

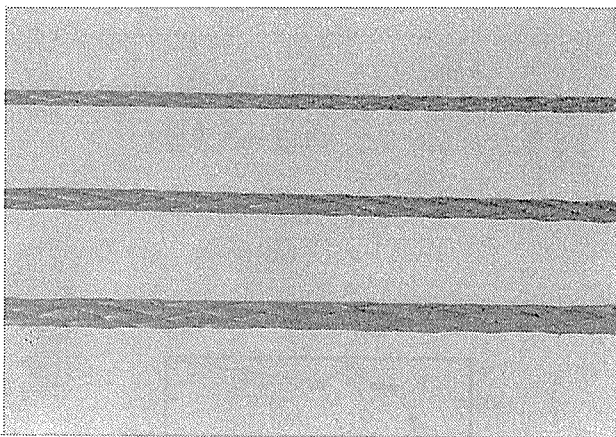
組紐状 AFRP ロッドの PC プレテンション部材への 適用に関する基礎的研究

三 上 浩*
林 寿 夫**
田 村 富 雄***

1. はじめに

最近、PC 構造物の緊張材に耐食性、非帯磁性に優れた新素材を利用する研究が各方面で進められている。

本文は、PC プレテンション部材の緊張材として組紐状 AFRP ロッド (写真—1) を使用した場合の定着特性および PC 梁の静的耐荷挙動について、実験的に研究した結果を報告するものである。この組紐状 AFRP ロッドは従来の新素材を用いたロッドと異なり、アラミドの連続繊維を組紐機で編みあげたもので、その組紐構造とロッド表面の異形性に大きな特徴を有している。ま



写真—1 組紐状 AFRP ロッドの形状

た、付着性能をさらに向上させる目的で、組紐状に成形した後の表面に砂を接着させたロッドも併せて製作し、その緊張材としての特性を調査、研究した。

本実験では、まず、円筒状型枠の断面図心位置に組紐ロッドを配置し初期緊張を行い、コンクリート打設、硬化後緊張力を徐々に解放した時のコンクリート表面のひずみから、ロッドの付着長 (材端から有効プレストレスの 95% が導入される点までの距離) を確認した。次に、組紐ロッドおよび PC 鋼棒を緊張材としたプレテンション梁において、緊張材に与える初期緊張力を変えることにより、PC 梁の下縁応力度を 3 段階に変化させ、初期緊張力の大きさが梁の耐力、破壊形態等と与える影響について調べた。

2. 使用した緊張材とコンクリートの諸元

実験に使用した緊張材とコンクリートの諸元を表—1～表—3 に示す。

3. 実験概要

3.1 付着長試験

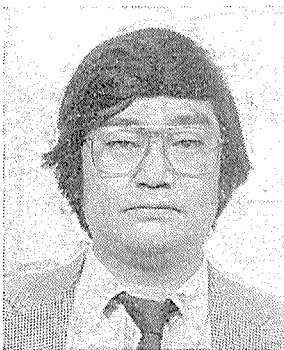
(1) 供試体形状寸法

供試体はすべて長さが 1 m の円柱状のもので、直径は各々 50, 75, 100 mm である。この供試体断面図心位置に、前述した組紐状 AFRP ロッドを 1 本配置し初期

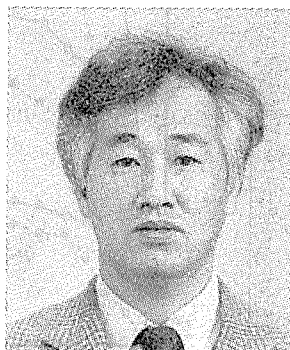
緊張を行った後コンクリートを打設し、コンクリート硬化後緊張力を徐々に解放させた。

(2) 載荷方法および測定項目

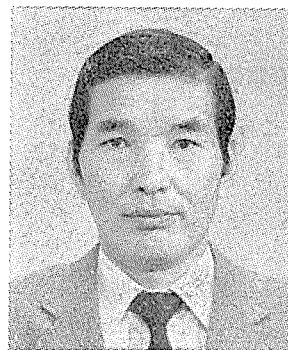
ロッドに与える初期緊張力は基準引張強度の 65% 程度までとし、緊張力を徐々に解放した時のコンクリート表面の軸方向圧縮ひずみをひずみゲージを用いて測定した。測定列は 2 列で、1 列あたり 9 測点とし、都



* Hiroshi MIKAMI
三井建設(株)土木技術部
設計第 3 課主任



** Toshio HAYASHI
三井建設(株)技術研究所
主任研究員



*** Tomio TAMURA
三井建設(株)技術研究所
主席研究員

表—1 組紐状 AFRP ロッド

直 径	8 mm
断 面 積	0.5 cm ²
単位体積重量	1.29 g/cm ³
基準引張強度*	6.4 ton
弾性係数	0.66×10 ⁹ kgf/cm ²
見かけのポアソン比*	0.6
破断時のひずみ	2.2×10 ⁻²
純リラクセーション率	10% 程度

* ここで、基準引張強度とは、ロッド 118 本の引張試験における平均引張強度 7.15 ton に対して、約 3σ (σ: 標準偏差) の安全性を考慮した強度である。また、組紐構造で異方性を示すロッドのため、見かけのポアソン比と称した。上述した弾性係数と見かけのポアソン比および破断時のひずみはロッド 118 本の引張試験での平均値である。

表—2 PC 鋼棒 (JIS G 3109 D 種 1 号)

直 径	9.2 mm	弾 性 係 数	2.05×10 ⁹ kgf/cm ²
断 面 積	0.66 cm ²	リラクセーション率	0.6%
引 張 荷 重	9.7 ton		

表—3 コンクリート

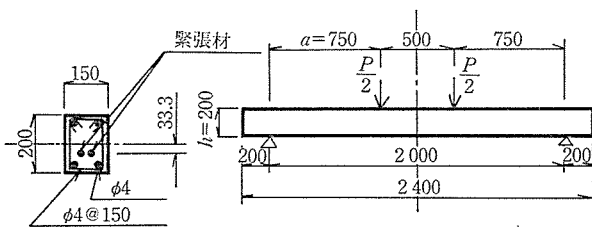
組骨材最大寸法	10 mm
水セメント比 W/C	33.5%
圧 縮 強 度	350~400 kgf/cm ²
ポ ア ソ ン 比	0.15~0.2
割 裂 強 度	20~30 kgf/cm ²
弾 性 係 数	2.5~2.7×10 ⁹ kgf/cm ²

注) 材令は 1~2 週

表—4 供試体の種類

緊張材の種類	初期緊張力	供試体の呼称
組紐ロッド (砂付き)	0.2 P _u , 0.4 P _u , 0.6 P _u	KS 0.2~KS 0.6
組紐ロッド (砂無し)	同 上	K 0.2~K 0.6
PC 鋼棒 D 種 1 号	同 上	PC 0.2~PC 0.6

注) ここで、P_u は、組紐ロッドの基準引張強度で、初期緊張力が 0.2 P_u における梁下縁の初期プレストレスは 17.1(kgf/cm²)、0.4 P_u では 34.1(kgf/cm²)、0.6 P_u 時は 51.2(kgf/cm²) である。



図—1 供試体形状寸法および荷重方法

合 18 測点で測定を行った。なお、この時の荷重強度はロードセルによって確認した。

3.2 PC 梁の静的耐荷試験

(1) 供試体の種類

供試体の種類は、緊張材の種類 (3 種類) と初期緊張力の大きさ (3 段階) をパラメータとする表—4 に示す 9 種類である。

(2) 供試体形状寸法および荷重方法

供試体形状寸法および荷重方法を 図—1 に示す。緊張

材は断面の核半径位置に 2 本配置した。荷重は 2 点荷重とし、せん断スパン梁高比 (a/h) は 3.75 とした。

(3) 測定項目

ひずみゲージで、梁の上・下面と側面および組紐状 AFRP ロッドと PC 鋼棒の表面ひずみを測定した。緊張材の測点数は各々 11 点で、25 cm 間隔でひずみゲージを配置した。また、14 か所の変位計により、梁の変位挙動を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 付着長試験

図—2 に、直径が 75, 100 mm の供試体の各荷重段階における各測点のコンクリート軸方向圧縮ひずみを示す。

この図より、砂付きロッドの方が部材端からの離れが短い所で圧縮ひずみは定常状態になりやすく、いわゆる付着長が短いことがわかる。砂付きロッドの付着長は約 20 D (D: ロッドの直径)、砂無しロッドでは 30~35 D 程度である。従来の PC 鋼線の定着に関する渡辺¹⁾の研究によると、付着長 λ および緊張解放後の緊張材任意点における応力度 σ_s は下式で与えられる。

$$\lambda = \frac{r_1}{2 \mu \psi} \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - 0.95 \mu \psi \sigma_{se} / (\bar{\tau}_0 + \mu \phi)} \right] \dots \dots \dots (1)$$

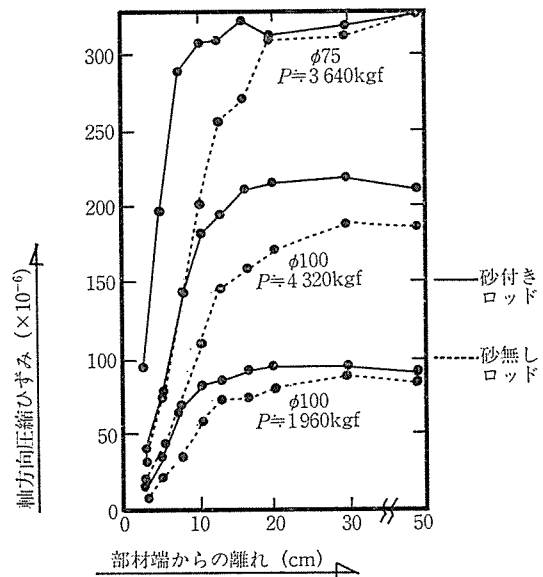
$$\sigma_s = \frac{\bar{\tau}_0 + \mu \phi}{\mu \psi} \{1 - \exp(-2 \mu \psi X / r_1)\} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、τ₀: 純付着力 (1 kgf/cm² と仮定)

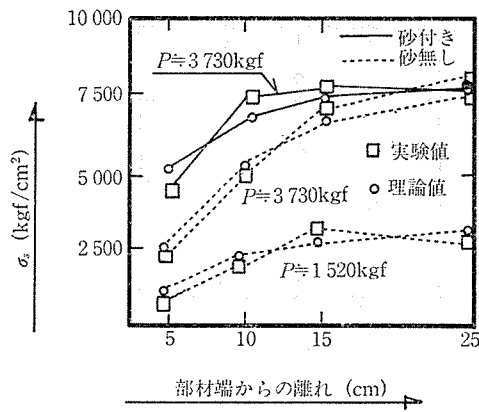
μ: 摩擦係数

$$\phi = \frac{\nu_s \cdot \sigma_{se}}{1 - \nu_s + n(1 + \nu_c)}$$

$$\psi = \frac{\nu_s + n k \nu_c}{1 - \nu_s + n(1 + \nu_c)}$$



図—2 部材端からの離れと軸方向圧縮ひずみの関係



図—3 σ_s の実験値と理論値 ($\phi 75$)

ν_c : コンクリートのポアソン比

X : 材端からの距離

ν_s : 組紐状 AFRP ロッドのポアソン比

σ_{se} : 初期緊張応力

$$k = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

n : 弾性係数比

r_1 : ロッドの半径

r_2 : 供試体の半径

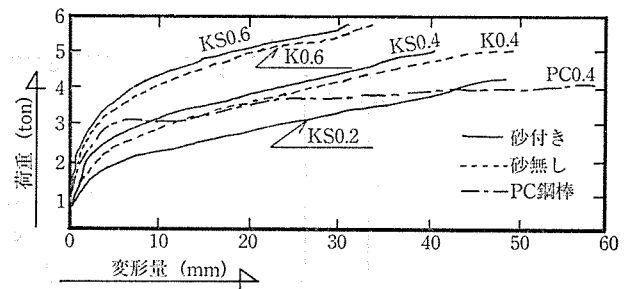
実験結果より λ は既知であり、(1) 式にその他の定数を代入することにより、組紐ロッドの摩擦係数 μ を求めることができる。この μ とその他の定数を (2) 式に代入すると、部材端からの離れが X における任意点の緊張材応力が求まる。ここではこの値を理論値と称し、実験結果をもとに、コンクリート表面のひずみとロッド表面のひずみが一致すると仮定して求めた値を実験値と称する。図—3 に、直径が 75 mm の供試体における σ_s の実験値と理論値を示す。これより、実験値と理論値は、ロッドの種類や解放荷重の大きさにかかわらず比較的良く対応しており、渡辺の研究結果をもとに組紐ロッドの定着特性を論ずることが可能と考えられる。なお、直径が 50 mm の供試体における実験結果から、導入荷重 (解放荷重) の 1/4 を全引張合力と仮定すると、部材端部での水平ひび割れの発生荷重を良い精度で予測できることが判明した。

4.2 PC 梁の静的耐荷試験

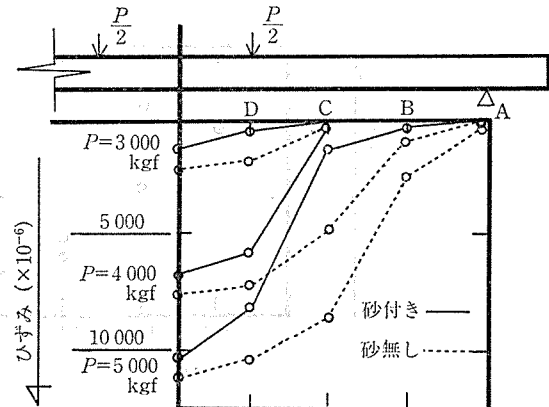
(1) 荷重-変形曲線

図—4 に、梁中央での荷重-変形曲線を示す。組紐状 AFRP ロッドを用いた供試体の変形は、ひび割れ前の弾性領域と遷移領域およびロッドの示す弾性領域から成立している。同じ種類の組紐ロッドであれば、初期緊張力が大きな梁ほど破壊時の変形量が小さく、破壊荷重は大きい。

PC 鋼棒を用いた梁では、荷重が 3 ton を超えたあたりから変形量が大幅に増加し始めたが、これは付着が良



図—4 荷重-変形曲線 (梁中央)



図—5 ロッドのひずみ分布 ($0.4 P_u$ 時)

好でなかったためと推定される。

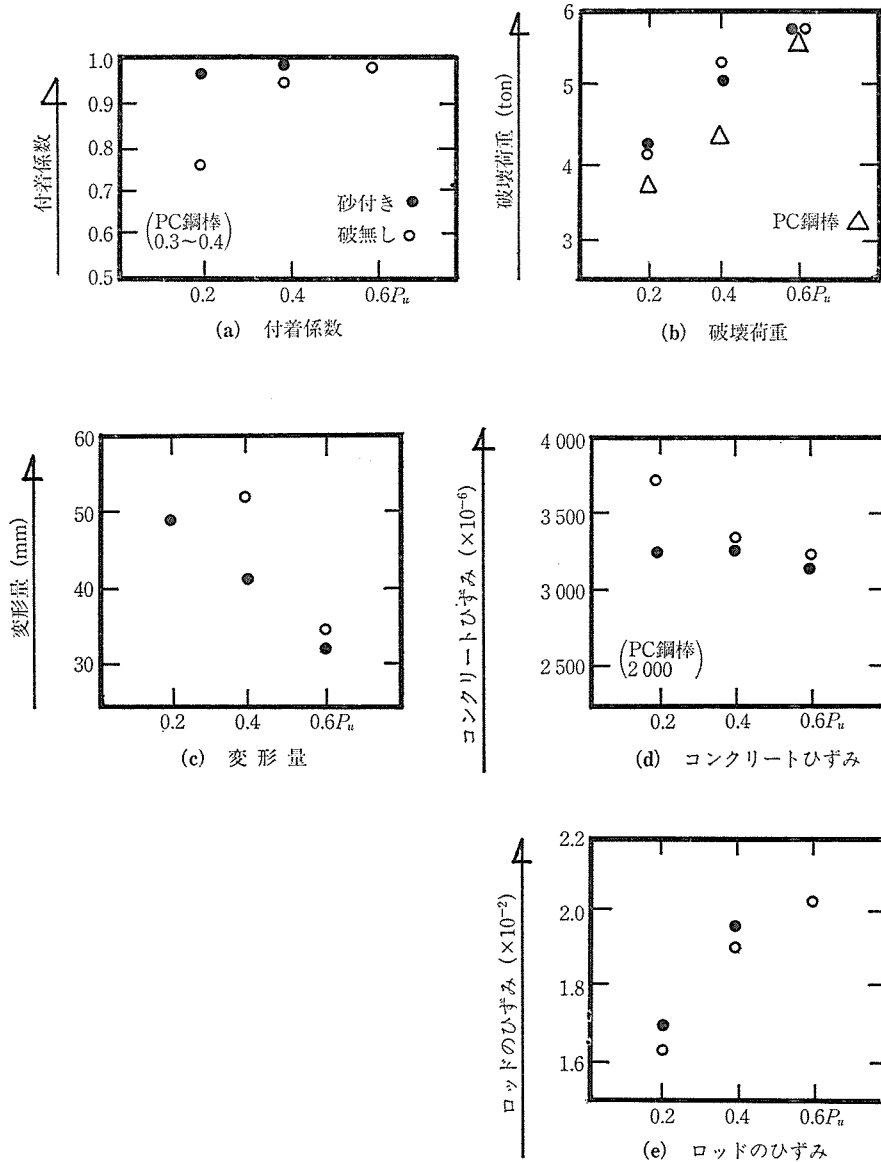
(2) 組紐状 AFRP ロッドのひずみ分布

図—5 に、初期緊張力が $0.4 P_u$ における、組紐ロッドのひずみ分布を示す。なお、このひずみには初期緊張力に対応するひずみは含まれていない。図より、砂付きロッドを使用した場合、測点 B より支点側には、載荷重によるひずみは発生していないことがわかる。砂無しロッドの場合は、載荷重が大きくなると測点 C, B, A にひずみが生じてくる。ただし測点 A, すなわち支点位置のひずみはわずかである。これは、砂付きロッドの付着性能が向上していることを示し、また、砂無しロッドを用いた梁の方が変形量が大きくなることを示唆しているものと考えられる。

ただし、梁中央におけるひずみは両者で大差なく、このため破壊荷重に大きな差異が生じていないと推定される。

(3) 初期緊張力と部材破壊時の計測値の関係

梁破壊時の載荷重によるモーメントは既知であり、これと内力のなすモーメントは釣り合っていると考える。この時、コンクリートの圧縮強度をもとに、全圧縮力を中立軸から梁上縁までの距離 X に関する 1 次式で表わし、これをモーメントの釣り合い式に代入して X に関する 2 次方程式が得られる。この方程式から X が求まり、この X とコンクリート上縁の圧縮ひずみより、緊張材



図—6

位置でのコンクリートのひずみを平面保持の仮定をもとに推定することができる。ここでは、このひずみの推定値と実測された緊張材のひずみの割合を付着係数と称する。

図—6(a) に付着係数を示す。これから、付着係数は初期緊張力の大きさと、ロッドの表面粗度に影響されると考えられる。ただし、初期緊張力が大きくなると、ロッドの表面粗度の影響度は低下する。これは、組紐ロッドは見かけのポアソン比が大きいため、接触圧力（緊張解放後ロッドとコンクリート間に発生するロッド径の増加に基づく圧力を仮称したもの）の低下が起り、また、低初期緊張力の場合、接触圧力よりも表面粗度の方が付着に対して影響度が大きいためと推定される。

図—6(b) に示すように、初期緊張力が大きい梁ほど、破壊荷重は大きくなっている。これは、今回の梁断面、

緊張材の位置および初期緊張力の大きさでは、緊張材の破断による梁の破壊が生じにくいためと予想される。また、PC 鋼棒を使用した梁の破壊荷重が組紐ロッドを使用した梁に比べて小さめになっているのは、付着性能によると考えられる。

図—6(c) より、部材破壊時の梁中央の変形量は、初期緊張力の大きさと使用したロッドの表面粗度に依存するようである。

図—6(d) に示すように、コンクリートの圧縮ひずみは、1 ケースを除き 3000~3500 μ 程度を示しており、いずれもコンクリートの終局ひずみに達している。

図—6(e) に、梁破壊時におけるロッド中央でのひずみを示す。このひずみは、初期緊張力に対応する初期ひずみと載荷重によって生じたひずみを加算したもので、初期緊張力が大きいほどロッドのひずみは大きくなって

おり、また、いずれもロッドの破断ひずみには達していないことがわかる。

(4) 破壊曲げモーメント (M_u) の実測値と計算値

1) M_u の計算に用いたロッドの応力-ひずみ関係

ロッドの初期緊張終了時から梁の載荷試験までは、ロッドに作用している荷重は、ほぼ一定であり、約1週間の荷重保持期間があった。ここで、荷重保持後のロッドの応力-ひずみ関係は図-7に示すように、保持荷重強度と保持時間に対応して非線形的に変化するものと仮定した。このような応力-ひずみ関係が生じる一つの要因としては、高荷重を保持することにより組紐が締まり、横方向ひずみが荷重保持前に比べて発生しにくくなることが考えられる。これはロープ等の締結性材料で見られる現象と同様のものと推測される。

2) 部材破壊時のロッドのひずみの推定式

(a) 平面保持の仮定より

$$\epsilon_p = \epsilon_{pe} + f \cdot \frac{d-X}{X} \cdot \epsilon_{cu} \dots \dots \dots (a)$$

(b) 組紐ロッドの応力-ひずみ関係より

$$\sigma_p = \beta \cdot E_{f1} \cdot \epsilon_{pe} + E_{f2} \cdot f \cdot \frac{d-X}{X} \cdot \epsilon_{cu} \dots \dots \dots (b)$$

(c) 断面力の釣合いより、

$$abX\sigma_{cu} = A_f \cdot \sigma_p \dots \dots \dots (c)$$

(a), (b), (c) 式を基に ϵ_p に関する2次方程式を解くと、

$$\begin{aligned} \epsilon_p = & \frac{1}{2} \left[\epsilon_{pe} \left(2 - \beta \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) - f \cdot \epsilon_{cu} \right] \\ & + \frac{1}{2} \sqrt{ \left[\epsilon_{pe} \left(2 - \beta \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) - f \cdot \epsilon_{cu} \right]^2 } \\ & + \frac{4 f \alpha b d \sigma_{cu} \cdot \epsilon_{cu}}{A_f \cdot E_{f2}} } \\ & - 4 \left(1 - \beta \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) (\epsilon_{pe}^2 - \epsilon_{pe} \cdot f \cdot \epsilon_{cu}) \dots \dots \dots (d) \end{aligned}$$

ここで、

- ϵ_p : 部材破壊時の組紐ロッドのひずみ ($\times 10^{-6}$)
- ϵ_{pe} : 初期緊張力に対応するロッドのひずみ ($\times 10^{-6}$)
- ϵ_{cu} : 上縁コンクリートの圧縮破壊ひずみ ($\times 10^{-6}$)
- σ_p : ϵ_p に対応する応力 (kgf/cm^2)

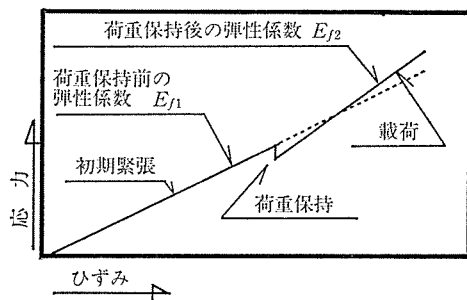


図-7 組紐ロッドの応力-ひずみ関係

表-5 M_{cr} と M_u の実測値および計算値

供試体の呼称	$M_{cr}(\text{ton}\cdot\text{m})$		①/②	E_{f2}/E_{f1}	$M_u(\text{ton}\cdot\text{m})$		③/④
	実測値①	計算値②			実測値③	計算値④	
KS 0.2	0.41	0.43	0.95	1.1	1.61	1.70	0.95
K 0.2	0.38		0.88		1.58	1.65	0.96
KS 0.4	0.56	0.56	1.0	1.2	1.91	1.97	0.97
K 0.4	0.56		1.0		2.03	1.94	1.05
K 0.6	0.83	0.84	0.99	1.3	2.21	2.10	1.05

- σ_{cu} : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2)
- E_{f1} : ロッドの荷重保持前弾性係数 (kgf/cm^2)
- E_{f2} : ロッドの荷重保持後弾性係数 (kgf/cm^2)
- f : 付着係数
- X : 中立軸から梁上縁までの距離 (cm)
- d : 梁の有効高さ (cm)
- β : $1-r$
- b : 梁幅 (cm)
- r : ロッドの純リラクセーション率
- α : コンクリートの応力-ひずみ曲線の形状係数 (0.85)

A_f : ロッドの断面積 (cm^2)

3) 実測値と計算値の比較

表-5に、ひび割れモーメント M_{cr} と M_u の実測値と計算値を示す。なお、荷重保持前の弾性係数 E_{f1} は $0.66 \times 10^6 (\text{kgf/cm}^2)$ 、純リラクセーション率は10%とし、荷重保持後の弾性係数の増加割合は表中の仮定値を使用した。

5. 結 論

今回の一連の実験から、アラミド繊維を組紐状に成形したロッドはPC緊張材に使用可能であることが判明した。実験結果および考察を以下に取りまとめる。

- 1) 組紐状 AFRP ロッドの付着長は $20D \sim 35D$ (D : ロッドの直径) 程度のものである。
- 2) PC 鋼線の定着に関する渡辺の研究結果をもとに、組紐ロッドの定着特性が把握できると考えられる。
- 3) 組紐ロッドとコンクリートとの付着は良好であるが、表面処理によってさらに付着性能を向上できる。
- 4) ロッドに与える初期緊張力の大きさが、付着係数や梁の耐力、破壊形態等に大きく影響するようである。
- 5) 表-5に示す弾性係数の仮定値をもとに、組紐ロッドを用いたPC梁の破壊曲げモーメントをある程度の精度で予想できると考えられる。

末筆ながら、本研究を進めるに当たり貴重な御意見を賜った、東京大学の小林一輔教授ならびに宇都宮大学の佐藤良一助教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 渡辺 明：ボンド定着プレテンション部材の鋼線定着に関する実験的研究，土木学会論文集第125号（昭和41.1），pp. 21～35

- 2) 長滝重義，佐藤良一：GFRP-BARで緊張したPC部材の力学的特性，東工大土木工学研究報告，No. 17，12月，1974，pp. 33～46
- 3) 小林一輔：PCと新材料，プレストレストコンクリート，Vol. 30，No. 1（1983），pp. 34～39
- 4) 岡本，松原，谷垣：アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その1），日本建築学会学術講演会，1987，10，pp. 529～530

【昭和63年5月11日受付】

◀刊行物案内▶

第27回研究発表会講演概要

体 裁：B5判 98頁

定 価：2500円 送 料：250円

内 容：（1）FC板の長支間，重荷重倉庫への適用，（2）PC合成床版の構造性能に関する実験的研究，（3）19年間工場建屋に使用されたPC鋼棒について，（4）プレキャストプレストレストコンクリート梁・柱接合部の終局域特性に関する実験的研究，（5）マイクロコンピュータを利用した緊張管理について，（6）PRC構造のCost Study，（7）持続荷重を受けるPRCはりの曲げひびわれ幅とたわみ，（8）PRC曲げ部材断面の終局限界モードとじん性設計について，（9）高強度鉄筋を緊張使用したPRCはりの力学特性，（10）ケミカルプレストレスを導入したPRC部材の曲げ特性，（11）PC斜張橋斜材定着部実験，（12）人工軽量骨材を用いたPC桁の定着部の補強実験，（13）緊張材用FRPロッドについて，（14）経年PCマクラギの耐力調査，（15）海岸部高架橋における塩害対策について——北陸自動車道親不知海岸高架橋——，（16）PC合成床版工法——PC板を埋設型枠として用いた合成床版工法——について，（17）プレキャスト化した床版及び壁高欄の施工，（18）新門司大橋の施工，（19）万之瀬橋（アーチローゼ）の設計と施工，（20）シンガポール高速鉄道における大型PC桁の架設について，（21）有田橋の設計と施工，（22）FCC工法における設計・施工管理システム，（23）二色の浜連絡橋（PC2径間ゲルバー桁橋）の設計・施工，（24）PC等径間連続ラーメン橋桁橋の設計と施工について——北陸自動車道親不知海岸高架橋——，（25）人工軽量骨材を用いたPC連続桁の設計，（26）軽量コンクリートを使用したPC下路桁の施工について（JR西日本片町線内代Bv），（27）新丹波大橋の施工について