

Βραχυπρόθεσμη Δράση (π.χ. θλιπτικό φορτίο) σε ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ:
 όταν το φορτίο δρα για μια δεδομένη χρονική στιγμή

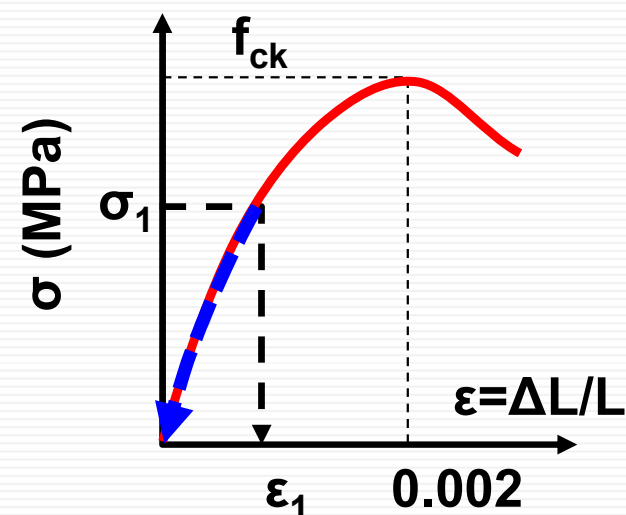
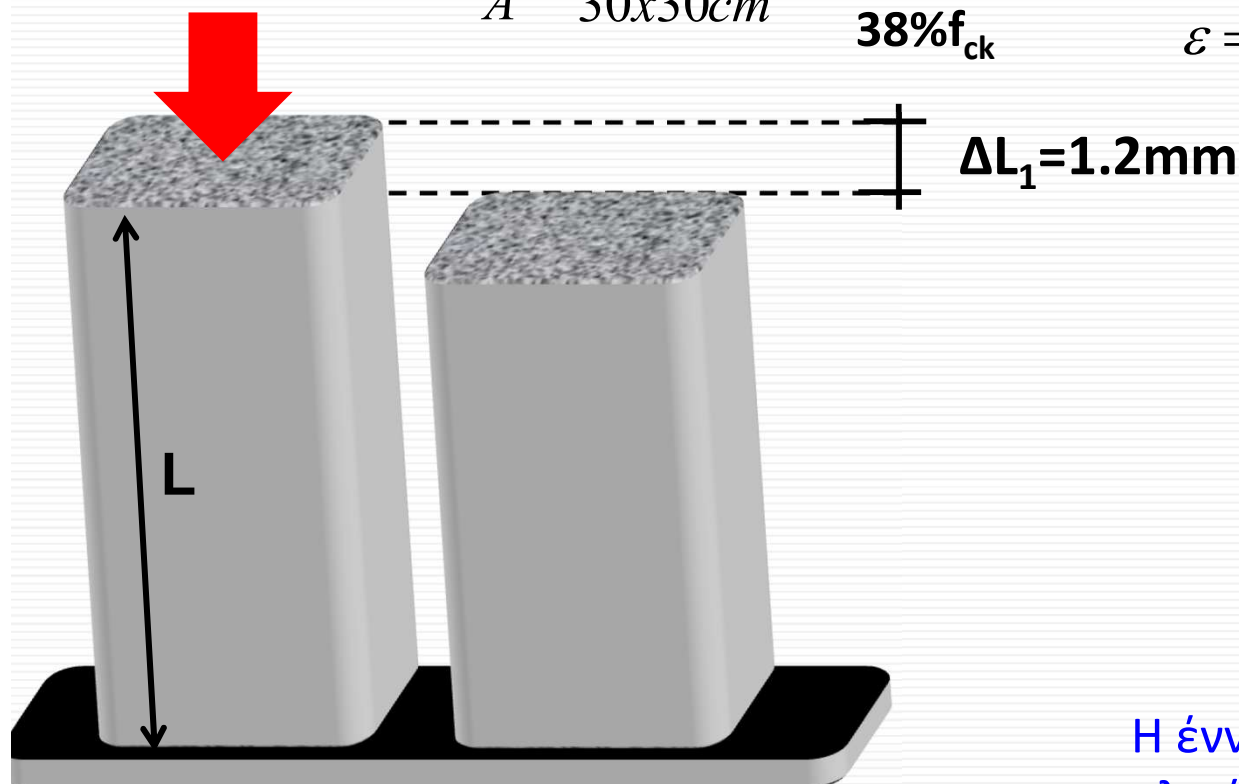
Π.χ. Για υποστήλωμα 30x30 με $L=3m$, $f_{ck}=16MPa$
 N από πλάκα επιφάνειας 10τ.μ. πάχους 15cm
 $\rightarrow N=1.35*2.5tn/m^3*10m^2*0.15=51tn$

$$\sigma = f_{ck} \left(2 \frac{\varepsilon}{0.002} - \left(\frac{\varepsilon}{0.002} \right)^2 \right)$$

$$\Rightarrow \varepsilon = 0.0004 (0.40 / 100)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \Rightarrow \Delta L = 0.0004 \times 3000 = 1.2mm$$

Θλίψη (N) $\sigma = \frac{N}{A} = \frac{51tn}{30 \times 30 cm^2} = 6MPa$
 $38\% f_{ck}$

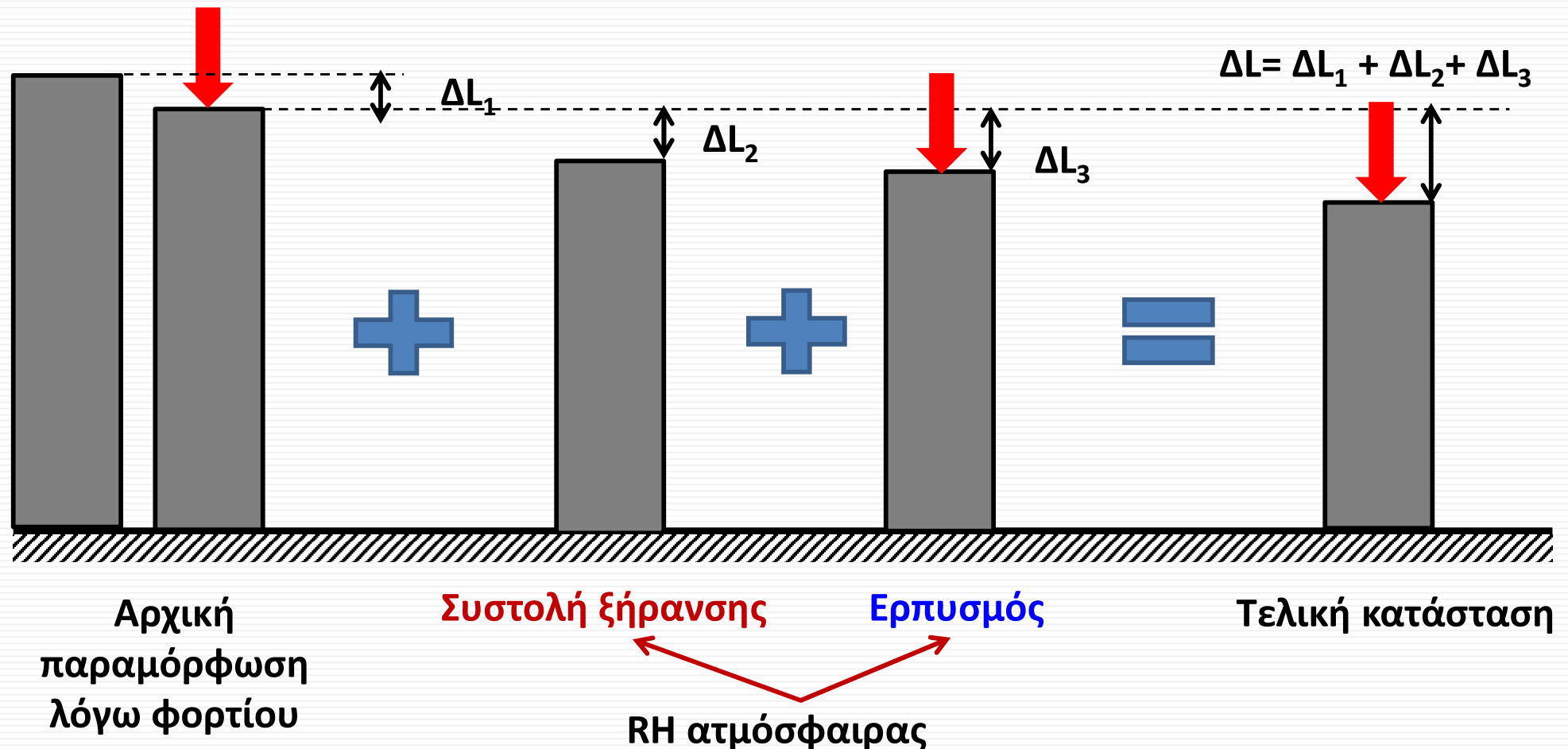


Η έννοια της αποφόρτισης ($N=0$) όταν το υλικό φορτίζεται στην ελαστική του περιοχή
 $\rightarrow \varepsilon=0 \rightarrow \Delta L=0$

χρόνιες παραμορφώσεις σκυροδέματος

(1) Συστολή ξήρανσης – χωρίς δράση φορτίου

(2) Ερπυσμός & χαλάρωση τάσεων – με χρόνια δράση φορτίου

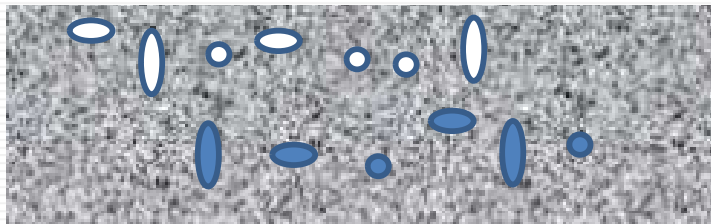


1) Συστολή ξήρανσης (drying shrinkage):

μετακίνηση νερού πόρων αρχικώς κορεσμένου τσιμεντολιθώματος – χωρίς παρουσία φορτίου

Ανομοιόμορφη υγρασία στο δομικό στοιχείο

Εξωτερική επιφάνεια, χαμηλή $RH_{εξ}$.



Συρρίκνωση ανώτερης περιοχής

Αδρανής εσωτ. περιοχή

Ρηγμάτωση!!



Εσωτερική επιφάνεια, υψηλότερη $RH_{εσ}$.

Με εκ νέου έκθεση σε συνθήκες κορεσμού ($RH=100\%$) → **ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ**

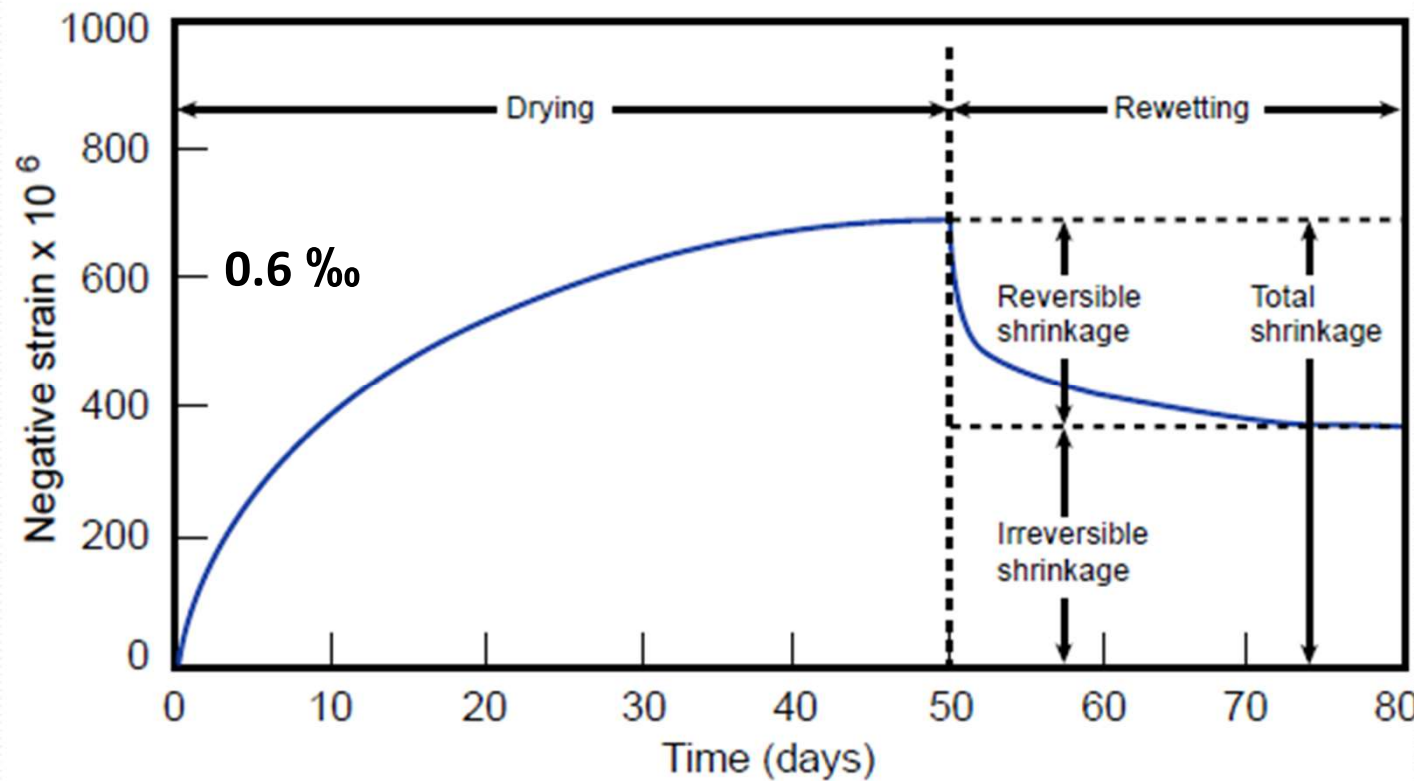
Η συστολή ξήρανσης επιφέρει:

Ανεμπόδιστη παραμόρφωση

→ καμία ένταση!

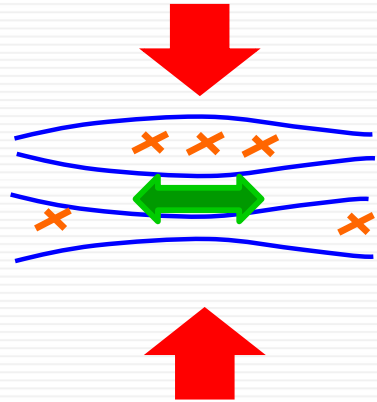
Παρεμποδιζόμενη παραμόρφωση

→ ένταση

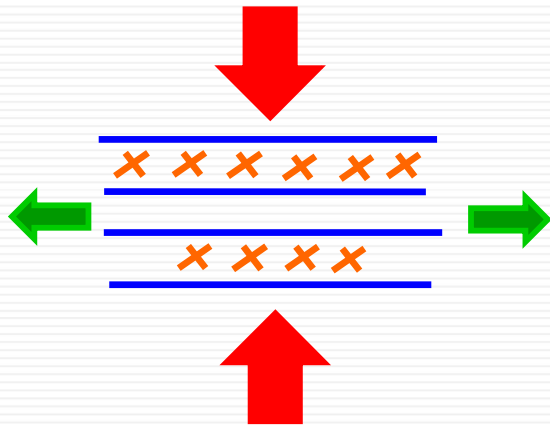


(2) Ερπυσμός (creep):

ανακατανομή νερού πόρων γέλης υπό την δράση του εξωτερικού φορτίου
(ο ρυθμός επιβραδύνεται με την πάροδο του χρόνου)



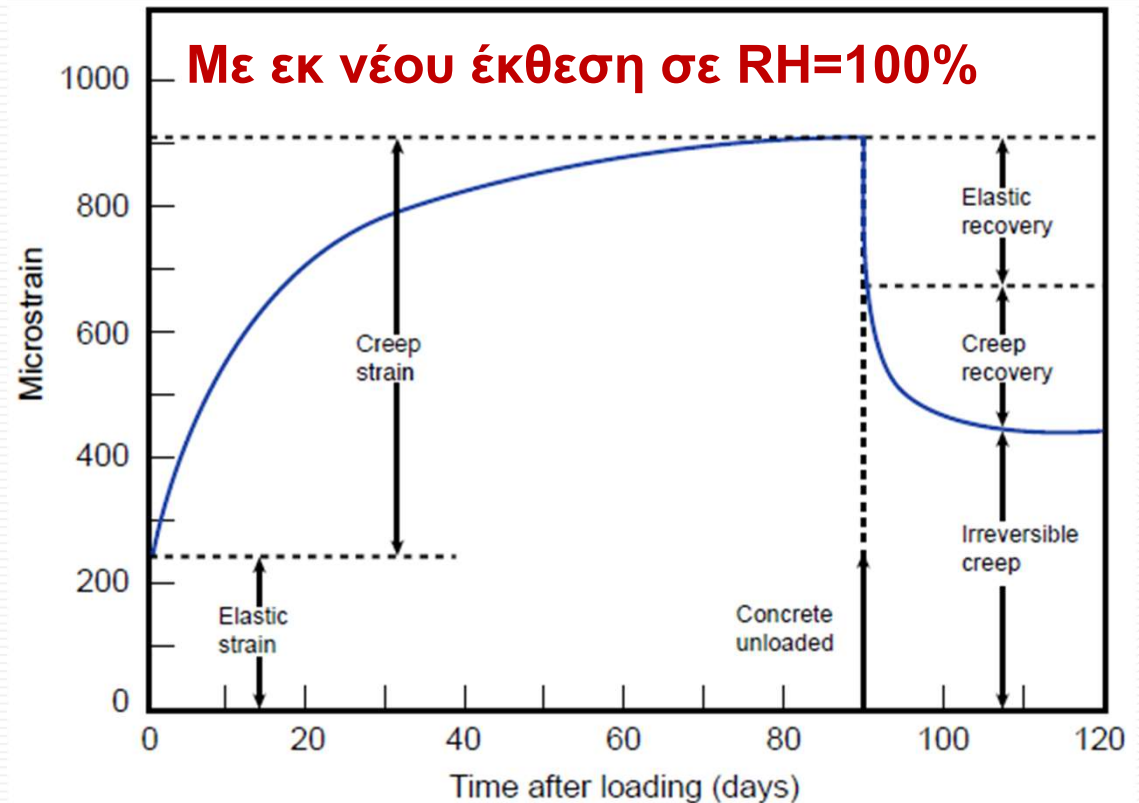
Χαμηλός βαθμός κορεσμού →
ανακατανομή νερού πόρων γέλης



Υψηλός βαθμός κορεσμού →
απομάκρυνση νερού πόρων γέλης

→ οι παραμορφώσεις $\uparrow\uparrow$ με την $\uparrow\uparrow$ βαθμού κορεσμού πόρων τσιμεντολιθώματος (με την σχετική υγρασία του περιβάλλοντος)

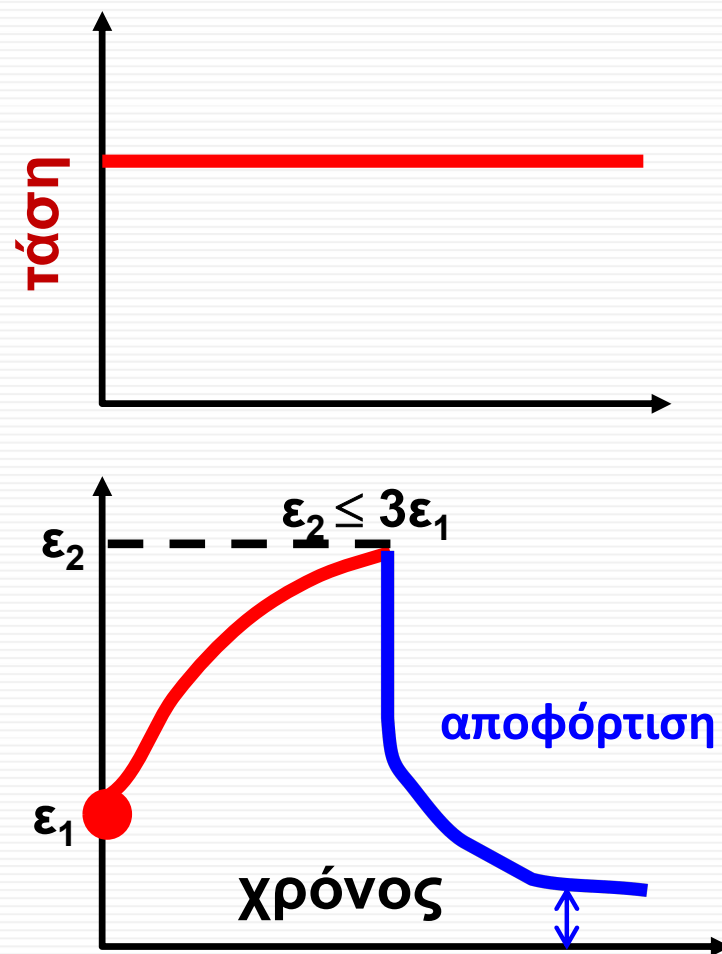
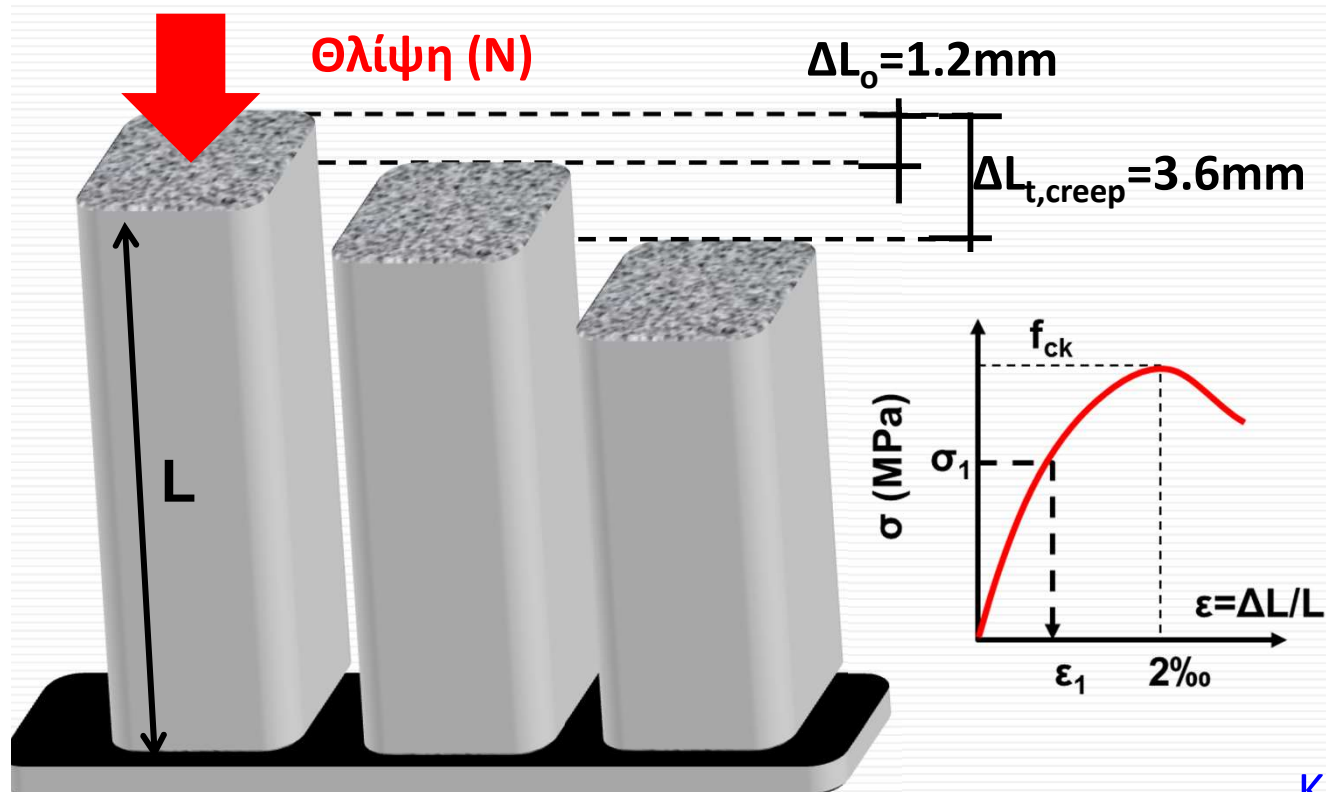
→ οι παραμορφώσεις $\uparrow\uparrow$ σε σκυροδέματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (τα αδρανή δεν ανακατανέμουν την ένταση)



Βραχυπρόθεσμη Δράση (π.χ. θλιπτικό φορτίο) σε ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ:
όταν το φορτίο δρα μια δεδομένη χρονική στιγμή

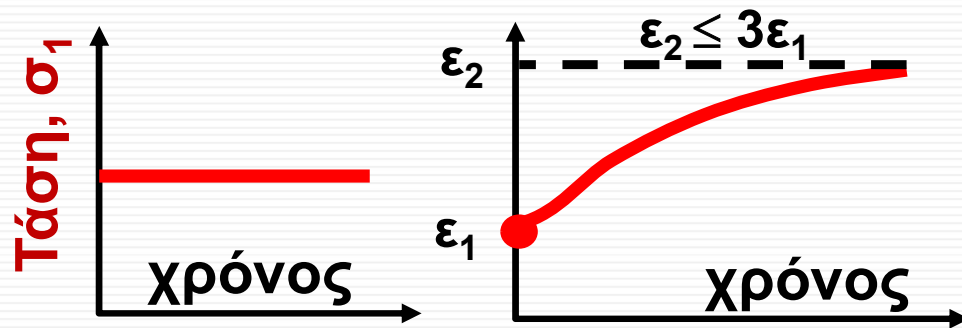
Ερπυσμός (creep): Μακροχρόνια Δράση Φορτίου Τάξη μεγέθους: $\varepsilon_2 = 0,5-1,5 \text{ ‰}$

Π.χ. Για υποστήλωμα 30x30 με $L=3\text{m}$, $f_{ck}=16\text{MPa}$
N από πλάκα επιφάνειας 10τ.μ. πάχους 15cm
→ $N=1.35*25\text{tn/m}^3*10\text{m}^2*0.15=51\text{tn}$



Κατά την αποφόρτιση ($N=0$) → $\varepsilon > 0$
παραμένουσα βράχυνση δομικού στοιχείου

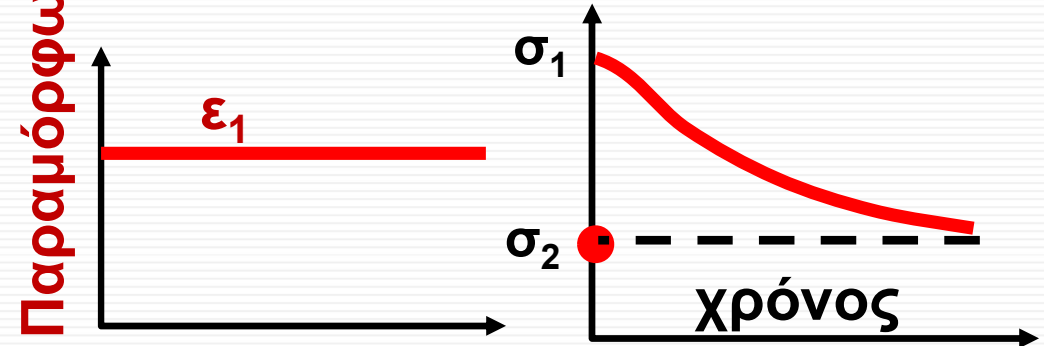
Ερπυσμός (creep): Μακροχρόνια Δράση Φορτίου



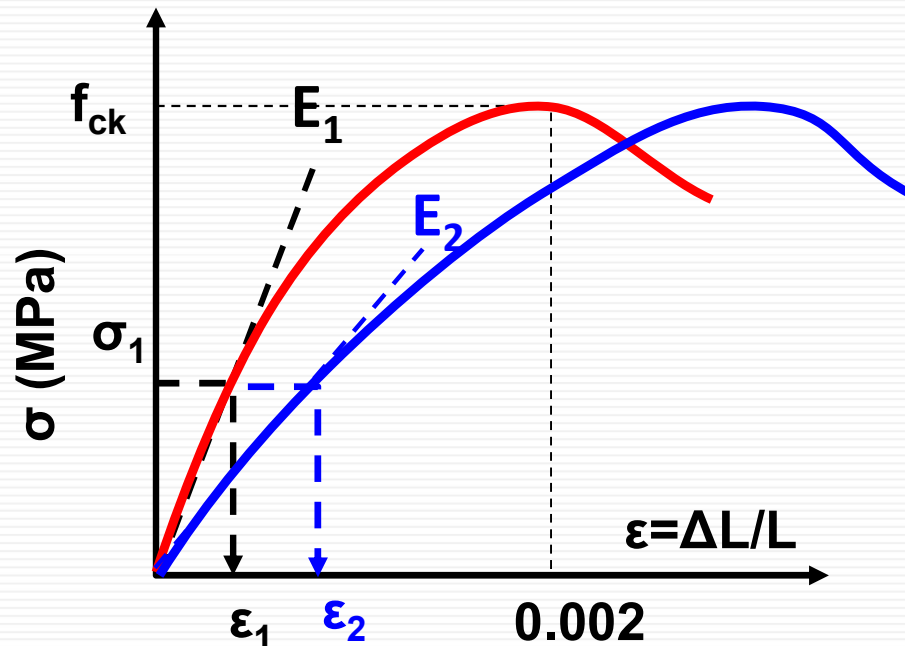
$$\sigma_1 = E_1 \epsilon_1 = E_2 \epsilon_2 \Rightarrow$$

$$\epsilon_2 > \epsilon_1 \Rightarrow E_2 < E_1$$

Χαλάρωση τάσεων (stress relaxation): Μακροχρόνια Δράση Παραμόρφωσης



$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_2} \Rightarrow \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{E_1}{E_2} > 1 \Rightarrow E_2 < E_1$$



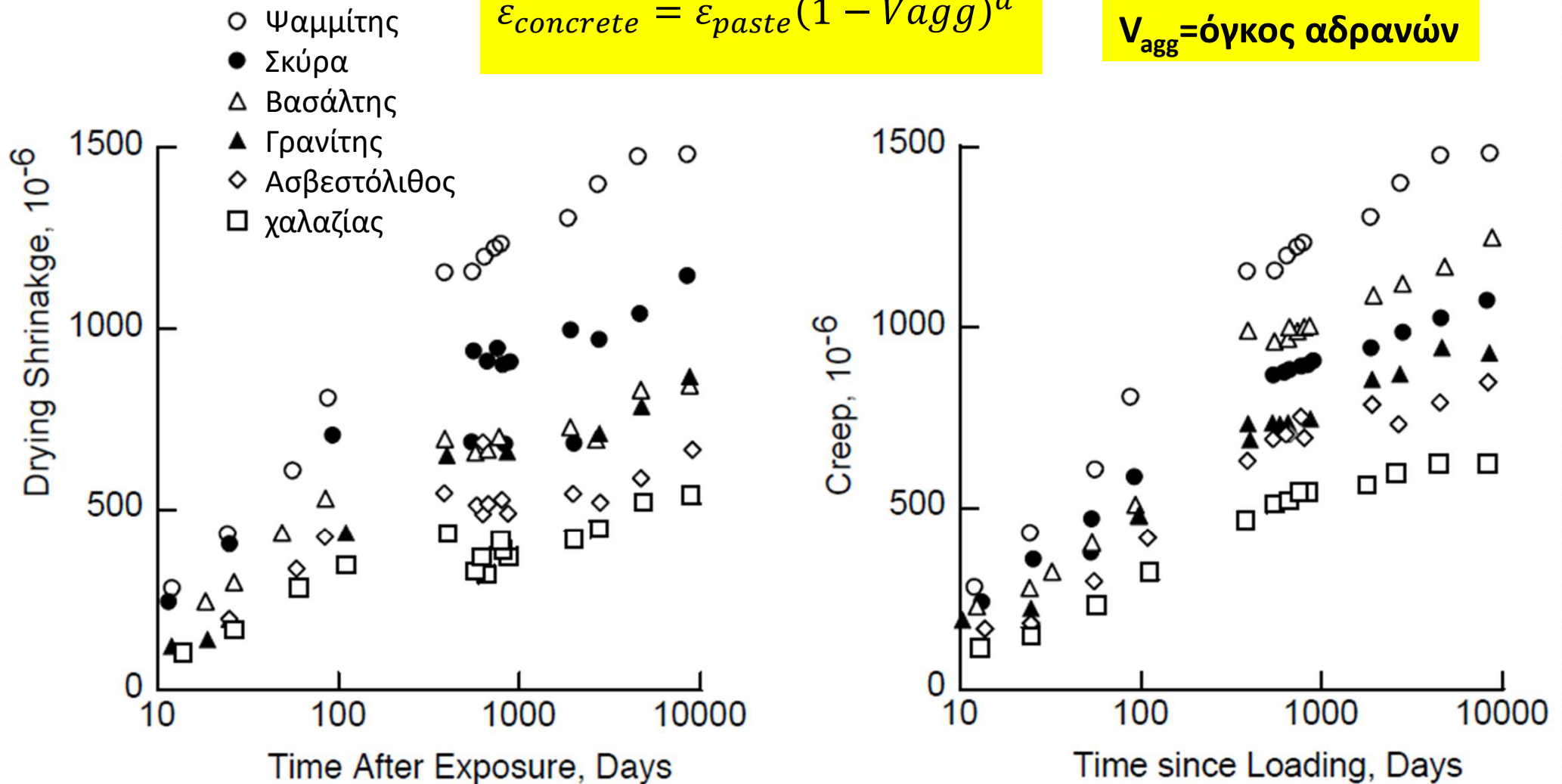
Το μέτρο ελαστικότητας E σκυροδέματος: μέτρο παρεμπόδισης της παραμόρφωσης λόγω ερπυσμού ή συστολής ξήρανσης

- Όμως το E εξαρτάται από τα αδρανή!!!
- Η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού ή συστολής ξήρανσης $\rightarrow$ και από ΕΙΔΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ

- Η παραμόρφωση $\varepsilon_{concrete}$ λόγω συστολής ξήρανσης ή ερπυσμού $\rightarrow$ ΕΙΔΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ (μελέτη 23 ετών των Troxel et al.)

$$\varepsilon_{concrete} = \varepsilon_{paste}(1 - V_{agg})^a$$

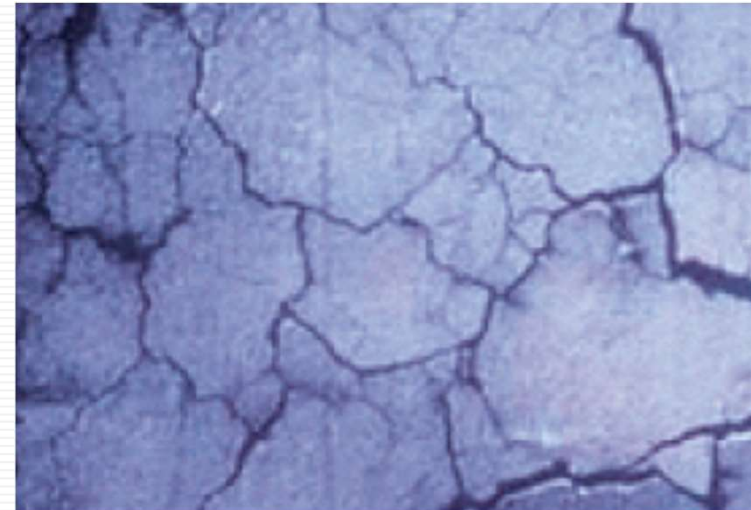
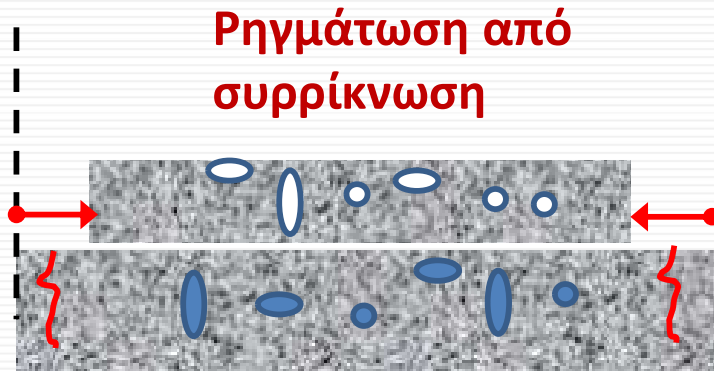
V_{agg} = όγκος αδρανών



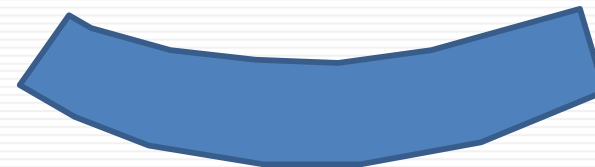
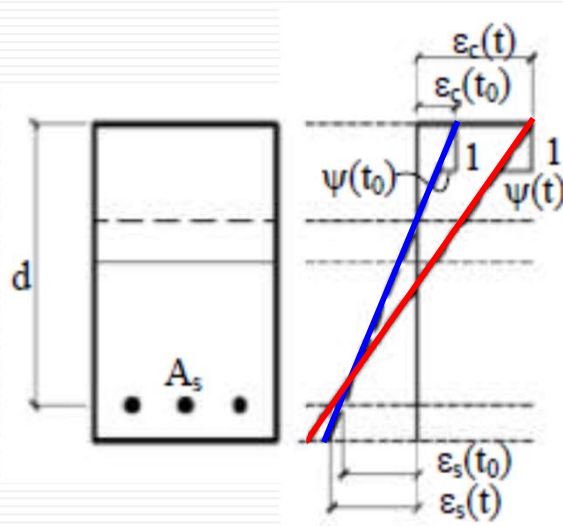
Αδρανή από ψαμμίτη, ως πιο μαλακά (ευπαραμόρφωτα) συμβάλουν σε συστολή και ερπυσμό, έναντι σκληρότερων (χαλαζίας)

Βλάβες από Ερπυσμό & Συστολή ξήρανσης

- Ρηγματώσεις κυρίως σε λεπτά δομικά στοιχεία μεγάλης επιφάνειας



- Πρόσθετα βέλη κάμψης. Γιατί?



- Καμπυλότητα διατομής: $\phi = \epsilon_c / x = M / EI$
- Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος «↓↓↓»

Πόση είναι η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού:

(Κατά FIB MC2010: RH 40-100%, T=5-30°C , 15MPa <f_{cm}<130MPa , σ<40%f_{cm})

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \varphi(t, t_0) \times \exp[1.5(k_\sigma - 0.4)] \quad k_\sigma = |\sigma_c|/f_{cm}(t_0) \quad (40\% < \sigma < 60\% f_{cm})$$

Για διάρκεια φόρτισης 70 χρόνια, μέση θερμοκρασία 10-20oC (διακύμανση -20oC έως 40oC), ο συντελεστής φ(t,t₀) δίνεται από τον πίνακα: (όταν η φόρτιση επιβάλλεται αργότερα, αναμένεται μικρότερη ερπυστική παραμόρφωση)

Age at loading t_0 [days]	Dry atmospheric conditions ($RH = 50\%$, indoors)			Humid atmospheric conditions ($RH = 80\%$, outdoors)		
	Notional size $2A_c/u$ [mm]					
	50	150	600	50	150	600
1	5.8	4.8	3.9	3.8	3.4	3.0
7	4.1	3.3	2.7	2.7	2.4	2.1
28	3.1	2.6	2.1	2.0	1.8	1.6
90	2.5	2.1	1.7	1.6	1.5	1.3
365	1.9	1.6	1.3	1.2	1.1	1.0
1	2.5	2.1	1.8	1.8	1.6	1.5
7	2.0	1.7	1.5	1.5	1.3	1.2
28	1.7	1.4	1.2	1.2	1.1	1.0
90	1.4	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8
365	1.1	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6

A_c: διατομή δομικού στοιχείου
u: εκτεθειμένη στο περιβάλλον περίμετρος του δομικού στοιχείου

Για συνήθη
σκυροδέματα
20-50MPa

Για σκυροδέματα 60-130MPa

$$\times (63/f_{cm})^{0.9}$$

Για 150 χρόνια η αύξηση (ως προς τις τιμές των 70 ετών) είναι μόνο 5%.

Για τσιμέντα 42.5R, 52.5N/R

Πόση είναι η παραμόρφωση λόγω συστολής ξήρανσης:

(Κατά FIB MC2010: RH 40-100%, T=5-30°C , 15MPa <f_{cm}<130MPa)

Για διάρκεια ξήρανσης 70 χρόνια

Table 5.1-14: Total shrinkage values $\varepsilon_{cs,70y} \cdot 10^3$ for structural concrete after a duration of drying of 70 years

Dry atmospheric conditions (RH = 50 %, indoors)			Humid atmospheric conditions (RH = 80 %, outdoors)		
Notional size $2A_c/u$ [mm]					
50	150	600	50	150	600
-0,57	-0,56	-0,47	-0,32	-0,31	-0,26

Dry atmospheric conditions (RH = 50 %, indoors)			Humid atmospheric conditions (RH = 80 %, outdoors)		
Notional size $2A_c/u$ [mm]					
50	150	600	50	150	600
-0.67	-0.67	-0.59	-0.43	-0.42	-0.38

Για συνήθη
σκυροδέματα
20-50MPa

σκυροδέματα 60-130MPa

$$\times (63/f_{cm})^{0.9}$$

Για τσιμέντα 42.5R, 52.5N/R

Για στοιχεία με $2 A_c/u > 500$ οι τιμές του πίνακα υπερεκτιμούν το φαινόμενο!!

Παράδειγμα #1: αξονική παραμόρφωση

- Τοιχείο ύψους 6μ. στο περιβάλλον (κοντά σε ποτάμι)
- Διατομής 120 x 30 (cm x cm) - Σκυρόδεμα $f_{ck}=20\text{MPa}$ ($f_{cm}=28\text{MPa}$) - $E_{ci}=29\text{GPa}$
- Φορτίσθηκε με τα φορτία ανωδομής στις 75μέρες ($t_o=75\text{μέρες}$) με $N=300\text{tn}$
- Ποια η βράχυνση που θα προκύψει στα 70 χρόνια?
- Δεν συνυπολογίζεται η συμμετοχή του οπλισμού

1) Αρχική παραμόρφωση λόγω επιβολής αξονικού N

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{300\text{tn}}{120 \times 30 \text{cm}^2} = 8.33\text{MPa} < 0.4 f_{cm} = 11.2\text{MPa}$$

$$\varepsilon(t_o) = \frac{\sigma_c(t_o)}{E_{ci}} \Rightarrow \varepsilon(t_o = 75d) = 0.00029$$

$$\Delta L_1 = \varepsilon(t_o) \cdot H = 1.74\text{mm}$$

Παράδειγμα #1: αξονική παραμόρφωση

- Τοιχείο ύψους 6μ. στο περιβάλλον (κοντά σε ποτάμι)
- Διατομής 120 x 30 (cm x cm) - Σκυρόδεμα $f_{ck}=20\text{MPa}$ ($f_{cm}=28\text{MPa}$) - $E_{ci}=29\text{GPa}$
- Φορτίσθηκε με τα φορτία ανοδομής στις 75μερες ($t_o=75\text{μέρες}$) με $N=300\text{tn}$
- Ποια η βράχυνση που θα προκύψει στα 70 χρόνια?
- Δεν συνυπολογίζεται η συμμετοχή του οπλισμού

1) Αρχική παραμόρφωση λόγω επιβολής $N \rightarrow$

$$\varepsilon(t_o) = 0.00029$$

2) Ερπυστική παραμόρφωση

$$\varepsilon_{cc}(t, t_o) = \frac{\sigma_c(t_o)}{E_{ci}} \phi(t, t_o)$$

$$\frac{2A_c}{u} = \frac{2 \cdot (1200 \times 300)}{2 \cdot (1200 + 300)} = 240$$

Διπλή Παρεμβολή ($t_o=75\text{ d}$, $2A_c/u=240$):

- Για 150 $\phi = 1.5 + \frac{90-75}{90-28} \cdot (1.8-1.5) = 1.57$
- Για 600 $\phi = 1.3 + \frac{90-75}{90-28} \cdot (1.6-1.3) = 1.37$
- Για 240 $\phi = 1.37 + \frac{600-240}{600-150} \cdot (1.57-1.37) = 1.53$

Age at loading t_o [days]	Humid atmospheric conditions (RH = 80 %, outdoors)		
	$2A_c/u$ [mm]		
	50	150	600
1	3.8	3.4	3.0
7	2.7	2.4	2.1
28	2.0	1.8	1.6
90	1.6	1.5	1.3
365	1.2	1.1	1.0

$$\varepsilon_{cc}(t, t_o) = \varepsilon_{cc}(70y, 75d) = 0.00029 \cdot 1.53 = 0.00044$$

Παράδειγμα #1: αξονική παραμόρφωση

- Τοιχείο ύψους 6μ. στο περιβάλλον (κοντά σε ποτάμι)
- Διατομής 120 x 30 (cm x cm) - Σκυρόδεμα $f_{ck}=20\text{MPa}$ ($f_{cm}=28\text{MPa}$) - $E_{ci}=29\text{GPa}$
- Φορτίσθηκε με τα φορτία ανοδομής στις 75μερες ($t_o=75\text{μέρες}$) με $N=300\text{tn}$
- Ποια η βράχυνση που θα προκύψει στα 70 χρόνια?
- Δεν συνυπολογίζεται η συμμετοχή του οπλισμού

1) Αρχική παραμόρφωση λόγω επιβολής $N \rightarrow \varepsilon = 0.00029$

2) Ερπυστική παραμόρφωση $\rightarrow \varepsilon_{cc}(t, t_o) = 0.00044$

3) Παραμόρφωση λόγω συστολής ξήρανσης

values $\varepsilon_{cs,70y} \cdot 10^3$ for structural condition of drying of 70 years

Humid atmospheric conditions
(RH = 80 %, outdoors)

$\varepsilon = 2A_c/u$ [mm]

50	150	600
-0,32	-0,31	-0,26

$$\frac{2A_c}{u} = 240$$

Παρεμβολή:

$$\varepsilon_{cs} = 0.26 + \frac{600 - 240}{600 - 150} \cdot (0.31 - 0.26) = 0.3 \times 10^{-3}$$

Συνολική βράχυνση:

$$\Delta L_1 = \varepsilon(t_o) \cdot H = 1.74\text{mm}$$

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs} = 0.00029 + 0.00044 + 0.0003 = 0.00103 \Rightarrow \Delta L = \varepsilon_{tot} \cdot H = 6.18\text{mm}$$

Τι συμβαίνει αν ληφθεί υπόψη ο οπλισμός, π.χ. συμμετρικά με $A_s=2\%A$?

- οι οπλισμοί δεν υφίστανται συστολή ξήρανσης ή ερπυσμό
- Αν οι οπλισμοί **δεν παρεμποδίζουν** τα δύο φαινόμενα $\rightarrow$ **Οι οπλισμοί θα εξείχαν**

Ισορροπία

συμβιβαστό παραμορφώσεων (t_o)

$$N = N_s + N_c = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c$$

$$\varepsilon = \varepsilon_c = \varepsilon_s$$

$$N = 0.02\sigma_s A + \sigma_c (1 - 0.02)A$$

$$N = (0.02\sigma_s + 0.98\sigma_c) \cdot A \quad \Rightarrow \text{Υπόθεση ελαστικής συμπεριφοράς: } \sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{N}{(0.02E_s + 0.98E_c) \cdot A} =$$

(πριν 0.00029)

$$\varepsilon = \frac{300 \cdot 10000}{(0.02 \cdot 200000 + 0.98 \cdot 29000) \cdot (1200 \cdot 300)} = 0.00026$$

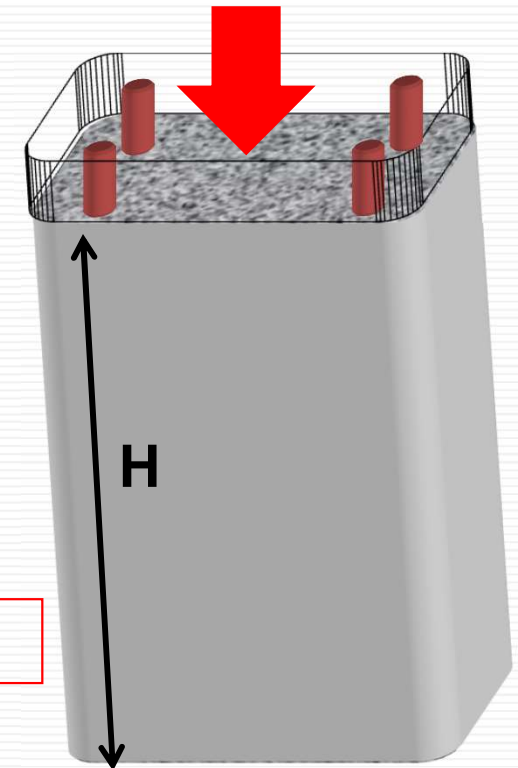
$$\Delta L_1 = \varepsilon(t_o) \cdot H = 1.56mm$$

Διόρθωση Ερπυστικής παραμόρφωσης

$$\varepsilon_{cc} = 0.00026 \cdot 1.53 = 0.0004 \quad (\text{πριν } 0.00044)$$

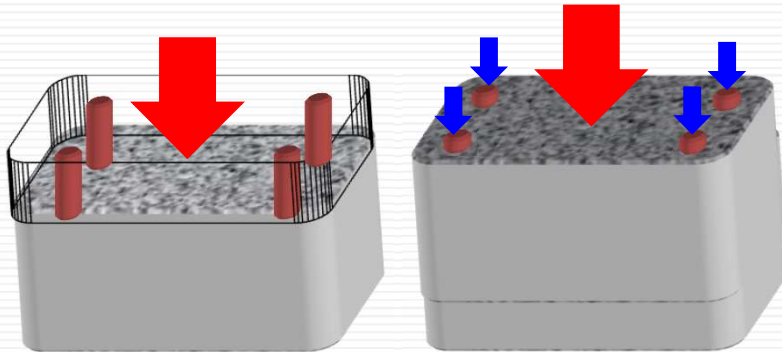
(πριν 6.18mm)

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs} = 0.00026 + 0.0004 + 0.0003 = 0.00096 \Rightarrow \Delta L = \varepsilon_{tot} \cdot H = 5.76mm$$



Τι συμβαίνει αν ληφθεί υπόψη ο οπλισμός, π.χ. συμμετρικά με $A_s=2\%A$?

- Αν οι οπλισμοί δεν παρεμποδίζουν τα δύο φαινόμενα
- Οι οπλισμοί **παρεμποδίζουν** τα δύο φαινόμενα λόγω αλληλεμπλοκής με το σκυρόδεμα → Οι οπλισμοί τίθενται σε πρόσθετη θλίψη (ε'_s), και το σκυρόδεμα σε εφελκυσμό (για εξισορρόπηση της αυτεντατικής κατάστασης).



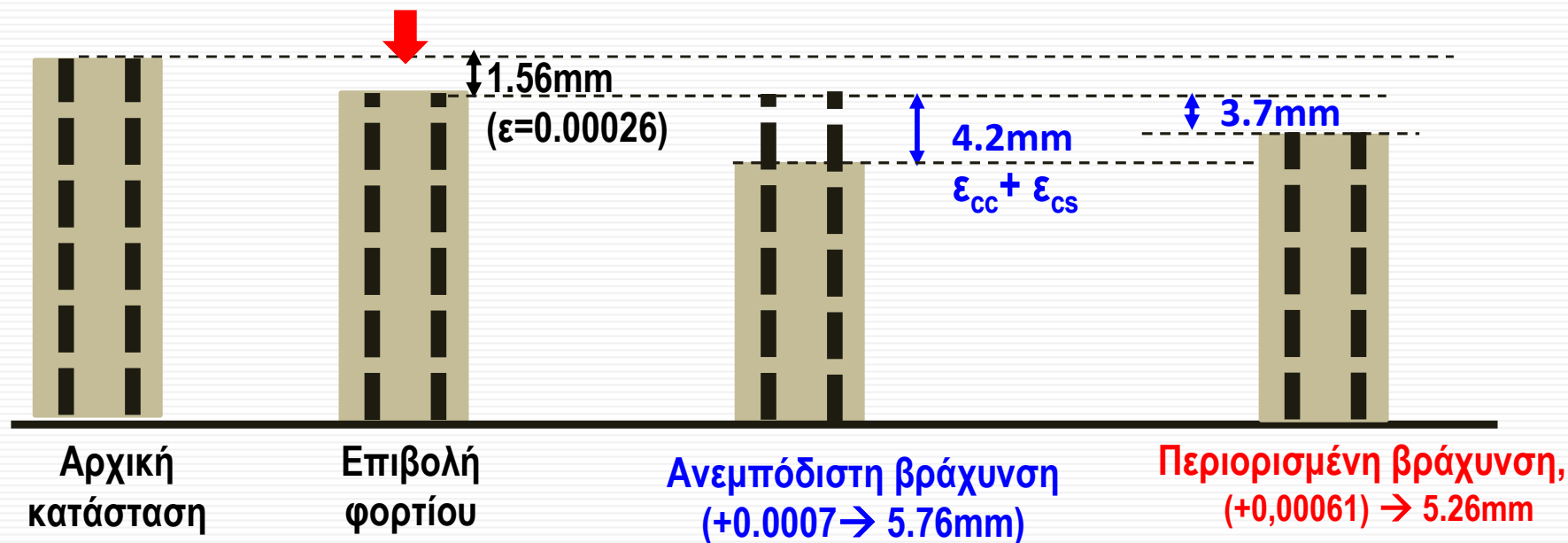
$$N_s = A_s \sigma_s = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon'_s$$

$$N_{c,t} = A_c E_c (\varepsilon_{c,cs} - \varepsilon'_s)$$

$$\Delta L = \varepsilon'_s \cdot H = 3.7mm$$

$$N_s = N_{c,t} \Rightarrow \varepsilon'_s = \underbrace{\varepsilon_{c,cs}}_{\varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs}} \cdot \frac{A_c E_c}{A_c E_c + A_s E_s} = 0.00061$$

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs} = 0.00026 + 0.0004 + 0.0003 = 0.00096 \Rightarrow \Delta L = \varepsilon_{tot} \cdot H = 5.76mm$$



Άσκηση

Υποστήλωμα ύψους 3.5μ. & διατομής 600 x 600 (mm x mm) - Σκυρόδεμα

$f_{ck}=20\text{MPa}$ ($f_{cm}=28\text{MPa}$) - $E_{ci}=29\text{GPa}$, οπλισμένο με 8Φ24. RH=50%

- Φορτίσθηκε με τα φορτία ανωδομής στις 60 μέρες ($t_o=60$ μέρες) με $N=2500\text{kN}$
- Ποια η βράχυνση που θα προκύψει στα 70 χρόνια και λόγω ερπυσμού;

Να λυθεί η άσκηση με και χωρίς συνυπολογισμό οπλισμού