

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

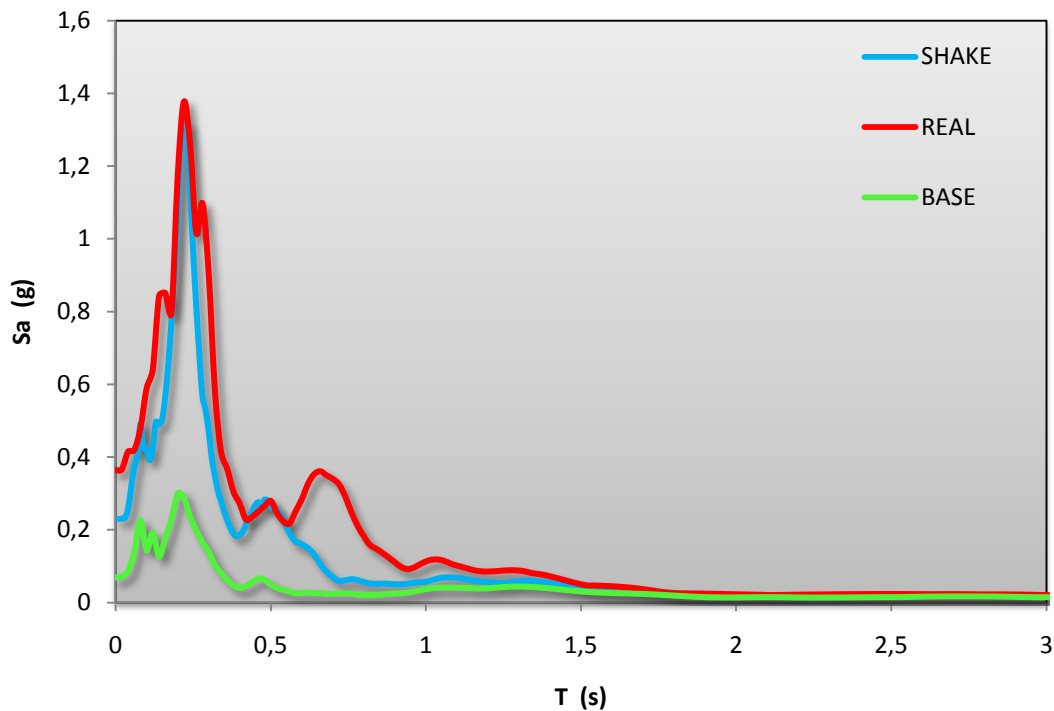
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία **ΙΩΑΝΝΗ ΓΕΩΡΓΑΛΑ**

Επιβλέπων Καθηγητής: **ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΓΚΑΖΕΤΑΣ**



Οκτώβριος 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΣΕΛ.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός.....	2
1.2 Δομή.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Στατιστική ανάλυση ελαστικών φασμάτων απόκρισης	4
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Φάσματα σχεδιασμού των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών.....	6
2.2.1 Ευρωκώδικας 8.....	6
2.2.2 Ε.Α.Κ 2000.....	8
2.3 Στατιστική ανάλυση φασμάτων αποκρίσεως σε βράχο.....	9
2.4 Στατιστική ανάλυση φασμάτων αποκρίσεως σε έδαφος κατηγορίας C.....	9
2.5 Συμπεράσματα	10
Πίνακες και Σχήματα.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εδαφική ενίσχυση σεισμικού κραδασμού	28
3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Χαρακτηριστικά παραδείγματα εδαφικής ενίσχυσης.....	30

3.2.1	Σεισμός Michoakan 1985.....	30
3.2.2	Σεισμός Loma Prieta 1989	31
3.3	Θεωρητική ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης.....	31
3.3.1	Ομοιογενες έδαφος χωρίς απόσβεση εδραζόμενο σε άκαμπτο βράχο.....	32
3.3.2	Ομοιογενες έδαφος με απόσβεση εδραζόμενο σε άκαμπτο βράχο	33
3.3.3	Ομοιογενές έδαφος με απόσβεση εδραζόμενο σε εύκαμπτο βράχο	35
3.3.4	Στρωματοποιημένο έδαφος με απόσβεση εδραζόμεν σε εύκαμπτο βράχο	38
3.3.5	Ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση.....	40
3.4	Διαδικασία ανάλυσης	42
	Σχήματα	43
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό KSRH10		52
4.1	Πληροφορίες για τον σταθμό.....	53
4.2	Σεισμός Tokachi-oki 2003.....	53
4.3	Σεισμός Hokkaido 28/11/2004.....	54
4.4	Σεισμός Hokkaido 06/12/2004.....	55
4.5	Θεωρητική ανάλυση.....	56
4.6	Παρατηρήσεις.....	57
	Σχήματα	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό TKCH07	85
5.1 Πληροφορίες για τον σταθμό.....	86
5.2 Σεισμός Tokachi-oki 2003.....	86
5.3 Παρατηρήσεις.....	87
Σχήματα.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό IBRH11	98
6.1 Πληροφορίες για τον σταθμό.....	99
6.2 Σεισμός Tohoku 2011.....	99
6.3 Σεισμός near the east coast of Honshu 11/03/2011.....	100
6.4 Σεισμός near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12.....	101
6.5 Σεισμός Eastern Honshu Japan 2011/04/11.....	102
6.6 Σεισμός Eastern Honshu Japan 2011/04/11.....	103
6.7 Σεισμός Off the East coast of Honshu Japan 2012/12/07.....	104
6.8 Παρατηρήσεις.....	105
Σχήματα.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα	154
7.1 Διερεύνηση αβεβαιοτήτων ανάλυσης.....	155
7.2 Συμπεράσματα.....	156
Σχήματα.....	158

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Οι πρόσφατοι σεισμοί στην Osaka στις 18/06/2018 και στο Hokkaido στις 05/09/2018.....	161
Σχήματα	164
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Στοιχεία Τεχνικής Σεισμολογίας.....	175
Σχήματα	179
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	183

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, δίνεται όλο και μεγαλύτερη προσοχή στην επιρροή του εδάφους στην ένταση και στο φασματικό περιεχόμενο του σεισμικού κραδασμού. Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί λαμβάνουν υπόψη τους αυτή την επιρροή με την τροποποίηση των φασμάτων σχεδιασμού για κάθε κατηγορία εδάφους καθώς και με διάφορες άλλες διατάξεις (π.χ. τοπογραφική ενίσχυση).

Τα ελαστικά φάσματα αποκρίσεως σχεδιασμού σε όρους επιταχύνσεων που προτείνονται από τους Κανονισμούς είναι αποτέλεσμα στατιστικής επεξεργασίας πραγματικών καταγραφών και ως εκ τούτου έχουν μια ομαλοποιημένη μορφή. Για κάθε εδαφική κατηγορία τα φάσματα αυτά παρουσιάζουν ένα πλατώ στις μικρές περιόδους, το οποίο είναι μεγαλύτερο για μαλακά εδάφη, και στη συνέχεια έναν φθίνοντα κλάδο. Ωστόσο, η μορφή αυτή δεν μοιάζει καθόλου με ένα τυχόν πραγματικό φάσμα. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία επιβεβαιώνεται αρχικά η μορφή και οι τιμές των φασμάτων σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 για βράχο και έδαφος κατηγορίας C και εξετάζεται κατά πόσο αυτά αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα. Για την κατασκευή των φασμάτων χρησιμοποιείται πλήθος πραγματικών καταγραφών ανά τον κόσμο.

Στη συνέχεια, αναλύεται το φαινόμενο της εδαφικής ενίσχυσης του σεισμικού κραδασμού, όπου κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων το έδαφος λειτουργεί ως «φίλτρο», ενισχύοντας εκείνες τις αρμονικές συνιστώσες των οποίων η συχνότητα πλησιάζει τις δικές του ιδιοσυχνότητες. Πραγματοποιούνται ισοδύναμες γραμμικές ελαστικές αναλύσεις με τις δύο οριζόντιες συνιστώσες σεισμών που καταγράφηκαν σε τρεις σταθμούς της Ιαπωνίας. Με δεδομένα το εδαφικό προφίλ κάθε σταθμού και το επιταχυνσιογράφημα στο βραχώδες υπόβαθρο, προσπαθούμε να προβλέψουμε την καταγραφή στην επιφάνεια. Έπειτα, κατασκευάζεται το ελαστικό φάσμα απόκρισης στην επιφάνεια και συγκρίνεται με το πραγματικό. Προκύπτουν επίσης οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και των διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος, καθώς και η συνάρτηση μεταφοράς. Σκοπός των αναλύσεων αυτών είναι να δούμε κατά πόσο η ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση είναι σε θέση να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα και να προσδιοριστούν οι αιτίες των αποκλίσεων από τη πραγματικότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Η σεισμική μηχανική αποτελεί έναν σημαντικό και συνεχώς εξελισσόμενο κλάδο της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού, ιδίως σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Η μεγαλύτερη ίσως δυσκολία που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι ότι η σεισμική δράση είναι απρόβλεπτη. Ως εκ τούτου, η διαμόρφωση ενός ενιαίου αντισεισμικού κανονισμού με παγκόσμια εφαρμογή είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν συνταχθεί διάφοροι αντισεισμικοί κανονισμοί οι οποίοι εκτός των άλλων προτείνουν ένα ελαστικό φάσμα απόκρισης (*Elastic Design Response Spectrum*) σχεδιασμού το οποίο έχει μια ομαλοποιημένη μορφή ως αποτέλεσμα στατιστικής επεξεργασίας. Με κάποιες μικροδιαφορές στις τιμές, αυτό το φάσμα είναι ίδιο σε όλους τους κανονισμούς. Όμως, το φάσμα απόκρισης ενός πραγματικού σεισμού παρουσιάζει διαρκώς αιχμές και πολλές φορές δεν έχει καμία σχέση με το φάσμα σχεδιασμού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά εξετάζεται κατά πόσο το φάσμα απόκρισης σχεδιασμού για βράχο και έδαφος είναι ασφαλές, πραγματοποιώντας στατιστική ανάλυση με ένα πλήθος πραγματικών καταγραφών.

Εκτός από το φάσμα σχεδιασμού, πολύ σημαντική είναι και η επιρροή των *τοπικών εδαφικών χαρακτηριστικών* (*Local Site Effects*) στην ένταση και στο φασματικό περιεχόμενο του σεισμικού κραδασμού. Μια από τις βασικότερες είναι η *εδαφική ενίσχυση* (*Soil Amplification*) η οποία έχει αποδειχθεί πολλές φορές καθοριστική για την καταστροφικότητα ενός σεισμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι σεισμοί στην Πόλη του Μεξικού το 1985 και το 2017, στην Loma Prieta το 1989, στην Αρμενία το 1988, στο Κόμππε το 1995, στην Αθήνα το 1999 κ.λπ.

Προκειμένου λοιπόν να προσδιοριστεί ο ρόλος του εδάφους στην τροποποίηση του σεισμικού κραδασμού, πραγματοποιείται μια σειρά από αναλύσεις στις οποίες γνωρίζοντας το επιταχυνσιογράφημα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού προβλέπεται η σεισμική δόνηση στην επιφάνεια και έπειτα το αντίστοιχο φάσμα απόκρισης. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιούνται δεδομένα που καταγράφηκαν από πραγματικούς σταθμούς της Ιαπωνίας κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών. Στόχος των αναλύσεων είναι να εξετασθεί κατά πόσο αυτές πλησιάζουν την πραγματικότητα και, αν υπάρχει σημαντική απόκλιση, να προσδιοριστούν οι αιτίες που οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα.

1.2 Δομή

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η έννοια του ελαστικού φάσματος απόκρισης καθώς και διάφορα φάσματα σχεδιασμού που έχουν προταθεί μέχρι τους συγχρονούς αντισεισμικούς κανονισμούς. Στη συνέχεια πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των ελαστικών φασμάτων απόκρισης σε βράχο και έδαφος κατηγορίας C κατά Ευρωκώδικα 8 με πλήθος καταγραφών ανά τον κόσμο. Οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των καταγραφών είναι οι εξής:

- PEER Ground Motion Database
- Cosmos Virtual Data Center
- Italian Accelimetric Archive
- BRI Strong Motion Database
- European Strong Motion Database

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται η έννοια της εδαφικής ενίσχυσης με την περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου στο οποίο βασίζεται και με χαρακτηριστικά ιστορικά περιστατικά που το έδαφος έπαιξε σημαντικό ρόλο, ενώ εξηγείται αναλυτικά η διαδικασία που θα ακολουθηθεί στη συνέχεια στις αναλύσεις.

Στα **Κεφάλαια 4, 5 και 6** πραγματοποιούνται *ισοδύναμες γραμμικές ελαστικές αναλύσεις ("equivalent linear" or "frequency domain" analyses)* με το πρόγραμμα *SHAKE* με διάφορες καταγραφές από σεισμούς στην Ιαπωνία μεγέθους $M > 5.5$ στους σταθμούς KSRH10, TKCH07 και IBRH11 αντιστοιχα.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις και τα τελικά συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί από τις διάφορες αναλύσεις.

Στο **Παράρτημα Α** ακολουθεί μια διερεύνηση των ισχυρότερων σεισμικών καταγραφών και των φασμάτων απόκρισής τους από δύο πρόσφατους (2018) σεισμούς της Ιαπωνίας στην Osaka και στο Hokkaido. Συγκεκριμένα, γίνεται μία γενική παρουσίαση του κάθε γεγονότος και υπολογίζονται και σχολιάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης που προκύπτουν από τις καταγραφές.

Στο **Παράρτημα Β** εξηγούνται περιληπτικά μερικές από τις βασικές έννοιες της Τεχνικής σεισμολογίας, οι οποίες σχετίζονται με την περιγραφή των σεισμών που χρησιμοποιούνται στις ελαστικές αναλύσεις. Επίσης, περιγράφεται το τεκτονικό περιβάλλον της Ιαπωνίας, στο οποίο οφείλονται οι ιδιαίτερα συχνοί και ισχυροί σεισμοί που πλήττουν τη χώρα.

Πραγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν:

1. Google Earth Pro
2. Seismosignal 2016
3. SHAKE2000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Στατιστική ανάλυση ελαστικών φασμάτων αποκρίσεως

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στατιστική ανάλυση ελαστικών φασμάτων απόκρισης

2.1 Εισαγωγή

Τα φάσματα απόκρισης έχουν πολύ μεγάλη σημασία στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, διότι περιγράφουν απλά αλλά επαρκώς τη μέγιστη απόκριση μιας κατασκευής, όταν δεχθεί έναν σεισμικό κραδασμό διαμέσου του εδάφους. Το φάσμα απόκρισης δίνει τη μέγιστη απόκριση (μετακίνηση, ταχύτητα, επιτάχυνση), ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με απόσβεση, σε μια συγκεκριμένη διέγερση στη βάση, ως συνάρτηση της ιδιοσυχνότητας (ή ιδιοπεριόδου) και του συντελεστή απόσβεσης του δεδομένου μονοβάθμιου ταλαντώτη.

Η πρακτική σημασία είναι μεγάλη για δύο λόγους. Καταρχήν, στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού όλοι οι έλεγχοι και οι υπολογισμοί γίνονται συνήθως για κάποιο μέγιστο φορτίο, που πρόκειται να φορτίσει την κατασκευή και προσδιορίζεται με κανονιστικό τρόπο. Επομένως, και στην περίπτωση του σεισμού, εκείνο που κυρίως ενδιαφέρει τον μηχανικό είναι η εκτίμηση της αναμενόμενης μέγιστης ταλάντωσης (με μορφή μετακίνησης, ταχύτητας και επιτάχυνσης) που θα επιφέρει στην κατασκευή μία σεισμική εδαφική κίνηση στη στάθμη θεμελίωσης.

Γνωρίζουμε δε από τη δυναμική των γραμμικών συστημάτων ότι η μέγιστη ταλάντωση ενός συστήματος εξαιτίας μιας περιοδικής κίνησης συμβαίνει για τη συχνότητα εκείνη που ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Ένα φάσμα απόκρισης λοιπόν δίνει για μια δεδομένη εδαφική κίνηση την αντίστοιχη μέγιστη ταλάντωση μιας πλήρους σειράς μονοβάθμιων ταλαντωτών διαφορετικών ιδιοσυχνοτήτων. Καλύπτοντας όλο το πιθανό φάσμα συχνοτήτων, θα περιλαμβάνει οπωσδήποτε και την ιδιοσυχνότητα της κάθε κατασκευής, ανεξαρτήτως του εάν πρόκειται για σύστημα ενός ή πολλών βαθμών ελευθερίας. Εάν, επομένως, η κατασκευή σχεδιαστεί για την ταλάντωση που αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδό της, τότε προφανώς για τη συγκεκριμένη σεισμική εδαφική κίνηση θα έχει σχεδιαστεί σωστά.

Κάποιοι επιπλέον λόγοι που έκαναν τα φάσματα απόκρισης ιδιαίτερα δημοφιλή μεταξύ των μηχανικών, και μάλιστα από την πρώτη στιγμή που προτάθηκαν (Housner, 1959), είναι:

- η απλότητα των σχετικών υπολογισμών
- η δυνατότητα ενσωμάτωσης στους υπολογισμούς πολύπλοκων φαινομένων, όπως είναι η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών και
- η ευκολία προσαρμογής τους στη φιλοσοφία των αντισεισμικών κανονισμών, η οποία είναι αντίθετη της περιπτωσιολογίας.

Όλοι οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί εισάγουν συντελεστές ενίσχυσης της εδαφικής επιτάχυνσης ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες. Οι συντελεστές ενίσχυσης αναφέρονται ως προς τις συνθήκες "βράχου", για τις οποίες ορίζεται η εδαφική επιτάχυνση βάσης. Μια αρχική προσπάθεια εκτίμηση συντελεστών ενίσχυσης φαίνεται στο Σχήμα 2.1, όπου εκτιμάται η σχέση της επιτάχυνσης σε διάφορα εδάφη με την επιτάχυνση σε βράχο (Seed et al. 1976). Στο Σχήμα 2.2 βλέπουμε τον μέσο όρο κανονικοποιημένων φασμάτων διάφορων σεισμών από την Καλιφόρνια και την Ιαπωνία, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους πάνω στο οποίο είχε γίνει η καταγραφή (Seed et al. 1976). Βλέπουμε ότι τα φάσματα διαφοροποιούνται ανάλογα με την κατηγορία εδάφους. Σε σκληρά και βραχώδη εδάφη τα φάσματα παρουσιάζουν μεγάλες επιταχύνσεις σε μικρές περιόδους, οι οποίες μειώνονται γρήγορα όσο μεγαλώνει η περίοδος της κατασκευής. Αντίθετα, σε μαλακά εδάφη εμφανίζονται μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις ακόμα και σε αρκετά μεγάλες περιόδους. Τα φάσματα σχεδιασμού των σύγχρονων Αντισεισμικών Κανονισμών που περιγράφονται παρακάτω ακολουθούν αυτή ακριβώς τη λογική.

2.2 Φάσματα σχεδιασμού των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών

2.2.1 Ευρωκώδικας 8

Ο *Ευρωκώδικας 8 (EC8)* "Design of structures for Earthquake resistance" ασχολείται με τον σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων και έργων πολιτικού μηχανικού σε σεισμικές περιοχές, αποτελώντας Εθνικό Κανονισμό σε όλες τις χώρες μέλη της ΕΕ. Στον EC8 προδιαγράφονται πέντε κατηγορίες εδάφους A, B, C, D και E ανάλογα με τη στρωματογραφία και τις παραμέτρους που περιγράφουν τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων (Πίνακας 2.1). Υπάρχουν δύο ειδικές κατηγορίες εδαφών, οι S1 και S2, για τις οποίες απαιτούνται ειδικές μελέτες για τον καθορισμό των σεισμικών δράσεων. Ιδιαίτερα στην κατηγορία S2 πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα αστοχίας του εδάφους υπό τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού. Για την κατηγορία S1 απαιτείται ειδική μελέτη για τον καθορισμό της *τοπικής μεγέθυνσης (site amplification)* και της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Το πλεονέκτημα τη ταξινόμησης είναι ότι οι τρεις παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των εδαφών (ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, τιμές N_{SPT} και αστράγγιστη διατμητική αντοχή) μπορούν να μετρηθούν σχετικά εύκολα. Συνήθως, η κατάταξη των εδαφών γίνεται με βάση τη μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30 m του εδάφους, η οποία συμβολίζεται με $V_{S,30}$ και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{H_i}{V_i}} \quad (2.1)$$

όπου:

H_i = πάχος στρώματος

V_i = ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων στρώματος i (για $\gamma \leq 10^{-5}$, δηλαδή για πρακτικά ελαστική συμπεριφορά)

N = πλήθος στρωμάτων στα ανώτερα 30 m εδάφους.

Εάν δεν είναι διαθέσιμη η $V_{S,30}$ μπορεί να χρησιμοποιείται η τιμή N_{SPT} (αριθμός κρούσεων για πρότυπη διείσδυση 30 cm).

Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να είναι μια βολική απλοποίηση, μπορεί όμως ενδεχομένως να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα, ειδικά σε περιπτώσεις βαθιών εδαφικών σχηματισμών ή απότομης αλλαγής δυσκαμψίας μεταξύ του εδαφικού στρώματος στα 30 μετρα και του βραχώδους υπόβαθρου.

Τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού για κάθε κατηγορία εδάφους φαίνονται στο Σχήμα 2.3 και προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$S_a = \alpha_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (2.2)$$

$$S_a = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad \text{για } T_B < T < T_C \quad (2.3)$$

$$S_a = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C < T < T_D \quad (2.4)$$

$$S_a = \alpha_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D < T < 4 \text{ s} \quad (2.5)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το η είναι ο σύντελεστής απόσβεσης που δίνεται από την σχέση

$$\eta = \sqrt{\frac{0.10}{\zeta + 0.05}} \quad (2.6)$$

και τροποποιεί κατάλληλα τις φασματικές τιμές σε περίπτωση που η απόσβεση της κατασκευής είναι διαφορετική από 5%.

Η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού ορίζεται

$$\alpha_g = \gamma_i \cdot \alpha_{gR} \quad (2.7)$$

όπου γ_i είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας οι τιμές του οποίου εξαρτώνται από το είδος της κατασκευής και δίνονται στον Πίνακα 2.2 και a_{gR} η εδαφική επιτάχυνση αναφοράς που σχετίζεται με την ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας της κάθε περιοχής. Οι ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα φαίνονται στο Σχήμα 2.4 και οι αντίστοιχες τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς στον Πίνακα 2.3. Ως S ορίζεται ο συντελεστής εδάφους, ο οποίος κυμαίνεται από 1.00 έως 1.40 ανάλογα με την κατηγορία εδάφους (Πίνακας 2.4).

2.2.2 E.A.K 2000

Ο *E.A.K 2000* αποτελεί την Ελληνική έκδοση του Ευρωκώδικα 8 που εφαρμοζόταν μέχρι πρόσφατα για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών.

Τα φάσματα σχεδιασμού των οριζόντιων συνιστωσών του σεισμού φαίνονται στο Σχήμα 2.5 καθορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$0 < T < T_1: \Phi_d(T) = \gamma_i \cdot A \cdot \left[1 + \frac{T_1}{T}\right] \cdot (\eta \cdot \theta \cdot \beta_o - 1) \quad (2.8)$$

$$T_1 < T < T_2 : \Phi_d(T) = \gamma_i \cdot A \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_o \quad (2.9)$$

$$T_2 < T: \Phi_d(T) = \gamma_i \cdot A \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_o \cdot \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.10)$$

όπου $A = \alpha \cdot g$ η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους, γ_i ο συντελεστής σπουδαιότητας (Πίνακας 2.5), $\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} \geq 0.7$ ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης, $\beta_o=2.5$ ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης, θ ο συντελεστής θεμελίωσης, T_1 και T_2 χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος ανάλογα το έδαφος (Πίνακας 2.6).

Η λογική του *E.A.K* είναι ίδια με αυτή του Ευρωκώδικα 8 με κάποιες μικρές τροποποιήσεις. Τα εδάφη κατατάσσονται σε πέντε κατηγορίες Α, Β, Γ, Δ και Χ που περιγράφονται στον Πίνακα 2.7. Ο χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας του *E.A.K* φαίνεται στο Σχήμα 2.6 ενώ η εδαφική επιτάχυνση για κάθε ζώνη δίνεται στο Πίνακα 2.8.

2.3 Στατιστικά φάσματα απόκρισης σε βράχο

Ο σκοπός της ανάλυσης είναι να κατασκευαστούν τα ελαστικά φάσματα απόκρισης από διάφορες καταγραφές σε βράχο, να προσδιοριστούν τα διάφορα στατιστικά μεγέθη (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή) και να εξεταστεί κατά πόσο τα φάσματα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 και του Ε.Α.Κ είναι ασφαλή για διάφορες περιπτώσεις. Ως βράχος θεωρήθηκε το έδαφος κατηγορίας Α κατά EC8 (βλέπε Πίνακα 2.1).

Για την κατασκευή των φασμάτων χρησιμοποιήθηκαν 135 καταγραφές από σεισμούς μεγέθους $M > 4.5$ με $rga > 0.15g$, όπου οι 101 είναι από σεισμούς μεγέθους $M > 6$ με $rga > 0.20g$. Για λόγους σύγκρισεως, τα φάσματα είναι κανονικοποιημένα ως προς τη μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους. Στα Σχήματα 2.7 και 2.8 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα φάσματα και η το μέσο φάσμα για $M > 6$ και $M > 4.5$ αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι τα μέσα φάσματα είναι πανομοιότυπα και στις δύο περιπτώσεις. Στα Σχήματα 2.9 και 2.10 φαίνονται οι καταγραφές και τα μέσα φάσματα για σεισμούς με $rga > 0.5g$ και για $4.5 < M < 6$ αντίστοιχα. Εδώ, η μορφή και οι τιμές του μέσου φάσματος διαφέρουν από πριν, όχι όμως υπερβολικά. Το μέγιστο, το ελάχιστο, το μέσο και το μέσο προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση φάσμα για $M > 6$ φαίνονται στο Σχήμα 2.11 και για $M > 4.5$ στο Σχήμα 2.12. Στη συνέχεια, το μέσο και το μέσο προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση φάσμα για $M > 4.5$ και $M > 6$ συγκρίνονται με τα φάσματα του Ευρωκώδικα 8 και του Ε.Α.Κ. (Σχήματα 2.13 - 2.16). Παρατηρούμε ότι τα φάσματα των κανονισμών είναι πιο συντηρητικά από το μέσο ελαστικό φάσμα και η μορφή τους συμφωνεί με τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης, αλλά δεν καλύπτουν το προσαυξημένο με την τυπική απόκλιση φάσμα για περιόδους μέχρι 0.50 s. Επίσης, δεν καλύπτουν πάντοτε τυχόντα φάσματα όπως αποδεικνύει το Σχήμα 2.17.

2.4 Στατιστικά φάσματα απόκρισης σε έδαφος κατηγορίας C

Ο σκοπός της ανάλυσης είναι να κατασκευαστούν τα ελαστικά φάσματα απόκρισης από διάφορες καταγραφές σε έδαφος κατηγορίας C κατά EC8 (βλέπε Πίνακα 2.1), να προσδιοριστούν τα διάφορα στατιστικά μεγέθη (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή) και να εξεταστεί κατά πόσο τα φάσματα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 και του Ε.Α.Κ είναι ασφαλή για διάφορες περιπτώσεις.

Για την κατασκευή των φασμάτων χρησιμοποιήθηκαν 67 καταγραφές σε έδαφος C με $rga > 0.20g$. Τα ελαστικά φάσματα των καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν κανονικοποιημένα ως προς την PGA φαίνονται στο Σχήμα 2.18, ενώ στα Σχήματα 2.19 και 2.20 φαίνονται το μέσο και το μέσο συν την τυπική απόκλιση φάσμα σε σύγκριση με το φάσμα του EC8 για έδαφος C και του Ε.Α.Κ για έδαφος κατηγορίας Γ. Προκύπτει ότι το φάσμα του EC8 είναι πολύ κοντά στη μορφή και στις τιμές του μέσου συν την τυπική απόκλιση φάσματος και καλύπτει ικανοποιητικά το μέσο φάσμα. Από την άλλη, ο Ε.Α.Κ. καλύπτει το μέσο φάσμα αλλά όχι και το προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση φάσμα. Παρόλα αυτά, το φάσμα του EC8 όπως και του Ε.Α.Κ. δεν καλύπτουν τις διάφορες περιπτώσεις πραγματικών φασμάτων ξεχωριστά, όπως αποδεικνύει το Σχήμα 2.21.

Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις καταγραφών σε μαλακά εδάφη όπως η καταγραφή στο σεισμό του Tokachi-oki το 2003 που φαίνεται στο Σχήμα 2.21, το φάσμα που προκύπτει έχει εντελώς διαφορετική μορφή από τα φάσματα των Κανονισμών. Οι μέγιστες φασματικές τιμές είναι δυνατόν να εντοπίζονται σε περιόδους μεγαλύτερες και από 2 s, οι οποίες πολλές φορές ταυτίζονται με τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του εδαφικού σχηματισμού (βλέπε Κεφάλαιο 3).

2.5 Συμπεράσματα

Τα φάσματα σχεδιασμού των κανονισμών προτείνουν ομαλοποιημένα φάσματα τα οποία ουσιαστικά προκύπτουν από τη στατιστική επεξεργασία ενός μεγάλου αριθμού ελαστικών φασμάτων απόκρισης πραγματικών καταγραφών. Για κάθε κατηγορία εδάφους τα φάσματα αυτά έχουν έναν σταθερό κλάδο και έναν κατιόντα. Ανάλογα με το είδος του εδάφους το φάσμα τροποποιείται ελαφρώς αλλά διατηρεί πρακτικά την ίδια μορφή. Η στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια επιβεβαιώνει τη προέλευση των φασμάτων σχεδιασμού από στατιστική ανάλυση, αλλά απόδεικνύει ότι αυτά δεν καλύπτουν το φάσμα της τυχούσας σεισμικής καταγραφής. Όπως δείχνεται στο Σχήμα 2.22, η μεγιστοποίηση των φασμάτων σε διαφορετικές μεταξύ τους περιόδους οδηγεί στην εξάλειψη των αιχμών και των κορυφών του πραγματικού φάσματος και στη δημιουργία ενός πλατώ σταθερών επιταχύνσεων που διαθέτουν τα φάσματα των Κανονισμών. Το πρόβλημα είναι εντονότερο σε περιπτώσεις πολύ μαλακών εδαφικών σχηματισμών, όπου η μορφή των φασμάτων διαφέρει δραστικά από τα φάσματα σχεδιασμού. Επομένως, είναι απαραίτητη η κατασκευή νέων φασμάτων απόκρισης που θα ποσοτικοποιούν ακριβέστερα και σωστότερα την επίδραση του εδάφους ώστε τα φάσματα σχεδιασμού να είναι πιο κοντά στη μορφή των πραγματικών φασμάτων και να μην είναι απλώς προϊόν στατιστικής επεξεργασίας.

Πίνακες και Σχήματα (2)

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση τον Ευρωκώδικα 8

	Περιγραφή	NSPT	Su (kPa)	V _{s,30}
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού	-	-	>800
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος	>50	>250	360-800
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων	15-50	70-250	180-360
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά	<15	<70	<180
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ιλύος με τιμές VS κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5 m και 20 m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με VS > 800 m/s			
S1	Αποθέσεις που αποτελούνται ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας (PI > 40) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό	-	10-20	<100 (ενδεικτικά)
S2	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A – E ή S1			

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες σπουδαιότητας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

Κατηγορία σπουδαιότητας	γ_i	Περιγραφή
I	0.80	Κτίρια δευτερεύουσας σημασίας για τη δημόσια ασφάλεια, π.χ. γεωργικά κτίρια, κλπ.
II	1.00	Συνήθη κτίρια, που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες.
III	1.20	Κτίρια των οποίων η σεισμική ασφάλεια είναι σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες κατάρρευσης, π.χ. σχολεία, αίθουσες συνάθροισης, πολιτιστικά ιδρύματα κλπ.
IV	1.40	Κτίρια των οποίων η ακεραιότητα κατά τη διάρκεια σεισμών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των πολιτών, π.χ. νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κλπ.

Πίνακας 2.3: Τιμές εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς για κάθε σεισμική ζώνη στην Ελλάδα

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	Εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} (g)
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 2.4: Παράμετροι εδαφικής ενίσχυσης και γωνιακές περίοδοι ως συνάρτηση της εδαφικής κατηγορίας με βάση τον Ευρωκώδικα 8

Κατηγορία εδάφους	S	T _B (sec)	T _C (sec)	T _D (sec)
A	1.00	0.15	0.40	2.50
B	1.20	0.15	0.50	2.50
C	1.15	0.20	0.60	2.50
D	1.35	0.20	0.80	2.50
E	1.40	0.15	0.50	2.50

Πίνακας 2.5: Κατηγορίες σπουδαιότητας σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ 2000

	Κατηγορία Σπουδαιότητας	γ _i
Σ1	Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, π.χ. αγροτικά οικήματα, υπόστεγα, στάβλοι κλπ.	0.85
Σ2	Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, ξενοδοχεία κλπ	1.00
Σ3	Εκπαιδευτικά κτίρια, κτίρια δημόσιων συναθροίσεων, αίθουσες αεροδρομίων και γενικώς κτίρια στα οποία ευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24ώρου. Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας (π.χ. κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες) κλπ.	1.15
Σ4	Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά την διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας, όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, κτίρια δημόσιων επιτελικών υπηρεσιών. Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας (π.χ. μουσεία κλπ.).	1.30


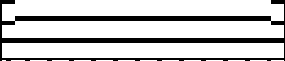


Πίνακας 2.6: Τιμές των χαρακτηριστικών περιόδων T_1 και T_2 (sec)

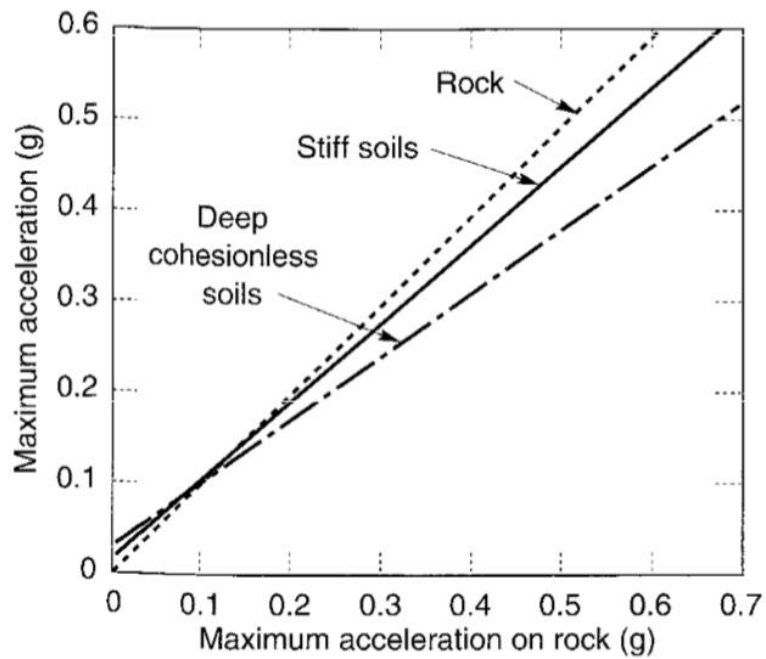
Κατηγορία εδάφους	A	B	Γ	Δ
T_1	0.10	0.15	0.20	0.20
T_2	0.40	0.60	0.80	1.20

Πίνακας 2.7: Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση τον Ε.Α.Κ 2000

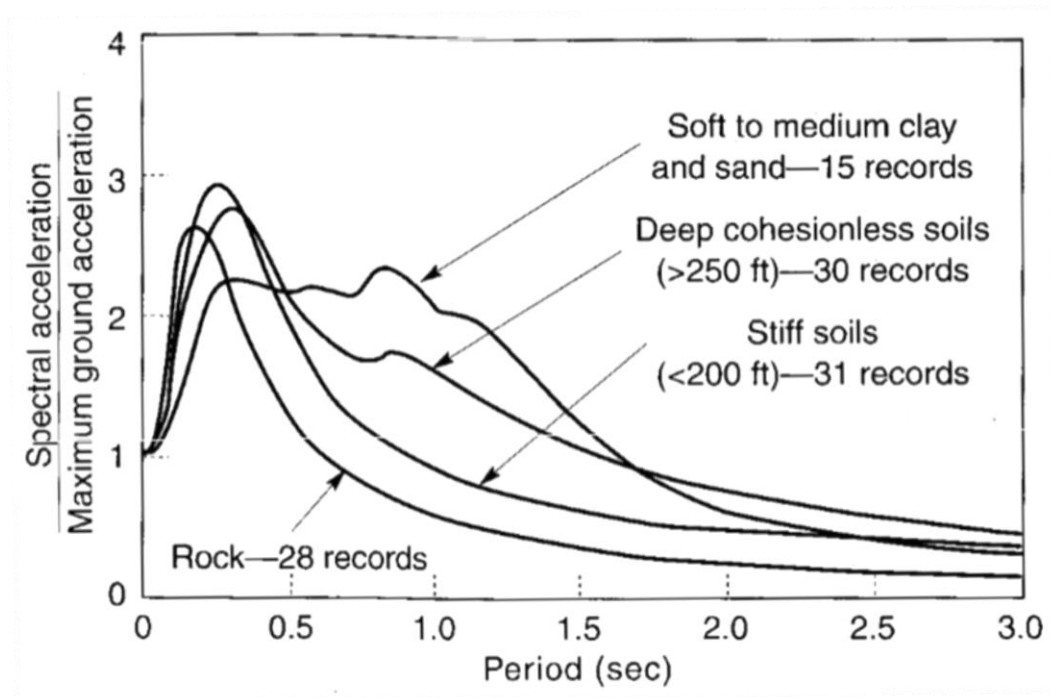
Κατηγορία	Περιγραφή
A	Βραχώδεις ή ημιβραχώδεις σχηματισμοί εκτεινόμενοι σε αρκετή έκταση και βάθος, με τη προϋπόθεση ότι δεν παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση Στρώσεις πυκνού κοκκώδους υλικού με μικρό ποσοστό ιλυοαργιλικών προσμίξεων, πάχους μικρότερου των 70μ. Στρώσεις πολύ σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μικρότερου των 70μ.
B	Εντόνως αποσαθρωμένα βραχώδη ή εδάφη που από μηχανική άποψη μπορούν να εξομοιωθούν με κοκκώδη. Στρώσεις κοκκώδους υλικού μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μεγάλης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. Στρώσεις σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μεγαλύτερου των 70μ.
Γ	Στρώσεις κοκκώδους υλικού μικρής σχετικής πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. Ιλυοαργιλικά εδάφη μικρής αντοχής σε πάχος μεγαλύτερο των 5μ.
Δ	Έδαφος με μαλακές αργίλους υψηλού δείκτη πλασιμότητας ($I_p > 50$) συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 10μ.
X	Χαλαρά λεπτόκοκκα αμμοϊλιώδη εδάφη υπό τον υδάτινο ορίζοντα, που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν (εκτός αν ειδική μελέτη αποκλείσει τέτοιο κίνδυνο, ή γίνει βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων). Εδάφη που βρίσκονται δίπλα σε εμφανή τεκτονικά ρήγματα. (Βλπ. και παρ. 5.1[3]). Απότομες κλιείς καλυπτόμενες με προϊόντα χαλαρών πλευρικών κορημάτων. Χαλαρά κοκκώδη ή μαλακά ιλυοαργιλικά εδάφη, εφόσον έχει αποδειχθεί ότι είναι επικίνδυνα από άποψη δυναμικής συμπεκνώσεως ή απώλειας αντοχής. Πρόσφατες χαλαρές επιχωματώσεις (μπάζα). Οργανικά εδάφη. Εδάφη κατηγορίας Γ με επικινδύνως μεγάλη κλίση.

Πίνακας 2.8: Τιμές εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς για κάθε σεισμική ζώνη στην Ελλάδα (Ε.Α.Κ. 2000)

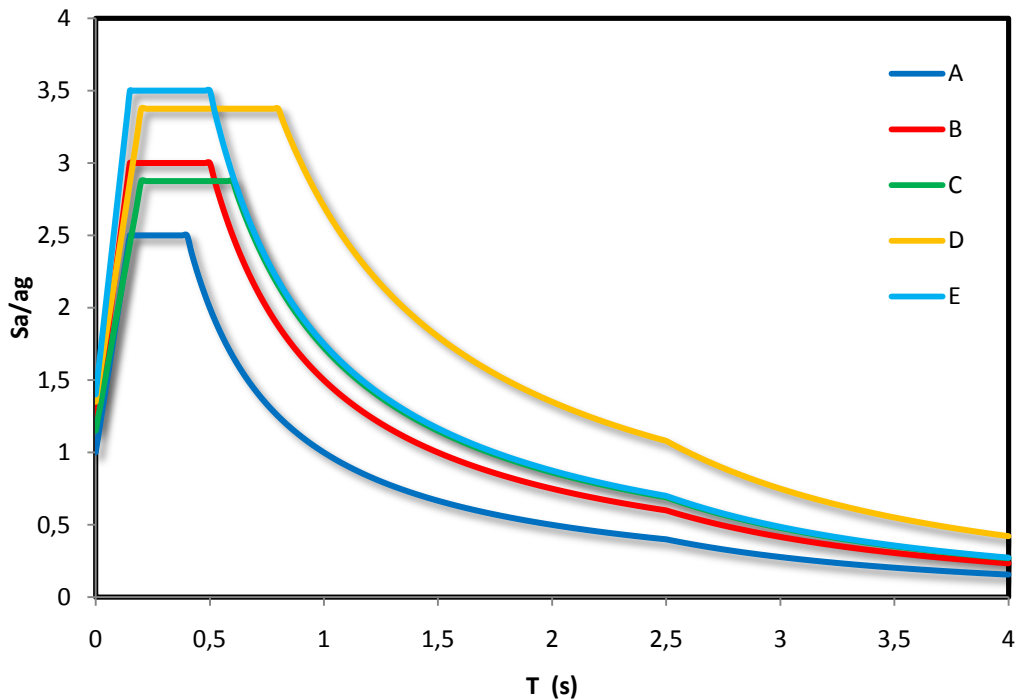
Ζώνη	Σύμβολο	a_g (g)
I		0.12
II		0.16
III		0.24
IV		0.36



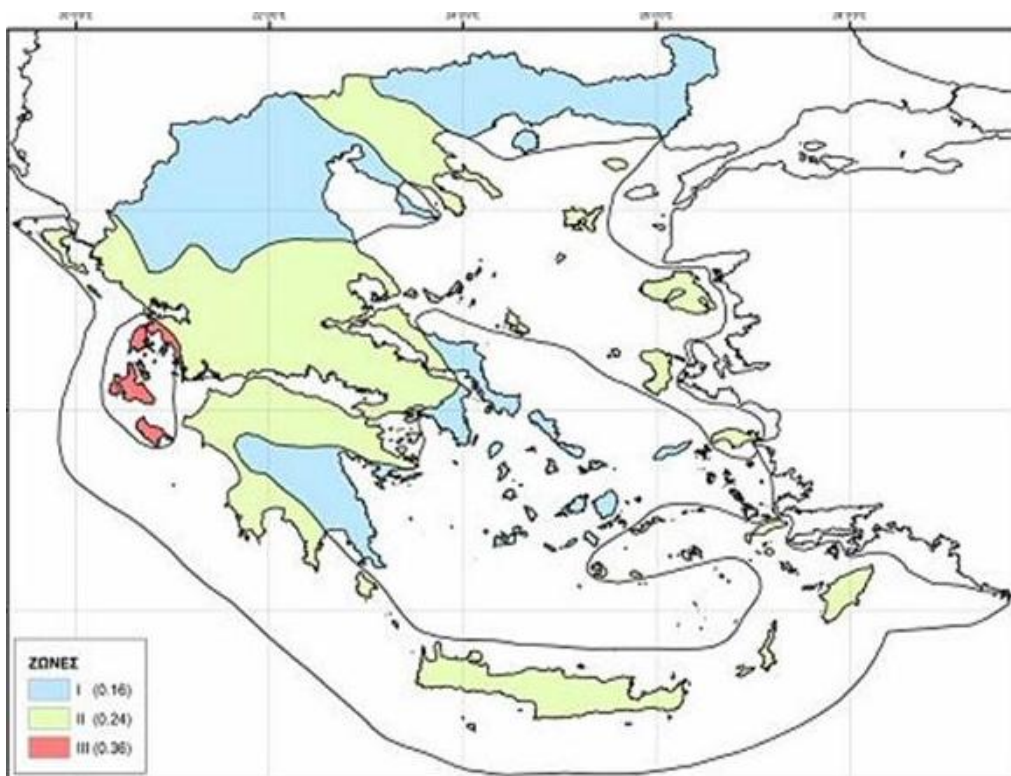
Σχήμα 2.1: Συσχέτιση επιταχύνσεων σε βράχο με επιταχύνσεις σε άλλες εδαφικές συνθήκες (Seed et al, 1976)



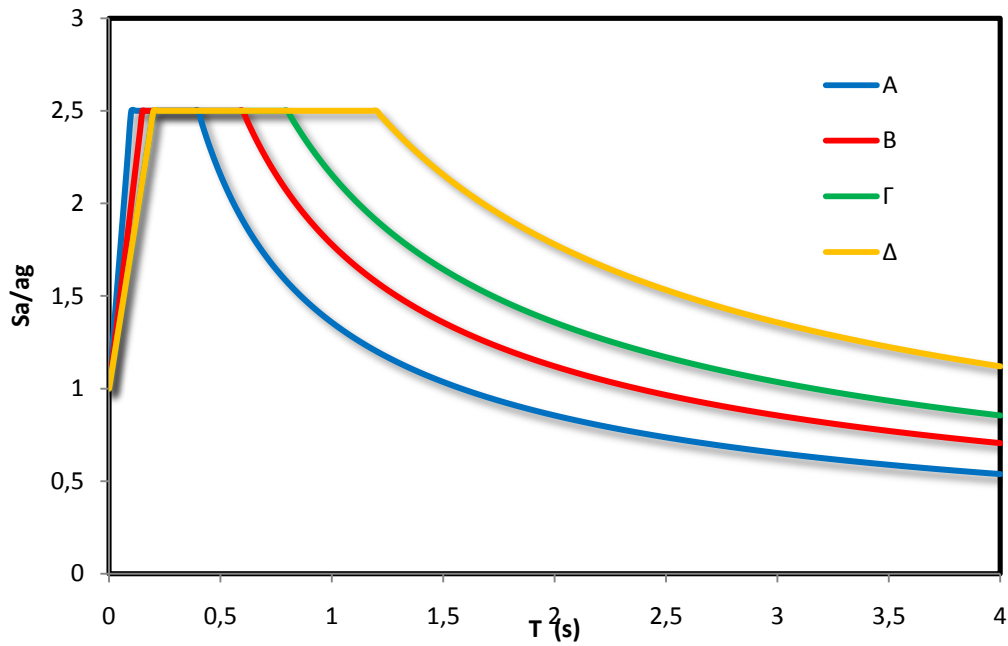
Σχήμα 2.2: Μέσα φάσματα απόκρισης απόλυτων επιταχύνσεων διαφόρων σεισμών για $\zeta=5\%$, ανάλογα με το είδος του εδάφους (Seed et al, 1976)



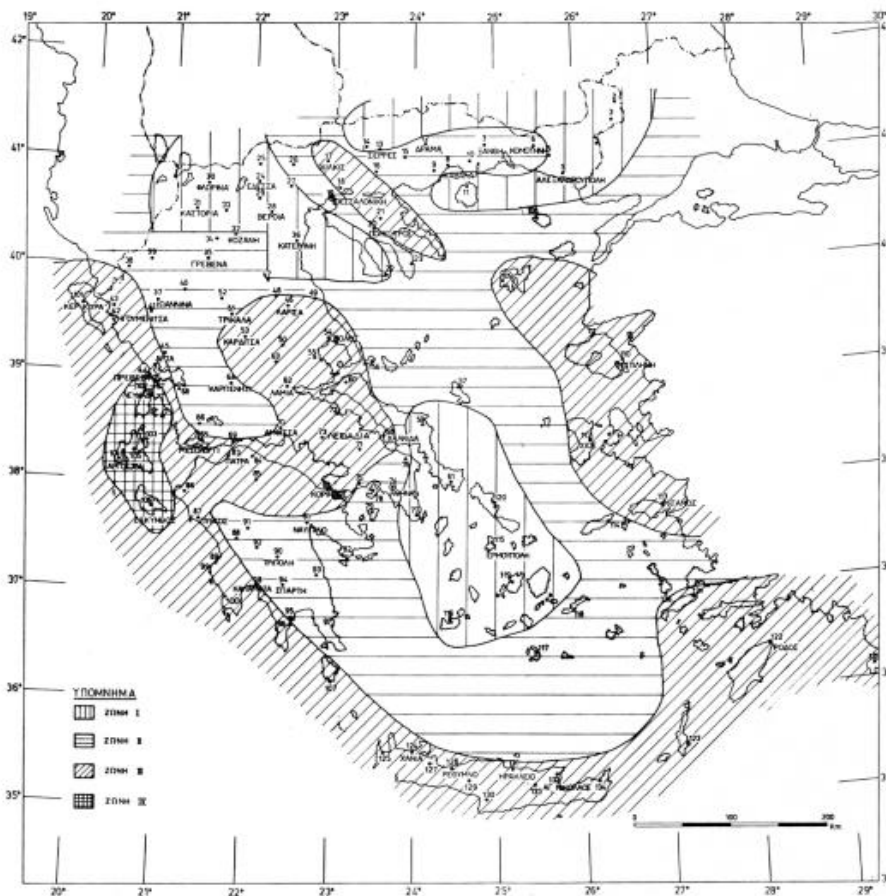
Σχήμα 2.3: Έλαστικά φάσματα απόκρισης σχεδιασμού για κατηγορίες εδαφών Α έως Ε κανονικοποιημένα ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8



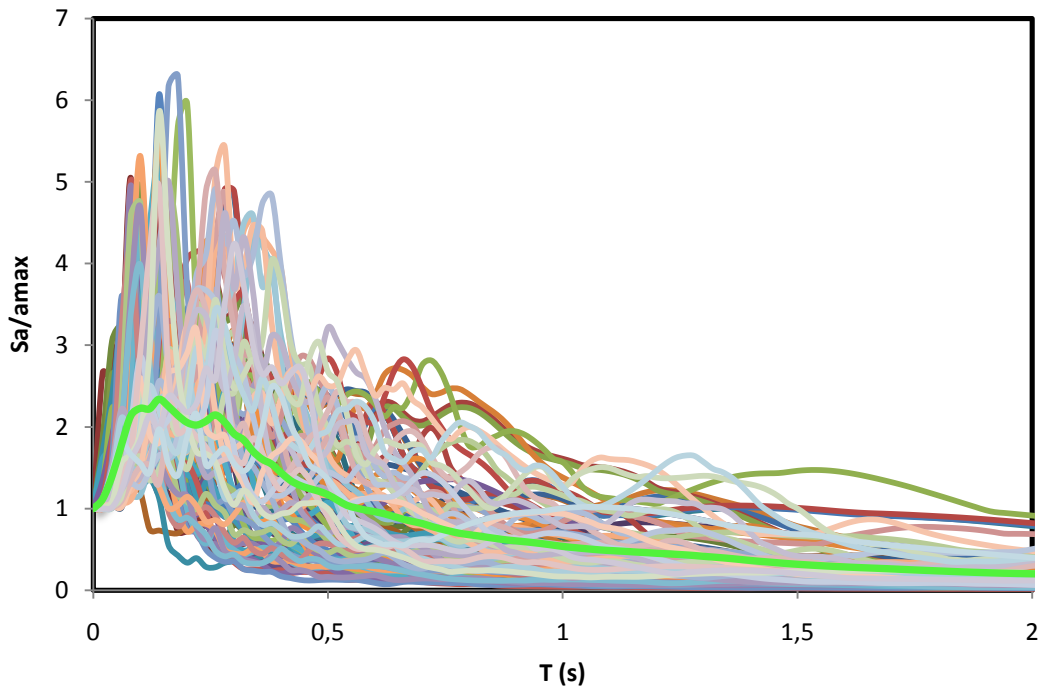
Σχήμα 2.4 Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα σύμφωνα με το Ελληνικό προσάρτημα του Ευρωκώδικα 8 (Ε.Α.Κ. 2003)



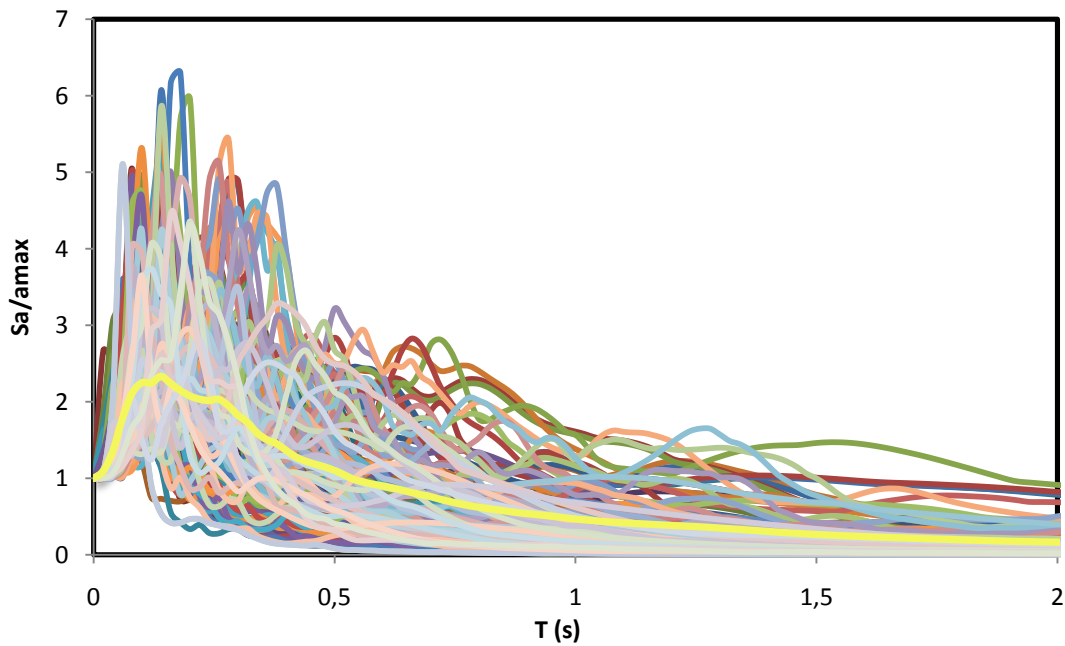
Σχήμα 2.5: Έλαστικά φάσματα απόκρισης σχεδιασμού για κατηγορίες εδαφών Α έως Δ κανονικοποιημένα ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ. 2000.



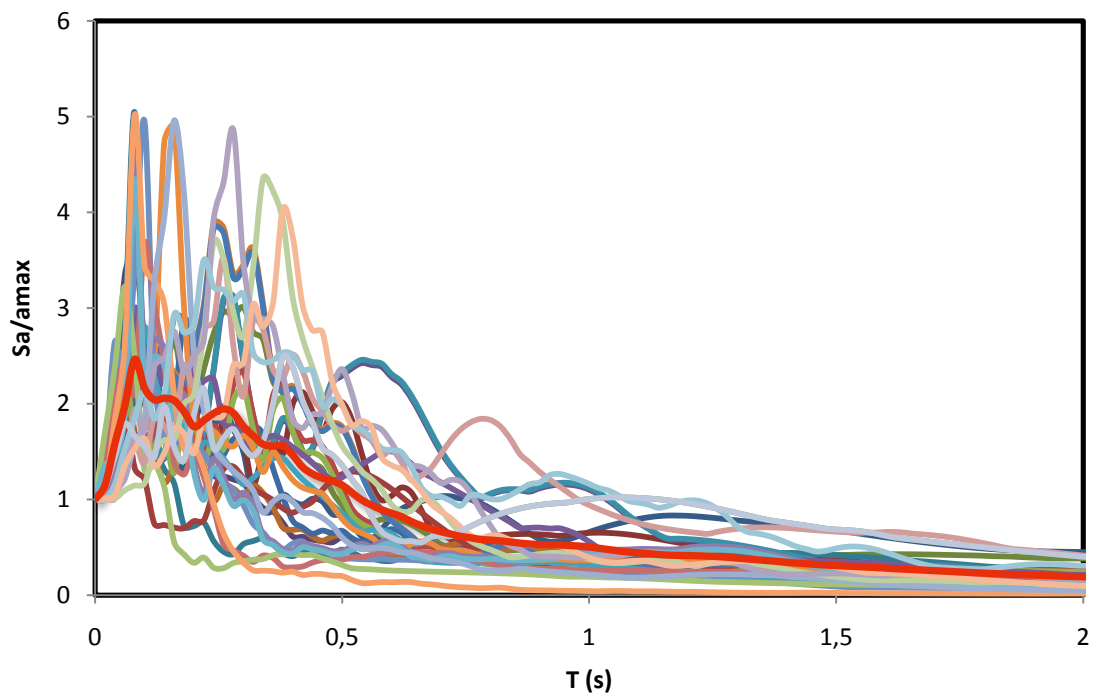
Σχήμα 2.6: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα σύμφωνα με τον Ε.Α.Κ 2000



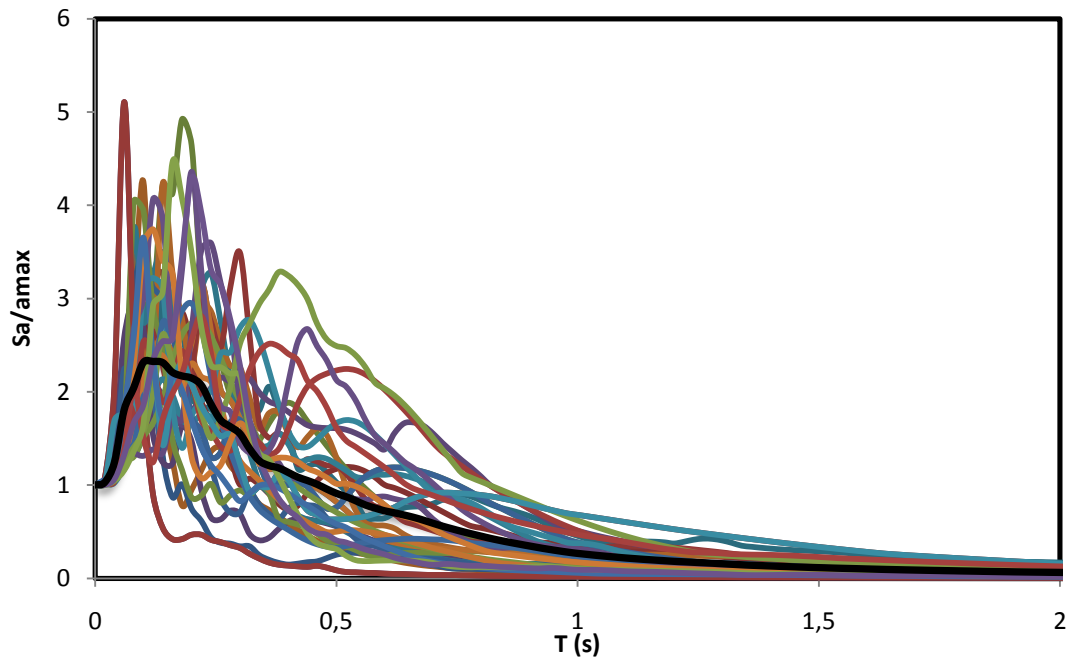
Σχήμα 2.7: Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε βράχο από 101 καταγραφές μεγέθους $M > 6$ και το μέσο ελαστικό φάσμα απόκρισης που προκύπτει (παχιά πράσινη γραμμή).



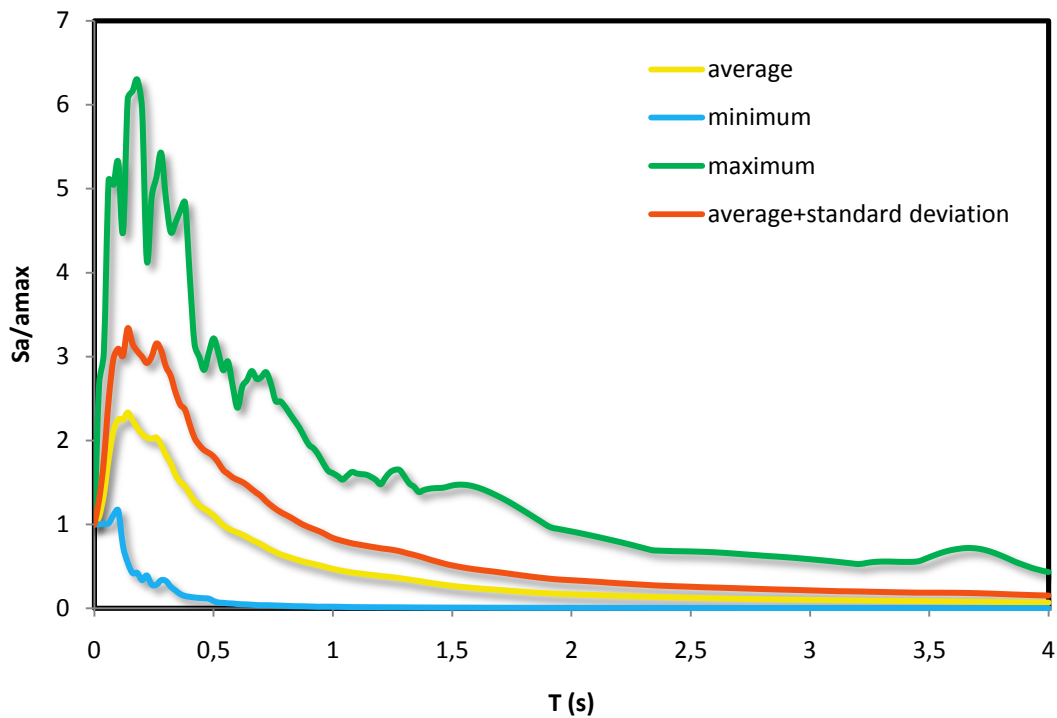
Σχήμα 2.8: Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε βράχο από 135 καταγραφές μεγέθους $M > 4,5$ και το μέσο ελαστικό φάσμα απόκρισης που προκύπτει (παχιά κίτρινη γραμμή).



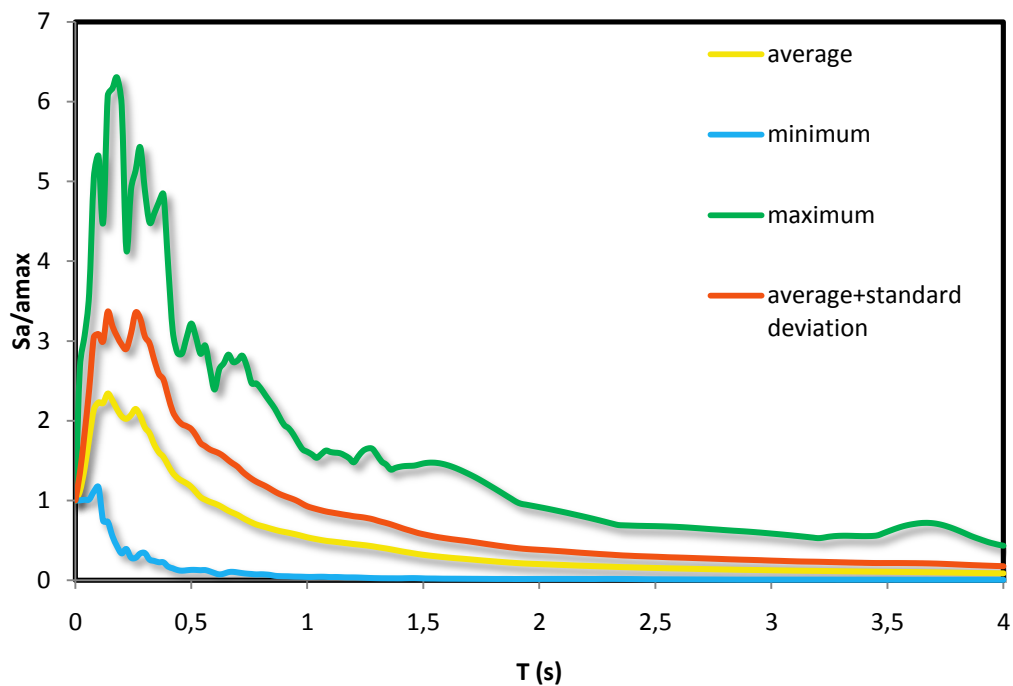
Σχήμα 2.9: Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε βράχο από καταγραφές με $PGA > 0.5g$ και το μέσο ελαστικό φάσμα απόκρισης που προκύπτει (παχιά κόκκινη γραμμή).



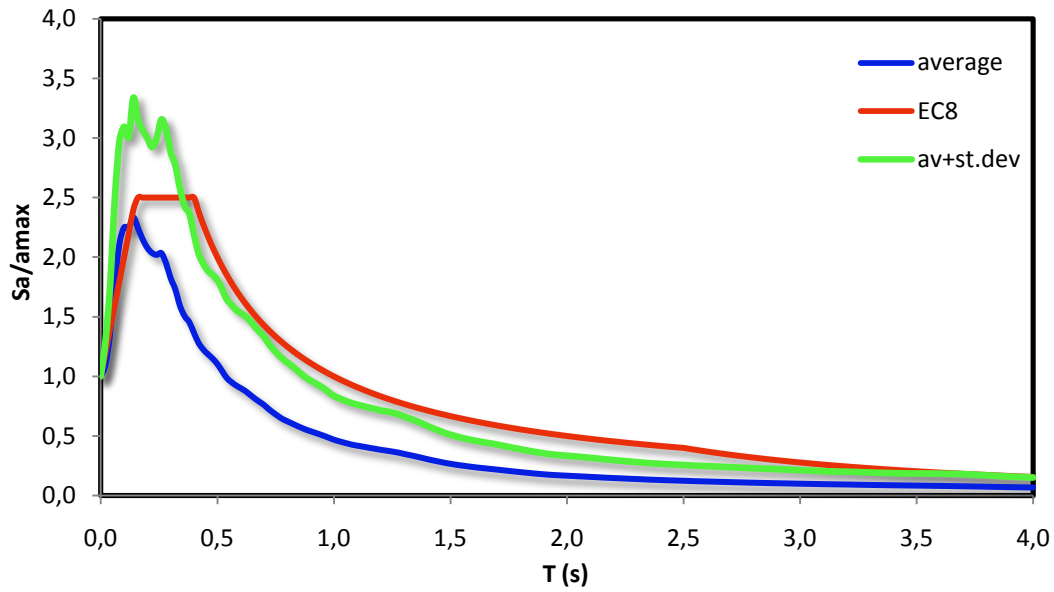
Σχήμα 2.10: Ελαστικά φάσματα απόκρισης σε βράχο από 34 καταγραφές μεγέθους $4.5 < M < 6$ και το μέσο ελαστικό φάσμα απόκρισης που προκύπτει (παχιά μαύρη γραμμή).



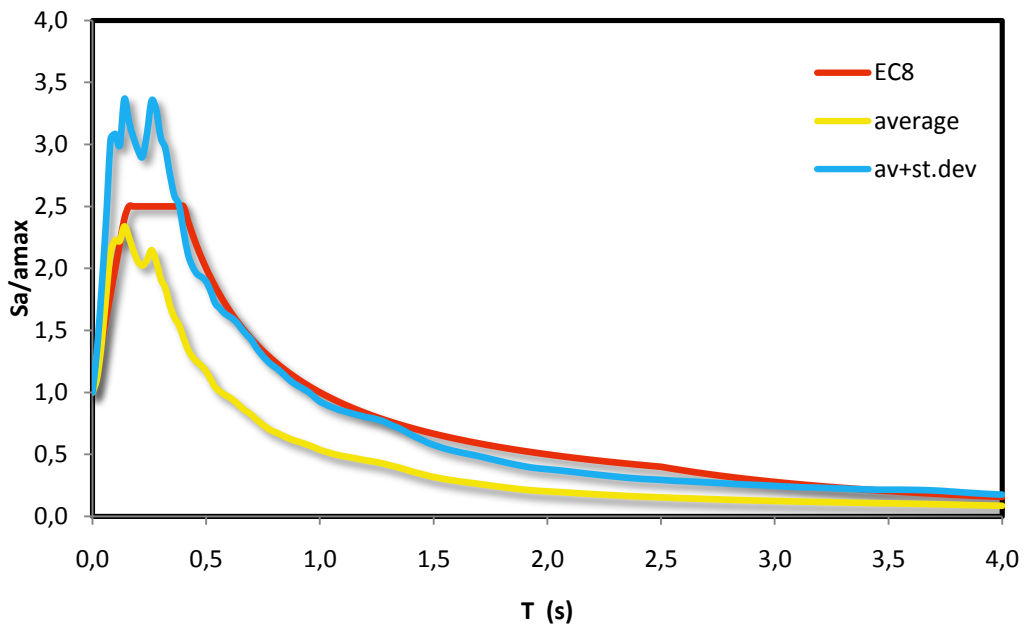
Σχήμα 2.11: μέσο, μέγιστο, ελάχιστο και μέσο προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση ελαστικό φάσμα σε βράχο για μέγεθος σεισμού $M > 4.5$.



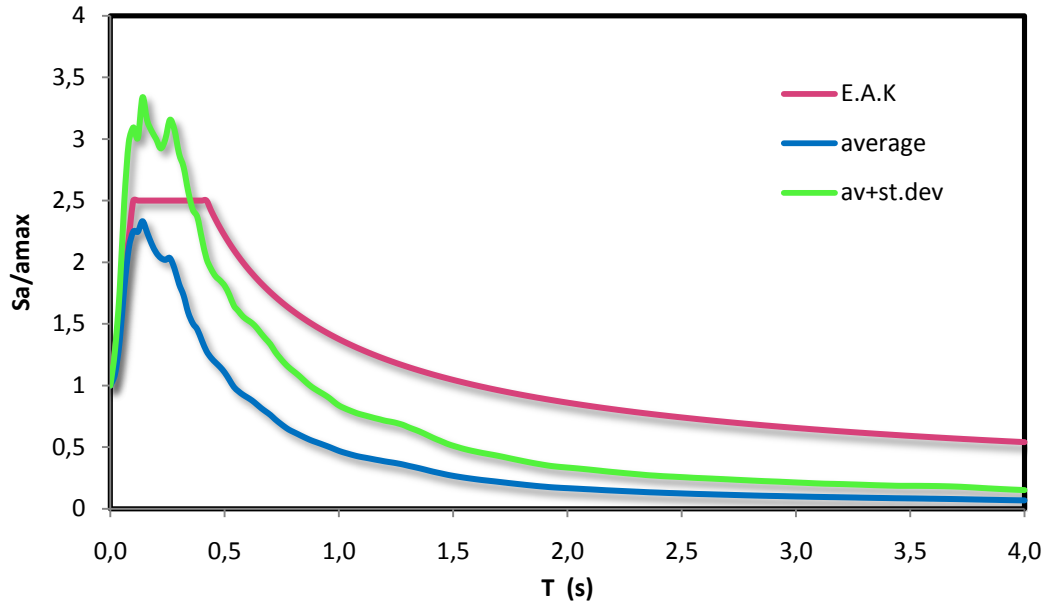
Σχήμα 2.12: μέσο, μέγιστο, ελάχιστο και μέσο προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση ελαστικό φάσμα σε βράχο για μέγεθος σεισμού $M > 6$.



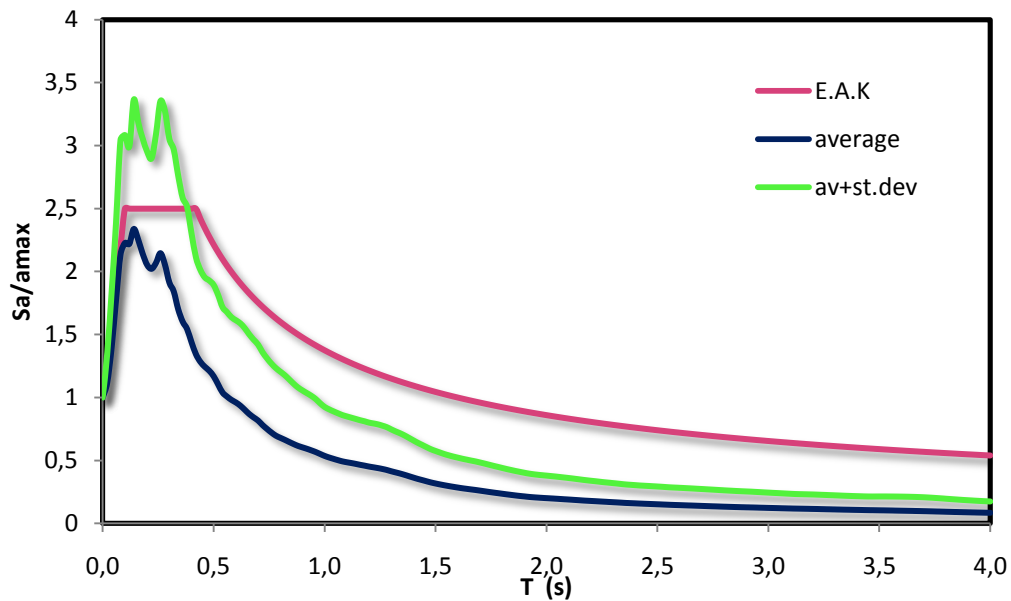
Σχήμα 2.13: Σύγκριση μέσου και μέσου προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση ελαστικού φάσματος σε βράχο με το φάσμα του EC8 για έδαφος A ($M > 4.5$).



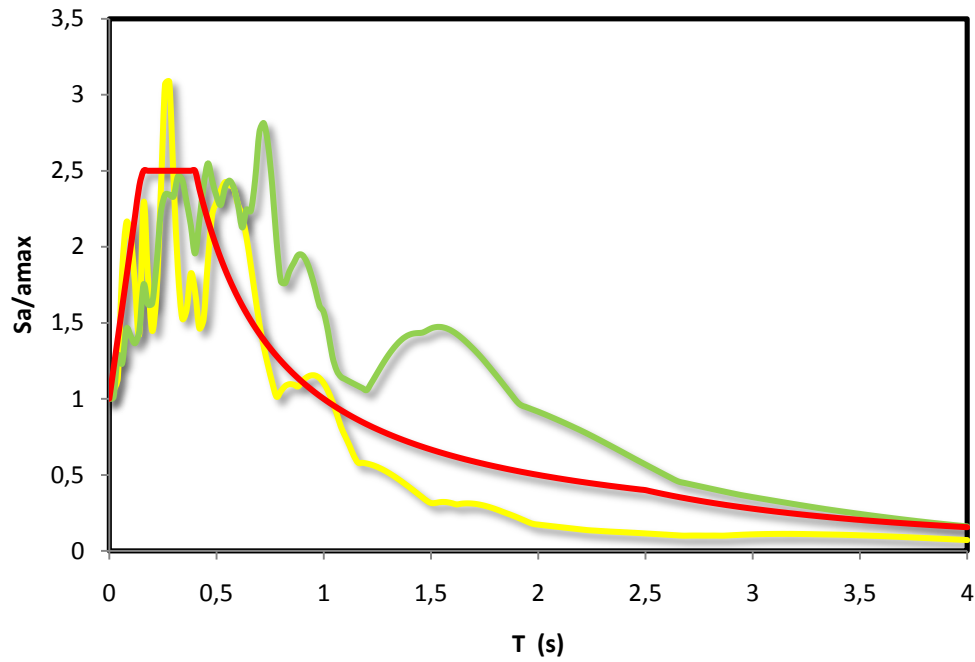
Σχήμα 2.14: Σύγκριση μέσου και μέσου προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση ελαστικού φάσματος σε βράχο με το φάσμα του EC8 για έδαφος A ($M > 6$).



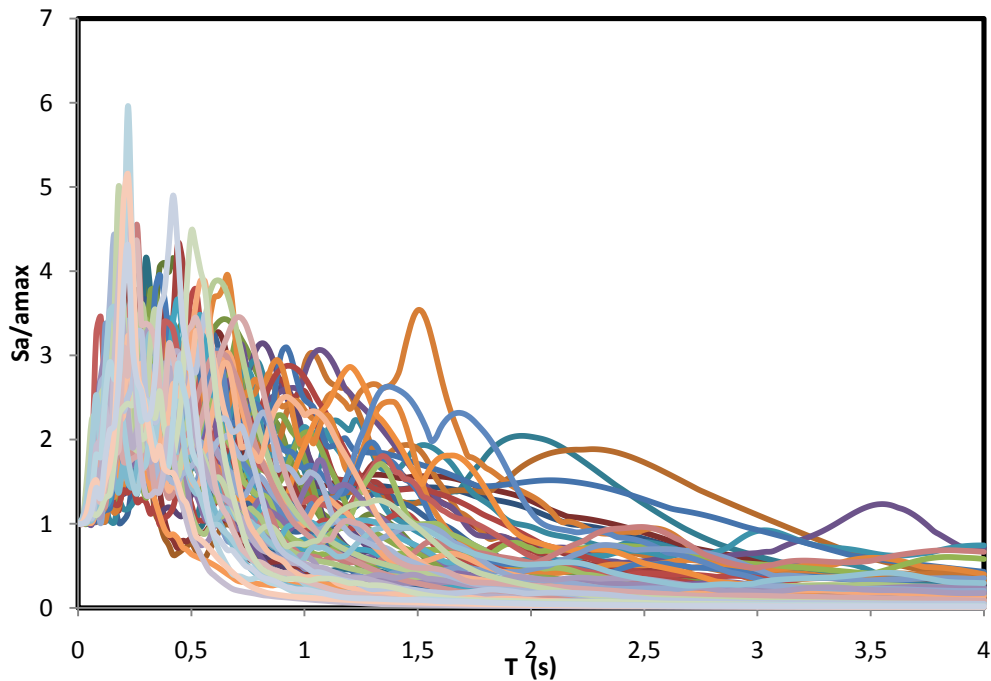
Σχήμα 2.15: Σύγκριση μέσου και μέσου προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση ελαστικού φάσματος σε βράχο με το φάσμα του E.A.K. για έδαφος A ($M > 4.5$).



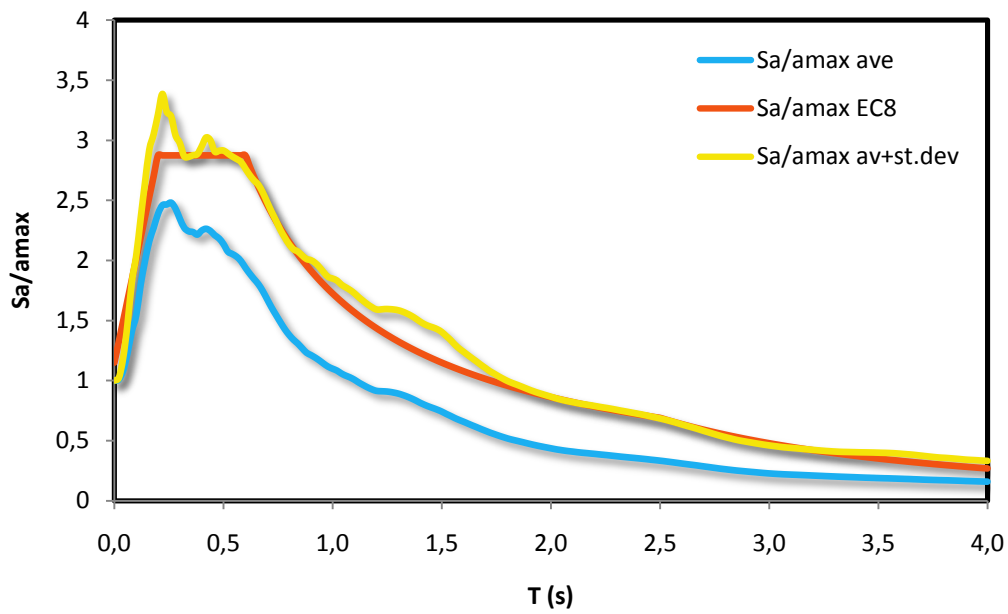
Σχήμα 2.16: Σύγκριση μέσου και μέσου προσαυξημένο κατά την τυπική απόκλιση ελαστικού φάσματος σε βράχο με το φάσμα του E.A.K. για έδαφος A ($M > 6$).



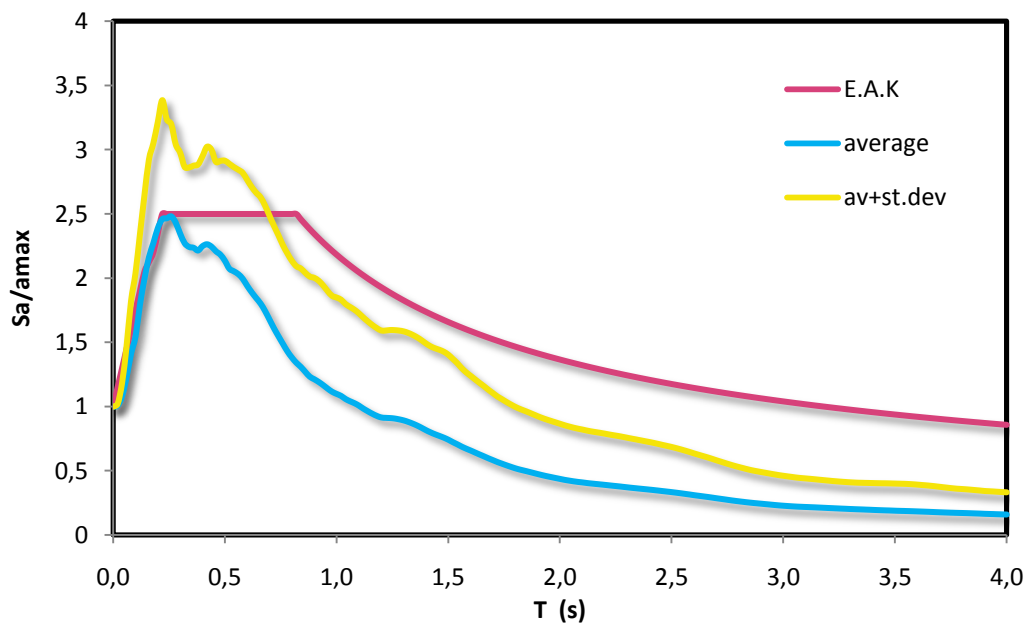
Σχήμα 2.17: Σύγκριση μεμονωμένων σεισμικών καταγραφών σε βράχο με το φάσμα σχεδιασμού του EC8. Παρατηρούμε ότι το φάσμα σχεδιασμού δεν περιβάλλει τις καταγραφές ακόμα και για περιόδους μεγαλύτερες από 0.5 s.



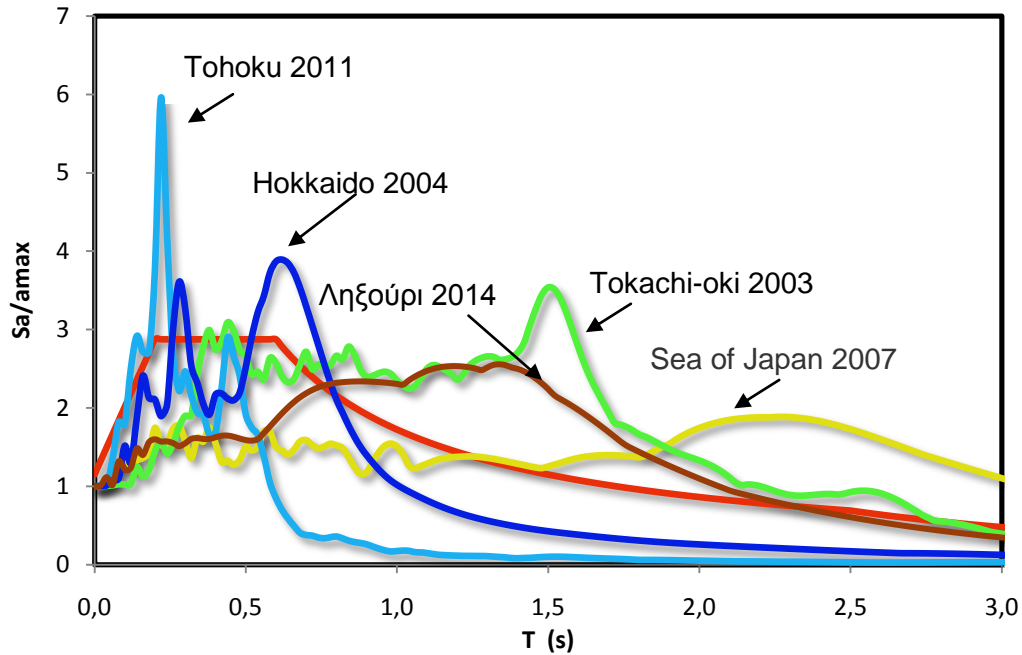
Σχήμα 2.18: Κανονικοποιημένα ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση φάσματα σε έδαφος κατηγορίας C κατά EC8.



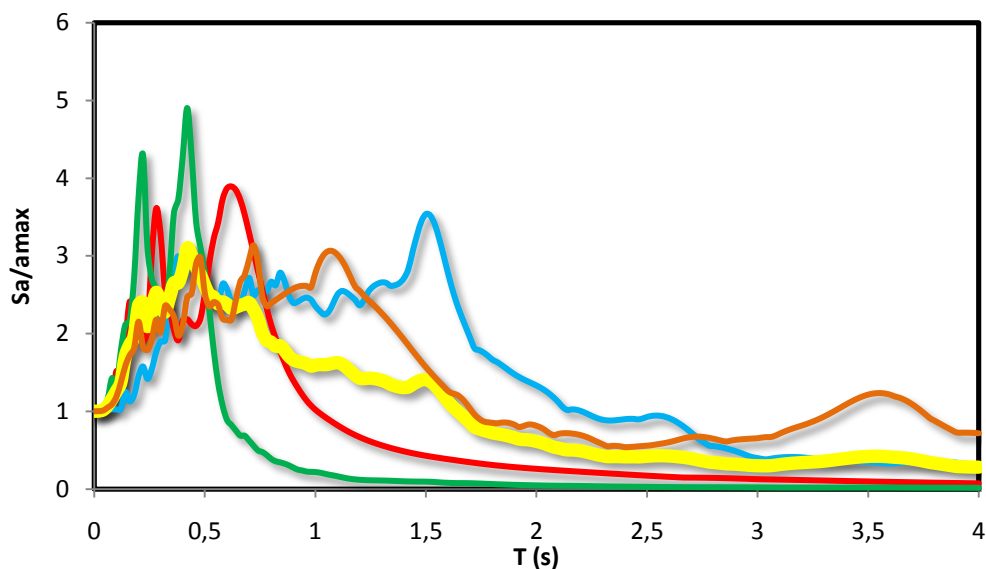
Σχήμα 2.19. Σύγκριση μέσου και μέσου συν την τυπική απόκλιση φάσματος με το φάσμα του EC8 για έδαφος C.



Σχήμα 2.20: Σύγκριση μέσου και μέσου συν την τυπική απόκλιση φάσματος με το φάσμα του E.A.K για έδαφος C.



Σχήμα 2.21: Σύγκριση ελαστικών φασμάτων από διάφορες καταγραφές με το φάσμα του EC8 για έδαφος C. Παρατηρούμε ότι το φάσμα που προτείνει ο Ευρωκώδικας δεν καλύπτει επαρκώς όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις.



Σχήμα 2.22: Φάσματα απόκρισης τριών καταγραφών σε έδαφος C και το μέσο φάσμα αυτών (παχιά κίτρινη γραμμή). Παρατηρούμε ότι οι τρεις καταγραφές εμφανίζουν μέγιστο σε διαφορετικές περιόδους και ως αποτέλεσμα η μέση τιμή τους δίνει ένα πιο ομαλοποιημένο φάσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εδαφική ενίσχυση σεισμικού κραδασμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εδαφική ενίσχυση σεισμικού κραδασμού

3.1.Εισαγωγή

Οι σεισμοί γεννιούνται σε γεωτεκτονικά ρήγματα, όταν οι διατμητικές τάσεις που "συσσωρεύονται" λόγω της συνεχούς βραδείας μικρομετατόπισης του φλοιού της γής ξεπερνούν τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας του ρήγματος. Η επακολουθούσα "διάρρηξη" (ή ολίσθηση) εκπέμπει στον περιβάλλοντα βράχο κύματα χώρου P (διαστολικά) και S (διατμητικά). Όταν τα κύματα αυτά φτάσουν στην επιφάνεια του εδάφους, ενδέχεται να δημιουργήσουν και *επιφανειακά κύματα* (Rayleigh και Love). Τελικώς, όλα αυτά τα κύματα "προσπίπτουν" (όχι ταυτόχρονα, βεβαίως) στη συγκεκριμένη θέση του έργου. Η πορεία των σεισμικών κυμάτων από την πηγή έως την επιφάνεια φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Πρωταρχική σημασία στον καθορισμό της πιθανής σεισμικής διέγερσης σε μια περιοχή έχει η πρόβλεψη της επιρροής της εδαφικής απόθεσης στην ένταση και στο φασματικό περιεχόμενο του κραδασμού. Πράγματι, οι συχνά παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις στην έκταση και στην ένταση των σεισμικών βλαβών αποδίδονται σε διαφορές στις "τοπικές" εδαφικές συνθήκες. Στην ουσία το εδαφικό στρώμα παίζει κατά κάποιον τρόπο τον ρόλο ενός κυματικού "φίλτρου", ενισχύοντας εκείνες τις αρμονικές συνιστώσες του προσπίπτοντος κυματισμού των οποίων η συχνότητα πλησιάζει τις δικές του ιδιοσυχνότητες (ή ταυτίζεται με αυτές : συντονισμός). Ο όρος "*εδαφική ενίσχυση*" χρησιμοποιείται συχνά για να περιγραφεί τέτοια φαινόμενα συντονισμού. Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι οι συνιστώσες που ενισχύονται είναι συνήθως οι χαμηλόσυχνες αρμονικές, ιδίως όταν αυτές επαναλαμβάνονται για κάμποσους κύκλους, ενώ αντίθετα οι υψίσυχνες συνιστώσες συχνά αποδυναμώνονται μέσα από μαλακούς ή/και βαθείς εδαφικούς σχηματισμούς. Σήμερα είναι πια γενικώς αποδεκτό ότι σε κραδασμούς μικρής και μεσαίας έντασης που παράγονται από μακρινούς σεισμούς και με εδαφικές στρωματογραφίες έντονων αντιθέσεων ως προς την δυστημσία των επάλληλων στρώσεων, τα φαινόμενα της εδαφικής τροποποίησης είναι έντονα και μπορούν να προβλεφθούν ικανοποιητικά με τις διαθέσιμες θεωρητικές μεθόδους. Η πρόβλεψη είναι δυσχερέστατη στις περιπτώσεις ισχύρου διεγείροντος κραδασμού, περίπλοκης συμπεριφοράς των υλικών και ασαφούς κάτω συνόρου του εδαφικού σχηματισμού. Για την ανάλυση της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στα χαρακτηριστικά του σεισμικού κραδασμού η συνήθης παραδοχή είναι ότι τα σεισμικά κύματα διαδίδονται μόνο κατακορύφως-παραδοχή η οποία είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα χάρη στον νόμο του Snell. Παράλληλα, η ανάλυση προϋποθέτει ομοιομορφία των εδαφικών στρώσεων ως προς το πάχος και τις ιδιότητες στην οριζόντια έννοια έτσι ώστε η ανάλυση να γίνεται σε μια μόνο διάσταση, την

κατακόρυφη. Οι εδαφικές στρώσεις είναι οριζόντιες και στην επιφάνεια έχουμε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.

Πολλές φορές, βέβαια, η σημασία της εδαφικής ενίσχυσης επισκιάζεται από τις διαφορές στον μηχανισμό της σεισμικής διάρρηξης, στον προσανατολισμό της περιοχής ως προς το ρήγμα, στη γεωλογία της σεισμογενούς ζώνης και της "κυματικής διαδρομής", στο ανάγλυφο της τοπογραφίας και του γεωλογικού υποβάθρου της συγκεκριμένης περιοχής.

3.2 Χαρακτηριστικά παραδείγματα εδαφικής ενίσχυσης

3.2.1 Σεισμός Michoacan 1985

Ο σεισμός Michoacan στο Μεξικό το 1985 ($M = 8.1$) γεννήθηκε στο μεγάλο ρήγμα το οποίο σχηματίζει η καταδυόμενη υπό τις πλάκες της Βόρειας Αμερικής λιθοσφαιρική πλάκα του Ειρηνικού. Η σεισμική αυτή διάρρηξη εξέπεμψε κύματα προς όλες τις κατευθύνσεις, αλλά σοβαρές ζημιές προκάλεσε μόνο στην Πόλη του Μεξικού, 400 χιλιόμετρα μακριά από το επίκεντρο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, η Πόλη του Μεξικού αποτελείται από τρεις γεωλογικές ζώνες: την λοφώδη ζώνη (I) όπου παρατηρείται επιφανειακή εκδήλωση βράχου, την λιμνιαία ζώνη (III) με μαλακές αργιλικές αποθέσεις υπό τον υδροφόρο ορίζοντα και την ενδιάμεση μεταβατική ζώνη (II). Το πάχος των μαλακών εδαφικών στρώσεων στην λιμνιαία ζώνη κυμαίνεται από 20 - 100 περίπου μέτρα, ενώ ο μητρικός βράχος είναι αρκετά βαθύτερα. Παρατηρήθηκαν εξαιρετικά μεγάλες ζημιές σε κτίρια με ιδιοπερίοδο $T = 1.5 - 2.0$ s στην Ζώνη III όπου βρισκόταν μια στρώση πολύ μαλακής ιλυώδους αργίλου (γνωστή και ως άργιλος της Πόλης του Μεξικού) πάχους 40-60 μέτρων με $V_s = 80$ m/s, $PI > 200$ και $w > 400\%$. Η άργιλος αυτή λόγω του τεράστιου δείκτη πλαστικότητας της, παρουσιάζει σχεδόν ελαστική συμπεριφορά ακόμη και για μεγάλα πλάτη παραμόρφωσης ($\gamma = 10^{-3}$), με αποτέλεσμα να μεγεθύνει σημαντικά τον σεισμικό κραδασμό. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα επιταχυνσιογραφήματα και τα ελαστικά φάσματα αποκρίσεως στον σταθμό UNAM στο σκληρό έδαφος και στον σταθμό SCT στη ζώνη III με πάχος αργίλου 40 μέτρα. Η σύμπτωση της ιδιοπεριόδου της εδαφικής απόθεσης στη θέση SCT ($T_1 = 4H/V_s = 4 \cdot 40/80 = 2.0$ s) με την δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο πολυόροφων κατασκευών ($T = 2.0$ s) αποτέλεσε την κύρια αιτία των σημαντικότερων καταστροφών σε κτίρια αυτής της κατηγορίας. Κτίρια με μικρότερη ιδιοπερίοδο και ουρανοξύστες με μεγαλύτερη ιδιοπερίοδο συμπεριφέρθηκαν πολύ καλύτερα. Είναι εμφανές λοιπόν ότι ο ρόλος του εδάφους στην καταστροφικότητα του σεισμού στην Πόλη του Μεξικού ήταν καθοριστικός.

3.2.2 Σεισμός Loma Prieta 1989

Το 1989 συνέβη ο σεισμός της Loma Prieta ο οποίος ήταν μεγέθους $M = 6.9$. Η μέση ένταση στην πόλη του San Francisco 120 χιλιόμετρα μακριά από το επίκεντρο ήταν VII, η οποία φυσιολογικά δεν δικαιολογείται για το μέγεθος αυτό και την σχετικά μεγάλη επίκεντρη απόσταση. Οι περισσότερες ζημιές, μεταξύ αυτών και η θεαματική κατάρρευση του διώροφου αυτοκινητόδρομου - γέφυρας Cypress Viaduct, παρατηρήθηκαν στις παραλιακές περιοχές του κόλπου, όπου επικρατούν επιφανειακά πολύ χαλαροί σχηματισμοί αργιλοίλυδους "λάσπης" (San Francisco Bay Mud). Οι δύο διαθέσιμες καταγραφές στη θέση Yerba Buena Island (βράχος) και στη θέση Treasure Island (17 m ιλύς του κόλπου του San Francisco, επικαθόμενη σε 14 m αμμώδους στρώσης που υπέρκειται του βραχώδους υποβάθρου), αποδεικνύουν την αιτία των αυξημένων καταστροφών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, η PGA αυξήθηκε κατά 2.5 φορές ενώ η PSA για $T=0.7$ s αυξήθηκε σχεδόν κατά 3.5 φορές. Το τμήμα της γέφυρας Cypress που κατέρρευσε βρίσκεται ακριβώς στη ζώνη της μαλακής- χαλαρής ιλύος. Οφείλουμε βέβαια να σημειώσουμε ότι στο μέγεθος της καταστροφής συνέβαλε και η αδυναμία του στατικού συστήματος της διώροφης γέφυρας. Παρόλα αυτά, αποδεικνύεται ότι το έδαφος ήταν αυτό που καθόρισε πού και σε ποιές κατασκευές σημειώθηκαν ζημιές.

3.3 Θεωρητική ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1, με την διάρρηξη ενός ρήγματος παράγονται κύματα χώρου που διαδίδονται σε όλες τις κατευθύνσεις και ανακλώνται και διαθλώνται στις διεπιφάνειες που συναντούν. Για την μονοδιάστατη ανάλυση της εδαφικής απόκρισης υποθέτουμε ότι όλα τα στρώματα είναι οριζόντια και εκτείνονται άπειρα στην οριζόντια διεύθυνση και η απόκριση του εδάφους οφείλεται στην κατακόρυφη διάδοση κυμάτων SH. Η κίνηση στην επιφάνεια του εδάφους ορίζεται ως *κίνηση ελεύθερης επιφάνειας (free surface motion)*. Η κίνηση στη βάση του εδαφικού σχηματισμού περιγράφεται ως *κίνηση βραχώδους υποβάθρου (bedrock motion)*. Η κίνηση στην περιοχή όπου ο βράχος είναι εκτεθειμένος στην επιφάνεια ονομάζεται *κίνηση επιφανειακής έξαρσης βραχώδους υποβάθρου (rock outcropping motion)*. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 3.5.

Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στο Σχήμα 3.6 και έχει ως εξής: η γνωστή χρονοϊστορία στο βραχώδες υπόβαθρο ανάγεται σε σειρά Fourier FFT. Στη συνέχεια, κάθε όρος της σειράς Fourier πολλαπλασιάζεται με την *συνάρτηση μεταφοράς* ώστε να προκύψει η σειρά Fourier της χρονοϊστορίας στην επιφάνεια και χρησιμοποιώντας αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier παράγεται το επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια. Δηλαδή, η συνάρτηση μεταφοράς δείχνει κατά πόσο κάθε συχνότητα της κίνησης στο βραχώδες υπόβαθρο ενισχύεται ή ελαττώνεται από την εδαφική απόθεση. Παρακάτω περιγράφεται η εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς για διάφορες γεωτεχνικές συνθήκες.

3.3.1 Ομοιογενές έδαφος χωρίς απόσβεση σε άκαμπτο βράχο

Θεωρούμε ομοιογενές στρώμα ισότροπου, γραμμικώς ελαστικού εδάφους υπερκείμενο σε άκαμπτο βράχο (Σχήμα 3.7). Η οριζόντια αρμονική κίνηση στον βράχο παράγει διατμητικά κύματα που διαδίδονται κατακόρυφα στο έδαφος. Η οριζόντια μετακίνηση που προκύπτει εκφράζεται ως:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)} \quad (3.1)$$

Όπου ω η γωνιακή συχνότητα, k ο κυματικός αριθμός ($= \omega/V_s$) και A, B τα πλάτη των κυμάτων που διαδίδονται προς τα πάνω και προς τα κάτω αντίστοιχα. Στην ελεύθερη επιφάνεια ($z = 0$), η διατμητική τάση, και επομένως και η διατμητική παραμόρφωση είναι μηδέν, δηλαδή:

$$\tau(0, t) = G\gamma(0, t) = G \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

Αντικαθιστώντας την (3.1) στην (3.2) έχουμε:

$$Gki(Ae^{ik(0)} - Be^{-ik(0)})e^{i\omega t} = Gik(A - B)e^{i\omega t} = 0 \quad (3.3)$$

Που ικανοποιείται μόνο όταν $A = B$. Επομένως, η μετακίνηση θα είναι:

$$u(z, t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = 2A \cos kz e^{i\omega t} \quad (3.4)$$

Που περιγράφει στάσιμο κύμα πλάτους $2A \cos kz$. Η Εξ. (3.4) χρησιμοποιείται για να οριστεί η συνάρτηση μεταφοράς ως ο λόγος της μετακίνησης στην επιφάνεια προς την μετακίνηση στη βάση του εδαφικού σχηματισμού:

$$F_1(\omega) = \frac{u_{max}(0, t)}{u_{max}(H, t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kH e^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos kH} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)} \quad (3.5)$$

Η απόλυτη τιμή της συνάρτησης μεταφοράς είναι ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης:

$$|F_1(\omega)| = \frac{1}{\left| \cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) \right|} \quad (3.6)$$

Η Εξ. 3.6 υποδεικνύει ότι η μετακίνηση (και η επιτάχυνση) στην επιφάνεια είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση με την μετακίνηση στον βράχο. Όσο ο όρος $\omega H/V_s$ πλησιάζει τις τιμές $\pi/2 + n\pi$ ο παρονομαστής της (3.5) τείνει στο μηδέν και η ενίσχυση γίνεται άπειρη (Σχήμα 3.8). Συγκεκριμένα, η ενίσχυση μεγιστοποιείται όταν προέλθει συντονισμός της συχνότητας της διέγερσης με τις ιδιοσυχνότητες του εδαφικού στρώματος, οι οποίες είναι ίσες με:

$$f_n = (2n + 1) \frac{V_s}{4H}, \quad n \text{ ακέραιος} \quad (3.7)$$

Η πρώτη ιδιοσυχνότητα ($n = 0$) ονομάζεται *θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα* και η αντίστοιχη περίοδος είναι η *θεμελιώδης ιδιοπερίοδος* T_p .

3.3.2 Ομοιογενές έδαφος με απόσβεση σε άκαμπτο βράχο

Η προηγούμενη περίπτωση με έδαφος χωρίς απόσβεση προφανώς δεν είναι ρεαλιστική, καθώς όλα τα υλικά διαθέτουν απόσβεση. Η μονοδιάστατη εξίσωση κίνησης για κατακορύφως διαδιδόμενα κύματα διάτμησης είναι:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3.8)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του εδαφικού στρώματος. Υποθέτοντας ότι το έδαφος συμπεριφέρεται όπως το ανάλογο του Kelvin-Voigt η Εξ.3.1 γίνεται:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + n \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (3.9)$$

Η λύση της κυματικής εξίσωσης είναι:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^*z)} + Be^{i(\omega t - k^*z)} \quad (3.10)$$

όπου k^* ο μιγαδικός κυματικός αριθμός. Ομοίως με την παράγραφο 3.3.1 προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς:

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos k^*H} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_S^*}\right)} \quad (3.11)$$

Δηλαδή, όλες οι εξισώσεις και οι λύσεις που προκύψαν από την προηγούμενη ανάλυση ισχύουν ίδιες και अपαράλλαχτες με την προϋπόθεση όλα τα μέτρα G , D και E να έχουν αντικατασταθεί με τα αντίστοιχα μιγαδικά μέτρα. Το μιγαδικό μέτρο διάτμησης δίνεται από τη σχέση:

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (3.12)$$

όπου ξ είναι ο λόγος υστερητικής απόσβεσης ο οποίος είναι ανεξάρτητος της συχνότητας. Σύμφωνα με την Εξ. 3.11 η μιγαδική ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ορίζεται ως:

$$V_S^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} = \sqrt{\frac{G^*(1 + 2i\xi)}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{G}{\rho}}(1 + i\xi) = V_S(1 + i\xi) \quad (3.13)$$

για μικρές τιμές του ξ . Ο μιγαδικός κυματικός αριθμός επίσης για μικρό ξ είναι:

$$k^* = \frac{\omega}{V_S^*} = \frac{\omega}{V_S(1 + i\xi)} \approx \frac{\omega}{V_S}(1 - i\xi) = k(1 - i\xi) \quad (3.14)$$

Επομένως, η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos k(1 - i\xi)H} = \frac{1}{\cos[\omega H/Vs(1 + i\xi)]} \quad (3.15)$$

Με χρήση της ταυτότητας $|\cos(x + iy)| = \sqrt{\cos^2 x + \sinh^2 y}$, η συνάρτηση ενίσχυσης γράφεται:

$$|F_2(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + \sinh^2 \xi kH}} \quad (3.16)$$

και αφού $\sinh^2 y \approx y^2$, τελικώς:

$$|F_2(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + (\xi kH)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \omega H/Vs + \left[\xi \left(\frac{\omega H}{Vs}\right)\right]^2}} \quad (3.17)$$

Η συνάρτηση ενίσχυσης εμφανίζει τοπικό μέγιστο για $kH \approx \frac{\pi}{2} + n\pi$ αλλά αυτή τη φορά έχει πεπερασμένη τιμή λόγω της απόσβεσης. Ο συντελεστής ενίσχυσης για διάφορες τιμές του λόγου απόσβεσης ξ απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Παρατηρούμε πως για υψηλότερες συχνότητες και/ή μεγαλύτερη απόσβεση η ενίσχυση είναι πολύ μικρή.

3.3.3 Ομοιογενές έδαφος με απόσβεση εδραζόμενο σε ελαστικό βράχο

Οι προηγούμενες δύο θεωρήσεις έδωσαν την συνάρτηση μεταφοράς για εδάφη υπερκείμενα σε άκαμπτο βράχο. Εάν το βραχώδες υπόβαθρο είναι άκαμπτο, η κίνησή του θα είναι ανεπηρέαστη από την κίνηση του υπερκείμενου εδάφους. Όλα τα κύματα που προσπίπτουν στον βράχο θα ανακλώνται πλήρως πίσω στο έδαφος και ως εκ τούτου όλη η κυματική ενέργεια θα μείνει παγιδευμένη στο έδαφος.

Ωστόσο, αν ο βράχος είναι ελαστικός τα κύματα που ταξιδεύουν προς αυτόν θα ανακλώνται εν μέρει και άρα μέρος της ενέργειας θα μεταφέρεται στον βράχο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η ενίσχυση να είναι μικρότερη από την περίπτωση του άκαμπτου υποβάθρου.

Θεωρούμε εδαφικό στρώμα υπερκείμενο σε ελαστικό βράχο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Αν οι δείκτες s και r αναφέρονται στο έδαφος (soil) και στον βράχο (rock) αντίστοιχα, η μετακινήσεις λόγω κατακορύφως διαδιδόμενα κύματα S σε κάθε υλικό γράφεται:

$$u_s(z_s, t) = A_s e^{i(\omega t + k_s^* z_s)} + B_s e^{i(\omega t - k_s^* z_s)} \quad (3.18a)$$

$$u_r(z_r, t) = A_r e^{i(\omega t + k_r^* z_r)} + B_r e^{i(\omega t - k_r^* z_r)} \quad (3.18b)$$

Όπως και πριν, η συνοριακή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας επιβάλλει $A_s = B_s$, και το συμβιβαστό των μετακινήσεων και η συνέχεια των τάσεων στη διεπιφάνεια εδάφους – βράχου απαιτεί:

$$u_s(z_s = H) = u_r(z_r = 0) \quad (3.19)$$

$$\tau_s(z_s = H) = \tau_r(z_r = 0) \quad (3.20)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. 3.18 στην Εξ. 3.19 έχουμε:

$$A_s (e^{ik_s^* H} + e^{-ik_s^* H}) = A_r + B_r \quad (3.21)$$

Από την Εξ.3.20 και τον ορισμό της διατμητικής τάσης ($\tau = G \frac{\partial u}{\partial z}$):

$$A_s i G_s k_s^* (e^{ik_s^* H} + e^{-ik_s^* H}) = i G_r k_r^* (A_r - B_r) \quad (3.22)$$

$$\frac{G_s k_s^*}{G_r k_r^*} A_s (e^{ik_s^* H} + e^{-ik_s^* H}) = A_r - B_r \quad (3.23)$$

Όπου

$$\frac{G_s k_s^*}{G_r k_r^*} = \alpha_z^* \quad (3.24)$$

Ο μιγαδικός λόγος ακαμψιών. Λύνοντας το σύστημα των Εξ. 3.21 και 3.23 προκύπτουν:

$$A_r = \frac{1}{2}A_s [(1 + \alpha_z^*)e^{ik_s^*H} + (1 - \alpha_z^*)e^{-ik_s^*H}] \quad (3.25a)$$

$$B_r = \frac{1}{2}A_s [(1 + \alpha_z^*)e^{ik_s^*H} + (1 + \alpha_z^*)e^{-ik_s^*H}] \quad (3.25b)$$

Υποθέτουμε ότι ένα κατακόρυφο διατμητικό κύμα πλάτους A διαδίδεται προς τα πάνω μέσα στον βράχο. Αν δεν υπήρχε έδαφος, στην επιφανειακή έξαρση του βράχου θα παραγόταν κίνηση πλάτους $2A$. Με την παρουσία του εδάφους, το πλάτος της κίνησης στην ελεύθερη επιφάνεια θα είναι:

$$2A_s = \frac{4A}{(1 + \alpha_z^*)e^{ik_s^*H} + (1 - \alpha_z^*)e^{-ik_s^*H}} \quad (3.26)$$

Επομένως, ορίζουμε την συνάρτηση μεταφοράς ως τον λόγο του πλάτους στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους προς το πλάτος της επιφανειακής έξαρσης του βραχώδους υποβάθρου:

$$F_3(\omega) = \frac{2}{(1 + \alpha_z^*)e^{ik_s^*H} + (1 - \alpha_z^*)e^{-ik_s^*H}} \quad (3.27)$$

Και εφαρμόζοντας τον νόμο του Euler:

$$F_3(\omega) = \frac{1}{\cos k_s^*H + i\alpha_z^* \sin k_s^*H} = \frac{1}{\cos\left[\frac{\omega H}{V_{ss}^*}\right] + i\alpha_z^* \sin\left[\frac{\omega H}{V_{ss}^*}\right]} \quad (3.28)$$

Ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης μπορεί να εκφραστεί με συμπαγή μορφή μόνο για έδαφος χωρίς απόσβεση ως:

$$|F_3(\omega, \xi = 0)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 k_s H + \alpha_z^2 \sinh^2 k_s H}} \quad (3.29)$$

Η επίδραση της ακαμψίας του βραχώδους υποβάθρου, η οποία εκφράζεται μέσω του μιγαδικού λόγου ακαμψιών, στην εδαφική ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Παρατηρούμε πως η ελαστικότητα του βράχου έχει την ίδια επίδραση στην ενίσχυση με την απόσβεση του εδάφους, δηλαδή και στις δύο περιπτώσεις η αύξησή τους προκαλεί μείωση της ενίσχυσης.

3.3.4 Στρωματοποιημένο έδαφος με απόσβεση εδραζόμενο σε ελαστικό βράχο

Θεωρούμε εδαφική απόθεση η οποία αποτελείται από N οριζόντια στρώματα με το τελευταίο να είναι το βραχώδες υπόβαθρο (Σχήμα 3.12). Η λύση της κυματικής εξίσωσης είναι της μορφής:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^*z)} + Be^{i(\omega t - k^*z)} \quad (3.30)$$

Η διατμητική τάση ορίζεται:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{\partial u}{\partial z} = G(1 + 2i\xi) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.31)$$

Ορίζοντας ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων Z για κάθε στρώμα, η μετακίνηση στη κορυφή και στη βάση του στρώματος είναι:

$$u_m(Z_m = 0, t) = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad (3.32)$$

$$u_m(Z_m = h_m, t) = (Ae^{ik_m^*h_m} + B_m e^{-ik_m^*h_m})e^{i\omega t} \quad (3.33)$$

Μεταξύ δύο στρωμάτων m , $m+1$ θα πρέπει να ισχύει:

$$\begin{aligned} u_m(Z_m = h_m, t) &= u_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \\ \rightarrow A_{m+1} + B_{m+1} &= Ae^{ik_m^*h_m} + B_m e^{-ik_m^*h_m} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Οι διατμητικές τάσεις στην κορυφή και στη βάση του στρώματος m είναι:

$$\tau_m(Z_m = 0, t) = ik_m^* G_m^* (A_m - B_m) e^{i\omega t} \quad (3.35a)$$

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = ik_m^* G_m^* (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \quad (3.35b)$$

Εφόσον οι τάσεις πρέπει να είναι ίσες στα όρια μεταξύ των στρωμάτων:

$$\begin{aligned} \tau_m(Z_m = h_m, t) &= \tau_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \\ \rightarrow A_{m+1} - B_{m+1} &= \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Από τις Εξ. 3.34 και 3.36 προκύπτουν:

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + a_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - a_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (3.37a)$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - a_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + a_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (3.37b)$$

όπου a_m^* είναι ο μιγαδικός λόγος των ακαμψιών στη διεπιφάνεια των στρωμάτων m και $m+1$:

$$a_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \quad (3.38)$$

Στην επιφάνεια του εδάφους η διατμητική τάση πρέπει να ισούται με μηδέν, οπότε από την Εξ. 3.35a προκύπτει $A_1=B_1$. Εφαρμόζοντας την Εξ. 3.37 διαδοχικά για τα στρώματα 1 έως m , εκφράζουμε την ενίσχυση στο στρώμα m σε σχέση με αυτή στο στρώμα 1 ως:

$$A_m = a_m(\omega) A_1 \quad (3.39a)$$

$$B_m = b_m(\omega) B_1 \quad (3.39b)$$

Τελικώς, η συνάρτηση μεταφοράς που συνδέει την μετακίνηση στο στρώμα i με την μετακίνηση στο στρώμα j είναι:

$$F_{i,j}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \quad (3.40)$$

3.3.5 Ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση

Εφόσον γνωρίζουμε την μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών, η γραμμική προσέγγιση χρειάζεται να τροποποιηθεί ώστε να δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στη πραγματικότητα. Στο Σχήμα 3.13 βλέπουμε έναν βρόχο υστέρησης για ένα τυπικό έδαφος υποβαλλόμενο σε ανακυκλική φόρτιση. Ο βρόχος υστέρησης χαρακτηρίζεται από την κλίση του και το εύρος του. Η κλίση του μπορεί να περιγραφεί από το *εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης* G_{tan} (*tangent shear modulus*), που όμως μεταβάλλεται σε όλο τον κύκλο φόρτισης. Έτσι, ορίζεται το *εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης* G_{sec} (*secant shear modulus*) για να προσεγγίζει την ανακυκλική συμπεριφορά ως:

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (3.41)$$

όπου τ_c και γ_c το μέγεθος της διατμητικής τάσης και παραμόρφωσης, αντίστοιχα. Το εύρος του βρόχου περιγράφεται με τον *λόγος απόσβεσης* ξ (*damping ratio*):

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (3.42)$$

όπου W_D είναι η απορροφούμενη ενέργεια, η οποία ισούται με το εμβαδόν που περικλείεται στον βρόχο υστέρησης και W_S η ελαστική ενέργεια (Σχήμα 3.13). Οι παράμετροι G_{sec} και ξ αναφέρονται ως *ισοδύναμες γραμμικές εδαφικές ιδιότητες* (*equivalent linear material parameters*) και χρησιμοποιούνται στην ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση της εδαφικής κίνησης. Στο Σχήμα 3.15 βλέπουμε την *σπονδυλωτή καμπύλη ή καμπύλη μονοτονικής φόρτισης* (*backbone curve*), η οποία ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος των κορυφών των βρόχων υστέρησης και καμπύλη απομείωσης του λόγου G/G_{max} σε σχέση με το επίπεδο της διατμητικής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης μειώνεται όσο αυξάνεται η διατμητική παραμόρφωση. Αντίθετα, όπως θα φανεί παρακάτω, ο λόγος απόσβεσης ξ αυξάνει με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης.

Για την αριθμητική ανάλυση μιας πλήρους χρονοϊστορίας φόρτισης με το ισοδύναμο γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία, με την οποία οι τιμές του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης υπολογίζονται και διορθώνονται σταδιακά με διαδοχικά επαναληπτικά βήματα. Το Σχήμα 3.15 δείχνει την διαδικασία, η οποία ξεκινά με την εκτίμηση των τιμών των $G^{(1)}$ και $\xi^{(1)}$, που αποτελούν τις αρχικές τιμές των G και ξ για πολύ μικρές παραμορφώσεις, καθώς και των τιμών της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης γ_{max} και της ενεργού διατμητικής παραμόρφωσης γ_{eff} . Συνοπτικά, η επαναληπτική διαδικασία για την ισοδύναμη γραμμική προσέγγιση σε κάθε εδαφική στρώση ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Για κάθε στρώση j εκτιμώνται οι αρχικές τιμές των G_j και ξ_j που αντιστοιχούν σε πολύ μικρές παραμορφώσεις.
2. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εδαφικής απόκρισης, συμπεριλαμβανομένης και της χρονοϊστορίας της διατμητικής παραμόρφωσης για κάθε στρώση.
3. Για κάθε στρώση j υπολογίζεται η ενεργός (δρῶσα) διατμητική παραμόρφωση γ_{eff} από τη μέγιστη διατμητική παραμόρφωση της χρονοϊστορίας που υπολογίστηκε γ_{max} :

$$\gamma_{eff,j}^{(i)} = R_\gamma \cdot \gamma_{max,j}^{(i)} \quad (3.43)$$

όπου ο δείκτης (i) αναφέρεται στον αριθμό της επανάληψης και R_γ είναι ο λόγος της ενεργού διατμητικής παραμόρφωσης προς την μέγιστη διατμητική παραμόρφωση, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού M και μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$R_\gamma = \frac{M - 1}{10} \quad (3.44)$$

Στις αναλύσεις που ακολουθούν θεωρούμε $R_\gamma = 0.65$

4. Άπο την ενεργό τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης υπολογίζονται από τα διαγράμματα $G - \gamma$ και $\xi - \gamma$ νέες τιμές $G^{(j+1)}$ και $\xi^{(j+1)}$ για τον επόμενο επαναληπτικό κύκλο.
5. Τα βήματα 2 ως 4 επαναλαμβάνονται μέχρις ότου η διαφορά των τιμών G και ξ μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων, και για όλα τα στρώματα, να είναι επαρκώς μικρή. Συνήθως επιτυγχάνονται διαφορές μικρότερες του 5-10% μετά από τρεις ως πέντε επαναληπτικούς κύκλους.

Στην εφαρμογή του μοντέλου της ισοδύναμης γραμμικής εδαφικής απόκρισης είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι στην πραγματικότητα η ανάλυση είναι γραμμική ελαστική. Οι εδαφικές ιδιότητες υπολογίζονται μεν ώστε να είναι συμβατές προς τις παραμορφώσεις, παραμένουν όμως σταθερές σε κάθε βήμα της σεισμικής φόρτισης, ανεξαρτήτως του επιπέδου παραμόρφωσης σε ένα χρονικό κλάσμα της ιστορίας φόρτισης. Οι γνωστότεροι κωδικές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης είναι το SHAKE (Schnabel et al, 1972) και το EERA (Bardet et al, 2000). Παρεμφερείς δυνατότητες προσφέρει και το CYBERQUAKE.

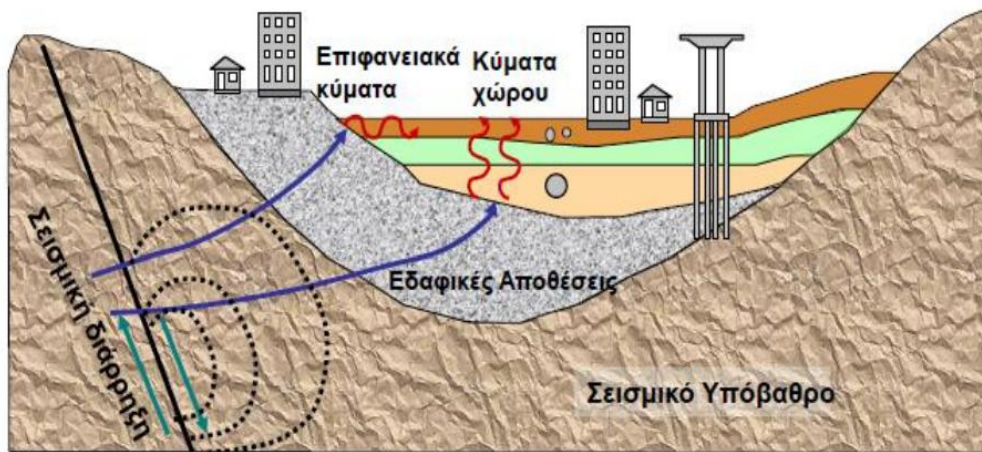
3.4 Περιγραφή ανάλυσης

Στόχος των αναλύσεων που πραγματοποιούνται στα επόμενα Κεφάλαια είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο η εδαφική ενίσχυση του σεισμού μπορεί να προβλεπτεί ικανοποιητικά με ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση.

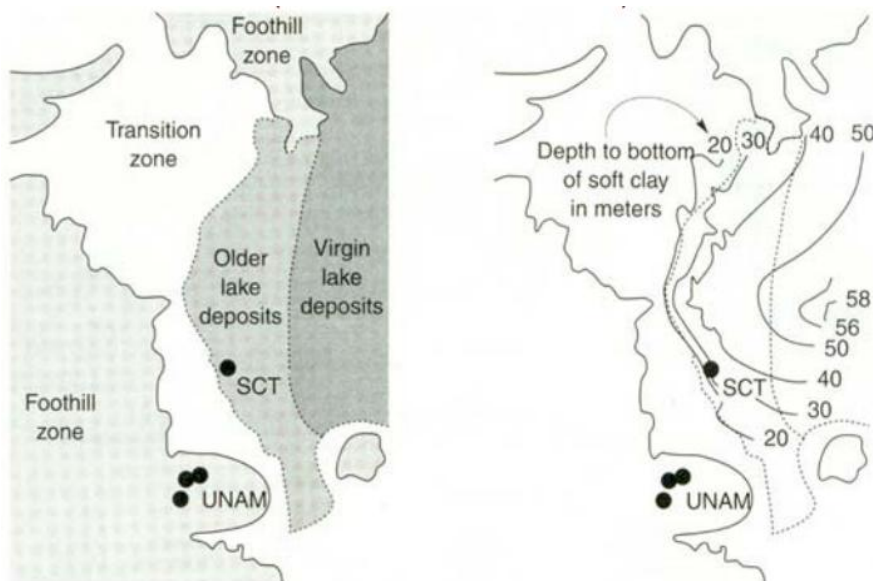
Για τις αναλύσεις χρησιμοποιούνται πραγματικές καταγραφές από διάφορους σταθμούς στην Ιαπωνία, η οποία διακρίνεται για την έντονη και ισχυρή σεισμική δραστηριότητα που παρουσιάζει (βλέπε Παραρτήματα Α και Β). Οι διάφορες σεισμικές καταγραφές επιλέχθηκαν από τρεις σταθμούς την Ιαπωνίας: τον KSRH10, τον TKCH07 και τον IBRH11. Αναλυτικότερες πληροφορίες για τους σταθμούς δίνονται στα παρακάτω Κεφάλαια. Το εδαφικό προφίλ των σταθμών αποτελείται από μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς στα πρώτα μέτρα (χονδροειδώς έδαφος κατηγορίας C κατά τον Ευρωκώδικα 8), οι οποίοι εδράζονται σε σκληρούς βράχους, έτσι ώστε το φαινόμενο της εδαφικής ενίσχυσης να είναι εντονότερο (όπως διαπιστώθηκε και στη παράγραφο 3.3). Όλες οι πληροφορίες για τους σταθμούς προέρχονται από το National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED). Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για τις δύο οριζόντιες συνιστώσες κάθε σεισμού NS και EW με το πρόγραμμα SHAKE. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο κώδικας SHAKE εκτελεί ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση. Οι σεισμοί που επιλέχθηκαν είναι μεγέθους $M > 5.5$. Σκοπός των αναλύσεων αυτών είναι:

- γνωρίζοντας το επιταχυνσιογράφημα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού να προβλέψουμε το επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια και να παράγουμε το αντίστοιχο φάσμα
- να συγκρίνουμε το φάσμα της επιφάνειας που μας έδωσε η ανάλυση με το πραγματικό φάσμα.
- να βρούμε την κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και των διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος
- να προσδιορίσουμε την συνάρτηση μεταφοράς
- να επιβεβαιώσουμε ή να απορρίψουμε τα συμπεράσματα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.
- πιθανώς να προβούμε σε νέα συμπεράσματα όσον αφορά την ελαστική ανάλυση και τις παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται.

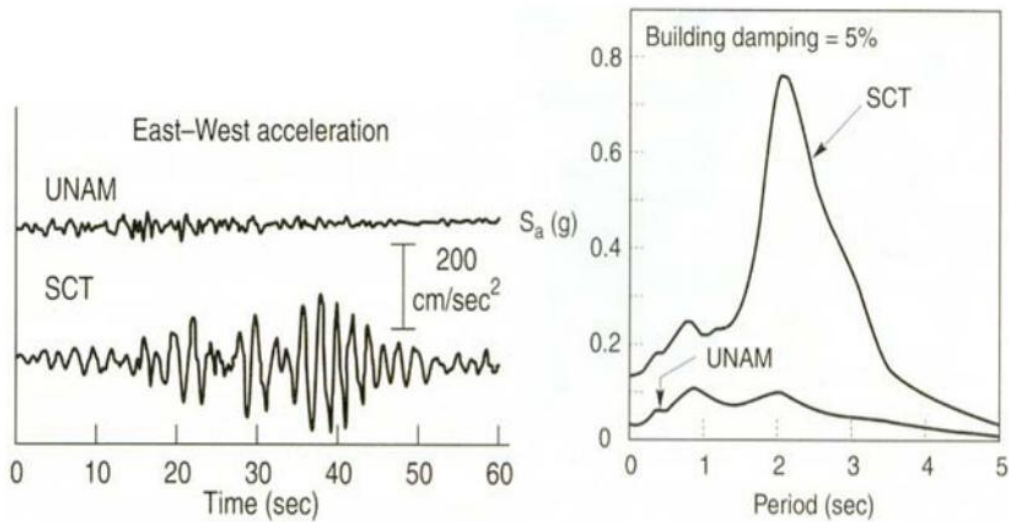
Σχήματα (3)



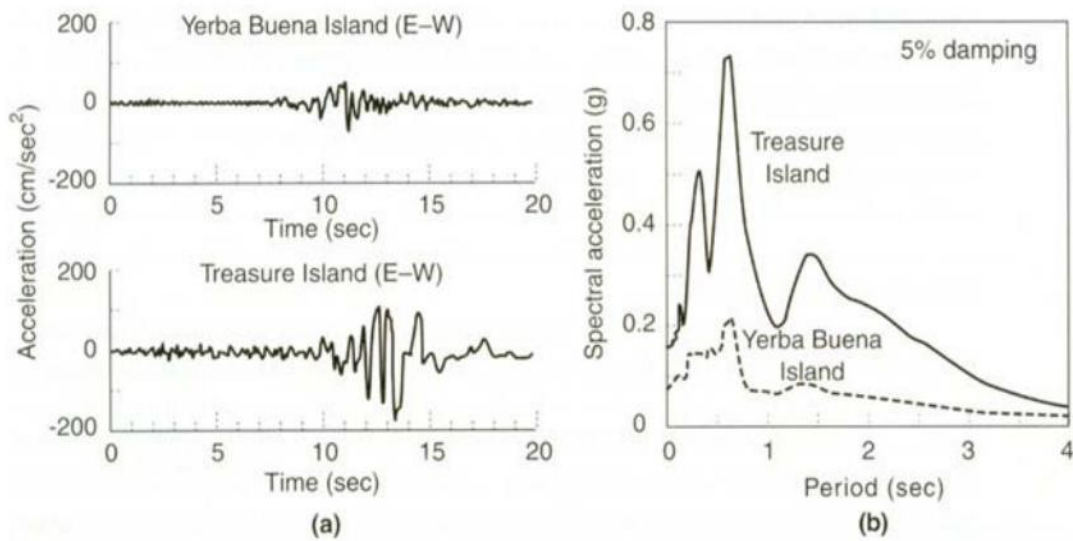
Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της διαδρομής των διατμητικών κυμάτων από τη διάρρηξη (πηγή) μέχρι την επιφάνεια. Κοντά στην επιφάνεια τα διατμητικά κύματα είναι σχεδόν κατακόρυφα (Πιτιλάκης 2010)



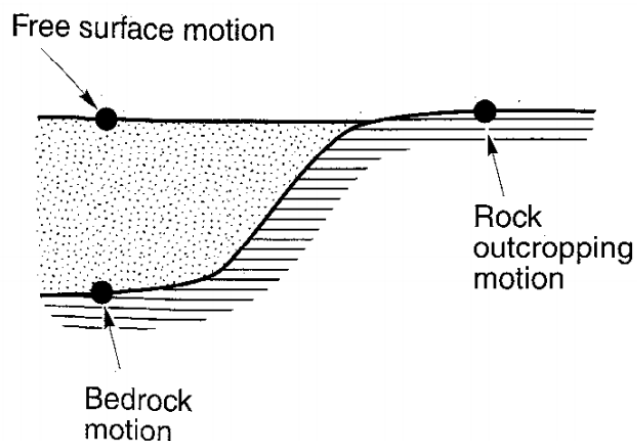
Σχήμα 3.2: Αριστερά: Τοποθεσία σταθμών στις ζώνες Foothill (I), Transition (II) και Lake (III)
 Δεξιά: Πάχος αργίλου της Πόλης του Μεξικού (Stone et al., 1987)



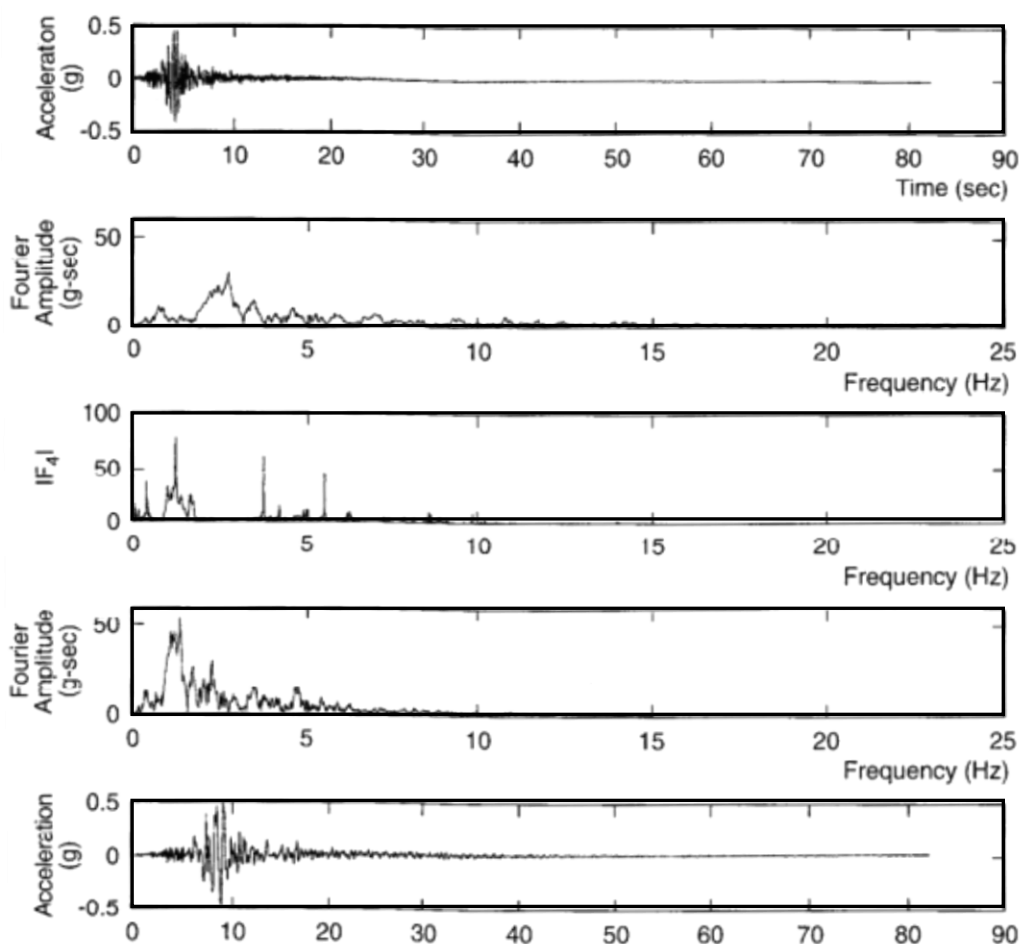
Σχήμα 3.3: Αριστερά: Επιταχυνσιογραφήματα που καταγράφηκαν στους σταθμούς UNAM και SCT (Stone et al., 1987) Δεξιά: ελαστικό φάσμα απόκρισης των καταγραφών στους σταθμούς UNAM και SCT (Romo and Seed, 1986)



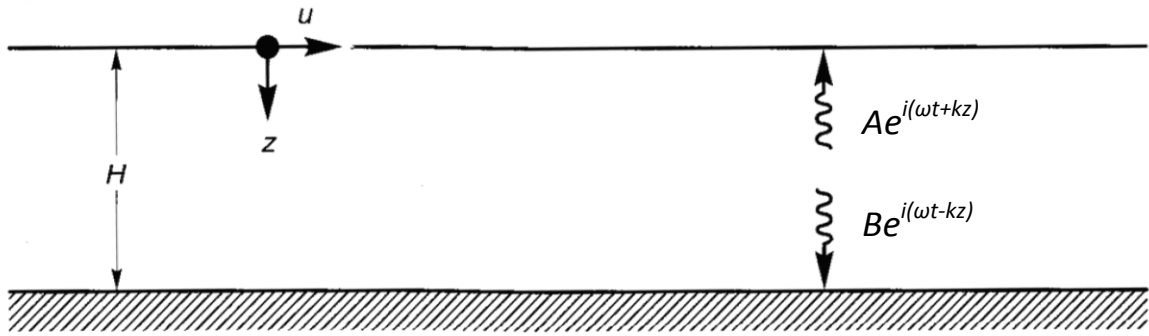
Σχήμα 3.4: Καταγραφές Treasure Island και Yerba Buena Island στην επιφάνεια στο σεισμό Loma Prieta 1989 (αριστερά) και τα ελαστικά φάσματα απόκρισής τους (δεξιά) (Seed et al., 1990).



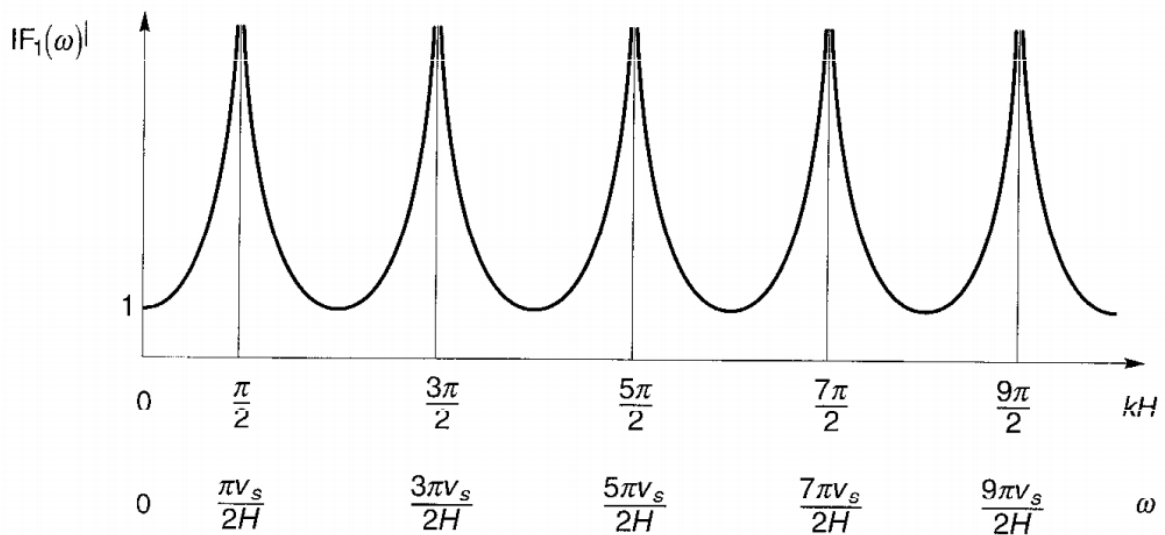
Σχήμα 3.5: Ορολογία που χρησιμοποιείται στην ανάλυση της απόκρισης



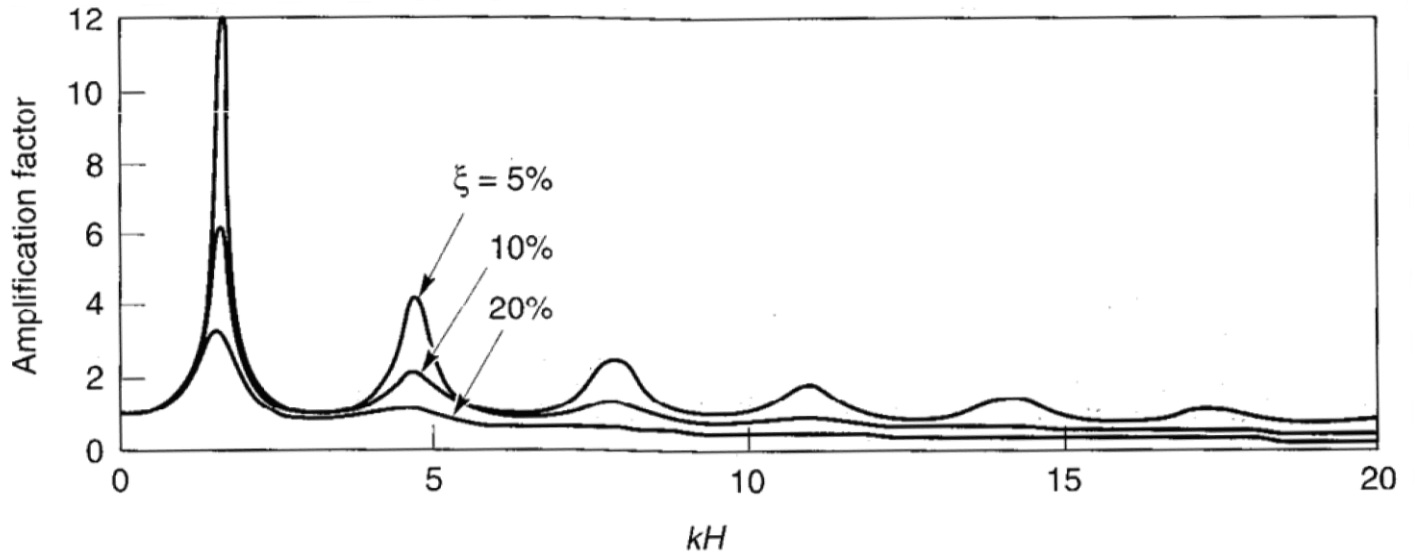
Σχήμα 3.6: Παράδειγμα εύρεσης επιταχυνσιογραφήματος στην επιφάνεια του εδάφους. Η δεδομένη την καταγραφή στο βραχώδες υπόβαθρο μετασχηματίζεται σε σειρά Fourier η οποία πολλαπλασιαζόμενη με την συνάρτηση μεταφοράς δίνει τη σειρά Fourier της κίνησης στην επιφάνεια. Με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier προκύπτει η καταγραφή στην επιφάνεια.



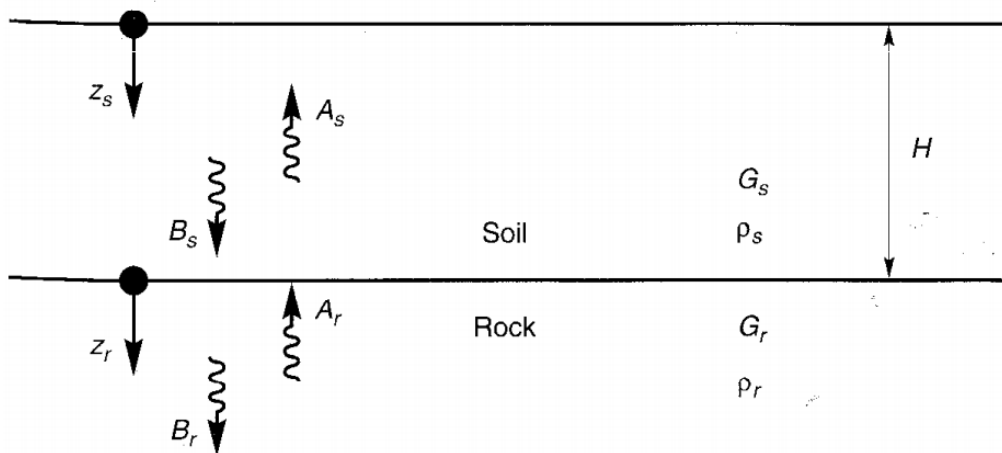
Σχήμα 3.7: Γραμμικώς ελαστικό έδαφος πάχους H υπερκείμενο σε άκαμπτο βράχο.



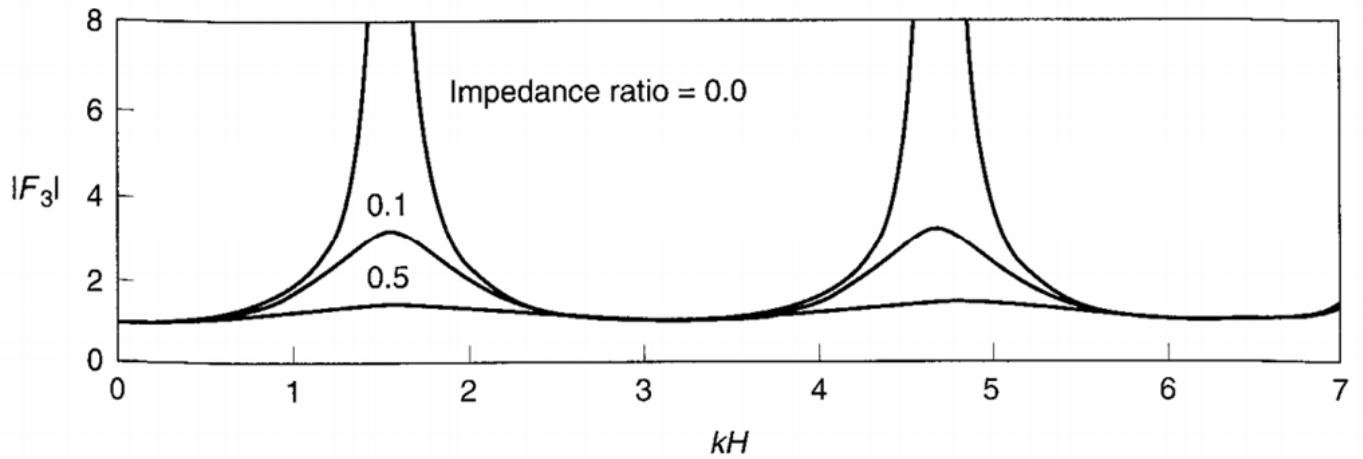
Σχήμα 3.8: Συνάρτηση μεταφοράς για την περίπτωση γραμμικώς ελαστικού εδάφους χωρίς απόσβεση υπερκείμενο σε άκαμπτο βράχο.



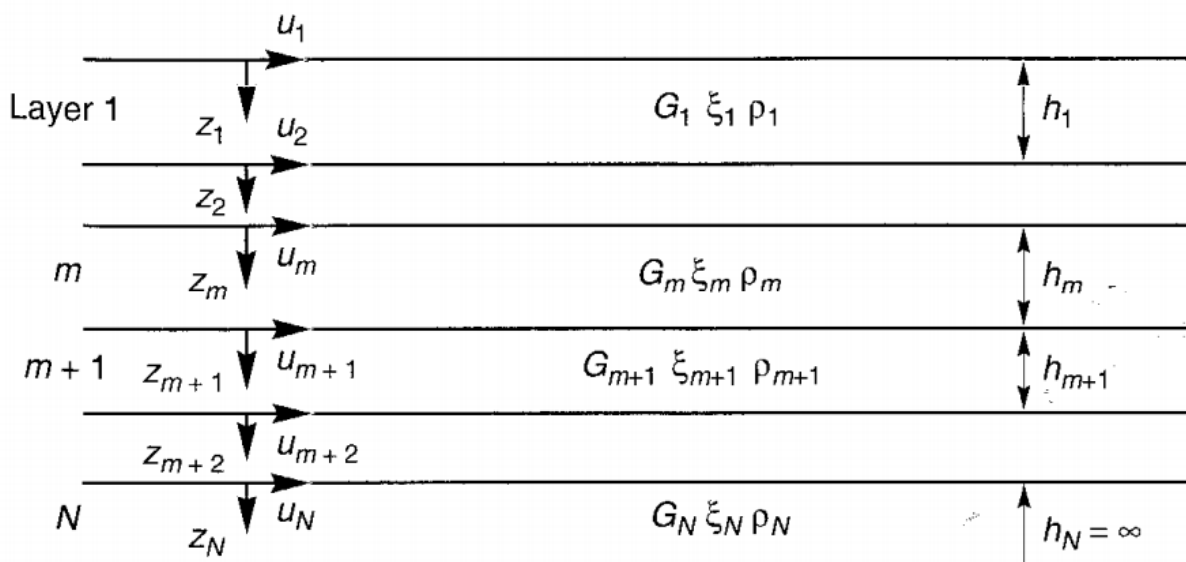
Σχήμα 3.9: Συνάρτηση μεταφοράς για την περίπτωση γραμμικώς ελαστικού εδάφους με απόσβεση ($\xi = 5, 10$ και 20%) υπερκείμενο σε άκαμπτο βράχο.



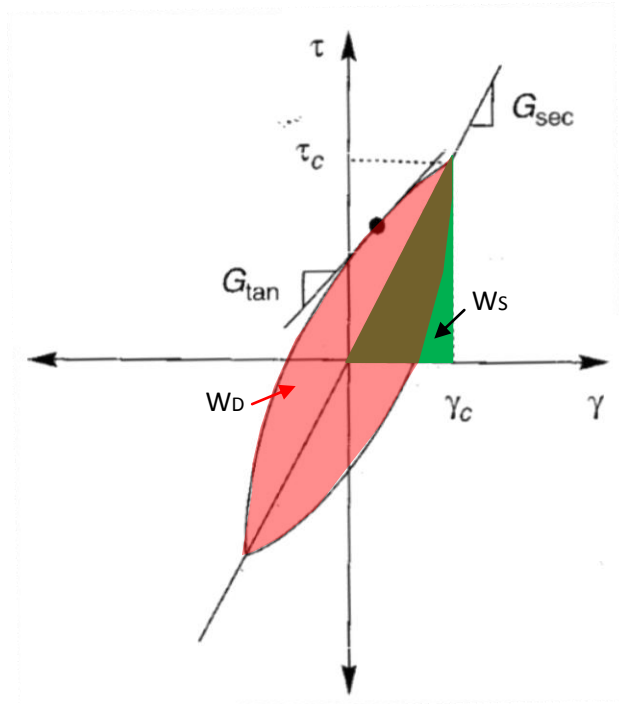
Σχήμα 3.10: Ονοματολογία για την περίπτωση εδαφικού στρώματος υπερκείμενου σε ελαστικό βράχο



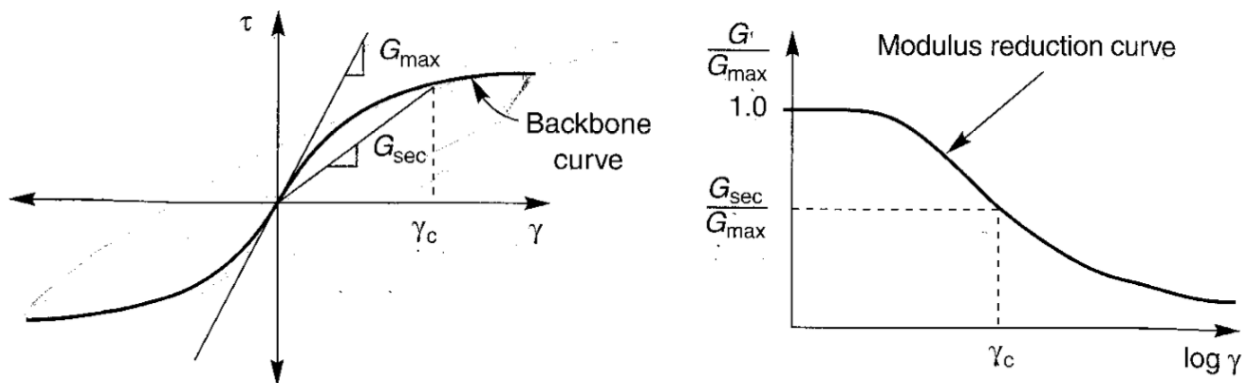
Σχήμα 3.11: Συνάρτηση μεταφοράς για την περίπτωση γραμμικώς ελαστικού χωρίς απόσβεση υπερκείμενο σε ελαστικό βράχο ($az^* = 0, 0.1, 0.5$).



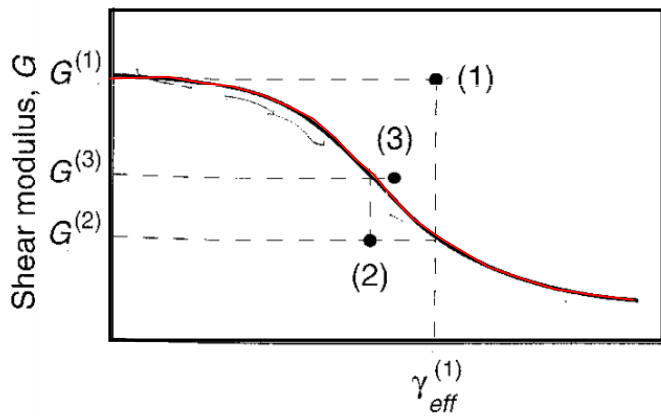
Σχήμα 3.12: Στρωματοποιημένο έδαφος υπερκείμενο σε ελαστικό βράχο.



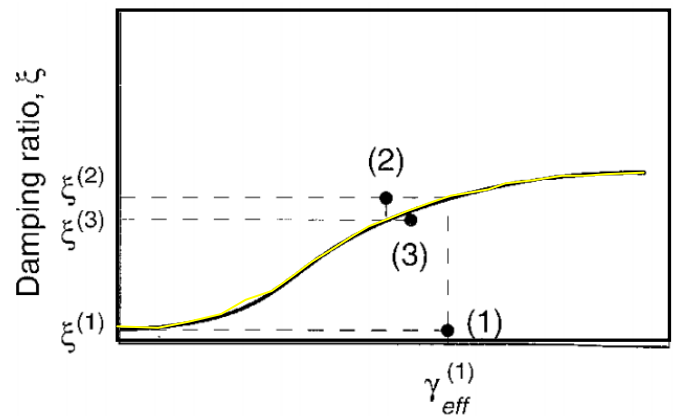
Σχήμα 3.13: Εφαπτομενικό και τέμνον μέτρο διάτμησης G_{sec} και G_{tan} και ορισμός της απορροφούμενης και της ελαστικής ενέργειας W_D και W_S σε βρόχο υστέρησης τυπικού εδάφους.



Σχήμα 3.14: Αριστερά: σπονδυλωτή καμπύλη και ορισμός ισοδύναμου και μέγιστου μέτρου διάτμησης. Δεξιά: διάγραμμα απομείωσης του λόγου G/G_{max} ανάλογα με το επίπεδο της διατμητικής παραμόρφωσης.



Shear strain (log scale)



Shear strain (log scale)

Σχήμα 3.15: Επαναλήψεις για την εύρεση των συμβατών ισοδύναμων παραμέτρων G και ξ . Με τις παραμέτρους $G^{(1)}$ και $\xi^{(1)}$, η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση προβλέπει ενεργό διατμητική παραμόρφωση $\gamma_{eff}^{(1)}$. Επειδή αυτή η παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στα $G^{(1)}$ και $\xi^{(1)}$, απαιτείται επανάληψη. Η επόμενη επανάληψη χρησιμοποιεί παραμέτρους $G^{(2)}$ και $\xi^{(2)}$, που είναι συμβατές με την $\gamma_{eff}^{(1)}$. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου οι παράμετροι G και ξ να είναι συμβατές με την ενεργό διατμητική παραμόρφωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό KSRH10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό KSRH10

4.1 Πληροφορίες για τον σταθμό

Ο σταθμός KSRH10 βρίσκεται στο Hokkaido της Ιαπωνίας σε υψόμετρο 31 μέτρων. Οι συντεταγμένες του σταθμού φαίνονται στο Σχήμα 4.1, ενώ το εδαφικό προφίλ και η κατανομή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων Vs απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2.

Τα πρώτα 36 μέτρα αποτελούνται από άργιλο (clay) με δείκτη πλαστιμότητας $PI = 30$ και από εκεί και κάτω υπάρχει σκληρός βράχος (hard rock). Οι καμπύλες G - γ, ξ - γ που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση φαίνονται στα Σχήματα 4.3 (άργιλος με $PI=30$) και 4.4 (σκληρός βράχος). Η μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων μέχρι το βάθος των 36 μέτρων είναι $V_{S(\mu\epsilon\sigma\sigma)} = 240$ m/s, ενώ στον βράχο ξεπερνά τα 1400 m/s. Με έναν πρόχειρο υπολογισμό, θεωρώντας πάχος εδαφικής στρώσης $h = 36$ m, η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος προκύπτει από τη σχέση $T_p = \frac{4 \cdot h}{V_{S(\mu\epsilon\sigma\sigma)}} = 0.6$ s. Θα εξετάσουμε στη συνέχεια αν αυτή η τιμή συμφωνεί με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

4.2 Σεισμός Tokachi-oki 2003

Στις 26 Σεπτεμβρίου 2003 και ώρα 4:50 JST (Japanese Standard Time) σεισμός μεγέθους $M = 8.0$ συνέβη κοντά στο Hokkaido στη βόρεια Ιαπωνία, ως αποτέλεσμα της βύθισης της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την Βορειο-Αμερικανική πλάκα. Το επίκεντρο του σεισμού είχε συντεταγμένες 41.848, 143.77 και φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Ο σεισμός προκάλεσε τσουνάμι με κύματα ύψους μέχρι και 4 μέτρων στην νότια παράκτια ζώνη του Hokkaido, το οποίο όμως δεν προκάλεσε τεράστιες ζημιές. Παρατηρήθηκαν πολλές κατολισθήσεις, ρευστοποιήσεις και ζημιές σε διάφορα τεχνικά έργα. Οι εδαφικές επιταχύνσεις δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλες, παρά το μεγάλο μέγεθος του σεισμού και οι ζημιές ήταν σχετικά περιορισμένες εξαιτίας της απομακρυσμένης υπεράκτιας τοποθεσίας του γεγονότος.

Συνιστώσα NS

Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται τα πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα της βάσης και της κορυφής για την συνιστώσα NS. Για την ανάλυση με το SHAKE έγινε η παραδοχή ότι το επιταχυνσιογράφημα της βάσης βρίσκεται σε βάθος 36 m και όχι σε 250 m που είναι στην πραγματικότητα. Αυτή η θεώρηση είναι απαραίτητη για την ανάλυση, καθώς οι παραδοχές για την αξιόπιστη λειτουργία του SHAKE απαιτούν εδαφικούς σχηματισμούς. Επιπλέον, θεωρούμε ότι αυτό δεν θα επηρεάσει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα, αφού στα 36 m έχουμε ήδη σκληρό βράχο ($V_s = 1400$ m/s). Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην επιφάνεια σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Παρατηρούμε ότι οι περίοδοι εμφάνισης των μέγιστων φασματικών επιταχύνσεων είναι σωστές, αλλά έχει υποτιμηθεί η εδαφική ενίσχυση, ιδίως για περιόδους από 0.4 - 0.7 s. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 4.8 ,οι διατμητικές παραμορφώσεις και τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 4.9 και 4.10 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 4.13 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 36 μέτρων όπως και πριν.

Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Εδώ περί της περιόδου 0.5 s έχουμε σημαντικές αποκλίσεις, αφού και η μορφή και οι τιμές του προβλεπόμενου φάσματος διαφέρουν σημαντικά από το πραγματικό φάσμα. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 4.15, οι διατμητικές παραμορφώσεις και τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 4.16 και 4.17 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 4.18 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19.

4.3 Σεισμός Hokkaido 28/11/2004

Ο σεισμός συνέβη στις 28 Νοεμβρίου 2004 , το επίκεντρό του φαίνονται στο Σχήμα 4.20 και είχε μέγεθος $M = 7$.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 4.21 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 36 μέτρων όπως προηγουμένως. Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Παρατηρούμε ότι το προβλεπόμενο φάσμα βρίσκεται πολύ κοντά στο πραγματικό σε όλο το εύρος των περιόδων με εξαίρεση στα 0.70 s. Η κατανομή της επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 4.23, οι διατμητικές παραμορφώσεις και τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 4.24 και 4.25 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 4.26 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.27.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 4.28 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 36 μέτρων όπως προηγουμένως. Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Παρατηρούμε ότι το προβλεπόμενο φάσμα είναι μετατοπισμένο προς τα αριστερά σε σχέση με το πραγματικό (σαν να αναφέρεται σε σκληρότερο έδαφος), αλλά είναι αξιόπιστο για μια πρώτη εκτίμηση. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 4.30, οι διατμητικές παραμορφώσεις και τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 4.31 και 4.32 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 4.33 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.34.

4.4 Σεισμός Hokkaido 06/12/2004

Ο σεισμός στις 6 Δεκεμβρίου του 2004 μεγέθους $M = 6.7$ στο Hokkaido (Σχήμα 4.35) αποτέλεσε έναν ισχυρό μετασεισμό του γεγονότος στις 28 Νοεμβρίου.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 4.36 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 36 μέτρων όπως προηγουμένως. Στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό

που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει είναι πολύ κοντά στο πραγματικό φάσμα σε όλο το εύρος περιόδων. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 4.38, οι διατμητικές παραμορφώσεις και τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 4.39 και 4.40 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 4.41 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.42.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 4.43 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 36 μέτρων. Στο Σχήμα 4.44 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει απέχει πολύ από το πραγματικό φάσμα στο σύνηθες εύρος ιδιοπεριοδών των κατασκευών. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 4.45, οι διατμητικές παραμορφώσεις και τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 4.46 και 4.47 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 4.48 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.49.

4.5 Θεωρητική ανάλυση

Χρησιμοποιώντας την κυματική θεωρία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.3, η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος δίνεται από την σχέση:

$$T_p = \frac{4 \cdot H}{V_s} \quad (4.1)$$

όπου H το πάχος της εδαφικής στρώσης και V_s η ταχύτητα του διατμητικού κύματος. Προηγουμένως θεωρώντας μια μέση διατμητική ταχύτητα κύματος για το αργιλικό στρώμα των 36 μέτρων υπολογίστηκε η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος $T_p=0.6$ s.

Η αντίστοιχη δυναμική ενίσχυση του πλάτους της αρμονικής συνιστώσας είναι:

$$A_1 = \frac{2}{\pi \cdot \xi} \quad (4.2)$$

όπου ξ ο βαθμός υστερητικής απόσβεσης του εδαφικού υλικού. Εφαρμόζοντας την προηγούμενη σχέση προκύπτει $A_1 = 12.7$, δηλαδή το πλάτος της αρμονικής συνιστώσας των 0.6 δευτερολέπτων στην επιφάνεια του εδαφικού στρώματος αναμένεται να είναι 12.7 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο πλάτος του διεγείροντος κραδασμού στη βάση του στρώματος.

Στο Σχήμα 4.50 απεικονίζεται το πραγματικό φάσμα της επιφάνειας του εδαφικού στρώματος με γαλάζιο χρώμα και με πράσινη τελεία το σημείο που προέκυψε από την απλουστευμένη θεωρητική ανάλυση πολλαπλασιάζοντας με 12.7 την τιμή του φάσματος της βάσης στα 0.6 δευτερόλεπτα. Η σύγκλιση θεωρίας και πραγματικότητας είναι παραπάνω από ικανοποιητική. Παρατηρούμε επίσης πως η μεγιστοποίηση του φάσματος συμβαίνει περίπου στην δεύτερη ιδιοπερίοδο του εδάφους $T_2 = T_1/3 = 0.2$ s.

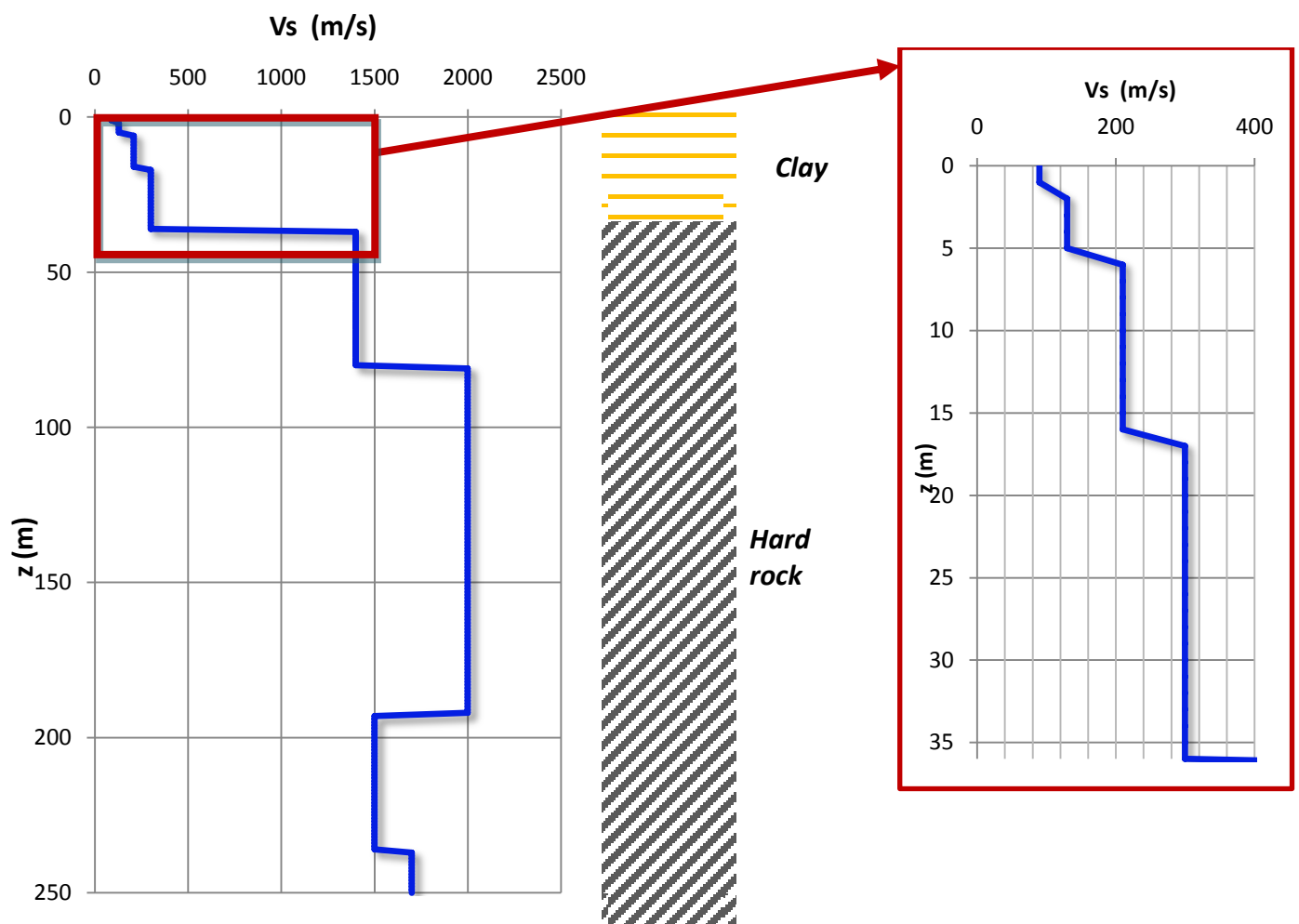
4.6 Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε πως, σε γενικές γραμμές, η ανάλυση με το SHAKE προσφέρει μια ικανοποιητική πρόβλεψη της πραγματικότητας στον συγκεκριμένο σταθμό. Βλέπουμε ότι τα φάσματα στην επιφάνεια κατά την συνιστώσα NS προσεγγίζουν καλύτερα τα αντίστοιχα πραγματικά φάσματα από ότι τα φάσματα στην συνιστώσα EW, όπου γενικά υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Για ασθενέστερη σεισμική διέγερση στη βάση παίρνουμε πιο ακριβή αποτελέσματα, χωρίς όμως αυτό να είναι απόλυτο, καθώς για παράδειγμα στη συνιστώσα NS του σεισμού στο Hokkaido στις 06/12/2004 με μια ασθενή σεισμική διέγερση στη βάση προκύπτουν ανακριβή αποτελέσματα. Από την άλλη, ακόμα και για τον ισχυρό σεισμό στο Tokachi-oki το 2003 τα αποτελέσματα είναι ανεκτά για την συνιστώσα NS.

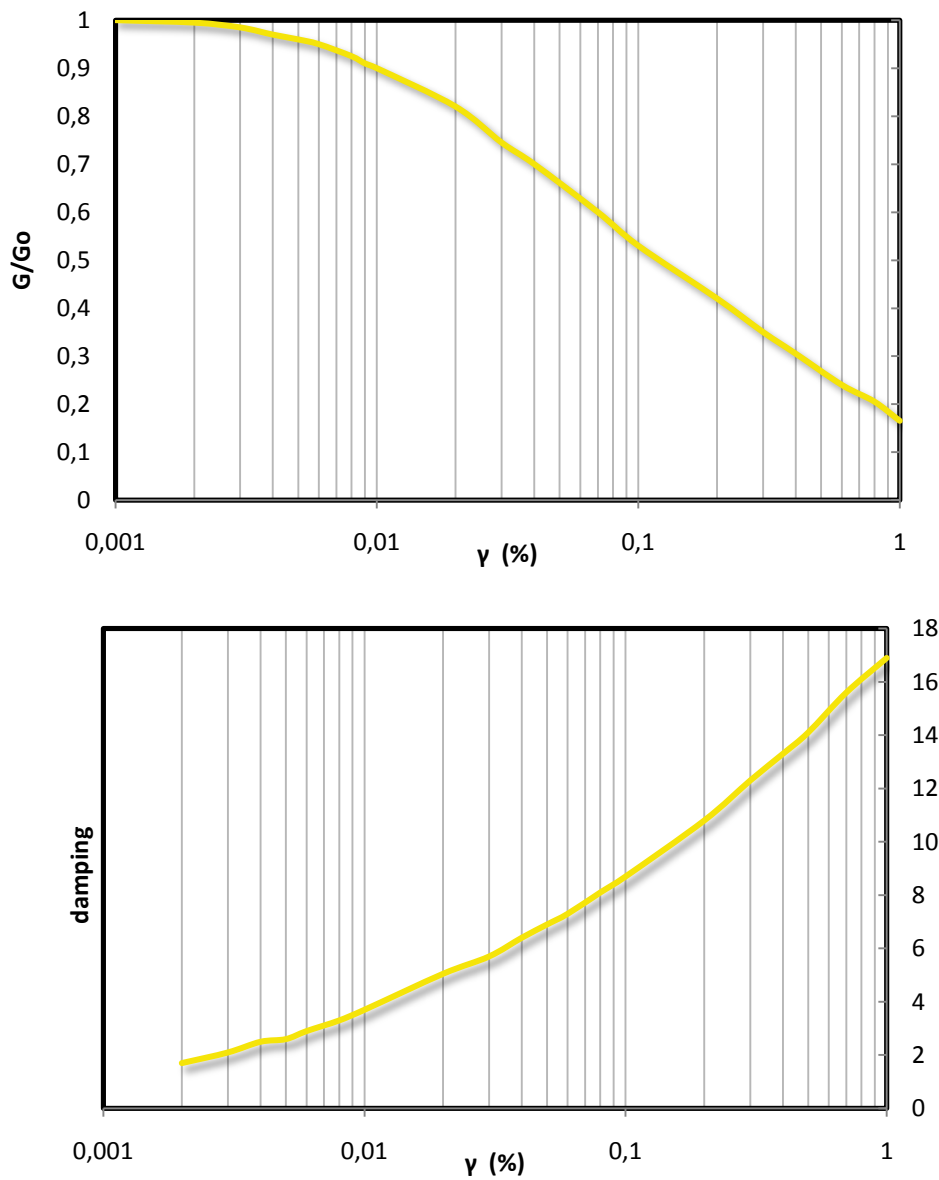
Σχήματα (4)



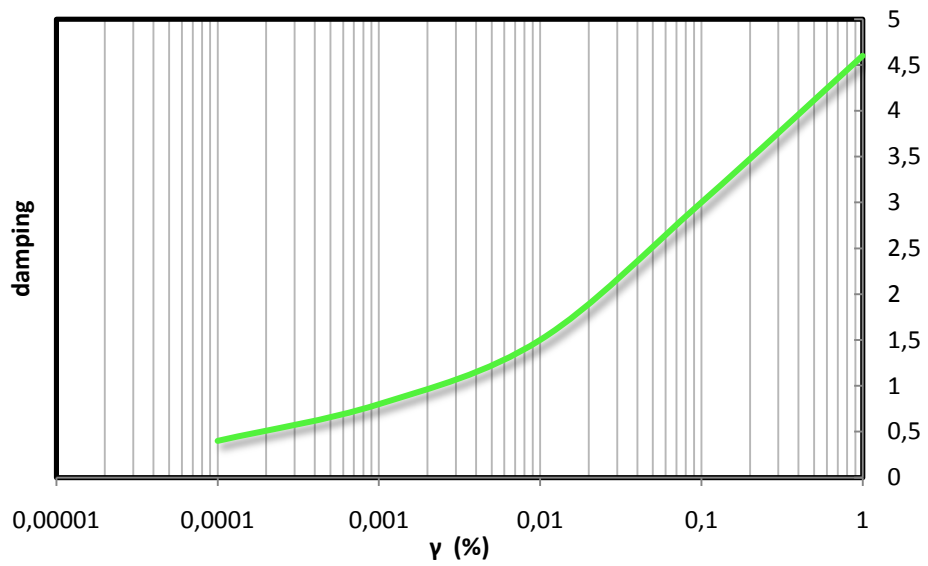
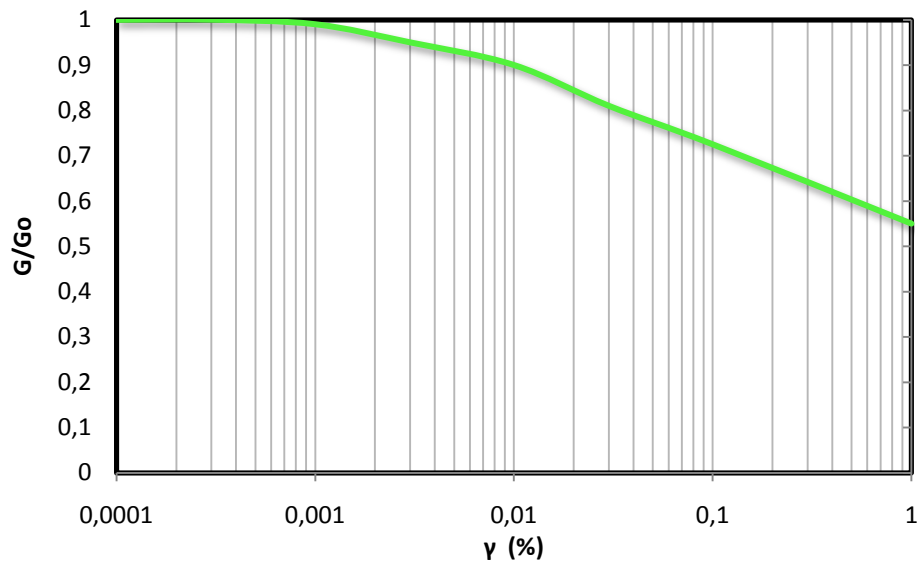
Σχήμα 4.1: Γεωγραφική θέση του σταθμού KSRH10



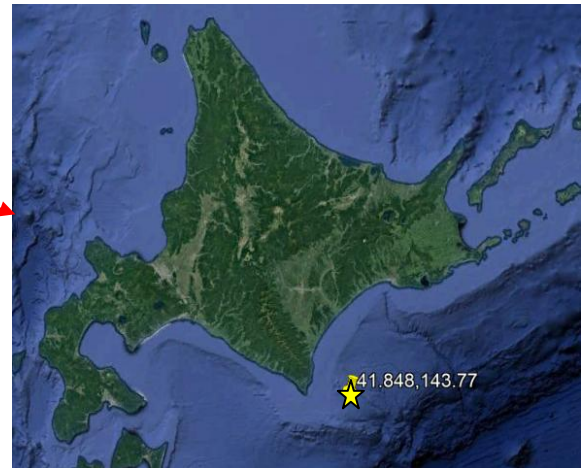
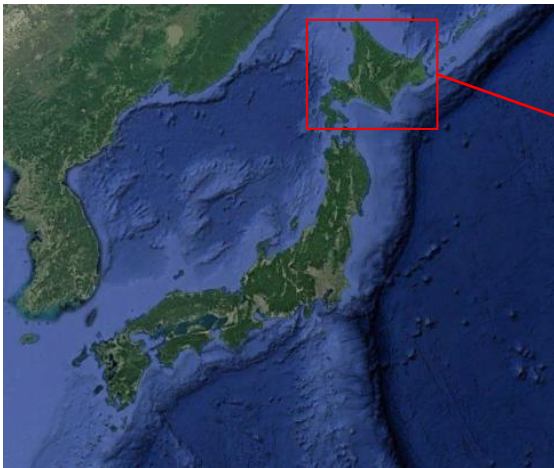
Σχήμα 4.2: Εδαφικό προφίλ και κατανομή V_s με το βάθος στον σταθμό KSRH10.



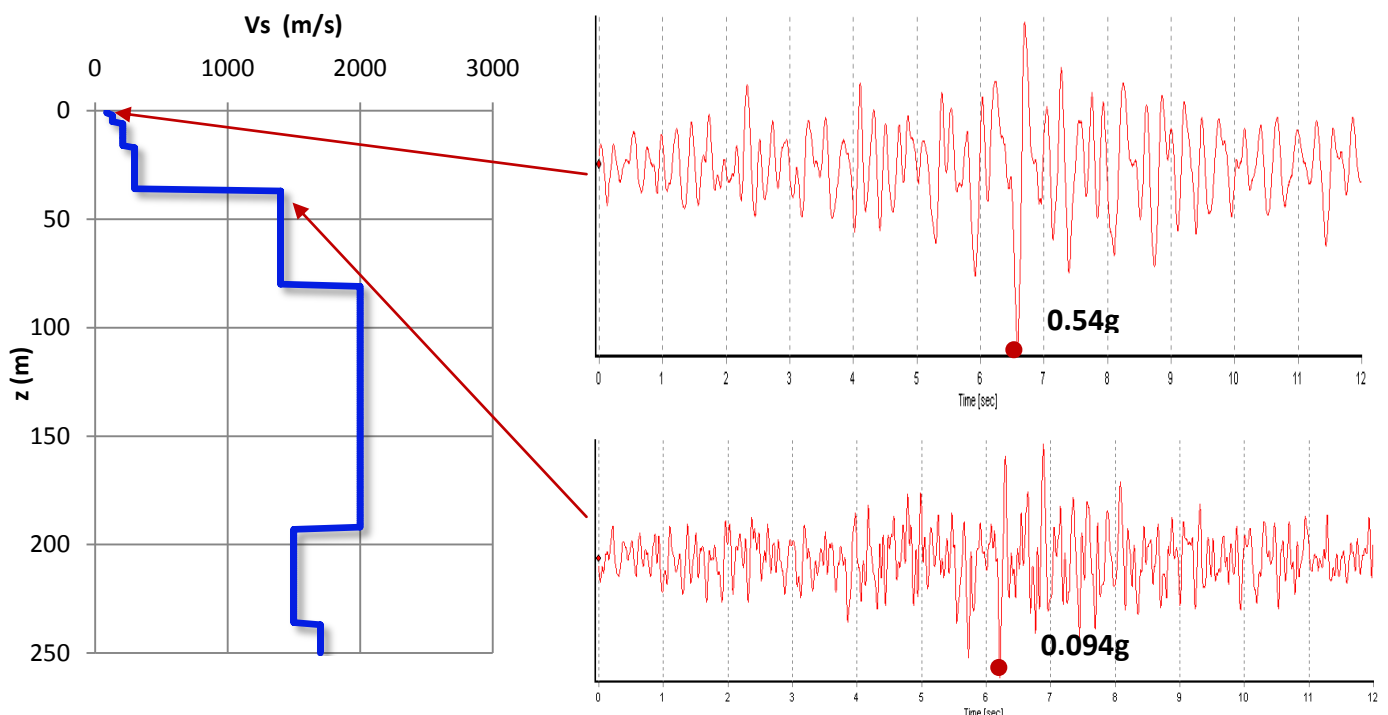
Σχήμα 4.3: Καμπύλες $G - \gamma$, $\xi - \gamma$ των Vucetic & Dorby (1994) για άργιλο με $PI = 50$.



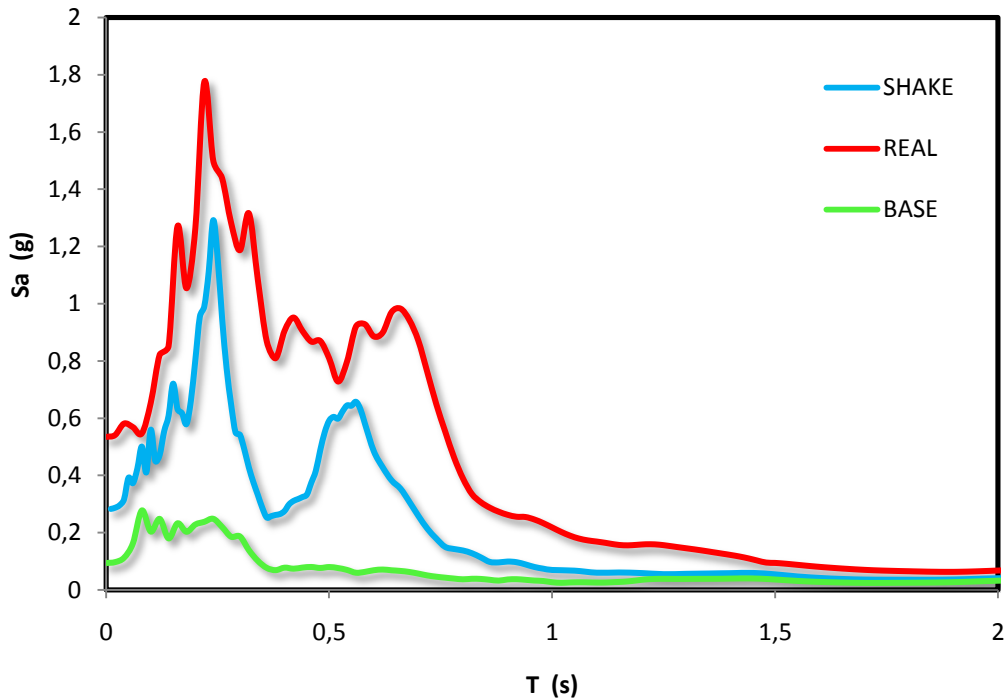
Σχήμα 4.4: Καμπύλες $G - \gamma$, $\xi - \gamma$ του Schnabel (1973) για βράχο.



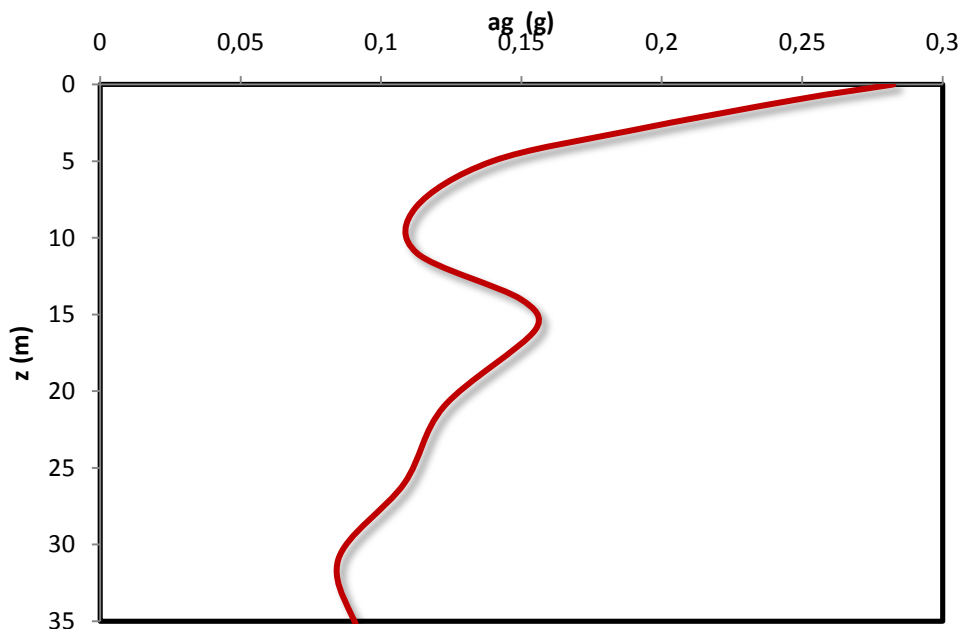
Σχήμα 4.5: Συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού Tokachi-oki 2003



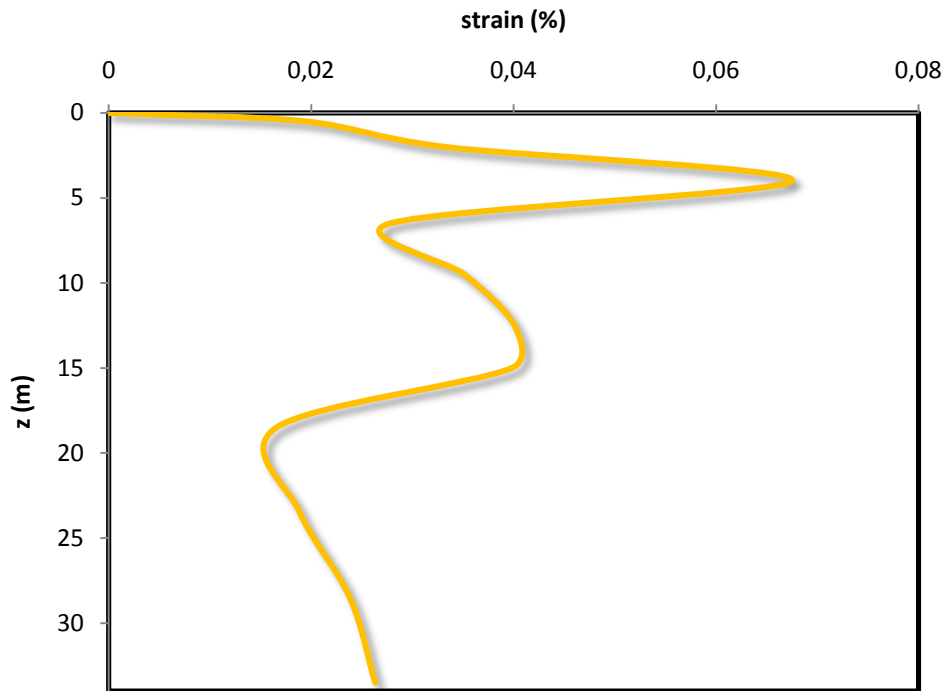
Σχήμα 4.6: επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 250 m και στη επιφάνεια στον σταθμό KSRH10 για την συνιστώσα NS του σεισμού Tokachi-oki 2003. Η καταγραφή στο βραχώδες υπόβαθρο θεωρούμε ότι εφαρμόζεται σε βάθος 36 m.



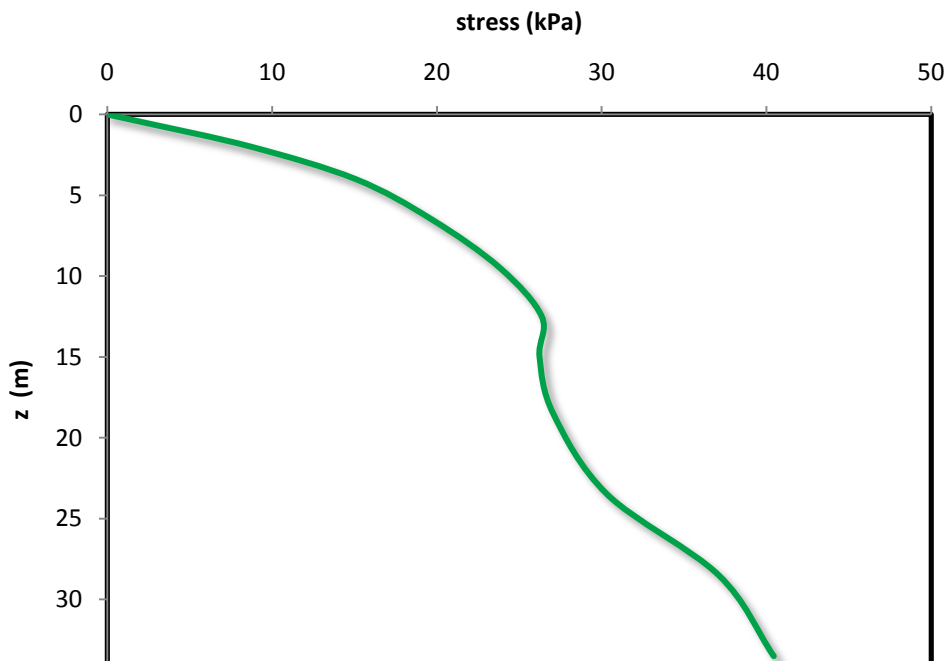
Σχήμα 4.7: Ελαστικά φάσματα απόκρισης στη βάση (πράσινη γραμμή) και στην κορυφή (κόκκινη γραμμή) του εδαφικού σχηματισμού στον σταθμό KSRH10 και προβλεπόμενο με το SHAKE φάσμα στην επιφάνεια (μπλε γραμμή) συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



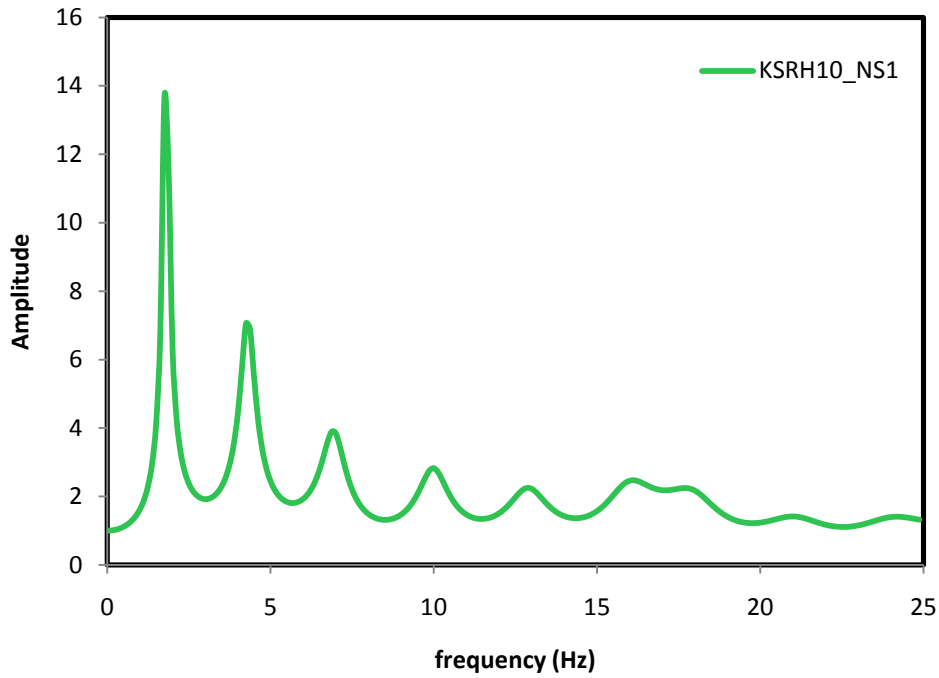
Σχήμα 4.8: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος στον σταθμό KSRH10 της συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



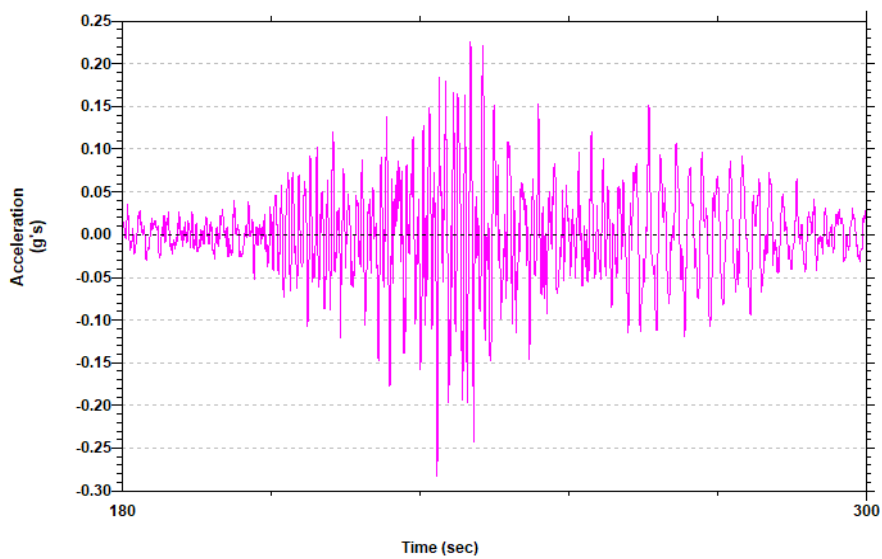
Σχήμα 4.9: Κατανομή διατμητικής παραμόρφωσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



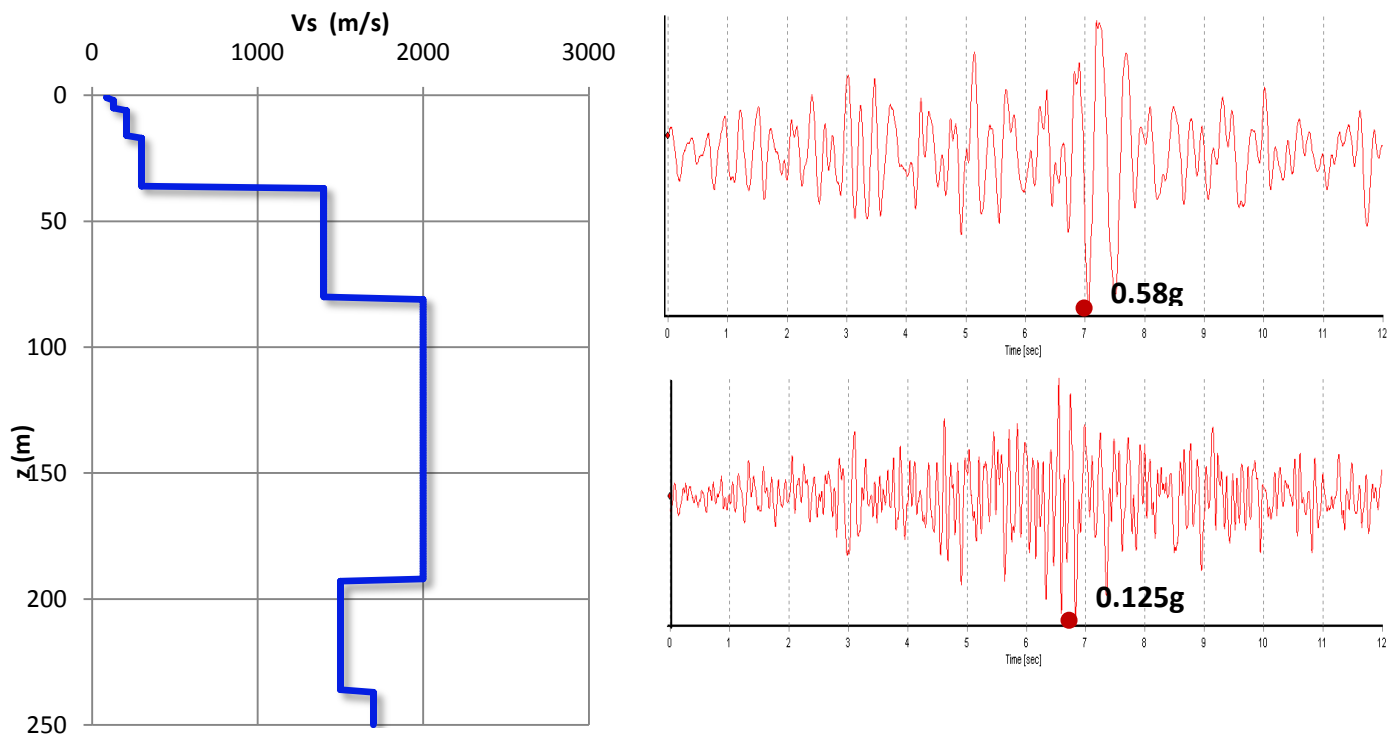
Σχήμα 4.10: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



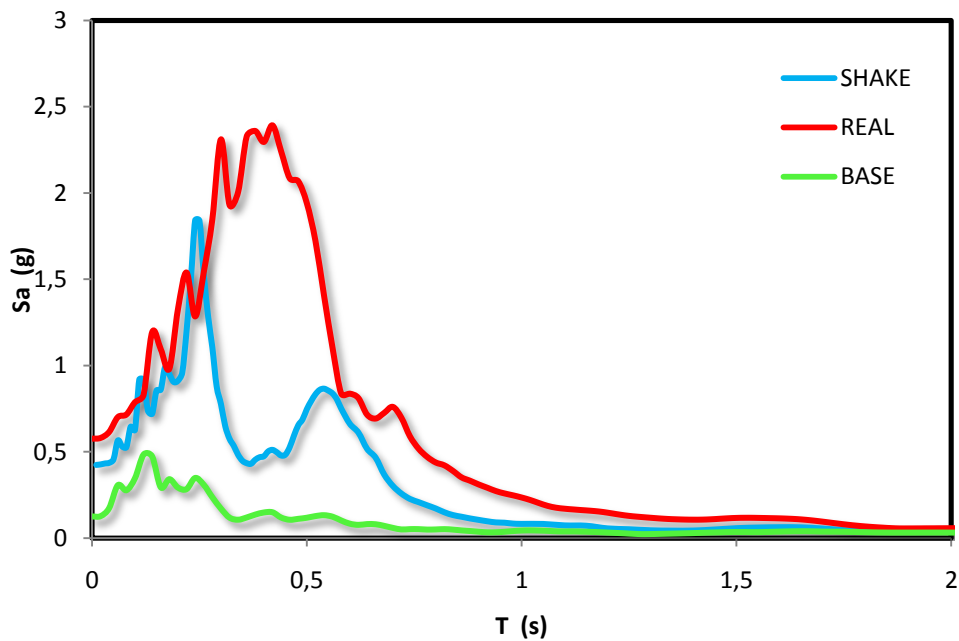
Σχήμα 4.11: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



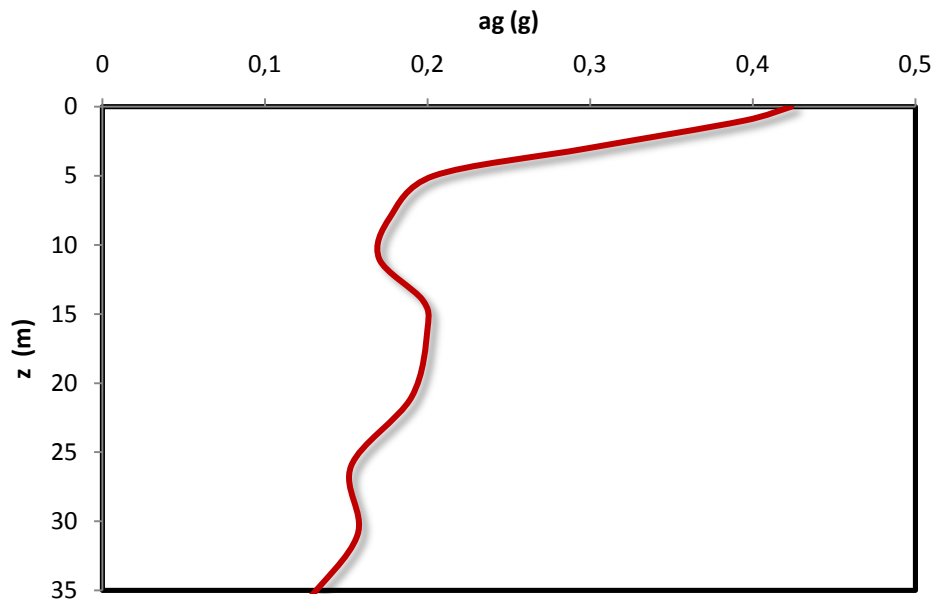
Σχήμα 4.12: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



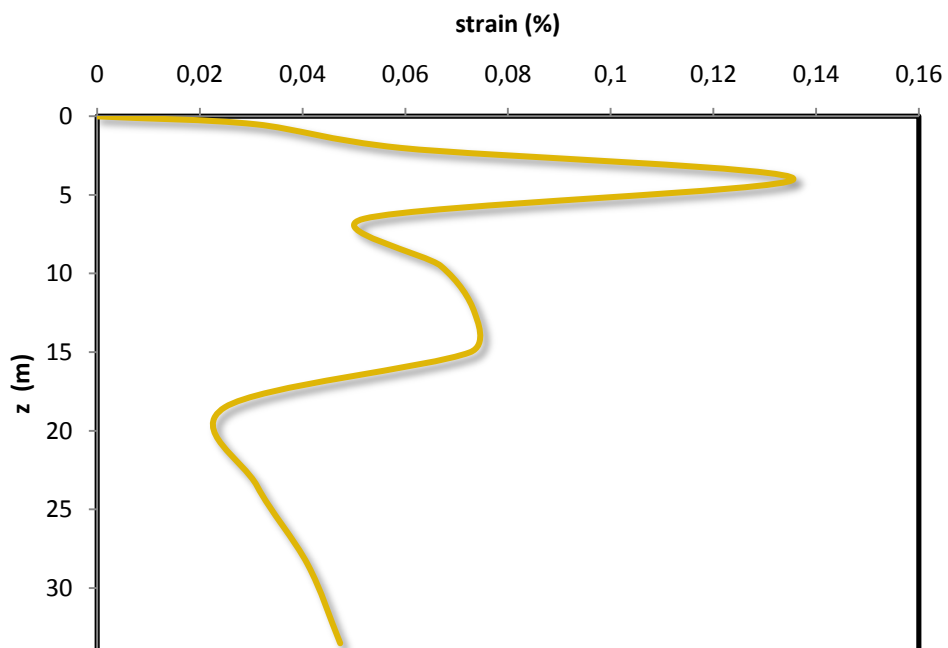
Σχήμα 4.13: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 36 m και στη επιφάνεια στον σταθμό KSRH10 συνιστώσα EW σεισμός Tokachi-oki 2003.



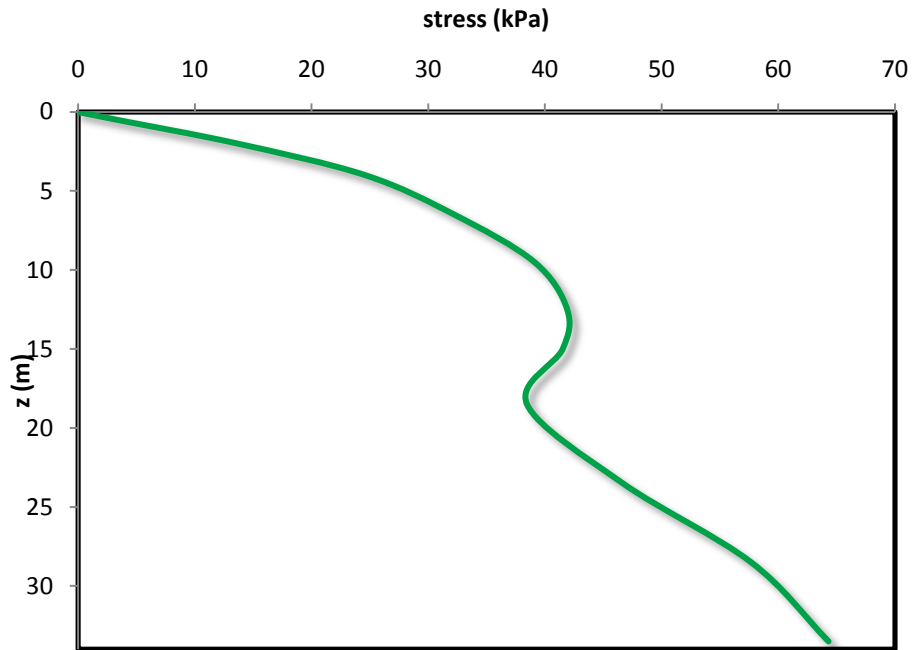
Σχήμα 4.14: Ελαστικά φάσματα απόκρισης στη βάση (πράσινη γραμμή) και στην κορυφή (κόκκινη γραμμή) του εδαφικού σχηματισμού στον σταθμό KSRH10 και προβλεπόμενο με το SHAKE φάσμα στην επιφάνεια (μπλε γραμμή) συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



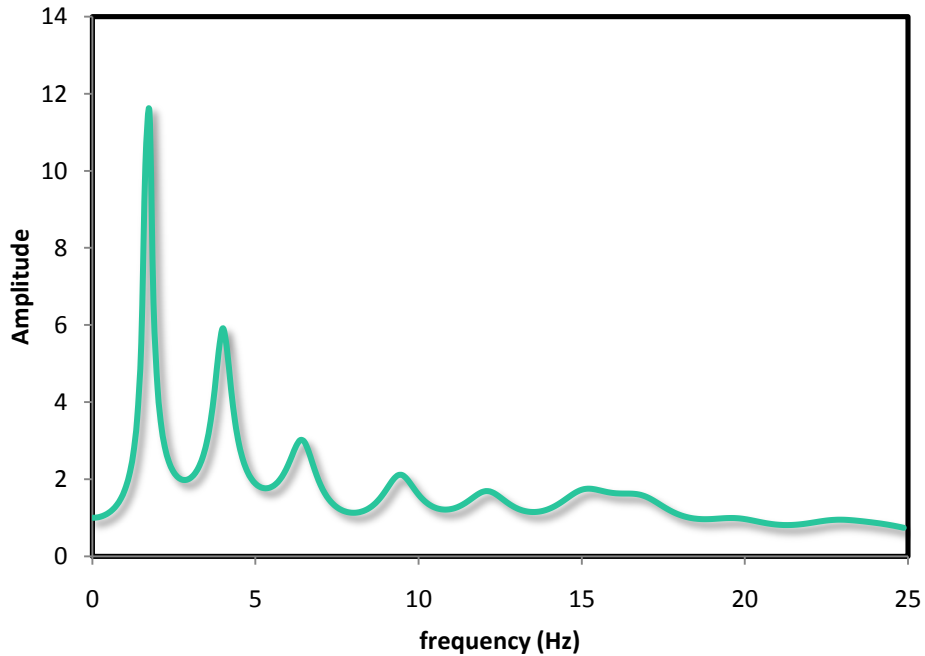
Σχήμα 4.15: Κατανομή επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



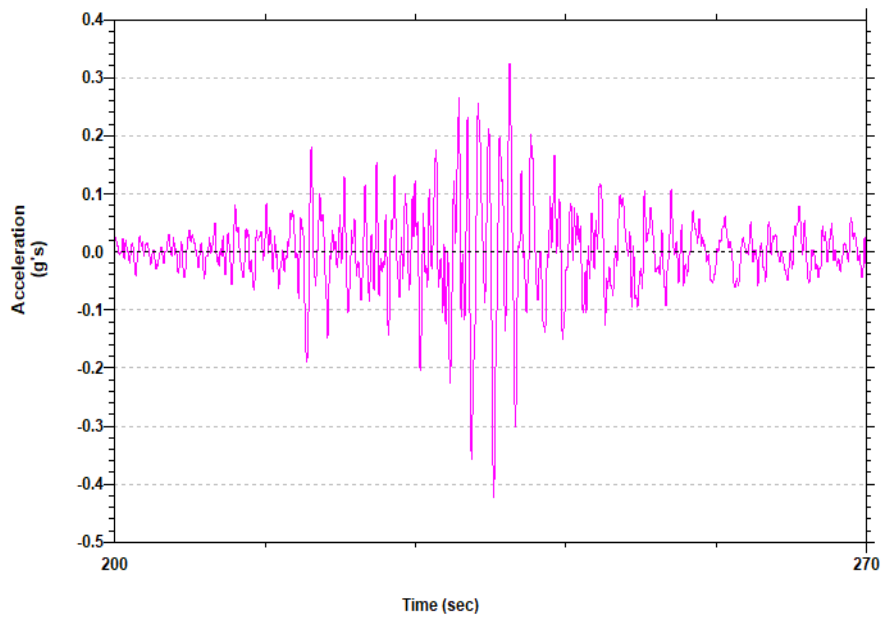
Σχήμα 4.16: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



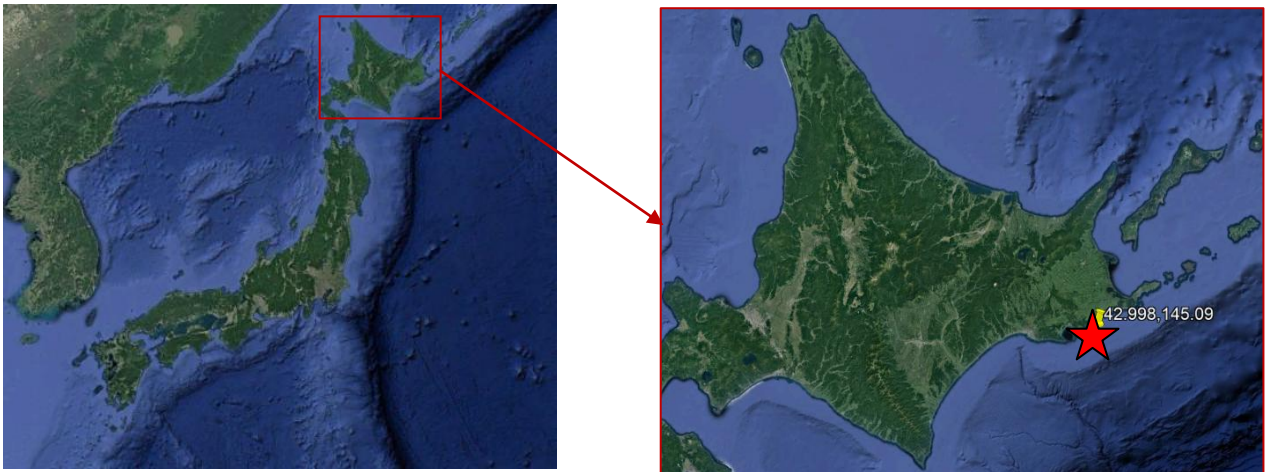
Σχήμα 4.17: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



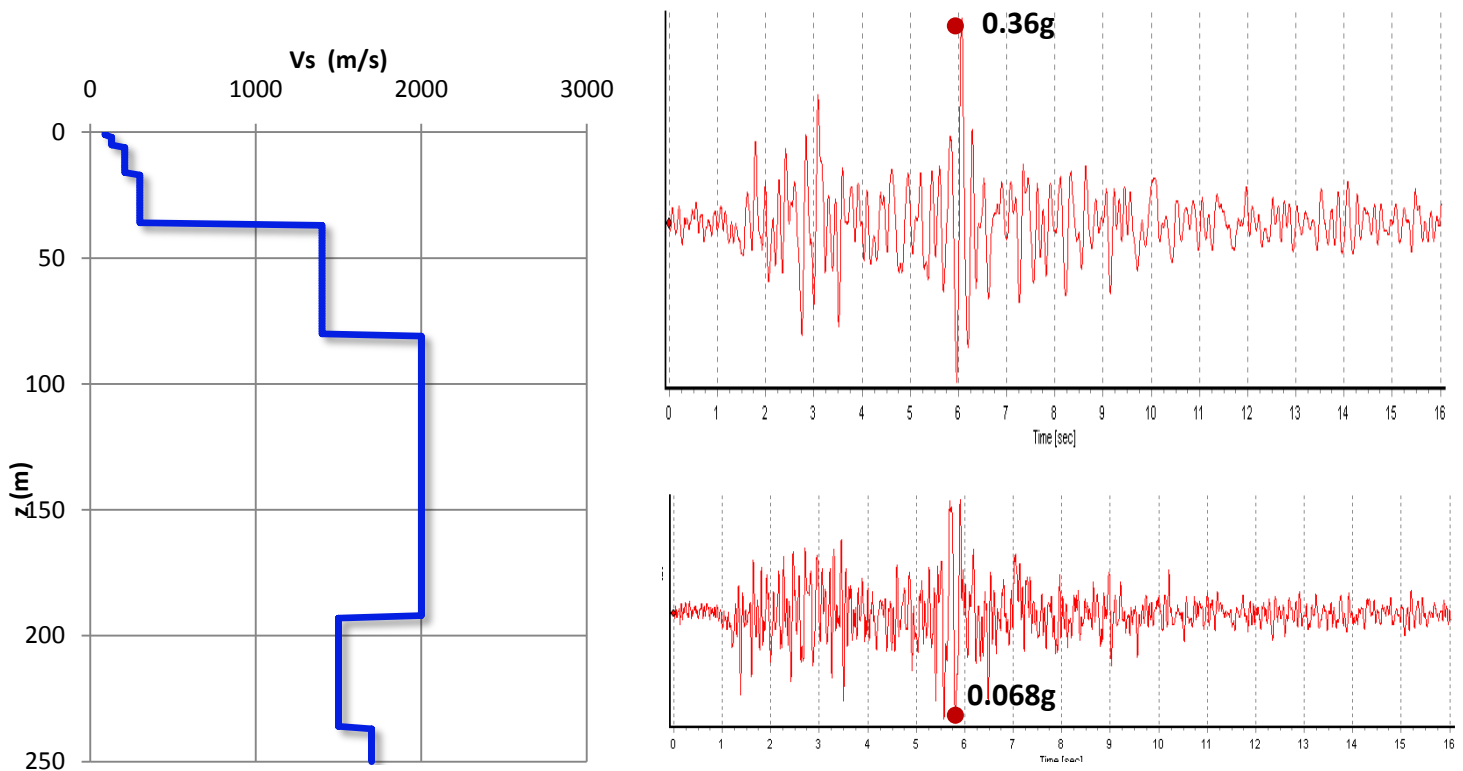
Σχήμα 4.18: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



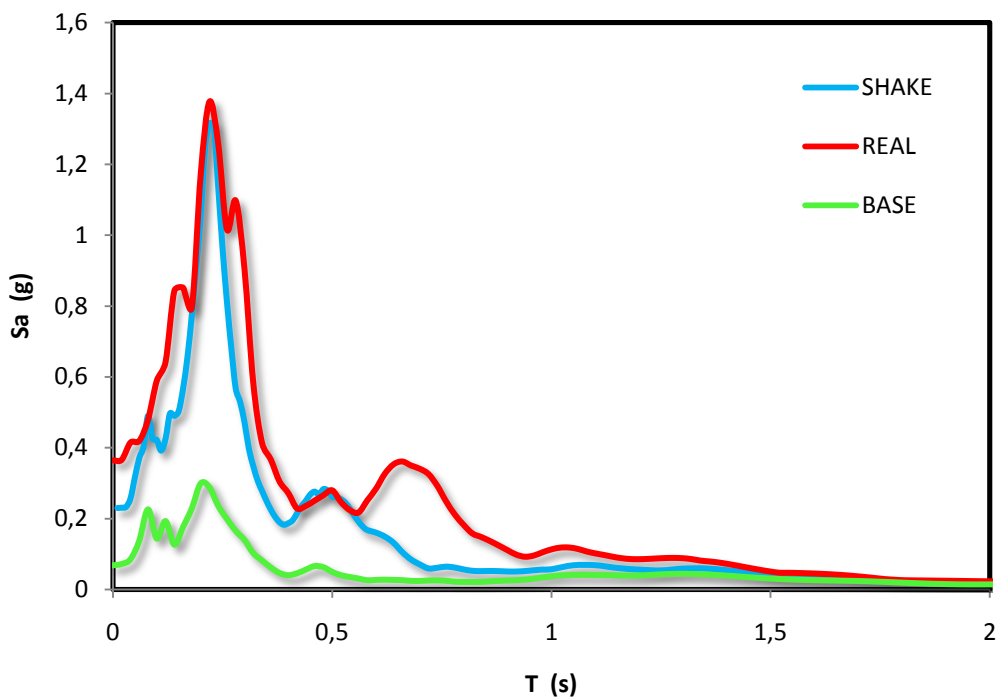
Σχήμα 4.19: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



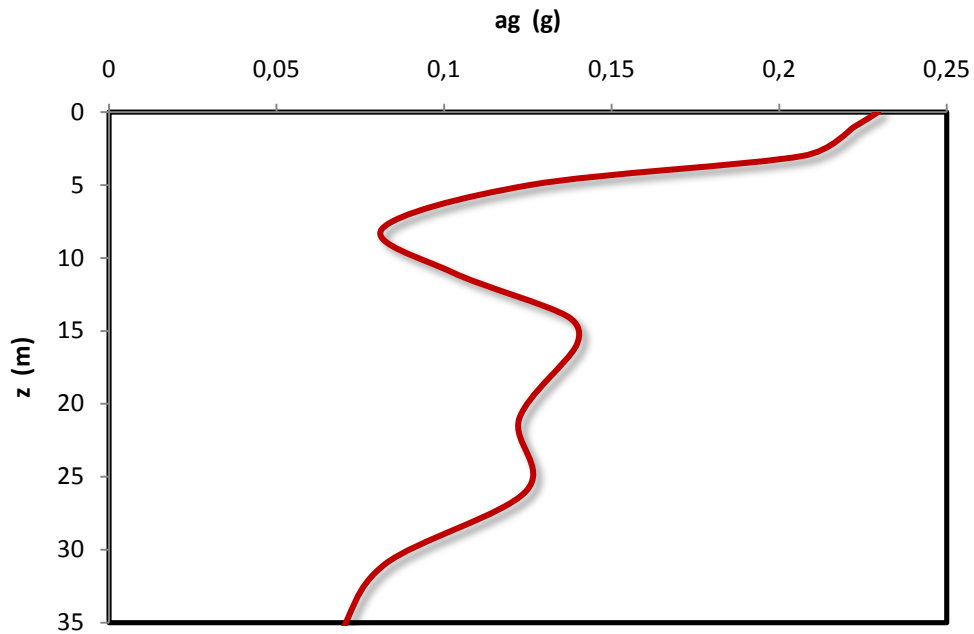
Σχήμα 4.20: Συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού στο Hokkaido στις 28/11/2004.



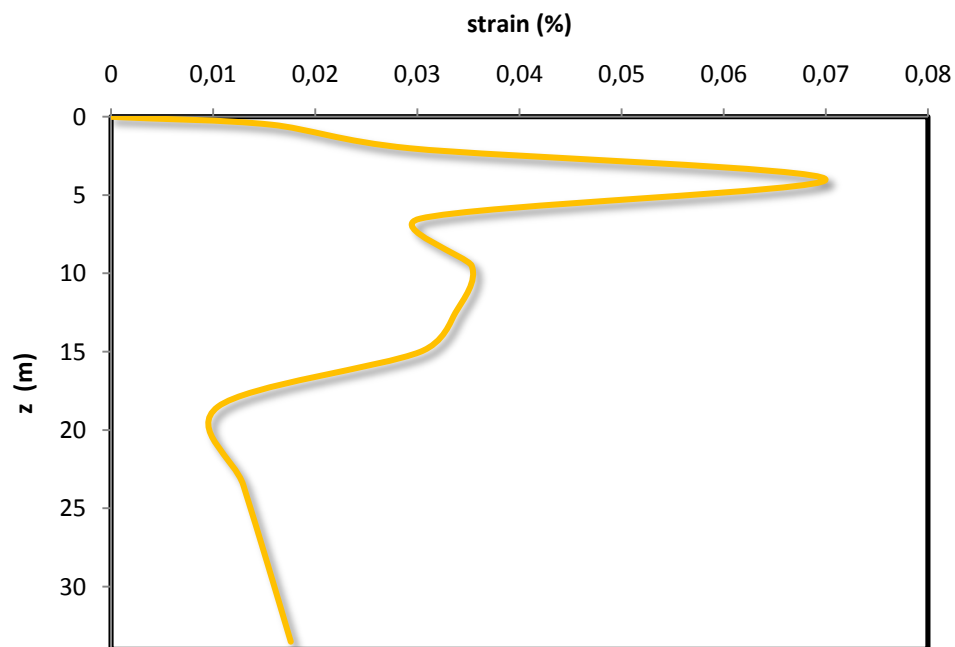
Σχήμα 4.21: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 36 m και στη επιφάνεια στον σταθμό KSRH10 συνιστώσα ΝΣ σεισμός Hokkaido 28/11/2004.



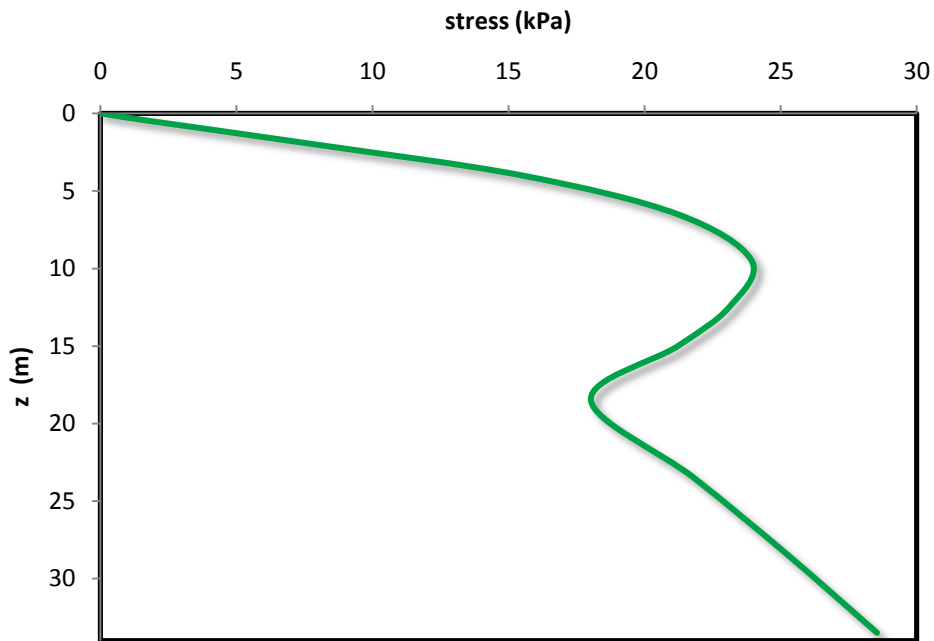
Σχήμα 4.22: Ελαστικά φάσματα απόκρισης στη βάση (πράσινη γραμμή) και στην κορυφή (κόκκινη γραμμή) του εδαφικού σχηματισμού στον σταθμό KSRH10 και προβλεπόμενο με το SHAKE φάσμα στην επιφάνεια (μπλε γραμμή) συνιστώσας ΝΣ του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



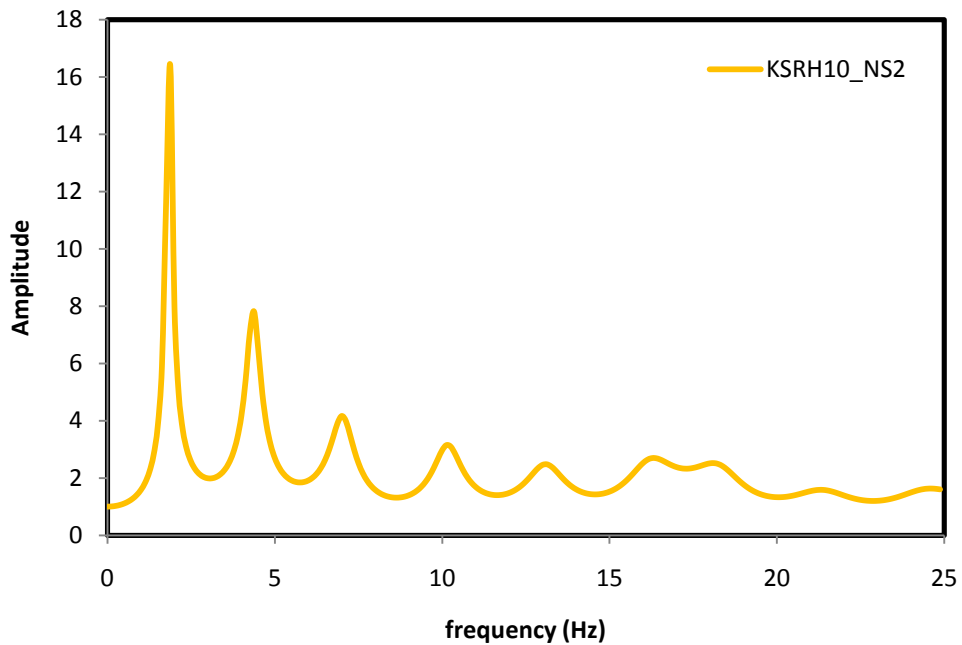
Σχήμα 4.23: Κατανομή επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



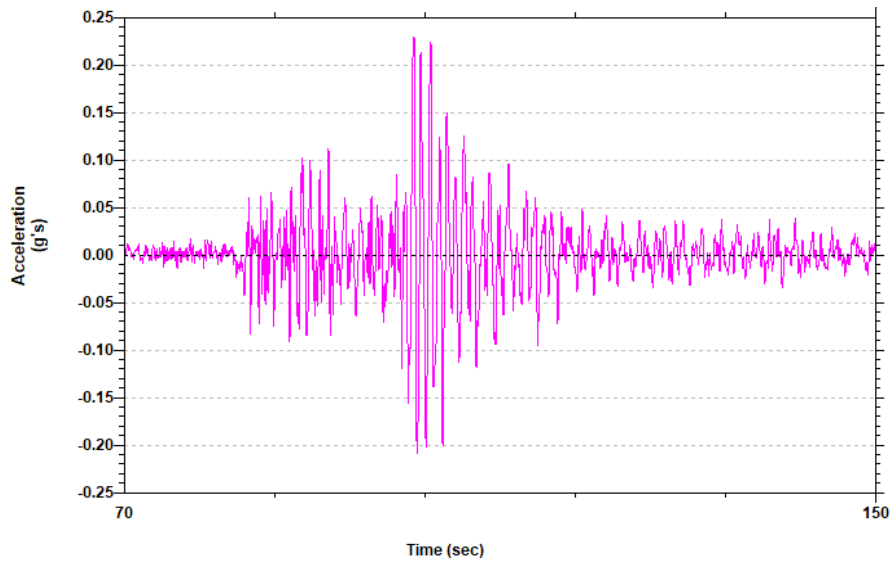
Σχήμα 4.24: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



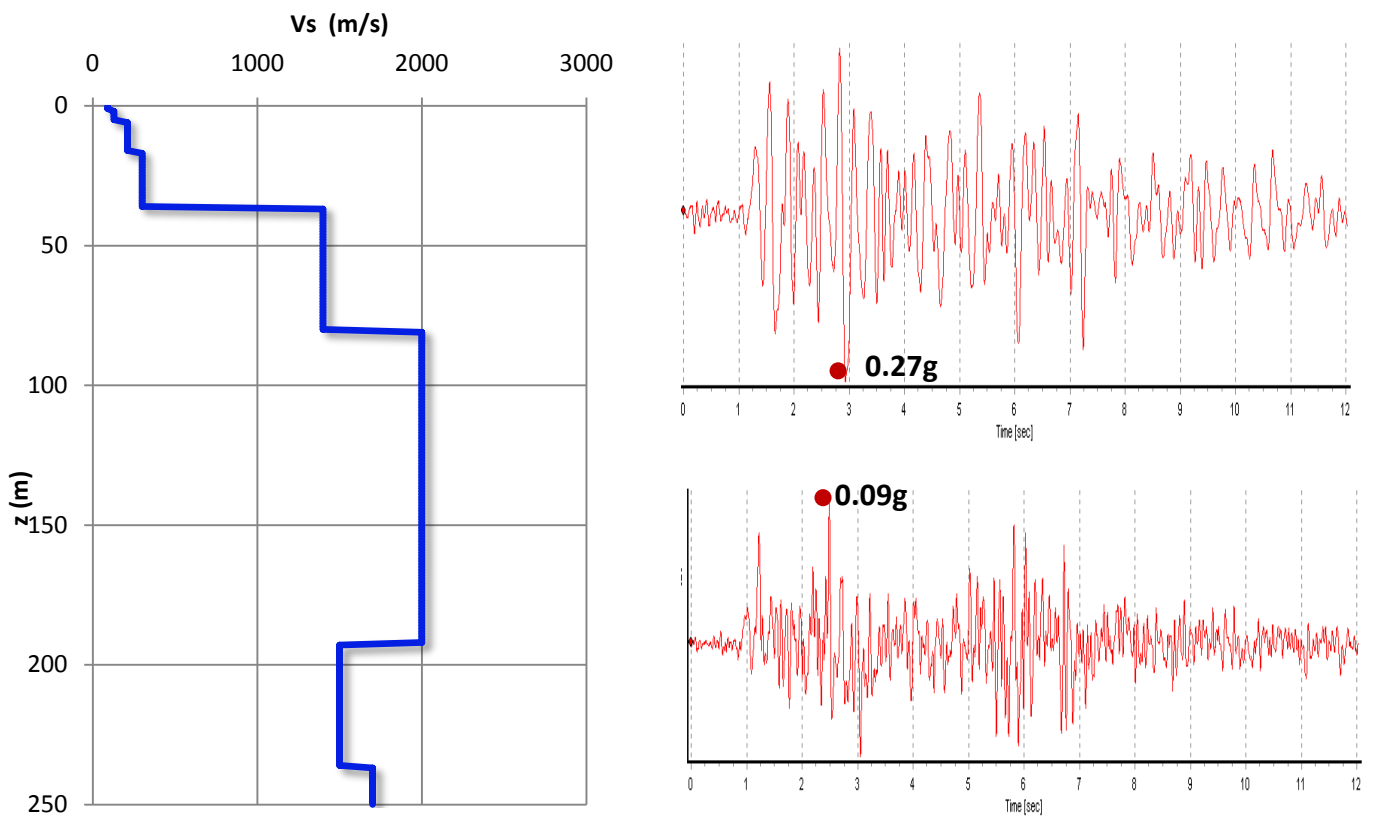
Σχήμα 4.25: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



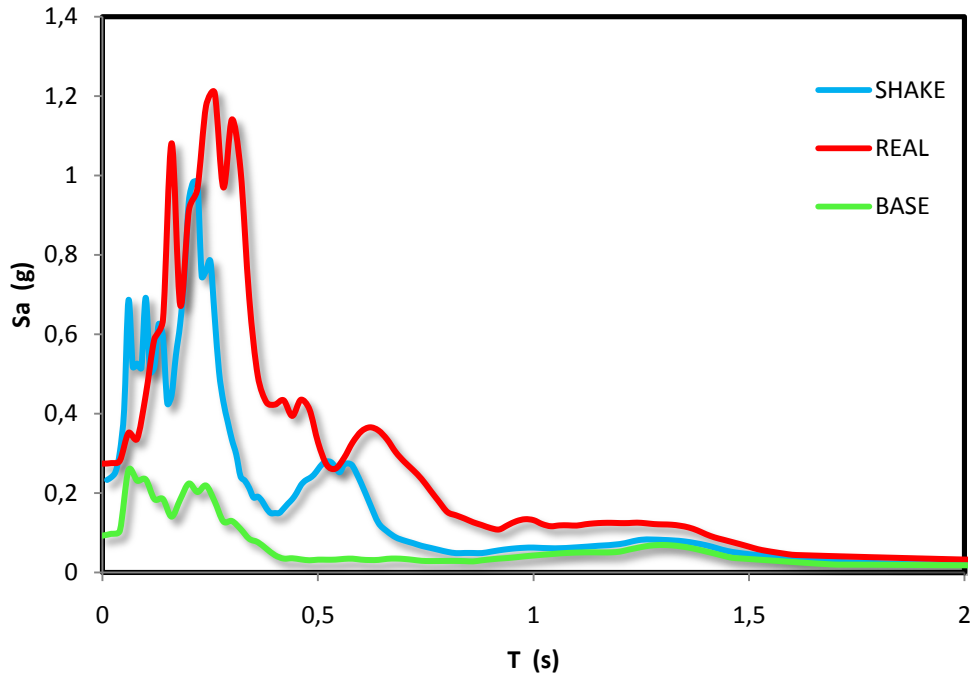
Σχήμα 4.26: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



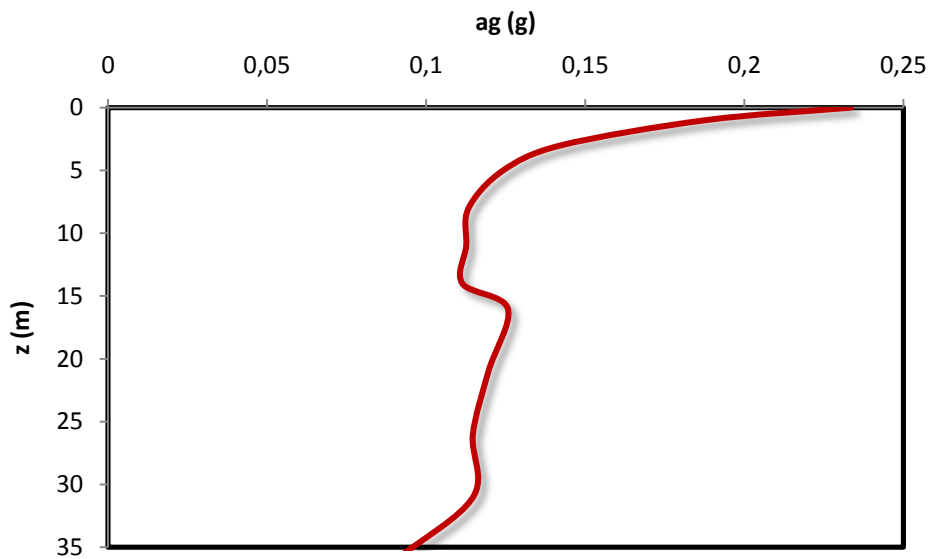
Σχήμα 4.27: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



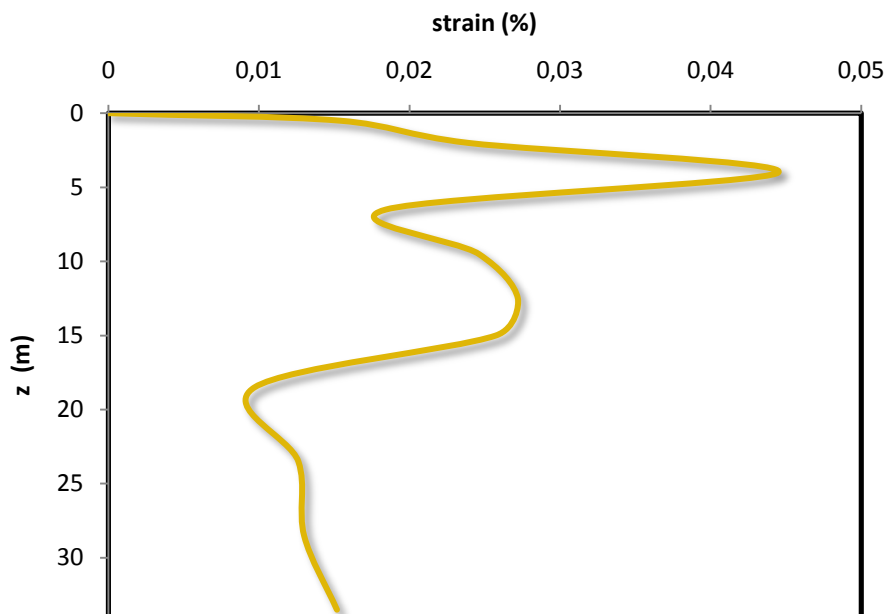
Σχήμα 4.28: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 36 m και στη επιφάνεια στον σταθμό KSRH10 συνιστώσα EW σεισμός Hokkaido 28/11/2004.



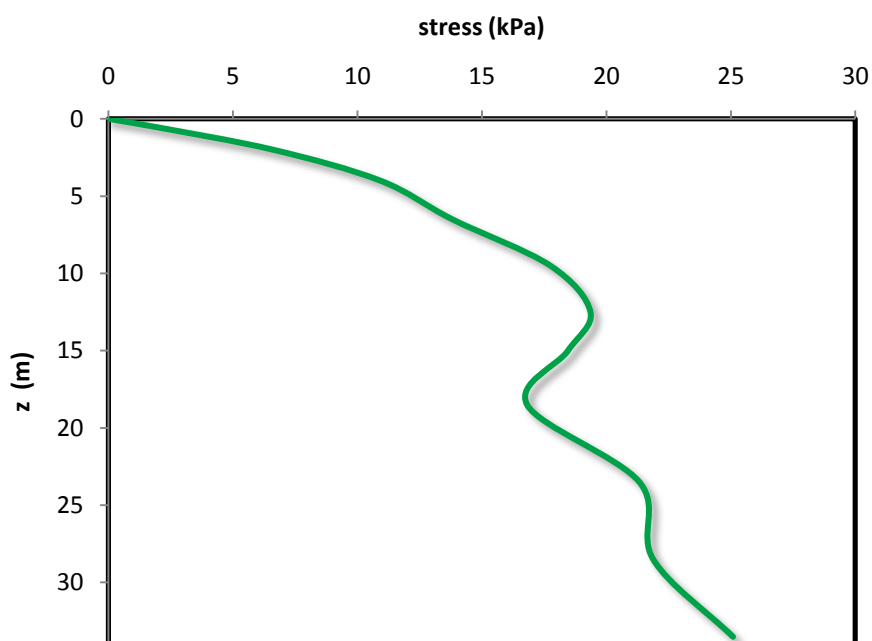
Σχήμα 4.29: Ελαστικά φάσματα απόκρισης στη βάση (πράσινη γραμμή) και στην κορυφή (κόκκινη γραμμή) του εδαφικού σχηματισμού στον σταθμό KSRH10 και προβλεπόμενο με το SHAKE φάσμα στην επιφάνεια (μπλε γραμμή) συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



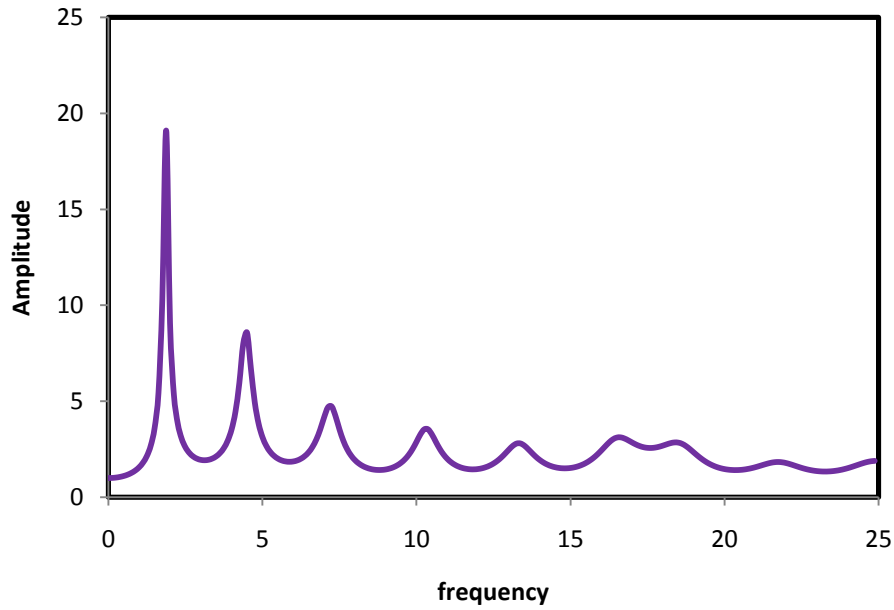
Σχήμα 4.30: Κατανομή επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



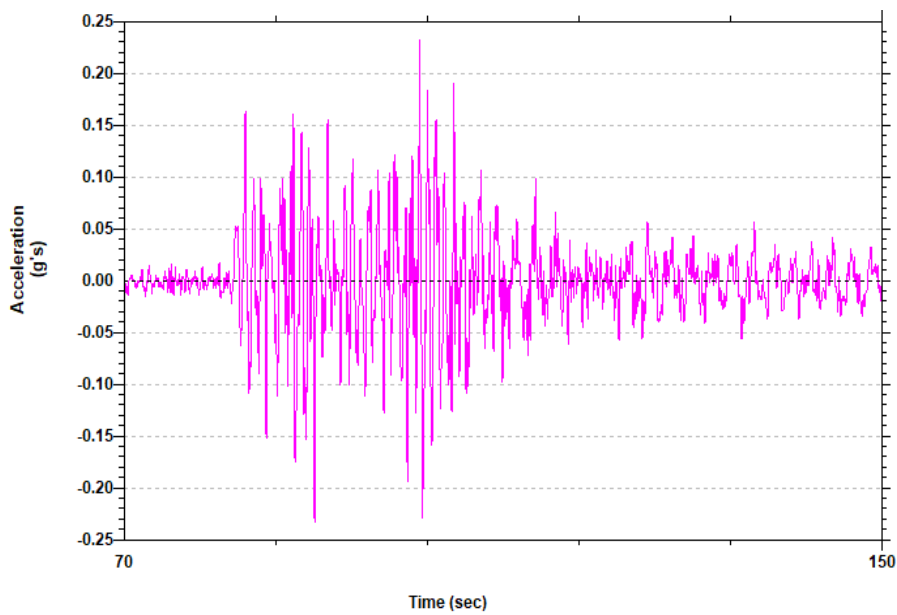
Σχήμα 4.31: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



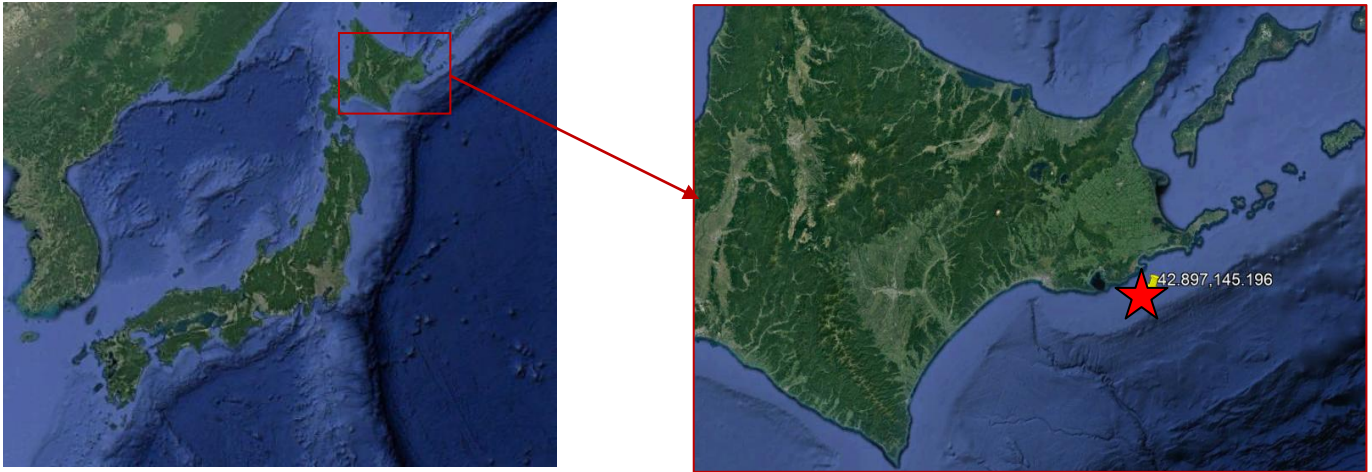
Σχήμα 4.32: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



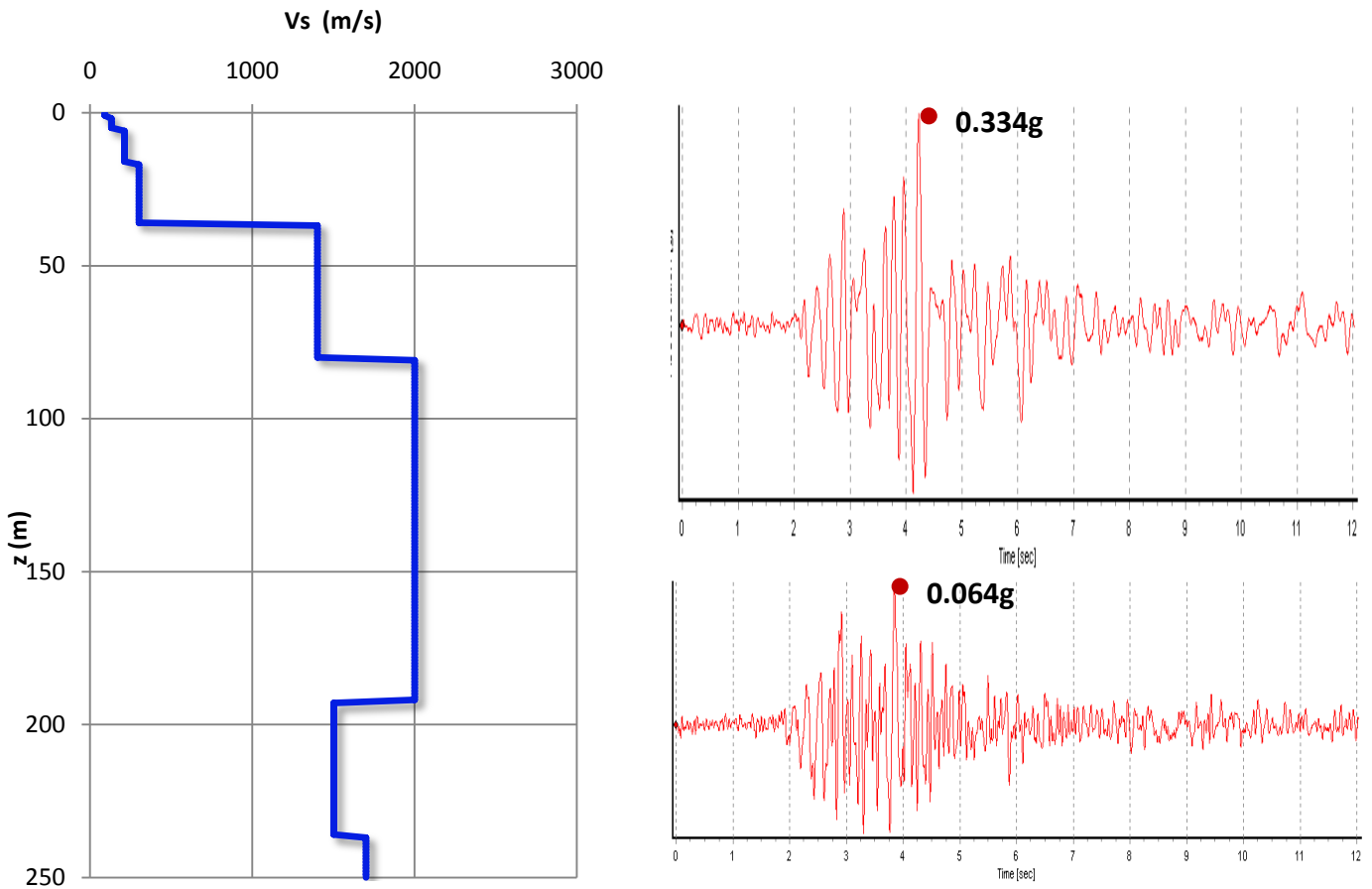
Σχήμα 4.33: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



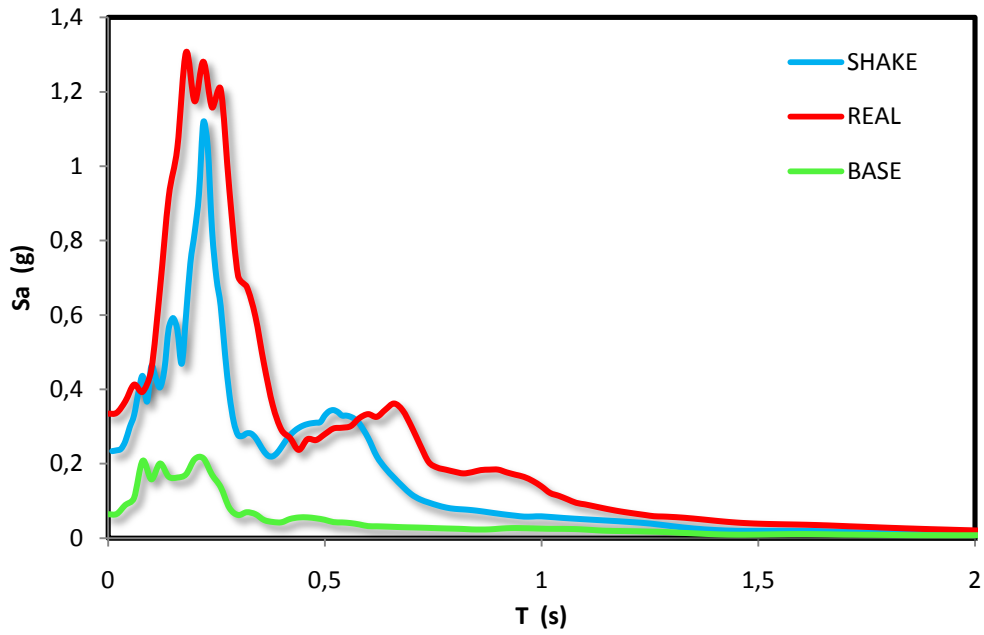
Σχήμα 4.34: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 28/11/2004.



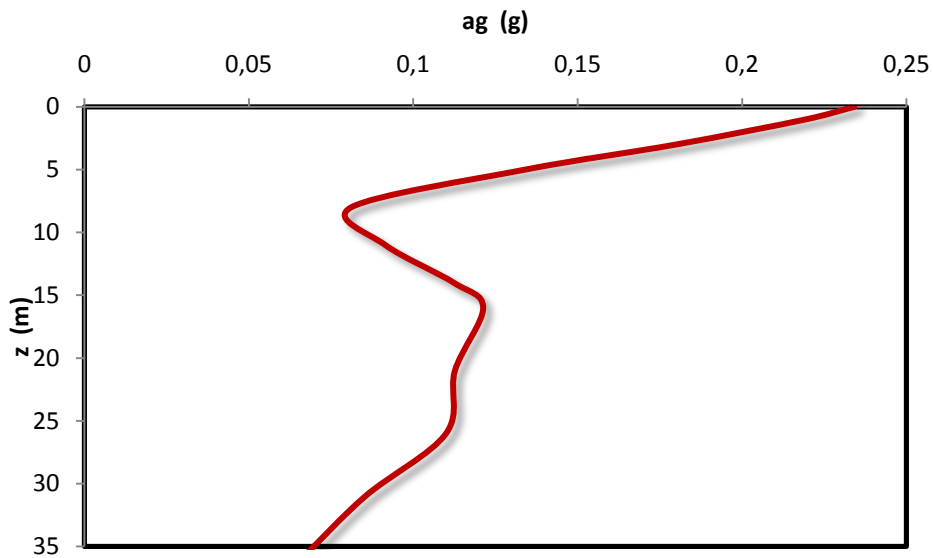
Σχήμα 4.35: Συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού στο Hokkaido στις 06/12/2004.



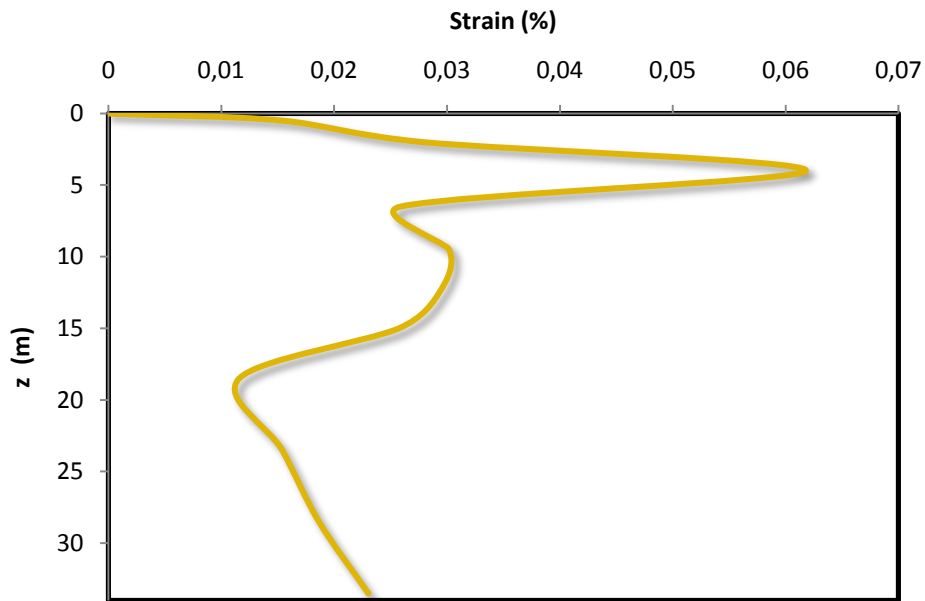
Σχήμα 4.36: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 36 m και στη επιφάνεια στον σταθμό KSRH10 συνιστώσα NS σεισμός Hokkaido 06/12/2004.



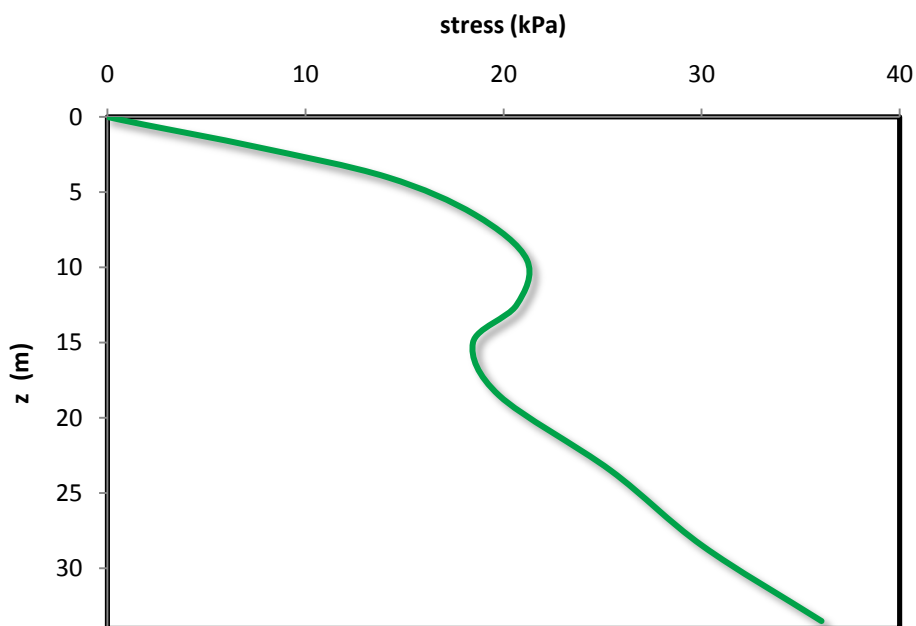
Σχήμα 4.37: Ελαστικά φάσματα απόκρισης στη βάση (πράσινη γραμμή) και στην κορυφή (κόκκινη γραμμή) του εδαφικού σχηματισμού στον σταθμό KSRH10 και προβλεπόμενο με το SHAKE φάσμα στην επιφάνεια (μπλε γραμμή) συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



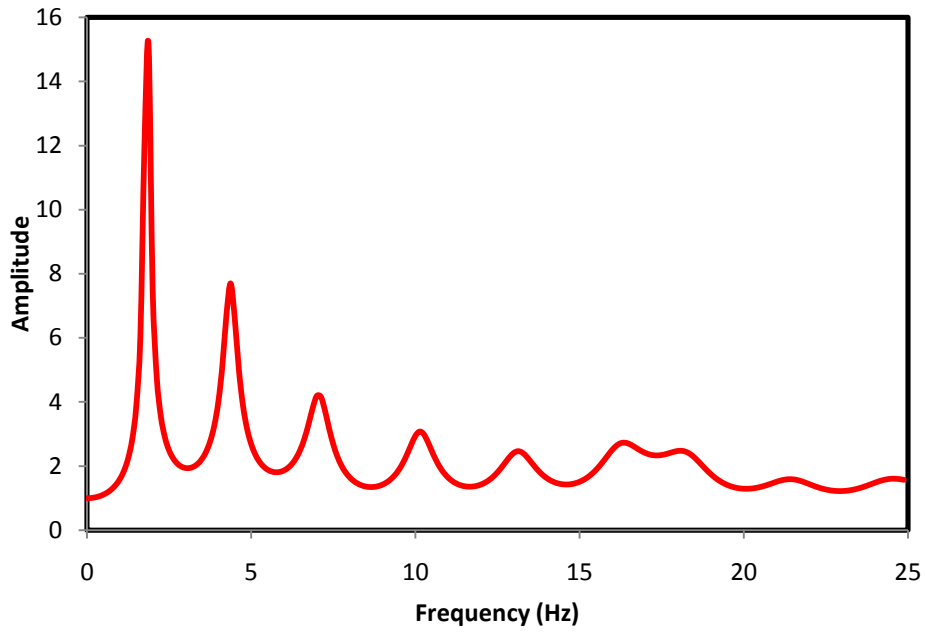
Σχήμα 4.38: Κατανομή επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



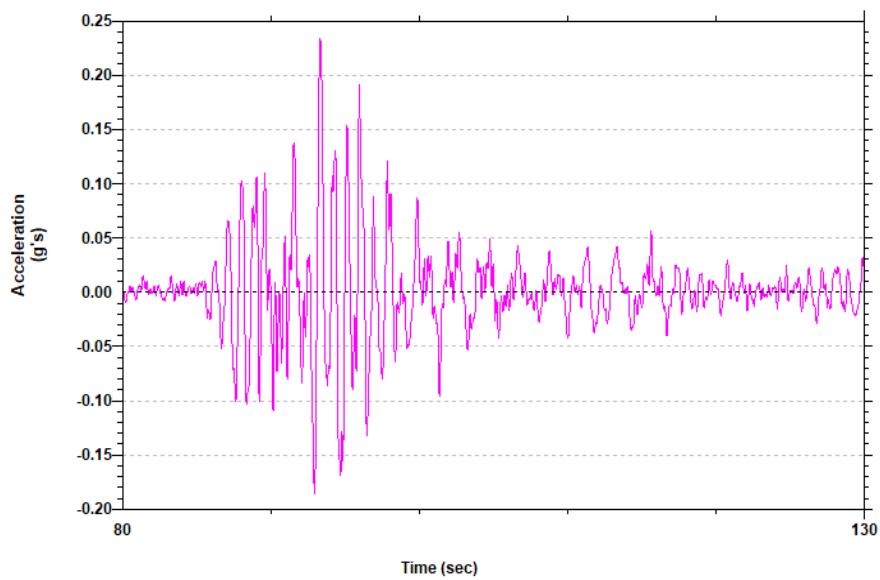
Σχήμα 4.39: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



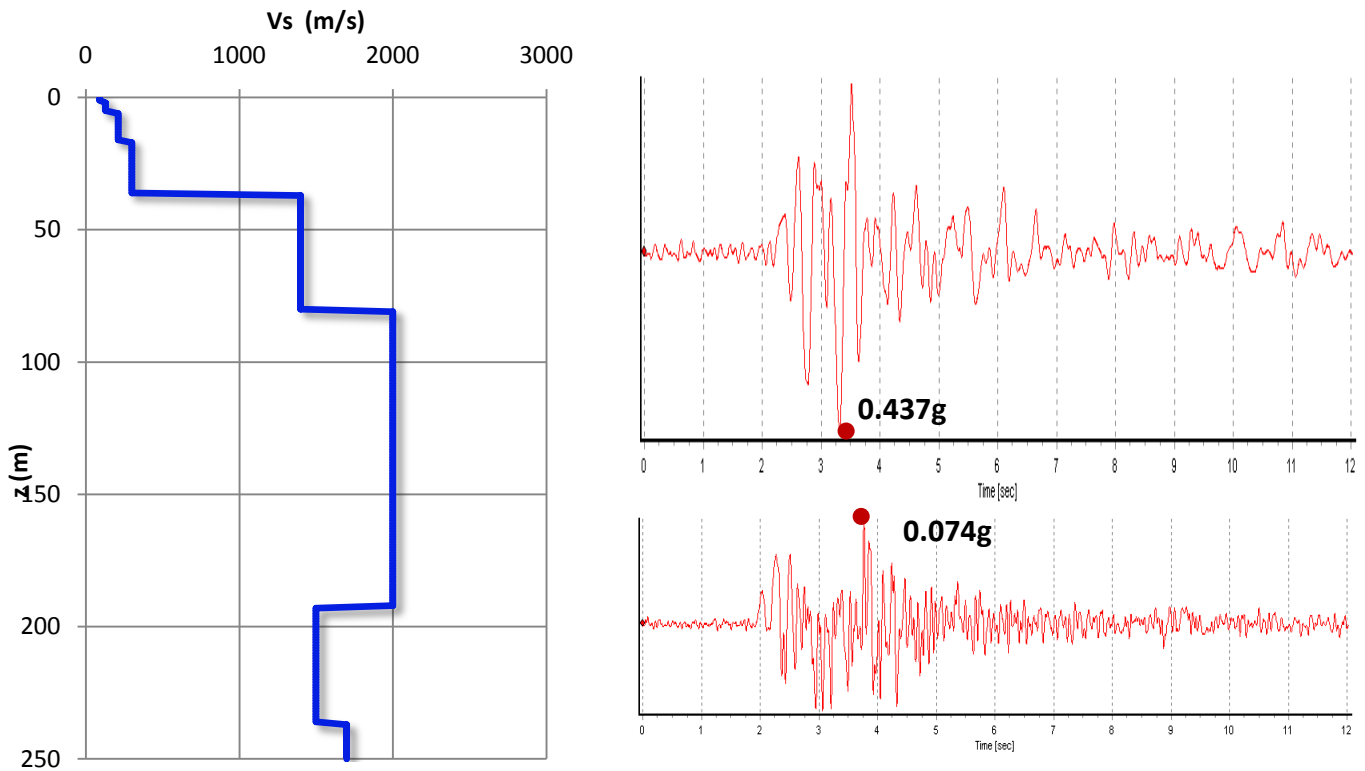
Σχήμα 4.40: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



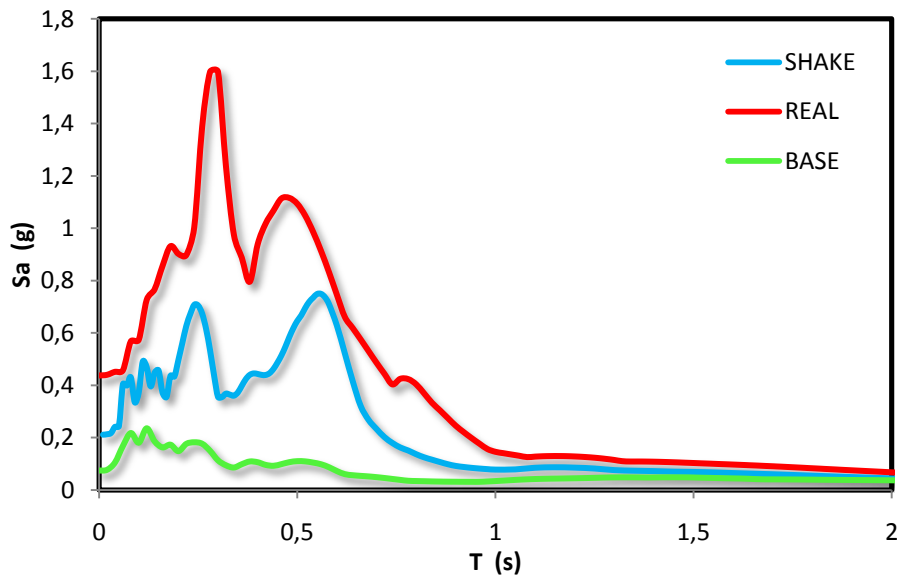
Σχήμα 4.41: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



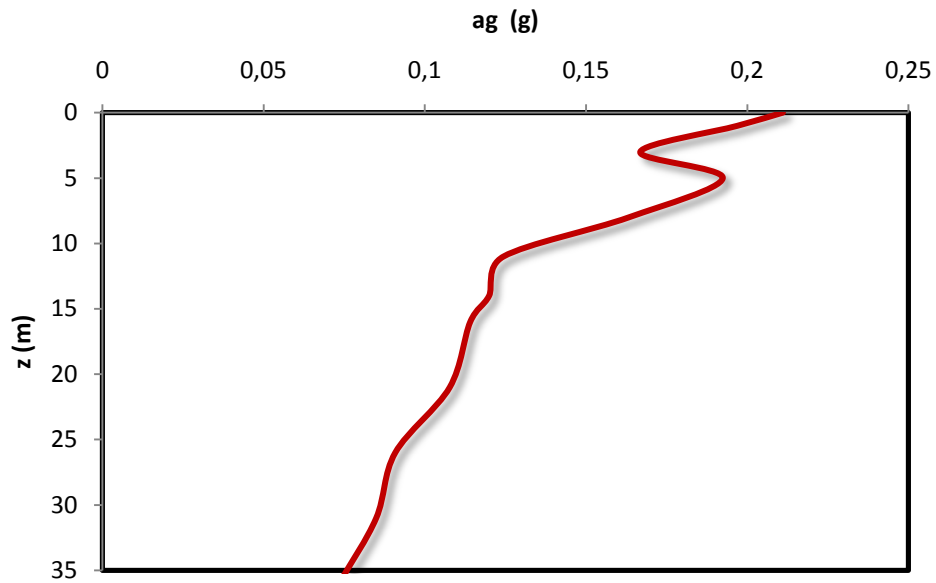
Σχήμα 4.42: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



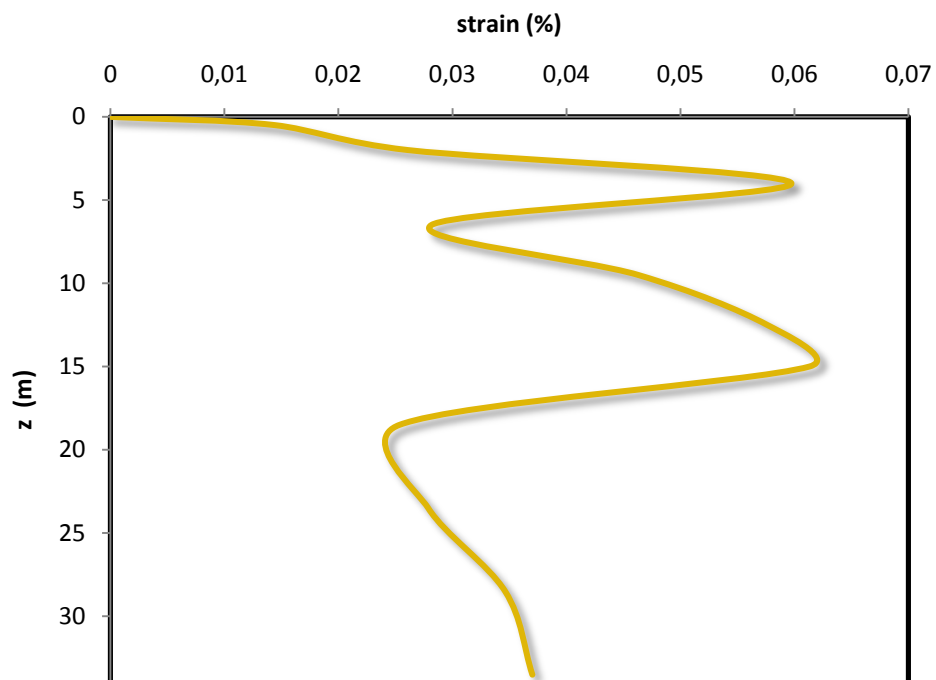
Σχήμα 4.43: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 36m και στη επιφάνεια στον σταθμό KSRH10 συνιστώσα EW, σεισμός Hokkaido 06/12/2004.



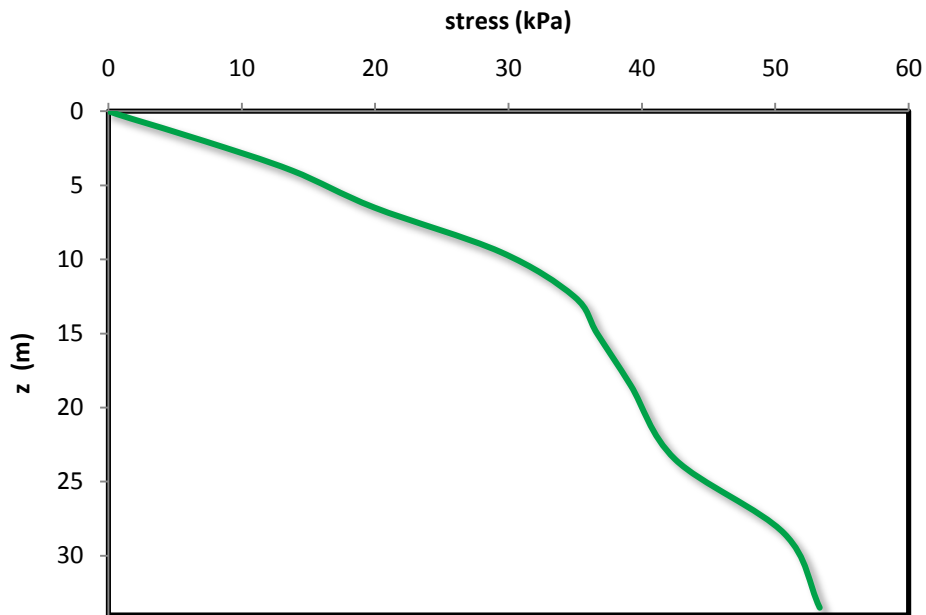
Σχήμα 4.44: Ελαστικά φάσματα απόκρισης στη βάση (πράσινη γραμμή) και στην κορυφή (κόκκινη γραμμή) του εδαφικού σχηματισμού στον σταθμό KSRH10 και προβλεπόμενο με το SHAKE φάσμα στην επιφάνεια (μπλε γραμμή) συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



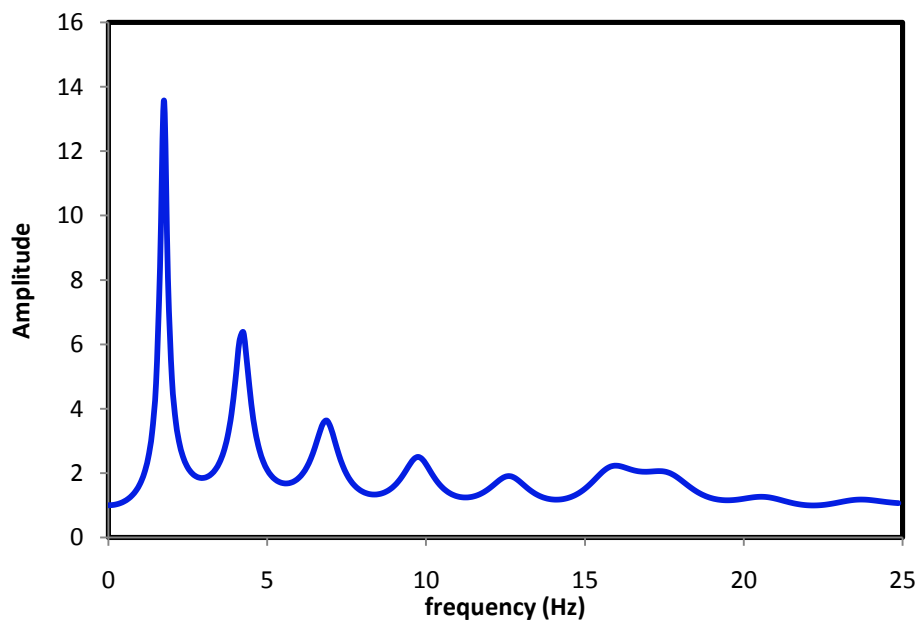
Σχήμα 4.45: Κατανομή επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



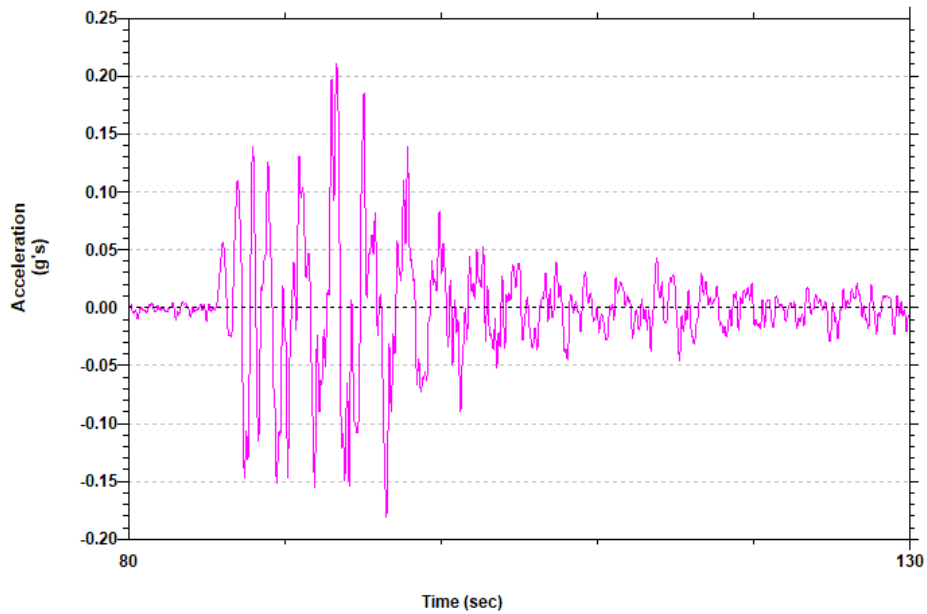
Σχήμα 4.46: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



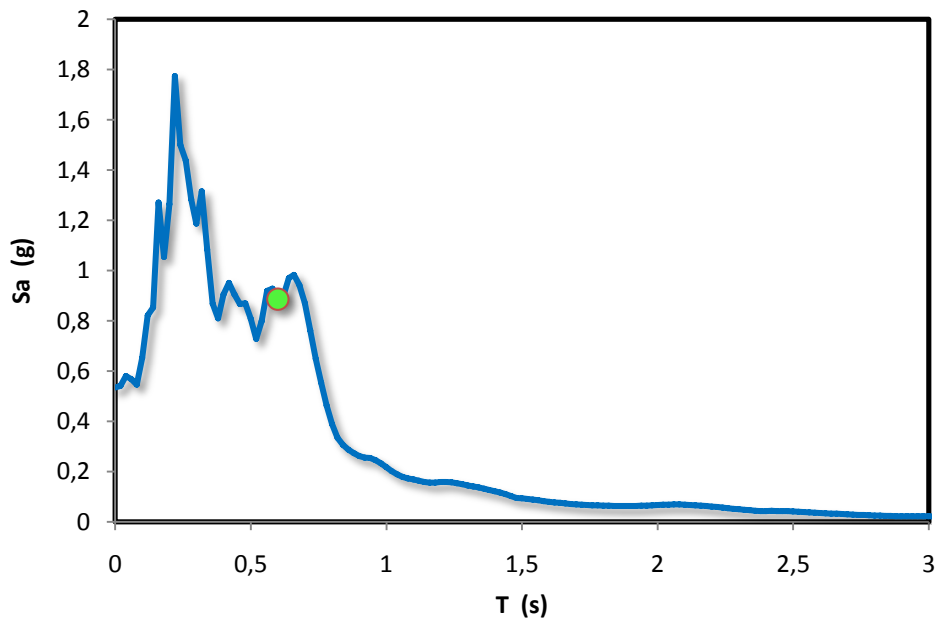
Σχήμα 4.47: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



Σχήμα 4.48: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



Σχήμα 4.49: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido 06/12/2004.



Σχήμα 4.52: Σύγκριση πραγματικού φάσματος (γαλάζια γραμμή) με θεωρητική ανάλυση (πράσινη τελεία).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό ΤΚΣΗ07

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό ΤΚCH07

5.1 Περιγραφή για τον σταθμό

Ο σταθμός ΤΚCH07 βρίσκεται στο Hokkaido της Ιαπωνίας σε υψόμετρο 9 μέτρων. Οι συντεταγμένες του σταθμού φαίνονται στο Σχήμα 5.1, ενώ το εδαφικό προφίλ και η κατανομή της ταχύτητας των διατμητικών κυματων Vs απεικονίζονται στο Σχήμα 5.2.

Το εδαφικό προφίλ αποτελείται από 100 μέτρα αργίλου με $PI = 50$ (Σχήμα 5.3) εδραζόμενα σε βράχο.

5.2 Σεισμός Tokachi-oki 2003

Ο σεισμός περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.1.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 5.4 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 100 μέτρων. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση είναι πολύ κοντά στο πραγματικό φάσμα σε όλο το εύρος περιόδων. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 5.6, οι διατμητικές παραμορφώσεις και τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 5.7 και 5.8 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 5.9 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10.

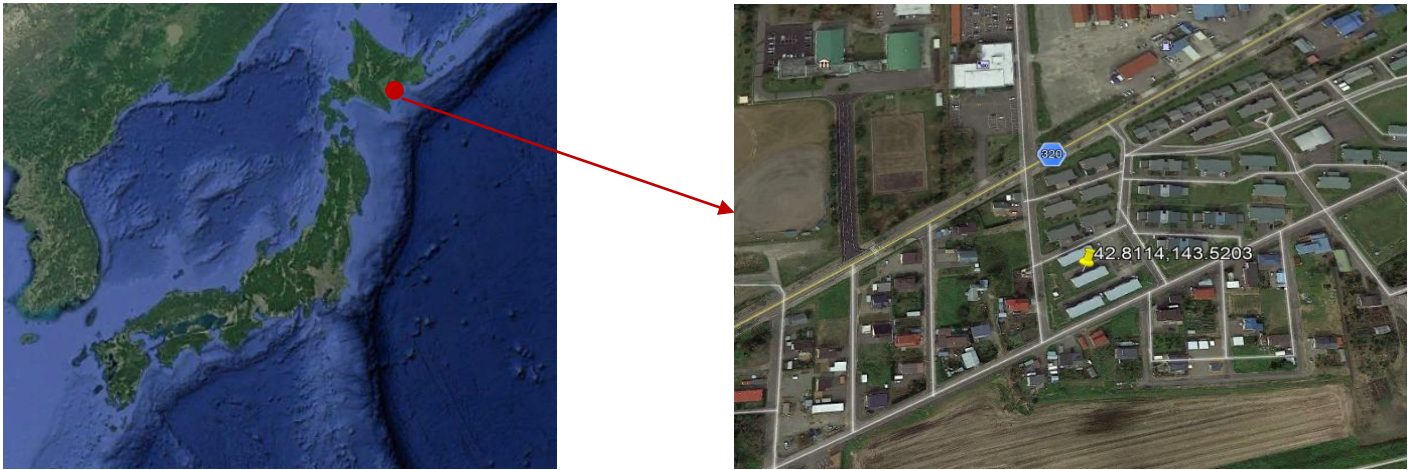
Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 5.11 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 103 μέτρων. Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει στην επιφάνεια απέχει αρκετά από το πραγματικό φάσμα στο σύνηθες εύρος ιδιοπεριοδών των κατασκευών και στις περιόδους περί το 1.5 s, η ανάλυση προβλέπει μικρότερη ενίσχυση. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 5.13, οι διατμητικές παραμορφώσεις και οι διατμητικές τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 5.14 και 5.15 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 5.16 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.17.

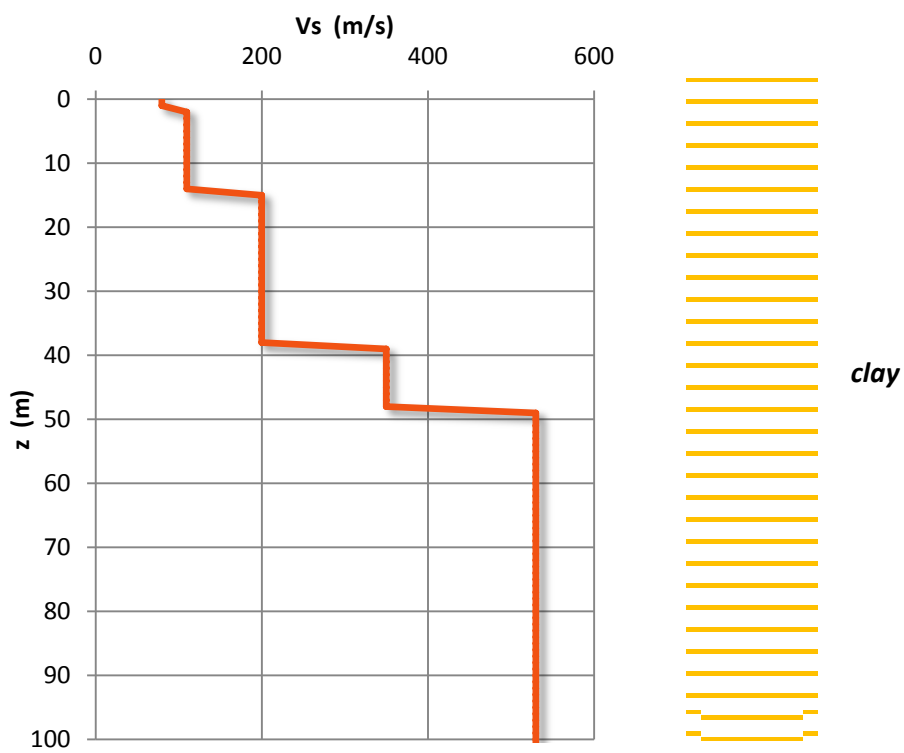
5.3 Παρατηρήσεις

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι αξιόπιστα και για τις δύο συνιστώσες του σεισμού. Συγκεκριμένα, στην συνιστώσα NS έχουμε πολύ καλή πρόβλεψη του φάσματος αποκρίσεως ακόμα και για μικρές περιόδους. Στην συνιστώσα EW η πρόβλεψη με το SHAKE υπερεκτιμά την ενίσχυση των χαμηλόσυχνων συνιστωσών της σεισμικής δόνησης. Παρόλα αυτά, οι τιμές του φάσματος δίνουν μια πρώτη εκτίμηση της πραγματικότητας, ιδίως στις υψηλές περιόδους.

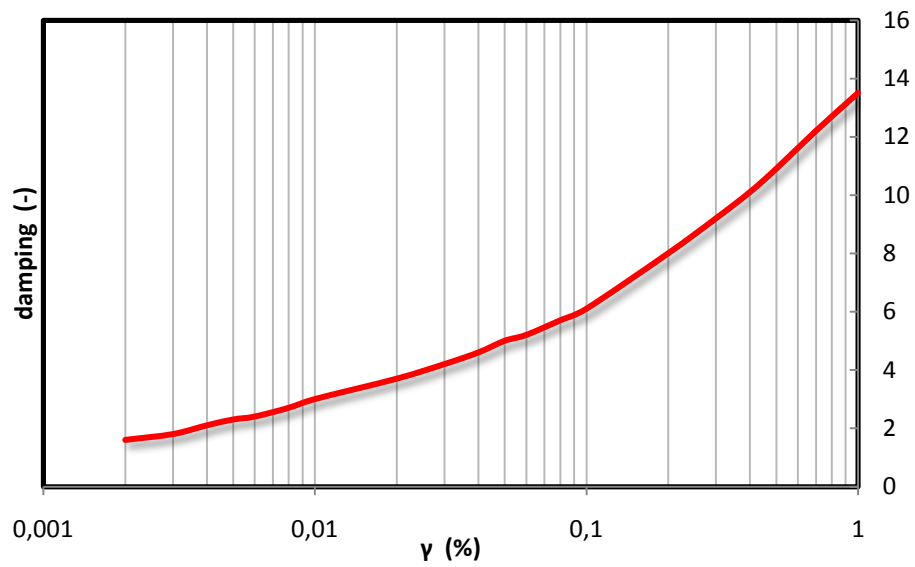
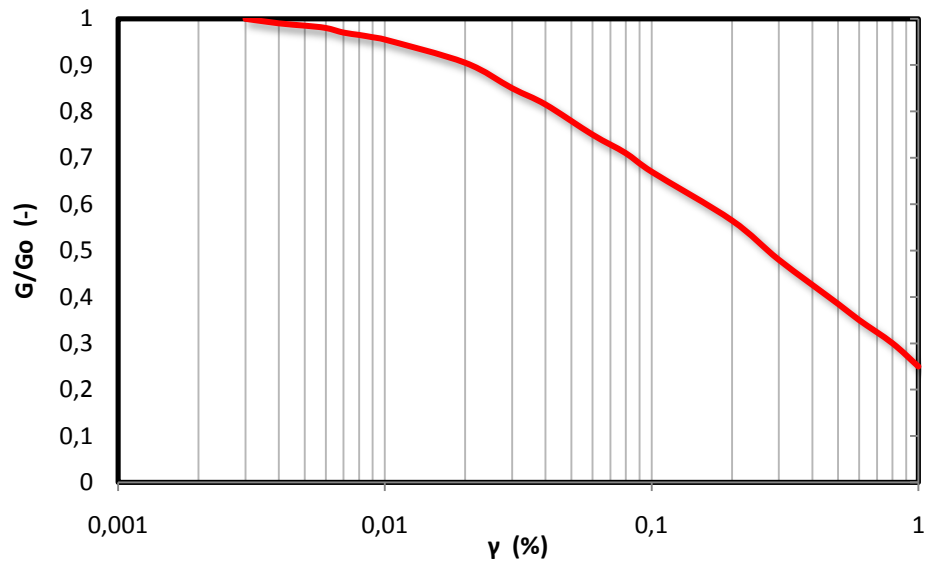
Σχήματα (5)



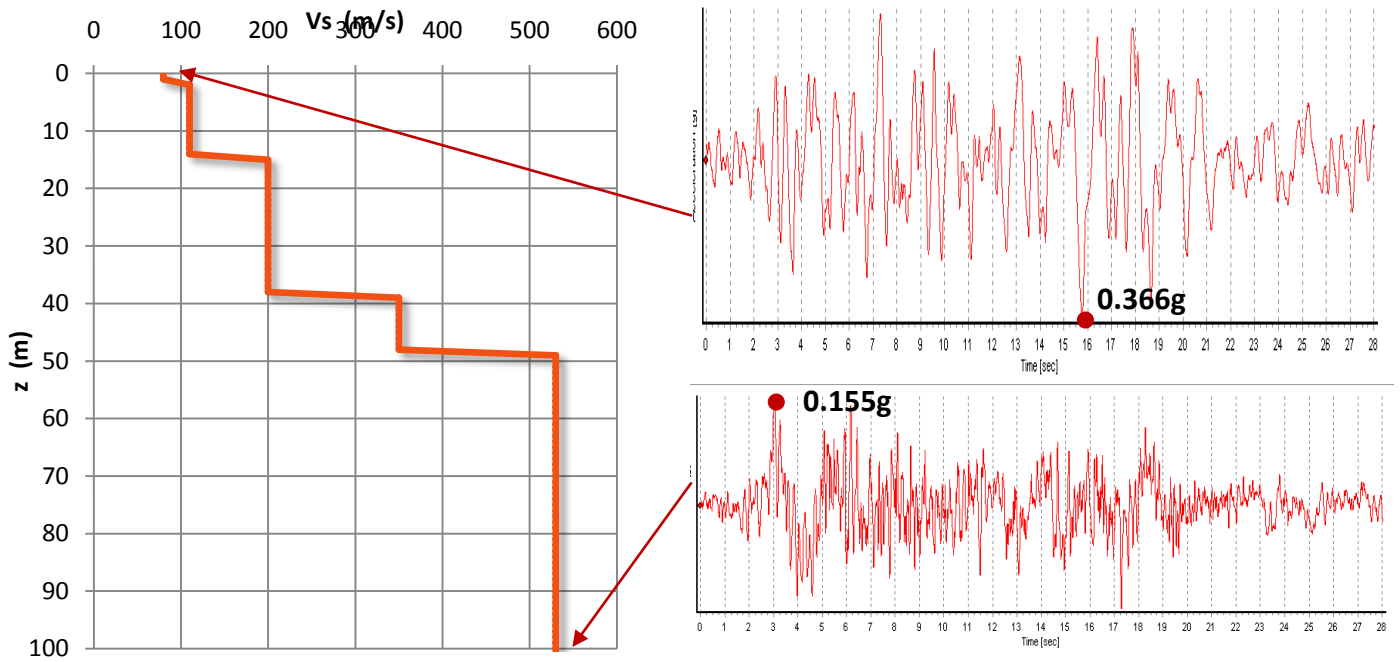
Σχήμα 5.1: Γεωγραφική θέση του σταθμού TKCH07



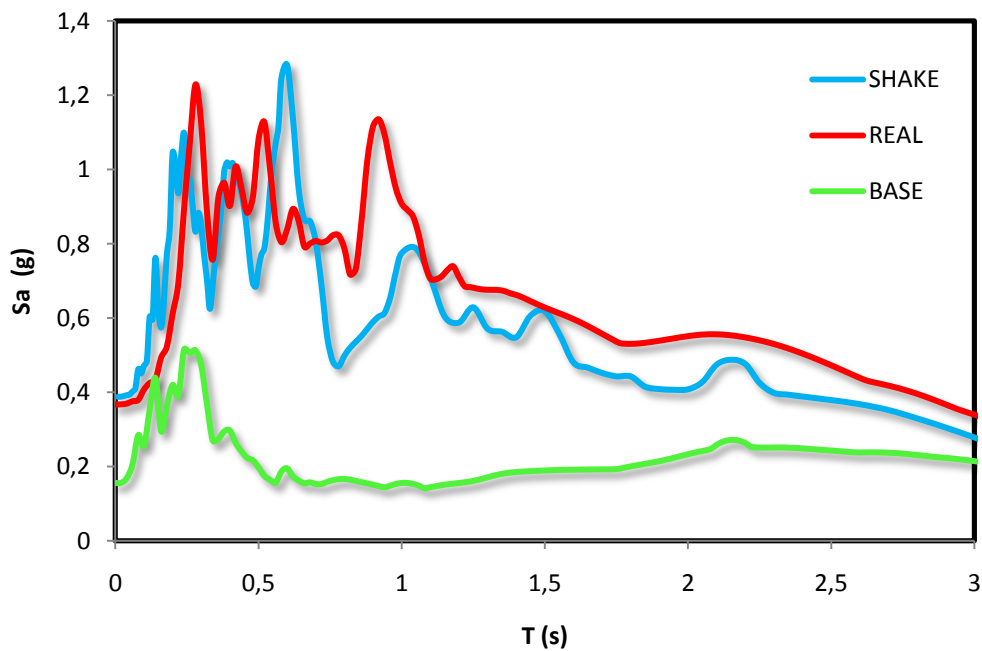
Σχήμα 5.2: Εδαφικό προφίλ και κατανομή Vs με το βάθος του σταθμού TKCH07.



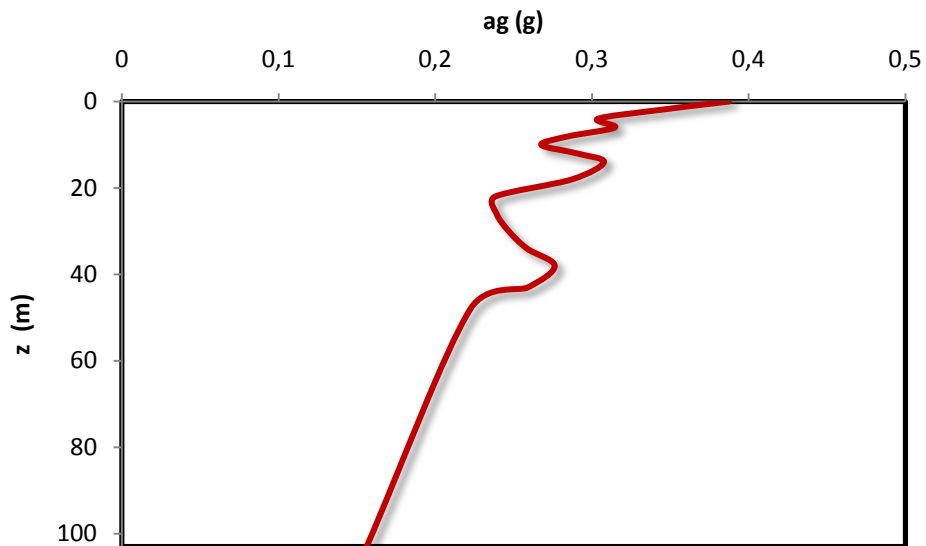
Σχήμα 5.3: Καμπύλες G - γ, ξ - γ των Vucetic & Dorby (1994) για άργιλο με PI = 50.



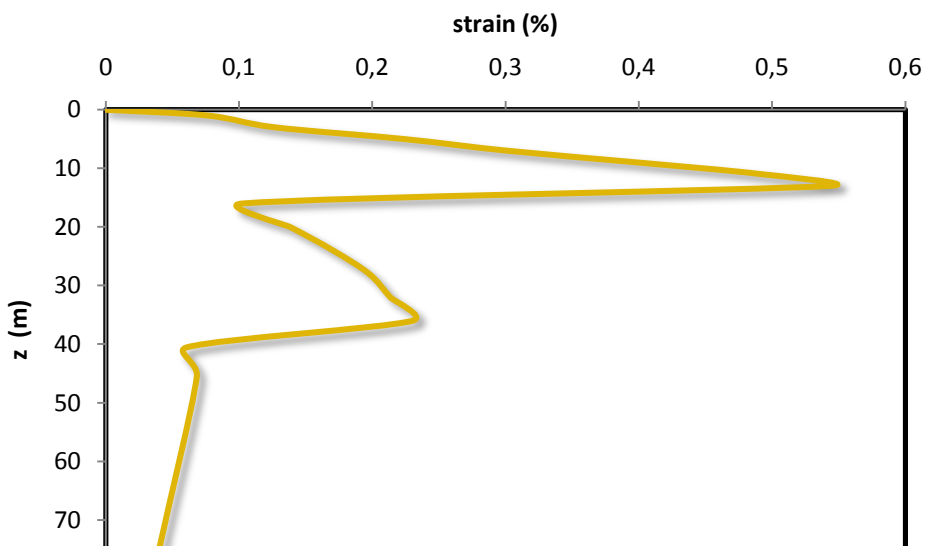
Σχήμα 5.4: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 100 m και στην επιφάνεια του εδάφους στον σταθμό ΤΚCH07 για την συνιστώσα NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



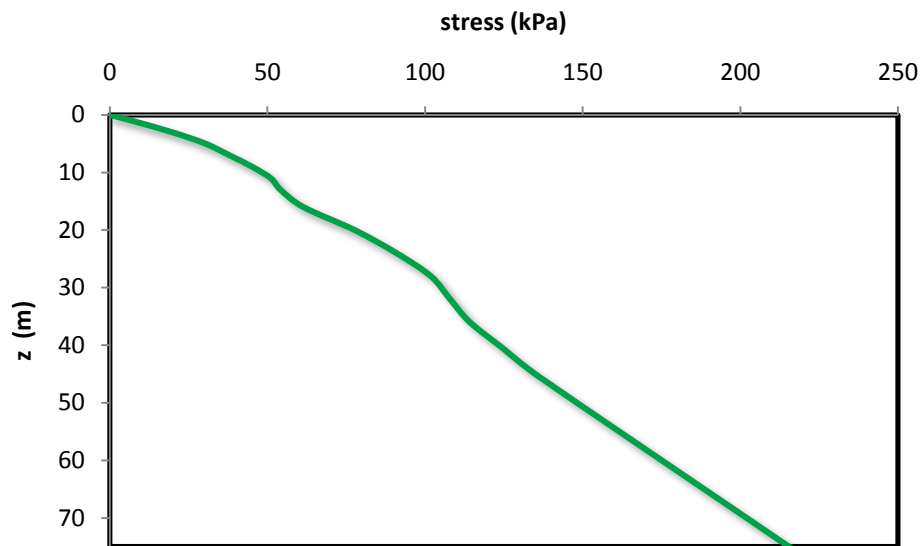
Σχήμα 5.5: Σύγκριση πραγματικού φάσματος στην κορυφή με προβλεπόμενου και φάσμα βάσης συνιστώσας NS του σεισμού στο Tokachi-oki 2003.



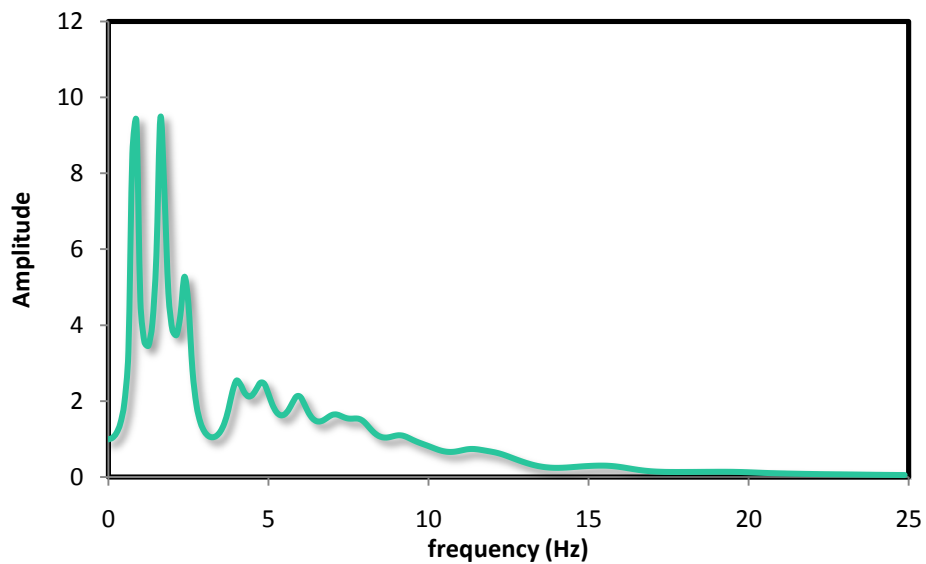
Σχήμα 5.6: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



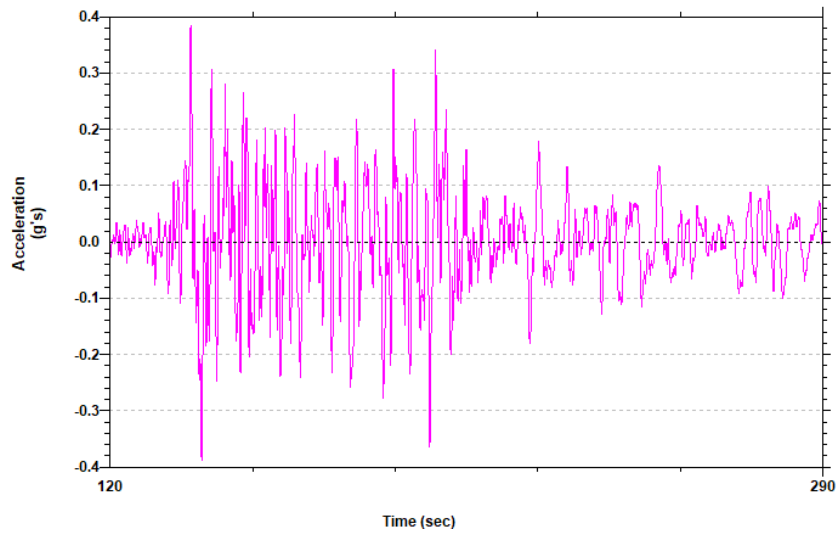
Σχήμα 5.7: Κατανομή διατμητικής παραμόρφωσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



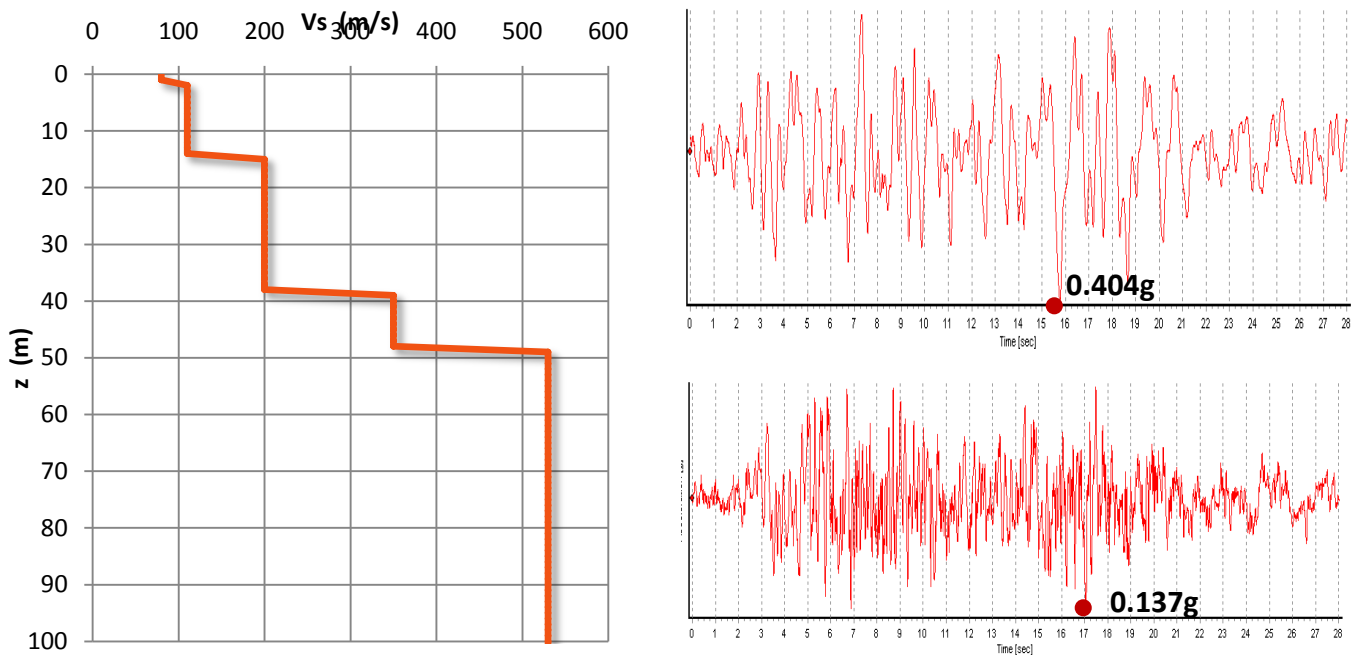
Σχήμα 5.8: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



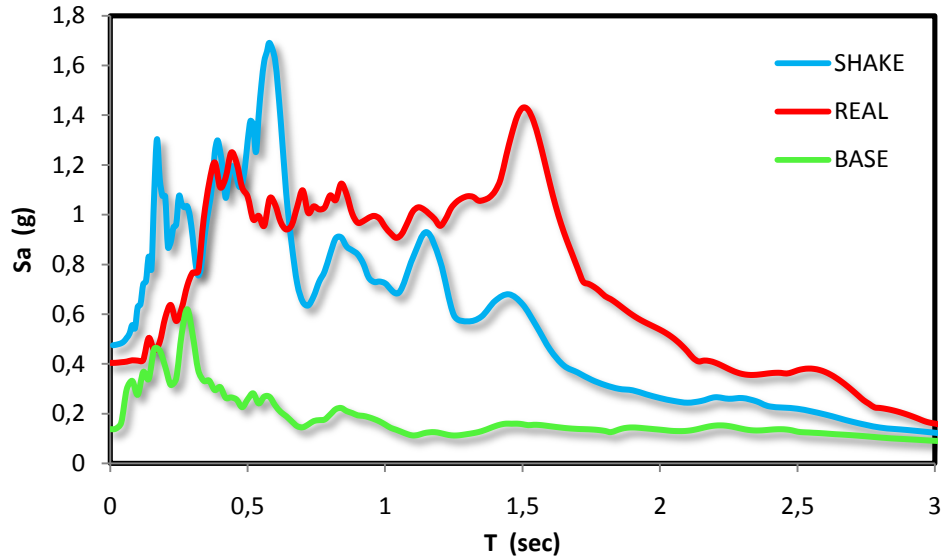
Σχήμα 5.9: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



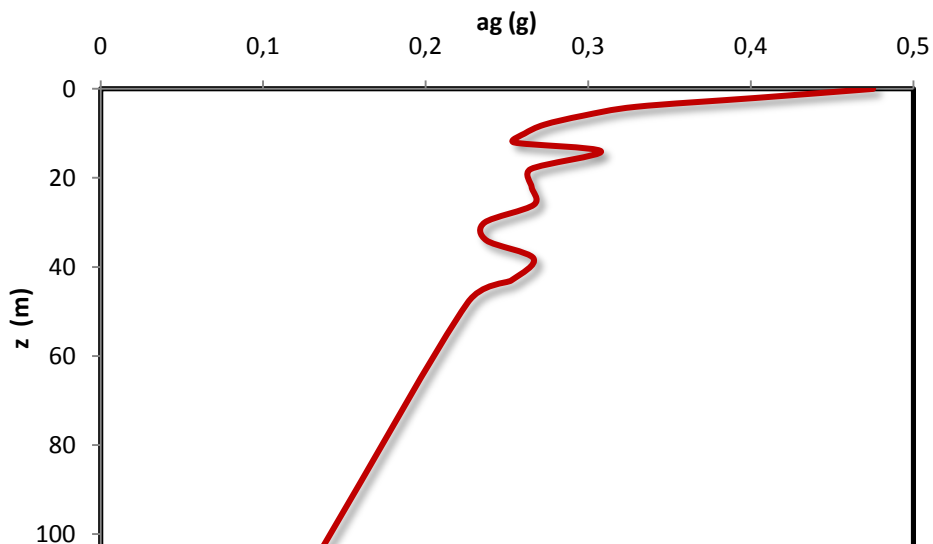
Σχήμα 5.10: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Tokachi-oki 2003.



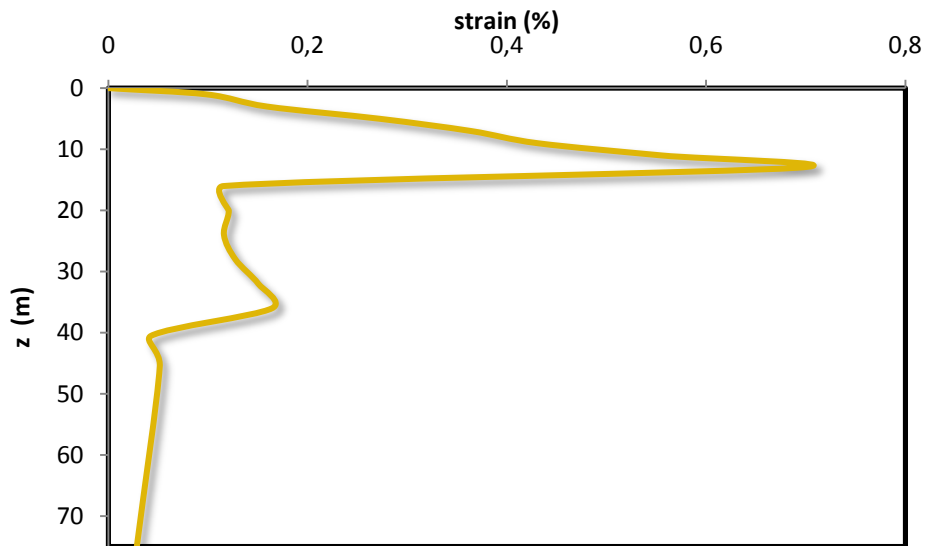
Σχήμα 5.11: Επιταχυνσιογραφήματα βάθος 100 m και στην επιφάνεια του εδάφους στον σταθμό TKCH07 συνιστώσα EW σεισμός Tokachi-oki 2003.



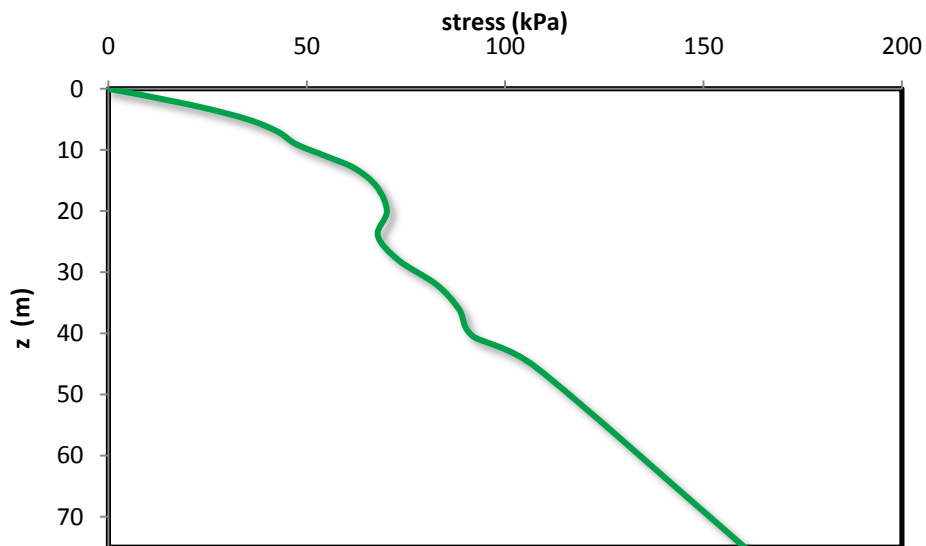
Σχήμα 5.12: Σύγκριση πραγματικού φάσματος στην κορυφή με προβλεπόμενου και φάσμα βάσης συνιστώσας EW του σεισμού στο Tokachi-oki 2003.



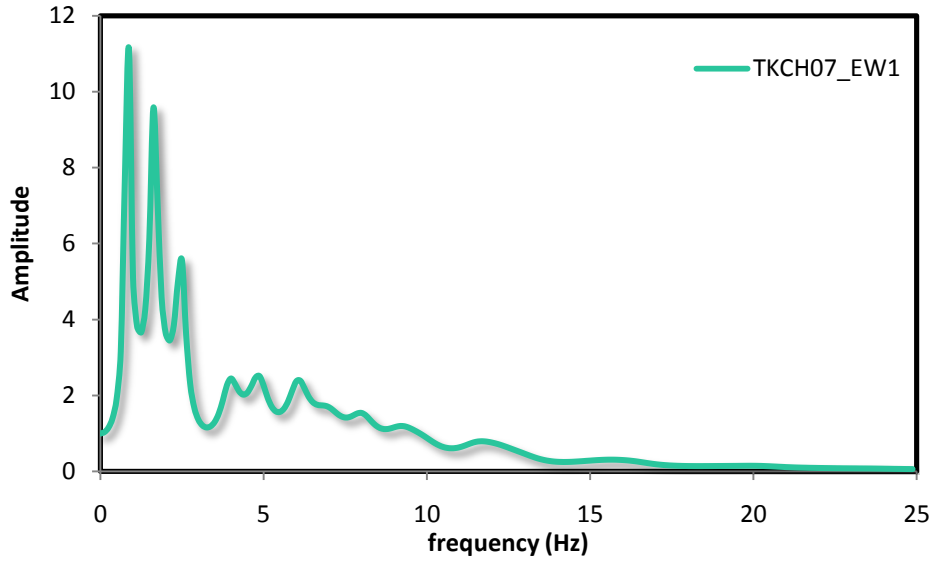
Σχήμα 5.13: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



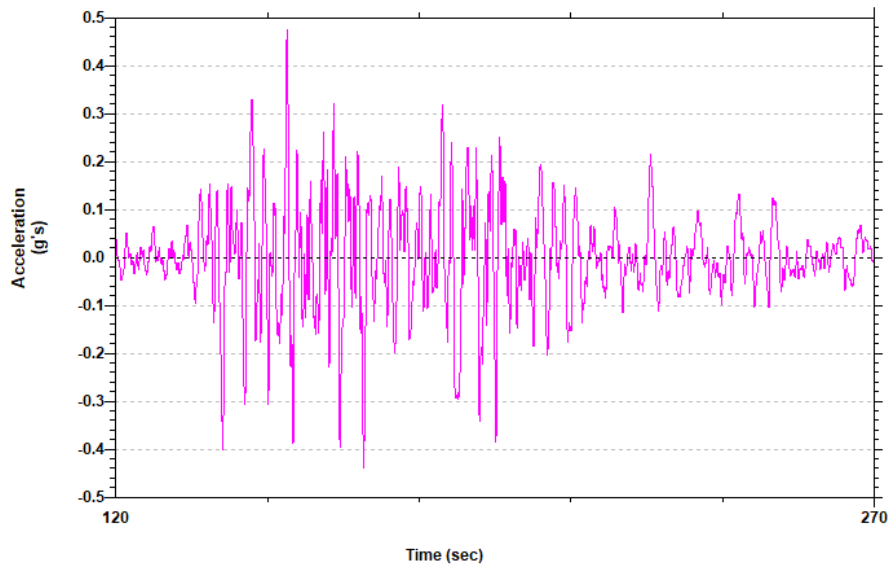
Σχήμα 5.14: Κατανομή διατμητικής παραμόρφωσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



Σχήμα 5.15: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



Σχήμα 5.16: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.



Σχήμα 5.17: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Tokachi-oki 2003.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό IBRH11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης στον σταθμό IBRH11

6.1 Πληροφορίες για τον σταθμό

Ο σταθμός IBRH11 βρίσκεται στο Ibarakiken της Ιαπωνίας σε υψόμετρο 67 μέτρων. Δύο επιταχυνσιογράφοι είναι τοποθετημένοι ο ένας στην επιφάνεια και ο άλλος σε βάθος 100 μέτρων. Η ακριβής τοποθεσία του σταθμού δείχνεται στο Σχήμα 6.1.

Το προφίλ, όπως δείχνει και το Σχήμα 6.2, αποτελείται από άργιλο με $PI = 50$ μέχρι σε βάθος 30 μέτρων με παρεμβολή μιάς στρώσης χαλικιού (gravel) από 10 έως 16 μέτρα βάθος. Μετά τα 30 μέτρα συναντάται σκληρός βράχος με $V_s = 2100$ m/s. Για την άργιλο χρησιμοποιούμε τις καμπύλες $G - \gamma$, $\xi - \gamma$ των Vucetic & Dorby (1994) για $PI = 50$ (Σχήμα 5.3), ενώ για τον βράχο τις καμπύλες του Schnabel (1973) (Σχήμα 4.5). Για το χαλίκι προτείνονται οι καμπύλες των Seed et al (1986). Όμως, η δυσκολία στην εξαγωγή δοκιμίων σε χαλίκι και στην μελέτη τους στο εργαστήριο, καθώς και ο μικρός αριθμός διαθέσιμων δειγμάτων για ανάλυση έχει οδηγήσει σε λανθασμένες καμπύλες $G - \gamma$, $\xi - \gamma$ που δείχνουν μια πιο ανελαστική συμπεριφορά του χαλικιού σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση από την πραγματική. Για αυτόν τον λόγο θα πραγματοποιήσουμε δύο αναλύσεις για τον πρώτο σεισμό. Μια με τις καμπύλες των Seed et al. (1986) και μία με νέες καμπύλες $G - \gamma$, $\xi - \gamma$ που οδηγούν σε μια πιο ελαστική συμπεριφορά (Καστραντά, Γκαζέτας 1997). Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται με τρκουάζ και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα στο Σχήμα 6.3.

6.2 Σεισμός Tohoku 2011

Στις 11 Μαρτίου του 2011 συνέβη στο Tohoku σεισμός μεγέθους $M = 9$, με το επίκεντρο να βρίσκεται περίπου 70 χιλιόμετρα ανατολικά της Oshika Peninsula και με υπόκεντρο σε βάθος περίπου 29 χιλιομέτρων (Σχήμα 6.4). Υπήρξε ο πιο ισχυρός σεισμός που έχει καταγραφεί ποτέ στην Ιαπωνία και ο τέταρτος μεγαλύτερος που έχει καταγραφεί παγκοσμίως, από το 1900 και μετά όπου υπάρχουν επιταχυνσιογραφήματα. Ο σεισμός προκάλεσε τσουνάμι με κύματα που ξεπέρασαν τα 40 μέτρα και επεκτάθηκαν πάνω από 10 χιλιόμετρα στην ενδοχώρα. Το τσουνάμι προκάλεσε πυρηνικά ατυχήματα σε τρεις πυρηνικούς σταθμούς της Fukushima οδηγώντας σε τεράστια οικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα.

Συνιστώσα NS

Στο Σχήμα 6.5 φαίνονται οι καταγραφές στο βραχώδες υπόβαθρο και στην επιφάνεια του εδάφους της συνιστώσας NS. Το επιταχυνσιογράφημα του βραχώδους υποβάθρου έχει τοποθετηθεί σε βάθος 30 μέτρων και όχι 103 μέτρων που ισχύει στην πραγματικότητα, καθώς μετά τα 30 μέτρα οι ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων είναι μεγαλύτερες από 1000 m/s, που σημαίνει ότι ήδη βρισκόμαστε σε βράχο. Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην επιφάνεια σε σύγκριση με αυτό που έδωσαν οι δύο αναλύσεις καθώς και το φάσμα στον βράχο. Το φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση με τις καμπύλες των Seed et al για το αμμοχάλικο δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά το πραγματικό φάσμα. Αντίθετα, το φάσμα της ανάλυσης με τις νέες καμπύλες πλησιάζει περισσότερο την πραγματική κατάσταση. Η κατανομή της εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος φαίνεται στο Σχήμα 6.7, οι διατμητικές παραμορφώσεις και οι διατμητικές τάσεις με το βάθος στα Σχήματα 6.8 και 6.9 αντίστοιχα, η συνάρτηση μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 6.10 και το προβλεπόμενο από το SHAKE επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.12 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτά που έδωσαν οι δύο αναλύσεις καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Και στις δύο περιπτώσεις η προσέγγιση του πραγματικού φάσματος δεν είναι καλή. Όμως, το φάσμα της ανάλυσης με τις νέες καμπύλες για το χάλικι δίνει καλύτερα αποτελέσματα από ότι αυτό που προέκυψε με χρήση των καμπυλών των Seed et al. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.14 - 6.18.

6.3 Σεισμός near the east coast of Honshu 11/03/2011

Ο παραπάνω σεισμός συνέβη την ίδια μέρα με τον σεισμό του Tohoku που είδαμε προηγουμένως και το μέγεθός του καταγράφηκε $M = 7.9$. Στο Σχήμα 6.19 φαίνονται οι συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.20 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.21 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό της ανάλυσης και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το προβλεπόμενο φάσμα δεν είναι αντιπροσωπευτικό της πραγματικής κατάστασης. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.22 - 6.26.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.27 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.28 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτά που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει είναι πιο σωστό από αυτό στη συνιστώσα NS, αλλά δεν πιάνει τις λεπτομέρειες του πραγματικού φάσματος. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.29 - 6.33.

6.4 Σεισμός near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12

Ο σεισμός είχε μέγεθος $M = 5.5$ και εστιακό βάθος 40 km. Οι συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού φαίνονται στο Σχήμα 6.34.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.35 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων, όπου αρχίζει το βραχώδες υπόβαθρο. Στο Σχήμα 6.36 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτό που έδωσε η ανάλυση, καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει είναι κοντά στο πραγματικό φάσμα όμως σε περιόδους κοντά στα 0.2 s οι τιμές είναι τελείως λανθασμένες. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των

διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.37 - 6.41.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.42 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.43 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με αυτά που έδωσε η ανάλυση καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει υποτιμά την εδαφική ενίσχυση και απέχει πολύ από το πραγματικό φάσμα στο σύνηθες εύρος ιδιοπεριόδων των κατασκευών. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.44 - 6.48.

6.5 Σεισμός Eastern Honshu Japan 2011/04/11

Ο σεισμός είχε μέγεθος $M = 5.8$ και εστιακό βάθος 77 km. Οι συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού φαίνονται στο Σχήμα 6.49.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.50 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.51 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με της ανάλυσης καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει δεν είναι ακριβές, αλλά δίνει μια πρώτη αίσθηση του αναμενόμενου φάσματος στην επιφάνεια. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.52 - 6.56.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.57 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.58

παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με της ανάλυσης καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει απέχει πολύ από το πραγματικό φάσμα στο σύνθετες εύρος ιδιοπεριοδών των κατασκευών. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.59 - 6.63.

6.6 Σεισμός Eastern Honshu Japan 2011/04/11

Ο σεισμός είχε μέγεθος $M = 6.6$ και εστιακό βάθος 11 km. Οι συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού φαίνονται στο Σχήμα 6.64.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.65 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.66 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με της ανάλυσης καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει δεν προβλέπει τη πρώτη αιχμή του πραγματικού φάσματος στα 0.2 s, αλλά γενικά αντικατοπτρίζει τη πραγματικότητα. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.67 - 6.71.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.72 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.73 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με της ανάλυσης καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει δε πλησιάζει καθόλου τη πραγματικότητα στις περιόδους κάτω από 0.6 s. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.74- 6.78.

6.7 Σεισμός Off the East coast of Honshu Japan 2012/12/07

Στις 7 Δεκεμβρίου 2012 στις 8:18 (UTC) ισχυρή σεισμική δόνηση μεγέθους $M = 7.3$ συνέβη στην ανατολική ακτή του Honshu της Ιαπωνίας, ως αποτέλεσμα ανάστροφου ρήγματος στην πλάκα του Ειρηνικού 20 χιλιόμετρα ανατολικά του ορίου μεταξύ της πλάκας του Ειρηνικού και της Βορειοαμερικανικής πλάκας που ορίζει τη θέση όπου η πλάκα του Ειρηνικού βυθίζεται κάτω από την Ιαπωνία. Το εστιακό βάθος εκτιμάται στα 36 km με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του επικέντρου να φαίνονται στο Σχήμα 6.79.

Συνιστώσα NS

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.80 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.81 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με της ανάλυσης καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει προβλέπει σωστά τη πραγματική μορφή, ωστόσο υποτιμά την ενίσχυση στις χαμηλές περιόδους. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.82- 6.86.

Συνιστώσα EW

Τα επιταχυνσιογραφήματα της κορυφής και της βάσης φαίνονται στο Σχήμα 6.87 με το επιταχυνσιογράφημα της βάσης τοποθετημένο σε βάθος 30 μέτρων. Στο Σχήμα 6.88 παρουσιάζονται το πραγματικό φάσμα αποκρίσεως στην κορυφή σε σύγκριση με της ανάλυσης καθώς και το φάσμα στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Το φάσμα που προκύπτει υποτιμά σημαντικά την ενίσχυση για περιόδους κάτω από 0.5 s. Οι κατανομές της εδαφικής επιτάχυνσης, των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων με το βάθος, η συνάρτηση μεταφοράς και η προβλεπόμενη καταγραφή στην επιφάνεια απεικονίζονται στα Σχήματα 6.89 - 6.93.

6.8 Παρατηρήσεις

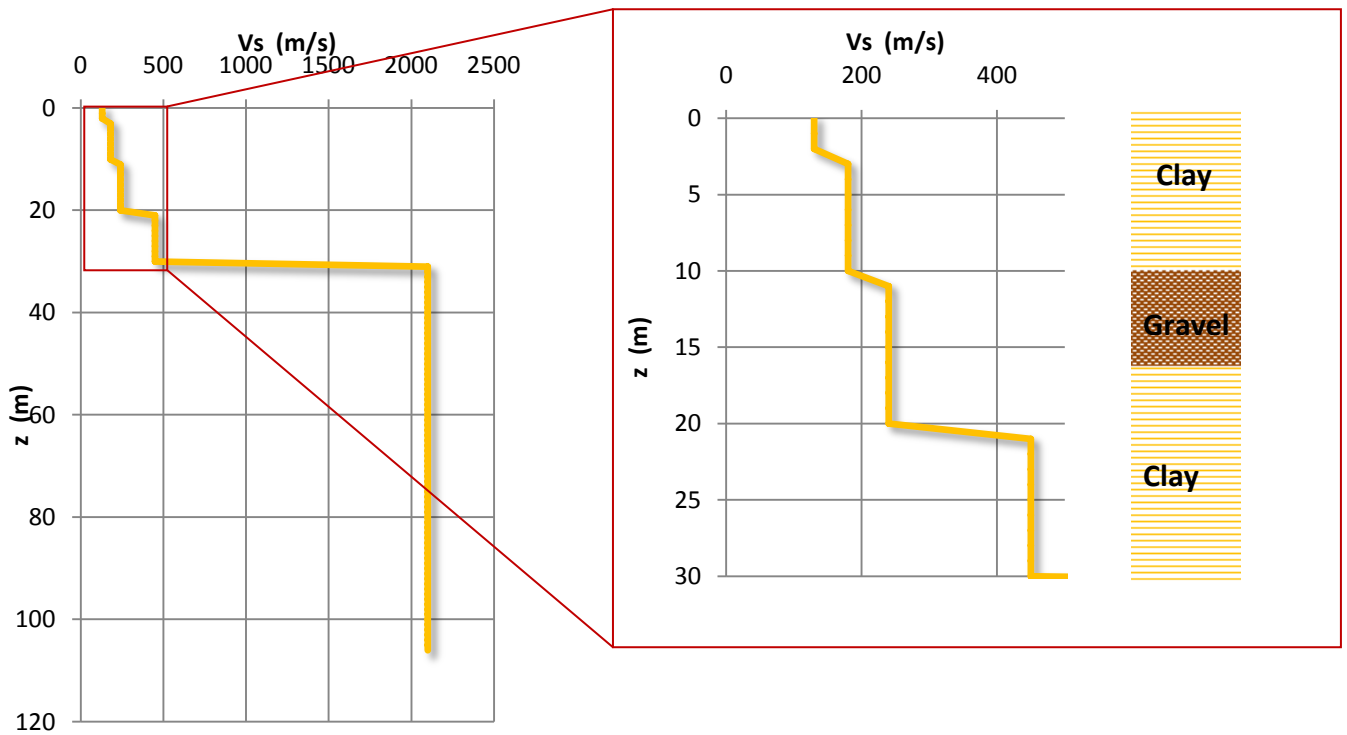
Εδώ τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάλογα το γεγονός. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πρόβλεψη είναι καλύτερη για τις συνιστώσες NS. Στις συνιστώσες EW παρατηρούμε σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα όχι τόσο ως προς την μορφή του φάσματος, αλλά ως προς το μέγεθος την ενίσχυσης του σεισμικού κραδασμού. Σε κάθε περίπτωση, η ανάλυση με το SHAKE φαίνεται να υποεκτιμά την ενίσχυση στις χαμηλές περιόδους.

Επίσης, αποδείχτηκε ότι οι καμπύλες G - γ, ξ - γ για το χαλίκι που προτείνονται από το πρόγραμμα δεν αντικατοπτρίζουν σωστά την συμπεριφορά του υπό ανακυκλική δυναμική φόρτιση. Οι νέες καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις προβλέπουν καλύτερα αυτή τη συμπεριφορά, η οποία είναι πιο ελαστική.

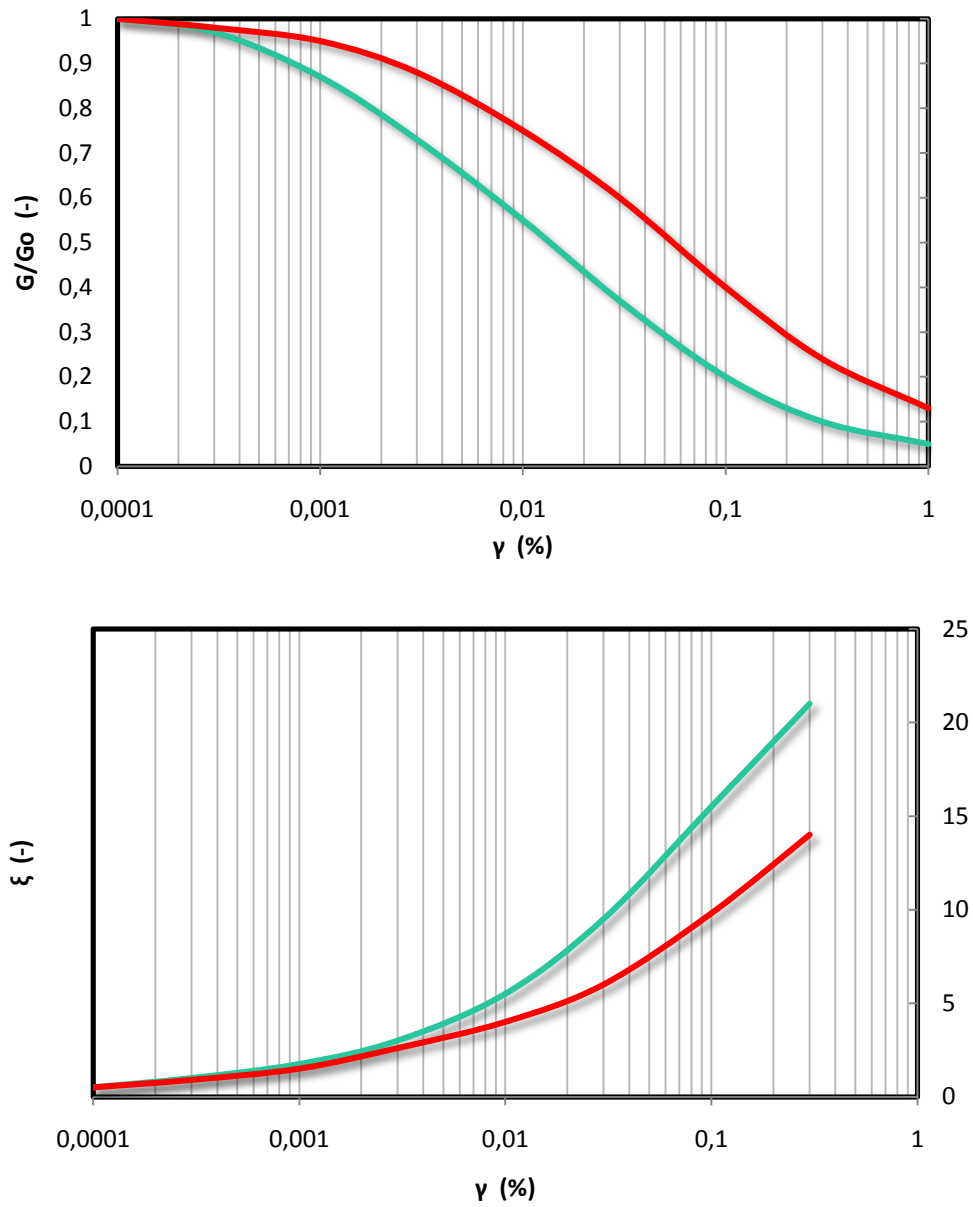
Σχήματα (6)



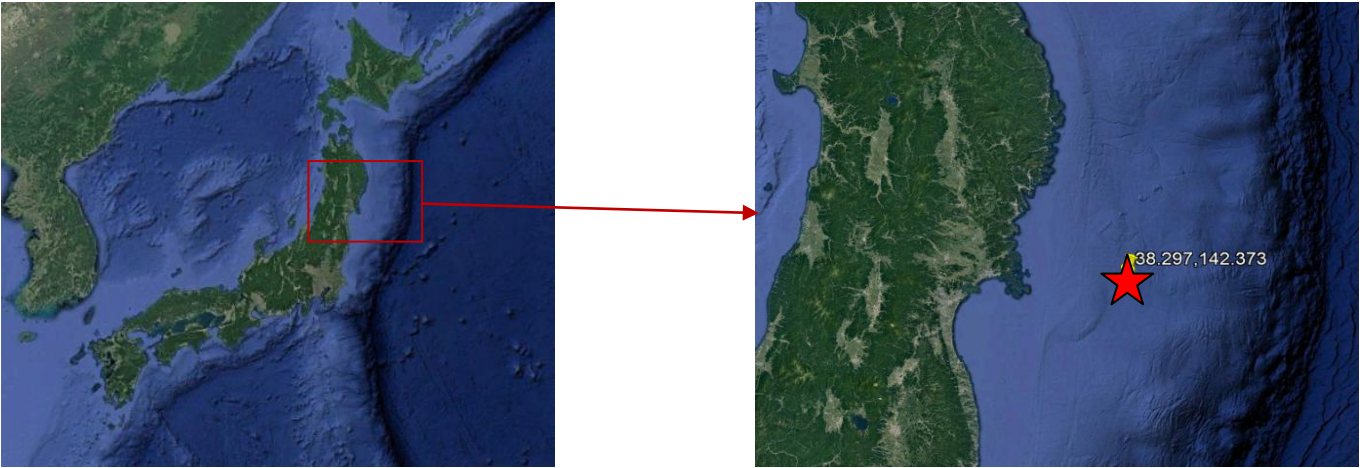
Σχήμα 6.1: Γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού IBRH11



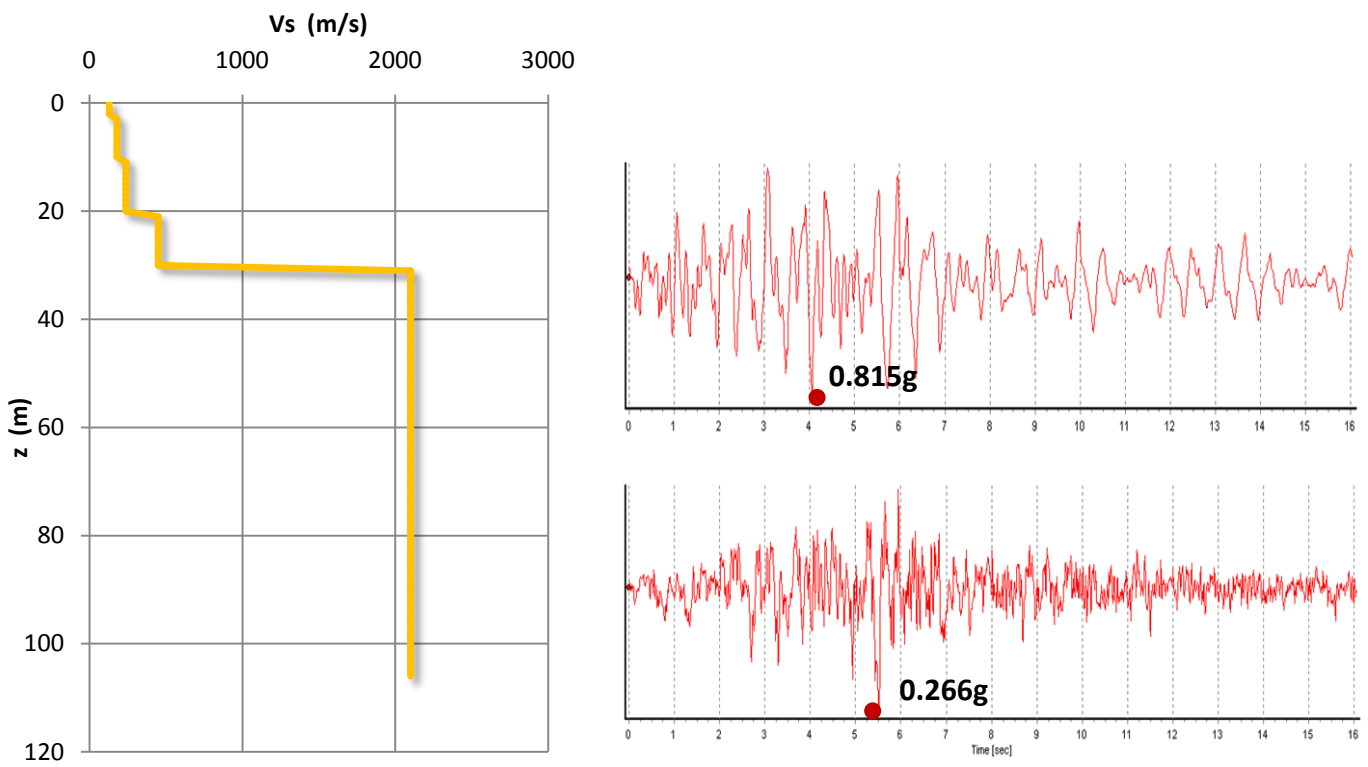
Σχήμα 6.2: Εδαφικό προφίλ και κατανομή V_s με το βάθος του σταθμού IBRH11.



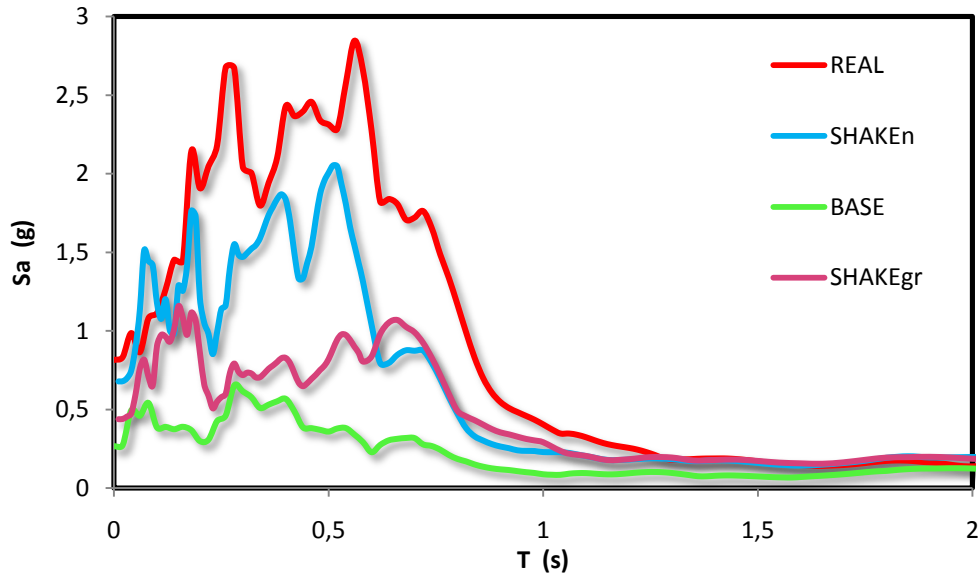
Σχήμα 6.3: Καμπύλες $G - \gamma$, $\xi - \gamma$ των Seed et al (1986) για χαλίκι (τιρκουάζ) και νέες καμπύλες $G - \gamma$, $\xi - \gamma$ για χαλίκι (κόκκινές).



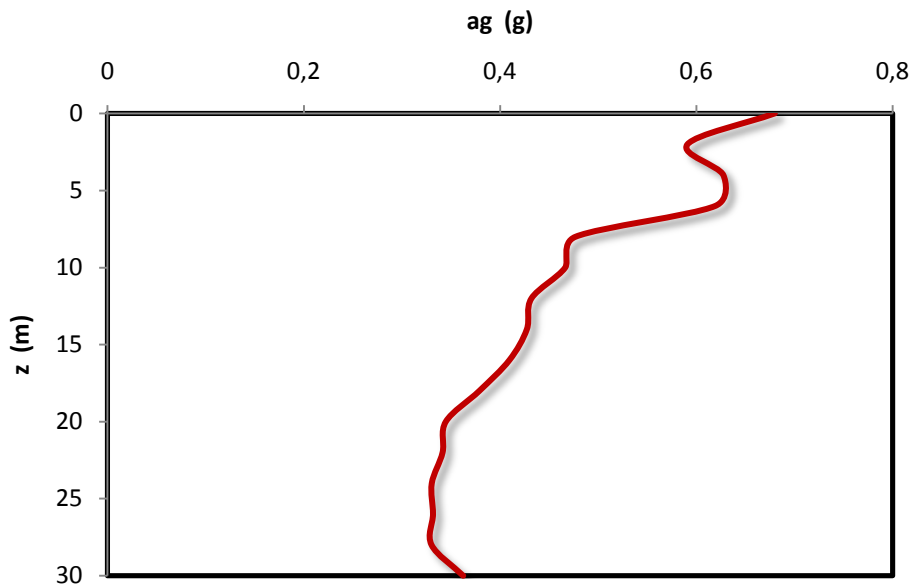
Σχήμα 6.4: Συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού του Tohoku 2011.



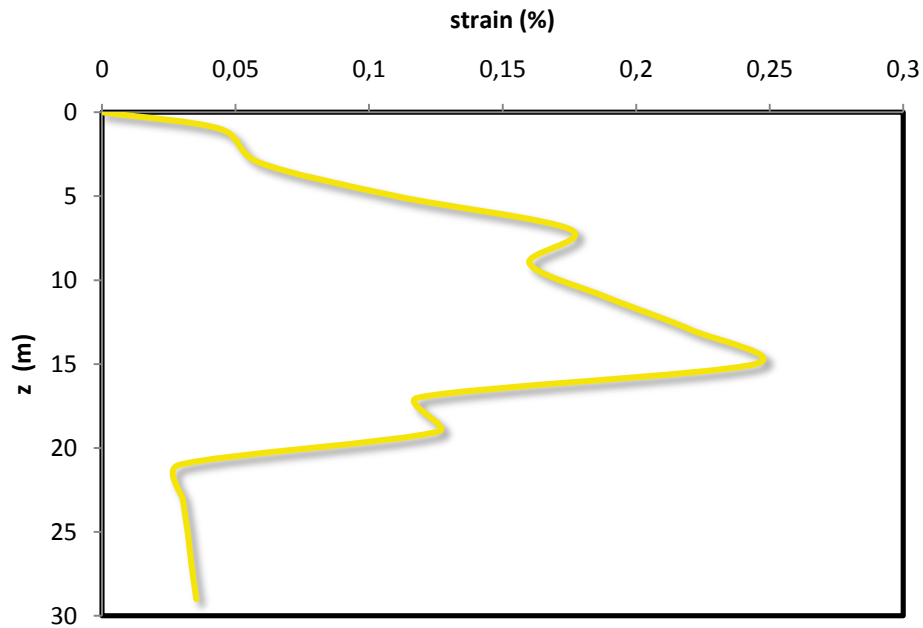
Σχήμα 6.5: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας NS, σεισμός Tohoku 2011.



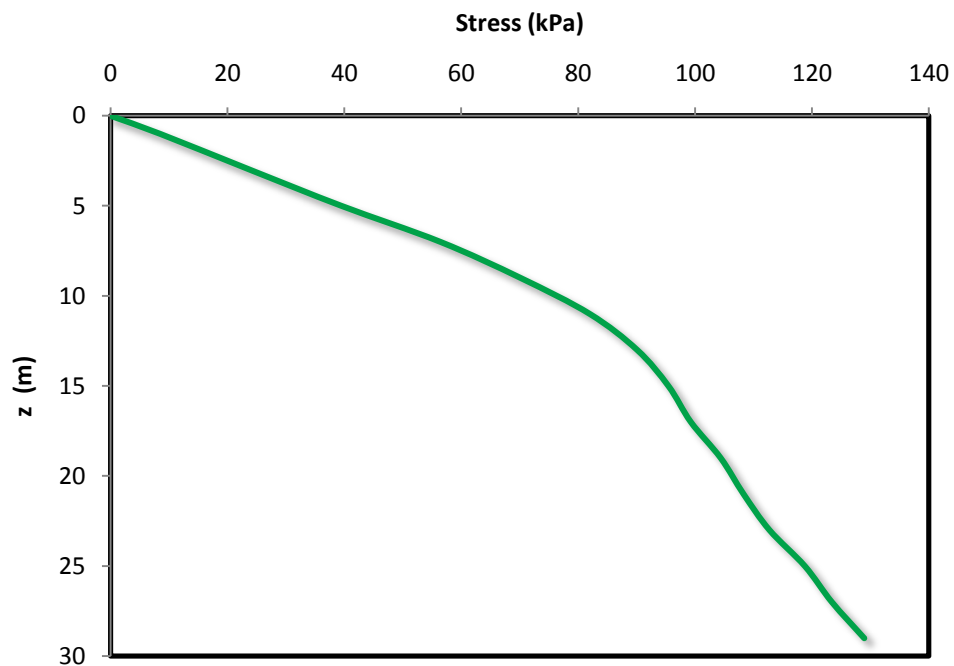
Σχήμα 6.6: Σύγκριση πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με αυτό της ανάλυσης με τις καμπύλες Seed et al (1986) για το χαλίκι (μοβ φάσμα) και με αυτό με τις νέες καμπύλες για το αμμοχάλικο (γαλάζιο φάσμα) και φάσμα στο βραχώδες υπόβαθρο (σεισμός Tohoku 2011, συνιστώσα NS).



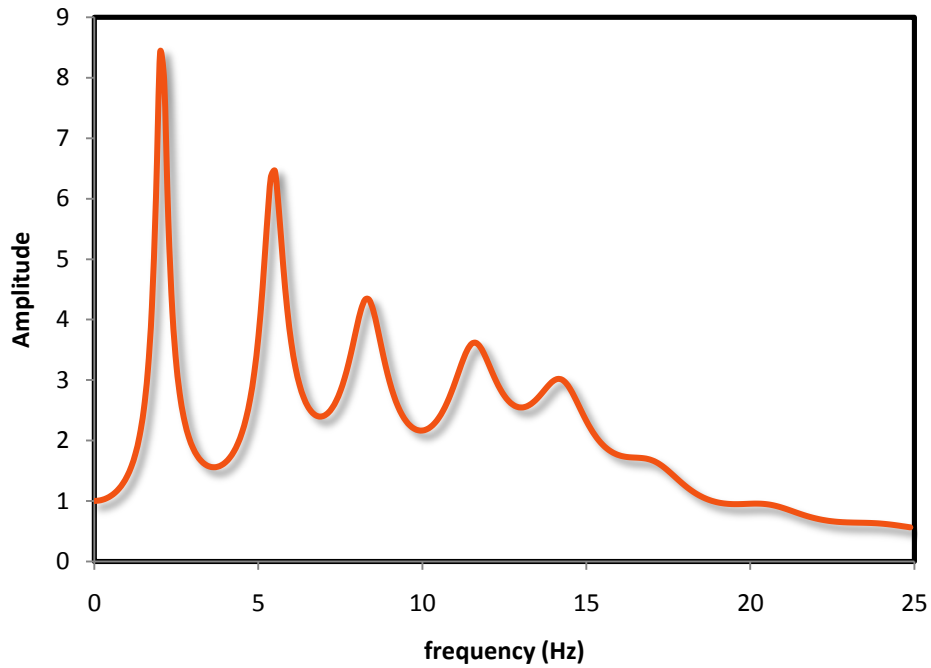
Σχήμα 6.7: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



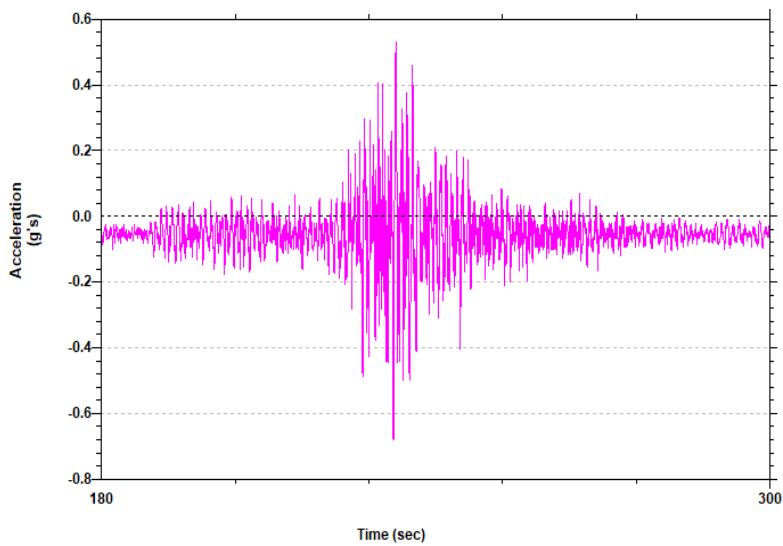
Σχήμα 6.8 : Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



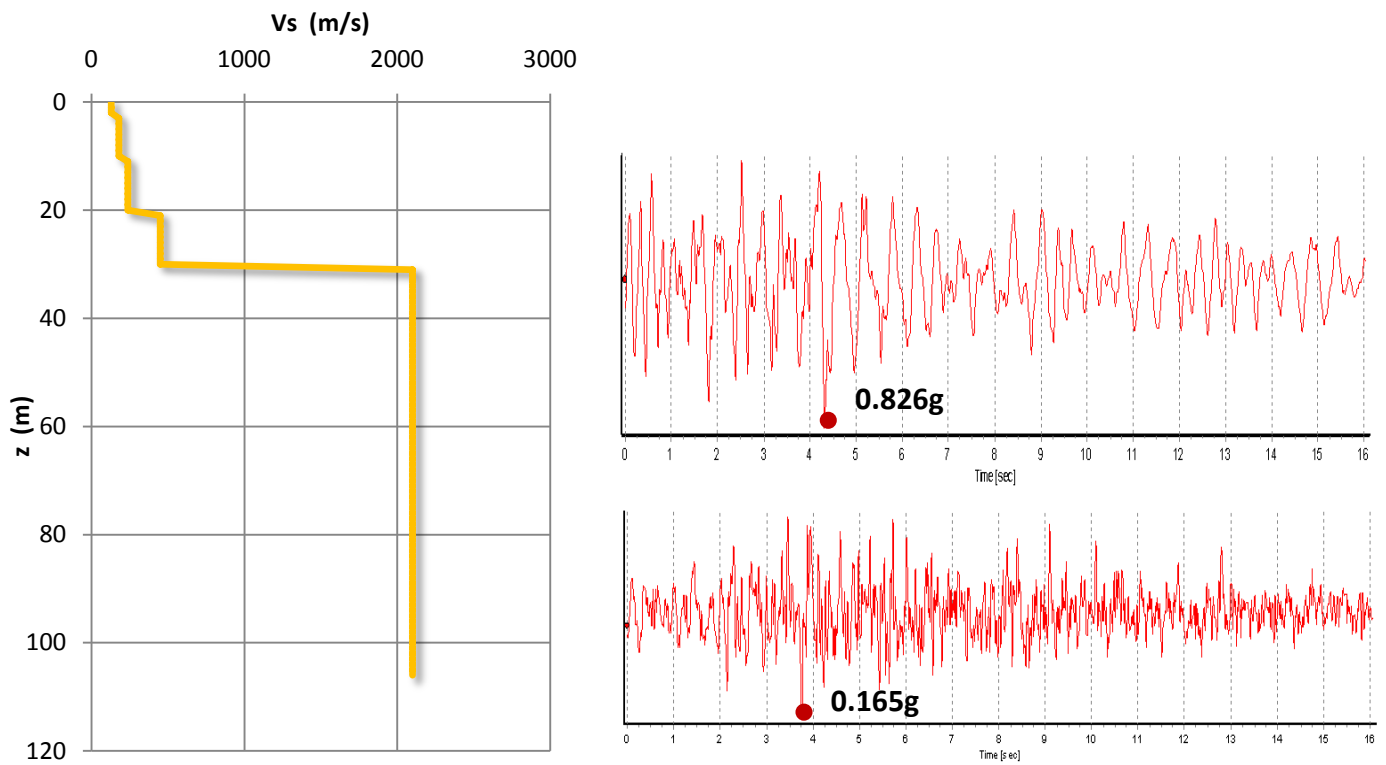
Σχήμα 6.9: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



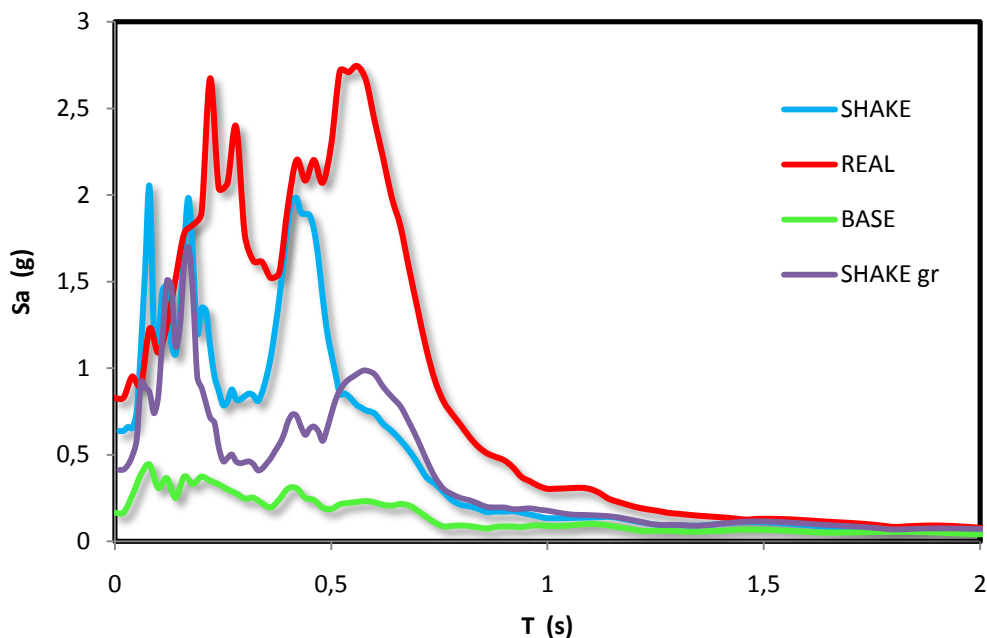
Σχήμα 6.10: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



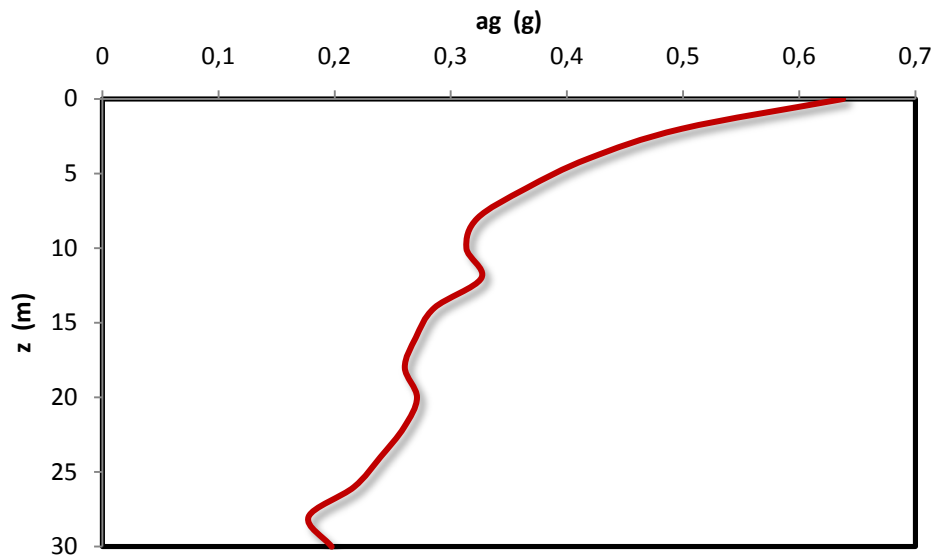
Σχήμα 6.11: Επιταχυνσιογράφημα στη επιφάνεια από την ανάλυση 2 συνιστώσας NS του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



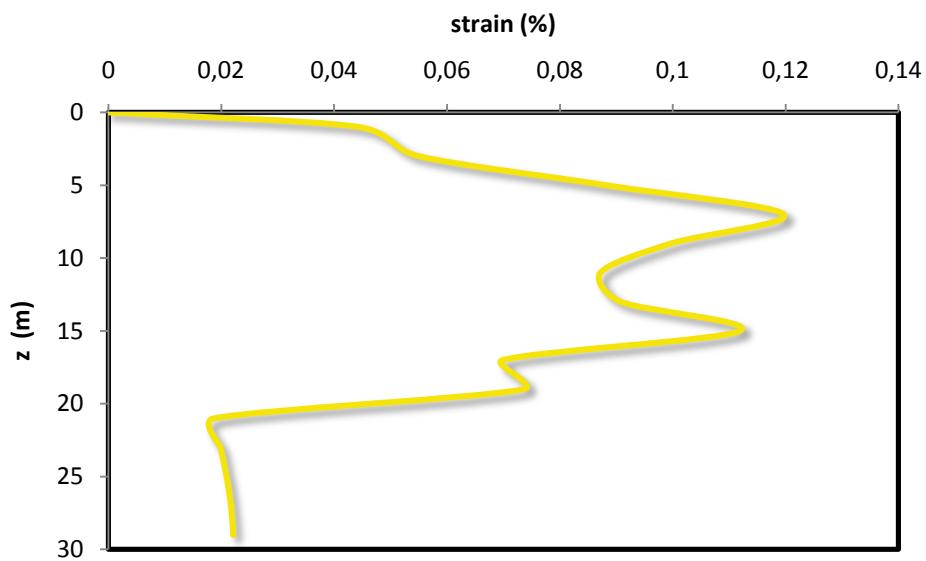
Σχήμα 6.12: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



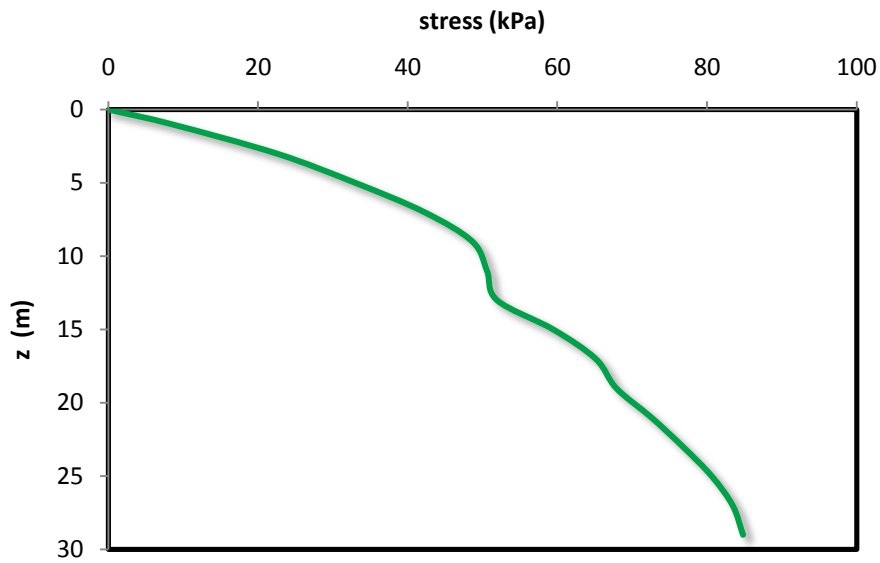
Σχήμα 6.13: Σύγκριση πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με αυτό της ανάλυσης με τις καμπύλες Seed et al (1986) για το χαλίκι (μοβ φάσμα) και με αυτό με τις νέες καμπύλες για το αμμοχάλικο (γαλάζιο φάσμα) και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας EW του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



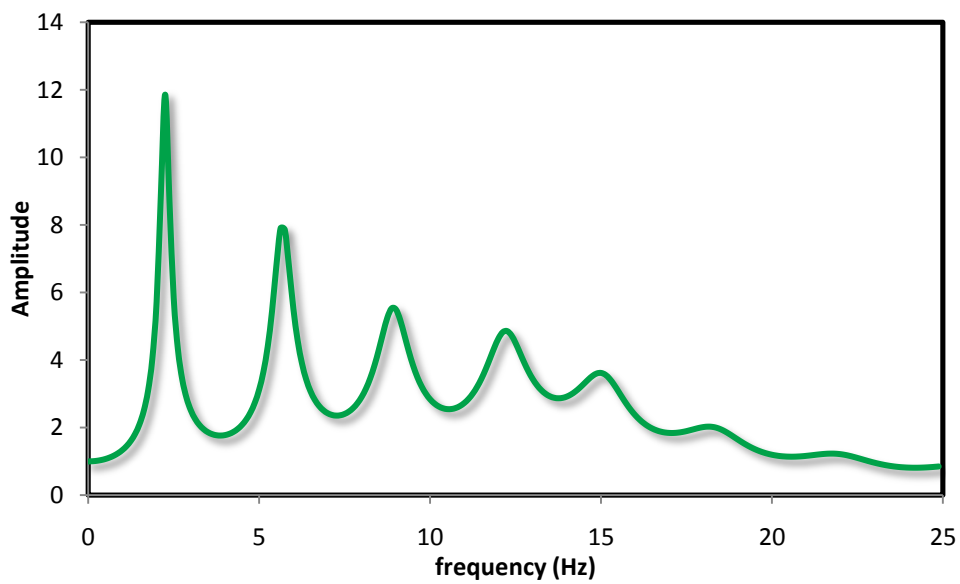
Σχήμα 6.14: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



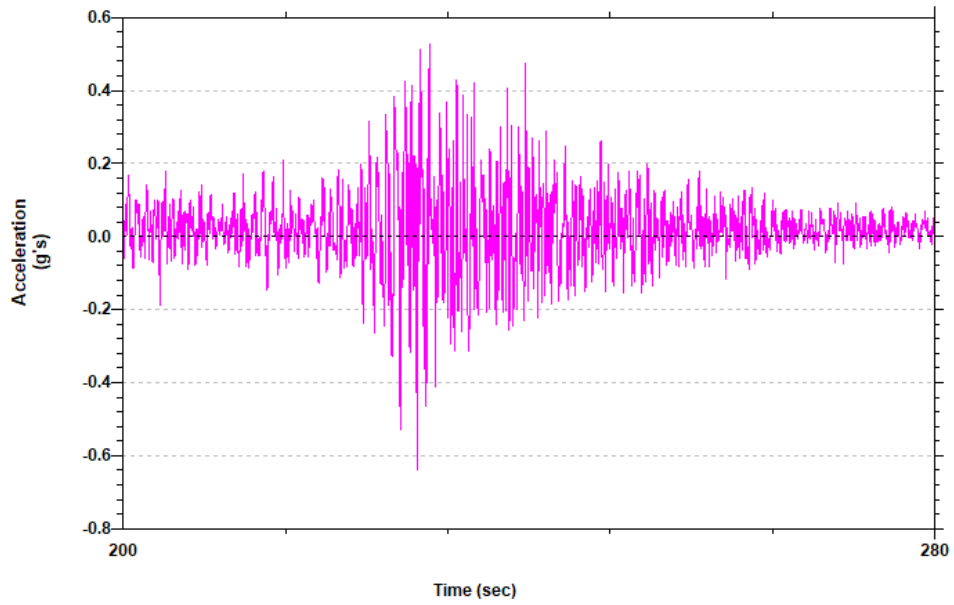
Σχήμα 6.15: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



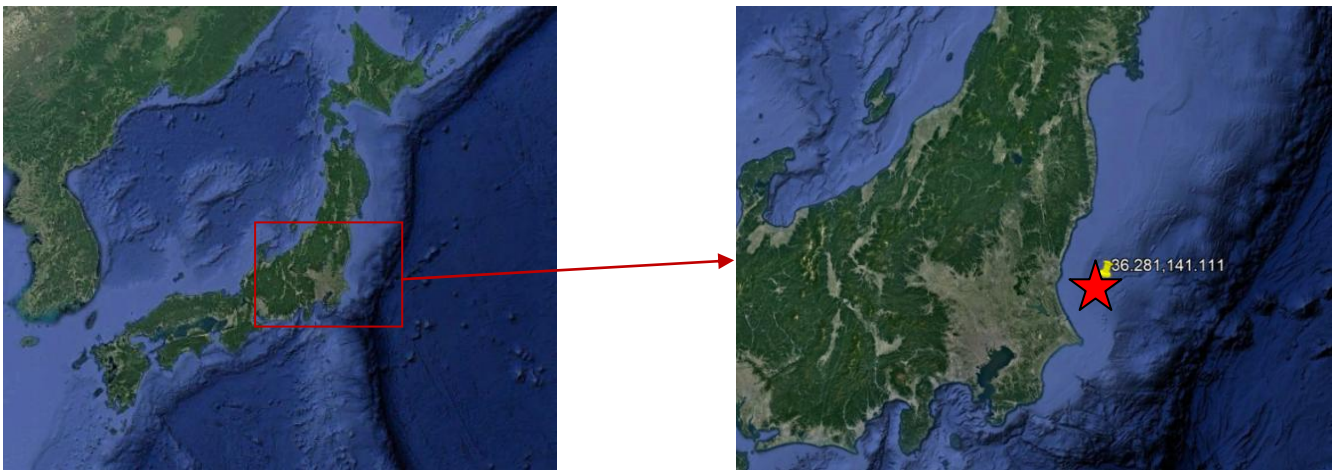
Σχήμα 6.16: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



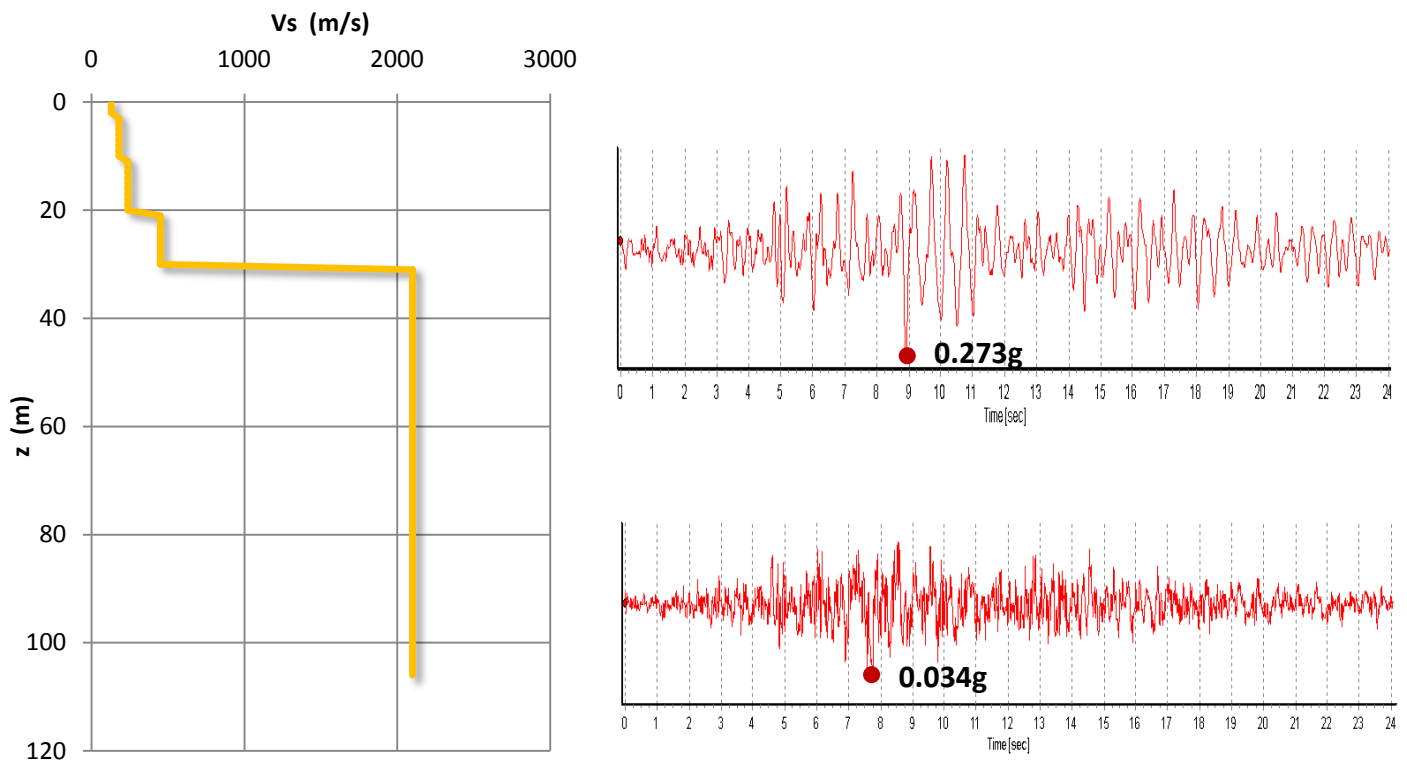
Σχήμα 6.17: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



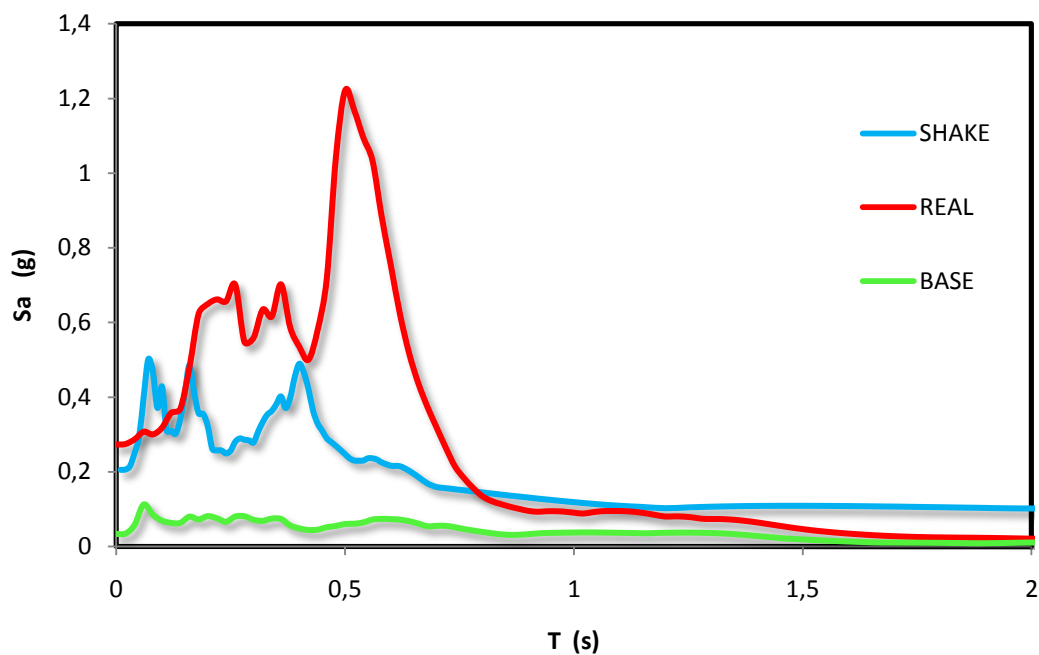
Σχήμα 6.18: Επιταχυνσιογράφημα στη επιφάνεια από την ανάλυση 2 συνιστώσας EW του σεισμού του Tohoku 2011 στον σταθμό IBRH11.



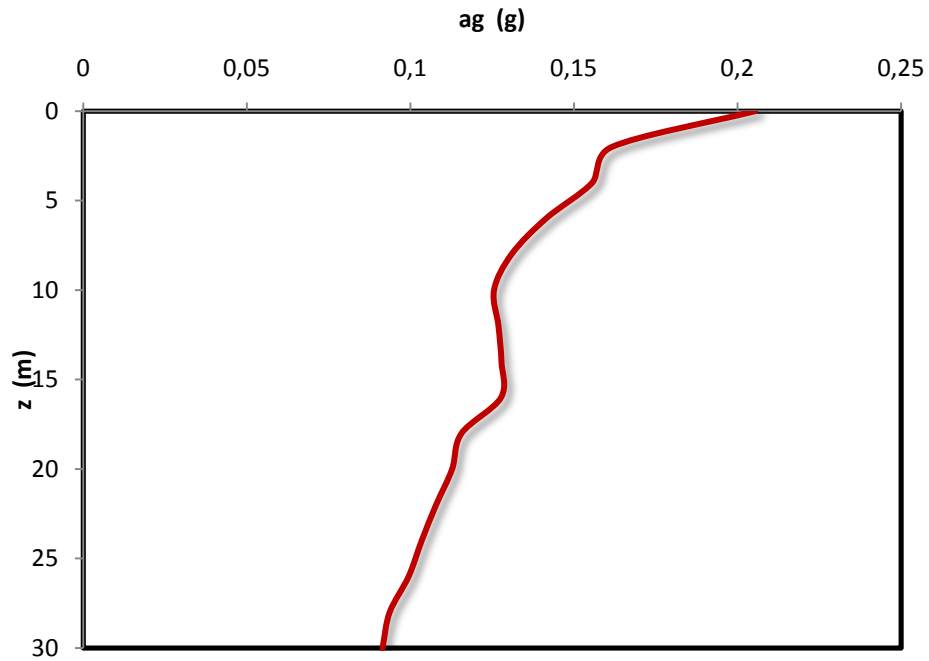
Σχήμα 6.19: Συντεταγμένες επικέντρου σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011.



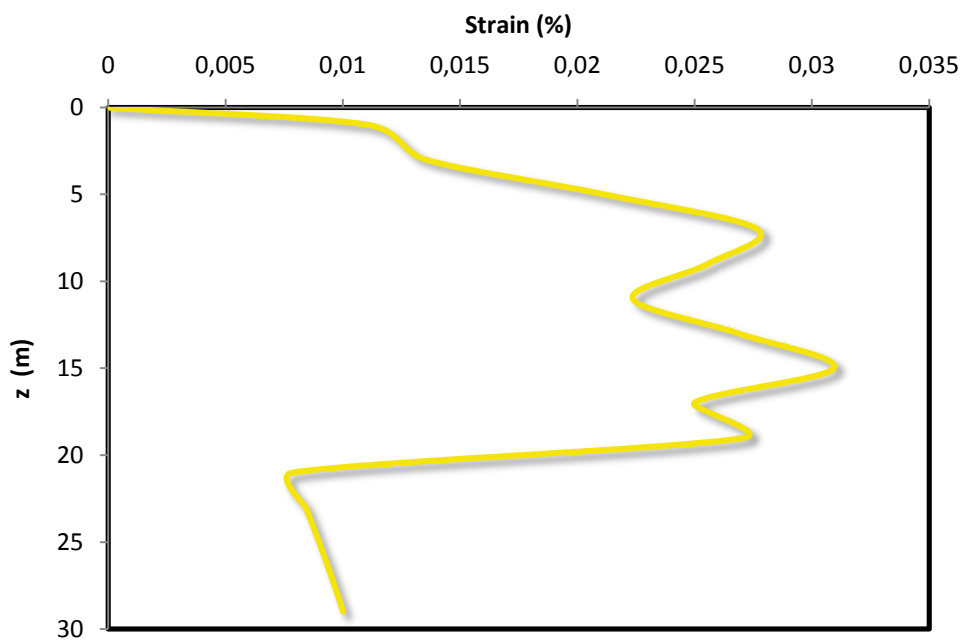
Σχήμα 6.20: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



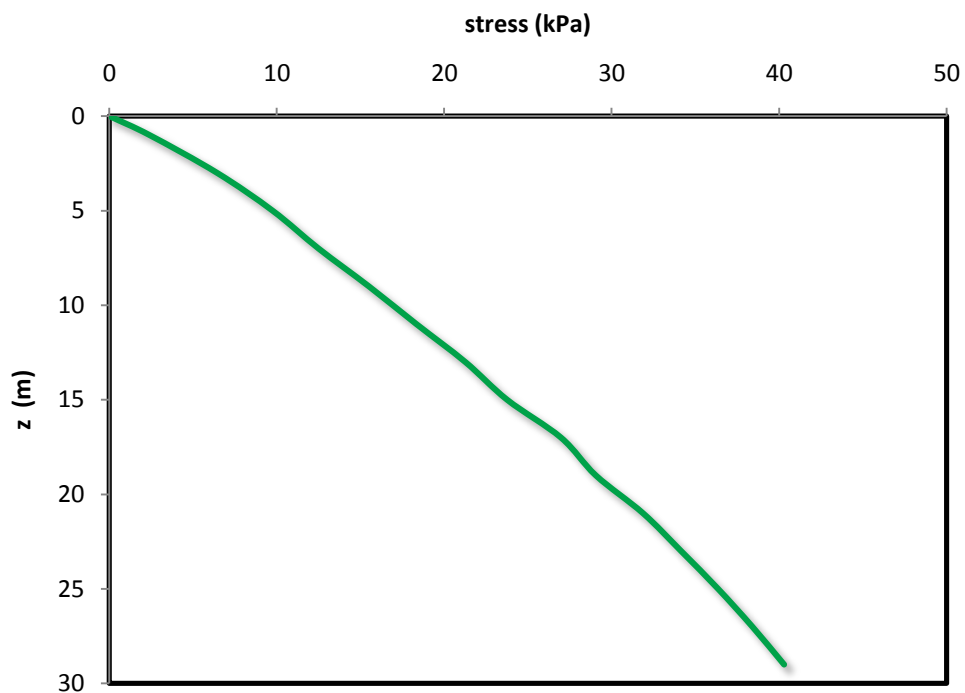
Σχήμα 6.21: Σύγκριση πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχύδους υποβαθρου συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



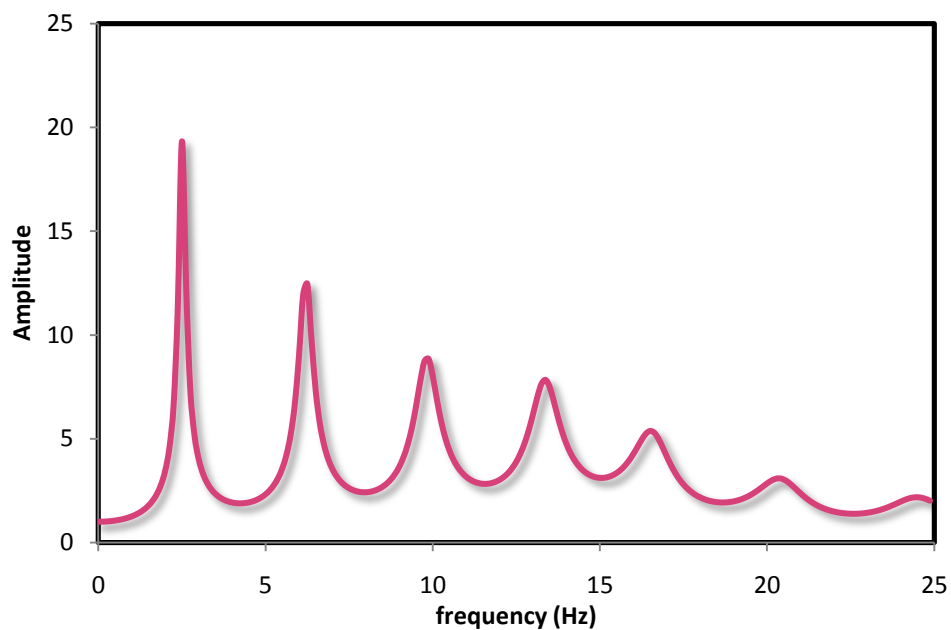
Σχήμα 6.22: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



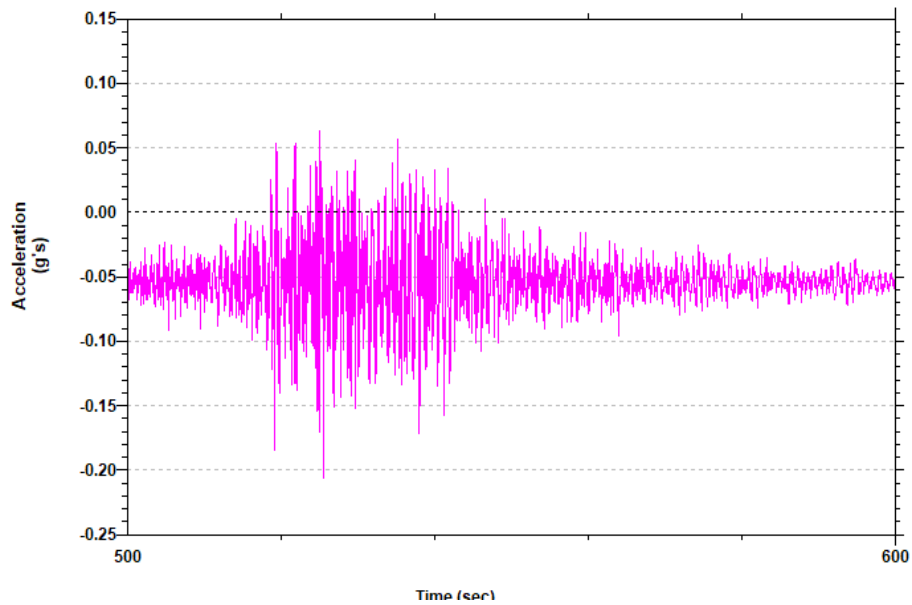
Σχήμα 6.23: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



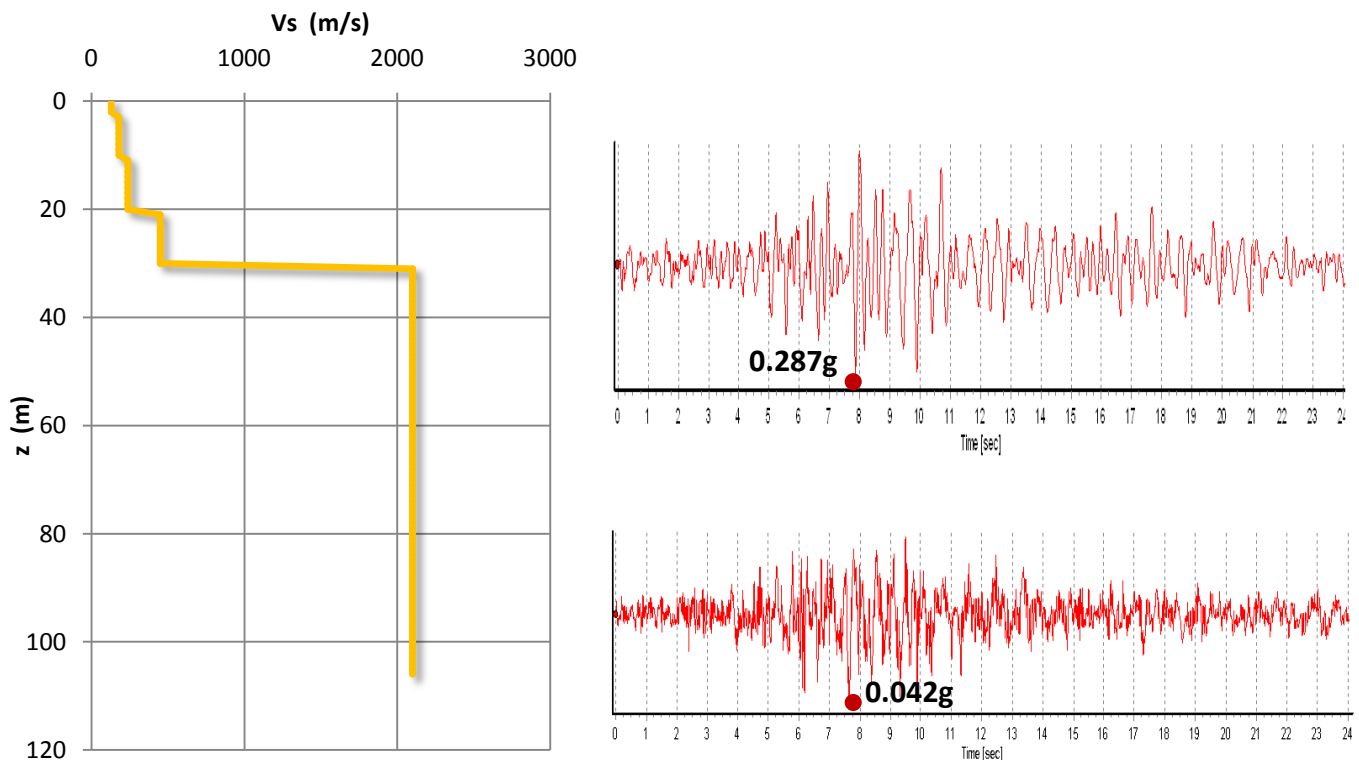
Σχήμα 6.24: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



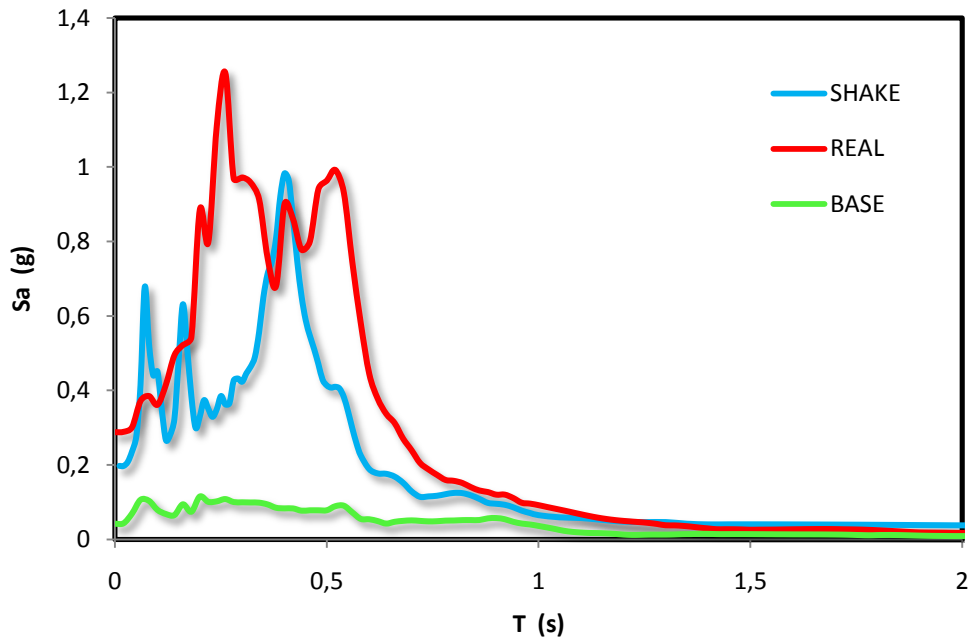
Σχήμα 6.25: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



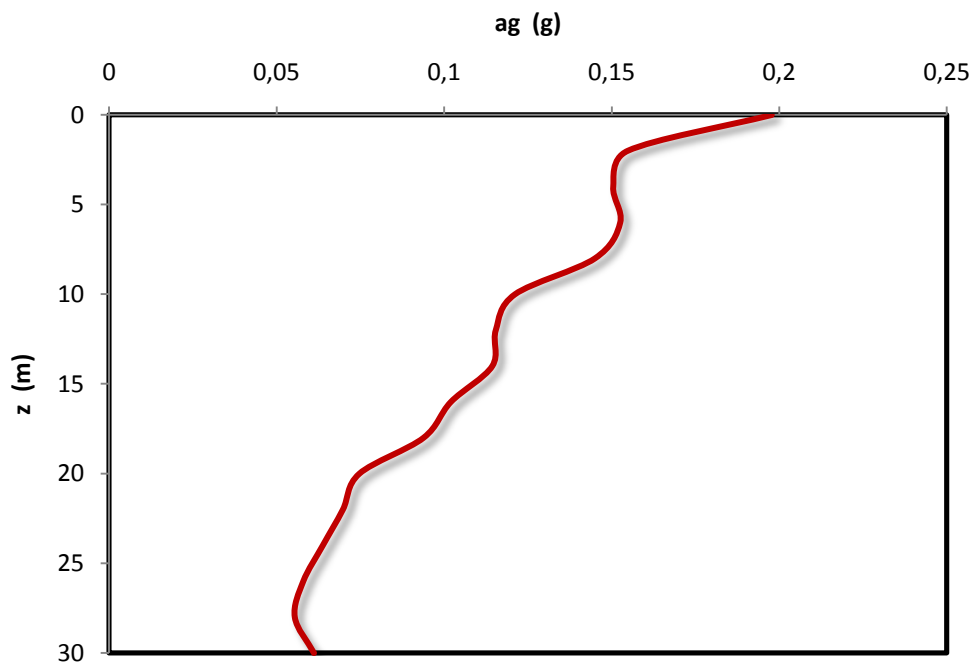
Σχήμα 6.26: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια (Σεισμός near the east coast of Honshu 11/03/2011 - συνιστώσα NS).



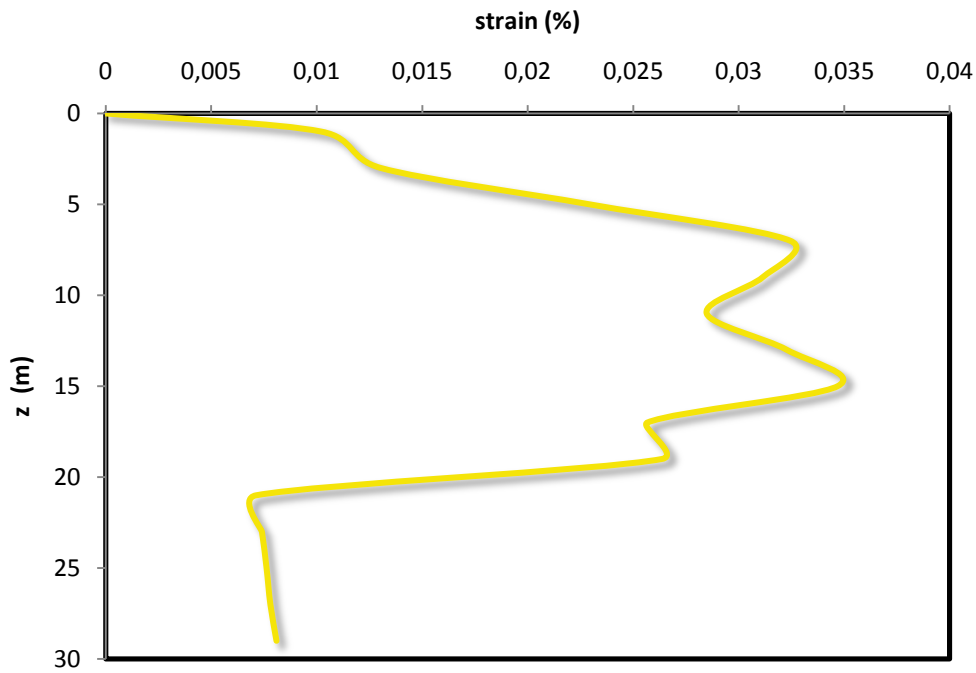
Σχήμα 6.27: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



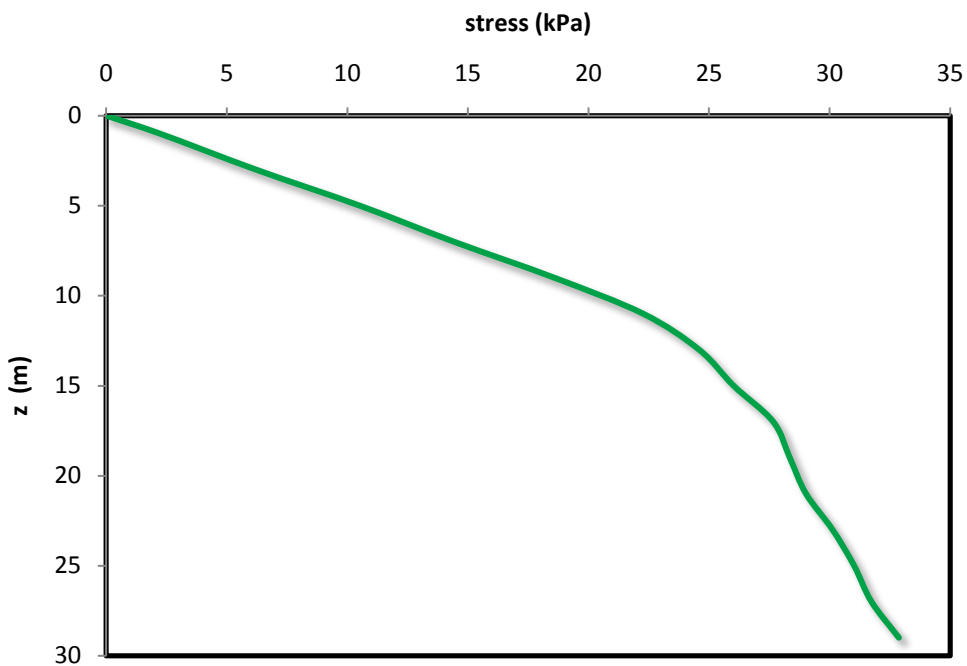
Σχήμα 6.28: Σύγκριση πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



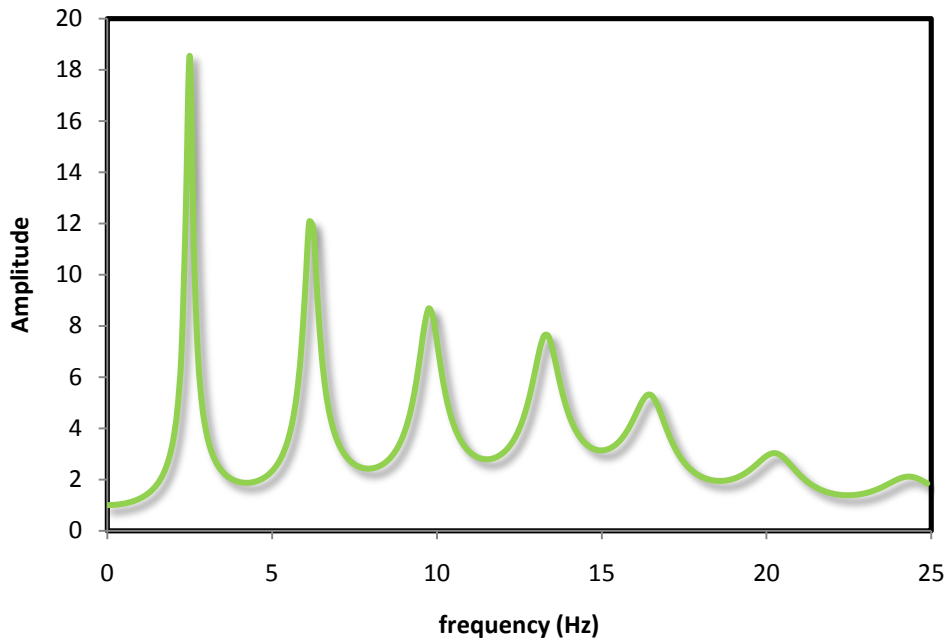
Σχήμα 6.29: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



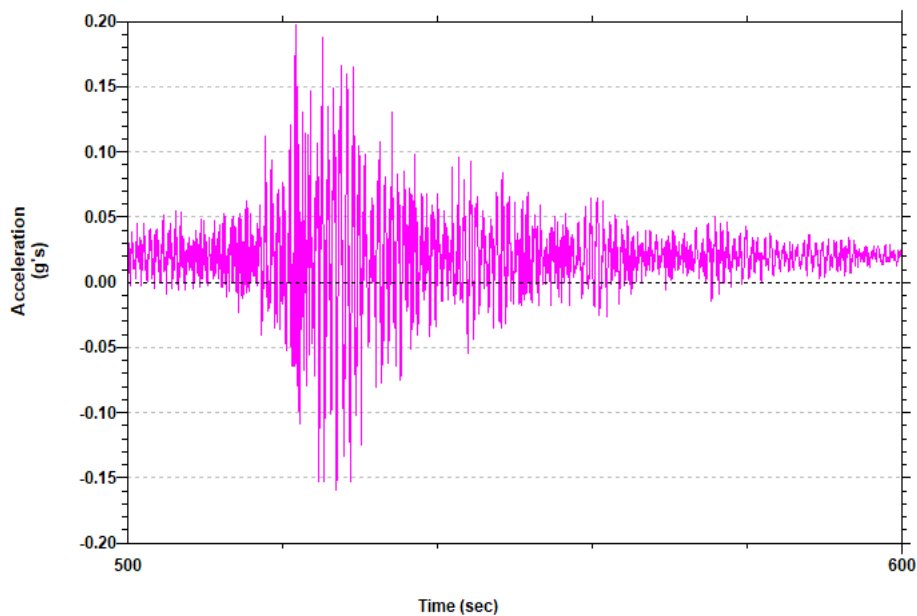
Σχήμα 6.30: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



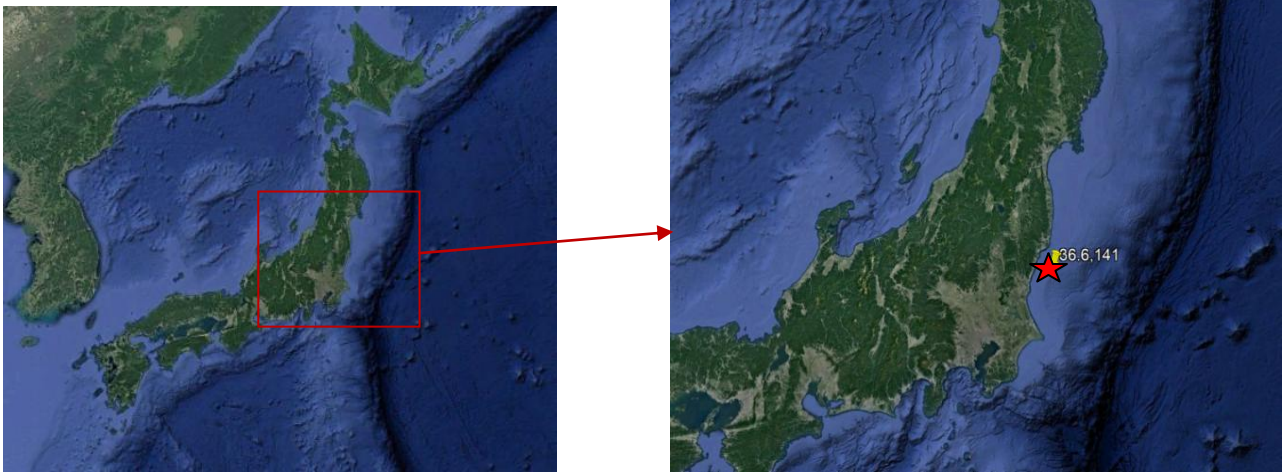
Σχήμα 6.31: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



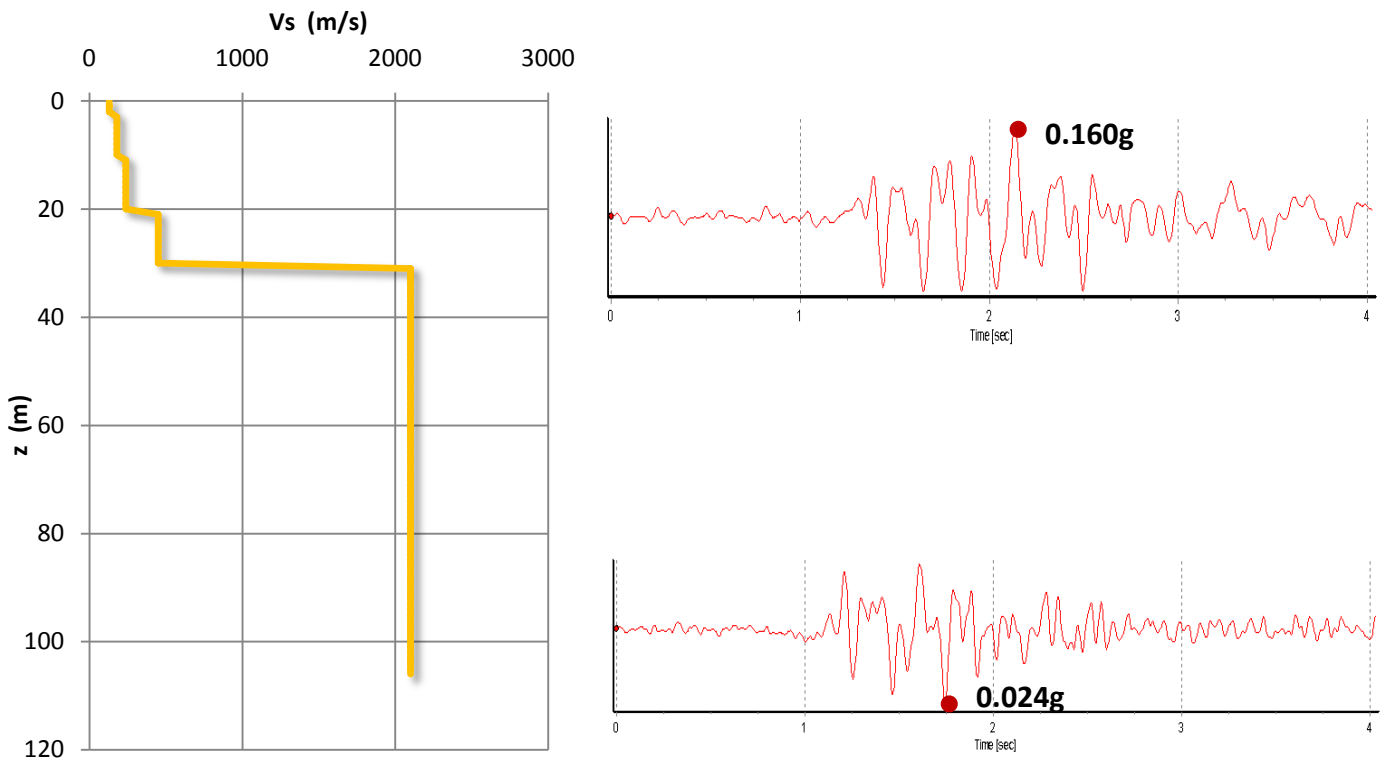
Σχήμα 6.32: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



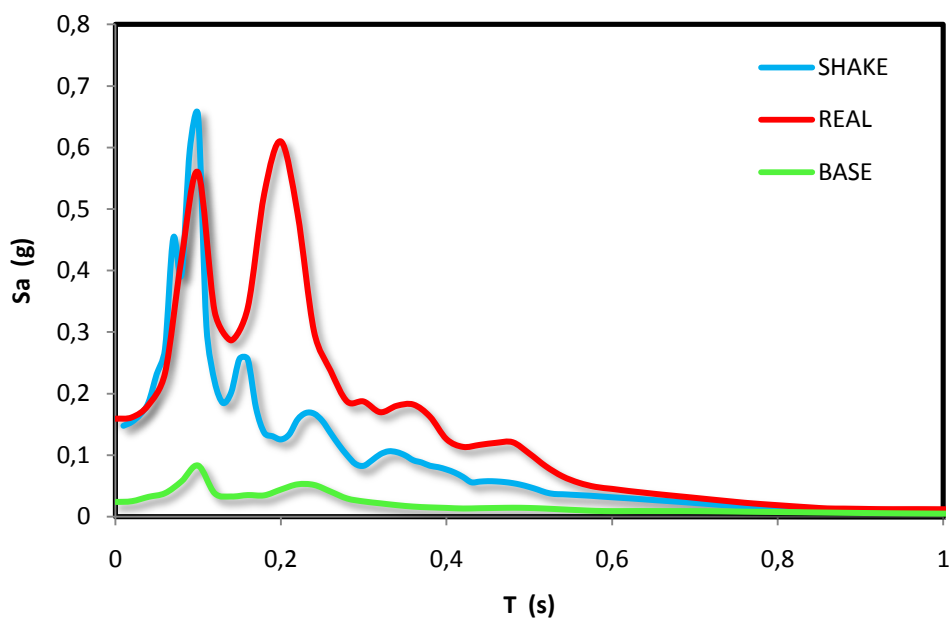
Σχήμα 6.33: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu 11/03/2011 στον σταθμό IBRH11.



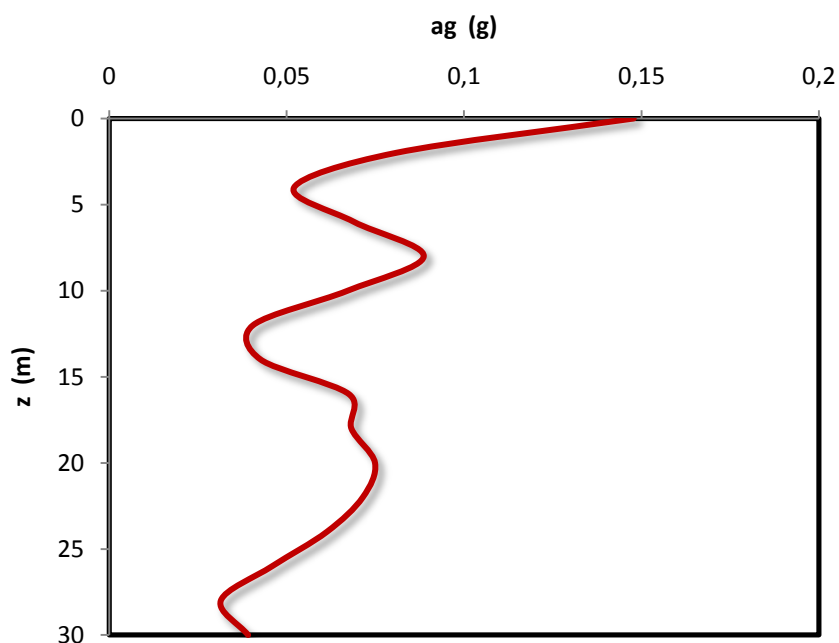
Σχήμα 6.34: Συντεταγμένες επικέντρου του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12.



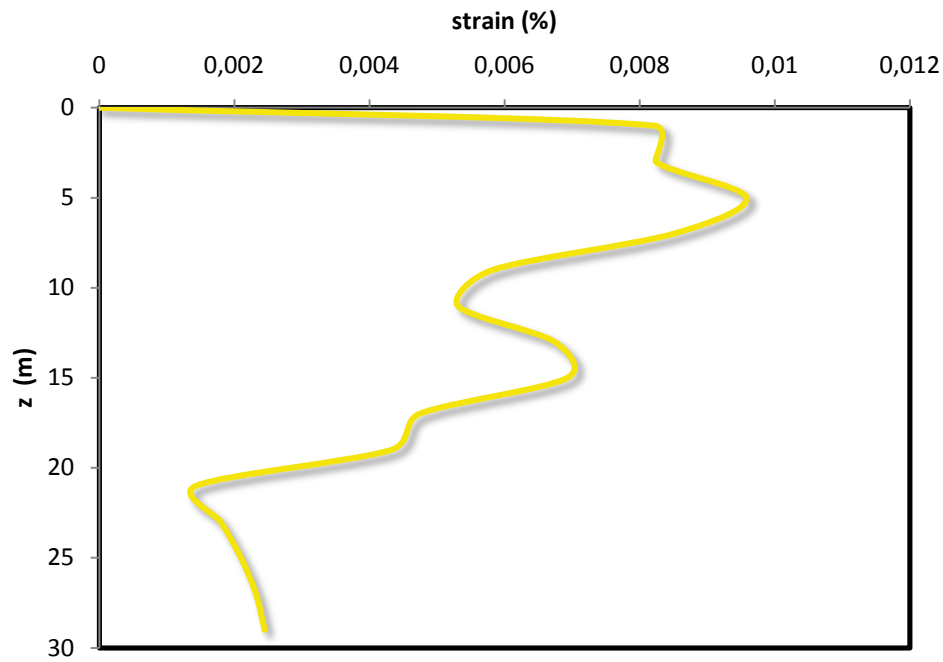
Σχήμα 6.35: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



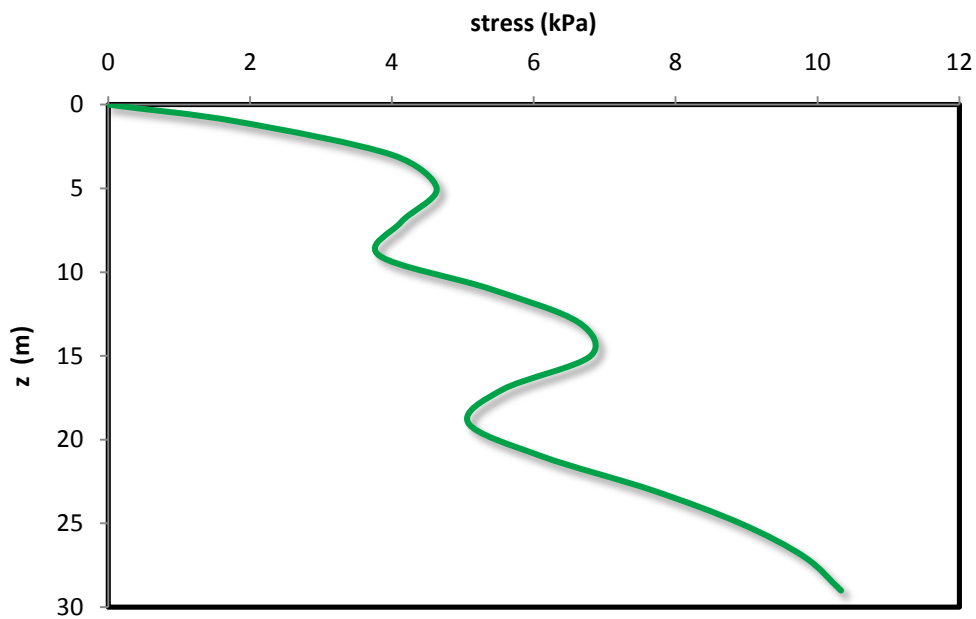
Σχήμα 6.36: Σύγκριση πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



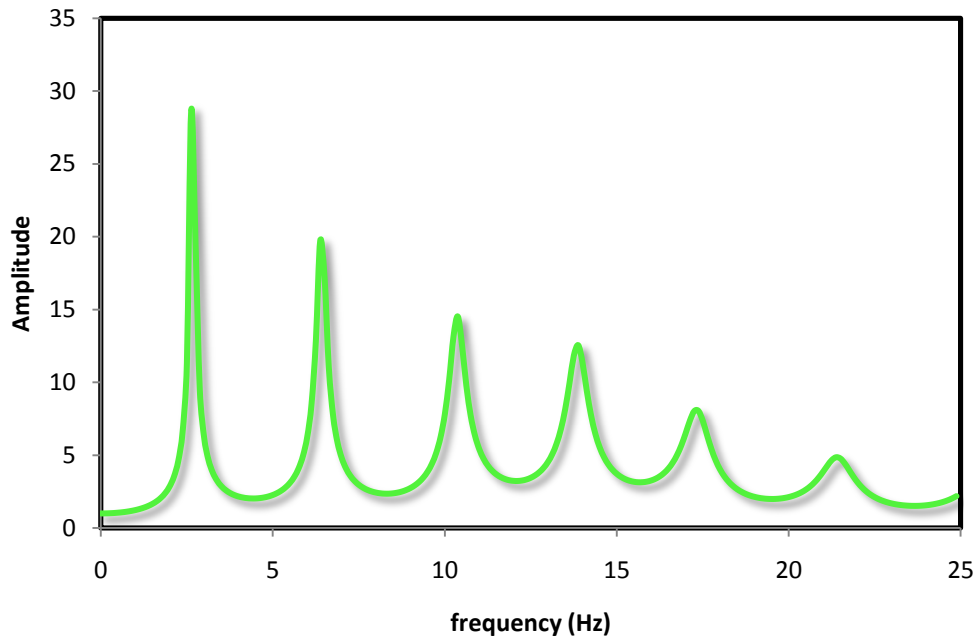
Σχήμα 6.37: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



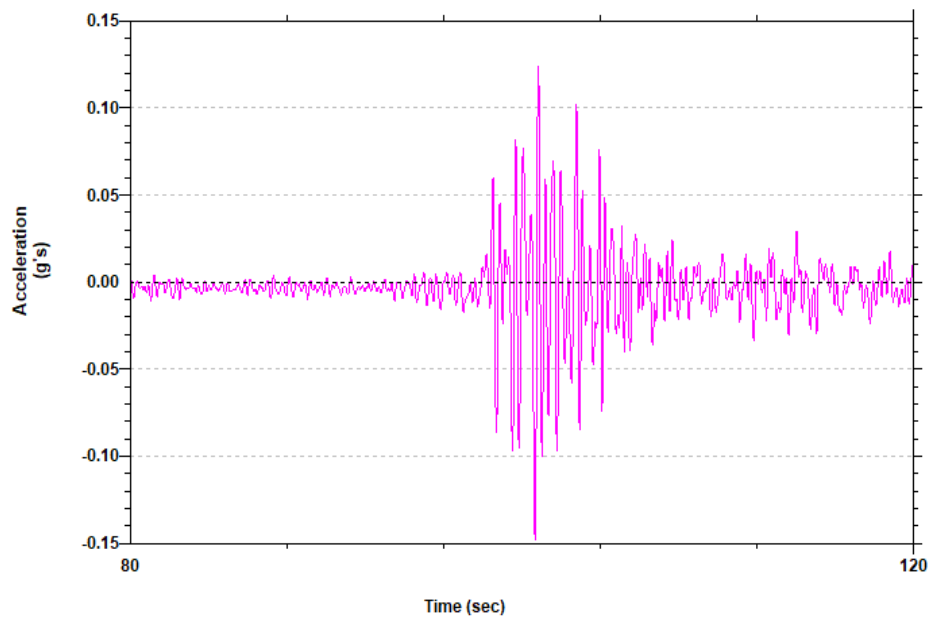
Σχήμα 6.38: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



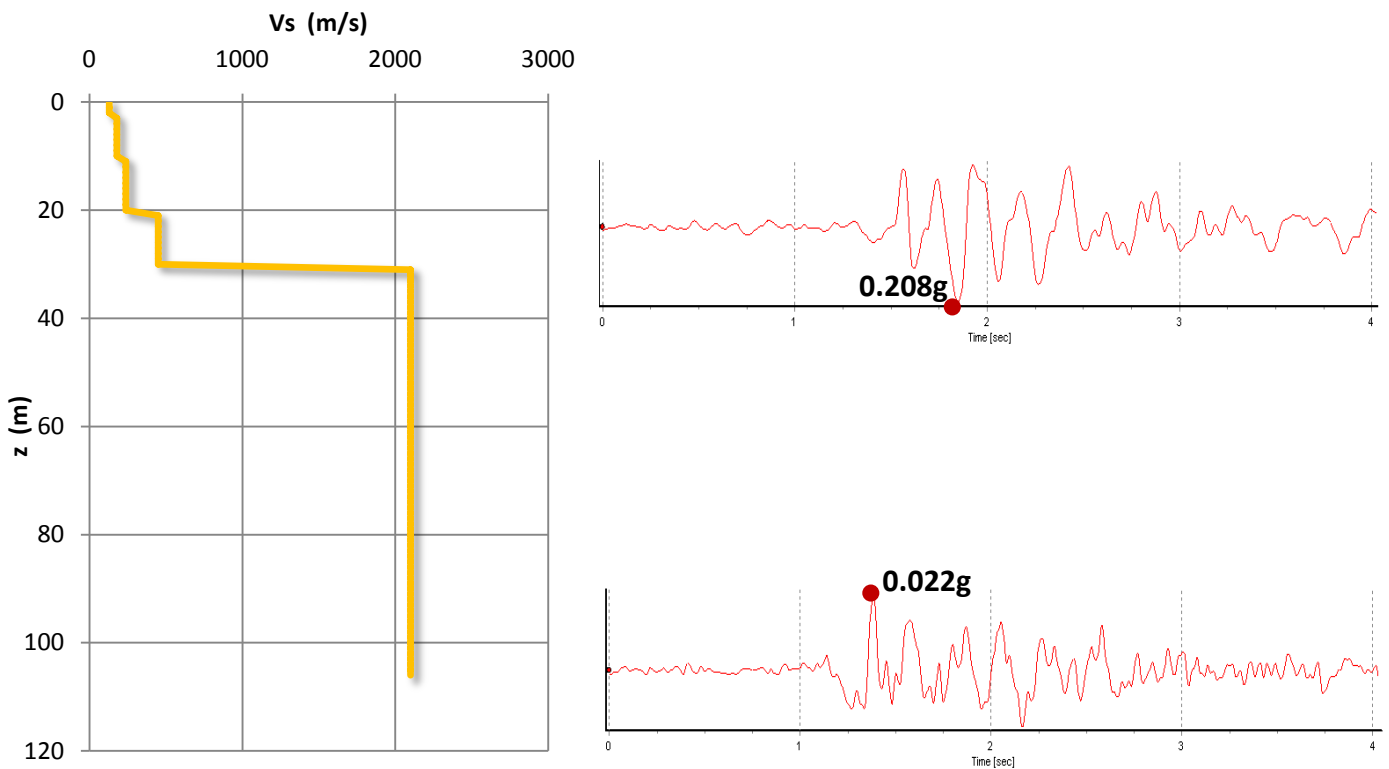
Σχήμα 6.39: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



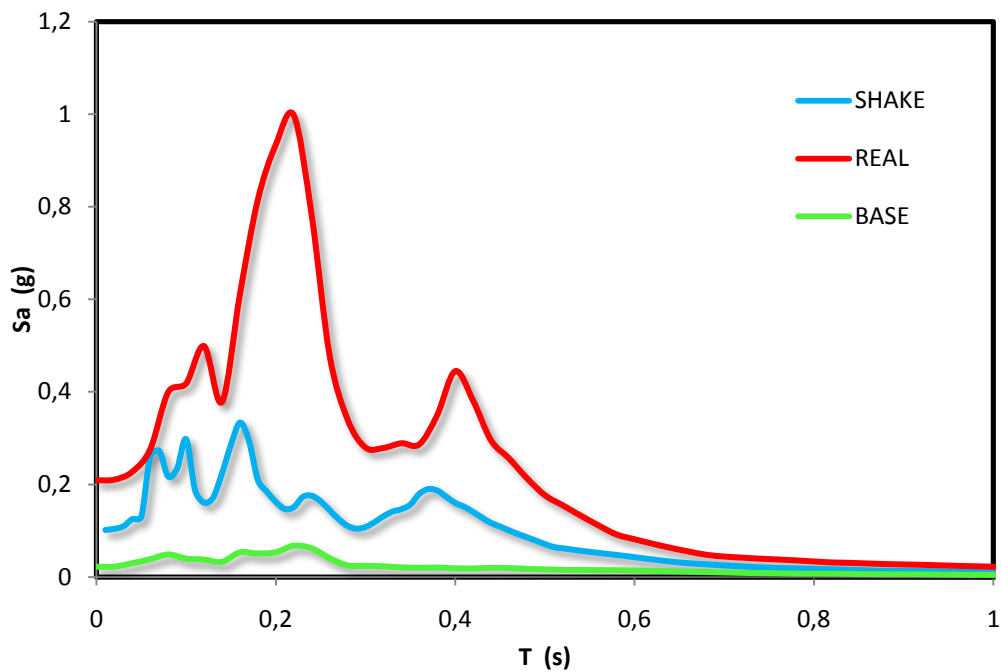
Σχήμα 6.40: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



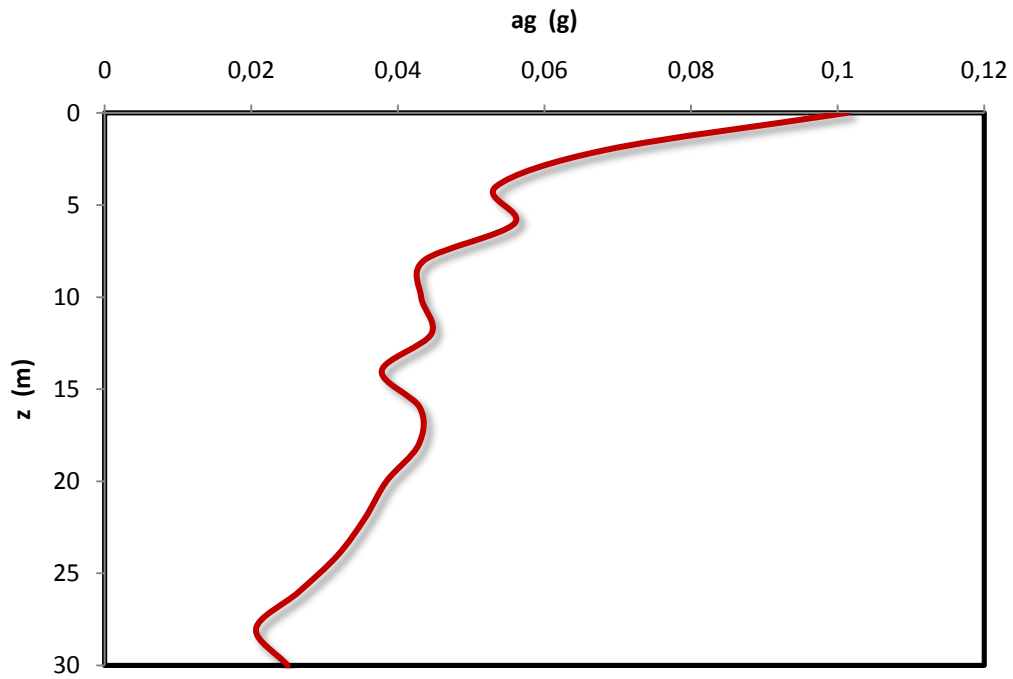
Σχήμα 6.41: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



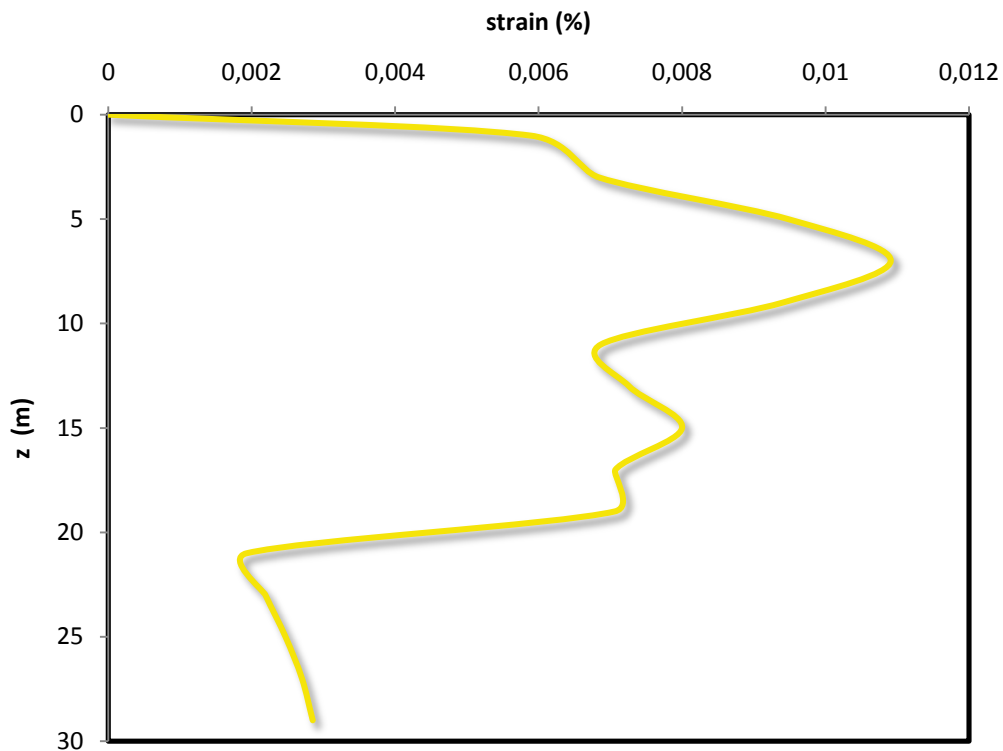
Σχήμα 6.42: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



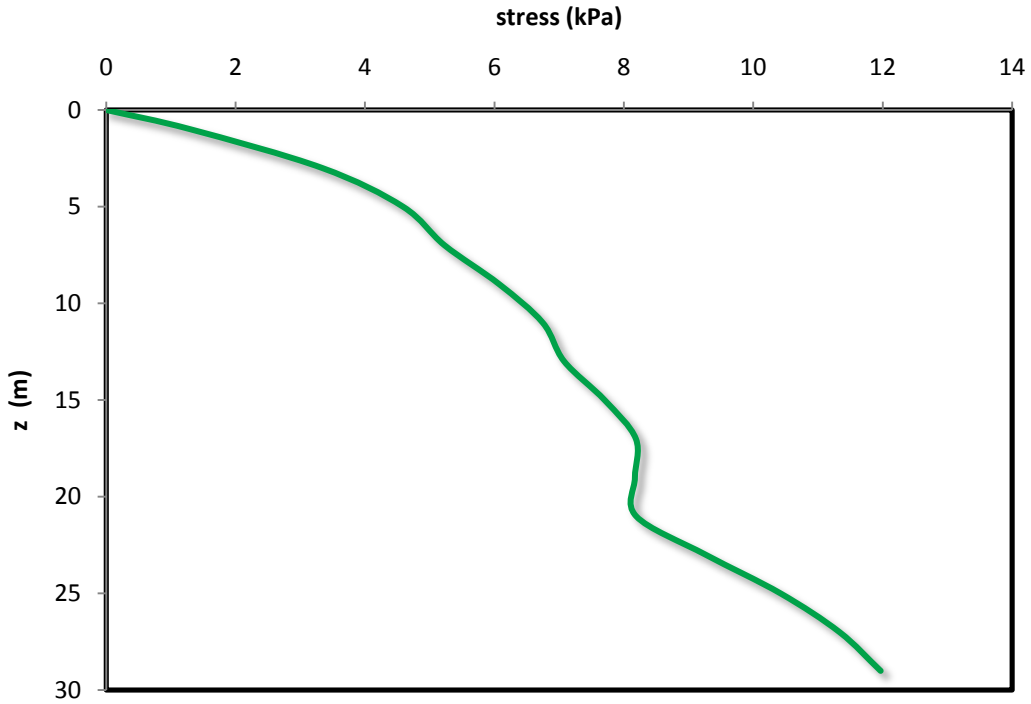
Σχήμα 6.43: Σύγκρισή πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



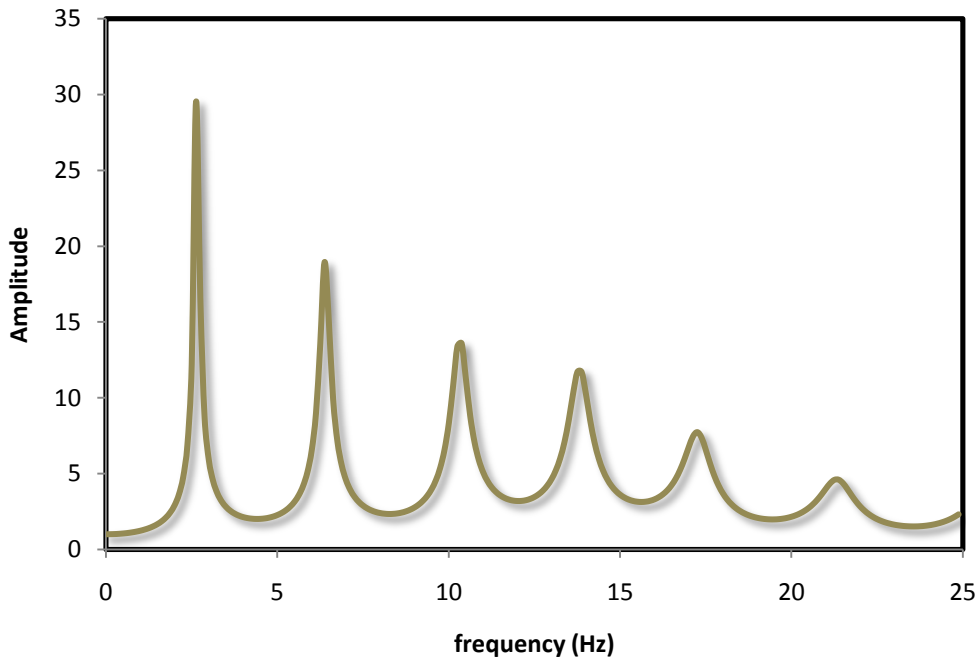
Σχήμα 6.44: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



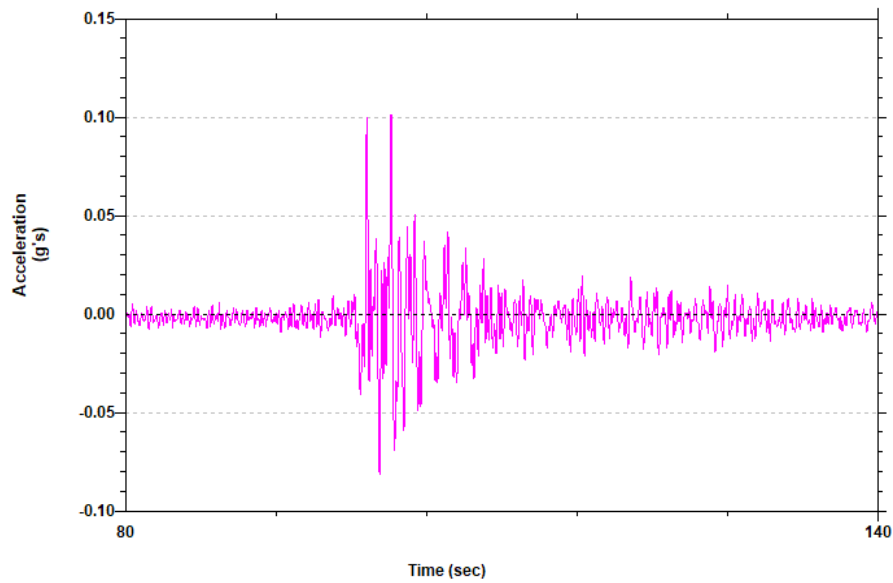
Σχήμα 6.45: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



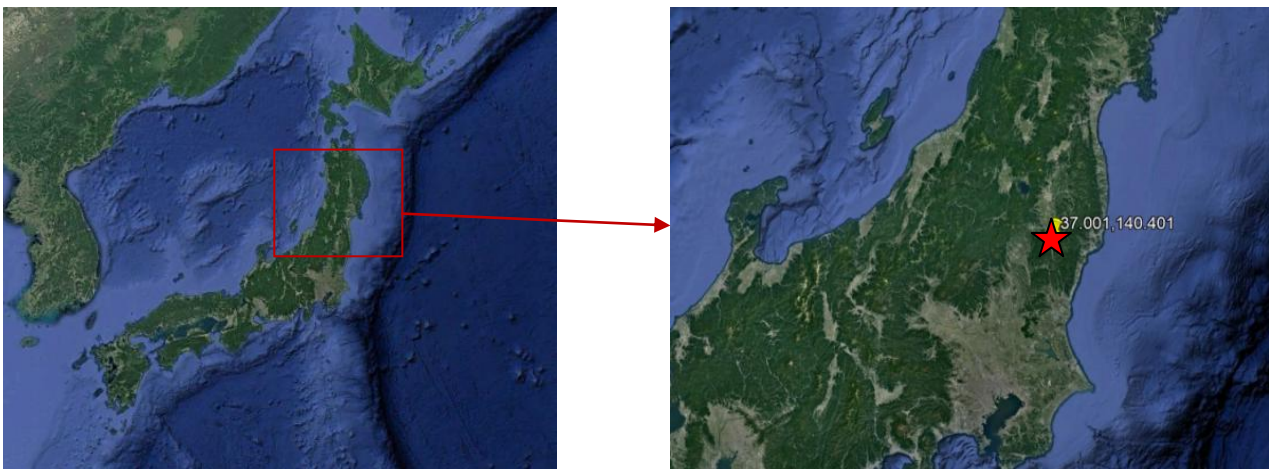
Σχήμα 6.46: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



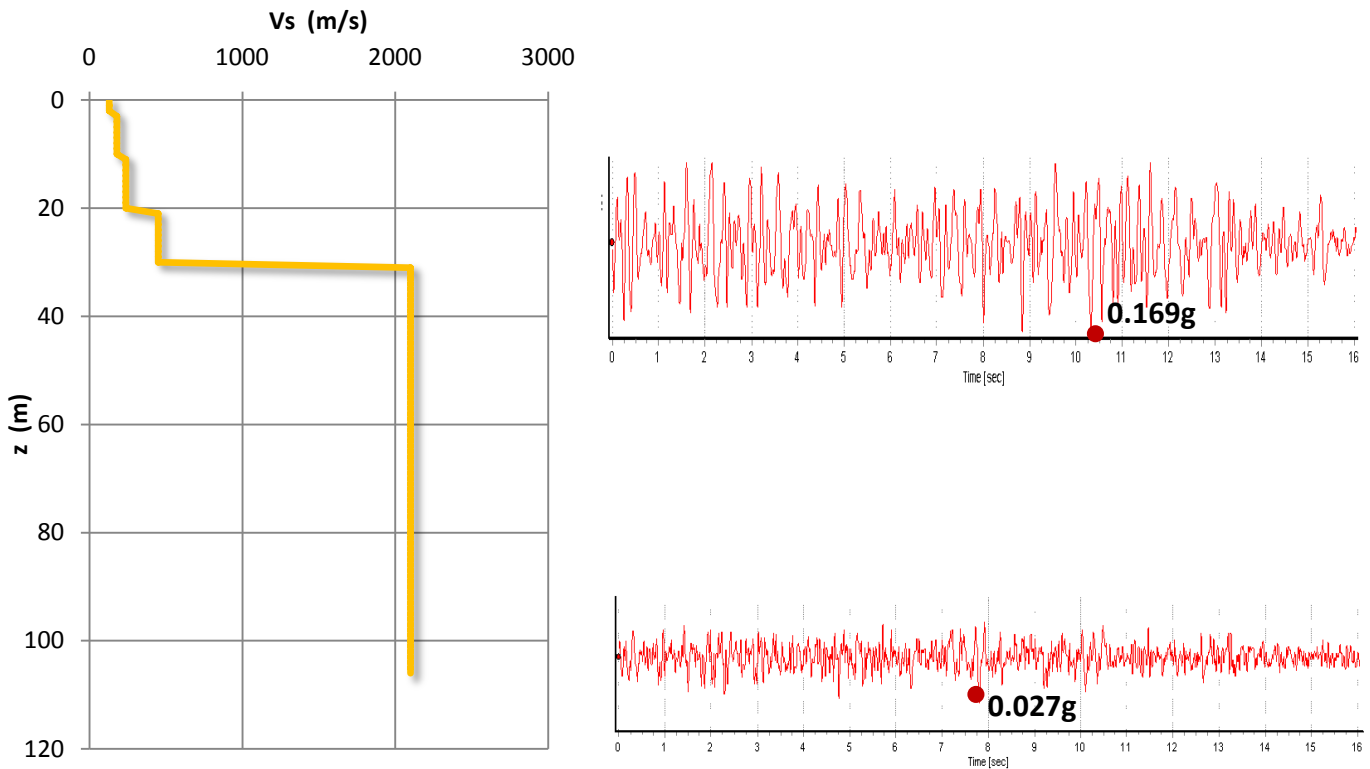
Σχήμα 6.47: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



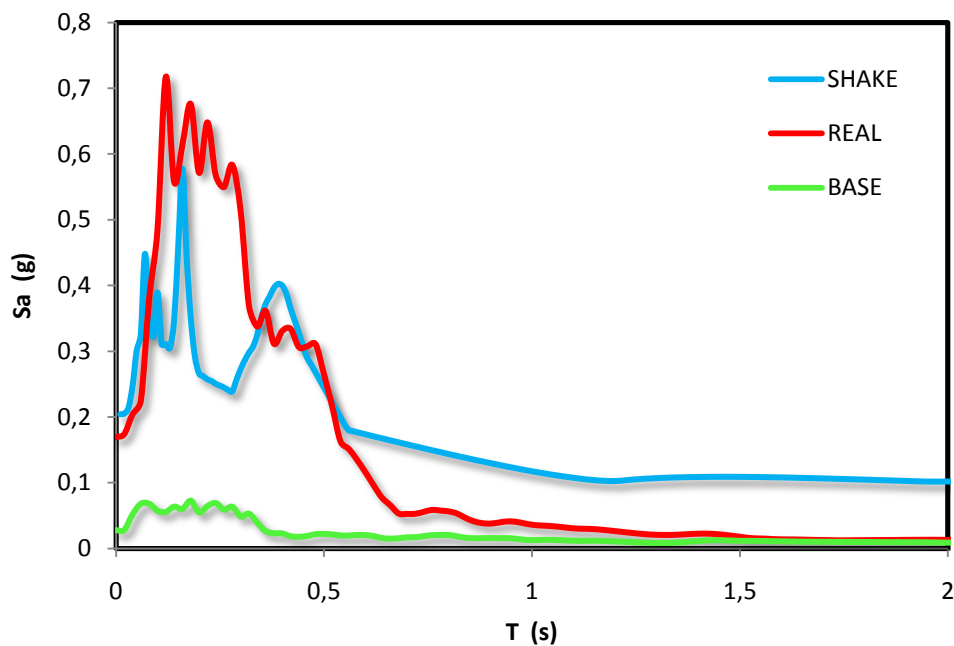
Σχήμα 6.48: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 στον σταθμό IBRH11.



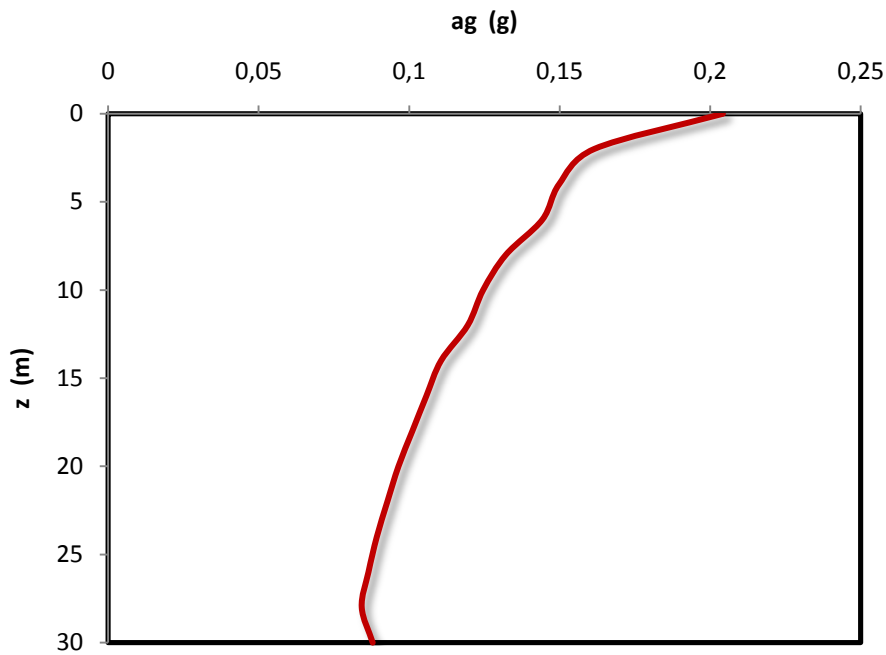
Σχήμα 6.49: Συντεταγμένες επικέντρου του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12



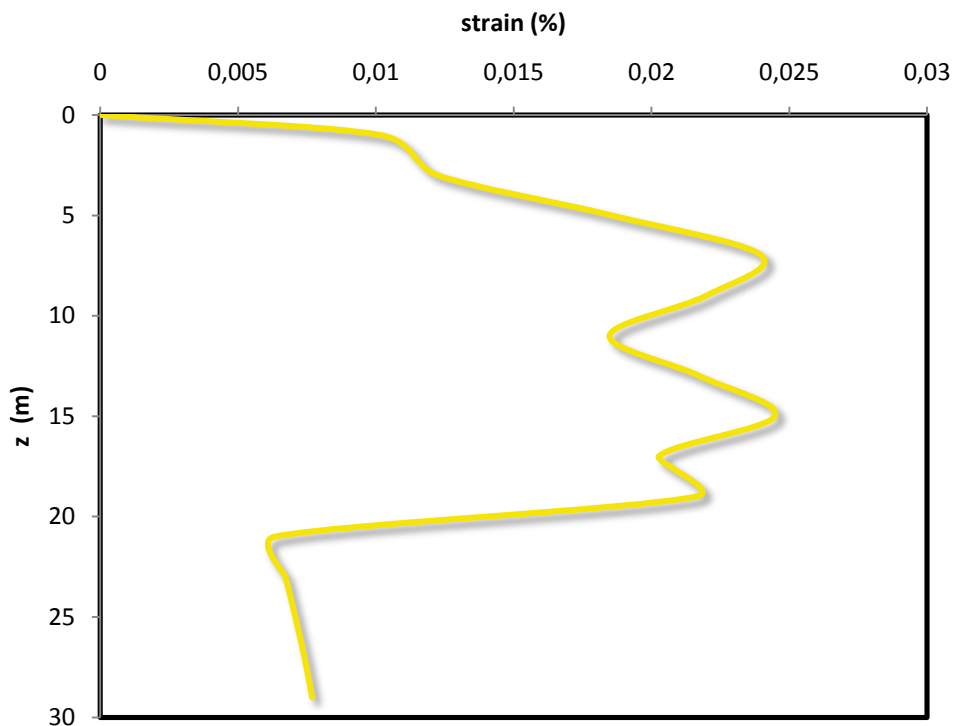
Σχήμα 6.50: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



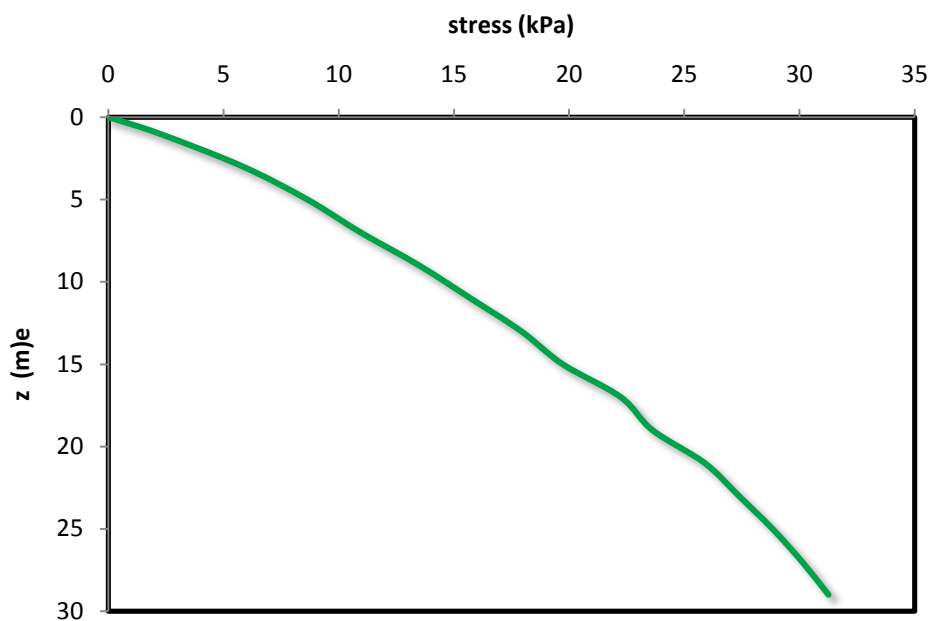
Σχήμα 6.51: Σύγκρισή πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



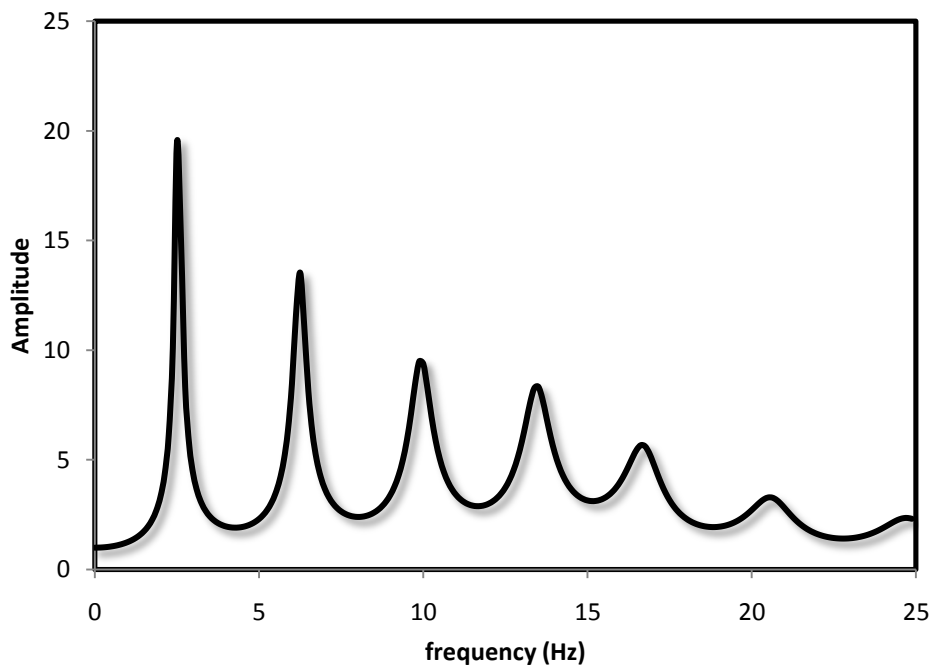
Σχήμα 6.52: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



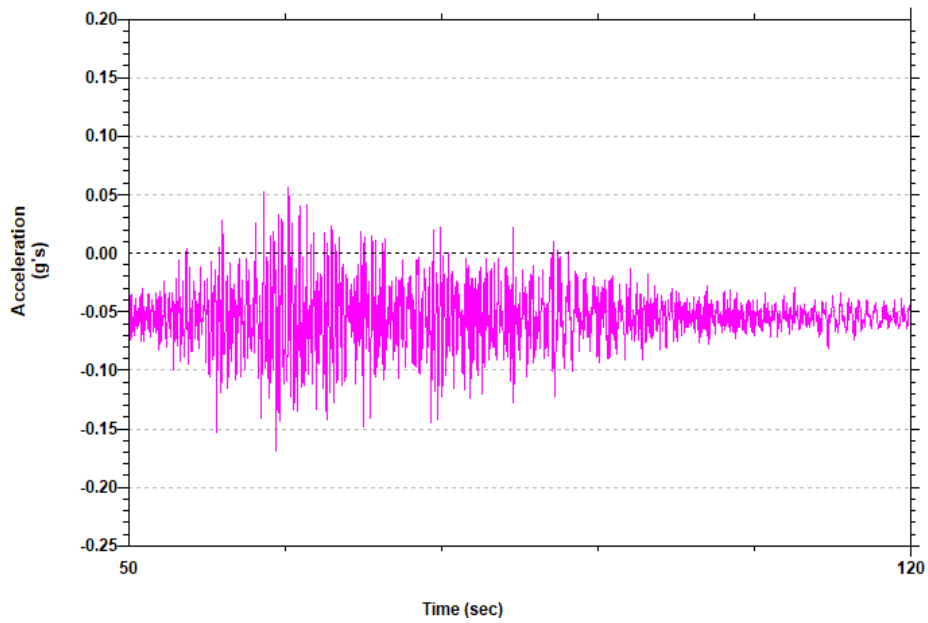
Σχήμα 6.53: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



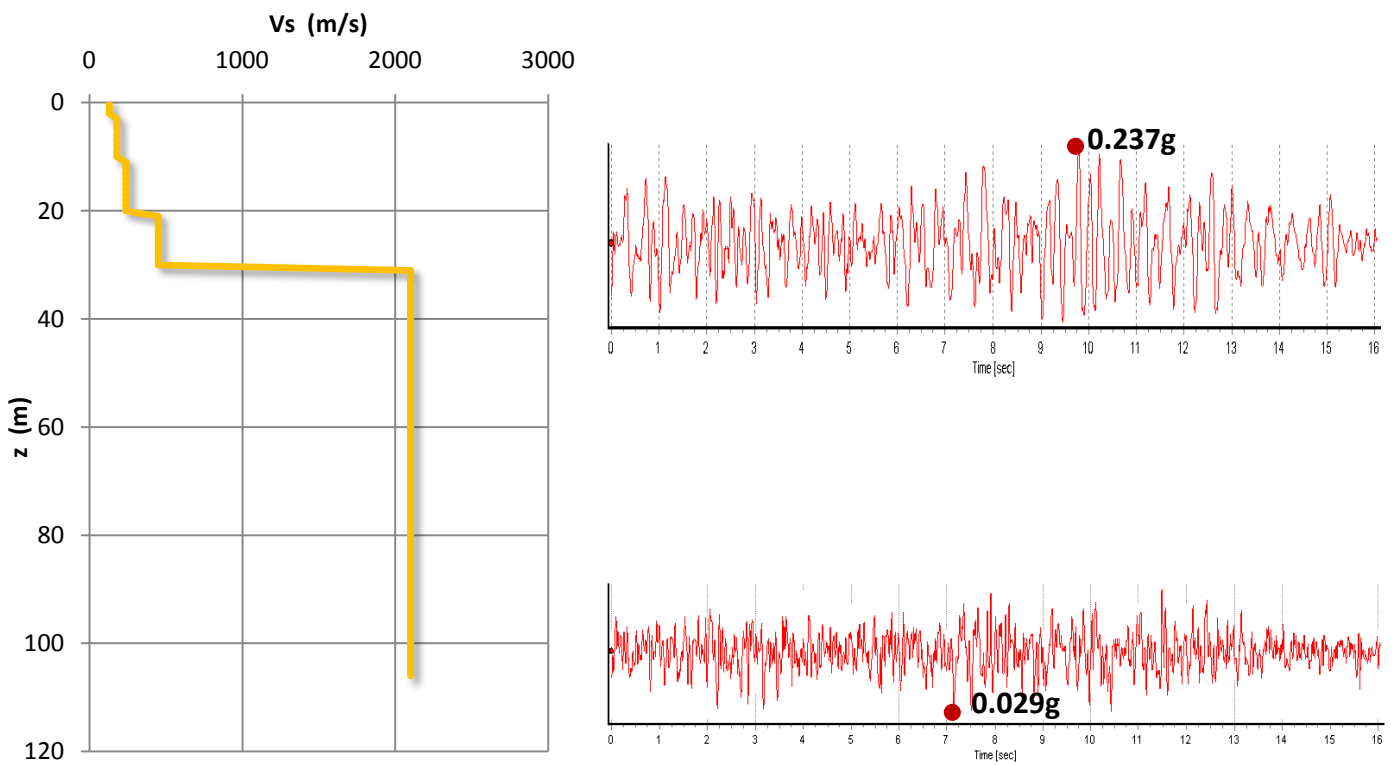
Σχήμα 6.54: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



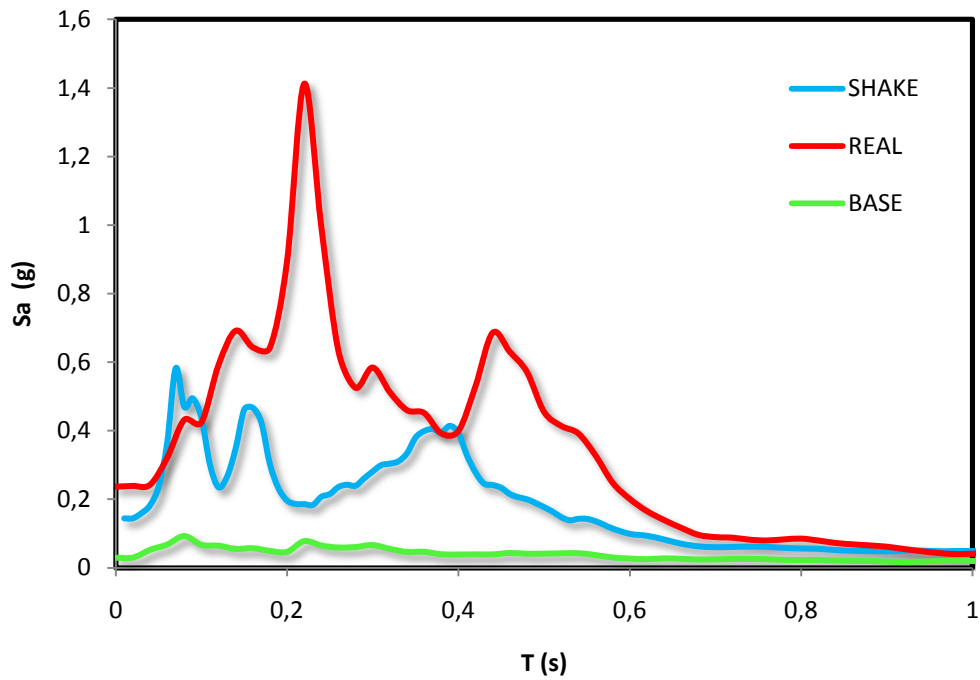
Σχήμα 6.55: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



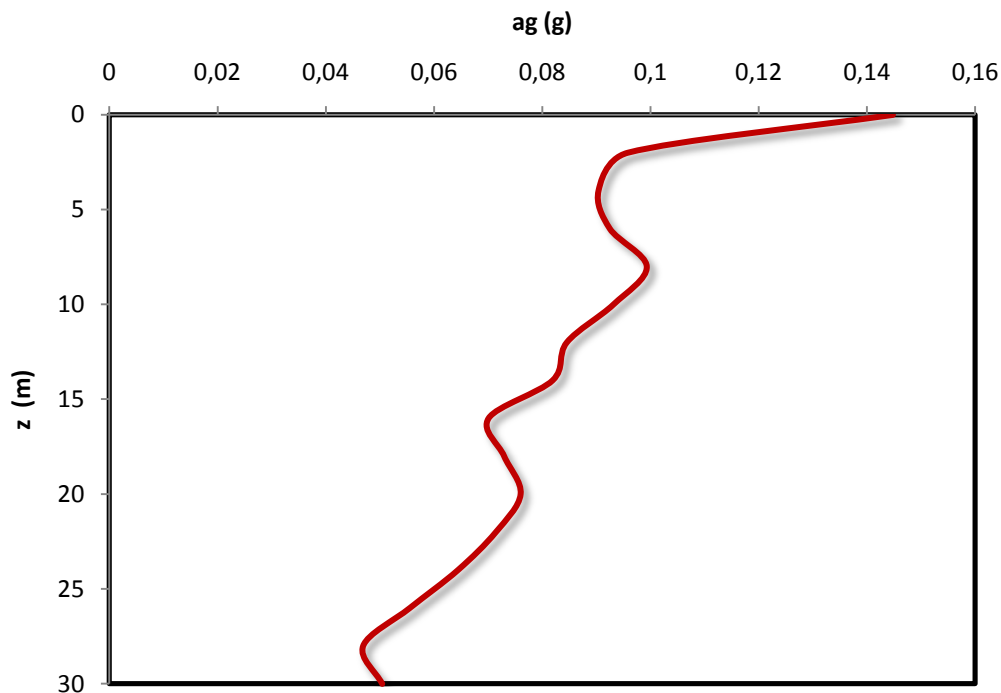
Σχήμα 6.56: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



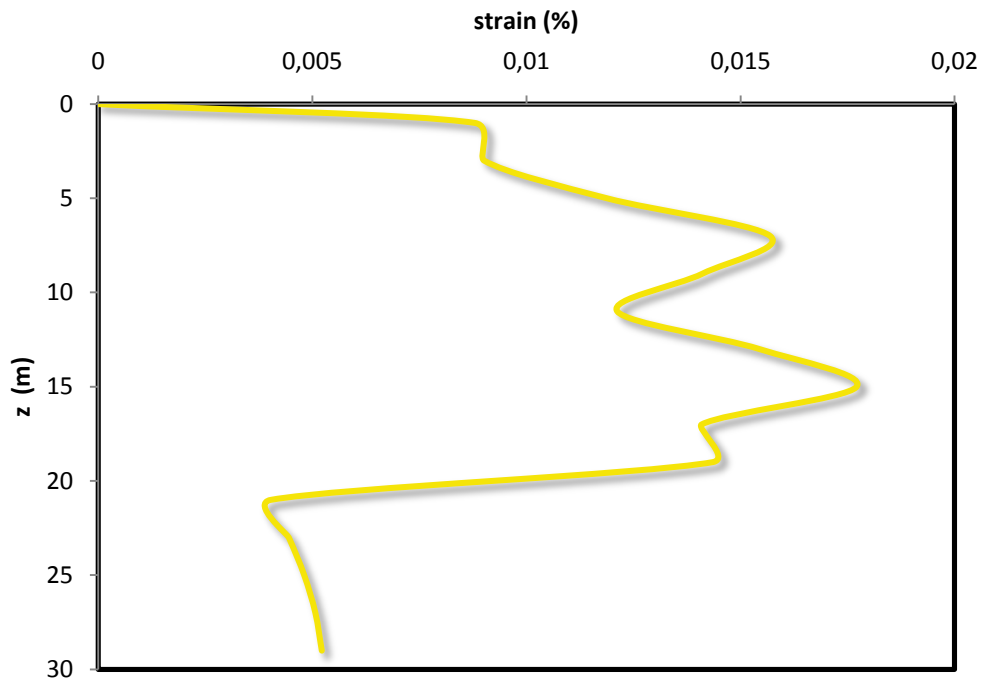
Σχήμα 6.57: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



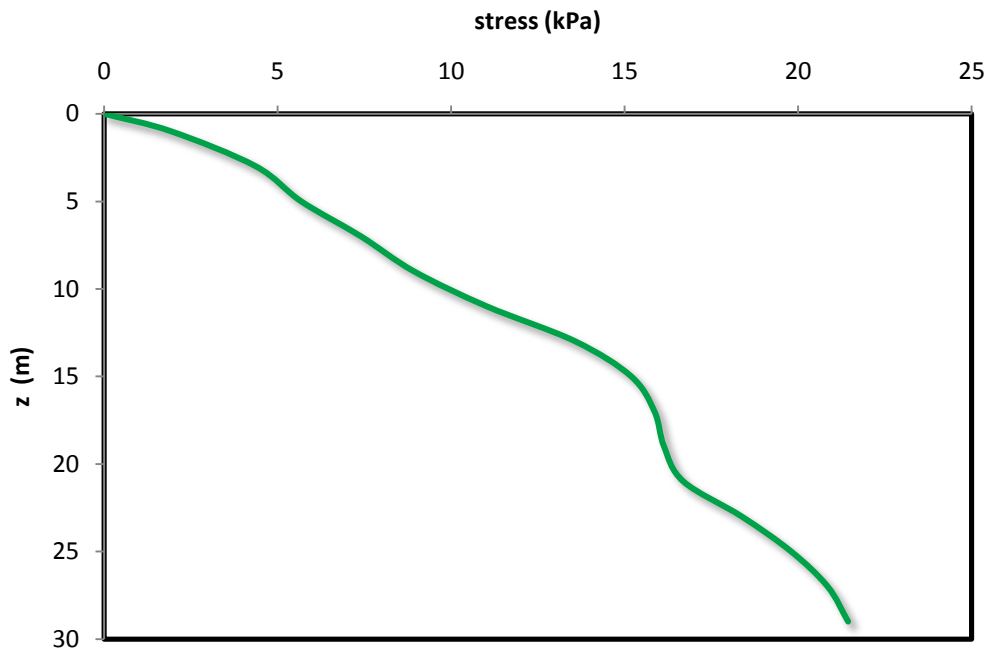
Σχήμα 6.58: Σύγκρισή πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



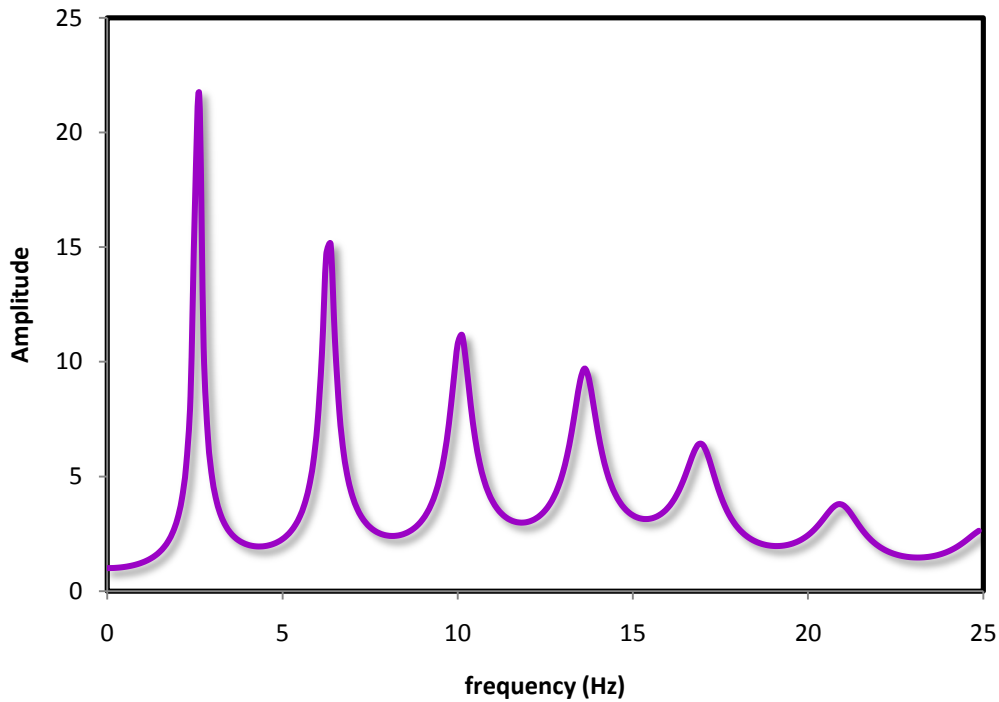
Σχήμα 6.59: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



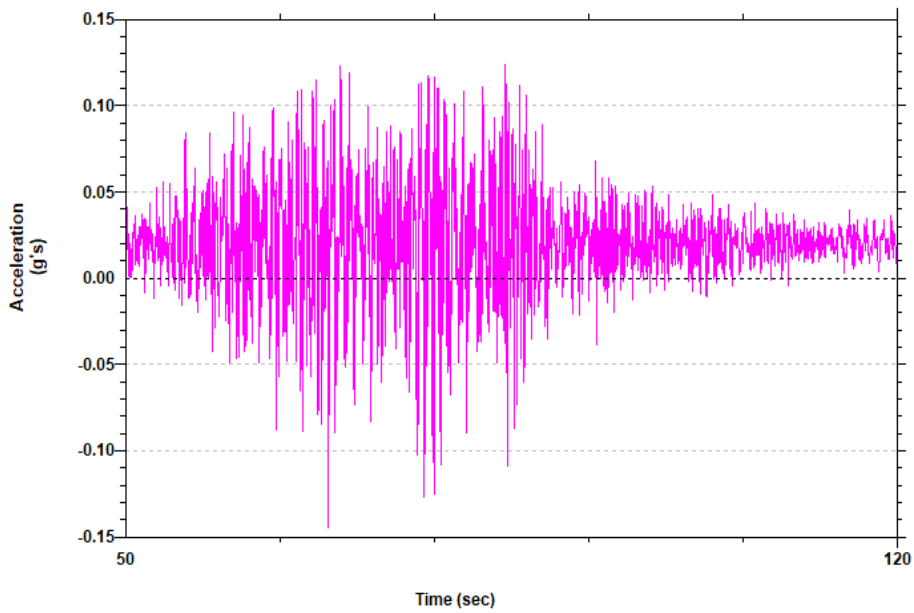
Σχήμα 6.60: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



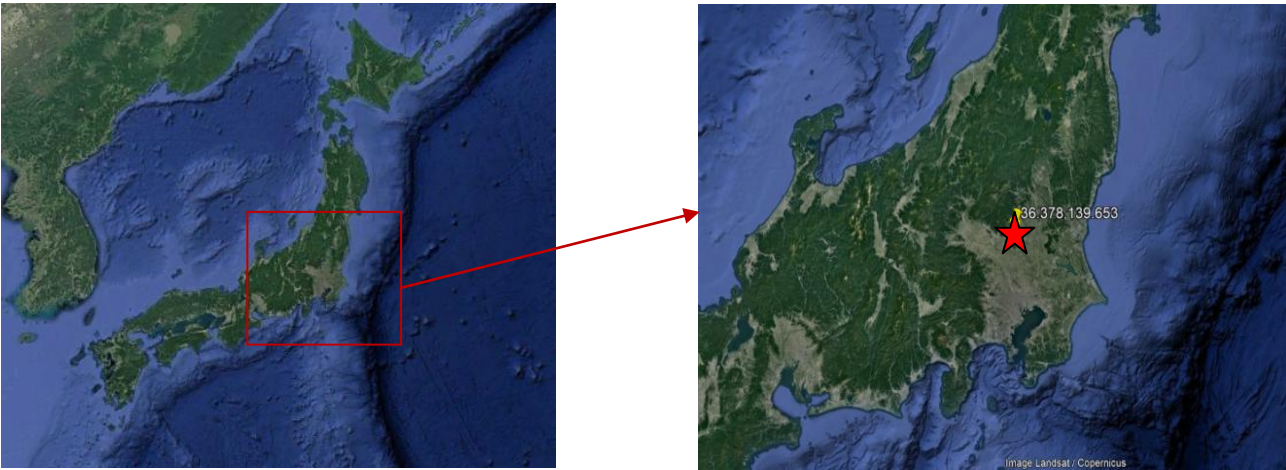
Σχήμα 6.61: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



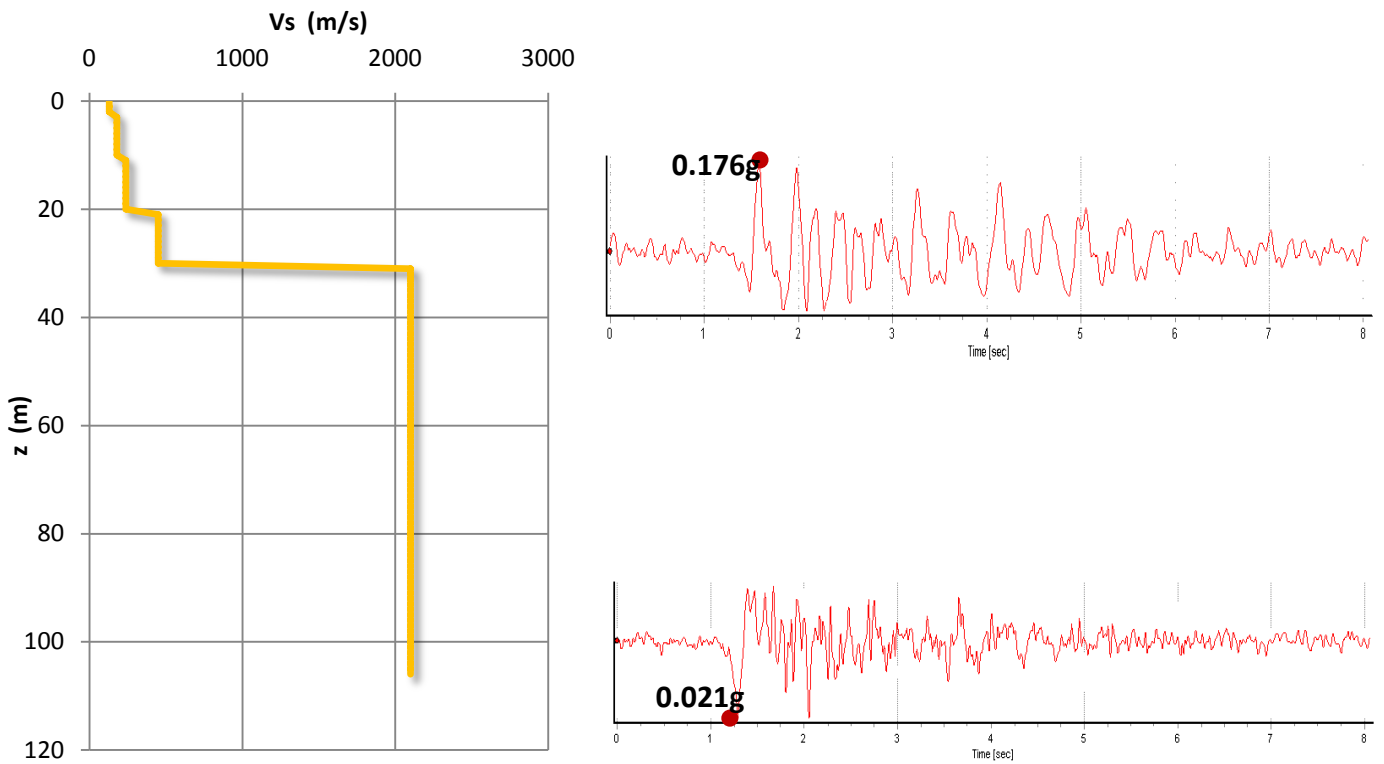
Σχήμα 6.62: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



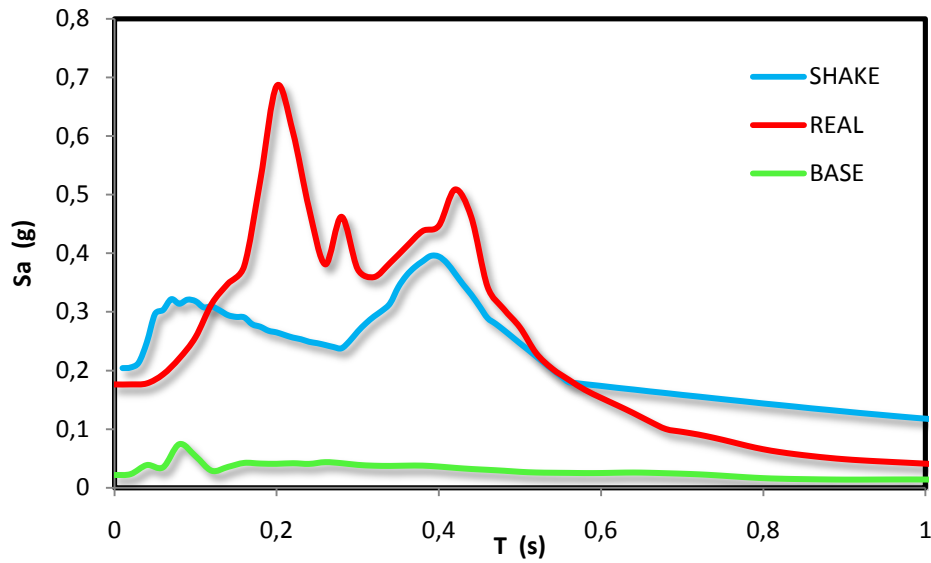
Σχήμα 6.63: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 8:16:12 στον σταθμό IBRH11.



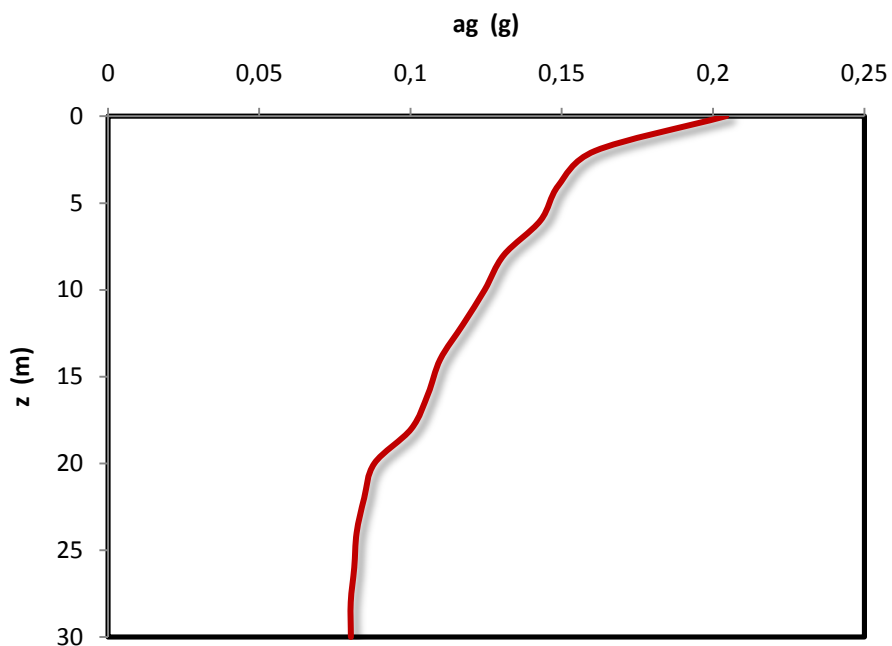
Σχήμα 6.64: Συντεταγμένες επικέντρου του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30.



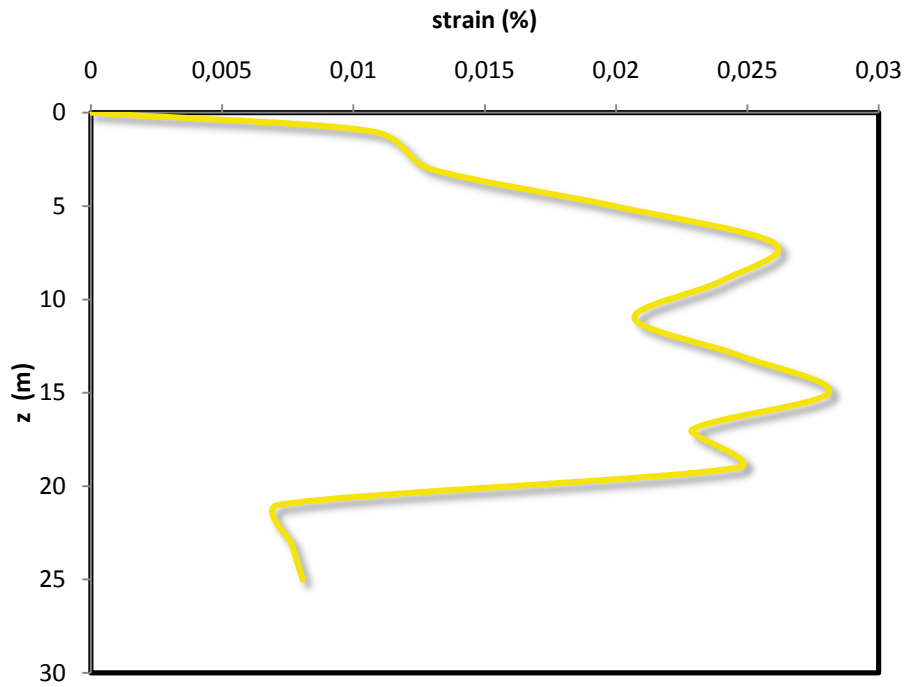
Σχήμα 6.65: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



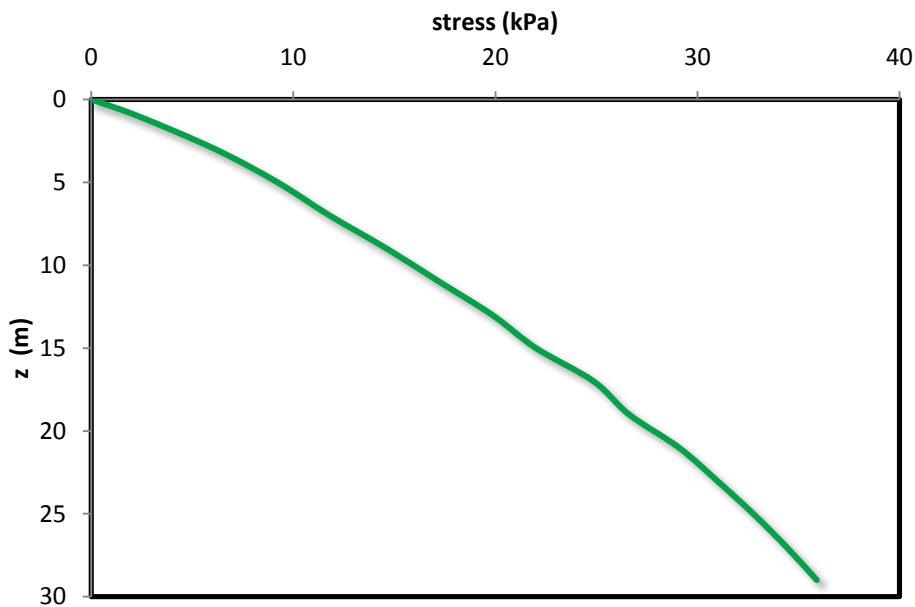
Σχήμα 6.66: Σύγκρισή πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



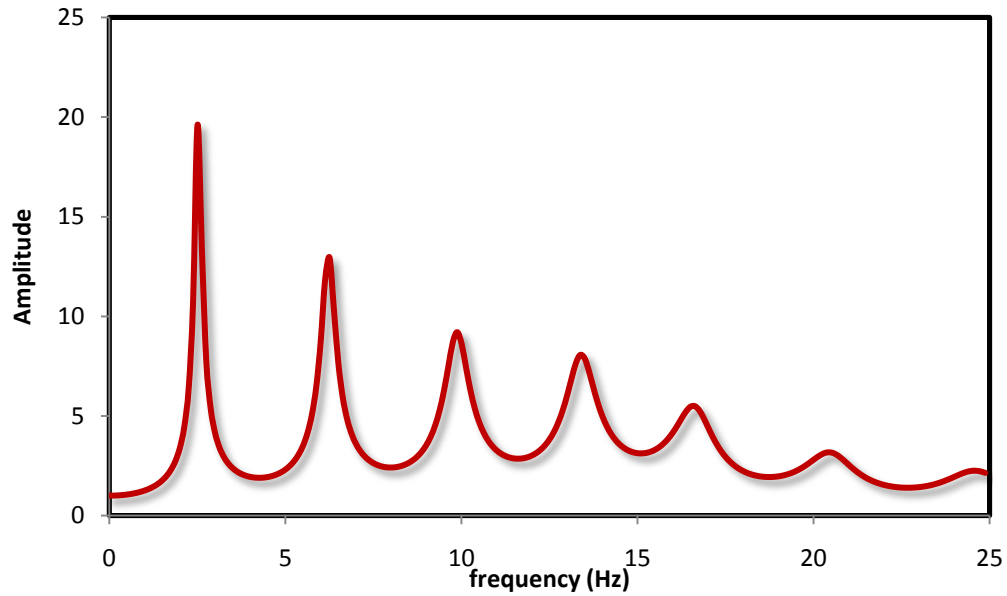
Σχήμα 6.67: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



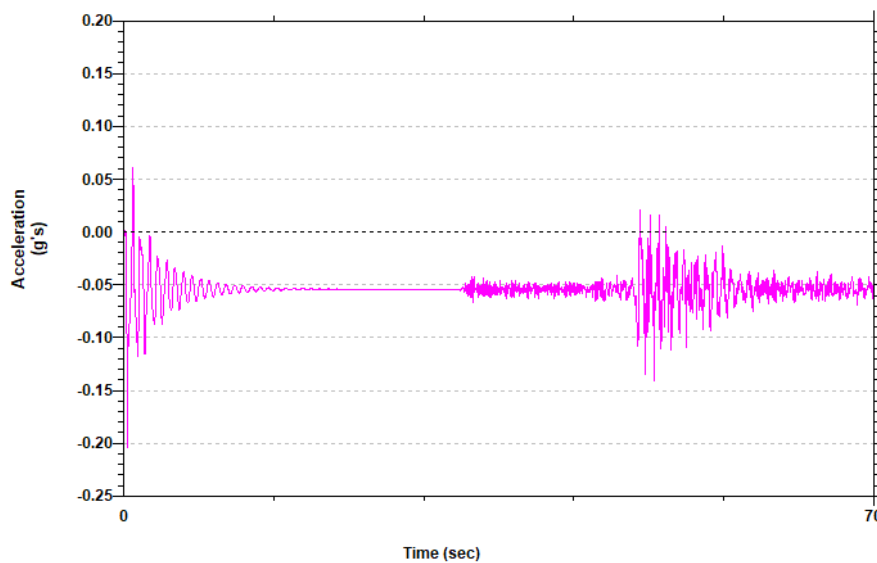
Σχήμα 6.68: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



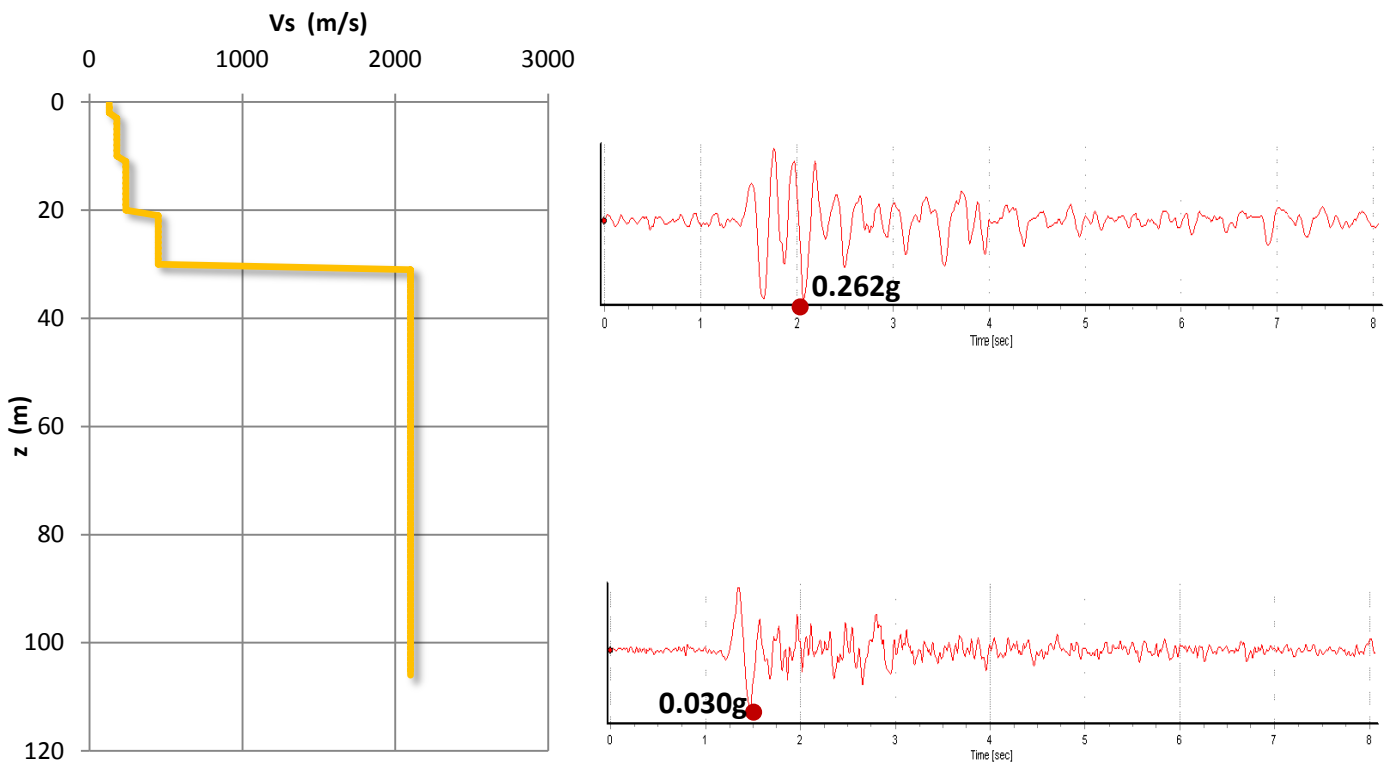
Σχήμα 6.69: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



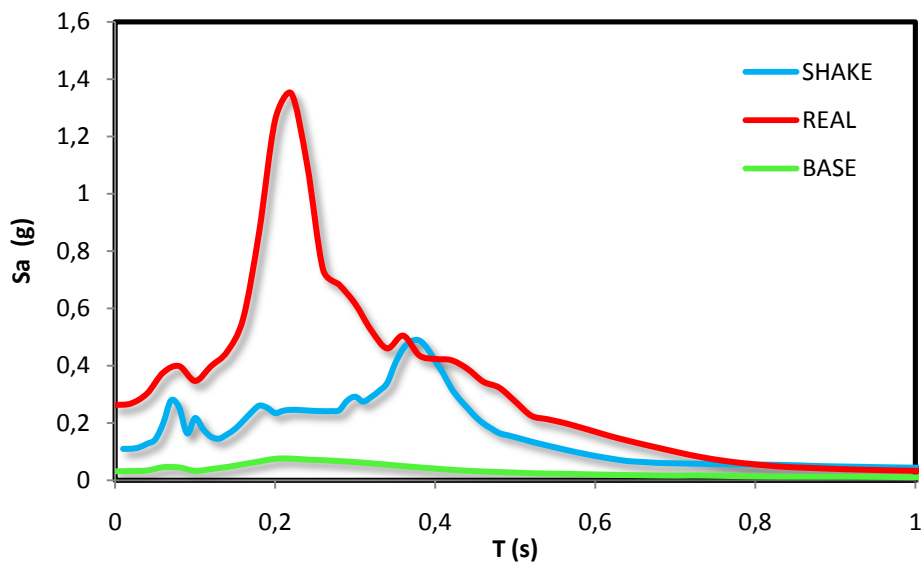
Σχήμα 6.70: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



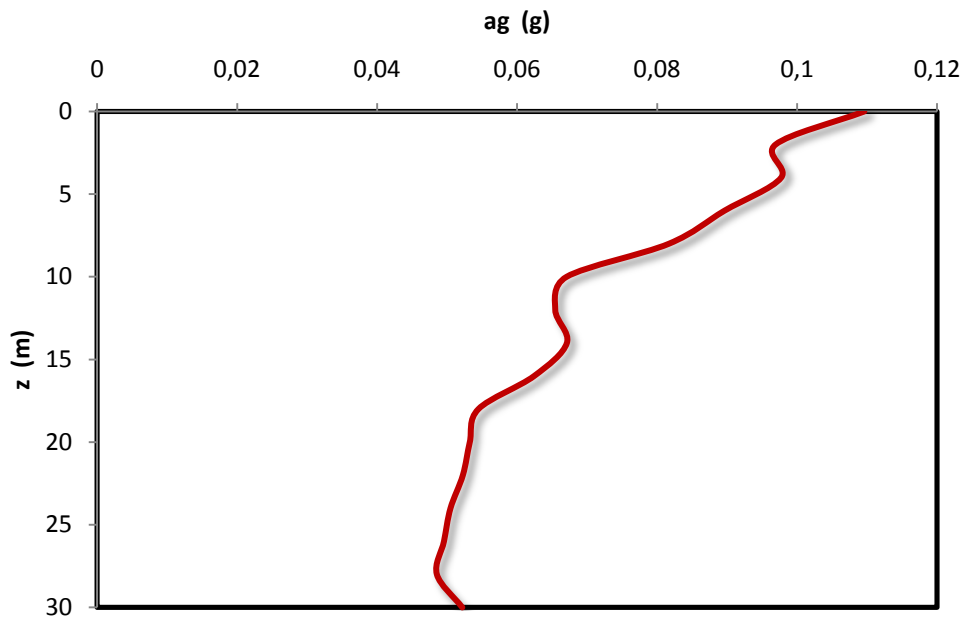
Σχήμα 6.71: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



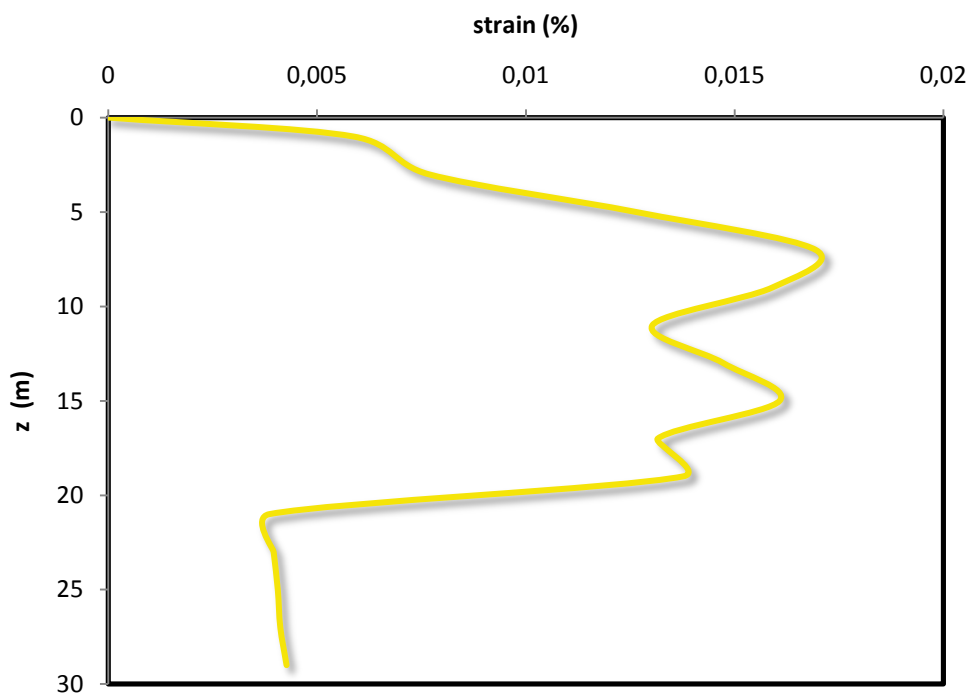
Σχήμα 6.72: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



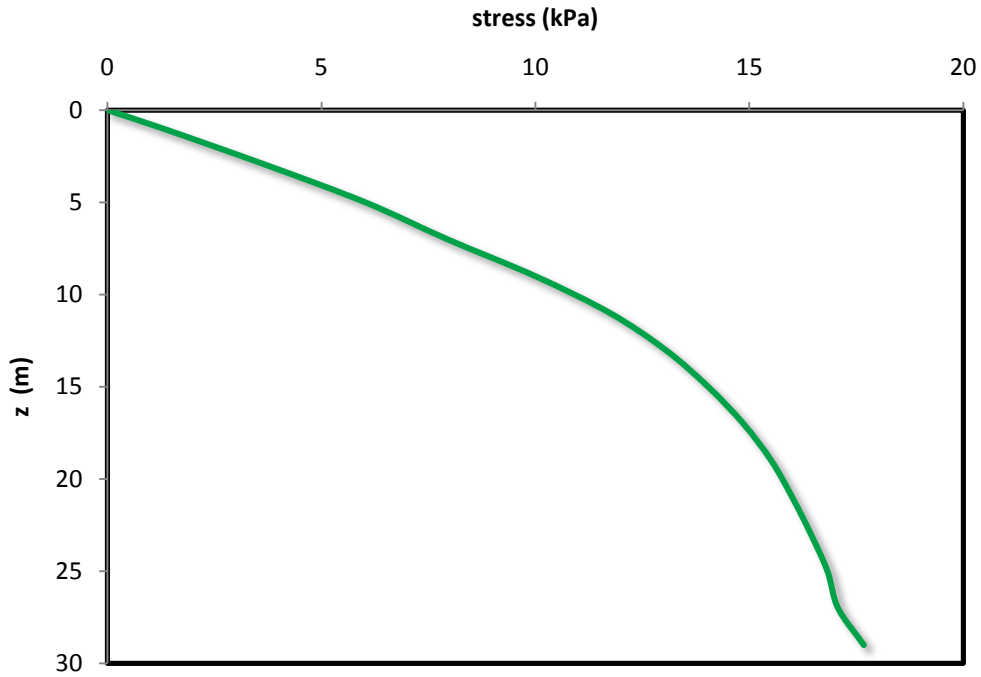
Σχήμα 6.73: Σύγκρισή πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



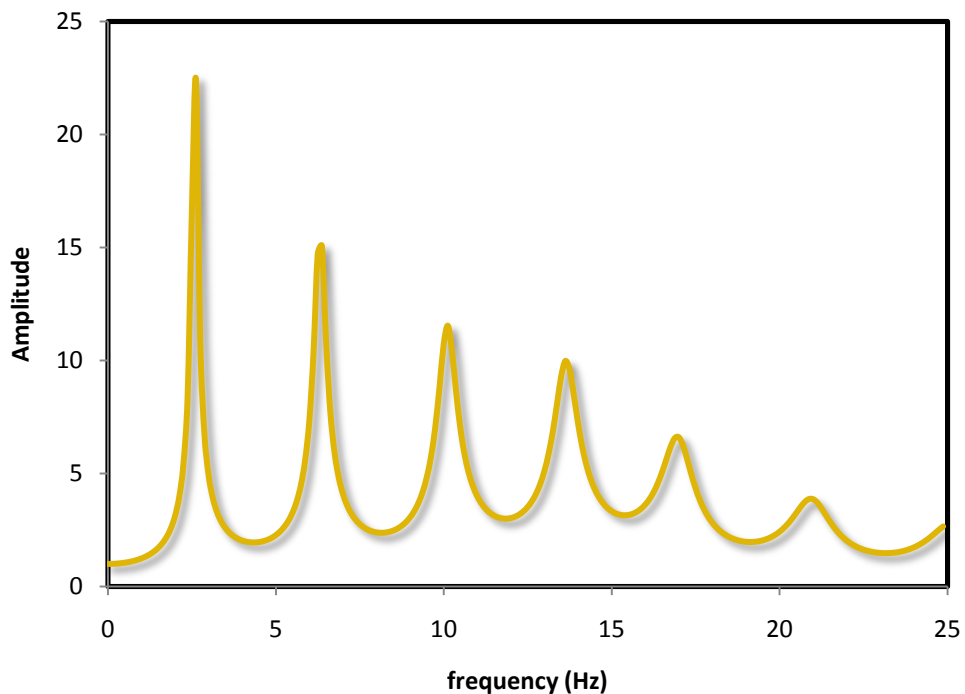
Σχήμα 6.74: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



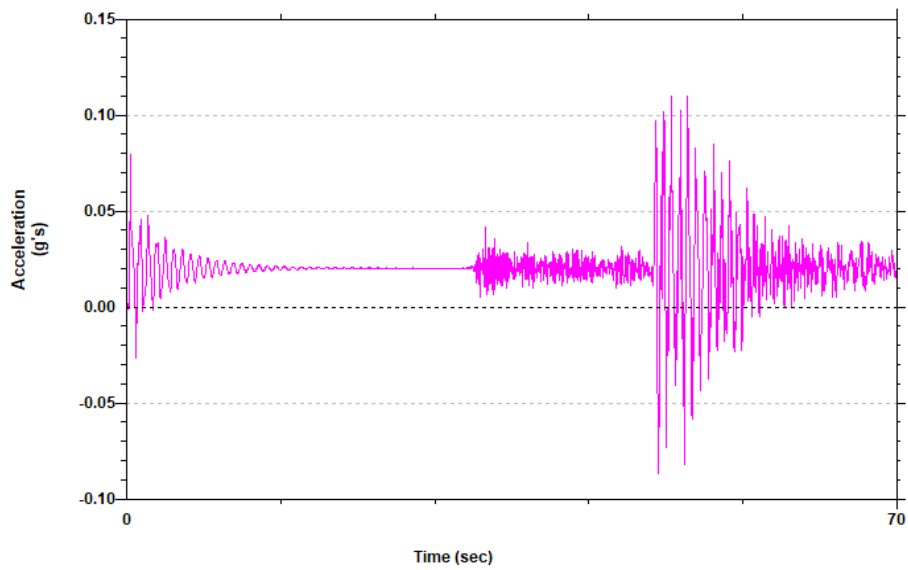
Σχήμα 6.75: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



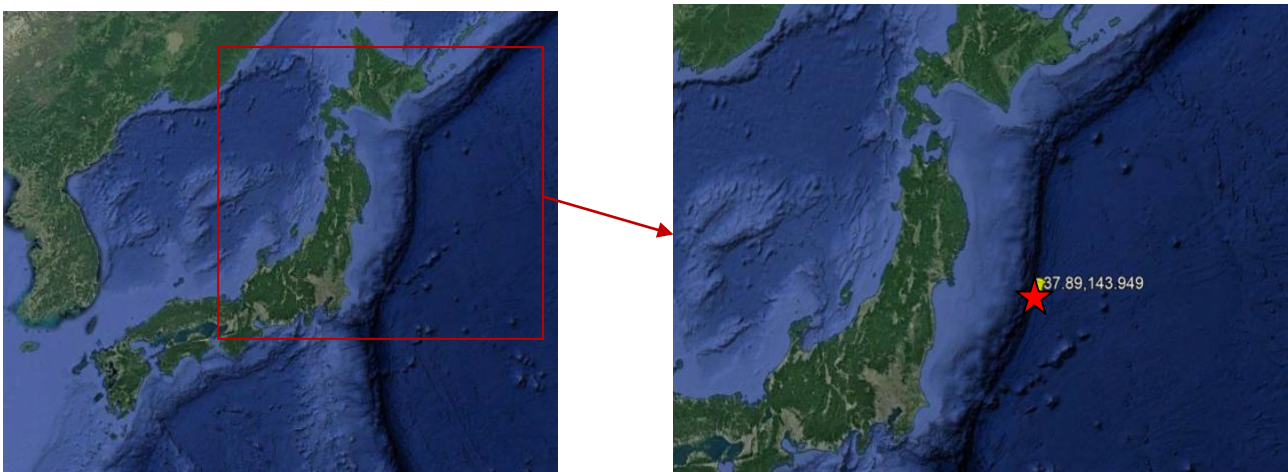
Σχήμα 6.76: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



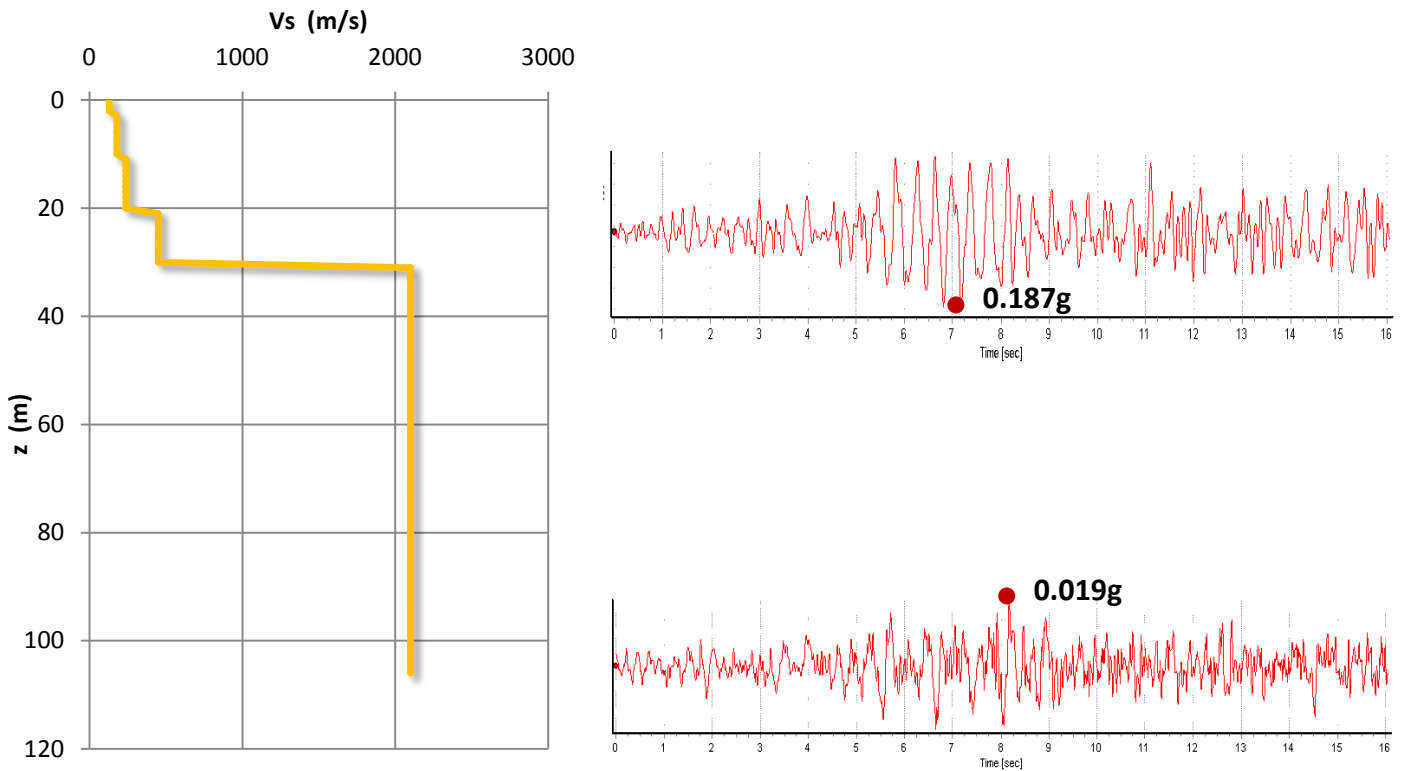
Σχήμα 6.77: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



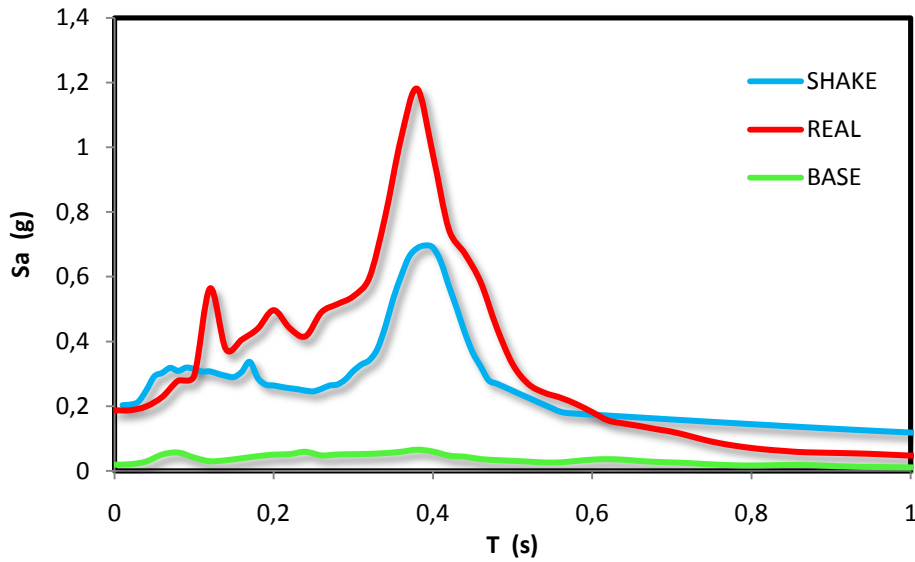
Σχήμα 6.78: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Eastern Honshu Japan 2011/04/11, 02:19:30 στον σταθμό IBRH11.



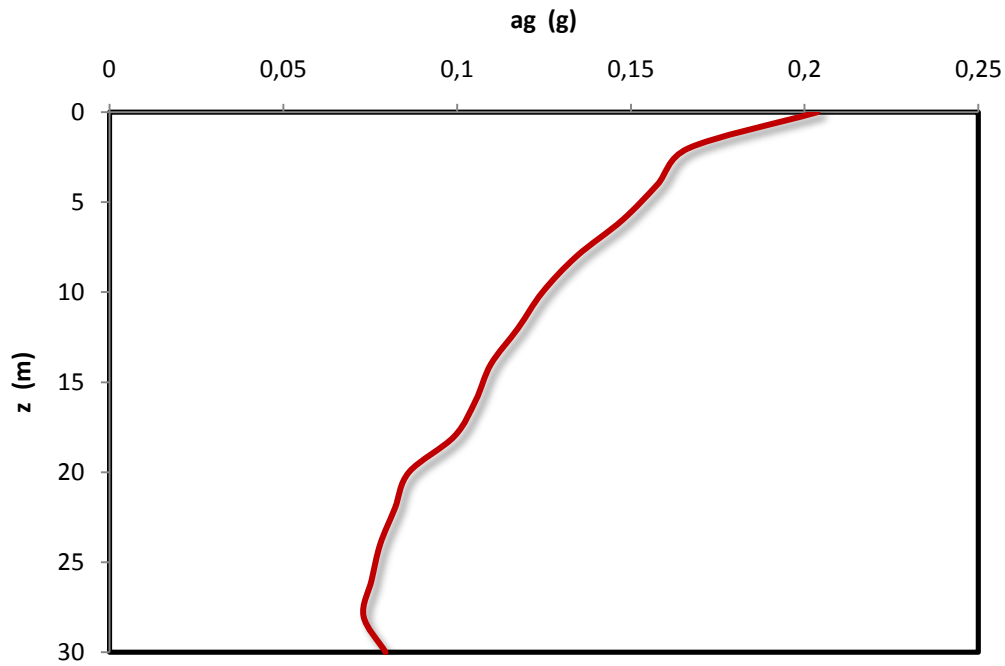
Σχήμα 6.79: Συντεταγμένες του επικέντρου του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07.



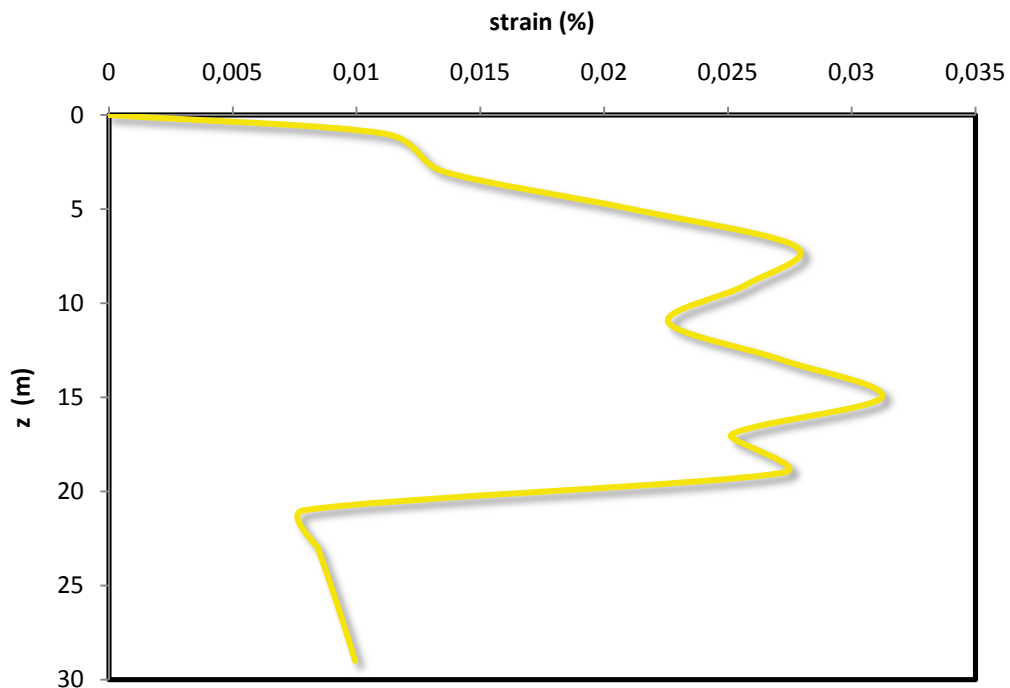
Σχήμα 6.80: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



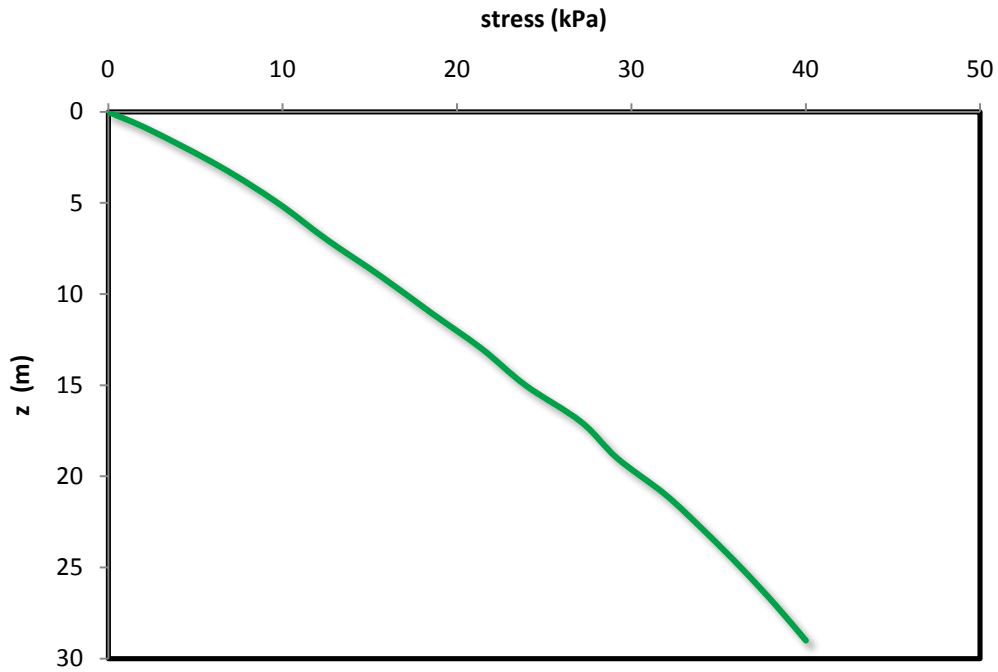
Σχήμα 6.81: Σύγκρισή πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας NS του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



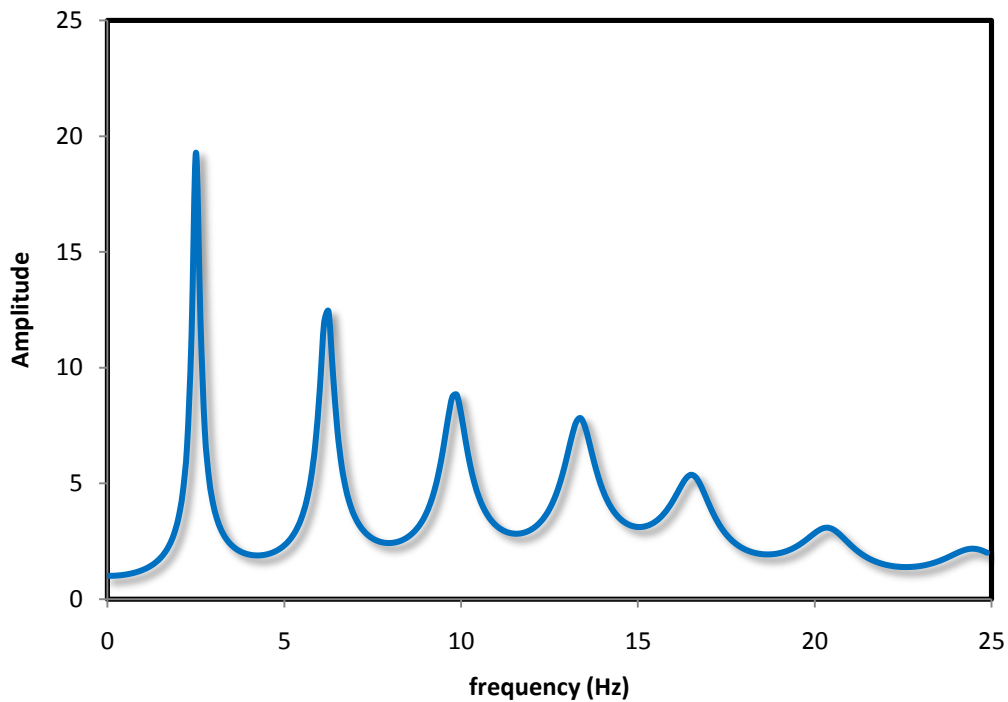
Σχήμα 6.82: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



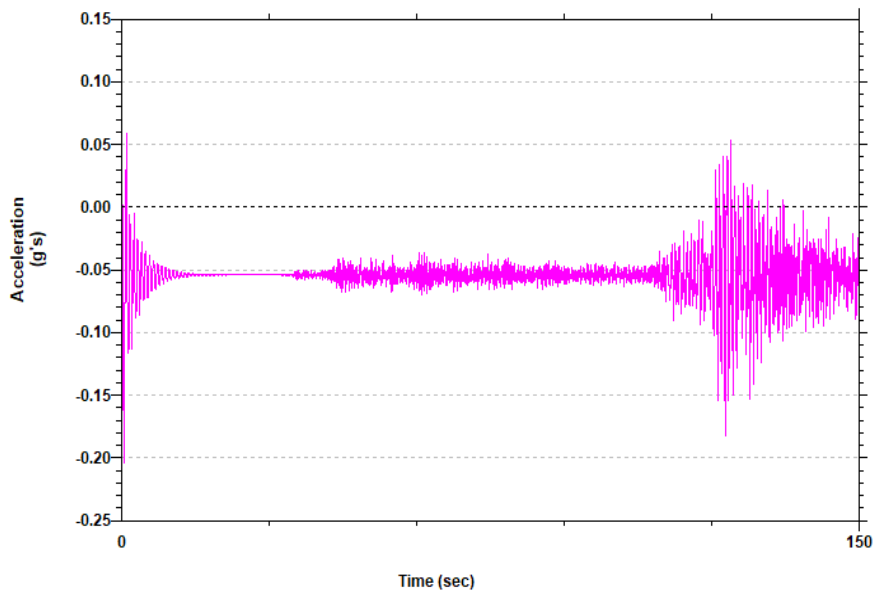
Σχήμα 6.83: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



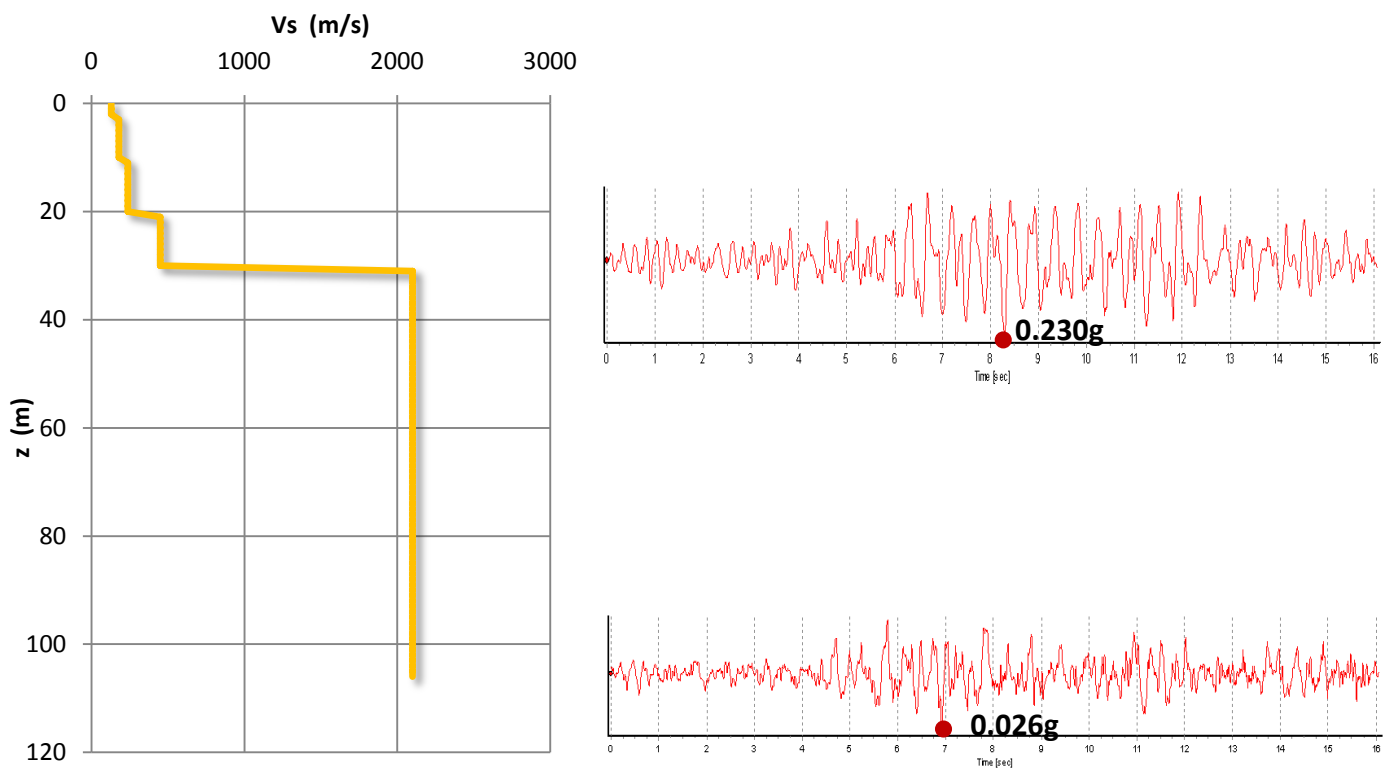
Σχήμα 6.84: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας NS του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



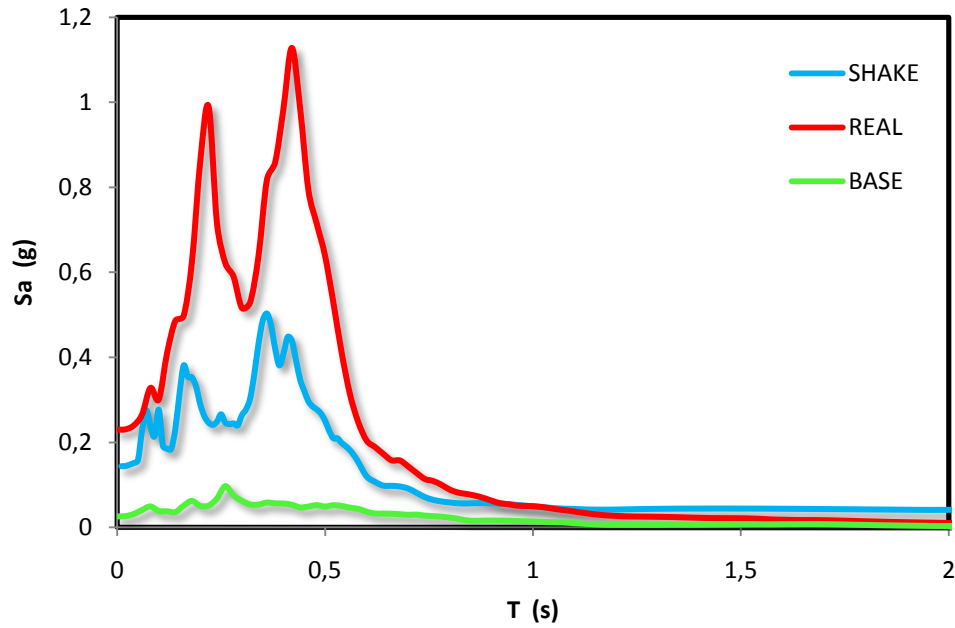
Σχήμα 6.85: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας NS του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



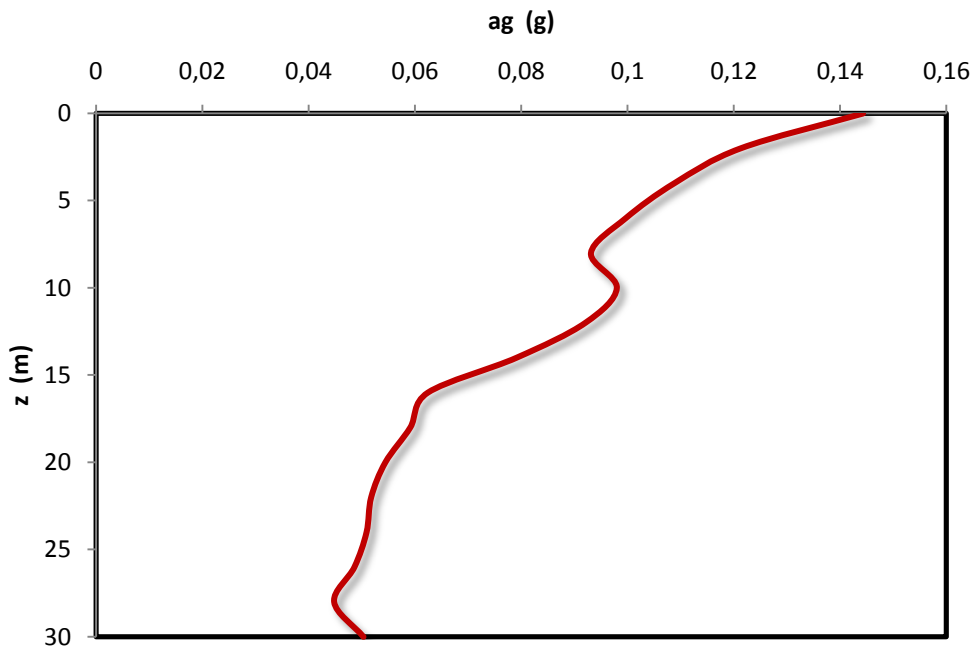
Σχήμα 6.86: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας NS του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



Σχήμα 6.87: Επιταχυνσιογραφήματα σε βάθος 30 m και στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



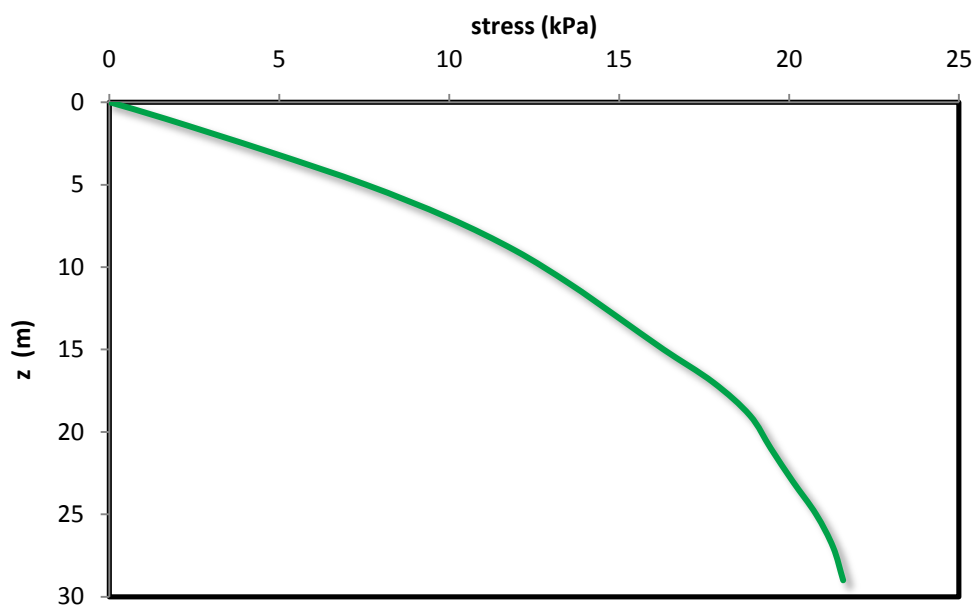
Σχήμα 6.88: Σύγκρισή πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια με προβλεπόμενου και φάσμα βραχώδους υποβάθρου συνιστώσας EW του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



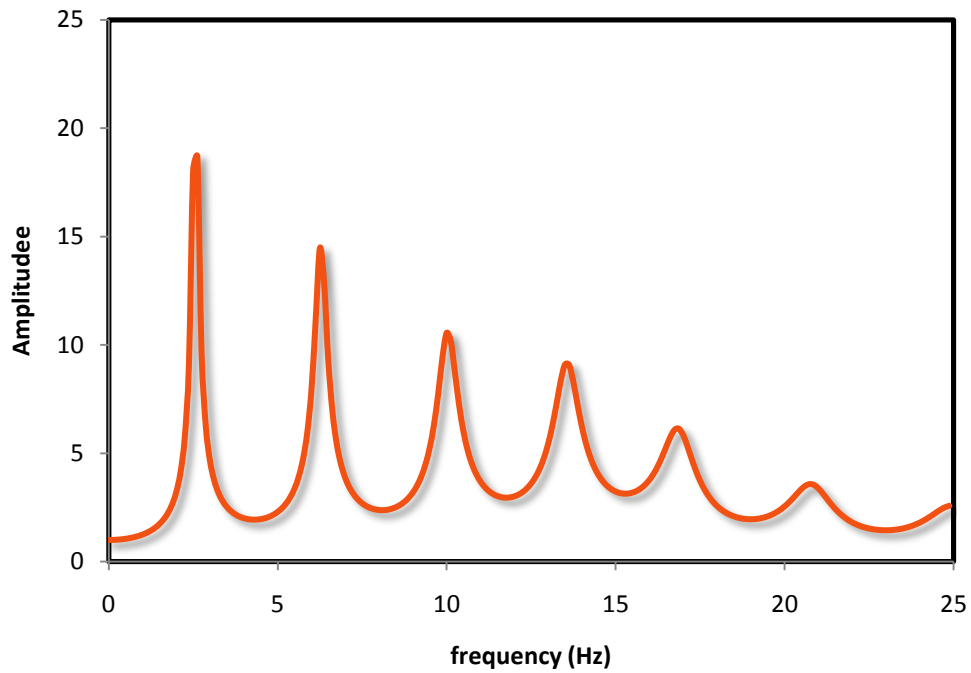
Σχήμα 6.89: Κατανομή εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



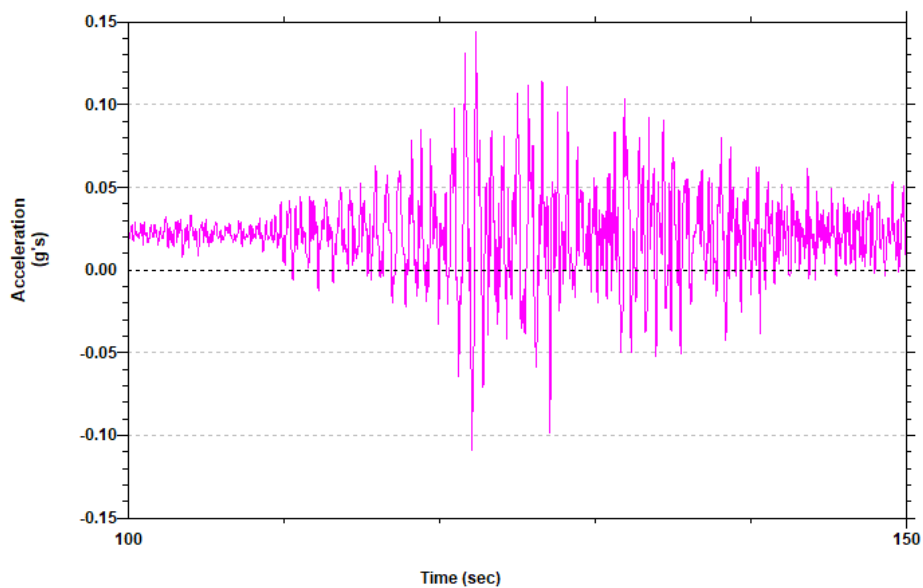
Σχήμα 6.90: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



Σχήμα 6.91: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος συνιστώσας EW του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



Σχήμα 6.92: Συνάρτηση μεταφοράς συνιστώσας EW του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.



Σχήμα 6.93: Προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα στην επιφάνεια συνιστώσας EW του σεισμού Off the East Coast of Honshu Japan 2012/12/07 στον σταθμό IBRH11.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα

7.1 Διερεύνηση αβεβαιοτήτων της ανάλυσης

Το βασικό πλεονέκτημα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης είναι η απλότητα και η ευκολία εφαρμογής. Όμως, παραβιάζει μια βασική αρχή της Μηχανικής. Εφαρμόζει επαλληλία των αρμονικών συνιστωσών της σεισμικής απόκρισης παρά το γεγονός ότι η ανακυκλική συμπεριφορά του εδάφους είναι μη γραμμική ιξωδο - ελαστική. Τα αποτελέσματα όσον αφορά την εδαφική ενίσχυση μπορεί να είναι αξιόπιστα κάπου κάπου, αλλά η λεπτομερής πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια προσκρούει σε αρκετά εμπόδια.

Κατ' αρχάς, έχουμε κάνει την παραδοχή ισοδύναμης γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους. Εναλλακτικά, υπάρχει και η *μη γραμμική ανάλυση (time domain analysis)* στην οποία θα πρέπει να γνωρίζουμε και τη καμπύλη διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης που δείχνει τη σεισμική απόκριση σε φόρτιση - αποφόρτιση - επαναφόρτιση της κάθε εδαφικής στρώσης. Αυτή η μέθοδος αφορά την αριθμητική επίλυση της μη γραμμικής διαφορικής εξίσωση κίνησης και δεν βασίζεται σε προσεγγιστικές παραδοχές που αντιβαίνουν βασικές αρχές της Μηχανικής.

Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες ως προς τις φυσικές και δυναμικές ιδιότητες των εδαφών, ακόμη και για το είδος των εδαφών. Χρειάστηκαν αρκετές υποθέσεις για τον δείκτη πλασιμότητας των αργιλικών εδαφών και για τα ειδικά βάρη. Μια σημαντική αβεβαιότητα που υπάρχει είναι και οι τιμές των διατμητικών ταχυτήτων με το βάθος, οι οποίες δίνονται από το NIED. Παρατηρούμε πως οι ταχύτητες διάδοσης των διατμητικών κυμάτων παραμένουν σταθερές πολλές φορές και για δεκάδες μέτρα, κάτι που δύσκολα συναντάται στην πραγματικότητα. Για παράδειγμα, στο σταθμό KSRH10 η V_s είναι σταθερή με 2100 m/s για πάνω από 100 m. Πιθανόν η μέτρηση της V_s να έγινε σε συγκεκριμένα βάρη και να θεωρήθηκε σταθερή από σημείο σε σημείο. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση του φάσματος απόκρισης προς τα δεξιά (αν θεωρήσουμε μαλακότερο έδαφος) ή προς τα αριστερά (για σκληρότερο έδαφος).

Παρατηρήθηκαν διαφορές στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο κάθετων οριζόντιων συνιστωσών σε κάθε σταθμό. Αυτές εν μέρει οφείλονται στις διαφορετικές τοπογραφικές συνθήκες. Έχουμε υποθέσει συνθήκες ελεύθερου πεδίου και ότι η σεισμική κίνηση αλλάζει μόνο λόγω εδαφικής ενίσχυσης. Αγνοήσαμε διδιάστατα ή τριδιάστατα φαινόμενα, διάδοση κυμάτων σε κοιλάδες ή άκρες πρηνών, την ύπαρξη κατασκευών γύρω από τους σταθμούς, που ενδέχεται να παίζουν σημαντικό ρόλο στη τροποποίηση της εδαφικής κίνησης.

Στις αναλύσεις στον σταθμό KSRH10 έγινε η υπόθεση ότι οι καταγραφές στο βραχώδες υπόβαθρο δεν βρίσκονται σε βάθος 250 m που ισχύει στην πραγματικότητα, αλλά τις εφαρμόσαμε σε βάθος

36 m, με την λογική ότι σε εκείνο το σημείο βρισκόμαστε ήδη σε βράχο και ότι η ανάλυση με το SHAKE είναι αξιόπιστη μόνο για εδαφικούς και όχι βραχώδεις σχηματισμούς.

Με αυτή τη παραδοχή όμως παραλείψαμε δεκάδες μέτρα διάδοσης του κραδασμού στον βράχο, τα οποία σίγουρα θα έχουν κάποια επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Με τις αναλύσεις που ακολουθούν θα ερευνήσουμε πόσο καθοριστική είναι η επίδραση αυτή, εφαρμόζοντας την καταγραφή του βράχου στα 250 m.

Μελετάμε τις δύο συνιστώσες του σεισμού στο Tokachi-oki το 2003. Για να δούμε κατά πόσο οι αναλύσεις αυτές είναι κοντά στην πραγματικότητα συγκρίνουμε το πραγματικό με το προβλεπόμενο φάσμα απόκρισης. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 7.1 η πρόβλεψη στη συνιστώσα NS είναι πλέον πολύ καλή, σε αντίθεση με την προηγούμενη ανάλυση. Και στη συνιστώσα EW τα αποτελέσματα είναι σαφώς βελτιωμένα (Σχήμα 7.2).

Ομοίως, στον σταθμό IBRH11 εφαρμόζουμε την καταγραφή του βραχώδους υποβάθρου της συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12 σε βάθος 103 m (και όχι 30 m που ήταν στο Κεφάλαιο 6). Και εδώ τα αποτελέσματα είναι καλύτερα από την προηγούμενη ανάλυση, όπως αποδεικνύει το Σχήμα 7.3. Βέβαια, και πάλι τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά.

7.2 Συμπεράσματα

Η εδαφική ενίσχυση είναι ένα φαινόμενο που θα πρέπει να λεμβάνεται σοβαρά υπόψη στον Αντισεισμικό σχεδιασμό. Είδαμε ότι σε περιπτώσεις μαλακών εδαφικών σχηματισμών εδραζόμενων σε σκληρό βράχο η ενίσχυση είναι ιδιαίτερα έντονη. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από την θεωρία και από τα ιστορικά περιστατικά που μελετήθηκαν. Ήδη δείξαμε ότι ο ισχύων Αντισεισμικός Κανονισμός (EC8) αδυνατεί να προβλέψει επαρκώς το μέγεθος και την περίοδο εμφάνισης της εδαφικής ενίσχυσης. Οι επιταχύνσεις στην επιφάνεια μπορεί να είναι και δεκαπλάσιες από αυτές που συναντάμε στο βραχώδες υπόβαθρο (ή και ακόμα μεγαλύτερες).

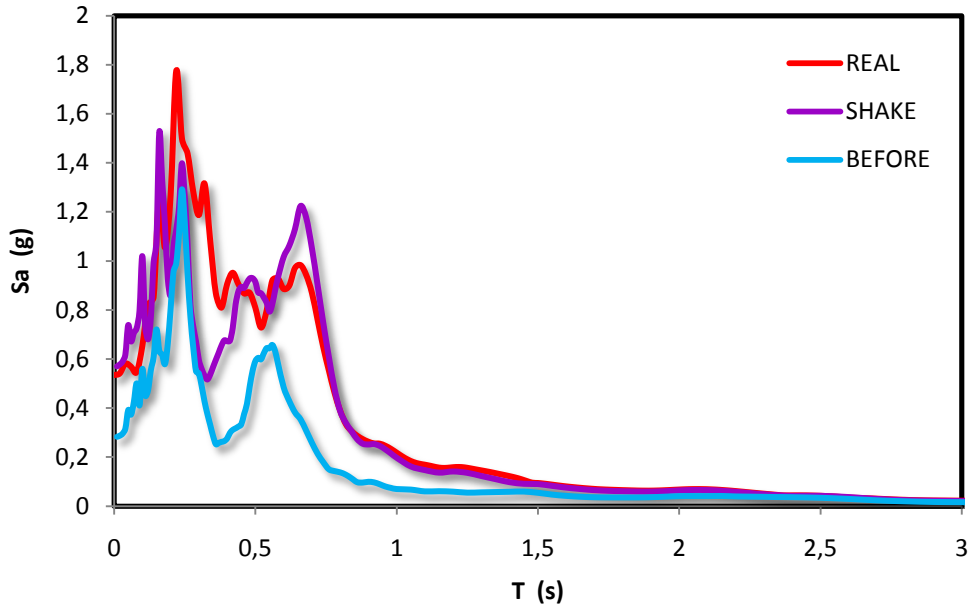
Η ισοδύναμη γραμμική ελαστική ανάλυση μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα ανάλογα την περίπτωση την οποία εξετάζουμε. Ακόμη και για καταγραφές του ίδιου σεισμού στον ίδιο σταθμό, η ορθότητα των αποτελεσμάτων διέφερε στις δύο συνιστώσες. Αυτό υποδηλώνει ότι η τροποποίηση του κραδασμού μέχρι την επιφάνεια εξαρτάται και από άλλα φαινόμενα και συνθήκες. Παρατηρήσαμε ότι η περίοδος εμφάνισης των κορυφών του φάσματος συνήθως ταυτίζονται με την θεμελιώδη ή την δεύτερη ιδιοπερίοδο του εδαφικού σχηματισμού. Επαληθεύεται έτσι η προσομοίωση που προκύπτει από την κυματική θεωρία.

Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η παράλειψη της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο βραχώδες υπόβαθρο, τελικά οδήγησε σε πιά ανακριβή αποτελέσματα. Η τοποθέτηση των καταγραφών στο πραγματικό τους βάθος έδειξε πως ο ρόλος του υπερκείμενου βράχου δεν ήταν απομειωτικός, αλλά ενισχυτικός. Μιά τέτοια συμπεριφορά αντιβαίνει τα όσα ισχύουν για την συμπεριφορά των

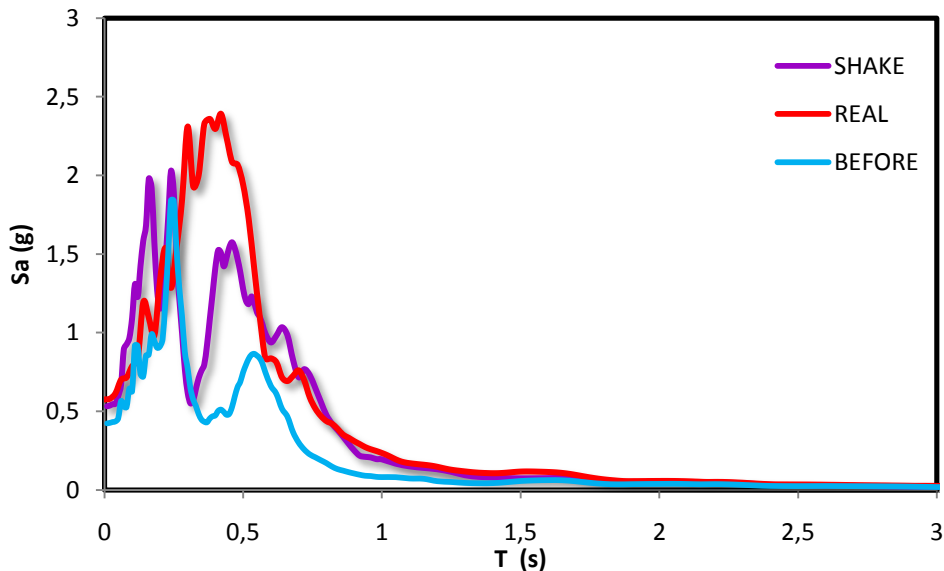
βράχων σε σεισμό. Προφανώς, για να αποδειχτεί ότι όντως οι στρώσεις του βράχου δύνανται να ενισχύσουν τα προσπίπτωντα σεισμικά κύματα χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου.

Επομένως, μπορούμε να πούμε πως για την μελέτη της εδαφικής ενίσχυσης, οι ισοδύναμες γραμμικές ελαστικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι σε θέση να δώσουν μια πρώτη αίσθηση της κίνησης στην επιφάνεια. Για την ακριβέστερη πρόβλεψη του φαινομένου θα χρειαστούν καλύτερα προσομοιώματα, διασαφήνηση των αβεβαιοτήτων που αφορούν τις παραμέτρους του προβλήματος και εκτενέστερη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών.

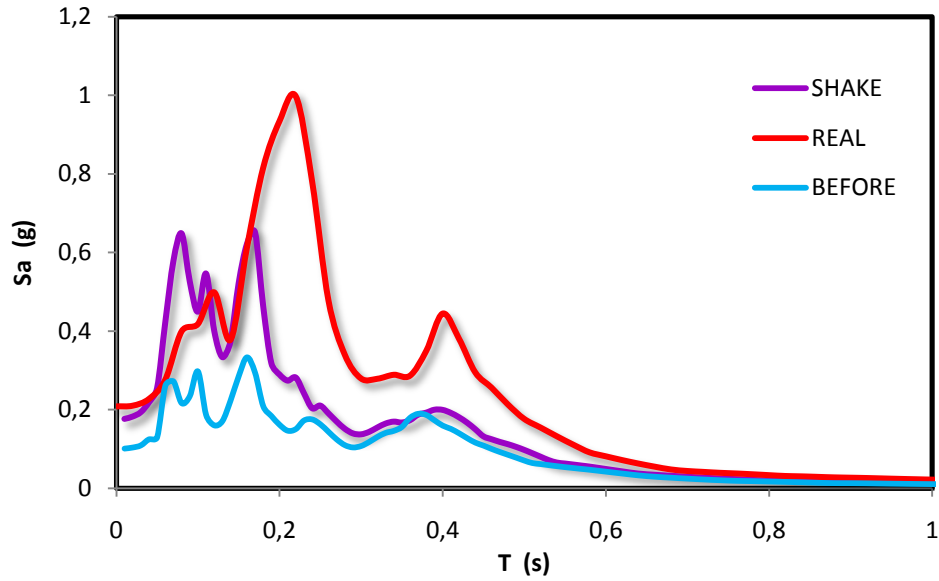
Σχήματα (7)



Σχήμα 7.1: Σύγκριση του φάσματος στην επιφάνεια (κόκκινη γραμμή) με αυτό που προέκυψε με την καταγραφή στον βράχο τοποθετημένη στα 250 m (μόβ γραμμή) στον σταθμό KSRH10 για την συνιστώσα NS του σεισμού Tokachi-oki 2003. Με γαλάζια γραμμή φαίνεται το φάσμα στην επιφάνεια που προέκυψε από την ανάλυση στο Κεφάλαιο 4. Το νέο φάσμα προσεγγίζει πολύ καλά την πραγματικότητα.



Σχήμα 7.2: Σύγκριση του φάσματος στην επιφάνεια (κόκκινη γραμμή) με αυτό που προέκυψε με την καταγραφή στον βράχο τοποθετημένη στα 250 m (μόβ γραμμή) στον σταθμό KSRH10 για την συνιστώσα EW του σεισμού Tokachi-oki 2003. Με γαλάζια γραμμή φαίνεται το φάσμα στην επιφάνεια που προέκυψε από την ανάλυση στο Κεφάλαιο 4. Το νέο φάσμα προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.



Σχήμα 7.3: Σύγκριση του φάσματος στην επιφάνεια (κόκκινη γραμμή) με αυτό που προέκυψε με την καταγραφή στον βράχο τοποθετημένη στα 250 m (μόβ γραμμή) στον σταθμό IBRH11 για την συνιστώσας EW του σεισμού near the east coast of Honshu Japan 2002/02/12. Με γαλάζια γραμμή φαίνεται το φάσμα στην επιφάνεια που προέκυψε από την ανάλυση στο Κεφάλαιο 6. Το νέο φάσμα προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:

Οι πρόσφατοι σεισμοί στην
Osaka στις 18/06/2018 και στο
Hokkaido στις 05/09/2018

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Οι πρόσφατοι σεισμοί στην Osaka στις 18/06/2018 και στο Hokkaido στις 05/09/2018

Ο ΠΡΟΣΦΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΟΣ ΣΤΗΝ OSAKA 18/06/2018

Στις 18 Ιουνίου 2018 σεισμός μεγέθους $M = 5.5$ συνέβη στη βόρεια Osaka στην Ιαπωνία. Το επίκεντρο του σεισμού ήταν κοντά στο Takatsuki σε βάθος περίπου 13 χιλιόμετρα. (Σχήμα Α.1). Παρακάτω παρουσιάζονται τα φάσματα αποκρίσης στους σταθμούς OSK002 (Σχήμα Α.2) και OSK005 (Σχήμα Α.3), στους οποίους είχαμε ισχυρές καταγραφές.

Η μέγιστη επιτάχυνση καταγράφηκε στον σταθμό OSK002 κοντά στο επίκεντρο του σεισμού και άγγιξε τα 0.8g. Στο Σχήμα Α.4 βλέπουμε την κατανομή των διατμητικών ταχυτήτων με το βάθος στον σταθμό. Η μέση ταχύτητα διάδοσης προκύπτει ίση με 303 m/s. Επομένως, η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του εδάφους προκύπτει $T_p = 0.26$ s. Τα επιταχυνσιογραφήματα των συνιστωσών NW και EW στην επιφάνεια του εδάφους φαίνονται στο Σχήμα Α.5 και τα αντίστοιχα ελαστικά φάσματα απόκρισης παρουσιάζονται στο Σχήμα Α.6. Παρατηρούμε πως τα δύο φάσματα δεν είναι κοντά ως προς την μέγιστη επιτάχυνση αλλά έχουν περίπου την ίδια μορφή με μέγιστη τιμή περί τα 0.3 δευτερόλεπτα. Η μεγιστοποίηση, λοιπόν, και στις δύο καταγραφές συμβαίνει περίπου στην θεμελιώδη ιδιοπερίοδο.

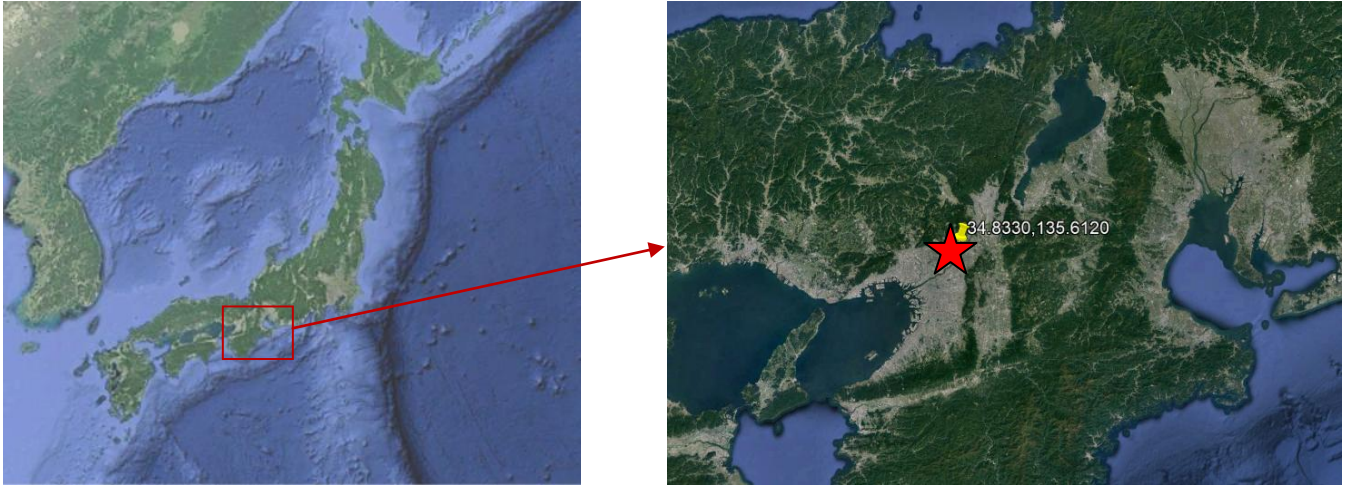
Στον σταθμό OSK005 διαθέτουμε καταγραφές και στο βραχώδες υπόβαθρο και στην επιφάνεια του εδάφους, οπότε μπορούμε να προσδιορίσουμε και την εδαφική ενίσχυση που πραγματοποιήθηκε. Παρακάτω, φαίνονται η κατανομή των διατμητικών ταχυτήτων με το βάθος (Σχήμα Α.7), οι καταγραφές σε βάθος 100 μέτρων και στην επιφάνεια για τις συνιστώσες EW (Σχήμα Α.8) και NS (Σχήμα Α.9) και τα φάσματα απόκρισης αυτών (Σχήμα Α.10). Οι δύο συνιστώσες δίνουν παρόμοια φάσματα τόσο σε μορφή όσο και σε μέγεθος. Στα Σχήματα Α.11 και Α.12 προσδιορίζονται οι πραγματικές συναρτήσεις μεταφοράς για τις συνιστώσες EW και NS, διαιρώντας τα φάσμα της κορυφής με το φάσμα της βάσης. Στην συνιστώσα EW η μέγιστη ενίσχυση συμβαίνει για περίοδο περίπου 1 δευτερόλεπτο, ενώ στην συνιστώσα NS η μέγιστη εδαφική ενίσχυση παρατηρείται λίγο μετά την περίοδο των 3 δευτερολέπτων και είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από ότι στην συνιστώσα EW.

Ο ΠΡΟΣΦΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΗΟΚΚΑΙΔΟ 05/09/2018

Στις 5 Σεπτεμβρίου 2018 σεισμός μεγέθους $M = 6.6$ συνέβη 27 χιλιόμετρα ανατολικά του Tomakomai στο νησι Hokkaido στην Ιαπωνία ως αποτέλεσμα ρηχού ανάστροφου ρήγματος. Το εστιακό βάθος εκτιμάται στα 27 km ενώ οι συντεταγμένες του επικέντρου φαίνονται στο Σχήμα A.13. Η ισχυρή σεισμική δόνηση προκάλεσε μεγάλη καταλίσθηση στην πόλη Atsumi, διακοπές ρεύματος και προβλήματα στο οδικό δίκτυο.

Οι διαθέσιμες καταγραφές χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης, ενώ σχεδόν εξίσου υψηλές είναι οι τιμές και για τις κατακόρυφες συνιστώσες των καταγραφών. Εξετάζεται ο σταθμός IBUH01, στον οποίο οι επιταχύνσεις ξεπέρασαν τα 1.3g. Ο σταθμός βρίσκεται στην περιοχή Oiwake και οι συντεταγμένες του φαίνονται στο Σχήμα A.14, ενώ η κατανομή των διατμητικών ταχυτήτων με το βάθος απεικονίζεται στο Σχήμα A.15. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι καταγραφές σε βάθος 100 μέτρων και στην επιφάνεια του εδάφους των δύο συνιστωσών EW και NS (Σχήματα A.16 και A.17), καθώς και τα ελαστικά φάσματα απίκρισης που προκύπτουν (Σχήμα A.18). Η εδαφική ενίσχυση είναι εμφανής και στις δύο συνιστώσες. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς για τη συνιστώσα EW (Σχήμα A.19) και NS (Σχήμα A.20), όπου και στις δύο παρατηρούμε πως η ενίσχυση είναι πολύ έντονη σε περιόδους περί τα 0.6 δευτερόλεπτα. Μεγαλύτερη ενίσχυση έχουμε στη συνιστώσα NS.

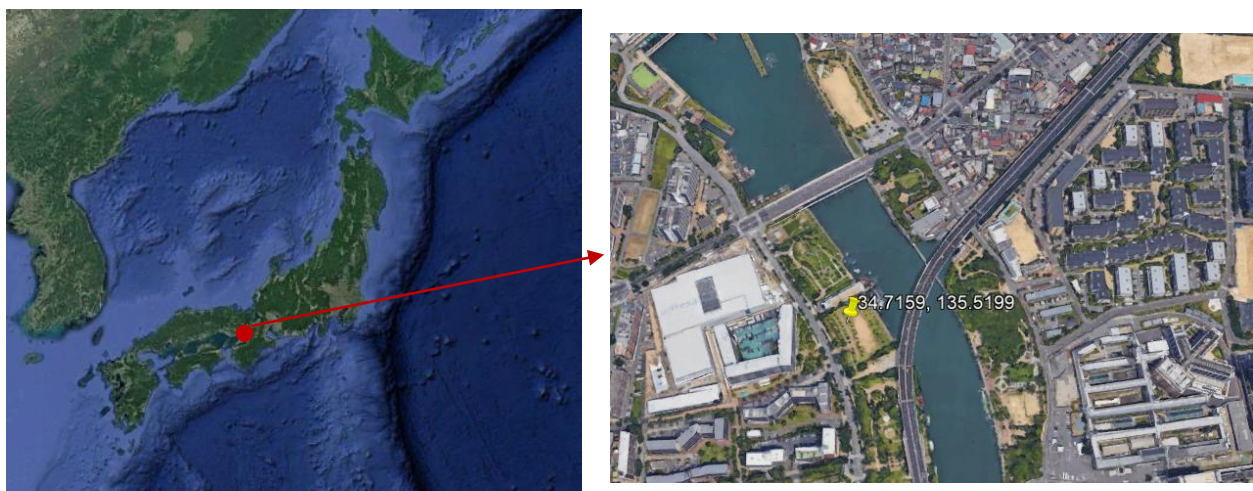
Σχήματα (Α)



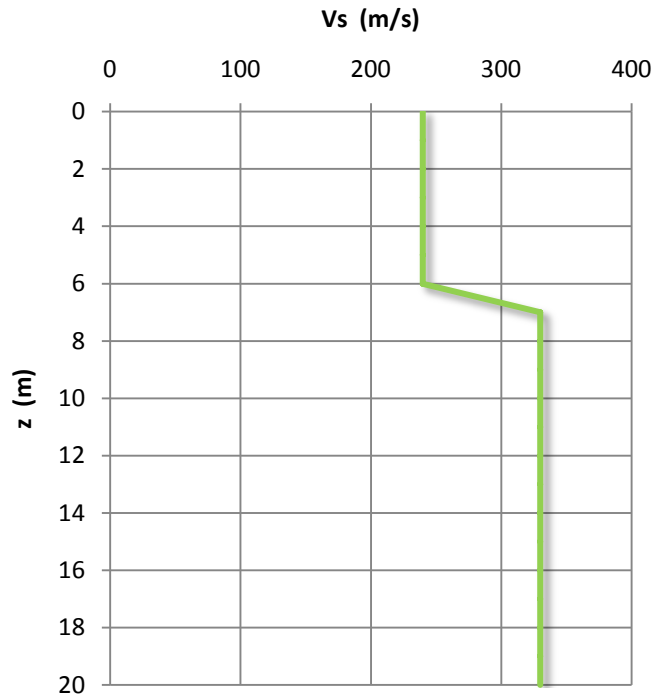
Σχήμα Α.1: Γεωγραφικές συντεταγμένες επικέντρου του σεισμού στην Osaka στις 18/06/2018



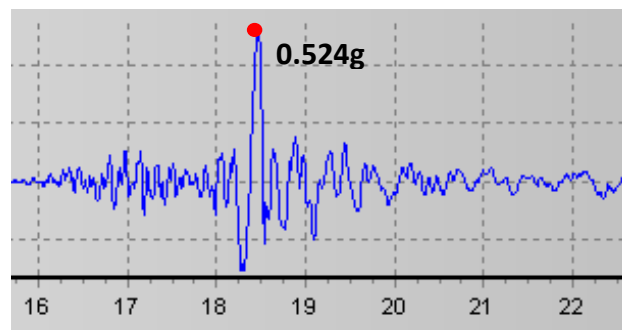
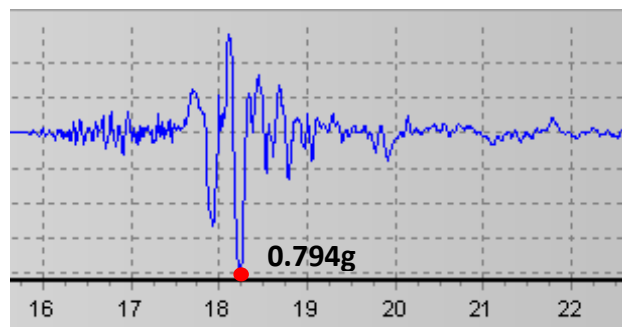
Σχήμα Α.2: Γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού OSK002 στο Takatsuki



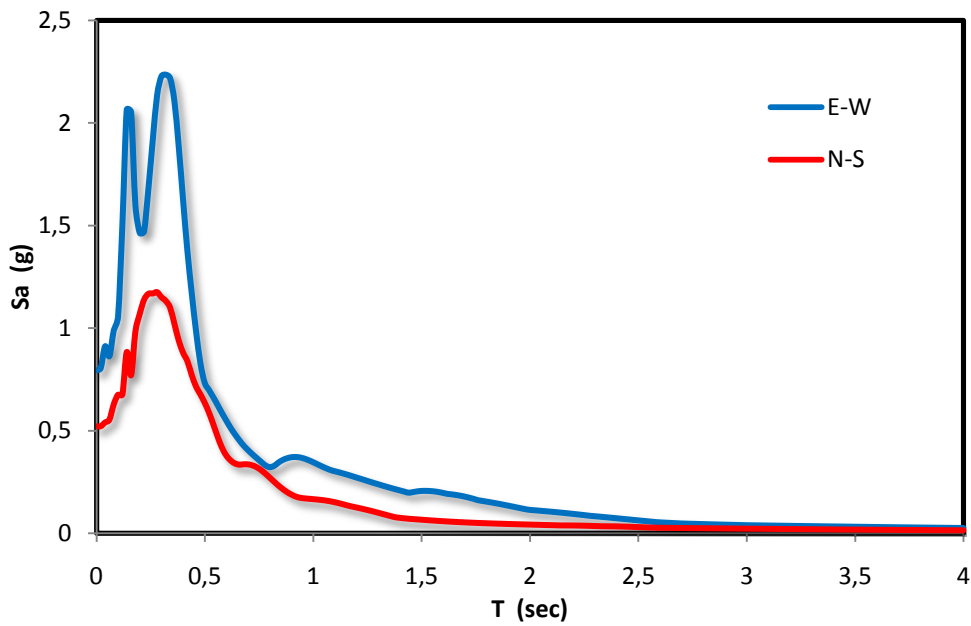
Σχήμα Α.3: Γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού OSKH05 στην Osaka



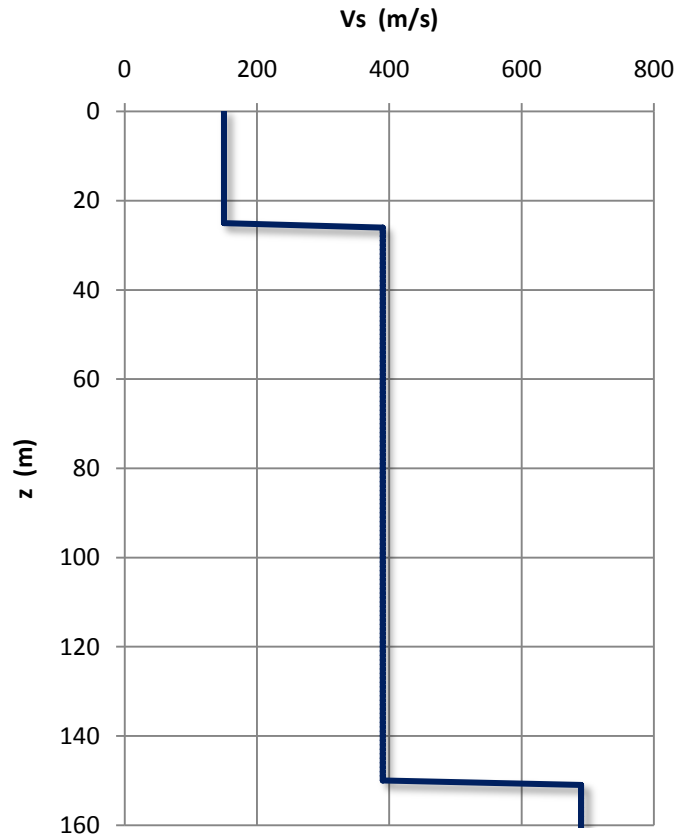
Σχήμα A.4: Κατανομή Vs με το βάθος στον σταθμό OSK002



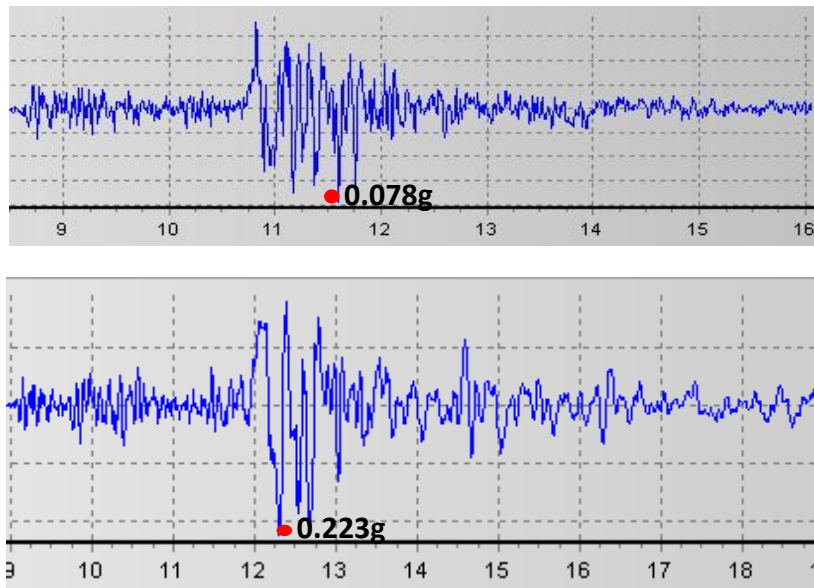
Σχήμα A.5: Καταγραφή EW (πάνω) και NS (κάτω) στον σταθμό OSK002 κατά τον σεισμό στην Osaka στις 18/06/2018.



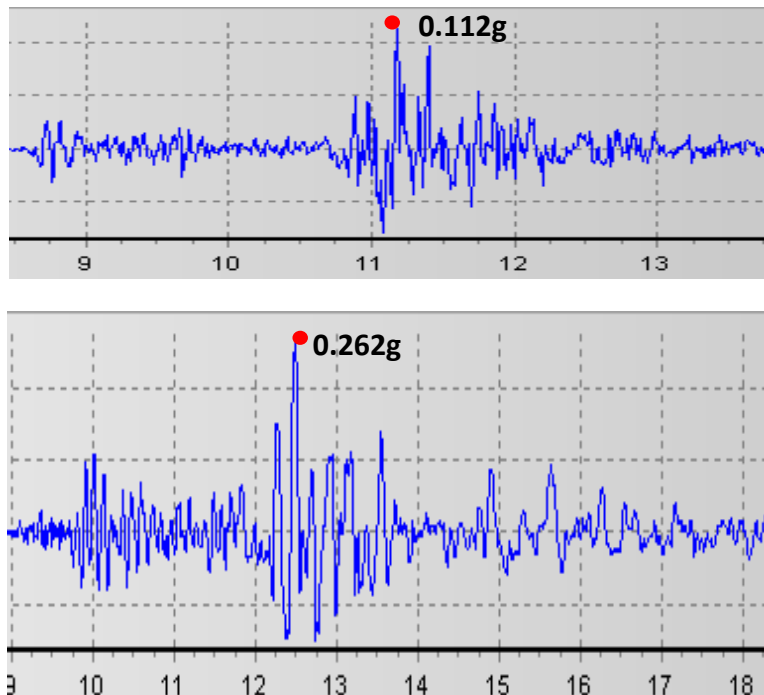
Σχήμα A.6: Ελαστικά φάσματα καταγραφών EW και NS στον σταθμό OSK002 κατά τον σεισμό στην Osaka στις 18/06/2018.



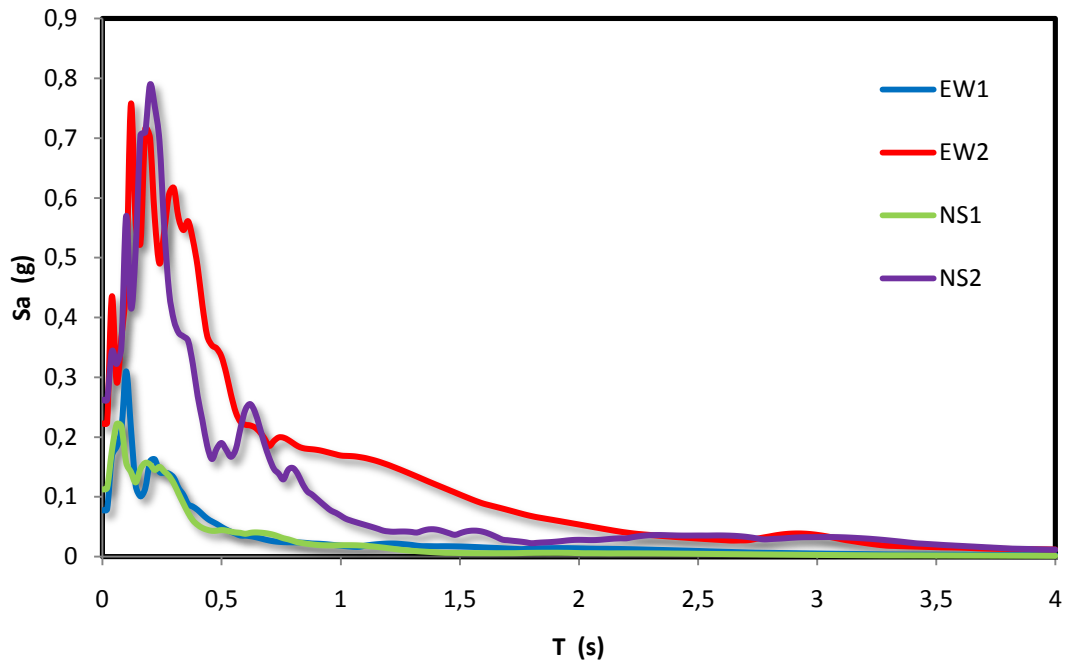
Σχήμα A.7: Κατανομή Vs με το βάθος στον σταθμό OSK005.



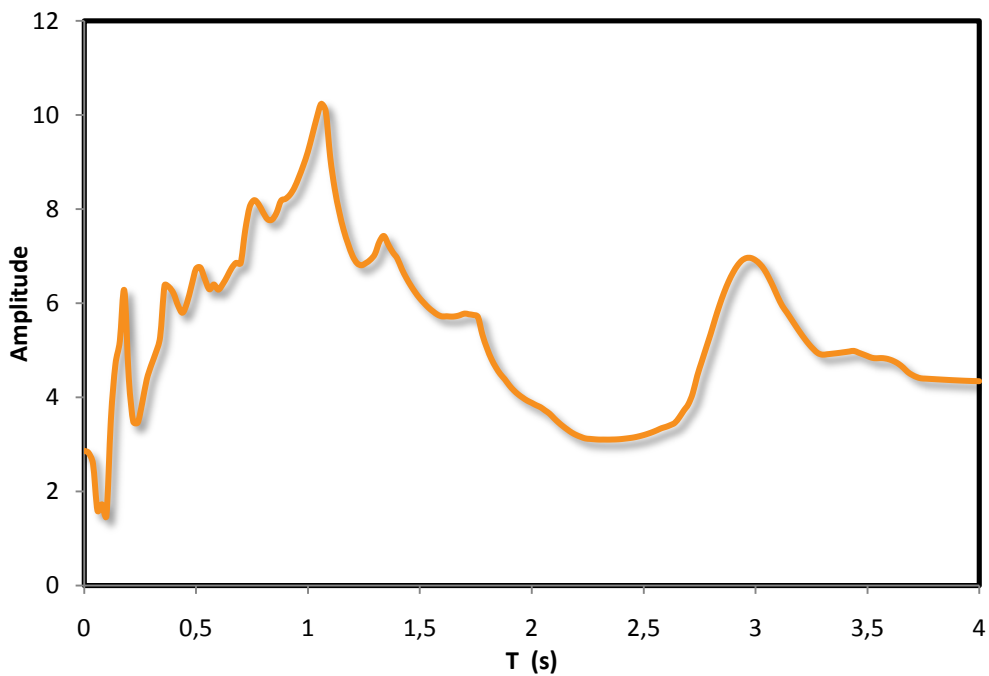
Σχήμα Α.8: Καταγραφές σε βάθος 100m (πάνω) και στην επιφάνεια (κάτω) της συνιστώσας EW του σεισμού στην Osaka στις 18/06/2018 στον σταθμό OSK005.



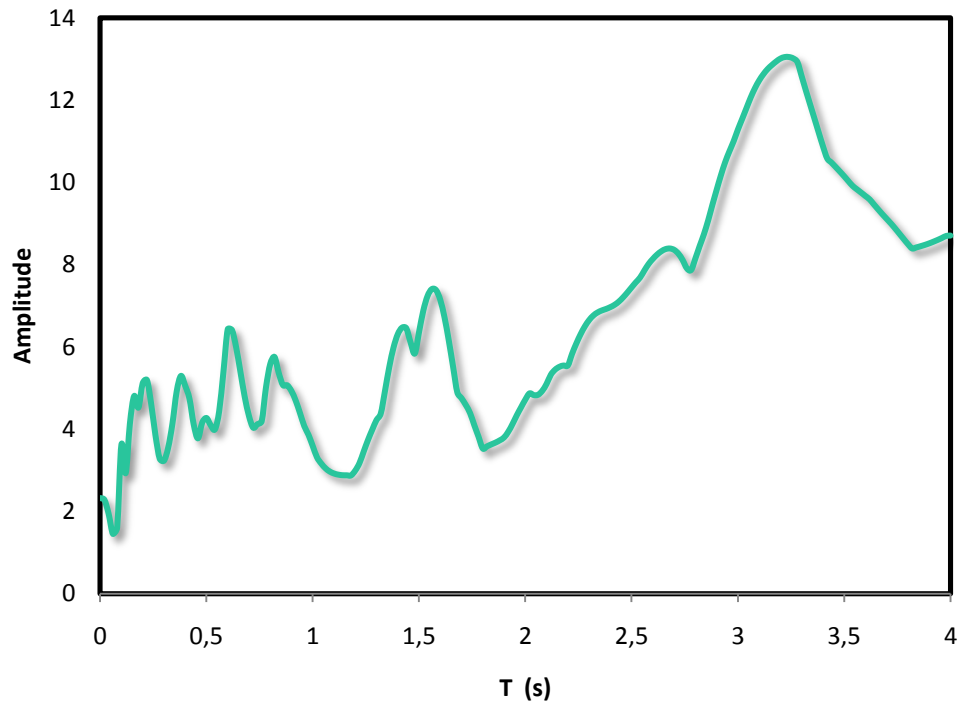
Σχήμα Α.9: Καταγραφές σε βάθος 100m (πάνω) και στην επιφάνεια (κάτω) της συνιστώσας NS του σεισμού στην Osaka στις 18/06/2018 στον σταθμό OSK005



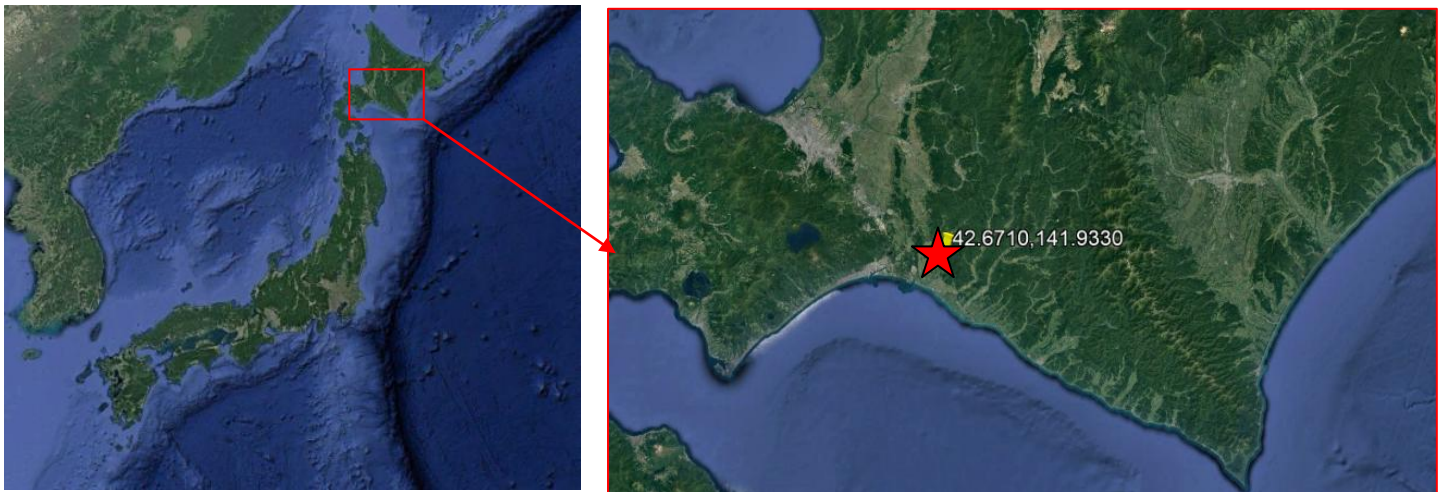
Σχήμα A.10: Τα ελαστικά φάσματα απόκρισης σε βάθος 100 μέτρων (EW1, NS1) και στην επιφάνεια (EW2, NS2) κατά τον σεισμό στην Osaka στις 18/06/2018 στον σταθμό OSKH05



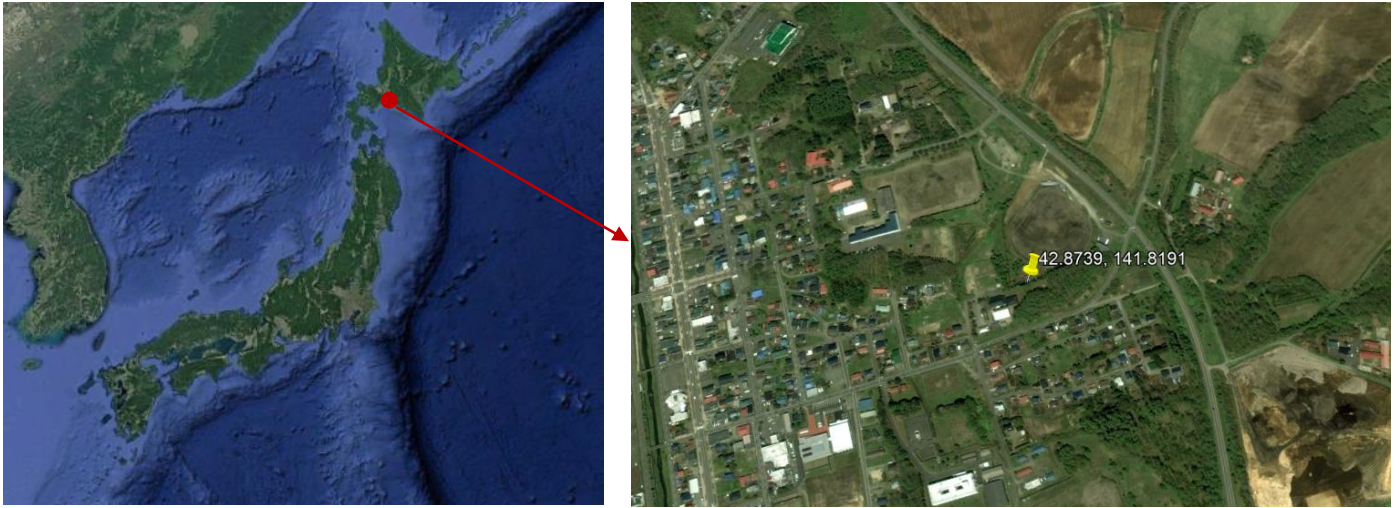
Σχήμα A.11: Εδαφική ενίσχυση σεισμός Osaka 2018 σταθμός OSKH05 συνιστώσα EW



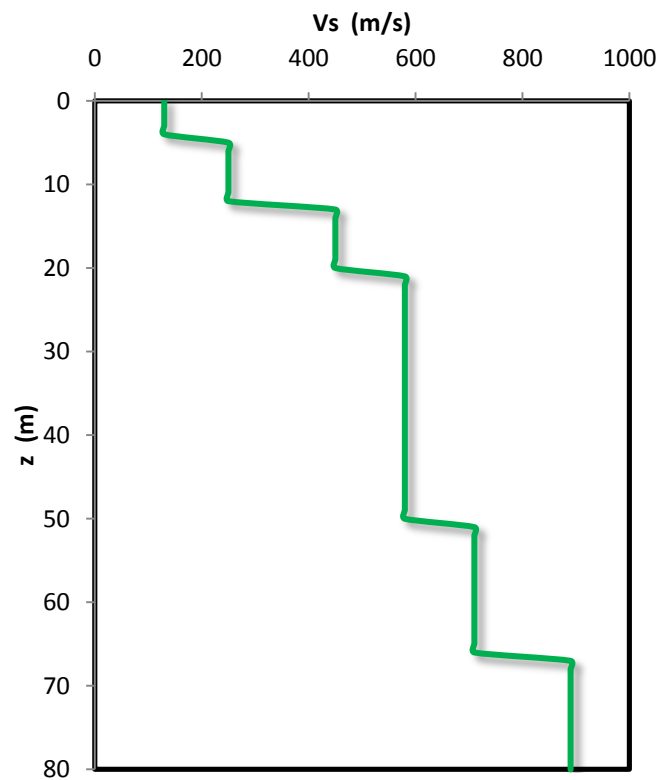
Σχήμα A.12: Εδαφική ενίσχυση σεισμός Osaka 2018 σταθμός OSKH05 συνιστώσα NS



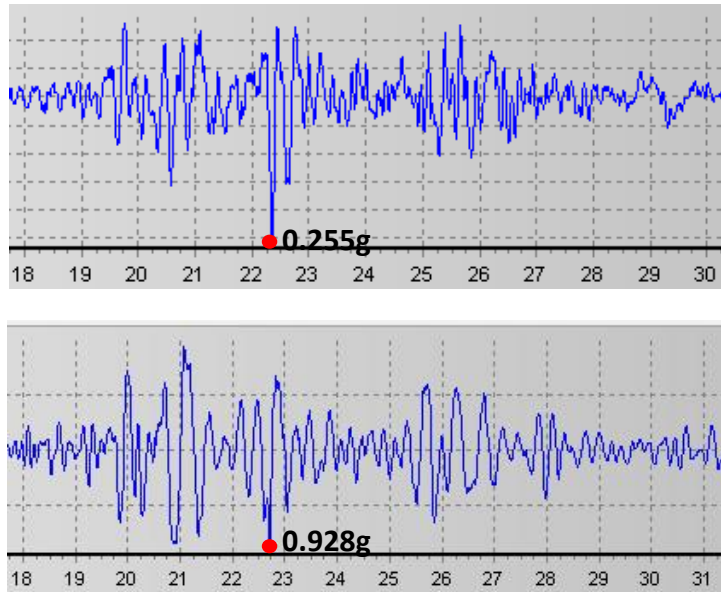
Σχήμα A.13: Γεωγραφικές συντεταγμένες επικέντρου του σεισμού στο Hokkaido στις 05/09/2018



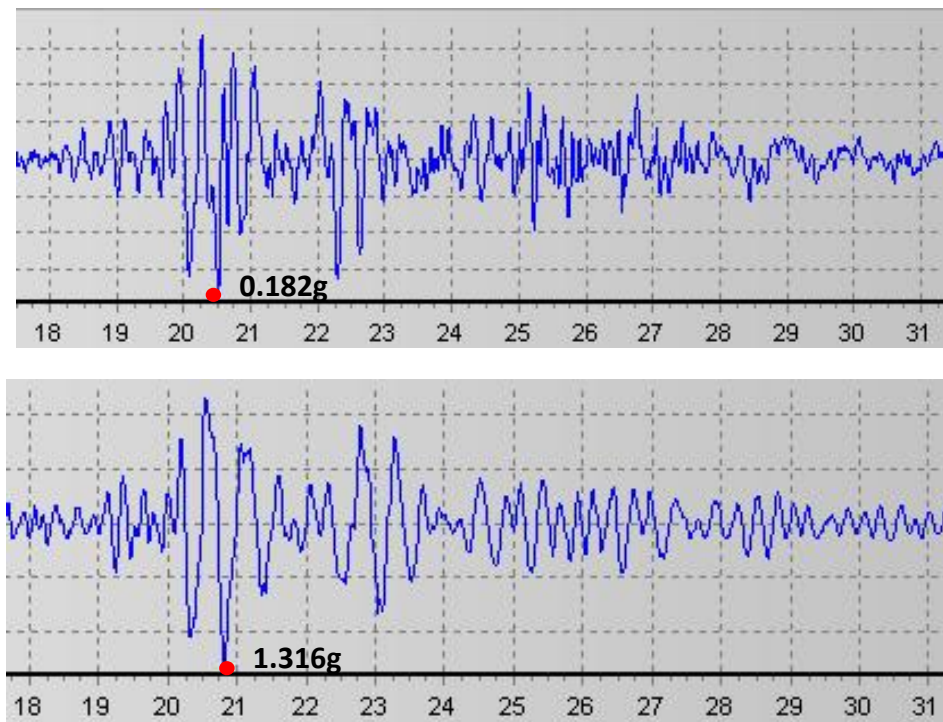
Σχήμα A.14: Γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού IBUH01 στο Hokkaido



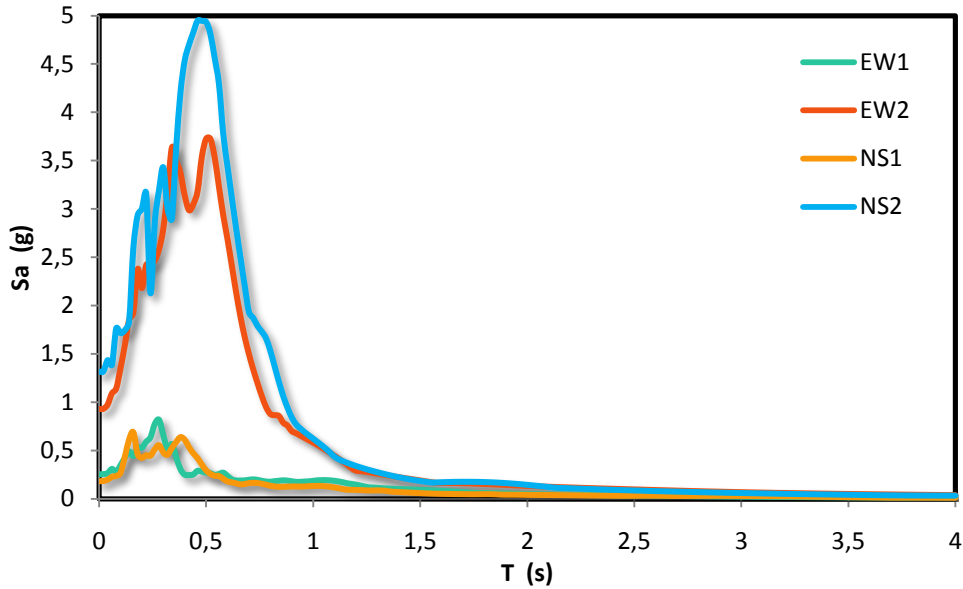
Σχήμα A.15: Κατανομή ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων με το βάθος στον σταθμό IBUH01 στο Hokkaido.



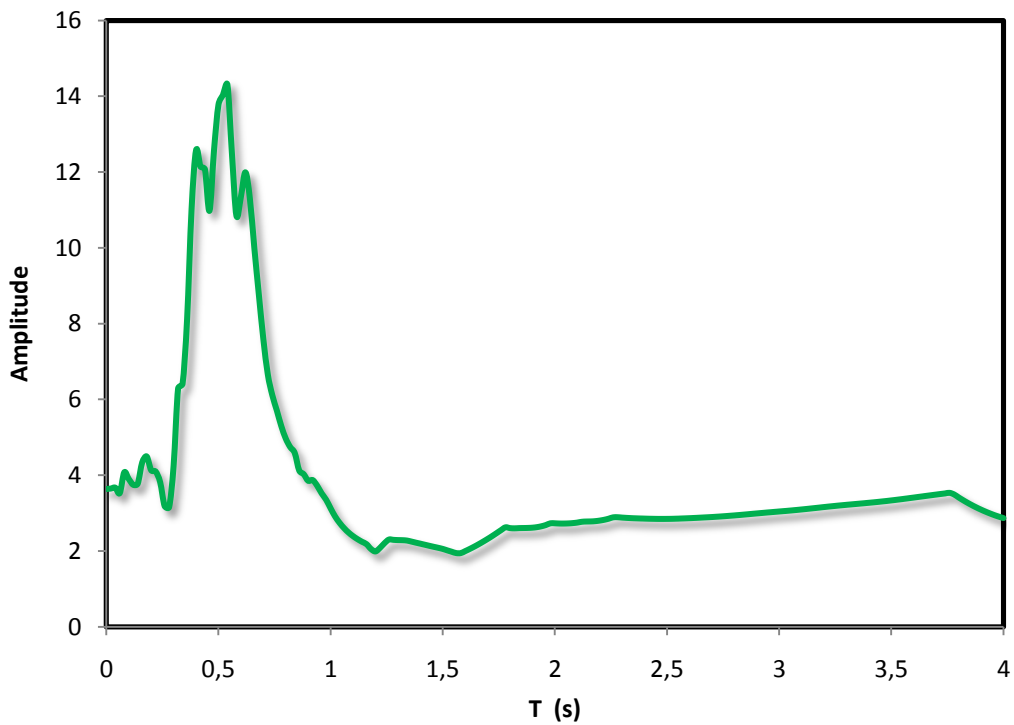
Σχήμα Α.16: Καταγραφές σε βάθος 100m (πάνω) και στην επιφάνεια (κάτω) της συνιστώσας EW του σεισμού στο Hokkaido στις 05/09/2018 στον σταθμό IBUH01.



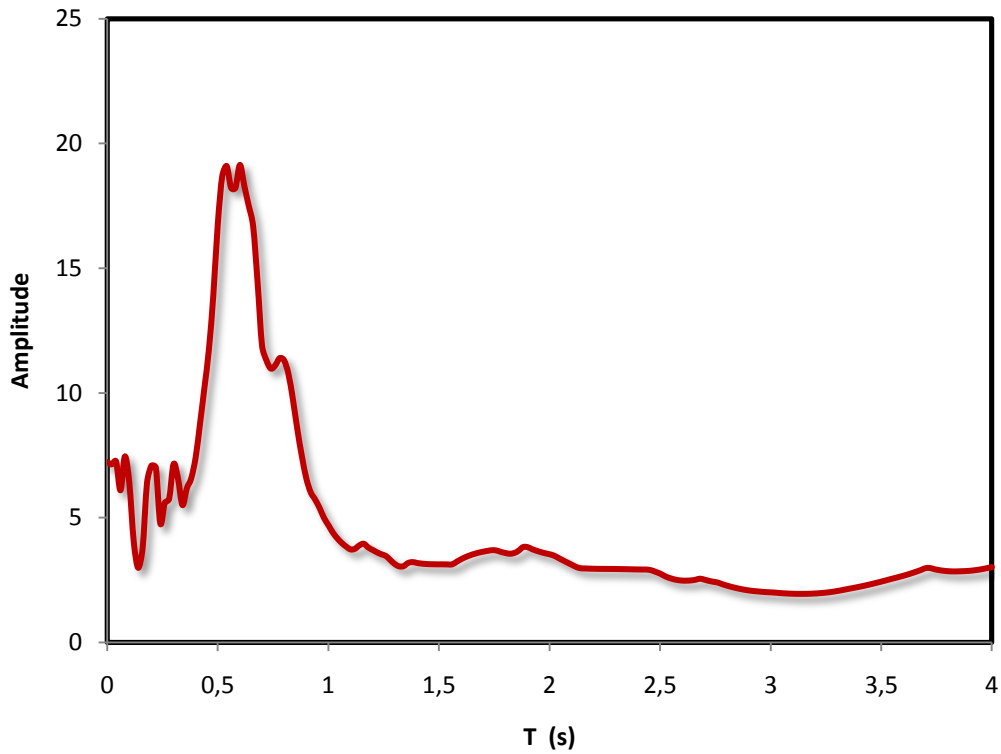
Σχήμα Α.17: Καταγραφές σε βάθος 100m (πάνω) και στην επιφάνεια (κάτω) της συνιστώσας NS του σεισμού στο Hokkaido στις 05/09/2018 στον σταθμό IBUH01



Σχήμα A.18: Τα ελαστικά φάσματα απόκρισης σε βάθος 100 μέτρων (EW1, NS1) και στην επιφάνεια (EW2, NS2) κατά τον σεισμό στο Hokkaido στις 05/09/2018 στον σταθμό IBUH01



Σχήμα A.19: Εδαφική ενίσχυση συνιστώσας EW στον σταθμό IBUH01 κατά τον σεισμό στο Hokkaido στις 05/09/2018. Η μέγιστη ενίσχυση παρατηρείται στις περιόδους κοντά στα 0.6 sec.



Σχήμα A.20: Εδαφική ενίσχυση συνιστώσας NS στον σταθμό IBUH01 κατά τον σεισμό στο Hokkaido στις 05/09/2018. Η μέγιστη ενίσχυση παρατηρείται και πάλι κοντά στα 0.6 sec και είναι λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέγιστη στη συνιστώσα EW.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:

Στοιχεία Τεχνικής Σεισμολογίας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στοιχεία Τεχνικής Σεισμολογίας

Τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών

Σύμφωνα με την επικρατούσα θεωρία, το ανώτερο στρώμα της Γης (λιθόσφαιρα) αποτελείται από έναν αριθμό μεγάλων, άκαμπτων πλακών. Ο φλοιός της Γης χωρίζεται σε έξι μεγάλες πλάκες (Αφρικανική, Αμερικής, Ανταρκτική, Αυστραλίας - Ινδίας, Ευρασία και Ειρηνικού) και περίπου 14 μικρότερες (Φιλιππίνων, Καραϊβικής, Κόκος, Νάζκα κ.λπ.) Οι πλάκες αυτές βρίσκονται σε μια αέναη κίνηση και σύγκρουση στα όριά τους. Μοιάζουν να πλέουν στον ρευστό μανδύα. Οι τεράστιες δυνάμεις που αναγκάζουν τις πλάκες να κινούνται οφείλονται στα ρεύματα μεταφοράς. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, μεταξύ του ανώτερου και ψυχρότερου τμήματος του μανδύα και του κατώτερου και θερμότερου αναπτύσσονται ρεύματα μεταφοράς λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, πίεσης και πυκνότητας. Θερμότερο και αραιότερο υλικό ανέρχεται προς την επιφάνεια, ενώ το επιφανειακό ψυχρότερο βυθίζεται στο εσωτερικό της Γης. Η φαινομενικά απλή αυτή θεωρία κατέληξε στην πρόταση ενός ολοκληρωμένου προσομοιώματος διαμόρφωσης και κινηματικής του φλοιού της Γης, γνωστού ως *Παγκόσμια Τεκτονική των Πλακών* (Σχήμα Β.1). Σύμφωνα με αυτή, οι παραμορφώσεις και οι διάφορες άλλες αλλαγές συμβαίνουν κατά κύριο λόγο στα όρια των πλακών και κατά συνέπεια στα όρια αυτά πρέπει να αναμένεται η κύρια σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα. Η κατανομή των επικέντρων των σεισμών της παγκόσμιας σεισμικής δράσης (Σχήμα Β.2) επιβεβαιώνει απόλυτα τη θεωρία της τεκτονικής των πλακών.

Σύμφωνα με τη θεωρία της τεκτονικής των πλακών, όταν συναντώνται δύο ωκεάνια τμήματα πλακών, η βύθιση της μίας σε σχέση με την άλλη επιτρέπει στο μάγμα να φτάσει στην επιφάνεια και τότε παρατηρείται έντονη σεισμική και ηφαιστειακή δράση. Όταν συγκρούονται δύο ηπειρωτικές πλάκες, τότε επειδή η διαφορά των πυκνοτήτων του υλικού τους είναι μικρή, η μία από τις δύο δεν βυθίζεται στο μάγμα της ασθενόσφαιρας (ανώτερο τμήμα του μανδύα) που είναι πυκνότερο, αλλά διεισδύει ανάμεσα στον μανδύα και τον φλοιό της Γης, αναγκάζοντας σε ανύψωση τη δεύτερη πλάκα. Όταν, τέλος, συγκρούεται μία ωκεάνια με μία ηπειρωτική πλάκα, τότε η ωκεάνια λόγω της μεγαλύτερης πυκνοτήτάς της, (βασαλτικό υλικό έναντι γρανιτικού), βυθίζεται κάτω από την ηπειρωτική και λιώνει στην ασθενόσφαιρα. Στη ζώνη αυτή παρατηρείται έντονη ηφαιστειακή και σεισμική δραστηριότητα.

Διακρίνονται τρεις τύποι ορίων (Σχήμα Β.3): οι *μεσοωκεάνιες ράχες (ridge)*, οι *καταβυθιζόμενες ζώνες (subduction zones)* και οι *ζώνες μετασχηματισμού (strike-slip or transform zones)*. Στις μεσοωκεάνιες ράχες αναδύεται νέο υλικό από το μάγμα του μανδύα (εφελκυσμένη περιοχή). Οι καταβυθιζόμενες ζώνες οριοθετούν τις περιοχές που συγκρούονται δύο ωκεάνιες πλάκες, ή μια ηπειρωτική με μία ωκεάνια. Και στις δύο περιπτώσεις η ωκεάνια πλάκα καταβυθίζεται και λιώνει

στο μάγμα της ασθενόσφαιρας (θλιβόμενη περιοχή). Τέλος, ζώνες μετασχηματισμού συμβαίνουν όταν δύο τεκτονικές πλάκες κινούνται η μία ως προς την άλλη, χωρίς καταβύθιση, εφίππευση ή απομάκρυνση, χωρίς δηλαδή δημιουργία νέου υλικού ή αντίστοιχα απώλεια παλαιού φλοιού.

Σεισμικά ρήγματα

Σεισμικά ρήγματα, ή σεισμικώς ενεργά ρήγματα, ονομάζονται αυτά που είναι δυνατόν να προκαλέσουν σεισμούς, έστω και μικρής ισχύος. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες ρηγμάτων (Σχήμα Β.4). Ένα ρήγμα ονομάζεται *κανονικό* (*normal fault*) όταν το υπερκείμενο της επιφάνειας του ρήγματος τέμαχος ολισθαίνει προς τα κάτω (λόγω βαρύτητας). Όταν το υπερκείμενο στην επιφάνεια του ρήγματος τέμαχος έχει κλίση προς τα πάνω, τότε έχουμε *ανάστροφο ρήγμα* (*reverse fault*). Τα κανονικά και τα ανάστροφα ρήγματα προκαλούν κατακόρυφες μετατοπίσεις. Αντίθετα, τα ρήγματα που προκαλούν μόνο οριζόντια μετατόπιση κατά μήκος της διεύθυνσης του ρήγματος, ονομάζονται *ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης* (*strike-slip fault*).

Τεκτονικό περιβάλλον της Ιαπωνίας

Η Ιαπωνία βρίσκεται κάτω από τέσσερις τεκτονικές πλάκες: την πλάκα του Ειρηνικού, την Βορειοαμερικανική πλάκα, την Ευρασιατική πλάκα και την πλάκα των Φιλιππινών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα Β.5, η πλάκα του Ειρηνικού, η πλάκα των Φιλιππινών και η Βορειοαμερικανική πλάκα συγκρούονται μεταξύ τους δημιουργώντας μια τεράστια καταβυθιζόμενη ζώνη όπου η πλάκα του Ειρηνικού βυθίζεται και λιώνει στο μάγμα της ασθενόσφαιρας προκαλώντας εντονότατη σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα. Όλοι σχεδόν οι καταστροφικοί σεισμοί της Ιαπωνίας προέρχονται από τη ζωνη καταβύθισης. Ισχυροί σεισμοί, όμως προκαλούνται και από τα πολλά ρήγματα που βρίσκονται στο εσωτερικό της πλάκας της Ιαπωνίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ο σεισμός στο Kobe το 1995 ο οποίος εξέπληξε δυσάρεστα τους Ιάπωνες σεισμολόγους και προκάλεσε τεράστιες καταστροφές.

Βασικές παράμετροι περιγραφής των σεισμών

Ο εστιακός ή σειсмоγόμος χώρος είναι γενικά η περιοχή του ρήγματος και η επιφανειακή προβολή του, όπου πραγματοποιήθηκε η διάρρηξη των πετρωμάτων και η απελευθέρωση της σεισμικής ενέργειας. Ένας σεισμός συντίθεται από άπειρους "μικροσεισμούς" που προκύπτουν από τη σημειακή-τοπική θραύση πετρωμάτων κατά μήκος μιας σύνθετης επιφάνειας ρήγματος. Συμβατικά έχει αποφασισθεί το σημείο απ' όπου θεωρητικά ξεκινά η αλυσιδωτή θραύση του ρήγματος να ονομάζεται *εστία ή υπόκεντρο*. Από την εστία η διάρρηξη διαδίδεται κατά μήκος του ρήγματος, με

ταχύτητες από 2 έως 3 km/s, ανάλογα βέβαια και με τον μηχανισμό της διάρρηξης. Και πάλι για συμβατικούς λόγους, η κάθετη προβολή του υποκέντρου στην επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται επίκεντρο και η απόσταση *εστιακό ή υποκεντρικό βάθος*. Η απόσταση από το επίκεντρο έως το οποιοδήποτε σημείο παρατήρησης στην επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται επίκεντρη απόσταση και αντίστοιχα η απόσταση του σημείου παρατήρησης από την εστία ονομάζεται υποκεντρική απόσταση.

Μέγεθος σεισμού

Η *σεισμική ροπή* εκφράζει την σφοδρότητα ενός σεισμού και αποτελεί ουσιαστικά μέτρο του παραγόμενου έργου κατά την διάρκεια της διάρρηξης. Η γενική σχέση της σεισμικής ροπής είναι:

$$M_0 = G \cdot u(t) \cdot S \quad (B.1)$$

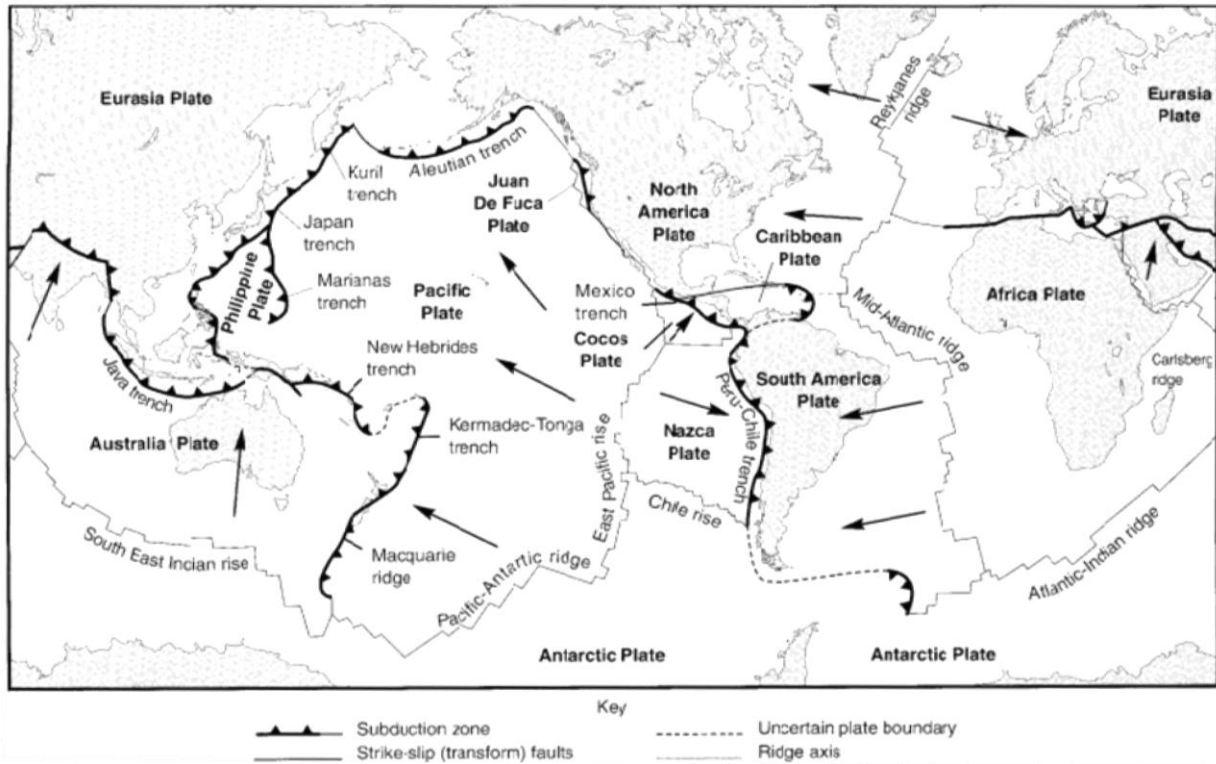
όπου G το μέσο μέτρο διατμητικής αντοχής στην επιφάνεια S του ρήγματος και $u(t)$ η μετάθεση, ή αλλιώς η σχετική ολίσθηση των δύο τμημάτων του ρήγματος.

Μέγεθος M ενός σεισμού είναι το μέτρο της ολικής ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Τελευταία χρησιμοποιείται ευρέως η *κλίμακα ροπής M_W* , η οποία δίνεται από τη σχέση:

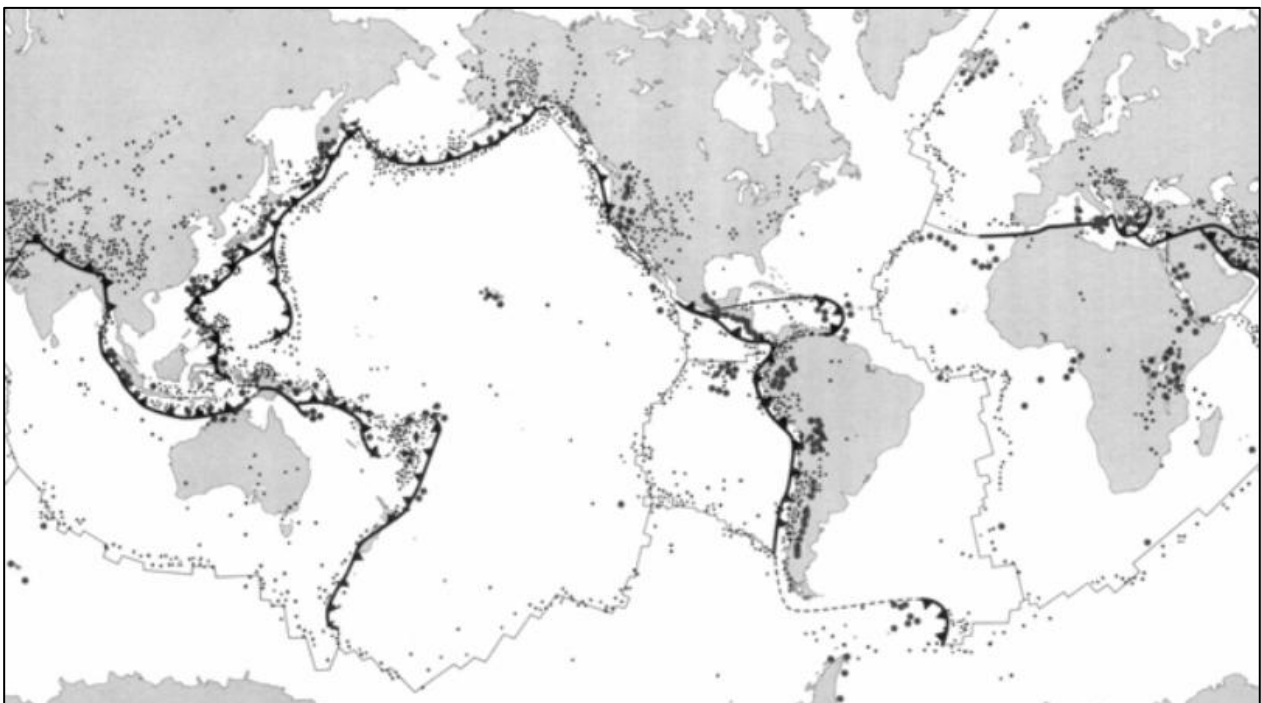
$$M_W = \frac{\log M_0}{1.5} - 10.7 \quad (B.2)$$

όπου M_0 είναι η σεισμική ροπή σε dyn cm.

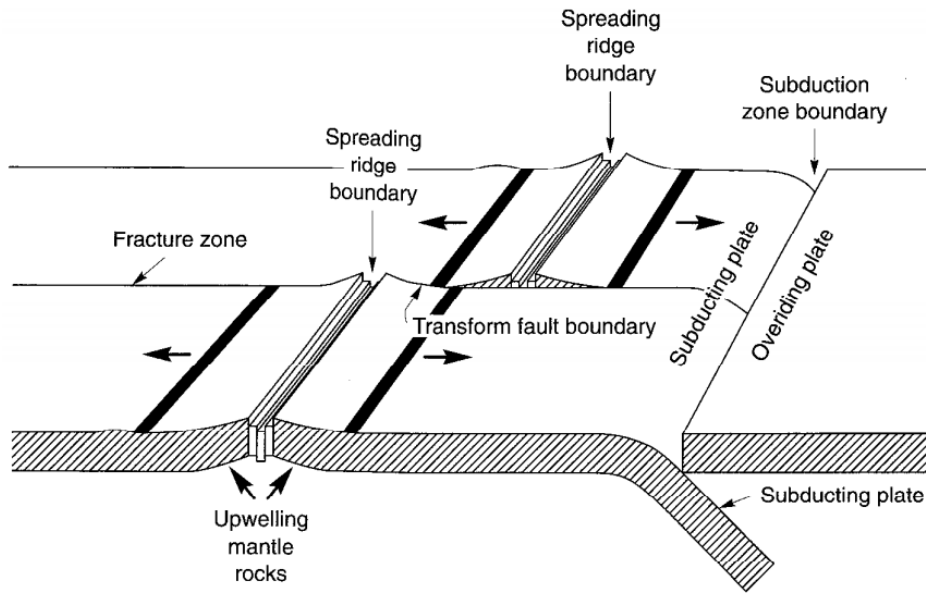
Σχήματα (B)



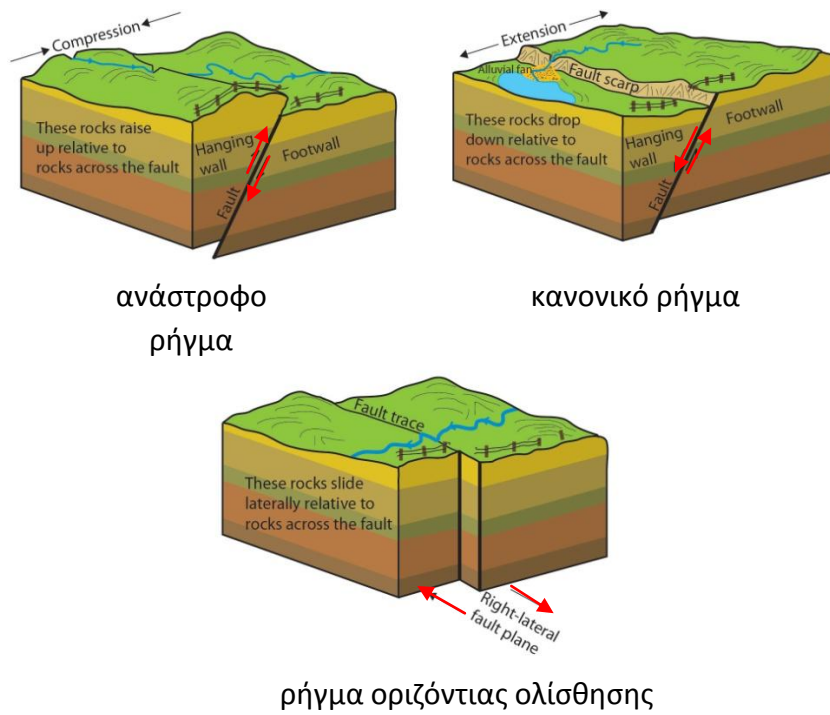
Σχήμα Β.1: Οι κύριες τεκτονικές πλάκες, μεσσοωκεάνιες ράχες, ζώνες καταβύθισης και μετασχηματισμού σε όλο τον κόσμο. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση κίνησης των πλακών (Fowler, 1990).



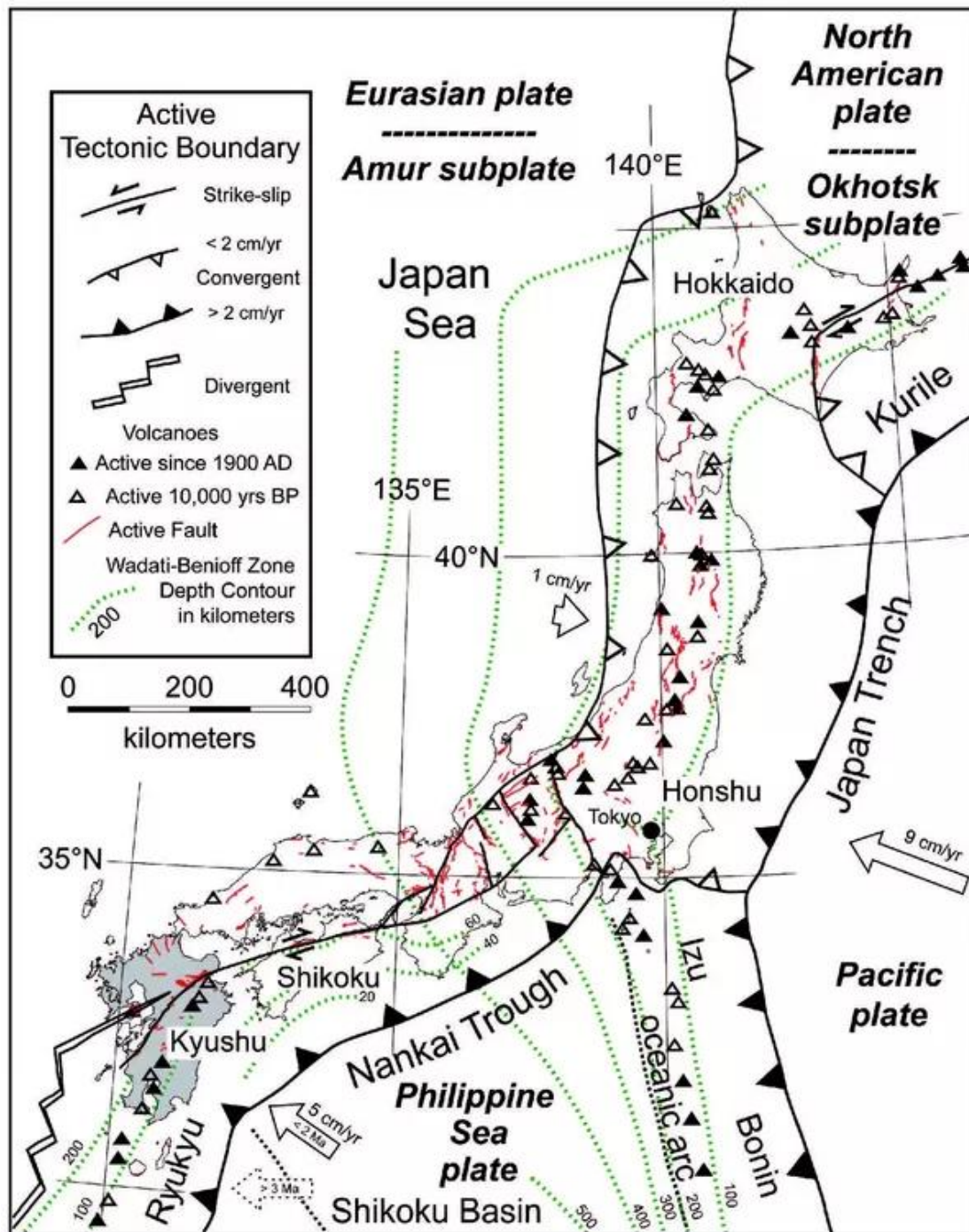
Σχήμα Β.2: Παγκόσμια σεισμική δραστηριότητα. Οι τελείες αναπαριστούν τα επίκεντρα των σημαντικών σεισμών. Οι πλειοψηφία των ισχυρών σεισμών εντοπίζεται στα όρια των τακτονικών πλακών (Bolt, 1988).



Σχήμα Β.3: Σχηματική περιγραφή των τριών μορφών σύγκρουσης τεκτονικών πλακών. Μεσσωκεάνιες ράχες, καταβυθιζόμενες ζώνες και ζώνες μετασχηματισμού.



Σχήμα Β.4: Σχηματική περιγραφή ρηγμάτων



Σχήμα Β.5: Τεκτονικά όρια, ενεργά ηφαιστεια και ενεργά ρήγματα στην περιοχή της Ιαπωνίας. Τα βέλη συμβολίζουν την ταχύτητα μετακίνησης κάθε τεκτονικής πλάκας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Συγγράμματα και Δημοσιεύσεις

- Γ. Γκαζέτας "Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής", εκδόσεις Ε.Μ.Π, 2007.
- Γ. Γκαζέτας "Εδαφοδυναμική και Σεισμική Μηχανική: Ιστορικά περιστατικά", εκδόσεις Συμείων, 1996 .
- ΕΑΚ (2000) *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000*, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεσιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδας (ΣΠΜΕ), Αθήνα, Απρίλιος 2001.
- Ιωάννης Ν. Ψυχάρης "Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας, Τεύχος Ι", Αθήνα 2016.
- Ιωάννης Ν. Ψυχάρης "Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας, Τεύχος ΙΙ", Αθήνα 2015.
- Κυριαζής Δ. Πιπιάκης "Γεωτεχνική σεισμική μηχανική", εκδόσεις Ζήτη, 2010.
- Anil K. Chopra "*Dynamics of structures: Theory and applications to Earthquake Engineering*", Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας.
- Bolt, B.A. (1988). *Earthquakes*, W.H. Freeman and Company, New York, 282 pp.
- Dorby, R., Borchardt, R.D., Crouse, C.B., Idriss, I.M., Joyner, W.B., Martin, G.R., Power, M.S. Rinne, E.E. and Seed, R.B. (2000) "*New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions*" *Earthquake Spectra - Theme Issue: Seismic Design Provisions and Guidelines*, Vol.16, Nr 1, February 2000.
- EC-8 (2001) "*Part 1 - General Rules, seismic actions and rules for buildings*" Eurocode 8, Draft 4 (prEN 1998), European Committee for Standardization.
- Fowler, C.W.R. (1990). *The solid earth. An introduction to global geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 472 pp.
- Gustavo A. Ordóñez "*SHAKE2000: A computer program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems. User's Manual*" University of California, Berkeley, July 2011 - Revision.
- Housner, G. W. (1959): *Behavior of Structures during Earthquakes*, Proceedings. ASCE, 85, October.
- Ikuo Towhata, "*Geotechnical Earthquake Engineering*", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
- Romo, M.P., and Seed, H.B. (1986). "Analytical modelling of dynamic soil response in the Mexico earthquake of September 19, 1985," *Proceedings, ASCE International Conference on the Mexico Earthquakes - 1985, Mexico City*, pp. 148-162.
- Schnabel P.B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): "*SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*" Rep. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.

- Seed, H. B., Ugas, C., and Lysmer, J. (1976b) "Site -dependent spectra for earthquake-resistant design" Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 66, 221-243, February 1976.
- Seed, H. B., Dickenson, S.E, Reimer, M.F., Bray, J.D., Sitar, N., Mitchell, J.K., Idriss, I.M., Kayen, R.E., Kropp, A., Harder, L.F., and Power, M.S. (1990). "Preliminary report on the principal geotechnical aspects of the October 17, 1989 Loma Prieta earthquake," *Report UCB/EECR-90/05*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 137 pp.
- Steven L. Kramer "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, 1996.
- Stone, W.C., Yokel, F.Y., Celebi, M., Hanks, T., and Leyendecker, E.V. (1987). "Engineering aspects of the September 19, 1985 Mexico Earthquake," NBS Building Science Series 165, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 207 pp.
- Vuletic, M. and R. Dorby (1991) "Effect of soil plasticity on cyclic response" J. Geotech. Eng. ASCE 117, 89-107.

Διαδικτυακές πηγές

- ABS Consulting, The Tokachi-oki earthquake in 2003 διαθέσιμο στο http://www.absconsulting.co.jp/pressservice/pressreport/2003Tokachi/tokachi_E.htm (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- BRI Strong Motion Network , διαθέσιμο στο: <http://smo.kenken.go.jp/useofdata> (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- COSMOS Virtual Data Center (VDC), διαθέσιμο στο: <https://strongmotioncenter.org/vdc/scripts/default.plx> (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- European Strong Motion Database (ESD), διαθέσιμο στο: http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- Italian Accelerometric Archive (ITACA), διαθέσιμο στο: http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/CadmoDriver?_action_do=1&_page=ACC_redirect_home_page&_rock=INVALID&_state=initial&_tabber=0&_token=NULLNULLNULLNULL (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- National Park Service, U.S. Department of the Interior, Explore Nature, Geology, Energy and Materials, διαθέσιμο στο https://www.nature.nps.gov/geology/education/education_graphics.cfm (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), Strong-motion Seismograph Networks (K-NET, Kik-net), διαθέσιμο στο: <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/> (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- PEER Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, διαθέσιμο στο: <https://ngawest2.berkeley.edu/> (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).

- Soils Mechanics Laboratory (SSI), National Technical University of Athens, διαθέσιμο στο: <http://ssi.civil.ntua.gr/> (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).
- United States Geological Survey (USGS) διαθέσιμο στο <http://www.usgs.gov/> (ημερομηνία πρόσβασης 15/09/2018).