

Γεωλογικά – Γεωτεχνικά Προβλήματα που Απαντώνται σε Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων Παρά τα Ρήγματα

Geological – Geotechnical Problems on Technical Work Foundations Caused by Faulting

ΛΕΚΚΑΣ, Ε.Λ. Δρ. Γεωλόγος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΚΡΑΝΗΣ, Χ.Δ. Δρ. Γεωλόγος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζονται και ταξινομούνται τα γεωλογικά – γεωτεχνικά προβλήματα που απαντώνται σε θεμελιώσεις παρά τα ρήγματα. Τα προβλήματα αντιστοιχούν σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες έχουν σχέση με: (i) τη διαφοροποίηση της γεωλογικής δομής εκατέρωθεν ενός ρήγματος, (ii) τη μεταβολή των γεωτεχνικών συνθηκών, (iii) τη διαφοροποίηση των υδρογεωλογικών συνθηκών και (iv) αυτά που ανακύπτουν σε σεισμικές διεγέρσεις. Πρόσθετα για κάθε μία κατηγορία προσεγγίζονται τα αίτια και περιγράφονται οι μέθοδοι εντοπισμού και αναγνώρισης. Τέλος, διατυπώνονται προτάσεις αναφορικά με τις ενέργειες, οι οποίες πρέπει να δρομολογηθούν για την αντιμετώπιση και την επίλυση των προβλημάτων.

ABSTRACT: The problems of geological and geotechnical nature that arise from foundation of buildings and technical works in the neighbourhood of active faults are presented in this paper. The problems fall into four categories, which are: (i) differentiation of geological configuration on the juxtaposed fault blocks; (ii) differentiation of geotechnical conditions; (iii) alteration in hydrogeological conditions; and (iv) problems arising in earthquake activity. For each category, the causes are presented, together with the appropriate reconnaissance and localization methods. Suggestions are also made, as to the measures that should be taken for the alleviation of the problems.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έννοια του γεωλογικού ρήγματος ταυτίζεται με μια ασυνέχεια στους γεωλογικούς σχηματισμούς, η οποία οφείλεται στη δράση των τεκτονικών δυνάμεων. Ανεξάρτητα από το εάν το ρήγμα είναι ενεργό ή ανενεργό, προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις σε μια σειρά παραμέτρους που, είτε αυτοτελώς ή σε συνδυασμό, προκαλούν έμμεσα προβλήματα σε κατασκευές και τεχνικά έργα. Βέβαια, ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα αυξημένος όταν το ρήγμα ή η ρηξιγενής ζώνη στην οποία ανήκει το ρήγμα είναι ενεργή.

Η προσέγγιση στα προβλήματα που δημιουργεί η παρουσία ρηγμάτων στα τεχνικά έργα μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω αναλυτικής έρευνας - μελέτης και διάκρισης κατηγοριών προβλημάτων, τα οποία

συνδέονται με συγκεκριμένα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά μήκος ή εκατέρωθεν των ρηγμάτων.

Στη συνέχεια θα γίνει μια προσπάθεια διάκρισης και ομαδοποίησης των περιπτώσεων (Πίν. 1). Πρόσθετα προσεγγίζονται τα αίτια των προβλημάτων και περιγράφονται οι μέθοδοι εντοπισμού και αναγνώρισης. Τέλος, διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις αναφορικά με τις παρεμβάσεις και τα μέτρα αντιμετώπισης.

2. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ

Κατά μήκος και εκατέρωθεν των ρηγμάτων τις περισσότερες φορές παρατηρείται διαφοροποίηση της γεωλογικής δομής. Οι παράμετροι

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΙΔΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΑΙΤΙΑ	ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ	ΚΥΡΙΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ
ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ - ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ	ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ	ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΔΟΜΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΡΗΞ/ΧΩΝ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	—	—
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ				—	—
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΡΙΒΗ	ΖΩΝΕΣ ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ	ΑΠΟΜΑΚΡ. ΤΕΚΤ. ΥΛΙΚΟΥ ΕΙΔ. ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΕΡΓΟΥ
	ΠΛΕΥΡΙΚΑ ΚΟΡΗΜΑΤΑ	ΔΙΑΒΡΩΣΗ	ΕΙΔΙΚΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΕΣ		ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	ΕΙΔ. ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΕΠΙΛ. ΘΕΣΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	ΔΙΑΦΟΡ. ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΙΔΙΚΟΙ ΟΡΟΙ
	ΔΙΑΦΟΡ. ΔΙΑΒΡΩΣΗ				ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	
	ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΛΙΣΕΙΣ ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΕΣ		ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΙΔΙΚΑ ΕΡΓΑ
	ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ-ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ-ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΕΙΣ	ΚΑΤΑΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ	ΧΑΛΑΡΩΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΕΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ	ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΡΓΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
	ΕΓΚΟΙΛΑ	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	ΚΑΡΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝ.ΕΜΦΑΝΙΣΗ	+ ΓΕΩΦΥΣ. ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ	ΑΠΩΛΕΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΕΡΓΟΥ ΕΙΔΙΚΟΙ ΟΡΟΙ

ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	—	ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΗΓΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ	ΓΕΩΛΟΓ.ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	ΔΥΣΧΕΡΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ	ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΔ. ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΕΡΓΟΥ
---------------------------------------	---	--	---	--	---	---

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ	ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΡΗΞΙΤΕΜΑΧΩΝ	ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΕΙΔΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	ΓΕΩΛ. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΝΕΟΤ. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ	ΜΕΓΑΛΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΕΙΣ	ΕΙΔΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΜΕΤΑΘΕΣΗΣ ΕΡΓΟΥ
	ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΝΤΑΣΕΩΝ	ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΣΤΙΑΣ				
	ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ					
	ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ	ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ				

Πίν. 1. Συγκεντρωτικός πίνακας κατηγοριοποίησης προβλημάτων, αιτιών και αντιμετώπισης που απαντώνται κατά μήκος των ρηγμάτων.
Table 1. Gathering table of problems, causes and facing categories, which can be seen along faults.

που σχετίζονται με αυτή τη διαφοροποίηση της γεωλογικής δομής είναι οι ακόλουθες:

2.1 Διαφοροποίηση της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης

Η διαφοροποίηση της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης είναι αρκετά συχνή, ειδικά στις περιπτώσεις όπου οι ρηξιγενείς δομές εμφανίζουν μεγάλο μέγεθος μετατόπισης των εκατέρωθεν τεμαχίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι δυνατόν να απαντούν σχηματισμοί με τελείως διαφορετικούς χαρακτήρες στα δύο εκατέρωθεν ρηξιτεμάχια. Τούτο είναι σύνηθες στον Ελληνικό χώρο, όπου μεγάλες περιθωριακές ρηξιγενείς ζώνες αλλά και ρήγματα μικρότερης τάξης, φέρνουν σε επαφή σχετικά συνεκτικούς βραχώδεις σχηματισμούς Αλπικής ηλικίας (π.χ. ασβεστόλιθους) με χαλαρές Μεταλπικές αποθέσεις (π.χ. μάργες, άργιλοι). Παρόλο που η ανισοτροπία αυτή καθ' αυτή δεν προκαλεί άμεσα σημαντικά προβλήματα, εντούτοις αποτελεί το αίτιο γενικότερης διαφοροποίησης των τοπικών συνθηκών στην περιοχή θεμελίωσης, όπως αυτές θα περιγραφούν στη συνέχεια (π.χ. υδρογεωλογικές συνθήκες, γεωτεχνικές συνθήκες, κλπ.)

Η προκαταρκτική έρευνα για τον εντοπισμό μιας ρηξιγενούς ζώνης, αλλά και τον εντοπισμό της διαφοροποίησης της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης, περιλαμβάνει: (i) χαρτογράφηση των γεωλογικών σχηματισμών σε λεπτομερή κλίμακα, (ii) συλλογή και επεξεργασία στοιχείων για τις τεκτονικές δομές εκατέρωθεν της ρηξιγενούς ζώνης, (iii) προσδιορισμό των γεωμετρικών και κινηματικών χαρακτηριστικών της, κ.ά.

2.2 Διαφοροποίηση της τεκτονικής δομής

Οι διαφορετικές λιθοστρωματογραφικές ενότητες που έρχονται σε επαφή λόγω του ρήγματος μπορεί να εμφανίζουν τελείως διαφορετική τεκτονική παραμόρφωση. Χωρίς αυτό να αποτελεί κανόνα, ρήγματα με μικρό άλμα και μήκος δεν προκαλούν σημαντική διαφοροποίηση στην τεκτονική δομή εκατέρωθέν τους. Στην αντίθετη περίπτωση, είναι συχνό το φαινόμενο να έρχονται σε επαφή अपαραμόρφωτοι ή ελαφρά παραμορφωμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί με άλλους, ισχυρά τεκτονισμένους. Η προκαταρκτική έρευνα για τον εντοπισμό της διαφοροποίησης της τεκτονικής δομής περιλαμβάνει τις έρευνες που περιγράφηκαν προηγουμένως. Όπως και

στην προηγούμενη περίπτωση, τα προβλήματα προκύπτουν συνήθως από τη συνεπαγόμενη διαφοροποίηση των γεωτεχνικών, υδρογεωλογικών, κλπ. συνθηκών στην περιοχή θεμελίωσης του έργου.

2.3 Παρουσία τεκτονικών πετρωμάτων

Πρόκειται για πετρώματα που προέρχονται από τον κατακερματισμό των γεωλογικών σχηματισμών κατά τη διάρρηξη, λόγω τριβής των εκατέρωθεν ρηξιτεμαχίων (Εικ. 1). Η παρουσία καθώς και το εύρος ανάπτυξής τους εξαρτώνται άμεσα, μεταξύ άλλων, από: (i) το είδος και την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου τάσεων, (ii) το είδος και το μέγεθος της μετακίνησης, (iii) την ύπαρξη ή μη διαδοχικών επαναδραστηριοποιήσεων, (iv) τη λιθολογική σύσταση των παρειών του ρήγματος, (v) την παρουσία υγρής φάσης, κ.ά. Το σημαντικότερο πρόβλημα που δημιουργείται είναι η έντονη ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών, που οδηγεί σε σειρά επιμέρους προβλημάτων όπως: (i) απώλεια στήριξης εξαιτίας πλήρωσης των δημιουργούμενων κενών από πιθανές υπερκείμενες μάζες, (ii) κυκλοφορία υπογείων υδάτων και συνεπαγόμενη υπόγεια διάβρωση, (iii) στατική και δυναμική καθίζηση εξαιτίας συμπίεσης των χαλαρών τεκτονικών πετρωμάτων στη ζώνη του ρήγματος και (iv) διαφοροποίηση ή/και ενίσχυση αναμενόμενων μετακινήσεων και επιταχύνσεων σε σεισμική διέγερση.

Για να εντοπιστούν τα τεκτονικά πετρώματα απαιτείται μια σειρά ερευνητικών εργασιών όπως: (i) χαρτογράφηση του ρήγματος σε κλίμακα ανάλογη με τη σπουδαιότητα του έργου, (ii) λεπτομερής γεωμετρική και κινηματική ανάλυση της ρηξιγενούς επιφάνειας και (iii) επακριβής προσδιορισμός του πάχους, της έκτασης και εν γένει της τρισευδιάστατης γεωμετρίας της ζώνης του τεκτονικού πετρώματος. Πρόσθετα, πρέπει να γίνει καθορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων τόσο του μητρικού, όσο και του τεκτονικού πετρώματος, ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη διαφορικών καθιζήσεων, κλπ., καθώς επίσης και περαιτέρω έρευνα για άλλα συνοδά φαινόμενα όπως η δημιουργία εγκοίλων, η διαφοροποίηση της κυκλοφορίας του υπόγειου νερού, κλπ.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού περιλαμβάνει, σε γενικές γραμμές, τα ακόλουθα: (i) απομάκρυνση του τεκτονικού

υλικού, (ii) βελτίωση βραχομάζας – εξυγίανση, (iii) πιθανή μετάθεση του τεχνικού έργου, κ.ά.



Εικ. 1 Υποχώρηση βραχωδών τεμαχίων που προήλθαν από τη δράση ρηξιγενούς ζώνης στην πόλη της Ρόδου.

Fig. 1 Yielding of rocking blocks because of fault zone activity in the city of Rhodes.

2.4 Παρουσία πλευρικών κορημάτων

Τα ρηξιγενή μέτωπα συχνά καλύπτονται από λιγότερο ή περισσότερο χαλαρά, γωνιώδη, αδρομερή ή λεπτομερή υλικά, τα πλευρικά κορήματα. Απαντούν σε ζώνη ποικίλου εύρους κατά μήκος του ίχνους ή του μετώπου του ρήγματος με το οποίο πολλές φορές συνδέονται γενετικά.

Τα προβλήματα που ανακύπτουν είναι συνάρτηση του βαθμού συνεκτικότητας των κορημάτων. Έτσι, όταν κυριαρχούν οι χαλαρές φάσεις τα πιθανά προβλήματα εντοπίζονται: (i) στις έντονες διαφορικές καθιζήσεις, (ii) στις κατολισθήσεις οι οποίες ευνοούνται λόγω της κλίσης των πρανών, (iii) σε φαινόμενα ερπυσμού και (iv) στις αυξημένες τιμές ορισμένων σεισμικών παραμέτρων (π.χ. μετατόπιση). Στις συνεκτικές/βραχώδεις φάσεις αναμένονται: (i) παρουσία εγκοίλων, λόγω εκλεκτικής υπόγειας διάβρωσης των ενδιαστρώσεων των πιθανών χαλαρών φάσεων και (ii) καταπτώσεις. Συνθετότερα

προβλήματα εμφανίζονται σε περίπτωση εναλλαγών τόσο κατά την κατακόρυφη, όσο και κατά την οριζόντια έννοια, διαστάσεις των χαλαρών και συνεκτικών φάσεων.

Η έρευνα σε περιοχή που καλύπτεται από κορήματα που ενδεχόμενα συνδέονται με ρηξιγενή ζώνη πρέπει να περιλαμβάνει, εκτός από τα βασικά στάδια που προαναφέρθηκαν, και γεωφυσικές διασκοπήσεις, λεπτομερή γεωτεχνική έρευνα και μελέτη ευστάθειας πρανών κάτω από συνθήκες σεισμικής φόρτισης, κ.ά.

Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα προτείνεται σε γενικές γραμμές: (i) θεμελίωση σε υγιές υπόβαθρο, (ii) αποφυγή θεμελίωσης σε διαφορετικές λιθολογικές φάσεις και (iii) ει δυνατόν, μετάθεση του έργου εκτός της ζώνης εμφάνισης των χαλαρών φάσεων των πλευρικών κορημάτων.

3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Τα προβλήματα αυτού του είδους είναι άμεσο αποτέλεσμα των διεργασιών που έχουν λάβει ή λαμβάνουν χώρα κατά μήκος των ρηγμάτων, τόσο κατά τη διάρκεια γένεσης όσο και κατά τη διάρκεια εξέλιξής τους, και σχετίζονται ως ένα μεγάλο βαθμό με την διαφοροποίηση της γεωλογικής δομής. Ειδικότερα, τα προβλήματα είναι τα ακόλουθα:

3.1 Διαφορικές καθιζήσεις

Είναι ένα συχνό φαινόμενο που παρατηρείται εκατέρωθεν των ρηγμάτων και των ρηξιγενών ζωνών. Οι πιθανότεροι παράγοντες εκδήλωσής τους είναι: (i) η παρουσία διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών εκατέρωθεν του ρήγματος, (ii) η παρουσία τεκτονικών πετρωμάτων κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης, (iii) η διαφοροποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών εκατέρωθεν του ρήγματος, και (iv) η διαφοροποίηση των υδρογεωλογικών συνθηκών.

Οι επιπτώσεις στις κατασκευές και στα τεχνικά έργα είναι κυρίως: (i) η σταδιακή απώλεια στήριξης σε τμήματα του έργου, οφειλόμενη σε στατική καθίζηση και (ii) η απώλεια στήριξης σε ορισμένα τμήματα κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων που συνοδεύονται από δυναμικές καθιζήσεις.

Η έρευνα σε περιοχές που αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους πρόβλημα θα πρέπει να περιλαμβάνει: (i) γεωλογική χαρτογράφηση σε λεπτομερή κλίμακα, (ii) γεωτεχνική

χαρτογράφηση, (iii) διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών, (iv) επιτόπιες και εργαστηριακές γεωτεχνικές εργασίες και (v) υπολογισμό των αναμενόμενων καθιζήσεων (στατικών – δυναμικών) κατά μήκος ή εκατέρωθεν των ρηγμάτων.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο προσδιορισμός του μεγέθους και της γεωγραφικής κατανομής των πιθανών καθιζήσεων. Τα πορίσματα των επιμέρους ερευνών θα πρέπει να ενσωματώνονται στη μελέτη του έργου, και εάν οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα δυσμενείς, αυτό να μετατίθεται.

3.2 Διαφορική διάβρωση

Η διαφορική διάβρωση κατά μήκος και εκατέρωθεν των ρηγμάτων ενισχύεται από: (i) τον κατακερματισμό των σχηματισμών, (ii) τη διαφοροποίηση της κυκλοφορίας των υπόγειων και των επιφανειακών υδάτων στα δύο ρηξιτεμάχια, (iii) τη διαφοροποίηση των μορφολογικών συνθηκών, κ.ά. Οι επιπτώσεις από την εκδήλωση της διαφορικής διάβρωσης σταδιακά έχουν σαν αποτέλεσμα: (i) την υποσκαφή των σχηματισμών θεμελίωσης, (ii) τη σταδιακή απώλεια στήριξης τμημάτων της κατασκευής και (iii) την πιθανή επιχωμάτωση τμημάτων του έργου λόγω των μεταφερομένων από τη διάβρωση υλικών.

Στην έρευνα για τον εντοπισμό διαφορικής διάβρωσης, οι επιμέρους εργασίες είναι ανάλογες με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ πρόσθετα θα πρέπει να εκτιμηθεί επακριβώς η διαβρωσιμότητα του κάθε σχηματισμού στη περιοχή θεμελίωσης. Σε ότι αφορά την αντιμετώπιση του προβλήματος συνιστώνται μια σειρά μέτρων, όπως: (i) έργα προστασίας από την επιφανειακή διάβρωση στην ευρύτερη περιοχή, (ii) αντιδιαβρωτική προστασία θεμελίωσης, (iii) έργα υποβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, κ.ά.

3.3 Κατολισθήσεις–Καταπτώσεις–Ανατροπές

Οι κύριοι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων είναι: (i) οι μορφολογικές συνθήκες, (ii) η γεωμετρία των πετρωμάτων και των πρωτογενών δομών τους, (iii) οι τεκτονικές ασυνέχειες, (iv) ο βαθμός κατακερματισμού των πετρωμάτων, (v) η παρουσία και κυκλοφορία υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, (vi) οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, κ.ά. Δεδομένου όμως ότι οι μορφολογικές ασυνέχειες συνδέονται ή

οφείλονται συχνότατα σε ρήγματα ή ρηξιγενείς ζώνες, γίνεται αντιληπτό ότι τα φαινόμενα αυτά ενισχύονται διότι: (i) η ρηξιγενής ζώνη προκαλεί κατακερματισμό των πετρωμάτων, (ii) στα εκατέρωθεν ρηξιτεμάχια δημιουργούνται διαφοροποιήσεις στην κίνηση των υπογείων υδάτων που οδηγούν σε υποβοήθηση των μετακινήσεων-ολισθήσεων κατά μήκος ασυνεχειών και (iii) οι διαδικασίες διάβρωσης – αποσάθρωσης στο ανερχόμενο τέμαχος τείνουν να εξομαλύνουν την υφιστάμενη μορφολογική ασυνέχεια, κ.ά. Τα φαινόμενα ενισχύονται σε περίπτωση σεισμικής διέγερσης.

Η έρευνα για τον εντοπισμό εκδήλωσης πιθανών κατολισθήσεων κατά μήκος των ρηγμάτων περιλαμβάνει: (i) γεωλογική χαρτογράφηση σε λεπτομερή κλίμακα, (ii) τεκτονική ανάλυση, (iii) γεωτεχνική χαρτογράφηση σε αντίστοιχη κλίμακα, (iv) προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων, (v) μοφοτεκτονική ανάλυση, (vi) υδρογεωλογική έρευνα, (vii) μελέτη σεισμικότητας και (viii) στατιστικό και δυναμικό υπολογισμό της ευστάθειας των μαζών.

Η αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων πρέπει να λαμβάνει υπόψη οπωσδήποτε τις ιδιαίτερες συνθήκες που διαμορφώνονται και αντιστοιχούν στα συνθήκη έργα αντιμετώπισης κατολισθήσεων (Εικ. 2).



Εικ. 2 Εκδήλωση κατολισθήσεων κατά μήκος ρηξιγενούς ζώνης στην οδό Πλατανιά – Απόλλωνα Ρόδου.

Fig. 2 Landslide reveal along the fault zone in Platania-Apollon route (Rhodes island).

3.5 Έγκοιλα – ασυνέχειες

Η προκαλούμενη λόγω της διάρρηξης ασυνέχεια στα πετρώματα έχει ως αποτέλεσμα τον κατακερματισμό της προϋπάρχουσας δομής, ακόμα και την πλήρη αλευροποίηση των σχηματισμών. Έτσι είναι δυνατό να

δημιουργηθούν έγκοιλα και λοιπές ασυνέχειες εξαιτίας της υπόγειας διάβρωσης από τα κυκλοφορούντα ύδατα κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα.

Οι διαδικασίες εντοπισμού, ειδικά στις περιοχές όπου υπάρχει υπόνοια παρουσίας εγκοίλων, περιλαμβάνουν: (i) εκσκαφή, σε βάθος πολλαπλάσιο του βάθους θεμελίωσης, (ii) συσχέτιση πιθανής ύπαρξης εγκοίλων – ρηξιγενούς ιστού και (iii) εκτέλεση ερευνητικών γεωτρήσεων, γεωφυσικών διασκοπήσεων και διάνοιξη ερευνητικών στοών. Στην περίπτωση εντοπισμού εγκοίλων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σοβαρά το ενδεχόμενο να μετατεθεί η θέση εκτέλεσης του τεχνικού έργου, ειδικότερα εάν βρίσκονται στη γειτονία ενεργού ή σεισμικού ρήγματος (Lekkas & Kranis 1994).

4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Η διαφοροποίηση των υδρογεωλογικών συνθηκών οφείλεται: (i) στην παρουσία της ρηξιγενούς επιφάνειας, ιδίως όταν συνοδεύεται από τεκτονικά πετρώματα, τα οποία είναι δυνατό να μεταβάλουν δραστικά τη διαπερατότητα σε διεύθυνση εγκάρσια της ρηξιγενούς ζώνης, (ii) στην παρουσία σχηματισμών διαφορετικής υδρογεωλογικής συμπεριφοράς στα δύο ρηξιτεμάχη και (iii) στην παρουσία σχηματισμών που χαρακτηρίζονται από διαφορετική τεκτονική δομή, η οποία με τη σειρά της ορίζει σε μακροεπίπεδο την κυκλοφορία των υπογείων υδάτων.

Η διαφοροποίηση των υδρογεωλογικών συνθηκών μπορεί να γίνει αντιληπτή μέσω: (i) της παρουσίας πηγών κατά μήκος της τεκτονικής επαφής, (ii) της έντονης υδροφορίας κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης, η οποία μπορεί να οφείλεται στην διαφορετική περατότητα των σχηματισμών των δύο ρηξιτεμαχών και στην περατότητα του τεκτονικού λατυπτοπαγούς, (iii) του διαφορετικού βάθους της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα, (iv) της διαφορετικής γεωμετρίας των υπό πίεση υδροφόρων οριζόντων, κ.ά.

Τα ανωτέρω είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε προβλήματα, όπως: (i) δυσχέριες κατά τη θεμελίωση, λόγω παρουσίας πηγών κατά μήκος του μετώπου, ιδιαίτερα όταν αυτές έχουν μεγάλη παροχή, (ii) εμφάνιση εποχιακής υδροφορίας κατά μήκος της ρηξιγενούς ασυνέχειας, (iii) εκλεκτική υπόγεια διάβρωση των σχηματισμών θεμελίωσης ή και των κατασκευών, (iv) επιφανειακές διαταραχές στη

μορφολογία από τη διακύμανση των ελευθέρων οριζόντων, ιδίως όταν αυτοί φιλοξενούνται σε πετρώματα με σημαντικό ποσοστό αργιλικών ορυκτών και (v) αποσυμπίεση του υδροφορέα στο ένα τέμαχος, με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση και μεταβολή της γεωμετρίας του.

Για τον εντοπισμό τέτοιου είδους προβλημάτων εκτελούνται οι ακόλουθες εργασίες: (i) έρευνα για τον εντοπισμό πιθανής ρηξιγενούς ζώνης, (ii) μελέτη των τεκτονικών πετρωμάτων, (iii) χαρτογράφηση των γεωλογικών σχηματισμών και τεκτονικών δομών της ευρύτερης περιοχής, (iv) υδρογεωλογική χαρτογράφηση, καταγραφή σημείων ύδατος και καθορισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων και (v) με βάση τα ανωτέρω, πρόταση μοντέλου κυκλοφορίας υπόγειων υδάτων.

Η αντιμετώπιση των προβλημάτων γίνεται με: (i) θεμελίωση σε ένα μόνο γεωλογικό σχηματισμό ή σχηματισμούς με σχετικά ομοιογενή υδρογεωλογική συμπεριφορά, (ii) αποφυγή θεμελίωσης κατά μήκος του ρήγματος, ιδίως όταν το τεκτονικό λατυπτοπαγός διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαφοροποίηση της κυκλοφορίας του υπόγειου νερού, (iii) αποφυγή θεμελίωσης ή θεμελίωση με ειδικούς όρους σε σχηματισμούς οι οποίοι αποκτούν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά με την εποχιακή παρουσία νερού, (iv) αποφυγή θεμελίωσης κοντά ή πάνω από καρστικές πηγές ή έγκοιλα, (v) στεγανοποίηση της θεμελίωσης πάνω από υψηλό υδροφόρο ορίζοντα, κ.ά. Επισημαίνεται βέβαια ότι πέραν του γενικού πλαισίου, πιθανόν να απαιτείται περαιτέρω έρευνα που θα υποδείξει τη λήψη και εφαρμογή ειδικών κατά περίπτωση μέτρων.

5. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Τα προβλήματα αυτού του είδους είναι και τα περισσότερο γνωστά, δεδομένης της άμεσης συσχέτισης ρήγματος – σεισμού και έχουν σχέση με τα ακόλουθα.

5.1 Μετατόπιση ρηξιτεμαχών

Η εμφάνιση αυτού καθ' αυτού του σεισμικού ρήγματος το οποίο προκαλεί μετάθεση των εκατέρωθεν ρηξιτεμαχών στην επιφάνεια δεν είναι ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις (Εικ. 3) στο πρόσφατο παρελθόν ήταν οι σεισμοί του Kobe (Ιαπωνία) το 1995 (Lekkas et al., 1996a,b), του Izmit και Duzce (Τουρκία) το 1999 (Lekkas,

2000a), καθώς και στην Taiwan το 1999 (Lekkas 2000b).

Τα προβλήματα αλλά και οι κίνδυνοι σε περίπτωση μετατόπισης ρηξιτεμαχών στη βάση της θεμελίωσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση αστοχιών στα τεχνικά έργα (Lazarte et al. 1994, Murbach et al. 1999, Lekkas 2001). Για το λόγο αυτό καθίσταται επιτακτικός ο εντοπισμός και χαρακτηρισμός ρηγμάτων που είναι δυνατό να ενεργοποιηθούν. Η διαδικασία εντοπισμού – χαρακτηρισμού είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και εμπεριέχει πάντα ποσοστό αβεβαιότητας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες προτεινόμενες εργασίες, όπως: (i) προσδιορισμός του νεοτεκτονικού καθεστώτος της περιοχής, (ii) γεωλογική χαρτογράφηση σε λεπτομερή κλίμακα, (iii) νεοτεκτονική χαρτογράφηση, (iv) η τεκτονική ανάλυση, (v) ενόργανες παρατηρήσεις για τη μέτρηση του εντατικού πεδίου, (vi) μελέτη σεισμικότητας, ιστορικής και ενόργανης, (vii) μορφοτεκτονική ανάλυση, (viii) παλαιοσεισμολογική μελέτη, κ.ά.



Εικ. 3 Ταυτόχρονη εμφάνιση ανάστροφου σεισμικού ρήγματος και ρευστοποιήσεων κατά το σεισμό του Kobe (βέλη).

Fig. 3 Appearance of both a reverse seismic fault and liquefactions during the Kobe earthquake (arrows).

Λόγω της μεγάλης επικινδυνότητας, η ενδεικνυόμενη λύση στην περίπτωση των τεχνικών έργων είναι η μετάθεσή τους εκτός της ζώνης του σεισμικού ρήγματος. Σε περίπτωση έργων χωρίς δυνατότητα μετάθεσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα των επιμέρους ερευνών και μάλιστα οι πιο δυσμενείς προβλέψεις τους, ώστε να εφαρμοστούν οι μέγιστοι δυνατοί συντελεστές ασφάλειας.

5.2 Ενίσχυση Εντάσεων

Σε πολλούς σεισμούς παρατηρήθηκε ότι κατά μήκος των σεισμικών ρηγμάτων οι τιμές των εντάσεων λάμβαναν τις μέγιστες τιμές και γενικά παρουσίαζαν γραμμική ή επιμήκη κατανομή, η οποία ταυτιζόταν με το ίχνος του σεισμικού ρήγματος. Τέτοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν τόσο στον Ελληνικό, όσο και στο διεθνές χώρο, ιδίως στις περιπτώσεις όπου τα σεισμικά ρήγματα έτεμναν αστικές πολεοδομικές μονάδες. Ενδεικτικά αναφέρονται οι σεισμοί του Αιγίου (1995), του Kobe (1995), του Izmit και του Duzce (1999) (Lekkas et al. 1996a, b, Lekkas 2000a).

Και σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητος ο εντοπισμός του ρήγματος ή των ρηγμάτων που μπορούν είτε να ενεργοποιηθούν ή να δραστηριοποιηθούν παθητικά κατά τη διάρκεια ενός σεισμού και ενδείκνυνται οι επιμέρους έρευνες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση, ενώ αντίστοιχες ενέργειες θα πρέπει να γίνουν για την αποφυγή του προβλήματος.

5.3 Φαινόμενα κυματικής συμβολής – κατευθυντικότητας

Σε ορισμένες περιπτώσεις σεισμών παρατηρήθηκε ότι κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος υφίσταται και ανισοκατανομή των εντάσεων, οι οποίες μειώνονται προς τη μία κατεύθυνση και αυξάνονται σημαντικά προς την άλλη. Το φαινόμενο έγινε περισσότερο κατανοητό όταν συνειδητοποιήθηκε ότι η σεισμική πηγή «μεταναστεύει» κατά μήκος του επιπέδου θραύσης, δίνοντας γένεση στο φαινόμενο Doppler/Fiseau (Lekkas & Kranis, 1997).

Το πλέον αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ήταν ο σεισμός του Kobe (1995) όπου κατά μήκος του σεισμικού ρήγματος οι εντάσεις αυξάναν δραματικά προς το ένα άκρο (ΒΑ), ενώ ήταν πολύ μικρότερες στο άλλο (ΝΔ). Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στο ότι ο σεισμός αποτελείτο από τρία υπο-γεγονότα που έλαβαν χώρα σε χρονικό διάστημα 11sec, με ταυτό-

χρονη μετανάστευση της σεισμικής πηγής από τα ΝΔ στα ΒΑ κατά 13 km. Το φαινόμενο προκάλεσε διαμόρφωση του συχνοτικού περιεχομένου με αποτέλεσμα μεγάλες βλάβες προς τα ΒΑ μέσα στο Kobe και μικρές βλάβες προς τα ΝΔ στη νήσο Awaji (Lekkas & Kranis, 1997).

5.4 Ρευστοποιήσεις και σεισμικά ρήγματα

Σε πρόσφατους μεγάλους σεισμούς (Kobe, Αίγιο) παρατηρήθηκε η ταυτόχρονη εκδήλωση σεισμικών ρηγμάτων και ρευστοποιήσεων. Τα φαινόμενα ρευστοποιήσεων λαμβάνουν χώρα κατά μήκος των σεισμικών ρηγμάτων και τα ρευστοποιηθέντα υλικά εκτινάσσονται διαμέσου των ασυνεχειών στην επιφάνεια (Lekkas 1996b, Lin 1997). Η συνύπαρξη αυτών των δύο στοιχείων δημιουργεί, όπως είναι επόμενο, εξαιρετικά αρνητικές επιπτώσεις στα υπερκείμενα τεχνικά έργα (Εικ. 3). Η έρευνα για τον προσδιορισμό εμφάνισης τέτοιων φαινομένων βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έγινε σαφές, ο παράγοντας ρήγμα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην πρόκληση προβλημάτων στις κατασκευές και στα τεχνικά έργα. Προηγουμένως έγινε προσπάθεια κατηγοριοποίησης των προβλημάτων που εμφανίζονται κατά μήκος ή εκατέρωθεν των ρηγμάτων με στόχο αφενός μεν να αναγνωρίζονται, να εντοπίζονται και να ερευνώνται διεξοδικά, αφετέρου δε να λαμβάνονται συστηματικά μέτρα για την αντιμετώπισή τους, έτσι ώστε ο κίνδυνος για τις κατασκευές να ελαχιστοποιείται.

Επισημαίνεται ότι οι γενικές κατευθύνσεις έρευνας προσδιορισμού του κινδύνου και αντιμετώπισης από τεχνικής πλευράς των προβλημάτων σε περιπτώσεις κατασκευής σημαντικών έργων, θα πρέπει να εξειδικεύονται κατά περίπτωση στις τοπικές συνθήκες. Είναι αυτονόητο ότι σε περίπτωση κατασκευής κάποιου σημαντικού τεχνικού έργου πρέπει να εκτελούνται εξειδικευμένες νεοτεκτονικές και σεισμοτεκτονικές έρευνες, τα πορίσματα των οποίων πρέπει να ενσωματώνονται στη μελέτη της κατασκευής, έτσι ώστε να διασφαλίζεται το όλο έργο.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το ΥΠΕΧΩΔΕ/ΔΟΚΚ και τη ΓΓΕΤ (Πρόγραμμα ΣΥΝ -1996) τους οποίους και ευχαριστούμε.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Lazarte C., Bray J., Johnson A. & Lemmer R. (1994), "Surface breakage of the 1992 Landers earthquake and its effect on structures". Bull. Seism. Soc. Am., 84, June, 547-561.
- Lekkas, E. & Kranis, H. (1994), "Discontinuous Tectonic Deformation and Cave Formation: Examples from the Hellenic territory". Διεθνές Σπηλαιολογικό Συνέδριο, Αθήνα.
- Lekkas, E., Kranis, H., Stylianos, P. & Leounakis, M. (1996a), "Brittle tectonics: a factor in the intensity distribution of the Hanshin earthquake". 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Lekkas, E., Lozios, S., Skourtsos, E. & Kranis, H. (1996b), "Linear distribution of damage and seismic fractures at the Egio earthquake (15 June 1995, Greece)". Earthquake Resistant Engineering Structures 96, Thessaloniki.
- Lekkas, E. & Kranis, H. (1997), "The Doppler-Fizeau effect on the damage distribution during the Kobe earthquake (Japan)". Advances in Earthquake Engineering, Earthquake Resistant Engineering Structures, Computational Mechanics Publications, 2, 57-66.
- Lekkas, E. (2000a), "Intensity distribution and parameters controlling Izmit and Düzce earthquakes (Turkey)". IESCA 2000 (in press).
- Lekkas, E. (2000b), "Analysis of damage parameters of the Chi-Chi Taiwan earthquake". Risk Analysis 2000 (in press).
- Lekkas, E. (2001), "The role of transcurrent fault structures in damage typology during the Izmit and Duzce earthquakes (Turkey, 1999)". ERES 2001 (in press).
- Lin, A. (1997), "Instantaneous-shaking liquefaction induced by the M7.2 1995 southern Hyogo Prefecture earthquake, Japan. Geology, 25, 5.
- Murbach D., Rockwell T. & Bray J. (1999), "The Relationship of Foundation Deformation to Surface and Near-Surface Faulting Resulting from the 1992 Landers Earthquake". Earthquake Spectra, Volume 15, No 1, 121-144.