

論文

[2169] FRP と各種モルタルで補強した RC 梁の曲げ破壊性状
に関する研究

正会員○佐藤 貢一(奈良建設 土木技術研究所)

正会員 小玉 克巳(武蔵工業大学 土木工学科)

1. はじめに

著者らは,これまでの研究で補強筋としてFRP(Fiber Reinforced Plastic)を,損傷を与えた鉄筋コンクリート梁(以下RC梁)の引張側に配置し,ポリアクリル酸エステル系ポリマーモルタル(以後PPモルタル)補強材で一体化する補強法を提唱してきた。本補強法で補強することにより,既存RC梁のひびわれ幅,梁中央のたわみ量,主鉄筋の応力が低減され,静的曲げおよび疲労環境下において耐久性が向上されること,さらにこれらの曲げ性状が計算によって十分把握できることを示してきた[1][2][3]。またFRPを補強筋として使用した場合,FRPの引張剛性(繊維断面積 x 弾性係数)が補強後の性状に大きく影響し,補強筋の剛性を上げることが必ずしも補強後の耐久性向上につながらず,その破壊性状が補強部の剥離破壊であることが認められた[4]。そこで損傷を与えたRC梁をFRPと各種性状の異なるモルタルを用い補強し,補強部分の曲げ破壊性状を検討した。

2. 補強材料の性状

2.1 FRPの力学的性状

本研究で補強筋として用いたFRPとRC梁の主鉄筋として用いた鉄筋D10の力学的性状を表-1に示す。FRPには高弾性炭素繊維(CFRP)を使用し,ビニールエステル樹脂をマトリックスとして格子状に成形したものを使用した(図-2供試体形状図)。

表-1 FRPと鉄筋D10の力学的特性

	種類	引張応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf)	断面積		弾性係数 (kgf/cm ²)	引張剛性 (kgf)
				繊維断面積 (cm ²)	総断面積 (cm ²)		
補強筋	CFRP Carbon	270000	1347	0.0499	0.0832	3.12 x 10 ⁶	1.56 x 10 ⁵
主鉄筋	D10 Steel	3600	3652	0.7133		1.92 x 10 ⁶	1.37 x 10 ⁶

1本の補強梁供試体で補強筋CFRPは8本,主鉄筋D10は2本

2.2 各種モルタルの性状

補強筋CFRPをRC梁と一体化させるために表-2に示す各種モルタルを使用した。ポリアクリル酸エステル系ポリマーモルタル(以後PPモルタル)は,曲げ強度,付着強度にとみ,弾性係数は比較的 low, 耐久性の高いものである。吹き付け補修材として用いられているシリカフェーム混合モルタル(以後SFモルタル),また圧縮強度,弾性係数の高いプラスチック繊維混合モルタル(以後PLモルタル)を使用した。

表-2 各種モルタルおよびコンクリートの性状

各種モルタル	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	付着強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
コンクリート (28日強度)	275.0	21.1	45.0	—	2.67 x 10 ⁵
PPモルタル (7日強度)	240.0	26.3	73.0	5.921	1.19 x 10 ⁵
SFモルタル (7日強度)	306.0	22.7	56.0	0.066	2.90 x 10 ⁵
PLモルタル (7日強度)	344.0	24.5	54.0	0.132	3.00 x 10 ⁵

表-3 供試体の種類一覧表

記号	補強筋数	補強厚 (cm)	供試体数 静的曲げ	補強材料
UR 無補強	—	—	2	—
PP1補強	CFRP 8本	1.0	2	POLYMER MORTAR
PP2補強	CFRP 8本	3.0	2	POLYMER MORTAR
SF補強	CFRP 8本	3.0	2	SILICA FUME MORTAR
PL補強	CFRP 8本	3.0	2	PLASTIC FIBER MORTAR

3. 実験概要

RC構造物の損傷を想定し、RC梁にあらかじめ主鉄筋D10の降伏強度の75%(主鉄筋応力2700kgf/cm²),0.3mm程度のひびわれが発生する荷重を載荷した。その後RC梁の主鉄筋の応力の低減、ひびわれ幅、梁中央のたわみ量を低減することを目的にRC梁を格子状FRPと各種モルタルを用い補強した。補強実験に関する一覧表を表-3に記す。

3.1 各種モルタルのせん断付着試験

各種モルタルとコンクリートとのせん断付着性状を把握するために図-1に示すように両面せん断試験を行った。せん断付着供試体は100x100x100(mm)のコンクリート供試体間に表面処理を行わず各種モルタルを打設し製作した。計測は荷重およびずれ量を測定した。

3.2 RC梁の製作

供試体の寸法は、図-2に示す通りで断面の高さ15cm、幅20cm、長さ120cmとした。軸方向補強材として梁引張側に鉄筋D10 (SD30)を2本配置し、スターラップとして鉄筋D10を7cm間隔に配置した。コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、28日間湿布養生した。コンクリートの力学的性状を表-2に記す。

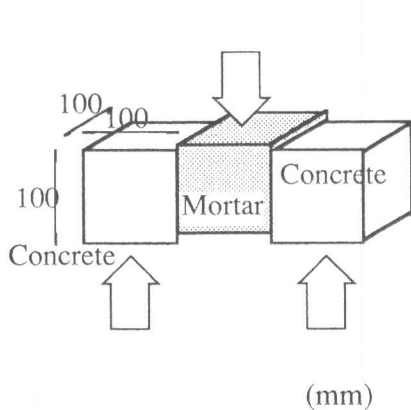


図-1 両面せん断試験状況

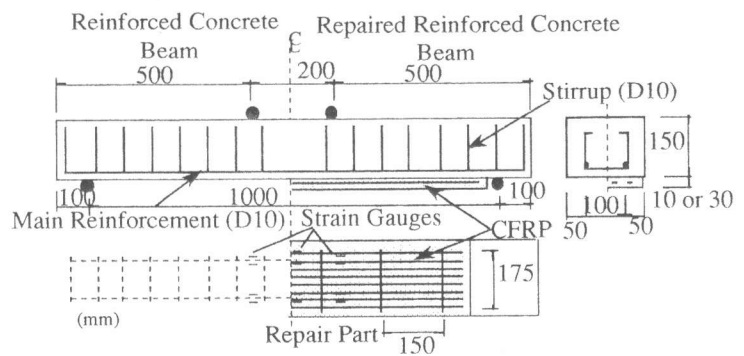


図-2 補強梁形状図

3.3 補強供試体の製作

製作したRC梁にあらかじめ損傷を与え、このRC梁の下面に格子状に加工したCFRPを配置(8本)しアンカー4本で固定した後各種モルタル(表-2)で一体化した。PPモルタル補強に関しては補強厚さ1および3cmの2種類とし、SF、PLモルタル補強は3cmとした。補強後7日間室内養生後に以下の実験を行った。試験供試体の一覧表を表-3に記す。

3.4 静的曲げ試験

荷重は、支点間隔100cm、間隔20cmの2点載荷とした。計測はロードセルにより載荷荷重、抵抗ひずみ線ゲージにより主鉄筋および補強筋のひずみ、クリップゲージによりひびわれ幅、変位計により梁中央点のたわみ量を計測した。

4. 試験結果と考察

4.1 コンクリートと各種モルタルの付着性状

図-3に各種モルタルの付着応力とずれ量の関係を示す。またコンクリートと各種モルタルの両面せん断試験結果より各種モルタルの付着強度を表-2に記す。モルタルとコンクリートとのずれ量が0.1mmに達した時をもとに付着強度を求めるとPPモルタルの付着強度は、5.92kgf/cm²で、SFモルタルは0.07kgf/cm²、PLモルタルは0.13kgf/cm²であった。本実験においてコンクリートとモルタルとの接着面の処理を行わなかったためSFモルタル、PLモルタルの付着強度は低い値を示した。

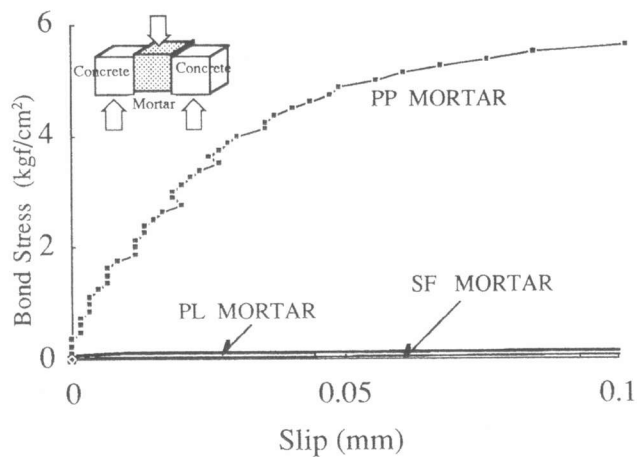


図-3 コンクリートとPPモルタルの付着応力とずれ量の関係

4.2 静的曲げ試験結果

(1) 破壊荷重と破壊形態

FRPと各種モルタルで補強した梁の破壊荷重とその破壊形態を表-4に示す。無補強RC梁が約4.0tfで曲げ破壊したのに対して、PPモルタル補強は6.0tf以上の強度を示した。しかしながらSF補強およびPL補強は4.3tf以下の破壊荷重であった。これはSFおよびPL補強では荷重初期段階より補強部分の剥離が生じ補強効果

表-4 静的曲げ試験結果

供試体	記号	破壊荷重 (kgf)	破壊形態	剥離荷重 (kgf)	剥離荷重 計算値 (kgf)
UR 無補強	UR 1	3999	曲げ破壊	—	—
	UR 2	3816	曲げ破壊	—	—
PP1補強 補強厚 t=10mm	PP1-1	6100	曲げ剥離破壊	6100	5000
	PP1-2	6900	曲げ剥離破壊	6900	5000
PP2補強 補強厚 t=30mm	PP2-1	6700	曲げ剥離破壊	4800	3800
	PP2-1	6300	曲げ剥離破壊	4400	3800
SF補強 補強厚 t=30mm	SI-1	3570	曲げ剥離破壊	400	200
	SI-2	3800	曲げ剥離破壊	400	200
PL補強 補強厚 t=30mm	PL-1	4000	曲げ剥離破壊	700	400
	PL-2	4250	曲げ剥離破壊	800	400

※剥離荷重はせん断試験ずれ量0.1mmにおける付着強度を用いて算定

果が十分に発揮できなかったことによると考えられる。また図-4の補強梁のひびわれ図に示される

ようにSF,PL補強梁は補強後に新たなひびわれが発生することなく,荷重初期に梁中央部つまり最大曲げモーメント区間より発生した剥離が荷重の増加にともない補強部分のほぼ全域に進展し,破壊した。一方PPモルタル補強梁は荷重の増加にともない新たなひびわれが発生し梁全体に応力の分散がなされ,剥離も破壊と同時に補強部端部に狭い範囲で生じた。この剥離に関しては4.4節で述べる。

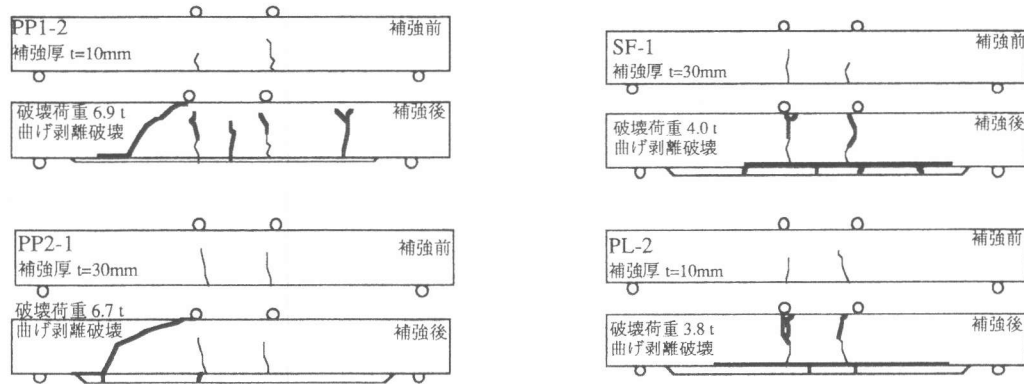


図-4 補強梁のひびわれ状況

4.2 主鉄筋応力およびひびわれ幅に関する検討

RC梁の主鉄筋の応力を低減させることは耐久性の向上すなわち補強効果を示すものと考えられる。補強筋FRPの断面量が一定であるため各補強梁の応力低減効果は同等であるはずであるSF,PI補強はPP補強と比較して,荷重初期段階より主鉄筋の応力低減効果が少ない。PP補強に関しては主鉄筋の応力を十分低減しており補強が有効であることがわかる(図-5)。さらに図-6の荷重と最大ひびわれ幅のグラフからもわかるようにSF,PL補強は荷重初期より無補強の最大ひびわれ曲線に荷重の増加と共に接近し破壊直前で一致するような動きとなっている。これは荷重初期段階より補強部分の剥離が徐々に進行し,補強効果が減少して行く過程を示している。PP1補強は梁全体に応力が分散し細いひびわれが数多く発生したことから,PP2補強と比較し最大ひびわれ幅が低減された。

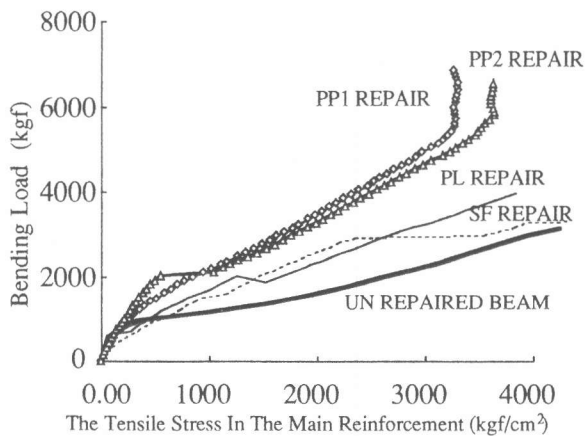


図-5 補強梁の荷重と主鉄筋応力の関係

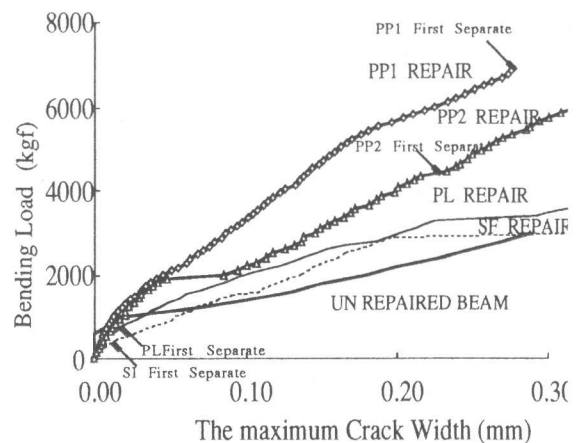


図-6 補強梁の荷重と最大ひびわれ幅の関係

4.3 梁中央部におけるたわみ量に関する検討

荷重と梁中央部のたわみ量の関係を図-7に示す。SF,PL補強は荷重初期段階からの剥離進展が原因でたわみ量が無補強梁と同程度となっている。一方PP補強に関しては無補強供試体に対してたわみ量が1/2以下に低減されている。また、補強部分のモルタルおよびFRPを考慮して梁の軸方向に100分割し、各断面の曲率($\rho = \frac{M_d}{E_c I_e}$ … (1)) を数値積分することによって求めた梁中央部のたわみ量[5]計算値を図中に付記する。PP1,PP2補強が共に計算値と良く一致していることから補強後において付着が有効であるならば補強梁は十分弾性的な挙動を呈し補強効果が向上するものと考えられる。

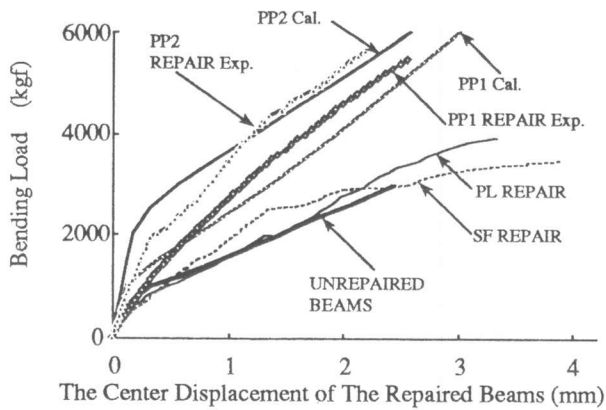


図-7 補強梁の荷重と梁中央部のたわみ量

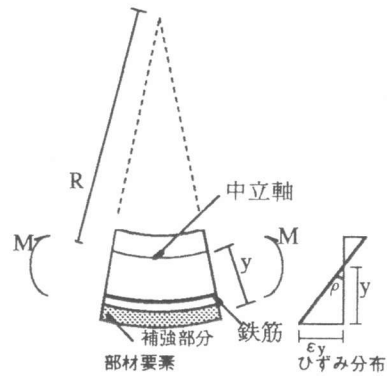


図-8 曲げ部材の変形状況

4.4 補強部分の剥離に関する検討

前項で補強梁のたわみ量計算値と実験値とがほぼ一致したことから各荷重段階における梁の各位置の曲率は計算値とほぼ一致するものと考えられる。ここで曲率は、図-8に示されるように部材の軸線に沿って変化する単位長さ当たりの回転を示し、曲率半径の逆数で示され(式(2))ひずみ分布の勾配である[6]。よって補強部分のひずみおよび応力は式(2),(3)で示される。

$$\rho = \frac{1}{R} = \frac{\epsilon_y}{y} \quad \dots (2)$$

$$\sigma_m = \epsilon_y \times E_m (1 + n_m \times P_m) \quad \dots (3)$$

この補強部分の応力はRC部分と補強部分の界面に作用するせん断付着力によって伝達されることから補強部分の応力と付着の関係は式(4)で表される。

$$\frac{d\sigma_m}{dx} = \frac{B}{A_m} \tau_x \quad \dots (4)$$

以上の式より接着界面の平均作用せん断付着応力と補強梁曲率との関係は式(5)となる。

$$\tau_m = \frac{y \rho E_m (1 + n_m \times P_m) A_m}{B \times \frac{L}{2}} \quad \dots (5)$$

ρ	曲率	R	曲率半径
y	中立軸からの距離		
ϵ_y	補強部分のひずみ		
M_d	作用曲げモーメント		
E_c	コンクリート弾性係数		
E_m	モルタル弾性係数		
I_e	補強梁断面2次モーメント		
n_m	補強材FRPとコンクリートの弾性係数比		
A_f	補強材FRPの断面積		
A_m	補強部モルタル部分の断面積		
P_m	A_f/A_m		
B	梁幅		
σ_m	補強部分モルタル作用応力		
τ_m	梁と補強部分の接着界面に作用する平均せん断付着応力		

式(1)(5)より

$$\tau_m = \frac{y M_d E_m (1 + n_m \times P_m) A_m}{E_c I_e B \frac{L}{2}} \quad \dots (6)$$

この曲率と付着応力の関係を示したのが図-8である。すなわち両面せん断試験より求めた各種モルタルのせん断付着強度に接着界面に作用するせん断付着応力度が達したときに補強部分の剥離が生じるものと考えられる。式(6)からも分かるように、接着界面の付着応力と曲率の関係は、コンクリートと補強部分の弾性係数の比に補強部分の面積を乗じたもの $\frac{E_m (1 + n_m \times P_m) A_m}{E_c}$ に左右され弾性係数の高いモルタルを用いた場合には高い付着力が要求されることが分かる。さらに同様なモルタル補強材を用いた場合でもPP2補強梁

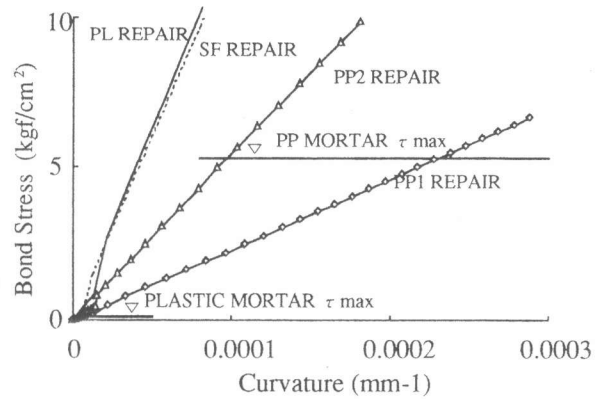


図-8 補強部の付着応力と梁曲率の関係

のように補強厚さが厚くなると補強部分の断面面積 A_m が増し付着応力は増加する。作用せん断付着強度と梁の最大曲率の1/2を式(6)に代入して算定した、各種モルタルを用いた補強梁の補強部分の初剥離荷重を表-4に記す。各補強梁の初剥離荷重は図-6に矢印で示した。表中の実験値と計算値とがほぼ一致することから本計算手法によって剥離荷重を算定できるものと考えられる。

5. まとめ

本実験結果より以下のことが言える。曲げ部材の引張側を補強筋とモルタルを用いて補強する場合弾性係数の高いモルタルを用いると同一曲率において、補強部分と曲げ部材の接着界面の作用せん断付着応力が増加する。したがって付着強度の高い材料を使用しないと早期剥離に至り主鉄筋応力、ひびわれ幅、梁中央部のたわみ量を低減できず補強効果が発揮できない。さらに、補強部分の断面厚の増加によっても、補強部分と曲げ部材の接着界面の作用せん断付着応力は増加する。以上のことから、弾性係数の低いフレキシブルなモルタルを用い、補強部分の断面厚は薄い形状のものが良好であると言える。また、補強梁の曲率を用いて接着界面の作用せん断付着応力を算定することにより補強梁の剥離性状を把握できた。

参考文献

- [1] 佐藤貢一・大木浩靖・小玉克巳:特殊ポリマーモルタルを使用したRC梁の補強工法,土木学会第44回年次学術講演概要集,1989.10
- [2] 佐藤貢一・小玉克巳 他:FRPとポリマーモルタルを用いたRC梁の補修に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.12,No.1,PP.1269-1274,1990.6
- [3] 佐藤貢一・小玉克巳 他:FRPとポリマーモルタルで補修したRC梁の疲労性状,土木学会第45回年次学術講演概要集V-299,PP.624,1990.10
- [4] 佐藤貢一・小玉克巳 他:FRPとポリマーモルタルで補修したRC梁の曲げ性状に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.13,No.2,PP.877-882,1991.6
- [5] コンクリート標準示法書,土木学会,平成3年度
- [6] 角田,池田,小柳編:新体系土木工学 鉄筋コンクリート,