΕΑΚ2000: Έδαφος Δ στο μέσο της γέφυρας και ομοιόμορφα έδαφος Γ κατά μήκος του υπολοίπου

Πίνακας 6. Σύγκριση μετακινήσεων κεφαλής και ροπών κάμψης βάσης βάθρων για διάφορα σενάρια σεισμικής διέγερσης (Έδαφος Δ)

Έδαφος Δ	Μετακινήσεις κεφαλής βάθρου				Ροπές βάσης βάθρου				
	Κίνηση	B1	B2	B3	μ.ο.	M1	M2	M3	μ.ο.
Σύγχρονη	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
θ	0.99	1.00	1.01	1.00	1.03	1.00	0.94	0.99	
γ+θ	0.99	0.98	1.01	0.99	0.93	0.88	0.91	0.91	
B-Γ-Δ-Γ-B	0.70	0.81	0.77	0.76	0.64	1.36	0.67	0.89	

\*θ: μόνο διαφορά φάσης, γ+θ: διαφορά φάσης και απώλεια συγχρωτισμού, B-Γ-Δ-Γ-B: Ακραία περίπτωση διαδοχής εδαφικών συνθηκών κατά ΕΑΚ2000: Έδαφος Δ στο μέσο της γέφυρας και έδαφος Β & Γ κατά μήκος του υπολοίπου

## 6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Λεκίδης, Β.Α., Καρακώστας Χ.Ζ., Σαλονικιός, Θ., Παπαδημητρίου Κ., & Καραμάνος, Σ., 2003. Παρακολούθηση της σεισμικής συμπεριφοράς χαρακτηριστικών γεφυρών Ο/Σ του Ελληνικού χώρου. *Πρακτικά 14ου Εθνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως* (σε CD-ROM)
- American Association of State Highway and Transportation Officials-AASHTO 1996. Interim Revisions to the AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges: Division I-A. Seismic Design, Washington, D.C.
- 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.
- Applied Technology Council - ATC 1996. Improved seismic design criteria for California bridges, Redwood City, California, Report No. ATC-32.
- Computers and Structures Inc. 1999. SAP 2000 Nonlinear Version 8.3.3. User's Reference manual. Berkeley, California.
- CEN. 2004 'Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges, prEN 1998-2, Brussels.
- Der Kiureghian, A. 1996. A coherency model for spatially varying ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 99-111.
- Der Kiureghian, A. & Keshinshian, P. 1997. Effects of incoherence, Wave Passage and Spatially Varying Site Conditions on Bridge Response. Proc. of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Motion, NCEER, 393-407.
- fib [fédération internationale du béton] 2006. Structural Solutions for Bridge Seismic Design and Retrofit - A State of the Art, fib T.G. 7.4 (forthcoming).
- Hao H. 1989. Effects of spatial variation of ground motions on large multiply-supported structures, UBC/EERC-89/06, Berkeley: EERC, University of California.
- Japan Road Association 2002. Design Specifications of Highway Bridges, Part V: Seismic Design.
- 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*.
- Karamanos, S.A., Papadimitriou, C., Christodoulou, K., Karakostas, C.Z., Lekidis, V.A. and Panetsos, P. 2004. Multi-Objective Framework for Model Updating with Application to a Four-Span Concrete Bridge Proc. *2nd European Workshop on Structural Health Monitoring*, C. Boller and W.J. Staszewski (Eds), DEStech Publications, Munich, pp. 195-202
- 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, *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver.
- Lekidis, V.A., Karakostas, C.Z. & Talaslidis, D.G. 1999. Instrumentation, Measurements and Numerical Analysis of Bridges: An Example of the Cable-Stayed Bridge on Evripos Channel, Greece. *NATO Advanced Research Workshop on Instrumentation for Civil Engineering Structures*, Turkey.
- Lou, L., and 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 n° 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., and Monti, G. 2005. Seismic design of bridges accounting for spatial variability of ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34(4-5), 327-348.
- Monti, G. ; Nuti, C. ; Pinto, P. and Vanzi, I. 1994. Effects of non-synchronous seismic input on the inelastic response of bridges, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Seismic Design of Bridges* , Queenstown, New Zealand, 1, 90-107.

- 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, 18-22 April 2006*, San Francisco, California, U.S.
- Nuti, C. & Vanzi, I. 2005. Influence of earthquake spatial variability on differential soil displacements and SDF system response, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 (11), 1353–1374.
- 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 n° 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, *12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, CDROM Volume, No 2227.
- Sextos, A., Pitilakis, K. and Kappos, A. 2003a. A global approach for dealing with spatial variability, site effects and soil-structure-interaction for non-linear bridges: Part 1: Methodology and analytical tools, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 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 and Structural Dynamics*, Vol. 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, *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering.*, Vancouver.
- Sextos, A. 2005. A computer interface for the asynchronous seismic excitation of bridges simulated in ANSYS, *23rd CDFEM Users' Meeting 2005*, International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, Bonn, Germany
- Sextos, A and Kappos, A.J. 2005. Evaluation of the new Eurocode 8-Part 2 Provisions regarding asynchronous excitation of irregular bridges, *4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, Thessaloniki, CD-ROM Volume, Paper No. 04
- 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.
- Simeonov V, Mylonakis G, Reinhorn A, 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.
- Tubino, F. Carassale, L. & S. Giovanni 2003. Seismic response of multi-supported structures by proper orthogonal decomposition, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, 1639-1654.
- Zerva, A. 1990. Response of multi-span beams to spatially incoherent seismic ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(6), 819-832.