論文　炭素繊維と有機繊維とのハイブリッド多軸繊維シートによる RC 梁のせん断補強に関する実験的研究

堀本　歴[*1]・星野　章仁[*2]・宮里　心一[*3]・上原子　晶久[*4]

要旨：連続繊維の配列方向を任意に設定し，複数層を重ねて１枚のシートとした多軸繊維シートによるＲＣ梁のせん断補強に関する実験を行った。炭素繊維と有機繊維のハイブリッド構成とすることにより，せん断耐力の向上に加え，脆性破壊を抑制する靭性能の向上が期待できる結果を得た。せん断耐力の向上は炭素繊維，靭性能の向上は有機繊維による効果であると思われる。また，多軸繊維シートの引張特性をもとに，せん断補強された RC 梁の載荷時における多軸繊維シートに作用する応力を検討した。その結果，シート編成条件によって，シートが負担する応力状態が異なることを掴んだ。

キーワード：ハイブリッド多軸繊維シート，ＲＣ梁部材，せん断補強

1. はじめに

連続繊維による既設構造物の補修・補強方法は，重機などが使用できない作業環境下でも人手での作業が可能であることや，補強後の重量の増加が小さく構造物自身への影響が小さいことなどから，多くの研究がなされ，適用実績も拡がっている。

筆者らは，連続繊維の配列方向を任意に設定でき，繊維を引き揃えた層を複数層積層して１枚の繊維シートとして編成できる「多軸繊維シート（**図－1**）」による，鉄筋コンクリート部材の補強性能に関して，炭素繊維により編成した多軸繊維シートなどによる梁部材のせん断補強に関する実験的検討を行ってきた[1)]。

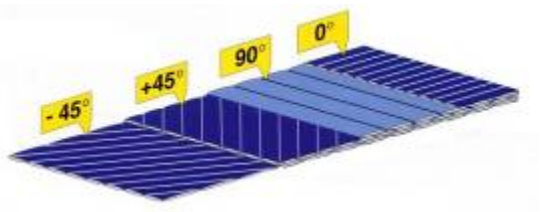
本研究では，炭素繊維と高強度ポリエチレン繊維によるハイブリッドタイプの多軸繊維シートを編成し，ＲＣ梁部材のせん断補強実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

コンクリートの示方配合を**表－1** に示す。普通ポルトランドセメント，最大寸法 25mm の粗骨材を用い，細骨材率を 44.4%，W/C を 50.5%とした。なお，載荷試験時の供試体材齢は 120 日，コンクリート強度 43.0 N/mm^2 であった。

図－2 に供試体の形状寸法と配筋を示す。梁高さ 300mm，幅 150mm の単純梁とし，引張鉄筋は D25 をかぶり 50mm の位置に２本配筋した。主筋比は 2.84%である。なお，本研究では片側半スパンにスターラップを配筋した。これは，ひずみゲージによるモニタリングや載荷中の供試体観察を適切に行うため，せん断破壊の発生側をコントロールすることを目的としたものである。したがって，スターラップが負担する半スパンのせん断耐力は無視するものとする。使用材料の機械的性質は**表－2** に示す通りである。ここでは，コンクリート強度は材料試験による結果，鉄筋については規格値を示している。

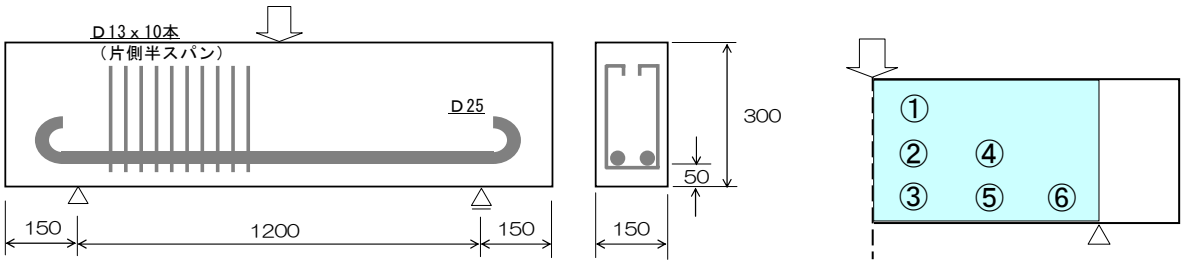


図－1　多軸繊維シート概念図

表－1　コンクリート示方配合

粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤（AE 減水剤）
25	8	50.5	44.4	155	307	801	1021	3.377

*1 倉敷紡績（株）　技術研究所　工修　(正会員)
*2 金沢工業大学大学院　工学研究科　環境土木工学専攻　（非会員）
*3 金沢工業大学　環境・建築学部環境土木工学科　准教授　工博　(正会員)
*4 弘前大学　大学院理工学研究科　助教　工博　（正会員）



(a) 形状寸法，配筋　　(b) ひずみゲージ位置

図－2　供試体概要図

本供試体のコンクリートの負担する設計せん断耐力 Vc は式(1)より 66.0 kN である[2)]。曲げ載荷は支点間距離 1200mm の２等分載荷で行っている。そのため，無補強供試体の設計せん断破壊荷重は 132 kN となる。

供試体の設計せん断破壊荷重と曲げ降伏破壊荷重をあわせて**表－3** に示す。

$$V_c = 0.2 \cdot (f'_c \cdot P)^{1/3} \cdot (d/1000)^{-1/4} \cdot [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b \cdot d \quad (1)$$

$f_{c'}$　：コンクリート強度（＝43.0 N/mm^2）
P　：鉄筋比（＝2.84%）
d　：梁有効高さ（＝237.5mm）
a　：載荷スパン（＝600mm）
b　：梁幅（＝150mm）

2.2 実験ケース

実験ケースを**表－4** に示す。補強用繊維として炭素繊維（CF），高強度ポリエチレン繊維（PeF）を用い，所定の目付量，角度にて編成した，炭素繊維／有機繊維ハイブリッドタイプの補強用多軸繊維シートである。つまり，***CF0 / PeF±45*** は，CF を 0° 方向に 220g/m^2, PeF を+45° および-45° 各方向に各々145g/m^2 編成した３軸タイプである。また，***CF0 / PeF±45*** の構成要素を ***CF0***，***PeF±45*** と考え，***CF0*** １軸シートおよび ***PeF±45*** ２軸シートによるせん断補強実験も行った。なお，繊維シートの編成角度は，鉛直方向を 0° 方向として表記した。CF，PeF の規格値は**表－5** に示す通りである。

繊維シートの貼付けは載荷スパン内とし，供試体上縁 150mm でラップさせた閉合巻きとした。貼付けに際し，グラインダーによる表面処理の後，エポキシ樹脂プライマーを塗布した。翌日まで静置養生の後，エポキシ樹脂により繊維シートを貼り付けた。その後，７日間の養生期間を設け，載荷試験を行った。なお，繊維シートが接する偶角部は半径約 20mm で面取りを施した。また，ハイブリッド多軸シートの貼付けは，炭素繊維面がコンクリートに接するように施した。

表－2　使用材料の機械的性質

コンクリート	圧縮強度	
	43.0 N/mm^2	
鉄筋	降伏強度	弾性係数
	345 N/mm^2	200 kN/mm^2

表－3　供試体の設計荷重

せん断破壊荷重	132 kN
曲げ降伏荷重	240 kN

表－5　補強繊維の諸物性

	引張弾性率 (GPa)	引張強度 (MPa)	破断ひずみ (%)	密度 (g/cm^3)
CF	240	4,900	2.0	1.80
PeF	88.2	2,700	3～5	0.97

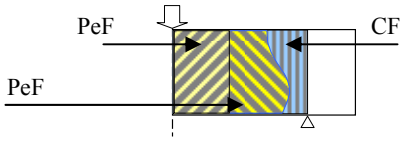
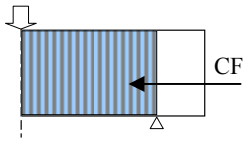
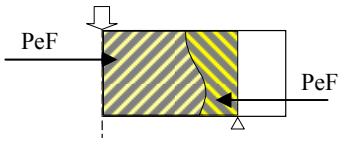
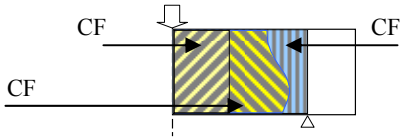
3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

載荷実験により得られた荷重－変位曲線を**図－3** に示す。変位は供試体スパン中央部に設置した変位計から得られた値である。また**表－6** に，最大荷重と最大荷重時の変位，および終局時の荷重と変位をまとめた。ここでは，耐力を完全に失った状態を終局状態とし，終局時直前にロードセルから得られた値を終局時の荷重とした。また，最大荷重は，載荷試験中にロードセルが記録した最大値である。

図－3 から，ハイブリッド多軸シートによる補強では，変位が大きく靭性的な補強挙動を示すことが明らかである。なお，本実験で使用した変位計の測定限界が 20mm であり，その容量以上の計測ができなかった。中央変位が 20mm を超えても載荷を継続し，試験中の目視による観察で変位量 40mm 程度まで載荷したが，本供試体を破

表－4　実験ケース（多軸繊維シート編成条件）

Name	編成条件（角度・目付）	模式図
CF0 / PeF ±45	0° CF（220 g/m^2） ／+45° PeF（145 g/m^2） ／-45° PeF（145 g/m^2）	
CF0	0° CF（220 g/m^2）	
PeF ±45	+45° PeF（145 g/m^2） ／-45° PeF（145 g/m^2）	
CF0 / ±45	0° CF（110 g/m^2） ／+45° CF（110 g/m^2） ／-45° CF（110 g/m^2）	

表－6　載荷試験結果

	最大荷重時		終局時	
	最大荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)
CF0 / PeF ±45	399※	-	-	20mm 以上
CF0	351	13.07	268	15.34
PeF ±45	281	4.13	261	14.08
CF0 / ±45	350	5.82	313	7.74
基準（無補強）	127	1.32	-	-

※　終局に至っていないが，載荷試験において記録した最大荷重

壊に至らしめることができなかった。後述するように，載荷試験時の観察において明らかな供試体上縁部の圧壊が認められたが，安全上の理由により耐力の低下が見られる前に載荷を止め，試験終了とした。また，載荷試験中の観察により，供試体中央下縁に発生した繊維シートのはく離が徐々に支点側に広がる様子が確認され，繊維シートのはく離の進展と変位の増加が関係しているものと思われる。

一方，***CF0*** 1軸および ***PeF ±45*** 2軸シートで補強された場合の荷重－変位曲線をみると，終局時の変位はほぼ同じであることがわかる。荷重については，***CF0*** の方が耐力が高いことが明らかであり，両者ともに最大荷重に到達後，一旦荷重が低下する様子が見られた。

また，**図－3** より部材の降伏以降でハイブリッドシートと ***CF0*** の荷重がほぼ同等である。そのことから，ハイブリッドシートの補強効果は構成要素シートの耐力が高い方に支配されると考えられる。したがって，***CF0*** と ***PeF ±45*** の加算とはならないものと考えられる。一方，変位が大きく伸びた，すなわち靭性能が向上した点に関しては，ハイブリッド化の効果によるものと考えられる。しかしながら，その理由や定量的な評価については，さらなる実験的検討が必要であると考えている。

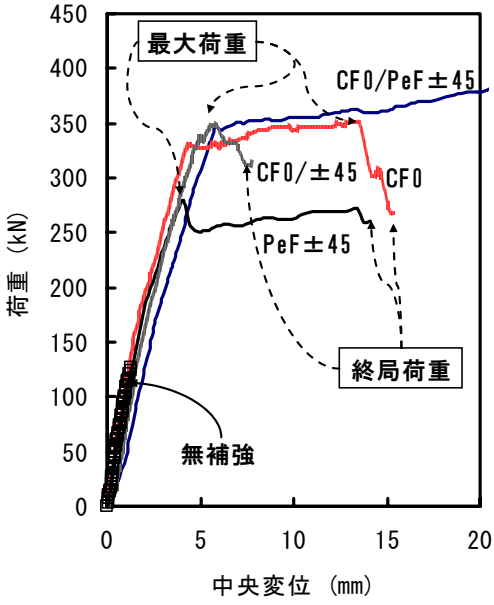
炭素繊維により編成した3軸シート ***CF0/CF ±45*** によりせん断補強したケースでは，最大荷重 350kN，終局変位 7.74mm であった。0° 方向炭素繊維の目付けが異なるため単純比較はできないが，ハイブリッドタイプに比べると，炭素繊維による3軸シートは脆性的な破壊となっている。このことから，炭素繊維がせん断耐力の向上に寄与し，有機繊維は靭性能の向上に働いたと考えられる。前述したように，炭素繊維と有機繊維を組み合わせたハ

イブリッド構成にすることにより，靭性的な挙動になったものと思われる。

なお，**表－3** に示したように，本供試体の計算上の曲げ降伏荷重は 240kN である。これに対し，繊維補強後の供試体の破壊荷重は240kN を大幅に超える結果となった。後述するように，補強後の供試体の載荷試験では曲げ破壊が先行し，***CF0 / PeF±45*** を除き斜めせん断ひび割れにより耐力を失った。さらに，試験後の観察によれば，供試体上縁のコンクリート圧壊と思われるひび割れも確認された。各ケースの耐力に優位な差が見られないことも含めて，供試体のせん断スパン比やせん断余裕度など一定の条件を満たす場合に，本実験のような結果になるものと考えている。この点については，例えば曲げ耐力を過剰に高く設計するなど供試体条件を変更することで明確にできると考えられる。

3.2 破壊性状

写真－1 に載荷試験による供試体の破壊性状を示す。ハイブリッドタイプは載荷点上縁部が大きくはらみ，圧壊している状況が確認できる。一方，ハイブリッドシートの構成要素である ***CF0*** ，***PeF±45*** は，ともに繊維シートの破断を伴うせん断破壊により終局に至っている。なお，３ケースとも，主鉄筋に貼り付けたひずみゲージによると，240～260kN で降伏していると推測される。したがって，これらの供試体は，主鉄筋の降伏後にせん断破壊に至ったと思われる。つまり，いずれのケースも曲げ破壊が先行している。しかし，終局状態に関しては，ハイブリッドタイプでは変位量が大きくなりコンクリートが圧壊したのに対し，***CF0*** および ***PeF±45*** はせん断破壊により終局に至った。このことからも，補強に用いる繊維シートをハイブリッド構成にすることにより，繊維シートの破断を誘発する脆性的なせん断破壊を抑制し，靭性的な挙動を示すようになったと考えられる。PeF は CF と比較して破断ひずみが大きく靭性の高い材料といえる。せん断補強において，耐力の向上には高弾性な CF が効果的に働き，部材の変形が大きくなった時点で PeF の靭性効果が現れ，繊維シートの破断を誘発せず徐々にはく離破壊が進展する破壊性状を示したと思われる。一方，PeF のみで編成した繊維シートでは，弾性率，強度が低いために，供試体のせん断ひび割れを抑制するまでには至らず，補強効果も低くなったものと思われる。つまり，コンクリートのような剛性の高い材料を補強するためには，相応の剛性を有する材料で補強することが必要である。しかし，剛性は高いが破断ひずみの小さい脆性材料で補強した場合，耐力の向上は期待できるものの脆性的な破壊性状は改善できない。ハイブリッドシートは剛性と靭性のバランスにより本実験のような補強性能を発現したものと考えている。

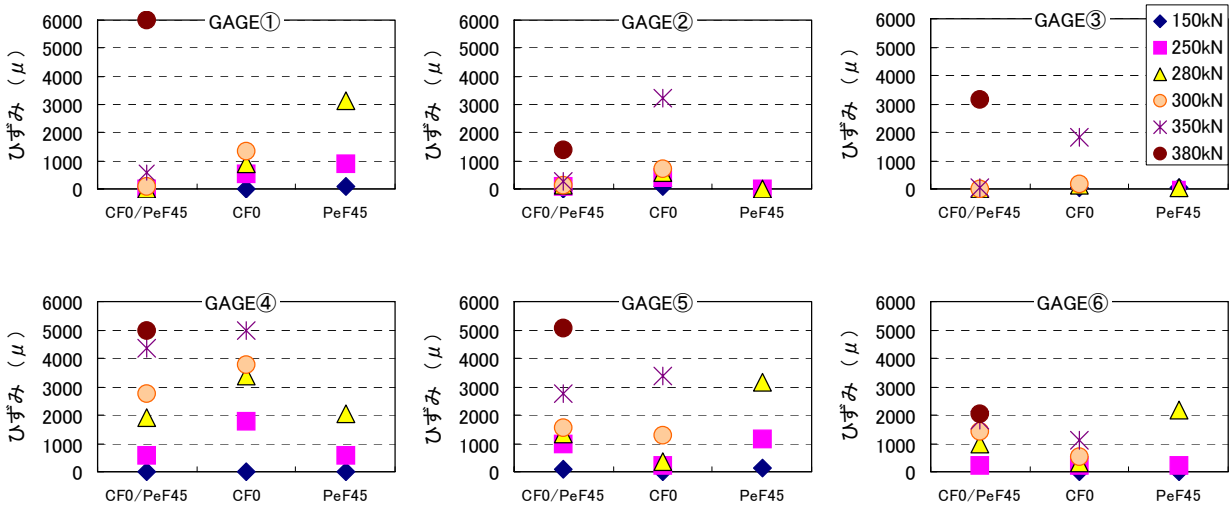


図－3　荷重－変位曲線

写真－1　破壊性状

3.3 繊維シートの応力状態

繊維シートが負担する応力状態を検討することを目的として，繊維シートに貼り付けたひずみゲージと荷重の関係を**図－4** に示す。各ケースについて，荷重ステッ



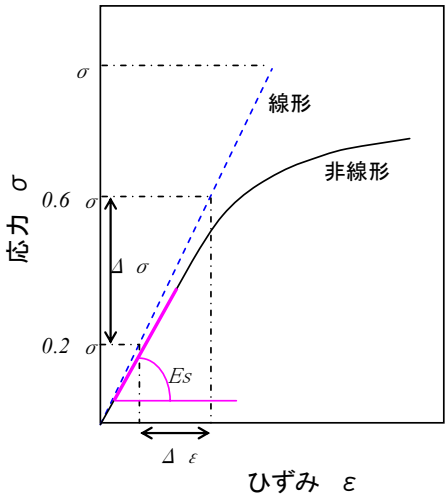
図－4　荷重ステップ毎の繊維シートひずみ

プごとのひずみをプロットした。なお，ひずみゲージの番号は供試体概要図（**図－2**）に対応している。また，ひずみゲージは鉛直方向に貼り付けた。**図－4** よりひずみ量の違いはあるものの，荷重ステップが大きくなるにつれて，つまり終局状態に近づくにつれて，シートのひずみが大きくなる様子がわかる。鉛直方向のひずみであるため，鉄筋降伏後（鉄筋ゲージによると約 250kN で降伏）の曲げひび割れの影響が強くなる状態でのひずみはほとんど測定されていない。したがって，ここで測定されたシートひずみは，せん断ひび割れによって繊維シートに鉛直方向引張力が作用したことを指し示しているものと考えられる。特に，ひずみゲージ **2** と **3** は終局荷重に近くなった時点で急激にひずみが増加する様子がみられた。これは，繊維シートが負担するせん断力が大きくなり，直後に終局に至った様子を示している。一方，斜めせん断ひび割れの影響を強く受けると思われるひずみゲージ **4** においては，他の測定箇所と比べて比較的低荷重段階から繊維シートに引張力が作用していることがわかる。

ここで，ひずみゲージの実験値を用い，繊維シートに働く鉛直方向応力の検討を試みる。繊維シートに作用する応力 σ は，繊維シートの弾性係数 E_s とひずみ ε の関数である。

$$\sigma = E_s \cdot \varepsilon \qquad (2)$$

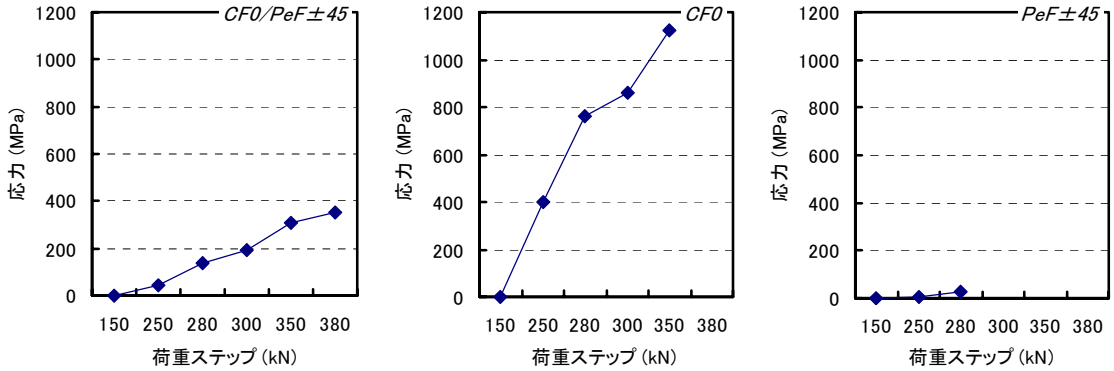
各繊維シートの弾性率は，既報の試験方法（案）[3)]に準拠し，各々の繊維シートを基材とした FRP 積層板を作製し，引張試験することにより得た。なお，多軸繊維シートは引張方向に対して斜め方向に繊維が配向しているが，1 方向シートの試験（案）と同様に，マトリックス樹脂の影響はないものとして算出した。ただし，***CF0 / PeF±45*** および ***PeF±45*** の応力－ひずみ関係は非線形であるため，破断強度の 20%と 60%の値ではなく，弾性



図－5　多軸シートの弾性率

表－7　繊維シートの弾性率，強度

	弾性率 (GPa)	強度 (MPa)
CF0 / PeF±45	71	960
CF0	227	4,188
PeF±45	13	131



図－6　繊維シートに作用する引張応力（ひずみゲージ④）

領域から導出した（図－5 参照）。このように算出した各繊維シートの弾性率は表－7 の通りである。表－5 と比較すると，***CF0*** は炭素繊維の引張特性とほぼ同等の数値で評価できていることが確認できる。そこで，***CF0／PeF±45*** および ***PeF±45*** についても，ほぼ妥当に評価できているものとした。なお，応力－ひずみ関係が非線形になる点について，本研究の範囲内では引張方向に対して繊維を斜めに編成していることに起因するものと思われる。

図－6 にひずみゲージ 4 における繊維シートに作用する引張応力を示す。横軸は載荷試験の荷重ステップとし，各荷重ステップ時の応力を縦軸にプロットした。載荷実験結果では，***CF0／PeF±45*** と ***CF0*** の最大荷重がほぼ同等であったことから，繊維シートが負担する耐力も同程度であると推測できる。しかし，上記の仮定より算出した繊維シートに作用する引張応力では ***CF0*** が３倍高い値となった。また，***PeF±45*** については，見掛け上，作用力が小さく応力を負担していないように見られる。このように，多軸繊維シートの編成条件によって，シートに作用する応力，つまりはシートが負担するせん断力が異なることがわかる。しかしながら，これらは実験結果から推定されるものである。繊維シートが負担するせん断力を正確に知るためには，繊維シートとコンクリートとの付着性状を考慮することが必要であると考えている。

繊維シート補強した梁部材の，繊維シートが負担するせん断耐力の評価ではコンクリートとの付着性状も検討要素の一つである [3)]。前述の図－5 に示す繊維シートの引張特性のように，付着特性に関しても多軸シートは 1 方向シートとは異なる挙動を示すと考えられる。付着性状に関する実験的研究を行い，界面はく離破壊エネルギーに関する定量評価が今後の課題の一つである。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 炭素繊維と有機繊維とのハイブリッド多軸繊維シート補強により，ＲＣ梁のせん断耐力が増すことがわかった。

(2) ハイブリッド多軸繊維シートによる補強では，せん断補強に加え，脆性的な破壊を抑制した靭性能の向上につながる可能性を見いだした。

(3) 多軸繊維シートの繊維編成の違いにより，繊維シートに作用する応力状態が異なることを掴んだ。

(4) 多軸繊維シートとコンクリートとの付着性状，および梁部材のせん断補強に関する定量評価が今後の課題である。

参考文献

1) 堀本　歴，星野章仁，宮里心一，上原子晶久：多軸炭素繊維シートによるＲＣ梁のせん断補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.3，pp.1513-1518，2008

2) 藤原忠司ほか：鉄筋コンクリート工学，技報堂出版，2003

3) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000