

Τα σύνθετα υλικά στις νέες κατασκευές



Του Στέφανου Η. Δρίτσου,
Αναπλ. Καθηγητή,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών

Κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στην δόμηση των κατασκευών μας επιλέγεται λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτει για την κάλυψη των συγκεκριμένων κατασκευαστικών απαιτήσεων. Όμως έχει και μειονεκτήματα που πρέπει να συνεκτιμηθούν για κάθε συγκεκριμένη επιλογή. Έτσι η λύση της δημιουργίας “σύνθετων υλικών” συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα δύο ή περισσότερων υλικών δείχνει ιδιαίτερα ελκυστική. Η χρήση των σύνθετων υλικών στην κατασκευή είναι “παλιά ιστορία”. Πρέπει να παρατηρηθεί ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ.), που και αυτό είναι ένα σύνθετο υλικό, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος και του χάλυβα, αποτελεί σήμερα το πλέον διαδομένο δομικό υλικό. Τα τελευταία 30 χρόνια ξεκινώντας από την Ιαπωνία, έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στις κατασκευές σύνθετα υλικά από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής, εμποτισμένες με “θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη” της οποίας τα χαρακτηριστικά δεν είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες κάτω των 60°C. Οι ίνες των περισσότερων υλικών έχουν μεγαλύτερη αντοχή και ατένεια απ’ ότι το αρχικό μαζικό υλικό. Η μικρή διάμετρος των ινών, σε σχέση με το μήκος τους, επιτρέπει αποτελεσματικότερη ενεργοποίηση των ικανοτήτων του υλικού και μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς φορτίων, αν χρησιμοποιηθεί ένα υλικό εμβάπτισης που θα επιτρέψει την συνεργασία των ινών. Έτσι, τα σύνθετα υλικά, που σήμερα χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, γνωστά και ως Fiber Reinforced Polymers (FRP) – Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ), έχουν εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή.

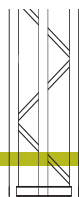
Οι συνήθεις τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι από γυαλί ή αραμιδίδιο (που συχνά αναφέρεται ως κέβληαρ) ή άνθρακα με πολύ μικρή διάμετρο, της τάξης των 5-25 μm. Ως εκ τούτου τα υλικά αυτά παρουσιάζουν δύο επιπλέον σημαντικά πλεονεκτήματα. Έχουν εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε διάβρωση και δεν επηρεάζονται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Στον Πίνακα 1 (fib, 2001) δίνονται τυπικά χαρακτηριστικά των ινών, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του χάλυβα.

Πίνακας 1. Τυπικές ιδιότητες ινών σύνθετων υλικών και σύγκριση με χάλυβα

Υλικό	Πυκνότητα (kg/m ³ ×10 ³)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκ. Αντοχή (MPa)	Παραμόρφ. Αστοχίας (%)
Ίνες Άνθρακα				
Υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-4800	1.40-2.00
Πολύ υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-6000	1.50-2.30
Υψηλού μέτρου ελαστ.	1.90	350-500	2500-3100	0.50-0.90
Πολύ υψηλού μέτρου ελαστ.	1.90	500-700	2100-2400	0.20-0.40
Ίνες Γυαλιού				
Τύπου E	2.55	70-75	1900-3000	3.00-4.50
Τύπου S	2.45	85-90	3500-4800	4.50-5.50
Ίνες Αραμιδίου				
Χαμηλού μέτρου ελαστ.	1.45	70-80	3500-4100	4.30-5.00
Υψηλού μέτρου ελαστ.	1.45	115-130	3500-4000	2.50-3.50
Χάλυβας	7.86	200	400-1700	12.0-25.0

Στον Πίνακα 1 αξίζει να παρατηρηθεί το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή αλλά και η μικρή παραμόρφωση αστοχίας των σύνθετων υλικών σε σχέση με τον χάλυβα. Επίσης, για την περίπτωση ινών άνθρακα, πρέπει να επισημανθούν οι σχετικά μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας καθώς και οι ιδιαίτερα μικρές τιμές της παραμόρφωσης αστοχίας τους. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι στις περιπτώσεις υψηλού και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας οι παραμορφώσεις αστοχίας είναι δραματικά μικρές.



ειδικά θέματα

Ως κρισιμότητα μειονέκτημα στην μηχανική συμπεριφορά των παραπάνω υλικών θα πρέπει να θεωρηθεί η παντελής έλλειψη ολκιμότητας τους. Μία τεχνική, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδώσει κάποιο βαθμό πηλασιμότητας στο υλικό, είναι η σύνθεση του υλικού με ίνες διαφορετικού τύπου. Οι ίνες αστοχώντας σε διαφορετικά μεγέθη παραμόρφωσης, δημιουργούν τελικά μία ψευδο-πηλάσιμη συμπεριφορά. Όμως, αυτού του τύπου οι συνθέσεις βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο.

Ως πρόσθετα αρνητικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών πρέπει εξάλλου να επισημανθούν:

- (α) Η αμφισβητούμενη ανθεκτικότητά τους σε διάρκεια. Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι ευαίσθητα σε ορισμένες περιβαλλοντικές δράσεις όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και η δράση χημικών. Σε γενικές γραμμές η παραπάνω ευαισθησία συναρτάται με την ευαισθησία της ρητίνης και εξαρτάται από τον τύπο των ινών του υλικού. Έτσι, για παράδειγμα, η υπεριώδης ακτινοβολία επιδρά δυσμενώς, κυρίως στα υλικά με ίνες αραμιδίου. Σε αλκαλικό ή όξινο περιβάλλον τα υλικά με ίνες άνθρακα, θεωρούνται περισσότερο ανθεκτικά, ενώ τα υλικά με ίνες γυαλιού είναι τα λιγότερο ανθεκτικά και τα υλικά με ίνες αραμιδίου βρίσκονται ενδιάμεσα.
- (β) Η χαμηλή αντίστασή τους σε μέτριες και υψηλές θερμοκρασίες. Ως γνωστόν η ρητίνη αλλοιώνεται στην θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου, που συνήθως είναι λίγο πάνω από 60°C. Πάνω απ' αυτή την θερμοκρασία, μειώνεται σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης και η αντοχή της, με αποτέλεσμα την δραματική πτώση της αντοχής του υλικού. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 250°C η ρητίνη καίγεται.
- (γ) Όταν τα υλικά βρίσκονται σε μόνιμη τάση, η εφεληκτικότητά τους αντοχή μειώνεται σημαντικά. Για υλικά με ίνες άνθρακα ή αραμιδίου, η μείωση της αντοχής τους μπορεί να είναι μέχρι και 30% ή 40% αντίστοιχα, ενώ για υλικά με ίνες γυαλιού η τελική τιμή της αντοχής μπορεί να είναι μόλις το 20% της αρχικής τους τιμής.

Ως εκ τούτου η χρήση τους στην κατασκευή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, σύνθεση και σχολαστική επιβεβαίωση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών σε βάθος χρόνου.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται μια ποιοτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των σύνθετων υλικών.

Πίνακας 2. Ποιοτική αξιολόγηση ινοπλισμένων πολυμερών

Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Άνθρακας	ΙΟΠ-Αραμιδίου	ΙΟΠ-Γυαλιού
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	πολύ καλή	καλή	οριακή
Αντοχή σε κόπωση	πολύ καλή	καλή	οριακή
Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον	πολύ καλή	καλή	ακατάλληλο υλικό
Αντοχή σε κρούση	μικρή	πολύ καλή	καλή
Αντοχή σε φθορά λόγω τριβής	μέτρια	πολύ καλή	καλή
Γαήβανικό φαινόμενο	ναι	όχι	όχι
Αντοχή σε υπεριώδεις ακτινοβολίες	καλή	μικρή	καλή
Πυκνότητα ($\text{kg}/\text{m}^3 \times 10^3$)	~ 1.80	~ 2.50	~ 1.50
Κόστος (συγκριτικά μεταξύ τους)	υψηλό	μέτριο	χαμηλό

Τα χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών εξαρτώνται κυρίως από την κατ' όγκο περιεκτικότητα τους σε ίνες. Προσεγγιστικά, κατ' εφαρμογή των "κανόνων των μιγμάτων", οι σχετικές εκφράσεις για το μέτρο ελαστικότητας, και την αντοχή των σύνθετων υλικών με συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης είναι οι εξής (fib, 2001):

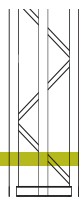
$$E_{FRP} = E_r V_r + E_f V_f, \quad f_{FRP} \approx f_r V_r + f_f V_f$$

όπου E_{FRP} , E_r , E_f και f_{FRP} , f_r , f_f είναι τα μέτρα ελαστικότητας και οι εφεληκτικές αντοχές του σύνθετου υλικού, της ρητίνης και των ινών αντίστοιχα και V_r , V_f είναι τα κ.ο. ποσοστά ρητίνης και ινών.

Προφανώς ισχύει $V_r + V_f = 1$

Εξάλλου, επειδή $E_f \gg E_r$, μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά: $E_{FRP} \approx V_f E_f$

Πάντως, μέχρι σήμερα, τα σύνθετα υλικά δεν έχουν τύχει ευρεία εφαρμογή στις κατασκευές. Τρεις είναι κυρίως οι λόγοι. Ο πρώτος είναι ότι το υψηλό τους κόστος είναι, σε πολλές περιπτώσεις, απαγορευτικό. Ακόμα και τα φθηνότερα σύνθετα υλικά, που είναι από ίνες γυαλιού, έχουν τελικό κόστος εφαρμογής υψηλό επειδή απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες υλικού λόγω του μικρού μέτρου ελαστικότητας τους. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι, στις μέχρι σήμερα εφαρμογές τους, τα υλικά αυτά προσπαθούν να αναλάβουν μερίδιο της αγοράς ανταγωνιζόμενα έναν "υψηλής κλάσης" αντίπαλο, τον χάλυβα. Όμως μέχρι στιγμής τα πλεονεκτήματά τους δεν φαίνεται να υπερτερούν, εν γένει, των αντιστοίχων του χάλυβα. Η εξαιρετική ελαστοπλάστική συμπεριφορά του χάλυβα σε συνδυασμό με το χαμηλό του κόστος, δείχνουν ανυπέρβλητα προσόντα. Ο τρίτος λόγος είναι η έλλειψη σαφών προδιαγραφών και προτύπων για την εφαρμογή τους, καθώς και ενός απαραίτητου κώδικα για τον σχεδιασμό. Τα πρώτα αποτελέσματα στην προσπάθεια "τακτοποίησης" του Κανονιστικού περιβάλλοντος με τα σύνθετα υλικά είναι ήδη εμφανή (ACI-440R, 1996, ACI-440.2R-02, 2002, ACI-440.1R-03, 2003, ACI-440.3R-04, 2004, CAN/CSA-S806-02, 2002, fib, 2001, ISIS Canada, 2001, J.B.D.P.A., 1999, J.S.C.E., 2001),



ειδικά θέματα

απομένει όμως ακόμα αρκετός δρόμος μέχρι την ολοκλήρωση της. Στην Ελλάδα, για πρώτη φορά ένα σχετικό Κανονιστικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό είναι έτοιμο προς εφαρμογή, στα πλαίσια του υπό σύνταξη Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2005).

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα στην κατασκευή με ποικίλες μορφές. Αρκετές είναι εξειδικευμένες επιλογές για ειδικές περιπτώσεις ενώ πολλές βρίσκονται στο στάδιο διερεύνησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την κάλυψη ειδικών απαιτήσεων έχουν ήδη κατασκευαστεί στο εξωτερικό (Ιαπωνία, Καναδά, Η.Π.Α., Γερμανία) αρκετές οδόσυνδεσμες κατασκευές από σύνθετα υλικά. Για εφαρμογές τους σε συν-λειτουργία με άλλα συμβατικά δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα και η τοιχοποιία θα μπορούσαν να ξεχωρίσουν οι τρεις παρακάτω κύριοι τύποι σύνθετων υλικών.

(α) Ράβδοι ή πλέγματα ως οπλισμός σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, στις νέες κατασκευές.

(β) Τένοντες προέντασης

(γ) Υφάσματα ή ελάσματα, για ενίσχυση στοιχείων σε υφιστάμενες κατασκευές, κυρίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών, ως οπλισμός σε συμβατικές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, αντικαθιστώντας τον χάλυβα, έχει τύχει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στην Ιαπωνία. Είναι όμως ιδιαίτερα προβληματική. Επειδή τα υλικά αυτά είναι ψαθυρά, το στοιχείο που οπλίζεται με αυτού του είδους το υλικό αναμένεται να έχει ψαθυρή αστοχία. Είναι μάλιστα χαρακτηριστικό ότι, αν η αστοχία προέλθει από υπέρβαση της αστοχίας του σύνθετου υλικού (στην εφεληκόμενη ζώνη), είναι ξαφνική και καταστροφική, ενώ αν προέλθει από υπέρβαση της αντοχής του σκυροδέματος (στη θλιβόμενη ζώνη), αν και ψαθυρή, έχει ένα μικρό βαθμό πλαστικότητας και είναι λιγότερο καταστροφική. Γι' αυτό το λόγο, οι σχετικές οδηγίες του ACI (ACI-440.1R-03, 2003) απαιτούν για τον σχεδιασμό σε κάμψη, πρόσθετο συντελεστή ασφαλείας $1/0.7 = 1.43$ αν η αστοχία οφείλεται στο σκυρόδεμα και $1/0.5 = 2.0$ αν η αστοχία οφείλεται στον οπλισμό. Προφανώς, μία κατασκευή στην οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ράβδοι οπλισμού από σύνθετα υλικά θα πρέπει να θεωρηθεί με μηδενική πλαστικότητα (συντελεστή συμπεριφοράς $q = 1.0$).

Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι η θλιπτική αντοχή των ράβδων είναι σημαντικά μικρότερη απ' ό,τι η εφεληκτική τους αντοχή και δεν συνιστάται η χρήση τους για ανάληψη θλιπτικών δυνάμεων.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η χρήση ράβδων οπλισμού από σύνθετα υλικά δεν είναι για ευρεία κατανάλωση. Αποτελεί λύση μόνο για εξειδικευμένες απαιτήσεις όπως για κατασκευές σε ιδιαίτερα έντονο διαβρωτικό περιβάλλον (π.χ. λιμενικά έργα) ή κατασκευές που απαιτούν χαμηλή ηλεκτρική ή θερμική αγωγιμότητα καθώς και σε στοιχεία που γειτνιάζουν με εξοπλισμό ευαίσθητο στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (π.χ. ιατρικός εξοπλισμός).

Η χρήση σύνθετων υλικών με τη μορφή τένοντων προέντασης αποτελεί ενδιαφέρουσα εναλλακτική επιλογή, σε σύγκριση με τους συμβατικούς τένοντες από χάλυβα. Το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών (σε σχέση με του χάλυβα), κάνει περισσότερο ελκυστική την εφαρμογή τους ως τένοντες προέντασης παρά ως εναλλακτική λύση στο συμβατικό χαλύβδινο οπλισμό. Μετά την πρώτη τους εφαρμογή, σε γέφυρα στην Γερμανία το 1986, η τεχνική φαίνεται να κερδίζει έδαφος στην Ιαπωνία. Όμως οι εφαρμογές εξακολουθούν να είναι λιγοστές, κυρίως λόγω του περιορισμένου αριθμού των σχετικών ερευνητικών προσπαθειών και της απουσίας σχετικών προτύπων και κανονιστικών κανόνων.

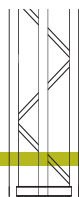
Στους Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται τυπικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών για ράβδους οπλισμού και τένοντες προέντασης από σύνθετα υλικά (CAN/CSA-S806-02, 2002). Για λόγους σύγκρισης παρατίθενται και οι αντίστοιχες τιμές για χάλυβα.

Πίνακας 3. Τυπικές τιμές μηχαν. χαρακτηριστικών για ράβδους οπλισμού από χάλυβα και σύνθετα υλικά

Ιδιότητες	Χάλυβας	Σύνθετα υλικά		
		Ίνες αραμιδίου	Ίνες άνθρακα	Ίνες γυαλιού
Όριο διαρροής (MPa)	276-517	όχι	όχι	όχι
Εφεληκτική αντοχή (MPa)	483-690	1720-2540	600-3690	483-1600
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	200	41-125	120-580	35-51
Παραμόρφωση διαρροής (%)	1.4-2.5	όχι	όχι	όχι
Παραμόρφωση αστοχίας (%)	6-12	1.9-4.4	0.5-1.7	1.2-3.1
Πυκνότητα (kgf/m^3)	7900	1250-1400	1500-1600	1250-2100

Πίνακας 4. Τυπικές τιμές μηχαν. χαρακτηριστικών για τένοντες προέντασης από χάλυβα και σύνθετα υλικά

Ιδιότητες	Προεντεταμένος χάλυβας	Σύνθετα υλικά		
		Ίνες αραμιδίου	Ίνες άνθρακα	Ίνες γυαλιού
Όριο διαρροής (MPa)	1000-1400	όχι	όχι	όχι
Εφεληκτική αντοχή (MPa)	1350-1900	1200-2068	165-2410	1379-1724
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	185-210	50-74	152-165	48-62
Παραμόρφωση διαρροής (%)	1.4-2.5	όχι	όχι	όχι
Παραμόρφωση αστοχίας (%)	>4	2-2.6	1-1.5	3-4.5
Πυκνότητα (kgf/m^3)	7900	1250-1400	1500-1600	1250-2400



Κλείνοντας πρέπει να επισημανθεί ότι, χωρίς αμφιβολία, η πλέον επιτυχής εφαρμογή των σύνθετων υλικών αφορά τον τομέα των επεμβάσεων. Η παρουσία του χάλυβα στα υφιστάμενα στοιχεία και ο επικουρικός ρόλος που ανατίθεται στα σύνθετα υλικά συντελεί σ' αυτήν την επιτυχία.

Η μέθοδος πάντως έχει περιορισμένη εφαρμογή, καλύπτοντας κυρίως αδυναμίες μεμονωμένων στοιχείων και δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιηθεί για αντισεισμική ενίσχυση του συνόλου της κατασκευής. Σε παλιές κατασκευές με χαμηλή αντισεισμική ικανότητα, οι συμβατικές μέθοδοι ενίσχυσης (με προσθήκη τοιχωμάτων, χαλύβδινων δικτυωμάτων ή/και μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα) πλεονεκτούν σημαντικά. Πάντως και τότε τα σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αναλαμβάνοντας επικουρικό ρόλο στο συνολικό σχήμα της επέμβασης (Δρίτσος 2005α, 2005β, Τάσιος, 2005 και Τσώνος, 2003).

Σε κάθε περίπτωση ο μηχανικός πρέπει να γνωρίζει ότι επειδή τα σύνθετα υλικά είναι νέα προϊόντα για τις κατασκευές απουσιάζει η σχετική εμπειρία από την εφαρμογή τους και ο βαθμός αξιοπιστίας για την συμπεριφορά τους είναι μειωμένος.

Αν και ο υπό σύνταξη Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2005) αποτελεί ένα καλό υπόβαθρο για τον σχεδιασμό των ενισχύσεων με σύνθετα υλικά η χρήση τους στην κατασκευή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, σύνεση και σχολαστική επιβεβαίωση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών σε βάθος χρόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δρίτσος, Σ., 2005α. Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Γ' Έκδοση, σελ.352.

Δρίτσος, Σ., 2005β. Επισκευή και Ενίσχυση Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος προς τον ΟΑΣΠ, Αθήνα.

ΚΑΝ.ΕΠΕ., (Κανονισμός Επεμβάσεων), 2005. Σχέδιο 2, ΟΑΣΠ, Αθήνα, (Αδημοσίευτο κείμενο).

Τάσιος Θ., 2005. Θεωρία Σχεδιασμού Επισκευών και Ενισχύσεων, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Ε.Μ.Π..

Τσώνος, Α., 2003. Εκτίμηση της Αποδοτικότητας της Ενίσχυσης Δομικών Στοιχείων από Ο/Σ με Σύνθετα Υλικά (FRPs), Επιστημονική Έκδοση Κίτριο, Α - Β/2003: 123-130.

ACI 440R, 1996. State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

ACI Committee 440.1R-03, 2003. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

ACI 440.2R-02, 2002. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

ACI Committee 440.3R-04, 2004. Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

CAN/CSA-S806-02, 2002. Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada.

fib, 2001. Externally Bonded FRP Reinforcement for R.C. Structures, fib Bul. No 14, Lausanne.

ISIS Canada, 2001. Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers, Design Manual No.3, The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada.

J.B.D.P.A. (Japan Building Disaster Prevention Association), 1999. Seismic Retrofit Design and Construction Guidelines for Existing Reinforced Concrete Buildings and Steel Encased Reinforced Concrete Building Using Continuous Fiber Reinforced Materials, Ed.by the Building Guidance Division, Housing Bureau, Japan Ministry of Construction.

J.S.C.E. (Japan Society of Civil Engineers), 2001. Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets, Concrete Engineering Series 41.