

CFRP ロッドで補強したコンクリートはりの強度と変形特性について

鳥取大学 正員 西林 新蔵 鳥取大学 正員 井上 正一
 鳥取大学 学員 ○伊南 仁樹 関東レ 角田 敦
 ㈱長谷工コーポレーション 清水 貴博

1. まえがき

塩害やアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の耐久性低下が社会問題となる中で、高耐久性構造物を作ることが強く要望されている。このような要請に応える構造物として、ここでは、CFRP ロッドで補強したはり（CFRP はり）を採り上げ、その強度特性と変形特性を検討した結果について述べる。

2. 実験概要

実験計画を表-1 に示す。表中、実験線で囲まれた RC と CFRP はりは後述する

表-2 補強筋の材料特性

	CFRP ロッド	鉄筋
E_p	130000	210000
f_{py}	$\phi 5$: 18000 $\phi 8$: 14400	D13: 3520 D16: 3490 D19: 3320

E_p : 弾性係数 f_{py} : CFRP ロッドは引張強度、鉄筋は降伏点強度 (kgf/cm²)

表-1 実験計画

載荷方法	配置	f_c	主補強筋量 A_s (cm ²)		スパン間隔 (mm)	
			CFRP	RC	CFRP	RC
単補強	566	371	3 ϕ 5	2 D 13	71	100
			(0.585)	(2.53)		
	566	371	2 ϕ 8	2 D 16	83	125
			(1.00)	(3.97)		
複補強	566	371	3 ϕ 8	2 D 19	71	83
			(1.50)	(5.73)		
	566	371	2 ϕ 8	2 D 16	83	125
			(1.00)	(2.53)		

載荷方法 (一: 一方向 正: 正負交番)
 f_c : コンクリート強度 (kgf/cm²)

る終局耐力の計算値がほぼ等しくなるように主補強筋量を選定したものである。補強筋の材料特性を表-2 に示す。試験は、図-1 に示すようなスパン 150cm の 3 等分点載荷で行い、一方向載荷試験においては 0.5tf 刻みの一様漸増載荷を行なった。なお、RC はりにおいては、降伏後スパン中央たわみを 1mm ずつ増加させるたわみ制御による試験を行なった。一方、正負交番載荷試験は、スパン中央たわみの大きさを $\pm k \delta_y$ (δ_y : 一方向載荷試験で得られた同一はりの降伏時のたわみ、 $k=1, 2, \dots$) と順次 k の値を増加させ、各繰返し変位水準 ($k \delta_y$) ごとに 5 回の載荷を行なった。この場合、CFRP はりにおいては、降伏点がないため、ほぼ等しい終局耐力を持つ RC はりと同一の変位水準を設定した繰返し載荷を行なっている。

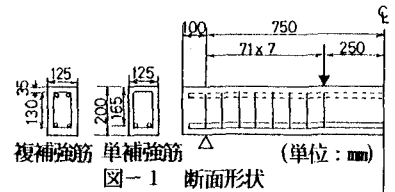


図-1 断面形状

3. 結果と考察

3.1 終局耐力 表-3 に一方向載荷試験における曲げ終局耐力と破壊様式を示す。表の計算値は、平面保持の仮定と図-2 に示すような応力～ひずみ関係を用い、コンクリートの引張抵抗は無視して算定したものである。すなわち、図-2 に示す応力～ひずみ関係において、表-2 の材料定数を用い、RC はりにおいては上縁コンクリートひずみ ϵ'_c が

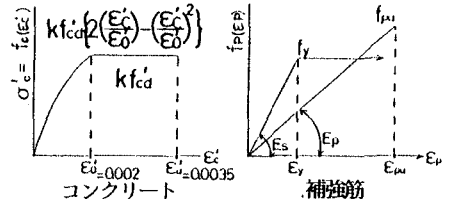


図-2 応力～ひずみ曲線

表-3 RC はり、CFRP はりの終局耐力と破壊様式 (一方向載荷)

RC はり	鉄筋量 (cm^2)	f_c	終局耐力					破壊様式		
			実験値 P_u (tonf)	計算値		P_u (T)	P_u (2T)	実験		
				(1) (tonf)	(2) (tonf)			実験	予測	予測
単	D13	371	7.00	5.53	5.46	1.27	1.28			
補強筋	(2.53)	566	7.08	5.65	5.61	1.25	1.26			
	D16	371	10.25	8.29	8.14	1.24	1.26			
はり	(3.97)	566	10.40	8.59	8.49	1.21	1.22			
	D19	371	13.07	10.95	10.67	1.19	1.22			
複補強	(5.73)	566	13.20	11.50	11.32	1.15	1.17			
	D16	371	10.20	8.56	8.45	1.19	1.21			
	(3.97)	566	10.24	8.94	8.78	1.15	1.17			

CFRP はり	補強筋量 (cm^2)	f_c	終局耐力					破壊様式		
			実験値 P_u (tonf)	計算値		P_u (T)	P_u (2T)	実験		
				(1) (tonf)	(2) (tonf)			実験	予測	予測
単	3 ϕ 5	371	6.24	6.45	6.37	0.97	0.98	2F	F	F
補強筋	(0.585)	566	6.30	6.60	6.55	0.95	0.96	2F	F	F
	2 ϕ 8	371	10.80	8.37	7.89	1.29	1.37	2F	F	C
はり	(1.00)	566	10.30	8.64	8.55	1.19	1.20	2F	F	F
	3 ϕ 8	371	14.92	10.16	9.15	1.47	1.63	C	C	C
複補強	(1.50)	566	15.47	12.57	11.96	1.23	1.29	C	F	C
	2 ϕ 8	371	11.10	8.60	8.27	1.29	1.34	1F	F	C
	(1.00)	566	10.70	8.83	8.81	1.21	1.21	1F	F	F

f_c : コンクリート強度 (kgf/cm²) 破壊様式 F: 曲げ引張破壊 C: 片端破壊 1F, 2FはそれぞれCFRP ロッド1本あるいは2本が破断したことを示す。

$\varepsilon'_c = \varepsilon'_u (=0.0035)$ 、CFRPはりにおいては、 $\varepsilon'_c = \varepsilon'_u$ （曲げ圧縮破壊（ $\varepsilon_p < \varepsilon_{pu}$ ）のとき）ないしは $\varepsilon_p = \varepsilon_{pu}$ （曲げ引張破断（ $\varepsilon'_c \leq \varepsilon'_u$ ）のとき）なる条件より算定したものである。なお、計算値(1)、(2)はそれぞれ図-2の $\varepsilon'_c \sim \sigma'_c$ 関係における $k f'_c$ において $f'_c = f'_c$ を用い、 k の値に $k=1$ と 0.85 を用いた結果を示している。表より、計算値(1)、(2)は、RCはりにおいては、破壊様式が同一で終局耐力の差も小さいが、一方、CFRPはりにおいては、終局耐力にかなりの差異が表われ、かつ破壊様式も異なっていることがわかる。この場合、CFRPはりについては、終局耐力と破壊様式の両観点から、 $k=1$ を用いた計算値(1)の方が計算値(2)よりも終局耐力比（ $P_u/(1)$ ）が1に近く、かつ破壊様式も実験とより一致しているため、以下においては計算値(1)の結果で議論することにする。

RCはりの終局耐力比（ $P_u/(1)$ ）は1.15～1.27の範囲にあること、鉄筋量の少ないほど大きくなることは従来から明らかにされている事実と一致している。一方、CFRPはりの（ $P_u/(1)$ ）は、補強筋が曲げ引張破断したはりに対しては0.95～1.29、曲げ圧縮破壊したはりに対しては1.23～1.47の範囲にあり、CFRPはりの曲げ終局耐力は、土木学会の方法による $k=0.85$ の代わりに $k=1$ を用いることによってかなりの精度で推定できる。なお、CFRPはりの終局耐力比は、コンクリート強度が小さいほど、さらに補強量が多い（圧縮破壊を起こしやすい）ほど大きな値となっている。

3.2 荷重～補強筋ひずみ

図-3に、一方向載荷試験における荷重と補強筋ひずみとの関係を示す。CFRPはりの荷重～ひずみ関係は、ひびわ

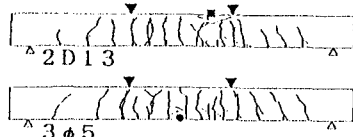


図-4 ひびわれ性状

れ発生前、直後のひずみのジャンプ、ジャンプ後から破断時までの3段階の直線で近似できる。なお、CFRPロッドのひずみは、破壊近傍においてほぼ破断伸度（1～1.2%）に近い値まで達していること、補強筋量の少ないものほどひずみのジャンプ量が大きく、荷重の増加に伴う補強筋ひずみの増加も大きくなること、がわかる。

3.3 ひびわれ性状

図-4に破壊後のひびわれ状況の一例を示す。終局耐力がほぼ等しいはりにおいては、CFRPロッドを用いた方が通常の鉄筋を用いた場合よりもひびわれ分散性はやや悪くなる。

3.4 荷重～たわみ関係

一方向載荷・正負交番載荷試験における荷重～スパン中央たわみ関係を図-5、図-6(a)、(b)に示す。図-5より、RCはりにはかなり大きな塑性域をもつのに対して、CFRPはりのそれはきわめて弾性的な挙動をすること、RCはりの終局時のたわみは鉄筋量の減少に伴って大きくなるが、CFRPはりのそれは補強材量が多くなるに伴って（曲げ圧縮破壊をする傾向が大きい）大きくなることが特徴的である。また、図-6(a)、(b)より、CFRPはりにはRCはりに比べて復元力特性はきわめて大きい、エネルギー消費能力が小さく、耐震構造として用いるには問題があるといえる。しかし一方において、CFRPロッドを用いたはり、繰返し荷重を受けた場合にも材料が弾性的な挙動を示し、かつ残留たわみも小さいことから、耐疲労性に優れた構造物を作りうる可能性があり、また、耐力はそれほど必要としないが、耐腐食性が要求される構造物への使用増加が考えられる。

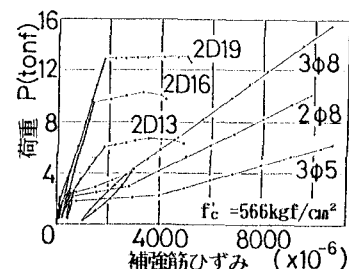


図-3 荷重～補強筋ひずみ関係

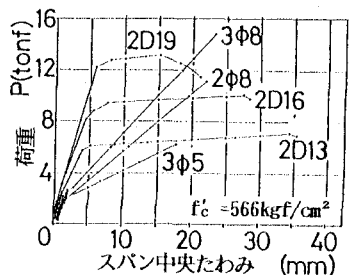
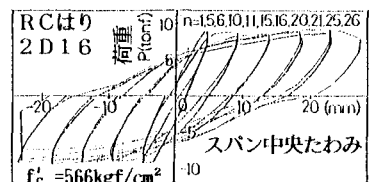
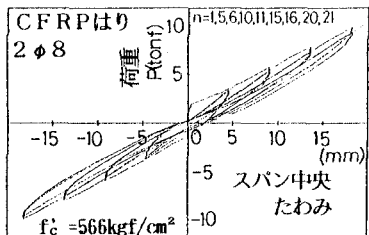


図-5 荷重～たわみ関係（一方向）



(a)



(b)

図-6 荷重～たわみ関係（正負交番）