

論文 S型試験体による連続繊維シートの局所性状

古田 智基^{*1}・椎屋 圭介^{*2}・福山 洋^{*3}・金久保 利之^{*4}

要旨：連続繊維シートで耐震補強された鉄筋コンクリート部材のせん断性能評価に資するために、連続繊維シートを外周に貼付けたS型試験体による押抜き型のせん断実験を行った。変動因子は横補強筋の有無およびコンクリートの一体性（一体打ち、完全分離）である。最終的な破壊はシートコーナー部の破断であったが、最大耐力は一体打ち試験体の場合、内部のコンクリートのせん断ずれが大きく発生したときであり、その時のシート中央部の歪は0.4%程度であった。また、シート各所の歪測定値の差が顕著に確認された。

キーワード：繊維シート、耐震補強、CFRP、せん断、歪

1.はじめに

鉄筋コンクリート（以下RC）構造物を対象とした耐震補強として、カーボン、アラミド、ガラス等の連続繊維シート（以下シート）を用いた補強工法が近年盛んに行われており、現在までに土木・建築両分野で部材レベルでの実験が数多く行われ、一応の研究成果が挙げられてきている。しかし、補強部材のせん断耐力および変形性能は、シートを鉄筋（せん断補強筋）に強度置換することによる既往式により評価することを基本としており¹⁾、詳細な破壊メカニズムに基づいた評価式はこれまで提案されていない。

筆者らは、シート補強RC部材のせん断性能評価に資するために、繊維の種類および弾性係数を変動因子とした梁の曲げせん断実験を行った²⁾。各シートの剛性（シート厚×弾性係数）を同一にした試験体によりせん断性状を確認したが、部材角 $R=1/60\text{rad}$ 程度まではおおむね各試験体で同様な性状を示したものの、最大強度時のせん断力、シート負担力は繊維の種類によって異なり、各繊維特有のシート有効係数の必要性を報告した。これは、繊維の破断がひび割れ箇所等での局所的な応力状態に左右され、繊維の種類によってそれら

に対する抵抗性能が変化するためであろうと考えている。

本研究では、コンクリートに貼付されたシートの局所的な性状、特にひび割れ箇所において面内せん断方向に変形が生じたときのシートの力学性状を把握することを目的とし、S型試験体による押抜き型のせん断実験を行った。シートには炭素繊維シートを使用し、変動因子は横補強筋の有無およびコンクリートの一体性（一体打ち、完全分離）である。実験結果の検討では、荷重-変形関係とともに主としてシートの歪に着目した。

2.実験概要

2.1 試験体

試験体は、文献2)の梁試験体と同様の断面および主筋配筋とした。試験体配筋図を図-1に示す。幅×せいは160mm×250mm、主筋は4-D13で、試験対象区間となるせん断面の長さは250mmとした。変動因子は横補強筋の有無およびコンクリートの一体性（一体打ち、完全分離）で、横補強筋のある試験体（SP-WR）では梁試験体と同一のD4@90の配筋とした（ $p_w=0.17\%$ ）。横補強筋のない試験体では、通常に一体打ちで作製した試験体

*1 バンドー化学免振事業部 博士（工学）

*2 明石工業高等専門学校 専攻科

*3 国土交通省建築研究所 第四研究部室長 工博（正会員）

*4 筑波大学講師 機能工学系 博士（工学）（正会員）

(SP-W) と、上端および下端を別に作製しシートを貼付する際に一体とした試験体 (SP-S) を製作した。なお、SP-S 試験体のコンクリート接合面は脱型後特別な処理は施していない。同一変動因子試験体で各 3 体ずつ、計 9 体の試験体について加力実験を行った。

シートの貼付手順は通常の耐震補強方法と同一で、ディスクサンダーでコンクリート表面のケレンを行い、プライマー、パテ処理を行った後、エポキシ樹脂を用いて軸直交方向にシートを 1 層閉鎖型に接着した。

2.2 使用材料

使用したシートは文献 2) の梁試験体 (No.2) と同様、目付量 150g/m^2 の炭素繊維シートで、弾性係数は 240GPa 、破断強度は 3400MPa (いずれもメーカー値) である。横補強筋には降伏強度 234MPa の異形鉄筋 D4、コンクリートには実験時材令で圧縮強度 32.0MPa 、割裂強度 2.54MPa の普通コンクリートを用いた。

2.3 加力・計測方法

加力には 2MN 変位制御式万能試験機を使用し、左右スタブを単調に圧縮することにより静的加力を行った。計測項目は荷重値、図-2 に示す位置でのスタブ間の相対軸方向変位および横方向変位、横補強筋歪 (図-1 中、試験体 SP-W の A1~C3)、および図-3 に示す位置でのシート歪である。

3. 実験結果および検討

3.1 破壊経過

実験結果の一覧を表-1 に、各

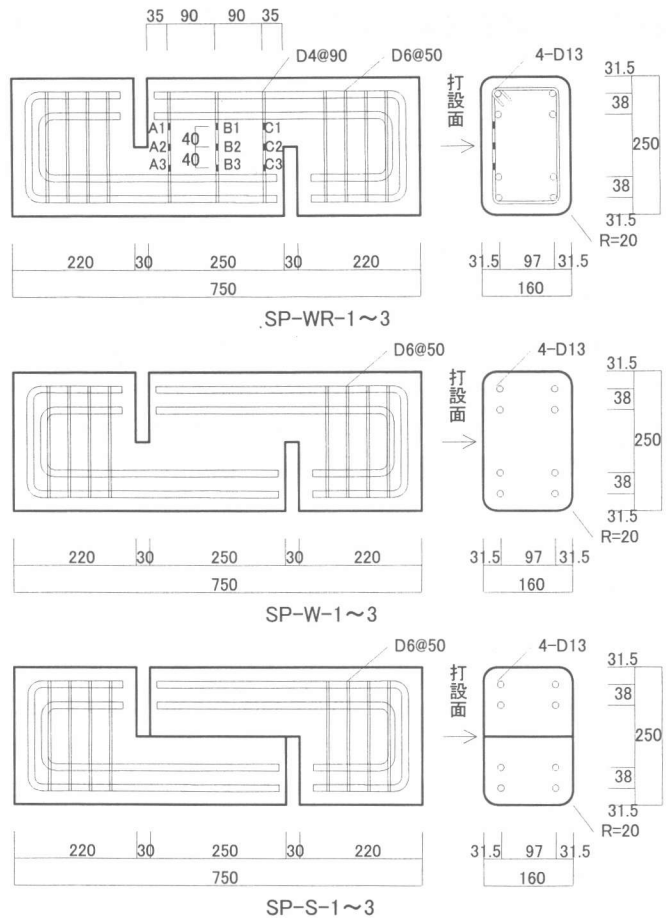


図-1 試験体配筋図

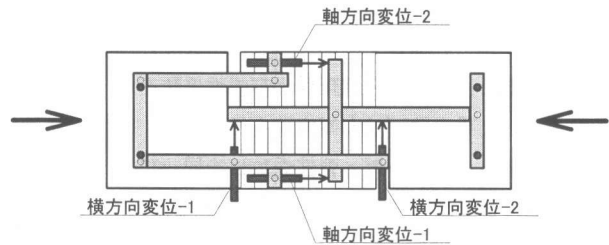


図-2 変位測定位置



図-3 シート歪測定位置

表-1 実験結果一覧

| 試験体 | 変動因子 | 最大荷重時 | | | | シート破断* |
|----------|--------------|--------|---------|---------|--------|----------|
| | | 荷重(kN) | 軸変位(mm) | 横変位(mm) | 最大シート歪 | |
| SP-WR-1 | 一体 横補強筋あり | 248.0 | 1.582 | 1.944 | 0.439% | COR |
| SP-WR-2 | | 248.5 | 1.452 | 2.138 | 0.449% | COR |
| SP-WR-3 | | 252.8 | 1.604 | 1.910 | 0.476% | COR |
| SP-WR 平均 | | 249.8 | 1.546 | 1.997 | 0.455% | |
| SP-W-1 | 一体 横補強筋なし | 203.9 | 0.964 | 1.767 | 0.425% | COR |
| SP-W-2 | | 214.9 | 0.967 | 1.818 | 0.444% | COR, CEN |
| SP-W-3 | | 222.1 | 1.551 | 2.132 | 0.591% | COR |
| SP-W 平均 | | 213.6 | 1.161 | 1.906 | 0.487% | |
| SP-S-1 | 分離 横補強筋なし | 24.1 | 18.517 | 1.748 | 0.960% | N |
| SP-S-2 | | 32.3 | 18.784 | -0.869 | 2.022% | N |
| SP-S-3 | | 18.5 | 17.841 | -0.571 | 0.460% | N |
| SP-S 平均 | | 25.0 | 18.381 | 0.103 | 1.147% | |

* COR : コーナー部 CEN : 中央部 N : なし

試験体の荷重-軸方向変位および横方向変位を図-4に示す。なお、軸方向変位、横方向変位とも図-2中の変位計の圧縮方向変位を正としている。

SP-WR および SP-W 試験体では、荷重が 200kN 弱の時に剛性が若干変化し、ひび割れの発生と対応していると思われる。最大荷重は軸方向変位がおおむね 1~1.5mm の時で、コンクリートの破壊あるいはひび割れの発生とともに荷重が急激に低下し、その後は 100kN 強の荷重を保持したまま変位が増

大した。軸方向変位がおおよそ 8~10mm のときにシートがコーナー部や中央部で破断し、荷重を保持することができなくなった。SP-S 試験体では荷重が小さいまま変位が増大し、コンクリートの破壊やシートの破断等は確認されず、変位計のストロークがなくなったため加力を終了した。SP-WR および SP-W 試験体では、試験体 3 体間のばらつきはほとんど見られなかった。

各変動因子試験体の最終破壊時の状況および

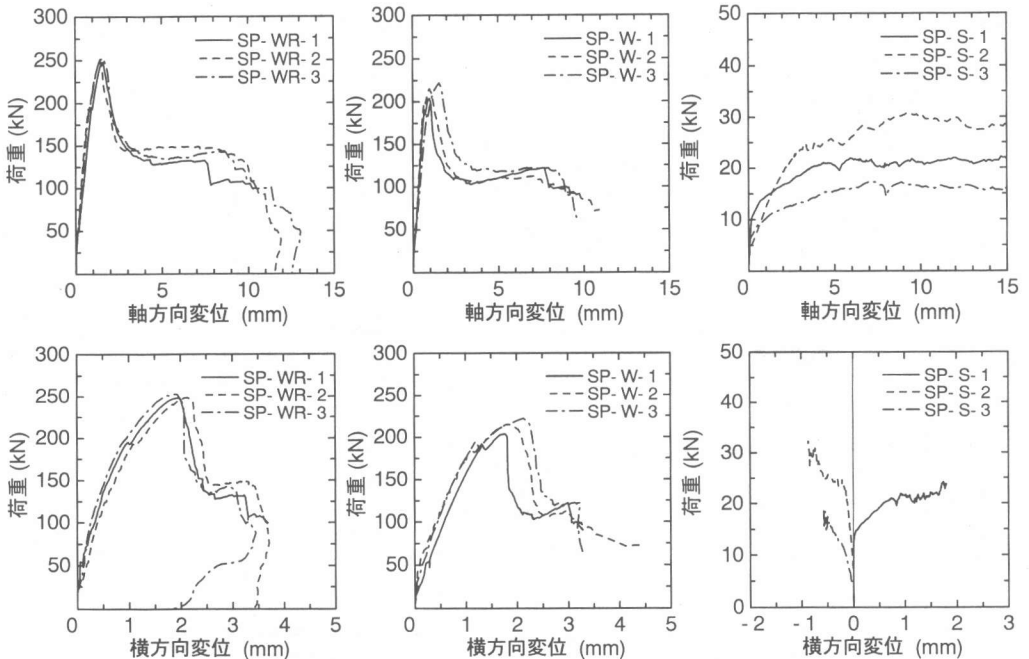


図-4 荷重-軸方向変位および横方向変位

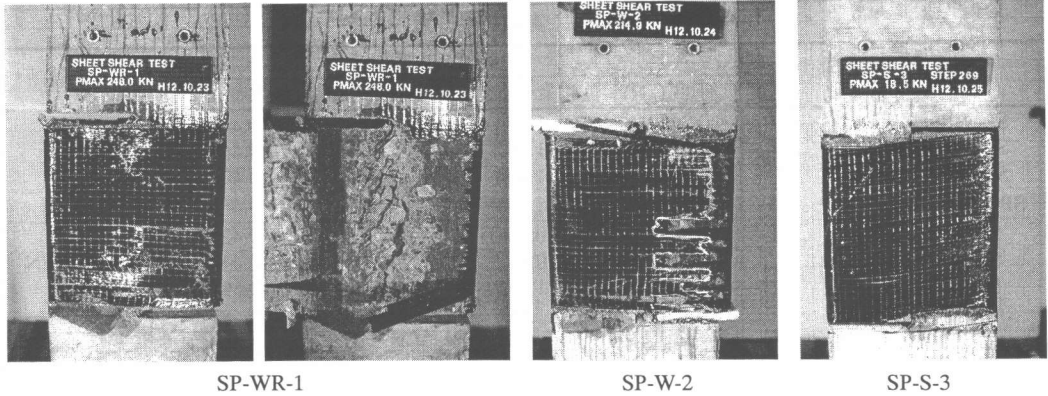


写真-1 試験体の破壊状況

SP-WR 試験体のコンクリートひび割れ状況を写真-1 に示す。ひび割れ面のコンクリートは表層部でシートに付着したままになっており、その領域は 100mm 程度であった。

3.2 シートの局所歪

シート歪の推移状況を図-5 に示す。上図は SP-WR 試験体、下図は SP-W 試験体を示し、左図はシート中央位置（図-3 中の E2, F2, G2）に貼付した歪ゲージの値、右図は中央から 40mm の位置（同 E3, F3, G3）に貼付した歪ゲージの値である。グラフ横軸は測定ステップで、荷重測定値もプロットしている。

シート中央位置の歪はコンクリートにひび割れが発生したと思われる測定ステップで急激に増し、増大した後、最大荷重までほぼ線形に大きくなっていく様子が分かる。最大荷重時の歪は 0.4~0.5% 程度である。一方、中央から 40mm 離れた場所の歪は最大荷重時にはほとんど生じておらず、最大荷重はコンクリートの破壊（ずれ）によって決定され、その時力を担っているシートの領域はひび割れ近傍のごく狭い部分である。荷重が減少する区間において歪が増大し、シートの負担領域が拡大していく様子が伺える。なお、前節で述べたように、ひび割れ近傍ではひび割れが発生して剥離

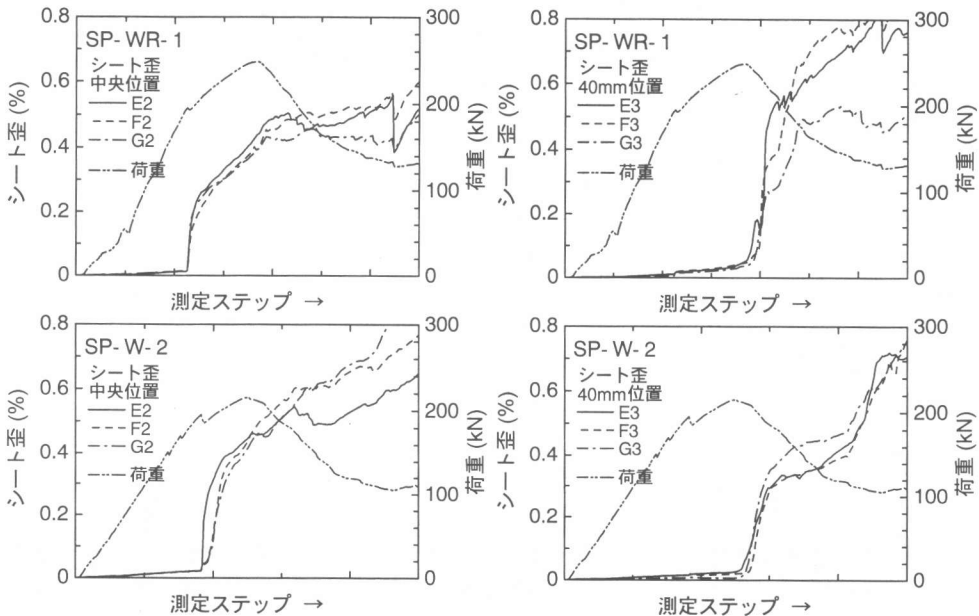


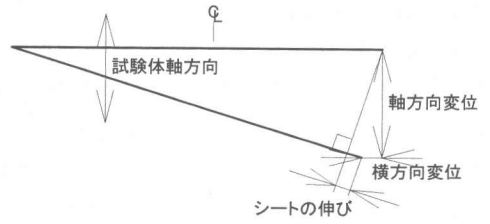
図-5 シート歪の推移

したコンクリートがシートに付着したままになっているため、テンションスティフニング効果によりシートの歪に弾性係数を乗じた応力がそのままシートの負担力に等しくはならないと考えられる。なお、SP-WR 試験体で最大荷重時の横補強筋歪は0.15%程度であった。

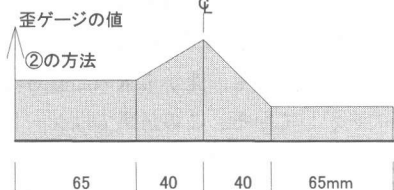
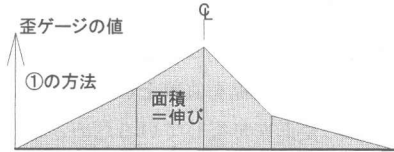
3.3 シートの平均歪

シートの伸び量を変位計の値および歪ゲージの値から求め、伸び量を試験体の面取部を除いたせいで除し、シートの平均歪の算出を試みた。シートの伸び量の算出方法を図-6に示す。変位計の値からの算出ではシートは直線形状を保つものとして、変形の適合条件から伸び量を求めた。歪ゲージの値からの算出では、①両端部でシートの歪が0、②両端部まで40mm位置の歪が一定であると仮定して歪分布図の囲む面積を求め、伸び量を求めた。

以上の方法により求めたシートの平均歪の推移状況を図-7に示す。グラフ上図はSP-WR 試験体、下図はSP-W 試験体のもので、左図が荷重と平均



変位計から求めたシートの伸び



歪ゲージから求めたシートの伸び

図-6 シートの伸び量の算出方法

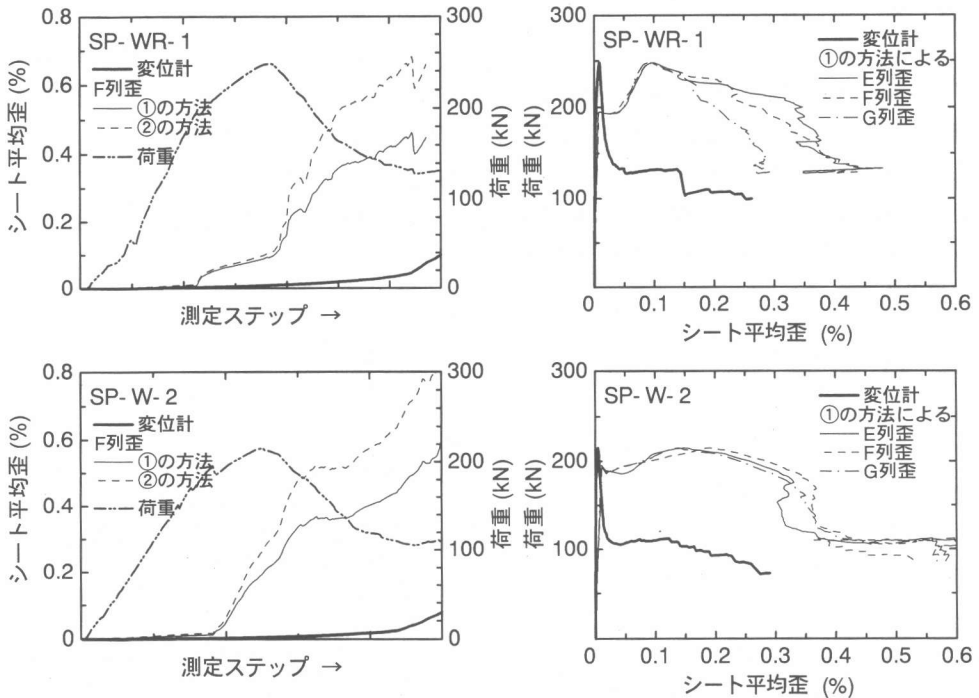


図-7 シートの平均歪の推移状況

歪（変位計および歪ゲージ①、②の算出方法）の関係、右図が横軸を測定ステップに取った平均歪（変位計および歪ゲージ①の算出方法）の推移状況を示している。左図から、最大荷重時近辺までは歪ゲージからの算出法①、②で平均歪に大きな差は見られないが、最大荷重以降、最大で30%程度の違いが見受けられる。また、荷重が増大し最大を迎えた後、荷重が減少して一定値に至るまでは変位から求めた平均歪と歪値から求めた平均歪は大きく異なっている。これは、変位から求めた伸び量がシートの束線を直線としているため、局所的な繊維の変形を無視しているためと思われる。右図から、荷重が一定値に落ち着いてからは両試験体とも平均歪が0.2%程度増加しており、この値は変位から求めた値も、歪から求めた値もほぼ同様な傾向を示している。この区間ではシートの剥離が全面に渡って生じていると考えられる。これらのことから、最大荷重時のシート負担領域がごく狭い範囲であることが分かる。

3.4 最大耐力

実験より得られた最大耐力を、通常のRCの場合のせん断接合強度算定として使用されるMattockの式³⁾より計算される値と比較した。なお、シートの影響を考慮するため、下式のようにせん断補強筋の項にシートの項を加え、シートの応力度として、表-1に示される最大荷重時の最大歪から求めた実応力と、シート破断強度(3400MPa)を用いたものの2通りを検討した。比較の結果を表-2に示す。

$$\tau_{mattock} = 0.162\sigma_B^{0.545} + 0.8(p_w\sigma_{wy} + p_{wf}\sigma_{wf}) \quad (1)$$

ここで、

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

p_w : 横補強筋比

σ_{wy} : 横補強筋の降伏強度 (MPa)

p_{wf} : シートの換算横補強筋比

σ_{wf} : シートの応力度 (MPa)

表-2より、実験値はシートの応力を実応力とした場合の計算値の2倍以上、シートの応力を破

断強度とした場合でも実験値が大きくなっている。通常のRCの場合とは最大耐力時の抵抗機構が異なると考えられ、例えばシートの拘束による三軸圧縮状態のコンクリートの強度上昇等を加味しなければならないと思われる。

表-2 最大耐力の比較

| 最大せん断応力 (MPa) | | SP-WR (平均) | SP-W (平均) |
|---------------|-----|---------------|--------------|
| 実験値 | | 6.25 | 5.34 |
| シート 実応力 | 計算値 | 2.31 | 2.05 |
| | 比較値 | 2.71 | 2.60 |
| シート 破断強度 | 計算値 | 4.24 | 3.91 |
| | 比較値 | 1.47 | 1.37 |

4.まとめ

連続繊維シートで耐震補強された鉄筋コンクリート部材のせん断性能評価に資するために、連続繊維シートを外周に貼付けたS型試験体による押抜き型のせん断実験を行った。最終的な破壊はシートコーナー部の破断であったが、最大耐力は一体打ち試験体の場合、内部のコンクリートのせん断ずれが大きく発生したときであり、その時のシート中央部の歪は0.4%程度であった。また、シートが応力を担っている区間はひび割れ近傍のごく限られた領域であった。

今後、コンクリートの強度やシートの特性値を変動因子とした同様な実験を行い、コンクリートのせん断ずれが発生するときのシート歪の評価等を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、筑波大学学内プロジェクト研究によって行っている。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)，1998
- 2) 古田智基，河内洋平，金久保利之，福山 洋：繊維シートの剛性がRC梁のせん断耐力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，第22巻，第3号，pp.1531~1536，2000.6
- 3) Hofbeck, J. A., Ibrahim, I. O. and Mattock, A. H. : Shear Transfer in Reinforced Concrete, ACI Journal, Proceedings V.66, No.2, pp. 119-128, Feb. 1969