

論文 RC はりの下面増厚補強における格子状 CFRP 継手部の力学的性状

岡村 雄樹^{*1}・山中 辰則^{*2}・辻 幸和^{*3}・佐藤 貢一^{*4}

要旨: 格子形状の連続繊維補強材の CFRP を用いた下面増厚補強工法の実施工では、継手部が不可欠であるが、継手部を設けると終局耐力が低下することが知られている。本研究では、継手部の終局耐力の向上を目的に継手部を補強した供試体の静的載荷試験より継手が無いものに比べ、継手部を有すると最大で 30%程度低下するが、補強することで終局耐力の低下を 10%程度まで低減できることを示した。そして、鋼製カップラーで拘束すること、交差点を 3 点から 4 点に増加させること、高強度・高弾性の吹付けポリマーセメントモルタルを用いることで継手部と分割部の一体性が十分に確保でき、応力の伝達が良好になることを示した。
キーワード: 格子状 CFRP, 継手, 力学的性状, 下面増厚補強

1. はじめに

近年、長期にわたる供用により道路橋床版の耐荷性能が低下しているものが多く、補修・補強が必要とされている。耐荷性能を向上させる工法は多く提案されており、その一つとして下面増厚補強工法がある。また、補強材として、軽量で耐腐食性に優れ、引張強度が大きい格子形状の炭素繊維の連続繊維補強材(以下、CFRP と略称する。)を用いた補強が、実施工で多く実施されている。

しかし、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、継手部を設けた補強がなされることが多い。著者らはこれまでに、道路橋床版および RC はりの補強を目的として CFRP に継手部を設けた下面増厚補強の実験を実施してきた¹⁻⁴⁾。その中で、継手の影響について継手のある場合には、継手部のグリッド筋が拘束されていないためずれが生じ、終局耐力は継手のない場合に比べて低下することが確認された。

本研究では、継手部の終局耐力の向上を目的に継手部を連続繊維シートや鋼製カップラーなどで拘束して補強した供試体の静的載荷試験を行い、検討した結果を報告する。また、継手部の影響による補強効果の低減を小さくすることを目的として、継手の交差点を増加させ、

また吹付けモルタルのかぶりおよび力学性状を変化させた供試体も作製し、検討した結果を報告する。

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、長さを 3000mm とし、継手部の長さや補強方法を変化させた合計 10 体、ならびに継手のないはりと下面増厚補強を行わなかったはりを作製した。継手部は一般に、主 CFRP を切断した箇所に継手用 CFRP を下面に配置したが、その長さを CFRP の横筋位置が 3 本重なる 2 升 3 交点および 4 本重なる 3 升 4 交点の 2 シリーズとした。また 1 体のみ主 CFRP を重ね継手としたはりは、その長さが 2 升 3 交点で 300mm となるように設置した。

そして 2 升 3 交点シリーズでは、継手部筋の拘束として、図-2 に示すように、炭素繊維シート、幅が 50mm で厚さが 6mm のフラットバー、端部結束バンド、および鋼製カップラーをそれぞれ用いて、拘束の程度を変化させた。

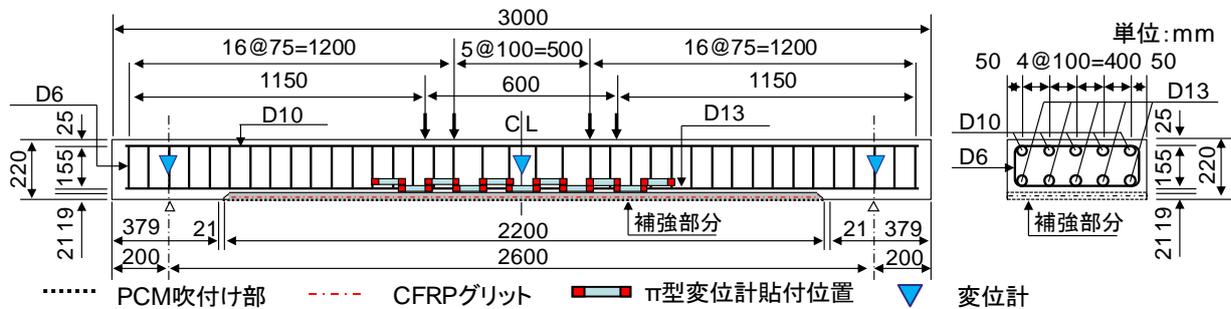


図-1 供試体の形状寸法および計測位置

*1 前橋工科大学 工学部 社会環境工学科 准教授 工学博士 (正会員)
 *2 羽島市役所 建設部 土木監理課 (正会員)
 *3 前橋工科大学 学長 工学博士 (正会員)
 *4 奈良建設(株) 本店営業部 博士 (工学) (正会員)

表-1 RC はり供試体一覧

シリーズ	供試体No.	継手の有無	継手の配置	かぶり (mm)	アンカー (本/m ²)	継手補強	備考・詳細
-	1	下面増厚補強なし					無補強
	2	無	-	10	22	-	継手なし
継手2升3交点	3	有	外添接	10	25	-	-
	4		外添接	5	25	-	限界かぶり
	5		外添接	10	22	シート施工	シートオーバーラップ
	6		外添接	10	22	長アンカー	フラットバー
	7		外添接	10	22	結束	継手部筋結束
	8		外添接	10	22	鋼製カップラー	鋼製カップラー
	9		重ね継手	10	24	結束	継手部筋結束
継手3升4交点	10	有	外添接	10	25	-	-
	11		外添接	10	22	-	-
	12		外添接	10	22	-	高強度・高弾性PCM

3 升 4 交点シリーズでは、継手部の性能向上を目的として、吹付けモルタルの力学性状の違いによる影響を検討した。すなわち、従来用いられている低弾性のポリマーセメントモルタル(以下、PCM と略称する。)ではなく、高強度・高弾性 PCM を主として用いた。

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が生じたことを模擬して、引張鉄筋の応力度が 300N/mm² となるまで 1 次载荷した。1 次载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 次载荷試験を行った。载荷試験方法はスパンを 2600mm の一定とし、等曲げモーメント区間を供試体 No.1~10 では 600mm とする、供試体 No.11, 12 では継手用 CFRP の端部がせん断スパンになるように 500mm とするそれぞれ 2 点集中载荷とし、载荷試験を行った。

2.2CFRP の配置位置、拘束方法および使用材料

交点数が 3, 4 となるように、継手用 CFRP と主 CFRP のそれぞれの横筋位置が重なるように配置した。そして、CFRP の配置位置および拘束方法を図-2 に示したように、炭素繊維シートでは継手部を覆うようにシートをオーバーラップし、長さ 150mm のフラットバー、結束バンドおよび鋼製カップラーでは継手用 CFRP と主 CFRP を拘束した。

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

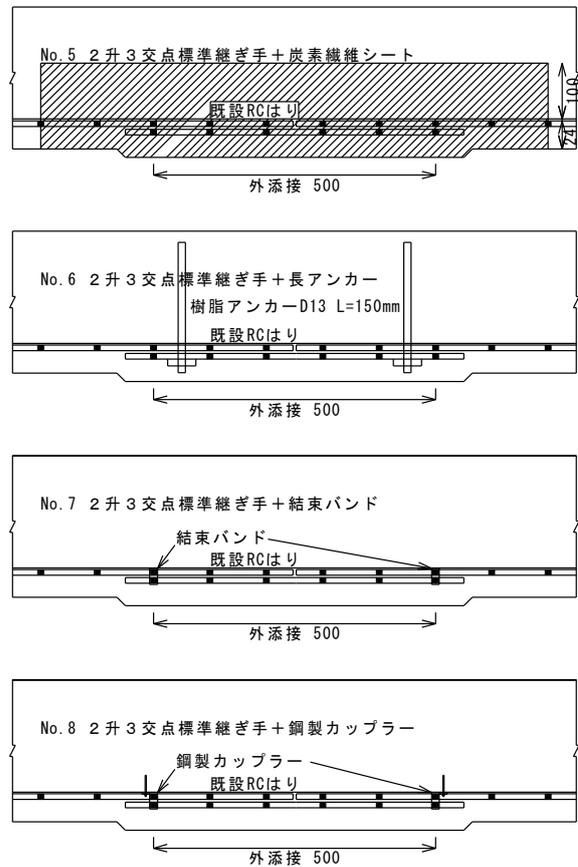


図-2 CFRP の配置位置および拘束方法

表-2 ポリマーセメントモルタルの力学的特性

PCM	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)
低弾性	38.2	7.9	1.45 × 10 ⁴	3.7
高強度・高弾性	66.3	11.5	2.51 × 10 ⁴	5.3

表-3 鉄筋および CFRP の力学的特性

鉄筋	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
D13	366	525	19.0 × 10 ⁴
D10	377	517	18.7 × 10 ⁴
D6	375	528	18.9 × 10 ⁴
CFRP	-	1794	18.1 × 10 ⁴

表-4 各種曲げモーメントおよび破壊形式

シリーズ	供試体 No.	最大荷重 (kN)	曲げモーメント				破壊形式
			鉄筋降伏モーメント (kN・m)	継手なし比	最大曲げモーメント (kN・m)	継手なし比	
-	1	96.1	38.6	—	48.1	—	曲げ破壊
	2	180.2	52.4	—	90.1	—	せん断破壊
継手2升3交点	3	124	53.8	1.03	62.0	0.69	曲げ破壊
	4	132.5	53.8	1.03	66.3	0.74	曲げ破壊
	5	135.2	50.6	0.96	67.6	0.75	曲げ破壊
	6	128.5	52.9	1.01	64.3	0.71	曲げ破壊
	7	134.4	54.3	1.04	67.2	0.75	曲げ破壊
	8	146.8	58.5	1.12	73.4	0.81	曲げ破壊
	9	138.6	54.2	1.03	69.3	0.77	曲げ破壊
継手3升4交点	10	145.3	54.3	1.04	72.7	0.81	曲げ破壊
	11	136.7	54.0	1.03	71.8	0.80	ピーリング破壊
	12	158.5	58.3	1.11	83.2	0.92	ピーリング破壊

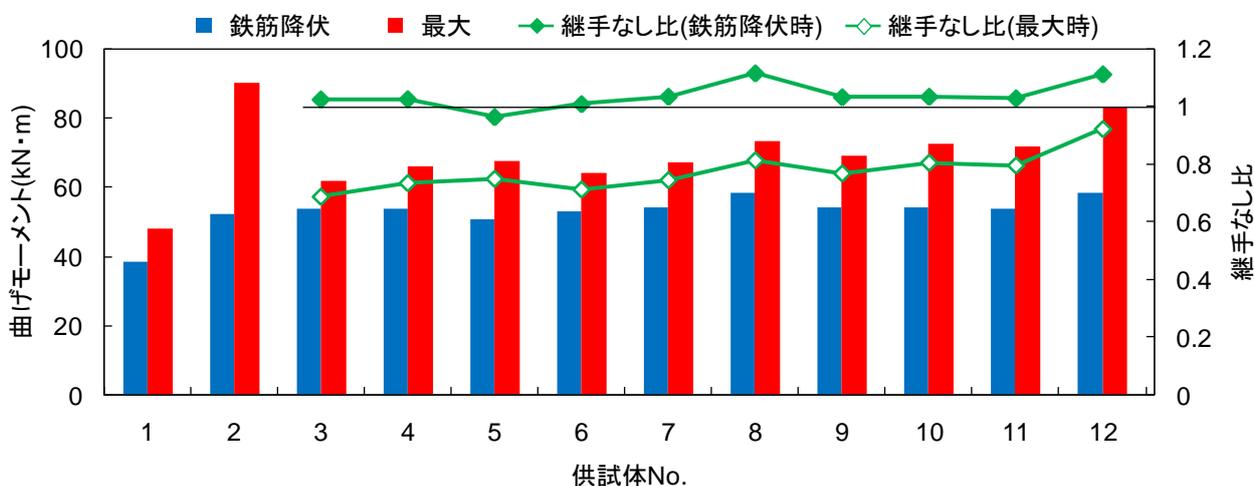


図-3 鉄筋降伏モーメントおよび最大曲げモーメント

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。

引張鉄筋に D13、圧縮鉄筋に D10 をそれぞれ 5 本ずつ使用し、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、ゲージ長が 6mm のワイヤストレーンゲージを貼付して計測を行った。CFRP のひずみは、各位置に貼付した 2~3 枚のワイヤストレー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

ワイヤストレーンゲージを貼付して、引張鉄筋のみの測定を行った。ひび割れ幅の測定には、載荷試験以前に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. 各種モーメントおよび破壊形式

鉄筋降伏モーメントと最大曲げモーメントおよび破壊形式の関係を表-4 に、各供試体の鉄筋降伏モーメントおよび最大曲げモーメントと継手なし比の関係を図-3 に示す。2 升 3 交点シリーズにおいて、リベットアンカーで固定する以外の補強を継手部に施していない供試体 No.3 を基準にして、継手部を補強した No.5~No.8 の各供試体を比較してみる。まず鉄筋が降伏した曲げモーメントについては、継手部を補強すると鉄筋降伏モーメントは僅かに向上はしたものの、拘束が一番強いと考えられる鋼製カップラーで継手部を補強した No.8 のは

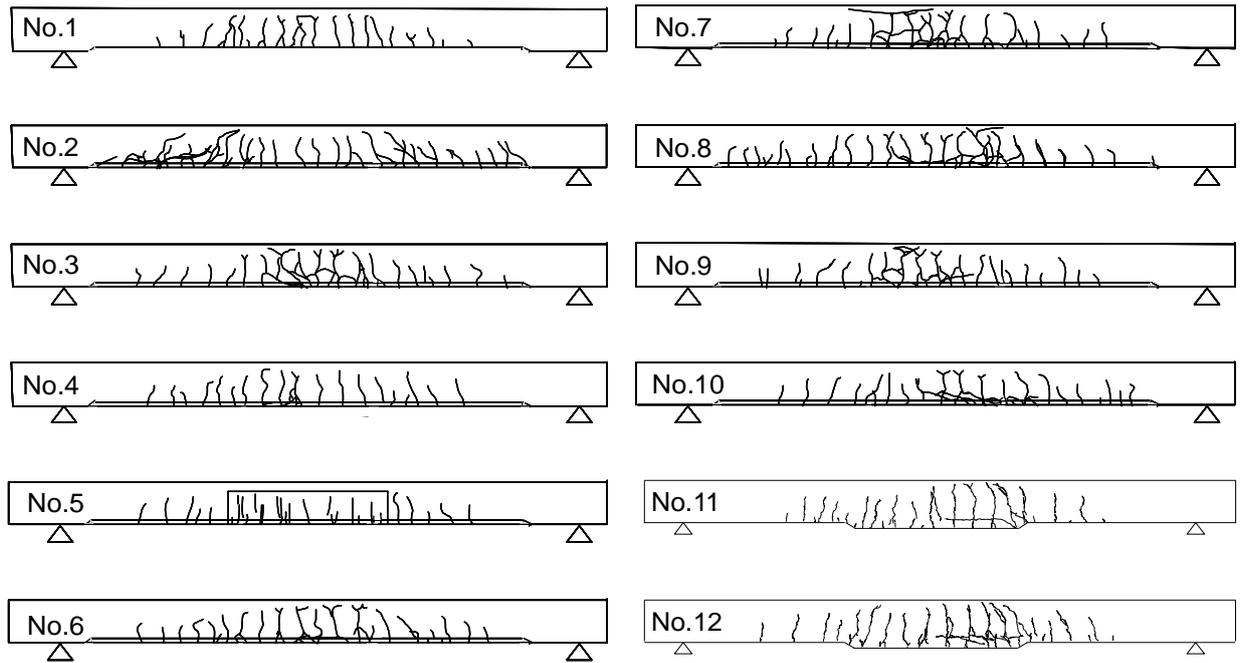


図-4 終局時のひび割れ状況

りでも、10%程度の増加であった。また、継手無しに比べて、継手を有することによる鉄筋降伏モーメントの低下は見られなかった。これは、引張鉄筋が降伏するまでは継手部の CFRP が十分に拘束されているために大きな低下が見られなかったと考えられる。

一方、最大曲げモーメントについては、継手が無い供試体 No.2 と比べると、継手部をリベットで固定する以外の補強を施していない供試体 No.3 と比べて最大の 30% 程度低下した。そして、拘束の程度が最も高い供試体 No.8 の鋼製カップラーを用いて結束を行ったものでは、No.3 に比べて約 15% 増加した。それに対して、フラットバーを用いて結束を行った供試体 No.6 では、4% 程度しか増加しなかった。これは施工の際、フラットバーによる PCM および継手部筋の結束が弱く、十分な補強効果が得られなかったために、載荷時に継手部と分割部のグリットとがずれてしまい、ひび割れの増大の原因となってしまったことによると考えられる。

それに対して、鋼製カップラーを用いて結束を行った供試体 No.8 は、カップラーと供試体の付着が良好であり、継手部の結束も良かったために、終局耐力が向上したと考えられる。

3 升 4 交点シリーズでは、吹付け PCM の力学的な増加により鉄筋降伏モーメントでは 10% 程度増加した。これは高弾性の PCM を用いることで、従来用いられている低弾性 PCM と比較して継手性能の向上および継手部の全体の剛性の増加によるものと考えられる。また、最大曲げモーメントについても 10% 程度の増加が認められた。これは、後述するように継手部を有する供試体では、継

手部の剥離に起因する破壊を生じる。そのため、本研究で用いた高強度・高弾性 PCM は低弾性 PCM に比べ、付着強度が大きく、コンクリート躯体と増厚部の付着が良好であるため、継手部の剥離耐力が増加したと考えられる。

以上のことから、継手を有する供試体では継手が無い供試体に比べ、最大で 30% 程度終局耐力が低下するが、継手部筋を拘束することで終局耐力の低下を 1 割程度まで低減できることが認められた。

終局時のひび割れ状況を図-4 に示す。破壊形式は継手の無い No.2 のみせん断破壊を示し、No.11 および No.12 ではピーリング作用による破壊、その他の供試体はすべて曲げ破壊であり、多くは継手部の CFRP の剥離を伴った破壊をした。これは、継手の無い供試体では引張強度の高い CFRP を用いることで曲げ耐力を著しく向上させることができるが、せん断力に対してはあまり向上しなかったため、せん断破壊をしたと考えられる。また、継手部を有する供試体では、継手部を有することで継手用 CFRP の端部に局所的にせん断応力が集中すること、曲げひび割れと斜めひび割れが介在し下方に押し下げられるピーリング作用によることで継手部の剥離が生じると考えられている。すなわち、継手部筋の拘束の強度を上げていくことで剥離耐力は増加するが、局所的なせん断力とピーリング作用が働いたため、拘束の強度を増加させていっても最終的には、継手部の CFRP の剥離が生じ、耐力が低下していくと考えられる。

なお、供試体 No.11 と No.12 は継手用 CFRP の端部がせん断力の大きいせん断スパンに配置されるため、図-1

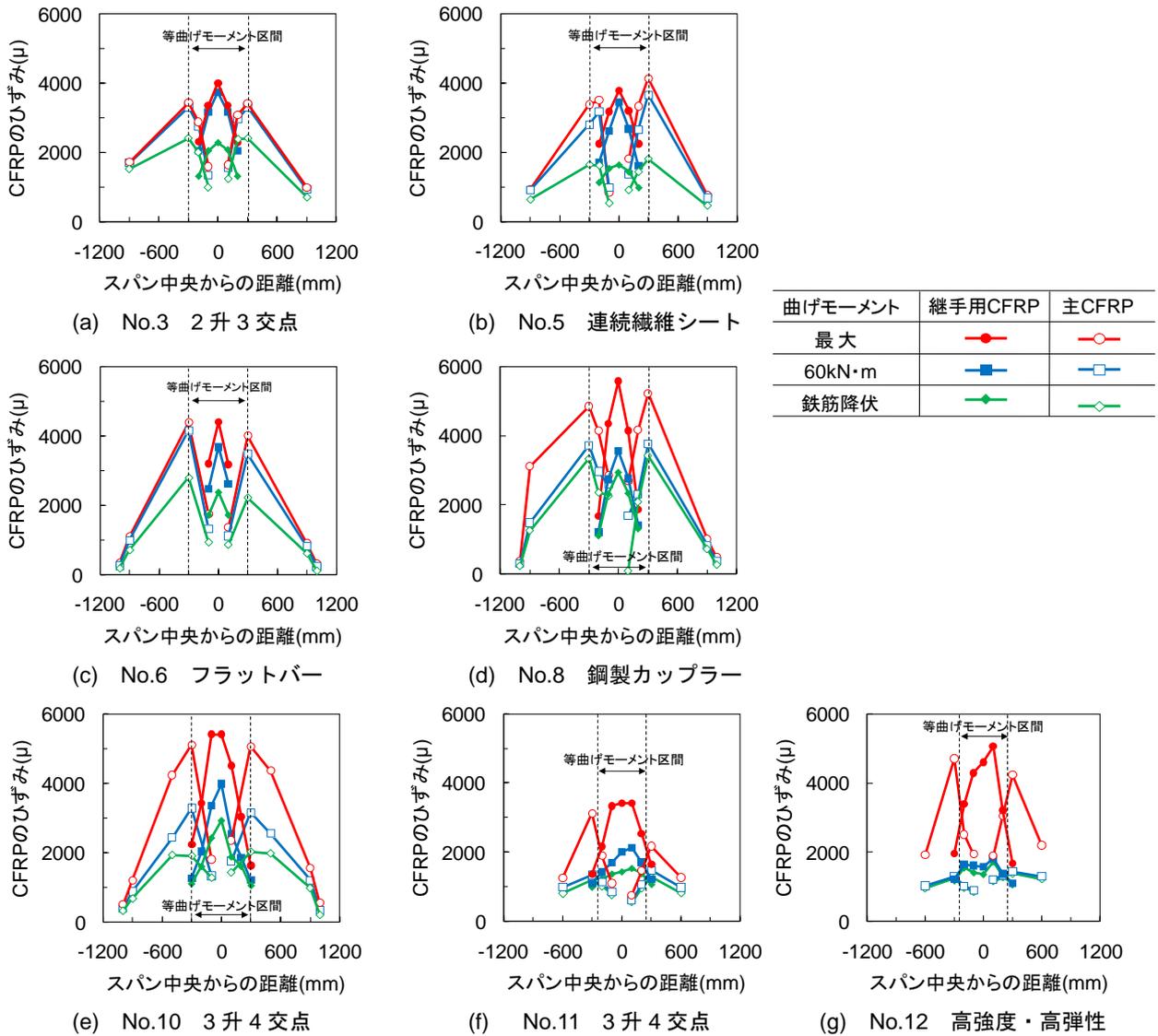


図-5 CFRP のひずみ分布

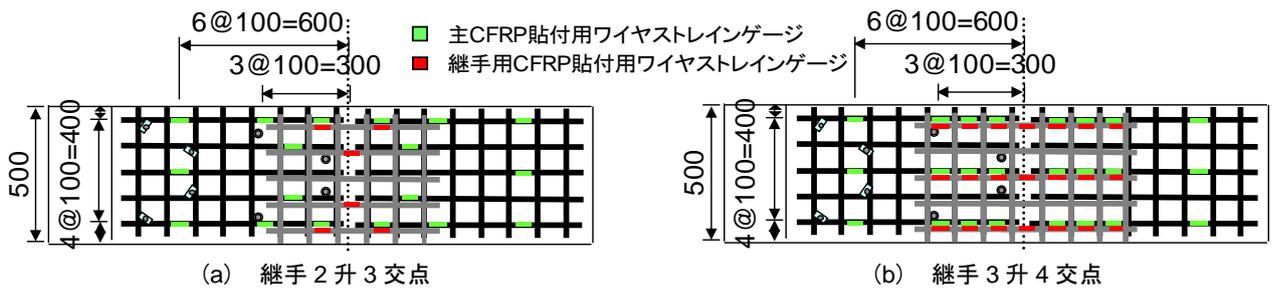


図-6 主 CFRP と継手用 CFRP の配置

4 では継手部の厚さを継手用 CFRP の厚さに対応して増し厚をして示している。他の供試体も、継手部は同様の増し厚をしていたが、ひび割れ図には示さなかった。供試体 No.11 と No.12 では、増し厚をしてもこの部分でピーリング破壊を生じた。

4. 継手部の応力伝達

供試体に鉄筋降伏モーメント、曲げモーメントが 60kN・m、最大曲げモーメントが作用した時の CFRP の

ひずみの分布を図-5 に示す。また図-6 には、主 CFRP と継手用 CFRP の配置を示す。横軸の 0mm は供試体中央部を示し、そこからの距離に対してプロットしたものである。また、2 升 3 交点シリーズの No.3~No.9 の供試体では、スパン中央からの距離が -300mm から 300mm、3 升 4 交点の No.11, No.12 の供試体では -250mm から 250mm までが、等曲げモーメント区間を示している。(a) の 2 升 3 交点から鉄筋降伏モーメント以降では、継手用 CFRP のひずみが大きくなっており、分布が山型になる

ほど継手部の応力の伝達が良好であると考えられる。ここで、2 升 3 交点シリーズにおいてリベットアンカーのみで固定した供試体 No.3 と比較することにより継手部の結束方法の効果について検討を行っていく。また、3 升 4 交点シリーズにおいて、吹付け PCM 力学性状の差についても検討を行う。

連続繊維シートで補強した供試体 No.5 の継手用 CFRP のひずみの値は供試体 No.3 に比べ鉄筋降伏時の値は小さく、鉄筋降伏後の伸びは大きいものの最終的な値も 4000 μ 前後で顕著な差は見られない。しかし、主 CFRP の最大ひずみの値がやや高くなった。全体的なひずみ分布からも良好な応力伝達が行われたとは考えられない。

フラットバーで補強した供試体 No.6 は、継手用 CFRP のひずみの値には供試体 No.3 と顕著な差は見られない。一方で、主 CFRP は最大ひずみの値がやや高くなった。しかし、継手用 CFRP と主 CFRP のグリッドが重なる位置におけるひずみの値は大きく離れている。これは、前述したように载荷の過程で継手部と分割部のグリッドがずれたことが原因であると考えられ、十分な補強効果は得られなかったといえる。また、図としては示していないが結束バンドで補強した供試体 No.7 も同様なひずみ分布を示した。

一方、鋼製カップラーで補強した供試体 No.8 は、最大曲げモーメント作用時の継手用 CFRP と主 CFRP のひずみが共に供試体 No.3 と比べ、約 1500 μ 高い値となった。また、鉄筋降伏モーメントおよび曲げモーメントが 60kN \cdot m 作用時においては、継手用 CFRP と主 CFRP の補強材の重なる位置のひずみの値は近い値を示しており、継手用 CFRP と主 CFRP の間で、良好な応力伝達が行われ、終局耐力が向上していることから、鋼製カップラーによる施工は良好な結束効果が得られたと考えられる。

交点数を 4 点に増加した供試体 No.10 では、曲げモーメントが 60kN \cdot m、鉄筋降伏モーメントの作用時において継手用 CFRP および主 CFRP のひずみの値に大きな差は認められないが、最大曲げモーメントにおいては、継手用 CFRP、主 CFRP 共にひずみに大きな差が認められる。これは、鉄筋降伏までは継手用 CFRP と主 CFRP のずれはほとんどないが、最大曲げモーメントに近づくにつれてずれが生じるため、交差点を多くすることで継手用 CFRP と主 CFRP のずれは少なく、また、応力の伝達良好であるためだと考えられる。しかし、供試体 No.11 では、交差点数が多いにも関わらずひずみは小さな値となった。これは、リベットアンカーの数によるものと考えられ、本数が多いほど供試体との一体性が良くなるためだと考えられる。

吹付け PCM の力学性状の差については、曲げモーメ

ント 60kN \cdot m、鉄筋降伏モーメントが作用時においてあまり大きな差は認められなかった。しかし、曲げモーメント 60kN \cdot m 以降では、継手用 CFRP と主 CFRP とともにひずみに大きな差が認められた。これは、高強度・高弾性 PCM を用いることで、継手用 CFRP と主 CFRP の一体性が十分に確保されていたためと考えられる。

5.まとめ

継手部の終局耐力の向上を目的に、継手部を連続繊維シートや鋼製カップラーなどで拘束して補強した供試体および交差点を 3 点から 4 点に増加と吹付けモルタルの高強度化・高弾性化させた供試体について静的载荷試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 継手部がある供試体では、継手が無い供試体に比べ、最大で 3 割程度終局耐力が低下するものもあるが、継手部筋を拘束することで終局耐力の低下を 1 割程度までに低減できることが認められた。
- 2) 継手部を有する供試体では、継手部筋の拘束の強度を上げていっても、継手部の CFRP に局所的なせん断力が発生するため最終的には、継手部の剥離が起り耐力が低下すると考えられる。
- 3) 鋼製カップラーで拘束すること、交差点を 3 点から 4 点に増加させること、高弾性の吹付け PCM を用いることで継手部と分割部の一体性が十分に確保でき、応力の伝達が良好になることが認められた。

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载荷実験に際しては、ドービー建設工業(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

- 1) 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) 佐藤貢一, 小田切芳春, 辻幸和, 岡村雄樹: 継手部を有する連続繊維補強材による RC はりの下面増厚補強効果, コンクリート年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1735-1740, 2004
- 3) 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
- 4) 山中辰則, 辻幸和, 栗原貢介: 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, コンクリート年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1357-1362, 2010