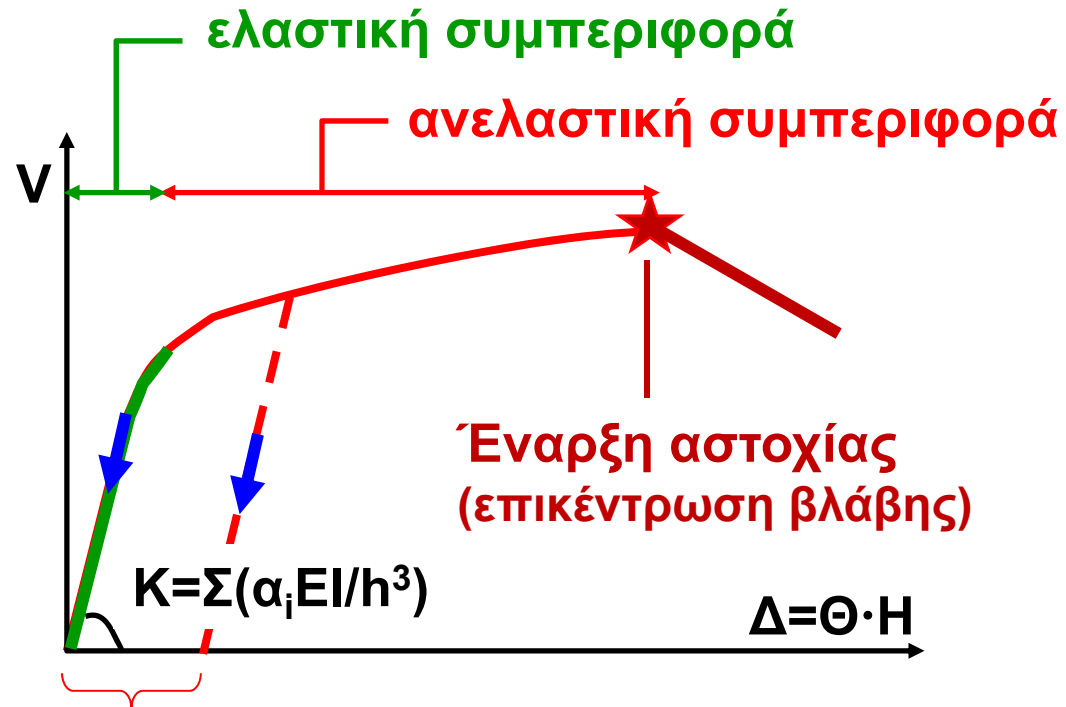
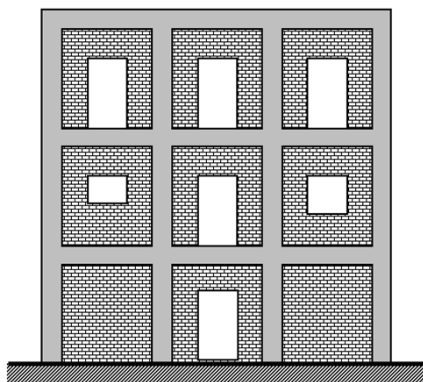
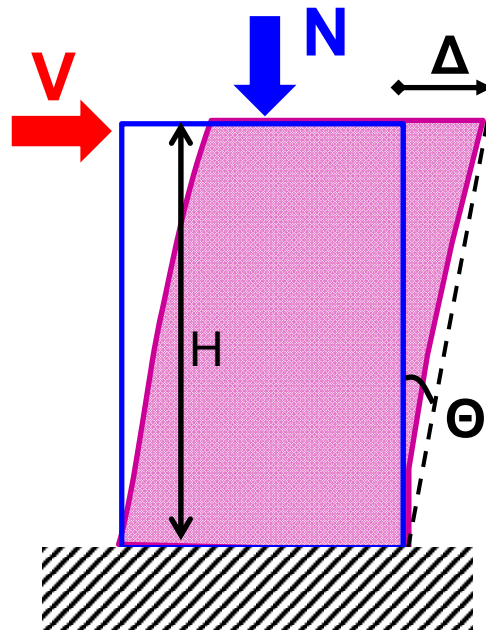


Η πλαστιμότητα στις κατασκευές η ανάληψη μεγάλων παραμορφώσεων χωρίς απώλεια αντοχής

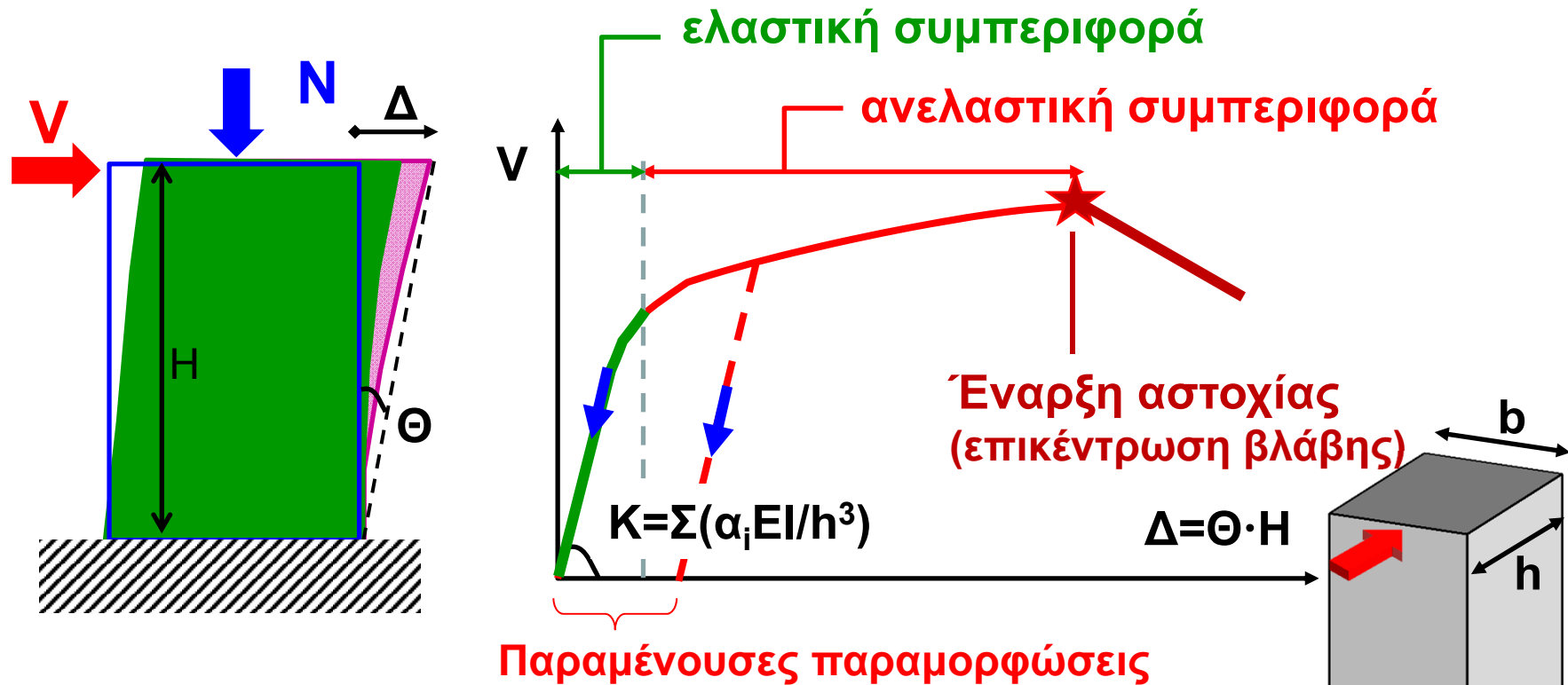


Παραμένουσες παραμορφώσεις

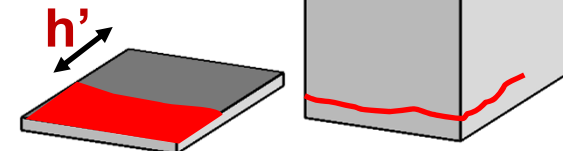
K: Δυσκαμψία από κατακόρυφα δομικά στοιχεία
(π.χ. υποστηλώματα, τοιχοποιίες, τοιχεία)

- Υλικό ή συνδυασμός υλικών (μέτρο Ελαστικότητας, E)
- Διατομή του δομικού στοιχείου (ροπή αδράνειας, I)

Η πλαστιμότητα στις κατασκευές η ανάληψη μεγάλων παραμορφώσεων χωρίς απώλεια αντοχής



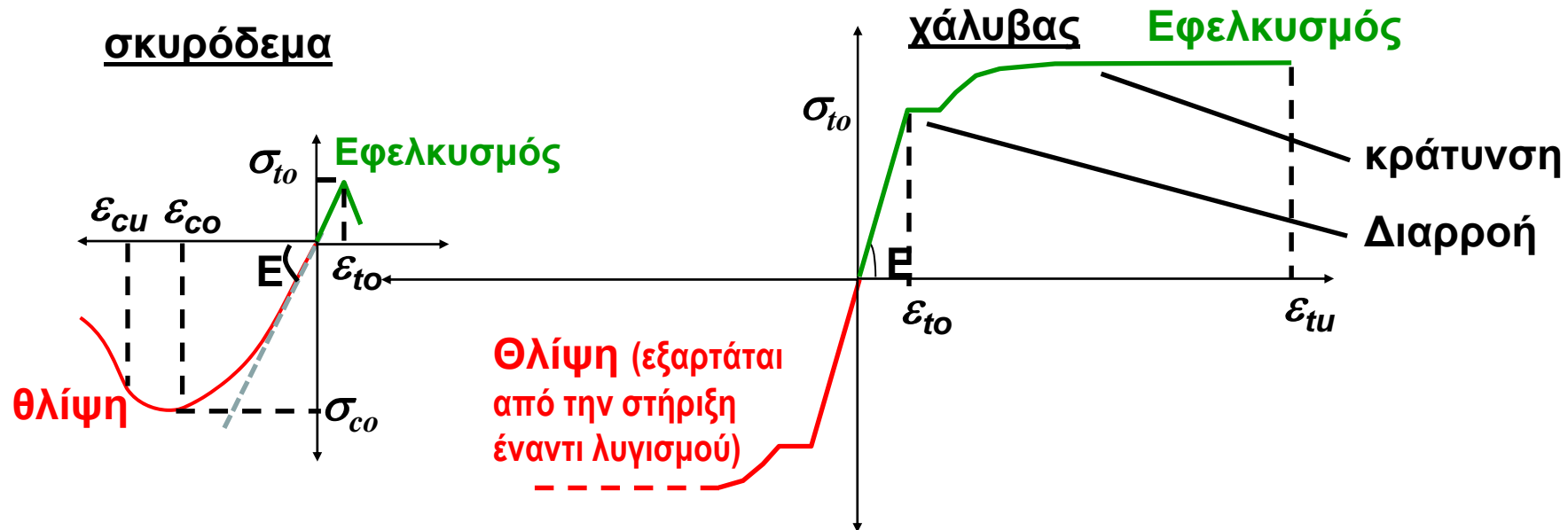
Γιατί αλλάζει το K καθώς μεγαλώνει η παραμόρφωση;
Αμετάβλητο το E , μειώνεται το I (από $bh^3/12 \rightarrow bh'^3/12$)



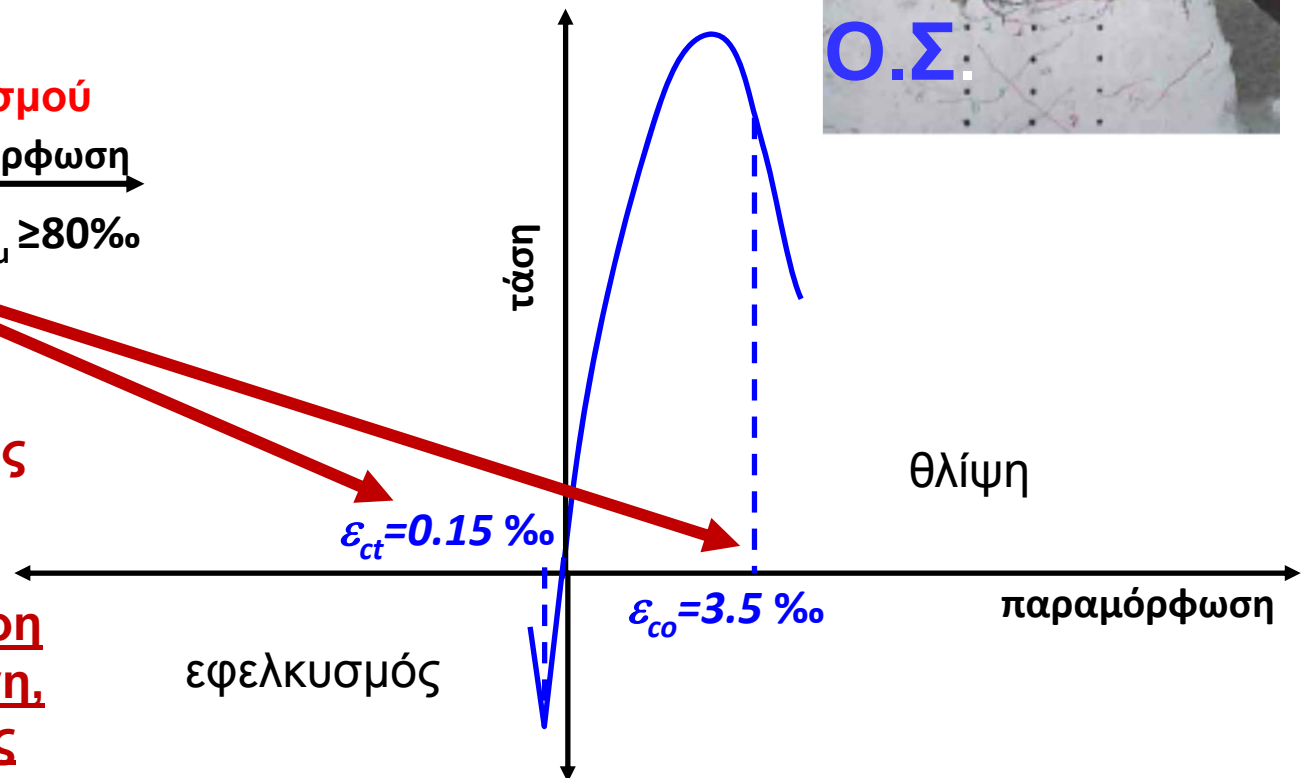
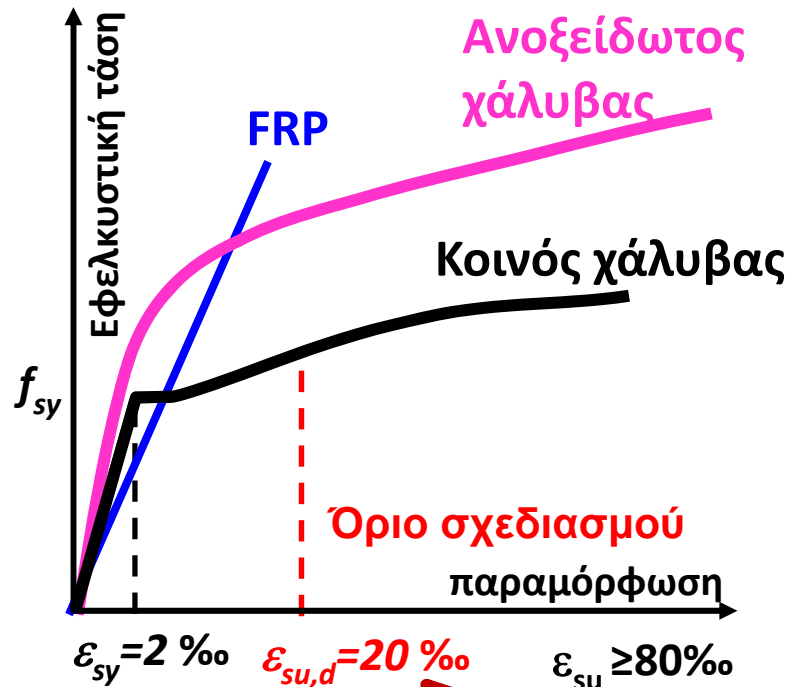
Τυπικά υλικά δόμησης

	Θλίψη (<u>C</u> ompression)				Εφελκυσμός (<u>T</u> ension)				
	E_c GPa	σ_{co} MPa	ϵ_{co} ‰	ϵ_{cu} ‰	E_t	σ_{to} MPa	ϵ_{to} ‰	σ_{tu} MPa	ϵ_{tu} ‰
σκυρόδεμα	25-37	12-50	2	3.5 85% σ_{co}	25-37	1-5	≈ 0.1	---	---
χάλυβας	200	220-500	2-2.5	3.5 λυγισμός	200	220-500	2-2.5	1.15* σ_{to}	20-70

ασυμβατότητα στα μεγέθη εφελκυστικής παραμόρφωσης μεταξύ σκυροδέματος και χαλύβδινων ράβδων



Βλάβες σε κατασκευές από ΟΣ



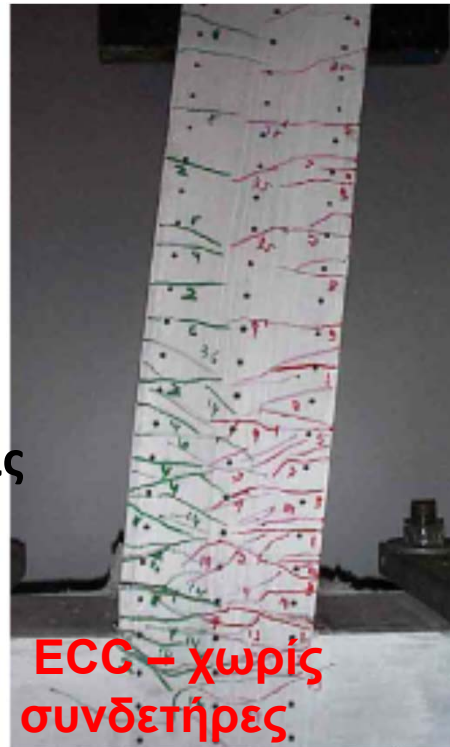
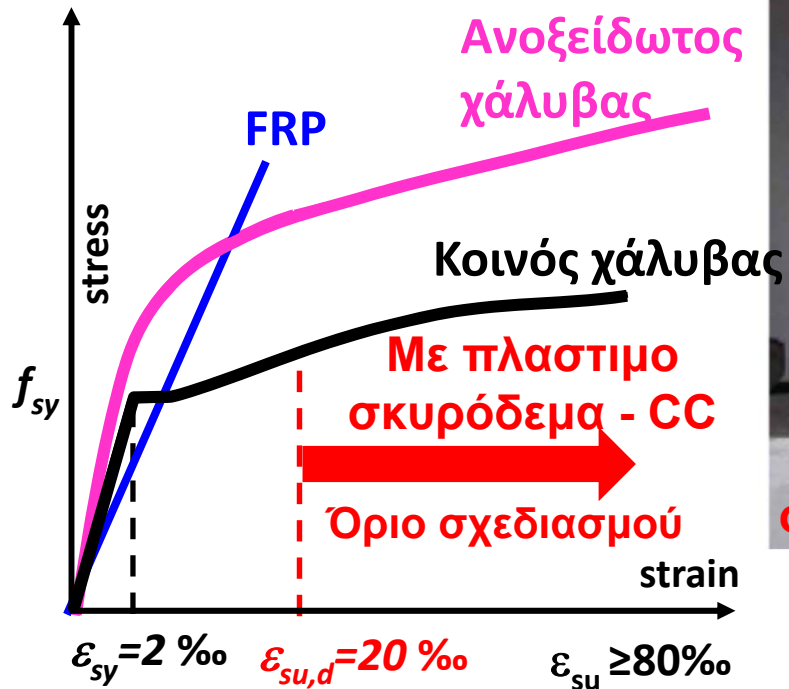
Σήμερα υπάρχει πλέον η δυνατότητα να προσαρμόσει ο μηχανικός τα χαρακτηριστικά των υλικών ξεκινώντας από την μοριακή ή την ατομική κλίμακα μέχρι την μακροσκοπική δομή, ώστε το υλικό να ανταποκριθεί σε συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις (**επιτελεστικότητα**).

Συνήθως εκφράζονται σε όρους δομικής συμπεριφοράς κτίσματος

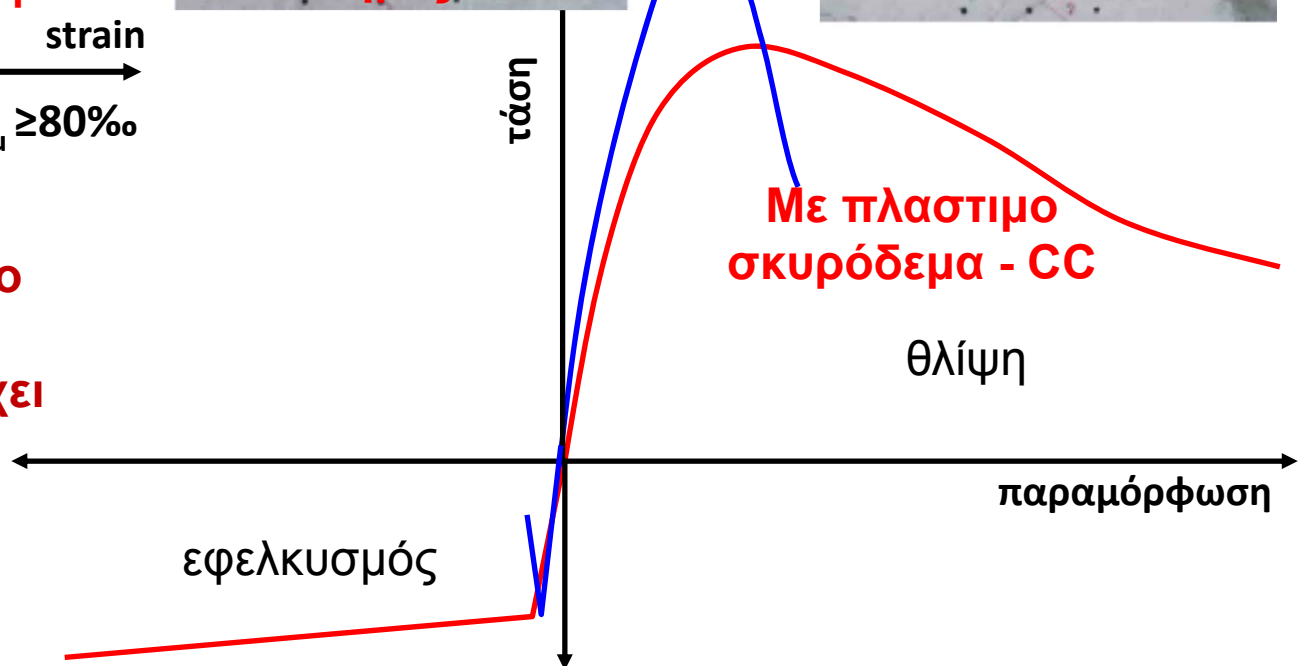
- **Ωφέλιμη διάρκεια ζωής**
- **Εύρος ρωγμών στο στάδιο της λειτουργικότητας, Αντίσταση σε CI, θειικά, κλιματολογικές συνθήκες, παράγοντες που αφορούν στις συνθήκες έκθεσης του δομήματος**
- **Πλαστιμότητα, Ενέργεια θραύσης, μορφή αστοχίας σε ανακύκλιση φορτίου**
- **Αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. τούνελ)**
- **Αντίσταση σε εκδορά (Abrasion)**

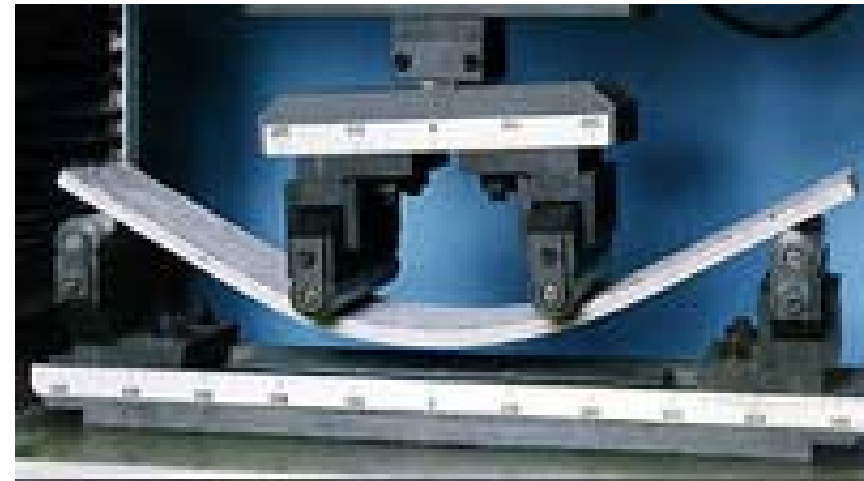
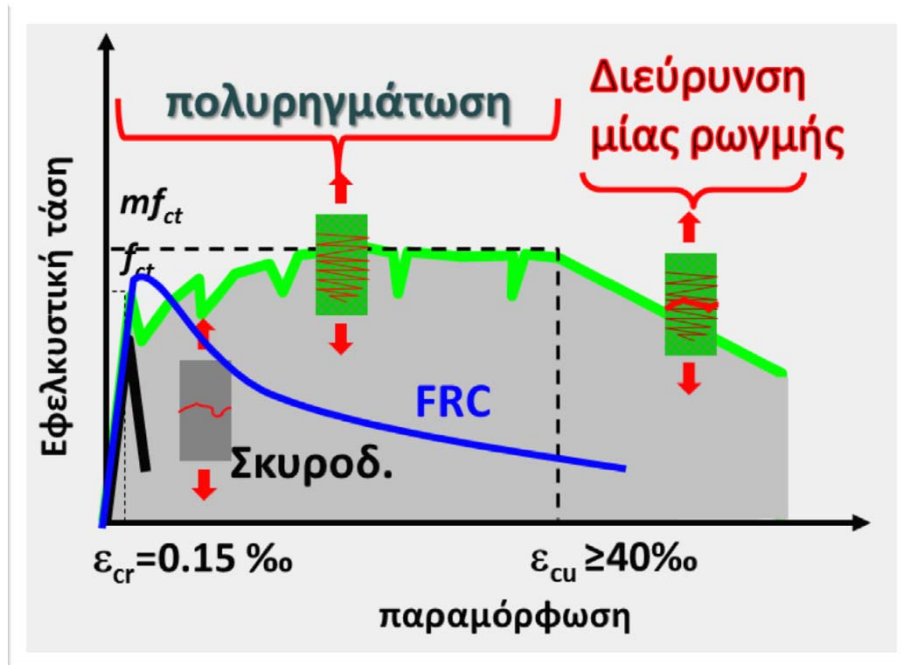
σύνθετα τσιμεντοειδή κονιάματα (fibre-reinforced cementitious composites) ► πλάστιμα σκυροδέματα
Σχεδιασμός υλικού στην μικροδομή

Βλάβες σε κατασκευές από ΟΣ



Αν όμως αντικατασταθεί το συμβατικό σκυρόδεμα με ένα «πλαστικό» που να έχει ισοδύναμη ικανότητα παραμόρφωσης σε εφελκυσμό με το χάλυβα;





ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΕΣ:

- Ανθεκτικότητα σε ρηγμάτωση
- Μείωση οπλισμών (π.χ. εξάλειψη συνδετήρων)
- Αυξημένη ικανότητα παραμόρφωσης κατασκευών
- Μείωση διατομών δομικών στοιχείων

Εύρη ρωγμών 60μm (0.06mm)
(ο Κανονισμός, ΟΚΛ επιτρέπει
σήμερα 0.3mm)



Δομικά στοιχεία χωρίς καθόλου οπλισμό!

Αισθητική
Μικρές διατομές
προκατασκευή

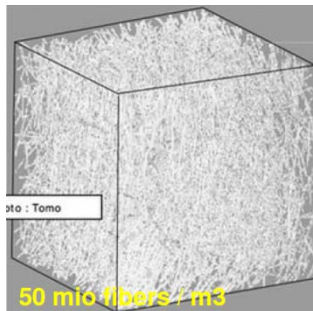


Σύνθετα τσιμεντοειδή



Τσιμέντο Portland, ιπτάμενη τέφρα,
λεπτόκοκκη πυριτική άμμος
($<0.25\text{mm}$), νερό (≈ 0.26),
υπερρευστοποιητής, πλαστικές ίνες
2% κ.ο.

f_c μέχρι 80 Mpa, $E < 25\text{GPa}$,
 f_t μέχρι 10 Mpa, $\epsilon_{tu} = 10-80\%$



τσιμέντο Portland, πυριτική παιπάλη,
χαλαζιακό άλευρο,
λεπτόκοκκη πυριτική άμμο ($<0.5\text{mm}$),
νερό (<0.25), υπερρευστοποιητής,
χαλύβδινες ή/και πλαστικές ίνες 3-
10%κ.ο

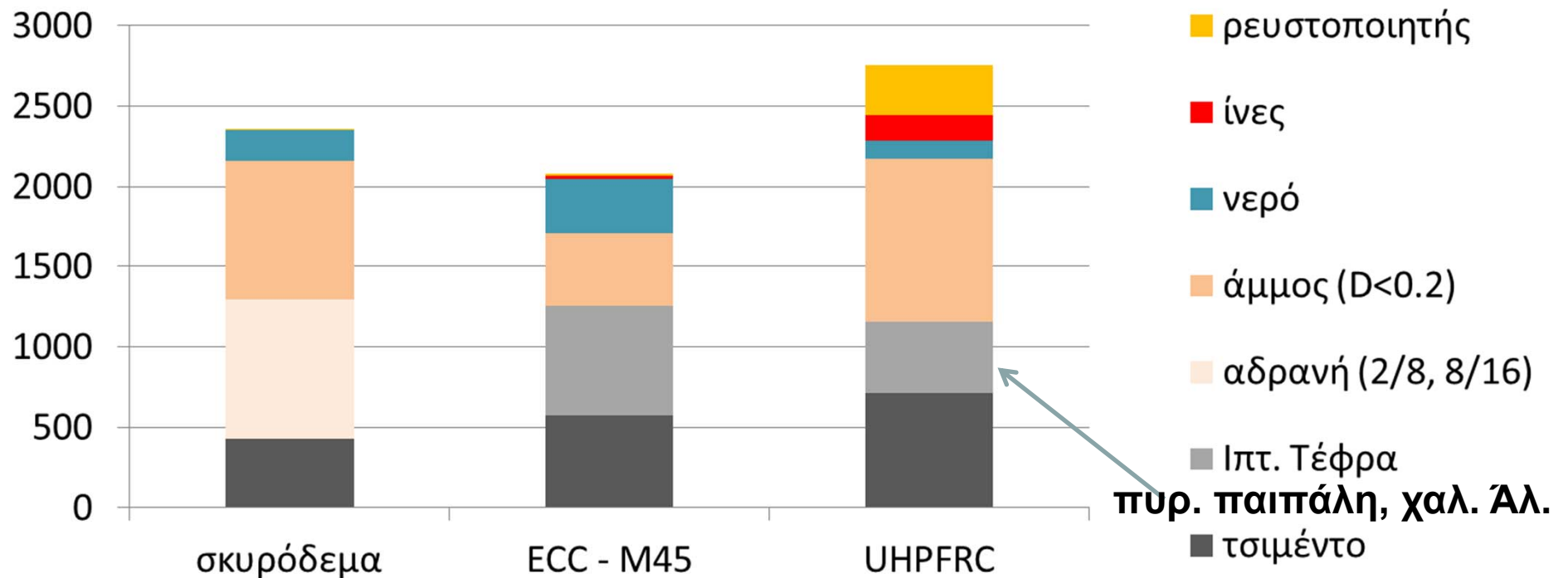
$f_c > 150\text{ Mpa}$, $E > 40\text{GPa}$
 $10\text{MPa} < f_t < 50\text{ Mpa}$, $\epsilon_{tu} < 10\%$



Σύνθετα τσιμεντοειδή



βάρη συστατικών, Kgr/m³



Σύνθετα τσιμεντοειδή



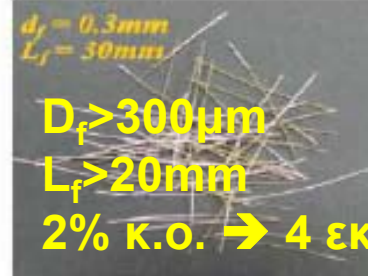
ECC

UHPCFRC

$E < 100 \text{ GPa}$



$E = 200 \text{ GPa}$



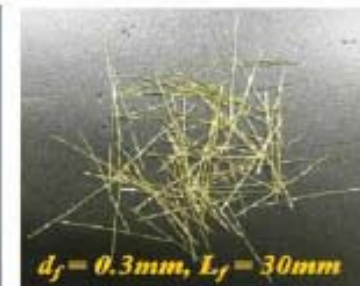
(a) Macro – Smooth fiber



(b) Macro – Hooked fiber A



(c) Macro – Hooked fiber B



(d) Macro – Twisted fiber

σύνθετα τσιμεντοειδή

► ECC – Engineer–designed Cementitious Composites

Τεχνολογική Πρόκληση (πρωτοπόρος Victor Li, '90 - ECC, Un. Michigan)

Βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας:

Συνδυασμός λεπτότατων υδραυλικών προσμίκτων και μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών $< 0.5\text{mm}$, με συνέπεια την μέγιστη δυνατή συμπύκνωση (πολύ πυκνή δομή υλικού) και κλειστούς (ασύνδετους) πόρους.

Σταθερότητα όγκου (dimensional stability - αμελητέος συντελεστής ερπυσμού)

Από την άποψη των Κανονισμών :

- Πώς σχεδιάζουμε κατασκευές με υλικά νέας τεχνολογίας τα οποία δεν υποστηρίζονται από τις υφιστάμενες κανονιστικές διατάξεις;

Από την άποψη της Τεχνολογίας Κατασκευής - Κύρια Προβλήματα:

Μίξη ακριβείας, απαιτούμενη μεγάλη διατμητική ενέργεια μίξης, διαμόρφωση τελικής επιφάνειας, βελτιστοποίηση κατανομής ινών, μέθοδοι ποιοτικού ελέγχου, άντληση παρά το αυξημένο ιξώδες λόγω ινών, κλπ.

Σύνθετο κονίαμα ECC

➤ Σύνθεση –ΜΕΓΑΛΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ

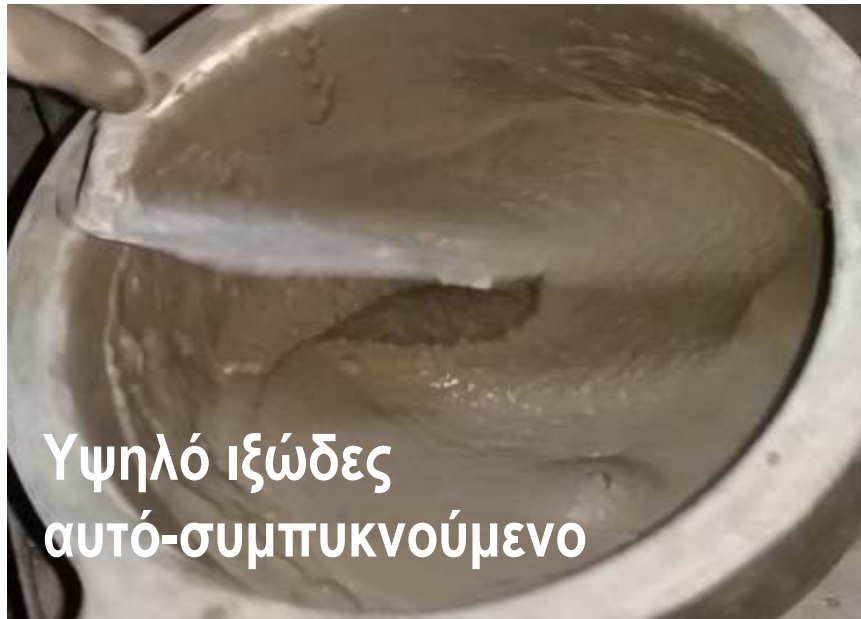
ΜΟΝΟ λεπτόκοκκα υλικά

(αναλογίες κ.β. ως προς τσιμέντο)

- τσιμέντο 1.0
- Ιπτάμενη τέφρα, παιπάλη 2.0 – 6.0
- Λεπτή, στεγνή άμμος ($d_{max} < 0.5mm$) < 1.0
- Απουσία αδρανών

Λόγος νερού προς κονίες < 0.30

➔ ➔ Υπερρευστοποιητής > 2%



Σύνθετο κονίαμα ECC



Οπλισμός μάζης: Πλαστικές ίνες χαμηλού ι.β., ~2% κ.ο.

(>2% πρόβλημα διασποράς ινών στο μίγμα)

→ Ποιες ιδιότητες των ινών είναι κρίσιμες: μέτρο Ελαστικότητας, παραμόρφωση θραύσης, επιφανειακή τραχύτητα (επηρεάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά σε εφελκυσμό), απορροφητικότητα, θερμοκρασία τήξης

→ Συνήθη μήκη ινών: 8 – 12 – 18 mm

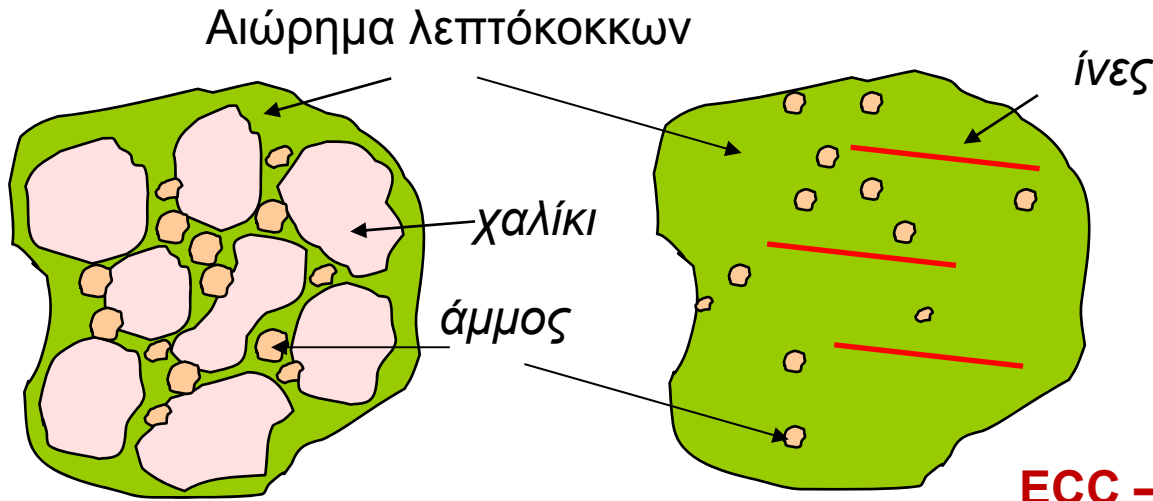
Ίνες PVA –πολύβινυλική αλκοόλη: $E=40-70\text{GPa}$, $f_u > 1000\text{MPa}$, $\epsilon_u > 6\%$, $\rho=1.3\text{gr/cm}^3$

Υδρόφιλες ίνες με ισχυρή συνάφεια με την μήτρα – για την πολυρηγγμάτωση συνήθως εφαρμόζεται εμβάπτιση σε πλάσμα

Ίνες PP πολυπροπυλενίου: $E < 5\text{GPa}$, $f_u = 400\text{MPa}$, $\epsilon_u > 3\%$, $\rho = 0.9\text{gr/cm}^3$ υδρόφοβες ίνες

Ίνες PE πολυαιθυλενίου : $E = 100\text{GPa}$, $f_u = 3000\text{MPa}$, $\epsilon_u > 2\%$, $\rho = 0.9\text{gr/cm}^3$ (UHP)

Ανάλογα τις κονίες και το είδος ινών \Rightarrow ευρεία γκάμα πλάστιμων σκυροδεμάτων



Κόστος συμβατικού σκυροδέματος 100€/μ³
Κόστος ECC;;;
 Υψηλό ως προς την παρασκευή του, αλλά με πολλαπλά, μακροχρόνια οφέλη για τις κατασκευές

Σύνηθες σκυρόδεμα → Μεγάλη πυκνότητα σε χονδρ. αδρανή

Engineered cementitious composites

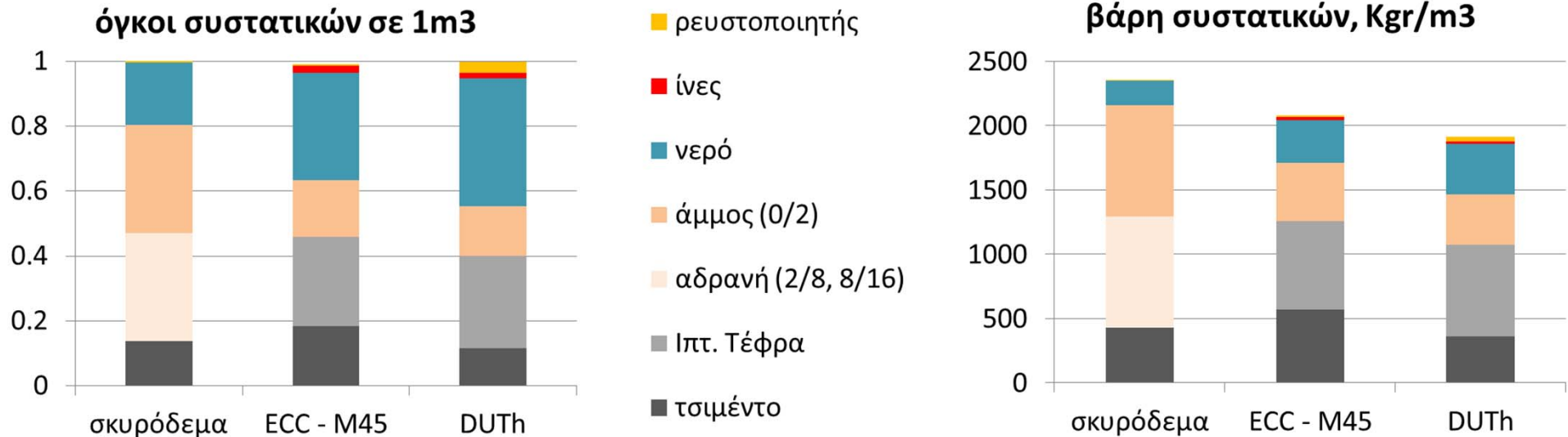
ECC – M45:

Θλιπτική αντοχή = 60 Mpa

Εφελκυστική αντοχή = 4MPa

παραμόρφωση σε εφελκυσμό > 2.0% (99% confidence)

Σύγκριση τυπικών μιγμάτων

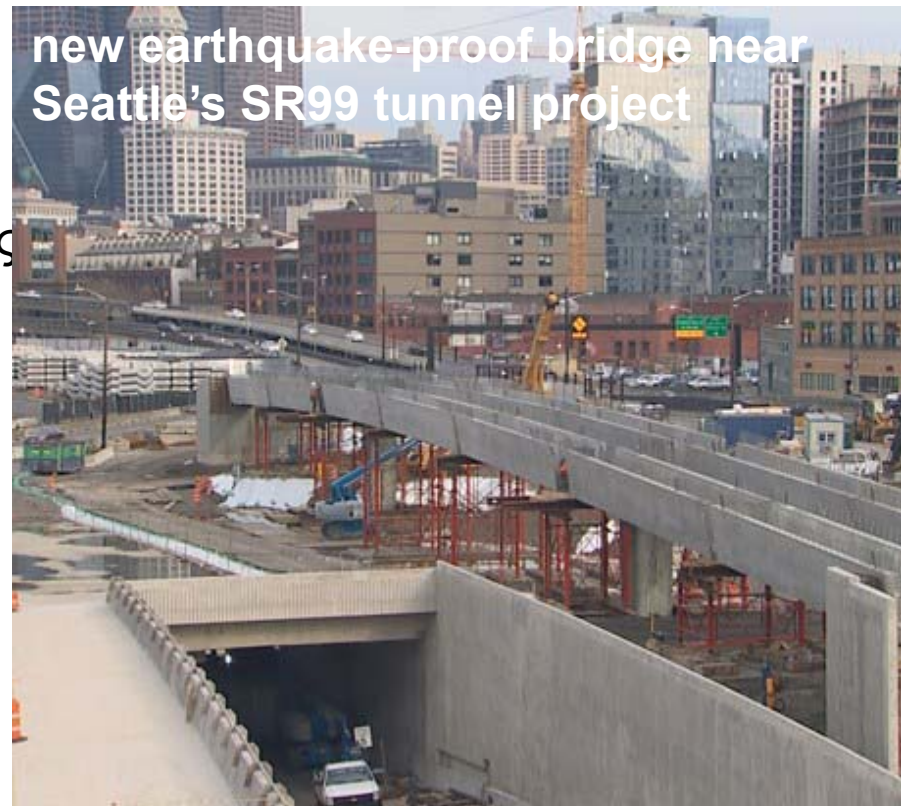


ECC σε κόμβους γεφυρών

Κόστος υλικού ECC σήμερα:
5-7% αύξηση του κόστους της γέφυρας
Με χρήση μόνο στους κόμβους!

Ωστόσο, το κόστος αποκατάστασης
βλαβών από σεισμό είναι πολύ
μεγαλύτερο!!!

ECC σε καταστρώματα γεφυρών, στις θέσεις αρμών



new earthquake-proof bridge near
Seattle's SR99 tunnel project

Σύνθετο κονίαμα ECC – η διαδικασία ανάμιξης

1° βήμα: αναμιγνύονται όλα τα λεπτόκοκκα για ομογενοποίηση του μίγματος (2-3 λεπτα)

2° βήμα: εισάγονται το νερό με την ποσότητα του ρευστοποιητή ώστε η υφή του μίγματος να γίνει πλαστική (έχουν εξασθενήσει οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων)

3° βήμα: ακολούθως εισάγονται οι ίνες (επιπλέον ρευστοποιητής) ώστε να αποσβεσθούν οι τριβές που αναπτύσσονται μεταξύ ινών και πάστας. Ζητούμενο η καλή διασπορά των ινών χωρίς συσσωματώματα!!!

Απαιτείται μεγάλη διατμητική ενέργεια μίξης – π.χ. ανάδευση 10'-15'



Σύνθετο κονίαμα ECC – η διαδικασία ανάμιξης

1^ο βήμα: αναμιγνύονται όλα τα λεπτόκοκκα για ομογενοποίηση του μίγματος (2-3 λεπτά)

2^ο βήμα: εισάγονται το νερό με την ποσότητα του ρευστοποιητή ώστε η υφή του μίγματος να γίνει πλαστική (έχουν εξασθενήσει οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων)

3^ο βήμα: ακολούθως εισάγονται οι ίνες (επιπλέον ρευστοποιητής) ώστε να αποσβεστούν οι τριβές που αναπτύσσονται μεταξύ ινών και πάστας. Ζητούμενο η καλή διασπορά των ινών χωρίς συσσωματώματα!!!

Απαιτείται μεγάλη διατμητική ενέργεια μίξης – π.χ. ανάδευση 10'-15'



Σύνθετο κονίαμα ECC – σκυροδέτηση

- Δεν απαιτείται συμπύκνωση (δόνηση): αυτοσυμπυκνούμενο υλικό
- Βασικό πρόβλημα: η διαμόρφωση της τελικής επιφάνειας (λειτουργεί ως «πάπλωμα») ► προτεινόμενη λύση, η χρήση υλικού πάχους λίγων χιλιοστών χωρίς ίνες....

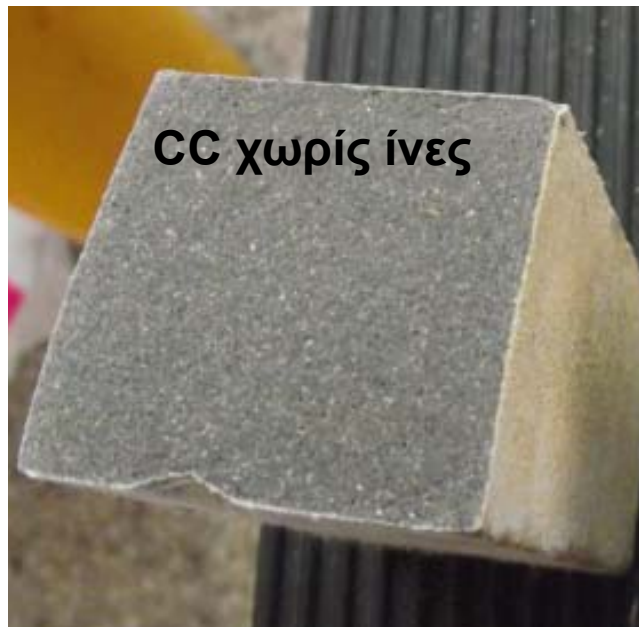


Σύνθετο κονίαμα CC – εσωτερική δομή

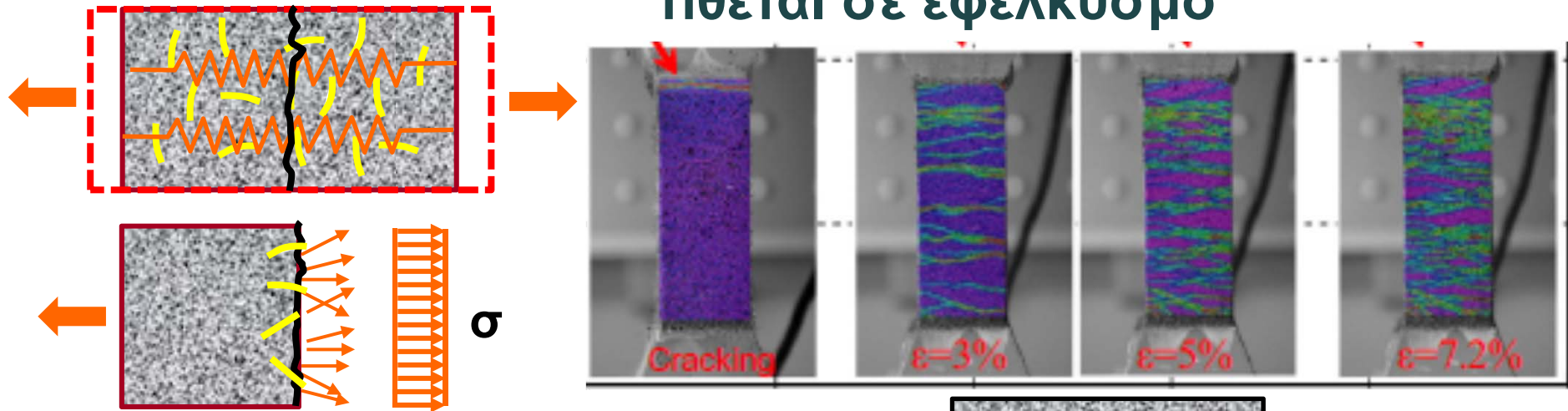


CC με ίνες: άπειρες ίνες γεφυρώνουν το άνοιγμα ρωγμής

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα (FRC)



Σύνθετο κονίαμα ECC – ο ρόλος των ινών όταν το υλικό τίθεται σε εφελκυσμό



$$\sigma = \rho_{f,eff} \cdot f_f$$

$\rho_{f,eff} = f$ (προσανατολισμού, αριθμού ινών που τέμνουν την ρωγμή)

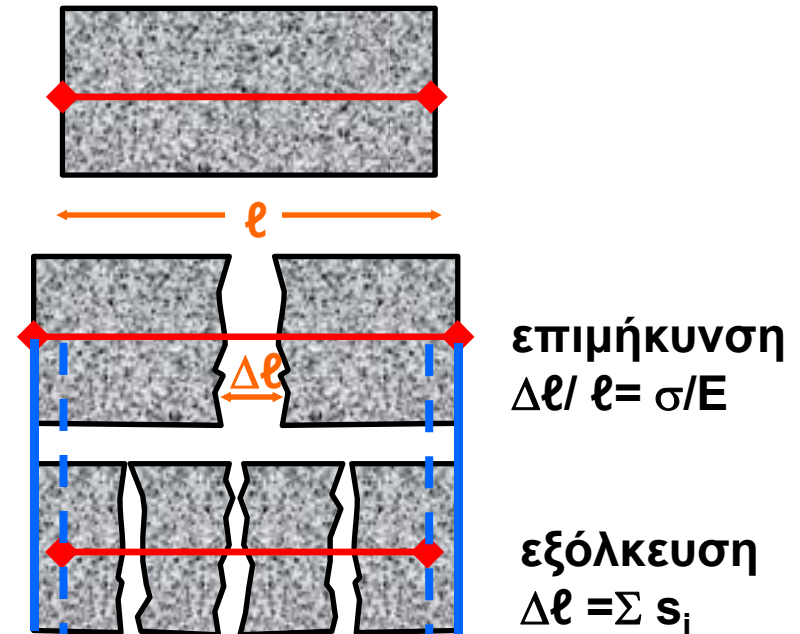
εφελκυστική αντοχή $f_{ct} = f(\sigma, \text{συνάφεια})$

παραμόρφωση σε εφελκυσμό:

$$\varepsilon = f(\varepsilon_{\text{ινών}}, E_{\text{ινών}}, \text{ολίσθηση ινών})$$

Συνάφεια ινών – μήτρας:

- Ισχυρή συνάφεια: Επιμήκυνση ίνας \rightarrow εντοπισμός βλάβης σε λίγες ρωγμές
- Ελεγχόμενη συνάφεια: Αποκόλληση / εξόλκευση ίνας \rightarrow ευνοείται η πολυρηγματώση



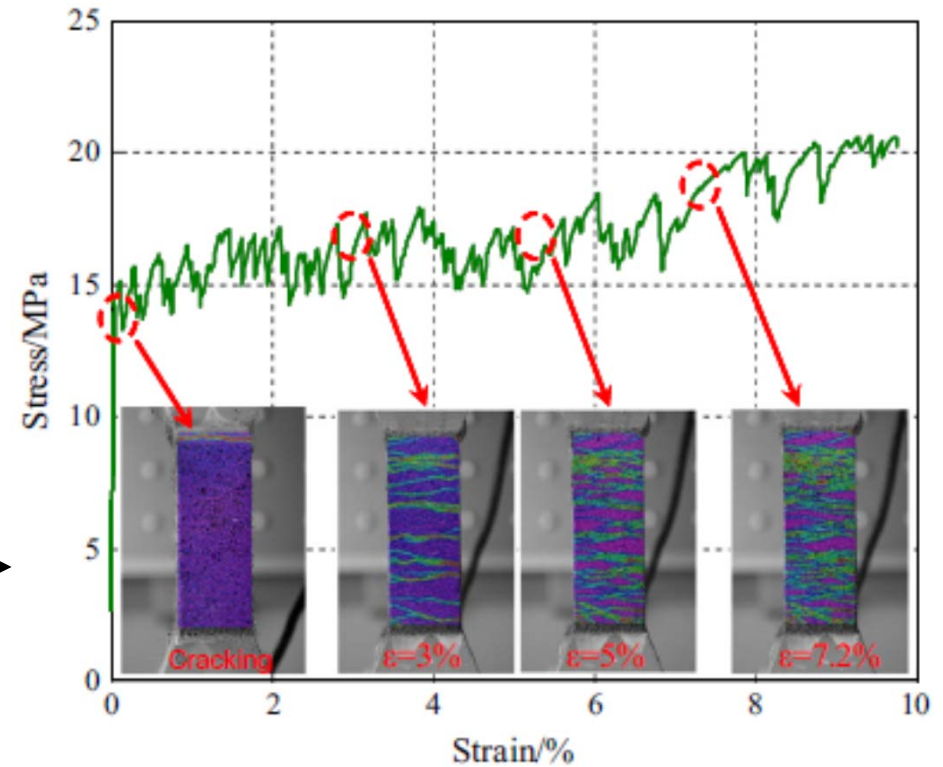
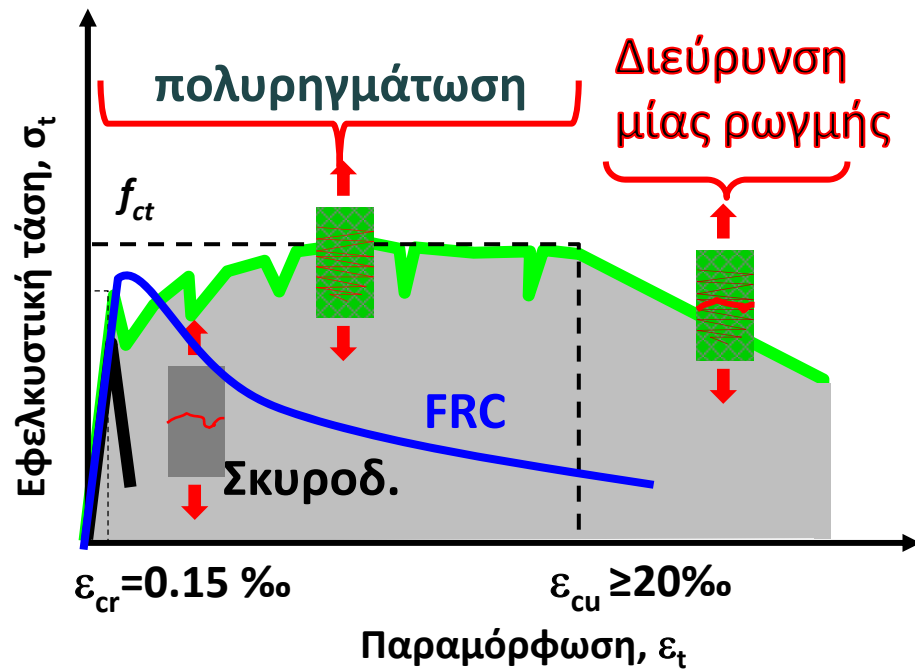
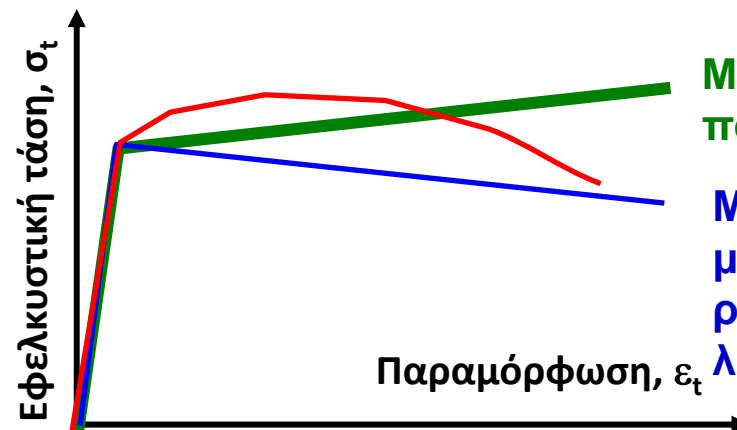


Fig. 13. The DIC pictures of UHP-ECC.

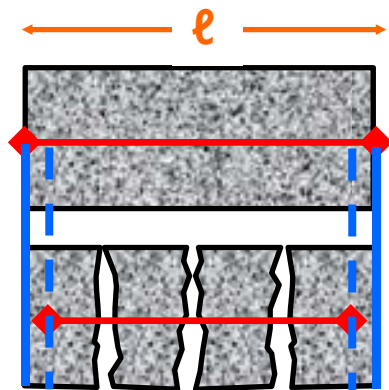
Το σχήμα της $\sigma_t - \epsilon_t$ εξαρτάται από την πολυρηγμάτωση, την συνάφεια των ινών με την μήτρα, το μέτρο ελαστικότητας των ινών



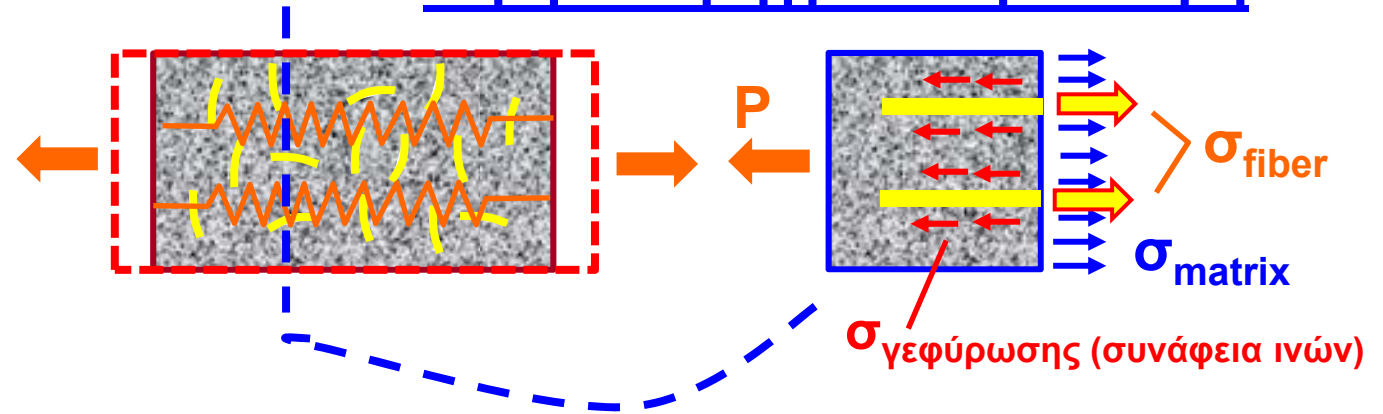
Με κράτνωση (hardening): πολλές ρωγμές

Με ήπιο πτωτικό κλάδο μετά την πρώτη ρηγμάτωση (softening): λίγες ρωγμές

• Πολυρηγμάτωση:



Τομή σε αρηγμάτωση διατομή



s_i : ολίσθηση ίνας \rightarrow εύρος ρωγμής

1^ο κριτήριο αντοχής για την πολυρηγμάτωση:

η εφελκυστική αντοχή της μήτρας έναντι ρηγμάτωσης ($\sigma_{matrix} = f_{cr, matrix}$) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αντοχή γεφύρωσης που παρέχουν οι διάσπαρτες ίνες ($\sigma_{\text{γεφύρωσης}}$)

$$P_{cr} = A_{matrix} * \sigma_{matrix} + A_{fiber} * \sigma_{fiber} \approx A_{matrix} * \sigma_{matrix}$$

$$\text{Αντοχή γεφύρωσης } P_{bridging} = A_{lateral, \text{ινών}} * \sigma_{\text{γεφύρωσης}}$$

Αν $P_{cr} > P_{bridging}$ οι ίνες εξολκεύονται, δημιουργείται ρωγμή και το φορτίο P δεν μπορεί να παραληφθεί (πολύ μικρή συνάφεια, $\sigma_{\text{γεφ.}}$)

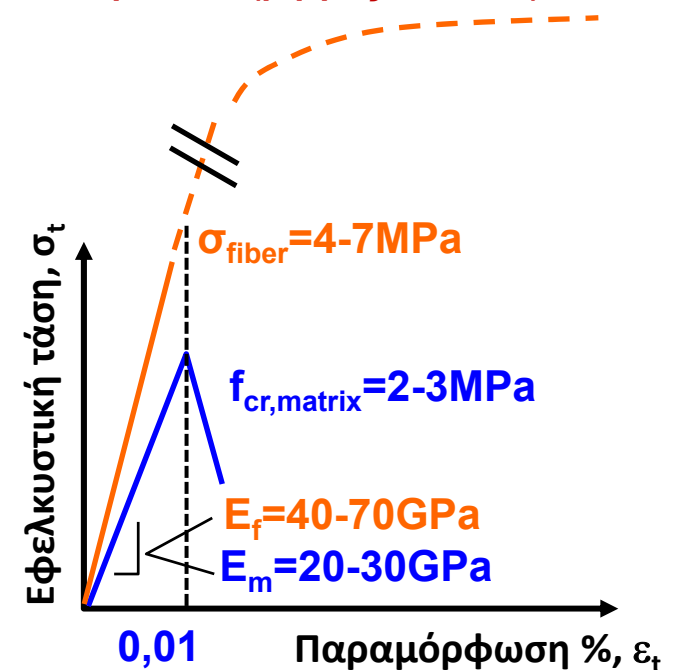
2^ο κριτήριο ενέργειας για πολυρηγμάτωση (συνάφεια)



- Φτωχή συνάφεια: εξόλκευση
- Ισχυρή συνάφεια: θραύση ίνας χωρίς ολίσθηση

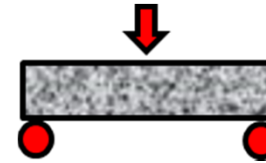
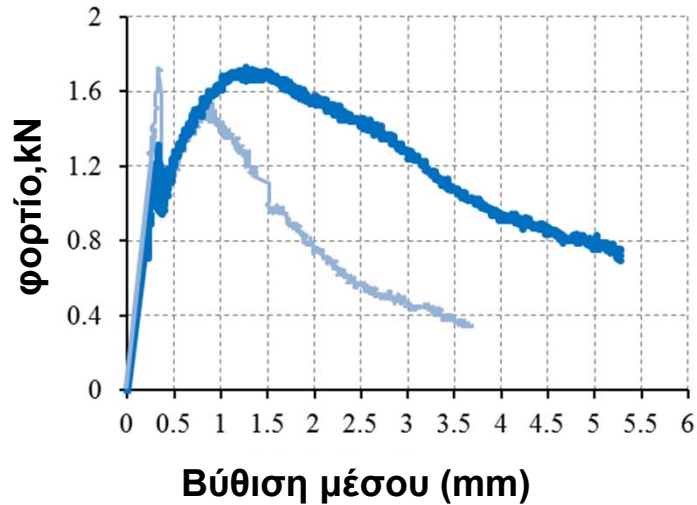
\rightarrow Ζητούμενο μια ενδιάμεση κατάσταση...

Νόμοι σε εφελκυσμό των δύο φάσεων (μήτρας και ινών)





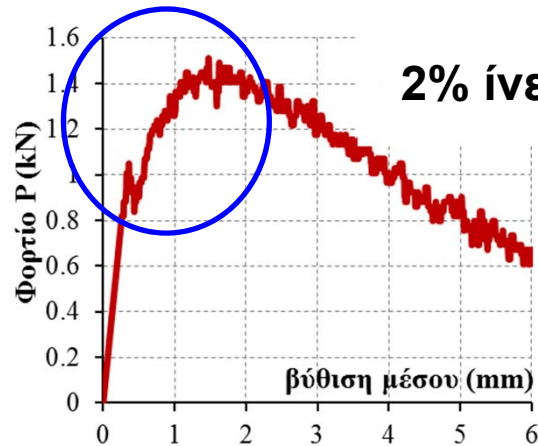
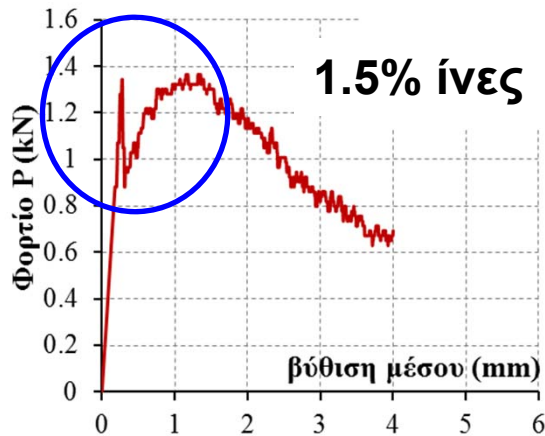
➤ Παράμετρος μελέτης: περιεκτικότητα ινών



Αύξηση περιεκτικότητας ινών:

➔ ομαλή μετάβαση από την ελαστική στην ανελαστική συμπεριφορά

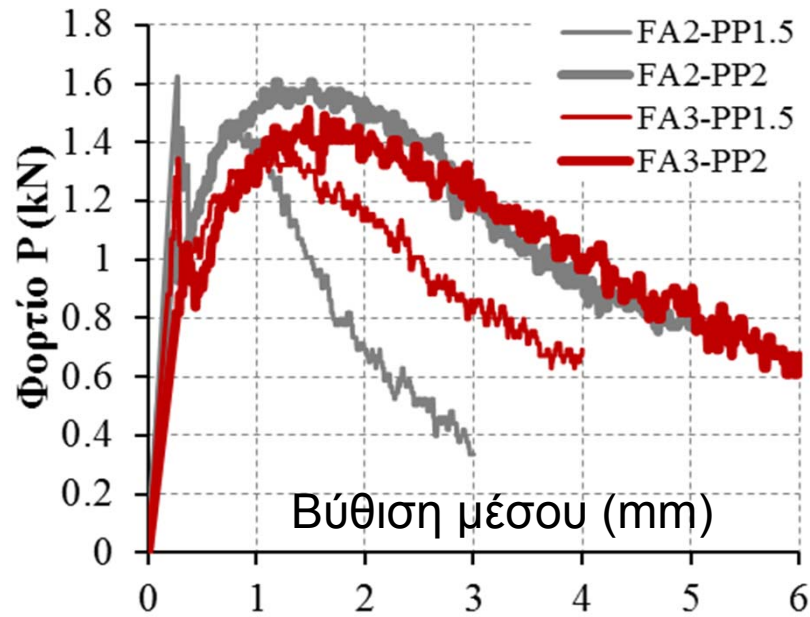
➔ Σαφώς αυξημένη ενέργεια θραύσης



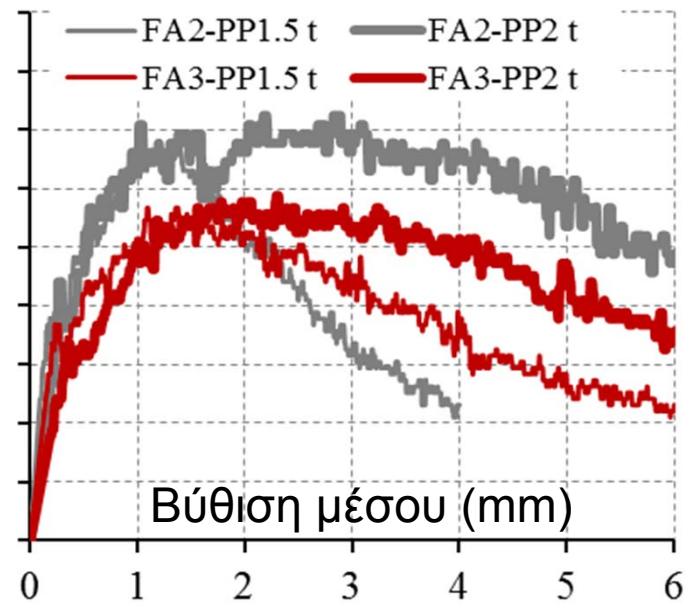
Ευπάθεια υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες, όχι όμως σε παγετό



αναφορά

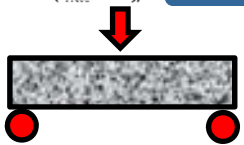


έκθεση σε 200°C για 2 ώρες

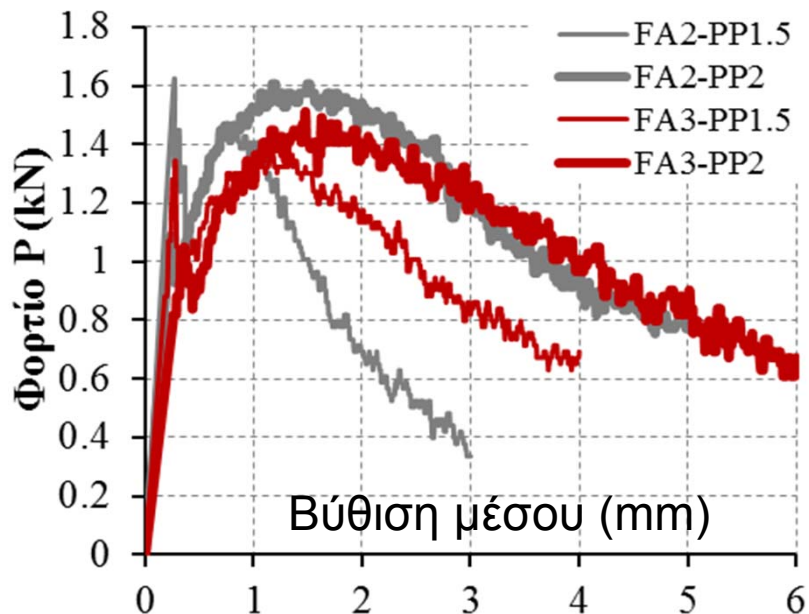




Ι. Καμπτικός εφελκυσμός: πρίσματα σε κάμψη 3 σημείων

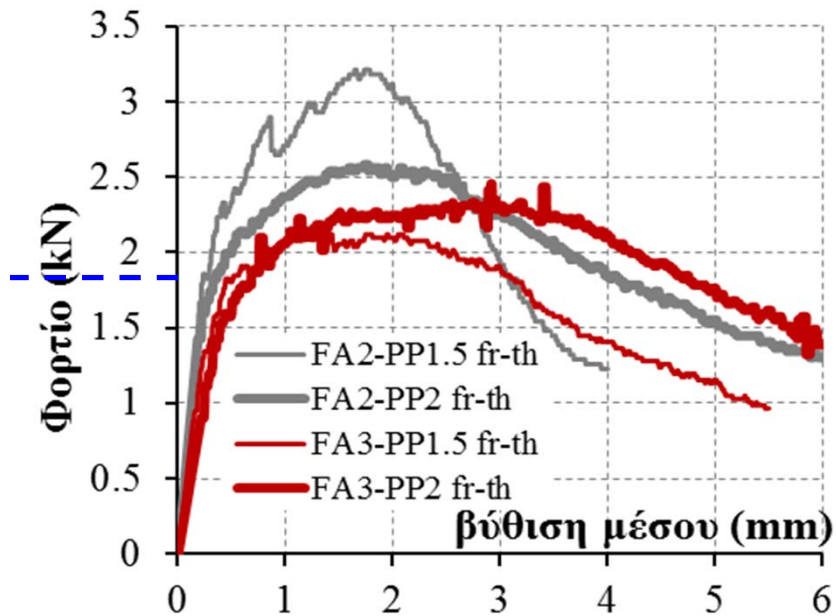


αναφορά



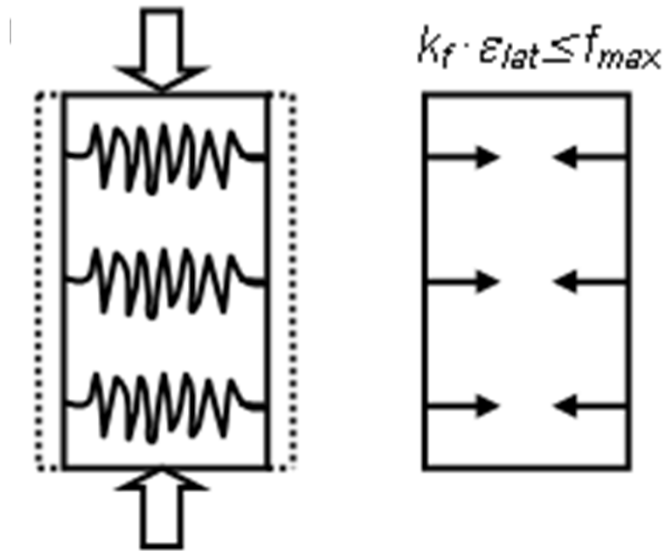
έκθεση σε ψύξη/απόψυξη

(35 κύκλοι, 48ωρο, +15/-20°C)

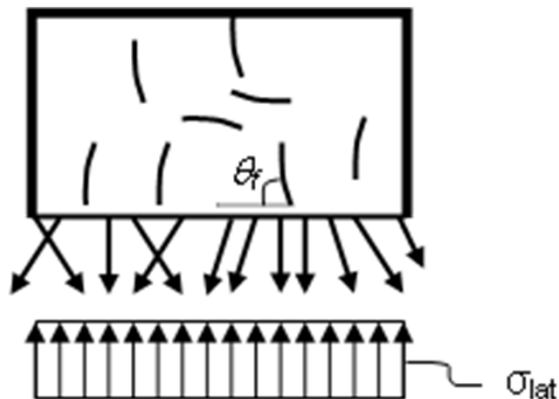


Σύνθετο κονίαμα ECC – ο ρόλος των ινών όταν το υλικό τίθεται σε θλίψη

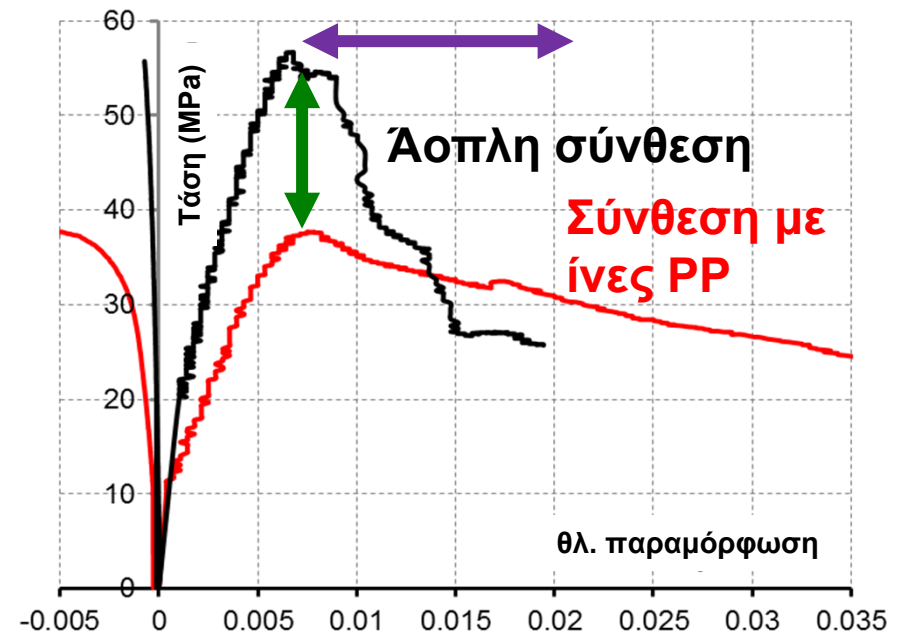
- Κινηματικό περιορισμό έναντι διόγκωσης



- παθητική περίσφιξη



- Οι ίνες μειώνουν την αντοχή, υπέρ της ικανότητας παραμόρφωσης

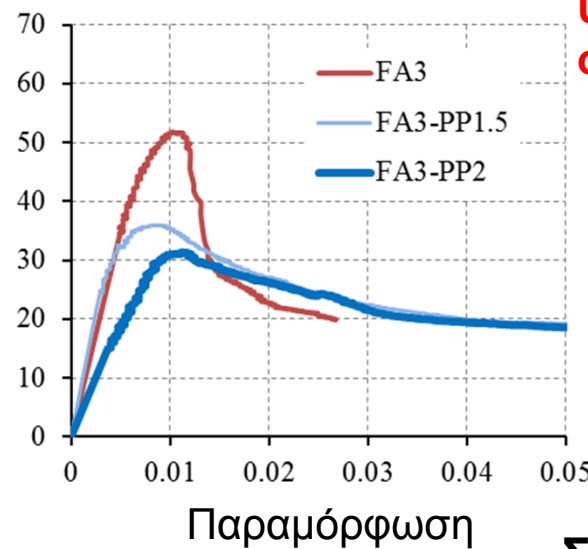
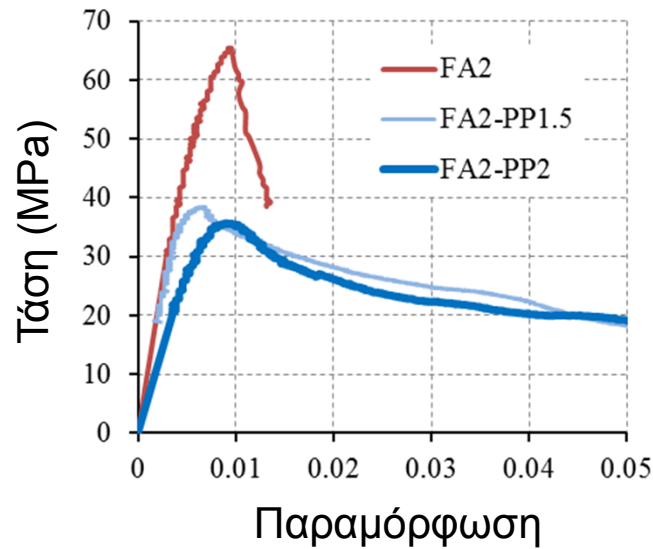


- Οι ίνες μειώνουν το μέτρο Ελαστικότητας (έναντι της άοπλης, χωρίς ίνες)

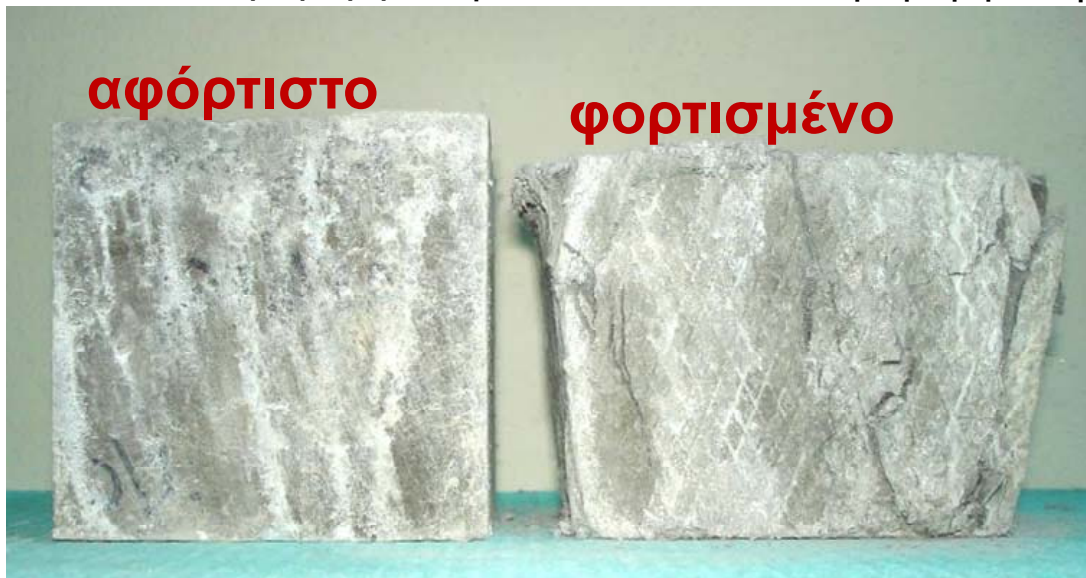
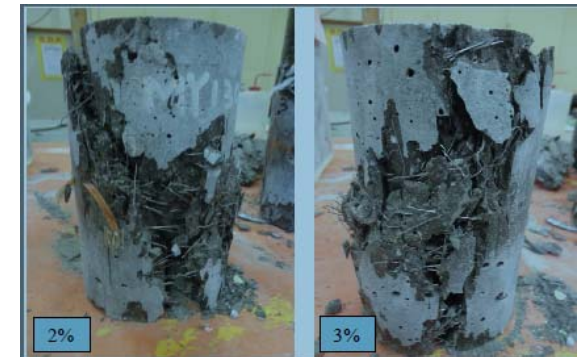


Πειραματικά Αποτελέσματα: Θλίψη (28 μέρες)

- Παράμετρος μελέτης: περιεκτικότητα ινών
Εντονότερη καμπύλη: ↑ % ινών



UHPFRC: διακριτές οι ίνες συγκριτικά με των ECC



Συμβατικό σκυρόδεμα και άοπλο ECC





II. Κεντρική θλίψη → ψ/α και μεταγενέστερη ηλικία

λεπτή καμπύλη → αναφοράς, 28 ημέρες

Εντονότερη συνεχής καμπύλη → μεταγ. ηλικία

Διακεκομμένη καμπύλη → κύκλοι ψύξης/απόψυξης

έκθεση σε ψ/α :

δεν επιδείνωσε την συμπεριφορά των υλικών
(χαμηλό πορώδες, $w=0.37$)



Ψαθυροποίηση άοπλου ECC

