

(144) 炭素繊維によるPC桁のせん断補強効果に関する実験的研究

名城大学 理工学部 正会員 泉 満明  
 (株)日本ピーエス 技術管理部 正会員 濱岡 弘二  
 (株)日本ピーエス 技術管理部 ○船野 浩司  
 日鉄コンポジット(株) トウシート部 小林 朗

1. はじめに

近年、炭素繊維補強材は多くの分野で使用されている。橋梁上部工においても構造物の老朽化、設計荷重の増大による応力超過の補修・補強材として、施工性およびその性能から多くの施工実績がある。

PC橋の場合、桁および床版の曲げ補強に関しては、数多くの既往の研究成果からその補強効果について明らかにされており、設計・施工手法も確立していると思われる。しかし、せん断補強に関しては有効な工法として確立していないのが現状であり、今後の研究が期待されている。

本実験では、せん断補強材として炭素繊維格子筋CR (Carbon Fiber Grid Reinforcement) および炭素繊維シートCFS (Carbon Fiber Sheet) を使用したPC供試体によりせん断破壊実験を行い、各工法のせん断補強効果について検討を行ったものであり、炭素繊維補強材による有効なせん断補強工法を確立するための基礎的実験である。

2. 実験概要

2-1 実験目的

①補強PC供試体耐力の検証

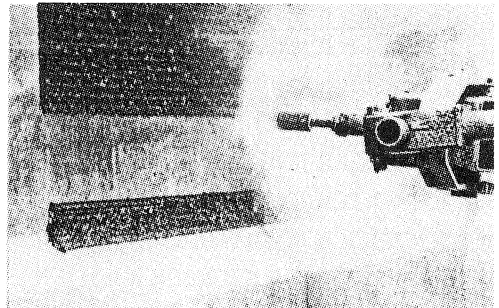
載荷実験により耐荷力を検証し、補強効果を比較する。

②附着性能の確認

コンクリートとの着着力を向上させる一案として、ウォータージェットによる下地処理を採用し、効果を確認する。

③破壊、変形性能の確認

破壊性状、変形性能など終局時までの挙動を確認する。



ウォータージェットによる下地処理

2-2 供試体計画

供試体は、表-1に示すものとし、3体のPCけたを使用した。載荷はけた1体につき各端部A、Bで2回実施するため、1体は両端部無補強とし、2体はA、B端部で異なる4種類のせん断補強を炭素繊維格子筋または炭素繊維シートにより行った。

供試体はプレテンションTけたを使用し、図-1に断面図を示す。供試体高1m、供試

体長12m、ウェブ厚15cmおよびせん断補強鉄筋の間隔はD10 (SD295) 350mmとし、全供試体同一とした。

各供試体の補強を図-2に示し、支点より3.15mの範囲でせん断補強を行った。

表-1 供試体種類

供試体名	補強材種別	アンカー種類	けたNo	載荷位置
N1	無補強		1	A端
N2	無補強		1	B端
CR4・M8	炭素繊維格子筋	M8 拡張アンカー	2	A端
CR6・M8	炭素繊維格子筋	M8 拡張アンカー	2	B端
CR6・R	炭素繊維格子筋	リベットアンカー	3	B端
CFS	炭素繊維シート		3	A端

炭素繊維格子筋補強は、コンクリート表面をウォータージェット（圧力 200 N/mm<sup>2</sup>）により下地処理した後、炭素繊維格子筋をウェブの両面に M8 拡張アンカーまたはリベットアンカーで固定し、ポリマーセメントモルタルを吹き付けて増厚し、コテ仕上げを行った。炭素繊維格子筋は CR 4（公称断面積 6.6 mm<sup>2</sup>）と CR 6（公称断面積 17.5 mm<sup>2</sup>）の 2 種類を使用し、格子間隔は縦・横とも 50mm とした。M8 拡張アンカーは格子の上下端部に 250 mm 間隔で設置し、リベットアンカーは格子の上下端部および中間部に 250 mm 間隔で打設した。

炭素繊維シート補強は炭素繊維格子筋補強と同様にウォータージェットにより下地処理した後、プライマー塗布、エポキシパテ不陸修正、シート貼付けの順で補強を行った。シートは、ウェブ側面と底面に繊維方向を軸直角方向として 1 層接着した後、ウェブ面には軸方向に 1 層接着した。

供試体に使用した材料物性を表-2 に示す。

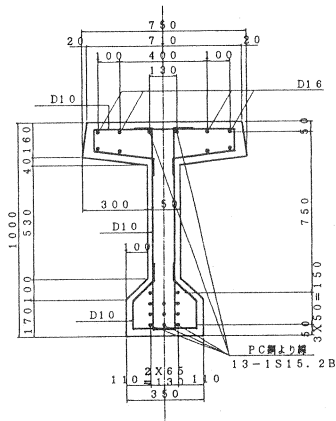
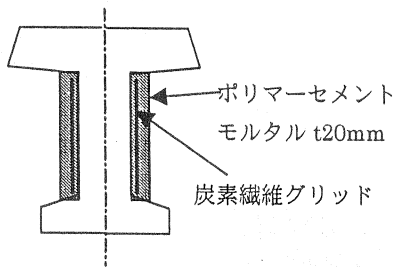
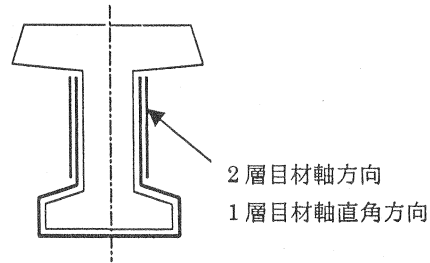


図-1 供試体断面図



炭素繊維格子筋補強断面



炭素繊維シート補強断面

図-2 供試体補強断面図

表-2 使用材料物性

コンクリート (N/mm<sup>2</sup>)

圧縮強度	引張強度	曲げ強度	弾性係数
81.4	5.05	9.65	42,400

ポリマーセメントモルタル (N/mm<sup>2</sup>)

圧縮強さ	曲げ強さ	付着強さ
32.4	6.8	2.6

炭素繊維格子筋

	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )
CR 4	6.6	1,644	111,300
CR 6	17.5	1,651	110,800

炭素繊維シート

目付量 (g/m <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )
205	4,520	234,000

P C 鋼材 (1S15.2B)

断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
139	1,971	1,813	195,000

せん断補強鉄筋 D10 (SD295A)

引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
522	388

2-3 実験方法

荷重方法は図-3に示すように1供試体につきA端部荷重、B端部荷重の2回、供試体両端部において単調増加荷重方式によりせん断破壊まで行った。計測はひびわれ発生および破壊荷重、供試体変位、コンクリート・鉄筋・補強材のひずみとし、荷重増加毎に計測を行った。また、目視によりひびわれの進行状況を追跡した。

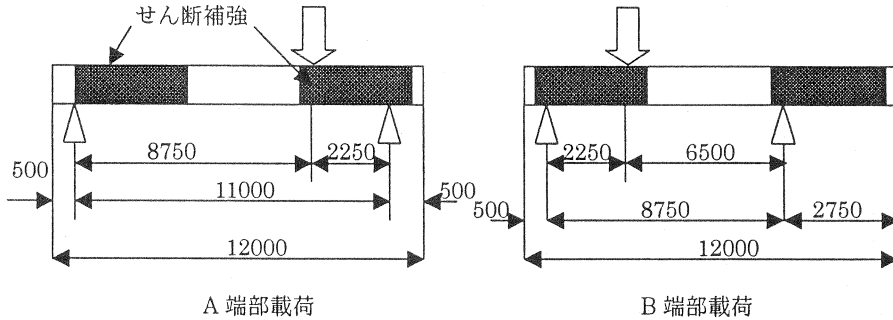


図-3 荷重方法

3. 実験結果および考察

表-3に各供試体の曲げひびわれ発生、せん断ひびわれ発生せん断力および最大耐力を示す。

各耐力は、荷重点荷重の計測値からせん断スパンを考慮して算出し、補強区間のせん断力で示す。また、最大耐力はトラス理論が成り立つものとし、補強材の破断まで補強材とコンクリートの剥離が生じないものとして補強材の負担するせん断力を累加して算定したものである。

表-3 荷重実験結果一覧 (KN)

供試体名	荷重位置	曲げひびわれ荷重	せん断ひびわれ荷重	最大耐力	
		せん断力	せん断力	実験値	計算値
N1	A端	612	628	—	287
N2	B端	609	698	910	287
CR4-M8	A端	620	732	954	620
CR6-M8	B端	609	773	1070	1293
CR6-R	B端	609	802	1084	1293
CFS	A端	652	779	994	1057

供試体N1は最大耐力（せん断破壊）前で除荷

3-1 せん断力と変位の関係

図-4にせん断力と荷重点下での変位の関係を示す。A・B端部荷重いずれの場合でも炭素繊維格子筋または炭素繊維シートで補強した供試体の曲げ剛性は曲げひびわれ発生前までは、無補強供試体とほぼ同一であった。曲げひびわれ発生後、せん断ひびわれ発生前までは補強供試体の方が若干高い曲げ剛性を示している。

A端部荷重では、CR4-M8とCFSはほぼ同じせん断力と変位関係を示したがCFSの方が最大耐力、最大力時の変位ともに大きかった。

B端部荷重では、N2に比べCR6-M8とCR6-Rはせん断ひびわれ発生後も高い耐荷力を示し、また最大耐

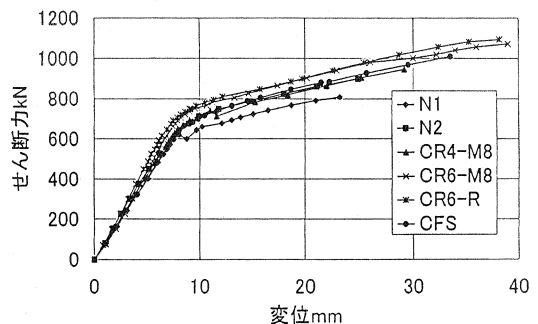


図-4 せん断力と変位の関係

力時の変位も大きくなっている。CR6-M8とCR6-R はほぼ同じせん断力と変位関係を示し、固定アンカーの違いによる大きな影響は認められない。せん断力が1000 KNを越えた後は、リベットアンカーで固定したCR6-Rの方がM8拡張アンカーで固定したCR6-M8より同じ変位では若干高いせん断力を示している。CR6-Rではウェブの中間にもアンカー打設しており、アンカーの本数の違いが影響していると考えられる。

いずれの補強でも、無補強供試体に比べ最大耐力および変形性能が向上しており、炭素繊維格子筋および炭素繊維シート補強はともにせん断補強に有効であると考えられる。

### 3-2 補強材のひずみ

図-5に炭素繊維格子筋(CR4)および炭素繊維シート(CFS)のせん断力とひずみの関係を示す。

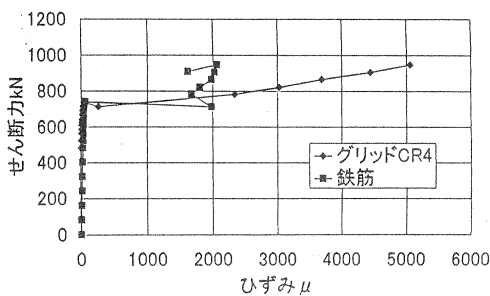
炭素繊維格子筋および炭素繊維シートのひずみは、載荷点から1125mm支点側のウェブ中央における材軸直角方向のひずみゲージにより計測したものである。

CR4では、斜めひびわれ発生直後にせん断補強鉄筋は急速に降伏ひずみに達し、その後荷重の増加とともに炭素繊維格子筋ひずみが増加している。

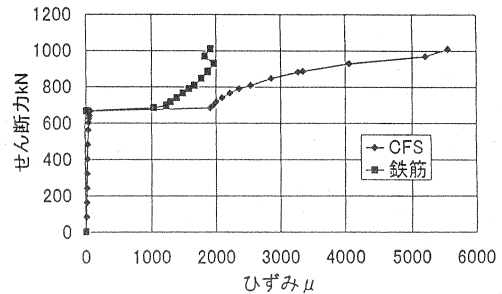
CFSでは、斜めひびわれ発生直後にせん断補強鉄筋に、約1000 $\mu$ のひずみが生じ、荷重の増加とともに鉄筋と炭素繊維シートのひずみが増加し、鉄筋の降伏後、炭素繊維シートのひずみが急増している。

これら各補強材によるひずみ発生状況の違いは附着性能の違いから生じたものと考えられる。

各補強材ひずみの最大値は、CR4で破断ひずみの1/3程度、CFSで破断ひずみの40%以上のひずみが計測されている。



CR4

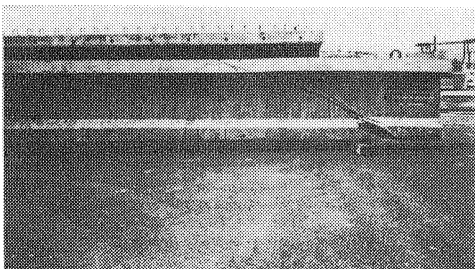


CFS

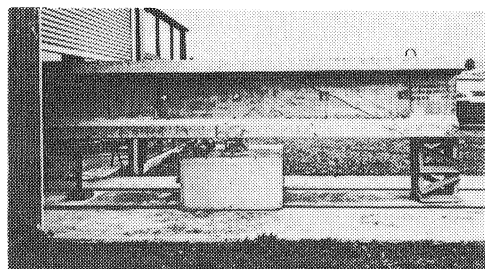
図-5 せん断力とせん断補強鉄筋および補強材ひずみの関係

### 3-3 破壊状況

図-6(1)、(2)に破壊状況を示す。

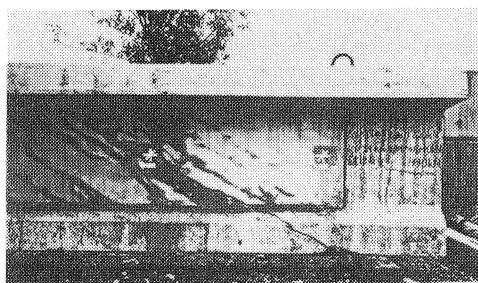


無補強 (N2)

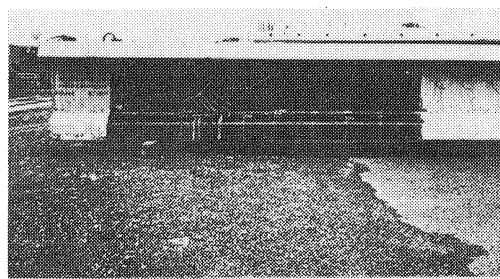


炭素繊維格子筋補強 (CR4-M8)

図-6(1) 破壊状況



炭素繊維格子筋補強 (CR6-M8)



炭素繊維シート補強 (CFS)

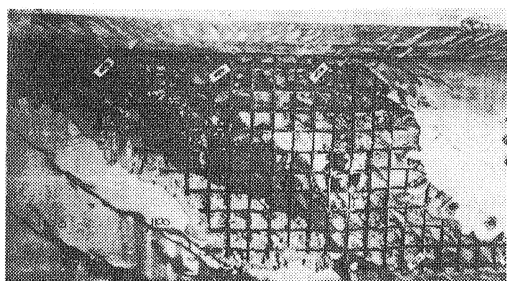
図-6(2) 破壊状況

全ての供試体が曲げひびわれ発生後、せん断ひびわれが発生したのちせん断破壊した。無補強供試体では載荷点から支点方向に2本の大きな斜めひびわれが発生した。

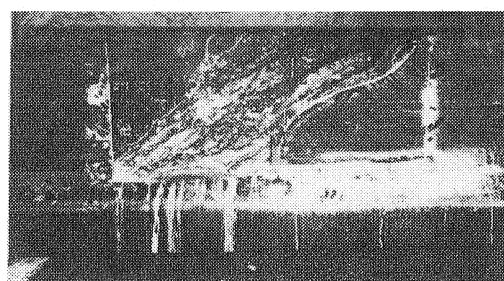
炭素繊維格子筋で補強した供試体では増厚部のモルタルに斜めひびわれが発生したが、載荷が進むにつれて、無補強供試体に比べて多数の斜めひびわれが分散して発生した。ひびわれ分散は、補強筋が太いCR6の方がCR4に比べ顕著で、リベットアンカーで固定したCR6-Rで特に顕著であった。破壊直前に、斜めひびわれ部で増厚モルタルの剥落が見られたが、躯体コンクリートと増厚モルタルの全面的な剥離は生じなかった。

炭素繊維シートで補強した供試体は、コンクリートに斜めひびわれ発生後、斜めひびわれに沿って炭素繊維シートとコンクリートの付着破壊が進行し、下フランジとウェブの境界付近から炭素繊維シートが大きく剥離し破壊した。炭素繊維シートの破断は生じなかった。

実験終了後、吹き付けモルタルおよび炭素繊維シートをはつて破壊状況を観察した。図-7に示す。



炭素繊維格子筋補強 (CR6-M8)



炭素繊維シート補強 (CFS)

図-7 破壊状況(はつり後)

CR4-M8では、材軸直角方向の炭素繊維格子筋が一部破断していた。炭素繊維格子筋のかぶりモルタルの剥離は少なく、損傷は斜めひびわれ周辺に限定されていた。

CR6-M8では、炭素繊維格子筋の破断やアンカーの脱落は生じなかった。モルタルは斜めにブロック化して一部浮きや剥離が生じていた。上フランジ下端部とウェブの境界線に水平方向のスリップ破壊が生じていた。

CR6-Rでは、リベットアンカーの脱落や塑性(せん断)変形が認められた。また、炭素繊維格子筋上、下端部での交点のすべり破壊が生じていた。炭素繊維格子筋のかぶりモルタルの剥離も大きな範囲で生じていた。

炭素繊維シート補強供試体は、斜めひびわれ部から剥離が発生していたが剥離は、既設コンクリート内部で生じており、引き剥がした炭素繊維シートにはコンクリートが最大で厚さ50mm程度付着していた。せん断補強鉄筋が露出しているところもあり、界面剥離やコンクリート表層の剥離ではなく、ウォータージェット処理により高い付着強度が得られたものと考えられる。

### 3-4 補強効果

表-4に各供試体の増加せん断耐力を示す。増加せん断耐力の実験値は、実験における無補強供試体のせん断耐力と補強供試体のせん断耐力から算定した。なお、無補強供試体のせん断耐力実験値はA端部荷重のN1供試体とB端部荷重のN2供試体でせん断ひびわれ荷重や荷重と変位関係に違いが認められたが、N1供試体が破壊まで

至っていないためN2供試体の結果を基本とした。

表-4 増加せん断耐力 (KN)

供試体名	せん断ひびわれ		せん断耐力		増加耐力			有効率 実験/計算
	実験値	補強効果	実験値	計算値	実験値	補強効果	計算値	
N2	698	—	910	287	—	—	—	—
CR4-M8	732	4.9 %	954	620	44	4.8 %	333	13.2 %
CR6-M8	773	10.7 %	1070	1293	160	17.6 %	1006	15.9 %
CR6-R	802	14.9 %	1084	1293	174	19.1 %	1006	17.3 %
CFS	779	11.6 %	994	1057	84	9.2 %	770	10.9 %

せん断ひびわれに対する補強効果は5~15%程度、せん断耐力に対しては4~20%程度見られた。また、有効率では10~18%程度であり低い値となった。計算値は、コンクリートが健全であり、破壊が炭素繊維格子筋または炭素繊維シートの破断によって生ずるとの仮定の上でトラス理論より算定したものであり、補強材とコンクリートの表面剥離、コンクリートのせん断耐力の低下、格子筋定着部の破壊、ウェブと上フランジ部のスリップ破壊が原因であると考えられる。

CR6 供試体の耐力増加が最も大きく、アンカーの違いによるせん断耐力、有効率の差異はほとんど見られなかった。また、炭素繊維シート補強ではシート端部を機械式定着しない場合、せん断耐力の増加はほとんど見られなかったという既往の結果に比べ、今回の実験では10%程度の効果が見られ、ウォータージェットによる下地処理は炭素繊維シートとコンクリートとの付着強度の向上に効果があることが認められた。

### 4. まとめ

本実験により次に示す結論が得られた。

- (1) 炭素繊維格子筋および炭素繊維シートによるせん断補強はせん断ひびわれに対し5~15%、せん断耐力に対し4~20%の補強効果があった。
- (2) ウォータージェットによる下地処理によりコンクリートとの付着強度の向上効果が確認された。
- (3) 炭素繊維格子筋、炭素繊維シート補強ともにトラス理論から算定されるせん断耐力より、実験による耐力は低い値となった。
- (4) 炭素繊維格子筋の断面積を大きくすることでより大きなせん断耐力が得られた。
- (5) 炭素繊維格子筋の固定アンカーの違いにより破壊耐力および荷重と変位関係に大きな差は認められなかったが破壊状況に違いが見られた。
- (6) 炭素繊維格子筋および増厚モルタルの全面的な剥離は、終局まで生じなかった。

最後に、本実験を実施するにあたり御協力いただいた、(株)ケミカル工事の皆様および名城大学卒研生の平野、栗原両君に感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) 木曾、緒方、安藤、新藤：車両の大型化に対するコンクリート橋の補強に関する実験的研究，第49回土木学会年次学術講演会，pp.658~659，1994.9.