

論 文

[1140] 暴露したFRPで補強したコンクリートはりの力学的特性

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)

八木橋浩隆 (ドーピー建設工業)

林 耕四郎 (大日本硝子工業開発部)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の寿命低下の主原因となる鉄筋の腐食に対処する一つの方法として、耐食性の高い繊維強化プラスチックス(FRP)が開発され、実用されつつある。FRPの使用に際しては、製造から使用時までの大気中においてその品質が劣化する懸念があること、また、塩分の侵入といった厳しい環境下においてFRPを用いた構造物の耐久性の確認が十分でないことなどの問題点がある。コンクリート部材の補強材としてのFRPの耐久性に関する研究は報告されていない。

本研究では、これらの問題点を解明する基礎データを得ることを目的に、1年間と短期間ではあるが、鉄筋および3種類のFRPを屋外放置ならびに屋内放置に加え食塩水を散布する厳しい環境下でそれぞれ暴露したものを補強材として用いたコンクリートはりを作製して曲げ強度試験を行い、FRPは厳しい環境下に暴露しても、コンクリートはりの補強材としての品質の低下がないこと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、ガラス繊維(G), 炭素繊維(C), 両者を併用したもの(CG)を、ビニルエスチル樹脂で被覆し、10cmピッチの格子状に成形したものである。なお、比較のための鉄筋にはSD35のD10を用いた。それらの力学的特性を表-1と図-1に示す¹⁾。

3種類のFRPおよび鉄筋は、室温20°C、湿度60%RHの恒温恒湿室内での放置(以下室内放置と称する)、屋外放置、屋内放置に加え3%の食塩水を1日1回散布する方法(以下屋外・食塩水と称する)の3種類の環境下において、それぞれ1年間暴露した後、コンクリートはりの補強材として用いた。一番厳しい環境下で暴露した鉄筋は、発錆による断面欠損等により、それを用いたはりの曲げ引張破壊荷重が約20%低下した。

セメントは普通ポルトランドセメントを、骨材は群馬県渡良瀬川産の川砂(比重=2.59, F.M.

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				
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 × 弹性係数

= 2.73, 吸水率 = 3.06%) と川砂利(比重 = 2.66, F.M. = 6.60, 吸水率 = 1.39%, 最大寸法 = 20mm)をそれぞれ用いた。配合は、W/Cを60%, 単位水量を165kg/m³, 細骨材率を45%, スランプを10cm、空気量を4%とした。また、適量のA-E減水剤を使用した。

コンクリートの練りませには、容量が100ℓの強制練りミキサを用いた。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日まで水中養生をした。なお、材令28日におけるコンクリートの圧縮強度は平均で284kgf/cm²であり、合計7バッチの練りませバッチ毎の強度と平均値の差は、最大で27kgf/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、引張側に補強材を配置したものである。引張縁から補強材の重心位置までの距離を、A断面で25mm、B断面で15mmとした(図-2参照)¹⁾。B断面で補強材のかぶりを約1cmに採ったのは、FRPの耐食性を積極的に利用することを目的としたためである。4種類の補強材に対して、暴露環境を3種類に変えた合計22体を作製した。

曲げ強度試験では、補強材のひずみ、曲げひびわれ幅、はり中央部のたわみをそれぞれ測定した。曲げひびわれ幅は、供試体側面の補強材の重心位置に10cmピッチで鋼球を埋め込んだチップを貼付して、コンタクト型ひずみ計で測定した。なお、曲げひびわれが測定区間内に発生するよう、ゲージ長の中央にFRPの格子交差部がくるようにチップを貼付した。

なお、暴露による補強材の品質の変化は、補強材の引張試験を行うことにより推測できるが、FRPは特にコンクリートとの付着強度の確保が重要視されており、はり供試体を作製して、その品質の変化の有無を検討した。

3. 暴露後の補強材の外観

鉄筋、FRPとも、室内放置したものの外観は、製造直後のものとほとんど同じであった。屋外放置した鉄筋は、節の部分にさびが発生した。更に食塩水を散布した鉄筋は、表面全体にさびが発生して表面が剥離し、節の角が丸くなっていた。打込みの際には、ワイヤブラシで剥離した部分を削り落として用いた。

FRPは、屋外放置により表面のつやが失われ、被覆材であるビニルエステル樹脂の品質が幾分変化したものと思われる。屋外・食塩水で暴露したFRPも、屋外放置とほぼ同様な外観であった。

4. 曲げひびわれ発生荷重

曲げひびわれ発生荷重を表-2にまとめて示す。曲げひびわれの発生荷重は、コンクリートの引張縁に貼付したワイヤストレインゲージのひずみの急変点、および補強材のひずみの急変点の

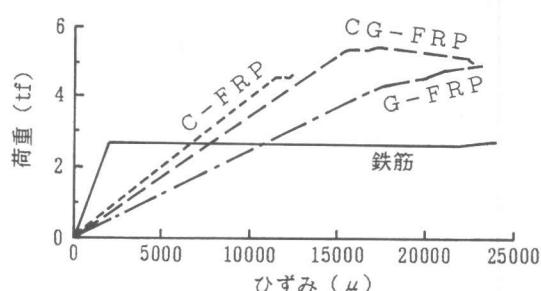


図-1 補強材の荷重—ひずみ曲線

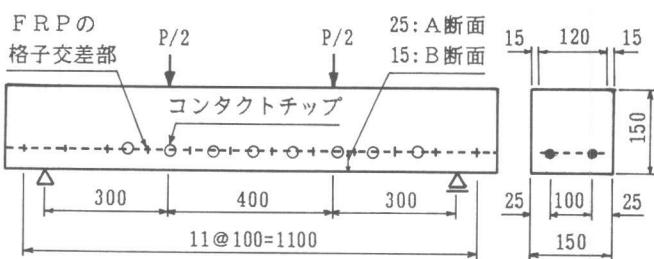


図-2 断面諸元と載荷方法

2種類の方法によりそれぞれ求めた。

既に報告したように¹⁾、暴露しないFRPを補強材に用いたはりの引張縁のひずみより求めた曲げひびわれ発生荷重は、RCはりより小さくなる傾向があり、この傾向はかぶりの小さいB断面ほど顕著である。今回の暴露したFRPを用いたはりにおいても、引張縁のひずみより求めた曲げひびわれ発生荷重と、補強材のひずみより求めたそれとの間にずれが生じた。FRPを補強材に用いたはり（以下、FRPはりと称する）では、暴露の有無にかかわらず、格子交差部付近のコンクリートの応力集中により、RCはりよりも小さい荷重で曲げひびわれが発生するものの、それが直ちに補強材のひずみの急変につながらないのである。そして、RCはりの曲げひ

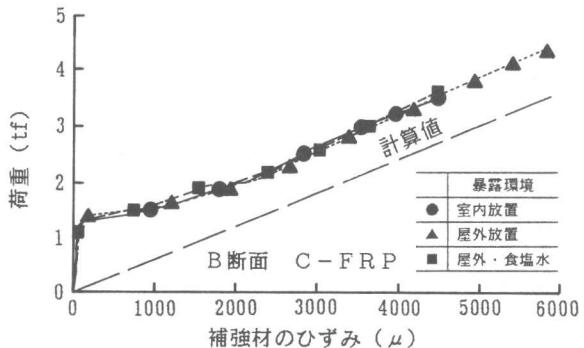


図-3 補強材のひずみと荷重の関係

表-2 曲げひびわれ発生荷重およびせん断耐力

断面の種類	補強材の種類	暴露環境	曲げひびわれ発生荷重 (tf)		せん断耐力				曲げ引張破壊荷重の計算値 (tf)	
			引張縁のひずみより	補強材のひずみより	斜めひびわれ発生荷重 V (tf)	せん断応力度** (kgf/cm ²)				
							実測値	計算値	計算値 ¹⁾ Ef考慮	
A	G	室内放置	0.9	1.3	3.4	3.6	9.6	8.7	4.7	7.8
		屋外放置	0.9	1.1	3.2	3.2	8.5	8.5	4.6	7.8
		屋外・食塩水	0.7	1.4	3.0	3.3	8.8	8.7	4.7	7.8
	CG	室内放置	0.9	1.4	3.2	3.5	9.3	9.3	5.3	7.8
		屋外放置	1.0	1.4	4.0	4.0	10.7	9.1	5.1	7.8
		屋外・食塩水	0.8	1.3	3.2	4.2	11.2	9.3	5.2	7.8
	C	室内放置	1.0	1.3	3.4	4.0	10.7	7.6	5.4	6.8
		屋外放置	0.6	1.2	3.4	3.8	10.1	7.4	5.3	6.8
		屋外・食塩水	0.7	1.4	3.1	3.3	8.8	7.5	5.4	6.8
B	鉄筋	室内放置	1.4	1.4	—	5.6	14.9	8.1	8.1	4.1
		屋外放置	1.3	1.5	—	5.1	13.6	8.1	8.1	4.1
		屋外・食塩水	1.3	1.3	—	4.4	11.7	8.1	8.1	4.1
	G	室内放置	0.6	1.3	3.0	3.4	8.4	8.2	4.4	8.4
		屋外放置	0.7	1.3	3.3	3.8	9.4	8.2	4.5	8.4
		屋外・食塩水	0.7	1.5	3.0	3.8	9.4	8.6	4.7	8.4
	CG	室内放置	0.7	1.4	3.1	3.8	9.4	8.8	5.0	8.5
		屋外放置	0.5	1.3	3.6	3.7	9.1	8.8	5.0	8.5
		屋外・食塩水	0.7	1.3	3.6	3.7	9.1	9.2	5.2	8.5
	C	室内放置	0.7	1.4	3.5	3.5	8.6	7.1	5.1	7.3
		屋外放置	0.7	1.2	3.7	4.3	10.7	7.2	5.1	7.3
		屋外・食塩水	0.8	1.3	3.4	3.6	8.9	7.5	5.4	7.3
	鉄筋	室内放置	1.0	1.2	—	6.0	14.8	7.9	7.9	4.4

* 図-2を参照

** せん断応力度 $\tau = V / (2bd)$ V : 破壊荷重 b : はりの幅 d : はりの有効高さ

びわれ発生荷重と同程度まで荷重が増加すると、曲げひびわれが圧縮縁近傍まで急激に進展し、それに伴い補強材のひずみが急激に増加した。

F R P はり、R C はりのいずれのはりも、室内放置、屋外放置および屋外・食塩水と暴露環境が悪化しても、曲げひびわれ発生荷重はほぼ等しく、補強材を暴露したことによる影響はほとんど認められなかった。

5. 補強材のひずみ

B断面のC-F R P はりにおける補強材のひずみと荷重の関係を、図-3に示す。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計算値も示した。室内放置、屋外放置、屋外・食塩水とも、破壊時までほぼ等しいひずみと荷重の関係を示している。

A断面のC-F R P およびB断面のG-F R P とCG-F R P はりにおいては、同一荷重時のひずみが設置環境により若干異なる現象が認められた。しかしながら、このようなはりでも、曲げひびわれが十分に進展した状態においては、補強材のひずみと荷重との関係を示す直線部分の傾きは、いずれの暴露環境におけるF R P はりでもほぼ等しかった。したがって、補強材のひずみの差は、主として曲げひびわれ発生箇所の相違による影響であり、異なる暴露環境下において、F R P が暴露により劣化したとは思われない。

R C はりの鉄筋のひずみと荷重の関係を、図-4に示す。室内放置と屋外放置の差はほとんどないが、屋外・食塩水の鉄筋を用いたはりでは、ひびわれが進展した状態において直線部分の傾きは小さくなり、腐食による鉄筋の断面積の減少が認められる。そして、破壊荷重は約20%減少している。屋外暴露の鉄筋も暴露期間をより長期にすれば、さびの進行により屋外・食塩水と同様の結果になるものと思われる。

6. 平均曲げひびわれ幅

図-5には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、上位3本の曲げひびわれ幅の平均値である。

F R P はりでは、図に示した通り暴

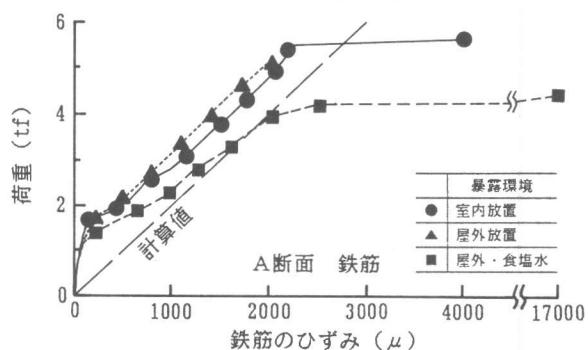


図-4 鉄筋のひずみと荷重の関係

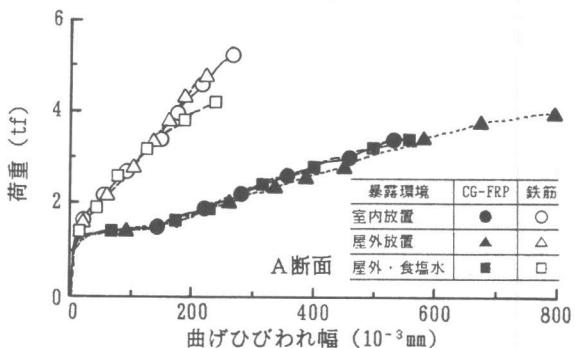


図-5 平均曲げひびわれ幅と荷重の関係

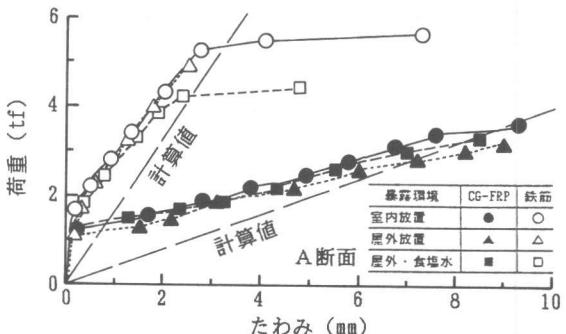


図-6 はり中央部のたわみ

露環境の違いによる影響は認められない。一方、屋外・食塩水の鉄筋を用いたRCはりは、上述のように鉄筋のひずみでは暴露環境による違いが認められるものの、曲げひびわれ幅では破壊近傍以外は他の暴露条件のはりとの相違は明確ではない。これは、腐食による鉄筋断面積の減少が一様ではなく部分的に異なっていたことにより、ひずみのように補強材のある断面の性状を示す値と、曲げひびわれ幅のようにある区間の性状を示す値との間に差が生じたものと思われる。

7. たわみ

はり中央部のたわみと荷重の関係を、図-6に示す。たわみについても、FRPはりでは暴露環境の影響は認められない。また、RCはりでも、食塩水散布の影響は、破壊荷重が小さい分だけ破壊近傍におけるたわみは大きくなっているものの、小さい荷重段階では平均曲げひびわれ幅と同様に明確な違いは認められない。

8. 除荷と再載荷による影響

曲げ強度試験時には、コンクリートの引張力を無視した弾性計算によるRCはりの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平均曲げひびわれ幅の、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。RCはりおよびFRPはりとも、暴露環境の違いによる影響は明確には認められない。また、室内放置の補強材を用いたはりの残留ひびわれ幅率は、FRP

表-3 除荷時と再載荷時の挙動

はりの方がRCはりより大きくなる傾向が認められた。この傾向はB断面の方が顕著であり¹⁾、全体に約10%増加している。なおB断面では、残留ひずみ率についても同様の傾向が認められる。

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曲げひびわれ幅の比率を、それぞれの増加率と定義する。FRPはりでは、ばらつきが大きく明確な傾向が認められないが、RCはりでは、屋外・食塩水で暴露した鉄筋を

断面の種類	補強材の種類	暴露環境	補強材のひずみ			平均曲げひびわれ幅		
			2.0tf時の値(μ)	残留ひずみ率(%)	再載荷時の増加率(%)	2.0tf時の値(mm)	残留ひびわれ幅率(%)	再載荷時の増加率(%)
A	G	室内放置	2962	32.2	11.2	0.531	38.2	6.4
		屋外放置	3261	31.2	4.5	0.531	37.5	4.7
		屋外・食塩水	3250	27.6	9.3	0.485	41.0	9.1
	CG	室内放置	1722	37.6	7.1	0.233	35.6	5.6
		屋外放置	1929	44.1	8.9	0.242	32.6	4.5
		屋外・食塩水	1842	41.9	6.2	0.269	35.7	0.7
	C	室内放置	1529	28.2	9.8	0.273	35.9	11.0
		屋外放置	2530	26.8	4.1	0.291	27.1	1.7
		屋外・食塩水	2068	38.9	4.0	0.272	33.5	6.3
B	鉄筋	室内放置	440	31.8	11.6	0.038	34.2	21.1
		屋外放置	365	38.4	10.4	0.044	34.1	22.7
		屋外・食塩水	733	34.7	8.3	0.043	34.9	9.1
	G	室内放置	2036	41.2	16.1	0.388	34.8	7.0
		屋外放置	3290	29.5	6.3	0.575	33.9	2.4
		屋外・食塩水	3048	33.1	7.9	0.421	38.5	5.9
	CG	室内放置	2206	31.5	6.0	0.269	34.6	5.2
		屋外放置	1418	44.8	13.6	0.232	31.0	0.4
		屋外・食塩水	1600	37.3	9.4	0.242	38.0	5.8
C	C	室内放置	1991	35.5	7.2	0.296	33.8	3.4
		屋外放置	2108	37.8	6.4	0.303	34.0	6.3
		屋外・食塩水	1798	17.9	10.0	0.316	33.5	2.5
	鉄筋	室内放置	459	27.5	8.1	0.034	23.5	8.8

用いた場合において、ひずみと平均ひびわれ幅の増加率が減少することが認められる。特に、平均曲げひびわれ幅の増加率は顕著であり、他の暴露条件のはりの半分以下となっている。その原因として、節の腐食によりコンクリートとの付着力が減少したことおよび断面積の減少等を考えられるが、明確なものではない。

9.せん断耐力

F R P はりはせん断破壊で、R C はりは曲げ引張破壊でそれぞれ破壊した。表-2には、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示している。計算値は、土木学会コンクリート標準示方書（R C 示方書）〔設計編〕に示されている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 の積で除した値である。なお、部材係数 γ_b は1.0とおき、また補強材の断面積は表-1の総断面積を用いた。

F R P はりの斜めひびわれ発生荷重および破壊荷重に及ぼす補強材の暴露の影響は、ばらつきがあり明確ではない。それに対して、屋外・食塩水で暴露した鉄筋を用いた R C はりの曲げ引張破壊荷重は、腐食による鉄筋の断面積の減少により、他の暴露環境のものと比較して約20%減少している。

また、既に報告したように¹⁾、F R P はりでは、破壊時のせん断応力度の計算値と実測値の差は小さく、B断面のC G - F R P はりのように危険側となるケースも生じている。表中には、補強材の断面積を弹性係数を考慮した換算断面積とした計算値¹⁾も示している。この計算方法により、F R P はりの計算値は十分に安全側となる。

10.結論

各種の環境下で1年間にわたって暴露したF R P と鉄筋をそれぞれ補強材として用いたコンクリートはりの曲げ強度試験を行い、その力学的特性を比較検討した。本研究により、F R P の悪環境下における耐久性が、以下のとおり認められた。

1) 暴露によるF R P の外観上の変化は、屋外放置で表面のつやがなくなる程度であり、更に3%の食塩水を1日1回散布しても屋外放置との違いは認められなかった。これに対して、鉄筋は、このような厳しい環境下においては、表面が剥離するほどの腐食を生じた。

2) F R P を1)に示した厳しい環境下で暴露しても、それを補強材として用いたはりの曲げひびわれ発生荷重、曲げひびわれ幅、たわみおよびせん断耐力の劣化は認められなかった。屋外放置により表面の樹脂のつやが失われたが、応力を主として負担する繊維の品質は低下しなかったものと思われる。

3) 屋外放置に加えて食塩水を散布した鉄筋を補強材に用いたはりでは、他の暴露条件の鉄筋を用いたはりと比較して、同一荷重での鉄筋のひずみは大きくなり、曲げ引張破壊荷重も約20%減少した。

[謝辞]

本研究の実施にあたり、御協力を頂いた樺沢規之氏に感謝致します。

[参考文献]

- 1) 辻, 斎藤, 関島, 小川: F R P 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