

Μεγάλη Σιδηροδρομική Γέφυρα Δομοκού (ΣΓ26) : Σχεδιασμός έναντι Σεισμικής Διάρρηξης Major Domokos (ΣΓ26) Rail Bridge : Design against Seismic Faulting

Ιωάννης ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ¹, Γιώργος ΓΚΑΖΕΤΑΣ², Ιωάννης ΜΑΛΙΟΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Παρουσιάζεται μια σημαντική εφαρμογή της προσφάτως αναπτυχθείσας μεθοδολογίας σχεδιασμού γεφυρών έναντι σεισμικής διάρρηξης. Πρόκειται για τον αντισεισμικό σχεδιασμό της μήκους 400 m και 3 ανοιγμάτων Μεγάλης Σιδηροδρομικής Γέφυρας Δομοκού. Δεδομένου ότι η εν λόγω γέφυρα διασχίζει ενεργή ρηξιγενή δομή η οποία σχετίζεται άμεσα με τον σεισμό $M \approx 7$ των Σοφάδων (1954), ήταν απαραίτητος ο σχεδιασμός της για τεκτονική μετατόπιση 30 cm στο βραχώδες υπόβαθρο. Ο αρχικός σχεδιασμός (10 αμφιέριστα ανοίγματα θεμελιωμένα μέσω ομάδων πασσάλων) τροποποιήθηκε ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της τεκτονικώς επιβαλλόμενης μετατόπισης. Ο βελτιωμένος σχεδιασμός περιλαμβάνει τρία μεγάλα τοξωτά μεταλλικά ανοίγματα εδραζόμενα επί εφεδράνων σεισμικής μόνωσης. Με βάση τα αποτελέσματα της αναλύσεως, οι τεκτονικά ευαίσθητες πασσαλομάδες αντικαταστάθηκαν με άκαμπτα φρέατα θεμελιώσεως. Η θέση ανάδυσης της διάρρηξης διερευνήθηκε παραμετρικά, τόσο σε *τοπικό* επίπεδο (βάθρο), όσο και *καθολικά* (ανωδομή). Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε *τοπικό* επίπεδο, δημιουργήθηκαν επτά συνδυασμοί φορτίσεως, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τον λεπτομερή σχεδιασμό της ανωδομής.

ABSTRACT : This article presents a significant application of a newly developed methodology for design of bridges against tectonic dislocation. It refers to a major 400 m 3-span arched rail bridge in Central Greece, at the region of Domokos. Crossing an active fault zone, associated with the 1954 Sofades $M \approx 7$ earthquake, the bridge had to be designed for 30 cm of normal-fault offset. The initial design (10 simply supported spans founded through pile groups) was modified to cope with the design tectonic displacement. The improved design consists of three steel arch-type spans on seismic isolation bearings. Following the results of the conducted study, the vulnerable pile groups were replaced with rigid caissons. The location of the fault rupture was parametrically investigated, both at the *local* (pier) and at the *global* (bridge) level. Based on the results of the local level analysis, seven different tectonic loading combinations were considered for the global level analysis of the superstructure. These combinations were utilized by the structural engineer to analyse the response of the bridge superstructure.

¹ Λέκτορας ΠΔ407/80, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: ianast@civil.ntua.gr

² Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: gazetas@ath.forthnet.gr

³ Πολιτικός Μηχανικός, Ι. Μάλιος και Συνεργάτες Α.Ε., email: geotech@malios.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάρρηξη ενός σεισμογόνου ρήγματος στην επιφάνεια της γής, καθώς και οι επιπτώσεις του στις υπερκείμενες ανθρώπινες κατασκευές είναι ένα πρόβλημα με πολλαπλό διακλαδικό ενδιαφέρον. Το πρόβλημα κατ' αρχήν εστιάζεται στην αναγνώριση, χαρτογράφηση και κυρίως εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στην "εγγύς του ρήγματος περιοχή". Το πρόβλημα αυτό, αν και δεν απασχόλησε τους τεχνικούς στον σεισμό της Αθήνας του 1999 ο οποίος συνέβη σε ρήγμα με διάρρηξη που δεν έφθασε στην επιφάνεια ("τυφλό" ή "θαμμένο"), έχει τα τελευταία χρόνια προβληματίσει (και ίσως διχάσει) τον τεχνικό κόσμο της χώρας σε μία σειρά έργων (κατασκευασθέντων, υπό κατασκευήν, ή μελετούμενων).

Το πρόβλημα κατ' αρχήν εστιάζεται στην αναγνώριση, χαρτογράφηση και κυρίως εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας στην "εγγύς του ρήγματος περιοχή". Οι παλαιότερες αντιλήψεις για πλήρη απαγόρευση δομήσεως "στην άμεση γειτονία του ρήγματος" (π.χ. EC8, 1994) θα ήταν όχι μόνον καταδικαστικές για μεγάλου μήκους έργα, όπως οι σιδηροδρομικές και οδικές γέφυρες, αλλά κρίνονται και ως αποδεδειγμένως υπερβολικές και συχνά ανεφάρμοστες.

Υπερβολικές κρίνονται οι αντιλήψεις αυτές για τους εξής τουλάχιστον λόγους :

- (a) Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προσδιοριστεί αν ένα γεωλογικό ρήγμα, από τα πολυάριθμα που συναντώνται στην πράξη, είναι πιθανώς ενεργό (ικανό δηλαδή να προκαλέσει σημαντική σεισμική κίνηση).
- (b) Σπανίως είναι γνωστή η ακριβής θέση του ρήγματος. Κατά μήκος δε αυτού, οι επιφανειακές διαρρήξεις δεν είναι ούτε συνεχείς, ούτε ακολουθούν με ακρίβεια τις παλαιότερες [Ambraseys & Jackson, 1984]. Αντιθέτως, ενδέχεται να ακολουθήσουν ζώνες χαμηλής αντοχής, αναδυόμενες στην επιφάνεια μέσα από μια ευρύτερη ζώνη παραμόρφωσης (πάχους έως και μερικών χιλιομέτρων). Επομένως, η πρόβλεψη της ακριβούς θέσης αναδύσεως μιας τεκτονικής διάρρηξης είναι εξαιρετικά δυσμενής, ακόμη κι αν το ρήγμα είναι αποτυπωμένο λεπτομερώς. Επί παραδείγματι, το Βόρειο τμήμα του ρήγματος Chelungpu, το οποίο ήταν υπεύθυνο για τον σεισμό M_w 7.4 του Chi-Chi (1999) στην Ταϊβάν (με επιφανειακές μετακινήσεις έως και 10 m), αναδύθηκε στην επιφάνεια σε απόσταση 1 km από την ιστορικά καταγεγραμμένη θέση του [Heermance et al, 2003].
- (c) Συνήθως, το βραχώδες υπόβαθρο καλύπτεται από εδαφικές αποθέσεις, οι οποίες ενδέχεται να αμβλύνουν τις επιπτώσεις της τεκτονικής διάρρηξης στην επιφάνεια. Η "διάδοση" της διάρρηξης διαμέσου του εδάφους ενδέχεται να "απορροφήσει" μέρος της τεκτονικής μετατόπισης, μετατρέποντας την από μια απότομη ασυνέχεια σε μια διάχυτη ζώνη παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους [Bray, 1990 ; Bray et al 1994 ; Lade & Cole, 1984 ; Lazarte & Bray, 1995]. Από την άλλη, στο εφελκυστικό τεκτονικό περιβάλλον που ως επί το πλείστον επικρατεί στον Ελλαδικό χώρο, είναι δυνατή ακόμη και μεγέθυνση της σεισμικής διάρρηξης στην επιφάνεια, λόγω συν-σεισμικής συμπύκνωσης των εδαφικών στρώσεων, κατολισθητικών φαινομένων, ή λόγω σχηματισμού κατακρημνίσματος βαρύτητας.
- (d) Τέλος, η ύπαρξη μιας κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους ενδέχεται να τροποποιήσει τόσο την "διαδρομή" της διαρρήξεως, όσο και το προφίλ των εδαφικών

παραμορφώσεων στην επιφάνεια (ή κοντά στην επιφάνεια) του εδάφους. Ανάλογα με την δυσκαμψία της θεμελίωσης και το φορτίο της ανωδομής, ενδέχεται η διάρρηξη να εκτραπεί πλήρως [Anastasopoulos & Gazetas, 2007a; 2007b]. Προφανώς λοιπόν, οι βλάβες που θα υποστεί μια κατασκευή δεν εξαρτώνται μόνον από την σχετική θέση ως προς την διάρρηξη στο οιονεί ελεύθερο πεδίο, αλλά και από την Αλληλεπίδραση Επιφανειακής Διαρρήξεως–Εδάφους–Θεμελίου–Ανωδομής (ΑΔΕΘΑ). Η αλληλεπίδραση αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο στην τελικώς επιτυγχανόμενη επιτελεστικότητα της κατασκευής.

Σημειώνεται σχετικώς ότι ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός [ΕΑΚ 2000] (σε συμφωνία με τα ανωτέρω) δεν απαγορεύει την δόμηση στην γειτονία ενεργών σεισμικών ρηγμάτων, προδιαγράφει όμως την ανάγκη εκπόνησης “ειδικής σεισμικής–γεωλογικής–γεωτεχνικής–στατικής μελέτης” (βλ. Κεφ. 5.1.2., παρ. 3).

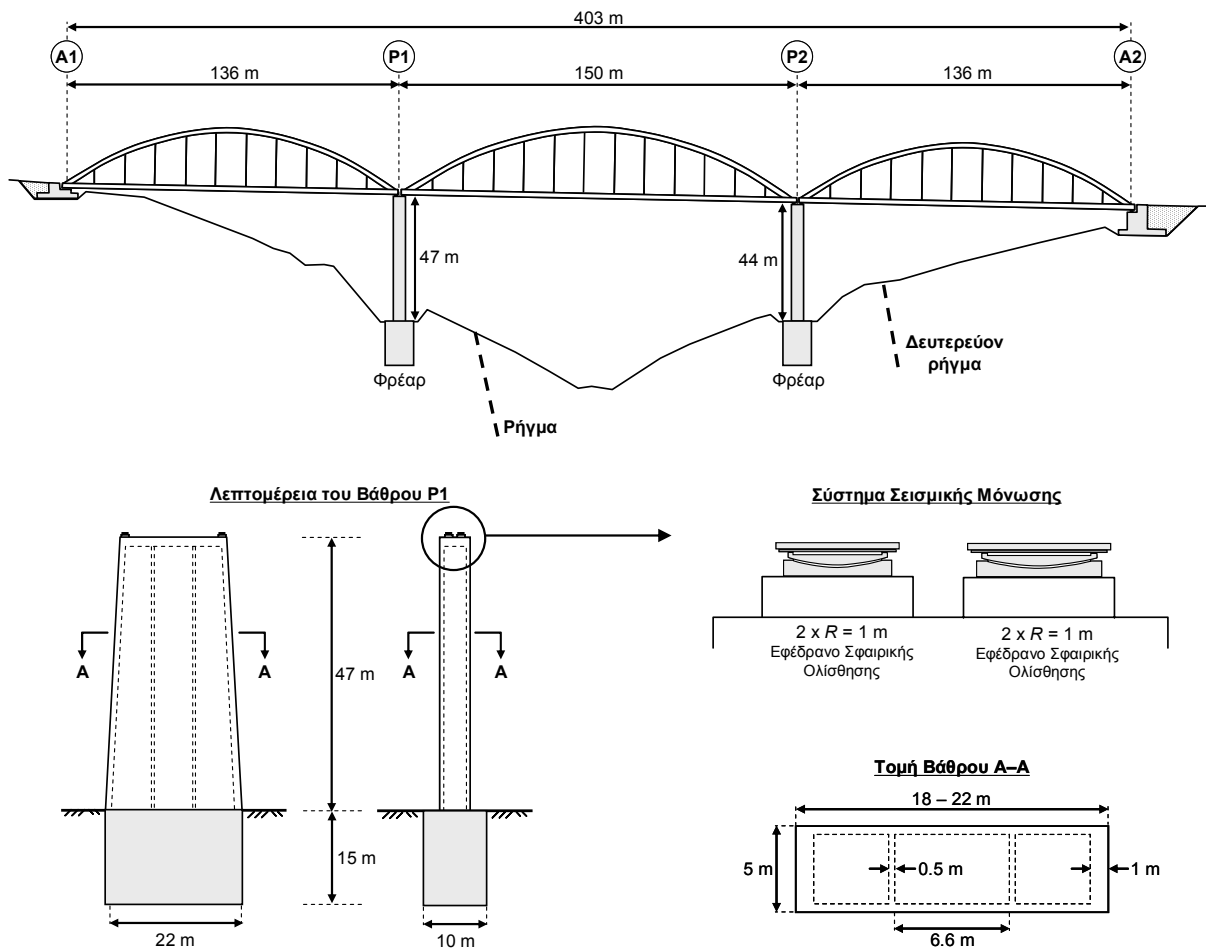
Προσβλέποντας στην δημιουργία μιας ορθολογικής μεθοδολογίας σχεδιασμού που να καλύπτει την ανωτέρω κανονιστική απαίτηση, έχει τα τελευταία χρόνια πραγματοποιηθεί ερευνητική προσπάθεια η οποία συνδύασε την επιτόπου καταγραφή πρόσφατων ιστορικών περιστατικών (από τους σεισμούς της Τουρκίας και της Ταϊβάν του 1999), πειράματα φυγοκεντρική, και αναλυτική μελέτη του προβλήματος [Anastasopoulos & Gazetas 2007a; 2007b; Bransby et al. 2008 ; Faccioli et al. 2008 ; Anastasopoulos et al. 2007; 2008].

Το παρόν άρθρο παρουσιάζει την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής για τον αντισεισμικό σχεδιασμό της Μεγάλης Σιδηροδρομικής Γέφυρας Δομοκού.

Η ΓΕΦΥΡΑ ΚΑΙ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η συνολικού μήκους 400 m Μεγάλη Σιδηροδρομική Γέφυρα Δομοκού (ΣΓ26) βρίσκεται στην περιοχή της Εκκάρας, και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά έργα του τμήματος Λιανοκλάδι–Δομοκός της Νέας Διπλής Σιδηροδρομικής Γραμμής Υψηλών Ταχυτήτων (**Σχήμα 1**). Δεδομένου ότι η χάραξη της γέφυρας (η οποία ήταν σχεδόν αδύνατο να τροποποιηθεί) διασχίζει σημαντικό ενεργό ρήγμα κρίθηκε απαραίτητος ο αντισεισμικός σχεδιασμός της έναντι τεκτονικής διάρρηξης.

Σύμφωνα με την εκτελεσθείσα γεωλογική και σεισμο-τεκτονική μελέτη, η γέφυρα διασχίζει ενεργή ρηξιγενή δομή η οποία σχετίζεται άμεσα με τον σεισμό των Σοφάδων της 30^{ης} Απριλίου 1954 [Papastamatiou & Vetoulis, 1955]. Ο εν λόγω σεισμός, μεγέθους $M_s \approx 7$, είναι αδιαμφισβήτητος ένας από τους ισχυρότερους που έχουν καταγραφεί στον Ηπειρωτικό Ελλαδικό χώρο. Το συνολικό μήκος του ρήγματος των Σοφάδων έχει εκτιμηθεί ότι είναι της τάξεως των 50 km, η δε μέση μετατόπιση του στον σεισμό του 1954 ήταν 1.8 m [Ambraseys & Jackson, 1990; Papazachos & Papazachou, 2002]. Με ρυθμό ολίσθησης 4 mm/έτος [Papadimitriou & Karakostas, 2003], το ρήγμα αυτό χαρακτηρίζεται ως η δεσπόζουσα σεισμοτεκτονική δομή της περιοχής.



Σχήμα 1. Αντισεισμικός σχεδιασμός της Μεγάλης Σιδηροδρομικής Γέφυρας Δομοκού (ΣΓ26) : 3 “μεγάλα” αμφιέριστα ανοίγματα επί εφεδράνων σεισμικής μόνωσης τύπου σφαιρικής ολίσθησης, θεμελίωση βάθρων μέσω φρεάτων. Ο αρχικός σχεδιασμός της γέφυρας (10 “μικρά” αμφιέριστα καταστρώματα, θεμελιωμένα μέσω πασσαλομάδων 3 x 3) τροποποιήθηκε ώστε να αντιμετωπιστεί η τεκτονική μετατόπιση σχεδιασμού (κανονική διάρρηξη κατακόρυφου εύρος $h = 30$ cm).

Στην περιοχή του έργου, η επιφανειακή διάρρηξη του σειсмоγόνου ρήγματος αποτυπώθηκε από τον αείμνηστο Γιάννη Παπασταματίου [Papastamatiou & Mougiaris, 1986], και επιβεβαιώθηκε πρόσφατα από την ομάδα του Πανεπιστημίου Αθηνών [Λέκκας κ.α., 2006]. Η διάρρηξη αυτή (Σχήμα 2), αποκαλούμενη “το Ρήγμα της Εκκάρας”, διέσχισε την τότε υφιστάμενη σιδηροδρομική γραμμή, προκαλώντας την αποκοπή της και διακόπτοντας τις σιδηροδρομικές συγκοινωνίες για μια εβδομάδα περίπου. Η διάρρηξη προκάλεσε αστοχία των μπουλονιών σύνδεσης, τα οποία αντικαταστάθηκαν σχεδόν αμέσως. Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι επί μια εβδομάδα τα μπουλόνια ξανα-έσπασαν και επαν-αντικαταστάθηκαν αρκετές φορές, γεγονός που υποδηλώνει η τεκτονική μετατόπιση του ρήγματος ολοκληρώθηκε “ερπυστικά” αρκετές ημέρες μετά.

Σύμφωνα με την ειδική σεισμο-τεκτονική μελέτη του Πανεπιστημίου Αθηνών, η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού ανέρχεται σε 0.39 g (με πιθανότητα μή-υπερβάσεως 90% σε χρονικό διάστημα 100), η δε μέγιστη κανονική τεκτονική μετατόπιση στο βραχώδες (αλπικό) υπόβαθρο είναι ίση με 30 cm.

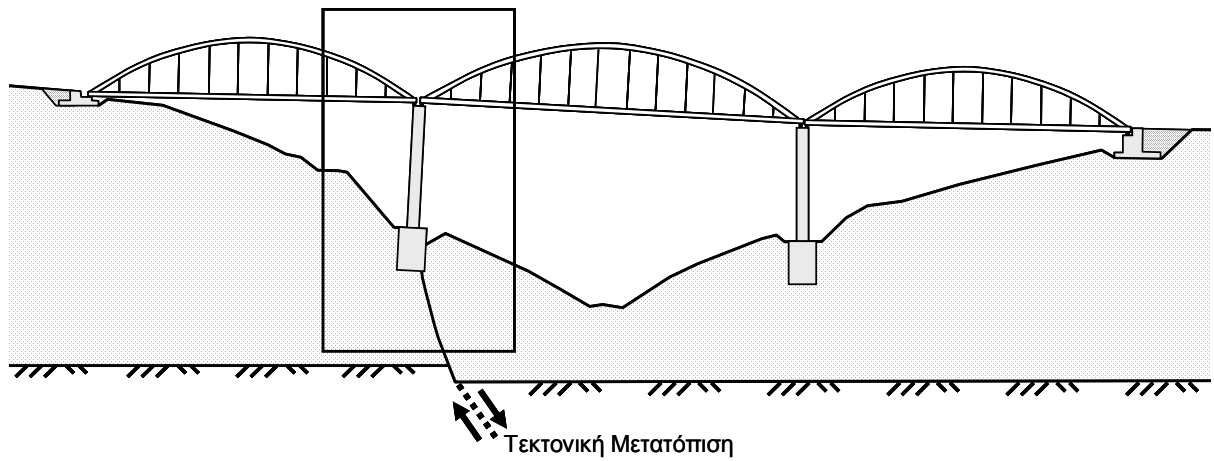


Σχήμα 2. Φωτογραφία της επιφανειακής εκδήλωσης του ρήγματος ΒΔ της Εκκάρας στον σεισμό των Σοφάδων του 1954 [Papastamatiou & Mouyaris, 1986].

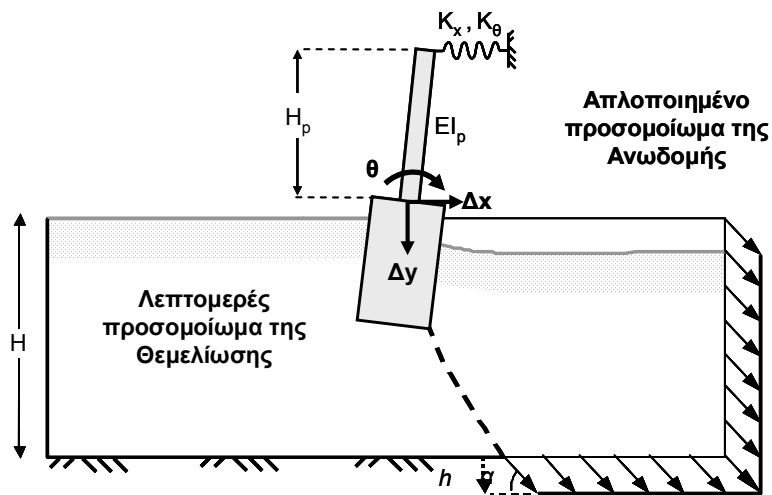
Ο αρχικός σχεδιασμός (10 αμφιέριστα ανοίγματα θεμελιωμένα μέσω ομάδων πασσάλων) τροποποιήθηκε ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της τεκτονικώς επιβαλλόμενης μετατόπισης. Ο βελτιωμένος σχεδιασμός (βλ. **Σχήμα 1**) περιλαμβάνει τρία μεγάλα τοξωτά μεταλλικά ανοίγματα εδραζόμενα επί εφεδράνων σεισμικής μόνωσης τύπου FPS. Ανάμεσα στα βάθρα (ύψους 44 m και 47 m) και τα καταστρώματα τοποθετούνται συσκευές δυναμικής εμπλοκής STU (*shock transmission units*). Οι συσκευές αυτές προσφέρουν αυξημένη απόσβεση κατά την διάρκεια ισχυρής σεισμικής δόνησης, χωρίς όμως να αντιδρούν σε οιονεί στατικά (δηλαδή με μικρή ταχύτητα) επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, όπως οι τεκτονικές. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, οι τεκτονικά ευαίσθητες πασσαλομάδες αντικαταστάθηκαν με άκαμπτα φρέατα θεμελίωσης διαστάσεων 10 x 22 m x 15 m (μήκος x πλάτος x ύψος).

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η ανάλυση του συστήματος εδάφους–κατασκευής διεξάγεται σε δύο βήματα (**Σχήμα 3**). Στο πρώτο βήμα αναλύεται η απόκριση ενός μεμονωμένου βάθρου υποβαλλόμενου σε σεισμική διάρρηξη (*τοπικού επιπέδου* ανάλυση). Στο βήμα αυτό προσομοιώνουμε με λεπτομέρεια την Αλληλεπίδραση Διάρρηξης–Εδάφους–Θεμελίωσης–Ανωδομής (ΑΔΕΘΑ). Η ανωδομή προσομοιώνεται με ρεαλιστικά απλοποιημένο προσομοίωμα, το οποίο συμπεριλαμβάνει το βάθρο ύψους H_p και δυσκαμψίας διατομής EI_p , και υποκαθιστά το κατάστρωμα με ένα διαμήκης, K_x , και ένα στροφικό ελατήριο, K_θ . Οι υπολογιζόμενες διαφορικές μετατοπίσεις και στροφές χρησιμοποιούνται στο δεύτερο βήμα για την λεπτομερή (*καθολικού επιπέδου*) ανάλυση της ανωδομής και τον τελικό σχεδιασμό του όλου φορέα.

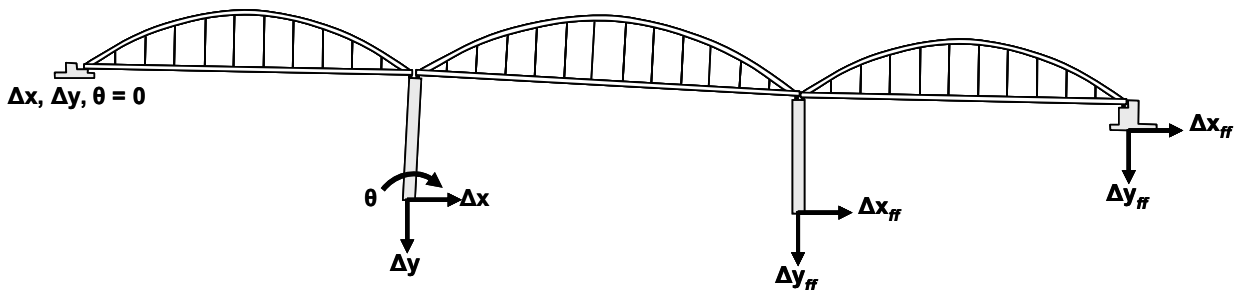


Βήμα 1



Βήμα 2

Λεπτομερές Προσομοίωμα της Ανωδομής



Σχήμα 3. Η ανάλυση του συστήματος εδάφους–κατασκευής περιλαμβάνει 2 βήματα. Στο πρώτο βήμα (Βήμα 1) αναλύουμε την απόκριση ενός μεμονωμένου βάθρου υποβαλλόμενου σε σεισμική διάρρηξη, προσομοιώνοντας με λεπτομέρεια την Αλληλεπίδραση Διάρρηξης–Εδάφους–Θεμελίωσης–Ανωδομής (ΑΔΕΘΑ). Στο δεύτερο βήμα (Βήμα 2), το λεπτομερές προσομοίωμα της ανωδομής υποβάλλεται στις υπολογισθείσες μετατοπίσεις και στροφές του πρώτου βήματος.

Η *τοπικού επιπέδου* ανάλυση της ΑΔΕΘΑ πραγματοποιείται με εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε 3 διαστάσεις (3-Δ) κάνοντας χρήση του κώδικα ABAQUS. Τόσο το έδαφος, όσο και το φρέαρ θεμελιώσεως προσομοιώνονται με 3-Δ εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία. Τα φρέατα θεωρούνται ελαστικά εξοπλισμένου σκυροδέματος, με μέτρο ελαστικότητας $E = 25 \text{ GPa}$. Το βάθρο προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού, το δε κατάστρωμα αντικαθίσταται με καταλλήλως βαθμονομημένα οριζόντια και στροφικά ελατήρια (βλ. “δυσκαμψία” εφερδάνων).

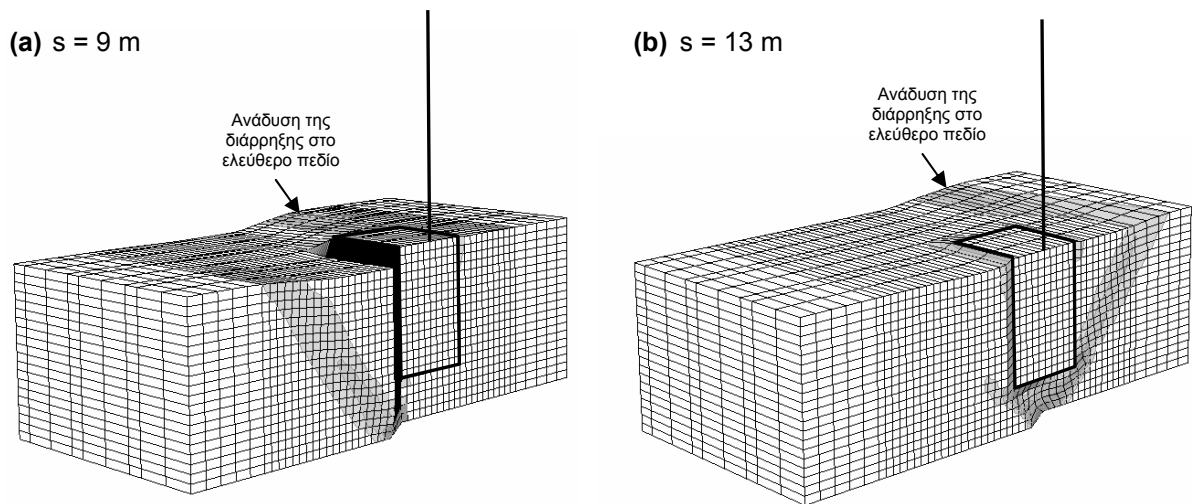
Η ανάλυση του συστήματος εδάφους–θεμελίωσης–ανωδομής πραγματοποιείται σε δύο επιμέρους στάδια. Στο πρώτο από αυτά αναλύεται η διάδοση της διάρρηξης στο ελεύθερο πεδίο (αγνοώντας δηλαδή την κατασκευή). Στο επόμενο στάδιο (γνωρίζοντας το σημείο ανάδυσης της διάρρηξης), προσθέτουμε το προσομοίωμα θεμελίωσης–κατασκευής σε τέτοια θέση ώστε η διάρρηξη να αναδύεται σε απόσταση s από το μέσον του φρέατος (βάση βάρου).

Η μή-γραμμική συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώνεται με ελαστοπλαστικό καταστατικό προσομοίωμα με κριτήριο διαρροής Mohr-Coulomb και ιστροπική χαλάρωση. Η τελευταία εφαρμόζεται μέσω ειδικής υπό-ρουτίνας στην γωνία τριβής φ_{mob} την διαστολικότητα ψ_{mob} και την συνοχή c , συναρτήσει της πλαστικής οκταεδρική παραμόρφωσης. Σημειώνεται ότι η εν λόγω μεθοδολογία ανάλυσης έχει επαληθευτεί εκτενώς μέσω γνήσιων ποσοτικών προβλέψεων πειραμάτων φυγοκεντρική [Anastasopoulos et al. 2008]. Δεδομένων των αβεβαιότητων ως προς τις παραμέτρους αντοχής της βραχώμαζας (κυρίως σερπεντινωμένοι περιδοτίτες, και δευτερευόντως ηφαιστειακά πετρώματα και σχηματισμοί σχιστοκερατολιθικής διάπλασης), εκτελέστηκε παραμετρική διερεύνηση ως προς τις εδαφικές παραμέτρους ($c = 90 - 190 \text{ kPa}$, $\varphi = 31^\circ - 39^\circ$).

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ

Με δεδομένη την αβεβαιότητα ακριβούς προβλέψεως της θέσης ανάδυσης της διάρρηξης, η απόστασή της από το μέσον του φρέατος διερευνήθηκε παραμετρικά : $s = 5, 9, 13$, και 16 m . Σημειώνεται ότι οι θέσεις αυτές αναφέρονται στην *τοπικού επιπέδου* ανάλυση. Στην συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής, δημιουργήθηκαν επτά συνδυασμοί φορτίσεως για την *καθολικού επιπέδου* ανάλυση της ανωδομής.

Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα της ανάλυσης *τοπικού επιπέδου*, σε όρους παραμορφωμένου καννάβου πεπερασμένων στοιχείων και ισούψων πλαστικών παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε επιβολή κανονικής διάρρηξη $h = 0.3 \text{ m}$, σε απόσταση $s = 9$ και 13 m . Για $s = 9 \text{ m}$ (**Σχήμα 4a**), το φρέαρ επιτυγχάνει εκτροπή της διάρρηξης προς τα αριστερά (δηλαδή προς την μεριά του κατερχόμενου τεμάχους), χωρίς να υφίσταται σημαντική στροφή ή μετατόπιση. Μετακινώντας την διάρρηξη σε απόσταση $s = 13 \text{ m}$ (**Σχήμα 4b**), η διάρρηξη πετυχαίνει το φρέαρ οριακά στην κάτω δεξιά άκρη του και εκτρέπεται προς τα δεξιά (δηλαδή προς την μεριά του αμετακίνητου τεμάχους). Παρά την εκτροπή και διάχυση της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, το φρέαρ υφίσταται στροφή $\theta = 0.24^\circ$ και σημαντικές μετατοπίσεις : $\Delta y = 17.1 \text{ cm}$ και $\Delta x = 17.7 \text{ cm}$.



Σχήμα 4. Βήμα 1 : Ανάλυση της Αλληλεπίδρασης Εδάφους–Διαρρήξεως–Θεμελίωσης–Ανωδομής (ΑΔΕΘΑ). Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων και ισούψεις πλαστικών παραμορφώσεων για το φρέαρ υποβαλλόμενο σε κανονική διάρρηξη $h = 0.3$ m (κλίμακα επαύξησης παραμορφώσεων = 5): (a) $s = 9$ m, και (b) $s = 13$ m.

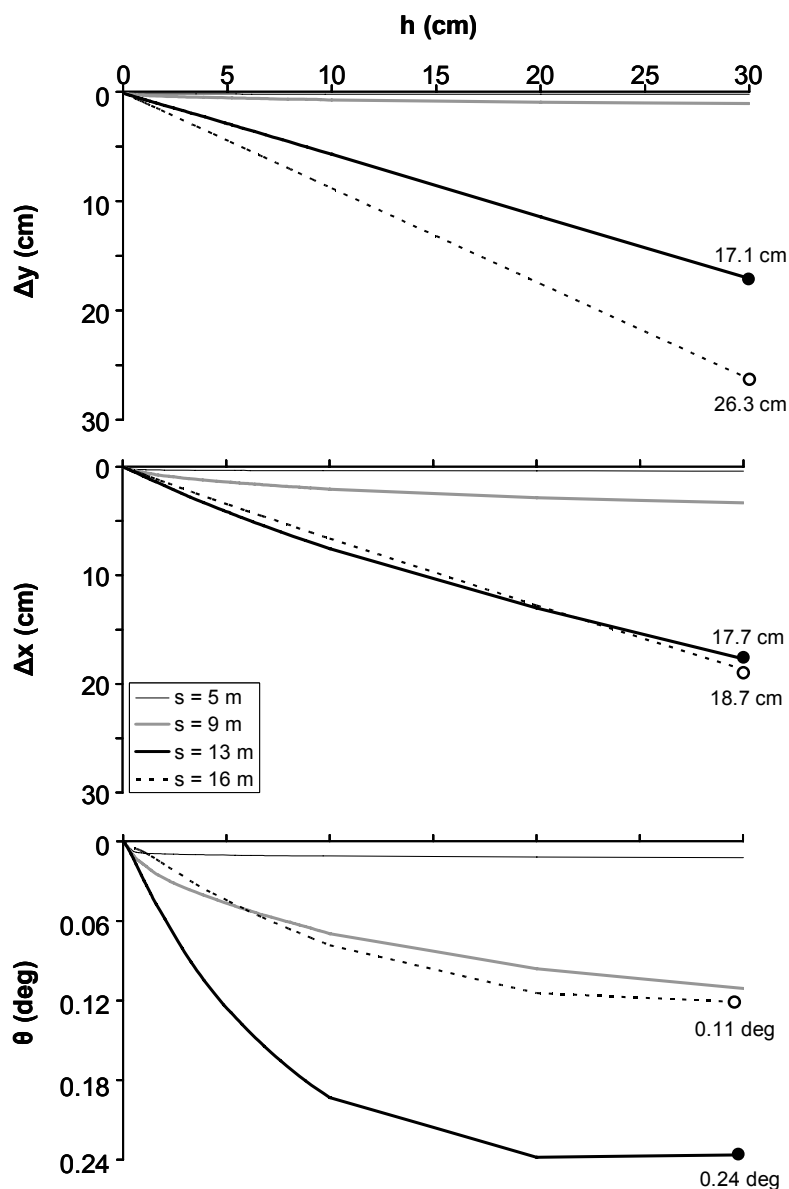
Στο **Σχήμα 5** συνοψίζεται η επιρροή της θέσης s της διάρρηξης στις οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις, Δx και Δy , και την στροφή θ στην βάση του βάθρου. Όπως θα αναμένονταν, οι μετατοπίσεις Δx και Δy γενικώς αυξάνονται με την αύξηση της s (μετατοπίζοντας την διάρρηξη προς τα δεξιά, το φρέαρ βρίσκεται όλο πιο πολύ στο κατερχόμενο τέμαχος). Όμως οι Δx και Δy εξαρτώνται καί από την στροφή θ του φρέατος η οποία μεγιστοποιείται για $s = 13$ m. Ως εκ τούτου, η Δx στην βάση του βάθρου για $s = 13$ m είναι σχεδόν εξίσου υψηλή με την περίπτωση $s = 16$ m, για την οποία και μεγιστοποιείται. Η Δy δεν επηρεάζεται τόσο από την στροφή θ , οπότε και η μέγιστη τιμή της (η οποία αντιστοιχεί σε $s = 16$ m) είναι σαφώς υψηλότερη από τις υπόλοιπες.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ

Τα αποτελέσματα της *τοπικού επιπέδου* ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση *καθολικού επιπέδου* του φορέα και τον αντισεισμικό σχεδιασμό της γέφυρας και του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Καθότι η επιρροή των Δx , Δy , και θ στα διάφορα τμήματα της γέφυρας (καταστρώματα, βάθρα, εφέδρανα, αρμοί) δεν μπορεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων, έγινε χρήση δύο σεναρίων *τοπικού επιπέδου* :

- (1) Σενάριο “a” – διάρρηξη σε απόσταση $s = 13$ m (μετρούμενη στο τοπικό σύστημα) :
 $\Delta x = 18.7$ cm, $\Delta y = 26.3$ cm, και $\theta = 0.11$ deg, και
- (2) Σενάριο “b” – διάρρηξη σε απόσταση $s = 16$ m (μετρούμενη στο τοπικό σύστημα) :
 $\Delta x = 17.7$ cm, $\Delta y = 17.1$ cm, και $\theta = 0.24$ deg.

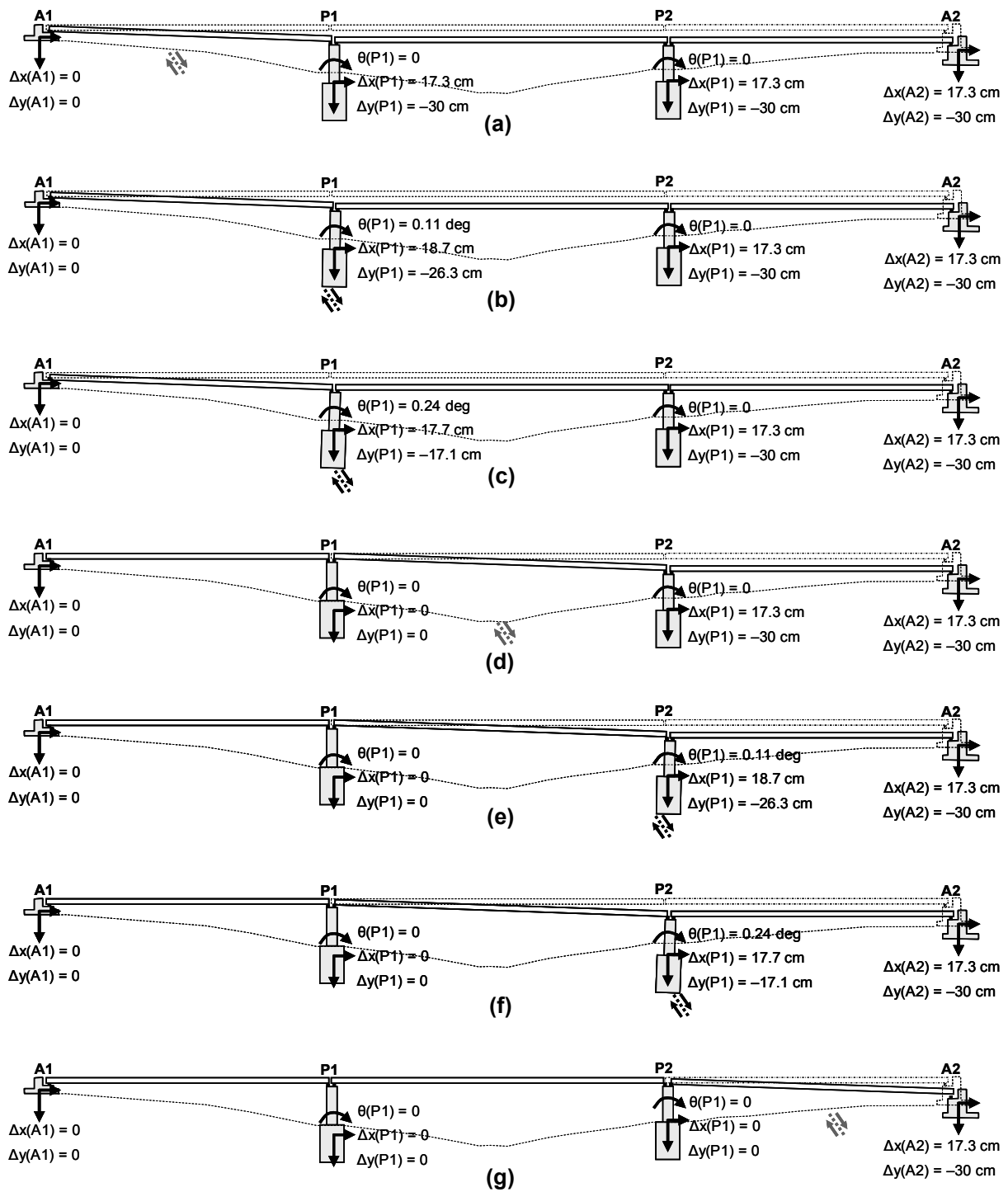
Στο πρώτο σενάριο (a) η μέγιστη βύθιση Δy και οριζόντια μετατόπιση Δx του φρέατος συνδυάζεται με μια σχετικά μικρή θ , στο δε δεύτερο (b) η μέγιστη στροφή θ συνδυάζεται με μικρότερες Δx και Δy .



Σχήμα 5. Σύνοψη αποτελεσμάτων ανάλυσης Αλληλεπίδραση Διάρρηξης–Εδάφους–Θεμελίωσης–Ανωδομής, κανονική διάρρηξη $h = 0.3$ m. Επιρροή της θέσης της διάρρηξης s στην προκαλούμενη κατακόρυφη Δy και οριζόντια Δx μετατόπιση, και την στροφή θ στην βάση του βάρου.

Με βάση τα ανωτέρω, δημιουργήθηκαν επτά συνδυασμοί φορτίσεως για την καθολικού επιπέδου ανάλυση της γέφυρας. Οι συνδυασμοί αυτοί δείχνονται σχηματικά στο **Σχήμα 6**, και έχουν ως εξής :

- (1) Φόρτιση 1 : διάρρηξη ανάμεσα στο ακρόβαθρο A1 και το βάθρο P1,
- (2) Φόρτιση 2 : διάρρηξη στο βάθρο P1 – σενάριο “a” (τοπικού επιπέδου),
- (3) Φόρτιση 3 : διάρρηξη στο βάθρο P1 – σενάριο “b” (τοπικού επιπέδου),
- (4) Φόρτιση 4 : διάρρηξη ανάμεσα στα βάρια P1 και P2,
- (5) Φόρτιση 5 : διάρρηξη στο βάθρο P2 – σενάριο “a” (τοπικού επιπέδου),
- (6) Φόρτιση 6 : διάρρηξη στο βάθρο P2 – σενάριο “b” (τοπικού επιπέδου),
- (7) Φόρτιση 7 : διάρρηξη ανάμεσα στο βάθρο P2 και το ακρόβαθρο A2.



Σχήμα 6. Οι επτά συνδυασμοί φορτίσεως της γέφυρας λόγω τεκτονικής διάρρηξης : (a) διάρρηξη ανάμεσα στο ακρόβαθρο A1 και το βάθρο P1, (b) διάρρηξη στο βάθρο P1 – σενάριο a, (c) διάρρηξη στο βάθρο P1 – σενάριο b, (d) διάρρηξη ανάμεσα στα βάθρα P1 και P2 ; (e) διάρρηξη στο βάθρο P2 – σενάριο a, (f) διάρρηξη στο βάθρο P2 – σενάριο b, και (g) διάρρηξη ανάμεσα στο βάθρο P2 και το ακρόβαθρο A2.

Οι εν λόγω συνδυασμοί φορτίσεως χρησιμοποιήθηκαν για την λεπτομερή – καθολικού επιπέδου – δομητική ανάλυση του όλου φορέα της γέφυρας. Η προκαλούμενη παραμορφωσιακή κατάσταση αποτέλεσε κρίσιμο στοιχείο για την επιλογή και

διαστασιολόγηση των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης, των συσκευών αποσβέσεως ενέργειας, του εύρους εδράσεως, καθώς και των ανοχών των αρμών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας αυτής έχουν ως εξής :

- [1] Ο αντισεισμικός σχεδιασμός γεφυρών έναντι σεισμικής διάρρηξης είναι εφικτός. Η παρούσα εργασία παρουσίασε μια πραγματική εφαρμογή μιας νέας μεθοδολογία ορθολογικού σχεδιασμού, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του ΟΣΕ.
- [2] Η θέση της διάρρηξης παίζει καθοριστικό ρόλο στην προκαλούμενη επιπόνηση. Οι μετατοπίσεις και οι στροφές στην βάση του βάρου δεν μεγιστοποιούνται για την ίδια θέση. Δεδομένου ότι η ακριβής θέση του ρήγματος δεν μπορεί να είναι εκ των προτέρων γνωστή, πρέπει να διερευνάται παραμετρικά στον σχεδιασμό.
- [3] Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάσαμε, η διαδρομή της διάρρηξης επηρεάζεται εντόνως από την ύπαρξη της θεμελιώσεως. Η διάρρηξη όχι μόνον εκτρέπεται, αλλά πολλές φορές υφίσταται διακλάδωση ή/και διάχυση της παραμόρφωσης.
- [4] Η επιβαλλόμενη τεκτονική μετατόπιση οδηγεί σε οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση, και στροφή του φρέατος θεμελιώσεως, προκαλώντας παραμόρφωση του όλου φορέα της γέφυρας.
- [5] Στις κορυφές των βάρων και των ακροβάθρων πρέπει οπωσδήποτε να τοποθετηθούν συσκευές ανάσχεσης (stoppers), ώστε σε περίπτωση υπέρβασης του διαθέσιμου περιθωρίου μετακίνησης να αποφευχθεί ενδεχόμενη πτώση. Οι συσκευές αυτές δέον είναι να ενεργοποιούνται για σχετική μετακίνηση βάρου–καταστρώματος μεγαλύτερη των 50 cm (δηλαδή μετά την αστοχία των εφεδράνων), αλλά προτού εξαντληθεί το διαθέσιμο εύρος εδράσεως.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της νέας μεθοδολογίας σχεδιασμού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ερευνητικού προγράμματος “Σιδηροδρομική Γέφυρα επί Ενεργού Σεισμογόνου Ρήγματος : Ανάπτυξη Νέας Πρότυπης Μεθοδολογίας Υπολογισμού της Καταπόνησης – Διερεύνηση και Ανάλυση Μεθόδων Αντιμετώπισης της Σεισμικής Διαρρήξεως”, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από τον Οργανισμό Σιδηροδρόμων Ελλάδος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ambraseys, N.N, & Jackson, J.A. (1990), Seismicity and associated strain of central Greece between 1890 and 1988, *International Journal of Geophysics*, 126 (3), pp. 663–708.
- Αναστασόπουλος Ι., Γερόλυμος Ν., Γκαζέτας Γ. (2001), Πιθανά Αίτια Καταρρεύσεως ενός Ανοίγματος Προσβάσεως της Γέφυρας Nishinomiya-ko : Κόμπτε 1995, *Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Αθήνα, Τόμος 2, σελ. 83–90.
- Anastasopoulos I., & Gazetas G. (2007a), Foundation-Structure Systems over a Rupturing Normal Fault : Part I. Observations after the Kocaeli 1999 Earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5 (3), pp. 253–275.

- Anastasopoulos I., & Gazetas G. (2007b), Behaviour of Structure–Foundation Systems over a Rupturing Normal Fault : Part II. Analysis of the Kocaeli Case Histories, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5 (3), pp. 277–301.
- Anastasopoulos I., Gazetas G., Bransby M.F., Davies M.C.R., and El Nahas A. (2007), Fault Rupture Propagation through Sand : Finite Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133 (8), pp. 943–958.
- Anastasopoulos I., Gazetas G., Bransby M.F., Davies M.C.R., and El Nahas A. (2008), Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 134 (8)
- Bransby, M.F., Davies, M.C.R., and El Nahas, A. (2008a), Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Special Issue : Integrated approach to fault rupture- and soil-foundation interaction, 6 (4) (in press).
- Bray, J.D. (1990), *The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B. (1994a), Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120 (3), pp. 543–561.
- Bray, J.D., Seed, R.B., and Seed, H.B. (1994b), Analysis of Earthquake Fault Rupture Propagation through Cohesive Soil, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120 (3), pp. 562–580.
- Bray, J.D. (2001), Developing Mitigation Measures for the Hazards Associated with Earthquake Surface Fault Rupture, *Workshop on Seismic Fault-Induced Failures – Possible Remedies for Damage to Urban Facilities*, University of Tokyo Press, pp. 55-79.
- Cole, D.A. Jr., and Lade, P.V. (1984), Influence Zones in Alluvium Over Dip-Slip Faults, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 110 (5), pp. 599-615.
- Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Callerio, A., and Gazetas, G. (2008), Case histories of fault–foundation interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Special Issue : Integrated approach to fault rupture- and soil-foundation interaction, 6 (4) (in press).
- Gerolymos N., and Gazetas G. (2006a), Winkler model for lateral response of rigid caisson foundations in linear soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, No. 5, pp. 347–361.
- Gerolymos N., and Gazetas G. (2006b), Development of Winkler model for static and dynamic response of caisson foundations with soil and interface nonlinearities, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, No. 5, pp. 363–376.
- Gerolymos N., Giannakou A., Anastasopoulos I., and Gazetas G. (2008), Evidence of Beneficial Role of Inclined Piles : Observations and Numerical Results, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Special Issue : Integrated approach to fault rupture- and soil-foundation interaction, 6 (4) (in press).
- Papadimitriou E.E., Karakostas V.G. (2003), Episodic occurrence of strong ($M_w \geq 6.2$) earthquakes in Thessalia area (central Greece), *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 215, pp. 395–409.
- Papastamatiou D., Mouyaris N. (1986), The earthquake of April 30, 1954, in Sophades (Central Greece), *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, Vol. 87, pp. 885–895.