

**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**

**Σεισμική Αξιολόγηση – Ενίσχυση Γεφυρών
με Νέες Μεθόδους**

Κ. Σπυράκος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2002

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	4
2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΓΕΦΥΡΩΝ	6
2.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Κατάλληλες για τα Ελληνικά Δεδομένα.....	6
2.1.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Βάθρων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα.....	6
2.1.2 Μέθοδοι Ενίσχυσης της Κεφαλής των Βάθρων.....	10
2.1.2.1 Μείωση των Σεισμικών Δράσεων στην Κεφαλή του Βάθρου.....	11
2.1.2.2 Αύξηση της Αντοχής της Κεφαλής του Βάθρου	11
2.1.3 Μέθοδοι Ενίσχυσης της Περιοχής των Κόμβων Κεφαλής Δοκού – Υποστολώματος.....	13
2.1.4 Μέθοδοι Ενίσχυσης της Ανωδομής	13
2.1.4.1 Ενίσχυση των Αρμών	13
2.1.4.2 Καμπτική Αντοχή της Ανωδομής.....	15
2.2 Σύγκριση Παραδοσιακών και Νέων Μεθόδων Ενίσχυσης	17
2.2.1 Συμπεριφορά Κατασκευής Ενισχυμένης με Παραδοσιακές Μεθόδους	17
2.2.2 Συμπεριφορά Κατασκευής Ενισχυμένης με Σύνθετα Υλικά.....	18
3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ CALTRANS.....	18
4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ	21
4.1 Απαιτήσεις Κανονισμού.....	21
4.1.1 Ελάχιστος Διαμήκης Οπλισμός Θλιβομένων Στοιχείων	21
4.1.2 Τοιχοειδή Βάθρα.....	22
4.1.3 Οπλισμός Περίσφιγξης εντός Περιοχών Σχηματισμού Πλαστικής Άρθρωσης	22
4.1.4 Λογισμός Θλιβομένων Ράβδων Διαμήκους Οπλισμού στις Περιοχές Σχηματισμού Πλαστικής Άρθρωσης Συστημάτων με $q > 1$	23
4.1.5 Μήκος Πλαστικής Άρθρωσης	24
4.1.6 Πλαστιμότητα Μετακινήσεως και Καμπυλότητας	24
4.2 Σχεδιασμός Ενίσχυσης Γέφυρας.....	25
4.2.1 Ανάλυση Γέφυρας.....	25
4.2.1.1 Μεσόβαθρα	25
4.2.1.2 Ακρόβαθρα	28

4.2.2 Ενίσχυση Μεσοβάθρων με Μανδύα Σύνθετων Υλικών	29
4.2.2.1 Αύξηση Πλαστιμότητας	29
4.2.2.2 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής	34
4.2.2.3 Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής Σκυροδέματος	36
4.2.3 Ενίσχυση Μεσοβάθρων με Μανδύα από Οπλισμένο Σκυρόδεμα.....	41
4.2.3.1 Σχεδιασμός Μανδύα Οπλισμένου Σκυροδέματος με τη Μέθοδο των Δυνάμεων	41
4.2.3.2 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής.....	43
4.2.3.3 Εναλλακτικός Σχεδιασμός Μανδύα Οπλισμένου Σκυροδέματος με τη Μέθοδο των Μετακινήσεων	44
4.2.4 Ενίσχυση Μεσοβάθρων με Μεταλλικό Μανδύα.....	48
4.2.4.1 Αύξηση Πλαστιμότητας	48
4.2.4.2 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής.....	51
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	54
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ.....	54
2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	54
3. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	56
3.1 Υλικά Ινών	57
4. ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	57

1. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η κύρια βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη και σύγκριση των κυριότερων μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης γεφυρών, παραδοσιακών και νέων, είναι:

1. Εγκύκλιος Ε. 39/99 (1999), Οδηγίες για την Αντισεισμική Μελέτη Γεφυρών, Αθήνα, Ελλάδα.
2. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (1999), Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Προσεισμικού Ελέγχου Υφιστάμενων Τύπων Γεφυρών και Διατύπωση Ενδεικτικών Προτάσεων Αναβάθμισης του Επίπεδου Ασφαλείας τους, Αθήνα, Ελλάδα.
3. State of California (1989), Bridge Design Aids, Equivalent Static Analysis of Restrainers, 14-11 thru 14-25.
4. AASHTO (1994), LRFD Bridge Design Specifications.
5. AASHTO (1994), Manual of Condition Evaluation of Bridges.
6. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (2000), Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000, Αθήνα, Ελλάδα.
7. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M. (1996), *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
8. Paulay, T., Priestley, M.J.N. (1992), *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
9. Xanthakos, P.P. (1996), *Bridge Strengthening and Rehabilitation*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey.
10. Raina, V.K. (1994), *Concrete Bridges: Inspection, Repair, Strengthening, Testing, Load Capacity Evaluation*, McGraw-Hill Companies, Inc., New Delhi.
11. Πενέλης, Γ.Γ., Κάππος, Α.Ι. (1990), *Αντισεισμικές Κατασκευές από Σκυρόδεμα*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
12. Τάσιος, Θ.Π. (1991), *Κατασκευές και Θεμελιώσεις από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*, Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
13. Δρίτσος Σ.Η. (2000), *Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*, Έκδοση Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.
14. Καραντζίκης, Μ.Ι. και Σπυράκος, Κ.Χ. (2000), Μέθοδοι Σεισμικής Ενίσχυσης Γεφυρών, *Τεχνικά*, Μάιος, σσ. 68-73.
15. Unjoh, S., Terayama, T., Adachi, Y., Hoshikuma, J. (2000), Seismic Retrofit of Existing Highway Bridges in Japan, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, σσ. 1-16.
16. Chen, H.L., Spyarakos, C.C., and Venkatesh, G. (1995), Evaluating Structural Deterioration by Dynamic Response, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 8, August.

17. Spyrakos, C.C., Kemp, E., and Venkaterredy, R. (1999), Seismic Study of a Historic Covered Bridge, *Engineering Structures*, Vol. 21, σσ. 877-882.
18. Spyrakos, C.C., Kemp, E., and Venkaterredy, R. (1999), Validated Analysis of Wheeling Suspension Bridge, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 4, No. 1, σσ. 1-7.
19. Spyrakos, C.C., Vlassis, A.G. (2002), Effect of Soil-Structure Interaction on Seismically Isolated Bridges, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 3, σσ. 1-39.
20. Vlassis, A.G., Spyrakos, C.C. (2001), Seismically Isolated Bridge Piers on Shallow Soil Stratum with Soil-Structure Interaction, *Computers and Structures*, Vol. 79, σσ. 2847-2861.
21. Chai, Y.H., Priestley, M.J.N., and Seible, F. (1991), Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance, *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, September/October, σσ. 572-584.
22. Chai, Y.H., Priestley, M.J.N., and Seible, F. (1991), Flexural Retrofit of Circular Reinforced Concrete Bridge Columns by Steel Jacketing, Structural Systems Research Project, Report SSRP-91/06, University of California, San Diego, October.
23. Sun, Z., Seible, F., and Priestley, M.J.N. (1993), Flexural Retrofit of Rectangular Reinforced Concrete Bridge Column by Steel Jacketing, Structural Systems Research Project, Report SSRP-93/07, University of California, San Diego, February.
24. Selna, L.G., Malvar, L.J., and Zelinski, R.J. (1989), Box Girder Bar and Bracket Seismic Retrofit Devices, *ACI Structural Journal*, September/October.
25. EERI (1990), Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, Special Supplement to Vol. 6, May.
26. EERI (1995), Northridge Earthquake Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, Special Supplement to Vol. 11, February.
27. Gates, J., Buckle, I.G. (1991), Basic Design Concepts, *Proceedings, International Workshop on Seismic Design and Retrofitting of Reinforced Concrete Bridges*, Bormio, Italy, April, σσ. 7-15.
28. Ingham, J.M., Priestley, M.J.N., and Seible, F. (1994), Seismic Performance of Bridge Knee Joints, Vol. 1, Structural Systems Research Project, Report SSRP-94/12, University of California, San Diego, June.
29. Ingham, J.M., Priestley, M.J.N., and Seible, F. (1994), Seismic Performance of Bridge Knee Joints, Vol. 2, Circular Column/Cap Beam Experimental Results, Structural Systems Research Project, Report SSRP-94/17, University of California, San Diego, October.
30. Jirso, J.O. (1995), Progress Reports, 1995 – Repair and Rehabilitation Research for Seismic Resistance of Structures, Report R/R 1995, University of Texas, Austin, February.
31. Kawashima, K., Ichimasu, H., and Ohuchi, H. (1991), Retrofitting, *Proceedings, International Workshop on Seismic Design and Retrofitting of Reinforced Concrete Bridges*, Bormio, Italy, April, σσ. 471-501.

32. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Chai, Y.H. (1992), Design Guidelines for Assessment Retrofit and Repair of Bridges for Seismic Performance, Structural Systems Research Project, Report SSRP-92/01, University of California, San Diego, August.
33. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Fyfe, E. (1992), Column Seismic Retrofit Using Fiberglass/Epoxy Jackets, *Proceedings, ACMBS-1 Conference*, Quebec, Canada, October, σσ. 287-297.
34. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Fyfe, E. (1993), Column Retrofit Using Prestressed Fiberglass/Epoxy Jackets, *Proceedings, '93 FIP Symposium*, Kyoto, Japan, October, σσ. 147-160.
35. Thewalt, C.R., Stojadinovic, B. (1992), Capacity Estimation and Retrofit of Outrigger Beam/Joint Systems, *Proceedings, 3rd NSF Workshop on Bridge Engineering Research in Progress*, La Jolla, California, November, σσ. 293-296.

2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΓΕΦΥΡΩΝ

2.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Κατάλληλες για τα Ελληνικά Δεδομένα

Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότερες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην Ελλάδα για την επισκευή και ενίσχυση γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι οποίες αποτελούν το συνηθέστερο τύπο γεφυρών που συναντώνται στη χώρα μας. Οι μέθοδοι αυτές αφορούν στην ενίσχυση των βάθρων, της κεφαλής των βάθρων, των κόμβων κεφαλής δοκού – υποστυλώματος και της ανωδομής.

2.1.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Βάθρων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Τα βάθρα από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι συνήθως ευπαθή όσον αφορά στην καμπτική τους πλαστιμότητα, τη διατμητική τους αντοχή και την καμπτική τους αντοχή λόγω σύνδεσης οπλισμού με παράθεση στις κρίσιμες περιοχές ή πρόωρης διακοπής του διαμήκου οπλισμού.

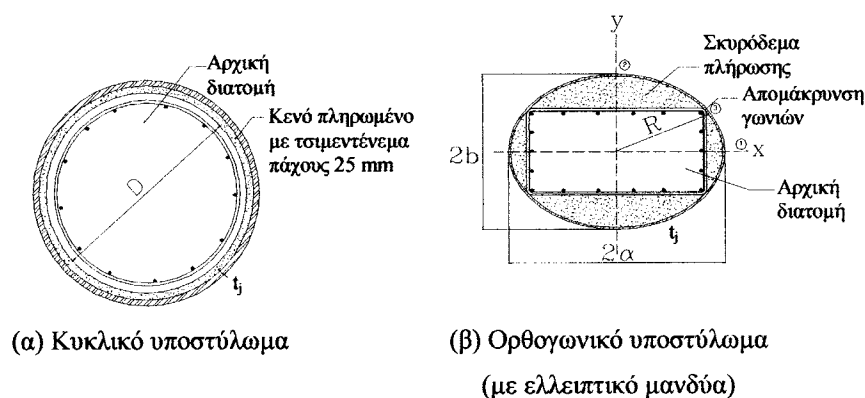
Παρόλο που διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης των βάθρων έχουν αναπτυχθεί και ελεγχθεί πειραματικά, ένας σχετικά μικρός αριθμός αυτών έχει εφαρμοσθεί στην πράξη. Οι μέθοδοι ενίσχυσης των βάθρων περιλαμβάνουν προσαρμογή μεταλλικών μανδύων, ενεργή περίσφιξη με προεντεταμένο πλέγμα, χρήση μανδύων από σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή σε εποξική βάση) και κατασκευή μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [Priestley et al., 1996], οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι ενίσχυσης που εφαρμόζονται σήμερα είναι η προσαρμογή μεταλλικών μανδύων ή μανδύων από σύνθετα υλικά, ενώ σε μικρότερο βαθμό γίνονται ενισχύσεις βάθρων με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος.

(α) Μεταλλικοί Μανδύες. Η διαδικασία αναπτύχθηκε αρχικά για υποστυλώματα βάθρων με κυκλική διατομή. Δύο κελύφη από μεταλλικό έλασμα με ημικυλινδρική μορφή και ακτίνα

από 12.5 έως 25 mm μεγαλύτερη από την ακτίνα του υποστυλώματος, τοποθετούνται πάνω από την περιοχή που πρέπει να ενισχυθεί και συγκολλούνται επιτόπου με συνεχή ραφή, έτσι ώστε να σχηματίσουν σωλήνα, μεταξύ του οποίου και του υποστυλώματος υπάρχει μικρό δακτυλιοειδές κενό. Το κενό πληρώνεται με τσιμεντένεμα, αφού ξεπλυθεί με νερό. Συνήθως, ένα διάστημα περίπου 50 mm αφήνεται μεταξύ του μανδύα και της κεφαλής του θεμέλιου ή του βάθρου, έτσι ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα δράσης του μανδύα ως θλιβόμενου οπλισμού που μπορεί να ασκήσει πίεση στο θεμέλιο ή στην κεφαλή για μεγάλες γωνίες στροφής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η υπερβολική αύξηση της καμπτικής αντοχής στην περιοχή σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης, η οποία θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα αυξήσεις στα εντατικά μεγέθη (ροπές και τέμνουσες) που μεταβιβάζονται στα θεμέλια και στις κεφαλές των βάθρων κάτω από σεισμική φόρτιση.

Ο μεταλλικός μανδύας είναι αποτελεσματικός στην ανάπτυξη παθητικής περίσφιγξης στο σκυρόδεμα του υποστυλώματος. Συγκεκριμένα, καθώς το σκυρόδεμα προσπαθεί να διογκωθεί πλευρικά, στη μεν θλιβόμενη ζώνη λόγω υψηλών αξονικών θλιπτικών παραμορφώσεων, στη δε εφελκόμενη ζώνη λόγω διαστολής των συνδέσεων οπλισμού με παράθεση που σηματοδοτούν την έναρξη αστοχίας των συνδέσεων, πλευρικές τάσεις περίσφιγξης ασκούνται στο σκυρόδεμα από τον εύκαμπτο μανδύα. Το επίπεδο περίσφιγξης εξαρτάται από την αντοχή και τη δυσκαμψία του μεταλλικού μανδύα.

Με παρόμοιο τρόπο ο μανδύας δρα αποτρεπτικά στην πλευρική διόγκωση του υποστυλώματος που σχετίζεται με την ανάπτυξη διαγώνιων διατμητικών ρωγμών. Και στις δύο περιπτώσεις – περίσφιγξη περιοχών σχηματισμού καμπτικών αρθρώσεων και ενδεχόμενων διατμητικών αστοχιών – ο μανδύας μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμος με επάλληλες στρώσεις κυκλικών συνδετήρων (ή σπειροειδούς οπλισμού). Στο Σχήμα 1α φαίνονται λεπτομέρειες του μανδύα.



Σχήμα 1 Ενίσχυση βάθρων με μεταλλικούς μανδύες.

Σε υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής, συνιστάται η χρήση ελλειπτικού μανδύα, ο οποίος παρέχει συνεχή περίσφιγξη παρόμοια με αυτή του κυκλικού υποστυλώματος, με τη διαφορά ότι η τάση που αναπτύσσεται ποικίλει κατά μήκος της περιφέρειας λόγω της

συνεχούς μεταβολής της καμπυλότητας του μανδύα. Το κενό μεταξύ του μανδύα και του υποστρώματος πληρώνεται με έγχυτο σκυρόδεμα και όχι με τσιμεντένεμα.

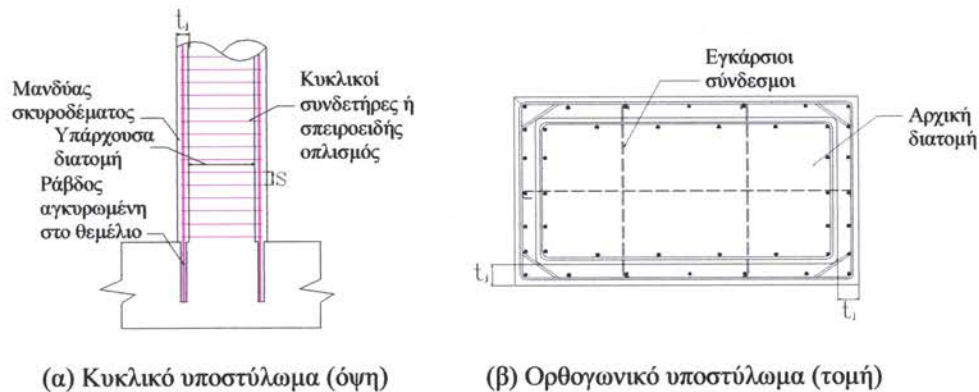
Ορθογώνιοι μεταλλικοί μανδύες για την ενίσχυση ορθογωνικών υποστρωμάτων δεν συνιστώνται. Παρόλο που τέτοιου είδους μανδύες μπορεί να είναι πλήρως αποτελεσματικοί για αύξηση της διατμητικής αντοχής, ένα υποστύλωμα ενισχυμένο για διάτμηση συνήθως απαιτεί αύξηση και της καμπτικής πλαστιμότητας, η οποία δεν παρέχεται από το μεταλλικό μανδύα εκτός από τις γωνίες, καθώς θα υπάρχει πολύ λίγος περιορισμός της πλευρικής διόγκωσης του πυρήνα λόγω κάμψης του μανδύα. Πειραματικοί έλεγχοι διαφόρων ορθογωνίων μανδύων έχουν αποδείξει ότι αυτοί είναι σημαντικά λιγότερο αποτελεσματικοί σε σχέση με τους ελλειπτικούς μανδύες.

Η χρήση μεταλλικών μανδύων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην Καλιφόρνια ως κύρια μέθοδος ενίσχυσης βάθρων γεφυρών, με εκατοντάδες γέφυρες να έχουν ενισχυθεί έως σήμερα. Κατά τη διάρκεια του σεισμού στο Northridge το 1994, περίπου 50 γέφυρες με βάθρα ενισχυμένα με μεταλλικούς μανδύες υποβλήθηκαν σε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση της τάξης του 0.3g ή μεγαλύτερη. Καμία από αυτές τις γέφυρες δεν υπέστη βλάβες στα υποστρώματα των βάθρων που να απαιτούν σημαντικές επισκευές.

(β) Μανδύες από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Η χρήση μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα σε υποστρώματα των βάθρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της καμπτικής αντοχής, της πλαστιμότητας και της διατμητικής αντοχής των υποστρωμάτων. Παρόλο που η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνότερα για την ενίσχυση υποστρωμάτων κτιρίων και όχι γεφυρών, έχει εφαρμοσθεί για την ενίσχυση ορισμένων γεφυρών κυρίως στην Ιαπωνία, αλλά και στην Ελλάδα που είναι αρκετά διαδεδομένη. Αγκυρώνοντας το διαμήκη οπλισμό του μανδύα μέσα στο θεμέλιο με επαρκές μήκος αγκύρωσης για την ανάπτυξη αντοχής, η καμπτική αντοχή του υποστρώματος μπορεί να αυξηθεί, παρόλο που η αύξηση αυτή πρέπει να συνοδεύεται από μέτρα ενίσχυσης του θεμελίου, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι η πλαστική άρθρωση θα αναπτυχθεί στο υποστύλωμα.

Αυξημένη περίσφιξη υποστρωμάτων κυκλικής διατομής με μανδύα σκυροδέματος επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα με χρήση πυκνών κυκλικών συνδετήρων ή σπειροειδούς οπλισμού με μικρό βήμα σπείρας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2α. Παρόλ' αυτά, εκτός εάν ο μανδύας σκυροδέματος έχει ελλειπτικό ή κυκλικό σχήμα, είναι δύσκολο να επιτευχθεί επαρκής περίσφιξη με ορθογωνικό μανδύα σκυροδέματος. Οι διαμήκεις ράβδοι στο μέσον κάθε πλευράς θα είναι ευάλωτες σε λυγισμό και μόνο το σκυρόδεμα κοντά στις γωνίες θα είναι επαρκώς περισφιγμένο. Η κατάσταση αυτή μπορεί να βελτιωθεί με απομάκρυνση του σκυροδέματος των γωνιών της υπάρχουσας διατομής έως τις γωνιακές ράβδους και χρήση συνδετήρων στο μανδύα σκυροδέματος, οι οποίες έχουν καμφθεί κατά 45° στις γωνίες, εναλλάξ με ορθογωνικούς συνδετήρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2β.

Η χρήση εγκάρσιων συνδέσμων διαμέσου οπών που διαπερνούν τον πυρήνα του υπάρχοντος υποστυλώματος, που φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 2β, μπορεί να αποδειχθεί ακριβή λύση και, επιπλέον, η τοποθέτηση των συνδέσμων είναι δύσκολη λόγω της ανάγκης να καμφθούν τα άγκιστρα στα άκρα επιτόπου αφού οι σύνδεσμοι διαπεράσουν τις οπές.



Σχήμα 2 Ενίσχυση βάθρων με μανδύες σκυροδέματος.

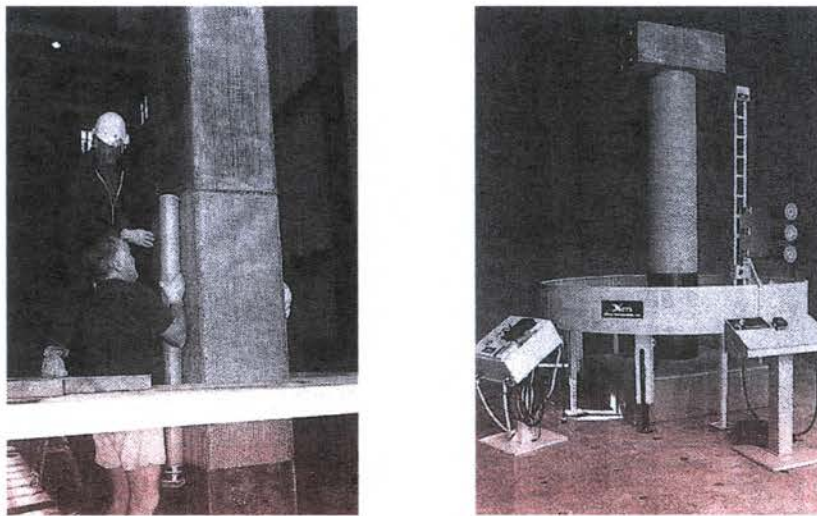
(γ) **Μανδύες από Σύνθετα Υλικά.** Η χρήση μανδύων από σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή) αποτελεί την πιο πρόσφατη και προηγμένη μέθοδο ενίσχυσης βάθρων. Η αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών στην αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας των βάθρων έχει αποδειχθεί με σειρά πειραμάτων. Τα πειράματα αυτά έχουν δείξει ότι τα σύνθετα υλικά είναι πιο αποδοτικά όσον αφορά στην περισφιγξη των βάθρων σε σχέση με τους μεταλλικούς μανδύες. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο χάλυβας παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά με αποτέλεσμα μετά τη διαρροή του, που συμβαίνει από τους πρώτους κιάλας κύκλους της ανακυκλιζόμενης σεισμικής φόρτισης, να απαιτείται ολοένα μεγαλύτερη παραμόρφωση για την ανάπτυξη της απαιτούμενης τάσης περισφιγξης. Αντίθετα τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται γραμμικά μέχρι την αστοχία τους και επομένως η τάση περισφιγξης που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα του βάθρου είναι σταθερή σε όλους τους κύκλους φόρτισης.

Το μήκος εφαρμογής του μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς για αύξηση της πλαστιμότητας του βάθρου στην περιοχή σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης συνιστάται να είναι λίγο μεγαλύτερο από το απαιτούμενο για νέες κατασκευές. Καθώς οι απαιτήσεις σε περισφιγξη μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση από την κρίσιμη διατομή, είναι αποδεκτό να μειώνεται κατά το ήμισυ το πάχος του μανδύα στο μισό ύψος της περισφιγμένης περιοχής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική οικονομία υλικού. Αντίστοιχη οικονομία υλικού είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί στην περίπτωση μεταλλικού μανδύα λόγω κατασκευαστικών δυσχερειών.

Στο Σχήμα 3 φαίνονται δύο τρόποι εφαρμογής των σύνθετων υλικών. Η πρώτη αφορά διάστρωση με το χέρι μανδύα που αποτελείται από στρώσεις εμποτισμένου με εποξική ρητίνη

υφάσματος υαλονημάτων και η δεύτερη μηχανική περιέλιξη του υποστυλώματος με στρώσεις από ανθρακονήματα επίσης εμποτισμένα με εποξική ρητίνη. Και οι δύο μέθοδοι έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές σε εργαστηριακά πειράματα και έχουν εφαρμοστεί για τη σεισμική ενίσχυση βάθρων γεφυρών σε διάφορες χώρες του κόσμου.

Η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή είναι πιο κατάλληλη για βάθρα κυκλικής διατομής, αφού η επίτευξη πλήρους περίσφιγξης ορθογωνικών βάθρων απαιτεί την τροποποίηση του σχήματος της διατομής με ενισχύσεις από σκυρόδεμα ή με κάποιο άλλο τρόπο, έτσι ώστε ο μανδύας να τοποθετηθεί πάνω σε μία συνεχή καμπύλη επιφάνεια. Παρόλ' αυτά, η έρευνα έχει δείξει ότι σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας έχει επιτευχθεί και με ορθογωνικούς μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή σε βάθρα ορθογωνικής διατομής.



Σχήμα 3 Ενίσχυση με μανδύες από σύνθετα υλικά. (α) Υαλονήματα υψηλής αντοχής: διάστρωση με το χέρι; (β) Ανθρακονήματα: μηχανική περιέλιξη.

2.1.2 Μέθοδοι Ενίσχυσης της Κεφαλής των Βάθρων

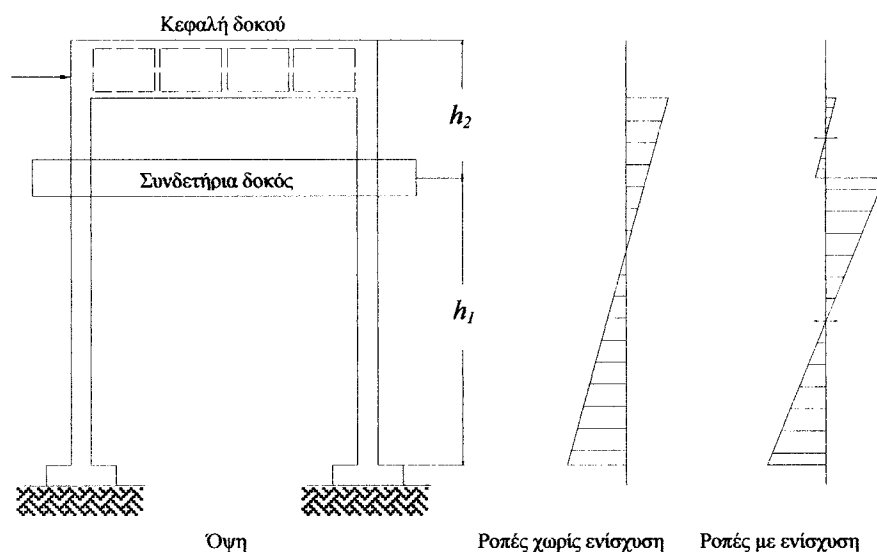
Οι κεφαλές των βάθρων αποτελούν το συνδετικό στοιχείο για τη μεταφορά της δύναμης μεταξύ της ανωδομής και των υποστυλωμάτων. Υπό εγκάρσια σεισμική δράση, οι κεφαλές πολύστυλων βάθρων υπόκεινται σε κάμψη και διάτμηση. Ανεπάρκειες στην καμπτική αντοχή είναι συνήθεις, κυρίως σαν συνέπεια χαμηλού ποσοστού εφελκόμενου οπλισμού στις παρειές των υποστυλωμάτων και πρόωρης διακοπής του θλιβόμενου οπλισμού. Συνήθης είναι επίσης η ανεπαρκής διατμητική αντοχή. Υπό διαμήκη σεισμική δράση, οι κεφαλές των βάθρων, πάνω στις οποίες εδράζονται οι ανωδομές μέσω εφεδράνων, δεν παρουσιάζουν συνήθως προβλήματα, αλλά ο μονολιθικός σχεδιασμός ανωδομών / κεφαλών βάθρων / υποστυλωμάτων μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στρέψης στις κεφαλές των βάθρων, κυρίως όταν τα υποστυλώματα βρίσκονται εκτός της κάτοψης της ανωδομής.

Η ενίσχυση των κεφαλών των βάθρων μπορεί να αποδειχτεί δύσκολη και δαπανηρή. Δύο βασικές προσεγγίσεις μπορούν να υιοθετηθούν: Η αντοχή της κεφαλής του βάθρου μπορεί να

αυξηθεί στο απαιτούμενο επίπεδο ώστε να εξασφαλιστεί ο σχηματισμός των πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα ή οι σεισμικές δράσεις που αναπτύσσονται στην κεφαλή του βάθρου μπορούν να μειωθούν με διάφορους τρόπους.

2.1.2.1 Μείωση των Σεισμικών Δράσεων στην Κεφαλή του Βάθρου

Όταν οι σεισμικές δράσεις που ασκούνται στην κεφαλή του βάθρου και κυρίως στον κόμβο υποστυλώματος / κεφαλής βάθρου υπερβαίνουν σημαντικά την αντοχή της κεφαλής, πρέπει να αναζητηθούν τρόποι μείωσης αυτών των εντάσεων. Μία αποτελεσματική μέθοδος είναι αυτή της χρήσης συνδετήριας δοκού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, εάν η συνδετήρια δοκός τοποθετηθεί ψηλά στα υποστυλώματα, θα προκαλέσει μείωση της σεισμικής δράσης στην κεφαλή του βάθρου.



Σχήμα 4 Χρήση συνδετήριας δοκού για μείωση των σεισμικών εντάσεων στην κεφαλή του βάθρου.

Προκειμένου να κατασκευαστεί η συνδετήρια δοκός πρέπει να απομακρυνθεί η επικάλυψη του σκυροδέματος του υποστυλώματος σε όλο το ύψος της συνδετήριας δοκού και να επιλεγεί επαρκές πλάτος δοκού έτσι ώστε ο διαμήκης οπλισμός της να βρίσκεται εκτός του πυρήνα του υποστυλώματος.

Οι σεισμικές δράσεις που ασκούνται στην κεφαλή του βάθρου μπορούν επίσης να μειωθούν σε βάθρα με εφέδρανα για την έδραση της ανωδομής αντικαθιστώντας τα υπάρχοντα εφέδρανα με εφέδρανα ολίσθησης (επιφάνειες ολίσθησης από τεφλόν / ανοξείδωτο χάλυβα) ή ελαστομερή εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης.

2.1.2.2 Αύξηση της Αντοχής της Κεφαλής του Βάθρου

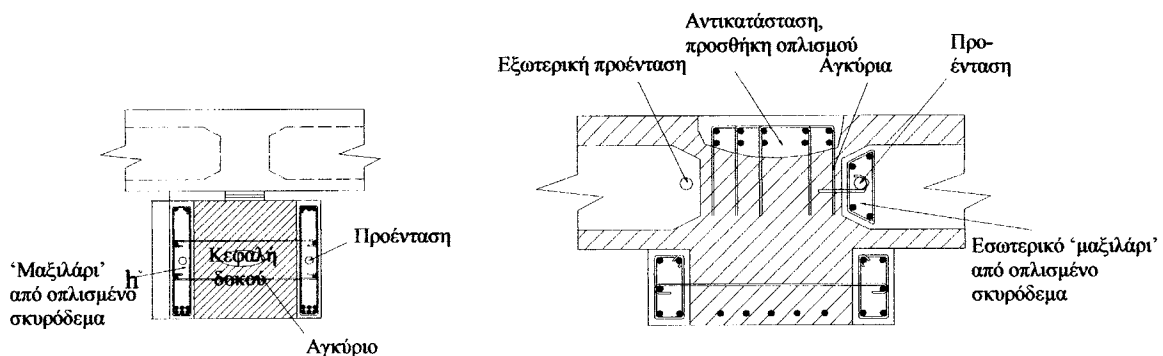
(α) Καμπτική Αντοχή. Γενικά, η φιλοσοφία αυτού του είδους της ενίσχυσης είναι η αύξηση της καμπτικής αντοχής της κεφαλής του βάθρου επαρκώς ώστε οι πλαστικές αρθρώσεις να σχηματιστούν στα υποστυλώματα. Στην περίπτωση κεφαλής βάθρου στην οποία η ανωδομή

εδράζεται μέσω εφεδράνων (Σχήμα 5α), η αύξηση της καμπτικής αντοχής μπορεί να επιτευχθεί με προσθήκη ‘μαξιλαριών’ από οπλισμένο σκυρόδεμα και στις δύο πλευρές της κεφαλής του βάρου αφού εκτραχυνθεί πρώτα η διεπιφάνεια. Το παλιό και το νέο σκυρόδεμα πρέπει να συνδέονται με αγκύρια, τα οποία κατά προτίμηση να διαπερνούν την υπάρχουσα κεφαλή του βάρου.

Εναλλακτικός ή και συμπληρωματικός τρόπος αύξησης της καμπτικής αντοχής είναι η προένταση της κεφαλής του βάρου. Οι τένοντες προέντασης μπορούν να βρίσκονται είτε μέσα στα ‘μαξιλάρια’ από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5α, είτε εξωτερικά, χωρίς να χρησιμοποιηθούν ‘μαξιλάρια’. Σε αυτή την περίπτωση, η προένταση δρα σαν μία επιπλέον αξονική θλιπτική δύναμη στην κεφαλή του βάρου και έτσι αυξάνει την καμπτική της αντοχή.

Η αύξηση της καμπτικής αντοχής μονολιθικών κεφαλών βάρων είναι δυσκολότερη λόγω των φυσικών περιορισμών που επιβάλλει η υπάρχουσα ανωδομή. ‘Μαξιλάρια’ από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορούν να προστεθούν στη βάση για αύξηση της αντοχής σε θετική ροπή, ενώ η αντοχή σε αρνητική ροπή μπορεί να αυξηθεί με απομάκρυνση του επιφανειακού σκυροδέματος και προσθήκη οπλισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5β.

(β) Διατμητική Αντοχή. Τα ‘μαξιλάρια’ από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 5α και 5β, αντίστοιχα) μπορούν να οπλιστούν με εγκάρσιο οπλισμό έτσι ώστε να αυξηθεί η διατμητική αντοχή της κεφαλής του βάρου. Η προένταση συμβάλλει επίσης στην αύξηση της διατμητικής αντοχής. Η διατμητική αντοχή της κεφαλής του βάρου μπορεί επίσης να αυξηθεί με την εφαρμογή σύνθετων υλικών στις δύο πλευρές της κεφαλής του βάρου. Η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική όταν οι στρώσεις του ινοπλισμένου πολυμερούς περιτυλίσσονται γύρω από την πάνω και την κάτω παρειά της κεφαλής του βάρου, που αποτελεί τη συνήθη περίπτωση για ανωδομές εδραζόμενες σε εφέντρανα.



Σχήμα 5 Καμπτική και διατμητική ενίσχυση κεφαλών βάρων. (α) Ανωδομή εδραζόμενη σε εφέντρανα; (β) Μονολιθική κεφαλή βάρου.

(γ) Στρεπτική Αντοχή. Η αύξηση της αντοχής σε στρέψη με εγκάρσιο οπλισμό προϋποθέτει τη χρήση κλειστών συνδετήρων. Επομένως χρειάζεται η προσθήκη μανδύα σκυροδέματος γύρω από ολόκληρη τη διατομή, η οποία είναι δυνατή σε φορείς που εδράζονται σε εφένδρανα και έχουν ανεξάρτητες κεφαλές βάθρων. Η εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών γύρω από τη διατομή είναι επίσης αποτελεσματική.

2.1.3 Μέθοδοι Ενίσχυσης της Περιοχής των Κόμβων Κεφαλής Δοκού - Υποστυλώματος

Αντίστοιχα με την περίπτωση της κεφαλής των βάθρων, υπάρχουν πολλές διαθέσιμες επιλογές για την ενίσχυση των κόμβων κεφαλής δοκού – υποστυλώματος, που περιλαμβάνουν τη μείωση των δυνάμεων που μεταβιβάζονται στον κόμβο, την αποδοχή επισκευάσιμων βλαβών, την προένταση του κόμβου, την τοποθέτηση μανδύων και την αντικατάσταση του κόμβου. Παρακάτω περιγράφονται οι δύο πρώτες επιλογές.

(α) Μείωση των Δυνάμεων του Κόμβου

Η χρήση συνδετήριας δοκού για τη μείωση των σεισμικών δράσεων της κεφαλής του βάθρου θα προκαλέσει κατ' επέκταση μείωση των εντάσεων του κόμβου κεφαλής δοκού – υποστυλώματος. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου ενίσχυσης συνήθως είναι πιο σημαντικά από το κόστος κατασκευής της συνδετήριας δοκού, η οποία είναι συγκριτικά απλή και συνήθως μπορεί να γίνει χωρίς διακοπή της κυκλοφορίας.

(β) Αποδοχή Επισκευάσιμων Βλαβών

Εάν μπορεί να αποδειχθεί στη φάση μελέτης της γέφυρας ότι η αστοχία του κόμβου δεν θα προκαλέσει κατάρρευση του βάθρου για το σεισμό σχεδιασμού, μία εναλλακτική πρόταση είναι η αποδοχή της πιθανότητας βλαβών κατά τη διάρκεια ενός σεισμού μεγάλου μεγέθους και ακολούθως η επισκευή ή η αντικατάσταση του κόμβου. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να είναι δεδομένο ότι η αστοχία του κόμβου δεν θα διακινδυνεύσει τη φέρουσα ικανότητα του φορέα και, επίσης, να μελετηθεί με προσοχή η πιθανότητα αστοχίας λόγω διάτρησης του καταστρώματος από τα υποστυλώματα των βάθρων.

2.1.4 Μέθοδοι Ενίσχυσης της Ανωδομής

Οι ανεπάρκειες της ανωδομής μίας γέφυρας σχετίζονται κατά κανόνα με ανεπαρκές μήκος έδρασης στους αρμούς και ανεπαρκή καμπτική αντοχή, κυρίως στις περιοχές των στηρίξεων, που να διασφαλίζει το σχηματισμό των πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα των βάθρων.

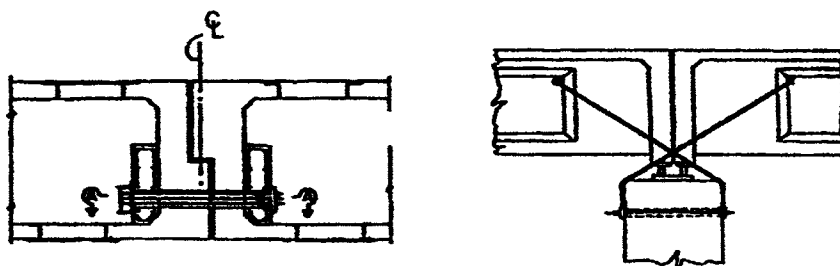
2.1.4.1 Ενίσχυση των Αρμών

Υπάρχουν δύο δυνατότητες ενίσχυσης για την περίπτωση που οι μετακινήσεις στους αρμούς του φορέα κρίνονται υπερβολικές. Σεισμικοί σύνδεσμοι μπορούν να τοποθετηθούν κατά μήκος του αρμού σε μία προσπάθεια να μειωθούν οι σχετικές μετακινήσεις ή το περιθώριο μετακινήσεων του αρμού μπορεί να αυξηθεί. Συχνά επιλέγονται και οι δύο ενέργειες.

(α) **Σεισμικοί Σύνδεσμοι.** Οι σεισμικοί σύνδεσμοι μπορούν να αποτελούνται από διατμητικούς τóρμους / εντορμίες από σκυρόδεμα ή χάλυβα, προσκρουστήρες, αποσβεστήρες και/ή κοχλίες σύνδεσης ή καλώδια. Παράλληλα με τη χρήση τους για περιορισμό των μετακινήσεων, οι σεισμικοί σύνδεσμοι μπορούν να τοποθετηθούν για να διασφαλίσουν τη μεταφορά των σεισμικών δράσεων μεταξύ γειτονικών τμημάτων του φορέα. Η δυναμική αλληλεπίδραση μη γραμμικών πλαισιακών φορέων που συνδέονται με σεισμικούς συνδέσμους είναι σύνθετο φαινόμενο και δε μπορεί να προσεγγιστεί με απλές ελαστικές αναλύσεις, αλλά μόνο με δυναμική μη γραμμική ανάλυση.

Σε πολλές γέφυρες η αποφυγή της απώλειας στήριξης στους αρμούς της ανωδομής διασφαλίζεται με χρήση σεισμικών συνδέσμων χωρίς περιθώριο μετακίνησης, έτσι ώστε να μηδενίζονται πρακτικά οι σχετικές μετακινήσεις. Οι παλιότερες γέφυρες έχουν συνήθως αρμούς σε μικρότερα διαστήματα από αυτά που προβλέπονται για τις νέες γέφυρες, παρόλ' αυτά είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι οι μετακινήσεις λόγω ερπυσμού και συστολής ξηράνσεως της γέφυρας θα έχουν πραγματοποιηθεί έως το χρόνο έναρξης των εργασιών ενίσχυσης. Επομένως μόνο οι θερμικές μετακινήσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι οι σχετικές μετακινήσεις σε πολλούς αρμούς υπαρχουσών γεφυρών μπορούν να περιοριστούν στο ελάχιστο χωρίς καταπόνηση των υποστυλωμάτων.

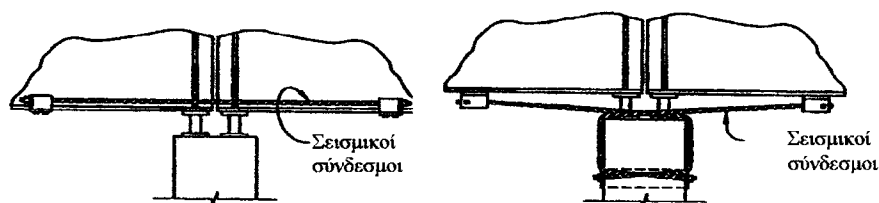
Ο περιορισμός των σχετικών μετακινήσεων του αρμού στο ελάχιστο επιτυγχάνεται συνήθως με προένταση και των δύο γειτονικών τμημάτων του φορέα μαζί κατά μήκος του αρμού. Μία άλλη δυνατότητα είναι η χρησιμοποίηση αποσβεστήρων ιξώδους υγρού για τη σύνδεση των πλαισίων κατά μήκος του αρμού. Οι αποσβεστήρες αυτοί παρέχουν μικρό περιορισμό των μετακινήσεων στην περίπτωση των θερμικών μεταβολών, αλλά τα πλαίσια συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως άκαμπτα υπό σεισμική φόρτιση, με σημαντικό περιορισμό των μετακινήσεων και αύξηση της απόσβεσης του συστήματος.



Σχήμα 6 Σεισμικοί σύνδεσμοι - καλώδια για αρμούς ανωδομών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

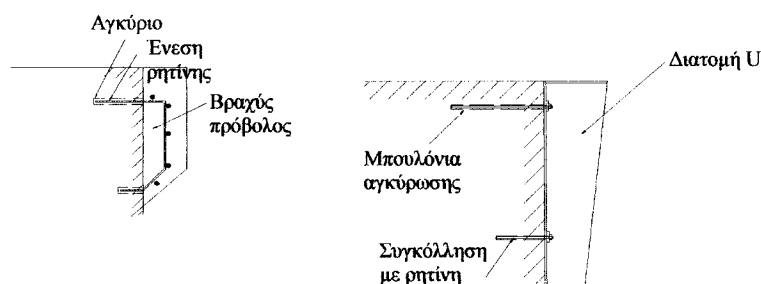
Οι εύκαμπτοι σεισμικοί σύνδεσμοι αποτελούνται από μεταλλικά καλώδια υψηλής αντοχής που αγκυρώνονται στο διάφραγμα ή στον κορμό γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα

(Σχήμα 6) ή στο κάτω πέλμα μεταλλικών δοκών (Σχήμα 7). Η περιέλιξη των καλωδίων γύρω από την κεφαλή του βάθρου συνδέει τα γειτονικά τμήματα του φορέα μεταξύ τους και με την κεφαλή του βάθρου αλλά μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα επίπεδα έντασης στο βάθρο. Τα καμπύλα καλώδια είναι πιο ευπαθή σε θραύση για μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με τα ευθύγραμμα καλώδια.



Σχήμα 7 Σεισμικοί σύνδεσμοι - καλώδια για αρμούς ανωδομών από χάλυβα.

(β) **Επέκταση του Μήκους Έδρασης.** Στις περιπτώσεις που ο περιορισμός των σχετικών μετακινήσεων του αρμού στο ελάχιστο δεν είναι επιθυμητός ή πρακτικός, μπορούμε να επιλέξουμε τη λύση της επέκτασης του μήκους έδρασης αντί για τον περιορισμό των μετακινήσεων με σεισμικούς συνδέσμους. Η επέκταση του μήκους έδρασης γίνεται σχετικά εύκολα και με μικρό κόστος. Το μήκος έδρασης στα ακρόβαθρα ή στις στηρίξεις αμφιέριστων ανοιγμάτων μπορεί να αυξηθεί με βραχείς προβόλους ή σιδηροδοκούς διατομής U που προστίθενται στις πλευρές των ακρόβαθρων ή μεσόβαθρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.



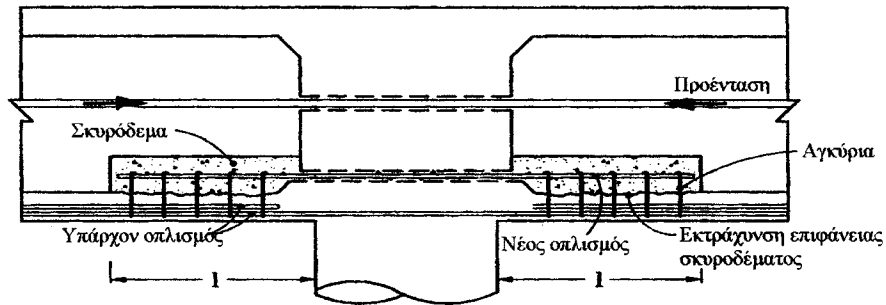
Σχήμα 8 Επέκταση του μήκους έδρασης για αποφυγή απώλειας στήριξης λόγω υπερβολικών διαμήκων μετακινήσεων.

2.1.4.2 Καμπτική Αντοχή της Ανωδομής

Όταν η καμπτική αντοχή της ανωδομής είναι ανεπαρκής, απαιτείται ενίσχυση. Πριν ληφθεί η απόφαση της ενίσχυσης πρέπει να έχουν εξεταστεί όλες οι άλλες εναλλακτικές λύσεις, καθώς η διαμήκης ενίσχυση της ανωδομής έχει μεγάλο κόστος.

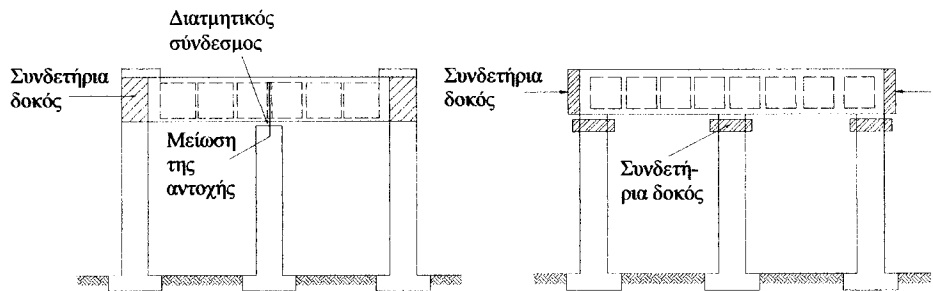
(α) **Αύξηση της Αντοχής.** Η εξωτερική προένταση της ανωδομής ενδέχεται να είναι εφικτή επιλογή για την αύξηση της αντοχής. Κατά κανόνα, πάντως, μία σχετικά μικρή περιοχή της ανωδομής που βρίσκεται κοντά στη στήριξη έχει ανεπαρκή αντοχή. Αυτή μπορεί να ενισχυθεί με αφαίρεση του σκυροδέματος από το ένα άκρο στο άλλο της κεφαλής του βάθρου πάνω

από την κάτω πλάκα του φορέα και τοποθέτηση οπλισμού συνδεδεμένου με τον οπλισμό της πλάκας και στις δύο πλευρές της κεφαλής του βάθρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.

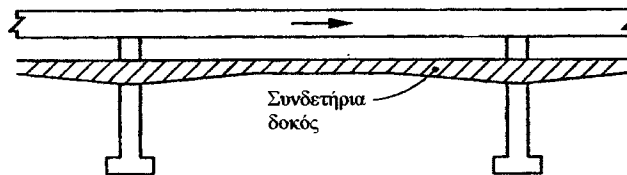


Σχήμα 9 Αύξηση της καμπτικής αντοχής της ανωδομής.

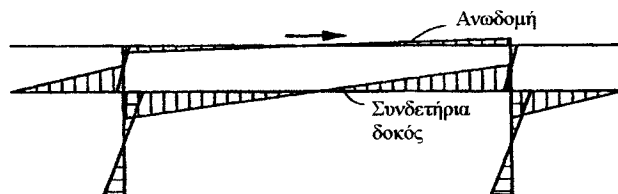
(β) **Μείωση των Δυνάμεων.** Η μείωση των σεισμικών δυνάμεων μπορεί να επιτευχθεί με χρήση διαμήκων συνδετήριων δοκών, κατ' αντιστοιχία με τη χρήση συνδετήριων δοκών για την ενίσχυση των βάθρων. Οι συνδετήριες δοκοί μπορούν να τοποθετηθούν είτε παράλληλα στο κατάστρωμα είτε κάτω από το κατάστρωμα, ανάλογα με τη θέση των υποστυλωμάτων ως προς την κάτοψη της ανωδομής και φυσικά εμπόδια που ενδέχεται να υπάρχουν κάτω από τη γέφυρα. Οι δύο δυνατές λύσεις φαίνονται στο Σχήμα 10.



(α) Συνδετήριες δοκοί παράλληλα στο κατάστρωμα, (β) Συνδετήριες δοκοί κάτω από το κατάστρωμα.



(γ) Όψη συνδετήριας δοκού κάτω από το κατάστρωμα.



(δ) Διάγραμμα ροπών στην περίπτωση συνδετήριας δοκού κάτω από το κατάστρωμα.

Σχήμα 10 Μείωση των διαμήκων ροπών της ανωδομής με συνδετήριες δοκούς.

Εάν το πλάτος του καταστρώματος είναι μικρότερο από το πλάτος της κεφαλής του βάρους (Σχήμα 10α), είναι πρακτικότερη η τοποθέτηση των συνδετήριων δοκών στο επίπεδο της ανωδομής.

Η δεύτερη εναλλακτική λύση φαίνεται στο Σχήμα 10β σε τομή και στο Σχήμα 10γ σε πλάγια όψη. Σε αυτή την περίπτωση οι συνδετήριες δοκοί μπορούν να τοποθετηθούν σε όλα τα υποστυλώματα, μειώνοντας τις σεισμικές ροπές της ανωδομής. Η συνδετήρια δοκός μπορεί να είναι μεταβλητής διατομής, ώστε να απεικονίζει τη σεισμική απαίτηση και να ελαχιστοποιεί τις ροπές λόγω ίδιου βάρους και περιττές πρόσθετες αδρανειακές δυνάμεις.

2.2 Σύγκριση Παραδοσιακών και Νέων Μεθόδων Ενίσχυσης

Η επισκευή - ενίσχυση γεφυρών με νέες μεθόδους που συνίσταται κυρίως στην εφαρμογή σύνθετων υλικών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

(α) 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.

(β) Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι απλή. Μπορεί να παρομοιαστεί με την τοποθέτηση ταπετσαρίας.

(γ) Οι διαστάσεις του ενισχυόμενου δομικού στοιχείου παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητες, λόγω του μικρού πάχους του υφάσματος σύνθετου υλικού (1 mm έως 2 mm).

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

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

(στ) Τα σύνθετα υλικά μπορούν να επιχριστούν και να χρωματιστούν σύμφωνα με τις αισθητικές απαιτήσεις του έργου.

(ζ) Τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά των κατασκευών παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα.

(η) Το κόστος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι ανάλογο των παραδοσιακών μεθόδων επισκευών - ενισχύσεων.

2.2.1 Συμπεριφορά Κατασκευής Ενισχυμένης με Παραδοσιακές Μεθόδους

Με την προσθήκη του σκυροδέματος και του οπλισμού ενίσχυσης αυξάνεται τόσο η αντοχή και η πλαστιμότητα όσο και η δυσκαμψία και το συνολικό βάρος της κατασκευής. Η αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας αποτελούν επιθυμητές βελτιώσεις. Η αύξηση της δυσκαμψίας επιδρά ευνοϊκά με την προϋπόθεση ότι διατηρείται η αντοχή του φέροντος οργανισμού. Επιτυγχάνεται προστασία των τοίχων πληρώσεως από ρηγματώσεις ή καταρρεύσεις και εν γένει μείωση των σεισμικών βλαβών στο μη φέροντα οργανισμό της

κατασκευής, λόγω της μείωσης των παραμορφώσεων του φέροντος οργανισμού. Ταυτόχρονα όμως, αυξάνονται τα σεισμικά φορτία, έχοντας ως δυσμενές αποτέλεσμα την αύξηση της καταπόνησης της κατασκευής. Η αύξηση του συνολικού βάρους επιδρά δυσμενώς, καθώς προκαλεί την αύξηση των σεισμικών φορτίων που καλείται να αναλάβει ο φέρων οργανισμός.

Ο επανασχεδιασμός των επισκευασμένων - ενισχυμένων στοιχείων απαιτεί τη στατική επίλυση με πλήρη την ακαμψία αυτών για τον προσδιορισμό της δικής τους έντασης και μειωμένη την ακαμψία τους για τον προσδιορισμό της έντασης των γειτονικών τους στοιχείων.

2.2.2 Συμπεριφορά Κατασκευής Ενισχυμένης με Σύνθετα Υλικά

Με τη χρήση μανδύα σύνθετων υλικών για την επισκευή - ενίσχυση μίας κατασκευής επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής, της πλαστιμότητας, αλλά και της δυσκαμψίας της, όταν αυτό είναι επιθυμητό. Σε όλες τις περιπτώσεις η αύξηση του βάρους της κατασκευής είναι πρακτικά μηδενική, λόγω του μικρού πάχους (της τάξεως των χιλιοστών) του μανδύα που απαιτείται.

Όσον αφορά την περίσφιξη και την αύξηση της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων και δοκών, η τεχνολογία των σύνθετων υλικών πλεονεκτεί έναντι των παραδοσιακών μεθόδων επισκευών - ενισχύσεων. Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν τριαξονική θλίψη στα στοιχεία, ενώ συμπεριφέρονται γραμμικά χωρίς μείωση της αντοχής τους σε μεγάλες παραμορφώσεις υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (σεισμική ένταση).

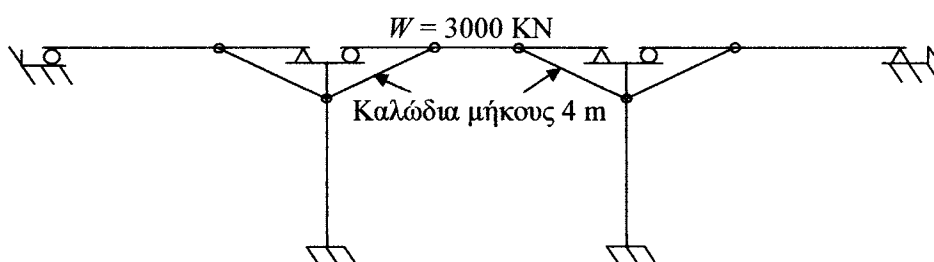
3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ CALTRANS

Η ισοδύναμη στατική ανάλυση των σεισμικών συνδέσμων που προτείνεται από το CALTRANS περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης μετακίνησης των σεισμικών συνδέσμων και περιορισμός της μετακίνησης αυτής στο μήκος έδρασης στη θέση του ενδιάμεσου αρμού ή της στήριξης.
2. Υπολογισμός της μέγιστης σεισμικής μετακίνησης στη διαμήκη διεύθυνση και για τα δύο γειτονικά τμήματα φορέα του υπό εξέταση αρμού. Σε καμπύλες γέφυρες, απαιτείται επιπλέον υπολογισμός του ανοίγματος του αρμού λόγω σεισμού στην εγκάρσια διεύθυνση ως προς τον άξονα της γέφυρας.
3. Σύγκριση των μετακινήσεων που προέκυψαν από τα βήματα 1 και 2.
4. Υπολογισμός του αριθμού των σεισμικών συνδέσμων που απαιτούνται.

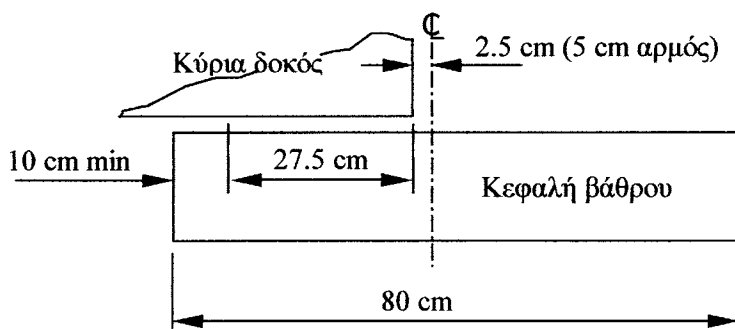
5. Έλεγχος των μετακινήσεων του συστήματος με τους σεισμικούς συνδέσμους και αναθεώρηση των αρχικών παραδοχών για τους σεισμικούς συνδέσμους και/ή τα βάθρα όπου αυτό απαιτείται. Επανάληψη των βημάτων 1 – 5 εάν χρειάζεται.

Προκειμένου να κατανοήσουμε την εφαρμογή της μεθόδου στην πράξη, ας θεωρήσουμε τη γέφυρα τριών αμφιέριστων ανοιγμάτων του Σχήματος 11. Κάθε άνοιγμα εδράζεται στο υποκείμενο ακρόβαθρο ή μεσόβαθρο μέσω εφεδράνων. Η γέφυρα έχει ενισχυθεί με σεισμικούς συνδέσμους - καλώδια. Το μήκος των καλωδίων είναι $L = 4$ m και έχουν περιθώριο μετακίνησης λόγω θερμικής διαστολής $D_g = 1$ cm. Επιπλέον, το βάρος του καταστρώματος σε κάθε άνοιγμα είναι $W = 3000$ kN και το πλάτος των αρμών του καταστρώματος στα σημεία στήριξης των φορέων στα βάθρα είναι 5 cm.



Σχήμα 11 Γέφυρα τριών ανοιγμάτων ενισχυμένη με σεισμικούς συνδέσμους.

Με βάση τη λεπτομέρεια του Σχήματος 12 το διαθέσιμο μήκος έδρασης είναι:



Σχήμα 12 Διαθέσιμο μήκος έδρασης.

$$\text{Διαθέσιμο μήκος έδρασης} = (80/2) - 10 - 2.5 = 27.5 \text{ cm} \quad (1)$$

Η διάσταση των 10 cm που φαίνεται στο Σχήμα 12 παρέχει ένα ονομαστικό επιτρεπόμενο μήκος έδρασης. Μία μεγαλύτερη ή και μικρότερη διάσταση μπορεί να απαιτείται ανάλογα με την περίπτωση.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση των σεισμικών συνδέσμων δίνεται από τη σχέση:

$$D_r = D_y + D_g \quad (2)$$

όπου D_y είναι η μετακίνηση διαρροής των σεισμικών συνδέσμων και υπολογίζεται ως εξής:

$$D_y = \frac{\sigma_y L}{E} \quad (3)$$

όπου σ_y είναι η τάση διαρροής και E το αρχικό μέτρο ελαστικότητας των σεισμικών συνδέσμων. Για σεισμικούς συνδέσμους - καλώδια είναι: $\sigma_y = 1214.21$ MPa, $E = 68950$ MPa. Οι ιδιότητες αυτές αντιστοιχούν σε χάλυβα υψηλής αντοχής. Άρα:

$$D_y = \frac{\sigma_y L}{E} = \frac{(1214.21)(4)}{68950} = 7.044 \text{ cm} \quad (4)$$

Επομένως:

$$D_r = D_y + D_g = 7.044 + 1 = 8.044 \text{ cm} \quad (5)$$

Εφόσον $8.044 \text{ cm} < 27.5 \text{ cm}$ δεν υπάρχει περίπτωση απώλειας στήριξης του φορέα πριν την ενεργοποίηση των σεισμικών συνδέσμων.

Θεωρώντας ότι τα αμφιέριστα ανοίγματα στηρίζονται πάνω σε σταθερά ελαστομεταλλικά εφέδρανα, προκειμένου να υπολογίσουμε την διαμήκη δυσκαμψία του συστήματος απαιτείται έλεγχος της διαμήκουσ επάρκειας των εφεδράνων να μεταφέρουν τις σεισμικές δράσεις στα βάθρα. Εάν τα εφέδρανα βρεθούν ανεπαρκή, τότε η διαμήκης δυσκαμψία του συστήματος οφείλεται αποκλειστικά στους σεισμικούς συνδέσμους. Επίσης, σύμφωνα με το CALTRANS, η δυσκαμψία γειτονικών τμημάτων δεν πρέπει να συνεκτιμάται για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας διαδοχικών αμφιέριστων ανοιγμάτων. Επομένως η διαμήκης δυσκαμψία δίνεται από τη σχέση:

$$K_t = \frac{\sigma_y A_r N_r}{D_r} \quad (6)$$

όπου A_r είναι το εμβαδόν της διατομής ενός σεισμικού συνδέσμου και N_r ο συνολικός αριθμός των σεισμικών συνδέσμων. Για καλώδια διαμέτρου $\varnothing 2 \text{ cm}$ είναι: $A_r = 1.432 \text{ cm}^2$. Έστω ότι χρησιμοποιούμε 5 καλώδια. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6) έχουμε:

$$K_t = \frac{\sigma_y A_r N_r}{D_r} = \frac{(1214.21 \times 100^{-2})(1.432)(5)}{8.044} = 108.103 \text{ KN/cm} \quad (7)$$

Η ιδιοπερίοδος του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g K_t}} = 2\pi \sqrt{\frac{3000}{(9.807)(108.103)}} = 1.057 \text{ sec} \quad (8)$$

Για τον υπολογισμό της μέγιστης σεισμικής μετακίνησης στη διαμήκη διεύθυνση χρησιμοποιούμε το φάσμα σχεδιασμού του *Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000)* σε συνδυασμό με τις διατάξεις των *‘Οδηγιών για την Αντισεισμική Μελέτη Γεφυρών’* (Εγκύκλιος Ε. 39/99). Για μέγιστη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους θεμελίωσης $A = 0.16g$

(ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: II), συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_l = 1.00$ (γέφυρες αυτοκινητοδρόμων, εθνικών οδών και σιδηροδρόμων), συντελεστή συμπεριφοράς $q = 1.00$ (ελαστική συμπεριφορά), συντελεστή επιρροής της θεμελίωσης $\theta = 1.00$ και κατηγορία εδάφους B, έχουμε: $\Phi_d(T) = 0.274g$. Επομένως η μέγιστη σεισμική μετακίνηση D_t δίνεται από τη σχέση:

$$D_t = \frac{\Phi_d(T) W}{g K_t} = \frac{(0.274)(3000)}{108.103} = 7.610 \text{ cm} \quad (9)$$

Εφόσον $7.610 \text{ cm} < 8.044 \text{ cm}$ ο αριθμός των καλωδίων είναι επαρκής. Άρα θα χρησιμοποιηθούν 5 καλώδια μήκους 4 m το καθένα.

4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Η μέθοδος της εφαρμογής μανδύα σύνθετων υλικών, μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος και μεταλλικού μανδύα για σεισμική ενίσχυση θα παρουσιαστεί εκτενώς μέσω του παραδείγματος μίας γέφυρας κατασκευασμένης πριν το 1993, η οποία διαπιστώθηκε ότι δεν πληροί την *Εγκύκλιο 39/99 (Οδηγίες για την Αντισεισμική Μελέτη Γεφυρών*, Νοέμβριος 1999). Συγκεκριμένα, ο οπλισμός περίσφιξης στις ενδεχόμενες θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων είναι λιγότερος από τον απαιτούμενο βάσει της *Εγκυκλίου 39/99*. Η πλαστιμότητα, λοιπόν που υπάρχει στις θέσεις αυτές και συνεπώς η διαθέσιμη πλαστιμότητα του συστήματος δεν είναι η απαιτούμενη.

Προκύπτει ότι η σεισμική ενίσχυση της γέφυρας είναι αναγκαία. Για να φτάσει το συνολικό σύστημα στα απαιτούμενα επίπεδα πλαστιμότητας ενισχύονται τα μεσοβάθρα του α) με μανδύα σύνθετων υλικών, β) με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος και γ) με μεταλλικό μανδύα. Το πάχος και το μήκος εφαρμογής του μανδύα προκύπτουν από την ανάλυση του φορέα και τη μελέτη ενίσχυσής του. Επιπλέον, ελέγχεται η διαμητική αντοχή των μεσοβάθρων και αυξάνεται με τη χρήση μανδύων, όπου κρίνεται ανεπαρκής. Τέλος, έχοντας το συνολικό πάχος του μανδύα σε κάθε θέση των μεσοβάθρων, υπολογίζεται η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω της περίσφιξης που προσφέρει ο μανδύας στις θέσεις αυτές.

4.1 Απαιτήσεις Κανονισμού

Σύμφωνα με την *Εγκύκλιο Ε. 39/99 (Οδηγίες για την Αντισεισμική Μελέτη Γεφυρών)* πρέπει να ισχύουν τα εξής:

4.1.1 Ελάχιστος Διαμήκης Οπλισμός Θλιβομένων Στοιχείων

- Σε θλιβόμενα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα (πλην πασσάλων) το ελάχιστο ποσοστό διαμήκους οπλισμού ορίζεται σε 1% της πραγματικής διατομής, δηλαδή:

$$\min A_{sl} = 1\% A_c \quad (10)$$

όπου A_c είναι η ολική διατομή σκυροδέματος.

4.1.2 Τοιχοειδή Βάθρα

- Προβλέπεται ελάχιστος οριζόντιος και κατακόρυφος οπλισμός S400 ή S500 των επιμήκων πλευρών με ποσοστό 0.20% ανά παρειά και όχι μεγαλύτερος των 10cm²/m (Ø18/25).

4.1.3 Οπλισμός Περίσφιγξης εντός Περιοχών Σχηματισμού Πλαστικής Άρθρωσης

- Στις θέσεις που πιθανολογείται σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, και αν η τιμή της ανηγμένης αξονικής είναι $n_k > 0.08$, πρέπει να διατάσσεται οπλισμός περίσφιγξης κατά προτίμηση μορφής κλειστών συνδετήρων, σε όλο το μήκος της πλαστικής άρθρωσης.
- Το μηχανικό ποσοστό ω του οπλισμού περίσφιγξης σε κάθε διεύθυνση πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω συνθήκες:

(α) για ορθογωνικούς ή μονοσκελείς συνδετήρες

$$\omega \geq 0.5 (A_c / A_{cc}) (n_k - 0.07) \geq 0.12 \quad (11)$$

[E39/93: $\omega \geq 0.39 (A_c / A_{cc}) (n_k - 0.08) \geq 0.12$]

(β) για σπειροειδείς συνδετήρες

$$\omega \geq 0.7 (A_c / A_{cc}) (n_k - 0.10) \geq 0.18 \quad (12)$$

[E39/93: $\omega \geq 0.57 (A_c / A_{cc}) (n_k - 0.08) \geq 0.18$]

με:

$$n_k = N_c / (A_c f_{ck}) \geq 0 \quad (13)$$

όπου:

A_c = ολική διατομή σκυροδέματος

A_{cc} = περισφιγμένη διατομή σκυροδέματος

N_c = μέγιστη αξονική δύναμη ικανοτικού σχεδιασμού (θλίψη: θετική)

f_{ck} = χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος κυλινδρικού δοκιμίου

Η τιμή της ανηγμένης αξονικής n_k στις περιοχές σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0.60 ($n_k < 0.60$). [E39/93: $n_k < 0.40$]

- Το μηχανικό ποσοστό ω του οπλισμού περίσφιγξης ορίζεται ως εξής :

$$\omega = \rho_s (f_{yd} / f_{cd}) \quad (14)$$

όπου:

f_{yd} = υπολογιστικό όριο διαρροής χάλυβα = f_{yk} / γ_s ($\gamma_s = 1.15$)

f_{cd} = υπολογιστική αντοχή σκυροδέματος = f_{ck} / γ_c ($\gamma_c = 1.50$)

ρ_s = γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού περίσφιγξης

- Το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης σε κυκλικές διατομές με σπειροειδείς ή κυκλικούς συνδετήρες είναι ο λόγος του ογκομετρικού ποσοστού του οπλισμού περίσφιγξης προς τον όγκο του περισφιγμένου σκυροδέματος. Δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_s = (4 A_s) / (s D_s) \quad (15)$$

όπου:

A_s = η διατομή του σπειροειδούς συνδετήρα

D_s = η διάμετρος της σπείρας

s = το βήμα της σπείρας

- Επιπλέον, θα πρέπει να τηρούνται και οι ακόλουθοι περιορισμοί :
 - Ελάχιστη διάμετρος συνδετήρων 10mm.
 - $Maxs < 1/5$ (της ελάχιστης διάστασης της περισφιγμένης διατομής).
 - $Maxs < \delta d_{sl}$, όπου d_{sl} είναι η διάμετρος της ράβδου του διαμήκους οπλισμού και δ είναι παράμετρος, η τιμή της οποίας εξαρτάται από το λόγο της χαρακτηριστικής τιμής της αντοχής σε εφελκυσμό f_{tk} προς τη χαρακτηριστική τιμή της τάσης διαρροής f_{yk} του διαμήκους οπλισμού (ο συντελεστής δ αφορά στην αποφυγή λυγισμού των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού). Οι τιμές που παίρνει το δ είναι:
 - $\delta = 6$, για $f_{tk} / f_{yk} \geq 1.50$
 - $\delta = 5 (f_{tk} / f_{yk}) - 1.50$, για $1.10 < f_{tk} / f_{yk} < 1.50$
 - $\delta = 4$, για $f_{tk} / f_{yk} \leq 1.10$
- [E39/93 : $maxs < 6 d_{sl}$]
- Το μήκος περίσφιγξης L_h θα λαμβάνεται ίσο με το μεγαλύτερο από τα ακόλουθα μεγέθη :
 - 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 το 80% της μέγιστης.

Όταν η τιμή της ανηγμένης αξονικής είναι μεγαλύτερη του 0.30 ($n_x > 0.30$), τότε το μήκος περίσφιγξης θα αυξάνεται κατά 50%.

4.1.4 Λυγισμός Θλιβομένων Ράβδων Διαμήκους Οπλισμού στις Περιοχές Σχηματισμού Πλαστικής Αρθρώσεως Συστημάτων με $q > 1$

- Σε κυκλικές διατομές η εξασφάλιση έναντι λυγισμού των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού στις περιοχές πλαστικών αρθρώσεων σε συστήματα με δείκτη μεταελαστικής συμπεριφοράς $q > 1$ απαιτεί:
 - $Maxs < \delta d_{sl}$

- Ελάχιστο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού ίσο με:

$$n_{sl} = \rho_{sl} (f_{ys} / f_{yt}) (0.0052 D_{sp} / d_s) \quad (16)$$

όπου:

ρ_{sl} = το γεωμετρικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού

D_{sp} = η διάμετρος της σπείρας

[E39/93: δεν γίνεται καμία αναφορά]

4.1.5 Μήκος Πλαστικής Άρθρωσης

- Το μήκος της πλαστικής άρθρωσης σε διατομές οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να δοθεί από τις δύο προσεγγιστικές σχέσεις που ακολουθούν:

$$L_h = 0.08 L + 0.022 d_s f_y \quad (17)$$

$$L_h = (0.4 \div 0.6) D \quad (18)$$

όπου:

d_s = η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού σε [m]

f_y = το όριο διαρροής του διαμήκους οπλισμού σε [MPa]

4.1.6 Πλαστιμότητα Μετακινήσεως και Καμπυλότητας

- Η πλαστιμότητα μετακινήσεως του συστήματος μ_d ορίζεται ως ο λόγος της οριακής μετακίνησης που αντιστοιχεί στη σεισμική αστοχία (d_u) προς τη μετακίνηση που αντιστοιχεί στη διαρροή (d_y), του συστήματος:

$$\mu_d = d_u / d_y \quad (19)$$

- Η πλαστιμότητα καμπυλότητας των πλαστικών αρθρώσεων μ_c ορίζεται ως ο λόγος της καμπυλότητας στη σεισμική αστοχία (C_u) προς την καμπυλότητα στη διαρροή του οπλισμού (C_y), της διατομής της πλαστικής άρθρωσης :

$$\mu_c = C_u / C_y \quad (20)$$

- Η πλαστιμότητα μετακινήσεως μ_d του συστήματος εξαρτάται από τη διαθέσιμη τοπική πλαστιμότητα καμπυλότητας μ_c της πλαστικής άρθρωσης. Για την περίπτωση προβόλου, συνδέονται με τη σχέση :

$$\mu_c = 1 + (\mu_d - 1) / \{3 \lambda (1 - 0.5 \lambda)\} \quad (21)$$

με:

$$\lambda = L_h / L \quad (22)$$

όπου:

L_h = το μήκος της πλαστικής άρθρωσης

L = το μήκος βάρους μορφής προβόλου πλήρως πακτωμένου στο έδαφος, στην παραμόρφωση του οποίου οφείλεται η μετακίνηση του φορέα

4.2 Σχεδιασμός Ενίσχυσης Γέφυρας

Η γέφυρα είναι μονολιθική με ανοίγματα (23.00 + 41.00 + 23.00) m. Η ανωδομή της γέφυρας είναι συνεχής φορέας από προεντεταμένο σκυρόδεμα B35. Η διατομή του φορέα είναι πλάκα συνολικού πάχους 1.50 m με κυκλικά διάκενα $\varnothing 110$.

Τα μεσόβαθρα είναι μονόστυλα κυκλικής διατομής διαμέτρου 2.00 m. Το ύψος τους είναι 11.00 m. Κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα B25. Η θεμελίωση των μεσοβάθρων γίνεται σε τέσσερις πασσάλους $\varnothing 120 / 2.00$ m από οπλισμένο σκυρόδεμα B25 ολικού μήκους 25.00 m μέσω κεφαλόδεσμου διαστάσεων 4.40 m x 4.40 m x 2.50 m.

Τα ακρόβαθρα είναι τοιχοειδή ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 13.70 m x 0.90 m. Το ύψος τους είναι 7.00 m. Κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα B25. Η θεμελίωση των ακρόβαθρων γίνεται σε τέσσερις πασσάλους $\varnothing 120 / 3.40$ m από οπλισμένο σκυρόδεμα B25 ολικού μήκους 29.00 m μέσω κεφαλόδεσμου διαστάσεων 14.10 m x 1.60 m x 1.50 m.

Η ποιότητα του χαλαρού οπλισμού S500 και του χάλυβα προέντασης 1570/1770. Η επικάλυψη των οπλισμών είναι 5 cm.

Η γεωμετρία του φορέα φαίνεται στο Σχήμα 13.

4.2.1 Ανάλυση Γέφυρας

Η ανάλυση του φορέα γίνεται με χρήση του προγράμματος SOFISTIK. Για τη δυναμική ανάλυση χρησιμοποιούμε το φάσμα σχεδιασμού του *Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ 2000)* θεωρώντας τις ακόλουθες παραμέτρους:

Επιτάχυνση Εδάφους $A = 0.12g$ (Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: I)

Συντελεστής Σπουδαιότητας $\gamma_I = 1.00$.

Συντελεστής Θεμελίωσης $\theta = 1.00$.

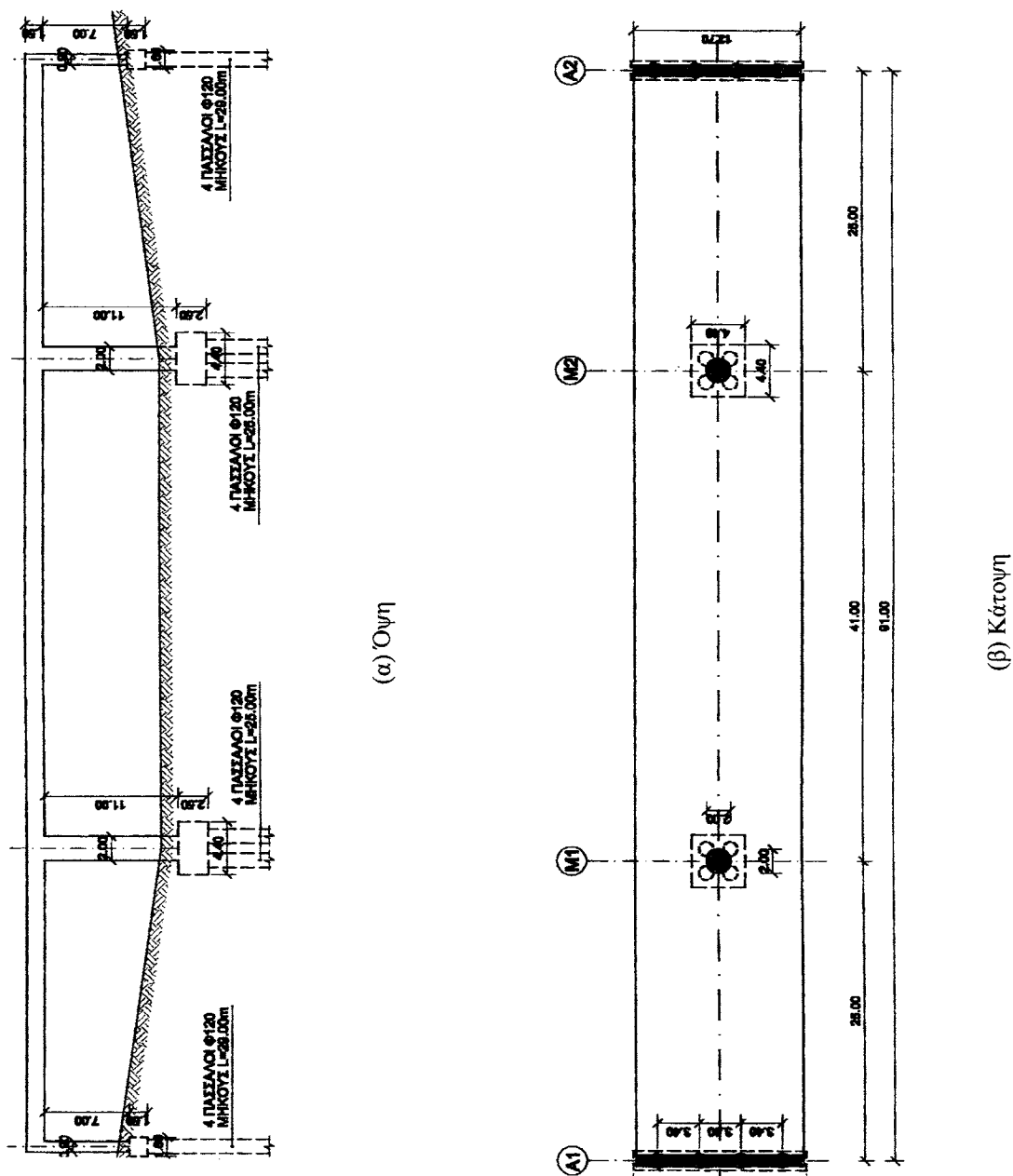
Κατηγορία Εδάφους Γ ($T_1 = 0.20$ sec και $T_2 = 0.80$ sec).

Δείκτης Μετελαστικής Συμπεριφοράς κατά τη Διαμήκη Διεύθυνση $q_x = 1.50$.

Δείκτης Μετελαστικής Συμπεριφοράς κατά την Εγκάρσια Διεύθυνση $q_y = 1.00$.

4.2.1.1 Μεσόβαθρα

Διαπιστώθηκε ότι τα μεσόβαθρα έχουν διαμήκη οπλισμό 64 $\varnothing 25$ (314.24 cm²) και εγκάρσιο οπλισμό σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/20$ (5.65 cm²/m/σκέλος) σε όλο το ύψος τους. Εξετάζεται εάν ο υπάρχων αυτός οπλισμός είναι και ο απαιτούμενος και εάν ο εγκάρσιος ικανοποιεί την απαίτηση για την ύπαρξη επαρκούς οπλισμού περίσφιγξης στις θέσεις που πιθανολογείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων.



Σχήμα 13 Γεωμετρία φορέα.

Από το πρόγραμμα SOFISTIK προέκυψαν για τα μεσόβαθρα τα εξής :

- Μέγιστος απαιτούμενος διαμήκης οπλισμός: $A_{sl} = 314.00 \text{ cm}^2$.
- Μέγιστος απαιτούμενος οπλισμός διάτμησης εντός της περιοχής σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης: $A_{sw} = 7.38 \text{ cm}^2/\text{m}$.
- Μέγιστος απαιτούμενος οπλισμός διάτμησης εκτός της περιοχής σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης: $A_{sw} = 7.68 \text{ cm}^2/\text{m}$.
- Μέγιστη αξονική θλιπτική δύναμη: $N_{max} = 27792 \text{ KN}$.

Από τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής προκύπτουν τα εξής:

- Ολική διατομή σκυροδέματος: $A_c = 3.14 \text{ m}^2$.

- Διατομή περισφιγμένου σκυροδέματος: $A_{cc} = 2.76 \text{ m}^2$.
- Διάμετρος σπείρας: $D_s = 1.90 \text{ m}$.
- Διάμετρος περισφιγμένης διατομής: $D_o = 1.876 \text{ m}$.

(α) Διαμήκης Οπλισμός

- Ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός είναι $\min A_{sl} = 1\% A_c = 314 \text{ cm}^2$.
- Ο υπάρχων διαμήκης οπλισμός είναι $64\varnothing 25 = 314.24 \text{ cm}^2 > \min A_{sl}$.
- Ο απαιτούμενος διαμήκης οπλισμός είναι ίσος με τον ελάχιστο.
Άρα, ο υπάρχων διαμήκης οπλισμός καλύπτει τον απαιτούμενο.

(β) Οπλισμός Περίσφιγξης εντός Περιοχών Σχηματισμού Πλαστικής Άρθρωσης

Από τη σχέση (13) η ανηγμένη αξονική προκύπτει:

$$n_k = 27792 / (3.14 \times 20000) = 0.44 < 0.60$$

Από τη σχέση (12) το μηχανικό ποσοστό του οπλισμού περισφιγξης προκύπτει:

$$\omega = 0.7 (3.14/2.76) (0.44 - 0.10) = 0.27 > 0.18$$

Από τη σχέση (14) το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού περισφιγξης προκύπτει:

$$\rho_s = 0.27 (20/1.50) / (500/1.15) = 0.828\%$$

Από τη σχέση (16) το ελάχιστο ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού στις περιοχές σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης προκύπτει:

$$n_{sl} = 1.08\% \times 1 \times (0.0052 \times 1.90 / 0.025) = 0.43\%$$

Από τη σχέση (15) προκύπτει ο οπλισμός που απαιτείται:

$$A_s/s = \rho_s D_s / 4 = 0.828\% \times 1.90 / 4 = 39.33 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Ο συνδετήρας έχει 2 σκέλη, άρα:

$$A_s/s = 19.67 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Για συνδετήρα διαμέτρου 12 mm προκύπτει ότι ο απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός εντός της περιοχής σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης είναι:

$$\varnothing 12/5 (22.60 \text{ cm}^2/\text{m})$$

Άρα, με τον υπάρχοντα οπλισμό περισφιγξης ($\varnothing 12/20$) δεν καλύπτονται οι απαιτήσεις περισφιγξης στις θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων.

(γ) Οπλισμός Διατήσεως εκτός Περιοχών Σχηματισμού Πλαστικής Άρθρωσης

- Ο υπάρχων οπλισμός είναι $\varnothing 12/20 (5.65 \text{ cm}^2/\text{m}/\text{σκέλος})$, δηλαδή $11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$.
- Από την ανάλυση προέκυψε ότι ο απαιτούμενος είναι $7.68 \text{ cm}^2/\text{m}$.
Άρα, ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης καλύπτει τον απαιτούμενο.

(δ) Πρόσθετες Απαιτήσεις

$$maxs < 1/5 D_o = 1/5 \times (2.00 - 2 \cdot 0.05 - 2 \times 0.012) \times 10^3 = 375.2 \text{ mm} \quad (\alpha)$$

$$maxs < \delta d_{sl} = 4 \times 25 = 100 \text{ mm} \quad (\beta)$$

Η απαίτηση (β) ισχύει για την περιοχή σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης. Με τον υπάρχοντα οπλισμό ($\varnothing 12/20$) η απαίτηση αυτή δεν καλύπτεται.

(ε) Μήκος Πλαστικής Άρθρωσης

Από τη σχέση (17) το μήκος της πλαστικής άρθρωσης προκύπτει:

$$L_h = 0.08 \times 11.00 + 0.022 \times 0.025 \times 500 = 1.16 \text{ m}$$

4.2.1.2 Ακρόβαθρα

Διαπιστώθηκε ότι τα ακρόβαθρα έχουν διαμήκη οπλισμό $252\varnothing 25$ (1237.32 cm^2) και εγκάρσιο οπλισμό δίτητους συνδετήρες $\varnothing 12/10$ ($11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$) κατά το πλάτος της διατομής και συνδετήρες εξήντα οκτώ σκελών $\varnothing 12/10$ ($11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$) εντός κρίσιμης διατομής και $\varnothing 12/20$ ($5.65 \text{ cm}^2/\text{m}$) εκτός κρίσιμης διατομής κατά την επιμήκη πλευρά της διατομής. Εξετάζεται εάν ο υπάρχων αυτός οπλισμός είναι και ο απαιτούμενος και εάν απαιτείται οπλισμός περίσφιξης στις θέσεις που πιθανολογείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων.

Από το πρόγραμμα SOFISTIK προέκυψαν για τα ακρόβαθρα τα εξής :

- Μέγιστος απαιτούμενος διαμήκης οπλισμός: $A_{sl} = 1030.50 \text{ cm}^2$.
- Μέγιστος απαιτούμενος οπλισμός διάτμησης κατά την επιμήκη πλευρά της διατομής:
 $A_{sw} = 92.52 \text{ cm}^2/\text{m}$.
- Μέγιστος απαιτούμενος οπλισμός διάτμησης κατά το πλάτος της διατομής:
 $A_{sw} = 9.59 \text{ cm}^2/\text{m}$.
- Μέγιστη αξονική θλιπτική δύναμη: $N_{max} = 12118 \text{ KN}$.

Από τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής προκύπτουν τα εξής:

- Ολική διατομή σκυροδέματος: $A_c = 12.33 \text{ m}^2$.

(α) Διαμήκης Οπλισμός

- Ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός είναι $min A_{sl} = 1\% A_c = 1233 \text{ cm}^2$.
- Επιπλέον, απαιτείται ελάχιστος οριζόντιος και κατακόρυφος οπλισμός των επιμήκων πλευρών ίσος με 20%, δηλαδή $0.20 \times 90 = 18 \text{ cm}^2/\text{m}$ και ανά παρειά $9 \text{ cm}^2/\text{m}$ ($\varnothing 12/10 = 11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$). Σε σχέση με τον ελάχιστο διαμήκη οπλισμό είναι:
 $9 \text{ cm}^2/\text{m} < 1233 \text{ cm}^2 / (2 \times 13.70 + 2 \times 0.90) \text{ m} = 42.2 \text{ cm}^2/\text{m}$.
- Ο υπάρχων διαμήκης οπλισμός είναι $252\varnothing 25 = 1237.32 \text{ cm}^2 > min A_{sl}$.

- Ο απαιτούμενος διαμήκης οπλισμός που προκύπτει από την ανάλυση του φορέα είναι:
 $1030.50 \text{ cm}^2 < \min A_{sl} = 1237.32 \text{ cm}^2$.

Άρα, ο υπάρχων διαμήκης οπλισμός καλύπτει τον απαιτούμενο.

(β) Οπλισμός Περίσφιγξης εντός Περιοχών Σχηματισμού Πλαστικής Άρθρωσης

Από τη σχέση (13) η ανηγμένη αξονική προκύπτει:

$$n_k = 12118 / (12.33 \times 20000) = 0.05 < 0.08$$

Άρα, δεν απαιτείται οπλισμός περίσφιγξης.

(γ) Οπλισμός Διάτμησης κατά την Επιμήκη Πλευρά της Διατομής

- Ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης είναι $\emptyset 12/10$ ($11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$) εντός της κρίσιμης περιοχής και $\emptyset 12/20$ ($5.65 \text{ cm}^2/\text{m}$) εκτός της κρίσιμης περιοχής.
- Από την ανάλυση προέκυψε ότι ο απαιτούμενος είναι $92.52 \text{ cm}^2/\text{m}$. Έχοντας εξήντα οκτώ σκέλη προκύπτει ίσος με $1.36 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης καλύπτει τις απαιτήσεις των κανονισμών (*ΕΚΩΣ 2000* και *Οδηγίες για την Αντισεισμική Μελέτη Γεφυρών*, Νοέμβριος 1999), αλλά και τον απαιτούμενο οπλισμό, που έχει προκύψει από την ανάλυση.

(δ) Οπλισμός Διάτμησης κατά το Πλάτος της Διατομής

- Ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης είναι $\emptyset 12/10$ ($11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$).
- Από την ανάλυση προέκυψε ότι ο απαιτούμενος είναι $9.59 \text{ cm}^2/\text{m}$. Έχοντας δύο σκέλη προκύπτει ίσος με $4.80 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Άρα, ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης καλύπτει τον απαιτούμενο.

(ε) Μήκος Πλαστικής Άρθρωσης

Από τη σχέση (17) το μήκος της πλαστικής άρθρωσης προκύπτει:

$$L_h = 0.08 \times 7.00 + 0.022 \times 0.025 \times 500 = 0.84 \text{ m}$$

4.2.2 Ενίσχυση Μεσοβάθρων με Μανδύα Σύνθετων Υλικών

4.2.2.1 Αύξηση Πλαστιμότητας

Η πλαστιμότητα (τόσο η γενική πλαστιμότητα μετακίνησης του συστήματος και των βάθρων όσο και η τοπική πλαστιμότητα καμπυλότητας στις θέσεις πλαστικών αρθρώσεων των βάθρων) αυξάνεται στην απαιτούμενη τιμή της με τη χρήση μανδύα σύνθετων υλικών. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις: (α) αύξηση της πλαστιμότητας με μανδύα σύνθετων υλικών ινών υάλου και (β) αύξηση της πλαστιμότητας με μανδύα σύνθετων υλικών ινών άνθρακα.

(α) Πλαστιμότητα Μετακίνησης Στοιχείου και Συστήματος

Σε ένα σύστημα ή σε ένα φέρον στοιχείο η γενική πλαστιμότητα μετακινήσεων (μ_d) και η τοπική πλαστιμότητα καμπυλοτήτων (μ_c) είναι άμεσα συνδεδεμένες. Η ύπαρξη επαρκούς

πλαστιμότητας καμπυλότητας στις θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων είναι αναγκαία, ώστε να επιτρέψει τη μετακίνηση του φορέα, την αντιστοιχί με την πλαστιμότητα μετακινήσεων του συστήματος. Σύμφωνα με τη σχέση (19) για την πλαστιμότητα μετακινήσεων του συστήματος έχουμε:

$$\mu_d = d_u / d_y = (d_y + d_p) / d_y = 1 + d_p / d_y \quad (23)$$

Η πλαστιμότητα μετακινήσεων ενός στοιχείου (μ_{cd}) ορίζεται ως ο λόγος της οριακής μετακίνησης που αντιστοιχεί στη σεισμική αστοχία (d_u) προς τη μετακίνηση που αντιστοιχεί στη διαρροή (d_{cy}), του στοιχείου:

$$\mu_{cd} = d_u / d_{cy} = (d_{cy} + d_p) / d_{cy} = 1 + d_p / d_{cy} \quad (24)$$

Η μετακίνηση που αντιστοιχεί στη διαρροή του συστήματος (d_y) εξαρτάται από τις μετακινήσεις των στοιχείων κατά τη διαρροή του συστήματος, δηλαδή τη μετακίνηση του υποστυλώματος (d_c), του ζυγώματος (d_b), του κόμβου (d_j) και της θεμελίωσης (d_f).

Ως παράδειγμα αναφέρεται το πλαίσιο του Σχήματος 14. Το πλαίσιο είναι έτσι σχεδιασμένο, ώστε οι πλαστικές αρθρώσεις να σχηματιστούν στα υποστυλώματα.

Η μετακίνηση διαρροής του συστήματος ισούται με:

$$d_y = d_c + d_b + d_j + d_f \quad (25)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (25) στην εξίσωση (24) έχουμε:

$$\mu_d = 1 + d_p / d_y = 1 + d_p / (d_c + d_b + d_j + d_f) \quad (26)$$

Η πλαστιμότητα μετακίνησης του υποστυλώματος δίνεται από την εξίσωση (24):

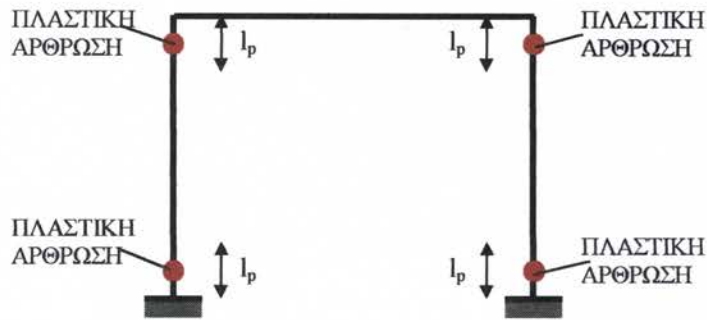
$$\mu_{cd} = 1 + d_p / d_{cy} = 1 + d_p / d_c \quad (27)$$

Από την εξίσωση (27) προκύπτει:

$$d_p = (\mu_{cd} - 1) d_c \quad (28)$$

Από τις σχέσεις (26) και (28) προκύπτει η πλαστιμότητα μετακίνησης του υποστυλώματος συναρτήσει της πλαστιμότητας μετακίνησης του συστήματος:

$$\mu_{cd} = (\mu_d - 1) \cdot [(d_b + d_j + d_f) / d_c + 1] + 1 \quad (29)$$



Σχήμα 14 Πλαίσιο με πλαστικές αρθρώσεις στα υποστυλώματα.

Εάν το ζύγωμα, ο κόμβος και το θεμέλιο θεωρηθούν ως σώματα άπειρης ακαμψίας, τότε η μετακίνηση του συστήματος ισούται με τη μετακίνηση του υποστυλώματος κατά τη διαρροή και η πλαστιμότητα μετακίνησης του υποστυλώματος ισούται με αυτήν του συστήματος:

$$\mu_{cd} = \mu_d \quad (30)$$

(β) Αύξηση Πλαστιμότητας Συστήματος με Μανδύα Σύνθετων Υλικών

Προκειμένου να αυξηθεί η υπάρχουσα πλαστιμότητα του συστήματος στην απαιτούμενη, οι θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων ενισχύονται με μανδύα σύνθετων υλικών. Η τοπική πλαστιμότητα καμπυλότητας (μ_c) της διατομής της πλαστικής άρθρωσης συνδέεται με την πλαστιμότητα μετακινήσεως του στοιχείου (μ_{cd}) μέσω της σχέσης:

$$\mu_c = 1 + (\mu_{cd} - 1) / \{3 (l_p / D) [1 - 0.5 (l_p / D)]\} \quad (31)$$

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 τη σχέση:

$$\varphi_u = \mu_c \varphi_y \quad (32)$$

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

$$\varepsilon_{cu} = \varphi_u c_u \quad (33)$$

Το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετων υλικών είναι:

$$\rho_{sj} = 0.4 (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}) f_{cc}^* / (f_{uj} \varepsilon_{uj}) \quad (34)$$

όπου:

ρ_{sj} = το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης από το μανδύα σύνθετων υλικών

ε_{co} = η αρχική θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος

f_{cc}^* = η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

f_{uj} = η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του μανδύα σύνθετων υλικών

ε_{uj} = η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του μανδύα σύνθετων υλικών

Το απαιτούμενο πάχος (t_f) του μανδύα σύνθετου υλικού, το αυξημένο πάχος (t_f') λόγω πρόσθετης προστασίας των ράβδων του διαμήκους σπλισμού από λυγισμό και οι τελικές στρώσεις (n) του σύνθετου υλικού δίνονται αντίστοιχα από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$t_f = \rho_{sj} D / 4 \quad (35)$$

$$t_f' = 1.33 t_f \quad (36)$$

$$n = t_f' / t_j \quad (37)$$

(γ) Σχεδιασμός Αύξησης Πλαστιμότητας με Μανδύα Σύνθετων Υλικών

Από ανάλυση ροπών – καμπυλοτήτων με τη βοήθεια του προγράμματος FAGUS προέκυψαν τα εξής:

$$\varphi_y = 0.00215 \text{ m}^{-1}$$

$$c_u = 2.00 \text{ m}$$

Η επιδιωκόμενη πλαστιμότητα του συστήματος στη διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με την Εγκύκλιο Ε. 39/99 πρέπει να είναι:

$$\mu_d = 1.50$$

Με θεώρηση πλήρως άκαμπτων κόμβων, ζυγώματος και θεμελίων, η μετακίνηση στη διαρροή του συστήματος εξαρτάται από τη μετακίνηση του υποστυλώματος, οπότε η πλαστιμότητα μετακίνησης των βάθρων (μ_{cd}) θα είναι ίση με την πλαστιμότητα μετακίνησης του συστήματος (μ_d):

$$\mu_{cd} = \mu_d = 1.50$$

Η πλαστιμότητα καμπυλότητας στη διατομή της πλαστικής άρθρωσης των μεσοβάθρων προκύπτει από τη σχέση (31):

$$\mu_c = 1 + (1.50 - 1) / \{3 \times (1.16/11.00) \times [1 - 0.5 \times (1.16/11.00)]\} = 2.6$$

Η καμπυλότητα αστοχίας της διατομής, καθώς και η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος βάσει των σχέσεων (32) και (33) θα είναι, αντίστοιχα:

$$\varphi_u = 2.6 \times 0.00215 = 0.006 \text{ m}^{-1}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.006 \times 2.00 = 0.012$$

Θεωρείται ως αρχική παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος ($\varepsilon_{co} = \varepsilon_{cu}' = 0.0105$) [βλ. σχέση (46)]. Σύμφωνα με την ανάλυση των μεσόβαθρων που προηγήθηκε, ο απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός είναι $\varnothing 12/5$ ($22.60 \text{ cm}^2/\text{m}$). Αν τοποθετηθεί ο απαιτούμενος οπλισμός, τότε η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι $f_{cc}' = 1.50 f_c$ [βλ. σχέση (45)].

A. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Υάλου

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 1.3 \text{ mm}$
- Εφελκυστική τάση: $f_{ij} = 500 \text{ MPa}$
- Εφελκυστική παραμόρφωση: $\varepsilon_{ij} = 0.01$

Το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετων υλικών προκύπτει από τη σχέση (34):

$$\rho_{sj} = 0.4 \times (0.012 - 0.0105) \times 1.50 \cdot 20 / (500 \times 0.01) = 0.0036$$

Από τις σχέσεις (35), (36) και (37) προκύπτει το απαραίτητο πάχος και οι στρώσεις του μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου:

$$t_f = 0.0036 \times 2.00 / 4 = 0.0018 \text{ m}$$

$$t_f' = 1.33 \times 0.0018 = 0.0024 \text{ m}$$

$$n = 0.0024 / 0.0013 = 2 \text{ στρώσεις}$$

B. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Άνθρακα

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 0.13 \text{ mm}$
- Εφελκυστική τάση: $f_{ij} = 1000 \text{ MPa}$
- Εφελκυστική παραμόρφωση: $\varepsilon_{ij} = 0.008$

Το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετων υλικών προκύπτει από τη σχέση (34):

$$\rho_{sj} = 0.4 \times (0.012 - 0.0105) \times 1.50 \cdot 20 / (1000 \times 0.008) = 0.0023$$

Από τις σχέσεις (35), (36) και (37) προκύπτει το απαραίτητο πάχος και οι στρώσεις του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα:

$$t_f = 0.0023 \times 2.00 / 4 = 0.00115 \text{ m}$$

$$t_f' = 1.33 \times 0.00115 = 0.00153 \text{ m}$$

$$n = 0.00153 / 0.00013 = 12 \text{ στρώσεις}$$

(δ) Μήκος Περίσφιξης

Το μήκος περίσφιξης θα ληφθεί ίσο με το ύψος της διατομής κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση (το μήκος αυτό είναι μεγαλύτερο από το μήκος εντός του οποίου η ροπή υπερβαίνει το 80% της μέγιστης τιμής της):

$$L_h = 2.00 \text{ m}$$

Η τιμή της ανηγμένης αξονικής είναι μεγαλύτερη του 0.30 ($n_k = 0.44 > 0.30$), οπότε το μήκος περίσφιξης αυξάνεται κατά 50%:

$$L_h' = 3.00 \text{ m}$$

4.2.2.2 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής

Προκειμένου να αυξηθεί η διατμητική αντοχή των μεσοβάθρων, ενισχύονται αυτά με μανδύα σύνθετων υλικών. Η διατμητική δύναμη που παραλαμβάνεται πλήρως από το μανδύα σύνθετου υλικού ινών υψηλής αντοχής σε κυκλική διατομή δίνεται από τη σχέση :

$$V_{sj} = a f_j n t_j D \quad (38)$$

όπου $a = 2.25$ είναι ο συντελεστής διάτμησης κυκλικού υποστυλώματος.

Η τέμνουσα δύναμη που παραλαμβάνει ο υπάρχων οπλισμός διατμήσεως (συνδετήρες) δίνεται από τη σχέση:

$$V_w = (A_{sw} / s) 0.9 d f_{ywd} \quad (39)$$

Αγνοώντας τη συμμετοχή του σκυροδέματος και τους μηχανισμούς θλίψης κατά την ανάληψη της τέμνουσας δύναμης και θεωρώντας ότι αυτή αναλαμβάνεται πλήρως μόνο από τον οπλισμό διατμήσεως, δηλαδή τους συνδετήρες και το μανδύα σύνθετου υλικού, ισχύει η σχέση:

$$V_{max} = V_w + V_{sj} \quad (40)$$

Από τις σχέσεις (38) και (40) προκύπτουν οι απαιτούμενες στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού, που απαιτούνται για την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής της διατομής:

$$n = (V_{max} - V_w) / (a f_j t_j D) \quad (41)$$

(α) Εντός Κρίσιμης Περιοχής

Ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης είναι $\varnothing 12/20$ (δίτημος), δηλαδή $11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$. Η δύναμη που παραλαμβάνουν οι συνδετήρες προκύπτει από τη σχέση (39):

$$V_w = (11.30 \times 10^{-4}) \times 0.9 \times 1.90 \times 500000 / 1.15 = 840 \text{ KN}$$

Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που καταπονεί τη διατομή, όπως προκύπτει από την ανάλυση, ισούται με:

$$V_{max} = 1125 \text{ KN}$$

A. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Υάλου

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 1.3 \text{ mm}$
- Τάση σχεδιασμού σε διάτμηση: $f_j = 120000 \text{ KPa}$

Οι στρώσεις του μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου που απαιτούνται, ως πρόσθετος οπλισμός διάτμησης, για την παραλαβή της μέγιστης δύναμης προκύπτουν από τη σχέση (41):

$$n = (1125 - 840) / (2.25 \times 120000 \times 0.0013 \times 2.00) = 1 \text{ στρώση}$$

B. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Άνθρακα

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 0.13 \text{ mm}$
- Τάση σχεδιασμού σε διάτμηση: $f_j = 240000 \text{ KPa}$

Οι στρώσεις του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα που απαιτούνται, ως πρόσθετος οπλισμός διάτμησης, για την παραλαβή της μέγιστης δύναμης προκύπτουν από τη σχέση (41):

$$n = (1125 - 840) / (2.25 \times 240000 \times 0.00013 \times 2.00) = 3 \text{ στρώσεις}$$

(β) Εκτός Κρίσιμης Περιοχής

Ο υπάρχων οπλισμός διατμήσεως είναι $\varnothing 12/20$ (δίτημος), δηλαδή $11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$. Η δύναμη που παραλαμβάνουν οι συνδετήρες προκύπτει από τη σχέση (39):

$$V_w = (11.30 \times 10^{-4}) \times 0.9 \times 1.90 \times 500000 / 1.15 = 840 \text{ KN}$$

Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που καταπονεί τη διατομή, όπως προκύπτει από την ανάλυση, ισούται με:

$$V_{max} = 1125 \text{ KN}$$

A. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Υάλου

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 1.3 \text{ mm}$
- Τάση σχεδιασμού σε διάτμηση: $f_j = 120000 \text{ KPa}$

Οι στρώσεις του μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου που απαιτούνται, ως πρόσθετος οπλισμός διάτμησης, για την παραλαβή της μέγιστης δύναμης προκύπτουν από τη σχέση (41):

$$n = (1125 - 840) / (2.25 \times 120000 \times 0.0013 \times 2.00) = 1 \text{ στρώση}$$

B. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Άνθρακα

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 0.13 \text{ mm}$
- Τάση σχεδιασμού σε διάτμηση: $f_j = 240000 \text{ KPa}$

Οι στρώσεις του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα που απαιτούνται, ως πρόσθετος οπλισμός διάτμησης, για την παραλαβή της μέγιστης δύναμης προκύπτουν από τη σχέση (41):

$$n = (1125 - 840) / (2.25 \times 240000 \times 0.00013 \times 2.00) = 3 \text{ στρώσεις}$$

4.2.2.3 Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής Σκυροδέματος

(α) Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής Σκυροδέματος με Μανδύα Σύνθετων Υλικών

Η αυξημένη λόγω περίσφιξης από το μανδύα σύνθετου υλικού θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κυκλικής διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$f_{cc}^* = f_{co} [2.25 (1 + 7.94 f_i / f_{co})^{1/2} - 2 f_i / f_{co} - 1.25] \quad (42)$$

με:

$$f_i = 0.26 \rho_{sj} f_{uj} \quad (43)$$

(β) Περίσφιξη από Συνδετήρες

Η θλιπτική αντοχή, καθώς και η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος αυξάνονται λόγω της περίσφιξης που προσφέρουν οι συνδετήρες. Έτσι, εάν f_c και ε_{cu} η θλιπτική αντοχή και η παραμόρφωση αστοχίας του απερίσφικτου σκυροδέματος αντίστοιχα και f_{cc}' και ε_{cu}' η θλιπτική αντοχή και η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου από τους συνδετήρες σκυροδέματος, οι σχέσεις που τις συνδέουν είναι [Θ. Π. Τάσιος, 1988]:

$$f_{cc}' = (1 + 2.5 \alpha \omega) f_c \quad \alpha \omega < 0.10 \quad (44)$$

$$f_{cc}' = (1.125 + 1.25 \alpha \omega) f_c \quad \alpha \omega > 0.10 \quad (45)$$

$$\varepsilon_{cu}' = \varepsilon_{cu} + 0.10 \alpha \omega \quad (46)$$

όπου:

α = συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης

- για κυκλικό συνδετήρα ισούται με 0.56
- εάν ο λόγος s/D_o είναι μικρότερος του 0.50, τότε δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha' = \alpha 1.8 (1 - 0.5 s/D_o)^2$$

(γ) Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής Σκυροδέματος λόγω Περίσφιγξης από Υφιστάμενους Συνδετήρες

Για τα μεσόβαθρα ο λόγος s/D_o ισούται με $0.20/1.876 = 0.11 < 0.50$, άρα $\alpha' = 0.56 \times 1.8 \times (1 - 0.5 \times 0.11)^2 = 0.90$.

Από τη σχέση (15) το γεωμετρικό ποσοστό του υπάρχοντος οπλισμού περίσφιγξης προκύπτει:

$$\rho_s = 4 \times 2 \times 5.65 / 1.90 = 0.238\%$$

Από τη σχέση (14) το μηχανικό ποσοστό του υπάρχοντος οπλισμού περίσφιγξης προκύπτει:

$$\omega = 0.238\% \times (500/1.15) / (20/1.50) = 0.08$$

Το γινόμενο $\alpha \omega$ ισούται με $0.90 \times 0.08 = 0.07 < 0.10$

Άρα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής και η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος λόγω της περίσφιγξης της διατομής από τους υπάρχοντες συνδετήρες δίνονται από τις σχέσεις (44) και (46) αντίστοιχα:

$$f_{cc}' = 1.18 f_c, \text{ αύξηση κατά } 18\%$$

$$\varepsilon_{cu}' = \varepsilon_{cu} + 0.007 = 0.0105$$

(δ) Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής Σκυροδέματος λόγω Περίσφιγξης από Απαιτούμενους Συνδετήρες εντός Κρίσιμης Περιοχής

Οι απαιτούμενοι συνδετήρες, όπως προκύπτει από την ανάλυση είναι $\varnothing 12/5$ (22.60 cm²/m/σκέλος). Για τα μεσόβαθρα ο λόγος s/D_o ισούται με $0.05/1.876 = 0.027 < 0.50$, άρα $\alpha' = 0.56 \times 1.8 \times (1 - 0.5 \times 0.027)^2 = 0.98$.

Από τη σχέση (15) το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης που απαιτείται είναι:

$$\rho_s = 4 \times 2 \times 22.60 / 1.90 = 0.952\%$$

Από τη σχέση (14) το μηχανικό ποσοστό του υπάρχοντος οπλισμού περίσφιγξης προκύπτει:

$$\omega = 0.952\% \times (500/1.15) / (20/1.50) = 0.31$$

Το γινόμενο $\alpha \omega$ ισούται με $0.98 \times 0.31 = 0.30 > 0.10$

Άρα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής και η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος λόγω της περίσφιγξης της διατομής από τους απαιτούμενους συνδετήρες δίνονται από τις σχέσεις (45) και (46) αντίστοιχα:

$$f_{cc}' = 1.50 f_c, \text{ αύξηση κατά } 50\%$$

$$\varepsilon_{cu}' = \varepsilon_{cu} + 0.03 = 0.0335$$

(ε) Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής Σκυροδέματος λόγω Περίσφιγξης από Απαιτούμενους Συνδετήρες εκτός Κρίσιμης Περιοχής

Οι απαιτούμενοι συνδετήρες, όπως προκύπτει από την ανάλυση είναι $7.68 \text{ cm}^2/\text{m}$ ή $\varnothing 12/20$ ($5.65 \text{ cm}^2/\text{m}/\text{σκέλος}$). Όπως προαναφέρθηκε οι υπάρχοντες συνδετήρες καλύπτουν τους απαιτούμενους εκτός της κρίσιμης περιοχής. Άρα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής και η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος λόγω της περισφιγξης της διατομής από τους απαιτούμενους συνδετήρες, όπως προέκυψε παραπάνω για τους υπάρχοντες συνδετήρες είναι αντίστοιχα:

$$f_{cc}' = 1.18 f_c, \text{ αύξηση κατά } 18\%$$

$$\varepsilon_{cu}' = \varepsilon_{cu} + 0.007 = 0.0105$$

(στ) Συνολική Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής Σκυροδέματος

Τα μεσόβαθρα ενισχύονται με μανδύα σύνθετων υλικών, προκειμένου η πλαστιμότητα και η διατμητική αντοχή να φτάσουν στο απαιτούμενο επίπεδο. Εξετάζεται η χρήση μανδύα σύνθετων υλικών ινών υάλου και μανδύα σύνθετων υλικών ινών άνθρακα.

A. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Υάλου

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 1.3 \text{ mm}$
- Εφελκυστική τάση: $f_{uj} = 500 \text{ MPa}$

Συγκεντρωτικά τοποθετούνται (Σχήμα 15):

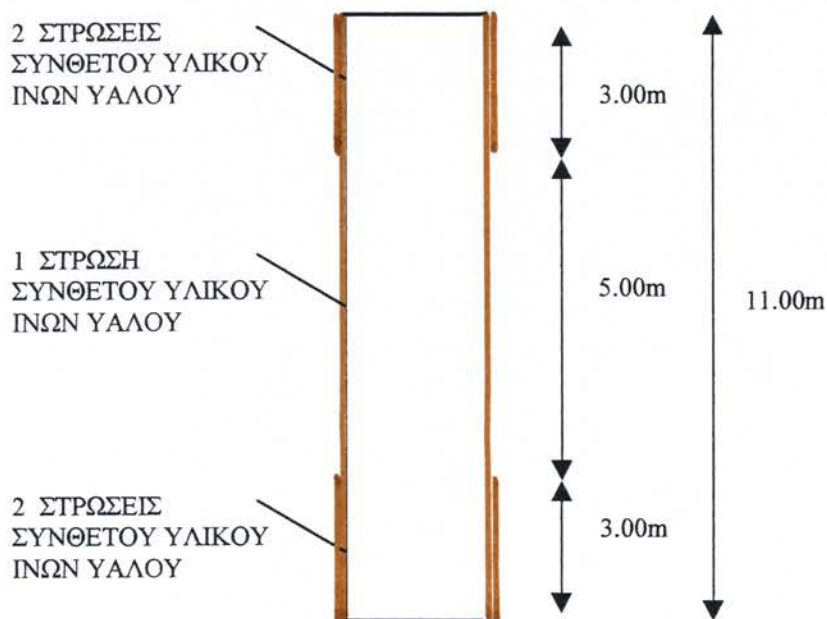
- 2 στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου στα άνω και κάτω 3.00 m των μεσοβάθρων.
- 1 στρώση μανδύα σύνθετου υλικού ινών υάλου στο υπόλοιπο ύψος (5.00 m) των μεσοβάθρων.

Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω περισφιγξης από το μανδύα σύνθετων υλικών ινών υάλου σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του υφιστάμενου σκυροδέματος προκύπτει από τις σχέσεις (35), (42) και (43):

Εντός Κρίσιμης Περιοχής

$$\rho_{sj} = 4 \times (2 \times 0.0013) / 2.00 = 0.0052$$

$$f_l = 0.26 \times 0.0052 \times 500 = 0.676 \text{ MPa}$$



Σχήμα 15 Ενίσχυση μεσοβάθρων με μανδύα σύνθετων υλικών ινών υάλου.

$$f_{cc}^* = f_{cc}' \times [2.25 \times (1 + 7.94 \times 0.676 / 23.6)^{1/2} - 2 \times 0.676 / 23.6 - 1.25] = 1.19 f_{cc}' = 1.40 f_c$$

Η πρόσθετη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών ινών υάλου είναι 19%.

Η συνολική αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είναι 40%.

Εκτός Κρίσιμης Περιοχής

$$\rho_{sj} = 4 \times (1 \times 0.0013) / 2.00 = 0.0026$$

$$f_l = 0.26 \times 0.0026 \times 500 = 0.338 \text{ MPa}$$

$$f_{cc}^* = f_{cc}' \times [2.25 \times (1 + 7.94 \times 0.338 / 23.6)^{1/2} - 2 \times 0.338 / 23.6 - 1.25] = 1.10 f_{cc}' = 1.30 f_c$$

Η πρόσθετη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών ινών υάλου είναι 10%.

Η συνολική αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είναι 30%.

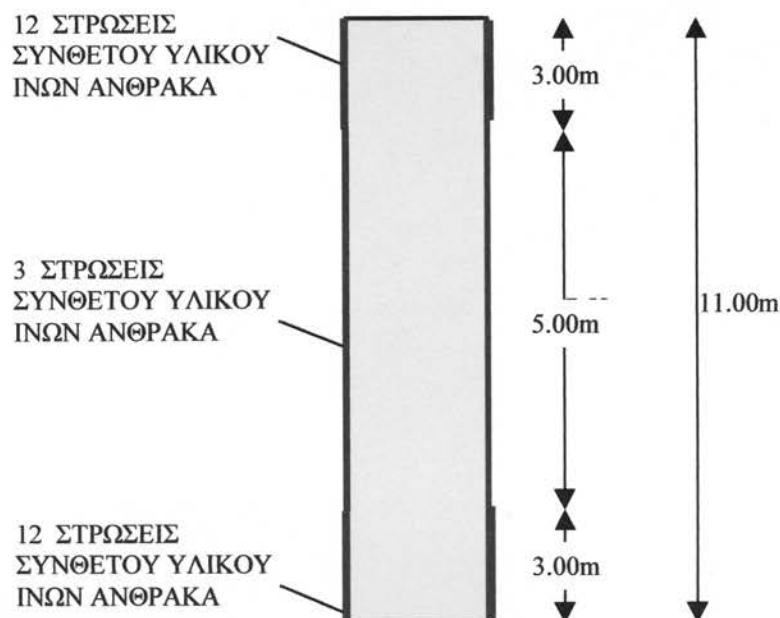
Β. Μανδύας Σύνθετων Υλικών Ινών Άνθρακα

Τα χαρακτηριστικά του μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα είναι:

- Πάχος μίας στρώσης: $t_j = 0.13 \text{ mm}$
- Εφελκυστική τάση: $f_{uj} = 1000 \text{ MPa}$

Συγκεντρωτικά, τοποθετούνται (Σχήμα 16):

- 12 στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα στα άνω και κάτω 3.00 m των μεσοβάθρων.
- 3 στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού ινών άνθρακα στο υπόλοιπο ύψος (5.00 m) των μεσοβάθρων.



Σχήμα 16 Ενίσχυση μεσοβάθρων με μανδύα σύνθετων υλικών ινών άνθρακα.

Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω περίσφιγξης από το μανδύα σύνθετων υλικών ινών άνθρακα σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του υφιστάμενου σκυροδέματος προκύπτει από τις σχέσεις (35), (42) και (43):

Εντός Κρίσιμης Περιοχής

$$\rho_{sj} = 4 \times (12 \times 0.00013) / 2.00 = 0.0031$$

$$f_l = 0.26 \times 0.0031 \times 1000 = 0.806 \text{ MPa}$$

$$f_{cc}^* = f_{cc}' \times [2.25 \times (1 + 7.94 \times 0.806 / 23.6)^{1/2} - 2 \times 0.806 / 23.6 - 1.25] = 1.22 f_{cc}' = 1.44 f_c$$

Η πρόσθετη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών ινών άνθρακα είναι 22%.

Η συνολική αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είναι 44%.

Εκτός Κρίσιμης Περιοχής

$$\rho_{sj} = 4 \times (3 \times 0.00013) / 2.00 = 0.00078$$

$$f_l = 0.26 \times 0.00078 \times 1000 = 0.203 \text{ MPa}$$

$$f_{cc}^* = f_{cc}' \times [2.25 \times (1 + 7.94 \times 0.203 / 23.6)^{1/2} - 2 \times 0.203 / 23.6 - 1.25] = 1.06 f_{cc}' = 1.25 f_c$$

Η πρόσθετη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του *μανδύα σύνθετων υλικών ινών υάλου είναι 6%*.

Η συνολική αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είναι 25%.

4.2.3 Ενίσχυση Μεσοβάθρων με Μανδύα από Οπλισμένο Σκυρόδεμα

4.2.3.1 Σχεδιασμός Μανδύα Οπλισμένου Σκυροδέματος με τη Μέθοδο των Δυνάμεων

Η μέθοδος σεισμικής ενίσχυσης βάθρων γεφυρών με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος είναι αρκετά διαδεδομένη στον ελλαδικό χώρο. Έστω ότι θα χρησιμοποιηθεί μανδύας πάχους $t_f = 10 \text{ cm}$ με εγκάρσιο οπλισμό σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12$. Στην περίπτωση αυτή τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής μεταβάλλονται ως εξής:

- Ολική διατομή σκυροδέματος: $A_c = 3.80 \text{ m}^2$.
- Διατομή περισφιγμένου σκυροδέματος: $A_{cc} = 3.39 \text{ m}^2$.
- Διάμετρος σπείρας: $D_s = 2.10 \text{ m}$.
- Διάμετρος περισφιγμένης διατομής: $D_o = 2.076 \text{ m}$.

(α) Διαμήκης Οπλισμός

- Ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός είναι $\min A_{sl} = 1\% A_c = 380 \text{ cm}^2$.
- Θα χρησιμοποιηθούν $64\varnothing 28 = 394.08 \text{ cm}^2 > \min A_{sl}$.

(β) Οπλισμός Περίσφιξης εντός Περιοχών Σχηματισμού Πλαστικής Άρθρωσης

Από τη σχέση (13) η ανηγμένη αξονική προκύπτει:

$$n_k = 27792 / (3.80 \times 20000) = 0.37 < 0.60$$

Από τη σχέση (12) το μηχανικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιξης προκύπτει:

$$\omega = 0.7 (3.80/3.39) (0.37 - 0.10) = 0.21 > 0.18$$

Από τη σχέση (14) το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιξης προκύπτει:

$$\rho_s = 0.21 (20/1.50) / (500/1.15) = 0.640\%$$

Από τη σχέση (16) το ελάχιστο ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού στις περιοχές σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης προκύπτει:

$$n_{sl} = 1.04\% \times 1 \times (0.0052 \times 2.10 / 0.028) = 0.40\%$$

Από τη σχέση (15) προκύπτει ο οπλισμός που απαιτείται:

$$A_s/s = \rho_s D_s / 4 = 0.640\% \times 2.10 / 4 = 33.61 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Ο συνδετήρας έχει 2 σκέλη, άρα:

$$A_s/s = 16.81 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Για συνδετήρα διαμέτρου 12 mm προκύπτει ότι ο απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός εντός της περιοχής σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης είναι:

$$\underline{\varnothing 12/6.5 (17.40 \text{ cm}^2/\text{m})}$$

(γ) Πρόσθετες Απαιτήσεις

$$maxs < 1/5 D_o = 1/5 \times 2.076 \times 10^3 = 415 \text{ mm} \quad (\alpha)$$

$$maxs < \delta d_{sl} = 4 \times 28 = 112 \text{ mm} \quad (\beta)$$

Με τον οπλισμό που επιλέχθηκε ($\varnothing 12/6.5$) και οι δύο απαιτήσεις καλύπτονται.

(δ) Μήκος Πλαστικής Άρθρωσης

Από τη σχέση (17) το μήκος της πλαστικής άρθρωσης προκύπτει:

$$L_h = 0.08 \times 11.00 + 0.022 \times 0.025 \times 500 = 1.16 \text{ m}$$

(ε) Μήκος Περίσφιγξης

Το μήκος περισφιγξης θα ληφθεί ίσο με το ύψος της διατομής κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση (το μήκος αυτό είναι μεγαλύτερο από το μήκος εντός του οποίου η ροπή υπερβαίνει το 80% της μέγιστης τιμής της):

$$L_h = 2.20 \text{ m}$$

Η τιμή της ανηγμένης αξονικής είναι μεγαλύτερη του 0.30 ($n_k = 0.37 > 0.30$), οπότε το μήκος περισφιγξης αυξάνεται κατά 50%:

$$L_h' = 3.30 \text{ m}$$

Πέραν του μήκους περισφιγξης και για πρόσθετο μήκος ίσο με L_h' ο εγκάρσιος οπλισμός δεν πρέπει να είναι λιγότερος από το 50% του οπλισμού περισφιγξης. Επομένως σε μήκος 3.30 m από το άνω και το κάτω άκρο του βάθρου θα χρησιμοποιήσουμε σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/6.5$ και στα υπόλοιπα 4.40 m σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/13$.

(στ) Έλεγχος Πλαστιμότητας με Μανδύα Οπλισμένου Σκυροδέματος

Από ανάλυση ροπών – καμπυλοτήτων με τη βοήθεια του προγράμματος FAGUS προέκυψαν τα εξής για την ενισχυμένη διατομή (ο υφιστάμενος οπλισμός της αρχικής διατομής αγνοήθηκε):

$$\varphi_y = 0.0021 \text{ m}^{-1}$$

$$c_u = 1.32 \text{ m}$$

Για τους συνδετήρες που επιλέχθηκαν ο λόγος s/D_o ισούται με $0.065/2.076 = 0.0313 < 0.50$, άρα $\alpha' = 0.56 \times 1.8 \times (1 - 0.5 \times 0.0313)^2 = 0.977$.

Από τη σχέση (15) το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης είναι:

$$\rho_s = 4 \times 2 \times 17.40 / 2.10 = 0.663\%$$

Από τη σχέση (14) το μηχανικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης προκύπτει:

$$\omega = 0.663\% \times (500/1.15) / (20/1.50) = 0.216$$

Το γινόμενο $\alpha \omega$ ισούται με $0.977 \times 0.216 = 0.211 > 0.10$

Άρα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής και η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος λόγω της περίσφιγξης της διατομής από τους απαιτούμενους συνδετήρες δίνονται από τις σχέσεις (45) και (46) αντίστοιχα:

$$f_{cc}' = 1.39 f_{cs} \text{ αύξηση κατά } 39\%$$

$$\varepsilon_{cu}' = \varepsilon_{cu} + 0.0211 = 0.0246$$

Η καμπυλότητα αστοχίας της διατομής βάσει της σχέσης (33) θα είναι:

$$\varphi_u = 0.0246 / 1.32 = 0.0187 \text{ m}^{-1}$$

Η πλαστιμότητα καμπυλότητας της διατομής προκύπτει από τη σχέση (32):

$$\mu_c = 0.0187 / 0.0021 = 8.88$$

Η πλαστιμότητα μετακίνησης του μεσόβαθρου δίνεται από τη σχέση (31):

$$\mu_{cd} = (8.88 - 1) \times \{3 \times (1.16/11.00) \times [1 - 0.5 \times (1.16/11.00)]\} + 1 = 3.36$$

Με θεώρηση πλήρως άκαμπτων κόμβων, ζυγώματος και θεμελίων, η μετακίνηση στη διαρροή του συστήματος εξαρτάται από τη μετακίνηση του υποστυλώματος, οπότε η πλαστιμότητα μετακίνησης των βάθρων (μ_{cd}) θα είναι ίση με την πλαστιμότητα μετακίνησης του συστήματος (μ_d):

$$\mu_{cd} = \mu_d = 3.36$$

Η τιμή αυτή της πλαστιμότητας μετακίνησης του συστήματος είναι μεγαλύτερη από την επιδιωκόμενη πλαστιμότητα στη διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με την Εγκύκλιο Ε. 39/99 ($\mu_d = 1.50$) οπότε ο σχεδιασμός είναι επαρκής.

4.2.3.2 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής

Αγνοώντας τη συμμετοχή του σκυροδέματος και τους μηχανισμούς θλίψης κατά την ανάληψη της τέμνουσας δύναμης και θεωρώντας ότι αυτή αναλαμβάνεται πλήρως μόνο από τους σπειροειδείς συνδετήρες του μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος, ισχύει η σχέση:

$$V_{max} = V_w \quad (47)$$

(α) Εντός Κρίσιμης Περιοχής

Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που καταπονεί τη διατομή, όπως προκύπτει από την ανάλυση, ισούται με:

$$V_{max} = 1125 \text{ KN}$$

Χρησιμοποιώντας συνδετήρες διαμέτρου $\varnothing 12$, η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των συνδετήρων προκύπτει βάσει των σχέσεων (39) και (47):

$$s \leq A_{sw} 0.9 d f_{ywd} / V_{max} = (2.26 \times 10^{-4}) \times 0.9 \times 2.10 \times (500000 / 1.15) / 1125 = 16.5 \text{ cm}$$

Επειδή η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη από την απόσταση των συνδετήρων για αύξηση της πλαστιμότητας, δε χρειάζεται να αλλάξουμε τους συνδετήρες που έχουμε ήδη επιλέξει.

(α) Εκτός Κρίσιμης Περιοχής

Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που καταπονεί τη διατομή, όπως προκύπτει από την ανάλυση, ισούται με:

$$V_{max} = 1125 \text{ KN}$$

Χρησιμοποιώντας συνδετήρες διαμέτρου $\varnothing 12$, η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των συνδετήρων προκύπτει βάσει των σχέσεων (39) και (47):

$$s \leq A_{sw} 0.9 d f_{ywd} / V_{max} = (2.26 \times 10^{-4}) \times 0.9 \times 2.10 \times (500000 / 1.15) / 1125 = 16.5 \text{ cm}$$

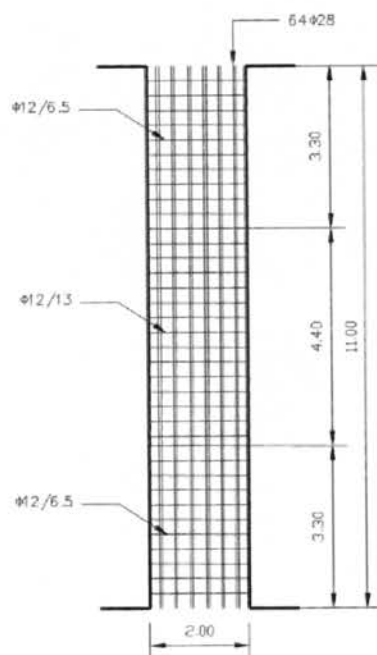
Επειδή η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη από την απόσταση των συνδετήρων για αύξηση της πλαστιμότητας, δε χρειάζεται να αλλάξουμε τους συνδετήρες που έχουμε ήδη επιλέξει.

Συγκεντρωτικά τοποθετούνται (Σχήμα 17):

- Σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/6.5$ στα άνω και κάτω 3.30 m των μεσοβάθρων.
- Σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/13$ στο υπόλοιπο ύψος (4.40 m) των μεσοβάθρων.

4.2.3.3 Εναλλακτικός Σχεδιασμός Μανδύα Οπλισμένου Σκυροδέματος με τη Μέθοδο των Μετακινήσεων

Εναλλακτικά στη μέθοδο σχεδιασμού του μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος με βάση τις απαιτήσεις του κανονισμού (*Μέθοδος των Δυνάμεων*) και του εκ των υστέρων ελέγχου της πλαστιμότητας, υπάρχει η δυνατότητα του εξαρχής σχεδιασμού του μανδύα έτσι ώστε να επιτευχθεί αύξηση της υπάρχουσας πλαστιμότητας του συστήματος στην απαιτούμενη (*Μέθοδος των Μετακινήσεων*) εντός των κρίσιμων περιοχών.



Σχήμα 17 Ενίσχυση μεσόβαθρων με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος (Μέθοδος των Δυνάμεων).

Όμοια με προηγουμένως, για την ενίσχυση της αρχικής διατομής των μεσόβαθρων θα χρησιμοποιηθεί μανδύας πάχους $t_j = 10$ cm. Στο μανδύα θα τοποθετηθεί ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός $minA_{sl} = 1\% A_c = 380$ cm². Προκειμένου να υπάρχει αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση επιλέγουμε $64\text{Ø}28 = 394.08$ cm² $\approx minA_{sl}$.

Όπως προαναφέρθηκε, ανάλυση ροπών – καμπυλοτήτων της αρχικής διατομής με τη βοήθεια του προγράμματος FAGUS έδωσε τα εξής:

$$\varphi_y = 0.00215 \text{ m}^{-1}$$

$$c_u = 2.00 \text{ m}$$

Η επιδιωκόμενη πλαστιμότητα του συστήματος στη διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με την Εγκύκλιο Ε. 39/99 πρέπει να είναι:

$$\mu_d = 1.50$$

Με θεώρηση πλήρως άκαμπτων κόμβων, ζυγώματος και θεμελίων, η μετακίνηση στη διαρροή του συστήματος εξαρτάται από τη μετακίνηση του υποστυλώματος, οπότε η πλαστιμότητα μετακίνησης των βάθρων (μ_{cd}) θα είναι ίση με την πλαστιμότητα μετακίνησης του συστήματος (μ_d):

$$\mu_{cd} = \mu_d = 1.50$$

Η πλαστιμότητα καμπυλότητας στη διατομή της πλαστικής άρθρωσης των μεσοβάθρων προκύπτει από τη σχέση (31):

$$\mu_c = 1 + (1.50 - 1) / \{3 \times (1.16/11.00) \times [1 - 0.5 \times (1.16/11.00)]\} = 2.6$$

Η καμπυλότητα αστοχίας της διατομής, καθώς και η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος βάσει των σχέσεων (32) και (33) θα είναι, αντίστοιχα:

$$\varphi_u = 2.6 \times 0.00215 = 0.006 \text{ m}^{-1}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.006 \times 2.00 = 0.012$$

Η διαδικασία που θα χρησιμοποιηθεί είναι επαναληπτική και ξεκινάει υποθέτοντας την ποσότητα του εγκάρσιου οπλισμού περίσφιξης εντός της κρίσιμης περιοχής του βάθρου. Έστω ότι θα χρησιμοποιηθούν σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/15$. Για τους συνδετήρες αυτούς ο λόγος s/D_o ισούται με $0.15/2.076 = 0.072 < 0.50$, άρα $\alpha' = 0.56 \times 1.8 \times (1 - 0.5 \times 0.072)^2 = 0.94$.

Από τη σχέση (15) το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιξης είναι:

$$\rho_s = 4 \times 2 \times 7.54 / 2.10 = 0.287\%$$

Από τη σχέση (14) το μηχανικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιξης προκύπτει:

$$\omega = 0.287\% \times (500/1.15) / (20/1.50) = 0.094$$

Το γινόμενο $\alpha \omega$ ισούται με $0.94 \times 0.094 = 0.088 < 0.10$

Άρα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής και η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος λόγω της περίσφιξης της διατομής από τους συνδετήρες που επιλέχθηκαν δίνονται από τις σχέσεις (45) και (46) αντίστοιχα:

$$f_{cc}' = 1.22 f_c, \text{ αύξηση κατά } 22\%$$

$$\varepsilon_{cu}' = \varepsilon_{cu} + 0.0088 = 0.0123$$

Επειδή η τιμή του ε_{cu}' που προέκυψε είναι πολύ κοντά στην τιμή με βάση την επιδιωκόμενη πλαστιμότητα του συστήματος ($\varepsilon_{cu} = 0.012$) δεν χρειάζεται άλλη επανάληψη.

Το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού με βάση την απαιτούμενη πλαστιμότητα $\rho_s = 0.287\%$ είναι μικρότερο από το ποσοστό που απαιτείται για αποφυγή λυγισμού των ράβδων του διαμήκους οπλισμού στις περιοχές σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης $n_{st} = 0.40\%$. Επομένως το ελάχιστο ποσοστό συνδετήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι $\rho_s = 0.40\%$. Ο οπλισμός που απαιτείται προκύπτει από τη σχέση (15):

$$A_s/s = \rho_s D_s / 4 = 0.40\% \times 2.10 / 4 = 21 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Ο συνδετήρας έχει 2 σκέλη, άρα:

$$A_s/s = 10.5 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Για συνδετήρα διαμέτρου 12 mm προκύπτει ότι ο απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός εντός της περιοχής σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης είναι:

$$\underline{\varnothing 12/10 \text{ (11.30 cm}^2/\text{m)}}$$

Θα πρέπει επίσης να τηρούνται οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$maxs < 1/5 D_o = 1/5 \times 2.076 \times 10^3 = 415 \text{ mm} \quad (\alpha)$$

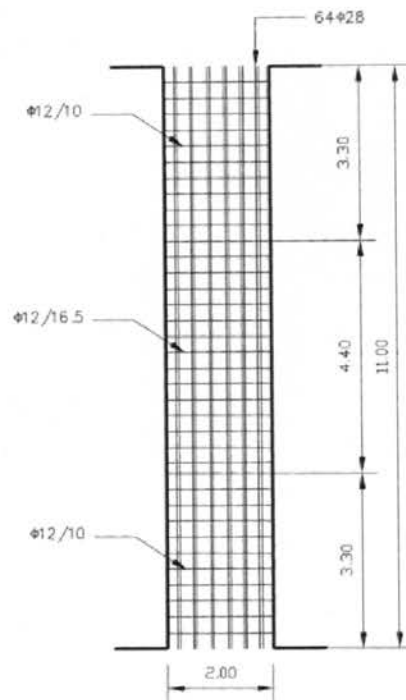
$$maxs < \delta d_{sl} = 4 \times 28 = 112 \text{ mm} \quad (\beta)$$

Με τον οπλισμό που επιλέχθηκε ($\varnothing 12/10$) και οι δύο απαιτήσεις καλύπτονται.

Εκτός των κρίσιμων περιοχών του βάθρου η ποσότητα των συνδετήρων προκύπτει με βάση την απαιτούμενη διατμητική αντοχή αρκεί ο οπλισμός που θα επιλεγεί να μην είναι λιγότερος από το 50% του οπλισμού περίσφιξης. Έτσι επιλέγονται $\varnothing 12/16.5$.

Συγκεντρωτικά τοποθετούνται (Σχήμα 18):

- Σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/10$ στα άνω και κάτω 3.30 m των μεσοβάθρων.
- Σπειροειδείς συνδετήρες $\varnothing 12/16.5$ στο υπόλοιπο ύψος (4.40 m) των μεσοβάθρων.



Σχήμα 18 Ενίσχυση μεσόβαθρων με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος
(Μέθοδος των Μετακινήσεων).

Με βάση τα παραπάνω είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός με τη Μέθοδο των Μετακινήσεων είναι ευνοϊκότερος σε σχέση με το σχεδιασμό με τη Μέθοδο των Δυνάμεων αφού απαιτεί 40% λιγότερους συνδετήρες στις κρίσιμες περιοχές των μεσόβαθρων.

4.2.4 Ενίσχυση Μεσοβάθρων με Μεταλλικό Μανδύα

4.2.4.1 Αύξηση Πλαστιμότητας

Αντί για μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος, η ενίσχυση των μεσόβαθρων μπορεί να γίνει με μεταλλικό μανδύα. Κατ' αντιστοιχία με το μανδύα σύνθετων υλικών, το ογκομετρικό ποσοστό περισφιγξης από το μεταλλικό μανδύα (ρ_s) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\rho_s = 4 t_j / D \quad (48)$$

όπου:

t_j = το πάχος του μεταλλικού μανδύα

D = η διάμετρος του μεταλλικού μανδύα

Συντηρητικά το ογκομετρικό ποσοστό του μεταλλικού μανδύα (ρ_s) μπορεί να συνδεθεί με την παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος (ε_{cu}) με την ακόλουθη σχέση [Priestley, 1996]:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + 1.4 \rho_s f_{yj} \varepsilon_{sm} / f_{cc}' \quad (49)$$

όπου:

f_{yj} = το όριο διαρροής του μανδύα

ε_{sm} = η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του μανδύα

f_{cc}' = η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (48) στην εξίσωση (49) έχουμε:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + 5.6 t_j f_{yj} \varepsilon_{sm} / D f_{cc}' \quad (50)$$

Η εξίσωση (50) μπορεί να λυθεί ως προς το πάχος του μανδύα (t_j):

$$t_j = 0.18 (\varepsilon_{cu} - 0.004) D f_{cc}' / f_{yj} \varepsilon_{sm} \quad (51)$$

Όπως προαναφέρθηκε, ανάλυση ροπών – καμπυλοτήτων της υφιστάμενης διατομής έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\varphi_y = 0.00215 \text{ m}^{-1}$$

$$c_u = 2.00 \text{ m}$$

Η επιδιωκόμενη πλαστιμότητα του συστήματος στη διαμήκη διεύθυνση σύμφωνα με την Εγκύκλιο Ε. 39/99 πρέπει να είναι:

$$\mu_d = 1.50$$

Με θεώρηση πλήρως άκαμπτων κόμβων, ζυγώματος και θεμελίων, η μετακίνηση στη διαρροή του συστήματος εξαρτάται από τη μετακίνηση του υποστυλώματος, οπότε η

πλαστιμότητα μετακίνησης των βάρων (μ_{cd}) θα είναι ίση με την πλαστιμότητα μετακίνησης του συστήματος (μ_d):

$$\mu_{cd} = \mu_d = 1.50$$

Στην περίπτωση ενίσχυσης στοιχείου με μεταλλικό μανδύα, το μήκος της πλαστικής άρθρωσης μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$L_h = g + 0.044 d_s f_y \quad (52)$$

όπου:

d_s = η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού σε [m]

f_y = το όριο διαρροής του διαμήκους οπλισμού σε [MPa]

g = το διάστημα μεταξύ του μανδύα και της κεφαλής του θεμελίου ή του βάρου

Η εξίσωση (52) αντιστοιχεί στο κάτω όριο της εξίσωσης (17) με την προσθήκη του g . Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι λόγω του μανδύα παρατηρείται συγκέντρωση της πλαστιμότητας στο διάστημα μεταξύ του μανδύα και της κεφαλής του θεμελίου ή του βάρου και, επομένως, είναι λογικό να λαμβάνεται ένα μειωμένο μήκος πλαστικής άρθρωσης σε σχέση με το στοιχείο χωρίς μανδύα. Λαμβάνοντας $g = 5$ cm, το μήκος της πλαστικής άρθρωσης προκύπτει:

$$L_h = 0.05 + 0.044 \times 0.025 \times 500 = 0.60 \text{ m}$$

Η πλαστιμότητα καμπυλότητας στη διατομή της πλαστικής άρθρωσης των μεσοβάρων προκύπτει από τη σχέση (31):

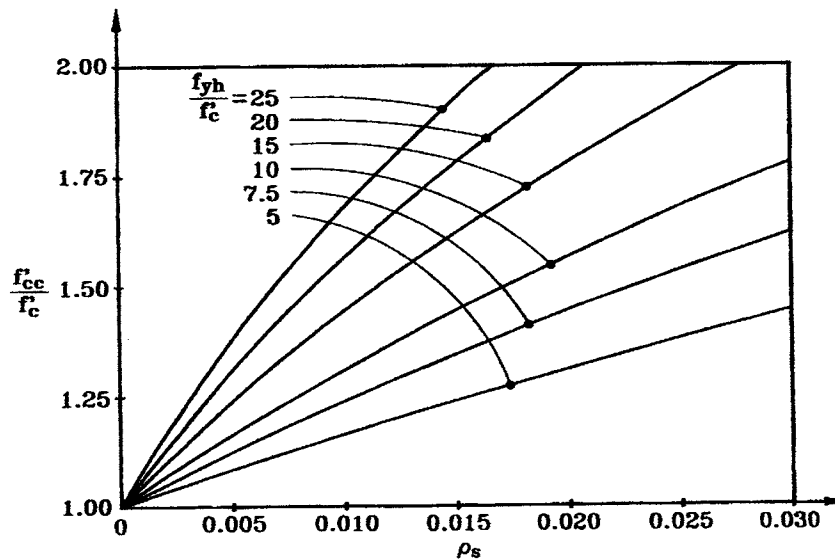
$$\mu_c = 1 + (1.50 - 1) / \{3 \times (0.60/11.00) \times [1 - 0.5 \times (0.60/11.00)]\} = 4.14$$

Η καμπυλότητα αστοχίας της διατομής, καθώς και η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος βάσει των σχέσεων (32) και (33) θα είναι, αντίστοιχα:

$$\varphi_u = 4.14 \times 0.00215 = 0.0089 \text{ m}^{-1}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0089 \times 2.00 = 0.0178$$

Η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος (f_{cc}) μπορεί να εκτιμηθεί από το διάγραμμα του Σχήματος 19 [Priestley, 1996]:



Σχήμα 19 Αύξηση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος λόγω περίσφιγξης.

Έστω ότι θα χρησιμοποιηθεί μανδύας με όριο διαρροής $f_{yj} = 275$ MPa και παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του μανδύα $\varepsilon_{sm} = 0.15$. Από το παραπάνω διάγραμμα, εάν υποθέσουμε ότι το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης από το μανδύα θα είναι $\rho_s = 0.006$, για $f_{yh} / f'_c = f_{yj} / f_c = 275 / 20 = 13.75$, έχουμε $f'_{cc} = 1.27 f_c = 25.33$ MPa. Επομένως από την εξίσωση (51) το πάχος του μανδύα προκύπτει:

$$t_j = 0.18 \times (0.0178 - 0.004) \times 2000 \times 25.33 / (275 \times 0.15) = 3.05 \text{ mm}$$

Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης δίνεται από τη σχέση (48):

$$\rho_s = 4 \times 3.05 / 2000 = 0.0061$$

Το ποσοστό αυτό σχεδόν ταυτίζεται με την τιμή που υποθέσαμε ($\rho_s = 0.006$) οπότε δεν απαιτείται άλλη επανάληψη.

Το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού που απαιτείται για αποφυγή λυγισμού των ράβδων του διαμήκους οπλισμού στις περιοχές σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης δίνεται από τη σχέση (16):

$$n_{st} = 1.08\% \times (500 / 275) \times (0.0052 \times 2.00 / 0.025) = 0.82\%.$$

Το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού με βάση την απαιτούμενη πλαστιμότητα $\rho_s = 0.61\%$ είναι μικρότερο από το ποσοστό που απαιτείται για αποφυγή λυγισμού των ράβδων του διαμήκους οπλισμού στις περιοχές σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης $n_{st} = 0.82\%$. Επομένως το ελάχιστο ποσοστό συνδετήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι $\rho_s = 0.82\%$. Το πάχος του μεταλλικού μανδύα δίνεται από τη σχέση (48):

$$t_j = 0.0082 \times 2000 / 4 = 4.08 \text{ mm}$$

Για κατασκευαστικούς λόγους επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε μανδύα με πάχος $t_j = 4.5$ mm.

Ο μανδύας αυτός θα τοποθετηθεί σε μήκος ίσο με το μήκος περίσφιγξης στο άνω και στο κάτω άκρο των μεσόβαθρων. Το μήκος αυτό θα ληφθεί ίσο με το ύψος της διατομής κατά την εξεταζόμενη διαμήκη διεύθυνση (το μήκος αυτό είναι μεγαλύτερο από το μήκος εντός του οποίου η ροπή υπερβαίνει το 80% της μέγιστης τιμής της):

$$L_h = 2.00 \text{ m}$$

Η τιμή της ανηγμένης αξονικής είναι μεγαλύτερη του 0.30 ($n_k = 0.44 > 0.30$), οπότε το μήκος περίσφιγξης αυξάνεται κατά 50%:

$$L_h' = 3.00 \text{ m}$$

Πέραν του μήκους περίσφιγξης και για πρόσθετο μήκος ίσο με L_h' το πάχος του μανδύα δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το 50% του πάχους εντός της κρίσιμης περιοχής. Παρόλ' αυτά στην περίπτωση του μεταλλικού μανδύα η μείωση αυτή δεν είναι πρακτική, οπότε διατηρούμε το ίδιο πάχος μανδύα σε όλο το ύψος του βάθρου.

4.2.4.2 Αύξηση Διατμητικής Αντοχής

Η διατμητική δύναμη που παραλαμβάνεται πλήρως από το μεταλλικό μανδύα σε κυκλική διατομή δίνεται από τη σχέση [Priestley, 1996]:

$$V_{sj} = \frac{\pi}{2} t_j f_{yj} D \cot \theta \quad (53)$$

όπου θ είναι η γωνία των διατμητικών ρωγμών ως προς τον άξονα του βάθρου. Για συνήθειες διατομές βάθρων συνιστάται να χρησιμοποιείται $\theta = 35^\circ$.

Κατ' αντιστοιχία με το μανδύα σύνθετου υλικού και το μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, αγνοούμε τη συμμετοχή του σκυροδέματος και τους μηχανισμούς θλίψης κατά την ανάληψη της τέμνουσας δύναμης και θεωρούμε ότι αυτή αναλαμβάνεται πλήρως μόνο από τον οπλισμό διατμήσεως, δηλαδή τους υφιστάμενους συνδετήρες και το μεταλλικό μανδύα, οπότε ισχύει η σχέση (40):

$$V_{max} = V_w + V_{sj}$$

Από τις σχέσεις (53) και (40) προκύπτει το πάχος του μεταλλικού μανδύα που απαιτείται για την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής της διατομής:

$$t_j = (V_{max} - V_w) / (0.5 \pi f_{yj} D \cot \theta) \quad (54)$$

(α) Εντός Κρίσιμης Περιοχής

Ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης είναι $\varnothing 12/20$ (δίτημος), δηλαδή $11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$. Η δύναμη που παραλαμβάνουν οι συνδετήρες προκύπτει από τη σχέση (39):

$$V_w = (11.30 \times 10^{-4}) \times 0.9 \times 1.90 \times 500000 / 1.15 = 840 \text{ KN}$$

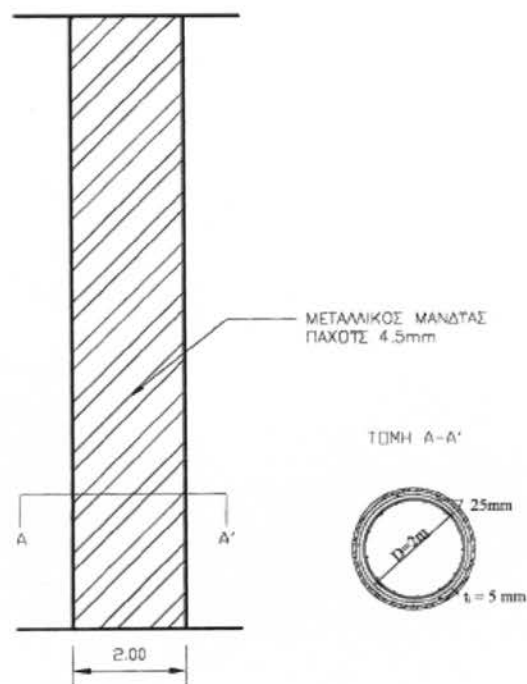
Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που καταπονεί τη διατομή, όπως προκύπτει από την ανάλυση, ισούται με:

$$V_{max} = 1125 \text{ KN}$$

Επομένως το απαιτούμενο πάχος του μεταλλικού μανδύα εντός της κρίσιμης περιοχής των βάθρων προκύπτει από την εξίσωση (54):

$$t_j = (1125 - 840) / (0.5 \pi \times 275000 \times 2.00 \times \cot 35^\circ) = 0.231 \text{ mm}$$

Επειδή το πάχος αυτό είναι μικρότερο από το πάχος που βρέθηκε για αύξηση της πλαστιμότητας, δε χρειάζεται να αλλάξουμε το μανδύα που έχουμε ήδη επιλέξει.



Σχήμα 20 Ενίσχυση μεσόβαθρων με μεταλλικό μανδύα.

(β) Εκτός Κρίσιμης Περιοχής

Ο υπάρχων οπλισμός διατμήσεως είναι $\varnothing 12/20$ (δίτημος), δηλαδή $11.30 \text{ cm}^2/\text{m}$. Η δύναμη που παραλαμβάνουν οι συνδετήρες προκύπτει από τη σχέση (39):

$$V_w = (11.30 \times 10^{-4}) \times 0.9 \times 1.90 \times 500000 / 1.15 = 840 \text{ KN}$$

Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που καταπονεί τη διατομή, όπως προκύπτει από την ανάλυση, ισούται με:

$$V_{max} = 1125 \text{ KN}$$

Επομένως το απαιτούμενο πάχος του μεταλλικού μανδύα εκτός της κρίσιμης περιοχής των βάρων προκύπτει από την εξίσωση (54):

$$t_j = (1125 - 840) / (0.5 \pi \times 275000 \times 2.00 \times \cot 35^\circ) = 0.231 \text{ mm}$$

Επειδή το πάχος αυτό είναι μικρότερο από το πάχος που βρέθηκε για αύξηση της πλαστιμότητας, δε χρειάζεται να αλλάξουμε το μανδύα που έχουμε ήδη επιλέξει.

Συγκεντρωτικά τοποθετείται μεταλλικός μανδύας πάχους $t_j = 4.5 \text{ mm}$ σε όλο το ύψος των μεσόβαθρων (Σχήμα 20).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Οι απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευών, όπως χαμηλό κόστος, καλύτερη αισθητική, βελτιωμένη συμπεριφορά και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής οδήγησαν στην αναζήτηση προηγμένων δομικών υλικών. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έκανε δυνατή την υλοποίηση αυτών.

Ένα δομικό στοιχείο που αποτελείται από δύο ή περισσότερα υλικά συνιστά ένα μέλος από σύνθετο υλικό. Τέτοια στοιχεία προκύπτουν από το συνδυασμό και τη συνεργασία των κλασσικών δομικών υλικών, δηλαδή ξύλο, χάλυβα και σκυρόδεμα. Η τελική συμπεριφορά τους παρουσιάζεται βελτιωμένη σε σχέση με τη συμπεριφορά των συστατικών τους στοιχείων.

Την τελευταία δεκαετία έχει παρουσιαστεί ραγδαία εξέλιξη στον τομέα όπλισης και ενίσχυσης των δομικών στοιχείων με προηγμένα σύνθετα υλικά. Τα τελευταία αποτελούνται από εύκαμπτα ‘υφάσματα’ από ινώδη οπλισμένα πολυμερή, τα οποία εμποτίζονται με ειδικές εποξειδικές ρητίνες. Τα ‘υφάσματα’ αυτά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων, αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυσή τους.

2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

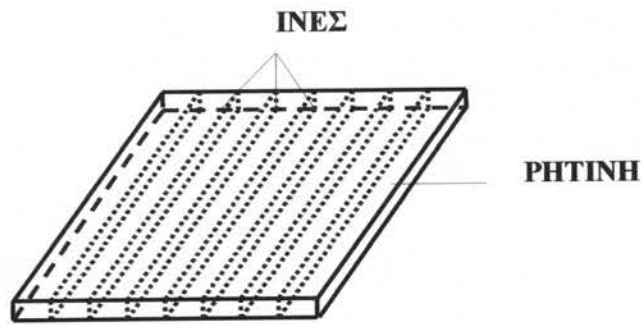
Σε ένα σύστημα σύνθετου υλικού δύο ή περισσότερα υλικά συνδέονται, αποτελώντας ένα σώμα. Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- *Ινών* (fibrous composites) (Σχήμα 17α), που αποτελούνται από ίνες σε ρητίνη.
- *Στρωμάτων* (laminated composites) (Σχήμα 17β), που αποτελούνται από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- *Σωματιδίων* (particulate composites) (Σχήμα 17γ), που αποτελούνται από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

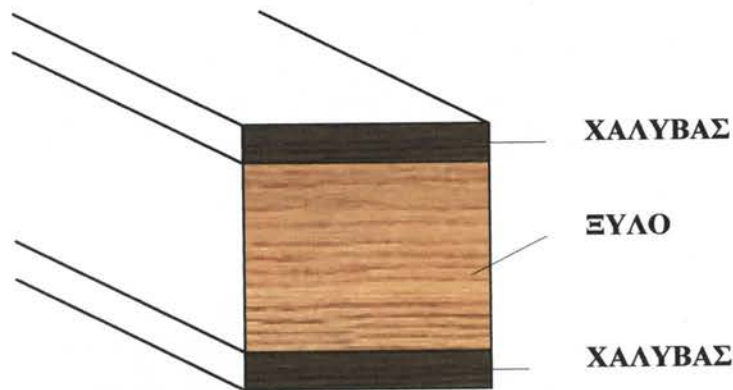
Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών:

- *Προσανατολισμένα* (Σχήμα 18α), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- *Μη προσανατολισμένα* (random) (Σχήμα 18β), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό.

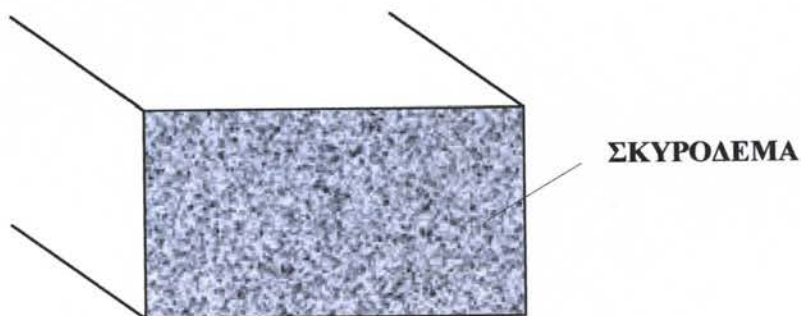
Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και τον συνδυασμό των ινών στο συνδετικό υλικό προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών:



(α) Σύνθετο υλικό ινών.



(β) Σύνθετο υλικό στρωμάτων.

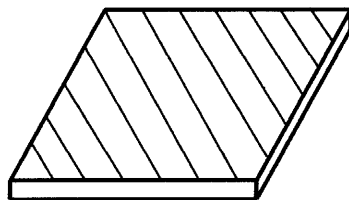


(γ) Σύνθετο υλικό σωματιδίων.

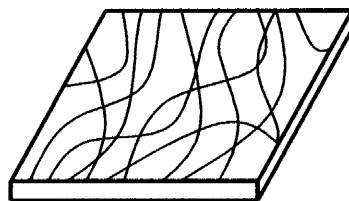
Σχήμα 17 Τύποι σύνθετων υλικών.

- *Συνεχών ινών* (continuous fiber) (Σχήμα 19α), όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα. Η αντοχή τους είναι μεγάλη, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.
- *Πλεκτών ινών* (woven fiber) (Σχήμα 19β), τα οποία είναι ένα συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης. Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.
- *Ασυνεχών ινών* (chopped fiber) (Σχήμα 19γ), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό. Προφανώς οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατώτερες αυτών των συνεχών ινών.

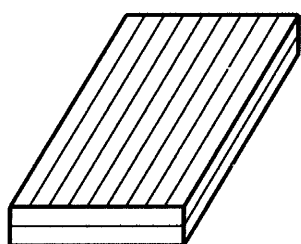
- *Υβριδικά* (hybrid) (Σχήμα 19δ), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες είτε από περισσότερους του ενός τύπου ινών (π.χ. γυαλί και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.



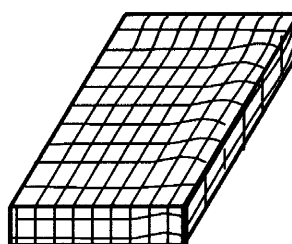
(α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό.



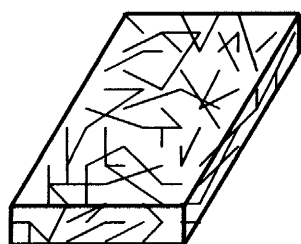
(β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό.

Σχήμα 18 Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών.

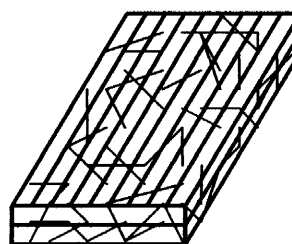
(α) Σύνθετο υλικό συνεχών ινών.



(β) Σύνθετο υλικό πλεκτών ινών.



(γ) Σύνθετο υλικό ασυνεχών ινών.



(δ) Υβριδικό σύνθετο υλικό.

Σχήμα 19 Τύποι σύνθετων υλικών ινών.

3. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα προηγμένα σύνθετα υλικά έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής από γυαλί, γραφίτη, άνθρακα, βόριο, πυρίτιο ή kevlar σε μήτρα πολυμερών, μετάλλων ή

κεραμικών υλικών. Η ρητίνη κρατάει τις ίνες μαζί, τις προστατεύει από εξωτερικής φύσεως ζημιές, τους μεταφέρει τα φορτία και σε ορισμένες περιπτώσεις συνεισφέρει στη δυσκαμψία, την ανθεκτικότητα ή την ηλεκτρική μόνωση του υλικού. Για να αναπτυχθεί ισχυρή σύνδεση, μηχανική ή χημική, μεταξύ ινών και ρητίνης προϋπόθεση είναι η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον απαιτείται χημική συμβατότητα μεταξύ τους, ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεσή τους.

Το μικρό βάρος των σύνθετων υλικών σε συνδυασμό με την υψηλή τους αντοχή καθιστά ελκυστική τη χρήση τους, σε πολλές εφαρμογές, σε σχέση με τα συμβατικά υλικά.

Οι ιδιότητες των διακριτών και των σύνθετων υλικών φαίνονται στους Πίνακες 1 και 2 αντίστοιχα.

3.1 Υλικά Ινών

(α) Ίνες Υάλου

Οι ίνες υάλου παράγονται με μηχανικό τρόπο από λιωμένο γυαλί. Χρησιμοποιούνται δύο είδη υάλου: E-glass και S-glass. Το πρώτο είδος είναι αυτό που χρησιμοποιείται ευρέως. Το δεύτερο, αν και έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το πρώτο, έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω του υψηλού του κόστους. Τα σύνθετα υλικά με ίνες υάλου χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών.

(β) Ίνες Γραφίτη - Άνθρακα

Οι ίνες γραφίτη και οι ίνες άνθρακα παράγονται μέσω πυρόλυσης. Η διαφορά τους βρίσκεται στο ότι κατά το τελικό προϊόν της πυρόλυσης, οι ίνες γραφίτη είναι κατά τουλάχιστον 99% άνθρακας, ενώ οι ίνες άνθρακα είναι λιγότερο από 95% άνθρακας. Το κόστος των ινών αυτών έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

(γ) Ίνες Πολυαμιίδης (Kevlar)

Οι ίνες Kevlar έχουν υψηλή αντοχή, πλαστιμότητα και ανθεκτικότητα. Τα Kevlar 29 και Kevlar 49 χρησιμοποιούνται ευρέως στα σύνθετα υλικά δομικών έργων.

(δ) Ίνες Βορίου

Οι 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.

(ε) Ίνες από Καρβίδιο του Πυριτίου

Οι ίνες από καρβίδιο του πυριτίου έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

4. ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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.

Πίνακας 1 Ιδιότητες διακριτών υλικών

ΥΛΙΚΟ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (MPa)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (%)
ΑΝΘΡΑΚΑΣ	160 - 270	1400 - 6800	1.0 – 2.5
ΥΑΛΟΣ	81	3400	4.9
ΚΕΥΛΑΡ 29	62 - 83	2800	3.6 – 4.0
ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ	2.0 – 4.5	27 - 62	4 - 14

Πίνακας 2 Ιδιότητες σύνθετων υλικών

ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (MPa)
ΥΑΛΟΣ + ΡΗΤΙΝΗ	30	500
ΑΝΘΡΑΚΑΣ + ΡΗΤΙΝΗ	120	1000

Ο *Νόμος Σύνθεσης* (Rule of Mixtures) εκφράζει τα ποσοστά συμμετοχής ινών και ρητίνης στο τελικό προϊόν. Χρησιμοποιείται στην πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Το Νόμο Σύνθεσης περιγράφουν οι παρακάτω σχέσεις [Gibson]:

$$v_f + v_m + v_u = 1$$

$$w_f + w_m = 1$$

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m$$

όπου:

- v_f, v_m, v_u είναι ο λόγος 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 του κάθε στοιχείου.
- w_f, w_m είναι ο λόγος βάρους των ινών και της ρητίνης (των κενών αγνοείται) αντίστοιχα και ισούνται με $w_i = W_i / W$, όπου W ο συνολικός όγκος του σύνθετου υλικού και W_i με $i = f, m$ ο όγκος του κάθε στοιχείου.
- ρ_f, ρ_m, ρ_c είναι η πυκνότητα των ινών, της ρητίνης και η συνολική του σύνθετου υλικού.

Όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, αυτή εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή των ινών, θεωρώντας ότι η αντοχή του συνδετικού υλικού είναι μεγαλύτερη. Η αστοχία του σύνθετου υλικού θα επέλθει με την αστοχία της ίνας. Αν και θεωρητικά, η ρητίνη θα μπορούσε να παραλάβει το φορτίο μετά την αστοχία της ίνας, έως την εφελκυστική αντοχή της, πρακτικά αστοχία της ίνας σημαίνει αστοχία του σύνθετου υλικού.

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

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

Παράδειγμα

Δίνεται δοκίμιο γραφίτη – εποξειδικής ρητίνης διαστάσεων 2.54 x 2.54 x 0.30 cm, που ζυγίζει 2.98 gr. Διαλύοντας τη ρητίνη με οξύ, οι ίνες που απομένουν ζυγίζουν 1.863 gr. Επίσης, είναι γνωστές οι πυκνότητες $\rho_f = 1.9 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_m = 1.2 \text{ gr/cm}^3$. Να προσδιοριστούν οι λόγοι όγκου ινών (v_f), ρητίνης (v_m) και κενών (v_u).

Η πυκνότητα του σύνθετου υλικού είναι:

$$\rho_c = 2.98 / (2.54 \times 2.54 \times 0.3) = 1.54 \text{ gr/cm}^3$$

Ο λόγος όγκου κενών (v_u) είναι:

$$v_u = 1 - [1.863/1.9 + (2.98 - 1.863)/1.2] / (2.54 \times 2.54 \times 0.3) = 0.012$$

Άρα:

$$v_f + v_m = 0.988$$

Η $\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m$ γράφεται:

$$1.54 = 1.9 v_f + 1.2 (0.988 - v_f) \Rightarrow v_f = 50.6\%$$

Οπότε:

$$v_m = 48.2\%$$

Συγκεντρωτικά, λοιπόν είναι:

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