$\begin{array}{l} \Delta OKIME\Sigma \; \Phi OPTI\Sigma H\Sigma \; TO\Xi \Omega T\Omega N \; \Delta IKTY \Omega T\Omega N \; \Delta OK\Omega N \; Y \Pi O\Sigma THPI \Xi H\Sigma \\ \Sigma HPA \Gamma \Gamma \Omega N \end{array}$

Κων/νος Μιλτιάδης Γ. Σακκάς

Μηχανικός Μεταλλειών, Υ.Δ Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, Τομέας Μεταλλευτικής ΕΜΠ Αθήνα, Ελλάδα e-mail: sakkasdin@yahoo.gr

Παύλος Π. Νομικός

Λέκτορας Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, Τομέας Μεταλλευτικής ΕΜΠ Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>nomikos@metal.ntua.gr</u>

Σπύρος Ν. Δελένδας

Διευθύνων Σύμβουλος MEVACO AE Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>info@mevaco.gr</u>

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός Καθηγητής Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, Τομέας Μεταλλευτικής ΕΜΠ Αθήνα, Ελλάδα e-mail: <u>sofianos@metal.ntua.gr</u>

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μεταλλικά πλαίσια από ευθύγραμμες και τοξωτές δικτυωτές δοκούς αντικαθιστούν συχνά τους φορείς ολόσωμης διατομής ως μέσο προσωρινής υποστήριξης σηράγγων. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η φέρουσα ικανότητα τοξωτών δικτυωτών δοκών υποστήριξης σηράγγων με δοκιμές φόρτισης πλήρους κλίμακας. Η τοξωτή δοκός στηρίζεται αμφιέρειστα και φορτίζεται οριζόντια μέχρι την αστοχία. Διαπιστώνεται ότι όλες οι τοξωτές δικτυωτές δοκοί που δοκιμάσθηκαν εμφάνισαν ένα κοινό τρόπο αστοχίας, με λυγισμό της κάτω ράβδου τους σε μήκος ενός φατνώματος. Τα αναπτυσσόμενα βέλη κάμψης στο μέσον τους ανέρχονται σε ποσοστό μεγαλύτερο από 10 % του ύψους του τόξου. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων συγκρίνονται με έναν απλουστευμένο θεωρητικό υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας της δοκού.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως μεταλλικά δικτυωτά πλαίσια υποστήριξης σηράγγων (Φωτ. 1) αναφέρονται οι μεταλλικοί φορείς που αποτελούνται από τοξωτές και ευθύγραμμες μεταλλικές δικτυωτές δοκούς (ΜΔΔ). Οι δικτυωτοί αυτοί φορείς αντικαθιστούν συχνά τους φορείς ολόσωμης διατομής, ως μέσο προσωρινής υποστήριξης σηράγγων, και πλεονεκτούν πολλές φορές σε σχέση με αυτούς, «[1]», «[2]». Το χαμηλό βάρος τους, δίνει τη δυνατότητα να τοποθετούνται ευκολότερα από λιγότερο εργατικό προσωπικό και εξοπλισμό και με μεγαλύτερη ασφάλεια. Η χρήση τους συνδυάζεται αποδοτικά με τη τεχνική υποστήριξης με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όπου επιπλέον λειτουργούν ως οπλισμός της επένδυσης. Τα παραδείγματα εφαρμογής τους είναι πολλά τόσο στην Ελλάδα, (π.χ. σήραγγες της Εγνατίας Οδού, της Π.Α.Θ.Ε, του Μετρό της Αθήνας, κ.α.), όσο και στο εξωτερικό.



Φωτ. 1- Χρήση δικτυωτών δοκών για την υποστήριξη σήραγγας.

Οι ΜΔΔ αποτελούνται από ράβδους οπλισμού σκυροδέματος διαμέτρου 18 έως 34 mm, με συνδετήρες διαμέτρου 8 έως 12 mm συγκολλημένους σε αυτές, ώστε να σχηματίζεται ένας φορέας με τη μορφή χωροδικτυώματος με τρείς ή τέσσερις κύριες ράβδους (Σχ. 1). Κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλού ορίου διαρροής, συνήθως μεγαλύτερο από 500 MPa «[3]». Η διαδικασία κατασκευής «[4]» τους περιλαμβάνει την κοπή των ράβδων στο επιθυμητό μήκος και την κάμψη τους ώστε να λάβουν το σχήμα διατομής της σήραγγας. Στη συνέχεια οι ράβδοι μαζί με τα υπόλοιπα εξαρτήματα (φλάντζες, γωνίες, ενδιάμεσοι αποστάτες) τοποθετούνται σε καλίμπρα και προ-συναρμολογούνται ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή. Η επόμενη φάση είναι η φάση της τελικής συγκόλλησης με ηλεκτροσυγκόλληση. Τέλος γίνονται τακτικοί δειγματοληπτικοί έλεγχοι διαστάσεων για τη διαπίστωση τυχών αποκλίσεων.



Σχ. 1- Φάτνωμα και διατομή δικτυωτής δοκού υποστήριξης σηράγγων.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι πειραματικές δοκιμές φόρτισης των τοξωτών δικτυωτών δοκών εκτελέσθηκαν με σκοπό να ελεγχθεί η φέρουσα ικανότητα τους για την ιδανική περίπτωση ισοστατικής δικτυωτού δοκού που φορτίζεται με οριζόντια δύναμη στη στήριξη και να διερευνηθεί ο τρόπος αστοχίας τους στην πράξη. Η πραγματοποίηση των πειραμάτων έγινε στο εργοστάσιο της εταιρείας MEVACO A.E.

Στη Φωτ. 2 φαίνεται η πειραματική διάταξη της δοκιμής. Μία οριζόντια δοκός διατομής Η φέρει δύο διατάξεις που υλοποιούν τις στηρίξεις του τοξωτού φορέα. Η άρθρωση υλοποιείται από στερεό μεταλλικό τμήμα συγκολλημένο στη δοκό, που συνδέεται μέσω πύρου με ημικυκλικό μεταλλικό τμήμα πάνω στο οποίο κοχλιώνεται η μία άκρη της τοξωτής ΜΔΔ. Το άλλο άκρο της δοκού κοχλιώνεται σε αντίστοιχη διάταξη. Το φορτίο μεταβιβάζεται στη στήριξη της δοκού με οριζόντιο έμβολο που ωθείται από χειροκίνητη υδραυλική αντλία δυναμικότητας 200 bar. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφεται η πίεση του υδραυλικού ρευστού στο έμβολο και από τη γνωστή διατομή του εμβόλου υπολογίζεται η οριζόντια δύναμη στη στήριξη της δοκού. Ταυτόχρονα μετρείται το βέλος κάμψης της δοκού στο μέσο του τόξου. Η δοκιμή σταματάει στο σημείο εκείνο, πέραν του οποίου η μετακίνηση του εμβόλου δεν οδηγεί σε αύξηση της πίεσης του λαδιού.



Φωτ. 2- Πειραματική διάταξη φόρτισης τοξωτών δικτυωτών δοκών.

Στο Σχ. 2 δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα και ορίζονται οι συμβολισμοί των διατομών και της γεωμετρίας των ράβδων της δικτυωτής δοκού. Το ύψος του τόξου του φορέα είναι fo και η βάση του έχει μήκος L. Η διατομή έχει ύψος H και πλάτος B. Οι κάτω κύριες ράβδοι έχουν διατομή S_1 και η άνω ράβδος S_2 ενώ ο κεντροβαρικός άξονας της διατομής βρίσκεται σε απόσταση e από το άνω όριο της διατομής.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 δοκιμές φόρτισης για δοκούς διαφορετικού ύψους και διαφορετικής διατομής κυρίων ράβδων. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία του φορέα και της διατομής των δοκών που δοκιμάσθηκαν. Κάθε δοκός συμβολίζεται με τα μεγέθη H_1 - S_1 - S_2 .

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα 12 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν συνολικά παρατηρήθηκε μία κοινή μορφή αστοχίας με λυγισμό των κάτω ράβδων της δοκού στο μήκος ενός φατνώματος. Οι δοκοί

αστοχούσαν στο μεσαίο φάτνωμα τους ή σε γειτονικό προς αυτό. Ο λυγισμός τη ράβδου εμφανιζόταν κυρίως εντός του επιπέδου του φορέα αλλά και κάθετα σε αυτό.



Γ. Σχ. 2- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορέα και συμβολισμοί των μεγεθών της διατομής

α/α	Τύπος	H (mm)	B (mm)	$S_1 (mm)$	$S_2 (mm)$	D (mm)	L (mm)	fo (mm)
1	70-22-32	124	140	22	32	10	3532	571
2	95-22-32	149	180	22	32	10	3531	570
3	110-22-32	164	220	22	32	12	3541	542
4	130-22-32	184	220	22	32	12	3535	542
5	110-25-32	170	220	25	32	12	3536	530
6	130-20-28	180	220	20	28	12	3543	515
7	50-20-28	100	100	20	28	10	3543	525
8	70-20-28	118	140	20	28	10	3543	527
9	110-20-28	158	220	20	28	12	3538	528
10	95-25-32	152	180	25	32	12	3540	520
11	95-20-28	143	180	20	28	10	3547	519
12	70-25-32	127	140	25	32	10	3545	515

Πίν. 1- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φορέα και διατομής δικτυωτών δοκών δοκιμών φόρτισης.

Στα Σχ. 3 και 4 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου βέλους κάμψης για τις δικτυωτές δοκούς 70-22-32 και 130-20-28 αντίστοιχα. Επιπλέον στις φωτογραφίες 3 και 4 δείχνονται οι δοκοί μετά τη δοκιμή και η μορφή της αστοχίας τους.



Σχ.3- Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης της δικτυωτής δοκού 70-22-32.



Φωτ. 3- Μορφή αστοχίας της δικτυωτής δοκού 70-22-32.

Όπως φαίνεται από τη Φωτ. 3, η οποία έχει ληφθεί από κάτω από τη δοκό, η δοκός αστόχησε με λυγισμό της μίας κάτω ράβδου κάθετα στο επίπεδο του φορέα και σε μήκος ενός φατνώματος, στο μέσον.



Σχ.4- Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης της δικτυωτής δοκού 70-22-32.



Φωτ. 4- Μορφή αστοχίας της δικτυωτής δοκού 70-22-32.

Στη Φωτ. 4 εξάλλου είναι εμφανής ο τρόπος αστοχίας της δοκού με λυγισμό της κάτω ράβδου μέσα στο επίπεδο του φορέα με μήκος λυγισμού ίσο με το μήκος ενός φατνώματος. Το φάτνωμα που εμφανίσθηκε η αστοχία ήταν επίσης το μεσαίο.

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα των Σχ. 3 και 4 το βέλος κάμψης της δοκού στο

μέσον του τόξου στο μέγιστο φορτίο ανήλθε σε 62 mm για τη δοκό 70-22-32 και σε 40 mm για τη δοκό 130-20-28, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 10.9 % και 7.8 % του αρχικού ύψους του τόξου του φορέα αντίστοιχα. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στις υπόλοιπες δοκιμές, με βέλη κάμψης της τάξης του 10 % του ύψους του τόξου και ελάχιστη και μέγιστη τιμή 7.8 % και 18 % αντίστοιχα.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

Η φέρουσα ικανότητα των δικτυωτών δοκών των δοκιμών φόρτισης υπολογίσθηκε θεωρητικά σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Baumann και Beetzle «[4]». Ο φορέας της δοκού επιλύεται ως ένα στατικά ορισμένο τόξο με οριζόντια φόρτιση στη στήριξη και υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη M, Q, N του φορέα. Στη συνέχεια και με βάση το μοντέλο του Σχ. 5 υπολογίζονται οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στις κύριες ράβδους του φορέα σε μία θέση.



Σχ.5- Καθολικά εντατικά μεγέθη του φορέα και τοπικά των ράβδων.

Οι αξονικές δυνάμεις στις κύριες ράβδους του φορέα υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$No = N \times Ao/(Ao + Au) - M/z$$
(1)

$$Nu = N \times Au/(Ao + Au) + M/z$$
(2)

Όπου Νο και Νu η αξονική δύναμη των άνω και κάτω ράβδων αντίστοιχα, Αο και Au το εμβαδό της διατομής των άνω και κάτω ράβδων αντίστοιχα και z κατακόρυφη απόσταση των αξόνων των άνω και κάτω ράβδων. Λαμβάνοντας υπόψη τη μορφή αστοχίας, που παρουσίασαν οι δοκοί κατά τις δοκιμές, η φέρουσα ικανότητα τους υπολογίζεται ελέγχοντας τις κάτω ράβδους έναντι λυγισμού στο μέσον του τόξου του φορέα. Το μήκος λυγισμού λαμβάνεται ίσο με το μήκος ενός φατνώματος της δοκού. Οι τιμές των αξονικών δυνάμεων των ράβδων αυξάνονται σύμφωνα με τη μέθοδο του συντελεστή ω και υπολογίζεται το οριακό φορτίο στο οποίο οι κάτω ράβδοι του φορέα αστοχούν σε λυγισμό.



Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή το οριακό φορτίο υπολογίζεται σε 35 kN για τη δοκό 70-22-32 και σε 34 kN για τη δοκό 130-20-28. Η απόκλιση από τις πειραματικές μετρήσεις είναι 10 % και 0.5 % αντίστοιχα. Στο σύνολο των 12 πειραμάτων οι αποκλίσεις του υπολογισμού του οριακού φορτίο με την απλουστευμένη μεθοδολογία των Baumann και Beetzle «[1]» ήταν από 0.2 % έως 17 % με μέσο όρο 5.3 %.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα μεταλλικά δικτυωτά πλαίσια υποστήριξης σηράγγων αντικαθιστούν συχνά τα πλαίσια ολόσωμης διατομής για την προσωρινή υποστήριξη μίας σήραγγας. Συνεργάζονται με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της επένδυσης επιτρέποντας το να γεμίσει τα κενά του πλαισίου ενώ ταυτόχρονα ενισχύουν το κέλυφος της επένδυσης. Ο φορέας τους αναλαμβάνει τα όποια πρώιμα φορτία της εκσκαφής μέχρι την σκλήρυνση του σκυροδέματος.

Για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας δικτυωτών δοκών υποστήριξης σηράγγων δοκιμάσθηκαν 12 τέτοιες δοκοί με φόρτιση μέχρι αστοχίας σε πειραματικές δοκιμές πλήρους κλίμακας. Ο φορέας της δοκού στηρίζεται αμφιέρειστα και φορτίζεται οριζόντια στη στήριξη. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης μετρείται και καταγράφεται το εφαρμοζόμενο φορτίο και το βέλος κάμψης στο μέσον της τοξωτής δικτυωτής δοκού.

Διαπιστώνεται ότι όλες οι τοξωτές δικτυωτές δοκοί που δοκιμάσθηκαν παρουσιάζουν ένα κοινό τρόπο αστοχίας, με λυγισμό της κάτω ράβδου τους σε μήκος ενός φατνώματος. Τα αναπτυσσόμενα βέλη κάμψης στο μέσον τους ανέρχονται σε ποσοστό έως και μεγαλύτερο από 10 % του ύψους του τόξου. Σημειώνεται εν τούτοις ότι η πειραματική διάταξη δεν λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό που μπορεί να υφίσταται η τοξωτή δοκός κατά την επαφή της με το περιβάλλον πέτρωμα μίας σήραγγας. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών συγκρίνονται με έναν απλουστευμένο θεωρητικό υπολογισμό του οριακού φορτίου που έδωσε συγκρίσιμα αποτελέσματα με τις πειραματικές μετρήσεις.

5.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] BAUMANN TH., BEETZLE M. "Investigation of the performance of Lattice Girders in Tunnelling", *Rock Mechanics and Rock Engineeirng* Vol 17, 1984, pp. 67-81.
- [2] ΣΟΦΙΑΝΟΣ Α.Ι., "Μέτρα υποστήριξης Σηράγγων", Σημειώσεις Πανεπιστημιακών Διαλέξεων Ε.Μ.Π., 2005
- [3] AFTES "Recommendations relatives a "Calcul, fabrication et mise en oeuvre des cintres reticules" *Tunnels et ouvrages souterrains*. Vol. 156, 1999, pp. 343-359.
- [4] ΜΕVACO ΑΕ, "Εύκαμπτα πλαίσια μεταλλικής κατασκευής" Διαφημιστικό έντυπο εταιρείας, 2007.

TESTING OF LATTICE GIRDER ARCHES FOR TUNNEL SUPPORT

Konstantinos Miltiadis G. Sakkas Mining Engineer, Msc. Tunnelling Laboratory, Section of Mining, N.T.U.A. Athens, Greece e-mail: sakkasdin@yahoo.gr

Pavlos P. Nomikos

Lecturer, PhD Tunnelling Laboratory, Section of Mining, N.T.U.A. Athens, Greece e-mail: <u>nomikos@metal.ntua.gr</u>

Spyros N. Delendas MEVACO S.A. Athens, Greece e-mail: info@mevaco.gr

Alexandros I. Sofianos Professor, PhD Tunnelling Laboratory, Section of Mining, N.T.U.A. Athens, Greece e-mail: <u>sofianos@metal.ntua.gr</u>

SUMMARY

Lattice girders often replace the conventional steel sets as a means of temporary tunnel support as they have several advantages over the latter. In this study the load carrying capacity of arched lattice girders is examined through full scale loading tests. The arched lattice girder beam is simply supported and loaded horizontally at the support until failure. It is observed that all beams tested exhibited a common failure mode with buckling of the lower chords over the length between two welded sections of the lower chord of the girder. Deflection of the girders at midspan was found to be up to more that 10 % of the arch height at the ultimate load. The experimental results compare well with a simplified static analysis for the calculation of the ultimate load.