

炭素繊維貼付けによる既存部材の補強に関する研究（その2）

——はり部材への適用性に関する実験——

岡野素之 木村耕三
小嶋克朗

A Study on Strengthening with Carbon Fiber of Existing Reinforced Concrete Structure (Part 2)

——Tests of Applicability to Existing Beams——

Motoyuki Okano Kohzo Kimura
Yoshiro Kobatake

Abstract

A strengthening method using carbon fiber has been developed and applied to existing reinforced concrete chimneys. It was in a previous paper (Part 1) that the fundamental performances of strength, anchorage, lap splice length, and durability of attached surface of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) in sheet form were reported.

In this paper, the following two tests concerning applicability to existing beams of this method are described: ① Bending fatigue tests of a prestressed concrete beam strengthened by CFRP, ② Bending test of existing reinforced concrete beams. And the following results were obtained: Significant strengthening effect of CFRP on prestressed concrete beams under fatigue loading was recognized, while existing reinforced concrete beams were strengthened by CFRP also. It was also ascertained that the strengthening method using carbon fiber is applicable to beams.

概 要

既存コンクリート部材の表面にシート状炭素繊維を樹脂で貼付けて補強する工法を開発し、既に鉄筋コンクリート煙突の耐震補強に採用してきた。前報（その1）では、炭素繊維補強材の基礎的性能である強度、定着、重ね継手長さ及び貼付け面の耐久性について報告した。本報告では、同工法の既存コンクリートはり部材への適用性を検討するために実施した、炭素繊維を貼付けて補強した。① プレストレストコンクリートはりの曲げ疲労実験、② 既存実大鉄筋コンクリートはりの曲げ実験について述べている。

実験の結果、曲げ疲労実験では200万回の疲労載荷後も十分な補強効果が期待できること、実大曲げ実験では炭素繊維の補強量に応じて部材の曲げ耐力を増大させることができること等が確認され、はり部材への適用が可能であることがわかった。

1. 序

炭素繊維の『軽量、高強度、高弾性、及び高耐久性』などの優れた特長を生かし、既存コンクリート部材の表面にシート状炭素繊維を樹脂で貼付けて補強する工法を開発し、既にRC煙突で実用化してきた¹⁾。本工法は橋桁等の既存はり部材の補強にも有効と考えられ、これらへの適用性を検討するために炭素繊維を貼付けて補強した試験体で、以下の2項目の実験を実施した。

① プレストレストコンクリート（以下、PCと呼ぶ）はりの曲げ疲労実験

② 既存実大鉄筋コンクリート（以下、RC）はりの曲げ実験

ともに既存部材の経年劣化を考慮し、①では補強前に曲げひびわれを発生させ、また②では建設後17年経過した実構造物から切り出したはりを使用した。

2. 炭素繊維を貼付けて補強したPCはりの曲げ疲労実験

橋桁のように繰返し荷重が極めて多数回載荷される部材では、部材の曲げ疲労性能が重要となる。本実験の目的は、あらかじめ曲げ載荷により損傷を与えたポストテンション方式PCはりにおいて、炭素繊維による補強が設計荷重レベルの疲労載荷後も有効であるかどうかを実験的に検討することである。

2.1 試験体

試験体は図-1に示すような、高さ30cm、幅20cm、及び長さ280cmのポストテンション方式PCはり1体である。先行して単純はり形式の2点曲げ載荷を行ないひびわれを発生させたが、先行加力により最大幅3mm程度のひびわれが発生し、残留たわみは2.5cmであった。また最大ひずみは、コンクリートで $2,900 \times 10^{-6}$ (圧

縮), 鉄筋で $31,000 \times 10^{-6}$ (引張) であった。除荷後, エポキシ注入によりひびわれを補修し, プレストレス再導入・グラウト充填後, はりの下縁に炭素繊維を貼付けた。疲労載荷時のプレストレスレベルは, コンクリート圧縮応力度に換算して, はりの上縁で 13 kgf/cm^2 , 下縁で 40 kgf/cm^2 であった。

使用材料の特性を表一に示す。シート状炭素繊維は, 石炭ピッチ系のモノフィラメントに高温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させて1方向に引きそろえ, シート状に加工したもので, 単位面積 (m^2) あたり 175 g の炭素繊維が含まれている。

2.2 実験方法

載荷は, 先行載荷と同様に単純ばり形式の2点曲げ載荷とし, アクチュエータ (容量 50 tf) で行なった。疲労載荷は, 上限荷重は 4.5 tf (弾性は理論で計算し下縁応力度が 30 kgf/cm^2 の引張りに相当する荷重), 下限荷重は 0.5 tf で, また振動数は $2 \sim 4 \text{ Hz}$ であった。200万回に至る疲労載荷を行ない, 途中の変位, ひずみ, 及びひびわれを観察した後, 静的破壊実験を実施した。

2.3 実験結果

2.3.1 疲労載荷 200万回の疲労載荷終了に至るまで, 貼付け面での炭素繊維の剝離・破断等の異常は見られず新たなひびわれも発生しなかった。上限荷重時の, 炭素繊維のひずみと繰返し回数との関係を, 図一2に示す。測定は, 先行載荷時に発生したひびわれ位置で行なった。

1万回程度の繰返しまではひずみが増加する傾向であるが, それ以降はほぼ一定で, 安定した性状を示している。

2.3.2 静的破壊実験 破壊時のひびわれ状況を図一3に, 荷重とより中央における変位の関係を図一4にそれぞれ示す。荷重の増加とともに変位が増大し, 最大荷重 18.0 tf で炭素繊維が破断し, 直後にコンクリートが圧壊し破壊した。最大荷重に至るまで炭素繊維の剝離・破断は発生しなかった。最大荷重は, 無補強の場合の計算値 (14.5 tf) に比較し 24% 高く十分な補強効果が認められた。なお, 純曲げ区間における破壊直前 ($P=17.5 \text{ tf}$) の炭素繊維の最大ひずみ (測定値: $9,400 \times 10^{-6}$) を用いて最大荷重を計算 (e関数法) すると 18.0 tf であり, 実験値に近似した。

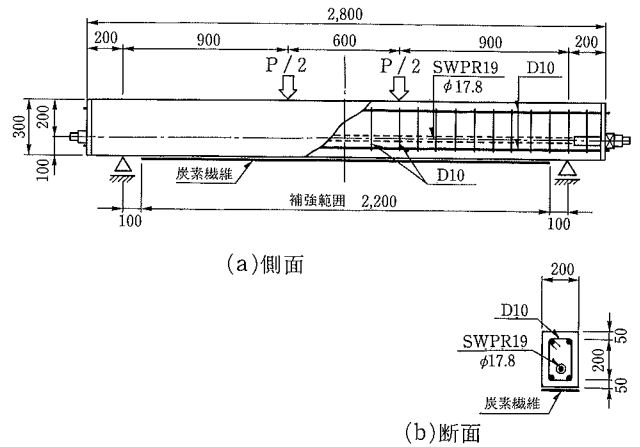
2.4 実験結果のまとめ

あらかじめひびわれを発生させた状態で炭素繊維を貼付けて補強したPCはりには, 200万回の疲労載荷に対し構造性能の低下は見られず, また疲労載荷後も十分な補強効果が確認できた。

3. 炭素繊維を貼付けて補強した既存実大鉄筋コンクリートはりの曲げ実験

炭素繊維貼付けによる補強工法では, 補強材とコンクリートとの一体性が補強効果に大きな影響を与える。

本実験の目的は, 建設後17年を経過した構造物 (4階建SRC造立体駐車場) のはり部材 (RC造小はり) 下端に炭素繊維を貼付けて実大部材での曲げ補強効果を実験

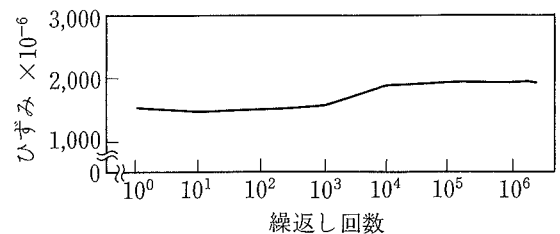


図一1 試験体の形状寸法

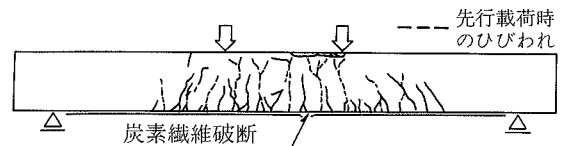
表一1 使用材料の特性

	降伏強度 (tf/cm^2)	引張強度 (tf/cm^2)	ヤング係数 (tf/cm^2)
鉄筋 (D10)	3.68	5.18	1,820
PC鋼より線 ($\phi 17.8$)	17.90	19.50	1,990
炭素繊維	—	35.50*	2,580*
		圧縮強度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 (tf/cm^2)
コンクリート		349	193 (1/3割線勾配)

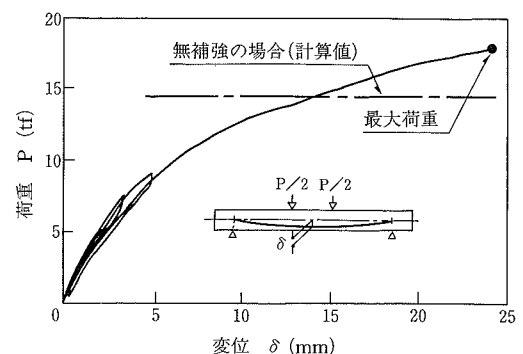
* 炭素繊維の実断面積 ($1.94 \text{ mm}^2/\text{cm}$) で評価



図一2 炭素繊維のひずみ—繰返し回数の関係



図一3 ひびわれ状況



図一4 荷重—変位関係

的に確認することである。

3.1 試験体

試験体は、図-5に示す幅50cm、高さ110cmの一般階小はり3スパン12m(1スパン4.0m)の中央部から切り出した長さ8mのRCはり部材3体で、そのパラメータは、表-2に示すシート状炭素繊維による補強の有無と補強量で、これによる曲げ性状の違いを把握した。表-3は、現場で試験体と同様のはりから採取した鉄筋及びコアコンクリートの材料特性の一覧である。

シート状炭素繊維は、2.1で前述した材料である。

炭素繊維貼付けによる補強は、このシート状炭素繊維を1層ずつ既存コンクリート表面に3層(CF3試験体)あるいは6層(CF6試験体)、常温硬化型エポキシ樹脂でコンクリート表面に貼付ける方法で行なった。

3.2 実験方法

実験は、図-5に示すようにスパン700cmの単純支持2点集中荷重による一方向繰返しで行なった。加力は、荷重(P)30tf、45tf、60tfで各2回の繰返しを、以降、荷重60tf時の変位に相当する変位で2回の繰返しを行なった後、終局状態に至るまで加力した。実験時には、コンクリートのひびわれ状況を適宜観察するとともに、高感度型変位計によるたわみと、クリップゲージによる代表的な曲げひびわれの幅の測定を行なった。

3.3 実験結果

3.3.1 破壊状況 各試験体のひびわれ状況を図-6に示す。曲げひびわれの進展と鉄筋降伏後の変位の増加は、炭素繊維による補強量が多くなるほど小さい。炭素繊維で補強したCF3試験体では、荷重75tfで炭素繊維の破断と圧縮コンクリートの圧壊により終局に至った。終局時には、炭素繊維の破断位置近くのコンクリートは引張補強筋に沿って引き剥されるように剝離した。一方、補強量の多いCF6試験体では、荷重90.0tfで純曲げ区間のコンクリートが圧壊し、その後、荷重92.5tfで炭素繊維の破断により終局状態に至った。しかし、終局時には、CF3試験体のようなコンクリートの剝離は見られなかった。

3.3.2 諸荷重 各試験体の曲げ降伏荷重と最大荷重の実験値と計算値の一覧を表-4に示す。なお、計算値は、e関数法による値で、CF3、CF6試験体の無補強の耐力は、炭素繊維を無視して求めた部材の曲率が、補強試験体の終局耐力時の曲率と等しくなる時の荷重を無補強試験体の耐力と定義した。

鉄筋の引張降伏と、コンクリートの圧壊あるいは炭素繊維の破断によって終局に至ったRC試験体、CF3試験体の最大荷重はe関数法による計算値と近似している。一方、コンクリートの圧壊が先行したCF6試験体の最大荷重は、計算値に比べて0.88倍と若干小さい。

最大荷重の値から炭素繊維による補強効果を見ると、CF3試験体では無補強の計算値に比べて24%、CF6試験体では48%の耐力の増大が見られた。

3.3.3 変位性状 図-7、図-8は、それぞれ荷重と

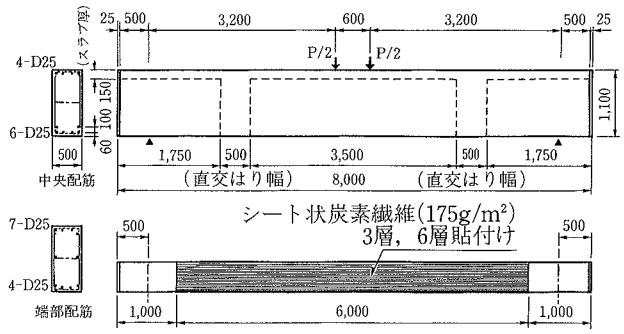


図-5 試験体の形状寸法

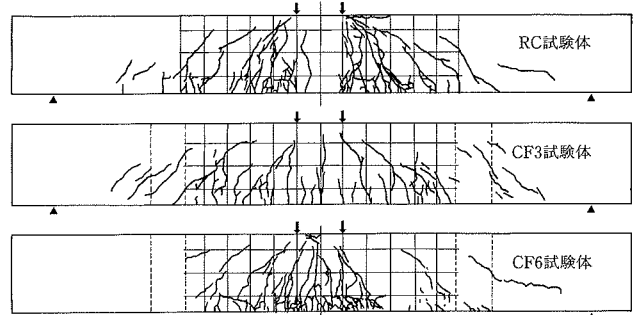


図-6 ひびわれ状況

表-2 試験体の一覧

試験体	曲 げ 補 強 筋				
	端 部		中 央	中 央 下 端	
	下 端	上 端	上 端	補強筋(材)	補強筋比
RC				6-D25	0.62%*
CF3	7-D25	4-D25	4-D25	6-D25 炭素繊維3層	0.62 * 0.026 **
CF6				6-D25 炭素繊維6層	0.62 * 0.053 **

*) $P_t = a_s / b \cdot d$, **) $P_t = a_t / b \cdot D$

表-3 使用材料の特性

	降伏強度	引張強度	弾性係数
鉄筋(D25)	3.44tf/cm ²	5.40tf/cm ²	2,060tf/cm ²
炭素繊維	—	29.3	2,640
	設計基準強度	圧縮強度	弾性係数
コンクリート	210kgf/cm ²	230kgf/cm ²	193tf/cm ²

試験体中央のたわみあるいは、曲げひびわれ幅の関係である。

炭素繊維で補強した試験体では、鉄筋降伏後の剛性及び荷重の増大は無補強のRC試験体より大きい。CF3試験体では、炭素繊維の破断により荷重が急激に低下しているのに対し、CF6試験体では、コンクリートの圧壊により徐々に剛性が、また炭素繊維の破断により急激に荷重が低下した。この時の変位(40.85mm)はCF3試験体の最大荷重時の変位(23.95mm)の1.7倍であった。この結果、シート状炭素繊維を既存コンクリート表面に貼付けることにより、最大耐力の増大と最大変位を増大

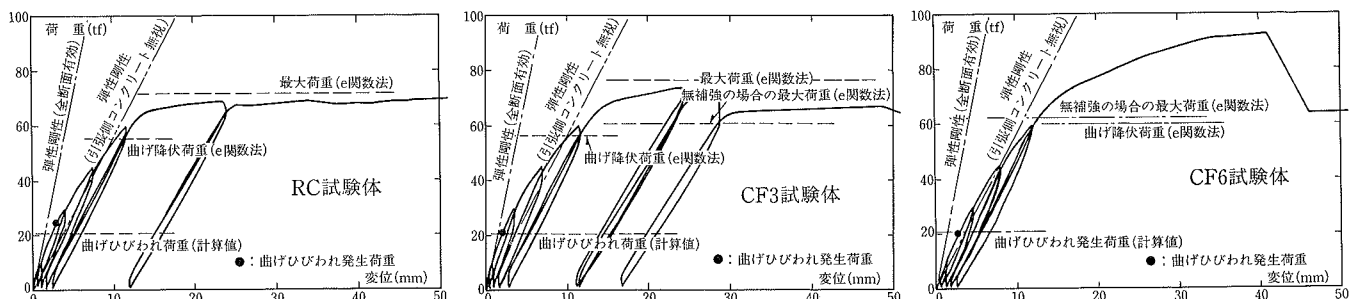


図-7 荷重-変位関係

表-4 諸荷重一覧

試験体名	曲げひびわれ荷重 (tf)		曲げ降伏荷重 (tf)		最大荷重 (tf) *	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
RC試験体	25.0	20.4 (1.23)	65.0	55.2 (1.18)	70.0	71.8 (0.97)
CF3試験体	21.0	20.4 (1.03)	66.0	56.1 (1.18)	75.0	76.4 (0.98) 60.4 (1.24)
CF6試験体	20.0	20.4 (0.98)	65.0	60.0 (1.08)	92.5	105.7 (0.88) 62.4 (1.48)

*) 括弧の値は計算値に対する実験値の比を示す
下段の値は、無補強試験体の荷重(計算値)を示す

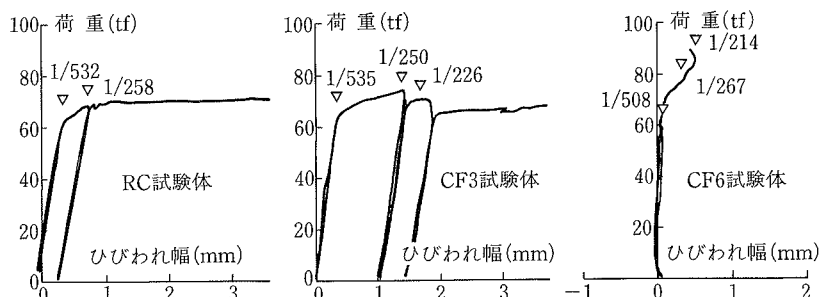


図-8 荷重-ひびわれ幅関係

させることができる。しかし、炭素繊維による初期剛性への影響は見られず、炭素繊維による補剛効果は余り期待できない。さらに、炭素繊維の貼付け量を増し、炭素繊維の破断による曲げ引張破壊からコンクリートの圧壊による圧縮破壊へと破壊モードを変えることによって最大荷重時の変位の増大と部材のエネルギー吸収の向上が期待できる。

図-8から、RC試験体及びCF3試験体では、鉄筋の降伏後、曲げひびわれ幅は増大する。最大荷重時における後者のひびわれ幅は、約2mmで、荷重の除荷によるひびわれ幅の閉鎖は少ない。しかし、補強量の多いCF6試験体では、ひびわれが分散し、鉄筋の降伏後のひびわれ幅は小さい。

炭素繊維は、一般に“引張強度は大きいが圧縮強度は小さい”という特性をもっており、炭素繊維を正負繰返し荷重を受ける柱部材などの曲げ補強材として用いる場合、残留ひびわれ幅が大きくなると、炭素繊維の座屈が早期に生じ、十分な補強効果が得られないことが予想される。このため、補強量の決定に当たっては、曲げ強度だけでなく、残留ひびわれ幅の低減についての配慮が必要であると考えられる。

3.4 実験結果のまとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- ① 既存のコンクリート表面に貼付ける炭素繊維量に応じて部材の曲げ耐力を増大させることができ、その曲げ終局耐力は、e関数法で求めることができる。
- ② 補強量を多くすることにより、炭素繊維の破断による曲げ引張破壊から、コンクリートの圧壊による曲げ

圧縮破壊へと破壊モードを変えることができ、部材の変形能とエネルギー吸収を向上させることができる。

③ 炭素繊維の貼付けによって、曲げひびわれを分散させ、ひびわれ幅の拡大を抑制することができる。しかし、部材のたわみ量を低減させる補剛効果は余り期待できない。

4. 結び

PCはり部材の曲げ疲労実験と既存実大RCはりの曲げ実験結果から、シート状炭素繊維による補強方法は既存コンクリートはり部材へも適用できることが確認された。

謝辞

曲げ疲労試験の実施にあたり、ご指導を頂きました大阪市立大学 中井 博教授、実大部材での曲げ補強実験を行なう機会を与えて頂きました東京都中央卸売市場関係者並びに実験に際し御協力御指導頂きました(財)東京建築防災センター 浜本理事長、秋田技術顧問に対し深謝致します。

参考文献

- 1) 木村, 小島, 他: 炭素繊維による既存煙突の耐震補強工法の開発 (その1), 大林組技術研究所報, No. 37, p. 73~79, (1988)
- 2) 木村, 小島: シート状炭素繊維による既存鉄筋コンクリートの曲げ補強, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム, (1992, 4)