

ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΙΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Θεοδώρα Κούκου

Μηχανικός μελετών, Ε.Υ.Δ.Α.Π. Α.Ε., Ιλισίων 9 & Λαοδίκειας 29, Τ.Κ.15771, Ιλίσια

Αριστόδημος Φωτόπουλος

Εργαστηριακός συνεργάτης, Τ.Ε.Ι. Πειραιά-ΣΤΕΦ, Π. Ράλλη & Θηβών 250,12244 Αιγάλεω, Αθήνα

Βασίλειος Σκαράκης

Διευθυντής παραγωγής, Χαλυβουργική Α.Ε. Βιομηχανία Χάλυβα, 20ο χιλ. ΕΟΑΚ,19200, Ελευσίνα

Κάρμεν Μέντρεα

Εργαστηριακός συνεργάτης, Τ.Ε.Ι. Πειραιά-ΣΤΕΦ, Π. Ράλλη & Θηβών 250,12244 Αιγάλεω, Αθήνα

Λέξεις κλειδιά: χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος, μηχανικές ιδιότητες, ενδοτράχυνση,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία αναφέρεται σε συγκολλησιμο χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος B500C. Σειρές δοκιμών υποβάλλονται σε δοκιμή εφελκυσμού με διαφορετικό βαθμό εργοσκλήρυνσης. Στην συνέχεια τα δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμή εφελκυσμού μέχρι θραύσης. Προσδιορίζονται εργαστηριακά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού με και χωρίς προηγούμενη εφελκυστική ενδοτράχυνση. Η εργασία επιδιώκει την ποσοτικοποίηση της μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών των συγκολλησιμων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, που οφείλονται στην ενδοτράχυνση και την αξιολόγηση των επιπτώσεων του βαθμού ενδοτράχυνσης στην περαιτέρω συμπεριφορά του οπλισμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μέτρο της ποιότητας ενός μεταλλικού υλικού είναι η ικανότητα του να λειτουργεί με συγκεκριμένο τρόπο (ο οποίος επιβάλλεται από κανονισμούς), κάτω από διάφορα είδη επιβαλλόμενων τάσεων:

εφελκυστικές, θλιπτικές, διατμητικές, κόπωσης, στρέψης, ερπυσμού κ.λπ. (Μαυροειδής, Π. 2005).

Η δοκιμή του μονο-αξονικού εφελκυσμού, μέσω του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων, επιτρέπει τον υπολογισμό των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αυτού (όριο αναλογίας, όριο ελαστικότητας, όριο διαρροής, εφελκυστική αντοχή, ολκιμότητα, δυσθραυστότητα), ενώ τα πρότυπα και οι κανονισμοί ορίζουν την ποιότητά του ανάλογα με αυτά (Κ.Τ.Χ. 2007, ΕΛΟΤ 1421-2,2005, ΕΛΟΤ 1421-3,2005 και ΕΛΟΤ EN 10002,2001). Στη γενική περίπτωση ορίζονται τρεις κατηγορίες ολκιμότητας: Α – κανονική, Β – μέση και C - υψηλή. Οι χάλυβες υψηλής ολκιμότητας χαίρουν ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στις χώρες με υψηλή σεισμική δραστηριότητα, όπως η Ελλάδα.

Ο χάλυβας B500C που εξετάζεται είναι μια ειδική κατηγορία χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος με υψηλή ολκιμότητα και παράγεται βιομηχανικά με θερμή έλαση και άμεση εν σειρά θερμική κατεργασία (επιφανειακή βαφή με νερό και αυτοεπαναφορά). Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υλικό παρουσιάζει μία σκληρή εξωτερική στοιβάδα επαναφερμένου μαρτενσίτη και μια όλκιμη φερριτο-περλιτική καρδιά. Το εξωτερικό στρώμα προσδίδει στο χάλυβα πολύ καλές αντοχές, ενώ η καρδιά του εξασφαλίζει την απαιτούμενη ολκιμότητα. Η τελική ποιότητά του κρίνεται από το συνδυασμό των δύο αυτών στρωμάτων. Ο Κ.Τ.Χ. και ο ΕΛΟΤ 1421-3 ορίζουν τα όρια των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων που διατίθενται στην αγορά (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Όρια μηχανικών ιδιοτήτων χαλύβων σε εφελκυσμό

Ιδιότητα	Τεχνική κατηγορία ποιότητας B500C
Όριο διαρροής, f_y (MPa)	≥ 500
Λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$	$\leq 1,25$
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, f_t/f_y	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$
Η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u (%)	$\geq 7,5$

Η μετέπειτα καταπόνηση τους κατά την εμπορία, διακίνηση, διαμόρφωση, τοποθέτησή ή κατά τις σεισμικές δονήσεις, μπορεί να προκαλέσουν μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις. Άμεσες συνέπειες αυτών

αποτελούν η μείωση της διατομής και η ενδοτράχυνση δομής. Η μείωση της διατομής οδηγεί στην μείωση των τάσεων του υλικού και η ενδοτράχυνση προκαλεί αύξηση της σκληρότητας, των ορίων διαρροής και θραύσης και μείωση της πλαστικότητας και δυσθραυστότητας (Χρυσουλάκης, Γ.Δ. 1996).

Η βελτίωση του στατικού φορέα των κτιρίων που έχουν υποστεί μόνιμες βλάβες, είτε από έντονη καταπόνηση είτε από διάβρωση, αποτελεί πεδίο μελέτης πολλών ερευνητών. Οι μελέτες αυτές στηρίζονται σε αποτελέσματα ελέγχων της συμπεριφοράς του οπλισμένου σκυροδέματος στο σύνολό του (Sarno, L. Di., 2007, Luccioni, B. M., 2006, Anggawidjaja, D., 2006, Shannag, M. J., 2006). Παράλληλα όμως και στην περίπτωση καταπόνησης του χάλυβα πριν από την τοποθέτηση του, οι τυχόν αλλαγές των μηχανικών του ιδιοτήτων επηρεάζουν δυσμενώς τη συμπεριφορά του υλικού μετά από μια ενδεχόμενη μετέπειτα δοκιμασία καταπόνησης, όπως αυτή που επιβάλλει η δράση ενός σεισμού.

Σκοπός λοιπόν της εργασίας είναι η μελέτη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος μετά από ενδεχόμενη ενδοτράχυνση καθώς και η επιρροή του βαθμού της στην μετέπειτα συμπεριφορά του χάλυβα αυτού.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ομάδες δοκιμίων από χάλυβα B500C, κυκλικής ονομαστικής διατομής Φ20 υποβλήθηκαν σε δοκιμή αξονικού εφελκυσμού. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με σταθερό ρυθμό φόρτισης. Για να διασφαλιστεί η ομοιογένεια του υλικού, τα δοκίμια κόπηκαν από την ίδια βέργα παραγωγής του ίδιου χυτηρίου. Επιλέγησαν τρεις ομάδες (Α, Β, Γ) των 4 δοκιμίων η καθεμία. Η ομάδα Α υπέστη αξονικό εφελκυσμό απευθείας μέχρι την αποκόλληση και οι επόμενες δύο (Β και Γ) προ-εφελκύστηκαν με διαφορετικό βαθμό ενδοτράχυνσης και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε νέα δοκιμή εφελκυσμού, μέχρι την αποκόλληση.

Κόπηκαν δοκίμια μήκους 500mm περίπου, μήκος το οποίο (για τη συγκεκριμένη διατομή) επιτρέπει την ‘δια χειρός’ (manual) μέτρηση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ευ (Ag όπως αναφέρεται στο Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10002.01). Η μέτρηση του μήκους και της μάζας των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με διακριβωμένο εξοπλισμό.

Η δοκιμή εφελκυσμού σε στατική φόρτιση έγινε στην μηχανή εφελκυσμού του εργοστασίου παραγωγής του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, που είναι διακριβωμένη για ελέγχους μηχανικών

αντοχών. Όλα τα δείγματα είχαν στην επιφάνειά τους σήμανση παραγωγού και φυλάσσονται, καθώς και τα διαγράμματα από τη δοκιμή εφελκυσμού σε καθένα από αυτά. Τα δοκίμια χαράχθηκαν ανά 5mm προκειμένου για τον υπολογισμό της ανηγμένης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τον βαθμό εργοσκλήρυνσης που επιτεύχθηκε πριν την δοκιμή εφελκυσμού. Τα δοκίμια της ομάδας Α εφελκύστηκαν πλήρως χωρίς να προηγηθεί κάποια άλλη καταπόνηση. Τα δοκίμια της ομάδας Β, προτού εφελκυστούν πλήρως, προεφελκύστηκαν μέχρι βαθμού εργοσκλήρυνσης ο οποίος να υπερβαίνει οριακά το όριο διαρροής του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε. Η ομάδα Γ καταπονήθηκε με βαθμό εργοσκλήρυνσης μεγαλύτερο, προσεγγίζοντας το μέγιστο φορτίο.

Πίνακας 2. Βαθμός εργοσκλήρυνσης

ΟΜΑΔΑ Α		ΟΜΑΔΑ Β		ΟΜΑΔΑ Γ	
Δοκίμιο	Βαθμός εργοσκλήρυνσης %	Δοκίμιο	Βαθμός εργοσκλήρυνσης %	Δοκίμιο	Βαθμός εργοσκλήρυνσης %
A1	0	B1	5,7	Γ1	12,0
A2	0	B2	5,0	Γ2	10,7
A3	0	B3	5,0	Γ3	11,0
A4	0	B4	5,3	Γ4	12,0

Οι Πίνακες 3...5 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού μέχρι την θραύση των ράβδων της ομάδας Α και της 'εκ νέου' δοκιμής εφελκυσμού των ράβδων των ομάδων Β και Γ, που ακολούθησε μετά από την εργοσκλήρυνσή τους. Ο πίνακας 6 παρουσιάζει τον μέσο όρο των τιμών ανά ομάδα δοκιμίων και την ποσοστιαία μεταβολή τους σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς (όπως αυτά παράγονται) και με τις ελάχιστες επιβαλλόμενες από τις προδιαγραφές τιμές (ΕΛΟΤ).

Εξετάζονται: το φανερό όριο διαρροής (f_y), η εφελκυστική αντοχή (f_t), ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής (f_t/f_y), ο λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής ($f_y/f_{y,nom}$), η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (ϵ_u) και η δυσθραυστότητα στατικού πεδίου φόρτισης (K_s).

Πίνακας 3. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα όπως παράγεται (ομάδα Α)

Μηχ.Ιδιότητες	Δοκιμιο				Κ.Τ.Χ. '07
	A1	A2	A3	A4	
Lo (mm)	300	300	300	300	
So (mm ²)	329,3	329,6	329,3	329,3	
Fy (N)	170725	170805	170423	170764	
fy (MPa)	518	518	518	519	≥500
Ft (N)	212574	211683	212008	212268	
ft (MPa)	646	642	644	645	
ft/fy	1,25	1,24	1,24	1,24	≥1,15 ≤1,35
fy/fy,nom(MPa)	0,95	0,95	0,95	0,95	≤1,25
εu (%)	19,2	19,7	20,7	19,7	≥7,5
K _s = W/Vo (N/mm)	108,3	110,0	116,6	111,4	

Πίνακας 4. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα μετά από εργοσκληρυνση (ομάδα Β)

Μηχ.Ιδιότητες	Δοκιμιο				Κ.Τ.Χ. '07
	A1	A2	A3	A4	
Lo (mm)	300	300	300	300	
So (mm ²)	318,9	319,1	319,7	319,6	
Fy (N)	202930	201388	202631	203376	
fy (MPa)	636	631	634	636	≥500
Ft (N)	211051	212397	213312	213773	
ft (MPa)	662	666	667	669	
ft/fy	1,04	1,05	1,05	1,05	≥1,15 ≤1,35
fy/fy,nom(MPa)	0,99	0,98	0,98	0,98	≤1,25
εu (%)	11,0	11,8	11,3	12,7	≥7,5
K _s = W/Vo (N/mm)	64,7	70,4	67,2	76,1	

Πίνακας 5. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα μετά από εργοσκληρυνση (ομάδα Γ)

Μηχ.Ιδιότητες	Δοκιμιο				Κ.Τ.Χ. '07
	A1	A2	A3	A4	
Lo (mm)	300	300	300	300	
So (mm ²)	307,5	309,5	309,2	307,5	
Fy (N)	214164	213194	213445	214112	
fy (MPa)	697	689	690	696	≥500
Ft (N)	214744	214558	214719	214460	
ft (MPa)	698	693	694	698	
ft/fy	1,00	1,01	1,01	1,00	≥1,15 ≤1,35
fy/fy,nom(MPa)	1,02	1,01	1,02	1,02	≤1,25
εu (%)	5,3	7,2	7,2	4,7	≥7,5
K _s = W/Vo (N/mm)	31,0	42,0	42,4	27,6	

Πίνακας 6. Μέσοι όροι των μηχανικών ιδιοτήτων των ράβδων κάθε ομάδας

Μηχ.Ιδιότητες	Ομάδες			% μεταβολή της Β ως προς την Α	% μεταβολή της Γ ως προς την Α
	A	B	Γ		
fy (MPa)	518,2	634,4	693,0	22,4	33,7
ft (MPa)	644,1	665,9	695,9	3,4	8,0
ft/fy	1,243	1,050	1,004	-15,5	-19,2
fy/fy,nom(MPa)	0,954	0,984	1,019	3,1	6,8
εu (%)	19,79	11,71	6,08	-40,8	-69,3
K _S = W/Vo (N/mm)	111,56	69,6	35,75	-37,6	-68,0

Μια μικρή εργοσκήρυνση προκαλεί μεγάλη αύξηση του ορίου διαρροής (22.4%), μικρή αύξηση του ορίου θραύσης (3.4%) και κατά συνέπεια δραματική μείωση του λόγου του ορίου θραύσης προς το όριο διαρροής ft/fy (15.5%). Η μεγάλη καταπόνηση (εργοσκήρυνση) προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση του ορίου διαρροής (33.7 %), μικρή αύξηση του ορίου θραύσης (8.0 %) και δραματική μείωση του λόγου ft/fy (19.2 %). Και στις δυο περιπτώσεις η παραμόρφωση της ράβδου πάνω από το όριο διαρροής καθιστά ακατάλληλο το χάλυβα, βάσει του ΚΤΧ'07. Ο λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής (fy/fy,nom) αυξάνεται κατά 3.1% και 6.8% αντίστοιχα. Παρόλη την αύξηση ο λόγος συνεχίζει να πληροί τις προϋποθέσεις των προδιαγραφών.

Η δυσθραυστότητα στατικού πεδίου φόρτισης (K_s) και η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (ε_u), παρουσιάζουν μείωση της τιμής τους. Η παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο προσεγγίζει τα όρια του κανονισμού κατά το μικρό βαθμό εργοσκήρυνσης και βγαίνει εκτός ορίου κατά την εργοσκήρυνση λίγο πριν το μέγιστο φορτίο.

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα με τα όρια του κανονισμού, οι ιδιότητες που παρουσίασαν πρόβλημα υπέρβασης ήταν ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής (ft/fy) και στις δύο περιπτώσεις εργοσκήρυνσης, καθώς και η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (ε_u), για την περίπτωση εργοσκήρυνσης λίγο πριν το μέγιστο φορτίο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις δοκιμές προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Η καταπόνηση των ράβδων με δυνάμεις που ξεπερνάνε το όριο διαρροής τους, προκαλεί μόνιμη παραμόρφωση (επιμήκυνση) και την ενδοτράχυνση της δομής του υλικού. Η επιμήκυνση έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της

πραγματικής διατομής του χάλυβα και η ενδοτράχυνση προκαλεί μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων του.

Συσχετίζοντας με τα όρια του Κ.Τ.Χ. '07 ($1.15 \leq f_t/f_y \leq 1.35$), ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, παρουσιάζει μείωση (που εξαρτάται από το βαθμό εργοσκλήρυνσης) και τοποθετεί όλες τις τιμές εκτός ορίων. Η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, παρουσιάζει μεγάλη μείωση αντίστοιχα. Για το δεύτερο βαθμό εργοσκλήρυνσης (λίγο πριν το μέγιστο φορτίο) παρατηρείται οριακή υπέρβαση των ορίων του Κ.Τ.Χ. '07 ($\epsilon_u \geq 7.5$). Η υψηλή ποιότητα του χάλυβα που παράγεται σε σχέση με τις απαιτήσεις ισορροπεί στην συγκεκριμένη περίπτωση την αρνητική επιδραση της καταπόνησης στο μέγεθος αυτό.

Σε κάθε περίπτωση η καταπόνηση που υπερβαίνει το όριο διαρροής καθιστά το υλικό ακατάλληλο για χρήση (εκτός προδιαγραφών).

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Anggawidjaja, D., Ueda, T., Dai, J., Nakai, H. "Deformation capacity of RC piers Wrapped by new fiber-reinforced polymer with large fracture strain", Cement & concrete Composites, No 28(2006)914-927.

Μαυροειδής, Π., «Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα (2005).

Jamal Shannag, M., Al-Atek, S., "Flexural behavior of strengthened concrete beams with corroding reinforcement", Construction and Building Materials, No 20(2006)834-840.

Luccioni, B.M., Rougier, V.C., "A plastic damage approach for confined concrete", Computers and Structures, No 83(2005)2238-2256.

Di Sarno, L., Pecce, M.R., Fabbrocino, G., "Inelastic response of composite steel and concrete base column connections", Journal of Constructional steel Research, No 63(2007)819-832.

Χρυσουλάκης, Γ.Δ. & Παντελής, Δ.Ι., «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα (1996)

Σχέδιο Κανονισμού Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος, ΚΤΧ Αθήνα, (2007).

ΕΛΟΤ EN 10002 – 1: 2001 (Ε), Μεταλλικά υλικά – Δοκιμές εφελκυσμού – Μέρος 1: Μέθοδος δοκιμής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, EN 10002-1:2001 (Ε) ICS:77.040.10-2001(2001)

ΕΛΟΤ EN 10080: 2005 (Ε), Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες – Γενικές απαιτήσεις.

ΕΛΟΤ 1421 – 3: Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες – Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C.

