

# FRP緊張材を用いた桁部材のじん性改善法に関する研究

加藤 武彦\*1・林田 則光\*2・乗富 博之\*3・久保 隆司\*4

## 1. はじめに

FRP 緊張材を用いて、ポストテンション方式によりプレストレスを導入し、シース内にグラウトを注入した桁部材を従来の PC 部材と比較してみると、曲げひびわれ荷重はプレストレス導入力に左右されるため、ほぼ同じとなるが、降伏荷重はヤング率の差により、従来の PC 部材の方が若干大きくなる。ただ、FRP 緊張材の場合は、曲げ降伏後も耐力は上昇し、終局時の耐力は、圧縮域のコンクリート圧壊ではなく、緊張材や引張補強筋の破断で決まる場合がほとんどとなる。そのため、部材の終局時の変形も在来の PC 鋼材を用いた場合より小さくなる。これは、FRP 緊張材に降伏点がなく破断まで一様に耐力が上昇し、かつ、破断時の伸び率が、従来の PC 鋼材に比しかなり小さいことが主な原因と考えられる。このような部材を構造物のフレームのなかに組み込むためには、構造物の安全上、部材のぜい性破壊を防止し、フレームの変形に追従できる変形能を部材に与えてやる必要がある。

部材の変形能の評価方法としては終局曲げモーメント時の曲率と降伏時の曲率の比を曲率じん性と定義し、これによって評価している場合が多い。ただ、現在は、まだ FRP 緊張材を用いた PC 部材の変形などに関する研究は少ない。

FRP 緊張材を用いた PC 桁のじん性改善をはかるには、まず、終局時に緊張材で破断しないようにすることが肝要である。その方法としては、FRP 緊張材の伸び性能の改善をはかることも考えられるが、最終的には、部材としてのじん性改善をはかる必要がある。

本報告は、FRP 緊張材を用いた PC 桁の終局時の変形性能（じん性）を改善するために、緊張材をアンボンド化した場合の部材の曲げ性能把握を目的に行った曲げ荷重実験結果について述べたものである。

なお、本研究は、FRP 緊張材研究会（ゼネコン・専

業者 4 社、メーカー 3 社で構成）での当社担当の研究をまとめたものである。

## 2. 曲げ荷重実験

### 2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に、試験体形状を図-1 に、材料特性を表-2 に示す。試験体は、断面が 25 cm×20 cm、長さ 250 cm であり、試験体数は、緊張材および引張鉄筋

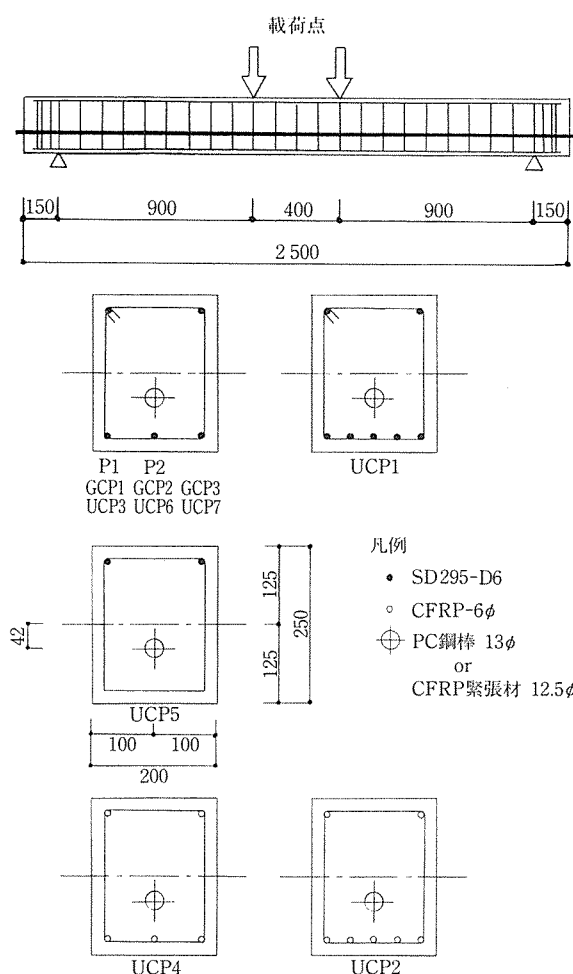


図-1 試験体断面形状

\*1 Takehiko KATO : (株)熊谷組技術研究所建築構造研究部副部長

\*2 Norimitsu HAYASIDA : (株)熊谷組技術研究所建築構造研究部研究員

\*3 Hiroyuki NORIDOMI : (株)熊谷組技術研究所建築構造研究部研究員

\*4 Takashi KUBO : (株)熊谷組技術研究所建築構造研究部研究員

表-1 試験体一覧

試験体名	グラウトの有無	有効プレストレス	引張鉄筋比	緊張材種類	
P 1	グラウト	8.7 tf	0.21 % ST	PC 鋼棒(13φ C-1)	
P 2	アンボンド		0.21 % ST	PC 鋼棒(13φ C-1)	
GCP 1	グラウト	0.6 $P_u$ (8.7 tf)	0.21 % ST	1-CFRP 12.5φ	
GCP 2			0.21 % CF	1-CFRP 12.5φ	
GCP 3			—	0.21 % ST	1-CFRP 12.5φ
UCP 1	アンボンド	0.6 $P_u$ (8.7 tf)	0.36 % ST	1-CFRP 12.5φ	
UCP 2			0.36 % CF	1-CFRP 12.5φ	
UCP 3			0.21 % ST	1-CFRP 12.5φ	
UCP 4			0.21 % CF	1-CFRP 12.5φ	
UCP 5			0 %	1-CFRP 12.5φ	
UCP 6			0.4 $P_u$ (5.8 tf)	0.21 % ST	1-CFRP 12.5φ
UCP 7			—	0.21 % ST	1-CFRP 12.5φ

注) ST: SD 295 D 6, CF: CFRP 6φ(引張鉄筋は異形 CFRP, 緊張材はより線 CFRP)

表-2 材料特性

材料	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)
PC 鋼棒 13φ	1.327	13 670	14 140	$2.1 \times 10^6$	11.5
CFRP 12.5φ	0.76	—	21 300	$1.4 \times 10^6$	1.6
SD 295 D 6	0.327	3 600	5 400	$2.1 \times 10^6$	22.7
CFRP φ6	0.283	—	16 600	$1.3 \times 10^6$	1.3

材料	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
コンクリート	406	$2.6 \times 10^5$	0.143

の種類, 有効プレストレス, グラウトの有無, 引張鉄筋比などを要因とした 12 体である。なお, 使用緊張材は 12.5φ のより線タイプの CFRP 緊張材と 13φ の PC 鋼棒を, 引張補強筋は, 6φ の異形 CFRP 筋と SD 295 の D 6 筋を用いた。

### 2.2 加力および測定方法

実験状況を写真-1 に, 載荷履歴を表-3 に, 計測位置を図-2 に示す。載荷は, 支持スパンが 220 cm, 純曲げ区間 40 cm, せん断スパン比 ( $a/D$ ) 3.6 の単純梁方式による中央 2 点載荷である。

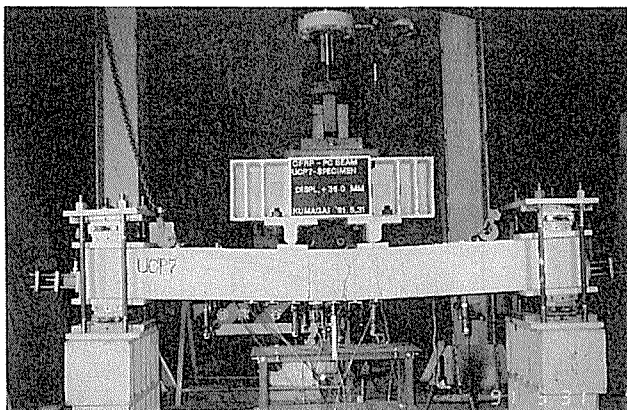


写真-1 実験状況

表-3 載荷履歴

載荷ステップ	加力段階	制御方式	繰返し回数 $N$
第 1 ステップ	初ひびわれ時	荷重	2
第 2 ステップ	$\delta = 3$ mm	変位	2
第 3 ステップ	$\delta = 6$ mm	変位	2
第 4 ステップ	$\delta = 18$ mm	変位	2
第 5 ステップ	$\delta = 36$ mm	変位	2
第 6 ステップ	最終破壊	変位	1

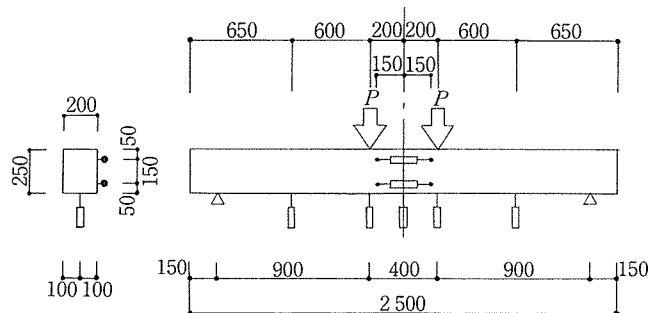


図-2 計測位置

### 2.3 解析

曲げひびわれモーメント, 曲げ破壊モーメントを, 日本建築学会 PC 規準略算式および  $e$  関数法を用いて求め, 実験値との比較を行った。この場合, アンボンド緊張材の評価は, 各荷重時における部材全長にわたる FRP 緊張材の伸び変形増分と緊張材配置位置でのコンクリート変形増分が等しくなる適合条件を用いて緊張材の引張応力度を修正し求めた。

## 3. 実験結果

実験結果一覧を表-4 に, 曲げモーメント-曲率曲線 ( $M-\phi$  曲線) を図-3 に示す。

### 3.1 曲げひびわれ荷重

ひびわれ発生荷重は, 主として, プレストレス導入力に左右される。緊張材の種類, グラウトの有無, 引張補強筋量および種類に対しては有意差が認められない。

実験値と計算値の比は, 0.9~1.13 でほぼ一致している。

### 3.2 ひびわれ状況

最終ひびわれ状況を図-4 に示す。

グラウトタイプとアンボンドタイプ試験体を比較するとグラウトタイプ試験体の方がひびわれがよく分散し, ひびわれ幅も小さい。PC 鋼棒と CFRP 緊張材を用いた試験体では, CFRP 緊張材の方がグラウトおよびアンボンドタイプともひびわれは分散している。これは, コンクリートとの付着性能や弾性係数の差によるものと思われる。引張補強筋についてもほぼ同じ傾向が見られ CFRP 筋の方が普通鉄筋 SD 295 よりもひびわれが分散している。引張補強筋は多いほどひびわれは分散する

◇研究報告◇

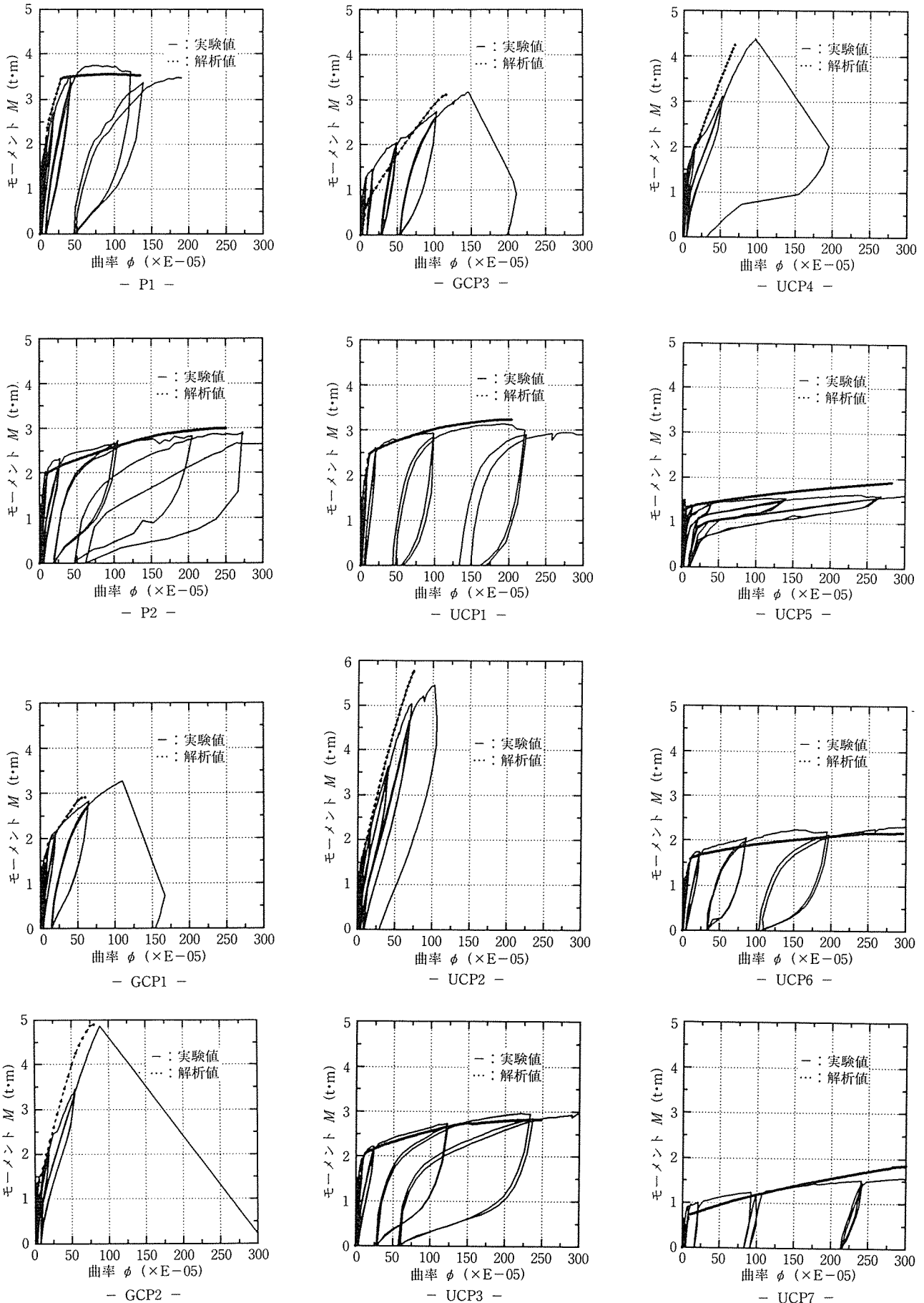


図-3 曲げモーメント-曲率曲線 ( $M-\phi$  曲線)

表-4 実験結果一覧

試験体名	初曲げひびわれ時*			降伏時			曲げ終局時			曲率じん性率 $U_\phi$ ( $\phi_u/\phi_y$ )	破壊形式
	荷重 (tf)	M (tf·m)	$\phi$ ( $\times 10^{-5}/\text{cm}$ )	荷重 (tf)	M (tf·m)	$\phi$ ( $\times 10^{-5}/\text{cm}$ )	荷重 (tf)	M (tf·m)	$\phi$ ( $\times 10^{-5}/\text{cm}$ )		
P 1	3.96	1.78	4.62	6.30	2.84	21.16	7.63	3.43	227.29	10.74	コンクリート圧壊 $\delta_{\max}=47.65$ mm
	3.50	1.58	4.00	5.47	2.46	12.00	7.80	2.57*	136.00	11.33	
P 2	3.84	1.73	5.20	5.25	2.36	33.60	6.14	2.76	472.00	14.05	コンクリート圧壊 $\delta_{\max}=42.52$ mm
	3.50	1.58	5.00	4.47	2.01	12.00	6.51	2.93	250.00	20.83	
GCP 1	3.16	1.42	2.76	4.96	2.23	24.53	7.27	3.27	110.27	4.50	CFRP 緊張材破断 $\delta_{\max}=27.52$ mm
	3.50	1.58	6.51	4.16	1.87	10.24	6.42	2.84*	55.24	5.39	
GCP 2	3.08	1.39	2.62	—	—	—	10.81	4.86	88.40	—	CFRP 緊張材破断 $\delta_{\max}=32.76$ mm
	3.50	1.58	7.87	—	—	—	10.84	5.10*	80.37	—	
GCP 3	1.89	0.85	3.07	3.53	1.59	22.27	7.03	3.16	146.75	6.58	CFRP 緊張材破断 $\delta_{\max}=51.64$ mm
	1.89	0.85	11.00	2.30	1.04	21.00	6.91	2.57*	116.00	5.52	
UCP 1	3.34	1.50	2.89	6.02	2.71	31.78	6.55	2.95	285.11	8.97	コンクリート圧壊 $\delta_{\max}=56.41$ mm
	3.50	1.58	4.00	5.33	2.40	12.00	7.13	—	212.00	17.67	
UCP 2	3.62	1.63	5.24	—	—	—	12.13	5.46	101.73	—	コンクリート圧壊, CFRP 主筋破断 $\delta_{\max}=50.91$ mm
	3.50	1.58	6.00	—	—	—	12.78	—	76.00	—	
UCP 3	3.44	1.55	3.38	5.01	2.26	29.11	6.65	2.99	376.44	12.19	コンクリート圧壊 $\delta_{\max}=60.04$ mm
	3.50	1.58	4.00	4.56	2.05	12.00	6.31	—	250.00	20.83	
UCP 4	3.17	1.43	2.40	—	—	—	9.77	4.40	95.29	—	CFRP 主筋破断 $\delta_{\max}=34.14$ mm
	3.50	1.58	8.00	—	—	—	9.48	—	70.00	—	
UCP 5	3.31	1.49	3.91	3.00	1.35	6.80	3.81	1.75	343.69	50.54	コンクリート圧壊 $\delta_{\max}=47.24$ mm
	3.50	1.58	4.00	2.98	1.34	12.00	4.26	—	282.00	23.50	
UCP 6	2.65	1.19	3.73	3.98	1.79	28.09	5.16	2.32	300.53	10.70	コンクリート圧壊 $\delta_{\max}=52.48$ mm
	2.96	1.33	7.00	3.63	1.63	12.00	4.60	—	296.00	24.67	
UCP 7	1.43	0.64	1.91	2.15	0.97	10.98	3.95	1.77	411.51	37.48	コンクリート圧壊 $\delta_{\max}=70.64$ mm
	1.89	0.85	8.00	1.65	0.74	10.00	4.17	—	299.00	29.90	

上段：実験値，下段： $e$  関数法による解析値。ただし，\*は学会 PC 規準略算式による。

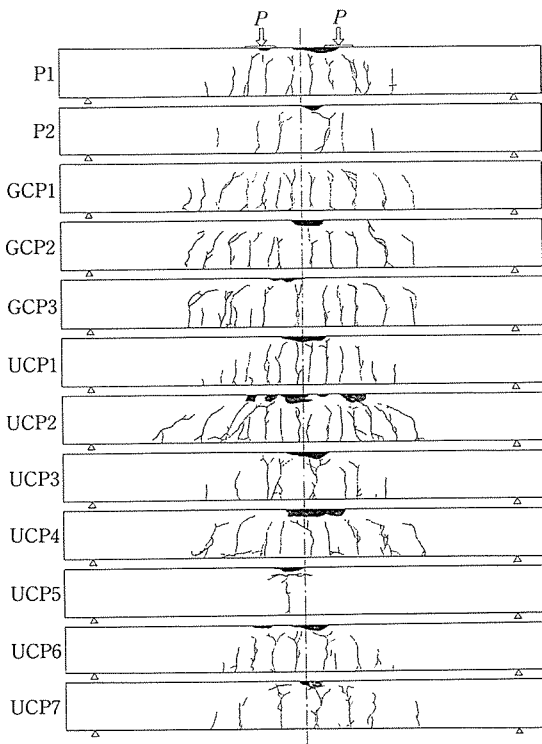


図-4 最終破壊状況

が、プレストレスを導入し引張補強筋を配置しない試験体 (UCP 5) では、中央部 1 か所にひびわれが集中した。

### 3.3 降伏荷重

図-5 に、 $M-\phi$  曲線の包絡線を示す。

降伏荷重を、引張補強筋に貼付したストレインゲージ

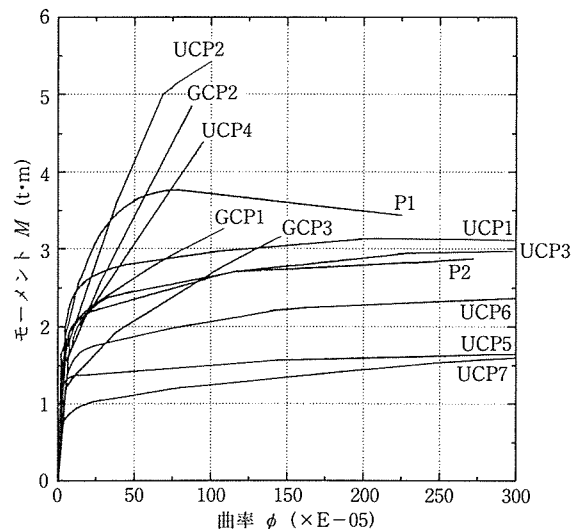


図-5  $M-\phi$  包絡線

## ◇研究報告◇

の値および実験値の  $M-\phi$  曲線の折れ曲がり点から求めて結果を比較すると、緊張材種類では CFRP 緊張材より PC 鋼棒が、グラウトとアンボンドタイプではグラウトタイプの方が大きい値を示した。また、引張補強筋は多い方が、プレストレス導入力は大きい方が降伏荷重は高い値を示した。

### 3.4 降伏後の剛性

PC 鋼棒を用いた試験体ではグラウトおよびアンボンドタイプとも降伏後の耐力上昇は見られない。CFRP 緊張材を用いた試験体ではアンボンドタイプは PC 鋼棒と同じ傾向であるが、グラウトタイプでは、引張補強筋量やプレストレス導入力に関係なく、降伏後も耐力は上昇する。これは、CFRP 緊張材に降伏点がなく、破断時まで弾性挙動を示すためである。特に、緊張材と引張補強筋に CFRP を用いた試験体では、グラウトおよびアンボンドとも降伏点は存在せず、最終破壊時まで耐力は一様に上昇する。

### 3.5 曲げ終局耐力

曲げ終局耐力は、緊張材種類にかかわらずアンボンドタイプよりもグラウトタイプの方が高い値を示している。CFRP 緊張材を用いた試験体では、アンボンドタイプの場合、プレストレス導入量が大きい方が高い値となるが、グラウトタイプの場合はほぼ同じ値となる。また、引張補強筋は多い方が、引張補強筋の種類は CFRP の方が普通鉄筋よりも高い値を示している。

### 3.6 破壊状況

破壊は、すべての試験体が曲げ破壊であるが、コンクリート圧壊先行型、緊張材破断先行型、引張補強筋破断先行型の3つのモードが見られた。PC 鋼棒を用いた試験体 (P 1~2) は、グラウト、アンボンドにかかわらずすべてコンクリート圧壊先行型、CFRP 緊張材を用いた試験体は、グラウトタイプ試験体のうち、プレストレスを導入している試験体 (GCP 1,2) では緊張材破断先行型、プレストレスを導入していない試験体 (GCP 3) ではコンクリート圧壊先行型となっている。ただし、この試験体の場合、コンクリート圧壊後すぐに緊張材が破断した。また、アンボンドタイプのうち、普通鉄筋を用いた試験体 (UCP 1,3,5~6) と引張補強筋を使用していない試験体 (UCP 5) はコンクリート圧壊先行型、CFRP 筋を用いた試験体 (UCP 2,4) は引張補強筋破断先行型となっている。

コンクリート圧壊先行型の試験体は、降伏後限界変形まではほぼ安定した挙動を示すが、緊張材破断先行型および引張補強筋破断先行型試験体においては、緊張材、引張補強筋破断後、ぜい性的な破壊性状を示した。

### 3.7 変形性状

CFRP 緊張材を用いた試験体においては、緊張材の

アンボンド化をはかることにより、曲げ終局時において大幅な変形能改善効果が見られた。これらを曲率じん性で比較してみると、有効プレストレスと引張補強筋の種類および本数が同じ試験体 (P 1, P 2, UCP 3) では、CFRP 緊張材を用いた試験体においても、ほぼ PC 鋼棒を用いた試験体と同じ曲率じん性 ( $U_{\phi}=10.7\sim 14.0$ ) を確保することができた。ただし、引張補強筋に CFRP 筋を用いた試験体 (UCP 2,4) においては、補強筋の破断によって最終耐力が決まるため、曲率じん性は、ほぼグラウトタイプ試験体と同じ ( $U_{\phi}=4.5\sim 6.6$ ) 程度になる。このような引張補強筋破断先行型試験体では、CFRP 筋の伸び変形能が小さいため、本数をふやせばふやすほど最終耐力は上昇するが、曲率はほぼ一定で、結局はじん性改善にはつながらない結果となっている。

つまり、部材の曲率じん性を改善するには、FRP 緊張材に破断させない工夫をすると同時に、引張補強筋も破断しないようにすることが大事である。

### 3.8 ひずみ性状

各試験体の最終破壊時における緊張材、引張補強筋、コンクリートのひずみの測定結果と各材料の破壊ひずみを比較したものを表-5 に示す。

コンクリート圧壊先行型の試験体 (P 1~2, UCP 1,3,5~7) においては、コンクリート部のひずみ余裕度が緊張材および引張補強筋よりも小さいため、コンクリートの圧壊で最終耐力となっている。同様に、緊張材破断先行型の試験体 (GCP 1~3) においては緊張材が、引張補強筋破断先行型の試験体 (UCP 2,4) においては、CFRP 筋のひずみ余裕度が小さくなり破断している。

このように、部材の曲率じん性を改善するためには、部材終局時におけるコンクリート圧縮部のひずみ余裕度を緊張材や引張補強筋のそれより小さくしてコンクリート圧壊先行型にしてやる必要がある。ただし、引張補強筋に CFRP 筋を使用する場合には、引張補強筋の破断が部材の破壊を誘因するため、引張補強筋の配置位置を考慮したり伸び性能のよい FRP 筋を用いるなどの方法を講じて、引張補強筋のひずみ余裕度を緊張材やコンクリート圧縮部のそれより大きくし、コンクリート圧壊先行型にするようにしなければならない。

## 4. ま と め

今回、FRP 緊張材をアンボンド化した PC 桁の曲げ載荷実験を行い、以下の結論を得た。

- ① CFRP 緊張材をアンボンド化した試験体のひびわれ発生荷重は、グラウトタイプ試験体や従来の PC 鋼棒を用いた場合と同じようにプレストレス導入力に左右される。
- ② CFRP 緊張材を用いた部材のひびわれ発生荷

表-5 最終破壊時ひずみ余裕度一覧

( )の値は、e 関数法による解析値。

試験体番号	ストレインゲージ貼付位置	破壊時ひずみ実測値 $\mu$	各材料の破壊ひずみに対する割合 %					ひずみ余裕度	破壊形式
			0%	20%	40%	60%	80%		
P1	PC鋼棒	14 402 (12 390)						87.5%	コンクリート圧壊
	SD295 D6	80 960 (30 244)						64.4	
	圧縮コンクリート	3 293 (3 894)						17.7	
P2	PC鋼棒	16 442 (9 436)						85.7	コンクリート圧壊
	SD295 D6	51 538 (33 515)						77.3	
	圧縮コンクリート	3 258 (4 000)						18.5	
GCP1	CFRP12.5φ	15 401 (16 000)						3.7	CFRP緊張材
	SD295 D6	24 978 (15 525)						89.0	
	圧縮コンクリート	3 350 (2 212)						16.2	
GCP2	CFRP12.5φ	13 744 (16 000)						14.1	CFRP筋
	CFRP 6φ	12 939 (10 512)						0.5	
	圧縮コンクリート	3 633 (2 287)						9.2	
GCP3	CFRP12.5φ	12 870 (16 000)						19.6	コンクリート圧壊 CFRP緊張材
	SD295 D6	45 407 (26 722)						80.0	
	圧縮コンクリート	4 600 (2 927)						0	
UCP1	CFRP12.5φ	9 916 (10 353)						38.1	コンクリート圧壊
	SD295 D6	53 545 (4 000)						76.5	
	圧縮コンクリート	4 758 (4 000)						0	
UCP2	CFRP12.5φ	11 129 (9 487)						30.0	CFRP筋
	CFRP 6φ	22 306 (13 000)						0	
	圧縮コンクリート	4 931 (3 899)						0	
UCP3	CFRP12.5φ	11 933 (12 155)						25.4	コンクリート圧壊
	SD295 D6	50 996 (32 635)						77.6	
	圧縮コンクリート	4 188 (4 000)						0	
UCP4	CFRP12.5φ	9 650 (9 339)						39.7	CFRP筋
	CFRP 6φ	14 903 (13 000)						0	
	圧縮コンクリート	4 405 (2 105)						0	
UCP5	CFRP12.5φ	12 582 (11 052)						21.4	コンクリート圧壊
	SD295 D6	—						—	
	圧縮コンクリート	4 083 (4 000)						0	
UCP6	CFRP12.5φ	9 516 (10 101)						40.5	コンクリート圧壊
	SD295 D6	25 413 (36 912)						88.8	
	圧縮コンクリート	4 541 (4 000)						0	
UCP7	CFRP12.5φ	5 806 (4 707)						63.7	コンクリート圧壊
	SD295 D6	85 429 (41 063)						62.4	
	圧縮コンクリート	4 689 (4 000)						0	

注：各材料の破壊ひずみ

① PC鋼棒13φ 11.5% ② SD295 D6:22.7% ③ CFRP 12.5φ : 16.7% ④ CFRP 6φ : 1.3% ⑤ コンクリート圧縮部 : 0.4%

#### ◇研究報告◇

重、降伏荷重および曲げ終局耐力は、PC 規準式および  $e$  関数法でほぼ模擬できる。

③ CFRP 緊張材をアンボンド化することにより、コンクリート圧壊先行型の破壊モードにすることができ、曲率じん性を従来の PC 緊張材の場合とほぼ同等にすることができる。

④ しかし、CFRP 緊張材と CFRP 筋を併用した場合には、部材降伏点がなく、CFRP 筋が最初に破断する可能性があるため、注意が必要である。

以上、CFRP 緊張材のアンボンド化による、じん性改善効果を把握することができた。

ただ、FRP 緊張材をアンボンド化して実構造物へ適用する場合には、まだ、つぎのような解決すべき問題点があると思われる。

- ① 定着部の応力集中による、定着部の疲労に対する信頼性の問題。
  - ② 曲線配置する場合の、FRP 緊張材の曲線部の荷重伝達に対する信頼性の問題。
  - ③ アンボンド緊張材の防錆に関する信頼性の問題。
- 今後、これらの問題についての検討を行い、実構造物への早期適用をはかるつもりである。

#### 参 考 文 献

- 1) 加藤武彦, 石橋久義, 河口俊郎: CFRP 緊張材用定着具の開発と PC 桁曲げ載荷実験, プレストレストコンクリート技術協会 1988 年 9 月
- 2) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説, 1986 年 1 月

【1991 年 9 月 17 日受付】

---

#### ◀刊行物案内▶

## 第 29 回 研究発表会講演概要

体 裁 : B5 判 116 頁

頒布価格 : 3 000 円 (送料 : 350 円)

内 容 : (1) プレストレストコンクリート部材の累加最大曲げ耐力について, (2) プレストレストコンクリート梁と鉄骨柱との接合法に関する基礎実験, (3) プレストレスト鉄骨鉄筋コンクリート梁部材の曲げ強度について, (4) アウトケーブルを用いたはりの支持点の力学的性状試験, (5) 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した格子状変厚プレキャスト板に関する実験的研究, (6) プレストレスト鉄筋コンクリート合成断面部材の応力計算, (7) 新綾部大橋実橋載荷試験について, (8) 大反力ゴム支承を用いた PC 多径間連続橋の振動試験, (9) PC 鋼材突起定着部の設計手法に関する一考察 (その 1), (10) PC 鋼材突起定着部の設計手法に関する一考察 (その 2), (11) 生口橋 PC 桁部の設計, (12) 3% 食塩水における PC 鋼より線の応力腐食割れ試験, (13) PC 板埋設型枠を用いた合成床スラブの多数回繰返し載荷実験, (14) プレキャスト PC 版を用いた床版打替工法用スラブ止めの実験, (15) PC 合成床版の耐火性について, (16) ポストテンション方式による PC 舗装版の摩擦低減試験およびジャッキアップ試験, (17) 沈下したプレキャストコンクリート舗装版のリフトアップ工法の開発, (18) ロックアンカーを用いた片持ち式ロックシェッドの載荷試験について, (19) 合成アーチ巻立て工法による城址橋の施工, (20) 三井野原ループ 6 号橋の施工, (21) 現場製作ケーブルを用いた PC 斜張橋 (上妻橋) の施工, (22) 横浜博覧会「海のパビリオン」H.M.S. の設計と施工, (23) 横浜新道 (拡幅) 藤塚工事に伴う PC フレームアンカー工事, (24) プレキャストブロックによる PC 耐圧板工事, (25) 国道 115 号横向 1 号橋の設計と施工について, (26) 吊床版橋の設計施工と振動実験一鳥山城カントリークラブ歩道橋一, (27) 新十勝大橋 (仮称) の設計と施工, (28) プレキャスト PC タンクの設計・施工, (29) 牛滝川橋の設計と施工, (30) 製紙用 PC タンクの設計について