

# 論文 連続繊維シートで補強した棒部材のせん断耐力の評価

中井裕司<sup>\*1</sup>・岡野素之<sup>\*2</sup>・睦好宏史<sup>\*3</sup>・丸山久一<sup>\*4</sup>

**要旨:**連続繊維シートで補強した棒部材のせん断耐力を再整理した. 連続繊維シートの負担するせん断力は, その引張強度, ヤング率, せん断補強率, 部材のコンクリート強度で表すせん断補強効率を修正トラス理論に適用することにより定量的に記述できた. 本論は, 土木学会コンクリート委員会連続繊維補修・補強研究小委員会の成果である.

**キーワード:**連続繊維シート, 補強, 棒部材, せん断耐力

## 1. はじめに

連続繊維シートを用いた耐震補強工事は, 1995 阪神・淡路大地震以降, その施工性や経済性に着目され, 施工量が年々増加している. しかし, その設計手法は少ない実験から実験式を導いたものが多く, 各設計式間で整合性が取れていないのが現状である. 著者らは, 連続繊維シートの物性を用いて, 各種の連続繊維シートを用いたせん断補強式を統一的に表現することを試みた. 本論は, 提案するせん断補強式について議論するものである.

なお, 本論で扱うせん断耐力は, 静的な加力により得られるもので, 繰返しの影響を考慮していない.

## 2. 既往の設計手法

現在までに, 連続繊維シート(以下:CFシート)で補強した棒部材の設計せん断耐力を算定する

いくつかの設計基準・要領が定められ運用されている<sup>1)</sup>. 一方で, CFシートの負担するせん断力を, シートの剥離と部材の変形に基づき数値計算で評価する方法<sup>2)</sup>, シートのひずみと引張剛性の積で評価する方法<sup>3)</sup>, せん断スパン比を係数とするせん断補強効率を用いて評価する方法<sup>4)</sup>などが提案されている. このように, CFシートを用いる補強工事が急ピッチで適用された関係上, 設計思想に混乱が生じていることは否めない.

代表的なせん断耐力の設計法を表-1に示す. これらのせん断耐力の設計法は, 補強される部材がすでに有しているせん断耐力に, CFシートが負担するせん断力を加算する方法を用いている. 鉄道総合技術研究所の指針は, 限界状態設計法で鉄道高架橋柱を対象とし, 炭素およびアラミドCFシートを用いた実物大の実験で確認した設計式を提示している. 補強後にCFシートが負担するせん断力

表-1 繊維シートによるせん断補強設計法の比較

出典	発行者	設計方法
炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計・施工指針 <sup>5)</sup>	鉄道総合技術研究所, 1996.7	限界状態設計法 $K=0.8, \gamma_{cf}=1.2, \gamma_b=1.15$
アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計・施工指針 <sup>6)</sup>	鉄道総合技術研究所, 1996.11	限界状態設計法 $K=0.4, \gamma_{af}=1.2, \gamma_b=1.15$
設計要領第二集 橋梁保全編 5章 耐震補強 p5-18 (炭素繊維シート) <sup>7)</sup>	日本道路公団, 1997.11	許容応力度法 $2/3 \sigma_{CFd}$
アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案) <sup>8)</sup>	アラミド補強研究会, 1997.8	許容応力度法 $0.6 \sigma_{AFd}$

\*1 住友建設(株)土木統括部技術部 (正会員)  
 \*2 (株)大林組技術研究所 土木第4研究室(正会員)  
 \*3 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)  
 \*4 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 工博(正会員)

$V_{cfd}$ を式(1)に示すように評価している。

$$V_{cfd} = K \cdot [A_f \cdot f_{fud} \cdot (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f] \cdot z / \gamma_b \quad (1)$$

ここに  $K$ :せん断補強効率で、炭素繊維の場合 0.8, アラミド繊維の場合 0.4,  $A_f$ :区間  $s_f$  における繊維シートの総断面積,  $f_{fud}$ :CFシートの設計引張強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $s_f$ :CFシートの配置間隔,  $\alpha_f$ :CFシートが部材軸となす角度,  $z=d/1.15$ ,  $d$ :有効高さ,  $\gamma_b$ :部材係数で、一般に 1.15 である。

道路公団およびアラミド補強研究会の要領は、許容応力度法で道路橋の橋脚を対象とし、式(1)と同様にCFシートの設計用引張強度の制限をもって、せん断補強効率に代えている。炭素繊維とアラミド繊維の設計用引張強度は、それぞれ保証引張強度の 2/3 と 0.6 倍となっている。

示したようにCFシートを用いてせん断補強した場合の統一的な耐力の評価方法は提案されていない。本論では、個々に行われた実験を総括再評価し、統一した設計式を提案するものである。

### 3. 調査の対象とした実験

調査の対象とした実験は、以下の判断基準で選定した。①補強前のせん断耐力と補強後のせん断耐力が比較できること。②CFシートもしくはストランドの引張強度が明らかであるもの。③CFシートが断面を1周して欠落部が無いこと。その結果、多くの実験が②③の条件を満足しておらず、採用された実験固有の偏りがあることは否めない。

採用した実験の内、せん断にかかわる破壊性状を示したデータを選択し、CFシートの負担したせん断力を、修正トラス理論<sup>16)</sup>により補強前後のせん断耐力の差分として算出し、CFシートの引張強度を用いてせん断補強効率  $K$  を算出した。このせん断補強効率が 1.0 以上のデータは、ひび割れ角度等の影響を含んでいる可能性が有るが、トラス理論を適用するので採用しなかった。また、低補強量領域においてせん断補強効率が著しく低いデータは、CFシートの付着強度と引張強度の関係で破壊したと判断し採用しなかった。結果、用いた実験の概要を表-2に、採用しなかったデータとともに Fig.1 に示す。データの範囲は、有効高さが 197~540mm、せん断スパン比 1.1~3.6、コンクリートの圧縮強度が 21~45MPa、シートの引張強度が 2482~4312MPa、弾性率が 87~252GPa のもので、carbon が 12 体、aramid が 15 体である。

### 4. 考慮したパラメーター

CFシートで補強した棒部材がせん断破壊する場合の一般的な破壊モードには、①CFシートが剥離後に破断する場合、②CFシートの破断と圧縮部の

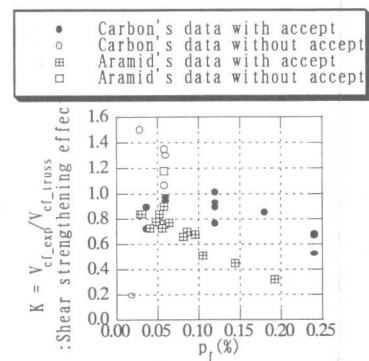


Fig.1 Relationship between shear strengthening effect and shear reinforcement ratio of CFsheet

表-2 参考にした実験の一覧

実験番号	A 実験 <sup>9)</sup>	B 実験 <sup>10)</sup>	C 実験 <sup>11)</sup>	D 実験 <sup>12)</sup>
供試体形状	柱	逆対称加力形式	はり	柱
断面寸法	600*600	180*400	300*300, 550*550	250*250
せん断スパン比	2.5	1.0-2.0	3.0	3.2
コンクリート強度 $f'_c$ (MPa)	32.0-34.9	21.0-27.9	40.0-45.6	20.7
使用繊維 形状	Carbon sheet	Carbon strand	Aramid sheet	Aramid sheet
シートの引張強度 $f_f$ (MPa)	2430-2940	2884	2806	2482
シートのヤング率 $E_f$ (GPa)	252	240	87.3	92.2
$p_f$ (%)	0.037	0.06-0.24	0.029-0.105	0.031-0.086

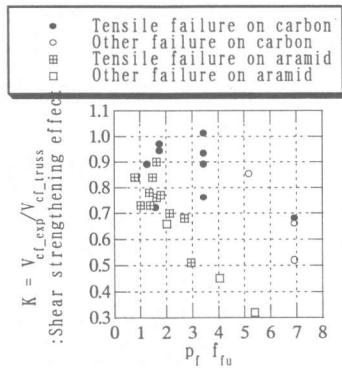


Fig.2 Relationship between tensile capacity of CFsheet per unit area ( $p_f f_{tu}$ ) and shear strengthening effect ( $k$ )

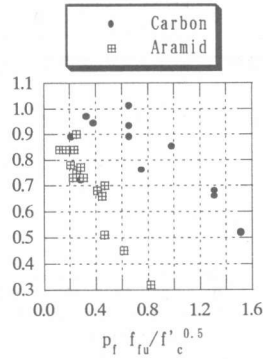


Fig.3 Relationship between  $p_f f_{tu} / f'_c{}^{0.5}$  and  $k$

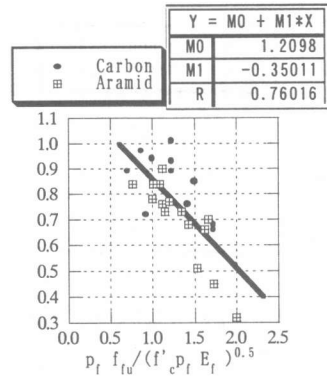


Fig.4 Relationship between  $p_f f_{tu} / (f'_c p_f E_f)^{0.5}$  and  $k$

コンクリートの圧縮破壊がほぼ同時に起こる場合、③圧縮部のコンクリートが圧縮破壊する場合がある。また、連続繊維シートの補強割合が著しく少ない場合、④剥離が生じる以前にCFシートが破断する場合もある。

ここでは、①②③の破壊モードを有する実験結果を、破壊モードの区別なく、回帰することにした。理由は、①と②の区別は難しく、また、②と③においてシートの負担していたせん断力とシートの破断する限界が実験的に明らかになっていないためである。

Fig.2は、用いたデータの破壊モードを、横軸をせん断補強率とCFシートの引張強度の積とし、縦軸をせん断補強効率としている。実験結果を見ると、CFシートによるせん断補強量が多いほど( $p_f f_{tu}$ が大きいほど)、CFシートの終局引張ひずみが大きいほど(aramid>carbon)、破壊モード②と③の発生確率が増えている。

実験式の要因として、コンクリートの圧縮強度、CFシートの引張強度、ヤング率、CFsheetと鉄筋のせん断補強率、部材の断面寸法、せん断スパン比、軸力、曲げ補強性状などが考えられる。しかしながら、得られたデータ内では検討外とせざるを得ない要因も多かった。本検討では、実験で得られた定性的なせん断性状を表すことに主眼を置き、CFシートのせん断補強量、CFシートの引張剛性、部材のコンクリート強度を評価することによ

り、統一的な実験式の構築を試みた。

## 5. 実験式の同定

CFシートによるせん断補強の場合、CFシート付着性状や載荷点付近の圧縮耐荷性状が、その負担するせん断力に影響を与えることがわかっている。これらを表す因子としてコンクリートの圧縮強度を用いた。Fig.3は、CFシートの単位幅あたりの引張耐力 $p_f f_{tu}$ を圧縮強度の1/2乗で除した無次元量を横軸とした。繊維種別ごとに線形の相関が高まることわかる。

せん断補強材の引張剛性はコンクリートの負担するせん断力に影響を与えること、小さな引張剛性は大きなせん断変形を生じさせ圧縮縁に応力を集中させることなどが考えられる。したがって、CFシートの引張剛性が小さいほどせん断補強効率は低下する。そこで、Fig.4は、CFシートの単位幅あたりの引張耐力をコンクリートの圧縮強度とCFシートの単位幅あたりの引張剛性の平方根で除した値を横軸としている。この結果、各繊維間の差異が少なくなり、ほぼ統一してせん断補強効率を表すことができる。

現在国内で補強工事に使用されている炭素とアラミドCFシートの負担するせん断力は、本手法を用いれば、いまだばらつきが大きいものの統一した記述が可能であることがわかる。今後、今回の検討に用いられていない要因を含めた力学的モデル

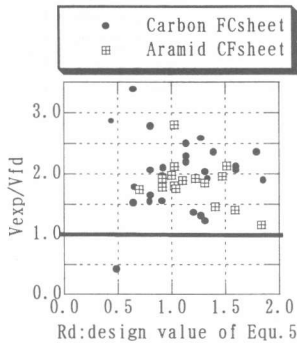


Fig.5 Evaluation of the shear capacity with CFsheet in test results by Equ.5

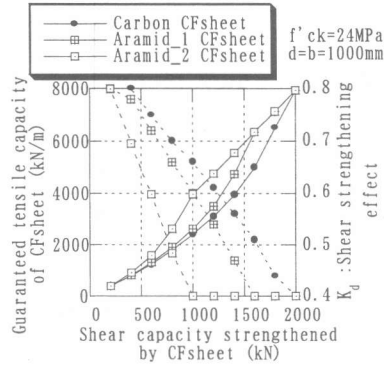


Fig.6 Relationship between strengthened shear capacity of 1m square member and guaranteed tensile capacity of CFsheet,  $K_d$

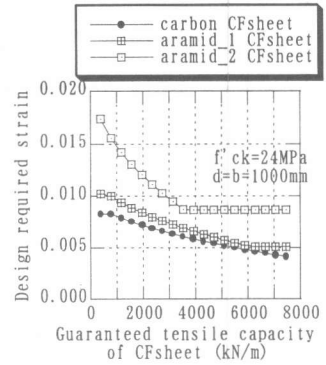


Fig.7 Relationship between guaranteed tensile capacity of CFsheet and design required strain

に基づく定式化が望まれる。

今回の検討範囲内で、せん断補強効率  $K$  を実験式で表すと下記ようになる。

$$K = 1.21 - 0.35 \times R \quad (2)$$

$$R = \frac{p_f \cdot f_{fu}}{\sqrt{f'_c \cdot \rho_f \cdot E_f}} = \sqrt{\frac{p_f \cdot f_{fu} \cdot \epsilon_{fu}}{f'_c}} = \sqrt{\frac{p_f \cdot f_{fu}^2}{f'_c \cdot E_f}} \quad (3)$$

ここで、 $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (MPa)、 $p_f$  : CFシートのせん断補強率、 $f_{fu}$  : CFシートの引張強度 (MPa)、 $\epsilon_{fu}$  : CFシートの設計終局ひずみ、 $E_f$  : CFシートのヤング率 (GPa) である。

CFシートのせん断補強効率は、CFシートのせん断補強量が小さいほど(大きいほど)、またCFシートの引張剛性が大きいほど(小さいほど)、および部材のコンクリート強度が大きいほど(小さいほど)、CFシートのせん断補強効率  $K$  が大きくなる(小さくなる)。別の表現をすると、CFシートは、同じ目付け量であれば単位質量が大きく、引張強度と伸度の積が小さい性状を有する材料が適切となる。変形性能を考慮しなければ、弾性材料では引張強度が小さくヤング率が大きい材料が有利になると思われる。

## 6. 設計式の提案

設計式に用いるせん断補強効率を実験式より次の手順で算出する。CFシートの特性値(保証強度)

表-3 CFシートの物性

繊維の種類	Carbon	Aramid_1	Aramid_2
保証強度 (MPa)	3433	2060	2354
ヤング率 (GPa)	240	117	78.5
伸度	0.0143	0.0176	0.0300

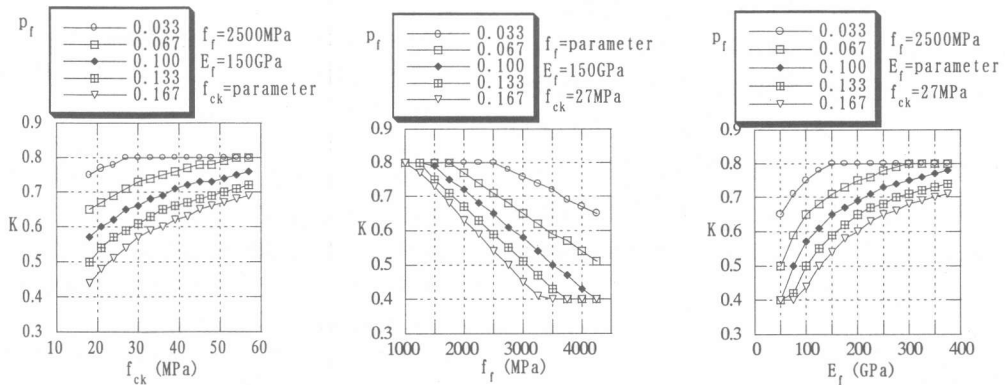
は、一般に引張強度から標準偏差の3倍が差引かれている。したがって、材料の修正係数は実績を踏まえ、 $\rho_f = 1.25$  とする。また、材料安全係数は、過去の実績を考慮し、 $\gamma_f = 1.2$  とする。コンクリートの修正係数と材料安全係数は、それぞれ  $\rho_c = 1.20$ 、 $\gamma_c = 1.3$  とする。また、現行の設計指針と整合をとるように、せん断補強効率に上限下限をそれぞれ与える。すると、設計に用いるせん断補強効率  $K$  は実験式より次式で与えられる。

$$0.4 \leq K = 1.0 - 0.3R \leq 0.8 \quad (4)$$

$$K = \sqrt{\frac{\rho_c \cdot \gamma_c}{(\rho_f \cdot \gamma_f)^2}} (1.21 - 0.35 \cdot R)$$

$$R = \sqrt{\frac{p_f \cdot f_{fu}^2}{f'_{cd} \cdot E_f}} \quad (5)$$

ここで、CFシートの材料安全係数  $\gamma_f = 1.2$ 、部材安全係数  $\gamma_c = 1.15$  として、式(4)を式(1)に代入し算定したCFシートの負担する設計せん断力と、公表されている実験結果<sup>4)13)14)15)</sup>を追加した実験値との比較をFig.5に示す。実験値は設計値に対して平均2倍程度の安全率を有しているが、ばらつきが大



(a) Compressive strength of concrete (b) Tensile strength of CFsheet (c) Young's modulus of CFsheet

Fig.8 Parameter study

きいのが現状である。特に、炭素CFシートの場合係数Rが0.5程度の領域ではばつぎが大きく、アラミドCFシートの場合は係数Rが大きくなるに従い危険度が増加する傾向がある。また、実験データグループごとにも偏りが有ることがわかる。

Fig.6は、表-3に示すCFシートを用いて、圧縮強度の特性値が24MPaのコンクリートを用いられた有効高さ1m、幅1mの角柱に対して、横軸に示す不足するせん断耐力を補強するために必要な2面のCFシートの単位長さの保証引張耐力を左縦軸の実線に、その時のせん断補強効率を右縦軸の破線に示した。必要な補強せん断耐力が少ない場合、CFシート量はほぼ等しいが、必要な補強せん断耐力が大きくなるにしたがいその差は最大1.6倍程度まで拡がる。これは、せん断補強効率が各CFシート間で異なるためである。

Fig.7は、前記と同様のCFシートと部材の構成で、横軸の保証引張耐力のCFシートでせん断補強した場合、設計荷重作用時にCFシートに生じるひずみを縦軸に示している。CFシートを用いた場合、5000 $\mu$ から17000 $\mu$ 程度のひずみが生じることがわかる。コンクリート標準示方書では、せん断補強鉄筋のひずみ量がコンクリートの負担するせん断力に影響を与えることを鑑みて、鉄筋に生じるひずみに制限を与えている。CFシートを用いた場合、このような大きなひずみが生じることは、実験的に観察されているが、今後、定量的な破壊

メカニズムを照査する必要がある。

## 7. パラメータスタデー

式(4)の感度を各パラメーターについてFig.8に示す。ここでは、コンクリートの圧縮強度が27MPa、CFシートの保証引張強度が2500MPa、ヤング率が150GPaを基準としている。各図は、CFシートのせん断補強率を変数とし、縦軸をせん断補強効率、横軸を(a)がコンクリートの圧縮強度、(b)がCFシートの保証引張強度、(c)がCFシートのヤング率でパラメーターとしている。

CFシートの保証引張強度の感度は、他に比較して高く、強度の増加に伴いせん断補強効率が線形に少なくなる。CFシートの強度を大きくする場合は、それ以上にヤング率を大きくし補強量を少なくしなければ、効率的なせん断補強は可能とならない。コンクリートの圧縮強度とCFシートのヤング率は大きくなるにしたがい、せん断補強効率が同一の割合で大きくなる。

現在、式(4)のパラメーターは、各変数間で相対的に定められている。今後、データの蓄積により、基準とした物理量に対して用いる材料の物理量を設定することにより、せん断補強効率が定量的に表示できる必要があると思われる。

## 8. 今後の課題

本研究は、CFシートでせん断補強された棒部材

のせん断耐力の評価を目的としたが、既往のせん断耐力式に、せん断補強効率で修正されたCFシートのトラス理論値を加算する手法を用いている。本手法は、弾性材料であるCFシートを用いる場合、力学モデルとして不十分である。今後、CFシートで補強されたコンクリート部材の引張破壊から圧縮破壊まで統一的に表現できるモデルの構築が必要と考えられる。

## 9. まとめ

本研究では、各種の連続繊維シート(CFシート)を用いてせん断補強した棒部材において、CFシートが負担するせん断力を統一的に評価した。評価は、過去の実験結果を選択的に用い、トラス理論に対するせん断補強効率を目的変数、構成材料の物理量をパラメーターとして回帰した。式(4)は、コンクリートの圧縮強度が大きいほど、CFシートの引張強度が小さいほど、CFシートのヤング率が大きいほど、せん断補強効率が大きくなる。以下得られた結論を示す。

(1) 式(2)は、限られた材料の物理量を用いて表現されているが、各種のCFシートで補強した部材のせん断引張破壊とせん断圧縮破壊形式を包括した統一的な記述の可能性を示した。

(2) 設計式(4)は、過去の実験結果を平均2倍程度安全側に評価しているが、ばらつきが大きい。また、終局時に要求されるCFシートの設計平均ひずみは、5000 $\mu$ から17000 $\mu$ 程度になる。

(3) 本研究の範囲内で、せん断補強用のCFシートに要求される性能は、脆性的な破壊性状を有さず、高いヤング率と低い引張強度の物性を有することである。

## 謝意

本研究を行うにあたり、適切なるご助言を頂いた「土木学会コンクリート委員会連続繊維補修・補強研究小委員会」の委員各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 丸山久一ほか:委員会報告「連続繊維補強コンクリート研究委員会報告」、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20, No. 1, pp. 1-10, 1998. 6
- 2) 上原子晶久ほか:連続繊維シートの付着性状を考慮したRCはりのせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20, No. 1, pp. 497-502, 1998. 6
- 3) 佐藤靖彦ほか:炭素繊維シートにより補強したRCはりのせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 18, No. 2, pp. 1469-1474, 1998. 6
- 4) 宮内克之ほか:CFRPシートでせん断補強した鉄筋コンクリートはりのせん断挙動、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 19, No. 2, pp. 1469-1474, 1997. 6
- 5) 鉄道総合技術研究所:炭素繊維シートによる鉄道高架柱の耐震補強工法・設計施工指針, 1996. 7
- 6) 鉄道総合技術研究所:アラミド繊維シートによる鉄道高架柱の耐震補強工法・設計施工指針, 1996. 11
- 7) 日本道路公団:設計要領第二集 橋梁保全編 5章耐震補強 PP. 5-18, 1997. 11
- 8) アラミド補強研究会:アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案), 1997. 8
- 9) 岡野素之ほか:炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱のせん断補強、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 19, No. 2, pp. 249-254, 1997. 6
- 10) 小島克朗ほか:炭素繊維の巻付けによる既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 11, No. 1, pp. 861-866, 1989. 6
- 11) UMEZU K. et al.: Shear Behavior of RC Beams with Aramid Fiber Sheet, Japan Concrete Institute, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Vol. 1, pp. 491-498, 1997. 10
- 12) 朝倉晃ほか:高強度繊維巻付けによる既存RC柱のせん断補強:コンクリート工学年次論文報告集, vol. 16, No. 1, pp. 1061-1066, 1994
- 13) 加藤博文ほか:炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートはり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. 18, No. 2, pp. 101-106, 1996. 6
- 14) 岡野素之ほか:炭素繊維による鉄筋コンクリートはりのせん断補強効果:土木学会第49回年次学術講演会, 第5部門, 1994. 9
- 15) 安藤博文ほか:炭素繊維によるせん断補強に関する研究果:土木学会第49回年次学術講演会, 第5部門, 1994. 9
- 16) 例えば:F・レオンハルトほか:鉄筋コンクリートの設計:鹿島出版会