

# 論文 連続繊維シート接着による RC 部材のせん断補強効果に関する研究

坂本佳理\*<sup>1</sup>・田村悟士\*<sup>2</sup>・末岡英二\*<sup>3</sup>・真嶋光保\*<sup>4</sup>

**要旨：**連続繊維シート接着によるコンクリート部材のせん断補強効果について検討した。シートは炭素、アラミド、ビニロンの3種類、補強方法は帯状、スパイラル状、ゼブラ状、側面貼りの4種類である。補強効果は、複鉄筋ばりの正負繰返し交番2点載荷試験により評価した。実験の結果、シート接着によりせん断補強効果は見られたものの、シートが十分な強度を発揮せずに剥離によりせん断破壊したものが多かった。また、シートの補強方法では、供試体拘束の有無が顕著にあらわれた結果となった。

**キーワード：**連続繊維シート、せん断補強、じん性、はり部材

## 1. はじめに

既設鉄筋コンクリート構造物の耐震補強工法として連続繊維シート接着工法が注目されている。従来の耐震補強工法として、RC巻立て工法や鋼板接着工法があるが、前者は躯体重量の増加により基礎の再検討が必要になること、後者は施工工程が複雑であることから施工性にやや劣るなどの問題点がある。一方、連続繊維シートは高い引張強度を有し、軽量で施工性に優れていること、要求される補強の程度に応じた補強量の調整が比較的容易であること、錆を伴う腐食を起こさないため一般に耐久性に優れていることなどの長所を持つ。そのため、この長所を活かせる構造物での実績も増え、設計・施工指針(案)<sup>1)</sup>もいくつか出されている。ただし、連続繊維シートは高価であるため、補強対象に応じた、より効率的な繊維シートの種類や補強方法などを明確にすることが必要となる。そこで、本研究では、連続繊維シートで補強したはりの正負繰返し交番2点載荷実験を行い、その結果から連続繊維シートの種類および補強方法の違いが、せん断およびじん性補強効果に及ぼす影響について評価したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用材料を表1に示す。使用した連続繊維シートは炭素繊維シート(通常弾性、高弾性)、アラミド繊維シート、ビニロン繊維シート(A種:厚さ0.25mm, B種:厚さ0.50mm)の3種類である。シートは材齢28日の供試体に、エポキシ樹脂を用いて接着した。また、用いた圧縮鉄筋、引張鉄筋およびスターラップは「金属材料引張試験方法(JIS Z 2241)」に準じて、引張試験を行った。載荷試験時のコンクリート強度は平均で $32.3\text{N/mm}^2$ ( $31.6\sim 33.2\text{N/mm}^2$ )であった。

### 2.2 供試体諸元

供試体諸元を図1に示す。供試体はせん断スパン比( $a/d$ )=2.0の複鉄筋コンクリートばりで、せん断破壊するように設計した。

### 2.3 実験ケース

実験ケースを表2に示す。主な要因として、①シートの種別、②補強方法を選んだ。①シートの種別は先に述べたとおりで、②補強方法は、せん断スパンの全長に帯状に巻いたものを基本とし、補強量の比較としてせん断スパンに補強部と無補強部を作り帯状に巻いたもの(ゼブラ状)、繊維方向の比較として $45^\circ$ に巻いたもの(スパイラル状)、供試体拘束程度の比較とし

\*1 東洋建設(株)総合技術研究所鳴尾研究所材料研究室研究員(正会員)

\*2 大阪市立大学大学院 工学研究科

\*3 東洋建設(株)総合技術研究所鳴尾研究所材料研究室主任研究員 工修(正会員)

\*4 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

表 1 使用材料

種類	仕様	
コンクリート	設計基準強度 $f_{ck}=30\text{N/mm}^2$ , スランプ=8cm, $G_{max}=20\text{mm}$	
炭素繊維	通常	繊維密度 $205\text{g/m}^3$ , 引張強度 $3480\text{N/mm}^2$ , 弾性係数 $230\text{kN/mm}^2$ , 厚さ $0.11\text{mm}$
	高弾性	繊維密度 $205\text{g/m}^3$ , 引張強度 $3480\text{N/mm}^2$ , 弾性係数 $372\text{kN/mm}^2$ , 厚さ $0.16\text{mm}$
アラミ® 繊維シート	繊維密度 $248\text{g/m}^3$ , 引張強度 $3050\text{N/mm}^2$ , 弾性係数 $80\text{kN/mm}^2$ , 厚さ $0.11\text{mm}$	
ビニロン® 繊維	A 種	繊維密度 $166\text{g/m}^3$ , 引張強度 $520\text{N/mm}^2$ , 弾性係数 $27\text{kN/mm}^2$ , 厚さ $0.25\text{mm}$
	B 種	繊維密度 $166\text{g/m}^3$ , 引張強度 $520\text{N/mm}^2$ , 弾性係数 $27\text{kN/mm}^2$ , 厚さ $0.50\text{mm}$
プライマー	FP プライマー (エポキシ樹脂)	
レジン	FR レジン (エポキシ樹脂)	
圧縮, 引張鉄筋*	SD295-D16 引張強度 $370\text{N/mm}^2$ , 降伏ひずみ $2084\mu$ , 弾性係数 $183\text{kN/mm}^2$	
スターラップ® *	$\phi 1\text{mm}$ 補強筋 引張強度 $385\text{N/mm}^2$ , 弾性係数 ; $78\text{kN/mm}^2$	

\*圧縮, 引張鉄筋およびスターラップ® は実測値

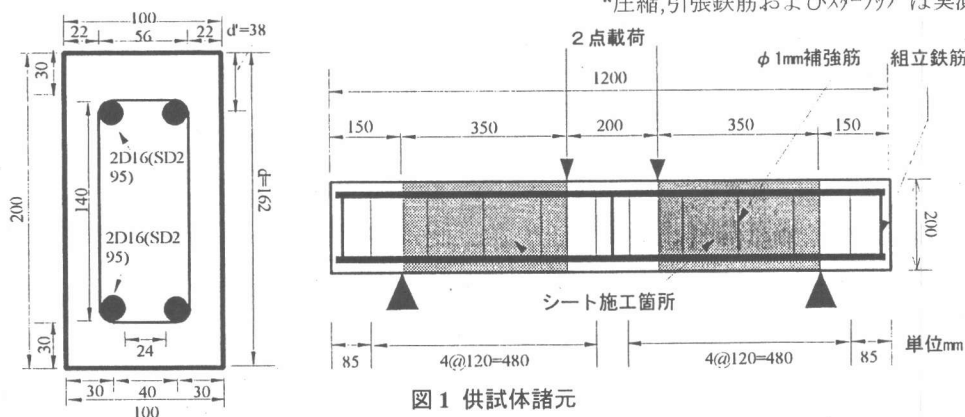


図 1 供試体諸元

表 2 実験ケース

実験 No.	シート 種別	補強 方法
1	なし	—
2	炭素繊維(通常)	帯状
3	炭素繊維(通常)	ゼブラ状
4	炭素繊維(通常)	スパイラル状
5	炭素繊維(通常)	側面 1 方向
6	炭素繊維(通常)	側面 2 方向
7	炭素繊維(高弾性)	帯状
8	アラミ® 繊維	帯状
9	アラミ® 繊維	ゼブラ状
10	アラミ® 繊維	スパイラル状
11	ビニロン(A 種)	側面貼り
12	ビニロン(B 種)	側面貼り

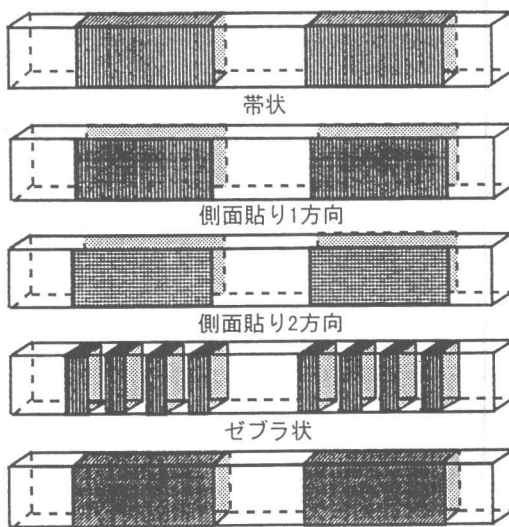


図 2 シートの補強方法

て、側面 1 方向貼りおよび 2 方向貼りのものを用いた。なお、帯状、ゼブラ状、スパイラル状では、シートのラップ長を 100mm とした。シ

ートの補強方法を図 2 に示す。

#### 2.4 荷重方法

荷重は定変位正負繰返し 2 点交番荷重とした。

表3 各供試体の最大耐力および破壊形式

実験 No.	実験値(kN)		計算値(kN)			破壊形式
	全体	シート	せん断耐力		曲げ 耐力	
			全体	シート		
1	66.5		43.7		124.5	せん断破壊
2	146.7	80.2	268.5	224.8	124.5	曲げ引張破壊
3	128.0	61.4	177.4	133.7	124.5	せん断破壊(シートの剥離・せん断)
4	144.8	78.3	363.7	320.0	124.5	せん断破壊(シートの剥離・せん断)
5	111.4	44.9	268.5	224.8	124.5	せん断付着割裂破壊(シートの剥離)
6	117.7	51.2	493.3	449.6	124.5	せん断,付着割裂破壊(シートの剥離)
7	145.1	78.6	301.2	257.4	124.5	曲げ引張破壊
8	137.0	70.5	240.5	196.8	124.5	せん断破壊(シートの剥離)
9	133.2	66.6	157.2	113.5	124.5	せん断破壊(シートの剥離)
10	146.6	80.1	324.0	280.3	124.5	曲げ引張破壊
11	93.3	26.8	153.1	109.4	124.5	せん断,付着割裂破壊(シートの剥離)
12	100.1	33.5	262.4	218.7	124.5	せん断,付着割裂破壊(シートの剥離)

実験値においてシートの分担するせん断耐力は累加法に基づく。

Ex. No.2=146.7-66.5(No.1 無補強)=80.2kN

無補強 (No.1)のせん断ひび割れ発生時のスパン中央たわみを基準たわみ $\delta_{vc}$ とし、0.5 $\delta_{vc}$ ごとに正負に増加させた。載荷は、最大荷重到達後、大きな耐力低下が認められるまで行った。載荷時には、荷重、たわみや鉄筋（圧縮鉄筋、引張鉄筋およびスターラップ）、繊維シートおよびコンクリートのひずみをそれぞれロードセル、変位計、ひずみゲージにより測定した。また、ひび割れの発生状況を目視で観察した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 最大耐力および破壊形式について

表3に各供試体の最大耐力の実験値、計算値、および破壊形式を示す。ここで、連続繊維シートの受持つせん断耐力の計算値は、通常のスターラップと同様に<sup>2)</sup>、標準示方書の考えに基づいて計算し、最大耐力は式(1)に示す累加法により求めた。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \quad (1)$$

$V_{yd}$ : 部材のせん断耐力

$V_{cd}$ : コンクリートが受持つせん断耐力

$V_{sd}$ : スターラップが受持つせん断耐力

$V_{fd}$ : 繊維シートが受持つせん断耐力

シートで補強することにより、せん断耐力が

曲げ耐力を大幅に上回るため、シートで補強したよりは、計算上は曲げ破壊が予想された。しかし、実験においては、主鉄筋降伏後、曲げ耐力の計算値付近で、シートの剥離によって、せん断破壊をしたものが多くみられた。これは、部材の曲げ耐力に達した時点で、変位の増大やせん断ひび割れの進展がみられ、これらにより、コンクリートと繊維シートが剥離して、シートが受け持っていたせん断力をコンクリートとスターラップで受持つこととなり、急激にせん断破壊に至ったと考えられる。つまり、曲げ降伏後、直ちにシートの剥離によりせん断破壊したものと考えられる。したがって、シートの引張強度に達する前に破壊に至ったため、シートの強度が十分に発揮されず、シートの受持つ耐力に実験値と計算値で大きな違いが見られた。

#### 3.2 じん性能について

表4に各ケースの荷重と変位の包絡線が囲む面積を示す。この面積は、耐力が最大耐力の80%まで低下した時を終局状態とし、終局に至るまでに、供試体が吸収するエネルギーを表す。この結果からじん性能を評価すると、側面貼付け以外の供試体では3~5倍程度吸収エネルギーが増加し、耐力面からみたじん性能が向上した。

表4 じん性能

No.	吸収エネルギー (kN・m)	No.	吸収エネルギー (kN・m)
1	435	7	2448
2	1852	8	1981
3	1594	9	1992
4	2370	10	2506
5	570	11	737
6	823	12	1057

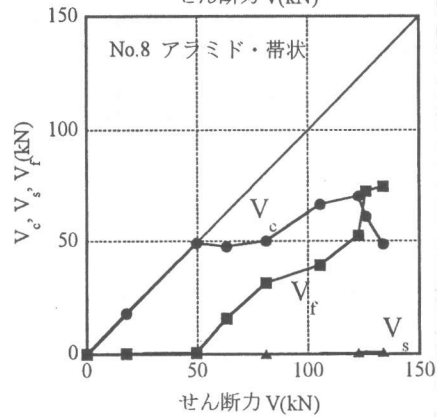
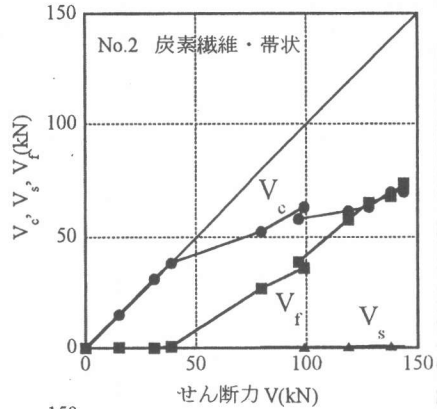
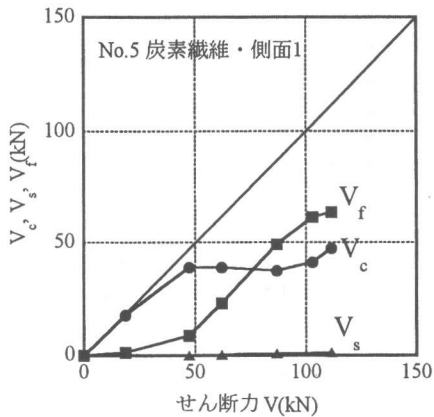


図3 せん断力の関係

### 3.3 せん断力の分担について

図3に、各繰返しサイクルの最大荷重時におけるNo.2,5,8 供試体の作用せん断力とコンクリート、スターラップ、繊維シートのせん断力との関係を示す。ここで、スターラップのせん断力  $V_s$  および繊維シートのせん断力  $V_f$  はそれぞれ、ひずみの実測値の平均値からトラス理論により計算したものであり、コンクリートのせん断力の実測値  $V_c$  は(1)式により、作用せん断力  $V$  から  $V_s$  および  $V_f$  を差し引いたものとした<sup>3)</sup>。図から各ケースとも、50(kN)付近までは、せん断力はほとんどコンクリートにより受け持たれていることがわかる。しかし、50(kN)を過ぎるとシートもせん断力を分担するようになり、帯状に補強したNo.2,8では130(kN)付近で、側面に補強したNo.5では80(kN)付近で、コンクリートとシートのせん断力が逆転し、その後コン

クリートが受け持つせん断力は一定もしくは減少傾向を示し、シートが受け持つせん断力が急増した。このことから、せん断力の増加により、斜めひび割れが発生し、コンクリートが受け持つせん断力に限界が生じるが、シートで補強することにより、効率よくせん断力を分担していることがわかる。

### 3.4 シートの種別による比較

表3から同じ補強方法において、シートが分担する耐力を比較すると、炭素繊維(通常弾性、高弾性)はアラミド繊維と同程度で、ビニロン繊維(A種、B種)の2倍程度の値となった。しかし、実験での耐力はシートの引張強度に比例せず、差は小さい結果となった。これは今回の実験では、シートが十分な強度を発揮するまえに、剥離して破壊に至ったケースが多かったためと考えられる。

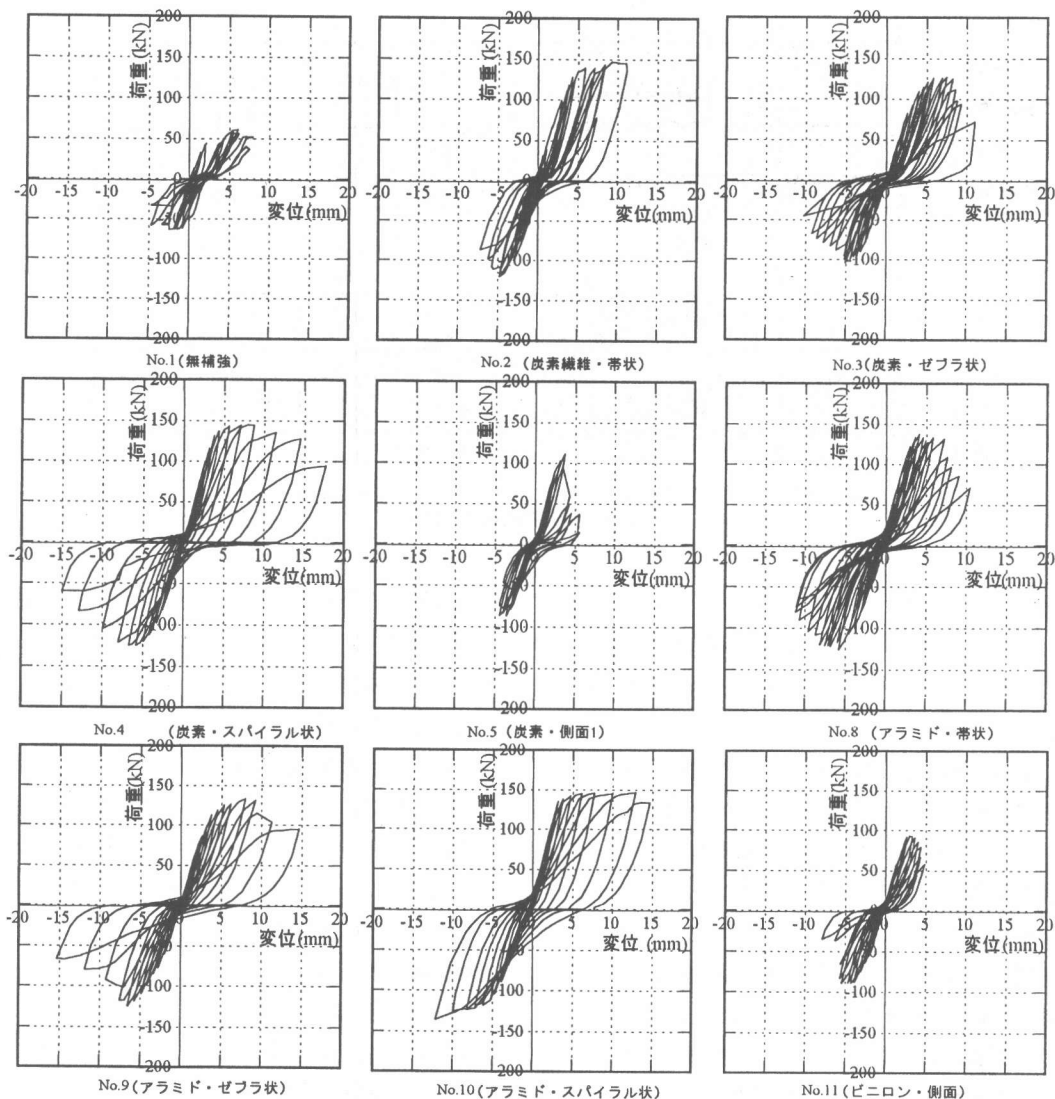


図4 荷重変位関係

中央変位が 10mm 程度までは、復元力に大きな差はみられないが 10mm を越えたあたりから変位量はアラミド繊維の方が若干大きかった。これは炭素繊維とアラミド繊維の弾性係数の差により生じたものと考えられる。

じん性能は、炭素繊維（通常弾性）とアラミド繊維とでは顕著な差が見られなかった。側面貼りの炭素繊維とビニロン繊維とでは、いずれの場合も主鉄筋降伏前にぜい性的な破壊に至ったためじん性能に顕著な差は見られなかった。

### 3.5 シートの補強方法の比較

表 3 からシートの補強方法の違いによるシートが分担する耐力を比較すると、帯状とスパイラル状はほぼ同程度で最も大きく、以下、ゼブラ状、側面貼りの順になった。しかし、帯状とゼブラ状とに補強量ほどの顕著な差はみられず、シートの分担耐力は補強量に比例しなかった。また、側面貼りは、帯状とせん断補強量は同じになるが、シートが分担する耐力は極端に低い結果となった。これらのことから、シート

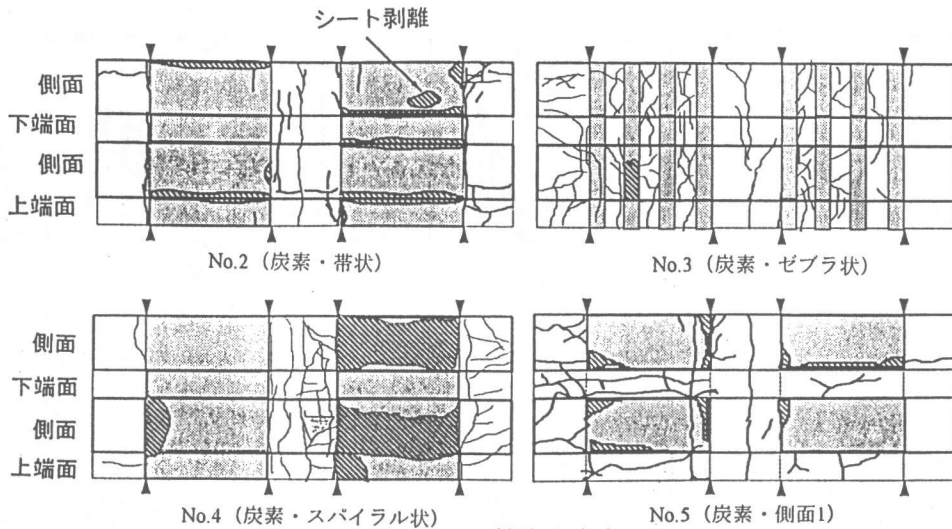


図5 ひび割れ発生状況

巻き付けによる拘束程度の違いにより耐力に差がみられ、シートの分担耐力は補強量よりも、部材の拘束の有無による影響が大きいと考えられる。

図4の荷重変位関係から、側面貼りと帯状、ゼブラ状、スパイラル状のシートを巻き付けたケースを比較すると、側面貼りは、各繰返し載荷時において、任意の同一荷重で見た場合の残留変位が大きく、吸収エネルギーが小さかった。

図5にひび割れ発生状況を示す。側面のみに貼り付けた No.5,6 の破壊状況は鉄筋に沿って付着割裂破壊が進行し、カバーコンクリートの剥離現象が見られ、脆性的な破壊性状を示した。また、帯状、ゼブラ状、スパイラル状では脆性的な破壊を起こさず、シートの拘束効果によりじん性が向上したものと考えられる。

#### 4. まとめ

本実験によって、次のような知見が得られた。

- (1) 連続繊維シートでせん断補強することで、シートがせん断力を効率よく分担し、部材の最大耐力が向上した。
- (2) シートの種別によるシートが分担する耐力は、炭素繊維（通常弾性、高弾性）はアラミド繊維と同程度で、ビニロン繊維（A種、B種）

の2倍程度の値となった。しかし、シートが十分な強度を発揮するまえに、剥離して破壊に至ったため耐力はシートの引張強度に比例せず、差は小さい結果となった。

(3) シートの補強方法の違いによるシートが分担する耐力は、帯状とスパイラル状はほぼ同程度で最も大きく、以下、ゼブラ状、側面貼りの順になった。また、じん性については、側面貼りの供試体では吸収エネルギーが小さく、脆性的な破壊性状を示した。

(4) 繊維シートによるせん断補強効果は部材の拘束の有無による影響が大きく、シートを巻き付ける補強方法が、側面のみに貼り付ける補強方法より、最大耐力およびじん性ともに、大幅に優れる結果になった。

#### 参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針，1996.7
- 2) 小林和夫：コンクリート構造学，森北出版 pp. 40-57, 72-92, 1994
- 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，Vol. 18, No.2, pp. 1469-1474, 1996.6