

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΚΡΗΞΕΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΠΑΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΥ ΛΥΔΙΑ

Περίληψη

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση των ενισχύσεων κατασκευών Ο.Σ. με σύνθετα υλικά, με σκοπό την αύξηση της αντοχής τους έναντι εκρήξεων. Αρχικά, γίνεται αναφορά στον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται μια έκρηξη και τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Στη συνέχεια, εξηγούνται οι λόγοι που οδηγούν στην επιλογή των σύνθετων υλικών για την ενίσχυση και γίνεται παρουσίαση της μέχρι τώρα έρευνας (αναλυτικής, πειραματικής και στον τομέα της ανάπτυξης νέων υλικών).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια ολοένα και αυξάνονται τα περιστατικά εκρήξεων, κυρίως από τρομοκρατικές επιθέσεις, αλλά και ατυχήματα. Εκτός από τις απώλειες ζωής που οφείλονται σε αυτήν καθεαυτή την έκρηξη, ο αριθμός των θυμάτων αυξάνεται και έμμεσα, όταν αυτή λαμβάνει χώρα κοντά ή μέσα σε κτίρια, προκαλώντας αστοχίες μελών ή ακόμη και κατάρρευση της κατασκευής. Πρόσφατα παραδείγματα αποτελούν οι βομβιστικές επιθέσεις στην αυστραλιανή πρεσβεία στην Jakarta (2004), στο Bali (2002 και 2005), την Κωνσταντινούπολη (2003), το Όσλο (2011) και φυσικά η 11^η Σεπτεμβρίου 2001.

Καθώς κανένα κτίριο δε σχεδιάζεται με γνώμονα την ανθεκτικότητα έναντι εξωτερικών εκρήξεων – κάτι τέτοιο θα ήταν αρκετά αντικοινωνικό – την τελευταία δεκαετία εντείνεται η έρευνα στον τομέα της ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών. Άλλωστε, μεγαλύτερη πιθανότητα να πληγούν από τρομοκρατικές ενέργειες έχουν κυβερνητικά και στρατιωτικά κτίρια, τα οποία συνήθως είναι ευάλωτα, λόγω της παλαιότητάς τους, ενώ πολλά από αυτά αποτελούν ιστορικά μνημεία. Επίσης, κτίρια υποδομής, όπως αεροδρόμια, νοσοκομεία, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, αλλά και άλλες κατασκευές, για παράδειγμα γέφυρες, έχουν υποστεί σοβαρές βλάβες μετά από επιθέσεις ή εκρήξεις που προκλήθηκαν από ατυχήματα. Παρουσιάζεται, λοιπόν, η ανάγκη ενίσχυσης τέτοιων κατασκευών, έτσι ώστε να αυξηθεί η ανθεκτικότητά τους σε αυτά τα φαινόμενα.

Τα σύνθετα υλικά ή ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) προσφέρονται για αυτόν το σκοπό, κυρίως διότι αποτελούν μια οικονομικά αποδοτική, γρήγορη στην εφαρμογή λύση. Χάρη στο μικρό τους βάρος, δεν επιβαρύνουν την κατασκευή, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν μεγάλη αντοχή και αύξηση της πλαστιμότητας. Επιπλέον, σε σχέση με άλλες μεθόδους ενίσχυσης, για παράδειγμα μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, δεν αλλάζουν δραστικά την αρχιτεκτονική μορφή του κτιρίου – κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία αν πρόκειται για ιστορικό μνημείο – ούτε παρεμποδίζουν έντονα τη λειτουργία του κατά την εφαρμογή τους, η οποία γίνεται ταχύτατα και εύκολα [1].

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

2.1. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Το βασικότερο πρόβλημα στην αντιμετώπιση εκρήξεων είναι η απρόβλεπτη φύση της έκρηξης. Είναι αδύνατο να προβλεφθεί με ακρίβεια το πώς θα εξελιχθεί το φαινόμενο, διότι αυτό εξαρτάται από πολλούς και ποικίλους παράγοντες.

Πρώτα απ' όλα, υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες ως προς το χρησιμοποιούμενο εκρηκτικό και τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζεται η βόμβα. Διάφορα εκρηκτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως το τρινιτροτολουόλιο (TNT) (με ή χωρίς προσμίξεις άλλων υλικών) και το ANFO (μίγμα νιτρικού αμμωνίου και ενός είδους πετρελαίου

θέρμανσης). Συνηθέστερα, όμως, χρησιμοποιούνται αυτοσχέδιοι εκρηκτικοί μηχανισμοί (IED), φτιαγμένοι πολλές φορές από μη στρατιωτικά, καθημερινής χρήσης υλικά, όπως λίπασμα. Το κάθε εκρηκτικό υλικό, ανάλογα με τη σύστασή του, την κατασκευή του μηχανισμού και τον τρόπο πυροδότησης, συμπεριφέρεται διαφορετικά, ως προς την ταχύτητα και το μέγεθος της έκρηξης, την έκλυση θερμότητας, το μέγεθος και σχήμα των εκτοξευόμενων θραυσμάτων [4].

Σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει μια έκρηξη, όσον αφορά στο ίδιο το εκρηκτικό, είναι το βάρος του, W . Προφανώς, η καταστροφική ικανότητά του αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας. Γι' αυτό και, γενικά, μεγαλύτερο κίνδυνο για ένα κτίριο αποτελούν τα παγιδευμένα οχήματα, κινούμενα ή όχι, αφού προσφέρουν μεγάλη χωρητικότητα, συνδυαζόμενη με δυνατότητα κάλυψης του μηχανισμού [2].

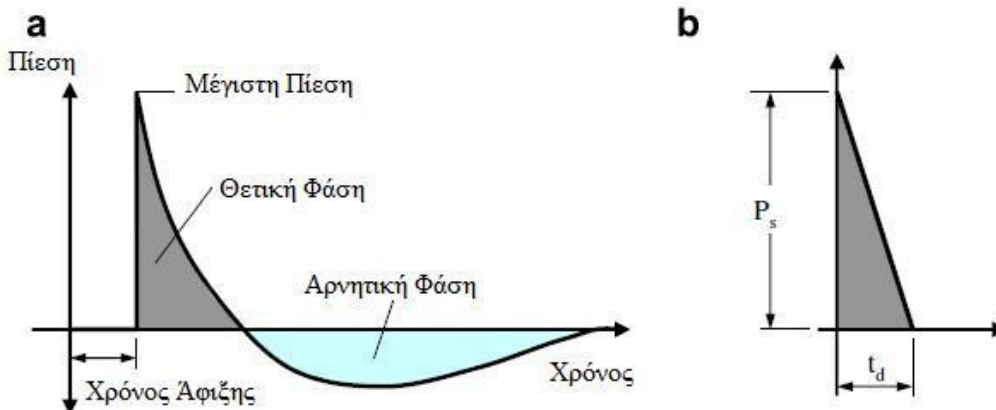
Εξίσου σημαντική είναι και η απόσταση του κτιρίου από το επίκεντρο της έκρηξης, R . Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η απόσταση, τόσο μικρότερη βλάβη προκαλείται. Σε υπάρχουσες κατασκευές η αύξηση αυτής της απόστασης μπορεί να γίνει κυρίως με ελέγχους σε οχήματα και επισκέπτες από προσωπικό ασφαλείας, ώστε τουλάχιστον να αποτραπεί το δυσμενέστερο ενδεχόμενο έκρηξης στο εσωτερικό του κτιρίου [2].

Ακόμη, η εξέλιξη μιας έκρηξης επηρεάζεται και από εμπόδια, τα οποία τυχόν συναντά το φωστικό κύμα στην πορεία του και μπορούν να συμβάλλουν στην απορρόφηση της εκλυόμενης ενέργειας [2].

Τέλος, έχει αποδειχθεί από πειραματικές μελέτες ότι πανομοιότυποι εκρηκτικοί μηχανισμοί στην ίδια απόσταση από το στόχο δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα εξαιτίας μεταβολών στις περιβαλλοντικές συνθήκες, π.χ. την υγρασία, τη θερμοκρασία και τον άνεμο [3, 4].

2.2. ΕΙΔΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Μια έκρηξη εκδηλώνεται στα γειτονικά της αντικείμενα ως μια σχεδόν στιγμιαία αύξηση της πίεσης σε μια μέγιστη τιμή. Ακολουθεί μια σύντομη θετική φάση, κατά την οποία η πίεση επιστρέφει στην αρχική της τιμή, και, τέλος, μια μεγαλύτερη σε διάρκεια, λιγότερο έντονη αρνητική φάση, όπου η πίεση αλλάζει φορά. Το όλο φαινόμενο ολοκληρώνεται μέσα σε μερικά ms. Κατά τη μελέτη μιας κατασκευής ή της ενίσχυσης μιας ήδη υπάρχουσας, η παραπάνω πορεία απλοποιείται, κάνοντας χρήση ενός ισοδύναμου τριγωνικού παλμού, αγνοώντας την αρνητική φάση (βλ. Σχ. 1) [2].



Σχήμα 1: (a) Πραγματική και (b) απλοποιημένη χρονοϊστορία πίεσης [5].

Τα χαρακτηριστικά του ισοδύναμου παλμικού φορτίου του διαγράμματος (b) του παραπάνω σχήματος υπολογίζονται ώστε να ανταποκρίνονται στη μέγιστη πίεση (p_r) και τη συνολική

ανακλώμενη ώση (i_r) στη θετική φάση του πραγματικού φορτίου [2]. Προκύπτει, έτσι, η διάρκεια σχεδιασμού του φαινομένου, t_d , ως [2]:

$$t_d = 2 i_r / p_r \quad (1)$$

Οι παραπάνω παράμετροι, p_r και i_r , μπορούν να εκτιμηθούν για διάφορους συνδυασμούς απόστασης R και βάρους εκρηκτικής ύλης W (με το W να εκφράζεται σε μάζα TNT) από διαγράμματα, συναρτήσει της κανονικοποιημένης απόστασης, Z , με [2, 5]:

$$Z = R / W^{1/3} \quad (2)$$

Υπάρχουν, όμως, διαθέσιμα αρκετά προγράμματα H/Y, όπως το CONWEP, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν γι' αυτόν το σκοπό, δίνοντας αρκετά καλά αποτελέσματα. [2]

3. ΤΙ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΖΕΙ ΜΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ – ΓΙΑΤΙ ΕΠΙΛΕΓΟΥΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Επιπλέον των συνήθων απαιτήσεων (εύκολη και γρήγορη εφαρμογή με την ελάχιστη όχληση, μικρό κόστος, διατήρηση όψης και διαστάσεων εσωτερικών χώρων του κτιρίου κλπ.), μια ενίσχυση κατασκευής έναντι εκρήξεων θα πρέπει να περιορίζει τις βλάβες της κατασκευής, βοηθώντας να διατηρηθεί σε επαρκή επίπεδα η αντοχή, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος σταδιακής κατάρρευσης [1, 3, 5, 6]. Παράλληλα με την αύξηση της αντοχής, πρέπει να αυξηθεί η πλαστιμότητα, άρα και η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας του κτιρίου. Εξίσου σημαντική είναι και η μείωση των θραυσμάτων που εκτοξεύονται από τα στοιχεία της κατασκευής, όταν αυτά πληγούν από το ωστικό κύμα της έκρηξης, και αποτελούν βασική αιτία τραυματισμών [1].

Συνήθεις λύσεις, όπως μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, μεταλλικοί κλωβοί, τοιχωματοποίηση πλαισίων και προσθήκη νέων τοιχωμάτων, κρίνονται ακατάλληλες, παρόλο που αυξάνουν την αντοχή ή/και την πλαστιμότητα της κατασκευής, κυρίως λόγω του αυξημένου κόστους, χρόνου ολοκλήρωσης και μεγέθους της επέμβασης, ενώ προσθέτουν μάζα στην κατασκευή, αλλάζοντας τη συμπεριφορά της στο σεισμό [1, 3].

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προσφορότερη μέθοδος ενίσχυσης φαίνεται να αποτελούν τα σύνθετα υλικά. Το σχετικά υψηλό κόστος τους αντισταθμίζεται από την υψηλή αντοχή και το πολύ μικρό τους βάρος. Επίσης, μπορούν πιο εύκολα να προσαρμοστούν στις διαστάσεις και σχήματα των προς ενίσχυση στοιχείων, ενώ δε μειώνουν το διαθέσιμο χώρο. Εφαρμόζονται ταχύτατα, χωρίς απαίτηση πολυάριθμου προσωπικού. Εν αντιθέσει με το χάλυβα, έχουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση, μειωμένο κόστος μεταφοράς και συντήρησης [1, 3, 4]. Τέλος, ειδικά όταν εφαρμόζονται σε μεγάλη επιφάνεια του στοιχείου και δεν έχει προηγηθεί φυσικά η δική τους αστοχία, μπορούν να συγκρατούν τα θραύσματα, π.χ. από πλάκες και τοιχοπληρώσεις [1, 4, 7].

4. ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΑ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Δυστυχώς, η υπάρχουσα έρευνα πάνω στο θέμα της ενίσχυσης κατασκευών για την αντιμετώπιση εκρήξεων είναι ακόμη περιορισμένη, αν και εντείνεται τα τελευταία πέντε περίπου χρόνια. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους:

Πρώτον, οι εκρήξεις ως σοβαρή απειλή για μια κατασκευή αναγνωρίστηκαν μετά την επίθεση στους Δίδυμους Πύργους το 2001.

Δεύτερον, λόγω της περιπλοκότητας του φαινομένου, είναι δύσκολο να μελετηθεί τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά. Όσον αφορά στην υπολογιστική ανάλυση, αυτή γίνεται με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων. Όμως, υπεισέρχονται πάρα πολλοί παράγοντες που, ει δυνατόν, πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως αυτοί που περιγράφονται στην ενότητα 2.1. Επιπλέον, υπάρχουσες αναλύσεις έχουν δείξει ότι σημαντικότερη είναι και η επιρροή της συμπεριφοράς των υλικών της κατασκευής υπό κρουστικά φορτία [1-3, 5]. Ακόμη και αν

γίνουν αρκετές απλοποιητικές παραδοχές, το πρόβλημα παραμένει σύνθετο, δυσχεραίνοντας την αναλυτική έρευνα.

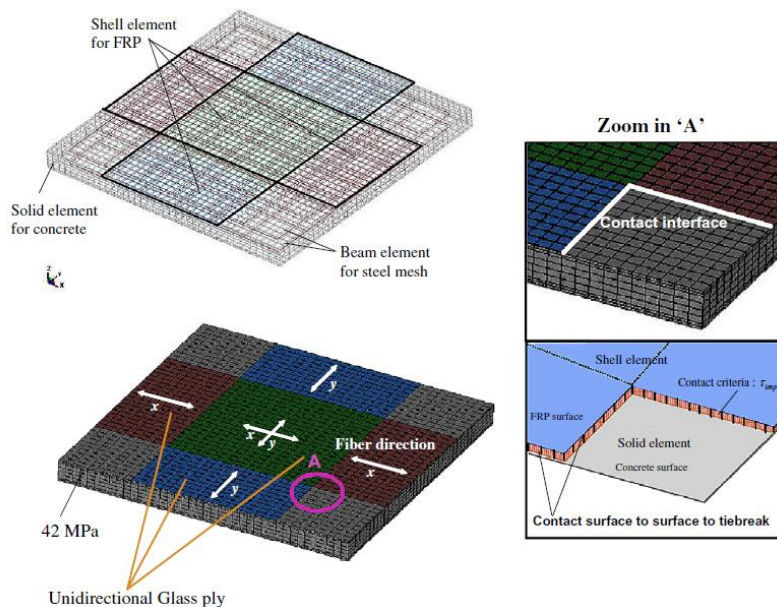
Από την άλλη πλευρά, η εκτέλεση πειραμάτων, εκτός από επικίνδυνη και δαπανηρή, έχει μεγάλο κόστος, απαιτεί ειδικούς χώρους για την πραγματοποίησή της ή ακόμη «σκοντάφτει» σε περιορισμούς σχετικά με τη χρήση εκρηκτικών [1, 4].

4.2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Η ανάλυση εκρήξεων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων έχει να αντιμετωπίσει διάφορα σύνθετα προβλήματα. Καταρχάς, οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται μια έκρηξη είναι πάρα πολλοί, ώστε να μπορέσουν να ληφθούν υπόψη με ακρίβεια, συνεπώς είναι απαραίτητες απλοποιητικές παραδοχές.

Υπάρχουν, όμως, και διαφορές ως προς τη συμπεριφορά των υλικών στις συνθήκες φόρτισης που επιβάλλει μια τέτοια φόρτιση. Συγκεκριμένα, η σχεδόν στιγμιαία αύξηση της πίεσης εξαιτίας της έκρηξης επιβάλλει υψηλό ρυθμό παραμόρφωσης. Το υλικό φτάνει την τάση διαρροής, χωρίς να έχει αναπτύξει και την παραμόρφωση διαρροής, με αποτέλεσμα να αναπτύσσει μεγαλύτερη τάση, μέχρι τελικά να επιτευχθεί η παραμόρφωση διαρροής (strain rate effect). Από αυτό το φαινόμενο επηρεάζονται, φυσικά, όλα τα υλικά από τα οποία αποτελείται η διατομή (σκυρόδεμα, ράβδοι σπλισμού και FRP), το καθένα με διαφορετικό τρόπο. Έχει βρεθεί ότι η συμβολή του φαινομένου αυτού στη γενικότερη συμπεριφορά της κατασκευής είναι πολύ σημαντική, άρα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αρκετά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί γι' αυτόν το σκοπό, αλλά υπάρχουν περιθώρια βελτίωσής τους [1-3, 5].

Εκτός από το παραπάνω φαινόμενο, έχει παρατηρηθεί πως η δυναμική φύση της φόρτισης μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση του φορτίου που απαιτείται για την αποκόλληση των FRP από το σκυρόδεμα, σε σύγκριση με αυτό που θα ήταν, αν το φορτίο επιβαλλόταν στην κατασκευή στατικά. Για την πλήρη κατανόηση αυτού του θέματος χρειάζεται περαιτέρω έρευνα [3].



Σχήμα 2: Παράδειγμα προσομοίωσης πλάκας ενισχυμένης με GFRP για ανάλυση έκρηξης [3].

4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην πλειοψηφία τους, τα πειράματα που έχουν εκτελεστεί μέχρι τώρα είχαν ποιοτικό χαρακτήρα, ήτοι απαντούσαν κατά κύριο λόγο στην ερώτηση «Βελτιώνουν τα σύνθετα υλικά

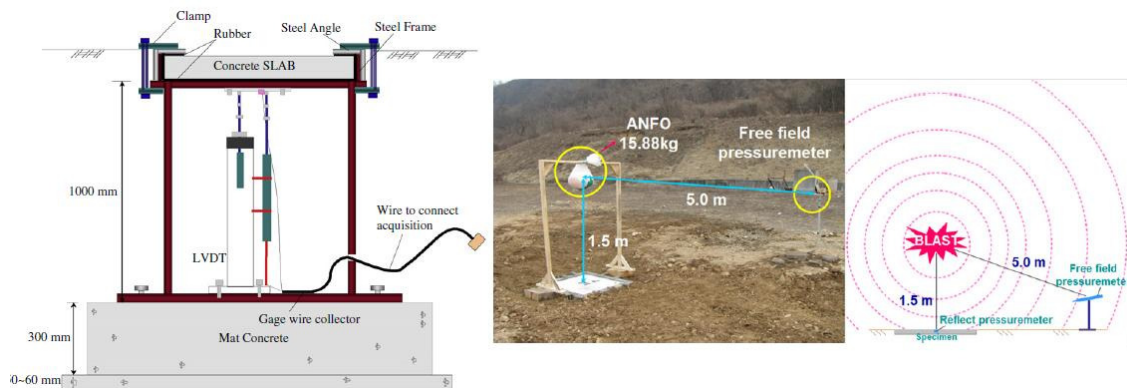
την αντοχή των ελεγχόμενων δοκιμίων σε εκρήξεις;», χωρίς να μελετούν σε βάθος τη συμπεριφορά των ενισχυμένων στοιχείων. Επίσης, πολλές φορές η λήψη δεδομένων από το πεδίο είναι αδύνατη, λόγω καταστροφής των οργάνων μέτρησης [1]. Υπάρχουν, ακόμη, περιπτώσεις, όπου τα πραγματικά δεδομένα, π.χ. η μετρούμενη ιστορία πιέσεων και οι παρατηρούμενες μετακινήσεις χαρακτηριστικών σημείων των δοκιμίων, δεν ταυτίζονται πλήρως με αυτά που προβλέπουν προηγούμενες αναλύσεις με χρήση Η/Υ. Το τελευταίο αποδίδεται σε συστηματικά σφάλματα των οργάνων μέτρησης και σε μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση, θερμοκρασία, άνεμος), παράγοντες δηλαδή που είναι αδύνατο να ληφθούν όλοι υπόψη κατά την ανάλυση [3, 4].

Στα περισσότερα πειράματα, το σύνθετο υλικό που προτιμήθηκε (χωρίς να δικαιολογείται παράλληλα αυτή η επιλογή, πιθανόν, όμως, επειδή πρόκειται για τα πιο διαδεδομένα) ήταν φύλλα ή υφάσματα ινών άνθρακα (CFRP) και γυαλιού (GFRP), με ίνες είτε σε μία είτε σε δύο κατευθύνσεις. Ως ελεγχόμενα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως πλάκες και τοιχοπληρώσεις, αφού, εκτός της κατάρρευσης του κτιρίου, σε δικές τους αστοχίες οφείλονται για τα περισσότερα θύματα, αλλά έχουν γίνει και πειράματα σε υποστυλώματα και δοκούς [1].

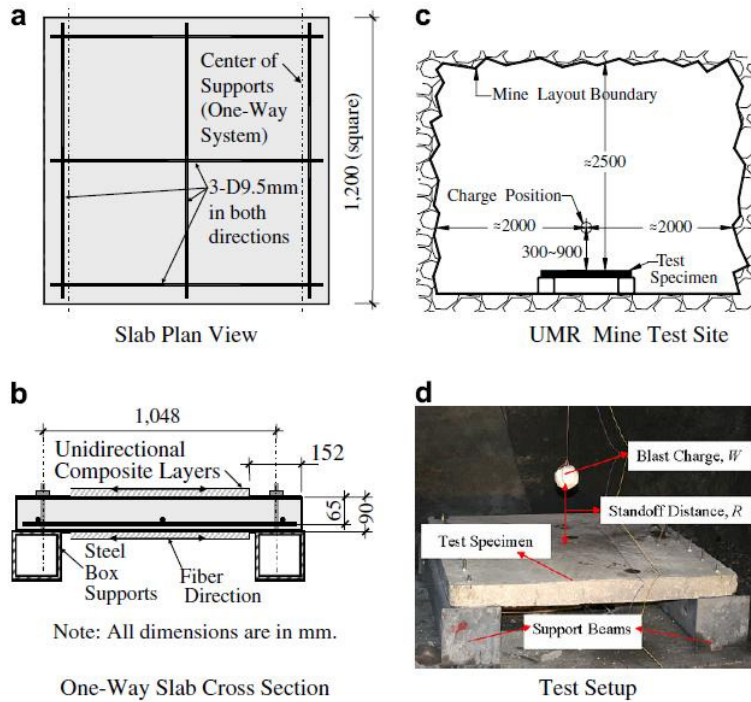
Βασικό σημείο, στο οποίο συμφωνούν όλοι οι ερευνητές, είναι ότι χάρη στη χρήση των FRP μειώθηκαν αρκετά οι παρατηρούμενες μετακινήσεις στα δοκίμια που ελέχθησαν, ενώ αυξήθηκε η απορρόφηση ενέργειας. Όσον αφορά στα πειράματα σε πλάκες, η μείωση αυτή ήταν, περίπου, από 20% έως 40% για τις μέγιστες μετακινήσεις, έφτανε σχεδόν το 70% για τις παραμένουσες, ενώ η απορρόφηση ενέργειας παρουσίαζε αύξηση της τάξης του 80% [4]. Παρόμοια ήταν τα αποτελέσματα και για υποστυλώματα, δοκούς και τοιχοπληρώσεις, στις περιπτώσεις όπου καταγράφηκαν μετρήσεις [1].

Επίσης σε πλάκες, βρέθηκε ότι μεγαλύτερο πρόβλημα αποτελεί η διάτμηση κοντά στις στηρίξεις. Προτιμητέα είναι η ενίσχυση και στις δύο πλευρές της πλάκας ή τουλάχιστον στη θλιβόμενη, καθώς ενίσχυση μόνο στην εφελκόμενη πλευρά της πλάκας δεν προσφέρει τίποτα [1, 4-6]. Οι βλάβες συγκεντρώνονται στο κέντρο των πλακών [4-6]. Στις περιπτώσεις που παρατηρήθηκε αποκόλληση, αυτή δεν ήταν στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-FRP, αλλά μεταξύ των στρώσεων του FRP [5, 6]. Αύξηση των στρώσεων από ένα σημείο και μετά δε φαίνεται να μειώνει ουσιαστικά τις παρατηρούμενες μετακινήσεις στο κέντρο της πλάκας [1].

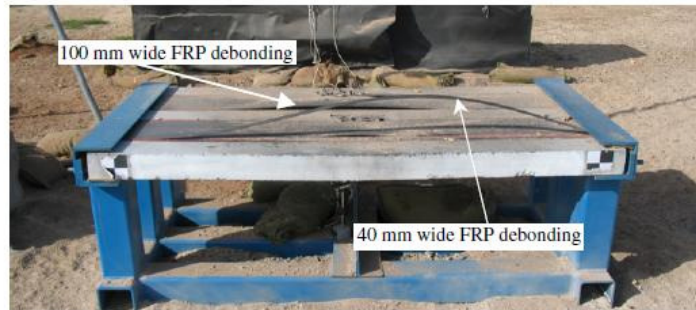
Όπως και οι πλάκες, έτσι και οι τοιχοπληρώσεις αστοχούν κυρίως σε διάτμηση [1, 7]. Οι στρώσεις του σύνθετου υλικού, όποιο κι αν ήταν αυτό, βοήθησαν επιπροσθέτως και στη συγκράτηση θραυσμάτων [1, 7]. Και εδώ, αύξηση των στρώσεων του υλικού δεν προσφέρει μείωση των μετακινήσεων [1]. Εξαιτίας της μικρής αντοχής των οπτόπλινθων, καθώς αυτοί θρυμματίζονται, μετά την ολοκλήρωση του φαινομένου και εφόσον έχει χρησιμοποιηθεί FRP με τη μορφή υφάσματος, αυτό αποκολλάται και γίνεται πιο χαλαρό [7].



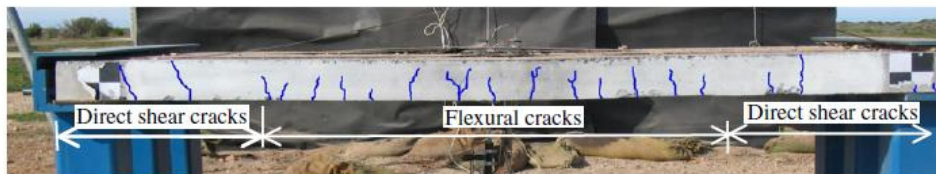
Σχήμα 3: Τυπική πειραματική διάταξη σε ανοικτό πεδίο [4].



Σχήμα 4: Τυπική πειραματική διάταξη εντός ορυχείου [5].



(a) FRP plate debonding.



(b) Crack patterns.

Σχήμα 5: Αστοχία πλάκας ενισχυμένης με CFRP. (a) Αποκόλληση του CFRP και (b) Ρωγμές [6].

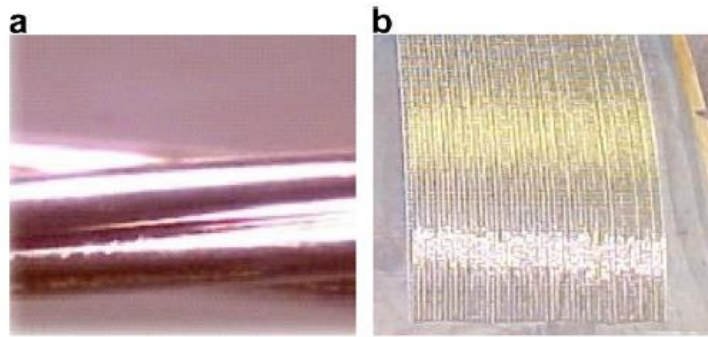
5. ΥΒΡΙΔΙΑ – ΝΕΑ ΥΛΙΚΑ

Εξαιτίας των ειδικών απαιτήσεων που προκύπτουν από την ιδιαιτερότητα του φαινομένου μιας έκρηξης, γίνεται συνεχώς προσπάθεια εύρεσης συνδυασμών υλικών (υβρίδια), αλλά και εξ ολοκλήρου νέων υλικών.

Με τα υβρίδια, εκμεταλλευόμαστε τη δυνατότητα συνδυασμού διαφόρων υλικών για τη δημιουργία ενός νέου προϊόντος με τις επιθυμητές ιδιότητες. Μέχρι σήμερα, έχουν επιχειρηθεί πολλοί συνδυασμοί, όπου το ένα υλικό είχε εξαιρετική αντοχή, ενώ το άλλο

υπερτερούσε στην ολκιμότητα. Για παράδειγμα, έχουν δημιουργηθεί υβρίδια GFRP με Kevlar (υβρίδιο K/G) [7] και CFRP με σπρέι πολυουρίας (CPU) [4]. Για το σχηματισμό του υβριδίου K/G, εξυφαινονται ίνες Kevlar μέσα στις ίνες γυαλιού και συνδέονται μαζί τους θερμοχημικά. Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα σε τοιχοπληρώσεις, το υβρίδιο K/G παρουσιάζει εξαιρετικά πλάστιμη συμπεριφορά, ευκολότερη εφαρμογή σε σχέση με το CFRP και τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με αυτό είχαν μικρότερες παραμένουσες παραμορφώσεις [7]. Το CPU προκύπτει με ψεκασμό με σπρέι πολυουρίας ενός μέλους που έχει ήδη ενισχυθεί με CFRP. Η πολυουρία, χάρη στη μεγάλη παραμορφωσιμότητά της, εκτός από αύξηση της πλαστιμότητας του υβριδίου, προσφέρει και δυνατότητα συγκράτησης των θραυσμάτων. Όπως και το υβρίδιο K/G, έτσι και η χρήση του CPU οδήγησε σε μείωση των παραμορφώσεων και αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας [4].

Ένα πολλά υποσχόμενο νέο υλικό είναι το SRP (steel fiber reinforced polymer), κατασκευασμένο από καλώδια χάλυβα υψηλής αντοχής σε μήτρα πολυμερικής ρητίνης. Ενώ η αντοχή του είναι συγκρίσιμη με του CFRP, είναι πολύ φθηνότερο, εμποτίζεται με ρητίνη εύκολα λόγω της τραχύτητάς του, δε χρειάζεται καμπύλωση τυχόν γωνιών πριν την εφαρμογή του και μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον μηχανικά αγκύρια (π.χ. ήλοι) για βελτίωση της σύνδεσης. Τα πειράματα που έγιναν με αυτό δείχνουν ότι είναι εφάμιλλο με το CFRP [5].



Σχήμα 6: (a) Καλώδια χάλυβα και (b) φύλλο SRP [5].

6. ΠΕΔΙΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Το πρόβλημα της ενίσχυσης κατασκευών έναντι εκρήξεων είναι πολυδιάστατο, προσφέροντας ένα ευρύ ερευνητικό πεδίο. Οι πολλές παράμετροι που εισάγονται εξαιτίας της φύσης της φόρτισης περιπλέκουν τα πράγματα, κάνοντας έτσι φανερή την ανάγκη διεξαγωγής περαιτέρω αναλυτικής και πειραματικής έρευνας.

Η πολύ σύντομη διάρκεια, η ταχύτητα εξέλιξης και η καταστροφική ικανότητα του φαινομένου δυσχεραίνουν την προσπάθεια κατανόησης της απόκρισης των κατασκευών μόνο μέσα από πειραματικές δοκιμές. Πρέπει, λοιπόν, να δημιουργηθούν ακριβέστερα μοντέλα προσομοίωσης, τόσο της ίδιας της έκρηξης όσο και των κατασκευών, ώστε, για παράδειγμα, να εξακριβωθεί η συνδρομή του υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης στη συμπεριφορά των υλικών και να αποδοθεί καλύτερα ο δεσμός FRP – επιφάνειας σκυροδέματος/τοιχοπλήρωσης σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης [1, 3].

Επίσης, σύμφωνα με τα υπάρχοντα πειράματα που έχουν γίνει σε πλάκες, φαίνεται ότι καθοριστική για την αστοχία των μελών αυτών ήταν η διατμητική αντοχή. Καθώς η διατμητική αστοχία είναι ψαθυρή, άρα ανεπιθύμητη, περαιτέρω δοκιμές και αναλύσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν, ώστε να βρεθεί τρόπος αποφυγής της [5].

Τέλος, υπάρχει δυνατότητα να βελτιστοποιηθούν οι τεχνικές και τα υλικά ενίσχυσης, κάνοντας χρήση υβριδικών υλικών, τα οποία συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των υλικών από

τα οποία συντίθενται, σπρέι πολυμερών ή και νέων σύνθετων υλικών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω [1, 4, 5, 7].

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υπάρχουσα έρευνα, είτε αναλυτική είτε πειραματική, καθιστά φανερή την αποτελεσματικότητα των ενισχύσεων κατασκευών με σύνθετα υλικά, ώστε να αυξηθεί η ανθεκτικότητά τους σε εκρήξεις.

Λόγω του πολύπλοκου και απρόβλεπτου χαρακτήρα μιας έκρηξης, δεν είναι δυνατόν να κατανοηθεί σε βάθος η συμπεριφορά μιας κατασκευής υπό τα ωστικά κύματα που προκαλούνται από μια έκρηξη μόνο μέσω πειραμάτων. Χρειάζεται να αναπτυχθούν ακριβέστερα προσομοιώματα της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και των υλικών από τα οποία αποτελείται. Σ' αυτά θα πρέπει, στο βαθμό που είναι δυνατό, να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι διαφορετικοί παράγοντες που επηρεάζουν μια έκρηξη. Αυτά τα προσομοιώματα, σε συνδυασμό με πειραματικά αποτελέσματα, θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων σχεδιασμού μιας ενίσχυσης.

Προφανώς, υπάρχουν αρκετά θέματα που επιδέχονται περαιτέρω έρευνα, είτε πρόκειται για τη συμπεριφορά των υλικών, είτε για την ανάπτυξη νέων, προηγμένων υλικών που ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες αντιμετώπισης μιας έκρηξης.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P.A. Buchan, J.F. Chen, "Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures – A state-of-the-art review", *Composites: Part B* 38, 2007, pp. 509 – 522.
- [2] Jon A. Schmidt, "Structural design for external terrorist bomb attacks", *STRUCTURE Magazine*, March 2003.
- [3] Jin-Won Nam, Ho-Jin Kim, Sung-Bae Kim, Na-Hyun Yi, Jang-Ho Jay Kim, "Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure", *Composite Structures* 92, 2010, pp. 1212 – 1222.
- [4] Ju-Hyung Ha, Na-Hyun Yi, Jong-Kwon Choi, Jang-Ho Jay Kim, "Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading", *Composite Structures* 93, 2011, pp. 2070 – 2082.
- [5] Pedro F. Silva, Binggeng Lu, "Improving the blast resistance capacity of RC slabs with innovative composite materials", *Composites: Part B* 38, 2007, pp. 523 – 534.
- [6] C. Wu, D.J. Oehlers, M. Rebstroft, J. Leach, A.S. Whittaker, "Blast-testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs", *Engineering Structures* 31, 2009, pp. 2060 – 2069.
- [7] Larry C. Muszynski and Michael R. Purcell, "Use of composite reinforcement to strengthen concrete and air-entrained concrete masonry walls against air blast", *Journal Of Composites For Construction*, ASCE, May 2003, pp. 98-108.