



Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
Hellenic Open University

Ειδικά θέματα Δυναμικής των Κατασκευών και Σεισμικής Μηχανικής

Διδάσκων: Ε.Ι. Σαπουντζάκης

Δυναμική Ανάλυση Κατασκευών

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

- 1. Εισαγωγή στην ανελαστική δυναμική ανάλυση*
- 2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων*
- 3. Ειδικές μέθοδοι μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης*

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

1. Εισαγωγή στην ανελαστική δυναμική ανάλυση

- Οι περισσότερες δυναμικές αναλύσεις κτιρίων βασίζονται στην ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Στην πραγματικότητα μια κατασκευή υπό την επίδραση ισχυρών σεισμικών δυνάμεων συμπεριφέρεται ανελαστικά.
- Η ανελαστική συμπεριφορά πρέπει να ληφθεί υπόψη, συνεπώς οι σύγχρονοι κανονισμοί αντισεισμικού σχεδιασμού (UBC 1994, EC8 1994, NEAK 1995) την προϋποθέτουν.
- Η Δυναμική ανάλυση μη γραμμικών κατασκευών γίνεται συνήθως με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) (Χωρική Διακριτοποίηση).
- Για τη χρονική ολοκλήρωση χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι αριθμητικής ολοκλήρωσης για την επίλυση των μη γραμμικών μητρικών εξισώσεων κίνησης, ενώ εφαρμόζονται και διάφορες προσεγγιστικές τεχνικές.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

1. Εισαγωγή στην ανελαστική δυναμική ανάλυση

- Άμεσες (Direct) Μέθοδοι αριθμητικής χρονικής ολοκλήρωσης:
 - Πεπλεγμένες (Implicit) μέθοδοι: Η ενυπάρχουσα αριθμητική απόσβεση τους απαλείφει την επίδραση των υψηλών ιδιομορφών. Επομένως είναι οι πλέον κατάλληλες για προβλήματα σεισμικής ανάλυσης κατασκευών, όπου η απόκριση εξαρτάται πρακτικά από τις κατώτερες ιδιομορφές
 - Απλές (Explicit) μέθοδοι: Σε σεισμικά προβλήματα χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εκτεταμένων μέσων (έδαφος ή υγρό). Δεν περιλαμβάνουν επίλυση μητρικών εξισώσεων σε κάθε βήμα, όμως απαιτούν μικρότερο Δt
 - Τεχνικές που περιλαμβάνουν υποβιβασμό, διάσπαση τελεστή κλπ
- Ειδικές μέθοδοι που δεν χρησιμοποιούν αριθμητική χρονική ολοκλήρωση
 - Στατική ανελαστική ανάλυση
 - Φασματική ανελαστική μέθοδος

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :
 - Με χρήση της ΜΠΣ η ανελαστική κατασκευή διακριτοποιείται και οι εξισώσεις κίνησης προκύπτουν ως

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{F} = \mathbf{R}$$

όπου \mathbf{M} μητρώο μάζας, \mathbf{C} μητρώο ιξώδους απόσβεσης, \mathbf{F} διάνυσμα επικόμβιων εσωτερικών δράσεων, \mathbf{R} διάνυσμα εξωτερικά επιβαλλόμενων επικόμβιων φορτίων

- Στην περίπτωση διέγερσης με δυο σεισμικές συνιστώσες είναι:

$$\mathbf{R} = -\mathbf{M}\left(\mathbf{e}_1\ddot{u}_{gx} + \mathbf{e}_2\ddot{u}_{gy}\right)$$

Όπου $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ είναι μοναδιαία διανύσματα.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

- Στην περίπτωση γραμμικού συστήματος υπενθυμίζεται ότι

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u}$$

\mathbf{K} είναι το μητρώο δυσκαμψίας

- Το μητρώο \mathbf{C} υπολογίζεται ως

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$$

- Σημειώνεται ότι η ιξώδης απόσβεση στις ανελαστικές κατασκευές είναι λιγότερο σημαντική απ' ό,τι στις ελαστικές κατασκευές διότι η κύρια πηγή απορρόφησης ενέργειας είναι η υστερητική ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής.
- Συνήθως στα μη γραμμικά συστήματα εφαρμόζεται άμεση πεπλεγμένη βήμα προς βήμα χρονική ολοκλήρωση, στην αυξητική μορφή του συστήματος εξισώσεων.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

- Η εξίσωση τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ λαμβάνει τη μορφή:

$$\mathbf{M}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{u}} + {}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}$$

- Αφού η λύση είναι γνωστή τη χρονική στιγμή t ισχύει:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = {}^t\mathbf{F} + \Delta\mathbf{F}$$

- $\Delta\mathbf{F}$ είναι η αύξηση των επικόμβιων δυνάμεων λόγω της αύξησης των μετατοπίσεων και τάσεων σε κάθε στοιχείο κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος Δt
- Αυτό προσεγγιστικά μπορεί να γραφεί ως:

$$\Delta\mathbf{F} \approx {}^t\mathbf{K}\mathbf{u}, \quad \mathbf{K} = \partial {}^t\mathbf{F} / \partial {}^t\mathbf{u}$$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :
 - Συνδυάζουμε τα εκφράσεις της ταχύτητας και επιτάχυνσης στο βήμα $t+\Delta t$ με τις προηγούμενες σχέσεις για να καταλήξουμε σε μια σχέση για τον υπολογισμό του $\Delta \mathbf{u}$:

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{u} \approx {}^t \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}$$

- Ακολουθεί ο προσδιορισμός των τάσεων και των επικόμβιων δυνάμεων τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

- Η χρήση του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας αντί του άγνωστου τμητικού, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα. Για το λόγο αυτό σε κάθε χρονικό βήμα εφαρμόζονται επαναληπτικές διαδικασίες. Οι πιο δημοφιλείς επαναληπτικές μέθοδοι βασίζονται στον κλασικό αλγόριθμο των Newton-Raphson:

Γνωρίζοντας μια αύξηση της μετατόπισης, η διαδικασία επίλυσης επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας την τρέχουσα ολική μετατόπιση αντί για αυτή τη χρονική στιγμή t

Ενεργό εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας

$${}^{t+\Delta t} \hat{\mathbf{K}}^{(k-1)} \Delta \mathbf{u}^{(k)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(k-1)} - \hat{\mathbf{F}} \quad k = 1, 2, 3$$

Ενεργό διάνυσμα εσωτερικών δυνάμεων

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(k)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(k-1)} + \Delta \mathbf{u}^{(k)}$$

Με αρχικές συνθήκες:

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(0)} = {}^t \mathbf{u}, \quad {}^{t+\Delta t} \hat{\mathbf{K}}^{(0)} = {}^t \mathbf{K}, \quad {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(0)} = {}^t \mathbf{F}$$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

- Ένας πιο αποδοτικός υπολογιστικά αλγόριθμος είναι αυτός της τροποποιημένης επαναληπτικής μεθόδου *Newton-Raphson*, όπου το μητρώο δυσκαμψίας υπολογίζεται μόνο τη χρονική στιγμή t και χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων στο Δt :

$${}^t \hat{\mathbf{K}}^{(k-1)} \Delta \mathbf{u}^{(k)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(k-1)} - \hat{\mathbf{F}} \quad k = 1, 2, 3$$

Για την ιδιαίτερη περίπτωση της μεθόδου *Newmark* με $\beta=1/4$ και $\gamma=1/2$ το ενεργό μητρώο δυσκαμψίας και το ενεργό διάνυσμα φορτίσεων εκφράζονται ως:

$${}^t \hat{\mathbf{K}} = {}^t \mathbf{K} + \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C}$$
$$\hat{\mathbf{F}} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(k-1)} = \left(\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C} \right) - {}^t \mathbf{u} \left(\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C} \right) - {}^t \dot{\mathbf{u}} \left(\frac{4}{\Delta t} + \mathbf{C} \right) - \mathbf{M} {}^t \ddot{\mathbf{u}}$$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

Μέθοδος *Newmark* για μη γραμμική δυναμική ανάλυση ($\beta=1/4$, $\gamma=1/2$):

1) Αρχικοί υπολογισμοί:

- $\mathbf{M}^0 \ddot{\mathbf{u}} = {}^0\mathbf{R} - \mathbf{C}^0 \dot{\mathbf{u}} - {}^0\mathbf{F}$

- Επιλογή Δt

- $\mathbf{A} = \frac{4}{\Delta t} \mathbf{M} + 2\mathbf{C} \quad \mathbf{B} = 2\mathbf{M}$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

• Πεπλεγμένες μέθοδοι :

2) Υπολογισμοί σε κάθε χρονικό βήμα i :

- $\Delta \hat{\mathbf{R}} = \Delta \mathbf{R} + \mathbf{A}^t \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{B}^t \ddot{\mathbf{u}}$

- Προσδιορισμός εφαπτ. δυσκαμψίας ${}^t \mathbf{K}$

- ${}^t \hat{\mathbf{K}} = {}^t \mathbf{K} + \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C}$

- Επίλυση ως προς $\Delta \mathbf{u}$ με την τροποποιημένη Newton-Raphson

- $\Delta \ddot{\mathbf{u}} = \frac{4}{(\Delta t)^2} \Delta \mathbf{u} - \frac{4}{\Delta t} {}^t \dot{\mathbf{u}} - 2 {}^t \ddot{\mathbf{u}} \quad \Delta \dot{\mathbf{u}} = \frac{2}{\Delta t} \Delta \mathbf{u} - 2 {}^t \dot{\mathbf{u}}$

- ${}^{t+\Delta t} \mathbf{u} = {}^t \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u} \quad {}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{u}} = {}^t \dot{\mathbf{u}} + \Delta \dot{\mathbf{u}} \quad {}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{u}} = {}^t \ddot{\mathbf{u}} + \Delta \ddot{\mathbf{u}}$

3) Αντικατάσταση του i με $i+1$ και επανάληψη του 2)

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

Μέθοδος *Wilson θ* για μη γραμμική δυναμική ανάλυση:

1) Αρχικοί υπολογισμοί:

- $\mathbf{M}^0 \ddot{\mathbf{u}} = {}^0 \mathbf{R} - \mathbf{C}^0 \dot{\mathbf{u}} - {}^0 \mathbf{F}$

- Επιλογή Δt και ϑ

- $\mathbf{A} = \frac{6}{\vartheta \Delta t} \mathbf{M} + 3\mathbf{C} \quad \mathbf{B} = 3\mathbf{M} + \frac{\vartheta \Delta t}{2} \mathbf{C}$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

2) Υπολογισμοί σε κάθε χρονικό βήμα i :

- $\delta \hat{\mathbf{R}} = \vartheta \Delta \mathbf{R} + \mathbf{A}^t \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{B}^t \ddot{\mathbf{u}}$
- Προσδιορισμός εφαπτ. δυσκαμψίας ${}^t \mathbf{K}$
- ${}^t \hat{\mathbf{K}} = {}^t \mathbf{K} + \frac{3}{\vartheta \Delta t} \mathbf{C} + \frac{6}{\vartheta^2 \Delta t^2} \mathbf{M}$
- Επίλυση ως προς $\delta \mathbf{u}$ με την τροποποιημένη Newton-Raphson
- $\delta \ddot{\mathbf{u}} = \frac{6}{\vartheta^2 \Delta t^2} \delta \mathbf{u} - \frac{6}{\vartheta \Delta t} {}^t \dot{\mathbf{u}} - 3 {}^t \ddot{\mathbf{u}} \quad \Delta \ddot{\mathbf{u}} = \frac{1}{\vartheta} \delta \ddot{\mathbf{u}}$
- $\Delta \dot{\mathbf{u}} = \Delta t {}^t \ddot{\mathbf{u}} + \frac{\Delta t}{2} \Delta \ddot{\mathbf{u}} \quad \Delta \mathbf{u} = \Delta t {}^t \dot{\mathbf{u}} + \frac{\Delta t^2}{2} {}^t \ddot{\mathbf{u}} + \frac{\Delta t^2}{6} \Delta \ddot{\mathbf{u}}$
- ${}^{t+\Delta t} \mathbf{u} = {}^t \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u} \quad {}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{u}} = {}^t \dot{\mathbf{u}} + \Delta \dot{\mathbf{u}} \quad {}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{u}} = {}^t \ddot{\mathbf{u}} + \Delta \ddot{\mathbf{u}}$

3) Αντικατάσταση του i με $i+1$ και επανάληψη του 2)

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

Τροποποιημένη επαναληπτική μέθοδος *Newton-Raphson*:

1) Αρχικοί υπολογισμοί:

- ${}^{t+\Delta t}\mathbf{u}^{(0)} = {}^t\mathbf{u}$

- $\mathbf{F}^{(0)} = {}^t\mathbf{F}$

- $\Delta\mathbf{R}^{(1)} = {}^t\Delta\hat{\mathbf{R}}$

- $\hat{\mathbf{K}}_T = {}^t\hat{\mathbf{K}}$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :

2) Υπολογισμοί σε κάθε κύκλο επανάληψης k :

- Επίλυση $\hat{\mathbf{K}}_T \Delta \mathbf{u}^{(k)} = \Delta \mathbf{R}^{(k)}$ για $\Delta \mathbf{u}^{(k)}$
- ${}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(k)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{u}^{(k-1)} + \Delta \mathbf{u}^{(k)}$
- $\Delta \mathbf{Q}^{(k)} = \mathbf{F}^{(k)} - \mathbf{F}^{(k-1)} + (\hat{\mathbf{K}}_T - {}^t \mathbf{K}) \Delta \mathbf{u}^{(k)}$
- $\Delta \mathbf{R}^{(k+1)} = \Delta \mathbf{R}^{(k)} - \Delta \mathbf{Q}^{(k)}$

3) Αντικατάσταση του k με $k+1$ και επανάληψη του 2)

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :
 - Όπως και στην περίπτωση των γραμμικά ελαστικών επιλύσεων η επιλογή του χρονικού βήματος Δt είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση ακρίβειας και ευστάθειας της λύσης.
 - Στη μη γραμμική ανάλυση μεγέθη όπως οι ιδιοσυχνότητες, ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων μεταβάλλονται με το χρόνο. Παρ' όλα αυτά οι πρακτικοί κανόνες επιλογής κατάλληλου βήματος Δt εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται.
 - Γενικά το Δt επιθυμείται να είναι σχετικά μεγάλο χωρίς όμως αυτό να είναι σε βάρος της ακρίβειας
 - Γενικά οι πεπλεγμένοι αλγόριθμοι είναι άνευ όρων ευσταθείς, τουλάχιστον για γραμμικά προβλήματα.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Πεπλεγμένες μέθοδοι :
 - Ο αλγόριθμος *Newmark* με $\beta=1/4$, $\gamma=1/2$ (Μέθοδος Μέσης Επιτάχυνσης) είναι άνευ όρων ευσταθής.
 - Ο αλγόριθμος *Wilson* θ είναι ευσταθής για $\theta \geq 1.37$ και συνήθως δίνει καλά αποτελέσματα για $\theta=1.42$.
 - Όταν $\theta=1$ ο αλγόριθμος *Wilson* εκπίπτει στη Μέθοδο Γραμμικής Επιτάχυνσης, η οποία είναι ευσταθής υπό όρους, δηλαδή εφόσον $\Delta t \leq 0.551T$, όπου T η μικρότερη ιδιοπερίοδος του συστήματος.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Προχωρημένες μέθοδοι ολοκλήρωσης:
 - **Η Μέθοδος των Υποκατασκευών:** Ιδανική για προβλήματα μεγάλου μεγέθους κατασκευών με τοπικές μη γραμμικότητες υλικού ή γεωμετρίας (πχ προβλήματα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής). Η κατασκευή υποδιαιρείται σε γραμμικές και μη γραμμικές υποκατασκευές. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί επίσης και σε πλήρως μη γραμμικά προβλήματα, ενώ εφαρμόζεται αποδοτικότερα με τη βοήθεια υπολογιστών με παράλληλους επεξεργαστές.
 - **Η Μέθοδος του Επιμερισμού:** Είναι παρόμοια με τη Μέθοδο των Υποκατασκευών και εστιάζει στη φυσική διαίρεση του προβλήματος σε υποκατασκευές και την ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων χρονικής ολοκλήρωσης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κάθε υποκατασκευής. Η μέθοδος των Υποκατασκευών είναι πιο γενική από τον επιμερισμό καθώς επιτρέπει τη διαίρεση σε υποκατασκευές με όχι αναγκαστικά διαφορετικές φυσικές ιδιότητες.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Προχωρημένες μέθοδοι ολοκλήρωσης:
 - **Μέθοδοι Διάσπασης τελεστή:** Ένας τελεστής απλού αλγορίθμου διασπάται ώστε να αποφεύγεται η λύση εξισώσεων ή να επιλύεται ένα σύστημα μειωμένου μεγέθους. Συνδυάζεται η ακρίβεια των πεπλεγμένων αλγορίθμων με την οικονομία των απλών αλγορίθμων. Η μέθοδοι διάσπασης τελεστή και επιμερισμού είναι παρόμοιες, αλλά η πρώτη είναι πιο γενική από τη δεύτερη.
 - **Μέθοδοι υποβιβασμού:** Η απόκριση του συστήματος προσεγγίζεται με έναν αριθμό καθολικών διανυσμάτων προσέγγισης (ιδιομορφές ή διανύσματα βάσης), ο οποίος είναι κατά πολύ μικρότερος από τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας της κατασκευής. Συνήθως στη γραμμική ανάλυση τα διανύσματα αυτά είναι οι ιδιομορφές. Στη μη γραμμική ανάλυση, όμως, οι ιδιομορφές πρέπει να υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός τους τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ μπορεί να γίνει αποδοτικά με τη μέθοδο υποχώρου. Αλλά η επαλληλία των ιδιομορφών σε μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις είναι αποδοτική όταν το μητρώο δυσκαμψίας δεν ανανεώνεται πολύ συχνά.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Προχωρημένες μέθοδοι ολοκλήρωσης:

Έτσι οι εξισώσεις κίνησης μιας κατασκευής προσομοιωμένης με τη ΜΠΣ τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ έχουν τη μορφή:

$$\mathbf{M}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{u}}^{(k)} + {}^t\mathbf{K}\Delta\mathbf{u}^{(k)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(k-1)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

${}^t\mathbf{K}$ είναι το μητρώο δυσκαμψίας σε κάποια προηγούμενη χρονική στιγμή t . Υποθέτουμε ότι η λύση της ανωτέρω εξίσωσης έχει τη μορφή:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{u} = \sum_{i=r}^s \mathbf{q}_i {}^{t+\Delta t}\mathbf{x}_i$$

${}^t\mathbf{x}_i$ είναι η ιδιομορφική μετατόπιση τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ και \mathbf{q}_i είναι οι ιδιομορφές του συστήματος (υπό ελαστική συμπεριφορά) τη χρονική στιγμή t που συνδέονται με τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες ω_i :

$${}^t\mathbf{K}\mathbf{q}_i = \omega_i^2 \mathbf{M}\mathbf{q}_i, \quad i = r, \dots, s$$

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

2. Χρονική ολοκλήρωση ανελαστικών δυναμικών εξισώσεων

- Προχωρημένες μέθοδοι ολοκλήρωσης:

Συνεπώς οι εξισώσεις κίνησης μπορούν να γραφούν ως:

$${}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{X}}^{(k)} + \mathbf{\Omega}^2 \Delta \mathbf{X}^{(k)} = \mathbf{Q}^T \left({}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(k-1)} \right)$$

Όπου $\mathbf{\Omega}^2$ είναι το διαγώνιο μητρώο με στοιχεία ω_i^2 , $\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}_r, \dots, \mathbf{q}_s\}$, ${}^{t+\Delta t}\mathbf{X} = \{{}^{t+\Delta t}x_r, \dots, {}^{t+\Delta t}x_s\}$. Οι ανωτέρω αποζευγμένες μη γραμμικές εξισώσεις κίνησης τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ με ιδιομορφές της χρονικής στιγμής t συνήθως επιλύονται με πεπλεγμένους αλγόριθμους χρονικής ολοκλήρωσης.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

3. Ειδικές μέθοδοι μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης

- Στατική ανελαστική ανάλυση (*Push over*):
 - Λαμβάνει υπόψη την ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής, αλλά επιβάλλει τα σεισμικά φορτία στατικά.
 - Η κατασκευή φορτίζεται με τα κατακόρυφα μόνιμα και κινητά φορτία και με πλευρικά φορτία που αυξάνουν βαθμιαία μέχρι τελικής κατάρρευσης. Η διανομή των φορτίων αυτών δίδεται από τους κανονισμούς υποθέτοντας παραμόρφωση σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή. Λαμβάνονται υπόψη οι επιρροές $P-\delta$ και $P-\Delta$.
 - Χρησιμοποιείται κυρίως για την ανακάλυψη πιθανών αδύνατων περιοχών της κατασκευής και για επαλήθευση των διαφόρων επίπεδων συμπεριφοράς της.
 - Δεν μπορεί να αντικαταστήσει τη δυναμική ανελαστική ανάλυση καθώς η φόρτιση είναι μονοτονική και όχι ανακυκλιζόμενη που είναι και η πραγματική.

Ανελαστική Απόκριση Κτιρίων

3. Ειδικές μέθοδοι μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης

- *Ανελαστική φασματική μέθοδος:*
 - *Η ιδέα του φάσματος απόκρισης που χρησιμοποιείται στη γραμμικά ελαστική ανάλυση επεκτείνεται και στα μη γραμμικά συστήματα υπό την προϋπόθεση ότι είναι δυνατόν να κατασκευαστούν ανελαστικά φάσματα απόκρισης.*
 - *Η κατασκευή ανελαστικών φασμάτων συνίσταται σε απλή τροποποίηση των αντίστοιχων ελαστικών. Είναι δυνατόν με διαίρεση με $\sqrt{2\mu-1}$ και μ για ενδιάμεσες και μεγάλες τιμές της ιδιοπεριόδου, αντίστοιχα, να παραχθεί το ελαστοπλαστικό φάσμα (μ δείκτης πλαστιμότητας, βλ. επόμενο κεφάλαιο).*
 - *Στους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς (UBC (1994), EC8 (1994), NEAK (1995)), ο προσδιορισμός της μέγιστης απόκρισης γίνεται με τη δυναμική φασματική μέθοδο, δηλαδή με επαλληλία ιδιομορφών σε συνδυασμό με ανελαστικό φάσμα που προκύπτει από το ελαστικό διαιρώντας με το συντελεστή συμπεριφοράς $q > 1$*

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

1. Εισαγωγή
2. Δείκτες πλαστιμότητας
3. Δείκτες βλάβης
4. Συντελεστής συμπεριφοράς

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

1. Εισαγωγή

- Σκοπός αντισεισμικού σχεδιασμού είναι να καταλήξει σε μια κατασκευή με μια αποδεκτή στάθμη ασφάλειας και ένα λογικό κόστος.
- Σε αντίθεση με το συμβατικό τρόπο σχεδιασμού για κύρια φορτία, τα σεισμικά φορτία, που θεωρούνται τυχαία, αναλαμβάνονται με την αποδοχή στάθμης βλάβης στην κατασκευή.
- Η απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω πλάστιμης υστερητικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Οι αντισεισμικοί κανονισμοί λαμβάνουν υπόψη τους την ανελαστική συμπεριφορά των κατασκευών, με έμμεσο και προσεγγιστικό τρόπο μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς η .
- Οι κανονισμοί επιτρέπουν μικρές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία για σεισμούς μέτριας έντασης και βλάβες τόσο στα μη φέροντα όσο και στα φέροντα στοιχεία, χωρίς κατάρρευση, για σεισμούς ισχυρής έντασης.

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

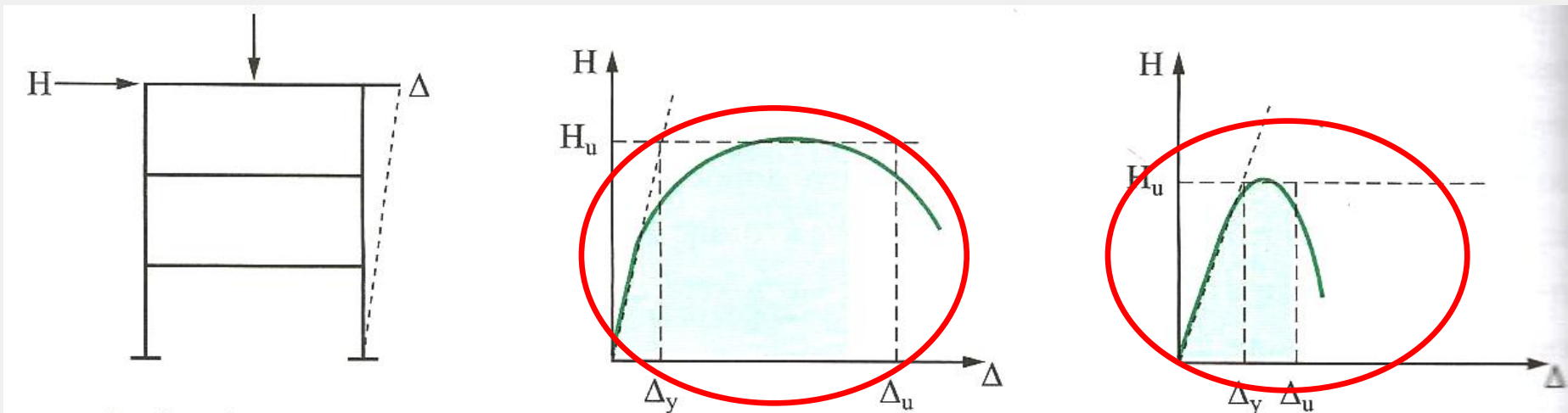
2. Δείκτες πλαστιμότητας

- Πλαστιμότητα είναι η διαθέσιμη ικανότητα ή η απαίτηση σχεδιασμού από ένα υλικό, ένα μέλος ή μια κατασκευή να παραμορφώνεται ανελαστικά (πέραν του σημείου διαρροής) κάτω από σεισμικές διεγέρσεις και επομένως να απορροφά σημαντικά ποσά σεισμικής ενέργειας χωρίς σημαντική απώλεια αντοχής.
- Επομένως σκοπός ενός αντισεισμικού σχεδιασμού είναι να δημιουργήσει κατασκευές με διαθέσιμη πλαστιμότητα μεγαλύτερη από οποιαδήποτε απαίτηση πλαστιμότητας μπορούν να επιβάλλουν μελλοντικοί σεισμοί.
- Σύμφωνα με τον EC8 οι κατασκευές διακρίνονται σε:
 - **Μη πλάστιμες (non-dissipative)**
 - **Πλάστιμες (dissipative):** Πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις που έχουν σχέση με την τοπολογία τους, τις λεπτομέρειες μόρφωσης και σχεδιασμού και την ποιότητα του υλικού στις ζώνες απορρόφησης ενέργειας.

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

- Οι πλάστιμες κατασκευές χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα να απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας, όπως φαίνεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου μετατόπισης.
- Το αντίστοιχο εμβαδόν για μια μη πλάστιμη κατασκευή είναι πολύ μικρότερο.



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

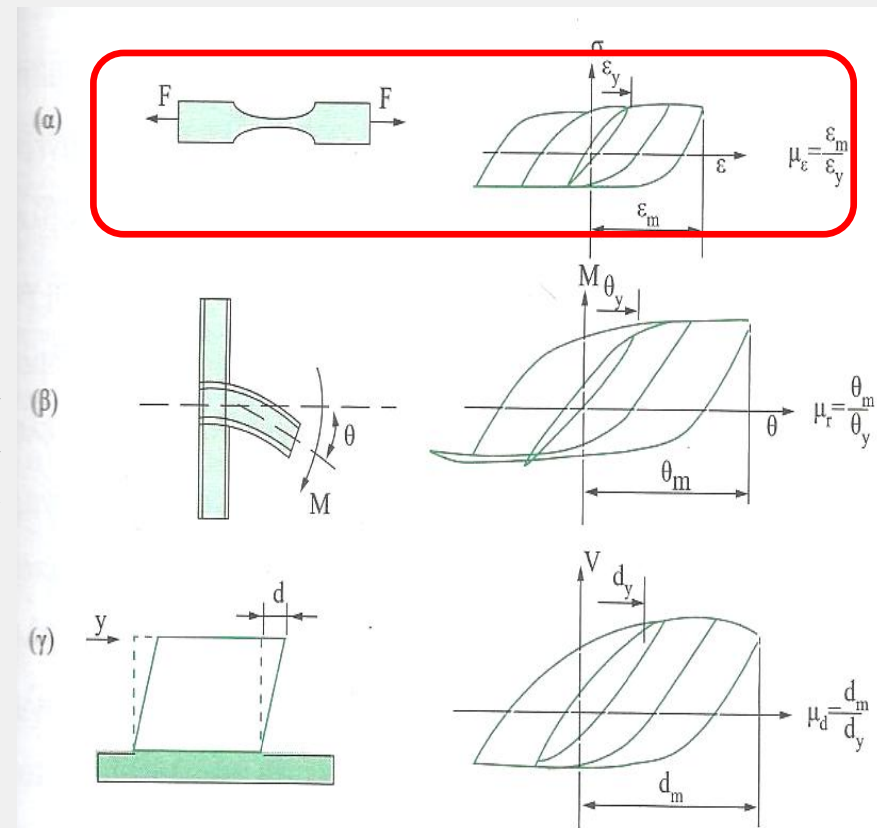
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Δείκτης πλαστιμότητας υλικού

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_y}$$

Για μονοτονική φόρτιση ο παραπάνω ορισμός είναι μονοσήμαντος. Στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης το ε_m ορίζεται είτε ως η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση από το αρχικά αφόρτιστο δοκίμιο είτε ως η ανηγμένη παραμόρφωση από την έναρξη ενός κύκλου φόρτισης έως τη νέα μέγιστη τιμή



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

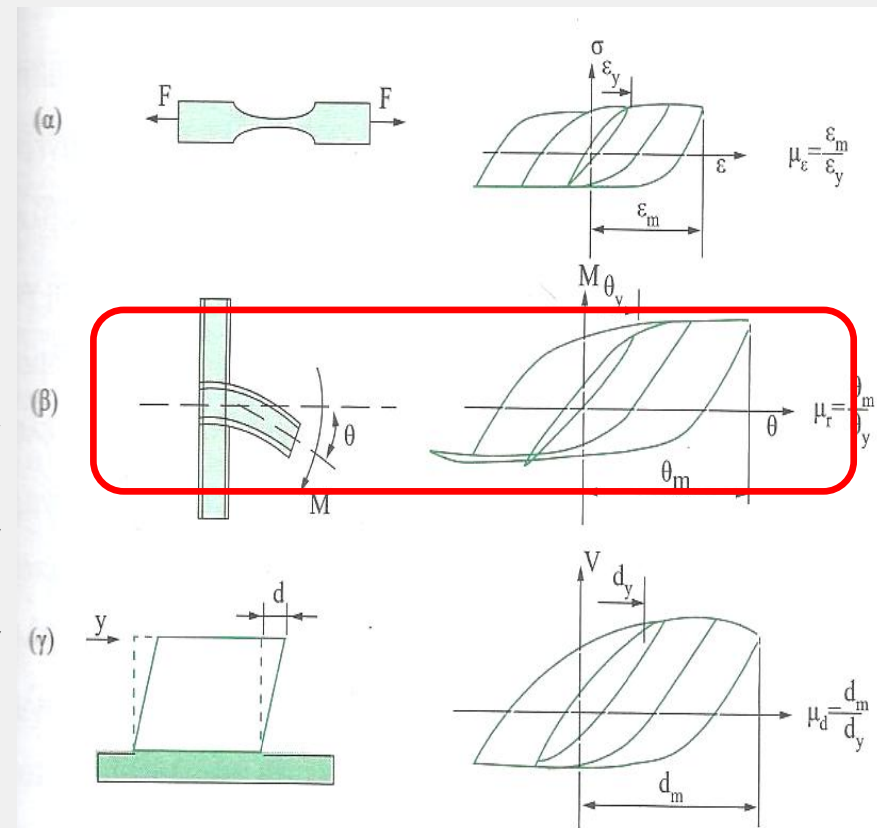
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Στροφικός δείκτης πλαστιμότητας μέλους (1^{ος} ορισμός)

$$\mu_r = \frac{\vartheta_m}{\vartheta_y}$$

Το θ_m ορίζεται ως η μέγιστη ή οριακή στροφή. Στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση λαμβάνουμε την ολική ανελαστική γωνία στροφής για μισό κύκλο φόρτισης. Εάν ένα μέλος έχει διαφορετικές ικανότητες στροφής στις δύο διευθύνσεις, ο λόγος μ_r μπορεί να είναι διαφορετικός. Δεν υπάρχει μια μοναδική στροφή διαρροής θ_y



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

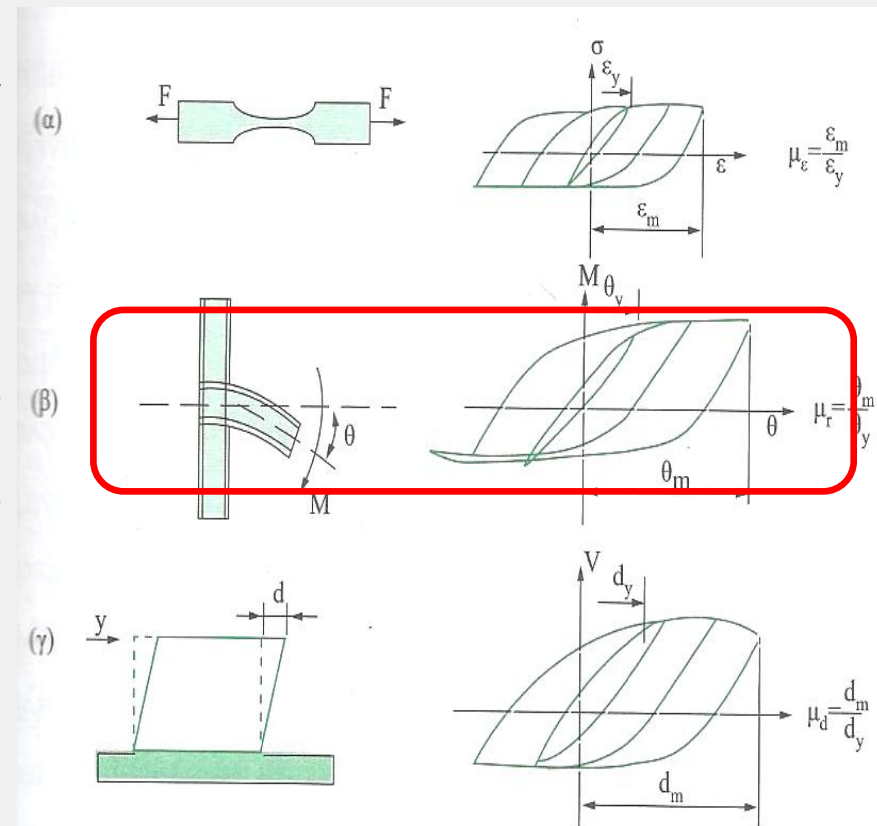
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Στροφικός δείκτης πλαστιμότητας μέλους (2^{ος} ορισμός)

$$\mu_r = 1 + \frac{\vartheta_\phi}{\vartheta_y}$$

Όπου θ_ϕ είναι η μέγιστη στροφή πλαστικής άρθρωσης και θ_y η στροφή διαρροής δοκού που φορτίζεται με δύο αντισυμμετρικές ακραίες ροπές.



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

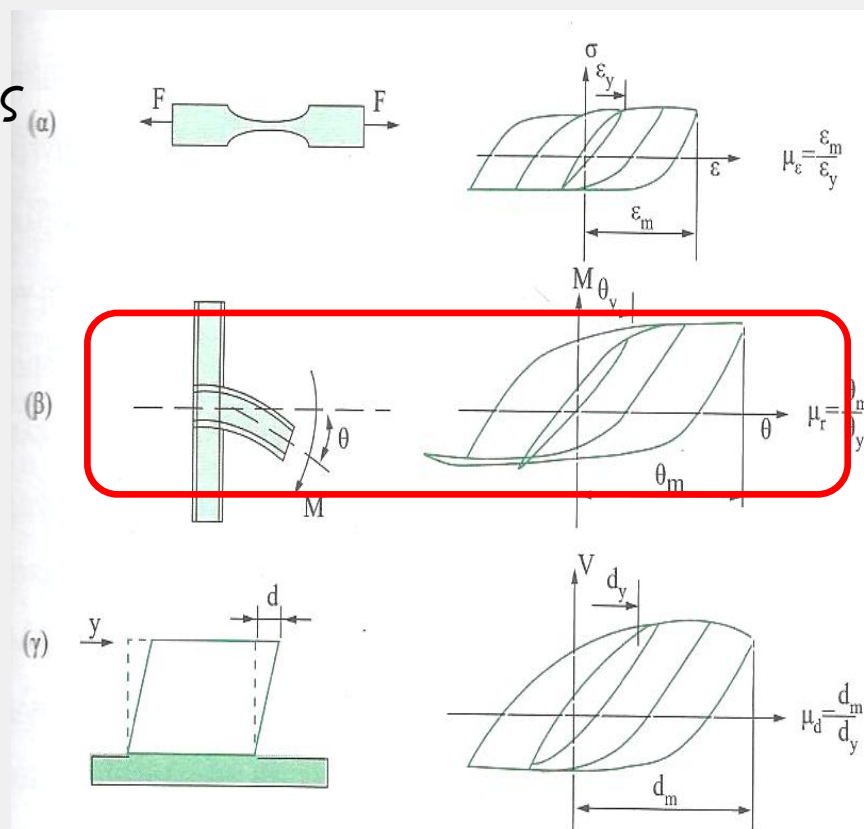
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Δείκτης πλαστιμότητας καμπυλότητας μέλους

$$\mu_c = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = 1 + \frac{\varphi_p}{\varphi_y}$$

Όπου φ_u είναι η μέγιστη τιμή της καμπυλότητας και φ_y είναι η καμπυλότητα διαρροής. Ο δείκτης μ_c δεν παρουσιάζει τα προβλήματα του δείκτη μ_r γιατί η σχέση ροπής-καμπυλότητας είναι μοναδική για κάθε μέλος (όταν δεν υπάρχει αξονική δύναμη). Υπολογιστικά όμως ο μ_r υπολογίζεται ευκολότερα. Επιπλέον ο μ_c είναι πρακτικά σημειακός και μπορεί να έχει μεγάλες τιμές χωρίς πρακτικές συνέπειες. Για το λόγο αυτό στην πράξη προτιμάται ο μ_r παρά τα μειονεκτήματά του



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

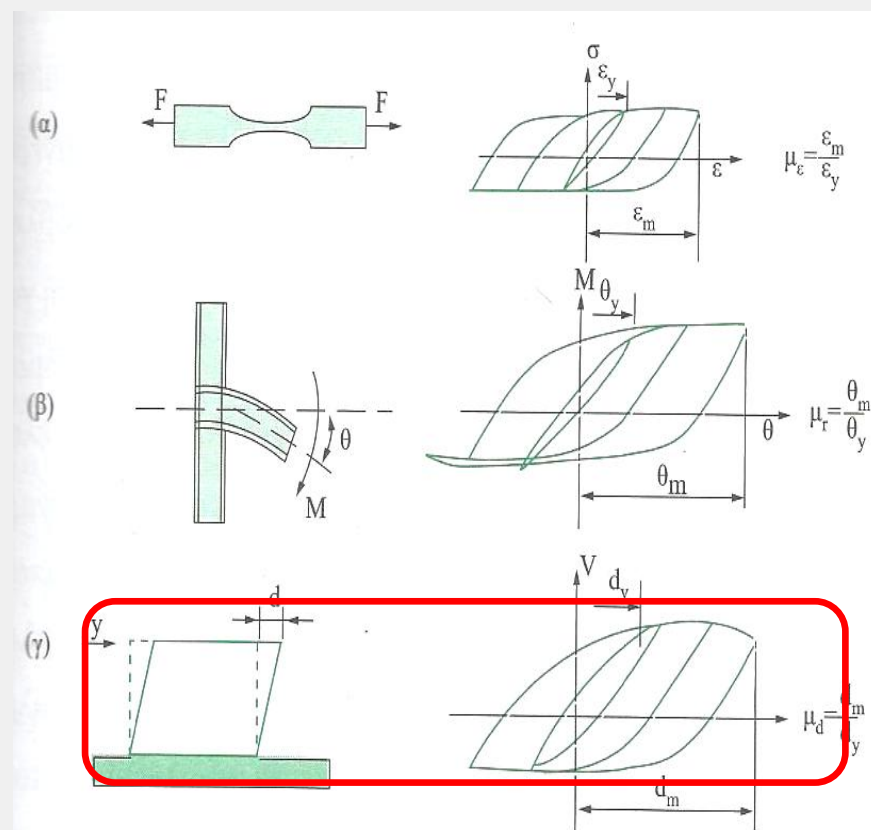
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Δείκτης πλαστιμότητας κατασκευής

$$\mu_b = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

όπου δ_u είναι η μέγιστη ή οριακή μετατόπιση και δ_y η μετατόπιση υπό συνθήκες διαρροής. Σε πολυβάθμια συστήματα είναι δυνατόν, διαφορετικές μορφές διαρροής να αντιστοιχούν στην ίδια μέγιστη ανελαστική μετατόπιση. Επιπλέον, η πλαστιμότητα όπως ορίστηκε δεν αντιπροσωπεύει μια επαρκή παράμετρο με την οποία μπορεί να προσδιορίζεται η βλάβη της κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού (ανακυκλιζόμενη φόρτιση).



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

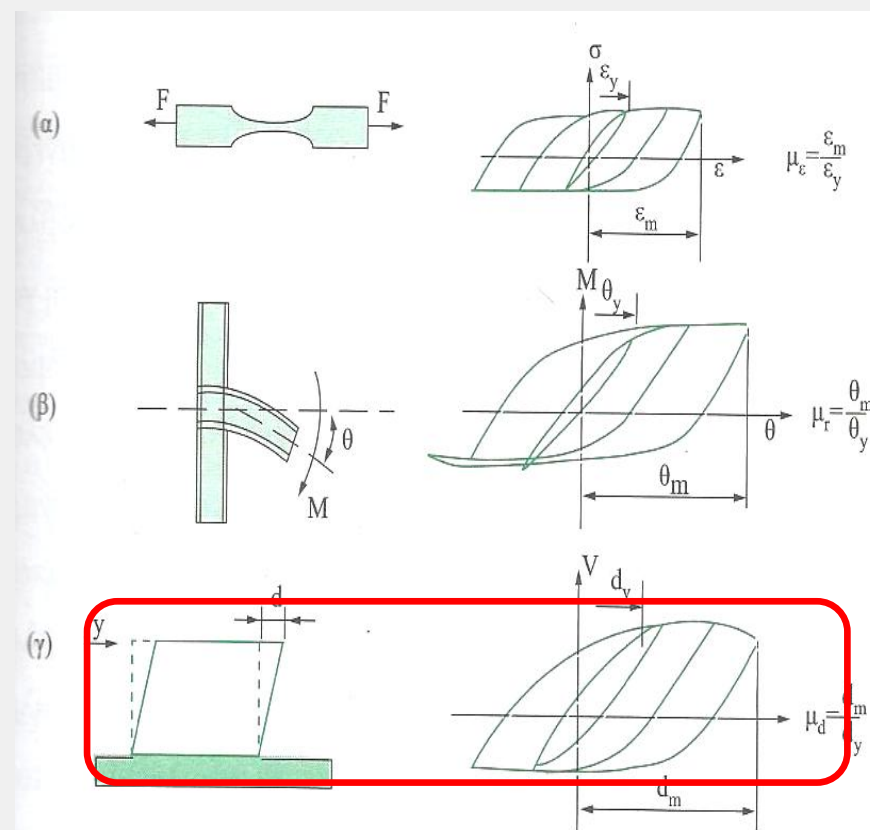
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Δείκτης πλαστιμότητας κατασκευής

$$\mu_b = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

Για την περίπτωση των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων ορίζουμε το συντελεστή ανακυκλιζόμενης πλαστιμότητας, ο οποίος δίνεται από την παραπάνω σχέση αλλά το δ_u παριστάνει την ολική ανελαστική μετατόπιση κατά τη διάρκεια ενός μισού κύκλου φορτίσεων-αποφορτίσεων.



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

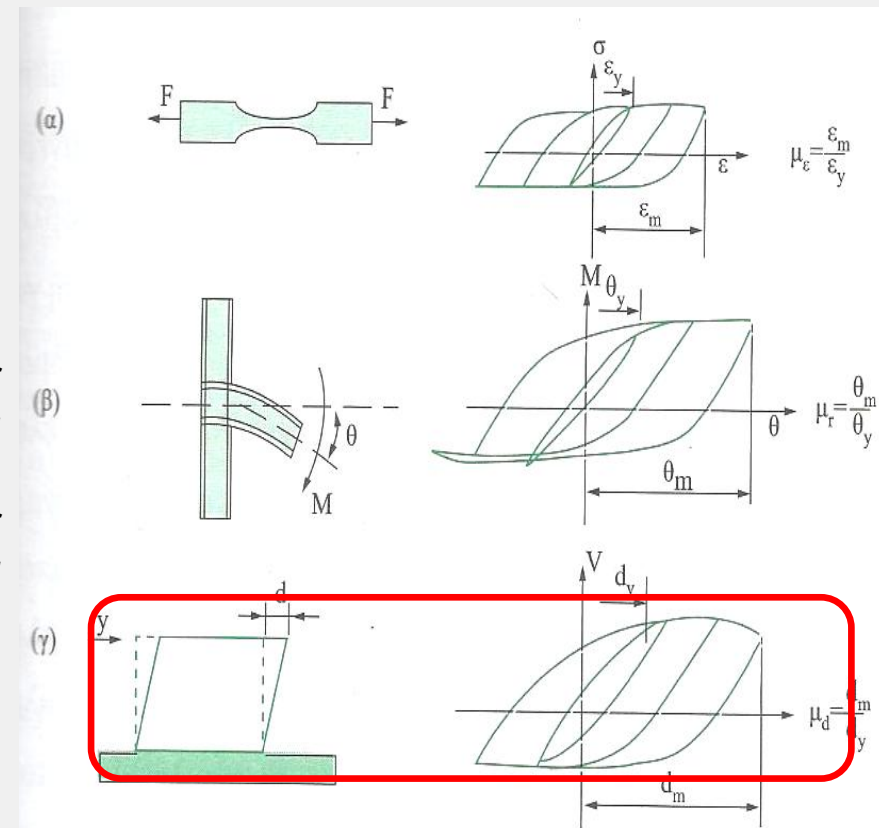
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορίζονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Δείκτης πλαστιμότητας κατασκευής

$$\mu_b = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

Ακόμα και απλός ορισμός του συντελεστή καθολικής πλαστιμότητας για μονοτονική φόρτιση δεν είναι αρκετά σαφής, γιατί εξαρτάται από παραμέτρους, όπως την καθ' ύψος κατανομή της σεισμικής φόρτισης, αλλά και τις πλευρικές μετατοπίσεις δ_u και δ_y που δεν ορίζονται μονοσήμαντα.

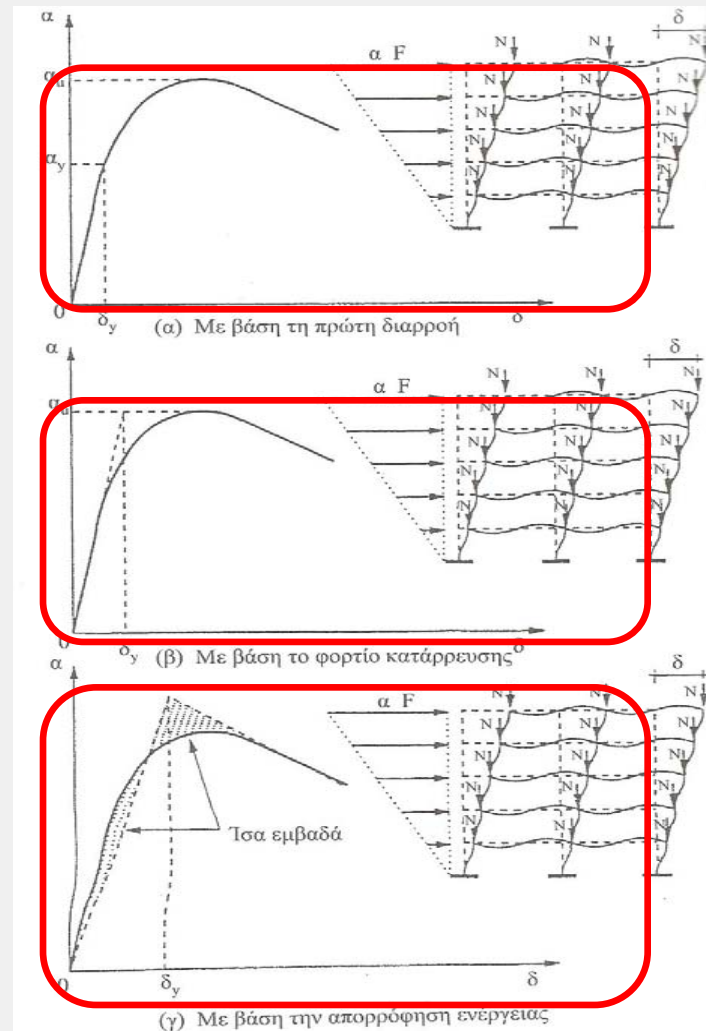


Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορισμοί μετατόπισης δ_y :

- Μετατόπιση στην πρώτη διαρροή
- Ελαστική μετατόπιση υπό φορτίο ίσο με το φορτίο κατάρρευσης
- Μετατόπιση διαρροής από διγραμμική προσέγγιση της καμπύλης α - δ που βασίζεται σε ισοδυναμία στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

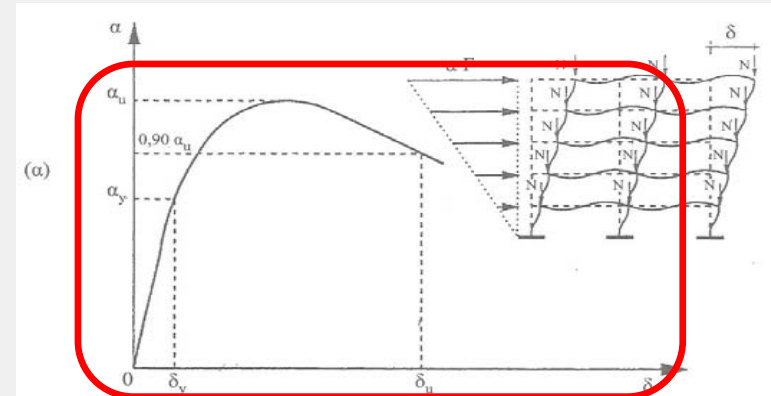


Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

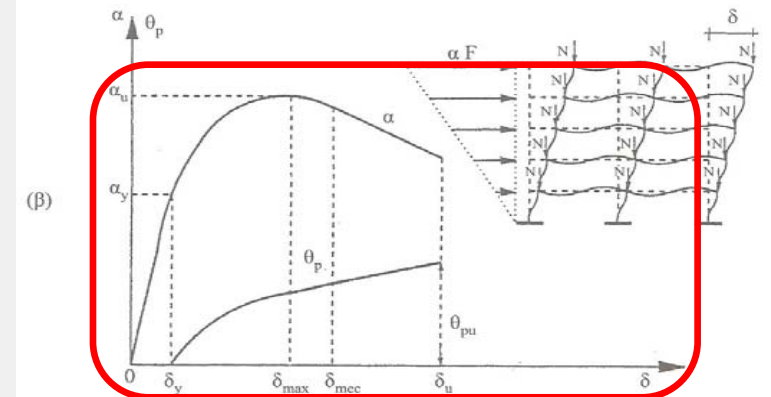
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Ορισμοί μετατόπισης δ_u :

- Μετατόπιση που αντιστοιχεί σε ένα προκαθορισμένο ποσοστό μείωσης της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής
- Μετατόπιση που αντιστοιχεί στην επίτευξη της διαθέσιμης στρωφικής ικανότητας στη κρίσιμη πλαστική άρθρωση



(α) Με βάση μια καθορισμένη % μείωση (π.χ 10 %) στην ικανότητα ανάληψης φορτίου

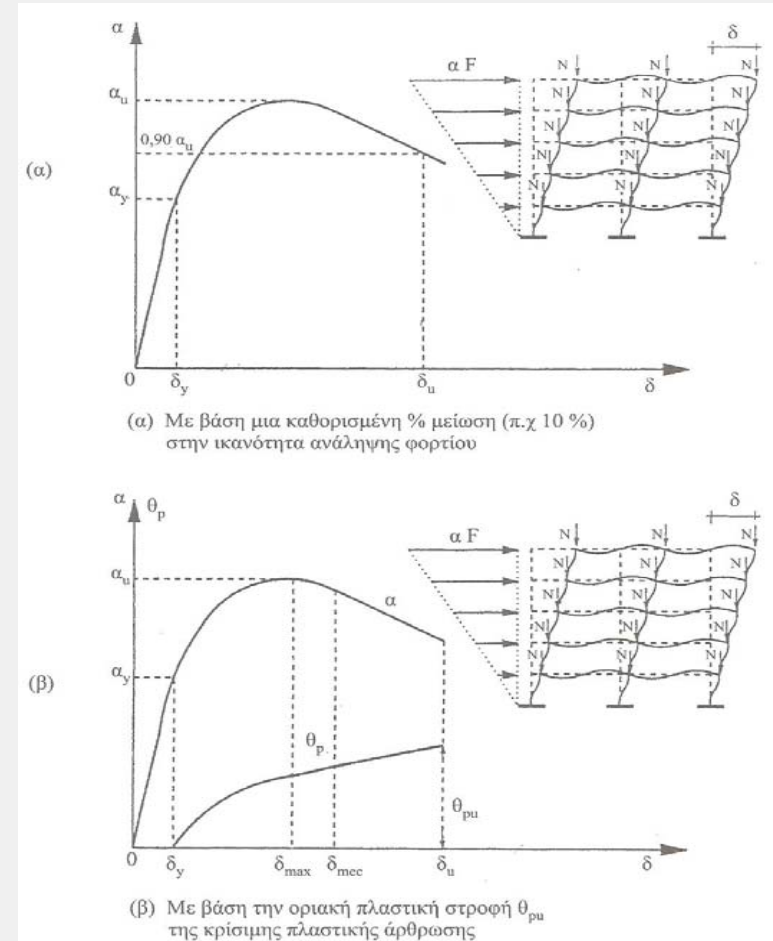


(β) Με βάση την οριακή πλαστική στρωφή θ_{pu} της κρίσιμης πλαστικής άρθρωσης

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

- Για κάθε δεδομένη κατανομή οριζοντίων δυνάμεων, η ανελαστική απόκριση κατασκευής υπό μονοτονική φόρτιση περιγράφεται πλήρως από την καμπύλη συμπεριφοράς, η οποία σχετίζεται με τον πολλαπλασιαστή των οριζόντιων δυνάμεων α με την κορυφαία οριζόντια μετατόπιση δ
- Η καμπύλη συμπεριφοράς αποτελείται από δύο κλάδους: Έναν ανοδικό και ένα φθίνοντα κλάδο.



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

Παράμετροι συμπεριφοράς που καθορίζουν την ανελαστική συμπεριφορά μιας κατασκευής:

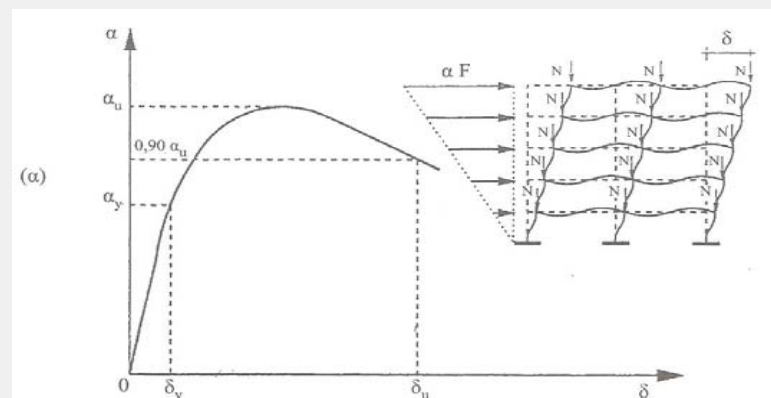
- Δείκτης καθολικής πλαστιμότητας: $\mu_b = \frac{\delta_u}{\delta_y}$

- Παράμετρος πλαστικής αναδιανομής: $\frac{a_u}{a_y}$

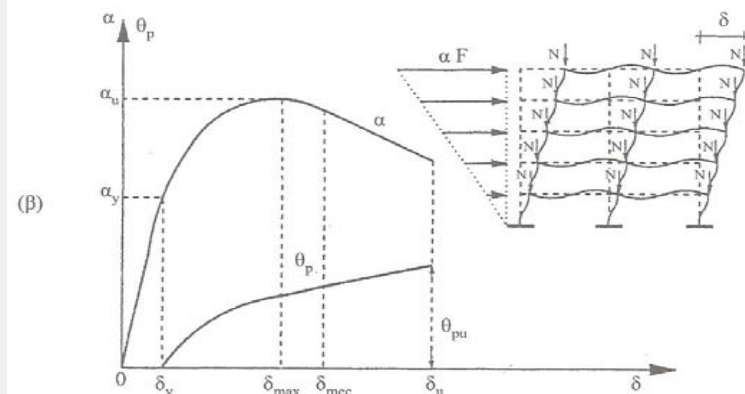
- Παράμετρος κλίσης γ του φθίνοντα κλάδου της καμπύλης α - δ (συντελεστής ευστάθειας)

- Στροφική ικανότητα της κρίσιμης πλαστικής άρθρωσης

- Ο τύπος μηχανισμού πλαστικής κατάρρευσης



(α) Με βάση μια καθορισμένη % μείωση (π.χ 10 %) στην ικανότητα ανάληψης φορτίου

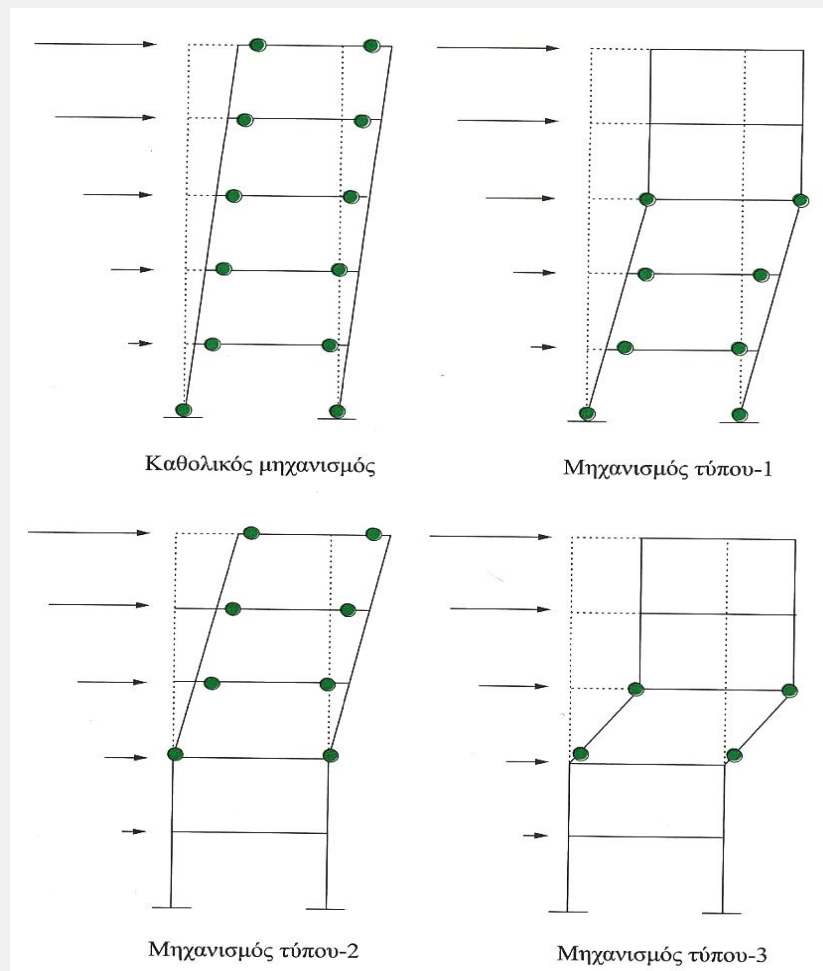


(β) Με βάση την οριακή πλαστική στροφή θ_{pu} της κρίσιμης πλαστικής άρθρωσης

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

- Ο μηχανισμός κατάρρευσης παίζει σημαντικό ρόλο στον αντισεισμικό σχεδιασμό πλαισίων, αφού επηρεάζει την τιμή της διαθέσιμης καθολικής πλαστιμότητας και την ευαισθησία του πλαισίου σε επιδράσεις 2^{ης} τάξης, οδηγώντας σε μείωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας
- Οι μηχανισμοί κατάρρευσης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες. Ο μηχανισμός καθολικής κατάρρευσης είναι μια ειδική περίπτωση του μηχανισμού τύπου 2



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

- Στην πράξη ο δείκτης καθολικής διαθέσιμης πλαστιμότητας μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά με κάποια από τις εξής μεθόδους:
 - Στατική Ανελαστική Ανάλυση
 - Μέθοδο Καμπύλης Μηχανισμού
 - Προσεγγιστικές σχέσεις

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

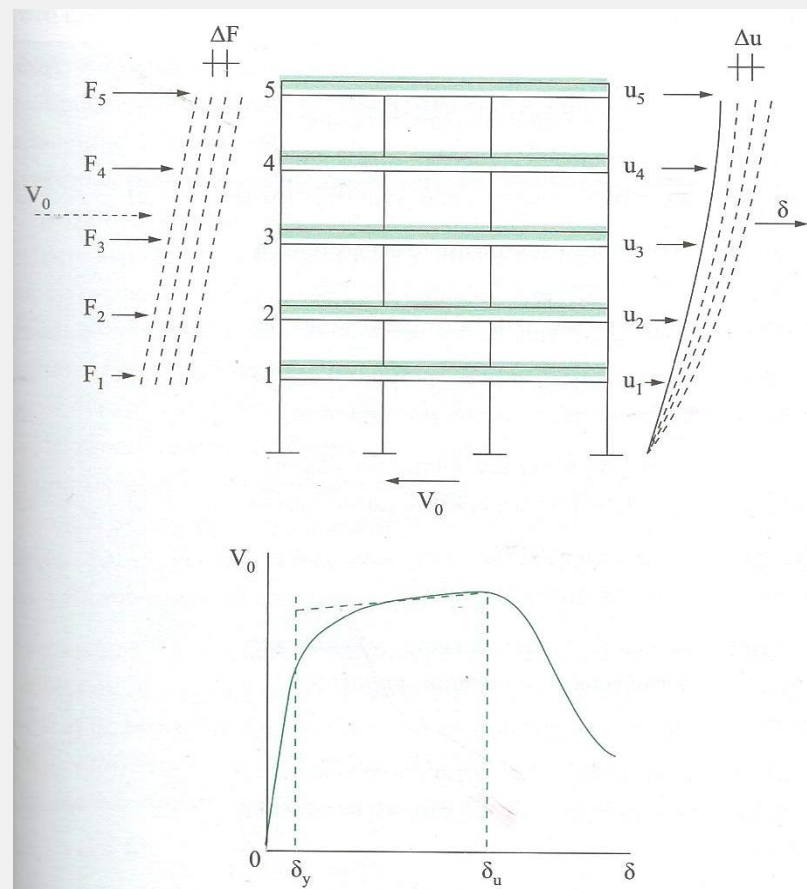
2. Δείκτες πλαστιμότητας

Με τη Μέθοδο Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης προσδιορίζονται οι μετατοπίσεις u_i για διάφορες εντάσεις των δυνάμεων F_i . Έτσι κατασκευάζεται το διάγραμμα της ολικής τέμνουσας δύναμης βάσης:

$$V_0 = \sum_{i=1}^n F_i$$

ως προς τη μετατόπιση του τελευταίου ορόφου δ_t ή τη μετατόπιση δ_b στη στάθμη όπου ενεργεί η συνιστώσα δύναμη $F=V_0$. Η μετατόπιση u_b υπολογίζεται από το έργο των δυνάμεων F_i :

$$\delta_b = \sum_{i=1}^n F_i \delta_i / V_0$$



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

- Οι δείκτες πλαστιμότητας που ορίστηκαν μπορεί να έχουν τιμές που διαφέρουν σημαντικά.
- Ο δείκτης πλαστιμότητας υλικού μ_ϵ χαρακτηρίζει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Υψηλή τιμή του μ_ϵ χαρακτηρίζει ένα πλάστιμο υλικό, ενώ μια χαμηλή ένα ψαθυρό υλικό.
- Ο δείκτης στροφικής πλαστιμότητας μ_r χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των μελών και των συνδέσεων.
- Ο δείκτης καθολικής πλαστιμότητας μ_b χαρακτηρίζει την ανελαστική συμπεριφορά ολόκληρης της κατασκευής.
- Οι δείκτες των διαθέσιμων δεικτών πλαστιμότητας ικανοποιούν την ανισότητα:

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

2. Δείκτες πλαστιμότητας

- Οι δείκτες πλαστιμότητας που ορίστηκαν μπορεί να έχουν τιμές που διαφέρουν σημαντικά.
- Ο δείκτης πλαστιμότητας υλικού μ_ε χαρακτηρίζει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Υψηλή τιμή του μ_ε χαρακτηρίζει ένα πλάστιμο υλικό, ενώ μια χαμηλή ένα ψαθυρό υλικό.
- Ο δείκτης στροφικής πλαστιμότητας μ_r χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των μελών και των συνδέσεων.
- Ο δείκτης καθολικής πλαστιμότητας μ_b χαρακτηρίζει την ανελαστική συμπεριφορά ολόκληρης της κατασκευής.
- Οι δείκτες των διαθέσιμων δεικτών πλαστιμότητας ικανοποιούν την ανισότητα:

$$\mu_\varepsilon < \mu_r < \mu_b$$

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

3. Δείκτες βλάβης

- Η ικανότητα μιας κατασκευής να επιζήσει ενός σεισμού μπορεί να μετρηθεί με βάση την αναμενόμενη κατάσταση βλάβης της μετά το σεισμό αυτό.
- Η βλάβη μπορεί να ποσοτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας δείκτες βλάβης που ορίζονται ως συναρτήσεις διαφόρων παραμέτρων βλάβης.
- Οι παράμετροι βλάβης είναι ποσότητες της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής (μετατόπιση, στροφή πλαστικής άρθρωσης, ανηγμένη παραμόρφωση, τάση, κλπ).
- Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για τον υπολογισμό ενός δείκτη βλάβης:
 - Η πρώτη βασίζεται στη σχέση απαίτησης-ικανότητας. Πιθανές επιλογές για απαίτηση και ικανότητα περιλαμβάνουν μετατόπιση, στροφή, αντοχή και απορρόφηση ενέργειας.
 - Η δεύτερη βασίζεται στην έννοια της υποβάθμισης. Πιθανές επιλογές για κατασκευαστική ιδιότητα περιλαμβάνουν δυσκαμψία, αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.
- Σε κάθε περίπτωση η παράμετρος βλάβης μπορεί να βασίζεται σε μια μέγιστη τιμή ή σε κάποια συσσωρευτική τιμή.

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

3. Δείκτες βλάβης

- Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος απαίτησης-ικανότητας, η υπολογιζόμενη απαίτηση αυξάνεται μονοτονικά καθώς αυξάνει η βλάβη στην κατασκευή και η παράμετρος μπορεί να είναι ίση με αυτή την απαίτηση.
- Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος υποβάθμισης, η τιμή της υποβαθμιζόμενης ιδιότητας μειώνεται προοδευτικά και μια κατάλληλη μορφή της παραμέτρου βλάβης είναι:

$$\delta = 1 - \frac{P_d}{P_0}$$

- Όπου δ είναι η παράμετρος βλάβης και P_d , P_0 είναι οι τιμές της ιδιότητας της κατασκευής στην κατάσταση μετά και πριν τη βλάβη, αντίστοιχα.
- Για κάθε παράμετρο βλάβης ορίζεται μια αρχική οριακή δ_t , μια τελική οριακή δ_u και μια υπολογιζόμενη δ_c τιμή

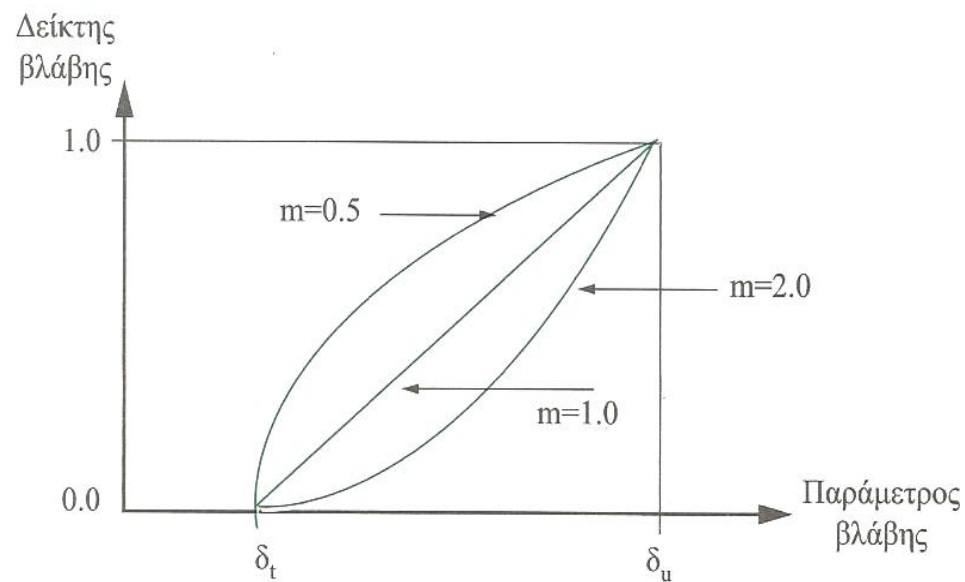
Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

3. Δείκτες βλάβης

- Έτσι ο δείκτης βλάβης D_s ορίζεται ως η συνάρτηση:

$$D_s = \left(\frac{\delta_c - \delta_t}{\delta_u - \delta_t} \right)^m$$

- Όπου m μια σταθερά η επίδραση της οποίας φαίνεται στο σχήμα.
- Όταν προκύπτει $\delta_c \leq \delta_u$ ισχύει $D_s=0$, δηλαδή ασήμαντη βλάβη.
- Όταν προκύπτει $\delta_c = \delta_u$ ισχύει $D_s=1$, δηλαδή αστοχία.



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

3. Δείκτες βλάβης

- Σύμφωνα με τη θεωρία συσσωρευτικής βλάβης των *Krawinkler and Zoheri (1983)* έχουμε ότι:

$$\delta_c = \delta_u \sum_i \left(\frac{\delta_i}{\delta_u} \right)^b$$

- Όπου δ_c είναι η συσσωρευτική τιμή της παραμέτρου βλάβης, δ_i είναι η τιμή της παραμέτρου βλάβης για τον i μισό κύκλο και $b > 1$ είναι σταθερά που εξαρτάται από την κατασκευή.
- Ένας δείκτης βλάβης για όλη την κατασκευή έχει σχέση με τις παραμέτρους βλάβης που υπολογίζονται σε στάθμη κατασκευής, υποκατασκευής ή μέλους. Οι παράμετροι σε στάθμη κατασκευής υστερούν σε ακρίβεια αλλά χρησιμεύουν για ταχεία αποτίμηση βλάβης.

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

3. Δείκτες βλάβης

- Παραμέτρους βλάβης συνήθως αποτελούν :
 - Για την πλήρη κατασκευή: Επικόμβιες μετατοπίσεις, ταχύτητες, επιταχύνσεις, έργο εξωτερικών δυνάμεων και αλλαγές στα μητρώα δυσκαμψίας, απόσβεσης και μάζας της κατασκευής.
 - Για φέροντα στοιχεία μπορεί να είναι δυνάμεις, τάσεις, παραμορφώσεις, αλλαγές δυσκαμψίας, έργο ελαστικών, ελαστοπλαστικών δυνάμεων, αποσβεστικών δυνάμεων κλπ.
- Οι μέθοδοι απαίτησης-ικανότητας και υποβάθμισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις τρεις στάθμες όπως φαίνεται παρακάτω:

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

3. Δείκτες βλάβης

- **Απαίτηση-ικανότητα σε στάθμη κατασκευής:** Παράμετροι βλάβης στην κατηγορία αυτή μπορεί να είναι η απαίτηση αντοχής (όπως μετριέται με την τέμνουσα βάσης), η απαίτηση μετατόπισης/παραμόρφωσης (όπως εκφράζεται με την καθολική πλαστιμότητα ή η απαίτηση ανάλωσης ενέργειας της κατασκευής).
- **Απαίτηση υποβάθμισης σε στάθμη κατασκευής:** Παράμετροι βλάβης στην κατηγορία αυτή μπορεί να είναι η υποβάθμιση της δυσκαμψίας της κατασκευής, η υποβάθμιση της αντοχής της ή η υποβάθμιση σε ικανότητα ανάλωσης ενέργειας.
- **Απαίτηση-ικανότητα σε στάθμη υποκατασκευής ή μέλους:** Παράμετροι βλάβης στην κατηγορία αυτή μπορεί να είναι η απαίτηση αντοχής (όπως μετριέται με την τέμνουσα ορόφου ή την ακραία ροπή μέλους), η απαίτηση μετατόπισης/παραμόρφωσης (όπως εκφράζεται με τη σχετική μετατόπιση ορόφου ή με τη στροφή πλαστικής άρθρωσης μέλους) ή η απαίτηση ανάλωσης ενέργειας (ορόφου ή μέλους).
- **Απαίτηση υποβάθμισης σε στάθμη υποκατασκευής ή μέλους:** Παράμετροι βλάβης στην κατηγορία αυτή μπορεί να είναι η υποβάθμιση της δυσκαμψίας (ορόφου ή μέλους), η υποβάθμιση αντοχής και η υποβάθμιση σε ικανότητα ανάλωσης ενέργειας (ορόφου ή μέλους).

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

3. Δείκτες βλάβης

- Όταν η βλάβη υπολογίζεται σε στάθμη κατασκευής, ο δείκτης βλάβης θα έχει μια καθολική τιμή: Όταν όμως η βλάβη υπολογίζεται σε στάθμη υποκατασκευής ή μέλους είναι απαραίτητη μια διαδικασία συνδυασμού των δεικτών βλάβης για να υπολογίσουμε μια καθολική τιμή. Ένας απλός τρόπος συνδυασμού είναι ο παρακάτω:

$$D_t = \frac{\sum_{i=1}^n w_i D_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

όπου D_t είναι ο καθολικός δείκτης βλάβης και w_i είναι το βάρος που έχει εκτιμηθεί για τη συμβολή της υποκατασκευής ή του μέλους i . Αν υποθέσουμε ότι $w_i = D_i$ τότε η παραπάνω σχέση λαμβάνει τη μορφή:

$$D_t = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^2}{\sum_{i=1}^n D_i}$$

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

4. Συντελεστής συμπεριφοράς

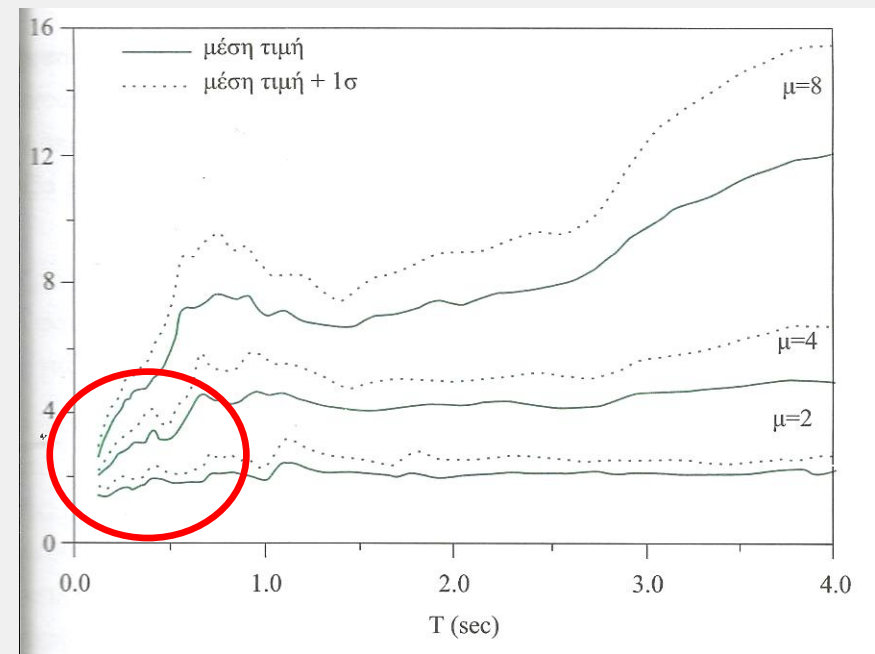
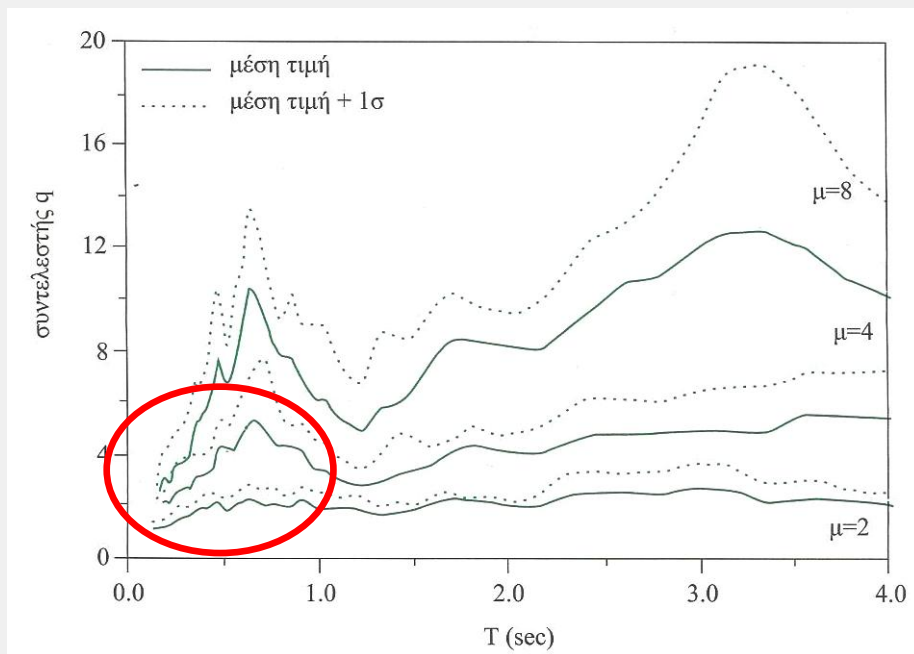
- Ο συντελεστής q ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της μέγιστης ελαστικής τέμνουσας δύναμης βάσης για το σεισμό σχεδιασμού και της τέμνουσας δύναμης βάσης σχεδιασμού:

$$q = \frac{V_{el,max}}{V_{des}}$$

- Στην πράξη ο q προσδιορίζεται με απλοποιημένες μεθόδους.
- Οι τιμές του q διαφέρουν μεταξύ κτιρίων με διαφορετικό υλικό και κατασκευαστικό τύπο και αντιπροσωπεύουν κυρίως την ικανότητα της κατασκευής να υφίσταται ανελαστικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια σεισμικών δράσεων.
- Δευτερευόντως αντιπροσωπεύουν κατασκευαστική υπεραντοχή, ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ευστάθεια του φέροντος συστήματος κατακόρυφων φορτίων της κατασκευής σε στάθμη μεγίστων ανελαστικών παραμορφώσεων.
- Ο q δεν πρέπει να συγχέεται με το δείκτη καθολικής πλαστιμότητας μ_b . Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχέση του δείκτη q με τον μ_b για διγραμμικά μονοβάθμια συστήματα με 5% απόσβεση

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

4. Συντελεστής συμπεριφοράς



Για μικρά T είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται δραστικά μικροί συντελεστές q

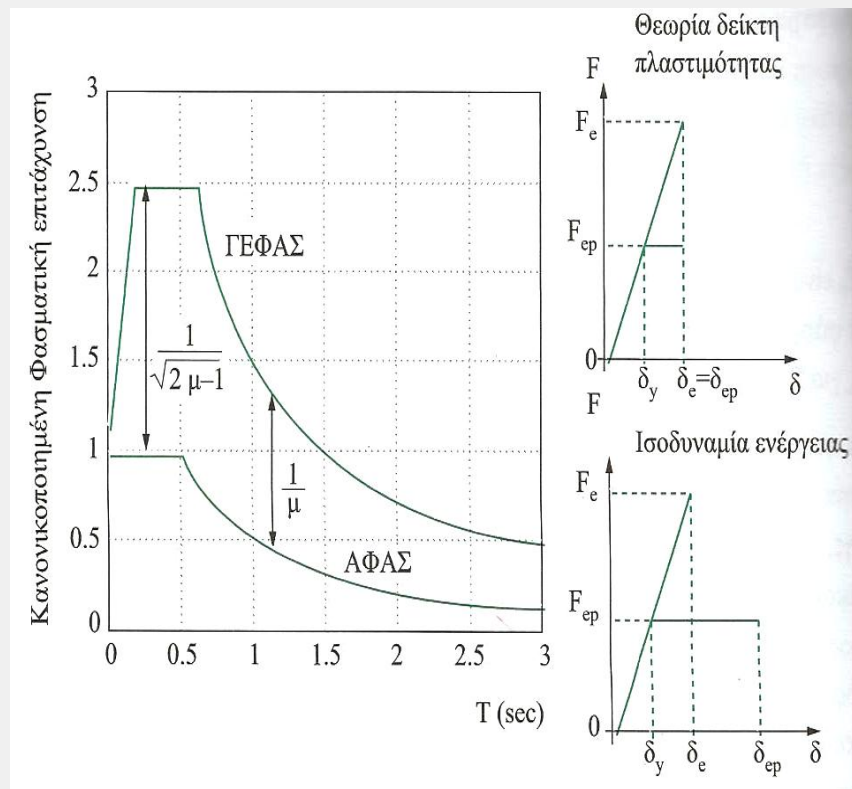
Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

4. Συντελεστής συμπεριφοράς

- Μέθοδος υπολογισμού Newmark and Hall (1973)

Το ελαστοπλαστικό φάσμα προκύπτει από το αντίστοιχο ελαστικό με διαίρεση των τεταγμένων με $\sqrt{2\mu-1}$ και μ για μικρές και μεγάλες περιόδους, αντίστοιχα ενός συστήματος ενός βαθμού ελευθερίας.

Επειδή οι μεταλλικές κατασκευές έχουν πολύ συχνά περιόδους μεγαλύτερες από 0.5 sec, ο συντελεστής συμπεριφοράς q συμπίπτει με το δείκτη καθολικής πλαστιμότητας μ_b



Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

4. Συντελεστής συμπεριφοράς

- Μέθοδος υπολογισμού *Giuffré and Giannini (1982)*

$$q = 1 + (\mu - 1)^{0.87 - 0.05T} \quad \text{για } T \geq T_0$$

$$q = 1 + 2(q_0 - 1) \frac{T}{T_0} \left(1 - \frac{T}{2T_0} \right) \quad \text{για } T \geq T_0$$

όπου T_0 είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στην απαρχή του φθίνοντα κλάδου του ελαστικού φάσματος απόκρισης και q_0 είναι η τιμή του q που προκύπτει από την παραπάνω σχέση για $T=T_0$

Δείκτες Πλαστιμότητας και Βλάβης και Συντελεστής Συμπεριφοράς

4. Συντελεστής συμπεριφοράς

- Μέθοδος υπολογισμού Kato and Akiyama (1977, 1985)

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η ασφάλεια μιας κατασκευής έναντι του σεισμού σχεδιασμού εκτιμάται συγκρίνοντας την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της κατασκευής με τη σεισμική ενέργεια που εισάγεται στην κατασκευή. Η διαδικασία προσδιορισμού της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας εφαρμόζεται σε κάθε όροφο.

- Μέθοδος κόπωσης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κλασική θεωρία κόπωσης χαμηλού αριθμού κύκλων φόρτισης και στη χρήση της υπόθεσης γραμμικής συσσώρευσης βλάβης σύμφωνα με τον κανόνα του Miner.

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

Δυναμική Ανάλυση Κατασκευών

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

1. *Εισαγωγή και βασικές έννοιες*
2. *Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ*
3. *Ικανοτικός σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ*
4. *Επιπρόσθετα στοιχεία σχεδιασμού κατά ΝΕΑΚ*

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

1. Εισαγωγή και βασικές έννοιες

Οι απαιτήσεις ενός σύγχρονου αντισεισμικού σχεδιασμού αντιστοιχούν σε τρεις δεδομένες οριακές καταστάσεις:

Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας: Αναφέρεται σε μέτριας έντασης συχνούς σεισμούς με περίοδο επανάληψης μικρότερη από τη ζωή σχεδιασμού της κατασκευής. Απαιτείται η κατασκευή και τα μη φέροντα στοιχεία να μην υποστούν καμία βλάβη.

Οριακή κατάσταση ικανότητας βλάβης: Αναφέρεται σε λιγότερο συχνούς, ισχυρούς σεισμούς και επιτρέπει μικρές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία σε κάποιες θέσεις της κατασκευής.

Οριακή κατάσταση αστοχίας: Αναφέρεται σε σεισμούς πολύ ισχυρής έντασης με πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης. Επιτρέπονται βλάβες τόσο στα μη φέροντα όσο και στη φέρουσα κατασκευή αλλά επιβάλλεται η εξασφάλιση της ασφάλειας των ενοίκων. Η κατασκευή πρέπει να έχει την ικανότητα να απορροφά μεγάλα ποσά σεισμικής ενέργειας μέσω ανελαστικής συμπεριφοράς.

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

1. Εισαγωγή και βασικές έννοιες

- Η ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής ελέγχεται σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς με βάση μια καθολική ανελαστική ανάλυση σε συνδυασμό με ανελαστικά φάσματα σχεδιασμού.
- Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εντατικά μεγέθη με τα οποία θα γίνουν οι έλεγχοι επάρκειας των διατομών των μελών της κατασκευής.
- Τα ανελαστικά φάσματα σχεδιασμού προκύπτουν από τα αντίστοιχα ελαστικά με μείωση τους μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς q .
- Η εξασφάλιση όμως της απαιτούμενης πλαστιμότητας επιβάλλει τη χρήση ειδικών κανόνων υπολογισμού και κατασκευαστικής διαμόρφωσης, ώστε η ανελαστική παραμόρφωση να περιορίζεται σε ορισμένες επιθυμητές και κατάλληλα διαμορφωμένες περιοχές της κατασκευής, η οποία δεν πρέπει να οδηγείται σε μερική ή ολική πρόωμη κατάρρευση. Ο σχεδιασμός αυτός είναι γνωστός ως **ικανοτικός σχεδιασμός**.

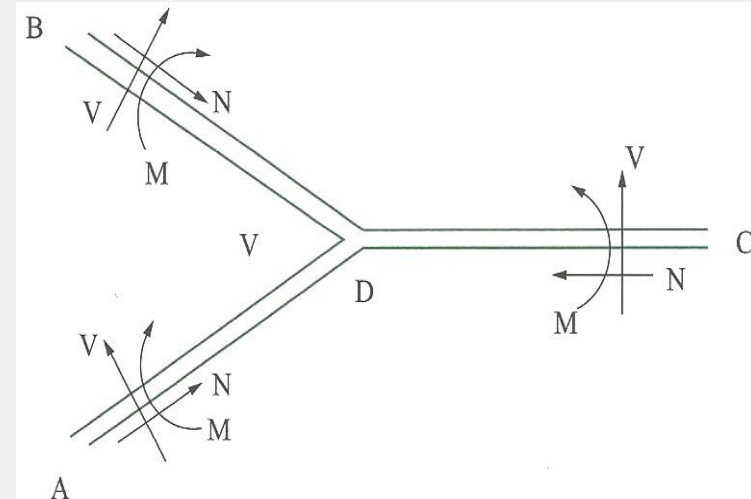
Αντισεισμικός Σχεδιασμός

1. Εισαγωγή και βασικές έννοιες

Διαφορά άμεσου και ικανοτικού σχεδιασμού:

Τα μέλη του παρακάτω πλαισίου υπόκεινται στις σεισμικές δράσεις $(M,N,V)_{AD}$, $(M,N,V)_{BD}$, $(M,N,V)_{CD}$

- Σύμφωνα με τον άμεσο σχεδιασμό κάθε μέλος διαστασιολογείται ώστε να παραλαμβάνει τις εφαρμοσμένες σ' αυτό δράσεις
- Σύμφωνα με τον ικανοτικό σχεδιασμό, επιλέγεται το μέλος που επιθυμείται να διαρρεύσει, εδώ το CD. Στη συνέχεια αφού διαστασιολογηθεί με τα παραπάνω μεγέθη, προσδιορίζεται η υπεραντοχή του λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική αντοχή διαρροής, την αύξηση του εμβαδού διατομής και την κράτυνση του χάλυβα. Στη συνέχεια επαναυπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη $(M',N',V')_{AD}$, $(M',N',V')_{BD}$, $(M',N',V')_{CD}$ κατά την ανάπτυξη της αντοχής αυτής και με αυτά διαστασιολογούνται τα AD, BD



Αντισεισμικός Σχεδιασμός

1. Εισαγωγή και βασικές έννοιες

Συμπερασματικά ο ικανοτικός σχεδιασμός αποσκοπεί:

- Στην επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης αντοχής και πλαστιμότητας μέσω ανελαστικής παραμόρφωσης εκείνων των στοιχείων που διαστασιολογούνται έτσι ώστε να μπορούν να απορροφήσουν μεγάλο ποσοστό σεισμικής διαρροής.*
- Στην εξασφάλιση επαρκούς αντοχής έναντι διαρροής των υπολοίπων στοιχείων της κατασκευής που θα παραμείνουν ελαστικά.*

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Θεμελιώδεις απαιτήσεις σεισμικής συμπεριφοράς κατά τον ΝΕΑΚ (1995):

• **Απαίτηση αποφυγής κατάρρευσης** η οποία ικανοποιείται όταν:

- Εξασφαλίζεται η μεταφορά στο έδαφος των δράσεων κάθε εδραζόμενου στοιχείου της ανωδομής χωρίς μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις
 - Εξασφαλίζεται η απαιτούμενη αντοχή σε όλα τα φέροντα στοιχεία του δομήματος, λαμβάνοντας τυχόν επιρροές 2^{ης} τάξης
- Ελέγχεται ο πλαστικός μηχανισμός απόκρισης του φορέα στο σεισμό σχεδιασμού με τα ακόλουθα κριτήρια:
- 1) Τον ικανοτικό σχεδιασμό για εξασφάλιση αξιόπιστου ελαστοπλαστικού μηχανισμού
 - 2) Την εξασφάλιση ικανοποιητικής σχέσης μεταξύ διαθέσιμης και απαιτούμενης τοπικής πλαστιμότητας στις θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Θεμελιώδεις απαιτήσεις σεισμικής συμπεριφοράς κατά τον ΝΕΑΚ (1995):

• **Απαίτηση αποφυγής κατάρρευσης** η οποία ικανοποιείται όταν:

- Εξασφαλίζεται μια ελάχιστη στάθμη πλαστιμότητας σε κάθε περιοχή πιθανού σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης
- Η συμπεριφορά της κατασκευής είναι επαρκώς συνεπής με τα χρησιμοποιούμενα προσομοιώματα ανάλυσης και σχεδιασμού
- Λαμβάνονται μέτρα προστασίας από πιθανή πρόσκρουση του κτιρίου με τα γειτονικά του κατά τη διάρκεια της σεισμικής τους ταλάντωσης

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Θεμελιώδεις απαιτήσεις σεισμικής συμπεριφοράς κατά τον ΝΕΑΚ (1995):

• **Απαίτηση περιορισμού βλαβών** η οποία ικανοποιείται όταν πέραν των προηγούμενων έχουμε ότι:

- Οι σχετικές μετακινήσεις των ορόφων είναι μικρότερες από ορισμένες τιμές

- Εξασφαλίζεται επαρκής αντοχή των στοιχείων στήριξης εγκαταστάσεων και προσαρτημάτων της κατασκευής

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Σεισμικές δράσεις σχεδιασμού:

- Οι σεισμικές δράσεις σχεδιασμού καθορίζονται από τα φάσματα επιταχύνσεων σχεδιασμού:

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(\frac{\vartheta}{q} \beta_0 - 1 \right) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_1$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \quad \text{για } T_1 \leq T \leq T_2$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{για } T \geq T_2$$

- $A=ag$ είναι η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού του εδάφους.
- γ_1 είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας της κατασκευής (0.85, 1.00, 1.15, 1.30)
- T_1, T_2 είναι οι χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος που εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Σεισμικές δράσεις σχεδιασμού:

- Οι σεισμικές δράσεις σχεδιασμού καθορίζονται από τα φάσματα επιταχύνσεων σχεδιασμού:

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(\frac{\vartheta}{q} \beta_0 - 1 \right) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_1$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \quad \text{για } T_1 \leq T \leq T_2$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{για } T \geq T_2$$

- θ είναι ο συντελεστής θεμελίωσης.
- q είναι ο συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς, που διαιρεί όλες τις τιμές του ελαστικού φάσματος
- β_0 είναι ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης που λαμβάνεται ίσος με 2.5

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Σεισμικές δράσεις σχεδιασμού:

- Οι σεισμικές δράσεις σχεδιασμού καθορίζονται από τα φάσματα επιταχύνσεων σχεδιασμού:

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(\frac{\vartheta}{q} \beta_0 - 1 \right) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_1$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \quad \text{για } T_1 \leq T \leq T_2$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{για } T \geq T_2$$

- Σε κάθε περίπτωση πρέπει $R_d \geq 0.25 A\gamma_1$
- Η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού καθορίζεται επίσης από το παραπάνω φάσμα αλλά με $0.7A$ με $0.5q$ και με $\theta=1$

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Σεισμικές δράσεις σχεδιασμού:

- Οι σεισμικές δράσεις σχεδιασμού καθορίζονται από τα φάσματα επιταχύνσεων σχεδιασμού:

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(\frac{\vartheta}{q} \beta_0 - 1 \right) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_1$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \quad \text{για } T_1 \leq T \leq T_2$$

$$R_d(t) = A\gamma_1 \left[\frac{\vartheta}{q} \right] \beta_0 \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{για } T \geq T_2$$

- Σε περίπτωση χρήσης ελαστικού φάσματος η ελαστική φασματική επιτάχυνση $Re(T)$ υπολογίζεται από τις παραπάνω σχέσεις για $q=1$

- Οι παραπάνω σχέσεις λαμβάνουν υπόψη ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης $\zeta=5\%$. Αν το ποσοστό είναι διαφορετικό, τότε ο β_0 πολλαπλασιάζεται με $\eta = \sqrt{7/(2+\zeta)} \geq 0.7$

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Σεισμικές δράσεις σχεδιασμού:

Για την πραγματοποίηση ανελαστικής ανάλυσης, ο ΝΕΑΚ επιτρέπει τη χρήση πραγματικών ή και συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων σχεδιασμού εφ' όσον πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Για συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα εφ' όσον το φάσμα τους περιβάλλει το φάσμα του ΝΕΑΚ
- Για πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα εφ' όσον
 - Χρησιμοποιούνται τουλάχιστον πέντε διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα ψηφιοποιημένα ανά 0.02 το μέγιστο.
 - Αντιπροσωπεύουν κατά το δυνατόν τις σεισμικές δράσεις και εν γένει τοπικές συνθήκες της περιοχής της κατασκευής και έχουν διάρκεια σύμφωνη με αυτές (οπλισθήποτε τουλάχιστον 15 sec)
 - Ο μέσος όρος των φασμάτων επιταχυνσιογραφημάτων σχεδιασμού είναι ισοδύναμος με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του ΝΕΑΚ για απόσβεση 5%

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Ισοδύναμη στατική μέθοδος:

Στην ισοδύναμη στατική μέθοδο η απόκριση της κατασκευής προκύπτει από τη στατική εφαρμογή ισοδύναμων σεισμικών φορτίων στις θέσεις των συγκεντρωμένων μαζών της κατασκευής. Το συνολικό μέγεθος των σεισμικών φορτίων V_0 (τέμνουσα βάση) υπολογίζεται ως:

$$V_0 = MR_d(T)$$

Όπου M είναι η συνολική μάζα της κατασκευής και $R_d(T)$ η τιμή της φασματικής επιτάχυνσης που υπολογίζεται από το φάσμα σχεδιασμού. T είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος ταλάντωσης στη διεύθυνση της σεισμικής δράσης. Σύμφωνα με τον EC8 (1994) μια προσεγγιστική τιμή του T υπολογίζεται ως:

$$T = CH^{3/4}$$

όπου H είναι το ύψος του κτιρίου σε m ($H \leq 80 m$) και $C = 0.085$ για καμπτικά χαλύβδινα χωρικά πλαίσια ή $C = 0.075$ για καμπτικά χωρικά πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα και για χαλύβδινα πλαίσια με έκκεντρους συνδέσμους ή $C = 0.05$ για όλα τα άλλα δομικά συστήματα

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Ισοδύναμη στατική μέθοδος:

Ένας πιο ακριβής τρόπος προσδιορισμού του T είναι ο παρακάτω:

Το ολικό σεισμικό φορτίο V_0 κατανέμεται καθ' ύψος του κτιρίου στις συγκεντρωμένες μάζες m_i στη στάθμη i σύμφωνα με τον τύπο:

$$F_i = (V_0 - V_H) m_i z_i / \sum_{i=1}^N m_i z_i$$

όπου $V_H = 0.07TV_0 < 0.25V$ είναι μια πρόσθετη δύναμη που εφαρμόζεται στην κορυφή του κτιρίου όταν $T > 1$ sec, N είναι ο αριθμός των ορόφων. Ο τύπος υπολογισμού της ιδιοπεριόδου T_a (Τύπος του Rayleigh) έχει τη μορφή:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i \delta_i^2}{\sum_{i=1}^N F_i \delta_i}}$$

Όπου δ_i είναι οι οριζόντιες μετακινήσεις των μαζών m_i , όπως υπολογίζονται από τη γραμμική ελαστική στατική ανάλυση της κατασκευής που φορτίζεται με τα F_i .

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

2. Σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Ισοδύναμη στατική μέθοδος:

Επειδή οι δυνάμεις F_i και οι μετακινήσεις δ_i είναι ανάλογες της V_0-V_H , δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε την πραγματική τιμή της V_0-V_H για να προσδιορίσουμε τις F_i και δ_i που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό του T . Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός μπορεί να γίνει με F_i που υπολογίζονται υποθέτοντας πχ $V_0-V_H = 1$:

Η ισοδύναμη φασματική μέθοδος εφαρμόζεται σε κτίρια με θεμελιώδη ιδιομορφή (κυρίως μεταφορική) που έχει υψηλό ποσοστό συμμετοχής στην απόκριση και πιο γενικά σε κανονικά κτίρια. Στον ΝΕΑΚ κανονικά θεωρούνται τα κτίρια στα οποία:

- i) Υπάρχει ομαλή μεταβολή της μάζας και της δυσκαμψίας καθ' ύψος των ορόφων*
- ii) Δεν υπάρχει σύζευξη μεταφορικών και στρεπτικών ταλαντώσεων*

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

3. Ικανοτικός σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Γενικοί κανόνες

Για να εξασφαλιστεί η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας από την κατασκευή κατά την απόκριση στη σεισμική δράση σχεδιασμού, χωρίς ολική ή μερική κατάρρευση πρέπει η ανελαστική συμπεριφορά να έχει πλαστική μορφή και να κατανέμεται στο μεγαλύτερο δυνατό αριθμό φερόντων στοιχείων, σε περιοχές με περιορισμένο μήκος (πλαστικές αρθρώσεις).

Πιθανές ή προβλεπόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων είναι εκείνες στις οποίες υπάρχει πρόβλεψη ή μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης των αρθρώσεων

Ενδεχόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων είναι εκείνες στις οποίες υπάρχει μικρότερη πιθανότητα δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων, πρέπει όμως να διαθέτουν αυξημένη πλαστικότητα επειδή βρίσκονται σε περιοχές ιδιαίτερα κρίσιμες.

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

3. Ικανοτικός σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Γενικοί κανόνες

Η εξασφάλιση ενός τέτοιου αξιόπιστου ελαστοπλαστικού μηχανισμού απόκρισης της κατασκευής στις αιχμές της σεισμικής δράσης επιτυγχάνεται με τον ικανοτικό σχεδιασμό, δηλαδή με κατάλληλη ιεράρχηση των αντοχών του φορέα.

Σε πολυώροφα κτίρια λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή σχηματισμού ορόφου δηλαδή συγκέντρωση πλαστικών παραμορφώσεων σε ένα μόνο όροφο.

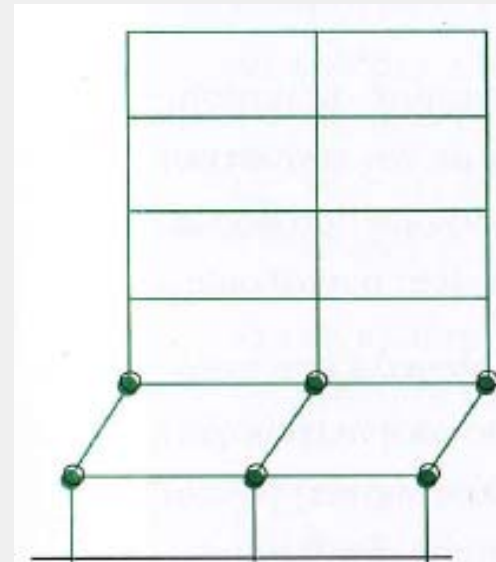
Στους ικανοτικούς ελέγχους, η υπολογιστική ροπή αντοχής M_R διατομής πλαστικής άρθρωσης, με βάση την οποία προσδιορίζεται η υπεραντοχή, θα λαμβάνεται ίση με τη μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί σε σύγχρονη δράση της αξονικής δύναμης η οποία προκαλείται από το σεισμικό συνδυασμό που χρησιμοποιείται στον αντίστοιχο ικανοτικό έλεγχο. Η αντοχή αυτή υπολογίζεται με βάση τις τελικές διαστάσεις της διατομής.

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

3. Ικανοτικός σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Αποφυγή σχηματισμού μηχανισμού ορόφου

Όταν το σύνολο των πλαστικών παραμορφώσεων συγκεντρώνεται στα άκρα των υποστυλωμάτων ενός ορόφου, δημιουργείται κίνδυνος μηχανισμού ορόφου (περίπτωση **μαλακού ορόφου**)



(α) Μηχανισμός ορόφου

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

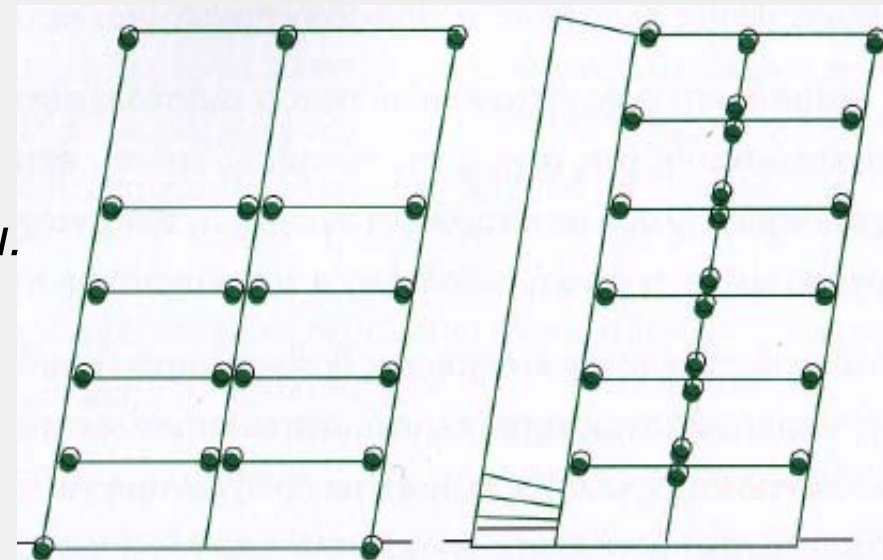
3. Ικανοτικός σχεδιασμός κατά ΝΕΑΚ

Αποφυγή σχηματισμού μηχανισμού ορόφου

Όταν το σύνολο των πλαστικών παραμορφώσεων συγκεντρώνεται στα άκρα των υποστυλωμάτων ενός ορόφου, δημιουργείται κίνδυνος μηχανισμού ορόφου (περίπτωση **μαλακού ορόφου**)

Τα κτίρια που αποτελούνται από πλαισιωτούς φορείς ο σχηματισμός μηχανισμού ορόφου πρέπει να αποκλείεται.

Αυτό επιτυγχάνεται με την αποφυγή ανάπτυξης πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα και την πρόβλεψη των πιθανών θέσεων πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς.



(β) Αποφυγή μηχανισμού ορόφου

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

4. Επιπρόσθετα στοιχεία σχεδιασμού κατά ΝΕΑΚ

Η πιθανή μέγιστη τιμή τυχόντος μεγέθους απόκρισης X για ταυτόχρονη δράση των τριών συνιστωσών του σεισμού υπολογίζεται από τη σχέση

$$X = \pm \left(X_x^2 + X_y^2 + X_z^2 \right)^{1/2}$$

όπου X_x , X_y και X_z οι μέγιστες πιθανές τιμές του μεγέθους για ανεξάρτητη σεισμική δράση κατά x , y και z αντίστοιχα. Εναλλακτικά επιτρέπεται να εφαρμόζεται ο δυσμενέστερος από τους ακόλουθους συνδυασμούς

$$X = X_x \pm 0.3X_y \pm 0.3X_z \quad X = 0.3X_x \pm X_y \pm 0.3X_z \quad X = 0.3X_x \pm 0.3X_y \pm X_z$$

Ο σεισμός σχεδιασμού αποτελεί τυχηματική δράση και έτσι τα εντατικά μεγέθη της δράσης αυτής συνδυάζονται με εκείνα των λοιπών δράσεων ως εξής

$$S_d = G_k + P_\infty \pm E + \sum \psi_{2,i} Q_{ki}$$

όπου S_d παριστάνει την τιμή εντατικού μεγέθους από συνδυασμό δράσεων.

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

4. Επιπρόσθετα στοιχεία σχεδιασμού κατά ΝΕΑΚ

Πέραν των φυσικών στρεπτικών επιππονήσεων ενός κτιρίου, που οφείλονται στη μη σύμπτωση του κέντρου μάζας με το κέντρο δυσκαμψίας κάθε ορόφου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τυχηματικές στρεπτικές επιππονήσεις.

Η σεισμική δράση σε κάθε όροφο λαμβάνεται μετατοπισμένη διαδοχικά, εκατέρωθεν του κέντρου βάρους, κάθετα προς τη διεύθυνση της σεισμικής δράσης σε απόσταση ίση με την **τυχηματική εκκεντρότητα** e_{ti} του ορόφου i .

Η απαίτηση του **περιορισμού βλαβών** ικανοποιείται όταν περιορίζονται οι παραμορφώσεις και στηρίζονται επαρκώς τα προσαρτήματα της κατασκευής. Οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς q θεωρείται ότι εξασφαλίζουν περιορισμένες και επιδιορθώσιμες βλάβες.

Κατά ΝΕΑΚ(1995), θα ελέγχεται ότι η **γωνιακή παραμόρφωση** σε όλους τους περιμετρικούς τοίχους δεν υπερβαίνει το 0.005 όταν ο οργανισμός πλήρωσης είναι από τοιχοποιία και το 0.007 όταν είναι από μεταλλικό σκελετό κτλ.

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

4. Επιπρόσθετα στοιχεία σχεδιασμού κατά ΝΕΑΚ

Στη φάση της σύνδεσης του στατικού συστήματος της κατασκευής θα πρέπει σύμφωνα με τον ΝΕΑΚ (1995) να επιδιώκεται ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων της σεισμικής συμπεριφοράς του.

Έτσι η μόρφωση του στατικού συστήματος πρέπει να στοχεύει στο μέγιστο δυνατό βαθμό απλότητας και κανονικότητας αλλά συγχρόνως και υπερστατικότητας ώστε να εξασφαλίζονται εναλλακτικοί δρόμοι στήριξης.

Πρέπει επίσης να αποφεύγονται δυσμενείς αλληλεπιδράσεις του φέροντος οργανισμού με τον οργανισμό πλήρωσης.

Ο ΝΕΑΚ (1995) δεν επιτρέπει να ληφθεί υπόψη συμβολή των τοιχοπληρώσεων στην ανάληψη σεισμικών δράσεων. Επιβάλλει όμως, να αντιμετωπιστούν οι ενδεχόμενες δυσμενείς επιδράσεις των τοιχοπληρώσεων στον φέροντα οργανισμό, όπως είναι η αφαίρεση των τοιχοπληρώσεων σε έναν όροφο κτλ.

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

4. Επιπρόσθετα στοιχεία σχεδιασμού κατά ΝΕΑΚ

Ειδικότερα πρέπει να επιδιώκονται οι ακόλουθοι στόχοι:

- 1) Κατά τη διαμόρφωση του συστήματος σε κάτοψη*
 - a) διάταξη κατακόρυφων στοιχείων που να ελαχιστοποιεί τη στρεπτική παραμόρφωση του κτιρίου,*
 - b) εξασφάλιση πλαισιακής λειτουργίας στο μέγιστο βαθμό των υποστυλωμάτων σε συνδυασμό με δοκούς επαρκούς δυσκαμψίας,*
 - c) κατάλληλη μορφή της κάτοψης της πλάκας κάθε ορόφου που να εξασφαλίζει διαφραγματική λειτουργία,*
 - d) επιλογή μικρού συστήματος πλαισίων και τοιχωμάτων για ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων στην ανελαστική αλληλεπίδραση του φέροντος οργανισμού με οργανισμό πλήρωσης σημαντικής δυσκαμψίας.*

Αντισεισμικός Σχεδιασμός

4. Επιπρόσθετα στοιχεία σχεδιασμού κατά ΝΕΑΚ

Ειδικότερα πρέπει να επιδιώκονται οι ακόλουθοι στόχοι:

2) Κατά τη διαμόρφωση ως προς ύψος:

a)συνεχής και κανονική κατανομή της δυσκαμψίας των κατακόρυφων στοιχείων καθώς και των μαζών και των τοιχοπληρώσεων

b)ισόσταθμη και κατά το δυνατόν ομοιογενής θεμελίωση των κατακόρυφων στοιχείων.

3) Κατά τη διαμόρφωση των λεπτομερειών:

a)αποφυγή έκκεντρων συνδέσεων οριζοντίων με κατακόρυφα στοιχεία σε κόμβους πλαισίων,

b)αποφυγή της καθ' ύψος διακοπής τοιχοπληρώσεων σε φατνώματα μεταξύ υποστυλωμάτων.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

1. Εισαγωγή
2. Ανάλυση αλληλεπίδρασης στο απλούστερο σύστημα εδάφους-κατασκευής
3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3
4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής
5. Μη γραμμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

1. Εισαγωγή

Η ανάλυση και ο σχεδιασμός μιας κατασκευής υπό την επίδραση σεισμικών διεγέρσεων γίνονται συνήθως με παραδοχή πλήρους πάκτωσης της κατασκευής στο απαραμόρφωτο έδαφος.

Στην πραγματικότητα όμως όλα τα εδάφη χαρακτηρίζονται από μικρή ή μεγάλη παραμορφωσιμότητα.

Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να εκφραστεί με τη διαφορά στην απόκριση της κατασκευής υπολογιζόμενης:

α) υποθέτοντας την κίνηση της θεμελίωσης να είναι ίδια με την κίνηση στο ελεύθερο πεδίο

και β) θεωρώντας την πραγματική κίνηση της θεμελίωσης.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

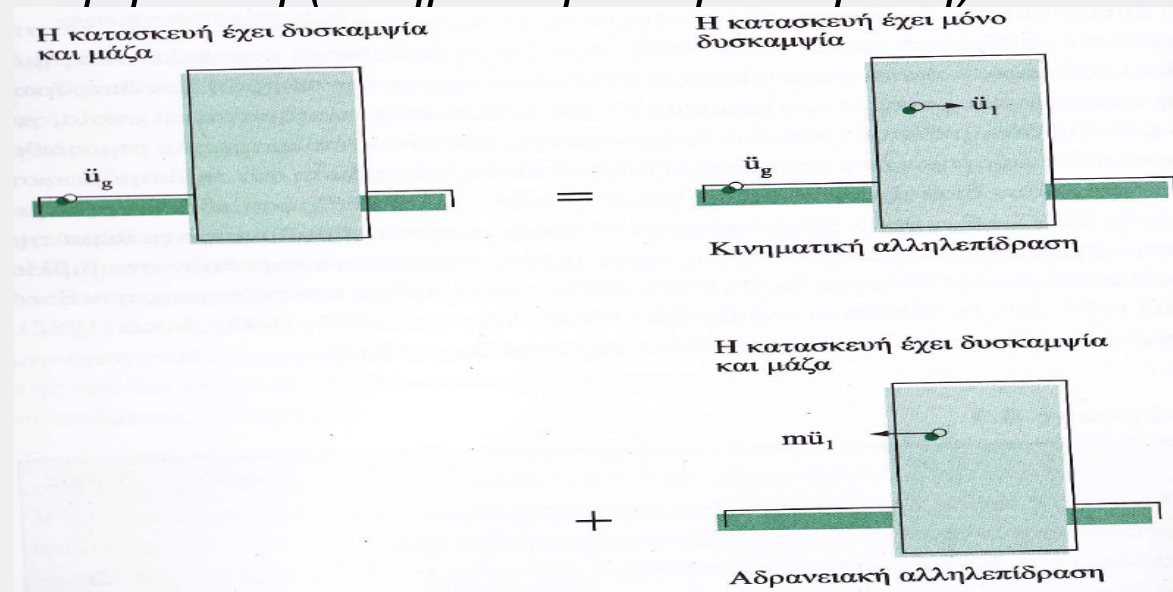
1. Εισαγωγή

Μια τυπική σεισμική ανάλυση μιας κατασκευής σε παραμορφώσιμο έδαφος γίνεται σε δύο βήματα, με τη βοήθεια της αρχής της επαλληλίας, εφόσον όλο το σύστημα είναι γραμμικό.

Στο πρώτο βήμα υπολογίζουμε την κίνηση της κατασκευής υποθέτοντας ότι έχει δυσκαμψία αλλά η μάζα της είναι μηδενική (Κινηματική Αλληλεπίδραση).

Στο δεύτερο βήμα υπολογίζουμε την κίνηση της κατασκευής λόγω αδρανειακών δυνάμεων, που είναι γινόμενα μαζών επί τις επιταχύνσεις του πρώτου βήματος.

(Αδρανειακή Αλληλεπίδραση)



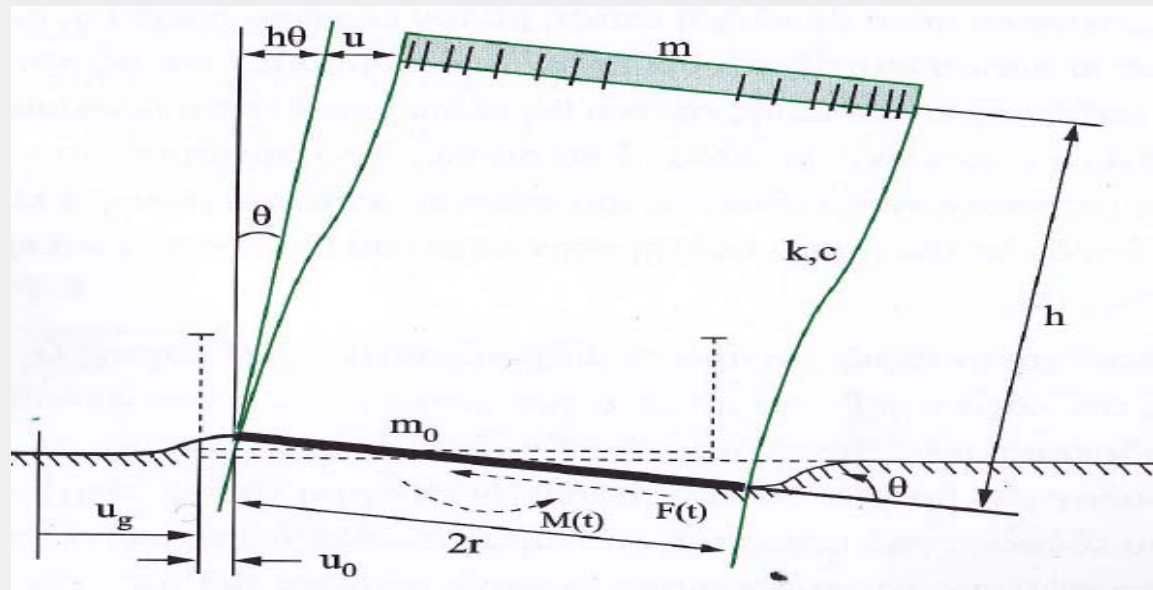
Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

2. Ανάλυση αλληλεπίδρασης στο απλούστερο σύστημα εδάφους-κατασκευής

Θεωρούμε το μονώροφο κτιριακό πλαίσιο το οποίο είναι μια γραμμικά ελαστική κατασκευή μάζας m , ιξώδους απόσβεσης c και εγκάρσιας δυσκαμψίας k που στηρίζεται μέσω ενός καθολικού θεμελίου με μάζα m_0 στην επιφάνεια του εδαφικού ομογενούς ημιχώρου με ελαστική ή ιξωδοελαστική συμπεριφορά.

Το θεμέλιο εξιδανικεύεται με μια άκαμπτη κυκλική πλάκα η οποία είναι σε πλήρη επαφή με τον εδαφικό ημίχωρο.

Οι μάζες της κατασκευής και του θεμελίου είναι ομοιόμορφα κατανομημένες.



Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

2. Ανάλυση αλληλεπίδρασης στο απλούστερο σύστημα εδάφους-κατασκευής

Το εδαφικό υλικό χαρακτηρίζεται από το ελαστικό μέτρο διάτμησης G , την πυκνότητα μάζας ρ , το λόγο Poisson ν και τον ειδικό συντελεστή απόσβεσης $\Delta W_s / W_s$ λόγω ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς .

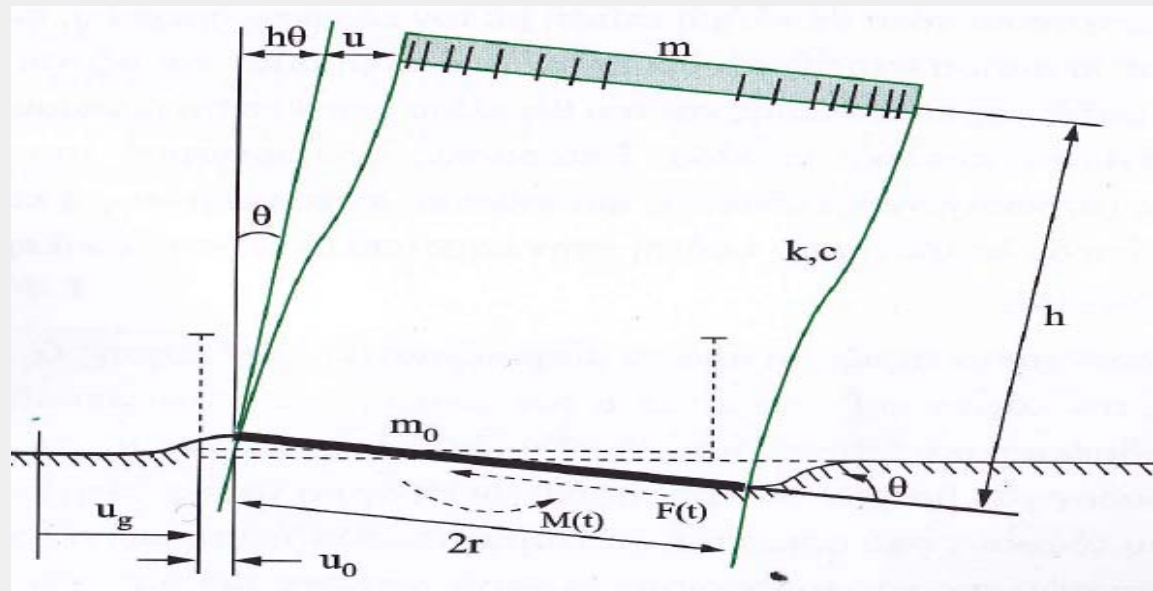
Για ένα δοκίμιο το ΔW_s παριστάνει το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης στο διάγραμμα $\sigma - \varepsilon$,

ενώ W_s παριστάνει την ενέργεια ανηγμένης παραμόρφωσης, η οποία αποθηκεύεται σε ένα γραμμικά ελαστικό υλικό.

Συνήθως:

$$\Delta W_s / W_s = 2\pi \tan \delta$$

δ : η γωνία διαφοράς φάσης



Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

2. Ανάλυση αλληλεπίδρασης στο απλούστερο σύστημα εδάφους-κατασκευής

Οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος εδάφους-κατασκευής περιλαμβάνουν οριζόντια δυναμική ισορροπία δυνάμεων για τη μάζα m , για το σύστημα μαζών m και m_0 και δυναμική ισορροπία ροπών του όλου συστήματος ως προς το κέντρο του θεμελίου:

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + ku = 0 \quad m\ddot{u}_t + m_0\ddot{u}_{0t} + F = 0 \quad m\ddot{u}_t h + I_0\ddot{\theta} + M = 0$$

όπου
$$u_{0t} = u_g + u_0 \quad u_t = u_g + u_0 + h\theta + u$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\begin{aligned} m\ddot{u} + c\dot{u} + ku + m\ddot{u}_0 + mh\ddot{\theta} &= -m\ddot{u}_g \\ m\ddot{u} + (m + m_0)\ddot{u}_0 + mh\ddot{\theta} + F &= -(m + m_0)\ddot{u}_g \\ mh\ddot{u} + mh\ddot{u}_0 + (mh^2 + I_0)\ddot{\theta} + M &= -mh\ddot{u}_g \end{aligned}$$

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

2. Ανάλυση αλληλεπίδρασης στο απλούστερο σύστημα εδάφους-κατασκευής

Οι εκφράσεις των αντιδράσεων F και M συναρτήσεσι των μετακινήσεων του u_0 και θ δίδονται συνήθως στο πεδίο των συχνοτήτων και όχι στο πεδίο του χρόνου.

Για αρμονικές ταλαντώσεις με συχνότητα ω έχουμε: $F = \bar{F}e^{i\omega t}$ $M = \bar{M}e^{i\omega t}$
 $u_0 = \bar{u}_0e^{i\omega t}$ $\theta = \bar{\theta}e^{i\omega t}$

Έτσι η συμπεριφορά του θεμελίου στο πεδίο των συχνοτήτων λαμβάνει τη μορφή

$$\begin{Bmatrix} \bar{F} \\ \bar{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{K}_{FF} & \bar{K}_{FM} \\ \bar{K}_{MF} & \bar{K}_{MM} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_0 \\ \bar{\theta} \end{Bmatrix}$$

Οι συναρτήσεις $K_{ij}=K_{ij}(\omega)$ ($i,j=F,M$) είναι γνωστές ως μιγαδικές δυναμικές δυσκαμψίες του θεμελίου και έχουν υπολογιστεί με αρκετά καλή προσέγγιση για κυκλικό και άκαμπτο θεμέλιο σε ελαστικό έδαφος.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

2. Ανάλυση αλληλεπίδρασης στο απλούστερο σύστημα εδάφους-κατασκευής

Υποθέτοντας σεισμική διέγερση της μορφής $u_g = 1 \cdot e^{i\omega t}$ έχουμε ότι όλες οι συναρτήσεις απόκρισης $f(t)$ θα γίνουν $f(\omega)e^{i\omega t}$

Οι τρεις γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν για κάθε συχνότητα ω και να δώσουν μιγαδικές συναρτήσεις απόκρισης.

Η απόκριση σε τυχούσα σεισμική διέγερση μπορεί να υπολογιστεί με σύνθεση κατά *Fourier* των αποκρίσεων του συστήματος σε κάθε μια από τις αρμονικές συνιστώσες του σεισμού.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(\omega) \bar{u}_g(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

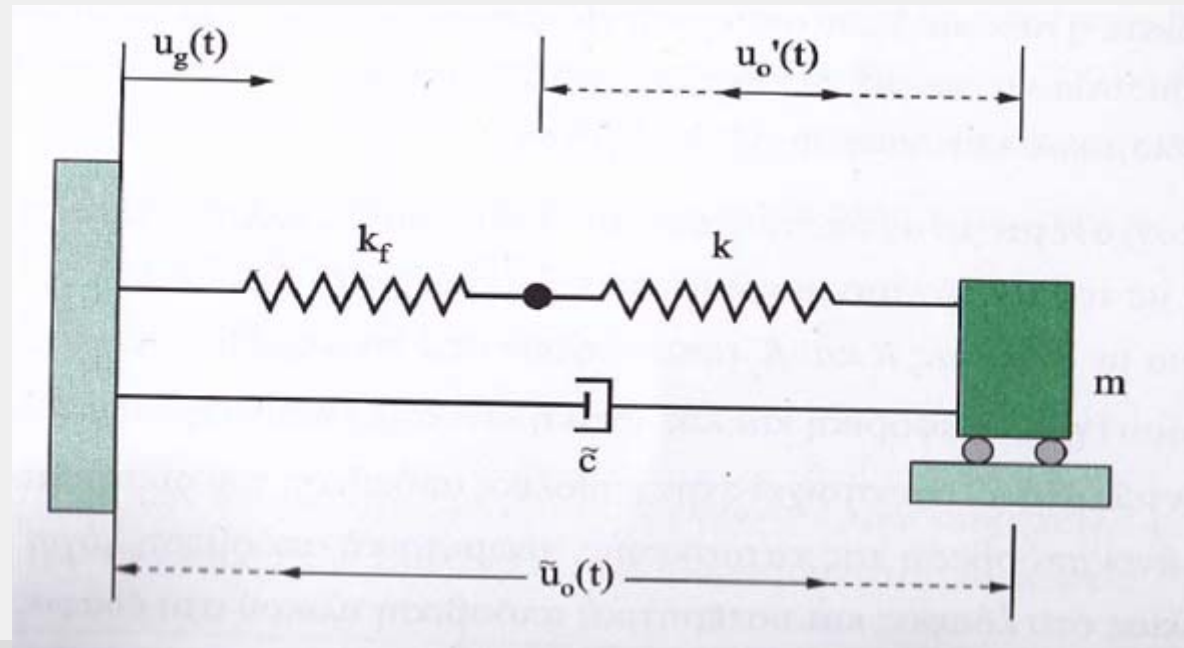
όπου η κατά *Fourier* μετασχηματισμένη συνάρτηση $\bar{u}_g(\omega) = \int_0^{t_0} \ddot{u}_g(t) e^{-i\omega t} dt$

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Για να ενταχθεί η όλη διαδικασία στα πλαίσια των διατάξεων του αμερικάνικου αντισεισμικού κανονισμού, θα αντικαταστήσουμε το σύστημα που αναλύθηκε προηγουμένως με ένα απλούστερο ισοδύναμο.

Αυτό επιτυγχάνεται με τον ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή στον οποίο τα ελατήρια με σταθερές K και K_f αντιστοιχούν στις δυσκαμψίες της κατασκευής και του θεμελίου, αντίστοιχα και ο αποσβεστήρας με συντελεστή c αντιστοιχεί στην καθολική απόσβεση του συστήματος (κατασκευής-κυματικής ακτινοβολίας-υστερητικής)



Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων και του αποσβεστήρα ορίζονται έμμεσα μέσω της ιδιοπεριόδου $\tilde{T} = 2\pi / \tilde{\omega}$ και του ποσοστού κρίσιμης απόσβεσης $\tilde{\beta}$. Η μάζα λαμβάνεται ίση με τη μάζα της κατασκευής και η σεισμική κίνηση ίση με αυτή του ελεύθερου πεδίου.

Στόχος είναι να αναπτύξουμε σχέσεις οι οποίες να συνδέουν τις ποσότητες \tilde{T} , $\tilde{\beta}$ με τις αντίστοιχες της κατασκευής θεμελιωμένης σε απαραμόρφωτο έδαφος, έτσι ώστε να αποτιμήσουμε την επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής.

Εάν \tilde{u}_0 είναι η μέγιστη τιμή της ολικής μετατόπισης του ισοδύναμου ταλαντωτή και u'_0 το τμήμα της που αντιστοιχεί στο ελατήριο K της κατασκευής, η μέγιστη δύναμη του ελατηρίου \tilde{Q}_0 στον ισοδύναμο ταλαντωτή έχει την έκφραση

$$\tilde{Q}_0 = \tilde{K}\tilde{u}_0 = m\omega^2 u'_0$$

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Με βάση τον προσδιορισμό των συναρτήσεων \tilde{T} , $\tilde{\beta}$ και επιπρόσθετες συγκριτικές μελέτες συμπεραίνουμε ότι στον ισοδύναμο ταλαντωτή αναπτύσσεται μέγιστη δύναμη ελατηρίου ίση με αυτήν του πραγματικού συστήματος αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής:

$$\text{οπότε} \quad u_0 = \frac{\tilde{u}_0}{\left(\tilde{T}/T\right)^2} \quad Q_0 = \tilde{Q}_0 \quad u_0 = u'_0$$

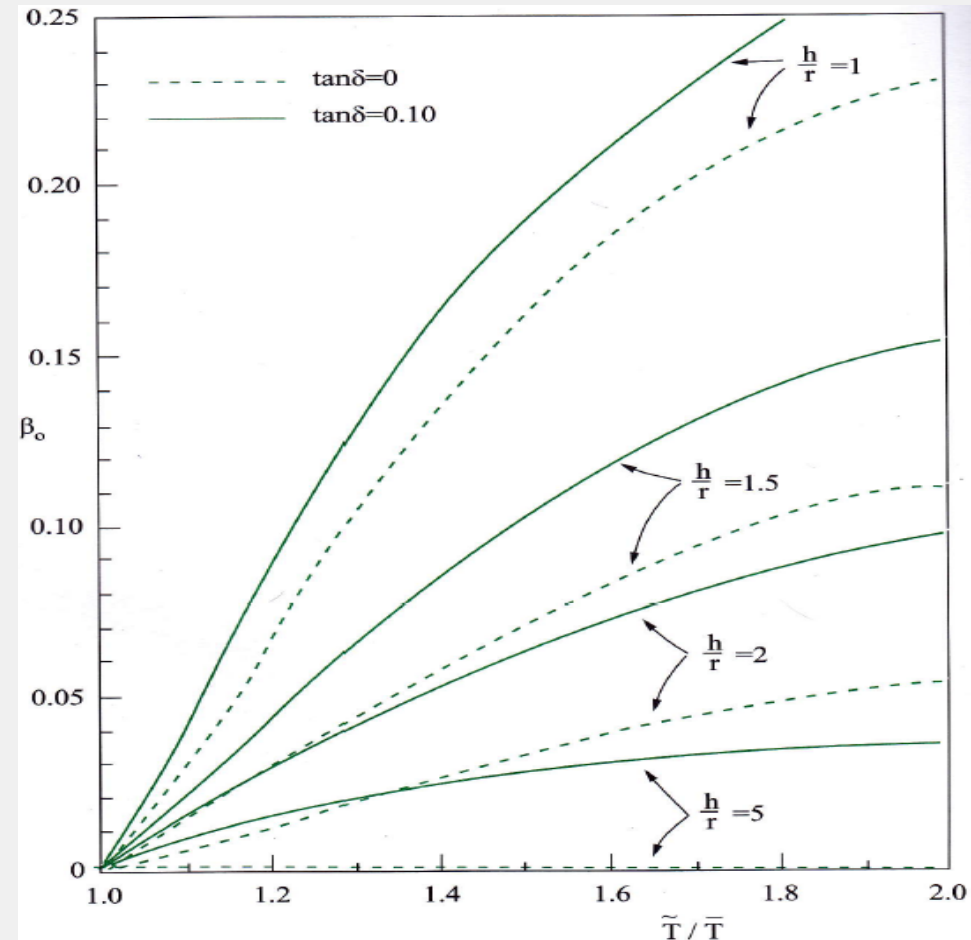
Τελικά οι ποσότητες \tilde{T} , $\tilde{\beta}$ μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των T , β ως:

$$\tilde{T} = T \sqrt{1 + \frac{k}{K_x} \left(1 + \frac{K_x h^2}{K_\theta}\right)} \quad \tilde{\beta} = \beta_0 + \frac{\beta}{\left(\tilde{T}/T\right)^3}$$

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

β_0 παριστάνει τη συνεισφορά της απόσβεσης της θεμελίωσης και περιλαμβάνει απόσβεση ακτινοβολίας και υλικού του εδάφους, συναρτήσει του λόγου \tilde{T}/T για διάφορες τιμές του h/r για δύο τιμές του $\tan \delta$

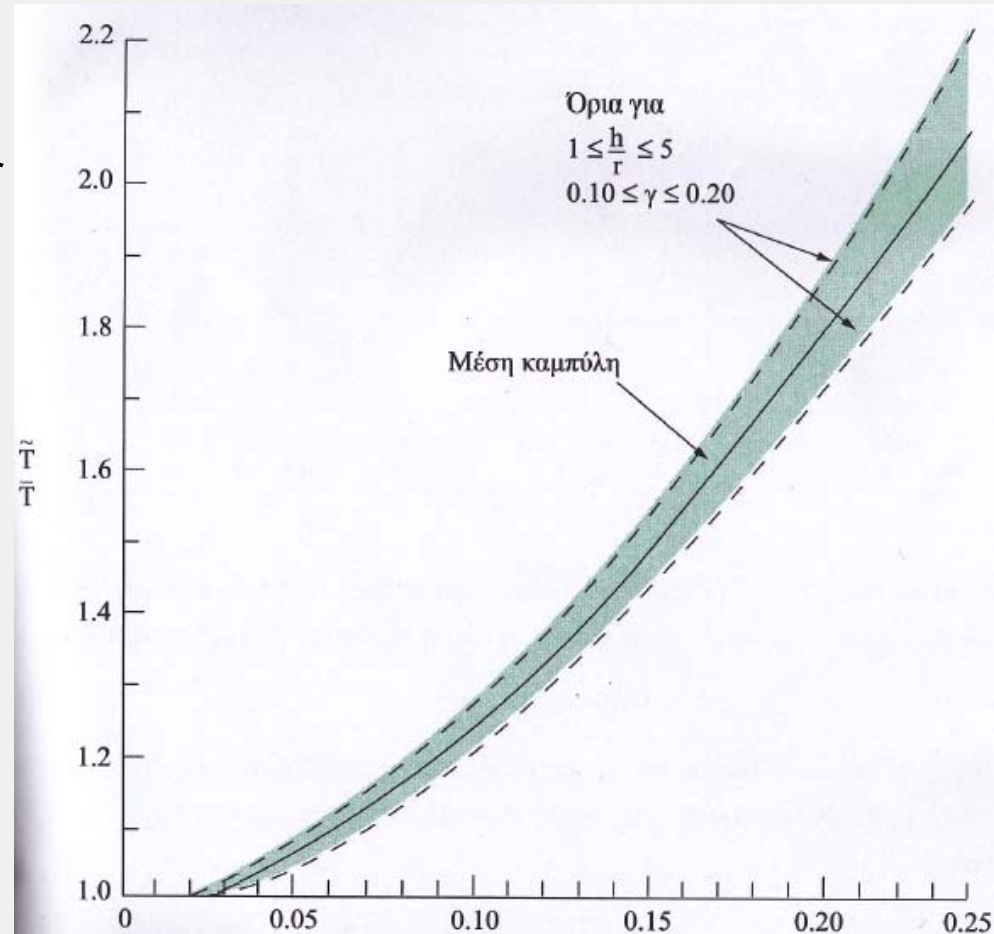


Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

β_0 παριστάνει τη συνεισφορά της απόσβεσης της θεμελίωσης και περιλαμβάνει απόσβεση ακτινοβολίας και υλικού του εδάφους, συναρτήσει του λόγου \tilde{T} / T για διάφορες τιμές του h / r για δύο τιμές του $\tan \delta$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι το \tilde{T} είναι πάντα μεγαλύτερο από το T όπως φαίνεται και στο σχήμα.

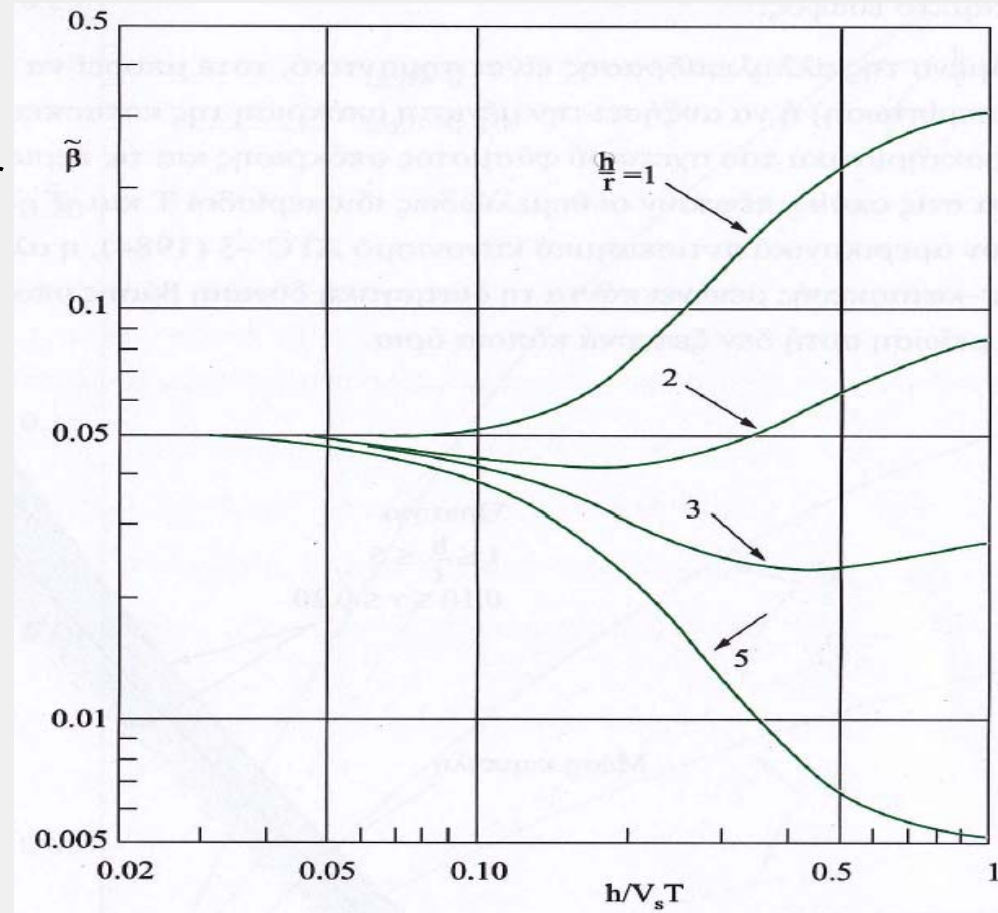


Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

β_0 παριστάνει τη συνεισφορά της απόσβεσης της θεμελίωσης και περιλαμβάνει απόσβεση ακτινοβολίας και υλικού του εδάφους, συναρτήσει του λόγου \tilde{T} / T για διάφορες τιμές του h / r για δύο τιμές του $\tan \delta$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι το $\tilde{\beta}$ μπορεί να είναι μεγαλύτερο, ίσο ή μικρότερο από το β όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Στην πράξη ενδιαφερόμαστε τότε το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής δεν είναι σημαντικό και μπορεί να αμεληθεί και εφόσον είναι σημαντικό, εάν αυξάνει ή μειώνει τη μέγιστη απόκριση της κατασκευής.

Σύμφωνα με τον Veletsos (1977) το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μπορεί να αμεληθεί εάν:

$$\hat{E} = (h / V_s T)(h / r)^{1/4} \leq 0.125$$

Υποθέτοντας ότι η σχέση πυκνότητας μάζας για την κατασκευή και το έδαφος, λαμβάνει τιμή $\gamma=0.15$ που είναι μια λογική μέση τιμή για κτιριακές κατασκευές, η παραπάνω ανισότητα αντιστοιχεί σε τιμές $\tilde{T} / T \leq 1.08$

Όταν αυτό το κριτήριο ικανοποιείται, η κατασκευή μπορεί να αναλυθεί σαν να ήταν θεμελιωμένη σε άκαμπτο έδαφος.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Σύμφωνα με τον ATC-3 (1984) για πολυώροφα κτίρια, τα οποία αναλύονται χωρίς την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, η ολική τέμνουσα Q εκφράζεται

$$Q = C_s W$$

όπου W είναι το ολικό βάρος της κατασκευής και C_s ο σεισμικός συντελεστής

$$C_s = 1.2 A_v S / RT^{2/3}$$

όπου A_v εκφράζει σε δεκαδικό ποσοστό του g την ενεργό εδαφική επιτάχυνση

S είναι ο συντελεστής των εδαφικών χαρακτηριστικών

R είναι ο συντελεστής μετατροπής της απόκρισης που εξαρτάται από την πλαστικότητα της κατασκευής

T είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής σε άκαμπτο έδαφος

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Σύμφωνα με τον ATC-3 (1984) για πολυώροφα κτίρια, τα οποία αναλύονται χωρίς την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, η ολική τέμνουσα Q εκφράζεται

$$Q = C_s W$$

Όταν υπάρχει αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, η τέμνουσα βάσης υπολογίζεται ως:

$$\tilde{Q} = Q - \Delta Q$$

όπου η μείωση λόγω αλληλεπίδρασης δίδεται ως:

$$\Delta Q = \left[C_s - \tilde{C}_s \left(0.05 / \tilde{\beta} \right)^{0.4} \right] W \quad \text{με} \quad C_s = 1.2 A_v S / R \tilde{T}^{2/3}$$

Κατά Veletsos (1993) η μέγιστη παραμορφωσιακή μετατόπιση της κατασκευής προσδιορίζεται από τη σχέση

$$u_m = \tilde{Q} / k$$

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Οι ανωτέρω διατάξεις του ATC-3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κάποιες τροποποιήσεις και σε περιπτώσεις επιφανειακών άκαμπτων καθολικών θεμελίων που δεν είναι κυκλικά, εγκιβωτισμένων άκαμπτων καθολικών θεμελίων σε ομογενές ή στρωσιγενές έδαφος και θεμελιώσεων που αποτελούνται από πολλά άκαμπτα θεμέλια συνδεδεμένα κατά άκαμπτο τρόπο μεταξύ τους.

Όταν λοιπόν το θεμέλιο έχει σχήμα διαφορετικό από κύκλο, τότε το r υπολογίζεται από σχέσεις ισοδυναμίας ως προς το εμβαδόν ή τη ροπή αδρανείας μεταξύ του ισοδύναμου κυκλικού και του τυχόντος σχήματος πραγματικού θεμελίου. Οι σχέσεις αυτές είναι:

$$r = \sqrt{A_0 / \pi} \quad \text{για το } K_x$$

$$r = \sqrt[4]{4I_0 / \pi} \quad \text{για το } K_\theta$$

όπου A_0 και I_0 το εμβαδόν και η ροπή αδρανείας του πραγματικού θεμελίου.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

3. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά ATC-3

Ο εγκιβωτισμός ενός θεμελίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των δυσκαμψιών K_x και K_θ . Για εγκιβωτισμένα άκαμπτα ολόσωμα θεμέλια με συνεχή επαφή πλευρικών τοίχων και περιβάλλοντος εδάφους οι δυσκαμψίες μπορούν να υπολογιστούν από τους προσεγγιστικούς τύπους:

$$K_x = \frac{8Gr}{2-\nu} \left(1 + \frac{2d}{3r} \right)$$

$$K_\theta = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu)} \left(1 + 2\frac{d}{r} \right)$$

όπου d είναι το βάθος εγκιβωτισμού.

Αντίστοιχες σχέσεις υπάρχουν στην περίπτωση που το έδαφος θεμελίωσης δεν είναι ομογενές ή όταν η κατασκευή αποτελεί πολυβάθμιο σύστημα.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Η σεισμική ανάλυση ενός συστήματος εδάφους-κατασκευής, ακόμα και αν είναι γραμμικό, απαιτεί τη χρήση αριθμητικών μεθόδων.

Γενικά η ανάλυση αυτή γίνεται είτε στο πεδίο των συχνοτήτων είτε στο πεδίο του χρόνου.

Χωρίζουμε τις διάφορες μεθόδους επίλυσης προβλημάτων αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο προσομοίωσης του εδάφους

a) Μέθοδοι που προσομοιώνουν το συνεχές ημίχωρο με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) ή τη Μέθοδο Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ).

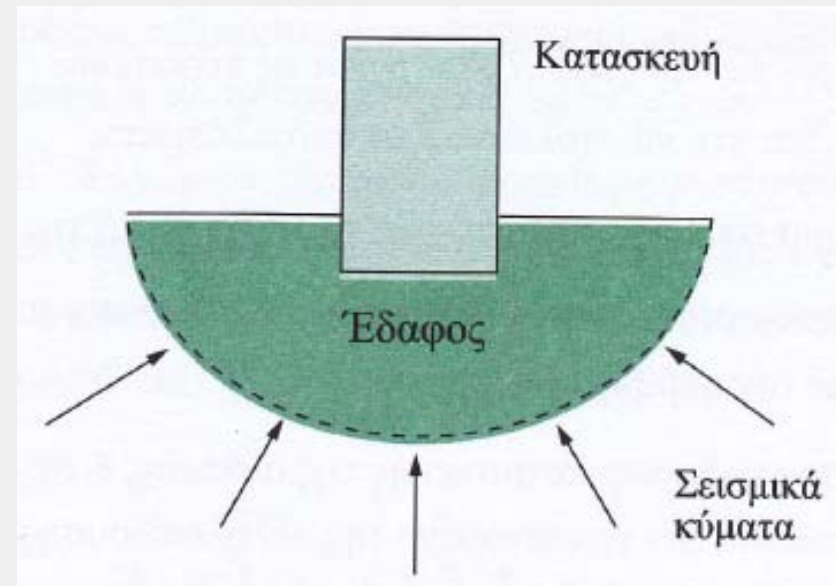
b) Μέθοδοι που προσομοιώνουν το συνεχές ημίχωρο με ελατήρια και αποσβεστήρες που εξαρτώνται ή είναι ανεξάρτητα της συχνότητας.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Ας θεωρήσουμε ότι η κατασκευή προσομοιώνεται με τη ΜΠΣ και στις δύο κατηγορίες μεθόδων.

Θεωρούμε το γραμμικό σύστημα εδάφους-κατασκευής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

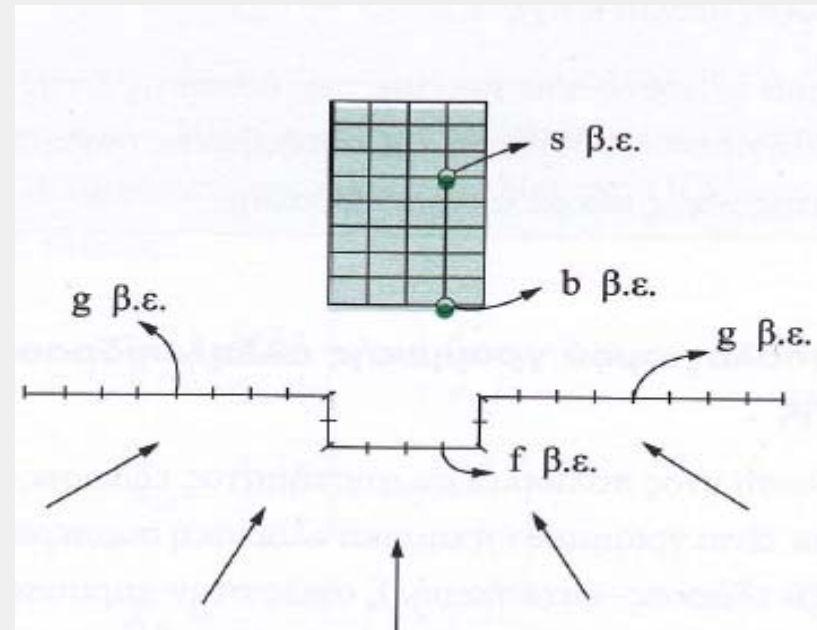
4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Ας θεωρήσουμε ότι η κατασκευή προσομοιώνεται με τη ΜΠΣ και στις δύο κατηγορίες μεθόδων.

Θεωρούμε το γραμμικό σύστημα εδάφους-κατασκευής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ακολουθώντας τη μέθοδο υποκατασκευών, το όλο σύστημα χωρίζεται σε δύο υποκατασκευές:

- 1) Την κατασκευή (ΜΠΣ)
- 2) Το έδαφος (ΜΣΣ)



Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

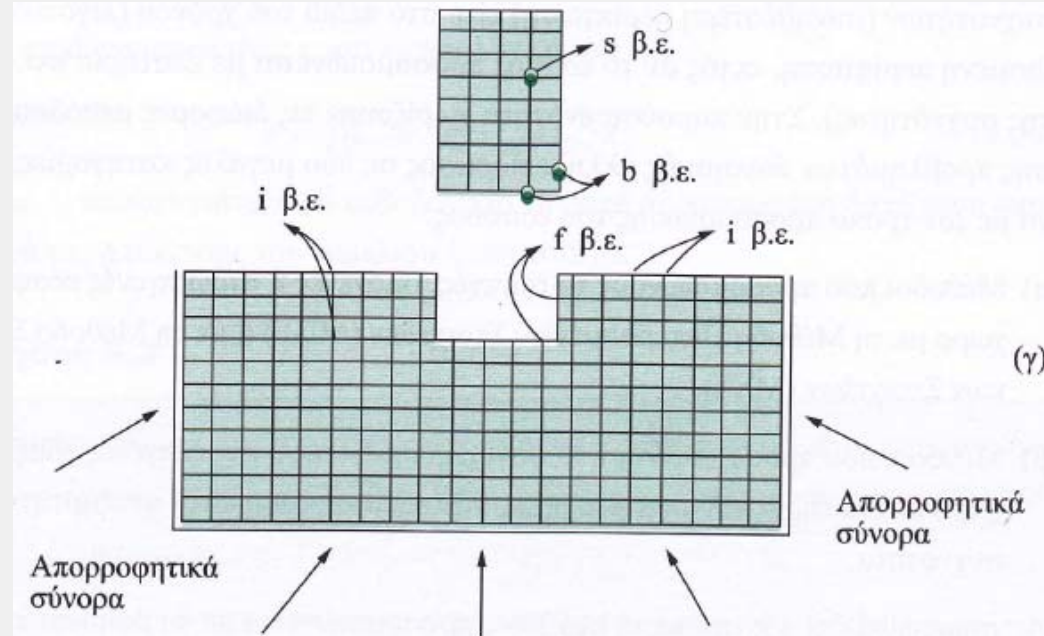
4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Ας θεωρήσουμε ότι η κατασκευή προσομοιώνεται με τη ΜΠΣ και στις δύο κατηγορίες μεθόδων.

Θεωρούμε το γραμμικό σύστημα εδάφους-κατασκευής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ακολουθώντας τη μέθοδο υποκατασκευών, το όλο σύστημα χωρίζεται σε δύο υποκατασκευές:

- 1) Την κατασκευή (ΜΠΣ)
- 2) Το έδαφος (ΜΠΣ)



Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης στην επιφάνεια επαφής είναι οι $\mathbf{R}_b(t)$ και $\mathbf{R}_f(t)$ και παριστάνουν τις δυνάμεις που ασκεί το έδαφος στην κατασκευή και αντίστροφα.

Οι εξισώσεις σεισμικής κίνησης της κατασκευής έχουν τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{M}_{bs} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{v}}_s^t \\ \ddot{\mathbf{v}}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_s^t \\ \dot{\mathbf{v}}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_s^t \\ \mathbf{v}_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_b \end{Bmatrix}$$

ο δείκτης s δηλώνει βαθμούς ελευθερίας της κατασκευής εκτός εκείνων της επαφής εδάφους-κατασκευής που συμβολίζονται με το δείκτη b .

Στατική εφαρμογή της κίνησης δημιουργεί στην κατασκευή ψευδοστατικές μετατοπίσεις οι οποίες συνδέονται με τις ολικές και τις σχετικές: $\mathbf{v}^t = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}$

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση, η εξίσωση κίνησης γράφεται ως

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K}\mathbf{v} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}}_0 + \mathbf{R}$$

αφού πρώτα λάβαμε υπόψη ότι $\mathbf{K}\mathbf{v}_0 = 0$ καθώς το \mathbf{v}_0 παριστάνει κίνηση απαραμόρφωτου σώματος και παραλείψαμε τον όρο $\mathbf{C}\dot{\mathbf{v}}_0$ ως αμελητέο έναντι του $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}}_0$

Εφαρμόζοντας τις συνθήκες συμβιβαστού των παραμορφώσεων και δυναμική ισορροπία στη διεπιφάνεια:

$$\mathbf{v}_{b0} = \mathbf{v}_{f0} \quad \mathbf{v}_b = \mathbf{v}_f$$

$$\mathbf{R}_b + \mathbf{R}_f = 0$$

Για τους β.ε. στη διεπιφάνεια μπορούμε να γράψουμε: $\mathbf{R}_f = \mathbf{S}_{ff}\mathbf{v}_f$

Με βάση τα παραπάνω γράφεται η μητρική εξίσωση κίνησης και ολοκληρώνεται αριθμητικά.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Ο προσδιορισμός της S_{ff} μπορεί να γίνει με μια εκ των ΜΠΣ ή ΜΣΣ, είτε κατευθείαν στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο των συχνοτήτων και μετά στο πεδίο του χρόνου με μετασχηματισμό *Fourier*.

Ο πλέον ακριβής και αποδοτικός υπολογισμός της S_{ff} επιτυγχάνεται με τη ΜΣΣ η οποία απαιτεί διακριτοποίηση μόνο της επιφάνειας του εδαφικού χωρίου και ικανοποιεί αυτόματα τις συνθήκες ακτινοβολίας στο άπειρο.

Ο υπολογισμός της S_{ff} με τη ΜΠΣ στο πεδίο του χρόνου ή των συχνοτήτων παρουσιάζει θεμελιώδεις δυσκολίες λόγω του ότι απαιτείται διακριτοποίηση όχι μόνο στο σύνορο αλλά και στο εσωτερικό του εδαφικού ημιχώρου, η οποία καταλήγει σε προσομοίωση ενός ημιαπείρου χώρου με ένα πεπερασμένο χώρο περιοριζόμενο από τεχνητά σύνορα που δεν επιτρέπουν την ακτινοβολία των σεισμικών κυμάτων.

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα απαιτείται η χρήση είτε απομακρυσμένων στοιχειωδών συνόρων είτε ειδικών απορροφητικών συνόρων.

Τα ειδικά τεχνητά σύνορα συνοψίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ιξώδη σύνορα (τα πιο απλά και συνηθισμένα στην πράξη)
- Παραξονικά σύνορα (μαθηματικά ισοδύναμα με τα ιξώδη)
- Σύνορα επαλληλίας (μαθηματικά ισοδύναμα με τα ιξώδη)
- Συμβατά σύνορα ή σύνορα οριζόντιου κύματος (απορρόφηση Love/Rayleigh)
- Στοιχεία απείρου (ΜΠΣ στο πεδίο των συχνοτήτων)

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

4. Μέθοδοι υπολογισμού γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Ένας άλλος τρόπος να εκφράσουμε τις δυναμικές δυσκαμψίες είναι ως ελατήρια και αποσβεστήρες και πιθανόν κάποιες ενεργές συγκεντρωμένες εδαφικές μάζες.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα εκτεταμένων παραμετρικών αναλύσεων με τις ΜΠΣ και ΜΣΣ έχουν κατασκευαστεί λεπτομερείς πίνακες που δίνουν αυτά τα εδαφικά ελατήρια, αποσβεστήρες και μάζες.

Τύπος κίνησης	Λόγος μάζας (αδράνειας), μ	Ισοδύναμη ακτίνα, r_0	Ενεργός εδαφική μάζα (αδράνεια), m_v	Στατική δυσκαμψία K	Απόσβεση C
Κατακόρυφη	$\frac{(1-\nu)}{4} \frac{m}{\rho r_0^3}$	$\frac{2a}{\sqrt{\pi}}$	$\frac{0.27m}{\mu}$	$\frac{4.7Ga}{1-\nu}$	$\frac{0.8a}{V_s} K$
Οριζόντια	$\frac{(7-8\nu)}{32(1-\nu)} \frac{m}{\rho r_0^3}$	$\frac{2a}{\sqrt{\pi}}$	$\frac{0.095m}{\mu}$	$\frac{9.2Ga}{2-\nu}$	$\frac{0.163a}{V_s} K$
Λικνιστική	$\frac{3(1-\nu)}{8} \frac{m}{\rho r_0^5}$	$\frac{2a}{\sqrt[4]{3\pi}}$	$\frac{0.24m}{\mu}$	$\frac{4.0Ga^3}{1-\nu}$	$\frac{0.6a}{V_s} K$
Στρεπτική	$\frac{m}{\rho r_0^5}$	$\frac{2a}{\sqrt[4]{3\pi}}$	$\frac{0.045m}{\mu}$	$8.31Ga^3$	$\frac{0.127a}{V_s} K$

Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής

5. Μη γραμμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Μη γραμμικότητες σε προβλήματα σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής οφείλονται κυρίως είτε σε ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους είτε σε συνθήκες μονόπλευρης επαφής εδάφους-κατασκευής, που αντιστοιχούν σε ανασήκωμα ή ολίσθηση του θεμελίου.

Τρεις είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για να προσομοιώσουν μη γραμμική εδαφική συμπεριφορά σε αναλύσεις αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

1. Γραμμική ελαστική ανάλυση με εδαφικές ιδιότητες συμβατές με την αναμενόμενη στάθμη ανηγμένων παραμορφώσεων στο έδαφος.

2. Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση.

3. Ακριβής μη γραμμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, χρησιμοποιώντας ένα διακριτό προσομοίωμα του συστήματος και ένα μη γραμμικό καταστατικό νόμο συμπεριφοράς εδάφους

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

1. *Εισαγωγή*
2. *Συστήματα σεισμικής απομόνωσης*
3. *Ανάλυση σεισμικά απομονωμένων κτιρίων*
4. *Σχεδιασμός σεισμικά απομονωμένων κτιρίων*

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

1. Εισαγωγή

Η **σεισμική απομόνωση** ως ιδέα είναι αρκετά παλιά και αποσκοπεί στο να απομονώσει την κατασκευή από τις επιδράσεις των εδαφικών επιταχύνσεων.

Ένας από τους στόχους της σεισμικής απομόνωσης είναι να μεταθέσει τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής μακριά από τις κυρίαρχες συχνότητες των σεισμικών διεγέρσεων και τη θεμελιώδη συχνότητα της πακτωμένης στο έδαφος κατασκευής.

Στις περισσότερες εφαρμογές η απομόνωση εφαρμόζεται στη βάση της κατασκευής και έτσι αναφέρεται ως **σεισμική απομόνωση βάσης**.

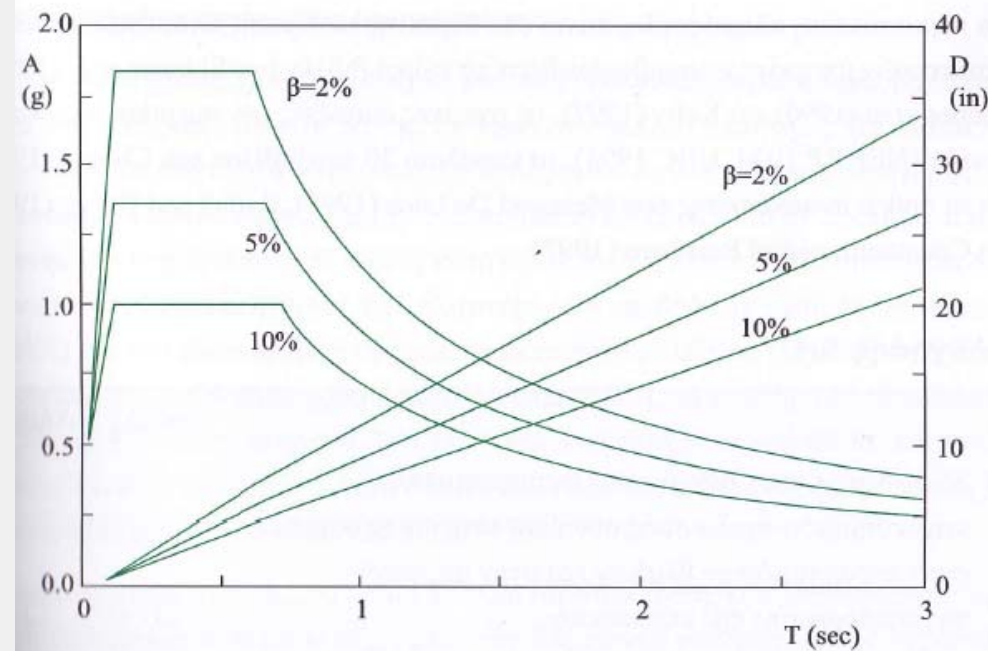
Αν και έχουν αναπτυχθεί τρισδιάστατα συστήματα σεισμικής απομόνωσης, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι οριζόντιες και η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού, τα συστήματα αυτά είναι περίπλοκα και δύσκολα εφαρμόζονται στη πράξη. Γι' αυτό η σεισμική απομόνωση συνήθως αναφέρεται στις δύο οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού.

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

1. Εισαγωγή

Η σεισμική απομόνωση εισάγει ευκαμψία στη βάση της κατασκευής κατά την οριζόντια διεύθυνση και έτσι μεταθέτει τη θεμελιώδη συχνότητα της κατασκευής μακριά από τις κυρίαρχες συχνότητες των σεισμικών διεγέρσεων με αποτέλεσμα την αποφυγή συντονισμού και μείωση επιταχύνσεων με αύξηση όμως των μετατοπίσεων .

Η σεισμική απομόνωση προσφέρει επίσης ένα μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας στο επίπεδο της.



Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

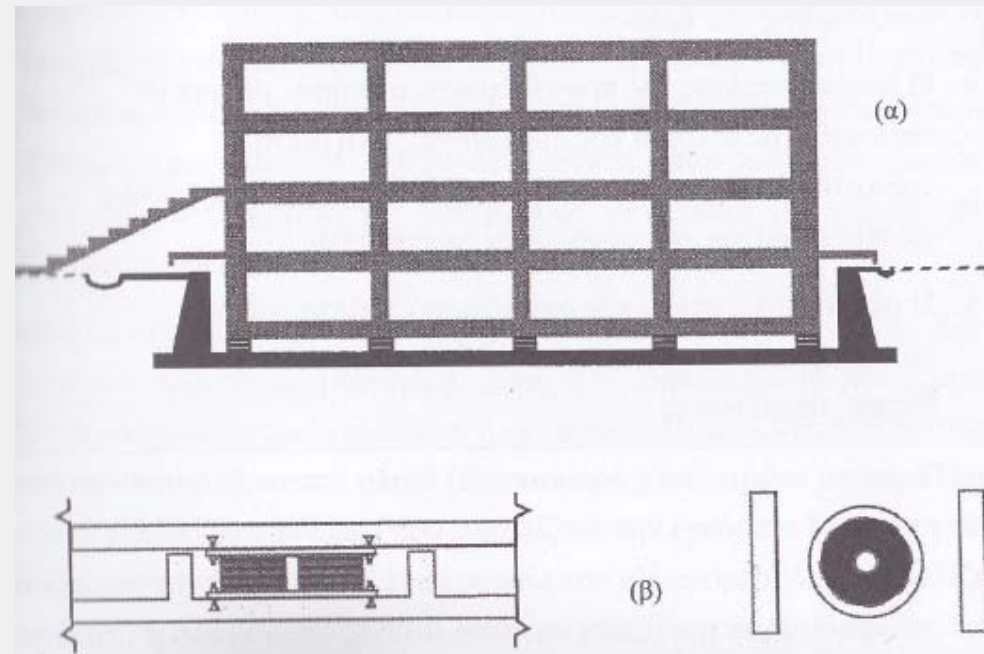
1. Εισαγωγή

Η σεισμική απομόνωση εισάγει ευκαμψία στη βάση της κατασκευής κατά την οριζόντια διεύθυνση και έτσι μεταθέτει τη θεμελιώδη συχνότητα της κατασκευής μακριά από τις κυρίαρχες συχνότητες των σεισμικών διεγέρσεων με αποτέλεσμα την αποφυγή συντονισμού και μείωση επιταχύνσεων με αύξηση όμως των μετατοπίσεων .

Η σεισμική απομόνωση προσφέρει επίσης ένα μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας στο επίπεδο της.

Η σεισμική απομόνωση έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε νέα και παλιά κτίρια καθώς και σε γέφυρες.

Τομή ενός σεισμικά μονωμένου κτιρίου:



Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

2. Συστήματα σεισμικής απομόνωσης

Τα συστήματα σεισμικής απομόνωσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

a) Ελαστομερή Εφέδρανα

1. ελαστομερή εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (ΕΕΥΑ)

2. ελαστομερή εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου (ΕΕΠΜ)

b) Συστήματα Ολίσθησης

c) Υβριδικά (συνδυασμός των (a) και (b))

Τα πλέον δημοφιλή συστήματα σεισμικής απομόνωσης είναι αυτά που χρησιμοποιούν ελαστομερή εφέδρανα με ή χωρίς πυρήνα μολύβδου.

Τα εφέδρανα αυτά έχουν σχήμα κυλίνδρου ή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου και αποτελούνται από συνθετικό υλικό οπλισμένο με παράλληλες στρώσεις λεπτών χαλύβδινων φύλλων.

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

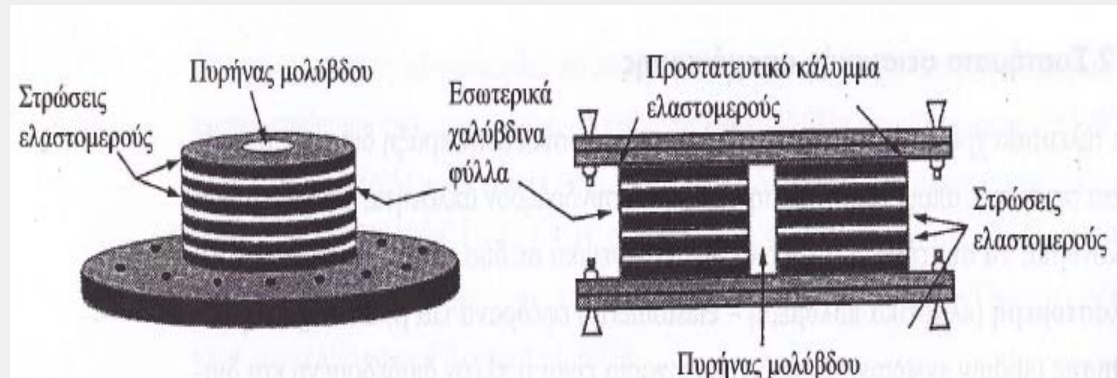
2. Συστήματα σεισμικής απομόνωσης

Τα ελαστομερή εφέδρανα υψηλής απόσβεσης (ΕΕΥΑ) και ελαστομερή με πυρήνα μολύβδου (ΕΕΠΜ) σε συνδυασμό παρέχουν:

I. Κατακόρυφη στήριξη

II. Οριζόντια ευκαμψία, η οποία μεταθέτει τη θεμελιώδη συχνότητα της κατασκευής μακριά από την επικίνδυνη περιοχή συχνοτήτων συντονισμού

III. Μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας είτε με βάση τις ενυπάρχουσες ιδιότητες απόσβεσης του ελαστομερούς είτε με βάση την πλαστική παραμόρφωση του πυρήνα μολύβδου.



Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

3. Ανάλυση σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Θεωρούμε μονώροφο πλαίσιο με σεισμική απομόνωση βάσης και γραμμική συμπεριφορά.

Για το γραμμικό αυτό σύστημα δυο βαθμών ελευθερίας υπό σεισμική φόρτιση, οι εξισώσεις κίνησης γράφονται ως:

$$m\ddot{u}_s + c_s(\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s(u_s - u_b) = 0$$

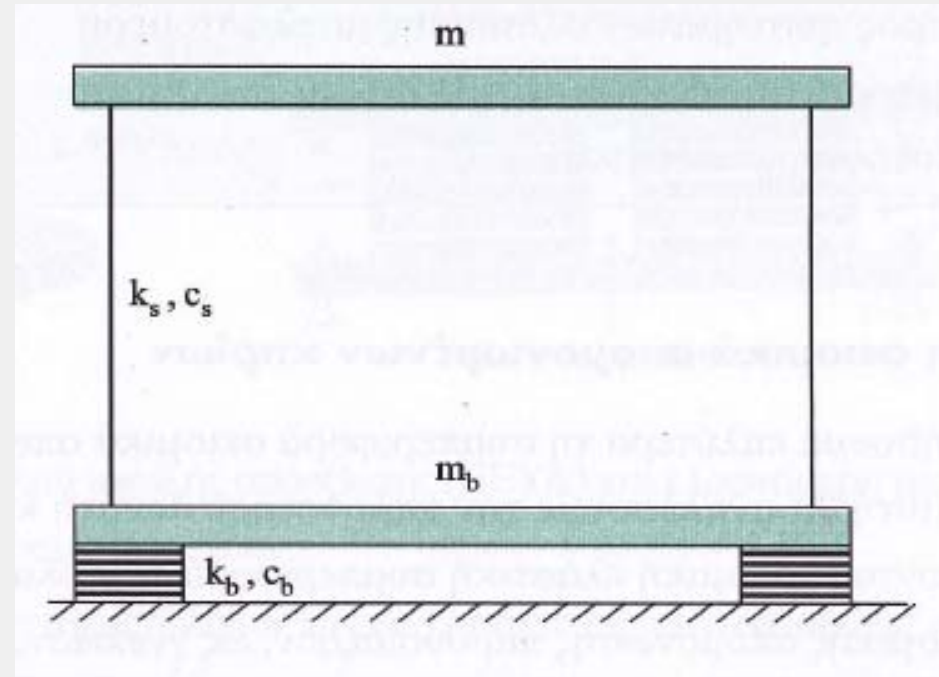
$$m_b\ddot{u}_b + c_b(\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b(u_b - u_g) = 0$$

Εισάγοντας τις σχετικές μετατοπίσεις:

$$v_s = u_s - u_b \quad v_b = u_b - u_g$$

Οι εξισώσεις γράφονται σε μητρική μορφή ως

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K}\mathbf{v} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g$$



Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

3. Ανάλυση σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Για να διευκολύνουμε την περαιτέρω ανάλυση εισάγουμε τα σύμβολα:

$$\begin{aligned} \omega_s &= (k_s / m)^{1/2} & \beta_s &= c_s / 2m\omega_s & \varepsilon &= (\omega_b / \omega_s)^2 \\ \omega_b &= (k_b / M)^{1/2} & \beta_b &= c_b / 2M\omega_b & \gamma &= m / M \end{aligned} \quad M = m + m_b$$

και υποθέτουμε ότι ισχύουν οι ακόλουθες εκτιμήσεις τάξης μεγέθους:

$$m < m_b \quad \omega_b \ll \omega_s \quad \varepsilon, \beta_s, \beta_b \text{ τάξης μεγέθους } \approx 10^{-2}$$

Ορίζοντας τις ιδιομορφές (χωρίς απόσβεση) και τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες μπορούμε να επιλύσουμε το πρόβλημα των ελεύθερων ταλαντώσεων

$$\omega_1 = \omega_b^* \approx \omega_b \quad \omega_2 = \omega_s^* \approx \omega_s / (1 - \gamma)^{1/2} \quad \phi^1 = \{1, \varepsilon\}^T \quad \phi^2 = \{1, -[1 - (1 - \gamma)\varepsilon] / \gamma\}^T$$

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν ότι η συχνότητα απομόνωσης ω_b^* δεν αλλάζει πρακτικά, ενώ η συχνότητα κατασκευής ω_s^* αυξάνει σημαντικά λόγω της παρουσίας της απομόνωσης βάσης.

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

3. Ανάλυση σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

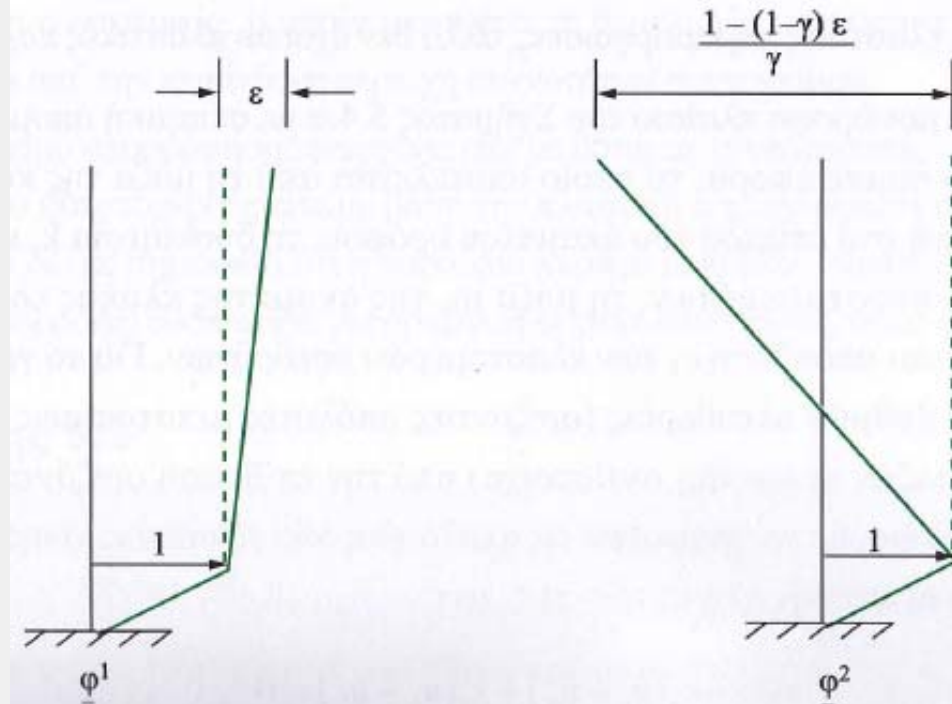
Οι ιδιομορφές της κατασκευής δείχνουν ότι η κατασκευή είναι σχεδόν άκαμπτη κατά την πρώτη ιδιομορφή ενώ παρουσιάζει παραμόρφωση κατά τη δεύτερη και ότι η βάση παρουσιάζει παραμόρφωση και κατά τις δυο ιδιομορφές.

$$\omega_1 = \omega_b^* \approx \omega_b$$

$$\omega_2 = \omega_s^* \approx \omega_s / (1 - \gamma)^{1/2}$$

$$\phi^1 = \{1, \varepsilon\}^T$$

$$\phi^2 = \left\{1, -\left[1 - (1 - \gamma)\varepsilon\right] / \gamma\right\}^T$$



Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

3. Ανάλυση σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Υποθέτοντας ότι οι σχετικές μετατοπίσεις υπολογίζονται με κατάλληλη επαλληλία των ιδιομορφών:

$$v_b = q_1 \phi_b^1 + q_2 \phi_b^2 \quad v_s = q_1 \phi_s^1 + q_2 \phi_s^2$$

έχουμε τα ιδιομορφικά εύρη $q_1(t)$ και $q_2(t)$ που είναι λύσεις των εξισώσεων

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_b^* \beta_b^* \dot{q}_1 + \omega_b^{*2} q_1 = -L_1 \ddot{u}_g \quad \ddot{q}_2 + 2\omega_s^* \beta_s^* \dot{q}_2 + \omega_s^{*2} q_2 = -L_2 \ddot{u}_g$$

Εδώ σημειώνεται ότι όταν δεν έχουμε σεισμική απομόνωση υποθέτουμε $\beta_s = 5\%$ ενώ όταν έχουμε σεισμική απομόνωση υποθέτουμε μικρότερη τιμή $\beta_s = 2\%$ αντίθετα η απόσβεση των ελαστομερών εφεδράνων είναι μεγάλη $\beta_b = 10 - 20\%$

Με τη βοήθεια του ολοκληρώματος *Duhamel* προκύπτει η λύση των εξισώσεων και τελικά η μέγιστη απόκριση του συστήματος

$$|v_s|_{\max} = \left[\left(\phi_2^1 |q_1|_{\max} \right)^2 + \left(\phi_2^2 |q_2|_{\max} \right)^2 \right]^{1/2} \quad |v_b|_{\max} = \left[\left(\phi_1^1 |q_1|_{\max} \right)^2 + \left(\phi_1^2 |q_2|_{\max} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

3. Ανάλυση σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Έτσι η μέγιστη τέμνουσα βάσης που ισούται με $V_{\max} = k_s |v_s|_{\max}$ λαμβάνει την προσεγγιστική τιμή:

$$V_{\max} = k_s \varepsilon \left[S_D(\omega_b^*, \beta_b^*)^2 + S_D(\omega_s^*, \beta_s^*)^2 \right]^{1/2}$$

ενώ μπορεί αν γραφεί συναρτήσει των μεγεθών του φάσματος απόκρισης ως

$$V_{\max} = m \omega_s^2 \left[\frac{(1 - \gamma \varepsilon)^2 S_A^2(\omega_b^*, \beta_b^*)}{(1 - \gamma \varepsilon)^2 \varepsilon^2} + \frac{(1 - (1 - \gamma \varepsilon))^2 S_A^2(\omega_s^*, \beta_s^*)}{(1 + \gamma \varepsilon)^2 / (1 - \gamma)^2} \right]^{1/2}$$

Εάν το φάσμα απόκρισης είναι σταθερής φασματικής ταχύτητας για την περιοχή των ω_s^*, ω_b^* η παραπάνω γράφεται

$$V_{\max} = m S_A(\omega_b^*, \beta_b^*) \omega_s^2 [1 + (1 - \gamma) \varepsilon]^{1/2}$$

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

3. Ανάλυση σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει σεισμική απομόνωση, η μέγιστη τέμνουσα βάσης προκύπτει ακλουθώντας την αντίστοιχη διαδικασία ως

$$V_{\max} = mS_A(\omega_s^*, \beta_s^*)$$

Συγκρίνοντας τις τέμνουσες βάσης με ή χωρίς σεισμική απομόνωση παρατηρούμε ότι η μείωση της τέμνουσας βάσης λόγω σεισμικής απομόνωσης οφείλεται στον λόγο $S_A(\omega_b^*, \beta_b^*) / S_A(\omega_s^*, \beta_s^*)$, ο οποίος για φάσμα σταθερής ταχύτητας είναι ίσος με ω_b / ω_s και επομένως της τάξης μεγέθους $\varepsilon^{1/2}$ ενώ ο όρος $(1 - \gamma)\varepsilon$ μπορεί να αμεληθεί ως πολύ μικρός.

Ακλουθώντας την μέθοδο της επαλληλίας ιδιομορφών μπορούμε να μελετήσουμε τη σεισμική συμπεριφορά γραμμικών κατασκευών με απομόνωση βάσης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολλούς βαθμούς ελευθερίας.

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

4. Σχεδιασμός σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Ο σχεδιασμός σεισμικά απομονωμένων κτιρίων αποσκοπεί να ελέγξει τις σεισμικές βλάβες στην κατασκευή και στα περιεχόμενα της επιτρέποντας ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής και μειώνοντας τις επιταχύνσεις των ορόφων και όχι να μειώσει το αρχικό κόστος της κατασκευής.

Η διαδικασία σχεδιασμού εκτελείται σε δύο φάσεις, κάθε μία εκ των οποίων αντιστοιχεί σε διαφορετικό επίπεδο σεισμικής διέγερσης. Έτσι η ανωδομή σχεδιάζεται να είναι ουσιαστικά ελαστική για το σεισμό σχεδιασμού βάσης (10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια - 475 χρόνια μέση περίοδος επαναφοράς), ενώ το σύστημα απομόνωσης σχεδιάζεται για τις πλήρεις επιρροές του μεγάλου σεισμού (10% πιθανότητα υπέρβασης σε 100 χρόνια - 1000 χρόνια μέση περίοδος επαναφοράς).

Ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει είτε με στατική είτε με δυναμική ανάλυση.

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

4. Σχεδιασμός σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Στατική Ανάλυση

Οι τύποι στατικής ανάλυσης βασίζονται στο γεγονός ότι για μία απομονωμένη κατασκευή οι μετατοπίσεις συγκεντρώνονται στη στάθμη της απομόνωσης και έτσι η ανωδομή κινείται σχεδόν ως ένα άκαμπτο σώμα λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή μόνο της θεμελιώδους ιδιομορφής και υπολογίζουν τις δυνάμεις σχεδιασμού της ανωδομής από τις δυνάμεις στο σύστημα απομόνωσης για τη μετατόπιση σχεδιασμού.

Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση φάσματα σταθερής ταχύτητας για μία περιοχή περιόδων από 1.0 έως 3.0 sec.

Κατ' αρχάς υπολογίζεται η μετατόπιση σχεδιασμού (D) στο κέντρο δυσμησίας και στη συνέχεια η ολική μετατόπιση (D_T). Υπολογίζονται οι δυνάμεις σχεδιασμού $V_b = k_{\max} D / 1.5$ και $V_s = k_{\max} D / R_{WI}$ (R_{WI} συντελεστής μείωσης) και τέλος υπολογίζεται και ελέγχεται η καθ' ύψος κατανομή του φορτίου V_s στους ορόφους του κτιρίου.

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

4. Σχεδιασμός σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Δυναμική Ανάλυση

Δυναμική φασματική ανάλυση απαιτείται όταν:

- i. απαιτούνται ειδικά φάσματα της περιοχής
- ii. η ανωδομή είναι ακανόνιστη οριζόντια και κάθετα
- iii. το κτίριο έχει περισσότερους από 4 ορόφους ή είναι υψηλότερο των 20m
- iv. η περίοδος του συστήματος απομόνωσης είναι μικρότερη κατά τρεις φορές από την ελαστική περίοδο της κατασκευής χωρίς απομόνωση.

Ειδικά φάσματα της περιοχής απαιτούνται όταν η κατασκευή

1. θεμελιώνεται σε μαλακό έδαφος (S_3 ή S_4)
2. βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη ή ίση των 15 km από γνωστό ενεργό σεισμικό ρήγμα
3. έχει περίοδο T_1 μεγαλύτερη από 3 sec.

Σεισμική Απομόνωση Βάσης Κατασκευής

4. Σχεδιασμός σεισμικά απομονωμένων κτιρίων

Δυναμική Ανάλυση

Δυναμική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της δυναμικής φασματικής ανάλυσης και απαιτείται όταν είτε το σύστημα απομόνωσης είτε η ανωδομή παρουσιάζουν υψηλή μη γραμμικότητα.

Όταν χρησιμοποιείται δυναμική ανάλυση, οι τιμές σχεδιασμού υπολογίζονται ως:

i. Εάν χρησιμοποιούνται τρία επιταχυνσιογραφήματα για αναλύσεις στο πεδίο του χρόνου, ο σχεδιασμός πρέπει να βασίζεται στις μέγιστες τιμές απόκρισης που προσδιορίζονται από τις τρεις αυτές αναλύσεις.

ii. Εάν χρησιμοποιούνται επτά επιταχυνσιογραφήματα για αναλύσεις στο πεδίο του χρόνου, ο σχεδιασμός πρέπει να βασίζεται στους μέσους όρους των ποσοτήτων απόκρισης που προσδιορίζονται από τις επτά αυτές αναλύσεις.

Εάν οι δυνάμεις που προκύπτουν από τη δυναμική ανάλυση είναι μικρότερες από αυτές της στατικής, πρέπει να μην είναι μικρότερες από ορισμένες οριακές τιμές (Πίνακας 5.6)