

CFRP 緊張材用定着具の開発と PC 桁曲げ載荷実験

加 藤 武 彦*
石 橋 久 義**
河 口 俊 郎***

1. はじめに

最近、炭素・アラミド繊維等のいわゆるスーパー繊維とよばれる新しい素材を建設分野で利用するための研究開発が活発に行われている。この素材の利用法には、大きく、鉄筋代替材や緊張材代替材のような FRP 材としての利用法とコンクリート補強材としての利用法が考えられる。一般に、鉄筋代替材としてコンクリート部材に利用した場合には、スーパー繊維のヤング係数が小さいことにより部材のひびわれ発生荷重は小さくなる。しかし、スーパー繊維は降伏点がなく破断時まで弾性挙動を示すため、除荷した場合にはその弾性効果によりひびわれ幅が小さくなる等の利点があり、その評価については今後の研究によるところが大きい。

ところが、緊張材代替材の場合には、プレストレスを外力として与えるため、ひびわれ発生荷重は、従来の PC 鋼材と同じであり、かつヤング係数が小さいため、緊張後の外荷重による荷重変動量も小さく従来の PC 桁よりも安定性がある等の理由により実用化に関しての問題点はほとんどないと思われる。ただし、緊張材代替材として利用する場合には、確実に緊張材の緊張力を伝達するための定着具の開発が不可欠となる。FRP 材は、スーパー繊維を樹脂で固めたものであるが、スーパー繊維自体は、従来の鋼材と違い柔らかい素材で、繊維直角方向の力に弱いという特性を有しているため、定着具開発にあたっては、繊維を傷つけないような定着方法を探

用することが肝要である。

本報告は、現在、FRP 緊張材研究会（ゼネコン・専業者 4 社、メーカー 3 社）で研究を進めている「スーパー繊維緊張材をもちいた部材開発」の研究成果の一部である炭素繊維緊張材を対象とした多数本用の定着具開発の概要と、その開発定着具を用いてプレストレスを導入した桁部材の曲げ載荷実験について述べたものである。

2. 定着具開発

既存の定着方式を分類し、スーパー繊維緊張材用として使用できると思われる定着方式を選び出し、予備実験を行った結果、グラウトと圧縮方式を組み合わせた定着方式がスーパー繊維緊張材用の定着具として最良との結論を得たため、この定着方式についての開発を進めた。ここで、グラウト方式とは、緊張材の端部に円筒形のスリーブをかぶせ緊張材との間にグラウト材を充填し、グラウト材の付着力だけで緊張力に抵抗させたものであり、圧縮方式とは、端部スリーブを縮径するようプレス加工し、圧着力で緊張力に抵抗させたものである。つまり、開発定着具は、スリーブと緊張材との間にグラウト材を注入してバインダー層をもうけることにより圧縮時に働く緊張材へのせん断力を低減し、付着力と圧縮力の両方で緊張力に抵抗するようにしたものである。そのため、小さい金物で確実に緊張力に抵抗させることができる。現在まで開発の終了した定着具は、1本-12.5φ（緊張材の引張荷重 14 ton）、3本-12.5φ（緊張材の引張荷重

42 ton）および6本-12.5φ（緊張材の引張荷重 84 ton）である。定着効率は、現在の時点では約 90% であるが、今までの開発実験結果から定着具の最大耐力は付着力と圧縮力との累加強度となっていることが証明されているので、今後、改良を加えて一層の性能向上をはかる予定である。3本用と6本用の定着具を写



* Takehiko KATO
(株)熊谷組技術研究所
主任研究員



** Hisayoshi ISHIBASHI
(株)熊谷組技術研究所
研究員



*** Toshiro KAWAGUCHI
(株)熊谷組技術研究所
研究員

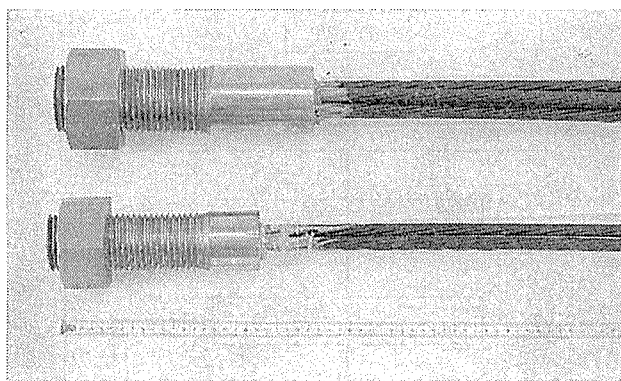


写真-1 3本用, 6本用定着具

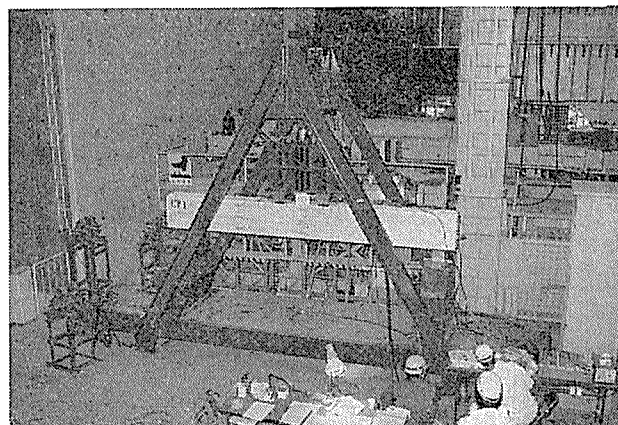


写真-3 実験状況

真-1 に示す。

3. 曲げ載荷実験

3.1 実験概要

断面が 45 cm×25 cm, 長さが 4 m の桁部材を製作し, 3-12.5 φ の CFRP 緊張材および開発定着具を使用してプレストレスを導入した桁部材を製作し, 曲げ載荷実験

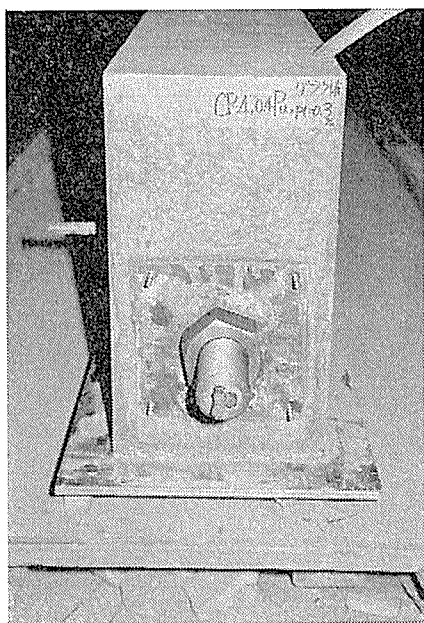


写真-2 緊張端

を行った(写真-2, 3)。試験体図を図-1 に, 試験体諸元一覧を表-1 に示す。ここで, CP シリーズとは炭素繊維緊張材を用いたもの, P シリーズとは従来の PC 鋼棒を用いた試験体である。載荷は, 試験体の両端をピン, ローラー支持し, 中央 2 点集中載荷による 1 方向繰返し加力で行った。載荷履歴を表-2 に, 計測位置を図-2 に示す。また, 表-3, 図-3 にコンクリート, 鉄筋, 緊張材の材料特性を示す。

3.2 解析

実験値との比較を行うため, 曲げひびわれモーメントおよび曲げ破壊モーメントの計算を, 日本建築学会 PC

表-1 試験体諸元 (450×250×4000)

試験体名	PS 導入力	グラウト材	引張鉄筋	緊張材	備考
CP 1	0.6 P_u (25.2 t)	有	3-D10(0.19%)	CFRP 3-12.5 φ	長期測定用
CP 2		無			
CP 3	0.4 P_u (16.8 t)	有	3-D13(0.33%)		
CP 4					
CP 5	0.6 P_u (25.2 t)	無	3-D10(0.19%)		
CP 6					
P 1	25.2 t	有	3-D10(0.19%)	PC 鋼棒 1-23 φ(B-1)	
P 2		無			

スターラップ D10@125, $p_w=0.4544$

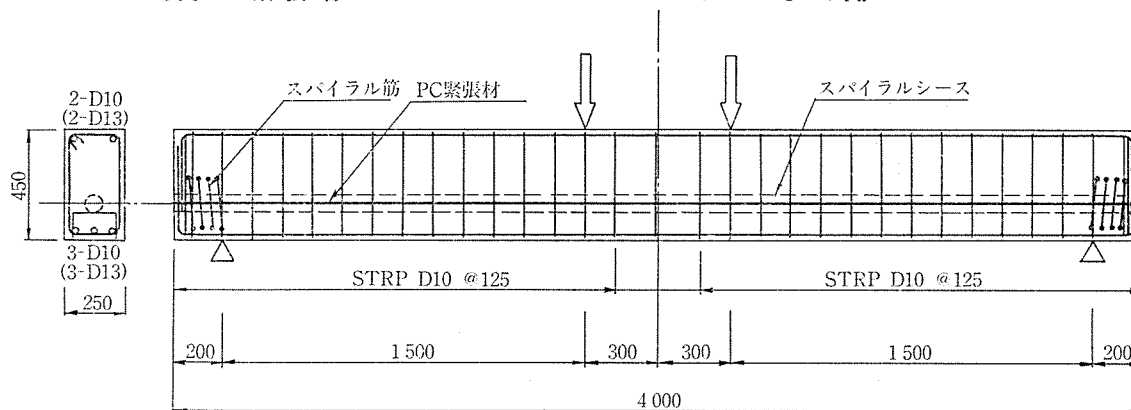


図-1 試験体図

表-2 載荷履歴

	繰返し		
	位置	制御	回数
第一ステップ	初ひびわれ	荷重	3
第二ステップ	$\delta=5\text{ mm}$	荷重	3
第三ステップ	$\delta=10\text{ mm}$	変位	3
第四ステップ	$\delta=30\text{ mm}$	変位	3
第五ステップ	$\delta=60\text{ mm}$	変位	3

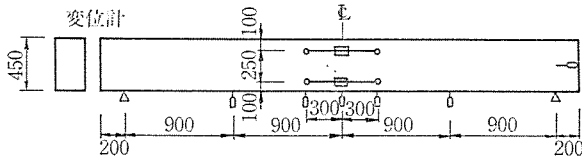


図-2 計測位置

表-3 材料特性一覧

		弾性係数	降伏強度	引張強度 (圧縮強度)	伸び
		kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	%
コンクリート		3.72×10^5	—	(451)	—
鉄筋	D10	2.10×10^6	3917	5323	18.6
	D13	2.10×10^6	3723	5207	21.1
CFRP ($\phi 12.5$)		1.39×10^6	—	21300	1.6
PC鋼棒 ($\phi 23, B-1$)		2.05×10^6	10600	11400	13.0

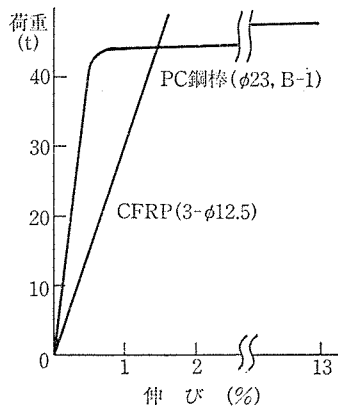


図-3 材料特性

梅村の e 関数式

$$\eta = 6.75(e^{-0.812\xi} - e^{-1.218\xi})$$

$$\xi = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c0}}, \quad \eta = \frac{\sigma}{f_c'}$$

f_c' : コンクリートの最大圧縮応力度

ϵ_{c0} : $\sigma=f_c'$ のときのひずみ

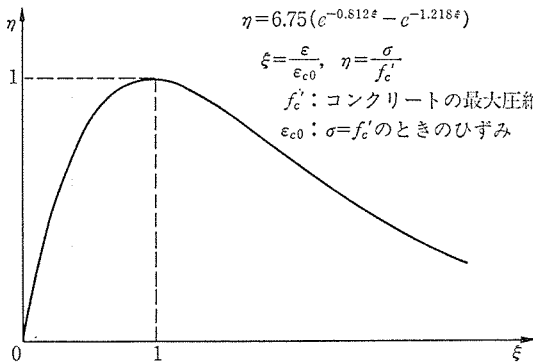


図-4 コンクリートの σ - ϵ 関係

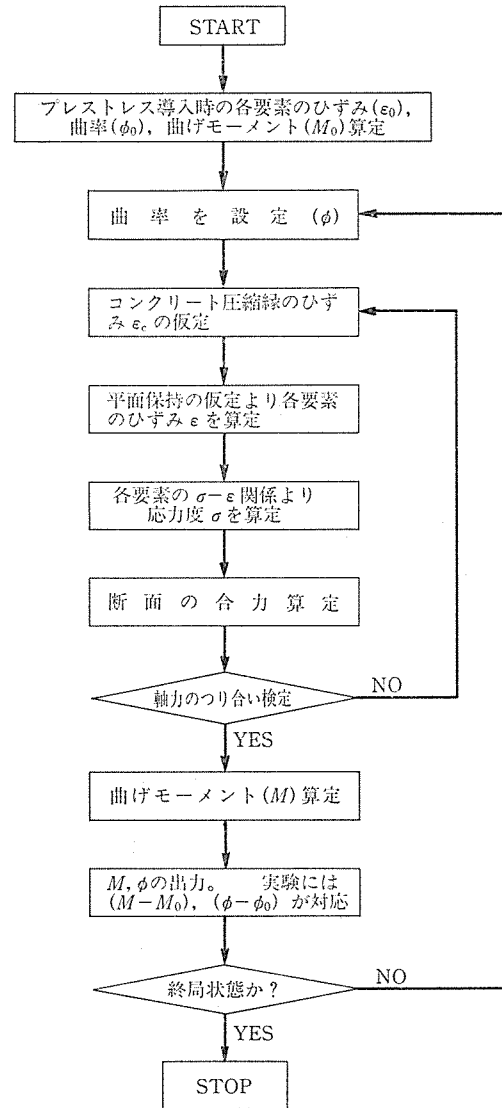


図-5 M - ϕ 関係の計算手順

規準略算式および e 関数法をもちいて行った。ここで、 e 関数法とは、コンクリートの圧縮応力度とひずみの関係を図-4のように仮定して、曲げモーメントに対する塑性挙動を理論的に求める解析法である。ここでは、図-5のようなプレストレス力を考慮した解析フローチャートにより PC 部材の解析を行った。

3.3 実験結果および考察

実験結果を表-4に、曲げモーメント-曲率曲線 (M - ϕ 曲線) を図-6に示す。また、中央部のたわみ $\delta=30\text{ mm}$ のときのひびわれ状況を図-7に示す。図-6中の破線は、緊張力を考慮した e 関数法による計算結果である。

i) 初曲げひびわれ荷重

表-4の実験結果一覧より、初曲げひびわれ荷重は、緊張材の種類・グラウト材の有無の違いによる差はほとんど見られず緊張力の大きいほうが大きい値を示した。

表-4 実験結果一覧

	初曲げひびわれ*			降 伏			曲 げ 終 局 時			破 壊 形 式
	荷重 (ton)	M (ton·m)	ϕ ($\times 10^{-5}/$ cm)	荷重 (ton)	M (ton·m)	ϕ ($\times 10^{-5}/$ cm)	荷重 (ton)	M (ton·m)	ϕ ($\times 10^{-5}/$ cm)	
CP 1	9.45	7.09	0.48	13.88	10.41	4.05	22.14	16.61	33.08	CFRP 緊張材破断 $\delta_{max}=32.93$ mm
	10.97	8.22	1.12	14.57	10.93	6.50	21.93	15.75* 16.45	32.00	
CP 2	9.42	7.07	0.42	13.45	10.09	4.30	16.68	12.51	76.36	コンクリート圧壊 $\delta_{max}=49.00$ mm
	10.93	8.20	1.13	13.37	10.03	6.50	16.64	— 12.48	100.0	
CP 3	7.92	5.94	0.54	11.92	8.94	5.82	21.03	15.77	42.06	CFRP 緊張材破断 $\delta_{max}=42.02$ mm
	9.36	7.02	0.96	11.67	8.75	6.00	22.00	15.75* 16.50	43.00	
CP 4	8.44	6.33	0.75	14.93	11.20	7.16	24.00	18.00	46.07	CFRP 緊張材破断 $\delta_{max}=45.02$ mm
	9.55	7.16	0.95	14.43	10.82	6.00	24.81	17.27* 18.61	43.00	
P 1	9.95	7.46	0.81	15.92	11.94	7.17	21.73	16.30	70.75	コンクリート圧壊 $\delta_{max}=44.05$ mm
	10.97	8.23	1.12	16.65	12.49	6.50	21.49	14.60* 16.12	65.00	
P 2	9.45	7.09	1.06	14.01	10.51	5.85	19.62	14.72	74.52	コンクリート圧壊 $\delta_{max}=46.05$ mm
	10.93	8.20	1.13	13.65	10.24	6.50	19.49	— 14.62	76.00	

上段：実験値，下段： e 関数法による計算値。ただし，* は学会 PC 規準略算式による

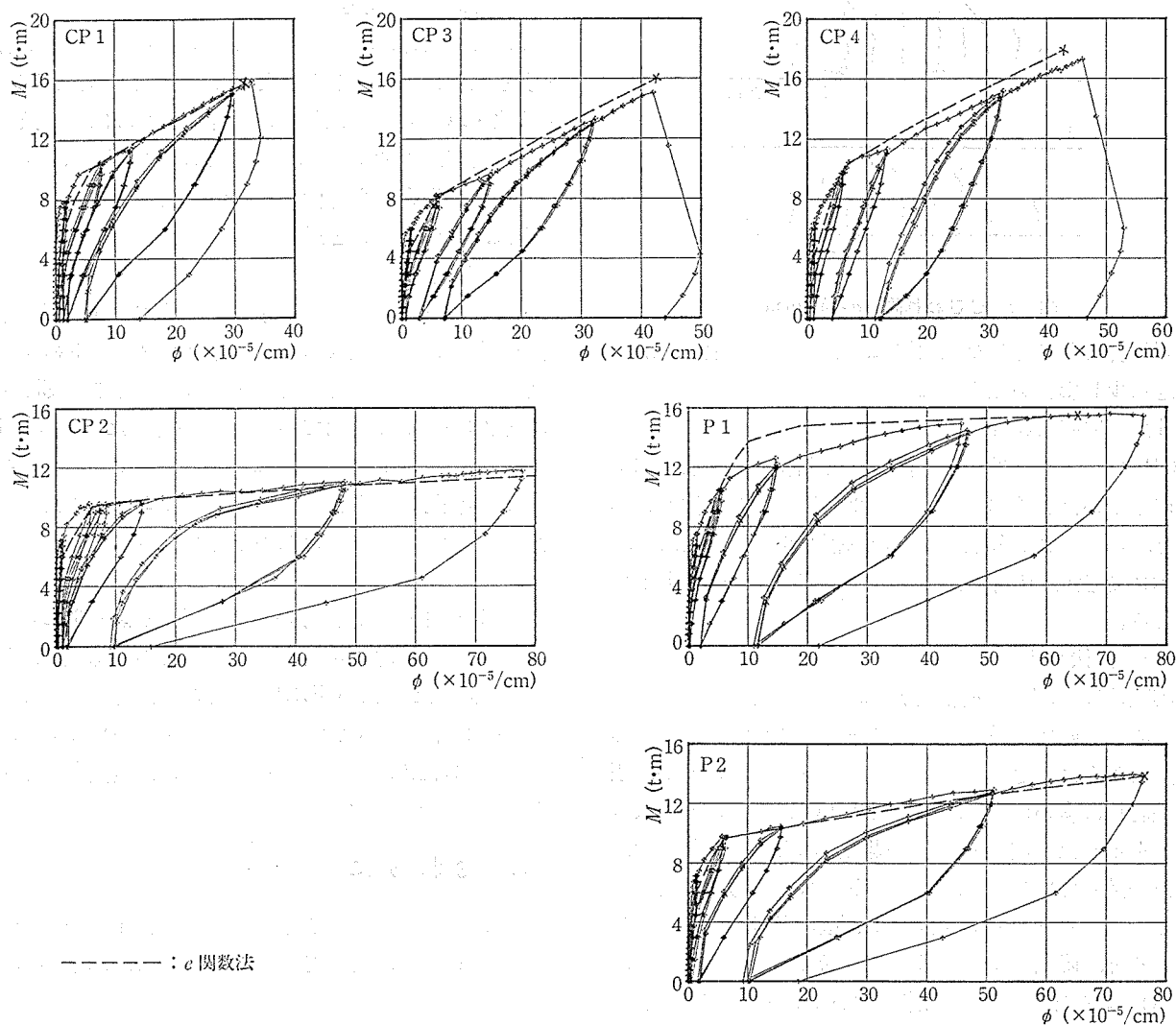
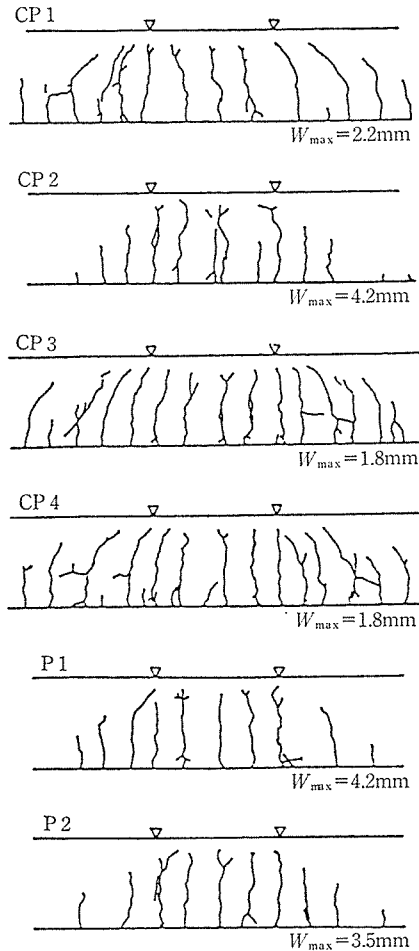


図-6 M- ϕ 曲線



図—7 ひびわれ図 ($\delta=30\text{ mm}$)

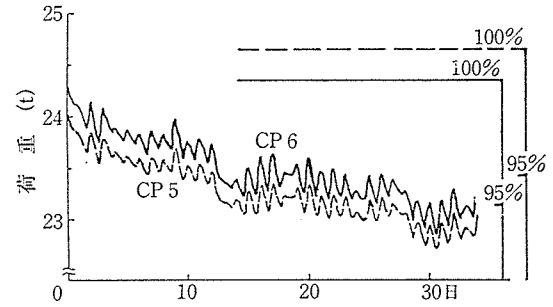
引張鉄筋比を多くした試験体は、ひびわれ発生時期が若干遅れ少し影響が見られた。

ii) ひびわれ状況

CP シリーズのグラウト有りの試験体は、従来の PC 鋼棒を用いた試験体およびグラウト無しの試験体と比べると、ひびわれが分散しひびわれ幅も小さい。これは、CFRP 緊張材の付着性能が良好であるための影響と思われる。

iii) 降伏荷重

実験値は、 $M-\phi$ 曲線の折れ曲がり点を降伏荷重として求めた。降伏荷重を各パラメーターで比較してみると、緊張力は大きいほうが、グラウトは有るほうが、引張鉄筋比は多いほうが、緊張材は PC 鋼棒のほうが大きい値を示した。実験結果と e 関数法による計算値とは、ほぼ一致している。今、プレストレス導入力と鉄筋量が同じでグラウト有りの場合の試験体 CP1 と P1 を比較すると、降伏荷重は P1 のほうが大きい。これは、CFRP 緊張材より PC 鋼棒の方がヤング係数が大きいいため、ひびわれ発生後の剛性に差が出てこのような結果になったものと思われる。



図—8 緊張力の減退状況

iv) 降伏後の剛性

CFRP 緊張材を用いたグラウト有りの試験体は、スーパー繊維に降伏点がなく破断時まで弾性挙動を示すことや CFRP 緊張材の付着がすぐれていることにより、引張鉄筋比や緊張力に関係なく部材の耐力は降伏後も上がっていく。ただし、グラウトの無しの場合、途中の付着力が期待されないため部材の耐力はほとんど上がらない。P シリーズの試験体も同じ傾向にある。

v) 曲げ終局耐力

曲げ終局耐力は、緊張力の大小よりも、グラウト有無・引張鉄筋比の影響をより大きく受ける。実験値と、 e 関数法・PC 規準略算式による計算値とはほぼ一致している。終局時の曲率は、P シリーズの方が大きいですが、CP シリーズの場合でも降伏時の 6 倍以上を示しており、実用上は、問題がないと思われる。

vi) 破壊状況

CP シリーズのグラウト有りの試験体は CFRP 緊張材の破断で、他の試験体は圧縮縁コンクリートの圧壊で破壊に至っている。その時の CFRP 緊張材の破断位置は試験体の純曲げ区間である。終局時のたわみは CP1 を除いてほぼ同じ ($\delta_{max}=42\sim 49\text{ mm}$) であった。その原因は緊張材間の負担荷重の不均等により 1 本だけが先行して破断してしまったためと思われる。

vii) 長期測定

CFRP 緊張材の緊張力の長期減退量を図—8 に示す。これによると、導入後約 1 か月経過後の減退量は、約 5% である。ただし、CFRP 緊張材の線膨張係数は、 $2 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ 以下と小さくコンクリートの線膨張係数との間に差があるため、コンクリート部材の温度変動により緊張力が変動する傾向にある。

4. おわりに

今回、CFRP 緊張材を用いて多数本タイプの定着具を開発し、PC 桁の載荷実験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) ひびわれ発生荷重は、緊張材の種類に関係なくプレストレス導入力に影響をうける。

- 2) CFRP 緊張材を用いた部材の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 緊張材は、降伏点がなく PC 鋼棒よりも付着力に優れているためひびわれが分散し、降伏後も耐力は上がる傾向にある。
- 4) CFRP 緊張材を用いた試験体の最終破壊は、グラウト有りの場合は緊張材の破断で、無しの場合は

PC 鋼棒の場合と同じように圧縮縁コンクリートの圧壊で決まる。

- 5) CFRP 緊張材の長期減退量は、1 か月経過後で約 5% である。

以上、CFRP 緊張材を用いた PC 桁の曲げ性能を把握することができた。今後、引き続いて実用化に向けての開発研究を行っていく予定である。

【昭和 63 年 6 月 13 日受付】

◀刊行物案内▶

FIP 「プレストレストコンクリート材料の極低温下挙動」 に関する技術水準報告書

- 体 裁：B 5 判 53 頁
定 価：2 500 円 送 料：300 円
内 容：緒言，序論。1. 極低温化の構造物と荷重載荷条件；極低温下の構造物，供用条件と荷重，危険状態と荷重，構造物の設計と材料特性。2. 低温下における材料の挙動；PC 鋼材，定着具用鋼材の種類と性質，鉄筋，極低温下のコンクリートとグラウト。3. 低温下での複合挙動；はじめに，低温下での付着，プレストレッシング・システムの挙動，注釈，PC の破壊靱性。4. 低温試験方法；鋼材の試験，コンクリートおよびグラウトの試験方法，定着部の試験，付着部の試験，付着に関する試験。