

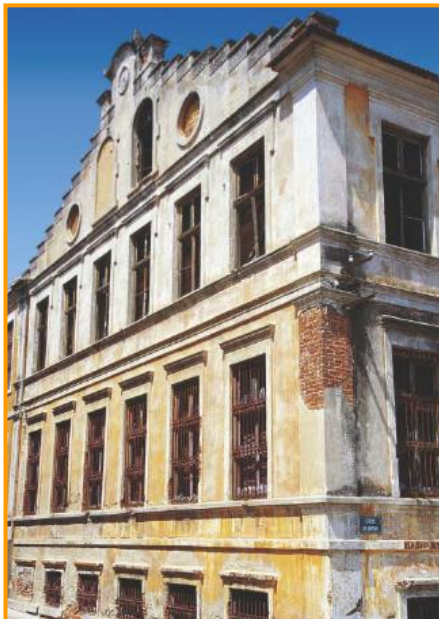
**Απλουστευμένο Προσομοίωμα για την Εκτίμηση της  
Σεισμικής Τρωτότητας Παραδοσιακών Πετρόκτιστων Κτιρίων.**



## Ξάνθη 2010



Παλαιά Πόλη: Παραδοσιακές  
κατοικίες



Καπναποθήκες εποχής



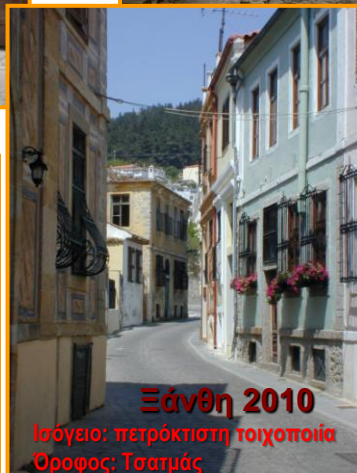
Herculaneum 78 μ.Χ



Herculaneum 78 μ.Χ.



Herculaneum 78 μ. Χ.



Ξάνθη 2010

Ισόγειο: Πετρόκτιστη τοιχοποιία  
Όροφος: Τσατμάς



## Παρατηρήσεις σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία μετά από σεισμό



## Η Διαδικασία Αντισεισμικού Σχεδιασμού & Αποτίμησης των Κατασκευών

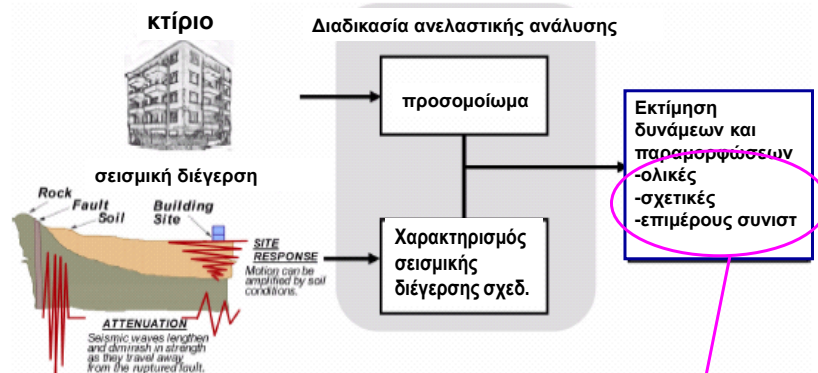


Figure 2-1 Schematic depicting the use of inelastic analysis procedures to estimate inelastic forces and deformations for given seismic ground motions and a nonlinear analysis model of the building.

Η εκτίμηση των επιπτώσεων του σεισμού στις κατασκευές από Ο.Σ. μετράται κυρίως σε όρους παραμόρφωσης του κτιρίου και των επιμέρους συνιστωσών του

ΤΙ ΘΑ ΣΥΜΒΕΙ σε ένα πετρόκτιστο κτίριο όταν αναπτύξει στροφή π.χ. 0.15% περί την κατακόρυφο. Αυτό εξαρτάται από τη μορφολογία του κτιρίου, και από την ικανότητά του να παραμορφώνεται χωρίς αστοχία.

## Ζητούμενο: Σεισμική επάρκεια κτιρίων από πετρόκτιστη τοιχοποιία

Δόμηση: προ της ισχύος Σύγχρονων Αντισεισμικών Κανονισμών

Ασαφές σύστημα αντίστασης σε σεισμικά φορτία  
(συνδυασμός φερόντων & μη στοιχείων)

- Επιβάρυνση σεισμικής ικανότητας λόγω γήρανσης & διάβρωσης (συνδετικών κονιαμάτων και ξύλινων στοιχείων)



Φωτογραφικό υλικό: [www.67100.gr](http://www.67100.gr)

- Παρεμβάσεις των χρηστών



## Σεισμική Αποτίμηση : Τρέχουσα Κατάσταση



1. Ταχύς Οπτικός Έλεγχος (εμπειρική προσέγγιση): Με βάση την γεωμετρία της κάτοψης και τις ορατές βλάβες

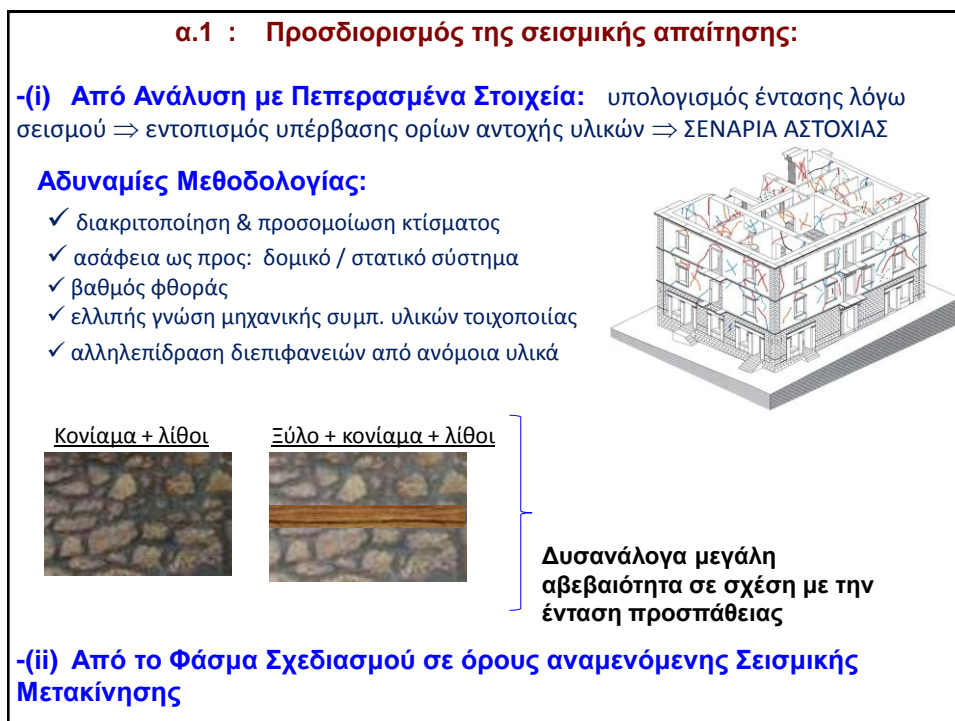
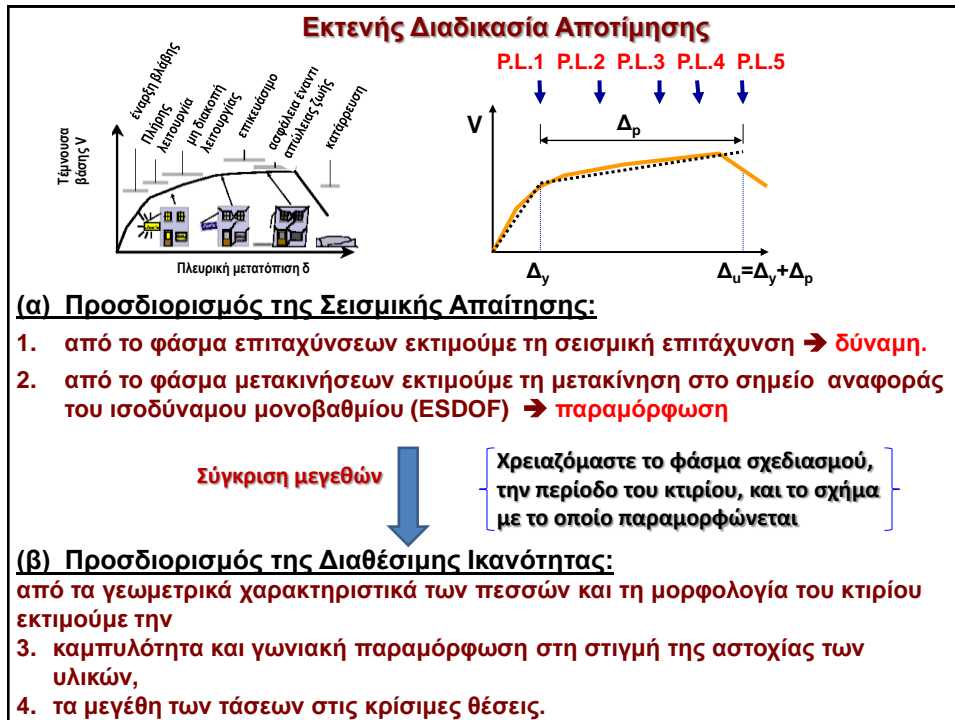
Πίνακας 9.3. Ενδεδειγμένες τιμές για το ανηγμένο εμβαδόν τοίχων στην κάτοψη για απλά κτίρια από τοιχοποιία

Επιτάχυνση εδάφους $a_g S$		$\leq 0,07 k \cdot g$	$\leq 0,10 k \cdot g$	$\leq 0,15 k \cdot g$	$\leq 0,20 k \cdot g$
Type of construction	Number of storeys (n)**	Ελάχιστη τιμή /κάθε κύρια κατεύθυνση σεισμικής δράσης			
Unreinforced masonry	1	2,0%	2,0%	3,5%	n/a
	2	2,0%	2,5%	5,0%	n/a
	3	3,0%	5,0%	n/a	n/a
	4	5,0 %	n/a*	n/a	n/a
Confined masonry	2	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%
	3	2,0%	3,0%	4,0%	n/a
	4	4,0%	5,0%	n/a	n/a
	5	6,0%	n/a	n/a	n/a
Reinforced masonry	2	2,0%	2,0%	2,0%	3,5%
	3	2,0%	2,0%	3,0%	5,0%
	4	3,0%	4,0%	5,0%	n/a
	5	4,0%	5,0%	n/a	n/a

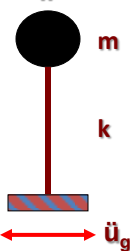
\* n/a means "not acceptable".

\*\* Roof space above full storeys is not included in the number of storeys.

Λόγος πλευρών:  $> 1:4$  & Αστήρικτη διάσταση (από εγκάρσιο τοίχο σε κάτοψη)  $< 7m$



**Σημείο Αναφοράς: Το μονοβάθμιο Σύστημα υπό Σεισμική Διέγερση**



$$k \cdot u = -m \cdot \ddot{u}_{\text{total}} \quad \text{Ισορροπία}$$

$\omega^2 = k/m$ , και  $\omega = 2\pi/T$

$$\omega^2 u = -\ddot{u}_{\text{total}}$$

η σεισμική σχετική μετακίνηση του κτιρίου σχετίζεται απευθείας με την ολική του επιτάχυνση:

$$\omega^2 \cdot u_{\text{max}} = \ddot{u}_{\text{total, max}} \quad \Rightarrow \quad u_{\text{max}} = (T^2/4\pi^2) \cdot \ddot{u}_{\text{total, max}}$$

ΣΧΕΤΙΚΗ μετακίνηση      ΟΛΙΚΗ επιτάχυνση

**Παράδειγμα:** Μέγιστη επιτάχυνση = 0.5g στην κορυφή ενός τριώροφου κτιρίου. Πόση μετακίνηση αναπτύσσει η κορυφή σε σχέση με τη βάση?

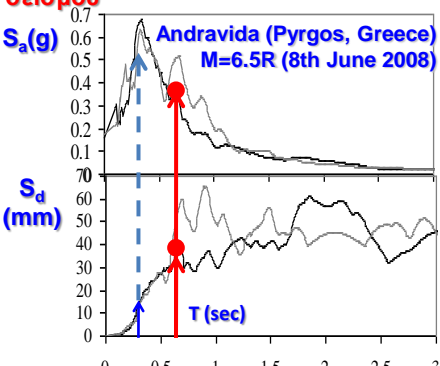
Εκτιμώ  $T \approx 0.05 \times 9^{3/4} = 0.26$  sec. Άρα,  $u_{\text{max}} = (0.26^2/4/3.14^2) \times 0.5 \times 9.81 \text{ m/sec}^2 = 0.0084$  m. Για ύψος κτιρίου  $3 \times 3 = 9$  m, έχουμε μέση στρόφη κτιρίου =  $0.0084/9 = 0.093\%$ .

**Προσεγγιστική Ανάλυση:** Δεδομένου του σεισμικού κινδύνου, Προσέγγιση Σχήματος Ταλάντωσης, Εκτίμηση Περιόδου T, Μετακίνηση κορυφής  $\Rightarrow$  εντατικά μεγέθη.

Η ολική επιτάχυνση  $S_a$ , προσδιορίζει τη σεισμική δύναμη στο κτίριο.  
 Η σχετική μετακίνηση  $S_d$ , προσδιορίζει το μέγεθος της βλάβης.

$\Rightarrow$  Από το σχήμα ταλάντωσης του κτιρίου μπορώ να βρω την εντατική κατάσταση (εσωτερικές δυνάμεις και παραμορφώσεις) σε κάθε σημείο.

**Τυπικό φάσμα (απόκρισης) ολικών επιταχύνσεων & σχετικών μετακινήσεων του σεισμού**

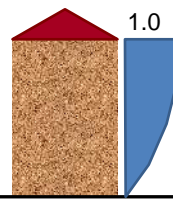


Andravida (Pyrgos, Greece)  
 $M=6.5R$  (8th June 2008)

**Παράδειγμα:**

Κτίριο, σχήμα ταλάντωσης  $\Phi(z) = 1 - \cos(\pi \cdot z/H)$ ,  $T=0.25$  sec.

Στο σεισμό της Ανδραβίδας θα αναπτύξει μετακίνηση  $15 \text{ mm} \cdot 1.2 = 18 \text{ mm} \approx 0.02 \text{ m}$ .



### Φάσμα του Σεισμού Σχεδιασμού: Περιβάλλουσα μέγιστων αποκρίσεων για όλα τα συστήματα (T, ξ)

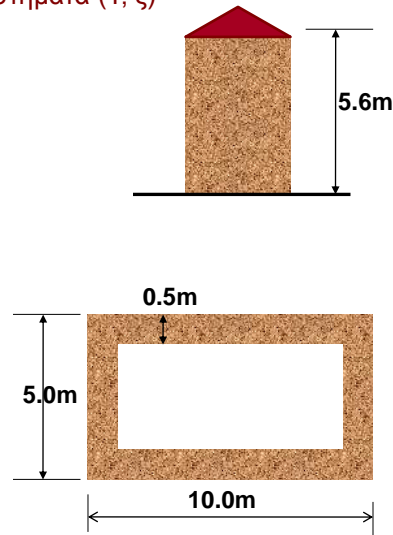
**Παράδειγμα:** Κτίριο, σχήμα ταλάντωσης  $\Phi(z) = 1 - \cos(\pi z/H)$ ,  $T = 0.25$  sec. Στο σεισμό της Ανδραβίδας θα αναπτύξει μετακίνηση  $15\text{mm} \cdot 1.2 = 18\text{mm} \approx 0.02\text{m}$ .

Μετακινήσεις καθ' ύψος:  $0.02 \cdot (1 - \cos(\pi z/H))$   
 Καμπυλότητα:  $c(z) = 0.02 \cdot (\pi/H)^2 \cdot \cos(\pi z/H)$   
 Ροπές:  $M_i(z) = EI \cdot c(z)$  κλπ.

Έτσι, για κτίριο κάτοψης  $5 \times 10$  m, πάχος τοίχου 0.5m,  $H = 5.6$  m, εξάγεται:  
 $I = 2 \cdot [(0.5^5/12) + 0.5 \cdot 10^2 \cdot 2.5^2 + (10^5/12)]$   
 $= 73.125\text{m}^4$ .

Έστω  $E = 10\text{GPa}$ .

Ροπή και τέμνουσα βάσης:  
 $M = 0.02 \cdot 10^7 \cdot 73.125 \cdot (3.14/5.6)^2 = 0.45 \times 10^7 \text{kN-m}$   
 $V = 0.3g \cdot 1.2 \cdot (W/g) = 0.36W$



### Το φάσμα Σχεδιασμού σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες

$$0 \leq T < T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \left( \frac{\eta \cdot \beta_o}{q} - 1 \right) \right]$$

$$\eta = (10/(5+\xi))^{1/2} \geq 0.55$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{\eta \cdot \beta_o}{q}$$

Για  $\xi = 5\%$  το  $\eta = 1$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{\eta \cdot \beta_o}{q} \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$q$  = συντελεστής συμπεριφοράς ή πλαστιμότητας. Για ελαστική συμπεριφορά το  $q = 1$

$$T_D \leq T : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{\eta \cdot \beta_o}{q} \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

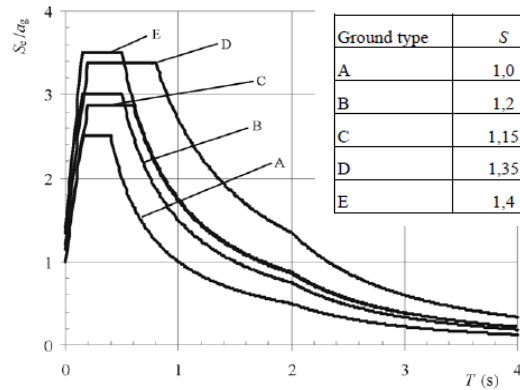
Η περίοδος  $T$  της κατασκευής εκτιμάται είτε προσεγγιστικά, είτε μέσω εξελιγμένης προσομοίωσης. Προσεγγιστικοί κανόνες:

-Μετατροπή του κτιρίου σε ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή, εύρεση γενικευμένης μάζας και δυσκαμψίας:  $\omega = 2\pi/T = \sqrt{(K^*/M^*)}$

-Εμπειρικά βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τύπου του κτιρίου, της μέγιστης εκτιμώμενης σεισμικής μετακίνησης, κλπ.

-Μερικές από τις εμπειρικές αυτές σχέσεις δίνονται και στον κανονισμό.



**Φάσμα EC-8, Type I, για διάφορους τύπους εδαφών****Τιμές παραμέτρων**

Ground type	$S$	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Figure 3.2: Recommended Type I elastic response spectra for ground types A to E (5% damping)

Ο σεισμικός κίνδυνος ποσοτικοποιείται με την σεισμική επιτάχυνση  $a_g$  σε έδαφος τύπου A, για τις διάφορες ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας της επικράτειας.

**Πίνακας 2.2:** Σεισμική επιτάχυνση εδάφους:  $A = \alpha \cdot g$  ( $g$ : επιτάχυνση βαρύτητας)

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III	IV
$\alpha$	0.12	0.16	0.24	0.36

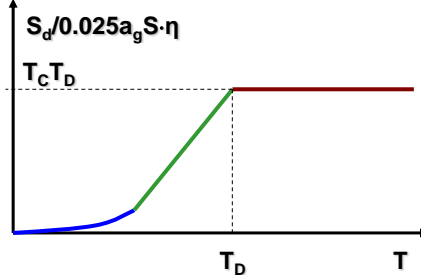
**Φάσμα Σχετικών Μετακινήσεων του Σεισμού Σχεδιασμού: Δίνει την Σχετική Μετακίνηση ως συνάρτηση της περιόδου.**

$$0 \leq T < T_B : \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot \beta_o - 1) \right] \cdot \frac{T^2}{40}$$

$$T_B \leq T \leq T_C : \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_o \cdot \frac{T^2}{40} = 0.025 a_g \cdot S \cdot \eta \cdot T^2$$

$$T_C \leq T \leq T_D : \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_o \cdot \left( \frac{T_C \cdot T}{40} \right) = 0.025 a_g \cdot S \cdot \eta \cdot T_C \cdot T$$

$$T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} : \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_o \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{40} \right) = 0.025 a_g \cdot S \cdot \eta \cdot T_C \cdot T_D$$



Τα εύκαμπτα συστήματα αναπτύσσουν μετακινήσεις που αυξάνονται γραμμικά με την περίοδό τους. Το ίδιο φυσικά και η αντίστοιχη βλάβη



### Θεμελιώδης Ιδιοπερίοδος $T$ του πετρόκτιστου κτιρίου:

Προσέγγιση της  $T$  κατόπιν υιοθέτησης αντιπροσωπευτικού σχήματος ταλάντωσης

$$\Phi(z)$$

$$T = 2\pi \sqrt{M^*/K^*}$$

$$M^* = \text{Γενικευμένη Μάζα} = \sum m_i \cdot \Phi_i^2 + \int m(x,y,z) \cdot \Phi(x,y,z)^2$$

$$K^* = \text{Γενικευμένη Δυσκαμψία} = \sum k_i \cdot \Delta \Phi_i^2 + \int EI(x,y,z) \cdot (\Phi''(x,y,z))^2 + \int GA(x,y,z) \cdot (\Phi'(x,y,z))^2$$

Χρειαζόμαστε το σχήμα  $\Phi(x,y,z)$  που θα λάβει η κατασκευή κατά την ταλάντωσή της – έστω και κατά προσέγγιση

### Θεμελιώδης Ιδιοπερίοδος $T$ του πετρόκτιστου κτιρίου:

Προσέγγιση της  $T$  εμπειρικά :

$T = C \cdot H^{3/4}$  όπου  $C=0,05$  για πετρόκτιστα, και  $H$  το ύψος του κτιρίου μετρούμενο από την στάθμη οροφής άκαμπτου υπογείου (ή θεμελίωση) μέχρι την κορυφή.

$$\text{Είτε } C=0,075/\sqrt{A_c} \text{ όπου } A_c = \sum A_x \cdot (0,2 + (L_{wx}/H)^2)$$

#### Παράδειγμα:

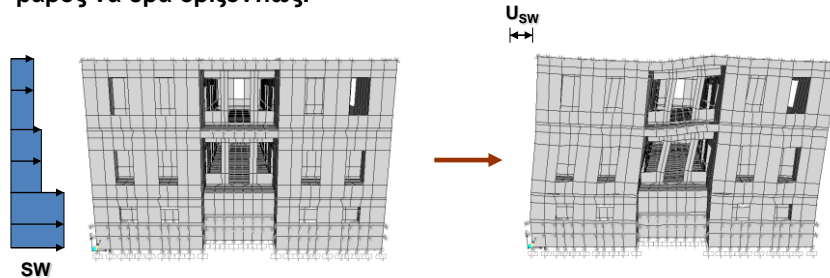
Για διώροφο ύψους 6m, η εκτιμώμενη περίοδος  $T$  είναι 0.19 sec. Για κάτοψη 5 m x 10 m, πάχος τοίχου 0.6m  $\rightarrow A_x = 2 \cdot 5 \cdot 0,6 = 6 \text{ m}^2$ . Αν τυπικό μήκος πεσσού = 1,5m  $\rightarrow A_c = 6 \cdot (0,2 + (1,5/6)^2) = 1,575 \rightarrow C = 0,059$ , κοντά με το χονδρικό αποτ.

Εναλλακτικά: Η περίοδος μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:  $T = 2\sqrt{\Delta}$ , όπου  $\Delta$  είναι η οριζόντια ελαστική μετακίνηση κορυφής που αναπτύσσει το κτίριο αν υποβληθεί σε οριζόντιες δυνάμεις ίσες με τα φορτία βαρύτητάς του.

Παράδειγμα: Έστω  $\Delta = 0,20\%H \rightarrow T = 2 \cdot \sqrt{0,002 \cdot 6} = 0,21 \text{ sec.}$

Σχήμα ταλάντωσης = σχήμα κτιρίου όταν το φορτίσουμε με τα ίδια βάρη του

Απλή στατική ανάλυση στις κύριες κατευθύνσεις της κάτοψης με το ίδιο βάρος να δρα οριζοντίως.

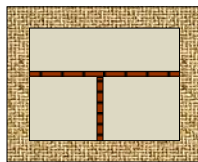


$$\text{Max Disp. / Max. Stresses} = \{ \text{Disp}_{\text{SW}} / \text{Stresses}_{\text{SW}} \} * \frac{S_d}{U_{\text{SW}}}$$

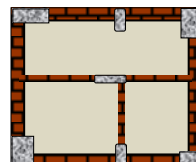
### Πετρόκτιστη Τοιχοποιία -vs- Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Εμβαδόν φερόντων στοιχείων ΠΤ >> Εμβαδόν φερόντων στοιχείων Ο.Σ.

**2όροφη Κατοικία Π.Τ.**



**2όροφη Κατοικία Ο.Σ.**



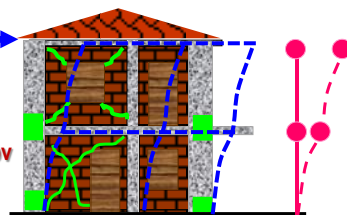
Διαφραγματική λειτουργία:

Δυσκαμψία ξύλινων δαπέδων << Δυσκαμψία πλάκας Ο.Σ.

Καμπτο-Διατμητική  
παραμόρφωση πεσσών

Καμπτική παραμόρφωση  
πρισματικών στοιχείων

Διαγώνια ρηγμάτωση  
vs  
ρηγμάτωση στήλων



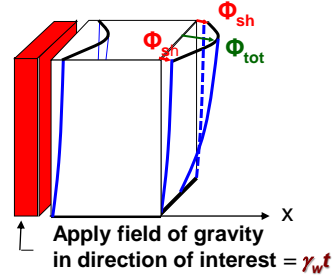
- εκτός επιπέδου κάμψη
- αποκόλληση πεσσών
- αποχωρισμός γωνιακών αγκωναριών

## Αξιόπιστο Σχήμα Ταλάντωσης $\Phi(x,y,z)$ για την μετατροπή σε ισοδύναμο Μονοβάθμιο Ταλαντωτή?

### Παράμετροι που επηρεάζουν το $\Phi(x,y,z)$ :

- Βαθμός Διαφραγματικής Λειτουργίας
  - Σκυρόδεμα
  - Μεταλλικές δοκοί με Πλινθοπλήρωση
  - Ξύλινα πατώματα (ελαφρά, μικρή διαφραγματ.)
  - Κτιστοί Θόλοι (Βαρειά, απαιτούν παχείς τοίχους)
- Ισοτροπικότητα (κατεύθυνση σανιδώματος, στήριξη στους φέροντες τοίχους)
- Βάρος (μάζα)
- Εάν ασκεί οριζόντιες ωθήσεις στους τοίχους λόγω βαρύτητας (κτιστοί θόλοι)

Cantilever model of building



Για τους τοίχους // στο σεισμό:  $\Phi = \Phi_{sh}$

Για τους τοίχους  $\perp$  στο σεισμό:  $\Phi = \Phi_{sh} + \Phi_f$

$\Phi_s$  η διατμητική συνιστώσα της συνάρτησης σχήματος ενώ  $\Phi_f$  είναι η καμπτική συνιστώσα, όπου θεωρείται ότι  $\Phi = \Phi_s + \Phi_f$ .

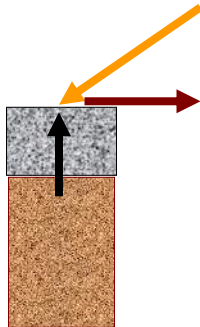
### Διαφράγματα

#### Ξύλινα Ζευκτά ανά 1 - 2 μ με τενίδες, σανίδωμα & κεραμίδι:

- Εδράζονται στην περιμετρική δοκό - γρεπίδα (άνω διάζωμα)
- Εάν δεν είναι άκρως υπερστατικά και πολύ καλά δεμένα στην γρεπίδα, δεν αναπτύσσουν ουσιαστική διαφραγματική λειτουργία
- Βάρος εξαρτάται από το είδος της επικάλυψης (ελαφρό κεραμίδι (γαλλικό), Βυζαντινό (καρφωτό), Βυζαντινό κολυμβητό, λίθινες πλάκες)
- Ανεπαρκής δικτύωση ζευκτών: Κάμψη πελμάτων, βύθιση και καταπόνηση ενδιάμεσων (ασθενών) τοίχων, & ωθήσεις περιμετρικών τοίχων (κάθισμα και άνοιγμα της στέγης).

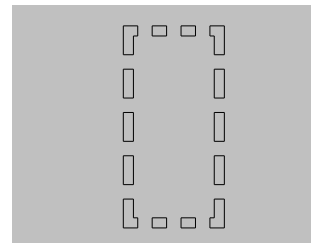
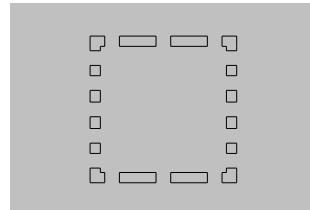
#### Διαζώματα: Συνήθεις Τύποι:

- Ξύλινα, μεταλλικά ή και από Ο.Σ. σε ανώφλια ανοιγμάτων
- Συνεχή ξύλινα (ξυλοδεσιές), μεταλλικά, ή και από Ο.Σ. ανά 1 μ., ή στη στάθμη των ορόφων, ή στη στάθμη των ανωφλίων και της στέγης.
- Μεταλλικοί ή και ξύλινοι ελκυστήρες. Παθητικοί ή και ελαφρώς προεντεταμένοι. Στις στάθμες των ορόφων ή και όπως τα διαζώματα.
- Κατακόρυφα διαζώματα ή και μεταλλικά (τσατμάς)



### Μελέτη του σχήματος ταλάντωσης μέσω προσομοίωσης

- τυπικοί φορείς νεοκλασσικών κατοικιών
- διώροφες κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία με υπόγειο
- με ομοιόμορφα κατανεμημένα ανοίγματα
- 1: κάτοψη **10x10μ.**
- 2: κάτοψη **7x14μ.**
- παρόμοιο εμβαδόν κάτοψης
- μελέτη της εκτός επιπέδου κάμψης σε σχέση με το μήκος του τοίχου που είναι κάθετα στο σεισμό



#### Παράμετροι:

- ποσοστό των ανοιγμάτων
- δυσκαμψία των διαφραγμάτων

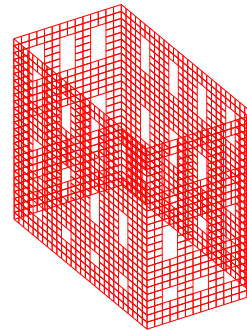
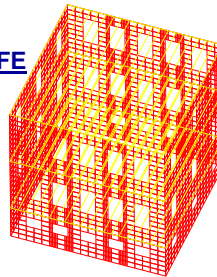
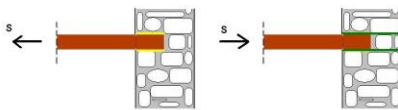
#### Προσομοίωση:

- Τοιχοποιία : συνεχές μέσο ; επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους
- Γραμμικά στοιχεία για τα ξύλινα πατώματα, οροφή στέγης, διαζώματα
- Συνδέσεις και επαφές με ελατήρια συνάφειας
- Στοιχεία μονόπλευρων επαφών για περιμετρικούς τοίχους υπογείου στην κατεύθυνση που εδράζονται στο έδαφος.

**F.E.M.**

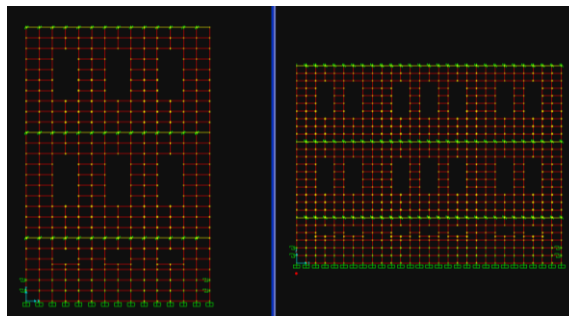
Η επιρροή της δυσκαμψίας διαφράγματος φαίνεται στη διαφορά μεταξύ  $\Phi_{total}$  και  $\Phi_{sh}$

#### Μελέτη κατόπιν προσομοίωσης με FE

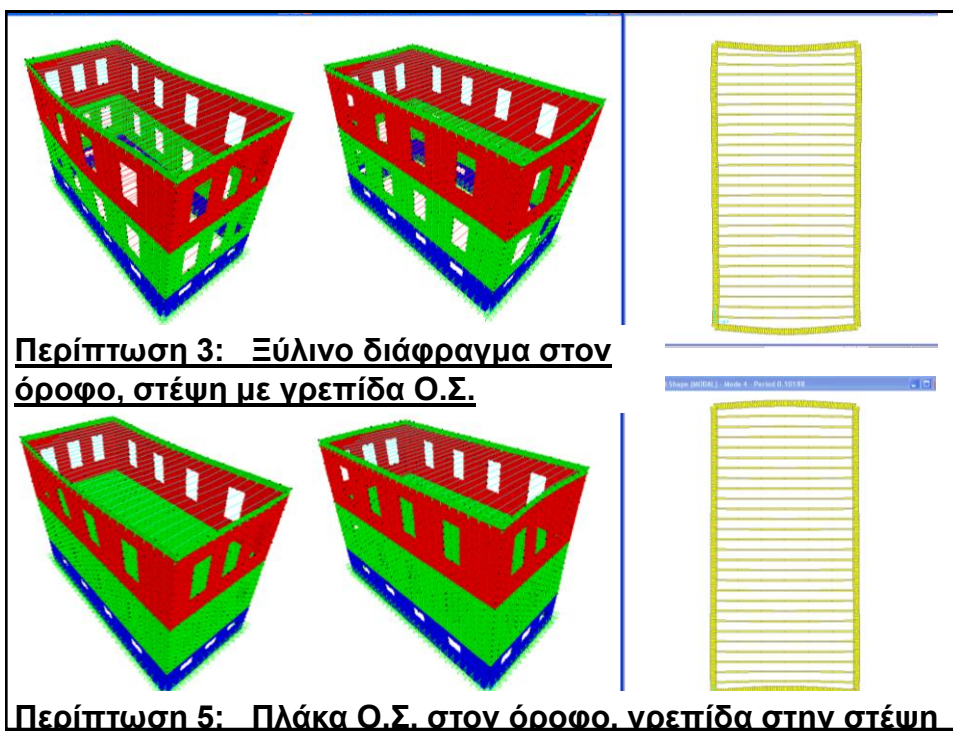
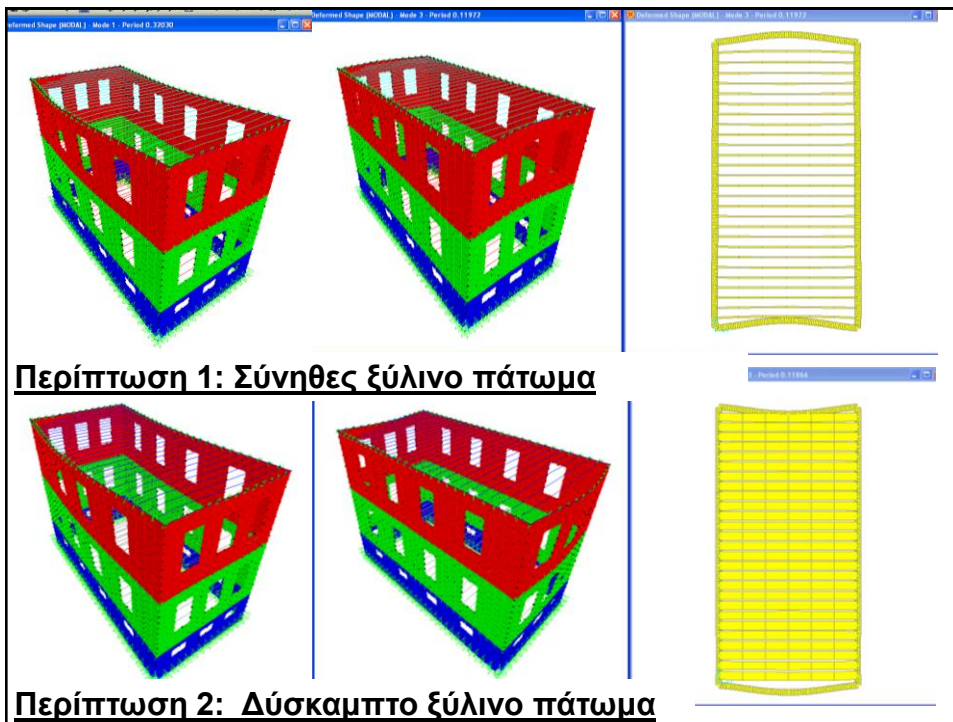


#### Παράμετροι Μελέτης:

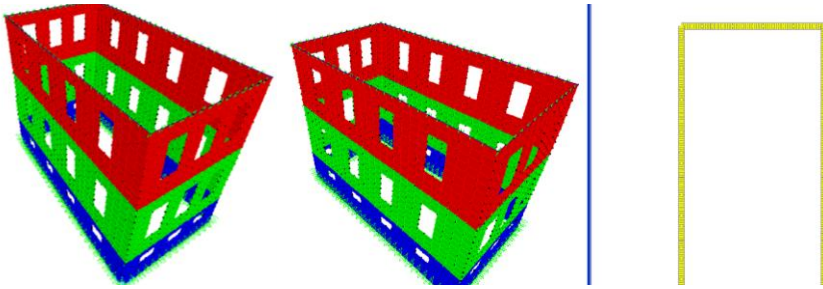
- Δυσκαμψία οριζοντίων διαφραγμάτων
- Εμβαδόν Ανοιγμάτων και απόσταση μεταξύ τους (εάν δημιουργούνται καμπτικοί ή διατμητικοί πεσσοί ανάμεσά τους)







### Περίπτωση 4: Διαφραγμ. λειτουργία με καταναγκ. κατά z



#### Ανοίγματα ανά όροφο: Ονομασία περιπτώσεων:

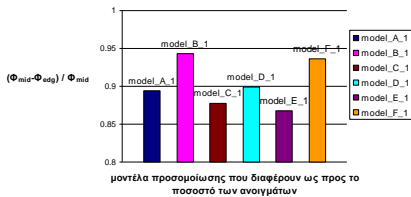
A: 4 αν. στην επιμήκη πλευρά, 3 στην μικρή πλευρά. B: 4 αν. στην επιμήκη πλευρά

C: 0 αν. στην επιμήκη, 3 στην κοντή πλευρά. D: 7 αν. στην επιμήκη, 3 στην κοντή πλευρά

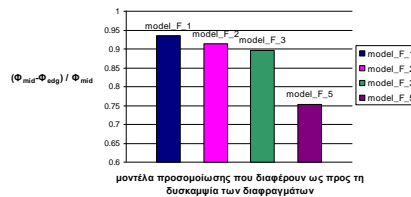
E: όπως η A, όμως στην κοντή πλευρά τα ανοίγματα είναι κοντά σχηματίζοντας καμπικούς πεσσούς.

F: Χωρίς ανοίγματα

Διαφορά μετακίνησης της μέσης του εγκάρσιου τοίχου με τα άκρα κατά την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή

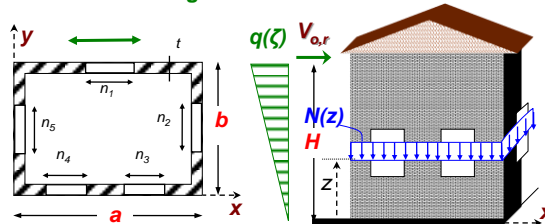


Διαφορά μετακίνησης της μέσης του εγκάρσιου τοίχου με τα άκρα κατά την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή



Για την εύρεση του σχήματος λύνουμε πρώτα με κλειστές εκφράσεις την απόκριση του δομήματος υπό τα ίδια βάρη ασκούμενα οριζοντίως

Seismic loading



$$\Delta_f^{outofplane} \left( \frac{b}{2}, H \right) = 0.105 \cdot e^{-2.65 \cdot \frac{H}{b}} \cdot \frac{\gamma_w \cdot t \cdot H^4}{D} \cdot 0.6$$

$$\Delta_s = \frac{0.5 \cdot \gamma_w \cdot (a + 0.5 \cdot b) \cdot H^2}{a \cdot G_w}$$

$$D = \frac{E_w \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

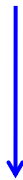
$$\Delta_{ανοίγ}^+ = \frac{V}{GH} \cdot (z_2 - z_1) \cdot \left( \frac{1}{A_{red}} - \frac{1}{A} \right) \cdot \left( H - \frac{z_1 + z_2}{2} \right)$$

**Κατανομή καθ' ύψος της μετακίνησης τοίχων // σεισμό:**

$$\Delta_s(z) = \Delta_s(H) \cdot \left( \frac{2 \cdot z \cdot H - z^2}{H^2} \right)$$

Όπου η μετακίνηση κορυφής (στέψη) ισούται με:

$$\Delta_s(H) = \Delta_s + \mu \cdot \Delta_f^{\text{inplane}} + \sum \Delta_{\text{ανοίγματος}}^+$$



αύξηση ευκαμψίας λόγω ανοιγμάτων τοίχων

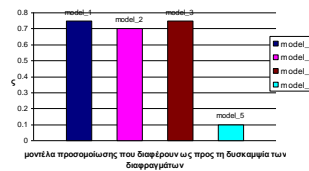
Μετακίνηση λόγω κάμψης του κτιρίου θεωρούμενου ως «πρόβολος» με διατομή ταυτόσημη με την κάτοψη του

Μετακίνηση λόγω διατμητικής παραμόρφωσης

$$\Delta_s = \frac{0.5 \cdot \gamma_w \cdot (a + 0.5 \cdot b) \cdot H^2}{a \cdot G_w}$$

$$\Delta_{\text{finplane},\alpha} = \frac{H^3 \cdot \gamma_w \cdot t \cdot (a+b)}{3 \cdot E_w \cdot I_y}$$

Μειωτικός συντελεστής μ ανάλογα με το είδος του διαφράγματος



**Εκτός επιπέδου κάμψη τοίχων ⊥ σεισμό: Μετακίνηση κορυφής στο μέσο του εγκάρσιου τοίχου:**

$$\Delta_f^{\text{outofplane}}\left(\frac{b}{2}, H\right) = 0.105 \cdot e^{-2.65 \cdot \frac{H}{b}} \cdot \frac{\gamma_w \cdot t \cdot H^4}{D} \cdot 0.6 \quad \text{όπου} \quad D = \frac{E_w \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

**Κατανομή καθ' ύψος της μετακίνησης τοίχων ⊥ σεισμό:**

$$\Delta_f(y, z) = \Delta_f(b/2, H) \cdot \frac{z}{H} \cdot \left( \frac{2 \cdot z \cdot H - z^2}{H^2} \right) \cdot \sin \frac{\pi \cdot y}{b}$$

όπου  $\Delta_f(b/2, H) = \xi \cdot \Delta_f^{\text{outofplane}}$

Κατόπιν αναγωγής στο σημείο αναφοράς (μέσο εγκάρσιου τοίχου, στέψη) το σχήμα είναι:

**Καμπτική συνιστώσα**

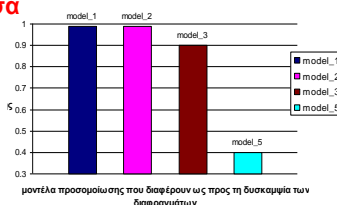
$$\Phi_T(y, z) = \Phi_s(z) + \Phi_f(y, z)$$



**Διατμητική συνιστώσα**

**Συνολική συνάρτηση σχήματος**

Μειωτικός συντελεστής ξ ανάλογα με το είδος του διαφράγματος



**Υιοθετούμενο σχήμα ταλάντωσης για την εκτός επιπέδου κάμψη των τοίχων κάθετα προς το σεισμό. Περίπτωση  $H = 5.6\text{m}$ ,  $a = 8\text{m}$ ,  $b = 8\text{m}$ ,  $t = 0.625\text{m}$ :**

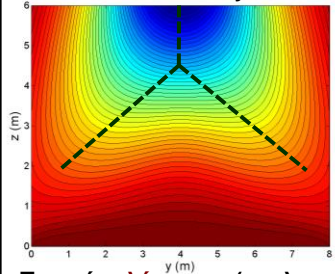
$$c_{1,2} = \frac{c_{yy} + c_{zz}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{c_{yy} - c_{zz}}{2}\right)^2 + c_{yz}^2}$$

$$c_{zz} = \frac{\partial^2 \Phi_{\text{Tot}}(y,z)}{\partial z^2}$$

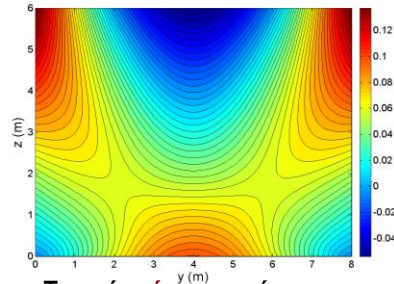
$$c_{yy} = \frac{\partial^2 \Phi_{\text{Tot}}(y,z)}{\partial y^2}$$

$$c_{yz} = c_{zy} = \frac{\partial^2 \Phi_{\text{Tot}}(y,z)}{\partial y \partial z}$$

Οι τροχιές αναδεικνύουν τη διαμόρφωση γραμμών διαρροής σε σχήμα ανεστραμένου Υ που προϋδεάζει για τον οικείο μηχανισμό αστοχίας



**Τροχιές ελάχιστης (εφελκυστ. έξω αν < 0) καμπυλότητας τοίχου**



**Τροχιές μέγιστης κύριας καμπυλότητας τοίχου**

$$M^* = \iint m(y,z) [\Phi(y,z)]^2 dy dz$$

$$K^* = \int GA \left[ \frac{d\Phi_s(y,z)}{dz} \right]^2 dz + \iint EI \left[ \frac{\partial^2 \Phi_f(y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_f(y,z)}{\partial z^2} \right]^2 dy dz$$

**Συνολική μάζα κτιρίου:** μάζα τοιχοποιιών, οροφής  $M_{rf}$  και μάζας που οφείλεται στα μόνιμα και κινητά φορτία των ορόφων.  $M_{\text{tot}} = m_w H + M_{rf} + M_{st} =$

$$2 \cdot \gamma_w \cdot t \cdot (a+b) \cdot H / g + \gamma_r \cdot a \cdot b / g + (\gamma_{st} + 0.3 \cdot q / g) \cdot a \cdot b$$

**Ισοδύναμη μάζα**

$$M^* = \frac{16}{15} \cdot \gamma_w \cdot t \cdot H \cdot a \cdot \Phi_s^2 + \frac{\gamma_w \cdot t \cdot H \cdot b}{105} \cdot \left( 112 \cdot \Phi_s^2 + \frac{308}{\pi} \cdot \Phi_s \cdot \Phi_f + 29 \cdot \Phi_f^2 \right) + M_{rf} \cdot \left( \Phi_s^2 + \frac{4}{\pi} \cdot \Phi_s \cdot \Phi_f + \frac{1}{2} \cdot \Phi_f^2 \right) + \sum M_{st} \cdot b \cdot \left( \frac{2 \cdot z_{st} \cdot H - z_{st}^2}{H^2} \right) \cdot \left( \Phi_s^2 + \frac{1}{2} \cdot \Phi_f^2 \cdot \frac{z_{st}^2}{H^2} \right)$$

**Ισοδύναμη δυσκαμψία**

$$K^* = \frac{8 \cdot a}{3 \cdot H} \cdot G \cdot t \cdot \Phi_{\text{shear}}^2 + E_w \cdot t^3 \cdot \left( 1 - (\Phi_{\text{shear}} + \Phi_f^{\text{inplane}}) \right)^2 \cdot \left( \frac{b}{3 \cdot H^3} + \frac{\pi^2}{45 \cdot b \cdot H} + \frac{29 \cdot \pi^4 \cdot H}{1260 \cdot b^3} \right) + E_w \cdot I_{\text{κτιρίου}} \cdot \Phi_f^{\text{inplane}} \cdot \frac{2}{H}$$

$$\text{όπου } \Phi_{\text{shear}} = \Phi_s - \Phi_f^{\text{inplane}}$$



Παράδειγμα: Έδαφος μέτριας κατηγορίας B  
 Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2:  $a_g=0.24 \cdot g$ ,  
 $T_B=0.15\text{sec}$ ,  $T_C=0.50\text{sec}$ ,  $T_D=2.00\text{sec}$ ,  $S=1.20$ ,  $n=1.00$ .

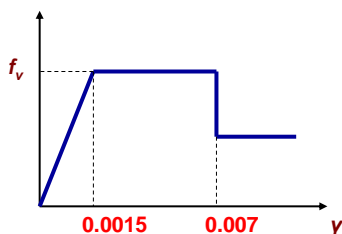
Model_A5		Model_B5		Model_C5		Model_D5		Model_F5	
<b>M*</b>	558.3758	<b>M*</b>	541.9393	<b>M*</b>	558.3758	<b>M*</b>	585.218114	<b>M*</b>	813.9135
<b>K*</b>	665835.3	<b>K*</b>	686807.7	<b>K*</b>	665835.3	<b>K*</b>	815200.798	<b>K*</b>	2919158
<b>T(sec)</b>	0.181861 0.209	<b>T(sec)</b>	0.176408 0.195	<b>T(sec)</b>	0.181861 0.192	<b>T(sec)</b>	0.16826207 0.166	<b>T(sec)</b>	0.104862 0.124
<b>S<sub>d</sub>(mm)</b>	5.92 = 0.1%	<b>S<sub>d</sub>(mm)</b>	5.57	<b>S<sub>d</sub>(mm)</b>	5.92	<b>S<sub>d</sub>(mm)</b>	5.07	<b>S<sub>d</sub>(mm)</b>	1.61

Πίνακας αποτελεσμάτων ιδιοπεριόδου και σεισμικής απαίτησης όπως προκύπτουν με χρήση του μαθηματικού μοντέλου για το τετράγωνο μοντέλο κτιρίων

	model_F_1	model_F_2	model_F_3	model_F_5
<b>M*</b>	1156.436961	1156.436961	1204.240556	1531.150622
<b>K*</b>	349138.5841	349138.5841	408843.4114	1738973.739
<b>T(sec)</b>	0.361427923	0.361427923	0.340829962	0.186346864
<b>S<sub>d</sub>(T), (mm)</b>	23.4 = 0.4%	23.4	20.8	6.22

Πίνακας αποτελεσμάτων ιδιοπεριόδου και σεισμικής απαίτησης όπως προκύπτουν με χρήση του μαθηματικού μοντέλου για το επιμήκες μοντέλο κτιρίων

### Έλεγχος επιτελεστικότητας:



#### • Τοίχοι // σεισμό

$$V_{Rd1} = c + \mu \cdot \sigma_z$$

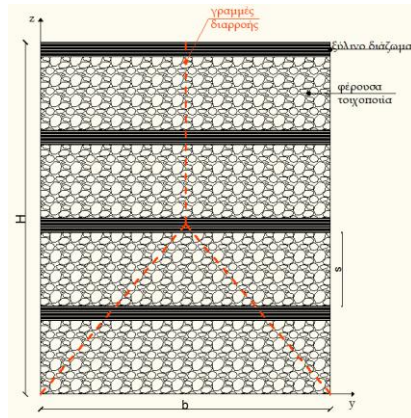
$c=0.5(f_t' f_c')^{0.5}$  (όπου  $f_t' \neq 0.1f_c'$ ); Αυτό αντιστοιχεί περίπου σε αντοχή σε διάτμηση  $0.5\text{MPa}$ )

Η τυχόν συμβολή διαζωμάτων πρέπει να συνυπολογίζεται στο μοντέλο αντοχής. Αυτή είναι η συνολική δύναμη  $V_d$ , που παραλαμβάνεται από τα διαζώματα που τέμνουν μια ρωγμή με κλίση  $45^\circ$

**Έλεγχος επιτελεστικότητας:****• Τοίχοι  $\perp$  σεισμό**

**Η καμπυλότητα που μπορεί να παραληφθεί πριν την αστοχία του εγκάρσιου τοίχου προκύπτει από την παραμόρφωση ρηγματώσεως της τοιχοποιίας:**

$$\Phi_{cr} = \frac{\varepsilon_{mt}}{x_t} = \frac{0.0001}{0.5 \cdot t} \quad (1)$$



**Εάν υπάρχουν διαζώματα τότε οι τοίχοι διαθέτουν πλαστιμότητα έναντι εκτός επιπέδου κάμψης: Μετά την υπέρβαση της  $\Phi_{cr}$  ακολουθεί ρηγμάτωση, όμως η αστοχία σχετίζεται με την εξάντληση της ικανότητας παραμόρφωσης της θλιβόμενης παρειάς(περίπου 0.0035):**

$$\Phi_u = \frac{\varepsilon_{mu}}{x_u} = \frac{0.0035}{0.3 \cdot t} \quad (2)$$

**Συμπέρασμα:** Η καμπυλότητα  $c_{zz}$  είναι αυτή που θα κυριαρχήσει στον εγκάρσια με το σεισμό τοίχο με μία κατακόρυφη ρωγμή στο πάνω μισό ύψος.

Επομένως η καμπυλότητα  $c_{yy}$  είναι αυτή που πρέπει να συγκριθεί με την οριακή καθώς είναι αυτή που ενεργοποιεί και τα ξύλινα διαζώματα εφόσον υπάρχουν. Το κριτήριο αυτό είναι κρίσιμο για το πάνω μισό του τοίχου καθώς εκεί η καμπυλότητα είναι δυσμενέστερη.

**Ορίζονται 2 κριτήρια αποτίμησης:**

•Αν η καμπυλότητα  $C_{zz} \cdot \Delta_{tot}$  έχει υπερβεί την  $\Phi_{crack}$  στο πάνω μισό του εγκάρσιου τοίχου τότε το κτίριο προσημαίνεται κίτρινο.

•Το κτίριο στη περίπτωση αυτή θα είναι σε άμεση χρήση μετά το σεισμό και θα έχει παρουσιάσει ελαφριές βλάβες στο φέροντα οργανισμό (δλδ ρωγμές 1-2mm). Εάν  $\Phi_{cr} = \Phi_u$  (απουσία ξύλινων διαζωμάτων), τότε η περίπτωση αυτή ταυτίζεται με την παρακάτω.

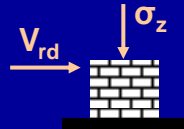
•Αν η καμπυλότητα  $C_{yy} \cdot \Delta_{tot}$  έχει υπερβεί την  $\Phi_u$  στο πάνω μισό του εγκάρσιου τοίχου τότε το κτίριο προσημαίνεται κόκκινο. Το κτίριο στη περίπτωση αυτή δεν είναι σε άμεση χρήση μετά το σεισμό αλλά θα πρέπει να επισκευαστεί έτσι ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση του. Το δομικό του σύστημα θα έχει υποστεί βαρύτατες βλάβες και θα διατηρείται οριακά έναντι κατακόρυφων φορτίων (πλήρης αποκόλληση πρεσσών).

## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Μέσω Στατικών Ελέγχων

- απλουστευμένα αλλά αξιόπιστα κριτήρια εκτίμησης σεισμικής τρωτότητας στο στάδιο προελέγχου =  $f$  (δυναμικά χαρακτηριστικά)
- Η ένταση της προσπάθειας για την αρχική αξιολόγηση  $\square \leftrightarrow$  αβεβαιότητα για το διαθέσιμο ιστορικό του δομήματος

- Μοντέλο τριβής:

$$V_{Rd} = C + \mu \cdot \sigma_z$$



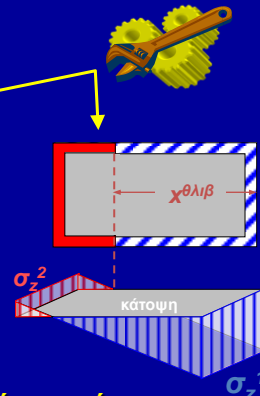
+

- Καμπτική ανάλυση διατομής

$$= V_{sd} < ? > V_{Rd}$$

Σεισμική τέμνουσα

Διατμητική αντοχή



## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι

$$V_{sd} < ? > V_{Rd} : \text{Διατμητική αντοχή}$$

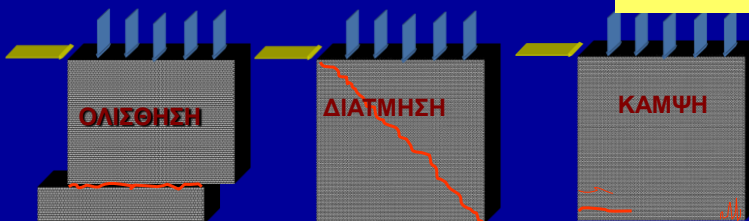
- Μοντέλο τριβής:  $V_{Rd} = C + \mu \cdot \sigma_z$

Συνοχή (κονίαμα)

Συντελεστής τριβής (1-5, ΚΑΝΕΠΕ)

Ορθή τάση

$$\sigma_z = \frac{N(z)}{A_w} \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot x$$



## Τύποι Φερουσών Τοιχοποιιών

Συνήθεις Τύποι:

- Λιθοδομή
- Πλινθοδομή συμπαγών οπτόπλινθων
- Πλινθοδομή ωμόπλινθων
- Πλινθοδομή διάτρητων οπτόπλινθων
- Ξυλόπηκτη τοιχοποιία (Γεμισμένο Ξύλινο Δικτύωμα - Τσατμάς)
- Ξυλόπλεκτη (μπαγδατότοιχος)

Οι τρεις τελευταίοι τύποι είναι χαμηλότερης αντοχής. Συνήθως η θεμελίωση είναι από λιθοδομή. Μεγάλη σημασία στη σεισμική συμπεριφορά έχει η διάταξη και η ομοιομορφία καθ' ύψος των ανοιγμάτων. Λόγω μεγάλου βάρους καθ' ύψος της τοιχοποιίας, η μάζα δεν μπορεί να θεωρηθεί συγκεντρωμένη στους ορόφους

Κονιάματα πλήρωσης:

- Τσιμεντοκονίαμα με ασβέστη
- Ασβέστης + άμμος
- Άργιλος (χώμα)

## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι

$$V_{Sd} < ? > V_{Rd} : \text{Διατμητική αντοχή}$$

$$N_w(z) = \gamma_w \cdot A_w \cdot (H - z)$$

$$N(z) = \gamma_w \cdot A_w \cdot (H - z) + \gamma_r \cdot A_r$$

$$\gamma_w = 20 \text{ to } 27 \text{ kN/m}^3$$

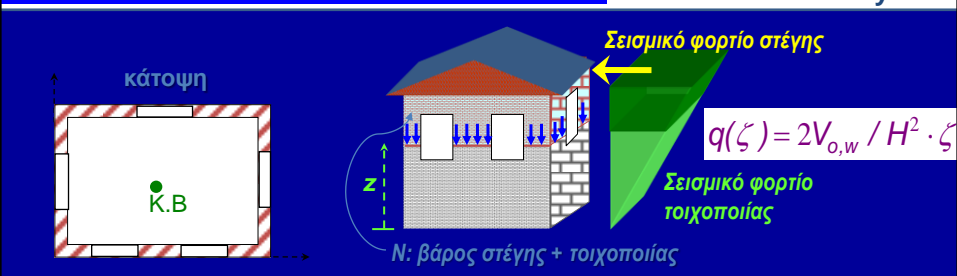
$$\gamma_r = 160\text{-}180 \text{ Kg/m}^2 \text{ για σχιστόλιθο,}$$

$$= 110\text{-}150 \text{ Kg/m}^2 \text{ για ρωμαϊκού και βυζαντινό κεραμίδι.}$$

$V_{o,r} = M_r \cdot \Phi_d(T) = (N_r / g) \cdot \Phi_d(T)$  όπου η μάζα οροφής  $M_r = N_r / 9.81 \text{ m/sec}^2$ , και  $\Phi_d(T)$  η επιτάχυνση του φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στην περίοδο του κτιρίου  $T$ .

$$M_y = \int_z^H q(\zeta) \cdot (\zeta - z) d\zeta + V_{o,r} \cdot (H - z)$$

$$\sigma_z = \frac{N(z)}{A_w} \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot x$$





### Θεωρώντας Μόνο Διατμητική Συμπεριφορά (για απλούστευση των Ελέγχων)

Η  $V_{o,w}$  λαμβάνεται από το γινόμενο:

$$V_{o,w} = \lambda \cdot M_w \cdot \Phi_d(T) = \lambda \cdot (N_{w,o}/g) \cdot \Phi_d(T)$$

όπου,  $N_{w,o}$  το συνολικό αξονικό φορτίο των τοίχων στην βάση (i.e.  $\gamma_w A_w H$ ) και  $T$  η περίοδος. Το  $\lambda$  είναι ο συντελεστής συμμετοχής της μάζας που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο σχήμα ταλάντωσης,  $\Phi$ .

( $\lambda = \Sigma m_i \Phi_i / \Sigma m_j \Phi_j^2$ ) Για τριγωνικό σχήμα,  $\lambda = 1/0.67$

Ροπή λόγω σεισμού

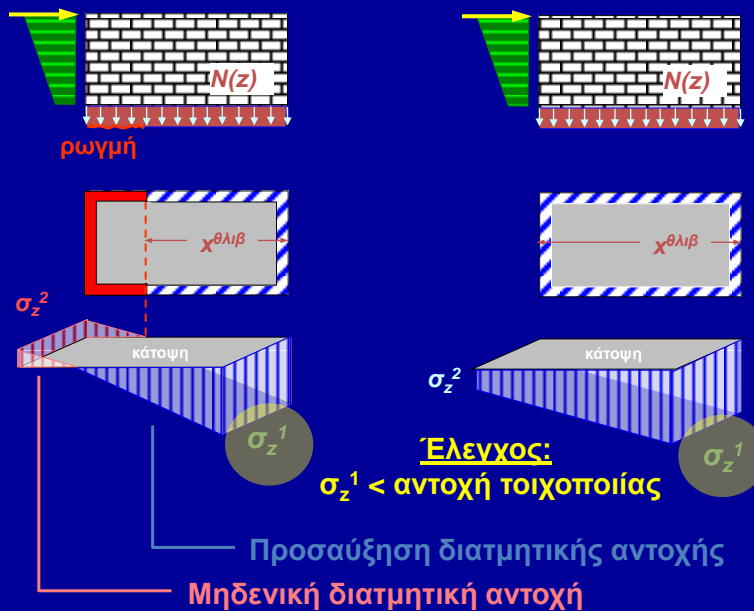
$$M_y = \frac{V_{o,w}}{3H^2} \cdot (2H^3 - 3H^2z + z^3) + V_{o,r}(H - z)$$

Γενικευμένη μάζα:  $M_d = M_w + M_r$

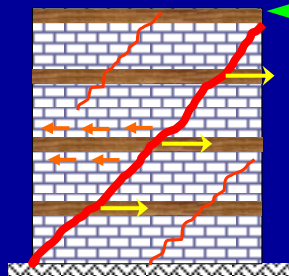
Γενικευμένη δυσκαμψία εντός επιπέδου τοίχου:

$$K_d = E \cdot t / [4 \cdot (h/\ell)^3 + 3(h/\ell)]$$

### Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι



## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι

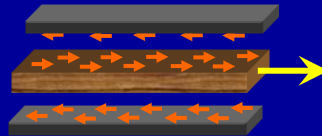


### ΔΙΑΖΩΜΑΤΙΚΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ

$$V_{Rd}^{tot} = V_{Rd} + V_b$$

Συμβολή διαζώματος

Συνάφεια σενάζ -  
κονιάματος



### Αρχικό στάδιο ρηγμάτωσης:

Η Σεισμική Τέμνουσα παραλαμβάνεται από ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΑ + ΔΙΑΖΩΜΑΤΑ

### Προχωρημένο στάδιο ρηγμάτωσης:

τα διαζώματα εξ' ολοκλήρου αναλαμβάνουν την Σεισμική Τέμνουσα

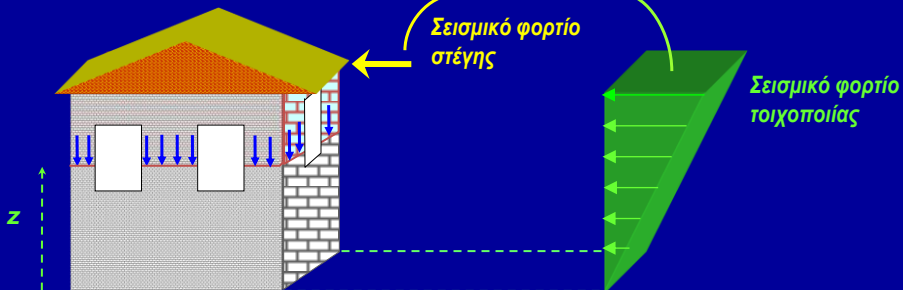
⇒ απώλεια συνοχής διαζώματος - κονιάματος ⇒

Η δύναμη που παραλαμβάνει ο τοίχος < αντοχή διαζώματος

## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι

Σεισμική Τέμνουσα :

$$V_{Sd} < ? > V_{Rd}$$



## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

$$V_{Sd} < V_{Rd}$$

βάρη στέγης και τοιχοποιίας  
γεωμετρία & υλικά  
η θέση της διατομής / κάτοψης  
σεισμική επιτάχυνση

Π.χ. στην κατώτερη στάθμη ( $z=0$ ):

$$V_{o,w} \left[ \frac{1}{A_w} \left( 1 + \frac{\xi}{\lambda} \right) + \frac{xH}{3I_y} \left( 2 + \frac{3\xi}{\lambda} \right) \right] \leq 0.5 \sqrt{f'_t f'_c} + \frac{N_{w,0}(1+\xi) + u_b P_{\sigma \epsilon \nu \alpha \zeta} \sum_{i=1}^n L_{bi}}{A_w}, \quad \sigma_z^{1,2} \geq 0$$

$$\frac{V_{o,w}}{A_w} \left( 1 + \frac{\xi}{\lambda} \right) \leq 0.5 \sqrt{f'_t f'_c} + \frac{u_b P_{\sigma \epsilon \nu \alpha \zeta} \sum_{i=1}^n L_{bi}}{A_w}, \quad \sigma_z^{1,2} \leq 0$$

## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι

### Κριτήρια επάρκειας

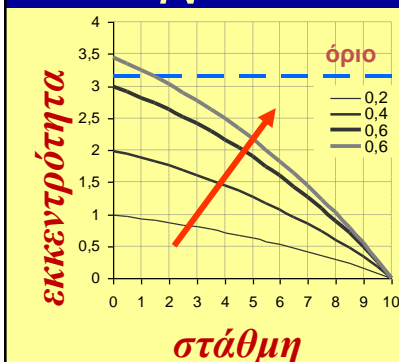
✓ Εκκεντρότητα,  $e$

ταχεία αντίληψη ως προς την  
ανάπτυξη εφελκυσμού

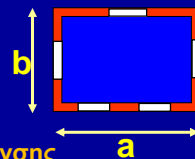
$$e = \frac{M}{N}$$

Αποκλεισμός  
εφελκυσμού

$$\leq \frac{a(a+3b)}{6(a+b)}$$



Όριο εκκεντρότητας  $e = F$  (εμβαδόν  
& ροπή αδράνειας)



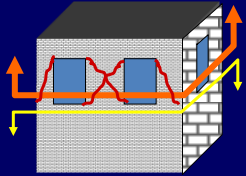
αύξηση εκκεντρότητας:

- ↑↑ φασματικής επιτάχυνσης
- ↑↑ βάρους της στέγης
- ↑↑ φορτίου στέγης ⇒ μεγέθυνση  
κατανομών εκκεντρότητας

## Αξιολόγηση σεισμικής επάρκειας: Στατικοί Έλεγχοι

### Κριτήρια επάρκειας

- ✓ Εκκεντρότητα,  $e$   ταχεία αντίληψη ως προς την ανάπτυξη εφελκυσμού
- ✓ Έλεγχος  $V_{sd} < V_{Rd}$  στις θέσεις ανοιγμάτων



$$V_{sd}(z) = A_w V_{sd} = A_w^{eff} V_{sd}^{eff}$$

μεγέθυνση της διατμητικής σεισμικής τάσης λόγω μείωσης εμβαδού από την παρουσία ανοιγμάτων

$$V_{sd}^{eff} < ? > V_{Rd}$$



Διατμητική αστοχία: διαγώνια ρηγμάτωση