

(62) 炭素繊維シートを用いたRC梁のせん断補強に関する実験

西日本旅客鉄道株式会社

○田村 悟士

大阪市立大学

工学部

山田 優

(株) 富士ピー・エス

大阪支店 正会員

真鍋 英規

(株) 富士ピー・エス

大阪支店 正会員

米川 英繁

1. はじめに

近年、交通量の増大および車両重量の増加に伴い道路橋梁の劣化が問題となっており、橋梁の耐久性の向上をはかる補修補強方法が各方面で研究、開発されている。補強方法には様々な工法が採られているが、既存RC梁のせん断補強工法の1つとして炭素繊維シート接着工法がある。炭素繊維シート(以下シート)は軽量かつ補強厚さが薄いと言った特徴を有することから施工性に優れており、近年補強工事例は増えつつある。しかしながら補強効果の有効性は認められているが、シートせん断補強に対する合理的な補強設計方法は確立されておらず、また、既往の研究・実験等は少なく、その補強効果や終局時の挙動等は必ずしも明らかにされていないのが現状である。

本研究ではシートの種類、巻き付け方法および巻き付け量が異なるシート補強RC梁供試体を作製し、静的載荷試験を行い、シート補強による補強効果、静的挙動、および破壊状況を確認し、シート補強を行うに当たって適切な補強方法、およびその効果について詳述する。

2. 実験概要

表-1 に実験計画、表-2 に使用材料の力学的特性値を示す。本実験では5要因を設定し、それぞれに対して2~4の水準を設けた。実験において製作した供試体を図-1に示す。供試体は複鉄筋長方形はり型形状で、断面幅 $b \times$ 断面高さ $h = 150\text{mm} \times 250\text{mm}$ 、有効高さ $d = 210\text{mm}$ 、せん断スパン・有効高さ比 (a/d) を2.5とし、シート補強した供試体がせん断破壊を呈するように設計した。また本供試体は終局曲げ耐力を卓越させるためPC鋼棒を使用した。なお設計においては、平成8年度制定コンクリート標準示方書を利用した¹⁾。

供試体製作時に当たり、セメント

は早強ポルトランドセメントを使用した。打設後、翌日脱型し、7日間の散水養生の後、28日間気中養生した。コンクリートの圧縮強度(テストピース)においては低強度が 49N/mm^2 、高強度が 89N/mm^2 、そして弾性係数はそれぞれ 33.3 、 44.4kN/mm^2 であった。シート補強施工に関しては、材令28日で実施した。まずシートの接着性を高めるため、コーナー部に半径2cmの面取りを設け、ディスクサンダーで供試体表面を研磨しモルタル部分を削除した。その後、プライマー塗布し、エポキシ系樹脂剤によりシートを接着、含浸させた。またシート補強施工後、気温20度の恒温室内で1週間の養生期間を設けてからひずみゲージの貼り付

表-1 実験計画

要因	水準
コンクリート強度 f_c	49,89
せん断補強筋比 $p_s(\%)$	0, 0.04, 0.17
シート目付量 (g/m^2)	200, 300
シート弾性係数 $E(\text{kN/mm}^2)$	244,250,402,624
シート補強方法	1層巻き付け, 2層巻き付け, ゼブラ状巻き付け

表-2 使用材料の力学的特性値

	タイプ	目付量 (g/m^2)	E_s or E_c (kN/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
スターラップ (軟鋼鉄線)	$\phi 3\text{mm}$	/	180	349	575
			163	351	481
	主鉄筋 (異形PC鋼棒)	/	209	1068	1193
			208	1061	1162
炭素繊維シート	低弾性	/	200	244	4228
			300	250	4302
	中弾性	/	300	402	4512
			300	624	4038

けを行い、その後、載荷実験を開始した。図-2に今回実験を行った供試体におけるシート補強方法を示す。

載荷実験は約10kNずつ荷重を単調に増加させ、一方向静的2点載荷により実施した。そして載荷により最大荷重に到達後、最大荷重の80%まで荷重が低下した時点を破壊と見なして実験を終了した。なお、測定項目として、荷重、たわみ変位、スターラップおよびシートのひずみを測定した。

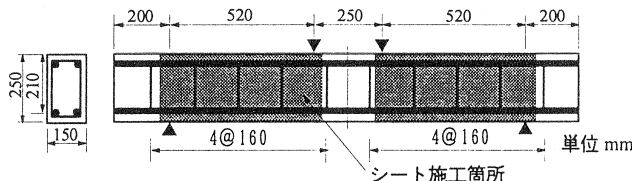


図-1 実験供試体

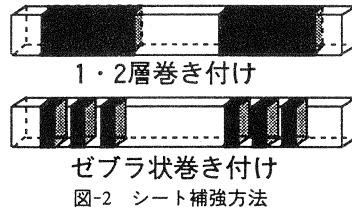


図-2 シート補強方法

3. 実験結果および考察

3.1 せん断耐力および破壊性状

表-3に実験供試体の諸元および実験結果を示す。供試体は表-1の要因から10体製作した。無補強供試体L6は斜めひびわれの発生後に定着部において主鉄筋の付着割裂破壊が起こるせん断引張破壊を呈した。これは主鉄筋にPC鋼棒を使用したために生じたものと考えられる。高弾性タイプのシートを巻き付けたL6-3HWはシートの剥離の進行とともにシートが破断したせん断引張破壊、それ以外のシート補強供試体は全て、シートの剥離によるせん断引張破壊を呈した。シート補強供試体におけるシートの剥離は、まずせん断スパンの中央付近で起こった。その後さらに作用せん断力を増やすにつれて定着部方向に向かって移行した。図-3にL6-2LWおよびL6-2LZの破壊状況図を示す。次にシートのせん断補強効果であるが、無補強供試体L6と他の補強した供試体のせん断耐力の実験値を比較すれば明らかな様に、巻き付け方、シートの弾性係数で耐力に違いはあるものの、シート巻き付け補強による終局せん断耐力は向上している。また、シートを2層巻き付けたL6-2LW2のせん断耐力が一番大きく、シートの積層数が補強効果に影響を与える事がわかる。

シートの弾性係数をパラメータとしたシリーズ(L6-3LW,L6-3MW,L6-3HW)において、せん断耐力の実験値は、シートの弾性係数が高い供試体が最も低く、逆に弾性係数が低い供試体では最も高い値となった。この原因として、シートの弾性係数が高くなるにつれてシートの終局の伸び率は低下するため、シートがRC

表-3 実験供試体の諸元および実験結果

供試体名	コンクリート圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	せん断補強比 P_s (%)	目付量 (g/m ²)	弾性係数 E_f (kN/mm ²)	補強方法 *1	実験値 P_u (kN)	計算値 P_{du} (kN)*2				破壊mode *3
							P_{du}	C	S	F	
L6	49	0.17	200	244		274.4	143.0	97.6	45.4		S
L6-2LW	49	0.17	200	244	W	408.6	482.7	97.6	45.4	339.6	P
H6-2LW	89	0.17	200	244	W	436.4	503.8	118.8	45.4	339.6	P
L3-2LW	49	0.04	200	244	W	341.0	448.4	97.6	11.1	339.6	P
L0-2LW	49	0	200	244	W	272.4	437.3	97.6		339.6	P
L6-3LW	49	0.17	300	250	W	442.9	483.1	97.6	45.4	340.0	P
L6-3MW	49	0.17	300	402	W	384.5	505.5	97.6	45.4	362.5	P
L6-3HW	49	0.17	300	624	W	362.2	467.4	97.6	45.4	324.4	PR
L6-2LW ₂	49	0.17	200	244	W ₂	498.6	822.4	97.6	45.4	679.2	P
L6-2LZ	49	0.17	200	244	Z	383.5	288.6	97.6	45.4	145.6	P

*1 補強方法…W：1層巻き付け、W₂：2層巻き付け、Z：ゼブラ状巻き付け

*2 計算値… P_{du} ：設計終局せん断耐力、C：コンクリート分担せん断耐力、S：スターラップ分担せん断耐力、F：シート分担せん断耐力

*3 破壊 mode…S：せん断引張破壊、P：シートの剥離によるせん断引張破壊、PR：シートの破断・剥離によるせん断引張破壊

部材の変形に対して追従できなかったことが考えられる。このことから、シートをせん断補強材として選定する場合、補強する部材の変形とシートの伸び能力を十分考慮する必要があると言える。

また、L6,L6-2LZを除く8体の供試体のせん断耐力は、実験値が計算値を下回る危険側となった。これは、シートの受け持つ分担せん断耐力算出式にシートの引張強度を含んでおり、計算上はシート引張強度まで期待していることになるが、実験ではシートとコンクリートの界面剥離により破壊しており、シートの引張強度までせん断分担能力を発揮していないことによると考える。図-4にL6-2LW,L6-2LZの荷重-シートひずみ関係を示す。これより最大荷重時のシートのひずみが、シート破断ひずみ(約17000 μ)の半分であることが解る。せん断耐力の算定では、シート自体の強度評価とは別にシートとコンクリートの界面剥離に関する項目を考慮する必要がある。

次に、シートの接着部分の違いによる影響であるが、シートの巻き付け方を全面ではなくセパレートのゼブラ状(図-3 L6-2LZ)にした供試体では実験値が計算値を上回った。これは、シートとコンクリート間に生ずる界面剥離の進展メカニズムの違いによると考えられる。つまり、RC部材全面に巻き付けた供試体では、せん断スパン中央付近に起こった剥離が、荷重を続けていくにつれて支点方向に連続的に移行して剥離する領域が大きくなり、シートのせん断抵抗が無くなる。一方、ゼブラ状巻き付けではシートが連続していないため、せん断スパン中央付近で発生した剥離が支点側のシートに連続的に移行せずシート有効部分がせん断抵抗する。実際に、図-4より明らかなように、全面巻き付けよりゼブラ状巻き付けのシートひずみの方が載荷荷重に追従しているのが解る。本実験結果だけではあるが、シートの巻き付け方法として、必ずしも全面巻き付けが有効であるとは言えない。

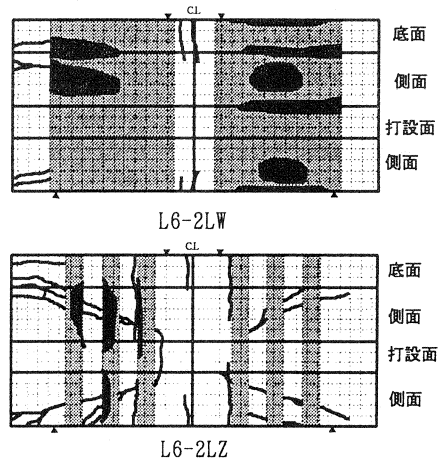


図-3 破壊状況図(黒い囲みは剥離箇所)

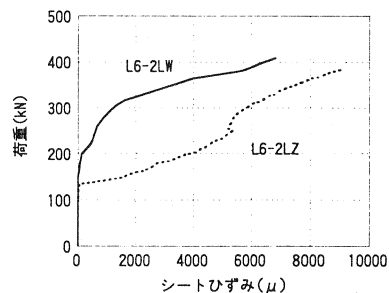


図-4 荷重-シートひずみ関係

3. 2 供試体のせん断性状

図-5にコンクリート強度が違うL6-2LW,H6-2LWの作用せん断力とコンクリート、スターラップおよびシートが受け持つ分担せん断力の関係を示す。この図において V_c 、 V_s 、 V_f はそれぞれ、作用せん断力に対するコンクリート、スターラップおよびシートの分担するせん断力を表す。その際、スターラップ、シートの分担せん断力は次式により計算した。また、コンクリートが受け持つ分担せん断力 V_c は作用せん断力 V から V_s 、 V_f を除いた値とした。また本実験ではせん断スパン内においてせん断ひびわれを跨いでいる3組のシート、スターラップの平均ひずみを用いてシートおよびスターラップの分担せん断力を計算している。ただしスターラップが降伏した場合には、降伏応力で一定として計算している²⁾。

$$V_f = A_f E_f \varepsilon_f \quad (\text{シートの分担するせん断力})、$$

$$V_s = A_s E_s \epsilon_s \quad (\text{スターラップの分担するせん断力})$$

ここで

A_p, A_s : せん断ひびわれとの交差部のシートおよびスターラップの総断面積

E_p, E_s : シートおよびスターラップの弾性係数

ϵ_p, ϵ_s : せん断ひびわれとの交差部のシートおよびスターラップの平均ひずみ

コンクリート強度の違いによるせん断性状を比較してみると、両供試体ともおよそ 100kN でシート、スターラップがせん断力の分担を開始している。その後 H6-2LW が L6-2LW より各荷重段階でのシートの分担せん断力が増加している。これは H6-2LW が L6-2LW よりシートの剥離の進行が遅かったため、シートにせん断力の分担が移行しやすかったと思われる。しかし、表4のせん断耐力時のせん断分担率を見ると、L6-2LW と H6-2LW のコンクリート、スターラップおよびシートのせん断分担率がほぼ同じであり、このことからコンクリート強度がせん断補強材（シートおよびスターラップ）のせん断分担力に与える影響は少ないと考えられる。また両者のせん断耐力に差が生じたのはコンクリート強度の違いによって得られたコンクリート部材のみのせん断分担力の差によるものだと考えられる。そして RC 部材のせん断耐力はコンクリートが受け持つせん断力と、せん断ひびわれ域でのシートとスターラップの受け持つせん断力の和として表されると言える。

次に図-6、7 にせん断補強筋比が異なる L6-2LW、L3-2LW、L0-2LW における作用せん断力とコンクリート、スターラップおよびシートが受け持つ分担せん断力の関係を示す。

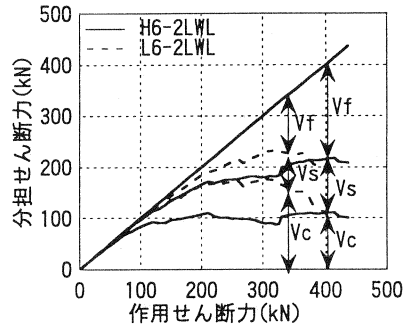


図-5 作用せん断力と分担せん断力
(コンクリート強度の違い)

表-4 せん断耐力時のせん断分担率(%)

供試体	コンクリート	スターラップ	シート
L6-2LW	22.4	22.2	55.4
H6-2LW	19.2	24.7	56.1
L3-2LW	37.3	6.1	56.6
L0-2LW	58.6		41.4
L6-3LW	27.7	19.0	53.3
L6-3MW	31.4	16.2	52.4
L6-3HW	28.0	16.6	55.3
L6-2LW _p	5.9	17.0	77.1
L6-2LZ	42.6	23.1	34.3

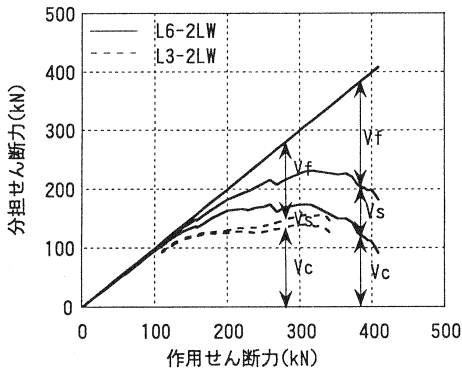


図-6 作用せん断力と分担せん断力
(せん断補強比 0.17, 0.04 の違い)

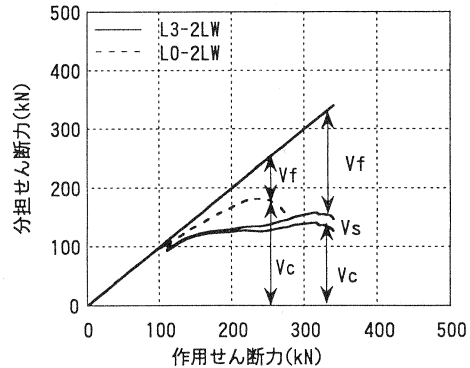


図-7 作用せん断力と分担せん断力
(せん断補強比 0.04, 0 の違い)

図-6よりL3-2LWがせん断破壊する約340kNまでにおいては、せん断補強筋比が大きいほどシートのせん断分担力が小さくなっているが、せん断補強筋比によらず同じ作用せん断力時にはシートとスターラップの受け持つせん断力を足し合わせた値はおおむね近い値を示している。しかしL3-2LWのせん断破壊後、L6-2LWはスターラップが降伏したと考えられ、スターラップのせん断分担力が頭打ちとなりシートのせん断分担力が増えている。そして表4からも明らかなようにシートのせん断分担率がL6-2LW、L3-2LWとも50~60%に到達した時点で終局を迎えた。一方、スターラップを配筋していないL0-2LWではせん断破壊時のシートせん断分担率が40%ほどである。よって、RC部材にスターラップが配筋されている場合においてシート補強をすればシートの引張強度特性を有効に発揮する事ができると言える。

次に図-8にシートの積層数の違うL6-2LW₁、L6-2LW₂の作用せん断力とコンクリート、スターラップおよびシートが受け持つ分担せん断力の関係を示す。図-8より、シートの積層数を増やすことによって、シートのせん断分担力が当然のことながら大きくなっていることがわかる。これはシートのせん断補強量(シートの総厚)が増えたことによる。しかし今回の実験において、積層数は2層までしか増やしていないが、これ以上に積層数を増やしていくと作用せん断力をシートのみで分担してしまうことが考えられ、またRC部材の破壊がシートとコンクリートの剥離現象によることを考慮すると、積層数の増加にともなう耐力面の増加には今後のさらなる研究が必要である。

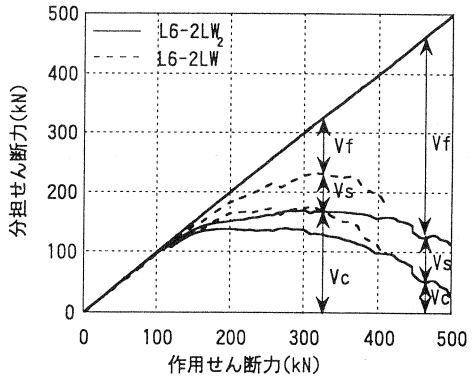


図-8 作用せん断力と分担せん断力の関係
(積層数の違い)

3.3 せん断耐力とせん断補強量の関係

シート補強したRC部材のせん断性状として、せん断耐力はコンクリートが受け持つせん断力と、せん断ひびわれ域でのシートとスターラップの受け持つせん断力の和として表されると述べた。そこでコンクリート強度が49N/mm²のシート補強を施した供試体8体におけるシートとスターラップのせん断補強量とせん断耐力の関係を考察した。せん断補強量(1) $p_w \cdot \sigma_w$ (単位 N/mm²) およびせん断補強比 p_w は次式で表される。

$$p_w \cdot \sigma_w = p_s \cdot \sigma_s + p_{cf} \cdot \sigma_{cf} \quad \dots\dots(1)$$

$$p_w = p_s + p_{cf} = 2A_s / (b_w d) + 2b_{cf} / b_w$$

ここで

p_s, p_{cf} : スターラップ、シートのせん断補強比

b_{cf} : シートの厚さ

A_s : スターラップ1本当たりの断面積

σ_s : スターラップの降伏強度

b_w : はり部材の断面幅

σ_{cf} : シートの引張強度

d : はり部材の有効高さ

また今回の実験においては破壊に至る際にシートが引張強度まで達しなかったため、(1)式中の σ_{cf} をせん断耐力時のシートひずみにシートの弾性係数を掛けて得られる応力値 σ_{cfp} に変えた(2)式からもせん断補強量(2) $p_w \cdot \sigma_w$ (単位 N/mm²) を算出した。

$$p_w \cdot \sigma_w = p_s \cdot \sigma_s + p_{cf} \cdot \sigma_{cf} \quad \dots\dots\dots(2)$$

以上の式から算出したせん断補強比、せん断補強量を表-5に、せん断補強量とせん断耐力の関係を図-9に示す。図-9より、せん断補強量(1)およびせん断補強量(2)においては特にせん断補強量が増加するにつれて概ねせん断耐力が増加する傾向がみられる。よって(1)式、(2)式で求められるせん断補強量をパラメータとしてせん断耐力の向上効果を評価できると考えられる。

表-5 せん断補強比およびせん断補強量

供試体	せん断補強比	せん断補強量(1) (N/mm ²)	せん断補強量(2) (N/mm ²)
L0-2LW	0.00074	3.13	0.36
L3-2LW	0.0012	3.29	0.78
L6-2LZ	0.0021	1.97	1.05
L6-2LW	0.0025	3.76	1.36
L6-3LW	0.0029	5.65	1.56
L6-3MW	0.0029	5.12	1.65
L6-3HW	0.0029	3.80	1.60
L6-2LW ₂	0.0033	6.89	1.86

4. まとめ

本実験結果により得られた知見を述べる。

- ・本実験結果からだけであるが変形性能の点からゼブラ状巻き付けは有効な補強方法といえ、これにせん断補強量増やすことでせん断耐力は増加するといえる。ただし、破壊状況より、シートの積層数だけの増加による補強効果には限界がある。
- ・RC部材にシート補強をした場合、コンクリート強度がシート、スタラップのせん断分担力(率)に与える影響は少ない。またせん断耐力はコンクリートが受け持つせん断力とシート、スタラップの受け持つせん断力の和で表される。
- ・シートの弾性係数が高くなるにつれてRC部材の変形に対して追従できないことが考えられ、施工時にシートを選定するに当たり、部材に適した変形(伸び)能力を要しているかを十分考慮する必要がある。
- ・スタラップ補強量、積層数および目付量をせん断補強量のパラメータとしてせん断耐力向上効果を評価できるが、RC部材の破壊形態がシートの剥離現象によるものであるため、耐力の算定には破壊形態を考慮した評価指標が必要だと考えられる。

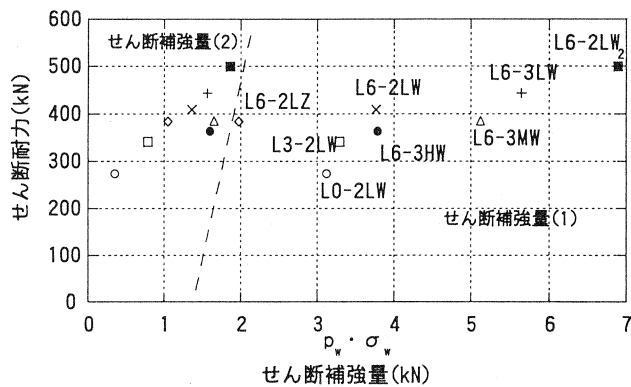


図-9 せん断補強量とせん断耐力の関係

【謝辞】

日鉄コンポジット(株)の小林朗氏には炭素繊維シートの提供など、本実験に多大な協力を頂きました。ここに記して謹んで謝意を表します。

【参考文献】

1) 土木学会：平成8年度制定コンクリート標準示方書, pp69~85, 1996
 2) 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, pp1469~1474, 1996