論文 ポリウレア樹脂を柔軟層として使用した連続繊維シートによる RC 梁のせん断補強効果の実験的評価

荒添 正棋^{*1}·小林 朗^{*2}·高橋 義裕^{*3}·佐藤 靖彦^{*4}

要旨:連続繊維シートの種類と組み合わせ方,さらには、ポリウレア樹脂層の有無を変数とした,RC梁のせん断補強効果に関する実験的検討を行った。その結果、ポリウレア樹脂層を連続繊維シートとコンクリート間に設けることでせん断耐力が増加すること、側面に貼付けた連続繊維シートを高強度ポリプロピレン繊維シートで巻きつけることにより、大きなせん断補強効果を期待できることが明らかとなった。 キーワード:梁、せん断補強、連続繊維シート、ストランドシート、ポリウレア樹脂、柔軟層

1. はじめに

既設コンクリート構造物の補強材として連続繊維シ ート(以下「繊維シート」)が,近年盛んに用いられてい る。しかし,繊維シートをコンクリート構造物に貼付け, 曲げ補強やせん断補強しても,一定の力が加わると繊維 シートの特性である高い強度を発揮させる前に剥離して しまうことがあり,さらにその傾向は,高目付の繊維シ ートほど大きい。

この繊維シートとコンクリート構造物との間にエポ キシ系の柔軟性のある樹脂を介すことにより、コンクリ ートと繊維シートとの付着性能を向上、および、コンク リートのひび割れ位置での付着せん断応力の集中を低減 させることにより、曲げ耐力等を向上させる研究¹⁾も数 多くみられる。しかし、エポキシ系の柔軟性のある樹脂 の場合、温度に依存される可能性があるとの指摘²⁾もあ り、筆者らは圧縮弾性係数が 60MPa 程度と連続繊維シー ト用エポキシ樹脂の数十分の一と小さく破断伸びが 300%以上と大きい柔軟性を持ちながらその弾性特性の 温度依存性の小さいポリウレア樹脂を柔軟層に用い有効 性を確認してきた³⁾。

また,筆者らは,繊維シートの一種であるストランド

状の FRP シート(以下, S シート)を, 既設コンクリートに側面のみ貼付け, その外側に破断ひずみの大きい高強度ポリプロピレン繊維シート(以下, 高強度 PP)を巻きつけることによりせん断補強する方法を考案し, 補強効果を確認してきた⁴⁾。

そこで本研究では、各種繊維シートとコンクリートと の間に柔軟層としてポリウレア樹脂を用いた場合および 高強度 PP 巻立てを併用してせん断補強した RC 梁を製作 し、載荷実験を通じてせん断補強効果を確認するととも に、各試験体においてひずみ測定値よりせん断分担力を 求め、分担割合の比較を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

表-1 に試験体一覧, 図-1 に試験体形状を示す。試 験体は, 断面を幅 300mm×高さ 400mm, 全長を 2400mm, せん断スパンを 840mm, せん断スパン比を 2.4 とした。 各実験時にコンクリートの圧縮試験を実施した。

表-2 に使用した鉄筋の材料特性を示す。曲げ破壊を 先行させないように, 圧縮鉄筋は D16(SD345)を3本,引 張鉄筋には D22(USD685)を2段の各3本の計6本配置し

武职伴	ホリワレノ倒加	111 月11 日本
No.1	なし	なし
No.2	なし	50mm 幅の高強度炭素繊維シートの巻立(1層)
No.3	あり	50mm 幅の高強度炭素繊維シートの巻立(1 層)
No.4	なし	50mm 幅の高強度 S シートの巻立(1 層)+40mm 幅の高強度 PP 外周巻立(1 層)
No.5	あり	50mm 幅の高強度 S シートの巻立(1 層)+40mm 幅の高強度 PP 外周巻立(1 層)
No.6	あり	50mm 幅の高弾性 S シートの巻立(1 層)+40mm 幅の高強度 PP 外周巻立(3 層)
No.7	あり	50mm 幅の高強度 S シートの巻立(1 層)

表一1 試験体一覧表

*1 新日鉄住金マテリアルズ(株) コンポジット社 社会資本材料事業部 技術部 (正会員)

*2 新日鉄住金マテリアルズ(株)コンポジット社 社会資本材料事業部 技術部 工修(正会員)

*3 北海学園大学 工学部社会環境工学科 教授 工博(正会員)

*4 北海道大学大学院 北方圈環境政策工学部門 准教授 博士(工) (正会員)

No.1~No.7



た。梁右側のせん断スパンを評価部分としせん断補強鋼 材を配置せずに繊維シート補強材にてせん断補強し、そ れ以外の部分はせん断破壊させないように D13(SD345) を 50mm ピッチで配置した。

本研究では,表-1および図-1に示す試験体 No.1~ No.7の7体作製した。表-3に使用した補強材の材料特 性を,表-4に使用した補強材を貼付ける際に使用した 樹脂の材料特性を示す。試験体 No.1は,補強材を配置せ ず無補強とした。試験体 No.2には,50mm 幅の帯状の高 強度炭素繊維シートを 150mm ピッチで巻きつけ補強し た。試験体 No.4には梁側面に50mm 幅の高強度 S シー トを 150mm ピッチで配置し,さらに 40mm 幅の高強度 PP を 1 層巻きつけた。高強度 PP を巻きつける際に炭素 繊維シート用樹脂を塗布した。試験体 No.3 および試験体 No.5 は、それぞれ試験体 No.2 および試験体 No.4 の繊維 シートとコンクリートの間にポリウレア樹脂層を設けた。 試験体 No.6 は、試験体 No.5 の高強度 S シートの代わり に高弾性 S シートで補強しさらに高強度 PP を 3 層に増 やし補強した。試験体 No.7 は、試験体 No.5 のように高 強度 PP で巻きつけないで S シートの側面貼付けのみで の補強とした。

2.2 計測項目および載荷方法

載荷時に,主鉄筋および補強材のひずみを測定した。 図-2 に示したように,主鉄筋は,9 ヶ所のひずみを測 定し,繊維シート補強材は,両側面に上下端部および中 央部の合計6ヶ所のひずみを測定した。

表-2 鉄筋の材料特性

材料	降伏強度	引張強度	
	MPa	MPa	
D13(SD345)	379.9	561.4	
D16(SD345)	370.6	559.7	
D22(USD685)	715.2	898.8	

表-3 補強材の材料特性

材料	設計	引張り	弾性率	使用
	厚さ	強度	(GPa)	供試体
	(mm)	(MPa)		
高強度炭素繊維	0.333	4402	259	No.2
シート	0.333	4792	255	No.3
高強度 S シート	0.333	4520	259	No.4
	0.333	4310	270	No.5,7
高弾性 S シート	0.286	3020	714	No.6
PP 繊維シート	0.824	515	17.5	No.4,5,6

表一4 札	計脂の材	*料特性
-------	------	------

材料	引張強	圧縮強	圧縮
	度	度	弾性率
	MPa	MPa	MPa
炭素繊維シート用樹脂	44	76	2390
S シート用樹脂	未測定	75	4030
ポリウレア樹脂	7	4	66

試験体 No.4 に関しては,高強度 PP のみのひずみを測 定し,試験体 No.5 および試験体 No.6 に関しては,高強 度 PP とともに S シートのひずみも同一位置で測定した。 載荷荷重についてはロードセル,載荷点中央変位につい ては変位計にて測定し,ひび割れ等の実験状況は目視に て観察した。

本実験では,最大荷重 2000kN 万能材料試験機でラム 変位制御による3点の単調載荷を実施した。支持条件は, 片側ピン支持,他端ローラー支持とした。

3. 実験結果

3.1 荷重変位および実験状況

図-3 に実験より得られた荷重変位関係を,表-5 に 実験結果一覧を示す。試験体 No.4 に関しては載荷途中で 変位の測定ができなかったため荷重変位曲線は測定でき たところまで記載している。

図-3 と表-5 より, せん断補強した試験体は, せん 断補強していない試験体と比べ耐力が向上していること がわかる。補強効果が一番小さい試験体はSシートのみ 側面に配置した試験体 No.7 であり, 一番効果の大きい試 験体は高弾性Sシートと高強度 PP で巻きつけた試験体 No.6 であった。なお, 最大荷重が最も大きかった試験体 No.6 においても主鉄筋の最大ひずみが 2850 μ 程度であ り, どの試験体も主鉄筋降伏前に最大耐力を示した。





図-2 ゲージ貼付け位置



図-3 荷重変位曲線

表-5 実験結果一覧

試験	コンクリ	最大	実験終了後の状況
体	ート強度	荷重	
	(N/mm ²)	(kN)	
No.1	45.4	337.3	せん断破壊
No.2	41.5	595.8	シート破断
No.3	40.6	724.9	シート破断
No.4	43.1	572.7	シートとコンクリートの剥離
No.5	40.5	648.4	シートとコンクリートの剥離
No.6	44.0	824.2	シートとコンクリートの剥離
No.7	42.9	415.5	シートとコンクリートの剥離

各試験体の実験終了後の状況を写真-1 に示す。試験 体 No.1 の無補強の試験体は、325kN で斜めひび割れが 発生した際に、少し荷重が低下した後、再度徐々に荷重 が増加するとともにひび割れ幅も大きくなり、337kN で 大きく荷重が低下した。高強度炭素繊維シートを用いた 試験体 No.2,試験体 No.3 は、斜めひび割れ進展後ひび 割れ幅が大きくなり最終的に高強度炭素繊維シートが破 断した際に大きな破壊音とともに大きく荷重が低下した。 S シートを用いた試験体 No.4~No.7 に関しては、どの試 験体も斜めひび割れ進展後ひび割れ幅が大きくなり、最 終的に S シートとコンクリートが剥離した際に破壊音と





試験体 No.5

試験体 No.6

試験体 No.7

写真-1 試験体の実験終了後の状況

ともに大きく荷重が低下した。

試験体 No.2 および試験体 No.7 以外の初期剛性に関し ては、補強材の有無および種類の違いにおいて大きな差 はみられなかった。なお、試験体 No.2 と No.7 の初期剛 性が他の試験体と比べ大幅に違う。これは、本実験では 支点の変位を測定していなかったため、その影響を補正 できなかったことによる。

ポリウレア樹脂の有無以外は同一仕様である試験体 No.2 と試験体 No.3,および,試験体 No.4 と試験体 No.5 を各々比較することで,ポリウレア樹脂を有する方が, 耐力が増加することが確認できた。

3.2 S シートと高強度 PP との一体性

図-4(a)に試験体 No.5 の梁中央から3番目の補強材の 中央部のひずみと荷重との関係,図-4(b)に試験体 No.6 の梁中央から1番目の補強材の上部のひずみと荷重との 関係を示す。図中の(A)および(B)は,梁断面の両側面に ひずみを貼付けておりどちらの面であるかを示している。 図-4(a)の結果から各面でのひずみの変化は若干異なる が,それぞれの面でのSシートと高強度 PP とのひずみ は最大荷重までほぼ同等の変化を示している。この傾向 は,試験体 No.5 の他の位置でも同等であり,試験体 No.5 においては,Sシートと高強度 PP は,最大荷重時まで概 ね一体化されているといえる。ただし,試験体 No.5 と同 様にSシートと PP シートを両方測定した試験体 No.6 に 関しては,図-4(b)に示すように,早期にSシートと PP でひずみのずれが生じているものもみられ,Sシートと 高強度 PP が剥離している補強材もみられた。

3.3 分担せん断力

(1) 分担力の検討方法

文献 5)によると、せん断耐力は、せん断補強鋼材、繊







(b) 試験体 No.6 (梁中央から1番目の補強材の上部のひずみ)

図-4 荷重ひずみ曲線

維シート、そして、それら以外が受け持つせん断耐力の 和として表される。そこで、本論文において、炭素繊維 シートもしくはSシートの受け持つせん断力 V_f と高強度 PP の受け持つせん断力 V_{PP} 、それ以外が受け持つせん断 力 V_c の各分担力の作用せん断力に対する変化を比較す る。なお、ここでは、式(1)、式(2)にて V_f と V_P を求め、 V_c は全せん断力Vから V_f 、 V_{PP} を差し引くことで求めた。



$$V_{f} = A_{f} \sum_{i=1}^{n_{f}} E_{f} \varepsilon_{fi}$$
(1)
$$V_{P} = A_{P} \sum_{i=1}^{n_{P}} E_{P} \varepsilon_{Pi}$$
(2)

ここに、 A_f は一組の帯状炭素繊維シートもしくはSシ ートの断面積、 n_f は破壊に支配的な斜めひび割れを跨ぐ 帯状炭素繊維シートもしくはSシートの本数、 E_f は炭素 繊維シートもしくはSシートの弾性率、 ϵ_{fi} はi本目の炭 素繊維シートもしくはSシートのひずみゲージの値(高 さ方向の3点のひずみゲージのうち破壊に支配的であっ た斜めひび割れに近い位置のひずみ)、 A_p は一組の帯状 高強度 PP の断面積、 n_p は破壊に支配的な斜めひび割れ を跨ぐ帯状高強度 PP の本数、 E_p は高強度 PP の弾性率、 ϵ_{pi} はi本目の高強度 PP のひずみゲージの値(高さ方向の 3点のひずみゲージのうち破壊に支配的であった斜めひ び割れに近い位置のひずみ)。なお、試験体 No.4 に関し ては、高強度 PP のみのひずみしか測定してないため、Sシートのひずみは高強度 PP のひずみにて代用した。

試験体 No.2~No.7 の分担力の推移を図-5 に示す。また,各試験体の最大荷重時の分担力を表-6 に示す。

表-6 最大荷重時のせん断力の負担一覧

試験体	V(kN)	V _c (kN)	V _f (kN)	V _p (kN)
No.2	298	122	176	
No.3	363	209	154	
No.4	286	—		_
No.5	324	192	115	17
No.6	412	150	172	89
No.7	208	151	57	

注) 試験体 No.4 の-は、ひずみが途中で計測不能のため

(2) ポリウレア樹脂の有無

試験体 No.2 と試験体 No.3 を比較すると、最大荷重に おける V_fは、176kN と 154kN と試験体 No.2 の方がやや 大きい値を示したが、V_cは、試験体 No.2 では早い段階 で低下し、最大荷重時では試験体 No.3 に比べかなり小さ な値を示した。またひび割れ状況をみても、試験体 No.2 より試験体 No.3 の方が、ひび割れが分散していることが わかる。このことから、ポリウレア樹脂なしの試験体 No.2 は、局所的にひび割れが発生すると、その部分の繊 維シートとコンクリートが剥離し、ひび割れ幅が大きく なり骨材の噛み合わせ抵抗が下がり、早い段階で V_cが低 下したと考えられる。それに対し、ポリウレア樹脂あり の試験体 No.3 は、ポリウレア樹脂によりコンクリートと 繊維シートの剥離を抑制することによりひび割れを分散 させ、かつひび割れ幅の拡大を防ぐことで、骨材の噛み 合わせ効果を保持し、V_cが低下することなく V_fが安定 して増加したものと思われる。このことが、ポリウレア 樹脂がある場合のせん断耐力の向上に寄与したものと考 えられる。

(3) 高強度炭素繊維シートと高強度 S シートの補強の 比較

高強度炭素繊維シートで全周巻きつけた試験体 No.3 と高強度 S シートを側面に貼付けた後高強度 PP1 層を巻 きつけた試験体 No.5 を比較する。最大荷重時の V_cは, 200kN 程度とほぼ同等の値を示したが、V_fに関しては同 ー目付にも関わらず高強度炭素繊維シートを全周に巻き つけた試験体 No.3 の方が 40kN 程度大きな値を示した。 いずれの場合も,最大荷重の直前に V_cの低下が起ってい るが、全周巻きつけた場合には、定着が確保されている ため、その低下分を炭素繊維シートが補うことができた が、高強度 S シートを側面貼付けの場合には、定着が十 分でなく剥離することで急激な破壊が起ったものと考え られる。

(4) 高強度 S シートの高強度 PP の巻きつけの有無

試験体 No.5 と試験体 No.7 を比較する。試験体 No.7 の最大荷重時の V_c は,試験体 No.5 のそれに比べ,約 25% 程度小さく、 V_f に関しては、半分程度となっている。巻きつけた高強度 PP1 層の分担せん断力 V_p は極めて小さいが、内側に貼付けた S シートの剥離の抑制に大きく寄与し、巻きつけてない場合に比べ、せん断耐力を大きく増加させることができることが明らかとなった。

(5) 高強度 S シートと高弾性 S シート補強の比較

試験体 No.5 と試験体 No.6 を比較する。試験体 No.6 の最大荷重時の V_c は,試験体 No.5 の V_c より 25%程度小 さい。しかし,試験体 No.6 の耐力は試験体 No.5 に比べ 大きな値を示した。これは,高強度 PP を巻きつける量 が増えたことと,高弾性 S シートを高強度 PP で巻きつ けた場合の V_f が高強度 S シートを高強度 PP で巻きつけ た場合の V_f よりも大きな値となったことによるもので ある。このことより,弾性率の高い補強材を用いた方が, より高いせん断補強効果を期待できる可能性がある。

4. まとめ

各種繊維シートとコンクリートとの間に柔軟層とし てポリウレア樹脂を用いてせん断補強した RC 梁の実験 を実施し、以下の知見が得られた。

(1) 本実験でせん断補強した試験体は、せん断補強していない試験体と比べ全て耐力が向上した。ポリウレア樹脂の有無以外は同一仕様である試験体は、どの試験体もポリウレア樹脂ありの試験体の方がなしの試験体に比べ耐力が向上した。

- (2) SシートをSシート用樹脂にて梁断面の両側面に貼付けた後,高強度 PP を高強度炭素繊維用樹脂にて貼付けたが,載荷の際に,Sシートと高強度 PP は,最大荷重時まで一体化されている場合とそうではない場合があった。
- (3) ポリウレア樹脂なしの試験体は、繊維シートとコン クリートとの早期の剥離によりひび割れが局所化 し、ひび割れ幅が大きくなることにより骨材の噛み 合わせ抵抗が下がり Vcが低下した。一方、ポリウレ ア樹脂ありの試験体は、繊維シートとコンクリート との早期の剥離を抑制することによりひび割れを 分散させ、かつひび割れ幅の拡大を防ぐことで骨材 の噛み合わせ抵抗を保ち Vc が低下することなく、 Vf が安定的に増加することで耐力を向上させ得た と考えられる。
- (4) 高強度 S シートのみでの補強に対し,高強度 S シートに高強度 PP1 層を巻きつけた補強は, V_c および V_f を大幅に向上させたが,高強度 PP1 層程度での巻きつけた量では同一目付の高強度炭素繊維シート での巻きつけの効果には及ばないことがわかった。
- (5) 高弾性 S シートを高強度 PP で巻きつけた場合の V_f は、高強度 S シートを高強度 PP で巻きつけた場合 の V_f よりも大きな値となった。これは、高強度 PP を巻きつける量の影響もあると考えられるが、弾性 率の高い補強材を用いた方が、より高いせん断補強 効果を期待できる可能性がある。

参考文献

- 前田敏也,小牧秀之,坪内賢太郎,村上かおり:緩 衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.817-822, 2001.6
- 三井雅一,福澤公夫,斉藤 誠,舟川 勲:緩衝材 を用いたFRPシート・コンクリート間のせん断付 着特性の温度依存性,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.351-356, 2004.7
- 高橋義裕,佐藤靖彦,小林 朗:ウレタン樹脂を有 するストランドシート補強 RC はりの曲げ挙動,土 木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集,V, pp.351-352, 2011.9
- (4) 荒添正棋,小林 朗,高橋義裕,佐藤靖彦:CFRP ストランドシートおよび高強度 PP による RC 梁のせん断補強に関する実験,土木学会第 66 回年次学術 講演会講演概要集,V,pp.353-354,2011.9
- 5) 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,土木学会, pp23-24, 2000.3