

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ  
ΕΞΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΟΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ**



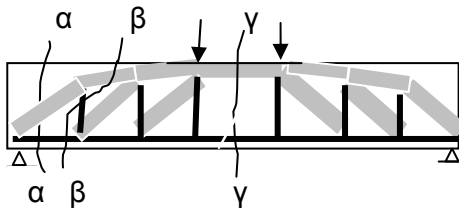
# 1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (ΑΝΤΟΧΩΝ)

Ο σχεδιασμός των φορέων βασίζεται στην επίλυση της ανίσωσης ασφαλείας:  $S_d = R_d < R_{du}$ . Οι δράσεις  $S_d$  εκφράζονται συναρτήσει των φορτίων και των ανοιγμάτων των φορέων. Ο υπολογισμός τους είναι ανεξάρτητος του υλικού του φορέα και προκύπτει με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα Γ και Δ2. Στα επόμενα κεφάλαια υπολογίζονται οι αντοχές  $R_{du}$  γραμμικών φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

## 1.1 Μεθοδολογία Προσδιορισμού Αντοχών Φορέων από Ο.Σ.

Για τον υπολογισμό των εσωτερικών μεγεθών και των αντοχών σε μια θέση φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα υιοθετείται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα Γ:

- Γίνονται κατάλληλες τομές\* του ισοδύναμου δικτύωματος του φορέα στις ζητούμενες θέσεις του φορέα, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.



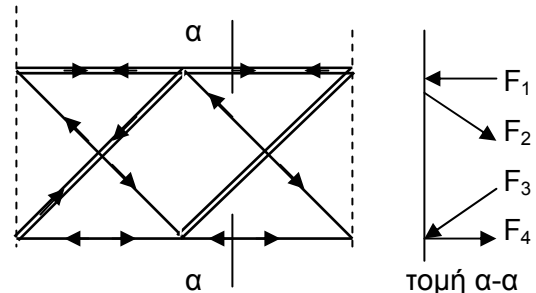
Σχ. 1.1 Τομές στο ισοδύναμο δικτύωμα για καμπτοδιατμητική επιπόνηση

- Υπολογίζονται ή εκτιμούνται οι διαστάσεις των ράβδων που τέμνονται από τις τομές αυτές και υπολογίζεται το εμβαδόν τους και η (κεντροβαρική) θέση τους.
- Υπολογίζονται οι δυνάμεις των ράβδων που τέμνονται πολλαπλασιάζοντας το εμβαδόν τους επί την αντίστοιχη τάση του υλικού τους.
- Για την εύρεση των μεγεθών αστοχίας ως τάση του υλικού των ράβδων τίθεται η αντοχή του.

- Οι τομές οι σχετιζόμενες με τους ελκυστήρες γίνονται σε θέσεις ρωγμών, γιατί στις θέσεις αυτές, ο χάλυβας παραμορφώνεται περισσότερο

(κατά το άνοιγμα της ρωγμής) και, γι' αυτό, εντείνεται περισσότερο.

- Τα εσωτερικά μεγέθη προκύπτουν, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.



$$N_R = F_1 - F_4 + F_{2x} - F_{3x}$$

$$V_R = F_{2y} - F_{3y}$$

$$M_R = (F_1 - F_{2x}) \cdot Z_1 + (F_4 - F_{3x}) \cdot Z_2$$

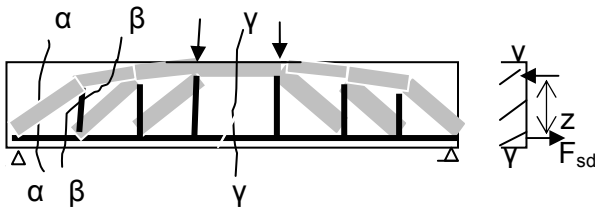
χ. 1.2 Ισοδύναμο δικτύωμα φορέα και εσωτερικά στατικά μεγέθη

- Η αξονική ως η συνισταμένη των παράλληλων προς τον κεντροβαρικό άξονα του φορέα συνιστωσών των δυνάμεων των ράβδων.
- Η τέμνουσα ως η συνισταμένη των κάθετων στον κ.β. άξονα του φορέα συνιστωσών των δυνάμεων των ράβδων.
- Η καμπτική ροπή ως η ροπή των οριζόντιων συνιστωσών των δυνάμεων των ράβδων προς τον κ.β. άξονα του φορέα.
- Η στρεπτική ροπή ως το άθροισμα των ροπών δύο ζευγών δυνάμεων επί της εγκάρσιας διατομής.

## 2. Η ΜΙΑ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ

### 2.1 Η Καμπτική Αντοχή ως Ζεύγος Εσωτερικών Δυνάμεων

Στην περιοχή της καθαρής κάμψης (περιοχή με σταθερή καμπτική ροπή) του φορέα γίνεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 1, η τομή γ-γ στη θέση της καμπτικής ρωγμής.



Σχ. 2.1 Τομές στο ισοδύναμο δικτύωμα για καμπτοδιατμητική επιπόνηση

Τέμνονται ο διαμήκης ελκυστήρας και ο διαμήκης θλιπτήρας με δυνάμεις  $F_{sd1}$  και  $F_{cd}$ , αντίστοιχα.

- ❖ Η εξωτερική καμπτική ροπή  $M_{sd}$  υλοποιείται εσωτερικά με τη μορφή του **ζεύγους των εσωτερικών αυτών δυνάμεων**. Το ζεύγος των δυνάμεων αυτών δίνει την εσωτερική ροπή  $M_{Rd}$ .
- ✚ Η καμπτική ροπή αστοχίας ή καμπτική αντοχή  $M_{Rdu}$  προκύπτει όταν η εσωτερική  $M_{Rd}$  φθάσει τη μέγιστη τιμή της.

Προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{❖ } M_{Rdu} = F_{sd} \cdot z \quad (1)$$

όπου:

$z$  : ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων

- Η καμπτική αντοχή σχετίζεται με τον υπολογισμό ή έλεγχο του διαμήκους σπλισμού και του ύψους του φορέα.

### 2.2 Οι Τρεις Εσωτερικές Τέμνουσες

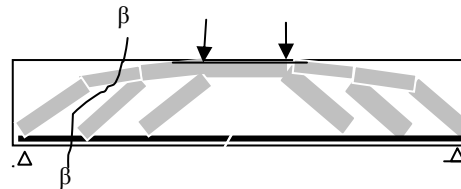
Στις θέσεις των διατμητικών μηκών του φορέα, δηλ. στις θέσεις ανάπτυξης τέμνουσας δύναμης (θέσεις με μεταβλητή καμπτική ροπή), **λόγω**

της ύπαρξης λοξών ράβδων στο ισοδύναμο δικτύωμα του φορέα, οι δυνατές τομές που δίνουν δυνάμεις ράβδων με κάθετη συνιστώσα είναι περισσότερες της μίας.

Γι αυτό, **διακρίνονται περισσότερες της μίας εσωτερικές τέμνουσες και αντίστοιχες αντοχές**.

#### 2.2.1 Διατμητική Αντοχή $V_{Rd1}$

Είναι η διατμητική αντοχή του διατμητικά άοπλου σκυροδέματος, δηλ. του φορέα χωρίς τους εγκάρσιους ελκυστήρες των συνδετήρων, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.



Σχ. 2.2 Τομή β-β στο διατμητικά άοπλο σκυρόδεμα (μετά την αστοχία των λοξών ελκυστήρων του σκυροδέματος)

Προκύπτει κάνοντας την τομή β-β στο φυσικό προσομοίωμα του φορέα στο οποίο ελλείψει εγκάρσιου σπλισμού δεν εμφανίζεται ο εγκάρσιος ελκυστήρας.

- Η αντοχή  $V_{Rd1}$  προκύπτει ως η συνισταμένη των κατακόρυφων δυνάμεων που αναπτύσσονται στη θέση της τομής β-β.

#### 2.2.2 Διατμητική Αντοχή $V_{Rd2}$

Η τομή γ-γ στο Σχ. 1 τέμνει τον λοξό θλιπτήρα και η κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμής του δίνει την  $V_{Rd2}$ .

- Η  $V_{Rd2}$  εκφράζει τη **συμβολή του λοξού θλιπτήρα**.

Σχετίζεται με τον υπολογισμό ή την επάρκεια της γεωμετρικής διατομής, (ιδιαίτερα του πλάτους).

### 2.2.3 Διατμητική Αντοχή $V_{Rd3}$

Η τομή β-β στο ισοδύναμο δικτύωμα του διατμητικά οπλισμένου φορέα που φαίνεται στο Σχ. 1 (στη θέση της λοξής ρωγμής που ανοίγει λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του λοξού ελκυστήρα του σκυροδέματος) τέμνει:

- τους κατακόρυφους ελκυστήρες των συνδετήρων (όλα τα σκέλη τους) και
- τον διαμήκη ελκυστήρα και θλιπτήρα.
- ❖ Η συνισταμένη των δυνάμεων των σκελών των συνδετήρων που τέμνονται αποτελεί την εσωτερική τέμνουσα  $V_{Rdw}$ .

Η συνισταμένη των κατακόρυφων δυνάμεων που αναπτύσσονται στη θέση του διαμήκους

ελκυστήρα και θλιπτήρα (βλ. Κεφ. 11) αποτελούν την εσωτερική τέμνουσα  $V_{cd}$  των μηχανισμών του διατμητικά άοπλου σκυροδέματος.

Το άθροισμα των κατακόρυφων δυνάμεων στη θέση της τομής β-β δίνει την εσωτερική τέμνουσα  $V_{Rd3}$ . Είναι:

$$\diamond V_{Rd3} = V_{Rdw} + V_{cd}$$

Στην περίπτωση κατακόρυφων φορτίων η  $V_{cd}$  ταυτίζεται με την  $V_{Rd1}$ .

Στην περίπτωση συνύπαρξης και σεισμικής δράσης η τέμνουσα  $V_{cd}$  λαμβάνεται αρκετά μικρότερη από την  $V_{Rd1}$ .

- Η  $V_{Rd3}$  σχετίζεται με τον υπολογισμό ή την επάρκεια των συνδετήρων

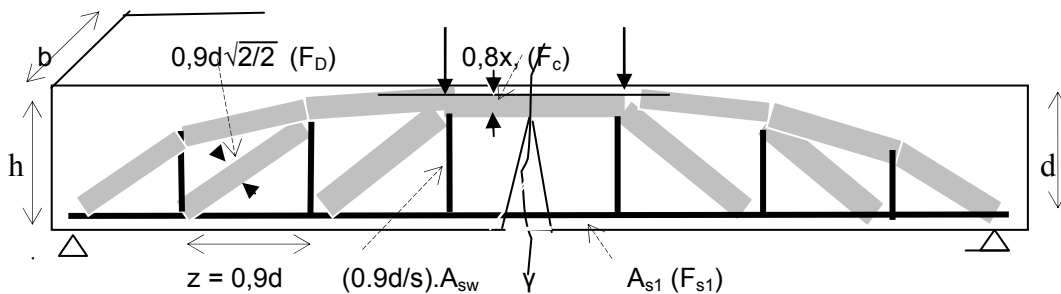
### 3. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΕΣ ΡΑΒΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ

#### 3.1 Ισοδύναμο Δικτύωμα Φορέα από Ο.Σ.

Όπως προέκυψε στην ενότητα Ε, φορέας από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό καμπτοδιατμητική επιπόνηση θεωρείται ότι αποτελείται, όπως φαίνεται από το φυσικό του προσομοίωμα στο Σχ. 1, από:

- Διαμήκη ελκυστήρα τον οποίο αποτελεί ο διαμήκης εφελκυσόμενος οπλισμός.

- Διαμήκη θλιπτήρα τον οποίο αποτελεί το σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης του φορέα.
- Εγκάρσιους ελκυστήρες τους οποίους αποτελούν οι κατακόρυφοι συνδετήρες.
- Λοξούς θλιπτήρες τους οποίους αποτελούν οι περιοχές του (αρηγμάτων) σκυροδέματος μεταξύ διαδοχικών λοξών ρωγμών.



Σχ. 3.1 Ισοδύναμο δικτύωμα για καμπτοδιατμητική επιπόνηση

#### 3.2 Διαστάσεις Ράβδων Δικτυώματος

Το εμβαδόν των ράβδων του ισοδύναμου δικτυώματος στο Σχ.1 είναι:

- **Διαμήκης ελκυστήρας** Εμβαδόν  $A_{s1}$  όλων των ράβδων κατά πλάτος της διατομής (Αμελείται η εφελκυστική συμβολή του σκυροδέματος)
- **Διαμήκης θλιπτήρας:** Πλάτος: το πλάτος της διατομής  $b$ ,  
Πάχος: το πάχος  $x$  της θλιβόμενης ζώνης.  
Μειώνεται όσο αυξάνει η επιπόνηση  
Εμβαδόν θλιπτήρων χάλυβα:  $A_{s2}$
- **Εγκάρσιοι ελκυστήρες** Το εμβαδόν  $A_{sw}$  όλων των σκελών τού ενός συνδετήρα επί τον αριθμό  $0,9d/s$  των συνδετήρων που αποτελούν τον εγκάρσιο ελκυστήρα (που είναι ο αριθμός των συνδετήρων που αντιστοιχούν στο φάτνωμα του δικτυώματος μήκους  $0,9d$ )  
όπου:  
 $s$ : η απόσταση των συνδετήρων
- **Λοξοί θλιπτήρες:** Πλάτος: το πλάτος της διατομής  $b$ ,  
Πάχος: ίσο με την απόσταση των λοξών ρωγμών.  
Λαμβάνεται ίσο με  $z\sqrt{2/2}$ , (εμπειρική εκτίμηση),  
όπου:  
 $z$  είναι η απόσταση των δυνάμεων του διαμήκους ελκυστήρα και θλιπτήρα, αποκαλούμενος μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων.

Προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ότι:  $z = 0.9d$

όπου  $d$  (design) είναι η απόσταση της δύναμης  $F_{s1}$  από την ακραία θλιβόμενη ίνα.  
 Το  $d$  ονομάζεται στατικό (ή υπολογιστικό) ύψος.

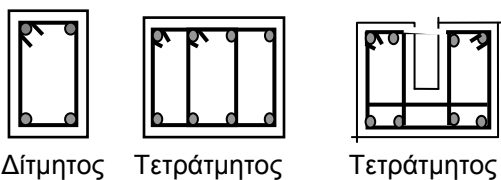
### 3.3 Παράδειγμα Διατομών Ελκυστήρων Προσομοιώματος

Για τη δοκό με όπλιση που φαίνεται στην κατά μήκο τομή και παραλλαγές εγκάρσιας διατομής στο Σχ. 2 τα εμβαδά των ελκυστήρων είναι:

$$A_{s1} = 4 \cdot 2,0 = 8,0 \text{ cm}^2 = 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{s2} = 2 \cdot 1,5 = 3,0 \text{ cm}^2 = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Τομή α-α: Εγκάρσιες τομές δοκού

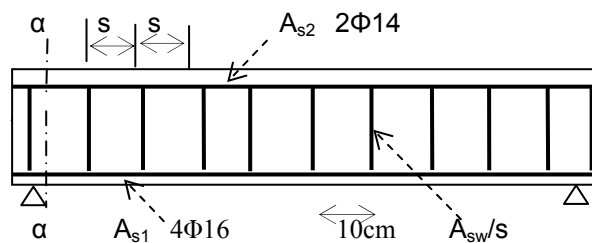


Δίτητος

Τετράτητος

Τετράτητος

$$A_{sw} = 2 \cdot 0,5 \text{ cm}^2 = 4 \cdot 0,5 \text{ cm}^2 = 4 \cdot 0,5 \text{ cm}^2$$



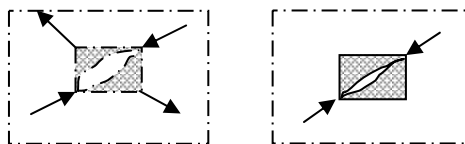
Σχ. 3.2 Κατά μήκος τομή δοκού

### 3.4 Αντοχές των Ράβδων του Δικτυώματος

Οι αντοχές των επί μέρους ράβδων του ισοδύναμου δικτυώματος είναι:

- Διαμήκης ελκυστήρας :  $f_{sd}$
- Διαμήκης θλιπτήρας:  $0.85 f_{cd}$
- Εγκάρσιοι ελκυστήρες:  $f_{sdw}$
- Εγκάρσιοι θλιπτήρες:  $v \cdot f_{cd}$ ,

όπου:  $v = 0,7 - f_{ck}/200$ ,  $f_{ck}$  σε MPa



Σχ.3.3 Η δυσμενής επιρροή της ετερόσημης διαξονικής επιπόνησης

- Ως αντοχή των διαμήκων θλιπτήρων λαμβάνεται η συμβατική αντοχή του σκυροδέματος  $f_{cd}$  (**κυλίδρου** καθώς οι φορείς είναι πρισματικοί) επί το συντελεστή 0,85 για να ληφθεί υπόψιν η βραδύτητα της επιβολής του φορτίου στις κατασκευές (η συμβατική αντοχή αντιστοιχεί σε σύντομη επιβολή του φορτίου).
- Ως αντοχή των λοξών θλιπτήρων λαμβάνεται η συμβατική αντοχή του σκυροδέματος  $f_{cd}$  επί το συντελεστή  $v$  για να ληφθεί υπόψιν η δυσμενής, όπως φαίνεται στο Σχ. 3 και σχολιάζεται στην ενότητα Δ, συνύπαρξη του λοξού εφελκυσμού.

### 3.5 Ανακεφαλαιωτικά για Καμπτοδιατμητική Επιπόνηση

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα γεωμετρικά και τεχνολογικά στοιχεία των ράβδων του ισοδύναμου δικτυώματος, οι δυνάμεις τους και τα στατικά μεγέθη αστοχίας του φορέα τα οποία σχολιάζονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

ΡΑΒΔΟΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ	ΑΝΤΟΧΗ	ΔΥΝΑΜΗ	ΜΕΓΕΘΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
Διαμήκης ελκυστήρας	$A_{s1}$	$f_{sd}$	$F_{sd1} = A_{s1} \cdot f_{sd}$	} $M_{Rdu} = F_{sd1} \cdot z$
Διαμήκης θλιπτήρας	$b \cdot x$	$0,85 f_{cd}$	$F_{cd} = b \cdot 0,8x \cdot 0,85 f_{cd}$	
Εγκάρσιοι ελκυστήρες:	$(0,9d/s) \cdot A_{sw}$	$f_{sdw}$	$V_{wd} = (0,9d/s) \cdot A_{sw} \cdot f_{sdw} \Rightarrow$	$V_{Rd3} = V_{wd} + V_{cd}$
Εγκάρσιοι θλιπτήρες:	$b \cdot z\sqrt{2/2}$	$v \cdot f_{cd}$	$F_D = b \cdot z\sqrt{2/2} \cdot v \cdot f_{cd} \Rightarrow$	$V_{Rd2} = F_D\sqrt{2/2} \Rightarrow$ $V_{Rd2} = 0,5b \cdot 0,9d \cdot v \cdot f_{cd}$

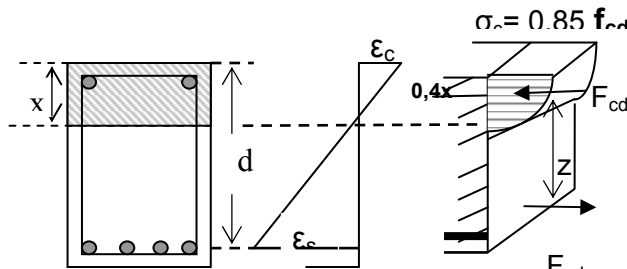
## 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

(Βλέπε και κεφ. 1 και 5 στην Ενότητα Η)

### 4.1 Βάθος $x$ Θλιβόμενης Ζώνης και Παραμορφώσεις $\epsilon_c$ και $\epsilon_s$

Το πάχος  $x$  του θλιπτήρα, αποκαλούμενο το **βάθος της θλιβόμενης ζώνης** του φορέα υπολογίζεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 1 συναρτήσει των ακραίων παραμορφώσεων του σκυροέματος  $\epsilon_c$  και του χάλυβα  $\epsilon_s$  καθύψους της διαομής και του στατικού ύψους  $d$  του φορέα από τη σχέση:

$$\diamond \quad x = d \cdot \epsilon_c / (\epsilon_c + \epsilon_s) \quad (1)$$



Σχ. 4.1 Παραμορφώσεις, τάσεις και εσωτερικές δυνάμεις

Οι παραμορφώσεις  $\epsilon_c$  και  $\epsilon_s$  συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε:

- η εγκάρσια διατομή του φορέα να παραμένει επίπεδη κατά την επιπόνηση (ευθύγραμμο διάγραμμα παραμορφώσεων)
- να ισχύει η ισοδυναμία των αξονικών δυνάμεων :

$$N_{sd} \equiv F_{cd} - F_{sd} = N_{sd} \quad (2)$$

όπου:

$F_{cd}$  : η δύναμη του διαμήκους θλιπτήρα

$F_{sd}$  η δύναμη του διαμήκους ελκυστήρα

### 4.2 Εσωτερικές Δυνάμεις $F_{cd}$ και $F_{sd}$ και Μοχλοβραχίονας $z$

Η δύναμη του διαμήκους ελκυστήρα είναι:

$$F_{sd} = A_{s1} \cdot f_{sd} \quad (3)$$

Τη δύναμη του διαμήκους θλιπτήρα αποτελεί η

συνισταμένη των τάσεων που δρουν στη διατομή του θλιπτήρα.

Επειδή, όμως, όπως φαίνεται στο Σχ. 1, οι παραμορφώσεις δεν είναι σταθερές καθ' ύψος του θλιπτήρα, δεν είναι σταθερές και οι τάσεις.

Σε κατάσταση αστοχίας το διάγραμμα των θλιπτικών τάσεων καθ' ύψος του θλιπτήρα είναι όπως φαίνεται Σχ.1.

Η δύναμη  $F_{cd}$  προκύπτει, ως ο όγκος παραβολοειδούς δευτέρου βαθμού, ίση με:

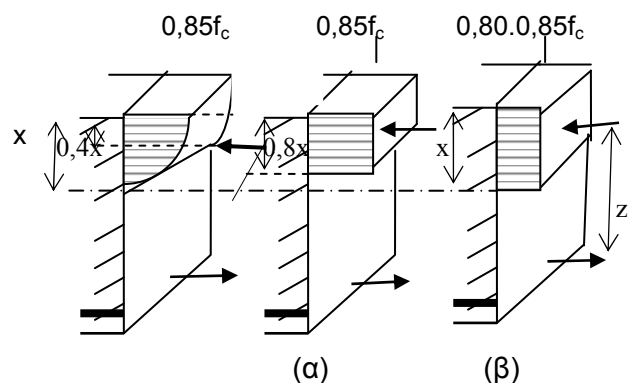
$$F_{cd} = 0,8 \cdot b \cdot x \cdot 0,85 f_{cd} = 0,68 \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \quad (5)$$

εφαρμοζόμενη σε απόσταση από το θλιβόμενο πέλμα ίση με  $0,4x$ .

Άρα η απόσταση  $z$  των εσωτερικών δυνάμεων δίνεται από τη σχέση (6)

$$z = d - 0,4x \quad (6)$$

Στα εγχειρίδια και τους κανονισμούς συνηθίζεται το παραβολικό διάγραμμα θλιπτικών τάσεων να μετασχηματίζεται σε ισοδύναμο ορθογώνιο διάγραμμα καθ' ύψος της θλιβόμενης ζώνης του φορέα.



Σχ. 4.2 Μετασχηματισμός του παραβολοειδούς διαγράμματος τάσεων σε ισοδύναμο πρισματικό διάγραμμα

Ο μετασχηματισμός συνηθίζεται να γίνεται:



- όπως φαίνεται στο Σχ 2(α) (σύμφωνα με τους αγγλοαμερικανικούς κανονισμούς), ή
- όπως φαίνεται στο Σχ. 2(β) (σύμφωνα με τους γερμανικούς κανονισμούς).

Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι δύο μετασχημα-

τισμοί είναι ισοδύναμοι, αφού δίνουν την ίδια τιμή της συνισταμένης δύναμης  $F_{cd}$ .

Στον πρώτο μετασχηματισμό μειώνεται 80% το πάχος  $x$ , στον δεύτερο μειώνεται 80% η οριακή τάση.

Ο πρώτος μετασχηματισμός πλεονεκτεί γιατί δίνει και τη σωστή θέση της  $F_{cd}$ .

### 4.3 Ροπή Αστοχίας

Η ροπή αστοχίας για μηδενική αξονική προκύπτει από τη σχέση:

$$M_{Rdu} = F_{sd} \cdot z = A_{s1} \cdot f_{sd} \cdot (d - 0,4x) \quad (7)$$

Η τιμή του  $x$  είναι συνάρτηση του  $A_{s1}$ , όπως προκύπτει από την ισοδυναμία των αξονικών (για  $N_{sd}=0$ ) στη σχέση (8).

$$F_{sd} = F_{cd} \Rightarrow A_{s1} \cdot f_{sd} = 0,68 b \cdot x \cdot f_{cd} \quad (8) \Rightarrow$$

$$x = A_{s1} \cdot f_{sd} / (0,68 b \cdot f_{cd}) \quad (8^a)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (7) την τιμή του  $x$  από τη σχέση (8<sup>a</sup>) προκύπτει η σχέση της ροπής αστοχίας συναρτήσεως των γεωμετρικών και τεχνολογικών στοιχείων της διατομής από τη σχέση (9)

$$M_{Rdu} = A_{s1} \cdot f_{sd} \cdot (d - 0,4 \cdot A_{s1} \cdot f_{sd} / (0,68 b \cdot f_{cd})) \quad (9)$$

Οι σχέσεις (1), (7) και (8) αποτελούν τις βασικές σχέσεις του καμπτικού σχεδιασμού.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (1) την τιμή του  $x$  που προκύπτει από τη σχέση (8) προκύπτει η τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{s1}$  του εφελκόμενου οπλισμού και ελέγχεται ο καλός σχεδιασμός του φορέα. Πρέπει να ισχύει:

$$\epsilon_{sy} < \epsilon_{s1} < 20\% \text{ (ή πρόσφατα } 68\% \text{)}.$$

Η τιμή της παραμόρφωσης διαρροής για χάλυβα S500 είναι:

$$\epsilon_y = f_{sd}/E_s = (500/1.15)/200.000 = 2.17\%.$$

### 4.4 Μεθοδολογία Υπολογισμού Ροπής Αστοχίας

Ο υπολογισμός βασίζεται στις παρακάτω σχέσεις που προέκυψαν παραπάνω:

$$A_{s1} \cdot f_{sd} = 0.68 b \cdot x \cdot f_{cd} \quad (1)$$

$$M_{Rdu} = A_{s1} \cdot f_{sd} \cdot (d - 0.4x) \quad (2)$$

$$\epsilon_{s1}/3.5\% = (d-x)/x \quad (3)$$

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

#### ➤ Δίνεται ο οπλισμός $A_{s1}$

1. Από τη σχέση (1) ισοδυναμίας των αξονικών προκύπτει η τιμή του  $x$
2. Αντικαθιστώντας τις τιμές του  $A_{s1}$  και  $x$  στη σχέση (2) προκύπτει η τιμή της  $M_{Rdu}$ .
3. Αντικαθιστώντας την τιμή του  $x$  στη σχέση (3) προκύπτει η τιμή του  $\epsilon_{s1}$
4. Ελέγχεται κατά πόσον ισχύει:

$$\epsilon_{sy} < \epsilon_{s1} < 68\%$$

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- $\epsilon_{sy} < \epsilon_{s1} < 68\%$ : Ο σχεδιασμός είναι κατάλληλος
- $\epsilon_{sy} \geq \epsilon_{s1}$ : Ο σχεδιασμός δεν είναι κατάλληλος, γιατί η αστοχία του φορέα είναι ψαθυρή. **Η τιμή του  $d$  είναι μικρή** (Βλ. Κεφ. 5).

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

(α) Αν ο φορέας υπάρχει και δεν μπορεί να αλλάξει η διαστασιολόγησή του (περίπτωση ελέγχου)

Στη σχέση (1) στη θέση της  $f_{sd}$  τίθεται:

$$\sigma_{sd} = E_s \cdot \epsilon_{s1}/1.15,$$

και επαναλαμβάνεται η διαδικασία .

(β) Αν ο φορέας μπορεί να αλλάξει (περίπτωση σχεδιασμού)

Αυξάνεται το ύψος και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

- $\varepsilon_{s1} \geq 68\%$ : Ο φορέας έχει μειωμένη ασφάλεια (δεν είναι επαρκής ο συντελεστής ασφαλείας ώστε να αποκλειστεί θραύση του οπλισμού που θα σήμαινε κατάρρευση του φορέα, βλ. Κεφ. Η5) **Η τιμή του d είναι μεγάλη** (βλ. Κεφ. 5).

➤ Δίνεται η Παραμόρφωση  $\varepsilon_{s1}$

Από τη σχέση (3) προκύπτει το x, από τη σχέση (1) το  $A_{s1}$  και από τη σχέση (2) η  $M_{Rdu}$ .

#### 4.5 Παράδειγμα Υπολογισμού Ροπής Αστοχίας

Υπολογίζεται η καμπτική αντοχή δοκού διαστάσεων 40/55 με εφελκόμενο οπλισμό 5Φ16. Υλικά δοκού:

1. Γεωμετρικά και Τεχνολογικά Στοιχεία

$$A_{s1} = 5 \cdot 2,0 = 10,0 \text{ cm}^2 = 10,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$d = 0,55 - 0,05 = 0,50 \text{ m}, b = 0,40 \text{ m}$$

$$C20 \Rightarrow f_{cd} = 20 \cdot 10^3 / 1,50 = 13,3 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$$

$$S500 \Rightarrow f_{sd} = 500 \cdot 10^3 / 1,15 = 435 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$$

$$\varepsilon_y = 435 \cdot 10^3 / 2 \cdot 10^5 = 2,2 \%$$

2. Ισοδυναμία Αξονικών:

$$435 \cdot 10^3 \cdot 10,0 \cdot 10^{-4} = 0,68 \cdot 0,40 \cdot x \cdot 13,3 \cdot 10^3$$

$$\Rightarrow x = 0,08 \text{ m}$$

3. Καμπτική Αντοχή:

$$M_{Rdu} = 435 \cdot 10^3 \cdot 10,0 \cdot 10^{-4} \cdot (0,50 - 0,4 \cdot 0,08) \Rightarrow$$

$$M_{Rdu} = 205 \text{ kNm}$$

4. Έλεγχος Καλού Σχεδιασμού

$$\varepsilon_{s1} = 3,5\% \cdot (0,50 - 0,08) / 0,08 = 18\%$$

$$\text{Είναι } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_{s1} < 68\% \Rightarrow$$

Σχεδιασμός αποδεκτός

## 5. ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

### 5.1 Η Αλληλοσυσχέτιση Όλων των Μεγεθών

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις που καθορίζουν την καμπτική αντοχή του φορέα, όλα τα γεωμετρικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά του φορέα αλληλοσυσχετίζονται και δεν μπορούν να απομονωθούν.

Για παράδειγμα, διπλασιάζοντας το  $A_{s1}$  δεν διπλασιάζεται η καμπτική αντοχή, γιατί, όπως προκύπτει από τη σχέση (8), μεταβάλλεται και το  $x$ .

### 5.2 Η Σημαντική Επιρροή του Οπλισμού και του Ύψους και η Μικρή Συμβολή του Πλάτους

Όπως προκύπτει από τη σχέση (7), αύξηση του  $A_{s1}$  είτε του  $d$  αυξάνει σημαντικά την καμπτική αντοχή (αλλά όχι αναλογικά).

Με την αύξηση του πλάτους, αυξάνεται, όπως προκύπτει από τη σχέση (8<sup>α</sup>) το  $x$ , αλλά, όπως φαίνεται από την (7), η συμβολή του στην αντοχή είναι μικρή.

### 5.3 Η Υπαρξη Ορίων για Όλα τα Μεγέθη- Η Αδυναμία Γενίκευσης

Επειδή όλα τα μεγέθη συσχετίζονται με την παραμόρφωση  $\epsilon_s$  και η  $\epsilon_s$  έχει όρια, όλα τα μεγέθη έχουν όρια, μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή.

Για δεδομένη διατομή, (με σταθερό το  $d$  και  $b$ ), όσο μειώνεται η  $\epsilon_s$  από τη σχέση (1) προκύπτει ότι αυξάνεται το  $x$ , από τη σχέση (8<sup>α</sup>) ότι αυξάνεται το  $A_s$  και από τη σχέση (7) ότι αυξάνεται και η  $M_{Rdu}$ .

Οι τιμές  $\max x$ ,  $\max A_s$ ,  $\max M_{Rdu}$  προκύπτουν για την ελάχιστη τιμή της  $\epsilon_s$  που είναι ίση με  $\epsilon_y$ . Αντίστοιχα οι τιμές  $\min x$ ,  $\min A_s$ ,  $\min M_{Rdu}$  προκύπτουν για τη μέγιστη τιμή της  $\epsilon_s$  που είναι ίση με 20% (ή με τη νέα αναθεώρηση 68%).

Για δεδομένη τιμή της  $M_{Rdu}$ , από την (7) προκύ-

πτει ότι το  $d$  αυξάνει όσο μειώνεται το  $x$ , το οποίο μειώνεται όσο αυξάνει η  $\epsilon_s$ . Άρα η μεγαλύτερη τιμή του ύψους προκύπτει για την μέγιστη τιμή  $\epsilon_s$  και αντίστροφα.

**Ανακεφαλαιωτικά:** Οι περιοχές διακύμανσης των μεγεθών και οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους προκύπτουν όπως φαίνεται στον Πίνακα 1:

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 : Τιμές του  $\epsilon_{s1}$  για Μέγιστες και Ελάχιστες Τιμές των μεγεθών

$\epsilon_y$	<	$\epsilon_{s1}$	<	20%ο
$\max x$	>	$x$	>	$\min x$
$\max A_s$	>	$A_s$	>	$\min A_s$
$\max M_{Rdu}$	>	$M_{Rdu}$	>	$\min M_{Rdu}$
$\min d$	<	$d$	<	$\max d$

Οι τιμές  $\max x$  και  $\max M_{Rdu}$  στη βιβλιογραφία αναφέρονται και ως  $\lim x$  και  $\lim M_{Rdu}$ .

### 5.4 Πλαστιμότητα και τιμή $x$ . Η Ανάγκη για Υποοπλισμένες Διατομές

Όπως σχολιάστηκε στα προηγούμενα, η πλαστιμότητα του φορέα μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της παραμόρφωσης  $\epsilon_{s1}$ .

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι για μεγάλο  $\epsilon_{s1}$  απαιτείται μικρή τιμή του  $x$ .

Από τη σχέση (6) η τιμή του  $x$  προκύπτει συναρτήσει των άλλων μεγεθών:

$$x = (A_{s1} \cdot f_{sd}) / (0.67b \cdot f_{cd}) \quad (10)$$

Από την (10) προκύπτει ότι η πλαστιμότητα αυξάνεται:

- αυξάνοντας το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης
- μειώνοντας τον εφελκόμενο οπλισμό

Γι αυτό, για μεγαλύτερη πλαστιμότητα των φορέων απαιτείται να είναι υποοπλισμένοι, δηλ. να διαμορφώνονται με μεγάλη διατομή και λίγο εφελκόμενο οπλισμό.

### 5.6 Μέθοδος Επίλυσης Θεωρητικών προβλημάτων - Το Μέγεθος $x$ ως το Μέγεθος Αναφοράς για Οποιαδήποτε Επιρροή –

Όπως εντοπίστηκε παραπάνω, το μέγεθος  $x$  αποτελεί το βασικό μέγεθος από το οποίο εξαρτώνται όλα τα άλλα μεγέθη.

Αν θέλει κανείς να εντοπίσει την επιρροή κάποιας παραμέτρου στην τιμή μιας άλλης παραμέτρου δύο φορέων, αρκεί να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

A) Εντοπίζεται με βάση τη σχέση (10) πώς επηρεάζει η δεδομένη παράμετρος το  $x$ ,

π.χ. ο φορέας με το μικρότερο πλάτος έχει το μικρότερο  $x$ .

B) Εντοπίζεται με βάση τις τρεις σχέσεις (1), (6) και (7) της καμπτικής επιπόνησης πώς επηρεάζει το  $x$  τη ζητούμενη παράμετρο.

π.χ. από τη σχέση:  $M_{Rd} = A_s \cdot F_{sd} \cdot (d - 0,4x)$  προκύπτει ότι η ροπή αστοχίας αυξάνει όσο μειώνεται το  $x$ , οπότε ο φορέας με το μικρότερο πλάτος έχει μεγαλύτερη ροπή αστοχίας (αφού έχει μικρότερο  $x$ ).

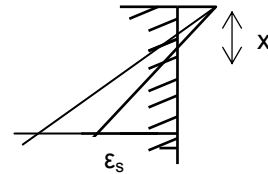
## 6. ΣΥΝΤΟΜΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Για καλοσχεδιασμένους φορείς μπορεί με αρκετή ακρίβεια να τεθεί  $z = 0,9d$ , οπότε η ροπή αστοχίας προκύπτει σύντομα από τη σχέση:  $M_{Rdu} = F_{sd1} \cdot 0,9 \cdot d^*$

\* **Αιτιολόγηση τύπου:**  $M_{Rdu} = F_{sd1} \cdot 0,9 \cdot d$

Όπως προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα για  $\epsilon_{s1} > 8\%$  είναι αρκετά ακριβές να τεθεί  $z = 0,9d$

$\epsilon_{s1}$	$\epsilon_y = 2,17\%$	10%	15%	20%	30%
$x/d$	0,65	0,25	0,20	0,15	0,12
$z/d$	0,70	0,90	0,91	0,92	0,94



Οι τιμές του πίνακα προκύπτουν από τις σχέσεις :  $x = d \cdot \epsilon_c / (\epsilon_c + \epsilon_s)$  και  $z = d - 0,4x$  θέτοντας  $\epsilon_c = 3,5 \%$  (παραμόρφωση αστοχίας)

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα παραμορφώσεων η παραμόρφωση  $\epsilon_s$  είναι μεγάλη για μικρό  $x$ . Οι καμπτόμενοι φορείς έχουν μικρό  $x$ , οι μεν πλάκες και πλακοδοκοί γιατί έχουν μεγάλο πλάτος  $b$  θλιβόμενης ζώνης (βλ. κεφ. 5.4), οι δε δοκοί γιατί έχουν θλιβόμενο οπλισμό (βλ. κεφ. 8).

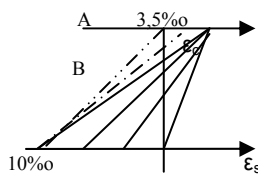
## 7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΠΑΛΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΧΡΗΣΗ ΠΙΝΑΚΩΝ CEB

### 7.1 Διαφοροποιήσεις στα Κριτήρια Αστοχίας και Γιατί Δεν Ισχύουν Σήμερα

Επειδή στους παλιότερους κανονισμούς η παραμόρφωση αστοχίας του χάλυβα οριζόταν σημαντικά μικρότερη από 20 ‰, π.χ. 10‰ στον προηγούμενο κανονισμό, σε κάποιους φορείς για την παραμόρφωση αυτή αστοχίας του εφελκόμενου οπλισμού, η παραμόρφωση του σκυροδέματος δεν έφτανε την οριακή της παραμόρφωση 3,5‰. Μπορούσε π.χ. να είναι  $\epsilon_c = 2,0‰$

❖ Το κριτήριο αστοχίας ήταν: η μία τουλάχιστον από τις παραμορφώσεις  $\epsilon_c$  και  $\epsilon_{s1}$  να φθάσει την οριακή της τιμή: 10‰ για το χάλυβα και 3,5‰ για το σκυρόδεμα.

Με βάση τη λογική αυτή υπάρχει στα παλιά εγχειρίδια η γραφική παράσταση της περιοχής στην οποία μπορεί να κινηθεί η εγκάρσια διατομή του φορέα κατά τη στιγμή της αστοχίας του:



- Η περιοχή Α, όταν κρίσιμο υλικό είναι ο χάλυβας  
Οι παραμορφώσεις κατά την αστοχία είναι:  $\epsilon_s = 10‰$ , ενώ η τιμή της  $\epsilon_c$  κυμαίνεται από 0 έως 3,5‰.
- η περιοχή Β, όταν κρίσιμο υλικό είναι το σκυρόδεμα.  
Οι παραμορφώσεις κατά την αστοχία είναι  $\epsilon_c = 3,5‰$ , ενώ η τιμή της  $\epsilon_s$  κυμαίνεται από 0 έως 3,5‰.

Στους φορείς με κρίσιμο υλικό το σκυρόδεμα η διαδικασία δεν διέφερε σε τίποτα από αυτήν που περιγράφεται στο κεφ. 4.

(Η ομοιομόρφιση του παραβολικού διαγράμματος των τάσεων της θλιβόμενης ζώνης γινόταν

σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.2).

Στους φορείς με κρίσιμο υλικό τον χάλυβα, επειδή η  $\epsilon_c$  ήταν μικρότερη από 3,5‰, η ακραία τάση του σκυροδέματος δεν ήταν ίση με την αντοχή του σκυροδέματος, αλλά ήταν συνάρτηση της τιμής της  $\epsilon_c$  και, γι' αυτό, η κατανομή των τάσεων του σκυροδέματος, το μέγεθος της συνισταμένης τους και η θέση εφαρμογής της ήταν συνάρτηση της τιμής της  $\epsilon_c$  και προέκυπταν με βάση νομογραφήματα, ή από σχέσεις δεύτερου βαθμού ως προς την  $\epsilon_c$ .

Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός της ροπής αστοχίας διαφοροποιείται ως εξής:

- Η ακραία θλιπτική τάση του σκυροδέματος δεν είναι κατ'ανάγκην ίση με  $0,85 f_{cd}$

Στις σχέσεις υπολογισμού τίθεται  $\sigma_{cd}$  στη θέση του  $0,85 f_{cd}$

- Ο συντελεστής για την εύρεση του εμβαδού του παραβολικού διαγράμματος των τάσεων δεν είναι κατ'ανάγκην ίσος με 0,8

Η σχέση ισοδυναμίας αξονικών δυνάμεων είναι:

$$F_{cd} = a \cdot \sigma_{cd} \cdot b \cdot x = A_s \cdot \sigma_{sd} = F_{sd} \quad (1)$$

- Το κέντρο βάρους του παραβολικού διαγράμματος τάσεων που είναι η θέση εφαρμογής της θλιπτικής δύναμης  $F_{cd}$  δεν είναι σ' απόσταση 0,4x από την ακραία θλιβόμενη ίνα. Είναι :

$$z = d - k_a \cdot x$$

Στις παραπάνω σχέσεις οι τιμές των συντελεστών  $a$  και  $k_a$  προκύπτουν από νομογραφήματα με βάση την τιμή της  $\epsilon_c$ .

- Ο συντελεστής  $a$  τίθεται για να μετατρέψει το παραβολικό διάγραμμα των τάσεων  $\sigma_c$  σε ισοδύναμο (με ίσο εμβαδόν) ορθογωνικό διάγραμμα και
- ο συντελεστής  $k_a$  για να εκφράσει την απόσταση της συνισταμένης του παραβολικού διαγράμματος από την ίνα 2 συναρτήσει του  $x$ .

❖ Με την αύξηση της τιμής της  $\epsilon_s$  σε 20% και πρόσφατα σε 68 %ο δεν προκύπτει πια παραμόρφωση αστοχίας  $\epsilon_c$  μικρότερη του 3.5%ο (παρά μόνον σε έντονα υπεροπλισμένους φορείς οι οποίοι, όμως, δεν επιτρέπονται σήμερα λόγω των αντισεισμικών απαιτήσεων).

Παρακάτω και για την κατανόηση μελετών που είναι σύμφωνα με τους παλιότερους κανονισμούς δίνεται σύντομη ανασκόπηση της αναλυτικής διαδικασίας υπολογισμού της ροπής αστοχίας.

## 7.2 Διαδοχικά Βήματα Αναλυτικής Διαδικασίας

Ο υπολογισμός βασίζεται στις παρακάτω σχέσεις: (1) ισοσυναμίας των αξονικών (2) έφρασης της ροπής των εσωτερικών δυνάμεων και (3) επιπεδότητας των διατομών

$$a. \sigma_{cd}. b. x = A_s \cdot \sigma_{sd} \quad (1)$$

$$M_{Rdu} = A_s \cdot \sigma_{sd} \cdot (d - k_a \cdot x) \quad (2)$$

$$x = \epsilon_c / [(\epsilon_c + \epsilon_s)] \cdot d \quad (3)$$

Οι άγνωστοι σ'αυτές τις σχέσεις είναι τρεις: οι τιμές των  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_s$  και  $M_{Rdu}$  (οι τιμές των  $a$  και  $k_a$  είναι συναρτήσεις της  $\epsilon_c$ ). Επιλύοντας τις τρεις σχέσεις προκύπτει η τιμή τους.

✚ Επειδή η σχέση (1) προκύπτει δεύτερου βαθμού ως προς την  $\epsilon_c$  και ήταν δύσκολη η επίλυσή της με τα παλιότερα υπολογιστικά μέσα, η επίλυση των τριών παραπάνω σχέσεων γινόταν αναλυτικά ως εξής:

- Αναζητούνται τιμές για το ζεύγος των παραμορφώσεων που να επαληθεύει την παραπάνω σχέση (1).

Από τις τιμές αυτές η μία τουλάχιστον πρέπει να είναι οριακή (αστοχίας).

Η αναζήτηση γίνεται με δοκιμές:

1η δοκιμή  $\epsilon_c=3,5\%ο$ ,  $\epsilon_s=10\%ο$

Ελέγχεται αν ισχύει η σχέση (1).

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Η σχέση (1) ισχύει (από το νομογράφημα προκύπτει η τιμή του συντελεστή  $\alpha$ ).

Άρα οι τιμές των παραμορφώσεων είναι :  
 $\epsilon_c=3,5\%ο$  και  $\epsilon_s=10\%ο$

Από τη σχέση (3) προκύπτει το  $x$ , από το νομογράφημα ο συντελεστής  $k_a$  και αντικαθιστώντας στην (2) προκύπτει η ροπή αστοχίας.

- Η σχέση (1) δεν ισχύει – προκύπτει  $F_{cd} > F_{sd}$   
Για να επέλθει η ισότητα πρέπει να μειωθεί η  $F_{cd}$  (Η  $F_{sd}$  δεν μπορεί να αυξηθεί).

Για να μειωθεί η  $F_{cd}$  πρέπει να μειωθεί η τιμή της  $\epsilon_c$  (κρίσιμο υλικό ο χάλυβας)

2η δοκιμή  $\epsilon_c=2,5\%ο$ ,  $\epsilon_s=10\%ο$   
Ελέγχεται η σχέση (1).

Αν δεν ισχύει, 3η δοκιμή με άλλη τιμή της  $\epsilon_c$  κ.ο.κ.

- Η σχέση (1) δεν ισχύει – προκύπτει  $F_{cd} < F_{sd}$   
Για να επέλθει η ισότητα πρέπει να μεγαλώσει η  $F_{cd}$  (Για να μικρύνει η  $F_{sd}$  πρέπει η  $\epsilon_s$  να είναι μικρότερη από την  $\epsilon_y$  που δεν ενδείκνυται).

Για να μεγαλώσει η  $F_{cd}$  πρέπει να μεγαλώσει το  $x$  και, άρα, να μικρύνει η  $\epsilon_s$ .

2η δοκιμή  $\epsilon_c=3,5\%ο$ ,  $\epsilon_s=8\%ο$   
Ελέγχεται η σχέση (1).

Αν δεν ισχύει, 3<sup>η</sup> δοκιμή με άλλη τιμή της  $\epsilon_s$  κ.ο.κ.

## 7.3 Επίλυση με Πίνακες CEB\*

Για διευκόλυνση η παραπάνω διαδικασία έχει πινακοποιηθεί.

Οι πίνακες έχουν την παρακάτω μορφή. Συνοδεύουν τους παλιότερους κανονισμούς και υπάρχουν επίσης στα περισσότερα σχετικά εγχειρίδια.

\* Ευρωπαϊκή Επιτροπή Σκυροδέματος

## Μορφή Πινάκων CEB

Ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Υπολογίζεται η τιμή της ανηγμένης ροπής:

$$\mu_{sd} = M_{sd} / (b \cdot d^2 \cdot f_{cd}) \quad (1)$$

και εντοπίζεται η τιμή του ανηγμένου ποσοστού οπλισμού  $\omega$ .

Ο οπλισμός προκύπτει από τη σχέση:

$$A_s = \omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} / f_{sd} \quad (2)$$

Στη στήλη του πίνακα που δίνει την τάση του χάλυβα από κάποια τιμή του  $\mu_{sd}$  και πέρα η τιμή πέφτει κάτω από την τάση διαρροής του χάλυβα, π.χ. για χάλυβα S400 κάτω από την τιμή 378 (=400/1,15) MPa.

Αυτή είναι η οριακή τιμή του  $\mu_{sd}$ . Για μεγαλύτερη τιμή χρειάζεται θλιβομενος οπλισμός

Δηλώνεται ως  $\lim \mu_{sd}$ .

Όπως φαίνεται στον πίνακα, για S400 είναι  $\lim \mu_{sd} = 0,33$ .

Οι τιμές αυτές είναι οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές που προκύπτουν για  $\epsilon_s = \epsilon_{ys}$  στο κεφ. 5.3.

Αν είναι  $\mu_{sd} > \lim \mu_{sd}$ , τότε επειδή ο οπλισμός δεν αξιοποιεί την πλήρη ικανότητά του (την τάση διαρροής του) ακολουθείται η λύση της τοποθέτησης και θλιβόμενου οπλισμού, ο οποίος, όμως, σήμερα τοποθετείται σε όλες τις περιπτώσεις για τους λόγους που σχολιάζονται στην Ενότητα Ε, κεφ. 6.2.

## 8. ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΜΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ

### 8.1 Σχέσεις Υπολογισμού

Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- **Αν το βάθος  $x$  της θλιβόμενης ζώνης της δοκού είναι μικρότερο από το πάχος  $h_f$  της πλάκας**, η θλιβόμενη ζώνη είναι ορθογωνική, όπως στο Σχ. (α), και η καμπτική αντοχή προκύπτει από τις σχέσεις (1), (2) και (3) που αναφέρονται στο κεφ. 5.

Η τιμή του  $x$  [ $x = 3,5/(3,5+\epsilon_s)$ ] κυμαίνεται από  $0,15d$  έως  $0,30d$  περίπου.

- **Αν το βάθος  $x$  της θλιβόμενης ζώνης της δοκού είναι μεγαλύτερο από το πάχος  $h_f$  της πλάκας**, η θλιβόμενη ζώνη αποτελείται από περισσότερα από ένα ορθογώνια, όπως φαίνεται στην περίπτωση των διατομών (β) και (γ) και (δ) στο σχήμα και η καμπτική αντοχή προκύπτει ως εξής:

1. Για μέτριες τιμές του λόγου  $b/b_w$ :

Τίθεται ως  $b$  το πλάτος της ακραίας θλιβόμενης ίνας, καθώς οι τάσεις κοντά στην ουδέτερη γραμμή είναι μικρές με μικρή συμβολή στη ροπή (με μικρό μοχλοβραχίονα) και δεν απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια.

Η προσέγγιση αυτή είναι υπέρ της ασφαλείας, καθώς το  $z$  προκύπτει μικρότερο και, γι αυτό, το  $A_s$  ( $A_s = M/z$ ) μεγαλύτερο.

2. Όταν ο λόγος  $b/b_w$  είναι μεγάλος (μεγαλύτερος του 5):

Αμελούνται οι θλιπτικές τάσεις στον κορμό και τίθεται  $z = d - h_f/2$ , οπότε οι σχέσεις (2) και (3) παίρνουν τη μορφή:

$$M_{Rd1} = A_{s1} \cdot f_{sd} \cdot (d - h_f/2) \quad (2)$$

$$\epsilon_{s1} / 3.5\% = (d - h_f) / h_f \quad (3)$$

3. Όταν ο λόγος  $b/b_w$  είναι μικρός:

Υπολογίζεται ξεχωριστά η θλιπτική δύναμη κάθε ορθογώνιου όπως φαίνεται στο Σχ. (δ).

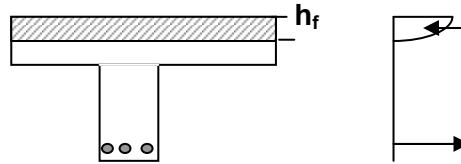
$$F_{cd} = F_{cd1} + 2F_{cd2}$$

$$F_{cd1} = 0,67 \cdot b_w \cdot x \cdot f_{cd}$$

$$F_{cd2} = 0,85 \cdot (b - b_w) / 2 \cdot h_f \cdot f_{cd}$$

$$M_{sd} = F_{cd1} \cdot (d - 0,4x) + 2F_{cd2} \cdot (d - h_f/2)$$

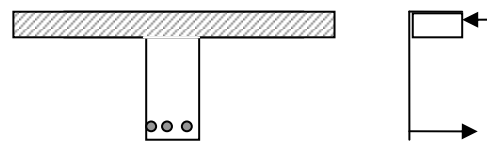
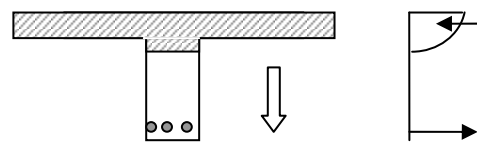
(α)  $x < h_f$



$$F_{cd} = 0,67 \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} = A_{s1} \cdot f_{sd}$$

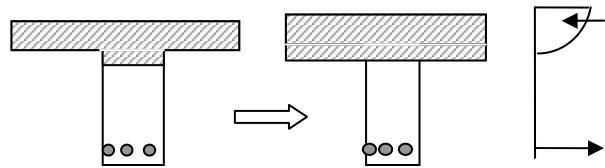
$$M_{sd} = A_{s1} \cdot f_{sd} \cdot (d - 0,4x)$$

(β)  $x > h_f, \quad b/b_w > 5$



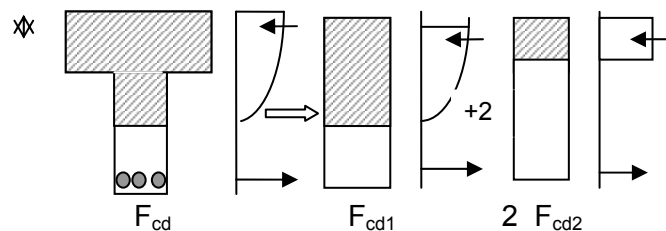
$$M_{sd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot (d - h_f/2)$$

(γ)  $x > h_f, \quad b/b_w < 5$



Όπως η περίπτωση (α)

(δ)  $x > h_f, \quad b/b_w < 5$





Στην περίπτωση των φορέων αυτών επειδή είναι **διαπλατυσμένο το θλιβόμενο πέλμα** (όπως στην περίπτωση πλακοδοκών, βλ. Κεφ. Κ: Σχεδιασμός δοκών) . **λόγω του μεγάλου b της θλιβόμενης ζώνης, η τιμή του x είναι πολύ μικρή**, γι αυτό, η παραμόρφωση  $\epsilon_{s1}$  προκύπτει κατά κανόνα μεγάλη και, όπως σχολιάστηκε στο κεφ. 6, η καμπτική αντοχή προκύπτει σύντομα από τη σχέση:

$$M_{Rdu} = A_{s1} \cdot f_{sd} \cdot 0,9d$$

## 8.2 Επίλυση με Πίνακες CEB

### Μορφή Πινάκων

Οι πίνακες αυτοί ισχύουν, εν γένει, όταν η θλιβομενη ζώνη αποτελείται από περισσότερα από ένα ορθογώνια, όπου  $b_w$  και  $b_{eff}$  είναι το άθροισμα των πλατών των επί μέρους ορθογώνιων της διατομής στον ουδέτερο άξονα και στην ακραία θλιβόμενη ίνα, αντίστοιχα.

Έχουν τη μορφή που φαίνεται παρακάτω:

Είναι δύο πίνακες, ο επάνω για φορείς χωρίς θλιβόμενο και ο κάτω για φορείς και με θλιβομενο οπλισμό (ο πίνακας συνεχίζεται οριζόντια σε 2 σελίδες).

Κάθε πίνακας αποτελείται από υποπίνακες ανάλογα με το λόγο του ύψους της πλάκας  $h_f$  προς το ύψος της δοκού  $h$ . Κάθε υποπίνακας δίνει την τιμή του ανηγμένου οπλισμού  $\omega$  πολλαπλασιασμένη  $\times 1000$  ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

Με βάση το λόγο  $h_f/h$  εντοπίζεται ο υποπίνακας και με βάση το λόγο  $b/b_w$  εντοπίζεται στον υποπίνακα η στήλη των τιμών του  $\omega \cdot 1000$ .

Στη στήλη αυτή εντοπίζεται η τιμή  $\omega \cdot 1000$  που αντιστοιχεί στην τιμή της ανηγμένης ροπής  $\mu_{sd} = M_{sd} / (b \cdot d^2 \cdot f_{cd})$ .

Ο οπλισμός δίνεται από τη σχέση :

$$A_s = \omega \cdot b_{eff} \cdot d \cdot f_{sd} / 1000$$

Αν στην κατακόρυφη στήλη στην τιμή  $\mu_{sd}$  δεν αντιστοιχεί τιμή  $\omega$  σημαίνει ότι χρειάζεται θλιβόμενος οπλισμός ο οποίος προκύπτει ως εξής:

Εντοπίζονται οι τιμές  $\mu_{lim}$  και  $\omega_{lim}$  που αντιστοιχούν στην τιμή του  $\mu_{sd}$ .

Ο εφελκόμενος οπλισμός  $A_{s1}$  και ο θλιβομενος  $A_{s2}$  δίνονται από τις σχέσεις :

$$A_{s1} = [ \omega_{lim} + (\mu_{sd} - \mu_{lim}) / (1 - d_2/d) ] \cdot b_{eff} \cdot d \cdot f_{cd} / f_{sd}$$

$$A_{s2} = [ (\mu_{sd} - \mu_{lim}) / (1 - d_2/d) ] \cdot b_{eff} \cdot d \cdot f_{cd} / f_{sd}$$

## 9. ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΘΛΙΒΟΜΕΝΟ ΟΠΛΙΣΜΟ

### 9.1 Η ΕΥΜΕΝΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΘΛΙΒΟΜΕΝΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

#### 9.1.1 Η Αύξηση της Πλαστιμότητας

Στο Σχ. 1 δίνονται τα διαγράμματα παραμορφώσεων, τάσεων και εσωτερικών δυνάμεων στην κρίσιμη διατομή τριών φορέων: **ενός υποωπλισμένου, ενός υπερωπλισμένου και ενός ιδιαίτερα υπερωπλισμένου φορέα**, δηλ. ενός φορέα, στον οποίο για λειτουργικούς λόγους το ύψος του κρατείται μικρό και, άρα, ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων  $z$  είναι μικρός και η ροπή αναλαμβάνεται μέσω μεγάλης δύναμης του οπλισμού (αφού  $M_{sd} = F_{sd} \cdot z$ ).

Στον δεύτερο και τρίτο φορέα, επειδή είναι μεγάλη η  $F_{sd}$  είναι μεγάλη και η  $F_{cd}$  και, γι αυτό, είναι μεγάλο και το πάχος  $x$  της θλιβόμενης ζώνης και μικρή η παραμόρφωση  $\epsilon_s$  αστοχίας του χάλυβα.

Η συμπεριφορά των φορέων αυτών είναι ψαθυρή.

Στον τρίτο φορέα, εκτός από την πολύ ψαθυρή συμπεριφορά του, μειώνεται και η απόδοση του χάλυβα, αφού η παραμόρφωση του είναι μικρότερη από την παραμόρφωση διαρροής  $\epsilon_y$  και η τάση του είναι ίση με  $\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s$  μικρότερη από την τάση διαρροής  $f_y$ .

Στο Σχ. 2 δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα των τριών φορέων μετά την προσθήκη θλιβόμενου οπλισμού με εμβαδόν  $A_{s2}$  σε απόσταση  $d_2$  από την ακραία θλιβόμενη ίνα 2.

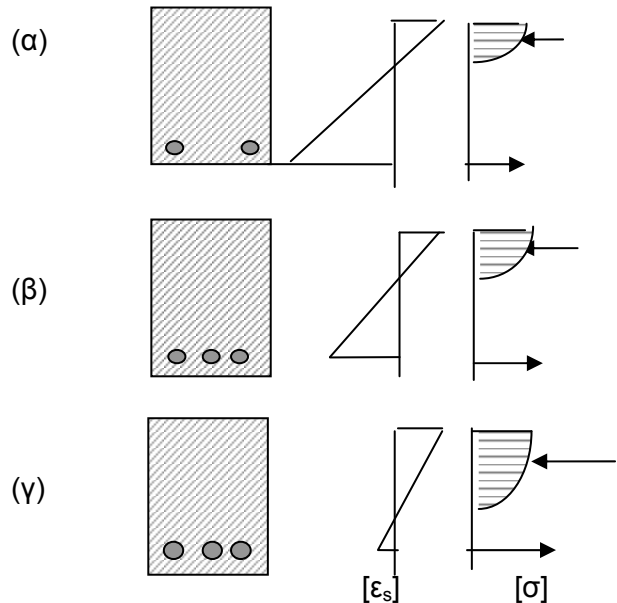
Στις εσωτερικές δυνάμεις έχει προστεθεί και η δύναμη  $F_{sd2}$  του θλιβόμενου οπλισμού σε απόσταση  $(d-d_2)$  από τον εφελκυσμένο οπλισμό.

Ο οπλισμός αυτός εντείνεται θλιπτικά, αφού λόγω της συνάφειάς του με το γειτονικό σκυρόδεμα υφίσταται θλιπτική παραμόρφωση  $\epsilon_{s2}$  ίδια με αυτήν του σκυροδέματος στη θέση αυτή και, γι' αυτό, αναπτύσσει θλιπτική τάση  $\sigma_{sd2}$  ίση με

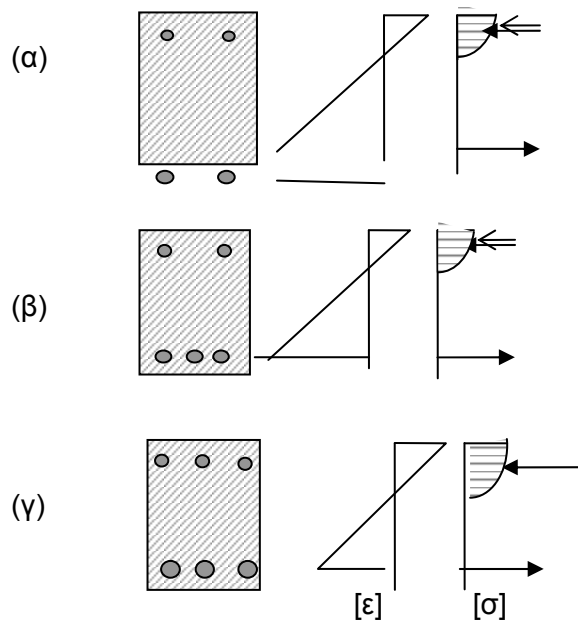
$$\sigma_{sd2} = f_{sd} \quad \text{αν } \epsilon_{s2} > \epsilon_y \quad \text{και}$$

$$\sigma_{sd2} = E_s \cdot \epsilon_{s2} \quad \text{αν } \epsilon_{s2} < \epsilon_y.$$

Λόγω της προσθήκης της  $F_{sd2}$  για την ισοδυναμία



Σχ. 9.1 Εσωτερικά μεγέθη φορέα χωρίς θλιβόμενο οπλισμό



Σχ. 9.2 Εσωτερικά μεγέθη φορέα με θλιβόμενο οπλισμό

των αξονικών απαιτείται μικρότερη δύναμη  $F_{cd}$  του σκυροδέματος (αφού τώρα είναι:  $F_{sd1} = F_{cd} + F_{sd2}$ ) με αποτέλεσμα να μειώνεται το πάχος  $x$  (αφού  $b$  και  $f_{cd}$  δεν μεταβάλλονται) και να αυξάνεται η  $\epsilon_{s1}$  (αφού η παραμόρφωση του σκυροδέματος σε κατάσταση αστοχίας είναι πάντα ίση με 3.5‰).

### 9.1.2 Η Μικρή Διαφοροποίηση της Ροπής Αστοχίας για Συνήθεις Φορείς

Στην περίπτωση των δύο πρώτων φορέων, ενώ αυξάνεται σημαντικά η παραμόρφωση  $\epsilon_{s1}$  (τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη  $F_{sd2}$ , άρα όσο μεγαλύτερο είναι το  $A_{s2}$ ), η ροπή αστοχίας δεν αυξάνεται σημαντικά, καθώς η τιμή της  $F_{sd1}$  δεν αλλάζει, και η αύξηση του μοχλοβραχίονα της  $F_{sd1}$  και της συνισταμένης θλιπτικής δύναμης  $F_{sd2} + F_{cd}$  δεν είναι σημαντική.

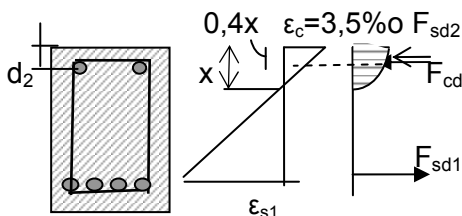
Για παράδειγμα:

Η δύναμη  $F_{sd2}$  ασκείται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3, σ' απόσταση  $d_2$  από την ακραία θλιβόμενη ίνα και η δύναμη  $F_{cd}$  σ' απόσταση  $0,4x$  από την ίνα αυτή.

Για  $d_2 = 0,1d$  (αντιστοιχεί στο σύνηθες  $d_2 = 0,05$  m για συνήθεις δοκούς με  $d = 0,50$  m) και ακραίες παραμορφώσεις  $\epsilon_c = 3,5\%$  και  $\epsilon_{s1} = 10\%$  (για καλοσχεδιασμένες δοκούς) προκύπτει:

$$x = 3,5 / (10 + 3,5)d = 0,25d \Rightarrow 0,4x = 0,1d = d_2,$$

δηλαδή οι δύο δυνάμεις ασκούνται στην ίδια θέση.



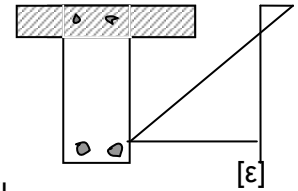
Σχ. 9.3 Παραμορφώσεις και εσωτερικές δυνάμεις

Γιαυτό:

Στην περίπτωση αυτών των φορέων:

❖ Στον υπολογισμό της ροπής αστοχίας μπορεί να παραλείπεται η συμβολή του θλιβόμενου οπλισμού.

♦ Στην περίπτωση των πλακοδοκών, επειδή λόγω του μεγάλου πλάτους της θλιβόμενης ζώνης, το βάθος της  $x$  είναι ιδιαίτερα μικρό, ο οπλισμός  $A_{s2}$  είτε θλίβεται ελάχιστα, είτε εφελκύεται.



Γι αυτό, δεν είναι αναγκαίος (απαιτείται, μόνον, ως οπλισμός συναρμολόγησης των συνδετήρων).

Λόγω του μικρού  $x$  η παραμόρφωση  $\epsilon_{s1}$  προκύπτει κατά κανόνα μεγαλύτερη από 20‰ και πρέπει να τηρηθεί ο ελάχιστος οπλισμός με βάση  $\epsilon_{s1} = 20\%$  ή για να είναι καλοσχεδιασμένος ο φορέας και σε κατάσταση λειτουργίας με  $\epsilon_{s1} = 10\%$ , οπότε  $x = 3,5 / (3,5 + 10)d = 0,25d \Rightarrow$

$$z = d - 0,4 \cdot 0,25d = 0,9d \Rightarrow \underline{A_{s1} = M_{sd} / (0,9d \cdot f_{sd})}.$$

### 9.1.3 Η Σημαντική Συμβολή στη Ροπή Αστοχίας στην Περίπτωση Υπερωπλισμένων Φορέων

Στην περίπτωση, όμως, του τρίτου υπερωπλισμένου φορέα στο κεφ. 9.11, λόγω της αύξησης της  $\epsilon_{s1}$  που επιτυγχάνεται με τον θλιβόμενο οπλισμό, εκτός από την αύξηση της πλαστιμότητας του φορέα, αυξάνεται σημαντικά και η ροπή αστοχίας, γιατί μεγαλώνει η τάση του εφελκυσμένου οπλισμού ( $\sigma_s = f_s$ ) και δεν ισχύει το όριο για  $\max(\lim) A_{s1}$  και  $\max(\lim) M_{sd}$  που είχε τεθεί προκειμένου για φορείς χωρίς θλιβόμενο οπλισμό (πλάκες).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι:

- 1) Η προσθήκη θλιβόμενου οπλισμού αυξάνει την πλαστιμότητα των φορέων.
- 2) Σε υποοπλισμένους και κανονικά οπλισμένους φορείς η ροπή αστοχίας δεν μεταβάλλεται σημαντικά, αν αγνοηθεί η συμβολή του θλιβόμενου οπλισμού.

3) Η προσθήκη θλιβόμενου οπλισμού αίρει τα μειονεκτήματα της υιοθέτησης μεγάλου εφελκυσμένου οπλισμού στις περιπτώσεις φορέων που σχεδιάζονται με μικρό ύψος.

Ανακεφαλαιωτικά:

❖ Για να αυξηθεί η ροπή αστοχίας ενός φορέα υιοθετούνται οι παρακάτω λύσεις:

- Αυξάνεται το ύψος του ή και ο εφελκυσμένος οπλισμός του, ή
- Αυξάνεται ο εφελκυσμένος οπλισμός μόνον, αλλά συγχρόνως αυξάνεται και ο θλιβόμενος οπλισμός.

## 9.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στην περίπτωση φορέων με θλιβόμενο οπλισμό οι αντίστοιχες σχέσεις (1), (2) και (3) ισοδυναμίας αξονικών, ισοδυναμίας ροπών και επιπεδότητας των διατομών προκύπτουν από τις αντίστοιχες σχέσεις που προέκυψαν για φορείς χωρίς θλιβόμενο οπλισμό, προσθέτοντας στη σχέση (1) τη δύναμη  $F_{sd2} = A_{s2} \cdot \sigma_{sd2}$  και στη σχέση (2) τη ροπή της  $F_{sd2}(d-d_2)$  (ροπές ως προς τον άξονα του εφελκυσμένου χάλυβα) και διατυπώνοντας τη συνθήκη επιπεδότητας της διατομής (και μετά την επιπόνηση, δηλ. ότι το διάγραμμα

παραμορφώσεων είναι γραμμικό) με τη σχέση (4):

$$F_{sd1} = F_{cd} + F_{sd2} \quad (1^*) \Rightarrow$$

$$A_{s1} \cdot f_{sd} = 0.68b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{sd2} \quad (1)$$

$$M_{Rdu} = F_{cd} \cdot (d - 0.4x) + F_{sd2} \cdot (d - d_2) \quad (2^*) \Rightarrow$$

$$M_{Rdu} = 0.68b \cdot x \cdot f_{cd} (d - 0.4x) + A_{s2} \cdot \sigma_{sd2} \cdot (d - d_2) \quad (2)$$

$$\epsilon_{s1} 3.5\% = (d - x) / x \quad (3)$$

$$\epsilon_{s2} / 3.5\% = (x - d_2) / x \quad (4)$$

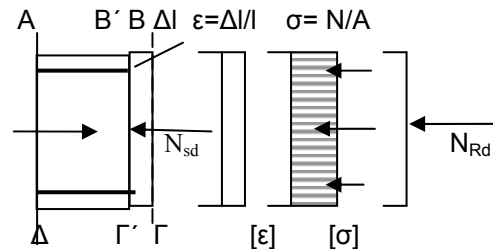
## 10. ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Το μέγεθος αυτό έχει θεωρητική μόνον σημασία, καθώς καθαρά αξονική επιπόνηση δεν υπάρχει σε φορείς από σκυρόδεμα. Ακόμα και χωρίς την σεισμική επιπόνηση (η οποία επιπονεί τα υποστυλώματα καμπτικά) και για την ιδανική περίπτωση που τα κατακόρυφα φορτία από τις δοκούς σκούνται κεντρικά, λόγω κατασκευαστικών ατελειών στην τοποθέτηση του οπλισμού, κ.λ.π. υπεισέρχεται πάντα μια αθέλητη εκκεντρότητα των κατακόρυφων φορτίων και άρα καμπτική ροπή.

### 10.1 Μορφή Διαγράμματος Παραμορφώσεων και Τάσεων

Αν ΑΒΓΔ είναι η θέση στοιχειώδους τμήματος μήκους Δx του φορέα στο Σχ. 1 πριν την επιπόνησή του, η νέα του θέση μετά την επιβολή θλιπτικής δύναμης  $N_{sd}$  θα είναι η ΑΒ'Γ'Δ.

Όλα τα σημεία της εγκάρσιας διατομής ΒΓ θα έχουν μετακινηθεί ισόποσα κατά  $\epsilon_c \cdot \Delta x$ . Το διάγραμμα των παραμορφώσεων και το διάγραμμα των θλιπτικών τάσεων θα είναι λοιπόν ορθογωνικά καθ' ύψος της διατομής.



Σχ. 10.1 Παραμορφώσεις, τάσεις και εσωτερικές δυνάμεις στην περίπτωση αξονικής επιπόνησης

## 10.2 Εσωτερικές Δυνάμεις και Αξονική $N_{Rd}$

Οι εσωτερικές δυνάμεις καθ' ύψος της διατομής είναι:

$F_{cd} = b \cdot h \cdot \sigma_{cd}$  του σκυροδέματος και

$F_{sd1} = (A_{s1} + A_{s2}) \cdot \sigma_{sd}$  του οπλισμού  $A_{s1}$  και  $A_{s2}$ .

Η εσωτερική αξονική  $N_{Rd}$  είναι το άθροισμα των δυνάμεων αυτών.

$N_{Rd} = b \cdot h \cdot \sigma_{cd} + (A_{s1} + A_{s2}) \cdot \sigma_{sd}$

Η αξονική δύναμη αστοχίας  $N_{Rdu}$  προκύπτει όταν αστοχήσει το σκυροδέμα, δηλ. όταν φθάσει την οριακή του παραμόρφωση.

## 10.3 Παραμόρφωση Αστοχίας Σκυρ/τος υπό Αξονική Δύναμη

Η παραμόρφωση αστοχίας στην περίπτωση αξονικής δύναμης τίθεται ίση με 2‰ και όχι 3,5‰, όπως στην περίπτωση της καμπτικής επιπόνησης.

Στην περίπτωση της καμπτικής επιπόνησης το διάγραμμα των θλιπτικών παραμορφώσεων είναι τριγωνικό (θλίβεται μέρος της διατομής) και αν υπερβληθεί η ακραία παραμόρφωση η υπέρβαση

θα είναι σε μικρή περιοχή (γιατί οι παραμορφώσεις μειώνονται προς τον ουδέτερο άξονα)..

Στην περίπτωση της αξονικής δύναμης επειδή θλίβεται εξίσου ολόκληρη η διατομή, οι συνέπειες της υπέρβασης της οριακής παραμόρφωσης εκτείνονται σ' όλη τη διατομή (η ρηγμάτωση εκτείνεται σ' όλη τη διατομή του φορέα), γι αυτό, και τίθεται μικρότερη τιμή.

## 10.4 Αξονική Δύναμη Αστοχίας

Για την οριακή παραμόρφωση  $\epsilon_c = 2\%$  οι τάσεις των υλικών του φορέα θα είναι:

$\sigma_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd}$ .

$\sigma_{sd} = E_s \cdot \epsilon_s / 1,15 = 2 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / 1,15 = 375 \text{ MPa}$ .

Αν η αντοχή του χάλυβα είναι μικρότερη απ' αυτή (για παράδειγμα στην περίπτωση S220), τότε τίθεται προφανώς η  $f_{sd}$ .

Η αξονική θλιπτική αντοχή θα είναι:

$$N_{Rdu} = 0.85 \cdot b \cdot h \cdot f_{cd} + (A_{s1} + A_{s2}) \cdot 375 \text{ kN} \quad (1)$$

Σε περίπτωση εφελκυστικής αξονικής δύναμης, λόγω της παραδοχής για μηδενική εφελκυστική τάση του σκυροδέματος, η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος θα είναι μηδενική και θα αναπτύσσονται μόνον οι εφελκυστικές δυνάμεις του οπλισμού.

Η αξονική αστοχίας θα είναι:

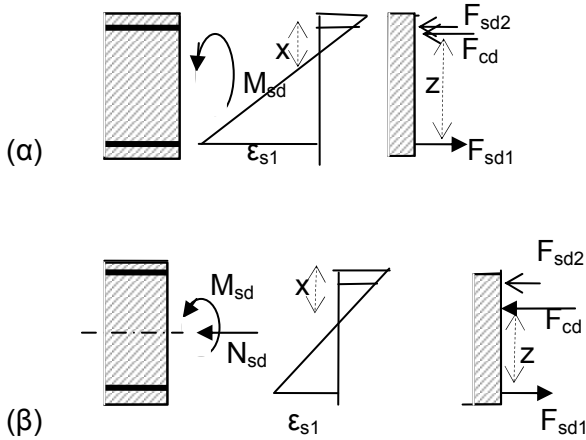
$$N_{Rdu} = (A_{s1} + A_{s2}) \cdot 375 \quad (2)$$

# 11. Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

## 11.1 Μεταβολή Εντατικών Μεγεθών λόγω της Αξονικής

### 11.1.1 Διαφοροποίηση στις Σχέσεις Ισοδυναμίας

Στο Σχ. 1 (α) φαίνονται τα διαγράμματα παραμορφώσεων, τάσεων και εσωτερικών δυνάμεων για την περίπτωση της καθαρής κάμψης και στο Σχ. 1(β) για την περίπτωση συνύπαρξης και αξονικής.



Σχ. 1.1 Διαγράμματα παραμορφώσεων και τάσεων για (α) καθαρή κάμψη και (β) κάμψη και αξονική

Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις ισοδυναμίας αξονικών και ροπών για τις παραπάνω περιπτώσεις:

#### > Καθαρή Κάμψη

$$N_{sd} = N_{Rd} = F_{cd} + F_{sd2} - F_{sd1} = 0 \quad (1) \Rightarrow$$

$$F_{cd} = F_{sd1} - F_{sd2} \quad (1^*)$$

$$M_{sd} = M_{Rdu} = F_{cd} \cdot (d - 0.4x) + F_{sd2} \cdot (d - d_2) \quad (2)$$

#### > Κάμψη με Αξονική

$$N_{sd} = N_{Rd} = F_{cd} + F_{sd2} - F_{sd1} \quad (1) \Rightarrow$$

$$F_{cd} = N_{sd} + F_{sd1} - F_{sd2} \quad (1^*)$$

$$M_{sd} + N_{sd} (h/2 - d_1) = F_{cd} \cdot (d - 0.4x) + F_{sd2} \cdot (d - d_2) \quad (2)$$

### 11.1.2 Μεταβολή Εσωτερικών Μεγεθών με την Αύξηση της Αξονικής

Όπως προκύπτει από τη σχέση (1\*) με την αύξηση της αξονικής αυξάνει η τιμή της θλιπτικής δύναμης  $F_{cd}$ , και, γι αυτό, προκύπτουν οι παρακάτω μεταβολές των μεγεθών:

1. Αυξάνει το  $x$ , οπότε:
2. Μειώνεται ο μοχλοβραχίονας  $z$
3. Αυξάνεται η  $\epsilon_{s2}$ , οπότε αυξάνεται η  $\sigma_{sd2}$  και, γι αυτό, και η  $F_{sd2}$
4. Μειώνεται η παραμόρφωση  $\epsilon_{s1}$ , οπότε μειώνεται η πλαστικότητα του φορέα.

Για αρκετά μεγάλη τιμή της αξονικής, η μείωση της  $\epsilon_{s1}$  οδηγεί σε μείωση της τιμής της  $F_{sd1}$  (όταν η  $\epsilon_{s1}$  γίνει μικρότερη από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα) και για ακόμη μεγαλύτερες τιμές σε αντιστροφή του προσήμου της (όταν η  $\epsilon_{s1}$  γίνει αρνητική).

## 11.2 Η Μη Μονοσήμαντη Επιρροή της Αξονικής στην Καμπτική Αντοχή

### 11.2.1 Οι Αντιτιθέμενες Επιρροές της Αξονικής στην Καμπτική Αντοχή

Όπως φαίνεται από τη σχέση (2) της ισοδυναμίας των ροπών:

- Η αύξηση της  $F_{cd}$  και της  $F_{sd2}$  που εντοπίστηκε παραπάνω αυξάνει την καμπτική αντοχή  $M_{Rdu}$ , ενώ
- Η μείωση του  $z$  και της  $F_{sd1}$  μειώνει την  $M_{Rdu}$

### 11.2.2 Η Εξάρτηση της Αντοχής από τη Στάθμη της Αξονικής

- > Για μικρές τιμές της αξονικής υπερισχύει η αυξητική επιρροή και η καμπτική αντοχή αυξάνεται.

Η ευνοϊκή επιρροή της αξονικής δύναμης στην

καμπτική αντοχή μπορεί να ειπωθεί ως μηχανισμός παρεμπόδισης (περιορισμού) των καμπτικών ρωγμών (κατ' αναλογία με την ευνοϊκή επιρροή της αξονικής στην διατμητική ικανότητα του φορέα λόγω παρεμπόδισης του ανοίγματος των διατμητικών ρωγμών).

- Για μεγάλες τιμές της αξονικής υπερισχύει, όπως φαίνεται στο Σχ. 2(α), η δυσμενής επιρροή της μείωσης του μοχλοβραχίονα και της μείωσης της  $F_{sd1}$  και η καμπτική ικανότητα μειώνεται.

Άρα:

- ❖ **Η καμπτική αντοχή φορέα επιπιονούμενου με καμπτική ροπή και αξονική δύναμη δεν είναι μονοσήμαντη. Μπορεί να πάρει διαφορετικές τιμές ανάλογα με την τιμή της αξονικής.**

Η γραφική παράσταση της εξάρτησης αυτής της καμπτικής αντοχής από την τιμή της αξονικής δηλώνεται ως το **διάγραμμα αλληλεπίδρασης** (ροπής και αξονικής) και η μορφή του φαίνεται στο Σχ. 3.

- Το σημείο Α αντιστοιχεί στην καμπτική ικανότητα της διατομής του φορέα όταν επιπιονείται σε καθαρή κάμψη,
- Το σημείο Β αντιστοιχεί στη μέγιστη καμπτική ικανότητα της διατομής, η οποία όπως φαίνεται στο διάγραμμα προκύπτει όταν συνυπάρχει και αξονική (θλιπτική) δύναμη.

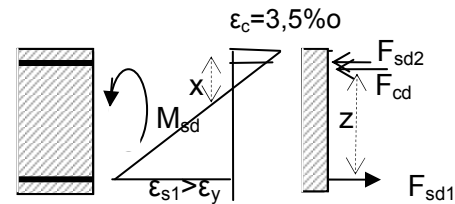
Η τιμή της αξονικής για την οποία προκύπτει αυτή η μέγιστη ικανότητα για συνήθεις ποιότητες υλικών και συμμετρικό οπλισμό είναι της τάξεως του 40% της μέγιστης αξονικής ικανότητας της διατομής.

Για την τιμή αυτή, για ποιότητα χάλυβα S500 είναι  $\epsilon_{s1} = \epsilon_y$ .

- Το σημείο Γ αντιστοιχεί στην μέγιστη ικανότητα της διατομής για θλιπτικό αξονικό φορτίο,
- Το σημείο Δ αντιστοιχεί στην καμπτική ικανότητα της διατομής για αρνητική ροπή (για φορείς με συμμετρικό οπλισμό η ικανότητα αυτή είναι προφανώς ίδια με τη περίπτωση θετικής ροπής) και
- Το σημείο Ε αντιστοιχεί στην ικανότητα της διατομής για αξονικό εφελκυστικό φορτίο.

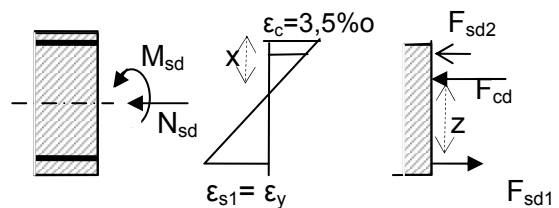
**ΣΗΜΕΙΟ Α**  $0 < N_{sd} < N_{1,} \quad \epsilon_{s1} > \epsilon_y$

$$F_{sd1} = A_{s1} \cdot f_{sd} \quad F_{cd} \uparrow \quad F_{sd2} \uparrow \quad z \downarrow \Rightarrow M_{Rdu} \uparrow$$



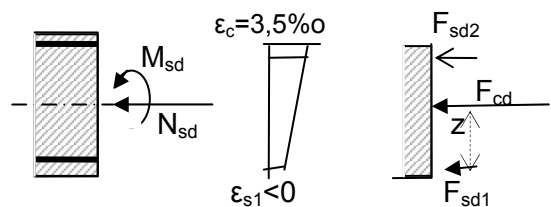
**ΣΗΜΕΙΟ Β**  $N_1 < N_{sd} < N_2, \quad \epsilon_{s1} = \epsilon_y$

$$F_{sd1} = A_{s1} \cdot \sigma_{sd} \downarrow \quad F_{cd} \uparrow \quad F_{sd2} \uparrow \quad z \downarrow \Rightarrow M_{Rdu} \downarrow$$

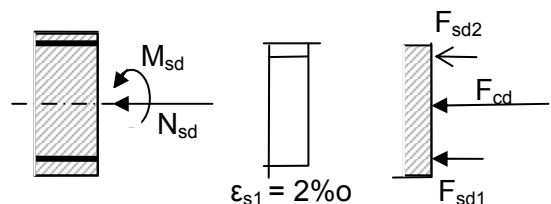


**ΣΗΜΕΙΟ Γ**  $N_2 < N_{sd} < N_3, \quad \epsilon_{s1} < 0$

$$F_{sd1} = A_{s1} \cdot \sigma_{sd} < 0 \quad F_{cd} \uparrow \quad F_{sd2} \uparrow \quad z \downarrow \downarrow \Rightarrow M_{Rdu} \downarrow \downarrow$$



**ΣΗΜΕΙΟ Δ**  $N_{sd} = N_{Rdu}, \quad \epsilon_{s1} = \epsilon_{s2} = 2\text{‰}$



Σχ. 10.2 Μεταβολή μεγεθών με την αύξηση της  $N_{sd}$

❖ Το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αποτελεί την καμπύλη αστοχίας ενός φορέα για διάφορους συνδυασμούς ροπής και αξονικής.

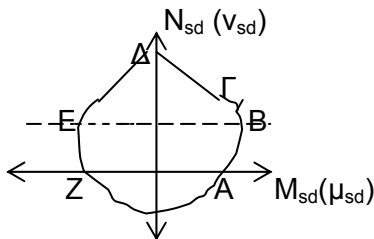
Αν ο συνδυασμός είναι τέτοιος που το σημείο που έχει συντεταγμένες τις τιμές  $M$  και  $N$  είναι στην περιοχή μεταξύ των αξόνων και της γραμμής του διαγράμματος ο φορέας δεν αστοχεί.

Ισχύει για συγκεκριμένη διαστασιολόγηση και όπλιση του φορέα

Για να έχει ισχύ και για φορείς με διαφορετική διαστασιολόγηση το διάγραμμα συντάσσεται με τις ανηγμένες τιμές της αξονικής και ροπής:

$$v_{sd} = N_{sd} / (b \cdot h \cdot f_{cd}) \text{ και}$$

$$\mu_{sd} = M_{sd} / (b \cdot h^2 \cdot f_{cd})$$



Σχ. 10.3 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης

### 11.3 Το Λάθος της Γενίκευσης των Συμπερασμάτων

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η επιρροή της αξονικής δύναμης στην καμπτική αντοχή ενός φορέα δεν είναι μονοσήμαντη.

Εξαρτάται από την τιμή της.

Από μία τιμή και πάνω η επιρροή της αντιστρέφεται.

- ◆ Το συμπέρασμα, λοιπόν, ότι όσο αυξάνεται η αξονική αυξάνεται και η αντοχή έχει μια περιοχή ισχύος. Ισχύει μέχρι μια τιμή ίση με  $0,40 N_{rdU}$ .
- ◆ Επίσης, και το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η αξονική μειώνεται η καμπτική αντοχή έχει και αυτό μια περιοχή ισχύος. Ισχύει για τιμές μεγαλύτερες από  $0,40 N_{rdU}$ .
- ❖ Η γενίκευση ή του πρώτου συμπεράσματος, ή του δεύτερου είναι το ίδιο λανθασμένη, όπως λανθασμένη και πηγή διαφωνιών και άλλων κακοδαιμονιών είναι η γενίκευση και οποιουδήποτε άλλου συμπεράσματος που αγνοεί ότι όλα έχουν μια περιοχή ισχύος και σε διαφορετικές συνθήκες μπορούν να αντιστραφούν.

Κάθε συμπέρασμα είναι η απάντηση σε κάποιο ερώτημα και ενδέχεται αν αλλάξει το ερώτημα (εν προκειμένω η στάθμη της αξονικής) να αντιστραφεί η απάντηση.

### 11.4 Η Επιρροή της Αξονικής στην Πλαστιμότητα

Όσο αυξάνεται η (θλιπτική) αξονική, αυξάνεται το  $\chi$  και η πλαστιμότητα του φορέα μειώνεται, αφού μειώνεται η εφελκυστική παραμόρφωση  $\epsilon_{s1}$  του εφελκυσμένου χάλυβα.



## 12. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΕΜΝΟΥΣΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

(ΒΛΕΠΕ ΚΑΙ ΚΕΦ. 2 ΚΑΙ 3)

Όπως εντοπίστηκε στο κεφ. 2, προκύπτουν τρεις διατμητικές αντοχές. Η τιμή τους προκύπτει ως η κατακόρυφη συνιστώσα των δυνάμεων των ράβδων του ισοδύναμου δικτυώματος του φορέα που προκύπτουν από τομή του στην περιοχή ανάπτυξης της δρώσας τέμνουσας.

### 12.1 Υπολογισμός $V_{Rd2}$

Η  $V_{Rd2}$  είναι η κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης  $F_D$  του λοξού θλιπτήρα, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.

Η δύναμη  $F_D$  του λοξού θλιπτήρα είναι ίση με το γινόμενο της διατομής του επί την αντοχή του (βλ. και κεφ.3):

$$F_D = \sqrt{2} / 2 \cdot 0,9d \cdot b \cdot v \cdot f_{cd}$$

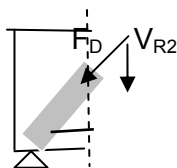
Η κάθετη συνιστώσα της λοξής αυτής δύναμης αποτελεί την εσωτερική τέμνουσα  $V_{R2}$ :

$$V_{R2} = \sqrt{2} / 2 \cdot \sqrt{2} / 2 \cdot 0,9d \cdot b \cdot v \cdot f_{cd} \Rightarrow$$

$$\diamond V_{Rd2} = 0,5 \cdot v \cdot 0,9d \cdot b \cdot f_{cd}$$

όπου:

$$v = 0,7 - f_{ck}/200 \quad (\text{MPa})$$



Σχ. 12.1 Η  $V_{Rd2}$  ως η κατακόρυφη προβολή της δύναμης  $F_D$  του λοξού θλιπτήρα

### 12.2 Υπολογισμός $V_{Rd3}$

Η  $V_{Rd3}$  προκύπτει, όπως φαίνεται στο Σχ. 2, ως άθροισμα δύο κατακόρυφων δυνάμεων, δύο επιμέρους εσωτερικών τέμνουσών:

$$\diamond V_{Rd3} = V_{Rdw} + V_{cd} \quad (1)$$

όπου:

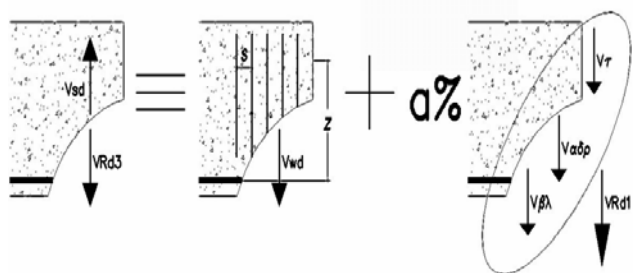
$V_{Rdw}$ : η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες

$V_{cd}$ : η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι επικουρικοί μηχανισμοί

#### 12.2.1 Υπολογισμός της $V_{Rdw}$

Η δύναμη του ενός συνδετήρα είναι  $A_{sw} \cdot f_{sdw}$ , όπου  $A_{sw}$  είναι το εμβαδόν όλων των σκελών

του συνδετήρα και  $f_{sdw}$  είναι η αντοχή του χάλυβα του συνδετήρα.



Σχ. 12.2 Η συνολική δύναμη των εγκάρσιων ελκυστήρων  $V_{R3}$  που διασταυρώνει η διατμητική ρωγμή

Θεωρώντας ότι η κλίση της ρωγμής είναι  $45^\circ$  (παράλληλη με τους λοξούς θλιπτήρες του φυσικού προσομοιώματος) και το ύψος της ίσο με  $z=0,9d$ , η οριζόντια προβολή της ρωγμής είναι  $0,9d$  και ο αριθμός των συνδετήρων προκύπτει  $0,9d/s$ , όπου  $s$  είναι η απόσταση διαδοχικών συνδετήρων.

Άρα:

$$V_{wd} = (0,9d/s) \cdot A_{sw} \cdot f_{swd} \quad (2)$$

όπου:

$0,9d/s$ : ο αριθμός των συνδετήρων που τέμνει η τομή

$s$ : η απόσταση των συνδετήρων

$A_{sw}$ : το εμβαδόν όλων των σκελών του συνδετήρα

$f_{swd}$ : η αντοχή του χάλυβα των συνδετήρων

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$\diamond V_{Rd3} = (0,9d/s) \cdot A_{sw} \cdot f_{swd} + V_{cd} \quad (3)$$

#### 3.2.2 Υπολογισμός της $V_{cd}$

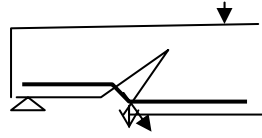
Για κατακόρυφα φορτία η τιμή της  $V_{cd}$  τίθεται ίση με την τιμή της διατμητικής αντοχής  $V_{Rd1}$  του (διατμητικά) άοπλου σκυροδέματος προκύπτει:

### 12.3 Υπολογισμός της $V_{Rd1}$

Η τιμή της τέμνουσας  $V_{Rd1}$  του διατμητικά άοπλου φορέα στους κανονισμούς θεωρείται ότι είναι το άθροισμα των παρακάτω επί μέρους κατακόρυφων δυνάμεων που φαίνονται στο Σχ. 2:

I. Της συνιστάμενης των διατμητικών τάσεων του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη

II. Της κατακόρυφης συνιστώσας της κεκλιμένης δύναμης του εφελκυσμένου καμπτικού οπλισμού λόγω καμπύλωσης του στη θέση της ρωγμής (δράση βλήτρου του οπλισμού)



III. Της κατακόρυφης συνιστώσας των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια της ρωγμής λόγω της τραχύτητάς της (εμπλοκής των αδρανών).

Η μέγιστη τιμή των παραπάνω μηχανισμών, είναι συνάρτηση της διατμητικής αντοχής  $T_{Rd}$  του σκυροδέματος (ίση περίπου με την εφελκυστική αντοχή, της τάξεως των 2 MPa), του εμβαδού της επιφάνειας  $b_w \cdot d$  που αναπτύσσονται οι διατμητικές τάσεις ( $b_w$ : το εμβαδόν του κορμού), του ποσοστού του εφελκυσμένου καμπτικού οπλισμού  $\rho_l$  και δίνεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση :

$$V_{Rd1} = T_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \rho_l) \cdot b_w \cdot d, \text{ όπου:}$$

$$k = 1,6 - d [m] < 1,0 \quad \rho_l = A_s \cdot b \cdot d [\%]$$

Η τιμή της  $T_{Rd}$  δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

$$f_{ck} \quad \underline{12} \quad \underline{16} \quad \underline{20} \quad \underline{25} \quad \text{MPa}$$

$$T_{Rd} \quad 0,18 \quad 0,22 \quad 0,26 \quad 0,30 \quad \text{MPa}$$

Οι παραπάνω εμπειρικοί παράγοντες II (του βλήτρου του διαμήκους οπλισμού) και III (της εμπλοκής των αδρανών) της  $V_{Rd1}$  στις περισσότερες περιπτώσεις δεν επαληθεύονται πειραματικά και αμφισβητούνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

❖ Ο μηχανισμός εμπλοκής των αδρανών δεν φαίνεται να έχει νόημα για τα σκυροδέματα των σημερινών κατασκευών.

Η αντοχή του σκυροδέματος έχει αυξηθεί και τα αδρανή δεν εξέχουν κατά την θραύση του σκυροδέματος για να εμπλακούν. Θραύονται κι αυτά.

Όπως σε μια αλυσίδα σπάει ο ασθενής της κρίκος, έτσι και στο σκυροδέμα σπάει η ασθενής του φάση, την οποία στα ελληνικά σκυροδέματα (με ασβεστολιθικά αδρανή) σχετικά μεγάλης αντοχής αποτελούν τα αδρανή.

Τα αδρανή παρέμεναν άθραυστα στα χαμηλής ποιότητας παλιά σκυροδέματα B160 και B225 (αντίστοιχα του C10 και C16 σήμερα) των παλιών κατασκευών με βάση τα οποία προέκυψαν τα πειραματικά αποτελέσματα περί της εμπλοκής των αδρανών.

🌈 Η άτοπη γενίκευση των αποτελεσμάτων για όλα τα σκυροδέματα, στην οποία βασίστηκε η παραπάνω διατύπωση της  $V_{Rd1}$  στους κανονισμούς εκτιμάται ότι αποτελεί, όπως και η άτοπη γενίκευση και στους άλλους τομείς της ζωής, την αιτία των αντιφατικών συμπερασμάτων και των αντεγκλήσεων στα συνέδρα και τη βιβλιογραφία.

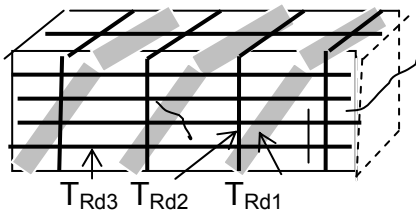
Το αποτέλεσμα εξαρτάται πάντα από το πώς έχει σχεδιαστεί η δοκιμή, το πείραμα, η στατιστική. Με άλλο σχεδιασμό μπορεί και να αντιστραφεί. Δεν μπορεί να γενικευτεί.

## 13. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ

(Βλέπε κεφ. Ε10 και Β3)

### 13.1 Οι Τρεις Στρεπτικές Αντοχές

Σε κάθε μία από τις τρεις ράβδους του ισοδύναμου δικτυώματος που εντοπίστηκε στην Ενότητα Ε και φαίνεται στο Σχ. 1, το λοξό θλιπτήριο, τον εγκάρσιο ελκυστήριο και το διαμήκη ελκυστήριο, αναπτύσσονται λόγω της περιμετρικής θέσης τους ζεύγη διατμητικών δυνάμεων τα οποία συνιστούν την εσωτερική στρεπτική ροπή  $T_R$ .



Σχ. 13.1 Φυσικό προσομοίωμα για στρεπτική επιπόνηση

- ♦ Η στρεπτική ροπή που αναπτύσσεται από τα δύο ζεύγη του σπειροειδούς θλιπτήρα δηλώνεται ως  $T_{Rd1}$ .
- ♦ Η ροπή που προκύπτει από τα ζεύγη των εγκάρσιων ελκυστήρων δηλώνεται ως  $T_{Rd2}$ , και
- ♦ Η ροπή που προκύπτει από τα ζεύγη των διαμήκων ισοκατανεμημένων στην περίμετρο ελκυστήρων δηλώνεται ως  $T_{Rd3}$ .

Οι οριακές τιμές  $T_{rd1u}$ ,  $T_{rd2u}$  και  $T_{rd3u}$  που προκύπτουν όταν οι αντίστοιχες τάσεις των ράβδων του δικτυώματος φθάσουν την οριακή τιμή τους, αποτελούν τις τρεις στρεπτικές αντοχές του φορέα, οι οποίες σύντομα δηλώνονται απλά ως  $T_{Rd1}$ ,  $T_{Rd2}$  και  $T_{Rd3}$ .

Η τιμή τους προκύπτει, όπως και στην περίπτωση της καμπτοδιατμητικής επιπόνησης, από την ισοδυναμία δυνάμεων σε κατάλληλες τομές του φυσικού προσομοιώματος, όπως αναπτύσσεται παρακάτω:

### 13.2 Αναπτυσσόμενη Διατμητική Τάση Συναρτήσεως της Στρεπτικής Ροπής

Η στρεπτική ροπή  $T$ , όπως εντοπίζεται στην Ενότητα Α και Ε, προκύπτει ως το άθροισμα δύο ζευγών διατμητικών δυνάμεων  $F_h$  και  $F_b$  συνισταμένων των διατμητικών τάσεων  $\tau$  που αναπτύσσονται κατά μήκος των απέναντι τοιχωμάτων της κοίλης ισοδύναμης διατομής του φορέα με διαστάσεις  $h_o$  και  $b_o$ .

Είναι:

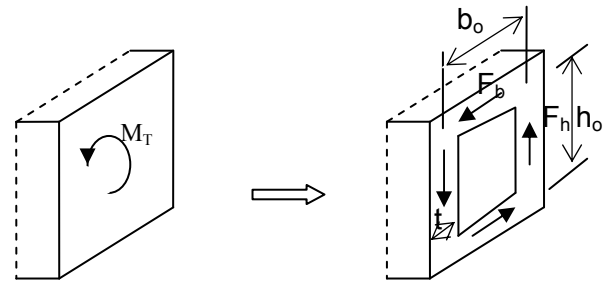
$$T_{sd} = F_h \cdot b_o + F_b \cdot h_o = \tau \cdot t \cdot h_o \cdot b_o + \tau \cdot t \cdot b_o \cdot h_o$$

$$T_{sd} = 2 \cdot \tau \cdot t \cdot h_o \cdot b_o = 2 \cdot \tau \cdot t \cdot A_k \Rightarrow$$

$$\tau = T_{sd} / (2 \cdot t \cdot A_k) \quad (1)$$

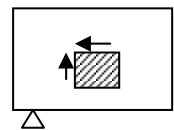
όπου:  $A_k = (b-t) \cdot (h-t)$ ,  $t = \max\{2c, A_c/u\}$ ,

$c$ : η επικάλυψη,  $u$  η περίμετρος της διατομής



Σχ. 13.2 Η στρεπτική ροπή ως άθροισμα δύο διατμητικών δυνάμεων

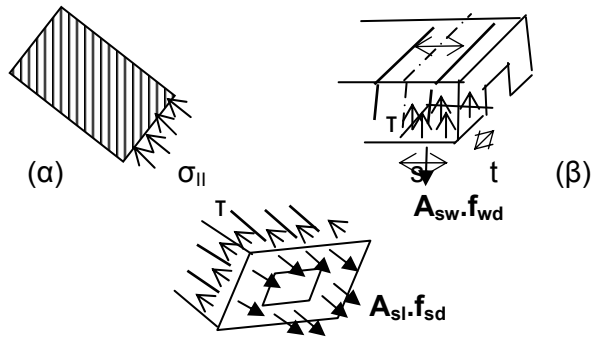
Σημειώνεται ότι, όπως έχει εντοπιστεί στην ενότητα Β, διατμητικές τάσεις και δυνάμεις αναπτύσσονται και κάθετα στην εγκάρσια διατομή, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα



### 13.3 Υπολογισμός Στρεπτικών Αντοχών

Για τον υπολογισμό των εσωτερικών στρεπτικών ροπών γίνονται, όπως και στην περίπτωση των καμπτοδιατμητικών μεγεθών, κατάλληλες

τομές στο φυσικό προσομοίωμα, όπως φαίνονται στο Σχ. 1 και 3 και διατυπώνονται οι σχέσεις ισοδυναμίας ως συνάρτηση της διατμητικής τάσης και μέσω της σχέσης (1) ως συνάρτηση της στρεπτικής ροπής.



Σχ. 13.3 Τομές προσομοιώματος  
 (α) κάθετα στο θλιπτήριο,  
 (β) κάθετα στους συνδετήρες,  
 (γ) κάθετα στο διαμήκη οπλισμό

- Από την τομή (α)  $\Rightarrow \sigma_{||} = \tau = T_{Rd1}/(2.t.A_k)$   
 $\Rightarrow T_{Rd1} = \sigma_{||} \cdot 2.t.A_k \Rightarrow$

$$T_{Rd1u} = v \cdot f_{cd} \cdot t \cdot A_k \quad (2)$$

- Από την τομή (β)  $\Sigma y = 0 \Rightarrow \tau \cdot t \cdot s = A_{sw} \cdot \sigma_{swd}$   
 $\Rightarrow$

$$T_{Rd2}/(2.t.A_k) \cdot t \cdot s = A_{sw} \cdot \sigma_{swd} \Rightarrow$$

$$T_{Rd2} = 2 \cdot A_k \cdot A_{sw}/s \cdot f_{wd} \quad (3)$$

- Από την τομή (γ)  $\Sigma x = 0 \Rightarrow$

$$\tau \cdot t \cdot u = A_{sl} \cdot \sigma_{sd} \Rightarrow$$

$$T_{Rd3}/(2.t.A_k) \cdot t \cdot u = A_{sl} \cdot \sigma_{sd} \Rightarrow$$

$$T_{Rd3u} = 2 \cdot A_k \cdot A_{sl}/u \cdot f_{sd} \quad (4)$$

Ο συντελεστής  $v = 0,7$  τίθεται λόγω ετερόσημης διαξονικής επιπόνησης για τους λόγους που εξηγούνται στο κεφ. 3.