

論文 CFRP 板で補強した RC はりの変形性状と静的および疲労強度

井上 正一*¹・西林 新蔵*²・吉野 公*³・小俣 富士夫*⁴

要旨：アンカーボルトの有無，補強板の種類（鋼板とCFRP板）を要因に選んで作製したRC補強はりの静的および疲労試験を実施し，破壊様式，変形と強度特性を中心に比較・検討した。その結果，① CFRP板接着はりは鋼板接着はりに比べて，(1)同一荷重作用時のひび割れ幅，間隔とも小さくなる，(2)破壊時のたわみ，じん性はかなり小さくなる。(3)はりの疲労強度は大きい。② 板接着RCはりの疲労破壊様式は，板の種類，アンカボルトの有無，さらに作用荷重の大きさによって異なってくる。などの特性を明らかにしている。

キーワード：CFRP 板接着補強工法，ひび割れ幅，たわみ，付着強度，疲労強度

1. はじめに

塩害やアルカリ骨材反応，最近では，阪神大震災（突発的な過大荷重）による損傷，等に対処するため，さらには供用後の設計荷重の増加や使用条件の変化に対処するためには，補修・補強技術を確立し，社会基盤であるコンクリート構造物の長寿命化を図っていくことが極めて重要となる。

このような観点から，ここでは，通常のRCはり下面に鋼板ないしはCFRP板を樹脂のみで接着（最も簡単な接着法）したはりと，樹脂接着とアンカボルト（以下，アンカと略称）を併用して一体化した補強はりの静的および疲労試験を実施し，板の種類やアンカの有無がはりの破壊様式や強度，変形特性に及ぼす影響を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

はり供試体の断面形状を図-1に，試験実施時（材齢3ヵ月以上）における使用材料の力学的特性を

表-1に示す。はりの種類は，RCはり（有効高さ

$d_s=16.5\text{cm}$ ，主鉄筋SD345，断面積 $A_s=2D16=3.97\text{cm}^2$ ）と，このRCはり下面に鋼板ないしはCFRP板をエポキシ樹脂（接着厚2mm）とアンカ（スパン方向43.3cm間隔で4カ所）を併用して接着・一体化した鋼板はりとCFRP-Aはりで，さらに，CFRPはりでは，アンカを使用せずエポキシ樹脂のみで接着したCFRP-Nはりも作製した。なお，ここで用いたCFRP板はT社製二次元等方メッシュの炭素繊維成型板で，その寸法は鋼板と同じ $125\times 1400\text{mm}$ ，厚さ2.3mmである。この結果，補強はりの有効高さは $d_p=20.315\text{cm}$ となっている。鋼板はりとCFRPはりの作製は，コンクリートの打設翌日から27日間水中養生を施した後実験室内で40日以上自然乾燥させたRCはりの一部に対して，以下の手順で行った。(A)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。(B)はり下面とCFRP板の間に2mmのすき間を確保するためのスペーサの挿入と，(鋼板はりとCFRP-Aはり

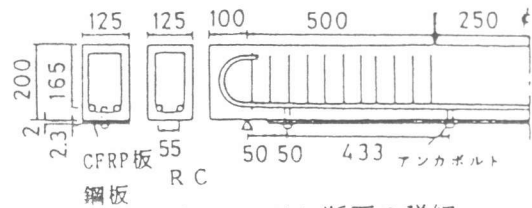


図-1 はり断面の詳細

*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 鳥取大学講師 工学部土木工学科，工博（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 (D16)				CFRP板 (1400×125×2.3mm)			鋼板 (1400×125×2.3mm)			エポキシ樹脂	
圧縮強度 <i>f_c</i>	引張強度 <i>f_{ct}</i>	弾性係数 <i>E_c</i>	面積 <i>A_s(cm²)</i>	降伏強度 <i>f_y</i>	引張強度 <i>f_u</i>	弾性係数 <i>E_s</i>	断面積 <i>A_p(cm²)</i>	引張強度 <i>f_{pu}</i>	弾性係数 <i>E_p</i>	断面積 <i>A_p(cm²)</i>	引張強度 <i>f_{pu}</i>	弾性係数 <i>E_p</i>	強度	
563	35.1	3.68×10 ⁵	3.97	3650	5420	2.1×10 ⁶	2.875	5800	6.5×10 ⁵	2.875	3680	2.03×10 ⁶	500	120

* アンカ有りのはりの終局耐力や応力の算定では、アンカ穴(φ15.1 mm)によるCFRP板ないしは鋼板の断面欠損を考慮して、 $A_p=2.461\text{cm}^2$ を用いている。

で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)ガムテープによる隅角部の仮止め。(C)すき間へのエポキシ樹脂の注入。このようにして接着・一体化した補強はり、さらに2週間以上実験室で養生した後に試験に供した。なお、RC補強はりとも、SR235、φ9 mmの矩形の鉛直スタラップを用い、せん断耐力が曲げ耐力を上回るようにせん断補強した(スタラップ間隔 *s*: RCはりでは *s*=10 cm, CFRPと鋼板はりでは *s*=5 cm)。

2.2 試験方法

はりの荷重試験は、全て、図-1に示すようなスパン150cmの三等分点荷重で行った。疲労試験は、繰返し荷重速度5Hz、荷重-時間関係には正弦波形を採用し、上限荷重比(P_s : 荷重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)との百分率)には $P_s=70\sim 55\%$ の間で3ないしは4水準を選び、下限荷重比は全て P_u の10%とした。

表-2(A) 静的試験結果

はりの種類	終局耐力 (tf)		耐力比	破壊様式	破壊位置
	実験値 P_u	計算値 P_{ucal}	$\frac{P_u}{P_{ucal}}$	CF-RE	PF
RC	9.87	8.84	1.12	-Y1	BS
CFRP-N	16.60	18.86	0.88	De-Y1	SS
CFRP-A	16.08	18.00	0.89	Fr-Y1	BS
鋼板	15.41	15.06	1.02	Y1-Y1	BS

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破壊様式を一括して表-2に、その典型例を図-2に示す。静的荷重下の破壊様式は、RCはりでは主鉄筋が降伏後にコンクリートが圧潰する曲げ引張破壊によって、CFRPはりは、主鉄筋が降伏後、CFRP-NはりではCFRP板の突発的な剥離によって、CFRP-Aはりではアンカ位置のCFRP板の破断によって、それぞれ破壊した。また、鋼板はりでは、主鉄筋および鋼板が降伏した後にコンクリートが圧縮破壊した。一方、疲労荷重下の破壊様式は、本研究に用いた程度の鉄筋比を有するRCはりに対しては、上限荷重の大きさが降伏荷重よりも小さい高サイクル疲労を対象とする場合には主鉄筋の疲労破断によって破壊するが[1]、CFRPはりではアンカの有無に関連して複雑な挙動をする。すなわち、アンカ無しの場合にはCFRP-Aはりは全てCFRP板の剥離により破壊したが、低荷重比になるに伴って板剥離位置が板端部から曲げスパン内へと移行し、それに伴って主鉄筋の疲労破断も併発した。一方、アンカ有りのCFRP-Aはりは、CFRP板の剥離ないしは破断によって破壊するが、 $P_s=70\%$ の高荷重比においても主鉄筋の疲労破断を誘発した。なお、アンカ有りの場合、CFRP板の疲労破断はアンカ位置(厳密にはアンカ用に穿孔したCFRP板の穴を貫通して)に生じ、また、板が剥離する場合には局所的な剥離にとどまっていた。鋼板はりは、全てのはりがアンカ位置の鋼板の疲労破断によって破壊したが、主鉄筋

表-2(B) 疲労試験結果

はりの種類	P_s	<i>r</i>	<i>N</i> (x10)	PF-RE	PF	はりの種類	P_s	<i>r</i>	<i>N</i> (x10)	PF-RE	PF
C F R P	1	62348	Fa-Fa	BS	C F	1	48500	De-Fa	SS		
	60	2	77034	Fa-Fa		BS	60	2	63090	De-Fa	BS
	%	3	132251	Fa-Fa		BS	%	3	132160	De-Fa	BS
	4	>200000				4	249000	De-Fa	BS		
R C	1	25152	No-CC	BS	R P I N	1	28620	De-Fa	BS		
	65	2	45835	Fa-Fa		BS	65	2	33090	De-Fa	SS
	%	3	51902	Fa-Fa		BS	%	3	34310	De-Fa	BS
	4	54552	Fa-Fa	BS		4	34960	De-Fa	BS		
は り	1	19565	De-Fa	BS	は り	1	4320	De-No	SS		
	2	22089	De-Fa	BS		70	2	7250	De-No	SS	
	70	3	25860	De-Fa		BS	%	3	11860	De-No	SS
	%	4	30198	De-Fa		BS	4	18130	De-Fa	SS	
鋼 板	5	46470	Fa-Fa	BS	鋼 板	70	1	1557	Fa-No	BS	
	P_s : 荷重比 (%)	70	2	1937		Fa-No	BS				
	<i>r</i> : 順序統計量,	65	1	2368		Fa-No	BS				
	PF-RE: はり破壊時の補強板と主鉄筋の破壊状況 (De: 剥離,	60	1	12638		Fa-No	BS				
Fa: 疲労破断, No: 非破壊,	55	1	24736	Fa-No	BS						
Fr: 静的破断, CC: コンクリートの圧縮疲労破断, Y1: 主鉄筋降伏) PF: 破壊位置 (SS: せん断スパン, BS: 曲げスパン)											

の疲労破断は伴わなかった（表-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、CFRP-A だけの曲げスパン内横断面のひずみ分布を示す。他のはりについても同様の図を描いた結果、補強板の種類やアンカの有無にかかわらず、ひずみは、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。

表-2 に、平面保持の仮定と、表-1 の材料特性および図-4 に示す応力-ひずみ関係を用い、土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書と称す）[2] の考え方に準拠して算定したはりの終局曲げ耐力、および各 2 体のはり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、鋼板、CFRP 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、鋼板はりでは鋼板も降伏、CFRP はりにおいては 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った。表より、終局耐力比（実験値と計算値の比）は、RC、鋼板はりでは 1 より大きく、CFRP はりにおいては、CFRP-N はりで 0.88、CFRP-A はりで 0.89 となっている。これらのことを総合評価すると、鋼板と CFRP はりでは破壊様式が異なること、CFRP はりにおいては、破壊様式はアンカの有無によって CFRP 板の破断と剥離に分かれるが、静的曲げ耐力比は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、アンカの有無によらず、示方書[2] に準拠した算定値の 0.9 倍程度の値でもって、鋼板はりでは示方書をそのまま適用することによって、予測できること、がわかる。なお、本実験において、CFRP-A はりの終局耐力が CFRP-N はりよりも小さいのは、CFRP-A はりの終局耐力の計算値においてはアンカ用の穿孔穴（ $\phi 15.1 \text{ mm}$ ）による CFRP 板の断面欠損の影響が考慮されているためで、実験値においては断面欠損に加え、穿孔による応力集中の影響が現れているためと考えられる。

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。破壊直前ないしは最大荷重の 80% に相当するスパン中央たわみ (δ_u) は、CFRP はりでは $\delta_u = 10 \text{ mm}$ 、鋼板はりでは $\delta_u = 23 \text{ mm}$ 程度となり、RC はりの $\delta_u > 35 \text{ mm}$ のそれぞれ 1/3.5、1/1.6 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 (δ_y) は、CFRP はりでは $\delta_y = 5.6 \text{ mm}$ 、鋼板はりでは $\delta_y = 6.7 \text{ mm}$ となり、RC はりの $\delta_y = 1.2 \text{ mm}$ より

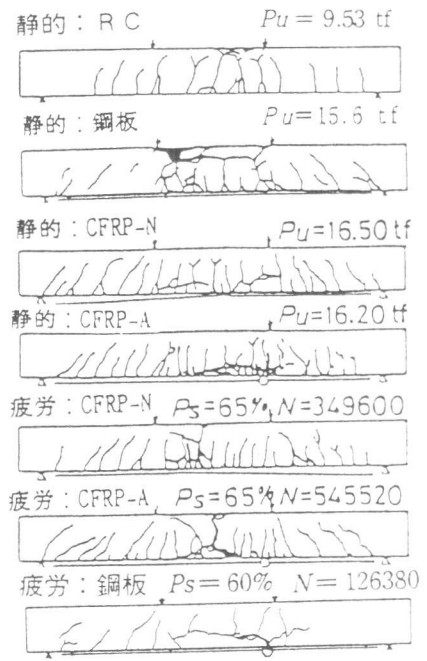


図-2 破壊様式 (○: 破断位置)

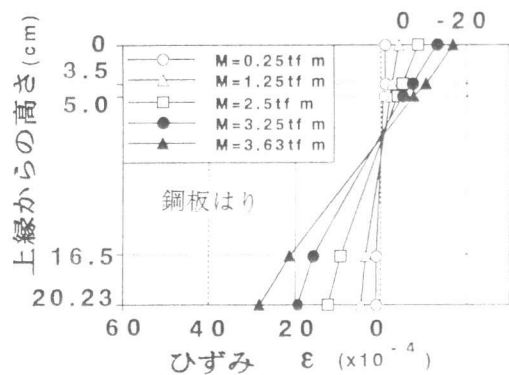


図-3 ひずみ分布 (鋼板はり)

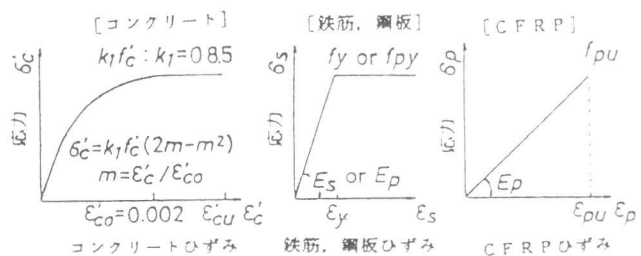


図-4 材料の応力-ひずみ関係 (数値は表-1 参照)

りも大きくなるが、 $\delta u / \delta v$ で定義したじん性率(μ)は、CFRPはりでは $\mu \approx 2$ となり、鋼板はりの $\mu = 3.3$ や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 ひび割れ性状

表-3に、RC、鋼板、CFRPの各2体のはりに対し、最大と平均の曲げひび割れ間隔の実験値(l_{max} , l_{ave})を示す。表より、 l_{max} , l_{ave} は、RCよりも鋼板はりで、鋼板はりよりもCFRPはりで小さく、特に、CFRPはりの l_{max} , l_{ave} は、アンカの有無にかかわらず8.5cmと6.5cm程度で、RCはりのそれらの約65%の値となっている。このことより、CFRP板の接着はひび割れの分散性に有効であることがわかる。

図-6は、主鉄筋ひずみ(ϵ_s)と鉄筋位置における最大曲げひび割れ幅(W_{max})との関係を示す。RCや鋼板はりでは主鉄筋降伏後にひび割れ幅が急激に大きくなるが、CFRPはりにおけるひび割れ幅は、鉄筋降伏後も破壊に至るまで、主鉄筋ひずみにほぼ比例して増加すること、はり降伏前における同一主鉄筋ひずみに対する W_{max} は、RCはりに比べてCFRPや鋼板はりでは小さいこと、その結果、補強板の接着、特にCFRP板の接着はひび割れ幅の制御にも有効であること、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-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はりの特性であると考え、混在した破壊様式に対して、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の分布と同様の対数正規に従う[3]か否かを検討した。

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

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

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 番目に対応する疲労寿命である。

図より、破壊様式の相違によらず、プロット点はほぼ直線上にあり、各荷重比ごとの疲労寿命の分布は対数正規分布に従うといえる。

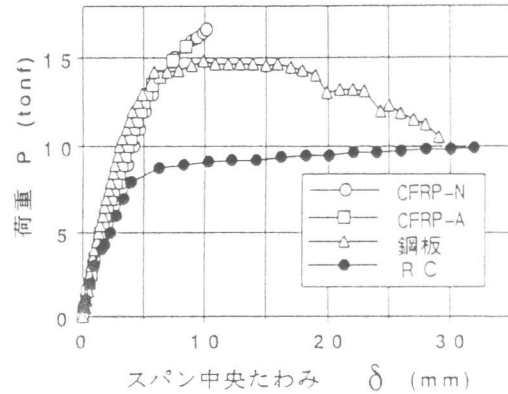


図-5 荷重-スパン中央たわみ関係

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-N	8.6, 8.7	6.4, 6.7
CFRP-A	8.2, 8.7	6.4, 6.4
鋼板	10.9, 11.3	8.1, 8.9

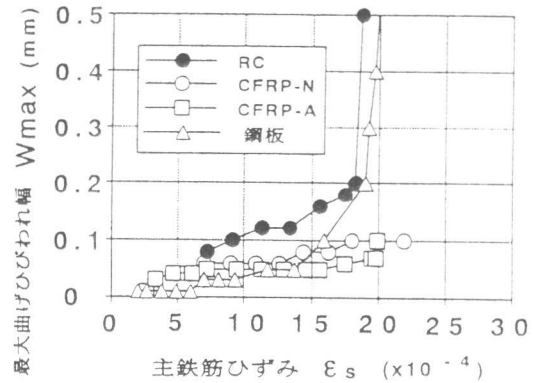


図-6 鉄筋応力と最大ひびわれ幅関係

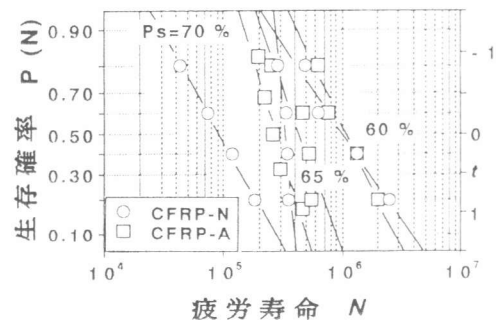


図-7 $P(N) - N$ 関係

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 (主鉄筋量 $A_s=2D19=5.73\text{cm}^2$ 以外の緒元 (断面寸法, コンクリート強度等) は同一) の $P_s-\bar{N}$ 関係 [1] も併記している。なお、鋼板はりの平均疲労寿命は、同一条件で用いた供試体数が 1 ないしは 2 体と少ないため、幾何学平均 $\bar{N}=\sqrt{N_1 \cdot N_2}$ を用いている。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

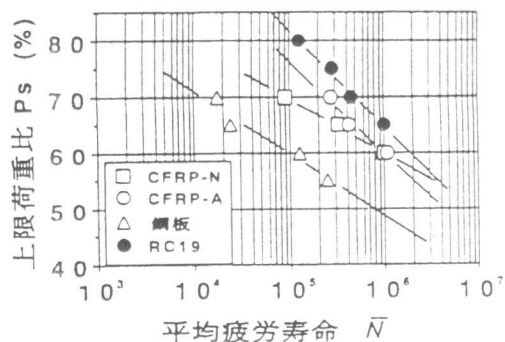


図-8 $P_s-\bar{N}$ 関係

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一方、(主鉄筋の疲労破断を伴わず) 鋼板の疲労破断で破壊する鋼板はりの $P_s=45\%$ は通常の RC はりの疲労強度よりかなり小さくなっている。なお、アンカの有無が疲労強度に及ぼす影響は、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誘発する破壊様式に移行したためと考えられる。

3. 3. 2 鉄筋の応力振幅とはりの疲労寿命

図-9は、はりの疲労破壊を決定した材料 (RC と CFRP はりでは主鉄筋、鋼板はりでは鋼板) に着目し、ひび割れ断面を仮定した弾性計算による主鉄筋ないしは鋼板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、この場合の材料の応力振幅 (σ_{sr} , σ_{pr}) は、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) に代入して求めた材料応力 σ_s , σ_p (下限応力は σ_{sp} , σ_{sp} と表記) より算定される。

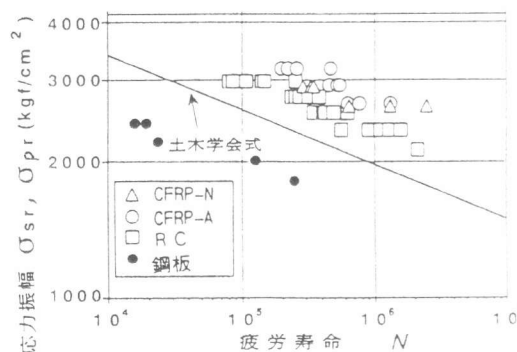


図-9 鉄筋ないしは鋼板応力とはりの疲労寿命

$$\sigma_{sr}=1900 \cdot (1-\sigma_{sp}/f_u) \cdot (10^3/N^{0.12})/\gamma_s \quad (2)$$

$$a=k_0 \cdot (0.82-0.03\Phi), \quad k_0=1.0, \quad \gamma_s=1.05$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \cdot (d_s - \frac{X}{3}) + A_p \cdot \frac{E_p}{E_s} \cdot \frac{(d_p - X)}{(d_s - X)} \cdot (d_p - \frac{X}{3})}, \quad \sigma_p = n_p \cdot \frac{d_p - X}{d_s - X} \cdot \sigma_s \quad (3)$$

$$X = \frac{- (n_s \cdot A_s + n_p \cdot A_p) + \sqrt{(n_s \cdot A_s + n_p \cdot A_p)^2 + 2b \cdot (n_s \cdot A_s \cdot d_s + n_p \cdot A_p \cdot d_p)}}{b}$$

ここに、添え字 s, p, c は鉄筋、補強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 ($n_s=E_s/E_c$, $n_p=E_p/E_c$) である。

図より、鉄筋の応力振幅が同一の場合、RC はりとアンカの有・無の CFRP はりの疲労寿命は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、鋼板の疲労強度は鉄筋の疲労強度に比してかなり小さいこと、がわかる。

なお、図-10 に示した CFRP-A はりの結果より、CFRP 板のひずみは繰返し載荷回数とともに徐々に

に増加するのに対して、主鉄筋応力は極めて安定した状態で疲労破断に至っていることがわかる。

3.3.3 付着応力とはりの疲労寿命

図-11 に、CFRP 板の剥離を伴って破壊したはりに対して、式(4)より算定される上限荷重作用時の補強板とコンクリート間の付着応力 τ_{ou} と CFRP 板剥離時までの載荷回数（本研究では疲労寿命と一致）との関係を示す。

$$\tau_{ou} = A_p \cdot \sigma_p / (b_p \cdot L_p) = t \cdot \sigma_p / L_p \quad (4)$$

ここに、 b_p 、 t ：補強板の幅(12.5cm)と厚さ(2.3mm)、 L_p ：補強板の付着長（荷重点から補強板端までの長さ45cm）、 σ_p ：静的試験においては補強板が剥離した時の、疲労試験では上限荷重作用時の、荷重点下の補強板の算定応力度。

図より、アンカの有無が $\tau_{ou}-N$ 関係に及ぼす影響は小さいが、補強板剥離までの載荷回数は付着応力の低下に伴って増加しており、設計供用寿命に応じて付着応力も制限する必要があることがわかる。なお、静的付着強度は、CFRP-N、CFRP-A、鋼板はりで、19.2、20.6、18.8 kgf/cm² となっており、補強板の種類、アンカの有無が付着強度に及ぼす影響は認められなかった。

4. まとめ

- (1) 補強はりの静的破壊は、CFRPはりで CFRP板を樹脂のみで接着した場合には板の剥離によって、樹脂とアンカを併用した場合にはアンカ穴を貫通する板の破断によって、鋼板はりではアンカ穴近辺の鋼板の局部剥離によって、もたらされる。一方、疲労破壊は、CFRPはりでアンカのない場合には主鉄筋の疲労破断と CFRP板の剥離によって、アンカ有りの場合には主鉄筋とCFRP板の同時疲労破断によって、鋼板はりでは鋼板の疲労破断によって、それぞれもたらされる可能性が高い。
- (2) RCはりに鋼板ないしは CFRP板を接着することによってひび割れの制御が可能で、特にCFRP板を接着することによってひび割れわれの分散性はきわめて良くなる。
- (3) CFRPはりは CFRP板と主鉄筋の同時破断による疲労破壊を生じやすいが、この場合、CFRP板の応力(ひずみ)は繰返し載荷回数とともに増加するが、鉄筋応力は極めて安定した状態で破断に至る。
- (4) 疲労強度を静的強度との比で表すと、CFRP板を接着したはりの疲労強度は通常のRCはりのそれと同程度であるが、鋼板接着はりの疲労強度はRCはりよりもかなり小さくなる。
- (5) CFRPはりの疲労寿命を支配する CFRP板剥離時の載荷回数は付着応力の低下に伴って長くなる。

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

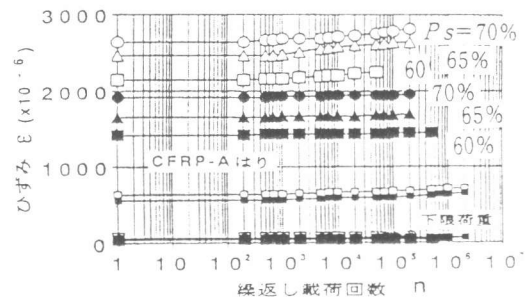


図-10 ひずみの経時変化 (白抜き:CFRP, 黒塗り:鉄筋)

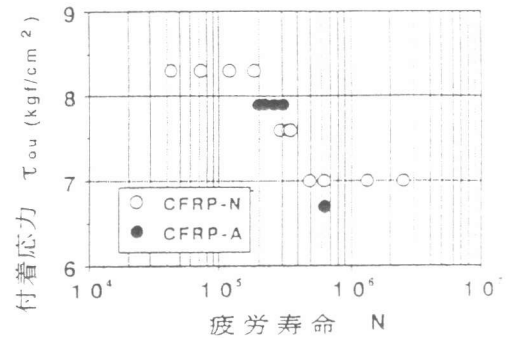


図-11 $\tau_{ou}-N$ 関係