

論文 CFRP 板で補強した RC はりの疲労強度と変形性状

井上 正一*1・西林 新蔵*2・黒田 保*3・小俣 富士夫*4

要旨：CFRP板の接着による補強が、既に高い信頼度でもって採用されている鋼板接着補強工法と同様の補強法となりうるか否かを、RCはり供試体を用いた静的載荷および疲労試験を通して検討した。その結果、CFRP板を接着することによって、(1)同一荷重作用時のたわみやひびわれ幅、さらには既埋設主鉄筋の応力を小さくできる、(2)静的終局耐力および疲労強度を増加できる、などの補強効果を明らかにしている。また、(3)CFRP板接着補強工法が鋼板接着工法と同様の補強法となりうることにも言及している。

キーワード：CFRP板接着補強工法、ひびわれ幅、たわみ、繰返し荷重、疲労強度

1. はじめに

阪神大震災復旧も含め、低経済安定成長期における社会基盤としての土木構造物への最適投資方策を考えた場合、ある種の構造物においては、取り壊して、①高耐久性の、あるいは②補修・補強を前提とした通常(性能)の、コンクリート構造物を新設・構築するのが有利となる場合や、取り壊さず③補修・補強を施して再使用することが最適となる場合も想定される。その場合、方策決定の判断材料として、ハード面からは、現有耐力や余寿命をも含めた構造物の健全度評価やその診断技術、さらには補修・補強工法の確立が極めて重要となってくる。ここでは、③に関連する補強の問題を採り上げ、通常のRCはり下面にCFRP板を樹脂のみ(最も簡単な方法)で接着したはりと、樹脂接着とアンカボルトを併用してCFRP板を固定・定着したはりに対して、その静的および疲労荷重下での強度と変形特性を比較・検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類と作製

供試はりの断面寸法は図-1に示す通りで、はりの種類としては、有効高さ $ds=16.5\text{cm}$ の主鉄筋 SD345, 断面積 $As=2D16=3.97\text{cm}^2$ を配置したRCはりと、このはりの下面にT社製二次元等方メッシュの炭素繊維成型板(CFRP板: $12.5 \times 120\text{cm}$, 厚さ 2.3mm)を有効高さ $dp=20.35\text{cm}$ 位置に接着したはり(以下CFRPはりと称す)である。このCFRPはりは2種類で、CFRP板をエポキシ樹脂のみで接着したAはりと、CFRP板をエポキシ樹脂と長手軸方向4カ所(43.3cm間隔)で設置したアンカボルト(以下、アンカと略称する)とを併用して接合したBはりである。使用材料の物理的性質を試験実施時(材齢3ヵ月以上)のコンクリート強度とともに表-1に示す。

RCはりと強度測定用の円柱供試体は、打設翌

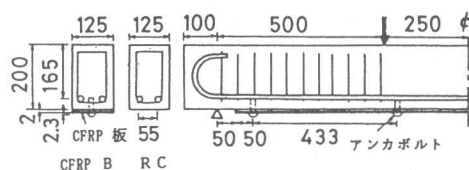


図-1 はり断面の詳細

- *1 鳥取大学助教授 工学部土木工学科, 工博(正会員)
- *2 鳥取大学教授 工学部土木工学科, 工博(正会員)
- *3 鳥取大学助手 工学部土木工学科, 工修(正会員)
- *4 ショーボンド建設(株)技術研究所課長, (正会員)

表-1 使用材料の物理的性質 (強度, 弾性係数の単位は kgf/cm²)

コンクリート			主鉄筋				CFRP板			エポキシ樹脂	
圧縮強度 f'_c	引張強度 f_{ct}	弾性係数 E_c	断面積 $A_s(\text{cm}^2)$	降伏強度 f_y	引張強度 f_u	弾性係数 E_s	断面積 $A_p(\text{cm}^2)$	引張強度 f_{pu}	弾性係数 E_p	強度	
563	35.1	3.68×10^4	3.97	3650	5420	2.1×10^4	2.875	5800	6.5×10^4	圧縮	せん断
										500	120

日に脱枠, 以後27日間の水中養生を施した後, 実験室内に搬入して保存・乾燥させた。なお, CFRP はりの作製は, 40日以上乾燥させた後に以下の手順で行った。(A) まず, はり下面のコンクリートをサンドペーパーとグラインダーで研磨した。(B) コンクリートと CFRP板の間にスペーサを挿入して 2mm のすき間を確保し, A はりにおいてはガムテープで, B はりにおいてはコンクリート打設前に埋込んでおいた高ナット(M8×30)に六角ボルト(M8×20)を挿入・締結した後, 隅角部をガムテープで, それぞれ仮止めした。(C) すき間にエポキシ樹脂を注入して接着し一体化した。このようにして作製した CFRP はりは, その後さらに 2 週間以上実験室で養生した後, 試験に供した。なお, RC, PFRC はりとも, 曲げ破壊がせん断破壊に先行するに十分量のスターラップを配置した。

2. 2 試験方法

はりの載荷は, 静的および疲労試験とも図-1 に示すようなスパン 150cm の三等分点載荷とした。疲労試験は, 繰返し載荷速度 5Hz, 荷重と時間との関係には正弦波形を採用し, 上限荷重比 (P_s : 載荷重と各はりの静的終局耐力の実験値 (各はり 2 体の平均値で, 表-2 (A) の P_u 参照) との比) には $P_s=70, 65, 60, 23\%$ の 4 水準選び, 下限荷重比は全て P_v の 10% とした。なお, $P_s=23\%$ は, 上限荷重作用時の鉄筋応力が $\sigma_s=1200\text{kgf/cm}^2$ になることから選定したものである。

静的および疲労試験においては, 支点とスパン中央に設置したレーザ変位計によってスパン中央たわみを, また, 電気抵抗線ひずみ計によって, 上縁と上縁より 2.5, 4.0cm 位置のコンクリートひずみ, 主鉄筋とCFRP板のひずみを測定した。

3. 実験結果と考察

3. 1 破壊様式

静的および疲労試験におけるCFRPはりの破壊様式を一括して表-2 に, その典型的な破壊様式を図-2 に示す。静的荷重下の破壊様式は, RC はりでは曲げ引張破壊を, CFRP はりでは, アンカのない (A はり) 場合にはコンクリート表面からのCFRP板の突発的な剥離によって, アンカ有りの B はりでは CFRP板の破断によって, それぞれ破壊した。一方, 繰返し荷重下の破壊様式は, 本研究で採用した程度の鉄筋比を有する RC はりがここで設定した範囲の上限荷重比 (鉄筋降伏時よりも小さい荷重) を受ける場合には主鉄筋の疲労破断によって破壊するが[1],

表-2 (A) 静的試験結果

はりの種類	終局耐力 (tf)		耐力比 $\frac{P_u}{P_{u,cal}}$	破壊様式 CF-RE	破壊位置 PF
	実験値 P_u	計算値 $P_{u,cal}$			
RC	9.87	8.84	1.12	-Yi	BS
A	16.60	18.86	0.88	De-Yi	SS
B	16.08	18.00	0.89	Fr-Yi	BS

表-2 (B) 疲労疲労試験

A はり		B はり							
P_s	r	$N(x10)$	CF-RE PF	P_s	r	$N(x10)$	CF-RE PF		
1	48500	De-Fa	SS	1	62348	Fa-Fa	BS		
60	2	63090	De-Fa	BS	60	2	77034	Fa-Fa	BS
%	3	132160	De-Fa	BS	%	3	132251	Fa-Fa	BS
4	249000	De-Fa	BS	4	>200000				
1	28620	De-Fa	BS	1	25152	No-CC	BS		
65	2	33090	De-Fa	SS	65	2	45835	Fa-Fa	BS
%	3	34310	De-Fa	BS	%	3	51902	Fa-Fa	BS
4	34960	De-Fa	BS	4	54552	Fa-Fa	BS		
1	4320	De-No	SS	1	19565	De-Fa	BS		
70	2	7250	De-No	SS	2	22089	De-Fa	BS	
3	11860	De-No	SS	70	3	25860	De-Fa	BS	
4	18130	De-Fa	SS	%	4	30198	De-Fa	BS	
23	1	>200000		5	46470	Fa-Fa	BS		
2	>200000			23	1	>200000			

P_s : 荷重比 (%) r : 順序統計量 CF-RE: はり破壊時の CFRP 板と主鉄筋の破壊状況 (De: 剥離, Fa: 疲労破断, No: 非破壊, Fr: 静的破断, CC: コンクリートの圧縮疲労破断, Yi: 主鉄筋降伏) PF: 破壊位置 (SS: せん断スパン, BS: 曲げスパン)

CFRP はりではアンカの有無とも関連して複雑な挙動をする。すなわち、アンカの無し A はりにおいては、上限荷重が高い場合には CFRP 板の剥離（鉄筋の疲労破断を伴わない）による破壊が、上限荷重比が小さくなるに伴って、主鉄筋の疲労破断と CFRP 板の剥離を同時に伴う破壊が、それぞれ生じた。一方、アンカ有りの B はりにおいては、高荷重で剥離していた CFRP 板は、荷重比の低下に伴ってアンカボルト穴を貫通する疲労破断になりやすくなる一方で、主鉄筋は、荷重比の大小にかかわらず、疲労破断を併発する、というのが特徴である。なお、一般には、CFRP 板の剥離あるいは破断位置は鉄筋の疲労破断位置と一致しない。また、アンカ無しの CFRP はりの破壊の特徴は、上限荷重比の低下に伴って破壊位置が CFRP 板の端部からスパン中央部へ移行することである（表-2、図-2 参照）。

3.2 静的試験結果

3.2.1 ひずみ分布と曲げ耐力

図-3 に、B はりの曲げスパン内横断面のひずみ分布を示す。A はりについても同様の図を描いた結果、本研究で用いた CFRP はりのひずみ分布は、アンカの有無にかかわらず、ほぼ直線形状を呈し、平面保持の仮定が成立することが明らかになった。

そこで、土木学会コンクリート標準示方書[2]の考え方に準拠し、使用材料の応力-ひずみ関係として図-4 を用い、さらに平面保持の仮定を適用することによって、はりの終局曲げ耐力を算定できる。

表-2 に、曲げ終局耐力の計算値とともに、各はりごとに 2 体の供試体より得られた終局耐力の実験値（平均値）を示す。なお、試算結果によれば、RC、A、B はりとも、その終局耐力は、コンクリートひずみが終局ひずみ $\epsilon'_{cu} = 0.0035$ に達した時に達成され、この時、主鉄筋は既に降伏しており、CFRP はりにおける CFRP 板のひずみ（応力）はその破断ひずみ（引張強度）よりもやや小さい状態にある。表より、終局耐力比（実験値と計算値の比）は、RC はりでは 1 より大きい、CFRP はりにおいては、A はりで 0.88、B はりで 0.89 となり、CFRP 板が破断した B はりと CFRP 板の剥離によって破壊した A はりとではほぼ等しい値を示した。このことは、CFRP はりの破壊様式はアンカの有無によって影響を受けるが、静的曲げ耐力はアンカの有無による破壊様式の相違の影響をほとんど受けていないこと、CFRP はりの曲げ耐力は、アンカを施した場合であっても、土木学会示方書[2]に準拠した算定値の 0.9 倍程度の値でもって評価しなければならないこと、を示している。なお、CFRP 板の剥離は、剥離位置や接着材料の強度、接着厚さ等の影響を受けるため、CFRP 板の剥離で破壊するはりの終局耐力は、一般に、大きなばらつきを示すと考えられる。しかし、本実験に

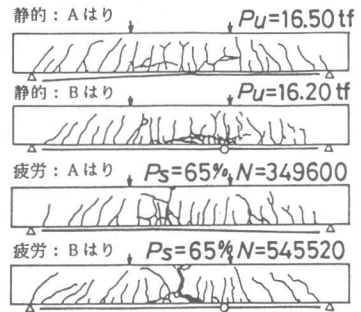


図-2 破壊様式 (○: 破断位置)

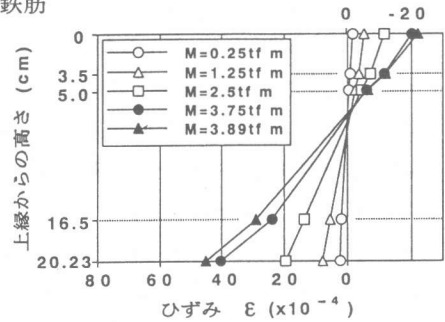


図-3 ひずみ分布

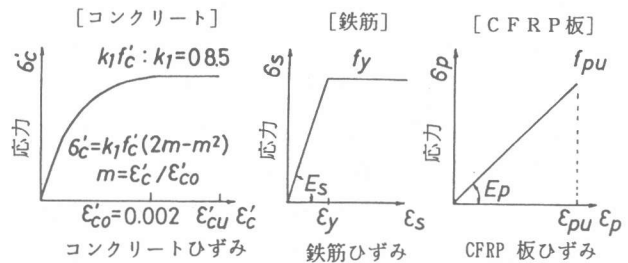


図-4 使用材料の応力-ひずみ関係 (数値は表-1 参照)

けるAはりの曲げ耐力の実験値(供試体2体の値は $P_u=16.5, 16.7$ tf)は、ばらつきが小さく、また接着が良好で、かつ CFRP板の断面積も大きいので、Aはりの方がBはりよりもやや大きな値となっている。

3.2.2 荷重-たわみ関係

図-5に、荷重-スパン中央たわみ関係を示す。最大荷重時のスパン中央たわみ(δu)は、CFRPはりでは $\delta u=10$ mm 程度となり、RCはりの $\delta u=35$ mm の1/3以下のたわみ量となっている。一方、主鉄筋降伏時のたわみ量(δy)は、CFRPはりでは $\delta y=5.6$ mm となり、RCはりの $\delta y=4.2$ mm よりも大きくなるが、 $\delta u/\delta y$ で定義したじん性率(μ)は、CFRPはりの $\mu=2$ はRCはりの $\mu=8$ に比べてかなり小さい。なお、本研究においては、アンカの有無がたわみやじん性に及ぼす影響は観察されなかった。

3.2.3 ひびわれ性状

表-3に、RCとCFRPの各2体のはりに対する最大と平均曲げひびわれ間隔の実験値(l_{max}, l_{ave})を示す。アンカの有無にかかわらず、CFRPはりの l_{max}, l_{ave} は、それぞれ8.5cmと6.5cm程度で、RCはりのそれらの約65%の値を示し、CFRP板の接着によってひびわれの分散性が極めてよくなるのがわかる。

図-6に、主鉄筋ひずみ(ϵ_s)と鉄筋位置における最大曲げひびわれ幅(W_{max})との関係を示す。RCはりでは鉄筋降伏後にひびわれ幅が急激に大きくなるが、CFRPはりにおけるひびわれ幅は、鉄筋降伏後もCFRP板の剥離(Aはり)あるいは破断(Bはり)まで、主鉄筋ひずみにほぼ比例して増加すること、同一鉄筋ひずみにおけるCFRPはりの W_{max} は、RCはりに比べてかなり小さいこと、その結果、CFRP板の接着はひびわれ幅制御に有効であること、もわかる。

3.3 疲労試験結果

3.3.1 疲労寿命の分布と $P_s - \bar{N}$ 関係

CFRPはりでは、はりの種類や試験条件が同一であっても疲労破壊様式が異なり、その結果、疲労寿命も大きくばらつくことが想定される。そこで、このような破壊の多様化がCFRPはりの破壊様式の特性であると考え、混在した破壊様式に対し、はりの種類別に、各荷重比ごとに得られた疲労寿命が、曲げやせん断の単一破壊様式における疲労寿命[3]と同様の対数正規に従うか否かを検討した。

図-7は、Bはりに対して、表-2に示す疲労寿命(N)と次式より算定される生存確率 $P(N)$ との関係に対数正規確率紙上に示したものである。

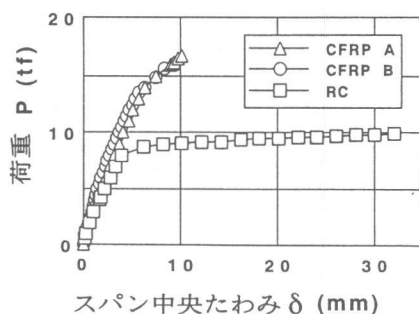


図-5 荷重-スパン中央たわみ関係

表-3 ひびわれ特性(各2体の値)

はりの種類	最大間隔 l_{max} (cm)	平均間隔 l_{ave} (cm)
RC	13.3, 13.1	9.7, 9.3
CFRP A	8.6, 8.7	6.4, 6.7
CFRP B	8.2, 8.7	6.4, 6.4

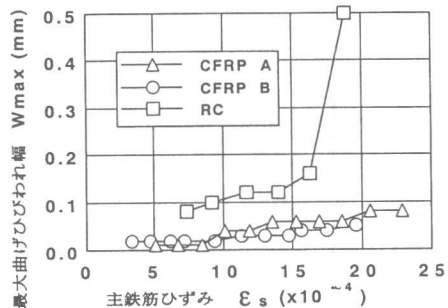


図-6 鉄筋応力と最大ひびわれ幅関係

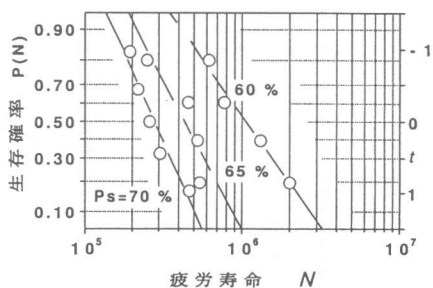


図-7 $P(N) - N$ 関係

$$P(N=N_r)=1-r/(L+1) \quad (1)$$

ここに、 N_r は、同一条件で試験した供試体総数 L から得られた疲労寿命 N を小さい順に並べたときの r 番目の対応する疲労寿命である。

図より、同一破壊様式を示した $P_s=65\%$ における疲労寿命のばらつきは小さくなるという特性を有するものの、プロット点はほぼ直線上にあり、他のはりの結果も含め、各荷重比ごとの疲労寿命の分布は対数正規分布に従うことが明らかになった。

図-8は、平均疲労寿命 (\bar{N} : 生存確率 $P(N)=0.5$ に対応する N の値) と荷重比との関係を示したもので、参考のため、主鉄筋の疲労破断で曲げ破壊したRCはり(断面寸法、コンクリート強度等は本研究と同一で、主鉄筋量 $A_s=2D19=5.73\text{ cm}^2$ のみが異なるRCはり)の $P_s-\bar{N}$ 関係[1]も併記している。図中の $P_s-\bar{N}$ 関係に $\bar{N}=200$ 万回を代入して求めた疲労強度は、CFRP はりで $P_s=55\%$ 程度となり、RC はりに対する $P_s=60\%$ と大差のない値が得られた。なお、アンカの有無が疲労寿命に及ぼす影響は、高荷重作用時に顕著で、アンカ有りの疲労寿命はアンカ無しの場合よりもかなり長くなる。これは、アンカを配置することによってCFRPはりの破壊が、高荷重作用時においても、主鉄筋とCFRP板の疲労破断を同時に伴う破壊様式を示したためであると考えられる。

3.3.2 鉄筋の応力振幅とはりの疲労寿命

図-9は、主鉄筋の疲労破断を伴って破壊したはりに対して、ひびわれ断面を仮定した弾性計算より算定される主鉄筋の応力振幅とはりの疲労寿命との関係を示したもので、図中の曲線は標準示方書²⁾に規定された鉄筋の $S-N$ 線式(式(2))を描いたものである。なお、この場合の応力振幅(σ_{sr})は、示方書に準拠し、表-1、図-1に示した材料定数と断面諸量を用い、上・下限荷重作用時のモーメント M (上限の場合: $M=M_{max}$, 下限の場合: $M=M_{min}$) を式(3)に代入して求めた鉄筋応力 σ_s (下限応力は σ_{sp} と表記) より算定される。

$$\sigma_{sr}=1900 \cdot (1-\sigma_{sp}/f_u) \cdot (10^6/N^{0.12})/\gamma_s \quad (2)$$

$$a=k\phi \cdot (0.82-0.03\phi), \quad k\phi=1.0, \quad \gamma_s=1.05$$

$$\sigma_s = \frac{M}{As \cdot \left(ds - \frac{\lambda}{3} \right) + Ap \cdot \frac{Ep \cdot (dp - \lambda)}{Es \cdot (ds - \lambda)} \left(dp - \frac{\lambda}{3} \right)} \quad (3)$$

$$\lambda = \left[-(ns \cdot As + np \cdot Ap) + \sqrt{(ns \cdot As + np \cdot Ap)^2 + 2b \cdot (ns \cdot As \cdot ds + np \cdot Ap \cdot dp)} \right] / b$$

ここに、添え字 s, p, c は鉄筋、CFRP板およびコンクリートを示し、 A は断面積、 d は有効高さ、 b ははり幅、 ϕ は鉄筋径(mm)、 E は弾性係数、 n は弾性係数比($ns=Es/Ec, np=Ep/Ec$)である。

図より、鉄筋の応力振幅が同一の場合、RCはりとCFRPはりの疲労寿命は、アンカの有無にかか

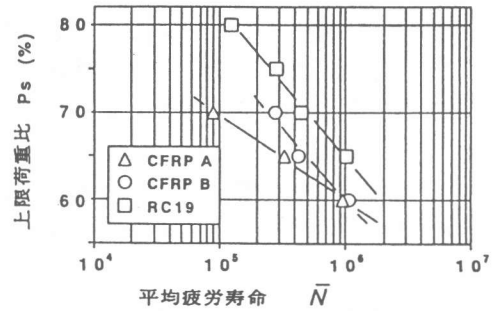


図-8 $P_s-\bar{N}$ 関係

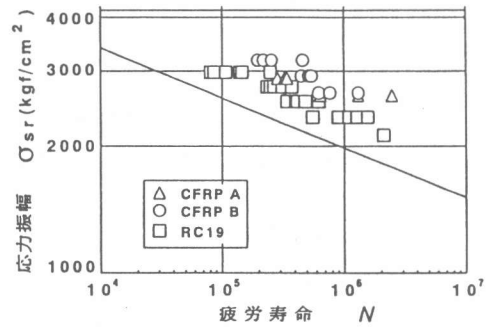


図-9 鉄筋応力とはりの疲労寿命

わらず、ほぼ等しい値を示していること、また、これらの疲労寿命はコンクリート標準示方書に規定されている鉄筋の $S-N$ 線式からかなりの精度でかつ安全側の値として予測できることがわかる。

3.3.3 繰返し荷重下の変形性状

図-10, 11 に、上限荷重および下限荷重作用時のスパン中央たわみ、ないしは CFRP 板ひずみと繰返し載荷回数との関係を示す。これらの図より、CFRP はりの上・下限荷重作用時のたわみや CFRP 板ひずみは、荷重比の大小にかかわらず、載荷回数とともに増加するが、荷重振幅によるたわみ振幅（上限荷重作用時と下限荷重作用時のたわみ差）の変化は小さいことがわかる。なお、CFRP B はりでは、荷重比 $P_s=65, 60\%$ のものが CFRP 板の疲労破断を併発して破壊したが、この場合においても繰返し載荷回数の増加に伴う顕著な CFRP 板ひずみの増加は観察されなかった。また、アンカボルトの有無によるたわみやひずみ挙動にも差異がなかった。さらに、 $P_s=23\%$ （鉄筋応力 $\sigma_s=1200 \text{ kgf/cm}^2$ ）に制限したはりでは、繰返し載荷回数 200 万回においても劣化の兆候は認められなかった。

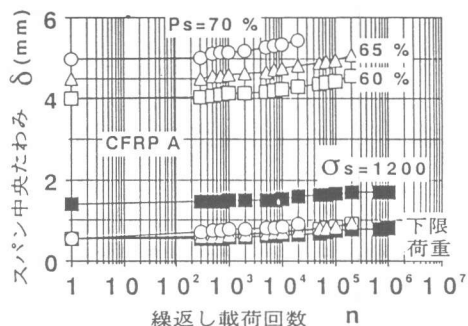


図-10 繰返し荷重下のたわみ増加

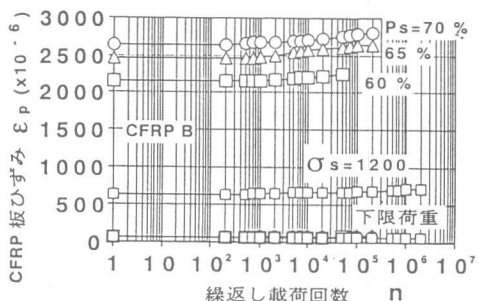


図-11 載荷回数と CFRP 板ひずみとの関係

4. まとめ

CFRP 板で接着補強した RC はりの静的および疲労試験を通して以下の結論が得られた。

- (1) CFRP 接着はりにおいても、通常の RC はりと同様に、平面保持の仮定がほぼ成立する。
- (2) RC はりに CFRP 板を接着することによって、ひび割れの制御が可能で、さらにひび割れわれの分散性もきわめて良くなる。
- (3) CFRP はりの静的終局耐力は、CFRP 板の接着を樹脂のみで行った場合には板の剥離によって、樹脂とアンカボルトを併用した場合にはアンカボルト穴近辺の板の剥離あるいは板の破断によって、決まる可能性が高い。一方、繰返し荷重下の CFRP はりの破壊は、アンカボルトのない場合には主鉄筋の疲労破断と CFRP 板の剥離が、アンカボルト有りの場合には主鉄筋と CFRP 板の疲労破断が、それぞれ同時に生じることによってもたらされている。
- (4) CFRP はりの疲労寿命は、ひびわれ断面を仮定した弾性論に基づく算定鉄筋応力と土木学会示方書に規定された鉄筋の $S-N$ 線式から概ね予測できる。
- (5) CFRP 板接着の際のアンカの配置は、高荷重作用時の疲労寿命を増加させるが、静的耐力、200 万回疲労強度、静的および疲労荷重下のたわみ、ひび割れ幅にはほとんど影響を及ぼさなかった。

参考文献

- 1) 西林新蔵, 井上正一, 吉野 公, 熊野知司: 水中環境下における RC はりの疲労寿命予測に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12-2, pp.287-292, 1990.6
- 2) コンクリート標準示方書 [平成三年度版] 設計編, 土木学会, pp.20-22, pp.94-97, 1991
- 3) S. Nishibayashi and S. Inoue: Fatigue Characteristics of Reinforced Concrete in Water, ACI, SP-109, pp.543-561, 1988.8