

論文

[2098] FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状

正会員 辻 幸和 (群馬大学 工学部)
 正会員 ○ 斎藤 等 (群馬大学 大学院)
 正会員 関島 謙蔵 (清水建設 技術本部)
 小川 広幸 (大都工業 大阪支店)

1. まえがき

鉄筋は、古くからコンクリートに対する優れた補強材として、広く用いられている。しかしながら、コンクリート表面からの塩分の侵入や海砂等に含有されている塩分などによって腐食するため、鉄筋の腐食は構造物の寿命低下の主原因となっている。このような状況に対処するための一つの方法として、腐食を起こさない繊維強化プラスチック(FRP)の補強材が開発され¹⁾²⁾、注目されている。

本研究は、炭素繊維、ガラス繊維および両繊維を、それぞれビニルエステル樹脂中に配置して作製したFRPを補強材として用いたコンクリートはりの曲げおよびせん断性状が、鉄筋コンクリートはりと比較して、補強材の種類ごとにどの程度の水準であるか検討することを目的として、曲げ強度試験を行なった結果を報告するものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料と配合

使用したFRPは3種類で、表-1に示す所定の繊維束数の炭素繊維、ガラス繊維あるいは両者を併用したものをビニルエステル樹脂で被覆し、10cmピッチの格子状に成形したものである。その力学的特性を表-1および図-1に示す。

セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は茨城県鹿島産の陸砂で、比重が2.58、粗粒率が2.55、吸水率が1.4%のもの、粗骨材は栃木県鬼怒川産の碎石で比重が2.71、粗粒率が6.59、吸水率が

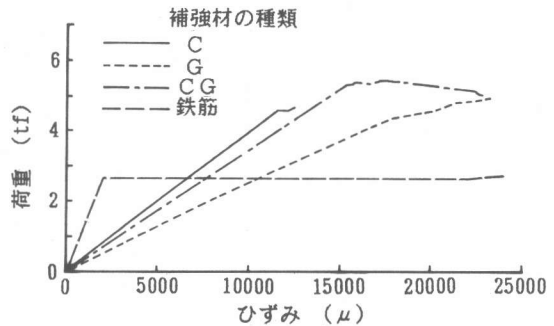


図-1 補強材の荷重-ひずみ曲線

表-1 補強材の力学的性質

補強材の種類	繊維の種類	繊維束の本数(本)	繊維含有率(%)	見かけの断面積(mm ²)			引張耐力(kgf/本)	引張強度、降伏点応力度(kgf/mm ²)	弾性係数(kgf/cm ²)	総断面積×弾性係数(kgf)
				繊維束	樹脂	総断面積				
FRP	C	32	26	14.8	41.6	56.2	4290	76.3	6.73×10 ⁵	3.81×10 ⁵
	G	36	37	31.5	53.6	85.1	4880	57.3	2.95×10 ⁵	2.50×10 ⁵
	CG	C=9,G=36	C=4,G=30	35.8	69.1	104.7	4960	47.4	3.34×10 ⁵	3.48×10 ⁵
鉄筋	(SD35)					71.3	3820	37.7	1.86×10 ⁶	1.33×10 ⁶

0.5%のものをそれぞれ用いた。配合は、水セメント比が60%、単位水量が $150\text{kg}/\text{m}^3$ 、細骨材率が46%、スランブが9.5cm、空気量が3.5%とした。また、減水剤をセメントの1.67%を使用した。

コンクリートの練りませには、容量が1500 Lの強制練りミキサを用い、1000 Lを練りませた。供試体は材令1日にキャッピング、材令2日で脱型後、材令28日まで湿布養生をした。

2.2 はり供試体および強度試験方法

はり供試体は、幅が15cm、高さが15cmの矩形断面で、図-2に示すように引張側に補強材を配置したものである。下縁から補強材までの距離が25mmのA断面、および15mmのB断面の2種類を用いた。なお図-2には、FRPの格子交差部も示している。

曲げ強度試験は、AおよびB断面につき、それぞれ表-1に示す鉄筋を含めた、4種類の補強材を用いた合計8体について行った。ひびわれ幅は、供試体側面の補強材の重心位置に10cm間隔で7区間にわたり鋼球を埋め込んだチップを接着し、コンタクト型ひずみ計で測定した。なお、はり供試体と同様に養生したコンクリートの圧縮強度は $250\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、ヤング係数は $2.52 \times 10^5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ であった。

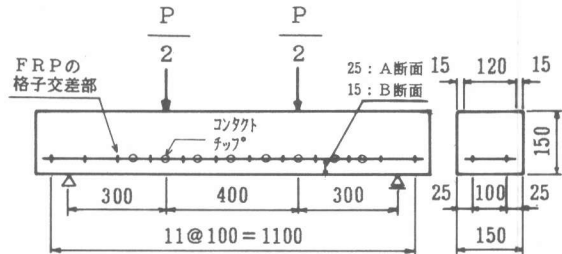


図-2 断面諸元と載荷方法

3. 曲げひびわれ発生荷重と補強材のひずみ

曲げひびわれ発生荷重と、その時のコンクリートの引張縁の応力度である曲げひびわれ応力度を表-2に示す。ひびわれの発生荷重は、コンクリートの引張縁に貼ったワイヤストレーンゲージのひずみの急変点より求めた。

FRPを用いたはりの曲げひびわれ発生荷重は、A、Bいずれの断面内でも、FRPの種類による差はほとんどないことがわかる。しかしながら、鉄筋で補強した場合に比べ、A断面において20~30%小さく、さら

にかぶりの小さいB断面では半分以下になっているはりもあった。したがって、FRPをスラブでなくはりに用いた場合は、かぶりを極端に減少させることは、曲げひびわれの発生に対しては不利であることが考えられる。

この原因として、FRPが格子状になっていることが考えられる。すなわち、はりの軸方向に対して垂直の向きにも、F

表-2 曲げひびわれ発生荷重および斜めひびわれ発生荷重

断面	補強材の種類	曲げひびわれ		斜めひびわれ				曲げ引張破壊荷重 計算値 (tf)
		荷重 (tf)	曲げひびわれ発生応力度 (kgf/cm^2)	荷重 (tf)	せん断応力度 (kgf/cm^2)			
					実測値	計算値	Eiを考慮した計算値	
A	C	0.7	19	3.4	9.1	7.2	5.1	6.7
	G	0.8	21	3.4	9.1	8.2	4.5	7.7
	CG	0.8	21	4.0	10.7	8.8	5.0	8.5
	鉄筋	1.0	27	4.8	12.8	7.8	7.8	4.0
B	C	0.6	16	3.3	8.1	7.0	5.0	7.3
	G	0.5	13	3.5	8.6	8.0	4.3	8.4
	CG	0.5	13	3.5	8.6	8.6	4.9	9.2
	鉄筋	1.1	30	4.8	11.9	7.6	7.6	4.4

注：せん断応力度の計算には、有効断面 (bd) を用いた。
また、部材係数 $\gamma_b = 1.0$ である。

FRPが交差して配置されているため、スラブと異なり図-2の断面諸元を持つはりでは、その部分のコンクリートに応力集中が生じたためと思われる。実際、FRPでは格子交差部の近傍においてひびわれが発生し進展していた。

低荷重領域における、補強材の表面に貼付したワイヤストレインゲージにより求めた、ひずみと荷重との関係を図-3に示す。この図より、鉄筋を使用した場合は、曲げひびわれの発生と補強材のひずみの増加の急変点がほぼ一致している。これに対してFRPを用いた場合は、曲げひびわれが発生してもその直後は、補強材のひずみの増加率にほとんど変化はなく、鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ発生荷重を少し超えた、荷重が1.2~1.3tfまで上昇すると、急激なひずみの増加を示すことがわかる。この現象はB断面でも同様であった。

曲げひびわれは発生しているが補強材のひずみは急激な増加を示さない、という不安定な領域がなぜ存在するかについては、FRPが繊維と樹脂の複合体であることに起因すると考えられるが、今回の実験では十分に説明することはできなかった。

また、補強材のひずみが急激な増加を示す前の段階においては、補強材の種類にかかわらず同一の荷重に対する補強材のひずみはほぼ等しいことも認められるため、この段階においては、はりを補強材の種類にかかわらず全断面有効と考えて、補強材のひずみを算定しても良いと思われる。

破壊近傍までの補強材のひずみと荷重の関係を図-4に示す。また図中には、コンクリートの引張力を無視し、換算断面を用いた弾性計算による鉄筋コンクリートと同様の方法で求めた計算値を破線で示す。曲げひびわれ発生後は、補強材の弾性係数と断面積の積が小さいほど、補強材のひずみの増加が大きい。これは、B断面についても同様であった。

4. 曲げひびわれ幅

AおよびB両断面の平均曲げひびわれ幅と荷重との関係を図-5に示す。平均曲げひびわれ幅とは最大から3本の曲げひびわれ幅の平均値である。なおFRPで補強したはりでは、格子交差

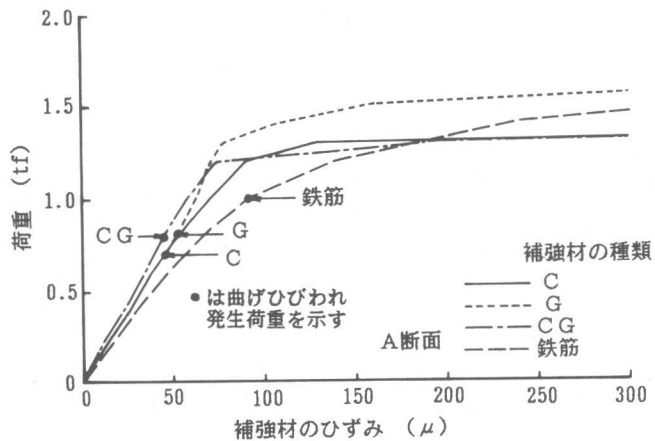


図-3 低荷重領域における補強材のひずみ

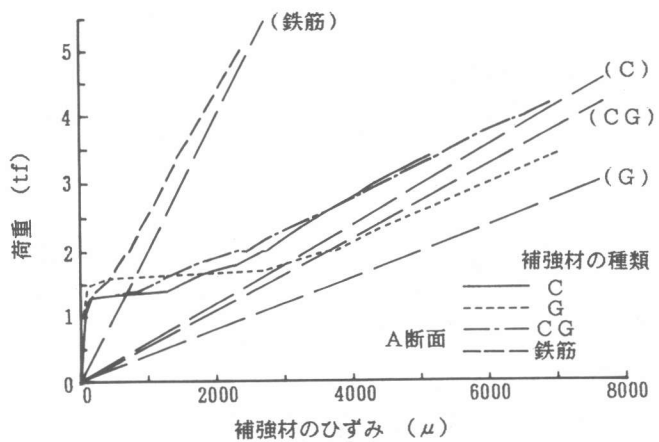


図-4 補強材のひずみと荷重の関係

部の近傍で曲げひびわれが複雑に分岐した例も生じたため、1区間(10cm)につき曲げひびわれは1本とした。また図中には、土木学会コンクリート標準示方書(RC示方書)に示された式を用いたB断面の計算値を破線で示した。式中的かぶりは、FRPを円形断面に換算して求めた値を用いた。

FRPを用いたはりの平均曲げひびわれ幅は、RCはりと比較して、FRPの引張剛性が小さいため大きくなっている。これは、同一の荷重に対応する引張ひずみが大きくなっているためである。また、計算値に対する実測値の割合はFRPで補強したはりでは、RCはりと比較して大きくなっている。これは曲げひびわれ発生荷重の場合と同様に、FRPの格子交差部の存在が原因と思われる。

また図-6に、補強材のひずみと平均曲げひびわれ幅の関係をプロットしたものを示す。FRPを用いた場合も鉄筋と同様にほぼ同一直線上に分布しており、両者は比例関係にあると考えられる。また、その直線の傾きはFRPの種類にかかわらずほぼ等しいが、鉄筋に比べて同じか、もしくは若干大きいようである。

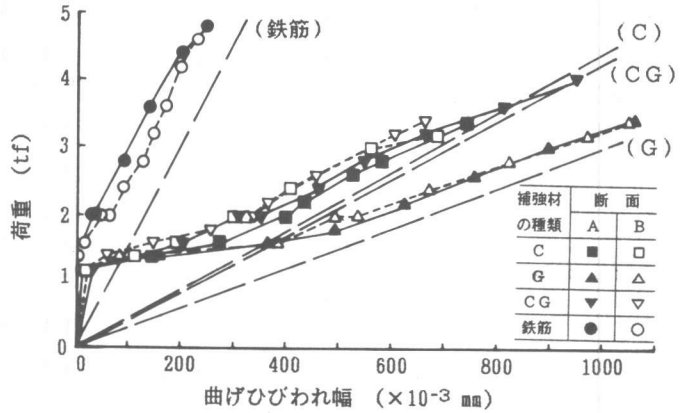


図-5 曲げひびわれ幅と荷重の関係

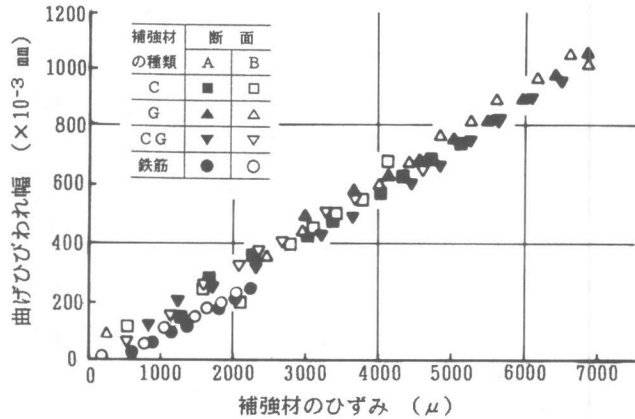


図-6 曲げひびわれ幅と補強材のひずみの関係

表-3 残留ひずみと残留ひびわれ幅

断面	補強材の種類	補強材のひずみ			平均曲げひびわれ幅		
		2.0tf 時のひずみ (μ)	残留ひずみ率 (%)	再載荷時のひずみ増加率 (%)	2.0tf 時のひびわれ幅 (10 ⁻³ mm)	残留ひびわれ幅率 (%)	再載荷時のひびわれ幅増加率 (%)
A	C	2703	29.7	1.4	1182	33.8	1.3
	G	3635	33.2	3.4	1723	37.4	0.9
	CG	2287	31.7	7.2	955	33.5	9.1
	鉄筋	679	28.1	9.3	89	31.5	31.5
B	C	2118	36.3	6.5	898	35.1	9.1
	G	3451	26.3	4.0	1483	35.0	9.3
	CG	2084	31.0	3.9	961	39.8	5.6
	鉄筋	739	26.1	5.5	152	27.6	31.6

5. 残留ひずみおよび残留ひびわれ幅

曲げ強度試験時に、コンクリートの引張力を無視した弾性計算による引張鉄筋の応力度が、約 1900kgf/cm^2 に相当する 2.0tf まで載荷した後、一旦除荷した。除荷時の補強材のひずみおよびコンクリートの平均ひびわれ幅の、除荷前の荷重 2.0tf の時におけるそれらに対する割合を、それぞれ残留ひずみ率、および残留ひびわれ幅率と定義して、表-3 に示す。FRPの種類が相違しても残留ひずみ率にはほとんど変化がないと認められるが、鉄筋に比べてFRPを用いた方が残留ひずみ率が少し大きくなり、最高で10%増となっている。また全体的に、鉄筋とFRPの差は、A断面の方がB断面よりも少ないことが認められた。これらの傾向は、残留ひびわれ幅率についてもほぼ同様であった。

除荷前の 2.0tf 時に対する再載荷 2.0tf 時の補強材のひずみおよび平均ひびわれ幅の比率を、それぞれ補強材のひずみの増加率および平均ひびわれ幅の増加率と定義する。補強材のひずみの増加率は、鉄筋とFRPとの間にほとんど差がない。それに対して平均ひびわれ幅の増加率は、鉄筋に比べてFRPを用いた場合が20%程度小さくなることが認められた。

6. たわみ

図-7 に、B断面のはり中央でのたわみを示す。曲げひびわれ発生後の補強材のひずみ等と同様に、補強材の弾性係数と断面積の積が小さいほど曲げひびわれ発生後のたわみの増加が大きいことが確かめられた。

7. 持続載荷供試体の曲げ性状

持続載荷を受けるFRPで補強したはりの曲げ性状の経時変化を求める実験も継続している。ここでは、材令28日の持続載荷開始時に、PC鋼棒とバネで図-2の支点位置において相対する2本のはりを緊張し(図-8参照)、はり中央部にコンクリートの引張力を無視した弾性計算による引張鉄筋の応力度が 2000kgf/cm^2 に相当する引張力を与えた場合に生じた、補強材のひずみ、平均曲げひびわれ幅および曲率をまとめて、表-4 に示す。前述のA断面の曲げ強度試験の結果も比較のため示している。

載荷時に設定値より少し大きな引張力で緊張した後調整したため、曲げ強度試験に比べ少し大きな値を示しているが、各補強材における3体の間のばらつきも小さく、補強材のひずみ、平均曲げひびわれ幅および曲率のいずれについても、補強材の弾性係数と断面積の積との間に上述の現象が等しく認められる。

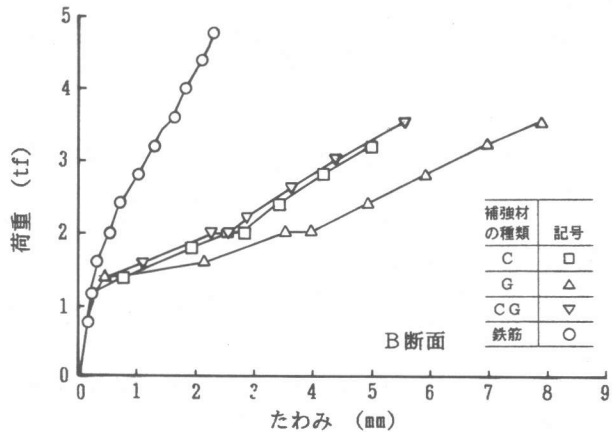


図-7 はり中央のたわみと荷重の関係

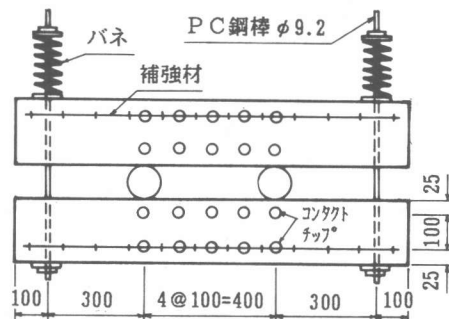


図-8 持続載荷試験方法

8. せん断耐力

すべてのはりの破壊形式は、斜めひびわれの発生後、直ちに破壊に至ったせん断破壊であった。斜めひびわれ発生荷重とそのせん断応力度の実測値と計算値を、表-2に示す。計算に用いた式は、RC示方書に示された式において、部材係数 γ_b を1.0とおいた場合である。また補強材の断面積は表-1の総断面積を用いた。

実測値と計算値を比較すると、RCについては両断面とも実測値は十分安全側であるが、FRPを用いた場合については計算値との差は小さく、B断面の炭素繊維とガラス繊維を併用したFRPを用いた場合(CG)のように両者が等しくなるケースも生じた。そこで、RC示方

書の式に補強材の弾性係数を考慮することにした。そして、断面積にFRPと鉄筋との弾性係数の比を乗じた、 $A_s(E_i/E_s)$ を換算断面として計算した。その計算値も表-2に示す。この計算方法により、FRPを使用した場合も、RCと同様に計算値は十分安全側となった。

9. 結論

FRPで補強したコンクリートはりの曲げ強度試験を行い、その性状を鉄筋で補強したRCはりと比較検討した。本研究で以下に示す知見が得られた。

- 1) FRPを補強材として用いた場合、曲げひびわれ発生荷重は、RCはりに比べて少し小さくなる。かぶりが極端に小さいと低下率大きい。
- 2) 曲げひびわれが発生してもFRPのひずみは直ちに急激な増加を示さず、RCはりに曲げひびわれが発生する荷重程度まで、ひずみの増加率はRCはりの場合とほぼ等しい。
- 3) 除荷後再載荷を行った場合の、再載荷時におけるFRPで補強したはりの平均曲げひびわれ幅の増加率は、RCはりに比べて20%程度小さい。
- 4) はりのせん断耐力を、土木学会コンクリート標準示方書の式で、FRPの断面積を弾性係数を考慮した換算断面を用いて算定すると、RCはりとほぼ同程度の安全率を得ることができる。

[参考文献]

- 1) 小沢一雅, 関島謙蔵, 岡村 甫: FRPで補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状、第9回コンクリート工学年次論文報告集 第2号、1987、pp.269-274
- 2) Tadashi FUJISAKI, Yasuhiro MATSUZAKI, Kenzo SEKIJIMA, Hajime OKAMURA: New Material for Reinforced Concrete in Place of Reinforcing Steel Bars, IABSE SYMPOSIUM PARIS-VERSAILLES 1987, Concrete Structures for the Future Vol.55, pp.413-418

表-4 持続載荷試験開始時のはりの曲げ性状

補強材の種類	補強材のひずみ (μ)	平均曲げひびわれ幅 ($\times 10^{-3}\text{mm}$)	曲率 ($10^{-6}/\text{cm}$)
C	(2931) 3971 3950 3902 } 3941	(423) 487 580 547 } 538	(319) 422 414 401 } 412
G	(4015) 5515 5603 5518 } 5545	(611) 732 793 739 } 754	(396) 559 552 485 } 532
CG	(2673) 4371 3960 4219 } 4183	(398) 501 509 672 } 561	(273) 426 352 496 } 425
D	(792) 1229 1064 1118 } 1137	(48) 114 117 103 } 111	(51) 110 83 71 } 88

注: ()内の数値は曲げ強度試験時の値