

論文 CFRP を適用した高強度 PC 部材に関する基礎的研究

赤嶺 文繁*1・酒井 博士*2・服部 篤史*3・宮川 豊章*4

要旨: 本研究は、炭素系連続繊維緊張材 (CFRP) と高強度コンクリートを組み合わせた高強度 PC 部材の曲げ特性について基礎的研究を行ったものである。先ず、コンクリートと緊張材の材料特性を試験により明らかにし、次にはり部材を製作して曲げ載荷試験を行い、解析結果と比較検討した。その結果、はり部材耐力は、円柱供試体の圧縮強度試験をもとにして、適切な応力ひずみ関係や終局ひずみを設定することで推定可能であることが判明した。

キーワード: CFRP, 高強度コンクリート, プレストレストコンクリート, 終局ひずみ

1. はじめに

現在、コンクリート構造物に対して、施工の省力化や少資源化あるいは耐久性の向上などを目的として、コンクリートの高強度化やコンクリート補強材としての炭素系連続繊維緊張材 (以下 CFRP と略す) の使用が注目されている。コンクリートの高強度化は、部材断面の縮小が可能となり、死荷重の減少によるスパンの長大化、あるいは、プレキャスト部材では軽量化による運搬効率の向上や架設工法の合理化など、施工の省力化が可能となる。また、CFRP は耐久性に優れ、その適用は構造物の長寿命化や維持補修費の削減に大きく寄与することが知られている。しかしながら、これまで高強度コンクリートと CFRP を組み合わせた構造物の研究があまり行われていないのが現状である。これらの材料は、脆性的な破壊性状を呈すことが考えられることから、特性値や材料係数などを適切に設定することが非常に重要となる。

そこで、高強度コンクリートと CFRP を組み合わせた高強度 PC はり部材の曲げ載荷試験を実施するとともに、各種材料試験で得られた

強度特性を用い、ひび割れ発生荷重や終局耐力を解析的に求め、両者の比較検討を行った。

2. 材料試験

コンクリートおよび緊張材の材料試験を実施し、これら材料の特性を明らかにする。コンクリートは圧縮強度試験を、緊張材である CFRP および PC 鋼材においては各々引張試験を実施した。

2.1 材料試験方法

(1) コンクリート

セメントには高ビーライト系セメントに超微粒子のシリカフュームをプレミックスしたタイプを用いた。コンクリートの圧縮強度は、60,100,140 N/mm²程度の3水準を想定し、それぞれ表-1中の①②③に示すような配合とした。

圧縮強度試験の試験体数は30体で、いずれもφ100×200mmの円柱供試体を用い、ロードセルによって荷重を、試験体側面に貼り付けたひずみゲージによってひずみをサンプリングタイム10msecで動的に測定した。

*1 (株)ピー・エス 開発技術第一部 工修 (正会員)

*2 (株)ピー・エス 開発技術第一部 主任研究員 (正会員)

*3 京都大学大学院工学研究科助教授 土木工学専攻 工博 (正会員)

*4 京都大学大学院工学研究科教授 土木工学専攻 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

配合	水粉体 比 (%)	最大骨材 寸法 (mm)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	消泡剤
①	36	20	50	155	431	891	956	5.597	0.013
②	20	20	50	155	775	745	800	11.625	0.023
③	16	20	50	165	1031	624	631	18.563	0.031

(2) 緊張材

CFRPおよびPC鋼材の主要諸元を表-2に示す。なお、表中のCFRP規格値は参考文献1)に示される各種試験によって求められたものであるが、これらを確認する目的で、各緊張材の引張試験を行った。試験体長さは両材料とも1mとし、試験数は各30本とした。

2.2 試験結果

(1) コンクリート

圧縮試験で得られたコンクリートの応力ひずみ関係は各供試体ごとに異なる結果となったが、平均的と考えられる代表例を図-1に、各配合の応力ひずみ関係を最小二乗法により2次式に近似した結果を表-3に示す。配合②③のコンクリート圧縮強度100N/mm²以上では、応力ひずみ関係は直線に近い形状を示した。

次に、コンクリート圧縮強度試験結果の平均値、標準偏差および変動係数を表-4に示す。表中のひずみ ϵ'_{cp} とは、圧縮強度時のひずみをさす。圧縮強度が増加するにしたがいひずみ ϵ'_{cp} は増大する。しかし、両者のばらつきを変動係数で比較した場合、圧縮強度よりひずみ ϵ'_{cp} の方が大きい。

(2) 緊張材

CFRPおよびPC鋼材の引張強度試験で得られた平均値、標準偏差および変動係数を表-5に示す。CFRPはPC鋼材に比べ、引張荷重および弾性係数の変動係数が大きい特徴を有す。また、表-2で示した引張耐力規格値と、試験で得られた引張荷重の平均値から標準偏差の3倍を減じた特性値を比較すると、PC鋼材では265kNでほぼ等しく、CFRPでは319kNと規格値を上回る結果を得た。

表-2 緊張材主要諸元

緊張材	CFRP	PC鋼材
呼 称	φ17.8	φ15.2(B)
規格値		
有効断面積(mm ²)	159.9	138.7
弾性係数(kN/mm ²)	137	200
引張耐力Pu(kN)	280	261

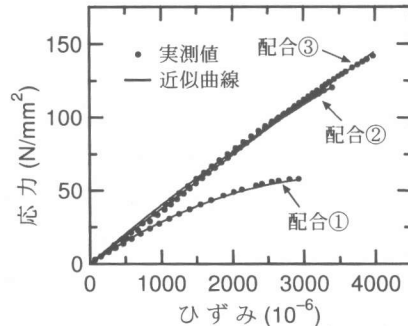


図-1 コンクリートの応力ひずみ関係

表-3 コンクリート応力ひずみ近似式[N/mm²]

配合	応力ひずみ近似式
配合①	$0.033114 \epsilon - 0.00000462 \epsilon^2$
配合②	$0.041989 \epsilon - 0.00000190 \epsilon^2$
配合③	$0.038131 \epsilon - 0.00000046 \epsilon^2$

表-4 コンクリート圧縮強度試験結果

配合	材 料 特 性	平均値	標準偏差	変動係数
①	圧縮強度 f'_{ck} [N/mm ²]	55.93	2.66	4.76%
	ひずみ ϵ'_{cp} [*10 ⁻⁶]	2975	139	4.67%
②	圧縮強度 f'_{ck} [N/mm ²]	119.80	6.04	5.04%
	ひずみ ϵ'_{cp} [*10 ⁻⁶]	3390	284	8.38%
③	圧縮強度 f'_{ck} [N/mm ²]	143.97	6.68	4.64%
	ひずみ ϵ'_{cp} [*10 ⁻⁶]	3965	453	11.42%

表-5 緊張材引張試験結果

緊張材	材 料 特 性	平均	標準偏差	変動係数
CFRP φ17.8	引張荷重Pu [kN]	348.7	9.83	2.82%
	破断ひずみ ϵ_{pu} [*10 ⁻⁶]	15,343	503	3.28%
	弾性係数 [kN/mm ²]	142.20	3.24	2.28%
PC 鋼材 φ15.2	降伏荷重 [kN]	253.1	3.32	1.31%
	引張荷重Pu [kN]	275.4	3.38	1.23%
	破断ひずみ ϵ_{pu} [*10 ⁻⁶]	76,133	3,521	4.62%
	弾性係数 [kN/mm ²]	195.9	0.86	0.44%

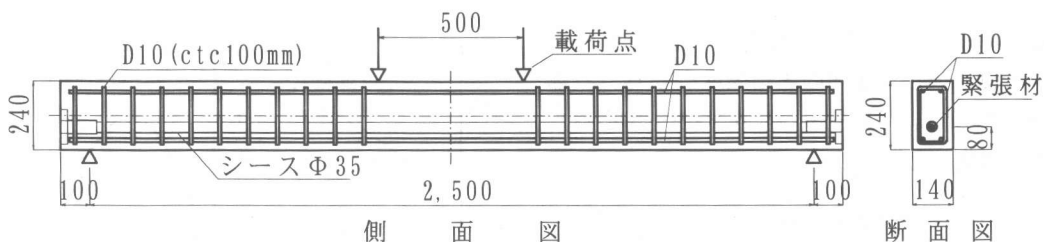


図-2 曲げ試験体 [mm]

3. 曲げ載荷試験

3.1 曲げ載荷試験方法

曲げ載荷試験体は、ポストテンション方式PCはり部材で、コンクリート打設後1週間でプレストレスを導入し、ただちにグラウトを充填した。グラウトの圧縮強度は、配合①で80.3N/mm²、配合②③で97.5N/mm²であった。緊張力は、引張耐力規格値 P_u に対する比を緊張力係数として、 $k=0.2, 0.4, 0.6$ の3水準を設定した。表-6に曲げ載荷試験体の一覧を示す。

表-6 曲げ試験体一覧表

番号	記号	配合	Con. 強度 [N/mm ²]	緊張材	緊張力係数 k
①	60-C2	①	60 (56)	CFRP	0.16
②	60-C4				0.39
③	100-C2	②	100 (120)		0.21
④	100-C4				0.32
⑤	100-C6	③	140 (144)		0.50
⑥	140-C2				0.14
⑦	140-C4	③	140 (144)	PC	0.27
⑧	140-P152				0.56

表中、カッコ内の数字は、表-4で示した曲げ載荷試験時に行った圧縮強度試験の平均値である。緊張力係数は、載荷試験直前に緊張材中央に添付したひずみゲージにより得たひずみに断面積や弾性係数の規格値を乗じて緊張力を算出し、引張耐力規格値との比を表したものである。緊張材の引張特性がはり部材耐力特性に与える影響も比較するため、試験体①～⑦の緊張材にはCFRPを、試験体⑧にはPC鋼材を使用した。

曲げ載荷試験体の寸法、配筋および載荷位置を図-2に示す。試験体寸法はすべて高さ240mm、幅140mmの矩形断面とし、支間長

2.5mの2点載荷（載荷点間隔500mm）で載荷を行い、載荷速度は約100N/secとした。等曲げ区間以外は十分なスターラップを配し、せん断破壊を防止した。

3.2 解析方法

材料試験で得られた材料特性を用い、曲げ試験体のひび割れ発生荷重および終局荷重を算定する。

(1) ひび割れ発生荷重

ひび割れ発生荷重は、コンクリートの引張軟化を考慮せず応力が中立軸からの距離に比例するものとし、はりの下縁応力が土木学会コンクリート標準示方書〔標準編〕の曲げ強度に達した荷重とした。ここで、曲げ強度 f_{bt} は、圧縮強度 f_{ck} から式(1)で算定できる。

$$f_{bt} = 0.42 f_{ck}^{2/3} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

同式は140N/mm²程度までのコンクリートにおいてもほぼ推定可能であることが報告されている²⁾ため、今回はこの式を準用することにより、実測値と比較するものとした。

(2) 曲げ耐力

a) コンクリート

曲げ耐力は、以下の仮定のもとで計算を行うものとした。

- 1) 平面保持の仮定
- 2) コンクリートの引張強度無視
- 3) コンクリートおよび鋼材の特性値は材料試験から得られた平均値を用いる
- 4) 材料係数は1.0とした

一般に、はり部材に生じる終局ひずみは、円柱供試体に生じる終局ひずみより大きいことが

知られている³⁾。横拘束筋の無いはり部材については、円柱供試体の圧縮強度 f'_{ck} からはり部材に生じる終局ひずみ ϵ'_{cu} を式(2)を用いることで推定した⁴⁾。

$$\epsilon'_{cu} = 5.508f'_{ck} + 3241 \quad [\mu] \quad (2)$$

曲げ耐力は、コンクリートの応力ひずみ曲線の仮定方法によって大きく異なることから、表-7に示す4手法を仮定して実験結果と比較することにした。計算1、2の応力ひずみ曲線を図-3(a)に、計算3を同図(b)に示す。計算1は表-3で示した近似式をそのまま使い、終局ひずみに表-4の最大ひずみ ϵ'_{cp} を用いた。計算2は、高強度の脆性的な特性を考慮してモデルを単純化するために、表-3の近似式で最大圧縮強度 f'_{ck} 以降も延長し、終局ひずみは式(2)で算定した値 ϵ'_{cu} を用いた。計算3はCollins等によって提案された式⁵⁾で、定数は表-4に示した平均値を、終局ひずみは同じく式(2)で算定した値 ϵ'_{cu} を用いた。また、比較のためコンクリート標準示方書（以下示方書と略す）に示された応力ひずみ曲線を計算4として曲げ耐力を算出した。終局ひずみをまとめると表-8となる。

b) 緊張材

図-4に曲げ耐力計算で用いた緊張材の応力ひずみ関係を示す。CFRPとPC鋼材の引張強度と破断ひずみは、材料試験で得られた実測値の平均値を用いた。応力ひずみ経路においては、CFRPでは完全弾性体として、PC鋼材では示方書で示されているPC鋼より線の応力ひずみ関係を準用した。平均値を使用した理由として、今回の曲げ試験においては、すべての試験体がコンクリートの圧縮破壊により終局に至ることを想定して供試体の諸元が決定されているため、緊張材の強度特性のばらつきは解析結果に影響しないと判断したためである。

3.3 試験結果および計算結果

(1) 荷重とスパン中央変位の関係

曲げ載荷試験における荷重とスパン中央変位の関係を図-5に示す。図中の丸数字は試験体番

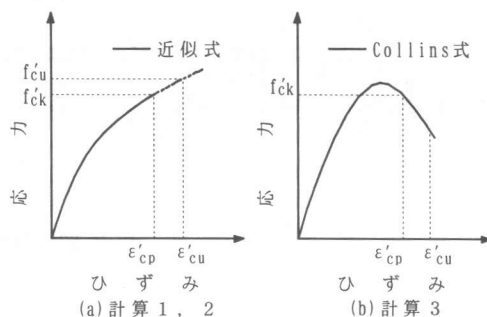


図-3 曲げ耐力計算説明図

表-7 コンクリート圧縮縁応力分布条件

コンクリート圧縮縁応力分布	
計算1	圧縮強度試験結果（表-3）
計算2	表-3の近似式を延長した曲線
計算3	Collinsによって提案された式
計算4	示方書による式

表-8 計算で用いた終局ひずみ $[\mu]$

配合	計算1 (圧縮試験)	計算2, 3 (式2)	計算4 (示方書)
①	2975	3549	3093
②	3390	3901	2500
③	3965	4034	2500

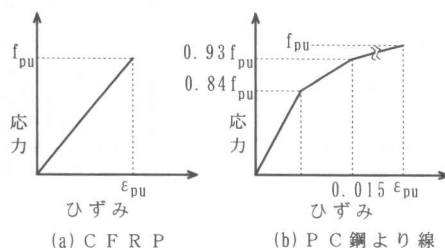


図-4 緊張材の応力ひずみ曲線

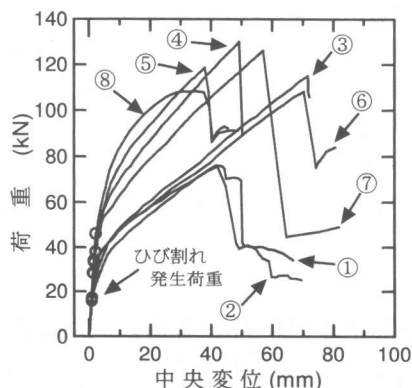


図-5 荷重とスパン中央変位

表-9 曲げ試験結果および計算結果一覧表

[kN]

番号	ひび割れ発生荷重			終 局 荷 重								
	実測値	計算値	実/計	実測値	計算1	実/計1	計算2	実/計2	計算3	実/計3	計算4	実/計4
①	15.77	20.57	0.77	76.17	58.31	1.31	63.70	1.20	63.01	1.21	55.82	1.36
②	17.14	24.71	0.69	75.51	60.02	1.26	64.43	1.17	63.78	1.18	61.33	1.23
③	28.13	34.03	0.83	114.93	96.67	1.19	107.19	1.07	104.37	1.10	91.96	1.25
④	34.20	40.59	0.84	129.90	110.05	1.18	119.52	1.09	118.56	1.10	103.61	1.25
⑤	33.37	43.36	0.77	118.73	99.27	1.20	105.78	1.12	105.51	1.13	92.10	1.29
⑥	28.44	34.61	0.82	108.07	101.16	1.07	102.59	1.05	105.90	1.02	92.81	1.16
⑦	37.99	39.59	0.96	126.21	106.08	1.19	107.49	1.17	110.84	1.14	97.00	1.30
⑧	46.38	55.40	0.84	108.27	99.47	1.09	99.67	1.09	100.41	1.08	99.23	1.09

号を示している。すべての試験体で最大荷重直後にコンクリート圧縮破壊によって耐力が急激に低下した。コンクリートのひび割れ発生以降、最大耐力までを比較すると、緊張材をCFRPとした①～⑦ではほぼ一定勾配で最大耐力に至るのに対して、PC鋼材とした⑧では最大耐力付近において変位が急激に増大する挙動が見られた。また、緊張力係数に着目すると、緊張力係数の小さい①③⑥では早い段階でひび割れが生じ変位が増大するが、緊張力係数の大きい④⑤⑦ではひび割れ発生荷重が大きいため比較の変位の小さいものとなった。

(2) ひび割れ発生荷重

はり部材のひび割れ発生荷重実測値と式(1)の曲げ強度式を用いた計算結果を表-9に、それらの比較を図-6に示す。ここで、実測値のひび割れ発生荷重とは、はり等曲げ区間の断面下縁に配置したパイゲージの値が急激に増加した荷重をいう。計算値はすべて実測値を上回っており、式(1)の高強度コンクリートへの適用は、曲げ強度を過大評価する恐れがあるため注意を要する。また、図-6より実測値と計算値の関係は回帰線の傾きで表され、実測値は計算値のおよそ83%であった。

(3) 終局荷重

終局荷重の実測値および計算値を表-9、図-7に示す。ここで、終局荷重は実測値の最大荷重を指す。計算結果はいずれの供試体においても実測値よりも小さい値となった。今回行った4種類の計算方法を比較すると、計算2および3

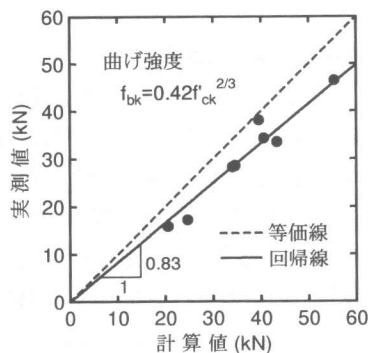


図-6 ひび割れ発生荷重の比較

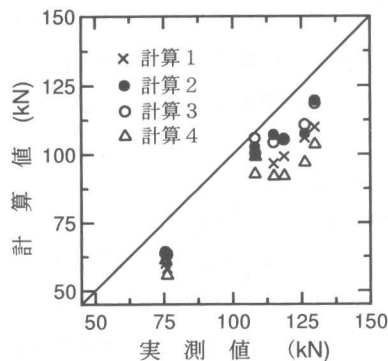


図-7 終局荷重の比較

の計算結果はほぼ同じ値で最も実測値に近く、次いで計算1、4の順で実測値との差が大きくなった。計算2と3では、コンクリートの軟化考慮の有無に違いがあるものの、終局ひずみ ϵ'_{cu} までの積分値いわゆる圧縮合力およびその作用位置の両者がほぼ等しいことから、同程度の計算結果となった。また、計算4では、特にCFRPを使用した場合に実測値との差が大きく、このような脆性材料を緊張材として用いた

場合には精度が低下する結果となった。

次に、はり部材に生じた終局時の推定圧縮応力 f_{cu} と円柱供試体で得られた圧縮強度 f_{ck} の関係を図-8に示す。ここでいう推定圧縮応力 f_{cu} とは、計算2においては表-3で示した応力ひずみ近似式に式(2)で算出した終局ひずみを代入したもので、計算3においてはCollins式による最大応力である。図-8によると、圧縮強度と推定圧縮応力の関係はおおよそ線形関係にあり、両者の比は計算2において1.10、計算3では1.03となった。

(4) 終局ひずみの再確認

ここで、式(2)の妥当性を検証するために実測値との比較を行う。図-9は、はり部材のコンクリート上縁に添付したひずみゲージから得た終局ひずみと円柱供試体の圧縮強度との関係を示している。図-9より実測値の平均と式(2)はほぼ一致しているのがわかり、はり部材の曲げ耐力計算における式(2)の適用は妥当であることが確かめられた。

ただし、今回のはり部材には横拘束筋が施されていないため、横拘束筋のある場合は別途推定式の提案が必要であると考えます。

4. まとめ

高強度コンクリートとCFRPを組み合わせた高強度PC部材の曲げ載荷試験を行った。以下に、本論で得られた知見をまとめる。

- 1) コンクリート圧壊先行型の高強度PC部材では、最大耐力直後に耐力が急激に低下し、脆性的な破壊形態を呈す。
- 2) CFRPを適用したはり部材は、ひび割れ発生、引張鉄筋降伏後、一定勾配で最大耐力に至るが、PC鋼材を使用した部材では、最大耐力付近において変位が急激に増大する。
- 3) CFRPのような脆性材料を緊張材とした場合、コンクリート示方書による耐力算定方法ではその精度が低下する。しかしながら、円柱供試体を使用した圧縮強度試験から得られた応力ひずみ曲線およびはりの終局ひずみ

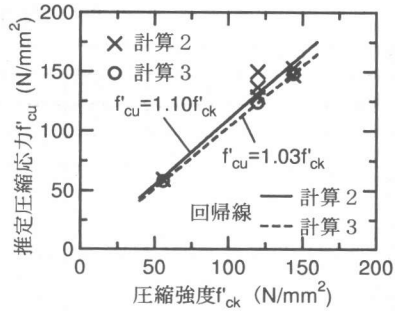


図-8 推定圧縮応力

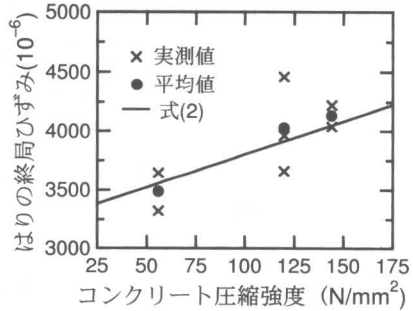


図-9 圧縮強度とはりの終局ひずみ

を適切に考慮することで、はり部材耐力が推定可能となる。

参考文献

- 1)連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用：土木学会コンクリートライブラリ-72, 1992.4
- 2)高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査：日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990.10,
- 3)建設省土木研究所他：高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書, 1994.3
- 4)鈴木基行他：純曲げを受ける超高強度コンクリートはり部材の力学的特性, コンクリート工学論文集, 第4巻, 第1号, 1993.1
- 5)Michael P. Collins et al., Prestressed Concrete Structure : Prentice-Hall, 1991
- 6)シリキウムを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)：土木学会コンクリートライブラリ-80, 1995.10
- 7)白濱昭二：高性能緊張材を用いたプレストレストコンクリート部材に関する基礎的研究, 2000.3