

ΔΙΑΔΟΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΕΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ* ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ¹, ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΛΟΥΚΙΔΗΣ², ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΥ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζονται η μεθοδολογία και προκαταρκτικά αποτελέσματα από την αναλυτική προσομοίωση της διάδοσης ενεργών διαρρήξεων δια μέσου προσχωματικών αποθέσεων που καλύπτουν το γεωλογικό υπόβαθρο. Η προσέγγιση του προβλήματος βασίζεται στην αριθμητική μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method) σε συνδυασμό με κατάλληλη προσομοίωση της διατμητικής συμπεριφοράς των αποθέσεων, της ταχύτητας της διάρρηξης και των συνοριακών συνθηκών. Τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίνονται με επιτόπου παρατηρήσεις για ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση της μεθοδολογίας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων χρησιμοποιούνται για ένα κατ'αρχήν προσδιορισμό των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού τεχνικών έργων πλησίον του ίχνους των ρηγμάτων καθώς και του πιθανού εύρους διακύμανσης τους.

ABSTRACT

The article presents the methodology and preliminary results from analytical simulations regarding fault rupture propagation through soft soil cover. The analyses employ the Finite Difference method for the numerical solution of boundary value problems, combined with appropriately chosen constitutive model for the shearing response of the soil cover, velocity time history for the rupture and boundary conditions. Analytical predictions are compared to field observations for an overall, qualitative as well as quantitative, evaluation of the methodology. In addition, results from an extensive parametric study are used for an initial definition of the basic design parameters in the vicinity of the fault trace and their possible range of variation.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ενεργά ρήγματα, προσχωματικές αποθέσεις, αντισεισμικός σχεδιασμός
KEY WORDS: Active faults, alluvial deposits, seismic design parameters

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός τεχνικών έργων πλησίον ενεργών ρηγμάτων, ενδεχόμενο ιδιαίτερα σύνηθες στην χώρα μας, είναι ένα από τα πλέον ακανθώδη θέματα της αντισεισμικής μηχανικής. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι οι περισσότεροι αντισεισμικοί κανονισμοί, συμπεριλαμβανομένου του ΕΑΚ2000, αποφεύγουν να ορίσουν ακόμη και το εύρος της επικίνδυνης για δόμηση ζώνης εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος, αλλά απαιτούν ρητά την εκτέλεση ειδικής έρευνας και μελέτης.

Οι δυσκολίες αντιμετώπισης του προβλήματος κλιμακώνονται σημαντικά όταν δεν υπάρχει άμεση εμπορεία του ίχνους του ρήγματος στο βραχώδες υπόβαθρο λόγω επικάλυψής του από προσχωματικές αποθέσεις με πάχος μερικών δεκάδων μέτρων (Σχήμα 1). Στην περίπτωση αυτή, ακόμη και όταν η θέση και τα χαρακτηριστικά του ρήγματος στο βραχώδες υπόβαθρο είναι δεδομένα, απομένει μια σειρά πρακτικών ερωτημάτων τα οποία θα πρέπει να διερευνηθούν πριν από τον σχεδιασμό των έργων. Συγκεκριμένα:

- Θα αναδυθεί η διάρρηξη στην επιφάνεια του εδάφους και που;
- Ποια θα είναι η παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους και σε τι έκταση θα εκτείνεται εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος;
- Θα υπάρξει τοπική ενίσχυση της σεισμικής δόνησης και πόση;

Η ακόλουθη παρουσίαση εστιάζεται στην μεθοδολογία καθώς και σε προκαταρκτικά αποτελέσματα της ερευνητικής προσπάθειας που καταβάλλεται στον Τομέα Γεωτεχνικής του Ε.Μ.Π. για αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών, σε συνδυασμό με κατάλληλη προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους σε διάτμηση, της χρονο-ιστορίας της διάρρηξης και των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Η αξιολόγηση της ακρίβειας των αναλύσεων

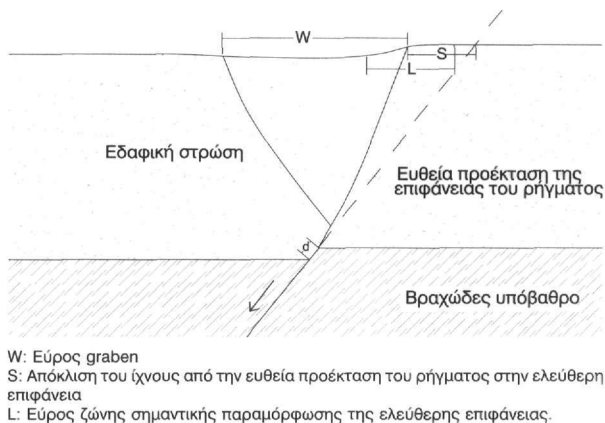
* FAULT RUPTURE PROPAGATION THROUGH SOFT SOIL COVERS

¹ Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

² Purdue University, USA.

³ Πολιτικός Μηχανικός M.Sc.

βασίζεται σε ποιοτική σύγκριση με καταγεγραμμένες περιπτώσεις διάρρηξεων από την διεθνή βιβλιογραφία και σε λεπτομερή ανάλυση της καλά τεκμηριωμένης διάρρηξης του Νικομηδινού στην λεκάνη της Βόλβης. Επιπλέον, εξάγονται προκαταρκτικά συμπεράσματα σχετικά με τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού των έργων στην περιοχή σεισμικών ρηγμάτων, μετά από παραμετρικές αναλύσεις για διάφορους τύπους ρήγματος και προσχωματικών αποθέσεων.



Σχ.1. Τυπική διάρρηξη κανονικού ρήγματος σε προσχωματικές αποθέσεις και παράμετροι σχεδιασμού.

Οι αριθμητικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν αφορούσαν κανονικό και ανάστροφο ρήγμα. Η περίπτωση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip) παρουσιάζει θεμελιώδεις διαφορές ως προς το μηχανισμό διάρρηξης του εδάφους, οι οποίες δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν αποτελεσματικά με την παρούσα μεθοδολογία.

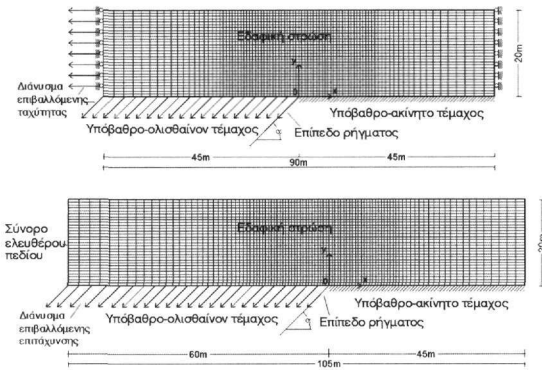
2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ

Δεδομένου ότι το φαινόμενο της διάδοσης ρήγματος επηρεάζεται από την συμπεριφορά του εδάφους όχι μόνο κατά την αστοχία αλλά και μετά από αυτή, η χρήση ενός ελαστο-πλαστικού καταστατικού νόμου με χαλάρωση είναι απαραίτητη. Σύμφωνα με τον Scott (1987), παλαιότερες προσπάθειες προσομοίωσης της διάδοσης ρήγματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με καταστατικό νόμο χαλάρωσης παρουσίασαν σημαντικά προβλήματα αριθμητικής αστάθειας, τα οποία όμως αποφεύγονται αποτελεσματικά με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Κατ' επέκταση, στην παρούσα έρευνα, η αριθμητική προσομοίωση της διάδοσης ενεργού ρήγματος διαμέσου προσχωματικών αποθέσεων έγινε με την μέθοδο των *Πεπερασμένων Διαφορών* και τον κώδικα H/Y FLAC.

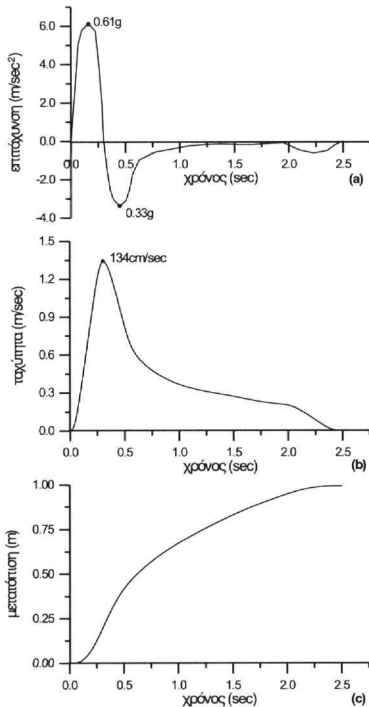
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα τυπικό προσομοίωμα των προσχωματικών αποθέσεων και του υποκειμένου ρήγματος, από όπου προκύπτει η λεπτομέρεια της διακριτοποίησης καθώς και οι συνοριακές συνθήκες. Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε εδαφική απόθεση η οποία αποτελείται από ένα μόνο στρώμα. Χάριν απλότητας, η επιφάνεια του εδάφους και η δι-επιφάνεια μεταξύ εδαφικής στρώσεως και βραχώδους υποβάθρου ήταν οριζόντια. Ο λόγος του πλάτους της διατομής που εξετάστηκε ως προς το πάχος των αποθέσεων ήταν τουλάχιστον ίσος με 4:1, έτσι ώστε να περιορισθεί στο ελάχιστο η επίδραση των πλευρικών κατακόρυφων συνόρων κατά την ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων στην περιοχή διάδοσης της διάρρηξης.

Εκτελέστηκαν τόσο στατικές όσο και δυναμικές παραμετρικές αναλύσεις. Στις στατικές αναλύσεις, οι οποίες παρέχουν σαφέστερη εικόνα και καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού διάδοσης της διάρρηξης, η κίνηση επιβάλλεται στους κόμβους του κάτω συνόρου ως διάνυσμα ταχύτητας παράλληλο προς το επίπεδο του ρήγματος. Αντίστοιχα, στις δυναμικές αναλύσεις η κίνηση του υποβάθρου επιβάλλεται ως διάνυσμα επιτάχυνσης. Η χρονοϊστορία της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης του ολισθαίνοντος τεμάχου καθορίστηκε με βάση δεδομένα σχετικά με τον ρυθμό ολίσθησης του ρήγματος κατά τη διάρκεια σεισμών (Day, 1982; Beroza, 1991). Ο παλμός επιτάχυνσης καθορίστηκε έτσι ώστε να παράγει τελική μετατόπιση 1m, η οποία είναι επαρκής για να αναδυθεί η διάρρηξη στην ελεύθερη επιφάνεια. Η συνολική διάρκεια του παλμού τέθηκε $T=2.5\text{sec}$, με μέγιστη επιτάχυνση 0.61g και μέγιστη ταχύτητα 134cm/sec (Σχ.3). Οι παραπάνω τιμές είναι συμβατές με παρατηρήσεις υπό τους Wells and Coppersmith (1994) και Trifunac & Novicova (1995), για σεισμούς μεγέθους $M=6-7$.

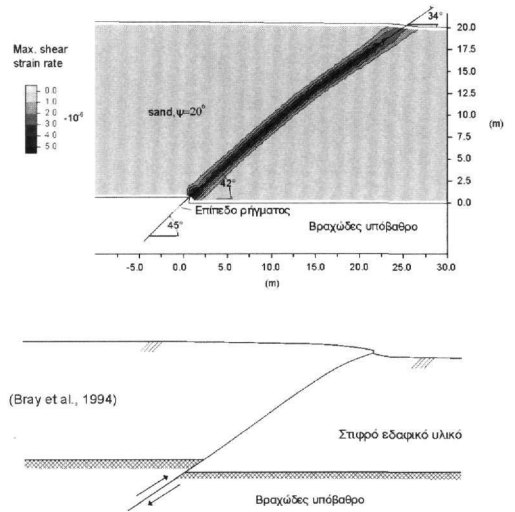
Το καταστατικό προσομοίωμα που θεωρήθηκε για τις προσχωματικές αποθέσεις είναι ελαστοπλαστικό, τύπου Mohr-Coulomb, με χαλάρωση. Η γωνία εσωτερικής τριβής θεωρήθηκε ότι μειώνεται γραμμικά ως προς την πλαστική διατμητική παραμόρφωση μετά την αστοχία, έως η πλαστική παραμόρφωση να φτάσει το 5%. Αντίστοιχα, η γωνία διαστολικότητας μειώνεται γραμμικά και μηδενίζεται για πλαστική διατμητική παραμόρφωση ίση με 5%. Η συνοχή c των προσχωματικών αποθέσεων μεταβλήθηκε γραμμικά με το βάθος z σύμφωνα με τη σχέση $c(z) = 0.7z$, αλλά παρέμεινε αμετάβλητη πριν και μετά την αστοχία. Σε όλες τις αναλύσεις, το μέτρο διάτμησης του εδάφους μεταβλήθηκε ανάλογα προς το $z^{1/2}$ ενώ ο λόγος Poisson θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με $\nu=0.33$. Στις δυναμικές αναλύσεις θεωρήθηκε απόσβεση τύπου Rayleigh με ελάχιστη τιμή $\xi_{\min} = 2\%$.



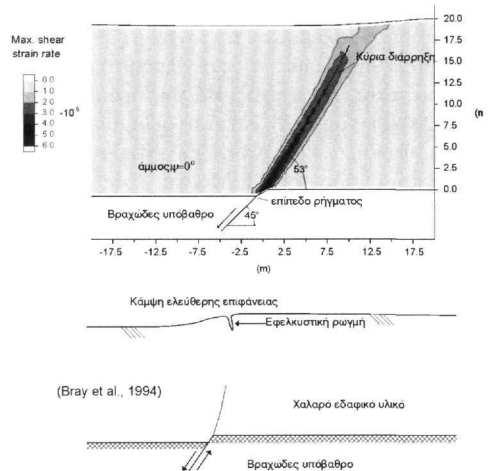
Σχ.2. Συνοριακές συνθήκες για στατικές και δυναμικές αναλύσεις κανονικού ρήγματος υποκείμενου εδαφικής στρώσεως πάχους 20m.



Σχ.3. Επιβαλλόμενη κίνηση βραχώδους υποβάθρου: (α) παλμός επιτάχυνσης (β) παλμός ταχύ

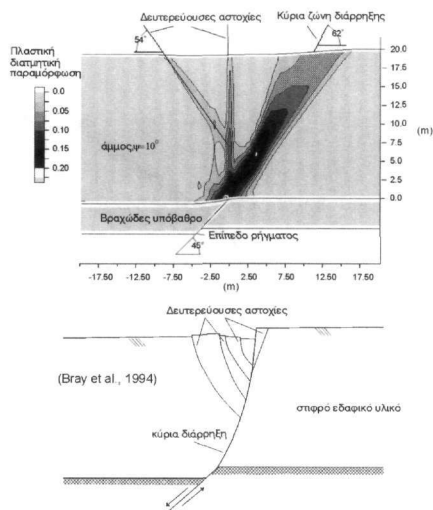


Σχ. 4 (α) Κατανομή (ρυθμού) διατμητικής παραμόρφωσης σε στρώμα πυκνής άμμου με γωνία διαστολικότητας 20° επί αναστροφόν ρήγματος με κλίση 45° (β) Αντίστοιχες παρατηρήσεις πεδίου.

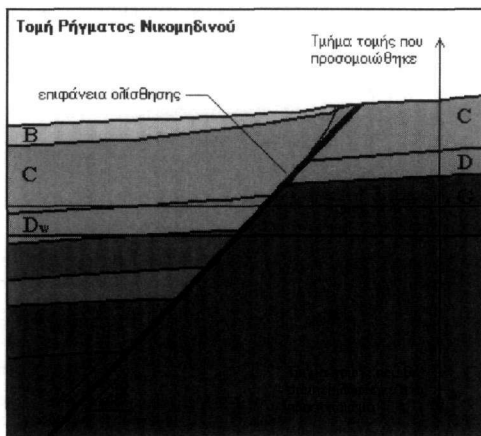


Σχ.5. (α) Κατανομή (ρυθμού) διατμητικής παραμόρφωσης σε στρώμα χαλαρής άμμου με μηδενική γωνία διαστολικότητας επί κανονικού ρήγματος με κλίση 45°. (β) Αντίστοιχες παρατηρήσεις πεδίου.

Τυπικά αποτελέσματα αναλύσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 για ανάστροφο ρήγμα καθώς και στα Σχήματα 5 και 6 για κανονικά ρήγματα με επικάλυψη χαλαρής και μέσης πυκνότητας άμμου αντίστοιχα. Σε κάθε σχήμα, οι αναλυτικές προσομοιώσεις συγκρίνονται με αντίστοιχες παρατηρήσεις πεδίου από την βιβλιογραφία (Bray et al. 1994). Η ομοιότητα μεταξύ παρατηρήσεων και αναλύσεων είναι χαρακτηριστική και υπογραμμίζει τις δυνατότητες ρεαλιστικής προσομοίωσης του προβλήματος που παρέχονται από τις σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους.



Σχ.6. (α) Κατανομή πλαστικής παραμόρφωσης από δυναμική ανάλυση σε στρώμα άμμου μέσης πυκνότητας με γωνία διαστολικότητας 10° επί κανονικού ρήγματος με κλίση 45° . (β) Σύγκριση με αντίστοιχες παρατηρήσεις πεδίου.



Σχ. 7. Στρωματογραφία, αριθμητικό προσομοίωμα και παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών για την περίπτωση του ρήγματος Νικομηδίνου.

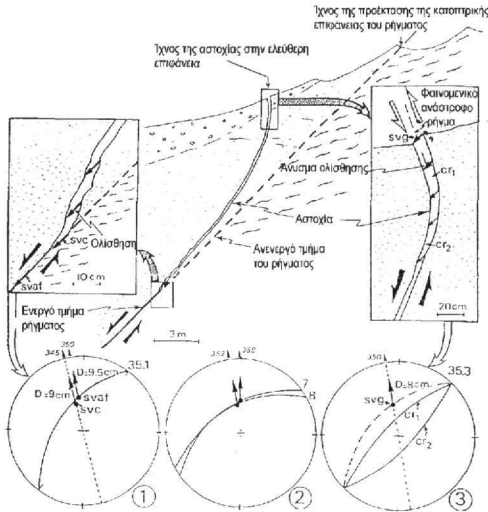
3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Η ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΝΙΚΟΜΗΔΙΝΟΥ

Για την ποσοτική αξιολόγηση της ακρίβειας που παρέχει η υπολογιστική προσέγγιση του προβλήματος, έγινε σύγκριση με τα δεδομένα ενός πραγματικού περιστατικού διάρρηξης του εδαφικού καλύμματος λόγω ενεργοποίησης υποκειμένου τεκτονικού ρήγματος. Μετά από εκτενή αναδρομή στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία, επελέγη τελικώς προς ανάλυση το ρήγμα του Νικομηδίνου (Σχ. 7, 8 και 9), ένα από τα τέσσερα κανονικά ρήγματα της λεκάνης της Βόλβης, η διάρρηξη του οποίου προκάλεσε το μεγάλο σεισμό της Θεσσαλονίκης κατά την 20^η Ιουνίου 1978. Κατά το σεισμικό περιστατικό του 1978, το συγκεκριμένο ρήγμα παρουσίασε επιφανειακή εκδήλωση (κοντά στο χωριό Νικομηδινό) και η επιφάνεια ολίσθησής του κατεγράφη λεπτομερώς από τη γεωλογική ομάδα του J.L.Mercier (Mercier et al., 1983). Επίσης, η επιφανειακή του εκδήλωση βρίσκεται γεωγραφικώς πολύ κοντά στο εκτεταμένο πεδίο ερευνών του Euroseistest Project στη λεκάνη της Βόλβης, το οποίο παρείχε τα απαραίτητα γεωλογικά, γεωφυσικά και γεωτεχνικά δεδομένα για την προσομοίωση.

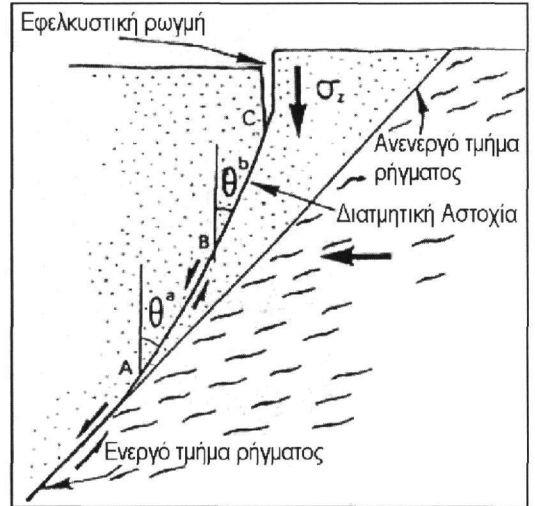
Με βάση τα δεδομένα αυτά, εκτελέστηκαν στατικές και δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις προσομοίωσης της εδαφικής διάρρηξης. Η διακριτοποίηση του εδαφικού καλύμματος έγινε με στρεβλό πλέγμα στο οποίο οι στήλες των στοιχείων από κατακόρυφες στα δυο άκρα γίνονται σταδιακά κεκλιμένες, μέχρι να πάρουν την κλίση των 48° ως προς την οριζόντιο στο κέντρο του προσομοιώματος. Με αυτό τον τρόπο, στην περιοχή όπου αναμενόταν να διαδοθεί η επιφάνεια ολίσθησης, τα στοιχεία είναι παραλλόγραμμα σχήματος, με τη μία τους διάσταση οριζόντια και την άλλη παράλληλη με το επίπεδο του ρήγματος. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση του δικτύου κατάφερε να προσομοιάσει την πλάγια διεπιφάνεια των εδαφικών σχηματισμών, πράγμα απαραίτητο για την απόδοση διαφορετικών ιδιοτήτων σε αυτούς μέσα στο προσομοίωμα και να μειώσει αισθητά το εύρος των επιφανειών ολίσθησης όπως αποτυπώνονται από τον κώδικα ανάλυσης.

Για τον εντοπισμό της επιφάνειας διάρρηξης συνεκτιμήθηκαν μια ή περισσότερες μεταβλητές που σχετίζονται με την θραύση του εδαφικού υλικού και την σχετική ολίσθηση των δυο τεμαχών, με κύρια τον ρυθμό μεταβολής της διαμηκτικής παραμόρφωσης (Σχ. 10). Αντίστοιχα, ο μηχανισμός αστοχίας κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης προκύπτει από τα διαγράμματα της εντατικής κατάστασης στα στοιχεία του δικτύου (Σχ. 11).

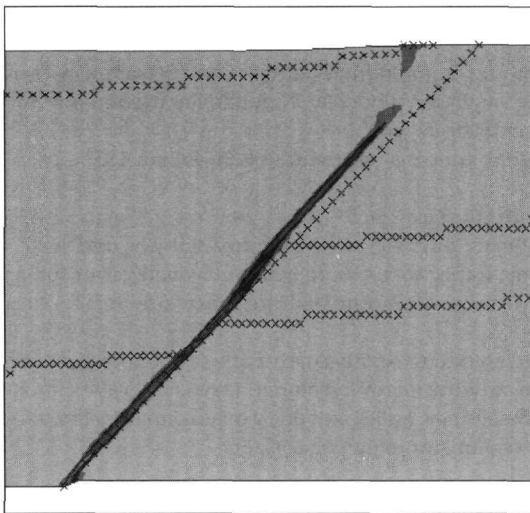
Η ομοιότητα μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης διάδοσης της διάρρηξης, από το γεωλογικό υπόβαθρο στην επιφάνεια του εδάφους, είναι χαρακτηριστική. Αξίζει ίσως ιδιαίτερης προσοχής η προσομοίωση της εφελκυστικής ρωγμής στο ανώτερο τμήμα της διάρρηξης (Σχ. 11), η οποία ευρίσκεται σε ικανοποιητική συμφωνία με την επιτόπου αποτύπωση του ρήγματος (Σχ. 8 και 9).



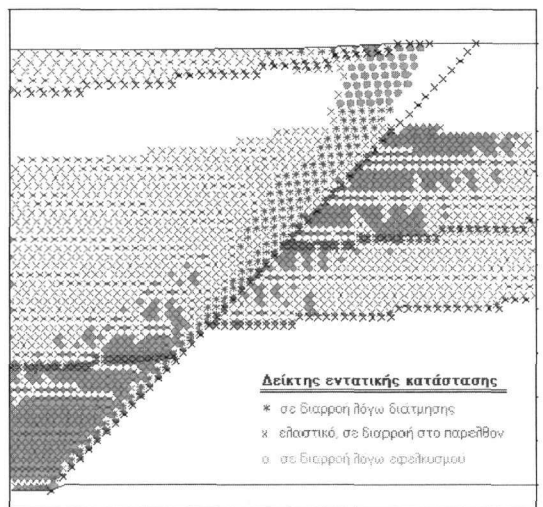
Σχ. 8. Μηχανισμός αστοχίας και γεωμετρία διάρρηξης Νικομηδινού (από J.L.Mercier et al., 1983)



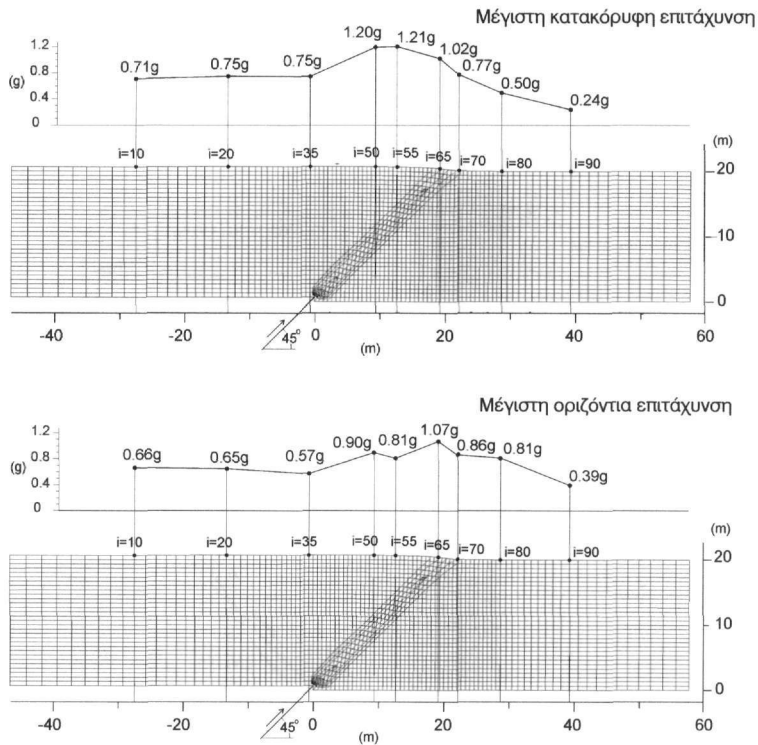
Σχ.9. Λεπτομέρεια επιφάνειας αστοχίας ρήγματος όπως αποτυπώθηκε από το J.L.Mercier.



Σχ. 10 Αποτύπωση της επιφάνειας ολίσησης με χρήση το ρυθμού μεταβολής της διατμητικής παραμόρφωσης. Στο ανώτερο τμήμα η ασυνέχεια της καμπύλης προκύπτει εφελκυστική αντί για διατμητική αστοχία.



Σχ. 11. Ο μηχανισμός αστοχίας του ρήγματος του Νικομηδινού όπως προκύπτει από απεικόνιση της εντατικής κατάστασης



Σχ. 12 Μέγιστες επιταχύνσεις στην επιφάνεια του εδάφους από ανάλυση για άμμο με γωνία διαστολικότητας 15° επί αναστρόφου ρήγματος κλίσης 45°.

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Μετά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα που έδωσε η ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των θεωρητικών αναλύσεων με επιτόπου παρατηρήσεις, επιχειρήθηκε η διερεύνηση των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού του προβλήματος με την βοήθεια μιας σειράς παραμετρικών αναλύσεων για:

- ορθά και ανάστροφα ρήγματα, με διάφορες γωνίες κλίσης προς την οριζόντια μεταξύ 45° και 135°,
- πάχη προσχωματικών αποθέσεων μεταξύ 5 και 40m,
- συνεκτικά και μη συνεκτικά εδάφη με γωνία διαστολικότητας έως και 20°.

Πιο συγκεκριμένα, για τα μη συνεκτικά εδάφη θεωρήθηκαν τιμές της γωνίας διαστολικότητας από $\psi=0^\circ$ - 30° , ρυθμίζοντας κατάλληλα την τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής φ έτσι ώστε η παραμένουσα γωνία τριβής να παραμένει ίση με 30° . Για τα συνεκτικά εδάφη η μέγιστη γωνία διαστολικότητας ήταν ίση με 5° και η παραμένουσα γωνία τριβής ήταν ίση με 20° .

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα κυριότερα από τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις εν λόγω παραμετρικές αναλύσεις έως σήμερα, σε σχέση πάντοτε με τον σχεδιασμό τεχνικών έργων. Επισημαίνεται βέβαια ο προκαταρκτικός χαρακτήρας των αποτελεσμάτων, καθώς και όσον συμπερασμάτων τα ακολουθούν, δεδομένου ότι η σχετική ερευνητική προσπάθεια βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη.

Γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης. - Η ζώνη διάτμησης ξεκινά από την τομή του επιπέδου του ρήγματος με την δι-επιφάνεια εδάφους-βραχώδους υποβάθρου και διαδίδεται προς τα άνω. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή και ο λόγος K_0 του εδάφους, τόσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπιση που απαιτείται για να διαδοθεί η αστοχία μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Για κανονικά ρήγματα, η απαιτούμενη μετατόπιση του υποβάθρου d_0 κυμαίνεται από 1% έως 2.2% του πάχους H του εδαφικού στρώματος, ενώ για ανάστροφα ρήγματα μπορεί να φτάσει το 6.5%. Στις περιπτώσεις κανονικών ρηγμάτων, η δευτερεύουσα διάρρηξη που διαμορφώνει τον "αύλακα" (graben) φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά από μετακίνηση του υποβάθρου κατά 2.5%-3% του πάχους H .

Για να εξετασθεί η επίδραση της κλίσης του ρήγματος, εκτελέσθηκε μία ομάδα αναλύσεων για τιμές της

κλίσης από 45° (κανονικό ρήγμα) έως 135° (ανάστροφο ρήγμα) και γωνία διαστολικότητας $\psi=10^\circ$. Για κανονικά ρήγματα, η ζώνη ολίσθησης αποκλίνει από την ευθεία προέκταση του επιπέδου του ρήγματος και τείνει να αυξήσει την κλίση της καθώς διαδίδεται μέσα στην εδαφική στρώση (Σχ. 6). Αντίθετα, στις περιπτώσεις ανάστροφου ρήγματος, η ζώνη ολίσθησης τείνει να μειώσει την κλίση της καθώς διαδίδεται προς την ελεύθερη επιφάνεια (Σχ. 4). Σε χαλαρή άμμο και αμμώδη ιλύ (μικρή γωνία διαστολικότητας), η ζώνη ολίσθησης δεν σχηματίζεται σαφώς σε όλο το μήκος της, με την περισσότερη διατμητική παραμόρφωση να συγκεντρώνεται κοντά στην διεπιφάνεια βράχου-εδάφους (Σχ.5). Παραπλήσια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στην πειραματική μελέτη των Cole and Lade (1984) και στα πραγματικά περιστατικά που περιγράφονται από τους Bray et al. (1994).

Η απόκλιση της ζώνης ολίσθησης από την προέκταση του επιπέδου του ρήγματος είναι μεγαλύτερη για ρήγματα με μικρές γωνίες κλίσης ως προς την οριζόντιο, ενώ για ρήγματα με μεγάλη κλίση η απόκλιση τείνει στο μηδέν. Η απόκλιση είναι μεγαλύτερη για έντονη διαστολικότητα. Τυπικές τιμές της απόκλισης του ίχνους του ρήγματος είναι 0.4H έως 0.65H για κανονικά ρήγματα και 0.15H έως 0.35H για ανάστροφα ρήγματα, όπου H είναι το πάχος του εδαφικού στρώματος.

Σε αναλύσεις κανονικών ρηγμάτων με γωνία κλίσης 45°, μια δευτερεύουσα διάρρηξη σχηματίζεται ή τείνει να σχηματιστεί στην αντίθετη πλευρά της κύριας διάρρηξης (Σχ.6). Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο αυλακας σχηματίζεται όταν η γωνία κλίσης του ρήγματος είναι μικρότερη από 45°+ $\psi/2$, όπου ψ είναι η γωνία διαστολικότητας. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με τα πειραματικά αποτελέσματα των Cole and Lade (1984) και Lade et al. (1984).

Αποτελέσματα από αναλύσεις για άμμο με $\psi=10^\circ$ και κλίση ρήγματος στο υπόβαθρο 45°, για πάχη εδαφικής στρώσεως από 5m σε 40m έδειξαν ότι η επίδραση του πάχους του εδαφικού στρώματος στην γεωμετρία της επιφάνειας ολίσθησης είναι πρακτικά αμελητέα.

Εύρος της ζώνης σημαντικής παραμόρφωσης της επιφάνειας του εδάφους.- Ως «ζώνη σημαντικής παραμόρφωσης» θεωρήθηκε η περιοχή εκατέρωθεν του ίχνους της κύριας διάρρηξης όπου η κλίση της επιφάνειας του εδάφους υπερβαίνει το 1/500, λαμβάνοντας υπόψη ότι αντίστοιχη διαφορική καθίζηση του εδάφους προκαλεί έντονες διατμητικές ρωγμές σε συνήθεις τοιχοποιίες. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος L της ζώνης σημαντικής παραμόρφωσης, τόσο μικρότερη είναι η κάμψη της επιφάνειας του εδάφους. Το εύρος L δείχνει να είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος της μετατόπισης του βραχώδους υποβάθρου, ενώ αντίθετα φαίνεται να επηρεάζεται από την γωνία διαστολικότητας του εδάφους. Για κανονικά ρήγματα, το L είναι της τάξεως μεγέθους του H για εδάφη με γωνία διαστολικότητας μηδέν (π.χ. χαλαρές άμμοι ή απροφορτιστές άργιλοι), ενώ μειώνεται έως και 0.4H για εντόνως διαστολικά εδάφη (π.χ. πυκνές άμμοι ή έντονα προφορτισμένες άργιλοι). Για ανάστροφα ρήγματα, το εύρος της ζώνης σημαντικής παραμόρφωσης παίρνει διπλάσιες περίπου τιμές. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι το μέγεθος της παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους παραμένει πρακτικά αμελητέο μέχρι να αναδυθεί η διάρρηξη στην ελεύθερη επιφάνεια.

Εδαφική κίνηση κοντά στο ίχνος του ρήγματος.- Στις δυναμικές αναλύσεις για πυκνή άμμο επί αναστρέφου ρήγματος παρατηρήθηκε ότι κοντά στο ίχνος της κύριας ζώνης διάτμησης, η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από αυτή που καταγράφεται μακριά από το ίχνος. Στις περιπτώσεις κανονικού ρήγματος, η παρατήρηση αυτή ισχύει για το ίχνος της δευτερεύουσα ζώνης διάτμησης. Η τοπική ενίσχυση της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους εκτείνεται σε μια περιοχή εύρους από 1H έως 1.3H, επί του κινούμενου πάντοτε τεμάχους του ρήγματος. Στην περίπτωση κανονικού ρήγματος, ο λόγος της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης κοντά στο ίχνος ως προς την αντίστοιχη τιμή για το ελεύθερο πεδίο είναι 1.6, ενώ ο λόγος για την οριζόντια επιτάχυνση είναι 1.1. Για ανάστροφα ρήγματα οι αντίστοιχοι λόγοι είναι 1.7 and 1.6 (Σχ. 12). Επιστημαίνεται ότι η τοπική ενίσχυση στην περίπτωση της χαλαρής αμμώδους ιλύος επί κανονικού ρήγματος είναι 1.3 για την κατακόρυφη επιτάχυνση, ενώ για την οριζόντια επιτάχυνση δεν υπάρχει ενίσχυση. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτό το έδαφος έχει πολύ μικρή γωνία διαστολικότητας και δεν οδηγεί στο πλήρη σχηματισμό ζώνης ολίσθησης, με αποτέλεσμα να μην εκδηλώνεται επαρκής ανάκτηση παραμόρφωσης μετά την αποχία.

Συγκριτικά προς τα ανωτέρω αναφέρεται ότι η προγενέστερη έκδοση του Γαλλικού Αντισεισμικού Κανονισμού (PS89) απαιτούσε διαλασιασμό των επιταχύνσεων επί του κινούμενου τεμάχους, ανεξαρτήτως τύπου ρήγματος και ποιότητας εδάφους [η διάταξη αυτή έχει αφαιρεθεί από την νεότερη έκδοση του κανονισμού (PS92)].

5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Από την παρουσίαση που προηγήθηκε προκύπτει ότι η αντιμετώπιση ενεργών ρηγμάτων στον σχεδιασμό και την κατασκευή τεχνικών έργων δεν πρέπει να μας δημιουργεί σήμερα αμηχανία. Αντίθετα υπάρχουν τα μέσα για ορθολογιστική εκτίμηση των βασικών παραμέτρων του προβλήματος, προς όφελος τόσο της ασφάλειας όσο και της οικονομίας των έργων. Παράλληλα όμως θα πρέπει να τονισθεί ότι το πρόβλημα είναι εξαιρετικά σύνθετο και πολύ-παραμετρικό και δεν είναι επί του παρόντος δυνατή η διατύπωση απλών-γενικών κριτηρίων, υπό μορφή διατάξεων του αντισεισμικού κανονισμού. Αντίθετα, η σχετική έρευνα να πρέπει συνεχισθεί έως το σημείο ικανοποιητικής σύγκλισης των αποτελεσμάτων από θεωρητικές προσομοιώσεις, εργαστηριακά πειράματα και επιτόπου παρατηρήσεις. Έως τότε, η ύπαρξη ενεργού τεκτονικού ρήγματος σε άμεση γειτονία με σημαντικά τουλάχιστον τεχνικά έργα θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως αντικείμενο ειδικής μελέτης και έρευνας όπως πολύ σωστά προβλέπουν πολλοί σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί, συμπεριλαμβανομένου του ελληνικού (ΕΑΚ2000).

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται στον αείμνηστο Αν. Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κο Δ. Παπασταματίου ο οποίος ήταν ένας από τους πρωτοπόρους στο θέμα αυτό και μοιράστηκε πρόθυμα την πλούσια εμπειρία του μαζί μας. Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται στην Δρ. Ρούλα Ροντογιάννη του Ινστιτούτου Γεωλογικών Μελετών Ελλάδος (ΙΓΜΕ) για τις πολύτιμες πληροφορίες που μας παρείχε σχετικά με τα αποτυπωμένα ενεργά ρήγματα στην χώρα μας, καθώς και τον Dr. Peter Cundall του Itasca Consulting Group για on-line βοήθεια στην χρήση του FLAC.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BEROZA, G. C. [1991]. "Near Source Modeling of the Loma Prieta Earthquake. Evidence for Heterogeneous Slip and Implication for Earthquake Hazard." Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 81, No5, pp. 1603-1621.
- BRAY, J. D., R. B. SEED, L. S. CLUFF AND H. B. SEED [1994,a]. "Earthquake Fault Rupture Propagation Through Soil". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No.3 , pp. 543-561.
- BRAY, J. D., R. B. SEED AND H. B. SEED [1994,b]. "Analysis of Earthquake Fault propagation through Cohesive Soil". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 3 ,pp. 562-580.
- COLE, D. A. JR. AND P. V. LADE [1984]. "Influence Zones in Alluvium Over Dip-Slip Faults". Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol 110, No 5, pp 599-615.
- DAY, M. [1982]. "Three-Dimensional Finite Difference Simulation of Fault Dynamics: Rectangular Faults with Fixed Rupture Velocity". Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 72, pp. 705-727.
- LADE, P. V. AND D. A. COLE JR. AND D. CUMMINGS [1984]. "Multiple Failure Surfaces Over Dip-Slip Faults". Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 110, No 5, pp. 616-627.
- PS 89. "Regles de construction parasismique"
- SCOTT, R. F. [1987]. "Failure" . Geotechnique, Vol.37, No.4, pp. 423-466.
- TRIFUNAC, M. D. AND E. I. NOVIKOVA [1995]. "Duration of Earthquake Fault Motion in California". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 781-799.
- WELLS, D. L. AND K. J. COPPERSMITH [1994]. "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement". Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 84, No.4, pp. 974-1002.