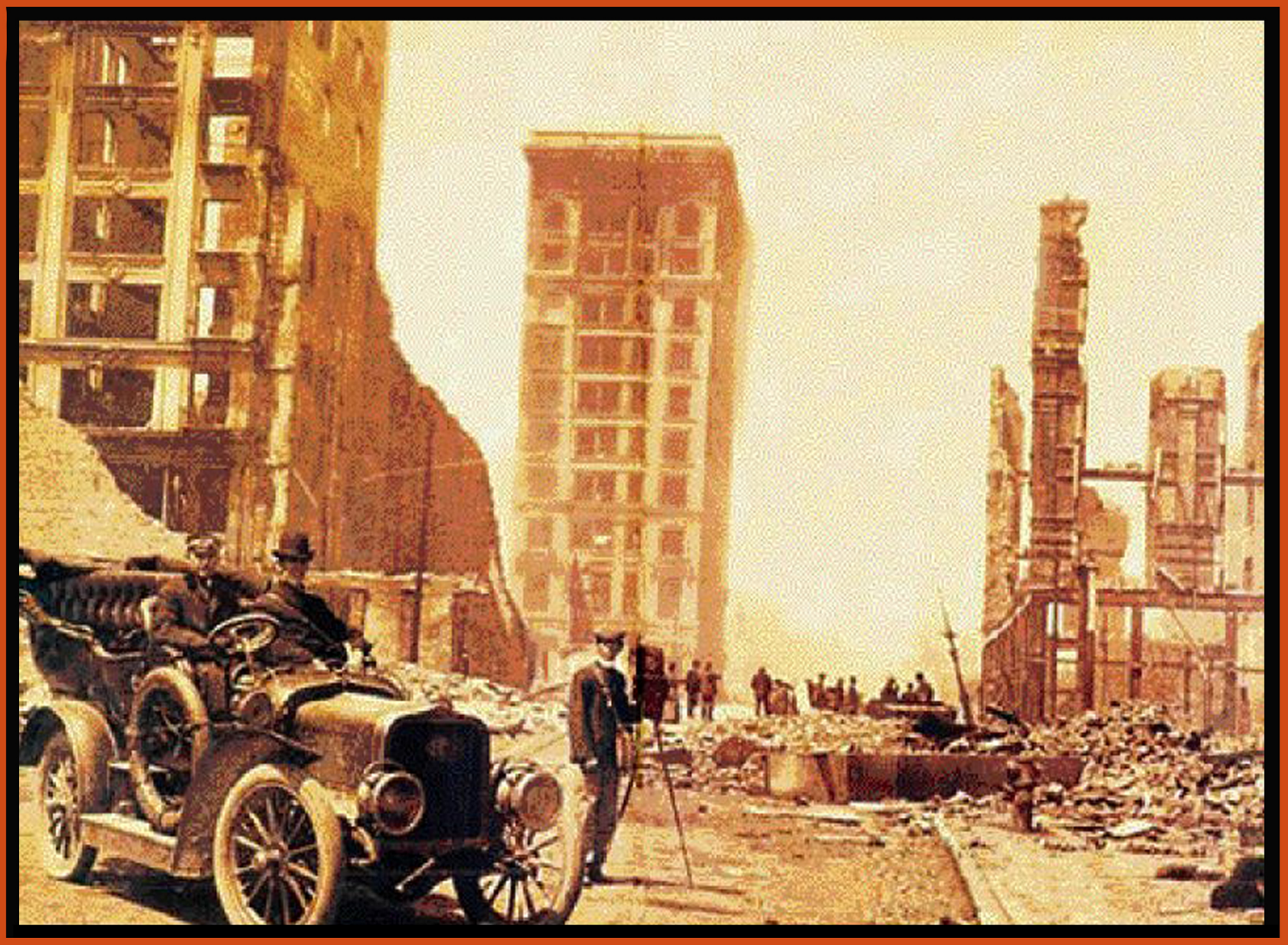
Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ (ΣΤΕΦ)
ΤΜΗΜΑ: ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ



ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (ΠΟΛΥΜΕΡΗ κ.α.)

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΔΕΛΕΓΚΟΣ Κ. ΝΙΚΗΤΑΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 28290



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

· ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΕΙΣΜΟΙ.

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ. σελ: 1
1.2. ΕΛΛΑΔΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ. σελ: 2
1.3. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ. σελ: 3
1.4. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΓΗ. σελ: 8
1.5.ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ. σελ: 9
1.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ. σελ: 14

· ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.

2.1. ΓΕΝΙΚΑ. σελ: 15
2.2. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ ΕΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ. σελ: 15
2.3 Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ. σελ: 19
2.4. ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ. σελ: 20

· ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.

3.1. ΓΕΝΙΚΑ. σελ: 22
3.2. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ. σελ: 26
3.3. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΚΟΜΒΟΥΣ ΔΟΚΩΝ – ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ. σελ: 30
3.4. ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ. σελ: 31
3.5. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ. σελ: 33
3.6. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΠΛΑΚΕΣ. σελ: 35

· ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.

4.1. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. σελ: 38
4.2. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ. σελ: 38
4.3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ. σελ: 39
4.4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΟΡΙΖΟΥΝ ΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ. σελ: 40
4.5. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. σελ: 40
4.6. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ. σελ: 41

· ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.

5.1. ΓΕΝΙΚΑ. σελ: 44
5.2.ΕΙΔΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ. σελ: 44
5.3. ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΕΣ ΚΟΛΛΕΣ. σελ: 48
5.4. ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ. σελ: 49
5.5. ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΑ ΦΥΛΛΑ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ή ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ. σελ:53
5.6. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ – ΑΓΚΥΡΙΑ. σελ: 55
5.7. ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ. σελ: 57

· ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ. σελ: 62
6.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. σελ: 64
6.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ. σελ: 66
6.4. ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. σελ: 70
6.5. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ σελ: 72
6.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. σελ: 78

· ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ.

7.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ. σελ: 104
7.2 ΤΕΧΝΙΚΉ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ – ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ. σελ: 105
7.3 ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ. σελ: 107
7.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ - ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ. σελ: 109
7.5 ΝΕΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ. σελ: 110
7.6 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ. σελ: 111
7.7 ΑΝΑΛΥΣΗ- ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ. σελ: 111
7.8 ΕΚΤΕΛΕΣΗ. σελ: 113
7.9 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ. σελ: 114
7.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ. σελ: 115

Φωτογραφίες στο εξώφυλλο: Το κέντρο του Σαν Φρανσίσκο, σχεδόν ισοπεδωμένο από τα 7,9 ρίχτερ και την επέλαση της φωτιάς, τον Απρίλιο του 1906.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΕΙΣΜΟΙ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος καταστροφή χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύνολο των αρνητικών αποτελεσμάτων μεγάλης κλίμακας, ως αποτέλεσμα της εκδήλωσης ενός φαινομένου. Χαρακτηρίζουμε ένα φαινόμενο καταστροφικό όταν προκαλεί ευρείας κλίμακας είτε κοινωνικής είτε οικονομικής φύσεως απώλειες. Βέβαια δεν προκαλούν καταστροφές όλα τα φαινόμενα ακόμα και αν αυτά, λόγω μμεγέθους, χαρακτηρίζονται εν δυνάμει ακραία καταστροφικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, ένας σεισμός με μέγεθος μμεγαλύτερο του 7 όταν έχει την εστία του σε υποθαλάσσιο χώρο ή μακριά από κατοικημένες περιοχές δεν αναμένεται να προξενήσει καταστροφές. Σε αυτό το σημείο βρίσκεται η διαφορά μιας δυνητικής καταστροφής από την καταγεγραμμένη τελικά καταστροφή μετά την εκδήλωση του φυσικού φαινομένου.

Ανάλογα με τα αίτια του φαινομένου τις διακρίνουμε σε φυσικές και ανθρωπογενείς ή τεχνολογικές καταστροφές και είναι αποτέλεσμα εκδήλωσης Φυσικών ή Τεχνολογικών δραστηριοτήτων αντίστοιχα, ικανών να προκαλέσουν βλάβες ή καταστροφές στον άνθρωπο ή το περιβάλλον. Όσον αφορά στους τεχνολογικούς κινδύνους και τις καταστροφές που συνήθως αυτοί προκαλούν ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι Αστοχίες Μεγάλων Τεχνικών Έργων, όπως Φραγμάτων, Γεφυρών, Πετροχημικών Εργοστασίων ή ακόμη και Πυρηνικών Εργοστασίων. Οι φυσικές καταστροφές είναι αποτέλεσμα της εκδήλωσης φυσικών φαινομένων ικανών να τις προκαλέσουν, δηλαδή εν δυνάμει φυσικών κινδύνων.

Το τελικό αποτέλεσμα, ήτοι ο κίνδυνος, άρα και το μέγεθος της καταστροφής, εξαρτάται από το μέγεθος και την ένταση του Φυσικού φαινομένου, από το κατά πόσο είναι ευάλωτο ή τρωτό το σύστημα που θα υποστεί την εκδήλωση του φαινομένου και από την αξία του στοιχείου που εκτίθεται στον κίνδυνο .

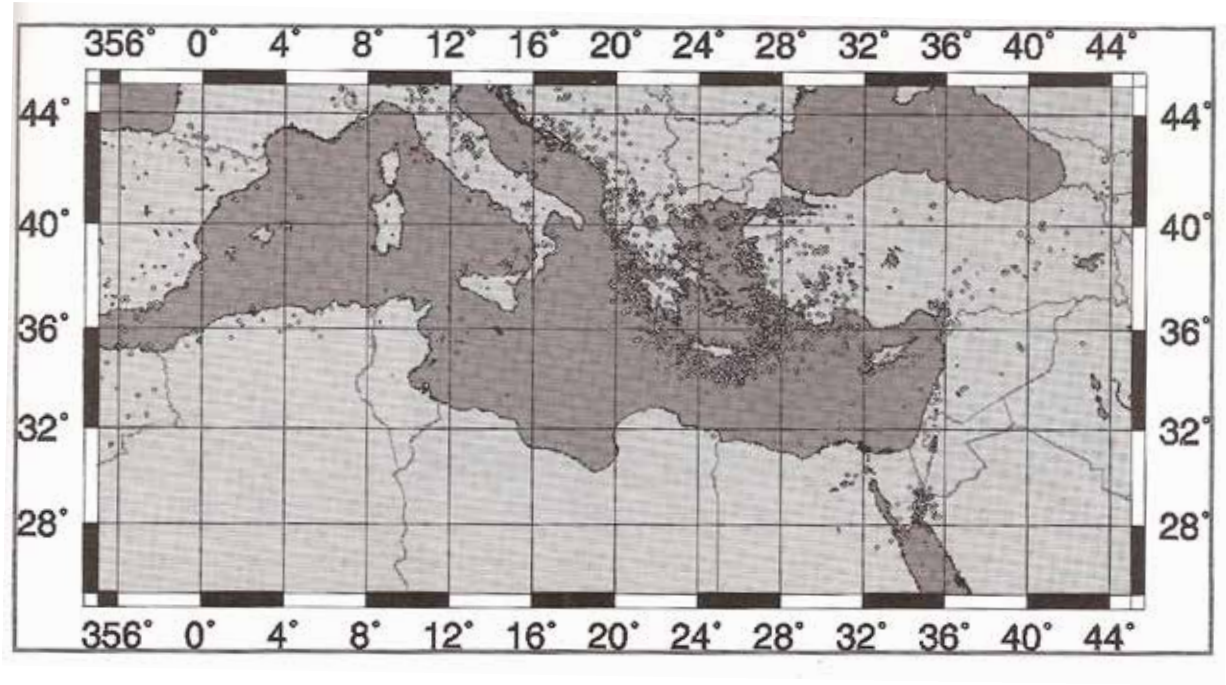
Όσον αφορά στον Ελληνικό χώρο και κατά την περίοδο 1928-2004, όπως προκύπτει από διεθνή βάση δεδομένων, 1341 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους εξ αιτίας φυσικών καταστροφών. Από τους θανάτους αυτούς οι 1036 προκλήθηκαν από σεισμούς" 115 από καταιγίδες, 84 από καύσωνες, 78 από πλημμύρες και 28 από πυρκαγιές. Κατά την ίδια περίοδο την πρώτη θέση σε αυτή τη λίστα φυσικών καταστροφών κατέχει ο σεισμός της Κεφαλονιάς (12 Αυγούστου 1953) που προκάλεσε 455 θανάτους και τη δεύτερη ο σεισμός της Αθήνας (7 Σεπτεμβρίου 1999) που προκάλεσε 140 θανάτους. Παρ' όλα αυτά την πρώτη θέση σε πληγέντες (νεκρούς, τραυματίες, άστεγου ς και οικονομικά ζημιωμένους) κατέχει ο σεισμός της Θεσσαλονίκης (20 Ιουνίου 1978) με 600.100 πληγέντες (48 νεκροί και 220 τραυματίες).

Τα ανωτέρω καθιστούν προφανή την αναγκαιότητα μελέτης όλων των μηχανισμών και των διαδικασιών που προκαλούν μία φυσική καταστροφή. Απαιτείται ανάπτυξη τεχνολογιών και μεθόδων που μπορούν να συμβάλλουν στην πρόγνωση και την πρόληψη φυσικών καταστροφών, στην εκτίμηση και αποκατάσταση των ζημιών που επιφέρουν, καθώς επίσης και στη διαχείρισή τους.

Η λεπτομερής ανάλυση των προβλημάτων που αναδύονται από την εκδήλωση φυσικών και ανθρωπογενών καταστροφών απαιτεί την εναρμόνιση της σύγχρονης ερευνητικής και

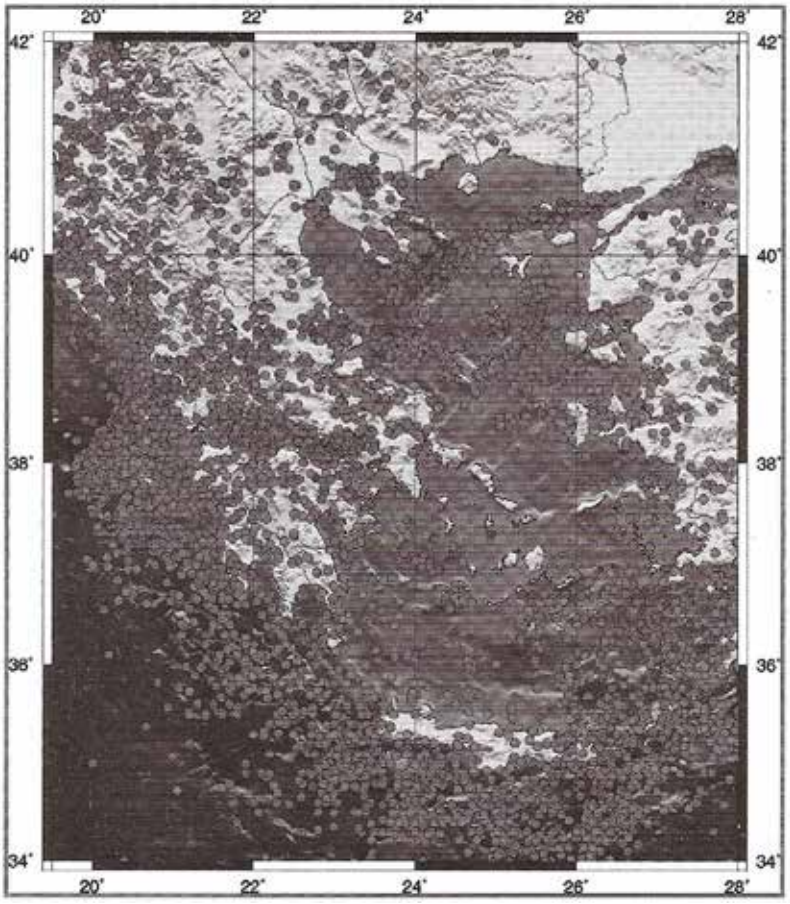
τεχνολογικής γνώσης με την εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων, με στόχο τη μείωση του κινδύνου από τις φυσικές καταστροφές. Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αίτια παραγωγής του φυσικού καταστροφικού φαινομένου, η εξέλιξή του, οι επιπτώσεις του, τα μέτρα πρόληψης και προστασίας καθώς και η διαχείριση της καταστροφής που επιφέρει. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί κυρίως στην πρόληψη και στα μέτρα προστασίας από φυσικές καταστροφές καθώς και στη διαχείριση αυτών. Έχει δειχθεί από την ελληνική και διεθνή εμπειρία ότι η δημιουργία και εξέλιξη μιας φυσικής καταστροφής μπορεί να επηρεασθεί από πολλούς παράγοντες, κυρίως από γεωλογικούς, γεωμορφολογικούς, κ.ά.

1.2. ΕΛΛΑΔΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ



Εικόνα 1. Κατανομή των επίκεντρων των σεισμών της Μεσόγειου από την οποία φαίνεται η μεγάλη σεισμικότητα της Ελλάδας

Η Ελλάδα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, έχει τη μεγαλύτερη σεισμικότητα στην Ευρώπη. Στη χώρα μας απελευθερώνεται το μισό της ενέργειας που βγαίνει από τους σεισμούς όλης της Ευρώπης. Δεν υπάρχει Ελληνική επαρχία που να μη φιλοξενεί σεισμικές εστίες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Ο τόπος μας έχει θυσιάσει εκατόμβες στον εγκέλαδο από αρχαιοτάτων χρόνων. Μέσα στην ατυχία μας όμως έχουμε και κάτι παρήγορο. Τα 3/4 των σεισμών μας είτε γίνονται στη θάλασσα, μακριά από κατοικημένες περιοχές, είτε έχουν αρκετά χιλιόμετρα βάθος, ώστε να μη προκαλούν καταστροφές.Το αποτέλεσμα δυστυχώς όλοι το ξέρουμε. Η Χώρα μας πέρα από το μέτωπο σύγκρουσης και λόγω της συγκριτικά μικρής της έκτασης είναι κατακερματισμένη με πλήθος από σεισμογόνες ζώνες.



Εικόνα 2.Επικεντρα των σεισμών στην Ελλάδα τα τελευταία 90 χρόνια (πάνω από 4.5R)

1.3. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

Είναι γνωστό από γεωφυσικές και γεωλογικές μελέτες ότι η Γη αποτελείται από τον πυρήνα, το μανδύα και τον εξωτερικό φλοιό (σχ. 3). Ο φλοιός και το επάνω μέρος του μανδύα συντίθεται από σκληρά πετρώματα με συνολικό πάχος 80 *km* περίπου και αποτελεί τη λεγόμενη *λιθόσφαιρα,* κάτω από την οποία βρίσκεται ένα παχύρρευστο στρώμα υλικού που αποτελεί την *ασθενόσφαιρα.* Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία, αλλά διαχωρίζεται σε μερικότερα τμήματα από δύο συστήματα ζωνών *διαρρήξεως:* το ηπειρωτικό σύστημα και το σύστημα των μεσοωκεάνιων ράχεων. Τα τμήματα αυτά της λιθόσφαιρας λέγονται *λιθοσφαιρικές πλάκες.*

Η *γένεση* των σεισμών αποδίδεται στις σχετικές κινήσεις και συγκρούσεις των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι κινήσεις αυτές οφείλονται σε εφαπτομενικές πιέσεις που ασκούν στους πυθμένες των πλακών τα *ρεύματα μεταφοράς* του υλικού του μανδύα, λόγω των ποικίλων φυσικών διεργασιών που γίνονται στο εσωτερικό του. Έτσι,ανάλογα με την κατεύθυνση των ρευμάτων, οι λιθοσφαιρικές πλάκες μπορεί να συγκλίνουν (στις ωκεάνιες τάφρους), να αποκλίνουν (στις μεσοωκεάνιες ράχεις), ή τέλος, να βυθίζεται πλάγια η μία κάτω από την άλλη και να φθάνει σε βάθος 700 *km* μέσα στο μανδύα, όπου τελικά διαλύεται.

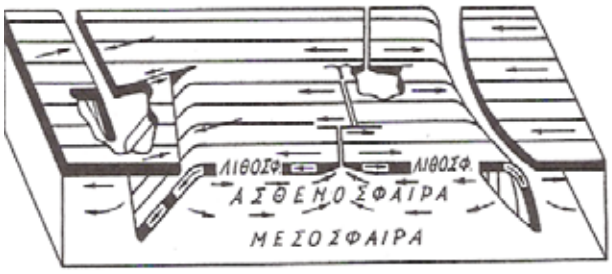
Με την παραπάνω *θεωρία* των λιθοσφαιρικών πλακών, που γίνεται σήμερα αποδεκτή από τους Σεισμολόγους, ερμηνεύεται πλήρως η γένεση των *τεκτονικών* σεισμών, οι οποίοι αποτελούν και το σύνολο σχεδόν των σεισμών.



Σχ.3. Τομή της γήινης σφαίρας

Σεισμοί πού σημειώνονται σε περιοχές ενεργών ηφαιστείων και οφείλονται σε πιέσεις, κρούσεις και τριβές πού αναπτύσσονται κατά την έξοδο της λάβας, των αέριων και των αναβλημάτων στην επιφάνεια της Γης λέγονται ηφαιστειογενείς σεισμοί. Πρόκειται για σεισμούς τοπικού χαρακτήρα και μικρής συνήθως εντάσεως.
Σεισμοί ακόμη ε[ναι δυνατόν να προκληθούν και από κατακρημνίσεις βραχωδών μαζών από την οροφή σπηλαίων και άλλων κοιλοτήτων πού βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης. Πρόκειται και στην περίπτωση αύτή για σεισμούς τοπικού χαρακτήρα μικρής συνήθως εντάσεως, οι οποίοι λέγονται εγκατακρημνισιγενείς σεισμοί. Σεισμοί αυτού του είδους ε[χαν σημειωθεί κατά το παρελθόν σε περιοχή του φράγματος Κρεμαστών κατά την πε-ρίοδο πληρώσεως του ταμιευτήρια, εξαιτίας υπόγειων κατακρημνίσεων στο φλύσχη της 'περιοχής, λόγω της ευαισθητοποιήσεως του από την πλήρωση του ταμιευτήρια.

.



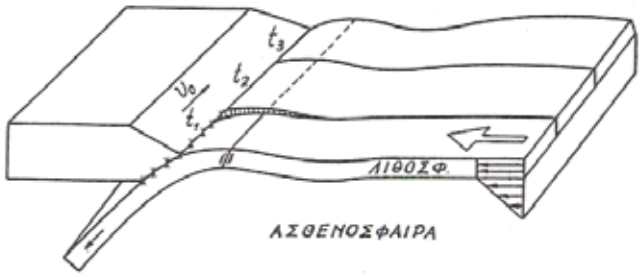
Σχ 4.Η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών

Στο σχ.4 φαίνεται, μεταξύ άλλων, η περίπτωση των πλακών που αποκλίνουν εκατέρωθεν της μεσοωκεάνιας ράχεως, όπου αναδύεται θερμό υλικό από το μανδύα

και στη συνέχεια ψύχεται και δημιουργεί τις πλάκες αντίθετα, στα απέναντι σύνορα των πλακών αυτών (ηπειρωτικό σύστημα διαρρήξεως) έχουμε σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών και ειδικότερα διολίσθηση της πυκνότερης ωκεάνιας πλάκας κάτω από την ηπειρωτική και καταβύθισή της στο εσωτερικό του μανδύα.

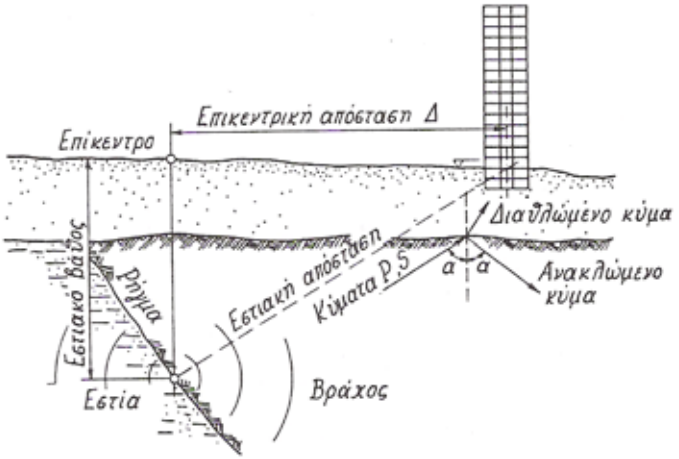
Οι προηγούμενες σχετικές κινήσεις των πλακών συνεπάγονται την προοδευτική αύξηση των τάσεων και παραμορφώσεων στις περιοχές επαφής τους και την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας παραμορφώσεως. Έτσι, όταν οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπερβούν την αντοχή των πετρωμάτων, επέρχεται απότομη θραύση και δημιουργία του πρώτου *σεισμικού ρήγματος*. Η ενέργεια που απελευθερώνεται θέτει σε παλμική κίνηση τα εκατέρωθεν του ρήγματος πετρώματα, που διαδίδεται στη συνέχεια στο χώρο με τη μορφή *σεισμικών κυμάτων*.

Ο μηχανισμός θραύσεως των πετρωμάτων εμφανίζει μεγάλη ποικιλία μορφών και δεν είναι εύκολο προς το παρόν να περιγραφεί με ακρίβεια και πληρότητα. Στο σχ.5 φαίνεται το μοντέλο του *Anderson,* με το οποίο ερμηνεύεται η *κατεύθυνση* και η *ταχύτητα* διαδόσεως των τάσεων στο ρήγμα σε διαδοχικούς σεισμούς. Η υπόψη κατεύθυνση έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί έχει παρατηρηθεί ότι συμπίπτει με αύξηση των προκαλουμένων βλαβών.



Σχ.5 Το μοντέλο του Anderson.

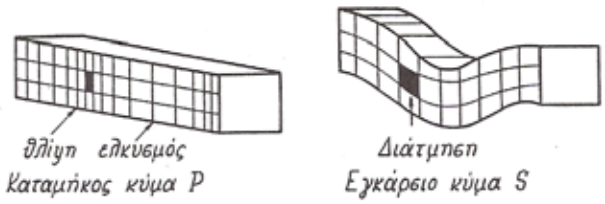
Η περιοχή ενάρξεως της ρήξεως -που στη συνέχεια επεκτείνεται- λέγεται *εστία* του σεισμού ή *υπόκεντρο,* ενώ το μικροσεισμικό *επίκεντρο* βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο επάνω στην επιφάνεια της Γης (σχ.6). Ανάλογα με το *εστιακό Βάθος h* οι σεισμοί λέγονται επιφανειακοί *(h < 60 km),* ενδιαμέσου βάθους *(h = 60 - 300 km)* και σεισμοί βάθους *(h > 300 km),* οι οποίοι δεν γίνονται αισθητοί στην επιφάνεια της Γης.



Σχ.6 Γεωμετρικά στοιχεία σεισμού

Οι επιφανειακοί σεισμοί εμφανίζονται συνήθως με τη μορφή μιας σεισμικής ακολουθίας, δηλαδή υπάρχουν μικρά σχετικώς χρονικά.
διαστήματα με έντονη σεισμική δράση. Ο μεγαλύτερος σεισμός της ακολουθίας λέγεται κύριος σεισμός, οι προηγούμενοι από αυτόν σεισμοί λέγονται προσεισμοί και οι επόμενοι μετασεισμοί. Με κέντρο την εστία η ταλάντωση διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις με τη μορφή κυμάτων χώρου (σχ.7).

.

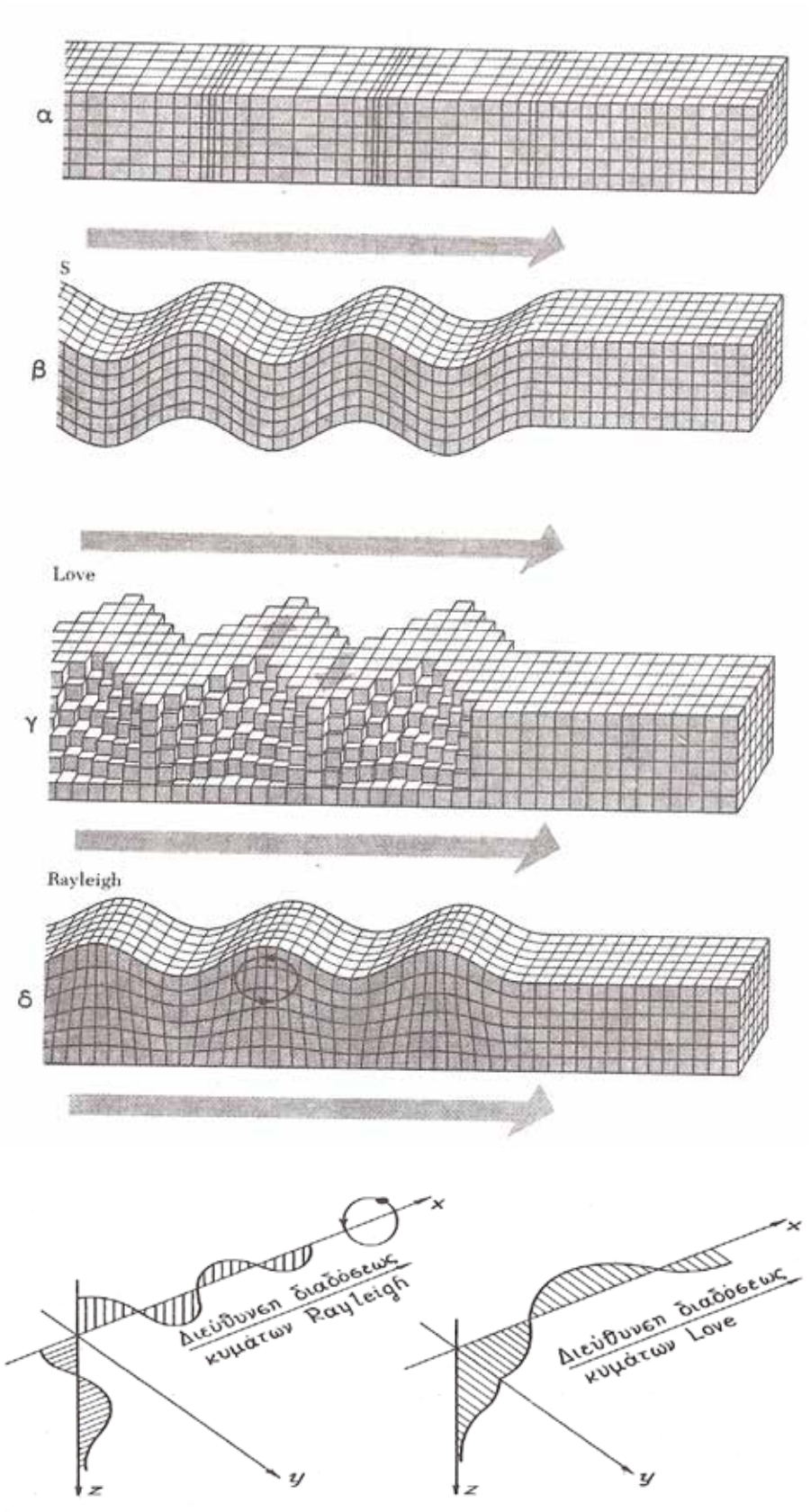


Σχ.7 Τα κύματα χώρου

Τα κύματα αυτά διακρίνονται στα *επιμήκη P,* που διαδίδονται με ταχύτητα (7 - 8) *km/s* περίπου και στα *εγκάρσια* S, που διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα (4 - 5) *km/s.* Τα πρώτα είναι κύματα πιέσεως-ελκυσμού, προκαλούν μεταβολή του όγκου και έχουν μικρή περίοδο και μικρό πλάτος ταλαντώσεως , τα δεύτερα είναι διατμητικά με πολύ μεγαλύτερη περίοδο και πλάτος ταλαντώσεως, προκαλούν μεταβολή του σχήματος και για το λόγο αυτό δεν διαδίδονται σε ρευστά μέσα.

Στις περιοχές συνεχειών των εδαφικών στρωμάτων τα παραπάνω κύματα ανακλώνται και διαθλώνται και φθάνοντας στην επιφάνεια της Γης δημιουργούν τα *επιφανειακά κύματα (L* - κύματα) (σχ.8). Αυτά διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα από τα χωρικά, έχουν μεγάλο πλάτος ταλαντώσεως και διακρίνονται σε κύματα *Rayleigh (R* - κύματα) και σε κύματα *Love* (Q - κύματα). Όπως φαίνεται στο σχ. 8 κατά τη διάδοση των κυμάτων *Rayleigh* τα υλικά σημεία διαγράφουν κατακόρυφες ελλείψεις, ενώ κατά τη διάδοση των κυμάτων *Love* (σε στρωματοποιημένο πάντοτε μέσο) τα υλικά σημεία κινούνται παράλληλα προς την επιφάνεια και κάθετα προς τη διεύθυνση διαδόσεως.

Από τη σύνθεση όλων των προηγούμενων κυμάνσεων προκύπτει η τελική κίνηση στο τυχόν σημείο της επιφάνειας. Η υπόψη κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε τρεις *ανεξάρτητες* συνιστώσες, δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη. Οι δύο οριζόντιες συνιστώσες είναι περίπου *ισότιμες* και σαφώς μεγαλύτερες από την κατακόρυφη, εκτός από την περιοχή του επικέντρου. Είναι, τέλος, αξιοσημείωτο ότι σε δεδομένη θέση δεν υπάρχει χαρακτηριστική *διεύθυνση* του σεισμού.



Σχ.8. Τα επιφανειακά κύματα

1.4. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΓΗ

Οι σεισμικές εστίες των μεγάλων σεισμών διατάσσονται βασικά σε δύο ζώνες επάνω στη Γη, οι οποίες συμπίπτουν με τις αντίστοιχες ζώνες ηφαιστειακής δραστηριότητας (σχ. 9) και οι όποιες είναι διατεταγμένες στα 0ρια των λιθοσφαιρικών πλακών. οι δύο αυτές ζώνες είναι ή Περιειρηνική και ή Μεσόγειο-Υπερασιατική. Η Περιειρηνική περιλαμβάνει τις ακτές του Ειρηνικού την Καραϊβική, το ΝΔ τμήμα της Νέας Ζηλανδίας και τις περιοχές των Νότιων Αντίλλων και των Μακάριων νήσων. Η Μεσόγειο-Υπερασιατική ζώνη περιλαμβάνει τις παραμεσογειακές χώρες, την Ερυθρά Θάλασσα, τον Περσικό, Αραβικό και Βεγγαλικά κόλπο, τις Άνω Ινδίες, το Ινδικό Αρχιπέλαγος, την Νέα Γουϊνέα, την Ανατολική Αυστραλιανή θάλασσα και τις Αζόρες νήσους. Η λεκάνη του Ειρηνικού ωκεανού, η Βραζιλία, ή ΒΑ Αμερική, ή Αυστραλία και ή Βαλτική θεωρούνται σεισμικός αδρανείς περιοχές, γιατί διαμορφώθηκαν κατά την Προκάμβρια περίοδο και αποτελούνται από εξαιρετικά δύσκαμπτους σχηματισμούς πού βρίσκονται σε ισορροπία.

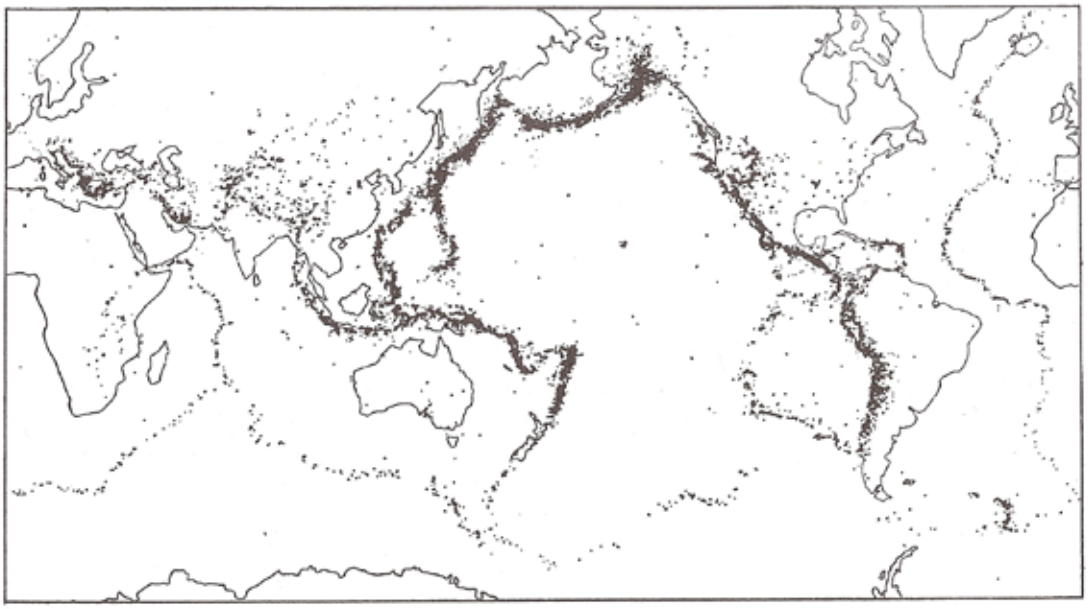
Στον Ελλαδικό χώρο παρατηρείται αρκετά έντονη σεισμική δράση, γιατί οι τεκτονικές κινήσεις πού διαμόρφωσαν το χώρο αυτό σημειώθηκαν κατά την τελευταία γεωλογική περίοδο και στο τεκτονισμένο υπέδαφος δεν έχει αποκατασταθεί ακόμη ασφαλής ισορροπία. Πράγματι οι περιοχές της Ελλάδος όπου εμφανίζονται οι σεισμοί βρίσκονται επάνω η κοντά σε τεκτονικά ρήγματα, όπως:

α. Στη ζώνη κατά μήκος των ακτών του Ιόνιου πελάγους όπου υπάρχει ομώνυμο ρήγμα,

β. Στη ζώνη κατά μήκος του Κορινθιακού κόλπου όπου υπάρχει το τεκτονικό ρήγμα από το όποίο προέκυψε ο κόλπος αυτός.

γ. Στην Ευβοϊκή ζώνη ή όποία περιλαμβάνει την περιοχή κατά μήκος του Ευβοϊκού κόλπου.

Άλλες σεισμογενείς περιοχές της Ελλάδος είναι ή περιοχή των Κυκλάδων, ή Θεσσαλία, ή Χαλκιδική, ή Αιτωλοακαρνανία κα.



Σχ 9. Κατανομή σεισμικών εστιών πάνω στη Γη,

1.5.ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Για τη «μέτρηση» των σεισμών και των επιπτώσεών τους στον άνθρωπο και τον περιβάλλοντα χώρο χρησιμοποιούνται δύο ποσότητες: το μέγεθος *M* και η ένταση *I* του σεισμού. Επίσης για τις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού ιδιαίτερη σημασία έχουν οι καταγραφές με ειδικά όργανα (επιταχυνσιόμετρα) των εδαφικών κινήσεων στην επιφάνεια της Γης, λόγω *ισχυρών σεισμικών δονήσεων (strong ground motion)*. Με τα όργανα αυτά, που αποτελούν ειδικό τύπο σεισμομέτρου, γίνεται απευθείας μέτρηση της επιταχύνσεως του εδάφους οριζόντια (π.χ. βορράς – νότος, ανατολή - δύση) και κατακόρυφα. Στη συνέχεια, με χρονική ολοκλήρωση, υπολογίζεται η ταχύτητα και η μετατόπιση του εδάφους στο θεωρούμενο σημείο.

α. *Μέγεθος*. Η ποσοτική σύγκριση διάφορων σεισμών μεταξύ τους γίνεται με τη λεγόμενη *κλίμακα μεγεθών του Richter*. Ο *Richter*, έπειτα από συγκριτικές μελέτες πολλών σεισμών στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α., όρισε αρχικά (1935) το τοπικό *μέγεθος* M_L ενός σεισμού από τη σχέση :

$$M_L = Log\ \frac{A(\Delta)}{A_0(\Delta)} = Log\ A(\Delta) - Log\ A_0(\Delta)$$

όπου Δ η επικεντρική απόσταση και A, A_o τα μέγιστα πλάτη αναγραφής, σε σεισμόμετρο *Wood-Anderson*, του θεωρούμενου σεισμού και ενός *πρότυπου* σεισμού αντίστοιχα, ως πρότυπος σεισμός ή σεισμός *μηδενικού* μεγέθους ορίσθηκε ο σεισμός που γράφεται με πλάτος 1 μ (μικρό) σε απόσταση $\Delta = 100\ km$. Στον προηγούμενο τύπο είναι $\Delta \leq 600\ km$ και το $A_o\ (\Delta)$ δίδεται από πίνακες που έχουν συνταχθεί.

Η κλίμακα του τοπικού μεγέθους M_L στηρίζεται στη μέτρηση του μέγιστου πλάτους των εγκάρσιων κυμάτων S από τα σεισμόμετρα *Wood-Anderson* με ιδιοπερίοδο *0,8 sec* και είναι κατάλληλη μόνο για κοντινούς σεισμούς. Έτσι, για τον υπολογισμό του μεγέθους σεισμών με διάφορα εστιακά βάθη και μεγάλες επικεντρικές αποστάσεις, με τη χρήση οποιουδήποτε σεισμομέτρου, επινοήθηκε αργότερα από τον *Gutenberg* (1945) η κλίμακα του *επιφανειακού μεγέθους* M_s και η κλίμακα *του ενιαίου* μεγέθους M_b (για εστιακά βάθη > 60 *km*). Η πρώτη στηρίζεται σε μετρήσεις πλατών επιφανειακών κυμάτων και η δεύτερη χωρικών *P*-κυμάτων.

Όλα τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με ορισμένες σχέσεις, ενώ με τον γενικό όρο μέγεθος *M* εννοούμε το επιφανειακό μέγεθος M_s. Αυτό για τον ελληνικό χώρο δίδεται από τον τύπο :

$$M = Log\ a + 1{,}41\ Log\Delta + 0{,}2$$

όπου a το ημιάθροισμα των μέγιστων πραγματικών πλατών των δύο οριζόντιων συνιστωσών της μμέγιστης κινήσεως σε *(m)* και Δ η επικεντρική απόσταση σε *(km)*.

Η κλίμακα μεγεθών είναι *ανοικτή* τόσο προς τα άνω όσο και προς τα κάτω. Οι σεισμοί με μέγεθος M > 2 γίνονται γενικά αισθητοί από τον άνθρωπο, ενώ με μέγεθος M > 5

προκαλούν διάφορες βλάβες σε κατοικημένες περιοχές. Ο μεγαλύτερος σεισμός στον κόσμο (Λισσαβόνα, 1755) εκτιμάται ότι είχε μέγεθος 9,25, ενώ ο μεγαλύτερος σεισμός που μετρήθηκε μέχρι σήμερα είχε μέγεθος 8,75. Σημειώνουμε, τέλος, ότι λόγω των πολλών απλουστεύσεων που γίνονται δεκτές για την περιγραφή του σύνθετου φυσικού φαινομένου, η μέτρηση του μεγέθους περιέχει πάντοτε μία *αβεβαιότητα* της τάξεως του 0,2 έως 0,3.

Το μέγεθος ενός σεισμού, όπως προκύπτει από τον ορισμό του, αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο *συγκρίσεως* μικρών και μεγάλων σεισμών και όχι έναν ποσοτικό δείκτη των φυσικών ιδιοτήτων της πηγής παραγωγής τους. Εντούτοις, με διάφορες μελέτες που έγιναν, επιτεύχθηκε ο συσχετισμός του μμεγέθους με ένα απόλυτο φυσικό μέγεθος, ήτοι με την *ενέργεια* που εκλύεται στην εστία ενός σεισμού. Έτσι, βρέθηκε ότι η παραπάνω ενέργεια (σε έργια) για M > 5 δίδεται από τη σχέση:

$$LogE=12,24 + 1,44\,M$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι αύξηση του μεγέθους κατά μία μονάδα συνεπάγεται αύξηση της ενέργειας κατά 28 φορές περίπου. Τα παραπάνω ισχύουν για μεγέθη μέχρι $M = 7$, πέρα από τα οποία το μέγεθος δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο της ενέργειας, λόγω του φαινομένου *κορεσμού* του μεγέθους. Στην περίπτωση αυτή καλύτερο μέτρο της ενέργειας αποτελεί το μέγεθος της λεγόμενης *σεισμικής ροπής*.

b. Ένταση. Με τον όρο μακροσεισμική *ένταση I* ενός σεισμού επιδιώκεται η θέσπιση ενός «μέτρου» των επιπτώσεων του υπόψη σεισμού στον άνθρωπο και στον περιβάλλοντα χώρο. Μία τέτοια όμως *αντικειμενική* μέτρηση θα μπορούσε θεωρητικά να γίνει με τη βοήθεια πολλών τυχαίων μεταβλητών και όχι με μία μόνη παράμετρο διότι το βλαπτικό δυναμικό ενός σεισμού εξαρτάται από τη συσχέτιση της σεισμικής κινήσεως (επιτάχυνση, συχνοτικό περιεχόμενο, κλπ.) με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών (ιδιοπερίοδοι, αποσβέσεις, κλπ.). Έτσι π.χ. η ίδια σεισμική δόνηση είναι δυνατόν να είναι καταστροφική για τις δύσκαμπτες κατασκευές και ελάχιστα βλαπτική για τις εύκαμπτες ή αντίστροφα.

Εντούτοις, για την ποιοτική εκτίμηση των βλαβών δεδομένων σεισμών, έχουν επινοηθεί ορισμένες εμπειρικές κλίμακες μακροσεισμικών εντάσεων με καθορισμένη, υποκειμενικά άλλωστε, βαθμονόμηση. Οι βασικές κλίμακες που χρησιμοποιούνται είναι:

- *Η δωδεκάβαθμα κλίμακα Mercalli.*
- *Η δωδεκάβαθμα κλίμακα Medvedev-Sponheur-Karnik (MSK).*
- *Η επταβάθμια Ιαπωνική κλίμακα (JMA).*

Η πρώτη από τις παραπάνω κλίμακες προδιαγράφει ως εξής τους βαθμούς εντάσεως:

Σεισμογραφική κλίμακα Mercalli - Sieberg

Βαθμοί	Χαρακτηροστοκά αποτελέσματα σεισμού	Επιτάχυνση γ m/sec 2
1	Αντιληπτός μόνο από ευαίσθητα όργανα (σεισμογράφους).	0.0000-0.0025
2	Αισθητός μόνο υπό ορισμένες συνθήκες (π.χ.γίνεται αισθητός από όσους βρίσκονται στους ανωτερους ορόφους ενός υψηλού οικοδομήματος).	0.0025-0.0050
3	Αισθητός από όσους βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας.	0.0050-0.0100
4	Αντιληπτός μέσα στα σπίτια και έξω στο ύπαιθρο (τρίζουν τϐ τζάμια)	0.0100-0.0250
5	Αισθητός από όλους (ανατρέπονται τα αντικείμενα,κτυπάνε οι καμπάνες των εκκλησιών κ.λ.π.).	0.0250-0.0500
6	Γενικό ξύπνημα, ελαφρές ζημίες στις οικοδομές (ρωγμές σε ασβεστοκονιάματα	0.0500-0.1000
7	Πτώση καπνοδόχων, πτώση επιχρισμάτων	0.1000-0.2500
8	Μερική κατεδϐφοση οικοδομών	0.2500-0.5000
9	Ολική κατεδάφιση ορισμένων οικοδομών, σποραδικά ανθρώπινα θύματα.	0.5000-1.0000
10	Καταστροφή όλων των λιθόκτιστων οικοδομών, ρωγμές στο έδαφος, πολλά θύματα.	1.0000-2.5000
11	Κατάρρευση κάθε οικοδομικού έργου.	2.5000-5.0000
12	Πλήρης καταστροφή κάθε ανθρωπινου έργου, τεκτονικές κουνήσεις με μεταβολή _της επιφανειακής τοπογραφίας.	> 5.0000

Η κλίμακα *M.S.K.* είναι ακριβέστερη από την προηγούμενη, γιατί λαμβάνει υπόψη το είδος και το ποσοστό των κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβες.

Η γεωγραφική, τέλος, κατανομή των εντάσεων σε μία περιοχή γίνεται με τις *ισόσειστες καμπύλες* που την χωρίζουν σε τμήματα ίσης εντάσεως. Στην *πλειόσειστη* περιοχή έχουμε τη μέγιστη ένταση και στο κέντρο της περιοχής αυτής βρίσκεται το *μακροσεισμικό επίκεντρο* που, γενικά, δεν ταυτίζεται με το *μικροσεισμικό επίκεντρο* του σχ.6.

Εκτός από τις προηγούμενες εμπειρικές κλίμακες που βασίζονται στην παρατήρηση πραγματικών βλαβών, έχουν προταθεί και ορισμένες άλλες ποσότητες ως «μέτρα» των μακροσεισμικών επιπτώσεων των σεισμών. Μία τέτοια ποσότητα είναι η φασματική *ένταση (Housner)* :

$$SI = \int_{0,1}^{2,5} S_V \, dT$$

όπου S_v η φασματική ταχύτητα και T η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος των κατασκευών, που βρίσκεται συνήθως στο διάστημα *(0,1* - 2,5). Το *SI* συνδέεται άμεσα με τη συνολική *ενέργεια* που εισάγεται από το σεισμό στις κατασκευές κι η αξιοπιστία του εξαρτάται, εκτός των άλλων, από την *ομοιόμορφη* κατανομή των ιδιοπεριόδων των κατασκευών στο διάστημα *0,1* - 2,5. Επίσης, μία δεύτερη ποσότητα είναι η ένταση του *Arias:*

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a^2(t) \, dt$$

όπου *α (t)* η εδαφική επιτάχυνση και t_o Ο συνολικός χρόνος του σεισμού. Εδώ λαμβάνεται υπόψη η συνδυασμένη επιρροή των επιταχύνσεων και της διάρκειας του σεισμού. Πάντως, παρά τον «αντικειμενικό» χαρακτήρα των προηγούμενων μεγεθών, είναι φανερό ότι στηρίζονται σε μεμονωμένες παραμέτρους και όχι στο συνδυασμό πολλών παραμέτρων.

c. *Εδαφικές κινήσεις.* Η εδαφική κίνηση στο τυχόν σημείο του εδάφους προσδιορίζεται με τη βοήθεια τριών επιταχυνσιογραφημάτων που δίνουν τις επιταχύνσεις του σημείου συναρτήσει του χρόνου· τα δύο επιταχυνσιογραφήματα αναφέρονται στις δύο οριζόντιες (και κάθετες μεταξύ τους) συνιστώσες της κινήσεως και το τρίτο στην κατακόρυφη συνιστώσα. Η καταγραφή γίνεται πρώτα σε φιλμ, κατά τη διάρκεια του σεισμού από τα επιταχυνσιόμετρα και στη συνέχεια ψηφιοποιείται και «διορθώνεται» για να απαλλαγεί από ορισμένες παρασιτικές επιρροές. Με διαδοχική ολοκλήρωση των επιταχύνσεων υπολογίζονται οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις του σημείου. Στα σχ.1.8 α, *b* φαίνονται τα «διορθωμένα» διαγράμματα επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων που έχουν καταγραφεί κατά το σεισμό της Καλαμάτας (13/9/86).

Σε ένα επιταχυνσιογράφημα διακρίνουμε, γενικά, τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή, με τις πολύ μικρές τεταγμένες, αντιστοιχεί· στα ταχύτερα διαδιδόμενα επιμήκη P-κύματα, ενώ η δεύτερη αρχίζει με την άφιξη των εγκαρσίων S-κυμάτων που προκαλούν απότομη αύξηση των τεταγμένων· από τη διαφορά των χρόνων αφίξεως των παραπάνω κυμάτων υπολογίζεται η *απόσταση* της εστίας από το σημείο καταγραφής. Η τρίτη περιοχή αρχίζει με την άφιξη και των επιφανειακών L-κυμάτων, εμφανίζει επίσης μεγάλες τετα-
-γμένες και ο διαχωρισμός της από την προηγούμενη περιοχή δεν είναι σαφής.

Οι τρεις συνιστώσες των επιταχύνσεων ενός σημείου είναι *ανεξάρτητες* μεταξύ τους, αλλά οι δύο οριζόντιες εμφανίζουν, γενικά, πολλές ομοιότητες, τόσο ως προς τις

συχνότητες όσο και ως προς τις μέγιστες επιταχύνσεις. Η κατακόρυφη συνιστώσα διαφέρει εμφανώς από τις δύο οριζόντιες , περιέχει κατά κανόνα *υψηλές* συχνότητες και η μέγιστη επιτάχυνσή της ισούται περίπου με τα 2/3 της μέγιστης οριζόντιας. Εντούτοις αυτό το τελευταίο δεν είναι απόλυτο, γιατί υπήρξαν και περιπτώσεις σεισμών όπου η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση ήταν μεγαλύτερη από την οριζόντια (π.χ. σεισμός *EL Centro n°* 6, Καλιφόρνια 1979, με μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση 1,75 *g* έναντι 0,5 *g* της οριζόντιας).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συνάρτηση επιταχύνσεως από πιθανοτική άποψη είναι μία *τυχαία* συνάρτηση του χρόνου που καθορίζει *μη* στάσιμη διαδικασία *(nonstationary process).* Το γεγονός αυτό δημιουργεί μμεγάλες δυσκολίες κατά την *στοχαστική* ανάλυση του προβλήματος, τόσο ως προς την διέγερση όσο και ως προς την απόκριση των κατασκευών, πράγμα που αποτελεί μία επιπλέον διαφοροποίηση της σεισμικής διεγέρσεως από άλλες τυχαίες διεγέρσεις με *στάσιμη* διαδικασία (π.χ. ανεμοπίεση). Ανεξάρτητα πάντως από τις παραπάνω δυσκολίες οι καταγραφές ισχυρών σεισμικών δονήσεων αποτελούν τα πιο χρήσιμα για τον Μηχανικό δεδομένα, διότι δίνουν τα παρακάτω ουσιώδη για τη μελέτη αντισεισμικών κατασκευών στοιχεία:

- Τη μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους, καθώς και τον αριθμό και την κατανομή των κορυφών *(peak)*, που υπερβαίνουν μία καθορισμένη τιμή επιταχύνσεως.
- Τη διάρκεια του σεισμού, καθώς και την περιοχή συχνοτήτων της ταλαντώσεως (αριθμός διελεύσεων από το μηδέν).

Αλλά η μεγαλύτερη πρακτική αξία, ιδιαίτερα των επιταχυνσιογραφημάτων, έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπουν, όπως θα δούμε, την κατασκευή των *φασμάτων αποκρίσεως,* με τα οποία εκφράζεται ποσοτικά η σεισμική δράση σε κάθε κατασκευή ανάλογα με τις μηχανικές της ιδιότητες (ακαμψία, πλαστιμότητα, κλπ.).

Από τη σκοπιά του Πολιτικού Μηχανικού είναι προφανές ότι κατά την φάση μελέτης και κατασκευής ενός έργου ο αναμενόμενος σεισμός είναι πάντοτε άγνωστος. Τίθεται, επομένως, το πρόβλημα της *εκτιμήσεως* των χαρακτηριστικών του αναμενόμενου σεισμού με βάση τα προϋπάρχοντα σεισμολογικά, γεωτεκτονικά και εδαφολογικά στοιχεία. Έτσι π.χ. σε πρώτη προσέγγιση η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση μπορεί να εκτιμηθεί από εμπειρικές σχέσεις συναρτήσει της εντάσεως *I* ή συναρτήσει του μεγέθους *M* βάσει των λεγόμενων *νόμων εξασθενήσεως*. Μια τέτοια σχέση είναι η ακόλουθη:

$$Log\ a = \frac{I}{3} - \frac{1}{2}$$

όπου α η επιτάχυνση και I η ένταση στην κλίμακα Mercalli.

1.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

Μία πρόβλεψη σεισμού για να έχει πρακτική σημασία πρέπει να δίνει ακριβή στοιχεία για το χρόνο εκδηλώσεως του σεισμού, την έκταση της πλειστόσειστης περιοχής, τη μέγιστη σεισμική ένταση στο επίκεντρο και την ακριβή θέση του.

Η δυσκολία για τον καθορισμό των στοιχείων αυτών βρίσκεται κυρίως στην έλλειψη γνώσεων γύρω από τις μεταβολές στο εσωτερικό της Γης και τις τάσεις που αναπτύσσονται και συντελούν στη γένεση των σεισμών.

Ωστόσο έχει παρατηρηθεί ότι, πριν από τους σεισμούς, συμβαίνουν ορισμένα φαινόμενα που έχουν κάποια σχέση με το αίτιο που προκαλεί το σεισμό. τα πιο συνηθισμένα από τα φαινόμενα αυτά ε[ναι αλλοιώσεις των φυσικών ιδιοτήτων των σχηματισμών του φλοιού της Γης κοντά στην εστία του σεισμού, προσεισμικές δονήσεις και μεταβολές στην ένταση του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου.

Παρά τις θεωρητικές και πρακτικές δυσχέρειες πού αντιμετωπίζει η επιστήμη σήμερα για την εύρεση μιας αξιόπιστης και γενικά εφαρμόσιμης μεθόδου προγνώσεως των σεισμών, πιστεύεται ότι πολύ γρήγορα θα υπάρχει πρόοδος και στον τομέα αυτό.

Όμως παρά τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να τονιστεί ότι οι σεισμολογικές παρατηρήσεις έχουν συμπληρωθεί σήμερα σε τέτοιο βαθμό και η αντισεισμική τεχνική έχει εξελιχθεί σε τέτοιο σημείο, ώστε να ε[ναι γνωστές οι περιοχές πού διατρέχουν κίνδυνο από σεισμούς καθώς και η μικρή πρόσθετη δαπάνη πού απαιτείται για την εκτέλεση αντισεισμικών κατασκευών ικανών να ανταποκριθούν ακόμη και σε αρκετά ισχυρούς σεισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η σεισμική δράση επάνω στις κατασκευές εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων που αποτελούν αντικείμενο πολλών περιοχών της επιστήμης. Οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες: η πρώτη περιλαμβάνει τα καθαρά σεισμολογικά δεδομένα μέγεθος σεισμού, εστία, μηχανισμός γενέσεως, κλπ. - και αποτελεί αντικείμενο των Σεισμολόγων η δεύτερη περιλαμβάνει τα γεωλογικά, τα γεωτεκτονικά, τοπογραφικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέσου που διασχίζουν τα σεισμικά κύματα από την εστία μέχρι τις κατασκευές και αφορά τους Γεωλόγους και τους Εδαφομηχανικούς η τρίτη, τέλος, κατηγορία αναφέρεται στη δομή και στη σεισμική απόκριση της ίδιας της κατασκευής και αποτελεί αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού των κατασκευών.

Είναι φανερό ότι η έκταση και η ποικιλία των παραπάνω παραγόντων δίνουν στη σεισμική δράση έναν εντελώς *ειδικό χαρακτήρα,* που δεν απαντάται στα άλλα είδη εξωτερικών δράσεων. Η ιδιαιτερότητα εν προκειμένω δεν οφείλεται μόνον στην εμπλοκή πολλών επιστημονικών κλάδων, αλλά και στην ανάγκη εξοικειώσεως του Μηχανικού με *ιδιάζοντα* προβλήματα που δεν θέτουν οι συνήθεις εξωτερικές δράσεις των κατασκευών, ακόμη και εκείνες που έχουν δυναμικό χαρακτήρα, όπως π.χ. η ανεμοπίεση.

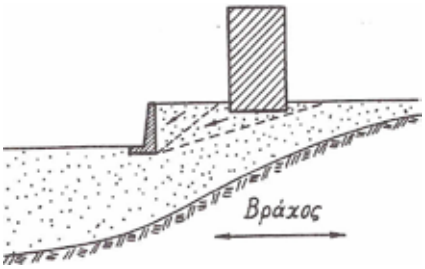
2.2. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ ΕΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Ανεξάρτητα από την γενική αποτίμηση, βασικό πρόβλημα για τον Μηχανικό αποτελεί ο *μηχανισμός δράσεως* των σεισμών επάνω στις κατασκευές. Έτσι, από υπολογιστική άποψη και καταναλογία προς άλλες στατικές και δυναμικές φορτίσεις, η σεισμική δράση θα μπορούσε καταρχήν να θεωρηθεί σαν μία απότομη και με εναλλασσόμενη φορά κίνηση της θεμελιώσεως. Πρόκειται δηλαδή για δυναμικά *επιβαλλόμενη μετακίνηση,* λόγω της οποίας η κατασκευή εκτελεί εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Εντούτοις η παραπάνω εικόνα του φαινομένου δεν είναι πλήρης. Διότι ανάμεσα στο μητρικό πέτρωμα -απαρχή της δονήσεως- και την θεμελίωση παρεμβάλλονται συνήθως επάλληλες εδαφικές στρώσεις, που δεν αποτελούν ένα «ουδέτερο» μέσο διαδόσεως της σεισμικής, δράσεως. Στην πραγματικότητα η εξαναγκασμένη κίνηση της θεμελιώσεως αποτελεί τη σεισμική *απόκριση* των παραπάνω εδαφικών στρώσεων ή, ακριβέστερα, τη σεισμική απόκριση του συμπλέγματος «έδαφος + κατασκευή». Επομένως, η ποιοτική τουλάχιστον θεώρηση του συμπλέγματος αυτού είναι υποχρεωτική, έστω και αν ο υπολογισμός περιορίζεται συνήθως μόνο στην κατασκευή. Από την άποψη αυτή ιδιαίτερη σπουδαιότητα έχουν ορισμένες μεγάλες παραμορφώσεις του εδάφους με *αθροιστικό* χαρακτήρα, στις οποίες θα αναφερθούμε

περιληπτικά πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των μηχανισμών διεγέρσεως των κατασκευών.

α.Κατολισθήσεις. Προκαλούνται από έντονες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους. Στο σχ.2.1 φαίνεται η περίπτωση κτιρίου θεμελιωμένου επάνω σε χαλαρή εδαφική απόθεση που διατρέχει άμεσο κίνδυνο κατολισθήσεως κατά το σεισμό. Στην περίπτωση αυτή, αν δεν είναι δυνατή η πλήρης αποφυγή της, επιβάλλεται οπωσδήποτε η θεώρηση του συμπλέγματος εδάφους-ανωδομής κατά τον υπολογισμό.



Σχ.2.1 Κατασκευή σε επικλινές έδαφος.

β. Επιφανειακό ρήγμα. Είναι μάλλον συνήθης η περίπτωση «ανόδου» του σεισμικού ρήγματος μέχρι την επιφάνεια του εδάφους σε επιφανειακούς σεισμούς. Αν το ρήγμα διασχίζει τη θεμελίωση μίας κατασκευής, η ανεπανόρθωτη βλάβη της τελευταίας -και της κατασκευής συνακόλουθα- είναι αναπότρεπτη.

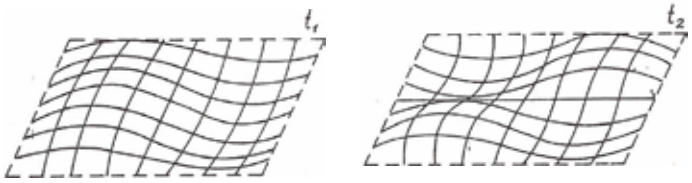
γ. Ρευστοποίηση εδάφους. Εμφανίζεται σε κορεσμένα αμμώδη εδάφη με ορισμένη κοκκομετρική σύνθεση, λόγω προοδευτικής αυξήσεως της πιέσεως πόρων. Το έδαφος χάνει πλήρως τη διατμητική του αντοχή με αποτέλεσμα την καθίζηση, ανατροπή, κλπ, των υπερκείμενων κατασκευών. Επίσης, εάν το ρευστοποιημένο έδαφος βρίσκεται επάνω σε κεκλιμένο υπόστρωμα, προκαλείται «ροή» μεγάλων εδαφικών όγκων και πλήρης αλλοίωση της τοπογραφίας της περιοχής.

δ. Συμπύκνωση εδάφους. Οι σεισμικές ταλαντώσεις προκαλούν συμπύκνωση των μη συνεκτικών εδαφών και συνακόλουθες καθιζήσεις. Ανάλογα με τη συνοχή του εδάφους οι παραπάνω καθιζήσεις μπορούν να φθάσουν το 1 % ή και περισσότερο, με αποτέλεσμα την άμεση πρόκληση βλαβών στις κατασκευές.

Σημειώνουμε, τέλος, το γενικότερο φαινόμενο της *αλληλεπιδράσεως* εδάφους - κατασκευής, το οποίο όμως μπορεί να είναι άλλοτε δυσμενές και άλλοτε ευμενές για τις κατασκευές. Με τον όρο αυτό εννοούμε την *αλλοίωση* που υφίσταται η σεισμική κίνηση στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή η λεγόμενη κίνηση ελευθέρου πεδίου *(free field motion),* λόγω της παρουσίας εκεί μίας κατασκευής. Η υπόψη αλλοίωση είναι μεγάλη στην περίπτωση μαλακού εδάφους και βαριάς δύσκαμπτης κατασκευής και αμελητέα στην περίπτωση σκληρού εδάφους και εύκαμπτης κατασκευής.

Έπειτα από την προηγούμενη υπόμνηση των ειδικών περιπτώσεων «παθολογίας» του εδάφους, που συνήθως οδηγούν σε *πρώιμη αστοχία* των κατασκευών,
Θεωρούμε τη γενική περίπτωση *ομαλής* μεταδόσεως της σεισμικής δράσεως από το έδαφος στις υπερκείμενες κατασκευές. Στο σχ.2.2 φαίνονται ενδεικτικά δύο μορφές

_.της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους κατά το σεισμό. Το τυχόν σημείο της επιφάνειας θα εμφανίζει γενικά μία μετατόπιση στο χώρο, τα δε σημεία μιάς αρχικής ευθείας θα βρίσκονται, μετά την παραμόρφωση, επάνω σε μία *στρεβλή* καμπύλη του χώρου λόγω των άνισων μετατοπίσεων μεταξύ τους. Έτσι, η στρεβλή επιφάνεια του εδάφους θα εμφανίζει *καμπυλότητες,* τόσο σε οριζόντιο επίπεδο όσο και σε τυχόν κατακόρυφο.



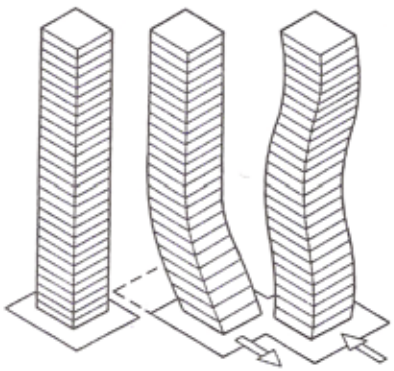
Σχ.2.2. Η παραμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους.

Η κίνηση του εδάφους θεμελιώσεως μιάς συνήθους κατασκευής (π.χ. κτίριο) είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι αποτελείται:

- από μία μεταφορική κίνηση *στερεού σώματος* με αμετάβλητες αποστάσεις των διαφόρων σημείων και με συνιστώσες *u, υ* και *w* ως προς ένα τρισορθογώνιο σύστημα αναφοράς *Oxyz,*
- από *διαφορικές* μετατοπίσεις των διαφόρων σημείων λόγω παραμορφώσεως του εδάφους, μεταβλητές στην έκταση της θεμελιώσεως.

Η παραπάνω *μεταφορική* κίνηση του εδάφους εξομοιώνεται με την κίνηση που μας δίνουν τα επιταχυνσιογραφήματα, όπως αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η κίνηση αυτή εισάγεται αυτούσια στη θεμελίωση και αποτελεί το *πρωταρχικό* αίτιο προκλήσεως ταλαντώσεων στο σύνολο της κατασκευής (σχ.2.3). Κατά την υπόψη ταλάντωση τα διάφορα στοιχεία της κατασκευής υποβάλλονται σε κυκλικές παραμορφώσεις μεγάλου πλάτους, ως επί το πλείστον στην *μετελαστική* περιοχή συμπεριφοράς τους, με παράλληλη αλλοίωση της ακαμψίας και της αντοχής (ιδιαίτερα σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα). Ο μη γραμμικός χαρακτήρας της αποκρίσεως συνεπάγεται την ταυτόχρονη θεώρηση των τριών συνιστωσών της μεταφορικής διεγέρσεως εντούτοις, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, κατά κανόνα περιοριζόμαστε στην ανεξάρτητη θεώρηση κάθε συνιστώσας, υποθέτοντας ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής.

.

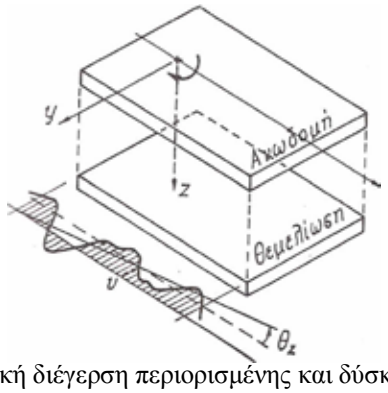


Σχ.2.3 Η μεταφορική διέγερση της θεμελιώσεως

Το είδος, τώρα, της ταλαντώσεως εξαρτάται από τη δομή της κατασκευής. Γενικά, κάθε συνιστώσα της μεταφορικής κινήσεως της θεμελιώσεως μπορεί να προκαλέσει ταλάντωση των στοιχειωδών μαζών με έξι συνιστώσες: τρεις μεταφορικές και τρεις περιστροφικές. Στην πραγματικότητα όμως ένας πολύ μικρός αριθμός από τις συνιστώσες αυτές είναι σημαντικός για τη συνολική απόκριση της κατασκευής.Έτσι π.χ. σε ένα συμμετρικό πολυόροφο κτίριο ή μεταφορική συνιστώσα της διεγέρσεως, που βρίσκεται σε ένα επίπεδο συμμετρίας, προκαλεί οριζόντιες, κατακόρυφες και στροφικές (με οριζόντιο άξονα) ταλαντώσεις των μαζών- από αυτές όμως μόνον οι οριζόντιες συνοδεύονται από ανάπτυξη σημαντικών δυνάμεων αδράνειας, ενώ οι κατακόρυφες δυνάμεις αδράνειας και οι αδρανειακές ροπές με οριζόντιο άξονα κατά κανόνα είναι αμελητέες. Μία ενδιαφέρουσα εξαίρεση από τον κανόνα αποτελούν οι *πρόβολοι* που εμφανίζουν σημαντικές κατακόρυφες δυνάμεις αδράνειας, καθώς επίσης και η περίπτωση μεγάλων *συγκεντρωμένων* μαζών που εμφανίζουν μεγάλες αδρανειακές ροπές (π.χ. υδατόπυργοι). Αν τώρα το πολυόροφο κτίριο είναι *ασύμμετρο,* τότε στις οριζόντιες ταλαντώσεις προστίθενται και οι *στρεπτικές* των πατωμάτων, οι οποίες συνοδεύονται από μεγάλες αδρανειακές ροπές στρέψεως.

Η *κατακόρυφη* μεταφορική κίνηση της θεμελιώσεως προκαλεί στα ασύμμετρα κτίρια τόσο κατακόρυφες όσο και οριζόντιες ταλαντώσεις. Οι πρώτες συνοδεύονται από σημαντικές δυνάμεις αδράνειας, λόγω γειτνιάσεως των υψηλών ιδιοσυχνοτήτων των κτιρίων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με τις επίσης υψηλές συχνότητες της διεγέρσεως, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τις οριζόντιες ταλαντώσεις. Αλλά και οι κατακόρυφες δυνάμεις αδράνειας, γενικά, αντισταθμίζονται από τα διατιθέμενα περιθώρια αξονικής αντοχής των κατακόρυφων στοιχείων, εκτός από ορισμένες περιπτώσεις κάμψεως. Μεταξύ αυτών πρωτεύουσα θέση κατέχουν οι *οριζόντιοι πρόβολοι,* τόσο οι ίδιοι όσο και οι κατασκευές που τους υποστηρίζουν. Επίσης, η αυξομείωση των αξονικών δυνάμεων κατά την κατακόρυφη ταλάντωση μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς ορισμένες μηχανικές ιδιότητες των κατακόρυφων στοιχείων, όπως π.χ. μείωση της *πλαστιμότητας* και της *διατμητικής* αντοχής. Σημειώνουμε, τέλος, την σπάνια περίπτωση κατακόρυφης επιταχύνσεως που υπερβαίνει την επιτάχυνση της βαρύτητας g και συνεπάγεται άμεσες μετατοπίσεις ορισμένων στοιχείων (π.χ. τοίχων).

Η συνολική επήρεια των μετατοπίσεων αυτών στην έκταση μιάς περιορισμένης και δύσκαμπτης θεμελιώσεως μπορεί να εκφρασθεί με τη βοήθεια μιάς γωνίας *στρέψεως* θ*,* περί κατακόρυφο άξονα και δύο γωνιών *περιστροφής* θ_X και θ_Y περί οριζόντιους άξονες. Στο σχ.2.4 φαίνεται η περίπτωση της στρεπτικής διεγέρσεως θ*,* της θεμελιώσεως από τη διάδοση επιφανειακών διατμητικών κυμάτων. Δυστυχώς μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν δεδομένα από απευθείας μέτρηση των παραπάνω γωνιακών συνιστωσών της σεισμικής διεγέρσεως. Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός τους γίνεται *έμμεσα* συναρτήσει των γραμμικών συνιστωσών u, υ και w που προκύπτουν από τις γενικές εξισώσεις της θεωρίας ελαστικότητας.



Σχ.2.4 Στρεπτική διέγερση περιορισμένης και δύσκαμπτης θεμελιώσεως.

2.3 Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μία απλή και καθολική εικόνα της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών αποκτάται αν σκεφθούμε το *ενεργειακό ισοζύγιο* κατά τη διάρκεια της σεισμικής κινήσεως. Πράγματι, ο σεισμός εισάγει καταρχήν στην κατασκευή μία ποσότητα ενέργειας. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής καταναλώνεται για την υπερνίκηση των ποικίλων εξωτερικών και εσωτερικών αντιστάσεων -τριβών: τριβές κατασκευής - εδάφους (αλληλεπίδραση), τριβές σκελετού- στοιχείων πληρώσεως, ανελαστικές παραμορφώσεις σκελετού, κλπ. Η υπόψη ενέργεια *αποσβέσεως* μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα και αφαιρείται από το σύστημα, ενώ το εναπομένον τμήμα παραμορφώνει και θέτει σε κίνηση την κατασκευή. Το τμήμα αυτό αποτελεί τη *μηχανική ενέργεια* του συστήματος που αποτελείται από την ενέργεια *παραμορφώσεως* (ελαστικής) και από την *κινητική* ενέργεια. Κατά την κίνηση έχουμε αμοιβαία μετατροπή των παραπάνω δύο μορφών της μηχανικής ενέργειας, της οποίας το μέγεθος αυξομειώνεται ανάλογα με το μέγεθος της ενέργειας *εισαγωγής* (από το σεισμό) και της ενέργειας *εξαγωγής* (από τις αποσβέσεις).

Με βάση την παραπάνω ενεργειακή εικόνα η σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών από την αρχική μέχρι την τελική φάση καταρρεύσεως θα μπορούσε να συνοψισθεί ως εξής: *Όσο αυξάνει η εισαγόμενη σεισμική ενέργεια τόσο αυξάνουν και οι παραμορφώσεις, χάρη στις οποίες ένα μέρος της ενέργειας* αποθηκεύεται *και ένα άλλο μέρος* διαχέεται. *Η αύξηση των παραμορφώσεων σταματά όταν οι «εξαγωγές» εξισορροπούν τις «εισαγωγές», ενώ η κατάρρευση επέρχεται όταν η κατασκευή δεν μπορεί να υποστεί τις απαιτούμενες παραμορφώσεις για την επίτευξη του παραπάνω ισοζυγίου.* Είναι προφανής από τα παραπάνω ο πρωταρχικός ρόλος των μεγάλων ανελαστικών παραμορφώσεων όχι μόνο για την αποθήκευση, αλλά κυρίως για τη *διάχυση - κατανάλωση* μεγάλων ποσοτήτων της σεισμικής ενέργειας.

2.4. ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Οι σεισμικές δυνάμεις και τα αποτελέσματα τους στα τεχνικά έργα παρουσιάζουν ξεχωριστό ενδιαφέρον για ένα μηχανικό. το έδαφος και γενικότερα οι γεωλογικοί σχηματισμοί σαν μέσο αποδοχής των τεχνιχών έργων, αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα της μελέτης τους τόσο από άποψη συμπεριφοράς αυτών των ίδιων των γεωλογικών σχηματισμών (σύσταση, δομή κ.λπ), όσο και από άποψη ενεργειακών επιδράσεων πού μεταφέρονται από αυτές στην κατασκευή.

Τα εδάφη γενικά πάνω στα οποία θεμελιώνονται τα τεχνικά έργα, ανάλογα με τη συμπεριφορά τους στη σεισμική ενέργεια, τα κατατάσσουμε σε εδάφη σεισμικά επικίνδυνα και σε εδάφη μη επικίνδυνα. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα βραχώδη εδάφη πού βρίσκονται κυρίως σε παλαιοτέρους γεωλογικούς σχηματισμούς, ενώ στην πρώτη ανήκουν τα χαλαρά εδάφη πού υπάρχουν κυρίως στους νέους και νεότατους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Η εικόνα 2.5. είναι χαρακτηριστική του μεγέθους των ζημιών πού μπορούν να προκαλέσουν οι σεισμοί στα τεχνικά έργα και των θυμάτων πού είναι δυνατόν να προκληθούν από αυτούς. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι ο καταστρεπτικός σεισμός της Μεσσήνης το 1908 είχε σαν αποτέλεσμα την ισοπέδωση των πόλεων της Μεσσήνης και Ρηγίου και 103 χιλιάδες νεκρούς, ο σεισμός του Τόκιο το 1923 προκάλεσε το θάνατο σε 250000 περίπου κατοίκους και ένας σεισμός πού έγινε στην κίνα το 1956 είχε περισσότερους από 800000 νεκρούς.

Για τούς παραπάνω λόγους έχει καθιερωθεί ιδιαίτερα σε σεισμόπληκτες περιοχες, για κάθε τεχνικό έργο να εκπονείται ειδική αντισεισμική μελέτη με σκοπό τη διασφάλιση του έργου από σεισμικές δοκιμασίες.

Λόγω της μεγάλης σημασίας του θέματος, για την Όλη αντιμετώπιση του σεισμικού προβλήματος έχουν συνταχθεί από 0λες σχεδόν τις ενδιαφερόμενες χώρες αντισεισμικοί κανονισμοί οι όποιοι κάθε τόσο αναθεωρούνται και προσαρμόζονται σε νέα στοιχεία και εμπειρίες. '

Σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό που ισχύει στην Ελλάδα, τα εδάφη από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας κατατάσσονται σε εδάφη μίκρας, μέτριας, μεγάλης και εξαιρετικά μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας.

Για το χαρακτηρισμό των εδαφών από άποψη επικινδυνότητας λαμβάνεται υπόψη ή σύσταση, ή ομοιογένεια, ή συνεκτικότητα και ή γεωμετρία των γεωλογικών σχηματισμών της αντίστοιχης περιοχής.



Εικ. 2.5. Η γέφυρα Showa μετά το σεισμό της Nigata Ιαπωνίας της 16.6.1964 (Iisee 1965).

Ειδικότερα τα εδάφη τα αποτελούμενα από οριζόντια ενιαία εκτεταμένα συμπαγή στρώματα άργιλομαργαϊκων υλικών πάχους 15 τουλάχιστον μέτρων κατατάσσονται στην πρώτη κατηγορία. τα ψαθυρά ή χαλαρά εδάφη με οριζόντια στρώση ή μικρή κλίση κατατάσσονται στη δεύτερη κατηγορία. Τα εδάφη τα οποία προέρχονται από φυσικές ή τεχνητές προσχώσεις και από υλικά αποξηραμένων ελών και λιμνών κατατάσσονται στην τρίτη κατηγορία και τέλος τα ανομοιογενή και τα χαλαρά εδάφη των απότομων κλιτών καθώς και τα εδάφη περιοχών πού βρίσκονται πάνω από σπηλαιώδεις σχηματισμούς κατατάσσονται στην τέταρτη κατηγορία επικινδυνότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Πρέπει εξ αρχής να τονιστεί ότι οι βλάβες στις κατασκευές δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν έστω και αν ο σχεδιασμός είχε γίνει σύμφωνα με τους πιο σύγχρονους Κανονισμούς με άρτια μελέτη και κατασκευή. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στο βαθμό αξιοπιστίας των δεδομένων και ιδιαίτερα των σεισμικών ή στις παραδοχές εξιδανίκευσης και τις προσεγγίσεις του αναλυτικού προσομοιώματος. Η ίδια η φιλοσοφία των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, επιτρέπει τις βλάβες όχι μόνο στα μη-φέροντα στοιχεία αλλά στο ίδιο το δομικό σύστημα. Στο άρθρο 1.2 του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (σΑ.Σ.π., 1999) γίνεται αποδεκτό ότι ο φέρων οργανισμός της κατασκευής θα υποστεί βλάβες κατά τη δράση του σεισμού σχεδιασμού που θα πρέπει να είναι "περιορισμένες και επιδιορθώσιμες". Εξάλλου για ένα πολύ ισχυρότερο σεισμό προβλέπεται ότι η πιθανότητα κατάρρευσης πρέπει να είναι επαρκώς μικρή. Όμως πέρα από όλα αυτά, και ειδικότερα καθόσον αφορά την ελληνική πραγματικότητα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο ανθρώπινος παράγοντας που επιδρά στο σύνολο των διαδικασιών για την ανέγερση των κατασκευών.

Ας δούμε το πλαίσιο διαδικασιών μέσα στο οποίο γίνεται σήμερα η ανέγερση οικοδομών στην Ελλάδα. Ο ιδιοκτήτης ή ο «επί αντιπαροχή» κατασκευαστής ζητάει από το μηχανικό την "έκδοση της οικοδομικής άδειας" και συχνά αδιαφορεί για την ποιότητα της στατικής και αντισεισμικής μελέτης. Στη συνέχεια αναθέτει την εκτέλεση των εργασιών σε 25, κατά μέσον όρο, διαφορετικά συνεργεία, κατά κανόνα άγνωστα μεταξύ τους με μοναδικό συνήθως κριτήριο επιλογής, την οικονομικότητα των επιμέρους εργασιών. Τα δύο βασικά για την ασφάλεια της κατασκευής συνεργεία, οι "καλουπιτζήδες" και οι "σιδεράδες" είναι χωρίς καμία ειδική παιδεία, με μοναδικό εφόδιο την προγενέστερη εμπειρία τους που μερικές φορές μπορεί να είναι επιβλαβής. Συνεργεία όπως π.χ. υδραυλικοί και ηλεκτρολόγοι εν αγνοία τους προξενούν συχνά βλάβες στο φέροντα οργανισμό των κτιρίων. Άλλες απαραίτητες εργασίες αιωρούνται μεταξύ συνεργείων, ή συνεργείων και ιδιοκτήτου. Για παράδειγμα, ποιος αναλαμβάνει τη συστηματική συντήρηση οριζοντίων και κατακόρυφων μελών του δομικού συστήματος μετά από τη σκυροδέτηση; Για το σκυρόδεμα, ποιος ευθύνεται για τη συχνά χαμηλότερη αντοχή του στο έργο; Το σκυρόδεμα έρχεται στο εργοτάξιο με μικρή ρευστότητα για λόγους οικονομίας του παραγωγού (λιγότερο τσιμέντο για σταθερό υδατοτσιμεντοσυντελεστή). Ο μηχανικός δεν θα ξεχάσει τη δειγματοληψία των 6 δοκιμίων που όμως μπορεί να βρεθούν εντάξει. Το συνεργείο σκυροδέτησης που δυσκολεύεται στη δόνηση λόγω της έλλειψης ρευστότητας του σκυροδέματος, ζητάει τηλεσυνθηματικά, περισσότερο νερό από το χειριστή της μπετονιέρας. Έτσι τυπικά όλοι φαίνεται να είναι εντάξει ενώ η αντοχή του σκυροδέματος είναι μειωμένη δραματικά.

Και σε όλα αυτά έρχεται να προστεθεί ο τεράστιος χρόνος διάρκειας της κατασκευής του έργου. Περισσότερο από 50% των διωρόφων-τριώροφων κτιρίων που κατασκευάζονται ιδιόκτητα έχουν χρόνο περάτωσης 10 χρόνια. Υπάρχουν μάλιστα κατασκευές που βρίσκονται οιονεί υπό εκτέλεση. Πολλές φορές ο ιδιοκτήτης μιας

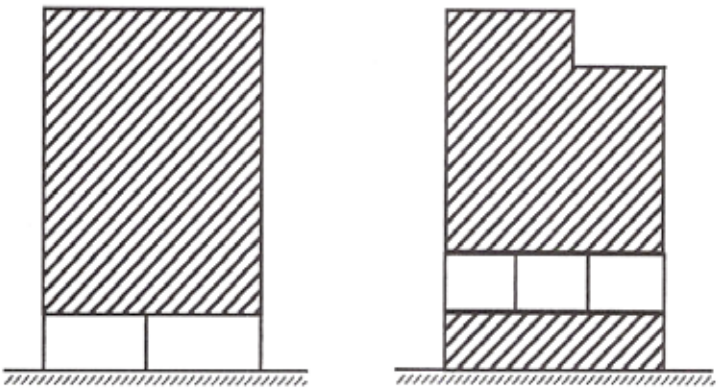
διώροφης π.χ. οικοδομής, φροντίζει για την αποπεράτωση του ορόφου όπου και κατοικεί, ενώ το ισόγειο παραμένει αδιαμόρφωτο. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του συνήθως έκκεντρου κλιμακοστασίου μαζί με την είσοδο για τον όροφο, όπου χτίζονται οι τοιχοπληρώσεις αυξάνοντας έτσι ακόμη περισσότερο την ασυμμετρία κατανομής των δυσκαμψιών στο ισόγειο. Δηλαδή όχι μόνο δημιουργείται η περίπτωση μαλακού ορόφου αλλά συγχρόνως και η δυσμενέστερη από σεισμικής απόψεως κατανομή των δυσκαμψιών. Είναι πιθανόν, ότι το παραπάνω πλέγμα διαδικασιών έχει το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης για τις βλάβες στις κατασκευές. Η δυνατότητα για ουσιαστική παρέμβαση είναι μειωμένη και είναι πρωταρχικός παράγοντας για την ασφάλεια των κατασκευών η αλλαγή αυτού του συστήματος διαδικασιών για την κατασκευή των έργων, γιατί σε τελική ανάλυση είναι άδικο να αναλαμβάνει ο μηχανικός ευθύνες που δεν του ανήκουν.

Τέλος δεν θα πρέπει να αγνοηθεί η Ελληνική πραγματικότητα όσον αφορά τις κατασκευές που έχουν δομηθεί στο παρελθόν με βάση τους παλαιότερους κανονισμούς και διαφορετικές γνώσεις. Δυστυχώς, ακόμα και σήμερα, πολλές φορές στην κατασκευή εφαρμόζονται λανθασμένες

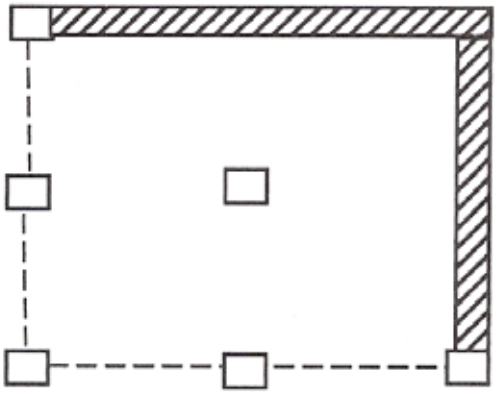
Σήμερα είναι γνωστό, ότι πολλές από τις υφιστάμενες κατασκευές με έντονη μεταβολή δυσκαμψίας καθ' ύψος (κτίρια με Pilotis ή με καταστήματα στο ισόγειο), όπου η δημιουργία μαλακού ορόφου είναι πολύ πιθανή (Σχ.3.1), είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε έναν ισχυρό σεισμό.

Επίσης εκκεντρότητες από ακανόνιστη κατανομή των δυσκαμψιών των κατακόρυφων μελών του δομήματος (Σχ.3.2) ή από "υποτιθέμενη" μη συνεργασία των τοιχοπληρώσεων με το δομικό σύστημα, επαυξάνουν την ένταση με στρεπτικές δυνάμεις και δημιουργούν ανομοιόμορφη κατανομή της σεισμικής καταπόνησης στο επίπεδο.

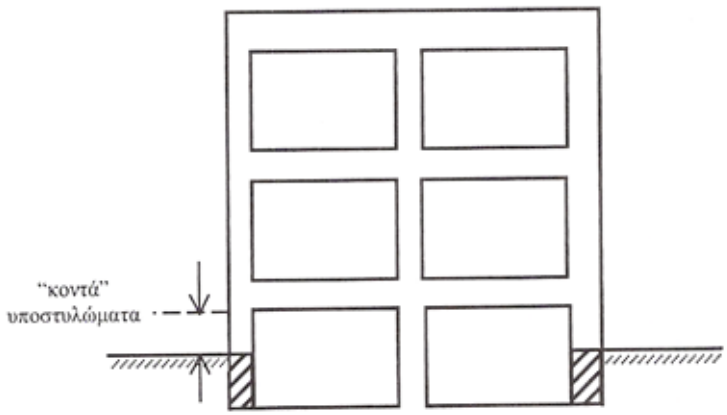
Σχ.3.1 Έντονη μεταβολή δυσκαμψίας καθ’ύψος



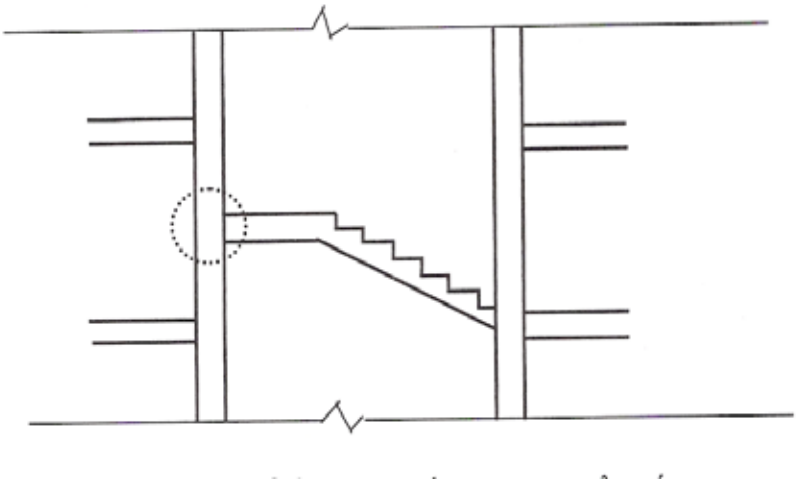
Σχ.3.2 Ακανόνιστη κατανομή δυσκαμψιών κατακόρυφων



"Κοντά" υποστυλώματα συναντώνται συχνά σε συνήθεις τύπους κατασκευών όπως σε περιμετρικά κατακόρυφα στοιχεία ημιυπόγειων (Σχ.3.3), στην περίμετρο κλιμακοστασίων λόγω ενδιάμεσων στηρίξεων της κλίμακας (Σχ.3.4), σε καταστήματα με πατάρια ή σε βιομηχανικούς χώρους όπου ισχυρές περιμετρικές τοιχοπληρώσεις σταματούν χαμηλότερα από τη στάθμη της δοκού για τη δημιουργία φεγγιτών. Σήμερα έχει πλέον συνειδητοποιηθεί ότι τα στοιχεία αυτά όχι μόνο καταπονούνται με μεγαλύτερη διατμητική ένταση λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας τους αλλά έχουν και μικρότερη διατμητική αντοχή.



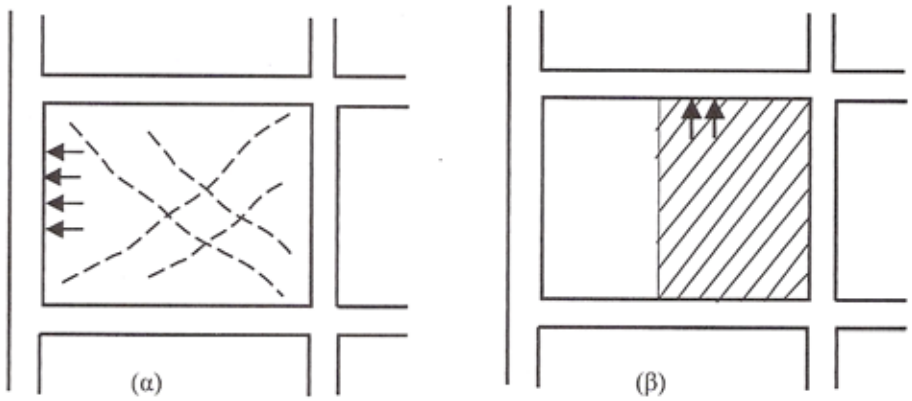
Σχ.3.3 ΄΄Κοντά΄΄ υποστυλώματα λόγω υπερυψωμένου υπογείου.



Σχ.3.4 Στηρίξεις στο ενδιάμεσο του ύψους υποστηλωμάτων.

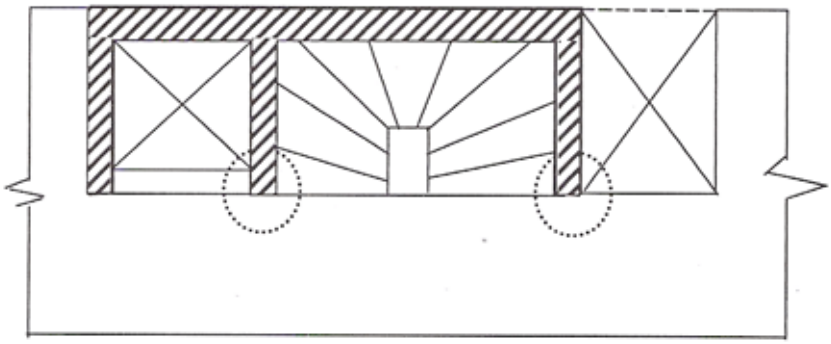
Βλάβες επίσης μπορούν να παρουσιαστούν λόγω δυσμενούς επίδρασης των τοιχοπληρώσεων στα περιβάλλοντα δομικά στοιχεία. Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις αυτού του τύπου. Η πρώτη (Σχ.3.5α) αφορά τη δυσμενή επίδραση στα περιβάλλοντα υποστυλώματα λόγω των πρόσθετων δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτά μετά τη ρηγμάτωση της τοιχοποιίας. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου η τοιχοπλήρωση καλύπτει τμήμα μόνο του φατνώματος του πλαισίου (Σχ.3.5β), το στατικό σύστημα στήριξης της δοκού οροφής μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικό απ' αυτό που έγινε αποδεκτό στην ανάλυση και ως εκ τούτου δημιουργούνται περιοχές με απρόβλεπτα υψηλότερες

καταπονήσεις απ' ότι η αρχική εκτίμηση.



Σχ.3.5 Δυσμενής επίδραση τοιχοπληρώσεων α)σε υποστηλώματα , β)σε δοκούς

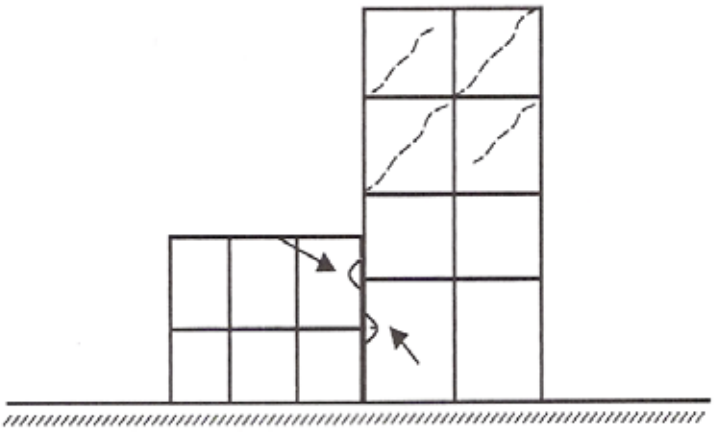
Επίσης, σκόπιμο είναι να επισημανθεί ότι οι περιοχές σύνδεσης ισχυρών και αδυνάτων στοιχείων του φορέα είναι εν γένει ευάλωτες. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτού του τύπου.

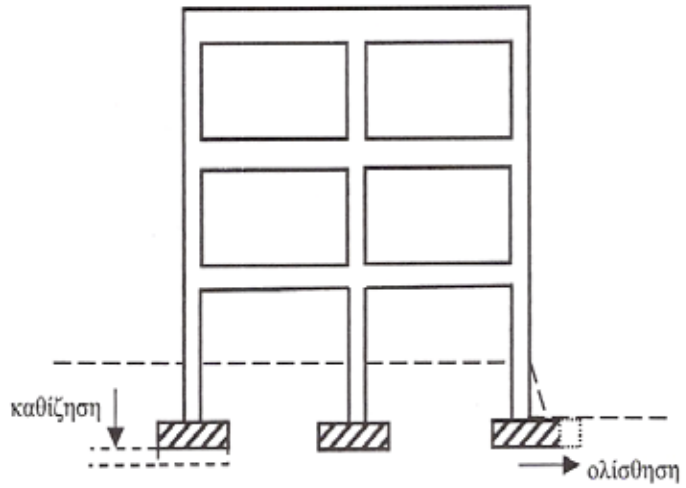


Σχ.3.6 Περιοχές σύνδεσης ισχυρών και αδύνατων στοιχείων του φορέα

Τέλος υπενθυμίζεται ότι συχνά παρουσιάζονται βλάβες είτε λόγω πρόσκρουσης (κατά τη σεισμική διέγερση) με γειτονικό κτίριο (Σχ.3.7) είτε λόγω προβλημάτων στη θεμελίωση (Σχ.3.8).

Σχ.3.7 Πρόσκρουση γειτονικού κτιρίου





Σχ.3.8 Προβλήματα θεμελίωσης.

Κλείνοντας την παραπάνω συνολική ανασκόπηση, πρέπει να επισημανθεί και μία κατηγορία βλαβών που δημιουργούνται στις κατασκευές με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να οφείλεται σε υπέρβαση αντοχής αλλά στην επίδραση περιβαλλοντικών δράσεων όπως π.χ. η οξείδωση των οπλισμών και η αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης. Βλάβες αυτής της κατηγορίας καθώς επίσης και κάθε άλλη μορφή βλάβης που δεν κρίνεται άμεσα επικίνδυνη (ρηγματώσεις σε μη φέροντα στοιχεία, πλάκες κλπ.) χρήζουν επισκευής όχι μόνο για λόγους αισθητικούς και λειτουργικούς ή για προστασία από περιβαλλοντικές δράσεις αλλά πολλές φορές και για την αποκατάσταση της αντοχής, δυσκαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας σε ένα μελλοντικό σεισμό.

3.2. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Μετά από ένα ισχυρό σεισμό, οι βλάβες στα υποστυλώματα μιας κατασκευής είναι από τις πιο συχνές και συγχρόνως από τις πιο σοβαρές. Αποτελούν πρώτη προτεραιότητα για την εκτίμηση της ασφάλειας της κατασκευής γιατί μπορεί να οδηγήσουν σε τμηματική ή ολική κατάρρευση του δομήματος. Είναι από τις περιπτώσεις όπου ο μηχανικός, εκτιμώντας το επίπεδο βλάβης αμέσως μετά το σεισμό σε στενά χρονικά περιθώρια πρέπει να αποφασίσει για άμεσα μέτρα προσωρινής υποστύλωσης και απομάκρυνσης ενοίκων. Η εμπειρία του παρελθόντος έχει δείξει την κρισιμότητα του χρονικού διαστήματος αμέσως μετά από τον κύριο σεισμό όπου ένας ισχυρός μετασεισμός είναι πολύ πιθανός και συχνά καταστρεπτικότερος του κύριου σεισμού.

Οι βλάβες αυτές μπορεί να είναι καμπτικού ή διατμητικού χαρακτήρα.

Ο τύπος της βλάβης εξαρτάται από τη συσχέτιση της καμπτικής και διατμητικής καταπόνησης του υποστυλώματος. Κρίνοντας με ελαστικά μεγέθη, η μέγιστη καμπτική τάση ενός στοιχείου είναι ανάλογη του μεγέθους M/bd^2, ενώ η μέγιστη διατμητική είναι ανάλογη του μεγέθους V/bd. Επομένως το μέτρο συσχέτιση ς της καμπτικής και διατμητικής έντασης που θα προκύπτει ως λόγος των παραπάνω μεγεθών είναι:

$$\frac{M}{bd^2} / \frac{V}{bd} = \frac{M}{Vd}$$

που εκφράζει το λόγο διάτμησης. Προσεγγιστικά μπορεί να ληφθεί:

$$\frac{M}{Vd} = \frac{VL}{2Vd} = \frac{L}{2d}$$

Έτσι χωρίς να μπορεί να υπάρξει σαφές ποσοτικό κριτήριο, είναι φανερό ότι στα υποστυλώματα με μεγάλο ύψος και μικρές διαστάσεις διατομής είναι ευάλωτα από κάμψη ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι ευάλωτα σε διάτμηση. Η τιμή M/Vd = 3.5 έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία (Πενέλης και Κάππος, 1990) ως ένα προσεγγιστικό ποσοτικό όριο για τον τύπο της αναμενόμενης βλάβης. Όμως αυτό μόνο δεν επαρκεί για την ερμηνεία της αστοχίας. Η εικόνα της βλάβης αρχικά και τα αποτελέσματα μιας ακριβέστερης ανάλυσης αργότερα θα βοηθήσουν στην ερμηνεία της βλάβης. Πάντως, αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό.

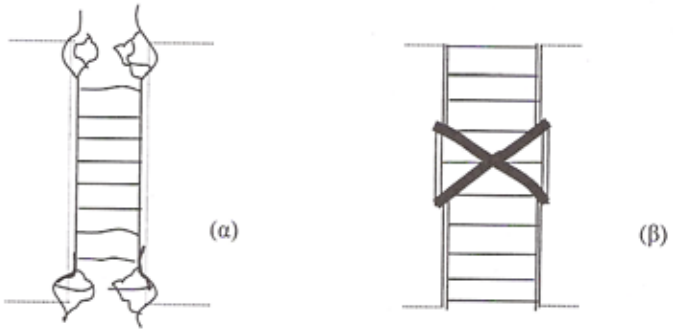
Οι βλάβες καμπτικού χαρακτήρα παρουσιάζονται συνήθως στην κορυφή και τη βάση των υποστυλωμάτων αφού εκεί γενικά παρουσιάζεται η μεγαλύτερη καμπτική ένταση. Στην περίπτωση μικρών αξονικών φορτίων όπως π.χ. σε περιμετρικά υποστυλώματα των ανωτέρων ορόφων, η βλάβη έχει την εικόνα οριζόντιας καμπτικής ρωγμής από υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα σε εφελκυσμό. Οφείλεται σε ανεπάρκεια των διαμήκων ράβδων οπλισμού και το εύρος της ρωγμής είναι συνήθως ενδεικτικό του βαθμού βλάβης. Μπορεί επίσης να εκδηλωθεί με αποφλοίωση του σκυροδέματος στην περιοχή επικάλυψης των οπλισμών από υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής. Η βλάβη αυτή δεν εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους εφόσον περιορίζεται στην εκτός του πυρήνα περιοχή. Παρατηρείται συχνά σε υπεροπλισμένα στοιχεία με πολύ μικρή απόσταση μεταξύ των διαμήκων ράβδων όπου πολλές φορές δημιουργείται ένα μεταλλικό "τείχος" με έλλειψη συνέχειας του εντός και του εκτός του πυρήνα σκυροδέματος.

Ένας σοβαρότερος όμως τύπος βλάβης, ψαθυρού χαρακτήρα, είναι αυτός που εμφανίζεται σε στοιχεία με μεγάλα θλιπτικά φορτία από σύγχρονη ύπαρξη κάμψης και διάτμησης. Εκδηλώνεται με σύνθλιψη και αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης που λόγω της αντιστροφής της σεισμικής δράσης μπορεί να εμφανιστεί και στις δύο πλευρές του υποστυλώματος ως εκ τούτου συχνά παρατηρείται εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος και διαρροή ή_ θραύση των συνδετήρων στην περιοχή βλάβης που πολλές

φορές οδηγεί σε βράχυνση του υποστυλώματος και λυγισμό των κατακόρυφων ράβδων οπλισμού (Σχ.2.9α). Τέτοιου είδους βλάβες παρουσιάζονται σε υποστυλώματα με διατομή μικρότερη από την απαιτούμενη, κοντά σε κόμβους που συντρέχουν ισχυρές δοκοί. Η χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος και η έλλειψη περίσφιγξης από ανεπάρκεια συνδετήρων είναι τις περισσότερες φορές εμφανείς. Είναι προφανές ότι αυτός ο τύπος βλάβης είναι από τους πιο σοβαρούς σε μία κατασκευή γιατί πέρα από τη ψαθυρότητα της αστοχίας και τη σημαντική μείωση της δυσκαμψίας του υποστυλώματος, συνεπάγεται αδυναμία μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων. Η υπερφόρτιση των γειτονικών κατακόρυφων στοιχείων από ανακατανομή της έντασης μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση του δομήματος μέσα από μία αλυσιδωτή σειρά αστοχιών.

Οι βλάβες διατμητικού χαρακτήρα παρατηρούνται σε υποστυλώματα με μικρό λόγο διάτμησης στις περιοχές με τη μεγαλύτερη διατμητική αδυναμία, και δεν είναι υποχρεωτικά στα άκρα του υποστυλώματος. Σε στοιχεία όμως με μικρό αξονικό φορτίο όπως π.χ. σε περιμετρικά υποστυλώματα που βρίσκονται στους τελευταίους ορόφους, τα άκρα των υποστυλωμάτων είναι περισσότερο ευάλωτα επειδή είναι πιθανή η διαρροή των διαμήκων ράβδων οπλισμού λόγω υψηλών καμπτικών ροπών σε αυτές τις θέσεις και επομένως μία μειωμένη διατμητική αντίσταση αναμένεται από έλλειψη αλληλοεμπλοκής των αδρανών.

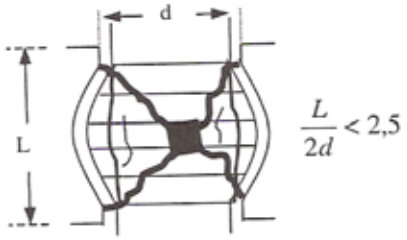
Για τιμές του λόγου διάτμησης μικρότερες από 2,5 όπως συμβαίνει σε κοντά υποστυλώματα, οι βλάβες αυτού του τύπου είναι οι συχνότερες. Εξάλλου πολλές φορές παρουσιάζεται συμπεριφορά κοντού υποστυλώματος όταν σε ένα κοινό υποστύλωμα εμποδίζονται οριζόντιες μετακινήσεις χωρίς κατασκευαστική πρόθεση από δύσκαμπτα στοιχεία σε ένα τμήμα του ύψους. Τέτοια συμπεριφορά συχνά παρατηρείται σε κατοικίες ή βιομηχανικούς χώρους με παράθυρα ή φεγγίτες αντιστοίχως, εκατέρωθεν του υποστυλώματος. Οι διατμητικού χαρακτήρα βλάβες, είναι ψαθυρής μορφής και ως εκ τούτου θεωρούνται σοβαρές. Εκδηλώνονται με λοξές ρωγμές που λόγω της αντιστροφής της σεισμικής δράσης πολλές φορές έχουν χιαστί μορφή (Σχ.3.9β και 3.10).



Σχήμα 3.9 Βλάβες υποστυλωμάτων. α) Ισχυρή αξονική σύνθλιψη και εναλλασσόμενη καμπτική ροπή , β) Ισχυρή αξονική σύνθλιψη και τέμνουσα.

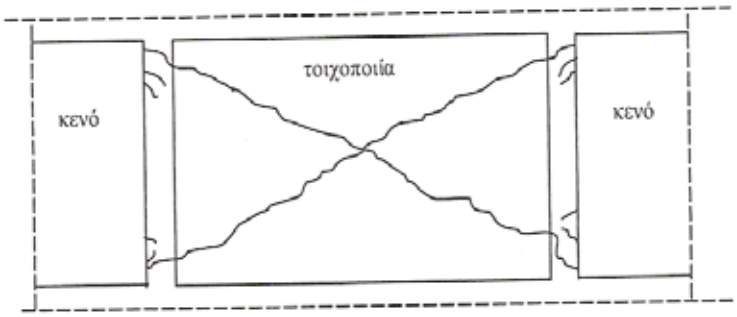
Η χαμηλή ποιότητα του σκυροδέματος και η έλλειψη επαρκούς διατμητικού οπλισμού είναι συνήθως εμφανείς σε αυτές τις βλάβες.

Ο σύγχρονος τρόπος διαστασιολόγησης σε διάτμηση όπου η τέμνουσα σχεδιασμού προσδιορίζεται με βάση τις μέγιστες ροπές που μπορούν να αναπτυχθούν στα άκρα του υποστυλώματος όταν δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις, δηλαδή $V=2M_R/L$ και όχι με βάση την τέμνουσα της ανάλυσης, αποτρέπει βλάβες αυτού του τύπου. Στα "κοντά" υποστυλώματα ο παραπάνω κανόνας δεν είναι επαρκής.



Σχ.3.10 Διατμητική αστοχία ΄΄κοντού΄΄ υποστηλώματος.

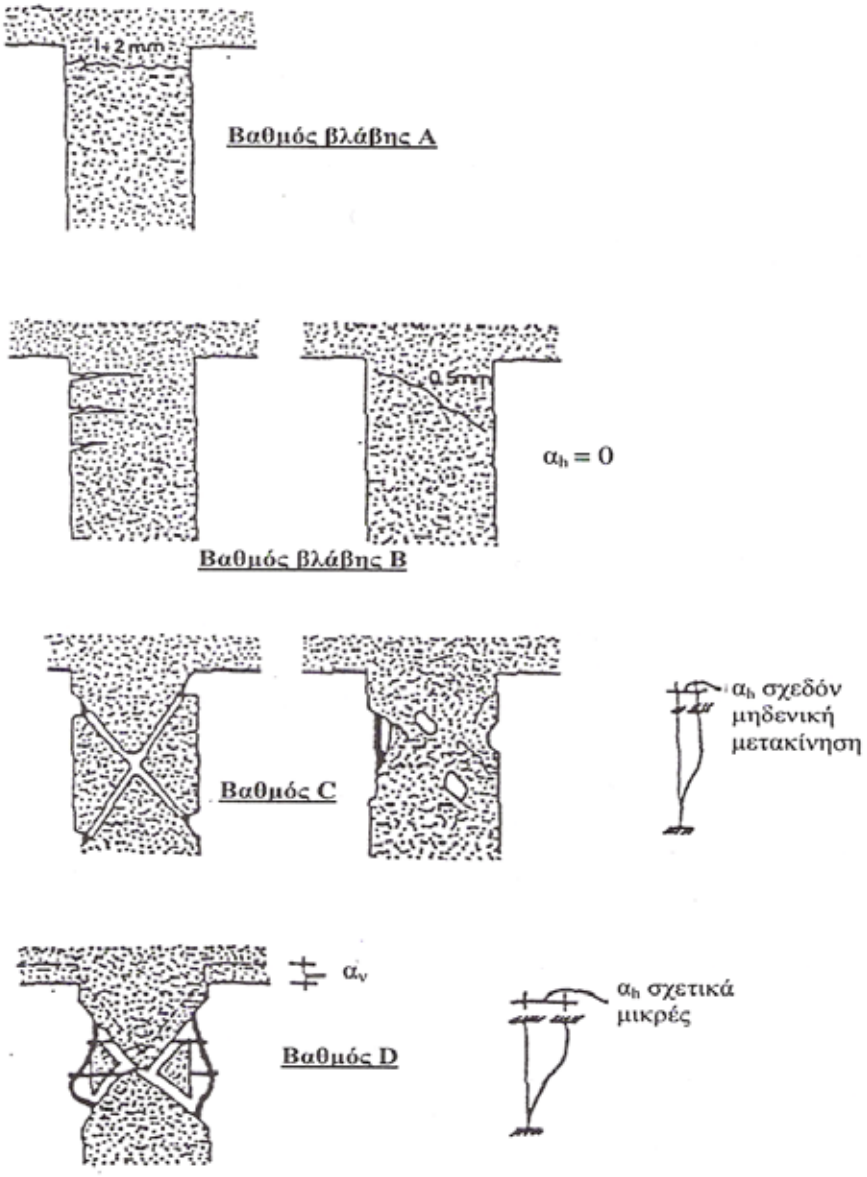
Ως ξεχωριστός τύπος διατμητικής βλάβης θα πρέπει να θεωρηθεί η περίπτωση που η αστοχία της τοιχοπλήρωσης ενός πλαισιώματος επεκτείνεται στα υποστυλώματα του πλαισίου (Σχ.3.11). Αυτό συμβαίνει συνήθως σε περιπτώσεις μονόπλευρης και καλά δομημένης τοιχοπλήρωσης σφηνωμένης περιμετρικά σε πλαίσιο με ασθενή κατακόρυφα στοιχεία. Έτσι η εικόνα της βλάβης ανταποκρίνεται στη θεώρηση ενός ενιαίου τοιχώματος όπου πλαισίωμα και τοιχοπλήρωση λειτουργούν ως ένα στοιχείο.



Σχ.3.11 Βλάβη υποστυλωμάτων στη συνέχεια μονόπλευρων τοιχοπληρώσεων.

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η κατάταξη των βαθμών βλάβης για υποστυλώματα, όπως παρουσιάζεται στο CEB Bul. No162 (1983) και EC8-Part 1.4, (1995). Μία τέτοια κατάταξη χρησιμεύει για τον προσδιορισμό των περιθωρίων ασφαλείας αφενός και για την επιλογή της καταλλήλου μεθόδου επισκευής ή ενίσχυσης αφετέρου.

Σχ.3.12 Βαθμοί βλάβης σε υποστυλώματα και τοιχώματα.



Βαθμός βλάβης Α

Μεμονωμένες οριζόντιες ρωγμές με πλάτος λιγότερο από 1-2 mm, με την προϋπόθεση ότι ένας απλός υπολογισμός έχει αποδείξει ότι αυτές οι ρωγμές δεν οφείλονται σε ανεπάρκεια της διατομής σε κάμψη, αλλά μάλλον σε τοπικές αδυναμίες όπως π.χ. αρμοί διακοπής εργασίας, επίδραση της εν επαφή τοιχοπλήρωσης, ανεπαρκής αγκύρωση οπλισμών, κ.τ.λ.

Βαθμός βλάβης Β

Αρκετές πλατιές καμπτικές ρωγμές ή μεμονωμένες λοξές διατμητικές ρωγμές με πλάτος μικρότερο από 0.5 mm, υπό τον όρο ότι δεν παρατηρούνται εναπομένουσες μετακινήσεις.

Βαθμός βλάβης C

Χιαστί λοξές διατμητικές ρωγμές ή έντονη τοπική σύνθλιψη και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος, υπό τον όρο ότι δεν παρατηρούνται άξιες λόγου εναπομένουσες μετακινήσεις.

Βαθμός βλάβης D

Πλήρης αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στην περιοχή βλάβης, λυγισμός των διαμήκων ράβδων, διαρροή ή θραύση των συνδετήρων της περιοχής, ασυνέχεια στην περιοχή χωρίς κατάρρευση του υποστυλώματος. Προϋποτίθεται επίσης ότι οι εναπομένουσες μετακινήσεις που παρατηρούνται (οριζόντιες και κατακόρυφες) και ιδιαίτερα οι κατακόρυφες είναι σχετικά μικρές.

Βαθμός βλάβης Ε

Πλήρης κατάρρευση του υποστυλώματος.

Ως μία γενικότερη παρατήρηση σημειώνεται ότι εάν η γενική εικόνα βλάβης συμφωνεί με μία από τις εικόνες βλάβης του Σχήματος 24 χωρίς όμως να τηρούνται οι προβλεπόμενες συνθήκες για τις εναπομένουσες μετακινήσεις, τότε ως βαθμός βλάβης θεωρείται ένα επίπεδο παραπάνω απ' ότι δηλώνεται στο σχήμα. Έτσι για παράδειγμα μία βλάβη με εικόνα τύπου **D,** όπου όμως υπάρχουν μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις, πρέπει να θεωρηθεί βαθμός βλάβης Ε.

3.3. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΚΟΜΒΟΥΣ ΔΟΚΩΝ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Όπως έχει φανεί από αποτελέσματα καταστρεπτικών σεισμών στη χώρα μας, οι κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων, ιδιαίτερα οι εξωτερικοί, αποτελούν ένα από τα πλέον ευπαθή στοιχεία των υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Αυτό οφείλεται κυρίως στους εξής λόγους:

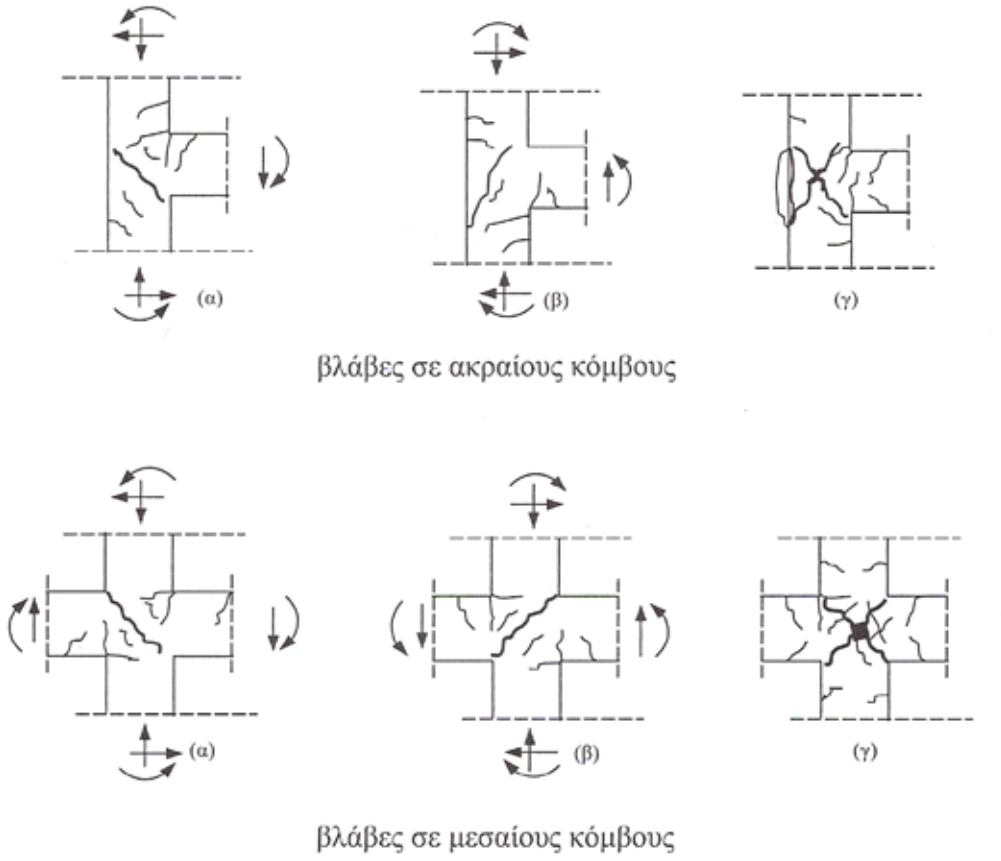
(α) Η διατμητική ένταση στους κόμβους είναι ιδιαίτερα υψηλή.

(β) Ο σχεδιασμός των κόμβων, μέχρι και σήμερα, δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της τοπικής έντασης.

(γ) Οι κόμβοι είναι συχνά περιοχές κακής σκυροδέτησης λόγω μεγάλης πυκνότητας οπλισμών.

Οι βλάβες στους κόμβους είναι από τις πλέον κρίσιμες για την ασφάλεια της ακεραιότητας του φορέα. Υπενθυμίζεται ότι κάθε ρηγμάτωση κόμβου, έστω και πολύ μικρού ανοίγματος ρωγμών, εξετάζεται ως επικίνδυνη και αντιμετωπίζεται ως σοβαρότερη βλάβη σε σύγκριση με άλλα δομικά στοιχεία που έχουν την ίδια εικόνα ρηγμάτωσης. Σε

μία βαθμονόμηση των βλαβών που προτείνεται στον EC8-Part **1.4** (1995), οι βλάβες στους κόμβους είναι κατά μία κατηγορία υψηλότερη από αυτήν που αντιστοιχεί σε υποστυλώματα με την ίδια εικόνα (εύρος, κατεύθυνση κ.τ.λ.) ρηγμάτωσης.



Σχ.3.13 Βλάβες σε κόμβους πλαισίων α)σύνθλιψη κάτω παρειάς δοκού β)σύνθλιψη άνω παρειάς δοκού γ)αποδιοργάνωση κόμβου από ανακυκλιζόμεμη φόρτιση

Έτσι ρηγματώσεις στους κόμβους με τη μορφή που απεικονίζονται στα Σχήματα 3.13α και 3.13β θεωρούνται ως βαθμός βλάβης C.

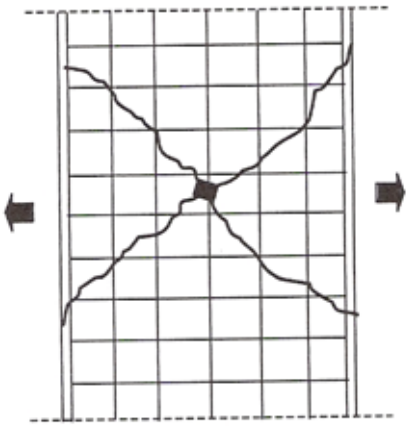
Σοβαρή αποδιοργάνωση στους κόμβους (Σχ.3.13γ) θεωρείται ως βαθμός βλάβης D.

3.4. ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ.

Τα τοιχώματα σε μία κατασκευή είναι τα στοιχεία που περιλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής έντασης. Μετά από ένα ισχυρό σεισμό οι βλάβες σε τοιχώματα είναι εξ' ίσου συχνές όπως και οι βλάβες σε υποστυλώματα. Ένα ποσοστό 28.5% των κατασκευών που παρουσίασαν βλάβες σε σκελετό, στο σεισμό της Θεσσαλονίκης τον Ιούλιο του 1978, είχαν παρουσιάσει βλάβες στα τοιχώματα .

Οι βλάβες αυτές είναι διατμητικής ή καμπτικής μορφής. Οι διατμητικού τύπου βλάβες είναι οι περισσότερο συχνές και πιο σοβαρές. Εμφανίζονται με λοξά ρήγματα που λόγω της αντιστροφής της σεισμικής δράσης τελικά εμφανίζουν χιαστί μορφή (Σχ.3.14). Η σοβαρότητα αυτής της μορφής βλάβης δεν οφείλεται μόνο στη ψαθυρότητα της αστοχίας αλλά και στο γεγονός ότι μπορεί να προκληθούν εκατέρωθεν μετακινήσεις των τριγωνικών τμημάτων του τοιχώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 26, που συνεπάγονται βράχυνση του

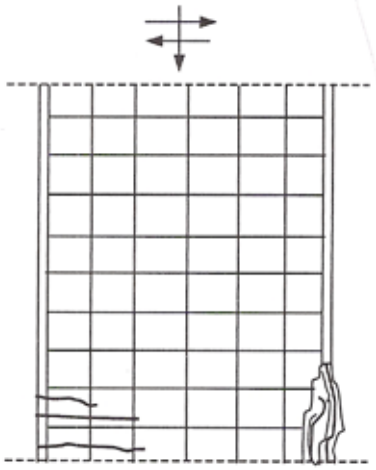
συνολικού στοιχείου και πιθανή αδυναμία μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων. Κατά συνέπεια υπάρχει κίνδυνος τμηματικής ή ολικής κατάρρευσης του δομήματος μέσα από μία αλυσιδωτή σειρά αστοχιών. Γι' αυτό το λόγο, ο σύγχρονος τρόπος σχεδιασμού των τοιχωμάτων προβλέπει τη μόρφωση των ενισχύσεων στα άκρα του τοιχώματος υπό τη μορφή εμφανών υποστυλωμάτων ή "κρυφών υποστυλωμάτων", που μπορούν να παραλάβουν το αξονικό φορτίο του τοιχώματος. Έτσι ο βαθμός κινδύνου μιας βλάβης τέτοιας μορφής, μειώνεται σημαντικά.



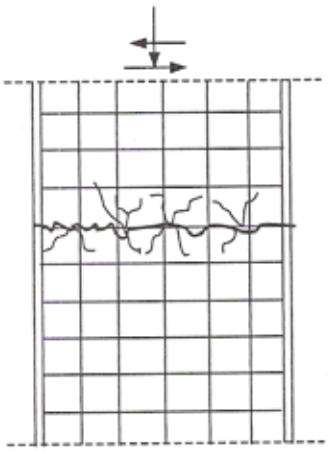
Σχ.3.14 Εικόνα διατμητικής βλάβης τοιχώματος.

Τα αίτια μιας τέτοιας αστοχίας θα πρέπει βασικά να αναζητηθούν στη συνολική μόρφωση και σχεδιασμό του φορέα και μερικές φορές συνδυάζονται με ανεπαρκή διατμητικό οπλισμό και χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος.

Οι βλάβες καμπτικού τύπου (Σχ.3.15), είναι λιγότερο συχνές.
Παρουσιάζονται στη βάση του τοιχώματος κοντά στη θεμελίωση, και είναι εμφανείς στον ισόγειο όροφο των κτιρίων, όταν έχουν κατασκευαστεί με ισχυρή θεμελίωση ή όταν διαθέτουν υπόγειο όροφο τα περιμετρικά τοιχώματα του οποίου δημιουργούν συνθήκες πάκτωσης του τοιχώματος. Στην περίπτωση θεμελίωσης τοιχωμάτων σε απλά πέδιλα, οι ροπές που αναπτύσσονται στη βάση είναι πολύ μικρότερες λόγω στροφής του πεδίλου, ενώ δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην αναπτυσσόμενη τέμνουσα. Έτσι οι αναμενόμενες βλάβες θα είναι διατμητικής μορφής με πιθανές αστοχίες στις συνδετήριες δοκούς της θεμελίωσης.



Σχ.3.15 Εικόνα καμπτικής βλάβης τοιχωμάτων.



Σχ.3.16 Εικόνα βλάβης τοιχωμάτων στον αρμό διακοπής εργασίας.

Μια ξεχωριστή περίπτωση βλάβης που παρουσιάζεται πάρα πολύ συχνά στα τοιχώματα είναι αυτή που παρατηρείται με ρηγμάτωση των αρμών διακοπής εργασίας (Σχ.3.16).

Δεν χαρακτηρίζεται επικίνδυνη μορφή βλάβης γιατί αφενός μεν δεν μειώνεται η δυνατότητα μεταφοράς των αξονικών φορτίων και αφετέρου δεν επηρεάζεται η συνολική δυσκαμψία του φορέα. Οφείλεται στην αδυναμία μεταφοράς τεμνουσών δυνάμεων στον αρμό. Αυτή η μορφή βλάβης παρουσιάζεται συχνότερα στα τοιχώματα απ' ότι στα υποστυλώματα λόγω των μικρών αξονικών φορτίων των τοιχωμάτων.

Έτσι εάν κατά τη σκυροδέτηση του νέου σκυροδέματος δεν είχε δημιουργηθεί η κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας του παλαιού σκυροδέματος, όπως επιβάλλουν οι κανονισμοί, δημιουργείται αστοχία της διεπιφάνειας από υπέρβαση της διατμητικής αντοχής του αρμού. Ο ΕΚΩΣ 2000 προβλέπει ένα ελάχιστο ποσοστό κατακόρυφου οπλισμού που πρέπει να διαπερνά τον αρμό (με καλή αγκύρωση).

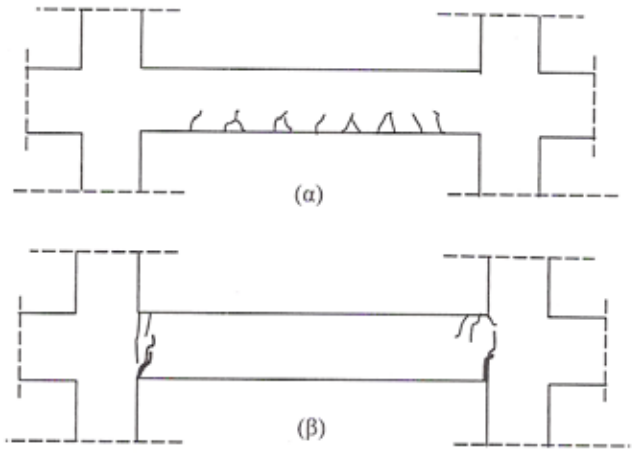
3.5. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ.

Οι βλάβες σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι εξ' ίσου συχνές είτε προέρχονται από σεισμό είτε από κατακόρυφα φορτία. Είναι συχνότερες και από τις βλάβες στα υποστυλώματα, ακόμη και στην περίπτωση σεισμού. Είναι όμως λιγότερο επικίνδυνες σε ότι αφορά την ευστάθεια του φορέα σαν σύνολο, και ως εκ τούτου έπονται σε σπουδαιότητα των βλαβών που παρατηρούνται σε υποστυλώματα.

Στο Σχήμα 3.17α παρουσιάζεται μία συνήθης εικόνα δοκού, με εγκάρσιες καμπτικές ρωγμές στο κάτω πέλμα. Αυτός ο τύπος βλάβης είναι ο συχνότερος στα δοκάρια μετά από ένα σεισμό. Το 83% των κατασκευών που παρουσίασαν βλάβες σε δοκούς στο σεισμό της Θεσσαλονίκης του 1978, είχαν βλάβες αυτής της μορφής. Όμως είναι προφανές ότι η μορφή της σεισμικής έντασης δεν δικαιολογεί τέτοιου είδους βλάβες και πιθανότατα δεν είναι βλάβες. Τις περισσότερες φορές είναι απλώς η αποκάλυψη προϋπαρχουσών τριχοειδών ρωγμών που έγιναν ορατές αφού διευρύνθηκαν λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας του σεισμού.

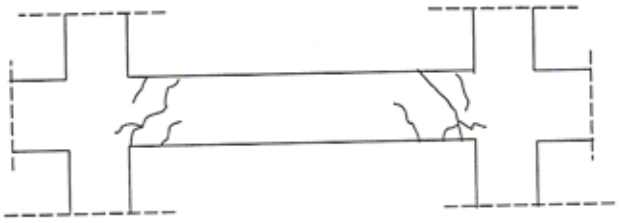
Όμως η ίδια εικόνα είναι ένδειξη καμπτικής ανεπάρκειας αν οφείλεται σε δράση κατακόρυφων φορτίων. Στην περίπτωση αυτή συχνά παρατηρούνται αρκετές ρωγμές μεγάλου πλάτους συγκεντρωμένες σε μία περιοχή της δοκού που μπορεί να πιθανολογηθεί ανάπτυξη μέγιστου ροπής κάμψης και είναι ένδειξη διαρροής του εφελκυόμενου χάλυβα.

Σχήμα 3.17 Καμπτικές βλάβες σε δοκούς (α) καμπτικές ρωγμές στο εφελκυόμενο πέλμα, (β) καμπτική αστοχία στο άνω πέλμα και ολίσθηση οπλισμών στο κάτω



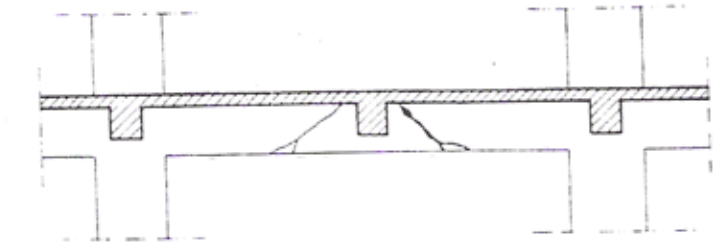
Καμπτικές βλάβες στο πάνω πέλμα των δοκών (Σχ.3.17β) είναι πολύ πιθανόν να εμφανιστούν κοντά στις στηρίξεις από σεισμικές ή από μακροχρόνιες δράσεις. Παρόμοιες επίσης εγκάρσιες ρωγμές μπορούν να εμφανιστούν κοντά στις στηρίξεις και στο κάτω πέλμα της δοκού (Σχ.3.17β) για δύο πιθανούς λόγους. Ο ένας είναι η καμπτική αστοχία της διατομής από διαρροή του εφελκυόμενου οπλισμού στο κάτω πέλμα και μπορεί να συμβεί στην περίπτωση ισχυρής σεισμικής έντασης. Ο δεύτερος λόγος, που είναι και ο συχνότερος, είναι η ανεπαρκής αγκύρωση και η ολίσθηση του οπλισμού κάτω πέλματος. Εμφανίζεται συνήθως με ένα ρήγμα μεγάλου πλάτους στην παρειά της στήριξης και μπορεί να συμβεί για κάθε περίπτωση φόρτισης.

Διατμητικές βλάβες στις περιοχές στήριξης των δοκών (Σχ.3.18) είναι οι σοβαρότερες που μπορούν να παρουσιαστούν σε δοκούς και είναι πολύ συχνές μετά από ένα ισχυρό σεισμό. Το 43% του συνόλου των δοκών που παρουσίασαν βλάβες στο σεισμό της Θεσσαλονίκης (1978), παρουσίασαν βλάβες αυτού του τύπου. Είναι ο πιο ανεπιθύμητος τύπος βλάβης λόγω της ψαθυρής μορφής αστοχίας. Για την αποφυγή του προβλέπεται πλέον στους σύγχρονους κανονισμούς ο ικανοτικός σχεδιασμός σε τέμνουσα με βάση τις μέγιστες ροπές που μπορεί να αναπτυχθούν στα άκρα της δοκού.



Σχήμα 3.18 Διατμητική αστοχία δοκού

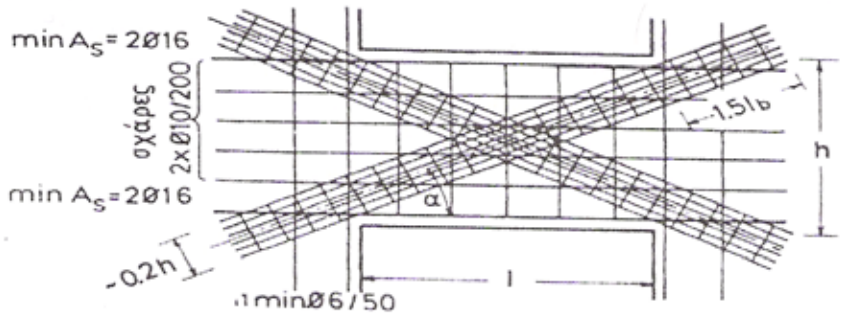
Επίσης ένας άλλος τύπος διατμητικής αστοχίας είναι αυτός που παρατηρείται σε περιπτώσεις εφαρμογής συγκεντρωμένων φορτίων όπως π.χ. τα "φυτευτά" υποστυλώματα ή δευτερεύουσες δοκοί (Σχ.3.19) και οφείλεται συχνά σε ανεπαρκή οπλισμό διάτμησης και ανάρτησης .



Σχ.3.19 Εικόνα διατμητικής αστοχίας λόγω συγκεκριμένου φορτίου.

Οριζόντια στοιχεία σύνδεσης συζευγμένων τοιχωμάτων που δημιουργούνται σαν υπέρθυρα μίας στήλης ανοιγμάτων σε μεγάλα τοιχώματα αστοχούν με λοξές χιαστί ρωγμές, με παρόμοιο τρόπο που αστοχούν τα "κοντά" υποστυλώματα.

Τα στοιχεία αυτά είναι σημαντικά για τη δυσκαμψία και την ικανότητα απόσβεσης ενέργειας των συζευγμένων τοιχωμάτων. Ο ΕΚΩΣ 2000 προβλέπει ειδικό δισδιαγώνιο οπλισμό (Σχ.3.20) για την αποφυγή αστοχίας τέτοιας μορφής.



Σχήμα 3.20: Ειδικός οπλισμός σύζευξης τοιχωμάτων

3.6. ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΠΛΑΚΕΣ.

Οι βλάβες οριζοντίων επιφανειακών στοιχείων μιας κατασκευής όπως είναι οι πλάκες, είναι εν γένει δευτερεύουσας σημασίας αφού σχεδόν πάντα δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του συνολικού φορέα. Εκτός τούτου, συνήθως δεν υπάρχει κίνδυνος ούτε για την ίδια την πλάκα λόγω του μεγάλου βαθμού υπερστατικότητας της, με εξαίρεση βέβαια τους προβόλους. Εξάλλου, όπως είναι γνωστό, οι πλάκες είναι στοιχεία ουσιαστικά ανεπηρέαστα από σεισμικές δράσεις.

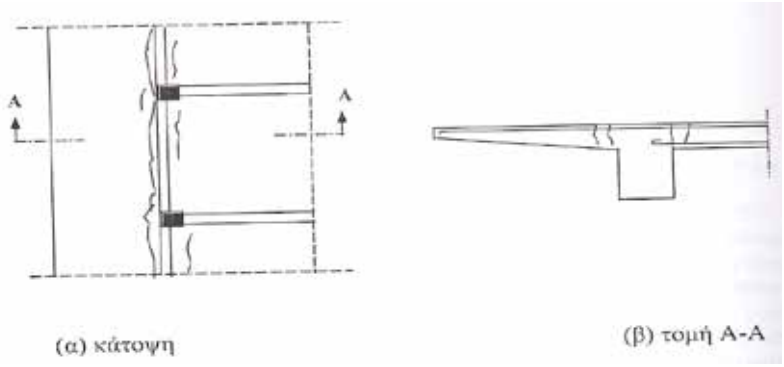
Μερικές φορές, μετά από ένα ισχυρό σεισμό, μπορεί να παρατηρηθούν διαμπερείς εγκάρσιες ρωγμές κατ' επέκταση καμπτικών ρηγματώσεων στη παρειά στήριξης των δοκών, σαν αποτέλεσμα της συνεργασίας πλάκας και δοκού. Δικαιολογείται έτσι η κατασκευαστική διευκόλυνση, που προτείνεται από τον ΕΚΩΣ 2000 για τοποθέτηση του 1/4 του απαιτούμενου οπλισμού στήριξης εντός της πλάκας και εκατέρωθεν του κορμού.

Μία σοβαρότερη μορφή βλάβης που οφείλεται σε καθιζήσεις υποστυλωμάτων συνοδεύεται συνήθως και από βλάβες των γειτονικών δοκών και ρηγματώσεις των τοιχοπληρώσεων.

Η εικόνα που συχνά παρουσιάζεται μετά από έναν ισχυρό σεισμό με αρκετό πλήθος ρηγματώσεων σε τυχαίες θέσεις δεν είναι ανησυχητική. Συχνά οφείλεται σε προϋπάρχουσες τριχοειδείς ρηγματώσεις που αποκαλύφθηκαν αφού διευρύνθηκαν λόγω της κατακόρυφης σεισμικής έντασης.

Όμως χρειάζεται περισσότερη προσοχή αν παρόμοια εικόνα βλάβης οφείλεται σε μακροχρόνιες δράσεις δηλαδή σε μόνιμα και κινητά φορτία, και οι βλάβες εντοπίζονται σε περιοχές μεγίστων ροπών οπότε πιθανολογείται καμπτική ανεπάρκεια.

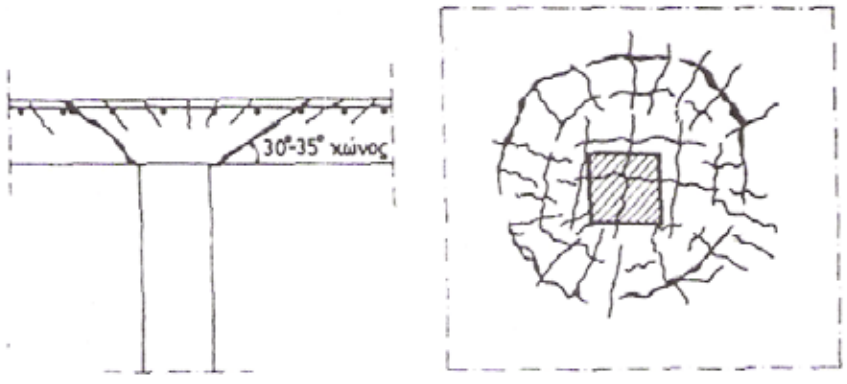
Οι ρωγμές που πολλές φορές παρατηρούνται σε προβόλους με διεύθυνση παράλληλη προς τους κύριους οπλισμούς, προφανώς δεν είναι ανησυχητικές. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι οι πρόβολοι λόγω έλλειψης υπερστατικότητας, είναι τα πλέον κρίσιμα επιφανειακά στοιχεία. Έτσι, χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή οι τυχόν ρηγματώσεις με διεύθυνση κάθετη προς τον κύριο οπλισμό, που θα εμφανιστούν στο πάνω πέλμα, στην παρειά στήριξης του προβόλου με τη δοκό (Σχ.3.21).



Σχήμα 3.21: Βλάβες σε πλάκες

Οι ρηγματώσεις αυτές συχνά οφείλονται στο μειωμένο στατικό ύψος που δημιουργείται αθέλητα μετά από την τοποθέτηση του οπλισμού και πριν τη σκυροδέτηση. Μερικές φορές οι ρηγματώσεις αυτές επεκτείνονται μόνο στην επικάλυψη του σκυροδέματος που λόγω του μειωμένου στατικού ύψους είναι σημαντικού πάχους και έτσι είναι ορατές. Στη φάση αυτή δεν υπάρχει βλάβη και ο μηχανικός θα πρέπει να προσδιορίσει την υφιστάμενη αντοχή του προβόλου εκτιμώντας το πραγματικό στατικό ύψος και να λάβει μέτρα ενίσχυσης στην περίπτωση που προκύψει ανεπάρκεια. Αν όμως το βάθος των ρωγμών είναι μεγαλύτερο από το πάχος της επικάλυψης τότε πιθανολογείται διαρροή του εφελκυόμενου χάλυβα και απαιτούνται άμεσα μέτρα επέμβασης.

Μία σοβαρή μορφή βλάβης σε πλάκες εδραζόμενες απ' ευθείας σε υποστυλώματα χωρίς την παρεμβολή δοκών φαίνεται στο Σχήμα 3.22. Οφείλεται σε αστοχία της πλάκας από διάτρηση και συνιστάται η αποφυγή τέτοιου είδους μόρφωσης σε αντισεισμικές κατασκευές (Ο.Α.Σ.Π., 1999).



Σχ. 3.22 Εικόνα βλάβης πλάκας λόγω διάτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.

4.1. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ο όρος *σύνθετο υλικό* απλοποιητικά σημαίνει ότι δυο ή περισσότερα υλικά συνδυαζόμενα μακροσκοπικά μπορούν να σχηματίσουν ένα νέο υλικό που συνήθως παρουσιάζει καλύτερες ιδιότητες από εκείνες των αρχικών υλικών και που συχνά ακόμη μπορεί να εμφανίζει και ιδιότητες τις οποίες κανένα από τα αρχικά υλικά δεν διέθετε.

Με βάση αυτό τον απλό ορισμό, μπορούμε να πούμε ότι ο άνθρωπος επινόησε και χρησιμοποίησε σύνθετα υλικά από τα πολύ παλιά χρόνια. Έτσι οι Εβραίοι χρησιμοποίησαν το άχυρο για να δώσουν μεγαλύτερη αντοχή στα λασπότουβλα. Οι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν ένα είδος "κόντρα πλακέ" όταν κατάλαβαν ότι στρώματα ξύλου μπορούν να συνδυασθούν κατάλληλα ώστε να παρουσιάσουν ικανοποιητική αντοχή σε διάφορες κατευθύνσεις και να είναι ανθεκτικά στην διόγκωση και στη στρέβλωση που προκαλείται από την υγρασία. Επίσης στην Αίγυπτο και στην Μεσοποταμία εμφανίσθηκαν σχεδίες από καλάμι παπύρου "δεμένο" με άσφαλτο. Οι Ασσύριοι έφτιαξαν πλωτές γέφυρες με σανίδες εμποτισμένες με αδιάβροχη άσφαλτο. Το Μεσαίωνα κατασκευάστηκαν σπαθιά, ασπίδες και θώρακες από συνδυασμούς στρωμάτων διαφόρων μετάλλων και πιο πρόσφατα ινώδη σύνθετα υλικά που έχουν μεγάλους λόγους αντοχής/βάρους και ακαμψίας/βάρους χρησιμοποιήθηκαν σε κατασκευές τις οποίες το μικρό βάρος αποτελεί σημαντικό παράγοντα, όπως π.χ. σε αεροσκάφη και διαστημόπλοια.

Τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω μας δείχνουν ότι ο άνθρωπος από τα πρώτα βήματα της ζωής του είχε "διαισθανθεί" ότι συνδυάζοντας δυο ή περισσότερα υλικά μπορούσε να κατασκευάσει ένα τρίτο "σύνθετο υλικό", που ικανοποιούσε καλύτερα τις κατασκευαστικές του ανάγκες.

Η πορεία εξέλιξης των συνθέτων υλικών δεν παρουσιάζει την ίδια ταχύτητα δια μέσου των αιώνων. Μέχρι τον 19ο αιώνα μ.χ. η εξέλιξη αυτή είναι πολύ μικρή και τα σύνθετα υλικά του 19ου αιώνα δεν απέχουν και πάρα πολύ από αυτά των αρχαίων Αιγυπτίων, Ελλήνων κλπ., ούτε σε ποιότητα, ούτε σε μεθόδους κατασκευής. Η πραγματικά αλματώδης εξέλιξη των συνθέτων υλικών σημειώνεται τον 20ο αιώνα και θα μπορούσαμε να πούμε τα τελευταία 30 χρόνια και είναι συνέπεια μιας άλλης σημαντικής εξέλιξης: της εξέλιξης της επιστήμης των γιγαντιαίων μορίων των πολυμερών.

4.2. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Το μόριο ενός *πολυμερούς* είναι ένα μόριο μεγάλου μεγέθους (μακρομόριο) που αποτελείται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες. Οι δομικές αυτές μονάδες είναι απλά χημικά παράγωγα τα οποία προέρχονται από τα αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά με άνοιγμα διπλού δεσμού.

Τα πολυμερή συνθέτουν το υλικό όλων των ζωντανών οργανισμών. Τα κύτταρα τόσο των ζωικών όσο και των φυτικών ιστών με το πρωτόπλασμά τους και τον πυρήνα τους, αποτελούνται από τέτοια μόρια. Ωστόσο η μοριακή δομή των πολυμερών και η επίδραση της δομής αυτής πάνω στις ιδιότητές τους ήταν άγνωστες ως πριν λίγες δεκαετίες.

Ευθύς μόλις ανακαλύφθηκε ότι τα πολυμερή είναι μακριές και με τάξη οργανωμένες αλυσίδες μικροτέρων μορίων, ο άνθρωπος κατόρθωσε να δημιουργήσει κατά βούληση, όχι μόνο πολυμερή πανομοιότυπα με τα ήδη γνωστά των ζώντων οργανισμών - πράγμα που άλλοτε ήταν εντελώς αδύνατο -, αλλά επιπλέον και πρωτότυπα πολυμερή, που δεν απαντώνται στη φύση. Τα τελευταία αυτά είναι και τα πιο ενδιαφέροντα από τη σκοπιά

των συνθέτων υλικών. Το αποτέλεσμα των επιτευγμάτων αυτών ήταν η δημιουργία πλήθους νέων βιομηχανιών, τεράστιας σπουδαιότητας σήμερα, που παράγουν μια τρομακτική ποικιλία από πλαστικές ύλες συνθετικές υφαντικές ύλες και συνθετικό ελαστικό.

Ένα πολυμερές υλικό ικανοποιεί τον ορισμό του συνθέτου υλικού, που δόθηκε στην §4.1 σε μικροσκοπική κλίμακα γιατί αποτελείται από δομικές μονάδες προερχόμενες από αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά που συνήθως έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες από τις δικές του.

4.3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ.

Κατά την πιο αποδεκτή σήμερα άποψη, ως *σύνθετο υλικό* ορίζεται το υλικό που αποτελείται από δυο ή περισσότερα υλικά συνδεδεμένα μακροσκοπικά ή μικροσκοπικά, έτσι ώστε να προκύπτει ένα πολυφασικό σύστημα - το σύνθετο υλικό - με φυσικές ιδιότητες διαφορετικές από τις φυσικές ιδιότητες των αρχικών υλικών, που μπορούν όμως σε πολλές περιπτώσεις να διατηρούν πολλές από τις αρχικές φυσικές τους ιδιότητες.

Τις περισσότερες φορές, τα αρχικά υλικά του συνθέτου αντιδρούν χημικά μεταξύ τους. Έτσι προκύπτει μια νέα φάση. Με τον όρο *φάση* εννοούμε κάθε ομογενές τμήμα του συνθέτου υλικού.

Στα σύνθετα υλικά επίσης παρατηρείται μια περιοχή μεταξύ των ορίων των δυο φάσεων που εμφανίζει φυσικές ιδιότητες διαφορετικές των αρχικών υλικών. Η περιοχή αυτή ονομάζεται *ενδιάμεση φάση.*

Ένα ή περισσότερα υλικά μέσα στο σύνθετο υλικό μπορεί αντίστοιχα να αποτελούν μια ή περισσότερες συνεχείς φάσεις που λέγονται *μήτρες* (matrices), ενώ τα υπόλοιπα υλικά, που μπορεί να είναι και αυτά ένα ή περισσότερα, θα αποτελούν αντίστοιχα μια ή περισσότερες ασυνεχείς ή διάχυτες φάσεις που λέγονται *εγκλείσματα* (fillers).

Το απλούστερο σύνθετο υλικό αποτελείται από δυο υλικά από τα οποία το ένα αποτελεί τη *μήτρα* (matrix) και το δεύτερο το *έγκλεισμα* (filler).

Κατά την χρήση ενός συνθέτου υλικού, η μήτρα και το έγκλεισμα αναλαμβάνουν διαφορετικά καθήκοντα. Η μήτρα είναι το σύνδετικό υλικό το οποίο συνδέει,

προστατεύει και υποστηρίζει την ασυνεχή φάση, το έγκλεισμα. Επίσης παίζει σπουδαίο ρόλο, επειδή μεταφέρει τις τάσεις μέσα στο σύνθετο υλικό. Το έγκλεισμα με την σειρά του συνεισφέρει στην αντοχή και την ακαμψία του συνθέτου υλικού. Η συνεργασία αυτή της μήτρας και του εγκλείσματος. δίνει στο σύνθετο υλικό ιδιότητες που σε πάρα πολλές εφαρμογές το καθιστούν ανώτερο και περισσότερο κατάλληλο από τα κοινά υλικά.

4.4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΟΡΙΖΟΥΝ ΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ

Η μελέτη της ισορροπίας των φάσεων των συνθέτων έχει μεγάλη σημασία. Η συμπεριφορά ενός συνθέτου εξαρτάται σημαντικά από την περιεκτικότητα των αρχικών του υλικών. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την περιγραφή ενός συνθέτου υλικού με μια ή περισσότερες διάχυτες φάσεις μέσα σε μια συνεχή φάση είναι:

I) Το είδος των υλικών των διάχυτων φάσεων (εγκλεισμάτων).
II) Η γεωμετρία της διάχυτης φάσης.
ΠΙ) Το είδος του υλικού, που χρησιμοποιείται ως μήτρα.

Για να περιγράψουμε αναλυτικά ένα σύνθετο υλικό, πρέπει να αναφέρουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- την συγκέντρωση και την κατανομή συγκέντρωσης των σωματιδίων
- το μέγεθος και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων
- το σχήμα των σωματιδίων
- τον προσανατολισμό των σωματιδίων
- την τοπολογία των σωματιδίων.

4.5. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη φύση της μήτρας και των συστατικών πρόσμειξης των εγκλεισμάτων.
Έτσι διακρίνουμε τα παρακάτω είδη:

Ι. Διάκριση ως προς την προέλευση της μήτρας:
· Σύνθετα με πλαστική μήτρα
· Σύνθετα με μεταλλική μήτρα

Π. Διάκριση ως προς τη μορφή του εγκλείσματος:
· Έγκλεισμα με μορφή ινών
· Έγκλεισμα με μορφή κόκκων
· Έγκλεισμα με μορφή φύλλων

4.6. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ.

4.6.1. Κύρια φάση

Όταν το ποσοστό της κατ' όγκο περιεκτικότητας είναι μεγαλύτερο του 50% του συνόλου του συνθέτου, τότε αυτό το υλικό αποτελεί την *κύρια φάση* του συνθέτου.

Τα σύνθετα των οποίων η μήτρα είναι πλαστικό, διακρίνονται σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες της μήτρας σε:

I. *Ελαστομερή (Elastomers)*

Τα ελαστομερή ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών προσθήκης και οι μηχανικές τους ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν με βουλκανισμό.

Σε αυτά, τα μακρομόρια έχουν τη μορφή ίνας συσπειρωμένης κατά τρόπο τυχαίο, όταν το υλικό είναι ελεύθερο εξωτερικής τάσης. Όταν επιβληθεί μια εξωτερική τάση, τότε η ίνα ξεδιπλώνεται και διατάσσεται παράλληλα στην κατεύθυνση της τάσης, αποκτώντας πιο οργανωμένη δομή. Με την άρση της εξωτερικής τάσης το μόριο επανέρχεται στην αρχική του μορφή. Τα ελαστομερή σε θερμοκρασία δωματίου αν υποστούν εφελκυσμό διπλασιάζουν τουλάχιστον το αρχικό μήκος τους.

Π. *Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (Thermosetting)*

Τα υλικά αυτά είναι προϊόντα ατελούς πολυμερισμού που θερμαινόμενα στην αρχή γίνονται μαλακά και στη συνέχεια με την αύξηση της θερμοκρασίας σκληραίνουν οριστικά καθώς ο πολυμερισμός γίνεται πλήρης. Οι ιδιότητές τους οφείλονται σε χημικές αντιδράσεις που προέρχονται από τη δημιουργία πολυμερών μακρομορίων. Οι χημικές αντιδράσεις υποβοηθούνται από ειδικούς καταλύτες (curing agents). Συνήθη θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι οι πολυεστερικές ρητίνες, οι ρητίνες φαινόλης-φορμαλδεΰδης, μελαμίνης, ρητίνες σιλικόνης και οι εποξειδικές ρητίνες.

III *Θερμοπλαστικά (Thermoplastics)*

Τα θερμοπλαστικά ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών συμπύκνωσης, που λαμβάνονται από την αντίδραση δυο μορίων με δυο χαρακτηριστικές ομάδες από μονομερή με ένα διπλό δεσμό.

Είναι διαλυτά σε ορισμένους διαλύτες και κατά τη θέρμανση μαλακώνουν όταν φθάσουν την υαλώδη θερμοκρασία, T_g.Αν το θερμοπλαστικό υλικό θερμανθεί πάνω από την υαλώδη θερμοκρασία και στη συνέχεια ψυχθεί, τότε επανακτά την αντοχή του. Στις υψηλές θερμοκρασίες οι δεσμοί σπάνε και το πολυμερές αποσυντίθεται. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή τους περιορίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από εκείνες στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά. Τα υλικά αυτά καλύπτουν μεγάλο αριθμό προϊόντων.

Χρησιμοποιούνται με κάποια μέσα ενίσχυσης, διότι από μόνα τους εμφανίζουν μεγάλο συντελεστή διαστολής και πτωχές μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχή σε σκληρότητα, ερπυσμό, εφελκυσμό, κρούση.

4.6.2. Διάχυτη ή δευτερεύουσα φάση συνεχής και διασπαρμένη

Ι) Δευτερεύουσα συνεχής φάση

Το πιο συνηθισμένο υλικό για αυτόν τον σκοπό είναι το γυαλί. Μια μέθοδος πολύ διαδεδομένη για την δημιουργία αυτής της φάσης, είναι η συνένωση πολλών φύλλων μαζί που θα αποτελέσουν ένα έλασμα, στο οποίο θα προστεθεί ρητίνη και με την επίδραση θερμότητας και πίεσης θα στερεοποιηθούν σε μια ενιαία μάζα.

Άλλα υλικά που χαρακτηρίζουν τη φάση ως συνεχή λόγω της μορφολογίας τους είναι το *Rayon* και το *πολυακριλονιτρίλιο*.

Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν λεπτά φύλλα από μέταλλα, με σειρά επιλογής χαλκό, αλουμίνιο και νικέλιο σε συνδυασμό με εποξειδικές ρητίνες ή πολυεστέρες.

ΙΙ) Δευτερεύουσα διασπαρμένη φάση

Το κοινό χαρακτηριστικό για την ποικιλία των υλικών που μπορεί να χαρακτηριστεί ως διασπαρμένη φάση είναι το παρεμφερές μέγεθος της διαμέτρου των κόκκων των υλικών. Η διάμετρος θεωρητικά δεν πρέπει να διαφέρει από 1μm.

Τα υλικά αυτά είναι συνήθως στερεές χημικά αδρανείς ουσίες που προστίθενται στο πολυμερές για την τροποποίηση των ιδιοτήτων με παράλληλη επιδίωξη τη μείωση του κόστους του συνθέτου.

Η ταξινόμηση των εγκλεισμάτων σε συνάρτηση κάποιων παραμέτρων και οι αντίστοιχες ιδιότητές τους είναι απαραίτητο να γίνουν λόγω της μεγάλης ποικιλίας τους. Οι παράμετροι αυτοί είναι λόγω της χημικής τους σύνθεσης (π.χ. ανθρακικό ασβέστιο), λόγω της προέλευσής τους (π.χ. ορυκτό σύνθετο), της φυσικής μορφής τους (π.χ. ίνα, σφαίρα, ράβδος, δισκίο), της λειτουργίας τους (π.χ. ενίσχυση, κόστος).

Ο πιο απλός τρόπος ταξινόμησης των εγκλεισμάτων είναι σε οργανικά και ανόργανα. Στη συνέχεια υποδιαιρούνται σε ινώδη και μη ινώδη. Ανάλογα με το μέγεθός τους, τα φυσικά τους χαρακτηριστικά, την πυκνότητά τους, κ.ά. Αν και θεωρητικά ο αριθμός και το είδος των εγκλεισμάτων που είναι αποδεκτός για να ενσωματωθούν σε ένα πολυμερές είναι μεγάλος, στην πράξη περιορίζεται πάρα πολύ λόγω των προϋποθέσεων που πρέπει να ικανοποιούν.

Επιδιώκουμε τα εξής:

· Χαμηλό κόστος και εύκολη διαθεσιμότητα.
· Μέγιστη βελτίωση των επιθυμητών φυσικών ιδιοτήτων.
· Χαμηλή διαλυτότητα στο νερό και σε άλλους διαλύτες.
· Μικρή απορρόφηση υγρασίας.
· Κατάλληλο ειδικό βάρος.
· Ικανοποιητική αντοχή.
· Ικανότητα διαβρέξεως.
· Απαλλαγή από χημικές, τοξικές ουσίες.

· Μη αναφλεξιμότητα.
· Επιθυμητό χρώμα.
· Θερμική αντοχή.
· Άοσμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ.

Η επιλογή της κατάλληλης λύσης για την επισκευή ή την ενίσχυση μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα προϋποθέτει ότι ο μηχανικός γνωρίζει καλά τα υλικά και τις τεχνικές που διατίθενται για τέτοιου είδους επεμβάσεις.

Στην πραγματικότητα, ο μηχανικός της πράξης, που δεν έχει ασχοληθεί με θέματα επεμβάσεων, θα αντιμετωπίσει το θέμα με δυσκολία, επειδή τα παραδοσιακά υλικά της οικοδομής (σκυρόδεμα και χάλυβας) είναι από μόνα τους ανεπαρκή να δώσουν τη λύση, έστω και αν εξακολουθούν να παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη διαδικασία.

Συχνά απαιτείται να χρησιμοποιηθούν νέα υλικά και νέες τεχνολογίες σε συνδυασμό με τροποποιημένα παραδοσιακά υλικά. Επειδή συχνά τα παραπάνω υλικά και τεχνολογίες εφαρμόζονται κάτω από ειδικές συνθήκες, χρειάζεται να διασφαλιστεί ένα σύστημα ποιοτικού ελέγχου σε επίπεδο σημαντικά υψηλότερο από αυτό που εφαρμόζεται στις νέες κατασκευές. Επιπλέον θα πρέπει να αντιμετωπιστούν νέα κρίσιμα θέματα που ανακύπτουν, όπως αυτό της διασφάλισης της συνεργασίας των παλαιών και νέων υλικών.

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη αναφορά στα διάφορα υλικά και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συχνότερα στις επεμβάσεις των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Τα θέματα που παρουσιάζονται είναι τα εξής:

Ειδικοί τύποι Σκυροδέματος
Πολυμερικές κόλλες
Επισκευαστικά κονιάματα
Επικολλητά φύλλα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs)
Διατμητικοί σύνδεσμοι-Αγκύρια
Αγκυρώσεις και συγκολλήσεις νέων ράβδων οπλισμού

5.2.ΕΙΔΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

Ειδικοί τύποι σκυροδέματος, χρησιμοποιούνται στην Τεχνολογία των Επεμβάσεων για να αντιμετωπιστούν μειονεκτήματα του συμβατικού έγχυτου σκυροδέματος όπως η συστολή ξήρανσης και η μειωμένη συνάφεια του με το παλαιό σκυρόδεμα.

Τα μειονεκτήματα αυτά, σε αντίθεση με ότι ισχύει για τις νέες κατασκευές, αποτελούν συχνά κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχία των επεμβάσεων και η αντιμετώπισή τους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Επιπλέον συχνά απαιτείται αυξημένη αντοχή του νέου σκυροδέματος, για να μειωθεί το μέγεθος της αισθητικής παρέμβασης.

Στη συνέχεια αναπτύσσονται τέσσερις ειδικοί τύποι σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στις επεμβάσεις: το έγχυτο σκυρόδεμα σταθερού όγκου, το πολυμερικό σκυρόδεμα, το σκυροτσιμεντόπηγμα και τέλος το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που αποτελεί την πλέον δημοφιλή επιλογή στον Ελληνικό χώρο, και μερικές φορές χρησιμοποιείται με προσθήκη ινών.

5.2.1. ΈΓΧΥΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΟΓΚΟΥ.

Το έγχυτο σκυρόδεμα σταθερού όγκου παράγεται με χρήση είτε διογκούμενου τσιμέντου είτε συνηθέστερα με προσθήκη ειδικών πρόσθετων που προκαλούν σταδιακή αύξηση του όγκου του σκυροδέματος εξουδετερώνοντας έτσι τη συστολή ξήρανσης. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να εφαρμόζονται πιστά οι οδηγίες του προμηθευτή του διογκούμενου τσιμέντου ή των πρόσθετων. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο N/T κυμαίνεται συνήθως από 0,50 έως 0,60 και οι αντοχές που επιτυγχάνονται είναι σχετικώς υψηλότερες από αυτές του συμβατικού έγχυτου σκυροδέματος για τον ίδιο λόγο N/T.

Από πρακτική άποψη, τα βασικά πλεονεκτήματα του έγχυτου σκυροδέματος σταθερού όγκου είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης τόσο στην επιφάνεια του όσο και στις θέσεις επαφής με τα υφιστάμενα στοιχεία σκυροδέματος. Πλεονεκτεί ως εκ τούτου, ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα επειδή εξασφαλίζει καλύτερη πρόσφυση σε παλαιό σκυρόδεμα. Εξάλλου ως πρόσθετο θετικό χαρακτηριστικό του μπορεί να καταγραφεί η αυξημένη αντοχή του σε επιφανειακή φθορά και σε δράση χημικών (CEB. Bu1.162, 1983).

5.2.2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.

Τα σκυροδέματα με πολυμερή παράγονται είτε με αντικατάσταση του τσιμέντου με πολυμερές (χρησιμοποιώντας πολυεστερικές ή εποξειδικές ρητίνες), είτε με μερική αντικατάσταση του νερού με υδατοδιαλυτό πολυμερές (latex), είτε εμποτίζοντας σκληρυμένο συμβατικό σκυρόδεμα με μονομερές που στη συνέχεια πολυμερίζεται. Αυτός ο τύπος του σκυροδέματος έχει υψηλό κόστος παρασκευής.

Όμως χαρακτηρίζεται από ένα πλήθος πλεονεκτημάτων ιδιαίτερα σημαντικών στην τεχνολογία των επεμβάσεων. Εδώ επισημαίνονται τα εξής:

α) Οι επιτυγχανόμενες αντοχές σε θλίψη μπορεί να φθάσουν μέχρι και το τετραπλάσιο των αντοχών των αντίστοιχων συμβατικών σκυροδεμάτων, ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φθάσει μέχρι και το 20πλάσιο!

β) Η σκλήρυνση του σκυροδέματος γίνεται πολύ γρήγορα και επιταχύνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να επιτευχθούν ιδιαίτερα υψηλές αντοχές. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για συντήρηση δοκιμίων σε θερμοκρασίες της τάξεως των 70^0 C προέκυψαν αντοχές μέχρι 140 MPa σε διάστημα 5 ωρών από το χρόνο σκυροδέτησης ενώ με θερμοκρασία περιβάλλοντος (20^0 C) οι αντίστοιχες αντοχές προέκυψαν μέχρι και 100 MPa σε διάστημα 7 ημερών.

γ) Επιτυγχάνεται εξαιρετικά καλή πρόσφυση με το παλαιό σκυρόδεμα, εξασφαλίζοντας σχεδόν μονολιθική συμπεριφορά του τελικού πολυφασικού στοιχείου.

δ) Το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει μέχρι 50% υψηλότερο του αντίστοιχου για συμβατικό σκυρόδεμα στην περίπτωση που το τσιμέντο έχει αντικατασταθεί με πολυμερές, ενώ όταν το νερό αντικατασταθεί με υδατοδιαλυτό πολυμερές (latex) το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να μειωθεί μέχρι και 50%.

ε) Επιτυγχάνεται αυξημένη αντίσταση στη επιφανειακή φθορά, στην προσβολή από χημικά και στον παγετό, ενώ παρατηρείται και μία σχετική μείωση του πορώδους και της συστολής ξήρανσης.

στ) Βασικά μειονεκτήματα των σκυροδεμάτων με πολυμερή είναι ο υψηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η μειωμένη αντίσταση στην ενανθράκωση του

σκυροδέματος, η μικρή αντοχή σε πυρκαγιά και ο σχετικά υψηλός ερπυστικός συντελεστής. Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί ότι η βελτίωση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος αυτού του τύπου μειώνεται ραγδαία σε υψηλές θερμοκρασίες.

5.2.3. ΣΚΥΡΟΤΣΙΜΕΝΤΟΠΗΓΜΑ.

Το σκυροτσιμεντόπηγμα δημιουργείται με αρχική διάστρωση αδρανών μεγάλης διαμέτρου στα καλούπια του προς σκυροδέτηση στοιχείου και στη συνέχεια πλήρωση των κενών των αδρανών με τσιμεντοκονία που εισάγεται υπό πίεση. Τα αδρανή έχουν ελάχιστο μέγεθος κόκκων 10-15 mm.Το σκυροτσιμεντόπηγμα έχει αρχικά μικρότερη αντοχή από το αντίστοιχο σκυρόδεμα. Με την πάροδο όμως του χρόνου η διαφορά μειώνεται συνεχώς μέχρι που παύει να υπάρχει. Εξάλλου πλεονεκτεί ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα επειδή έχει μικρότερη συστολή ξήρανσης, μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο, μεγαλύτερη στεγανότητα και ικανοποιητική πρόσφυση στο παλαιό σκυρόδεμα.

5.2.4. ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (sprayed concrete ή shotcrete ή gunite) που χρησιμοποιείται σε έργα επεμβάσεων, είναι σκυρόδεμα λεπτής διαβάθμισης αδρανών που σκυροδετείται με εκτόξευση.

Συντίθεται από τσιμέντο, λεπτόκοκα (ή και σχετικώς χονδρόκοκα) αδρανή και νερό, μπορεί δε να περιλαμβάνει πρόσθετα υλικά όπως ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικάμινων, οξείδια του πυριτίου και βελτιωτικά (όπως επιταχυντικά πήξης και σκλήρυνσης, πρόσμικτα για αύξηση της πρόσφυσης, θιξοτροπικά πρόσμικτα που εμποδίζουν το «κρέμασμα» (Sagging) του υλικού, κ.α.) καθώς και χαλύβδινες ή πλαστικές ίνες ή από γυαλί. Η εφαρμογή του απαιτεί πάντα, ειδικό εξοπλισμό και κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό.

Στοιχεία από μετασεισμικές επεμβάσεις, μετά από τους τελευταίους ισχυρούς σεισμούς στην χώρα μας , δείχνουν ότι η χρήση του Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος (Ε.Σ.) είναι κυρίαρχη, ανεξαρτήτως από το είδος του φέροντος οργανισμού της κατασκευής. Σε μετασεισμικές επεμβάσεις οι εργασίες Ε.Σ. αποσπούν το μεγαλύτερο οικονομικό μερίδιο σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές επεμβάσεων και καλύπτουν ποσοστό της τάξεως του 30% του συνολικού κόστους των επεμβάσεων του φέροντος οργανισμού των κτιρίων. Σε κατασκευές με φέροντα οργανισμό από Οπλισμένο Σκυρόδεμα το ποσοστό αυτό ξεπερνά το 40%.

Η ευρύτατη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ή ακόμα και κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία οφείλεται κυρίως στα παρακάτω τέσσερα χαρακτηριστικά του:

(1) Το Ε.Σ. έχει υψηλή θλιπτική αντοχή επειδή ο υδατοσυντελεστής Ν/Τ είναι χαμηλός και επειδή επιτυγχάνεται υψηλή συμπύκνωση λόγω της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αντοχές της τάξης των 50 MPa βρίσκονται μέσα στα πλαίσια συνήθους εφαρμογής της τεχνικής και ότι αντοχές μέχρι 30 MPa επιτυγχάνονται σχετικά εύκολα.

(2) Η μεγάλη ταχύτητα εκτόξευσης παρέχει δυνατότητα πολύ καλής πρόσφυσης με το υλικό βάσης. Οι διαστάσεις των κόκκων των αδρανών παρέχουν μεγάλη ικανότητα διείσδυσης μέσα στις μικροανωμαλίες της επιφάνειας βάσης, η οποία συνήθως έχει προηγουμένως εκτραχυνθεί.

(3) Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αυτοστηρίζεται, δηλαδή δεν απαιτείται χρήση ξυλότυπου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και στο κάτω μέρος οριζοντίων στοιχείων.

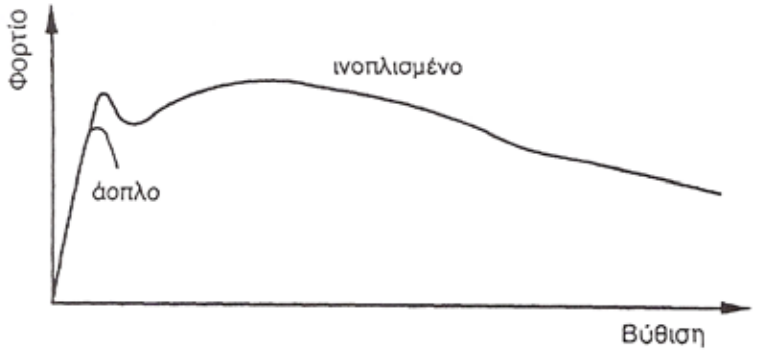
(4) Η εγκατάσταση είναι κινητή και σε συνδυασμό με το είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται επιτρέπει τη σκυροδέτηση σε δύσκολες και δυσπρόσιτες θέσεις.

Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί ότι "αν υπάρχει χώρος για έναν άνθρωπο και ένα λάστιχο, μπορούμε να σκυροδετήσουμε".

Όμως παρά την ευρύτατη χρήση του υλικού, εξακολουθεί να υπάρχει σύγχυση στους μηχανικούς και τα συνεργεία που χρησιμοποιούν το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, κυρίως λόγω της απουσίας ενός Κανονιστικού πλαισίου για την εφαρμογή του ή έστω μιας σαφούς προδιαγραφής εφαρμογής σε έργα επεμβάσεων. Μία προσπάθεια που ξεκίνησε πριν μερικά χρόνια από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. και κατέληξε στο "Σχέδιο Προδιαγραφής για το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα" (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2000α), αν και ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη, δεν ήταν προσανατολισμένη για έργα Επισκευών/Ενισχύσεων και δεν ολοκληρώθηκε. Το τοπίο θα αποσαφηνιστεί πλήρως όταν οριστικοποιηθεί η παραπάνω προδιαγραφή και ολοκληρωθεί μία αντίστοιχη προσπάθεια που γίνεται σήμερα από το Ι.Ο.Κ. στα πλαίσια σύνταξης των «Προσωρινών Εθνικών Τεχνικών Προδιαγραφών» για Έργα Αποκατάστασης Ζημιών από Σεισμούς (Ι.Ο.Κ.,2004).

Η προσθήκη ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα γίνεται κυρίως για περιορισμό της ρηγμάτωσης λόγω της υψηλής συστολής ξήρανσης. Συνήθως οι ίνες που χρησιμοποιούνται είναι από χάλυβα, προπυλένιο ή γυαλί. Το μήκος τους είναι της τάξης μερικών εκατοστών, και η διάμετρος τους, που εξαρτάται από το υλικό, συνήθως δεν ξεπερνά το χιλιοστό. Η προσθήκη των ινών γίνεται συνήθως σε ποσοστό μεταξύ 1 % και 3% κ.ο. Για ίνες χάλυβα το μέγιστο ποσοστό είναι 2% και ο λόγος του μήκους τους προς τη διάμετρο τους, δεν πρέπει να ξεπερνάει το 100. Εξάλλου η τυχόν διάβρωση των ινών χάλυβα δεν έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα του υλικού .

Εκτός από τον περιορισμό της ρηγμάτωσης, η προσθήκη των ινών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού κατά την αστοχία και μια μικρή αύξηση της εφελκυστικής αντοχής (Σχ.5.1).



Σχ.5.1 Επίδραση ινών στη συμπεριφορά σε κάμψη.

Η παραπάνω αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας ,συνεπάγεται μια αύξηση της ικανότητας του υλικού να απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση (δυσθραυστότητα) που φτάνει να είναι 10-40 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του χωρίς ίνες εκτοξευόμενου σκυροδέματος . Προφανώς η παραπάνω εξαιρετικά θετική συμβολή των ινών στην απορρόφηση ενέργειας πρέπει να αξιολογηθεί ιδιαίτερα στην περίπτωση επεμβάσεων που στοχεύουν στην αντισεισμική ενίσχυση των κατασκευών.

5.3. ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΕΣ ΚΟΛΛΕΣ.

Οι πολυμερικές κόλλες είναι συγκολλητικά υλικά που δημιουργούνται από την "επί τόπου" ανάμιξη των δύο συστατικών.

Το πρώτο είναι το πολυμερές που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση (συστατικό Α) και το δεύτερο είναι ο σκληρυντής (συστατικό Β). Η ανάμιξή τους σ' ένα ομοιογενές υλικό δημιουργεί ένα ισχυρό συγκολλητικό υλικό με ασυναγώνιστες σε πολλές περιπτώσεις ιδιότητες. Αυτός είναι ο λόγος που οι πολυμερικές κόλλες έχουν ευρύτατη εφαρμογή στον τομέα των επισκευών και των ενισχύσεων. Εξάλλου σε σύγκριση με άλλα συστήματα σύνδεσης έχουν το πλεονέκτημα της κατανομής των φορτίων σε μεγαλύτερη επιφάνεια μειώνοντας έτσι τις τοπικές εντάσεις. Επιπρόσθετα, η χρήση τους επιτρέπει την πλήρη επαφή των προς σύνδεση στοιχείων χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις στο σχήμα ή την επιφάνεια επαφής τους. Τέλος σημειώνεται ότι έχουν το πλεονέκτημα να δημιουργούν ένα αδιαπέραστο φράγμα υγρασίας.

Τα είδη των πολυμερών που χρησιμοποιούνται είναι αρκετά. Όμως για τις διαδικασίες επισκευής και ενίσχυσης των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα τα πλέον διαδεδομένα και ενδεδειγμένα πολυμερή είναι (κυρίως) οι εποξειδικές και (δευτερευόντως) οι πολυεστερικές ρητίνες.

Στην πράξη έχει επικρατήσει η ονομασία ρητίνη, υπονοώντας τη ρητινοειδή κόλλα. Στη συνέχεια ο όρος ρητίνη χρησιμοποιείται με αυτήν την έννοια ενώ όταν χρειάζεται να δηλωθεί το πρώτο συστατικό πριν την ανάμιξη θα χρησιμοποιείται ο όρος "συστατικό Α".

Κρίσιμο μειονέκτημα των τεχνικών που χρησιμοποιούν ρητίνες είναι ότι απαιτούν ειδικό

προγραμματισμό των εργασιών επέμβασης επειδή: (α) ο χρόνος εργασιμότητας τους (pot life), δηλαδή ο χρόνος που η ρευστότητά τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν, είναι μικρός και (β) τα στοιχεία που συγκολλήθηκαν θα πρέπει να παραμείνουν αδιατάρακτα για όσο χρόνο (ώρες ή ημέρες) διαρκεί η συγκόλλησή τους.

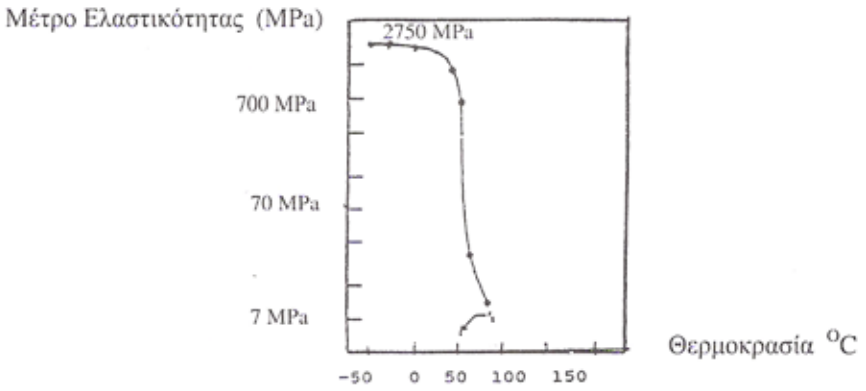
Εξάλλου δεν πρέπει να λησμονούνται τα βασικά προβλήματα, όλων των ρητινοειδών υλικών, που οφείλονται στο γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά τους είναι διαφορετικά από αυτά του σκυροδέματος και πολλές φορές καθορίζουν τα όρια εφαρμογής της παραπάνω τεχνικής.

Ως τέτοια μπορούν να επισημανθούν:

α) Η μικρή αντοχή του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες. Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία τα χαρακτηριστικά της ρητίνης αρχίζουν να αλλάζουν και η αντοχή της μειώνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50^0 C (ACI Com.503). Στο Σχήμα 5.2 (ACI

Com.503), δείχνεται αυτή η επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας. Τελικά η ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 250 °C.

Γίνεται ως εκ τούτου προφανής ο κίνδυνος που δημιουργείται σε περίπτωση πυρκαγιάς και γι' αυτό απαιτείται να ληφθούν ειδικά μέτρα προστασίας των επισκευασμένων δομικών στοιχείων.



Σχ.5.2 Επίδραση θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας

β) Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού είναι πολύ μικρότερο από αυτό του σκυροδέματος. Εν γένει είναι μικρότερο από το 1/10 της τιμής του μέτρου ελαστικότητας του συνηθισμένου σκυροδέματος.

Κρίσιμος παράγοντας επιτυχίας της συγκόλλησης είναι η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να είναι υγιής και καθαρή. Εξάλλου επισημαίνεται ότι, εάν δεν έχουν αποκαλυφθεί τα χονδρόκοκκα αδρανή, η αντοχή της σύνδεσης θα είναι μειωμένη. Αυτό επιβάλλεται από το γεγονός ότι η αντοχή της σύνδεσης εξαρτάται από την αντοχή του ασθενέστερου συγκολλημένου στοιχείου ενώ η επιδερμική στρώση σκυροδέματος είναι πάντοτε ασθενέστερη από το σκυρόδεμα που είναι κάτω από την επιφάνεια.

Οι συνηθέστερες χρήσεις των ρητινών στον τομέα των επισκευών και ενισχύσεων είναι: (α) η συγκόλληση νωπού ή σκληρυμένου σκυροδέματος σε σκληρυμένο σκυρόδεμα, (β) η συγκόλληση άλλων υλικών στο σκυρόδεμα, (γ) οι αγκυρώσεις ράβδων σε σκληρυμένο σκυρόδεμα και (δ) η επισκευή ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Στην πράξη, το μεγαλύτερο μερίδιο εργασιών με πολυμερικές κόλλες αφορά τις επισκευές ρωγμών με την τεχνική των ρητινενέσεων. Σε εργασίες μετασεισμικών επεμβάσεων το οικονομικό αντικείμενο των εργασιών με ρητινενέσεις εκτιμήθηκε σε ποσοστό 90% του συνόλου των εργασιών με πολυμερικές κόλλες.

5.4. ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ.

Επισκευαστικά κονιάματα χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές αποκατάστασης και ενίσχυσης των κατασκευών, όταν το απαιτούμενο πάχος του υλικού είναι μικρό και απαιτείται πολύ καλή πρόσφυση. Βασικό μειονέκτημα αυτών των υλικών είναι το υψηλό

τους κόστος, που όμως συχνά εξουδετερώνεται από το γεγονός ότι η ποσότητα που απαιτείται είναι μικρή και το μέγεθος της προστασίας που προσφέρεται είναι υψηλό.

Στην πράξη εφαρμόζονται σήμερα δύο τύποι κονιαμάτων. Τα κονιάματα με πολυμερή και τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο.

5.4.1. Κονιάματα με πολυμερή.

Τα κονιάματα με πολυμερή παράγονται με δύο τρόπους:

(α) με αντικατάσταση του τσιμέντου με πολυμερές

(β) με αντικατάσταση μέρους του νερού με υδατοδιαλυτό πολυμερές (latex).

Στην πράξη έχει επικρατήσει η ονομασία ρητινοκονιάματα επειδή συνήθως ως πολυμερές χρησιμοποιείται ρητίνη.

Κονιάματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να αποκατασταθούν βλάβες μικρού βαθμού σε δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως αποφλοιώσεις σκυροδέματος ή άλλες περιπτώσεις όπου το απαιτούμενο πάχος του επισκευαστικού υλικού είναι ιδιαίτερα μικρό (π.χ. στην περίπτωση οπλισμών χωρίς επικάλυψη λόγω κακής σκυροδέτησης).

Τα πλεονεκτήματα των κονιαμάτων αυτού του τύπου είναι σημαντικά, και ανάλογα με αυτά που αναφέρθηκαν για την περίπτωση του σκυροδέματος με πολυμερή. Αν και το κόστος τους είναι ιδιαίτερα υψηλό σε σύγκριση με τα ανταγωνιστικά κονιάματα που έχουν βάση το τσιμέντο, πρέπει να τονιστεί ότι στο πεδίο εφαρμογής που αναφέρθηκε παραπάνω έχουν σαφές προβάδισμα.

5.4.2. Κονιάματα με βάση το τσιμέντο.

Τα κονιάματα αυτά δημιουργούνται από ειδικές κονίες με προσθήκη μικρής ποσότητας νερού, της τάξεως 10-20 % του βάρους του κονιάματος. Οι κονίες είναι μίγματα τσιμέντου με λεπτόκοκκα αδρανή που η διάμετρος τους συνήθως δεν ξεπερνά τα 2,5 mm, σε συνδυασμό με υπερευστοποιητικά υλικά, και πρόσμικτα που παρεμποδίζουν τη συστολή ξήρανσης. Σε μερικές περιπτώσεις τα αδρανή μπορεί να έχουν διάμετρο μέχρι και 10 mm. Συνήθως τα αδρανή περιέχονται στο μίγμα, που προσφέρεται στην αγορά σε συσκευασμένους σάκους έτοιμο προς χρήση απαιτώντας μόνο την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας νερού. Σε μερικές περιπτώσεις τα αδρανή προβλέπεται να προστίθενται σε προκαθορισμένη αναλογία, που συνήθως δεν ξεπερνά την 1:1, ακολουθώντας πάντοτε τις οδηγίες του παραγωγού.

Κονιάματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται όταν απαιτούνται μικρά μεν πάχη υλικού, αλλά όμως μεγαλύτερα απ' ότι στις περιπτώσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως για εφαρμογές με κονιάματα πολυμερών. Συνήθεις εφαρμογές τους είναι η αποκατάσταση περιοχών αποδιοργανωμένου σκυροδέματος και η πλήρωση φωλεών σε στοιχεία σκυροδέματος με κακή συμπύκνωση.

Τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτών των κονιαμάτων είναι:

α) Οι υψηλές αντοχές που οφείλονται στο χαμηλό υδατοτσιμεντοσυντελεστή. Στον Πίνακα 5.1 (Ε.Π.Ρ.Κ., 1994) παρουσιάζονται οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά ενός

δείγματος από υλικά της αγοράς για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία. Στις δύο τελευταίες στήλες δίνονται για λόγους σύγκρισης τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για τις κατηγορίες σκυροδέματος C16/20 και C25/30.

β) Η ταχεία ανάπτυξη αντοχής, όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί στον Πίνακα 5.2.

γ) Η μεγάλη ρευστότητα, που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς μείωση της αντοχής, λόγω παρουσίας υπερευστοποιητών.

δ) Η εξουδετέρωση της συστολής ξήρανσης λόγω της παρουσίας των ειδικών προσθέτων που προκαλούν σταδιακή αύξηση του όγκου του κονιάματος.

Ιδιότητες-Χαρακτηριστικά	Συμβατική Ονομασία Υλικού						Κατηγορία Σκυροδέματος	
	MA	MB	MC	MD	ME	MF	C16/20	C25/30
Θλιπτική Αντοχή (MPa)	74	70	75	63	68	42	24	33
Μέτρο Ελαστικ. σε Θλίψη (MPa)	25000	25000	30000	*	*	27500	30500	*
Παραμόρφωση Αστοχίας (‰)	6	6	6	*	*	*	3,7	3,5
Εφελκ. Αντοχή σε Κάμψη (MPa)	8,8	8	8,5	8	11,3	6,3	2,1	2,8
Συνάφεια με παλαιό Σκυρ. (MPa)	6	6	6,5	*	*	*	1,5	1,5
Συνάφεια με Χάλυβα (MPa) Για Λείους Ράβδους Για ράβδους με ραβδώσεις	 3 20	 3 20	 4 30	*	*	*	*	*

* δεν διατίθενται στοιχεία

Πίνακας 5.1 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά επισκευαστικών κονιαμάτων με βάση το τσιμέντο.

Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Συμβατική Ονομασία Υλικού				
	MA	MB	MC	MD	ME
1 ημ.	33	26	30	3	16
4 ημ.	*	40	45	33	38
8 ημ.	*	50	60	48	48
28 ημ.	74	70	75	63	68

* δεν διατίθενται στοιχεία

Πίνακας 5.2 Εξέλιξη της ανάπτυξης της αντοχής επισκευαστικών κονιαμάτων με βάση το τσιμέντο.

Συμπερασματικά μπορεί να λεχθεί ότι το υλικό, έχει χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του σκυροδέματος και υψηλότερη αντοχή. Επίσης έχει πολύ καλή πρόσφυση στο υλικό βάσης που μπορεί να είναι σκυρόδεμα ή τοιχοποιία και δεν παρουσιάζει ρηγματώσεις ή κενά κακής χύτευσης.

Το υλικό πρέπει να είναι καλά συσκευασμένο και σωστά αποθηκευμένο σε ξηρό χώρο. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή επειδή η παρουσία υγρασίας έχει ιδιαίτερα αρνητικές επιπτώσεις στα επιδιωκόμενα αποτελέσματα.

Το μίγμα αναμειγνύεται για 3-4 min, σε μικρό αναμικτήρα. Πρώτα τοποθετείται το νερό στην ελάχιστη συνιστώμενη ποσότητα και στη συνέχεια προστίθεται κονία σε συνεχή ροή. Έπειτα προστίθεται όσο νερό χρειάζεται (μέσα στα όρια της προδιαγραφής του προμηθευτή), για την απόκτηση της επιθυμητής ρευστότητας και συνεχίζεται η ανάμιξη για 2-3 min, ακόμα. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ότι οι προβλεπόμενες από τους προμηθευτές ποσότητες νερού, αφορούν κανονικές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Σε συνθήκες ψυχρού και υγρού περιβάλλοντος (π.χ. το χειμώνα) το νερό θα πρέπει να μειώνεται ενώ σε αντίθετες συνθήκες το νερό θα πρέπει να αυξάνει.

Υπενθυμίζεται πάντως ότι, όπως και στο συμβατικό σκυρόδεμα, οι αντοχές αναπτύσσονται αργότερα, σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας χλιαρό (30^0_- 50^0 C) νερό ανάμιξης και θερμομονωτικά καλύμματα. Παρακάτω παρουσιάζεται η πορεία των εργασιών σε μία τυπική διαδικασία χρήσης αυτών των υλικών.

Απομακρύνεται το αποσαθρωμένο σκυρόδεμα και δημιουργείται τραχεία επιφάνεια πρόσφυσης, σε βάθος της τάξεως των 5 mm. Δημιουργείται περιμετρική απότμηση της προς επισκευή επιφάνειας, σε βάθος τουλάχιστον 10 mm, έτσι ώστε να δημιουργηθεί περιμετρικός εγκιβωτισμός του κονιάματος. Καθαρίζεται ο οπλισμός από τη σκουριά και το σκυρόδεμα βάσης από τυχόν σκόνη. Τοποθετείται ελαφρύς οπλισμός, σε περιπτώσεις πάχους μεγαλύτερου από 20 mm, ειδικότερα στις περιπτώσεις που δεν έχει εξασφαλιστεί ο περιμετρικός εγκιβωτισμός. Διαβρέχεται το σκυρόδεμα βάσης για όσο χρόνο συνιστάται από τον προμηθευτή. Πάντως χρειάζεται προσοχή να μην παραμείνει νερό πριν τη χύτευση στην επιφάνεια βάσης (κίνδυνος) σε οριζόντιες επιφάνειες. Εφόσον χρησιμοποιείται ξυλότυπος, αυτός διαβρέχεται με προσοχή πριν τη χύτευση. Τοποθετείται το κονίαμα. Σε περιπτώσεις ρευστού υλικού η χύτευση γίνεται από τη μία πλευρά για να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός αέρα. Σε περίπτωση πλαστικού υλικού, η τοποθέτηση γίνεται χειρονακτικά πιέζοντας το υλικό. Όταν υπάρχει οπλισμός, τότε το υλικό τον καλύπτει τουλάχιστον 10-15 mm.Αφαιρείται ο τυχόν ξυλότυπος μετά πάροδο χρόνου τουλάχιστον 24 ωρών μετά τη χύτευση. Σε επιφάνειες χωρίς καλούπι, τις πρώτες 24 ή 48 ώρες απαιτείται καλή συντήρηση με υγρές λινάτσες. Ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος και τις απαιτήσεις της κονίας, η συντήρηση συνεχίζεται για 4-5 μέρες, σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή. Συνήθως η ανάγκη επιμελούς συντήρησης είναι μεγαλύτερη όταν είναι μεγάλη η ρευστότητα του κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε.

5.5. ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΑ ΦΥΛΛΑ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ή ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.

Η χρήση επικολλητών φύλλων, από χάλυβα ή ινοπλισμένων πολυμερών (FRP_s) για την ενίσχυση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι σήμερα μια πολύ δημοφιλής τεχνική λόγω της ευκολίας εφαρμογής της.

Ο παραδοσιακός τρόπος εφαρμογής της τεχνικής είναι με χρήση χαλύβδινων ελασμάτων. Σήμερα έχει αρχίσει να εφαρμόζεται ανταγωνιστικά (με αρκετά πράγματι πλεονεκτήματα) η χρήση φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή όπου θα μελετηθούν λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Χαλύβδινα Επικολλητά ελάσματα.

Η χρήση χαλύβδινων ελασμάτων που επικολλώνται στην εξωτερική επιφάνεια δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι μια πολύ πρακτική τεχνική ενίσχυσης, που στοχεύει στη συμπλήρωση του ελλείμματος του προϋπάρχοντος οπλισμού, με νέους οπλισμούς.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της καμπτικής αντοχής δοκών και πλακών ή της διατμητικής αντοχής δοκών. Τα χαλύβδινα ελάσματα επικολλώνται, χρησιμοποιώντας κάποια κατάλληλη εποξειδική ρητίνη σε επίπεδο παράλληλο προς αυτό του προϋπάρχοντος ανεπαρκούς οπλισμού. Έτσι είτε τοποθετούνται στο εφελκυστικό πέλμα των στοιχείων (ενίσχυση σε κάμψη) είτε τοποθετούνται στις παρειές των δοκών (ενίσχυση σε διάτμηση). Επίσης μεταλλικά ελάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με τη μορφή κλειστών μανδυών για την ενίσχυση υποστυλωμάτων με τη τεχνική της περίσφιγξης.

Τα τελευταία 30 χρόνια η τεχνική εφαρμόστηκε ευρύτατα σε περιπτώσεις ενίσχυσης του εφελκυόμενου πέλματος καταστρωμάτων γεφυρών. Οι πρώτες εφαρμογές έγιναν στη Γαλλία και στη Ν.Αφρική στα μέσα της δεκαετίας του 1960.

Συνήθως χρησιμοποιούνται λεπτά χαλύβδινα ελάσματα πάχους 1-1,5 mm με όριο διαρροής που κυμαίνεται από 240 έως 400 MPa. Τα ελάσματα επικολλούνται σε μία ή περισσότερες στρώσεις σε συνεχή σύνδεση χρησιμοποιώντας ειδική κόλλα που συνήθως είναι εποξειδική. Συνίσταται η χρησιμοποίηση κόλλας με πλάστιμη συμπεριφορά για καλύτερη κατανομή των τάσεων στην περιοχή αγκύρωσης. Πρόσθετα στοιχεία αγκύρωσης μέσω βλήτρων ή μικροσυνδέσμων (καρφιών) χρησιμοποιούνται συχνά για μεγαλύτερη εξασφάλιση της σύνδεσης.

Το πάχος των ελασμάτων ενίσχυσης πρέπει να είναι μικρό για να αποφεύγεται η πρόωρη αστοχία στη διεπιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος, ιδιαίτερα στην ακραία περιοχή αγκύρωσης του. Γενικά προτείνεται να μην ξεπερνά τα 4 mm και επίσης να είναι μικρότερο από 2% του πλάτους του ελάσματος. Εξάλλου η χρήση ελασμάτων με μικρό πάχος επιτρέπει την καλύτερη σύνδεση με το στοιχείο αφού έτσι ακολουθείται κάθε αλλαγή της επιπεδότητας του πέλματος, χωρίς να εισάγονται πρόσθετες τοπικές τάσεις στο έλασμα. Αυτός είναι ο λόγος που σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ελάσματα σε περισσότερες στρώσεις, αντί για ελάσματα μεγάλου πάχους. Μια τυπική διαδικασία εφαρμογής της τεχνικής είναι η εξής:

1.Η επιφάνεια του σκυροδέματος που θα έρθει σε επαφή με το συγκολλητικό μέσο λειαίνεται με επιμέλεια και καθαρίζεται καλά από τυχόν σκόνες.

2.Η επιφάνεια του σκυροδέματος διαβρέχεται με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται καλά.

3.Γίνεται αμμοβολή στην εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων έτσι ώστε να παρεμποδιστεί η οξείδωση του χάλυβα και ακολουθεί καθαρισμός με απολυμαντικό μέσο.

4.Η επιφάνεια του σκυροδέματος εμποτίζεται με αραιό διάλυμα εποξειδικής ρητίνης εάν κριθεί ότι είναι ιδιαίτερα πορώδης ή υπάρχουν μικρορηγματώσεις.

5.Η επιφάνεια αναμονής επαλείφεται με εποξειδική ρητίνη πάχους 1-2 mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του ελάσματος. Η κόλλα τοποθετείται με μεγαλύτερο πάχος, που είναι της τάξης των 10 mm, στην κεντρική περιοχή επαφής, έτσι ώστε κατά την τοποθέτηση του ελάσματος η κόλλα να προχωράει προς τα έξω όταν συμπιεστεί.

6.Το έλασμα τοποθετείται στην επιφάνεια αναμονής με προσοχή έτσι ώστε να μην εγκλωβιστεί αέρας και συμπιέζεται για χρονικό διάστημα περίπου 24 ωρών με κατάλληλη διάταξη.

7.Αν προβλέπεται η τοποθέτηση περισσοτέρων του ενός μεταλλικών ελασμάτων, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, προετοιμάζοντας με ανάλογο τρόπο την εξωτερική επιφάνεια του προηγούμενου ελάσματος.

8.Τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα "πεταχτό" τσιμεντοκονίαμα για προστασία των ελασμάτων από διάβρωση και αντίσταση σε προσβολή από υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυρκαγιά).

Η ευκολία εφαρμογής της τεχνικής σε συνδυασμό με την ελάχιστη όχληση που προκαλείται στη χρήση του δομήματος και το χαμηλό κόστος αποτελούν τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου.

Κύρια μειονεκτήματα της τεχνικής είναι η ευκολία διάβρωσης του χάλυβα που συχνά διαπιστώνεται εντονότερη στην εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων. Απαιτείται ως εκ τούτου συνεχής συντήρηση που τελικά αυξάνει το κόστος. Εξάλλου η προφανής δυσκολία άμεσης διαπίστωσης της διάβρωσης του χάλυβα και η αδυναμία λήψης μέτρων προστασίας στην εσωτερική επιφάνεια των ελασμάτων, αυξάνει τους κινδύνους για μια απροειδοποίητη αστοχία της διεπιφάνειας και τελικά ένα ανεπιθύμητο τρόπο αστοχίας των στοιχείων.

Επιπλέον στα αρνητικά της τεχνικής θα πρέπει να προστεθούν (α) η δυσκολία εφαρμογής της τεχνικής λόγω του μεγάλου βάρους του χάλυβα και (β) η ανάγκη κατασκευής ενώσεων των ελασμάτων στις περιπτώσεις που απαιτούνται μεγάλα μήκη (π.χ. γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων).

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω μειονεκτήματα έχει αρχίσει να εφαρμόζεται ως εναλλακτική λύση η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή που επικολλώνται με ανάλογο τρόπο στην εξωτερική επιφάνεια των στοιχείων.

5.6. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ – ΑΓΚΥΡΙΑ.

Μεταλλικοί σύνδεσμοι που αγκυρώνονται σε υφιστάμενα στοιχεία σκυροδέματος μπορούν να δρουν είτε ως βλήτρα είτε ως αγκύρια, ανάλογα με τον τύπο του φορτίου που καταπονούνται. Ως **βλήτρα** χαρακτηρίζονται, όταν καταπονούνται σε διάτμηση, ενώ ως **αγκύρια,** όταν καταπονούνται σε αξονικό φορτίο.

Στην πράξη, διατίθενται ένα πλήθος από βιομηχανοποιημένους συνδέσμους που αγκυρώνονται στα στοιχεία σκυροδέματος με χημικό ή μηχανικό τρόπο. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τμήματα ράβδων οπλισμού ή δομικού χάλυβα που πακτώνονται με χημικό τρόπο σε τρύπες που διανοίγονται στα υφιστάμενα στοιχεία σκυροδέματος. Η χημική πάκτωση των συνδέσμων, που αποτελεί τη συχνότερη επιλογή στην πράξη, γίνεται σχεδόν πάντοτε με εποξειδικές ρητίνες. Για την εκτέλεση της εργασίας επισημαίνονται τα εξής:

(α) Η διάμετρος της οπής της τρύπας γίνεται 2-6 mm μεγαλύτερη από τη διάμετρο του συνδέσμου για να υπάρξει ο απαραίτητος χώρος για τη ρητίνη.

(β) Όπως έχει προκύψει πειραματικά (Luke et a1, 1985), η αγκύρωση των συνδέσμων είναι καλύτερη όταν ο καθαρισμός της τρύπας γίνεται με αναρρόφηση της σκόνης από το εσωτερικό της. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει ακόμα καλύτερα όταν τα τοιχώματα στο εσωτερικό της τρύπας εκτραχύνονται χρησιμοποιώντας μια λεπτή συρματόβουρτσα.

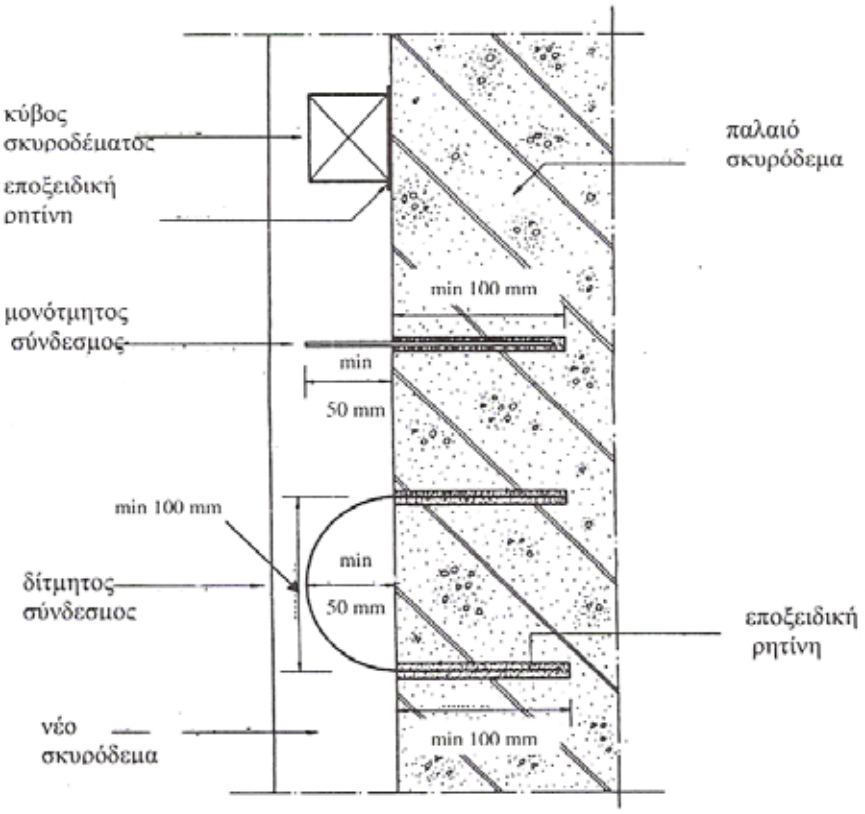
(γ) Γενικά προτιμώνται ρητίνες με μικρό ιξώδες (μεγάλη ρευστότητα).

(δ) Για οριζόντιες αγκυρώσεις, ο άξονας της τρύπας είναι ελαφρώς κεκλιμένος για να μην χάνεται η ρητίνη έξω από την τρύπα.

(ε) Για κατακόρυφες αγκυρώσεις οροφής χρησιμοποιούνται ειδικές κάψουλες ρητινών που τοποθετούνται με κατάλληλο εξοπλισμό.

(στ) Επαρκής ποσότητα ρητίνης θα πρέπει να τοποθετηθεί στην τρύπα πριν την είσοδο του συνδέσμου, έτσι ώστε στην τελική φάση η ρητίνη να καλύπτει πλήρως το κενό μεταξύ συνδέσμου και τοιχωμάτων της τρύπας. Στην πράξη, συχνά, αντί για την παραπάνω διαδικασία ο μεταλλικός σύνδεσμος επαλείφεται με παχύρρευστη ρητίνη ή ρητινόστοκο σε μήκος όσο απαιτείται για την αγκύρωση του, και στη συνέχεια τοποθετείται στη θέση του. Η τεχνική αυτή είναι άκρως επικίνδυνη και απαγορεύεται επειδή έτσι η ρητίνη δεν μπορεί να γεμίσει πλήρως το κενό μεταξύ συνδέσμου και τοιχωμάτων της τρύπας.

Εναλλακτικά, όταν στο έργο εφαρμόζεται η τεχνική των ρητινενέσεων (για την επισκευή ρωγμών) αυτή μπορεί να επεκταθεί και στη χημική πάκτωση των συνδέσμων. Κάθε τρύπα σφραγίζεται εξωτερικά με ρητινόστοκο και η ρητίνη εισπιέζεται από επιστόμιο. Για την αποφυγή εγκλωβισμού αέρα θα πρέπει να έχει προβλεφθεί κατάλληλη οδός διαφυγής του αέρα. Σημειώνεται πάντως ότι στην πράξη η εφαρμογή της παραπάνω εναλλακτικής διαδικασίας δεν είναι συνήθης και χρησιμοποιείται μόνο όταν αντικαθιστά εργασίες υψηλού κόστους, όπως για παράδειγμα κατακόρυφες αγκυρώσεις οροφής.

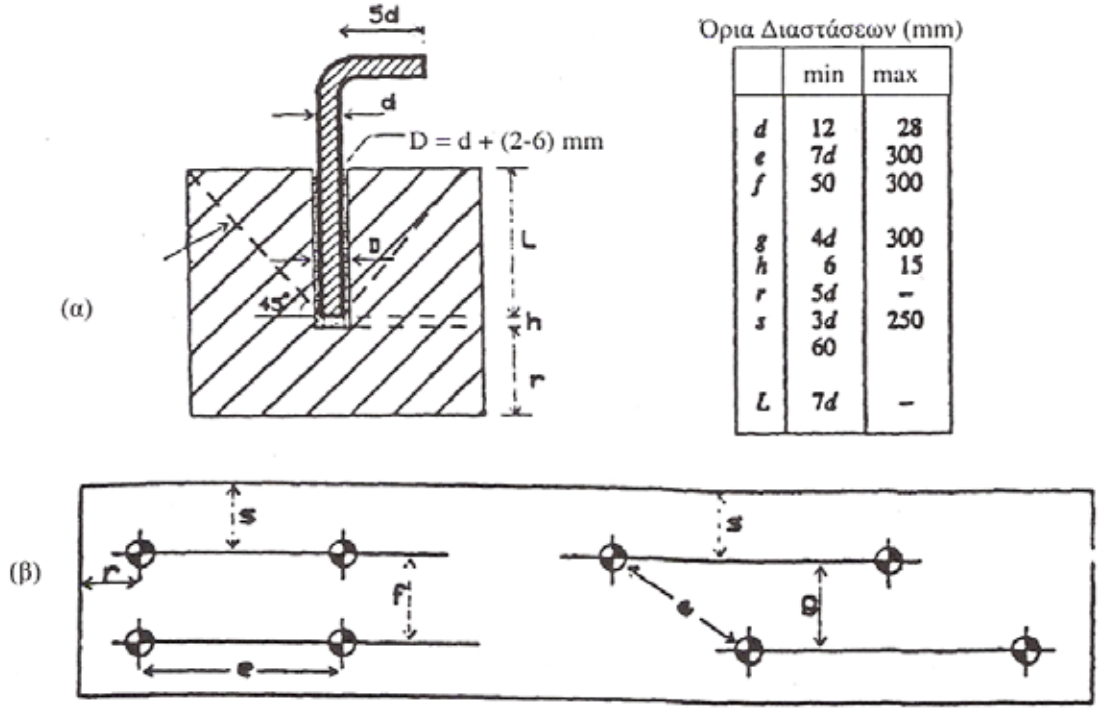


Σχ.5.3 Προτεινόμενοι τρόποι διατμητικής σύνδεσης.

Τέλος επισημαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση που χρησιμοποιούνται βιομηχανοποιημένοι σύνδεσμοι θα πρέπει να ακολουθούνται πιστά οι οδηγίες των προμηθευτών.

Στις ενισχύσεις των κατασκευών η χρήση διατμητικών συνδέσμων αποτελεί την πλέον διαδεδομένη διαδικασία ανάληψης τέμνουσας στις διεπιφάνειες παλαιού νέου στοιχείου. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται τρεις τύποι διατμητικών συνδέσμων που χρησιμοποιούνται στις διεπιφάνειες παλαιού και νέου σκυροδέματος (CEB Bu1.162, 1983).

Οι δύο, πλέον συνήθεις, τύποι είναι μεταλλικοί σύνδεσμοι με ένα ή δύο σκέλη ενώ ο τρίτος τύπος (που χρησιμοποιείται σπάνια) αφορά μικρούς κύβους από σκυρόδεμα συγκολλημένους με ρητίνη στην επιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος. Προφανώς αν από τη μελέτη προκύψει η ανάγκη για πυκνούς διατμητικούς συνδέσμους, οι δίτμητοι μεταλλικοί σύνδεσμοι αποτελούν την καταλληλότερη λύση. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μονότμητοι διατμητικοί σύνδεσμοι με μορφή Γ για καλύτερη αγκύρωση στο νέο σκυρόδεμα. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται μια τυπική μορφή των βλήτρων αυτού του τύπου. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται κατασκευαστικές διατάξεις σύμφωνα με πρακτικές συστάσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για συνήθεις εφαρμογές της πράξης (Tezcan and Ikizogullari, 1998).



Όρια Διαστάσεων (mm)

	min	max
d	12	28
e	7d	300
f	50	300
g	4d	300
h	6	15
r	5d	–
s	3d	250
	60	
L	7d	–

Σχ.5.4 α) Τυπική μορφή μονότμητου βλήτρου μορφής Γ. β) Τυπικές διατάξεις μονότμητων βλήτρων

5.7. ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ.

Οι αγκυρώσεις νέων ράβδων οπλισμού στον υφιστάμενο φορέα καθώς και οι συνδέσεις παλαιών και νέων ράβδων αποτελούν συχνή πρακτική στις ενισχύσεις κατασκευών από Ο.Σ.

Οι αγκυρώσεις ράβδων οπλισμού σε σκληρυμένο σκυρόδεμα γίνονται με χημικό τρόπο, χρησιμοποιώντας κάποια εποξειδική ρητίνη. Η όλη διαδικασία εκτέλεσης της εργασίας είναι ίδια ακριβώς με αυτή που αναπτύχθηκε, στην προηγούμενη ενότητα για μεταλλικούς συνδέσμους και δεν θα επαναληφθεί.

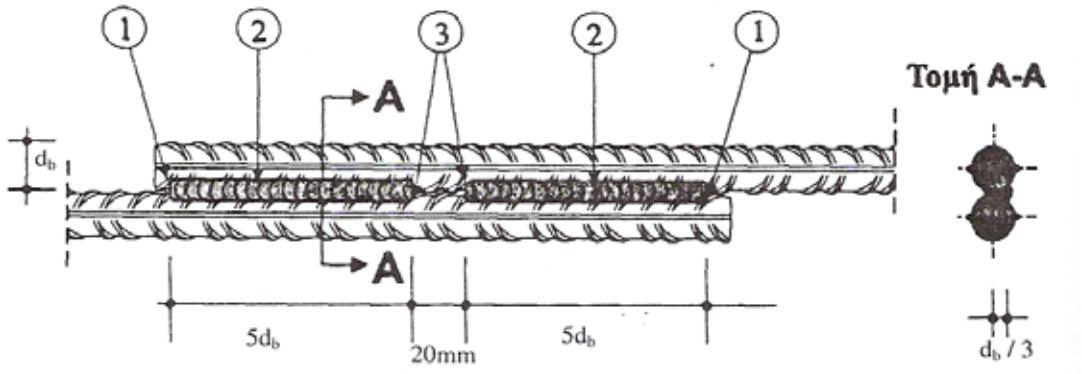
Για τις συγκολλήσεις παλαιών και νέων ράβδων οπλισμού εφαρμόζονται πιστά οι διατάξεις περί συγκολλήσεων του Κανονισμού Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2000β).

Όπως είναι γνωστό, χάλυβες με ποσοστό άνθρακα C μικρότερο από 0.24% και ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C_{eq} μικρότερο από 0.53% θεωρούνται συγκολλήσιμοι. Οι παραπάνω συνθήκες εκπληρούνται για τους χάλυβες παλαιού τύπου μόνο στον StI (σήμερα S220) όπου η περιεκτικότατα σε άνθρακα είναι της τάξεως του 0,15% και δεν εκπληρούνται στο χάλυβα τύπου StIII (σήμερα S400) όπου η περιεκτικότητα σε άνθρακα ξεπερνά το 0.30%. Παρόλα αυτά ο χάλυβας StIII (S400) όπως και κάθε άλλου τύπου χάλυβας που δεν πληροί τις παραπάνω συνθήκες χημικής σύστασης, μπορεί να θεωρηθεί συγκολλήσιμος εφόσον η συγκολλησιμότητα του ελέγχεται σε εφελκυσμό και κάμψη

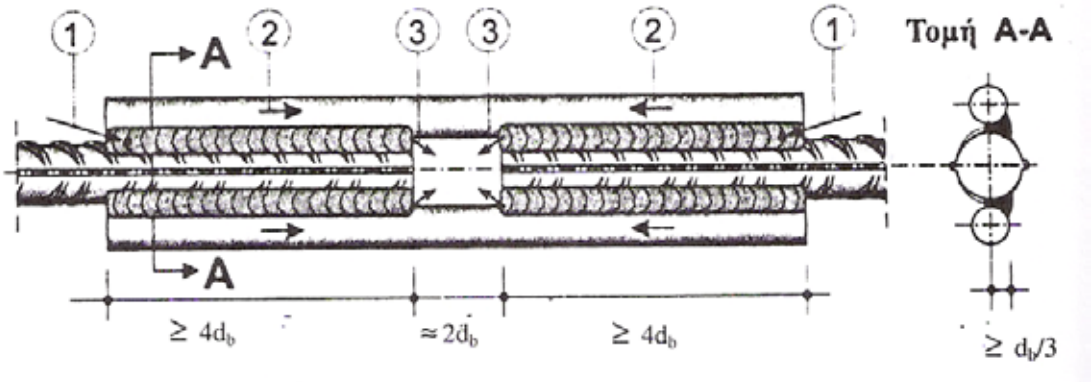
σύμφωνα με πρότυπες δοκιμές που περιγράφονται στον Κανονισμό Χαλύβων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2000β). Η πλέον ενδεδειγμένη διαδικασία συγκόλλησης είναι η ηλεκτροσυγκόλληση. Η οξυγονοκόλληση φαίνεται να είναι ιδιαίτερα προβληματική και πρέπει να αποφεύγεται.

Εφόσον οι ράβδοι μπορούν να παρατεθούν σε επαφή, η ηλεκτροσυγκόλληση γίνεται από τη μία μόνο πλευρά, με δύο ραφές συγκόλλησης μήκους $5d_b$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Εδώ, όπως και σε κάθε ανάλογη αναφορά που ακολουθεί, ως διάμετρος d_b λαμβάνεται η μικρότερη από τις ράβδους. Οι ραφές της συγκόλλησης ξεκινούν από τα άκρα των ράβδων (σημεία 1 του Σχήματος) και προχωρούν προς το εσωτερικό σε μήκος $5d_b$, έτσι ώστε να απομένει ανάμεσα στις απολήξεις (σημεία 3 του Σχήματος) ένα διάκενο 20 mm περίπου.

Οι μετωπικές ηλεκτροσυγκολλήσεις (άκρο με άκρο) ή όπως συχνά αναφέρονται «κατά κεφαλή», δεν επιτρέπονται (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2000β Τζωρτζάκης κ.α, 1990). Άντ' αυτών, για ηλεκτροσυγκολλήσεις ράβδων με μηδενική εκκεντρότητα μπορεί να επιλεγεί η λύση της συγκόλλησης με λωρίδες, όπου χρησιμοποιούνται δύο τμήματα ράβδων μήκους τουλάχιστον $10d_b$ το καθένα, τα οποία τοποθετούνται συμμετρικά εκατέρωθεν των ράβδων και ηλεκτροσυγκολλούνται στα άκρα σε μήκος τουλάχιστον $4d_b$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχ.5.5 Συγκόλληση κατά παράθεση



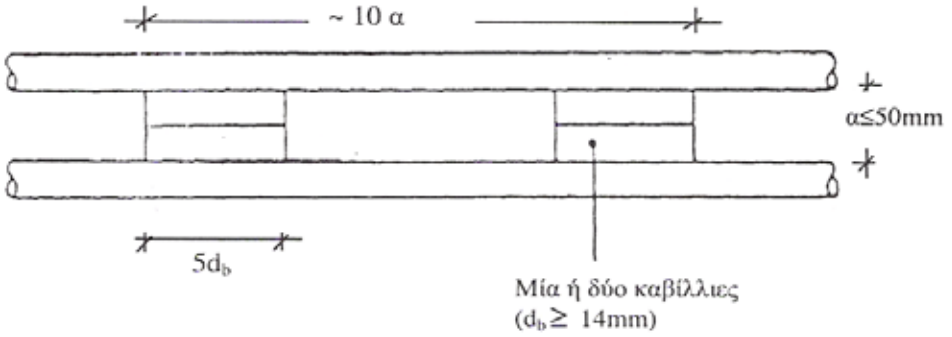
Σχ.5.6 Συγκόλληση με λωρίδες

Και σ' αυτήν την περίπτωση οι ραφές των συγκολλήσεων γίνονται μόνο από τη μία πλευρά και ξεκινούν από τα εξωτερικά σημεία (σημεία 1 στο Σχήμα 5.6) και προχωρούν προς το εσωτερικό (σημεία 3 στο Σχήμα 5.6), αφήνοντας ένα κενό ίσο περίπου με $2d_b$.

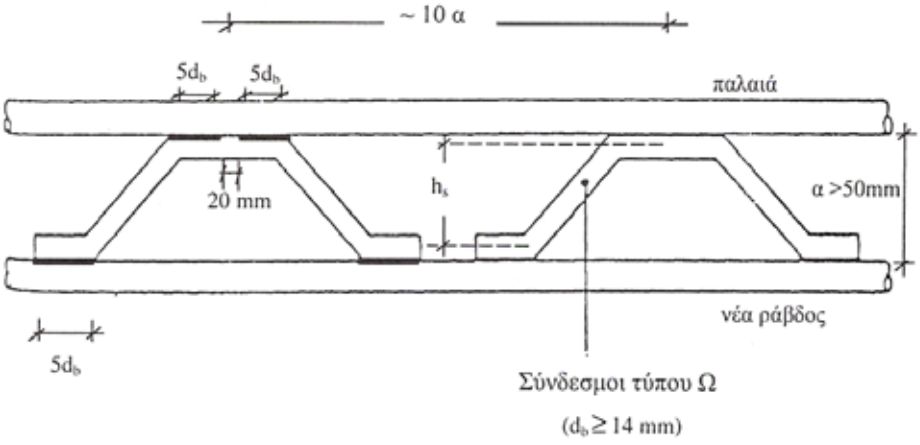
Σε όλες τις περιπτώσεις τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι είτε με βασική επένδυση είτε με ολική επένδυση ρουτιλίου. Η διάμετρος των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι σύμφωνη με τα προβλεπόμενα στον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2000β) και είναι της τάξεως του 1/5 της διαμέτρου των προς συγκόλληση ράβδων.

Στην περίπτωση που οι προς συγκόλληση ράβδοι βρίσκονται σε μικρή μεταξύ τους απόσταση αλλά όχι εν επαφή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σύνδεσμοι μεταλλικά παρεμβλήματα που θα ηλεκτροσυγκολληθούν στις εκατέρωθεν ράβδους και θα γεφυρώνουν την απόσταση. Οι σύνδεσμοι αυτοί θα πρέπει να είναι από συγκολλήσιμο χάλυβα, και εάν είναι δυνατόν, της ίδιας ποιότητας χάλυβα με τις προς συγκόλληση ράβδους.

Στην πράξη, ανάλογα με την απόσταση των ράβδων χρησιμοποιούνται οι δύο τύποι συνδέσμων που φαίνονται στο Σχήμα 5.7: (α) οι «δύσκαμπτοι» σύνδεσμοι και (β) οι «εύκαμπτοι» σύνδεσμοι (CEB Bu1.l62, 1983). Σε κάθε περίπτωση η διατομή των συνδέσμων δεν πρέπει να υπολείπεται της μικρότερης διατομής των συγκολλούμενων ράβδων. Στο Σχήμα 5.7, d_b είναι η μικρότερη από τις διαμέτρους των ράβδων.



α)Δύσκαμπτοι Σύνδεσμοι



β)Εύκαμπτοι Σύνδεσμοι

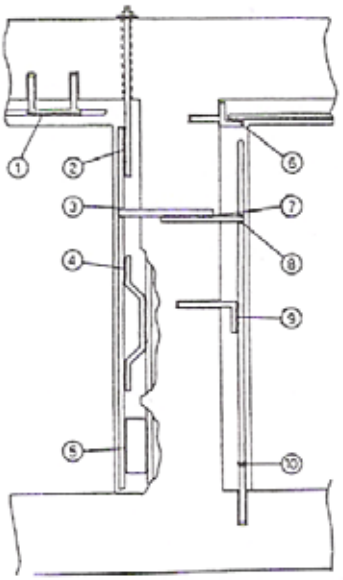
Σχήμα 5.7: Σύνδεσμοι παλαιών-νέων ράβδων οπλισμού.

Οι «δύσκαμπτοι σύνδεσμοι» εφαρμόζονται, όταν η καθαρή απόσταση μεταξύ των ράβδων δεν ξεπερνάει τα 50 mm. Συνήθως χρησιμοποιούνται τμήματα ράβδων οπλισμού («καβίλλιες»), μήκους της τάξεως του $5d_b$, με διάμετρο ανάλογη προς το υπάρχον κενό. Εάν το κενό δεν μπορεί να καλυφθεί από τη διάμετρο μιας ράβδου, μπορούν να ηλεκτροσυγκολληθούν, σε σειρά, δύο τμήματα ράβδων. Η τελευταία περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7α.

Όταν η απόσταση είναι μεγαλύτερη από 50 mm, χρησιμοποιούνται οι «εύκαμπτοι» σύνδεσμοι με μορφή Z ή Ω. Στο Σχήμα 5.7β παρουσιάζεται η περίπτωση εύκαμπτων συνδέσμων με μορφή Ω. Συχνά στη πράξη, οι σύνδεσμοι αυτού του τύπου ονομάζονται "πάπιες", ενώ όταν χρησιμοποιούνται σε υποστυλώματα ονομάζονται και "αναρτήρες" .

Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζονται διάφοροι τύποι συγκολλήσεων που είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν στις επεμβάσεις . Ο τρόπος εκτέλεσης των συγκολλήσεων αυτών ποικίλει ανάλογα με τη θέση που βρίσκονται τα προς συγκόλληση τμήματα. Αυτό επηρεάζει την ικανότητα διείσδυσης της «πάστας» του ηλεκτροδίου και ως εκ τούτου και την πρόσφυση της συγκόλλησης στο μέταλλο.

Σχήμα 5.8: Είδη συγκολλήσεων στις επεμβάσεις (1,8) "Ουρανός",
(2,4,5,9) "Ανεβατό" (ή "Κατεβατό"), (3) "Πλάκα",
(6,7) "Οριζόντιο", (lO)"Κατά κεφαλή"



Η συγκόλληση «ανεβατό» (κατακόρυφη συγκόλληση με φορά προς τα πάνω) είναι πολύ δύσκολο να γίνει σωστά και απαιτεί επενδυμένα ηλεκτρόδια. Αν και έχει πολύ καλή διείσδυση έχει δύο βασικά μειονεκτήματα: α) Το λειωμένο μέταλλο και η προστατευτική πάστα τείνουν να γυρίσουν προς τα πίσω λόγω της βαρύτητας, δημιουργώντας εγκλείσεις πάστας στη ραφή συγκόλλησης και μείωση της διατομής της. β) Στο τέλος της ραφής συγκόλλησης δημιουργείται ένας «κρατήρας» στο βασικό μέταλλο, πράγμα που μειώνει τη διατομή του. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί μόνο αν ο τεχνίτης είναι ειδικευμένος και προσεκτικός.

Η συγκόλληση «κατεβατό» (κατακόρυφη συγκόλληση με φορά προς τα κάτω) είναι δύσκολη κατασκευαστικά, απαιτεί επενδυμένα ηλεκτρόδια και το κυριότερο μειονέκτημά της είναι ότι έχει πολύ μικρή διείσδυση άρα και μικρή ικανότητα μεταφοράς φορτίων.

Η συγκόλληση «ουρανός» (συγκόλληση στο κάτω μέρος στοιχείων τοποθετημένων στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο) καθώς και η συγκόλληση «οριζόντιο» (συγκόλληση οριζόντια σε στοιχεία τοποθετημένα στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο) εκτός της κατασκευαστικής τους δυσκολίας δεν έχουν άλλα μειονεκτήματα ενώ η συγκόλληση «πλάκα» (συγκόλληση στο πάνω μέρος στοιχείων τοποθετημένων στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο) είναι η πλέον εύκολη.

Από μία έρευνα που έγινε στο Πανεπιστήμιο Πατρών (Τζωρτζάκης κ.α., 1990) σε χάλυβες S400, των οποίων η περιεκτικότητα σε άνθρακα ξεπερνούσε το 0,24% μπορούν να επισημανθούν οι παρακάτω χρήσιμες οδηγίες για την εκτέλεση των συγκολλήσεων:

α) Η ηλεκτροσυγκόλληση «κατεβατό», η οξυγονοσυγκόλληση και ηλεκτροσυγκόλληση «κατά κεφαλή», πρέπει να αποφεύγονται.

β) Η συγκόλληση «ανεβατό» πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά κυρίως προς το τέλος της ραφής και αν υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης να γίνεται διακοπτόμενα.

γ) Προθέρμανση των προς συγκόλληση ράβδων σε 250°C είναι χρήσιμη.

δ) Το μήκος των ραφών και ο τρόπος εκτέλεσης της ηλεκτροσυγκόλλησης πρέπει να συμφωνεί απόλυτα με τα οριζόμενα στους κανονισμούς.

Από την ίδια έρευνα προκύπτουν οι παρακάτω ιδιαίτερα σημαντικές διαπιστώσεις:

α) Ο συγκολλημένος χάλυβας παρουσιάζει μικρότερη παραμόρφωση αστοχίας από τον ασυγκόλλητο χωρίς όμως αλλαγή στην τάση και την παραμόρφωση διαρροής.

β) Οι συγκολλήσεις ράβδων οπλισμού στο εργοτάξιο πρέπει να γίνονται από τεχνίτες ειδικά εκπαιδευμένους για τέτοιου είδους συγκολλήσεις. Συγκολλήσεις που έγιναν από τεχνίτες που είχαν εμπειρία συγκολλήσεων μόνο από εργασίες σε μη φέροντα μεταλλικά στοιχεία (π.χ. μεταλλικές πόρτες, κάγκελα κ.λ.π.), αστόχησαν στην περιοχή συγκόλλησης σε ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό. Είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό ότι η μέχρι σήμερα εμπειρία από εργασίες μετασεισμικών επεμβάσεων στον ελληνικό χώρο δείχνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των εργασιών ηλεκτροσυγκόλλησης γίνεται από τεχνίτες χωρίς την απαραίτητη ειδίκευση.

Τέλος από τη μέχρι σήμερα επιστημονική γνώση επί του θέματος, επισημαίνονται οι παρακάτω χρήσιμες πρακτικές πληροφορίες:

(α) Η επικρατούσα άποψη (και πάντως υπό διερεύνηση) είναι ότι, η ηλεκτροσυγκόλληση νέων ράβδων οπλισμού θα μπορούσε να γίνει ακόμα και στην περίπτωση που οι παλαιές ράβδοι είναι οξειδωμένες. Προϋποτίθεται βέβαια ότι απομακρύνεται προηγουμένως επιμελώς η σκουριά, η ηλεκτροσυγκόλληση γίνεται πάνω στο υγιές τμήμα των ράβδων και χρησιμοποιείται αναστολέας διάβρωσης.

(β) Εάν οι παλαιές ράβδοι είναι StI (S220), τότε οι νέες ράβδοι μπορεί να είναι οποιουδήποτε τύπου αρκεί να είναι συγκολλήσιμες δηλαδή S500s ή S400s. Του ίδιου τύπου θα πρέπει να είναι και τα τυχόν παρεμβλήματα.

Στην περίπτωση που οι παλαιές ράβδοι είναι StIII (S400) συνιστάται όπως οι προς συγκόλληση νέες ράβδοι και τα τυχόν μεταλλικά παρεμβλήματα είναι από χάλυβα S400s διαφορετικά θα χρησιμοποιηθεί S500s.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.

Η ραγδαία πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα της τεχνολογίας των δομικών υλικών τα τελευταία χρόνια, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πληθώρας νέων προϊόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού, όπου η αποκλειστική χρήση συμβατικών υλικών αποτυγχάνει να παρέχει μία ικανοποιητική λύση. Μεταξύ των προϊόντων αυτών σημαντική θέση κατέχουν τα *σύνθετα υλικά* από *ινοπλισμένα πολυμερή* (fiber reinforced po1ymer composites), τα οποία αποτελούνται από 'υφάσματα' από *ινώδη οπλισμένα πολυμερή* εμποτισμένα με ειδικές *εποξικές ρητίνες*. Τα 'υφάσματα' αυτά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων, αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυσή τους. Λόγω κυρίως της ανθεκτικότητάς τους σε ηλεκτροχημική διάβρωση και του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος, αποτελούν μία πολύ καλή εναλλακτική επιλογή για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαπενταετίας, στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων και δραστηριοτήτων, ερευνητές από διάφορα μέρη του κόσμου έχουν αναπτύξει πολλές εφαρμογές σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή για την όπλιση και προένταση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, τη σεισμική ενίσχυση κατασκευών τόσο από οπλισμένο σκυρόδεμα όσο και από άοπλη τοιχοποιία, την ενίσχυση γεφυρών και κτιριακών κατασκευών, κτλ. Οι προσπάθειες των ερευνητών αυτών είχαν ως αποτέλεσμα μία πραγματικά εντυπωσιακή ανάπτυξη της μεθόδου ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά, με τις πρώτες ευρείας κλίμακας εφαρμογές να αναφέρονται στις αρχές της περασμένης δεκαετίας . Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο ο γενικός όρος “σύνθετα υλικά” θα αναφέρεται πλέον αποκλειστικά στα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή.

Η πρώτη ευρείας κλίμακας εφαρμογή σύνθετων υλικών αφορά στην ενίσχυση δύο χιλιάδων βάθρων γεφυρών στην περιοχή Yolo δυτικά του Sacramento, πρωτεύουσας της Καλιφόρνια, στα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας. Γρήγορα η χρήση τους επεκτάθηκε στην ενίσχυση πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο στις ΗΠΑ όσο και σε πολλά άλλα κράτη της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ασίας. Αποτελεί χαρακτηριστικό γεγονός ότι στην Ιαπωνία, χώρα με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή αυξήθηκε την περίοδο 1992-1995 και κυρίως μετά το σεισμό του Hyogoken-Nangu το 1995 κατά 500%. Στην Ελλάδα εφαρμογές πολιτικού μηχανικού αναφέρονται από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Χαλκίδα).

Οι βασικές αρχές για το σχεδιασμό μανδυών από σύνθετα υλικά είναι αντίστοιχες με τις αρχές σχεδιασμού των μεταλλικών μανδυών. Σε σύγκριση με τη χρήση μεταλλικών ελασμάτων για την ενίσχυση δομικών στοιχείων, η εναλλακτική εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως οι εξαιρετικές ιδιότητες βάρους προς αντοχή, η διαθεσιμότητα του υλικού σε σχετικά απεριόριστο μήκος, η συγκριτικά

ευκολότερη εγκατάσταση και η ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τα σύνθετα υλικά μία πολύ ελκυστική εναλλακτική πρόταση.

Γενικά, η εφαρμογή των υλικών αυτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή ορθότερα την τροποποίηση της καμπτικής, διατμητικής και αξονικής αντοχής του μέλους στο οποίο εφαρμόζεται. Η εξωτερική ενίσχυση με μανδύα από ινοπλισμένα πολυμερή είναι κατάλληλη για πληθώρα εφαρμογών. Αντιπροσωπευτικές χρήσεις είναι οι ακόλουθες :

· Ενίσχυση της *φέρουσας ικανότητας* της κατασκευής. Ως παράδειγμα αναφέρεται μεταξύ άλλων η ενίσχυση κτιρίων στάθμευσης αυτοκινήτων στο Μόναχο της Γερμανίας και στο Δουβλίνο της Ιρλανδίας, καθώς και βιομηχανικών κτιρίων στην πόλη Zug της Ελβετίας.

· *Παθητική περίσφιγξη* για βελτιστοποίηση της *ικανότητας ανάληψης σεισμικών φορτίων*. Χαρακτηριστικές εφαρμογές αποτελούν η ενίσχυση της γέφυρας Osaky στη Νότια Κορέα και η ενίσχυση της οδογέφυρας Belo Horizonte στο Σάο Πάολο της Βραζιλίας.

· *Έλεγχος ρηγματώσεως* και *συρραφή ρωγμών*. Τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί και για την επισκευή και ενίσχυση διατηρητέων κτιρίων, μνημείων και ιστορικών και αρχαιολογικών κτισμάτων που έχουν υποστεί ρηγματώσεις και άλλου είδους βλάβες. Ενδεικτικά αναφέρεται η ενίσχυση του τρούλου του ιστορικού καθεδρικού ναού στη British Columbia του Καναδά.

Παρόλες τις υψηλές προσδοκίες που έχουν καλλιεργηθεί, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή έχει μία σχετικά βραχύχρονη ιστορία. Κατά συνέπεια, η απόφαση για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών με ινοπλισμένα πολυμερή πρέπει να λαμβάνεται με ιδιαίτερη προσοχή και αφού συνεξεταστούν όλες οι υπόλοιπες εναλλακτικές επιλογές. Η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει γενικά να αποφεύγεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

· Η κατάσταση της υπόστρωσης πάνω στην οποία θα εφαρμοστούν τα σύνθετα υλικά είναι άγνωστη ή έχει υποστεί σημαντική απομείωση της αντοχής της.

· Υπάρχει σε εξέλιξη σημαντική διάβρωση του σιδηροπλισμού.

· Δεν υπάρχει σιδηροπλισμός που να εξασφαλίζει την πλάστιμη συμπεριφορά του μέλους που πρόκειται να ενισχυθεί.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους επισκευής και ενίσχυσης με χρήση συμβατικών υλικών είναι τα εξής:

· Απαιτείται μικρή προετοιμασία στο εργοτάξιο. Η εκκένωση του χώρου δεν είναι αναγκαία και η όχληση στους χρήστες είναι ελάχιστη. Η προετοιμασία των προς ενίσχυση στοιχείων είναι μικρή και σύντομη.

· Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι απλή.

· Οι διαστάσεις του ενισχυόμενου δομικού στοιχείου παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητες, λόγω του μικρού πάχους του σύνθετου υλικού.

· Η τοποθέτηση των σύνθετων υλικών είναι δυνατή ακόμα και σε περιπτώσεις που υπάρχει περιορισμός του χώρου εργασίας (π.χ. υποστυλώματα σε μεσοτοιχία).

· Το βάρος των σύνθετων υλικών είναι μικρό και για την τοποθέτησή τους δεν απαιτείται βαρύς ή ειδικός εξοπλισμός.

· Τα σύνθετα υλικά μπορούν να επιχριστούν και να χρωματιστούν σύμφωνα με τις αισθητικές απαιτήσεις του έργου.
· Τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά των κατασκευών παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα.
· Το κόστος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι ανάλογο των παραδοσιακών μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης.

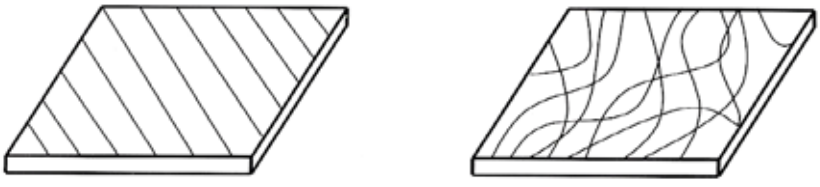
Ως επίλογος αξίζει να αναφερθεί ότι οι μηχανικοί που επιλέγουν τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών για την ενίσχυση μίας κατασκευής βρίσκονται αντιμέτωποι με μία μεγάλη πρόκληση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η τεχνολογία τους δεν είναι ευρέως γνωστή στον τεχνικό κόσμο σε σύγκριση με την αντίστοιχη τεχνολογία των συμβατικών υλικών επισκευής και ενίσχυσης, όπως είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα.

6.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσοτέρων υλικών συνιστά ένα δομικό στοιχείο από *σύνθετο υλικό*. Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Σε αυτή τη μορφή, τόσο οι ίνες όσο και η μήτρα διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κανένα από τα συστατικά στοιχεία όταν δρα μόνο του. Η συγκόλληση των προσανατολισμένων ινών πάνω στο μαλακότερο υλικό της μήτρας έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς με σαφώς καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες

· *Σύνθετα υλικά ινών* (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
· *Σύνθετα υλικά στρωμάτων* (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
· *Σύνθετα υλικά σωματιδίων* (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών
· *Προσανατολισμένα* (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 6.1α).
· *Μη προσανατολισμένα* (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 6.1β).



Σχήμα 6.1 (α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό. (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό.

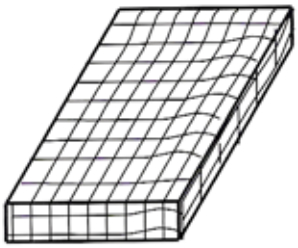
Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες τέσσερεις κατηγορίες:

· *Πλεκτών ινών* (woven fiber), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης (Σχήμα 6.2α). Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.

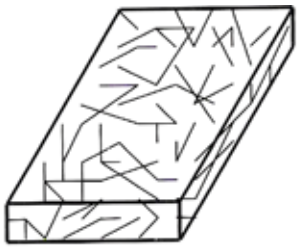
· *Ασυνεχών ινών* (chopped fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 6.2β). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.

· *Υβριδικά* (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Σχήμα 6.2γ) είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.

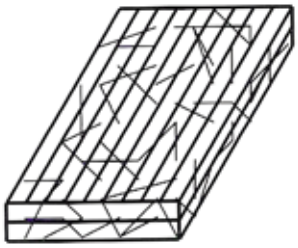
· *Συνεχών ινών* (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα (Σχήμα 6.2δ). Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



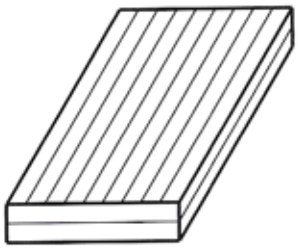
(α) Σύνθετο υλικό πλεκτών ινών.



(β) Σύνθετο υλικό ασυνεχών ινών.



(γ) Υβριδικό σύνθετο υλικό.



(δ) Σύνθετο υλικό συνεχών ινών.

Σχήμα 6.2 Τύποι σύνθετων υλικών ινών.

Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των προσανατολισμένων σύνθετων υλικών συνεχών ινών (directional continuous fibrous composites). Λόγω του προσανατολισμού των ινών, το σύνθετο υλικό που προκύπτει συμπεριφέρεται ανισοτροπικά, σε αντιστοιχία με τη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτή η ανισοτροπική συμπεριφορά δίνει στο μελετητή τη δυνατότητα να διευθετήσει κατά τέτοιο τρόπο τις στρώσεις του σύνθετου υλικού έτσι ώστε να ενισχύσει το μέλος στη διεύθυνση που αναπτύσσονται οι υψηλότερες τάσεις.

6.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.

Όπως προαναφέρθηκε, οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης - παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του φορτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

6.3.1. Υλικά Ινών.

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες πολυαραμίδης.

(α) Ίνες Υάλου. Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-Ε και ο ύαλος-S. Αν και, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.α, ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-Ε, λόγω του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο.

Είδος υαλονήματος	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm^3)
ύαλος-Ε	2000 – 3000	70 – 75	3.0 – 4.5	2.54
ύαλος-S	3500 – 4800	85 – 90	4.5 – 5.5	2.48

Πίνακας 6.α Ιδιότητες υάλου-Ε και υάλου-S.

Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Ο ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμίδης, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο

άνθρακας, ο ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

(β) Ίνες Άνθρακα. Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγιόν με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000°C).

Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εντείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Θεωρητικά, οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες που προσεγγίζουν τα 100 GPa εφελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως, οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στην κρυσταλλική δομή.

Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0.2 έως 2.5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής.

Οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες, είτε αυτοί είναι όξινοι είτε βασικοί, και επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος· των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

(γ) Ίνες Πολυαραμίδης. Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμίδης που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kev1ar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμίδης σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία.

Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμίδης έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα. Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2.5 και 5.0%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά

μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%), ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

Εκτός από τις παραπάνω τρεις κύριες κατηγορίες, άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές πολιτικού μηχανικού είναι οι ακόλουθες:

· *Ίνες γραφίτη:* παράγονται όπως και οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση. Οι ίνες γραφίτη περιέχουν κατά τουλάχιστον 99% άνθρακα, ενώ το ποσοστό άνθρακα των ανθρακονημάτων είναι λιγότερο από 95%.

· *Ίνες βορίου:* έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο (0.05-0.2 mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες. Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.

· *Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου:* έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

6.3.2. Μήτρες Σύνθετων Υλικών

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Η ρητίνη αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών και, ταυτόχρονα, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και ρητίνης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεσή τους.

Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στην πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες, καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομογενές υλικό.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Η προένταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η διάρρηξη λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες.

Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.β.

(α) Εποξικές Ρητίνες. Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξικές

ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους.

Ο συντελεστής ιξώδους των εποξικών ρητινών είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Χρειάζονται επίσης περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις δύο άλλες κατηγορίες ρητινών.

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm^3)
Εποξική	55 – 130	2.0 – 4.5	4.0 – 14.0	1.20 – 1.30
Πολυεστερική	35 – 104	2.1 – 4.1	< 5.0	1.10 – 1.46
Βινυλεστερική	73 – 81	3.0 – 3.6	3.5 – 5.5	1.12 – 1.32

Πίνακας 6.β Ιδιότητες ρητινών.

(β) Πολυεστερικές Ρητίνες. Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίδες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Η χημική αντίδραση με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα εάν η μάζα είναι μικρή η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση συγκριτικά με τις εποξικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται είναι η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης.

(γ) Βινυλεστερικές Ρητίνες. Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών υάλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών λόγω συστολής ξηράνσεως.

Αντιθέτως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσοσμίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξης του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξικών και των πολυεστερικών ρητινών.

6.3.3. Ιδιότητες Σύνθετου Υλικού

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Στον Πίνακα 6.γ παρουσιάζονται η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος μίας στρώσης των δύο συνηθέστερων τύπων ινοπλισμένων πολυμερών υγρής εφαρμογής που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση δομικών στοιχείων. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν με συνδυασμό είτε υαλονημάτων και εποξικής ρητίνης είτε ανθρακονημάτων και εποξικής ρητίνης.

Τύπος σύνθετου υλικού	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Πάχος στρώσης (mm)
Υαλονήματα και εποξική ρητίνη	1800 – 4300	65 – 80	0.30 – 1.30
Ανθρακονήματα υψηλής αντοχής και εποξική ρητίνη	2200 – 4300	200 – 450	0.12 – 0.60

Πίνακας 6.γ Ενδεικτικές ιδιότητες σύνθετων υλικών ινοπλισμένων πολυμερών.

Στη διάθεση του μηχανικού βρίσκονται επίσης με τη μορφή ελασμάτων μικρού πλάτους (60 - 100 mm) και πάχους της τάξης του 1.5 mm προκατασκευασμένα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα τα οποία επικολλούνται στο σκυρόδεμα μέσω ρητίνης. Εφαρμόζονται κυρίως για την ενίσχυση πλακών και δοκών.

6.4. ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

Όπως προαναφέρθηκε, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού καθορίζονται από τα αντίστοιχα των συστατικών του. Από τη σκοπιά της μικρομηχανικής, προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού θα πρέπει να είναι γνωστό το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει το κάθε υλικό στο τελικό προϊόν.

Ο *Νόμος της Σύνθεσης* (Rule of Mixtures) χρησιμοποιεί τα ποσοστά συμμετοχής ινών και ρητίνης στο τελικό προϊόν για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Ο νόμος της σύνθεσης περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_f + v_m + v_u = 1 \quad (6.1)$$

$$w_f + w_m = 1 \qquad (6.2)$$

$$p_c = p_f v_f + p_m v_m \qquad (6.3)$$

όπου v_f , v_m και v_u είναι οι λόγοι όγκου των ινών, της ρητίνης και των κενών, αντίστοιχα και ισούνται με $v_i = V_i/V$, όπου V ο συνολικός όγκος του σύνθετου υλικού και V_i με i = f, m, u ο όγκος των ινών, της ρητίνης και των κενών, αντίστοιχα. Επίσης, w_f και w_m είναι οι λόγοι βάρους των ινών και της ρητίνης και ισούνται με $w_i = W_i/W$, όπου W το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού και W_i με i = f, m το βάρος του αντίστοιχου συστατικού στοιχείου. Τέλος, p_f , p_m και p_c είναι οι πυκνότητες των ινών, της ρητίνης και η συνολική του σύνθετου υλικού, αντίστοιχα.

Επίσης η σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού E με το μέτρο ελαστικότητας των ινών E_f και το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας E_m είναι η ακόλουθη:

$$E = E_f v_f + E_m v_m \quad (6.4)$$

Όσον αφορά στην εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, αυτή εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή των ινών, δεδομένου ότι η αντοχή τους είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του συνδετικού υλικού. Πρακτικά αστοχία της ίνας συνεπάγεται αστοχία του σύνθετου υλικού.

Εάν s, s_f και s_{mf} είναι η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, η εφελκυστική αντοχή της ίνας και η εφελκυστική τάση της μήτρας κατά την αστοχία της ίνας αντίστοιχα, τότε ισχύει:

$$s = s_f v_f + s_{mf} (1-v_f) \qquad (6.5)$$

Εφαρμογή. Προκειμένου να κατανοήσουμε την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων, θεωρούμε δοκίμιο γραφίτη - εποξικής ρητίνης διαστάσεων 2.54 cm x 2.54 cm x 0.30 cm, που ζυγίζει 2.980 gr. Οι πυκνότητες του γραφίτη και της ρητίνης είναι $p_f = 1.9$ gr/cm^3 και $p_m = 1.2$ gr/cm^3, αντίστοιχα. Διαλύοντας τη ρητίνη με οξύ, οι ίνες που απομένουν ζυγίζουν 1.863 gr. Ζητείται να προσδιοριστούν οι λόγοι όγκου ινών v_f , ρητίνης v_m και κενών v_u.

Η πυκνότητα του σύνθετου υλικού είναι:

$$p_c = W/V = 2.98 / (2.54x2.54x0.3) = 1.54 \text{ gr/cm}^3$$

Επίσης, σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) ο λόγος όγκου κενών v_u είναι:

$$V_u = 1- (v_f + v_m) = 1-[W_f / p_f + (W – W_f) / p_m] / V =$$
$$=1 – [1.863/1.9 + (2.98 - 1.863)/1.2] / (2.54x2.54x0.3) =$$
$$=0.012 = 1.2\%$$

Επομένως, $v_f + v_m = 0.988$ οπότε η σχέση (6.3) γράφεται

$p_c = p_f v_f + p_m v_m \Rightarrow$
$\Rightarrow 1.54 = 1.9 v_f + 1.2 (0.988 - v_f) \Rightarrow$
$\Rightarrow v_f = 50.6\%$

Συνοψίζοντας λοιπόν έχουμε

$V_f = 50.6\%$, $v_m = 48.2\%$, $v_u = 1.2\%$

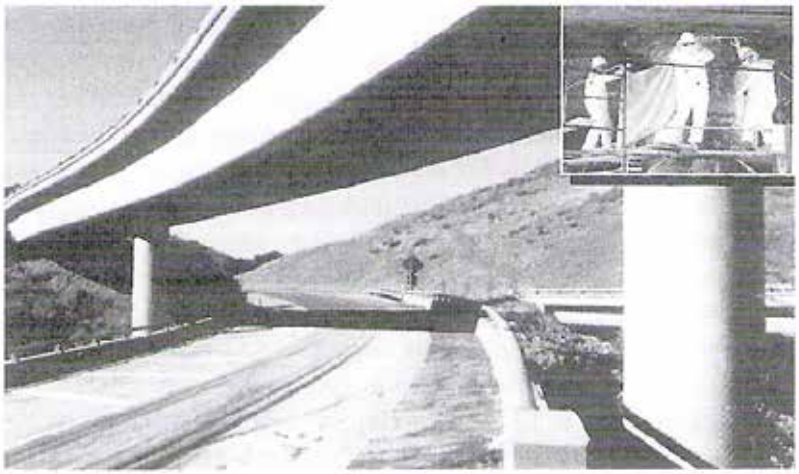
6.5. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.

6.5.1. Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από τα τέλη του 19ου αιώνα και είχαν ως συστατικά στοιχεία φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η μαζική παραγωγή υαλονημάτων ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του 1930 και ουσιαστικά σηματοδοτεί τη γέννηση των σύνθετων υλικών προηγμένης τεχνολογίας. Τα σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών από υπόγειες δεξαμενές καυσίμων έως ύφαλα πλοίων και πολεμικά αεροσκάφη. Αρχικά, λόγω του υπερβολικού κόστους και των περιορισμένων πειραματικών αποτελεσμάτων, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών περιορίστηκαν στην αεροναυπηγική, τη χημική βιομηχανία και τη ναυπηγική. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυση τους πρωτοεφαρμόστηκε στην Ελβετία το 1984. Το Υπουργείο Συγκοινωνιών της Καλιφόρνια (CALTRANS) πρωτοπόρησε με τη χρήση 'υφασμάτων' ινοπλισμένων πολυμερών για τη σεισμική ενίσχυση βάθρων γεφυρών στην Καλιφόρνια πριν από περίπου μία δεκαετία (Σχήμα 6.5). Η συμπεριφορά των συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών κατά την τελευταία εικοσαετία έχει δοκιμαστεί με εξαιρετική επιτυχία και ιδιαίτερα σε χώρες με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι οι ΗΠΑ, ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Ελβετία, η Αυστραλία, κτλ..

Τα μόνα στοιχεία που διαθέτουμε για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ινοπλισμένων πολυμερών που έχουν εγκατασταθεί σήμερα σε εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού προέρχονται από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ερευνητικών προγραμμάτων, καθώς και από την προβολή στο χρόνο συμπερασμάτων που αφορούν στην τρέχουσα κατάσταση των υλικών αυτών. Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία πρόοδος που έχει σημειωθεί στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών, όσον αφορά τόσο στις ιδιότητες όσο και στη διαδικασία παραγωγής τους, έχει επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη

διάρκεια ζωής των ινοπλισμένων πολυμερών και δραματική αύξηση εφαρμογής τους σε τεχνικά έργα. Σήμερα το 1/4 της παραγωγής σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Στη χώρα μας οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εξαπλώθηκαν ιδιαίτερα μετά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999.



Σχήμα 6.5 Ενίσχυση της γέφυρας Gaviota στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ με 'υφάσματα' ινοπλισμένων πολυμερών.

6.5.2. Περιβαλλοντικές συνθήκες

Γενικά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών σχεδιάζονται και παρασκευάζονται έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά υπό φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος για μακρές χρονικές περιόδους.

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζουν μεγάλη διάρκειας ζωής για ένα λογικό εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών, οι οποίες περιλαμβάνουν

· *Θερμοκρασία:* από -30°C έως 60°C για μακρά έκθεση και 650°C έως 1100°C για βραχεία έκθεση (μικρότερη από 2 ώρες) σε φωτιά.

· *Υγρασία:* πλήρης βύθιση σε γλυκό ή αλμυρό νερό για έκθεση μακράς διάρκειας από 0°C έως 40°C.

· *pH:* από 3.0 έως 10.0 για μακρά χρήση.

· *Υπεριώδης ακτινοβολία:* δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας ίσος με 10.0 για μακρά έκθεση.

· *Υδρογονάνθρακες:* απορρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας για μακρές χρονικές περιόδους.

Σε εφαρμογές σε έντονα αλκαλικό περιβάλλον, π.χ. ενίσχυση πασσάλων στη θάλασσα, απαιτείται χρήση ειδικών ρητινών με ίνες άνθρακα ή υάλου. Αξίζει να τονιστεί ότι οι προδιαγραφές ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να περιέχουν στοιχεία για έκθεση του συστήματος σε κάθε μία από τις παραπάνω συνθήκες για περιόδους έως 10000 ώρες.

6.5.3. Επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Για το φυσιολογικό εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες χρησιμοποιούνται τα περισσότερα συστήματα ινοπλισμένων πολυμερών, δεν αναμένονται σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά τους, με την προϋπόθεση ότι τόσο η επιλογή όσο και η εφαρμογή του συστήματος έχει γίνει με τον ενδεδειγμένο τρόπο. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου (Tg) είναι το σημείο πέρα από το οποίο η συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς αλλοιώνεται δραματικά παρουσιάζοντας σημαντική μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Η παρεχόμενη θερμική ενέργεια για αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από την T_g επιτρέπει στις χημικές αλυσίδες της ρητίνης να μετακινηθούν και να γίνουν πιο εύκαμπτες. Ως εκ τούτου μειώνεται η συμμετοχή της ρητίνης στην ανάληψη φορτίου αλλά και η ικανότητά της να μεταφέρει τα φορτία ισομερώς στις ίνες, προκαλώντας περαιτέρω φόρτιση μεμονωμένων ινών, κυρίως των κοντύτερων από αυτές. Κατά συνέπεια, είναι πιθανό να υπάρξει υπέρβαση της αντοχής και

ενδεχόμενη αστοχία. Η διαδικασία είναι εξελικτική και έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της φέρουσας ικανότητας του ινοπλισμένου πολυμερούς κατά 30 με 40% σε ακραίες περιπτώσεις.

Κατά το σχεδιασμό συστημάτων ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή επιβλαβής επίδραση θερμοκρασιών μεγαλύτερων από 80°C. Σκούρες επιφάνειες που εκτίθενται άμεσα στο ηλιακό φως, έχουν καταγράψει θερμοκρασίες της τάξης των 70°C. Σύνθετα υλικά έχουν επίσης δοκιμαστεί σε ακραίες αρνητικές θερμοκρασίες της τάξης των -40°C και δεν έχουν διαπιστωθεί δυσμενείς επιπτώσεις στην εν γένει συμπεριφορά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε θερμοκρασίες μεταξύ -10 και -30°C αυξάνεται σημαντικά η δυσκαμψία του υλικού με συνέπεια μία εξαιρετικά ψαθυρή μορφή αστοχίας, αλλά και μείωση της αντοχής σε κρούση. Πειράματα που έχουν γίνει σε μεμονωμένες στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς, δεν έχουν δείξει απομείωση της αντοχής των ινών λόγω επαναλαμβανόμενης εναλλαγής ψύξης-απόψυξης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο σε συνθήκες τριετούς σταθερής έκθεσης όσο και επιταχυνόμενης έκθεσης για την προσομοίωση πεντηκονταετούς πραγματικής έκθεσης. Η μοναδική αλλοίωση της εποξικής ρητίνης που διαπιστώθηκε με τη μέθοδο της υπέρυθρης φασματοσκόπησης περιοριζόταν στην επιφανειακή της στρώση, χωρίς να επηρεάζει τη συνολική συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς. Επίσης ανακυκλιζόμενες ψύξεις και αποψύξεις είχαν μικρή ή καθόλου επίδραση σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών όταν για την παρασκευή τους είχαν χρησιμοποιηθεί υλικά υψηλής ποιότητας και αντοχής σε υγρασία.

Όσον αφορά στη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε περίπτωση πυρκαγιάς, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, τα σύνθετα υλικά που έρχονται σε άμεση επαφή με τη φωτιά αναφλέγονται, εκτός εάν επιχριστούν ή επαλειφθούν με ειδική ρητίνη. Για το λόγο αυτό τα σύνθετα υλικά που δε διαθέτουν πυροπροστασία θεωρούνται ανενεργά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Πυροπροστασία επιτυγχάνεται με ειδικά επιχρίσματα ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους (40 – 50 mm). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ειδικά προστατευτικά όπως γυψοσανίδες. Το επίχρισμα προστατεύει τα υλικά και ιδιαίτερα τη ρητίνη όχι μόνο από τη φωτιά και γενικά τις υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και από τη γήρανση λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας. Επίσης, η τοποθέτηση επιχρίσματος

αποτελεί οικονομικότερη λύση και επιπλέον δίνει τη δυνατότητα βαφής και διακοσμητικής επέμβασης στο δομικό στοιχείο που ενισχύεται.

6.5.4. Συμπεριφορά στο νερό

Το νερό αποτελεί εν γένει εξαιρετικά δυσμενές περιβάλλον για όλα τα δομικά υλικά. Ο χάλυβας οξειδώνεται, το σκυρόδεμα ενανθρακώνεται, το ξύλο σαπίζει, οι ρητίνες μπορούν να αποσχιστούν λόγω σκλήρυνσης της αλυσίδας του πολυμερούς και ο ύαλος μπορεί να χάσει την εφελκυστική του αντοχή. Κατά συνέπεια, η κύρια μέριμνα όσον αφορά στα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι η αντοχή της μήτρας από ρητίνη σε παρατεταμένη έκθεση σε νερό. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στη διάρκεια των εξήντα περίπου χρόνων που ινοπλισμένα πολυμερή υαλονημάτων χρησιμοποιούνται για την επένδυση υφάλων πλοίων, δεν έχει παρατηρηθεί απομείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων λόγω σήψης ή διάβρωσης, με αποτέλεσμα, όταν τα πλοία αυτά εγκαταλείπονται, να μην υπάρχει εύκολος τρόπος αποσύνθεσής τους. Το παραπάνω παράδειγμα δεν σημαίνει ότι η υγρασία δεν έχει επίδραση στη συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών, αλλά ότι η επίδραση είναι μικρή και χρειάζεται εξαιρετικά μακρά χρονική περίοδο για να εκδηλωθεί. Μετά το πέρας του χρόνου αυτού, οι χημικές αλυσίδες του πολυμερούς είναι πλήρως υδατοδιαλυτές, μεταλλικά ιόντα διηθούνται από τα υαλονήματα και το σύνθετο υλικό γίνεται εξαιρετικά εύθραυστο.

Η μήτρα από ρητίνη απορροφά νερό. Η ποσότητα του νερού που απορροφάται εξαρτάται από το είδος της ρητίνης και τη θερμοκρασία του νερού. Οι άμεσες συνέπειες της απορρόφησης νερού από τη μήτρα είναι συνήθως οι ακόλουθες δύο: πρώτον, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου (Tg) μειώνεται και, δεύτερον, η ρητίνη χάνει τη δυσκαμψία της. Και τα δύο φαινόμενα είναι μερικώς ανατρέψιμα σε συστήματα με εποξικές ρητίνες. Αντίθετα, στις πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες, οι μεταβολές μπορεί να είναι είτε αναστρέψιμες είτε όχι, ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία της έκθεσης. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο ταχύτερες και δυσμενέστερες είναι οι μόνιμες επιπτώσεις της διείσδυσης υγρασίας. Προσεγγιστικά, η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων διπλασιάζεται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C.

Η υγρασία αποκτά πρόσβαση στο ινοπλισμένο πολυμερές μέσω τριών διαφορετικών οδών

· Μέσω της τριχοειδούς δράσης κατά μήκος του διαμήκους άξονα της ίνας στη διεπιφάνεια ρητίνης και ίνας .

· Μέσω ρωγμών και κενών στη δομή του σύνθετου υλικού .

· Μέσω διάχυσης διαμέσου της μήτρας.

Λόγω της υψηλής πολικότητας των μορίων υάλου, τα υαλονήματα απορροφούν υγρασία κατά τη διάρκεια της παρασκευής, αποθήκευσης, μεταφοράς και εφαρμογής τους στο δομικό στοιχείο. Οι ίνες πολυαραμίδης απορροφούν υγρασία έως 13% του βάρους τους, η οποία μπορεί να έχει επιβλαβή επίδραση στην εφελκυστική τους αντοχή, καθώς και στη διεπιφάνεια ρητίνης και ινών. Τα ανθρακονήματα είναι αδρανή στο νερό ενώ οι ίνες υάλου παρουσιάζουν μικρή μείωση αντοχής. Επομένως η επίδραση της υγρασίας σε

αυτού του είδους τα σύνθετα υλικά περιορίζεται στην επίδραση που έχει στη ρητίνη της μήτρας.
Πλήρης στεγάνωση στοιχείων σκυροδέματος με σύνθετα υλικά δημιουργεί στεγανές εξωτερικές επιφάνειες σε νερό με αποτέλεσμα την προστασία τους από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι σε στοιχεία τα οποία πρέπει να 'αναπνέουν', π.χ. πλάκες, συνιστάται να αποφεύγεται η τοποθέτηση καθολικού μανδύα σύνθετου υλικού.
Με την επιλογή της κατάλληλης ρητίνης, ινοπλισμένα πολυμερή ανθρακονημάτων μπορούν να εφαρμοστούν σε κατασκευές που είναι μέσα στο νερό. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί κανείς να αξιοποιήσει τη δυνατότητα που έχουν τα σύνθετα υλικά να αυξάνουν την πλαστιμότητα, την αντοχή και τη δυσκαμψία των στοιχείων στα οποία εφαρμόζονται, αλλά και να τα χρησιμοποιήσει ως στεγανωτική μόνωση. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η θεμελίωση κατασκευών στη θάλασσα (Σχήμα 6.6), η ενίσχυση λιμενικών εγκαταστάσεων, η ενίσχυση και στεγάνωση σηράγγων και αγωγών μεγάλων διαστάσεων, κτλ.



Σχήμα 6.6 Ενίσχυση πασσάλων με σύνθετα υλικά ανθρακονημάτων στο Lamma Island Jetty του Χονγκ Κονγκ.

6.5.5. Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) προκαλεί μείωση της αντοχής των σύνθετων υλικών. Ένδειξη αποτελεί σε εκτεθειμένες επιφάνειες η μικρορηγμάτωση και η χρωματικά αλλοίωση. Για την προστασία προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών βαφών.

6.5.6. Γαλβανική διάβρωση

Πρέπει να αποφεύγεται η επαφή ινών άνθρακα με χάλυβα. Η επαφή των δύο υλικών προκαλεί γαλβανική διάβρωση του χάλυβα. Το πρόβλημα δεν υφίσταται όταν χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά με ίνες υάλου ή πολυαραμίδης.

6.5.7. Ερπυσμός

Μεταξύ όλων των συστατικών στοιχείων ινοπλισμένων πολυμερών που έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες, μόνο τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα δεν υπόκεινται σε ερπυσμό. Τόσο οι ίνες πολυαραμίδης όσο και οι μήτρες των ρητινών, άλλες λιγότερο και άλλες περισσότερο, παρουσιάζουν ερπυσμό. Ο βαθμός του ερπυσμού είναι συνάρτηση του υλικού της ίνας και του προσανατολισμού των ινών σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ένταση. Εάν πρόκειται για ίνες υάλου ή άνθρακα, οι οποίες δεν στρεβλώνονται αλλά παραμένουν αμετακίνητες στα άκρα τους, δεν παρατηρείται ερπυσμός και το σύνθετο υλικό συμπεριφέρεται σχεδόν πλήρως ελαστικά. Οι ίνες μπορεί να γίνονται ευθείες όταν υπόκεινται σε φόρτιση, το ινοπλισμένο πολυμερές μπορεί να ολισθαίνει στις θέσεις που αγκυρώνεται, ενώ υπάρχει επίσης η πιθανότητα επιπλέον έντασης των ινών λόγω χαλάρωσης της μήτρας του πολυμερούς, ακόμα και μετά την απομάκρυνση της εξωτερικής φόρτισης. Αν και τα παραπάνω φαινόμενα προκαλούν 'έκταση' του σύνθετου υλικού, δεν αποτελούν πραγματικό ερπυσμό και τα περισσότερα έχουν ασήμαντες επιδράσεις στις διαστάσεις του ινοπλισμένου πολυμερούς. Στην περίπτωση όμως που ο άξονας των ινών βρίσκεται εκτός του επιπέδου της φόρτισης ή οι ίνες είναι από πολυαραμίδη, μπορεί να είναι σημαντική η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού του σύνθετου υλικού.

Σε εφαρμογές σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών σε σεισμό ο ερπυσμός σπάνια αποτελεί φαινόμενο προεξέτασης διότι τα σύνθετα υλικά θα αναπτύξουν τάσεις μόνο για τα πρόσθετα φορτία επιπλέον του ιδίου βάρους και επίσης το υφιστάμενο σκυρόδεμα έχει αναπτύξει το μεγαλύτερο τμήμα των φαινομενικών παραμορφώσεών του.

6.5.8. Θραύση και διάβρωση λόγω έντασης

Στα περισσότερα ινοπλισμένα πολυμερή παρατηρείται το φαινόμενο της θραύσης λόγω έντασης υπό διατηρούμενη φόρτιση. Η διάβρωση λόγω έντασης συμβαίνει όταν η ατμόσφαιρα που περιβάλλει το σύνθετο υλικό περιέχει διαβρωτικά στοιχεία, αλλά όχι επαρκή ώστε να προκαλέσουν διάβρωση του υλικού χωρίς την ταυτόχρονη δράση διατηρούμενης φόρτισης. Και τα δύο φαινόμενα σχετίζονται με το χρόνο έκθεσης, το επίπεδο της έντασης, τον περιβάλλοντα χώρο, τη μήτρα και τις ίνες του σύνθετου υλικού. Η αστοχία που οφείλεται στα φαινόμενα αυτά κρίνεται πρώιμη, καθώς το ινοπλισμένο πολυμερές αστοχεί για επίπεδο έντασης σαφώς μικρότερο από την αντοχή του.

Η ποιότητα της μήτρας που χρησιμοποιείται έχει πολύ σημαντική επίδραση στο χρόνο που θα εκδηλωθεί η αστοχία και στο επίπεδο της έντασης που μπορεί να φέρει το υλικό. Συνήθως, συστήματα με εποξικές ρητίνες είναι δύο έως τέσσερεις τάξεις μεγέθους πιο ανθεκτικά από αντίστοιχα συστήματα που περιέχουν άλλη κατηγορία ρητίνης. Επίσης, οι βινυλεστερικές ρητίνες εμφανίζουν κατά κανόνα μεγαλύτερη τρωτότητα σε θραύση και διάβρωση λόγω διατηρούμενης έντασης από τις πολυεστερικές.

Όσον αφορά στις ίνες, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά όταν χρησιμοποιούνται για την ανάληψη μόνιμων φορτίων.

6.5.9. Κόπωση

Γενικά τα ινοπλισμένα πολυμερή συμπεριφέρονται καλύτερα από το σκυρόδεμα ή το χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα ανθρακονήματα είναι καλύτερα από τις ίνες πολυαραμίδης, οι οποίες είναι με τη σειρά τους καλύτερες από τα υαλονήματα. Ειδικά για σύνθετα υλικά με ίνες από άνθρακα η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού. Η αντίστοιχη κατάταξη των ρητινών, όσον αφορά στην αντοχή τους σε κόπωση, είναι εποξικές, πολυεστερικές και βινυλεστερικές. Πρέπει να τονιστεί ότι η αντοχή σε κόπωση ενός συστήματος ινοπλισμένου πολυμερούς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της ρητίνης στο οποίο εμποτίζονται οι ίνες.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή, λόγω της οργανικής φύσης του υλικού της μήτρας, είναι ευαίσθητα στη συχνότητα εφαρμογής της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Ως γενικός κανόνας, η συχνότητα αυτή πρέπει να διατηρείται μικρότερη από 10 HZ, έτσι ώστε να προλαμβάνεται η έκλυση θερμότητας στο πολυμερές, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πρώιμη αστοχία της μήτρας και στη συνέχεια ολόκληρου του συστήματος του πολυμερούς.

6.5.10. Κρούση

Όσον αφορά στην επίδραση της κρούσης την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν κατά σειρά τα σύνθετα υλικά με ίνες πολυαραμίδης (είναι χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων), ακολουθούν αυτά με ίνες υάλου και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

6.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.

Η διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια, την *προετοιμασία* της επιφάνειας του δομικού στοιχείου στο οποίο γίνεται η επέμβαση και την *επικόλληση* των στρώσεων του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια αυτή. Πρέπει να τονιστεί ότι η προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου στην οποία θα επικολληθεί το σύνθετο υλικό αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη της επιδιωκόμενης συμπεριφοράς του ενισχυμένου στοιχείου, καθώς από αυτήν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η συνεργασία παλαιού και νέου υλικού.

6.6.1. Σύμφυση και επαφή διεπιφανειών

Τα σύνθετα υλικά επικολλούνται στα δομικά στοιχεία με χρήση διαφόρων συγκολλητικών ουσιών, όπως είναι οι εποξικές κόλλες, οι πολυεστερικές κόλλες, κτλ.. Οι ουσίες αυτές εξασφαλίζουν τη διαρκή σύνδεση και από κοινού λειτουργία του ινοπλισμένου πολυμερούς με το σκυρόδεμα του στοιχείου μέσω της διατμητικής τάσης που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια επαφής τους.

Οι κυριότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί η συγκολλητική ουσία είναι οι ακόλουθες:

· Επαρκής αντοχή σε υγρασία και ερπυσμό.

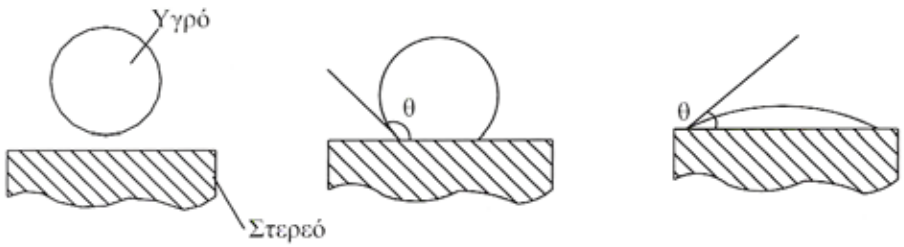
· Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου (T_g) τουλάχιστον ίση με 45°C.

· Ελάχιστη διατμητική αντοχή στους 20°C ίση με 18 MPa.

· Ικανότητα πλήρωσης κενών και εφαρμογής σε κατακόρυφες και ανεστραμμένες επιφάνειες.

· Ανθεκτικότητα στην αλκαλική φύση του σκυροδέματος.

Οι συγκολλητικές ουσίες συνδέουν δύο υλικά επικολλώντας στις επιφάνειές τους μία στρώση απειροελάχιστων διαστάσεων, της τάξης των 0.1 - 0.5 nm. Ο όρος *σύμφυση* αναφέρεται στις εφελκυστικές μοριακές δυνάμεις που δρουν κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών. Λόγω της υγρής τους φύσης, οι συγκολλητικές ουσίες ρέουν πάνω και ανάμεσα στις ανωμαλίες της στερεάς επιφάνειας και, καθώς έρχονται σε επαφή με αυτή, αλληλεπιδρούν μέσω των μοριακών τους δυνάμεων. Στη συνέχεια, η ουσία στερεοποιείται και έτσι επιτυγχάνεται η σύνδεση των δύο υλικών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη ικανοποιητικής σύμφυσης, είναι η άμεση επαφή μεταξύ της συγκολλητικής ουσίας και των δύο υποστρωμάτων, καθώς και η απουσία αδύναμων και ενανθρακωμένων στρώσεων ή σκόνης από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7, η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται από την ομοιόμορφη διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας, η οποία πρέπει να σχηματίζει μία πολύ λεπτή στρώση χωρίς να διαιρείται σε επιμέρους σταγονίδια.



Σχήμα 6.7 Διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου.

6.6.2. Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος

Λόγω της σύνθετης σύστασης του σκυροδέματος, η επιφάνειά του μπορεί να περιέχει εκτεθειμένα αδρανή, άμμο, άνυδρα σωματίδια τσιμέντου και τσιμεντοκονίας, καθώς επίσης ρωγμές και κενά. Σκοπός της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι η απομάκρυνση τυχόν αδύναμων ή ενανθρακωμένων στρώσεων, καθώς και η εξομάλυνσή της, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συγκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού σε αυτή.

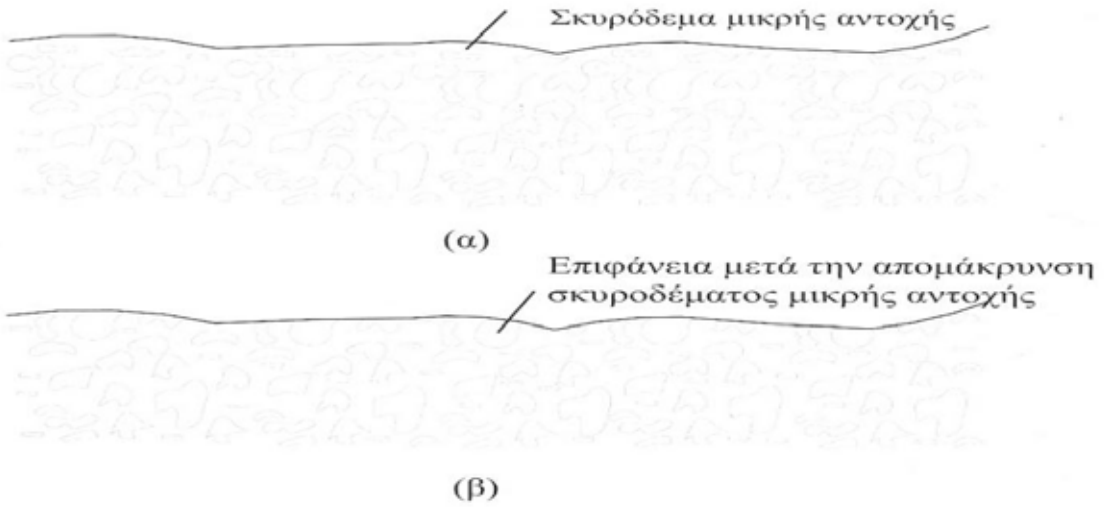
Η προετοιμασία της επιφάνειας έχει γενικά πολύ μεγαλύτερη επίδραση στη μακρόχρονη παρά στη βραχύχρονη αντοχή της σύνδεσης. Για το λόγο αυτό, η προσεκτική προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνδέεται άμεσα με τη συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου με την πάροδο του χρόνου.

Σε πολλές εφαρμογές επισκευής και ενίσχυσης, οι εργασίες στην επιφάνεια του σκυροδέματος εκτελούνται επιτόπου υπό αντίξοες συνθήκες. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προετοιμασίας είναι άμεση συνάρτηση του προσανατολισμού της επιφάνειας του σκυροδέματος (οριζόντια, κατακόρυφη, ανεστραμμένη, κτλ.), αλλά και διαφόρων άλλων παραμέτρων, όπως είναι το κόστος, η κλίμακα και η τοποθεσία του έργου, η εύκολη πρόσβαση στα υλικά και τον εξοπλισμό, καθώς και απαιτήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια και την υγιεινή του προσωπικού.

Ουσιαστικά, ο αντικειμενικός σκοπός της προεργασίας που γίνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, είναι η απομάκρυνση της εξωτερικής, μειωμένης αντοχής και ενδεχομένως ενανθρακωμένης, επιφανειακής στρώσης, με ταυτόχρονη έκθεση αδρανών μικρού έως μεσαίου μεγέθους (Σχήμα 6.8). Ο σκοπός αυτός πρέπει να επιτευχθεί χωρίς να προκληθούν μικρορωγμές ή άλλες βλάβες στην υποκείμενη στρώση που θα μειώσουν την αντοχή της. Τυχόν μεγάλα κενά, οπές και ρωγμές μεγάλου εύρους πρέπει να πληρωθούν με κατάλληλα κονιάματα ή ρητινενέσεις πριν την εφαρμογή της συγκολλητικής ουσίας. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η δημιουργία μίας στρώσης σχετικά ομοιόμορφου πάχους και μεγιστοποιείται η ικανότητα μεταφοράς διατμητικής τάσης. Η διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνιστάται να περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

· Απομάκρυνση βλαμμένου σκυροδέματος ή σκυροδέματος που δεν πληροί τις προδιαγραφές και αντικατάσταση με υλικό καλής ποιότητας.
· Απομάκρυνση σκυροδέματος υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο κατά προτίμηση με αμμοβολή.
· Απομάκρυνση σκόνης και θραυσμάτων με χρήση πεπιεσμένου αέρα.

Μετά την προεργασία, συνιστάται η καταλληλότητα της επιφάνειας να ελεγχθεί με τη μέθοδο του εξολκέα. Το χρονικό κενό μεταξύ προετοιμασίας της επιφάνειας και επικόλλησης των στρώσεων του σύνθετου υλικού καλό είναι να διατηρείται όσον το δυνατόν μικρότερο, ώστε να προλαμβάνεται περαιτέρω ενανθράκωση του σκυροδέματος.



Σχήμα 6.8 Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος (α) πριν την επεξεργασία , (β) μετά την επεξεργασία

6.6.3. Στάδια εφαρμογής σύνθετων υλικών

Συνοπτικά, η διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

· Καθαίρεση του επιχρίσματος.

· Αποκατάσταση των ενδεχόμενων βλαβών με χρήση κατάλληλης μεθόδου.

· Προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου (εξομάλυνση της επιφάνειας, λάξευση γωνιών, κτλ.).

· Επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική ρητίνη ή άλλη κατάλληλη συγκολλητική ουσία.

· Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Συνιστάται η πλήρης επαφή του σύνθετου υλικού με την επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση χρήσης υλικών τύπου ελάσματος χρησιμοποιείται μόνο μία στρώση.

· Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων όπου απαιτείται (τοιχεία, άνω παρειές δοκών, κτλ.).

· Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου υλικού σύμφωνα με τη μελέτη επισκευής / ενίσχυσης.

· Μετά τη σκλήρυνση του συστήματος (περίπου μετά από 24 ώρες), εφαρμογή επιχρίσματος και βαφή της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με βάση αρχιτεκτονικές και αισθητικές απαιτήσεις.

6.7. Αρχές σχεδιασμού συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης με σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό της ενίσχυσης τόσο γραμμικών στοιχείων - υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων και δοκών - όσο και επιφανειακών στοιχείων - πλακών - από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με την εφαρμογή των σύνθετων υλικών μπορεί να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της *καμπτικής* και *διατμητικής αντοχής* των ενισχυόμενων στοιχείων με πρακτικά μηδενική επιβάρυνση του βάρους τους. Ειδικά για την περίπτωση γραμμικών στοιχείων, τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται επιπλέον για την επιβολή *εξωτερικής περίσφιγξης* στο στοιχείο μέσω της οποίας επιτυγχάνεται

αύξηση τόσο της *θλιπτικής αντοχής* του σκυροδέματος όσο και της *πλαστιμότητας* του στοιχείου.

Η διαστασιολόγηση βασίζεται στην ικανοποίηση της συνθήκης συμβιβαστού των παραμορφώσεων μεταξύ σκυροδέματος, υπάρχοντος σιδηροπλισμού και σύνθετου υλικού. Πρέπει να τονιστεί ότι απαραίτητη προϋπόθεση του σχεδιασμού ενίσχυσης με χρήση σύνθετων υλικών είναι ο αποκλεισμός της αποκόλλησης του ινοπλισμένου πολυμερούς από την επιφάνεια του στοιχείου που ενισχύεται κατά την επιβολή των φορτίων.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού με χρήση σύνθετων υλικών για αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, αύξηση της πλαστιμότητας του στοιχείου, αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα και αύξηση της αντοχής

σε κάμψη. Δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα ώστε να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία που αναπτύσσεται.

6.7.1. Επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης με μανδύα σύνθετων υλικών

Η τεχνική της επιβολής εξωτερικής περίσφιγξης με τοποθέτηση μανδυών από σύνθετα υλικά εφαρμόζεται κυρίως σε υποστυλώματα κτιρίων και βάθρα γεφυρών. Η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή είναι αποδοτικότερη για στοιχεία κυκλικής και τετραγωνικής διατομής. Για υποστυλώματα με ορθογωνική διατομή, η απόδοση της εφαρμογής περιορίζεται όσο αυξάνεται ο λόγος των πλευρών της διατομής του υποστυλώματος. Προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης περίσφιγξη ορθογωνικής διατομής, απαιτείται η τροποποίηση του σχήματος της διατομής, είτε με λάξευση των γωνιών της είτε με τοποθέτηση πρόσθετου σκυροδέματος, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία συνεχής καμπύλη επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί ο μανδύας. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της περίσφιγξης μπορεί να έχουν μία από τις ακόλουθες μορφές:

· Ολόσωμοι μανδύες που αποτελούνται από στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών, οι οποίοι επικολλούνται εξωτερικά σε όλο το ύψος του προς ενίσχυση στοιχείου.

· Μανδύες περιορισμένου ύψους ('κολάρα') που αποτελούνται από μεμονωμένες λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών.

· Προεντεταμένοι μανδύες περιορισμένου ύψους από ινοπλισμένα πολυμερή με μορφή ταινιών 'πακεταρίσματος'.

· Ινοπλισμένα πολυμερή με μορφή σπειροειδούς οπλισμού, ο οποίος περιελίσσεται στην εξωτερική επιφάνεια του προς ενίσχυση στοιχείου κατ' αντιστοιχία με το συνήθη σπειροειδή σιδηροπλισμό που χρησιμοποιείται για την όπλιση του στοιχείου.

Μέσω της εξωτερικής περίσφιγξης που επιβάλλει ο μανδύας σύνθετων υλικών, εισάγεται τριαξονική θλίψη στο σκυρόδεμα και έτσι επιτυγχάνεται αύξηση τόσο της θλιπτικής του αντοχής του όσο και της πλαστιμότητας του στοιχείου έναντι του πρόσθετου φορτίου που καλείται να αναλάβει μετά την επέμβαση. Επιπλέον με το μανδύα σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να αποτραπεί ο λυγισμός των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου λόγω μεγάλης απόστασης μεταξύ των υπαρχόντων συνδετήρων στις περιοχές σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων. Τέλος, όταν το διατιθέμενο μήκος υπερκάλυψης των διαμήκων οπλισμών στις περιοχές των ενώσεων δεν είναι επαρκές, είναι δυνατό μέσω της εξωτερικά επιβαλλόμενης περίσφιγξης από το μανδύα σύνθετων υλικών να επιτευχθεί βελτίωση των συνθηκών αγκύρωσης και κατά συνέπεια να μειωθεί ο κίνδυνος αστοχίας της συνάφειας των ματιζομένων ράβδων οπλισμού του στοιχείου.

6.7.1.1. Αύξηση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος

Όπως προαναφέρθηκε, οι μανδύες σύνθετων υλικών τοποθετούνται στις εξωτερικές επιφάνειες υποστυλωμάτων για να αυξήσουν τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η

αύξηση της θλιπτικής αντοχής επιτυγχάνεται με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, των οποίων οι ίνες είναι προσανατολισμένες κάθετα στον άξονα του στοιχείου.

(α) Κυκλική διατομή. Η αυξημένη λόγω εξωτερικής περίσφιγξης από το μανδύα σύνθετου υλικού θλιπτική αντοχή f_{cc} του σκυροδέματος κυκλικής διατομής διαμέτρου D δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{cc} = f_{co} [2.25 (1 + 7.94 f_i / f_{co})^{1/2} – 2 f_i / f_{co} – 1.25] \qquad (6.6)$$

με

$$f_i = 0.26 p_{sj} f_{uj} \qquad (6.7)$$

όπου f_{co} είναι η θλιπτική αντοχή του υπάρχοντος σκυροδέματος , f_i η τάση περίσφιγξης, f_{uj} η μέγιστη εφελκυστική τάση του μανδύα σύνθετου υλικού και p_{sj} το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης σκυροδέματος από το μανδύα σύνθετου υλικού. Το p_{sj} δίνεται από τη σχέση:

$$p_{sj} = 4 n t_j / D \qquad (6.8)$$

όπου n είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα σύνθετου υλικού και t_j το πάχος μίας στρώσης.

(β) Ορθογωνική διατομή. Η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή f_{cc} του σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής διαστάσεων bxd υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_{cc} = f_{co} (1 + 1.5 p_{sj}) \qquad (6.9)$$

όπου f_{co} είναι η θλιπτική αντοχή του υπάρχοντος σκυροδέματος και p_{sj} το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης σκυροδέματος από το μανδύα σύνθετου υλικού, το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p_{sj} = 2 n t_j (b + d) / (b d) \qquad (6.10)$$

όπου n είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα σύνθετου υλικού και t_j το πάχος μίας στρώσης.

6.7.1.2. Αύξηση πλαστιμότητας

Για την αύξηση της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων κυκλικής και ορθογωνικής διατομής χρησιμοποιούμε σύνθετα υλικά με προσανατολισμό των κυρίων ινών τους κάθετα στον άξονα του στοιχείου. Όπως προαναφέρθηκε, η αύξηση της πλαστιμότητας επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη τριαξονικής θλίψης που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα της διατομής με περίσφιγξη. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αύξηση της πλαστιμότητας, ενδείκνυται να λαξεύονται οι γωνίες των ορθογωνικών διατομών με ακτίνα όχι μικρότερη από 2 cm, πριν την τοποθέτηση του μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς.

Όσον αφορά στα βάθρα γεφυρών, για την ικανοποίηση των 'Οδηγιών για την Αντισεισμική Μελέτη Γεφυρών' , ο αριθμός των απαιτούμενων στρώσεων μανδύα σύνθετων υλικών για την περίσφιγξη των κρίσιμων περιοχών του ενισχυόμενου στοιχείου, δηλαδή των περιοχών που αναμένεται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων, πρέπει να εφαρμόζεται σε μήκος μεγαλύτερο από τα ακόλουθα:

· Το ύψος της διατομής κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση .

· Το μήκος από το άκρο του στοιχείου (θέση μέγιστης ροπής) μέχρι το σημείο όπου η ροπή γίνεται ίση με το 80% της μέγιστης.

Όταν η τιμή της ανηγμένης αξονικής που ασκείται στο στοιχείο είναι μεγαλύτερη του 0.30, τότε το μήκος περίσφιγξης πρέπει να αυξάνεται κατά 50%. Επίσης, το απαιτούμενο πάχος του μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς συνιστάται να αυξάνεται κατά 33% για πρόσθετη προστασία των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό.

Με τη χρήση μανδύα σύνθετων υλικών αυξάνεται στην απαιτούμενη τιμή της τόσο η γενική πλαστιμότητα μετακίνησης του φορέα μ_d όσο και η τοπική πλαστιμότητα καμπυλότητας μ_c στις θέσεις πλαστικών αρθρώσεων των επιμέρους στοιχείων που ενισχύονται. Η ύπαρξη επαρκούς πλαστιμότητας καμπυλότητας στις θέσεις που αναμένεται ο σχηματισμός των πλαστικών αρθρώσεων είναι αναγκαία, έτσι ώστε να επιτρέψει τη μετακίνηση του φορέα που αντιστοιχεί στη γενική πλαστιμότητα μετακίνησης του συστήματος.

Η τοπική πλαστιμότητα καμπυλότητας μ_c της διατομής της πλαστικής άρθρωσης συνδέεται με την πλαστιμότητα μετακίνησης του στοιχείου μ_{cd} μέσω της σχέσης:

$$\mu_c = 1 + \frac{\mu_{cd} - 1}{3(l_p/l)[1 - 0.5(l_p/l)]} \quad (6.11)$$

όπου l_p είναι το θεωρητικό μήκος της πλαστικής άρθρωσης και l το μήκος στοιχείου μορφής προβόλου πλήρως πακτωμένου στο έδαφος, στην παραμόρφωση του οποίου οφείλεται η μετακίνηση του φορέα. Το μήκος της πλαστικής άρθρωσης σε διατομές οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί από την προσεγγιστική σχέση:

$l_p = 0.08\, l + 0.022\, d_s\, f_y$ (6.12)

όπου ds και fy είναι η διάμετρος και το όριο διαρροής του διαμήκους οπλισμού σε m και MPa, αντίστοιχα.

Από ανάλυση ροπών-καμπυλοτήτων προκύπτει η καμπυλότητα διαρροής της διατομής της πλαστικής άρθρωσης φ_y . Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής φ_u δίνεται από την σχέση:

$\varphi_u = \mu_c\, \varphi_y$ (6.13)

Η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος ε_{cu} συνδέεται με την καμπυλότητα φ_u και το μήκος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής κατά την αστοχία c_u μέσο της σχέσης:

$\varepsilon_{cu} = \varphi_u\, c_u$ (6.14)

α) Κυκλική διατομή. Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης p_{sj} από το μανδύα σύνθετων υλικών που προστίθεται για την ενίσχυση υποστηλώματος κυκλικής διατομής διαμέτρου D είναι:

$p_{sj} = 0.4\, (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co})\, f_{cc} / (f_{uj}\, \varepsilon_{uj})$ (6.15)

όπου ε_{co} είναι η αρχική θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος , f_{cc} η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος , f_{uj} η μέγιστη εφελκυστική τάση του μανδύα σύνθετων υλικών και ε_{uj} η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του μανδύα σύνθετων υλικών. Αν αγνοηθεί η περίσφιγξη λόγω συνδετήρων, η αρχική θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος λαμβάνεται $\varepsilon_{co} = 0.0035$. Με θεώρηση περισφιγμένου σκυροδέματος η θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας αυξάνεται σε:

$\varepsilon_{co} = 0.0035 + 0.10\, \alpha\, \omega_{wd}$ (6.16)

όπου ω_{wd} είναι το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των υφιστάμενων συνδετήρων.

Το απαιτούμενο πάχος t_f του μανδύα σύνθετων υλικών , το αυξημένο πάχος t_f' λόγω πρόσθετης προστασίας των ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό και ο τελικός αριθμός των στρώσεων n του σύνθετου υλικού δίνονται αντίστοιχα από τις ακόλουθες σχέσεις:

$t_f = p_{sj}\, D / 4$ (6.17)

$t_f' = 1.33\, t_f$ (6.18)

$n = t_f' / t_j$ (6.19) όπου t_j είναι το πάχος μίας στρώσης σύνθετου υλικού.

(β) Ορθογωνική διατομή. Κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση της κυκλικής διατομής , το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης p_{sj} από το μανδύα σύνθετων υλικών που προστίθεται για την ενίσχυση υποστηλώματος ορθογωνικής διατομής διαστάσεων bxd υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_{sj} = 0.8 (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}) f_{cc} / (f_{uj} \varepsilon_{uj}) \qquad (6.20)$$

όπου ε_{co} είναι η αρχική θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος , f_{cc} η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος , f_{uj} η μέγιστη εφελκυστική τάση του μανδύα σύνθετων υλικών και ε_{uj} η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του μανδύα σύνθετων υλικών.

Επίσης, το απαιτούμενο πάχος t_f του μανδύα σύνθετων υλικών, το αυξημένο πάχος t_f' λόγω πρόσθετης προστασίας των θλιβόμενων ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό και ο τελικός αριθμός των στρώσεων n του σύνθετου υλικού υπολογίζεται ως εξής:

$$t_f = 0.5 p_{sj}(b\ d) / (b+d) \qquad (6.21)$$

$$t_f' = 1.33\ t_f \qquad (6.22)$$

$$n = t_f' / t_j \qquad (6.23)$$

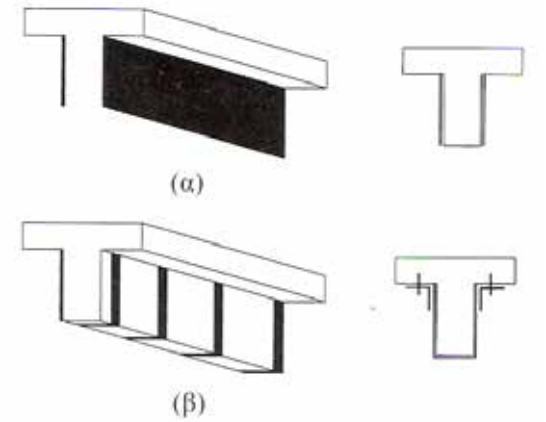
όπου t_j είναι το πάχος μίας στρώσης σύνθετου υλικού.

6.7.2. Αύξηση αντοχής σε τέμνουσα

Η διατμητική αντοχή δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, μπορεί να αυξηθεί με μανδύες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή, οι οποίοι επικολλούνται εξωτερικά στα στοιχεία και παραλαμβάνουν τέμνουσα δύναμη κατ' αντιστοιχία με το συμβατικό οπλισμό διάτμησης. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση σε διάτμηση μπορεί να έχουν, είτε τη μορφή ολόσωμων μανδυών που αποτελούνται από επικολλητές στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών είτε τη μορφή μανδυών περιορισμένου ύψους ('κολάρα') που αποτελούνται από λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών. Στο Σχήμα 6.9 φαίνεται η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων ενίσχυσης στην περίπτωση δοκών. Για την περίπτωση ενίσχυσης υποστυλωμάτων σε διάτμηση, η τοποθέτηση των ινοπλισμένων πολυμερών εφαρμόζεται όπως για την περίπτωση της επιβολής εξωτερικής περίσφιγξης . Οι ίνες του πολυμερούς είναι κατά κανόνα κάθετες στον άξονα του στοιχείου.

Πρέπει να τονιστεί ότι, στην περίπτωση που ο μανδύας από σύνθετο υλικό δεν είναι δυνατό να περιβάλλει πλήρως τη διατομή του στοιχείου (π.χ. περίπτωση ενίσχυσης πλακοδοκού), ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην όσο το δυνατόν καλύτερη αγκύρωση των στρώσεων του σύνθετου υλικού στο υπάρχον στοιχείο (Σχήμα 6.10). Στην περίπτωση ορθογωνικών διατομών, συνιστάται επίσης η λάξευση των γωνιών τους πριν

την τοποθέτηση των στρώσεων του μανδύα, όπως καθορίζουν οι κατασκευαστικές διατάξεις.



Σχήμα 6.9 Ενίσχυση δοκων σε οιατμηση με μανουα συνυετων υλικών. (α) Ολόσωμοι μανδύες. (β) 'Κολάρα'.



Σχήμα 6.10 Αγκύρωση μανδύα σύνθετου υλικού για ενίσχυση πλακοδοκού.

Όσον αφορά στο σχεδιασμό του μανδύα σύνθετων υλικών, θεωρούμε ότι αυτός συμπεριφέρεται σαν πρόσθετος οπλισμός διάτμησης , ενώ δεν συνεισφέρει στην αντοχή της διατομής λόγω λοξής θλίψης κορμού. Για το λόγο αυτό , η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω λοξής θλίψης κορμού V_{Rd2} λαμβάνεται ίση με αυτήν του στοιχείου πριν την επέμβαση. Η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης V_{Rd3} υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd,\upsilon\pi} + V_{sj} \qquad (6.24)$$

όπου V_{cd} και $V_{wd,\upsilon\pi}$ είναι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα και τον υπάρχοντα οπλισμό διάτμησης, αντίστοιχα, ενώ V_{sj} είναι η πρόσθετη τέμνουσα που παραλαμβάνει ο μανδύας σύνθετων υλικών.

(α) Κυκλική διατομή. Η τέμνουσα δύναμη V_{sj} που παραλαμβάνεται από το μανδύα σύνθετου υλικού, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ενίσχυση στοιχείου κυκλικής διατομής διαμέτρου D, δίνεται από τη σχέση:

(6.25)

$$V_{sj} = 0.5\, \sigma_{wd}\, \rho_w\, \frac{\pi D^2}{4}\, (\cot\theta + \cot\alpha)\, \sin^2\alpha$$

όπου σ_{wd} και p_w είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης και το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετου υλικού, αντίστοιχα, θ είναι η γωνία κλίσης των θλιβομένων διαγωνίων του σκυροδέματος και α η γωνία κλίσης των κυρίων ινών του πολυμερούς ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου.

Το ογκομετρικό ποσοστό p_w του μανδύα σύνθετου υλικού είναι ίσο με:

$p_w = 4\, n\, t_j / D \sin\alpha$ (6.26)

όπου n είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα από πολυμερές και t_j το πάχος μίας στρώσης.

Θεωρώντας $\theta=45^o$ και $\alpha=90^o$ η σχέση (6.25) απλοποιείται ως εξής:

$V_{sj} = 0.5\, \sigma_{wd}\, n\, t_j\, \pi\, D$ (6.27)

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης σ_{wd} του μανδύα σύνθετου υλικού μπορεί να ληφθεί από την παρακάτω σχέση:

$\sigma_{wd} = \varepsilon_{max}\, E_f / \gamma_{fl}$ (6.28)

όπου $\varepsilon_{max} = 0.006$ είναι η μέγιστη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού, E_f το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού στην κατεύθυνση των κυρίων ινών,ενώ ο συντελεστής ασφαλείας γ_{fl} λαμβάνεται ίσος με 1.25.

(β) Ορθογωνική διατομή. Στην περίπτωση στοιχείου ορθογωνικής διατομής με πλάτος b_w και ύψος h, η τέμνουσα δύναμη V_{sj} που παραλαμβάνεται από το μανδύα σύνθετου υλικού υπολογίζεται από τη σχέση:

$V_{sj} = \sigma_{wd}\, p_w\, b_w\, (0.9\, h)\, (\cot\theta + \cot\alpha)\, \sin^2\alpha$ (6.29)

όπου σ_{wd} και p_w είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης και το γεωμετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετου υλικού, αντίστοιχα, θ είναι η γωνία κλίσης των θλιβομένων διαγωνίων του σκυροδέματος και α η γωνία κλίσης των κυρίων ινών του σύνθετου υλικού ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου. Στη γενική περίπτωση που $\theta=45^o$ και $\alpha=90^o$, η σχέση (6.29) παίρνει τη μορφή:

$V_{sj} = 0.9\, \sigma_{wd}\, p_w\, b_w\, h$ (6.30)

Για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού της ενεργού τάσης σ_{wd} του μανδύα σύνθετου υλικού χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_{wd} = \varepsilon_{fd,e} E_f \qquad (6.31)$$

όπου E_f είναι το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών και $\varepsilon_{fd,e}$ η τιμή σχεδιασμού της ενεργού παραμόρφωσης του ινοπλισμένου πολυμερούς. Η $\varepsilon_{fd,e}$ εξαρτάται από τον τύπο του μανδύα σύνθετου υλικού. Για μανδύες κλειστού τύπου η $\varepsilon_{fd,e}$ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\varepsilon_{fd,e} = \min [0.17 \varepsilon_{fud} (f^{2/3}_{cm} / E_f p_w)^{0.30} , 0.006 / \gamma_{fl}] \qquad (6.32)$$

όπου $f_{cm} = f_{ck} + 8$ η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.
Αντίστοιχα, για ανοικτούς μανδύες:

$$\varepsilon_{fd,e} = \min [0.17 \varepsilon_{fud} (f^{2/3}_{cm} / E_f p_w)^{0.30}, 0.65x10^{-3} / \gamma_{fb} , (f^{2/3}_{cm} / E_f p_w)^{0.56} , 0.006 / \gamma_{fl}] \qquad (6.33)$$

Στις σχέσεις (6.32) και (6.33) με f_{cm} συμβολίζουμε τη μέση θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε MPa, το E_f λαμβάνεται σε GPa , ενώ οι συντελεστές ασφαλείας γ_{fl} και γ_{fb} παίρνουν τις τιμές 1.25 και 1.30, αντίστοιχα. Επίσης, ε_{fud} είναι η τιμή σχεδιασμού της παραμόρφωσης θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{fud} = \varepsilon_{fuk} / \gamma_f \qquad (6.34)$$

όπου ε_{fuk} είναι η χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης θραύσης του σύνθετου υλικού, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας γ_f λαμβάνει την τιμή 1.20, 1.25 και 1.30 για ίνες υάλου, πολυαραμίδης και άνθρακα αντίστοιχα.

Το γεωμετρικό ποσοστό p_w του μανδύα σύνθετου υλικού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_w = 2 n t_j / b_w \sin\alpha \qquad (6.35)$$

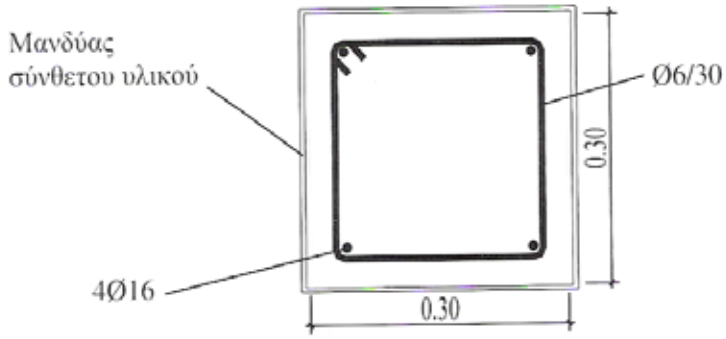
όπου n είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα και t_j το πάχος μίας στρώσης.

Εάν οι ίνες του πολυμερούς είναι κάθετες στον άξονα του στοιχείου, τότε $\alpha=90^o$ οπότε η σχέση (6.30) απλοποιείται ως εξής:

$$V_{sj} = 1.8 n t_j h \varepsilon_{fd,e} E_f \qquad (6.36)$$

6.7.3. Παράδειγμα ενίσχυσης υποστυλώματος με μανδύα σύνθετων υλικών

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 30 cm x 30 cm, το οποίο πρόκειται να ενισχυθεί με μανδύα σύνθετου υλικού είτε από υαλονήματα είτε από ανθρακονήματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11 , το υποστύλωμα έχει διαμήκη οπλισμό 4Ø16 . Ο υπάρχων οπλισμός περίσφιγξης του υποστυλώματος αποτελείται από συνδετήρες Ø6/30 και η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι c = 2 cm. Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι C12/15 και του χάλυβα S400. Το πάχος μίας στρώσης υαλονημάτων και μίας στρώσης ανθρακονημάτων είναι t_j = 1.0 mm και t_j = 0.6 mm, αντίστοιχα. Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών για το μανδύα υαλονημάτων είναι E_f = 70 GPa και για το μανδύα ανθρακονημάτων E_f = 200 GPa. Τέλος η χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης θραύσης είναι ε_{fuk} = 0.01 και ε_{fuk} = 0.008 για το μανδύα υαλονημάτων και ανθρακονημάτων, αντίστοιχα. Ζητείται να υπολογιστεί ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα σύνθετου υλικού που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση ώστε να επιτευχθεί αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστυλώματος που θα εξασφαλιζόταν με συνδετήρες Ø8/10. Επίσης να υπολογιστεί η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και της πλαστιμότητας του στοιχείου λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών. Το αξονικό θλιπτικό φορτίο που καταπονεί τη διατομή είναι N_{sd} = 400 kN.



Σχήμα 6.11 Διαστάσεις υποστυλώματος ενισχυμένου με μανδύα σύνθετου υλικού.

1. Αύξηση διατμητικής αντοχής υποστυλώματος.

Δεδομένου ότι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα V_{cd} είναι η ίδια τόσο για την αρχική όσο και για την ενισχυμένη διατομή, η πρόσθετη τέμνουσα που θα παραλάβει ο μανδύας σύνθετων υλικών V_{sj} θα προκύψει ως η διαφορά της τέμνουσας $V_{wd,\varepsilon\pi}$ - $V_{wd,\upsilon\pi}$ που παραλαμβάνει ο επιθυμητός και ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης, δηλαδή οι συνδετήρες Ø8/10 και Ø6/30 ,αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τη σχέση (11.11) του ΕΚΩΣ 2000, η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από τον οπλισμό διάτμησης της διατομής είναι:

(6.37) $$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.90\, d\, f_{ywd} (1 + \cot\alpha) \sin\alpha$$

όπου A_{sw} είναι η διατομή του οπλισμού διάτμησης , s η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων , d το στατικό ύψος της διατομής, f_{ywd} η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων και α η γωνία κλίσης του οπλισμού διάτμησης.
Για τους συνδετήρες Ø8/10, d = 30 - 2 - 0.8- 1.6/2 = 26.4cm οπότε αντικαθιστώντας στη σχέση (6.37) έχουμε:

$$V_{wd,\varepsilon\pi} = \frac{2\times 0.50}{10}\times 0.90\times 26.4\times \frac{40}{1.15}\left(1+\cot 90^\circ\right)\sin 90^\circ = \\ = 82.64 \text{ kN}$$

Ομοίως, για τους συνδετήρες Ø6/30, d = 30 - 2 - 0.6 - 1.6/2 = 26.6 cm οπότε:

$$V_{wd,\upsilon\pi} = \frac{2\times 0.28}{30}\times 0.90\times 26.6\times \frac{40}{1.15}\left(1+\cot 90^\circ\right)\sin 90^\circ = \\ = 15.54 \text{ kN}$$

Επομένως, η τέμνουσα που πρέπει να παραλάβει ο μανδύας σύνθετων υλικών είναι:

$V_{sj} = V_{wd,\varepsilon\pi} - V_{wd,\upsilon\pi} = 82.64 - 15.54 = 69.10$ KN

Θεωρώντας $\theta = 45^o$ και $\alpha = 90^o$,η Vsj δίνεται από τη σχέση (6.36).Επιλύοντας ως προς τον αριθμό των στρώσεων του μανδύα σύνθετου υλικού n έχουμε:

$$n = \frac{V_{sj}}{1.8 t_j h \varepsilon_{fd,e} E_f}$$

(α) Μανδύας υαλονημάτων. Η τιμή σχεδιασμού για μανδύα κλειστού τύπου $\varepsilon_{fd,e}$ δίνεται από τη σχέση (6.32). Δεδομένου ότι για τον υπολογισμό της $\varepsilon_{fd,e}$ πρέπει να είναι γνωστό το γεωμετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετων υλικών p_w, το οποίο σύμφωνα με τη σχέση (6.35) είναι συνάρτηση του αριθμού των στρώσεων n, απαιτείται επαναληπτική διαδικασία. Για μία στρώση μανδύα υαλονημάτων έχουμε:

$p_w = 2\ n\ t_j / b_w \sin\alpha = (2x1x0.1) / (30x\sin 90^o) = 0.0067$

$\varepsilon_{fud} = \varepsilon_{fuk} / \gamma_f = 0.01 / 1.20 = 0.0083$

$\varepsilon_{fd,e} = \min [0.17\ \varepsilon_{fud}\ (f^{2/3}_{cm} / E_f\ p_w)^{0.30}\ ,\ 0.006 / \gamma_{fl}] =$

= min [0.17x0.0083x($20^{2/3}$ / 70x0.0067)$^{0.30}$, 0.006 / 1.25] =
= min [0.0032 , 0.0048] = 0.0032

$$n = \frac{V_{sj}}{1.8 t_j h \varepsilon_{fd,e} E_f} = \frac{67.10}{1.8 \times 0.1 \times 30 \times 0.0032 \times 7000} = 0.55 \approx 1$$

Επομένως μία στρώση μανδύα υαλονημάτων είναι επαρκής για την αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστυλώματος. Παρ όλ' αυτά, συνιστάται να χρησιμοποιηθούν δύο στρώσεις για πρόσθετη προστασία των θλιβόμενων ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό.

(β) Μανδύας ανθρακονημάτων. Όμοια με την επαναληπτική διαδικασία για το μανδύα υαλονημάτων, για μία στρώση μανδύα ανθρακονημάτων έχουμε:

$p_w = 2\ n\ t_j / b_w \sin\alpha = (2x1x0.06) / (30x\sin 90^o) = 0.004$

$\varepsilon_{fud} = \varepsilon_{fuk} / \gamma_f = 0.008 / 1.30 = 0.0062$

$\varepsilon_{fd,e} = \min [0.17\ \varepsilon_{fud} (f^{2/3}_{cm} / E_f\ p_w)^{0.30}$, $0.006 / \gamma_{fl}] =$
= min [0.17x0.0062x($20^{2/3}$ / 200x0.004)$^{0.30}$, 0.006 / 1.25] =
= min [0.0020 , 0.0048] = 0.0020

$$n = \frac{V_{sj}}{1.8 t_j h \varepsilon_{fd,e} E_f} = \frac{67.10}{1.8 \times 0.06 \times 30 \times 0.0020 \times 20000} = 0.52 \approx 1$$

Επομένως μία στρώση μανδύα ανθρακονημάτων είναι επαρκής για την αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστυλώματος. Παρ όλ' αυτά, όπως και στη περίπτωση του μανδύα υαλονημάτων, θα χρησιμοποιηθούν δύο στρώσεις μανδύα.

2. Αύξηση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Σύμφωνα με την § 18.4.4.2 του ΕΚΩΣ 2000, το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης για το τετραγωνικό υποστύλωμα του παραδείγματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

(6.38) $$\omega_{wd} = \frac{4 A_{sw}}{s b_o} \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

όπου A_{sw} είναι το εμβαδόν της διατομής του συνδετήρα, s η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων και b_o το πλάτος της διατομής του πυρήνα, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το b_o μετράται στα κέντρα των διαμήκων ράβδων.

Επομένως, για τους συνδετήρες Ø8/10 είναι:

$b_o = 30 - 2x2 - 2x0.8 - 1.6 = 22.8$ cm

Αντικαθιστώντας στη σχέση (6.38), το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων Ø8/10 είναι:

$$\omega_{wd} = \frac{4\times 0.50}{10\times 22.8}\times\frac{400/1.15}{12/1.50} = 0.383 \geq 0.10$$

Αντίστοιχα, για τους συνδετήρες Ø6/30 είναι:

$b_o = 30 - 2x2 - 2x0.6 - 1.6 = 23.2$ cm

Το υπάρχον μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων Ø6/30 είναι:

$$\omega_{wd} = \frac{4\times 0.28}{30\times 23.2}\times\frac{400/1.15}{12/1.50} = 0.071$$

Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων από τη βιβλιογραφία, η θλιπτική αντοχή f_{cc}' του περισφιγμένου από κλειστούς συνδετήρες σκυροδέματος υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$f_{cc}' = (1 + 2.5\ \alpha\ \omega_{wd})\ f_c$ $\quad \alpha\ \omega_{wd} < 0.10$ (6.39)

$f_{cc}' = (1.125 + 1.25\ \alpha\ \omega_{wd})\ f_c$ $\quad \alpha\ \omega_{wd} > 0.10$ (6.40)

όπου α είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης που εξαρτάται από τη διάταξη και την απόσταση των συνδετήρων και f_c η θλιπτική αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος. Σύμφωνα με την § 18.4.4.2 του ΕΚΩΣ 2000, για ορθογωνικά υποστυλώματα ο συντελεστής α υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha = \alpha_n\ \alpha_s = (1 - 8 / 3\ n)\ (1 - s' / 2\ b_o)^2 \qquad (6.41)$$

όπου s' είναι η καθαρή ελεύθερη απόσταση μεταξύ των συνδετήρων.
Για τους συνδετήρες Ø8/10 , $s' = 10 - 2x0.4 = 9.2$ cm οπότε

$\alpha = (1 - 8 / 3x4)x(1 - 9.2 / 2x22.8)^2 = 0.333x0.637 = 0.212$

Επομένως:

$\alpha\ \omega_{wd} = 0.212x0.383 = 0.0814 < 0.10$

οπότε, σύμφωνα με τη σχέση (6.39) έχουμε:

$f_{cc}' = (1 + 2.5x0.0814)f_c = 1.204f_c$

Για τους υπάρχοντες συνδετήρες Ø6/30 , $s' = 30 – 2x0.3 = 29.4$ cm οπότε:

$\alpha = (1 – 8 / 3x4)x(1 – 29.4 / 2x23.2)^2 = 0.333x0.134 = 0.045$

Επομένως:

$\alpha\ \omega_{wd} = 0.045x0.071 = 0.0032 < 0.10$

οπότε, σύμφωνα με τη σχέση (6.39) έχουμε:

$f_{cc}' = (1 + 2.5x0.0032)f_c = 1.008f_c$

(α) Μανδύας υαλονημάτων. Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης του σκυροδέματος από το μανδύα σύνθετου υλικού που αποτελείται από δύο στρώσεις ινών υάλου δίνεται από τη σχέση (6.10):

$p_{sj} = 2\ n\ t_j\ (b + d) / (b\ d) =$
$= 2x2x0.1x(30 + 30) / (30x30) = 0.026$

Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (6.9) η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα των υαλονημάτων είναι:

$f_{cc} = f_{co}\ (1 + 1.5\ p_{sj}) = 1.040\ f_{co} = 1.040x1.008\ f_c = 1.048\ f_c$

Άρα, η συνολική αύξηση που παρέχεται στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από τους υπάρχοντες συνδετήρες Ø6/30 και τις δύο στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού υαλονημάτων είναι 4.8%.

(β) Μανδύας ανθρακονημάτων. Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης του σκυροδέματος από το μανδύα δύο στρώσεων ανθρακονημάτων είναι:

$p_{sj} = 2\ n\ t_j\ (b + d) / (b\ d) =$
$= 2x2x0.06x(30 + 30) / (30x30) = 0.016$

Σύμφωνα με τη σχέση (6.9) η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα των ανθρακονημάτων είναι:

$f_{cc} = f_{co} (1 + 1.5\ p_{sj}) = 1.024\ f_{co} = 1.024x1.008\ f_c = 1.032\ f_c$

Επομένως, η συνολική αύξηση που παρέχεται στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από τους συνδετήρες Ø6/30 και τις δύο στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού ανθρακονημάτων είναι 3.2%.

Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών είναι σημαντικά μικρότερη από την αύξηση που επιτυγχάνεται με συνδετήρες Ø8/10 και η οποία είναι περίπου 20% (f_{cc}' = 1.204 f_c). Είναι χαρακτηριστικό ότι για να επιτευχθεί μία τέτοια αύξηση, απαιτούνται είτε δέκα στρώσεις μανδύα υαλονημάτων είτε δεκαέξι στρώσεις μανδύα ανθρακονημάτων. Επειδή ο παραπάνω αριθμός στρώσεων είναι μη ρεαλιστικός, στην πράξη δεν θα επιδιώκαμε να επιτύχουμε τόσο μεγάλη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών.

3. Αύξηση πλαστιμότητας.

Προκειμένου να υπολογιστεί η αύξηση της πλαστιμότητας λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών πρέπει αρχικά να βρεθεί η πλαστιμότητα του υποστυλώματος με τους υπάρχοντες συνδετήρες Ø6/30.

Η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος ε_{co} λόγω περίσφιγξης της διατομής από τους υπάρχοντες συνδετήρες σύμφωνα με τη σχέση (6.16) είναι ίση με:

$\varepsilon_{co} = 0.0035 + 0.10\ \alpha\ \omega_{wd} = 0.0035 + 0.0003 = 0.0038$

Από υπολογισμό ροπών – καμπυλοτήτων για N_{sd} = 400 KN, προκύπτει η καμπυλότητα διαρροής της διατομής της πλαστικής άρθρωσης του στοιχείου $\varphi_y = 0.013\ m^{-1}$,καθώς και το μήκος της θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία $c_u = 0.238$ m.

Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής φ_u προκύπτει από τη σχέση (6.14) θέτοντας $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co}$.

$\varphi_u = \varepsilon_{co} / c_u = 0.0038 / 0.238 = 0.016\ m^{-1}$

Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (6.13), η πλαστιμότητα καμπυλότητας μ_c της διατομής της πλαστικής άρθρωσης είναι:

$\mu_c = \varphi_u / \varphi_y = 0.016 / 0.013 = 1.24$

(α) Μανδύας υαλονημάτων. Η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου από το μανδύα υαλονημάτων σκυροδέματος ε_{cu} υπολογίζεται από τη σχέση (6.20) αντικαθιστώντας $p_{sj} = 0.026$, $\varepsilon_{co} = 0.0038$, $f_{cc} = 1.048\ f_c = 1.048 \times 12 = 12.58$MPa, $\varepsilon_{uj} = \varepsilon_{fud} = 0.0083$ και $f_{uj} = \varepsilon_{uj}\ E_f = 583$ MPa.

$$\varepsilon_{cu} = \frac{\rho_{sj} f_{uj} \varepsilon_{uj}}{0.8 f_{cc}} + \varepsilon_{co} = \frac{0.026 \times 583 \times 0.0083}{0.8 \times 12.58} + 0.0038 = 0.0167$$

Από ανάλυση ροπών – καμπυλοτήτων προκύπτει $\varphi_y = 0.013\ m^{-1}$ και $c_u = 0.215$ m.
Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής φ_u προκύπτει από τη σχέση (6.14).

$\varphi_u = \varepsilon_{cu} / c_u = 0.0167 / 0.215 = 0.082\ m^{-1}$

Άρα, η πλαστιμότητα καμπυλότητας μ_c της διατομής της πλαστικής άρθρωσης από τη σχέση (6.13) είναι:

$\mu_c = \varphi_u / \varphi_y = 0.082 / 0.013 = 6.29$

Είναι προφανής η ουσιαστική αύξηση της πλαστιμότητας με την προσθήκη των υαλονημάτων.

(β) Μανδύας ανθρακονημάτων. Η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος ε_{cu} υπολογίζεται από τη σχέση (6.20) αντικαθιστώντας $p_{sj} = 0.016$, $\varepsilon_{co} = 0.0038$, $f_{cc} = 1.032\ f_c = 1.032 \times 12 = 12.38$MPa, $\varepsilon_{uj} = \varepsilon_{fud} = 0.0062$ και $f_{uj} = \varepsilon_{uj}\ E_f = 1231$ MPa.

$$\varepsilon_{cu} = \frac{\rho_{sj} f_{uj} \varepsilon_{uj}}{0.8 f_{cc}} + \varepsilon_{co} = \frac{0.016 \times 1231 \times 0.0062}{0.8 \times 12.38} + 0.0038 = 0.0160$$

Από ανάλυση ροπών – καμπυλοτήτων προκύπτει $\varphi_y = 0.013\ m^{-1}$ και $c_u = 0.214$ m.
Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής φ_u προκύπτει από τη σχέση (6.14).

$\varphi_u = \varepsilon_{cu} / c_u = 0.0160 / 0.214 = 0.078\ m^{-1}$

Άρα, η πλαστιμότητα καμπυλότητας μ_c της διατομής της πλαστικής άρθρωσης είναι:

$\mu_c = \varphi_u / \varphi_y = 0.078 / 0.013 = 6.03$

Επομένως, όπως και στην περίπτωση των υαλονημάτων παρατηρείται σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας.

6.7.4. Αύξηση αντοχής σε κάμψη

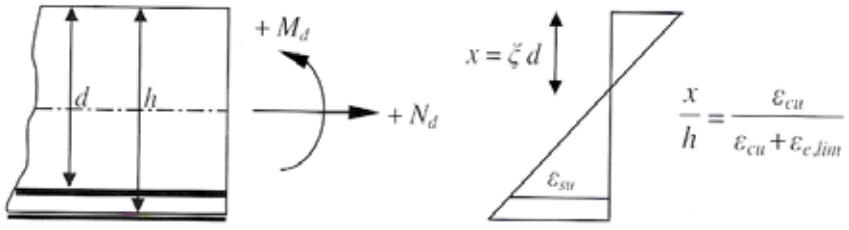
Όταν η καμπτική αντοχή ενός δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι μειωμένη λόγω ανεπαρκούς εφελκυόμενου οπλισμού, μπορεί να αυξηθεί με επικόλληση στην κάτω παρειά του 'υφασμάτων' από σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως για την ενίσχυση πλακών και δοκών.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι σε περίπτωση αστοχίας του σύνθετου υλικού λόγω μίας τυχηματικής δράσης, όπως π.χ. πυρκαγιάς, το προς ενίσχυση στοιχείο να αναλαμβάνει ασφαλώς τουλάχιστον τα μόνιμα φορτία του. Για το λόγο αυτό συνιστάται να μην αυξάνεται η καμπτική αντοχή του στοιχείου περισσότερο από 50% σε σχέση με την αρχική αντοχή του.

Η σύνδεση του υπάρχοντος στοιχείου με τις στρώσεις του σύνθετου υλικού της ενίσχυσης θεωρείται μονολιθική, με το ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σαν πρόσθετος εξωτερικός οπλισμός. Ο υπολογισμός της αύξησης της καμπτικής αντοχής του στοιχείου γίνεται με θεώρηση μίας μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης του σύνθετου υλικού $\varepsilon_{e,lim}$, πέρα από την οποία το σύνθετο υλικό αστοχεί με αποκόλληση από την παρειά του ενισχυόμενου στοιχείου. Η $\varepsilon_{e,lim}$ λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ του 33 - 50% της παραμόρφωσης θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς. Το σύνηθες εύρος των τιμών της $\varepsilon_{e,lim}$ είναι από 3.5 έως $9^{o}/_{oo}$,ενώ μία ενδεικτική τιμή που μπορεί να χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της ενίσχυσης σε περίπτωση που δεν διαθέτουμε επαρκέστερα στοιχεία είναι $\varepsilon_{e,lim} = 6^{o}/_{oo}$, ανεξάρτητα από το είδος του ινοπλισμένου πολυμερούς.

Προκειμένου να αποφευχθεί η ψαθυρή αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος ($\varepsilon_c \le \varepsilon_{cu} = 3.5^{o}/_{oo}$) επιλέγουμε τόσες στρώσεις σύνθετου υλικού, ώστε στην οριακή κατάσταση αστοχίας της ενισχυμένης διατομής, η παραμόρφωση του υφιστάμενου εφελκυόμενου οπλισμού να είναι τουλάχιστον ίση με την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα και η παραμόρφωση του ινοπλισμένου πολυμερούς ίση με την $\varepsilon_{e,lim.}$ Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12, αυτό εξασφαλίζεται όταν $\xi > \varepsilon_{cu}\,(h / d) / (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{e,lim})$, όπου h και d είναι το γεωμετρικό και το στατικό ύψος της διατομής, αντίστοιχα.

Η αποδοτικότητα της ενίσχυσης της καμπτικής αντοχής με χρήση 'υφασμάτων' ινοπλισμένου πολυμερούς, είναι δυνατή μόνο εφόσον έχει εξασφαλιστεί η επάρκεια του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων στην περιοχή απόληξης του 'υφάσματος' μέσω κατάλληλης αγκύρωσης των στρώσεων του σύνθετου υλικού στο υφιστάμενο στοιχείο, η οποία καλό είναι να γίνεται στη θλιβόμενη ζώνη της διατομής. Ενδεχόμενη ανεπάρκεια του μηχανισμού αυτού, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του συστήματος της ενίσχυσης με αποκόλληση από το ενισχυόμενου στοιχείο, λόγω υπερβολικής συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα του μανδύα σύνθετου υλικού.



Σχήμα 6.12 Επιθυμητή οριακή κατάσταση αστοχίας ενισχυμένης διατομής.

Οι γενικοί κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας της ενίσχυσης είναι οι εξής:

· Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται περισσότερες στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς μικρότερου πάχους αντί για λιγότερες στρώσεις μεγαλύτερου πάχους, αφού έτσι ικανοποιείται ευκολότερα το συμβιβαστό των παραμορφώσεων χωρίς σημαντική επιβολή τάσεων στο σύνθετο υλικό. Συνιστάται ο αριθμός των στρώσεων να μην υπερβαίνει τις πέντε.

· Δεδομένου ότι τα σύνθετα υλικά διατίθενται κατά κανόνα σε ρολά μεγάλου σχετικά μήκους, συνιστάται να αποφεύγεται η τοποθέτηση επικαλυπτόμενων φύλλων ινοπλισμένου πολυμερούς κατά μήκος του ενισχυόμενου στοιχείου, αλλά να χρησιμοποιούνται ενιαία 'υφάσματα' .
· Προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από το στοιχείο, η απόσταση του 'υφάσματος' από το άκρο της διατομής του ενισχυόμενου στοιχείου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την επικάλυψη σκυροδέματος της πλησιέστερης προς το άκρο παράλληλης ράβδου σιδηροπλισμού.
· Για την καλύτερη αγκύρωση του ινοπλισμένου πολυμερούς στο στοιχείο μπορούν να χρησιμοποιούνται εγκάρσιες λωρίδες σύνθετου υλικού ή γωνιακά. Αντίθετα, πρέπει να αποφεύγεται η αγκύρωση του υλικού με διάνοιξη οπών, γιατί έτσι μειώνεται σημαντικά η αντοχή στα σημεία αυτά.
· Όταν χρησιμοποιούνται παράλληλα 'κολάρα' σύνθετου υλικού, η απόσταση μεταξύ τους δεν πρέπει να υπερβαίνει το μικρότερο μήκος από το πενταπλάσιο του πάχους του στοιχείου και το 20% της απόστασης μεταξύ των σημείων μηδενισμού του διαγράμματος των ροπών κάμψεως κατά μήκος του στοιχείου.

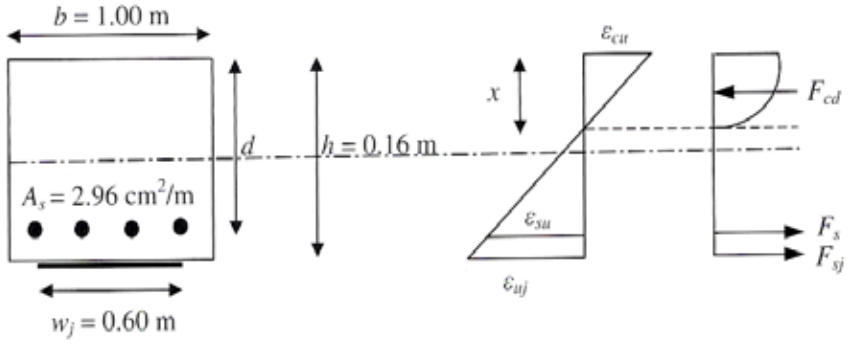
6.7.5. Παράδειγμα ενίσχυσης πλάκας με μανδύα σύνθετων υλικών

Θεωρούμε πλάκα πάχους h = 16 cm, η οποία ενισχύεται στην κάτω παρειά της με δύο στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού από υαλονήματα (Σχήμα 6.13). Ο μανδύας είναι τοποθετημένος σε λωρίδες (strips) με πλάτος w_j = 60 cm. Ο υπάρχων εφελκυόμενος οπλισμός της πλάκας είναι Ø8/17 (A_s = 2.96 cm^2/m) και η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι c = 2 cm. Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι C16/20 και του χάλυβα S500. Το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών του σύνθετου υλικού είναι E_f = 60 GPa και το πάχος μίας στρώσης ινοπλισμένου πολυμερούς είναι t_j = 0.6 mm. Επίσης η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού είναι $\varepsilon_{e,lim} = 7^o/_{oo}$ Ζητείται να υπολογιστεί η αύξηση της ροπής αντοχής της πλάκας λόγω του μανδύα του σύνθετου υλικού θεωρώντας ότι η καμπτική ροπή λόγω ιδίου βάρους της πλάκας είναι μικρότερη από τη ροπή ρηγμάτωσης οπότε η αρχική παραμόρφωση λόγω ιδίου βάρους είναι αμελητέα.

Η επίλυση γίνεται με δοκιμές έως ότου ικανοποιηθεί η εξίσωση ισορροπίας των δυνάμεων που ασκούνται στη διατομή

$$F_{cd} = F_s + F_{sj} \qquad (6.42)$$

όπου F_{cd} είναι η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος, F_s η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα του σιδηροπλισμού και F_{sj} η εφελκυστική δύναμη του μανδύα σύνθετου υλικού.



Σχήμα 6.13 Οριακή κατάσταση αστοχίας πλάκας ενισχυμένης με δύο στρώσεις μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς.

Η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος F_{cd} δίνεται από τη σχέση:

$$F_{cd} = \alpha\ 0.85\ f_{cd}\ \chi\ b \qquad (6.43)$$

όπου α είναι ο συντελεστής πληρώσεως, f_{cd} η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος, χ το βάθος της θλιβόμενης ζώνης και b το πλάτος της διατομής της πλάκας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θεωρούμε μοναδιαίο πλάτος οπότε b = 1.00 m.
Ο συντελεστής πληρώσεως α υπολογίζεται ως συνάρτηση της θλιπτικής παραμόρφωσης αστοχίας της άνω παρειάς του σκυροδέματος ε_{cu}

$$\alpha = \varepsilon_{cu}\ (6 - \varepsilon_{cu}) / 12 \qquad \text{για } \varepsilon_{cu} < 2^{o}/_{oo} \qquad (6.44)$$

$$\alpha = 3\ \varepsilon_{cu} - 2 / 3\ \ \varepsilon_{cu} \qquad \text{για } 3.5^{o}/_{oo} \geq \varepsilon_{cu} \geq 2^{o}/_{oo} \qquad (6.45)$$

Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13, το βάθος της θλιβόμενης ζώνης είναι:

$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{uj}}\, h \qquad (6.46)$$

Η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα του σιδηροπλισμού F_s εξαρτάται από την παραμόρφωση αστοχίας του χάλυβα ε_{su}

$F_s = A_s E_s \varepsilon_{su}$ για $\varepsilon_{su} < \varepsilon_{syd}$ (6.47)

$F_s = A_s f_{yd}$ για $\varepsilon_{su} \geq \varepsilon_{syd}$ (6.48)

όπου E_s = 200 Gpa είναι το μέτρο ελαστικότητας, f_{yd} η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής και ε_{syd} η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα, αντίστοιχα.
Η εφελκυστική δύναμη του μανδύα σύνθετου υλικού F_{sj} υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{sj} = n\, t_j\, w_j\, E_f\, \varepsilon_{uj} \qquad (6.49)$$

όπου n είναι ο αριθμός των στρώσεων του σύνθετου υλικού.

Με διαδοχικές δοκιμές βρίσκουμε ότι στην οριακή κατάσταση αστοχίας $\varepsilon_{cu} = 3.5^{o}/_{oo}$, $\varepsilon_{uj} = 6.52\,^{o}/_{oo} \leq \varepsilon_{e,lim} = 7\,^{o}/_{oo}$ και $\varepsilon_{su} = 5.02\,^{o}/_{oo} \geq \varepsilon_{syd} = 2.17\,^{o}/_{oo}$. Επίσης α = 0.81 και χ = 0.056 m. Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις (6.43), (6.48) και (6.49) έχουμε F_{cd} = 410.28 KN, F_s = 128.70 KN και F_{sj} = 281.58 KN, οπότε ικανοποιείται η εξίσωση ισορροπίας (6.42).

Η ροπή αντοχής υπολογίζεται ως προς την κάτω παρειά της ενισχυμένης διατομής αμελώντας το πάχος του μανδύα σύνθετου υλικού:

$M_{Rd} = F_{cd}\,(h - a) - F_s\,(h - d)$ (6.50)

όπου a είναι η απόσταση της θλιπτικής δύναμης F_{cd} από την άνω παρειά του σκυροδέματος και d το στατικό ύψος της διατομής. Είναι: d = h – c – 0.8/2 = 13.6 cm. Επίσης a = ζ'χ όπου

$\zeta' = 8 - \varepsilon_{cu} / 4\,(6 - \varepsilon_{cu})$ για $\varepsilon_{cu} < 2\,^{o}/_{oo}$ (6.51)

$\zeta' = \varepsilon_{cu}\,(3\,\varepsilon_{cu} - 4) + 2 / 2\,\varepsilon_{cu}\,(3\,\varepsilon_{cu} - 2)$ για $3.5^{o}/_{oo} \geq \varepsilon_{cu} \geq 2^{o}/_{oo}$ (6.52)

Αντικαθιστώντας στη σχέση (6.52) έχουμε ζ' = 0.416 οπότε a = 0.023 m.
Άρα

M_{Rd} = 410.28x(0.16 – 0.023) – 128.70x(0.16 – 0.136) =
= 53.02 KNm

Χωρίς το μανδύα του σύνθετου υλικού η ροπή αντοχής της διατομής υπολογίζεται με βάση τους πίνακες CEB

$$\omega = \frac{A_s}{A_c}\frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 0.0887 \rightarrow \mu_{Rd} = 0.084$$

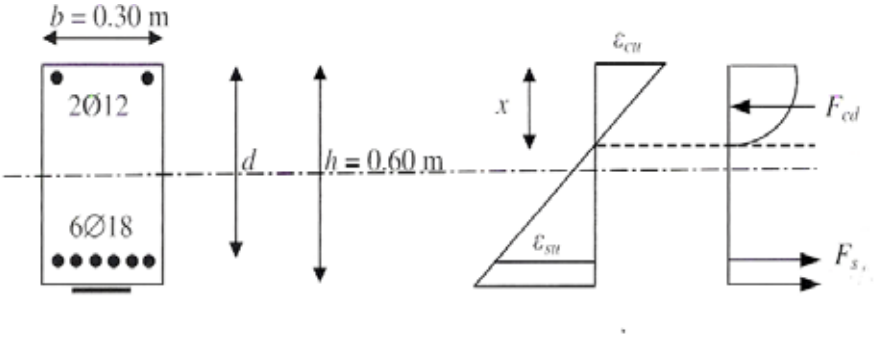
οπότε

$$M_{Rd} = \mu_{Rd}\, b\, d^2\, f_{cd} = 16.57 \text{ KNm}$$

Επομένως, η χρήση δύο στρώσεων μανδύα σύνθετου υλικού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καμπτικής αντοχής της διατομής κατά 220%.

6.7.6. Παράδειγμα ενίσχυσης δοκού με ελάσματα σύνθετων υλικών

Θεωρούμε αμφιέρειστη δοκό μήκους l = 7 m και διαστάσεων 30 cm x 60 cm (Σχήμα 6.14), η οποία διαθέτει στο άνοιγμα εφελκυόμενο οπλισμό 6Ø18 (A_s = 15.26 cm^2), θλιβόμενο οπλισμό 2Ø12 (A_s = 2.26 cm^2) και συνδετήρες Ø8/20. Η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι c = 2.5 cm, η ποιότητα του σκυροδέματος C20/25 και του χάλυβα S500. Τα φορτία σχεδιασμού της δοκού είναι g_{sd} = 17 KN/m (συμπεριλαμβανομένου του ιδίου βάρους) και q_{sd} = 25 KN/m. Η δοκός πρόκειται να ενισχυθεί με ελάσματα σύνθετου υλικού πλάτους w_j = 7.5 cm, πάχους tj = 1.2 mm, μέτρου ελαστικότητας E_f = 235 GPa και μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης $\varepsilon_{e,lim}$ = 5 $^o/_{oo}$. Ζητείται να υπολογιστεί ο αριθμός των ελασμάτων σύνθετου υλικού ώστε το κινητό φορτίο σχεδιασμού της δοκού να αυξηθεί σε 35 KN/m. Για τους υπολογισμούς να θεωρηθεί ότι η καμπτική ροπή κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης της δοκού.



Σχήμα 6.14 Οριακή κατάσταση αστοχίας δοκού ενισχυμένης με ελάσματα σύνθετου υλικού.

Επειδή η ροπή κάμψης κατά τη διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης της δοκού, πρέπει να υπολογιστεί η αρχική παραμόρφωση λόγω μονίμων φορτίων. Η ροπή κάμψης στο μέσον του ανοίγματος είναι $M_o = g_{sd}\, l^2 / 8$ = 104.13 KNm. Λόγω ισορροπίας η ροπή αυτή πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων ως προς το κέντρο βάρους του εφελκυόμενου χάλυβα.

$$M_o = F_{cd}\,(d - a) + F_{s2}(d - d_2) \qquad (6.53)$$

όπου d = 60 – 2.5 – 0.8 – 1.8/2 = 55.8 cm και d_2 = 2.5 + 0.8 + 1.8/2 = 4.2 cm.

Επίσης πρέπει να ισχύει η εξίσωση ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων

$$F_{cd} + F_{s2} = F_{sl} \quad (6.54)$$

Αντίστοιχα, το βάθος της θλιβόμενης ζώνης είναι:

$$(6.55) \qquad x_o = \frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{co} + \varepsilon_{so}} d$$

όπου ε_{co} και ε_{so} είναι η αρχική παραμόρφωση της άνω παρειάς του σκυροδέματος και του εφελκυόμενου χάλυβα, αντίστοιχα. Επιλύοντας τις εξισώσεις (6.53) έως (6.55) με τη βοήθεια των εξισώσεων (6.43), (6.44), (6.46), (6.47) και κάνοντας διαδοχικές δοκιμές βρίσκουμε: $\varepsilon_{co} = 0.60\ ^{o}/_{oo}$, $\varepsilon_{so} = 0.80\ ^{o}/_{oo}$, $\chi_o = 0.24$ m, $F_{cd} = 220.3$ KN, $F_{sl} = 242.7$ KN και $F_{s2} = 22.4$ KN. Επίσης η παραμόρφωση στην ακραία εφελκυόμενη ίνα της διατομής λόγω συμβιβαστού των παραμορφώσεων είναι:

$$(6.56) \qquad \varepsilon_o = \frac{h - x_o}{x_o} \varepsilon_{co} = \frac{0.60 - 0.24}{0.196} \times 0.00060 = 0.0009$$

Η απαιτούμενη ροπή αντοχής της διατομής μετά την ενίσχυση είναι:

$M_{Rd} = (g_{sd} + q_{sd})\ l^2 / 8 = 52x7^2 / 8 = 318.50$ KNm. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (6.42) έως (6.48) με δοκιμές βρίσκουμε ότι στην οριακή κατάσταση αστοχίας $\varepsilon_{cu} = 3.5\ ^{o}/_{oo}$, $\varepsilon_{uj} = \varepsilon_{cu}\ (h - \chi) / \chi - \varepsilon_o = 3.6\ ^{o}/_{oo} \leq \varepsilon_{e,lim} = 5\ ^{o}/_{oo}$, και $\varepsilon_{su} = 3.9\ ^{o}/_{oo} \geq \varepsilon_{syd} = 2.17\ ^{o}/_{oo}$. Επίσης $\chi = 0.263$ m, $F_{cd} = 724.6$ KN, $F_{sl} = 663.5$ KN, $F_{s2} = 98.3$ KN, n = 2 και $F_{sj} = 159.4$ KN. Ακόμα βρίσκουμε ότι η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής είναι MRd = 382.37 KNm > 318.50 KNm. Επομένως, για την καμπτική ενίσχυση της δοκού απαιτούνται 2 ελάσματα σύνθετου υλικού.

Η θέση πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης l_b του σύνθετου υλικού βρίσκεται εκεί όπου η τιμή της συνολικής εφελκυστικής δύναμης που καταπονεί τη διατομή είναι ίση με τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει ο χάλυβας μόνος του $A_s\ f_{yd}$. Η συνολική εφελκυστική δύναμη ισούται με το άθροισμα $F_s + F_{sj}$ οπότε

$$(6.57) \qquad A_s f_{yd} = A_s E_s \varepsilon_s + n\ t_j\ w_j\ E_f \varepsilon_j = F_{sj} \left(1 + \frac{A_s E_s \varepsilon_s}{n t_j w_j E_f \varepsilon_j}\right)$$

Θεωρώντας ότι $\varepsilon_s \approx \varepsilon_j$, η σχέση (6.57) γράφεται:

$$A_s f_{yd} = F_{sj} \left(1 + \frac{A_s E_s}{n t_j w_j E_f}\right)$$

(6.58)

Αντικαθιστώντας στη σχέση (6.58) A_s = 15.26 cm^2 , f_{yd} = 43.48 KN/cm^2 , E_s = 200 GPa , n = 2, t_j = 0.12 cm, w_j = 7.5 cm και E_f = 235 GPa έχουμε F_{sj} = 84.53 KN.

Η δύναμη αγκύρωσης του σύνθετου υλικού F_{sj} , υπέρβαση της οποίας συνεπάγεται αποκόλληση των ελασμάτων, αυξάνεται με το μήκος αγκύρωσης l_b. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι πέρα από μία οριακή τιμή του μήκους αγκύρωσης $l_{b,max}$ η δύναμη αγκύρωσης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη και ίση με $F_{sj,max}$. Είναι:

(6.59) $$F_{sj,max} = \frac{c_1 k_c k_b w_j}{\gamma_b} \sqrt{f_{ctm} E_f t_j}$$

Είναι c_1 = 0.64, k_c ο συντελεστής συμπύκνωσης του σκυροδέματος που μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 1.0 για κανονική συμπύκνωση, $k_b \approx 1.2$, f_{ctm} = 2.2 MPa και γ_b = 1.5. Επομένως $F_{sj,max}$ = 30.25 KN. Επίσης η οριακή τιμή του μήκους αγκύρωσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

(6.60) $$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_j}{c_2 f_{ctm}}}$$

Είναι c_2 = 2.0 οπότε αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6.60) έχουμε $l_{b,max}$ = 253 mm ≈ 25 cm. Επομένως το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης των ελασμάτων σύνθετου υλικού ώστε να αποτραπεί η αποκόλλησή τους είναι 25 cm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Στατική & Αντισεισμική αναβάθμιση κτιρίου θεάτρων Παλλάς-Αλίκη στην Αθήνα

Γ. Γρ. Πενέλης
Καθηγητής, Τομέας Κατασκευών Α.Π.Θ.
Γρ. Γ. Πενέλης
Πολιτ. Μηχανικός Α.Π.Θ, Msc, Dic, υπ. Διδάκτωρ
Κ-Π. Πασχαλίδης
Πολιτ. Μηχανικός Α.Π.Θ., υπ. Διδάκτωρ
Χ .. *Δρακόπουλος*
Πολιτ. Μηχανικός Α.Π.Θ. Msc Ε.Μ.Π

Λέξεις κλειδιά: Αντισεισμική ενίσχυση, στατική αποκατάσταση, αντισεισμική αναβάθμιση.

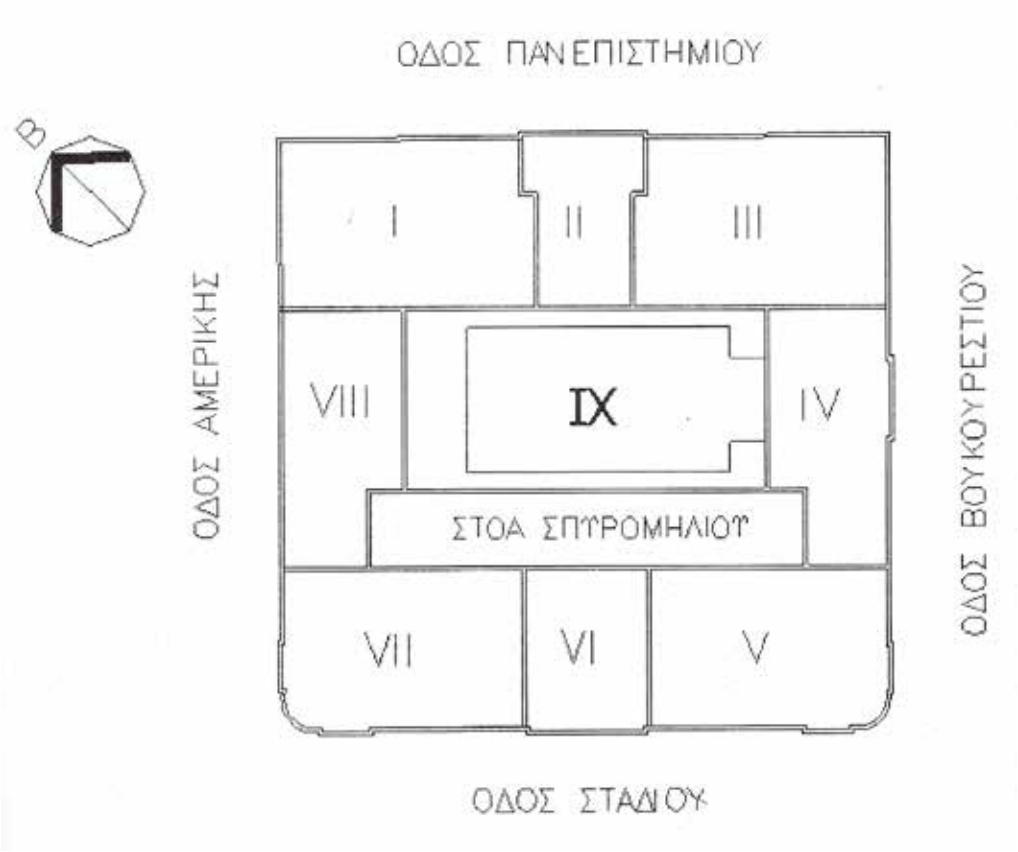
ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στόχος της παρούσας ανακοίνωσης είναι η παρουσίαση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε κατά την στατική και αντισεισμική αναβάθμιση του κτιρίου των θεάτρων Παλλάς Αλίκη στην Αθήνα προκειμένου αυτό αφ' ενός να ανταποκρίνεται στις λειτουργικές απαιτήσεις ενός σύγχρονου πολυθεατρικού συγκροτήματος και αφ' ετέρου να καλύπτει τις απαιτήσεις των σύγχρονων Κανονισμών Ο/Σ Χάλυβα και Αντισεισμικών Κατασκευών. Με δεδομένο ότι πρόκειται για διατηρητέο κτίριο στο ιστορικό κέντρο της Αθήνας, κρίσιμη παράμετρο στις επιμέρους επιλογές αποτέλεσαν επίσης οι απαιτήσεις διατήρησης όπως αυτές υπαγορεύθηκαν από το Υ.Π.ΠΟ.

7.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Το κτίριο των θεάτρων Παλλάς - Αλίκη αποτελεί τμήμα του συγκροτήματος του Μεγάρου του Μετοχικού Ταμείου Στρατού στο κέντρο των Αθηνών (Σταδίου ~ Παν/μίου), το οποίο αποτελεί ένα οικοδομικό τετράγωνο εμβαδού 1Ο.000Μ2 με κτισμένη συνολική επιφάνεια 80.000M^2 περίπου. (Εικόνα 1). Το κτίριο των θεάτρων ,βρίσκεται στο κέντρο του οικοδομικού συγκροτήματος ως ανεξάρτητη στατική μονάδα που εξυπηρετείται όμως σε ορισμένες του λειτουργίες (Είσοδοι φουαγιέ) και από άλλες παράπλευρες οικοδομικές μονάδες του συγκροτήματος.

Το κτίριο κτίσθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1930 με φέροντα οργανισμό από Ο/Σ και δίκλινη μεταλλική στέγη που κάλυπτε την αίθουσα του θεάτρου. Περιελάμβανε μία αίθουσα κινηματοθεάτρου (ΠΑΛΛΑΣ) 1.500 θέσεων, κάτω από αυτήν μια αίθουσα καμπαρέ (Καμπαρέ <<Ν1ΑΧΙΜ») 'και μια σειρά καταστημάτων με όψη προς την Στοά Σπυρομήλιου (Εικόνα 2) και τέλος κάτω από την αίθουσα του Καμπαρέ τα Μηχανοστάσια (Εικόνα 3). Τόσο η αίθουσα του ΠΑΛΛΑΣ όσο και του ΜΑΧΙΜ περιελάμβαναν εξώστη και θεωρεία. Το Παλλάς κάλυπτε όλες τις απαιτήσεις ενός σύγχρονου θεάτρου της εποχής του σε κλιματισμό (πλένουμ), υποσκήνιο, μικρό πύργο σκηνής, παρασκήνια, καμαρίνια (Εικόνα 4). Κατά την δεκαετία του 1960 ο φέρων οργανισμός υπέστη μια σημαντική επέμβαση κατά την οποία αφαιρέθηκαν δύο σειρές υποστυλωμάτων (5+5) από την αίθουσα του καμπαρέ ΜΑΧΙΜ ώστε να δημιουργηθεί αίθουσα ελεύθερου ανοίγματος

15.70 για θέατρο 600 θέσεων, το θέατρο ΑΛΙΚΗ (Εικόνα 5). Έτσι το πάτωμα του ΠΑΛΛΑΣ κρατήθηκε με τη βοήθεια 5 νέων δίδυμων αμφιαρθρωτών πλαισίων από Ο/Σ με ελκυστήρες στην οροφή της τρίτης κύριας στάθμης, του μηχανοστασίου. Η επέμβαση αυτή έγινε από τον αείμνητο συνάδελφο καθηγητή Γ. Κορωναίο.

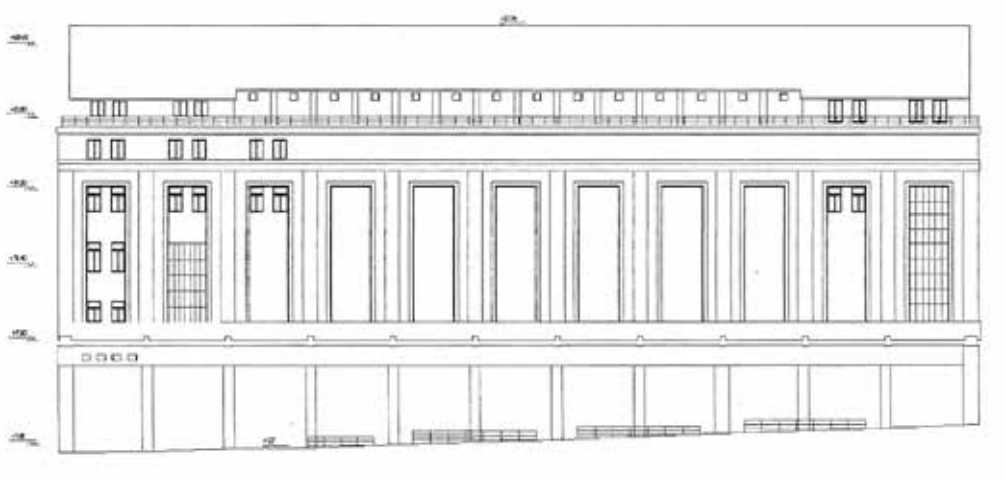


Εικόνα 1. Τοπογραφική διάταξη κινηματοθεάτρων. Με την μορφή αυτή λειτούργησε το συγκρότημα μέχρι προσφάτως.

7.2 ΤΕΧΝΙΚΉ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ - ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ

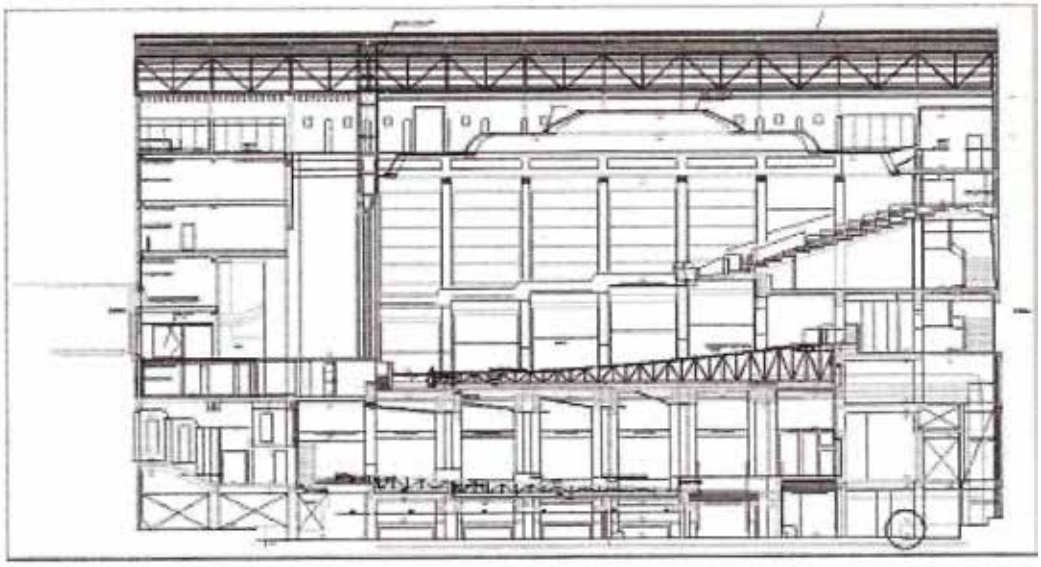
Πρόκειται για ένα κτίριο 55.09 χ 28.15 χ 32.0m που συντίθεται από τρεις βασικούς χώρους:

-Υπόγεια μηχανοστάσια: ύψος = 3.00m
-Θέατρο ΑΛΙΚΗ: ύψος = 7.00m
-Θέατρο ΠΑΛΛΑΣ: ύψος = 19.00m
-Στέγη: ύψος = 3.00m



Εικόνα 2. Όψη κινηματοθεάτρων από τη στοά Σπυρομήλιου

Μέχρι και την οροφή του ΑΛΙΚΗ ο φέρων οργανισμός (εξωτ. τοίχοι, στύλοι, δοκοί, πλάκες) συντίθεται από σκελετό Ο/Σ με πλήρη διαφράγματα στο ύψος των πατωμάτων. Από το πάτωμα του ΠΑΛΛΑΣ και άνω ο φέρων οργανισμός συντίθεται από δύο σειρές υποστυλωμάτων σε απόσταση 23.00ιη και δύο διαμήκεις εξωτερικούς τοίχους Ο/Σ με νευρώσεις υπό μορφή στύλων σε απόσταση 28.0ιη. Στις δύο κιονοστοιχίες οι οποίες συνδέονται με τους εξωτερικούς τοίχους με πλάκες στην στάθμη των θεωρείων και στην κεφαλή τους, δημιουργώντας έτσι δύο πλευρικά κλίτη κυκλοφορίας, εδράζεται η μεταλλική δικτυωτή στέγη από τη μία πλευρά με σταθερά έδρανα και από την άλλη κυλιόμενα. Τα δύο ανεξάρτητα μμεταξύ τους κλίτη συνδέονται στο μέσο περίπου του ύψους τους στο ένα άκρο της αίθουσας με τον εξώστη ο οποίος καλύπτει το 30% περίπου της αίθουσας ενώ προς το άλλο άκρο τους με το εξ οπλισμένου σκυροδέματος πλαίσιο της μπούκας σκηνής και τον πλαισιωτό τοίχο πέρατος του πύργου σκηνής.



Εικόνα 3. Κατά μήκος τομή

-Το σκυρόδεμα κατασκευής του κτιρίου βρέθηκε με βάση εκτεταμένες δοκιμές B160 / B225 (C12/15)
-Ο χάλυβας όπλισης ήταν κατηγορίας 8TI (8220), ο δε χάλυβας της μεταλλικής στέγης ήταν ST37
-Τέλος ο χάλυβας της μεταλλικής στέγης ήταν :ST 37
-Οι τοιχοποιίες πλήρωσης είχαν γίνει με τσιμεντότουβλα συμπαγή.

Η γεωμετρική αποτύπωση του φέροντος οργανισμού του κτιρίου έγινε με τις συμβατικές διαδικασίες αφού αφαιρέθηκαν οι πάσης φύσεως επενδύσεις και διασταυρώθηκε με όσα σχέδια αρχείου υπήρχαν στο Μ.Τ.Σ. Οι οπλισμοί των φερόντων στοιχείων προσδιορίστηκαν με τρεις διαδικασίες και διασταυρώθηκαν όπου αυτό ήταν εφικτό και έτσι και βαθμονομήθηκαν.
- Με επί τόπου αποκαλύψεις
- Με σχέδια και πίνακες οπλισμών αρχείου
- Με ανάδρομη ανάλυση του κτιρίου με βάση το DIN 1045/25.

Από την διασταύρωση των παραπάνω στοιχείων προέκυψε ότι ο οπλισμός των φερόντων στοιχείων στις θέσεις όπου υφίσταντο στοιχεία αρχείου βρέθηκε επί τόπου όπως προβλέπονταν στην αρχική μελέτη με ελάχιστες εξαιρέσεις, όπου είχαν γίνει τοπικές αλλαγές. Το ίδιο ίσχυσε και για τις διατομές της μεταλλικής δικτυωτής στέγης.

7.3 ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ

Με βάση την λεπτομερή αποτύπωση του φέροντος οργανισμού προέκυψαν τα εξής:



Εικόνα 4. Εσωτερική όψη ΠΑΛΛΑΣ πριν από την επέμβαση

(α) Το κτίριο δεν παρουσιάζει ρηγματώσεις συγκεκριμένης κλίσης που να υποδηλώνουν διαφορικές καθιζήσεις γεγονός άλλωστε αναμενόμενο δοθέντος ότι είναι θεμελιωμένο επί του Αθηναϊκού σχιστόλιθου.

(β) Από τους σεισμούς του 1981 και του 1999 παρουσίασε τις εξής βλάβες:

- Ρηγματώσεις οριζόντιες και κατακόρυφες στον πίσω τοίχο σκηνής ο οποίος είναι διαστάσεων 12,50 χ 12.5m χτισμένος από πλινθοδομή εντός πλέγματος δοκών - στύλων μικρής εγκάρσιας δυσκαμψίας. Έτσι ο τοίχος αυτός λειτούργησε ως πλάκα για τα φορτία σεισμού εκτός επιπέδου και ρηγματώθηκε τοπικός αποδιοργανώθηκε.
- Χιαστί μικρορηγματώσεις σε πλινθοδομές εγκάρσια δομημένες στο χώρο των παρασκηνίων, όπου οι δύο πτέρυγες ταλαντώθηκαν ανεξάρτητα η μία από την άλλη λόγω χαλαρής εγκάρσιας σύνδεσης στο χώρο του ΠΑΛΛΑΣ του όλου κτιρίου.



Εικόνα 5. Εσωτερική όψη ΑΛΙΚΗ πριν από την επέμβαση.

Κατά τα λοιπά το κτίριο συμπεριφέρθηκε πολύ καλά χωρίς εμφανείς βλάβες στον φέροντα οργανισμό.

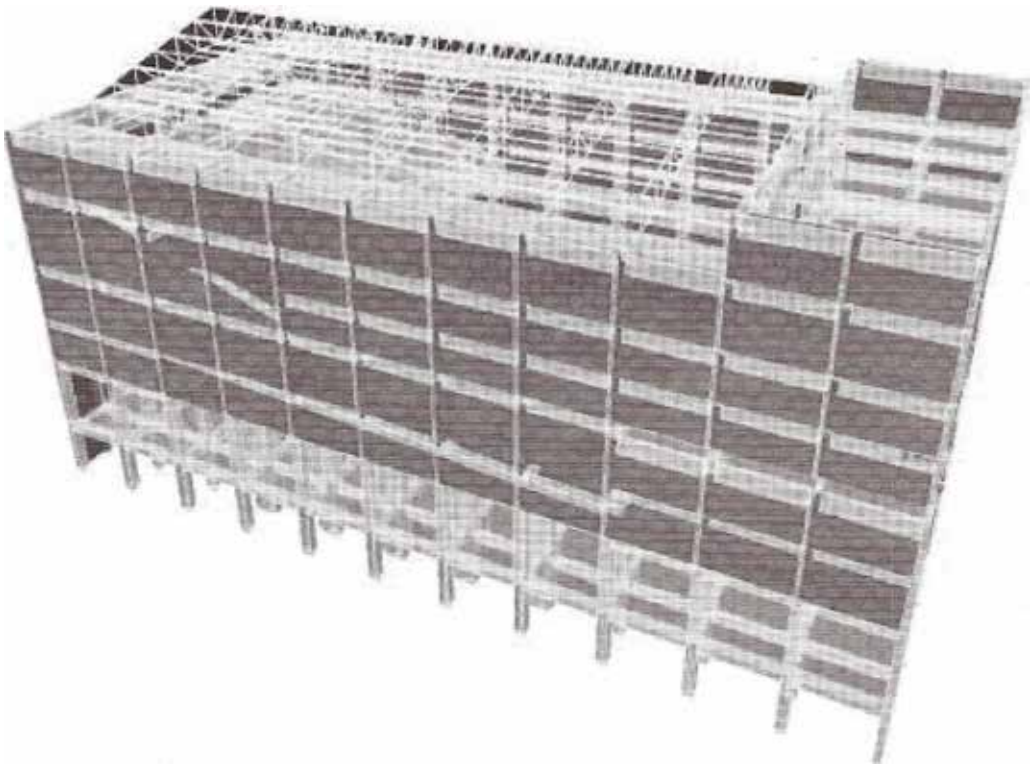
(γ) Από πλευράς γήρανσης το κτίριο παρουσίασε εκτεταμένες ρηγματώσεις και αποφλοιώσεις του σκυροδέματος ιδιαίτερα στους υπόγειους χώρους του μηχανοστασίου, λόγω οξείδωση ς των οπλισμών (υψηλός βαθμός ενανθράκωσης).

(δ) Η μεταλλική στέγη του κτιρίου ήταν, παρά την πλημμελή συντήρησή της, σε πολύ καλή κατάσταση χωρίς εκτεταμένες οξειδώσεις.

7.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ - ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ

Με βάση τα στοιχεία αποτύπωσης και διερεύνησης ποιότητας υλικών έγινε ανάλυση και διαστασιολόγηση του υφιστάμενου φορέα για τα μέχρι τότε φορτία λειτουργίας του κτιρίου με βάση τους ισχύοντες σήμερα Κανονισμούς ΕΚΩΣ 2000, ΕΑΚ 2000/2003 και EC3 για σεισμική καταπόνηση την προβλεπόμενη από τον ΕΑΚ 2000/2003 και συντελεστή συμπεριφοράς q = 2.0 (Εικόνα 6).

Η ανάλυση έγινε με την παραδοχή της πραγματικής δυσταίνιας για όλα τα οριζόντια στοιχεία άνω του πατώματος του ΠΑΛΛΑΣ ώστε να συνεκτιμηθεί στην ανάλυση η δυνατότητα ανεξάρτητης ταλάντωση ς των δύο διαμηκών κλιτών. Δηλαδή δεν εισήχθησαν στα επίπεδα αυτά διαφράγματα αλλά όλα τα οριζόντια στοιχεία προσομοιώθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία δεδομένης δυσταίνιας.



Εικόνα 6. Στατικό μοντέλο ανάλυσης υφισταμένου

.

Η ανάλυση έγινε με την φασματική ελασTLK11 δυναμική ανάλυση. Από την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση προέκυψαν τα εξής στοιχεία:

- Θεμελιώδης ιδιοπερίοδο Το = 0,50lsec.

- Η συμπεριφορά του Φέροντος Οργανισμού από Ο/Σ ήταν ικανοποιητική με μικρές υπερβάσεις.

- Η μεταλλική στέγη όπως είχε σχεδιασθεί και κατασκευασθεί για τα φορτία που έφερε (επικάλυψη με λαμαρίνα κυματοειδή + ψευδοροφή) παρουσίαζε εξάντληση φέρουσας ικανότητας στο επίπεδο του 90%.

- Η δυναμική καταπόνηση του πίσω τοίχου σκηνής εκτός επιπέδου (λειτουργία πλάκας) έδωσε μεγάλες αναπτυσσόμενες τάσεις ελκυσμού της τάξεως των 300 -:- 400 KN/M^2 (3 / 4kg / cm^2) τιμή η οποία πλήρως δικαιολογεί τις βλάβες του σεισμού του 1999.

Με βάση τα παραπάνω θα ήταν δυνατή η σεισμική αναβάθμιση του κτιρίου με πολύ μικρής κλίμακας επεμβάσεις. Όμως οι νέες λειτουργικές απαιτήσεις του έργου κατέστησαν κάτι τέτοιο ανέφικτο.

7.5 ΝΕΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Προκειμένου το συγκρότημα να ανταποκριθεί στις σύγχρονες λειτουργικές απαιτήσεις θεάτρων κατέστη αναγκαίο να γίνουν μια σειρά από ριζικές μεταβολές χωρίς όμως να μεταβάλλεται η όλη δομή λειτουργίας και η εξωτερική όψη του κτιρίου από την πλευρά της στοάς Σπυρομήλιου. Οι μεταβολές αυτές ήταν οι έξεις:

-Αύξηση του βάθους σκηνής κατά *5.10 m* εις βάρος της πλατείας.

-Αύξηση των διαστάσεων της μπούκας σκηνής

-Κατασκευή plaenuin στην πλατεία ΠΑΛΛΑΣ με άλλη κλίση από *την* αρχική (λόγω ορατότητας)

-Ηχητική προστασία τόσο εξωτερική όσο και μεταξύ των δύο αιθουσών με διπλά κολυμβητά σε silomere κελύφη.

-Δημιουργία σύγχρονου συστήματος κλιματισμού

-Ανάρτηση από τη στέγη κλιματισμού, ηχοπαγίδων, γεφυρών φωτισμού, μονωμένης ψευδοροφής

-Ανάρτηση από τη στέγη στην περιοχή της σκηνI1ς ανυψωτικών εγκαταστάσεων συνολικού φορτίου 1100 KN (110 ΤΟΝΝΟΙ) για τις σκηνικές ανάγκες.

-Δημιουργία πύργου σκηνής κατάλληλου για την υποδοχή σκηνικών όπερας.

-Επέκταση των κλιμακοστασίων προς τα υπόγεια για τη δημιουργία οδών διαφυγής (πυροπροστασία)

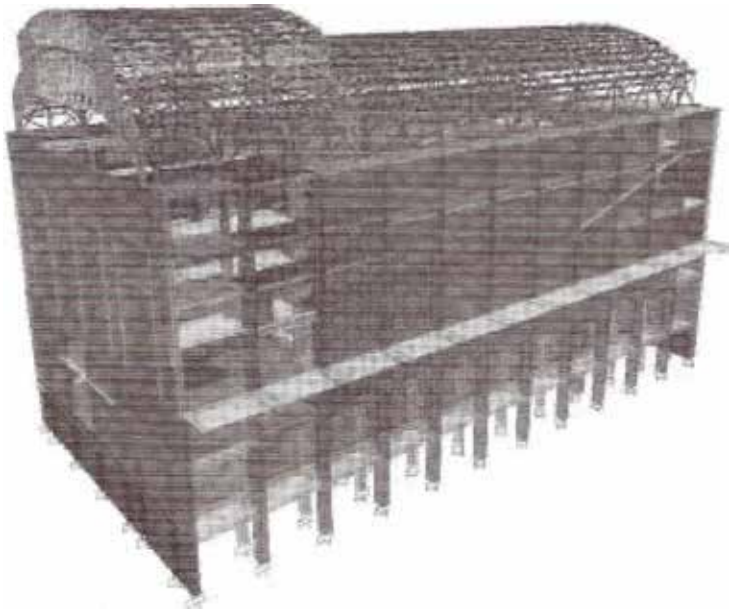
-Νέοι ανελκυσΤ11ρες

-Υαλοπετάσματα εισόδου

7.6 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ

Οι παραπάνω νέες λειτουργικές απαιτήσεις οδήγησαν στις παρακάτω επεμβάσεις στον φέροντα οργανισμό (Εικόνα 7).

-Καθαίρεση και ανακατασκευή της μεταλλικής στέγης με μορφή που να επιτρέπει μεγαλύτερη μπούκα σκηνής και δημιουργία πύργου σκηνής.
-Καθαιρέσεις στον υφιστάμενο φέροντα οργανισμό
-Νέες κατασκευές Ο/Σ συμπλήρωσης
-Ενίσχυση των περιμετρικών τοιχίων και τοιχοποιιών με μανδύες εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατάλληλα οπλισμένων πάχους 7 -:- 10εκ.
-Μανδύες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε δοκούς και στύλους που απαίτησαν ενίσχυση.
-Ενισχύσεις με FRP'S σε πλάκες και δοκούς που απαίτησαν ενίσχυση
-Ενισχύσεις με FRP'S σε πλάκες και δοκούς που απαίτησαν μικρής κλίμακας ενίσχυση.
-Ενίσχυση στη θεμελίωση



Εικόνα 7. Στατικό μοντέλο ανάλυσης αναβαθμισμένου.

7.7 ΑΝΑΛΥΣΗ, ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

1. *Υλικά επεμβάσεων*

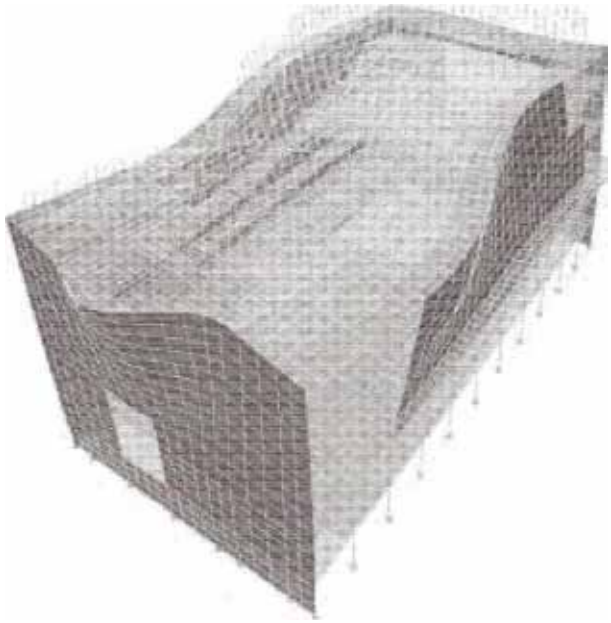
Τα επιλεγέντα υλικά επεμβάσεων είναι τα εξής:
Νέες κατασκευές Ο/Σ χυτές επί τόπου ή μανδύες Ο/Σ Gunite: *C20!25,* S500s
FRP'S: Ανθρακουφάσματα, Ανθρακοελάσματα
Χάλυβας μορφής FE 360 (UST 37-2)

2. Φορτία

Το όλο έργο αναλύθηκε για τα ειδικά φορτία που απαιτούσαν οι σύγχρονες λειτουργίες. Από πλευράς σεισμικών φορτίων η ανάλυση έγινε για τα σεισμικά φορτία που επιβάλλει ο ΕΑΚ *2000/2003* και για συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς
q = 3.0

3. Διαδικασία ανάλυσης

Η ανάλυση του φορέα έγινε με τη ελαστική δυναμική φασματική μέθοδο (Εικόνα 7,8).



Εικόνα 8. 4η Ιδιομορφή αναβαθμισμένου

Σημειώνεται ότι όλες οι πλάκες από το πάτωμα της πλατείας του ΠΑΛΛΑΣ και άνω προσομοιώθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία δεδομένης δυσταίνιας ώστε να καταστεί δυνατή η συνεκτίμηση της δυνατότητας ανεξάρτητης ταλάντωσης των δύο κλιτών (Εικόνα 9). Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα ανάλυσης.

(α) Για τα μόνιμα φορτία η ανάλυση έγινε με την παραδοχή ότι η έδραση της στέγης είναι αρθρωτή από την μία πλευρά και από την άλλη σε κύλιση. Με δεδομένη την τοξωτή μορφή του δικτυωτού ζευκτού με την συγκεκριμένη παραδοχή οι προς τα έξω ωθήσεις που μεταφέρονται στην κεφαλή των στύλων για τα μόνιμα φορτία είναι μηδενικές.

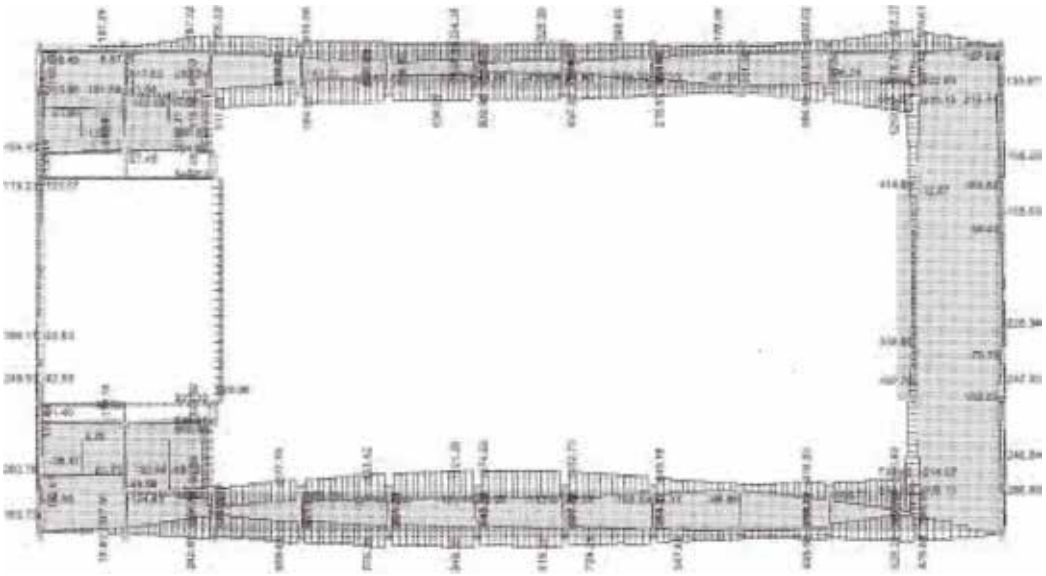
(β) Για τα ωφέλιμα φορτία που είναι μικρό ποσοστό των μονίμων η κυλιόμενη έδραση σταθεροποιείται με στόπερς και συνεπώς αναπτύσσονται ανεπιθύμητες μεν μικρές όμως ωθήσεις.

(γ) Για την περίπτωση σεισμικής καταπόνησης η σταθεροποίηση της κινητής έδρασης με στόπερς διασφαλίζει την συνεργασία σε μεγάλο βαθμό των δύο κλιτών και οι οριζόντιες αδρανειακές δυνάμεις της στέγης μ\μεταφέρονται αντιμετρικά και στα δύο κλίτη με

αποτέλεσμα τη δραστική μείωση της επιπόνησης αφού αυτή μοιράζεται στα δύο. Λειτουργεί δηλαδή η στέγη οιωνοί ως διάφραγμα.

4. Αποτελέσματα ανάλυσης – διαστασιολόγησης.

Από την ανάλυση - διαστασιολόγηση προέκυψαν οι εξής βασικές επεμβάσεις.



Εικόνα 9. Αξονικές καταπονήσεις λόγω σεισμού εξώστη αναβαθμισμένου

(α) Ενίσχυση με διαμήκεις «ελκυστήρες» των πλακών των θεωρείων και των πλακών στέψης λόγω
περιορισμένης διαφραγματικής λειτουργίας.

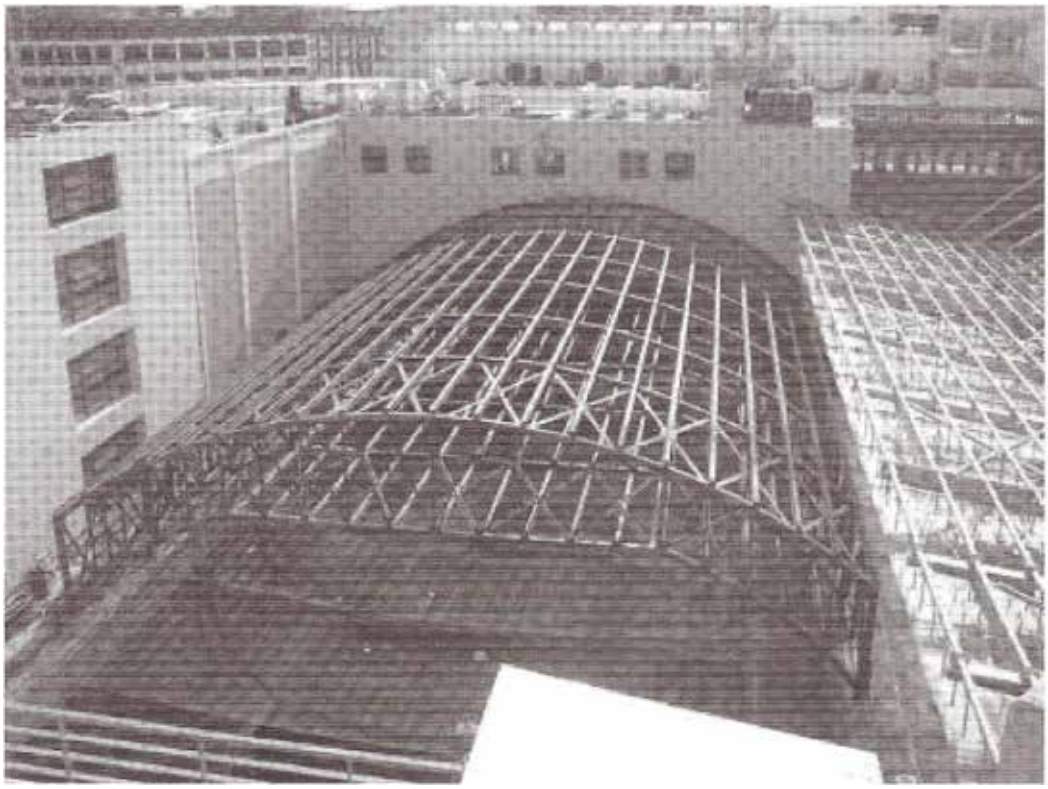
(β) Ενίσχυση με ελκυστήρες εγκαρσίως του πλαισίου της παλαιάς μπούκας σκηνής.

(γ) Ενίσχυση με οπλισμένες νευρώσεις οριζόντιες και κατακόρυφες του πίσω τοίχου σκηνής.

(δ) Ενισχύσεις επί μέρους δομικών στοιχείων που λόγω νέων μεγάλων φορτίων χρειάσθηκε να ενισχυθούν (π.χ. υποσκήνιο ΠΑΛΛΑΣ)

7.8 ΕΚΤΕΛΕΣΗ

Το έργο αφού έλαβε όλες τις κατά Νόμο άδειες άρχισε να εκτελείται και ήδη βρίσκεται εν τω περατούσθαι. Ο συνολικός προϋπολογισμός ανήλθε περίπου στα 30.000.000€ ενώ ο προϋπολογισμός για τις επεμβάσεις στον Φέροντα Οργανισμό έφθασε τα 4.500.000€. Σημειώνεται ότι το έργο παρουσίασε ιδιαίτερες δυσκολίες εκτέλεσης λόγω της ήδη ολοκλήρωσης των εργασιών στα λοιπά 8 κτίρια του οικ. τετραγώνου και μη ύπαρξης διαθέσιμων εργοταξιακών χώρων (Εικόνα 10).



Εικόνα 10. Φάση συναρμολόγησης νέας μεταλλικής Στέγης.

7.9 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

-Κύριος του Έργου: Μ.Τ.Σ.

-Παραχωρησιούχος: PICAR Α.Ε.

-Διοίκηση Έργου: ΔΙΑΓΩΝΙΟΣ ΑΕΤΕ

-Αρχιτεκτονική Μελέτη: Κίζης & Συνεργάτες

-Στατική Μελέτη: Γ. & Γ. Πενέλης Σύμβουλοι Μηχανικοί

-*Η/* Μ Μελέτη: Κ. Χανιώτης

-Ηχομονώσεις - Ακουστικές Μελέτες: Ψαρράς

-Μελέτη Σκηνής: ΒΒΗ

-Θεατρική Μελέτη: Γαβαλάς - Μουρίκης

-Εκτέλεση: ΤΕΡΝΑ Α.Ε.

7.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

(i) Σε διατηρητέα κτίρια καλοσχεδιασμένα και δοκιμασμένα στο σεισμό είναι δυνατή η αντισεισμική αναβάθμιση με ήπιες επεμβάσεις εφ' όσον οι λειτουργικές τους απαιτήσεις δεν αυξηθούν.

(ίί) Όταν όμως οι λειτουργικές απαιτήσεις υποστούν δραστικές μεταβολές τότε οι μεγάλης κλίμακας επεμβάσεις στον φέροντα οργανισμό είναι αναπόδραστες.

(ίίί) Κατά συνέπεια το κρίσιμο πρόβλημα που τίθεται κάθε φορά είναι η εξισορρόπηση ανάμεσα στις αρχές της διατήρησης από τη μια και στην βελτίωση των λειτουργικών δυνατοτήτων του έργου από την άλλη ώστε να καθίσταται ελκυστική η επένδυση συνεπώς δυνατή η αναβάθμιση του κτιρίου.

(ίν) Σε κτίρια αυτού του μεγέθους και της πολυπλοκότητας είναι απαραίτητη η συνεχής συνεργασία προσώπων πολλών ειδικοτήτων, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα του συντονισμού τόσο κατά τη φάση της μελέτης όσο και κατά τη φάση της εκτέλεσης ιδιαίτερα δύσκολο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος (25 – 27 Οκτωβρίου 2006, Αλεξανδρούπολη) βιβλίο εισηγήσεων, τόμος Α.

- Μακρόπουλος Κ. , Φυσικές Καταστροφές : Σεισμοί και μέτρα προστασίας.
- Πενέλης Γ. Γρ. Πενέλης Γρ. Γ. Πασχαλίδης Κ. Π. Δρακόπουλος Χ. (σελ: 514-525)

Στατική και αντισεισμική αναβάθμιση κτιρίου Θεάτρων Παλλάς – Αλίκη, στην Αθηνά.

2. Στέφανος Η. Δρίτσος, Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πάτρα 2005.

- (σελ: 13-33, 67-70, 101-108, 113-122, 124-130, 136-144)

3. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας. (Θεσσαλονίκη Μακεδονία Παλλάς 28 – 30 Νοεμβρίου 2001) τόμος Β.

- (σελ: 91-95)

4. Κυριάκου Κ. Αναστασιάδη, Αντισεισμικές Κατασκευές, τόμος Α. Εκδοτικός οίκος : Π.Ζήτη κ Σια Ο.Ε. Θεσσαλονίκη 2001.

- (σελ: 11-17, 19-25, 27-28)

5. Κ. Α. Δεμίρη, Τεχνική Γεωλογία (γεωλογικοί σχηματισμοί) μέρος Α. Εκδοτικός οίκος : University studio press. Θεσσαλονίκη 1993.

- (σελ: 147, 150, 154, 157-159, 160-163, 164-165)

6. Θανάσης Χ. Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά. 5^{η} έκδοση Πάτρα, Νοέμβριος 2002.

- (σελ: 231-233)

7. Ενίσχυση Σκυροδέματος Με Σύνθετα Πολυμερή, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, ΕΒΕΑ (Ακαδημίας 7) 18 Μαΐου 2000.

- (συγκρίσεις, προσθήκες στοιχείων.)

8. Γεώργιος Α. Βιάζης, Συλλογή Γνώσεων Δομικά Υλικά – Οικοδομική , Κονίες – Κονιάματα, Αθήνα 2005.

- (σελ: Μέρος Δ 1 – 20)