

Κυριαζής Δ. Πιτιλάκης

# ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ



ΕΚΔΟΣΕΙΣ  
**ΖΗΤΗ**

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	ix
Πρόλογος	xvii
Πίνακας συμβόλων	xxi
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Σύντομη ανασκόπηση	2
1.2 Παραδείγματα ζημιών - αστοχιών σε τεχνικά έργα	6
1.2.1 Αστοχίες από τον σεισμό του Kobe	7
1.2.2 Αστοχίες από τον σεισμό της Loma Prieta	13
1.2.3 Αστοχίες από τον σεισμό Κοζάνης - Γρεβενών	15
1.2.4 Αστοχίες από τον σεισμό του Northridge	16
1.2.5 Αστοχίες από τον σεισμό της Λευκάδας	19
1.2.6 Αστοχίες σε χωμάτινα φράγματα	21
1.2.7 Αστοχίες λόγω ασύγχρονης κίνησης	22
1.2.8 Εδαφικές αστοχίες γενικευμένου τύπου - Κατολισθήσεις	24
1.2.9 Αστοχίες σε πρηνή και επιχωματα - Μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις	25
1.2.10 Αστοχίες θεμελιώσεων	27
1.3 Ανασκόπηση βασικών εννοιών	30
1.4 Κατάλογος ιστοσελίδων	42
<b>2 Εισαγωγή στη σεισμολογία</b>	<b>49</b>
2.1 Εισαγωγή	50
2.2 Η δομή του εσωτερικού της γης	50
2.2.1 Σεισμικά κύματα	51
2.2.2 Δομή της γης	53
2.3 Αίτια γένεσης των σεισμών	57

2.3.1	Γεωλογική ιστορία της γης . . . . .	57
2.3.2	Τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών . . . . .	59
2.4	Μηχανισμός γένεσης των σεισμών . . . . .	65
2.4.1	Θεωρία ελαστικής ανάπαλσης . . . . .	65
2.4.2	Διατμητική αντοχή ρηγμάτων και ομοιώματα σεισμικής θραύσης . . . . .	67
2.4.2.1	Διατμητική αντοχή ρηγμάτων . . . . .	67
2.4.2.2	Ομοιώματα σεισμικής θραύσης ρηγμάτων . . . . .	68
2.4.3	Συσχέτιση του μηχανισμού γένεσης με την επαναληψιμότητα και το μέγεθος των σεισμών . . . . .	70
2.5	Σεισμικά ρήγματα . . . . .	72
2.5.1	Γεωμετρικές παράμετροι ρηγμάτων . . . . .	72
2.5.2	Τυπικές μορφές σεισμικών ρηγμάτων . . . . .	72
2.6	Όργανα καταγραφής της σεισμικής κίνησης . . . . .	73
2.6.1	Σεισμογράφοι - επιταχυνσιογράφοι . . . . .	74
2.6.2	Δίκτυα σεισμογράφων - επιταχυνσιογράφων . . . . .	82
2.6.3	Τοπικά, πολύ πυκνά δίκτυα επιταχυνσιογράφων . . . . .	85
2.7	Μακροσεισμικές παράμετροι περιγραφής των σεισμών . . . . .	86
2.7.1	Εστιακός χώρος - Σεισμική πηγή - Υπόκεντρο - Επίκεντρο . . . . .	86
2.7.2	Σεισμική ροπή . . . . .	89
2.7.3	Σεισμική πτώση τάσης . . . . .	91
2.7.4	Μεγέθη σεισμών . . . . .	93
2.7.4.1	Τοπικό μέγεθος $M_L$ . . . . .	94
2.7.4.2	Επιφανειακό μέγεθος $M_s$ . . . . .	96
2.7.4.3	Μέγεθος κυμάτων χώρου $m_b$ . . . . .	96
2.7.4.4	Μέγεθος σεισμικής ροπής $M_w$ . . . . .	97
2.7.5	Σεισμική ενέργεια . . . . .	98
2.7.6	Γεωμετρικές παράμετροι ρηξιγενούς ζώνης . . . . .	99
2.8	Σεισμική ένταση . . . . .	101
2.8.1	Η έννοια της έντασης ενός σεισμού . . . . .	101
2.8.2	Μακροσεισμικές κλίμακες έντασης . . . . .	102
2.8.3	Ισόσειστες καμπύλες - Συσχέτιση με το μέγεθος . . . . .	106
2.9	Σεισμικότητα της Ελλάδας . . . . .	110
2.9.1	Γεωλογική και σεισμοτεκτονική δομή του Ελληνικού χώρου . . . . .	110
2.9.2	Εννοιολογικοί ορισμοί και ποσοτικός καθορισμός της σεισμικότητας . . . . .	115
2.9.3	Σεισμικότητα επιφανειακών σεισμών του Ελληνικού χώρου . . . . .	119

2.9.4	Σεισμικότητα σεισμών ενδιάμεσου βάθους . . . . .	120
<b>3</b>	<b>Ισχυρή εδαφική κίνηση</b>	<b>125</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	126
3.2	Περιγραφή της ισχυρής εδαφικής κίνησης . . . . .	132
3.2.1	Πλάτος της εδαφικής κίνησης . . . . .	133
3.2.1.1	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση . . . . .	135
3.2.1.2	Μέγιστη εδαφική ταχύτητα . . . . .	138
3.2.1.3	Μέγιστη εδαφική μετακίνηση . . . . .	140
3.2.2	Συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης . . . . .	141
3.2.2.1	Φάσματα Fourier . . . . .	141
3.2.2.2	Φάσματα απόκρισης . . . . .	144
3.2.2.3	Φάσμα εκθετικής πυκνότητας . . . . .	154
3.2.2.4	Παράγοντες που καθορίζουν τη μορφή των φασμάτων . . . . .	155
3.2.3	Διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης . . . . .	159
3.2.4	Άλλες παράμετροι περιγραφής της ισχυρής εδαφικής κίνησης	162
3.2.5	Ανακεφαλαίωση - Σύνοψη . . . . .	167
3.3	Εκτίμηση των βασικών παραμέτρων της εδαφικής κίνησης . . . . .	168
3.3.1	Σχέσεις εκτίμησης της ισχυρής εδαφικής κίνησης . . . . .	168
3.3.2	Εκτίμηση του μέγιστου πλάτους . . . . .	172
3.3.2.1	Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση ( <i>PHA</i> ) . . . . .	172
3.3.2.2	Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση ( <i>PVA</i> ) . . . . .	176
3.3.2.3	Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα ( <i>PHV</i> ) . . . . .	177
3.3.2.4	Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση ( <i>PHD</i> ) . . . . .	178
3.3.2.5	Σύνοψη . . . . .	179
3.3.3	Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης φασματικών παραμέτρων . . . . .	179
3.3.3.1	Γενικά . . . . .	179
3.3.3.2	Φάσματα απόκρισης απόλυτης επιτάχυνσης . . . . .	181
3.3.3.3	Φάσμα πλάτους Fourier . . . . .	181
3.3.3.4	Δεσπόζουσα περίοδος . . . . .	186
3.3.4	Σχέσεις εκτίμησης της εδαφικής κίνησης των Boore and Atkinson (2007) . . . . .	187
3.4	Εκτίμηση συνθετικών εδαφικών κινήσεων . . . . .	188
3.5	Χωρική μεταβλητότητα της εδαφικής κίνησης . . . . .	191
3.6	Χαρακτηριστικά επιταχυνσιογραφήματα και ελαστικά φάσματα ισχυρών σεισμών στην Ελλάδα . . . . .	196

<b>4</b>	<b>Σεισμική επικινδυνότητα</b>	<b>199</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	200
4.2	Σεισμική επικινδυνότητα και διακινδύνευση . . . . .	201
4.3	Ο ρόλος της γεωλογίας και της νεοτεκτονικής . . . . .	203
4.4	Μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας . . . . .	209
4.4.1	Προσομοίωση των σεισμικών πηγών . . . . .	209
4.4.2	Αιτιοκρατική μέθοδος ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας . . . . .	212
4.4.3	Πιθανοτική μέθοδος ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας . . . . .	215
4.5	Γενικές αρχές εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας . . . . .	220
4.6	Παραδείγματα . . . . .	225
4.6.1	Ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας της Θεσσαλονίκης	225
4.6.2	Σεισμική επικινδυνότητα της Ελλάδος κατά ΕΑΚ 2000 . . . . .	229
4.6.3	Σεισμική επικινδυνότητα της Ευρώπης και της Μεσογείου . . . . .	230
4.6.4	Σεισμική επικινδυνότητα της υδρογείου . . . . .	233
<b>5</b>	<b>Ελαστικά κύματα</b>	<b>237</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	238
5.2	Ελαστικά κύματα σε απειρομήκες μέσο . . . . .	239
5.2.1	Ελαστικά κύματα σε μία διάσταση . . . . .	239
5.2.1.1	Διαμήκη κύματα σε απειρομήκη ράβδο - κύμα P (διαστολής - συστολής) . . . . .	239
5.2.1.2	Στρεπτικά (ή διατμητικά) κύματα σε απειρομήκη ράβδο - κύμα S (διάτμησης - στρέψης) . . . . .	241
5.2.1.3	Η φυσική έννοια του κύματος . . . . .	242
5.2.1.4	Αρμονικά κύματα . . . . .	243
5.2.2	Ελαστικά κύματα σε μέσο τριών διαστάσεων . . . . .	247
5.2.3	Εφαρμογές των κυμάτων P και S στη σεισμολογία . . . . .	252
5.3	Ελαστικά κύματα σε περιορισμένο μέσο . . . . .	253
5.3.1	Ελαστικά κύματα σε μία διάσταση με ένα σύνορο . . . . .	253
5.3.1.1	Γενικές έννοιες . . . . .	253
5.3.1.2	Διάδοση κυμάτων σε ελαστικές ράβδους πεπερασμένου μήκους . . . . .	254
5.3.1.3	Μονοδιάστατα κύματα σε «κλειστό» μέσο . . . . .	261
5.4	Ελαστικά κύματα σε πραγματικό έδαφος . . . . .	267
5.4.1	Εισαγωγή . . . . .	267
5.4.2	Κύματα σε ελαστικό ημιχώρο . . . . .	268

5.4.2.1	Κύματα Rayleigh . . . . .	268
5.4.2.2	Κύματα Love . . . . .	275
5.4.2.3	Ταχύτητα φάσης και ταχύτητα ομάδας . . . . .	278
5.4.3	Κύματα σε στρωματοποιημένο ελαστικό μέσο . . . . .	279
5.4.3.1	Μονοδιάστατη περίπτωση - Ανάλογο «ελαστικής ράβδου» απείρου μήκους δύο υλικών . . . . .	280
5.4.3.2	Διερευνητικά σχόλια . . . . .	283
5.4.4	Η έννοια και το ανάλογο του ιξώδους απορροφητήρα . . . . .	284
5.4.5	Ανάκλαση, μετάδοση και διάθλαση κυμάτων σε διεπιφάνειες	289
5.4.6	Φαινόμενη ταχύτητα . . . . .	294
5.4.7	Διάδοση κυμάτων σε κορεσμένο μέσο . . . . .	298
5.4.7.1	Εισαγωγή . . . . .	298
5.4.7.2	Διάδοση κυμάτων στον αέρα . . . . .	299
5.4.7.3	Διάδοση κυμάτων στο νερό . . . . .	299
5.4.7.4	Διάδοση ελαστικών κυμάτων συμπίεσης σε ημι- κορεσμένα και κορεσμένα εδάφη . . . . .	300
5.4.8	Απόσβεση κυμάτων . . . . .	301
5.4.8.1	Υστερητική απόσβεση . . . . .	303
5.4.8.2	Γεωμετρική εξασθένηση . . . . .	309
5.4.8.3	Άλλες μορφές απομείωσης της σεισμικής ενέργειας	311
<b>6</b>	<b>Εδαφοδυναμική</b>	<b>315</b>
6.1	Γενική Εισαγωγή . . . . .	316
6.2	Γενικές αρχές της συμπεριφοράς εδαφών σε δυναμικές φορτίσεις . . . . .	323
6.3	Αρχές περιγραφής των σχέσεων τάσεων - παραμορφώσεων εδα- φών σε κυκλική φόρτιση . . . . .	328
6.3.1	Γραμμικό ιξωδοελαστικό μοντέλο . . . . .	329
6.3.2	Μη γραμμικά μοντέλα . . . . .	332
6.3.3	Ανακεφαλαίωση . . . . .	340
6.4	Μέτρηση των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των εδαφών σε δυ- ναμικές και κυκλικές φορτίσεις . . . . .	341
6.4.1	Εισαγωγή . . . . .	341
6.4.2	Έρευνα και μετρήσεις στο πεδίο . . . . .	341
6.4.2.1	Γεωτρήσεις . . . . .	343
6.4.2.2	Δοκιμές εντός γεωτρήσεων . . . . .	343
6.4.2.3	Δοκιμές πεδίου μικρού πλάτους παραμόρφωσης . . . . .	356
6.4.2.4	Άλλες γεωφυσικές μέθοδοι . . . . .	374
6.4.2.5	Ανακεφαλαίωση – Συγκρίσεις – Συσχετίσεις . . . . .	375

6.4.3	Εργαστηριακές δοκιμές και συσκευές . . . . .	382
6.4.3.1	Συσκευή κυκλικής τριαξονικής δοκιμής . . . . .	389
6.4.3.2	Συσκευή κυκλικής απλής διάτμησης . . . . .	393
6.4.3.3	Συσκευές κυκλικής περιστροφικής διάτμησης . . . . .	394
6.4.3.4	Συσκευή στήλης συντονισμού . . . . .	395
6.4.3.5	Δοκιμές διάδοσης ελαστικών κυμάτων σε εδαφικά δοκίμια . . . . .	401
6.4.4	Εργαστηριακές δοκιμές σε ομοιώματα μεγάλης κλίμακας . . . . .	403
6.4.5	Άλλες εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές . . . . .	409
6.4.6	Δίκτυα επιταχυνσιογράφων . . . . .	410
6.5	Δυναμικές ιδιότητες εδαφών . . . . .	413
6.5.1	Δυναμικές ιδιότητες εδαφών σε μικρά πλάτη παραμόρφωσης	414
6.5.2	Δυναμικές ιδιότητες εδαφών σε μεσαία και μεγάλα πλάτη παραμόρφωσης . . . . .	426
6.6	Διατμητική αντοχή εδαφών υπό δυναμική φόρτιση . . . . .	440
6.6.1	Γενικές αρχές . . . . .	440
6.6.2	Δυναμική διατμητική αντοχή συνεκτικών εδαφών . . . . .	443
6.6.3	Δυναμική αντοχή κοκκωδών εδαφών . . . . .	453
6.6.4	Καθιζήσεις στεγνής άμμου . . . . .	457
6.7	Ρευστοποίηση εδαφών . . . . .	460
6.7.1	Εισαγωγή . . . . .	460
6.7.2	Ιστορικά παραδείγματα ρευστοποίησης και συναφών αστοχιών . . . . .	463
6.7.3	Θεμελιώδεις αρχές της ρευστοποίησης . . . . .	469
6.7.3.1	Μονοτονική φόρτιση κορεσμένων άμμων . . . . .	470
6.7.3.2	Ανακυκλιζόμενη φόρτιση κορεσμένης άμμου . . . . .	478
6.7.3.3	Παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή στη ρευστοποίηση . . . . .	480
6.7.3.4	Σύνοψη των θεμελιωδών αρχών του φαινομένου της ρευστοποίησης . . . . .	490
6.7.4	Εκτίμηση της διακινδύνευσης ρευστοποίησης . . . . .	495
6.7.4.1	Γενικές αρχές . . . . .	495
6.7.4.2	Εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης . . . . .	496
6.7.4.3	Εκτίμηση της διακινδύνευσης ρευστοποίησης . . . . .	500
6.7.4.4	Καθιζήσεις και μόνιμες παραμορφώσεις λόγω ρευστοποίησης . . . . .	520
6.7.4.5	Σύγχρονες θεωρητικές μέθοδοι . . . . .	533

6.7.4.6	Κανονισμοί . . . . .	536
6.7.4.7	Σεισμός σχεδιασμού, μικροζωνικές μελέτες και ρευστοποίηση . . . . .	540
6.7.5	Αστοχίες λόγω ρευστοποίησης και μέτρα αντιμετώπισης . . . . .	541
6.7.5.1	Μορφές και μηχανισμοί αστοχίας λόγω ρευστοποίησης . . . . .	543
6.7.5.2	Μέτρα αντιμετώπισης του κινδύνου ρευστοποίησης	547
<b>7</b>	<b>Επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην ισχυρή εδαφική κίνηση (ΕΤΕΣ)</b>	<b>559</b>
7.1	Εισαγωγή . . . . .	560
7.2	Βασικές έννοιες και ορισμοί . . . . .	566
7.3	Μέθοδοι εκτίμησης της ΕΤΕΣ . . . . .	575
7.3.1	Πειραματικές – εμπειρικές μέθοδοι . . . . .	576
7.3.2	Εμπειρικές μέθοδοι . . . . .	582
7.3.3	Ημι-εμπειρικές μέθοδοι . . . . .	585
7.3.4	Θεωρητικές μέθοδοι . . . . .	585
7.4	Παραδείγματα θεωρητικών αναλύσεων της σεισμικής εδαφικής απόκρισης . . . . .	607
7.4.1	Μελέτη της σεισμικής απόκρισης οριζόντιων εδαφικών στρώσεων . . . . .	607
7.4.2	Αναλύσεις της εδαφικής απόκρισης σε δύο διαστάσεις . . . . .	615
7.5	Εδαφική ενίσχυση λόγω τοπογραφίας . . . . .	629
7.5.1	Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση . . . . .	629
7.5.2	Παράδειγμα διερεύνησης της τοπογραφικής επιρροής στην ενίσχυση της εδαφικής απόκρισης . . . . .	636
7.6	Εμπειρικοί και θεωρητικοί συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης του σεισμικού κραδασμού . . . . .	645
7.7	Αντισεισμικοί κανονισμοί . . . . .	649
7.7.1	Χαρακτηρισμός των εδαφών κατά Ευρωκώδικα 8, τον IBC 2000 και τους Κ. Πιτιλάκη και συνεργάτες . . . . .	650
7.7.2	Φασματική ενίσχυση . . . . .	655
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>661</b>
	<b>Ευρετήριο</b>	<b>706</b>



# Πρόλογος

Η γεωτεχνική σεισμική μηχανική αναπτύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες ως ένας ιδιαίτερος κλάδος της σεισμικής μηχανικής. Το έναυσμα ήταν ένας ώριμος και ευτυχής συνδυασμός τεχνολογικής και επιστημονικής προόδου αφενός, και συστηματικών παρατηρήσεων και καταγραφών αφετέρου, από μια σειρά μεγάλων και καταστροφικών σεισμών, όπου αναδείχθηκε περίτρανα ο ρόλος των εδαφικών συνθηκών και η ιδιαίτερα πολύπλοκη συμπεριφορά του εδάφους, που σε αρκετές περιπτώσεις φόρτισης δεν μοιάζει με κανένα άλλο τεχνητό υλικό. Τέτοιοι σεισμοί ήταν οι σεισμοί στο Anchorage στην Αλάσκα και στη Niigata στην Ιαπωνία τη δεκαετία του 1960, και στην Πόλη του Μεξικού δύο δεκαετίες αργότερα, για να ακολουθήσουν πολλοί άλλοι, εξίσου ενδιαφέροντες και σημαντικοί σεισμοί για τη γεωτεχνική σεισμική μηχανική και όχι μόνο. Παράλληλα, η κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων καθώς και η εκμετάλλευση και μεταφορά πετρελαϊκών κοιτασμάτων στην ανοικτή θάλασσα, ή σε ιδιαίτερα σεισμογενές περιβάλλον, όπως είναι η Αλάσκα, σε συνδυασμό με την εκρηκτική οικιστική ανάπτυξη σε παγκόσμια κλίμακα, και τη συνακόλουθη ανάγκη οικιστικής εκμετάλλευσης περιοχών σε σεισμογενές περιβάλλον και μέτριες εδαφικές συνθήκες, όλα αυτά μαζί προκάλεσαν μια σημαντικότερη και αυτόνομη ανάπτυξη της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής, η οποία σήμερα βρίσκεται πλέον σε ώριμη φάση. Απομένουν βέβαια ακόμη πολλά να γίνουν. Υπάρχουν πολλές εκκρεμότητες και πολλά σημαντικά αναπάντητα ερωτήματα, οπότε σίγουρα τα προσεχή χρόνια αναμένεται ακόμη μεγαλύτερη πρόοδος σε πολλούς και σημαντικούς τομείς. Το ανά χείρας βιβλίο φιλοδοξεί να καλύψει ένα σημαντικό κενό στην ελληνική βιβλιογραφία και να αποτελέσει οδηγό και αναφορά για το μέλλον, τόσο στην εκπαίδευση και την έρευνα, όσο και στην καθημερινή πρακτική κυρίως του πολιτικού μηχανικού, αλλά και του γεωλόγου, του τεχνικού σεισμολόγου και του γεωφυσικού.

Το βιβλίο καλύπτει ένα μεγάλο μέρος του αντικείμενου της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής. Διαπραγματεύεται κατά κύριο λόγο τα θέματα που αφορούν την εδαφοδυναμική, την ισχυρή εδαφική κίνηση, την επιρροή των τοπικών εδαφι-

κών συνθηκών και την εκτίμηση του σεισμού σχεδιασμού τεχνικών έργων. Επειδή όμως τα συγκεκριμένα αντικείμενα απαιτούν μια διεπιστημονική προσέγγιση, το βιβλίο ξεκινά με μια συνοπτική μεν αλλά συστηματική παρουσίαση, στα πλαίσια πάντοτε των ενδιαφερόντων του πολιτικού μηχανικού, της σεισμολογίας και της τεχνικής σεισμολογίας. Τα υπόλοιπα θέματα της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής που αναφέρονται στη δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους, θεμελιώσεων, και κατασκευών, όπως επίσης και στον αντισεισμικό σχεδιασμό θεμελιώσεων και λοιπών γεωτεχνικών έργων, θα παρουσιασθούν σε επόμενο πόνημα.

Το βιβλίο απευθύνεται σε φοιτητές των τελευταίων εξαμήνων του προπτυχιακού κύκλου σπουδών των Πολιτικών Μηχανικών, σε μεταπτυχιακούς φοιτητές πολιτικούς μηχανικούς, γεωλόγους και σεισμολόγους, και φυσικά σε επαγγελματίες πολιτικούς μηχανικούς, σεισμολόγους, γεωλόγους και γεωφυσικούς. Απαιτεί σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, γνώσεις εδαφομηχανικής, δυναμικής των κατασκευών και θεωρίας ελαστοδυναμικής, καθώς και σε μικρότερο βαθμό γνώσεις από άλλες ειδικότητες, όπως είναι η φυσική, η σεισμολογία, η γεωλογία, η υδραυλική και φυσικά τα μαθηματικά και η γενική μηχανική και δυναμική. Όπου κρίνεται απαραίτητο, ορισμένα από τα παραπάνω αντικείμενα αναπτύσσονται εν συντομία, κάτι που επί παραδείγματι ισχύει στο κεφάλαιο που παρουσιάζεται η θεωρία των ελαστικών κυμάτων.

Η παρουσίαση των θεμάτων που διαπραγματεύεται το βιβλίο οργανώθηκε σε επτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται χαρακτηριστικές βλάβες και αστοχίες από διαφόρους πρόσφατους και παλαιότερους σεισμούς. Στόχος του κεφαλαίου είναι η εισαγωγή στην πολυπλοκότητα των φαινομένων που απαρτίζουν τη γεωτεχνική σεισμική μηχανική και η ανάδειξη του καθοριστικού ρόλου του εδάφους. Ερωτήματα που τίθενται στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια. Το δεύτερο κεφάλαιο είναι μια γενική εισαγωγή στη σεισμολογία και στις παραμέτρους που περιγράφουν τη γένεση των σεισμών, καθώς και τις μεθόδους και τα όργανα που μετρούν την ένταση, τη σφοδρότητα και τα χαρακτηριστικά τους. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικά θέματα της τεχνικής σεισμολογίας, όπως είναι η φυσική της ισχυρής εδαφικής κίνησης, τα όργανα μέτρησης της εδαφικής ταλάντωσης, τα ελαστικά φάσματα απόκρισης, οι σχέσεις εκτίμησης της εδαφικής ταλάντωσης, και γενικά όλα τα θέματα που είναι χρήσιμα στην εκτίμηση της ισχυρής εδαφικής σεισμικής κίνησης από τη σκοπιά του μηχανικού. Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με το σπουδαίο πρόβλημα της σεισμικής επικινδυνότητας και την πιθανοτική εκτίμηση του σεισμού σχεδιασμού. Όλα αυτά τα θέματα αναπτύσσονται δίνοντας συγκεκριμένα παραδείγματα και εφαρμογές από τον Ελλαδικό χώρο. Στο

πέμπτο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της θεωρίας των ελαστικών κυμάτων, με έμφαση στις εφαρμογές τους στην εδαφοδυναμική και τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο έδαφος.

Έχοντας λοιπόν αποκτήσει τις απαραίτητες προαπαιτούμενες γνώσεις, στα επόμενα δύο κεφάλαια παρουσιάζονται τα κατεξοχήν θέματα που ενδιαφέρουν το παρόν βιβλίο, τα οποία είναι στο μεν έκτο κεφάλαιο η εδαφοδυναμική, στο δε έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο η θεωρητική και πρακτική εκτίμηση της ισχυρής εδαφικής σεισμικής ταλάντωσης και του σεισμικού φορτίου σχεδιασμού των πάσης φύσεως κατασκευών πολιτικού μηχανικού. Το κεφάλαιο της εδαφοδυναμικής διαπραγματεύεται θέματα θεωρητικής και πειραματικής εδαφοδυναμικής, όπου αναλύονται διεξοδικά οι δυναμικές ιδιότητες των εδαφών καθώς και τα θέματα της δυναμικής αντοχής ψαθυρών και συνεκτικών εδαφών, με έμφαση στην περιγραφή και τις μεθόδους εκτίμησης της ρευστοποίησης. Τέλος, το έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρεται διεξοδικά στην επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Παρουσιάζονται οι πλέον δόκιμες θεωρητικές και πειραματικές μέθοδοι εκτίμησης της αναμενόμενης εδαφικής ενίσχυσης, δίδονται συγκεκριμένα παραδείγματα, ενώ παρουσιάζονται και αξιολογούνται οι σχετικές διατάξεις των εν ισχύ αντισεισμικών κανονισμών, συμπεριλαμβανομένων του Ευρωκώδικα 8, του ΕΑΚ 2000 και του IBC2000, που ισχύει στις ΗΠΑ. Παρουσιάζονται επίσης και προτάσεις του συγγραφέα και των συνεργατών του για τη βελτίωση των σχετικών διατάξεων του EC8 και του ΕΑΚ2000.

## 1.1 Σύντομη ανασκόπηση

Οι σεισμοί αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο που έχει έντονα αποτυπωθεί στη μνήμη όλων των λαών της γης και φυσικά με πιο έντονο τρόπο στους λαούς που κατοικούν σε περιοχές με έντονη σεισμικότητα. Γκραβούρες, περιγραφές και διηγήσεις περιγράφουν με παραστατικό τρόπο φαινόμενα και καταστάσεις αστοχιών, τις οποίες έρχεται σήμερα να επιβεβαιώσει και να ερμηνεύσει η επιστημονική γνώση. Η περιγραφή από τον Πausανία της καταστροφής και της καταβύθισης στα νερά του Κορινθιακού της αρχαίας Ελίκης (373 π.Χ.) αποτελεί μία αρκετά πλήρη περιγραφή ενός φαινομένου ρευστοποίησης και αστοχίας του εδάφους ανάλογου αυτού που παρατηρήθηκε πρόσφατα στον σεισμό του Kocaeli ( $M_s = 7.5$ , 1999) στην παραθαλάσσια πόλη Golcuk, στη θάλασσα του Μαρμαρά.

Η σεισμική ιστορία μιας περιοχής είναι αποτυπωμένη με τον πλέον παραστατικό τρόπο στα μνημεία. Παράλληλα, οι αστοχίες των μνημείων και ακόμη περισσότερο η σημερινή τους κατάσταση, με αποτυπωμένη την εικόνα των βλαβών, αποτελούν ένα άριστο «διδασκτικό» εργαλείο για την κατανόηση του μηχανισμού με τον οποίο αποκρίνονται οι κατασκευές στην επιβαλλόμενη σεισμική φόρτιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αρχαία κολόνα του Σχ.1.1 στα Προπύλαια του Παρθενώνα, η οποία θα μπορούσε να παραπέμπει σε θέματα ιδιομορφικής ανάλυσης, πράγμα το οποίο δεν ισχύει, διότι έχει αποδειχθεί ότι οι ελεύθερα εδραζόμενοι κίονες δεν έχουν ιδιοσυχνότητες. Η σχετική μετακίνηση που παρατηρείται οφείλεται κυρίως στην υπέρβαση της διατμητικής αντοχής στη διεπιφάνεια των τριών σπονδύλων.

Η γκραβούρα του Σχ.1.2 περιγράφει πολύ παραστατικά την πόλη της Λισσαβόνας κατά τον ισχυρότατο σεισμό ( $M_s = 8.0$ ) που έπληξε την πόλη το 1775. Ο προσεκτικός αναγνώστης μπορεί να εντοπίσει διάφορα θέματα που απασχολούν τη γεωτεχνική σεισμική μηχανική, όπως τη διαφορετική απόκριση παρόμοιων κατασκευών σε διαφορετικές περιοχές της πόλης (επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών), έντονες παραμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους στην παραλιακή ζώνη που ενδεχομένως υποδηλώνουν εκδήλωση ρευστοποίησης και γενικής αστοχίας του εδάφους ανάλογης αυτής που παρατηρήθηκε στην Αλάσκα (Anchorage,  $M_s = 8.5$ , 1965), ακόμη δε και τη δημιουργία θαλάσσιων κυμάτων βαρύτητας (τσουνάμι), ή ακόμη και την εκδήλωση πυρκαγιών. Ανάλογα φαινόμενα μπορεί να παρατηρήσει κανείς στην ξυλογραφία του 16ου αιώνα από τη μονή Αγίου Διονυσίου στο Άγιον Όρος (Σχ.1.3).

Οι λαοί μέσα από τη μυθολογία τους έχουν αποδώσει τους σεισμούς με διάφορους τρόπους που εμμέσως υποδηλώνουν πολλά. Για παράδειγμα, η Ιαπωνική μυθολογία συμβολίζει τον σεισμό με ένα τεράστιο ψάρι που κουνάει τη γη

(Σχ.1.4). Οι άνθρωποι προσπαθούν να το τιθασιεύσουν με τις φτωχές τους σωματικές δυνάμεις και προφανώς αποτυγχάνουν. Αντιθέτως, στην ελληνική μυθολογία (Σχ.1.5) η Αθηνά, η θεά της σοφίας και της επιστήμης, είναι αυτή που κατανικά τον Εγκέλαδο, τον αρχηγό των Τιτάνων, γιο του Ταρτάρου και της Γης, η οποία αφού τον έτρεψε σε φυγή τον καταπλάκωσε στα έγκατα της γης με τη Σικελία ή το όρος-ηφαίστειο Αίτνα. Ετυμολογικά δε, ο Εγκέλαδος αποτελεί σύντμηση του «έγκειμαι-λας», που σημαίνει ο εγκατεστημένος στα πετρώματα του στερεού φλοιού της γης.



Σχήμα 1.1: Προπύλαια Παρθενώνας - Σχετική ολίσθηση σπονδύλου.



Σχήμα 1.2: Λισσαβόνα, 1/11/1755 (60000 νεκροί).



Σχήμα 1.3: Μονή Αγ. Διονυσίου, 16ος αιώνας, Αγιον Όρος.

### **Αντικείμενο και περιεχόμενο της Τεχνικής Σεισμολογίας, της Εδαφοδυναμικής και της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής**

Η Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική αποτελεί έναν σημαντικό κλάδο της Σεισμικής Μηχανικής ενώ παράλληλα συνδέεται οργανικά και με τη σεισμολογία δια της Τεχνικής Σεισμολογίας, που επίσης συνιστά βασικό της γνωστικό αντικείμενο. Η Εδαφοδυναμική αποτελεί τμήμα της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, όπως αντίστοιχα και κατά αναλογία η Εδαφομηχανική αποτελεί τμήμα της Γεωτεχνικής Μηχανικής. Φυσικά μπορεί κάποιος να θεωρήσει τη Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική και ως έναν κλάδο της Γεωτεχνικής Μηχανικής, και συγκεκριμένα αυτόν που ασχολείται με τις δυναμικές και σεισμικού τύπου φορτίσεις και τον αντίστοιχο σχεδιασμό θεμελιώσεων και γεωκατασκευών.

Η Τεχνική Σεισμολογία περιλαμβάνει εισαγωγικές γνώσεις σεισμολογίας και στη συνέχεια την εφαρμογή και εξειδίκευση αυτών σε θέματα που ενδιαφέρουν τον πολιτικό μηχανικό. Η γνώση του μηχανισμού γένεσης των σεισμών, οι μέθοδοι ποιοτικής και ποσοτικής περιγραφής των σεισμών (μεγέθη, εντάσεις), η διάδοση



Σχήμα 1.4: Στην Ιαπωνία οι άνθρωποι προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το τεράστιο ψάρι-σεισμό που κάνει τη γη να τρέμει.

της σεισμικής ενέργειας στον χώρο, τα σεισμικά κύματα, τα όργανα μέτρησης και καταγραφής της σεισμικής εδαφικής ταλάντωσης, η μελέτη της εξασθένησης της έντασης του σεισμικού κραδασμού με την απόσταση από την πηγή, η χωρική και χρονική κατανομή της σεισμικής δραστηριότητας (σεισμικότητα), η σεισμική επικινδυνότητα και διακινδύνευση, η περιγραφή της ισχυρής εδαφικής ταλάντωσης στο πεδίο του χρόνου (μεταβολή των επιταχύνσεων, ταχυτήτων και εδαφικών μετακινήσεων με τον χρόνο) και η μεταβολή των συχνοτήτων (φάσματα Fourier και φάσματα απόκρισης), όλα αυτά αποτελούν αντικείμενο και περιεχόμενο της Τεχνικής Σεισμολογίας. Με τη συνεισφορά και της Εδαφοδυναμικής, η Τεχνική Σεισμολογία έχει ως πρακτικό στόχο την εκτίμηση των σεισμικών φορτίων σχεδιασμού των πάσης φύσεως κατασκευών πολιτικού μηχανικού.

Αντικείμενο της Εδαφοδυναμικής είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφών υπό δυναμικές και σεισμικές φορτίσεις. Η δυναμική συμπεριφορά του εδάφους είναι κεφαλαίωδους σημασίας για την εκτίμηση των σεισμικών φορτίων σχεδιασμού, όπως επίσης και για την εκτίμηση της αντοχής του εδάφους σε σύνθετες φορτίσεις όπως είναι οι σεισμικές φορτίσεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στον εργαστηριακό προσδιορισμό και την αναλυτική περιγραφή της μη-γραμμικής και ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού, στη χρήση γεωφυσικών και άλλων τεχνικών «πεδίου» για την εκτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων, όπως επίσης και στο θέμα της ρευστοποίησης.

Τέλος η Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική, ως υπερσύνολο των προηγούμενων, ασχολείται κατεξοχήν με τον αντισεισμικό σχεδιασμό και την ανάλυση πάσης φύσεως θεμελίσεων οικοδομικών έργων, αντιστηρίξεων και γεωκατασκευών. Η θεμελίωση γεφυρών και λοιπών έργων υποδομής, ο αντισεισμικός σχεδιασμός



Σχήμα 1.5: Ελληνικός αμφορέας: Η Αθηνά νικά τον Εγκέλαδο.

δικτύων κοινής ωφέλειας, υπόγειων έργων και σιράγγων, όπως και συγκοινωνιακών έργων και λιμενικών εγκαταστάσεων, αποτελούν επίσης αντικείμενο της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους και κατασκευών. Κρίνεται επίσης σκόπιμο να γίνουν και ορισμένες αναφορές στα θέματα της σεισμικής τρωτότητας και διακινδύνευσης αναφορικά με τα έργα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στη συνέχεια, προκειμένου να δοθεί μία πρώτη εικόνα της παθολογίας των κατασκευών σε περίπτωση ισχυρού σεισμού, παρουσιάζονται και σχολιάζονται λιτά ορισμένες τυπικές μορφές αστοχιών.

## 1.2 Παραδείγματα ζημιών - αστοχιών σε τεχνικά έργα

Τα παραδείγματα που ακολουθούν αναφέρονται σε διάφορους σεισμούς της τελευταίας εικοσαετίας στην Ελλάδα και στον υπόλοιπο κόσμο.

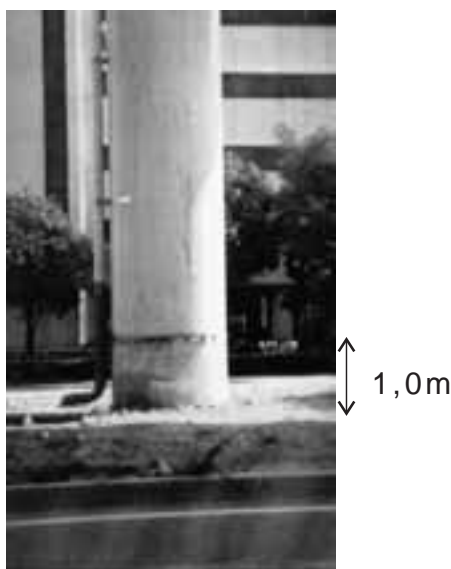
Στα κοινά οικοδομικά έργα εξετάζεται κυρίως ο συντονισμός και ο ρόλος των τοπικών εδαφικών συνθηκών στο μέγεθος και τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της σεισμικής φόρτισης, καθώς και στην απόκριση των κατασκευών. Παράλληλα παρουσιάζεται το πρόβλημα της ρευστοποίησης και τα συναφή με αυτό φαινόμενα



συνιζήσεων, καθιζήσεων και πλευρικών μετακινήσεων. Παρουσιάζονται αστοχίες σε επιφανειακές και βαθιές θεμελιώσεις, σε τεχνητά και φυσικά πρηνή (κατολισθήσεις). Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται σε συγκοινωνιακά έργα και στην παθολογία επιχωμάτων, σε αστοχίες γεφυρών, σηράγγων, τοίχων αντιστήριξης και κρηπιδοτοίχων. Τέλος παρουσιάζονται παραδείγματα αστοχιών σε αγωγούς ύδρευσης, αποχέτευσης και σε αγωγούς μεταφοράς καυσίμων σε φράγματα, ενώ τονίζεται και η σημασία των εμμέσων ζημιών και απωλειών (κατασκευαστικών, οικονομικών και άυλης μορφής).

### 1.2.1 Αστοχίες από τον σεισμό του Kobe (17/01/95 – $M_s=7.2$ )

Ο σεισμός του Kobe μας δίδαξε πολλά, τόσο από την πλευρά της σεισμολογίας και της ακριβούς και αξιόπιστης εκτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης, όσο και από την πλευρά της σεισμικής μηχανικής αναφορικά με την ανάλυση, τη σχεδίαση κατασκευών ικανών να παραλάβουν με ασφάλεια τα σεισμικά φορτία, τους κανονισμούς και τις κατασκευαστικές διατάξεις και λεπτομέρειες. Στα Σχ.1.6 - 1.14 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών, σε διάφορες κατασκευές και έργα υποδομής (γέφυρες, λιμενικά έργα κ.λπ.).



Σχήμα 1.6: Καθίζηση χαλαρού επιχώματος σε συνδυασμό και με την καθίζηση λόγω ρευστοποίησης του στρώματος έδρασης του επιχώματος, σε σχέση με τον «ακλόνητο» πάσσαλο αιχμής (Σεισμός Kobe, 1995).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 1.7: Αστοχίες σε συγκοινωνιακά έργα (γέφυρες) στην πόλη του Kobe, 17/1/1995. Στις φωτογραφίες (α) και (β) παρουσιάζονται δύο αστοχίες τοίχων αντιστήριξης τύπου βαρύτητας που είτε κατασκευάστηκαν χωρίς πρόβλεψη σεισμικών φορτίσεων, είτε σχεδιάστηκαν με χαμηλό σεισμικό συντελεστή  $\varepsilon = 0.2$ , ενώ οι καταγραφείσες κορυφαίες οριζόντιες επιταχύνσεις ξεπέρασαν το  $0.5g$ . Η αστοχία βάθρων σιδηροδρομικής γέφυρας στη φωτογραφία (γ) σε μήκος 350m οφείλεται σε ανεπάρκεια οπλισμού σε συνδυασμό με φαινόμενα συντονισμού. Η πτώση του καταστρώματος οδικής γέφυρας στη φωτογραφία (δ) οφείλεται στις μεγάλες πλευρικές μετατοπίσεις της θεμελίωσης του βάθρου, το οποίο συμπαρασύρθηκε από τις μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις του κρηπιδότοιχου. Η μετακίνηση αυτή του βάθρου είχε ως συνέπεια την αδυναμία του εφεδράνου να κρατήσει τη δοκό του καταστρώματος, διότι προφανώς δεν σχεδιάστηκε για την παραλαβή τόσο μεγάλων σχετικών μετακινήσεων. Αντίστοιχες αστοχίες παρουσιάστηκαν σε πολλές γέφυρες, ειδικά στην περιοχή των τεχνητών νησιών, όπου παρατηρήθηκαν εκτεταμένες καθιζήσεις και οριζόντιες μετακινήσεις, λόγω κυρίως φαινομένων ρευστοποίησης (πλευρική εξάπλωση).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

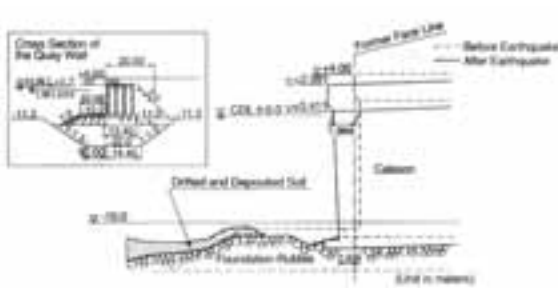
Σχήμα 1.8: Αστοχίες σε λιμενικές εγκαταστάσεις στο Kobe, 17/01/1995, βασικά λόγω ρευστοποίησης και συνακόλουθων μεγάλων πλευρικών μετακινήσεων των γιγαντιαίων κρηπιδότοιχων ύψους μεγαλύτερου των 20m. Η αστοχία του κρηπιδότοιχου (οριζόντιες μετακινήσεις μεταξύ 2.0 και 5.0m όπως φαίνεται στη φωτογραφία (α) είχε ως έμμεσο αποτέλεσμα την καταστροφή και των γιγαντιαίων ανυψωτικών γερανών οι οποίοι κινούνταν σε σιδηροτροχιές που εδράζονταν στους κρηπιδότοιχους και σε πασσαλοσυστοιχία στα ανάντη (φωτογραφία γ). Οι κρηπιδότοιχοι τύπου κιβωτίου (caisson) υψηλής σεισμικής αντίστασης, που κατασκευάστηκαν ειδικά για την παράδοση προμηθειών άμεσης ανάγκης, αποκρίθηκαν πολύ ικανοποιητικά δίχως να παρουσιάσουν αστοχία λόγω της ισχυρής σεισμικής διέγερσης (φωτογραφία β). Η ποδιά του κυματοθραύστη σε ένα τμήμα της φαίνεται σχεδόν βυθισμένη όταν η παλίρροια βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο της (φωτογραφία δ).



(α)



(β)



(γ)

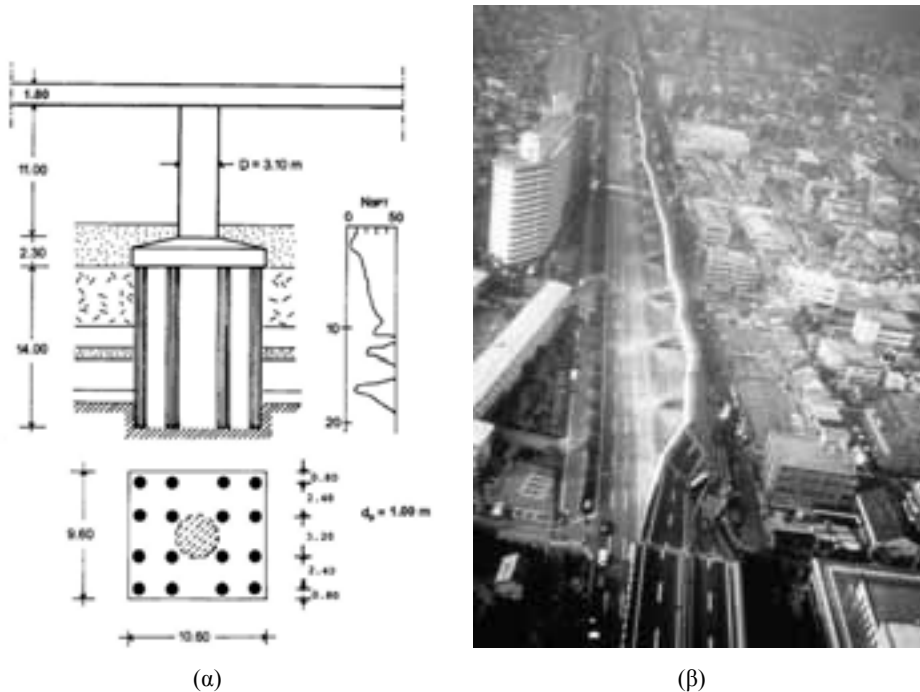


(δ)

Σχήμα 1.9: Αστοχία τοίχου βαρύτητας σε λιμενικές εγκαταστάσεις στο Rokko Island - Kobe. Παρατηρήθηκε οριζόντια μετακίνηση 4.2-5.2m και κατακόρυφη μετακίνηση 1.5-2.2m σε κατασκευή του 1989 (Σεισμός Kobe, 1995).



Σχήμα 1.10: Πλήρης καταστροφή κρηπιδότοιχου λόγω ρευστοποίησης του εδάφους θεμελίωσης (Σεισμός Kobe, 1995).



Σχήμα 1.11: (α) Σχηματική τομή βάθρου και πασσαλοθεμελίωσης και (β) άποψη τμήματος της γέφυρας που αστόχησε από εναέρια φωτογραφία (Σεισμός Kobe, 1995).

Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η αστοχία της γέφυρας Higashi-Nada στον αυτοκινητόδρομο Hanshin (Σχ. 1.11). Το συνολικό μήκος της γέφυρας είναι 630m με έτος κατασκευής το 1969. Τα βάθρα της γέφυρας, πολλά από τα οποία αστόχησαν, είναι μονόστυλα τύπου T με πασσαλοθεμελίωση, ενώ το κατάστρωμα μορφώνεται από μυκητοειδή φατνωματική πλάκα Ο/Σ. Το υπέδαφος στην περιοχή της γέφυρας αποτελείται από αμμοχαλικώδεις στρώσεις μεταβλητού πάχους (10-80m) με εναλλασσόμενες στρώσεις αργίλου επάνω σε μαλακό βράχο. Σε μεγάλο βάθος υπάρχει γρανιτικό υπόβαθρο. Τα κυριότερα αίτια αστοχίας της γέφυρας μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω (Mylonakis et al., 2006):

1. ανεπαρκής εγκάρσιος οπλισμός των βάθρων
2. ανεπαρκής αγκύρωση διαμήκους οπλισμού
3. ελαστικές μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής δύναμης σχεδιασμού
4. σημαντική και δυσμενής επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής



Σχήμα 1.12: Διατμητική αστοχία ορθογωνικού βάρου (Σεισμός Kobe, 1995).



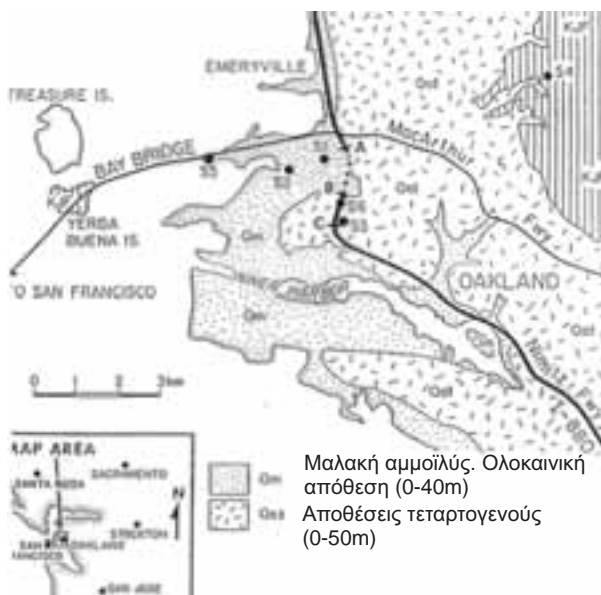
Σχήμα 1.13: Κατάρρευση βάρου - Αστοχία θεμελίου (Σεισμός Kobe, 1995).



Σχήμα 1.14: Αστοχία σφαιρικού εφεδράνου (Σεισμός Kobe, 1995).

### 1.2.2 Αστοχίες από τον σεισμό της Loma Prieta (17/10/1989, $M_s=7.1$ )

Η αστοχία της διώροφης γέφυρας Cypress Viaduct στο San Francisco αποτελεί μια θεαματική αστοχία, η οποία οφείλεται στη μέτρια έως κακή σχεδίασή της, σε συνδυασμό με την ενίσχυση της εδαφικής ταλάντωσης και των φασματικών της χαρακτηριστικών λόγω τοπικών εδαφικών συνθηκών. Όπως φαίνεται στο Σχ.1.15, το τμήμα της γέφυρας όπου αστόχησε το άνω κατάστρωμα βρίσκεται σε πολύ μαλακούς - χαλαρούς πρόσφατους σχηματισμούς αμμοιίλους, ενώ η ίδια γέφυρα συμπεριφέρθηκε ικανοποιητικά σε περιοχές όπου επικρατούν στιφροί σχηματισμοί μεγαλύτερης αντοχής και δυσμησίας. Το στατικό σύστημα του άνω καταστρώματος, με κύλιση στο ένα βάθρο και πλήρη «πάκτωση» στο άλλο, οδήγησε στη μεταφορά όλων των σεισμικών φορτίων στο συνδεδεμένο βάθρο με το κάτω πλαίσιο, με αποτέλεσμα τη διατμητική αστοχία του κόμβου λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων και του ελλιπούς σχετικού οπλισμού (Σχ.1.16).



Σχήμα 1.15: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης που απεικονίζει την ευθυγράμμιση του I-880 Cypress Elevated Viaduct. Κατέρρευσε το τμήμα AB και εμφάνισε ζημιές το τμήμα BC (Hough et al., 1989). Το παχύ στρώμα μαλακής αμμοιίλους (Bay mud) προκάλεσε σημαντική ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού και ταυτόχρονα εμπλουτισμό της δόνησης σε ισχυρά πλάτη σε μεγάλες περιόδους (Σεισμός Loma Prieta, 1989).



Σχήμα 1.16: Η γέφυρα I-880 Cypress Viaduct μετά την κατάρρευση του άνω καταστρώματος (Σεισμός Loma Prieta, 1989).



Σχήμα 1.17: Αστοχία του κόμβου καταστρώματος – πασσάλου. Η σύνδεση πασσάλου - κεφαλόδεσμου και πασσάλου – καταστρώματος όταν ο πάσσαλος θεμελίωσης προεκτεινόμενος καθ' ύψος εκτελεί και χρέη βάθρου είναι από τα πλέον ευπαθή σημεία της κατασκευής (Σεισμός Loma Prieta, 1989).





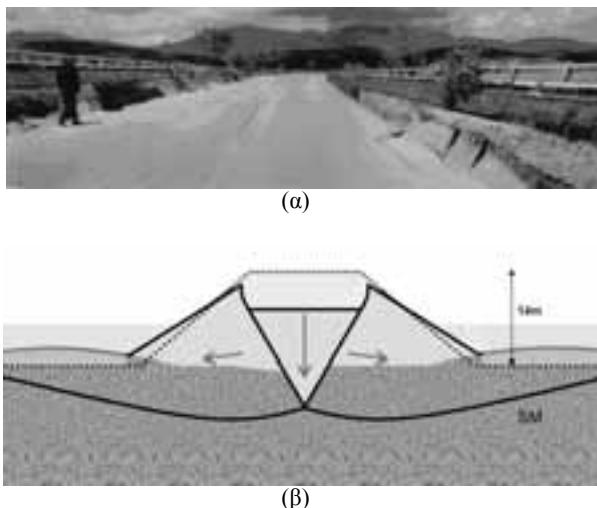
*Σχήμα 1.18:* Οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου και αποκόλληση από το περιβάλλον έδαφος. Η συμβολή της πλευρικής τριβής στην παραλαβή των αξονικών και των πλευρικών φορτίων θα πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα αποκόλλησης, μείωσης ή ακόμη και μηδενισμού της διατμητικής αντοχής και κατά συνέπεια της συνάφειας και της δυνατότητας να μεταφέρει αξονικά φορτία και να ανθίσταται σε πλευρικές φορτίσεις (Σεισμός Loma Prieta, 1989).

### 1.2.3 Αστοχίες από τον σεισμό Κοζάνης - Γρεβενών (13/05/1995, $M_s=6.5$ )

Στον σεισμό Κοζάνης-Γρεβενών το 1995 η θεαματικότερη αστοχία γεωτεχνικού ενδιαφέροντος παρατηρήθηκε στο ανάχωμα της γέφυρας Ρυμνίου στον Αλιάκμονα, στην απόληξη της λίμνης του φράγματος Πολυφύτου. Πρόκειται για την αστοχία του αναχώματος της γέφυρας λόγω ρευστοποίησης στρώσης λεπτής αμμοιλλώδους (Σχ.1.19 - 1.20), επί της οποίας ουσιαστικά εδράζεται το οδικό επίχωμα ύψους 14.0m περίπου.



*Σχήμα 1.19:* Οι κρατήρες που φαίνονται στη φωτογραφία (στο βάθος το ανάχωμα) οφείλονται στη ρευστοποίηση της λεπτόκοκκης άμμου που αποτελεί το έδαφος θεμελίωσης του αναχώματος (Σεισμός Κοζάνης, 1995).



Σχήμα 1.20: (α) Γενική άποψη του καταστρώματος του αναχώματος της γέφυρας Ρυμίου στον Αλιάκμονα ποταμό, στα ανάντη του φράγματος Πολύφντου μετά την αστοχία του πρανούς λόγω ρευστοποίησης του εδάφους θεμελίωσης και υποχώρησης του κεντρικού τμήματος του καταστρώματος κατά 70-90cm. (β) Σχηματική περιγραφή του μηχανισμού αστοχίας και μετακίνησης (Σεισμός Κοζάνης, 1995).

#### 1.2.4 Αστοχίες από τον σεισμό του Northridge (17/01/1994, $M_s=6.7$ )

Κατά τον σεισμό του Northridge στην Καλιφόρνια παρατηρήθηκαν σημαντικότερες ζημιές σε γέφυρες και σε δίκτυα κοινής ωφέλειας, ενώ καταγράφηκε πλήθος μικρών και μεγάλων κατολισθήσεων. Στα σχήματα Σχ.1.21 - 1.26 δίνονται μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις αστοχιών σε γέφυρες και στοιχεία δικτύων κοινής ωφέλειας. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως οι ζημιές σε δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης και φυσικού αερίου, κυρίως λόγω μεγάλων μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων, όπως στην περίπτωση του Balboa Blvd - Granada Hills, είναι δυνατόν να έχουν πολύ σημαντικότερες οικονομικές επιπτώσεις απ' ότι οι αστοχίες μεμονωμένων κατασκευών. Στον σεισμό του Northridge μελετήθηκε για πρώτη φορά με πολύ συστηματικό τρόπο το θέμα της αστοχίας γεφυρών και των οικονομικών επιπτώσεων που μπορεί να έχει στην κοινωνική, εμπορική και οικονομική ζωή μιας περιοχής, η αστοχία κρίσιμων υποδομών του δικτύου μεταφορών.



Σχήμα 1.21: Κατάρρευση καταστρώματος γέφυρας - Ανεπάρκεια πλάτους εφεδράνου (Σεισμός Northridge, 1994).



Σχήμα 1.22: Κατάρρευση καταστρώματος γέφυρας (Σεισμός Northridge, 1994).



Σχήμα 1.23: Κατάρρευση καταστρώματος γέφυρας (Σεισμός Northridge, 1994).



Σχήμα 1.24: Αστοχία στύλου κάτω από τη θλιβόμενη ζώνη (Bull Creek Canyon Channel Bridge, SR118 - Σεισμός Northridge, 1994).



Σχήμα 1.25: Πανοραμική φωτογραφία της λεωφόρου Balboa στην περιοχή Granada Hills - Δρόμος πλημμυρισμένος λόγω αστοχίας από εφελκυσμό αγωγών ύδρευσης - Ταυτόχρονη αστοχία και αγωγών φυσικού αερίου προκάλεσαν εκτεταμένες φωτιές στις παρακείμενες κατοικίες, οι οποίες ήταν αδύνατο να σβήσουν λόγω αστοχίας του δικτύου ύδρευσης – πυρόσβεσης (L.A. Times Photo) (Σεισμός Northridge, 1994). Πρόκειται για μια από τις χαρακτηριστικότερες περιπτώσεις έμμεσων ζημιών.

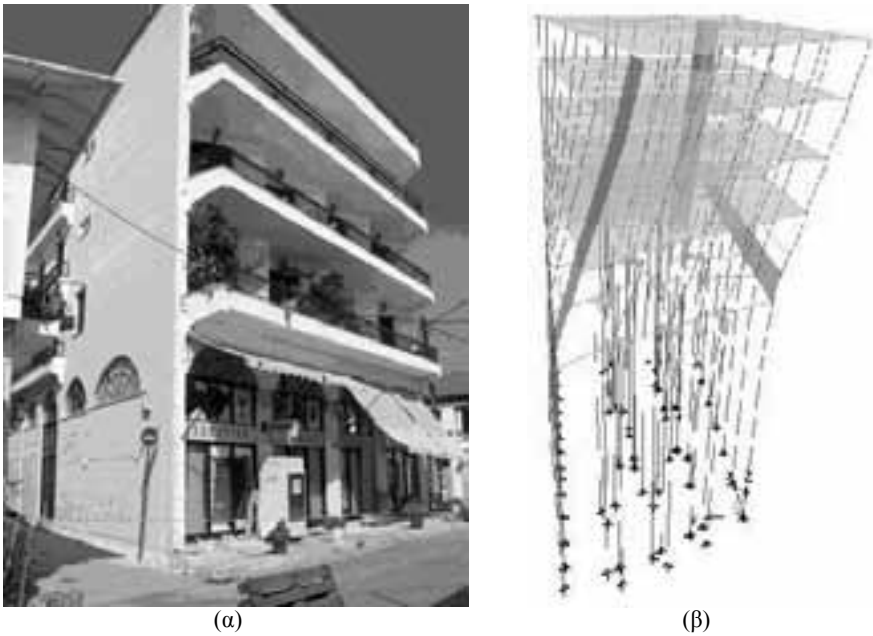


Σχήμα 1.26: Αστοχίες σε δίκτυα κοινής ωφέλειας και έμμεσου τύπου ζημιές και απώλειες (Σεισμός Northridge, 1994).

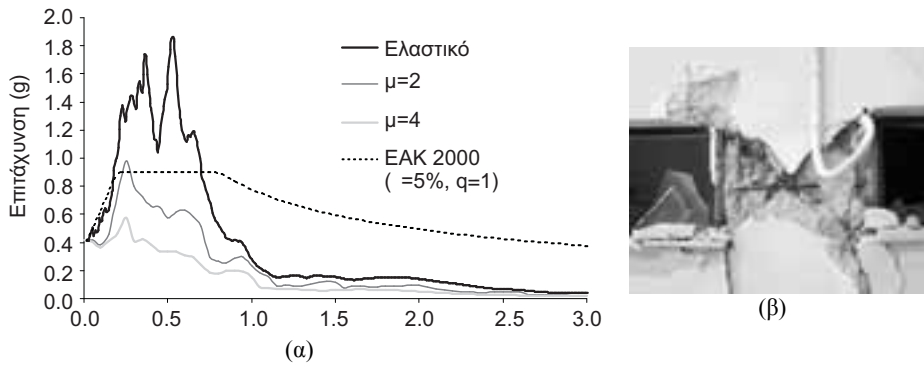
### 1.2.5 Αστοχίες από τον σεισμό της Λευκάδας (14/08/2003, $M_s=6.4$ )

Κατά τον σεισμό της Λευκάδας παρατηρήθηκαν σημαντικές βλάβες γεωτεχνικού χαρακτήρα που περιελάμβαναν κατολισθήσεις και αστοχίες κρηπιδότοιχων ως απόρροια της πλευρικής εδαφικής εξάπλωσης και ρευστοποίησης τοπικού χαρακτήρα, σχεδόν σε όλη την παραλιακή ζώνη της πόλης της Λευκάδας. Οι παραδοσιακές κατασκευές του νησιού δεν αντιμετώπισαν σημαντικά προβλήματα παρά την υψηλή εδαφική επιτάχυνση ( $0.42g$ ), κυρίως λόγω του παραδοσιακού τρόπου κατασκευής που περιελάμβανε δυο επίπεδα αντίστασης στα σεισμικά φορτία. Αντίθετα, αναλογικά περισσότερες ήταν οι περιπτώσεις βλάβης σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, όπως η τετραώροφη πολυκατοικία του Σχ.1.27 και Σχ.1.28. Η θεμελίωση της κατασκευής είναι με πασσάλους σε βάθος 18m, καθώς το έδαφος αποτελείται από στρώσεις μαλακής αργίλου στα πρώτα 6.50m ( $V_s = 120 - 170m/s$ ) και στρώση ιλυώδους άμμου, επιρρεπούς σε ρευστοποίηση μεταξύ 6.50-12.00m.

Συστηματική μελέτη της απόκρισης της κατασκευής (ελαστικής και ανελαστικής), συνυπολογίζοντας και τη ρευστοποίηση μιας στρώσης με την αντίστοιχη επιρροή που έχει μια τέτοια κατάσταση στη συμπεριφορά των πασσάλων της θεμελίωσης, απέδειξε πως η αστοχία της οφείλεται κατά κύριο λόγο στην έλλειψη κανονικότητας σε κάτοψη σε συνδυασμό με την ισχυρή εδαφική κίνηση στο εύρος των περιόδων που βρίσκεται η κατασκευή (βλ. φάσμα απόκρισης). Πολύ σημαντικός αποδείχθηκε ο προσανατολισμός του κτιρίου σε σχέση με τις συνιστώσες της διέγερσης, ενώ συμμετοχή είχε κατά πάσα πιθανότητα και η μερική ρευστοποίηση στο έδαφος θεμελίωσης (Sextos et al. 2005, Φωτάκη, 2004).



Σχήμα 1.27: Φωτογραφία κτιρίου και στατικό σύστημα μελέτης με την πασσαλοθεμελίωση.



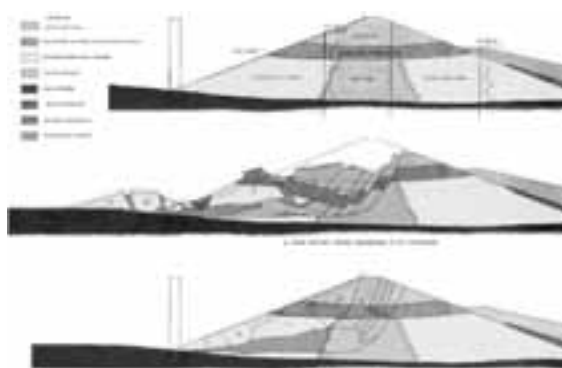
Σχήμα 1.28: (α) Φάσματα απόκρισης στα οποία κατέληξε η ανάλυση - Υπέρβαση της διαθέσιμης αντοχής στα συγκεκριμένα στοιχεία και (β) Διατμητική αστοχία κοντών υποστυλωμάτων (εκρηκτικού τύπου) στην πλαϊνή πλευρά της οικοδομής (Σεισμός Λευκάδας, 2003).

### 1.2.6 Αστοχίες σε χωμάτινα φράγματα

Τα χωμάτινα φράγματα αποτελούν έργα ιδιαίτερος σημαντικά, και ο αντισεισμικός τους σχεδιασμός προϋποθέτει πληθώρα συνδυασμένων μελετών. Σε γενικές γραμμές, λόγω της μεγάλης τους σπουδαιότητας, σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με αυξημένους συντελεστές ασφάλειας και συστηματικούς ποιοτικούς ελέγχους σε όλα τα στάδια της κατασκευής. Για τον λόγο αυτό οι αστοχίες τους είναι περιορισμένες. Παρόλα αυτά στο παρελθόν έχουν παρατηρηθεί αστοχίες, όπως για παράδειγμα η αστοχία του φράγματος του San Fernando κατά τον ομώνυμο σεισμό (1971). Η σφοδρότητα της σεισμικής ταλάντωσης σε συνδυασμό με τη ρευστοποίηση εδαφικών στρώσεων ήταν οι κύριες αιτίες της θεαματικής αστοχίας που παρουσιάζεται στο Σχ.1.29.



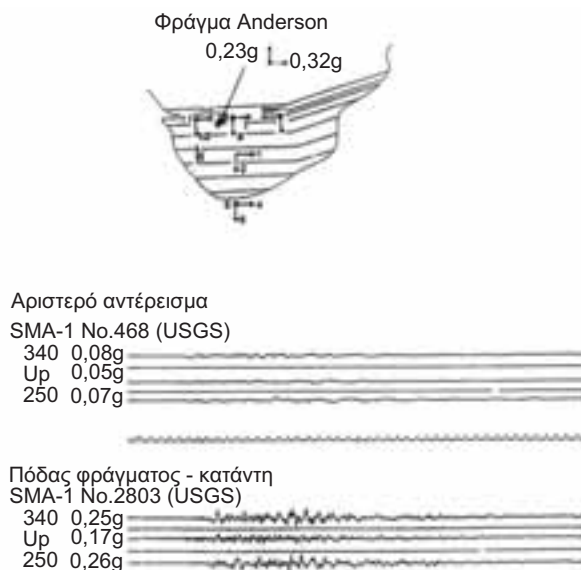
(α)



(β) (Seed et al., 1975b)

Σχήμα 1.29: Αστοχία φράγματος Lower San Fernando (Σεισμός San Fernando, 1971).

Ένα άλλο κρίσιμο θέμα στην περίπτωση των φράγματων είναι η εκτίμηση του σεισμικού κραδασμού σχεδιασμού στα όρια της βραχώδους κοιλάδας και η διάδοση του σεισμικού κραδασμού στον κορμό του φράγματος που ως γνωστόν είναι ένα αμιγώς τρισεδιάστατο πρόβλημα. Η εδαφική κίνηση στα αντερείσματα (βράχος) και στον κορμό του φράγματος είναι πολύ διαφορετική και μεταβάλλεται έντονα στα διάφορα σημεία. Η σημαντική ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού μέσα στον κορμό του φράγματος φαίνεται στο Σχ.1.30, όπου δίδονται οι καταγραφές επιταχύνσεων σε διάφορες θέσεις.



Σχήμα 1.30: Καταγραφές στο φράγμα Anderson (χωμάτινο - λιθόριπτο). Οι διαφορετικές ταλαντώσεις του βράχου στα αντερείσματα και στον πυθμένα, (κυρίως λόγω γεωμετρίας και τοπογραφίας,) δημιουργούν εξαιρετικά σύνθετες «ταλαντώσεις» στο εσωτερικό του φράγματος, δηλαδή στον κορμό του φράγματος. Εκτός από τη μεγέθυνση του πλάτους της εδαφικής ταλάντωσης έως και 3.5 φορές, παρατηρούμε τη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων μεγάλης περιόδου (προφανώς λόγω πολλαπλών ανακλάσεων στα όρια της κοιλάδας) και την επιμήκυνση της χρονικής διάρκειας.

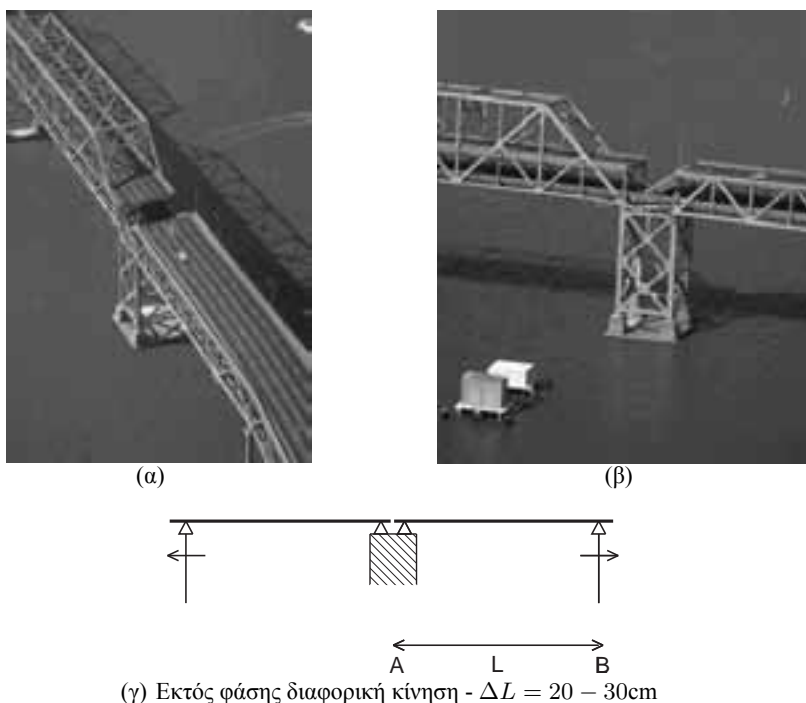
### 1.2.7 Αστοχίες λόγω ασύγχρονης κίνησης

Οι εκτός φάσης ταλαντώσεις δύο διαδοχικών σημείων και ακόμη περισσότερο η ασύγχρονη κίνηση, όπου εκτός από τη διαφορά φάσης μπορεί να έχουμε διαφορά και στο πλάτος, τη συχνότητα και το διάνυσμα της ταλάντωσης, είναι



ένα θέμα που έχει μεγάλη σημασία σε γέφυρες μεγάλου μήκους, όπως επίσης και στη σεισμική συμπεριφορά αγωγών. Το αποτέλεσμα της διαφορικής ταλάντωσης δύο συνεχόμενων βάθρων μια γέφυρας μπορεί να εκδηλωθεί με την πτώση του καταστρώματος στην περίπτωση απλά εδραζόμενου ισοστατικού φορέα, ή στην ανάγκη ανάληψης πρόσθετων εφελκυστικών και θλιπτικών φορτίων κατά τη διαμήκη έννοια. Η δεύτερη φορτιστική κατάσταση είναι η κύρια φόρτιση και η κύρια πηγή αστοχιών σε υπόγειους αγωγούς και σήραγγες κατά τη διαμήκη έννοια.

Το παράδειγμα που ακολουθεί (Σχ.1.31) αφορά την πτώση ενός τμήματος της γέφυρας Bay Bridge στο San Francisco, κατά τον σεισμό της Loma Prieta. Η πτώση οφείλεται στην απώλεια έδρασης λόγω υπερβολικής οριζόντιας μετακίνησης (20-30cm), για την οποία δεν ήταν μάλλον σχεδιασμένα τα εφέδρανα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάστηκε πολύ έντονα στον επόμενο σεισμό του Northridge (1994) σε πλήθος γεφυρών, με αποτέλεσμα να διερευνηθεί περισσότερο συστηματικά το θέμα της χωρικής μεταβολής της σεισμικής ταλάντωσης και της ασύγχρονης κίνησης (βλ. Κεφ. 3.5).



Σχήμα 1.31: Αστοχία τμήματος γέφυρας, San Francisco Bay Bridge (Σεισμός Loma Prieta, 1989).

### 1.2.8 Εδαφικές αστοχίες γενικευμένου τύπου - Κατολισθήσεις

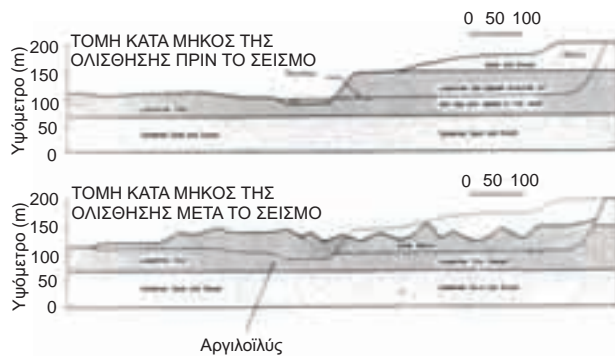
Κατολισθήσεις είναι δυνατόν να προκληθούν λόγω ρευστοποίησης στρωμάτων λεπτόκοκκης αμμοίλου, ή και λόγω γενικής αστοχίας, με τον συνδυασμό αυξημένων φορτίων λόγω σεισμού, αύξησης της πίεσης των πόρων και μείωση της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του εδάφους. Η τελευταία είναι μια αρκετά συνηθισμένη κατάσταση σε πολλούς ισχυρούς σεισμούς. Δεν είναι απαραίτητο να συνδέεται με τη μείωση ή την απώλεια της διατμητικής αντοχής του εδάφους, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της ρευστοποίησης, αλλά απλά να οφείλεται στην αδυναμία παραλαβής των πρόσθετων σεισμικών φορτίων με τη δεδομένη γεωμετρία του πρανούς και τα δεδομένα εδαφικά υλικά. Πρέπει να σημειωθεί ότι στα πρανή, όπως και στους τοίχους αντιστήριξης βαρύτητας, η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής ταλάντωσης, μειώνοντας το ενεργό βάρος, δρα επιβαρυντικά στην ευστάθεια και επομένως πρέπει να λογαριάζεται με ιδιαίτερη προσοχή. Στα Σχ. 1.32 - 1.34 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα γενικής αστοχίας σε δυο από τους σφοδρότερους σεισμούς που έπληξαν τον πλανήτη τα τελευταία 50 χρόνια.



Σχήμα 1.32: Σκαρίφημα αστοχίας πρανούς (Σεισμός Valdez, 1964).



Σχήμα 1.33: Πλήρης αστοχία λόγω ρευστοποίησης φακών χαλαρής κορεσμένης αμμοίλου σε βάθος 15m από την επιφάνεια (Σεισμός Anchorage, Alaska, 1964,  $M = 8.2$ ).



Σχήμα 1.34: Πλήρης αστοχία λόγω μεγάλων αδρανειακών σεισμικών φορτίων και υπέρβασης της ούτως ή άλλως χαμηλής διατμητικής αντοχής στρώματος αργιλοΐλιος (Σεισμός Χιλής, 1960,  $M = 8.5$ ).

### 1.2.9 Αστοχίες σε πρανή και επιχωματα - Μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις

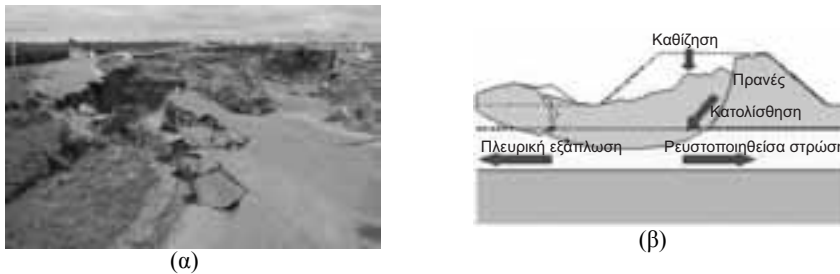
Ένα φυσικό ή τεχνητό πρανές καθίσταται ασταθές κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, όταν οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του σεισμού, υπό τον συνδυασμό στατικών και δυναμικών - σεισμικών φορτίσεων, υπερβούν τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή σε μια ενδεχόμενη επιφάνεια θραύσης. Τότε

παρατηρείται ολίσθηση στο πρανές, η οποία μπορεί να είναι από μερικά εκατοστά μέχρι δεκάδες μέτρα. Ως σεισμικά φορτία θεωρούνται οι οριζόντιες εδαφικές επιταχύνσεις που επιβάλλουν πρόσθετες αδρανειακού τύπου φορτίσεις καθώς και η αντίστοιχη κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού που μειώνοντας το ενεργό βάρος μειώνει τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή στην κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης. Με τη σειρά της η διατμητική αντοχή στην κρίσιμη αυτή επιφάνεια μπορεί να μειωθεί σε σχέση με τη «στατική» της τιμή κατά τη διάρκεια του σεισμού. Τέλος και η πιθανή αύξηση της πίεσης των πόρων είναι ένας κυρίαρχος αποσταθεροποιητικός παράγοντας. Οι μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις προκαλούν βλάβες σε κατοικίες και σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα που συνδέονται με το πρανές. Ιδιαίτερα δυσμενής είναι η περίπτωση όπου το φαινόμενο συνδέεται με ρευστοποιήσιμα εδάφη. Επιχώματα μεγάλου ύψους και απότομων κλίσεων είναι ιδιαίτερα τρωτά σε ισχυρές σεισμικές φορτίσεις. Η αστοχία τους μπορεί να εκδηλωθεί τόσο ως αστοχία των πρανών, όσο και ως αστοχία της θεμελίωσης ή και ως συνδυασμός των δύο (Σχ.1.35 και 1.36).



Σχήμα 1.35: Αστοχία οδικού επιχώματος και πρανούς - Συνδυασμός σεισμικών αδρανειακών φορτίων και μείωσης της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής στρώσης μαλακής αργίλου (Σεισμός Κοζάνης, 13/05/1995,  $M_s = 6.6$ ).

Συχνές είναι και οι βλάβες λόγω μόνιμης μετάθεσης επί ρήγματος. Όταν η μετάθεση (μετακίνηση) των δύο παρειών των σεισμικών ρηγμάτων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια, παρατηρούνται οριζόντιες ή κατακόρυφες μόνιμες μετακινήσεις του εδάφους που προκαλούν ανάλογες παραμορφώσεις σε οδικά, σιδηροδρομικά ή άλλα δίκτυα που διασταυρώνονται με το ρήγμα (Σχ.1.37). Σημαντικές ζημιές έως και πλήρεις καταρρεύσεις μπορεί να παρατηρηθούν και σε μεμονωμένες κα-



Σχήμα 1.36: Αστοχία επιχώματος λόγω ρευστοποίησης. Συνδυασμός ισχυρών αδρανειακών σεισμικών φορτίων και μηδενισμού της διατμητικής αντοχής στην υποκείμενη στρώση αμμούλος, η οποία ρευστοποιήθηκε (Σεισμός Tokachi-oki, Hokkaido, 26/09/2003,  $M_s = 8.3$ ).

τασκευές (κτίρια). Η έκταση και το εύρος των μετακινήσεων εξαρτάται από τον τύπο και τη γεωμετρία του ρήγματος, το μέγεθος του σεισμού, την τοπογραφία και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τεχνικού έργου.



Σχήμα 1.37: Κάμψη και μόνιμες παραμορφώσεις σιδηροδρομικής γραμμής λόγω δευτερογενούς επιφανειακής διάρρηξης ρήγματος (Σεισμός Chi-Chi, 21/09/1999,  $M_s = 7.6$ ).

### 1.2.10 Αστοχίες θεμελιώσεων

Στις περισσότερες περιπτώσεις αστοχίας επιφανειακών θεμελιώσεων οι βλάβες είναι δύσκολο να εντοπισθούν καθώς είναι περιορισμένης έκτασης, ενώ δεν



Σχήμα 1.38: Τυπική αστοχία επιφανειακής θεμελίωσης σε συνδυασμό με μερική ρευστοποίηση (Σεισμός Kocaeli, 17/08/1999,  $M_w = 7.4$ ).

μπορεί πάντα να προσδιοριστεί επακριβώς ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύχθηκε. Κάποιες εντυπωσιακές μορφές αστοχίας επιφανειακών θεμελιώσεων έχουν παρατηρηθεί στην περίπτωση ρευστοποίησης του υπεδάφους θεμελίωσης ενός έργου, όπως στην περίπτωση που εικονίζεται στο Σχ.1.38.

Στην περίπτωση των βαθιών θεμελιώσεων, οι βασικοί μηχανισμοί αστοχίας, που έχουν παρατηρηθεί με βάση ιστορικά περιστατικά σεισμικής απόκρισης, μπορούν να συνοψιστούν στους παρακάτω:

- Μείωση ή ακόμα και απώλεια πλευρικής εδαφικής στήριξης κυρίως λόγω ρευστοποίησης χαλαρών αμμωδών εδαφικών σχηματισμών (Σχ.1.39)
- Υπέρβαση διατμητικής αντοχής πασσάλου λόγω της συγκέντρωσης σημαντικών διατμητικών τάσεων σε θέσεις διεπιφανειών έντονης μεταβολής της εδαφικής δυσκαμψίας (Σχ.1.40α)
- Υπέρβαση οριακού οριζόντιου φορτίου με την ανάπτυξη σημαντικών εδαφικών παραμορφώσεων κατά την πλευρική εξάπλωση ρευστοποιήσιμων εδαφικών σχηματισμών (Σχ.1.40β)
- Μείωση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων λόγω μείωσης της πλευρικής τριβής εξαιτίας της μείωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Δεδομένου δε ότι κατά τη δυναμική αδρανειακή φόρτιση οι πάσσαλοι λειτουργούν στιγμιαία και ως στοιχεία αγκύρωσης που αντιστέκονται στην ανατροπή, η μείωση της πλευρικής τριβής μπορεί να οδηγήσει σε εξόλκευση του πασσάλου και σε ανατροπή του κτιρίου (Σχ.1.41).



Σχήμα 1.39: (α) Απώλεια πλευρικής στήριξης εδάφους (δημιουργία κενού μεταξύ πασσάλου - εδάφους) και (β) Καμπτική αστοχία κεφαλής πασσάλου (Σεισμός Loma Prieta, 1989).

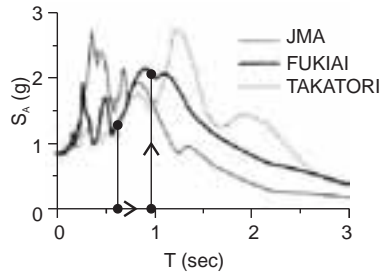


Σχήμα 1.40: (α) Διατμητική αστοχία πασσάλων ως αποτέλεσμα της έντονης εδαφικής διαστρωμάτωσης και (β) Αστοχία πασσάλων λόγω πλευρικής εξάπλωσης ρευστοποιήσιμου εδαφικού σχηματισμού (Σεισμός Kobe, 1995).

Σε κάθε περίπτωση δεν θα πρέπει να αγνοείται και ο ρόλος της αλληλεπίδρασης εδάφους - πασσαλοθεμελίωσης - ανωδομής, εξαιτίας της οποίας διαφοροποιείται τόσο η σεισμική κίνηση εισαγωγής στη βάση της ανωδομής, όσο και ο βαθμός κατά τον οποίο η εδαφική ενδοσιμότητα μεταβάλλει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Η επιρροή αυτή, παρόλο που θεωρείται γενικά ευνοϊκή σε επίπεδο αναπτυσσόμενης έντασης για την ανωδομή, θα πρέπει να συσχετίζεται και με το αντίστοιχο φάσμα απόκρισης, δεδομένου ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες εδαφικής διαστρωμάτωσης, ιδιοπεριόδου συστήματος κατασκευής - θεμελίωσης και συχνοτικού περιεχομένου σεισμικής διέγερσης, το σεισμικό φορτίο που τελικά θα ασκηθεί στην ανωδομή είναι δυνατό να προκύψει δυσμενέστερο έναντι της θεώρησης πλήρους πάκτωσης της κατασκευής (Σχ.1.42).



Σχήμα 1.41: Απώλεια φέρουσας ικανότητας πασσαλοθεμελίωσης σε πλευρική τριβή (Σεισμός Michoacan, 1985).



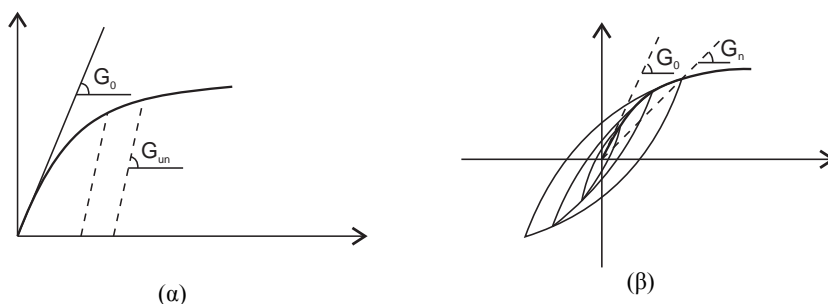
Σχήμα 1.42: Δυσμενής επιρροή αλληλεπίδρασης σε επίπεδο αύξησης του σεισμικού φορτίου: (Α) Θεώρηση απλής πάκτωσης, (Β) Αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος λόγω της αλληλεπίδρασης και της ενδοσιμότητας του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του επιβαλλόμενου φορτίου σε υψηλότερες φασματικές τιμές. (Σεισμός Kobe, 1995 - Gazetas and Mylonakis, 1998)

### 1.3 Ανασκόπηση βασικών εννοιών

Μετά την προηγηθείσα ανασκόπηση με βάση αστοχίες που παρατηρήθηκαν σε τεχνικά έργα από διάφορους σεισμούς, στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται οι βασικές έννοιες προκειμένου να είναι εύκολη η συνέργια των εννοιών και η εσωτερική τους διασύνδεση.

Η **Τεχνική Σεισμολογία** και η **Εδαφοδυναμική** είναι δύο βασικά γνωστικά αντικείμενα που ως κεντρικό στόχο έχουν την εκτίμηση, δια μέσου και της μελέτης της **Σεισμικής Απόκρισης των Εδαφικών Σχηματισμών**, αφενός μεν των παραμέτρων σχεδιασμού των κατασκευών, που εν συντομία θα αναφέρεται στο εξής ως «**σεισμός σχεδιασμού**», αφετέρου δε τη **δυναμική συμπεριφορά**





Σχήμα 1.43: Στατικές και ανακυκλικές φορτίσεις εδαφών.

των εδαφών και κυρίως τη διατμητική τους αντοχή και τις συνακόλουθες μόνιμες παραμορφώσεις σε ισχυρές σεισμικές φορτίσεις. Η **Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική** ως υπερσύνολο των παραπάνω αντικειμένων αναφέρεται επίσης και στη μελέτη και τον αντισεισμικό σχεδιασμό θεμελιώσεων, αντιστηρίξεων, πρανών, επιχωμάτων-αναχωμάτων, υπόγειων κατασκευών αγωγών και σπράγγων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίδεται στο θέμα της **δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής**, που επηρεάζει αποφασιστικά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Ο ανά χείρας τόμος της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής αναφέρεται στα τρία πρώτα αντικείμενα της Εδαφοδυναμικής και της Τεχνικής Σεισμολογίας.

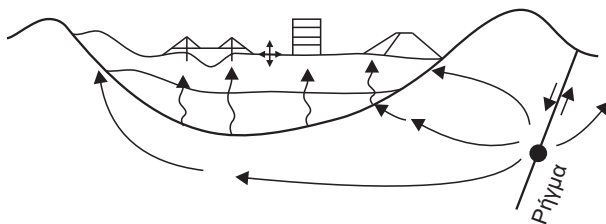
#### Ειδοποιός διαφορά της Εδαφοδυναμικής και της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής από την Εδαφομηχανική και την κλασική Γεωτεχνική Μηχανική

Η ειδοποιός διαφορά της εδαφοδυναμικής από την εδαφομηχανική και κατ' επέκταση της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής από την κλασική γεωτεχνική μηχανική, είναι η ανάγκη συνυπολογισμού στις δρώσες δυνάμεις των αδρανειακών δυνάμεων, καθώς και ο δυναμικός χαρακτήρας των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Η γενική εξίσωση της δυναμικής έχει την ακόλουθη μορφή:

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = F(t) \quad (1.1)$$

Στη στατική οι δύο πρώτοι όροι που περιλαμβάνουν τη μάζα  $m$  και την απόσβεση  $c$  δεν υπάρχουν, ενώ η εξωτερική δύναμη  $F$  δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο.

Η επόμενη σημαντική διαφορά έγκειται στον ανακυκλικό δυναμικό χαρακτήρα του καταστατικού νόμου που περιγράφει τη συμπεριφορά των εδαφών σε δυναμικές ανακυκλικές φορτίσεις (Σχ.1.43).



Σχήμα 1.44: Σχηματική διάδοση της σεισμικής ενέργειας με τη μορφή σεισμικών ελαστικών κυμάτων από την πηγή (ρήγμα) έως την υπό μελέτη κατασκευή.

### Τεχνική Σεισμολογία

Στα πλαίσια της Τεχνικής Σεισμολογίας και συγκεκριμένα στο Κεφ. 2 περιγράφονται εν συντομία τα αίτια και ο μηχανισμός γένεσης των σεισμών. Γίνεται αναφορά στα είδη των σεισμικώς ενεργών ρηγμάτων και στα σεισμικά κύματα που μεταφέρουν την απελευθερωθείσα από τη θραύση σεισμική ενέργεια. Περιγράφονται οι βασικές αρχές των οργάνων (σεισμογράφοι και επιταχυνσιογράφοι) που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ασθενούς και της ισχυρής εδαφικής ταλάντωσης και αναλύονται οι διάφοροι τρόποι και οι μέθοδοι με τις οποίες η σύγχρονη επιστήμη περιγράφει, ποσοτικά και ποιοτικά, την ένταση και τα χαρακτηριστικά του σεισμικού κραδασμού, από τον σεισμογόνο χώρο μέχρι την κατασκευή που μελετάται (Σχ.7.1).

Στο Κεφ. 3 και πάντοτε στα πλαίσια του γενικού κεφαλαίου της Τεχνικής Σεισμολογίας γίνεται συστηματική περιγραφή διαφόρων θεμάτων που αναφέρονται στην ισχυρή εδαφική κίνηση, η οποία ενδιαφέρει πρωτίστως τη σεισμική μηχανική και τον πολιτικό μηχανικό. Κύριο αντικείμενο του σχετικού κεφαλαίου είναι η ανάλυση και η περιγραφή της σεισμικής δόνησης στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων, και η συστηματική επεξήγηση των φασμάτων ελαστικής απόκρισης που αποτελούν τη βάση του σεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών. Οι διαθέσιμες εμπειρικές σχέσεις εξασθένησης της σεισμικής έντασης με την απόσταση, που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας και του σεισμού σχεδιασμού, αποτελούν επίσης αντικείμενο του κεφαλαίου της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Αξίζει να σημειωθεί με εμφαντικό τρόπο ότι η ισχυρή εδαφική κίνηση εξαρτάται όχι μόνο από την ένταση και τα χαρακτηριστικά του σεισμού, όπως περιγράφονται στην πηγή, δηλαδή στο σεισμικό ρήγμα ή γενικότερα στον σεισμογόνο χώρο, αλλά και από τα χαρακτηριστικά της διαδρομής.

Στο Κεφ. 4 δίνονται οι έννοιες που περιγράφουν τη σεισμικότητα μιας περιοχής και γίνεται συστηματική αναφορά στη σεισμικότητα του Ελληνικού χώρου,

που αποτελεί τη βάση αναφοράς του αντισεισμικού κανονισμού. Στη συνέχεια αναλύονται οι έννοιες της σεισμικής επικινδυνότητας και της σεισμικής διακινδύνευσης και περιγράφονται οι μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας που ουσιαστικά καταλήγουν στην εκτίμηση της σεισμικής επιτάχυνσης σχεδιασμού σε κάθε περιοχή και θέση ενδιαφέροντος.

### **Ελαστικά κύματα**

Η σεισμική ενέργεια διαδίδεται στον χώρο σε γενικές γραμμές με τη μορφή ελαστικών κυμάτων χώρου και επιφανείας. Η γνώση των βασικών αρχών που διέπουν τη φυσική των ελαστικών κυμάτων είναι θεμελιώδους σημασίας στην εδαφοδυναμική, την τεχνική σεισμολογία και τη γεωτεχνική σεισμική μηχανική. Είναι επίσης προφανές ότι η πειραματική εδαφοδυναμική και η κατασκευή του σχετικού εργαστηριακού εξοπλισμού στηρίζονται εξ ολοκλήρου στη θεωρία διάδοσης ελαστικών κυμάτων. Το ίδιο ισχύει και για τις πειραματικές διατάξεις δοκιμών στο πεδίο, όπως είναι για παράδειγμα οι δοκιμές σεισμικής διάθλασης, ανάκλασης ή οι δοκιμές εντός γεωτρήσεων. Τέλος, όλα τα όργανα μέτρησης της εδαφικής ταλάντωσης, όπως είναι οι σειсмоγράφοι, ταχυτογράφοι και επιταχυνσιογράφοι, βασίζονται εξ ολοκλήρου στη θεωρία των ελαστικών κυμάτων.

Στο Κεφ. 5 λοιπόν παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της κυματομηχανικής από τη σκοπιά των ελαστικών κυμάτων και της διάδοσης αυτών σε εδαφικούς σχηματισμούς.

### **Εδαφοδυναμική**

Η Εδαφοδυναμική (Κεφ. 6) ασχολείται με τη μελέτη της μηχανικής και δυναμικής συμπεριφοράς του εδάφους σε ανακυκλιζόμενες δυναμικές φορτίσεις. Τα θέματα που θα μας απασχολήσουν είναι τα εξής:

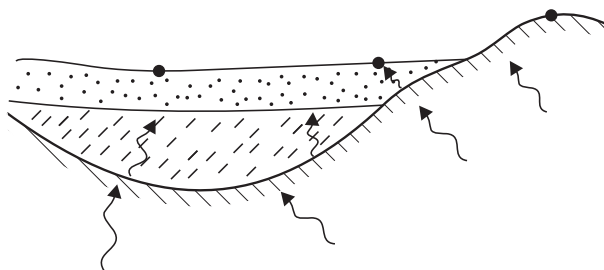
- Καταστατικοί νόμοι τάσεων-παραμορφώσεων που περιγράφουν για παράδειγμα τη μεταβολή των ορθών και των διατμητικών τάσεων με την αντίστοιχη παραμόρφωση,  $\sigma - \varepsilon$  ή  $\tau - \gamma$ , την επιρροή του επιπέδου της παραμόρφωσης στην τιμή των ελαστικών μέτρων  $E$  και  $G$ , τη μεταβολή όγκου με την επιβαλλόμενη παραμόρφωση, τη μεταβολή της πίεσης των πόρων  $\Delta u$  με την παραμόρφωση  $\varepsilon$  ή  $\gamma$ , την εκτίμηση της εσωτερικής απόσβεσης των εδαφικών υλικών κ.λπ.
- Η διατμητική αντοχή των εδαφών σε ανακυκλικές ισχυρές δονήσεις. Με την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής και των μεγάλων κυρίως μόνιμων παραμορφώσεων συνδέονται κατ'εξοχήν και τα θέματα της ρευστοποίησης των χαλαρών λεπτόκοκκων κορεσμένων αμμωδών εδαφών, η οποία καλύπτει ένα σημαντικό μέρος του Κεφ. 6.

- Δοκιμές πεδίου και εργαστηριακές μέθοδοι για την εκτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων και παραμέτρων του εδάφους.

Η δυναμική συμπεριφορά του εδαφικού στοιχείου κατά την ανακυκλική φόρτιση καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής δόνησης στην επιφάνεια του εδάφους που ενδιαφέρει πρωτίστως τον μηχανικό. Προσδιορίζει επίσης τα σεισμικά φορτία που σε συνδυασμό με τη διατμητική αντοχή, καθορίζουν την ευστάθεια των γεωκατασκευών.

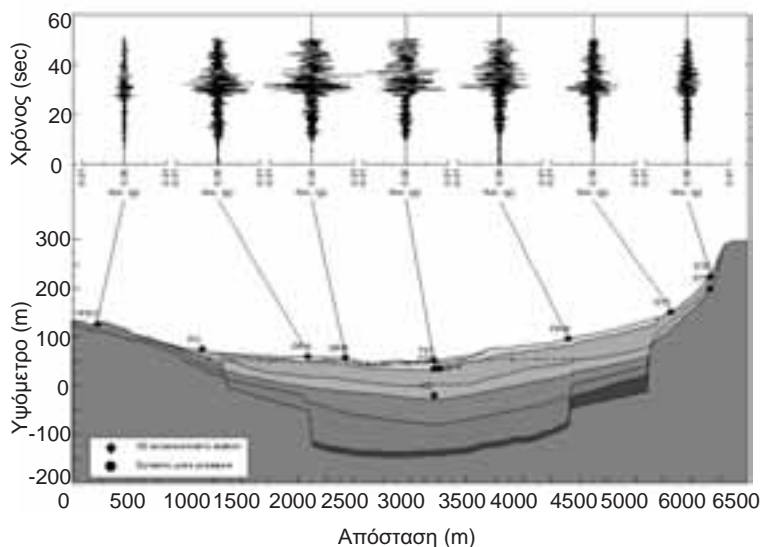
### Σεισμική απόκριση εδαφικών σχηματισμών

Με τον όρο σεισμική απόκριση των εδαφικών σχηματισμών εννοούμε ουσιαστικά την εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται η σεισμική δόνηση (ένταση, πλάτος, συχνοτικό περιεχόμενο και διάρκεια) από το βραχώδες υπόβαθρο μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Με άλλα λόγια η εδαφική ταλάντωση στα σημεία Α, Β και Γ (έξαρση του βραχώδους υποβάθρου) του Σχ.1.45 θα είναι διαφορετική, και τις διαφορές αυτές θα πρέπει όχι μόνο να τις κατανοήσουμε ως φυσικό φαινόμενο, αλλά αν είναι δυνατόν να τις περιγράψουμε και να τις εκτιμήσουμε. Η τοπογραφία της επιφάνειας, η γεωμετρία των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών και του υποβάθρου, οι γεωλογικές ασυνέχειες, η αντίθεση (λόγος) των ταχυτήτων με τις οποίες διαδίδονται τα διάφορα σεισμικά κύματα στα διάφορα εδαφικά στρώματα, η μη γραμμική ανελαστική συμπεριφορά των εδαφών (δηλαδή τα αντικείμενα και το περιεχόμενο της εδαφοδυναμικής), όλα αυτά επηρεάζουν την τελική ταλάντωση σε κάθε σημείο του χώρου.



Σχήμα 1.45: Γιατί η σεισμική δόνηση διαφέρει στα σημεία Α, Β και Γ;

Γιατί όμως η εδαφική ταλάντωση, όπως εκφράζεται σε όρους επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετάθεσης (με τη μορφή χρονοϊστοριών και φασμάτων Fourier ή ελαστικής απόκρισης), είναι διαφορετική στον βράχο και στο μαλακό έδαφος; Πού οφείλονται οι διαφορές που βλέπουμε πολύ παραστατικά στις καταγραφές



Σχήμα 1.46: Καταγραφές στο δίκτυο του EUROSEISTEST από τον σεισμό της Κοζάνης (13/05/1996). Ενδεικτική η σημαντική διαφοροποίηση του σεισμικού κραδασμού στον βράχο και στις αλλουβιακές αποθέσεις στο εσωτερικό της κοιλάδας.

ενός μακρινού σεισμού (Κοζάνη 1996,  $M = 6.5$ ), άρα χωρίς οποιαδήποτε επιρροή του μηχανισμού διάρρηξης στην «πηγή», στο δίκτυο του EUROSEISTEST (<http://euroseis.civil.auth.gr>) (Σχ.1.46); Η κύρια αιτία είναι η «παγίδευση» των σεισμικών κυμάτων στα επιφανειακά χαλαρά στρώματα και η σημαντική αντίθεση των ταχυτήτων μεταξύ των επιφανειακών και των βαθύτερων στρωμάτων. Το πρόβλημα αυτό θα μελετηθεί ενδελεχώς στο Κεφ. 7, όπου επίσης θα δοθούν και συγκεκριμένες μέθοδοι εκτίμησης καθώς και το σχετικό πλαίσιο κανονισμών.

Γενικά το θέμα αυτό της σεισμικής απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών και των σύνθετων γεωλογικών δομών, και συγκεκριμένα αφενός μεν η κατανόηση του φυσικού φαινομένου, αφετέρου δε η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των διαφορών, που αντικατοπτρίζονται άμεσα και στα φάσματα του Κανονισμού, είναι ένα από τα σημαντικότερα και πλέον ενδιαφέροντα θέματα της Εδαφοδυναμικής και της Τεχνικής Σεισμολογίας (Κεφ. 7).

### Ο ρόλος των τοπικών εδαφικών συνθηκών

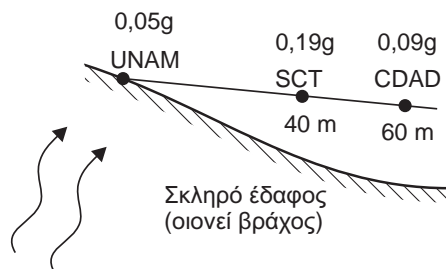
Η εδαφική κίνηση σε οποιοδήποτε σημείο του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού κραδασμού εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

- τον μηχανισμό διάρρηξης του ρήγματος (πηγή), δηλαδή τα χαρακτηριστικά του σειсмоγόνου χώρου και του ίδιου του σεισμού.
- τη διαδρομή των σεισμικών κυμάτων (διαδρομή), ουσιαστικά δηλαδή την απόσταση από την πηγή αλλά και θέματα αζιμούθιου και μη ισότροπης διάδοσης της σεισμικής ενέργειας στον χώρο.
- τις τοπικές εδαφικές συνθήκες (έδαφος), δηλαδή το είδος και τη γεωμετρία των εδαφικών αποθέσεων, τα δυναμικά χαρακτηριστικά, καθώς και την τοπική γεωλογία και τοπογραφία.

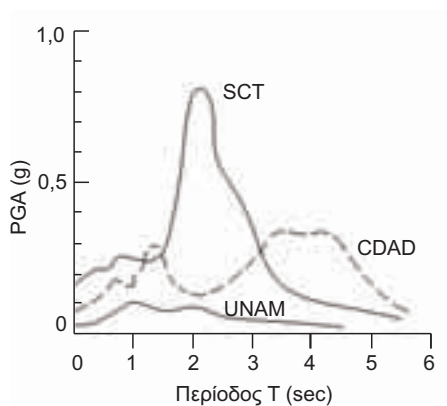
Ο ρόλος των τοπικών εδαφικών συνθηκών δεν εξαντλείται στην εκτίμηση της εδαφικής ταλάντωσης. Αντιθέτως είναι σημαντικός και σε όλα τα θέματα που σχετίζονται με τη ρευστοποίηση, τη μεταβολή της διατμητικής αντοχής του εδάφους (συνήθως μείωση), τις μόνιμες παραμορφώσεις λόγω συμπύκνωσης των χαλαρών εδαφών, κατολίσθησης ή ακόμα και στην περίπτωση διασταύρωσης με σεισμικό ρήγμα. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στα θέματα αυτά δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Χαρακτηριστικότερη περίπτωση είναι η μείωση των εδαφικών επιταχύνσεων (και η ταυτόχρονη αύξηση των ταχυτήτων και μεταθέσεων) στη επιφάνεια εδαφικών αποθέσεων που βρίσκονται σε διαδικασία ρευστοποίησης. Εδάφη που έχουν υποστεί ρευστοποίηση και έχει παρέλθει ικανός χρόνος για την πλήρη εκτόνωση του φαινομένου είναι δυνατόν να έχουν αρκετά διαφορετική συμπεριφορά σε μελλοντικούς σεισμούς, λόγω σχετικής συμπύκνωσης και φυσικά της πιθανώς διαφορετικής έντασης του σεισμού.

Το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα σημαντικής και ουσιώδους επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών καταγράφηκε για πρώτη φορά με απολύτως αξιόπιστο τρόπο κατά τον σεισμό του Michoacan, 1985 στην Πόλη του Μεξικού ( $M_s = 8.1$ ,  $R = 400\text{km}$ ). Όπως φαίνεται στα Σχ.1.47 και 1.48 οι επιταχύνσεις και τα φάσματα ελαστικής απόκρισης ήταν τελείως διαφορετικά στη λιμναία ζώνη όπου επικρατούν οι πολύ μαλακοί μικρής δεσμησίας εδαφικοί σχηματισμοί (μαλακή άργιλος με  $W > 300\%$  και  $V_s < 100\text{m/s}$ ), σε αντίθεση με τη λοφώδη περιοχή των σκληρών εδαφών. Στη λιμναία ζώνη καταγράφηκαν επιταχύνσεις μέχρι και τέσσερις φορές υψηλότερες από τη λοφώδη περιοχή και γενικά η μεγέθυνση της εδαφικής κίνησης στις λιμναίες αποθέσεις, (χαλαρές άμμοι, μαλακή άργιλος), ήταν εξαιρετικά μεγάλη σε σχέση με τα σκληρά εδάφη.

Αποτέλεσμα αυτών των εδαφικών συνθηκών ήταν η άνιση κατανομή της έντασης στις αντίστοιχες περιοχές. Παρατηρήθηκαν δηλαδή και καταγράφηκαν έντονες διαφορές στο μέγεθος και την κατανομή των ζημιών σε διάφορες θέσεις της πόλης (Σχ.1.49), και μάλιστα με πολύ διαφορετικό τρόπο σε διαφορετικού

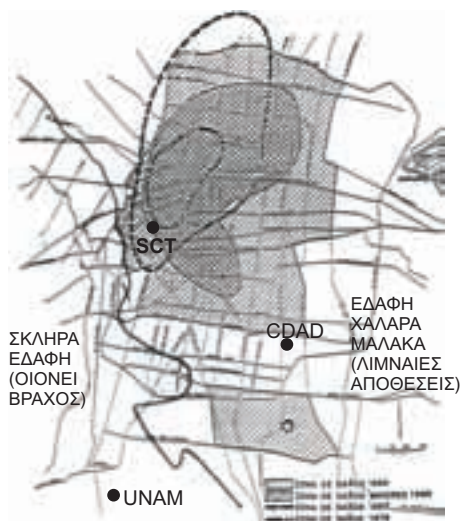


Σχήμα 1.47: Ενδεικτική εδαφική τομή στην Πόλη του Μεξικού και καταγραφές κορυφαίων επιταχύνσεων από μακρινό σεισμό ( $R > 400\text{km}$ ) όπου δεν υπάρχει σημαντική επιρροή της «πηγής» και της «διαδρομής».



Σχήμα 1.48: Ελαστικά φάσματα επιτάχυνσης σε τρεις χαρακτηριστικές θέσεις. Χαρακτηριστική η εξαιρετικά μεγάλη ενίσχυση σε μεγάλες περιόδους (που συμπίπτουν με την ιδιοπερίοδο του εδάφους στη συγκεκριμένη περιοχή) ειδικά στη θέση SCT.

ύψους, και κατά συνέπεια ιδιοπερίοδου, κατασκευές. Οι έντονες ζημιές παρατηρήθηκαν κυρίως σε κτίρια με μεγάλο αριθμό ορόφων και μεγάλη ιδιοπερίοδο ( $1.2 < T < 2.0$ ). Κτίρια με 4-5 ορόφους στην ίδια περιοχή παρουσίασαν σαφέστατα μικρότερες ζημιές. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει με τον πλέον εμφαντικό τρόπο τη σημασία του διπλού συντονισμού – ιδιοπερίοδου κατασκευής και σεισμικού κραδασμού - στην ένταση, το είδος και την κατανομή των αστοχιών σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Στο Σχ.1.50 δίνονται μερικές εικόνες από τις αστοχίες σε υψηλόροφα κτίρια.



Σχήμα 1.49: Κατανομή της σεισμικής έντασης στην πόλη του Μεξικού στον σεισμό του 1985 και σε προηγούμενο.



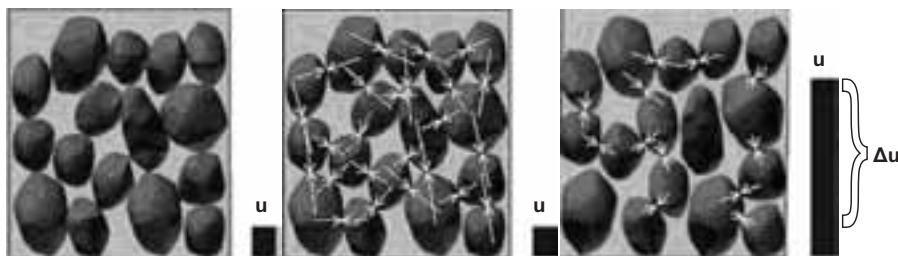
(α)



(β)

Σχήμα 1.50: Ζημιές στην Πόλη του Μεξικού από τον σεισμό του Michoacan, 1985.





Σχήμα 1.51: Μηχανισμός του φαινομένου της ρευστοποίησης (εδάφη SM-ML)

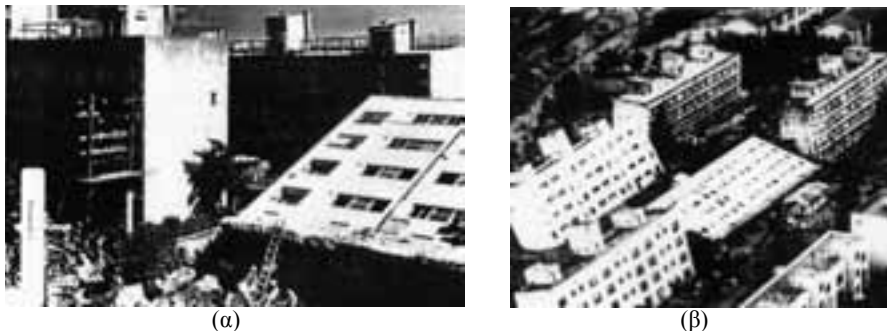
### Ρευστοποίηση

Ρευστοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία κορεσμένα μη - συνεκτικά εδάφη χάνουν τη διατμητική αντοχή τους λόγω αύξησης της πίεσης του νερού των πόρων, κατά τη διάρκεια ισχυρής σεισμικής διέγερσης. Εδάφη επιδεκτικά σε ρευστοποίηση είναι χαλαρές κορεσμένες λεπτόκοκκες άμμοι κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης, με μικρό ενδεχομένως ποσοστό ιλύος. Ο μηχανισμός της ρευστοποίησης περιλαμβάνει αρχικά την ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων  $u$  λόγω της σεισμικής κίνησης, καθώς υπάρχει αδυναμία μεταβολής του όγκου, εξαιτίας των αστράγγιστων συνθηκών που επικρατούν σε μια σεισμική δόνηση διάρκειας μερικών δεκάδων δευτερολέπτων. Η υπερπίεση προκαλεί τη σχετική απομάκρυνση των κόκκων του εδάφους του ενός σε σχέση με τους διπλανούς του (Σχ.1.51), με αποτέλεσμα τη μείωση της επιφάνειας επαφής μεταξύ τους και στην περίπτωση μηδενικής συνοχής  $c$ , τη μερική ή ολική απώλεια της διατμητικής τους αντοχής  $\tau_f$ , όπως μπορεί να περιγραφεί από τη γνωστή σχέση Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \tan \phi \quad (1.2)$$

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη ρευστοποίησης είναι η φόρτιση του εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες, οπότε είναι αδύνατη η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων, ενώ η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ( $> 12 - 15\text{sec}$ ). Όταν συμβεί ρευστοποίηση, το έδαφος συμπεριφέρεται για μικρό χρονικό διάστημα (μερικά λεπτά) ως βαρύ ρευστό με μηδαμινή διατμητική αντοχή.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών (Σχ.1.52) παρατηρήθηκαν και μελετήθηκαν για πρώτη φορά με πολύ συστηματικό τρόπο στη Niigata της Ιαπωνίας (16/06/1964,  $M_s = 7.5$ ), σε μία περιοχή όπου οι χαλαρές δελταϊκές αποθέσεις ρευστοποιήθηκαν σε μεγάλη έκταση.



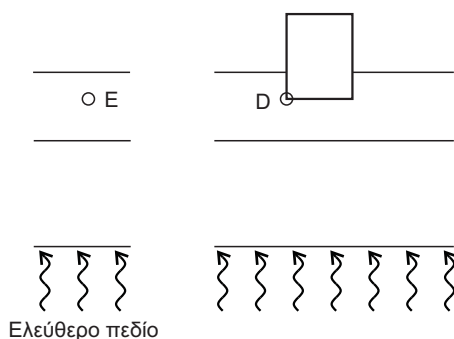
Σχήμα 1.52: Χαρακτηριστικές αστοχίες στη Niigata, Ιαπωνία (1964). Μηδενισμός της διατμητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης λόγω ρευστοποίησης, οδήγησε σε απώλεια της φέρουσας ικανότητας του εδάφους και κατά συνέπεια στη «βύθιση» και ανατροπή των σχετικώς άκαμπτων κτιρίων, λόγω και της περίπου σύγχρονης δράσης των αδρανειακών σεισμικών φορτίων.

### Αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής

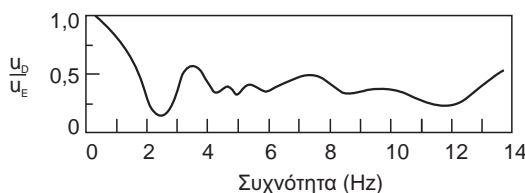
Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται σήμερα για τον αντισεισμικό σχεδιασμό τεχνικών έργων λαμβάνει υπόψη ένα σεισμικό φορτίο που έχει προκύψει με τη θεώρηση συνθηκών «ελεύθερου πεδίου» στην επιφάνεια του εδάφους. Με τον όρο «ελεύθερο πεδίο» χαρακτηρίζεται μια θέση αναφοράς της σεισμικής κίνησης η οποία είναι αρκούτως απομακρυσμένη από οποιαδήποτε κατασκευή, ώστε η καταγραφή της να μπορεί να θεωρηθεί ανεπηρέαστη από την ταλάντωση της κατασκευής. Με βάση τη στατιστική επεξεργασία παρόμοιων μετρήσεων, καθώς και πολλές θεωρητικές αναλύσεις, έχουν προκύψει τα φάσματα απόκρισης των σύγχρονων Αντισεισμικών Κανονισμών, τα οποία εν συνεχεία χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό κτιρίων ή άλλων τεχνικών έργων.

Αυτό όμως που στην πραγματικότητα συμβαίνει είναι πως η κίνηση ελεύθερου πεδίου μεταβάλλεται με την παρουσία μιας κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους. Πράγματι το ενδόσιμο γενικά έδαφος τείνει να παραμορφωθεί με τρόπο διαφορετικό από αυτόν που δύναται να παρακολουθήσει η θεμελίωση μιας κατασκευής, ενώ η ταλάντωση της κατασκευής με τη σειρά της επιβάλλει πρόσθετες μετακινήσεις στο έδαφος όπου εδράζεται, και οι οποίες δεν υπήρχαν στο ελεύθερο πεδίο. Το φαινόμενο κατά το οποίο λαμβάνει χώρα μεταβολή της αρχικής κίνησης ελεύθερου πεδίου λόγω της ύπαρξης και της απόκρισης κάποιας κατασκευής, αποδίδεται περιληπτικά με τον όρο αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής.

Η αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής μπορεί να διαχωριστεί απλοποιητικά στα παρακάτω δυο στάδια:



Σχήμα 1.53: Διαφοροποίηση του σεισμικού κραδασμού στη στάθμη της θεμελίωσης σε σχέση με συνθήκες «ελεύθερου πεδίου» λόγω αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής.



Σχήμα 1.54: Λόγος μετακινήσεων στο φυσικό έδαφος (σημείο E) και στη θεμελίωση (σημείο D) κατά την οριζόντια ταλάντωση (αναλυτική μελέτη).

1. Κατά την ανάδυση των σεισμικών κυμάτων προς την επιφάνεια, η κατασκευή επιπονείται λόγω των επιβαλλόμενων σε αυτήν παραμορφώσεων του εδάφους. Ασφαλώς η κίνηση που εισάγεται στην κατασκευή είναι διαφοροποιημένη από την κίνηση ελεύθερου πεδίου λόγω της δυσκαμψίας της θεμελίωσης, που αδυνατεί να παρακολουθήσει τις παραμορφώσεις του ελεύθερου πεδίου, και της ενδοσιμότητας του εδάφους.
2. Ακολούθως η ταλάντωση της κατασκευής δημιουργεί με τη σειρά της αδρανειακές δυνάμεις και ροπές που επιβάλλουν πρόσθετη δυναμική φόρτιση στο έδαφος. Τα δύο αυτά φαινόμενα είναι συζευγμένα.

Τα αποτελέσματα της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους και κατασκευής εκδηλώνονται κυρίως με την αύξηση της ιδιοπεριόδου των κατασκευών και τη διαφοροποίηση του σεισμικού κραδασμού στη στάθμη της θεμελίωσης. Η κίνηση  $[u(t) - \dot{u}(t) - \ddot{u}(t)]$  του σημείου D στη διεπιφάνεια θεμελίου - εδάφους (Σχ. 1.53) είναι διαφορετική από την κίνηση του σημείου E στο ίδιο βάθος αλλά σε συνθήκες «ελεύθερου πεδίου» χωρίς την κατασκευή. Το γεγονός αυτό φαίνεται καθαρά

στο Σχ.1.54 όπου δίνεται ο λόγος των δύο μετακινήσεων συναρτήσει της συχνότητας. Η μετακίνηση στο κτίριο είναι πάντοτε μικρότερη από αυτήν του ελεύθερου πεδίου και μάλιστα σε κάποιες συχνότητες τείνει σε ιδιαίτερες χαμηλές τιμές.

## 1.4 Κατάλογος ιστοσελίδων

Δίνεται μια σειρά διευθύνσεων στο διαδίκτυο που παρέχουν διάφορες πληροφορίες σε σχέση με τους σεισμούς. Ανά θεματική ενότητα δίνονται ενδεικτικές ιστοσελίδες. Κατά κανόνα όμως υπάρχουν κάποια μεγαλύτερα web sites που αναφέρονται στη Σεισμική Μηχανική (Earthquake Engineering) και στα οποία μπορεί κανείς να αναζητήσει πληροφορίες για κάθε σχεδόν θέμα, φωτογραφίες, άρθρα κ.ά. Επίσης πολύ χρήσιμοι είναι οι υπερσύνδεσμοι των διαφόρων σελίδων που οδηγούν σε νέες διευθύνσεις με ακόμη περισσότερες λεπτομέρειες. Εναλλακτικός τρόπος αναζήτησης πληροφοριών επί συγκεκριμένου θέματος είναι η χρήση μιας μηχανής αναζήτησης στο Διαδίκτυο (προτείνεται το <http://www.google.com>) και η πληκτρολόγηση κάποιων λέξεων-όρων κλειδιά τα οποία αναφέρονται στο ζητούμενο θέμα.

### Earthquake Engineering (Σεισμική Μηχανική)

- Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering (ITΣAK – Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών) (<http://www.itsak.gr>)
- Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) (<http://www.oasp.gr>)
- Center for Earthquake Research and Information (ERI) (Research center at the University of Memphis - <http://www.ceri.memphis.edu>)
- National Information Service for Earthquake Engineering (NISEE) (<http://nisee.berkeley.edu>)
- Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER) (<http://mceer.buffalo.edu/>)
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI) (<http://www.eeri.org>)
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (<http://www.fema.gov>)
- Southern California Earthquake Center (<http://www.scec.org>)

- International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (<http://iisee.kenken.go.jp/net/>)
- Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) (<http://peer.berkeley.edu/>)
- U.S. Geological Survey (<http://www.usgs.gov/>)
- Association française du génie parasismique (AFPS) (<http://www.afps-seisme.org/>)

#### **Geotechnical Earthquake Engineering (Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική)**

- Civil Engineering Portal ([www.civilengineering.gr](http://www.civilengineering.gr))
- Geotechnical Earthquake Engineering Server (<http://gees.usc.edu/GEES>)
- California Geological Survey (<http://www.consrv.ca.gov/CGS/index.htm>)
- Geosengineer (<http://www.geosengineer.org>)
- International centre for geohazards (NGI) (<http://www.geohazards.no/>)

#### **Liquefaction (Ρευστοποίηση)**

- DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Liquefaction Hazards in California (<http://www.scec.org/resources/catalog/hazardmitigation.html#liq>)
- Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation (<http://nisee.berkeley.edu/library/seed/>)

#### **Landslides (Κατολισθήσεις)**

- DMG Special Publication 117: Guidelines for Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California (<http://www.scec.org/resources/catalog/hazardmitigation.html#liq>)

#### **Near Fault Effects (Συνθήκες Κοντινού Πεδίου)**

- Dr. Norman Abrahamson, "Incorporating Effects of Near Fault Tectonic Deformation into Design Ground Motions" (<http://civil.eng.buffalo.edu/webcast/abrahamson>)

**Seismic Hazard (Σεισμική Επικινδυνότητα)**

- Geologic Hazards Team (<http://geohazards.cr.usgs.gov/>)
- World Earthquake Information by Country/Region (<http://earthquake.usgs.gov/regional/world.php?>)
- California Geological Survey (<http://www.consrv.ca.gov/CGS>)

**Seismicity Data – Recordings (Στοιχεία σεισμικότητας - Καταγραφές)**

- National Strong-Motion Project (NSMP) (<http://agram.wr.usgs.gov>)
- PEER Strong Motion Database (<http://peer.berkeley.edu/smcat/>)
- COSMOS Virtual Data Center (<http://db.cosmos-eq.org/>)
- European Strong-Motion Database (<http://www.isesd.hi.is/>)
- Digital Strong-Motion Seismograph Network (<http://www.kik.bosai.go.jp/>)
- Significant Earthquake Database (<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml>)
- International Seismological Centre/ISC ([www.isc.ac.uk](http://www.isc.ac.uk))
- European-Mediterranean Seismological Centre/EMSC ([www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org))
- National Earthquake Information Centre/NEIC της U.S. Geological Survey/USGS (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>)
- National Institute of Geophysics and Volcanology/INGV ([www.ingv.it](http://www.ingv.it))
- Γεωδυναμικό Ινστιτούτο στο Αστεροσκοπείο Αθηνών ([www.gein.noa.gr](http://www.gein.noa.gr))
- Εργαστήριο Γεωφυσικής του ΑΠΘ (<http://geophysics.geo.auth.gr/>)

**Journals – Papers – Libraries (Περιοδικά – Άρθρα – Βιβλιοθήκες)**

- Μέντωρ – Σύστημα βιβλιοθηκών ΑΠΘ (<http://web.lib.auth.gr/>) για πρόσβαση σε πολυάριθμες ηλεκτρονικές πηγές με χρήση διαφόρων εργαλείων αναζήτησης
- Journal subscription management tool, SwetsWise (<http://www.swetswise.com/public/login.do>). Παρέχει ελεύθερη πρόσβαση σε πολυάριθμα περιοδικά με επιλογή login via IP authentication

- Journal of Earthquake Engineering (JEE) (<http://ejournals.wspc.com.sg/jee/jee.shtml>)
- Science Direct (Elsevier Publications) (<http://www.sciencedirect.com>)
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (<http://www.pubs.asce.org>)
- Interscience (Wiley) (<http://www.interscience.wiley.com>)
- Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER) (<http://peer.berkeley.edu/publications>)
- MCEER Bulletin (<http://mceer.buffalo.edu/publications/bulletin/default.asp>)

#### **Photos (Φωτογραφίες)**

- Photos of the San Francisco earthquake and fire (<http://www.sfmuseum.org/1906/photos.html>)
- Earthquake Image Information System (EQIIS) (<http://nisee.berkeley.edu/elibrary/>)
- The Jan T. Kozak Collection of historical earthquake slides (<http://nisee.berkeley.edu/kozak>)
- Exposure of the Genoa Fault, available by the Geoengineer website (<http://www.geoengineer.org/photos>)
- Earthquake Image Archives (<http://geot.civil.metro-u.ac.jp/archives/eq>)

#### **Recent Earthquakes - Earthquake Reconnaissance reports (Πρόσφατοι Σεισμοί - Αναγνωρίσεις)**

- Documenting Incidents of Ground Failure Resulting from the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, Online description and data of the geotechnical investigation (<http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari/index.html>)
- Reports of the GEER Association (Geo-engineering Extreme Events Reconnaissance):  
 $M_w = 6.6$  earthquake in Niigata-ken Chuetsu, Japan on October 23, 2004 ([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/))

Niigata-ken\_2004/IndexNiigata.htm)

$M_w = 6.6$  earthquake in Niigata - Chuetsu Oki, Japan, on July 16, 2007  
([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Japan\\_2007/Cover\\_Japan2007.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Japan_2007/Cover_Japan2007.html))

$M_w = 7.7$  earthquake in Bhuj, India on January 26, 2001  
([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Bhuj\\_2001/Cover\\_Bhuj.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Bhuj_2001/Cover_Bhuj.html))

$M_w = 7.1$  earthquake in Duzce, Turkey on November 12, 1999  
([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Duzce\\_1999/Cover\\_Duzce.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Duzce_1999/Cover_Duzce.html))

$M_s = 7.6$  earthquake in Chi-Chi, Taiwan on September 21, 1999  
([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Chi-Chi\\_1999/Cover\\_ChiChi.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Chi-Chi_1999/Cover_ChiChi.html))

$M_s = 7.8$  earthquake in Kocaeli, Turkey on August 17, 1999  
([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Kocaeli\\_1999/Cover\\_Kocaeli.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Kocaeli_1999/Cover_Kocaeli.html))

$M_w = 6.3$  earthquake in L'Aquila, Italy, on April 6, 2009-09-30  
([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Italy\\_2009/Cover\\_Italy2009\\_Rev.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Italy_2009/Cover_Italy2009_Rev.html))

$M_w = 6.8$  earthquake in Nisqually, Washington on February 28, 2001  
([http://www.geerassociation.org/GEER\\_Post%20EQ%20Reports/Nisqually\\_2001/Cover\\_Nisqually.html](http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Nisqually_2001/Cover_Nisqually.html))

- Preliminary report on the geotechnical engineering aspects of the June 15 and June 21, 1999, Mexico, Earthquakes of the churches, J. M. Pestana, M. J. Mendoza, J. M. Mayoral, R. E. S. Moss, R.B. Sancio, R. B. Seed, J. D. Bray, and M. P. Romo ([http://nisee.berkeley.edu/mexico/geotech/central\\_mexico\\_earthquake.html](http://nisee.berkeley.edu/mexico/geotech/central_mexico_earthquake.html))
- Nisqually Earthquake of February 28, 2001 by Bray et al (<http://peer.berkeley.edu/publications/nisqually/geotech/index.html>)
- Catastrophe Reports (<http://www.absconsulting.com/catastropheReports.html>)

### General Information in Earthquake Engineering and Soil Dynamics (Γενικά Στοιχεία Σεισμικής Μηχανικής)

- Educational Geo-websites (<http://www.geoengineer.org/learnbyhy.html>)



- NISEE-2000-01, Introduction to Earthquake Engineering (<http://nisee.berkeley.edu/ebooks/SetJ.lit>) V. V. Bertero, available by the NISEE website (<http://nisee.berkeley.edu>)
- An excellent resource of papers on Ground motion ([http://www.slac.stanford.edu/~seryi/gm/gm\\_papers/](http://www.slac.stanford.edu/~seryi/gm/gm_papers/)), available by Stanford University.
- Biographical Memoir of Harry B. Seed (<http://www.nap.edu/readingroom/books/biomems/hseed.html>), written by James K. Mitchell. Available from the National Academy of Sciences website (<http://bob.nap.edu>)
- Earthquake effects & experiences, FAQ (<http://earthquake.usgs.gov/faq/effects.html>) published by the USGS.
- Worldwide Earthquake Locator (<http://www.geo.ed.ac.uk/quakexe/quakes>)
- Proceedings of the Eighth U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction (<http://mceer.buffalo.edu/publications/workshop/03-0003/cooperative.asp>)