

Κ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗ

ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ Ι



ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

1.1. Γενικά	11
1.2. Το φαινόμενο του σεισμού	12
1.3. Αποτίμηση των σεισμών	16
1.4. Η σεισμική δράση επάνω στις κατασκευές	22
1.5. Η σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών	27
1.6. Η υστερητική συμπεριφορά των κατασκευών	32
1.7. Τα φάσματα αποκρίσεως	46
1.8. Τα φάσματα υπολογισμού	58
1.9. Η φιλοσοφία της αντισεισμικής ασφάλειας	72
Βιβλιογραφία	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ο ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ Η ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ

2.1. Γενικά	79
2.2. Μορφολογία κτιρίων	81
2.3. Τα κατακόρυφα αντισεισμικά στοιχεία	93
2.4. Το αντισεισμικό δομικό σύμπλεγμα	119
2.5. Θεμελιώσεις	132
Βιβλιογραφία	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

3.1. Εισαγωγή	141
3.2. Τα μοντέλα υπολογισμού	144
3.3. Διαφορικές εξισώσεις του προβλήματος	154
3.4. Ιδιοταλάντωση – Δυναμικά χαρακτηριστικά	159
3.5. Παραδείγματα υπολογισμού δυναμικών χαρακτηριστικών	167
3.6. Η μέθοδος χρονικής επαλληλίας των ιδιομορφών	176
3.7. Η μέθοδος φασματικής επαλληλίας των ιδιομορφών	180
3.8. Η στατική συμπεριφορά του μονόροφου κτιρίου	202
3.9. Η δυναμική συμπεριφορά του μονόροφου κτιρίου	213
3.10. Η ψευδοστατική μέθοδος	240
3.11. Ο μη γραμμικός δυναμικός υπολογισμός	253
Βιβλιογραφία	256

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΣΤΡΕΨΗ ΠΡΟΒΟΛΟΥ

4.1. Γενικά	259
4.2. Απλή κάμψη – Καμπτική στρέψη	260
4.3. Καθαρή διάτμηση – Καθαρή στρέψη	262
4.4. Μικτή κάμψη – Μικτή στρέψη	264
4.5. Τα αναλογικά πλαίσια	269
4.6. Παραδείγματα	274
4.7. Πρόβολοι με ημιανοικτή διατομή	285
4.8. Διακριτοποίηση του μικτού προβόλου	290
4.9. Δυναμικός υπολογισμός του μικτού προβόλου	295
Βιβλιογραφία	307

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΕΣ ΔΟΚΟΙ

1. Εισαγωγή	309
2. Ορισμοί – Παραδοχές	310
3. Κινηματικές συνθήκες	312
4. Παραδείγματα	315
5. Ελαστικές συνθήκες	316
6. Εξωτερικά φορτία	321
7. Φορτία διατομής	324
8. Χρήση των φορτίων διατομής	327
9. Στατικές συνθήκες – Διαφορικές εξισώσεις	330
10. Κύριοι άξονες	334
11. Παραδείγματα	340
12. Μικτή στρέψη	349
13. Μοναχικά φορτία	363
14. Διατμητικές παραμορφώσεις	366
Βιβλιογραφία	369

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας I: Τιμές των συντελεστών τ_0 , μ_0 , ρ , γ και k	370
Πίνακας II: Τιμές του μέτρου συμπίεσης C_z	370
Πίνακας III: Τιμές του πηλίκου $\lambda\varphi/\lambda$	371
Πίνακας IV: Προσεγγιστικός υπολογισμός μικτών συστημάτων	372
Πίνακες O-1.0 έως O-0.5: Ομοιόμορφη φόρτιση	374
Πίνακες T-1.0 έως T-0.5: Τριγωνική φόρτιση	380
Πίνακες Π-1.0 έως Π-0.5: Παραβολική φόρτιση	386
Πίνακες M-1.0 έως M-0.5: Μοναχική φόρτιση	392

Το βιβλίο αυτό είχε προγραμματισθεί αρχικά να αποτελέσει τον τρίτο τόμο της «Δυναμικής των Κατασκευών», που κυκλοφόρησε το 1983 με το ισχύον τότε σύστημα εκτυπώσεως και διανομής πανεπιστημιακών βιβλίων. Έκτοτε όμως, λόγοι ανεξάρτητοι από την επιθυμία μας, δεν επέτρεψαν την ολοκλήρωση του έργου, τα δε σχετικά με τον αντισεισμικό υπολογισμό μαθήματά μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. καλύφθηκαν από εναλλασσόμενες κατ' έτος «Σημειώσεις».

Ήδη, με την παρότρυνση πολλών συναδέλφων μηχανικών και χάρη στην οικονομική υποστήριξη του εκδότη *COMPUTER TECHNICS*, κατέστη δυνατή η παρούσα ανεξάρτητη και αυτοτελής έκδοση με τίτλο «Αντισεισμικές Κατασκευές». Η αυτοτέλεια, βέβαια, επέβαλε την επανάληψη των βασικών στοιχείων από τη Δυναμική των Κατασκευών, αλλά συγχρόνως έδωσε και τη δυνατότητα για μία πιό ολοκληρωμένη παρουσίαση του αντικειμένου, με στόχο την πληρέστερη δυνατή ικανοποίηση των αναγκών του μηχανικού της πράξης. Η απαιτηθείσα για το σκοπό αυτό ύλη κατανεμήθηκε σε οκτώ κεφάλαια και τρία βοηθητικά παραρτήματα, από τα οποία τα τέσσερα τελευταία κεφάλαια με το τρίτο παράρτημα θα αποτελέσουν το δεύτερο τόμο που ετοιμάζεται.

Οι αντισεισμικές μελέτες των κατασκευών απαιτούν κατά κανόνα έναν μεγάλο όγκο στατικών ή / και δυναμικών υπολογισμών, για την εκτέλεση των οποίων ο διατιθέμενος σήμερα ηλεκτρονικός υπολογιστής (H/Y) δεν προσφέρει μόνον ανακούφιση, αλλά αποτελεί συχνά και πραγματική αναγκαιότητα. Παράλληλη όμως είναι η απαίτηση και για πληρέστερη γνώση των φυσικών φαινομένων, είτε αυτά αφορούν την σεισμική διέγερση είτε τη σεισμική απόκριση των κατασκευών. Διότι, σε έναν επιστημονικό χώρο όπου η γενίκευση και η τυποποίηση δεν είναι προς το παρόν δυνατή, υπάρχει πάντοτε ο κίνδυνος (και η τάση) με το «κύρος» του H/Y ορισμένες παραδοχές –ενδεχομένως άστοχες– να εκλαμβάνονται ως αλήθειες υπεράνω πάσης υποψίας. Επίσης, η δυνατότητα για γρήγορη αξιολόγηση πολλών εναλλακτικών λύσεων στο στάδιο της προμελέτης · η υποχρέωση για αυτοδύναμο έλεγχο των αποτελεσμάτων του αυτόματου υπολογισμού · και τέλος η τόσο απαραίτητη στις αντισεισμικές κατασκευές ποιοτική αντίληψη της μηχανικής συμπεριφοράς και η μη αποξένωση του μηχανικού από τα δρώμενα, επιβάλλουν μία βαθύτερη γνώση της λειτουργίας των φορέων και απαιτούν ειδικότερες συνοπτικές μεθόδους παρεμβάσεως.

Οι παραπάνω σκέψεις επηρέασαν αποφασιστικά την επιλογή και διάρθρωση της ύλης, η οποία επιδιώχθηκε να καλύψει κατά τρόπο σύμμετρο τις προαναφερθείσες απαιτήσεις. Έτσι, το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στη σεισμική διέγερση και στα γενικά χαρακτηριστικά της αποκρίσεως, ενώ στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται με τη μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια –χωρίς καθόλου υπολογισμούς– η μηχανική λειτουργία και η σεισμική παθολογία του σύνθετου σκελετού των πολυορόφων κτιρίων. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι διάφορες μέθοδοι αντισεισμικού υπολογισμού με βάση το διακριτό μοντέλο των κατασκευών και με τη χρήση μητρωικών συμβολισμών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις ενός αυτόματου υπολογισμού με τον H/Y . Αντίθετα, στο τέταρτο

κεφάλαιο παρουσιάζονται με ενιαίο τρόπο και με αρκετά στοιχεία πρωτοτυπίας οι βασικές αρχές του απλοποιημένου υπολογισμού των πολυορόφων κτιρίων σαν απλών προβόλων, με βάση το συνεχές μοντέλο και με τη χρήση αριθμητικών πινάκων.

Αλλά η πολυμορφία του αντισεισμικού σκελετού των κτιρίων επιβάλλει μία λεπτομερέστερη ανάλυση, ανάλογα με τη δομή του και με τη χρήση τόσο του διακριτού όσο και του συνεχούς μοντέλου. Για το λόγο αυτό στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται χωριστά τα αμιγή συστήματα που εμφανίζουν απλούστερη ελαστική συμπεριφορά, ενώ τα επόμενα δύο κεφάλαια αφιερώνονται για τη μελέτη των μικτών συστημάτων, το έκτο για τα συμμετρικά και το έβδομο για τα ασύμμετρα, λόγω της συνθετότερης συμπεριφοράς τους στο χώρο. Μία σαφής αντίληψη της υπόψη συμπεριφοράς πιστεύουμε ότι αποκτάται με τη βοήθεια της μεθόδου των τριών πόλων που αναπτύξαμε πρόσφατα και που εκτίθεται στο έβδομο κεφάλαιο. Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται μία μάλλον σύντομη αναφορά στα φαινόμενα δευτέρας τάξεως χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις πληρότητας.

Η σύνταξη του εκτενούς παραρτήματος Α κρίθηκε αναγκαία όχι μόνον για τον ακριβέστερο υπολογισμό των πυρήνων βάσει της θεωρίας Vlassov, αλλά κυρίως διότι με την υπόψη θεωρία επιτυγχάνεται ο υπολογισμός και η κατανόηση της συνολικής στατικής λειτουργίας των κτιρίων στο χώρο. Στο παράρτημα Β περιέχονται οι απαιτούμενοι αριθμητικοί πίνακες για τη διευκόλυνση των υπολογισμών στην περίπτωση εφαρμογής του συνεχούς μοντέλου, ενώ στο παράρτημα Γ εκτίθενται βασικά στοιχεία της μητρωικής στατικής και του προγραμματισμού στον Η/Υ.

Η θεωρία και ο υπολογισμός των αντισεισμικών κατασκευών, παρά την αλματώδη πρόοδο της τελευταίας εικοσαετίας, βρίσκεται ακόμη σε πλήρη εξέλιξη και για το λόγο αυτό στο τέλος κάθε κεφαλαίου δίδεται και η σχετική βιβλιογραφία· επίσης, σε ορισμένες παραγράφους δίδονται με μικρότερους χαρακτήρες πρόσθετα στοιχεία ιστορικού ή θεωρητικού περιεχομένου, των οποίων η ανάγνωση δεν είναι υποχρεωτική. Σοβαρή, τέλος, δυσχέρεια κατά την επεξεργασία των αριθμητικών παραδειγμάτων απετέλεσε η έλλειψη σύγχρονου ελληνικού αντισεισμικού κανονισμού, δυσχέρεια που αντιμετωπίστηκε προσωρινά με την υιοθέτηση διατάξεων από το σχέδιο του Ευρωκώδικα Ν° 8.

Τελειώνοντας, θεωρώ χρέος μου να εξάρω την επιστημονική συνδρομή και συνεργασία του συναδέλφου κ. Ι. - Ε. Αβραμίδη, Επίκουρου Καθηγητή στο Εργαστήριο Στατικής και Δυναμικής των Κατασκευών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. Επίσης, επιθυμώ να ευχαριστήσω τη σχεδιάστρια κυρία Β. Μπινίκου - Σηφουνάκη για την επιμελημένη αντιγραφή των σχημάτων, την κυρία Π. Ζήτη για την άρτια φωτοστοιχειοθέτηση - εκτύπωση του βιβλίου και τον εκδότη COMPUTER TECHNICS, χωρίς την οικονομική συνδρομή του οποίου θα ήταν αδύνατη η παρούσα έκδοση.

Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 1989

Κ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ

ΕΠΕΞΗΓΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΜΝΗΜΑ

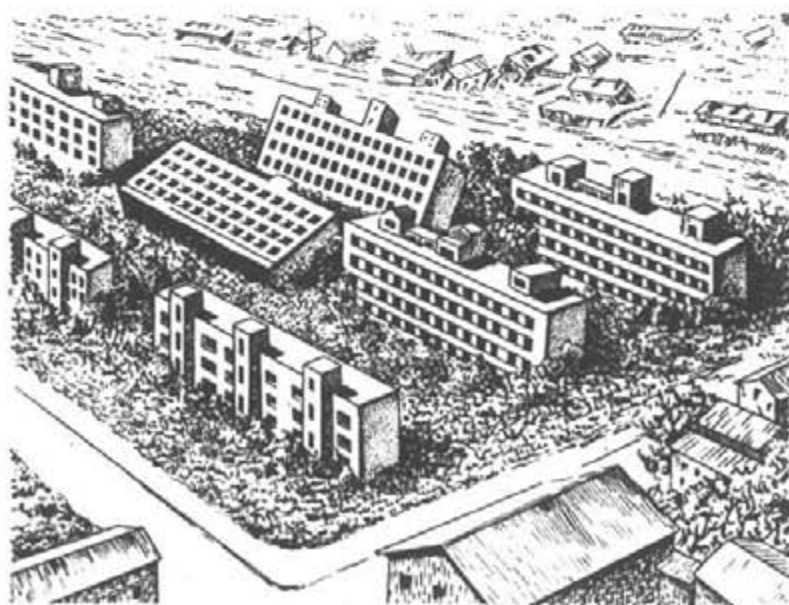
1. Η αρίθμηση των παραγράφων, των εξισώσεων και των σχημάτων σε κάθε κεφάλαιο είναι αυτοτελής· το ίδιο ισχύει και για τα παραδείγματα σε ορισμένη παράγραφο. Η παραπομπή σε μία εξίσωση ή σε ένα σχήμα γίνεται με την αναφορά του αριθμού τους, π.χ. εξ. (35) ή σχ. 18, εκτός αν ανήκουν σε άλλο κεφάλαιο, οπότε προτάσσεται ο αριθμός του κεφαλαίου αυτού, π.χ. εξ. (2.35) ή σχ. 2.18.
2. Οι αριθμοί μέσα σε αγκύλες παραπέμπουν στη βιβλιογραφία στο τέλος κάθε κεφαλαίου.
3. Κατά την επεξεργασία των αριθμητικών παραδειγμάτων χρησιμοποιείται το Διεθνές Σύστημα Μονάδων: *SI (Système International)*. Στο σύστημα αυτό το χιλιόγραμμα (*kg*) μάζας αποτελεί θεμελιώδη μονάδα μετρήσεως και ισούται με τη μάζα μιας κυβικής παλάμης απεσταγμένου ύδατος σε θερμοκρασία 4 °C. Αντίθετα, η μονάδα μετρήσεως δυνάμεως, το *N (Newton)*, είναι παράγωγη μονάδα που ορίζεται από τον νόμο του Νεύτωνα $F = m \cdot \gamma$, ήτοι:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/sec}^2$$

Πολλαπλάσια της μονάδας αυτής είναι το *décanewton*: $1 \text{ daN} = 10 \text{ N}$, το *kiloneutron*: $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$, το *Méganewton*: $1 \text{ MN} = 10^6 \text{ N}$ και το *Giganewton*: $1 \text{ GN} = 10^9 \text{ N}$. Μονάδα μετρήσεως τάσεως στο *SI* είναι το *Pascal*: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ και πολλαπλάσιό της το *Mégapascal*: $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$. Οι δύο αντιστοιχίες (για $g \approx 10 \text{ m/sec}^2$):

- Δύναμη: $1 \text{ N} = 0,1 \text{ kg}$ (βάρους)
 $1 \text{ kN} = 0,1 \text{ t}$ (βάρους) ή 100 kg
- Τάση: $1 \text{ MPa} = 10 \text{ kg/cm}^2$ ή 100 t/m^2

αρκούν συνήθως για τον συσχετισμό των μονάδων μετρήσεως των διαφόρων μεγεθών που εμφανίζονται στις τεχνικές εφαρμογές μεταξύ του *SI* και του παλιού συστήματος μονάδων (*MTS*).



Niigata, 1964

1.1 Γενικά

Η σεισμική δράση επάνω στις κατασκευές εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων που αποτελούν αντικείμενο πολλών περιοχών της επιστήμης. Οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες: η πρώτη περιλαμβάνει τα καθαρά σεισμολογικά δεδομένα –μέγεθος σεισμού, εστία, μηχανισμός γενέσεως, κλπ.– και αποτελεί αντικείμενο των Σεισμολόγων· η δεύτερη περιλαμβάνει τα γεωλογικά, τα γεωτεκτονικά, τοπογραφικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέσου που διασχίζουν τα σεισμικά κύματα από την εστία μέχρι τις κατασκευές και αφορά τους Γεωλόγους και τους Εδαφομηχανικούς· η τρίτη, τέλος, κατηγορία αναφέρεται στη δομή και στη σεισμική απόκριση της ίδιας της κατασκευής και αποτελεί αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού των κατασκευών.

Είναι φανερό ότι η έκταση και η ποικιλία των παραπάνω παραγόντων δίνουν στη σεισμική δράση έναν εντελώς *ειδικό χαρακτήρα*, που δεν απαντάται στα άλλα είδη εξωτερικών δράσεων. Η ιδιαιτερότητα εν προκειμένω δεν οφείλεται μόνον στην εμπλοκή πολλών επιστημονικών κλάδων, αλλά και στην ανάγκη εξοικειώσεως του Μηχανικού με *ιδιάζοντα* προβλήματα που δεν θέτουν οι συνήθεις εξωτερικές δράσεις των κατασκευών, ακόμη και εκείνες που έχουν δυναμικό χαρακτήρα, όπως π.χ. η ανεμοπίεση.

Για τους παραπάνω λόγους στο παρόν πρώτο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα γενικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των σεισμών, στον τρόπο δράσεώς τους επάνω στις κατασκευές, καθώς και στη σεισμική συμπεριφορά των τελευταίων. Η σεισμική δράση θα εκφρασθεί περαιτέρω ποσοτικά με τη βοήθεια των *φασμάτων αποκρίσεως* και, τέλος, θα επιχειρηθεί η ανάλυση και η οριοθέτηση της έννοιας των *αντισεισμικών κατασκευών* και της *αντισεισμικής προστασίας*.

1.2. Το φαινόμενο του σεισμού

Είναι γνωστό από γεωφυσικές και γεωλογικές μελέτες ότι η Γη αποτελείται από τον πυρήνα, το μανδύα και τον εξωτερικό φλοιό (σχ. 1). Ο φλοιός και το



Σχ. 1. Τομή της γήινης σφαίρας.

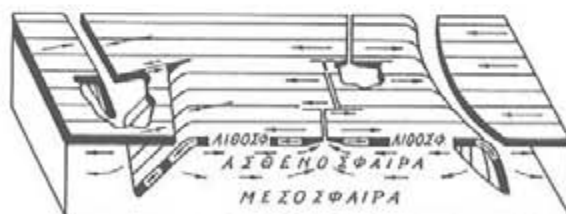
Επάνω μέρος του μανδύα συντίθεται από σκληρά πετρώματα με συνολικό πάχος 80 km περίπου και αποτελεί τη λεγόμενη *λιθόσφαιρα*, κάτω από την οποία βρίσκεται ένα παχύρρευστο στρώμα υλικού που αποτελεί την *ασθενόσφαιρα*. Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία, αλλά διαχωρίζεται σε μερικότερα τμήματα από δύο συστήματα ζωνών *διαρρήξεως*: το ηπειρωτικό σύστημα και το σύστημα των μεσοωκεάνιων ράχων. Τα τμήματα αυτά της λιθόσφαιρας λέγονται *λιθοσφαιρικές πλάκες*.

Η *γένεση* των σεισμών αποδίδεται στις σχετικές κινήσεις και συγκρούσεις των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι κινήσεις αυτές οφείλονται σε εφαπτομενικές πιέσεις που ασκούν στους πυθμένες των πλακών τα *ρεύματα μεταφοράς* του υλικού του μανδύα, λόγω των ποικίλων φυσικών διεργασιών που γίνονται στο εσωτερικό του. Έτσι, ανάλογα με την κατεύθυνση των ρευμάτων, οι λιθοσφαιρικές πλάκες μπορεί να συγκλίνουν (στις ωκεάνιες τάφρους), να αποκλίνουν (στις μεσοωκεάνιες ράχες), ή τέλος, να βυθίζεται πλάγια η μία κάτω από την άλλη και να φθάνει σε βάθος 700 km μέσα στο μανδύα, όπου τελικά διαλύεται.

Με την παραπάνω *θεωρία* των λιθοσφαιρικών πλακών, που γίνεται σήμερα αποδεκτή από τους Σεισμολόγους, ερμηνεύεται πλήρως η *γένεση* των *τεκτονικών*

σεισμών, οι οποίοι αποτελούν και το σύνολο σχεδόν των σεισμών [1], [2]. Ένας μικρός αριθμός άλλων σεισμών, οι λεγόμενοι *ηφαιστειογενείς* σεισμοί και οι σεισμοί *εγκατακρημνίσεως*, οφείλονται σε ειδικότερα αίτια.

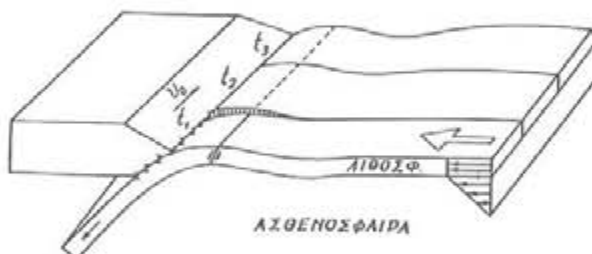
Στο σχ. 2 φαίνεται, μεταξύ άλλων, η περίπτωση των πλακών που αποκλίνουν εκατέρωθεν της μεσοωκεάνιας ράχης, όπου αναδύεται θερμό υλικό από το μανδύα και στη συνέχεια ψύχεται και δημιουργεί τις πλάκες αντίθετα, στα απέναντι σύνορα των πλακών αυτών (ηπειρωτικό σύστημα διαρρήξεως) έχουμε σύγκλιση των λιθосφαιρικών πλακών και ειδικότερα διολίσθηση της πυκνότερης ωκεάνιας πλάκας κάτω από την ηπειρωτική και καταβύθισή της στο εσωτερικό του μανδύα.



Σχ. 2. Η κίνηση των λιθосφαιρικών πλακών, από [2].

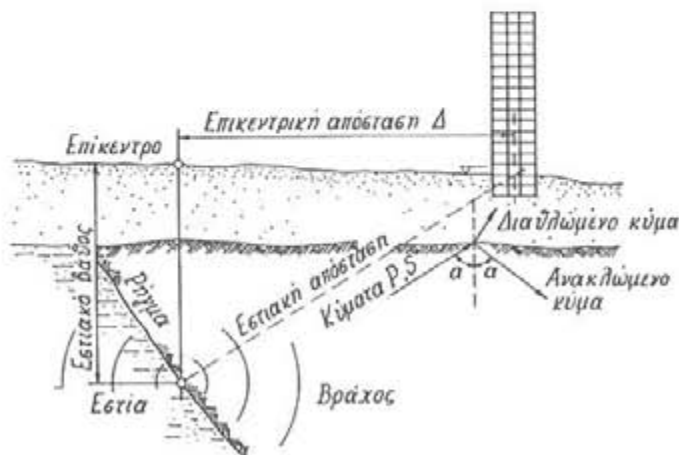
Οι προηγούμενες σχετικές κινήσεις των πλακών συνεπάγονται την προοδευτική αύξηση των τάσεων και παραμορφώσεων στις περιοχές επαφής τους και την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας παραμορφώσεως. Έτσι, όταν οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπερβούν την αντοχή των πετρωμάτων, επέρχεται απότομη θραύση και δημιουργία του πρώτου *σεισμικού ρήγματος*. Η ενέργεια που απελευθερώνεται θέτει σε παλμική κίνηση τα εκατέρωθεν του ρήγματος πετρώματα, που διαδίδεται στη συνέχεια στο χώρο με τη μορφή *σεισμικών κυμάτων*.

Ο μηχανισμός θραύσεως των πετρωμάτων εμφανίζει μεγάλη ποικιλία μορφών και δεν είναι εύκολο προς το παρόν να περιγραφεί με ακρίβεια και πληρότητα. Στο σχ. 3 φαίνεται το μοντέλο του Anderson, με το οποίο ερμηνεύεται η *κατεύθυνση* και η *ταχύτητα* διαδόσεως των τάσεων στο ρήγμα σε διαδοχικούς σεισμούς. Η υπόψη κατεύθυνση έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί έχει παρατηρηθεί ότι συμπίπτει με αύξηση των προκαλουμένων βλαβών.



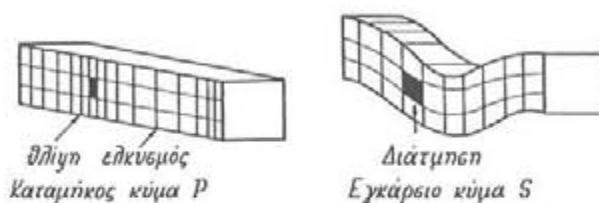
Σχ. 3. Το μοντέλο του Anderson, από [2].

Η περιοχή ενάρξεως της ρήξεως —που στη συνέχεια επεκτείνεται— λέγεται *εστία* του σεισμού ή *υπόκεντρο*, ενώ το μικροσεισμικό επίκεντρο βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο επάνω στην επιφάνεια της Γης (σχ. 4). Ανάλογα με το *εστιακό βάθος* h οι σεισμοί λέγονται επιφανειακοί ($h < 60 \text{ km}$), ενδιάμεσου βάθους ($h = 60 \div 300 \text{ km}$) και σεισμοί βάθους ($h > 300 \text{ km}$), οι οποίοι δεν γίνονται αισθητοί στην επιφάνεια της Γης. Οι επιφανειακοί σεισμοί εμφανίζονται συνήθως με τη



Σχ. 4. Γεωμετρικά στοιχεία σεισμού.

μορφή μιας σεισμικής ακολουθίας, δηλαδή υπάρχουν μικρά σχετικά χρονικά διαστήματα με έντονη σεισμική δράση. Ο μεγαλύτερος σεισμός της ακολουθίας λέγεται *κύριος σεισμός*, οι προηγούμενοι από αυτόν σεισμοί λέγονται *προσεισμοί* και οι επόμενοι *μετασεισμοί*. Με κέντρο την εστία η ταλάντωση διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις με τη μορφή *κυμάτων χώρου* (σχ. 5). Τα κύματα αυτά διακρίνονται



Σχ. 5. Τα κύματα χώρου.

στα *επιμήκη* P , που διαδίδονται με ταχύτητα $(7 \div 8) \text{ km/s}$ περίπου και στα *εγκάρσια* S , που διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα $(4 \div 5) \text{ km/s}$. Τα πρώτα είναι κύματα πίεσης-ελκυσμού, προκαλούν μεταβολή του όγκου και έχουν μικρή περίοδο και

ελλείψεις, ενώ κατά τη διάδοση των κυμάτων *Love* (σε στρωματοποιημένο πάντοτε μέσο) τα υλικά σημεία κινούνται παράλληλα προς την επιφάνεια και κάθετα προς τη διεύθυνση διαδόσεως.

Από τη σύνθεση όλων των προηγούμενων κυμάνσεων προκύπτει η τελική κίνηση στο τυχόν σημείο της επιφάνειας (σχ. 7). Η υπόψη κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε τρεις ανεξάρτητες συνιστώσες, δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη. Οι δύο οριζόντιες συνιστώσες είναι περίπου *ισότιμες* και σαφώς μεγαλύτερες από την κατακόρυφη, εκτός από την περιοχή του επικέντρου. Είναι, τέλος, αξιοσημείωτο ότι σε δεδομένη θέση δεν υπάρχει χαρακτηριστική *διεύθυνση* του σεισμού.

1.3. Αποτίμηση των σεισμών

Για τη «μέτρηση» των σεισμών και των επιπτώσεών τους στον άνθρωπο και τον περιβάλλοντα χώρο χρησιμοποιούνται δύο ποσότητες: το *μέγεθος* M και η *ένταση* I του σεισμού. Επίσης για τις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού ιδιαίτερη σημασία έχουν οι καταγραφές με ειδικά όργανα (επιταχυνσιόμετρα) των εδαφικών κινήσεων στην επιφάνεια της Γης, λόγω *ισχυρών σεισμικών δονήσεων* (*strong ground motion*). Με τα όργανα αυτά, που αποτελούν ειδικό τύπο *σεισμομέτρου*, γίνεται απευθείας μέτρηση της επιταχύνσεως του εδάφους οριζόντια (π.χ. βορράς - νότος, ανατολή - δύση) και κατακόρυφα. Στη συνέχεια, με χρονική ολοκλήρωση, υπολογίζεται η ταχύτητα και η μετατόπιση του εδάφους στο θεωρούμενο σημείο.

α. *Μέγεθος*. Η ποσοτική σύγκριση διάφορων σεισμών μεταξύ τους γίνεται με τη λεγόμενη *κλίμακα μεγεθών του Richter*. Ο *Richter*, έπειτα από συγκριτικές μελέτες πολλών σεισμών στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α., όρισε αρχικά (1935) το *τοπικό μέγεθος* M_L ενός σεισμού από τη σχέση [2]:

$$M_L = \text{Log} \frac{A(A)}{A_0(A)} = \text{Log} A(A) - \text{Log} A_0(A) \quad (1)$$

όπου A η επικεντρική απόσταση και A , A_0 τα μέγιστα πλάτη αναγραφής, σε σεισμόμετρο *Wood-Anderson*, του θεωρούμενου σεισμού και ενός *πρότυπου* σεισμού αντίστοιχα· ως πρότυπος σεισμός ή σεισμός *μηδενικού* μεγέθους ορίσθηκε ο σεισμός που γράφεται με πλάτος 1 μ (μικρό) σε απόσταση $A = 100 \text{ km}$. Στον προηγούμενο τύπο είναι $A \leq 600 \text{ km}$ και το $A_0(A)$ δίδεται από πίνακες που έχουν συνταχθεί.

Η κλίμακα του τοπικού μεγέθους M_L στηρίζεται στη μέτρηση του μέγιστου πλάτους των εγκάρσιων κυμάτων S από τα σεισμόμετρα *Wood-Anderson* με ιδιοπερίοδο $0,8 \text{ sec}$ και είναι κατάλληλη μόνο για κοντινούς σεισμούς. Έτσι, για τον υπολογισμό του μεγέθους σεισμών με διάφορα εστιακά βάθη και μεγάλες επικεντρικές αποστάσεις, με τη χρήση οποιουδήποτε σεισμομέτρου, επινοήθηκε αργότερα από τον *Gutenberg* (1945) η κλίμακα του *επιφανειακού μεγέθους* M_s και η κλίμακα

του ενιαίου μεγέθους M_b (για εστιακά βάθη > 60 km). Η πρώτη στηρίζεται σε μετρήσεις πλατών επιφανειακών κυμάτων και η δεύτερη χωρικών P -κυμάτων.

Όλα τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με ορισμένες σχέσεις, ενώ με τον γενικό όρο *μέγεθος* M εννοούμε το επιφανειακό μέγεθος M_s . Αυτό για τον ελληνικό χώρο δίδεται από τον τύπο [1]:

$$M = \text{Log } a + 1,41 \text{ Log } A + 0,2 \quad (2)$$

όπου a το ημιάθροισμα των μέγιστων πραγματικών πλατών των δύο οριζόντιων συνιστωσών της μέγιστης κινήσεως σε (m) και A η επικεντρική απόσταση σε (km).

Η κλίμακα μεγεθών είναι ανοικτή τόσο προς τα άνω όσο και προς τα κάτω. Οι σεισμοί με μέγεθος $M > 2$ γίνονται γενικά αισθητοί από τον άνθρωπο, ενώ με μέγεθος $M > 5$ προκαλούν διάφορες βλάβες σε κατοικημένες περιοχές. Ο μεγαλύτερος σεισμός στον κόσμο (Λισσαβόνα, 1755) εκτιμάται ότι είχε μέγεθος 9,25, ενώ ο μεγαλύτερος σεισμός που μετρήθηκε μέχρι σήμερα είχε μέγεθος 8,75. Σημειώνουμε, τέλος, ότι λόγω των πολλών απλουστεύσεων που γίνονται δεκτές για την περιγραφή του σύνθετου φυσικού φαινομένου, η μέτρηση του μεγέθους περιέχει πάντοτε μία αβεβαιότητα της τάξεως του 0,2 έως 0,3 [2].

Το μέγεθος ενός σεισμού, όπως προκύπτει από τον ορισμό του, αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο *συγκρίσεως* μικρών και μεγάλων σεισμών και όχι έναν ποσοτικό δείκτη των φυσικών ιδιοτήτων της πηγής παραγωγής τους. Εντούτοις, με διάφορες μελέτες που έγιναν, επιτεύχθηκε ο συσχετισμός του μεγέθους με ένα απόλυτο φυσικό μέγεθος, ήτοι με την *ενέργεια* που εκλύεται στην εστία ενός σεισμού. Έτσι, βρέθηκε ότι η παραπάνω ενέργεια (σε έργια) για $M > 5$ δίδεται από τη σχέση:

$$\text{Log } E = 12,24 + 1,44 M \quad (3)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι αύξηση του μεγέθους κατά μία μονάδα συνεπάγεται αύξηση της ενέργειας κατά 28 φορές περίπου. Τα παραπάνω ισχύουν για μεγέθη μέχρι $M = 7$, πέρα από τα οποία το μέγεθος δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο της ενέργειας, λόγω του φαινομένου *κορεσμού* του μεγέθους. Στην περίπτωση αυτή καλύτερο μέτρο της ενέργειας αποτελεί το μέγεθος της λεγόμενης *σεισμικής ροπής*.

b. Ένταση. Με τον όρο *μακροσεισμική ένταση* I ενός σεισμού επιδιώκεται η θέσπιση ενός «μέτρου» των επιπτώσεων του υπόψη σεισμού στον άνθρωπο και στον περιβάλλοντα χώρο. Μία τέτοια όμως *αντικειμενική* μέτρηση θα μπορούσε θεωρητικά να γίνει με τη βοήθεια πολλών τυχαίων μεταβλητών και όχι με μία μόνη παράμετρο· διότι το βλαπτικό δυναμικό ενός σεισμού εξαρτάται από τη συσχέτιση της σεισμικής κινήσεως (επιτάχυνση, συχνотικό περιεχόμενο, κλπ.) με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών (ιδιοπερίοδοι, αποσβέσεις, κλπ.). Έτσι π.χ. η ίδια σεισμική δόνηση είναι δυνατόν να είναι καταστροφική για τις δύσκαμπτες κατασκευές και ελάχιστα βλαπτική για τις εύκαμπτες ή αντίστροφα.

Εντούτοις, για την ποιοτική εκτίμηση των βλαβών δεδομένων σεισμών, έχουν επινοηθεί ορισμένες εμπειρικές κλίμακες μακροσεισμικών εντάσεων με καθορισμένη, υποκειμενικά άλλωστε, βαθμονόμηση. Οι βασικές κλίμακες που χρησιμοποιούνται είναι:

- Η δωδεκαβάθμια κλίμακα *Mercalli*.
- Η δωδεκαβάθμια κλίμακα *Medvedev–Sponheur–Karnik (MSK)*.
- Η επταβάθμια *Ιαπωνική κλίμακα (JMA)*.

Η πρώτη από τις παραπάνω κλίμακες προδιαγράφει ως εξής τους *βαθμούς* εντάσεως:

<i>Βαθμός I</i>	Δεν γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο.
<i>Βαθμοί II – III</i>	Γίνεται αντιληπτός από μικρό αριθμό ανθρώπων.
<i>Βαθμοί IV – V</i>	Γίνεται αντιληπτός από μεγάλο αριθμό ανθρώπων.
<i>Βαθμός VI</i>	Γίνεται αντιληπτός από το σύνολο σχεδόν του πληθυσμού και οι καμπάνες των εκκλησιών χτυπούν.
<i>Βαθμός VII</i>	Ελαφρές ζημιές σε κτίσματα.
<i>Βαθμοί VIII – IX</i>	Σοβαρές ζημιές σε κτίσματα και εμφάνιση ρωγμών στο έδαφος.
<i>Βαθμός X</i>	Γενική κατάρρευση οικοδομών.
<i>Βαθμοί XI – XII.</i>	Καταστροφή.

Η κλίμακα *M.S.K.* είναι ακριβέστερη από την προηγούμενη, γιατί λαμβάνει υπόψη το είδος και το ποσοστό των κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβες.

Η γεωγραφική, τέλος, κατανομή των εντάσεων σε μία περιοχή γίνεται με τις *ισόσειστες καμπύλες* που την χωρίζουν σε τμήματα ίσης εντάσεως. Στην *πλειόσειστη* περιοχή έχουμε τη μέγιστη ένταση και στο κέντρο της περιοχής αυτής βρίσκεται το *μακροσεισμικό επίκεντρο* που, γενικά, δεν ταυτίζεται με το *μικροσεισμικό επίκεντρο* του σχ. 4.

Εκτός από τις προηγούμενες εμπειρικές κλίμακες που βασίζονται στην παρατήρηση πραγματικών βλαβών, έχουν προταθεί και ορισμένες άλλες ποσότητες ως «μέτρα» των μακροσεισμικών επιπτώσεων των σεισμών. Μία τέτοια ποσότητα είναι η *φασματική ένταση (Housner)* :

$$SI = \int_{0,1}^{2,5} S_V dT \quad (4)$$

όπου S_V η φασματική ταχύτητα (βλ. παραγ. 1.7) και T η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος των κατασκευών, που βρίσκεται συνήθως στο διάστημα $(0,1 \div 2,5)$. Το SI συνδέεται άμεσα με τη συνολική *ενέργεια* που εισάγεται από το σεισμό στις κατασκευές κι η αξιοπιστία του εξαρτάται, εκτός των άλλων, από την *ομοιόμορφη* κατανομή των ιδιοπεριόδων των κατασκευών στο διάστημα $0,1 \div 2,5$. Επίσης, μία δεύτερη ποσότητα είναι η ένταση του *Arias* :

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a^2(t) dt \quad (5)$$

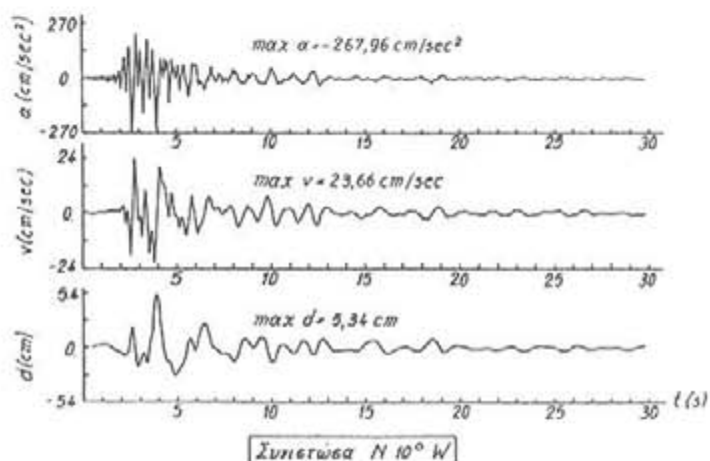
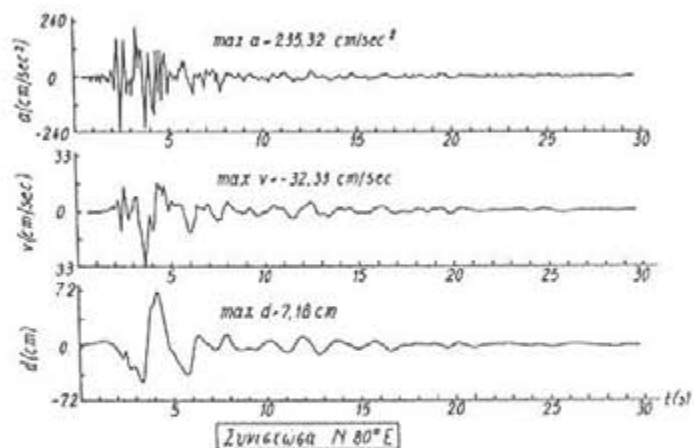
όπου $a(t)$ η εδαφική επιτάχυνση και t_0 ο συνολικός χρόνος του σεισμού. Εδώ λαμβάνεται υπόψη η συνδυασμένη επιρροή των επιταχύνσεων και της διάρκειας του σεισμού. Πάντως, παρά τον «αντικειμενικό» χαρακτήρα των προηγούμενων μεγεθών, είναι φανερό ότι στηρίζονται σε μεμονωμένες παραμέτρους και όχι στο συνδυασμό πολλών παραμέτρων.

ς. Εδαφικές κινήσεις. Η εδαφική κίνηση στο τυχόν σημείο του εδάφους προσδιορίζεται με τη βοήθεια τριών επιταχυνσιογραφημάτων που δίνουν τις επιταχύνσεις του σημείου συναρτήσει του χρόνου: τα δύο επιταχυνσιογραφήματα αναφέρονται στις δύο οριζόντιες (και κάθετες μεταξύ τους) συνιστώσες της κίνησης και το τρίτο στην κατακόρυφη συνιστώσα. Η καταγραφή γίνεται πρώτα σε φιλμ, κατά τη διάρκεια του σεισμού από τα επιταχυνσιόμετρα και στη συνέχεια ψηφιοποιείται και «διορθώνεται» για να απαλλαγεί από ορισμένες παρασυνιστώσες. Με διαδοχική ολοκλήρωση των επιταχύνσεων υπολογίζονται οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις του σημείου. Στα σχ. 8 *a, b* φαίνονται τα «διορθωμένα» διαγράμματα επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων που έχουν καταγραφεί κατά το σεισμό της Καλαμάτας (13/9/86).

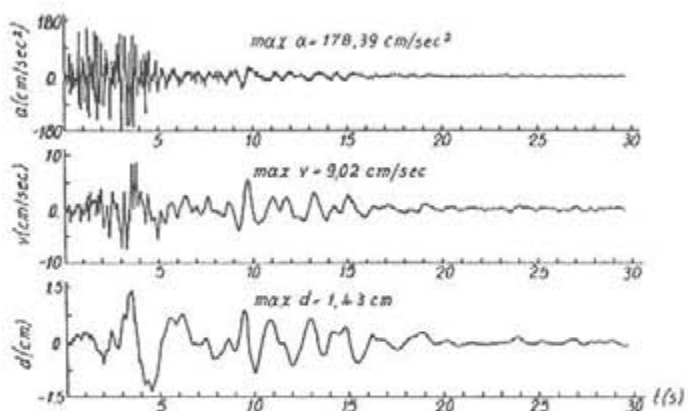
Σε ένα επιταχυνσιογράφημα διακρίνουμε, γενικά, τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή, με τις πολύ μικρές τεταγμένες, αντιστοιχεί στα ταχύτερα διαδιδόμενα επιμήκη *P*-κύματα, ενώ η δεύτερη αρχίζει με την άφιξη των εγκάρσιων *S*-κυμάτων που προκαλούν απότομη αύξηση των τεταγμένων από τη διαφορά των χρόνων άφιξης των πυραπάνω κυμάτων υπολογίζεται η απόσταση της εστίας από το σημείο καταγραφής. Η τρίτη περιοχή αρχίζει με την άφιξη και των επιφανειακών *L*-κυμάτων, εμφανίζει επίσης μεγάλες τεταγμένες και ο διαχωρισμός της από την προηγούμενη περιοχή δεν είναι σαφής.

Οι τρεις συνιστώσες των επιταχύνσεων ενός σημείου είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά οι δύο οριζόντιες εμφανίζουν, γενικά, πολλές ομοιότητες, τόσο ως προς τις συχνότητες όσο και ως προς τις μέγιστες επιταχύνσεις. Η κατακόρυφη συνιστώσα διαφέρει εμφανώς από τις δύο οριζόντιες: περιέχει κατά κανόνα υψηλές συχνότητες και η μέγιστη επιτάχυνσή της ισούται περίπου με τα 2/3 της μέγιστης οριζόντιας. Εντούτοις αυτό το τελευταίο δεν είναι απόλυτο, γιατί υπήρξαν και περιπτώσεις σεισμών όπου η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση ήταν μεγαλύτερη από την οριζόντια (π.χ. σεισμός *El Centro* n° 6, Καλιφόρνια 1979, με μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση 1.75 *g* έναντι 0.5 *g* της οριζόντιας).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συνάρτηση επιταχύνσεως από πιθανοτική άποψη είναι μία τυχαία συνάρτηση του χρόνου που καθορίζει μη στάσιμη διαδικασία (*nonstationary process*). Το γεγονός αυτό δημιουργεί μεγάλες δυσκολίες κατά την στοχαστική ανάλυση του προβλήματος, τόσο ως προς την διέγερση όσο και ως προς την απόκριση των κατασκευών, πράγμα που αποτελεί μία επιπλέον διαφορο-



Σχ. 8α. Οι οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού της Καλαμάτας, από [3].



Σχ. 8β. Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού της Καλαμάτας, από [3].