

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Ο Σεισμός του CHI-CHI (TAIWAN 1999)

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΠΑΥΛΙΔΗΣ ΣΠΥΡΟΣ
Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΟΥ CHI-CHI (ΤΑΙΩΑΝ 1999)

ΓΕΩΛΟΓΙΑ, ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΔΙΑΡΡΗΞΕΙΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ



ΙΟΥΝΙΟΣ 2003

Η έκθεση αυτή αποτελεί το αποτέλεσμα βιβλιογραφικών δεδομένων και στοιχείων υπαίθρου που προέκυψαν από την επίσκεψη του Σ. Παυλίδη στην Taiwan (14 - 29 Οκτωβρίου 2001). Στη σύνταξη της έκθεσης συνεργάστηκε ο γεωλόγος Σ. Σμπόρας, μεταπτυχιακός φοιτητής.

■ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η Taiwan έχει έκταση 35.960 τετραγωνικά χιλιόμετρα και βρίσκεται 150 km απόσταση από την περιοχή Fucian της ηπειρωτικής Κίνας. Πρόκειται για ένα κύριο ατρακτοειδές νησί, με τον επιμήκη άξονα να επεκτείνεται από Βορρά έως Νότο μήκους 394 km και πλάτους 144 km. Το νησιωτικό συγκρότημα αποτελείται από 79 νησιά και νησίδες, που υψώνονται απότομα από το περιθώριο της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας. Η ηπειρωτική κατωφέρεια, ανατολικά του νησιού βυθίζεται στον ειρηνικό ωκεανό σε βάθος που φτάνει τα 4000 μέτρα και απέχει 50km από την ακτή.

Στον κεντρικό του νησιού εκτείνεται μια επιμήκης οροσειρά της Taiwan, με διεύθυνση Βορρά-Νότου, που καλύπτει τα 2/3 περίπου του νησιού. Στην κεντρική ράχη τοποθετείται ο υδροκρίτης που διαχωρίζει σε δύο άνισα μέρη το νησί, με το δυτικό μέρος να παρουσιάζει διπλάσιο πλάτος από αυτό του ανατολικού. Η οροσειρά έχει μήκος 350km με περισσότερες από 25 με υψόμετρα που φτάνουν και ξεπερνούν τα 3000 μέτρα. Η υψηλότερη κορυφή βρίσκεται στα 3952 μέτρα, πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, ονομάζεται Yushan (Mt. Morrison) και τοποθετείται στην δυτική πλευρά του νησιού. Μια ακόμα χαρακτηριστική υψηλή ράχη διακρίνεται δυτικά της κύριας κεντρικής οροσειράς με κορυφή στα 3885 μέτρα (Hsuehsham).

Ανατολικά της κεντρικής ορεινής περιοχής προς την παράκτια ζώνη αναπτύσσονται βουνά με μήκη ~140 km, πλάτος ~10 km και ύψος κορυφών 1000-1500 μέτρα. Μεταξύ τους παρεμβάλλεται μια επιμήκη κοιλάδα, μήκους 150km και

μέσο βάθος μικρότερο των 5 km. Ανατολικά της παράκτιας ζώνης εκτείνεται ο ειρηνικός ωκεανός.

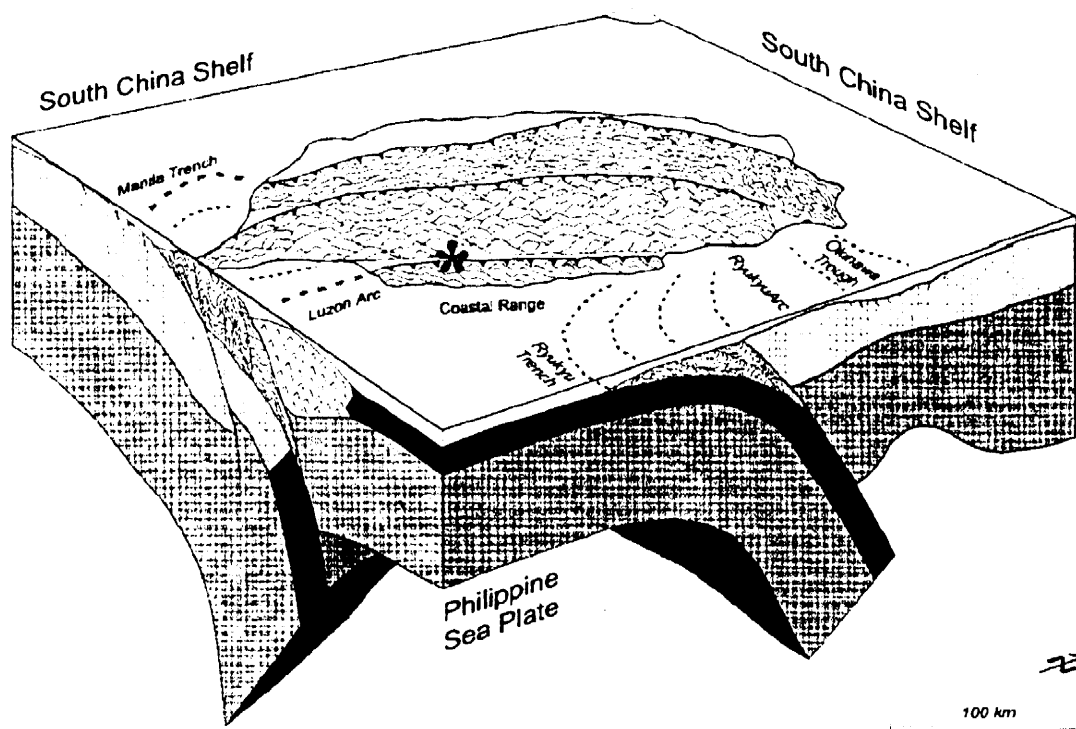
Στην Taiwan είναι γνωστές τρεις χαρακτηριστικές ηφαιστειακές περιοχές. Τα ηφαίστεια είναι ανενεργά και χαρακτηρίζονται από πολυάριθμες φουμαρόλες, σολφαταρες και θερμές πηγές, χωρίς καμία καταγραφή ενεργής έκρηξης στους ιστορικούς χρόνους. Το ηφαιστειακό συγκρότημα Tatun, στη βόρεια Taiwan αποτελείται από ηφαιστειακούς κώνους και καταθέσεις κυρίως ανδρσιτικών ροών και πυροκλαστών. Τα νησιά Penghu εμφανίζουν ηφαιστειότητα λόγω εκρήξεων που συνοδεύτηκαν από τη δημιουργία βασαλτικών εκχύσεων και τόφφων, με δευτερογενή ενστρώσεις άμμου και αργίλου. Η υψηλότερη ανύψωση σ' αυτό το νησιωτικό τόξο είναι λίγο μεγαλύτερη των 50 μέτρων.

Η τρίτη ηφαιστειακή περιοχή είναι το συγκρότημα Chilung, αποτελούμενο από διασκορπισμένες εκρήξεις δακτιών που σχηματίζουν αρκετές ευδιάκριτες κορυφογραμμές που προεξέχουν από Μειοκαινικά στρώματα στη βόρεια ακτή, ανατολικά της πόλης Chilung. Στην ύπαιθρο λίγοι από τους σχηματισμούς των ηφαιστειών μπορούν να διακριθούν. Τα δακτιτικά στρωματά μπορεί να είναι ρηχές, ανώμαλες διεισδύσεις ή εκβολές και είναι στενά συνδεδεμένες με τις αποθέσεις χρυσού –χαλκού στην περιοχή.

■ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ TAIWAN

Η Taiwan σχηματίστηκε κυρίως κατά το Πλειόκαινο, εξαιτίας της σύγκρουσης της Ευρασιατικής πλάκας με την ωκεάνια πλάκα των Φιλιππίνων. Τοποθετείτε στο όριο των πλακών που συγκλίνουν, με την ωκεάνια πλάκα να βυθίζεται κάτω από την Ευρασιάτικη, με ταχύτητα 7-8 cm/yr και διεύθυνση προς ΒΔ. Λόγω της σύγκλισης αυτής υλικό συσσωρεύτηκε στην Ευρασιάτικη πλάκα, πλησίον του ορίου σύγκλισης

και σχηματίστηκε έτσι το νησιώτικο τόξο, με διεύθυνση B-BA στο βόρειο, λιγότερο κυρτό μέρος του τόξου, κεντρικά του νησιού και B-N στο νότιο τμήμα του τόξου, στις δυτικές ακτές της Taiwan, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Λιθοσφαιρικές πλάκες στην ευρύτερη περιοχή της Taiwan (Angelier et al, 2000)

Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο του νησιού καλύπτεται από Καινοζωικές αποθέσεις πάχους μεγαλύτερο των 10.000 μέτρων. Ο B-N άξονας των αποθέσεων έχει μετακινηθεί προοδευτικά προς τα δυτικά με διαδοχικά ορογενετικά επεισόδια. Σημαντικό μέρος των Τριτογενών αποθέσεων με διαφορετικούς βαθμούς αποσκλήρυνσης ή μεταμορφισμού έχουν βυθιστεί. Μεγάλες πυριγενείς διεisdύσεις είναι σπάνιες και αρκετές ηφαιστειακές περιοχές εντοπίζονται κυρίως στη βόρεια, ανατολική Taiwan.

Οι πλέον εκτεταμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί βρίσκονται σε στενόμακρες ζώνες, παράλληλα του τόξου του νησιού. Οι ζώνες αυτές, των πετρωμάτων, εκτείνονται προοδευτικά από το κέντρο του κυρίως νησιού προς τη δυτική ακτή. Η επικρατούσα δομή της Ταϊβαν είναι η προέκταση του κυρτού τόξου προς τα δυτικά. Το βόρειο τμήμα, λιγότερο κυρτό μέρος του τόξου, κατευθύνεται ανατολικά-βορειοανατολικά. Αντίθετα, το νότιο σημαντικότερο τμήμα του τόξου επεκτείνεται Β-Ν. Όλες οι σημαντικές δομές συμπεριλαμβανόμενων των ρηγμάτων και των αξόνων πτυχών, σε όλη την έκταση του νησιού, ακολουθούν στενά την τοξοειδή ανάπτυξη.

Τα παλαιότερα πετρώματα της Ταϊβαν είναι το μεταμορφωμένο υπόβαθρο και τα "αλπικά" που σχηματίστηκαν από το Αν.Παλαιοζωικό έως το Μειόκαινο, όταν μια ακολουθία ψαμμίτη, σχιστής αργίλου, ιλυόλιθου, ασβεστόλιθου και ηφαιστειακών πετρωμάτων, μεγάλου πάχους, τοποθετήθηκαν πάνω σ'αυτό. Η ακολουθία συνοδεύτηκε από όξινη έως ενδιάμεση μαγματική δραστηριότητα.

Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο, αφού υπέστη παραμόρφωση, μεταμόρφωση και την δράση του μαγματισμού, αναδύθηκε κατά την ορογένεση του Ανώτερου Μεσοζωικού, τοπικά γνωστή ως Nanao ορογένεση. Πρόκειται για προκαινοζωικά πετρώματα, που πτυχώθηκαν κατά την ανάπτυξη οροσειρών και υπέστησαν μεταμόρφωση, σχηματίζοντας το κύριο μεταμορφωμένο σύμπλεγμα της Ταϊβαν. Αποκαλύπτεται κατά μήκος της ανατολικής πλευράς της κεντρικής γραμμής ανάπτυξης και επεκτείνεται βόρεια, από την περιοχή Wuyenchio, νοτιότερα, στον ποταμό Tamali. Το μήκος του είναι 250 km και το πλάτος του κυμαίνεται από 10-30 km. Η μεταμορφωμένη αυτή ζώνη αποτελείται από αρκετά είδη σχιστόλιθων, κυρίως πρασινοσχιστόλιθους, μαύρους σχιστόλιθους, πυριτικούς και μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους με μικρότερη συμμετοχή γνευσίων και αμφιβολιτών, που αποκαλύπτονται κυρίως στο βόρειο μέρος του νησιού. Στο ανατολικό τμήμα έχουμε αποκαλύψεις βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων (ωκεάνιος φλοιός), που κατά θέσεις έχουν αλλοιωθεί σε σερπεντινίτες, και πετρώματα ωκεάνιας προέλευσης.

Η ηλικία των μεταμορφωμένων αυτών πετρωμάτων, που προσδιορίστηκε από ίχνη απολιθωμάτων και ραδιομετρικές μεθόδους, πιθανολογείται ότι είναι προ-Τριαδικής ηλικίας, πιθανότατα όμως Ανώτερης Παλαιοζωικής - Μεσοζωικής. Τρία μεγάλα μεταμορφικά επεισόδια που αναγνωρίζονται στο υπόβαθρο, είναι:

- © Του Ανώτερου Μεσοζωικού. Έχουμε δυο ζώνες μεταμορφισμού στον σχιστόλιθο του Tananao, μια χαμηλής P/T δυτικά, στην περιοχή Tailuko και μια υψηλής P/T ανατολικά, στην περιοχή Yuli.
- © Του Ανώτερου Μειοκαίνου. Έχουμε μεταμόρφωση και ανακρυστάλλωση των δυο μεταμορφικών ζωνών.
- © Του Πλειο-Πλειστόκαινου. Σύγκρουση και συσχέτιση των δυο μεταμορφικών ζωνών με το υπερκείμενο στρώμα.

Το μεταμορφωμένο υπόβαθρο αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία εκτιμάται ότι έχουμε τις περισσότερες αποθέσεις του Τριτογενούς. Οι πρώτες αποθέσεις που καλύπτουν την λεκάνη αποτελούνται από σκουρόχρωμα αργιλικά ιζήματα που αργότερα μεταμορφώθηκαν, σχηματίζοντας σειρές από αργιλίτη, αργιλικό σχιστόλιθο και φυλλίτη, μεγάλου πάχους. Μέλη ψαμμιτών εμφανίζονται τοπικά με χαλαζιακή υφή. Αποθέσεις βασαλτικών πυροκλαστών και μικρές εκχύσεις λάβας εμφανίζονται σε ζώνες αργιλικών σχιστόλιθων. Όλοι αυτοί οι σχηματισμοί αποκαλύπτονται στο άνω τμήμα της κεντρικής ανάπτυξης και στις δυτικές, νοτιοανατολικές πλευρές.

Δυο διαφορετικές λιθοτεκτονικές ζώνες μπορούν να αναγνωριστούν στις σειρές των αργιλικών σχιστόλιθων. Ο διαχωρισμός τους βασίζεται στην διαφορετική λιθολογία, ηλικία και βαθμό μεταμόρφωσης, ενώ η τεκτονική τους συσχέτιση δεν είναι ακόμα γνωστή. Πρόκειται για σχηματισμούς Ηωκαινικής, Ολιγοκαινικής και Κ.-Μ.Μειοκαινικής ηλικίας. Η παραμόρφωση, σ' αυτή τη ζώνη, έχει δημιουργήσει επαναλαμβανόμενες αντικλινικές και συγκλινικές δομές που διακόπτονται από ρήγματα. Οι πτυχές είναι ορθές και ανοιχτές ή κλειστές και ισοκλινείς.

Μη μεταμορφωμένα Άνω Καινοζωικά πετρώματα εμφανίζονται στα δυτικά της Taiwan. Από πρόσφατες μελέτες απολιθωμάτων, που βρέθηκαν στους κατώτερους ορίζοντες αυτών, προσδιορίστηκε ως ηλικία των πετρωμάτων, Ολιγοκαινική. Τα μη μεταμορφωμένα πετρώματα, αλλά και τα μεταμορφωμένα αργίλικα ιζήματα, του Ηωκαίνου-Μειοκαίνου, είναι ρηγματωμένα.

Στο δυτικό τμήμα της λεκάνης του Ανώτερου Καινοζωικού έχουμε αποθέσεις κλαστικών υλικών. Πρόκειται για εναλλαγές στρωμάτων ψαμμιτών, ιλυολίθων και σχιστής αργίλου με μικρές παρεμβολές ασβεστόλιθων και φακούς τόφων. Το πάχος των αποθέσεων αυτών εκτιμάται στα 8.000 μέτρα ή και περισσότερα.

Τα ιζήματα που αποτέθηκαν κατά την περίοδο Ολιγοκαίνου και Μειοκαίνου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το περιβάλλον απόθεσης: σε ιζήματα υποθαλάσσιας κρηπίδας και σε ιζήματα που αποτέθηκαν σε λεκάνη. Τα στρώματα της πρώτης κατηγορίας χαρακτηρίζονται από αποθέσεις θαλάσσιας και ηπειρωτικής προέλευσης. Είναι κυρίως ανοιχτόχρωμα, άσπρα έως φωτεινά γκρι που αποτελούνται από ορθοχαλαζίτες ή αρκοζικούς ψαμμίτες, λεπτά στρώματα ανθράκων, σκουρόχρωμη σχιστή άργιλο και λεπτές ενστρώσεις αργίλου, άμμου και ιλύος. Τα ιζήματα των λεκανών, που οφείλουν τη δημιουργία τους στις συνθήκες έντονης καταβύθισης και απότομης συσσώρευσης υλικών, είναι αποκλειστικά θαλάσσια. Αποτελούνται από κλαστικά υλικά ή ψαμμίτη ή σχιστή άργιλο, μεγάλου πάχους, ή από εναλλασσόμενους λεπτόκοκκους ψαμμίτες με φτωχή ταξινόμηση.

Την περίοδο του Μειοκαίνου σχηματίστηκαν φακοί τόφων, εκχύσεις λαβών και πυροκλαστικά στρώματα, ποικίλων διαστάσεων, ως αποτέλεσμα των υποθαλάσσιων εκρήξεων. Η ηφαιστειότητα είναι σπάνια στην κεντρική Taiwan και λιγότερο σπάνια στην νότια Taiwan, όπου παρατηρείται προοδευτική ελάττωση της ιζηματογένεσης, υποθαλάσσια, στην κρηπίδα, με ταυτόχρονη ανάπτυξη ιζηματογένεσης σε λεκάνες, με τη βάθυνση των πυθμένων των λεκανών προς τα νότια.

Η βύθιση συνεχίστηκε στο Νεογενές, με αποτέλεσμα οι αποθέσεις να αποκτούν σημαντικό πάχος, σχιστότητα και το μέγεθος των κόκκων να ελαττώνεται. Η ιζηματογένεση του Νεογενούς ολοκληρώνεται με την απόθεση κροκαλοπαγούς μεγάλου πάχους, στο Κατώτερο Πλειστόκαινο, που περιλαμβάνει τη φάση του μεγάλου ορογενετικού παροξυσμού. Όλοι οι Καινοζωικής ηλικίας σχηματισμοί εμφανίζονται πτυχωμένοι και τοποθετημένοι τεκτονικά, με επώθηση, στις ράχες των οροσειρών.

Η ακόλουθη ορογένεση του Κατώτερου Πλειστοκαίνου προκαλεί παραμόρφωση με συνδυασμό πτυχών και επωθήσεων. Κλειστές, ασύμμετρες πτυχές και μικρής κλίσης επωθήσεις κυριαρχούν στο ανατολικό τμήμα του νησιού. Πλήθος παράλληλων αντικλινικών και συγκλινικών δομών εμφανίζονται διαδοχικά ή μια μετά την άλλη με αναστροφή των μεν αντικλίνων προς τα ΒΔ, των δε συγκλίνων προς ΝΑ και χωρίζονται από ανάστροφα ρήγματα σχηματίζοντας σειρές επωθημένων τεμαχών με κλίση προς τα ΒΑ. Αυτή η παραμόρφωση οφείλεται στη δράση πλευρικών συμπίεσεων από τα ανατολικά, αποτέλεσμα ίσως των δυνάμεων βαρύτητας. Από τον τεκτονισμό αυτό δεν ενοχλήθηκαν τα βασικά πετρώματα, ενώ έχουν αναγνωριστεί δυο είδη ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφων με κλίση ΔΒΔ και αριστερόστροφων με κλίση ΒΒΑ, παρατασσόμενα συμμετρικά σχετικά με τους κύριους άξονες των πτυχών, στη ζώνη πτύχωσης. Τα ρήγματα αυτά αναγνωρίζονται σε διάφορα μέρη της δυτικής Taiwan και οφείλονται στις συμπιεστικές δυνάμεις που ασκούνται με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

Κατά τη διάρκεια και μετά την ορογένεση του Ανώτερου Πλειστόκαινου συνέβησαν μέρος οι ανδεσιτικές εκρήξεις νότια του νησιού και νότια, νοτιοανατολικά των υφάλων και σχημάτισαν δυο ηφαιστειακά συγκροτήματα στη βόρεια Taiwan, αυτό του Tatun και του Chilung. Ακολούθησαν βασαλτικές εκχύσεις που κάλυψαν το νησί, εκτός μιας νησίδας ΝΔ και άρχισε η ανάδυση της Taiwan, ταυτόχρονα με αποθέσεις ψαμμιτών, σχιστής αργίλου, αργιλόλιθου, άμμου και στρώματα χαλικιών. Λατεριτικές και μη λατεριτικές αναβαθμίδες χαλικιών κάλυψαν ένα σημαντικό μέρος του νησιού,

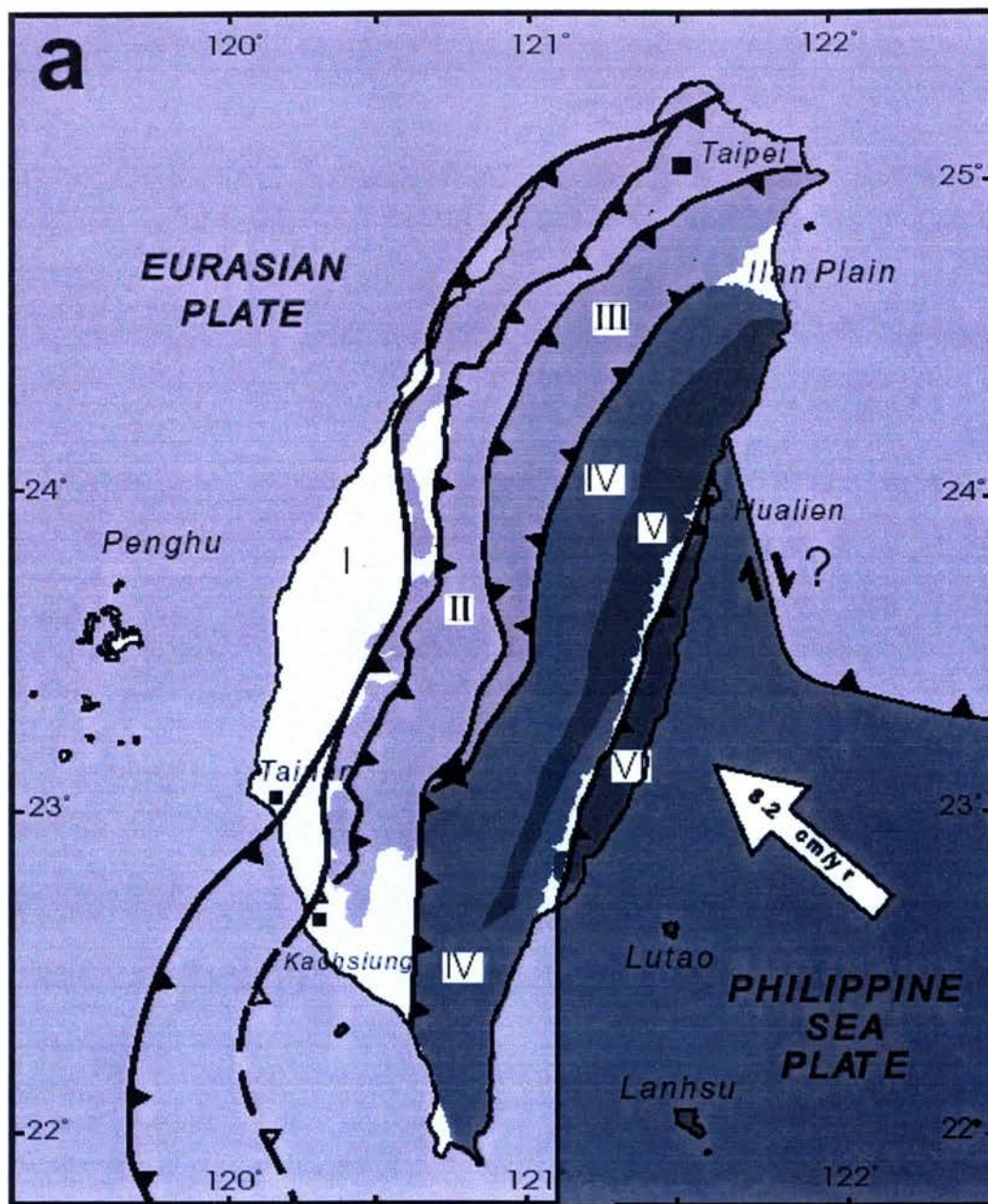
ασύμφωνα των υποκείμενων παλαιότερων πετρωμάτων. Οι σχηματισμοί και η τεκτονική αυτής της περιόδου συνεχίζει να είναι αποτέλεσμα της σύγκλισης και σύγκρουσης της δυτικής Ευρασιατικής πλάκας με την ανατολική ωκεάνια πλάκα των Φιλιππίνων.

Αποτέλεσμα της δράσης συμπιεστικών δυνάμεων, κατά τη διάρκεια της ορογένεσης, ήταν η εναλλαγή αυτών από εφελκυστικές φάσεις, (μεταορογενετική χαλάρωση - εκτόνωση της περιοχής). Έτσι, τις συμπιεστικές δυνάμεις διαδέχονται οι εφελκυστικές, που προκαλούν ήπιες, διακοπτόμενες τοπικές ανυψώσεις, ρηγματώσεις, περιστροφές τεμαχών κατά μήκος ρηγμάτων και κάμψη ρηγμάτων. Οι κινήσεις αυτές στην περιοχή της Taiwan δεν σταμάτησαν, αλλά συνεχίζονται μέχρι σήμερα. Χαρακτηρίζονται από συνεχείς κινήσεις του φλοιού, με εμφανίσεις συχνών σεισμών, μερικοί από τους οποίους συνοδεύονται από ρηγματώσεις οριζόντιου άλματος (ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης strike-slip) και από επαναλαμβανόμενες μετατοπίσεις κατά μήκος ρηξιγενών ζωνών.

Η συστηματική μελέτη της περιοχής οδήγησε στην διαίρεση της Taiwan σε τρεις ζώνες:

- ✱ Στη ζώνη των δυτικών προπόδων των λόφων. (I, II, III)
- ✱ Στη κεντρική ζώνη ανάπτυξης, που υποδιαιρείται σε δύο υποζώνες,
 - α)στη δυτική πλευρά και ζώνη ράχης, που περιλαμβάνει τις περιοχές Hsuehshan και Yushan και β) στην ανατολική πλευρά. (IV, V)
- ✱ Στην ανατολική ζώνη παράκτιας ανάπτυξης. (VI)

Ο διαχωρισμός της Taiwan σε τρεις ζώνες φαίνεται στο σχήμα 2:



Σχ. 2: Η δυτική Κεντρική ζώνη ανάπτυξης (IV) είναι μια πλατιά υπομεταμορφική ζώνη που προβάλλει κατά μήκος της δυτικής πλευράς της ζώνης ράχης και του νότιου τμήματος της κεντρικής ζώνης ανάπτυξης. Μπορεί να διαιρεθεί σε δύο λιθοτεκτονικές ζώνες: τη δυτική ζώνη ανάπτυξης της Hsuehsan (IV a) και την ανατολική ζώνη ράχης (IV β).

Η ανατολική κεντρική ζώνη ανάπτυξης υπόκειται των προ-Τριτογενών μεταμορφωμένων πετρωμάτων και αποκαλύπτεται ιδιαίτερα στο ανατολικό πλευρό της κύριας κεντρικής ανάπτυξης. Χωρίζεται σε δυο μικρότερες ζώνες, στη δυτική ζώνη Tailuko (Va) και στην ανατολική ζώνη Yuli (Vb).

Η ζώνη των δυτικών προπόδων των λόφων (III) αποτελείται από κλαστικά ιζήματα Ολιγοκαίνου-Πλειστοκαίνου. Πρόκειται για εναλλαγές ψαμμιτών και σχιστόλιθων με κατά τόπους εμφανίσεις φακών ασβεστόλιθων και τόφφων, πάχους έως και 8000 μέτρα. Δυτικά, η υποθαλάσσια πεδιάδα(II) και τα νησιά Penghu(I), μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν στη ζώνη δυτικών προπόδων των λόφων.

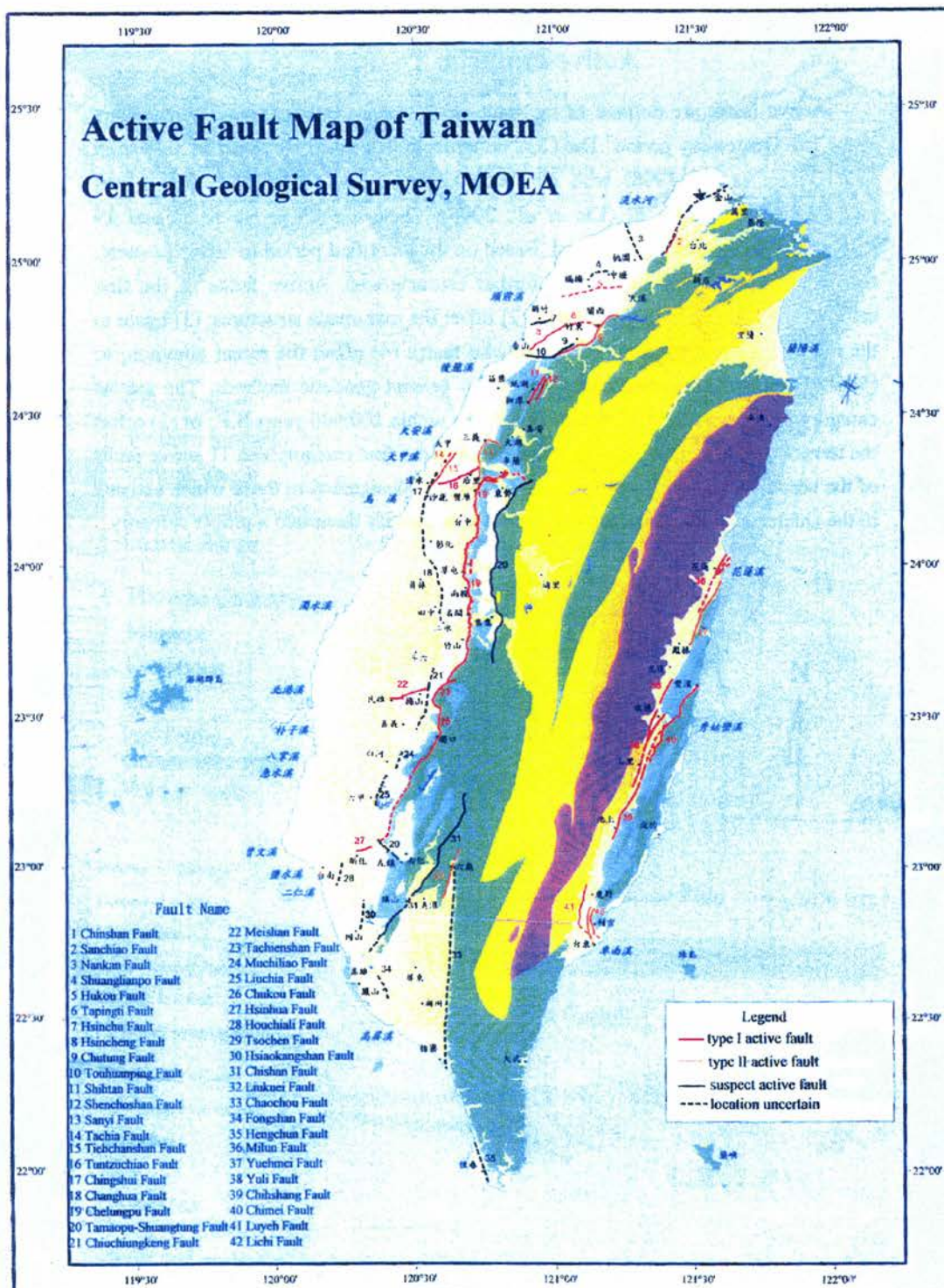
Η τρίτη γεωλογική ζώνη, η παράκτια ζώνη ανάπτυξης(VII), τοποθετείται στην δυτική Taiwan. Καλύπτεται από Νεογενή ιζήματα διαφορετικών γεωλογικών περιβαλλόντων και χαρακτηρίζεται από ηφαιστειότητα. Έχουμε αποθέσεις ηφαιστειακών υλικών, τουρβιδιτικών κλαστικών πετρωμάτων και χαοτικών *mélange*. Η ζώνη αυτή διαχωρίζεται από την ζώνη κεντρικής ανάπτυξης με την επιμήκη κοιλάδα Taitung, που αποτελεί σημαντικό τεκτονικό χαρακτηριστικό και μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη υποζώνη.

■ ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ TAIWAN

Όπως είναι γνωστό, οι μεγάλοι σεισμοί συνοδεύονται συνήθως από την ενεργοποίηση ενεργών ρηγμάτων, που πολλές φορές προκαλούν χαρακτηριστικές δομές στην επιφάνεια. Για το λόγο αυτό η γνώση των χαρακτηριστικών των ενεργών ρηγμάτων είναι απαραίτητη για τη μελέτη των σεισμών αλλά και τη μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας.

Ως ενεργά ρήγματα προσδιορίζουμε τα ρήγματα εκείνα που ενεργοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς και κυρώς του Ολοκαίνου. Με βάση το χρόνο που τα ρήγματα αυτά ενεργοποιήθηκαν για τελευταία φορά, διακρίνουμε δύο κατηγορίες ενεργών ρηγμάτων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εκείνα τα ενεργά ρήγματα τα οποία παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά: 1) Ενεργοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του Ολοκαίνου, 2) συνδέονται με πρόσφατους μεγάλους σεισμούς, 3) παρουσιάζουν σεισμική ολίσθηση (ερπυσμός), όπως μετρείται από γεωδαιτικές μεθόδους, 4) επέδρασαν πάνω σε ανθρώπινες κατασκευές με το φαινόμενο της βαθμιαίας ολίσθησης, 5) και τέλος αυτά που επέδρασαν, με το ίδιο φαινόμενο, στα πρόσφατα χερσαία ιζήματα. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα

ενεργά ρήγματα τα οποία ενεργοποιήθηκαν τα τελευταία 100.000 χρόνια αλλά και εκείνα που επέδρασαν με το φαινόμενο του ερπυσμού πάνω σε αποθέσεις αναβαθμίδων.



Σχήμα 3. Χάρτης των ενεργών ρηγμάτων στην Τaiwan, σε κλίμακα 1:50.000, όπως συντάχθηκε από τη Κεντρική Γεωλογική Υπηρεσία της Τaiwan.

Στην Taiwan υπάρχουν **42 γνωστά ενεργά ρήγματα** με επιφανειακά ίχνη μεγαλύτερα από 5 Km. Από αυτά, τα δεκατρία (13) ενεργοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του **Ολοκαίνου**, έντεκα (11) στο τέλος **Πλειστοκαίνου** και δεκαοχτώ (18) είναι **πιθανά ενεργά ρήγματα**. Τα πιθανά αυτά ενεργά ρήγματα, ενεργοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του Τριτογενούς, αλλά υπάρχουν ελλιπής πληροφορίες, με αποτέλεσμα να μην μπορούν καταταχθούν σε μία από τις δύο παραπάνω κατηγορίες ρηγμάτων.

■ Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΟΥ 1999 ΣΤΗΝ TAIWAN

✱ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σεισμός του 1999 έλαβε χώρα στο κεντρικό –δυτικό τμήμα της Taiwan στις 21 Σεπτεμβρίου, τοπική ώρα 01 :47 και είχε μέγεθος $M_w=7,8$ της κλίμακας Richter. Το επίκεντρο του σεισμού εντοπίστηκε στην πόλη Chi – Chi. Ο σεισμός αυτός χαρακτηρίστηκε ως ένας επιφανειακός σεισμός από το σεισμολογικό κέντρο Central Weather Bureau (CWB). Οι συνέπειες του σεισμού ήταν καταστροφικές: 2.372 άνθρωποι σκοτώθηκαν, 10.002 τραυματίστηκαν σοβαρά, 9.909 κτίρια καταστράφηκαν τελείως και 7.575 υπέστησαν σοβαρές ζημιές. Παράλληλα υπήρξαν καταστροφές και ζημιές σε γέφυρες, τεχνικά έργα, σιδηροδρομικές γραμμές και δρόμους.

Η μετασεισμική δραστηριότητα ήταν αρκετά έντονη. Περισσότεροι από 10 χιλιάδες μετασεισμοί παρατηρήθηκαν στην περιοχή και μάλιστα κάποιοι από αυτούς είχαν μέγεθος μέχρι και 6.8 R, με αποτέλεσμα να προκαλέσουν σοβαρές καταστροφές.

✱ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΛΕΛΟΜΕΝΑ

Το ρήγμα Chelungpu που προκάλεσε το σεισμό του 1999 στην περιοχή Chi-Chi στην Taiwan είναι ένα ανάστροφο ρήγμα εφίπτευσης, με διεύθυνση B – N στη δυτική Taiwan. Το ρήγμα αυτό, που έχει παράταξη που συμπίπτει σχεδόν με εκείνη

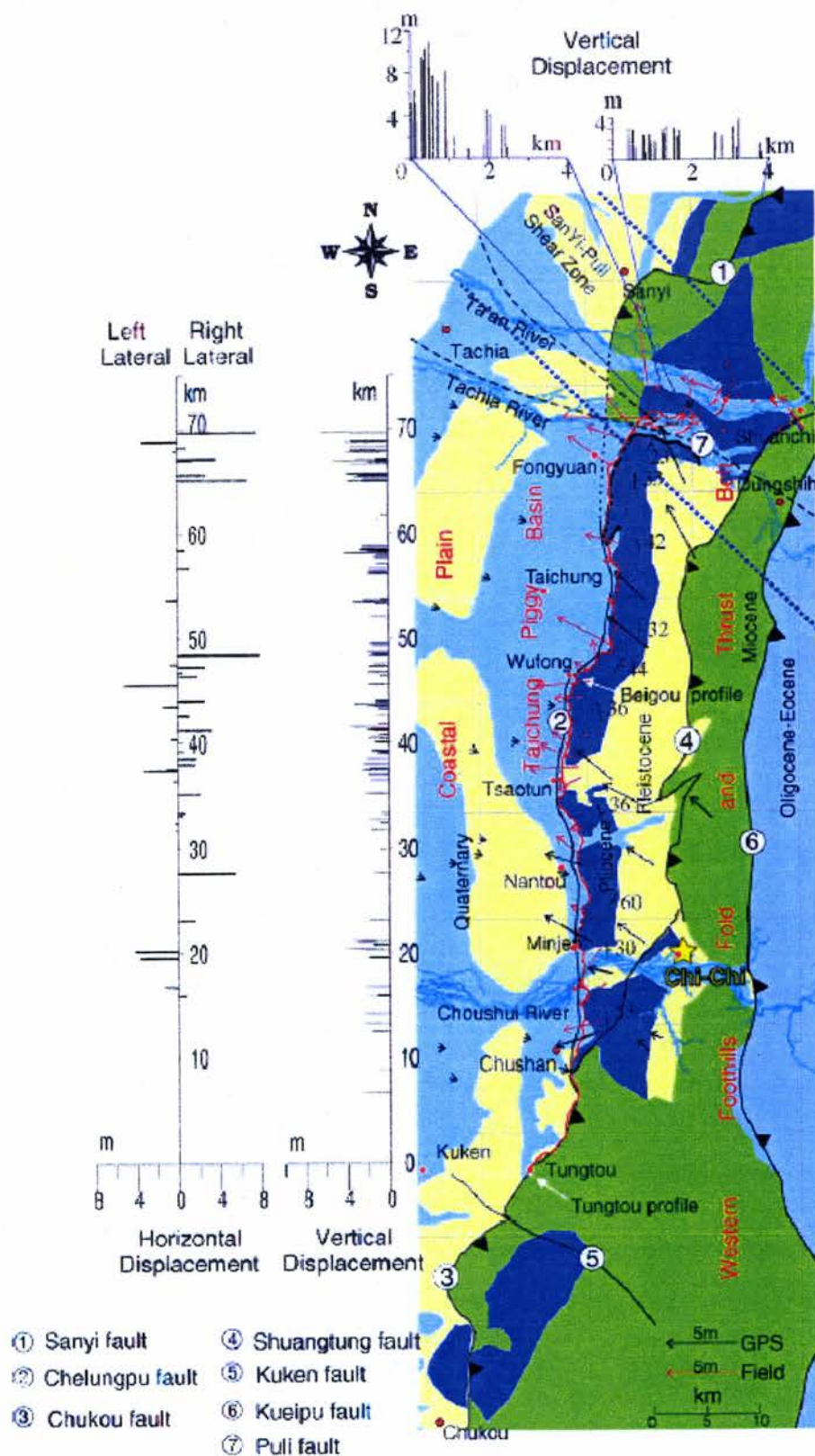
των γειτονικών στρωμάτων, προκαλεί εφίππευση των Μειοκαινικών στρωμάτων πάνω στα μέσο – Πλειστοκαινικά στρώματα.

Τα στρώματα του επάνω τεμάχους του ρήγματος του Chalungpu, είναι μονοκλινείς δομές που κλίνουν δυτικά. Η γενική κλίση των στρωμάτων είναι 20°-30°, αλλά κοντά στο ρήγμα είναι περίπου 40°. Η ζώνη αυτή των πτυχωμένων στρωμάτων, διακόπτεται στα νότια από κάποια δευτερογενή ρήγματα, τα οποία περιλαμβάνουν το Β – Δ ρήγμα Luliao στην ποτάμια λεκάνη Choushui. Στη θέση αυτή, στο τέλος δηλαδή της λεκάνης Taichung προς τα νότια, το ρήγμα Chelungpu, κλίνει προς τα νοτιοδυτικά.

✱ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΡΗΓΙΓΕΝΟΥΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ CHI-CHI

Ο σεισμός στην περιοχή Chi-Chi στην Taiwan, προκάλεσε τη δημιουργία μίας ρηξιγενούς επιφάνειας περίπου 100 Km. Η ρηξιγενής αυτή επιφάνεια ακολουθεί το προϋπάρχον ρήγμα του Chalungpu, έχει μικρή γωνία κλίσης, διεύθυνση Β – Ν και κλίνει προς τα ανατολικά. Μπορεί να χωριστεί σε τρία διαφορετικά τμήματα. Το νότιο τμήμα εκτείνεται από το Kukeng έως τη γέφυρα I-jiang και έχει μήκος περίπου 67 Km. Το βόρειο τμήμα εκτείνεται από τη γέφυρα I-jiang μέχρι την μικρή πόλη Shihkang και έχει μήκος 18Km, ενώ το βορειοανατολικό τμήμα έχει μήκος 11 Km και εκτείνεται από την πόλη Shihkang μέχρι την πόλη Tsuolan.

Έχουν μετρηθεί περισσότερα από 300 κατακόρυφα και 100 οριζόντια άλματα, κατά μήκος του ρήγματος που προκάλεσε το σεισμό. Τα κατακόρυφα άλματα είναι αρκετά περίπλοκα. Το μεγαλύτερο άλμα που μετρήθηκε 15 μέτρων συνδυάζει τρία συστήματα εφίππευσης. Κατά την κύρια διεύθυνση Β–Ν του ρήγματος της εφίππευσης, το μεγαλύτερο κατακόρυφο άλμα έχει ύψος 3,5 μέτρων, αλλά με διαφορετικά χαρακτηριστικά παραμόρφωσης. Από τη γέφυρα Wufeng μέχρι το Nantou η επιφάνεια του ρήγματος έχει ύψος 2-3 μέτρα και σταδιακά αυξάνεται σε 3-5 μέτρα. Από το Nantou μέχρι το Rueychu η επιφάνεια του ρήγματος παρουσιάζει ασυμμετρία. Μπορεί να χωριστεί σε πέντε υποτμήματα. Το κατακόρυφο άλμα καθενός από αυτά παρουσιάζεται υψηλότερο προς την βόρεια πλευρά (3-4 μέτρα) ενώ μειώνεται προς τα νότια (< του 1 μέτρου). Νότια του Rueychu, τα περισσότερα άλματα είναι μικρότερα του ενός μέτρου.



Σχ. 4: Το σεισμικό ρήγμα Chelungpu και οι καταγεγραμμένες κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις (Lin C. W. et al, 2003).

Η διεύθυνση των οριζόντιων αλμάτων αλλάζει συμμετρικά : BBA – B – BΔ – NΔ – N στο BA/κό τμήμα , BBA – BΔ στο βόρειο τμήμα μεταξύ του Fengyuan και του Wufeng , BΔ – Δ , στο κέντρο του τμήματος μεταξύ Wufeng και Tsaotun και ΔBΔ – NΔ στο νότιο τμήμα , νότια του Nantou. Στα βόρεια και κεντρικά τμήματα, το σύστημα των οριζόντιων αλμάτων έχει ύψος μεγαλύτερο των 3 μέτρων και σε ορισμένες περιοχές φτάνει και τα 7 μέτρα. Προς τα νότια, μεταξύ Mingchien και Jushan φτάνει τα 2 με 5 μέτρα. Κοντά στο επίκεντρο του σεισμού, στην ευρύτερη περιοχή του Nantou , παρουσιάζονται τα μικρότερα οριζόντια άλματα.

Η κλίση της επιφάνειας του ρήγματος είναι 50° - 60° στα βόρεια. Η γωνία κλίσης είναι μεγαλύτερη στο βόρειο τμήμα (60° - 80°) μεταξύ της γέφυρας Pifeng και Taichung. Στο μεσαίο τμήμα, μεταξύ Wufeng και Tsaotun , παρατηρείται μικρή γωνία κλίσης του επιπτευτικού ρήγματος (45°). Στο νότιο τμήμα η γωνία κλίσης είναι 40° - 60° και γίνεται μεγαλύτερη ($>70^{\circ}$) στα BA της επιφάνειας του ρήγματος.

Η συστηματική αλλαγή της διεύθυνσης του οριζόντιου άλματος, από βορρά προς νότο, συνδέεται με την περιστροφή του οριζόντιου άλματος στο επάνω τέμαχος του ρήγματος, όπως προσδιορίστηκε από μετρήσεις με GPS. Στο νότιο τμήμα όμως, το άλμα έχει διεύθυνση NΔ, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τα δεδομένα που υπάρχουν από τις μετρήσεις , οι οποίες δείχνουν διεύθυνση BΔ. Το διάνυσμα του άλματος καθώς και τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης του, δείχνουν ότι από το μεσαίο μέχρι και το βόρειο τμήμα του, αυτό έχει προκληθεί από εφίπτευση ενώ υπάρχει και ένα αριστερόστροφο , οριζόντιας μετατόπισης ρήγμα. Το νότιο τμήμα του έχει προκληθεί από εφίπτευση μαζί με ένα δεξιόστροφο, μικρής συνιστώσας, οριζόντιας μετατόπισης, ρήγμα.

✿ ΕΔΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από υπαίθριες παρατηρήσεις στην περιοχή, κατά μήκος του ρήγματος Chelungpu, οι περισσότερες εδαφικές παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στο επάνω τέμαχος του ρήγματος (hanging wall). Σε διαφορετικά τμήματα του ρήγματος, το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης μεταβάλλεται από μερικά μέτρα μέχρι και περισσότερο των 10 μέτρων. Σε ορισμένα μάλιστα τμήματα, κυρίως στο βόρειο τμήμα του ρήγματος, το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης φτάνει μέχρι και τα 50 έως τα 100 μέτρα.

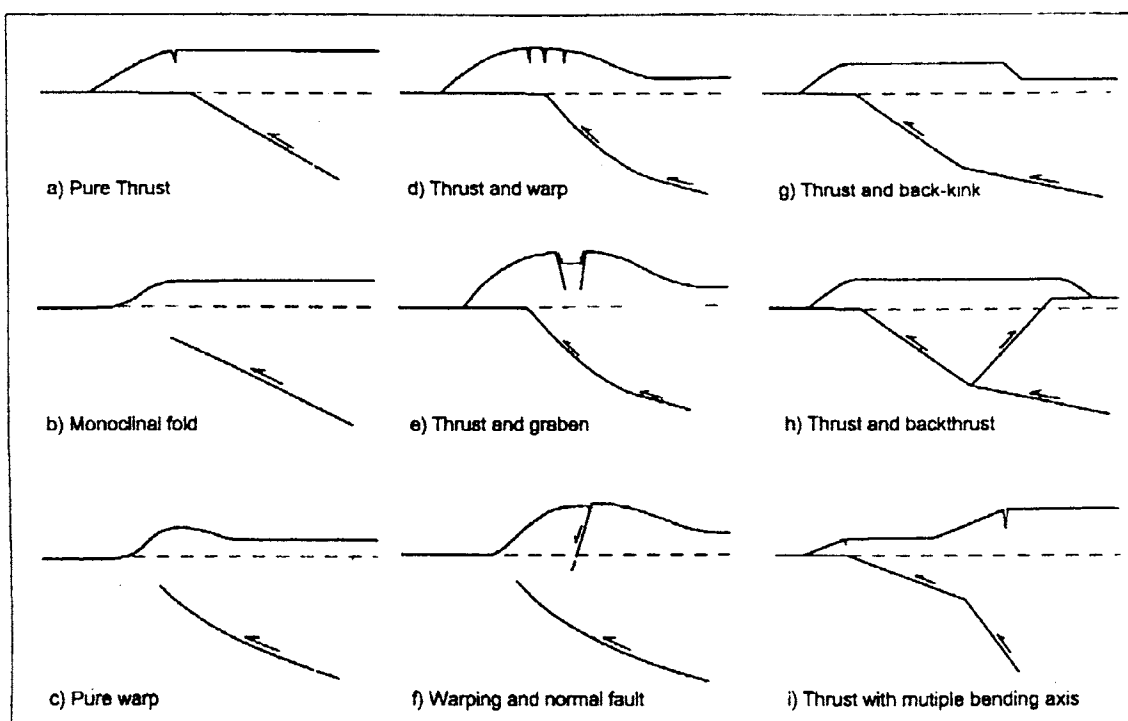
Εκτός όμως από το πλάτος που μεταβάλλεται και το είδος της παραμόρφωσης ποικίλει. Παρατηρούνται εννιά διαφορετικά είδη παραμόρφωσης στο επάνω τέμαχος του ρήγματος, που είναι τα εξής :

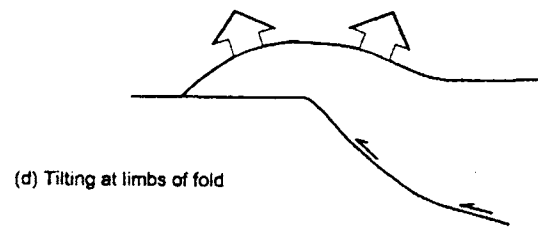
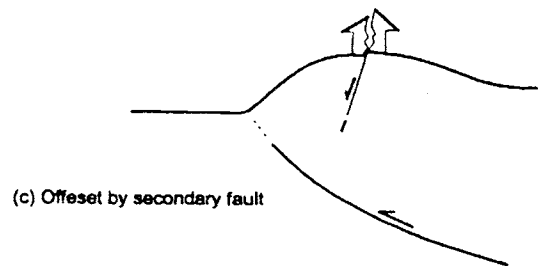
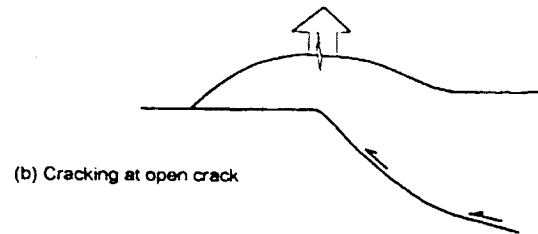
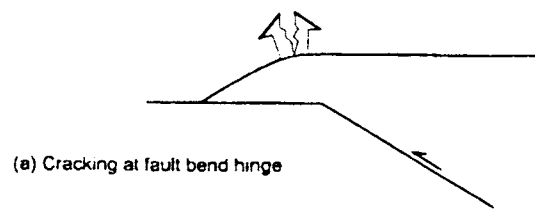
- Απλές δομές που δημιουργήθηκαν από το ανάστροφο ρήγμα εφίππευσης και αποτελούν μικρής παραμόρφωσης δομές στο επάνω τέμαχος του ρήγματος. Μόνο η άκρη (μύτη) της επώθησης παραμορφώθηκε. Τέτοιες δομές είναι τυπικές στο σχολείο Kuangfu.
- Μονοκλινείς πτυχές όπου υπάρχει απλή επώθηση χωρίς επιφανειακή εμφάνιση του ρήγματος. Το έδαφος παρουσιάζει λιγότερες ρωγμές.
- Απλή κάμψη του επάνω τεμάχους, χωρίς επιφανειακή ρηγματώση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ρήγματος με καμπύλη επιφάνεια κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Τέτοιου είδους παραμόρφωση παρατηρείται στην περιοχή Baowei.
- Επώθηση και κάμψη του επάνω τεμάχους. Τέτοιες δομές προκαλούνται από κάμψεις στην επιφάνεια του ρήγματος, και παρατηρούνται στις περιοχές Fengyuan και Shihkang. Εφελκυστικές ρωγμές βρίσκονται συνήθως στην κορυφή της κάμψης.
- Εφίππευση και δημιουργία δευτερογενών τεκτονικών τάφρων λόγω εφελκυσμού στο επάνω τέμαχος του ρήγματος.
- Κάμψη του επάνω τεμάχους χωρίς την εμφάνιση στην επιφάνεια του ίχνους της επώθησης, και δημιουργία δευτερογενών κανονικών ρηγμάτων. Αυτό το είδος της παραμόρφωσης μπορεί να παρατηρηθεί στην περιοχή Wushuan.
- Επώθηση που προκαλεί την ανάπτυξη μιας ζώνης γωνιωδών πτυχών στην πίσω πλευρά του κύριου ρήγματος. Δομές αυτού του είδους λαμβάνουν χώρα στην περιοχή Tsaotun.
- Επώθηση που προκαλεί την ανάπτυξη ενός δευτερογενούς ρήγματος επώθησης με αντίθετη διεύθυνση από αυτή του κύριου ρήγματος. Τυπικές δομές αυτού του είδους παρουσιάζονται στις περιοχές Tsaolan , Tsaotun και Chungcheng Park.

- Επώθηση με πολλαπλούς άξονες κάμψης που εξηγείται από την κάμψη της επιφάνειας του ρήγματος κάτω από την επιφάνεια. Τέτοιες δομές παραμόρφωσης μπορούν να βρεθούν στις περιοχές Chungcheng Park , Chutseken και Grape field side.

Έκτος από αυτές τις δομές παραμόρφωσης που παρατηρούνται στην ύπαιθρο, υπάρχουν και άλλες, που αποτελούν διάφορους συνδυασμούς των παραπάνω δομών, και δημιουργούν μία ακόμη πιο περίπλοκη εικόνα της εδαφικής παραμόρφωσης.

Τα εννιά διαφορετικά είδη παραμόρφωσης φαίνονται στο σχήμα 5.





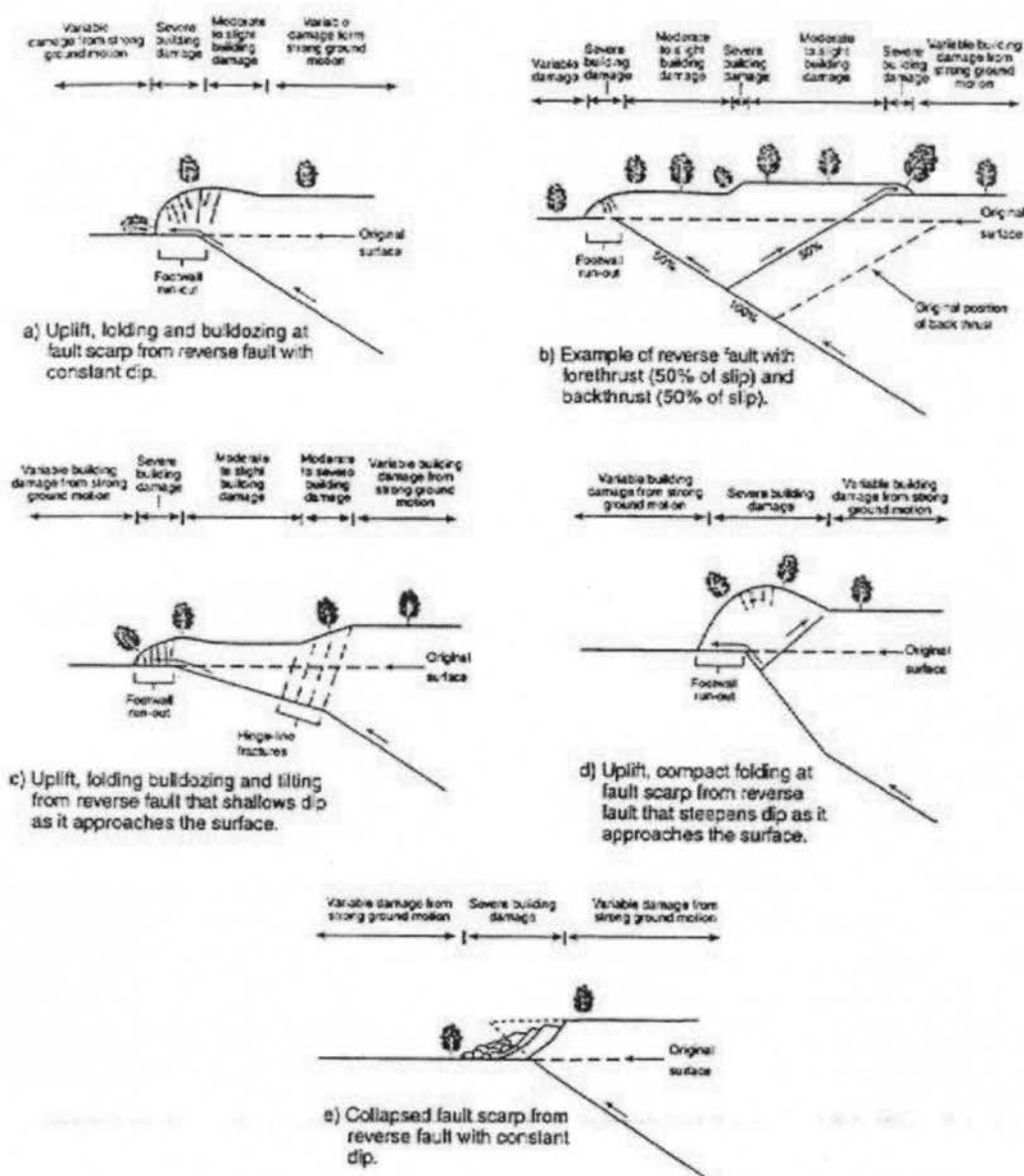


Figure 26. Schematic structural models showing generalized surface deformation, inferred subsurface fault geometries, and building damage produced by the 1999 Chi-Chi earthquake.

ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο σεισμός του 1999 στο Chi-Chi της Taiwan, προκάλεσε εκτός από τις απώλειες πολλών ανθρώπινων ζωών, καταστροφές και σοβαρές ζημιές σε κτίρια, γέφυρες και σε άλλα τεχνικά έργα. Επειδή η μετατόπιση που προκλήθηκε από το ρήγμα ήταν αρκετά μεγάλη, οι καταστροφές είναι ιδιαίτερα έντονες στις κατασκευές που βρίσκονταν πάνω στο ρήγμα ή σε αυτές

που τις διαπέρασε το ρήγμα. Μόνο λίγες πολύ γερές κατασκευές δεν κατέρρευσαν, αλλά μετατοπίστηκαν και περιστράφηκαν. Όλες οι γέφυρες από τις οποίες πέρασε το ρήγμα υπέστησαν σοβαρές ζημιές και κατέρρευσαν τμήματά τους.

Η ζώνη διάρρηξης του ρήγματος κυμαίνεται γενικά από αρκετά μέτρα έως περίπου 10m (Lee, 2000). Στη ζώνη αυτή, το έδαφος έχει παραμορφωθεί, μετατοπιστεί και συνθλιβεί. Αυτή είναι η πιο κρίσιμη ζώνη σχετικά με την επίδραση του ρήγματος στις κατασκευές. Πέρα από τη ζώνη διάρρηξης, το έδαφος έχει ανασηκωθεί και/ή περιστραφεί στο επάνω τέμαχος του ρήγματος, όπου συχνά βρίσκονται ανοιχτές εφελκυστικές ρωγμές που είναι επίσης καταστροφικές για τις κατασκευές. Κάποιες από αυτές τις επιδράσεις που είχε ο σεισμός πάνω στις ανθρώπινες κατασκευές παραθέτονται παρακάτω.

Επιδράσεις στα κτίρια

Οι διάφορες παραμορφώσεις που προκλήθηκαν στο επάνω τέμαχος του ανάστροφου ρήγματος, δημιούργησαν ανοιχτές ρωγμές στο έδαφος κάτω που είχε ως αποτέλεσμα και την ρωγμάτωση των κτιρίων. Οι κάμψεις των στρωμάτων προκάλεσαν ανοιχτές ρωγμές στα επάνω τμήματα του εδάφους, ενώ στα κάτω τμήματα προκάλεσαν πύκνωση. Το γεγονός αυτό είχε σοβαρές επιπτώσεις στα διάφορα κτίρια, ειδικά σε αυτά που βρίσκονταν πάνω στο ρήγμα.

Επιδράσεις στις γέφυρες

Πολλές γέφυρες καταστράφηκαν από τη μετατόπιση του ρήγματος, είτε από οριζόντια συμπίεση, είτε από κατακόρυφη ανύψωση. Ωστόσο, οι μικρές πτυχώσεις και οι εφελκυστικές ρωγμές δεν είχαν σοβαρή επίπτωση στη δομή της γέφυρας.

Επιδράσεις στο τεχνητό φράγμα Shihkang.

Εκτός από τις παραπάνω επιδράσεις, αξιοσημείωτη είναι η μετατόπιση που προκλήθηκε στο τεχνητό φράγμα Shihkang, από το βόρειο άκρο του βόρειου κλάδου του ρήγματος Chelung Pu. Σύμφωνα με την έρευνα των Central Water Resources Bureau, WCA και MOEA, το αριστερό αντέρεισμα του φράγματος ανυψώθηκε 10m και το δεξί 2,2m. Η κατακόρυφη ανύψωση που δηλαδή, έφτασε τα 8m. Το κυρίως σώμα του τσιμεντένιου φράγματος δεν μετατοπίστηκε μόνο από το ρήγμα αλλά και από τις ρωγμές του επάνω τεμάχους του ρήγματος (hanging wall). Επίσης παρατηρήθηκε μια διόγκωση (bulking) στο σώμα του φράγματος. Η μέγιστη

διαφορική ανύψωση της κορυφής του ρυθμιστικού φράγματος μεταξύ των σηράγγων διαφυγής #12 και #1 υπολογίστηκε 87cm. Σύμφωνα με γεωτρήσεις (drillings and borehole camera results), η επαφή μεταξύ του τσιμεντένιου φράγματος και των θεμελίων του διερράγη και άνοιξε σε πλάτος αρκετών millimeters, ώστε να χρειάζεται τσιμεντένευση. Επίσης η παραμόρφωση που υπέστη το επάνω τέμαχος του ρήγματος δημιούργησε σοβαρές ρωγμές πάνω στο φράγμα.

Σχολείο Kuang Fu

Η περιοχή που εδράζεται το σχολείο Kuang Fu βρίσκεται πάνω από το κεντρικό τμήμα του ρήγματος Chelungpu και ίσως είναι η πιο χαρακτηριστική περίπτωση κατάρρευσης επί του ρήγματος. Το σχολείο είναι χτισμένο πάνω σε ένα επίπεδο ύψους 4m δίπλα από το βόρειο άκρο του ποταμού Gan, που αποτελείται από ποτάμιας αποθέσεις του τέλους Ολοκαίνου. Οι χαλικοαμμώδεις αποθέσεις που μάλλον είναι λεπτές (πάχους περίπου 2 - 3m) είναι υπερκείμενες των σχιστόλιθων του Πλειοκαινικού σχηματισμού Chinshui. Ο σεισμός του 1999 προκάλεσε εδαφική παραμόρφωση που αρχικά εκφράστηκε ως επιφανειακή διάρρηξη με μικρή κάμψη και λίγες ρωγμές του επάνω τεμάχους του ρήγματος.

Το πρανές του ρήγματος που δημιουργήθηκε από το σεισμό, πέρασε μέσα από το στάδιο και τον εξωτερικό χώρο του σχολείου, τοποθεσιές δηλαδή με επίπεδο και οριζόντιο ανάγλυφο. Το πρανές είναι κυματοειδές με μικρά εξογκώματα και προεξοχές της τάξης μερικών δεκάδων μέτρων. Το κατακόρυφο άλμα στο χώρο του σταδίου ήταν $2,8 \pm 0,5m$, ενώ το οριζόντιο άλμα υπολογίστηκε ότι είναι 5m αν θεωρηθεί η γωνία κλίσης του ρήγματος 30° . Το ρηξιγενές πρανές προκάλεσε στο ταρτάν του σταδίου κάμψη, περιστροφή και αποκόλληση. Η ζώνη παραμόρφωσης έχει πλάτος περίπου 15m.

Στο επάνω τέμαχος του ρήγματος, στο ανατολικό τμήμα του ρηξιγενούς πρανούς, η παραμόρφωση είναι πολύ μικρή αν ληφθεί υπόψη το ποσό της ανύψωσης και βράχυνσης στη συγκεκριμένη τοποθεσία (στάδιο). Παρατηρούνται μόνο μικρές κάμψεις που δημιούργησαν μία ήπια αντικλινική δομή σε απόσταση 20 - 30m από το ίχνος του ρήγματος. Εδαφικές ρωγμές εμφανίζονται μόνο στην κορυφή του αντικλίνου με πλάτος ανοίγματος 20cm. Το κάτω τέμαχος δε δείχνει δομές δευτερογενών επωθήσεων. Ωστόσο ένας τσιμεντένιος αποχετευτικός αγωγός υπέστη βράχυνση περίπου 40cm. Η παραμόρφωση αυτή φαίνεται ότι προκλήθηκε από μια προς τα ανατολικά μεταφορά τάσης από τη διάρρηξη και κατά μήκος του "άκαμπτου -

ψαθυρού" αγωγού, σε αντίθεση με την "ελαστική - όλκιμη" συμπεριφορά των εδαφικών υλικών κάτω από το στάδιο.

Επιδράσεις στις σήραγγες

Οι σήραγγες γενικά δεν επηρεάστηκαν από τη σεισμική δόνηση, υπάρχει όμως ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στην περιοχή Taiwan Provincial Government Office, όπου έχουν προκληθεί ανοιχτές ρωγμές σε μια ομάδα σηράγγων με μέγεθος μέχρι και οχτώ εκατοστών, φαινόμενο το οποίο δεν έχει παρατηρηθεί στην επιφάνεια, μόνο σπάνια σε ασφάλτινο δρόμο. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η παραμόρφωση του επάνω τεμάχους του ρήγματος μπορεί να είναι έντονη στο έδαφος και στο υπόβαθρο ενώ δεν παρατηρούνται οι ανοιχτές ρωγμές στην επιφάνεια.

✱ **ΙΣΧΥΡΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΟ ΚΟΝΤΙΝΟ ΠΕΔΙΟ**

Οι καταγραφές του σεισμού του 1999 έδειξαν ότι στο επάνω τέμαχος του ρήγματος (hanging wall) οι σημειακές κινήσεις ήταν μεγαλύτερες από το κάτω τέμαχος. Επίσης, η εδαφική κίνηση ήταν ισχυρότερη στο βόρειο τμήμα του ρήγματος απ' ότι στο νότιο. Αν και η ισχυρότερη εδαφική κίνηση και οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις συνέβησαν στο βόρειο τμήμα, οι καταστροφές ήταν μεγαλύτερες στην περιοχή του νότιου τμήματος. Ουσιαστικά, μόνο τα κτίρια που βρίσκονταν ακριβώς πάνω στην επιφανειακή διάρρηξη υπέστησαν σοβαρές ζημιές στην περιοχή του βόρειου τμήματος.

Η εξομοίωση της διαδικασίας διάρρηξης που πραγματοποίησαν οι Dalguer et al (2001) ξεχωριστά για το βόρειο και νότιο τμήμα του ρήγματος, έδειξε ότι οι ταχύτητες της εδαφικής κίνησης στο βόρειο τμήμα στην περιοχή συχνοτήτων 0,5 - 2 Hz (ιδιοσυχνότητες βασικών κατασκευών) ήταν μικρές κοντά στο ίχνος του ρήγματος. Αυτό σημαίνει ότι βόρεια δημιουργήθηκαν ισχυρότερες εδαφικές κινήσεις σε χαμηλές συχνότητες. Η ταχύτητα διάρρηξης του ρήγματος στην ίδια περιοχή έφτασε στην επιφάνεια με μικρή τιμή (περίπου 1,2km/sec), σε αντίθεση με το νότιο τμήμα όπου η ταχύτητα διάρρηξης έφτασε τα 3,0km/sec. Οι ίδιοι ερευνητές, αφού θεώρησαν στο μοντέλο τους τη διάρρηξη ανάστροφη (τα αποτελέσματα του οποίου ταιριάζουν με τις καταγραφές της εδαφικής κίνησης), έδειξαν ότι τέτοιου είδους ρήγματα μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες διαφορές εδαφικής κίνησης στο κοντινό πεδίο ανάμεσα στο επάνω τέμαχος (hanging wall) και στο κάτω (footwall).

Στις επόμενες βελίδες παρατίθεται φωτογραφικό υλικό, με χαρακτηριστικές φωτογραφίες των παραπάνω επιδράσεων που είχε ο σεισμός του 1999 στην Ταϊβαν.

地震災害圖版位置

Locations of Photographed Earthquake Calamitous Areas

自由村
(Freedom Village)

東勢鎮
(Town of Tung-Shih)

大甲溪鐵路橋
(Railroad Bridge Across
Ta-Chia River)

台中港
(Port of Tai-Chung)

豐原市
(Fung-Yan City)

大里市
(Ta-Li City)

霧峰鄉
(Wu-Fung Hsiang)

九九峰
(99 Peaks)

平林橋
(Ping-Lin Bridge)

埔里鎮
(Town of Pu-Li)

南投市
(Nan-Tou City)

暨南大學
(Chi-Nan University)

二高名間交流道
(Min-Chien Interchange
of 2nd Freeway)

中寮鄉
(Chung-Liao Hsiang)

濁水溪南岸
(South Bank of
Cho-Hsui River)

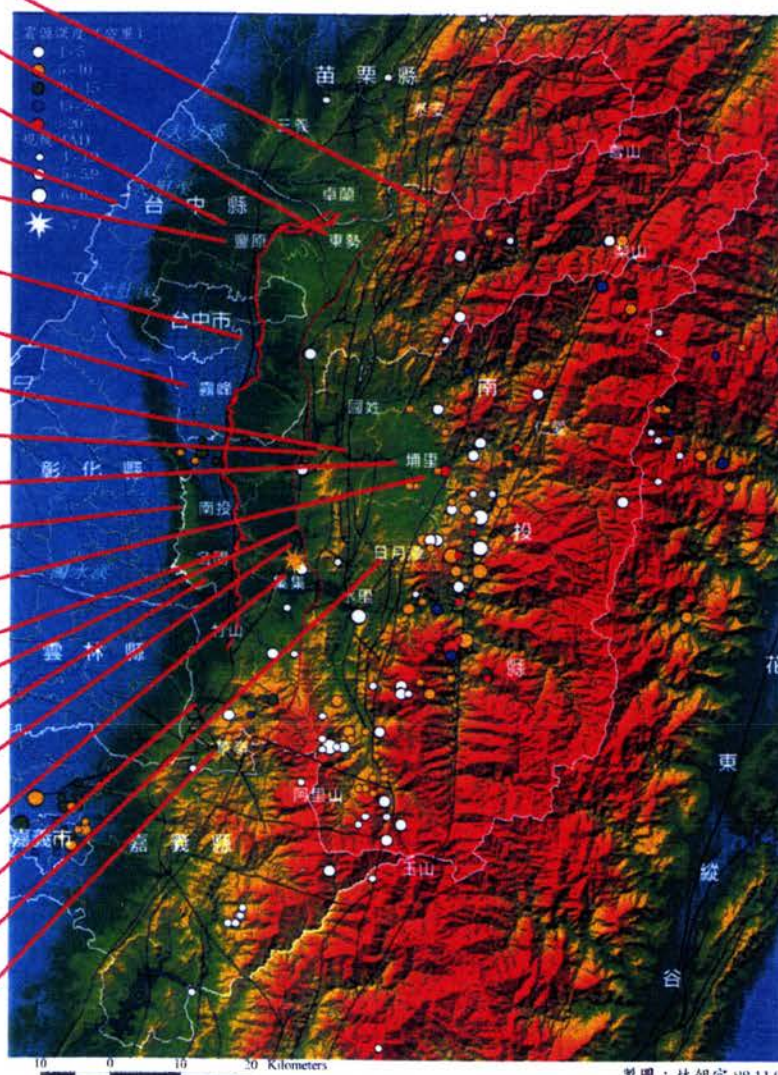
九份二山
(Jiu-Feng-Er-Shan)

集集鎮
(Town of Chi-Chi)

桶頭橋
(Tun-Tou Bridge)

日月潭
(Sun Moon Lake)

草嶺
(Grass Hill)



製圖：林朝宗 88.11.03

經濟部中央地質調查所編製
地震資料來源：中央氣象局

Χάρτης της Τaiwan, στον οποίο φαίνονται οι κυριότερες περιοχές
με τα χαρακτηριστικά παραδείγματα καταρρεύσεων και ζημιών.

Κτίρια



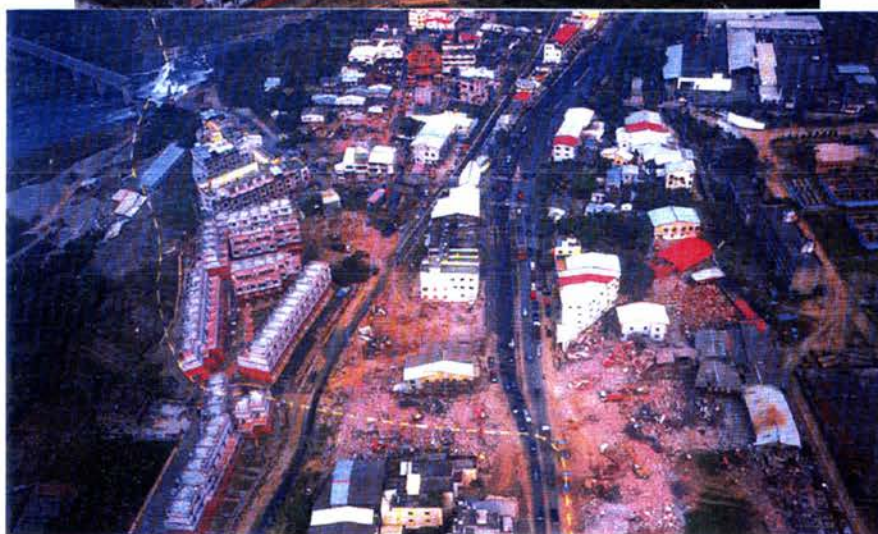
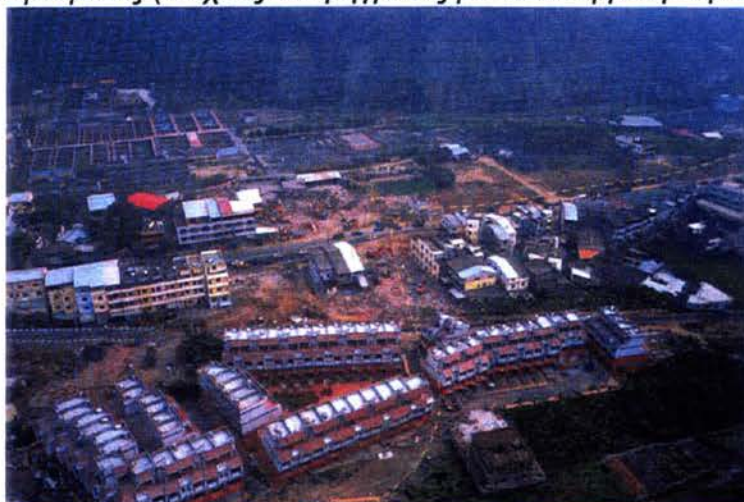


Η λέσχη Lion στην πόλη Shui-Yan και άλλες κατασκευές καταστράφηκαν από την ανύψωση 4m του ρήγματος.



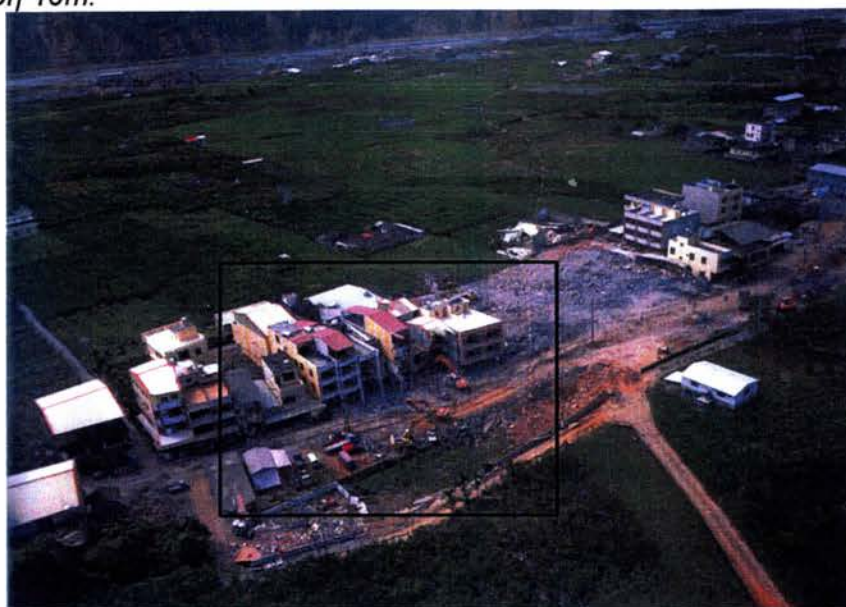


Το ρήγμα διέρρηξε τη νότια όχθη της περιοχής Dry Creek με μετατόπιση 3m και προκάλεσε την κατάρρευση του πρानού με γωνία περίπου 15° . Το κάτω τέμαχος του ρήγματος παρέμεινε σχετικά αδιατάραχτο όπως δείχνουν οι κατακόρυφοι πυλώνες του ηλεκτρικού ρεύματος (το ίχνος του ρήγματος με διακεκομμένη κίτρινη γραμμή).





Το ρήγμα διέσχισε τον αυτοκινητόδρομο #3 και στο δρόμο Fung-Shih με βορειοανατολική διεύθυνση, ανύψωσε το έδαφος 6m και παρουσίασε οριζόντια μετατόπιση 10m.



Το βορειοανατολικό άκρο της διάρρηξης του ρήγματος ChelungPu, όπου η βορειοδυτική πλευρά του εδάφους ανυψώθηκε 4,5m σχετικά με την νοτιοανατολική, σχηματίζοντας μια συζυγή οπισθοεπώθηση (back-thrust fault).



Σόροφη οικοδομή στη περιοχή Wufeng θεμελιωμένη σε αλλούβια που υπέστη καθίζηση λόγω του ρήγματος

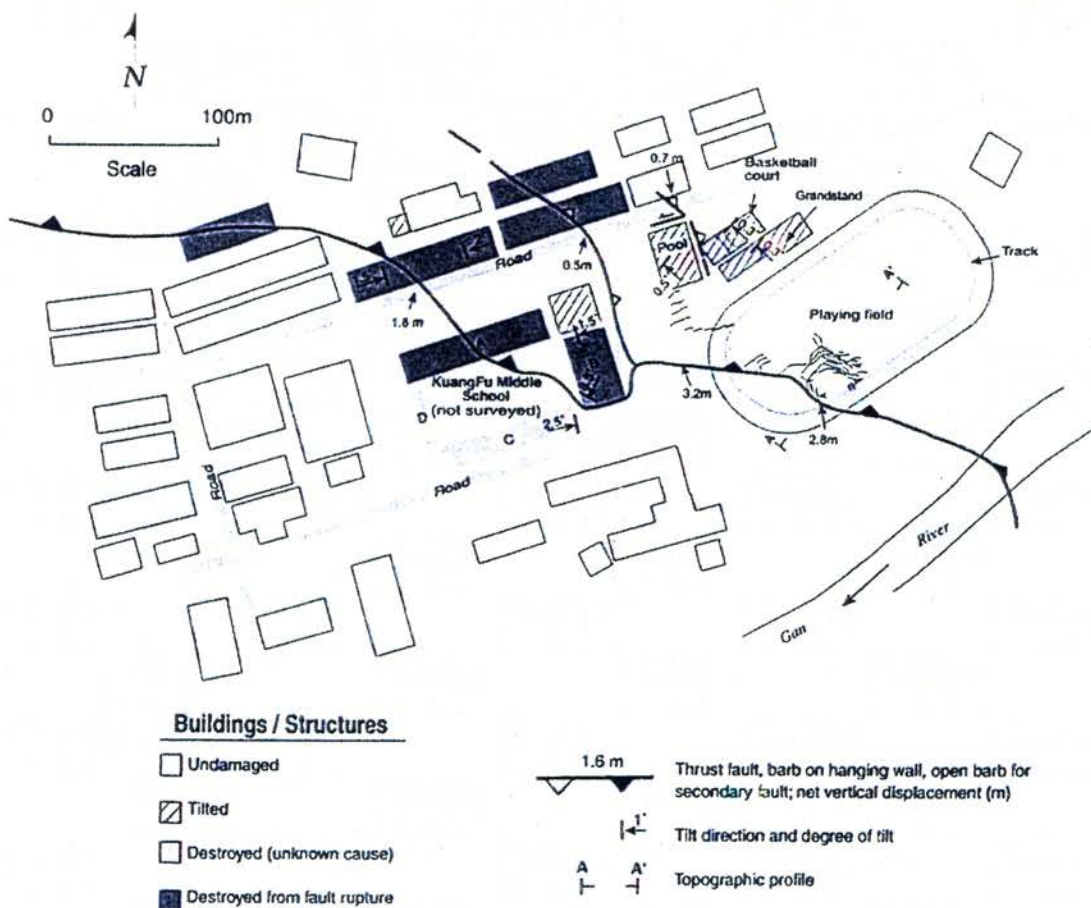


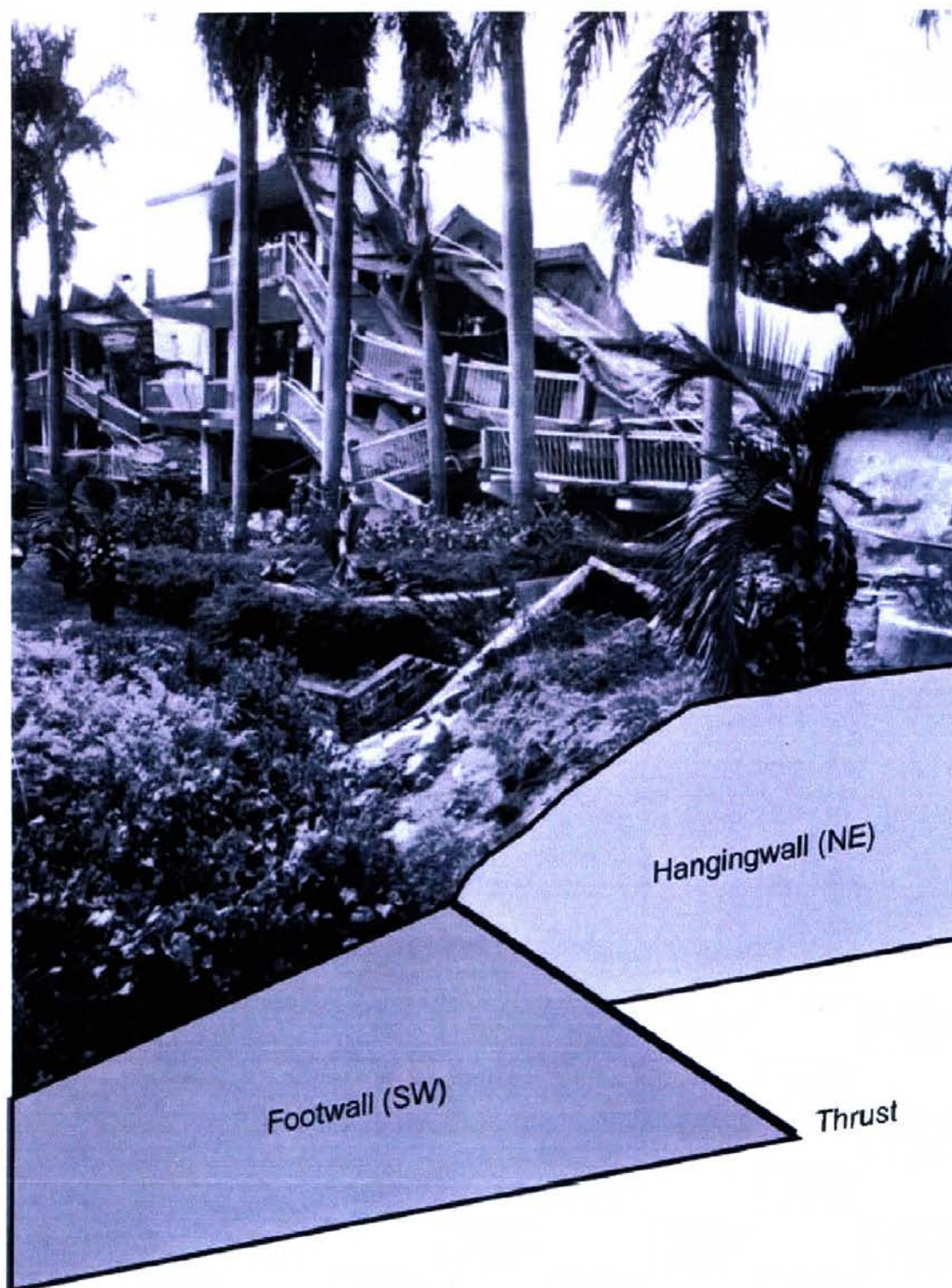
Σχολείο Kuang Fu



Γενικά πλάνα από το κατεστραμμένο σχολείο Kuang-Fu







Διάγραμμα της κίνησης του ρήγματος στο οποίο οφείλεται η κατάρρευση του σχολείου (Angelier et al, 2003).



Το δάπεδο του σχολείου Kuang Fu όπου αποτυπώνεται η εδαφική παραμόρφωση του ρήγματος με μικρές εφίππευσεις.



Ζημιές στον φέροντα οργανισμό του σχολείου σε απόσταση από την επιφανειακή σεισμική διάρρηξη.



Η εκδήλωση του ανάστροφου ρήγματος στο στάδιο του σχολείου Kuang Fu όπου παρατηρήθηκε ανύψωση 2 - 3m (Lin et al, 2001)

Γέφυρες

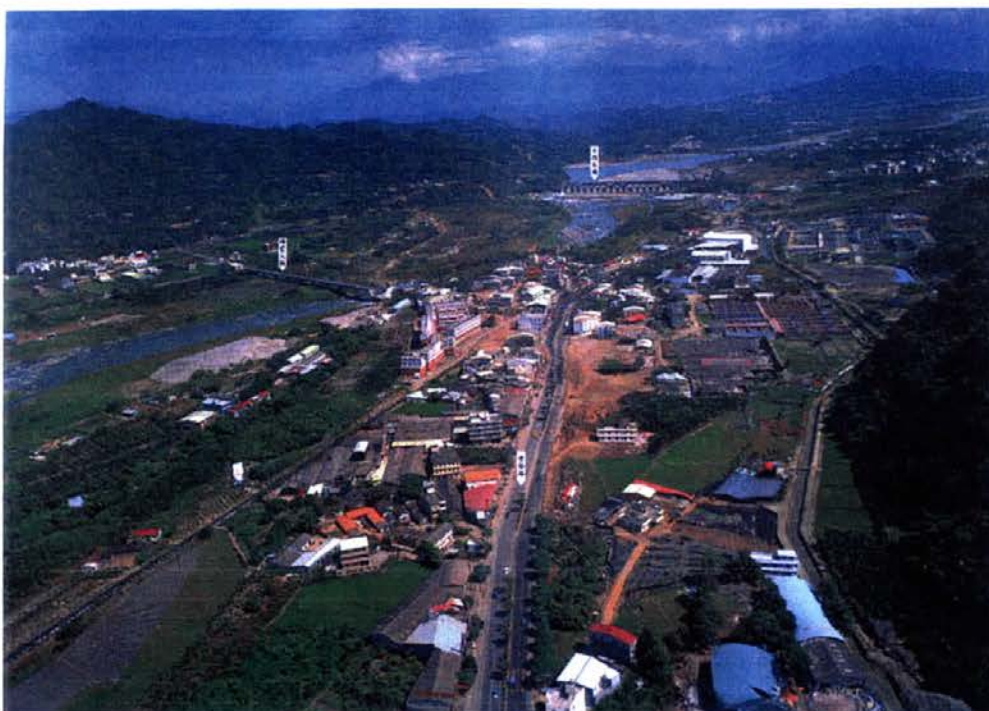


Η γέφυρα Wu-Hsi του ποταμού Wu Creek που ενώνει την Wu-Fung Hsiang με την πόλη Tzao-Tun και από την οποία κατέρρευσαν τα δύο τμήματα που βρίσκονταν ακριβώς πάνω από την επιφανειακή διάρρηξη του ρήγματος.





Κοντά στη πόλη Ta-Li, η γέφυρα από σκυρόδεμα Chien-Min καταστράφηκε από το ρήγμα που διέσχισε το νότιο αντέρεισμα.



Στην περιοχή Shih-Kang Hsiang, βόρεια της πόλης Fuang-Yan, το ρήγμα Cher-Lung-Pu χωρίζεται σε δύο κλάδους: ο 1ος συνεχίζει με διεύθυνση B30A και ο 2ος στρίβει ανατολικά με διεύθυνση B80A. Οι ενδιαμέσες κατασκευές όπως ο αυτοκινητόδρομος #3, οι γέφυρες Chan-Ken και Bei-Fung και το φράγμα Shih-Kang υπέστησαν σοβαρές ζημιές από τη διάρρηξη του ρήγματος.



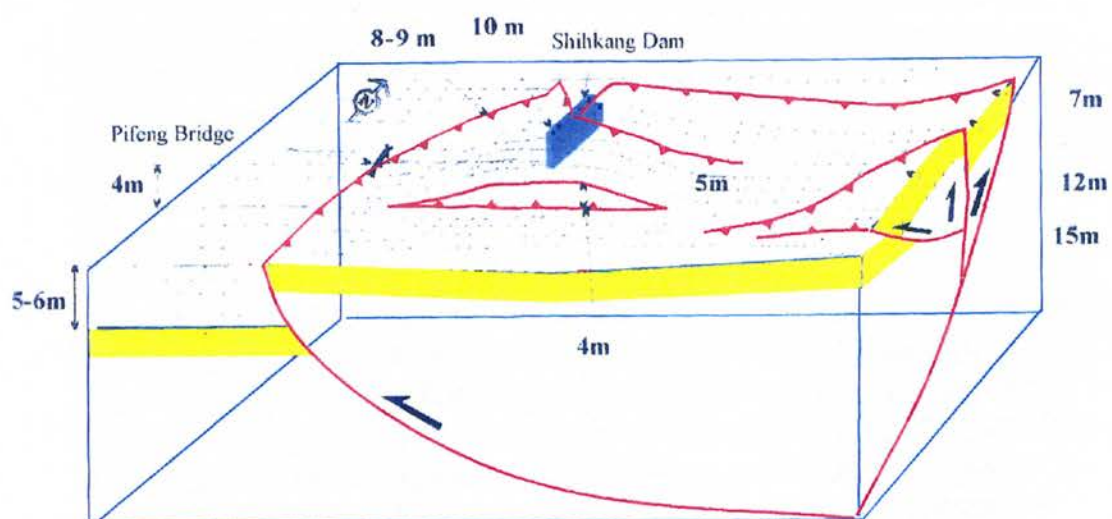
Ένας κλάδος του ρήγματος Cher-LungPu διέσχισε το βόρειο τμήμα του φράγματος. Η πλευρά νότια του ρήγματος ανυψώθηκε 9,8m και η βόρεια 2m, καταστρέφοντας τις σήραγγες διαφυγής και τις θύρες του φράγματος



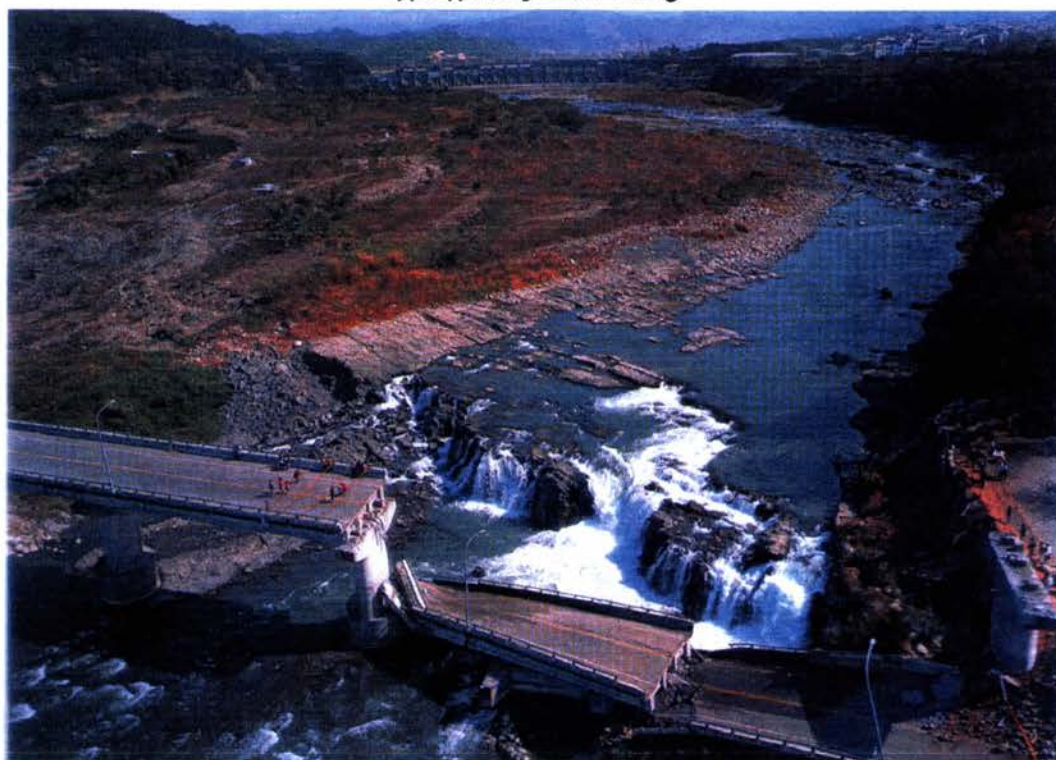
Άποψη προς NNA του φράγματος Shih-Kang (Bilham & Yu, 2000)

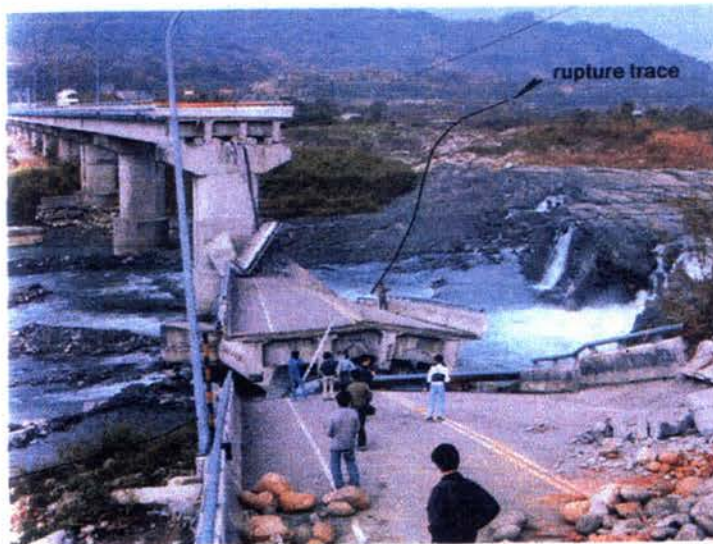


Λεπτομέρειες από τις θέσεις κατάρρευσης του φράγματος.

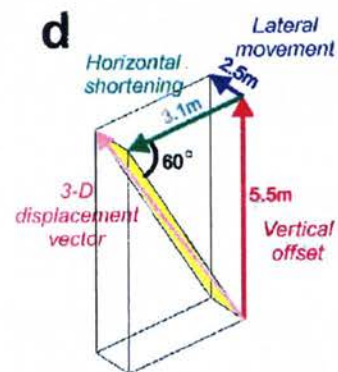
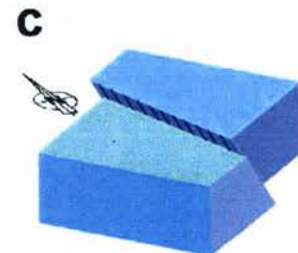
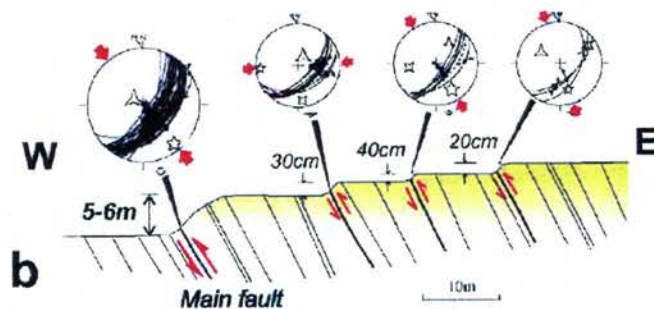


Τρισδιάστατη δομή των ρηγμάτων στη θέση της γέφυρας Bei-Fung (Pifeng) και του φράγματος Shih-Kang





Η γέφυρα Bei-Fung (Pifeng) που διασχίζει τον ποταμό Ta-Chia είναι 4 λωρίδων post-tensioned κατασκευασμένη με σκυρόδεμα. Ο βόρειος κλάδος του ρήγματος ανύψωσε και διέρρηξε το νότιο αντέρεισμα.



Κινηματική ανάλυση των ανάστροφων ρηγμάτων στη θέση της γέφυρας Pifeng κατά μήκος του ποταμού Ta Chia Chi κοντά στην Shihkang και τρισδιάστατο σχήμα της κίνησης των δύο τεκτονικών τεμαχίων (Lee J. C., et al, 2002).



Παράταξη των γεωλογικών σχηματισμών (γραμμώσεις). Το ρήγμα που έδωσε την κατακόρυφη μετατόπιση δεν ήταν εμφανές γεωλογικά πριν το σεισμό.



Η κατάρρευση της γέφυρας Shih-Wui προκλήθηκε από την ανύψωση της νότιας όχθης του ποταμού Shar-Lian





Μια περιοχή έκτασης 300m x 100m κατά μήκος της νότιας όχθης του ποταμού Shar-Lian, ολίσθησε προς την όχθη.





Απόψεις της κατεστραμμένης γέφυρας Yi-Chiang στη πόλη Tai-Ping, όπου 9 τμήματα κατέρρευσαν στην όχθη του ποταμού Του-Bien



Κοντινή άποψη της γέφυρας Yi-Chiang



Εδάφη



(a')

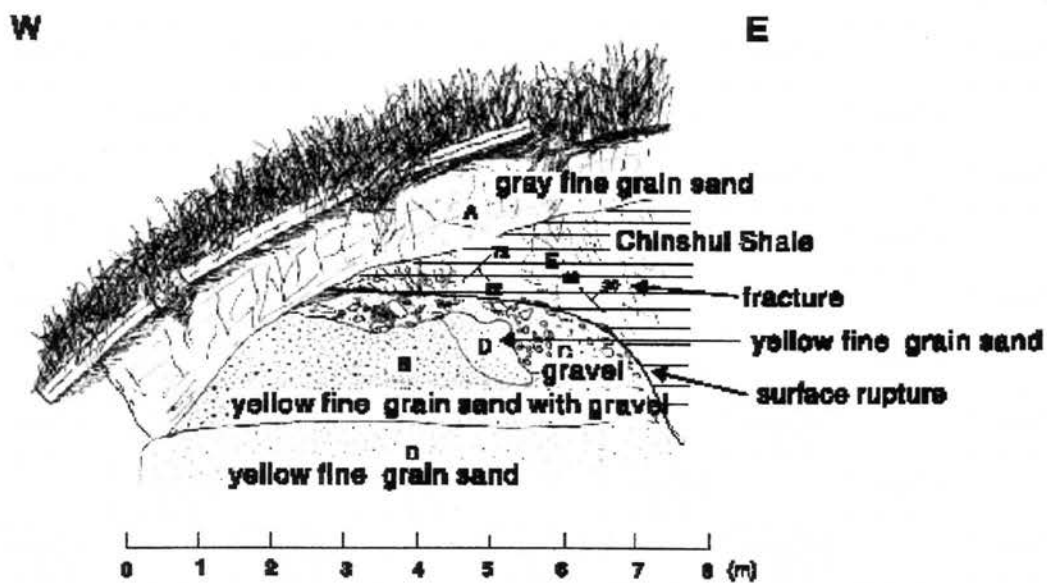
(a)



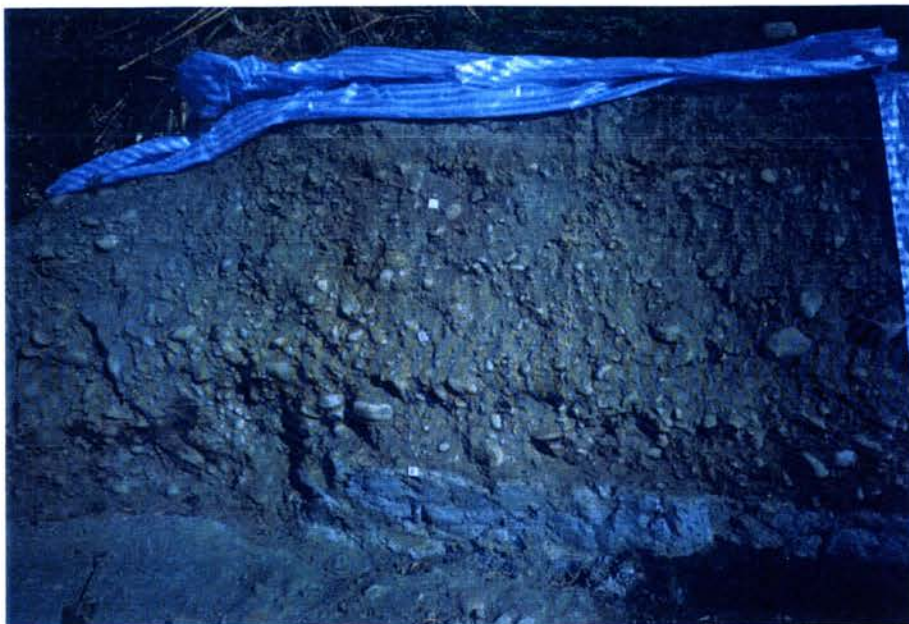
(b)

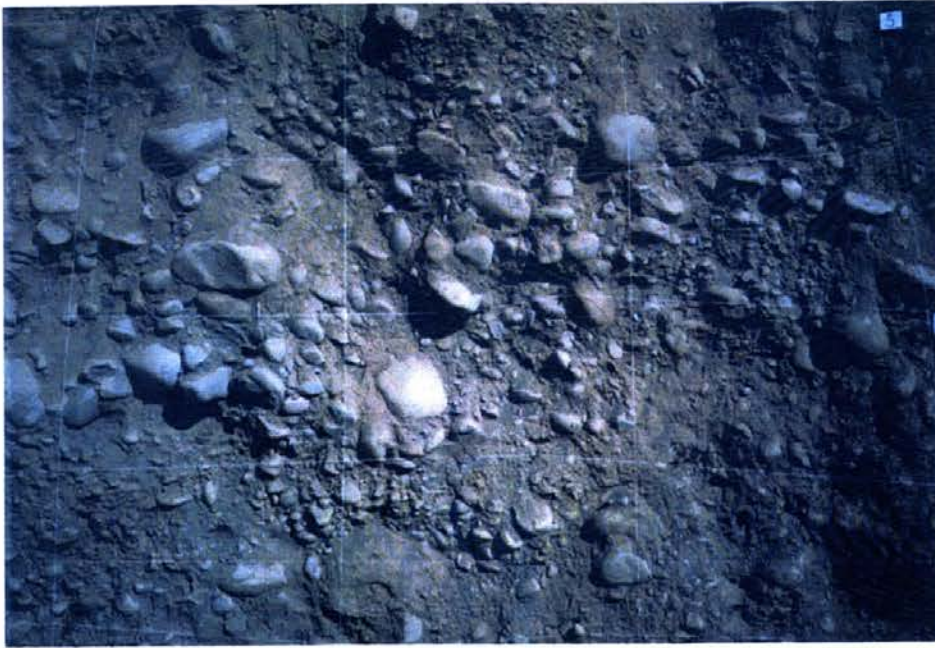


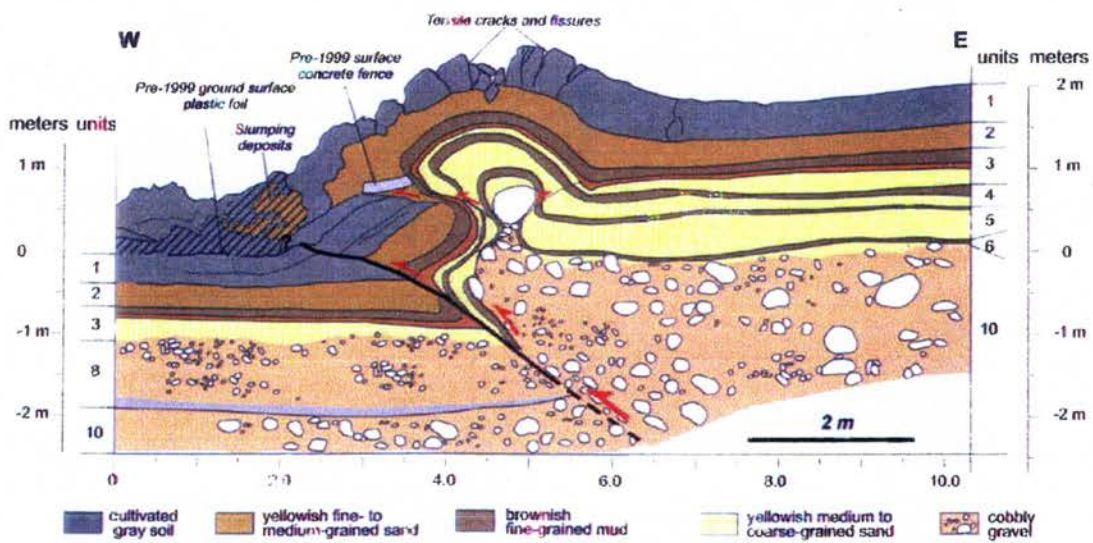
(c)

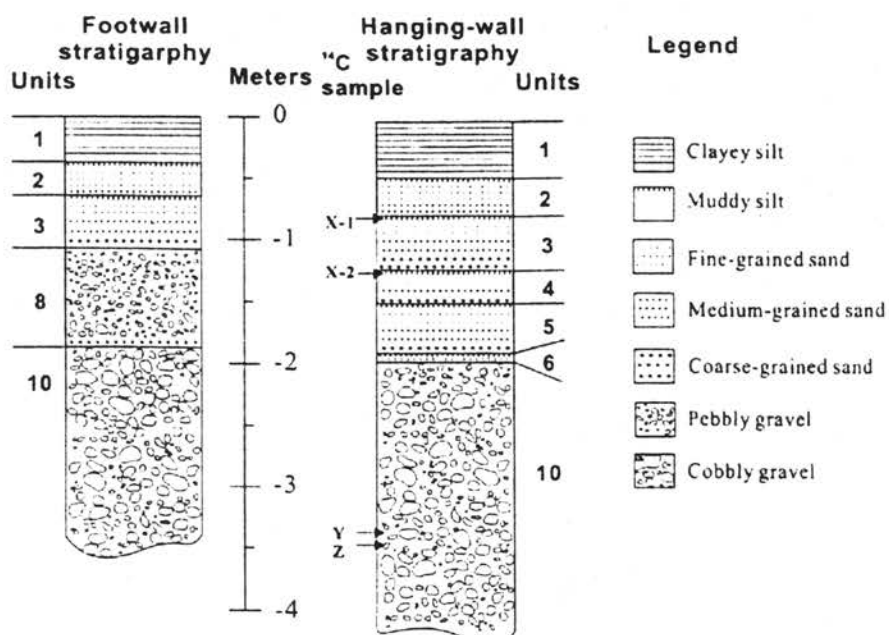
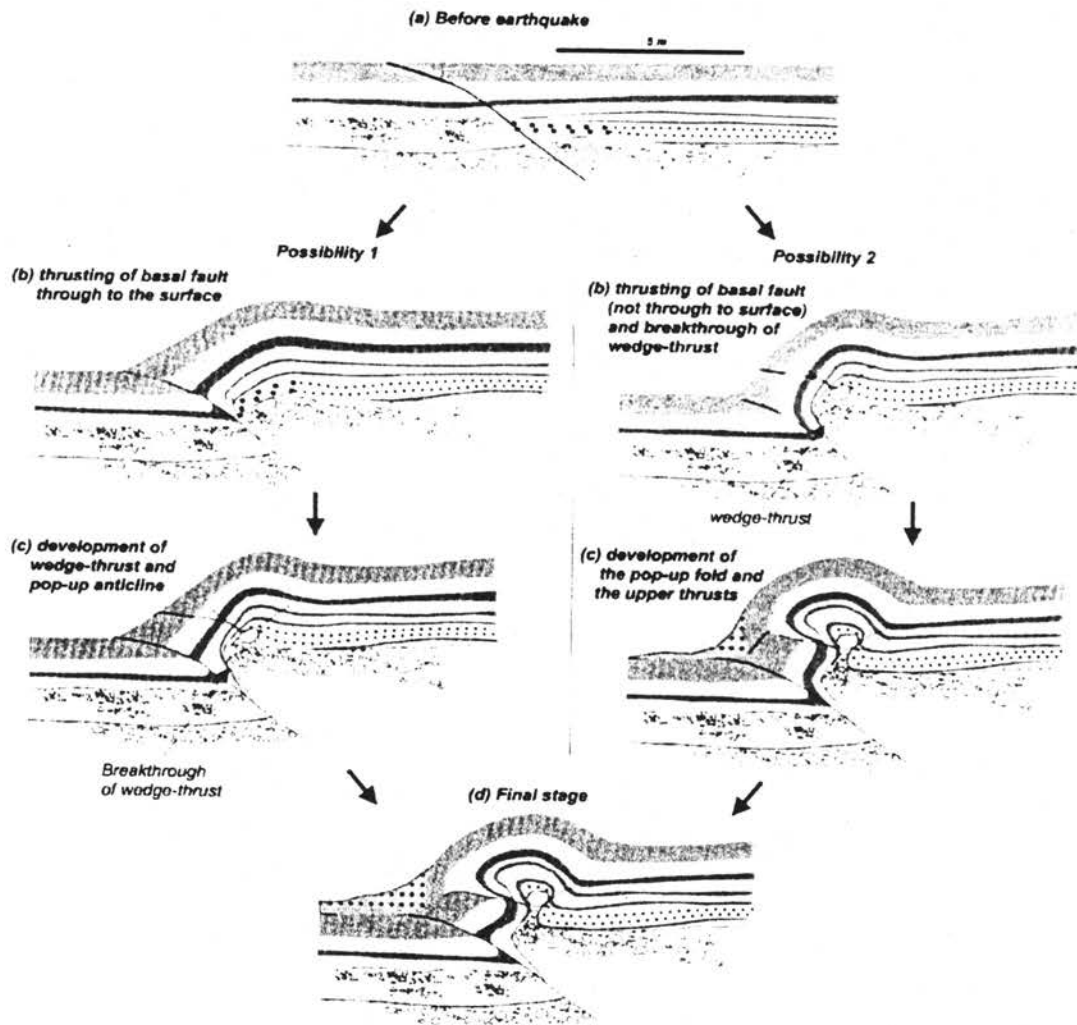


Εδάφη θεμελίωσης και το ρήγμα στο Βεΐγου πριν το σεισμό του Chi-Chi (a & a') και μετά (b). Λιθολογική ανάλυση της θέσης (c) (Lin C. W. et al, 2003).









Σειρά φωτογραφιών και διαγραμμάτων από παλαιοσεισμολογικές τομές σε κατοικημένες περιοχές (εδάφη θεμελίωσης)



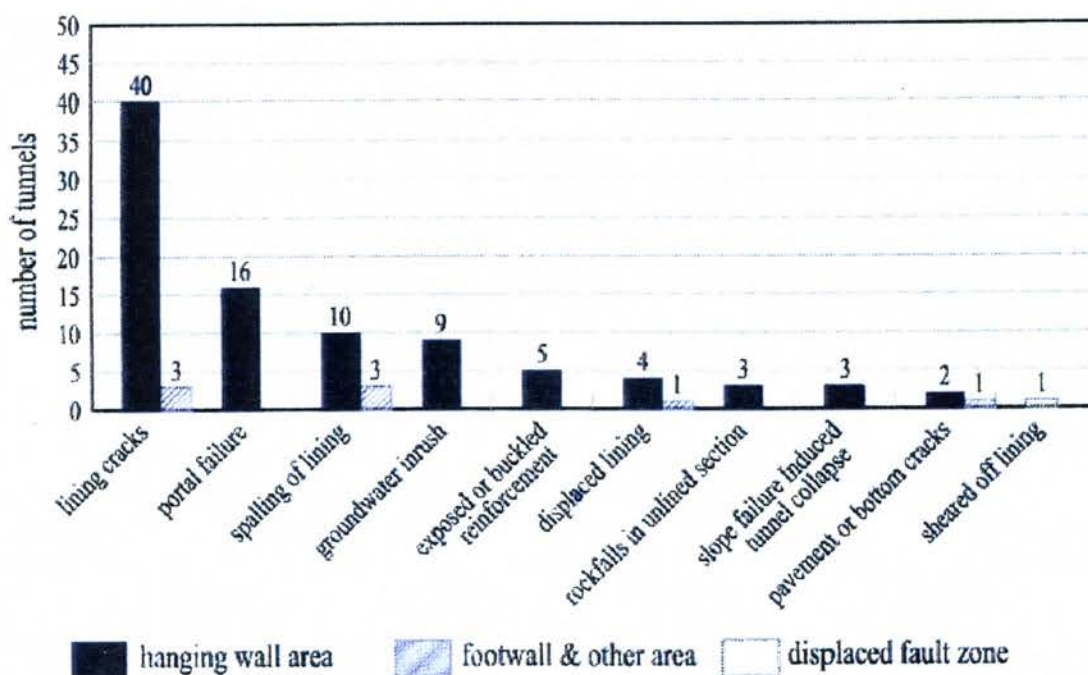
Παραμορφωμένη σιδηροδρομική γραμμή λόγω της σεισμικής διάρρηξης στη περιοχή Mingjin (κεντρική περιοχή του ρήγματος).



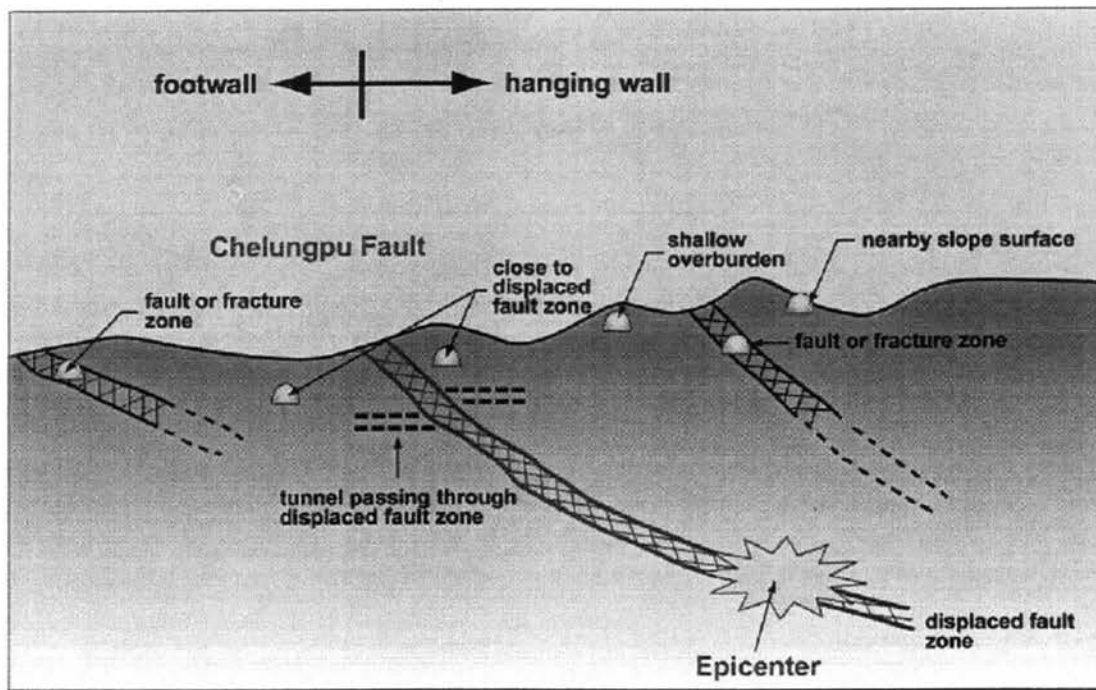


Κλίση ηλεκτρικών πυλώνων από την ίδια περιοχή (Mingjin).

Σηράγγες



Αριθμός σηράγγων που επηρεάστηκαν από το σεισμό.



Θέσεις σπράγγων σε σχέση με το ρήγμα ChelungPu και τα γειτονικά του (Wang et al, 2001).



(a)



(b)

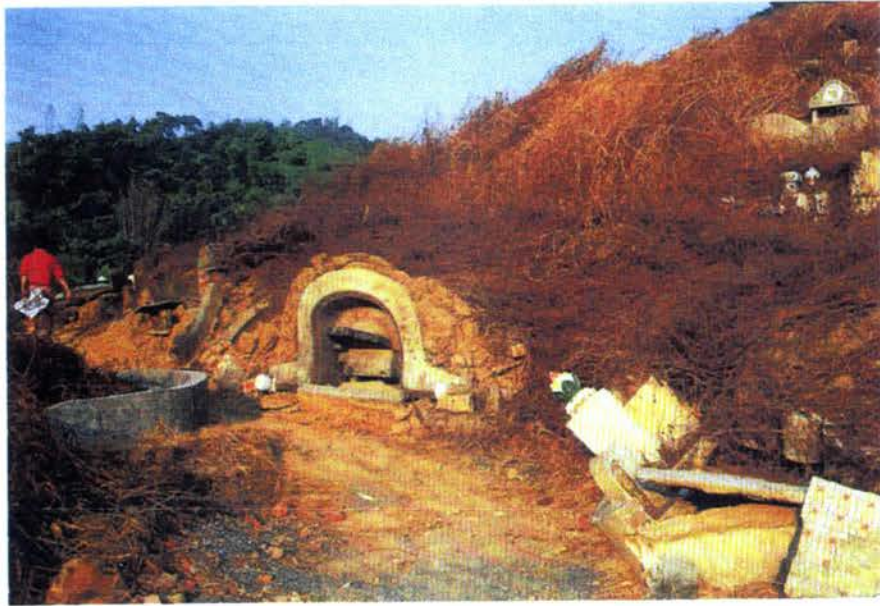


(c)



(d)

Κατάρρευση τμήματος σήραγγας μετά το σεισμό Chi-Chi εξαιτίας ρηγμάτων με παράταξη κατά μήκος του άξονα της σήραγγας και ομόροπου ως προς τη μορφολογική κλίση (Wang et al, 2001).



Παραμόρφωση σήραγγας.

■ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Angelier J., Chu H.-T., Lee J.-C. (1997): Shear concentration in a collision zone: kinematics of the Chihshang Fault as revealed by outcrop-scale quantification of active faulting, Longitudinal Valley, eastern Taiwan. *Tectonophysics*, 274, 117–143
- Angelier, J., 1986. Geodynamics of the Eurasia & Philippine Sea Plate boundary: Preface. *Tectonophysics*, 125, (13), 9-10.
- Angelier, J., Barrier, E., Chu, H.-T., 1986. Plate collision and paleostress trajectories in a fold-thrust belt: the Foothills of Taiwan. *Tectonophysics*, 125, 161±178.
- Angelier J., Chu H.-T., Lee J.-C., Hu J.-C. (2000). Active faulting and earthquake hazard: The case study of the Chihshang Fault, Taiwan. *Journal of Geodynamics*, 29, 151±185
- Angelier J., Lee J.-C., Hu J.-C., Chu H.-T. (2003). Three-dimensional deformation along the rupture trace of the September 21st, 1999, Taiwan earthquake: a case study in the Kuang-Fu school. *Journal of Structural Geology*, 25, 351-370
- Bilham R., Yu T.-T. (2000): The morphology of thrust faulting in the 21 September 1999, Chichi, Taiwan earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 351-367

BIRD'S EYE VIEW OF CHER-LUNG-PU FAULT TAIWAN CHI-CHI
EARTHQUAKE 9.21.1999

- Chen W.-S., Huang B.-S., Chen Y.-G., Lee Y.-H., Yang C.-N., Lo C.-H., Chang H.-C., Sung Q.-C., Huang N.-W., Lin C.-C., Sung S.-H., Lee K.-J. (2001). 1999 Chi-Chi Earthquake: A Case Study on the Role of Thrust-Ramp Structures for Generating Earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 5, 986-994
- Chi-Chi Earthquake, 1999. Special Issue, *Central Geological Survey*, Republic of China, 2000
- Dong J.J., Wang C.D., Lee C.T., Liao J.J., Pan Y.W. (2003): The influence of surface ruptures on building damage in the 1999 Chi-Chi earthquake: a case study in Fengyuan City. *Engineering Geology*, In Press
- Ho S. C. (1999): An introduction to the geology of Taiwan explanatory text of the geologic map of Taiwan. *Central Geological Survey*, Republic of China, pp 192
- HONN KAO, WANG-PING CHEN (2000), THE CHI-CHI EARTHQUAKE, SEQUENCE: ACTIVE, OUT-OF-SEQUENCE THRUST FAULTING IN TAIWAN
- 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. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 5, 930-952
- Lee C.-T. (1999): Hangingwall deformation and its effect to building and structures as learned from the Chelungpu faulting in the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Institute of Applied Geology*, National Central University, Taiwan
- Lee J.-C., Angelier J., Chu H.-T., Hu J.-C., Jeng F.-S. (2001): Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan. *Tectonophysics*, 333, 219-240
- Lee J.-C., Chen Y.-G., Sieh K., Mueller K., Chen W.-S., Chu H.-T., Chan Y.-C., Rubin C., Yeats R. (2001). A vertical exposure of the 1999 surface rupture of the Chelungpu Fault at Wufeng, Western Taiwan: Structural and Paleoseismic implications for an Active Thrust Fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 5, 914 - 929.
- Lee J.-C., Chu H.-T., Angelier J., Chan Y.-C., Hu J.-C., Lu C.-Y., Rau R.-J. (2002): Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures. *Journal of Structural Geology*, 24, 173-192
- Lee Y.-H., Ota Y., Lu S.-T., Shih T.-S. (2001): 1999 Chi-Chi Earthquake Fault and Active Fault, Central Taiwan. *National Taiwan University*, Taiwan, pp 61

- Lin C.-W., Lee Y.-L., Huang M.-L., Lai W.-C., Yuan B.-D., Huang C.-Y. (2003): Characteristics of surface ruptures associated with the Chi-Chi earthquake of September 21, 1999. *Engineering Geology*, 2192, In Press
- Lin A., Ouchi T., Chen A., Maruyama T. (2001): Co-seismic displacements, folding and shortening structures along the Chelungpu surface rupture zone occurred during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake. *Tectonophysics*, 330, 225-244
- LIN C-W., CHEMY H-C, LU, S.T., SHIH, T-S. AN INTRODUCTION TO THE ACTIVE FAULTS OF TAIWAN SECOND EDITION. EXPLANATORY TEXT OF THE ACTIVE FAULT MAP OF TAIWAN. SPEC. PUBL. No 13, OCTOBER 2000. P.121-122
- Ling H.-I., Leshchinsky D., Chou Nelson N.S. (2001): Post-earthquake investigation on several geosynthetic-reinforced soil retaining walls and slopes during the Ji-Ji earthquake of Taiwan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 297-313
- Wang W.L., Wang T.T., Su J.J., Lin C.H., Seng C.R., Huang T.H. (2001): Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16, 133-150