

論文 高靱性ポリマーセメントモルタル積層補強と炭素繊維シートおよびプレート接着工法による RC 梁の曲げ補強効果

角野 嘉則*1・生森 勝久*2・村上 聖*3

要旨:本論文では、連続繊維補強材接着工法に関して、RC 部材の断面修復材として一般的なポリマーセメントモルタルにポリエチレン繊維の短繊維を分散混入したポリエチレン繊維補強ポリマーセメントモルタルにより曲げ引張かぶり部分を積層補強した RC 梁において、連続繊維シートおよび連続繊維プレート接着工法により曲げ補強を施した RC 梁の曲げ補強効果について実験的検討を行った。その結果、連続繊維シートおよび連続繊維プレートの付着耐力が改善され、RC 梁の終局耐力および変形能力が増加し顕著な曲げ補強効果が得られることが実験的に確認された。

キーワード: 高靱性ポリマーセメントモルタル, 積層補強, 炭素繊維シートおよびプレート接着工法

1. はじめに

連続繊維補強材による RC 部材の曲げ補強工法としては、連続繊維シート接着工法、鉄筋あるいは連続繊維ロッド補強増厚工法などが一般的である。その中で、連続繊維シート接着工法に関しては、せん断力による曲げ引張かぶり部分の斜めひび割れ発生に起因し、かぶり部コンクリートの剥落を伴うシートの付着剥離が先行する場合が多く、連続繊維シートの力学的特性を十分に発揮するためには、シートの付着強度の改善が必要である¹⁾。また、連続繊維プレート接着工法に関しても、連続繊維プレートが高強度・高弾性のため単位幅あたりの補強効果が連続繊維シート接着工法に比べ大きい特徴があるが、破壊形式として連続繊維シートと同じく付着剥離が先行し終局破壊に至るのが一般的である。

従って、連続繊維シートおよびプレートの剥離が曲げ引張かぶり部分の斜めひび割れに起因することから、高引張強度の断面修復材を用いてかぶり部分を積層補強することで付着剥離が抑制され曲げ性状を改善できるものと考えられる。そこで、本論文では、断面修復材として一般的なポリマーセメントモルタルにポリエチレン繊維の短繊維を分散混入したポリエチレン繊維補強ポリマーセメントモルタル（以下、高靱性ポリマーセメントモルタルと称す）を用いた場合の連続繊維シートおよびプレートの付着剥離の抑制効果と、それに伴う曲げ補強効果の向上について実験的に確認した結果を報告する。なお、高引張強度の断面修復材でも高靱性でなければ欠陥やひび割れの発生、さらに引張強度に及ぼす部材の寸法効果により、信頼強度として高引張強度を期待することができないものと考えられる。

2. 実験方法

2.1 高靱性ポリマーセメントモルタルの調合設計

(1) 調合シリーズ 1

(a) 実験方法

連続繊維シートおよびプレート接着工法における付着剥離の抑制を目的に高引張強度のポリマーセメントモルタルの開発を行った。

表-1 に使用材料、表-2 に使用調合を示す。マトリックスには、柱の耐震補強工法における鋼板補強の充填材料として実績のあるポリマーセメントモルタルを使用した。短繊維には、繊維長さが 18mm のポリエチレン

表-1 使用材料 (シリーズ 1)

ポリマーセメントモルタル	コンパウンド 白色セメント+細骨材 エマルジョン ポリアクリル酸エステル系 水溶性エマルジョン
短繊維	ポリエチレン繊維 密度=0.97g/cm ³ 寸法=径 12μm×長さ 18mm 引張強度=2580N/mm ² 引張弾性率=73kN/mm ²

表-2 使用調合 (シリーズ 1)

V _f (%)	Em : Co (質量比)	フロー値 (mm)
0	1.0 : 3.5	-
1.0		171
2.0		157

V_f: 繊維体積率 Em: エマルジョン Co: コンパウンド

*1 熊本大学 大学院自然科学研究科環境共生工学専攻博士後期課程 工修 (正会員)

*2 熊本大学 大学院自然科学研究科環境共生工学専攻博士後期課程 工修

*3 熊本大学 大学院自然科学研究科環境共生工学専攻教授 工博 (正会員)

繊維（原糸カットタイプ）を用い、繊維体積率は 0%、1.0%、2.0%の 3 水準とした。混練には容量 5L のオムニキサーを使用し、ポリマーセメントモルタルマトリックスを 90 秒間練り混ぜた後に繊維を混入し、3 分間練り混ぜた。

素材強度試験用の供試体は、圧縮強度および割裂引張強度試験用に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体を、曲げ強度試験用に $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 角柱供試体を各 3 個ずつ作製し、気中養生材齢 28 日後に試験に供した。

(b) 実験結果

表-3 に強度試験結果、図-1 に曲げ荷重 - 変位曲線の測定値を示す。繊維体積率の増加に伴い、強度の大きな低下が見られる。これは、元々のポリマーセメントモルタルの圧縮強度が約 20N/mm^2 と小さい上に、繊維混入に伴う連行空気量の増大によるマトリックスの強度の低下が繊維界面の付着強度を大きく低下させ、十分な繊維補強効果が得られなかったものと考えられる。なお、空気量は直接測定していないが、同一マトリックスに対して気乾密度が繊維体積率の増加とともに減少していることから、連行空気量の増大が推察される。

(2) 調合シリーズ 2

(a) 実験方法

表-4 に使用材料、表-5 に使用調合を示す。ポリマーセメントモルタルおよび短繊維はシリーズ 1 と同様のものを使用した。シリーズ 1 の実験結果より、ポリマーセメントモルタルの強度向上を目的に混和材として高炉スラグ微粉末と二水石膏を用いた。これは、高炉スラグのアルカリ刺激による潜在水硬性、高炉スラグと二水石膏との反応で生じるエトリンガイトによる強度発現促進および強度向上、ならびに水酸化カルシウムの消費に伴う繊維界面組織の緻密化による付着強度の増加を期待したものである。繊維体積率は 1.5%一定とし、高炉スラグ微粉末は、エマルジョンに対する質量比 1.0、1.5、2.0 の 3 水準で混入した。また、二水石膏は、結合材（白色セメント+高炉スラグ微粉末）に対する質量比で 10%一定で外割り混入した。混練には、容量 5L のオムニキサーを使用し、コンパウンド、高炉スラグ微粉末、二水石膏を 30 秒間空練りし、次にエマルジョンを投入し 90 秒間練り混ぜた後に繊維を混入し 3 分間練り混ぜた。

素材強度試験用の供試体は、圧縮強度試験用に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体を、曲げ強度試験用に $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 角柱供試体を各 3 個ずつ作製し、気中養生材齢 14 日後に試験に供した。

(b) 実験結果

表-6 に強度試験結果、図-2 に曲げ荷重 - 変位曲線の測定値を示す。高炉スラグと二水石膏を混入し、高炉スラグをエマルジョンに対して 1.5（質量比）以上混入

表-3 強度試験結果（シリーズ 1）

V_f (%)	気乾密度 (g/cm^3)	F_c (N/mm^2)	F_t (N/mm^2)	F_b (N/mm^2)	T_b (kNmm)
0	1.96	17.4	2.16	6.33	-
1.0	1.62	11.0	2.01	4.96	3.51
2.0	1.35	3.77	1.16	2.69	2.11

F_c : 圧縮強度 F_t : 割裂引張強度 F_b : 曲げ強度
 T_b : 曲げタフネス(変位が 2mm までの荷重 - 変位曲線下の面積)

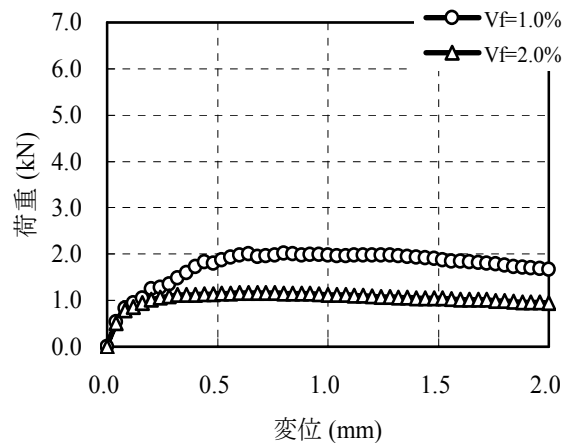


図-1 曲げ荷重 - 変位曲線の測定値（シリーズ 1）

表-4 使用材料（シリーズ 2）

ポリマーセメントモルタル	コンパウンド 白色セメント+細骨材 エマルジョン ポリアクリル酸エステル系 水溶性エマルジョン
混和材	高炉スラグ微粉末 密度= 2.89g/cm^3 比表面積= $6140\text{cm}^2/\text{g}$ 二水石膏 密度= 2.34g/cm^3 粒径= 1.2mm アンダー 高性能 AE 減水剤
短繊維	ポリエチレン繊維 密度= 0.97g/cm^3 寸法=径 $12\mu\text{m}$ ×長さ 18mm 引張強度= 2580N/mm^2 引張弾性率= 73kN/mm^2

表-5 使用調合（シリーズ 2）

記号	V_f (%)	Em : Co : S_g (質量比)	S_p/B (%)	フロー値 (mm)
S 1.0	1.5	1.0 : 3.5 : 1.0	0.5	126
S 1.5		1.0 : 3.5 : 1.5	1.5	135
S 2.0		1.0 : 3.5 : 2.0	2.5	118

Co: 白色セメント 40%+細骨材 60% S_g : 高炉スラグ微粉末
 S_p : 高性能 AE 減水剤 B: 結合材(白色セメント+高炉スラグ微粉末) 二水石膏混入率 =10%(対結合材質量比)

することにより、繊維を混入した場合も十分な強度が得られ、繊維補強効果が非常に大きくなることが分かった。今回は高性能 AE 減水剤の使用量が過度にならない範囲での流動性確保と圧縮強度 30N/mm²程度を目安に、記号 S 1.5 を断面修復材として使用する高靱性ポリマーセメントモルタルの仕様とした。

2.2 積層補強 RC 梁の使用材料

表-7 に RC 梁試験体の使用材料を示す。コンクリートには呼び強度 30N/mm² のレディーミクストコンクリート、連続繊維補強材には高強度タイプの炭素繊維シート（以下、CF シートと略す）および高弾性の炭素繊維強化プラスチックプレート（以下、CFRP プレートと略す）を用いた。断面修復材には、前項の高靱性ポリマーセメントモルタル（シリーズ 2, S 1.5）を使用した。

コンクリートの素材試験用供試体は、圧縮強度および割裂引張強度試験用に φ100×200mm 円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、現場湿布養生材齢 28 日後に試験に供した。高靱性ポリマーセメントモルタルの素材試験用供試体は、圧縮強度および割裂引張強度試験用に φ50×100mm 円柱供試体を、曲げ強度試験用に 40×40×160mm 角柱供試体を各 3 個ずつ作製し、現場気中養生材齢 14 日後に試験に供した。

2.3 RC 梁試験体作製方法

表-8 に RC 梁試験体の種類を示す。作製した RC 梁試験体は、無補強、CF シート 2 層貼付補強のみのもの、高靱性ポリマーセメントモルタルで積層補強後 CF シート 2 層貼付補強したもの、CFRP プレート貼付補強のみのもの、高靱性ポリマーセメントモルタルで積層補強後 CFRP プレート貼付補強したものの計 5 体である。

写真-2 に RC 梁試験体作製状況を示す。積層補強方法は、レディーミクストコンクリートを型枠頂面から 60mm の位置まで打設し、材齢 28 日間現場湿布養生を行った。その後、金属ブラシ等で汚れやレイタンスを除去し、断面修復材打設面に打ち継ぎ面の付着を良くするためにポリマーセメントモルタルを下塗り後、高靱性ポリマーセメントモルタルを打設した。断面修復材打設後、材齢 14 日間現場湿布養生を行った。

連続繊維補強材による補強方法は、CF シートあるいは CFRP プレート貼付面にグラインダーによる下地処理を行い、CF シート貼付のものは、プライマーを塗布し乾燥させた後、RC 梁試験体にエポキシ樹脂を塗布し 1 層目のシートを貼付、エポキシ樹脂の上塗り後、2 層目のシートを貼付し再びエポキシ樹脂の上塗りを行った。CFRP プレート貼付のものは、RC 梁試験体およびプレート両方にエポキシ樹脂を塗布し貼付を行った。

2.4 試験方法

図-3 に RC 梁試験体の形状寸法、配筋および載荷形

表-6 強度試験結果（シリーズ 2）

記号	気乾密度 (g/cm ³)	F _c (N/mm ²)	F _b (N/mm ²)	T _b (kNmm)
S 1.0	1.70	14.7	9.81	7.01
S 1.5	1.90	35.9	10.5	7.15
S 2.0	2.09	61.1	15.2	10.2

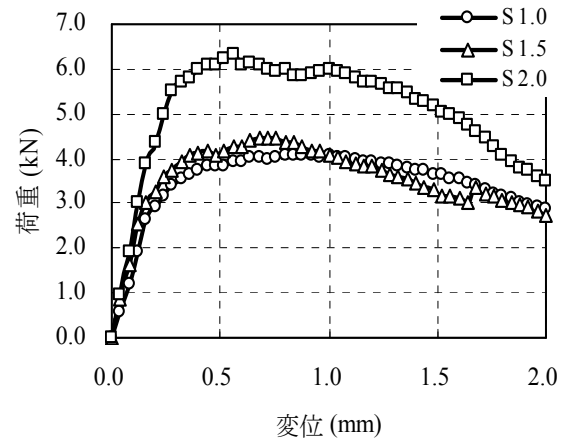


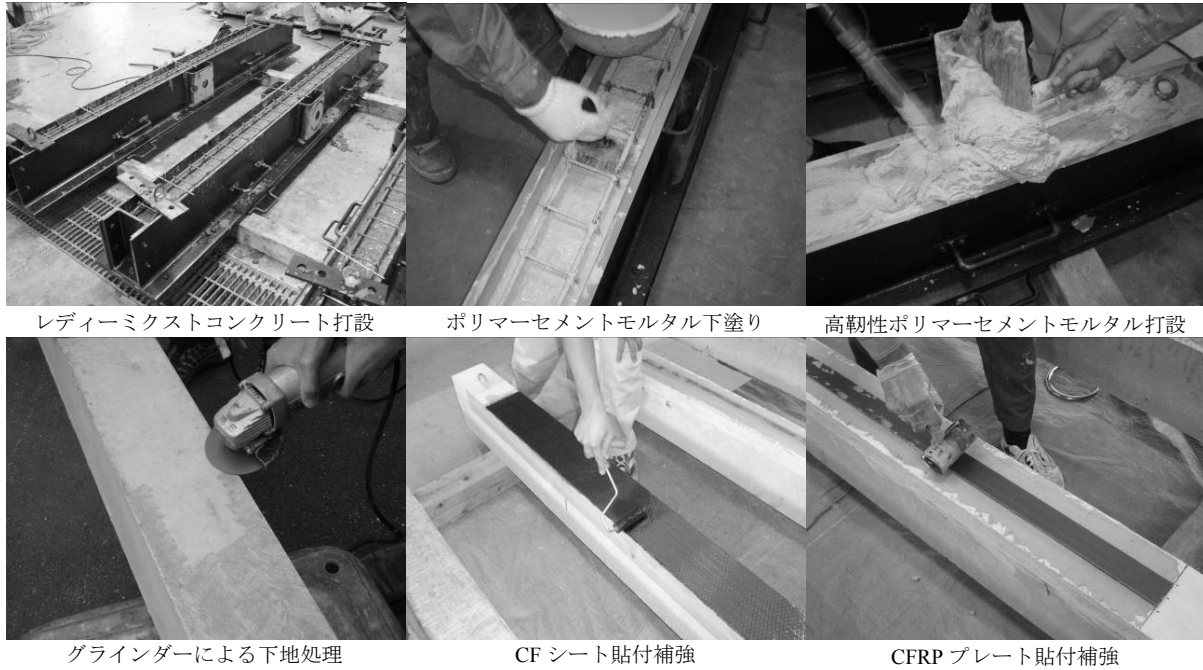
図-2 曲げ荷重 - 変位曲線の測定値（シリーズ 2）

表-7 RC 梁試験体の使用材料

コンクリート	レディーミクストコンクリート 呼び強度=30N/mm ² 指定スランブ=18cm 粗骨材最大寸法=20mm 実測スランブ=11.5cm
主筋	SD295A, D10 公称断面積=71mm ² 降伏強度=353N/mm ² 引張強度=498N/mm ² 破断伸び=26.1%
あばら筋	φ5 みがき棒鋼 降伏強度=719N/mm ² 引張強度=785N/mm ² 破断伸び=9.33%
連続繊維補強材	炭素繊維シート 公称厚さ=0.167mm 引張強度=3430N/mm ² ヤング係数=230kN/mm ² 炭素繊維強化プラスチックプレート 幅=50mm 公称厚さ=2.0mm 引張強度=1200N/mm ² ヤング係数=450kN/mm ²
断面修復材	高靱性ポリマーセメントモルタル

表-8 RC 梁試験体の種類

記号	RC 梁試験体補強方法	
	断面修復材	連続繊維補強材
No.1	なし	なし
No.2	なし	CF シート 2 層貼付
No.3	高靱性ポリマーセメントモルタル	CF シート 2 層貼付
No.4	なし	CFRP プレート 1 層貼付
No.5	高靱性ポリマーセメントモルタル	CFRP プレート 1 層貼付



レディーミクストコンクリート打設

ポリマーセメントモルタル下塗り

高靱性ポリマーセメントモルタル打設

グラインダーによる下地処理

CFシート貼付補強

CFRPプレート貼付補強

写真-2 RC梁試験体作製状況

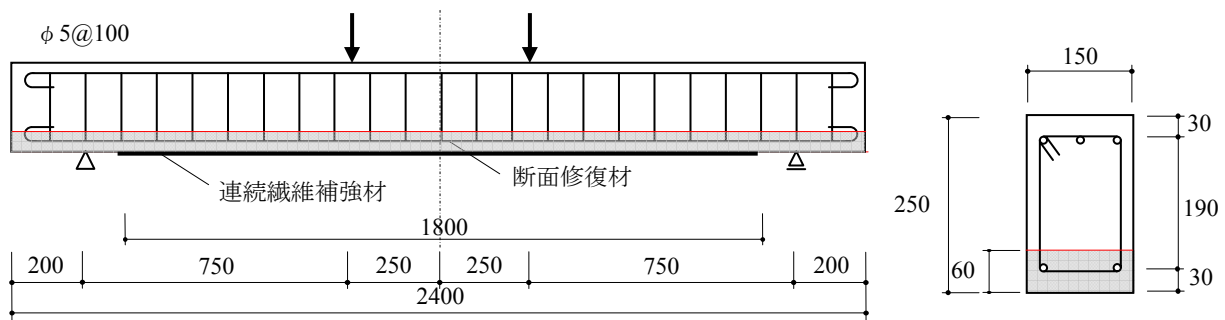


図-3 RC梁試験体の形状寸法、配筋および荷形式

式を示す。荷重方法はスパン長 2000mm、荷重点間距離 500mm の 4 点曲げ荷重試験により行った。

測定は容量 500kN のロードセルにより荷重を、容量 100mm の変位計によりスパン中央変位を、標点間距離 300mm のパイ型変位計によりスパン中央断面の主筋ひずみを、シートおよびプレートのひずみをゲージ長 20mm のひずみゲージによりそれぞれ測定した。なお、後述の曲率は、平面保持を仮定して主筋ひずみの測定値から求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 素材試験結果

表-9 に素材試験結果を示す。高靱性ポリマーセメントモルタルの引張強度はレディーミクストコンクリートと比較して約 2 倍の値となっている。

3.2 終局破壊性状

図-5 に RC 梁試験体のひび割れおよび終局破壊性状

表-9 素材試験結果

1) レディーミクストコンクリート

No.1, No.2		
F_c (N/mm ²)	F_t (N/mm ²)	E (kN/mm ²)
41.5	3.33	32.1
No.3, No.4, No.5		
F_c (N/mm ²)	F_t (N/mm ²)	E (kN/mm ²)
35.8	2.78	29.3

E: ヤング係数

2) 高靱性ポリマーセメントモルタル

F_c (N/mm ²)	F_t (N/mm ²)	F_b (N/mm ²)
29.5	5.27	11.3

を示す。無補強の RC 梁試験体は、曲げ圧縮破壊により終局破壊に至った。CF シートおよび CFRP プレート貼付補強のみの RC 梁試験体では、荷重点近傍で引張側かぶ

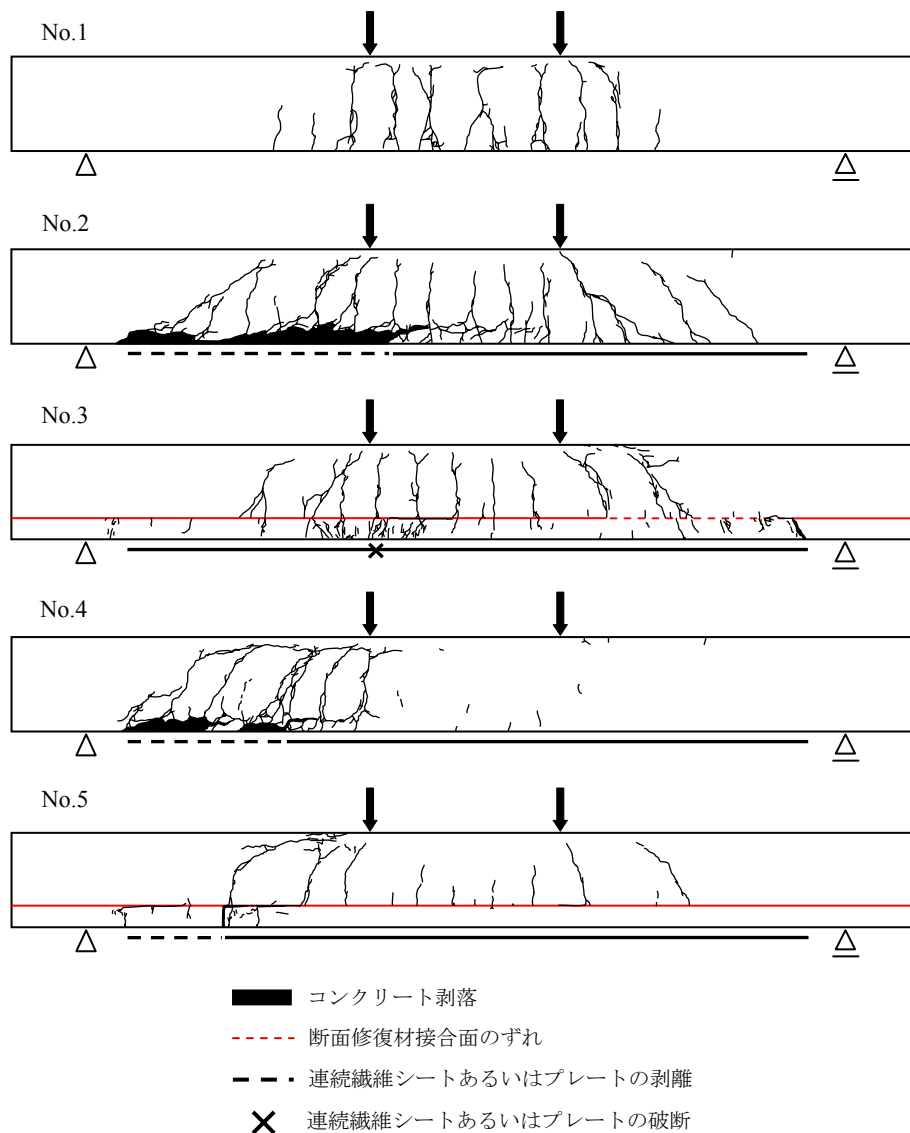


図-5 RC 梁試験体のひび割れおよび終局破壊性状

り部分に斜めひび割れが発生し、かぶり部分の剥落を伴いながらシートおよびプレートの剥離により終局破壊に至った。それに対し、高靱性ポリマーセメントモルタルで積層補強後 CF シートを貼付した RC 梁試験体では、かぶり部分での斜めひび割れの発生が抑制され、シートの破断によって終局破壊に至っている。また、高靱性ポリマーセメントモルタルで積層補強後 CFRP プレート貼付した RC 梁試験体では、コンクリートに生じた曲げせん断ひび割れからコンクリートと積層補強接合面に沿ってひび割れが進展し、局部的にかぶり部分がほぼ垂直にずれて、その外側のプレート部分が界面剥離し終局破壊に至った。

3.3 曲げ耐力および変形状

図-6にCFシート貼付補強RC梁試験体の荷重-変位曲線の測定値、図-7にCFシート貼付補強RC梁試験体の曲げモーメント-曲率関係、図-8にCFRPプレート

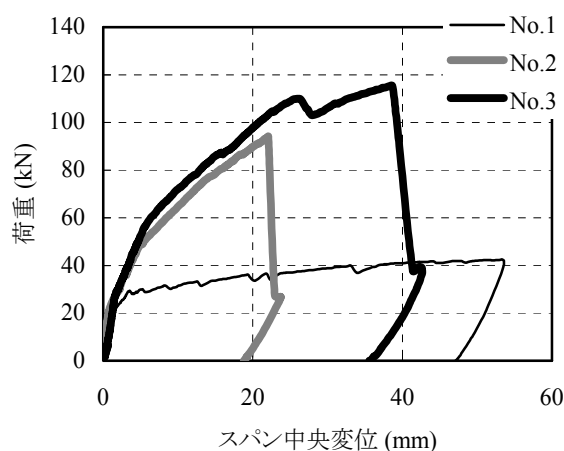


図-6 RC 梁試験体の荷重 - 変位曲線の測定値 (CF シート貼付補強)

貼付補強 RC 梁試験体の荷重 - 変位曲線の測定値、図-9にCFRPプレート貼付補強RC梁試験体の曲げモーメン

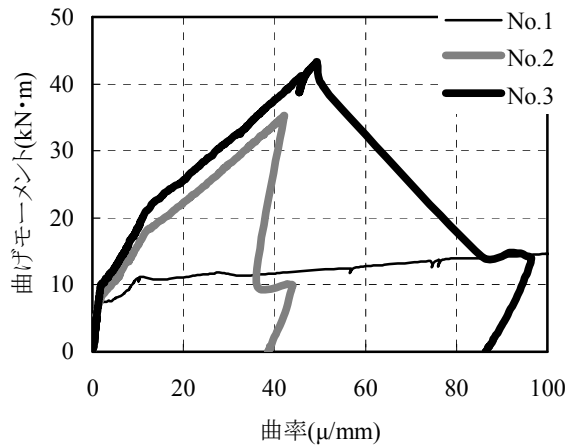


図-7 RC 梁試験体の曲げモーメント - 曲率関係 (CF シート貼付補強)

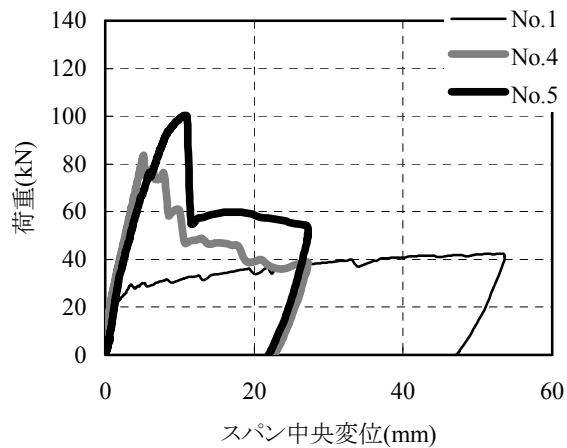


図-8 RC 梁試験体の荷重 - 変位曲線の測定値 (CFRP プレート貼付補強)

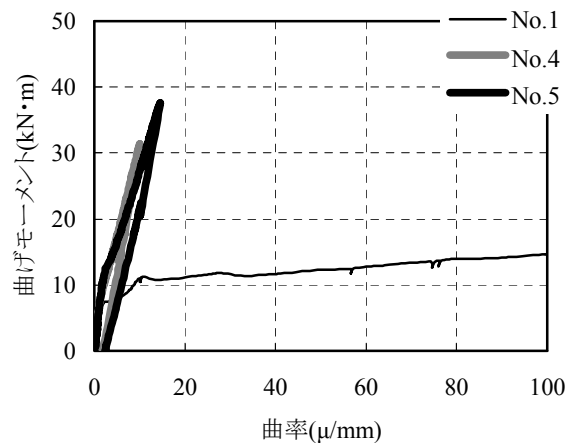


図-9 RC 梁試験体の曲げモーメント - 曲率関係 (CFRP プレート貼付補強)

ト - 曲率関係, 図-10 に各 RC 梁試験体の曲げ耐力の比較を示す。コンクリート表面に CF シートのみを貼付した梁に比べて, 高靱性ポリマーセメントモルタルで積層

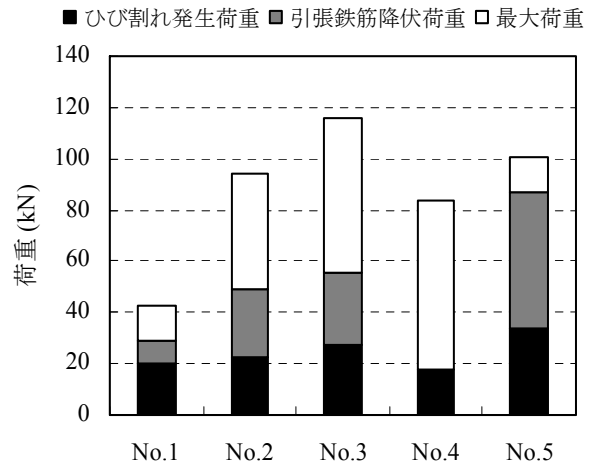


図-10 各 RC 梁試験体の曲げ耐力の比較

補強した後に CF シートを貼付した梁の終局曲げ耐力は, 約 23% 増加し, 終局的破壊も前者がシートの剥離で決まったのに対して, 後者ではシートの破断により終局的破壊に至った。これは, 高引張強度の高靱性ポリマーセメントモルタルの積層補強により, かぶり部分での斜めひび割れの発生が抑制されたためと推察される。

CFRP プレート補強 RC 梁に関しては, コンクリート表面にプレートのみを貼付した場合には, プレートが高弾性率のために引張鉄筋が降伏する前にプレートの剥離が生じているのに対して, 高靱性ポリマーセメントモルタルで積層補強した後にプレートを貼付した場合は, 引張鉄筋降伏以降にプレートが剥離し, プレートのみを貼付したものに比べて, 終局曲げ耐力は約 19% 増加している。

4. まとめ

本論文では, RC 梁の曲げ補強工法として, 連続繊維シートおよびプレート接着工法について高引張強度の断面修復材により積層補強を施した RC 梁試験体により比較検討を行い, 高靱性ポリマーセメントモルタルを断面修復材として用いることにより, シートおよびプレートの付着耐力が改善され, 曲げ補強効果がかなり大きくなることが実験的に確認された。

今後は, 実施工での効果を調べるために上向き施工による補強作業を行い, 曲げ補強効果への影響についての検討および解析的検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 角野嘉則ほか: 各種断面修復材で積層補強した RC 梁に対する連続繊維シートの曲げ補強効果, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.497-504, 2006