

# 論文 炭素繊維プレートで補強したRCはりの曲げ特性

井上 真澄\*1・大島 正記\*2・高木 宣章\*3・児島 孝之\*3

**要旨:** 本研究では、中弾性型炭素繊維プレートをはり下面に貼り付けて曲げ補強した RC はりの静的曲げ載荷試験を実施し、プレート補強した RC はりの耐荷性状および炭素繊維シートの U 字巻付けによるプレート接着端部の剥離抑制効果について検討を行った。また、プレート補強した RC はりの曲げ疲労載荷試験も実施し、その耐疲労性状およびプレートの付着特性に及ぼす繰返し荷重の影響等について検討を行った。

**キーワード:** 炭素繊維プレート, 曲げ補強, 剥離, 疲労, U 字巻き

## 1. はじめに

近年、連続繊維を一方向に引き揃えて板状に成型した連続繊維プレートをコンクリート表面に貼り付けて補強する工法が注目されている。

本補強工法は、現場での連続繊維シートへの樹脂含浸作業がないことや、連続繊維プレートを接着剤で貼り付けるだけであるため、上向き作業での樹脂の垂れ下がりもなく優れた施工性を発揮する。さらに、連続繊維シートに比べ剛性が高いため、大きな補強効果が得られるとともに、下地処理を広範囲に行う必要もないことや幾層にも貼り付ける必要がないため大幅な工期短縮が可能となる。

しかし、連続繊維シートあるいは連続繊維プレートで補強した RC 部材の耐力および変形性状は、その剥離に支配される場合が多く、連続繊維シートを接着して補強したコンクリート部材の曲げ耐力は、連続繊維シートの剥離の有無を考慮して算定する必要があることが指摘されている。また、RC 部材における連続繊維補強材とコンクリート間の付着・定着特性や曲げ補強した RC 部材の疲労性状については、まだ十分に解明されていないのが現状である。

このような背景から、本研究では中弾性型炭素繊維プレート(以下、プレート)をはり下面に貼り付けて曲げ補強した RC はりの静的曲げ載

荷試験を実施し、プレート補強した RC はりの耐荷性状および炭素繊維シート(以下、シート)の U 字巻付け補強によるプレート接着端部の剥離抑制効果について検討を行った。さらに、プレート補強した RC はりの曲げ疲労載荷試験を実施し、その耐疲労性状やプレートの付着特性に及ぼす繰返し荷重の影響を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

プレートとシートの力学的特性を表-1に示す。プレートは、引抜き成型寸法を 50×1mm とし、プルトルージョン法により製作した。繊維体積含有率は 68% である。プレートの接着には、2 液性のエポキシ樹脂系接着剤を使用した。シートには、汎用的な一方向高強度型(目付量 200g/m<sup>2</sup>)のものを使用した。

表-1 プレートおよびシートの力学的特性

炭素繊維	プレート	シート
設計幅 (mm)	50	250
設計厚 (mm)	1	0.111
保証耐力* (kN)	90.2	—
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1810	3400
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	261	245
破断ひずみ (μ)	6920	13900

注)\*: 3σ法

コンクリートの示方配合を表-2に示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度:

\*1: 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修 (正会員)

\*2: 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 工修

\*3: 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤* (cc/m <sup>3</sup> )	
		W	C	S	G	AE 減水剤	AE 助剤
66	47	175	266	860	1004	2660	1330

注) \* : AE 減水剤は 25%溶液, AE 助剤は 1%溶液を使用

表-3 コンクリートの力学的特性

	静的載荷時	疲労載荷時
圧縮強度	36.6	37.2
引張強度	2.90	2.60
曲げ強度	5.14	5.30
弾性係数	30900	30300

注) 単位 : N/mm<sup>2</sup>

表-4 供試体名称および要因

シリーズ	供試体名称	補強方法
S (静的)	S-N	無補強
	S-P	下面補強
	S-PCS	下面補強+端部 U 字補強
F (疲労)	F-P	下面補強
	F-PCS	下面補強+端部 U 字補強

3.16 g/cm<sup>3</sup>)を使用し、設計基準強度を 26.5N/mm<sup>2</sup>として配合設計を行った。表-3 に載荷試験時のコンクリートの力学的特性を示す。目標スランプは 7.5±1cm, 目標空気量は 4±1%とした。

## 2.2 供試体の概要

表-4 に供試体の名称および要因を、図-1 に供試体の概要を示す。供試体寸法は、150×240×2000mmである。引張鉄筋には、D13(SD345, f<sub>y</sub>=377N/mm<sup>2</sup>)を3本配置した。有効高さは200mm, 引張鉄筋比は1.27%である。曲げ破壊に先行してせん断破壊が生じないように、スターラップにはD10 (SD345, f<sub>y</sub>=349N/mm<sup>2</sup>)を100mm間隔で配置した。

シリーズ S は、プレートをはり下面に接着して曲げ補強した RC はりの静的載荷試験を行い、プレート補強した RC はりの耐荷性状およびシートの U 字巻付け補強によるプレート接着端部の剥離抑制効果を検討するシリーズである。一方、シリーズ F は、TL-20 荷重に対して設計された橋梁に B 活荷重が作用した時の疲労に対するプレートの補強効果およびプレートの付着特性に及ぼす繰返し荷重の影響等を検討するシリーズである。ここで、TL-20 荷重は旧道路橋示

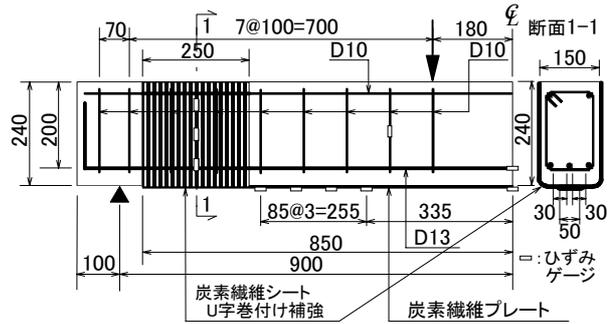


図-1 供試体概要図 (単位 : mm)

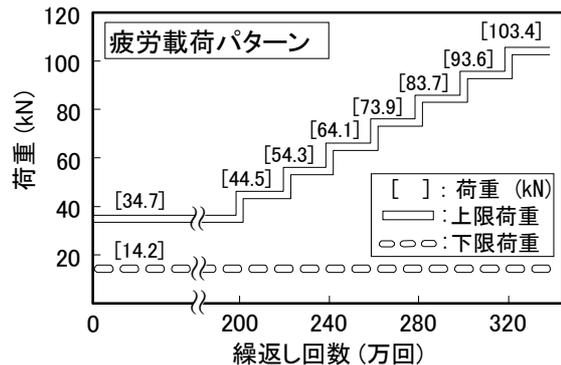


図-2 疲労載荷パターン

方書において 1 等橋の設計時に載荷する活荷重 (総重量 196kN)であり、B 活荷重は現行道路橋示方書において総重量 245kN の大型車の走行頻度が比較的高い状況を想定した活荷重である。

実験に用いた RC はりは、各シリーズともにプレートをはり下面に貼り付けた P 供試体とその下面貼り付け後にシートによりプレート端部を U 字巻付け補強した(以下、U 字補強)PCS 供して無補強供試体も製作した。

プレートの接着方法は、供試体の接着面をディスクサンダーで研磨し、掃除機を用いて接着面に付着しているダストを吸い取る。その後、エポキシ樹脂系接着剤をプレート接着面および供試体接着面に塗布して接着した。

## 2.3 載荷方法および測定項目

載荷条件は、支点間距離1800mm, 曲げスパン360mm, せん断スパン有効高さ比(a/d)3.6の対称2点集中載荷とした。計測項目は、引張鉄筋ひずみ、曲げ引張方向のプレートひずみ、シートひずみ、スターラップひずみ、スパン中央たわみおよび曲げスパン内のひび割れ幅とした。

静的載荷試験(シリーズS)は、曲げひび割れの発生を確認した後一旦除荷し、その後供試体

表-5 静的曲げ載荷試験結果 (シリーズS)

供試体名	ひび割れ発生荷重	引張鉄筋降伏荷重	プレート剥離荷重	終局曲げ耐力	計算耐力*1			破壊形式*3
					5000 $\mu$ *2	6000 $\mu$ *2	7000 $\mu$ *2	
S-N	15	76	—	86 [1.00]	74 (1.18)			F
S-P	20	98	115	115 [1.33]	109(1.06)	116(0.99)	123 (0.93)	P → F
S-PCS	17	101	121	121 [1.40]	109(1.12)	116(1.05)	123 (0.99)	P → F

注) \*1: S-P と S-PCS 供試体は、プレートの剥離ひずみを仮定して、断面分割法により算定

\*2: プレート剥離ひずみ, \*3: Fは曲げ破壊, Pはプレート剥離, ( ): 終局曲げ耐力/計算耐力

[ ]: S-N 供試体の終局曲げ耐力に対する比率, 単位: kN

が破壊するまで単調載荷した。

疲労載荷試験(シリーズ F)の載荷パターンを図-2に示す。疲労載荷試験は、曲げひび割れの発生を確認した後、初期上限荷重(34.7kN)まで静的載荷を行い、上限荷重到達後、下限荷重を14.2kNとして200万回繰返し載荷を行った。その後、上限荷重を9.8kNずつ増加して順次20万回の繰返し載荷を供試体が破壊するまで行った。なお、初期上限荷重は、TL-20荷重で設計された道路橋にB活荷重を載荷した場合の試設計を行い、引張鉄筋応力度を算定した結果を供試体に反映して決定した。すなわち、補強前の橋梁にB活荷重が作用した時、支間中央断面の引張鉄筋応力度は191N/mm<sup>2</sup>であった。そこで、無補強供試体の引張鉄筋応力度が191N/mm<sup>2</sup>になる荷重を逆算して上限荷重とした。また、下限荷重(14.2kN)は、支間中央断面の死荷重作用時の引張鉄筋応力度が78.5N/mm<sup>2</sup>であったことに基づき、初期上限荷重と同じ方法で逆算して求めた。なお、疲労載荷は正弦波による部分片振り繰返し載荷とし、繰返し載荷速度は各上限荷重に追随するように、0.6~4Hzの範囲で変化させた。また、1万回から50万回毎に繰返し載荷を中断して上限荷重まで静的曲げ載荷を実施し、所定の計測を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 静的曲げ載荷試験 (シリーズS)

##### (1)破壊性状

表-5に静的曲げ載荷試験結果を示す。無補強供試体は、引張鉄筋降伏後、曲げスパン圧縮部コンクリートが圧壊して終局に至った。プレート補強した供試体は、U字補強の有無に関わ

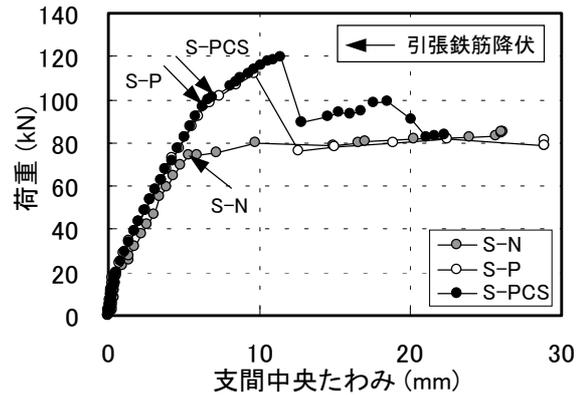


図-3 荷重と支間中央たわみの関係

らず、プレート剥離時に最大荷重に達し、その後コンクリートが圧壊して終局に至った。プレートの剥離は、曲げせん断ひび割れ部での面外変形に起因するものであり、爆音とともに全スパンに進展した。一方、U字補強に用いたシートはプレートの剥離に伴い、RCはり下面で破断した。また、試験後プレートの剥離面を観察するとコンクリート片が付着しており、コンクリート表層部の破壊によりプレートが剥離したことを確認した。

##### (2)変形状

図-3に荷重と支間中央たわみの関係を示す。なお、荷重は2点載荷の合計値とした。無補強供試体は、引張鉄筋降伏後、荷重の増加は少なく変位が急増した。プレート補強した供試体は、引張鉄筋降伏以降も荷重は増加し、最大荷重時のプレート剥離により急激に低下した。その後はほぼ無補強供試体の荷重レベルに至った。S-P供試体とS-PCS供試体の変形状は概ね同様の傾向を示した。

##### (3)引張鉄筋およびプレートのひずみ

図-4にプレート補強した供試体の荷重と引張鉄筋ひずみの関係を、図-5に荷重とプレ

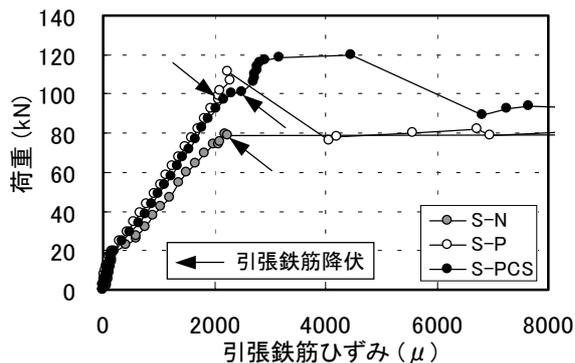


図-4 荷重と引張鉄筋ひずみの関係

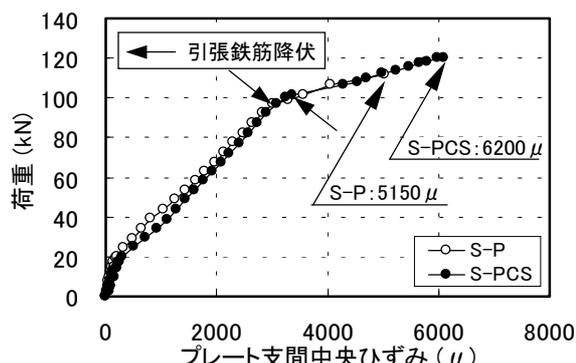


図-5 荷重とプレート支間中央ひずみの関係

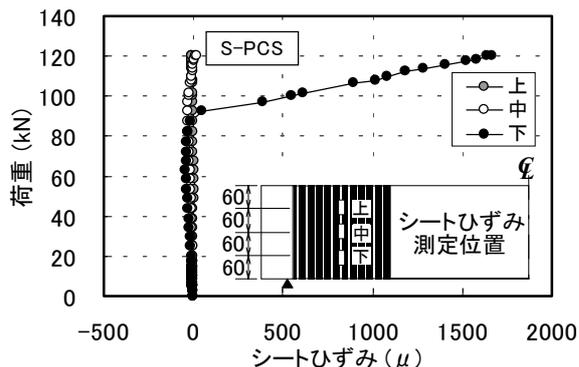


図-6 荷重とシートひずみの関係

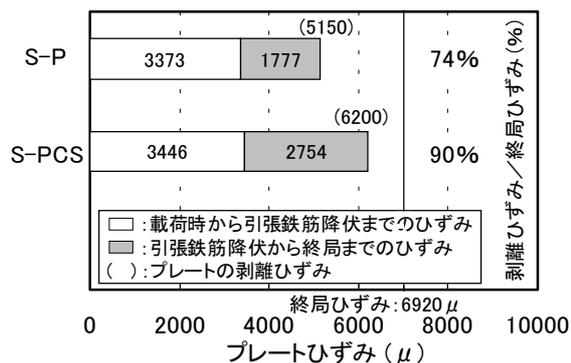


図-7 プレート支間中央ひずみと終局ひずみの比率

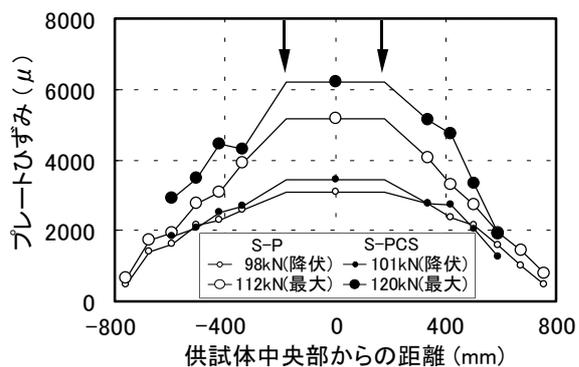
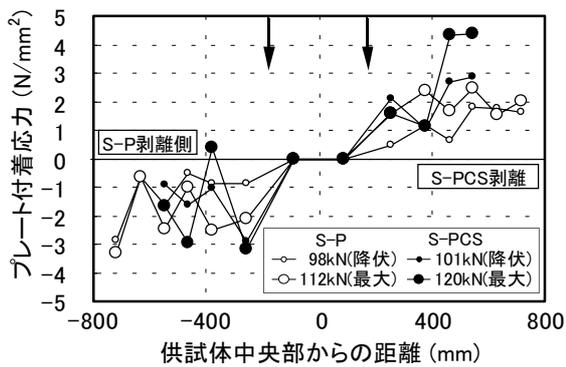


図-8 プレートひずみおよび付着応力分布



ト支間中央ひずみの関係を示す。U字補強の有無に関わらず、引張鉄筋およびプレートひずみは、曲げひび割れ発生後、引張鉄筋が降伏するまで荷重の増加とともにほぼ一定の割合で増加した。引張鉄筋降伏後のプレートひずみは、最大荷重に至るまでほぼ一定の割合で急激に増加した。これは、破壊直前までコンクリートとプレート間の付着が良好であったことを示しており、プレートが引張鉄筋降伏後も有効に載荷荷重に抵抗することが確認できた。

図-6に荷重とシートひずみの関係を、図-7に支間中央のプレートのひずみと終局ひずみの比率を示す。端部シートひずみは、引張鉄筋

降伏前までは全く変化が無いが、降伏付近よりシートの下側ひずみ(計測位置は図-6参照)が急激に増加した。プレート剥離直前のプレートひずみ(以下、剥離ひずみ)は、S-P供試体が約5150 $\mu$ 、S-PCS供試体が約6200 $\mu$ となり、プレート端部をシートでU字補強することによるプレートの剥離抑制効果が確認できた。一方、幅50mm、厚さ1~2mm程度のプレートを載荷点から800~900mm程度接着補強したRCはりの曲げ載荷試験を行った既報告<sup>3),4)</sup>では、プレートの剥離ひずみは4000~6500 $\mu$ 程度であった。一般に、プレートの剥離ひずみは、プレートの厚さ、接着するコンクリートの強度、接着剤の種類など

の諸要因に影響を受けると考えられる。しかし、本研究および既報告<sup>3),4)</sup>の範囲においては剥離ひずみは、5000～7000 $\mu$ 程度であると推察される。また、プレート接着補強を施すことにより、損傷はりのひび割れ幅やたわみなどの使用性を改善することはできないものの、プレートの終局ひずみ6920 $\mu$ に対するプレートの剥離ひずみは、S-P供試体で約74%、S-PCS供試体で約90%であり、RCはりの耐力補強の面に関しては、プレート接着面を十分に補強すれば、プレートの能力を有効に利用できることが確認できた。

#### (4) プレートのひずみ分布

図-8にプレートひずみおよび付着応力分布を示す。プレートの付着応力は、隣接するひずみゲージ間のひずみ差と、プレートの弾性係数、厚さ(表-1参照)の積をゲージ間の長さで割った値とした。付着応力分布は、最大荷重時には大きな曲げせん断ひび割れに伴う面外変形が生じるため、せん断スパン部における付着応力の著しい増加が確認できる。付着応力分布の最大値は、U字補強によりプレート剥離が抑制されたS-PCS供試体の方が大きくなった。

#### (5) 曲げ耐力

表-5に静的曲げ耐力の実験値と計算値を示す。プレート補強した供試体の曲げ耐力は、無補強供試体の約1.3～1.4倍であり、プレートによる曲げ補強効果が認められた。しかし、S-PCS供試体の曲げ耐力は、S-P供試体の1.05倍程度であり、U字補強による耐力の増加は小さかった。本実験では、プレートの剥離が曲げせん断ひび割れに起因しており、端部だけでなくせん断スパン部にもU字補強を施すことで効果的に耐力を改善できるものと考えられる。

プレート補強したRCはりの曲げ耐力は、プレート剥離時にコンクリートが圧壊していない

ことを考慮し、プレート位置でのひずみをプレートの剥離ひずみと仮定して、コンクリートの圧縮合力と全補強材の引張合力の釣り合いから断面分割法により曲げ耐力を算定した。プレートの剥離ひずみは、5000、6000、7000 $\mu$ と仮定してそれぞれ曲げ耐力を算定した。無補強供試体は、終局圧縮ひずみを3500 $\mu$ として曲げ耐力を算定した。なお、耐力の算定においては、コンクリートおよび鉄筋の応力～ひずみ関係は、コンクリート標準示方書[設計編]<sup>2)</sup>に規定されているモデルを用いた。プレートの応力～ひずみ関係は、プレートの保証引張強度と終局ひずみの交点と原点を直線で結ぶモデルを使用した。

S-P供試体ではプレートの剥離ひずみを6000 $\mu$ 、S-PCS供試体では7000 $\mu$ を仮定した時、実験値と計算値の比率がそれぞれ0.99であり、高い整合性が得られた。プレート剥離がコンクリートの圧壊に先行して生じ、その後破壊に至る場合の曲げ耐力は、プレートの剥離ひずみと断面分割法を用いて、十分評価できるものと考えられる。

### 3. 2 曲げ疲労載荷試験 (シリーズF)

#### (1) 疲労寿命および破壊形式

表-6に曲げ疲労載荷試験結果を示す。B活荷重に相当する上限荷重(34.7kN)を200万回繰返し載荷しても、プレート補強したRCはりは、プレート端部のU字補強の有無に関わらず疲労に対して十分な安全性を有していた。F-P供試体は、上限荷重103kNの載荷中に破壊し、破壊時の累積繰返し回数は約321万回であった。一方、F-PCS供試体は、上限荷重93.6kNの載荷中に累積繰返し回数約315万回で破壊に至り、F-P供試体と疲労寿命はほぼ等しくなった。このように、U字補強の有無に関わらず疲労寿命は同程度となった。これは破壊形式がプレートの剥

表-6 曲げ疲労載荷試験結果 (シリーズF)

供試体名称	最終上限荷重(kN)	最終上限荷重比(%)	疲労寿命 N(回)	破壊形式
F-P	103.4	89.8	9,848 [3,209,848]	引張鉄筋疲労破断 →プレート剥離
F-PCS	93.6	77.1	148,375 [3,148,375]	

注[ ] : 累積繰返し回数

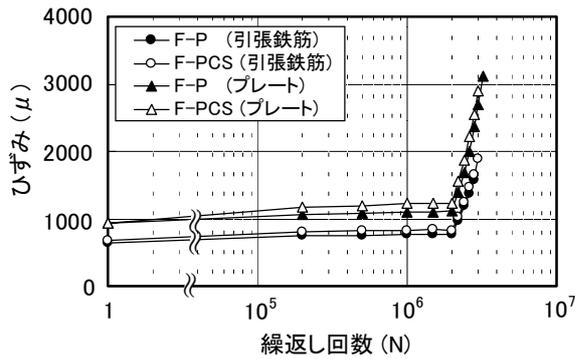


図-9 引張鉄筋およびプレートのひずみと繰返し回数の関係

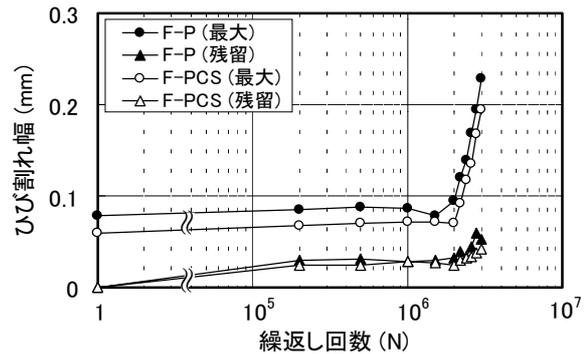


図-10 ひび割れ幅と繰返し回数の関係

離ではなく引張鉄筋の疲労破断であったためであると考えられる。

### (2) 引張鉄筋およびプレートひずみ

図-9に各上限荷重作用時の引張鉄筋およびプレートのひずみと繰返し回数の関係を示す。両供試体における引張鉄筋ひずみの増加傾向はほぼ同じであり、同一繰返し回数時のひずみ量も同程度である。つまり、プレート端部のU字補強の有無が引張鉄筋応力度に及ぼす影響は少なく、はりの疲労寿命は引張鉄筋の疲労寿命に大きく影響を受けるため、両供試体の疲労寿命が同程度になったものと考えられる。

### (3) ひび割れ幅

図-10に上限荷重時のひび割れ幅および残留ひび割れ幅と繰返し回数の関係を示す。F-P供試体およびF-PCS両供試体の曲げひび割れ幅に顕著な差はなく、上限荷重増加後も同様の傾向を示した。このことから疲労載荷下において、U字補強の有無が変形性状に及ぼす影響は小さく、その結果両供試体の疲労寿命が同程度になったものと考えられる。

## 4. 結論

- (1) 中弾性型プレートを RC はり下面に接着補強することにより、RC はりの曲げ降伏荷重および曲げ耐力は向上した。
- (2) プレートで接着補強した RC はりの曲げ耐力は、プレート剥離がコンクリートの圧壊に先行して破壊に至る場合、プレートの剥離ひずみと断面分割法を用いて、十分評価が可能

である。

- (3) プレートで接着補強した RC はりの破壊形式は、静的載荷ではプレート剥離、疲労載荷では引張鉄筋の疲労破断であった。
- (4) TL-20 荷重に対して設計された RC はりをプレートで接着補強することにより、B 活荷重相当の繰返し荷重が作用しても、十分な疲労性能が得られた。

**謝辞** 本研究で使用した炭素繊維プレートは、東レより提供して頂いた。本研究の遂行に当たっては、東レの鈴川研二氏に貴重な助言を賜りました。また、実験では立命館大学の池端隼人氏、木村直行氏に多大な協力を得ました。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，pp.21-23，2000
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp.17-44，1996
- 3) 木村耕三，小島克朗，平田 亮，土屋好男：CFRP板による既存RCはりの曲げ補強，第40回日本学会材料連合講演会講演前刷集，pp.216-217，1996
- 4) 濱田 譲，阪上徳行，高木宣章，児島孝之：緊張した連続繊維プレートで補強したRCはりの曲げ特性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.446-453，2000