

Επενδύσεις σηράγγων μονολιθικού κελύφους με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Θ. Β. Παναγιωτίδης
Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Υπογείων Έργων BASF C.C. Ελλάς Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρουσίαση αυτή περιγράφει τη μέθοδο της μόνιμης επένδυσης σηράγγων μονολιθικού κελύφους με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Περιγράφεται πως η μέθοδος αυτή μπορεί να μειώσει το κόστος και το χρόνο κατασκευής ενός έργου, τη διαδικασία σχεδιασμού του έργου που θα πρέπει να ακολουθηθεί και τέλος τον τρόπο διαχείρισης έργου και τις αρχές της σύμβασης που θα πρέπει να υιοθετηθούν, έτσι ώστε να προκύψουν το μέγιστο δυνατό όφελος. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η νέα φιλοσοφία αναφορικά με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η οποία εξασφαλίζει τη ποιότητα και την ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος. Ο έλεγχος των εισροών νερού θεωρείται σημαντικό θέμα και παρουσιάζεται επίσης. Τέλος παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τη παθητική πυροπροστασία του σκυροδέματος στις σήραγγες.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι πιθανό, ο όρος «Επενδύσεις Σηράγγων Μονολιθικού Κελύφους με Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα», να μην γίνεται αντιληπτός με τον ίδιο τρόπο από το σύνολο των ανθρώπων που ασχολούνται με τα υπόγεια έργα. Η παρακάτω ερμηνεία, αποτελεί και τη βάση αυτής της παρουσίασης:

Μέθοδος Κατασκευής Μονολιθικού Κελύφους: Οι στατικές απαιτήσεις του φορέα της σήραγγας, ικανοποιούνται από ένα μονολιθικό στοιχείο, το οποίο μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες στρώσεις.»

Το πρακτικό αποτέλεσμα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι, όλο το σκυρόδεμα που θα χρησιμοποιηθεί για τη σήραγγα, θα λάβει μέρος στη τελικό φορέα. Συγκρινόμενη με τη παραδοσιακή μέθοδο κατασκευής σηράγγων, όπου το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται στο μέτωπο της σήραγγας, θεωρείται ως προσωρινή υποστήριξη, η οποία δεν συνυπολογίζεται στο τελικό φορέα, αυτή είναι πιθανόν η διαφορά με τη μεγαλύτερη σημασία.

Η υποστήριξη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αποτελεί μια πολύ ευέλικτη κατασκευαστική μέθοδο, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του φορέα, δεν χρειάζονται καλούπια, η συνεργασία της με άλλα στοιχεία, όπως αγκύρια, μεταλλικά πλαίσια, ράβδοι οπλισμού κλπ. είναι άριστη, ενώ η τελική κατασκευή μπορεί να γίνει σε διάφορα στάδια, ανάλογα με τη κατάσταση. Η ευελιξία αυτή είναι και το κλειδί της νέας μεθόδου αναφορικά με τη μείωση κόστους και χρόνου, αλλά ταυτόχρονα είναι και ο λόγος που πρέπει να εφαρμοστεί ένα διαφορετικό πακέτο απαιτήσεων για την επιτυχημένη εφαρμογή της. Οι απαιτήσεις αυτές έχουν να κάνουν με τη σχεδιαστική μέθοδο υποστήριξης, το μοντέλο της σύμβασης που θα χρησιμοποιηθεί και τη δομή της αλυσίδας: πελάτης – σύμβουλος πελάτη – επίβλεψη – ανάδοχος, ή οποία είναι κρίσιμη για την εξέλιξη των εργασιών.

Το σκυρόδεμα που θα χρησιμοποιηθεί σαν μέρος της τελικής επένδυσης, θα πρέπει οπωσδήποτε να έχει ικανοποιητική ποιότητα και ανθεκτικότητα. Έτσι, ο σωστός χειρισμός της εισροής νερού, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τη προσέγγιση της μεθόδου κατασκευής σηράγγων με μονολιθικό κέλυφος. Εάν οι τοπικές συνθήκες στο μέτωπο, προσομοιάζουν με έντονη βροχόπτωση, τότε η εφαρμογή της μεθόδου αυτής καθίσταται αδύνατη. Η συστηματική διάτρηση μπροστά από το μέτωπο σε συνδυασμό με την εφαρμογή της μεθόδου της προενεμάτωσης (pre-injection), μπορούν να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα. Το να βασιστεί κάποιος στη μέθοδο των προενεματώσεων και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

για να έχει μια τελείως στεγνή σήραγγα στη περίοδο χρήσης της, αποτελεί συνήθως ουτοπία. Σε ορισμένες σήραγγες, μερικές σταγόνες μπορεί να είναι αποδεκτές, ενώ σε άλλες όχι. Η συνειδητοποίηση της κατάστασης αυτής από την αρχή, θα οδηγήσει στη λήψη των σωστών μέτρων και στην επιτυχία του αρχικού σχεδιασμού.

Σε σύγκριση με τη παραδοσιακή μέθοδο, με τη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σαν προσωρινή υποστήριξη (το πάχος και η ποιότητα του οποίου είναι πολύ κοντά στην ικανοποίηση της ολικής στατικής απαίτησης) και της τελικής επένδυσης με έγχυτο σκυρόδεμα μεγάλου πάχους, η χρήση της μεθόδου της επένδυσης σηράγγων με μονολιθικό κέλυφος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μπορεί να είναι έως και 50% οικονομικότερη. Ο λόγος που χρήση της δεν έχει γίνει ευρέως αποδεκτή έχει να κάνει περισσότερο με έλλειψη ενημέρωσης, συντηρητισμό αλλά και την υπέρβαση που πρέπει να γίνει για τη σωστή εφαρμογή της, η οποία πηγάζει από την ανάγκη για ολοκληρωτική στροφή τόσο στο τρόπο σκέψης όσο και στη πολιτική που εφαρμόζεται σε τέτοια έργα. Τα κύρια εμπόδια μπορούν να συνοριστούν ως εξής:

- Πολλά από τα στελέχη που λαμβάνουν αποφάσεις για λογαριασμό του Κυρίου του Έργου, συνήθως δεν είναι σε θέση να κρίνουν αυτά που τους προτείνει ο σύμβουλος του έργου και συνήθως απορρίπτουν οτιδήποτε μοιάζει να είναι πειραματικό.
- Μια φυσική και προφανής απόκλιση στη γνώση, ικανότητα και πρωτοβουλία μεταξύ των εταιριών συμβούλων, να παρακινήσουν και να προωθήσουν λύσεις διαφορετικές από αυτές που είναι γνωστές και αποδεδειγμένες στη τοπική κοινωνία. Έτσι, οι αρχές σχεδιασμού και οι τεχνικές προδιαγραφές, εμποδίζουν την ανάπτυξη πιο οικονομικών λύσεων, ακόμα και αν αυτές οι λύσεις προτείνονται κατά τη διαδικασία του διαγωνισμού.
- Συμβατικά τεύχη που αναπτύσσονται στη λογική της πάγιας μελέτης, συγκεκριμένων πρακτικών λύσεων και κλειστών ποσοτήτων, τα οποία δεν αφήνουν περιθώριο για προσαρμογές και βελτιώσεις. Τα συμβατικά τεύχη, δίνουν συνήθως μεγάλη προσοχή στις λεπτομέρειες, έτσι ώστε να προστατέψουν το κύριο του έργου από τους «κακούς» εργολάβους, χάνοντας έτσι την ευκαιρία να επενδύσουν θετικά πάνω στην εμπειρία του εργολάβου.

Η ανάγκη για υπόγειες κατασκευές, ειδικά στις αστικές περιοχές, αυξάνεται συνεχώς σε όλο τον κόσμο. Επίσης, η ανάγκη αυτή είναι συνήθως μεγαλύτερη από τα διαθέσιμα κεφάλαια. Και αυτό ισχύει τόσο για τις υπανάπτυκτες όσο και για τις ανεπτυγμένες χώρες. Έτσι, αυτή η έλλειψη κεφαλαίων, είναι πιθανότερα ο σημαντικότερος λόγος για το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την έννοια της επένδυσης σηράγγων μονολιθικού κελύφους.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Η συνήθης πρακτική στο σχεδιασμό σηράγγων, είναι η χρησιμοποίηση των διερευνητικών διατρήσεις για τη ποιότητα της εδαφικής μάζας, σαν βάση για τη μελέτη. Η υπόθεση αυτή συνήθως συνδυάζεται με την αρχική (προσωρινή) υποστήριξη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, η οποία ακολουθείται από τη μόνιμη υποστήριξη με έγχυτο σκυρόδεμα, σε μεταγενέστερο στάδιο. Ανάμεσα στις δύο στρώσεις χρησιμοποιείται συνήθως μια στεγανοποιητική μεμβράνη από PVC. Η συνηθισμένη αυτή προσέγγιση, είναι υπέρ – συντηρητική, απαιτεί μεγάλο χρόνο κατασκευής και συμπερασματικά κοστίζει πολύ περισσότερο από αυτό που πραγματικά είναι απαραίτητο. Δύο από τους λόγους για το υψηλό κόστος είναι οι εξής:

- Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αρχική υποστήριξη είναι στατικά ισοδύναμη με τη τελική επένδυση, καθώς ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι τη τοποθέτηση της τελικής επένδυσης μπορεί να είναι αρκετοί μήνες.

- Η τελική επένδυση είναι προμελετημένη (συνήθως υπάρχει μία και μοναδική λύση για ολόκληρο το μήκος της σήραγγας, βασισμένο στις διερευνητικές διατρήσεις).

Πάρα πολλοί άνθρωποι που ασχολούνται με το χώρο των σηράγγων, έχουν συνειδητοποιήσει ότι μία λύση είναι οι επενδύσεις σηράγγων μονολιθικού κελύφους με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Πίσω από τη λύση αυτή, βρίσκεται η κοινή λογική, δηλαδή ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται στο μέτωπο και αργότερα πίσω από αυτό, θεωρείται σαν μέρος της τελικής επένδυσης. Φυσικά, η λύση αυτή συνδυάζεται με αγκύρια, μεταλλικές δοκούς, πλαίσια και οπλισμό, όπου αυτά είναι απαραίτητα. Η μεγαλύτερη εμπειρία και ο μεγαλύτερος όγκος τέτοιου είδους εφαρμογών υποστήριξης, απαντώνται στις Σκανδιναβικές χώρες, όπου η προσέγγιση είναι κυρίαρχη μετά το Δεύτερο παγκόσμιο Πόλεμο, για πολλά χιλιόμετρα σήραγγας.

Μια μοντέρνα λύση με μονολιθικό κέλυφος για μία σήραγγα που διανοίγεται με τη κλασική μέθοδο drill & blast, υπολογισμένη με μέσες τιμές για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες, συστηματική χρήση αγκυρίων και την εκσκαφή (υπολογίζοντας το σχετικό κόστος του drill & blast ίσο με 100), θα έδινε ένα συνολικό κόστος 225. Για την ίδια σήραγγα, το συνολικό κόστος διάνοιξης με τη παραδοσιακή μέθοδο (εκσκαφή –προσωρινή υποστήριξη – τελική επένδυση), θα έδινε ένα σύνολο που θα άγγιζε το 500.

Ο λόγος που παρατηρούμε αυτή την ακραία διαφορά στο κόστος έχει να κάνει με τις ποσότητες σκυροδέματος. Ένα απλό παράδειγμα υπολογισμών δείχνει τη κατάσταση αυτή:

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε να διανοίξουμε μια σήραγγα με τη μέθοδο drill & blast, μέσα από μασίφ βραχώμαζα, που θα είχε σαν αποτέλεσμα υπερεκσκαφή της θεωρητικής διατομής της τάξεως του 15%. Έστω επίσης ότι το πάχος της τελικής επένδυσης είχε προδιαγραφεί στα 35 cm για καθαρή διάμετρο σήραγγας 8 m. Για απλοποίηση των υπολογισμών, το σχήμα της σήραγγας, θεωρείται κυκλικό με πλήρη επένδυση. Στη καθαρή διάμετρο των 8 m, θα πρέπει να προσθέσουμε ακόμα 0,7 m για τη τελική επένδυση καταλήγοντας σε θεωρητική διατομή εκσκαφής τα 8,7 m. Προσθέτοντας τώρα ένα 15% λόγω υπερεκσκαφής, η μέση διάμετρος ανεβαίνει στα 9,33 m, που δίνει μέσο πάχος επένδυσης από σκυρόδεμα 660 mm, δηλαδή 18,3 m³ σκυροδέματος ανά μέτρο μήκους σήραγγας.

Στη περίπτωση που θα χρησιμοποιούσαμε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ένα πάχος 200 mm από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα είχε σαν αποτέλεσμα τη κατανάλωση 5,7 m³ ανά μέτρο μήκους σήραγγας. Το σκυρόδεμα αυτό θα ήταν οπλισμένο με μεταλλικές ίνες και θα συνδυαζόταν με αγκύρια και μεταλλικά πλαίσια, όπου αυτό θα ήταν απαραίτητο.

Στη σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, θα εφαρμοστεί ούτως ή άλλως (με τη χρήση αγκυρίων και πλαισίων), για τη διασφάλιση της ευστάθειας της σήραγγας μέχρι τη φάση της τελικής επένδυσης. Οι επιπρόσθετες εργασίες που θα πρέπει να γίνουν για λόγους ποιότητας και ανθεκτικότητας είναι αρκετά περιορισμένες.

Υπάρχουν ακόμα δύο παράγοντες που είναι σημαντικοί για τους υπολογισμούς μας. Πρώτον, μπορεί να μειωθεί το περίγραμμα της εκσκαφής, αν επιλεγεί η μέθοδος του μονού κελύφους (τοπικές ανάγκες για επαύξηση του πάχους εφαρμογής μπορούν να αντιμετωπιστούν με τοπικές υπερεκσκαφές), μειώνοντας έτσι τον όγκο των εκσκαφών, όπως συνέβη με τον όγκο των σκυροδεμάτων. Δευτερευόντως, όπου υπάρχει ανάγκη τοπικά για ενίσχυση με πλαίσια, η μελέτη θα πρέπει να επιτρέπει τη τοποθέτηση των πλαισίων αυτών πάνω στο πραγματικό περίγραμμα της εκσκαφής και να μην βασίζεται σε προκατασκευασμένα πλαίσια με συγκεκριμένη διάμετρο, καθώς αλλιώς θα χρειαστεί μεγάλος όγκος ενεμάτων για τη πλήρωση των κενών και τη πάκτωση των πλαισίων αυτών, όγκος ο οποίος είναι περιττός.

Για τη πλήρη αξιοποίηση της μεθόδου του μονού κελύφους, είναι προαπαιτούμενο να παραιτηθούμε από το προαποφασισμένο τρόπο τελικής επένδυσης. Η λύση είναι να εφαρμοστούν οι αρχές της Μεθόδου Παρατήρησης (Observational Method – OM).

Οι βασικές αρχές της μεθόδου αυτής, συνοψίζονται παρακάτω:

- Οι κατηγορίες υποστήριξης του βράχου, θα πρέπει να σχεδιάζονται για τις αναμενόμενες διαφοροποιήσεις της βραχώμαζας, σαν πρόγνωση υποστήριξης βραχώμαζας (rock support prognosis). Σε αυτό τον τρόπο σχεδιασμού, οποιαδήποτε εμπειρική και υπολογιστική μέθοδος, θεωρείται απαραίτητη και χρήσιμη.
- Η επαλήθευση της πρόγνωσης αυτής, θα γίνεται μετά την εκσκαφή και τη τοποθέτηση της υποστήριξης, με οπτική παρατήρηση, καταγραφή των παραμορφώσεων, των τάσεων, των φορτίων, της πίεσης νερού και γενικά με οποιονδήποτε άλλο τρόπο θεωρείται απαραίτητος. Η προσαρμογή ή προσθήκη πρόσθετης υποστήριξης, όπου χρειάζεται τοπικά, υπόκειται και αυτή σε μεταγενέστερη επαλήθευση.
- Η πρόγνωση θα πρέπει να επικαιροποιείται από συνεχή τροφοδοσία στοιχείων από τα προηγούμενα βήματα, έτσι ώστε να αποφασίζονται πιθανές μικροδιορθώσεις.

Τα πλεονεκτήματα της Μεθόδου Παρατήρησης είναι προφανή. Το βουνό χρησιμοποιείται σαν ένα πλήρους κλίμακας εργαστήριο, όπου εμφανίζονται και αντιμετωπίζονται ένα πλήθος από γνωστές και άγνωστες παραμέτρους. Επιτρέπει μια ευέλικτη διαδικασία εργασίας, άμεση δράση όπου αυτό είναι απαραίτητο και ο τρόπος υποστήριξης προσαρμόζεται στις πραγματικές συνθήκες. Κανονικά, ο τρόπος αυτός δίνει λιγότερο συντηρητικές και φτηνότερες λύσεις. Φυσικά, οι διαφορετικοί τρόποι υποστήριξης θα πρέπει να ομογενοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο έτσι ώστε να καλύπτουν ένα λογικό μήκος σήραγγας, για την αποφυγή της πολύ συχνής αλλαγής μεθόδου η οποία μπορεί να επιφέρει αύξηση κόστους. Εάν θεωρείται εντελώς απαραίτητο να εφαρμοστεί μια πολύ συντηρητική μέθοδος υποστήριξης, μία επαληθευμένη και σίγουρη μέθοδος υποστήριξης μπορεί να συμπληρωθεί από μία επιπρόσθετη επένδυση από σκυρόδεμα, για να δώσει έναν παραπάνω βαθμό ασφάλειας.

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΙΕΣ

Δυστυχώς, στη βιομηχανία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, οι προδιαγραφές και έγγραφα με οδηγίες τείνουν συχνά να «κόβονται και να επανακολλώνται – copy & paste» από σύμβαση σε σύμβαση επί σειρά ετών, χωρίς να πραγματοποιείται ενδεδειγμένη έρευνα ως προς τις τρέχουσες εξελίξεις στο χώρο του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η πρόσφατη αύξηση της χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος υγρής ανάμιξης, έχει δώσει το έναυσμα για την επανεξέταση των «παλιών» προδιαγραφών και τώρα καταρτίζονται νέα έγγραφα τα οποία αντανακλούν τις σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Οι σύγχρονες αυτές προδιαγραφές εκτοξευόμενου σκυροδέματος ορίζουν τώρα για πρώτη φορά το μόνιμο, ανθεκτικό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως κατασκευαστικό υλικό. Εξετάζουν τα ζητήματα επίτευξης σύγχρονης μελέτης σύνθεσης ελεγχόμενης ποιότητας, παροχής οδηγιών για την προώθηση και τον έλεγχο της αντοχής και την αποτελεσματική εκτέλεση της μεθόδου εκτόξευσης. Η νέα Ευρωπαϊκή Προδιαγραφή Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος (1996) της EFNARC, για παράδειγμα, παρέχει γενικά συστήματα για την επίτευξη μόνιμου εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η προδιαγραφή αυτή έχει αποτελέσει τη βάση για συγκεκριμένες προδιαγραφές για νέα έργα σε παγκόσμια κλίμακα και για τη νέα Ευρωπαϊκή Προδιαγραφή Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος – EN 14487.

Η νέα Ευρωπαϊκή Προδιαγραφή Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος της EFNARC αποτελεί επιπλέον το πρώτο έγγραφο που εξετάζει ζητήματα όπως την εθνική κατάρτιση χειριστών εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τη διαπίστευση. Η Προδιαγραφή εκθέτει επίσης συστήματα τα οποία

θα λάβουν υπ' όψιν οι εργολάβοι και μελετητές πριν την έναρξη της κατασκευής και τις δομές που θα κατασκευάσουν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ώστε να προσαρμόζουν αναλόγως το σύστημα εκτοξευόμενου σκυροδέματος με τη μελέτη σύνθεσης.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Η ομάδα κατασκευής θα πρέπει να γνωρίζει τα στοιχεία της μελέτης, τα οποία αποτελούν παράγοντες πρωταρχικής σημασίας για τον καθορισμό της ασφάλειας και αντοχής της σήραγγας. Για τη διασφάλιση της ποιότητας της επένδυσης από σκυρόδεμα, τα συστήματα ποιοτικού ελέγχου θα πρέπει να είναι κατάλληλα για έλεγχο παραγωγής. Η διατήρηση της επικοινωνίας ανάμεσα στις ομάδες μελέτης και κατασκευής, από το στάδιο που προηγείται της μελέτης μέχρι την ολοκλήρωση του έργου, είναι υψίστης σπουδαιότητας για την προώθηση των ανωτέρω διαδικασιών.

Οι χειριστές εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει να έχουν προηγούμενη εμπειρία εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος και γνώση της μεθόδου εκτόξευσης που θα υιοθετείται για το συγκεκριμένο έργο. Συνιστάται η ικανότητα ενός χειριστή να διαπιστώνεται είτε εφ' όσον είναι κάτοχος πιστοποιητικού από προηγούμενη εργασία είτε με επίδειξη της ικανότητάς του σε μία περιοχή εκτός του έργου.

Οι ισχύουσες διατάξεις απαιτούν επιπλέον από τους ανθρώπους που εκτελούν τις εργασίες εκτόξευσης, να διαθέτουν τεχνική γνώση του σκυροδέματος και ιδίως του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι σύγχρονες απαιτήσεις έχουν οδηγήσει στην καλύτερη κατάρτιση του εν λόγω προσωπικού, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας εργασίας. Ο αριθμός των εξειδικευμένων εργολάβων που χρησιμοποιούν εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει αυξηθεί κατά τα τελευταία χρόνια, κάτι το οποίο έχει βελτιώσει την ποιότητα εφαρμογής σε παγκόσμιο επίπεδο.

Για την κάλυψη του διεθνούς ζητήματος της κατάρτισης όσον αφορά στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μία καινοτόμος υπηρεσία η οποία παρέχεται από το Διεθνές Κέντρο Γεωτεχνικής και Υπόγειας Κατασκευής (International Centre for Geotechnical and Underground Construction - CUC), που εδρεύει στην Ελβετία, λειτουργεί τμήματα εκμάθησης της σύγχρονης τεχνολογίας εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε να αντιμετωπίσει τις ελλείψεις του κλάδου. Υπάρχουν ειδικά τμήματα για μελετητές και εργολάβους, με εξειδικευμένη διεθνή κατάρτιση χειριστών για την έναρξη εφαρμογής ρομποτικής εκτόξευσης το 2002 για παράδειγμα.

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την αντοχή μίας κατασκευής από σκυρόδεμα, είναι η επίτευξη χαμηλής διαπερατότητας, που ελαττώνει την είσοδο πιθανώς επιβλαβών ουσιών, εμποδίζοντας έτσι χημικές αντιδράσεις όπως εκείνες που αφορούν στο τσιμέντο και συνεπώς αποτρέποντας χημικές αλλαγές. Η χαμηλή διαπερατότητα στις εφαρμογές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος επιτυγχάνεται με τα ακόλουθα μέσα:

- Ένα καλά διαβαθμισμένο υλικό, κατάλληλο για το σύστημα εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από άποψη άντλησης, εργασιμότητας, μείωσης της αναπήδησης (rebound) και καλής συμπίκνωσης (παρόμοιο με την κοκκομετρική διαβάθμιση της EFNARC)
- Επαρκής περιεκτικότητα τσιμέντου, συνήθως από 400 έως 500 kg. Η περιεκτικότητα του τσιμέντου δε θα πρέπει να είναι μικρότερη από 350 kg.
- Χαμηλός, προκαθορισμένος λόγος νερού/τσιμέντου (N/T), μικρότερος από 0,45, ο οποίος επιτυγχάνεται με χρήση σύγχρονων υπερρυστοποιητών. Οι σύγχρονοι υπερρυστοποιητές έχουν

τη δυνατότητα επίτευξης λόγου N/T μεταξύ 0,35 και 0,4, διατηρώντας παράλληλα τη κάθιση στα 20 cm.

- Χρήση ποζολανικών υλικών, όπως πυριτική παιπάλη και ιπτάμενη τέφρα. Η πυριτική παιπάλη έχει δράση φίλερ, καθώς θεωρείται ότι κατανέμει τα προϊόντα ενυδάτωσης στο διαθέσιμο χώρο κατά τρόπο περισσότερο ομοιογενή. Έτσι επιτυγχάνεται σκυροδέμα χαμηλής διαπερατότητας, με αυξημένη αντοχή σε θειικά άλατα και βελτιωμένη αντοχή ψύξης/απόψυξης.
- Έλεγχος μικρορηγματώσεων της τάξης των 0,2 mm μέσω οπλισμού από ίνες αντί πλέγματος, επιτρέποντας έτσι αυτογενή επούλωση.
- Ελεγχόμενες, χαμηλές δοσολογίες επιταχυντών ελεύθερων αλκαλίων (alkali free), για μειωμένη ελάττωση της τελικής αντοχής σε σύγκριση με το βασικό μίγμα, μειωμένο rebound και σκόνη και κυρίως, παροχή ασφαλών συνθηκών εργασίας.
- Πρόσμικτα ελέγχου ενυδάτωσης για την αποτροπή πρόωρης ενυδάτωσης του μίγματος πριν την εφαρμογή του στο υπόστρωμα. Η πρόωρη ενυδάτωση ενδέχεται να προκαλέσει σημαντικές επιβλαβείς επιπτώσεις στις μετά τη σκλήρυνση φυσικές ιδιότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όπως χαμηλές αντοχές και πυκνότητες και αυξημένη διαπερατότητα.

Η Τεχνική Έκθεση Υπ'αρ. 31 της Concrete Society (UK): Δοκιμές διαπερατότητας σκυροδέματος εργοταξίου (1988), περιγράφει μία σειρά δοκιμών διαπερατότητας για ελέγχους στο εργοτάξιο. Περιλαμβάνονται τρεις κατηγορίες σκυροδέματος που διαθέτουν υψηλή, μέση και χαμηλή διαπερατότητα, βάσει αποτελεσμάτων από τις τεχνικές ελέγχου. Οι δοκιμές διαπερατότητας και τα πεδία εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς και τα πεδία των αποτελεσμάτων των δοκιμών σε δείγματα σιμάντων στην Αγγλία από μόνιμο εκτοξευόμενο σκυροδέμα, παρουσιάζουν το εκτοξευόμενο σκυροδέμα ως ανθεκτικό υλικό επένδυσης, καθώς αποτελεί εν γένει κατηγορία σκυροδέματος «Χαμηλής Διαπερατότητας» (Dimmock 1998).

ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΙ ΑΛΚΑΛΙΩΝ

Τελευταία, οι ανησυχίες που αφορούν στην ασφάλεια και την οικολογία έχουν κυριαρχήσει στην αγορά επιταχυντών εκτοξευόμενου σκυροδέματος και έχει ξεκινήσει μία τάση διστακτικότητας ως προς τη χρήση προϊόντων επιθετικών προς το περιβάλλον. Παράλληλα αυξάνονται οι απαιτήσεις ως προς την αντοχή και την ανθεκτικότητα των κατασκευών από σκυροδέμα. Υποψίες ότι οι δυνατοί αλκαλικοί επιταχυντές (αργιλικοί) ευθύνονται για την απώλεια αντοχής και την πρόκληση επιπτώσεων απόπλυσης, έχουν αναγκάσει τη βιομηχανία μας να προχωρήσει στην παροχή απαντήσεων και στην εξεύρεση προϊόντων με καλύτερες αποδόσεις.

Λόγω της σύνθετης χημείας τους, οι επιταχυντές ελεύθεροι αλκαλίων είναι εύλογα πολύ πιο ακριβοί από τους παραδοσιακούς επιταχυντές. Παρ'όλα αυτά, οι τιμές των επιταχυντών δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική δαπάνη του τοποθετημένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Πολύ πιο σημαντικές είναι οι συνέπειες που απορρέουν από την οικονομία στο χρόνο και τις απώλειες αναπηδήσεως, τη βελτίωση της ποιότητας και της αντοχής και το ασφαλές περιβάλλον εργασίας.

Η αυξημένη ζήτηση για επιταχυντές εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που ορίζονται ως *ελεύθεροι αλκαλίων*, εμπεριέχει πάντοτε ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω ζητήματα:

- Μείωση του κινδύνου αντίδρασης αλκαλικών - αδρανών, με αφαίρεση της περιεκτικότητας σε αλκαλικές ουσίες, που προέρχεται από τη χρήση κοινών καυστικών αργιλικών επιταχυντών.
- Βελτίωση της ασφάλειας στο χώρο εργασίας μέσω της μειωμένης επιθετικότητας του επιταχυντή, ώστε να αποφεύγονται εγκαύματα, απώλεια όρασης και αναπνευστικά προβλήματα. Το

χαρακτηριστικό pH των μη αλκαλικών επιταχυντών κυμαίνεται μεταξύ 2,5 και 4 (το pH του δέρματος είναι 5,5).

- Προστασία του περιβάλλοντος με μείωση της ποσότητας επιθετικών παραγόντων στα υπόγεια νερά, τόσο από το τοποθετημένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όσο και από το υλικό της αναπηδήσεως που απορρίπτεται σε χωματερές.
- Μείωση της διαφοράς μεταξύ του βασικού μίγματος και της τελικής αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, σε σύγκριση με τους αργιλικούς και υδρύαλους επιταχυντές παλαιότερου τύπου, που συνήθως κυμαινόταν μεταξύ 15 και 50%.

Το βάρος που δίδεται από τις διάφορες αγορές ως προς τα ανωτέρω σημεία διαφέρει. Όταν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για αρχική υποστήριξη, τα σημεία 2 και 3 είναι τα πιο σημαντικά. Όταν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για μόνιμες κατασκευές, τα σημεία 1 και 4 γίνονται εξίσου σημαντικά.

Όσον αφορά στην αντοχή σε θειικά άλατα, η SINTEF (Νορβηγία) έχει προχωρήσει στην εκτέλεση δοκιμών. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτουν τα παρακάτω σχόλια:

- Οι μη αλκαλικοί επιταχυντές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανθεκτικού σε θειικά άλατα σε δοσολογίες έως 10%.
- Οι μη αλκαλικοί επιταχυντές έχουν καλύτερη απόδοση από τους τροποποιημένους επιταχυντές νιτρικού άλατος με τα τσιμέντα OPC.
- Η χρήση 6% πυριτικής παιπάλης παρέχει αντίσταση στα θειικά άλατα με το OPC ανάλογη με το ανθεκτικό στα θειικά άλατα τσιμέντο (SR). Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς είναι προτιμότερη η χρήση του OPC αντί του τσιμέντου SR στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, λόγω της ταχύτερης πήξης του και νωρίτερης ανάπτυξης αντοχών.
- Όσο χαμηλότερη είναι η αναλογία νερού – τσιμέντου, τόσο υψηλότερη είναι η αντοχή σε θειικά άλατα. Συνιστάται η αναλογία νερού – τσιμέντου να είναι μικρότερη του 0,45, και κατά προτίμηση με χρήση των νέων υπερπλαστικοποιητών να επιτυγχάνεται αναλογία νερού – τσιμέντου μικρότερη του 0,4.

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Παρατηρείται αρκετά συχνά το φαινόμενο, τα οφέλη μίας καλά σχεδιασμένης μελέτης σύνθεσης για την επίτευξη των απαιτήσεων αντοχής της δομής να αναιρούνται από ανεπαρκείς μεθόδους εφαρμογής. Προκειμένου να επιτευχθεί ανθεκτικό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και να διασφαλιστεί η ικανοποίηση των απαιτήσεων της μελέτης από τις ιδιότητες του υλικού, η μέθοδος εφαρμογής θα πρέπει να συνάδει με τα ακόλουθα κριτήρια ώστε να επιτυγχάνεται ένα σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης με ελάχιστη απόκλιση στην ποιότητα:

- Θα πρέπει να παράγεται καλά αναμεμιγμένο και ομοιογενές σκυρόδεμα στο ακροφύσιο (ινών περιλαμβανομένων) και θα πρέπει να μην παρουσιάζει παλμικά φαινόμενα και μπλοκαρίσματα (pulsation effects and blockages), μέσω αντλιών υγρής ανάμιξης.
- Η μετρημένη απώλεια αναπηδήσεως των αδρανών θα πρέπει να είναι μικρότερη του 10%, εφοδιάζοντας την επένδυση της σήραγγας με ένα υλικό κατάλληλα διαβαθμισμένο. Αυτό συνεπάγεται την ελάττωση φαινομένων αποκόλλησης, σκιών πίσω από το χαλύβδινο οπλισμό, ρηγάτωσης λόγω συρρίκνωσης, και ανεπαρκούς μικροδομής.

- Η μετρημένη απώλεια αναπηδήσεως των ινών θα πρέπει να είναι μικρότερη του 20% έτσι ώστε να παρέχεται αποτελεσματικός έλεγχος των ρωγμών και δομική απόδοση, προσδίδοντας έτσι καλύτερη αντοχή στην επένδυση της σήραγγας.
- Οι αυτόματοι δοσομετρητές επιταχυντών που λειτουργούν συγχρονικά με την εκροή του σκυροδέματος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά τρόπον ώστε να επιτρέπουν ακριβείς και σταθερούς ρυθμούς δοσολογίας.
- Χαμηλά επίπεδα σκόνης που επιτρέπουν την ύπαρξη καλύτερης ορατότητας για τους χειριστές εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε να επιτυγχάνουν καλύτερο έλεγχο της εκτόξευσης.
- Στόχος του συστήματος θα πρέπει να είναι η μείωση του κινδύνου οι ανθρώπινες επιρροές να επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για παράδειγμα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αυτοκινούμενα μέσα ρομποτικής εκτόξευσης όπου είναι δυνατό, επιτρέποντας την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος υψηλής ποιότητας, κατά τρόπον ασφαλέστερο και οικονομικότερο.
- Μία έτοιμη ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει να είναι διαθέσιμη προς εφαρμογή, ως ενδεχόμενη υποστήριξη κατά τη διάρκεια εκσκαφών στη σήραγγα. Αυτό μπορεί να διευκολυνθεί από τον έλεγχο της ενυδάτωσης του τσιμέντου με χρήση σταθεροποιητικών προσμίκτων.
- Σε περίπτωση σαθρού εδάφους και τρεχούμενων υπόγειων υδάτων, το σύστημα θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμο, ώστε να παρέχει εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαρακτηριστικά άμεσης πήξης (αστραπιαία πήξη - flash setting).
- Η μέθοδος εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πρέπει να επιτρέπει την αποτελεσματική συντήρηση του σκυροδέματος, η οποία δε θα επηρεάζει αρνητικά τη συνοχή μεταξύ διαδοχικών στρώσεων, όπως με ενσωμάτωση προσμίκτων βελτίωσης σκυροδέματος.

Πολλοί από τους παράγοντες που προκαλούν υψηλές τιμές απώλειας αναπηδήσεως, χαμηλή συμπίκνωση, απώλεια δομικής απόδοσης και ως εκ τούτου αυξάνουν τις δαπάνες του έργου, αποδίδονται στην απόδοση των χειριστών εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ιδίως στην απόδοση των χειροκίνητων συστημάτων ακροφυσίου που χρησιμοποιούν τη μέθοδο ξηρής ανάμιξης.

Η χρήση των σύγχρονων προσμίκτων που εφαρμόζονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υγρής ανάμιξης έχει περιορίσει σημαντικά τα φαινόμενα αυτά, επιτρέποντας στο τοποθετημένο σκυρόδεμα να παρουσιάζει αρχικά πλαστική συμπεριφορά. Για μερικά λεπτά μετά την εφαρμογή του, το νέο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να απορροφηθεί και να συμπυκνωθεί πιο εύκολα από ότι κάποια υλικά γρήγορης ή αστραπιαίας πήξης. Η προσέγγιση αυτή μειώνει σημαντικά την απώλεια αναπηδήσεως και επιτρέπει την ευκολότερη επίτευξη επικάλυψης - ενθυλάκωσης του χάλυβα.

ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η συντήρηση είναι μία από τις πιο βασικές εργασίες για την επίτευξη καλής αντοχής στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η αναγκαιότητα αυτή οφείλεται στη σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα του μίγματος σε νερό και τσιμέντο και συνεπώς στην αυξημένη πιθανότητα συρρίκνωσης και ρηγμάτωσης του τοποθετημένου σκυροδέματος. Άλλοι λόγοι είναι ο κίνδυνος γρήγορου στεγνώματος, λόγω του χαρακτηριστικά υψηλού εξαερισμού των σηράγγων, και η ταχεία ενυδάτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που έχει υποστεί επιτάχυνση πήξεως και η εφαρμογή σε λεπτές στρώσεις. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα πρέπει πάντα κατά συνέπεια να συντηρείται κατάλληλα, με χρήση ενός αποτελεσματικού μέσου συντήρησης. Υπάρχουν παρ' όλα αυτά κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά στη χρήση των μέσων συντήρησης:

- Δεν πρέπει να περιέχουν διαλύτη (χρήση σε κλειστούς χώρους)
- Δεν πρέπει να έχουν αρνητική επίδραση στη συνοχή μεταξύ των στρώσεων
- Πρέπει να εφαρμόζονται αμέσως μετά την τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Το τοποθετημένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ως επί το πλείστον, ανά τον κόσμο, δεν παρουσιάζει συνοχή και δημιουργούνται πολλές ρηγματώσεις, λόγω του ότι δεν εφαρμόζεται σύστημα συντήρησης. Η αύξηση της χρήσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μόνιμου υλικού τελικής επένδυσης, δημιούργησε σημαντικές απαιτήσεις για μακροπρόθεσμη αντοχή και απόδοση. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν στην καλή συνοχή, την υψηλή τελική πυκνότητα και αντοχή σε θλίψη, ώστε να διασφαλίζονται η αντοχή σε ψύξη/απόψυξη και η χημική αντοχή, η στεγανοποίηση και ένα υψηλό επίπεδο ασφαλείας.

Κατά τη συντήρηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ένα εξωτερικό μέσο συντήρησης, πρέπει να δίδεται μεγάλη προσοχή στον καθαρισμό του υποστρώματος πριν την εφαρμογή επόμενης στρώσης. Ο καθαρισμός πρέπει να εκτελείται με πεπιεσμένο αέρα και πολύ νερό.

Ένα άλλο πρόβλημα όσον αφορά στα μέσα συντήρησης, είναι η δυνατότητα εφαρμογής τους σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα μετά το τέλος της εκτόξευσης. Για τη διασφάλιση της σωστής συντήρησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τα μέσα συντήρησης πρέπει να εφαρμόζονται εντός 15 έως 20 λεπτών μετά την εκτόξευση. Λόγω της χρήσης επιταχυντών πήξης, η ενυδάτωση του σκυροδέματος λαμβάνει χώρα εντός μικρού χρονικού διαστήματος μετά την εκτόξευση (5 έως 15 λεπτά). Η ενυδάτωση και η θερμοκρασία είναι πολύ δραστικές κατά τα πρώτα λεπτά και τις πρώτες ώρες που ακολουθούν την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η προστασία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι πολύ σημαντική κατά το κρίσιμο αυτό στάδιο.

Η εφαρμογή των μέσων συντήρησης απαιτεί δύο χρονοβόρες λειτουργίες: Εφαρμογή του μέσου συντήρησης και καθαρισμό/αφαίρεση του μέσου συντήρησης από την επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μεταξύ των στρώσεων, εάν πρόκειται για δομή πολλαπλών στρώσεων.

Έχουν αναπτυχθεί νέα συστήματα, για την αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη συντήρηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος υγρής ανάμιξης, που αναφέρονται ως πρόσμικτα Βελτίωσης Σκυροδέματος. Βελτίωση σκυροδέματος (εσωτερική συντήρηση) σημαίνει ότι ένα ειδικό πρόσμικτο προστίθεται στο σκυρόδεμα κατά τη σύνθεση, ως κανονικό πρόσμικτο. Το πρόσμικτο αυτό αναπτύσσει ένα εσωτερικό φράγμα στο σκυρόδεμα, το οποίο διασφαλίζει ασφαλέστερη ενυδάτωση από ότι η εφαρμογή συμβατικών μέσων συντήρησης. Τα οφέλη που απορρέουν από αυτήν την τεχνολογία είναι τα εξής:

- Η χρονοβόρα εφαρμογή και, σε περίπτωση πολλαπλών στρώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η αφαίρεση των μέσων συντήρησης, δεν είναι πλέον απαραίτητες
- Η συντήρηση είναι εγγυημένη από την έναρξη της ενυδάτωσης
- Δεν παρουσιάζεται αρνητική επίδραση στη συνοχή μεταξύ των στρώσεων, επιτρέποντας στις δομές να δρουν μονολιθικά, χωρίς τον κίνδυνο αποκόλλησης.
- Δρα σε όλο το πάχος της επένδυσης από σκυρόδεμα και όχι μόνο στην εκτιθέμενη επιφάνεια.

Συνεπεία της βέλτιστης αυτής επίδρασης της συντήρησης, βελτίωση παρουσιάζεται επίσης σε όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος: πυκνότητα, τελικές αντοχές, αντοχή σε ψύξη/απόψυξη και χημική αντοχή, στεγανοποίηση, μείωση ρηγματώσεων και συρρίκνωσης. Βελτιώνει επιπλέον την αντλησιμότητα και εργασιμότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ακόμα και

με αδρανή κακής διαβάθμισης. Επίσης, βελτιώνει ιδιαίτερα την αντλησιμότητα μιγμάτων εκτοξευόμενου σκυροδέματος οπλισμένου με ίνες χάλυβα.

ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ Ή ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (HPP)

Η είσοδος νερού συνδέεται εμπειρικά με τμήματα της επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που περιέχουν οπλισμό από χάλυβα μεγάλης διαμέτρου, όπως δικτυωτό σκελετό, ράβδους σύνδεσης δικτυωτού σκελετού και υπέρμετρες επικαλύψεις οπλισμού από χάλυβα. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να δίδεται έμφαση στην ελαχιστοποίηση της ποσότητας του οπλισμού μέσω:

- Βελτιστοποίησης του κατακόρυφου προφίλ της σήραγγας ώστε να μειωθούν στιγμιαίες επιδράσεις
- Αύξησης του πάχους της επένδυσης της σήραγγας, ώστε να διατηρηθεί η γραμμή πιέσεων στο μεσαίο τρίτο του τμήματος από σκυρόδεμα
- Όπου είναι δομικώς δυνατό, χρήσης της πιο ευνοϊκής λύσης οπλισμού από ίνες.

Οι ίνες από χάλυβα έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε έργα σηράγγων από μόνιμο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, για τη μείωση του πλάτους των ρωγμών, οι οποίες φτάνουν τα 0,2 mm, και στην παραγωγή υδατοστεγανών, ανθεκτικών επενδύσεων σηράγγων. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν, έναντι του συμβατικού οπλισμού κατά των ρωγμών, είναι ότι οι ίνες κατανέμονται κατά τρόπο τυχαίο και ασυνεχή σε όλη τη δομή της επένδυσης της σήραγγας, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφο οπλισμό ο οποίος ανακατανέμει ομοιόμορφα τα φορτία εφελκυσμού, αναπτύσσοντας μεγαλύτερη ποσότητα ομοιογενώς κατανεμημένων μικρορωγμών περιορισμένου βάθους. Οι ίνες από χάλυβα μεταμορφώνουν επίσης το σκυρόδεμα και από εύθραυστο το μετατρέπουν σε εύπλαστο υλικό, προσδίδοντας στην επένδυση αυξημένη φέρουσα ικανότητα φορτίων, γεφυρώνουν την αρχική ρηγμάτωση μέσω της αποτελεσματικής ανακατανομής του φορτίου, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια της δομής κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Πρόσφατα, έχει εισαχθεί η χρήση ινών HPP, καθώς διαθέτουν το επιπλέον πλεονέκτημα της ανθεκτικότητας σε διάβρωση, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα απόδοση παρόμοια με εκείνη των ινών από χάλυβα.

Με όλα τα μίγματα που περιέχουν ίνες, θα πρέπει να δίδεται προσοχή στο συνδυασμό της αντοχής των ινών με την αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος, καθώς ένα σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με ίνες κανονικής αντοχής εφελκυσμού, μπορεί να δημιουργήσει εύθραυστο υλικό. Καθώς προστίθενται οι ίνες κατά τη διαδικασία της σύνθεσης, εγκαταλείπεται από τον κύκλο κατασκευής η χρονοβόρα λειτουργία της εγκατάστασης συγκολλημένου πλέγματος.

Εάν ο συμβατικός οπλισμός απαιτείται για δομικούς σκοπούς, η μελέτη του οπλισμού θα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν τη μέθοδο εγκατάστασης και να τον κατανέμει ομοιόμορφα. Η διάταξη του οπλισμού θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε ο χειριστής εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος να μπορεί να προχωρεί στην πλήρη επικάλυψη - ενθυλάκωση των ράβδων και η διαδοχή της κατασκευής να επιτρέπει τη διαδοχική εγκατάσταση του οπλισμού. Σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα να εφαρμόζεται μέσα από κλουβιά οπλισμού ή πολλαπλά επικαλυμμένα πλέγματα. Θα πρέπει να δίδεται προσοχή και στην αποφυγή αστραπιαίας πήξης λόγω υψηλής δοσολογίας προσμίκτων επιτάχυνσης, καθώς αυτό αναστέλλει την πλαστική συμπεριφορά στο φρέσκο σκυρόδεμα και εμποδίζει τη μετακίνηση του οπλισμού αμέσως μετά την εκτόξευση.

ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΨΕΚΑΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

Με την έλευση των επενδύσεων από μόνιμο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, προέκυψε επίσης από τη βιομηχανία, μία απαίτηση για την παροχή υδατοστεγανούς εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στις σήραγγες στις οποίες έχει πρόσβαση το κοινό και στις σήραγγες των

αυτοκινητοδρόμων, οι οποίες εκτίθενται σε συνθήκες ψύξης κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς επίσης και στις ηλεκτροδοτούμενες σιδηροδρομικές σήραγγες. Έχει αποδειχθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, το μόνιμο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή διαπερατότητα (χαρακτηριστικά 1×10^{-14} m/s), παρ'όλα αυτά η είσοδος νερού εξακολουθεί να παρατηρείται σε κατασκευαστικούς αρμούς, σε σημεία όπου υπάρχει σφηνωμένος χάλυβας και ήλωση σε βράχο.

Παραδοσιακά χρησιμοποιούνται πολυμερή φύλλα μεμβράνης, όπου το σύστημα έχει αποδειχθεί ευαίσθητο στην ποιότητα θερμικά σφραγισμένων αρμών και στη γεωμετρία των σηράγγων, κυρίως σε διασταυρώσεις. Επίσης, όπου έχουν εγκατασταθεί φύλλα μεμβράνης πάνω από επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μπορούν να παρατηρηθούν τα ακόλουθα δυσμενή φαινόμενα:

- Καθώς τα φύλλα μεμβράνης είναι στερεωμένα σε ένα σημείο, οι εκτοξευόμενες εσωτερικές επενδύσεις μπορεί να μην έχουν στενή επαφή μέσω της μεμβράνης με το υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην ασύμμετρη φόρτιση της επένδυσης της σήραγγας.
- Για τη διευκόλυνση της εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα φύλλα μεμβράνης, χρησιμοποιείται μία στρώση συγκολλημένου πλέγματος. Καθώς τα φύλλα μεμβράνης είναι στερεωμένα σε ένα σημείο, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μεταξύ του πλέγματος και των φύλλων μεμβράνης είναι συχνά κατώτερης ποιότητας, και μπορεί να οδηγήσει σε ανησυχίες όσον αφορά στην αντοχή.
- Η αντοχή των δεσμών μεταξύ της εσωτερικής επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και των φύλλων μεμβράνης είναι ανεπαρκής και οδηγεί σε πιθανή αποδέσμευση, κυρίως στη στέψη του προφίλ της σήραγγας. Πρόκειται για επιβλαβή επίδραση όταν κατασκευάζονται μονολιθικές δομές.
- Καθώς η συνοχή της διεπαφής σκυροδέματος – φύλλων μεμβράνης είναι μικρή, τα υπόγεια νερά μπορεί να κυλήσουν κατά οποιονδήποτε ανεξέλεγκτο τρόπο. Σε περίπτωση διάρρηξης της μεμβράνης, τα υπόγεια νερά θα διαρρέυσουν αναπόφευκτα στην εσωτερική επιφάνεια της σήραγγας σε οποιοδήποτε κατασκευαστικό αρμό της επένδυσης ή ρωγμή, κατά ένα σημαντικό μήκος της επένδυσης της σήραγγας.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, η DEGUSSA έχει δημιουργήσει μία ψεκαζόμενη πολυμερή μεμβράνη με βάση το νερό, το προϊόν Masterseal® 345.

Η ψεκαζόμενη αυτή μεμβράνη αναπτύσσει εξαιρετική συνοχή διπλής όψεως (0,8 έως 1,3 MPa), κάτι το οποίο επιτρέπει τη χρήση της σε σύνθετες κατασκευές, αποτρέποντας έτσι αποτελεσματικά τη δημιουργία των όποιων πιθανών αυλακίων υπόγειων νερών στη διεπαφή μεμβράνης-σκυροδέματος. Το Masterseal® 345 διαθέτει επίσης ελαστικότητα από 80 έως 140%, σε μία μεγάλη κλίμακα θερμοκρασιών, κάτι το οποίο του επιτρέπει να γεφυρώνει τις ρηγματώσεις που τυχόν δημιουργούνται στη δομή του σκυροδέματος. Καθώς έχει ως βάση το νερό και δεν περιέχει επικίνδυνα συστατικά, η χρήση και εφαρμογή του σε κλειστούς χώρους είναι ασφαλής. Το προϊόν μπορεί να εφαρμοστεί με ψεκασμό με χρήση μίας ελικοειδούς αντλίας και απαιτεί δύο χειριστές για εφαρμογή έως 50 m²/hr, ιδίως στις πιο σύνθετες γεωμετρίες σηράγγων, όπου η χρήση φύλλων μεμβράνης παρουσιάζει πάντα κάποιους περιορισμούς.

Σε εφαρμογές επενδύσεων μονού κελύφους, το Masterseal® 345 εφαρμόζεται μετά την πρώτη στρώση του μόνιμου εκτοξευόμενου σκυροδέματος οπλισμένου με ίνες, όπου η επιφάνεια του τοποθετημένου σκυροδέματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδη, ώστε να επιτρέπει μία οικονομική εφαρμογή της μεμβράνης, πάχους 3 mm κατ' ελάχιστον(καλύπτοντας επίσης όλες τις ίνες). Μία δεύτερη στρώση μόνιμου εκτοξευόμενου σκυροδέματος οπλισμένου με ίνες χάλυβα, μπορεί να εφαρμοστεί στη συνέχεια στο εσωτερικό. Καθώς η δύναμη συνοχής μεταξύ του Masterseal® 345 και των δύο στρώσεων του μόνιμου εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι περίπου 1MPa, η δομή μπορεί να δράσει

μονολιθικά, με την ψεκαζόμενη μεμβράνη να παρουσιάζει αντοχή έως 15bar. Καθώς η εφαρμογή αυτή δε λαμβάνει υπ' όψιν την αποστράγγιση νερού, η δεύτερη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να έχει μελετηθεί έτσι ώστε να αντέχει σε τυχόν υδροστατικά φορτία κατά τη διάρκεια εξυπηρέτησης της κατασκευής.

ΠΑΡΟΧΗ ΠΥΡΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία κατασκευής σηράγγων έχει συγκλονιστεί από την ταχεία καταστροφή, και σε κάποιες περιπτώσεις την απώλεια ζώνων, που έχουν προκαλέσει κάποιες πολύ μεγάλες πυρκαγιές, όπως αυτή στη Σήραγγα της Μάγχης, στο Mont Blanc και προσφάτως σε σήραγγες στην Αυστρία.

Ενώ αναπτύσσονται συστήματα για την περαιτέρω διασφάλιση των ρυθμίσεων ασφαλείας των επιβατών και των χειριστών των σηράγγων σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα, οι αιτήσεις των χρηστών για δομικές επενδύσεις σηράγγων που παραμένουν ανθεκτικές σε πυρκαγιά, ολοένα και αυξάνονται. Η Εταιρεία DEGUSSA, καθώς και άλλες εταιρείες, έχει εξετάσει το ζήτημα παροχής αποτελεσματικής προστασίας σε επενδύσεις σηράγγων, ώστε να αποφεύγονται εκτεταμένες καταστροφές και να μειωθεί σημαντικά ο κίνδυνος υποχώρησης της επένδυσης και του εδάφους κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς.

Η φιλοσοφία του MEYCO® Fix Fireshield 1350 βασίζεται στην παροχή μίας παθητικής στρώσης πυρασφάλειας σε οποιαδήποτε υπόγεια δομή, χρησιμοποιώντας μία ταχεία διαδικασία εφαρμογής μέσω ψεκασμού, όπως απεικονίζεται στο Σχέδιο 15. Επιπλέον, η προστατευτική στρώση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτή, ώστε να μειώνονται τυχόν επιπτώσεις στην απαιτούμενη δομική ζώνη. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, το υπόστρωμα σκυροδέματος θα παραμείνει προστατευμένο από θερμοκρασίες έως 1350°C. Οι επισκευές εκτελούνται απλά, με τοπική αφαίρεση της κατεστραμμένης προστατευτικής στρώσης και επαναψεκασμό αυτής.

Η απόδοση τέτοιων παθητικών συστημάτων πυρασφάλειας διαπιστώνεται τώρα από το TNO Test Centre for Fire Research, Delft, Netherlands (Κέντρο Δοκιμών Ερευνών Πυρκαγιάς). Για την προσομοίωση εκδήλωσης πυρκαγιάς σε βυτίο καυσίμων εντός σήραγγας, η Ολλανδική καμπύλη πυρκαγιάς του RWS καθορίζεται τώρα για τη δοκιμή συστημάτων πυρασφάλειας σε υπόγειες δομές. Πέρα από τη διατήρηση της θερμοκρασίας πάνω από τους 1200°C για δύο ώρες και μία μέγιστη θερμοκρασία 1350°C, η δοκιμή υποβάλλει επίσης το σύστημα σε άμεσο θερμικό σοκ. Βλέπε στο Σχέδιο 16 την καμπύλη χρόνου-θερμοκρασίας της θερμοκρασίας της καμίνου και την αντίστοιχη καμπύλη της θερμοκρασίας στη διεπαφή της πυρασφάλειας και του δείγματος δομικού σκυροδέματος.

Η δοκιμή του MEYCO® Fix Fireshield 1350 στο Κέντρο TNO έχει παρουσιάσει εξαιρετικά αποτελέσματα, σε πάχος στρώσης μεταξύ 40 και 50 mm, αναπτύσσοντας πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στη διεπαφή, κάτω των 225°C σε πάχος 50 mm, και κάτω των 400°C σε πάχος 400 mm. Δεν παρατηρήθηκε αποφλοίωση σε κανένα από τα δοκιμαστικά πανέλα.. Το Κέντρο TNO θεωρεί ότι 225°C είναι το πιο απαιτητικό κριτήριο έως σήμερα.