

Υποθαλάσσια Σήραγγα Ρίου–Αντιρρίου : Σχεδιασμός έναντι Διάρρηξης Ρήγματος και Μεταγενέστερης Σεισμικής Δόνησης

Rion–Antirion Immersed Tunnel : Design for Combined Faulting Deformation and Subsequent Seismic Shaking

Ιωάννης ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ¹, Νίκος ΓΕΡΟΥΛΥΜΟΣ², Βασίλης Δρόσος³,
Ράλλης ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ⁴, Τάκης ΓΕΩΡΓΑΡΑΚΟΣ⁵, και Γιώργος ΓΚΑΖΕΤΑΣ⁶

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Το άρθρο παρουσιάζει τον αντισεισμικό σχεδιασμό της μελλοντικής υποθαλάσσιας σιδηροδρομικής σήραγγας Ρίου–Αντιρρίου, σε επίπεδο μελέτης εφικτότητας. Η εμβαπτιζόμενη αυτή σήραγγα θα αποτελέσει πρωτοποριακό έργο, τόσο λόγω του ιδιαίτερου μεγάλου βάθους (70 m), όσο και λόγω της έντονης σεισμικότητας της περιοχής. Αναλύεται η συνδυασμένη επίδραση κανονικής διάρρηξης 2 m στο βραχώδες υπόβαθρο, και μίας μεταγενέστερης ισχυρής σεισμικής δόνησης. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε τρία βήματα : (α) εφαρμογή της αρχικής υδροστατικής συμπίεσης των τεμαχίων της σήραγγας, (β) επιβολή της τεκτονικής παραμόρφωσης (προϊόν 2-διάστατης ανάλυσης επίπεδης παραμόρφωσης), και (γ) επιβολή ισχυρής σεισμικής δόνησης. Η κανονική τεκτονική παραμόρφωση προκαλεί διαφορετική από αρμό σε αρμό *αποσυμπίεση*. Παραδόξως, η μεταγενέστερη σεισμική δόνηση οδηγεί σε ομοιορφοποίηση των παραμορφώσεων. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην *υπερ-ελαστικότητα* των ελαστικών παρεμβυσμάτων των αρμών, σε συνδυασμό με την δυνατότητα ολίσθησης των τμημάτων της σήραγγας.

ABSTRACT : The paper investigates the response of a future 70 m deep immersed tunnel to the consecutive action of a major normal fault rupturing in an earthquake occurring in the basement rock underneath the tunnel, and a subsequent strong excitation from a different large-magnitude seismic event that may occur years later. It is shown that despite imposed bedrock offset of 2 meters, net tension or excessive compression between tunnel segments could be avoided with a suitable design of the joint gaskets. Then, the already deformed structure is subjected to strong asynchronous seismic shaking. The effect of segment length and joint properties is explored parametrically. A fascinating conclusion emerges in all analysed cases for the joints between segments that were differentially deformed after the quasi-static fault rupture: upon subsequent very strong seismic shaking, overstressed joints de-compress and understressed joints re-compress — a “healing” process that leads to a more uniform deformation profile along the tunnel and thus improving the safety.

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

² Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email : gerolymos@gmail.com

³ Μεταδιδάκτωρ Ερευνητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, drosos@mail.ntua.gr

⁴ Υπ. Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: rallisko@yahoo.com

⁵ Υπ. Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: takgeor@yahoo.gr

⁶ Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: gazetas@ath.forthnet.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εμβαπτιζόμενες σήραγγες αποτελούνται από προκατασκευασμένα πλεύσιμα τεμάχια μήκους 100 έως 160 m. Τα τεμάχια αυτά κατασκευάζονται σε ξηρά δεξαμενή (dry-dock), στεγανοποιούνται με χρήση ειδικών θυρο-φραγμάτων, μεταφέρονται με πλεύση, και εμβαπτιζονται εντός ορύγματος στον πυθμένα. Η σύνδεση δύο διαδοχικών τεμαχίων πραγματοποιείται μέσω ειδικών ελαστικών παρεμβυσμάτων τύπου *Gina*, αξιοποιώντας την υδροστατική πίεση. Οι εμβαπτιζόμενες σήραγγες επιτρέπουν μείωση του βάθους διέλευσης, ελαχιστοποιώντας την υδροστατική πίεση και το μήκος της σήραγγας. Επιπλέον, η κατασκευή των τεμαχίων της σήραγγας στην ξηρά εξασφαλίζει την ποιότητα κατασκευής.

Στόχος του άρθρου είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς κι ο αντισεισμικός σχεδιασμός της υπό μελέτη σιδηροδρομικής σήραγγας Ρίου–Αντιρρίου, σε παραμόρφωση από διάρρηξη κανονικού ρήγματος και επακόλουθη σεισμική δόνηση. Η κατασκευή της σήραγγας αυτής, αν τελικώς εγκριθεί και χρηματοδοτηθεί, θα αποτελέσει τεχνολογική πρόκληση τόσο λόγω του μεγάλου βάθους (67 m), όσο και της υψηλής σεισμικότητας της περιοχής σε συνδυασμό με τις μαλακές εδαφικές στρώσεις στις οποίες θα θεμελιωθεί. Τα στενά Ρίου–Αντιρρίου αποτελούν το στενότερο και ρηχότερο σημείο του Κορινθιακού Κόλπου, και μια από τις πλέον ενεργές τεκτονικές τάφρους παγκοσμίως : ρυθμός ολίσθησης 1 cm/έτος. Ως εκ τούτου, η σχεδιαζόμενη σήραγγα θα “διασταυρωθεί” με τουλάχιστον ένα ενεργό ρήγμα. Για τον λόγο αυτόν, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της καί έναντι τεκτονικής παραμόρφωσης.

Επιπλέον, στα 100 χρόνια διάρκειας ζωής του έργου είναι πολύ πιθανό να λάβει χώρα ισχυρή σεισμική δόνηση λόγω διάρρηξης άλλων ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής. Μια τέτοια σεισμική δόνηση θα έβρισκε την εμβαπτιζόμενη σήραγγα ήδη “ταλαιπωρημένη” από την μόνιμη τεκτονική παραμόρφωση λόγω της διάρρηξης του ρήγματος του πρώτου σεισμού. Σε μια τέτοια περίπτωση, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η μόνιμη εφελκυστική μετατόπιση από την διάρρηξη του κανονικού ρήγματος και η επιπρόσθετη δυναμική μετατόπιση του μεταγενέστερου σεισμού δεν θα οδηγήσουν σε πλήρη αποσυμπίεση των αρμών, κάτι που θα έθετε σε κίνδυνο την στεγανότητα και άρα την ασφάλεια της σήραγγας. Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζονται οι δύο σεισμικές φορτίσεις της σήραγγας.

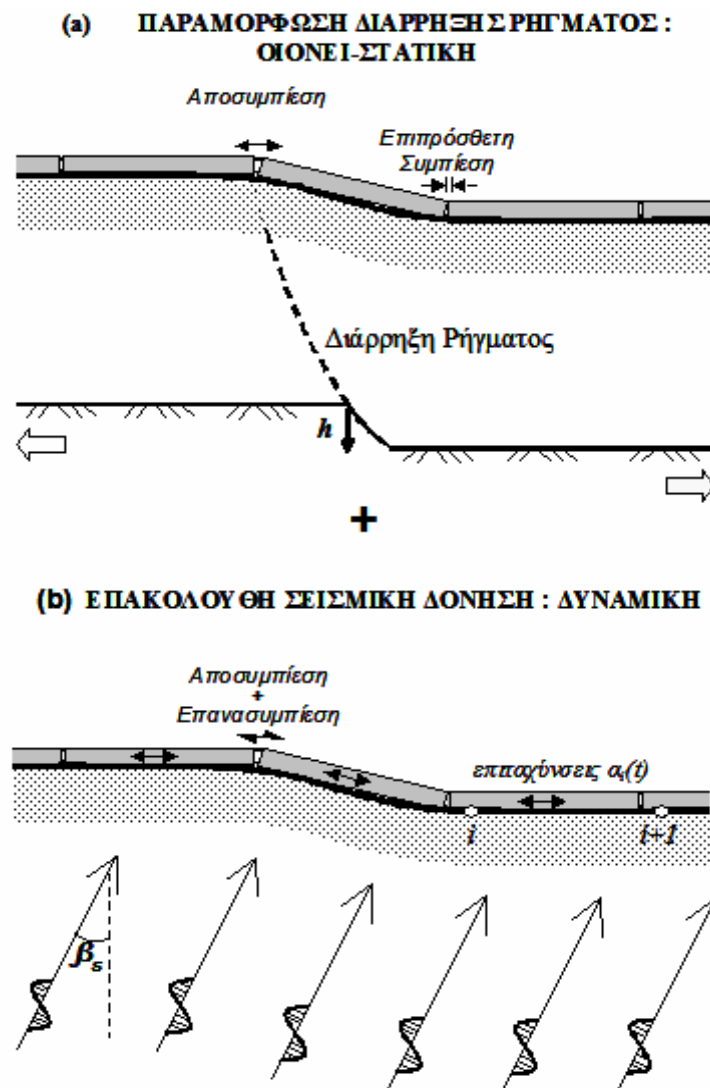
Η ΥΠΟ–ΜΕΛΕΤΗΝ ΣΗΡΑΓΓΑ

Στο **Σχήμα 2** δείχνεται ο χάρτης της περιοχής του έργου και τα γνωστά ενεργά ρήγματα. Η σήραγγα θα βρίσκεται σε απόσταση 300 m περίπου ανατολικά της υπάρχουσας οδικής γέφυρας. Το υποθαλάσσιο τμήμα της σήραγγας έχει συνολικό μήκος περίπου 2.5 km, το δε μέγιστο βάθος αγγίζει τα 67 m. Με συνολικό μήκος 9.5 km, η σήραγγα αποτελείται από την κεντρική εμβαπτιζόμενη σήραγγα μήκους 980 m, όπως δείχνεται στο **Σχήμα 3**, και δύο διανοιγόμενες σήραγγες “προσβάσεως” στα δύο άκρα. Σχεδιασμένη για διπλή σιδηροδρομική γραμμή, η ορθογωνική διατομή της εμβαπτιζόμενης σήραγγας έχει πλάτος 23 m και ύψος 11 m, με πάχος τοιχωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος 1.5 m. Οι διανοιγόμενες σήραγγες είναι κυκλικής διατομής διαμέτρου 12.5 m, με πάχος τοιχωμάτων 1.0 m.

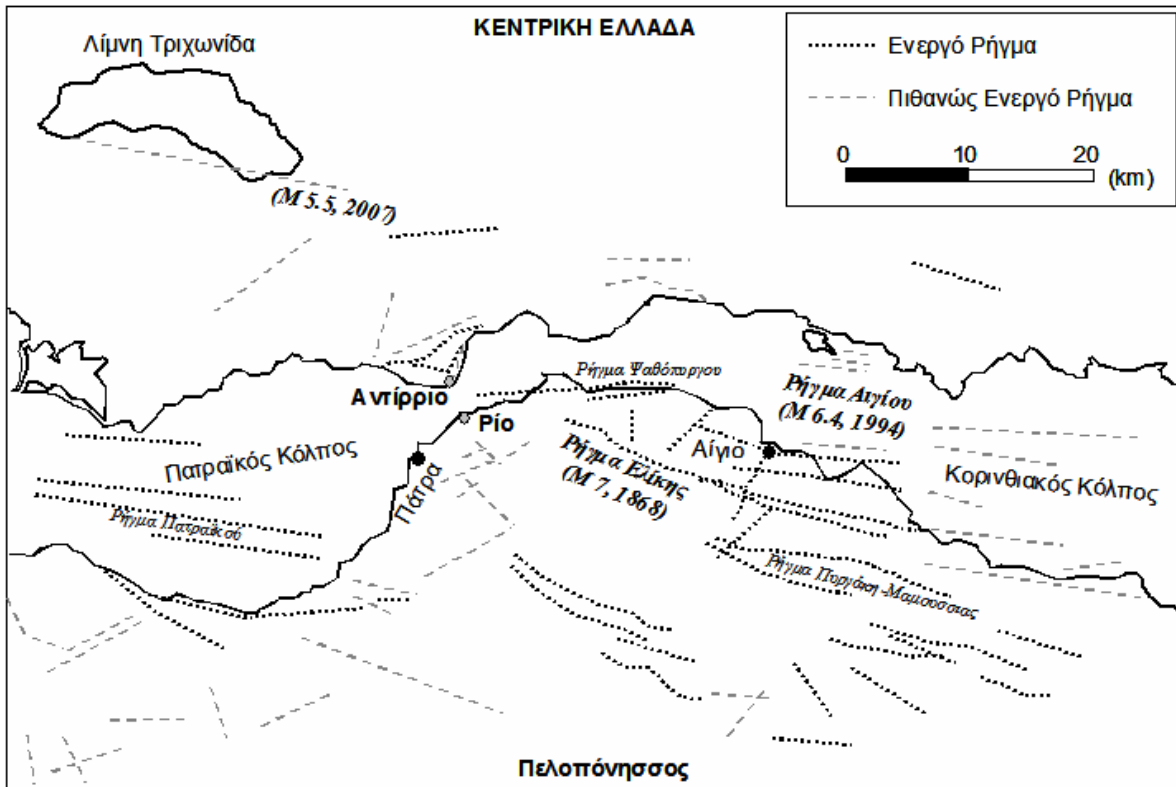
Το γεωτεχνικό προφίλ περιλαμβάνει εναλλαγές αμμοχάλικου, με ιλυώδη έως καθαρή άμμο, και ιλυώδη άργιλο. Η γεωτεχνική διερεύνηση έφτασε σε βάθος περίπου 100 m, χωρίς όμως

να συναντήσει το ασβεστολιθικό υπόβαθρο. Τα αποτελέσματα παλαιότερων γεωλογικών ερευνών και πρόσφατων γεωφυσικών διασκοπήσεων υποδηλώνουν ότι το βάθος του βραχώδους υποβάθρου είναι της τάξεως των 800 m [Rion-Antirion, 1992].

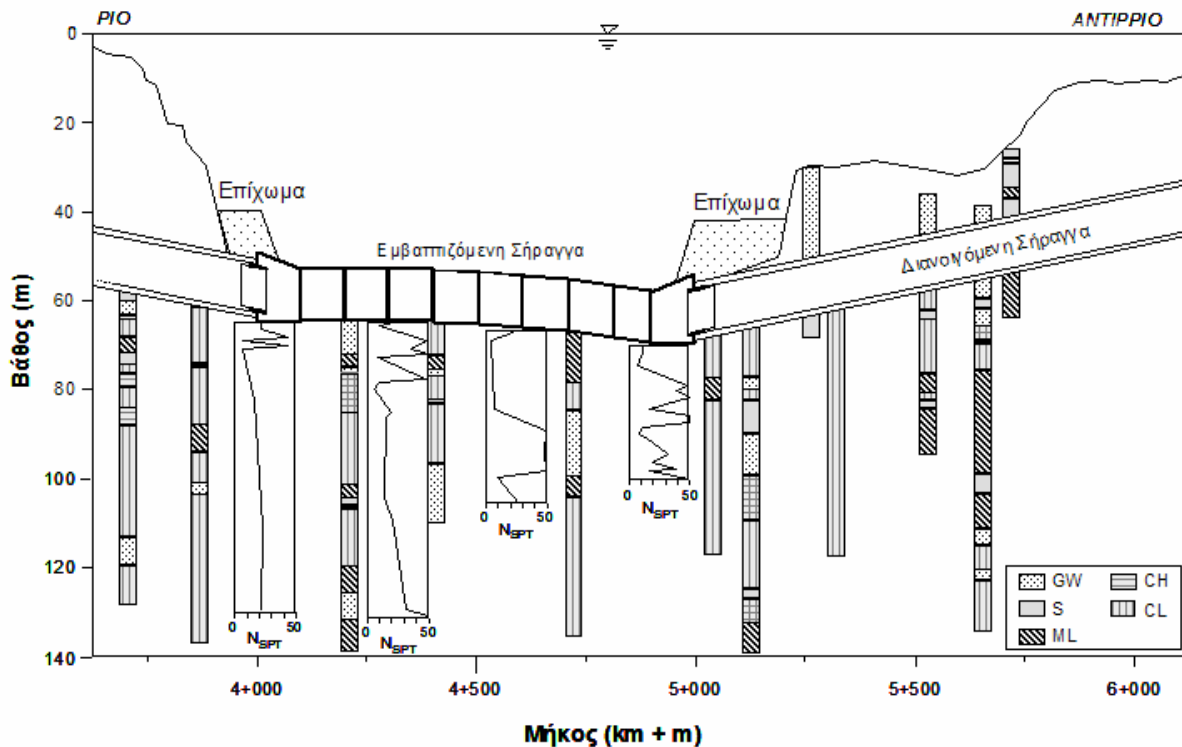
Ο Κορινθιακός Κόλπος περιλαμβάνει πλήθος ενεργών κανονικών ρηγμάτων, με διεύθυνση Α–Δ. Τα τελευταία 30 χρόνια η ευρύτερη περιοχή έχει πληγεί από έξι σεισμούς $M_s \approx 6$, με πλέον πρόσφατο τον σεισμό $M_s = 6.2$ του Αιγίου (1995) [Bernard et al., 1997; Gazetas, 1996]. Τα στενά επηρεάζονται *καί* από πιο απομακρυσμένες σεισμικές πηγές, όπως τα ρήγματα του Ιονίου.



Σχήμα 1. Διατύπωση του προβλήματος – οι δυο κρίσιμοι τύποι σεισμικής φόρτισης που είναι πιθανό να συμβούν στην διάρκεια ζωής της σήραγγας : (a) οιονεί-στατική παραμόρφωση λόγω τεκτονικής διάρρηξης κανονικού ρήγματος κάτω από την σήραγγα, και (b) μεταγενέστερη σεισμική δόνηση (διατμητικά κύματα διαδιδόμενα υπό γωνίαν β_s).



Σχήμα 2. Τα στενά Ρίου-Αντιρρίου, τα χαρτογραφημένα ενεργά και πιθανώς ενεργά ρήγματα, και τα μεγέθη μερικών πρόσφατων σεισμών που έλαβαν χώρα στην περιοχή.



Σχήμα 3. Κατά μήκος τομή της υπο-διερεύνησιν σήραγγας με ενδεικτική εδαφική ταξινόμηση και μετρήσεις N_{SPT} .

ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Μέχρι σήμερα, καμία εμβαπτιζόμενη σήραγγα δεν έχει υποστεί διάρρηξη σεισμικού ρήγματος. Από την άλλη, υπάρχουν μερικά ιστορικά περιστατικά απόκρισης εμβαπτιζόμενων σηράγγων σε σεισμική ταλάντωση. Μέχρι σήμερα, δύο τέτοιες σήραγγες έχουν υποβληθεί σε μετρίως ισχυρή σεισμική δόνηση: (α) η σήραγγα Bay Area Rapid Transit (BART) στην Καλιφόρνια, και (β) η σήραγγα Osaka South Port στην Ιαπωνία. Καί στις δύο περιπτώσεις, η απόκριση τους ήταν άκρως ικανοποιητική.

Η μήκους 5.8 km και μεγίστου βάθους 40 m σήραγγα *BART* είχε κατασκευαστεί την δεκαετία του '60. Αποτελούμενη από 58 τεμάχια πλάτους 14.6 m και ύψους 6.5 m, η σήραγγα ήταν ήδη σε λειτουργία επί 30 χρόνια όταν έλαβε χώραν ο σεισμός $M_s 7.1$ της Loma Prieta (1989). Σε απόσταση 110 km από το ρήγμα, η σήραγγα επέζησε του σεισμού χωρίς βλάβες. Ήταν εξοπλισμένη με ειδικούς τρι-διάστατους αρμούς, σχεδιασμένους για οριζόντια και κατακόρυφη διαφορική μετατόπιση ± 8 cm και ± 15 cm, αντιστοίχως [Bickel & Tanner, 1982]. Οι αρμοί συμπεριφέρθηκαν άψογα, αν και οι ακριβείς μετατοπίσεις τους δεν είναι γνωστές.

Η μήκους 1 km και μεγίστου βάθους 27 m σήραγγα *Osaka South Port*, αποτελούμενη από 10 τεμάχια σκυροδέματος πλάτους 35 m και ύψους 8.6 m, είχε μόλις αποπερατωθεί όταν έλαβε χώραν ο σεισμός $M_s 7.2$ του Kobe (1995). Σε απόσταση μόλις 15 km από το ρήγμα, η σήραγγα υπεβλήθη σε μέγιστη επιτάχυνση 0.27 g, χωρίς να υποστεί βλάβες. Για την σύνδεση των τεμαχίων έγινε χρήση ελαστικών παρεμβυσμάτων τύπου *Gina*, σε συνδυασμό με στεγανωτικές μεμβράνες *Ωμέγα*, τένοντες, και διατμητικές κλείδες. Παρατηρήθηκαν παραμορφώσεις των αρμών της τάξεως των 2 έως 3 cm, χωρίς να σημειωθούν διαρροές ή ρηγματώσεις.

Ο προτεινόμενος αντισεισμικός σχεδιασμός είναι παρόμοιος με αυτόν της σήραγγας *Osaka South Port*, και σκιαγραφείται στο **Σχήμα 4**. Τα τεμάχια, αφού μεταφερθούν με πλεύση, εμβαπτίζονται εντός της τάφρου στον πυθμένα. Μόλις δύο διαδοχικά τεμάχια έρθουν σε επαφή, το ενδιάμεσο ύδωρ αναρροφάται. Η αναρρόφηση αυτή καταργεί την υδροστατική πίεση στο άκρο το οποίο εφάπτεται του προηγηθέντος τεμαχίου. Στο άλλο άκρο, η υδροστατική πίεση παραμένει, προκαλώντας την συμπίεση του ελαστικού *Gina* και την στεγανοποίηση της σύνδεσης (**Σχήμα 4b** και **c**).

Σε αυτή την περίπτωση, η πίεση είναι της τάξεως των 650 kPa, καθιστώντας αναγκαία την χρήση του μεγαλύτερου διαθέσιμου ελαστικού *Gina*. Τα ελαστικά αυτά είναι επιρρεπή σε εφελκυστική αστοχία κάθετα στον άξονα της φόρτισης, αν υποβληθούν σε υπερβολικό θλιπτικό φορτίο [Kelly, 1997]. Μετά την ολοκλήρωση της σύνδεσης αφαιρούνται τα θυροφράγματα και τοποθετείται η δευτερεύουσα στεγανωτική ελαστική μεμβράνη *Ωμέγα*. Σε αντίθεση με το ελαστικό *Gina*, η μεμβράνη *Ωμέγα* δεν απαιτεί θλιπτικό φορτίο για να είναι στεγανή. Δεδομένου ότι τα ελαστικά αυτά δεν μπορούν να παραλάβουν διάτμηση και εφελκυσμό, είναι απαραίτητες οι διατμητικές κλείδες και οι τένοντες. Οι μεν διατμητικές κλείδες σκυροδετούνται εκ των υστέρων, οι δε τένοντες προϋπάρχουν μεν αλλά συνδέονται εκ των υστέρων. Η σύνδεση τους γίνεται με ειδικές ενώσεις (*couplers*), οι οποίες επιτρέπουν μια μικρή απο-συμπίεση του αρμού χωρίς ενεργοποίηση των τενόντων.

Κύριος στόχος του αντισεισμικού σχεδιασμού είναι η εξασφάλιση της στεγανότητας των αρμών, η αποφυγή δηλαδή υπερβολικής *απο-συμπίεσης* και “καθαρού” εφελκυσμού. Σκοπός αυτού του άρθρου είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς της σήραγγας : (α) σε παραμόρφωση από διάρρηξη κανονικού ρήγματος και (β) σε επακόλουθη ισχυρή σεισμική δόνηση. Η συμπεριφορά της σήραγγας για ποικίλες σεισμικές δονήσεις παρουσιάζεται με λεπτομέρεια στην δημοσίευση των Anastasopoulos et al [2007], στην οποία δείχνεται ότι η σήραγγα μπορεί να αντέξει πλήθος ενισχυμένων εδαφικών διεγέρσεων με PGA έως 0.60 g, PGV έως 80 cm/s, και με παλμούς κατευθυντικότητας μεγάλων περιόδων. Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους είναι το μήκος των τεμαχίων της σήραγγας, το οποίο καθορίζει το πλήθος των αρμών. Διερευνούνται παραμετρικά τρία μήκη : (i) 70 m, (ii) 100 m, και (iii) 165 m. Παρότι η διεθνής πρακτική έχει δείξει ότι η χρήση τεμαχίων μεγάλου μήκους οδηγεί σε ελαχιστοποίηση του κόστους [Marshall, 1999], λόγω του μεγάλου βάθους και της έντονης σεισμικότητας της περιοχής κάτι τέτοιο δεν συνιστά την πρώτη προτεραιότητα.

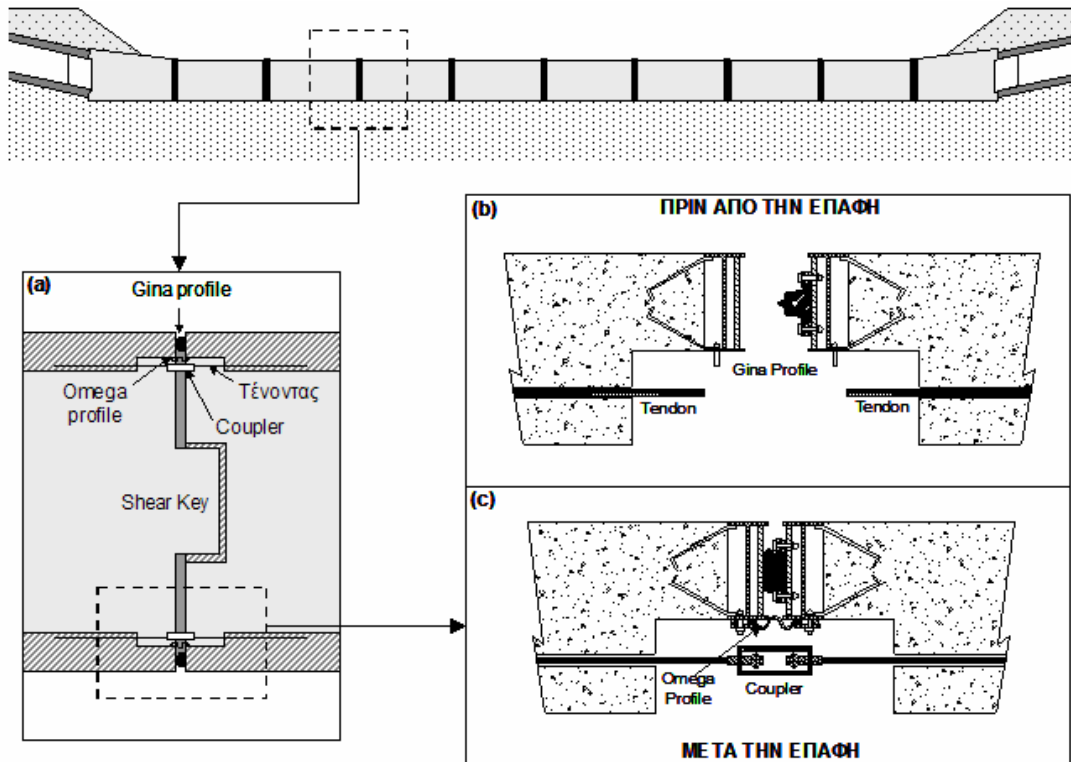
Οι επιμηκύνσεις και οι διαφορικές καθιζήσεις που θα προκληθούν από την διάρρηξη του ρήγματος θα αποσυμπιέσουν μερικούς από τους αρμούς. Επιπρόσθετα, κατά την επακόλουθη σεισμική δόνηση τα ελαστικά *Gina* θα υποστούν διαδοχικές *συμπίεσεις* και *αποσυμπιέσεις*. Εάν η συνολική αποσυμπίεση εξαντλήσει την αρχική (υδροστατική) συμπίεση, τότε οι τένοντες θα κληθούν να παραλάβουν σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις. Η παραλαβή εφελκυστικών τάσεων από το σκυρόδεμα θα συνοδευτεί αναπόφευκτα από ανάπτυξη ρωγμών, με αποτέλεσμα την απώλεια της στεγανότητας. Ως εκ τούτου, ο περιορισμός της αποσυμπίεσης των αρμών είναι πρωταρχικής σημασίας. Η ανάλυση έγινε για τους δύο τύπους ελαστικών αρμών του **Σχήματος 5**. Ο πρώτος, “Τύπος Α”, αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο διαθέσιμο *Gina*. Ο δεύτερος, “Τύπος Β”, είναι ένα υποθετικό *Gina* διπλάσιας διάστασης. Η συμπεριφορά αυτού του υποθετικού ελαστικού επιτρέπει μεγαλύτερα όρια παραμόρφωσης και σημαντική επιπρόσθετη συμπίεση και αποσυμπίεση. Η υπερελαστική συμπεριφορά αμφοτέρων εκτιμήθηκε βάσει πειραματικών δεδομένων [Kiyomiya, 1995].

Επίσης, διερευνάται και το διάκενο της διατμητικής κλείδας. Όσο μεγαλύτερο είναι το διάκενο αυτό, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη επιτρεπτή εγκάρσια σχετική μετατόπιση. Περιορισμός του διακένου οδηγεί σε πιο “πακτωμένη” σύνδεση. Διερευνήθηκαν δύο λογικές τιμές του διακένου : 5 mm και 20 mm.

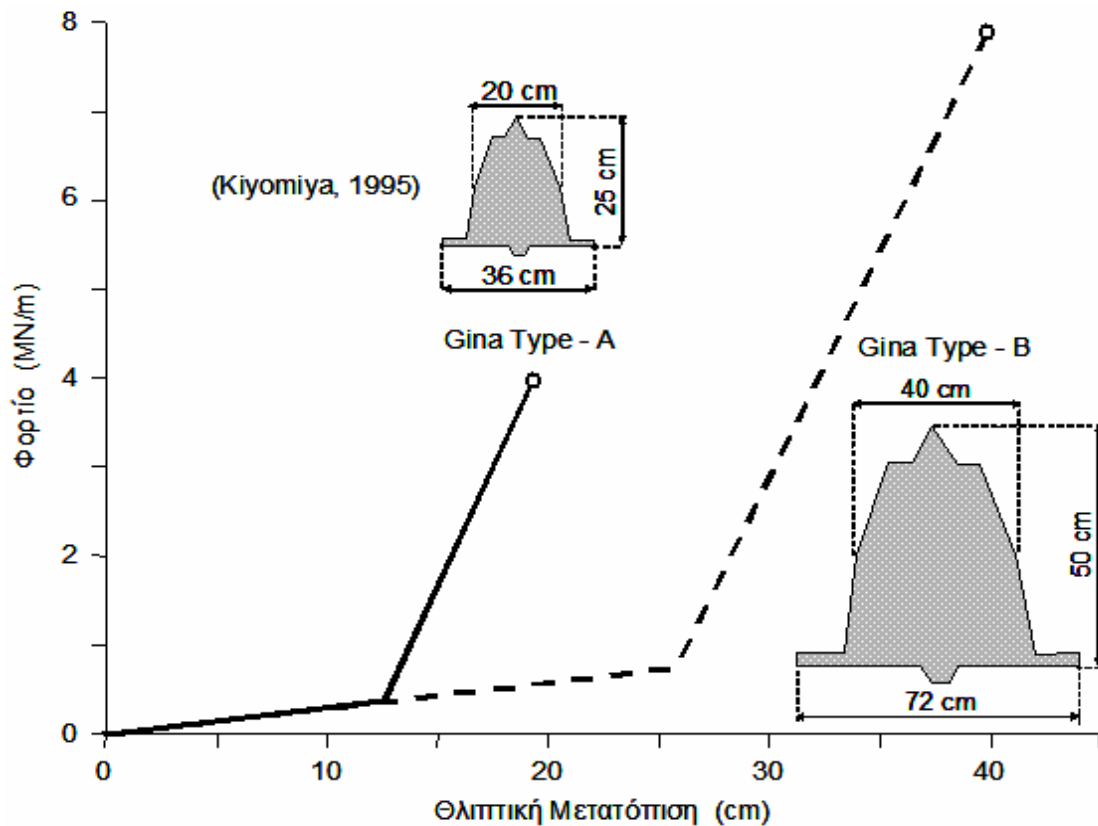
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ

Για την μη-γραμμική οιονεί-στατική και δυναμική ανάλυση της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS [2004]. Το προσομοίωμα της σήραγγας παρουσιάζεται σχηματικά στο **Σχήμα 6**. Τα τεμάχια της σήραγγας προσομοιώνονται με στοιχεία δοκού, τα οποία συνδέονται στο έδαφος μέσω καταλλήλως βαθμονομημένων εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων. Η ανάλυση διεξάγεται σε τρία βήματα:

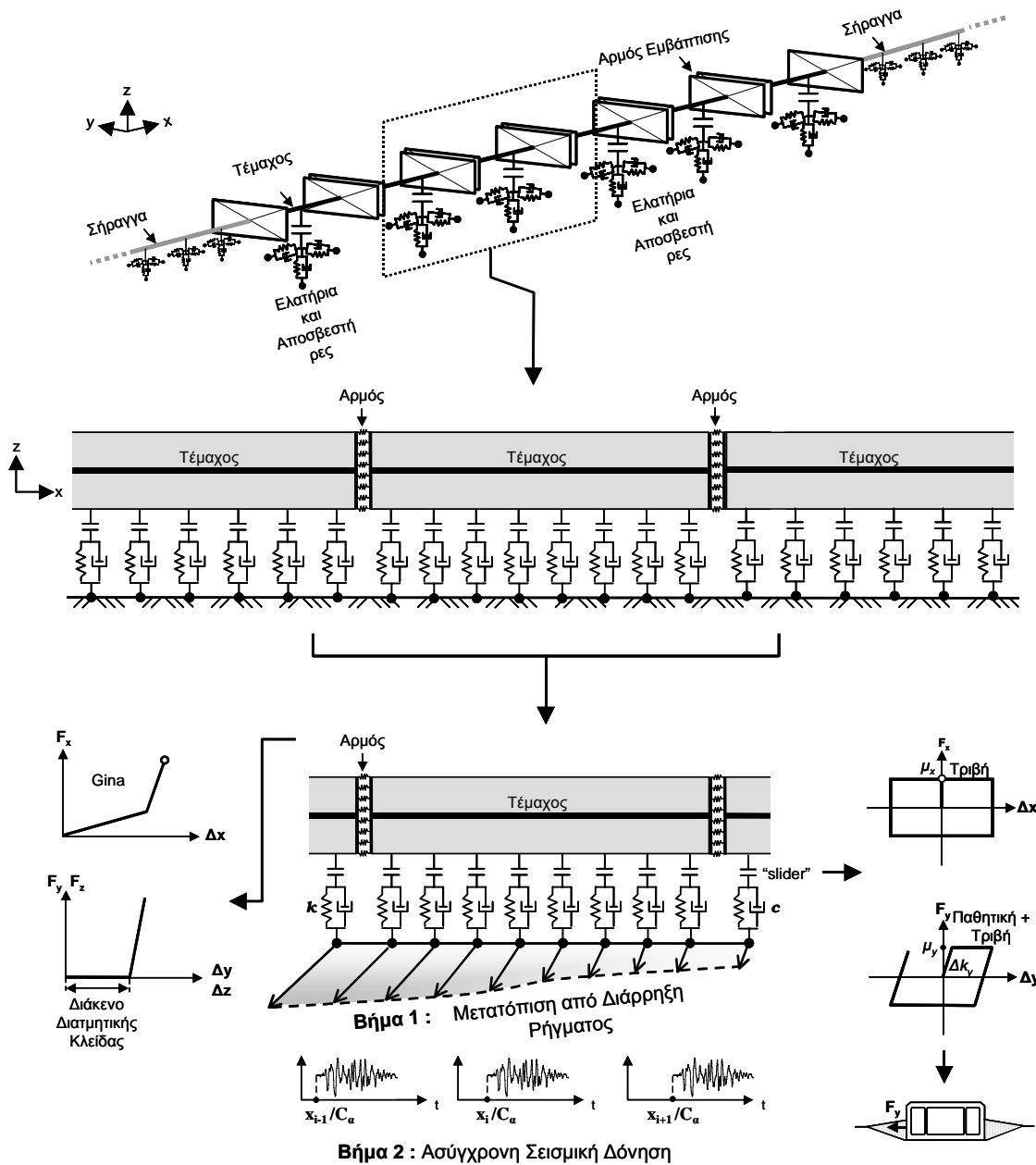
- Στο “Βήμα 0” η υδροστατική πίεση εφαρμόζεται στατικά στα άκρα του κάθε τεμάχους για να προσομοιωθεί η αρχική υδροστατική συμπίεση. Λεπτομέρειες αυτής της διαδικασίας δίδονται στην εργασία Anastasopoulos et al. [2007].



Σχήμα 4. (α) Σκαρίφημα του αρμού εμβαπτίσεως, (β) λεπτομέρεια του αρμού, πριν από την επαφή δυο διαδοχικών τμημάτων της σήραγγας, και (γ) μετά την επαφή και ολοκλήρωση της σύνδεσης.



Σχήμα 5. Υπερελαστική συμπεριφορά των ελαστικών αρμών της ανάλυσης : ο Τύπος Α αναφέρεται στο μεγαλύτερο διαθέσιμο ελαστικό αρμό GINA, ο υπολογισμός του οποίου βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα του Kiyomiya [1995]. Ο Τύπος Β αποτελεί μια υποθετική μεγέθυνση του αρμού αυτού.



Σχήμα 6. Σχηματικό διάγραμμα του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Στο πρώτο βήμα εφαρμόζονται οιονεί-στατικά οι τεκτονικές μετατοπίσεις. Στο δεύτερο βήμα, εφαρμόζεται η ασύγχρονη σεισμική διέγερση

- Στο “Βήμα 1” το προφίλ των μετατοπίσεων από την διάρρηξη του ρήγματος (το οποίο έχει υπολογισθεί ξεχωριστά με 2-διάστατη ανάλυση διάδοσης της διάρρηξης, επίπεδης παραμόρφωσης) εφαρμόζεται οιονεί-στατικά στις “στηρίξεις” της σήραγγας.
- Στο τελικό “Βήμα 2”, το προσομοίωμα υποβάλλεται σε δυναμική διέγερση. Η διέγερση διέρχεται πρώτα από τις αλλουβιακές αποθέσεις ώστε να ληφθεί υπόψη η εδαφική απόκριση (ενίσχυση του κραδασμού). Στην συνέχεια, η προκύπτουσα διέγερση εφαρμόζεται κατά μήκος των στηριξεων της σήραγγας με χρονική υστέρηση.

Παράμετροι Αλληλεπίδρασης Εδάφους-Σήραγγας

Ακόμα κι αν η σήραγγα ήταν *πλήρως εγκιβωτισμένη* εντός ενός ιδεατού ελαστικού μέσου, η βαθμονόμηση των “ελατηρίων” των στηρίξεων δεν θα ήταν και τόσο εύκολη υπόθεση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, πρέπει να ληφθούν επίσης υπόψιν τα εξής : (i) η επίλυση του Kelvin δεν μπορεί να εφαρμοστεί αφού η σήραγγα δεν είναι πλήρως εγκιβωτισμένη, (ii) η δυσκαμψία των τμημάτων της σήραγγας σε σχέση με το μαλακό έδαφος κοντά στην επιφάνεια θα οδηγήσει σε σχεδόν ομοιόμορφη μετατόπιση στην οριζόντια διεύθυνση (x ή y) και όχι σε ημιτονοειδή παραμόρφωση της σήραγγας, και (iii) η ανομοιογένεια του εδάφους περιπλέκει περαιτέρω την λύση του προβλήματος [βλ. Gazetas, 1983].

Για τους λόγους αυτούς, χρησιμοποιήθηκαν οι δημοσιευμένες ελαστοδυναμικές λύσεις για άκαμπτο ορθογωνικό θεμέλιο επί μη-ομοιογενούς ημιχώρου [Gazetas, 1991]. Σύμφωνα με αυτές, το ενεργό μέτρο διατμήσεως ορίζεται ως εξής :

$$G(z) \gg G_0 \frac{z}{2B} + \alpha \frac{z^m}{B^{\frac{m+1}{2}}} \quad (1)$$

όπου G_0 είναι το μέτρο διάτμησης σε βάθος $z = 0$, $2B (= 23.5 \text{ m})$ είναι το πλάτος της σήραγγας, και α, m εδαφικές παράμετροι. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μή-γραμμικότητα του εδάφους, οι παράμετροι G_0, α, m ελήφθησαν από με βάση τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης εδαφικής απόκρισης (με βάση την τελευταία επανάληψη της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης) και όχι απλά χρησιμοποιώντας το αρχικό μέτρο διάτμησης G_{max} . Τα κατανεμημένα κατακόρυφα και οριζόντια ελατήρια λαμβάνονται ως η στατική κατακόρυφη, εγκάρσια και αξονική δυσκαμψία μίας πολύ μακριάς σήραγγας. Οι σταθερές των ελατηρίων Winkler k_z, k_y, k_x εκφρασμένες ως δυσκαμψία ανά μονάδα μήκους (kN/m/m) για $\nu = 0.5$ είναι :

$$k_z \gg \frac{0.73}{1-\nu} G_0 (1+2\alpha)^m \quad (2)$$

$$k_y \gg \frac{2}{2-\nu} G_0 \frac{z}{2B} + \frac{2}{3} \alpha \frac{z^m}{B^{\frac{m+1}{2}}} \quad (3)$$

$$k_x \gg k_y - \frac{0.2}{0.75-\nu} \frac{z}{2B} - \frac{B}{L} \frac{z}{2B} G_0 \frac{z}{2B} + \frac{1}{2} \alpha \frac{z^m}{B^{\frac{m+1}{2}}} \quad (4)$$

Οι ανωτέρω εκφράσεις μπορούν να θεωρηθούν έγκυρες για όλο το εύρος συχνοτήτων. Η επίδραση του μερικού εγκιβωτισμού της σήραγγας λαμβάνεται εμμέσως υπόψιν στην εγκάρσια διεύθυνση (y), με προσαύξηση της σταθεράς του ελατηρίου k_y , η οποία υπολογίζεται με βάση την ελαστική αντίσταση του πλευρικού τοιχίου :

$$\Delta k_y \approx E_{fill} h/2B \quad (5)$$

όπου E_{fill} το μέτρο ελαστικότητας της επίχωσης και h το “ενεργό” βάθος εγκιβωτισμού. Οι κατακόρυφοι c_z , εγκάρσιοι c_y , και διαμήκεις c_x συντελεστές απόσβεσης λαμβάνονται αντίστοιχα όπως περιγράφεται στην εργασία Gazetas [1991].

Όπως δείχνεται στο **Σχήμα 6**, ανάμεσα στα ελατήρια και τα τεμάχια της σήραγγας παρεμβάλλονται ειδικά στοιχεία “διεπιφάνειας”. Κατά μήκος του άξονα της σήραγγας (x), η συμπεριφορά της διεπιφάνειας ελέγχεται από τον συντελεστή τριβής σήραγγας–πυθμένα μ_x . Στην εγκάρσια διεύθυνση (y), ο ισοδύναμος συντελεστής τριβής μ_y είναι συνάρτηση της παθητικής αντίστασης της επίχωσης, υπολογίζεται δε με ανάλυση σε επίπεδη παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας.

Στα άκρα των τεμαχίων της σήραγγας τοποθετούνται ειδικά άκαμπτα στοιχεία για την προσομοίωση των επιφανειών σύνδεσης των αρμών. Τα τεμάχια συνδέονται μέσω μή-γραμμικών “ελατηρίων”. Στην διαμήκη διεύθυνση (x) τα “ελατήρια” προσομοιώνουν το ελαστικό παρέμβυσμα *Gina*, η δε συμπεριφορά τους είναι υπερ-ελαστική ακολουθώντας τις καμπύλες του **Σχήματος 5** (δηλαδή προοδευτική κράτυνση με την αύξηση του φορτίου). Στην εγκάρσια διεύθυνση (y), δεδομένου ότι τα ελαστικά *Gina* δεν μεταβιβάζουν διάτμηση, τα “ελατήρια” αναφέρονται στην αντίσταση της διατμητικής κλείδας : μηδενική αντίσταση μέχρι εξαντλήσεως του διακένου, ακολουθούμενη από πλήρως άκαμπτη συμπεριφορά.

ΒΗΜΑ 1 : ΕΠΙΒΟΛΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η ανάλυση της διάδοσης της διάρρηξης διαμέσου των εδαφικών στρώσεων είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του προφίλ των μετακινήσεων στην βάση της σήραγγας (δηλαδή στον πυθμένα της θαλάσσης). Η ακριβής θέση ανάδυσης και το μέγεθος του αναβαθμού στην επιφάνεια του εδάφους δεν εξαρτάται μόνο από το είδος και το μέγεθος του ρήγματος, αλλά και από την σύσταση των υπερκείμενων εδαφικών στρώσεων [Slemmons, 1957; Brune & Allen, 1967; Berrill, 1983; Taylor et al., 1985; Buwalda & St. Amand, 1955; Kelson et al., 2001; Sanford, 1959; Horsfield, 1977; Roth et al., 1981; Cole & Lade, 1984; Lade et al., 1984; Bray, 1990; Bray et al. 1994; Lazarte & Bray, 1995; Bray, 2001; Johansson & Konagai, 2004; El Nahas et al., 2006]. Η ανάδυση διάρρηξης κατακόρυφου εύρους h στην επιφάνεια του εδάφους διαμέσου εδαφικής στρώσεως πάχους H εξαρτάται κυρίως από την αδιάστατη μετατόπιση h/H και την πλαστιμότητα του εδάφους [Bray, 1990; Cole and Lade, 1984; Lade et al., 1984; Anastasopoulos et al., 2007b]. Για κανονικά ρήγματα με γωνία κλίσης α από 45° έως 60° , η απαιτούμενη τιμή του λόγου h/H για ανάδυση της διάρρηξης είναι της τάξης του 1% [Anastasopoulos et al., 2007b]. Αν η αδιάστατη επιβαλλόμενη μετατόπιση h/H δεν ξεπεράσει αυτή την κρίσιμη τιμή, η διάρρηξη δεν θα αναδυθεί και το έδαφος θα παραμορφωθεί οιονεί-ελαστικά [Cole and Lade, 1984; Lade et al., 1984; Anastasopoulos et al., 2007b]. Αυτού του είδους η παραμόρφωση είναι σαφώς ευνοϊκότερη σε σχέση με την ανάπτυξη αναβαθμού.

Η γεωτεχνική έρευνα (που εκτελέστηκε για την Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου) έφτασε σε βάθος 100 m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, χωρίς να συναντηθεί το βραχώδες υπόβαθρο. Προκειμένου να διερευνηθεί με περισσότερη το τεκτονικό περιβάλλον της περιοχής και να

εκτιμηθεί το πάχος H των αλλουβιακών αποθέσεων, διεξήχθη λεπτομερής γεωφυσική έρευνα [Tselenitis et al., 2004], με χρήση δικτύου δίκτυο εβδομήντα σειсмоγράφων. Εκτελέστηκε τομογραφική απεικόνιση προκειμένου να εντοπισθούν τα πιθανώς ενεργά ρήγματα. Τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας αυτής έχουν ως εξής :

- i. Δεν ανιχνεύτηκε σεισμική δραστηριότητα σε βάθη μικρότερα του 1.5 km, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση ότι τα υποκείμενα ενεργά ρήγματα δεν φτάνουν στον πυθμένα.
- ii. Όπως δείχνεται στο **Σχήμα 7a**, πέντε ζώνες διάρρηξης ανιχνεύτηκαν στα στενά, με διεύθυνση πρακτικά κάθετη στον άξονα της σήραγγας.
- iii. Το ασβεστολιθικής συστάσεως βραχώδες υπόβαθρο ($V_p > 3500$ m/s) ανιχνεύτηκε σε βάθος της τάξης των 800 m.

Με αυτά τα αποτελέσματα, αναλύθηκε το κεντρικό τμήμα του στενού μέχρι τα 800 m όπου ανιχνεύθηκε το υγιές βραχώδες υπόστρωμα. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το προσομοίωμα απεικονίζεται στο **Σχήμα 7b**. Στο βραχώδες υπόστρωμα, σε βάθος 800 m, εκδηλώνεται διάρρηξη ενός κανονικού ρήγματος με κλίση α και μετατόπιση h στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το συνολικό εύρος του προσομοιώματος είναι $B = 4H = 3200$ m σύμφωνα με την σύσταση του Bray (1990).

Η συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώνεται με μή-γραμμικό καταστατικό προσομοίωμα με κριτήριο διαρροής Mohr-Coulomb και ισοτροπική χαλάρωση, η οποία εισάγεται στον κώδικα μέσω ειδικής υπόρουτινας. Η χαλάρωση εφαρμόζεται στην γωνία τριβής φ_{mob} και την διαστολικότητα ψ_{mob} σε συνάρτηση με την πλαστική οκταεδρική παραμόρφωση :

$$\varphi_{mob} = \begin{cases} \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_{res}}{\gamma_f^P} \gamma_{oct}^P, & \text{for } 0 \leq \gamma_{oct}^P < \gamma_f^P \\ \varphi_{res}, & \text{for } \gamma_{oct}^P \geq \gamma_f^P \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi_{mob} = \begin{cases} \psi_p \left(1 - \frac{\gamma_{oct}^P}{\gamma_f^P} \right), & \text{for } 0 \leq \gamma_{oct}^P < \gamma_f^P \\ \psi_{res}, & \text{for } \gamma_{oct}^P \geq \gamma_f^P \end{cases} \quad (7)$$

όπου : φ_p και φ_{res} η μέγιστη και η παραμένουσα γωνία τριβής, ψ_p η μέγιστη γωνία διαστολικότητας, και γ_f^P η πλαστική οκταεδρική παραμόρφωση για την οποία έχει ολοκληρωθεί η χαλάρωση. Οι παράμετροι του προσομοιώματος βαθμονομούνται με βάση τα αποτελέσματα πειραμάτων άμεσης διάτμησης. Περισσότερες λεπτομέρειες για την διαδικασία βαθμονόμησης και την προσεγγιστική μέθοδο συνυπολογισμού των φαινομένων κλίμακας μπορούν να βρεθούν στην δημοσίευση Anastasopoulos et al. [2007b].

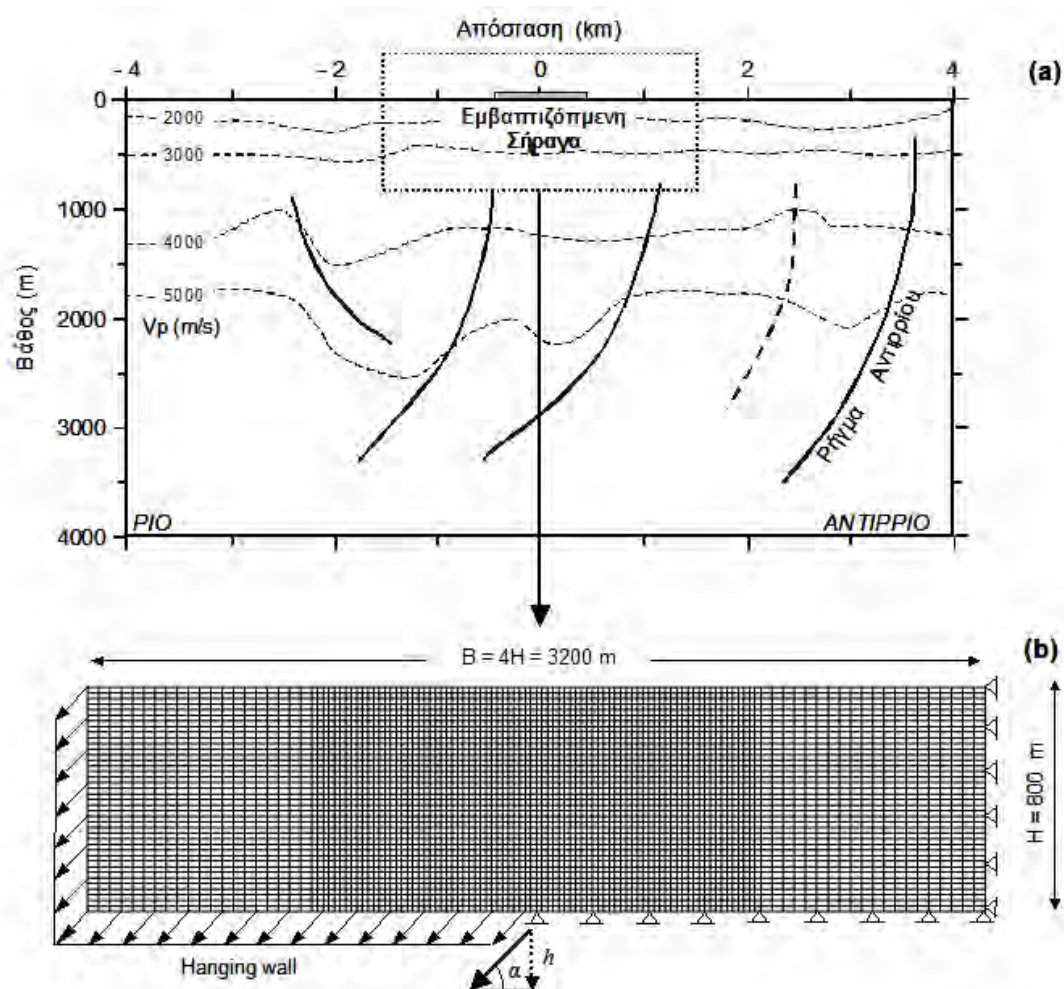
Η εγκυρότητα της εν λόγω μεθοδολογίας έχει επιβεβαιωθεί ποιοτικά με σύγκριση με δημοσιευμένα ιστορικά περιστατικά και εργαστηριακές έρευνες [Slemmons, 1957; Brune &

Allen, 1967; Taylor et al., 1985; Horsfield, 1977; Cole & Lade, 1984], και ποσοτικά μέσω τυφλών προβλέψεων πειραμάτων φυγοκεντριστή [Anastasopoulos et al., 2007]. Λόγω των αβεβαιοτήτων ως προς την σύνθεση του εδαφικού προφίλ, αναλύθηκαν παραμετρικά δυο ιδεατά εδαφικά υλικά :

- (a) Πυκνό μή-συνεκτικό έδαφος : $\varphi_p = 45^\circ$, $\varphi_{res} = 30^\circ$, $\psi_p = 15^\circ$, $\psi_{res} = 0^\circ$ και $\gamma_y = 1.5\%$
- (b) Χαλαρό μή-συνεκτικό έδαφος: $\varphi_p = 30^\circ$, $\varphi_{res} = 25^\circ$, $\psi_p = 5^\circ$, $\psi_{res} = 0^\circ$ και $\gamma_y = 3.0\%$

όπου γ_y είναι μια παράμετρος που ελέγχει την πλαστιμότητα του εδάφους.

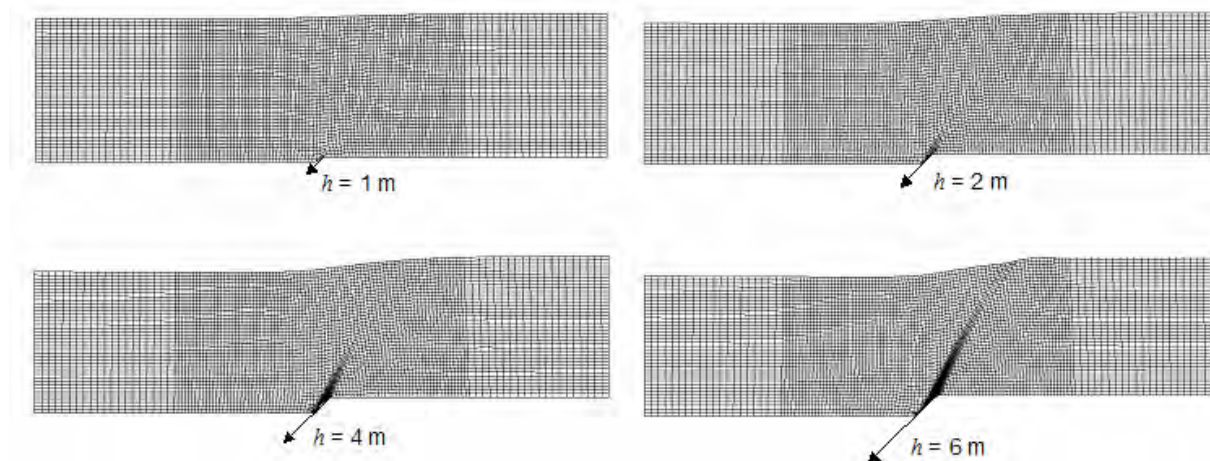
Η μετατόπιση h_d του βραχώδους υποβάθρου ελήφθη συντηρητικά ίση με 2 m. Πρέπει να τονισθεί ότι αυτή η μετατόπιση δεν θα λάβει χώρα απαραίτητα κατά την διάρκεια ενός μόνο σεισμού, αλλά μπορεί να είναι το συσσωρευτικό αποτέλεσμα πολλαπλών σεισμικών επεισοδίων κατά την διάρκεια ζωής του έργου. Η κλίση του ρήγματος α ελήφθη ίση με 45° (συντηρητική παραδοχή). Όπως αναφέρθηκε, για μικρές τιμές του λόγου h/H η διάρρηξη δεν αναδύεται στην επιφάνεια. Για $H = 800$ m και μετατόπιση $h = 2$ m, η αδιάστατη μετατόπιση $h/H = 0.25\%$, κάτι που σημαίνει ότι διάρρηξη δεν θα αναδυθεί στον πυθμένα [Anastasopoulos et al., 2007b].



Σχήμα 7. (a) Χαρτογράφηση των ενεργών ρηγμάτων στην περιοχή της σήραγγας σύμφωνα με την γεωφυσική τομογραφία [Tselentis, 2004], και (b) κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση

διάδοσης της διάρρηξης διαμέσου των εδαφικών στρώσεων συνολικού πάχους 800 m.

Στο **Σχήμα 8** δείχνονται χαρακτηριστικά “στιγμιότυπα” της διάδοσης της διάρρηξης διαμέσου του ιδεατής πυκνής εδαφικής στρώσεως. Ακόμη και για $h = 4$ m (δηλαδή $h/H = 0.5\%$), η διάρρηξη δεν εμφανίζεται στην επιφάνεια. Μόνο όταν η μετατόπιση του βραχώδους υποβάθρου ξεπεράσει τα 6 m (δηλαδή $h/H = 0.75\%$) η διάρρηξη αρχίζει να αναδύεται στην επιφάνεια. Για μετατόπιση σχεδιασμού $h_d = 2$ m, η διάρρηξη απέχει πολύ από το να αναδυθεί στον πυθμένα. Η κατάσταση είναι ακόμη καλύτερη για την περίπτωση του χαλαρής εδαφικής στρώσεως.

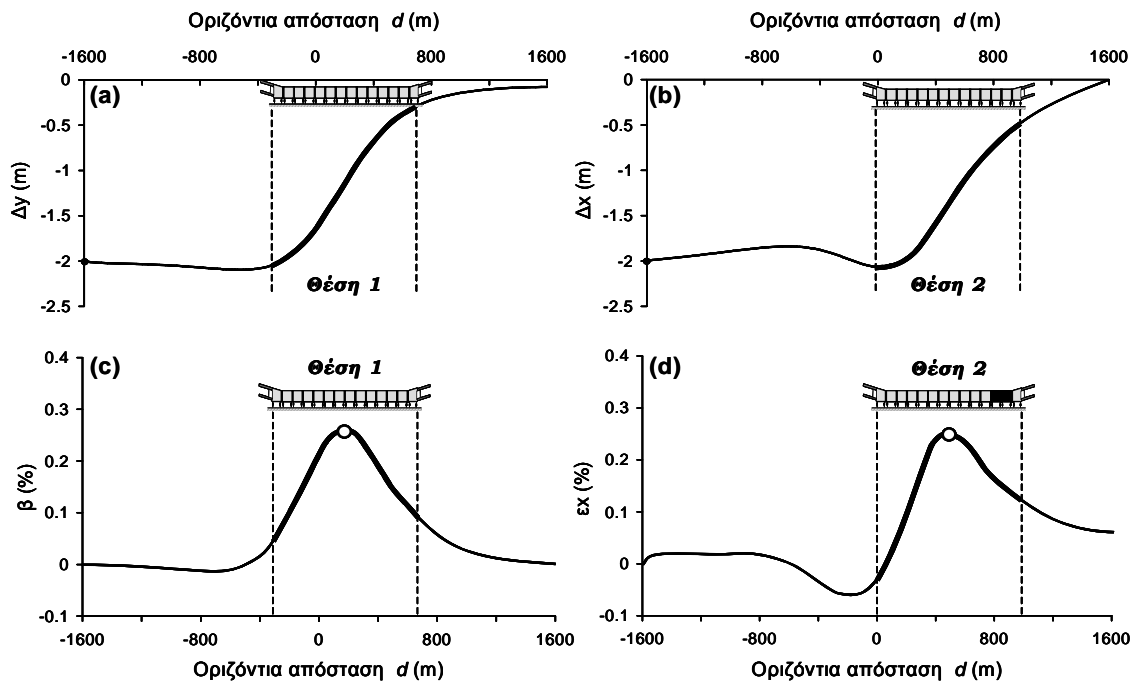


Σχήμα 8. Εικόνες παραμορφωμένου καννάβου και πλαστικής παραμόρφωσης για διάρρηξη ρήγματος με κλίση $\alpha = 45^\circ$, και μετατοπίσεις του βραχώδους υποστρώματος $h = 1, 2, 4$, και 6 m, για ιδεατό πυκνό αμμώδες έδαφος.

Στα **Σχήματα 9a** και **9b** δείχνεται το προφίλ της κατακόρυφης Δy και οριζόντιας Δx μετατόπισης κατά μήκος του πυθμένα για την ιδεατή πυκνή εδαφική στρώση (συντηρητική προσέγγιση) και $h_d = 2$ m. Η οριζόντια απόσταση d μετράται από το σημείο εφαρμογής της τεκτονικής μετατόπισης στο βραχώδες υπόβαθρο. Στο **Σχήμα 9c** απεικονίζεται η γωνία γωνιακή παραμόρφωση β στον πυθμένα. Αντιστοίχως, στο **Σχήμα 9d** δείχνεται η οριζόντια παραμόρφωση ϵ_x κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους (οι θετικές τιμές αντιστοιχούν σε εφελκυσμό). Καθότι η διάρρηξη δεν αναδύεται, η επιφάνεια του εδάφους παραμορφώνεται ομαλά. Η γωνιακή παραμόρφωση β μεγιστοποιείται (0.26%) για $d \approx 200$ m. Αντιστοίχως, η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_x μεγιστοποιείται (0.25%) για $d \approx 500$ m.

Οι υπολογισθείσες μετατοπίσεις Δ_x και Δ_y επιβάλλονται στις στηρίξεις της σήραγγας. Η μεν εφελκυστική παραμόρφωση προκαλεί απο-συμπίεση των αρμών, η δε καμπτική παραμόρφωση αποσυμπιέζει μερικούς από τους αρμούς και πιθανώς συμπιέζει περαιτέρω άλλους. Δεδομένου ότι η μέγιστη καμπτική και εφελκυστική παραμόρφωση δεν εκδηλώνονται στην ίδια θέση, είναι αναγκαία η παραμετρική διερεύνηση δύο σχετικών θέσεων σήραγγας-διάρρηξης :

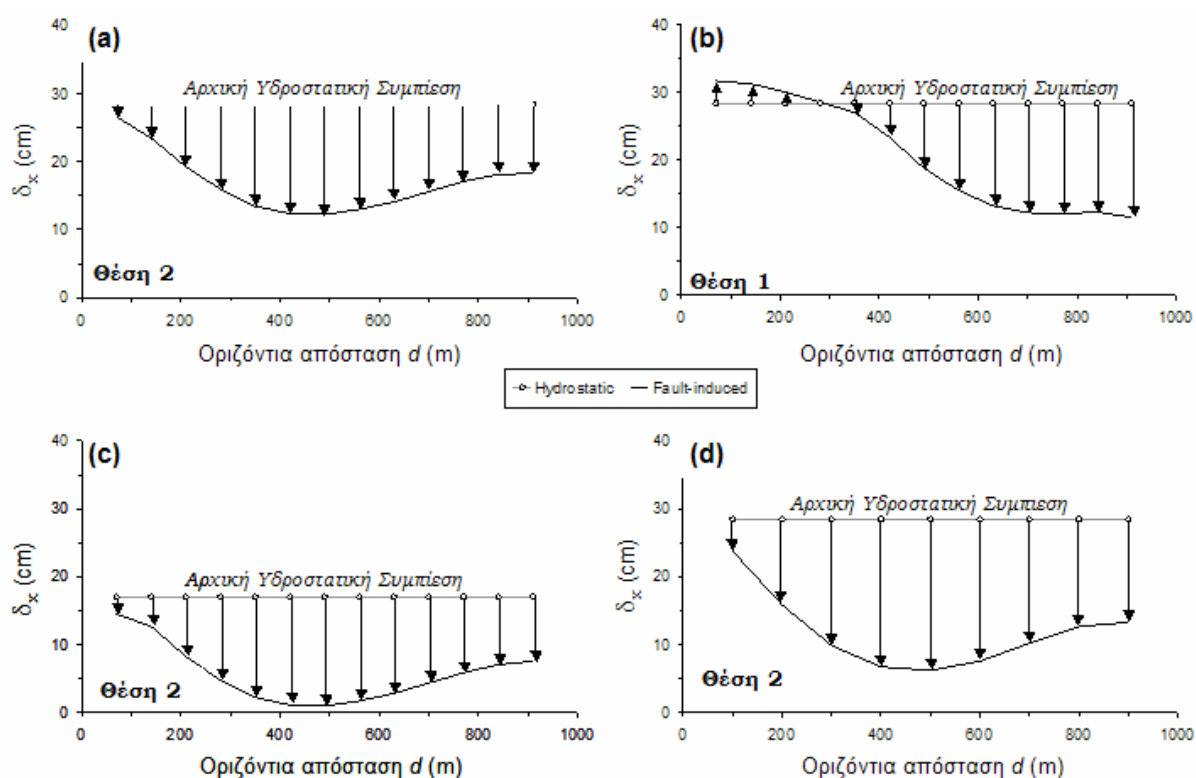
- (1) Θέση 1 : το κέντρο της σήραγγας συμπίπτει με την θέση του μέγιστου β
- (2) Θέση 2 : το κέντρο της σήραγγας συμπίπτει με την θέση του μέγιστου ϵ_x



Σχήμα 9. Αποτελέσματα ανάλυσης για την εξάπλωση της διάρρηξης ρήγματος με κλίση $\alpha = 45^\circ$ και μετατόπιση βραχώδους υποστρώματος $h_d = 2$ m, για ιδεατό πυκνό αμμώδες υλικό : (a) κατακόρυφη μετατόπιση Δy , (b) οριζόντια μετατόπιση Δx , (c) γωνιακή παραμόρφωση β , και (d) οριζόντια παραμόρφωση ϵ_x στον πυθμένα.

Όπως δείχνεται στο **Σχήμα 10**, η επιβαλλόμενη τεκτονική παραμόρφωση προκαλεί σημαντική απο-συμπίεση των περισσότερων αρμών. Στην περίπτωση διάρρηξης στην θέση 2 (δηλαδή το κέντρο της σήραγγας στην μέγιστη ϵ_x), η τεκτονική παραμόρφωση οδηγεί σε απο-συμπίεση όλων των αρμών (**Σχήματα 10a, c, d**). Αντιθέτως, στην περίπτωση διάρρηξης στην θέση 1 (το κέντρο της σήραγγας στην μέγιστη β), η καμπτική παραμόρφωση του πυθμένα οδηγεί σε αύξηση της συμπίεσης των αρμών κοντά στην αριστερή πλευρά της σήραγγας (**Σχήμα 10b**). Το πάχος του ελαστικού παρεμβύσματος δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τις απο-συμπίεσης των αρμών.

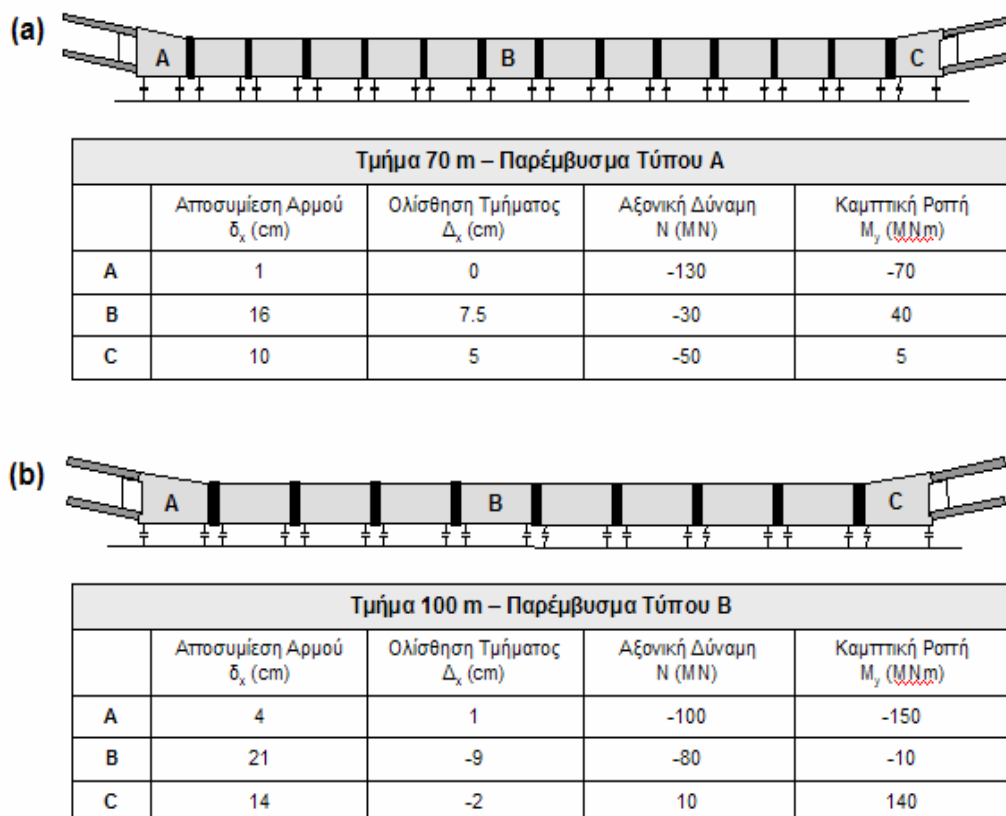
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοψίζονται στο **Σχήμα 11**, σε όρους διαμήκους παραμορφώσεως δ_x των αρμών, ολίσθησης Δ_x επί του πυθμένα, καμπτικών ροπών M_y , και διαμήκων αξονικών δυνάμεων N . Το **Σχήμα 11a** αναφέρεται στην περίπτωση τεμαχών μήκους 70 m με παρέμβυσμα Τύπου Α, το δε **Σχήμα 11 b** σε τεμάχια μήκους 100 m και παρέμβυσμα Τύπου Β. Παρότι αναλύθηκε και η περίπτωση τεμαχών μήκους 165 m, τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται καθότι με τόσο μεγάλο μήκος τεμαχίου μεγάλο πλήθος αρμών υφίσταται “καθαρό” εφελκυσμό. Επιπλέον, επειδή το διάκενο της διαμητικής κλειδας δεν παίζει σημαντικό ρόλο, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν μόνο την περίπτωση διακένου 5 mm. Τέλος, επικεντρώνουμε την προσοχή μας στην περίπτωση διάρρηξης στην θέση 2, η οποία αποδείχθηκε η πλέον κρίσιμη.



Σχήμα 10. Αποσυμπίεση των αρμών της σήραγγας λόγω διάρρηξης ρήγματος : (a) τεμάχιο μήκους 70 m με ελαστικό παρέμβυσμα Τύπου Β – διάρρηξη στην Θέση 2 (μέγιστη μετατόπιση λόγω εφελκυσμού), (b) τεμάχιο μήκους 70 m με ελαστικό παρέμβυσμα Τύπου Β – διάρρηξη στην Θέση 1 (μέγιστη μετατόπιση λόγω κάμψης), (c) τμήματα 70 m με ελαστικό παρέμβυσμα Τύπου Α – διάρρηξη στην Θέση 2, και (d) τμήματα 100 m με ελαστικό παρέμβυσμα Τύπου Β – διάρρηξη στην Θέση 2.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της ανάλυσης έχουν ως εξής :

1. Η εφαρμογή της εφελκυστικής τεκτονικής παραμόρφωσης αποσυμπιέζει όλους τους αρμούς. Η αποσυμπίεση δ_x είναι μεγαλύτερη στην μέση της σήραγγας, γίνεται δε πιο έντονη στην περίπτωση τεμαχίων μήκους 100 m.
2. Η ολίσθηση Δ_x είναι μεγαλύτερη κοντά στην μέση της σήραγγας, όπου λαμβάνει χώρα η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση. Η αύξηση του μήκους των τεμαχίων της σήραγγας οδηγεί σε αύξηση της Δ_x .
3. Η εφαρμογή της τεκτονικής παραμόρφωσης οδηγεί σε απο-συμπίεση της σήραγγας στην διαμήκη έννοια, και άρα μείωση της αξονικής δύναμης N σε σχέση με την αρχική τιμή της (160 MN) λόγω της υδροστατικής συμπίεσης (Βήμα 0). Στην περίπτωση τεμαχίων μήκους 70 m, η αξονική δύναμη N μειώνεται από τα 160 MN σε 30 MN κοντά στη μέση της σήραγγας. Η αύξηση του μήκους των τεμαχίων στα 100 m χειροτερεύει την κατάσταση : η αρχική συμπίεση εξαλείφεται πλήρως, και μάλιστα στο σημείο C αναπτύσσεται εφελκυσμός.



Σχήμα 11. Αποσυμπίεση αρμών, ολίσθηση επί του πυθμένα, αξονικές δυνάμεις, και καμπτικές ροπές λόγω τεκτονικής παραμόρφωσης : (a) τμήματα 70 m, και (b) τμήματα 100 m [Διάρρηξη στην Θέση 2, παρέμβυσμα Τύπου B, και διάκενο διατμητικής κλειδας 5 mm].

ΒΗΜΑ 2 : ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΟΝΗΣΗ

Μεθοδολογία Ανάλυσης

Η μεθοδολογία δυναμικής ανάλυσης δείχνεται σχηματικά στο **Σχήμα 12**. Η δυναμική απόκριση της σήραγγας αναλύεται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ). Αρχικά, διενεργείται ανάλυση διάδοσης των σεισμικών κυμάτων διαμέσου των των εδαφικών στρώσεων. Με τον τρόπο αυτόν υπολογίζεται η διέγερση στο ελεύθερο πεδίο (δηλαδή στον πυθμένα), αγνοώντας την αλληλεπίδραση εδάφους–κατασκευής. Στην συνέχεια, η εδαφική διέγερση εφαρμόζεται στο προσομοίωμα της σήραγγας.

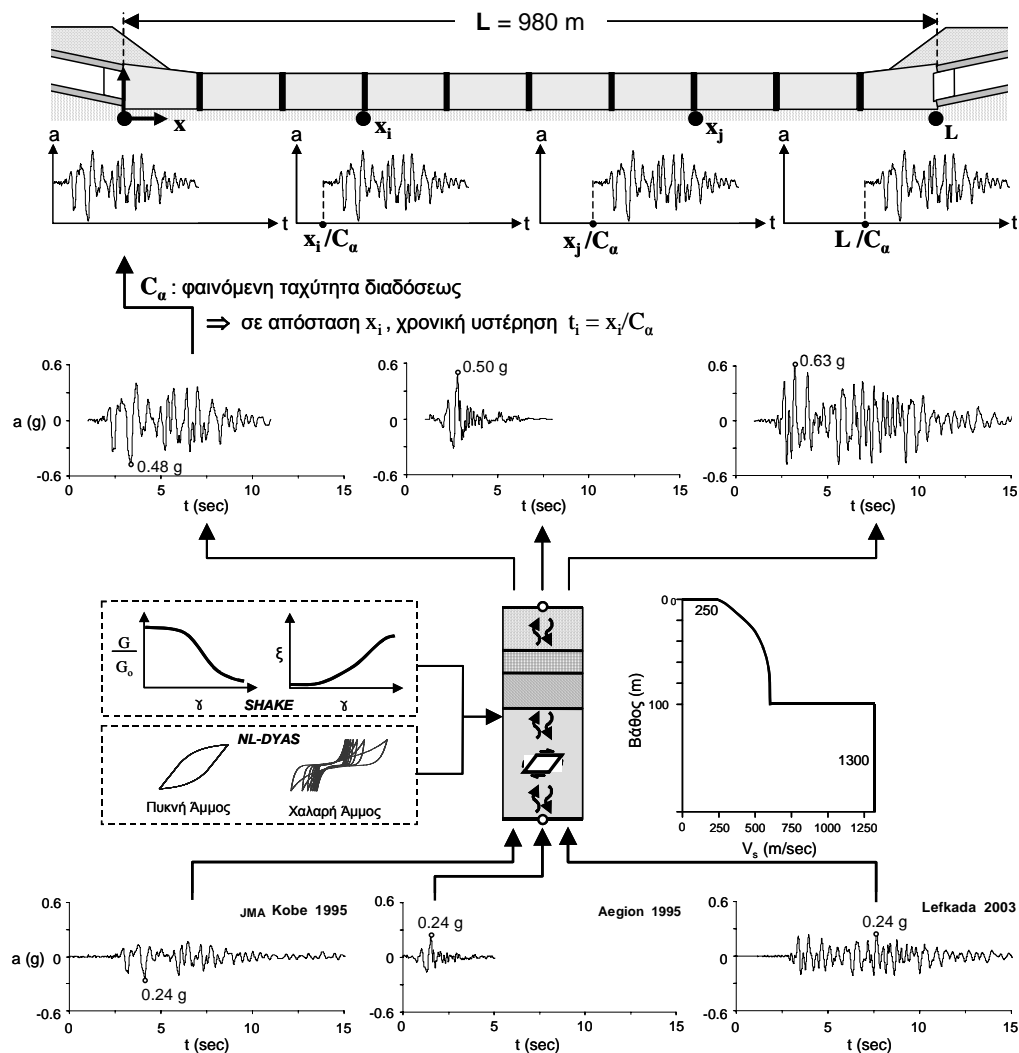
Η επιτάχυνση στο ελεύθερο πεδίο υπολογίζεται με 1-διάστατη κυματική ανάλυση : (α) με ισοδύναμη γραμμική ανάλυση – SHAKE [Schnabel et al, 1975], και (β) με μη-γραμμική εν-χρόνω ανάλυση – προσομοίωμα BWGG [Gerolymos & Gazetas, 2005]. Παρότι η πρώτη μέθοδος είναι ευρέως γνωστή, έχει ορισμένα μειονεκτήματα για εδαφικές αποθέσεις μεγάλου βάθους. Αυτά αντιμετωπίζονται με της δεύτερη μέθοδο.

Έχοντας υπολογίσει την επιτάχυνση ελεύθερου πεδίου, οι υπολογισθείσες χρονοϊστορίες επιταχύνσεως εφαρμόζονται στο προσομοίωμα της σήραγγας με χρονική υστέρηση. Δεδομένου του μήκους της σήραγγας (~1 km), τα σεισμικά κύματα τα οποία δεν διαδίδονται

ακριβώς κατακόρυφα, φτάνουν στην σήραγγα με φαινόμενη ταχύτητα διάδοσης C_α . Η χρονική υστέρηση άφιξης των σεισμικών κυμάτων οδηγεί σε ασύγχρονη ταλάντωση των τεμάχων της σήραγγας. Θεωρώντας ως x τον διαμήκη άξονα της σήραγγας, σε απόσταση x_i από την αρχή της τα κύματα θα φτάσουν με χρονική υστέρηση :

$$t_i = x_i / C_\alpha \quad (8)$$

Η φαινόμενη ταχύτητα διαδόσεως θεωρείται συντηρητικώς ίση με $C_\alpha = 1000$ m/s. Ως σεισμική διέγερση στο βραχώδες υπόβαθρο επιλέγονται τα τέσσερα επιταχυνσιογραφήματα του Πίνακα 1 : (α) η καταγραφή JMA του σεισμού M_s 7.2 του Kobe 1995 [Fukushima et al., 2000], (β) η καταγραφή Rinaldi του σεισμού M_s 6.8 του Northridge 1994 [Trifunac et al., 1998], (γ) η καταγραφή του σεισμού M_s 6.2 του Αιγίου 1995 [Gazetas, 1996], και (δ) η καταγραφή του σεισμού M_s 6.4 της Λευκάδας 2003 [Gazetas et al., 1995; Benetatos et al., 2005].



Σχήμα 12. Μεθοδολογία δυναμικής ανάλυσης και αποτελέσματα για το δυσμενέστερο σενάριο ($V_s = 1300$ m/s κάτω από τα 100 m βάθος). Η επιτάχυνση στο ελεύθερο πεδίο υπολογίζεται με 1- διάστατη κυματική ανάλυση. Η διάδοση αναλύεται με ισοδύναμη γραμμική μέθοδο (SHAKE) και με τον μη-γραμμικό κώδικα NL-DYAS. Στη συνέχεια, οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσεως επιβάλλονται με

χρονική υστέρηση στο προσομοίωμα της σήραγγας.

Σε όλες τις καταγραφές εφαρμόζεται υπο-κλιμάκια αναγωγή στα 0.24 g (επιτάχυνση σχεδιασμού, σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000). Όπως αναφέρθηκε, το εδαφικό προφίλ είναι γνωστό μόνον στα πρώτα 100 m. Το **Σχήμα 12** απεικονίζει τη μονοδιάστατη κυματική ανάλυση για τρεις από τις καταγραφές, για το δυσμενέστερο σενάριο ως προς το εδαφικό προφίλ : $V_s = 1300$ m/s κάτω από τα 100 m. Οι καταγραφές του Αιγίου και του Kobe προκαλούν μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) της τάξης του 0.5 g στον πυθμένα, ενώ η καταγραφή της Λευκάδας 0.63 g. Πέντε επιπλέον πιθανά εδαφικά προφίλ εξετάστηκαν παραμετρικά. Απ' όλες τους συνδυασμούς εδαφικού προφίλ - σεισμικής διεγέρσεως, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) κυμαίνονται από 0.40 έως 0.63 g και από 0.42 έως 0.81 m/s αντίστοιχα (βλ. **Πίνακα 1**).

Πίνακας 1. Καταγραφές ισχυρών διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

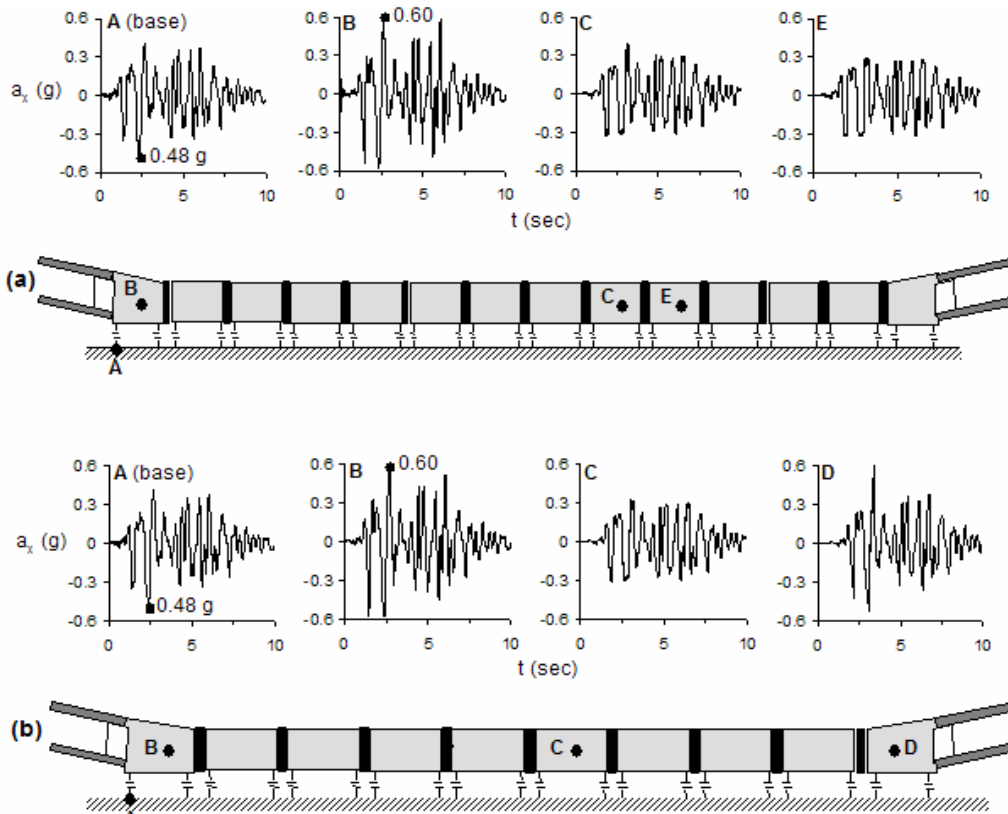
Καταγραφή	Στοιχεία Καταγραφών			Αρχικά		Υπό κλίμακα ³		Πυθμένας ⁴	
	M_s	E-Dist ¹ (km)	F-Dist ² (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)
Kobe JMA	7.2	22	1.5	0.82	81	0.24	24	0.48	64
Rinaldi	6.8	9	2	0.79	164	0.24	50	0.53	81
Aegion 1995	6.2	11	4	0.54	52	0.24	23	0.50	48
Lefkada 2003	6.4	14	14	0.43	33	0.24	18	0.63	42

¹ Απόσταση από το επίκεντρο, ² Απόσταση από το ρήγμα, ³ Εισαγόμενα στην 1-Δ ανάλυση εδαφικής απόκρισης, ⁴ Εξαγόμενα από την 1-Δ ανάλυση εδαφικής απόκρισης

Αποτελέσματα

Στα **Σχήματα 13** έως **16** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, σε όρους χρονοϊστορίας διαμήκων επιταχύνσεων a_x , αξονικών δυνάμεων N , διαμήκων ολισθήσεων Δ_x , και αξονικών παραμορφώσεων των αρμών δ_x σε χαρακτηριστικά σημεία κατά μήκος της σήραγγας. Η οιονεί-στατική παραμόρφωση θεωρείται ότι έχει γίνει από προηγηθείσα σεισμική διάρρηξη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για μήκος τεμάχους $L = 70$ και 100 m. Εστιάζουμε την προσοχή μας στα αποτελέσματα για την διέγερση Kobe JMA, η οποία αποτελεί ιδιαίτερος δυσμενές σενάριο.

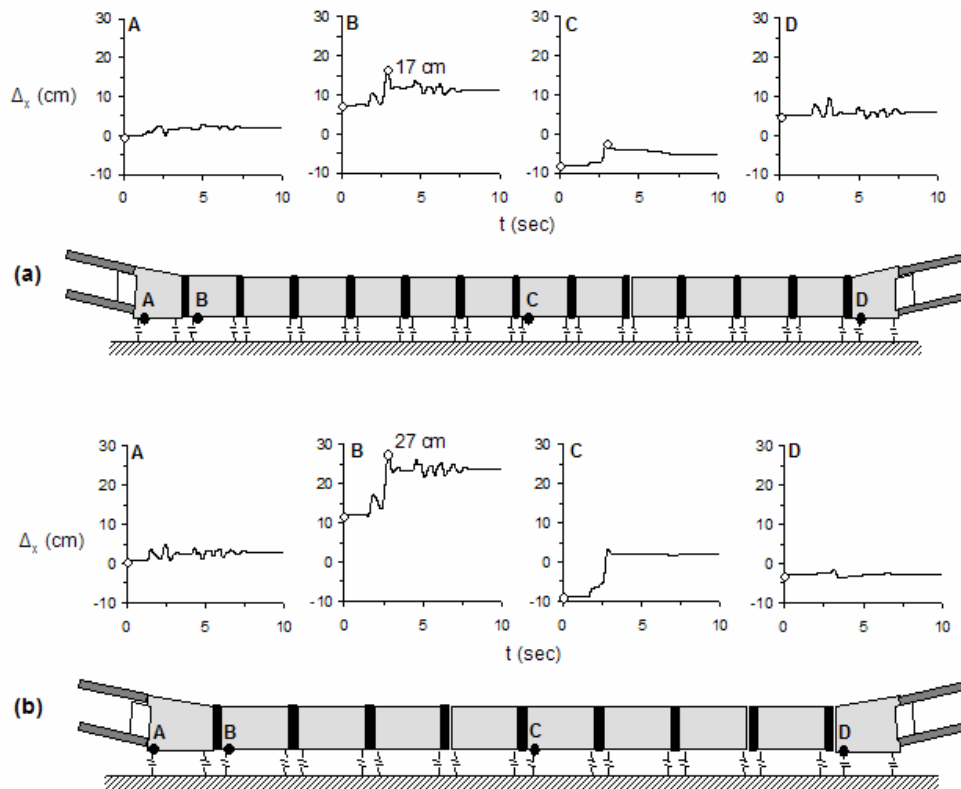
Στο **Σχήμα 13** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της διαμήκους επιτάχυνσης a_x στο μέσον τριών χαρακτηριστικών τεμαχών της σήραγγας (B, C και D). Η μέγιστη επιτάχυνση ενισχύεται από 0.48 g στην βάση (σημείο A) σε περίπου 0.60 g στα ακραία τμήματα της σήραγγας (B και D). Αντιθέτως, στο μέσον της σήραγγας (C) η a_x δεν ξεπερνά τα 0.30 g, κάτι που οφείλεται στην ολίσθηση της σήραγγας επί του πυθμένα. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανομοιομορφη μετατόπιση κατά μήκος της σήραγγας λόγω της προηγηθείσας τεκτονικής παραμόρφωσης, και στην συνεπαγόμενη τάση των τεμαχών της σήραγγας να “επανα-διευθετηθούν” κατά την μεταγενέστερη σεισμική δόνηση (όπως εξηγείται αναλυτικά παρακάτω). Αν δεν είχε προηγηθεί η διαφορική μετατόπιση λόγω τεκτονικής διάρρηξης, η δυναμική απόκριση της σήραγγας θα ήταν σχεδόν ομοιομορφη [βλ. Anastasopoulos et al., 2007]. Η αύξηση του μήκους των τεμαχών δεν φαίνεται να έχει σημαντική επιρροή στις αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις.



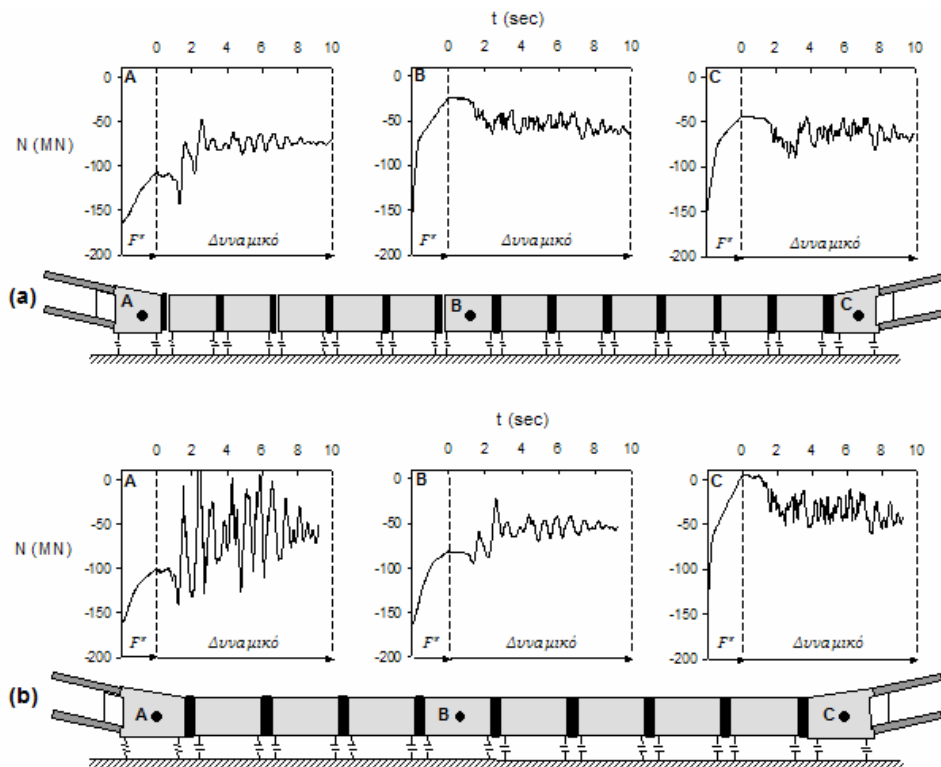
Σχήμα 13. Χρονοϊστορίες διαμήκους επιτάχυνσης a_x για : (a) τεμάχη μήκους 70 m, και (b) τεμάχη μήκους 100 m. [Διέγερση Kobe JMA, διάρρηξη στην θέση 2, παρέμβυσμα Τύπου Β, και 5 mm διάκενο στις διατμητικές κλείδες].

Στο **Σχήμα 14** παρουσιάζονται η χρονοϊστορίες των ολισθήσεων Δ_x των τεμαχών της σήραγγας. Κατά την διαμήκη διεύθυνση (x), τα τεμάχια της σήραγγας έχουν ήδη ολισθήσει, πριν από την εφαρμογή της ασύγχρονης σεισμικής διέγερσης (Βήμα 2), λόγω της επιβληθείσας τεκτονικής παραμόρφωσης (Βήμα 1). Αυτή η αρχική ολίσθηση είναι μεγαλύτερη κοντά στο κέντρο της σήραγγας, όπου αναπτύσσεται η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_x . Η αύξηση του μήκους L των τεμαχών οδηγεί σε αύξηση της αρχικής Δ_x : από 7 cm για $L = 70$ m σε περίπου 11 cm για $L = 100$ m. Οι επιπρόσθετες δυναμικές ολισθήσεις επίσης αυξάνονται με την αύξηση του μήκους L : ενώ για $L = 70$ m η επιπρόσθετη Δ_x λόγω της δυναμικής διέγερσης φτάνει τα 10 cm, για $L = 100$ m ξεπερνάει τα 16 cm (στο σημείο Β).

Στο **Σχήμα 15** δείχνονται οι αξονικές δυνάμεις N σε χαρακτηριστικές διατομές της σήραγγας. Αρχικά, η αξονική δύναμη λόγω της υδροστατικής συμπίεσης ισούται με 160 MN (Βήμα 0). Στην συνέχεια, λόγω της επιβαλλόμενης τεκτονικής παραμόρφωσης (Βήμα 1), η N μειώνεται σημαντικά (βλ. διαμήκης απο-συμπίεση της σήραγγας). Κατά την επακόλουθη σεισμική δόνηση (Βήμα 2), η επανα-διευθέτηση των τεμαχών της σήραγγας οδηγεί σε ομογενοποίηση της διαμήκους N . Τα τμήματα με τις μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις αποφορτίζονται, ενώ εκείνα με την μικρότερη συμπίεση συμπιέζονται περισσότερο. Στο τέλος της σεισμικής δόνησης, αυτή η ανακατανομή οδηγεί σε σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της N : περίπου 70 MN για $L = 70$ m, και 60 MN για $L = 100$ m. Στην τελευταία περίπτωση, κατά την δόνηση παρατηρείται μέγιστη εφελκυστική δύναμη ίση με 10 MN περίπου.



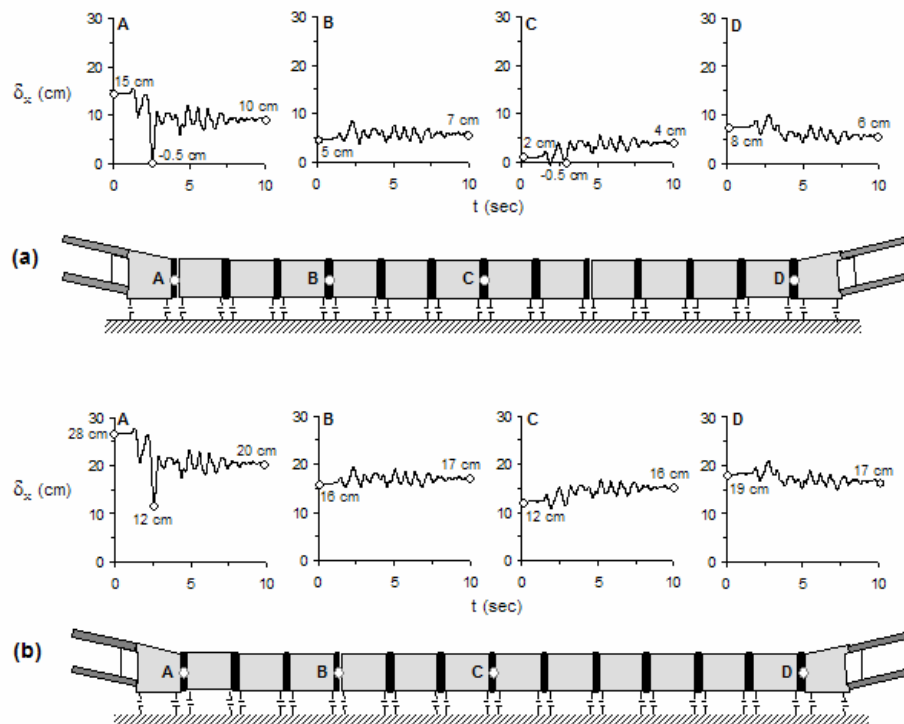
Σχήμα 14. Χρονοϊστορίες διαμήκου ολισθήσεως Δ_x για : (a) τεμάχη μήκους 70 m, και (b) τεμάχη μήκους 100 m. [Διέγερση Kobe JMA, διάρρηξη στην θέση 2, παρέμβυσμα Τύπου Β, και 5 mm διάκενο στις διατμητικές κλείδες]



* : μετατόπιση λόγω ρήγματος

Σχήμα 15. Χρονοϊστορίες διαμήκου αξονικής δύναμης N για : (a) τεμάχη μήκους 70 m, και (b) τεμάχη μήκους 100 m. [Διέγερση Kobe JMA, διάρρηξη στην θέση 2, παρέμβυσμα Τύπου Β, και 5 mm διάκενο στις διατμητικές κλείδες]

Η διαμήκης παραμόρφωση δ_x των αρμών αποτελεί τον πλέον καθοριστικό παράγοντα για την σεισμική ασφάλεια της σήραγγας. Στο **Σχήμα 16** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των διαμήκων παραμορφώσεων δ_x , για την περίπτωση τεμαχών μήκους 70 m. Συγκρίνεται η απόκριση της σήραγγας εξοπλισμένης με ελαστικά παρεμβύσματα Τύπου A και Τύπου B. Τονίζεται ότι στην διαμήκη διεύθυνση τα ελαστικά παρεμβύσματα υφίστανται θλιπτική παραμόρφωση λόγω της αρχικής υδροστατικής συμπίεσης (Βήμα 0): 17 cm και 28 cm, για τον Τύπο A και B, αντιστοίχως. Η επιβολή της εφελκυστικής τεκτονικής παραμόρφωσης τείνει να ανοίξει τους αρμούς, με αυτούς που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της σήραγγας να υφίστανται την μεγαλύτερη απο-συμπίεση. Στην περίπτωση του παρεμβύσματος Τύπου A, τα 17 cm της υδροστατικής συμπίεσης εξαλείφονται πλήρως στο κεντρικό τέμαχος της σήραγγας C, όπου η παραμένουσα συμπίεση είναι μόλις 2 cm. Η κατάσταση είναι λιγότερο κρίσιμη στα ακραία τεμάχη A και D, με την παραμένουσα συμπίεση να φτάνει τα 15 cm και 6 cm, αντιστοίχως. Κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης, τα παρεμβύσματα υφίστανται διαδοχικές αυξομειώσεις της συμπίεσής τους : *απο-συμπίεσεις* και *περαιτέρω συμπίεσεις*. Παρότι η δυναμική συμπίεση δεν είναι υπερβολική, σημειώνονται εφελκυστικές παραμορφώσεις (απο-συμπίεση) στα παρεμβύσματα A και C, κάτι το οποίο είναι επισφαλές.



Σχήμα 16. Χρονοϊστορίες διαμήκους παραμόρφωσης δ_x των αρμών για : (a) τεμάχη μήκους 70 m, και (b) τεμάχη μήκους 100 m. [Διέγερση Kobe JMA, διάρρηξη στην θέση 2, παρέμβυσμα Τύπου B, και 5 mm διάκενο στις διατμητικές κλειδές]

Η χρήση ελαστικών παρεμβυσμάτων Τύπου B βελτιώνει αισθητά την όλη απόκριση του συστήματος. Φυσικά, ο σημαντικότερος λόγος της βελτίωσης αυτής έγκειται στον διπλασιασμό της αρχικής (υδροστατικής) συμπίεσης των αρμών (στα 28 cm), λόγω του οποίου το περιθώριο απο-συμπίεσης επίσης διπλασιάζεται. Έτσι, η απο-συμπίεση των αρμών λόγω της τεκτονικής παραμόρφωσης οδηγεί σε ελάχιστη $\delta_x = 12$ cm στο κρίσιμο κεντρικό τέμαχος C. Η μεγαλύτερη απο-συμπίεση παρουσιάζεται στους αρμούς κοντά στο

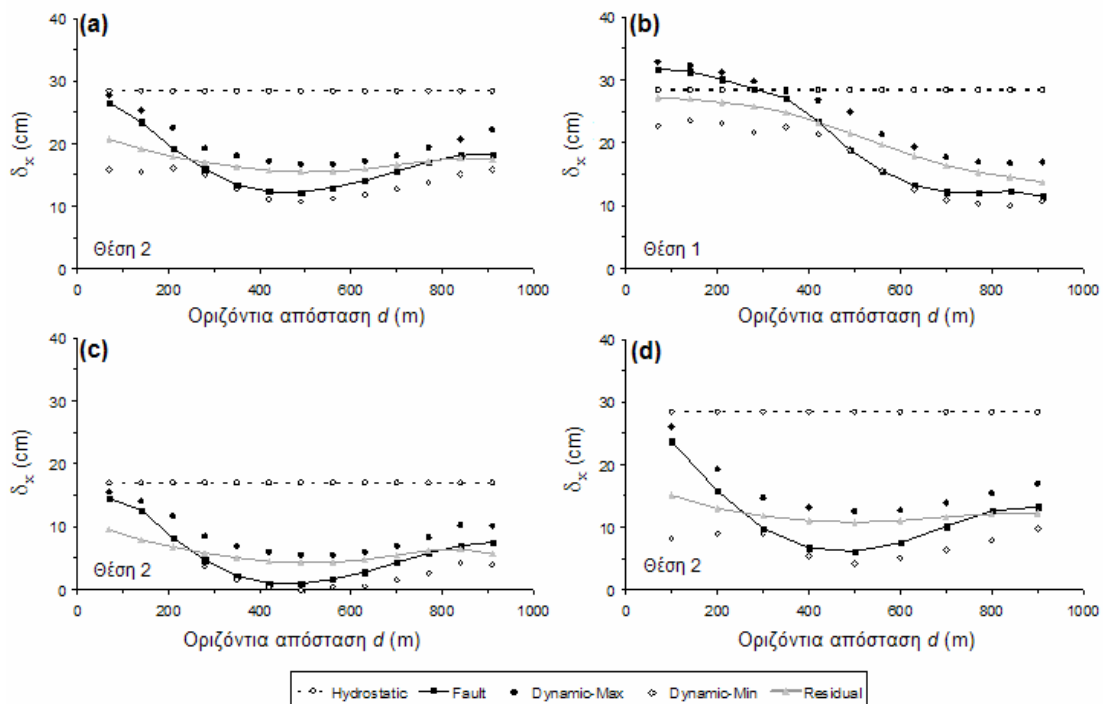
κέντρο της σήραγγας, όπου η εφελκυστική τεκτονική παραμόρφωση μεγιστοποιείται. Στα ακραία τεμάχια A και D η απο-συμπίεση των ελαστικών παρεμβυσμάτων είναι λιγότερο έντονη. Κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης, τα ελαστικά παρεμβύσματα υφίστανται αυξομειώσεις της συμπίεσής τους. Η συνολική (δυναμική και στατική) συμπίεση σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά τα αποδεκτά όρια του παρεμβύσματος Τύπου B ($\delta_{x,max} \approx 29$ cm). Επιπλέον, το παρέμβυσμα παραμένει πάντα συμπιεσμένο, διατηρώντας έτσι την υδατοστεγανότητά του : $\delta_{x,min} > 10$ cm σε όλους τους αρμούς. Κατά την διάρκεια της δόνησης, *οι υπερ-συμπιεσμένοι αρμοί τείνουν να απο-συμπιεστούν και οι απο-συμπιεσμένοι να επανα-συμπιεστούν* : ανακατανομή–ομογενοποίηση της παραμόρφωσης.

Αυτό είναι και το θεμελιώδες συμπέρασμα της παρούσας εργασίας. Δηλαδή, η επιβλαβής απο-συμπίεση ορισμένων αρμών της σήραγγας (λόγω τεκτονικής παραμόρφωσης) μπορεί να μειωθεί με την δυναμική ταλάντωση της σήραγγας σε επόμενη ισχυρή σεισμική δόνηση.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΑΝΑ-ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την ασύγχρονη δυναμική ταλάντωση της σήραγγας παρατηρείται ομογενοποίηση της παραμόρφωσης των αρμών. Όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 17**, η επιβολή της τεκτονικής παραμόρφωσης οδηγεί σε απο-συμπίεση των αρμών. Για το σενάριο διάρρηξης στην θέση 2 (το κέντρο της σήραγγας συμπίπτει με την θέση της μέγιστης ε_x), η τεκτονική παραμόρφωση οδηγεί σε αποσυμπίεση όλων των αρμών. Από την άλλη πλευρά, για το σενάριο διάρρηξης στην θέση 1 (το κέντρο της σήραγγας συμπίπτει με την θέση της μέγιστης β), οι περισσότεροι αρμοί απο-συμπιέζονται, με εξαίρεση εκείνους που βρίσκονται κοντά στο αριστερό άκρο της σήραγγας. Σε αυτήν τη θέση η παραμόρφωση λόγω κάμψης του πυθμένα φαίνεται να είναι η πιο σημαντική, προκαλώντας περαιτέρω συμπίεση στους αρμούς. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση τεμαχών μήκους 70 m με παρέμβυσμα Τύπου B (“χόντρο”) και διάρρηξη στην θέση 2 (**Σχήμα 17a**), οι αρμοί απο-συμπιέζονται από την αρχική τους υδροστατική συμπίεση των 28 cm σε μια ελάχιστη παραμένουσα συμπίεση 12 cm κοντά στο κέντρο (όπου πραγματοποιείται η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση). Η απο-συμπίεση μειώνεται σημαντικά περί το αριστερό άκρο της σήραγγας ($\delta_x \approx 26$ cm), αλλά όχι στον ίδιο βαθμό και στο δεξιό ($\delta_x \approx 18$ cm).

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 17c**, το πάχος του ελαστικού παρεμβύσματος δεν επηρεάζει σημαντικά το προφίλ των από-συμπιέσεων. Παρότι όμως η τεκτονικώς επιβαλλόμενη απο-συμπίεση είναι πρακτικά η ίδια, στην περίπτωση του λεπτότερου ελαστικού παρεμβύσματος Τύπου A η αρχική υδροστατική συμπίεση είναι μόλις 18 cm. Το αποτέλεσμα είναι οι αρμοί κοντά στο κέντρο να χάνουν σχεδόν όλη τους την αρχική συμπίεση : $\delta_x \approx 2$ cm. Αυτό είναι ιδιαίτερος ανησυχητικό για την υδατοστεγανότητα της σήραγγας. Με την αύξηση του μήκους των τεμαχών L σε 100 m (σε συνδυασμό με παρέμβυσμα Τύπου B) τα όρια ασφαλείας βελτιώνονται : $\delta_{x,min} \approx 6$ cm κοντά στο κέντρο της σήραγγας (**Σχήμα 17 d**). Η εξήγηση είναι σχετικά εύκολη : ενώ για $L = 70$ m η επιβαλλόμενη παραμόρφωση “απορροφάται” από συνολικά 13 αρμούς, για $L = 100$ m πρέπει να απορροφηθεί από 9 αρμούς μόνον. Προφανώς, η μείωση του πλήθους των αρμών αναπόφευκτα αυξάνει το “άνοιγμα” του κάθε αρμού. Παρατηρείστε ότι η συνολική αποσυμπίεση όλων των αρμών παραμένει πρακτικά η ίδια : $\delta_{x,total} \approx 1.5$ m.



Σχήμα 17. Δυναμική ανακατανομή της παραμόρφωσης των εμβαπτιζόμενων αρμών : (a) τμήματα 70 m με παρέμβυσμα Τύπου Β, στη θέση 2 (μέγιστη εφελκυστική μετατόπιση), (b) τμήματα 70 m με παρέμβυσμα Τύπου Β, στη θέση 1 (μέγιστη καμπτική μετατόπιση), (c) τμήματα 70 m με παρέμβυσμα Τύπου Α, στη θέση 2, και (d) τμήματα 100 m με παρέμβυσμα Τύπου Β, στη θέση 2.

Στο **Σχήμα 18** δείχνεται η “ιστορία” των διαμήκων παραμορφώσεων έξι χαρακτηριστικών αρμών, για την περίπτωση της σήραγγας με τεμάχιο μήκους 70 m εξοπλισμένη με παρεμβύσματα Τύπου Β, υποβληθείσα σε διάρρηξη στην θέση 2. Η εφαρμογή της αρχικής υδροστατικής συμπίεσης (Βήμα 0) προκαλεί ομοιόμορφη συμπίεση όλων των αρμών σε $\delta_x \approx 28$ cm. Η επιβολή της τεκτονικής παραμόρφωσης (Βήμα 1) προκαλεί απο-συμπίεση, διαφορετική από αρμό σε αρμό. Η επακόλουθη δυναμική ταλάντωση (Βήμα 2), τείνει να ομογενοποιήσει τις δ_x των αρμών και να επανα-διευθετήσει τα τεμάχια της σήραγγας. Ο αρμός 1, ο οποίος είχε υποστεί την μικρότερη απο-συμπίεση στο Βήμα 1, υφίσταται την μεγαλύτερη δυναμική απο-συμπίεση. Αντιθέτως, ο αρμός 7 στο κέντρο της σήραγγας, ο οποίος είχε υποστεί την μεγαλύτερη απο-συμπίεση λόγω της προηγηθείσας τεκτονικής παραμόρφωσης (Βήμα 1), επανα-συμπιέζεται περισσότερο από τους υπόλοιπους κατά την δυναμική ταλάντωση.

Η εν λόγω επωφελής συμπεριφορά οφείλεται στην υπερ-ελαστική συμπεριφορά των ελαστικών παρεμβυσμάτων των αρμών, σε συνδυασμό με την δυνατότητα των τεμαχίων της σήραγγας να ολισθαίνουν κατά την δόνηση. Εξετάζοντας την συμπεριφορά των αρμών 1 και 7 σε περισσότερη λεπτομέρεια, παρατηρούμε ότι η τεκτονικώς επιβαλλόμενη παραμόρφωση απο-συμπιέζει ελάχιστα τον αρμό 1 (από 28 σε 26 cm, σημείο a_1). Την ίδια στιγμή (Βήμα 1), ο αρμός 7 απο-συμπιέζεται πολύ περισσότερο (στα 12 cm, σημείο a_7). Μετά την τεκτονική παραμόρφωση, ο αρμός 1 παραμένει αρκετά συμπιεσμένος και βρίσκεται στην υπερ-ελαστική περιοχή, αποκρινόμενος με $K_{hyper} \approx 50$ MPa. Αντιθέτως, ο αρμός 7 έχει απο-συμπίεστεί αρκετά, και βρίσκεται στην αρχική μαλακή περιοχή με $K_{el} \approx 3$ MPa. Συνεπώς, κατά την σεισμική δόνηση, ο αρμός 1 θα είναι μια τάξη μεγέθους πιο άκαμπτος

από τον αρμό 7. Δεδομένου ότι οι αρμοί συνδέονται σε σειρά, οι πιο άκαμπτοι αναγκάζουν τους μαλακότερους να συμπιεστούν. Με άλλα λόγια, οι υπερ-συμπιεσμένοι αρμοί (σκληρότεροι) αναγκάζουν τους λιγότερο συμπιεσμένους αρμούς (μαλακότεροι) να επανα-συμπιεστούν. Προφανώς, μια τέτοια επανα-συμπίεση οδηγεί με τη σειρά της σε υπερ-ελαστική ακαμψία, κάνοντας τους τελευταίους σκληρότερους. Τελικά, το σύστημα καταλήγει σε μια ισορροπία, όπου όλες οι συμπιέσεις των αρμών “ομογενοποιούνται”. Στο τέλος της δόνησης, ο πιο άκαμπτος αρμός 1 έχει τελική αποσυμπίεση $\delta_x \approx 20$ cm (σημείο b_1), ενώ ο μαλακότερος αρμός 7 επανα-συμπιέζεται σε $\delta_x \approx 13$ cm (σημείο b_7). Πρέπει να τονισθεί ότι αυτή η συμπεριφορά θα ήταν πολύ δύσκολο να επιτευχθεί, εάν η σήραγγα δεν είχε την ελευθερία να ολισθήσει (αν ήταν δηλαδή πλήρως εγκιβωτισμένη).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

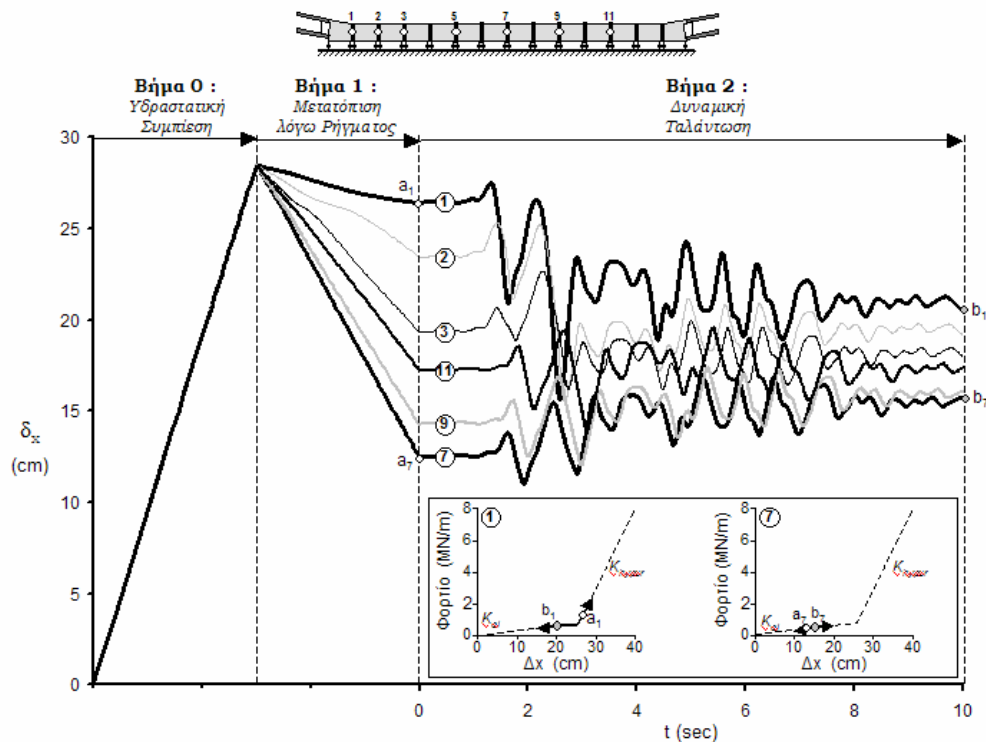
Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας αυτής έχουν ως εξής :

- (1) Μια σωστά σχεδιασμένη εμβαπτιζόμενη σήραγγα (ελαστικά παρεμβύσματα κατάλληλου πάχους, σχετικά μικρό μήκος τεμαχίων, ικανοποιητικό διάκενο στις διατμητικές κλείδες, και κατάλληλους τένοντες) μπορεί να αντισταθεί σε :
 - Κανονική διάρρηξη 2 m στην βάση του βραχώδους υποβάθρου, 800 m κάτω από την σήραγγα.
 - Επακόλουθη ισχυρή σεισμική δόνηση μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης τουλάχιστον 0.50 g.
 - Συνδυασμένη επίδραση των δυο ανωτέρω γεγονότων, ακόμη και με την δυσμενέστερη πιθανή ακολουθία: διάρρηξη ρήγματος και επακόλουθη σεισμική δόνηση.
- (2) Η αρχική υδροστατική συμπίεση είναι ανεξάρτητη από το μήκος του τεμάχους ή από τον συνολικό αριθμό των αρμών. Η αύξηση του συνολικού αριθμού των αρμών οδηγεί σε αύξηση της συνολικής αρχικής θλιπτικής παραμόρφωσης της σήραγγας. Η αρχική συμπίεση των παρεμβυσμάτων τύπου Gina πρέπει να είναι μεγάλη, ώστε να διασφαλιστεί η υδατοστεγανότητα της σήραγγας.
- (3) Η διαμήκης δυναμική παραμόρφωση των αρμών εμβαπτίσεως εξαρτάται από το μήκος L των τεμαχίων της σήραγγας και από το πάχος του παρεμβύσματος Gina. Η αύξηση του L αναπόφευκτα προκαλεί την αύξηση των παραμορφώσεων των αρμών. Δεδομένου ότι τα τεμάχια της σήραγγας είναι πολύ πιο δύσκαμπτα από τα παρεμβύσματα Gina, η παραμόρφωση απορροφάται κυρίως από τους αρμούς. Προφανώς, η μείωση του πλήθους των αρμών προκαλεί αύξηση της παραμόρφωσής τους.
- (4) Η αύξηση του πάχους των παρεμβυσμάτων οδηγεί σε αύξηση της αρχικής υδροστατικής συμπίεση από 17 cm για τον Τύπο Α σε 29 cm για τον Τύπο Β. Καθότι η τεκτονική παραμόρφωση είναι κυρίως εφελκυστική, η αύξηση της αρχικής θλιπτικής παραμόρφωσης οδηγεί σε μεγαλύτερα περιθώρια ασφάλειας. Κατά την επακόλουθη σεισμική δόνηση, η δυναμική επανα-συμπίεση και απο-συμπίεση των αρμών δεν είναι ιδιαίτερως ευαίσθητη στο πάχος των παρεμβυσμάτων.

- (5) Κατά την μεταγενέστερη σεισμική δόνηση, τα τεμάχια της σήραγγας τείνουν να επαναδιευθετηθούν, ολισθαίνοντας στον πυθμένα κατά την διαμήκη διεύθυνση. Αυτό συνοδεύεται από ανακατανομή των παραμορφώσεων των αρμών, οδηγώντας σε ομογενοποίηση της συμπίεσης κατά μήκος της σήραγγας. Αυτή η “ευεργετική” συμπεριφορά οφείλεται στην υπερ-ελαστικότητα των παρεμβυσμάτων, σε συνδυασμό με την δυνατότητα ολίσθησης επί του πυθμένα. Έτσι, ενώ οι τεκτονική παραμόρφωση οδηγεί σε επιβλαβή απο-συμπίεση, η οποία διαφέρει από αρμό σε αρμό, με την επακόλουθη σεισμική δόνηση οι πιο επικίνδυνα απο-συμπιεσμένοι αρμοί γίνονται πιο εύκαμπτοι σε σχέση με τους αρμούς που έχουν απο-συμπιεστεί λιγότερο. Καθότι οι αρμοί συνδέονται εν σειρά, οι πιο άκαμπτοι θα αναγκάσουν τους λιγότερο άκαμπτους να επανα-συμπιεστούν.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος Ερευνητικού Προγράμματος χρηματοδοτηθέντος από τον Οργανισμό Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ).



Σχήμα 18. Διαμήκης παραμόρφωση των αρμών για σήραγγα με τεμάχια μήκους 70 m, ελαστικό παρέμβυσμα Τύπου Β, και 5 mm διάκενο στις διατηρητικές κλείδες, υποβαλλόμενη σε διάρρηξη στην θέση 2 (μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση) και επακόλουθη σεισμική δόνηση. Ενώ η τεκτονική παραμόρφωση (Βήμα 1) “ανοίγει” τους αρμούς, η ασύγχρονη σεισμική δόνηση τείνει να επαναφέρει τα τμήματα στην αρχική τους θέση, επιτρέποντας ομογενοποίηση των παραμορφώσεων των αρμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABAQUS, Inc. (2004), *ABAQUS V.6.4 User's Manual*, Providence, Rhode Island, USA.
- Anastasopoulos, I. (2005), "Fault Rupture–Soil–Foundation–Structure Interaction", *Ph.D. Dissertation*, School of Civil Engineering, National Technical University, Athens, pp.570.
- Anastasopoulos I., and Gazetas G. (2007), "Behaviour of Structure–Foundation Systems over a Rupturing Normal Fault : II. Analyses, Experiments, and the Kocaeli Case Histories", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 277–301.
- Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Drosos, V., Kourkoulis, R., Georgarakos, T., and Gazetas, G. (2007), "Nonlinear Response of Deep Immersed Tunnel to Strong Seismic Shaking", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 9, pp. 1067–1090.
- Anastasopoulos I., Gazetas G., Bransby M.F., Davies M.C.R., and El Nahas A. (2007b), "Fault Rupture Propagation through Sand : Finite Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 8, pp. 943–958.
- Benetatos, C., Kiratzi, A., Roumelioti, Z., Stavrakakis, G., Drakatos, G., and Latoussakis, I. (2005), "The 14 August 2003 Lefkada Island (Greece) earthquake: Focal mechanisms of the mainshock and of the aftershock sequence", *Journal of Seismology*, Vol. 9, No. 2, pp. 171–190.
- Bernard, P. et al. (1997), "The $M_s = 6.2$, June 15, 1995 Aigion earthquake (Greece) : Evidence for a low-angle normal faulting in the Corinth rift", *Journal of Seismology*, Vol. 1, pp. 131–150.
- Berrill, J.B. (1983), "Two-dimensional analysis of the effect of fault rupture on buildings with shallow foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 156-160.
- Bickel, J.O., Tanner, D.N. (1982), "Sunken tube tunnels", in : Bickel, J.O., Keusel, T.R. Eds., *Tunnel Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, N.York, pp. 354-394.
- 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. (1994), "Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No.3, March, 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, Vol. 120, No.3, March, pp. 562-580.
- Bray, J.D. (2001), "Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture", in *A Workshop on Seismic Fault-Induced Failures–Possible Remedies for Damage to Urban Facilities*, Japan Society for the Promotion of Science, University of Tokyo, Japan, January 11-12, pp. 55–79.
- Brune, J.N., and Allen, C.R. (1967), "A low-stress-drop, low magnitude earthquake with surface faulting. The Imperial, California, Earthquake of March 4, 1966", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vo. 57, pp. 501-514.
- Buwalda, J.P., and St. Amand, P. (1955), *Geological Effects of the Arvin-Tehachapi Earthquake*, California Division of Mines, Bulletin 171, pp. 41-56.
- Cole, D.A. Jr., and Lade, P.V. (1984), "Influence Zones in Alluvium Over Dip-Slip Faults", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 5, pp. 599-615.
- EAK–2000, Greek Seismic Code, published by O.A.S.P, Athens, 2001.

- El Nahas, A., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. (2006), "Centrifuge modelling of the interaction between normal fault rupture and rigid, strong raft foundations", *Proc. International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Hong Kong, August, pp. 337-342.
- Fukushima, Y., Irikura, K., Uetake, T., and Matsumoto H. (2000), "Characteristics of observed peak amplitude for strong ground motion from the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe) earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, pp. 545–565.
- Gazetas, G. (1983), "Analysis of machine foundation vibrations: state of the art", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 2–43.
- Gazetas, G. (1991), *Foundation Vibrations. Foundation Engineering Handbook*, 2nd edition, ed. H.Y.Fang, Springer / Cluwer, Chapter 15, pp.553-593.
- Gazetas, G. (1996), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering : Case Histories*, Symeon Pub., Athens.
- Gazetas, G., Anastasopoulos I., and Dakoulas P. (2005), "Failure of harbor quaywall in the Lefkada 2003 earthquake", *Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conference – Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering : Concepts and Research*, Osaka, pp. 62-69.
- Gerolymos, N., and Gazetas, G. (2005), "Constitutive model for 1-D cyclic soil behaviour applied to seismic analysis of layered deposits", *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 3, p.p.147–159.
- Gilbert, G.K. (1890), "Lake Boneville", *U.S. Geological Survey Monograph 1*.
- Horsfield, W.T. (1977), "An Experimental Approach to Basement-Controlled Faulting", *Geologie En Mijnbouw*, Vol. 56, No. 4, pp. 363-370.
- Johansson, J., Konagai, K. (2004), "Fault induced permanent ground deformations— Simulations and experimental verification", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, August 1–6, Vancouver, Canada.
- Kelly, J.M. (1997), *Earthquake Resistant Design with Rubber*. 2nd Edition, Springer.
- Kelson K. I., Kang K.-H., Page W. D., Lee C.-T., Cluff L. S. (2001), Representative styles of deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake: Geomorphic Characteristics and Responses of Man-made Structures, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 5, pp. 930-952.
- Kiyomiya, O. (1995), "Earthquake-resistant design features of immersed tunnels in Japan", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 10, No. 4, pp. 463-475
- Lade, P.V., Cole, D.A., Jr., and Cummings, D. (1984), "Multiple Failure Surfaces Over Dip-Slip Faults", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 5, pp. 616-627.
- Lazarte, C.A., and Bray, J.D. (1995), "Observed Surface Breakage due to Strike-Slip Faulting", *Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, Vol. 2, pp. 635–640.
- Marshall, C. (1999), "The Øresund Tunnel — Making a success of design and build", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 14, No.3, pp. 355–365.
- Rion–Antirion (1992), "Additional Offshore Geotechnical Investigations, Report of Seismic Cone Testing (SCPT): Shear Wave Velocities", *Technical Report*.
- Roth, W.H, Scott, R.F, and Austin, I. (1981), "Centrifuge modelling of fault propagation through alluvial soils", *Geophysical Research Letters*, Vol. 8, No. 6, pp. 561-564.
- Sanford, A.R. (1959), Analytical and Experimental Study of Simple Geologic Structures, *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 70, January, pp. 19–52.

- Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, B.H. (1972), SHAKE : a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *Report no. EERC 72 /12, University of California, Berkeley, CA, USA.*
- Slemmons, D.B. (1957), "Geological Effects of the Dixie Valley-Fairview Peak, Nevada, Earthquakes of December 16, 1954", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 47, No. 4, pp. 353–375.
- Stein, R.S., and Barrientos, S.E. (1985), *The Borah Peak Idaho earthquake-Geodetic evidence for deep rupture on a planar fault*, U.S. Geological Survey, Open-File Report 85-250, pp. 181–234.
- Taylor, C.L., Cline, K.M.m Page, W.D., and Schwartz, D.P. (1985), The Borah Peak, Idaho Earthquake of October 28, 1983 – Surface Faulting and Other Phenomena, *Earthquake Spectra*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-49.
- Trifunac, M.D., Todorovska, M.I., and Lee V.W. (1998), "The Rinaldi strong motion accelerogram of the Northridge, California, earthquake of 17 January, 1994", *Earthquake Spectra*, Vol. 14, No. 1, pp. 225-239.
- Tselentis, A. et al. (2004), "Estimation of seismic hazard and seismic deformation of the Rion-Antirion straits, *Technical Report to O.S.E.*, Earth Research Ltd, July 2004.
- Vrettos, Ch. (2005), "Design issues for immersed tunnel foundations". *Proc. 1st Greece-Japan Workshop on Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations*, G. Gazetas, Y.Goto, T. Tazoh (editors), pp. 257-266.
- Witkind, I. J., Myers, W.B., Hadley, J.B., Hamilton, W., and Fraser, G.D. (1962), Geologic Features of the Earthquake at Hebgen Lake, Montana, August 17, 1959, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 52, No. 2, April, pp. 163-180.