

Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κτιρίων Ο.Σ. με τη Μέθοδο των Μετατοπίσεων

Direct Displacement-Based Seismic Design



Αλέξανδρος Λάλας, UME School, Pavia, Italy

Βασικές αναφορές:

- Priestley M.J.N. (2003) "Myths and Fallacies in Earthquake Engineering, Revisited", The Mallet Milne Lecture 2003, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. (2007) "Displacement-Based Seismic Design of Structures", IUSS Press, Pavia, Italy.
- Sullivan T.J., Priestley M.J.N. , Calvi G.M. (2012) "DBD12 - A Model Code for the Displacement-Based Seismic Design of Structures", IUSS Press, Pavia, Italy

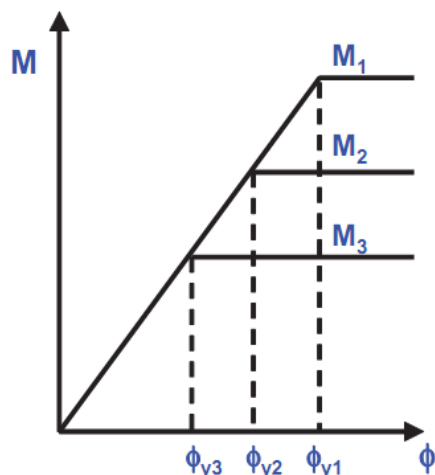
& υλικό από σημειώσεις και παρουσιάσεις των καθηγητών:

Alessandro Dazio, UME School, Pavia, Italy

Stefano Pampanin, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand

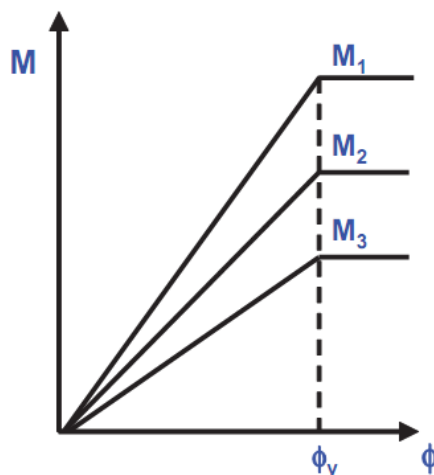
Ζητήματα ως προς τον αντισεισμικό σχεδιασμό με τη Μέθοδο των Δυνάμεων (Force-Based Design)

Αντοχή και Δυσκαμψία



Παραδοχή σχεδιασμού
(σταθερή δυσκαμψία)

$$EI_{i,eff} = \alpha EI_g \quad EI_{i,eff} = \frac{M'_y}{\phi_y}$$



Ρεαλιστική παραδοχή
(σταθερή καμπυλότητα διαρροής)

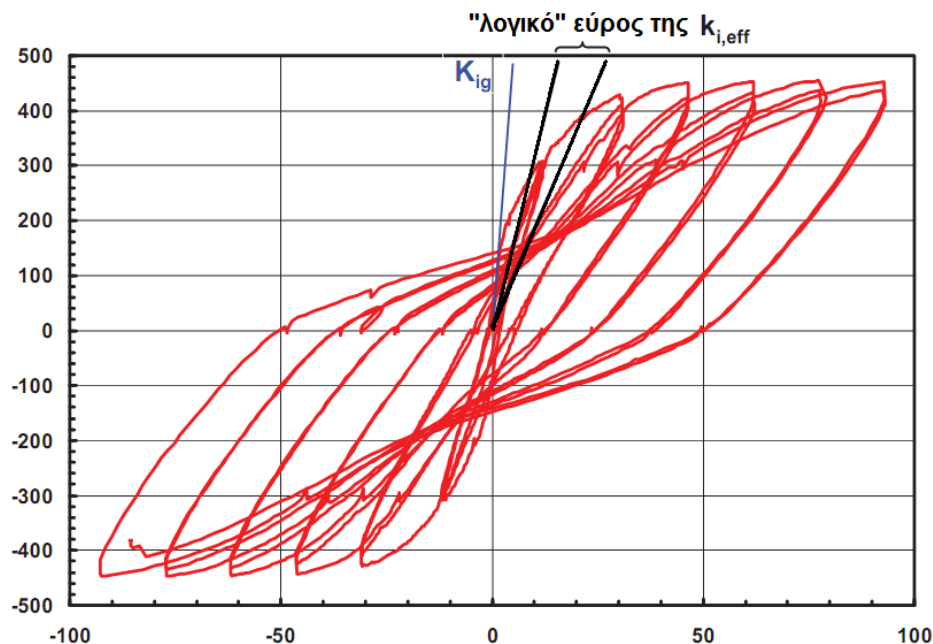
$$\phi_y = C \frac{\epsilon_y}{h}$$

C: συντελεστής συναρτήσεως του είδους της διατομής (ορθογωνική, κυκλική κτλ)

h: διάσταση της διατομής

η Δυσκαμψία **εξαρτάται** από την Αντοχή της διατομής!

Ορισμός της αρχικής δυσκαμψίας



Η αρχική δυσκαμψία των μελών δεν είναι γνωστή πριν από τον καθορισμό της αντοχής τους (επαναλήψεις)

Η επιρροή του αξονικού φορτίου στα υποστυλώματα δεν λαμβάνεται υπόψη αν και είναι σημαντική

Αναπαράσταση της κατασκευής μέσω ελαστικών χαρακτηριστικών (έστω και “ρηγματωμένων”) στην περίπτωση ανελαστικής απόκρισης δίνει αβάσιμα αποτελέσματα (διαφορετική κατανομή των δυνάμεων μετά τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων)

Υπολογισμός της ιδιοπεριόδου

Αριθμός ορόφων	Εξίσωση (1.7)	$I=0.5I_{gross}$	Ροπή-καμπυλότητα	Εξίσωση (1.12)
2	0.29	0.34	0.6	0.56
4	0.48	0.8	1.2	1.12
8	0.81	1.88	2.26	2.24
12	1.1	2.72	3.21	3.36
16	1.37	3.39	4.09	4.48
20	1.62	3.65	4.77	5.6

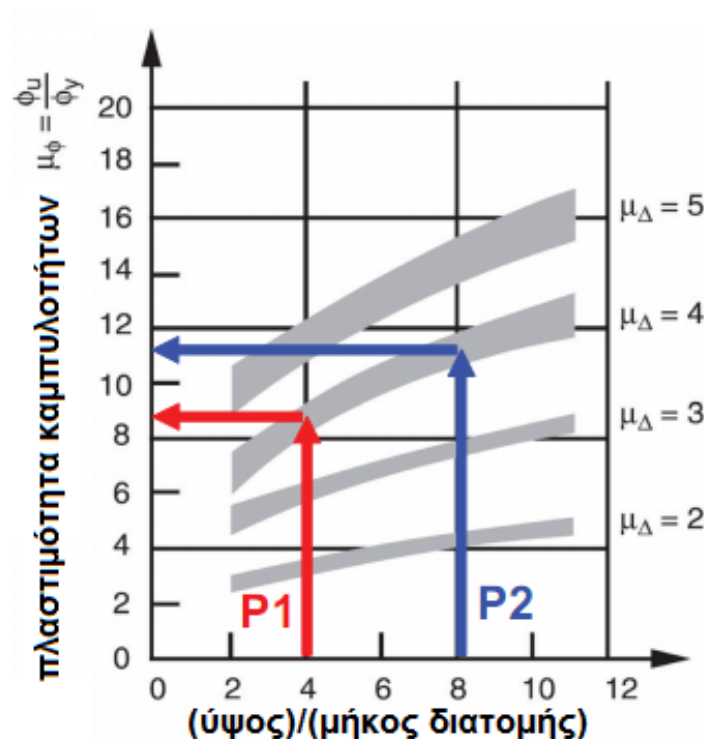
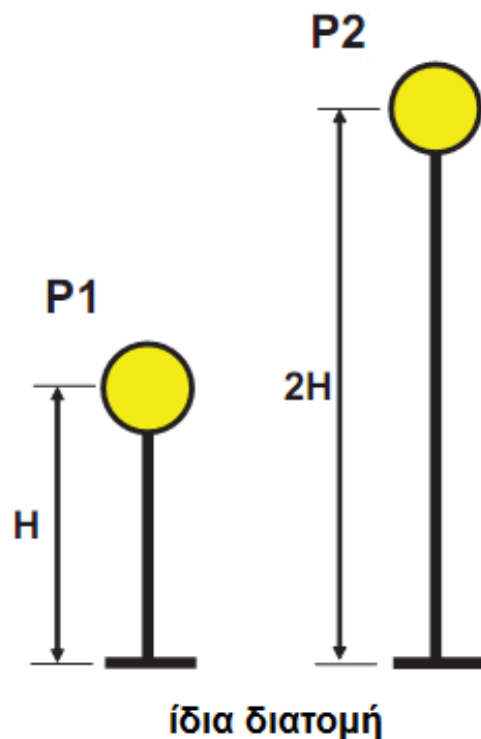
$$T = 0.075H_n^{0.75} \quad (1.7)$$

$$T = 0.1H_n \quad (1.12)$$

Παράδειγμα κτιρίου με τοιχώματα: διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της ιδιοπεριόδου οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα → σημαντική απόκλιση

Εισαγωγή:

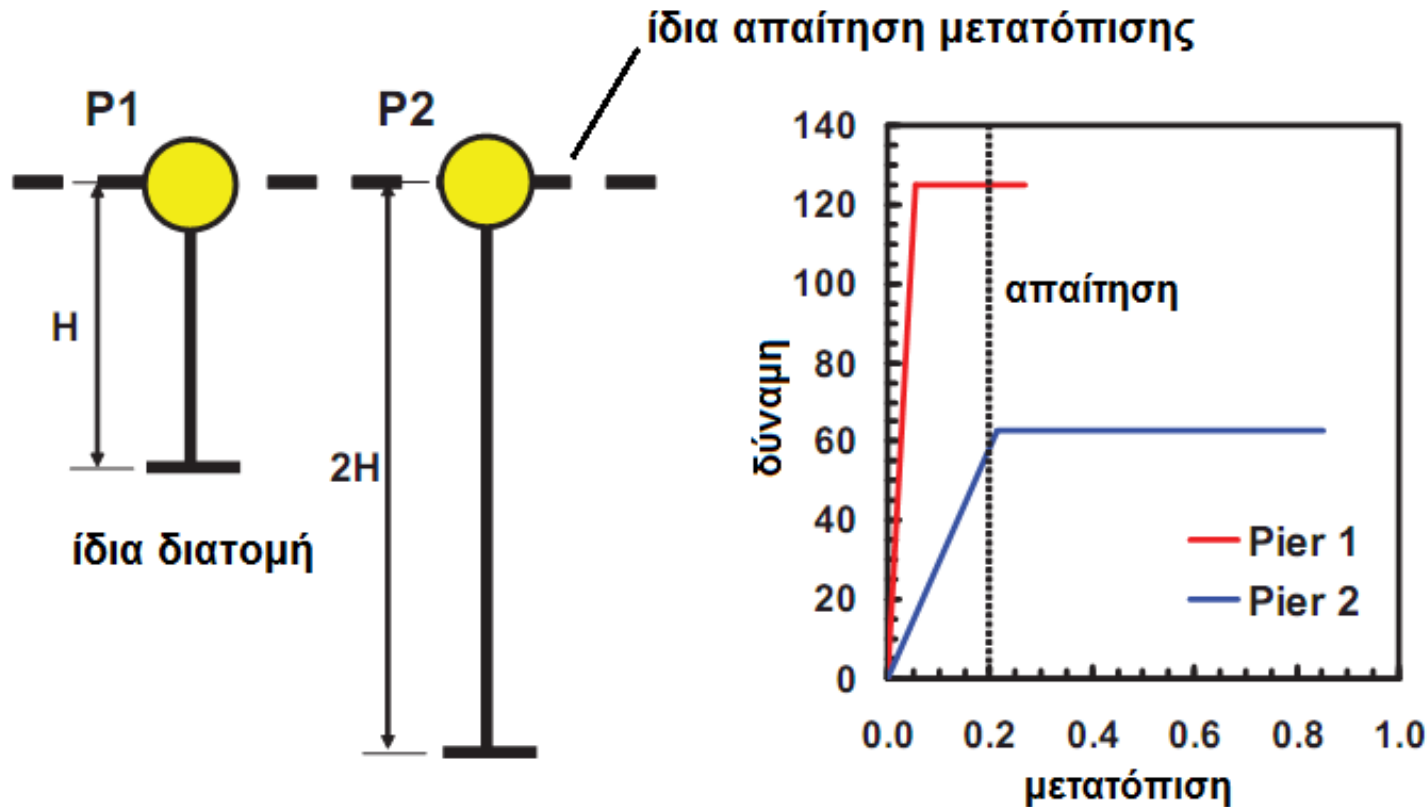
Διαθέσιμη πλαστιμότητα



για την ίδια πλαστιμότητα καμπυλοτήτων: $\mu_{\Delta,P1} > \mu_{\Delta,P2}$

➡ σχεδιασμός και των δύο για τον ίδιο συντελεστή συμπεριφοράς η ?

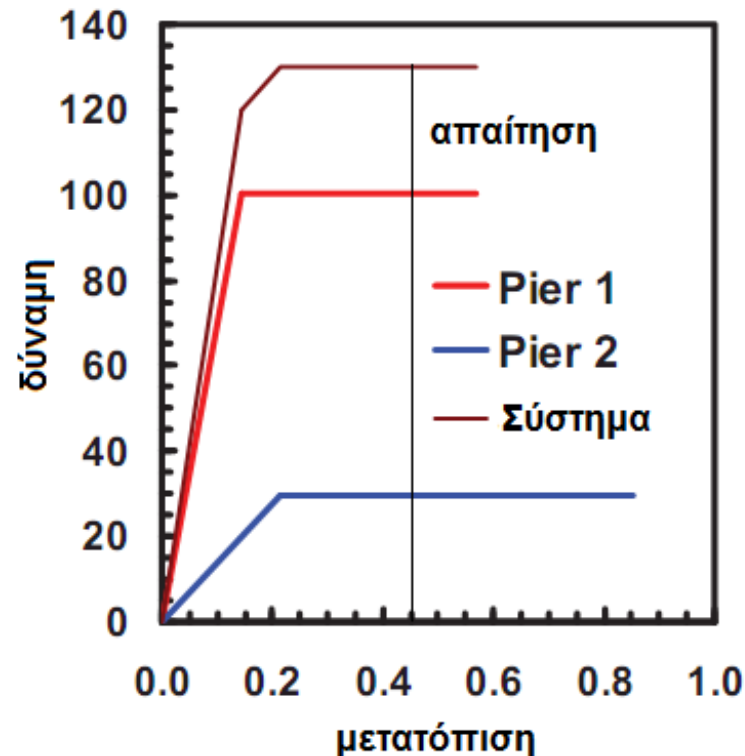
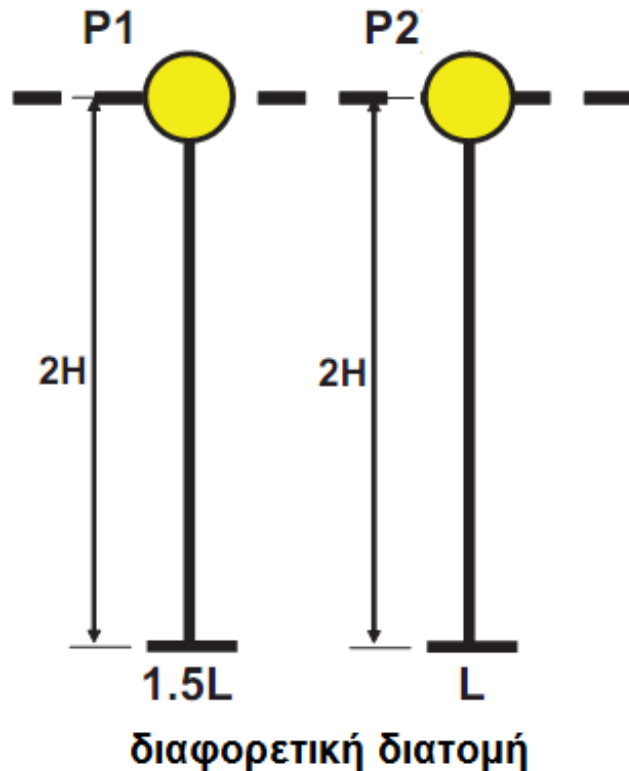
Απαίτηση πλαστιμότητας (I)



Απαίτηση: $\mu_{\Delta, P1} > \mu_{\Delta, P2}$ $\longrightarrow$ σχεδιασμός για τον ίδιο συντελεστή συμπεριφοράς q ?

Σημαντικό ζήτημα σε γέφυρες με διαφορετικό ύψος πυλώνων!

Απαίτηση πλαστιμότητας (II)



Απαίτηση: $\mu_{\Delta, P1} > \mu_{\Delta, P2}$ $\longrightarrow$ σχεδιασμός για τον ίδιο συντελεστή συμπεριφοράς q ?

Περίπτωση γεφυρών ή κτιρίων με τοιχώματα

Επιρροή της πλαστιμότητας σε ανώτερες ιδιομορφές

Η πλαστιμότητα δεν έχει την ίδια επιρροή στις ανώτερες ιδιομορφές

μέθοδος SRSS

$$Q_{i,max} = \sqrt{\frac{Q_{i,1}^2}{q} + \frac{Q_{i,2}^2}{q} + \frac{Q_{i,3}^2}{q} + \dots}$$

πιο λογικό

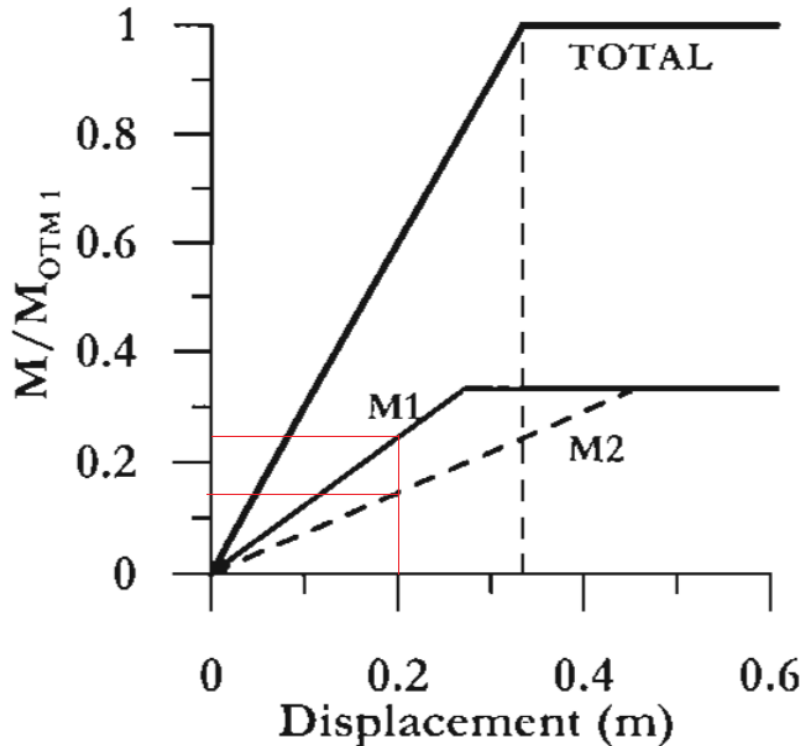


$$Q_{i,max} = \sqrt{\frac{Q_{i,1}^2}{q} + Q_{i,2}^2 + Q_{i,3}^2 + \dots}$$

διαφορετική επιρροή σε
πλαίσια και τοιχώματα

υιοθέτηση συντελεστή συμπεριφοράς q για όλες τις ιδιομορφές?

Κατανομή σεισμικών δυνάμεων



Η κατανομή των σεισμικών δυνάμεων στα διάφορα στοιχεία με βάση την αρχική δυσκαμψία οδηγεί συχνά σε μη λογικά αποτελέσματα

- Βασίζεται στην υπόθεση ότι διαφορετικά στοιχεία μπορούν να “υποχρεωθούν” να διαρρεύσουν ταυτόχρονα

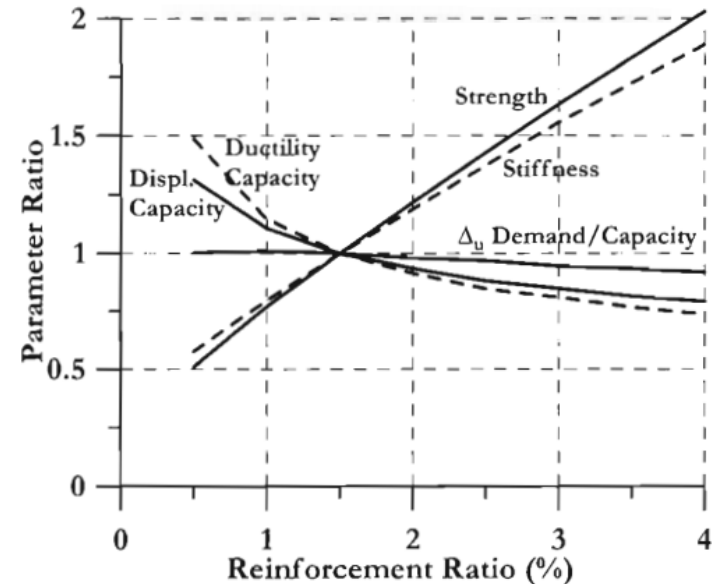
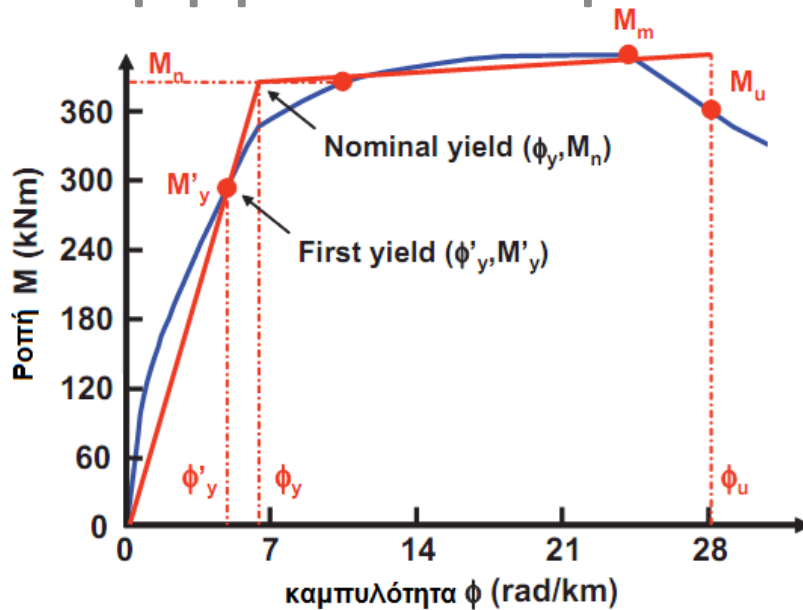
- Κατανέμει μεγαλύτερη δύναμη στα πιο δυσκαμπτα στοιχεία οδηγώντας σε αύξηση της αντοχής τους και άρα περεταίρω αύξηση της δυσκαμψίας!
- Η παραλαβή μεγαλύτερης δύναμης αυξάνει τον κίνδυνο διατμητικής αστοχίας ενώ παράλληλα μειώνει την διαθέσιμη πλαστιμότητα

Σύνοψη

- Η πραγματική δυσαμψία είναι άγνωστη στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού
 - Αβεβαιότητα στην εκτίμηση της πλαστιμότητας μετακινήσεων
 - Διαφορετικές διαθέσιμες πλαστιμότητες στην ίδια κατασκευή
ίδιος συντελεστής η για όλα τα μέλη?
 - Διαφορετικές απαιτήσεις πλαστιμότητας στην ίδια κατασκευή
ίδιος συντελεστής η για όλα τα μέλη?
 - Κατανομή των σεισμικών δυνάμεων με βάση τις ελαστικές δυσκαμψίες
μπορεί να οδηγεί σε μη λογικά αποτελέσματα
- *** Παρά την κριτική ο σχεδιασμός με βάση τις Δυνάμεις στις διάφορες μορφές του αναπτύσσεται τα τελευταία 50 χρόνια και σε συνδυασμό με ικανοτικές διατάξεις οδηγεί γενικά σε ασφαλείς κατασκευές

Εισαγωγή:

Η ανάγκη μιας μεθόδου σχεδιασμού με βάση τις Μετατοπίσεις Δύναμη ή Μετατόπιση?

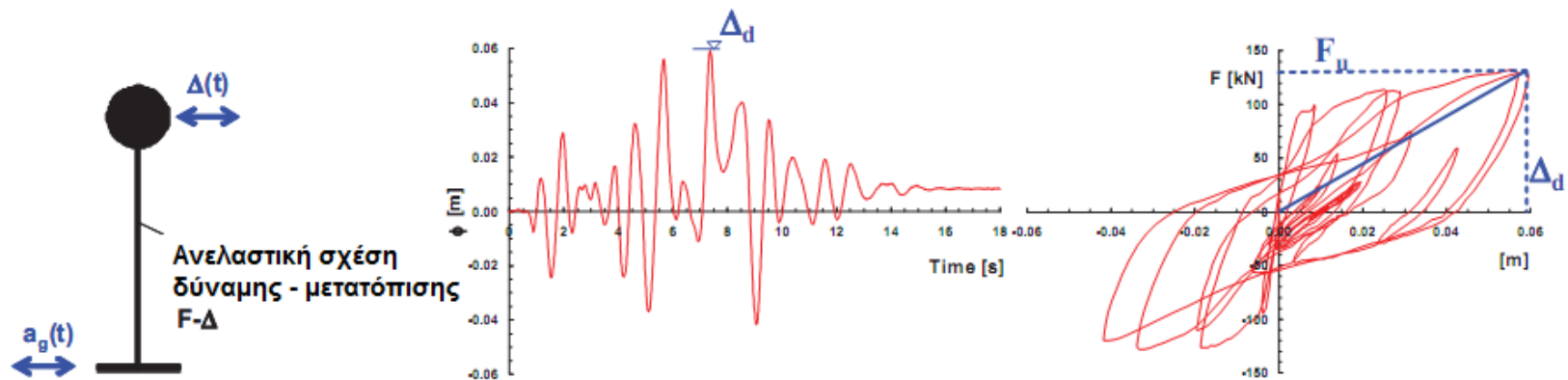


- η βλάβη εξαρτάται από τις παραμορφώσεις των υλικών → άρα μετατοπίσεις και όχι δυνάμεις κρίσιμες
- η αύξηση της αντοχής δεν συνεπάγεται αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης
- τα επίπεδα επιτελεστικότητας (performance limits) συνδέονται συνήθως με όρια μετατοπίσεων

Βασικές αρχές:

Ισοδύναμο μονοβάθμιο
σύστημα (SDOFs):

χαρακτηρισμός της κατασκευής στη
μέγιστη μετατόπιση κατά την απόκριση



Χαρακτηριστικά μονοβάθμιου συστήματος:

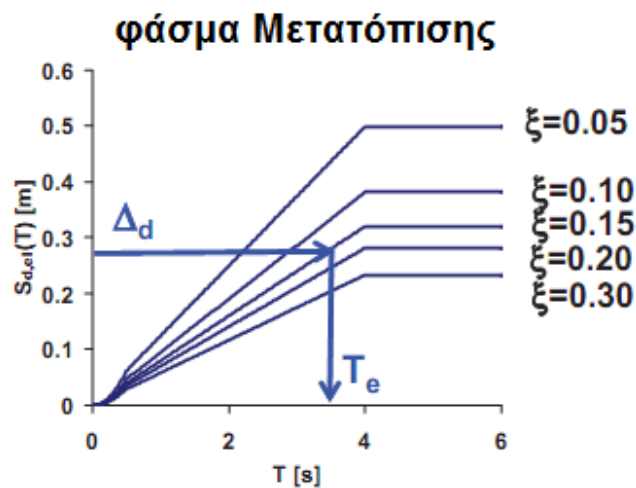
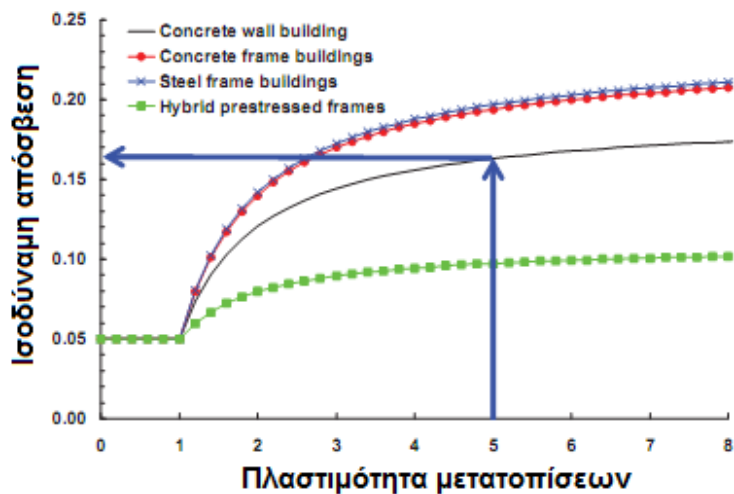
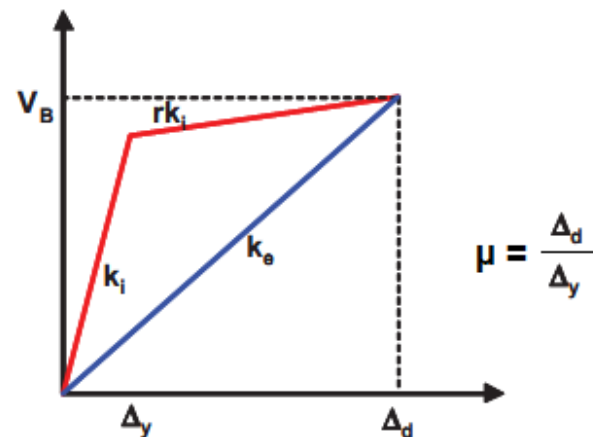
- τέμνουσα δυσκαμψία στη μέγιστη μετατόπιση του μονοβάθμιου
- ισοδύναμη απόσβεση που αναπαριστά την αρχική ελαστική απόσβεση και την ανελαστική υστερετική απόσβεση

Στόχοι της μεθόδου

- Σχεδιασμός της κατασκευής ώστε να επιτύχει ένα συγκεκριμένο επίπεδο επιτελεστικότητας (= μέγιστη μετατόπιση) → οδηγεί σε κατασκευές καθολικής τρωτότητας
- Η μέθοδος καθορίζει την αντοχή που απαιτείται στα σημεία σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων ώστε να επιτευχθεί η καθορισμένη μετατόπιση, για δεδομένη σεισμική ένταση
- Συνδυασμός της μεθόδου με τις αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού ώστε να εξασφαλιστεί ο σχηματισμός του επιθυμητού πλαστικού μηχανισμού

Βασικές αρχές:

Μονοβάθμια συστήματα



Μονοβάθμια συστήματα

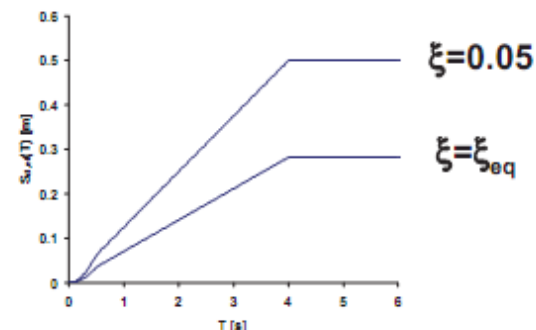
Δεδομένα:

- Γεωμετρία και διαστάσεις δομικών στοιχείων
- Βασικές ιδιότητες υλικών ϵ_{sy} , ϵ_{su} , ϵ_{cu} , ϵ_{ccu}
- Σεισμικότητα:
- + Φάσμα μετατοπίσεων (για συγκεκριμένο επίπεδο σεισμικότητας, πχ. 10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια)

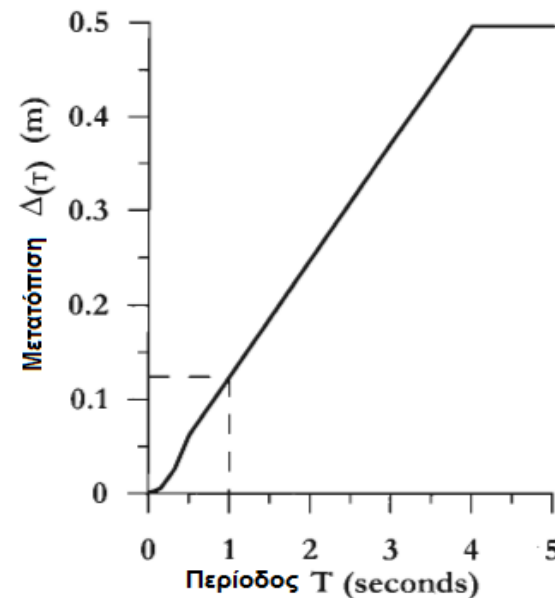
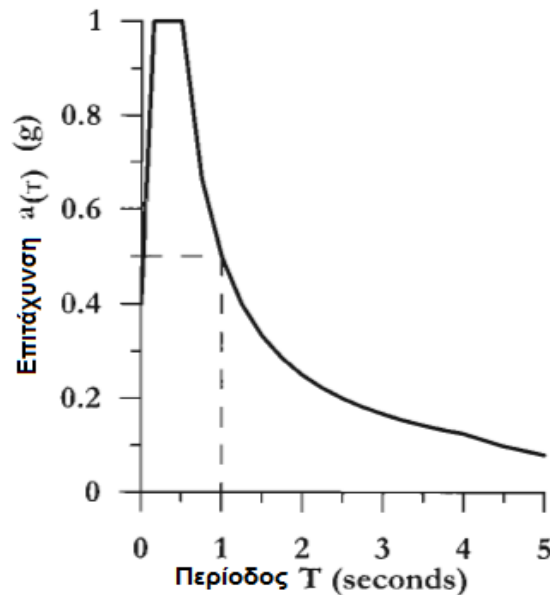
+ Εξίσωση μετατροπής από φάσμα 5% απόσβεσης σε φάσμα για την ενεργό απόσβεση ξ_{eq}

σεισμός μακρινού πεδίου:
$$S_{d,\xi} = S_{d,5\%} \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{0.5}$$

σεισμός κοντινού πεδίου:
$$S_{d,\xi} = S_{d,5\%} \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{0.25}$$



$$\Delta_{(T)} = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot a_{(T)} g$$



- Μετατροπή φάσματος επιταχύνσεων σε φάσμα μετατοπίσεων
- Φάσμα μετατοπίσης Ευρωκώδικας 8
- Έρευνα για την απευθείας δημιουργία φασμάτων μετατόπισης

Μονοβάθμια συστήματα

Βήμα 1: Καθορισμός της μετόπισης διαρροής Δ_y

$$\Delta_y = \frac{\phi_y (H + L_{SP})^2}{3} \quad \text{για μονοβάθμιο σύστημα που λειτουργεί ως πρόβολος}$$

- η καμπυλότητα διαρροής εξαρτάται βασικά απ' τη γεωμετρία των μελών και τις ιδιότητες των υλικών

κυκλική διατομή σκυροδέματος - υποστύλωμα :	$\phi_y = 2.25\varepsilon_y / D$
ορθογωνική διατομή σκυροδέματος - υποστύλωμα :	$\phi_y = 2.10\varepsilon_y / h_c$
ορθογωνική διατομή τοιχώματος :	$\phi_y = 2.00\varepsilon_y / l_w$
συμμετρική μεταλλική διατομή :	$\phi_y = 2.10\varepsilon_y / h_s$
διατομή πλακοδοκού σκυροδέματος :	$\phi_y = 1.70\varepsilon_y / h_b$

Μονοβάθμια συστήματα

Βήμα 2 (I): Καθορισμός της μετόπισης σχεδιασμού Δ_d

Η μετατόπιση σχεδιασμού αναφέρεται στο επιλεγμένο επίπεδο επιτελεστικότητας για το επιλεγμένο επίπεδο σεισμικότητας

$$\Delta_{d,ls} = \Delta_y + \Delta_p = \Delta_y + \theta_p \cdot H$$

♦ όρια παραμορφώσεων υλικών (strain limits) (δομικά)

$$\theta_p = (\varphi_{ls} - \varphi_y) L_p$$

$$\varphi_{ls} = \min(\varphi_{ls,s}, \varphi_{ls,c})$$

οριακές καμπυλότητες:

$$\varphi_{ls,c} = \varepsilon_{c,ls} / c \quad (\text{θλίψη σκυροδέματος})$$

$$\varphi_{ls,s} = \varepsilon_{s,ls} / (d - c) \quad (\text{εφελκυσμός οπλισμού})$$

οριακές παραμορφώσεις ($\varepsilon_{c,ls}$, $\varepsilon_{s,ls}$) υλικών ανάλογα με το επίπεδο επιτελεστικότητας

L_p : ισοδύναμο μήκος πλαστικής άρθρωσης

$$L_p = k L_c + L_{SP} \geq 2 L_{SP}$$

(δοκοί &
υποστυλώματα)

$$k = 0.2 \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) < 0.08$$

Μονοβάθμια συστήματα

Βήμα 2(II): Καθορισμός της μετόπισης σχεδιασμού Δ_d

Η μετατόπιση σχεδιασμού αναφέρεται στο επιλεγμένο επίπεδο επιτελεστικότητας για το επιλεγμένο επίπεδο σεισμικότητας

$$\Delta_c = \theta_c \cdot H$$

♦ όρια σχετικής μετάθεσης ορόφου (drift limits) (μη δομικά)

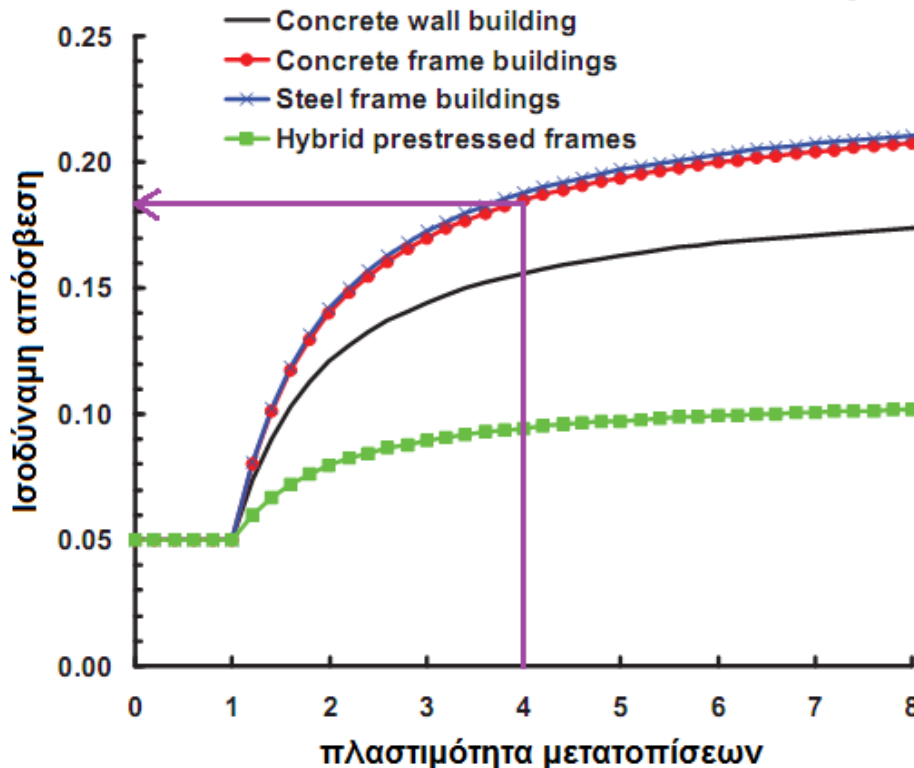
θ_c

Καθορίζονται συνήθως από τον κανονισμό, για τον περιορισμό βλαβών σε μη φέροντα στοιχεία

Έλεγχος:

$$\Delta_d = \min (\Delta_{d,s}, \Delta_c)$$

Πλαστιμότητα μετατοπίσεων: $\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{d,ls}}{\Delta_y}$



Τοιχώματα σκυροδέματος

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.444 \left(\frac{\mu_{\Delta} - 1}{\mu_{\Delta} \pi} \right)$$

Πλαίσια σκυροδέματος

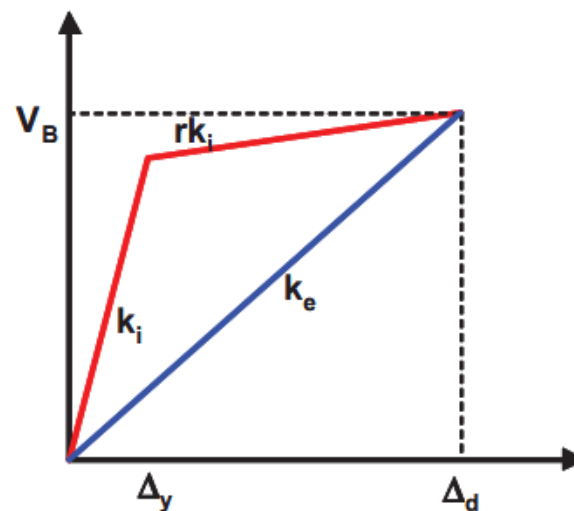
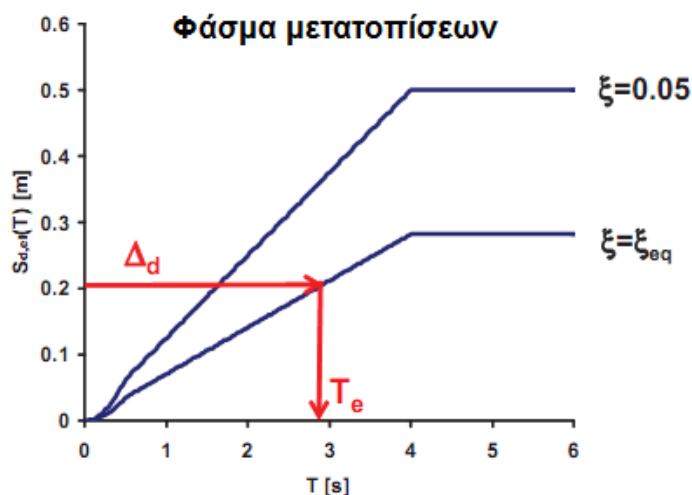
$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 \left(\frac{\mu_{\Delta} - 1}{\mu_{\Delta} \pi} \right)$$

Μεταλλικά πλαίσια

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.577 \left(\frac{\mu_{\Delta} - 1}{\mu_{\Delta} \pi} \right)$$

Βήμα 4: Υπολογισμός περιόδου και τέμνουσας βάσης

$$T_e = \frac{\Delta_{d,\xi_{eq}}}{n} \cdot \frac{T_c}{\Delta_c} \quad n = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi_{eq}} \right)^{0.5} \quad \Delta_{d,\xi_{eq}} \equiv \Delta_{d,ls}$$

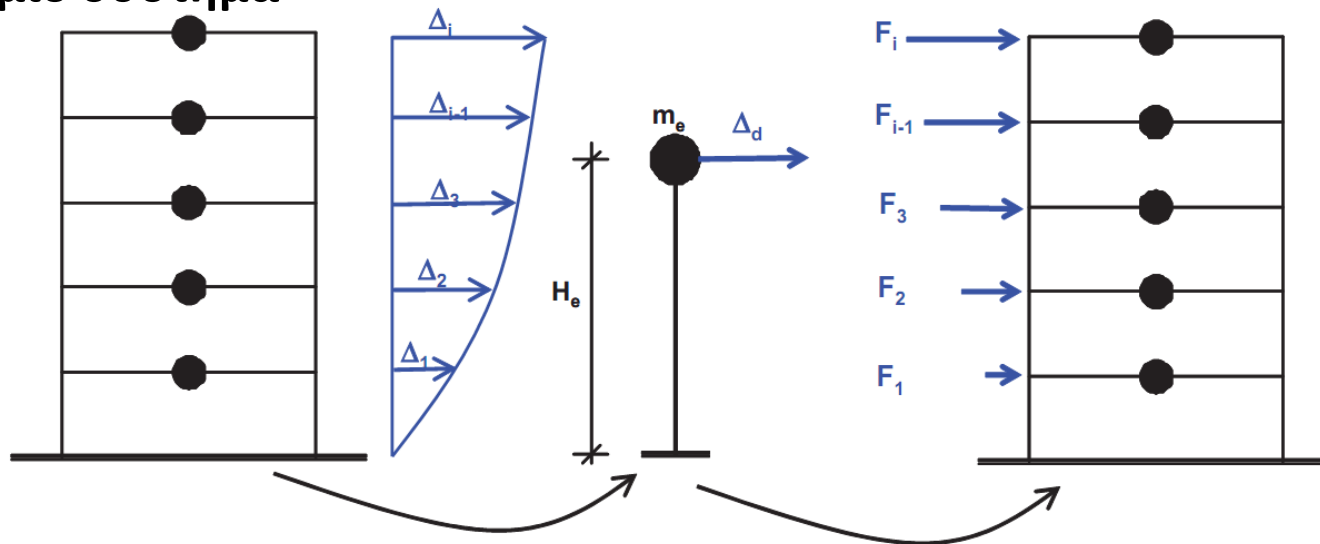


$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{k_e}} \longrightarrow k_e = \frac{4\pi^2 m_e}{T_e^2} \longrightarrow V_B = k_e \Delta_d$$

Βασικές αρχές:

Πολυβάθμια συστήματα

- τα πραγματικά κτίρια είναι συνήθως πολυβάθμια συστήματα (MDOFs)
- η μέθοδος βασίζεται στη μετατροπή του πολυβάθμιου σε ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα



Απομείωση του MDoF συστήματος σε ισοδύναμο SDoF σύστημα με βάση την 1^η ανελαστική ιδιομορφή

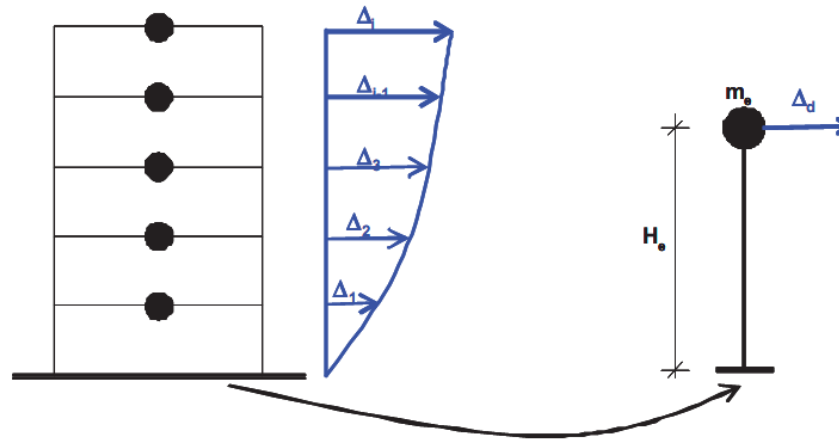
Εφαρμογή της μεθόδου των μετακινήσεων στο ισοδύναμο SDoF σύστημα

- Κατανομή δυνάμεων καθ' ύψος και στα διαφορετικά στοιχεία
- Επιρροή ανώτερων ιδιομορφών
- Ικανοτικός σχεδιασμός

Βασικές αρχές:

Πολυβάθμια συστήματα

Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα:



- Μετατόπιση σχεδιασμού (στο ενεργό ύψος)

$$\Delta_d = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)$$

- Ενεργός μάζα

$$m_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) / \Delta_d$$

- Ενεργό ύψος

$$H_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)$$

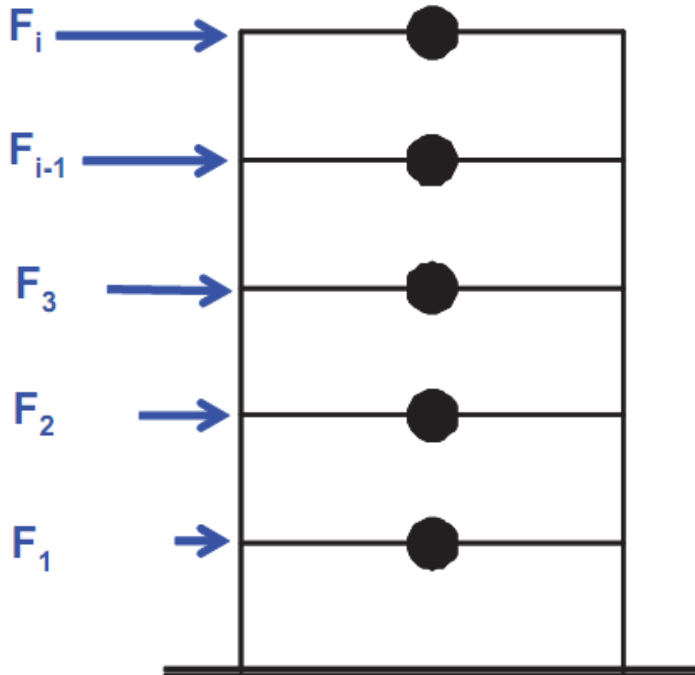
- Μετατόπιση διαρροής (στο ενεργό ύψος)

$$\Delta_y = \Delta_{yi}(H_e)$$

Βασικές αρχές:

Πολυβάθμια συστήματα

Κατανομή της τέμνουσας βάσης καθ' ύψος



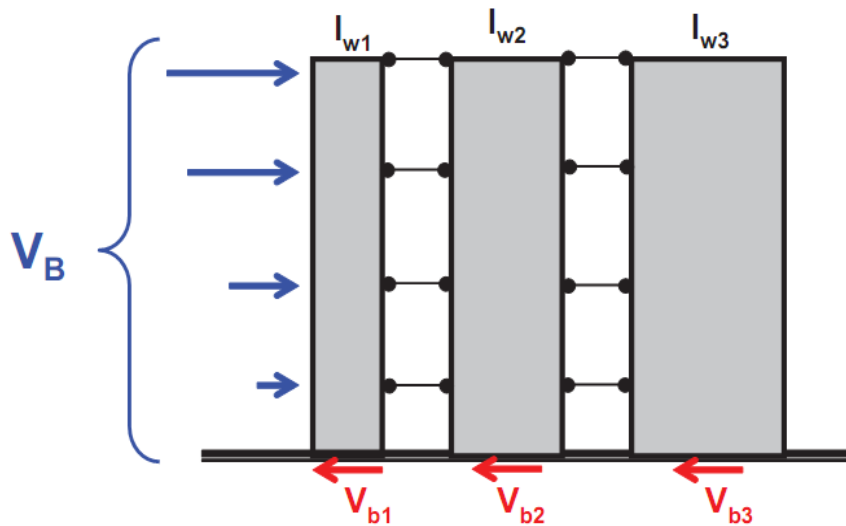
Η κατανομή της τέμνουσας βάσης γίνεται συναρτήσει της μάζας και της ανελαστικής μετακίνησης κάθε ορόφου- i

$$F_i = V_B \frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i}$$

Βασικές αρχές:

Πολυβάθμια συστήματα

Κατανομή της τέμνουσας βάσης μεταξύ των στοιχείων που συνιστούν το σύστημα αντίστασης σε οριζόντια φορτία



Παραδοσιακά με βάση την ελαστική (ρηγματωμένη) δυσκαμψία των στοιχείων

Από τη μέθοδο προτείνεται η κατανομή της αντοχής σύμφωνα με την κρίση του μελετητή

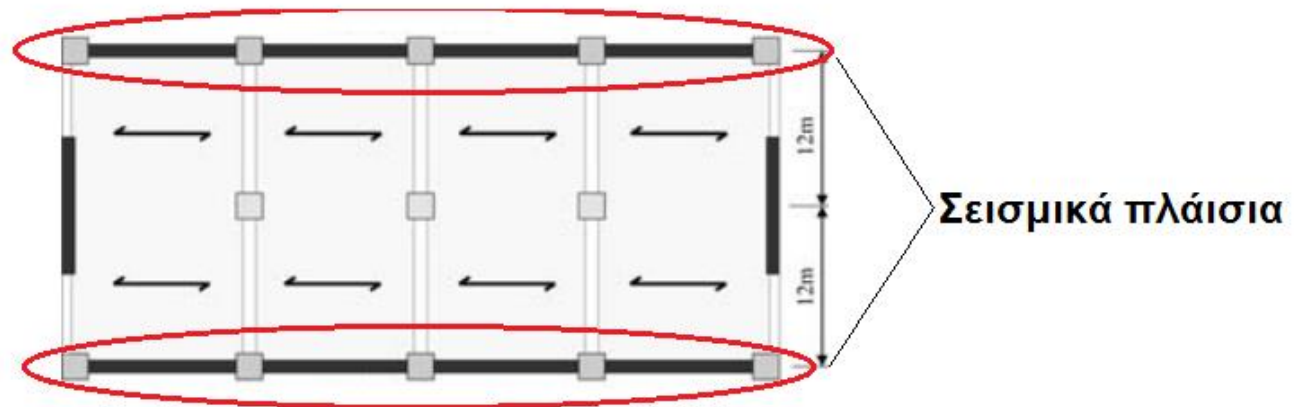
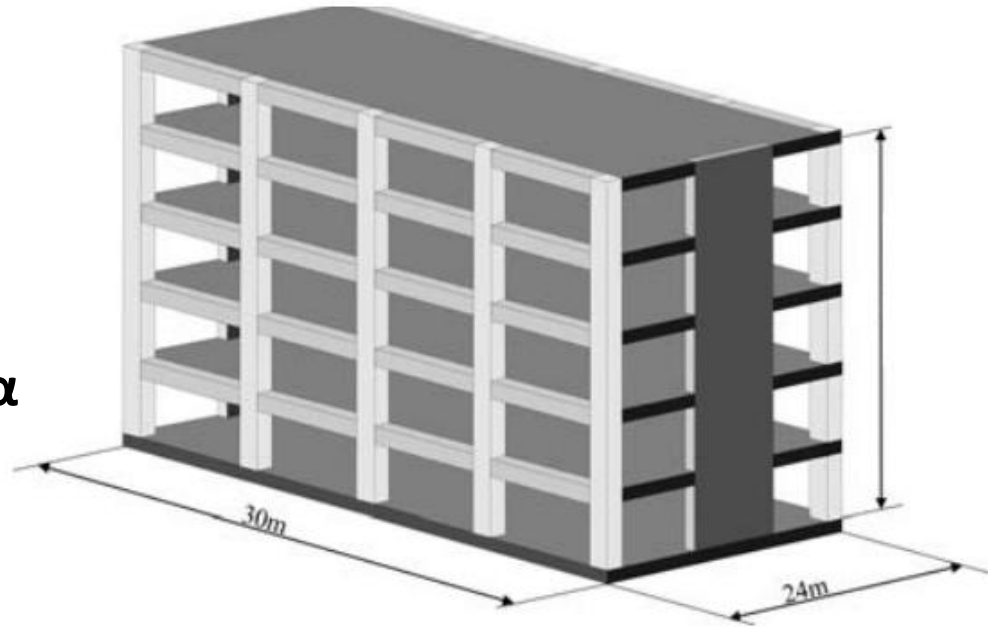
- Πιθανή κατανομή ώστε να προκύπτει ίσο ποσοστό οπλισμού στα στοιχεία
- Αποφυγή υψηλής απαίτησης σε τέμνουσα
- Αποφυγή εκκεντρότητας αντοχής (αποφυγή στροφικής απόκρισης)

Κτίρια με Πλαίσια:

Παράδειγμα κτιρίου

Σύστημα παραλαβής
σεισμικών φορτίων:

πλαίσια στη διαμήκη
διεύθυνση και τοιχώματα
στην εγκάρσια



Κτίρια με Πλαίσια:

Προφίλ μετατόπισης σχεδιασμού

κανονικοποιημένη ανελαστική ιδιομορφή:

$$\text{για } n \leq 4: \delta_i = \frac{H_i}{H_n}$$

$$\text{για } n > 4: \delta_i = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{H_i}{H_n} \right) \cdot \left(1 - \frac{H_i}{4 \cdot H_n} \right)$$

Μετατόπιση σχεδιασμού i-ορόφου:

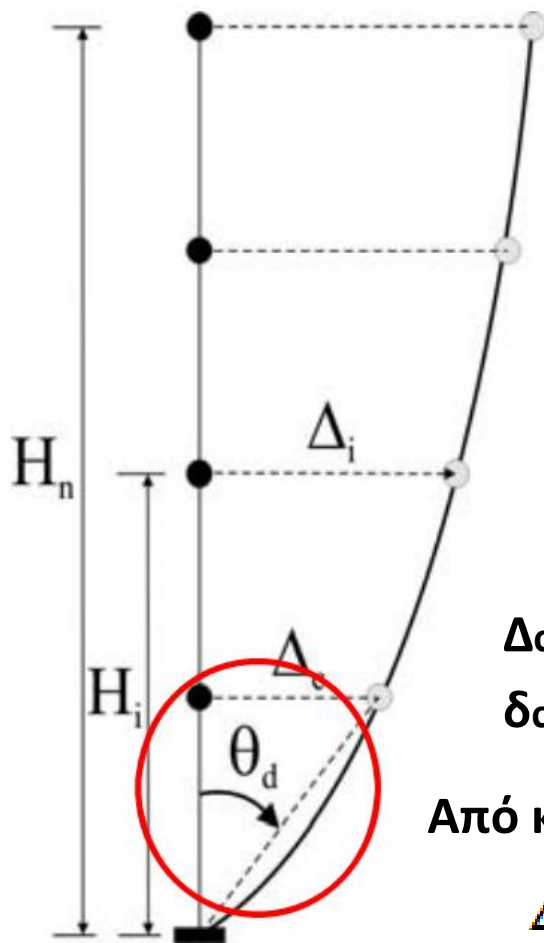
$$\Delta_i = \delta_i \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c} \right)$$

Δ_c : μετατόπιση κρίσιμου ορόφου (τυπικά 1^{ος} όροφος)

δ_c : ανελαστική ιδιομορφή δ_i για $H_i = H_c$

Από κανονιστικό όριο σχετικής μετάθεσης ορόφου (drift) θ_d :

$$\Delta_c = \theta_d H_{i=1}$$



Μετατόπιση και Drift διαρροής

Drift διαρροής για πλαίσια Ω.Σ. $\theta_y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_b}{h_b}$

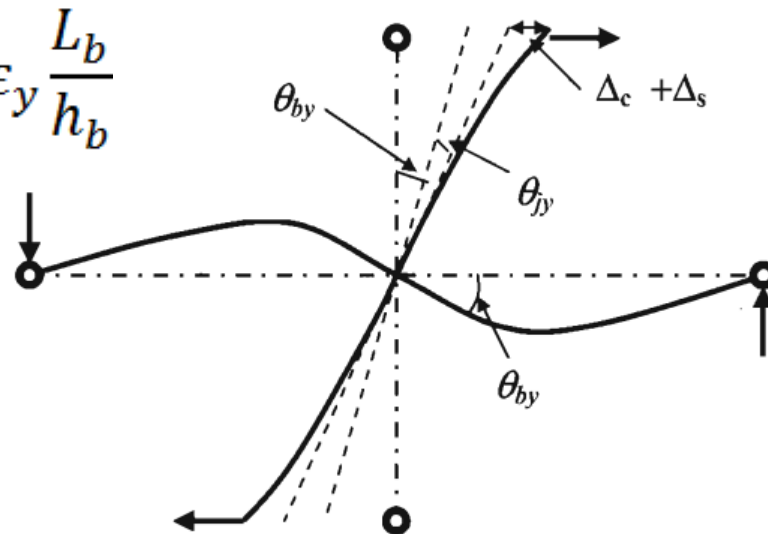
Ειδικές περιπτώσεις με διαφορετικό ύψος δοκών στους ορόφους ή/και διαφορετικά ανοίγματα στο ίδιο πλαίσιο

Προφίλ μετατόπισης διαρροής:

$$\Delta_{y,1} = \theta_y H_1 \longrightarrow \Delta_{y,i} = \delta_i \left(\frac{\Delta_{y,1}}{\delta_c} \right)$$

Μετατόπιση διαρροής ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος:

$$\Delta_{y,e} = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_{y,i}^2) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_{y,i})$$



$$\theta_y = \theta_{by} + \theta_{jy} + 2\Delta_c / L_c + 2\Delta_s / L_c$$

Συνεισφορά στο θ_y :

- κάμψη δοκού
- διατμητική παραμόρφωση κόμβου
- ελαστική παραμόρφωση υποστυλώματος
- διατμητική παραμόρφωση στοιχείων

Παράδειγμα υπολογισμών (I)

Level	H_i [mm]	δ_i	Δ_i [mm]	m_i [t]	$m_i\Delta_i$	$m_i\Delta_i^2$	$m_i\Delta_i H_i$
5	19000	1.000	300	472	1.4162E+05	4.2486E+07	2.6908E+09
4	15200	0.853	256	530	1.3578E+05	3.4759E+07	2.0638E+09
3	11400	0.680	204	530	1.0820E+05	2.2072E+07	1.2334E+09
2	7600	0.480	144	530	7.6374E+04	1.0998E+07	5.8044E+08
1	3800	0.253	76	530	4.0309E+04	3.0635E+06	1.5317E+08
Total				2594	5.0228E+05	1.1338E+08	6.7217E+09

$$\Delta_d = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)$$

μετατόπιση σχεδιασμού
ισοδύναμου μονοβάθμιου

$$m_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) / \Delta_d$$

ενεργός μάζα

$$H_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)$$

ενεργό ύψος

Παράδειγμα υπολογισμών (II)

Level	H _i [mm]	δ _i	Δ _{y,i} [mm]	m _i [t]	m _i Δ _i	m _i Δ _i ²
5	19000	1.000	69	472	32682	2262581
4	15200	0.853	59	530	31333	1851060
3	11400	0.680	47	530	24969	1175441
2	7600	0.480	33	530	17625	585687
1	3800	0.253	18	530	9302	163143
Total				2594	115910	6037912

$$\Delta_{y,e} = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_{y,i}^2) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_{y,i})$$

μετατόπιση διαρροής
ισοδύναμου μονοβάθμιου

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_d}{\Delta_{y,e}}$$

πλαστιμότητα μετατοπίσεων

Μετά τον καθορισμό των παραπάνω, συνεχίζουμε με το Βήμα 3, 4 για το ισοδύναμο μονοβάθμιο υπολογίζοντας τελικά την τέμνουσα βάσης

Κτίρια με Πλαίσια:

Επιρροή ανώτερων ιδιομορφών

Έλεγχος της σχετικής μετάθεσης ορόφου λόγω ανώτερων ιδιομορφών:

Κατανομή της τέμνουσας βάσης καθ' ύψος

$$F_i = F_t + 0.9V_B(m_i\Delta_i) / \sum_{i=1}^n (m_i\Delta_i)$$

$F_t = 0.1V_B$ στον όροφο- n και 0 σε κάθε άλλο

Τροποποίηση της μετατόπισης σχεδιασμού

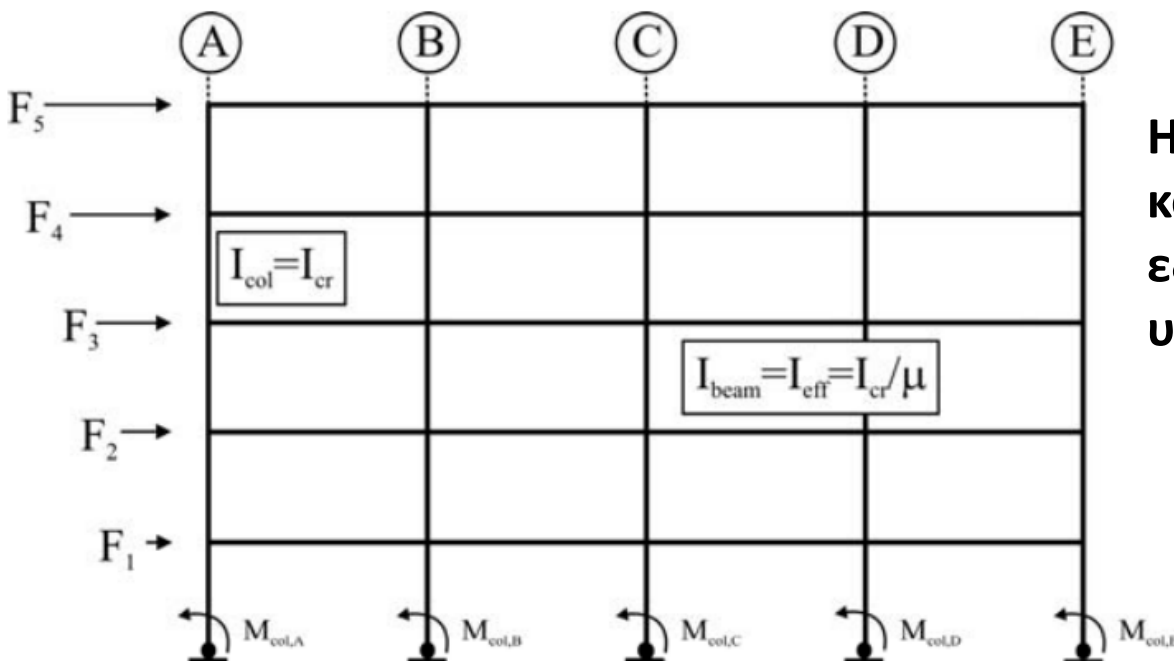
$$\Delta_{i,\omega} = \omega_\theta \Delta_i$$

$$\omega_\theta = 1.15 - 0.0034H_n \leq 1.0, (H_n \text{ σε } m)$$

Κτίρια με Πλαίσια:

Υπολογισμός των εσωτερικών εντάσεων

Ανάλυση με βάση τις δυσκαμψίες (χρήση στατικού προγράμματος):



Η συνολική τέμνουσα βάσης
κατανέμεται με λόγο 1:2 μεταξύ
εξωτερικών/εσωτερικών
υποστυλωμάτων

$$\sum M_{column,base} = M_{c1} + \dots + M_{c,j} = \sum_{i=1}^n F_i (0.6h_i)$$

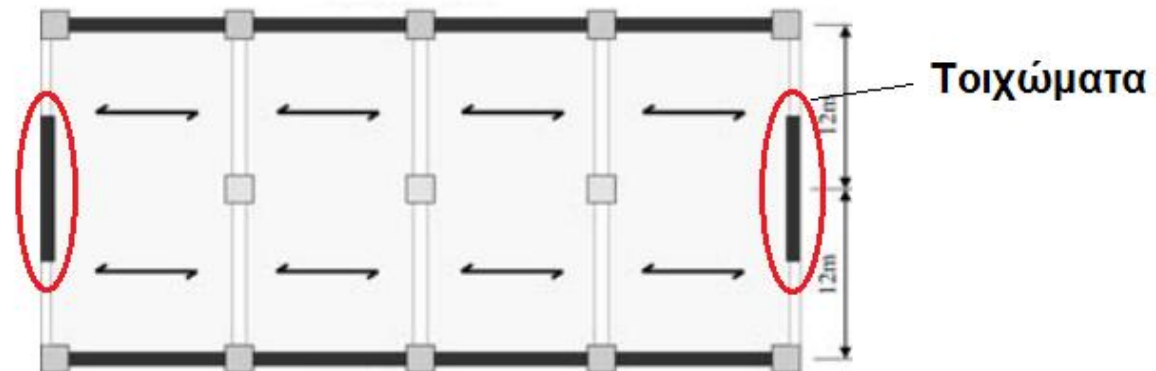
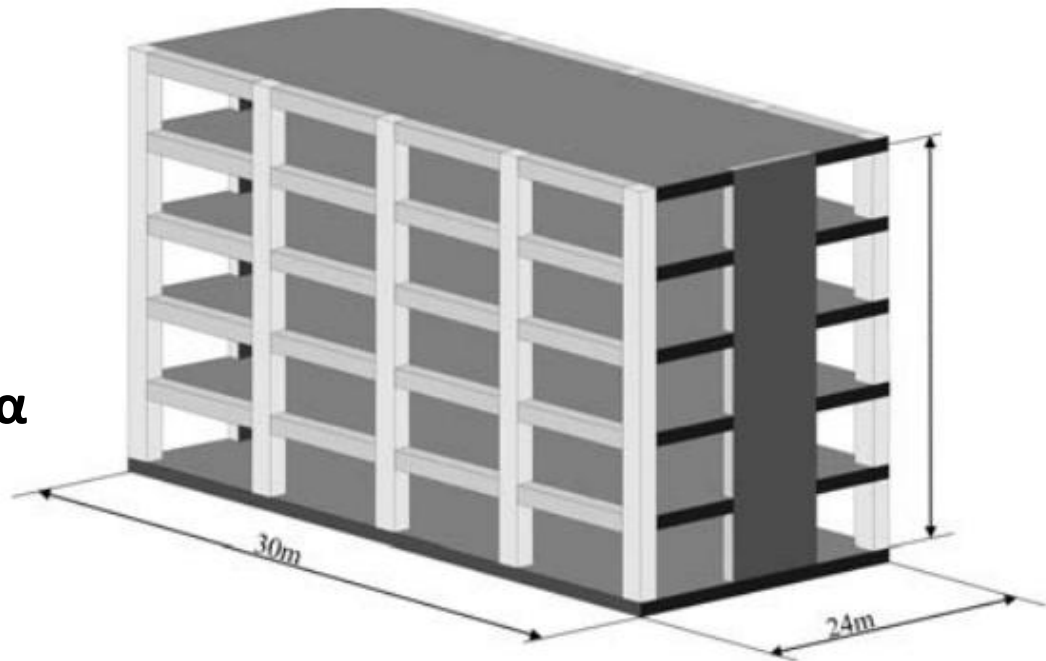
♦ Εναλλακτικά: μέθοδος βασισμένη στην ισορροπία (επίλυση «με το χέρι»)

Κτίρια με Τοιχώματα:

Παράδειγμα κτιρίου

Σύστημα παραλαβής
σεισμικών φορτίων:

πλαίσια στη διαμήκη
διεύθυνση και τοιχώματα
στην εγκάρσια



Κτίρια με Τοιχώματα:

Μετατόπιση και Drift διαρροής

Προφίλ μετατόπισης διαρροής:

$$\Delta_{yi} = \frac{\varepsilon_y (H_i + L_{SP})^2}{l_w} \left(1 - \frac{H_i}{3H_n} \right)$$

Drift διαρροής:

$$\theta_{yn} = \varepsilon_y \frac{(H_n + L_{SP})}{l_w}$$

Ισοδύναμο μήκος πλαστικής άρθρωσης (τοιχώματα):

$$L_p = kH_e + 0.1l_w + L_{SP}$$

$$k = 0.2 \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) < 0.08$$

μήκος εισχώρησης της διαρροής:

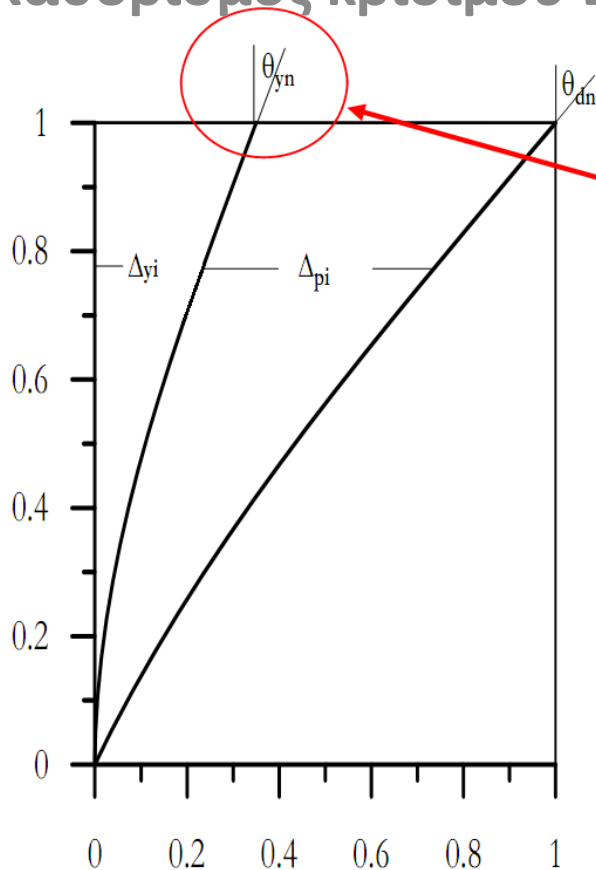
$$L_{SP} = 0.0022 f_{ye} d_{bl}$$

Καμπυλότητα διαρροής (για τοιχώματα):

$$\varphi_y = \frac{2\varepsilon_y}{l_w}$$

Κτίρια με Τοιχώματα:

Καθορισμός κρίσιμου Drift



Παραμορφώσεις υλικών ή όριο κανονισμού?

Σε τοιχώμα το μέγιστο drift εντοπίζεται στον τελευταίο n-όροφο

Οριακό Drift λόγω παραμορφώσεων υλικών

$$\theta_{d,s} = \theta_{yn} + \theta_p$$

$$\theta_p = (\varphi_{ls} - \varphi_y) L_p = \left(\left(\frac{1.2 \varepsilon_{s,ls}}{l_w} \right) - \varphi_y \right) L_p$$

Όριο κανονισμού: θ_c

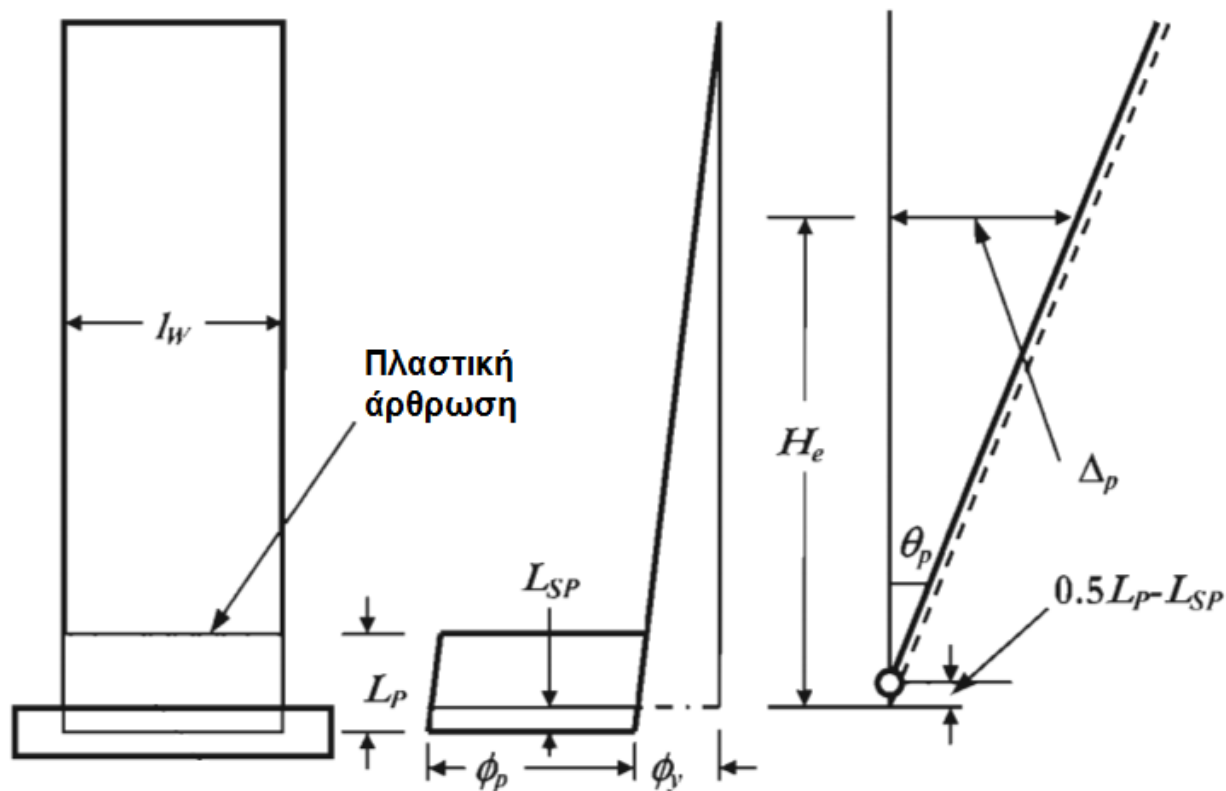
Κρίσιμο drift σχεδιασμού:

$$\theta_d = \min(\theta_{d,s}, \theta_c)$$

Καμπυλότητα σχεδιασμού: $\varphi_d = \varphi_y + (\theta_d - \theta_{yn}) / L_p$

Κτίρια με Τοιχώματα:

Προφίλ μετατόπισης σχεδιασμού



$$\Delta_i = \Delta_{yi} + \Delta_p = \Delta_{yi} + (\theta_d - \theta_{yn})H_i$$

Παράδειγμα υπολογισμών (I)

Level	H _i [mm]	Δ _i [mm]	m _i [t]	m _i Δ _i	m _i Δ _i ²	m _i Δ _i H _i
5	19000	228	472	1.0763E+05	2.4540E+07	4.6626E+11
4	15200	182	530	9.6741E+04	1.7646E+07	2.6821E+11
3	11400	137	530	7.2556E+04	9.9256E+06	1.1315E+11
2	7600	91	530	4.8370E+04	4.4114E+06	3.3526E+10
1	3800	46	530	2.4185E+04	1.1028E+06	4.1908E+09
Total			2594	3.4948E+05	5.7625E+07	8.8534E+11

$$\Delta_d = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)$$

μετατόπιση σχεδιασμού
ισοδύναμου μονοβάθμιου

$$m_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) / \Delta_d$$

ενεργός μάζα

$$H_e = \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)$$

ενεργό ύψος

Παράδειγμα υπολογισμών (II)

Level	H_i [mm]	Δ_{yi} [mm]	m_i [t]	$m_i \Delta_{yi}$	$m_i \Delta_{yi}^2$	$m_i \Delta_{yi} H_i$
5	19000	60	472	2.8403E+04	1.7089E+06	5.3965E+08
4	15200	42	530	2.2465E+04	9.5157E+05	3.4147E+08
3	11400	26	530	1.3786E+04	3.5831E+05	1.5716E+08
2	7600	13	530	6.6375E+03	8.3066E+04	5.0445E+07
1	3800	3	530	1.7870E+03	6.0211E+03	6.7907E+06
Total			2594	7.3078E+04	3.1079E+06	1.0955E+09

$$\Delta_y = \frac{\varepsilon_y H_{ey}^2}{l_w} \left(1 - \frac{H_{ey}}{3H_n} \right)$$

μετατόπιση διαρροής
ισοδύναμου μονοβάθμιου

$$H_{ey} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_{yi} H_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_{yi}}$$

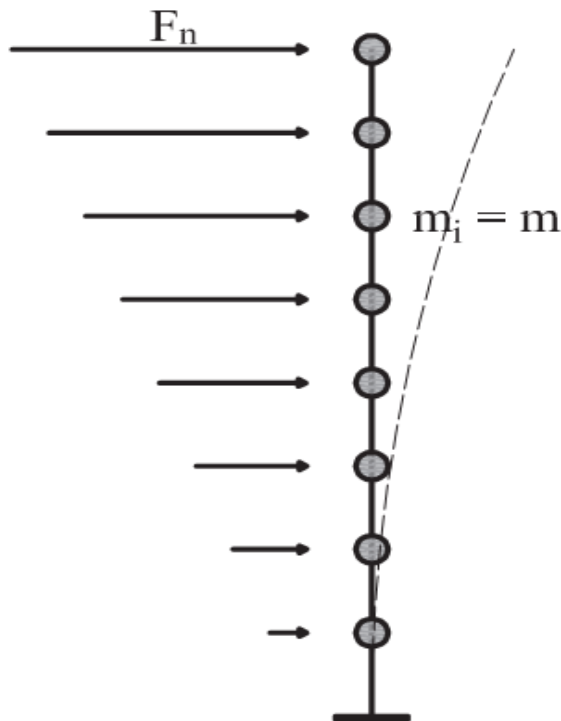
ενεργό ύψος στη διαρροή

Κτίρια με Τοιχώματα:

Τέμνουσα βάση και κατανομή δυνάμεων

Πλαστιμότητα μετακινήσεων: $\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_d}{\Delta_y}$

Συνεχίζουμε με το Βήμα 3, 4 για το ισοδύναμο μονοβάθμιο υπολογίζοντας τελικά την τέμνουσα βάσης



Κατανομή της τέμνουσας βάσης καθ' ύψος:

$$F_i = V_B \frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i}$$

Χαρακτηριστικά υλικών

Για το σχεδιασμό περιοχών όπου προβλέπεται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων συνίστανται οι παρακάτω αντοχές υλικών:

$$\text{Σκυρόδεμα: } f'_{ce} = 1.3f'_c$$

$$\text{Χάλυβας: } f_{ye} = 1.1f_y$$

→ αποτελούν συντηρητικές προβλέψεις της αναμενόμενης αντοχής ενώ η χρήση συντελεστών ασφαλείας υλικού για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων συνίσταται να αποφεύγεται καθώς δεν εξυπηρετεί ουσιαστικά την ασφάλεια (η πρόθεση άλλωστε είναι η σεισμική απαίτηση να ξεπεράσει την αντοχή και η διατομή να διαρρεύσει)

τιμές για τον υπολογισμό της υπεραντοχής:

$$\text{Σκυρόδεμα: } f'_{co} = 1.7f'_c$$

$$\text{Χάλυβας: } f_{yo} = 1.3f_y$$

Ικανοτικός σχεδιασμός

Για το σχεδιασμό έναντι κάμψης των διατομών όπου δεν προβλέπεται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων και τον σχεδιασμό των μελών έναντι τέμνουσας εφαρμόζονται οι αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού κατά τα γνωστά.

$$S_D = \varphi^o \omega S_E$$

Γενικά, η σεισμική απαίτηση από την ανάλυση μετατρέπεται σε ικανοτική απαίτηση λαμβάνοντας υπόψη δύο παραμέτρους:

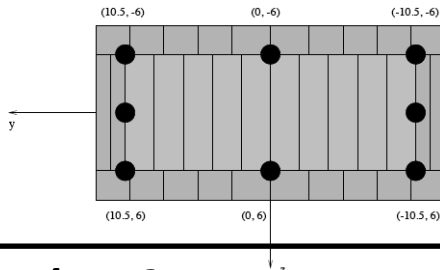
φ^o συντελεστής καμπτικής υπεραντοχής στις θέσεις πλαστικών αρθρώσεων

ω συντελεστής δυναμικής μεγέθυνσης για την επιρροή ανώτερων ιδιομορφών

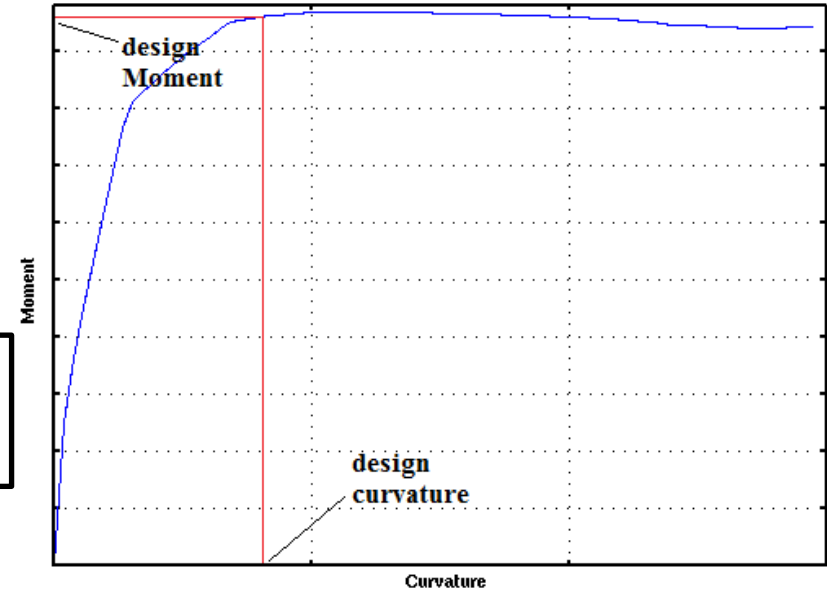
Επιπλέον ζητήματα:

Αναλυτική επαλήθευση του σχεδιασμού και εργαλεία

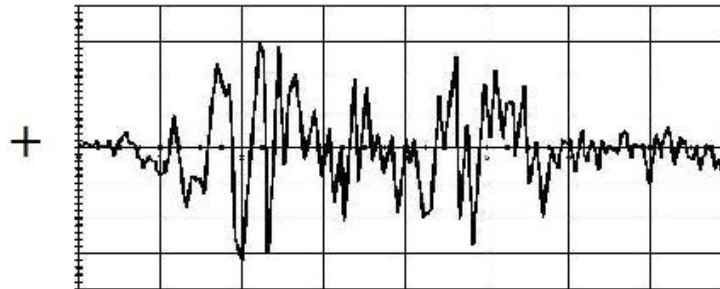
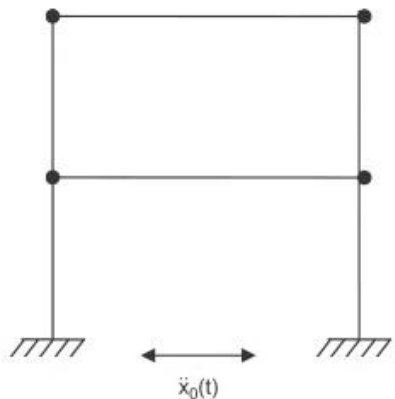
Αναλύση ροπής-καμπυλότητας διατομών



Επίτευξη της απαιτούμενης ροπής αντοχής M_{Rd} στην καμπυλότητα σχεδιασμού ϕ_d



Ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας



Υπολογισμός όλων των σχετικών παραμέτρων (μετατοπίσεις, δυνάμεις κτλ) και σύγκριση με το σχεδιασμό

Άλλες περιπτώσεις κατασκευών:

- ❖ Κτίρια με εκκεντρότητα στην κάτοψη και καθ' ύψος
- ❖ Κτίρια με συζευγμένα τοιχωμάτα
- ❖ Μικτά συστήματα τοιχωμάτων – πλαισίων
- ❖ Γέφυρες από σκυρόδεμα
- ❖ Κτίρια με σεισμική μόνωση
- ❖ Προβλήτες επί πασσάλων σκυροδέματος



“ Η αντοχή είναι θεμελιώδης όμως κατά τ’άλλα ασήμαντη ”
Hardy Cross

“ Όλα πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο απλά αλλά όχι απλούστερα ”
Albert Einstein