

論文

[1195] CFRPで補強したコンクリート部材の力学的性状および設計手法

正会員○陸好宏史（埼玉大学工学部）

上原啓生（株）間組

正会員 町田篤彦（埼玉大学工学部）

1. はじめに

近年、鉄筋あるいはPC鋼材に代わる補強材としてFRPが注目を浴び、これを用いたコンクリート部材の基本的力学的特性、構造物への適用性等に関する研究が盛んに行われている。FRPは一般に高強度であるが、破断時における伸びが小さいことが鉄筋とは異なる宿命的な欠点であり、これを如何に克服して構造材料として用いるかが現在の大きな問題点のひとつである。本研究は、FRPの中でCFRP（炭素繊維強化プラスチック）を緊張材として用いたポストテンションPC部材の曲げ性状、鉄筋に代わる補強材として用いたRC部材の曲げおよびせん断性状ならびにこれらの実験結果を踏まえて、FRPを使用したRCおよびPC部材の曲げに対する設計方法を提案しようとするものである。

2. 実験概要

(1) CFRPを緊張材として用いたPC部材の実験

使用したCFRPは、連続炭素繊維をエポキシ樹脂で固めてストランド化し、さらに7本のストランドを撚り合わせて一本のケーブルとしたものである。実験に用いたCFRPおよびPC鋼棒の機械的性質を表-1に、応力-ひずみ関係を図-1に示す。供試体は、図-2に示すように、コンクリート打設前にシースを設置しておき、コンクリートが所要強度に達した後、CFRPを挿入してプレストレスを導入した。定着方法は、CFRPの端部を素線にはばらし、これを鋼製のチューブに入れて樹脂で固め、ネジを切ってナットで定着したものである。この定着装置を用いてCFRPの引張試験を行ったところ、定着部における損傷は殆ど認められなかった。プレストレスの導入は、CFRPについては定着装置に取り付けたロードセルから測定される荷重により、またPC

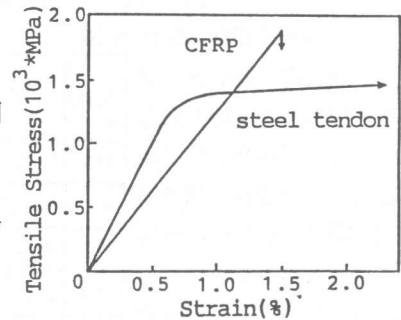


図-1 応力-ひずみ関係

表-1 使用した材料の機械的性質

Mechanical Properties	Steel Tendon	CFRP
Tensile Strength (MPa)	1460	1803
Elongation (%)	>3.0	1.5
Young's Modulus (GPa)	201	123
Bond Strength (MPa)	—	4.2

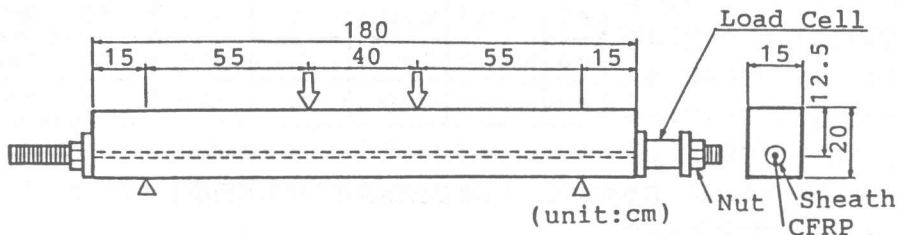


図-2 PC部材に用いた供試体の形状寸法

鋼棒については、鋼棒に貼付したひずみゲージから測定されるひずみにより制御した。実験要因は表-2に示すように、導入プレストレス量、CFRP量、ボンドおよびアンボンド工法、CFRPの付着強度の大きさとした。実験に使用したCFRPの付着強度は鉄筋とほぼ同程度（約60kg/cm²）と大きく、付着強度の大小が部材の挙動あるいは破壊性状に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、表-2中に示す2体の供試体については、CFRPにテープを巻き、付着強度を小さくしたものを使用した。

表-2 PC部材の実験要因

Beam No.	Material (Number X Diameter)	Bond Type	Introduced Prestressing Stress (MPa) (※)	Concrete Strength (MPa)
A 1	CFRP (φ10.5)	A	694 (0.42)	53.7
A 2	CFRP (φ10.5)	C	695 (0.43)	53.7
B 1	steel tendon (φ13)	A	1012 (0.74)	51.3
B 2	CFRP (2Xφ12.5)	A	2X878 (0.44)	51.3
C 1	steel tendon (φ13)	A	536 (0.39)	53.7
C 2	steel tendon (φ13)	A	573 (0.41)	51.3
C 3	CFRP (φ12.5)	A	879 (0.44)	53.7
D 1	CFRP (φ12.5)	B	1329 (0.67)	45.4
D 2	CFRP (φ12.5)	A	1224 (0.61)	45.4
D 3	CFRP (φ12.5)	B	954 (0.48)	45.4

A; Perfect bond. B; Vinyl tape was wrapped around CFRP to reduce bond strength. C; Unbonded method

(2) CFRPを補強材として用い ※; (Introduced Prestress/Tensile Strength)

たRC部材の曲げ実験

表-3 RC部材の曲げ実験要因と実験結果

Beam No.	CFRP	Concrete Strength (MPa)	Cracking Load (KN)		Ultimate Load (KN)		Failure Mode
			Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	
F 1	2Xφ7.5	29.3	10.9	8.8	60.5	60.5	●
F 2	2Xφ12.5	33.8	12.3	10.0	94.0	91.8	○
F 3	4Xφ12.5	32.2	12.0	11.8	114.8	122.2	○
F 4	2Xφ7.5	65.7	19.4	13.2	63.3	61.4	●
F 5	4Xφ12.5	64.3	19.6	19.3	181.9	166.3	○
S 6	2XD16	60.4	19.4	14.4	70.3	74.2	*

S 6; Usual deformed bars were used (fy=382(MPa))

○; Concrete in compression zone failed.

●; CFRP was finally broken.

*; Flexural tensile failure.

はCFRPの量およびコンクリート強度である。

表-4 RC部材のせん断実験要因と実験結果

実験要因を表-3に示す。

(3) CFRPを補強材として用

いたRC部材のせん断実験

せん断実験に用いた供試体は図

-3に示すもので、軸方向筋およ

びせん断補強筋ともにCFRPを

使用した。せん断補強筋は図に示すように、直径6mmのCFRPを帯鉄筋として、1本ずつ折り

曲げて製作したものである。実験要因は、せん断補強筋量および軸方向筋量、コンクリート強度

である。表-4に実験要因を示す。

Beam No.	Tensile CFRP	Compressive CFRP	Spacing of Stirrup (cm)	Concrete Strength (MPa)	Ultimate Load (KN)	
					Cal.	Exp.
P 1	6Xφ12.5	2Xφ12.5	26	26.8	198.0	98.0
P 2	6Xφ12.5	6Xφ12.5	13	26.7	309.6	166.6
P 3	6Xφ12.5	2Xφ12.5	13	69.5	341.0	196.0
P 4	8Xφ12.5	2Xφ12.5	13	65.9	348.8	235.2

載荷実験は、いずれの供試体も一方向単調載荷とし、破壊に至るまで実験を行った。

3. 実験結果

(1) PC部材の実験結果

載荷実験を行う前に、すべての供試体についてプレストレスの損失量を測定した。その結果、プレストレス導入後1箇月経過した後のプレスト

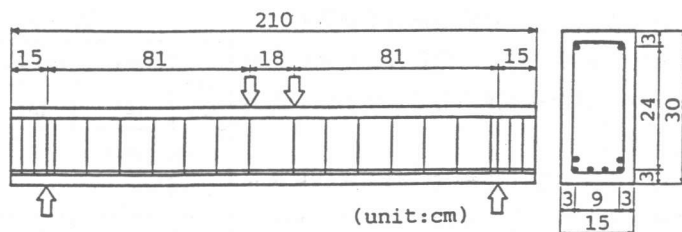
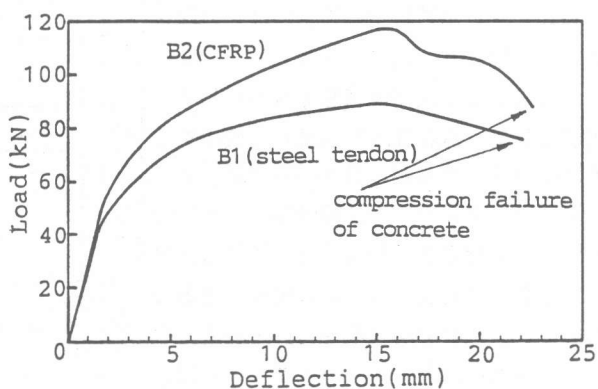
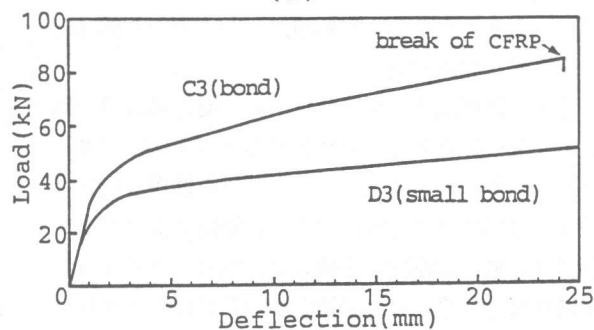


図-3 せん断実験に用いた供試体の形状寸法

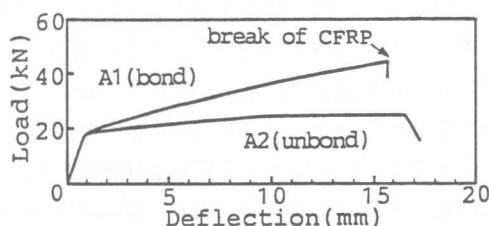
レスの損失率は、5～8%程度であった。図-4 (a)、(b)、(c)は一方荷重実験から得られた荷重-変位曲線を示している。図-4 (a)はCFRP (B2)とPC鋼棒 (B1)を用いた部材の挙動を比較したもので補強量、導入プレストレスの大きさが若干異なるため、最大耐力に違いが生じたものの、概して同じような荷重-変位挙動を示している。この場合、B1は、PC鋼棒が降伏後コンクリートが圧壊する典型的な曲げ降伏型破壊を示したが、B2はCFRPが破断強度に達する前にコンクリートが圧壊する曲げ圧縮型破壊であった。図-4 (b)に示すC3は、CFRPが大きな音とともに破断することにより終局に至り、耐力が急減した。これは、先に述べたように、CFRPには降伏棚域がなく、さらにCFRPの付着強度が大きいいため、曲げびびわれが生じた断面において応力が集中して破断が生じたと考えられる。一方、CFRPの表面にテープを巻くことによって付着強度を低減させ、他の要因はC3と全く同じ条件のもとで製作した部材 (D3)を見てみると、最大耐力は低くなるものの、CFRPは破断せず、コンクリートが圧壊することにより終局に至った。図-4 (c)はボンドとアンボンド工法による部材の性状を比較したものである。図-4 (b)と同様で、ボンド工法を用いたA1は、最終的にCFRPが破断したが、アンボンド工法によるA2は、最大耐力は30%程度小さくなるものの、CFRPは破断することなく破壊に至った。表-5は実験および計算から得られた最大耐力を比較したもので、A2、D1、D3につい



(a)



(b)



(c)

図-4 荷重-変位曲線

た。図-4 (c)はボンドとアンボンド工法による部材の性状を比較したものである。図-4 (b)と同様で、ボンド工法を用いたA1は、最終的にCFRPが破断したが、アンボンド工法によるA2は、最大耐力は30%程度小さくなるものの、CFRPは破断することなく破壊に至った。表-5は実験および計算から得られた最大耐力を比較したもので、A2、D1、D3につい

てはアンボンドPC部材として計算した。

従来の計算手法によりCFRPを用いたPC部材の耐力を推定することが可能であると言える。

以上のように、付着強度が大きいFRPを曲げ補強材として使用する場合、どのような終局破壊形式が適当であるかが問題となる。FRPが破断する場合にはその破壊は急激に起こり、極めて危険である。従って、このような破壊性状をできる限り防ぐ方法として、付着強度を低減して使用方法が考えられるが、最大耐力は低下する。一方、コンクリートの圧縮破壊をFRPの破断より先行させた場合、その破壊はFRPが破断する場合よりも幾分緩やかであるものの、FRPの高強度を有効に利用できず、使用状態において、コンクリートに過分の負担を強いることが考えられる。

(2) CFRPを軸方向補強筋として用いた部材の曲げ実験結果

図-5は実験から得られた荷重-変位曲線の一例を示したものである。CFRPのヤング係数は鉄筋の60%程度であるため、CFRPを使用したF4、F5のひびわれ発生後の剛性は、鉄筋コンクリート部材(S6)の剛性に比較してかなり小さくなる。破壊性状は、CFRPの量が多いF5はコンクリートが圧壊し、F4はCFRPが破断することによって部材が破壊した。図-6は実験および計算から得られたモーメント-曲率関係を示したものである。実験から得られた曲率は、はり部材の圧縮縁および引張縁に取り付けた変位計から求め、計算値はコンクリートとCFRPの応力-ひずみ曲線を用いて、要素分割法により求めたものである。図に示すように、実験値と計算値は破壊に至るまでよく一致しており、本実験で用いたFRPに関する限り、これを使用したコンクリート部材の曲げ-変形性状は従来のRCの曲げ解析手法により精度よく計算することができる。

(3) CFRPをせん断補強筋として用いた部材のせん断実験結果

供試体はすべて曲げ破壊する前に、斜め引張クラックが生じた箇所にあるCFRPせん断補強筋が破断することによって耐力を失った。表-4に実験結果を示す。表中、計算せん断耐力とは

表-5 PC部材の実験結果

Beam No.	Cracking Load (kN)		Ultimate Load (kN)		Failure Mode
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	
A 1	19.2	17.7	37.6	45.1	●
A 2	—	—	26.3	25.5	○
B 1	50.2	48.9	89.5	90.0	*
B 2	50.0	49.1	103.3	117.6	○
C 1	38.4	33.3	90.0	86.2	*
C 2	37.8	31.3	86.7	80.3	*
C 3	37.2	31.3	78.4	84.3	●
D 1	—	—	54.4	66.5	○
D 2	40.1	25.5	77.7	58.9	○
D 3	—	—	52.7	49.9	○

○; Concrete in compression zone failed.
 ●; CFRP was finally broken.
 *; Flexural tensile failure.
 —; Cracking load was not measured.

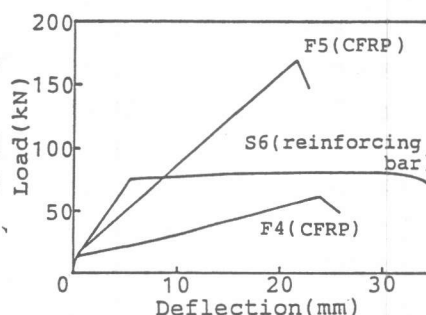


図-5 RC部材の荷重-変位曲線

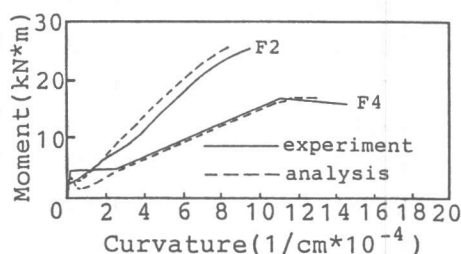


図-6 モーメント-曲率関係

土木学会コンクリート標準示方書〔1〕によるもので、せん断補強筋が降伏する時のせん断耐力である。これによるせん断耐力はいずれも実験値よりもかなり大きいことが分かる。この理由として、学会式は鉄筋コンクリートのみを対象として経験的に求められたものであるため、異なる材料に対する式の適用性は全く検討されていないこと、さらに実験ではCFRPを1本ずつ帯筋に曲げ加工したため、折り曲げ部が弱点となり、ここが最初に破断し、順次破断がウェブのせん断補強筋に進展していったため、せん断耐力が小さくなったこと等の原因が考えられる。FRPをせん断補強筋として用いる場合、最適な補強法およびそのメカニズム、そしてせん断耐力の推定法の解明等が今後の課題である。

4. FRPを用いた部材の曲げに対する設計法の検討

FRPを軸方向補強筋として曲げを受けるコンクリート部材に用いた場合、如何にして合理的かつ安全に設計するかが問題となる。これまで述べてきたように、曲げを受ける部材の終局破壊形式は、コンクリートの圧縮破壊またはFRPの破断のいずれかであり、さらにFRPの付着性状によっても最大耐力、靱性能、破壊形式が異なってくる。ここでは、本実験で用いたFRPのように、付着強度が鉄筋と同程度であるようなものを対象とし、RCおよびPCに適用する場合の設計の考え方について述べることにする。部材の設計を行う場合、先ず始めにどのような荷重状態を設定するかが問題となるが、ここではとりあえず、終局状態を限界状態と考え、以下に示す条件を設定した。

(1) 部材の終局破壊形式はコンクリートの圧縮破壊とする。

(2) FRPの高強度をできる限り有効に利用する。

(1) はこれまで述べてきたように、FRPが破断する場合は、その破壊は急激であり、極めて危険なものである。一方、コンクリートが圧壊する場合は、その破壊はFRPが破断する場合に比較して、幾分緩やかであり、さらに圧縮部のコンクリートを補強筋等によって拘束することにより、急激な破壊をある程度防げることが可能であると考えられる。よって、(1) の条件を設定した。しかし、この場合、FRPを過大に配筋することになり、FRPの高強度を有効に活用できないことが考えられる。よって(2) の条件を設定した。図-7はFRPの補強率($A_s \cdot f_{sd} / (b \cdot d \cdot f_c')$)、ここに、 A_s : FRPの総断面積、 f_{sd} : FRPの設計強度、 b 、 d : 部材断面の幅、有効高さ、 f_c' : コンクリートの設計強度)と終局モーメントを無次元化した量($M_u / (b \cdot d^2 \cdot f_c')$)、ここに、 M_u : 終局モーメント)との関係をプレストレス導入率($r = f_p / f_{sd}$ 、ここに r : プレストレス導入率、 f_p : 導入プレストレス、 f_{sd} : FRPの設計強度)を0から0.8まで変化させて示したものである。FRPの設計強度(f_{sd})は、数多くの引張試験から得られたデータから、 $f_{sd} = f_s - 3 \cdot \sigma$ (ここに、 f_s : 平均引張強度、 σ : 標準偏差)とした〔2〕。上記の関係の他に、終局時におけるFRPの応力の負担率もあわせて示している。つまり破壊よりも左側の部分、すなわちFRPが最終的に破断する場合、応力の負担率は1.0となり、右側の部分、すなわちコンクリートの圧壊が生じる部分では、FRPの応力負担率が、 $A_s \cdot f_{sd} / b \cdot d^2 \cdot f_c'$ の増加とともに小さくなり、FRPの強度が有効に使われていないことになる。この図をもとに、先に述べた(1) の条件を満足する領域は釣り合い破壊より右側の部分となる。さらに(2) の条件に関して、ここでは以下のようにして定めた。すなわち、FRPの設計強度はばらつきを考慮して定めているので、(1) の条件は十分に満足されている。従って、FRPの強度をできるだけ有効に使うためには、少なくとも設計強度の80~90%程度の応力を終局時において受け持つのが適当であろうと考えた。以上のことより、2つの条件を満足する範囲は図に示す部分である。終局状態

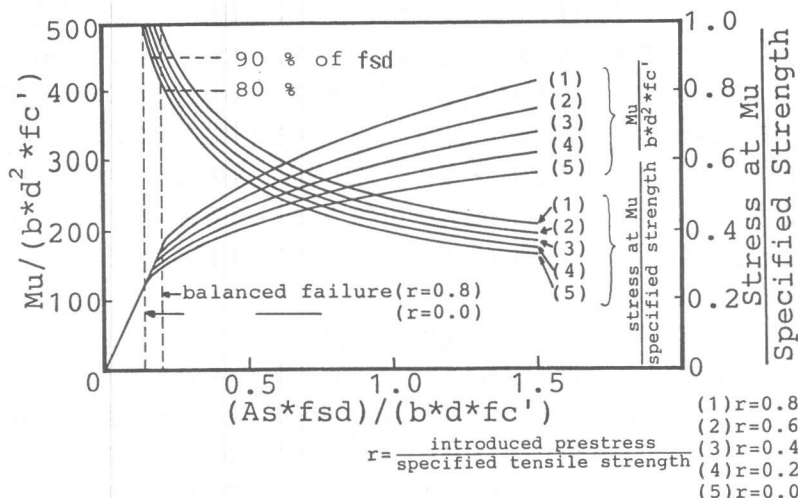


図-7 終局モーメント，軸方向筋補強率，FRPの終局時の応力レベルの関係

において、このような適用範囲を設定したとしても、実際に使用する場合にはコンクリートにどの程度の負担がかかるかを検討する必要がある。いま仮にPC部材の使用状態において、コンクリートの圧縮応力の限界値を $0.4 \cdot f_{c'}$ [1]とし、上記の条件を満足する時、コンクリートの応力が $0.4 \cdot f_{c'}$ となる時のモーメントに対する終局モーメントの比を計算すると、 $f_{c'}=500 \text{ kg/cm}^2$ の時12.8~13.3となり、かなり大きな値となる。この値は、コンクリート強度が高くなる程小さくなる。

以上のように、高い付着強度を有するFRPをRCおよびPC部材に用いた場合の曲げに対する設計の考え方の一例を示した。これについては今後さらに検討する必要がある。

5. 結論

(1) 付着強度が大きいFRPを、鉄筋あるいはPC鋼材に代わる曲げ補強材として使用した場合、終局破壊形式はコンクリートの圧壊またはFRPの破断のいずれかである。FRPが破断する場合にはその破壊は急激に起こり、極めて危険である。しかし、付着強度を低減させて使用すれば部材の耐力は低下するものの、破断が生じず靱性に富むことが確かめられた。一方、コンクリートの圧縮破壊をFRPの破断より先行させた場合、その破壊はFRPが破断する場合よりも幾分緩やかであるものの、FRPの高強度を有効に利用できず、使用状態において、コンクリートに過分の負担を強いることが考えられる。

(2) 上で得られた結果に基づいて、曲げに対する設計の考え方の一例を示した。これについては、さらに検討する必要がある。

CFRPを提供して頂いた(株)東京製綱に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書(設計編)、土木学会、昭和61年
- 2) 「新宮橋」検討報告書、石川県土木部、昭和63年
- 3) 六車・渡辺・西山、アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究、プレストレスコンクリート、Vol.26,1984