

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

3.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός ενισχύσεων με σύνθετα υλικά ακολουθεί τη φιλοσοφία των σύγχρονων κανονισμών (π.χ. ΕΚΩΣ 2000, ΕΑΚ 2000, Ευρωκώδικες 2, 6 και 8, ΚΑΝΕΠΕ), και περιλαμβάνει όλους τους γνωστούς ελέγχους των οριακών καταστάσεων, με τροποποιήσεις όπου χρειάζεται ώστε να ληφθεί υπόψη η συμβολή των συνθέτων υλικών. Ειδική μνεία χρειάζεται μόνον η ακραία περίπτωση πρόωρης αστοχίας των οπλισμών ενίσχυσης, π.χ. λόγω πυρκαϊάς. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται εν γένει ως τυχηματική δράση (και κατά πάσα πιθανότητα δεν απαιτούνται ειδικά μέτρα πυροπροστασίας, όπως π.χ. σε πολλές εφαρμογές αντισεισμικών ενισχύσεων), σε ειδικές όμως περιπτώσεις που πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις πυροπροστασίας, η μελέτη ενίσχυσης θα πρέπει να περιλαμβάνει τον σχεδιασμό αντιστοίχων συστημάτων (π.χ. ειδικά επιχρίσματα ή γυψοσανίδες). Περισσότερα στοιχεία για ειδικά θέματα ανθεκτικότητας και προστασίας των συνθέτων υλικών δίνονται στο Κεφάλαιο 10.

3.2 Καταστατικοί νόμοι των υλικών

Ακολούθως περιγράφονται οι καταστατικοί νόμοι των υλικών σε μονοαξονική φόρτιση και δίνονται οι τιμές για τους μερικούς συντελεστές ασφάλειας.

3.2.1 Υπολογισμός αντιστάσεων – πλήρης συνεργασία υλικών

Για το σκυρόδεμα, την τοιχοποιία και τον χάλυβα (τα “υφιστάμενα” υλικά) οι τιμές σχεδιασμού των αντοχών υπολογίζονται διαιρώντας την **αντιπροσωπευτική** τιμή X_k της αντοχής με τον συντελεστή ασφάλειας υλικού γ_m . Αν ο έλεγχος ασφαλείας γίνεται σε όρους εντατικών μεγεθών (“δυνάμεις”), ως αντιπροσωπευτικές τιμές λαμβάνονται οι μέσες τιμές μειωμένες ως εξής: (α) Κατά τον Ευρωκώδικα 8 διαρούνται (ή πολλαπλασιάζονται, αν είναι δυσμενέστερο) με διορθωτικό συντελεστή “αξιοπιστίας” (1.0, 1.2, 1.35) που εξαρτάται από την ποσότητα και αξιοπιστία των διαθέσιμων στοιχείων για την αποτίμηση της υφιστάμενης κατασκευής. (β) Κατά τον ΚΑΝΕΠΕ αφαιρείται από τη μέση τιμή μία τυπική απόκλιση. Αν ο έλεγχος ασφαλείας γίνεται σε όρους

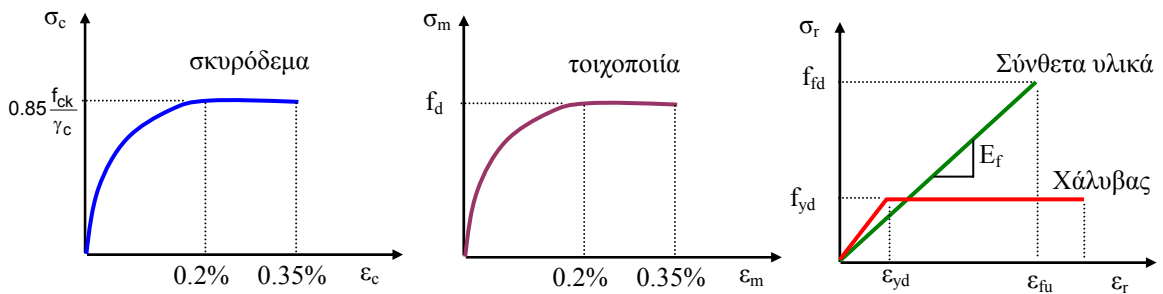
παραμορφωσιακών μεγεθών (π.χ. μετακινήσεις, στροφές), ως αντιπροσωπευτικές τιμές λαμβάνονται οι μέσες τιμές. Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, ο συντελεστής γ_m (γ_c , γ_M και γ_s για το σκυρόδεμα, την τοιχοποιία και τον χάλυβα, αντίστοιχα) εξαρτάται από τη στάθμη αξιοπιστίας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση αντοχών. Για την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$, όπου f_{ck} = αντιπροσωπευτική αντοχή και γ_c = συντελεστής ασφάλειας για το σκυρόδεμα. Αντίστοιχα για την φέρουσα τοιχοποιία έχουμε $f_d = f_k / \gamma_M$ όπου f_k = αντιπροσωπευτική αντοχή και γ_M = συντελεστής ασφάλειας υλικού για την τοιχοποιία. Τέλος για τον χάλυβα είναι $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$, όπου f_{yk} = αντιπροσωπευτική τιμή τάσης διαρροής και γ_s = συντελεστής ασφάλειας για τον χάλυβα.

Τα σύνθετα υλικά, ως “προστιθέμενα” σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία, αντιπροσωπεύονται από τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής αν ο έλεγχος ασφαλείας γίνεται σε όρους εντατικών μεγεθών και από τις μέσες τιμές αν γίνεται σε όρους παραμορφωσιακών μεγεθών. Η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό θεωρείται γραμμικά ελαστική μέχρι την θραύση, η οποία επέρχεται σε τάση (σχεδιασμού) $f_{fd} = f_{fk} / \gamma_f$:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fd} \tag{3.1}$$

Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από το λόγο των αντιπροσωπευτικών τιμών εφελκυστικής αντοχής προς οριακή παραμόρφωση, $E_f = f_{fk} / \varepsilon_{fuk}$.

Οι καταστατικοί νόμοι σχεδιασμού για τα διάφορα υλικά δίνονται στο Σχ. 3.1.



Σχ. 3.1 Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης υλικών για τον υπολογισμό αντιστάσεων.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η επί τόπου εφελκυστική αντοχή των συνθέτων υλικών είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει από δοκιμές εφελκυσμού στο εργαστήριο. Αυτό οφείλεται σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ενδεχόμενη πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στα σύνθετα υλικά, στην ύπαρξη σημαντικού αριθμού στρώσεων, στην επίδραση διαφόρων παραγόντων του περιβάλλοντος, στον τρόπο δράσης των φορτίων κλπ. Μπορεί δε να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς θεωρώντας ότι η αστοχία

επέρχεται όταν η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με μία “ενεργή” παραμόρφωση, ε_{fue} , η οποία είναι μικρότερη από την μέση οριακή παραμόρφωση αστοχίας, ε_{fum} (η τελευταία προσδιορίζεται μέσω δοκιμής εφελκυσμού). Βάσει των παραπάνω, η ενεργή αντοχή σχεδιασμού f_{fde} για τα σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$f_{fde} = \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \eta_e f_{fd} \quad (3.2)$$

Περισσότερα στοιχεία για την ενεργή παραμόρφωση ε_{fue} θα δοθούν στην περιγραφή των ενοτήτων όπου ο ρόλος αυτής είναι σημαντικός (π.χ. ενίσχυση σε διάτμηση, περίσφιγξη).

Οι τιμές για τον συντελεστή ασφάλειας των συνθέτων υλικών δίνονται στον Πίνακα 3.1 (*fib* 2001), με την επισήμανση ότι αποτελούν ακόμα αντικείμενο τρέχουσας έρευνας, γι’ αυτό και θα πρέπει να θεωρούνται ως ενδεικτικές. Ας σημειωθεί πάντως ότι ο Ευρωκώδικας 8 προτείνει, επί το απλούστερον και εν γένει επί το συντηρητικότερον, την ενιαία τιμή $\gamma_f = 1.50$.

Πίνακας 3.1 Συντελεστής ασφάλειας υλικού για τα σύνθετα υλικά, γ_f .

Τύπος ινών	Εφαρμογή τύπου Α ⁽¹⁾	Εφαρμογή τύπου Β ⁽²⁾
Άνθρακας	1.20	1.35
Αραμίδιο	1.25	1.45
Γυαλί	1.30	1.50

⁽¹⁾ Χρήση ελασμάτων (προκατασκευασμένων) σε συνθήκες συνθήκες. Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες υψηλής στάθμης ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής.

⁽²⁾ Χρήση υφασμάτων σε συνθήκες συνήθους στάθμης ποιοτικού ελέγχου. Χρήση οποιουδήποτε υλικού σε δύσκολες συνθήκες επιτόπου εφαρμογής.

3.2.2 Υπολογισμός αντιστάσεων – αποκόλληση

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο μηχανισμός της εφελκυστικής αστοχίας των συνθέτων υλικών δεν ενεργοποιείται, αλλά αντ’ αυτού παρατηρείται αποκόλλησή τους από την επιφάνεια του σκυροδέματος (το φαινόμενο περιγράφεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο) ή της τοιχοποιίας. Η αποκόλληση αυτή οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια υποστρώματος (σκυροδέματος ή τοιχοποιίας) – συνθέτων υλικών και γίνεται κατά κανόνα μέσω του υποστρώματος, δεδομένου ότι αυτό έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις συνθήκες εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας

(Neubauer and Rostásy 1999). Σε τέτοιες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφάλειας υλικού αφορά στο υπόστρωμα, και λαμβάνεται ίσος με $\gamma_{fb} = 1.50$.

3.2.3 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

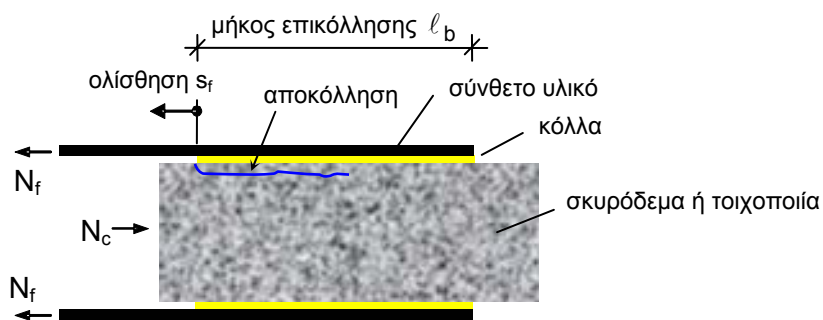
Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας το μέτρο ελαστικότητας των συνθέτων υλικών μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ίσο με αυτό που υπολογίζεται για την οριακή κατάσταση αστοχίας.

3.3 Συνάφεια συνθέτων υλικών - υποστρώματος

Η πλήρης συνεργασία των συνθέτων υλικών με το υπόστρωμα (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία) προϋποθέτει την ύπαρξη ισχυρού δεσμού μεταξύ των δύο υλικών, ο οποίος εξασφαλίζεται μέσω των εποξειδικών ρητινών. Τυχόν αστοχία του δεσμού αυτού (απώλεια συνάφειας) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους ελέγχους των οριακών καταστάσεων.

3.3.1 Γενικά, συμπεριφορά

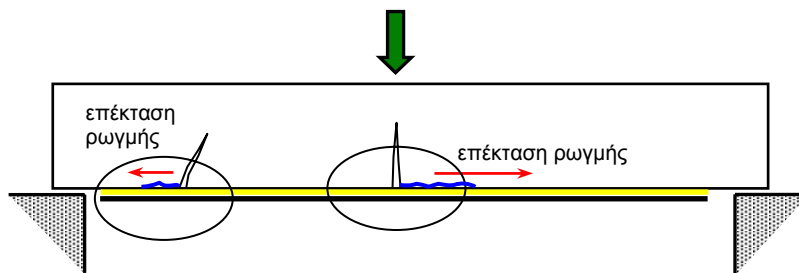
Η συμπεριφορά του δεσμού συνθέτων υλικών – υποστρώματος μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή μέσω απλών δοκιμών συνάφειας, όπως αυτή του Σχ. 3.2, η οποία αντιπροσωπεύει (κατά προσέγγιση) την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση σε περιοχές ρωγμών, όπως δείχνεται για παράδειγμα στη δοκό του Σχ. 3.3 (βλ. ελαφρά σκιασμένες περιοχές).



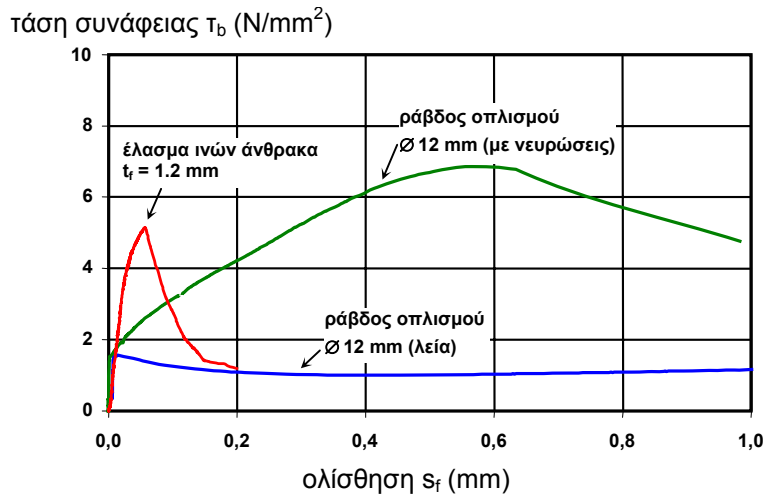
Σχ. 3.2 Δοκιμή συνάφειας συνθέτων υλικών – υποστρώματος (π.χ. Zilch et al 1998, Bizindavyi and Neale 1999).

Στις περιοχές ανάπτυξης ρωγμών, όπως αυτές στο παράδειγμα του Σχ. 3.3, ο εξωτερικός οπλισμός παραλαμβάνει εφελκυστική δύναμη N_f (Σχ. 3.2), η οποία

μεταφέρεται στο υπόστρωμα μέσω διάτμησης. Ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ της μέσης διατμητικής τάσης τ_b στη διεπιφάνεια συνθέτων υλικών και υποστρώματος (ίση με $N_f / \ell_b b_f$ στο Σχ. 3.2, όπου b_f το πλάτος του ελάσματος) συναρτήσεως της ολίσθησης s_f . Η σχέση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι η αντοχή του υποστρώματος, η ποιότητα της κόλλας, τα χαρακτηριστικά των συνθέτων υλικών (π.χ. πάχος, μέτρο ελαστικότητας) και το μήκος επικόλλησης. Μπορεί δε να παρασταθεί γραφικά όπως δείχνει το Σχ. 3.4, στο οποίο δίνονται για λόγους σύγκρισης και ενδεικτικές σχέσεις τάσης συνάφειας – ολίσθησης για ράβδους οπλισμού με ή χωρίς νευρώσεις σε σκυρόδεμα.



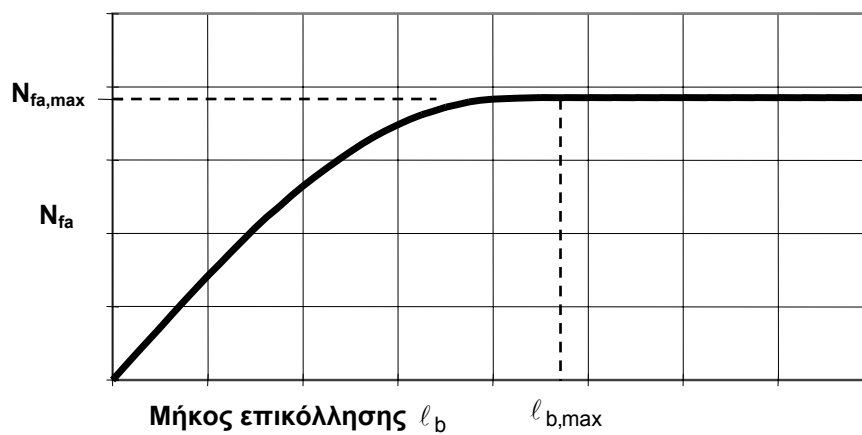
Σχ. 3.3 Ρηγμάτωση δοκού και ενδεχόμενη αστοχία λόγω αποκόλλησης των συνθέτων υλικών (τα βέλη δείχνουν τη φορά επέκτασης της αποκόλλησης).



Σχ. 3.4 Σχέσεις τάσης συνάφειας – ολίσθησης (Zilch et al. 1998).

Κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του δεσμού συνθέτων υλικών – σκυροδέματος (ή τοιχοποιίας) είναι ότι η θραύση των συνθέτων υλικών σπανίως

προηγείται της αποκόλλησης, σε αντίθεση με τις ράβδους οπλισμού στο σκυρόδεμα, οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκές μήκος αγκύρωσης ώστε να εξασφαλίζεται η αστοχία τους – διαρροή τους - πριν την απώλεια συνάφειας. Η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση (η οποία, σημειωτέον, γίνεται λόγω ρηγμάτωσης του υποστρώματος κοντά στη στρώση της κόλλας, δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή αυτής ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του υποστρώματος), δηλαδή η μέγιστη δύναμη “αγκύρωσης”, N_{fa} , αυξάνεται με το μήκος επικόλλησης ℓ_b , μέχρις ότου αυτό λάβει μία οριακή τιμή $\ell_{b,max}$, πέρα από την οποία η δύναμη αποκόλλησης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, ίση με $N_{fa,max}$ (Σχ. 3.5).



Σχ. 3.5 Σχέση δύναμης αποκόλλησης συνθέτων υλικών συναρτήσει του μήκους επικόλλησης.

3.3.2 Αναλυτικό προσομοίωμα

Για σύνθετα υλικά επί σκυροδέματος, η σχέση δύναμης αποκόλλησης (χαρακτηριστική τιμή) – μήκους επικόλλησης του Σχ. 3.5 μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από τις παρακάτω σχέσεις (Holzenkämpfer 1994, Brosens and Van Gemert 1999):

$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,max} : \quad N_{fa} = N_{fa,max} = b_f \sqrt{0.6k_b E_f f_{ctm} t_f} \quad (N) \quad (3.3\alpha)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,max} : \quad N_{fa} = N_{fa,max} \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \left(2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \right) \quad (N) \quad (3.3\beta)$$

$$\ell_{b,max} = 0.6 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_{ctm} k_b}}} \quad (mm) \quad (3.4)$$

όπου k_b ο συντελεστής κάλυψης, ίσος με

$$k_b = \sqrt{\frac{1.5 \left(2 - \frac{b_f}{b} \right)}{1 + \frac{b_f}{100}}} \geq 1 \quad (3.5)$$

Στις παραπάνω σχέσεις είναι b_f = πλάτος ελάσματος (mm), b = πλάτος διατομής στοιχείου σκυροδέματος στο οποίο έχει επικολληθεί το έλασμα (mm), f_{ctm} = μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (N/mm^2), E_f = μέτρο ελαστικότητας συνθέτων υλικών (N/mm^2) και t_f = πάχος ελάσματος συνθέτων υλικών (mm).

Σε όρους **τάσεων**, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η αποκόλληση των συνθέτων υλικών επέρχεται όταν η εφελκυστική τάση σχεδιασμού σε αυτά ($N_{fad}/b_f t_f$) γίνει ίση με την αντοχή που αντιστοιχεί σε αποκόλληση, f_{fbd} :

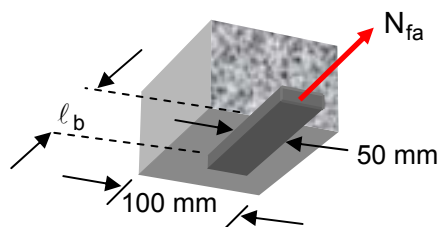
$$\text{για } \ell_b \geq \ell_{b,max} : \quad f_{fbd} = \frac{1}{\gamma_{fb}} \sqrt{\frac{0.6 E_f f_{ctm} k_b}{t_f}} \quad (N, mm) \quad (3.6\alpha)$$

$$\text{για } \ell_b < \ell_{b,max} : \quad f_{fbd} = \frac{1}{\gamma_{fb}} \sqrt{\frac{0.6 E_f f_{ctm} k_b}{t_f}} \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \left(2 - \frac{\ell_b}{\ell_{b,max}} \right) \quad (N, mm) \quad (3.6\beta)$$

Οι παραπάνω σχέσεις θα μπορούσαν, κατά προσέγγιση, να υιοθετηθούν και για υπόστρωμα τοιχοποιίας, αντικαθιστώντας το f_{ctm} με τη μέση αντοχή της τοιχοποιίας σε εφελκυσμό παράλληλα στη διεύθυνση δράσης της N_{fa} .

Παράδειγμα 3.1

Θεωρήστε ένα έλασμα συνθέτου υλικού με πλάτος $b_f = 50$ mm, πάχος $t_f = 1.2$ mm, μέτρο ελαστικότητας $E_f = 180$ kN/mm^2 και εφελκυστική αντοχή $f_f = 3000$ N/mm^2 , το οποίο επικολλάται σε στοιχείο σκυροδέματος πλάτους $b = 100$ mm (Σχ. 3.6). Έστω ότι το σκυρόδεμα έχει εφελκυστική αντοχή $f_{ctm} = 1.9$ N/mm^2 .



Σχ. 3.6

Η εξ. (3.5) δίνει

$$k_b = \sqrt{\frac{1.5 \left(2 - \frac{50}{100} \right)}{1 + \frac{50}{100}}} = 1.22 \geq 1$$

Από την εξ. (3.4) προκύπτει ότι το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης ώστε να μεγιστοποιηθεί η δύναμη που μπορεί να παραλάβει το έλασμα πριν αποκολληθεί ($N_{fa,max}$) είναι $\ell_{b,max} = 0.6 \sqrt{(180000 \times 1.2) / \sqrt{1.9 \times 1.22}} = 226$ mm, οπότε από την εξ. (3.3α) υπολογίζεται $N_{fa,max} = 50 \sqrt{0.6 \times 1.22 \times 180000 \times 1.9 \times 1.2} = 27405$ N \approx 27.4 kN και η τάση στο έλασμα θα είναι $27405 / (50 \times 1.2) = 457$ N/mm².

Εδώ αξίζει να παρατηρήσουμε ότι αν το έλασμα εξαντλούσε την αντοχή του θα μπορούσε να παραλάβει συνολική δύναμη $N_f = 3000 \times (50 \times 1.2) / 1000 = 180$ kN, δηλαδή περίπου 6.5-πλάσια της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση].

Αν το ζητούμενο είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση **σχεδιασμού** (για μήκος επικόλλησης τουλάχιστον ίσο με 226 mm), από την εξ. (3.6) προκύπτει (με συντελεστή ασφάλειας $\gamma_{fb} = 1.5$) $f_{fbd} = 305$ N/mm².