論文 継手部を有する格子状 CFRP を用いた RC はりの下面増厚補強効果

山中 辰則^{*1}· 辻 幸和^{*2}· 栗原 貢介^{*3}

要旨:性能が低下した RC 床版の補強工法として, 吹付け下面増厚補強工法がある。本研究では, 実施工で は不可欠な継手部を有する炭素繊維の格子状連続繊維補強材(以下, CFRP と略称する。)を使用した場合の下 面増厚補強効果を検討するために, CFRP の補強長さ, 下面増厚に用いるポリマーセメントモルタル(以下, PCM と略称する。)の力学的特性を変化させた実験結果を報告する。CFRP の補強長さが長いものでは, 補強 材を有効に使用することができ, 補強効果が十分に発揮された。また, 高強度・高弾性の PCM は低弾性の PCM に比べ, コンクリート躯体との付着が良好であり, 平均ひび割れ幅の値も小さくなることが示された。 キーワード: 格子状 CFRP, CFRP の継手, ポリマーセメントモルタル, 補強長さ, ひび割れ幅

1. はじめに

我が国の RC 構造物には、高度経済成長期に建設され たものが多く、耐久性能が低下している構造物が見られ る。特に、大型車交通量の増加、平成5年11月の車両制 限令による車両総重量の規制緩和および道路構造令に よる設計荷重の増加に伴い、橋梁上部工の RC 部材の劣 化が進行している。そのため, RC 構造物の耐荷性能の 向上には、これまで様々な工法が提案されている。その 中で、軽量で耐腐食性に優れ、引張強度が大きい連続繊 維補強材を用いた補強工法に関する研究開発が多く実 施されている。既往の研究 1)~3)においても、道路橋床版 の補強を目的として, RC はりを用いた炭素繊維の格子 状連続繊維補強材(以下, CFRPと略称する。)による下面 増厚補強実験を実施してきた。実施工においては、CFRP が一体で用いられることは少なく、複数の CFRP を既設 RC 床版に設置し、継目部をもう一枚の継手用 CFRP で 補った重ね継手による補強がなされることが多い。そう した重ね継手による補強が下面増厚補強効果に及ぼす 影響については、これまでほとんど報告されておらず未 解明な部分が多い。

本研究では、 CFRP の継手の有無、下面増厚に用いる

吹付けポリマーセメントモルタル(以下, PCMと略称する。)の力学的特性および CFRP の補強区間の長さの違いが,下面増厚補強に及ぼす影響を主として検討をする。

2.実験概要

2.1 供試体の概要

RC はり供試体の一覧を表-1に、形状寸法を図-1に それぞれ示す。補修・補強が必要な道路橋床版を主な対 象とし、その一部を切り出したはりを模擬している。高 さを 220mm,幅を 500mmとし、補強長さの違いにより S(1,600mm), M(2,200mm), L(2,800mm)の3シリーズとし、 継手の有無, PCMの種類を変化させた合計9体のはり供 試体を作製した。供試体名の第1項は、供試体の補強長 さにより「S」、「M」、「L」シリーズとし、第2項では継 手を有する供試体を「J」、継手がない一体型の CFRP で 補強した供試体を「N」、CFRP による補強のない供試体 を「O」とする。また、高強度・高弾性 PCM で吹き付け た供試体には、第3項で「H」を付記した。

コンクリートの目標圧縮強度を 20N/mm²とし, コンク リートの材齢が 28 日に達した後,これまでの供用で過 大な損傷生じたことを模擬して,引張鉄筋の応力度が

シリーズ名	供試体名	支点間隔 (mm)	補強の 有無	継手の 有無	補強長さ (mm)	補強材CFRPグリッド	吹付け材
Sシリーズ	S-J S-N	2,000	あり	あり なし	1,600	CMR10-100p	低弾性
	S-0		なし	—	_		
Mシリーズ	M-J	2,600	あり	あり	2,200	CMR10-100p	低弾性
	M-J-H						高強度・高弾性
	M-O		なし	—	_		
Lシリーズ	L-J		± 11	あり	2 000	CMP10 100p	在遗产
	L-N 3,200	のりな	なし	, 2,000	Civil T0-100p	1437부1エ	
	L-0		なし	—	_		

表-1 RC はり供試体一覧

*1 群馬大学大学院 工学研究科博士前期課程社会環境デザイン工学専攻 (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 教授 工学博士 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道 (株) 高崎土木技術センター (正会員)



図-1 供試体の形状寸法および計測位置

300N/mm²となるまで1次載荷した。1次載荷によりひび 割れを発生させた RC はりには、PCM との付着が良好と なるように、供試体底面にサンドブラストを用い粗骨材 が見えるまで削り、凹凸を設けた状態にした。RC はり の底面に噴霧器で水を散布することで湿潤状態にした 後, CFRP をアンカーで固定し, PCM を吹き付けた。ア ンカーは, 直径が 4.8mm, 全長が 35mm, 埋込み長が 25mm のリベットを用い、補強長さ 1m(幅は 50cm で一定)あた り 10 本設置した。継手用 CFRP は 2 枚の主 CFRP とそれ ぞれ4節ずつ重なるように800mmの範囲に配置した。

吹付け終了後,28日間の湿布養生を行い,その後,終 局時まで2次載荷試験を行った。載荷試験方法は,等曲 げモーメント区間を500mmとする2点集中載荷とした。 2.2 使用材料

表-2 に PCM の, 表-3 に鉄筋および CFRP の力学的 特性をそれぞれ示す。表-2の付着強度は、母材と補修 材との付着面の強さであり, 建研式接着力試験方法で求 めたものである。PCM は高機能性特殊粉末樹脂および特 殊短繊維をプレッミクスした特殊無機系パウダーで構 成されており,高いひび割れ抵抗性,優れた施工性,耐 久性、付着性能を有している。高強度・高弾性 PCM の 圧縮強度は 66.3N/mm², 弾性係数は 2.51×10⁴N/mm² であ り,低弾性 PCM の圧縮強度は 38.2N/mm²,弾性係数は 1.45×10⁴N/mm²であった。

引張鉄筋に D13, 圧縮鉄筋に D10 をそれぞれ 5 本ずつ

表-2 ポリマーセメントモルタルの力学的特性

РСМ	圧縮強度 N/mm ²	曲げ強さ N/mm ²	静弾性係数 N/mm ²	付着強度 N/mm ²
高強度·高弾性	66.3	11.5	2.51×10^{4}	5.3
低弾性	38.2	7.9	1.45×10^{4}	3.7

-3 鉄筋および CFRP の力学的特性

~ ~	2010010010	0111	
鉄筋	降伏応力度	引張強度	静弾性係数
CFRP	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
D13	366	525	19.0 × 104
D10	377	517	18.7 × 104
D6	375	528	18.9 × 104
CFRP	—	1794	18.1 × 104

主CFRP貼付用ワイヤストレインゲ-

継手用CFRP貼付用ワイヤストレインゲ -ジ СL 100@6=600 500 継手を有する供試体 (a) CT 100@6=600 500 (b) 一体型供試体

図-2 CFRP のひずみ計測位置

シリーズ名	供試体名	補強長さ	吹付け材	ひび割れ発生荷重	最大荷重	最大曲げモーメント	破壊形式	
		(mm)		(kN)	(kN)	(kN•m)		
Sシリーズ	S-J	1 600	低弾性	8.9	187.5	70.3	ピーリング破壊	
	S-N	1,000		10.7	237.1	88.9	せん断破壊	
	S-0	—	—	4.8	135.6	50.9	曲げ破壊	
Mシリーズ	M-J	2,200	2,200	低弾性	9.6	136.7	71.8	ピーリング破壊
	M-J-H			高強度·高弾性	9.3	158.5	83.2	ピーリング破壊
	M-O	—	—	5.5	93.8	49.2	曲げ破壊	
Lシリーズ	L-J	2 800	2 800	300 低硝性	7.6	123.5	83.4	ピーリング破壊
	L-N	2,000	14.7半1工	9.0	135.3	91.3	CFRP破断	
	L-0	—	_	3.8	70.6	47.7	曲げ破壊	

表-4 各種荷重・最大曲げモーメントおよび破壊形式

使用し, せん断補強鉄筋には D6 を用いた。せん断補強 鉄筋は, せん断スパンでは 75mm 間隔, 等曲げモーメン ト区間では 100mm 間隔で配置した。曲げ引張破壊耐力 を約 1.5 倍に増加させることを目標に, CFRP は格子間隔 が 100mm×100mm, 筋1本当たりの公称断面積が 39.2mm² のものを用いた。

2.3 測定項目

CFRP のひずみの測定には、図-2に示すようにワイ ヤストレインゲージを貼付して計測を行った。継手を有 する供試体の主 CFRP ではスパン中央からの距離が ±100mm, ±200mm, ±300mm, ±600mm の位置に、継手 用 CFRP ではスパン中央からの距離が 0mm, ±100mm, ±200mm, ±300mm の位置に貼付した。一体型の供試体で は、0mm, ±200mm, ±600mm の位置に貼付した。CFRP のひずみは、各位置に貼付した3つのワイヤストレイン ゲージの平均値とした。

鉄筋のひずみ測定は、引張鉄筋のスパン中央部にのみ ワイヤストレインゲージを貼付して、引張鉄筋のみ測定 を行った。ひび割れ幅の測定には、供試体側面の引張鉄 筋位置に貼付した測定長が 100mm の π 型変位計を用い て測定を行った。変位の測定には変位計を用い、支点位 置の片面とスパン中央の両面に配置して測定を行った。

3.最大曲げモーメントおよび破壊形式

表-4 に各種荷重・最大曲げモーメントおよび破壊形 式を,図-3 に支点間隔と最大曲げモーメントの関係を それぞれ示す。CFRP で補強した供試体は継手の有無に かかわらず,CFRP 無補強の供試体に比べ,最大曲げモ ーメントが増加し,CFRP による補強効果が確認できた。

継手がない一体型 CFRP 供試体 S-N, L-N では,補強 長さの違いによる最大曲げモーメントの差は小さく,補 強長さによる影響は小さいことが確認された。継手を有 する供試体では,補強長さが長い供試体 L-J は供試体 S-J, M-J に比べ,最大曲げモーメントが 20%程度増加してい る。これは,補強区間の長さが長くなったことにより, 主 CFRP から継手用 CFRP への引張応力度の伝達がスム ーズになされたことによると考えられる。





また, Mシリーズの供試体において, いずれもピーリ ング破壊をしたが, 高弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J-Hは,低弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-Jに比べ, 最大荷重が 15%程度増加した。

図-4 に各供試体の終局時におけるひび割れ状況を示 す。CFRP により補強した供試体に発生した曲げひび割 れは,その間隔が均等であり,CFRP の格子交差部の位 置に発生した。また,ひび割れ本数も多く,ひび割れの 分散性が良好であることが認められる。

継手を有する供試体 S-J, M-J, M-J-H, L-J の場合では, まず曲げひび割れが発生した後,ひび割れは進展してい き,斜めひび割れが発生した。斜めひび割れの発生後は, 載荷点に向かって伸びていくがせん断破壊をする前に 増厚部の剥離が起こり破壊した。これは,載荷点側に発 生した曲げひび割れと斜めひび割れが介在してブロッ ク化したコンクリート片によって増厚部が下方に押し 下げられるピーリング作用によるものである。(写真-1)

CFRP 無補強の供試体は曲げひび割れが発生した後, 圧縮側にひび割れが進展し,曲げ引張破壊をした。また, CFRP が一体型の供試体では,供試体 S-N がせん断圧縮 破壊,供試体 L-N が CFRP の破断といった脆性的な破壊 をしている。

高強度・高弾性 PCM で吹き付けた供試体 M-J-H では, 写真-1 に示したように,ピーリング破壊時にコンクリ ート躯体を一緒に剥がしていることから,界面の付着が 良好であると考えられる。

4.変位と曲げモーメントの関係

変位と曲げモーメントの関係を図-5に示す。補強長 さの短いSシリーズでは、継手の有無による差はほとん ど生じていない。しかし、補強長さの長いLシリーズで は、一体型 CFRP 供試体は継手を有する供試体に比べ、 剛性が小さく、変位が少し増加する傾向が認められる。

高強度・高弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J-H と低 弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J では, PCM の力学的 特性による影響は小さいことが確認できた。

5.補強材のひずみ

図-6 に引張鉄筋および CFRP のひずみと曲げモーメントの関係を示す。CFRP のひずみは、引張鉄筋と同位置のスパン中央の値とした。

L シリーズでは、引張鉄筋の降伏まで、継手の有無に かかわらず、引張鉄筋が CFRP より少し小さいひずみ値 かほぼ同じ値を示しており、はり高さ方向のひずみの大 小関係がほぼ保持されている。しかしながら、引張鉄筋 の降伏後は、CFRP が引張鉄筋に作用する応力を主体的 に負担してひずみの増加が大きくなっているものの、引 張鉄筋の引張ひずみの急増が生じていない。この現象は、 継手の有無にかかわらず認められる。引張鉄筋が降伏す る際に、コンクリート躯体と PCM 吹付け材の界面の付 着が弱まり、CFRP がタイとなり、コンクリート躯体が アーチのリブとして機能する、いわゆるタイドアーチに 耐荷モデルが移行されたと考えられる。そして、継手の



無いはりではタイの CFRP が破断し,継手を有するはり では、破断する前の荷重により継手部がピーリング破壊 したものと推測できる。

Sシリーズでは、継手のない一体型の供試体 S-N のみ, 引張鉄筋の降伏後にタイドアーチに移行して,引張鉄筋 のひずみが増加しない荷重段階が生じ,降伏後の荷重の 増加が引張鉄筋に作用するであろう応力までを CFRP が 負担していることが認められる。しかし,継手を有する 供試体 S-J では、CFRP の方が引張鉄筋よりもひずみが大 きくならずに小さくなっている。そして,引張鉄筋の降 伏後も,引張鉄筋のひずみが急増するためか,CFRP の ひずみは小さくなっている。コンクリート躯体と PCM 吹付けとの界面の付着は小さいものの,タイドアーチへ の耐荷機構への移行が不十分なままになっており,最終 的にピーリング破壊したと考えられる。

M シリーズにおいて,高強度・高弾性 PCM では引張 鉄筋が降伏した後にひずみが大きく増加している一般 のはりの性状を示している。しかし,低弾性 PCM では, コンクリート躯体との付着力が小さいため,L シリーズ と同様な引張鉄筋の降伏後にひずみが急増しないタイ ドアーチの耐荷機構へ移行した現象が現れている。

以上のことから,一体型供試体では補強長さにかかわ らず,引張鉄筋の降伏後,引張鉄筋のひずみが増加しな いタイドアーチの耐荷機構が認められ,CFRPが引張鉄 筋の応力を負担していることが認められる。しかしなが ら,継手を有する供試体では,補強長さの違いにより引 張鉄筋の降伏後に,引張鉄筋のひずみが増加しないタイ ドアーチの耐荷機構へ移行したと考えられる現象に差 が現れている。すなわち,補強長さが長いほど CFRP の 引張応力の負担分が大きくなるという,補強長さによる 影響は大きいことが認められる。

6.CFRP のひずみ分布

曲げモーメントが 30,50,65kN・m それぞれ作用し た時における各シリーズの供試体の CFRP のひずみ分布 を,図-7 に示す。CFRP のひずみ分布は、スパン中央 からの距離とする。図には、継手を有する供試体の主 CFRP と継手用 CFRP の同位置におけるひずみの合計値 を併記した。各シリーズの継手を有する供試体において、 等曲げモーメント区間での主 CFRP のひずみは、端部の スパン中央に近づくに従って減少し、その減少分は継手 用 CFRP のひずみが増加し、スパン中央で最大に達する ことが認められる。また、主 CFRP と継手用 CFRP のひ ずみの合計した値は、継手のない CFRP のひずみの値に ほぼ一致していくことも認められる。

引張鉄筋が弾性域の曲げモーメントが 30kN・m 作用 した時では、継手部での継手用 CFRP と主 CFRP のひず みのこのような現象は補強長さが短い S シリーズ供試体



で顕著である。

引張鉄筋が降伏直前の曲げモーメントが 50kN・m 作 用した時でも,ほぼ同じ性状を示している。ただ,L シ リーズの主 CFRP のひずみが,S シリーズに比べて大き い。一方で,継手用 CFRP のひずみはその分,L シリー ズの方がSシリーズより小さくなっている。

引張鉄筋が降伏した後の曲げモーメントが 65kN・m 作用した時では,継手を有する供試体の継手用 CFRP と 主 CFRP のひずみの合計が,一体型の供試体の CFRP の ひずみに近くなり,継手用 CFRP と主 CFRP での引張応 力の分担が明瞭にされている。また,引張鉄筋はすでに 降伏しており,一体型 CFRP および継手用 CFRP の応力 負担分が急増して,ひずみが大きく増加していることが 確認できる。

これらのことより,一体型供試体では補強長さに関わ らず引張鉄筋が降伏した後,一体型 CFRP が引張応力を 負担することが認められ,はり型式の耐荷機構が別なタ イドアーチの耐荷機構に移ったことが示唆される。また, 継手を有する供試体では,補強長さが短いものでは引張 鉄筋の降伏前から,下面側に配置された CFRP の方が引 張鉄筋よりも小さなひずみを生じるが,補強長さが長く なると,引張鉄筋の降伏後は,一体型と同様な耐荷機構 に移行することが推測される。

7.平均曲げひび割れ幅

図-8 に平均ひび割れ幅と曲げモーメントの関係を示 す。高強度・高弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J-H は, 低弾性 PCM を吹き付けた供試体 M-J に比べ,平均ひび 割れ幅は抑制されることが認められる。また,継手を有 する供試体は一体型の供試体に比べ,平均ひび割れ幅は 小さい値を示している。これは,継手を有する供試体で は継手用 CFRP の長さだけ一体型 CFRP に比べ,引張縁 に近い位置に配置されているため,ひび割れ幅が小さく なったと考えられる。

8.まとめ

CFRP を下面増厚補強したはり供試体を用いて、載荷

実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 一体型 CFRP で補強した場合は、補強長さが異なって も最大曲げモーメントにはほとんど差はないが、継手 を有する CFRP で補強した場合では、補強長さの長い ものでは、最大曲げモーメントが 20%程度増加するこ とが認められた。
- 2)高強度・高弾性 PCM で吹き付けた供試体は低弾性 PCM で吹き付けた供試体に比べ,コンクリート躯体と PCM 吹付けの界面の付着性状が良好であり,荷重が 15%程 度増加した。
- 3)一体型供試体では補強長さにかかわらず引張鉄筋が降 伏した後,継手の無い CFRP が引張応力を負担してい る現象が認められ,はり型式の耐荷機構が別な機構に 移ったことが示唆される。継手を有するはり供試体で は,補強長さが長いと,引張鉄筋の降伏後は,一体型 と同様な耐荷機構に移行することが示唆されたが,補 強長さが短いはりではタイドアーチへの移行が十分 でないといった,補強長さの相違の影響が認められた。
- 4)継手を有する供試体は一体型供試体と比べ、平均ひび割 れ幅は小さな値を示す。また、高強度・高弾性 PCM を吹 き付けた供試体は低弾性 PCM を吹き付けた供試体に 比べ、平均ひび割れ幅は抑制されることが認められる。

謝辞:本研究は, FRP グリッド工法研究会との共同研究 の一環として実施したものである。供試体の作製および 載荷実験に際しては,ドーピー建設工業(株)関東工場に 多大なご協力をいただいた。付記して,厚くお礼申し上 げる。

参考文献

 小田切芳春, 辻幸和, 岡村雄樹, 小林朗:継手部を有 する連続補強材により下面増厚補強した RC はりの疲労 性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1915-1920, 2003

2) 辻幸和,小田切芳春,岡村雄樹,佐藤貢一:継手部を 有する連続繊維補強材を用いた RC はりの下面増厚補強 効果,土木学会論文集,No.788, pp.67-80,2005.5