

論文

[1136] 組紐状 AFRP ロッドを用いた PRC 梁の曲げ性状

正会員○谷垣 正治 (三井建設 技術研究所)

正会員 野村 設郎 (東京理科大学理工学部)

正会員 岡本 直 (三井建設 技術研究所)

正会員 遠藤 克彦 (三井建設 技術研究所)

1. はじめに

コンクリート部材の耐久性向上や電磁気的特性の改善等を目的として、近年連続状高強度繊維ロッドによるコンクリート補強に関する研究が行われている。著者らは繊維ロッドの強度効率や付着性能を向上するために繊維を組紐状に編むことを考案し、それらを主筋やプレテンション緊張材として用いるための研究を行ってきた^{5), 6)}。本論ではさらにこの繊維ロッドをポストテンションの緊張材および主筋として用いた PRC 梁の曲げ性状について検討した。またプレテンション方式も含めてこのような繊維補強 PRC 梁のクリープ試験を行い長期的な耐荷性状について検討した。

2. 繊維ロッドの材料特性

この繊維ロッドは表-1 に示すようなアラミド繊維とエポキシ樹脂で構成されており写真-1 に示すように表面には規則正しい凹凸が形成されている。本試験体で使用したアラミド繊維ロッドの諸元値を表-2 に引張特性を表-3 に示す。ロッド名中 S の表示があるものはロッド表面に 5 号珪砂が接着されていることを表す。なお、引張強度、弾性係数のバラッキおよび付着性能については文献⁶⁾を参照されたい。

3. 曲げ試験

3. 1 試験体および試験方法

表-4 に試験体の構成を示す。B-26-15N, B-26-30N, B-26-30, B-26-45N 試験体は、主筋として表面に珪砂を接着させた繊維ロッドを用いており引張補強筋比 (下端主筋繊維ロッド

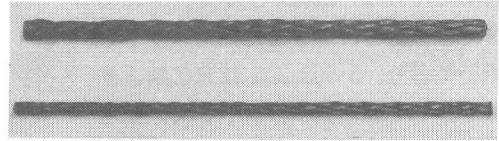


写真-1 組紐状アラミド繊維ロッド

表-1 アラミド繊維エポキシ樹脂のカタログ値

特性 材料	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	伸び率 (%)	密度 (g/cm ³)
アラミド繊維	27600	1.30×10^6	2.40	1.44
エポキシ樹脂	800	1.45×10^4	5.50	1.16

表-2 アラミド繊維ロッドの諸元

棒材名	繊維量 X6000φ [*] (g/m)	重量 (g/m)	最大直径 (mm)	断面積 (mm ²)		周長 (mm)
				棒材	繊維のみ	
K128S	128	120	13.5	100	60	42.0
K192S	192	180	15.5	150	90	49.0

(* 1φ^{*} = 1g/9000mm)

表-3 繊維ロッドの引張性能

棒材名	引張耐力 (ton)	弾性係数 $\times 10^6$ (kg/cm ²)		破断時伸び率 (%)
		棒材断面	繊維断面	
K128S	13.29	0.59	0.99	2.28
K192S	20.48	0.59	0.98	2.31

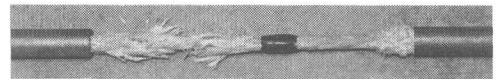


写真-2 繊維ロッドの破断状況

表-4 曲げ試験体一覧

No	試験体名	主筋		プレストレス緊張材		
		種類	補強筋比 (%)	種類	緊張力 (t/本)	プレストレス下 応力 (kg/cm ²)
1	B-26-15N	3-K128S	0.26	2-K192	3.13	15.0
2	B-26-30N	3-K128S	0.26	2-K192	6.25	30.0
3	B-26-30	3-K128S	0.26	2-K192S	6.25	30.0
4	B-26-45N	3-K128S	0.26	2-K192	9.38	45.0
5	B-59S-30N	2-D16	0.59	2-K192	6.25	30.0
6	B-59S-30S	2-D16	0.59	SWPRφ12.4	6.25	30.0

の繊維のみの断面積のコンクリート断面積に対する比)は0.26%である。B-59S-30N, B-59S-30S 試験体は主筋に異形鉄筋を用いており引張鉄筋比は0.59%である。また、B-26-15N, B-26-30N, B-26-45N, B-59S-30N では、ポストテンション緊張材として表面に珪砂を接着させていない繊維ロッドを、B-26-30では珪砂を接着させた繊維ロッドを用いており、B-59S-30S はPC鋼より線を用いている。プレストレスによる応力は、コンクリート下縁で15, 30, 45kg/cm²である。

試験体の形状は、図-1に示すように、梁巾225mm 梁せい300mm 長さが3600mmで、厚さ75mm巾270mmのスラブが両側に付いている。主筋はコンクリート縁から40mm(上端、下端とも)の位置に、プレストレス緊張材は下端から100mmの位置に2本配置している。シース管には内径26mmのスパイラルメタルシース、定着具には鋼製スリーブと2つ割りの鋼製くさびを用いた。プレストレスの導入はCCLジャッキを用い、緊張、定着した後、グラウト材を圧入した。グラウト材の調合および曲げ試験時圧縮強度を表-5に示す。

各試験体ともスラブ筋は、D10@200タテヨコせん断補強筋はD10@100である。

加力方法は、図-2に示すように、加力スパン750mm, 支持スパンL=3000mmの2点荷重とし、図-3に示す一方向繰り返し荷重を行った。

3.2 荷重-変形関係

図-4に各試験体の荷重-変形曲線を示す。図中・印は初ひびわれ発生点を表す。主筋、緊張材両者に繊維ロッドを用いた試験体では初ひびわれが発生した後、終局点までほぼ直線的に荷重が増大し

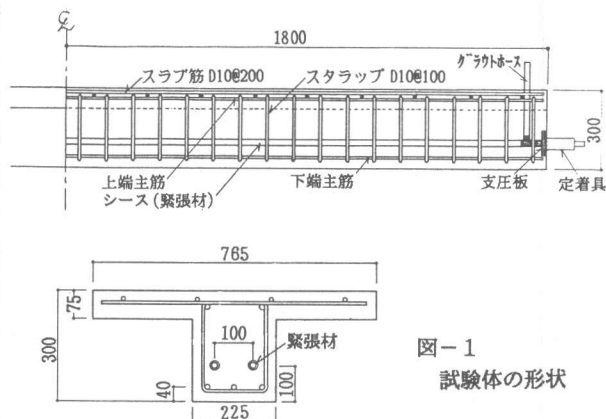


図-1 試験体の形状

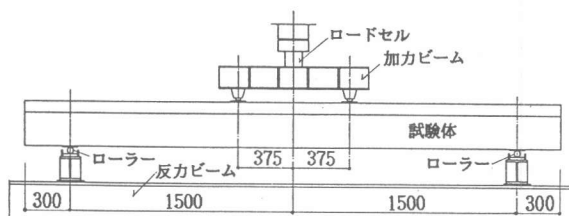


図-2 加力方法

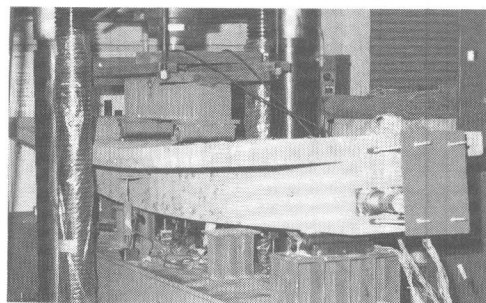


写真-3 曲げ試験状況

表-5 グラウト材の調合および圧縮強度

調 合(ハヅ当り)				圧縮強度
W/C	早強セメント	水	グラウト用混和剤	
40%	10 kg	4 kg	100 g	54.5 (kg/cm ²)

変位D(cm)

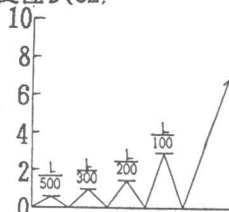


図-3 加力ルール

表-6 材料特性

a) コンクリート

	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 ×10 ⁵ (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)
導入時	384	—	—
試験時	415	3.17	32.0

b) 鋼材

	弾性係数 ×10 ⁵ (kg/cm ²)	降伏強度 (kg/cm ²)	破断強度 (kg/cm ²)
D10	2.13	3742	5415
D16	1.88	3660	5377
SWPR φ12.4	2.17	—	16954

ている。主筋に異形鉄筋、緊張材に繊維ロッドを用いたB-59S-30N 試験体では、主筋降伏後は弾性材料である緊張材繊維ロッドの剛性で直線的に荷重が増大している。破壊形式はB-26-15Nでは主筋の破断、B-26-30Nでは主筋および緊張材の同時破断、B-26-45N, B-59S-30Nでは緊張材の破断、B-26-30, B-59S-30Sでは上端コンクリートの圧壊であった。各試験体とも中央部終局時変位は支持スパン (300cm) の1/40以上あり、十分な変形能力を持っている。

3. 3 ひびわれ性状

図-5にL/100 変形時 (L: 支持スパン) のひびわれ状況を示す。この時点では、各試験体とも曲げひびわれ定常状態になっている。ひびわれ間隔が10cm程度と分散してはいており、主筋が繊維ロッドの場合と異形鉄筋の場合とあまり差はない。したがって、表面に珪砂の付いた繊維ロッドは異形鉄筋と同程度の附着性能を持つものと考えられる。

3. 4 初ひびわれ荷重

表-7に初ひびわれ荷重の実験値と計算値を比較する。計算値は、コンクリートの曲げ強度 ($1.8\sqrt{\sigma_B}$) とプレストレスによる

下縁圧縮応力度 (有効率 $\eta=0.8$ として) より求めた曲げモーメントから自重の影響を差引いて算定した。実験値と計算値はよく一致しており、各試験体とも所定のプレストレス力が導入されたものと考えられる。

3. 5 終局耐力と破壊モード

補強筋が弾性材料であるので曲げ

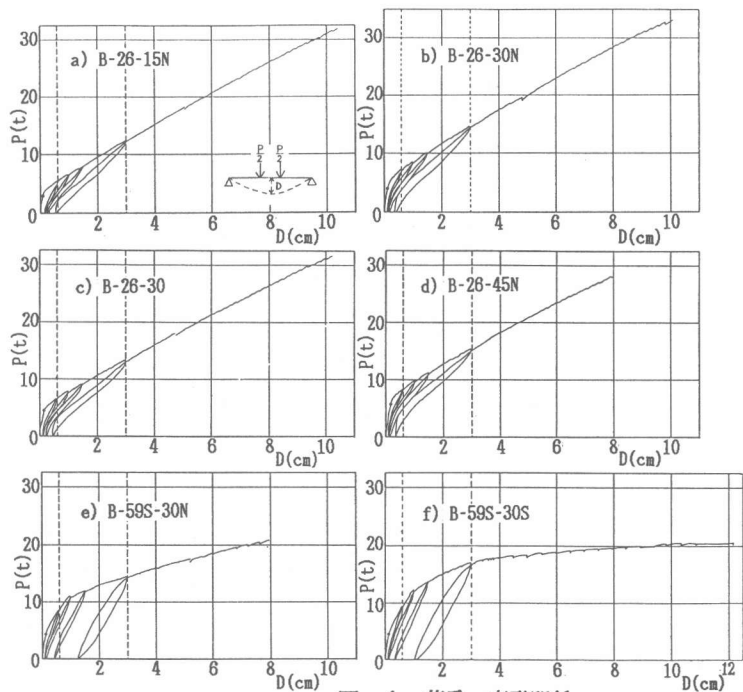


図-4 荷重-変形関係

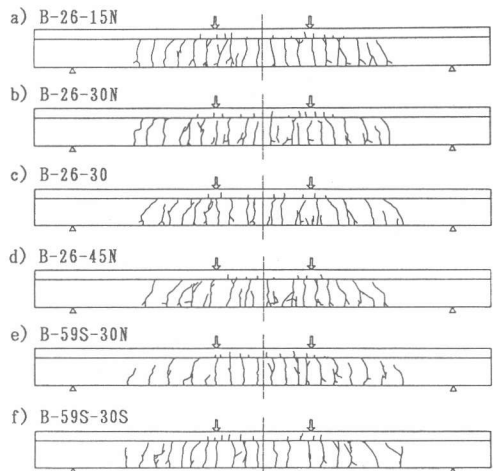


図-5 ひびわれ図 (L/100変形時)

表-7 曲げ試験結果一覧

試験体名	初ひびわれ時			終局時				破壊モード※	
	実験値 荷重 Pcr(t)	計算値 荷重 Pcr(t)	Pcr Pcr(t)	たわみ δ_u (cm)	実験値 荷重 Pu(t)	計算値 荷重 Pu(t)	Pu Pu(t)	実験	計算
B-26-15N	2.98	3.37	0.88	10.56	31.5	29.7	1.08	R	R
B-26-30N	4.00	4.57	0.88	9.97	32.5	31.3	1.04	P, R	R
B-26-30	4.52	4.57	0.99	10.14	31.5	31.1	1.01	C	R
B-26-45N	5.52	5.77	0.96	8.04	28.0	28.8	0.97	P	P
B-59S-30N	4.32	4.57	0.95	7.71	20.9	19.2	1.09	P	P
B-59S-30S	4.53	4.57	0.99	12.05	21.0	15.4	1.36	C	—

※ C: 曲げ圧縮破壊, P: 緊張材破断, R: 主筋破断

耐力は終局時の補強筋ひずみ量を考慮して算定する必要があるが、2%前後の大きなひずみ域でのコンクリートと繊維ロッドの一体性が問題となる。そこで実験で得られたコンクリートひずみと繊維ロッドのひずみを比較して図-6に示した。図中横軸は純曲げスパン内の主筋または緊張材位置でのコンクリートひずみ、縦軸はコンクリートひずみに対する同位置での繊維ロッドのひずみの比でありひずみ適合係数(F)³⁾である。

ひずみの小さな領域ではコンクリートと繊維ロッドのひずみはバラツキが大きい、終局時付近では $F=0.9$ 前後の値を示している。これまでの実験結果⁶⁾では表面に珪砂が接着されている繊維ロッドとコンクリートとのF値は0.93程度であったが、本試験体の緊張材の場合にはグラウト材に若干の膨張性があるため珪砂の接着の有無にかかわらず0.9程度のF値を示しているものと考えられる。以上の実験結果を基に、

ひずみの適合性を考慮した曲げ耐力の略算を試みた。終局状態の断面の応力分布を上端筋の効果を無視して図-7のように仮定し中立軸はスラブ内にあるとすると、力のつりあい式は(1)式で表される。(1)式中の緊張材ひずみ ϵ_{pt} および主筋ひずみ ϵ_{rt} を破壊モード別に表-8に示す。表中 F_p, F_R は緊張材および主筋繊維ロッドのひずみ適合係数である。なお、鉄筋とコンクリートは完全付着しているものと仮定した。

$k_1 \cdot b \cdot x_n \cdot \sigma_B = A_p \cdot E_p \cdot \epsilon_{pt} + A_r \cdot E_r \cdot \epsilon_{rt}$ (1)

$M_u = k_1 \cdot b \cdot x_n \cdot \sigma_B (d_0 - k_2 \cdot x_n)$ (2)

(1), (2)式を解いて破壊モード別の終局曲げモーメントを求め、(3), (4)式によって終局曲げモーメントを求めると同時に破壊モードを決定することができる。

主筋、緊張材ともに繊維ロッドの場合

$$M_u = \min (M_{uc}, M_{up}, M_{ur}) \quad (3) \quad (\text{記号の説明})$$

主筋普通鉄筋、緊張材繊維ロッドの場合

$$M_u = \min (M_{uc}, M_{up}) \quad (4)$$

$F_p, F_R=0.93$ と仮定してこの方法によって求めた終局耐力、破壊モードを計算値として表-7に示す。

この略算法を用いてB-26-15N試験体と同配筋の断面について、プレストレス力の増大に伴う終局耐力と破壊モードの変化を計算した結果を図-8, 9に示す。

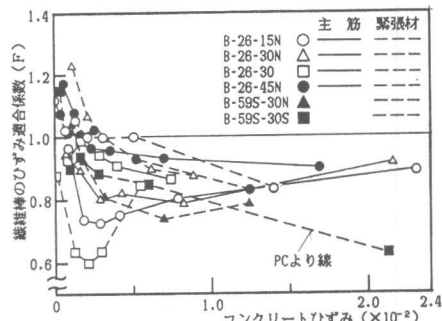


図-6 コンクリートに対する繊維ロッドのひずみ適合性

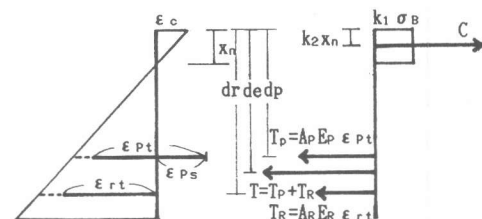


図-7 終局時のひずみ、応力分布の仮定

表-8 破壊形式別の $\epsilon_{pt}, \epsilon_{rt}$

	破壊モード	緊張材ひずみ ϵ_{pt}	主筋ひずみ ϵ_{rt}
主筋 緊張材 ともに 繊維棒	圧壊	$\epsilon_{ps} + F_p \cdot \frac{d_p \cdot x_n}{x_n} \cdot \epsilon_{cu}$	$F_R \cdot \frac{d_r \cdot x_n}{x_n} \cdot \epsilon_{cu}$
	緊張材 破断	ϵ_{pu}	$\frac{F_R \cdot d_r \cdot x_n}{F_p \cdot d_p \cdot x_n} (\epsilon_{pu} - \epsilon_{ps})$
	主筋破断	$\frac{F_p \cdot d_p \cdot x_n}{F_R \cdot d_r \cdot x_n} \epsilon_{ru} + \epsilon_{ps}$	ϵ_{ru}
主筋: 普通鉄筋 緊張材: 繊維棒	圧壊	$\epsilon_{ps} + F_p \cdot \frac{d_p \cdot x_n}{x_n} \cdot \epsilon_{cu}$	$\frac{\sigma_{ry}}{E_r}$
	緊張材 破断	ϵ_{pu}	$\frac{\sigma_{ry}}{E_r}$

σ_B, ϵ_{cu} : コンクリートの圧縮強度, 終局圧縮ひずみ
 $A_p, E_p, \epsilon_{pu}, \epsilon_{ps}$: 緊張材の断面積, ヤング率, 破断ひずみ, 有効プレストレス時ひずみ
 $A_r, E_r, \epsilon_{ru}, \sigma_{ry}$: 主筋の断面積, ヤング率, 破断ひずみ, 降伏応力度
 M_{uc}, M_{up}, M_{ur} : 曲げ圧縮破壊, 緊張材破断, 主筋破断の場合の終局曲げモーメント

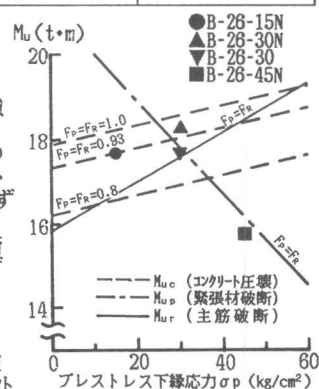


図-8 プレストレス力と曲げ耐力、破壊形式の関係 ($F_p = F_R$ の場合)

図-8は F_P と F_R が等しい場合を示しており、同図中には本試験結果もあわせてプロットしている。 $F_P=F_R=0.8$ と仮定した場合にはプレストレス力が増加するに従い、耐力が増大しながら破壊モードは主筋破断からコンクリート圧壊に移行し、その後破壊モードが緊張材の破断となり耐力が減少してゆく。また実験結果についても同様の傾向が認められる。図-9は $F_P \neq F_R$ の場合の例として、 $(F_P, F_R) = (0.8, 0.93)$ 、 $(F_P, F_R) = (0.93, 0.8)$ とした計算結果を示す。主筋と緊張材の付着性能の違いによって終局耐力、破壊形式が変動する。したがって終局状態の推定にあたって F 値の影響は無視できないものと考えられる。

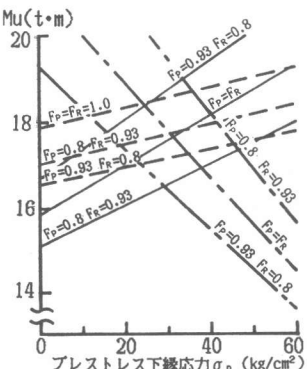


図-9 プレストレス力と曲げ耐力、破壊形式の関係 ($F_P \neq F_R$ の場合)

4. 曲げクリープ試験

4. 1 試験体および試験方法

クリープ試験体では、主筋、緊張材の配置と梁巾、梁せいおよび梁の長さは曲げ試験の場合と同様であるが、断面はスラブのない長方形である。表-9に示すように、試験体はプレテンション梁3体、ポストテンション梁1体の合計4体で、主筋には K128S、緊張材にはK192S が使用されている。ただし、CB-26-30N I 試験体の緊張材のみは表面に珪砂を接着させていない K192を用いた。プレストレスによる下縁応力は、15,30kg/cmの2種類とし、荷重レベルはC-26-30 II 試験体で1.5P_{cr} (P_{cr}:初ひびわれ荷重)、他の3体は1.0P_{cr} とした。図-10に示すように、試験体は2個のローラーによって支持され、両端でP C鋼棒を介してバネにより加力され、約25℃の室温中に置かれている。

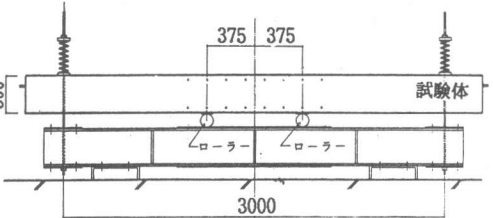


図-10 クリープ試験加力方法

表-9 クリープ試験体一覧

	引張主筋種類	プレストレス緊張材			荷重レベル
		種類	下縁プレストレス応力 (kg/cm ²)	導入方法	
C-26-15 I	3-K128S	2-K192S	15	プレテンション	1.0P _{cr}
C-26-30 I	3-K128S	2-K192S	30	プレテンション	1.0P _{cr}
C-26-30 II	3-K128S	2-K192S	30	プレテンション	1.5P _{cr}
CB-26-30N I	3-K128S	2-K192	30	ポストテンション	1.0P _{cr}

表-10 中央部曲率の時間変化 単位 [×10⁻⁶/cm]

	弾性計算	荷重直後	100 hr 後	1000 hr 後
C-26-15 I	10.8	29.1 (2.69)	47.5 (4.40)	84.9 (7.86)
C-26-30 I	13.9	23.8 (1.71)	41.8 (3.00)	68.7 (4.94)
C-26-30 II	20.9	117.1 (5.60)	153.5 (7.34)	202.9 (9.71)
CB-26-30N I	13.9	19.5 (1.40)	29.3 (2.11)	62.5 (4.50)

4. 2 試験結果

表-10、表-11に梁中央部の曲率とたわみの変化を弾性計算値と比較して示した。曲率は圧縮縁コンクリートひずみと梁側面主筋高さ位置に取付けたパイゲージのひずみから求めた。

曲率とたわみの変化はほぼ同様な増加傾向を示している。1000時間経過後の曲率およびたわみの弾性計算値に対する比は、C-26-15N I 試験体で7~8倍、C-26-30 I、CB-26-30N I 試験体で5倍前後、C-26-30 II 試験体で10倍程度である。図-11に梁中央部たわみの時間変化を示す。荷重後100 時間程度までは新たな曲げひびわれの発生が見られたが、その後ひびわれの本数は安

表-11 中央部変位の時間変化 単位 [mm]

	弾性計算	荷重直後	100 hr 後	1000 hr 後
C-26-15 I	0.984	2.00 (2.03)	4.05 (4.12)	7.02 (7.13)
C-26-30 I	1.27	2.14 (1.69)	3.99 (3.14)	6.68 (5.26)
C-26-30 II	1.91	7.51 (3.93)	13.84 (7.25)	18.62 (9.75)
CB-26-30N I	1.27	1.73 (1.36)	4.08 (3.21)	6.94 (5.46)

()内は弾性計算値に対する比

定しており、100 時間以後のたわみの増大量は時間の対数にほぼ比例している。図-12に主筋繊維ロッド、図-13に圧縮縁コンクリートひずみの時間変化を示す。補強筋のひずみは時間の対数に対してほぼ直線的に増大している。プレストレス力の小さいC-26-15 I では増加率が若干大きい。コンクリートひずみは増加率が時間（対数表示）とともに大きくなっているが約300 時間以後は時間の対数にほぼ比例して増加しているようである。各試験体ともひずみの増加傾向は繊維ロッドよりもコンクリートの方が大きくそのため中立軸の低下が見られる。なお、クリープ試験は測定開始から3000時間程度しか経過していないので結果の紹介にとどめたが、今後さらに測定を継続していく予定である。

5. まとめ

以上の実験、考察より得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 主筋および緊張材に繊維ロッドを使用した場合、荷重-たわみ関係はひびわれ発生以前の第1勾配部分と最大耐力に至るまでの第2勾配部分とから成る。主筋に鉄筋、緊張材に繊維ロッドを用いた場合では、主筋降伏後弾性材料である緊張材の剛性でほぼ直線的に荷重が増大する。
- 2) 本繊維ロッドはポストテンション緊張材として用いることができ、表面に珪砂が接着されている繊維ロッドを用いた場合と、接着されていない場合とで曲げ性能に大差はない。
- 3) 主筋または緊張材に繊維ロッドを用いた梁では、繊維ロッドのひずみ量を考慮した略算法で終局曲げ耐力、破壊形式を推定することができる。また、算定に際し終局時付近での繊維ロッドとコンクリートのひずみの適合度が重要な因子となる。
- 4) クリープ試験における1000時間経過後のたわみおよび曲率の弾性計算値に対する増大率は荷重レベル $1.0P_{cr}$ のもので5~8倍、 $1.5P_{cr}$ のもので10倍程度であった。

最後に、試験体の製作にあたりご協力頂いた神鋼鋼線工業（株）の関係各位に深く感謝致します。

<参考文献>

- 1) 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 付13」 日本建築学会 1988
- 2) 「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 65条解説」 日本建築学会 1987
- 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」 プレストレストコンクリート Vol.26 No.1 1984
- 4) 岡本、田村、松原、谷垣 「アラミド繊維による組紐状棒材の基本的特性」 第10回コンクリート工学年次論文報告集 p.659 1988
- 5) 岡本、遠藤、松原、谷垣 「アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPRC梁の曲げ性状」 第10回コンクリート工学年次論文報告集 p.671 1988
- 6) 岡本、遠藤、松原、谷垣 「アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPRC梁の曲げ性状」 第35回構造工学シンポジウム論文集 Vol.35B p.219 1989

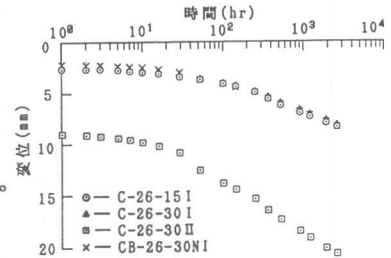


図-11 変位と時間の関係

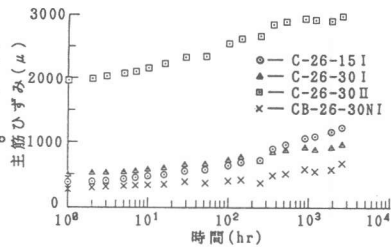


図-12 主筋ひずみと時間の関係

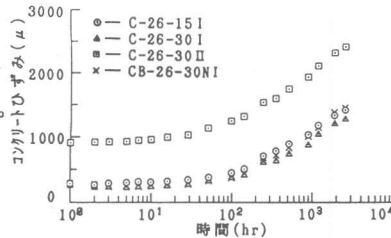


図-13 コンクリートひずみと時間の関係