

Για μια μέθοδο διερεύνησης του όρου V_{CR} της διατμητικής αντοχής δοκών οπλισμένου σκυροδέματος

Παππά Χαρίκλεια

Πολιτικός Μηχανικός, pappachara8@gmail.com

Θ. Π. Τάσιος

Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π., tassiost@central.ntua.gr

Εισαγωγή

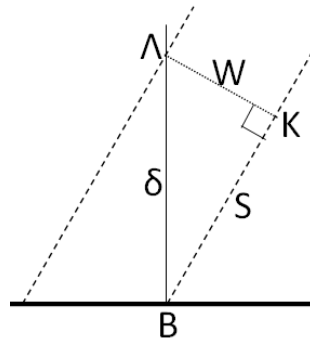
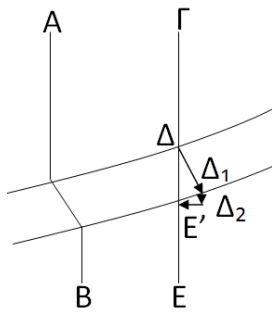
Ως γνωστόν υπό μη σεισμικές συνθήκες, η συμβολή σκυροδέματος, V_{CR} στην συνολική αντίσταση V_R έναντι τέμνουσας σε γραμμικά στοιχεία (δοκοί, υποστυλώματα), μπορεί συνήθως να είναι σημαντική. Παρά τη σημασία αυτής της συμβολής, παρατηρείται ότι ο τρόπος υπολογισμού της τιμής V_{CR} στους σύγχρονους Κανονισμούς (πχ EC2, fib MC2010, ACI κα), είναι υπεραπλοποιημένος ενώ η τιμή του ενδέχεται να είναι εσφαλμένη κατά +40%. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια θεωρητικής ανάλυσης όλων των συνιστωσών συμβολής στην V_{CR} . Για τον υπολογισμό της συμβολής της καθεμιάς από αυτές τις συνιστώσες, ακολουθείται η εξής μέθοδος:

1) Δύναμη εμπλοκής αδρανών (θεωρία J. C. Walraven, 1980): Λαμβάνοντας υπόψη ότι το σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή και τσιμεντοπολλτό, κατά τη διάρκεια της διατμητικής μετατόπισης των μετώπων της ρωγμής αναπτύσσονται επιφάνειες επαφής των αδρανών με ταυτόχρονη αλληλεμπλοκή τους στα δύο χείλη της ρωγμής, εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης του τσιμεντοπολλτού. Οι αντιστάσεις στο άνοιγμα ρωγμής (για κλίση έστω 45^0) είναι: $\Sigma F_Y = \sigma_{pu} * (\Sigma a_x - \mu * \Sigma a_y)$, $\Sigma F_X = \sigma_{pu} * (\Sigma a_y + \mu * \Sigma a_x)$, όπου ΣF_Y , ΣF_X οι συνισταμένες των δυνάμεων στην επιφάνεια επαφής της ρωγμής στις δύο διευθύνσεις, σ_{pu} οι τάσεις κάθετα στην επιφάνεια επαφής των αδρανών, Σa_x , Σa_y η επιφάνεια επαφής των χειλέων της ρωγμής και μ ο συντελεστής τριβής. Οι συνισταμένες των παραπάνω δυνάμεων στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι ίσες με: $\Sigma F_Y' = \Sigma F_Y * \cos 45$, $\Sigma F_X' = \Sigma F_X * \cos 45$. Οπότε η συνολική δύναμη που ασκείται στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι: $\Sigma F = \Sigma F_X' + \Sigma F_Y'$. Η επιφάνεια της ρωγμής είναι $A = x * b$, όπου x είναι το μήκος της ρωγμής και b το πλάτος του δοκιμίου. Οπότε η συνολική δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή στην επιφάνεια της ρωγμής είναι: $\Sigma F_{τελικό} = (\Sigma F * A / 2) / \gamma_c$. 2) Ο μηχανισμός τόξου: Στη θλιβόμενη ζώνη πάνω από το άκρο της λοξής ρωγμής αναπτύσσονται ορθές τάσεις σ_x και και διατμητικές τάσεις τ . Λόγω της συνύπαρξης αυτών προκύπτει μια λοξή θλιπτική τάση σ_{Π} και δημιουργείται ένας λοξός θλιπτήρας, ο οποίος καταλήγει στη στήριξη του φορέα. Με αυτόν τον τρόπο (μηχανισμός τόξου) μεταφέρεται τέμνουσα από το δεξιό στο αριστερό τμήμα της δοκού. 3) Ο διαμήκης οπλισμός ρ_{tot} α) μηχανισμός οιονεί βλήτρου του θλιβόμενου οπλισμού: Η τέμνουσα δύναμη που μεταφέρεται στο σημείο τομής του εφελκόμενου οπλισμού με τον συνδετήρα μέσω του δικτύωματος Morsch προκαλεί εξόλκευση του συνδετήρα και κατά συνέπεια διάθεση για κάμψη του θλιβόμενου οπλισμού εγκάρσια στον άξονά του. Ο θλιβόμενος οπλισμός δεν κάμπτεται διότι εδράζεται καλά στο σκυρόδεμα και έτσι η τέμνουσα αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα κάτω από τον θλιβόμενο οπλισμό.

β) Ο μηχανισμός βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού: Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας που αναλαμβάνει ο εφελκόμενος οπλισμός δίνεται στη βιβλιογραφία (Θ.Π. Τάσιος, 2014). Όσο η ρωγμή διευρύνεται, ο διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός δέχεται δύναμη εγκάρσια στον άξονά του, η οποία τείνει να κάμψει τον διαμήκη οπλισμό. Ο διαμήκης οπλισμός αντιστέκεται σε αυτή τη μετακίνηση μέχρις ότου καμφθεί και εισάγει μια τέμνουσα δύναμη βλήτρου D_{Π} , ανοίγοντας μια οριζόντια ρωγμή κάτωθιν του. γ) Συμβολή του εφελκόμενου οπλισμού στη μείωση του ανοίγματος της ρωγμής: Ο εφελκόμενος οπλισμός μειώνει το άνοιγμα της ρωγμής κατά $\Delta w = \lambda * 2 * \sqrt{2} * \rho_1 * (\tau_m / E_c) * (\alpha_{cr} / d_b) * [h / (2 * c + d_b)] * z$

Μέθοδος

Η ρωγμή διαπερνά τους συνδετήρες AB και ΓΕ (Σχήμα 1). Η δύναμη που μεταφέρεται μέσω του δικτυώματος Morsch προκαλεί εξόλκευση στον συνδετήρα, ο οποίος αντιδρά και συμβάλει στη μείωση του ανοίγματος της ρωγμής. Ο συνδετήρας λειτουργεί ταυτόχρονα ως βλήτρο, (Σχήμα 1), οπότε αντιστέκεται στην παραμόρφωση εγκάρσια στον άξονά του. Ο συνδετήρας από το σημείο Δ καταλήγει στο σημείο Ε' κατακόρυφα. Η διαδρομή που ακολουθεί το σημείο Δ του σκυροδέματος είναι η ΔΔ1Δ2Ε'. Το σημείο Δ μεταφέρεται στη θέση Δ1 λόγω του ανοίγματος της ρωγμής. Έπειτα από τη θέση Δ1 κατευθύνεται στη θέση Δ2 για την συμπλήρωση της εξόλκευσης. Τελικά από το σημείο Δ2 θα καταλήξουμε στο σημείο Ε' λόγω δράσης βλήτρου του συνδετήρα. Ουσιαστικά η συνισταμένη των Δ2Ε με την ΔΔ2, η οποία είναι συνισταμένη των ΔΔ1 και Δ1Δ2, είναι η ΔΕ' είναι η εξόλκευση του συνδετήρα. Είναι: ΔΔ1=w=άνοιγμα ρωγμής, Δ1Δ2=κατακόρυφη μετακίνηση του συνδετήρα, Δ1Ε'=s=ολίσθηση επιφάνειας χείλους ρωγμής, ΔΕ'=εξόλκευση.

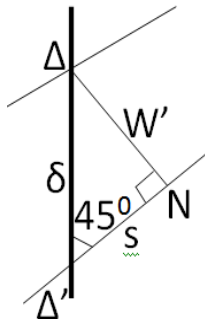


Σχήμα 1 Δράση βλήτρου συνδετήρα **Σχήμα 2** Λεπτομέρεια συνδετήρα στο σημείο τομής με τον εφελκυσμένο οπλισμό – μέγιστο άνοιγμα ρωγμής

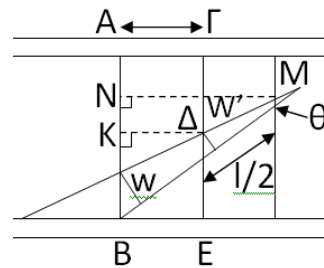
Ο συνδετήρας AB θα επιμεριστεί σε, λόγω χάρη, πέντε τμήματα ίσου μήκους Δx. Θεωρείται ότι στο σημείο B ο συνδετήρας έχει φτάσει το όριο διαρροής του. Ακόμη θεωρείται πως στο σημείο A αγκύρωσης του συνδετήρα με τον διαμήκη θλιβόμενο οπλισμό, η ολίσθηση είναι μηδενική, λόγω της αγκύρωσης. Για δεδομένο άνοιγμα ρωγμής ξεκινάμε με μια υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο A, υπολογίζεται η τάση που αναπτύσσεται σε καθένα από τα πέντε επιμέρους τμήματα του συνδετήρα, κάνοντας επαναλήψεις μέχρι να ικανοποιηθεί η αρχική θεώρηση ότι ο συνδετήρας διαρρέει στο σημείο B. Έτσι αρχικά γίνεται υπόθεση τάσης σ_{sA} , η τάση σε κάθε επόμενο τμήμα του συνδετήρα, σ_{si} είναι ίση με την τάση που αναπτύσσεται στο προηγούμενο τμήμα, $\sigma_{s(i-1)}$, αυξημένη κατά την τάση συνάφειας που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο τμήμα, $\pi \cdot d \cdot \Delta x$, λόγω της ολίσθησης, ανοιγμένη στο συνολικό εμβαδόν του συνδετήρα A_s : $\sigma_{si} = \sigma_{s(i-1)} + \pi \cdot d \cdot \Delta x / A_s$. Η παραμόρφωση σε αυτό το τμήμα: $\epsilon_{si} = \sigma_{sA} / E_s$, (όπου E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα), η δε ολίσθηση του τμήματος είναι $s_i = \epsilon_{si} \cdot \Delta x$. Η τιμή της τάσης συνάφειας λόγω της εξόλκευσης προκύπτει από το διάγραμμα 'τοπικής ολίσθησης – τοπικής τάσης συνάφειας'. Στο τελευταίο τμήμα του συνδετήρα θεωρούμε το ορθογώνιο τρίγωνο του σχήματος 2. Στο παραπάνω τρίγωνο, το τμήμα ΚΛ είναι ίσο με το άνοιγμα της ρωγμής w, το τμήμα ΒΛ είναι ίσο με την εξόλκευση του συνδετήρα, δ, και το τμήμα ΒΚ είναι ίσο με την ολίσθηση s της επιφάνειας της ρωγμής. Θεωρούμε επί το δυσμενέστερο ότι η ρωγμή έχει κλίση 45° , οπότε $w = \delta \cdot \sin 45^\circ$. Έπειτα εξετάζοντας τον δεύτερο συνδετήρα τον οποίο τέμνει η ρωγμή, χωρίζουμε και πάλι κάθε τμήμα άνω και κάτω από τη ρωγμή σε πέντε τμήματα. Ξεκινώντας από το σημείο Γ- σημείο τομής του θλιβόμενου οπλισμού με τον υπό εξέταση συνδετήρα (Σχήμα 3) - και υποθέτοντας μία τάση στο σημείο αυτό, ακολουθούμε την ανωτέρω διαδικασία και καταλήγουμε σε μία τάση στο σημείο Δ. Στο σημείο Δ θα πρέπει να απαιτήσουμε: 1) $\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'}$. Δηλαδή η τάση στο σημείο Δ του πρώτου τμήματος του υπό εξέταση συνδετήρα να είναι ίση με την τάση στο σημείο Δ' του δεύτερου τμήματος αυτού. Αυτό συμβαίνει διότι το μήκος ΔΔ' (Σχήμα 3) είναι πολύ μικρό οπότε

η τάση που επικρατεί στα δύο άκρα θα είναι ίση. Ακόμη γνωρίζουμε ότι το άνοιγμα της ρωγμής στον δεύτερο συνδετήρα είναι $w'=w/2$, δηλαδή το μισό του ανοίγματος του πρώτου συνδετήρα γιατί έχουμε τριγωνική κατανομή του ανοίγματος. Επίσης θα πρέπει να ισχύει το εξής: $2) \delta_{\Gamma\Delta} \cdot \sin 45^\circ + \delta_{\Delta\Gamma} \cdot \sin 45^\circ = w' = w/2$ (Σχήμα 1). Η παραπάνω σχέση εξάγεται εύκολα αν σχηματίσουμε το ορθογώνιο τρίγωνο $\Delta\Delta'N$ που προκύπτει στο σημείο τομής της ρωγμής με τον δεύτερο συνδετήρα ΓΕ.

Στο παρακάτω τρίγωνο στο σχήμα 3: το τμήμα ΔN είναι ίσο με το άνοιγμα της ρωγμής w' , το τμήμα $\Delta\Delta'$ είναι ίσο με την εξόλκωση του συνδετήρα, δ , το τμήμα $\Delta'N$ είναι ίσο με την ολίσθηση s της επιφάνειας της ρωγμής. Οπότε $w' = \delta \cdot \sin 45$. Το άνοιγμα της ρωγμής στον συνδετήρα ΓΕ θα είναι το μισό του ανοίγματος στον συνδετήρα ΑΒ στην περίπτωση του παραδείγματός μας.



Σχήμα 3 Άνοιγμα ρωγμής συνδετήρα ΓΕ



Σχήμα 4 Λεπτομέρεια σημείου τομής ρωγμής και συνδετήρα ΓΕ

Τέλος, θα πρέπει και πάλι η ολίσθηση στα σημεία Γ και Ε να είναι μηδενικές διότι ο συνδετήρας είναι καλά αγκυρωμένος στο θλιβόμενο και εφελκόμενο οπλισμό αντίστοιχα. Δηλαδή: $3) s_{\Gamma} = s_{\text{E}} = 0 \text{ mm}$. Έτσι έχει υπολογισθεί το άνοιγμα ρωγμής και η τάση στο σημείο Δ. Αν δεν ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις επανερχόμαστε στην αρχική υπόθεση της τάσης στο σημείο Γ και ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία. Σε περίπτωση που ικανοποιούνται, συνεχίζεται η διαδικασία για το δεύτερο τμήμα του συνδετήρα. Έχοντας γνωστή την τάση στο σημείο Δ' (καθώς απαιτήθηκε $s_{\Delta} = s_{\Delta'}$), υπολογίζεται η τάση στο πρώτο τμήμα του δεύτερου τμήματος του συνδετήρα ως εξής: Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Ε του συνδετήρα, ενώ η παραμόρφωση και η ολίσθηση στο σημείο αυτό είναι μηδενικές διότι ο εφελκόμενος οπλισμός είναι αγκυρωμένος. Υπολογίζεται ακολούθως η τάση, η παραμόρφωση και η ολίσθηση με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως μέχρις ότου καταλήξουμε στην γνωστή τάση στο σημείο Δ. Με αυτά τα δεδομένα είναι εύκολο από τις σχέσεις του J.C. Walraven, 1980 να υπολογισθούν επιφάνειες A_x και A_y των αδρανών που αναλαμβάνουν την τέμνουσα δύναμη και έπειτα την δύναμη ΣF_x και ΣF_y που αναλαμβάνουν αυτά. Η μέγιστη διάμετρος των αδρανών είναι: $D_{\text{max}} = 32 \text{ mm}$ ενώ η ελάχιστη $D_{\text{min}} = 0 \text{ mm}$. Υπολογίστηκαν οι επιφάνειες A_x και A_y . Με την παραπάνω διαδικασία έχει υπολογιστεί η δύναμη που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα από την εμπλοκή των αδρανών. Αθροίζοντας τη δύναμη από τα αδρανή, από τον μηχανισμό τόξου και από τον διαμήκη οπλισμό, έχει εν τέλει υπολογιστεί η συνολική αντίσταση του σκυροδέματος, V_{CR} , για δεδομένο άνοιγμα λοξής ρωγμής.

Βιβλιογραφία

- 1) J. C. Walraven, H. W. Reinhardt - Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading, 1980
- 2) Θ. Π. Τάσιος - Θεωρία Σχεδιασμού Επισκευών και Ενισχύσεων, 2014
- 3) Χ. Παππά - Συμβολή στη διερεύνηση της εξασθένησης των μηχανισμών αντίστασης σε τέμνουσα υπό ανακυκλιζόμενη ένταση μετά τη διαρροή (με έμφαση στην αντίσταση V_{cd} σκυροδέματος), 2014