

論文

[1139] FRP で補強したコンクリートはりの持続載荷後の力学的特性

正会員 辻 幸和 (群馬大学 工学部)
 正会員 斎藤 等 (埼玉県 松伏町役場)
 正会員 ○ 中島 規道 (群馬大学 大学院)
 正会員 関島 謙蔵 (清水建設 技術本部)

1. まえがき

鉄筋は、コンクリート構造物の強度ならびに靱性を発現させ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、鉄筋が塩化物などによって腐食すると、その補強効果は損なわれて鉄筋コンクリート構造物の寿命低下の主原因となる。このような状況に対処する一つの方法として、耐食性に優れている繊維強化プラスチック (FRP) が開発され、実用されつつあるものの、この種の補強材を用いたはりが持続荷重を受けた場合の変形ならびにその後の力学的特性については、ほとんど研究されていない。本研究では、炭素繊維、ガラス繊維および両繊維を併用したものを、それぞれビニルエステル樹脂中に配置して成形した FRP を補強材として用いたコンクリートはり (以下 FRP はりと称する) に、まず、1 年間にわたって各種環境下で持続荷重を載荷してその変形性状を検討する。そして、除荷した後に曲げ強度試験を行って、はりの補強材の引張ひずみ、曲げひびわれ幅、たわみ、およびせん断耐力を RC はりと比較検討する。

2. 実験方法

2. 1 使用材料と配合

使用した FRP は 3 種類で、ガラス繊維 (G)、炭素繊維 (C)、両者を併用したもの (CG) 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。なお、比較のための RC はりには D10 の鉄筋を用いた。それらの力学的特性を表-1 と図-1 に示す¹⁾。

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 (比重 = 2.58, F.M. = 2.55, 吸水率 = 1.4%)、粗骨材は栃木県鬼怒川産の碎石 (比重 = 2.71, F.M. =

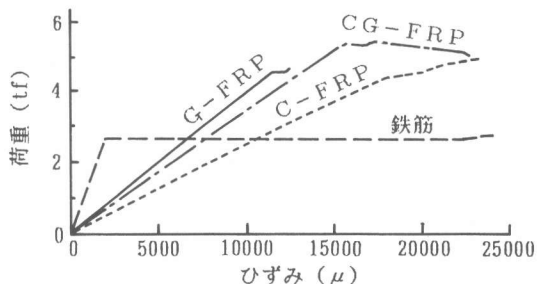


図-1 補強材の荷重—ひずみ曲線

表-1 各補強材の力学的特性

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, 降伏点強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張剛性* (kgf)
				繊維束	樹脂	総断面積				
FRP	G	36	37	31.5	53.6	85.1	4880	5730	0.295 × 10 ⁶	0.250 × 10 ⁶
	CG	C=9, G=36	C=4, G=30	35.6	69.1	104.7	4960	4740	0.334 × 10 ⁶	0.348 × 10 ⁶
	C	32	26	14.6	41.6	56.2	4290	7630	0.673 × 10 ⁶	0.381 × 10 ⁶
鉄筋	(SD35 D10)	—	—	—	—	71.3	3820	3770	1.86 × 10 ⁶	1.33 × 10 ⁶

* 引張剛性 = 総断面積 × 弾性係数

6.59, 吸水率=0.5%, 最大寸法=15mm)をそれぞれ用いた。配合は、W/Cを60%, 単位水量を150kg/m³, 細骨材率を46%, スランプを10cm、空気量を3.5%とした。また、適量の減水剤を使用した。コンクリートの練りまぜには容量が1500ℓの強制練りミキサを用い、1バッチの量を1000ℓとして練りまぜた。

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。なお、材令28日における圧縮強度は250kgf/cm²で、その後、恒温恒湿室内で1年間空气中に放置した圧縮強度は306kgf/cm²であった。

2.2 はり供試体および試験方法

はり供試体は、幅が15cm、高さが15cmの矩形断面で、引張縁から25mmの位置に補強材を2本配置したものである。

持続載荷試験は、載荷荷重の大きさをRCはりについてコンクリートの引張力を無視して弾性計算により求めた引張鉄筋の応力度にして0kgf/cm²から2000kgf/cm²に変えた、恒温恒湿室内

放置のシリーズ1からシリーズ4と、載荷荷重はシリーズ4と同じで材令28日より屋外に放置したシリーズ5、屋外に放置して1日1回3%濃度の食塩水を散布したシリーズ6（以後、屋外放置、食塩水散布と称する）の合計6シリーズにつき、補強材を4種類に変化させた合計24体のはりについて行った²⁾。これらの一覧を表-2に示す。そして、図-2に示すようにPC鋼棒とばねを用いて、供試体2体を一組にして載荷し、1年間にわたり補強材のひずみおよびはりの平均曲率の経時変化を測定した。なお、シリーズ2, 3, 4では、載荷7日後にFRPはりで約92%の緊張力に低下したためPC鋼棒の再緊張を行った。

曲げ強度試験は、1年後に持続荷重を解放した供試体に対して、持続載荷試験と同じ載荷位置で行い、補強材のひずみ、はり側面の補強材重心位置での曲げひびわれ幅、およびはり中央部のたわみをそれぞれ測定した。

3. 持続載荷時の変形状

3.1 経時変化

図-3に、補強材に貼付したワイヤストレーンゲージによるシリーズ4のひずみの経時変化を示す。FRPでは格子交差部間の中央部分に貼付したものの値である。なお、載荷200日以後の値は信頼できないと判定して省略した。この図から、材令が経過した後についても、補強材の引張剛性が大きいほど、持続載荷を受けるはりの補強材のひずみは小さいことが認められる。

表-2 持続載荷試験の荷重と設置環境

シリーズ	荷重 (kgf)	鉄筋の応力度 (kgf/cm ²)	設置環境
1	0	0	20±2°C, 60% R.H. 恒温恒湿室内放置
2	1070	1000	
3	1600	1500	
4	2140	2000	
5	2140	2000	屋外放置
6	2140	2000	屋外放置, 食塩水散布

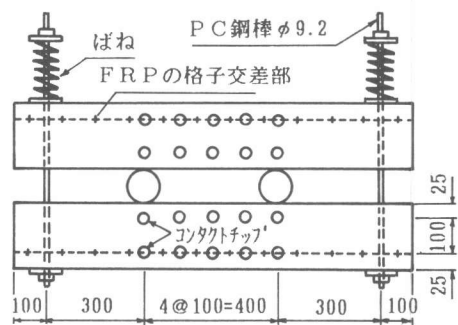


図-2 持続載荷試験方法

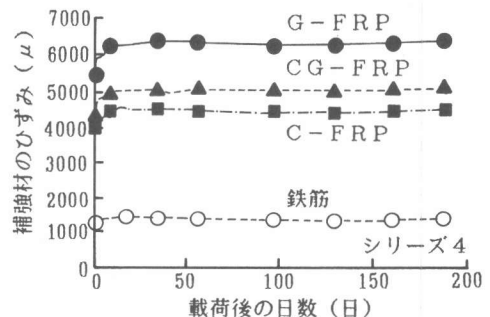


図-3 補強材のひずみの経時変化

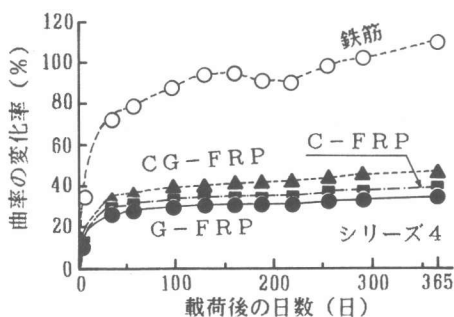


図-4 平均曲率の変化率の経時変化

表-3 持続載荷1年後の曲率と除荷時の復元力

シリーズ	1年後の曲率 ($10^{-6}/\text{cm}$)				復元力 (%)			
	G	CG	C	鉄筋	G	CG	C	鉄筋
1	12	10	12	18	—	—	—	—
2	264	357	165	99	20.7	40.7	23.2	19.0
3	439	432	306	139	55.9	50.7	55.5	25.6
4	751	624	588	231	59.7	60.6	53.9	36.6
5	628	669	507	182	45.7	44.7	49.2	26.9
6	683	523	553	142	46.6	46.9	42.2	18.6

これは、シリーズ3でも同様であった。しかしながら、載荷荷重の一番小さいシリーズ2においては、CG-FRPはりを除く他のはりには、載荷直後に曲げひびわれの著しい発達が生じていなかったため、上記の現象は認められなかった。

ゲージ長が10cmのコンタクト型ひずみ計で測定した平均曲率についても、補強材のひずみと同様に、補強材の引張剛性が大きいほど小さくなることが認められた。平均曲率の載荷直後からの変化量を載荷直後の平均曲率で割った値を、曲率の変化率として図-4に示す。この図より、FRPはりの曲率の変化率は、RCはりと比較して半分以上と、小さいことが認められる。この現象は他のシリーズでも同様であった。本研究で用いたFRPは格子状のため、曲げひびわれの発生が格子交差部に集中する¹⁾。それに加えて、鉄筋と比較して引張剛性が小さいため、発生した曲げひびわれは圧縮縁近傍まで大きく進展してしまう。また、FRPとコンクリートとの付着力は主として格子交差部において確保される。これらが原因で、RCはりに比較して、材令経過時のひびわれの進展に伴う曲率の増加が減少し、曲率の変化率も小さくなったものと推測できる。

また、載荷荷重が等しいシリーズ4, 5, 6では、載荷直後におけるひずみおよび曲率とも、シリーズ間で20%程度のばらつきが認められた。ひびわれの発生位置と、せん断スパンにおけるひびわれの有無による影響と思われる。

3. 2 除荷時の性状

表-3に、持続載荷1年後の曲率の値と、それを基準にしたときの除荷時の曲率の復元力を示す。設置環境による影響は、持続載荷中は確認できなかったが、除荷時の性状において認められた。すなわち、この表より、RCはり、FRPはりともに屋外に設置(シリーズ5)することにより、復元力は減少していることが明らかである。屋外放置に加えて食塩水散布のシリーズ6において、FRPはりではC-FRPを用いたはりを除き、シリーズ5との差はほとんど認められないのに対し、RCはりでは復元力が著しく減少している。これは、ひびわれ部の鉄筋が腐食・膨張していたことに起因すると思われる。なお、シリーズ2においてはCG-FRPはりのみが、3.1で述べたように載荷直後の曲げひびわれの発生が著しかったため、復元力は他のはりの約2倍となっている。

4. 補強材のひずみ

曲げ強度試験における、C-FRPはりの補強材のひずみと荷重の関係を図-5に示す。補強材のひずみは、次節で述べる曲げひびわれ幅と異なり、除荷後の残留分を考慮していない。

載荷荷重が小さかったシリーズ2において、曲げひびわれの急激な進展に伴うひずみの急変が認められる。既に持続載荷によってひびわれが発生しているにもかかわらず、その挙動は持続載

荷を受けなかったはり¹⁾や載荷荷重が 0tf のシリーズ 1 と似ている。なお、持続載荷試験時に既に曲げひびわれの進展が大きかった CG-FRP はりでは、ひずみの急変はなかった。

持続載荷荷重の比較的大きかったシリーズ 3, 4 では、ひずみの急変は認められず、ひずみの増加は直線的である。しかしながら、直線の傾きはシリーズ 1, 2 より大きくなっている。その傾向は、補強材の弾性係数が大きいものほど顕著だった。そして、弾性係数の小さい G-FRP を用いたはりでは、シリーズごとの傾きはほぼ一定であった。

なお、持続載荷荷重が大きかったシリーズ 3 から 6 の RC はりでは、はりの破壊時に鉄筋の引き抜けが認められた。FRP はりでは、FRP の引き抜けは生じなかったことを勘案すると、本研究で採用したはりの断面形状寸法および載荷方法では、過去に受けた持続荷重が大きい場合には、RC はりの鉄筋の付着が低下することを示唆するものである。

5. 曲げひびわれ幅

図-6 には、G-FRP はりの平均曲げひびわれ幅と荷重の関係を示す。平均曲げひびわれ幅とは、最大から 3 番目までのひびわれ幅の平均値である。この曲げひびわれ幅は、除荷時に残留した分を考慮してあり、図中の荷重が 0tf のときの値がそれに相当する。また、図中の矢印は持続載荷試験時の初期載荷荷重を表している。

シリーズ 2 では、補強材のひずみと同様に、荷重が 1.2tf 程度までは、曲げひびわれ幅の増加率は小さい。しかしながら、持続荷重を受けなかったはり¹⁾と比較すると、曲げひびわれが十分に進展した状態となる前の段階では剛性の低下が認められ、曲げひびわれ幅の増加率は大きい。一方、荷重が増加して曲げひびわれが十分に発達した状態における曲げひびわれ幅の増加率は、持続荷重を受けなかったはり¹⁾とほぼ等しい値となっている。シリーズ 2 におけるこの傾向は、C-FRP はりや RC はりでも同様であった。

持続載荷試験時にひびわれが十分に発達していたシリーズ 3, 4 では、曲げひびわれ幅の増加は直線的である。また、載荷荷重の大きさによる違いは、ほとんど認められない。この傾向は、他の FRP はり、シリーズ 4 の RC はり、およびシリーズ 2 の CG-FRP はりについても同様に認められた。例外としてシリーズ 3 の RC はりでは、シリーズ 2 と同様にある程度荷重が大きくなると、増加率が大きくなる挙動を示した。RC はりは補強材の引張剛性が大きいため、持続荷重の載荷中に FRP はりのような極端なひびわれの進展は生じなかった。そのため、曲げ強度

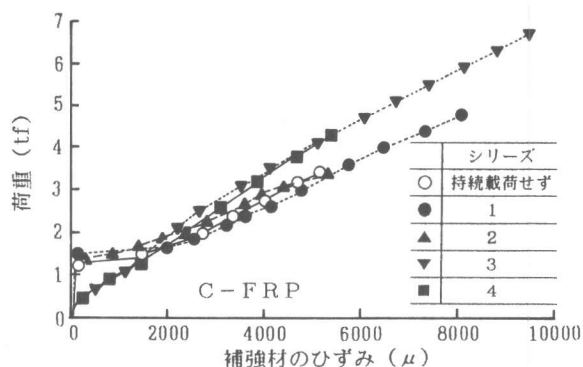


図-5 補強材のひずみと荷重の関係

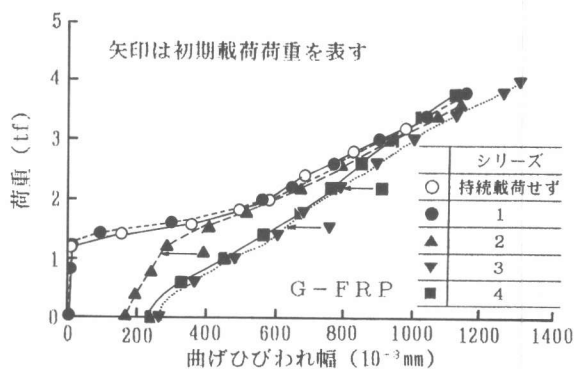


図-6 平均曲げひびわれ幅と荷重の関係

試験時にひびわれの新たな進展が生じ、見かけ上、曲げひびわれ幅の増加率が急増する荷重段階が現れたのである。

以上のことから、FRPはりおよびRCはりとも、持続荷重荷重の大きさよりも、曲げひびわれの著しい進展が持続荷重試験時に生じたか否かが、その後の曲げ強度試験時の供試体の曲げ性状に大きな影響を与えることになるものと思われる。

持続荷重試験時の設置環境が異なるCG-FRPはりの平均曲げひびわれ

幅と荷重の関係を、図-7に示す。屋外に放置したシリーズ5、6では、荷重が1tfから1.5tf程度までの曲げひびわれ幅の増加は緩やかで、恒温恒湿室内放置のシリーズ4との残留ひびわれの差を減少する形となっている。荷重がそれ以上大きくなると、各シリーズの増加率はほぼ一定となった。また、シリーズ5と食塩水散布のシリーズ6の曲線はよく似ており、食塩水散布は残留ひびわれ幅に影響を与えたにとどまっている。残留ひびわれ幅がほぼ等しかったG-FRPはりでは、両者の曲線はほぼ一致していた。

なおRCはりでは、曲げひびわれ幅の増加率が等しくなる荷重は、3tfから3.5tf程度であり、FRPはりと比較して大きかった。

6. たわみ

C-FRPはりのたわみと荷重の関係を、図-8に示す。また、図中には引張側のコンクリートを無視した計算値も示した。両者の関係は、図-5に示した補強材のひずみと荷重の関係に、大略において一致している。破壊近くにおいては斜めひびわれの発生のため、たわみが急激に大きくなっているはりもある。

7. せん断耐力

はりの斜めひびわれ発生荷重と破壊荷重、破壊時のせん断応力度の実測値と計算値を、表-4に示す。計算値は土木学会コンクリート標準示方書（設計編）の棒部材の設計せん断耐力 V_{cd} をはりの幅 b と有効高さ d の積で除したものである。部材係数 r_b は1.0とおき、補強材の断面積としては表-1の総断面積を用いた。また表中には、補強材の弾性係数を考慮した換算断面積を用いて求めた¹⁾せん断応力度の計算値も示した。FRPはりの破壊形式は、シリーズ3のC-FRPを用いたはりが、せん断スパン内の補強材の破断によるものであった他は、すべて一般的なせん断破壊であった。それに対してRCはりでは、予想通りの曲げ引張破壊もしくは高持続荷重を受けた場合の補強材の引き抜けによる破壊であった。

GおよびC-FRPはりでは、持続荷重により破壊時のせん断応力度が、ほとんどのはりでわ

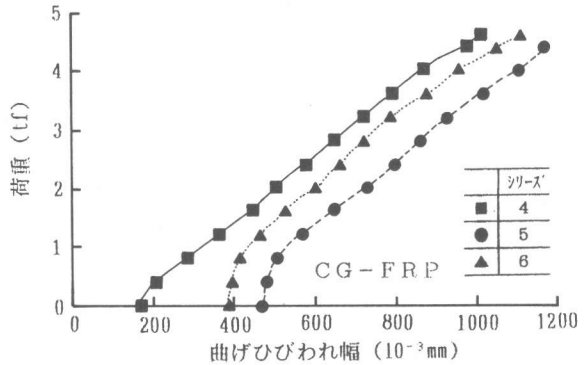


図-7 平均曲げひびわれ幅と荷重の関係 (設置環境を変化)

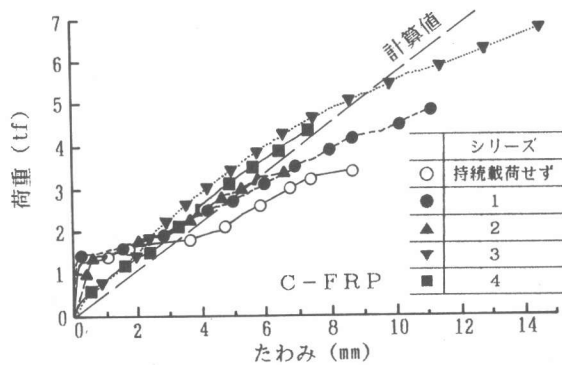


図-8 はり中央部のたわみと荷重の関係

ずかではあるが向上しているものの、C G - FRP はりでは、持続荷重によるせん断耐力の向上がほとんど認められない。全体としては、持続荷重荷重の大きさとせん断耐力との間に明確な関係は認められない。また、設置環境による影響では、シリーズ 5, 6 の C - FRP はりの破壊荷重がシリーズ 4 と比較して大きくなっている。同様の傾向が、他の FRP はりでもほぼ認めらる。コンクリートの圧縮強度が屋外の放置により増加したためと考えられる。

8. 結論

FRP で補強したコンクリートはり (FRP はり) に、1 年間にわたり各種環境下において持続荷重を載荷するとともに、除荷後に曲げ強度試験を行い、曲げおよびせん断性状を RC はりと比較検討した。本研究により、以下に示す知見が得られた。

1) 持続荷重試験における設置環境が厳しくなると、除荷時の曲率の復元力は減少するが、FRP はりの減少量は RC はりより小さい。

2) FRP はりでは、持続荷重試験時に曲げひびわれが十分に進展した状態になったか否かが、その後の曲

げ強度試験におけるはりの補強材のひずみ、曲げひびわれ幅、およびたわみに大きな影響を与える。

3) 屋外で持続荷重することにより、はりの残留ひびわれ幅は増加するが、その後の曲げ強度試験では低荷重において曲げひびわれ幅の増加が減少する傾向を示す。なお、屋外放置における食塩水散布の有無の相違は、曲げ強度試験ではほとんど認められなかった。

4) 持続荷重により、G および C - FRP はりのせん断耐力が低下することはないようである。

[謝辞]

本研究の実施にあたり、御協力を頂いた樺沢規之、八木橋浩隆 両氏に感謝致します。

[参考文献]

- 1) 辻, 斎藤, 関島, 小川: 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、コンクリート工学年次論文報告集 第10巻 第3号, 1988, pp. 547~552
- 2) 辻, 斎藤, 関島: 持続荷重を受ける FRP で補強したコンクリートはりの変形性状、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集 第5部, 1988, pp. 658~659

表-4 斜めひびわれ発生荷重とせん断応力度

補強材	シリーズ	斜めひびわれ発生荷重 (tf)	破壊荷重 (tf)	せん断応力度 (kgf/cm ²)			曲げ引張破壊荷重の計算値 (tf)
				実測値	計算値	計算値・Ef考慮	
G	※	3.4	3.4	9.1	8.2	4.5	7.8
	1	3.9	3.9	10.4	8.8	4.8	7.8
	2	3.8	3.8	10.1			
	3	4.1	4.1	10.9			
	4	3.8	3.8	10.1			
	5	3.6	3.6	9.6			
	6	4.8	4.8	12.8			
CG	※	4.0	4.2	11.2	8.8	5.0	7.8
	1	4.1	4.1	10.9	9.4	5.3	7.8
	2	3.8	3.8	10.1			
	3	3.9	3.9	10.4			
	4	4.3	4.6	12.3			
	5	4.0	4.4	11.7			
	6	4.5	4.7	12.5			
C	※	3.4	3.4	9.1	7.2	5.1	6.8
	1	4.2	4.8	12.8	7.7	5.5	6.8
	2	3.4	3.4	9.1			
	3	4.8	6.7	17.9			
	4	4.3	4.3	11.5			
	5	5.7	5.7	15.2			
	6	5.8	6.2	16.5			
鉄筋	※	4.8	5.1	13.6	7.8	7.8	4.1
	1	—	5.2	13.9	8.3	8.3	4.1
	2	—	5.3	14.1			
	3	—	5.3	14.1			
	4	—	5.4	14.4			
	5	—	5.2	13.9			
	6	—	5.4	14.4			

※印は、持続荷重されなかったはり¹⁾である。