

**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ –  
ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ**

**Σημειώσεις κατά τις  
..... παραδόσεις**

**Α. Ι. Κάππος  
Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

**Θεσσαλονίκη 2012**

**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ – ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ  
(Πέμπτη 2:30-5μμ, αίθ. 513 Υπογ./αίθ. σεμιν. ΕΚΟΣΦΤ)**

	Ημερομηνία	Αντικείμενο	Διδάσκων	Παρατηρήσεις
1.	18/10	Διευκρινήσεις + διανομή <b>Θέματος</b>	Θερμού	
2.	25/10	<b>Στοιχεία Τεχν. Σεισμολογίας:</b> Γένεση σεισμών – κατανομή. Ισχυρή σεισμική κίνηση – καταγραφές. Μέγεθος και ένταση. Σεισμική επικινδυνότητα – διακινδύνευση.	Κάππος	Κεφ. 2 βιβλίου
3.	1/11	<b>Στοιχεία Σεισμικής Μηχανικής:</b> Βασικές έννοιες. Ελαστικά φάσματα απόκρισης. Ανελαστική απόκριση – υστερητική απόδρεψη – πλαστιμότητα.	Κάππος	Κεφ. 3
4.	8/11	Στοιχεία Σεισμικής Μηχανικής: Φάσματα σχεδίασμού. Ανάλυση κτιρίων Ο/Σ για σεισμικές δράσεις. Πλαστιμότητα στοιχείων και φορέων Ο/Σ. <b>Σκυρόδεμα</b> υπό σεισμική φόρτιση - I. <b>Χάλυβας</b> οπλισμών. <b>Συνάφεια</b> υπό σεισμική φόρτιση.	Κάππος	Κεφ. 3 Κεφ. 5
5.	15/11	Σκυρόδεμα υπό σεισμική φόρτιση - II <b>Χάλυβας</b> οπλισμών. <b>Συνάφεια</b> υπό σεισμική φόρτιση.	Κάππος	§5.3, 5.4

6.	22/11	<b>Δοκοί</b> Ο/Σ υπό μονότονη φόρτιση. Δοκοί Ο/Σ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση	Κάππος	§6.2
7.	29/11	Δοκοί Ο/Σ – Υπόβαθρο κανονιστικών διατάξεων αντισεισμικού σχεδιασμού	Κάππος	
8.	6/12	<b>Υποστυλώματα</b> υπό σεισμική φόρτιση	Κάππος	§6.3
9.	13/12	<b>Τοιχώματα</b> Ο/Σ υπό σεισμική φόρτιση. Παλιά θέματα εξετάσεων	Κάππος	§6.5
10.	20/12	<b>Κόμβοι</b> δοκών – υποστυλωμάτων Ο/Σ υπό σεισμική φόρτιση. Υπόβαθρο κανονιστικών διατάξεων αντισεισμικού σχεδιασμού.	Τσώνος	§6.4
11.	10/1/2013	Σεισμική <b>παθολογία</b> .	Τσώνος	Κεφ. 7
12.	17/1	Τεχνολογία υποστυλώσεων – επισκευών-ενισχύσεων 10° κεφάλαιο	Τσώνος	Κεφ. 10
13.		Παραδείγματα <b>επεμβάσεων</b> – Αποδοτικότητα της ενίσχυσης δομικών στοιχείων από Ο/Σ με FRPs	Τσώνος	

# ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ – ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ

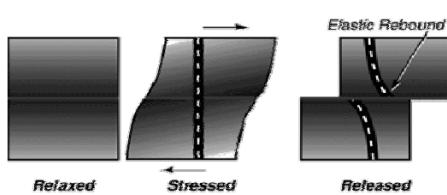
## Στοιχεία Τεχν. Σεισμολογίας

**Α. Ι. Κάππος**  
**Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

**Θεσσαλονίκη 2012**

### 1. Γένεση και γεωγραφική κατανομή σεισμών

- Συσσώρευση τάσεων σε ρήγματα του φλοιού της γης → διάρρηξη
- Πολύ σπανιότεροι οι σεισμοί λόγω εκρήξεων ηφαιστείων
- Θεωρία ελαστικής ανάπτασης (αναπτήδησης): έκλυση ελαστικής (κινητικής) ενέργειας παραμορφώσεως καταμήκος γεωλογικού ρήγματος
- Θεωρία κίνησης **λιθοσφαιρικών πλακών** (που προκαλεί τη συσσώρευση ελαστικής ενέργειας)
- Διάδοση κυμάτων από το σημείο της διάρρηξης



Εγκέλαδος

Ruaumoko  
(N.Zηλανδία)



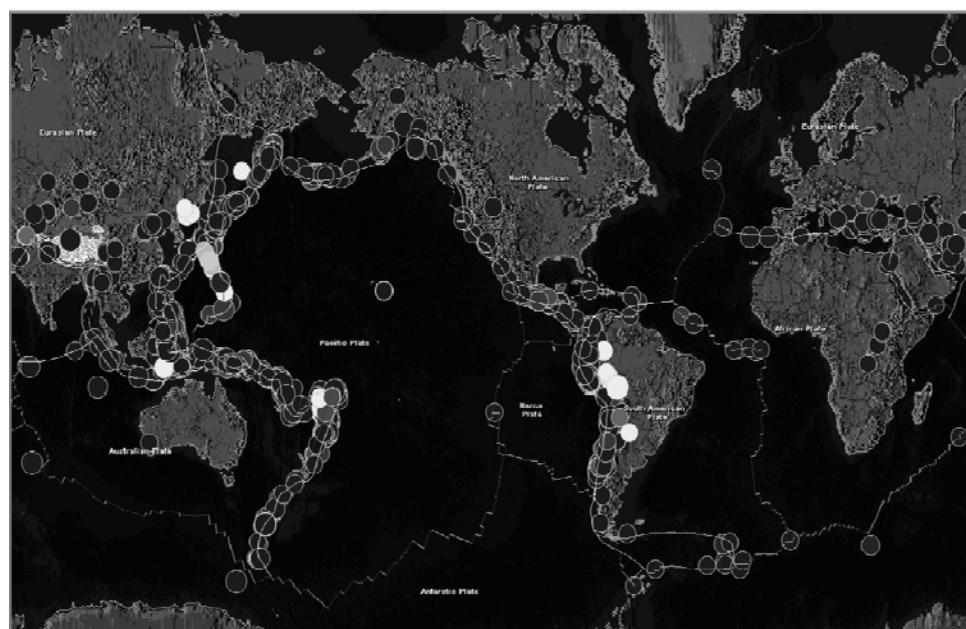
## Γένεση των σεισμών

The image contains two side-by-side screenshots from an educational application about plate tectonics.

**Left Screenshot:** A world map showing plate boundaries. Labeled plates include Eurasian, North American, Cocos, Nazca, South American, African, Arabian, Indian, Pacific, Australian, and Juan de Fuca. A callout box states: "Most earthquakes occur at the plate boundaries." Buttons for "RESTART", "BACK", and "NEXT" are visible, along with the text "3 of 10".

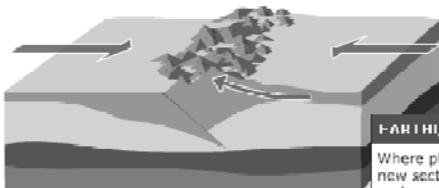
**Right Screenshot:** A diagram showing two rectangular plates converging. One plate is drawn slowly beneath the other, with arrows indicating the direction of movement. A callout box states: "Where plates converge, one plate is drawn slowly beneath the other. This takes place over thousands of years." Buttons for "RESTART", "BACK", and "NEXT" are visible, along with the text "4 of 13".

Όρια λιθοσφαιρικών πλακών – Γεωγραφική κατανομή επικέντρων σεισμών μεγέθους  $M>7$  στην περίοδο 1960-2000



## Γένεση των σεισμών

**EARTHQUAKES** RESTART  
Where plates collide, rock layers are forced upwards creating mountains.



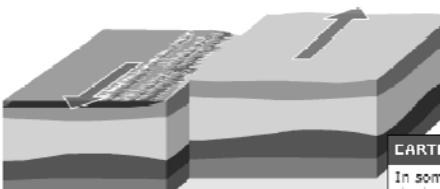
**EARTHQUAKES** RESTART  
Where plates diverge, lava emerges from the mantle and cools to form new sections of crust. Diverging plate boundaries are often found underwater.



**BACK** **5 of 13** **NEXT ▶**

## Γένεση των σεισμών

**CARTIQUAKES** RESTART  
Other plates move very slowly alongside each other. Faults are found at the edges of the plates where the crust is moving in different directions.

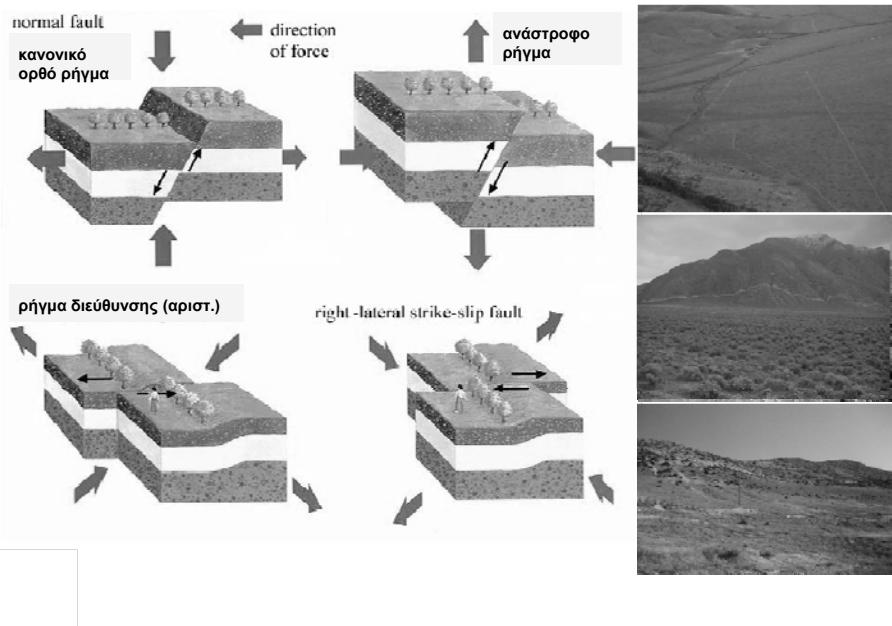


**CARTIQUAKES** RESTART  
In some places the plates become locked together. Energy builds up in the locked plates.

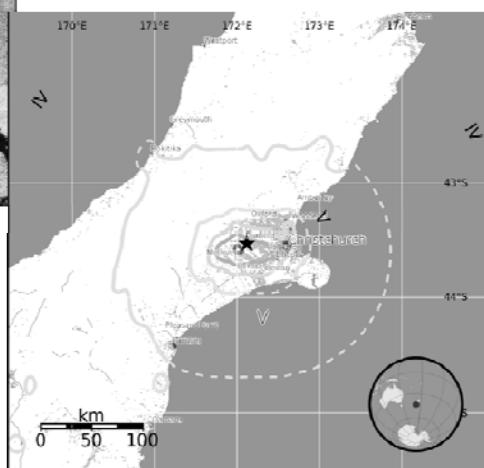


**BACK** **7 of 13** **NEXT ▶**

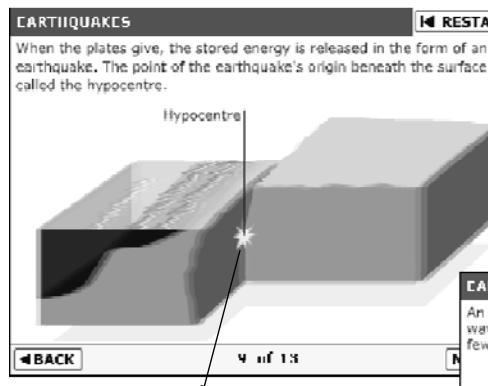
## Γένεση των σεισμών: τύποι διάρρηξης



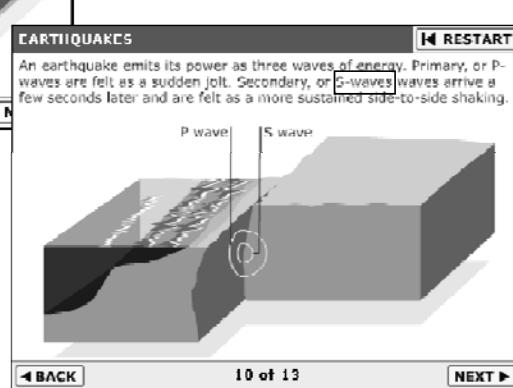
Σεισμός Ν. Ζηλανδίας (South Island)  
3-9-2010, M7.0



## Γένεση των σεισμών

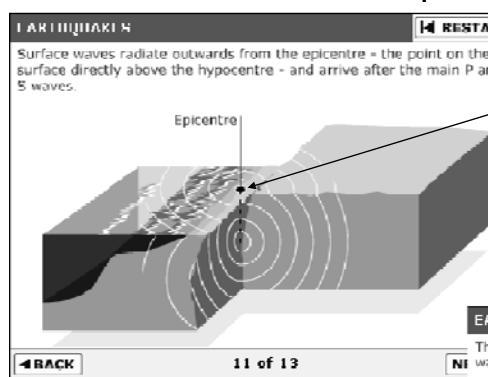


Εστία (υπόκεντρο)

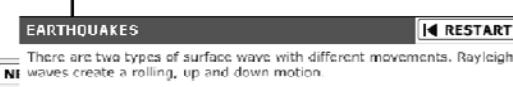


Κύματα P και S

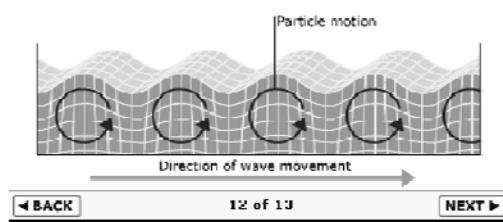
## Γένεση των σεισμών



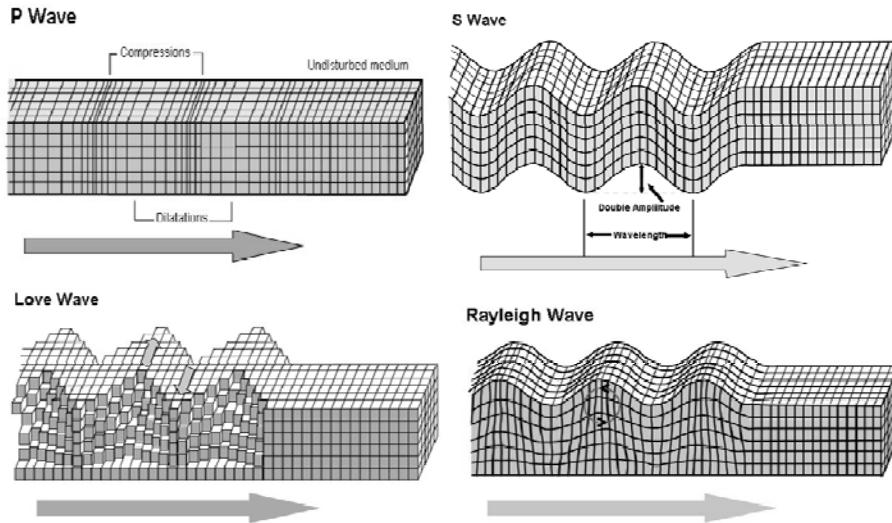
Επίκεντρο



### Επιφανειακά κύματα



## Τύποι σεισμικών κυμάτων



ταχύτητα διατμητικών κυμάτων:  $V_i = \sqrt{G/\rho}$  (σημαντική για ταξινόμηση εδάφους)

## 2. Όργανα καταγραφής σεισμικών κινήσεων

### ❖ Σεισμόμετρα (σεισμογράφοι):

- καταγραφή μετακινήσεων εδάφους  $u_g(t)$ , ακόμη και από μακρινούς σεισμούς
- λειτουργία σε συνεχή βάση
- ενδιαφέρουν κυρίως τους σεισμολόγους (π.χ. επίκεντρα, μέγεθος)

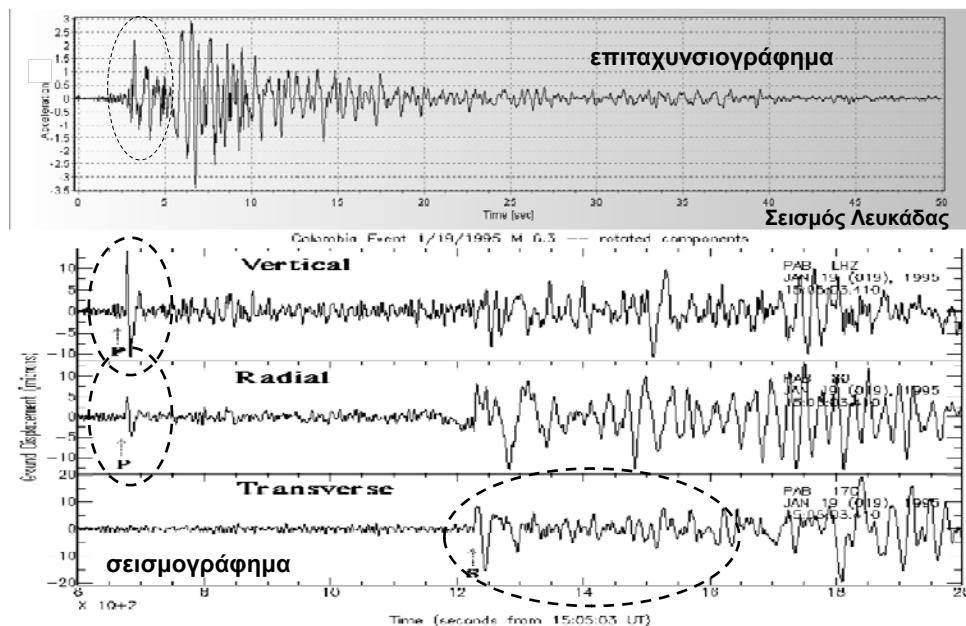


### ❖ Επιταχυνσιόμετρα (επιταχυνσιογράφοι):

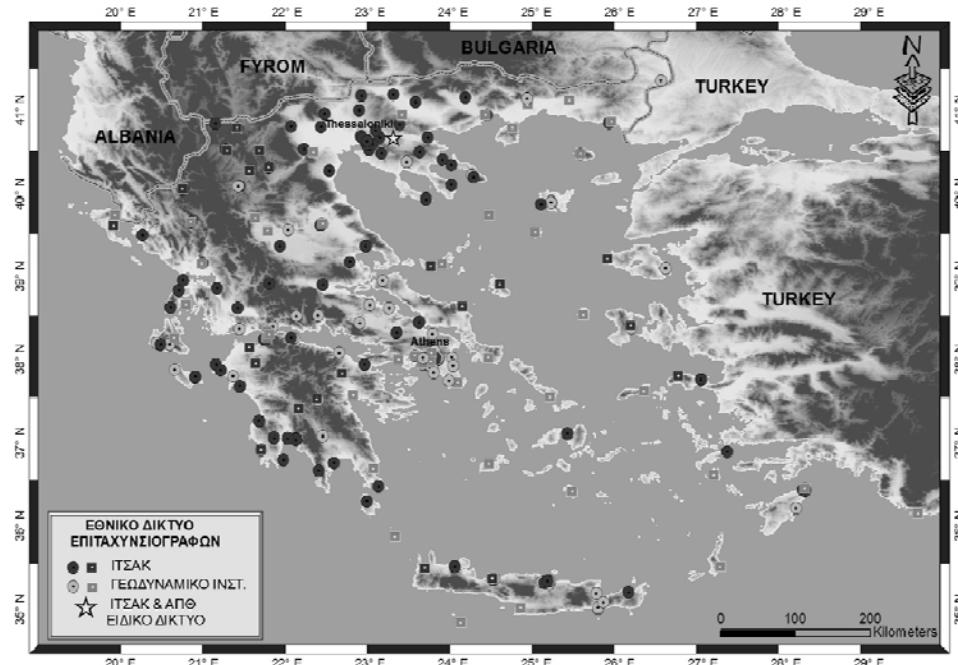
- καταγραφή επιταχύνσεων εδάφους  $a_g(t)$ , αναλογικά (παλιά) ή ψηφιακά (σύγχρονα όργανα)
- διεγείρονται πάνω από προκαθορισμένη τιμή (π.χ. 0.5%g)
  - καταγραφή «ισχυρών κινήσεων» (strong motions)
- ενδιαφέρουν και τον Μηχανικό



## Καταγραφές σεισμικών κινήσεων



2011 Μάρτιος: ΙΤΣΑΚ + ΓΙ ~250 επιταχυνσιογράφοι 'έλευθερου πεδίου'



### 3. Μέτρα του σεισμού: Μέγεθος - Ένταση

#### ❖ Μέγεθος

- το μέτρο (η 'δύναμη') του σεισμού στην πηγή (εστία) του
- συνήθως μετριέται μέσω της **ενέργειας** που εκλύεται
- τοπικό μέγεθος ( $M_L$ ) κατά Richter  $\log E = 11.8 + 1.5M_L$   
→ μοναδιαία αύξηση  $M$  αντιστοιχεί σε ~32-πλάσια ενέργεια!
- άλλα μεγέθη:

➤ επιφανειακό μέγεθος  $M_s$  (επιφανειακών κυμάτων Rayleigh)

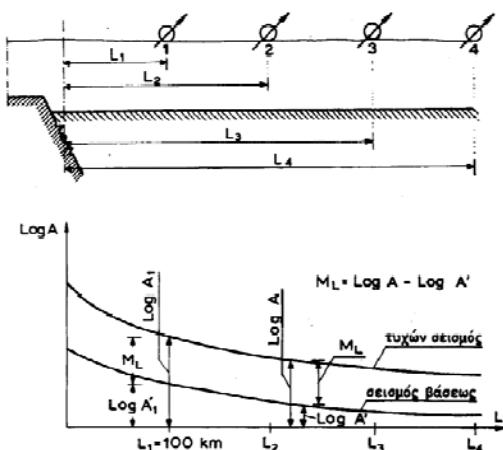
$$M_s = \log \left( \frac{A}{T} \right)_{\max} + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad A: \text{εύρος}, T: \text{περίοδος}$$

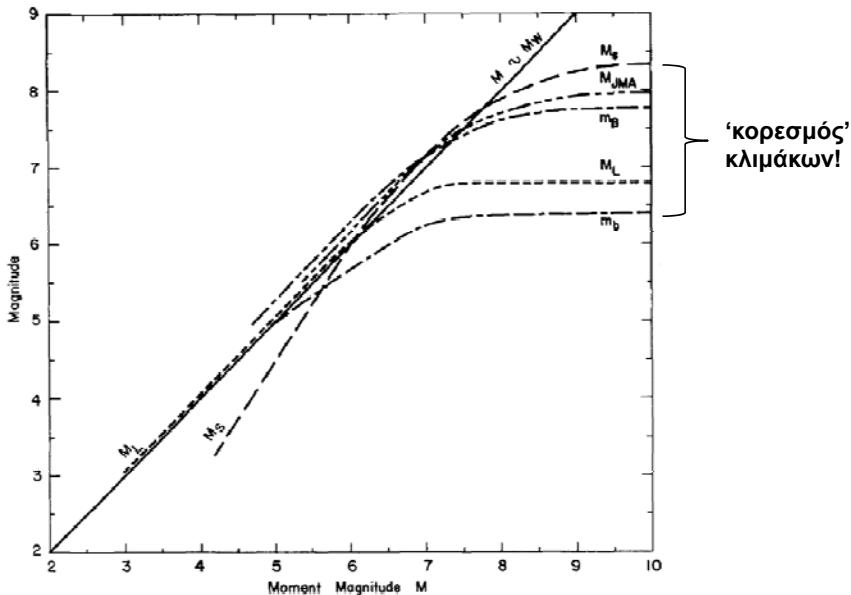
$\Delta: \text{επικεντρική απόσταση}$

➤ σεισμική ροπή  $M_0$ : μέτρο παραμόρφωσης στην πηγή  
(συνάρτηση της ολίσθησης και της επιφάνειας του διάρρηξης)

➤ μέγεθος ροπής  $M_w$  (συνάρτηση  $M_0$ ):  $M_w = 0.67 \log M_0 + 10.7$

Ορισμός:  $M_L = \log A - \log A'$  όπου  $A$  η  $u_g$  του σεισμού (σε  $\mu m$ ) ανηγμένη σε απόσταση 100km, δηλ. αφαιρώντας το  $\log A'$  που ορίζεται ως ο σεισμός που προκαλεί 0.001mm σε απόσταση 100km από την εστία





Σύγκριση του μεγέθους ροπής ( $M_w$ ) με τα υπόλοιπα χρησιμοποιούμενα μεγέθη  
[Heaton et al. 1986]

## Μέτρα του σεισμού: Μέγεθος - ένταση

### ❖ Ένταση

- μέτρο των αποτελεσμάτων του σεισμού (ζημιές, θάνατοι, κλπ.)
- μετριέται με εμπειρικές κλίμακες μακροσεισμικής έντασης, π.χ.
  - Modified Mercalli (MMI ή ορθότερα  $I_{MM}$ ), κυρίως στην Αμερική
  - Medvedev-Sponheur-Karnik ( $I_{MSK}$ ), κυρίως στην Ευρώπη
- όλες είναι δωδεκαβάθμιες (Ι ως XII, ή και 1 ως 12) → **EMS-98**
- ή με παραμέτρους της εδαφικής κίνησης, π.χ. επιταχύνσεις ( $A_g$ )
- κάθε σεισμός έχει ένα μέγεθος, αλλά πολλές εντάσεις!
- γενικώς η ένταση μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την εστία
- σχέσεις εξασθένησης  $\log(A) = b_1 + b_2 M + b_3 \log R + b_4 R + \sigma P$   
 π.χ. για Ευρώπη (Ambraseys-Bommer 1995):  $(R=\Delta)$   

$$\log(A) = -1.09 + 0.238M - \log R - 0.0005R + 0.28P$$
- τα σημεία ίσης έντασης (στο χάρτη) ορίζουν τις ισόσειστες καμπύλες

ΒΑΘΜΟΣ	ΑΙΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
I	Δε γίνεται αισθητός παρό πάνω από πολύ λόγος, ανθρώποις και κόπο από επιδημίας, ουσίων.
II	Γίνεται αισθητός μόνο από λόγος ανθρώπων που βρίσκονται σε στρατική ανάπτυξης.
III	Αρχειο αισθητός μέσα σε κύρια, κυρίως στους κυριαρχούσας ορόφους, αν και πολλοί ανθρώποι δεν την αισθανθήσαν σε αυτήν. Σταθμητέα αγγίματα μπορεί να μετανιωθείν ελαφρά ενώ η δύνηται μείνει μόνιμη με αυτήν που προκαλεί ένα δεργόμενο φερόμενο.
IV	Κατά τη διάρκεια της σήμερας είναι αισθητός από πολλούς ανθρώπους που βρίσκονται μέσα σε κύρια και από πολλούς λόγος που βρίσκονται πάνω. Αν συμβεί καπά τη διάρκεια της γήρας πολλοί διάφοροι έμποροι. Στηρίζομενα στήματα μπορεί να μετανιωθούν ελαφρά ανά ο τοίχων τρίβονται. Σταθμητέα αγγίματα μπορεί να μετανιωθούν αρκετά.
V	Αισθητός από όλους σχεδόν ενώ πολλοί ανθρώποι ξυπνούν από τον ύπνο τους. Πλήνται αναπνοής, παρθύρα, κλπ. απόλευτα ενώ αισθητή αναπνοή αναπρέπεται. Πλήνται δέντρων ή πασσάλων παραπρόμενη πτώση. Εκφερεί φορόδρομα μπορεί να σπαραγώσει.
VI	Αισθητός από όλους που αιθρίωσαν, πολλοί τραυματούνται και σπανδύονται να βγαίνουν από τα κτήρια. Βαριά θανάτων προκαλούνται και κατακρύψη έχουν καρκίνος και γχρόνια. Ελαφρά καταπορροφή.
VII	Οίτη τρέψουν ήδη από τα κτήρια. Αισθητές σε ζημιές σε κτήρια με καλό στρέμματος και καποσκοτικούς και έλαστρες τούβλα, μετρός σε καλά κατασκευασμένα κοινά κτήρια. Στηρίζονται σε ζημιές σε κακές καποσκοτικές, καλακαρηρήσεις και καρκίνος. Αισθητός είδησης από ανθρώπους που οδηγούν οχήματα.
VIII	Ελαφρές ζημιές στα εδώντα κατασκευασμένα κτήρια, αιραντικές στα κοινά κτήρια με μαρμάρινη ουρανίθια, μεγάλες σε ζημιές στα μικρά καποσκοτικά. Πλήνται καρκίνων οικιών ή και εργοστάσιων, μετρόν, άλλων. Βαριά θανάτων προκαλούνται. Εκσερνίσεις αφρού και λάσπης σε μηριές ποσότητας από το έδαφος. Άλληγα της στιθμής των οικισμών στη γηγενή. Ο απορρός πυρπόλης άμεσα δίστας αισηγούνται σήματα.
IX	Καταστρόφρονται μερικά καλά κατασκευασμένα έδαντα κτήρια, ενώ πολλές καλοσχεδιασμένες καποσκοτικές ξερεύγουν από το δούριο τους οικέτες. Πολύ μεγάλες σε ζημιές που συνοδεύονται από πορώσια καταρρέουν στα κοινά κτήρια. Οι καποσκοτικές φράγμες από τα θερμά που, Εδαφικές ρωγμές, διεριθρίζονται και καταπορροφούνται μεγάλους στρατών.
X	Καταστρόφρονται μερικά καλά κατασκευασμένα έδαντα κτήρια, ενώ σι περισσότερες λήνθες καποσκοτικές καποσκοτικές φράγμες από τα θερμά. Μεγάλες ελαφρείς ρωγμές. Οι οιδηροδρομικές γραμμές κάμπτονται και σπαραγκικές καποσκοτικές λαρβάνονται τούρβα. Αποθήκες, άμφου και λίστων μεγακούνται και το τέρος συνα κοίτες που ποτοφόρονται υπερχαλάνει.
XI	Πολύ λίγες ή και καθόλου λήνθες καποσκοτικές στεκάσται ορθές. Γέρνεται καταπορρόφηση. Πολύ μεγάλες ρωγμές στο έδαφος, ενώ όλα οι υπόγειους αγωγοί καταστρέφονται ωσσερές.
XII	Η καταπορρόφηση είναι άλλα. Η επικράτεια του εδαφικού σηματάζει κάτισμα. Λαίρορα συντείνεται στον άρρεν.

→ Έναρξη Βλαβών  
κτιρίων

### Τροποποιημένη κλίμακα μακροσεισμικής έντασης Mercalli (MMI)

## Σύγκριση μακροσεισμικών κλιμάκων

Earthquake Intensity Scales					
MM	Descriptive term	Acceleration	EMS	RF	JMA
1956		% g	1992	1883	1951
I	Imperceptible	<0.1	II	II	
II	Very slight	0.1-0.2		III	I
III	Slight	0.2-0.5		III	
IV	Moderate	0.5-1	IV	IV	II
V	Rather strong	1-2	V	V	III
VI	Strong	2-5	VI	VI	IV
VII	Very strong	5-10	VII	VII	
VIII	Destructive	10-20	VII	VIII	V
IX	Devastating	20-50	VIII	IX	
X	Annihilating	50-100 (~ 1g)	IX	X	VI
XI	Disaster	1-2 g	XI	X	
XII	Major disaster	>2 g	XII		VII

MM: 1956 Modified Mercalli  
 EMS: 1992 European Macroseismic Scale (Improvement of Medvedev-Sponheuer-Ka  
 RF: 1883 Rossi-Forel  
 JMA: 1951 Japan Meteorological Agency

NATHAN  
WORLD MAP OF NATURAL HAZARDS

Ημερομηνία	Ώρα	φ°Ν	λ°Ε	Εστιακό βάθος	Μέγεθος	Μέγιστη μακροσεισμική ένταση
11 Αυγούστου 1903	04:32	36.0	23.0	80	7.9	XI στα Μητάτα Κυθήρων
11 Αυγούστου 1904	06:08	37.7	26.9	5	6.9	X στη Σάμο
8 Νοεμβρίου 1905	22:06	40.3	24.4	5	7.5	X στον Άθω
24 Ιανουαρίου 1912	16:23	38.1	20.8	5	6.8	X στον Ασπρογέρακα Κεφαλληνίας
26 Ιουνίου 1926	19:46	36.5	27.5	100	8.0	XI στον Αρχάγγελο Ρόδου
14 Φεβρουαρίου 1930	18:38	36.5	24.5	130	6.7	X στην Αϊτάνια
26 Σεπτεμβρίου 1932	19:20	40.5	23.9	5	7.0	X στην Ιερισσό
30 Ιουλίου 1944	04:01	36.7	22.5	5	5.9	X στον Κάμπο
12 Αυγούστου 1953	09:23	38.2	20.6	5	7.2	X+ στο Αργοστόλι
5 Απριλίου 1965	03:13	37.7	22.0	34	6.1	X στην Απιδίτσα (Χωρέμη) Αρκαδίας
13 Σεπτεμβρίου 1986	17:41	37.1	22.2	28	6.0	X στην Καλαμάτα

Μεγαλύτερες μακροσεισμικές εντάσεις στον ελληνικό χώρο (ΠΙ-ΕΑΑ, 2011)

[http://www.gein.noa.gr/Greek/web\\_macro/int1list1.htm](http://www.gein.noa.gr/Greek/web_macro/int1list1.htm)

## Μέτρα του σεισμού: Μέγεθος - ένταση

- ❖ **Σύγχρονες κλίμακες μακροσεισμικής έντασης – EMS**
  - Οι βαθμοί της κλίμακας ορίζονται με βάση:
    - A. τα αποτελέσματα του σεισμού στους ανθρώπους
    - B. τα αποτελέσματα του σεισμού στα αντικείμενα και στη φύση
    - C. τις βλάβες των κτιρίων (διάφορες κατηγορίες τρωτότητας!)
  - π.χ. βαθμός VI (ελαφρά καταστροφικός σεισμός):
    - A. Αισθητός απ'όλους τους ανθρώπους μέσα σε σπίτια και από τους περισσότερους στο δρόμο. Πολλοί άνθρωποι τρομοκρατούνται και τρέχουν έξω από τα σπίτια τους
    - B. Πολλά αντικείμενα μπορεί να πέσουν και έπιπλα να μετακινηθούν. Μεμονωμένες περιπτώσεις θραύσης πιάτων και υαλικών. Τα ζώα (ακόμη και έξω στην ύπαιθρο) μπορεί να νιώσουν φόβο.
    - C. Βλάβη βαθμού 1 σε πολλά κτίρια κατηγορίας τρωτότητας A και B. Λίγα κτίρια κατηγορίας A και B υφίστανται βλάβη βαθμού 2. Λίγα κτίρια κατηγορίας C υφίστανται βλάβη βαθμού 1.

Type of Structure	Vulnerability Class A B C D E F
MASONRY	O
	O
	HO
	HOH
	HOH
	HOH
REINFORCED CONCRETE (RC)	HOH
	HOH
STEEL	HOH
WOOD	HOH

ACCORD PARRIÉ OUVERT  
en matière de prévention de la protection et  
d'organisation des secours contre les risques naturels  
et technologiques

CONSEIL DE L'EUROPE  
Cahiers  
du Centre Européen  
de Géodynamique  
et de Séismologie

Volume 15



European Macroseismic Scale 1998  
Editor  
C. MURRAY HALL  
London 1998

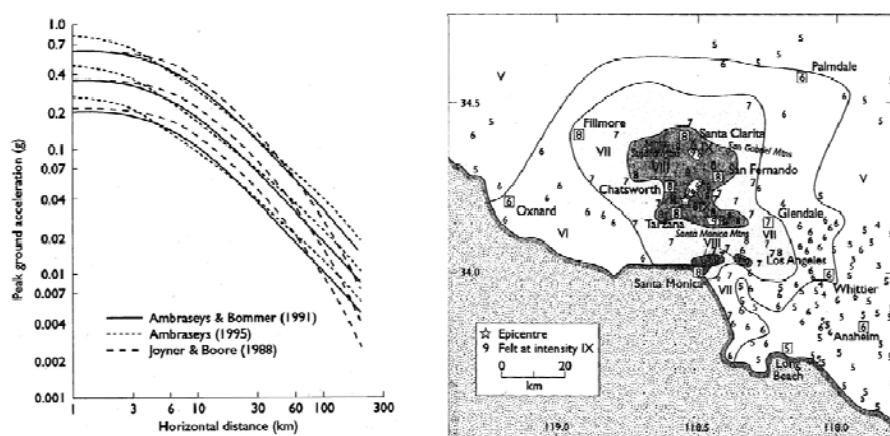
## Κατηγορίες τρωτότητας κτιρίων στην EMS

	<b>Grade 3: Substantial to heavy damage</b> (moderate structural damage, heavy non-structural damage) Cracks in columns and beam-column joints of frames at the base and at joints of coupled walls. Spalling of concrete cover, buckling of reinforced rods. Large cracks in partition and infill walls, failure of individual infill panels.
	<b>Grade 4: Very heavy damage</b> (heavy structural damage, very heavy non-structural damage) Large cracks in structural elements with compression failure of concrete and fracture of rebars; bond failure of beam reinforced bars; tilting of columns. Collapse of a few columns or of a single upper floor.
	<b>Grade 5: Destruction</b> (very heavy structural damage) Collapse of ground floor or parts (e. g. wings) of buildings.

Παραδείγματα ορισμού βαθμών βλάβης στην EMS (κτίρια Ο/Σ)

Di	Damage description <sup>a</sup>	Scheme	Example
D1	Negligible to slight Hair-line cracks in very few walls. Fall of small pieces of plaster Fall of loose stones from upper parts of buildings in very few cases.		
D2	Moderate Cracks in many walls. Fall of fairly large pieces of plaster. Partial collapse of chimneys.		
D3	Substantial to heavy Large and extensive cracks in most walls. Roof tiles detach. Chimneys fracture at the roof line; failure of individual non-structural elements (partitions, gable walls).		
D4	Very heavy Serious failure of walls; partial structural failure of roofs and floors.		
D5	Destruction	not observed	

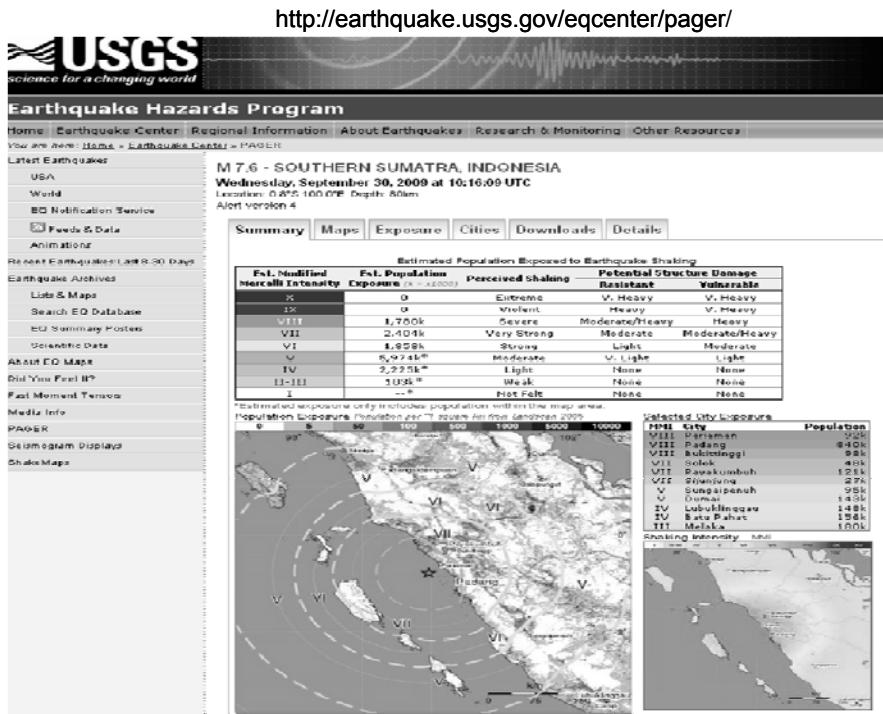
Παραδείγματα ορισμού βαθμών βλάβης στην EMS  
(κτίρια από τοιχοποιία) [Schwarz et al. 2008]



- Σύγκριση σχέσεων εξασθένησης για την PGA στην Ευρώπη και τη ΒΔ Αμερική για επιφανειακούς σεισμούς με  $M = 5, 6$ , και 7
- Κατανομή εντάσεων ( $I_{MM}$ ) στην επικεντρική περιοχή του σεισμού του Northridge, Calif. (1994)

PERCENTILE	No felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate-Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(g/s)	<0.17	.17-1.1	1.1-3.0	3.0-9.2	9.2-18	18-31	31-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/pager/>



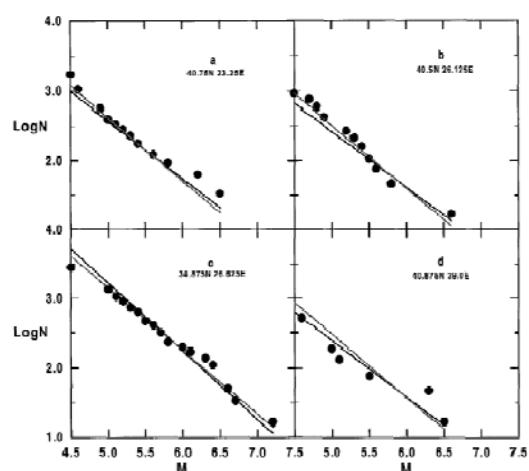
## 4. Σεισμικότητα και σεισμική επικινδυνότητα

### ❖ Σεισμικότητα (seismicity)

- η εμφάνιση σεισμών 'εν χώρω' και 'εν χρόνω'
- μετρική που αυξάνει τόσο με το μέγεθος, όσο και με τη συχνότητα των σεισμών σε μια περιοχή
- προκύπτει από στατιστική επεξεργασία καταλόγων σεισμών
- συνηθέστερη έκφραση της σεισμικότητας: στατιστικός νόμος Gutenberg-Richter [1944]

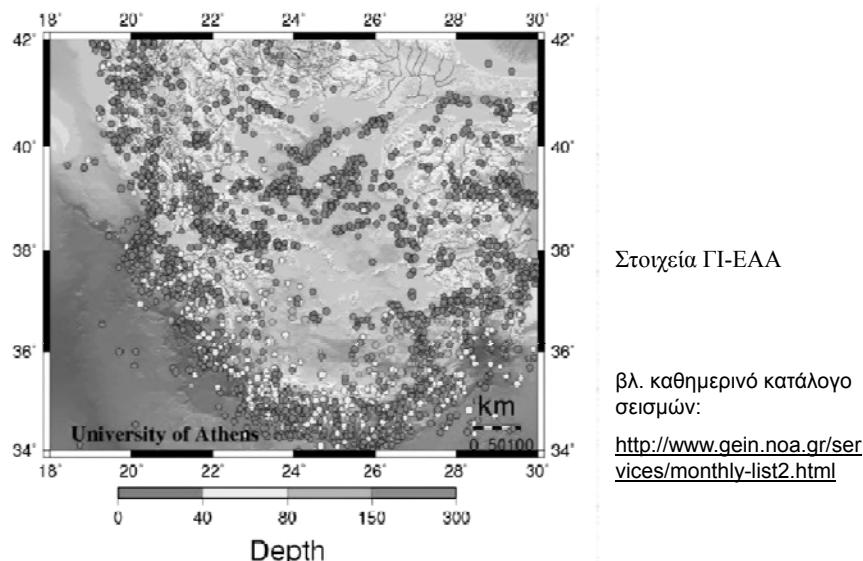
$$\log N = a - b \cdot M$$

➤ π.χ. για τον ελληνικό χώρο:  
 $a \approx 6.0$ ,  $b \approx 0.9$



C. Papazachos, BSSA 1999

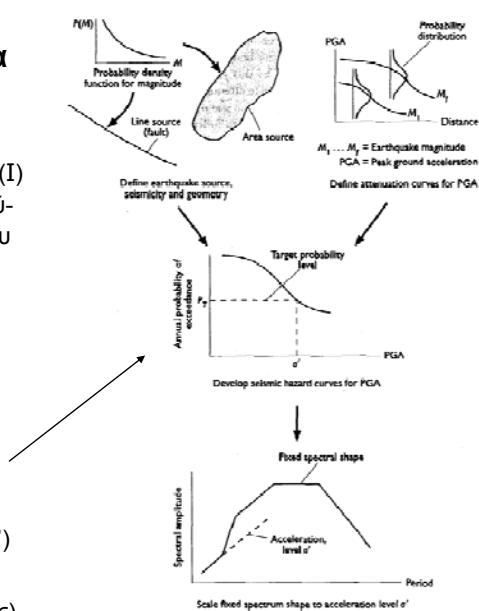
## Σεισμοί με $M > 4.5$ στον Ελληνικό χώρο (περίοδος 1964 – 2008)



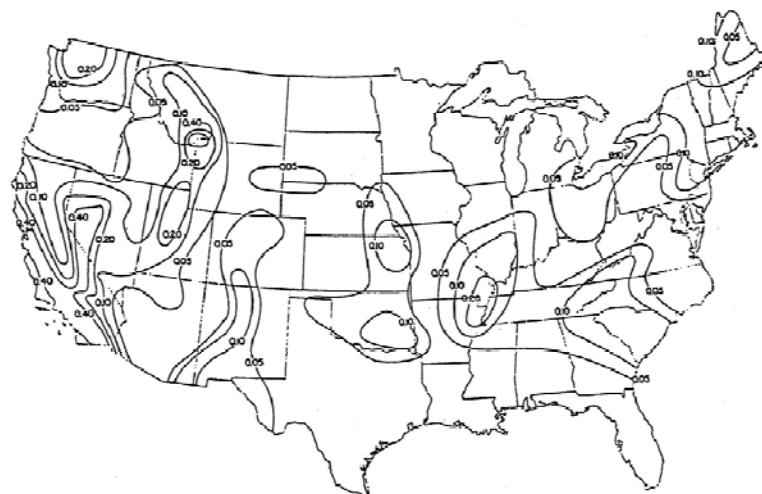
### ❖ Σεισμική επικινδυνότητα (seismic hazard)

- πιθανότητα ( $p$ ) να παρατηρηθεί σε μια περιοχή ('ζώνη') ένταση ( $I$ ) ή επιτάχυνση (PGA ή A) μεγαλύτερη μιας τιμής, εντός ορισμένου χρόνου, π.χ. 10%/50 έτη
- είναι η κατεξοχήν παράμετρος που ενδιαφέρει το Μηχανικό, καθόσον αποτελεί τη βάση του φάσματος σχεδιασμού
- πιθανοτική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard assessment)
- μοντέλο Poisson ('χωρίς μνήμη',  

$$p = 1 - e^{-t_d N}$$
 ( $t_d$ : χρόνος ζωής,  
 $N$ : αριθ. σεισμών/έτος))



## Χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας



PGA με πιθανότητα υπέρβασης 10%/50 έτη στις ΗΠΑ (κανονισμός NEHRP 1994)



Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδος (ΕΑΚ 2003)

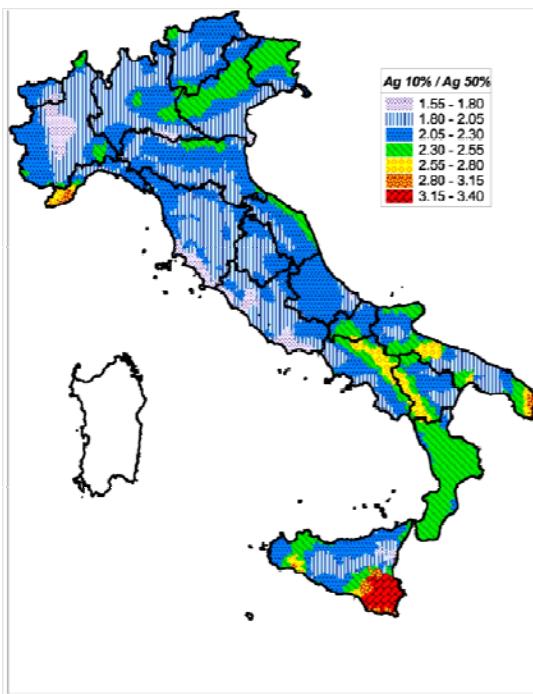


Figure 1. Ratio between  $a_g$  relatives to return periods of 475 years and 72 years (as to say  $a_g$  having a probability of exceedance of 10% and 50% in 50 years) in Italy

Διαφορετικές πιθανότητες

υπέρβασης για σεισμό

ελέγχου:

- ΟΚΑ (συνήθως 10%/50έτη)
- ΟΚΛ (40-50%/50έτη)

→ ο λόγος των δύο δεν είναι σταθερός!

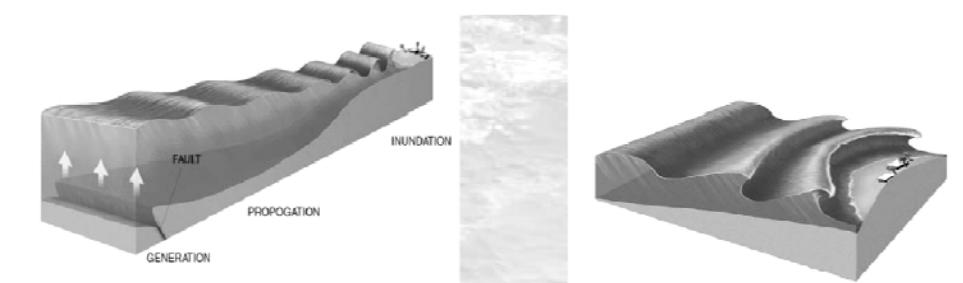
## Αίτια σεισμικών βλαβών

- ❖ Τεκτονικές παραμορφώσεις (τοπικά)
- ❖ Αστοχία εδάφους
  - ρευστοποίηση, διαφορική συμπύκνωση, κατολισθήσεις
- ❖ Ταλαντώσεις που μεταφέρονται στην κατασκευή →  $a_g(t)$
- ❖ Παλιρροιακά κύματα (tsunamis)
- ❖ Παρεπόμενα φαινόμενα, π.χ.
  - πυρκαγιές, κατολισθήσεις, παλίρροιες λόγω αστοχίας φραγμάτων
  - Κατά κανόνα, οι Κανονισμοί εξαντλούνται στο θέμα της αντιμετώπισης των συνεπειών της ταλάντωσης!
  - Ορισμένοι απ' τους άλλους παράγοντες λαμβάνονται υπόψη έμμεσα (π.χ. επιλογή περιοχής ανέγερσης κτιρίου)



Κατολίσθηση λόγω του σεισμού του Khait (1949) στο Tajikistan

Δημιουργία tsunami λόγω διάρρηξης υποθαλάσσιου ρήγματος



απότομη ώθηση του νερού λόγω  
της κατακόρυφης μετακίνησης  
του ρήματος  
→ δημιουργία κύματος

καθώς το κύμα διαδίδεται (προς  
την ακτή (χαμηλότερα βάθη  
πυθμένα), η αυξημένη ενέργεια του  
οδηγεί σε αύξηση του ύψους του



tsunami της Sumatra (2004):  
αεροφωτογραφίες αεροδρομίου Male πριν και μετά

39

## Σεισμική επικινδυνότητα, τρωτότητα και σεισμική διακινδύνευση

### **Σεισμική Επικινδυνότητα (*Seismic Hazard - SH*):**

Είναι η μέγιστη αναμενόμενη τιμή μιας σεισμικής παραμέτρου για δεδομένη περίοδο επανάληψης ή για συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης και συγκεκριμένο χρονικό διάστημα

### **Τρωτότητα (*Vulnerability - V*):**

Η πιθανότητα μια κατασκευή να υποστεί μια συγκεκριμένη στάθμη βλάβης για δεδομένη στάθμη σεισμικών δυνάμεων.

### **Σεισμική Διακινδύνευση (*Seismic Risk - SR*):**

Η στάθμη απώλειας ή βλάβης που σχετίζεται με μια ομάδα κατασκευών οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε συγκεκριμένη στάθμη σεισμικής επικινδυνότητας, δοθείσας της τρωτότητάς τους.

$$SR = V * SH$$

## ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ – ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ

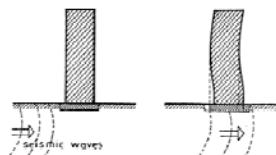
### Στοιχεία Σεισμικής Μηχανικής – Σεισμικές Δράσεις Σχεδιασμού

**Α. Ι. Κάππος**  
**Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

**Θεσσαλονίκη 2012**

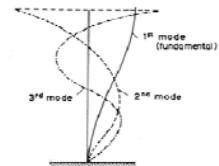
#### 1. Βασικές έννοιες

- Η ένταση στην κατασκευή προκαλείται από την (εξαναγκασμένη) ταλάντωσή της λόγω διέγερσης της βάσης της ( $\leftrightarrow$  εισαγωγή ενέργειας)
- Ο Μηχανικός διαστασιολογεί την κατασκευή έτσι ώστε να εκλύει τη σεισμική ενέργεια (υστερητική απόσβεση) χωρίς υπερβολική βλάβη
- Συνήθεις απαιτήσεις (και υπό στατική φόρτιση)
  - Αντοχή, δυσκαμψία
- Πρόσθετη απαίτηση (για σεισμική φόρτιση):
  - Ικανότητα απορρόφησης και έκλυσης (κατανάλωσης) ενέργειας (energy absorption & dissipation)
- Ισοδυναμία ιξώδους και υστερητικής απόσβεσης  $\rightarrow \zeta_{\text{eff}}$
- Κύρια χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης:
  - max επιτάχυνση (PGA), ταχύτητα PGV, μετακίνηση PGD
  - προέχουσα ιδιοπερίοδος ( $T_g$ ), διάρκεια ισχυρής κίνησης ( $t_{\text{eff}}$ )

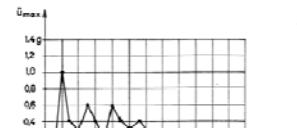
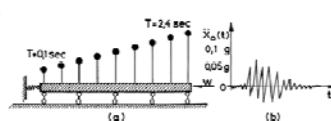


## 2. Δυναμική απόκριση μονοβάθμιων συστημάτων

- Συνηθέστερη μέθοδος της Δυναμικής των Κατασκευών:
  - Ιδιομορφική φασματική ανάλυση (modal spectral analysis)
- Βασικές έννοιες της Σεισμικής Μηχανικής:
  - Ιδιομορφές και ιδιοπερίοδοι ταλάντωσης
  - Φάσματα απόκρισης ( $\Rightarrow$  φάσματα σχεδιασμού)
- Η σεισμική απόκριση ενός φορέα μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστό το φάσμα του σεισμού και οι ιδιομορφές του φορέα
- Σε πολλές κατασκευές (π.χ. κτίρια Ο/Σ μικρού ή μέσου ύψους) λίγες ιδιομορφές ( $2 \div 3$ ) αρκούν για τον υπολογισμό της απόκρισης
- Ακόμη και σε ψηλά κτίρια Ο/Σ η θεμελιώδης ιδιομορφή συνεισφέρει συνήθως  $>80\%$  της απόκρισης (σε κάθε διεύθυνση)
  - Πολύ σημαντικός ο γρήγορος υπολογισμός της απόκρισης μονοβάθμιων συστημάτων ( $\Rightarrow$  φάσματα)

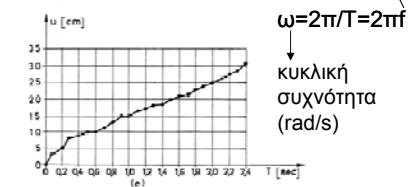
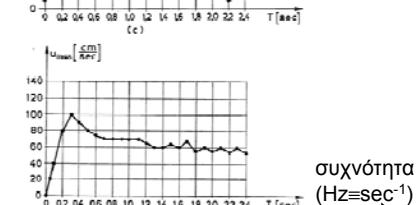


### Φάσματα απόκρισης

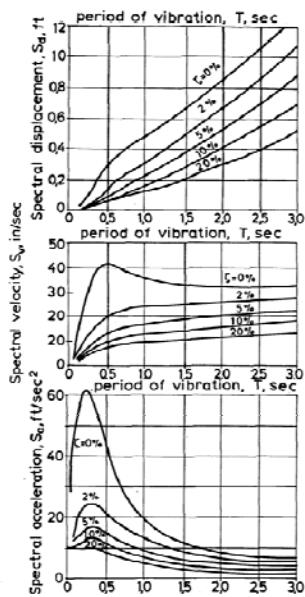


- ❖ Φάσμα απόκρισης = μέγιστη απόκριση μονοβάθμιων ταλαντωτών, με  $T=2\pi(m/k)^{1/2}$ , απόσβεση  $\zeta$ , σε δεδομένη σεισμική διέγερση

- ❖ Φάσματα:  $m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$
- (ψευδο)επιταχύνσεων  $S_{pa} \approx \text{max } \ddot{u}$  ( $\leftrightarrow$  αδρανειακή δύναμη  $m \cdot S_{pa}$ )
- (ψευδο)ταχυτήτων  $S_{pv} = S_{pa}/\omega$  ( $\leftrightarrow$  κινητική ενέργεια  $\frac{1}{2}m \cdot S_{pv}^2$ )
- μετακινήσεων  $S_d = S_{pa}/\omega^2$  ( $\leftrightarrow$  ενέργεια παραμόρφωσης  $F \cdot S_d$ )



συχνότητα  
( $\text{Hz} \equiv \text{sec}^{-1}$ )  
 $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$   
κυκλική συχνότητα  
( $\text{rad/s}$ )



## Φάσματα απόκρισης – συνέχεια

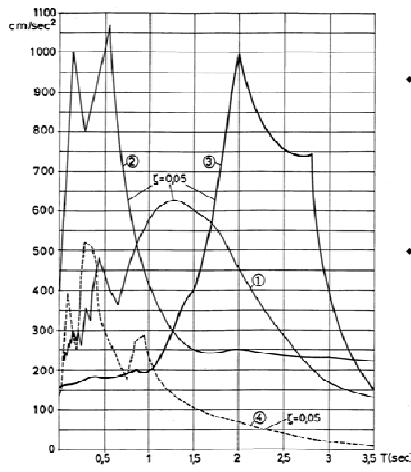
- ❖ Η φασματική απόκριση μειώνεται με την απόσβεση:

$$S_a(\zeta \neq 5\%) = \sqrt{\frac{7}{(2 + \zeta)}} \cdot S_a(5\%)$$

$$\text{EC8: } \sqrt{\frac{10}{(5 + \zeta)}}$$

- ❖ Φασματική ενίσχυση (της PGA) ως και ~6 (ανάλογα με έδαφος και απόσβεση), <1 για μεγάλες T ( $>>T_g$ )
- ❖ Η φασματική ενίσχυση είναι μέγιστη όταν  $T \approx T_g$  (συντονισμός)

## Φάσματα απόκρισης – συνέχεια

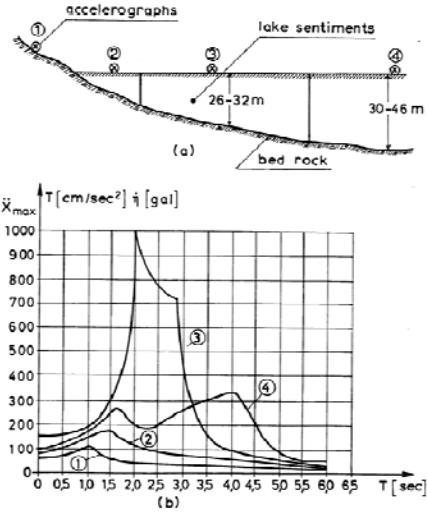


1. Βουκουρεστίου 1977
2. El Centro 1940
3. Mexico City 1985
4. Βόλβης 1978

- ❖ Σεισμοί μικρού βάθους (<60km), ο κανόνας στην Ελλάδα:  $T_g \approx 0.2 \div 0.4$  sec
  - πλήγτονται περισσότερο τα χαμηλά κτίρια (π.χ. μονώροφα ως 4-ώροφα)
- ❖ Σεισμοί μεγάλου βάθους (70÷300km), π.χ. Βουκουρεστίου 1997 (90km), ή μεγάλης απόστασης (π.χ. Μεξικού 1985) σε συνδυασμό με μαλακό έδαφος:  $T_g \approx 1 \div 2$  sec
  - πλήγτονται περισσότερο τα ψηλά κτίρια (π.χ. 10-ώροφα ως 20-ώροφα)

## Φάσματα απόκρισης – συνέχεια

- ❖ Μαλακότερα εδάφη  $\Rightarrow$   
μεγαλύτερες  $T_g \Rightarrow$  μετατόπιση  
φάσματος προς τα δεξιά
- πλήττονται περισσότερο τα ψηλά  
κτίρια
- αντίστροφα για σκληρά εδάφη

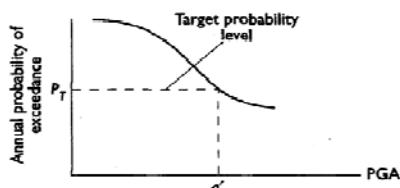


Σεισμός Μεξικού 1985: Επιρροή του εδάφους  
(μαλακή άργιλλος) στα φάσματα

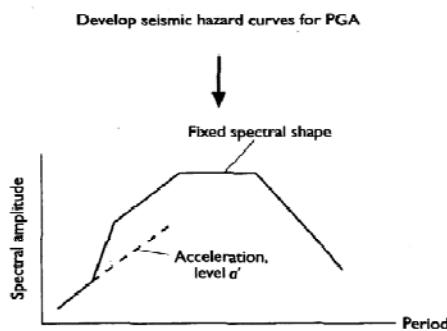
### ❖ Σύγκριση / αναγωγή σεισμικών διεγέρσεων

- μέγιστη επιτάχυνση εδάφους  $PGA \equiv S_a(T=0)$
- μέγιστη ταχύτητα (PGV) ή μετακίνηση εδάφους (PGD)
- ένταση Arias  $f(\zeta) [\bar{u}_g(t)]^2 dt$  ή  $\frac{\pi}{2\theta} [\bar{u}_g(t)]^2 dt$   
→ χρήσιμο μέγεθος, ανεξάρτητο της κατασκευής
- φασματική ένταση:  $SI = \int_{T_1}^{T_2} S_{pv}(T, \zeta) dT$   
(Housner:  $T_1=0.1s$ ,  $T_2=2.5s$ )  
→ χρήσιμο μέγεθος, εξαρτάται από την κατασκευή ( $T$ ,  $\zeta$ )
- τα επιταχυνσιογραφήματα μπορεί να αναχθούν σε κοινή ένταση  
βάσει μιας από τις ανωτέρω παραμέτρους
  - PGA: καλή μόνο για μικρές τιμές  $T$  (κατασκευής)
  - PGV, SI: καλές για μέσες και μεγάλες  $T$

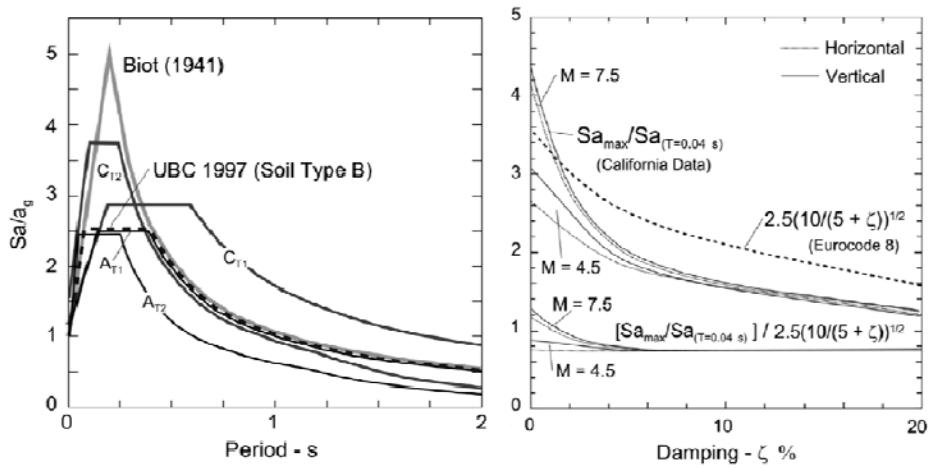
Ημερομ.	Ώρα	LAT	LONG	M	Κωδικός καταγραφ.	MP	$A_g$ (cm/sec <sup>2</sup> )	SI (m)	αναγωγή
110783	124129	38.09	20.19	6.9	arg83-1	L	173.3	0.2427	1.252
				6.9	arg83-1	T	142.5	0.3090	0.983
032383	235106	38.33	20.22	6.2	arg83-7	L	179.8	0.1682	1.806
				6.2	arg83-7	T	219.2	0.2479	1.226
032483	041732	38.18	20.32	5.4	arg183-8	L	240.1	0.0782	3.886
				5.4	arg183-8	T	285.3	0.1302	2.334
091386	172434	37.03	22.2	5.9	kal186-1	L	229.3	0.9623	0.316
				5.9	kal186-1	T	263.9	0.8903	0.341
091586	114130	37.04	22.13	5.4	kal186-8	L	233.8	0.5322	0.571
				5.4	kal186-8	T	137.1	0.2517	1.207
				5.4	kal286-2	L	159.5	0.3134	0.969
				5.4	kal286-2	T	254.3	0.6013	0.505
051595	041357	40.07	21.67	5.2	chrom013	L	157	0.0705	4.311
				5.2	chrom013	T	132.1	0.0511	5.948
051795	041426	40.07	21.61	5.2	chrom032	L	116.7	0.1206	2.520
<b>Ελληνικές καταγραφές (ΙΤΣΑΚ) σε έδαφος Β</b>									
				5.2	chrom032	T	130.3	0.1212	2.508



Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού



Το φάσμα σχεδιασμού προκύπτει με αναγωγή ενός σταθερού (...) σχήματος στην επιτάχυνση που δίνει η καμπύλη σεισμικής επικινδυνότητας



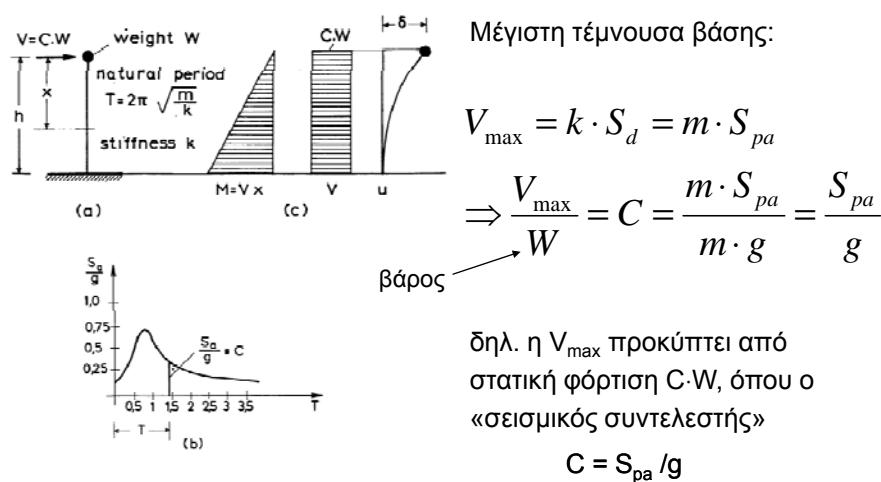
Φάσματα Ευρωκώδικα 8 (T1 και T2) για εδάφη Α και Κ: Σύγκριση με αμερικανικό UBC και με 'ιστορικό' φάσμα Biot

Σύγκριση συντελεστών φασματικής ενίσχυσης (2.5) και απόσβεσης ( $\zeta$ ) του Ευρωκώδικα 8 με αμερικανικά δεδομένα ( $S_{a(0.04s)} \approx PGA$ )

Μορφή φασμάτων σχεδιασμού

[Trifunac 2011]

## «Στατικοποίηση» του δυναμικού προβλήματος



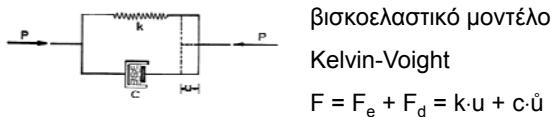
### 3. Δυναμική απόκριση ανελαστικών μονοβάθμιων συστημάτων

❖ Οι κατασκευές υπολογίζονται (κατά κανόνα) για δυνάμεις πολύ μικρότερες αυτών που προκύπτουν από το ελαστικό φάσμα ( $S_{pa}$ )

- πού στηρίζεται αυτή η «αυθαιρεσία»;;
- στο ό,τι οι σεισμικές δυνάμεις για ανελαστική συμπεριφορά μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερες!
- ανελαστικά φάσματα απόκρισης, ή  $m\ddot{u} + c\dot{u} + \bar{k}(t)u = -m\ddot{u}_g(t)$
- φάσματα για αυξημένη (ισοδύναμη) απόσβεση

❖ Ιξώδης απόσβεση (σπανιότατη στις κατασκευές Πολ. Μηχανικού):

- δύναμη απόσβεσης:  $F_d = c \cdot (du/dt) = c \cdot \dot{u}$



#### Τύποι απόσβεσης

❖ Ενέργεια λόγω ιξώδους απόσβεσης = εμβαδό διαγράμματος  $F - u$  {  $F = F_e + F_d$  }, ταλαντωτής υπό αρμονική διέγερση

$$\Delta W = \int_t^{t+2\pi/\omega} F(t) \cdot \dot{u} dt = \pi \cdot c \cdot \omega \cdot u_0^2$$

❖ Υστερητική απόσβεση (ο κανόνας στις κατασκευές Πολ. Μηχανικού):

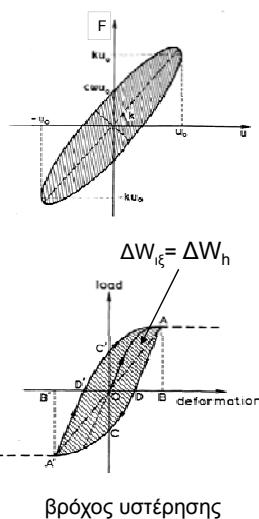
- Εμβαδόν βρόχου ( $\Delta W$ ) = έκλυση (διάχυση) ενέργειας (ως θερμότητα) = απόσβεση

❖ Ενέργεια παραμορφώσεως (δυνητική):

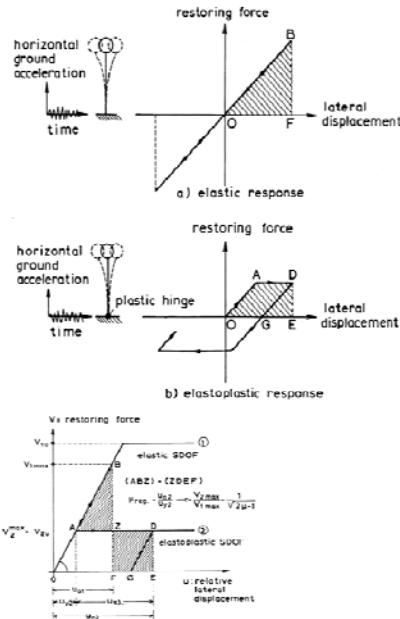
$$U_e = \frac{1}{2} k \cdot u_o^2$$

➤ Από τον λόγο  $\Delta W/U_e$ , με  $c = 2m\zeta_e$ , ο ισοδύναμος λόγος απόσβεσης προκύπτει:

$$\zeta_e = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{U_e}$$



## Έκλυση ενέργειας – πλαστιμότητα



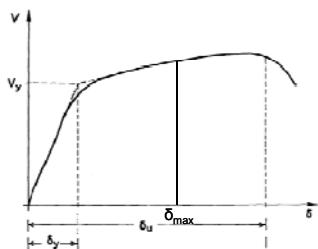
- ❖ Τα δύο συστήματα έχουν ίδια  $m$ ,  $k$ ,  $\zeta$  και (έστω) την ίδια ταχύτητα  $v_{max}$
- ελαστικό σύστημα (μεγάλη αντοχή  $V_{1u}$ ):  
κινητική ενέργεια = δυνητική ενέργεια

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}ku_0^2$$

- ❖ ανελαστικό σύστημα (αντοχή  $V_{2u}$ ):  
κινητική ενέργεια = απορρόφηση ενέργειας (OADG)
- $$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}V_{2u} \cdot u_{y2} + V_{2u} \cdot u_{pl}$$
- μετά την αποφόρτιση: η ενέργεια (EDG) μετατρέπεται ξανά σε κινητική, ενώ η (OADG) έχει καταναλωθεί (διαφορά απορρόφησης – έκλυσης)

## Έκλυση ενέργειας – πλαστιμότητα

- Στο ελαστικό σύστημα όλη η δυνητική ενέργεια μετατρέπεται ξανά σε κινητική → απαιτείται πρόσθετη απόσβεση («ξώδης»)
- Στο ανελαστικό σύστημα τμήμα μόνο της δυνητικής ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική, ενώ το υπόλοιπο εκλύεται (ως θερμότητα) → δεν απαιτείται πρόσθετη απόσβεση (αρκεί η υστερητική)
- Δύο πιθανοί δρόμοι:
  - ελαστική συμπεριφορά και μεγάλες δυνάμεις επαναφοράς
  - ανελαστική συμπεριφορά (πλαστική συμπεριφορά → πλαστιμότητα) και μικρότερες δυνάμεις επαναφοράς, αλλά βλάβες!



Δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων:

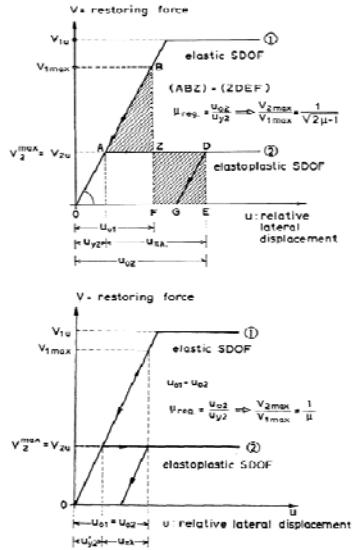
$$\mu_\delta = \delta_{max} / \delta_y$$

διαθέσιμη πλαστιμότητα:

$$\mu_{\delta u} = \delta_u / \delta_y$$

όπου  $\delta_u$  η μετακίνηση αστοχίας

## Σχέση αντοχής – πλαστιμότητας



- ❖ Εάν ισχύει η προσέγγιση των ίσων ενεργειών παραμόρφωσης (ίση απορρόφηση ενέργειας από ελαστικό και ανελαστικό σύστημα, για  $T < 0.5s$ )

$$q_1 = \frac{V_{el}}{V_u} = \sqrt{2\mu - 1}$$

- ❖ Εάν ισχύει η προσέγγιση των ίσων μετακινήσεων (συμβαίνει για  $T \geq 0.6s$ )

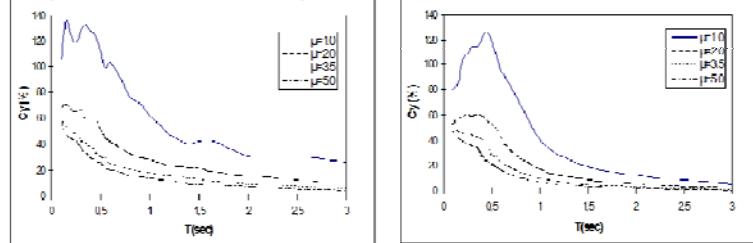
$$q_2 = \frac{V_{el}}{V_u} = \mu$$

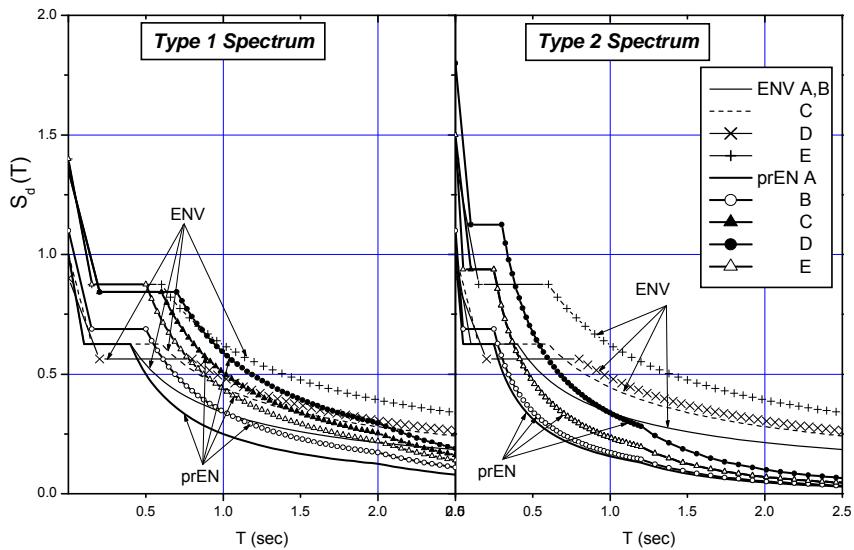
- Μεγάλη πλαστιμότητα επιτρέπει μεγάλη μείωση της απαίτησης αντοχής (και αντίστροφα!)

## Ανελαστικά φάσματα απόκρισης

- ❖ Φάσμα σταθερής αντοχής: Για δεδομένη αντοχή ( $V=C_y \cdot W$ ) σχεδιάζεται η απαιτούμενη  $\mu_\delta$  για δεδομένη διέγερση
- ❖ Φάσμα σταθερής πλαστιμότητας: Με παρεμβολή στα φάσματα  $\mu - T$  υπολογίζεται η απαιτούμενη  $C_y$  ώστε η πλαστιμότητα  $\mu \leq \mu_{\text{σχεδ}}$
- ❖ Τα φάσματα  $C_y - T$  είναι ουσιαστικά τα φάσματα σχεδιασμού, δηλ. σχεδιάζουμε για τόση αντοχή, ώστε να μην ξεπερνιέται η πλαστιμότητα την οποία δίνουμε στην κατασκευή (π.χ. ΚΠ 'Μ' ή 'Υ' του ΕΚ8)

Μέσα ανελαστικά φάσματα αντοχής για μέσο έδαφος (αλλούβια) για αμερικανικά (αριστερά) και ελληνικά (δεξιά) επιπαχυνσιογραφήματα





Φάσματα Ευρωκώδικα 8: (ENV,1994) και prEN1998-1(2002), για q=4

#### 4. Δυναμική απόκριση πολυβάθμιων ελαστικών συστημάτων

- ❖ Αντικείμενο της Δυναμικής των Κατασκευών
- ❖ Παρατηρήσεις για τα πολυβάθμια συστήματα (κτίρια) Ο/Σ:
  - ισχύει συνήθως η παραδοχή διαφραγματικής λειτουργίας (πλάκες Ο/Σ)
  - εύλογη η θεώρηση συγκεντρωμένων μαζών (στις στάθμες των ορόφων)
  - κυριαρχία πρώτης ιδιομορφής ( $\geq 80\%$  σε κάθε διεύθυνση,  $T_{x0}$ ,  $T_{y0}$ )
  - επιρροή στρεπτικής ιδιομορφής ( $T_z$ ) στα εύστρεπτα κτίρια
- ❖ Μεθοδολογίες ανάλυσης:
  - ιδιομορφική φασματική ανάλυση (επαλληλία φασματικών αποκρίσεων)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ιδιομορφικές δυνάμεις <math>f_n = m \phi_n \frac{L_n}{M_n} S_{par}</math> (<math>L_n = [\phi_n]^T [m][1]</math>)</li> <li>■ τέμνουσα βάσης της <math>n</math>- ιδιομορφής <math>V_{0n} = \frac{L_n^2}{M_n} S_{par}</math></li> <li>■ τετραγωνική επαλληλία μεγεθών απόκρισης <math>S_{i,para} \equiv \sqrt{S_{i1}^2 + S_{i2}^2 + S_{i3}^2 + \dots}</math></li> </ul>
---	---

➢ χρονοϊστορία (time-history) της απόκρισης → αριθμητική ολοκλήρωση

**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ –  
ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ**

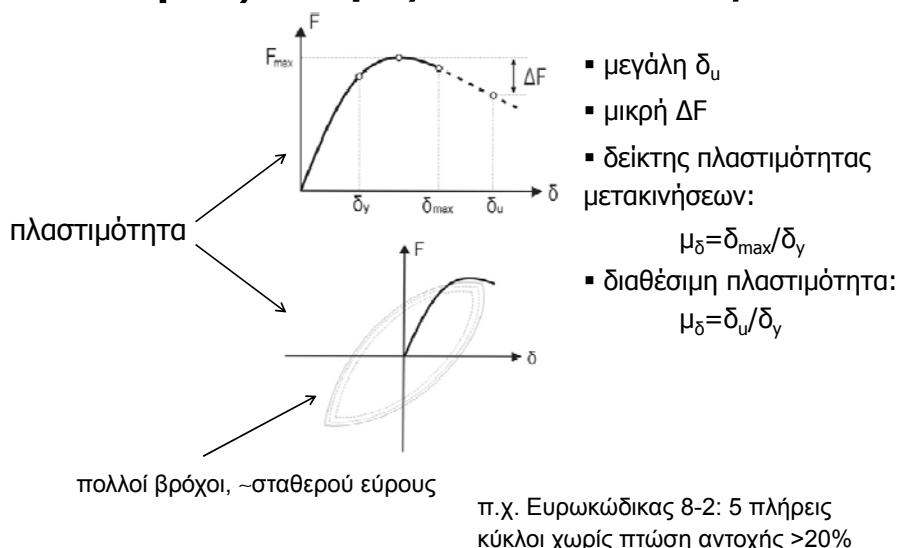
**Πλαστιμότητα Ο/Σ – Σκυρόδεμα  
υπό σεισμική φόρτιση**

**Α. Ι. Κάππος**  
**Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

**Θεσσαλονίκη 2012**



**Αντισεισμικές ιδιότητες των υλικών του Ο/Σ**



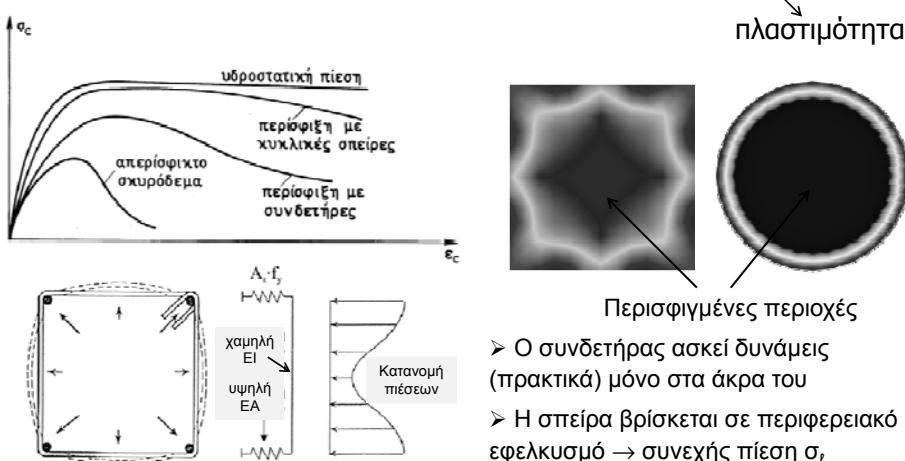


- Πλαστιμότητα δομικού στοιχείου σημαίνει:
  - πλαστιμότητα υλικών (σκυρόδεμα, χάλυβας)
  - και συνάφεια (μεταξύ τους)
- Ποιοτικός έλεγχος – ευκολία εφαρμογής υλικών
  - διαφορά ποιότητας (quality) – επιτελεστικότητας (performance)
- Σχετικοί κανονισμοί:
  - EKOΣ 2000, ΕΑΚ 2000 (2003) → υπό απόσυρση...
  - Ευρωκώδικας 8 (EN1998-1, 2004)
    - υποχρεωτικός από 1/1/2012 (?)
  - E39/99 (Αντισεισμικός Γεφυρών) → EN1998-2
  - Νεοζηλανδικός Κανονισμός NZS3101 – 2006
  - Το μάθημα επικεντρώνεται κυρίως στο υπόβαθρο των κανονισμών που είναι ~κοινό στους σύγχρονους κανονισμούς



## Περισφιγμένο σκυρόδεμα (εγκιβωτισμένο)

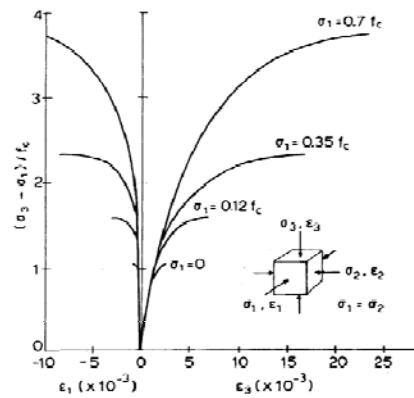
- Παρεμπόδιση (από τον εγκάρσιο οπλισμό) της διόγκωσης λόγω εσωτερικής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος
  - τριαξονική κατάσταση (περίσφιξη) → αύξηση αντοχής/παραμόρφωσης
  - πλαστιμότητα





## Τριαξονική σύνθλιψη

(συνήθως:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \text{σταθ.}$  και αύξηση  $\sigma_3$  μέχρι αστοχίας)



Σκυρόδεμα σε  
τριαξονική σύνθλιψη  
(Hobbs et al, 1977)

Τριαξονική αντοχή:  
 $f_{cc} = f_c + \lambda \sigma_1$   
 $\lambda \approx 4 \div 6$  πλευρική τάση

→ σημαντικότατη αύξηση τόσο της αντοχής όσο και της παραμόρφωσης αστοχίας, καθώς αυξάνει η "υδροστατική" τάση

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_t$$



### • Παράμετροι της περίσφιξης

➢ Ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού  $\rho_w = \frac{\text{όγκος συνδετήρων}}{\text{όγκος πυρήνα}}$

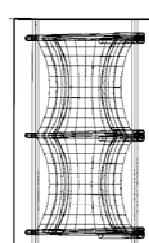
$$\text{εμβαδό συνδετήρα } A_{sw} = \frac{\pi \phi_w^2}{4}$$

$$\rightarrow \text{ογκομετρ. ποσοστό } \rho_w = \frac{2(b_c + h_c)A_{sw}}{b_c h_c s}$$

➢ Θλιπτική αντοχή  $f_c$

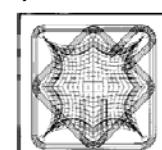
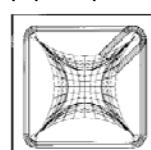
➢ Όριο διαρροής εγκάρσιου οπλισμού

$$f_{yw} \leftrightarrow \text{δυνάμεις περίσφιξης}$$

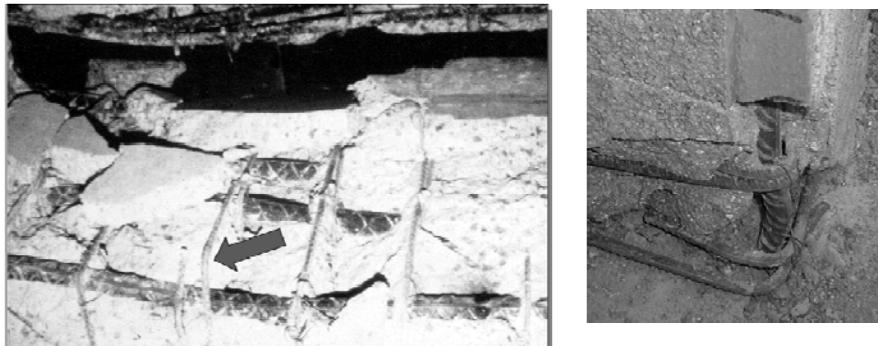


➢ Απόσταση συνδετήρων ( $\leftarrow$  κρίσιμη και για λυγισμό)

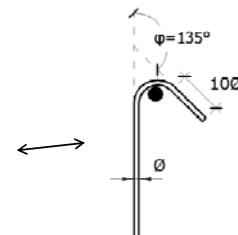
➢ Διάταξη συνδετήρων



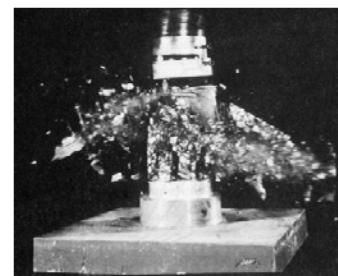
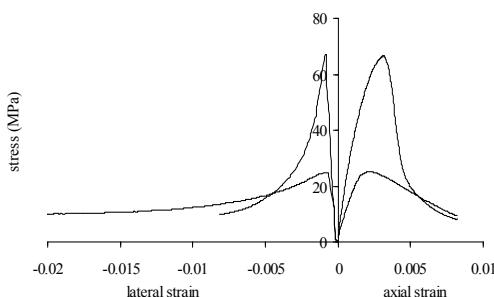
➢ Διαμήκης οπλισμός ( $\Phi_t, \rho_t$ )



Για να ασκηθούν οι δυνάμεις περίσφιξης είναι απαραίτητο να είναι επαρκώς αγκυρωμένοι (στο εσωτερικό του πυρήνα) οι συνδετήρες!



- Ερμηνεία επιρροής  $f_c$  στην περίσφιξη
  - πλευρική παραμόρφωση  $\varepsilon_{lat,HSC} \leq \varepsilon_{lat,NSC}$



- 'σενάριο 1': ίδιο  $N \Rightarrow$  ίδιο  $\sigma = N/A$
- 'σενάριο 2': ίδιο  $\sigma/f_c$  (πιο εύλογο στην πράξη)

- Άλλες παράμετροι που υπεισέρχονται στο πρόβλημα
  - Ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης (φόρτισης):  $d\varepsilon/dt$  ( $d\sigma/dt$ )
  - Εκκεντρότητα αξονικής δύναμης

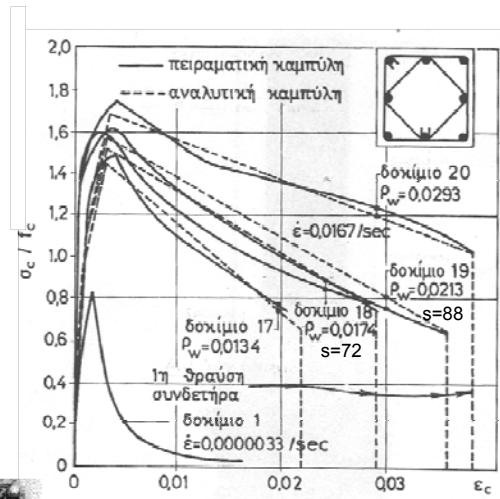
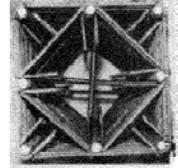


### Περισφιγμένο σκυρόδεμα: Πειραματικά αποτελέσματα

- Διαγράμματα  $\sigma_{cc}$ - $\epsilon_{cc}$  για διάφορους βαθμούς περίσφιξης (με τετραγωνικούς συνδετήρες)

[Scott et al. 1982]

- αύξηση αντοχής λόγω  $d\varepsilon/dt$ : περίπου 24%
- αύξηση αντοχής λόγω περίσφιξης: 19÷41%
- αύξηση πλαστιμότητας: 5 ως 9 φορές!



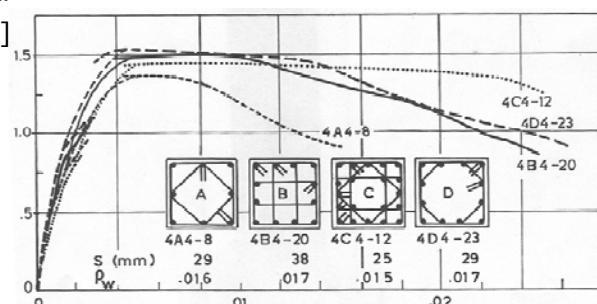
$\leftrightarrow \epsilon_{cu}$



### Περισφιγμένο σκυρόδεμα: Πειραματικά αποτελέσματα

- Διαγράμματα  $\sigma_{cc}$ - $\epsilon_{cc}$  για υποστυλώματα με διάφορες διατάξεις πολύτμητων συνδετήρων

[Sheikh-Uzumeri 1980]



Προσοχή:

- στην πράξη καθεμία από τις διατάξεις συνδετήρων αντιστοιχεί σε διαφορετικές διαστάσεις υποστυλώματος ( $s_h \leq 150 \div 200$  mm)
- για  $\rho_w \approx$  σταθ. η συμπεριφορά υποστυλωμάτων με έναν μόνο συνδετήρα είναι αρκετά υποδεέστερη εκείνης των υποστυλωμάτων με πολύτμητους συνδετήρες!



❖ Φαινομενολογικά μοντέλα για περίσφιξη με ορθογων. συνδετήρες

❖ Αντοχή:  $f_{cc} = K \cdot f_c$

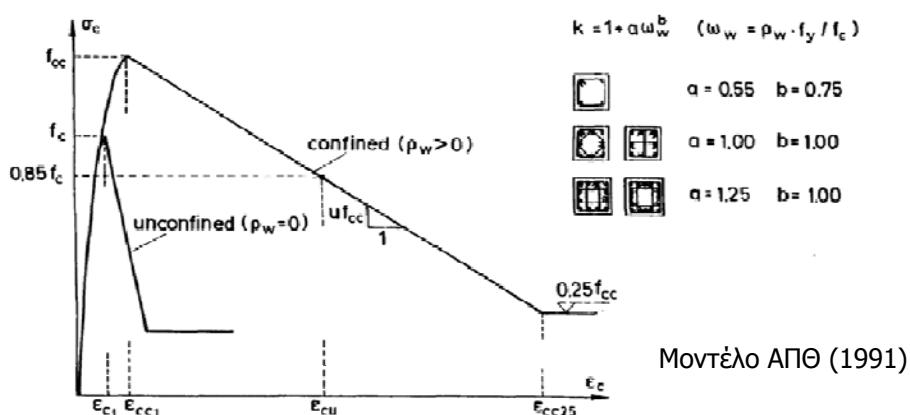
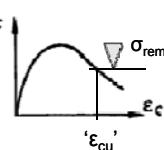
➢ Park et.al. (1982):  $K = 1 + \rho_w \frac{f_{yw}}{f_c}$

➢ Μοντέλο ΑΠΘ:  $K = 1 + \alpha \cdot \left( \rho_w \frac{f_{yw}}{f_c} \right)^b$

όπου τα  $\alpha$ ,  $b$  εξαρτώνται από τη διάταξη των συνδετήρων  
[Kappos 1991, Penelis-Kappos 1997]

❖ Παραμόρφωση: μέσω της κλίσης του φθιτού κλάδου

➢ κριτήριο αστοχίας ( $\epsilon_{cu}$ ) βάσει % πτώσης αντοχής



$$u = \frac{0.5}{\epsilon_{cc50} - \epsilon_{cc1}}$$

$$\epsilon_{cc50} = \frac{3 + 0.29 f_c / k}{145 f_c / k - 1000} + 0.75 \rho_w \sqrt{\frac{b_c}{s}}$$

πτώση αντοχής 50%



- Μοντέλο CEB MC ( $\approx$  μοντέλο Sheikh-Uzumeri, 1982)

- Ηλευθρική (“υδροστατική”) τάση λόγω περίσφιξης

$$\frac{\sigma_1}{f_c} - \frac{\sigma_2}{f_c} - \frac{1}{2}\alpha_w\alpha_s w_w \quad \text{óποι } w_w = \rho_w \cdot f_{yd} / f_{cd}$$

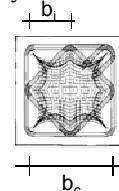
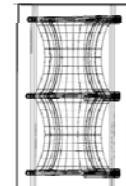
- Μείωση περίστριξης ανάμεσα στους συνδετήρες

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{s}{b_c}\right)^2 \quad s > b_c / 2$$

- Μείωση περίσφιξης στη διατομή (μη ενεργές ζώνες)

$$\alpha_n \simeq 1 - \frac{n(b_i^2 / 6)}{b_c^2} \quad \alpha_n = 1 - \frac{8}{3} \cdot \frac{1}{n} \quad \leftarrow \text{για τετραγωνικές διατομές} \quad (n \cdot b_i = 4b_c)$$

λόγος απερίσφικτης προς συνολική διατομή πυρήνα



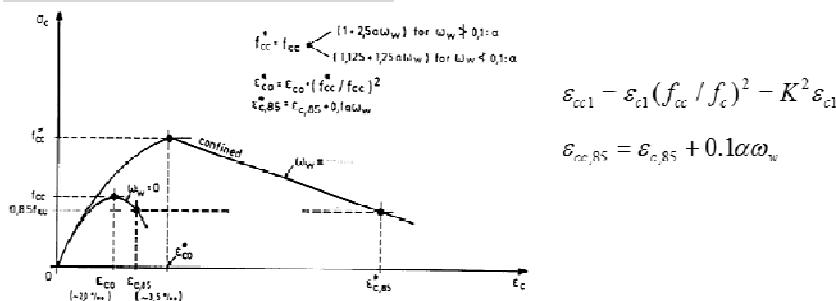
Προσχέδιο (ENV) Ευρωκώδικα 8 (όχι στο τελικό κείμενο):

- Ανέγηση αυτοχής λόγω περίσσωιξης

$$f_{ce} = f_c(1.000 + 2.5\alpha\omega_w) \quad \text{when } \alpha\omega_w < 0.1$$

$$f_{\text{cr}} = f_c(1.125 + 1.25\alpha\omega_w) \quad \text{forall } \alpha\omega_w > 0.1 \quad \alpha = \alpha_s\alpha_r$$

#### Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης





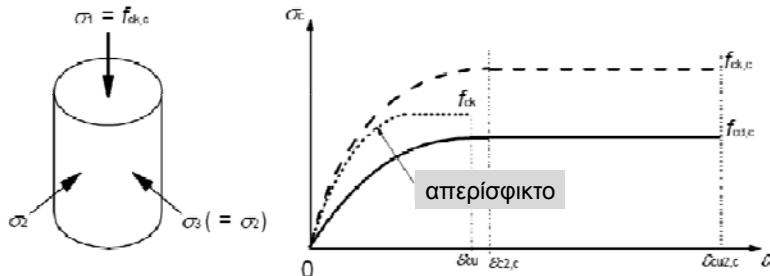
- Μοντέλο Ευρωκώδικα 2 (ΕΝ1992-1-1, §3.1.9)

$$f_{ck,c} = f_{ck}(1.00 + 5.0\sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{για } \sigma_2 \leq 0.05f_{ck}$$

$$f_{ck,c} = f_{ck}(1.125 + 2.5\sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{για } \sigma_2 > 0.05f_{ck}$$

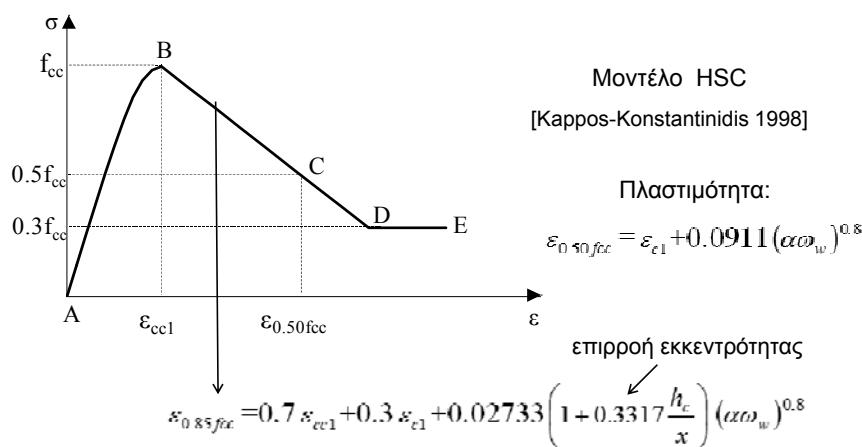
$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2}(f_{ck,c} / f_{ck})^2 \quad \sigma_2 = ?$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0.2\sigma_2 / f_{ck} \quad \rightarrow \text{Από EC8-ENV:} \\ \sigma_2 = 0.5\alpha\omega_w \cdot f_{ck}$$



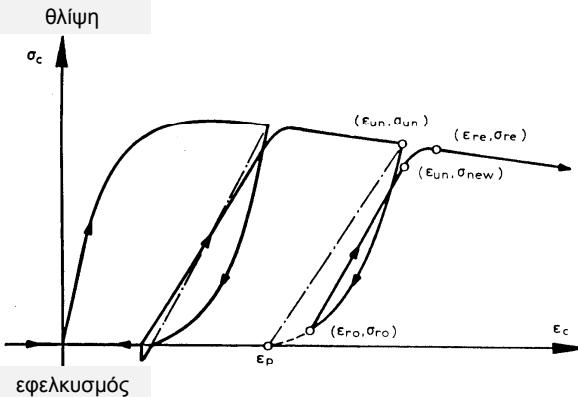
- Επιρροή εκκεντρότητας φόρτισης (N+M):

➢ αυξάνει η πλαστιμότητα, αλλά και η αντοχή (λιγότερο), επειδή μικρό μόνο τμήμα της διατομής καταπονείται έντονα





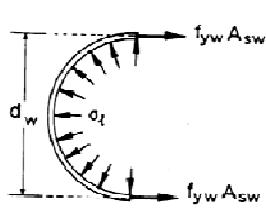
• Ανακυκλιζόμενη φόρτιση:



- Περιβάλλουσα  $\approx$  καμπύλη  $\sigma_c$ - $\epsilon_c$  της μονότονης
- Αποφόρτιση / επαναφόρτιση  $\sim$  όπως στο απερίσφικτο  
(σταδιακή μείωση της κλίσης των κλάδων)



• Περίσφιξη με σπείρες:



$$2f_{yw}A_{sw} = \sigma_e d_w s \rightarrow \text{βήμα σπείρας}$$

$$\Rightarrow \sigma_e = \frac{2f_{yw}A_{sw}}{d_w s}$$

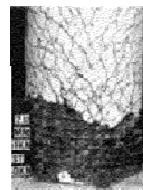
αύξηση αντοχής:  $f_{cc} = f_c + \lambda \sigma_e$

$$\Rightarrow f_{cc} = f_c \left( 1 + \lambda \frac{2f_{yw}A_{sw}}{d_w s f_c} \right)$$

Ογκομετρικό μηχανικό ποσοστό σπειροειδούς οπλισμού:

$$\omega_w = \rho_w \frac{f_{yw}}{f_c} = \frac{\pi d_w A_{sw}}{\pi d_{yw}^2 \cdot s} \cdot \frac{f_{yw}}{f_c} = \frac{4 A_{sw}}{d_{yw} s} \cdot \frac{f_{yw}}{f_c}$$

$$\rightarrow f_{cc} = f_c \left( 1 + \frac{\lambda}{2} \omega_w \right)$$



- άρα, για  $\lambda \approx 4 \rightarrow$  ~διπλάσια αύξηση αντοχής απ' ό,τι για περίσφιξη με συνδετήρες

## ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ – ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ

### Υλικά Ο/Σ – Χάλυβας και συνάφεια υπό σεισμική φόρτιση

**Α. Ι. Κάππος**  
**Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

**Θεσσαλονίκη 2012**

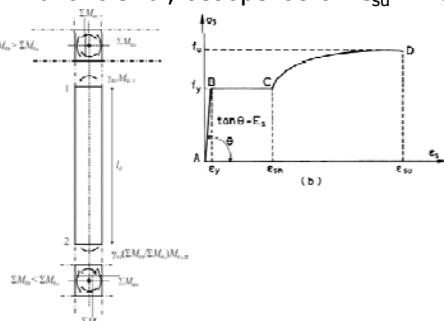


### **Χάλυβας υπό σεισμική φόρτιση**

■ Κυριότερες απαιτήσεις αντισεισμικότητας

- ❖ Πλαστιμότητα (ολκιμότητα χάλυβα): Ικανοποιείται, δεδομένου ότι  $\epsilon_{su} > 4\%$ , ακόμη και για χάλυβες προέντασης  $f_y,act \leq a \cdot f_{yd}$  ( $a \geq 1.15$ )
  - για έλεγχο  $V_{max,act}$  ( $\sim \Sigma M / l$ )
  - για έλεγχο σχετικών αντοχών (στους κόμβους)

$$\sum M_{Rc} \geq \gamma_R \cdot \sum M_{Rb}$$



- ❖ Κράτυνση (κάπως προβληματική στους χάλυβες Tempcore S500s, B500C)
  - Ευνοϊκή επιρροή ( $\min f_u / f_y$ ): όχι σημειακή πλαστική άρθρωση στα άκρα
  - Δυσμενής επιρροή ( $\max f_u / f_y$ ): έλεγχος  $V_{max,act}$ , έλεγχος σχετικών αντοχών

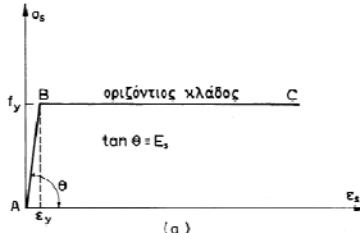


## Χάλυβας υπό σεισμική φόρτιση

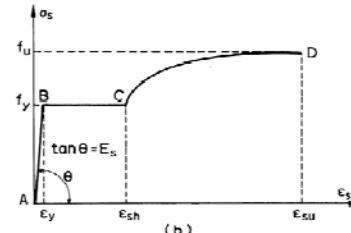
(Η συμπεριφορά των ράβδων σε διάτμηση/ψαλιδισμό σπανίως λαμβάνεται υπόψη, π.χ. σε σχέση με τη δράση βλήτρου...)

### ▪ Μονότονη φόρτιση

- Όσο αυξάνει η αντοχή ( $f_y$ ), μειώνεται η πλαστιμότητα ( $\epsilon_{su}$ ) και (συνήθως) αυξάνει η κράτυνση ( $f_u/f_y$ )
- Συνήθη μοντέλα:



Ελαστοπλαστικό



Ελαστοπλαστικό + κράτυνση

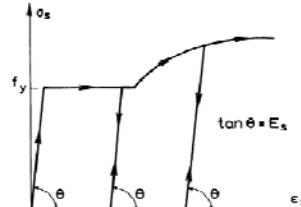
(ικανοποιητικό για κατακόρυφα φορτία) (ενδείκνυται για αντισεισμ. σχεδιασμό)

Εναλλακτικά: Ελαστοπλαστικό + εμπειρικός συντελεστής γ<sub>n</sub> (π.χ. στον έλεγχο κόμβων)



### ▪ Επαναλαμβανόμενη φόρτιση

- Περίπου ελαστική αποφόρτιση και επαναφόρτιση



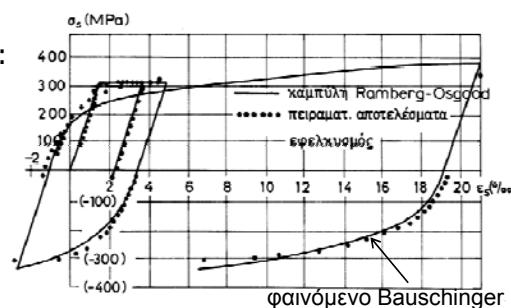
### ▪ Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

- Επαναφόρτιση μετά τη διαρροή:

$$\epsilon_s - \epsilon_{si} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left( 1 + \left| \frac{\sigma_s}{\sigma_{ch}} \right|^{r-1} \right)$$

(καμπύλη Ramberg-Osgood)

$\sigma_{ch}$ ,  $r$ : από εμπειρικές σχέσεις  
(απαραίτητη η χρήση H/Y)

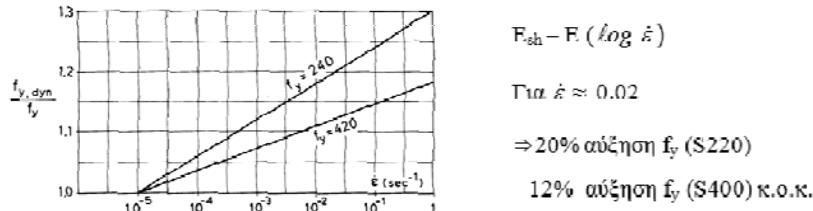




### ▪ Δυναμική φόρτιση

- Αύξηση αντοχής (λόγω  $dε/dt$ ):

$$f_{y,dyn} = f_{y,stat} \left[ -6.54 \times 10^{-4} f_y + 1.46 + (-1.33 \times 10^{-4} f_y + 0.0927) \cdot \log \dot{\epsilon} \right]$$



$$F_{sh} = F \cdot (\log \dot{\epsilon})$$

$$\text{Τιπ. } \dot{\epsilon} \approx 0.02$$

⇒ 20% αύξηση  $f_y$  (S220)

12% αύξηση  $f_y$  (S400) κ.ο.κ.

### ▪ Απαιτήσεις κανονισμών

- Τα τελευταία χρόνια οι κανονισμοί και οι προδιαγραφές για τους χάλυβες έχουν συγκλίνει μεταξύ των χωρών της ΕΕ
- EN10080: Steel for the reinforcement of concrete (2005)
- ΚΤΧ (Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος) 2008
- καθιερώνουν τις ποιότητες: B500A κατά ΕΛΟΤ 1421-2  
B500C κατά ΕΛΟΤ 1421-3



Όρια μηχανικών ιδιοτήτων χαλύβων σε εφελκυσμό κατά ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 (Χαρακτηριστικές τιμές)

Ιδιότητα	Τεχνική κατηγορία ποιότητας	
	B500A	B500C
Όριο διαρροής, $f_y$ (MPa)	$\geq 500$	$\geq 500$
Λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$	—	$\leq 1,25$
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, $f_t/f_y$	$\geq 1,05$ ( $\geq 1,03$ για $d < 6\text{mm}$ )	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$
Συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο $\varepsilon_u$ (%)	$\geq 2,5$ ( $\geq 2$ για $d < 6\text{mm}$ )	$\geq 7,5$

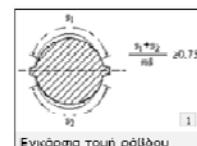
$$f_t = f_u$$

→ Στην Ελλάδα, B500A υπάρχει μόνο μέχρι Φ8



## ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΧΑΛΥΒΑ – ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

- Βασικός παράγοντας σε σχέση με:
- αγκυρώσεις – ματίσματα – ρηγμάτωση – παραμορφώσεις

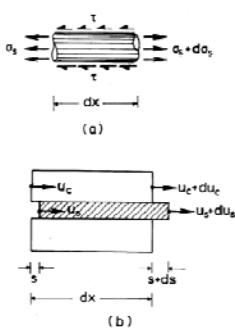


- Επηρεάζεται από:

- τραχύτητα ράβδου ( $\leftrightarrow$  ανηγμένη επιφάνεια νευρώσεων)
- ποιότητα σκυροδέματος
- θέση και προσανατολισμό ράβδου κατά τη σκυροδέτηση
- πάχος επικάλυψης
- συνοριακές συνθήκες



## Καταστατικές εξισώσεις συνάφειας



$$\begin{aligned} A_s d\sigma_s &= \tau u \, dx \\ A_s &= \frac{\pi \phi^2}{4}, \quad u = \pi \phi \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{4}{\phi} \tau \\ s = u_s - u_c, \quad ds = du_s - du_c \end{array} \right\}$$

$$\Rightarrow \frac{ds}{dx} = \frac{du_s}{dx} - \frac{du_c}{dx} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{ds}{dx} = \varepsilon_s - \varepsilon_c \approx \varepsilon_s$$

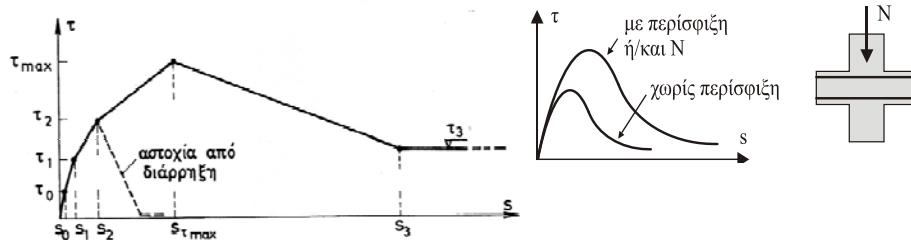
μετά τη ρηγμάτωση

(ελαστική)

- $\tau = \tau(s) \rightarrow$  καταστατ. νόμος τοπικής συνάφειας – τοπικής ολίσθησης
- $\sigma_s = \sigma(\varepsilon_s) \rightarrow$  καταστατ. νόμος χάλυβα
- επίλυση μόνο με αριθμητικές μεθόδους (Η/Υ)
  - εναλλακτικά: εμπειρική  $\theta_{rs}$  (στροφή λόγω ολίσθησης)



## ▪ Μονότονη φόρτιση

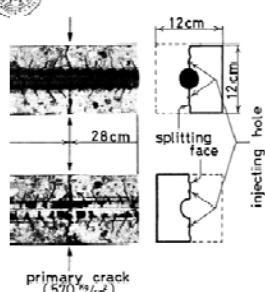
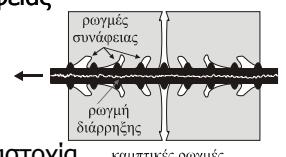


$\tau \leq \tau_0 \rightarrow$  πρόσφυση (φυσικοχημική συνάφεια) τσιμεντοπολτού – ράβδου

$\tau_0 < \tau \leq \tau_1 \rightarrow$  μηχανική εμπλοκή τσιμεντοπολτού – ανωμαλιών επιφάνειας ράβδου, αλλά και εμπλοκή νευρώσεων (για χάλυβες υψηλής συνάφειας)  $\tau = \tau_1 \approx f_{ct} \rightarrow$  ρωγμές συνάφειας

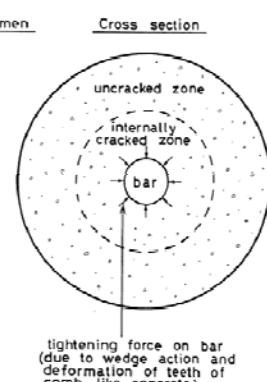
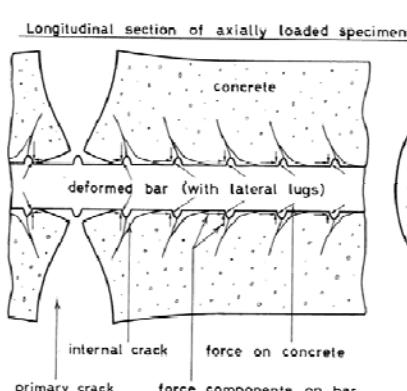
$\tau_1 < \tau \leq \tau_2 \rightarrow$  εμπλοκή νευρώσεων – ρηγματωμένου σκυροδέματος

$\tau = \tau_2 \left. \begin{array}{l} \text{χωρίς περίσφιξη: αστοχία από διάρρηξη} \\ \text{με περίσφιξη: ρωγμές διάρρηξης, χωρίς αστοχία} \end{array} \right\} \text{καμπτικές ρωγμές}$   
(από πίεση ράβδου-νευρώσεων στο περιβάλλον σκυρόδεμα)



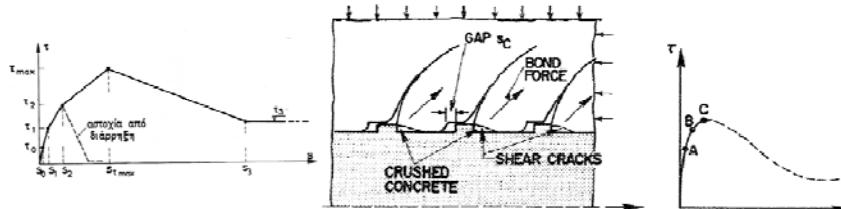
## ▪ Δημιουργία ρωγμών συνάφειας και διάρρηξης

[Goto, 1971]





$\tau_2 < \tau \leq \tau_m$  : σταδιακό φάγωμα των δοντιών ανάμεσα στις νευρώσεις  
 → σχηματισμός ρωγμών διατμητικού τύπου



$s_{Tm} < s \leq s_3$  (φθίνων κλάδος): αποδιοργάνωση των δοντιών σκυροδέματος  
 → σχηματισμός κυλινδρικής επιφάνειας στο ύψος των νευρώσεων

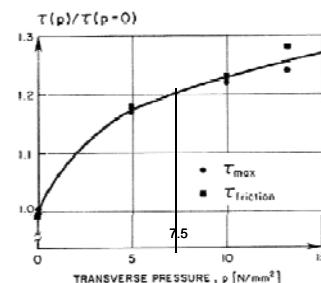
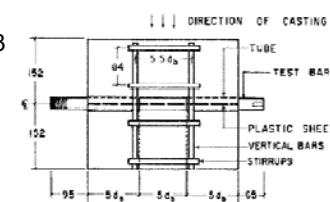
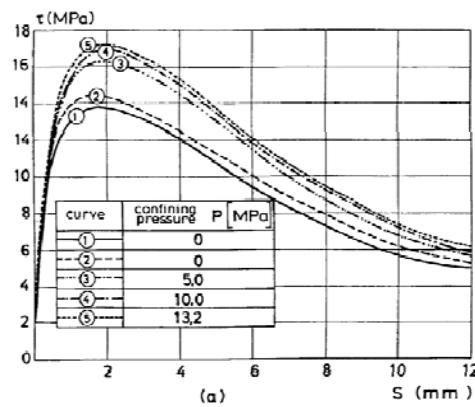
$s > s_3$  : παραμένουσα συνάφεια ( $\tau_3$ ) λόγω τριβών στην κυλινδρική διεπιφάνεια

▪ Επιρροή εφελκυσμού / σύνθλιψης → της τάξης του  $\pm 20 \div 30\%$

μείωση συνάφειας αύξηση συνάφειας



Πειραματικά αποτελέσματα Eligehausen et al. 1983

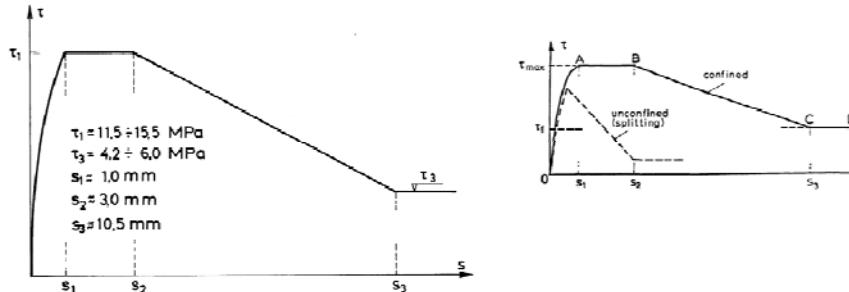


Επιρροή εγκάρσιας πίεσης ( $p$ ): Ευνοϊκή, αλλά όχι καθοριστική

CEB MC: Οι υψηλότερες τιμές της τ λαμβάνονται για  $p \geq 7.5 \text{ MPa}$



▪ Μοντέλο CEB/MC για συνάφεια – ολισθηση [Eligehausen et al., 1983]



Κλάδος ΟΑ ( $0 \leq s \leq s_1$ )

$$\tau = \tau_{\max} (s/s_1)^{\alpha}$$

$$; \tau = \tau_{\max}$$

BC ( $s_1 < s \leq s_2$ )

$$; \tau = \tau_{\max} - (\tau_{\max} - \tau_f) \left( \frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right)$$

CD ( $s > s_3$ )

$$; \tau = \tau_f$$

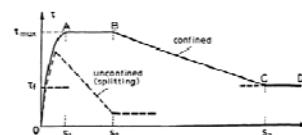


▪ Παράμετροι τ-s για ράβδους με νευρώσεις:

	Περισφιγμένο σκυρόδεμα		Απερισφικτο σκυρόδεμα	
	Καλές συνθήκες συνάφειας	Μέτριες συνθήκες συνάφειας	Καλές συνθήκες συνάφειας	Μέτριες συνθήκες συνάφειας
$s_1$	1.0	1.0	0.6	0.6
$s_2$	3.0	3.0	0.6	0.6
$s_3$	= απόσταση νευρώσεων		1.0	2.5
$\alpha$	0.4	0.4	0.4	0.4
$\tau_{\max}$	$2.5\sqrt{f_{ck}}$	$1.25\sqrt{f_{ck}}$	$2.0\sqrt{f_{ck}}$	$1.0\sqrt{f_{ck}}$
$\tau_f$	$0.4\tau_{\max}$	$0.4\tau_{\max}$	$0.15\tau_{\max}$	$0.15\tau_{\max}$

s: σε mm

t: σε MPa





▪ Παράμετροι τ-s για λείες ράβδους (παλιές κατασκευές):

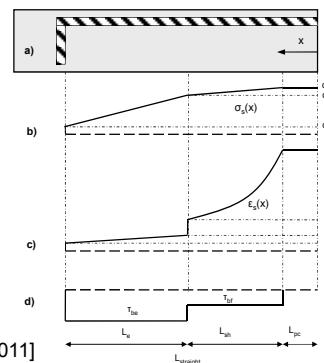
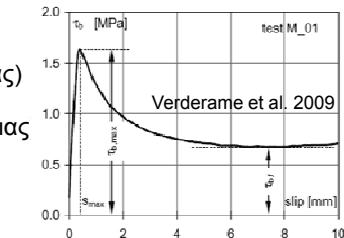
$$s_1 = s_2 = s_3 \approx 0.1 \text{ mm} \quad a = 0.5$$

$$T_{\max} = T_f = \begin{cases} 0.3\sqrt{f_{ck}} & (\text{καλές συνθήκες συνάφειας}) \\ 0.15\sqrt{f_{ck}} & (\text{μέτριες συνθήκες συνάφειας}) \end{cases}$$

(οι τιμές της  $T_{\max}$  ισχύουν για ράβδους θερμής έλασης)

- Η διασπορά στα πειράματα συνάφειας είναι σημαντική ( $\sigma/\bar{\tau} \approx 0.30$ )

- Λείες ράβδοι με 'γάντζο' (άγκιστρο)  
→ βελτίωση συμπεριφοράς!



[Mergos-Kappos 2011]

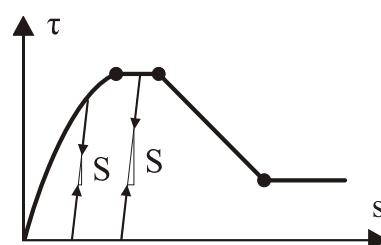


▪ Επαναλαμβανόμενη φόρτιση

➤ Περιβάλλουσα: Περίπου ταυτίζεται με την καμπύλη τ-s της μονότονης φόρτισης, ακόμη και ύστερα από πολλούς κύκλους (φόρτισης – αποφόρτισης).

➤ Η κλίση S του κλάδου αποφόρτισης είναι ανεξάρτητη από την τιμή της ολίσθησης s

( $S \approx 200 \text{ MPa/mm}$ )



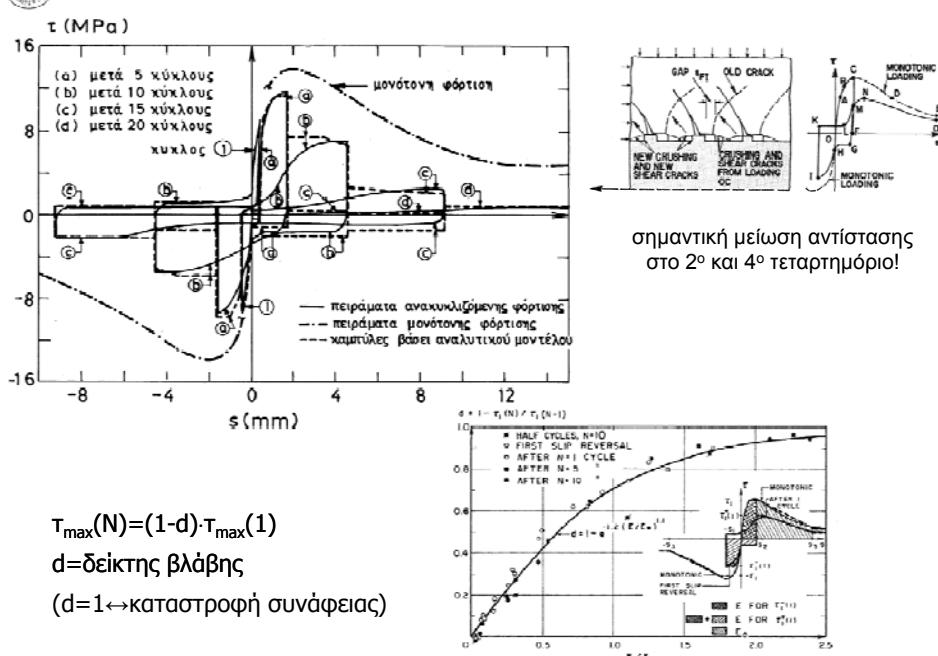
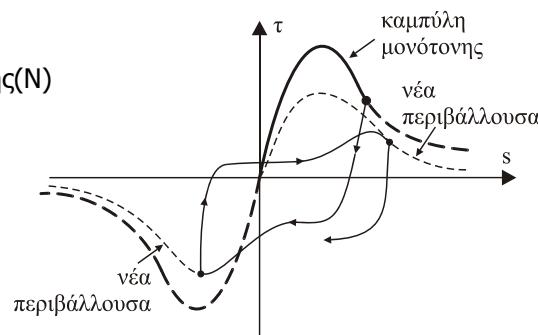


#### ▪ Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

- Για τη  $(70 \div 80)\%$  τ<sub>max</sub>
  - πτώση περιβάλλουσας με την ανακύκλιση

Εξαρτάται από:

- στάθμη τάσης ( $\tau$ )
  - αριθμό κύκλων φόρτισης( $N$ )



$$\tau_{\max}(N) = (1-d) \cdot \tau_{\max}(1)$$

**d=δείκτης βλάβης**

( $d=1 \leftrightarrow$  καταστροφή συνάφειας)

**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ –  
ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ**

**Σεισμική συμπεριφορά  
δοκών Ο/Σ**

**Α. Ι. Κάππος  
Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

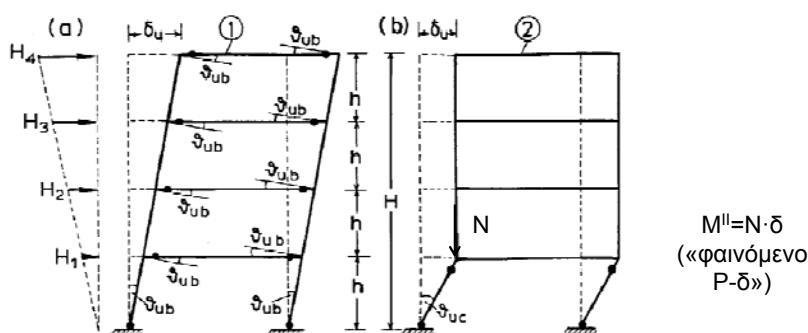
**Θεσσαλονίκη 2012**



Σεισμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων Ο/Σ – Δοκοί

**Στοχευόμενη συμπεριφορά δοκών Ο/Σ**

- Επιθυμητοί και μη-επιθυμητοί μηχανισμοί αστοχίας υπό οριζόντια (σεισμική) φόρτιση (για κτίρια)



Γενικά:

- απαιτούμενη στροφή  $\theta_{pb} < \theta_{pc}$ , ενώ διαθέσιμη πλαστιμότητα  $\mu_{\theta b} > \mu_{\theta c}$
- επισκευή δοκών ~πάντα εφικτή, υποστυλωμάτων όχι (για βαρειές βλάβες)
- πραγματική κατάρρευση (ανατροπή) μόνο όταν  $M^{\text{II}} > M_{\text{παραμέν.}}$

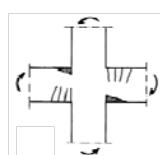


Άρα:

- Ο επιθυμητός μηχανισμός αστοχίας συνίσταται στη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς και (~αναπόφευκτα) στη βάση των κατακόρυφων στοιχείων του ισογείου

Επομένως:

- οι δοκοί πρέπει να διαστασιογηθούν και να οπλιστούν με τέτοιον τρόπο ώστε να καταναλώνουν τη σεισμική ενέργεια (υστερητική απόσβεση) μέσα από σταθερούς (δηλ. χωρίς σημαντική απώλεια της αντοχής τους) βρόχους υστέρησης
- ο επιθυμητός μηχανισμός διασφαλίζεται μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού (οριακή ισορροπία στις θέσεις πλαστικοποίησης)

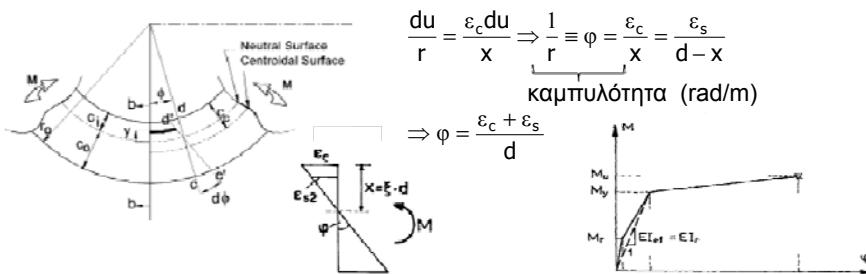


➢ π.χ. Ευρωκώδικας 8, §4.4.2.3, για πλαισιακούς φορείς

$$\sum M_{Rc} \geq 1.3 \sum M_{Rb}$$



Συμπεριφορά υπό μονότονη φόρτιση:



- Παραδοχή τεχνικής θεωρίας κάμψης:  $\phi = \frac{M}{EI}$  → επηρεάζεται από τη ρηγμάτωση!

- Δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων:  $\mu_\phi \equiv \mu_\gamma = \frac{\phi_{max}}{\phi_y}$

➢ διαθέσιμη πλαστιμότητα:  $\mu_{\phi u} = \frac{\phi_u}{\phi_y}$

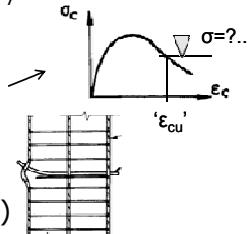
( $\phi_u$ : καμπυλότητα 'αστοχίας',  $\phi_y$ : καμπυλότητα διαρροής)



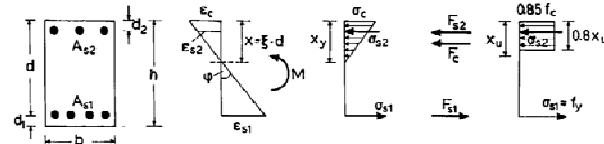
Προσδιορισμός διαθέσιμης πλαστιμότητας:  $\mu_{\phi u} = \frac{\phi_u}{\phi_y}$

➤ αστοχία θλιβόμενης ζώνης:  $\phi_u = \varepsilon_{cu}/x_u$

- $\varepsilon_{cu}$  {
- 1. σημαντική πτώση αντοχής σκυροδέματος
- 2. θραύση συνδετήρα ( $\leftrightarrow$  διόγκωση πυρήνα)
- 3. λυγισμός θλιβόμενων ράβδων



➤ αστοχία εφελκυόμενου χάλυβα:  $\phi_u = \varepsilon_{su}/(d-x_u)$



$$\begin{aligned}\rho_1 &= A_{s1}/bd \\ \rho_2 &= A_{s2}/bd \\ n &= E_s/E_c \\ \xi &= x/d\end{aligned}$$

❖ Προσεγγιστική εκτίμηση δείκτη  $\mu_\phi$  για δοκούς ορθογωνικής διατομής

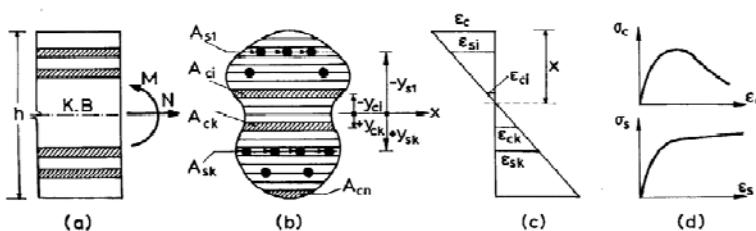
[Park-Paulay, 1975]

$$\mu_{\phi u} = \frac{0.68 f_c \varepsilon_{cu} E_s}{f_y^2 (\rho_1 - \rho_2)} (1 - \xi_y)$$

ρόλος κάθε παραμέτρου  $\leftrightarrow$  επιρροή στο  $x$  (για  $\varepsilon_{cu} = \text{const.}$ )

### Άκριβής' υπολογισμός $M - \phi$ και $\mu_\phi$ τυχούσας διατομής Ο/Σ

- Στη γενική περίπτωση (τυχούσα διατομή, τυχόντα  $\sigma - \epsilon$  υλικών)



➤ Για κάθε  $N$ ,  $\varepsilon_c$ :  $N = \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} A_{ci} + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} = N_{\text{επιβολ.}}$  ?

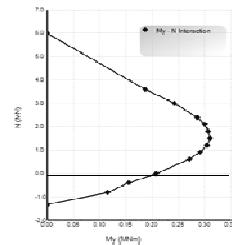
$\Rightarrow$  αλλιώς, νέο  $x$  (και αρχική εκτίμηση  $x$ )

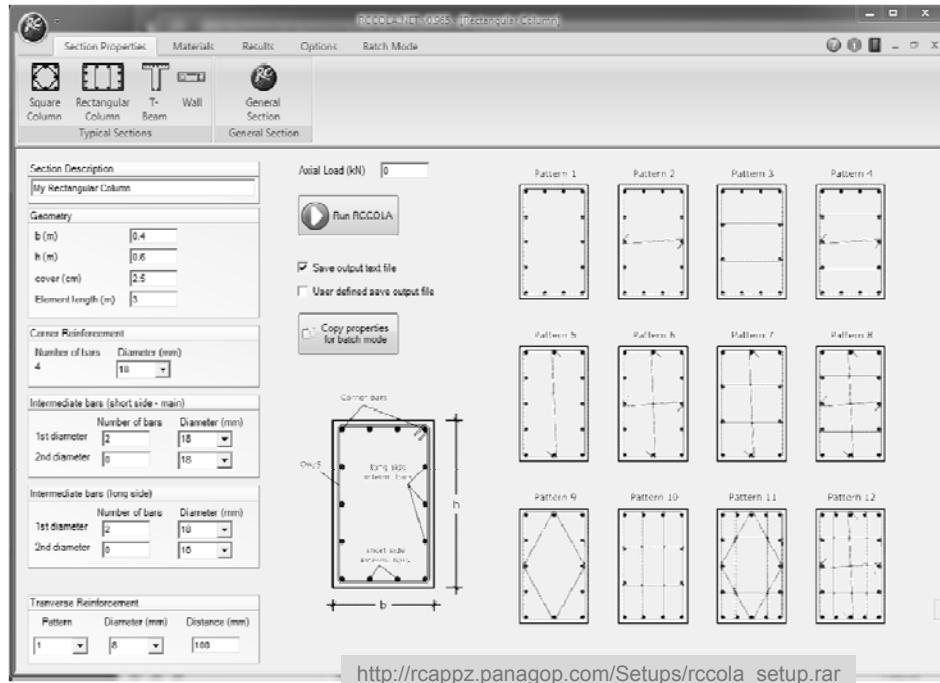
➤ Όταν συγκλίνει το  $x$ , υπολογίζεται  $\phi = \varepsilon_c/x$  και

$$M = \sum \sigma_{ci} A_{ci} y_{ci} + \sum \sigma_{si} A_{si} y_{si}$$

➤ Παραγωγή διαγραμμάτων  $M - \phi$  και  $M_y - N$  ( $\dot{\gamma}/\kappa$  ή  $M_u - N$ )

→ Διάφορα διαθέσιμα προγράμματα, π.χ. RCCOLA 2009 ΑΠΘ, RCCOLA.NET





Εικονικά εργαστήρια | Αντισειμική Τεχνολογία - Ποιολογία Κατασκευών Σκυροδέματος

**Εισαγωγή**

**Οιστόποιος αναπτύξαντας συνεργάτες στην υπηρεσία**

**Στόχος του εικονικού θεωρητικής στοχείου της υπό ανάλυση διάστασης**

**Μεθοδολογία υπολογισμού**

- Η ανάλυση των διατομών βασίζεται στο πρόγραμμα **RCCOLA** (Reinforced Concrete COncrete Analysis) που αναπτύχθηκε αρχικά στο πανεπιστήμιο του Berkeley και στην συνέχεια διαποστολήθηκε και αναδιδόταν στο Α.Π.Ο. (Κόπινος, 1996; Κόπινος & Παναγιώτηλος, 2006) για να καταλήξει στην υπηρεσία του Ινστιτού **RCCOLA.NET**, της οποίας τον κώδικα χρησιμοποιεί η παρόνταν υπόθεση.

**Στοιχεία μη** - Η πιθανή των διατομών γίνεται μέσω της κατάλληλης διακαταποτήρησης τους σε λωρίδα (Layered) και των υπολεγμένων μεταβλητών όπως η ροπή (M) και η περισσότερο στοιχείο καρπούλατη (Q) για διερεύνηση της τιμής του θεωρητικού φαστού (N) και της αντιτιμήντης περισσόφρωσης στην ακραία ή την συμβολισμένη υπόθεση.

- Χρησιμοποιούνται κατάλληλα διαγράμματα τόσον - πορτμορφώστειν για το σκυρόδεμα (Kappa, 1990) και τον χάλυβα (Kent & Park, 1971).

- Γίνεται οριχτή απίληση της πλήρους διατομής μέχρι να απλίζεται η αποφλοίωση της επικαλυψης και στη συνέχεια επιλέγεται μόνο ο περιφεριγμένος πυρήνας.

- Υπολογίζονται χαρακτηριστικά σημεία στα οποία θεωρείται ότι επορχύεται η οστογοία της διατομής, όπως η θρούση των συνδετήρων, ο λυγισμός των διαμήκων ράβδων, η πτώση της τάσης του σιευρόδεματος κάτια από το 85% της  $E_c$  στην κατερχήμενα κλίση του διαγράμματος ε-σ-κτλ.

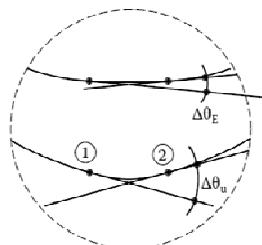
© ΕΚΩΦΤ. Τη. Πολιτικόν Μηχανικόν Α.Π.Θ. 2009



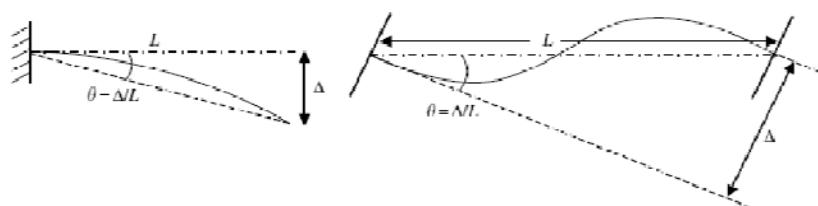
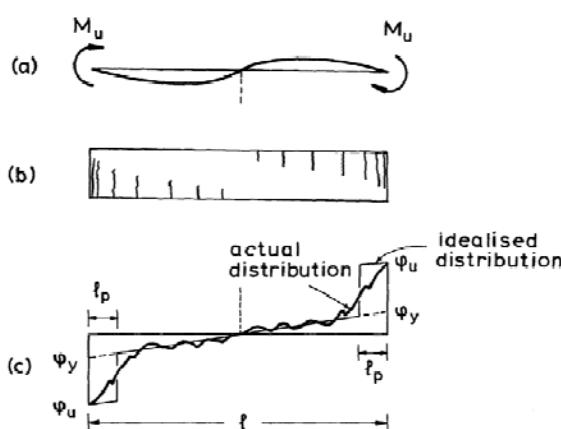
## Καμπτικές παραμορφώσεις στοιχείων από Ο/Σ

- Η στροφή, λόγω κάμψης, μεταξύ διαδοχικών διατομών ενός στοιχείου δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$\Delta\theta_{1-2} = \int_{x_1}^{x_2} \varphi \cdot dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{M}{EI} dx$$



Συνήθως χρησιμοποιείται η στροφή χορδής  $\theta$  (για αντισυμμετρικό  $M$ ,  $x_2=l/2$ )

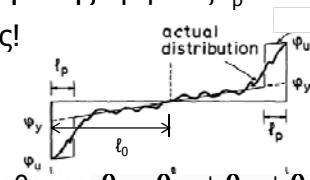


ορισμός στροφής χορδής σε πρόβολο και σε δοκό πλαισίου  
(είναι η στροφή που οφείλεται στην καμπτική παραμόρφωση και μόνο)



- Δυο επιλογές για τον υπολογισμό της  $\theta$ :

- αριθμητική ολοκλήρωση των φ
- εισαγωγή της έννοιας της «πλαστικής άρθρωσης» μήκους  $l_p$   
→ απλούστερος και συνηθέστερος τρόπος!
- Πλαστική στροφή:  $\theta_p = (\phi_u - \phi_y) \cdot l_p$
- δύσκολος/κρίσιμος ο καθορισμός του  $l_p$ !
- πρέπει να συνεκτιμά επιρροές διάτμησης, ολίσθησης  $\theta_u = \theta_{u,M} + \theta_{u,V} + \theta_{u,s}$
- παλιές εμπειρικές σχέσεις, π.χ.  $l_p \approx 0.05 l_0 + 0.5d$  [Mattock 1967]
- σύγχρονες εμπειρικές σχέσεις:
  - Paulay/Priestley (1992):  $l_p \approx 0.08 l_0 + 0.022 f_y d_b$
  - EC8-3(2005):  $L_p = 0.1L_V + 0.17h + 0.24 \frac{d_{BL} f_y (\text{MPa})}{\sqrt{f_c (\text{MPa})}}$
- Δείκτης πλαστιμότητας στροφών:  $\mu_\theta = \theta_{\max} / \theta_y$  ( $\mu_{\theta u} = \theta_u / \theta_y$ )

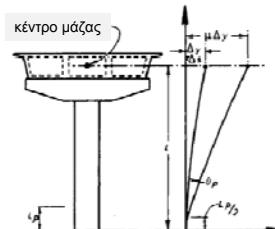


### Συσχετισμός τοπικής και ολικής πλαστιμότητας

- για πρόβολο μήκους  $L$  [Priestley & Park 1987,  
Ευρωκώδικας 8-2, Παράρτ. Β]

$$\mu_\delta = 1 + \frac{3}{C} (\mu_\phi - 1) \frac{L_p}{L} (1 - 0.5 \frac{L_p}{L})$$

όπου  $C$  ο συντελεστής ευκαμψίας της θεμελίωσης

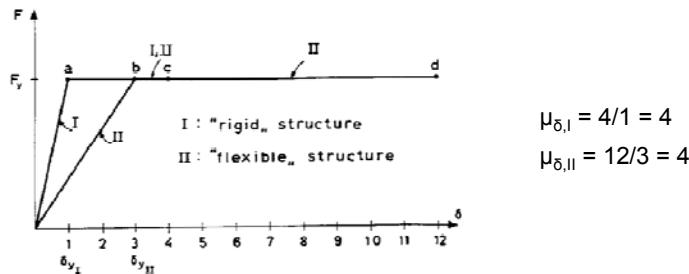


❖ Υποθέτοντας  $L_p/L \approx 0.10$ , η πλαστιμότητα καμπυλοτήτων που αντιστοιχεί σε  $\mu_\delta = 4$  είναι  $\mu_\phi = 11.5$  για  $C=1$  (άκαμπτη θεμελίωση), ενώ  $\mu_\phi = 32.5(!)$  για εύκαμπτη θεμελίωση με  $C=3$

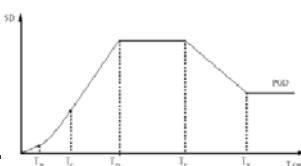
- η τοπική απαίτηση πλαστιμότητας μπορεί να είναι τριπλάσια ή πολλαπλάσια της συνολικής (για δείκτη  $q \approx \mu_\delta \Rightarrow \mu_\phi \geq 3q$ )
- ωστόσο, οι δείκτες πλαστιμότητας δεν δίνουν πάντα μια ολοκληρωμένη εικόνα της ανελαστικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής
- πρέπει να εκτιμηθούν/αξιολογηθούν και οι μετακινήσεις!



### Μετακινήσεις – πλαστιμότητα μετακινήσεων



- για την ίδια μ<sub>δ</sub> η συνολική μετακίνηση του εύκαμπτου φορέα είναι τριπλάσια και το πλαστικό τρήμα της δ πολύ μεγαλύτερο (απαίτηση για μεγαλύτερη φ<sub>ρ</sub>) απ' ό,τι στο δύσκαμπτο φορέα
- ωστόσο, δεν είναι σωστό να θεωρηθεί ότι η (δυναμική) μετακίνηση του φορέα II για δεδομένο σεισμό είναι τριπλάσια εκείνης του φορέα I για μεγάλες T<sub>0</sub> μπορεί να συμβαίνει και το αντίθετο!  
⇒ οι μετακινήσεις (τουλάχιστο) εξίσου σημαντικές με τους δείκτες μ<sub>δ</sub>!



### Εικονικά εργαστήρια

| Αντισεισμική Τεχνολογία - Παθολογία Κατασκευών Σκυροδέματος



Αρχική Μεθοδολογία πειραμάτων Δοκός Ο/Σ Υποστυλώματα Ο/Σ Επικοινωνία

- ▣ Προσομοίωση πειράματος ορθογωνικής δοκού - προβόλου υπό μονότονη φόρτιση

#### Εικονική διεύρυνση

Γεωμετρία στοιχείου/διατομής	Ιδιότητες υλικών
0,25 Πλάτος, κυριού λω (m) 0,70 Ύψος, δοκού h (m) 2,5 Επιπλέοντα μέτρα στοιχείων (cm) 3 Μήκος δοκού L (m)	Χελυφός: 440 f <sub>y</sub> (MPa) 200000 E <sub>s</sub> (MPa) 0,01 ζ <sub>sh</sub> 0 E <sub>sh</sub> (MPa) 0,12 επιλογής (εκατομμύρια) 600 γρ.δοκούς 440 f <sub>y</sub> ,εγκάρσιους 0,09 ζ <sub>sh</sub> ,εγκάρσιους
Οιλιγμένες κρίσιμες διατομής	
Διαμήκησης οιλιγμέδας Λρ. ράβδων Διάμετρος (mm) Άνω ήταν (εφελκ.): 4 10	
Οιλιγμένες κρίσιμες διατομής Εγκάρσιος οιλιγμός Οεώρηση διπητών συνδετήρων διάμετρος, πινακίδετήρων (mm)	
Επιλογή διπητών διάμετρος (mm) Άνω ήταν (εφελκ.): 28 f <sub>cm</sub> (MPa)	

Αποδομή διεύρυνσης: Ειεζεργασία διατομής

<http://www.civil.auth.gr/content/view/243/102/lang/el/>



## Συμπεριφορά δοκών Ο/Σ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση

- Πειραματικοί βρόχοι υστέρησης [Bertero et al. 1977]:

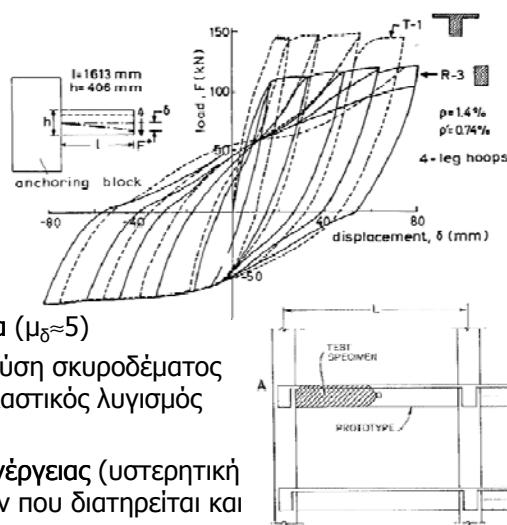
λόγος διατμησης  $a_s = 4.5$

$$a_s = (M/V)/d$$

$$T_{max} = 0.26\sqrt{f_c} \approx 0.52f_{ctm}$$

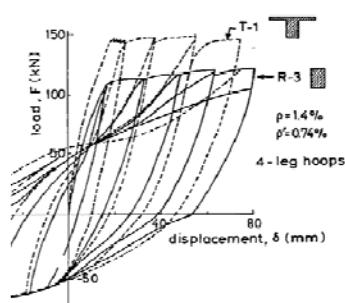
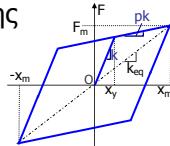
Στη δοκό αυτή το ποσοστό της διατμητικές παραμορφώσεις δεν ξεπερνά το 10% και έχει ως συνέπεια:

- υψηλή διαθέσιμη πλαστιμότητα ( $\mu_\delta \approx 5$ )
- αστοχία καμπτικού τύπου: θραύση σκυροδέματος επικάλυψης ('αποφλοίωση'), ανελαστικός λυγισμός διαμήκων ράβδων οπλισμού
- έκλυση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας (υστερητική απόσβεση), μεγάλο εύρος βρόχων που διατηρείται και για υψηλές απαιτούμενες μέτρα διατηρητικότητας

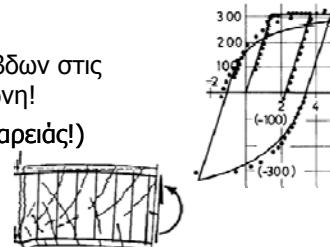


- Η πλακοδοκός (T-1) παρουσιάζει:

- αύξηση αντοχής ανάλογη προς την αύξηση του άνω οπλισμού (λόγω ράβδων πλάκας)
- αύξηση δυσκαμψίας κυρίως στη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης



- παρά την καλή συμπεριφορά, οι βρόχοι δεν είναι ελαστοπλαστικοί
- παράγοντες που μειώνουν τη δυσκαμψία δοκών υπό προέχουσα κάμψη:
  - φαινόμενο Bauschinger χάλυβα
  - παραμένουσες (πλαστικές) επιμηκύνσεις ράβδων στις ρωγμές → ανοιχτές ρωγμές στη θλιβόμενη ζώνη!
  - ( $M_y^+ < M_y^- \Rightarrow$  διαρκώς ανοιχτές ρωγμές άνω παρειάς!)
  - απομίωση συνάφειας κατά την ανακύκλιση ( $2^\circ$  και  $4^\circ$  τεταρτημόριο,  $\delta_s \approx 40\% \delta_{tot}$ )





- Λυγισμός διαμήκων ράβδων υπό ανακυκλιζόμενη (σεισμική) ένταση:

➢ επέρχεται μετά την αποφλοίωση της δοκού και τη διαρροή των ράβδων (ανελαστικός λυγισμός)



ιαχυροί συνδετήρες

➢ δύσκολος ο θεωρητικός υπολογισμός της απαιτούμενης απόστασης ( $s_h$ ) και διαμέτρου ( $d_{bw}$ ) συνδετήρων για την αποφυγή πρόωρου λυγισμού



ασθενείς συνδετήρες

➢ λυγηρότητα  $\lambda = \frac{4s_h}{d_{bw}} \leq 2\pi \sqrt{\frac{E_{sh}}{f_y}}$



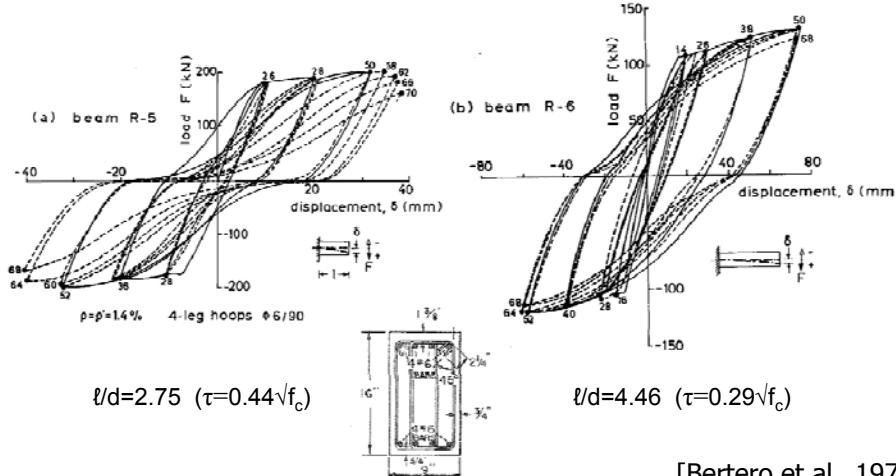
για να επέλθει ο λυγισμός απαιτείται βράχυνση ↔ αστοχία πυρήνα στοιχείου



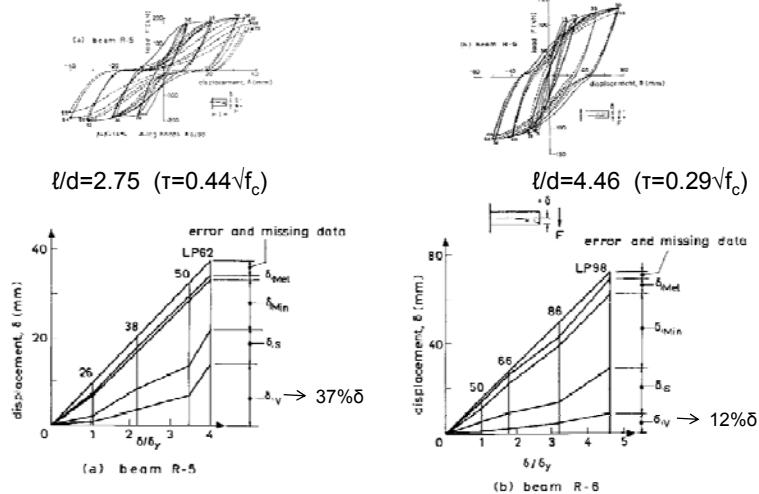
- Από πειραματικά αποτελέσματα, απαίτηση:  $s \leq (5 \div 6) d_{bw} \leq 200 \text{ mm}$
- Απαίτηση για εμβαδό συνδετήρα  $A_{sw} = \frac{\pi d_{bw}^2}{4} \geq \frac{\sum A_{sl} \cdot f_{y\ell}}{16f_{yw}} \cdot \frac{s}{100}$  (από  $F_w \geq F_t/16$ ) (NZS 3101)



### Επιρροή διάτμησης



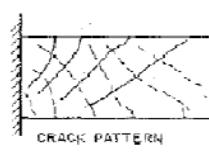
➢ εντελώς όμοιες δοκοί, διαφέρουν μόνο στο λόγο διάτμησης  $\frac{M}{V \cdot d} = \frac{\ell}{d} = \alpha_s$



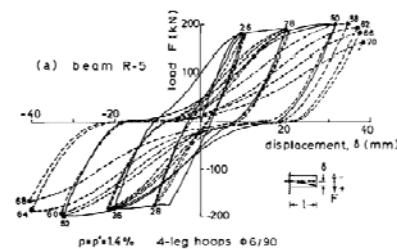
➤ συνολική μετακίνηση:  $\delta = \delta_M + \delta_V + \delta_s$   
 κάμψη διάτμηση ολίσθηση



- ❖ Οι δοκοί με υψηλή διατμητική τάση ( $\leftrightarrow$ μεγάλη  $\delta_V$ ) χαρακτηρίζονται από:
    - σχετικά χαμηλή πλαστιμότητα (έστω κι αν έχουν πυκνούς συνδετήρες)
    - αστοχία διατμητικού τύπου
    - στένωση (pinching) των βρόχων υστέρησης, εντονότερη κατά τον 2<sup>o</sup> κύκλο στην ίδια στάθμη μετακίνησης
      - όσο αυξάνει η  $\mu_d$ , η δυσκαμψία και η απόσβεση μειώνονται και το φαινόμενο εντείνεται με την αύξηση των κύκλων φόρτισης
- μη επιθυμητή συμπεριφορά (αλλά όχι ψαθυρή,  $\mu_d \approx 3$ )



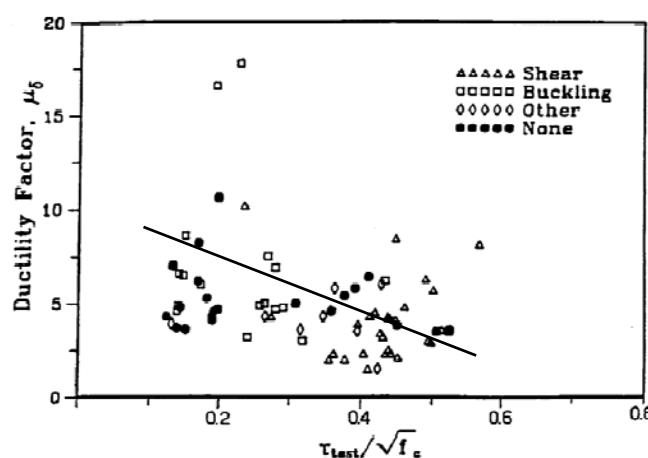
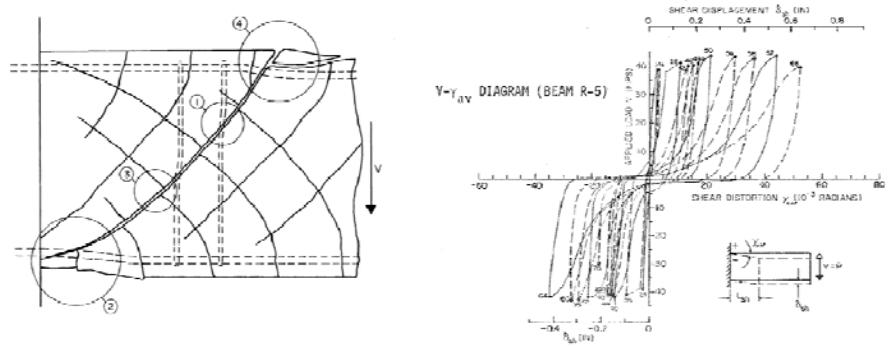
→ Ερμηνεία;





### Μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας

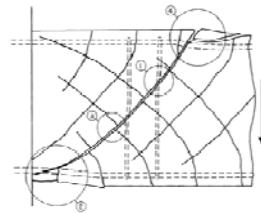
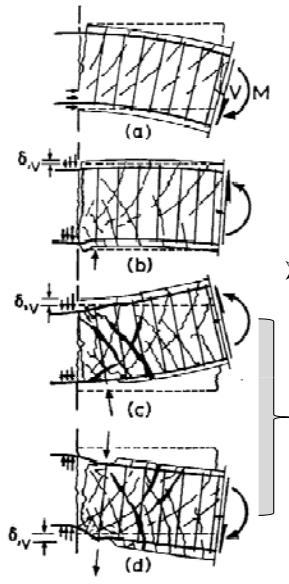
Μονότονη φόρτιση	Θλιβόμενη ζώνη (αρηγμάτωτη)	Εμπλοκή αδρανών-τριβές στις ρωγμές	'Δικτύωμα' (συνδετήρες-λοξές ρωγμές)	Δράση βλήτρου διαμήκων ράβδων
Ανακυκλιζόμενη φόρτιση	καταστρέφεται! (ανοιχτές ρωγμές)	αποδιοργανώνεται σταδιακά (μδ, κύκλοι φόρτισης) – λείανση ρωγμών	χαλάρωση αγκύωσης – πρόβλημα με τις κατακόρυφες ρωγμές	αποδιοργανώνεται σταδιακά (μδ, κύκλοι φόρτισης) – καταστροφή συνάφειας



Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων συναρτήσει της διατμητικής τάσης  $\tau = V/(bd)$ , για δοκούς Ο/Σ υπό ανακυκλιζόμενη ένταση [French & Schultz 1991]



## Διεπιφανειακή μεταφοράς τέμνουσας



[Bertero et al., 1977]

- κρίσιμη η κατακόρυφη ρωγμή, που δεν τέμνεται από τους συνδετήρες (όσο πυκνοί κι αν είναι)!

δ<sub>v</sub>: διατμητική ολίσθηση!

- ανάγκη για 'δισδιαγώνιους' οπλισμούς!  
(λειτουργία σε εφελκυσμό)

$$A_{si} = \frac{V_{Ed}}{2f_{yd} \cdot \sin \alpha}$$



- Βασική απαίτηση για πλάστιμη συμπεριφορά:  
να παραμείνει η διατμητική τάση σε ~χαμηλές τιμές  
(↔ μεγάλες διαστάσεις διατομών, χαμηλά ποσοστά οπλισμού)
- ❖ 3 κατηγορίες συμπεριφοράς (βάσει της  $\tau = V/(b \cdot d)$ )
  - $\tau \leq 0.3\sqrt{f_c}$ : Μικρή επιρροή της  $V$  (για σωστά σχεδιασμένα στοιχεία!)  
↔ μεγάλη πλαστιμότητα, απόσβεση
  - $0.3 < \tau / \sqrt{f_c} \leq 0.5$ : Σημαντική επιρροή της  $V$  ↔ μείωση δυσκαμψίας και  
υστερητικής απόσβεσης
  - $\tau > 0.5\sqrt{f_c}$ : Καθοριστική η επιρροή της  $V$  ↔ πιθανή αστοχία από  
διατμητική ολίσθηση για ~χαμηλή πλαστιμότητα
- ❖ Τα ανωτέρω όρια ισχύουν για πλήρη ανακύκλιση ( $V^+ \approx |V^-|$ )
  - για μερική ανακύκλιση:  $\zeta = V_{min}/V_{max}$  (ετερόσημες  $V$ )  
το κάτω όριο γίνεται  $\tau \leq 0.3(2+\zeta)\sqrt{f_{cm}}$  ( $-1 \leq \zeta < 0$ )
  - ή  $\tau \leq 0.6(2+\zeta)f_{ctm}$  ( $f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{2/3} \rightarrow \sqrt{f_{cm}} = (1.8 \div 2.4)f_{ctm} \approx 2f_{ctm}$ )

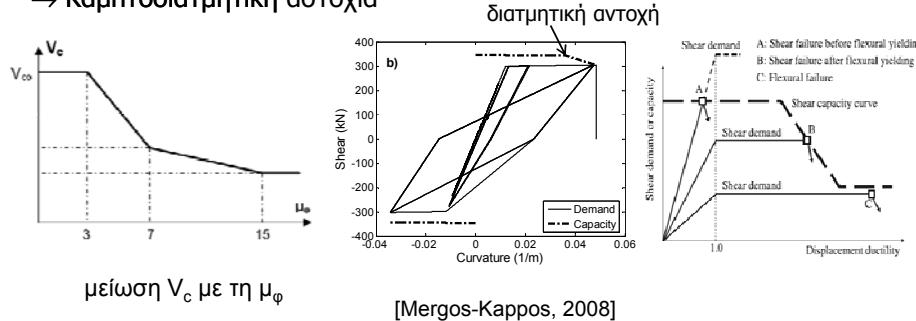


❖ Σχετικές διατάξεις Ευρωκώδικα 8 ( $\tau = V/(b_w \cdot d)$ )

- Αν  $|V_{Ed}| > |V_E|_{max} \leq (2 + \zeta) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$  απαιτείται δισδιαγώνιος οπλισμός για την ανάληψη τέμνουσας στις δοκούς  
→ όντως, για  $\tau > 0.5(2+\zeta)\sqrt{f_c} \approx (2+\zeta)f_{ctm}$  κίνδυνος διατμητικής ολίσθησης!

- ❖ Διατμητική αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη ένταση μπορεί να συμβεί μετά την καμπτική διαρροή, άρα για μδ σχετικά υψηλό!

→ Καμπτοδιατμητική αστοχία



❖ Άλλες διατάξεις Ευρωκώδικα 8 (πλαστιμότητα στοιχείων)

- Για να διασφαλισθεί πλαστιμότητα  $\mu_\phi$  το max ποσοστό οπλισμού

$$\rho_{max} = \rho' + \frac{0.0018}{\mu_\phi \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

→ συντηρητική και δύσκολη στην υλοποίηση σχέση, βασισμένη στην πολύ συντηρητική παραδοχή  $\varepsilon_{cu}=0.0035$  (δηλ. απερίσφικτο σκυρόδεμα!)

- Συνεκτίμηση περίσφιξης στον υπολογισμό του  $\rho_{max}$ :

→ για μια τυπική δοκό 25/50 απαιτούνται συνδετ. Φ8/100 στο  $\ell_{cr}$

$\Rightarrow \rho_w=0.0076$ , και για C25/30, B500C  $\rightarrow \omega_w=0.197$ , άρα  $\omega_w \approx 0.20$

$\varepsilon_{cu} \approx 0.0035 + 0.1\omega_w$ , οπότε για  $n=4$  (μονός συνδετήρας ↔ δυσμενέστερο)

$a_n = 1 - (8/3)(1/n) = 0.33$ ,  $a_s = [1 - 0.5(s/b_c)]^2 = 0.54 \Rightarrow a = 0.18 \Rightarrow \varepsilon_{cu} \approx 0.007$

➤ Από τη σχέση  $\varphi_{cu} = \varepsilon_{cu}/\xi_{cu}d$ , για  $\xi_{cu} \approx \frac{\omega - \omega'}{1 - \varepsilon_{c0}} \xrightarrow{3\varepsilon_{cu} \rightarrow 0.007} \varphi_y \approx \frac{1.54\varepsilon_y}{d}$  [Fardis, 2009]

$$\mu_\phi = \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_{cu}d} \cdot \frac{d}{1.54\varepsilon_y} \quad \text{προκύπτει τελικά: } \omega \approx \omega' + \frac{0.004}{\mu_\phi \varepsilon_y} \Rightarrow \rho_{max} = \rho' + \frac{0.004}{\mu_\phi \varepsilon_{sy,d}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

## ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ – ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ

### Σεισμική συμπεριφορά Υποστυλωμάτων Ο/Σ

**Α. Ι. Κάππος**  
**Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

**Θεσσαλονίκη 2012**

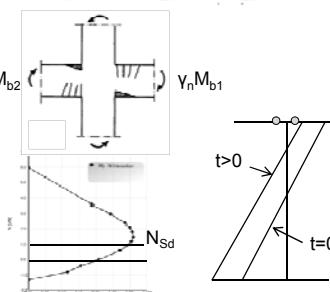
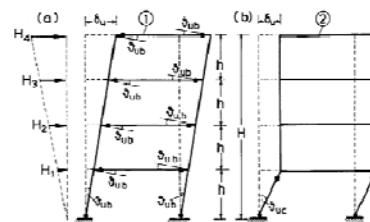


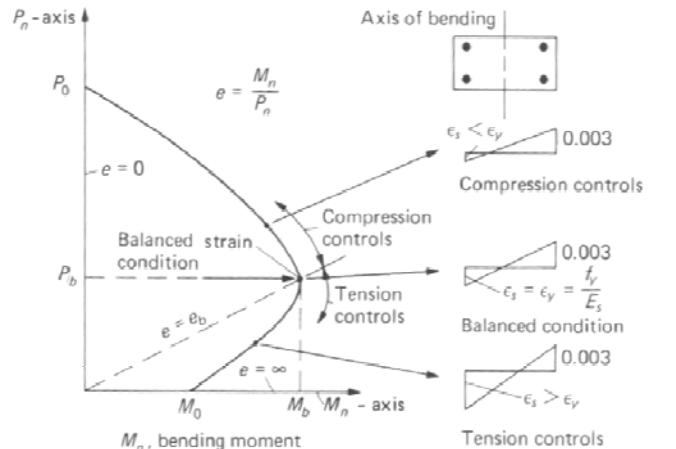
Σεισμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων Ο/Σ – Υποστυλώματα

#### Αναμενόμενη συμπεριφορά υποστυλωμάτων Ο/Σ

- Σύμφωνα με τις αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού, στα υποστυλώματα (με εξαίρεση τη στάθμη του ισογείου και τον τελευταίο όροφο) δεν πρέπει να σχηματιστούν πλαστικές αρθρώσεις. Εντούτοις, λόγω:

- κράτυνσης του χάλυβα
  - συμβολής των οπλισμών της πλάκας στην αντοχή των δοκών ( $M_{b1}$ )
  - διακύμανσης του αξονικού φορτίου,  $M_y = M(N)$
  - διακύμανσης του σημείου μηδενισμού των  $M$  (επιρροή ανώτερων ιδιομορφών, αλλαγή λόγου δυσκαμψιών λόγω πλαστικοποιήσεων...)
  - διαξονικής επιπόνησης (κυρίως στα γωνιακά)
- σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις και σε ορισμένα υποστυλώματα, εκτός και αν γίνει διαστασιολόγηση για  $\gamma_n \geq 2.0 \div 2.5$ . Χρήση πολύ υψηλών  $\gamma_n$  μπορεί να γίνει μόνο αν συνδυαστεί με χαλάρωση των απαιτήσεων περίσφιξης (??...)
- ανάγκη για επαρκή πλαστιμότητα και στα υποστυλώματα!





Αλληλεπίδραση  $M_y$ - $N$  στα υποστυλώματα  
Σημείο ισόρροπης (ταυτόχρονης) αστοχίας ( $M_b$ ,  $N_b$ )



### Συμπεριφορά υπό μονότονη φόρτιση:

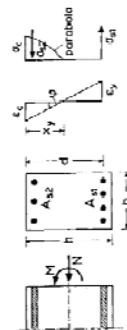
Διαθέσιμη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων

$$\mu_\phi \approx 1.2 \frac{E_s}{f_y} \left[ \frac{0.6}{v + (\rho_1 - \lambda \rho_2) f_y / f_c} - 1 \right] \epsilon_{cu}$$

$$v = \frac{N}{f_c b h}; \rho_1 = \frac{A_{sl}}{b h}; \rho_2 = \frac{A_{s2}}{b h}$$

όπου:

- για  $v < 0.1$  ("δοκοί")  $\lambda = 0.5 + 18\rho_1$
- για  $v = 0.1$   $\lambda \approx 2/3$
- για  $v = 0.2$   $\lambda \approx 0.9$
- για  $v > 0.2$   $\lambda \approx 1.0$



ορθογωνικό υποστύλωμα με  
δυο στρώσεις οπλισμών

❖ Σε κάθε περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ανάλυση  $M - \phi$  (RCCOLA)

❖ Προσεγγιστική αναλυτική έκφραση (EC8, CEB-MC):

$$\epsilon_{cu} \approx 0.0035 + 0.1 \alpha \omega_w \quad (\alpha = a_n \cdot a_s, \text{ από μοντέλο περισφιγμένου})$$

Για μη-τετραγωνικές διατομές να λαμβάνεται  $a_n = 1 - (8/3)(1/n)$ ,  
όπου  $n = 4, 8, 12$ , για 0, 1, 2 ενδιάμεσους συνδετήρες





Προσδιορισμός διαθέσιμης πλαστιμότητας υποστυλωμάτων:

- αστοχία θλιβόμενης ζώνης:  $\phi_u = \epsilon_{cu} / x_u$

Καθορισμός οριακής βράχυνσης  $\epsilon_{cu}$ :

- με βάση την πτώση αντοχής, επιλογές:

➢ στάθμη τάσεως  $0.85f_c$  (συντηρητική παραδοχή, κατάλληλη για χρήση στο πλαίσιο κανονισμών)

➢ στάθμη τάσεως  $0.50f_{cc}$  (φυσική σημασία, αντιστοιχεί στην αστοχία του πυρήνα)

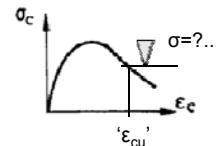
- με βάση τη θραύση του πρώτου συνδετήρα εμπειρική σχέση Park et al. (1982)

$$\epsilon_{cu} \approx \epsilon_{co} + 0.9\rho_w \cdot f_{yw} / 300$$

- με βάση το λυγισμό των θλιβόμενων ράβδων:  $k = \frac{4E_w I_w}{s}, \lambda = \frac{4s_h}{d_{bw}}$ , ~περίπλοκα μοντέλα, π.χ. Papia-Russo (1989)

$$\epsilon_{cu} = f(k, \lambda, \eta, \xi) \rightarrow RCCOLA.net \quad \eta = \sqrt{\frac{4s}{d_{bl}}}, \quad \xi = 1 - \sqrt{\frac{f_u}{1.5f_y}}$$

- αστοχία εφελκυόμενου χάλυβα: πολύ σπάνια σε υποστυλώματα!

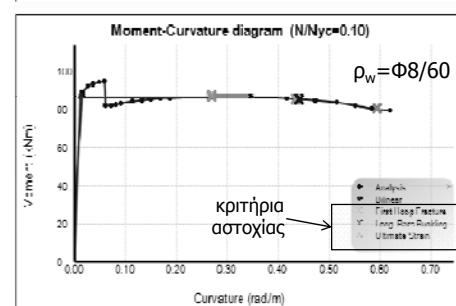
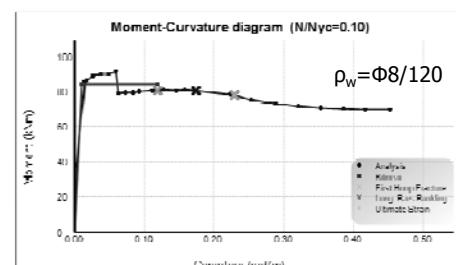
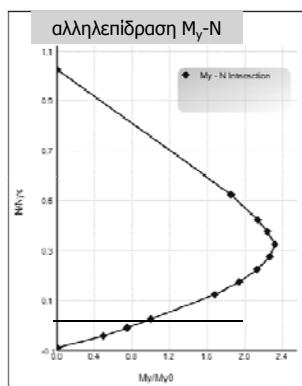


## Συμπεριφορά υπό μονότονη φόρτιση:

Διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων

Υποστύλωμα  $300 \times 300$ ,  
 $\rho_{min}=4\Phi 16$ , χαμηλή N

Επιρροή συνδετήρων στην πλαστιμότητα

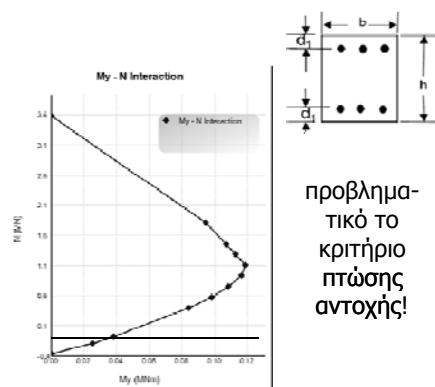




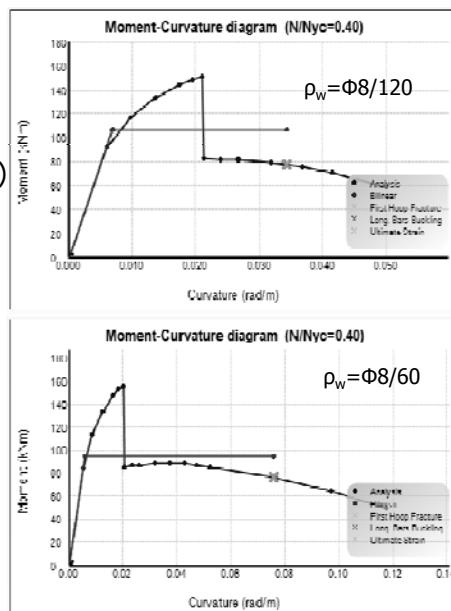
## Συμπεριφορά υπό μονότονη φόρτιση: Διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων

Υποστύλωμα  $300 \times 300$ ,  
 $\rho_{min} = 4\Phi 16$ , υψηλή N

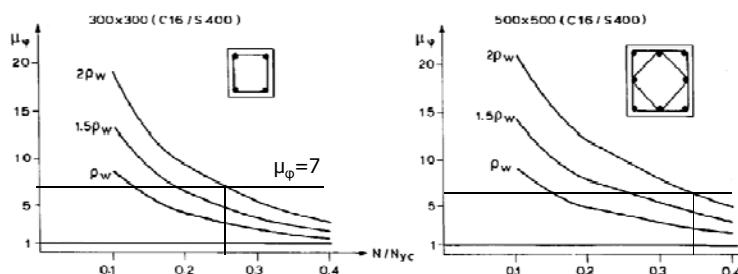
Επιρροή αποφλοίωσης  
(για υψηλά  $d_1/h \leftrightarrow$  μικρές διατομές)



προβλημα-  
τικό το  
κριτήριο  
πτώσης  
αντοχής!



## Συμπεριφορά υπό μονότονη φόρτιση



μεταβολή  $\mu_\phi$  συναρτήσει της στάθμης του αξονικού φορτίου

Ευρωκάδικας 8:  $\mu_\phi = 2q_o - 1$  (για  $T_1 \geq T_C$ )

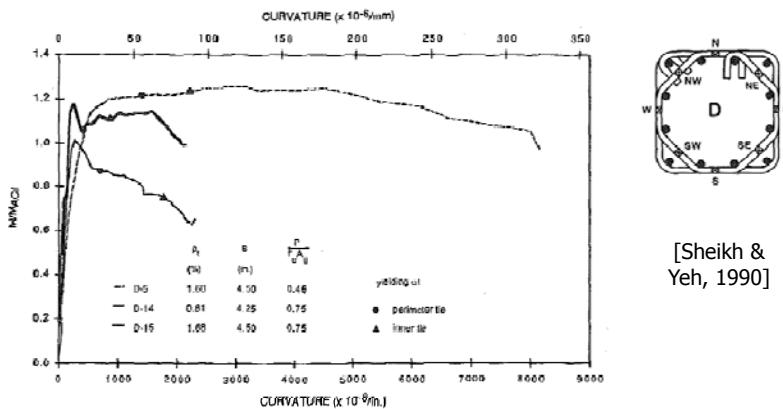
$\Rightarrow$  για  $q_o \approx 4$  (DC M, πλαισιακά ή διπλά συστήματα)  $\rightarrow \mu_\phi = 7$

$\rightarrow$  ακόμη και για  $\rho_w = 2\rho_{w,min}$ , το  $\mu_\phi = 7$  διασφαλίζεται μόνο για  $N/N_{yc} \leq 0.26$  ( $N/N_{ud} \leq 0.39$ ) στο  $300 \times 300$

ή για  $N/N_{yc} \leq 0.35$  ( $N/N_{ud} \leq 0.52$ ) στο  $500 \times 500$



## Συμπεριφορά υπό μονότονη φόρτιση

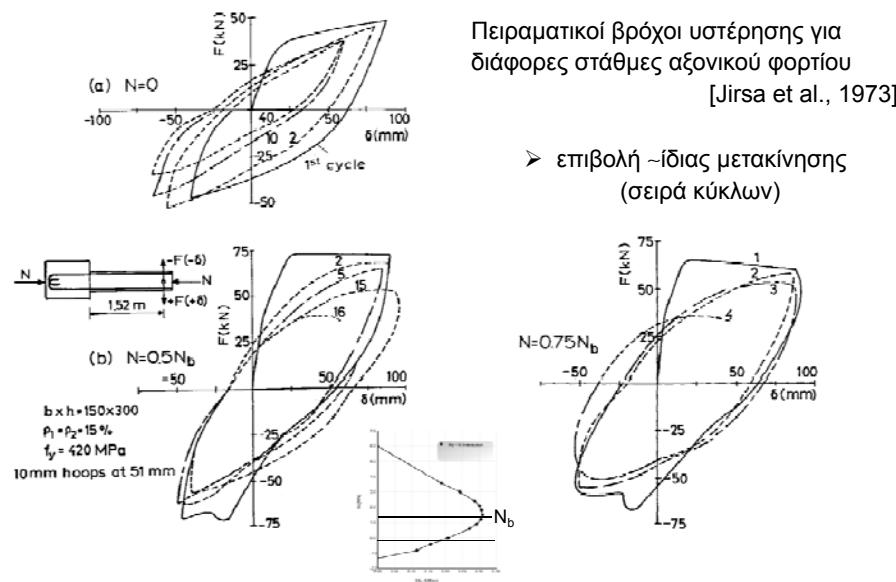


πειραματικά διαγράμματα M – φ υπό μονότονη φόρτιση:

Επιρροή του υψηλού αξονικού φορτίου,  $\nu = 0.46 \div 0.75$   
(D-15 ίδιο N με D-14 αλλά διπλάσιο  $\rho_w$ !)



## Επιρροή αξονικού φορτίου στη σεισμική συμπεριφορά





Συνέπειες θλιπτικού αξονικού φορτίου ( $N < -0.1f_c A_c$ )

• Ευμενείς:

- κλείσιμο των ρωγμών κάμψης/διάτμησης (σ' αυτό βοηθά και το  $\rho_1 = \rho_2$ )
- παρεμπόδιση αξονικής επιμήκυνσης ( $\leftrightarrow$  αποδιοργάνωση του στοιχείου)
  - αύξηση δυσκαμψίας, πάχους βρόχων  $F - \delta$
  - αποτροπή πρόωρης αστοχίας από:
    - διατμητική ολίσθηση
    - συνάφεια / αγκυρώσεις

• Δυσμενείς:

- Εξαντλείται ταχύτερα η  $\varepsilon_{cu}$  (παραμόρφωση θλιβόμενης ζώνης), άρα:
  - πρόωρη αποφλοίωση – μείωση αντοχής ( $\leftrightarrow$  επιρροή  $d_2/h$ )
  - κίνδυνος πρόωρου λυγισμού διαμήκων ράβδων
- Για σχετικά υψηλές πλαστιμότητες ( $\mu_\delta > 4$ ) δημιουργούνται σημαντικές ροπές 2ας τάξεως (φαινόμενο  $P - \delta$ )
  - μείωση αντοχής / δυσκαμψίας  $\Rightarrow$  κατάρρευση!
  - (κατά κανόνα, η τελική κατάρρευση ενός κτηρίου προκαλείται λόγω  $P - \delta$ )



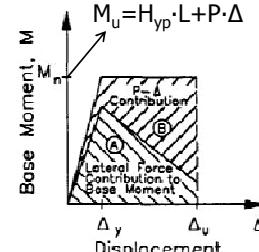
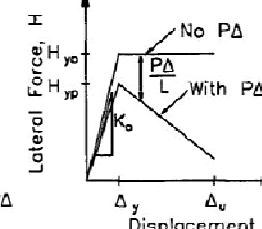
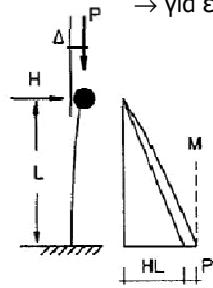
Ερμηνεία επιρροών 2ας τάξεως ( $P - \Delta$ )

➢ για δεδομένη  $H^I$ , αύξηση της  $\Delta$  λόγω  $P - \Delta \leftrightarrow H^{II} = (P \cdot \Delta)/L$

➢ μείωση δυσκαμψίας  $K = H/\Delta \rightarrow K = K_0 \cdot (1 - \theta)$

$$\theta = \frac{P \cdot \Delta_y}{H_{yo} \cdot L}$$

$\rightarrow$  για επίλυση με  $K_0$ , η σωστή  $\Delta$  προκύπτει για φορτίο  $H/(1-\theta)$



$$\text{μείωση αντοχής } H_{yp} = H_{yo} - (P \cdot \Delta_y)/L$$

οριζ. δύναμη που εξαντλεί την καμπτική αντοχή  $M_n$

κλίση μετελαστικού κλάδου:

$$\frac{-\theta}{1 - \theta} \cdot K_0$$



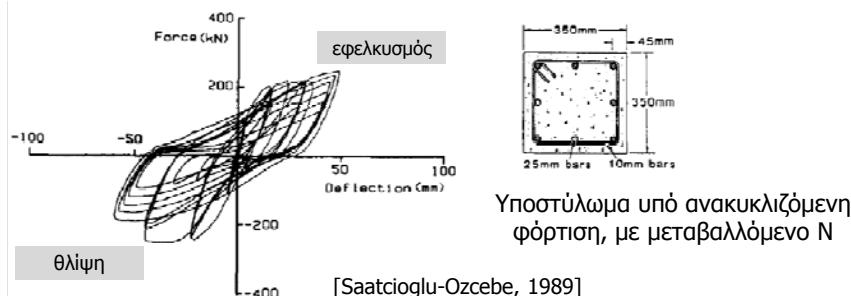
### Υποστυλώματα σε σεισμό – Συμπεράσματα από πειραματικές μελέτες

- Κατάλληλα διαστασιολογημένα υποστυλώματα ( $\rho < \rho_{max}$ ,  $\rho_w > \rho_{w,min}$ ,  $N < N_b$ ) διαθέτουν επαρκή πλαστιμότητα ( $\mu_\theta \geq 4$ ) σε σχέση με τις απαιτήσεις που προκύπτουν σε φορείς όπου εφαρμόστηκε ο ικανοτικός σχεδιασμός.

➤ με βαρειά περίσφιξη (NZ3101 ή EC8 DC'H') εξασφαλίζεται  $\mu_\theta = 6$

- Έντονη διακύμανση του  $N$  στη διάρκεια του σεισμού (λόγω ροπών ανατροπής ή/και κατακόρυφης συνιστώσας) → πιθανότητα εφελκυσμού !

⇒ μείωση δυσκαμψίας, κίνδυνος διατμητικής ολίσθησης

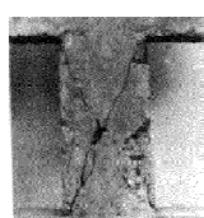


### Κοντά υποστυλώματα σε σεισμό

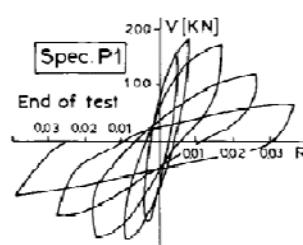
- Ο λόγος διάτμησης  $a_s = (M/V)/h$  καθορίζει τον τύπο της αστοχίας του υποστυλώματος (αμφίπακτο:  $\ell/h = 2a$ )

➤  $a_s > \sim 2.0 \rightarrow$  καμπτική αστοχία

➤  $a_s < \sim 2.0 \rightarrow$  διατμητική αστοχία (διάρρηξη καταμήκος των διαγωνίων, ή, για χαμηλό  $N$ , διατμητική ολίσθηση)



Συμβατικά οπλισμένο κοντό υποστύλωμα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση  $a_s = 1.0$

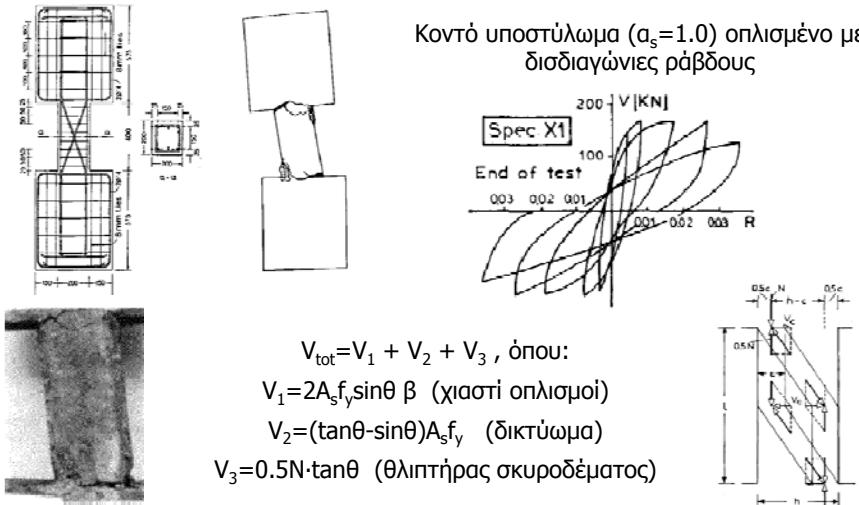


[Tegos-Penelis 1988]



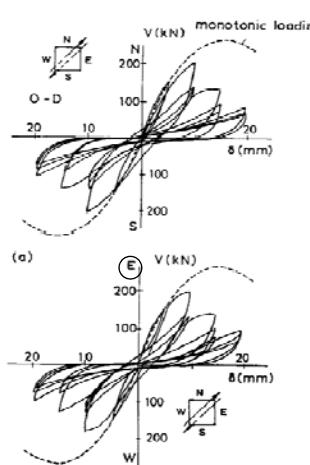
Κοντά υποστυλώματα σε σεισμό

- Σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς όταν χρησιμοποιούνται χιαστί διαγώνιοι οπλισμοί (ένα ή περισσότερα ζεύγη)

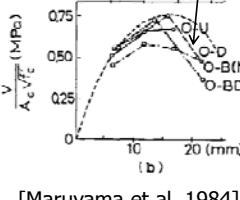


### Ανακυκλιζόμενη διαξονική επιπόνηση

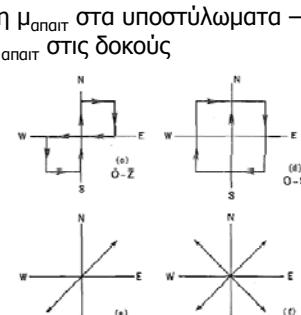
- Για  $\phi=45^\circ$  σ' ένα γωνιακό υποστύλωμα μπορεί να αναπτυχθούν  $M$  και  $V$  42% ( $\sqrt{2}$ ) υψηλότερες από εκείνες που αντιστοιχούν στη μονοαξονική καμπτική αντοχή των δοκών (εφόσον διαρρέουν ταυτόχρονα, για  $\mu_d=3$  συμβαίνει για  $\phi>18^\circ$ ) ➤ διαρροή και του υποστυλώματος!
- αλλά  $M_u(\phi=0^\circ) \geq M_u(\phi=45^\circ)$  ! ➤ πρόβλημα υψηλής τέμνουσας
- μείωση δυσκαμψίας (ρήγματα σε όλες τις παρειές)
- αύξηση  $\mu_{apart}$  στα υποστύλωματα – μείωση  $\mu_{apart}$  στις δοκούς



μείωση συνισταμένης  
απόκρισης μετά την ανάπτυξη  
της μέγιστης αντοχής



[Maruyama et al. 1984]



σημαντική η επιρροή  
του ιστορικού φόρτισης



### Σεισμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων Ο/Σ – Υποστυλώματα

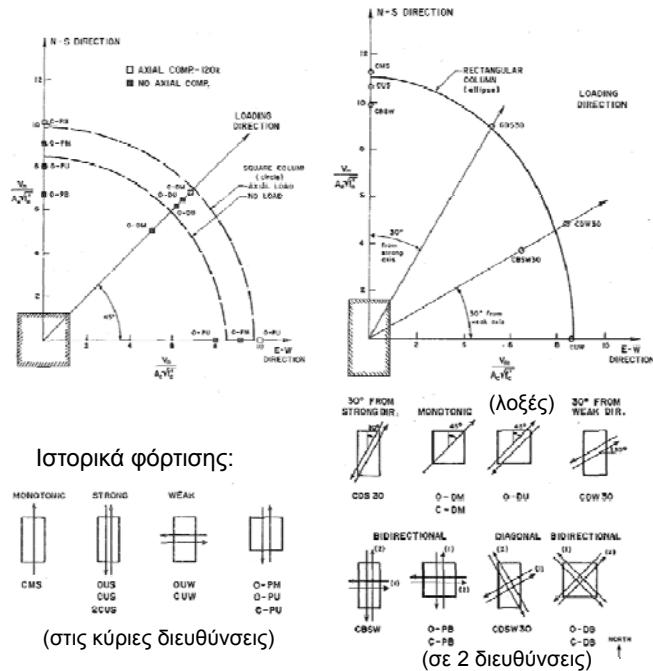
**Διαξονική αντοχή  
υποστυλωμάτων**  
[Umebara-Jirsa 1984]

Για 17 δοκίμια  
υποστυλωμάτων  
(κλίμακα 2:3):

$(V_m/V_c)_{av} \approx 1.0$   
μετρηθείσα  
από καμπύλη αλληλεπιδρασης  
διασπορά 10%

- Παρόμοιες καμπύλες αλληλεπιδρασης ισχύουν για τις ροπές ( $M_{xu}, M_{yu}$ )

[Zahn et al. 1989]



**ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ –  
ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ Ο/Σ**

**Σεισμική συμπεριφορά  
Τοιχωμάτων Ο/Σ**

**Α. Ι. Κάππος  
Καθηγητής Τμήμ. Πολιτ. Μηχανικών ΑΠΘ**

**Θεσσαλονίκη 2012**



(Τα βασικά των τοιχωμάτων καλύφθηκαν στο ΣΣ III)

- ❖ Κύριος ρόλος: Ανάληψη σεισμικών δράσεων
- **Πλεονεκτήματα**
  - i. Σημαντική αύξηση δυσκαμψίας  
→ Μείωση μετακινήσεων → μείωση P-Δ (ροπές 2<sup>ας</sup> τάξεως)  
- μείωση βλαβών μη-φέροντων στοιχείων (↔ μεγάλα σχετικά βέλη)
  - ii. Διατήρηση φέρουσας ικανότητας μετά τη ρηγμάτωση
  - iii. Κατασκευαστικά πιο εύκολα από τα «πλάστιμα πλαίσια»  
(σημαντικό κυρίως για τα παλιότερα κτίρια!)
  - iv. Πιο αξιόπιστη συμπεριφορά από τα πλαίσια, λόγω:
    - αποφυγής σχηματισμού μη αναμενόμενων πλαστικών αρθρώσεων
    - μικρότερης επιρροής ασύμμετρα διαταγμένων τοιχοπληρώσεων



### **Μειονεκτήματα**

- i. Φόβοι μη επαρκούς πλαστιμότητας, λόγω επιρροής της τέμνουσας ( $\Leftrightarrow$  μικρότερα q, ιδιαίτερα σε παλιότερους κανονισμούς)

→ Έχουν ήδη ξεπεραστεί, λόγω κατάλληλων μεθόδων διαστασιολόγησης – όπλισης

ΕΝ1998-1: ~ίδια q για πλαίσια και για μικτά συστήματα

ΤΥΠΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΚΠΜ	ΚΠΥ
Πλαισιωτό σύστημα, διπλό σύστημα, σύστημα συζευγμένων τοιχωμάτων	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Σύστημα ασύζευκτων τοιχωμάτων	3,0	$4,0\alpha_u/\alpha_1$

- ii. Μικρότερη ευμενής επιρροή των (συμμετρικά διαταγμένων) τοιχοποιιών συμπλήρωσης απ' ό,τι στα πλαισιακά συστήματα (σε σχέση με αντοχή και δυσκαμψία)
- iii. Τυχόν αρχιτεκτονικά προβλήματα ( $\Leftrightarrow$  μόνιμοι τοίχοι)

### **Μορφές αστοχίας τοιχωμάτων**

- Αν οι ακραίες περιοχές έχουν επαρκή περίσφιξη («κρυφοκολώνες» με πυκνούς συνδετήρες) τα τοιχώματα διαθέτουν υψηλή πλαστιμότητα, αντίστοιχη των δοκών



- Συνήθεις μορφές αστοχίας (υπό ανακυκλ. ένταση):

→ λυγισμός → ράβδων διαμ. οπλισμού

(μετά την αποφλοίωση) κορμού τοιχώματος

→ συντριβή σκυροδέματος κορμού

ή, για μη επαρκή οπλισμό έναντι τέμνουσας:

αστοχία από διαγώνιο εφελκυσμό

- Καθοριστικός παράγοντας η τιμή της διαταγμητικής τάσης

$$\tau = \frac{V}{b_w d} \cong \frac{V}{0.8 b_w l_w}$$

$\tau \leq 0.5\sqrt{f_c}$  → κυρίως καμπτική λειτουργία ( $\sqrt{f_c} \approx 2f_{ctm}$ )

$\tau \geq 0.6\sqrt{f_c}$  → αστοχία από τέμνουσα

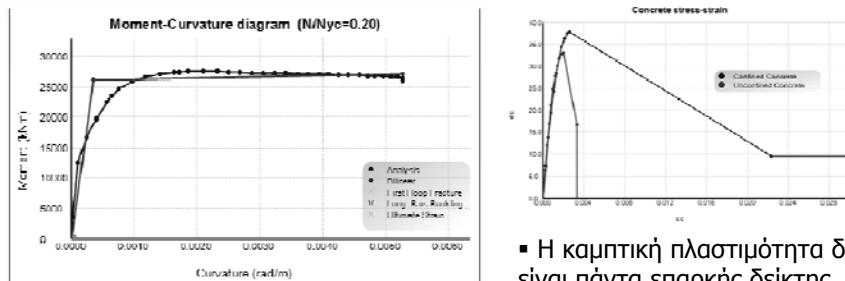
- Αντίστοιχα, η λυγηρότητα:  $h_w/l_w > 2 \rightarrow$  'μεγάλη' (κυριαρχεί η κάμψη)

$h_w/l_w < 1 \rightarrow$  'μικρή' (κυριαρχεί η διάτμηση)



Προσδιορισμός διαθέσιμης αντοχής και πλαστιμότητας τοιχωμάτων:

- αστοχία θλιβόμενης ζώνης:  $\Phi_u = \varepsilon_{cu}/x_u$
  - αστοχία εφελκυόμενου χάλυβα:  $\Phi_u = \varepsilon_{su}/(d-x_u)$ 
    - Με τη γενική μέθοδο (ανάλυση M-φ, π.χ. RCCOLA.net), αλλά:
      - η παραδοχή Bernoulli αδρομερής (δίνει, ωστόσο, εύλογα αποτελέσματα)
      - διαφορετικό  $\sigma_c - \varepsilon_c$  για κάθε περιοχή με διαφορετικό βαθμό περίσφιξης!
      - δεν υπάρχει σαφές σημείο διαρροής (διαδοχική διαρροή πολλών στρώσεων)

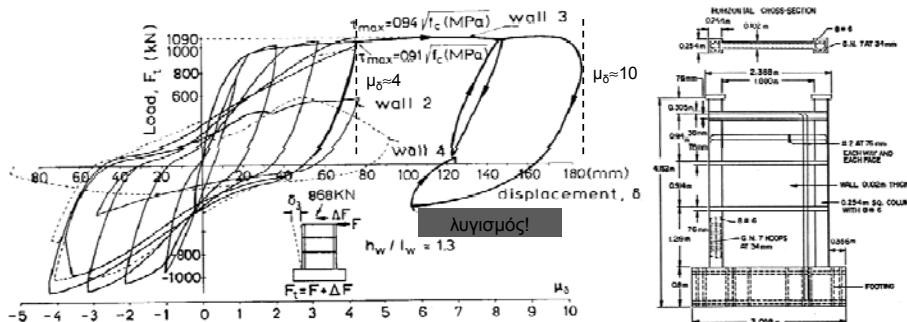


τοίχωμα 250/6000, με  
κρυφοκολώνες 250/900

- Η καμπτική πλαστιμότητα δεν είναι πάντα επαρκής δείκτης. Μπορεί να είναι κρίσιμη η τέμνουσα (αλλά για  $\mu > 1$ )



Τοιχώματα μεγάλης λυγηρότητας: Κυρίαρχη κάμψη



Βρόχοι υστέρησης για δοκίμια αντιπροσωπευτικά τοιχωμάτων μεγάλης λυγηρότητας υπό μονότονη (Wall 3) και ανακυκλιδόμενη (Walls 2, 4) φόρτιση [Bertero et al., 1980]

- λυγηρά τοιχώματα μπορεί να αστοχήσουν με λυγισμό στην αδύνατη διεύθυνση (μετά την αποφλοίωση)
  - συνεισφορά οπλισμού σχάρας: μικρή σε σχέση με  $M_u$ , μέτρια σε σχέση με  $\mu_\theta$
  - καμπύλη μονότονης φόρτισης  $\sim 2 \div 11\%$  πάνω από την περιβάλλουσα [Endo 1980]
  - γενικά, πλαστιμότητα  $\mu_{\text{ανακυκλ}} \leq 0.7 \mu_{\text{μονότ}}$



Καμπτική αστοχία τοιχωμάτων λόγω ανεπαρκούς διαμόρφωσης των ακραίων περιοχών τους, κατά το σεισμό της 27-2-2010 στη Νότια Χιλή ( $M_w$  8.8 !)

[RMS 2011, Massone 2011]



### Τυπικές μορφές διατμητικής αστοχίας σε τοιχώματα

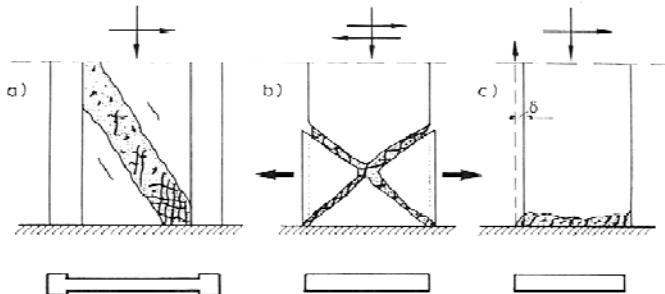
(a) Συντριβή κορμού: για  $V > 0.2f_c b_w l_w$  ( $\Leftrightarrow \tau > 0.6\sqrt{f_c} \approx 1.2f_{ctm}$ )

→ μικρή η βελτίωση από την αύξηση των οριζόντιων ράβδων της σχάρας!

(b) Διαγώνιος εφελκυσμός: για  $\tau < 0.6\sqrt{f_c}$ , εφόσον δεν υπάρχουν επαρκείς οριζόντιοι οπλισμοί (σχάρας)

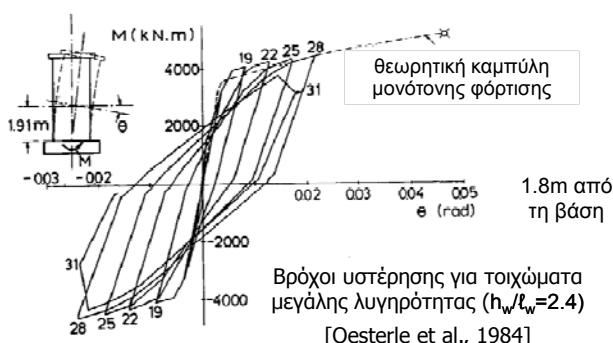
(c) Διατμητική ολίσθηση (καταμήκος ανοικτής καμπτικής ρωγμής)

- υπό ισχυρή ανακυκλιζόμενη τέμνουσα ή/και
- λόγω κακότεχνου αρμού διακοπής εργασίας

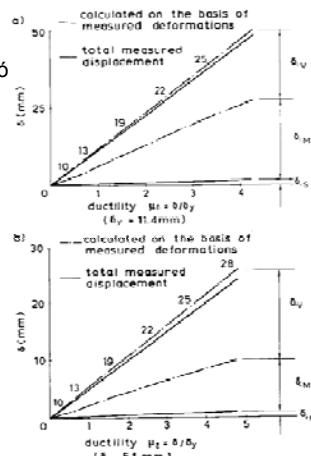




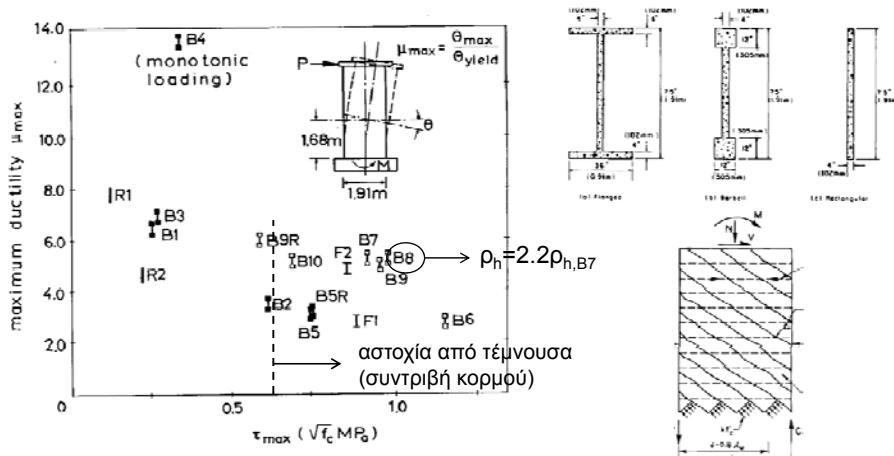
### Τοιχώματα μεγάλης λυγηρότητας με υψηλή τέμνουσα



$\sigma_o = 0.08f_c$   
 $T_{max} = 0.9\sqrt{f_c} \rightarrow$  υψηλή!  
 $\rho_h = 0.63\%$ ,  $\rho_v = 0.29\%$   
 άκρα:  $\rho_f = 3.67\%$ !  
 $\rho_w = 1.35\%$



### Τοιχώματα μεγάλης λυγηρότητας



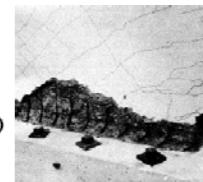
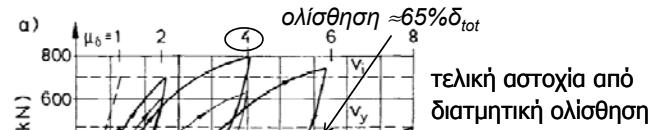
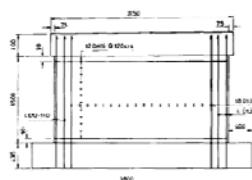
Πλαστιμότητα ( $\mu_0$ ) τοιχωμάτων με διάφορους τύπους διατομής, με N ή χωρίς (μαύρες κουκίδες) [Oesterle et al., 1984]



### Τοιχώματα μικρής λυγηρότητας

συμβατικά  
οπλισμένο τοίχωμα

[Paulay-  
Santhakumar,  
1976]



$$h_w/t_w = 0.5 \quad M_v = 1.25M_u \quad T_{max} = 0.65\sqrt{f_c}$$

→ Τυπική μορφή αστοχίας (χωρίς χιαστί ράβδους αλλά με  $V_d > \gamma_u \cdot V(M_u)$ ):

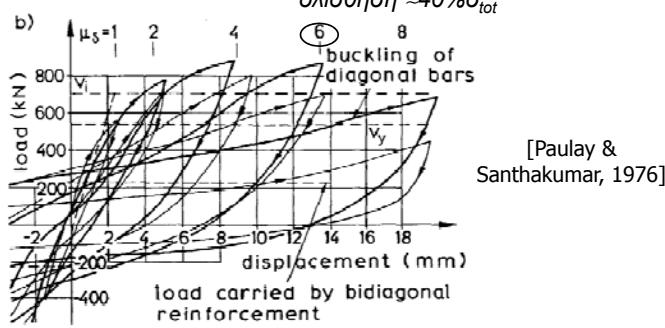
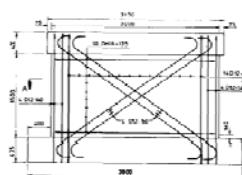
Διατμητική ολίσθηση  $\leftrightarrow$  μη-επιθυμητή, αλλά όχι ψαθυρή! ( $\mu_\delta \approx 4$ )



### Τοιχώματα μικρής λυγηρότητας

ολίσθηση  $\approx 40\% \delta_{tot}$

τοίχωμα με δισδιαγώνιες ράβδους



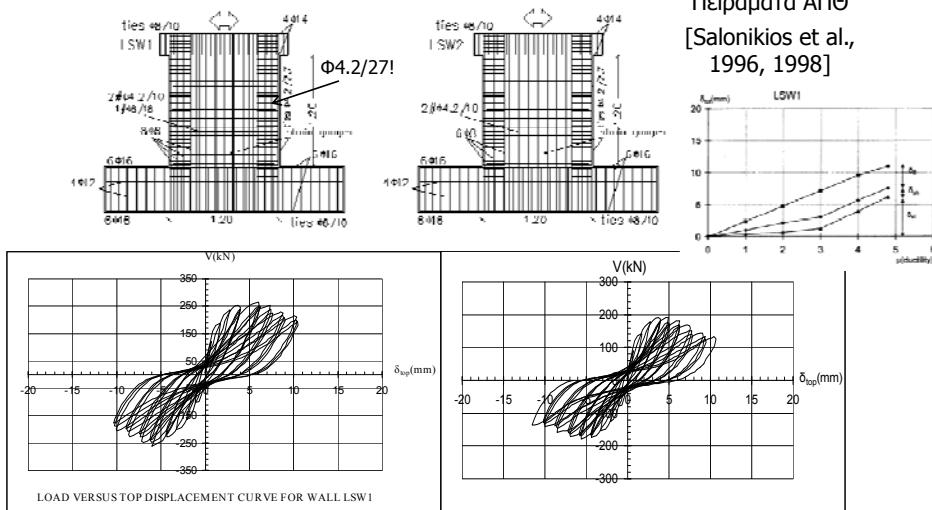
[Paulay &  
Santhakumar, 1976]

→ Τυπική μορφή αστοχίας (με χιαστί ράβδους που αναλαμβάνουν 30%  $V_u$ ):

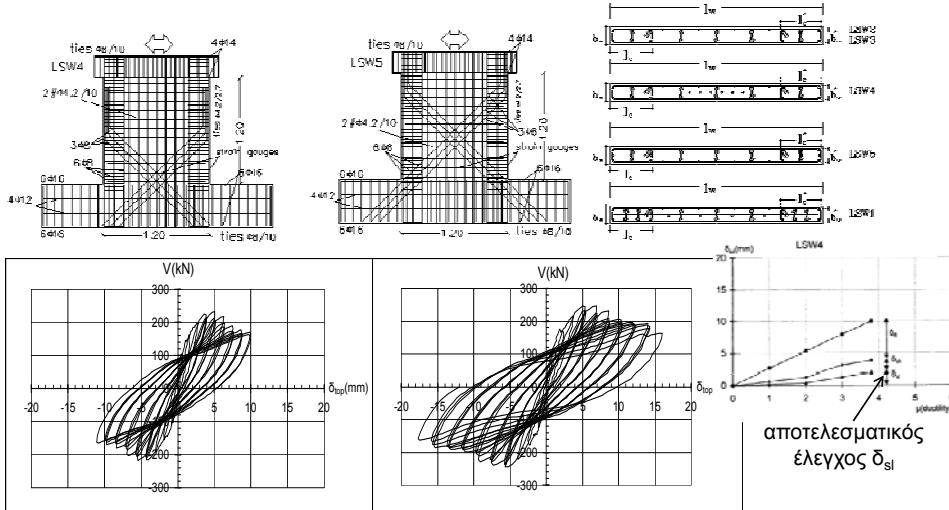
Διατμητική ολίσθηση  $\leftrightarrow$  μη-επιθυμητή, αλλά σχεδόν πλάστιμη! ( $\mu_\delta \approx 6$ )



## Τοιχώματα μικρής λυγηρότητας

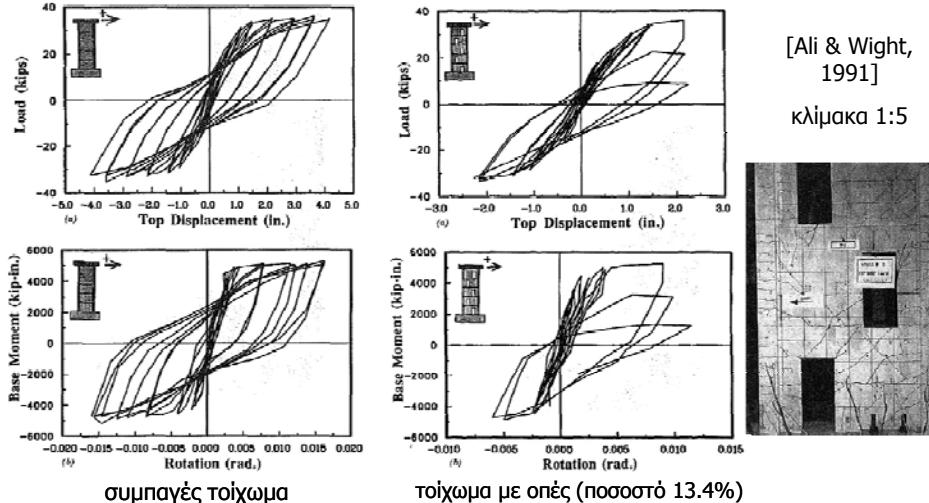
τοιχώματα με λόγο διάτμησης  $a_s=1.0$ LSW1:  $\rho_h = \rho_v = 5.65\%$ LSW2:  $\rho_h = \rho_v = 2.77\%$ 

## Τοιχώματα μικρής λυγηρότητας

τοιχώματα ΑΠΘ, λόγος διάτμησης  $a_s=1.0$ LSW4:  $\rho_h = \rho_v = 2.77\%$ ;  $\rho_d = 4.16\%$  ( $\ell_d = 0$ )    LSW5:  $\rho_h = \rho_v = 2.77\%$ ;  $\rho_d = 4.16\%$  ( $\ell_d = 0.8\ell_w$ )αποτελεσματικός  
έλεγχος  $\delta_{sl}$



## Τοιχώματα με οπές



- Παρόμοια αντοχή των δυο τοιχωμάτων, καλή συμπεριφορά ως drifts  $\approx 1\%$
- Για drifts  $> 1.5\%$  το τοίχωμα με οπές αστόχησε από διαγώνια θλίψη στον ακραίο πεσσό

## Αξιολόγηση μαθήματος (<https://qa.auth.gr/>)

**ΜΟΔΙΠ**  
ΜΟΝΑΔΑ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ  
Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Αρχιτέκτονες | Το ΑΠΘ | Μέλη | Διεύθυνση Ποιότητας | Σύστημα Διαχείρισης Ποιότητας | Επικαιρότητα | Ηλεκτρονική Αξιολόγηση



Εικοδομούμενοι

**Μπαίνετε με το ριν σας**

- Αρχή
- Το ΑΠΘ
- Μέλη
- Διασφάλιση Ποιότητας
- Σύστημα Διαχείρισης Ποιότητας
- Επικαιρότητα
- Ηλεκτρονική Αξιολόγηση

Σας καλωσορίζουμε στην ιστοσελίδα της Μονάδας Διασφάλισης Ποιότητας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Η ΜΟΔΙΠ ισπατεί ένα συμφέρουσα άργανο για τη διείλεση του Πανεπιστημίου το οποίο, μέσα από τα συναντημένα την διαδικασία των εισαγόμενων και εξαγόμενων αθλούμενων εκπαίδευσης εκπαίδευσης των ακαδημαϊκών μενδών του ίδρυματος, συγχρηματίζει πολύτιμες πληροφορίες για τα δεντράτα και αδενάτα σημεία του Πανεπιστημίου, για τις πλημμύρες και τις ενισχυτήσεις και παρέχει βελτιωτικές και αλλαγές σε γνωμόνες τη διεύθυνση αρμόδιων επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών στους φοιτητές του, το ανθρώπινο δυναμικό του, καθώς και στην ευρύτερη κοινωνία.

Ο διαδικτυακός αυτός τόπος αποτελεί επίσης την πύλη του Συστήματος Διαχείρισης Ποιότητας που αποσκοπεί στη διευκόλυνση του έργου της ΜΟΔΙΠ και των ΟΜΕΔ, με τη μηχανογνωμόνως των διαδικασιών αθλούμενης ποιότητας που πραγματοποιούνται στη Α.Π.Θ.

Ο λογότυπος της ΜΟΔΙΠ

Με το άρθρο 18 του Ν. 1885/1939 ορίστηκε η οφειλέδα του Πανεπιστημίου να φέρει ως ζήμιμα τον ήχο Δημήτριο, προστάτη της Θεσσαλονίκης. Η Σύγκλητος του ΑΠΘ (αναδρόμηση υπ. αριθ. 2005/13-8-1975) αποφάσισε να συνήγεισε η οφειλέδα του να αποκανθίσει τον ήχο Δημήτριο, ενώ το 2005, μετά από πρόταση της Επιτροπής Διμούσων Σχεσών και του Πρωτοβουλίου Σωματείου, η Σύγκλητος (αναδρόμηση 2/76/2-3-2005) ενέκρινε, ο λογότυπος και οι νέες οφειλέδες του ΑΠΘ να αποκανθίσουν τον ήχο Δημήτριο, σε γραφιστική μπαφόρα τοιχογραφίας του Καθολικού της Ιεράς Μονής Χαλιναρίου του Αγίου Όρους.

Συνοδευμένοι χρήστες: 20  
Επανάλειψη: 0