

論文

[1221] 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

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)

正会員 吉川 弘道 (武蔵工業大学)

1. はじめに

近年、RC構造物の劣化が社会問題となっており、各関係機関で補修工法の開発、実施工が進められている。これまで著者らは、RC梁の下面に補強鉄筋を配置し、塩害、コンクリートの中性化、凍結融解作用に強く耐候性に優れている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)で一体化させた補修法を提唱し、主鉄筋応力、ひびわれ幅、たわみ量が低減されることを実施した[1]。さらにこの補修法は、施工中、橋梁構造物などの交通振動の影響を無視できることや、補修後にRC部材としての機能が十分期待できることなどの多くの利点を有し、今後の発展が望まれる。本研究は、最近話題となっている高強度、高弾性繊維を用いた繊維強化プラスチック(FRP格子)を用い、コンクリート梁(FRPC梁)を製作し、静的曲げ性状を検討した(シリーズA)。さらに補修部分の死荷重の低減や、海浜構造物などの耐久性の向上を目的として補強鉄筋の変わりにRC梁の下面にFRP格子を配置し、PPモルタルで一体化した補修梁を製作し、その静的曲げ、曲げ疲労性状を検討した(シリーズB)。

2. 各種FRP材とPPモルタルの性状

表-1 FRP材性状表

a) FRP材:表-1に示すように、繊維は、ガラス繊維、高弾性炭素繊維、アラミド繊維(以下GFRP, CFRP, AFRPと記す)を用い、比較のために鉄筋D13も使用した。繊維量は素材の引張強度が同程度となる4712(kg/本)とした。また、FRP材の特性値として引張剛性値(繊維断面積A1×弾性係数E)を示す。

繊維の種類	繊維含有率(%)	最大強度(kg/本)	最大応力(kg/mm ²)	繊維断面積 A1 (mm ²)	総断面積 A2 (mm ²)	弾性係数 E (kg/cm ²)	引張剛性 A1E (kg)
GFRP ガラス繊維	40	4712	143	32.95 (0.26)	82.38 (0.65)	0.74×10 ⁶ (0.39)	2.4×10 ⁵ (0.10)
CFRP 高弾性炭	40	4712	270	17.45 (0.14)	43.63 (0.34)	3.50×10 ⁶ (1.83)	6.1×10 ⁵ (0.25)
AFRP アラミド繊維	40	4712	312	15.10 (0.12)	37.75 (0.30)	0.71×10 ⁶ (0.37)	1.1×10 ⁵ (0.05)
D13 (SD 30)		5012	39.58	126.7 (1)		1.91×10 ⁶ (1)	24.2×10 ⁵ (1)
D10 (SD 30)		2586	36.26	71.33 (0.56)		1.84×10 ⁶ (0.96)	13×10 ⁵ (0.49)

※ ()内は、D13を1とした場合の比率

使用したFRP材は格子状に加工したものを使用し、本研究ではFRPC梁及び補修梁にこれらFRP材を2本配置した。

b) PPモルタル: PPモルタルの性状を

表-2 PPモルタル性状表

表-2に示す。PPモルタルは、白セメントと珪砂からなるコンパウンドとエマルジョンを5:1で混合した。その性状は曲げ強度、引張強度、付着強度が特に高く、コンクリートとの接着効果及び補強材との付着力も高いと考えられる。また、凍結融解抵抗性、耐候性、耐塩性、耐アルカリ性に優れておりコンクリ

圧縮強度	曲げ強度	引張強度	付着強度	ヤング係数	凍結融解抵抗
240.0 (kg/cm ²)	73.0 (kg/cm ²)	26.3 (kg/cm ²)	75.0 (kg/cm ²)	1.19×10 ⁵ (kg/cm ²)	ASTM C 866 300サイクル 重量変化なし
促進耐候性試験		塩水噴霧試験	中性化促進試験	耐アルカリ性	
3000時間 異常無し		3000時間 異常無し	中性化深度 コンクリートの 5分の1	異常無し	

※ 強度試験は28日強度とする。

ートの中性化を防ぐ効果がある。

3. FRPC梁の静的曲げ性状 —シリーズA—

3-1 実験概要

AFRP, GFRP, CFRP (表-1) を、格子状に加工した補強材をコンクリート中に配置した場合の静的曲げ性状を把握するために、各FRPを主筋として用いたFRPC梁を製作し、その力学的性状を検討した。(上記3種FRP以外に比較のためにD13も使用した。)

a) FRPC梁の製作: 図-1に示すようにFRP材を引張側に配置し、スタースラップ(SD30-D10)を70mm間隔に配筋した。供試体は各FRPごとに2体製作した。セメントは早強セメントを用い(W/C=60%)養生は、室内一週湿潤養生とした。

b) 静的曲げ試験: 静的曲げ荷重試験方法は、二点荷重とし、支間を100cm, 荷重点幅を20cmとした。試験に際して、荷重荷重, 引張材の歪, 梁中央点のたわみ, ひびわれ幅を測定した。

3-2 破壊形態及び最大耐力

従来の弾性理論を用いて計算した破壊強度の計算値と実測値の比較を表-3に示す。GFRP梁とD13梁の実測値は、計算値に比べ、ほぼ同程度か上回る値を示した。AFRP梁, CFRP梁の実測値は、計算値に比べそれぞれ75%以上の値を示した。以上のことから、FRPC梁もRC梁の弾性理論から破壊荷重をある程度推測する事ができたが、さらに、算定精度を向上させるために、剛性, 付着の違いを考慮する必要がある。

3-3 主筋の応力

図-2に各FRPC梁の引張材に作用した応力と荷重の関係を示した。図中の実線は、弾性理論から求めた各引張材の応力計算値である。各引張材に作用する応力の実測値と計算値とがほぼ一致し、FRP材を用いた場合でも弾性理論で応力を十分推定できるといえる。

3-4 発生したひびわれ

図-3, 4に各梁に発生したひびわれ発生状況を示す。各梁とも曲げ破壊であった

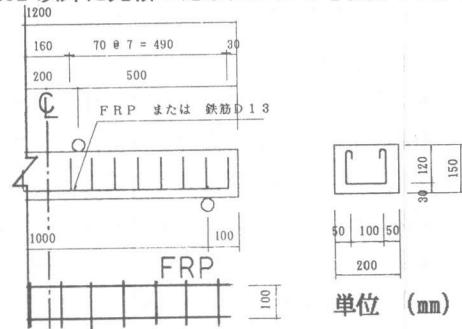


図-1 形状寸法図

表-3 静的試験結果

引張材	破壊荷重 (kg)	計算値 (kg)	備考
D13	5150	4951	曲げ破壊
AFRP	3975	5333	曲げ破壊
GFRP	5080	5200	曲げ破壊
CFRP	4415	5133	曲げ破壊

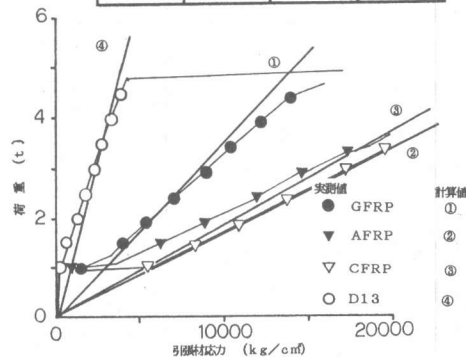


図-2 荷重と応力の関係

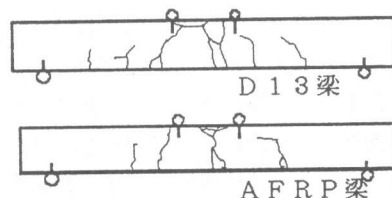


図-3 ひびわれ発生パターン

が、引張材の種類によりひびわれ発生状況は異なりD13梁がひびわれ本数が最も多く広範囲に発生し、CFRP梁、GFRP梁、AFRP梁の順に引張剛性（表-1）が小さくなるにつれ、ひびわれ間隔が大きくなったといえる。図-5に荷重と最大ひびわれ幅の関係を示す。引張剛性の大きな引張材ほど同一荷重における最大ひびわれ幅が小さくなっている。以上の図-3~5は同じことを意味し、ひびわれ性状と主筋引張剛性の間に明瞭な相関関係が認められる。ここで、土木学会ひびわれ算定式より、ひびわれ幅の計算値を求め[2]、図-6で比較した。

$$W_s = K_1 \{4C + 0.7(C_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_f}{E_f} + \epsilon_{cs} \right]$$

- W_s : ひびわれ幅 K_1 : 係数
 C : かぶり C_s : 引張材中心間隔
 ϕ : 引張材径 E_f : 弾性係数
 σ_f : 引張材応力 ϵ_{cs} : 乾燥及びクリープ

上式における σ_f/E_f は $P/(A_f \cdot E_f)$ となり、同じ引張力作用状態で引張剛性値がひびわれ幅に反比例すると考えられる。ひびわれ幅を求めるにあたり引張材の応力は、梁に作用した実際の応力を代入し $\epsilon_{cs}=0$ とした。

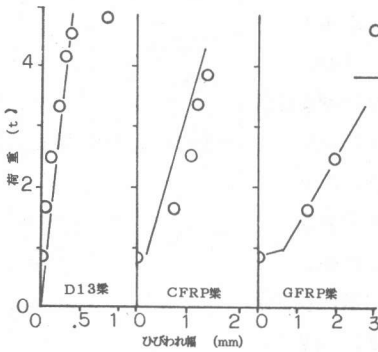


図-6 荷重とひびわれ幅の関係

図中よりFRPC梁に発生するひびわれを、ある程度推定できることが示された。

3-5 梁のたわみ

D13梁に対して、AFRP梁、GFRP梁、CFRP梁は荷重1t程度で梁にひびわれが発生した後たわみ量が著しく増大しているといえる。(図-7)

この各梁に発生した、たわみ量の実測値と、断面二次モーメントを次式のBranson [3]の式より求め、単純梁のたわみ式を用いて

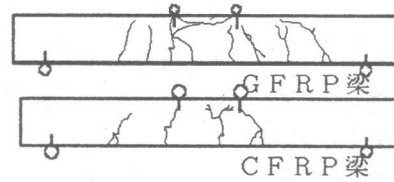


図-4 ひびわれ発生パターン

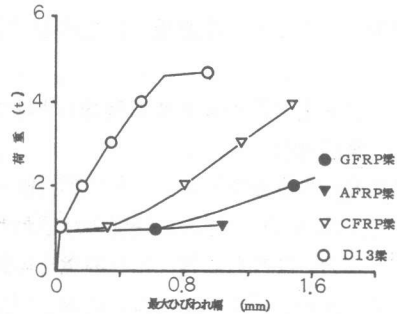


図-5 荷重と最大ひびわれ幅の関係

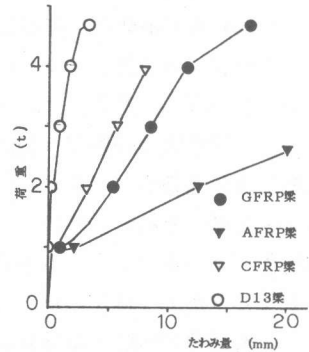


図-7 荷重とたわみ量の関係

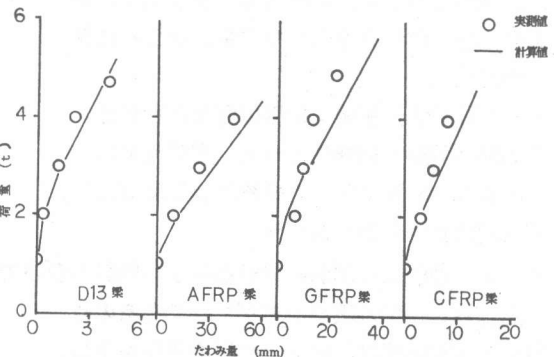


図-8 荷重とたわみ量の関係

算定した、たわみ量の計算値との比較を図

－8に示す。

$$I_e = \left[\left(\frac{M_{cr}}{M_{dmax}} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{dmax}} \right)^3 \right) I_{cr} \right]$$

ひびわれ発生モーメントは実測値とし、ま

た I_{cr} は次式より算定した。

$$I_{cr} = \frac{b x^3}{3} + n A_f (d - x)^2$$

図中より、D13梁、AFRP梁、GFR

P梁、CFRP梁、各々たわみ量の実測値と計算値とが大略合致しており、たわみ量を計算により推定できることがわかった。しかし、破壊近傍において計算値が過大評価となった。これは、梁全スパンに I_e を適用したためと考えられ、今後の研究が必要である。

I_e : 断面二次モーメント

M_{cr} : ひびわれ発生モーメント

M_{dmax} : 作用モーメント

I_g, I_{cr} : ひびわれ発生前後の断面二次モーメント

x : 中立軸からの距離

4. FRPとPPモルタルで補修した梁の性状 - シリーズB -

4-1 実験概要

RC構造物の損傷を想定し、RC梁（図-9）にあらかじめ、鉄筋(D10)の降伏強度の75%（応力2700kg/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、上部RC梁の主筋の応力、ひびわれ幅、たわみ量を低減することを目的にRC梁を、シリーズAで検討したFRP材とPPモルタルを用い補修し（図-9）、静的曲げ性状、疲労曲げ性状を検討した。

- RC供試体の製作：RC梁は、D10 (SD 30) の主鉄筋を引張側に2本、スターラップ(D10)を70mm間隔に配筋し、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート (W/C=60%) を打設し、製作した。(28日間湿潤養生)
- 補修供試体の製作：損傷を与えたRC梁の下面に補強筋AFRP, GFRP, CFRP, 比較のために鉄筋D13をそれぞれ2本配置、ホールアンカー4本で固定した後、PPモルタルで一体化した。(7日間室内養生)
- 静的曲げ試験：荷重は、図-9に示す位置、支点間隔100cm 載荷点幅20cmで載荷した。試験に際して、載荷荷重、主鉄筋及び補強筋の歪、梁中央点のたわみ量、ひびわれ幅を測定した。
- 曲げ疲労試験：荷重位置及び計測は、静的曲げ試験と同様に行った。載荷荷重は、上限2.3t～3.7t下限0.2tの繰り返し載荷とし、載荷速度を約5.0Hzとした。

4-2 静的曲げ試験における破壊形態および耐力

無補修RC梁の破壊荷重が3.8tであるのに対し各種補修梁は6.0t以上の破壊荷重を示し、十分な補修効果が示された（表-4）。破壊

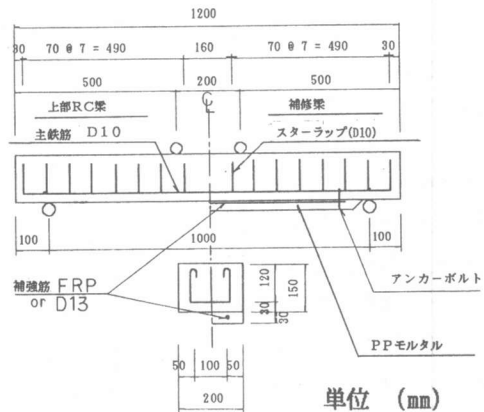


図-9 補修梁形状寸法図

表-4 静的曲げ試験結果

補強筋	破壊荷重 (kg)	備考
D13	7175	せん断破壊
AFRP	6050	曲げ破壊
GFRP	7115	曲げ剥離
CFRP	6300	曲げ剥離
無補修	3833	曲げ破壊

形態は、図-12に示すひびわれ発生状況からも明らかなように、D13補修梁は、最終的に上部RC部分がせん断し、補修部分の剝離破壊をおこした。これは引張剛性の高い補強筋で補修した結果、梁の曲げ剛性が向上し、高荷重に耐え得るようになり、RC梁のせん断耐力が高荷重に耐えきれず破壊したと考えられる。また引張剛性が、高くないCFRP補修梁、GFRP補修梁は、曲げ剝離破壊し、引張剛性の低いAFRP補修梁は、曲げ破壊であった。今後、この引張剛性と破壊形態の力学的説明が課題となる。

4-3 主鉄筋に作用する応力

補修後の上部RC梁の主鉄筋に作用する応力と荷重の関係を図-10に示した。載荷荷重2tで無補修梁の主鉄筋に作用する応力は2300kg/cm²であったが、補修後はAFRP補修梁、GFRP補修梁、CFRP補修梁で74%、55%、52%に、主鉄筋応力が低減し補修効果がかがえた。また図中における実線は弾性理論より求めたD13補修梁、CFRP補修梁の主鉄筋の作用応力計算値である。計算値と実測値がほぼ一致し、なお補修後も弾性理論による推定が可能であると考えられる。

4-4 発生したひびわれ

荷重2.2tで無補修梁に、補修の対象となる0.3mmのひびわれが発生しているが補修することによりAFRP補修梁、GFRP補修梁、CFRP補修梁では0.2mm以下に低減できている(図-11)。この補修効果は引張剛性が大きいほど顕著であり、D13補修梁は、この荷重ではひびわれは発生していない。

補修前に発生させたひびわれと、これに補修後の載荷によって発生したひびわれ(図中太線)を追記し、両者を図-12に比較した。この図より引張剛性の大きなD13補修梁、GFRP補修梁、CFRP補修梁は補修後にさらに新しいひびわれが発生し、既存のひびわれの成長を阻止したものと考えられる。

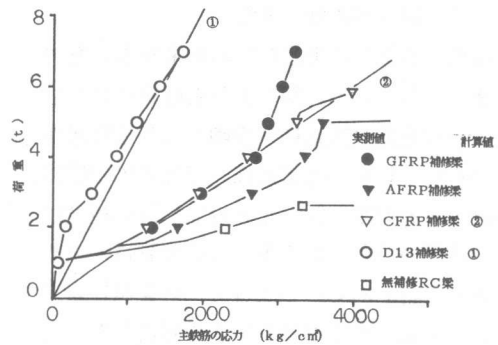


図-10 荷重と主鉄筋応力の関係

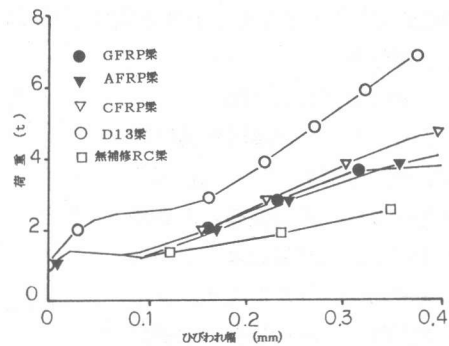


図-11 荷重と最大ひびわれ幅の関係

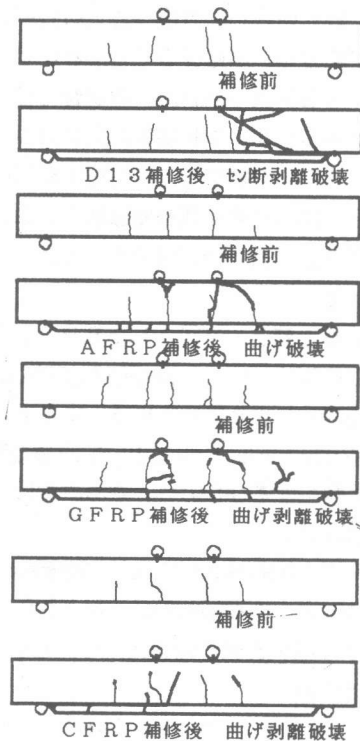


図-12 ひびわれ発生パターン

4-5 補修梁のたわみ量

荷重と補修梁中央点のたわみ量を表したのが図-13である。図中より引張剛性の高いD13補修梁は荷重初期段階から補修効果が現れるが、FRP補修梁は、無補修梁の鉄筋の降伏する荷重2.8t、たわみ量1.5mm程度から補修効果がうかがえる。この実測値によるたわみ量とBransonの式(3-5参照)より求めた断面2次モーメントより算出した、たわみ量との比較を図-14に示す。図中より各種補強筋で補修した後も計算値と実測値がほぼ一致し、Bransonによる算定式がなお有効であることがわかる。

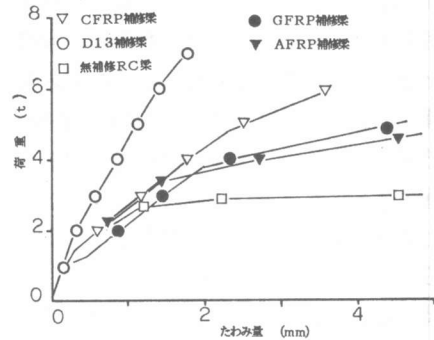


図-13 荷重とたわみ量の関係

4-6 疲労曲げ試験結果

図-15における実線は無補修梁に載荷した上限荷重と繰り返し回数との関係を示した。各補強筋による補修梁はすべてこの関係線より上側に位置し補修効果がうかがえる。また、上限荷重が低い2.5tの場合に引張剛性の高いD13補修梁、CFRP補修梁は、繰り返し回数150万回をこえ引張剛性が高い方が疲労延命が延びることがわかった。しかし、上限荷重の高い3.7tの場合には、この関係はみられず、引張剛性の高いD13補修梁は、AFRP補修梁と同程度の48000回で上部RC部材がせん断剝離破壊し、GFRP補修梁が最も高い12万回であった。

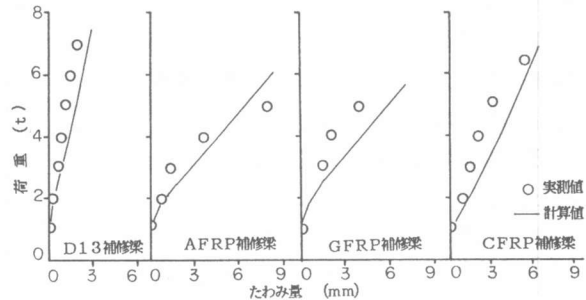


図-14 荷重とたわみ量の関係

5 まとめ

FRPを主筋として製作したFRPC梁の引張筋に作用する応力、及び破壊荷重は、従来の弾性理論により算定できる。また土木学会ひびわれ幅算定式により、発生するひびわれ幅を、さらにBransonの式によって求めた断面2次モーメントを用いてたわみ量を算出できる。さらに、発生するひびわれ、たわみ量は、FRPの引張剛性と相関関係があり、素材の種類に影響されない。

各FRPを補強筋としてRC梁を補修した結果、主鉄筋応力の低減、ひびわれ幅や、たわみ量の減少など十分な補修効果が得られた。また、RC梁を補修した後もなお、RC梁の主鉄筋に作用する応力を弾性理論により、たわみ量をBransonの式を用い算定できた。

6. 参考文献

- [1] 小玉克巳 佐藤真一 他 特殊ポリマーモルタルを使用したRC梁の補修工法 土木学会 第44回年次学術講演会 VI-71
 [2] 土木学会 コンクリート標準示方書 (昭和61年制定)
 [3] 角田与史雄: 曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状 (土木学会論文集 第384号/V-7 1987-8)