



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**

ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΤΟΥ 9^{ου} ΕΞΑΜΗΝΟΥ
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 2**

ΓΙΑΝΝΗΣ Ν. ΨΥΧΑΡΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|------|--|----|
| 1. | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 2. | ΣΤΟΧΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ | 2 |
| 2.1. | Γενικά..... | 2 |
| 2.2. | Στάθμες επιτελεστικότητας φέροντος και μη-φέροντος οργανισμού..... | 3 |
| 2.3. | Συνδυασμένες στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής | 5 |
| 3. | ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ..... | 9 |
| 3.1. | Καμπύλη ικανότητας (capacity curve) | 9 |
| 3.2. | Καμπύλη $F - \delta$ δομικού στοιχείου ή διατομής | 9 |
| 3.3. | Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής..... | 14 |
| 4. | ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ | 17 |
| 5. | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ | 19 |
| 5.1. | Εισαγωγή..... | 19 |
| 5.2. | Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα..... | 19 |
| 5.3. | Μεθοδολογία ATC-40 | 22 |
| 5.4. | Μέθοδος N2 | 26 |
| 5.5. | Μέθοδος των συντελεστών..... | 30 |
| 6. | ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΦΗΣ | 34 |
| 6.1. | Εισαγωγή..... | 34 |
| 6.2. | Επέκταση μεθόδου N2 (Extended N2) | 35 |
| 6.3. | Ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (modal pushover) | 37 |
| 6.4. | Επιλογή κόμβου αναφοράς | 40 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 41 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας (Performance-Based Design) βασίζεται στην αρχή του καθορισμού αποδεκτού επιπέδου ζημιών (στάθμης επιτελεστικότητας) ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού, δηλαδή στον καθορισμό του επιδιωκόμενου στόχου σεισμικής ικανότητας. Με άλλα λόγια, η μέθοδος εξετάζει τον πραγματικό τρόπο που θα συμπεριφερθεί η κατασκευή σε διάφορα επίπεδα ισχύος της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού και το αντίστοιχο αναμενόμενο επίπεδο ζημιών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ένας βέλτιστος συνδυασμός ασφάλειας και οικονομίας.

Αντίθετα, η κλασική μεθοδολογία σχεδιασμού των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών (μέθοδος των δυνάμεων) εξετάζει μόνο τη συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι να αρχίσουν οι ζημιές (ελαστική απόκριση) και δεν ασχολείται με το τι συμβαίνει μετά. Το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο ασφάλειας εξασφαλίζεται μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς που χρησιμοποιείται στη μελέτη. Οι συντελεστές συμπεριφοράς έχουν καθοριστεί από τη γνώση που έχουμε αποκτείσει από προηγούμενους σεισμούς και την πειραματική και αναλυτική έρευνα που έχει διεξαχθεί, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία της ανθρώπινης ζωής και η αποφυγή κατάρρευσης. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, ο σχεδιασμός αυτός μπορεί να είναι επισφαλής, όπως π.χ. σε έντονα μη κανονικά κτήρια.

Η μεθοδολογία των σταθμών επιτελεστικότητας εφαρμόζεται κυρίως για τον έλεγχο και την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών και αποτελεί τον βασικό κορμό των διεθνών κανονισμών επεμβάσεων (π.χ. Ευρωκώδικας 8 – Μέρος 3, Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων – ΚΑΝ.ΕΠΕ., FEMA 356, ATC-40 κλπ). Σε νέες κατασκευές, η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο μιας ήδη διαστασιολογημένης κατασκευής.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η γνώση του τρόπου συμπεριφοράς της κατασκευής και πέραν της ελαστικής περιοχής, δηλαδή μετά την εμφάνιση των ζημιών έως την οιονεί κατάρρευση. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος εφαρμόζεται σε συνδυασμό με μη-γραμμικές (ανελαστικές) αναλύσεις, είτε στατικές (ανάλυση pushover) είτε δυναμικές (αναλύσεις χρονοϊστορίας).

2. ΣΤΟΧΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

2.1. Γενικά

Οι στόχοι της σεισμικής ικανότητας μιας κατασκευής αποτελούν συνδυασμούς μιας στάθμης επιτελεστικότητας (δηλαδή του αποδεκτού επιπέδου βλαβών) και ενός επιπέδου της σεισμικής δράσης, που συνήθως καθορίζεται από την ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης στη διάρκεια ζωής της κατασκευής ή την ισοδύναμη περίοδο επανάληψης. Δηλαδή, κάθε στόχος σεισμικής ικανότητας καθορίζει μία ανεκτή οριακή κατάσταση βλαβών για συγκεκριμένη ισχύ της σεισμικής δόνησης. Αφού καθοριστεί ο *επιθυμητός* στόχος σεισμικής ικανότητας, μπορεί στη συνέχεια να γίνει η αποτίμηση μιας υφιστάμενης κατασκευής ή ο ανασχεδιασμός της (ενίσχυσή της) ή ο σχεδιασμός μιας νέας κατασκευής. Οι στόχοι σεισμικής ικανότητας αναφέρονται τόσο στο φέροντα οργανισμό, όσο και στο μη-φέροντα οργανισμό, δηλαδή στο σύστημα που δεν συμμετέχει στην ανάληψη των κατακορύφων φορτίων. Ο συνολικός στόχος για όλη την κατασκευή προκύπτει από συνδυασμό των στόχων για το φέροντα και το μη-φέροντα οργανισμό.

Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται οι στόχοι σχεδιασμού σύμφωνα με τις στάθμες επιτελεστικότητας και τις περιόδους επανάληψης του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο συνήθης σχεδιασμός με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς (π.χ. ΕΑΚ 2000) αντιστοιχεί σε στόχο σχεδιασμού B2.

Πίνακας 2.1: Στόχοι σεισμικής ικανότητας κατά Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3.

| | | Στάθμη επιτελεστικότητας | | |
|--|---|--------------------------|-------------------|-------------------|
| | | Περιορισμός βλαβών | Σημαντικές βλάβες | Οιονεί κατάρρευση |
| Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης σε 50 χρόνια | 20% (Περίοδος επανάληψης 225 χρόνια) | A1 | B1 | Γ1 |
| | 10% (Περίοδος επανάληψης 475 χρόνια) | A2 | B2 | Γ2 |
| | 2% (Περίοδος επανάληψης 2475 χρόνια) | A3 | B3 | Γ3 |

Ο καθορισμός του στόχου για τον οποίο θα γίνει ο σχεδιασμός εξαρτάται από τον επιθυμητό συνδυασμό ασφάλειας και κόστους, λαμβάνοντας υπόψη και τη σπουδαιότητα της κατασκευής. Σχηματικά, η φιλοσοφία σχεδιασμού φαίνεται στο Σχ. 2.1, όπου κάθε τετράγωνο αντιπροσωπεύει ένα στόχο σχεδιασμού, ενώ οι διαγώνιες γραμμές αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα κριτήρια σχεδιασμού. Έτσι, η γραμμή 1-3 καθορίζει τον βασικό σχεδιασμό συνήθων κατασκευών, η γραμμή 2-3 αντιστοιχεί σε ένα σχεδιασμό με μικρότερο σεισμικό κίνδυνο και θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας (π.χ. Σ3 κατά ΕΑΚ) και η γραμμή 3-3 σε ένα πολύ ασφαλή (αλλά και πολύ αντισυμβατικό) σχεδιασμό που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μία κατασκευή πολύ μεγάλης σπουδαιότητας (Σ4 κατά ΕΑΚ). Οι στόχοι που αντιστοιχούν στα τετράγωνα δεξιά της γραμμής 1-3 δεν είναι αποδεκτοί.

| | | Στάθμη επιτελεστικότητας | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------|---------------------|
| | | Άμεση χρήση | Προστασία ζωής | Οιονεί κατάρρευση |
| Συχνότητα εμφάνισης σεισμικής δράσης | Μεγάλη (συχνοί σεισμοί) | 1 | | Μη-αποδεκτοί στόχοι |
| | Μικρή (σπάνιοι σεισμοί) | 2 | | |
| | Πολύ μικρή (πολύ σπάνιοι σεισμοί) | 3 | 3 | 3 |

Σχ. 2.1. Καθορισμός στόχων σχεδιασμού.

2.2. Στάθμες επιτελεστικότητας φέροντος και μη-φέροντος οργανισμού

Όλοι οι κανονισμοί ορίζουν, με μικροδιαφορές, τρεις βασικές στάθμες επιτελεστικότητας για το φέροντα οργανισμό και τα μη-φέροντα στοιχεία, ανάλογα με το επίπεδο βλαβών. Σε ορισμένους κανονισμούς υπάρχουν και ενδιάμεσες στάθμες επιτελεστικότητας (π.χ. ATC-40).

A. Άμεση χρήση μετά το σεισμό (Immediate occupancy)

Όσον αφορά στο **φέροντα οργανισμό** (στάθμη Α), το επίπεδο βλαβών είναι τέτοιο ώστε καμμία λειτουργία να μη διακόπτεται κατά τη διάρκεια του σεισμού ή μετά από αυτόν, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επιτρέπονται μόνο μερικές αραιές τριχοειδείς ρωγμές καμπτικού χαρακτήρα, οι οποίες δεν επηρεάζουν την ικανότητα της κατασκευής να φέρει τα κατακόρυφα και τα οριζόντια φορτία, στον ίδιο βαθμό, όπως και πριν το σεισμό. Επίσης, ο κίνδυνος τραυματισμού ατόμων από τις βλάβες είναι πρακτικά αμελητέος.

Όσον αφορά στα **μη-φέροντα στοιχεία** (στάθμη α), επιτρέπονται μικρές μόνο βλάβες, οι οποίες δεν επηρεάζουν τις βασικές λειτουργίες. Οι προσβάσεις και τα συστήματα ασφαλείας (π.χ. κλιμακοστάσια, πόρτες, ανελκυστήρες, συστήματα πυρασφάλειας, γεννήτριες κλπ) πρέπει να παραμείνουν σε λειτουργία, εκτός εάν υπάρχει γενική διακοπή ηλεκτροδότησης στην περιοχή, η οποία τα επηρεάζει.

Στον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3, ως πρώτη στάθμη επιτελεστικότητας χρησιμοποιείται η Οριακή κατάσταση περιορισμού βλαβών (*Limit state of damage limitation*), η οποία δεν ταυτίζεται ακριβώς με τη στάθμη *Άμεση χρήση*, αλλά αναφέρεται σε λίγο μεγαλύτερες βλάβες. Για το σχεδιασμό συνήθων κατασκευών, η στάθμη *Άμεση χρήση* συνδυάζεται με σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης 72 χρόνια (50% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια) ενώ η στάθμη *Περιορισμού βλαβών* με σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης 225 χρόνια (20% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια).

Στον Πίνακα 2.2 δίνεται μία ενδεικτική περιγραφή των αναμενόμενων βλαβών στα βασικά στοιχεία ενός κτηρίου από Ω.Σ. για τις στάθμες επιτελεστικότητας *Άμεση χρήση* και *Περιορισμός βλαβών*.

B. Προστασία ζωής (*Life safety*)

Όσον αφορά στο **φέροντα οργανισμό** (στάθμη Β), αναμένεται να εμφανιστούν βλάβες, οι οποίες είναι επισκευάσιμες και δεν αποτελούν αιτία απώλειας της στατικής ευστάθειας της κατασκευής ή σοβαρού τραυματισμού ατόμων (μικροί τραυματισμοί, οι οποίοι όμως δεν αποτελούν κίνδυνο απώλειας ζωής, μπορεί να συμβούν) ή σημαντικών ζημιών σε αντικείμενα που βρίσκονται στην κατασκευή. Για την επανάχρηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτείται να επισκευαστούν οι βλάβες.

Όσον αφορά στα **μη-φέροντα στοιχεία** (στάθμη β), αναμένονται βλάβες, οι οποίες όμως δεν αποτελούν κίνδυνο για άτομα εντός ή εκτός της κατασκευής, είτε λόγω πτώσης αντικειμένων είτε λόγω δευτερογενών αιτιών, όπως διαφυγή τοξικών ουσιών, αστοχία συστημάτων υψηλής πίεσης, κίνδυνος πρόκλησης πυρκαϊάς, κλπ.

Η στάθμη αυτή στον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 αναφέρεται ως Οριακή κατάσταση σημαντικών βλαβών (*Limit state of significant damage*).

Στον Πίνακα 2.2 δίνεται μία ενδεικτική περιγραφή των αναμενόμενων βλαβών στα βασικά στοιχεία ενός κτηρίου από Ω.Σ. για τη στάθμη επιτελεστικότητας *Προστασία ζωής*.

Γ. Οιονεί κατάρρευση (*Structural stability*)

Όσον αφορά στο **φέροντα οργανισμό** (στάθμη Γ), αναμένεται να εμφανιστούν εκτεταμένες, μη-επισκευάσιμες κατά πλειονότητα βλάβες. Ο φέρων οργανισμός έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, αλλά η οριζόντια δυσκαμψία και η ικανότητα αντίστασης σε οριζόντια φορτία έχουν μειωθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα η κατασκευή να μη διαθέτει άλλα

περιθώρια ασφάλειας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης. Γι' αυτό υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης σε μετασεισμούς. Ο κίνδυνος σοβαρού τραυματισμού ατόμων από πτώσεις στοιχείων της κατασκευής είναι μεγάλος, εντός και εκτός αυτής. Για τη επανάχρηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτούνται εκτεταμένες επιδιορθώσεις, ενώ είναι πιθανόν να μην είναι τεχνικά ή οικονομικά δυνατή η επισκευή της.

Όσον αφορά στα **μη-φέροντα στοιχεία** (στάθμη γ), αναμένονται σημαντικές βλάβες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και την πτώση τους. Εξαίρεση αποτελούν τα υψηλού κινδύνου μη-φέροντα στοιχεία και προσαρτήματα, τα οποία πρέπει να είναι καλά στερεωμένα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος πτώσης τους σε χώρους συνάθροισης κοινού.

Η στάθμη αυτή στον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 αναφέρεται επίσης ως Οριακή κατάσταση οιονεί κατάρρευσης (Limit state of near collapse).

Στον Πίνακα 2.2 δίνεται μία ενδεικτική περιγραφή των αναμενόμενων βλαβών στα βασικά στοιχεία ενός κτηρίου από Ω.Σ. γι' αυτή τη στάθμη επιτελεστικότητας.

2.3. Συνδυασμένες στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής

Η στάθμη επιτελεστικότητας της κατασκευής ορίζεται από το συνδυασμό μιας στάθμης επιτελεστικότητας του φέροντος οργανισμού και μιας στάθμης επιτελεστικότητας των μη-φερόντων στοιχείων.

Ένα παράδειγμα αποδεκτών σταθμών επιτελεστικότητας μιας κατασκευής, σύμφωνα με την ορολογία του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3, φαίνονται στον Πίνακα 2.3. Ο δείκτης "i" αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης του σεισμού σχεδιασμού. Για παράδειγμα, εάν οι στόχοι σχεδιασμού περιγράφονται όπως στον πίνακα 2.1, τότε ο δείκτης i παίρνει τιμές: i=1, 2, 3 (i=1 δηλώνει σεισμό με περίοδο επανάληψης 225 χρόνια, i=2 δηλώνει σεισμό με περίοδο επανάληψης 475 χρόνια, i=3 δηλώνει σεισμό με περίοδο επανάληψης 2475 χρόνια). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ο συνδυασμένος στόχος επιτελεστικότητας της κατασκευής. Για κατασκευές υψηλής σπουδαιότητας, μπορεί να εφαρμόζονται δύο στόχοι, π.χ. B3-β3 και A2-α2 (βλ. πίνακα 2.1).

Πίνακας 2.2: Ενδεικτική περιγραφή αναμενόμενων βλαβών σε κτήρια από Ω.Σ. για διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας (πηγή: ATC-40)

| Στοιχείο | Άμεση χρήση | Περιορισμός βλαβών | Προστασία ζωής | Οιονεί κατάρρευση |
|--------------|---|---|--|---|
| Υποστυλώματα | <p>Πολύ περιορισμένες καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις χωρίς αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης.</p> <p>Καμμία μόνιμη οριζόντια παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Περιορισμένες καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις χωρίς ή πολύ μικρή αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης.</p> <p>Καμμία μόνιμη οριζόντια παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στο κατώτερο τμήμα του κτηρίου που προκαλούν αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης πάνω και κάτω από τους κόμβους.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 2.0%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στο κατώτερο τμήμα του κτηρίου που προκαλούν σημαντική αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης πάνω και κάτω από τους κόμβους και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στο εσωτερικό των κόμβων.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 3.5%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων διατηρείται σχεδόν σε όλα τα υποστυλώματα της κατασκευής.</p> |
| Τοιχώματα | <p>Ασήμαντες διατμητικές ρηγματώσεις στο επίπεδο του τοιχώματος. Καθόλου ή πολύ μικρές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Καμμία μόνιμη παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Ελάχιστες διατμητικές ρηγματώσεις στο επίπεδο του τοιχώματος. Καθόλου ή πολύ μικρές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Καμμία μόνιμη παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης και διατμητικές και καμπτικές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος. Ενδείξεις αστοχιών λόγω διατμητικής ολίσθησης.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 2.0%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης και διατμητικές και καμπτικές ρηγματώσεις σε όλο το ύψος του τοιχώματος και ειδικά στις περιοχές με τη μεγαλύτερη μόνιμη παραμόρφωση. Ενδείξεις λυγισμού διαμήκων ράβδων οπλισμού. Ενδείξεις αστοχιών λόγω διατμητικής ολίσθησης στις θέσεις των αρμών σκυροδέτησης και στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 3.5%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων διατηρείται σχεδόν σε όλα τα τοιχώματα της κατασκευής.</p> |

| Στοιχείο | Άμεση χρήση | Περιορισμός βλαβών | Προστασία ζωής | Οιονεί κατάρρευση |
|---------------------|---|--|---|--|
| Δοκοί | Πολύ περιορισμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης γύρω από τους κόμβους. Πολύ περιορισμένες καμπτικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων. Καμμία μόνιμη παραμόρφωση. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων. | Περιορισμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης γύρω από τους κόμβους. Περιορισμένες καμπτικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων. Καμμία μόνιμη παραμόρφωση. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων. | Αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης στους κόμβους και τις περιοχές πλαστικών αρθρώσεων. Καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων, που επεκτείνονται και μέσα στους κόμβους. Επιμήκυνση των συνδετήρων κοντά στους κόμβους. Μόνιμες κατακόρυφες παραμορφώσεις της τάξης του $L/175$. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων. | Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης στους κόμβους και τις περιοχές πλαστικών αρθρώσεων. Εκτεταμένες καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων, που επεκτείνονται και μέσα στους κόμβους. Θραύση των συνδετήρων κοντά στους κόμβους. Μόνιμες κατακόρυφες παραμορφώσεις της τάξης του $L/75$. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων. |
| Πλάκες | Πολύ περιορισμένες ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων. | Περιορισμένες ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων. | Ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων. | Εκτεταμένες ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Αποκολλήσεις τμημάτων σκυροδέματος μεταξύ των οπλισμών. Κατακόρυφες παραμορφώσεις κοντά στις στηρίξεις της τάξης του $d/4$ (d =πάχος πλάκας). Όχι κατάρρευση της πλάκας. |
| Θεμελιώσεις | Καμμία ένδειξη διαφορικής καθίζησης μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων | Καμμία ένδειξη διαφορικής καθίζησης μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων | Διαφορικές καθιζήσεις της τάξης του $L/150$ μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων | Διαφορικές καθιζήσεις της τάξης του $L/60$ μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων |
| Μη-φέροντα στοιχεία | Δεν υπάρχουν θραύσεις εξωτερικών υαλοπινάκων. Όλες οι πόρτες (εσωτερικές και εξωτερικές) παραμένουν σε λειτουργία. Πολύ περιορισμένες ζημιές σε ψευδοροφές και φωτιστικά σώματα χωρίς καταπτώσεις. Ελάχιστα έπιπλα ανατρέπονται. Πολύ περιορισμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα και επικαλύψεις κλιμάκων. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός παραμένουν σε λειτουργία. Πολύ περιορισμένες βλάβες σε σοφίτες. | Πολύ περιορισμένες θραύσεις εξωτερικών υαλοπινάκων. Όλες οι πόρτες (εσωτερικές και εξωτερικές) παραμένουν σε λειτουργία. Πολύ περιορισμένες ζημιές σε ψευδοροφές και φωτιστικά σώματα χωρίς καταπτώσεις. Μεμονωμένες ανατροπές επίπλων. Περιορισμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα και επικαλύψεις κλιμάκων. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός παραμένουν σε λειτουργία. Περιορισμένες βλάβες σε σοφίτες. | Μερικές θραύσεις υαλοπινάκων. Οι περισσότερες εξωτερικές πόρτες παραμένουν σε λειτουργία, αλλά μερικές εσωτερικές πόρτες μπλοκάρουν. Μερικές ψευδοροφές καταρρέουν και φωτιστικά σώματα καταστρέφονται. Ανατροπές επίπλων. Εκτεταμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα και ορισμένες ανατροπές. Εκτεταμένες ρηγματώσεις των τοίχων που περικλείουν το κλιμακοστάσιο. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός τίθενται εκτός λειτουργίας. Εκτεταμένες βλάβες σε σοφίτες. | Οι περισσότεροι υαλοπίνακες θραύονται. Οι εξωτερικές και εσωτερικές πόρτες μπλοκάρουν. Οι περισσότερες ψευδοροφές και φωτιστικά σώματα καταρρέουν. Ανατροπές επίπλων. Εκτεταμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα που ανατρέπονται μερικώς. Εκτεταμένες ρηγματώσεις των τοίχων που περικλείουν το κλιμακοστάσιο. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός τίθενται εκτός λειτουργίας. Μερική κατάρρευση σε σοφίτες. |

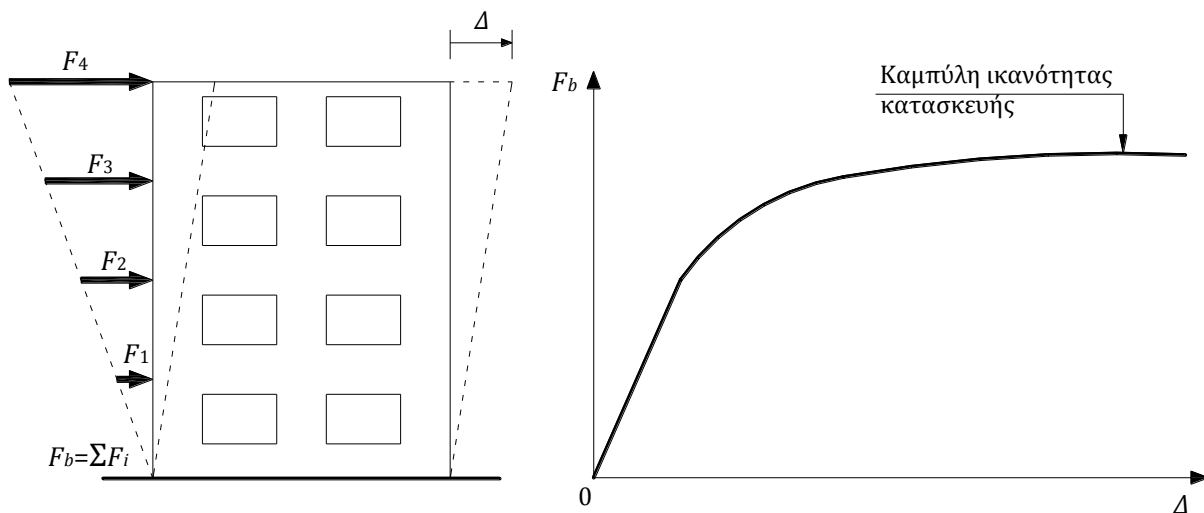
Πίνακας 2.3: Συνδυασμένοι στόχοι σεισμικής ικανότητας

| | | Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού | | |
|--|------------------------|--|---|-----------------------|
| | | Περιορισμός βλαβών (Α) | Σημαντικές βλάβες (Β) | Οιονεί κατάρρευση (Γ) |
| Στάθμη επιτελεστικότητας μη-φερόντων στοιχείων | Περιορισμός βλαβών (α) | Αi – αι Συνιστάται για κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας σε συνδυασμό με Βi-βι | Βi - αι | Δεν συνιστάται |
| | Σημαντικές βλάβες (β) | Αi - βi | Βi – βi Συνιστάται για κατασκευές συνήθους σπουδαιότητας | Γi - βi |
| | Οιονεί κατάρρευση (γ) | Δεν συνιστάται | Βi - γi | Γi - γi |

3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

3.1. Καμπύλη ικανότητας (capacity curve)

Ο καθορισμός των διάφορων σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται πάνω στην καμπύλη ικανότητας της κατασκευής, η οποία εκφράζει τη μη-γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και της μετατόπισης της κορυφής. Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας γίνεται με υπολογισμό της ανελαστικής μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές του οριζόντιου φορτίου, με δεδομένη κατανομή φορτίων στους ορόφους (Σχ. 3.1). Ως κατανομή των φορτίων καθ' ύψος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τριγωνική κατανομή, η πρώτη ιδιομορφή ή ακόμη και περισσότερο πολύπλοκοι συνδυασμοί με συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών. Για την κατασκευή αυτής της καμπύλης γίνονται πολλές στατικές επιλύσεις, με σταδιακή αύξηση της τέμνουσας βάσης και υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής σε κάθε βήμα (μεθοδολογία pushover), λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη δυσκαμψία των στοιχείων που έχουν διαρρεύσει.



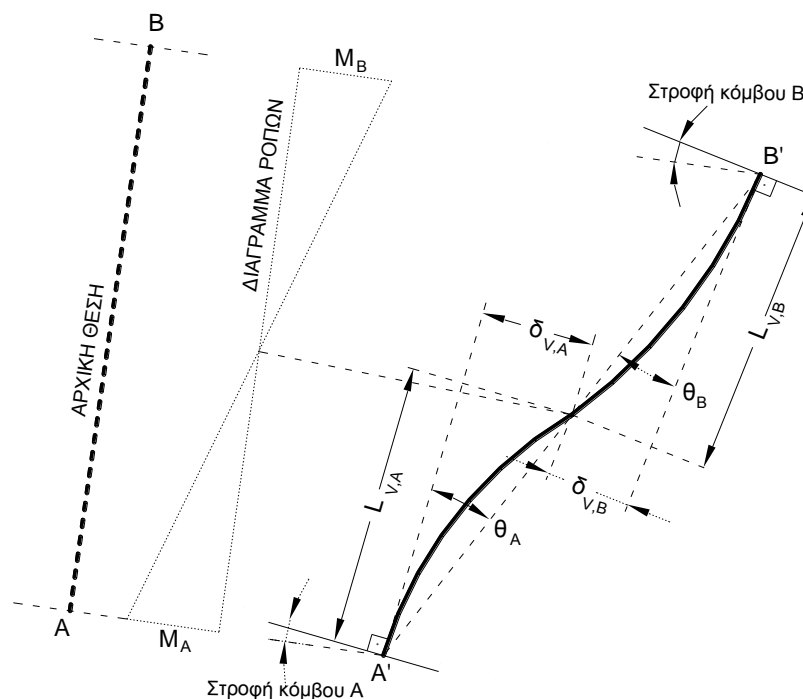
Σχ. 3.1. Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής.

3.2. Καμπύλη $F - \delta$ δομικού στοιχείου ή διατομής

Το πρώτο βήμα της παραπάνω διαδικασίας είναι ο καθορισμός των νόμων που διέπουν την ανελαστική συμπεριφορά των μελών της κατασκευής, οι οποίοι περιγράφονται μέσω διαγραμμάτων που σχετίζουν εντατικά μεγέθη, " F ", με παραμορφώσεις ή σχετικές μετακινήσεις, " δ ". Τα μεγέθη F μπορούν να είναι δυνάμεις ή ροπές και οι σχετικές μετακινήσεις δ παραμορφώσεις, καμπυλότητες, ή στροφές. Εάν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, τότε κατάλληλα μεγέθη F και δ είναι η ροπή κάμψης, M και η καμπυλότητα, C (ή

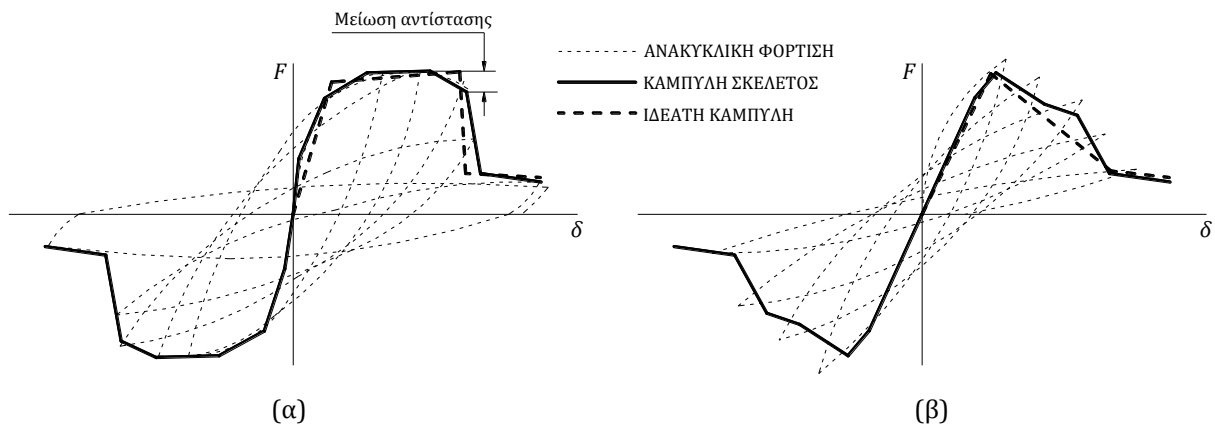
$1/r)$, αντίστοιχα. Εάν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η διάτμηση, τότε κατάλληλα μεγέθη F και δ είναι η διατμητική δύναμη, V και η διατμητική παραμόρφωση, γ , αντίστοιχα.

Επειδή στα στοιχεία από Ω.Σ. οι καμπτικές και οι διατμητικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν, ενώ οι στροφές των ακραίων διατομών των στοιχείων επηρεάζονται και από την εξόλκευση των οπλισμών στις αγκυρώσεις, η καταλληλότερη επιλογή F και δ είναι η ροπή κάμψης, M και η γωνία στροφής χορδής, θ , στα άκρα του στοιχείου. Η γωνία θ ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης στον άξονα του στοιχείου στο άκρον υπό διαρροή και της χορδής που συνδέει το άκρο αυτό με το άκρον του ανοίγματος διάτμησης, δηλ. το σημείο μηδενισμού των ροπών (Σχ. 3.2). Με άλλα λόγια, η γωνία θ ορίζεται ως η γωνία στροφής της χορδής που ενώνει τη βάση με την κορυφή ενός θεωρητικού προβόλου μήκους ίσου με το διατμητικό μήκος L_V , δηλαδή, $\theta = \delta_V / L_V$, όπου: $L_V = M/V$ (M =ροπή στη βάση, V =τέμνουσα) και δ_V είναι η μετατόπιση στην κορυφή του θεωρητικού προβόλου.

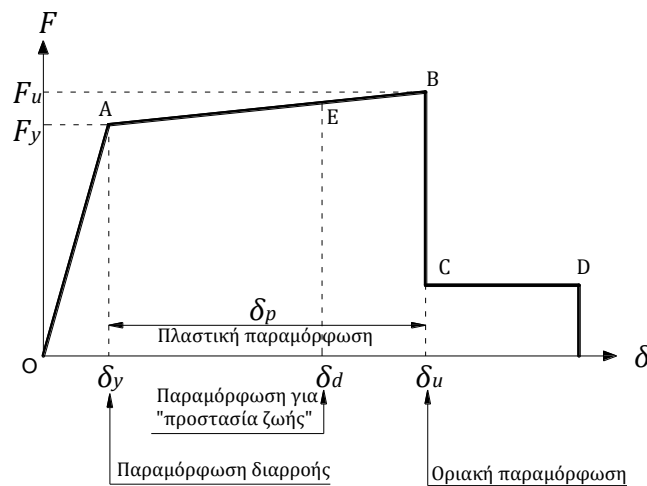


Σχ. 3.2. Ορισμός γωνίας στροφής χορδής, θ .

Η κατασκευή των διαγραμμάτων F - δ των στοιχείων έχει συνήθως ιδεατή μορφή, η οποία βασίζεται στην καμπύλη-σκελετό της συμπεριφοράς σε ανακυκλική φόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3. Στο Σχ. 3.3(α) φαίνεται η ανελαστική συμπεριφορά ενός στοιχείου σε καμπτική καταπόνηση και στο Σχ. 3.3(β) σε διατμητική καταπόνηση.



Σχ. 3.3. Καμπύλες F-δ δομικών στοιχείων: (α) καμπτική συμπεριφορά, (β) διατμητική συμπεριφορά.



Σχ. 3.4. Ιδεατή καμπύλη F-δ δομικών στοιχείων.

Η γενική μορφή των διαγραμμάτων F - δ λαμβάνεται συνήθως όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4. Στους διάφορους κανονισμούς δίνονται οδηγίες υπολογισμού των χαρακτηριστικών σημείων. Γενικώς, οι κλάδοι αυτού του διαγράμματος ορίζονται ως εξής:

Τμήμα OA

Αντιπροσωπεύει την ελαστική συμπεριφορά μέχρι το θεωρητικό σημείο διαρροής. Η κλίση της ευθείας OA ορίζει την τέμνουσα δυσκαμψία που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ελαστική ανάλυση.

Σημειώνεται ότι εάν η παραμόρφωση δίνεται σε όρους στροφής χορδής, η τιμή της $\delta_y = \theta_y$ πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την καμπυλότητα διαρροής C_y ή $(1/r)_y$ αλλά και τη συμμετοχή των διατμητικών παραμορφώσεων και της πιθανής ολίσθησης οπλισμού στις αγκυρώσεις. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και τον Ευρωκώδικα 8 – Τμήμα 3 δίνονται σχέσεις για τον υπολογισμό της θ_y για συνήθεις διατομές από Ω.Σ., λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα φαινόμενα.

Τμήμα AB

Αντιπροσωπεύει τη μετελαστική συμπεριφορά του στοιχείου μέχρι τη θεωρητική αστοχία (σημείο B). Το σημείο B καθορίζεται από την οριακή παραμόρφωση αστοχίας, δ_u , που ορίζεται ως η παραμόρφωση για την οποία έχει συμβεί ουσιαστική μείωση της ικανότητας παραλαβής φορτίων. Συνήθως, στην καμπύλη-σκελετό το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε μείωση της αντοχής (δηλαδή του μεγέθους F) κατά 20% σε σύγκριση με τη μέγιστη τιμή της [βλ. Σχ. 3.3(α)]. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και τον Ευρωκώδικα 8 – Τμήμα 3 δίνονται σχέσεις για τον υπολογισμό της οριακής γωνίας στρωφής χορδής, θ_u , για συνήθεις διατομές από Ω.Σ.

Πολλές φορές, η κλίση του κλάδου AB λαμβάνεται οριζόντια. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίσταση διαρροής F_y μπορεί να ληφθεί ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας.

Η παραμόρφωση δ_u ορίζει και την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία ορίζεται από το μετελαστικό τμήμα της παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία, δηλαδή: $\delta_p = \delta_u - \delta_y$.

Τμήμα CD

Αντιπροσωπεύει την απομένουσα ικανότητα του στοιχείου. Συνήθως, μετά την παραμόρφωση αστοχίας, δ_u , η ικανότητα ενός μέλους να παραλάβει σεισμικά φορτία μειώνεται σημαντικά, αλλά δεν μηδενίζεται και έτσι το στοιχείο μπορεί να εξακολουθήσει να παραλαμβάνει κατακόρυφα φορτία. Στο σημείο D, θεωρούμε ότι το στοιχείο χάνει την ικανότητα να παραλαμβάνει και κατακόρυφα φορτία.

Η τιμή της απομένουσας αντοχής είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Συνήθως λαμβάνεται ίση με το 20% της οριακής αντοχής.

Στάθμες επιτελεστικότητας, E

Στην καμπύλη F - δ του δομικού στοιχείου ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας με βάση τις αντίστοιχες παραμορφώσεις, δ_d . Στο Σχ. 3.4, το σημείο E αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας *προστασία ζωής*. Ο ορισμός των σημείων επιτελεστικότητας, E, δίνεται στους διάφορους κανονισμούς ανάλογα με το είδος του στοιχείου (υποστυλώματα, δοκοί, κλπ), τον τρόπο αστοχίας (δηλαδή εάν η συμπεριφορά είναι πλάστιμη ή ψαθυρή) και την κατηγοριοποίηση του στοιχείου σε *πρωτεύον* ή *δευτερεύον*. Ο διαχωρισμός των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα εξηγείται παρακάτω και γίνεται με κριτήριο το κατά πόσον η συμμετοχή του στην παραλαβή των σεισμικών φορτίων είναι περισσότερο ή λιγότερο σημαντική.

Παράδειγμα: ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. ορίζει ως εξής τις παραμορφώσεις δ_d που αντιστοιχούν σε πλάστιμα στοιχεία στη στάθμη επιτελεστικότητας *προστασία ζωής*:

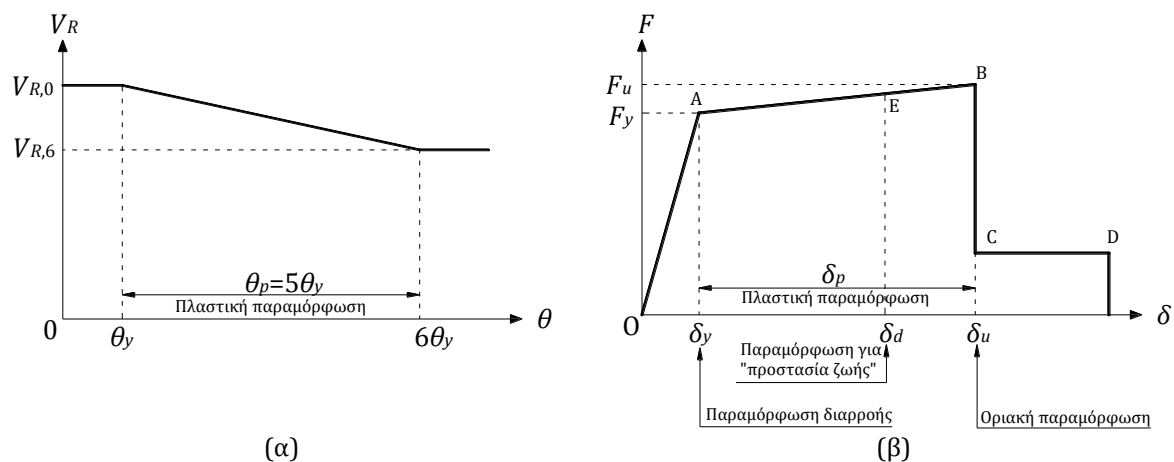
- Πρωτεύοντα στοιχεία: $\delta_d = 0.5(\delta_y + \delta_u) / \gamma_{Rd}$
- Δευτερεύοντα στοιχεία: $\delta_d = \delta_u / \gamma_{Rd}$

όπου γ_{Rd} είναι ο συντελεστής ασφαλείας, συνήθως ίσος με 1.50.

Πλάστιμα και ψαθυρά στοιχεία

Σε περιπτώσεις πλαστικών στοιχείων, δηλαδή όταν η αστοχία σε κάμψη προηγείται της αστοχίας σε διάτμηση, κρίσιμες είναι οι **παραμορφώσεις**, γι' αυτό ο ορισμός των σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται σε όρους παραμορφώσεων. Αντίθετα, σε περιπτώσεις **ψαθυρών στοιχείων**, δηλαδή όταν η αστοχία σε διάτμηση προηγείται αυτής σε κάμψη, ο ορισμός γίνεται σε όρους δυνάμεων.

Για τον καθορισμό του τελικού διαγράμματος $F - \delta$ που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή της καμπύλης ικανότητας, πρέπει να ελεγχθεί εάν η αστοχία σε τέμνουσα συμβαίνει πριν την αστοχία σε κάμψη και, εάν ναι, να τροποποιηθεί κατάλληλα το διάγραμμα $F - \delta$ που αντιστοιχεί στην κάμψη (δηλαδή το διάγραμμα $M - \theta$). Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται η αρχική αντοχή σε τέμνουσα $V_{R,0}$, η οποία όμως μειώνεται μετά τη διαρροή της διατομής σε κάμψη. Η μείωση της αντοχής σε τέμνουσα είναι ανάλογη της πλαστιμότητας στρεφών μ_θ . Επομένως, ο έλεγχος πρέπει να γίνεται για την τέμνουσα αντοχής που αντιστοιχεί στην εκάστοτε στρόφη θ . Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ., η μείωση της αντοχής σε τέμνουσα εφαρμόζεται για γωνίες στρόφης $\theta_y < \theta < 6\theta_y$, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5. Για στρόφες μεγαλύτερες από $6\theta_y$ η αντοχή σε τέμνουσα θεωρούμε ότι παραμένει σταθερή, ίση με $V_{R,6}$.



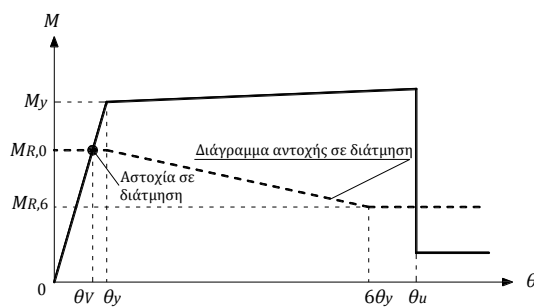
Σχ. 3.5. (α) Μεταβολή της αντοχής σε τέμνουσα, V_R , με τη γωνία στρόφης χορδής, θ , (β) Μετατροπή του διαγράμματος σε διάγραμμα ροπής - στρόφης χορδής, $M_R - \theta$.

Για τον καθορισμό του τελικού διαγράμματος $M - \theta$ μετατρέπουμε το διάγραμμα $V_R - \theta$ του Σχ. 3.5(α) σε διάγραμμα $M_R - \theta$, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5(β), όπου M_R είναι η ροπή στη διατομή που αντιστοιχεί στη V_R , δηλαδή: $M_R = V_R \cdot L_V$. Στη συνέχεια, τοποθετούμε το διάγραμμα $M_R - \theta$ πάνω στο διάγραμμα $M - \theta$ της διατομής που περιγράφει τη συμπεριφορά σε κάμψη. Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις (βλ. Σχήματα 3.6 και 3.7):

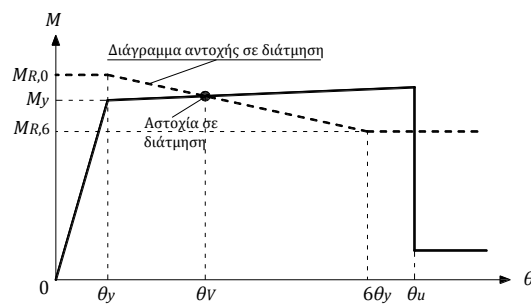
1. Αστοχία σε διάτμηση συμβαίνει πριν τη διαρροή της διατομής σε κάμψη (Σχ. 3.6(α)). Σε αυτή την περίπτωση η διατομή αστοχεί σε διάτμηση για γωνία στρόφης χορδής θ

$= \theta_v$. Για μεγαλύτερες γωνίες στρώσης, η αντοχή πέφτει απότομα, επειδή η αστοχία σε διάτμηση είναι ψαθυρή μορφή αστοχίας. Επομένως το τελικό διάγραμμα $M - \theta$ προκύπτει όπως φαίνεται στο Σχ. 3.7(α).

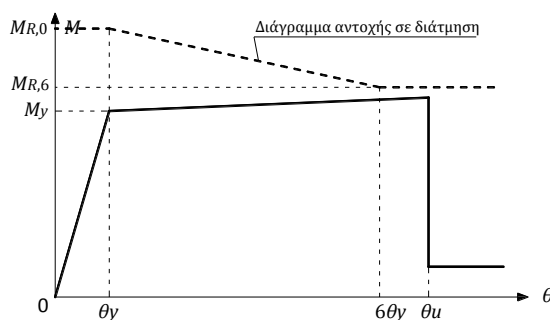
2. Αστοχία σε διάτμηση συμβαίνει μετά τη διαρροή της διατομής σε κάμψη, αλλά πριν την αστοχία σε κάμψη (Σχ. 3.6(β)). Σε αυτή την περίπτωση η διατομή αστοχεί σε διάτμηση για γωνία στρώσης χορδής $\theta = \theta_v$ όπου $\theta_y < \theta_v < \theta_u$. Για γωνίες στρώσης μεγαλύτερες της θ_v , η αντοχή πάλι πέφτει απότομα. Επομένως το τελικό διάγραμμα $M - \theta$ προκύπτει όπως φαίνεται στο Σχ. 3.7(β).



(α)

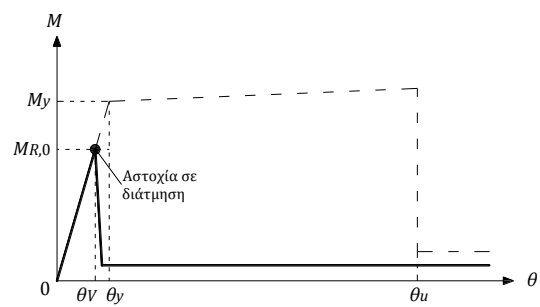


(β)

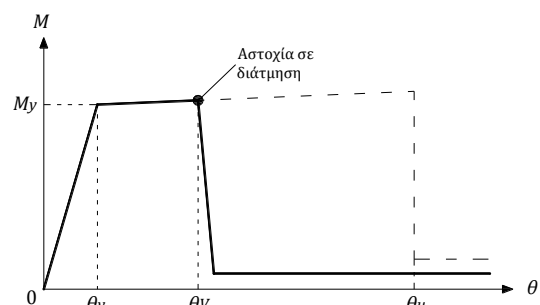


(γ)

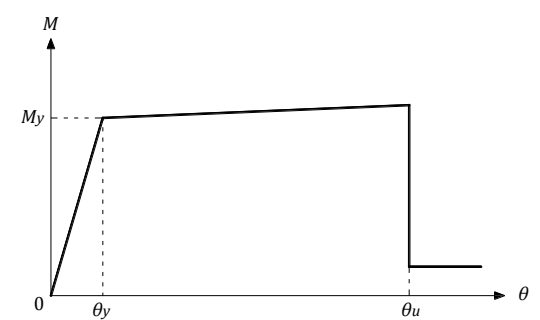
Σχ. 3.6. (α) Αστοχία σε διάτμηση πριν τη διαρροή σε κάμψη, (β) Αστοχία σε διάτμηση μετά τη διαρροή σε κάμψη, αλλά πριν την αστοχία σε κάμψη, (γ) Αστοχία μόνο σε κάμψη.



(α)



(β)



(γ)

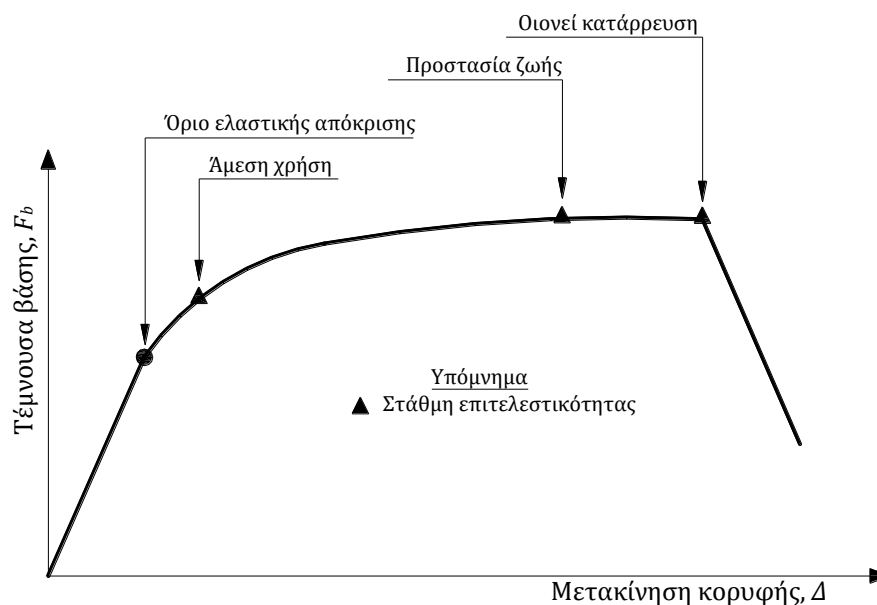
Σχ. 3.7. Διαγράμματα $M - \theta$ για τις περιπτώσεις του Σχ. 3.6.

3. Το διάγραμμα που περιγράφει την αστοχία σε διάτμηση βρίσκεται πάνω από το αντίστοιχο διάγραμμα που περιγράφει την αστοχία σε κάμψη (Σχ. 3.6(γ)). Σε αυτή την

περίπτωση η διατομή δεν αστοχεί σε διάτμηση και το τελικό διάγραμμα $M - \theta$ προκύπτει ίδιο με αυτό της αντοχής σε κάμψη, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.7(γ).

3.3. Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής

Αφού καθοριστούν οι καμπύλες $F-\delta$ που περιγράφουν τη συμπεριφορά των στοιχείων της κατασκευής και οι στάθμες επιτελεστικότητας κάθε στοιχείου πάνω στην αντίστοιχη καμπύλη, μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη ικανότητας όλης της κατασκευής και να τοποθετηθούν πάνω σε αυτή τα σημεία που αντιστοιχούν στις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας συνολικά για όλη την κατασκευή, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.8. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο καθορισμός των σημείων επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη ικανότητας, δηλαδή των μετακινήσεων κορυφής που αντιστοιχούν στα αντίστοιχα επίπεδα βλαβών, δεν είναι προφανής και συνήθως απαιτεί καλή κρίση μηχανικού. Αυτό συμβαίνει γιατί μία στάθμη επιτελεστικότητας για την κατασκευή ως σύνολο δεν αντιστοιχεί πάντοτε στο σημείο που το πρώτο στοιχείο της κατασκευής φτάνει σε αυτή τη στάθμη επιτελεστικότητας. Επειδή η κατασκευή αποτελείται από πολλά στοιχεία, είναι πιθανόν ένα μικρό ποσοστό των στοιχείων να έχει περάσει κάποια στάθμη επιτελεστικότητας, αλλά η κατασκευή ως σύνολο να βρίσκεται ακόμη κάτω από αυτή τη στάθμη. Επομένως, ο μηχανικός θα πρέπει να αξιολογήσει τη σημασία που έχει η εμφάνιση βλαβών σε κάποιο στοιχείο στη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.



Σχ. 3.8. Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη ικανότητας.

Σε αυτό το πνεύμα γίνεται ο διαχωρισμός των στοιχείων σε **πρωτεύοντα** και **δευτερεύοντα**, ώστε να βοηθηθεί ο μηχανικός σε τέτοιου είδους κρίσεις. Γενικώς, ως πρωτεύοντα ορίζονται τα στοιχεία που συμβάλλουν στην αντοχή και την ευστάθεια της

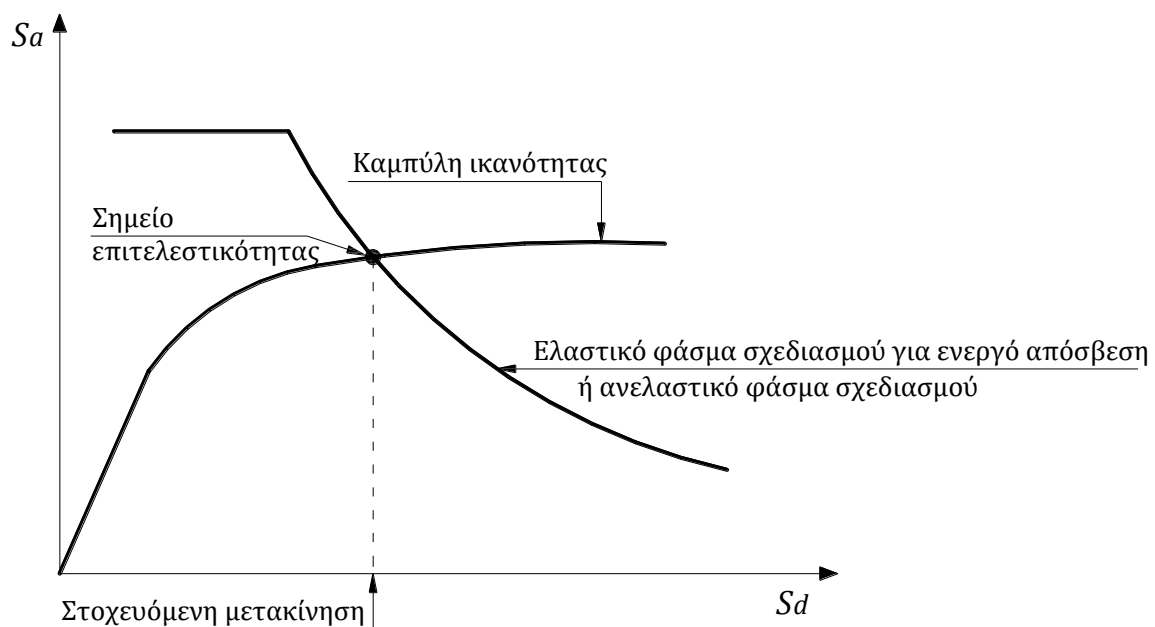
κατασκευής υπό σεισμικά φορτία, ενώ όλα τα υπόλοιπα χαρακτηρίζονται ως δευτερεύοντα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός των στοιχείων της κατασκευής σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα υπάρχει και στο βασικό κείμενο του Ευρωκώδικα 8 και εφαρμόζεται και στον αντισεισμικό σχεδιασμό νέων κατασκευών με τη μέθοδο των δυνάμεων.

Για κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας, οι παραμορφώσεις και οι αναμενόμενες βλάβες που αντιστοιχούν στα δευτερεύοντα στοιχεία είναι γενικώς μεγαλύτερες από αυτές των πρωτευόντων. Εάν κατά την κατασκευή της καμπύλης ικανότητας προκύψει ότι ένα μικρό μόνο ποσοστό των στοιχείων της κατασκευής υπερβαίνει μία στάθμη επιτελεστικότητας, ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να ορίσει αυτά τα στοιχεία ως δευτερεύοντα, αυξάνοντας έτσι το όριο της παραμόρφωσης της κατασκευής που αντιστοιχεί σε αυτό το επίπεδο επιτελεστικότητας. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι οι δοκοί που συνδέουν συζευγμένα τοιχώματα υφίστανται σημαντικές βλάβες ακόμη και για σχετικά μικρές παραμορφώσεις της κατασκευής, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ικανότητα της κατασκευής να παραλάβει σεισμικά φορτία. Επομένως, οι δοκοί σύζευξης μπορούν να οριστούν ως δευτερεύοντα στοιχεία.

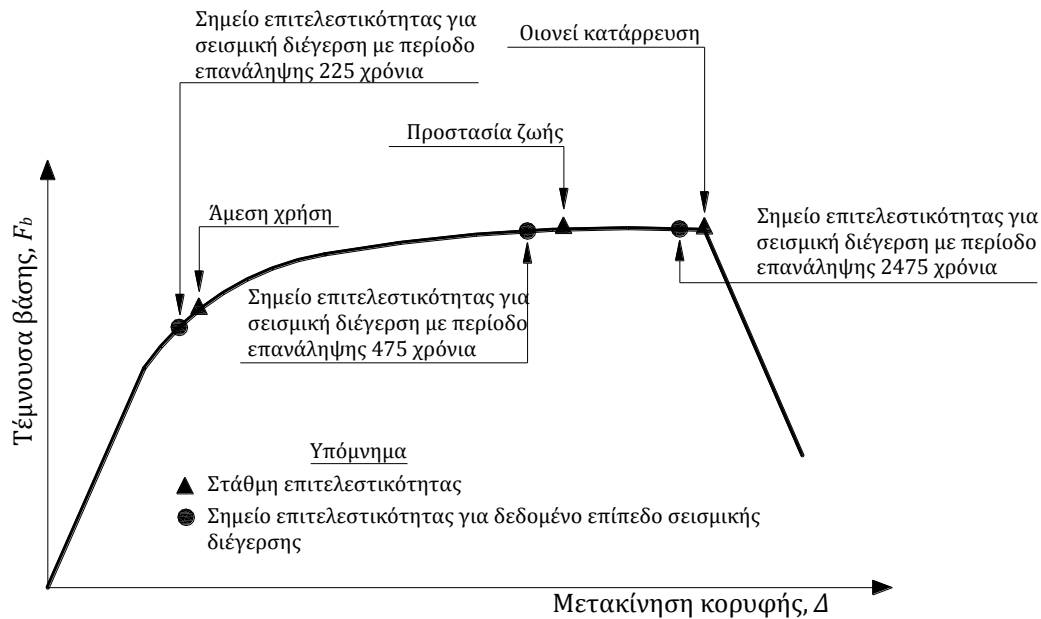
Μετά τον διαχωρισμό των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, μπορούν να οριστούν οι στάθμες επιτελεστικότητας της κατασκευής, π.χ. ως τα σημεία πάνω στην καμπύλη ικανότητας που το πρώτο πρωτεύον στοιχείο φθάνει στην αντίστοιχη στάθμη.

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Για δεδομένη περίοδο επανάληψης του σεισμού σχεδιασμού, υπολογίζεται κατ' αρχήν η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (στοχευόμενη μετακίνηση – target displacement) που ορίζει το σημείο επιτελεστικότητας (performance point) της κατασκευής γι' αυτό το σεισμό. Ο ακριβέστερος τρόπος υπολογισμού αυτής της μετακίνησης είναι με μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας. Η μέθοδος αυτή, όμως, απαιτεί εξειδικευμένα προγράμματα και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, ενώ τα αποτελέσματα δεν είναι κατ' ανάγκην αξιόπιστα, επειδή εξαρτώνται από την επιλογή της σεισμικής διέγερσης. Γι' αυτό και απαιτούνται πολλές τέτοιες επιλύσεις με σεισμικές διεγέρσεις διαφορετικών χαρακτηριστικών. Ως μία απλοποίηση του προβλήματος, η μετακίνηση μπορεί να υπολογιστεί με προσεγγιστικές μεθόδους (π.χ. μέθοδος των συντελεστών) ή με στατική μη-γραμμική ανάλυση (μέθοδος pushover), η ακρίβεια όμως των αποτελεσμάτων είναι αμφισβητήσιμη. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες εναλλακτικές μεθοδολογίες εφαρμογής της στατικής μη-γραμμικής ανάλυσης όπως η μέθοδος ATC-40, η μέθοδος N2, η ιδιομορφική στατική μη-γραμμική ανάλυση (modal pushover), η προσαρμοζόμενη στατική μη-γραμμική ανάλυση (adaptive pushover) κ.α. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται κάποιες από τις ευραίως χρησιμοποιούμενες μεθόδους υπολογισμού της στοχευόμενης μετακίνησης.



Σχ. 4.1. Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.



Σχ. 4.2. Σύγκριση στοχευόμενης μετακίνησης και αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας.

Αφού υπολογιστεί η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (μετακίνηση κορυφής) σημειώνεται στην καμπύλη ικανότητας το αντίστοιχο σημείο επιτελεστικότητας, το οποίο συγκρίνεται με την επιθυμητή στάθμη επιτελεστικότητας για τη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις στάθμες επιτελεστικότητας για τις οποίες γίνεται έλεγχος (Σχ. 4.2). Διαπιστώνεται έτσι εάν έχει υπερβληθεί ή όχι κάποιος στόχος σεισμικής ικανότητας (βλ. πίνακα 2.1).

Για τη στοχευόμενη μετακίνηση που αντιστοιχεί σε κάποια στάθμη σεισμικής δόνησης, μπορεί να ελεγχθεί σε ποιο σημείο της δικής του καμπύλης $F-\delta$ βρίσκεται κάθε στοιχείο. Στοιχεία, στα οποία υπάρχει υπέρβαση της επιθυμητής στάθμης επιτελεστικότητας, πρέπει να ενισχυθούν και η όλη διαδικασία να επαναληφθεί.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ

5.1. Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν δεν γίνονται μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, η στοχευόμενη μετακίνηση, που αντιστοιχεί σε κάποια σεισμική διέγερση με δεδομένο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού, μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή προσεγγιστικών μεθόδων, όπως η μέθοδος των συντελεστών και η στατική μη-γραμμική ανάλυση, γνωστή και ως μεθοδολογία pushover.

Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με αυτές τις “στατικές” μεθόδους δεν είναι γενικά ικανοποιητική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βασίζονται στην απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και ο υπολογισμός της απόκρισης της κατασκευής σε κάθε όροφο γίνεται με βάση την παραμόρφωσή της για συγκεκριμένη κατανομή φορτίων καθ’ ύψος. Η φιλοσοφία καθορισμού του σημείου επιτελεστικότητας βασίζεται στον υπολογισμό του σημείου που αντιστοιχεί στην εξισορρόπηση της απαίτησης (demand), σύμφωνα με το επιθυμητό φάσμα σχεδιασμού, και της ικανότητας (capacity) της κατασκευής. Σε διάγραμμα ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum), η εξισορρόπηση αυτή για το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα συμβαίνει στο σημείο τομής της καμπύλης ικανότητας και του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στην ενεργό απόσβεση για τη μέγιστη μετακίνηση (η ενεργός απόσβεση υπολογίζεται με βάση την πλαστιμότητα που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετακίνηση) ή του αντίστοιχου ανελαστικού φάσματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 4,1. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν την ελαστική μετακίνηση με την ανελαστική.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας σύμφωνα με τη μεθοδολογία ATC-40, τη μέθοδο N2 και τη μέθοδο των συντελεστών. Σε όλες τις μεθόδους, η μετακίνηση της κατασκευής υπολογίζεται από τη μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

5.2. Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα

Το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα εξαρτάται από την κατανομή των φορτίων καθ’ ύψος που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της καμπύλης ικανότητας. Για την κατανομή των φορτίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί τριγωνική κατανομή, ομοιόμορφη κατανομή, κατανομή σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή ή περισσότερο πολύπλοκοι συνδυασμοί με συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών.

Γενικά, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κατανομή των φορτίων στους ορόφους γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$F_i = V \frac{m_i \varphi_i}{\sum_j m_j \varphi_j} \quad (5.1)$$

όπου, $V = \sum F_i$ είναι η τέμνουσα βάσης. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για επίπεδη κίνηση της κατασκευής στη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης και επομένως οι συντελεστές φ_i δηλώνουν την κατανομή των μετακινήσεων στους ορόφους. Συνήθως λαμβάνονται ίσοι με τις αντίστοιχες τιμές της 1^{ης} ιδιομορφής. Σημειώνεται, όμως, ότι αντί της 1^{ης} ιδιομορφής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και οποιαδήποτε άλλη κατανομή μετακινήσεων, αντιπροσωπευτική της αναμενόμενης παραμόρφωσης της κατασκευής. Συνήθως, οι τιμές των φ_i κανονικοποιούνται έτσι ώστε η τιμή στην κορυφή να ισούται με μονάδα: $\varphi_{top}=1$.

Εάν η κατανομή των φορτίων γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (5.1) και $\varphi_{top}=1$, η αντιστοιχία μεταξύ του πολυβάθμιου συστήματος και του ισοδύναμου μονοβαθμίου για όλα τα μεγέθη (δυνάμεις, μετακινήσεις, ενέργεια, κλπ) γίνεται με τη σχέση:

$$Q = \Gamma \cdot Q^* \quad (5.2)$$

όπου

Q^* = μέγεθος στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα (π.χ. δύναμη F^* , μετακίνηση δ^*)

Q = αντίστοιχο μέγεθος στο πολυβάθμιο σύστημα (π.χ. τέμνουσα βάσης V , μετακίνηση κορυφής Δ)

Γ = συντελεστής συμμετοχής που δίνεται από τη σχέση (για επίπεδη κίνηση του της κατασκευής):

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i^2} \quad (5.3)$$

Ο αριθμητής της παραπάνω σχέσης ισούται με τη μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, δηλαδή,

$$m^* = \sum m_i \varphi_i \quad (5.4)$$

Σημειώνεται ότι, εφόσον τόσο οι δυνάμεις όσο και οι μετακινήσεις ακολουθούν τον ίδιο κανόνα μετασηματισμού [σχέση (5.2)], η δυσκαμψία του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος ισούται με αυτή του πολυβαθμίου. Η ιδιοπερίοδος όμως του ισοδύναμου μονοβαθμίου δεν ισούται με την 1^η ιδιοπερίοδο του πολυβαθμίου, ακόμη και εάν οι συντελεστές φ_i ισούνται με τις αντίστοιχες τιμές του 1^{ου} ιδιοδιανύσματος.

Η σχέση (5.2) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της καμπύλης ικανότητας του κτηρίου σε φάσμα ικανότητας (capacity spectrum) του ισοδύναμου μονοβαθμίου σε ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum) μορφή (Σχ. 5.1). Η μετατροπή αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$S_a = \frac{V}{\alpha \cdot m_{o\lambda}} \quad (5.5)$$

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma} \left[\text{ή } S_d = \frac{\Delta}{\Gamma \cdot \varphi_{top}} \text{ εάν } \varphi_{top} \neq 1 \right] \quad (5.6)$$

όπου:

V = τέμνουσα βάσης πολυβαθμίου

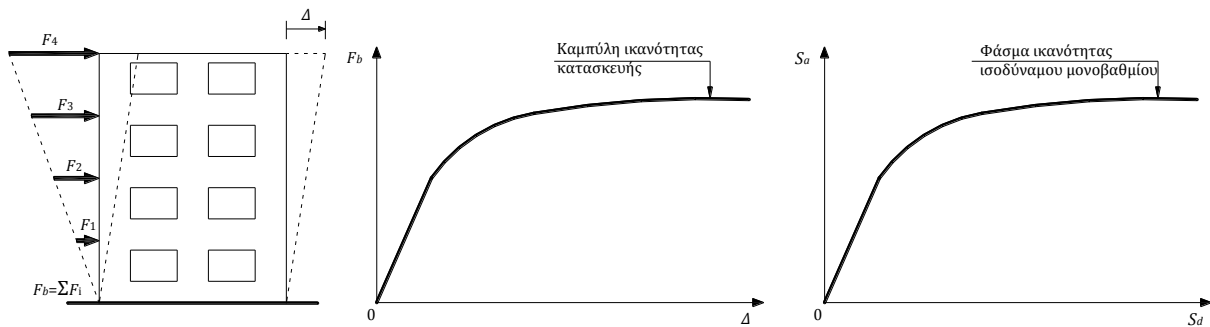
$m_{ολ}$ = συνολική μάζα πολυβαθμίου

α = ποσοστό συνολικής μάζας που συμμετέχει στη δυναμική απόκριση της κατασκευής για την αναμενόμενη μορφή παραμόρφωσης, που δίνεται από τη σχέση:

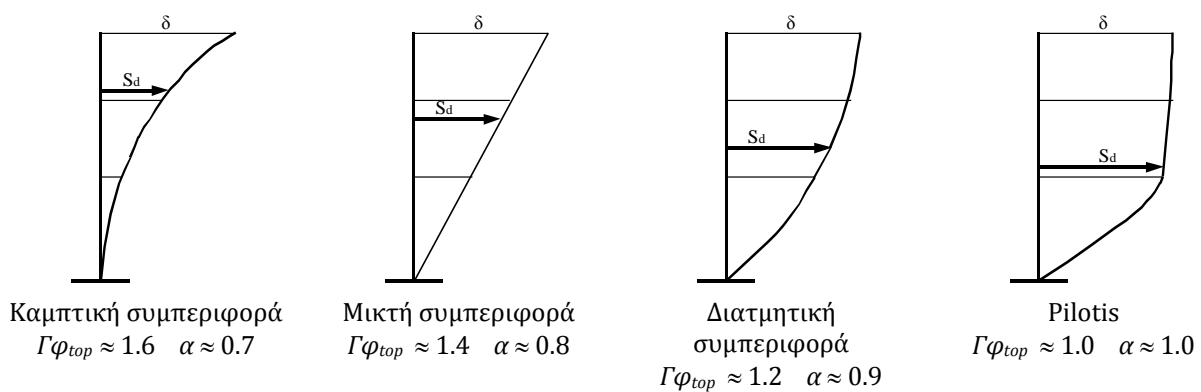
$$\alpha = \frac{[\sum m_i \varphi_i]^2}{m_{ολ} \cdot \sum m_i \varphi_i^2} = \frac{\Gamma \cdot \sum m_i \varphi_i}{m_{ολ}} = \Gamma \frac{m^*}{m_{ολ}} \quad (5.7)$$

Δ = μετακίνηση κορυφής

Ενδεικτικές τιμές των συντελεστών α για διάφορους τρόπους συμπεριφοράς κτηρίων παρουσιάζονται στο Σχ. 5.2.



Σχ. 5.1. Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής και του φάσματος ικανότητας του ισοδύναμου μονοβαθμίου σε ADRS μορφή.



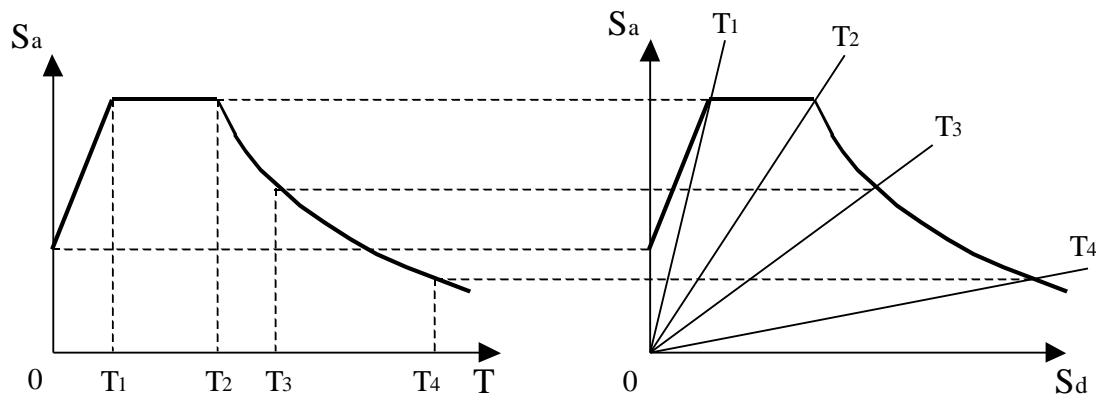
Σχ. 5.2. Τιμές συντελεστή α για χαρακτηριστικούς τρόπους συμπεριφοράς.

5.3. Μεθοδολογία ATC-40

Στο ATC-40 προτείνονται τρεις μεθοδολογίες υπολογισμού με παραπλήσια αποτελέσματα. Παρακάτω περιγράφεται με βήματα η διαδικασία υπολογισμού της πρώτης μεθοδολογίας, η οποία είναι και η περισσότερο αναλυτική, σε αντίθεση με την τρίτη, η οποία είναι γραφική.

Βήμα 1: Μεταφορά του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για $\zeta=5\%$ στο πεδίο επιτάχυνση-μετακίνηση (μορφή ADRS).

Η διαδικασία μετατροπής είναι απλή και φαίνεται στο Σχ. 5.3.



Κλασική μορφή φάσματος

$$S_a = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot S_d$$

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_a$$

ADRS μορφή φάσματος

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}}$$

Ακτινικές γραμμές από το (0,0)
έχουν σταθερή περίοδο

Σχ. 5.3. Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε ADRS μορφή.

Βήμα 2: Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας (capacity curve) και του φάσματος ικανότητας (capacity spectrum).

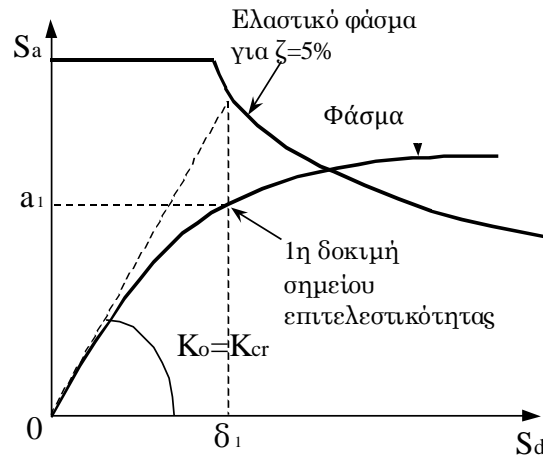
Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας γίνεται με υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές της τέμνουσας βάσης θεωρώντας κατανομή των φορτίων καθ' ύψος συμβατή με την αναμενόμενη μορφή μετακινήσεων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος.

Βήμα 3: Εύρεση 1^{ου} σημείου δοκιμών (Σχ. 5.4).

Στην παρακάτω διαδικασία, για λόγους απλοποίησης, τα μεγέθη (μετακίνηση, επιτάχυνση) που αφορούν στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα παρουσιάζονται χωρίς αστερίσκο.

Από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση $\zeta=5\%$ υπολογίζεται η μετακίνηση δ_1 για τη δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό

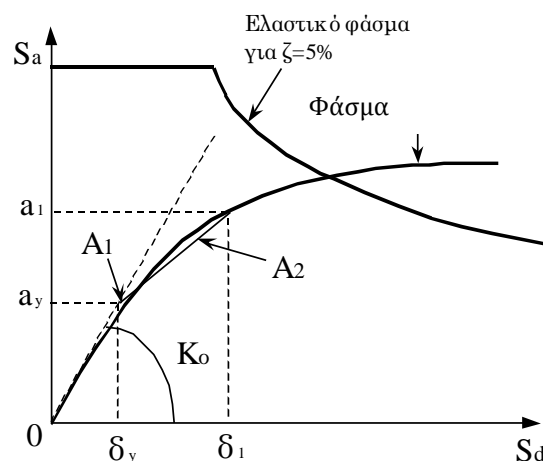
σημείο διαρροής). Για τη μετακίνηση δ_1 υπολογίζεται η πρώτη εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας πάνω στο φάσμα ικανότητας και η αντίστοιχη επιτάχυνση a_1 . Η μετακίνηση δ_1 είναι η τιμή που θα προέκυπτε από τη θεώρηση ίσης μετακίνησης μεταξύ του ελαστικού και ανελαστικού συστήματος.



Σχ. 5.4. Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών.

Βήμα 4: Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας (Σχ. 5.5)

Από το 1^ο σημείο δοκιμής φέρνουμε ευθεία, έτσι ώστε τα εμβαδά A_1 και A_2 να είναι περίπου ίσα και ορίζουμε το σημείο τομής με την ευθεία που αντιστοιχεί στην αρχική δυσκαμψία. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη διαρροή σύμφωνα με τη διγραμμική καμπύλη συμπεριφοράς και η προβολή του στους άξονες S_a και S_d ορίζει την επιτάχυνση διαρροής, a_y , και τη μετακίνηση διαρροής, δ_y , αντίστοιχα.



Σχ. 5.5. Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας.

Βήμα 5: Υπολογισμός ενεργούς απόσβεσης

Η ενεργός απόσβεση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\zeta_{eff} = \zeta_{ελ} + \zeta_{υστ} \quad (5.8)$$

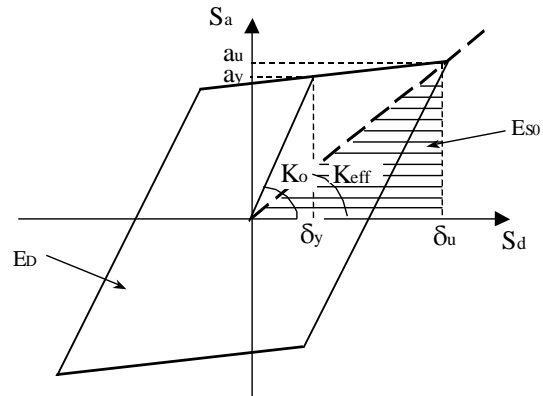
όπου: $\zeta_{ελ}$ = απόσβεση κατασκευής για ελαστική συμπεριφορά (= 0.05 για Ω.Σ.)

$\zeta_{υστ}$ = υστερητική απόσβεση λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς.

Για τον υπολογισμό της υστερητικής απόσβεσης προτείνεται η σχέση του Chopra (1995), η οποία βασίζεται στη σχέση των ενεργειών του ελαστοπλαστικού και του ισοδύναμου ελαστικού συστήματος:

$$\zeta_{υστ} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_D}{E_{S0}} \Rightarrow$$

$$\zeta_{υστ} = \frac{0.637 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u} \quad (5.9)$$



Σχ. 5.6. Υπολογισμός υστερητικής απόσβεσης κατά Chopra.

Η σχέση του Chopra *υπερεκτιμά* την υστερητική απόσβεση για σεισμούς μεγάλης διάρκειας και κατασκευές χωρίς καλή πλάσιμη συμπεριφορά. Γι' αυτό, στο ATC-40 προτείνεται η χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή κ , ανάλογα με την ποιότητα της κατασκευής σε συνδυασμό με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση. Οι τύποι συμπεριφοράς δίνονται στον πίνακα 5.1 και οι συντελεστές κ στον πίνακα 5.2.

Θέτοντας στη σχέση (5.9) $a_u = a_1$ και $\delta_u = \delta_1$ προκύπτει:

$$\zeta_{eff} (\%) = 5 + \frac{63.7 \cdot \kappa \cdot (a_y \cdot \delta_1 - \delta_y \cdot a_1)}{a_1 \cdot \delta_1} \quad (5.10)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε απόσβεση $\zeta = \zeta_{eff}$ με πολλαπλασιασμό των τιμών του φάσματος για $\zeta = 5\%$ με τους συντελεστές SR_A και SR_V (βλ. Σχ. 5.7):

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \cdot \ln \zeta_{eff}}{2.12} \geq SR_{A,min} \quad (5.11)$$

$$SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln \zeta_{eff}}{1.65} \geq SR_{V,min} \quad (5.12)$$

στα τμήματα που αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση και σταθερή ταχύτητα, αντίστοιχα. Οι ελάχιστες τιμές των συντελεστών δίνονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.1. Τύποι συμπεριφοράς κτηρίων.

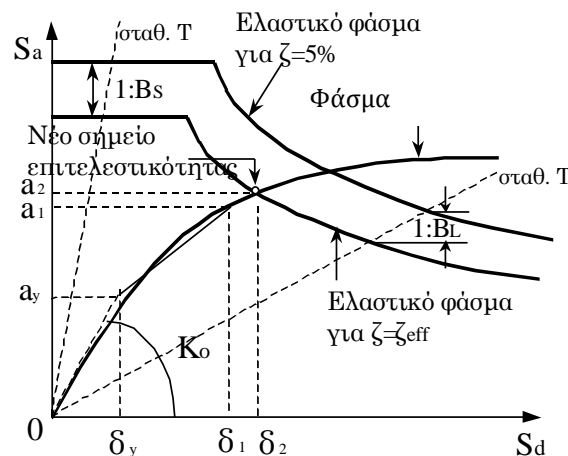
| Διάρκεια σεισμού | Νέες, καλές αντισεισμικές κατασκευές | Μέτριες αντισεισμικά κατασκευές | Φτωχές αντισεισμικά κατασκευές |
|---|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| Μικρή (κοντά στο επίκεντρο) | A | B | C |
| Μεγάλη (μακριά από επίκεντρο, γενικώς για ζώνες III & IV) | B | C | C |

Πίνακας 5.2. Τιμές διορθωτικού συντελεστή κ.

| Τύπος συμπεριφοράς | $\zeta_{\text{υστ}} (\%)$ | κ |
|--------------------|---------------------------|--|
| A | ≤ 16.25 | 1.00 |
| | > 16.25 | $1.13 - \frac{0.51 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$ |
| B | < 25 | 0.67 |
| | > 25 | $0.845 - \frac{0.446 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$ |
| C | Όλες οι τιμές | 0.33 |

Πίνακας 5.3. Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης

| Τύπος συμπεριφοράς | $SR_{A,min}$ | $SR_{V,min}$ |
|--------------------|--------------|--------------|
| A | 0.33 | 0.50 |
| B | 0.44 | 0.56 |
| C | 0.56 | 0.67 |

**Σχ. 5.7.** Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για $\zeta=\zeta_{\text{eff}}$ και εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας.

Το σημείο τομής μεταξύ του φάσματος σχεδιασμού για $\zeta=\zeta_{\text{eff}}$ και του φάσματος ικανότητας ορίζει το νέο σημείο επιτελεστικότητας. Η προβολή αυτού του σημείου στους άξονες S_a και S_d ορίζει την νέα επιτάχυνση, a_2 και τη νέα μετακίνηση, δ_2 αντίστοιχα.

Βήμα 6: Έλεγχος σύγκλισης

Η μέθοδος βασίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Θεωρούμε ότι η σύγκλιση έχει επιτευχθεί εάν:

$$0.95 \cdot \delta_1 < \delta_2 < 1.05 \cdot \delta_1 \quad (5.13)$$

Εάν το κριτήριο δεν ικανοποιείται, θέτουμε $a_1=a_2$ και $\delta_1=\delta_2$ και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το 4^ο βήμα. Εάν το κριτήριο ικανοποιείται, η μετακίνηση δ_2 αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση δ^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (στοχευόμενη μετακίνηση).

Βήμα 7: Στοχευόμενη μετακίνηση κατασκευής

Η μετακίνηση της κορυφής, Δ , που αντιστοιχεί στη μετακίνηση δ^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, υπολογίζεται από τη σχέση (5.6), επιλύοντας ως προς Δ και θέτοντας $S_d = \delta^*$.

5.4. Μέθοδος N2

Η μέθοδος N2 προτάθηκε από τον Fajfar (1996, 1999) και βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το συντελεστή συμπεριφοράς με την πλαστιμότητα. Έτσι, αντί να χρησιμοποιούνται ελαστικά φάσματα για την ισοδύναμη απόσβεση που αντιστοιχεί στην αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα, όπως γίνεται στη μεθοδολογία ATC-40, υπολογίζεται απ' ευθείας η ανελαστική επιτάχυνση. Η ανελαστική φασματική επιτάχυνση, S_a , συνδέεται με την αντίστοιχη ελαστική, S_{ae} , με τη σχέση:

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (5.14)$$

όπου R_μ είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς (reduction factor) λόγω της ανελαστικής απόκρισης. Σημειώνεται ότι ο όρος R_μ αντιστοιχεί στο συντελεστή συμπεριφοράς χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η υπεραντοχή, δηλαδή στον όρο q_y (q_d κατά ΕΑΚ). Υπενθυμίζεται ότι στον ΕΑΚ ο συντελεστής συμπεριφοράς q ορίζεται ως: $q = \gamma_{Rd} \cdot q_y$, όπου γ_{Rd} είναι ο συντελεστής υπεραντοχής.

Αντίστοιχα, η ανελαστική φασματική μετακίνηση, S_d , συνδέεται με τη μετακίνηση διαρροής, S_{dy} , με τη σχέση:

$$S_d = \mu \cdot S_{dy} \quad (5.15)$$

Για ένα ελαστικό – τελείως πλαστικό σύστημα (δηλ. χωρίς κράτυνση), ισχύει $S_a = S_{ay}$, όπου S_{ay} =επιτάχυνση διαρροής. Επειδή $S_{ae} = \omega^2 \cdot S_{de}$ και $S_{ay} = \omega^2 \cdot S_{dy}$, όπου ω είναι η ιδιοπερίοδος του ελαστικού συστήματος, οι εξισώσεις (5.14) και (5.15) οδηγούν στην παρακάτω σχέση μεταξύ της ελαστικής και της ανελαστικής μετακίνησης:

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} \quad (5.16)$$

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί εμπειρικοί τύποι που δίνουν τη σχέση μεταξύ της πλαστιμότητας, μ , και του συντελεστή συμπεριφοράς, R_μ . Στις εργασίες του Fajfar χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$R_{\mu} = (\mu - 1) \frac{T}{T_0} + 1 \quad \text{για } T \leq T_0 \quad (5.17\alpha)$$

$$R_{\mu} = \mu \quad \text{για } T \geq T_0 \quad (5.17\beta)$$

όπου

$$T_0 = 0.65 \cdot \mu^{0.3} \cdot T_c \leq T_c \quad (5.18)$$

Στην παραπάνω σχέση, T είναι η ιδιοπερίοδος του μονοβάθμιου ταλαντωτή και T_c η χαρακτηριστική περίοδος της εδαφικής κίνησης. Για φάσματα σχεδιασμού της μορφής του ΕΑΚ ή του EC8, η περίοδος T_c ορίζεται ως το σημείο τομής του τμήματος που αντιστοιχεί σε σταθερή επιτάχυνση (οριζόντιο τμήμα) με αυτό που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα (φθίνων κλάδος), δηλαδή $T_c = T_2$ κατά ΕΑΚ και $T_c = T_c$ κατά EC8.

Η εξίσωση (5.17β) δηλώνει ότι για μεσαίες και μεγάλες περιόδους ισχύει η παραδοχή των ίσων μετακινήσεων, δηλαδή ότι η μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος είναι ίση με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού με την ίδια περίοδο. Για κατασκευές με μικρές περιόδους, η ισότητα αυτή δεν ισχύει, όπως δηλώνει η εξίσωση (5.17α). Η περίοδος T_0 , που καθορίζει το όριο μεταξύ των περιοχών ισχύος κάθε εξίσωσης, εξαρτάται από την πλαστιμότητα, όπως φαίνεται από τη σχέση (5.18). Η περίοδος T_0 δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική περίοδο του φάσματος σχεδιασμού, T_c .

Επειδή η εξάρτηση της περιόδου T_0 από την πλαστιμότητα απαιτεί επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας, προτείνεται η απλοποίηση:

$$T_0 = T_c \quad (5.19)$$

η οποία είναι μία συντηρητική παραδοχή που δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα.

Η μέθοδος σε βήματα περιγράφεται ως εξής:

Βήμα 1: Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής και του αντίστοιχου φάσματος ικανότητας του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος σε μορφή ADRS.

Η διαδικασία είναι ίδια με τη μέθοδο ATC-40.

Βήμα 2: Κατασκευή του αντίστοιχου ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος.

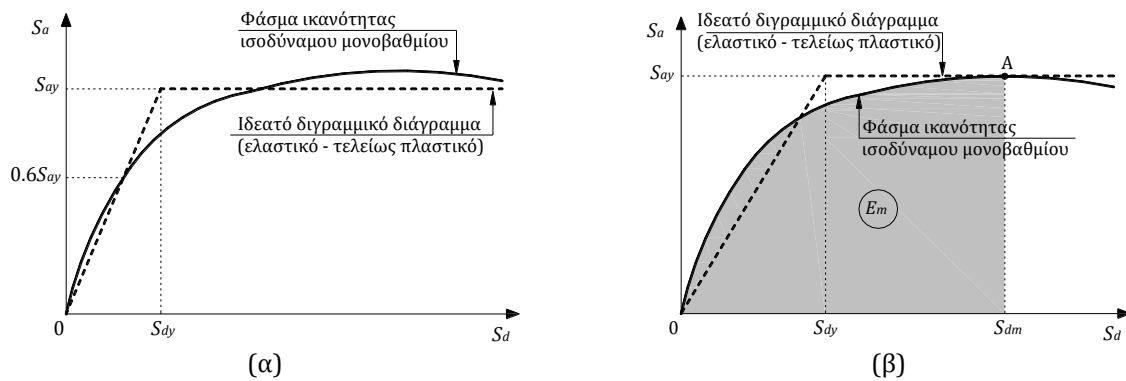
Το διγραμμικό διάγραμμα ικανότητας κατασκευάζεται χωρίς κράτυνση, δηλαδή ο μετελαστικός κλάδος είναι οριζόντιος. Αυτό γίνεται γιατί έχει αποδειχθεί ότι μία συνήθης (μικρή) κράτυνση δεν έχει σημαντική επίδραση στην τιμή της ανελαστικής μετακίνησης.

Σύμφωνα με την αρχική πρόταση των εμπνευστών της μεθόδου, το διγραμμικό διάγραμμα κατασκευάζεται με κλίση ελαστικού κλάδου ίση με την τέμνουσα δυσκαμψία που αντιστοιχεί στο 60% της επιτάχυνσης διαρροής και έτσι ώστε τα εμβάδα που αποκόπτονται πάνω και κάτω από την αρχική καμπύλη να είναι ίσα (Σχ. 5.8(α)). Στον EC8, όπου υιοθετείται η μέθοδος N2, προτείνεται μία πιο απλή διγραμμικοποίηση, στην οποία ο οριζόντιος κλάδος περνάει από το

σημείο που αντιστοιχεί στη δημιουργία πλαστικού μηχανισμού (σημείο A, Σχ. 5.8(β)). Έτσι, η επιτάχυνση διαρροής S_{ay} αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή του φάσματος ικανότητας, ενώ η μετακίνηση διαρροής, S_{dy} , μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$S_{dy} = 2 \left(S_{dm} - \frac{E_m}{S_{ay}} \right) \quad (5.20)$$

όπου S_{dm} είναι η μετακίνηση που αντιστοιχεί στο σημείο A και E_m το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του φάσματος ικανότητας μέχρι τη μετακίνηση S_{dm} .



Σχ. 5.8. Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού φάσματος ικανότητας: (α) σύμφωνα με τη μέθοδο N2, (β) σύμφωνα με τη μέθοδο του Παραρτήματος Β του EC8.

Από το διγραμμικό διάγραμμα ικανότητας καθορίζονται η επιτάχυνση διαρροής, S_{ay} και η μετακίνηση διαρροής, S_{dy} . Έτσι, για το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα η δύναμη διαρροής είναι $F_y^* = m^* S_{ay}$ και η μετακίνηση διαρροής $\delta_y^* = S_{dy}$.

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η ιδιοπερίοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος από τη σχέση:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{S_{dy}}{S_{ay}}} = 2\pi \sqrt{\frac{m^* \delta_y^*}{F_y^*}} \quad (5.21)$$

Βήμα 3: Υπολογισμός της ανελαστικής μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

Για την περίοδο T^* , υπολογίζονται η ελαστική επιτάχυνση, S_{ae} και η ελαστική μετακίνηση, S_{de} , από το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού. Ο απαιτούμενος συντελεστής συμπεριφοράς ισούται με:

$$R_\mu = S_{ae} / S_{ay}.$$

Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

(α) Εάν $T^* \geq T_0$, η ανελαστική μετακίνηση ισούται με την ελαστική και επομένως:

$$\delta^* = S_d = S_{de} \quad (5.22)$$

Η χαρακτηριστική περίοδος, T_0 , υπολογίζεται από την (5.18) ή την απλοποιημένη (5.19). Σε αυτή την περίπτωση, $\mu = R_\mu$.

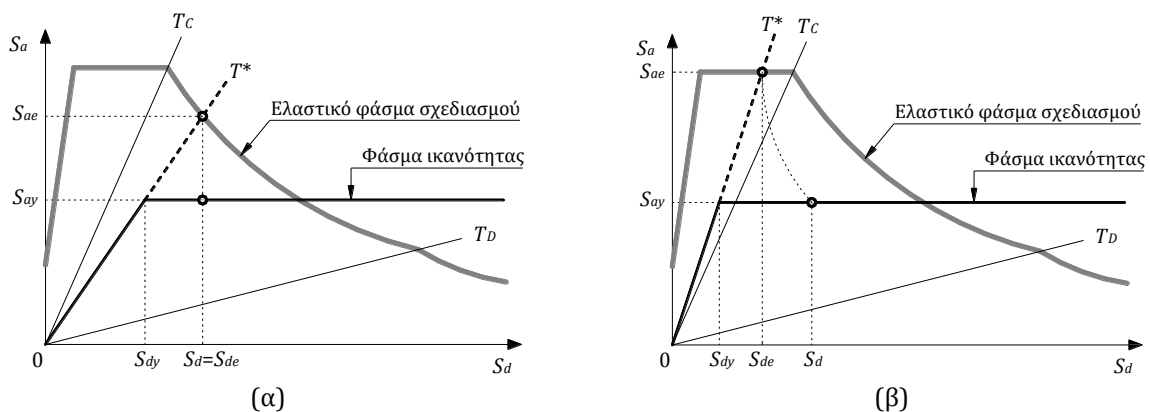
(β) Εάν $T^* < T_0$, η πλαστιμότητα, μ , υπολογίζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς, R_μ , από τη σχέση (5.17α), η οποία δίνει:

$$\mu = (R_\mu - 1) \frac{T_0}{T^*} + 1 \quad (5.23)$$

Εάν για τον υπολογισμό της T_0 χρησιμοποιηθεί η σχέση (5.18), απαιτείται επαναληπτική διαδικασία, ενώ εάν ο υπολογισμός γίνει σύμφωνα με την απλοποιημένη σχέση (5.19), ο υπολογισμός του μ είναι άμεσος, χωρίς να απαιτούνται επαναλήψεις. Μετά τον υπολογισμό της πλαστιμότητας, η ανελαστική μετακίνηση προκύπτει από τη σχέση:

$$\delta^* = S_d = \mu \cdot S_{dy} \quad (5.24)$$

Ο τρόπος προσδιορισμού της στοχευόμενης μετακίνησης για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις (α) και (β) φαίνεται σχηματικά στο Σχ. 5.9. Και στις δύο περιπτώσεις, η ανελαστική μετακίνηση αντιστοιχεί στο σημείο τομής του διγραμμικού φάσματος ικανότητας με το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε πλαστιμότητα μ . Σημειώνεται όμως ότι με την παραπάνω διαδικασία υπολογίζεται η μετακίνηση χωρίς να χρειάζεται να κατασκευαστεί το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού.



Σχ. 5.9. Υπολογισμός στοχευόμενης μετακίνησης: (α) $T^* \geq T_0$, (β) $T^* \leq T_0$.

Βήμα 4: Στοχευόμενη μετακίνηση κατασκευής

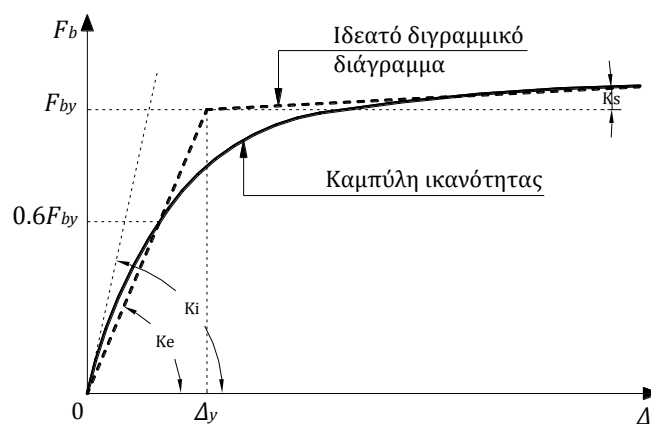
Όπως και στη μέθοδο ATC-40, η μετακίνηση της κορυφής, Δ , που αντιστοιχεί στη μετακίνηση δ^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.6), με αντικατάσταση της S_d με τη δ^* .

5.5. Μέθοδος των συντελεστών

Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης της κατασκευής με τη μέθοδο των συντελεστών περιγράφεται στη FEMA 356 και τον ATC-40. Και αυτή η μέθοδος βασίζεται στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα, το οποίο όμως χρησιμοποιείται χωρίς να αναφέρεται ρητά.

Βήμα 1: Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος για την καμπύλη ικανότητας

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται κατ' αρχήν η μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε διγραμμικό διάγραμμα. Σε αντίθεση με τη μέθοδο N2, η κλίση του μετελαστικού κλάδου δεν λαμβάνεται μηδενική, αλλά έχει τιμή K_s . Ο τρόπος κατασκευής του διγραμμικού διαγράμματος είναι παρόμοιος με αυτόν της μεθόδου N2 με μικρή διαφοροποίηση. Στον ATC-40 προτείνεται η εξής διαδικασία (βλ. Σχ. 5.10):



Σχ. 5.10. Κατασκευή ιδεατής διγραμμικής απεικόνισης της καμπύλης ικανότητας.

- Κατασκευάζεται ο μετελαστικός κλάδος, ορίζοντας τη δυσκαμψία, K_s , κατά την κρίση του μηχανικού, και θεωρώντας ότι η αντίστοιχη ευθεία διέρχεται από το σημείο που η καμπύλη ικανότητας έχει γίνει περίπου οριζόντια.
- Ορίζεται η ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία, K_e , από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο πάνω στην καμπύλη ικανότητας που αντιστοιχεί στο 60% της τέμνουσας διαρροής, V_y . Επειδή αυτή η τιμή δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, απαιτούνται κάποιες δοκιμές.
- Ορίζεται η τέμνουσα διαρροής, V_y , από το σημείο τομής των ευθειών με κλίση K_e και K_s , που αντιστοιχούν στον ελαστικό και τον μετελαστικό κλάδο αντίστοιχα.

Βήμα 2: Υπολογισμός της ενεργούς θεμελιώδους ιδιοπεριόδου, T_e .

Από δυναμική ανάλυση υπολογίζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής στη διεύθυνση που εξετάζεται, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική δυσκαμψία, K_i (βλ. Σχ. 5.10). Για να υπολογίσουμε την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο, που αντιστοιχεί σε δυσκαμψία K_e , χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (5.25)$$

Βήμα 3: Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης, Δ_t .

Η στοχευόμενη μετακίνηση της κορυφής που αντιστοιχεί σε δεδομένο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού (target displacement) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (5.26)$$

Οι τιμές των παραμέτρων ορίζονται παρακάτω σύμφωνα με FEMA 356.

C_0 = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση της κορυφής, Δ , με τη φασματική μετακίνηση, S_d . Ισχύει: $\Delta = \Gamma \cdot S_d \cdot \varphi_{top}$, όπου Γ ο συντελεστής συμμετοχής σύμφωνα με τη σχέση (5.3). Άρα, $C_0 = \Gamma \cdot \varphi_{top}$. Εάν $\varphi_{top} = 1$, τότε $C_0 = \Gamma$. Για τον υπολογισμό του συντελεστή συμμετοχής μπορούν να χρησιμοποιούνται οι τιμές φ_i που αντιστοιχούν στην 1^η ιδιομορφή ή οι τιμές που αντιστοιχούν στην παραμόρφωση του κτηρίου όταν συμβαίνει η στοχευόμενη μετακίνηση. Εναλλακτικά, η τιμή του συντελεστή C_0 μπορεί να λαμβάνεται απ' ευθείας από τον Πίνακα 5.4.

C_1 = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$C_1 = 1.0 \quad \text{για } T_e \geq T_s \quad (5.27\alpha)$$

$$C_1 = \frac{1.0 + (R-1) \cdot T_s / T_e}{R} \quad \text{για } T_e < T_s \quad (5.27\beta)$$

Επίσης ισχύει: $C_1 \leq 1.5$ για $T_e \leq 1.0$ sec και $C_1 \geq 1.0$.

Στις παραπάνω σχέσεις:

T_s = η περίοδος που ορίζεται από το σημείο τομής του τμήματος του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε σταθερή επιτάχυνση (οριζόντιο τμήμα) με αυτό που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα (φθίνων κλάδος), δηλαδή $T_s = T_2$ κατά ΕΑΚ και $T_s = T_c$ κατά EC8.

R = ο συντελεστής συμπεριφοράς που εκφράζει το λόγο της ελαστικής απαίτησης προς τη δύναμη διαρροής, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{S_a / g}{V_y / W} \cdot C_m \quad (5.28)$$

όπου:

S_a = φασματική επιτάχυνση σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο, T_e .

V_y = τέμνουσα διαρροής σύμφωνα με τη διγραμμική απεικόνιση της καμπύλης ικανότητας (Σχ. 5.9).

W = συνολικό βάρος της κατασκευής

C_m = συντελεστής που δηλώνει την ενεργό μάζα σύμφωνα με τον πίνακα 5.5.

Εναλλακτικά, ο συντελεστής C_m μπορεί να λαμβάνεται ίσος με το λόγο της 1^{ης} ιδιομορφικής μάζας προς τη συνολική μάζα.

C_2 = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη μορφή των βρόχων υστέρησης της ανελαστικής συμπεριφοράς. Οι τιμές του C_2 για διάφορους τύπους συστημάτων και διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας δίνονται στον Πίνακα 5.6. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή $C_2=1.0$.

C_3 = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την αύξηση των μετακινήσεων λόγω επιρροής $P-\Delta$, που ορίζεται ως εξής:

$C_3 = 1.0$ για θετική κλίση του μετελαστικού κλάδου ($K_s > 0$)

$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha| \cdot (R-1)^{3/2}}{T_e}$ για αρνητική κλίση του μετελαστικού κλάδου ($K_s < 0$)

όπου $\alpha = K_s / K_e$ (βλ. Σχ. 5.9).

Η τιμή του συντελεστή C_3 δεν χρειάζεται να υπερβαίνει την τιμή:

$$C_3 \leq 1.0 + 5 \cdot \frac{(\theta - 1)}{T_e}$$

όπου θ = συντελεστής σχετικής μεταθετότητας, ίσος με τη μέγιστη τιμή των αντίστοιχων συντελεστών των ορόφων, θ_i , οι οποίοι ορίζονται από τη σχέση:

$$\theta_i = \frac{P_i \delta_i}{V_i h_i} \quad (5.29)$$

όπου:

P_i = το κατακόρυφο φορτίο του i ορόφου

V_i = η συνολική τέμνουσα δύναμη του i ορόφου στην εξεταζόμενη διεύθυνση για το σεισμικό συνδυασμό, σύμφωνα με την κλασική ανάλυση

h_i = ύψος του i ορόφου

δ_i = σχετική μετακίνηση των πλακών του ορόφου στην εξεταζόμενη διεύθυνση, μετρούμενη στο κέντρο δυσκαμψίας (center of rigidity).

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Η μέθοδος N2 πρακτικά ταυτίζεται με τη μέθοδο των συντελεστών, εάν $C_2 = 1.0$ και $C_3 = 1.0$, αφού ισχύει $C_0 = \Gamma$ (για $\varphi_{top}=1.0$) και $C_1 = \mu/R_\mu$.

Πίνακας 5.4. Τιμές του συντελεστή C_0

| Αριθμός ορόφων | Διατμητικά κτήρια | | Λοιπά κτήρια |
|----------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | Τριγωνική κατανομή φορτίων | Ομοιόμορφη κατανομή φορτίων | Οποιαδήποτε κατανομή φορτίων |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2 | 1.2 | 1.15 | 1.2 |
| 3 | 1.2 | 1.2 | 1.3 |
| 5 | 1.3 | 1.2 | 1.4 |
| 10+ | 1.3 | 1.2 | 1.5 |

Πίνακας 5.5. Τιμές του συντελεστή C_m (*)

| Αριθμός ορόφων | Πλαισιακά κτήρια από Ω.Σ. | Τοιχωματικά κτήρια από Ω.Σ. | Κτήρια από Ω.Σ. τύπου ανεστρ. εκκρεμούς | Πλαίσια παραλαβής ροπών από χάλυβα | Πλαίσια από χάλυβα με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα | Πλαίσια από χάλυβα με έκκεντρους συνδέσμους | Άλλος τύπος |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|---|------------------------------------|---|---|-------------|
| 1 - 2 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 3+ | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.0 |

(*) $C_m = 1.0$ για $T_e > 1.0$ sec.**Πίνακας 5.6.** Τιμές του συντελεστή C_2

| Στάθμη επιτελεστικότητας | $T_e \leq 0.1$ sec | | $T_e \geq T_s$ | |
|--------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Τύπος κτηρίου 1 | Τύπος κτηρίου 2 | Τύπος κτηρίου 1 | Τύπος κτηρίου 2 |
| Άμεση χρήση | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Προστασία ζωής | 1.3 | 1.0 | 1.1 | 1.0 |
| Οιονεί κατάρρευση | 1.5 | 1.0 | 1.2 | 1.0 |

Επεξήγηση

Τύπος 1: Κατασκευές στις οποίες περισσότερο από το 30% της τέμνουσας σε κάθε όροφο αναλαμβάνεται από οποιονδήποτε συνδυασμό των εξής στοιχείων: Τυπικά πλαίσια παραλαβής ροπών, πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους, πλαίσια με ημιάκαμπτες συνδέσεις, πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους που παραλαμβάνουν μόνο εφελκυστικές δυνάμεις, άοπλη τοιχοποιία.

Τύπος 2: Οι κατασκευές που δεν ανήκουν στην κατηγορία 1.

Παρατήρηση: Για ενδιάμεσες τιμές ιδιοπεριόδων γίνεται γραμμική παρεμβολή.

6. ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΟΦΗΣ

6.1. Εισαγωγή

Η μεθοδολογία της τυπικής στατικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover analysis) μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις κυρίως επίπεδης απόκρισης, η οποία καθορίζεται κυρίως από τη συμμετοχή της αντίστοιχης δεσπόζουσας ιδιομορφής. Εάν όμως η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών ή η επιρροή της στροφής σε περιπτώσεις μη-κανονικών κτηρίων είναι σημαντική, απαιτείται τροποποίηση της μεθόδου ώστε να ληφθούν υπόψη αυτά τα φαινόμενα.

Διάφορες τροποποιήσεις της στατικής ανελαστικής ανάλυσης έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι οποίες μπορούν να καταταγούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

Στην πρώτη ομάδα μεθόδων ανήκουν αυτές που θεωρούν ότι η ανελαστική συμπεριφορά περιορίζεται μόνον στην απόκριση της θεμελιώδους ιδιομορφής στην εξεταζόμενη διεύθυνση, ενώ η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών αντιστοιχεί σε ελαστική συμπεριφορά. Επομένως, η συμμετοχή της θεμελιώδους ιδιομορφής υπολογίζεται από μία τυπική ανάλυση pushover, ενώ η συμμετοχή των ανώτερων ιδιομορφών και της στροφής λαμβάνεται υπόψη από ελαστική ιδιομορφική ανάλυση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η επέκταση της μεθόδου N2 (extended N2) που περιγράφεται παρακάτω.

Στη δεύτερη ομάδα μεθόδων ανήκουν αυτές στις οποίες υπολογίζεται η ανελαστική συμπεριφορά για όλες τις σημαντικές ιδιομορφές και στη συνέχεια συνδυάζονται οι ανελαστικές ιδιομορφικές αποκρίσεις με SRSS ή CQC, όπως γίνεται και στην ελαστική ιδιομορφική ανάλυση. Η θεώρηση αυτή είναι καταχρηστική, αφού δεν είναι σωστό να γίνεται συνδυασμός ανελαστικών αποκρίσεων. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (modal pushover analysis) που περιγράφεται παρακάτω.

Για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της στροφής, οι αναλύσεις γίνονται υποχρεωτικά σε τρισδιάστατο προσομοίωμα της κατασκευής. Γίνεται όμως ξεχωριστή ανάλυση για κάθε διεύθυνση σεισμικής καταπόνησης που εξετάζεται. Έτσι, στη συνήθη περίπτωση που εξετάζεται σεισμός κατά X και σεισμός κατά Y, απαιτούνται, γενικώς, τέσσερις επιλύσεις: σεισμός +X, σεισμός -X, σεισμός +Y και σεισμός -Y.

Γενικώς, μπορούμε να χωρίσουμε το διάνυσμα της απόκρισης της κατασκευής $\{u\}$ σε τρία τμήματα, κάθε ένα εκ των οποίων αντιστοιχεί στην απόκριση σε μία μόνο διεύθυνση, δηλαδή: $\{u\}^T = \{\mathbf{u}_x \ \mathbf{u}_y \ \mathbf{u}_\theta\}^T$, όπου $\mathbf{u}_x = \{u_x\}$ είναι το διάνυσμα των μετακινήσεων των μαζών κατά x, $\mathbf{u}_y = \{u_y\}$ είναι το διάνυσμα των μετακινήσεων των μαζών κατά y και $\mathbf{u}_\theta = \{u_\theta\}$ είναι το διάνυσμα των στροφών. Αντίστοιχα, η i ιδιομορφή μπορεί να γραφεί ως: $\{\varphi_i\}^T = \{\varphi_{i,x} \ \varphi_{i,y} \ \varphi_{i,\theta}\}^T$, όπου κάθε όρος του δεξιού μέλους περιέχει τις συνιστώσες της ιδιομορφής στην αντίστοιχη διεύθυνση. Με αυτή

την κατάταξη των βαθμών ελευθερίας, το διάνυσμα κατεύθυνσης της σεισμικής διέγερσης $\{r\}$ για σεισμό κατά X μπορεί να γραφεί ως εξής: $\{r_x\}^T = \{\mathbf{1} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}\}^T$, όπου $\mathbf{1} = \{1\}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα και $\mathbf{0} = \{0\}$ είναι το μηδενικό διάνυσμα. Αντίστοιχα, για σεισμό κατά Y ισχύει: $\{r_y\}^T = \{\mathbf{0} \ \mathbf{1} \ \mathbf{0}\}^T$.

6.2. Επέκταση μεθόδου N2 (Extended N2)

Παρακάτω παρουσιάζεται η επέκταση της μεθόδου N2 (Kreslin and Fajfar, 2012), η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο ανώτερες ιδιομορφές όσο και την πρόσθετη καταπόνηση της κατασκευής λόγω στροφής σε περιπτώσεις μη-κανονικών κτηρίων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απαιτείται ξεχωριστή ανάλυση σε κάθε διεύθυνση σεισμικής διέγερσης. Σε κάθε διεύθυνση ανάλυσης απαιτούνται τα εξής βήματα:

Βήμα 1

Γίνεται μία στατική ανελαστική ανάλυση εφαρμόζοντας την τυπική μέθοδο N2 (βλ. παρ. 5.4). Από την ανάλυση αυτή προκύπτει η στοχευόμενη μετακίνηση (target displacement), $S_{d,t}$, του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος για το φάσμα σχεδιασμού, η οποία μετατρέπεται σε μετακίνηση του Κ.Μ. της κορυφής του κτηρίου, Δ_t , με εφαρμογή της σχέσης (5.6): $\Delta_t = \Gamma \cdot \varphi_{top} \cdot S_{d,t}$. Από τα δεδομένα της ανάλυσης pushover μπορούν να υπολογιστούν τα drift των ορόφων, οι πλαστικές στροφές και τα εντατικά μεγέθη των μελών που αντιστοιχούν στη μετακίνηση Δ_t .

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας γίνεται για το τρισδιάστατο προσομοίωμα της κατασκευής, στο οποίο εφαρμόζονται οριζόντια φορτία με την κατανομή της δεσπόζουσας ιδιομορφής στη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης. Στη γενική περίπτωση, επειδή όλες οι ιδιομορφές έχουν γενικώς μη-μηδενικούς όρους σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας, η κατανομή των σεισμικών φορτίων θα περιλαμβάνει τόσο οριζόντια φορτία στη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης, όσο και φορτία στην κάθετη σε αυτή διεύθυνση καθώς και στρεπτικές ροπές. Ως μία απλοποίηση της διαδικασίας, θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη μόνον τα φορτία στη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης, μηδενίζοντας τα φορτία στην κάθετη διεύθυνση καθώς και τις στρεπτικές ροπές (Fajfar *et al.* 2005). Αυτό ισοδυναμεί με το να μηδενίσουμε τις τιμές της δεσπόζουσας ιδιομορφής που αντιστοιχούν στην κάθετη διεύθυνση και τις στροφές, δηλαδή, ο υπολογισμός της κατανομής των φορτίων για την κατασκευή της καμπύλης ικανότητας να μη γίνει με βάση την πλήρη ιδιομορφή $\{\varphi_1\}^T = \{\varphi_{1,x} \ \varphi_{1,y} \ \varphi_{1,\theta}\}^T$, αλλά, π.χ. για ανάλυση κατά X, με την απλοποιημένη ιδιομορφή $\{\varphi_1\}^T = \{\varphi_{1,x} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}\}^T$. Σημειώνεται όμως ότι ακόμη και σε αυτή την περίπτωση που τα φορτία εφαρμόζονται μόνο σε μία διεύθυνση, η απόκριση της κατασκευής θα έχει, γενικώς, μη-μηδενικές τιμές σε όλες τις διευθύνσεις, λόγω της στροφής.

Βήμα 2

Γίνεται μία τυπική ιδιομορφική ανάλυση στη διεύθυνση που εξετάζεται, για όσες ιδιομορφές απαιτούνται (π.χ. για να ικανοποιηθεί το κριτήριο του 90% της συνολικής μάζας) συμπεριλαμβανομένης και της δεσπόζουσας ιδιομορφής του βήματος 1, με θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Από αυτή την ανάλυση υπολογίζεται η μετακίνηση Δ_{el} στο Κ.Μ. της κορυφής για το φάσμα σχεδιασμού. Στη συνέχεια κανονικοποιούνται όλα τα μεγέθη (εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις) έτσι ώστε η μετακίνηση να είναι ίση με τη στοχευόμενη μετακίνηση Δ_t του βήματος 1. Δηλαδή, όλα τα αποτελέσματα του βήματος 2 πολλαπλασιάζονται με το λόγο Δ_t/Δ_{el} .

Βήμα 3

Σε αυτό το βήμα γίνεται ο υπολογισμός δύο διορθωτικών συντελεστών που θα χρησιμοποιηθούν για να ληφθούν υπόψη οι ανώτερες ιδιομορφές και η επιρροή της στροφής.

3.α Διορθωτικός συντελεστής μετακινήσεων λόγω στροφής

Σε κάθε θέση j στην κάτοψη του κτηρίου που μας ενδιαφέρει υπολογίζεται ο λόγος:

$$c_{Tj} = \frac{D_{j,norm}^{(2)}}{D_{j,norm}^{(1)}} \quad (6.1)$$

όπου $D_{j,norm}^{(2)}$ είναι η ανηγμένη μετακίνηση στη θέση j του ανώτερου ορόφου (κορυφής) του κτηρίου που προέκυψε από την επίλυση του βήματος 2 (μετά την κανονικοποίηση) και $D_{j,norm}^{(1)}$ είναι η ανηγμένη μετακίνηση στη θέση j της κορυφής που προέκυψε από την επίλυση του βήματος 1. Η ανηγμένη μετακίνηση σε κάθε θέση ορίζεται από τη σχέση:

$$D_{j,norm}^{(i)} = \frac{\Delta_j^{(i)}}{\Delta_{KM}^{(i)}}, \quad i = 1, 2 \quad (6.2)$$

όπου $\Delta_j^{(i)}$ είναι η μετακίνηση στη θέση j της κορυφής από την επίλυση του βήματος i ($i = 1$ αντιστοιχεί στην ανάλυση του βήματος 1 και $i = 2$ αντιστοιχεί στην ανάλυση του βήματος 2) και $\Delta_{KM}^{(i)}$ είναι η αντίστοιχη μετακίνηση στο Κ.Μ. της κορυφής.

Οι ανηγμένες μετακινήσεις αντιστοιχούν στη “μεγέθυνση” της μετακίνησης στη θέση j σε σύγκριση με τη μετακίνηση του Κ.Μ. λόγω της στροφής. Η λέξη μεγέθυνση τίθεται σε εισαγωγικά γιατί στη δύσκαμπτη πλευρά του κτηρίου είναι πιθανόν να προκύψει $D_{j,norm} < 1$, δηλαδή η στρόφη προκαλεί μείωση της μετακίνησης στη θέση j σε σύγκριση με τη μετακίνηση του Κ.Μ. Λόγω όμως των μεγάλων αβεβαιοτήτων που υπάρχουν στη στρεπτική συμπεριφορά, δεν επιτρέπεται να ληφθεί υπόψη μείωση των μετακινήσεων λόγω της στροφής. Γι’ αυτό, οι ανηγμένες μετακινήσεις από την ελαστική ανάλυση (βήμα 2) δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερες από τη μονάδα και εάν προκύψει $D_{j,norm}^{(2)} < 1$ τίθεται $D_{j,norm}^{(2)} = 1$.

3.β Διορθωτικός συντελεστής drifts λόγω ανώτερων ιδιομορφών (καθ' ύψος)

Για κάθε όροφο i υπολογίζεται ο λόγος:

$$c_{Ei} = \frac{drift_i^{(2)}}{drift_i^{(1)}} \quad (6.3)$$

όπου $drift_i^{(2)}$ είναι το drift του ορόφου i από την ανάλυση του βήματος 2 και $drift_i^{(1)}$ το αντίστοιχο drift από την ανάλυση του βήματος 1. Τα drifts των ορόφων υπολογίζονται από τις μετακινήσεις των Κ.Μ. των ορόφων.

Και σε αυτή την περίπτωση, δεν επιτρέπεται μείωση των μετακινήσεων λόγω ανώτερων ιδιομορφών, δηλαδή, εάν προκύψει $c_{Ei} < 1$ τίθεται $c_{Ei} = 1$.

Βήμα 4

Υπολογίζεται ο συνολικός διορθωτικός συντελεστής για κάθε θέση j (σε κάτοψη) και για κάθε όροφο i από τη σχέση:

$$c_{ij} = c_{Tj} \times c_{Ei} \quad (6.4)$$

Ο συντελεστής c_{ij} εφαρμόζεται σε όλα τα μεγέθη παραμορφώσεων (μετακινήσεις, στροφές κόμβων κλπ.) που προέκυψαν από την ανάλυση του βήματος 1 (ανάλυση pushover).

Ο συντελεστής c_{ij} εφαρμόζεται και στα εντατικά μεγέθη (δυνάμεις, ροπές) των μελών που προέκυψαν από την ανάλυση του βήματος 1, εφόσον δεν προκύπτει δύναμη ή ροπή μεγαλύτερη από την τιμή διαρροής (δηλαδή για τα μέλη που συμπεριφέρονται ελαστικά). Στα μέλη που προκύπτει ότι διαρρέουν, τα εντατικά μεγέθη υπολογίζονται από τις καμπύλες $F - \delta$ (βλ. Σχ. 3.4) με βάση την παραμόρφωση του μέλους.

6.3. **Ιδιομορφική στατική ανελαστική ανάλυση (modal pushover)**

Σε αυτή τη μεθοδολογία, η οποία προτάθηκε από τους Chopra & Goel (2004), γίνεται στατική ανελαστική ανάλυση (pushover) για όλες τις σημαντικές ιδιομορφές. Τα βήματα, που ακολουθούνται για την ανάλυση σε κάθε διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης που εξετάζεται, είναι:

Βήμα 1

Υπολογισμός των k πρώτων σημαντικών ιδιομορφών, με βάση τις ελαστικές ιδιότητες της κατασκευής, όπως γίνεται και στην τυπική ιδιομορφική ανάλυση. Προκύπτουν έτσι τα πρώτα k ιδιοδιανύσματα, $\{\varphi_i\}$, $i = 1, 2, \dots, k$. Η ανάλυση γίνεται για το χωρικό προσομοίωμα της κατασκευής και οι ιδιομορφές που προκύπτουν έχουν γενικώς μη-μηδενικούς όρους σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή: $\{\varphi_i\}^T = \{\varphi_{i,x} \ \varphi_{i,y} \ \varphi_{i,\theta}\}^T$ όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Βήμα 2

Για κάθε ιδιομορφή i και για τη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης που εξετάζεται υπολογίζεται η κατανομή των οριζόντιων φορτίων για μία (αυθαίρετη) μικρή τιμή της επιτάχυνσης σχεδιασμού S_d :

$$\{F_i\} = [M] \cdot \{\varphi_i\} \cdot \Gamma_i \cdot S_d \quad (6.5)$$

όπου $[M]$ είναι το μητρώο μάζας και Γ_i είναι ο συντελεστής συμμετοχής της i ιδιομορφής που προκύπτει από τη σχέση:

$$\Gamma_i = \frac{\{\varphi_i\}^T [M] \{r\}}{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}} \quad (6.6)$$

Τα φορτία που προκύπτουν έχουν, γενικώς, συνιστώσες τόσο στην εξεταζόμενη διεύθυνση του σεισμού όσο και στην κάθετη σε αυτή, καθώς και στρεπικές ροπές, δηλαδή μπορούμε να γράψουμε: $\{F_i\} = \{F_{i,x} \ F_{i,y} \ M_{i,\theta}\}^T$.

Με αυτή την κατανομή των φορτίων κατασκευάζεται η καμπύλη ικανότητας της i ιδιομορφής με σταδιακή αύξηση των φορτίων και υπολογισμό της τέμνουσας βάσης F_{bi} και της μετακίνησης δ_{ri} στον κόμβο αναφοράς r (reference point) λαμβάνοντας υπόψη την ανελαστική συμπεριφορά σε κάθε στάθμη φόρτισης. Σημειώνεται ότι ο κόμβος αναφοράς μπορεί να είναι διαφορετικός σε κάθε ιδιομορφή (βλ. παρ. 6.4).

Επειδή στον κόμβο αναφοράς r υπολογίζονται δύο οριζόντιες μετακινήσεις: $\delta_{ri,x}$ και $\delta_{ri,y}$, σε κάθε ιδιομορφή μπορούν να υπολογιστούν δύο καμπύλες ικανότητας, μία στη διεύθυνση x και μία στη διεύθυνση y . Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούμε την καμπύλη ικανότητας που αντιστοιχεί στη *δεσπόζουσα διεύθυνση μετακίνησης* της ιδιομορφής, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση στην οποία θεωρούμε ότι ενεργεί η σεισμική διέγερση. Σημειώνεται όμως ότι η διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης επηρεάζει την κατανομή των οριζόντιων φορτίων μέσω του διανύσματος κατεύθυνσης $\{r\}$, όπως φαίνεται από την Εξ. (6.6), και επομένως έχει ληφθεί υπόψη στην κατασκευή της καμπύλης ικανότητας.

Επισημαίνεται ότι η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας για κάθε ιδιομορφή i γίνεται θεωρώντας ότι προϋπάρχουν τα φορτία βαρύτητας. Επομένως, οι μετακινήσεις $\{\delta_i\}$ και τα drifts $\{drift_i\}$ που αντιστοιχούν σε κάθε σημείο της καμπύλης ικανότητας εμπεριέχουν και τις μετακινήσεις $\{\delta_g\}$ και τα drifts $\{drift_g\}$ λόγω κατακορύφων φορτίων (τα οποία, όμως, στις συνήθεις περιπτώσεις είναι μηδενικά ή πολύ μικρά).

Βήμα 3

Για κάθε ιδιομορφή γίνεται μία τυπική ανάλυση pushover και υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση $\delta_{ri,t}$. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει:

- Την κατασκευή του αντίστοιχου φάσματος ικανότητας χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$S_{ai} = \frac{F_{bi}}{M_i^*} \quad (6.7\alpha)$$

$$S_{di} = \frac{\delta_{ri}}{\Gamma_i \varphi_{ri}} \quad (6.7\beta)$$

όπου M_i^* είναι η ιδιομορφική μάζα της i ιδιομορφής που δίνεται από τη σχέση:

$$M_i^* = \Gamma_i \{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\} \quad (6.8)$$

- Τη διγραμμικοποίηση του φάσματος ικανότητας. Σημειώνεται ότι συνιστάται να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα $P - \Delta$ στο βήμα 2, που οδηγεί σε καμπύλες ικανότητας με φθίνοντα κλάδο. Σε αυτή την περίπτωση συνιστάται και το διγραμμικό φάσμα ικανότητας να κατασκευάζεται με μετελαστικό κλάδο αρνητικής κλίσης (φθίνοντα).
- Τον υπολογισμό της στοχευόμενης μετακίνησης $S_{di,t}$ του ισοδύναμου μονοβαθμίου για το φάσμα σχεδιασμού (π.χ. με εφαρμογή της τυπικής μεθοδολογίας N2)
- Τον υπολογισμό της αντίστοιχης στοχευόμενης μετακίνησης στον κόμβο αναφοράς με εφαρμογή της σχέσης: $\delta_{ri,t} = \Gamma_i \varphi_{ri} S_{di,t}$.
- Τον υπολογισμό της παραμόρφωσης της κατασκευής που αντιστοιχεί σε μετακίνηση $\delta_{ri,t}$ από τα δεδομένα της αντίστοιχης καμπύλης ικανότητας. Προκύπτουν οι μετακινήσεις $\{\delta_i\}$ και τα drifts $\{drift_i\}$ της ιδιομορφής, που περιέχουν όμως και την επιρροή των φορτίων βαρύτητας, αφού τα φορτία βαρύτητας έχουν ληφθεί υπόψη ως προϋπάρχουσα φόρτιση για την κατασκευή της καμπύλης ικανότητας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Βήμα 4

Σε αυτό το βήμα γίνεται ο συνδυασμός των ιδιομορφικών αποκρίσεων με τη μέθοδο CQC. Ο συνδυασμός γίνεται μόνο για τις μετακινήσεις και τα drifts. Οι πλαστικές στροφές και τα εντατικά μεγέθη των μελών (δυνάμεις και ροπές) υπολογίζονται στη συνέχεια από τα drifts.

Ο συνδυασμός των ιδιομορφικών αποκρίσεων γίνεται στις “δυναμικές” τιμές των μετακινήσεων και των drifts κάθε ιδιομορφής, δηλαδή στα μεγέθη που προκύπτουν εάν αφαιρεθούν τα αντίστοιχα μεγέθη λόγω κατακορύφων φορτίων. Έτσι, για κάποιο μέγεθος απόκρισης r_i που υπολογίστηκε στο βήμα 3 για την ιδιομορφή i (το r δηλώνει μετακίνηση ή drift) υπολογίζεται:

$$r_{i,dyn} = r_i - r_g \quad (6.9)$$

και η τελική τιμή του μεγέθους r προκύπτει από τη σχέση:

$$r \approx \max \left[r_g \pm \sqrt{\sum_i \sum_j \varepsilon_{ij} r_{i,dyn} r_{j,dyn}} \right] \quad i, j = 1, 2, \dots, k \quad (6.10)$$

όπου ε_{ij} είναι ο συντελεστής συσχέτισης των ιδιομορφών i και j σύμφωνα με τη μέθοδο CQC.

6.4. Επιλογή κόμβου αναφοράς

Σε κτήρια, ως κόμβος αναφοράς επιλέγεται συνήθως το Κ.Μ. του ανώτερου ορόφου (Κ.Μ. κορυφής). Σε άλλες όμως κατασκευές, η επιλογή του κατάλληλου κόμβου αναφοράς δεν είναι προφανής.

Γενικώς, ο κόμβος αναφοράς κάθε ιδιομορφής, ο οποίος δεν απαιτείται να είναι ίδιος σε όλες τις ιδιομορφές, πρέπει να αντιστοιχεί σε σημείο που να είναι αντιπροσωπευτικό της κίνησης της ιδιομορφής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση γεφυρών ο κόμβος αναφοράς θα μπορούσε να είναι (Karpos *et al.* 2005):

- Το Κ.Μ. του φορέα (καταστρώματος) ή της κορυφής του βάθρου που βρίσκεται πλησιέστερα σε αυτό. Η επιλογή αυτή είναι λογική για βάθρα με συμμετρική κατανομή υψών και δυσκαμψιών, όπου το Κ.Μ. του φορέα βρίσκεται κοντά στο σημείο της μέγιστης μετακίνησης. Σε περιπτώσεις όμως γεφυρών με ανισοϋψή βάθρα, ασύμμετρα κατανεμημένα κατά μήκος της γέφυρας, η επιλογή αυτή μπορεί να μην είναι η πλέον κατάλληλη, επειδή το Κ.Μ. μπορεί να απέχει σημαντικά από τη θέση της μέγιστης μετακίνησης στην εγκάρσια διεύθυνση, η οποία διαφοροποιείται σημαντικά από ιδιομορφή σε ιδιομορφή.
- Το σημείο του φορέα που αντιστοιχεί στη θέση x_i^* του ισοδύναμου μονοβαθμίου της ιδιομορφής (η απόσταση x_i^* μετριέται κατά μήκος της γέφυρας). Η τιμή x_i^* υπολογίζεται από τη σχέση:

$$x_i^* = \frac{\sum_j x_j m_j \varphi_{ji}}{\sum_j m_j \varphi_{ji}} \quad (6.11)$$

- Το σημείο του φορέα στο οποίο συμβαίνει η μέγιστη μετακίνηση της ιδιομορφής.
- Η κορυφή του βάθρου στο οποίο συμβαίνει η μεγαλύτερη πλαστική στρόφη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Applied Technology Council (ATC) (1996). 'Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings', ATC-40.
- Chopra, A.K. and Goel, R.K. (2004). 'A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**: 903-927.
- European Committee for Standardization (CEN). 'Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 3: Strengthening and Repair of Buildings', prEN 1998-3, Brussels.
- Fajfar, P. and Gašperšič, P. (1996). 'N2 - a method for non-linear seismic analysis for RC buildings', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**, 23-67.
- Fajfar, P. (1999). 'Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**, 979-993.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000). 'Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings', FEMA 356.
- Kappos, A.J., Paraskeva, T.S., Sextos, A.G. (2005). 'Modal pushover analysis as a means for the seismic assessment of bridge structures', *4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, Thessaloniki, 26-27 Aug.
- Maja, K and Fajfar, P. (2012). 'The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation', *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**, 695-715.
- Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) (2013). 'Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)', 1^η Αναθεώρηση.