

Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας, ΟΚΛ, (Serviceability Limit States, SLS)

Η ρηγματώση, όπως και ο έλεγχος των βελών κάμψεως, αποτελούν τους ελέγχους **οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας** (ενώ οι έλεγχοι κάμψεως, διατμήσεως, στρέψεως, διατρήσεως κλπ είναι έλεγχοι **οριακών καταστάσεων αστοχίας**).

Στις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας των δράσεων είναι ίσοι με 1.00 ($\gamma_G=1.00$), σε αντίθεση προς τις οριακές καταστάσεις αστοχίας (ΟΚΑ, ultimate limit states ULS) όπου οι συντελεστές είναι $\gamma_G=1.35$ και $\gamma_Q=1.50$). Επιπλέον, οι χαρακτηριστικές τιμές των κινητών φορτίων πολλαπλασιάζονται επί τους (μειωτικούς) συντελεστές ψ_i (<1.0) ανάλογα με το τί ελέγχεται.

Λόγοι περιορισμού της ρηγματώσεως:

- ανθεκτικότητα των υλικών σκυρόδεμα (ενανθράκωση, χλωρίοντα) και χάλυβα (διάβρωση). Η συσχέτιση της διαβρώσεως και του εύρους της ρωγμής είναι ιδιαίτερα έντονη σε βλαπτικά διαβρωτικά περιβάλλοντα, για πολύ ευαίσθητους χάλυβες, ή όταν το εύρος της ρωγμής είναι μεγαλύτερο των 0.4mm
- ψυχολογία του χρήστη (αισθήματα δυσάρεσκειας και φόβου)
- σταθερότητα (μικρά βέλη κάμψεως, όχι αισθητές δονήσεις, ενόχληση σε δευτερεύοντες οργανισμούς)
- ειδικές απαιτήσεις ανάλογα με την χρήση πχ: στεγανότητα δεξαμενών, σ' έναν σιρό (=silo) οι ρωγμές είναι εστίες μυκήτων, η ηχομονωτική ικανότητα μιας ρηγματωμένης επιφάνειας, μειώνεται σημαντικά.

Περιορισμός των τάσεων

Ο περιορισμός των τάσεων υπό τα φορτία λειτουργίας σχετίζεται με απαιτήσεις λειτουργικότητας και όχι με απαιτήσεις αντοχής. Οι απαιτήσεις αντοχής που σχετίζονται με τις οριακές τάσεις των υλικών καλύπτονται από τις οριακές καταστάσεις αστοχίας (ορθής εντάσεως, διατμήσεως, στρέψεως κλπ.), από τις οποίες συνήθως προσδιορίζονται οι διαστάσεις των διατομών και οι ποσότητες του απαιτούμενου οπλισμού. Ας εξετάσουμε ειδικότερα τις τάσεις των υλικών στις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας:

Εφελκυστικές τάσεις σκυροδέματος

Για το Σιδηροπαγές Σκυρόδεμα δεν απαιτείται κανένας περιορισμός των εφελκυστικών τάσεων του σκυροδέματος στην φάση λειτουργίας (και αν απαιτείτο, αυτός θα είχε σκοπό τον περιορισμό της ρηγματώσεως, αλλά για τον σκοπό αυτό γίνεται ιδιαίτερος έλεγχος όπως θα δούμε στην συνέχεια). Αντιθέτως για το Προεντεταμένο Σκυρόδεμα ο περιορισμός των εφελκυστικών τάσεων είναι, όπως θα δούμε στο 9^ο εξάμηνο, συνήθως ο καθοριστικός έλεγχος.

Θλιπτικές τάσεις σκυροδέματος

Ο περιορισμός των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος δεν γίνεται για λόγους αντοχής (μιας και η αντοχή ελέγχεται στην οριακή κατάσταση αστοχίας από ορθή ένταση) αλλά γίνεται κυρίως για:

- τον περιορισμό του ερπυσμού (ιδίως στο ΠΣ) (για τάσεις σκυροδέματος $\sigma_c > 0.4f_{ck}$ δεν ισχύει το απλοποιημένο προσομοίωμα υπολογισμού του ερπυσμού)
- τον περιορισμό της διαμήκους ρηγματώσεως

Τάσεις χάλυβα

Ο κανονισμός δεν επιβάλλει ευθέως κανέναν περιορισμό των εφελκυστικών τάσεων του χάλυβα στην φάση λειτουργίας. Εμμέσως μόνον ο περιορισμός των τάσεων του χάλυβα θα είχε σκοπό την αποφυγή ανελαστικών παραμορφώσεων οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μεγάλες και μόνιμες ρωγμές.

Οι περιορισμοί των τάσεων καλύπτονται συνήθως:

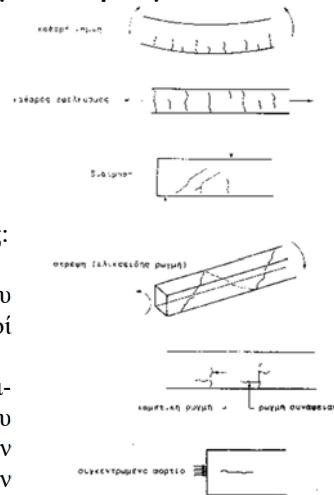
- από τον έλεγχο αστοχίας από ορθή ένταση
- από την τοποθέτηση ελάχιστου οπλισμού
- από τις λεπτομέρειες οπλίσεως
- από τον περιορισμό της ανακατανομής της εντάσεως στις οριακές καταστάσεις αστοχίας

Ετσι, δεν γίνεται κάποιος ιδιαίτερος έλεγχος για τον περιορισμό των τάσεων του σκυροδέματος αλλά ούτε και χάλυβα στην φάση λειτουργίας.

Ρηγματώση μπορεί να παρουσιασθεί είτε στο νωπό σκυρόδεμα είτε στο σκληρυμένο.

Αιτίες ρηγματώσεως στο σκληρυμένο σκυρόδεμα

- Άμεσες δράσεις:
 - κάμψη,
 - εφελκυσμός,
 - διάτμηση,
 - στρέψη,
 - συνάφεια,
 - συγκεντρωμένο φορτίο
- Επιβαλλόμενες παραμορφώσεις:
 - διαφορικές καθιζήσεις,
 - θερμοκρασία (σε μεγάλου μήκους στοιχεία, θερμοκοί σταθμοί, καμινάδες)
- Διάβρωση οπλισμού: τα δημιουργούμενα οξειδία του σιδήρου έχουν μεγαλύτερο όγκο από τον χάλυβα από τον οποίο προήλθαν με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων
- Χημικές δράσεις
- Παγετός (αποσάθρωση σκυροδέματος)



Τρόποι αντιμετώπισης της ρηγματώσεως στο σκληρυμένο σκυρόδεμα: κατάλληλη όπλιση, κατάλληλη μόρφωση του φορέα (αρμοί διαστολής κλπ.), κατάλληλη σύνθεση σκυροδέματος.

Αιτίες ρηγματώσεως στο νωπό σκυρόδεμα

- Συστολή ξηράνσεως,
- Θερμοκρασία (πήξη σκυροδέματος σε ογκώδεις κατασκευές)
- Εντονη απαγωγή υγρασίας (σκυροδέτηση υπό υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλη ταχύτητα ανέμου κλπ.)

Τρόποι αντιμετώπισης της ρηγματώσεως στο νωπό σκυρόδεμα: κατάλληλη σύνθεση σκυροδέματος, κατάλληλη συντήρηση (μέτρα προστασίας, σερπαντίνες ψύξης, διαβροχή κλπ.), κατάλληλη σκυροδέτηση (αρμοί διακοπής σκυροδέτησης, αναβολή σκυροδέτησης, ψύξη αδρανών κλπ.).

- ¹Το παρόν συμπληρώνει την παράγραφο 12.6 του βιβλίου «ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ» του 6^{ου} εξ.
Κ. Γ. Τρέζος, Ρηγματώση, 29/11/2019

Το **μέγιστο ανεκτό εύρος ρωγμής**, w_{\max} , εξαρτάται από την λειτουργία και τη φύση της κατασκευής, τις συνθήκες περιβάλλοντος και από την ευαισθησία των χαλύβων (χαλαροί ή προεντεταμένοι οπλισμοί) (βλ. Πίνακα 7.1N του EC2).

Πίνακας 7.1N Συνιστώμενες τιμές του w_{\max} (mm) κατά EC2

Κατηγορία περιβαλλοντικών συνθηκών	Οπλισμένα και προεντεταμένα στοιχεία με τένοντες χωρίς συνάφεια	Προεντεταμένα στοιχεία με τένοντες με συνάφεια
	Οιονεί-μόνιμος συνδυασμός δράσεων (ψ_2)	Συχνός συνδυασμός δράσεων (ψ_1)
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Απόθλιψη

Σημείωση 1: Για τις κατηγορίες περιβαλλοντικών συνθηκών X0, XC1, το εύρος της ρωγμής δεν επηρεάζει την ανθεκτικότητα, και το σχετικό όριο τίθεται για την εξασφάλιση αποδεκτής αισθητικής εμφάνισης. Εφόσον δεν τίθενται απαιτήσεις αισθητικής, το όριο αυτό μπορεί να αυξηθεί.

Σημείωση 2: Για αυτές τις κατηγορίες περιβαλλοντικών συνθηκών, πρέπει, επιπλέον, να ελέγχεται η απόθλιψη υπό τον οιονεί-μόνιμο συνδυασμό δράσεων.

Η εμφάνιση ρωγμών χωρίς προσπάθεια περιορισμού του εύρους τους μπορεί να επιτρέπεται, υπό την προϋπόθεση ότι δεν παρεμποδίζουν την ομαλή λειτουργία της κατασκευής.

Απαλλακτικές διατάξεις:

- Οι πλάκες με πάχος μέχρι 20cm και εφόσον τηρούνται οι κατασκευαστικές διατάξεις της παρ. 9.3² του EC2 δεν χρειάζεται να ελέγχονται έναντι ρηγματώσεως.
- Απλοποιητικά ο έλεγχος μπορεί να γίνει με τον περιορισμό (διαξενικά):
 - είτε της διαμέτρου των οπλισμών, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.2N,
 - είτε των αποστάσεων μεταξύ των ράβδων του οπλισμού, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.3N,

συναρτήσει των τάσεων του οπλισμού και του χαρακτηριστικού εύρους ρωγμής.

Πίνακας 7.2N Μέγιστες διαμέτροι ράβδων Φ_s^* για περιορισμό της ρηγματώσεως^(α)

Τάση χάλυβα ^(β) [MPa]	Μέγιστη διάμετρος ράβδων [mm]		
	$w_k=0,4\text{mm}$	$w_k=0,3\text{mm}$	$w_k=0,2\text{mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Για κάμψη (όταν ένα τμήμα τουλάχιστον της διατομής βρίσκεται υπό θλίψη) και αν η ποιότητα του σκυροδέματος είναι διάφορη της C30/37 ($f_{ct,eff}=2.9\text{MPa}$) ή και $d\leq 0.9h$, οι τιμές παραπάνω του πίνακα διορθώνονται με την σχέση (βλ. και σχέση 7.6N του Ευρωκώδικα όπου περιγράφεται ακριβέστερα ο έλεγχος):

$$\Phi_s = \Phi_s^* (f_{ct,eff} / 2.9) [(0.1h) / (h-d)]$$

²Οι διατάξεις αυτές αφορούν: τον ελάχιστο οπλισμό, τις μέγιστες αποστάσεις ράβδων, την τοποθέτηση δευτερευόντος οπλισμού κλπ
Κ. Γ. Τρέζος, Ρηγματώση, 29/11/2019

Πίνακας 7.3N Μέγιστη απόσταση ράβδων για περιορισμό της ρηγματώσεως^(α)

Τάση χάλυβα ^(β) [MPa]	Μέγιστη απόσταση ράβδων [mm]		
	$w_k=0,4\text{mm}$	$w_k=0,3\text{mm}$	$w_k=0,2\text{mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Σημειώσεις Πινάκων 7.2N και 7.3N

(α) Έχουν ληφθεί υπόψη: $c=25\text{mm}$, $f_{ct,eff}=2.9\text{MPa}$, $h_{cr}=0.5h$, $d=0.9h$, $k_1=0.8$, $k_2=0.5$, $k_3=0.4$, $k=1.0$, $k_t=0.4$ και $k_4=1.0$ (για την σημασία των συντελεστών k βλ. σχέση 7.11 στο τέλος του παρόντος)

(β) Για τον συνδυασμό δράσεων για τον οποίο ελέγχεται το εύρος ρωγμής

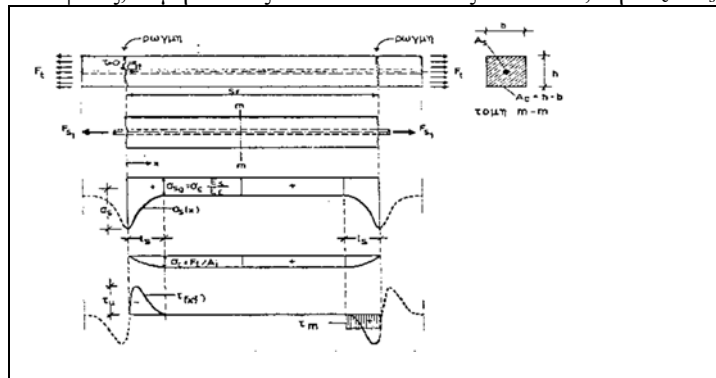
Διαδικασία σχηματισμού ρωγμών (από το άνοιγμα της 1^{ης} ρωγμής μέχρι την γενικευμένη ρηγματώση).

Ας εξετάσουμε την περίπτωση ενός ελκυστήρα από Ω.Σ. (ράβδος υπό κεντρικό εφελκυσμό):

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ράβδος από σκυροδέμα με οπλισμό, A_s , στο κέντρο της διατομής, A_c , η οποία εφελκύεται κεντρικά με δύναμη F_t . Μόλις η τάση σε κάποια διατομή ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος το σκυροδέμα ρηγματώνεται. Έτσι στη θέση της ρωγμής, στη ράβδο οπλισμού αναπτύσσεται μια δύναμη $F_{s1} = F_t$ για την αποκατάσταση της ισορροπίας. Εκεί ο χάλυβας αποκρίνεται με τάση: $\sigma_s = \frac{F_{s1}}{A_s}$ και αντίστοιχη μήκυνση $\epsilon_s = \sigma_s / E_s$.

Αμέσως μετά το χείλος της ρωγμής και από αμφότερες τις πλευρές της ρωγμής, η τοπική ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος ενεργοποιεί τη συνάφεια.

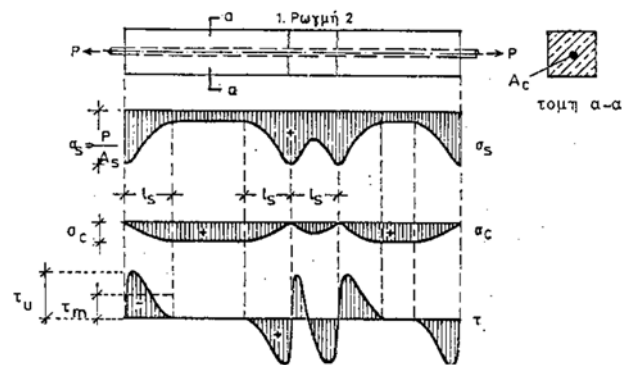
Στο εξής, οι παραμορφώσεις ϵ_s (και οι αντίστοιχες τάσεις σ_s) του χάλυβα μειώνονται ενώ στο σκυροδέμα εισάγονται σε αντιστάθμισμα παραμορφώσεις ϵ_c (και αντίστοιχες τάσεις σ_c). Μετά ένα ορισμένο μήκος εισαγωγής l_s , (μήκος αγκυρώσεως) το οποίο απαιτείται για την πλήρη ενεργοποίηση των τάσεων συναφείας, οι μήκυνσεις των δύο υλικών εξισώνονται, δηλ. $\epsilon_c = \epsilon_s$.



Από το σημείο αυτό και μέχρι την ανάπτυξη νέας ρωγμής, μεταξύ των l_s , μηδενίζονται οι τάσεις συναφείας αφού δεν υπάρχει μεταβολή εντάσεως και επομένως και μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Η διατομή λειτουργεί στην περιοχή αυτή ως

ομογενής, με $\sigma_c = F_t/A_i$, όπου: $A_i = (A_c - A_s) + \frac{E_s}{E_c} A_s$ είναι η ιδεατή διατομή, και $\sigma_{s0} = \sigma_c \frac{E_s}{E_c}$.

Αν το εξωτερικό φορτίο αυξηθεί θα εμφανιστούν και άλλες ρωγμές. Θα φθάσει όμως κάποια στιγμή όπου οι ρωγμές θα είναι τόσο πυκνές, ώστε η τάση του σκυροδέματος, ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ρωγμές, δεν θα “προλαβαίνει” να φθάσει την εφελκυστική αντοχή, και έτσι δεν θα ανοίγουν πλέον άλλες ρωγμές. Απλώς θα διευρύνονται οι υπάρχουσες. Η κατάσταση αυτή λέγεται **κατάσταση γενικευμένης ρηγματώσεως**.



Ας δούμε αντιστοίχως την περίπτωση μιας καμπτόμενης ράβδου από Ω.Σ.: Από το επόμενο σχήμα βλέπουμε ότι όσο η ροπή, M, είναι αρκετά μικρή ώστε να μην ξεπερνιέται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, δηλ. όσο :

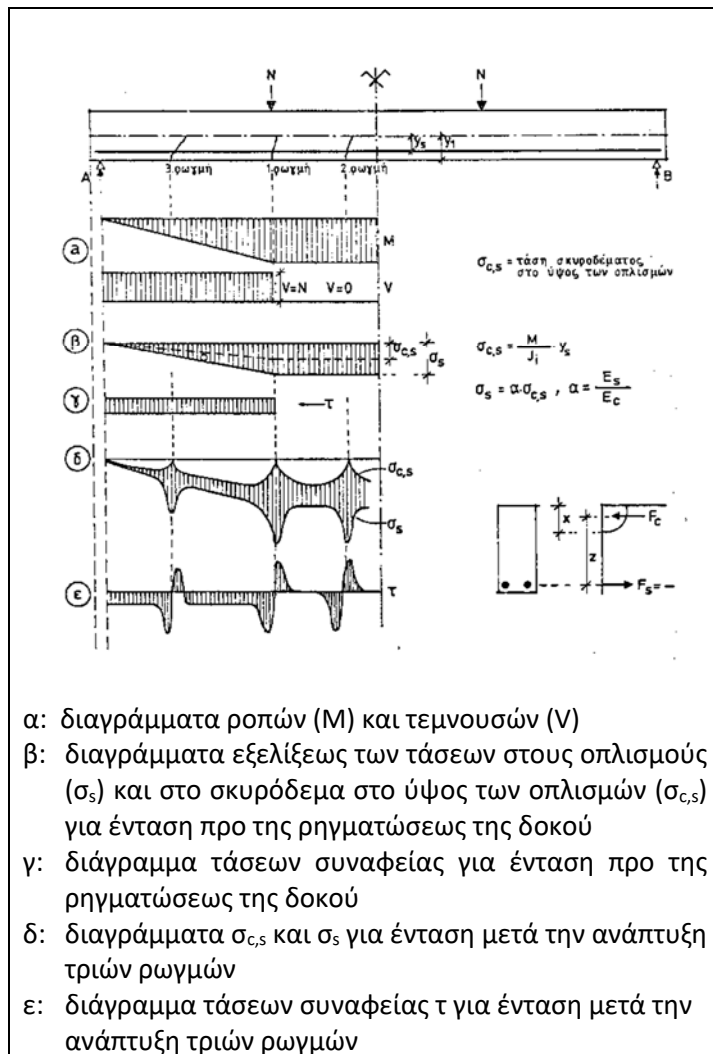
$$\sigma_{c1} = \frac{M}{J_1} y_1 \leq f_{ct}$$

όπου J_1 η ροπή αδρανείας της ιδεατής διατομής A_i , η διατομή λειτουργεί ως ομογενής και οι τάσεις στους οπλισμούς που βρίσκονται σε απόσταση y_s από τον κεντροβαρικό άξονα έχουν την τιμή: $\sigma_s = \alpha \sigma_{cs} = \alpha \frac{M}{J_1} y_s$, όπου $\alpha = \frac{E_s}{E_c}$.

Ποιοτική κατανομή των τάσεων σ_{cs} και σ_s κατά μήκος της δοκού φαίνεται στο β.

Για τη συγκεκριμένη φόρτιση του φορέα παρατηρούμε ότι μεταξύ των στηριγμάτων και των σημείων εφαρμογής των δύο φορτίων, N, η τέμνουσα έχει σταθερή τιμή (βλ. α).

Η παρουσία της τέμνουσας dM/dx , είναι η αιτία ανάπτυξης αντιστοιχών τάσεων συναφείας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος στην περιοχή μεταξύ στηρίγματος και φορτίου N, αφού η κατά E_s/E_c πολλαπλάσια τάση που είναι αναγκασμένος να παραλάβει ο χάλυβας από την τάση του σκυροδέματος που τον περιβάλλει, συνεχώς μεταβάλλεται. Η ανάπτυξη αυτή τάσεων συναφείας στο χάλυβα και στο περιβάλλον σκυρόδεμα κατά μήκος του φορέα εξαρτώνται από την τέμνουσα δύναμη και εκδηλώνεται είτε για ένταση προ της ρηγματώσεως της δοκού (βλ. γ), είτε για φόρτιση μετά τη ρηγματώση, για τη μεταξύ των ρωγμών περιοχή (βλ. ε, αριστερά). Σε περιοχές μηδενικής τέμνουσας δεν αναπτύσσονται τάσεις συναφείας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος (βλ. γ και ε, δεξιά) εκτός από τις περιοχές γύρω από τις ρωγμές.



α: διαγράμματα ροπών (M) και τεμνουσών (V)

β: διαγράμματα εξελίξεως των τάσεων στους οπλισμούς (σ_s) και στο σκυρόδεμα στο ύψος των οπλισμών ($\sigma_{c,s}$) για ένταση προ της ρηγματώσεως της δοκού

γ: διάγραμμα τάσεων συναφείας για ένταση προ της ρηγματώσεως της δοκού

δ: διαγράμματα $\sigma_{c,s}$ και σ_s για ένταση μετά την ανάπτυξη τριών ρωγμών

ε: διάγραμμα τάσεων συναφείας τ για ένταση μετά την ανάπτυξη τριών ρωγμών

Λογιστικός έλεγχος ρηγματώσεως.

Το πιθανό μέσο εύρος ρωγμής ισούται με την μέση απόσταση των ρωγμών s_{rm} επί την μέση σχετική³ παραμόρφωση του χάλυβα ϵ_{srm} , δηλαδή

$$w_m = s_{rm} \epsilon_{srm}$$

Επειδή τα μεγέθη παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά (της τάξεως του 40%) γι' αυτό υπολογίζουμε το χαρακτηριστικό εύρος ρωγμής (με πιθανότητα 95%) δηλαδή

$$w_k = (1 + 1.64 \cdot 0.40) w_m = 1.7 w_m$$

Υπολογισμός της μέσης αποστάσεως των ρωγμών s_{rm}

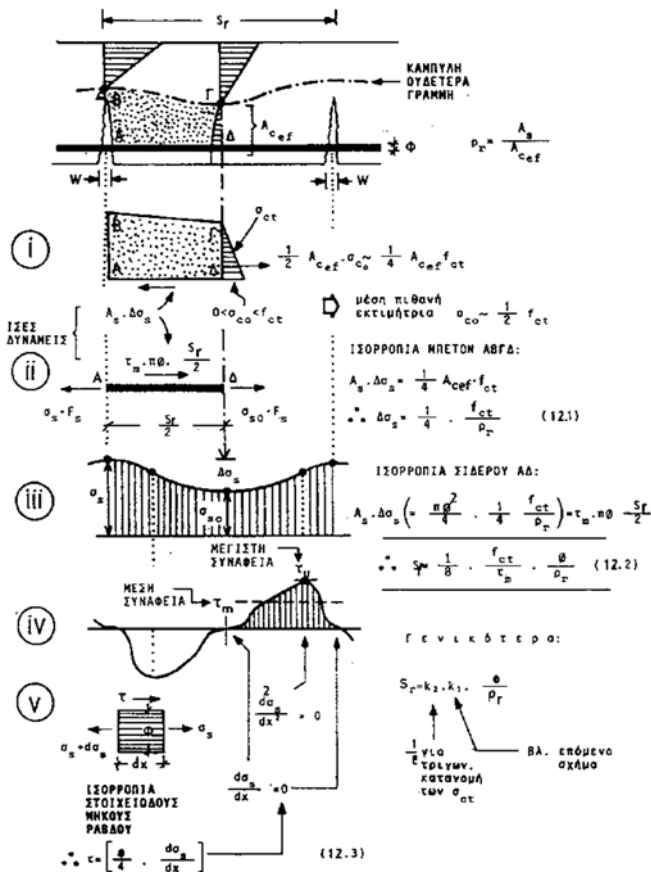
Στο μέσον του τμήματος, μεταξύ των δύο ρωγμών, η κατανομή των εφελκυστικών τάσεων είναι τριγωνική, με μέγιστη τιμή: $0 < \sigma_{c0} < f_{ct}$, έστω $\sigma_{c0} = 0.5 f_{ct}$.

Αρα εφελκυστική δύναμη σκυροδέματος: $0.5 A_{c,ef} \sigma_{c0} = 0.25 A_{c,ef} f_{ct}$.

Ισορροπία τραπέζιου ΑΒΓΔ: $0.25 A_{c,ef} f_{ct} = A_s \Delta \sigma_s$.

³ Σχετική: ως προς το περιβάλλον σκυρόδεμα δηλαδή η διαφορά της παραμορφώσεως του χάλυβα μείον την παραμόρφωση του Κ. Γ. Τρέζος, Ρηγμάτωση, 29/11/2019

σκυροδέματος (διότι ΑΥΤΗ η διαφορά είναι που προκαλεί τις ρωγμές).



Αρα η μεταβολή της τάσεως του χάλυβα είναι: $\Delta\sigma_s = 0.25f_{ct}/\rho_r$
όπου: $\rho_r = A_s/A_{c,ef}$

Από την ισορροπία του σιδήρου ΑΔ έχουμε ότι:

$$A_s \Delta\sigma_s = \tau \pi \Phi \frac{s_{rm}}{2} \quad \text{ή} \quad \left[\frac{\pi \Phi^2}{4} \right] \left[\frac{0.25f_{ct}}{\rho_r} \right] = \tau_m \pi \Phi \frac{s_{rm}}{2}$$

$$\text{ή} \quad s_{rm} = \frac{1}{8} \frac{f_{ct}}{\tau_m} \frac{\Phi}{\rho_r}$$

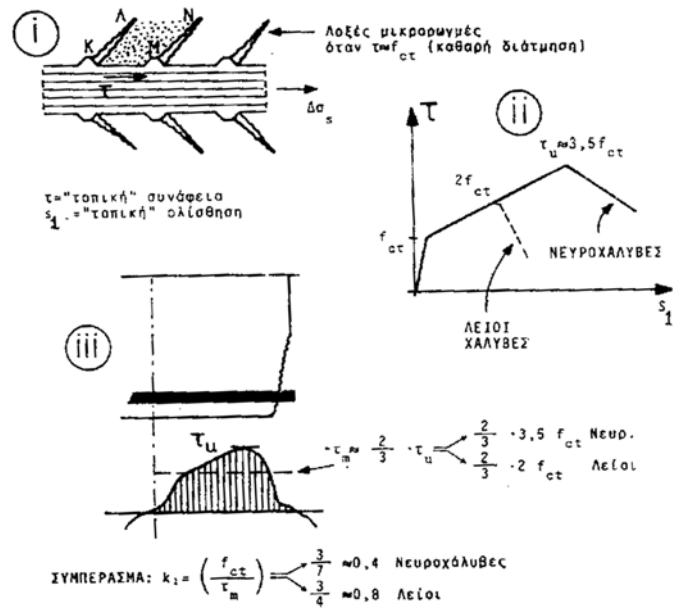
$$\text{Γενικεύοντας: } s_{rm} = k_2 k_1 \frac{\Phi}{\rho_r}$$

Όπου η τιμή του λόγου $k_1 = f_{ct}/\tau_m$ παίρνει τις τιμές (βλ και επόμενο σχήμα):

$k_1 = 0.4$ για νευροχάλυβες και

$k_1 = 0.8$ για λείους χάλυβες.

$k_2 = 1/8$ για τριγωνική κατανομή τάσεων (κάμψη) ή $k_2 = 1/4$ για ορθογωνική κατανομή τάσεων (εφελκυσμός).

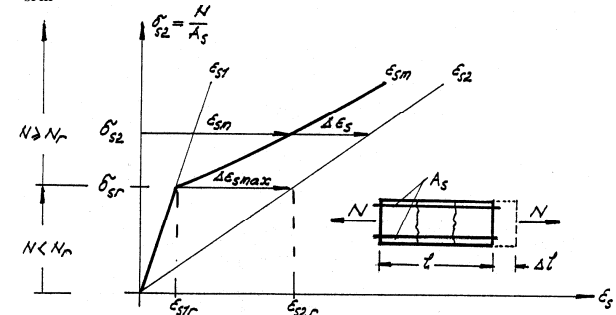


Η παραπάνω σχέση συμπληρώνεται (ημιεμπειρικά) για πλάκες:

$$s_{rm} = k_2 k_1 \frac{\Phi}{\rho_r} + 2 \left(c + \frac{s}{10} \right)$$

όπου c η επικάλυψη των οπλισμών και s η απόσταση των οπλισμών. Το συμπλήρωμα αυτό μπορεί να αντικαθίσταται απλοποιητικά και από την τιμή 50mm.

Υπολογισμός της μέσης σχετικής παραμορφώσεως του χάλυβα ε_{srm} .



Η μέση παραμόρφωση του χάλυβα είναι: $\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \Delta\varepsilon_s$.

Κάνουμε την παραδοχή ότι η ανακούφιση από την εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος⁴ $\Delta\varepsilon_s$ είναι αντιστρόφως ανάλογη της τάσεως:

$$\Delta\varepsilon_s = \Delta\varepsilon_{s,max} \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \quad \text{άρα:} \quad \varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \left(\varepsilon_{s2r} - \varepsilon_{s1r} \right) \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \quad \text{ή}$$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} \left(1 - \frac{\varepsilon_{s2r}}{\varepsilon_{s2}} \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right) + \varepsilon_{s1r} \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \quad \text{ή}$$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] + \varepsilon_{s1} \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \quad \text{ή}$$

$$\varepsilon_{sm} = \zeta \varepsilon_{s2} + (1 - \zeta) \varepsilon_{s1} \quad \text{όπου: } \zeta = 1 - \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$

Η **σχετική** παραμόρφωση του χάλυβα (ως προς το σκυρόδεμα) είναι ο πρώτος όρος του παραπάνω αθροίσματος:

⁴ Το φαινόμενο αυτό το λέμε «εφελκυστική συμβολή στην δυσκαμψία» (tension stiffening effect)
Κ. Γ. Τρέζος, Ρηγμάτωση, 29/11/2019

$$\varepsilon_{srm} = \zeta \varepsilon_{s2} \text{ ή } \varepsilon_{srm} = \varepsilon_{s2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right]$$

Ο όρος αυτός διορθώνεται για να ληφθεί υπόψη το είδος της συνάφειας και το είδος της φόρτισης:

$$\varepsilon_{srm} = \varepsilon_{s2} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] > 0.4 \varepsilon_{s2}$$

όπου: $\beta_1=1.0$ για ράβδους με νευρώσεις και $\beta_1=0.5$ για λείες ράβδους και

$\beta_2=1.0$ για μεμονωμένη και βραχυχρόνια φόρτιση και $\beta_2=0.5$ για επαναλαμβανόμενη ή μακροχρόνια φόρτιση.

Άρα τελικώς:

$$w_k = 1.7 w_{im} = 1.7 s_{rm} \varepsilon_{srm},$$

όπου σ_{sr} η τάση του χάλυβα την στιγμή της ρηγματώσεως,

$$\varepsilon_{s2} = \sigma_s / E_s \text{ και}$$

σ_s η τάση του χάλυβα υπό τα φορτία λειτουργίας

Στον EC2 δίνονται λίγο διαφορετικές εκφράσεις, συγκεκριμένα:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (7.9)$$

Για την απόσταση των ρωγμών ισχύουν τα εξής:

Σε περιπτώσεις που ο οπλισμός με συνάφεια είναι τοποθετημένος σε ευλόγως μικρές αποστάσεις εντός της εφελκόμενης ζώνης (απόσταση ράβδων $\leq 5(c+\Phi/2)$), η μέγιστη τελική απόσταση των ρωγμών μπορεί να υπολογιστεί από τη Σχέση (7.11)

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \Phi / \rho_{p,eff} \quad (7.11)$$

όπου:

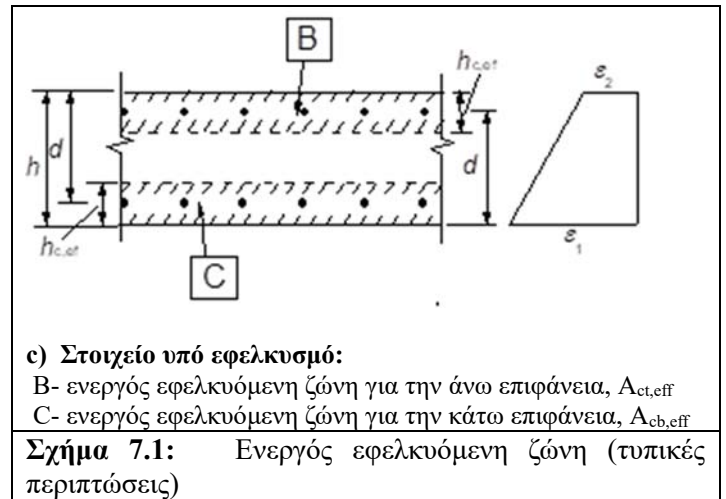
σ_s = η τάση του χάλυβα για τον εξεταζόμενο συνδυασμό λειτουργίας (ρηγματωμένη διατομή)

$f_{ct,eff}$ είναι η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος που ισχύει τη στιγμή που αναμένεται να δημιουργηθούν οι ρωγμές για πρώτη φορά: $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ ή και χαμηλότερη, ($f_{ctm}(t)$), αν η ρηγματώση αναμένεται να συμβεί πριν τις 28 ημέρες)

α_e είναι ο λόγος E_s/E_{cm}

$\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$ αν δεν υπάρχει προένταση

$A_{c,eff}$ είναι η ενεργός επιφάνεια του εφελκόμενου σκυροδέματος που περιβάλλει τον οπλισμό ή τους τένοντες προέντασης, ύψους $h_{c,ef}$, όπου $h_{c,ef} = \min[2.5(h-d), (h-x)/3, h/2]$ (βλ. Σχήμα 7.1).



ε) Στοιχείο υπό εφελκισμό:

B- ενεργός εφελκόμενη ζώνη για την άνω επιφάνεια, $A_{ct,eff}$

C- ενεργός εφελκόμενη ζώνη για την κάτω επιφάνεια, $A_{cb,eff}$

Σχήμα 7.1: Ενεργός εφελκόμενη ζώνη (τυπικές περιπτώσεις)

k_t είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη διάρκεια της φόρτισης:

$$k_t = 0,6 \text{ για βραχυχρόνια φόρτιση}$$

$$k_t = 0,4 \text{ για μακροχρόνια φόρτιση}$$

όπου:

Φ είναι η διάμετρος της ράβδου. Όταν χρησιμοποιείται ποικιλία διαμέτρων, πρέπει να εισάγεται στη σχέση μια ισοδύναμη διάμετρος, Φ_{eq} . Για μια διατομή με n_1 ράβδους διαμέτρου Φ_1 και n_2 ράβδους διαμέτρου Φ_2 , χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\Phi_{eq} = \frac{n_1 \Phi_1^2 + n_2 \Phi_2^2}{n_1 \Phi_1 + n_2 \Phi_2}$$

c είναι η επικάλυψη του διαμήκους οπλισμού

k_1 είναι ένας συντελεστής για να ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες συνάφειας του οπλισμού με συνάφεια:

$$= 0,8 \text{ για ράβδους υψηλής συνάφειας}$$

$$= 1,6 \text{ για ράβδους με πρακτικώς λεία επιφάνεια (π.χ. τένοντες προέντασης)}$$

k_2 είναι ένας συντελεστής για να ληφθεί υπόψη η κατανομή των παραμορφώσεων:

$$= 0,5 \text{ για κάμψη}$$

$$= 1,0 \text{ για καθαρό εφελκισμό}$$

Σε περιπτώσεις έκκεντρου εφελκισμού ή για τμήματα μιας διατομής, χρησιμοποιούνται ενδιάμεσες τιμές του k_2 που μπορεί να υπολογιστούν από τη Σχέση:

$$k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / (2\varepsilon_1)$$

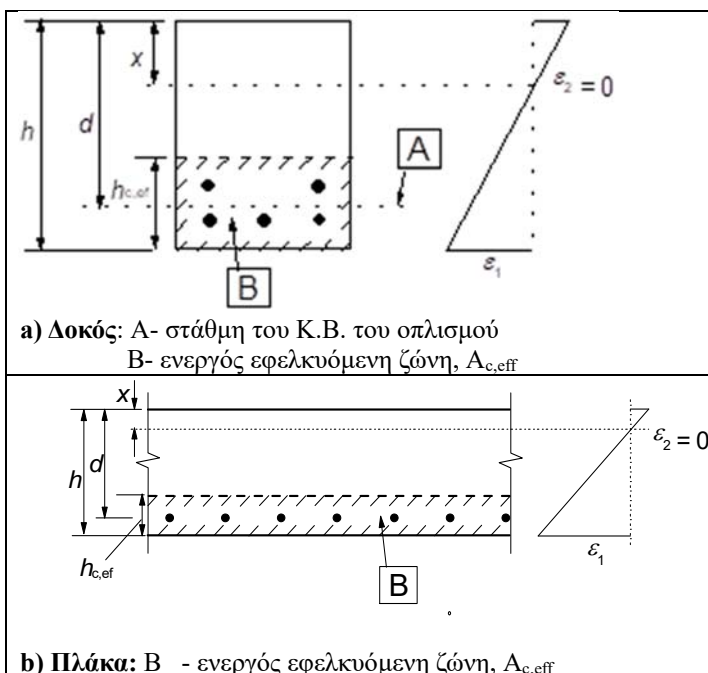
Όπου ε_1 είναι η μεγαλύτερη και ε_2 η μικρότερη εφελκυστική παραμόρφωση στα άκρα της θεωρούμενης διατομής, που υπολογίζονται με την παραδοχή ρηγματωμένης διατομής

$$k_3 = 3.4 \text{ και}$$

$$k_4 = 0.425$$

Όπου η απόσταση του οπλισμού με συνάφεια υπερβαίνει την τιμή $5(c+\Phi/2)$ ή όπου δεν υπάρχει οπλισμός με συνάφεια εντός της εφελκόμενης ζώνης, ένα άνω όριο για το εύρος ρωγμής μπορεί να βρεθεί υποθέτοντας την ακόλουθη μέγιστη απόσταση:

$$s_{r,max} = 1.3(h - x)$$



a) Δοκός: A- στάθμη του Κ.Β. του οπλισμού

B- ενεργός εφελκόμενη ζώνη, $A_{c,eff}$

b) Πλάκα: B - ενεργός εφελκόμενη ζώνη, $A_{c,eff}$