

組紐状AFRPロッドのPC緊張材としての定着および付着特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BOTH ANCHORING AND BOND PROPERTIES OF BRAIDED AFRP ROD USING AS PC TENDONS

三上浩* 加藤正利** 田村富雄*** 能町純雄****

BY Hiroshi MIKAMI, Masatoshi KATO, Tomio TAMURA and Sumio NOMACHI

There are many well-studies on application of fiber reinforced plastic rods (FRP rods) by various new materials for the flexural and shear reinforcement of RC and PC structures. One of the defects of these FRP rods would be low modulus of elasticity. Therefore, using these rods as PC tendons of pretensioning members will be effective to improve the composite action between FRP rods and concrete. In such member, the resisting mechanism and efficiency at the end of a member have been found to be influenced by both anchoring and bond properties of FRP rods. Thus, in order to investigate the above properties, anchoring length test and static loading test of PC beams were carried out. This paper describes the test results and discusses these properties of braided AFRP rods when using as PC tendons.

1. まえがき

近年、軽量で高強度かつ耐食性や非帯磁性に優れた各種の新素材繊維（例えばアラミドや炭素繊維等）をコンクリートの曲げおよびせん断補強材として用いる研究が各方面で盛んに進められている。これらの研究から、新素材繊維による補強方法には、連続繊維^{1)~7)}として従来の鉄筋やPC鋼材の代替として使用する方法と鋼繊維補強の様に短繊維^{8)~9)}にて使用する方法の2つの方法が見受けられる。

特に、繊維の連続性を利用し、繊維に樹脂を含浸して硬化させたFRPロッドを鉄筋等の代替として利用する場合では、これらのFRPロッドが同一断面積で鉄筋の5~6倍の引張強度を有する反面、弾性係数が鋼材の1/2~1/3程度と小さいことや、1方向強化材料のため引張には強いものの他の方向からの外力には比較的弱い点および鉄筋等に比べコスト高である等の短所も指摘されている。さらに、コンクリートの補強材として極めて重要な特性である、コンクリートとFRPロッドとの付着追随性は繊維に樹脂を含浸硬化させただけではロッド表面が平滑になるため、鉄筋等と同程度には期待できないという欠点がある。そのため、FRPロッドを成形する際に繊維を編んだり^{10)~11)} 纏る¹²⁾ ことでロッド表面に異形性を持たせる方法が考

*	工修	三井建設(株)土木設計部	(〒 101 東京都千代田区岩本町 3-10-1)
**		三井建設(株)土木設計部	(〒 101 東京都千代田区岩本町 3-10-1)
***		三井建設(株)技術開発推進部	(〒 101 東京都千代田区岩本町 3-10-1)
****	工博	日本大学生産工学部教授	(〒 275 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

えられている。その他にも、繊維のローピングを3軸方向に織り上げた立体状の織物としたり¹³⁾、FRPを格子状^{14)~16)}にして、格子交差部の配力筋でコンクリートとの付着を確保する等の工夫がなされているのが現状である。この様に、多くの長所と短所を合わせもつFRPロッドであるが、新素材が有する耐食性や非帯磁性はコンクリート構造物の置かれる多様な環境を想定すると、既往の材料には期待することができない極めて優れた特質であり、当面、付加価値の高い利用方法が研究されるものと考えられる。

そこで、本研究では弾性係数が低い欠点を極力補い、かつ集中して効率良くコンクリート補強が可能となると思われる方法として、特にアラミド繊維を用いたFRPロッドをPC緊張材として用いるための基礎的な研究を行った。今回、緊張材として使用したロッドはアラミドの連続繊維を組紐機で編み上げた後、樹脂を含浸して硬化させた組紐状AFRPロッドで、これは組紐構造（従来のワイヤーロープと同様）にすることにより、ロッド表面に異形性を持たせて付着性能の向上を図ったものである。さらに、付着性能はロッド表面の粗度を高めることによって向上すると考えられ、その目的で、繊維を組紐状に編み上げた後、ロッド表面に5号珪砂を接着させたものもあわせて製作し、PC緊張材としての適用性を比較検討した。

本文では、これら砂付きや砂無しの組紐状AFRPロッドをプレテンション方式PC部材の緊張材として使用する際に特に重要と思われる、部材端部における定着特性ならびにPC梁部材において、その耐力や変形性能と破壊形式等に影響を与えると考えられるコンクリートとの付着特性について実験的に検討したのでその結果を報告するものである。

2. 実験計画

本実験計画は大きく2つから成り、1つは組紐ロッドの付着長（部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、部材端部の定着特性を検討するための付着長試験であり、他はPC梁における組紐ロッドの付着特性を検討するためのPC梁静的加力試験である。また、付着長試験は円柱状供試体と梁状供試体の2種類の形状のもので行った。以下に、各々の試験の概要と方法を示す。

2.1 付着長試験の概要および方法

PCプレテンション部材に所要のプレストレスが導入されるか否かは緊張材の定着特性に左右され、これはまたプレテンション部材端部の有効利用および部材の耐力や変形という観点からも極めて重要である。

そこで本研究では、特に円柱状供試体によって付着長を実験的に確認し、さらに従来のPC鋼線の定着に関する渡辺の研究¹⁷⁾を基に、砂付きや砂無しの組紐状AFRPロッドの摩擦係数を求め、定着特性に与える組紐構造の影響等についてもあわせて検討した。さらに、梁状供試体において、緊張力を偏心して部材に導入した際の緊張材位置およびその他の位置における部材断面内のプレストレスを調べた。

(1) 円柱状供試体の試験方法

初期緊張はラーメン形状の縦型の鋼製フレームを用いて、円筒状型枠の断面図心位置に直径8~9mmの組紐ロッドを1本配置した後センターホールジャッキにて行い、コンクリートを縦打ちし、コンクリート硬化後ロッドの初期緊張力を徐々に解放した。供試体の直径は50mm、75mm、100mmの3種類で長さは1mであり、緊張材として砂付きと砂無しの組紐ロッドを用いた合計8供試体にて試験を行った。ここで、直径が50mmの供試体では主に緊張力解放過程における、部材端部での水平ひび割れの発生について検討し、その他の供試体では付着長および定着特性を検討した。

この際、組紐ロッドに与えた初期緊張力はロッドの基準引張耐力（後述）の65%程度までとした。測定はコンクリート表面に取り付けた、測定列2列、全測点数18点のひずみゲージを基に行い、各々の解放荷重に

おける部材端からの距離と軸方向圧縮ひずみの関係を把握した。なお、緊張解放荷重は樹脂型定着具とフレームの間に挿入したロードセルによって確認した。

(2) 梁状供試体の試験方法

図-1 に示す梁断面の核半径位置に、表面砂無しの直径 8mm のロッドを 1 本配置して、プレテンション方式 PC 梁を製作した。初期緊張力は基準引張耐力の 60 % 程度とした。測定列 A および B における供試体側面のひずみを緊張解放荷重に対応して測定し、偏心して緊張力の導入を行った際の梁状供試体断面内のプレストレスを調査した。

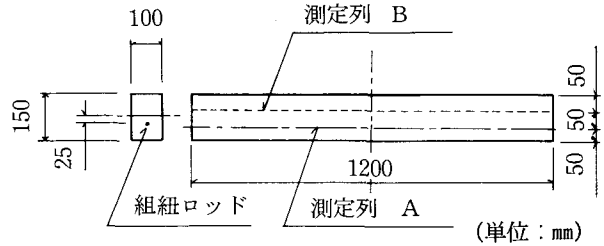


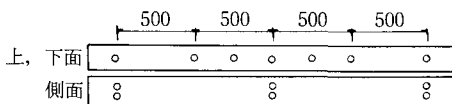
図-1 梁状供試体の形状寸法

2. 2 PC 梁静的加力試験の概要および方法

砂付きまたは砂無しの組紐状 AFRP ロッドおよび PC 鋼棒を緊張材とするプレテンション方式 PC 梁において、緊張材に与える初期緊張力の大きさを変えて PC 梁下縁の応力度を 3~4 段階に変化させ、初期緊張力の大きさが緊張材とコンクリートとの付着追従性に与える影響を調べ、あわせて各種の緊張材の付着特性が梁の耐力や変位量および破壊形式に与える影響を検討した。表-1 に供試体の種類を示す。供試体は緊張材の種類と下縁応力度を変化させた合計 10 体である。

図-2 に供試体の形状寸法を示す。緊張材を断面の核半径位置に 2 本配置し、荷重はせん断スパンー梁高比 (a/h) が 3.75 の 2 点荷重で行った。なお、初期緊張を与えることによる梁上縁のコンクリートひずみは 0 である。緊張はセンターホールジャッキとキリンジャッキにて行い、緊張荷重の管理はロードセルによって行った。

図-3 に梁の上、下面および側面と組紐状 AFRP ロッド表面のひずみゲージ取り付け位置および変位計の取り付け位置を示す。なお、KS-3 の組紐ロッドにはひずみゲージを取り付けていない。



ひずみゲージ (梁の上下面、側面)

図-3 ひずみゲージと変位計の取り付け位置

表-1 供試体の種類

供試体の呼称	緊張材の種類	初期緊張力の大きさ	梁下縁応力度 (kgf/cm ²)
K-1	AFRP/砂無し	0.2 P _u	17.1
KS-1	AFRP/砂付き	0.2 P _u	17.1
K-2	AFRP/砂無し	0.4 P _u	34.1
KS-2	AFRP/砂付き	0.4 P _u	34.1
K-3	AFRP/砂無し	0.6 P _u	51.2
KS-3	AFRP/砂付き	0.6 P _u	51.2
KS-4	AFRP/砂付き	0.8 P _u	68.3
PC-1	PC 鋼棒	0.2 P _u	17.1
PC-2	PC 鋼棒	0.4 P _u	34.1
PC-3	PC 鋼棒	0.6 P _u	51.2

(P_u: 基準引張耐力)

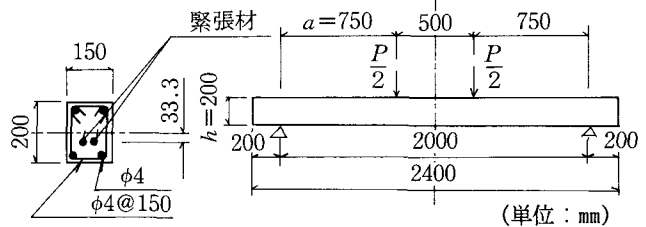
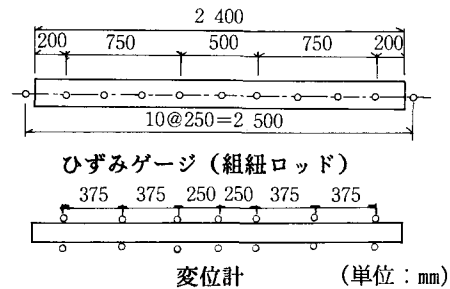


図-2 供試体の形状寸法



3. 緊張材とコンクリートの特性

(1) 緊張材の特性

組紐状AFRPロッドの特性を表-2 に、PC鋼棒の特性を表-3 に示す。また、組紐ロッドの構造概念を図-4 に示す。ここで、表-2 中の基準引張耐力とは、ロッド 118本の引張試験における平均引張耐力の7.15tonf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、ポアソン比は見掛けのポアソン比とした。

表中の弾性係数と見掛けのポアソン比および破断時の歪みはロッド118本の引張試験での平均値である。ロッドは直径12 μ の繊維を6000デニール(1d=1g/9000m) 束ねたボビン 8本を 1組として、8組を組紐状に編み上げたものである。また、図-4 に示す組紐の凹凸はロッド径の10倍の区間内に 4回できる。

図-5 に組紐状AFRPロッドの荷重-ひずみ関係の 1例を示す。ここで、A線はロッド表面に取り付けたひずみゲージの値を示し、B線は50mm程度の基長を有するクリップ式変位計より求めたひずみである。

図-5 より、両者の勾配は比較的良く合致するが、クリップ式変位計によるひずみはひずみゲージに比べて小さいことが判る。このひずみ差はクリップ式変位計とロッドの接触部分のなじみがロッドに凹凸があることや表面への樹脂のまわりこみによって、低荷重段階で不十分であったことに起因すると推察される。

この様にして、ひずみゲージとクリップ式変位計の両方を取り付けた 7本の試験片での引張試験から、ひずみゲージによる弾性係数の平均値は 6.98×10^5 (kgf/cm²)、クリップ式変位計で 6.87×10^5 (kgf/cm²)であり、この種のロッドのひずみを従来のひずみゲージを用いて追跡することが可能と思われる。

次に、本実験に先立ち行った付着試験の結果を図-6 に示す。試験はJIS原案「引張試験による鉄筋とコンクリートとの付着

表-2 組紐状AFRPロッドの特性

ロッドの呼称	K64/K64S
砂の有無	砂無し/砂付き
公称径	8 ^{mm} /9 ^{mm}
公称断面積 繊維のみ(cm ²)	0.3
公称断面積 全断面(cm ²)	0.5
単位体積重量 (g/cm ³)	1.3
基準引張耐力 (tonf)	6.4
基準引張強度 繊維のみ(kgf/cm ²)	2.1×10^4
基準引張強度 全断面(kgf/cm ²)	1.3×10^4
弾性係数(kgf/cm ²)	6.6×10^5
見掛けのポアソン比	0.6
破断時の歪み(μ)	2.2×10^4
純リラク セーション率(%)	10.0

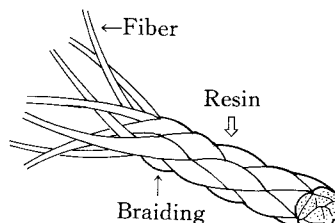


図-4 組紐ロッドの概念図

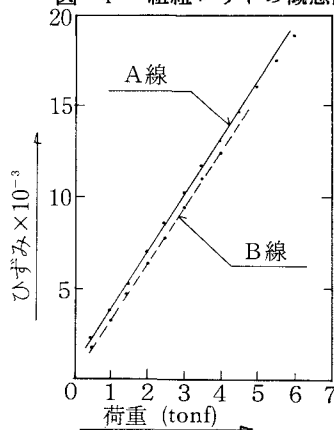


図-5 組紐ロッドの荷重-ひずみ関係

表-3 PC鋼棒の特性

(JIS G 3109 D種 1号)

直径(mm)	9.2	弾性係数(kgf/cm ²)	2.1×10^5
断面積(cm ²)	0.7	リラクセーション率(%)	0.6
引張耐力(tonf)	9.7		

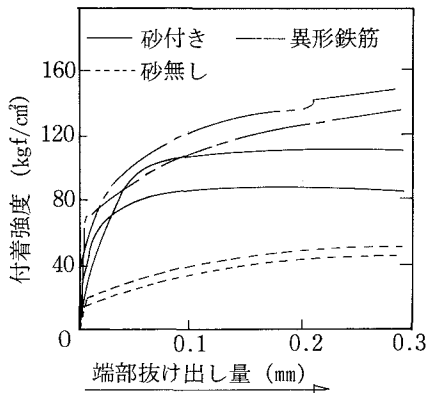


図-6 付着試験の結果

強度試験方法（案）」に基づき、付着区間をロッド径の約 4 倍の30mmとし、非付着区間を70mmとした。図には砂付きおよび砂無しロッドと比較のために異形鉄筋 8mmの結果も示した。この図から、砂を接着したロッドの付着強度は比較的高く、端部抜け出し量が 0.1mm程度以上ではほぼ一定になることが判る。これに対し、砂無しロッドは砂付きロッドや異形鉄筋と比較して、抜け出し量が少ない段階での付着強度が低く、端部抜け出し量が徐々に増加するのに対応して付着強度も増加する傾向にあることが判る。

（２） コンクリートの特性

コンクリートは粗骨材の最大寸法が10mmのレデーミクストコンクリートである。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、試験時の目標強度は400(kgf/cm²)とした。コンクリートの諸元を表-4 に示す。材令は付着長試験が 7日～14 日、静的加力試験が11日～14日である。

表-4 コンクリートの諸元

粗骨材最大寸法(mm)	10.0	
水セメント比(%)	33.5	
材令 (日)	7	14
圧縮強度(kgf/cm ²)	350	420
ポアソン比	0.15	0.20
割裂強度(kgf/cm ²)	20	30
弾性係数(kgf/cm ²)	2.5x10 ⁵	2.7x10 ⁵

4. 付着長試験の結果および考察

4. 1 円柱状供試体

直径75mm、100mm の供試体における各測点、各荷重段階でのコンクリート表面の軸方向圧縮ひずみを使用した緊張材ごとに示したものが図-7 である。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が定常状態になりやすく付着長が短いことが判る。また、この図から付着長は供試体の直径や導入する荷重強度に関わりなく、ロッドの直径Dを基準とすると、砂付きで約20D、砂無しで30～35D程度であることが判る。すなわち、組紐状AFRPロッドの付着長は砂無しでP C鋼線と同程度、砂付きではP C鋼線よりも短いものと思われる。ここで、従来のP C鋼線の定着に関する渡辺の研究¹⁷⁾ 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。

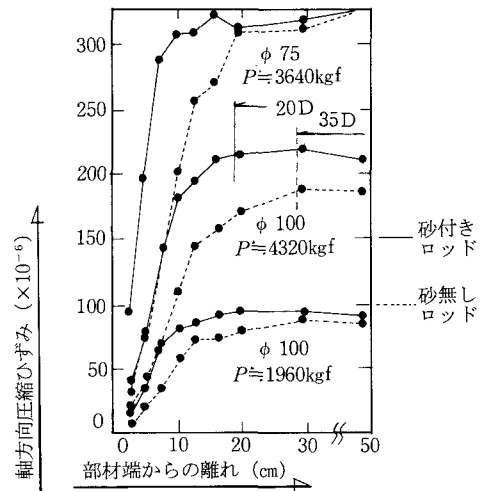


図-7 コンクリートの軸方向圧縮ひずみ

$$\lambda = \frac{r_1}{2 \mu \phi} \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - 0.95 \mu \phi \sigma_{s0} / (\bar{\tau}_0 + \mu \phi)} \right] \quad \cdots \cdots \cdots [1]$$

$$\sigma_s = \frac{\bar{\tau}_0 + \mu \phi}{\mu \phi} \cdot [1 - \exp(-2 \mu \phi X / r_1)] \quad \cdots \cdots \cdots [2]$$

(1)式に実験値の付着長λを代入し、その他の既知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、結果は砂付きロッドで 0.2程度、砂無しロッドで 0.1程度である。この値はP C鋼線が0.3 程度であるのに比べて小さく、付着長がP C鋼線と同程度またはそれよりも短い原因として摩擦係数と同様に影響度の高い要因が他にあるものと予想される。この一因として、組紐ロッドの見掛けのポアソン

比が 0.5 以上であることが考えられる。すなわち、初期緊張力を加えることでロッド径の減少が起こり、その後の緊張力の解放によりロッド径は回復しようとするが、コンクリートに拘束されているためにその回復力は接触圧力（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）として作用し、部材端ではロッドが楔状となり構造的な抵抗力が極めて大きくなるためと推定される。

次に、 μ やその他の諸定数を (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。この値を計算値と称し、コンクリート表面の実測ひずみとロッドのひずみが一致すると仮定して求めた値を σ_s の実験値と称して、直径 75mm の供試体における両者を図-8 で比較した。これより、実験値と計算値はロッドの種類や解放荷重の大きさに関わらず比較的良好に対応することが判る。

また、直径 50mm の供試体の実験結果によると、断面積の小さな供試体に大きなプレストレスを導入すると部材端部に水平ひび割れが発生することが確認された。ひび割れ発生荷重は砂付きロッドを使用した供試体で約 2680kgf、砂無しロッドを使用した供試体で約 2600kgf であり、両者に顕著な差異はない。この結果を用い、緊張荷重の 1/4 を全引張合力と仮定すると合力は 650~670kgf となる。

これに対して、ギヨンによる端ブロックでの横方向引張応力に関する研究結果¹⁸⁾ に基づく引張合力は 581~599kgf 程度となり、両者は比較的良好一致することが判る。以上から、従来のポストテンション部材端部の水平ひび割れ発生に対する検討式¹⁸⁾ を用いて、組紐状の FRP ロッドを用いた時の部材端部のひび割れ発生の検討が可能と考えられる。

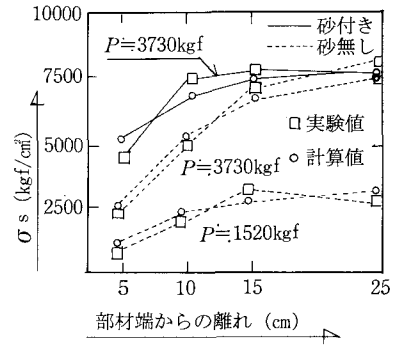


図-8 σ_s の実験値と計算値

4. 2 梁状供試体

梁状供試体の測定列 A、B におけるコンクリートのひずみを緊張力ごとに図-9 に示す。測線 A の緊張材位置でのひずみから、部材端から梁の高さ程度の離れで部材中心でのプレストレス（有効プレストレスと称する）の 95% 程度が導入されることが判る。測線 B では有効プレストレスの導入される点までの距離が偏心曲げの影響により緊張材位置と比べて多少長くなるもののプレストレスが良好に導入されていることが判る。この様に組紐ロッドは、部材端部の有効利用を可能とする緊張材と思われる。

また、部材中心における A、B の歪みは A が B の約 2 倍を示しており、部材断面の鉛直方向に梁の理論で想定されるプレストレスが導入されたことが判る。

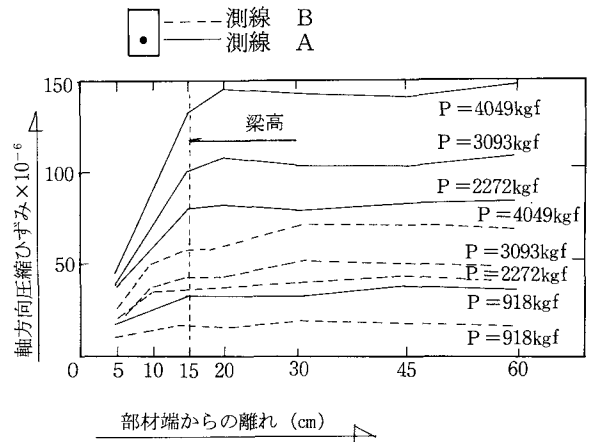


図-9 断面内のプレストレス分布

5. PC 梁静的加力試験の結果および考察

5. 1 実験結果

(1) ひび割れ図

初期緊張力が $0.4P_u$ における供試体のひび割れ状況を図-10に示す。砂付きロッドを使用した梁のひび割れの分散性が良好であるのに対して、砂無しロッド、P C鋼棒の順にひび割れが集中する傾向が見受けられ特に砂付きロッドとコンクリートとの付着追随性が良好であることが判る。この図において、緊張材位置に生じている水平方向のひび割れの大部分は梁が曲げ破壊した時に一気に発生したもので、緊張材とコンクリートとの付着が大変形によって切れたためと推察される。

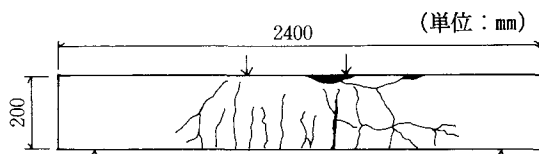


図-10(a) ひび割れ図 (砂付きロッド)

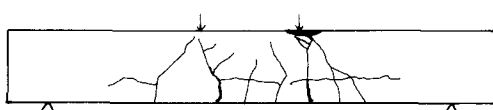


図-10(b) ひび割れ図 (砂無しロッド)

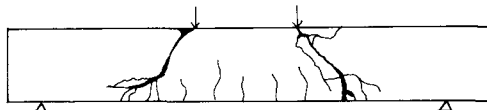


図-10(c) ひび割れ図 (P C鋼棒)

(2) 荷重-変位関係

梁中央での荷重-変位曲線を図-11に示す。組紐ロッドを用いた供試体の荷重-変位関係は曲げひび割れ発生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り立つことが判る。また、下縁応力度の大きな梁ほど曲げひび割れ発生荷重が大きく、破壊時の変形量が小さく、破壊荷重が大きくなる傾向が見られる。

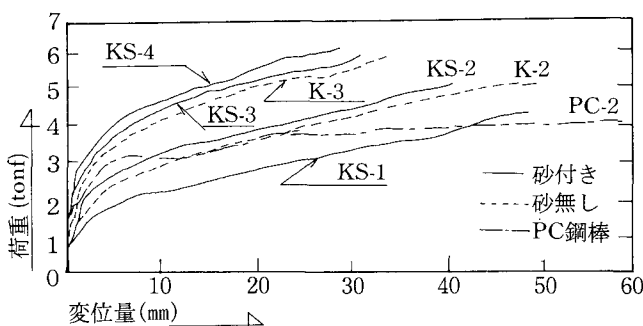


図-11 荷重-変位曲線

ここで、K-3、KS-3とKS-4の変位曲線から、初期緊張力が大きいと靱性に乏しくなる傾向も見られる。なお、P C鋼棒を用いた梁では荷重が 3tonfを超えた段階から変位量が大幅に増加し始めたが、これはP C鋼棒とコンクリートとの付着が切れたためと推察される。

(3) 組紐ロッドのひずみ分布

初期緊張力が $0.4P_u$ の供試体(K-2、KS-2)における組紐状A FRPロッドのひずみを各荷重段階、各測点ごとに図-12に示した。この図から、砂付きのロッドでは測点Bより支点側には載荷重によるひずみがほとんど発生していないことが判る。これに対して、砂無しのロッドでは載荷重が大きくなるにしたがって測点C、B、Aにひずみが発生する。

これは砂を接着することでコンクリートとの付着をより広範囲に確保できることを示すものと考えられ、曲げや曲げせん断ひび割れの分散性が砂付きのロッドで良好であることに対応するものと考えられる。ただし、砂無しロッドの測点A、すなわち支点位置におけるひずみは微小であり、部材端部の

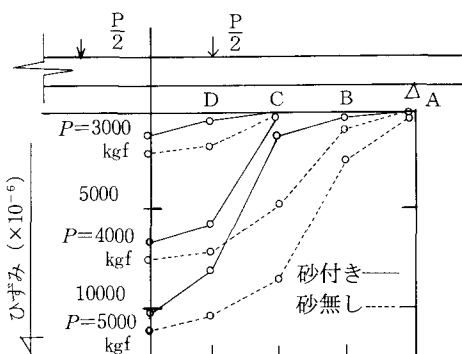


図-12 組紐ロッドのひずみ分布

定着は砂無しロッドでも確保されていると考えられる。次に、梁中央における載荷重によるロッドのひずみは終局荷重近傍まで砂付きと砂無しで顕著な差は無く、破壊荷重が梁中央の緊張材のひずみに関連すると考えると、破壊荷重は砂付き、砂無し両者で大差ないことも予想される。

(4) 初期緊張力と梁破壊時の実験量および破壊形式の関係

図-13に梁破壊時の各種実験量と破壊形式を取りまとめた。破壊形式は初期緊張力が $0.8P_u$ ではロッドの破断による破壊であり、他のものはすべてコンクリートの圧縮破壊である。

図-13 (a)より、初期緊張力の大きい梁ほど破壊荷重が大きいことが判る。ただし、組紐ロッドを用いた梁では初期緊張力の大きさと破壊荷重の大きさは線形関係になく、初期緊張力の増加に対する破壊荷重の増加量は初期緊張力が大きくなるに従って低下する傾向が見られる。これは、今回の供試体計画では初期緊張力の大きさが $0.6P_u$ 程度までは圧縮破壊を示し、それ以後はロッドの破断による破壊へと移行するためと思われる。

図-13 (b)より、梁破壊時の最大変位量は初期緊張力の大きさと使用したロッドの表面粗度(砂付きまたは砂無し)に影響され、特に表面粗度の影響は初期緊張力が小さい梁で顕著であることが判る。

図-13 (c)に示す様に、コンクリートの圧縮ひずみは変位量が極めて大きい、初期緊張力が $0.2P_u$ の砂無しのロッドを用いた梁を除いてほぼ同程度である。

図-13 (d)に梁破壊時における組紐ロッドのひずみを示す。この値は初期緊張力に対応するひずみと梁に載荷することによって生じた実測ひずみを加算したものである。

この図から、初期緊張力が大きい梁ほど破壊時のロッドのひずみが大きいことが判る。また、初期緊張力が $0.6P_u$ まではひずみの合計がロッドの破断ひずみ以下であり、これが $0.8P_u$ では破断ひずみに達することが判る。これらから、 $0.6P_u$ までは梁の破壊がコンクリートの圧縮破壊であり、 $0.8P_u$ ではロッドの破断による破壊であることが確認できる。

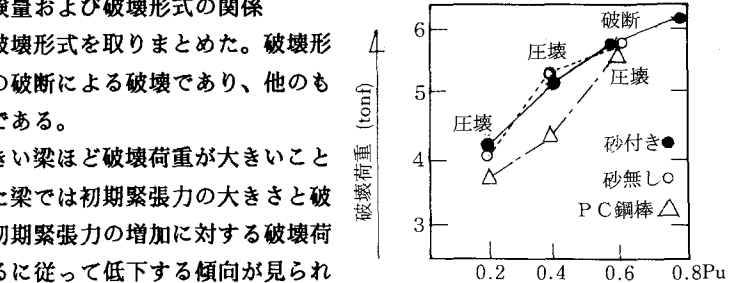


図-13(a) 破壊形式と荷重

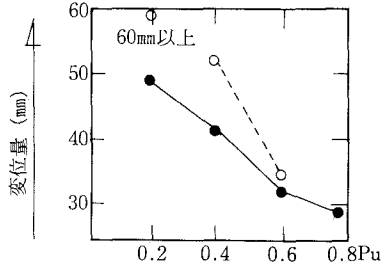


図-13(b) 変位量

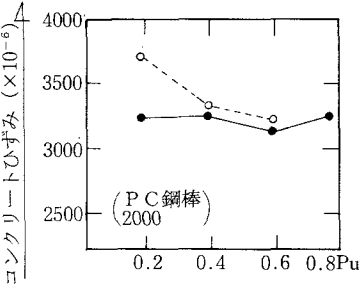


図-13(c) コンクリートの圧縮ひずみ

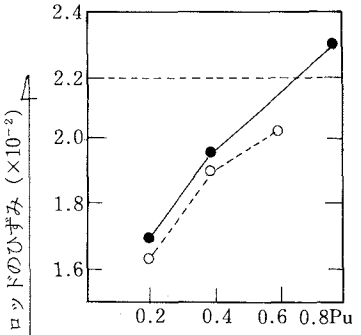


図-13(d) ロッドのひずみ

5. 2 組紐ロッドの付着係数

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られる。また、コンクリートが負担する圧縮力は実測の圧縮強度と図-14に示す応力分布の仮定を基に中立軸から梁上縁までの距離 x に関する 1次式で表される。これをモーメントの釣り合い式に代入すると x に関する 2次方程式が得られ、中立軸の位置 x が求まる。この x と梁上縁の実測圧縮ひずみを基に、平面保持の仮定により緊張材位置におけるコンクリートのひずみが推定でき、このひずみの推定値と実測された緊張材

のひずみとの割合をここでは付着係数と称する。図-15に付着係数を示す。

これより、付着係数は初期緊張力の大きさと緊張材の種類および表面状態に影響されることが判る。

特に、組紐ロッドでは砂を接着させて表面粗度を高めることにより付着係数は増加し、この傾向が初期緊張力の小さい梁で顕著であることが判る。

これは、組紐ロッドのコンクリートとの付着追随性が表面粗度と接触圧力の両者によって確保されていることを示すものと思われ、また、低初期緊張力の梁では接触圧力が低く、表面粗度の影響が顕著に出現しやすいと推察される。

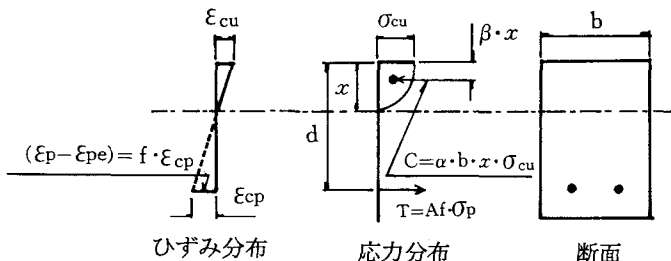


図-14 ひずみと応力分布の仮定

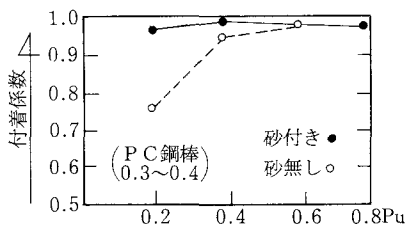


図-15 付着係数

5. 3 梁の破壊荷重の検討

(1) 計算に用いた組紐ロッドの応力-ひずみ関係

静的に一樣な荷重速度で加力した時の組紐状AFRPロッドの荷重-ひずみ関係は既に図-5に示した。しかし、本実験の様にプレテンション方式で梁を製作する際は、ロッドに加えられた荷重が長期間保持される等荷重速度は一樣でない。従って、この様な荷重条件下における組紐ロッドの応力-ひずみ関係は前述したものとは異なることも予想される。これは、組紐ロッドの構造が従来のワイヤーロープと同様であり、ワイヤーロープではプレストレスの効果(処女荷重の加力時と2回目の加力時で応力-ひずみ曲線が変化し、2回目の方が弾性係数が大きくなる効果)が確認されており、本ロッドも同様な締結性材料に特有な挙動を示すことが考えられるからである。

そこで、現実の荷重強度-保持時間関係を再現する様に、新たに引張試験を行った。試験結果を図-16に示す。この図から0.4P_uの荷重を1週間保持した後、保持荷重より大きな荷重で再載荷を行うと、再載荷における弾性係数は荷重保持前と比較して大きくなる傾向が見られた。本文では、1週程度荷重を保持した際の保持荷重と弾性係数の増加割合の関係を図-17の様に仮定して以後の検討を行った。ただし、この試験は同一条件で3体の試験片でしか実施しておらず、ワイヤーロープのストレッチングの効果が時間に依存しないことやロッドはワイヤーロープと異なり繊維と樹脂の複合材であること等相違点もあり、今後詳細な検討を要するものと考えられる。

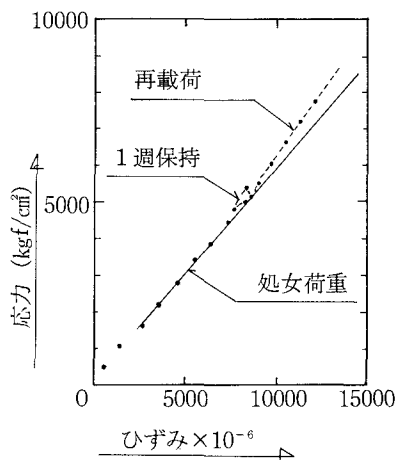


図-16 組紐ロッドの応力-ひずみ関係

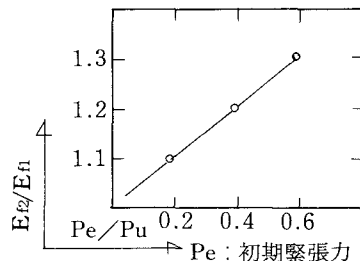


図-17 保持荷重と弾性係数の増加関係の仮定

(2) 梁破壊時における組紐ロッドのひずみの推定式

梁が圧縮破壊する時の組紐ロッドのひずみは次式によって推定できると思われる。

(a) 平面保持の仮定より (図-14より)

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pe} + f \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{ou} \quad \text{..... [3]}$$

(b) 荷重保持に対応する組紐ロッドの応力-ひずみ関係より

$$\sigma_p = \gamma \cdot E_{f1} \cdot \varepsilon_{pe} + E_{f2} \cdot f \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{ou} \quad \text{..... [4]}$$

(c) 内力の釣り合いより (図-14より)

$$\alpha \cdot b \cdot x \cdot \sigma_{ou} = A_f \cdot \sigma_p \quad \text{..... [5]}$$

(3)、(4)、(5) 式を基に ε_p についての 2 次方程式を解くと (6) 式が得られる。

$$\varepsilon_p = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_{pe} \left(2 - \gamma \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) - f \cdot \varepsilon_{ou} \right] + \frac{1}{2} \sqrt{\left[\varepsilon_{pe} \left(2 - \gamma \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) - f \cdot \varepsilon_{ou} \right]^2 + \frac{4 f \alpha b d \sigma_{ou} \varepsilon_{ou}}{A_f \cdot E_{f2}} - 4 \left(1 - \gamma \cdot \frac{E_{f1}}{E_{f2}} \right) (\varepsilon_{pe}^2 - \varepsilon_{pe} f \varepsilon_{ou})} \quad \text{..... [6]}$$

(3) ε_p と ε_{pe} の相関関係および梁の破壊形式について

(6) 式を用いて、各々の初期緊張力の大きさに対応する梁破壊時の組紐ロッドのひずみを推定した。結果を図-18に示す。ここで、 E_{f1} は $6.6 \times 10^5 (\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、純リラクセーション率は 10% とし、付着係数を 1.0、コンクリートの強度およびひずみを各々 $400 (\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、 3250μ とした。この結果から、初期緊張力が $0.7P_u$ 程度以上であると組紐ロッドのひずみは破断ひずみ以上となり、梁の破壊がコンクリートの圧縮破壊からロッドの破断による破壊へと移行することが判る。今回の実験で、 $0.8P_u$ の供試体がロッドの破断によって破壊したことから、(6) 式の適用によって圧縮破壊時の梁の耐力および破壊形式の予測等がある程度の精度で可能であると思われる。この様に、組紐状 AFRP ロッドを緊張材に用いた梁の破壊形式は初期緊張力の大きさに大きく影響されるものと考えられる。

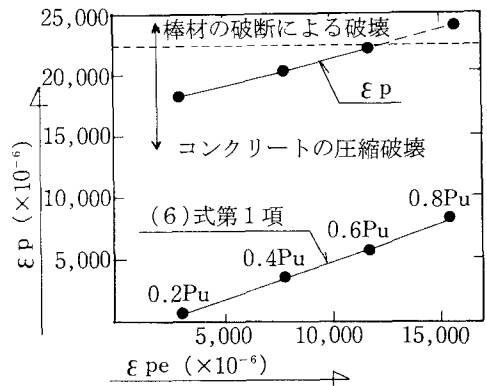


図-18 ε_p と ε_{pe} の相関関係および梁の破壊形式

(4) 実測値と計算値の比較

表-5 に梁のひび割れ発生モーメント M_{or} と破壊モーメント M_u の実測値と計算値の比較を示す。なお、KS-4 (初期緊張力 $0.8P_u$) のロッドの実破断荷重は不明のため、平均引張耐力に荷重保持の影響を補正して推定した。補正係数としての弾性係数の増加割合は図-17と同じ割合と考えて 1.4 と仮定した。また、KS-4 の破壊モーメントの算定には、上述した破断荷重を用い、内力のなすモーメントのアーム長を $(7/8)d$ とする略算式を用いた。その他の圧縮破壊した梁の M_u の算定には図-15に示す付着係数と (3) の検討と同様の荷重保持前弾性係数および純リラクセーション率を用いた。なお、KS-3 はロッドのひずみが測定されていないため検討を省略した。

この表から、組紐ロッドを PC 緊張材に用いた梁の曲げひび割れ発生モーメントは初期緊張力の大きさに対応して大きくなることが判る。また、プレストレスによる梁下縁の応力度とコンクリートの曲げ引張り強度を加算する方法で求めた M_{or} の計算値と実測値は比較的良く一致する。次に、破壊モーメント M_u はコン

クリートが圧縮破壊する時には(6) 式を用いて、ロッドの破断による時は略算式を用いることにより、ある程度の精度で推定することができると考えられる。

表-5 実測値と計算値の比較

供試体の 呼称	$M_{or}(\text{tonf}\cdot\text{m})$		① ②	$\frac{E_{r1}}{E_{r2}}$	$M_u(\text{tonf}\cdot\text{m})$		③ ④
	実測値①	計算値②			実測値③	計算値④	
K-1	0.38	0.43	0.88	1.1	1.58	1.65	0.96
KS-1	0.41		0.95		1.61	1.70	0.95
K-2	0.56	0.56	1.0	1.2	2.03	1.94	1.05
KS-2	0.56		1.0		1.91	1.97	0.97
K-3	0.83	0.84	0.99	1.3	2.21	2.10	1.05
KS-4	0.94	0.98	0.96	1.4	2.32	1.99	1.17

6. 結果の要約

- 1) 組紐ロッドの付着長は砂付きでロッド径の20倍、砂無しで 30~35倍程度と短く、部材端部の有効利用が可能であり、また、所要のプレストレスを梁部材に導入できる。
- 2) P C鋼線の定着に関する渡辺の研究を基に、部材端部の定着特性を評価できると思われ、摩擦係数と組紐構造が定着特性に大きな影響を与えたと考えられる。
- 3) 組紐ロッドの表面に砂を接着することでひび割れの分散性は良好となり、ロッドとコンクリートとの付着追従性を梁の軸方向において広範囲に確保することができると考えられる。
- 4) ロッドに与える初期緊張力の大きさおよび表面粗度が付着係数に大きな影響を与えたと考えられる。
- 5) 組紐状AFRPロッドを用いた梁部材が圧縮破壊する時の破壊荷重を(6) 式を用いて、ある程度の精度で推定することができると考えられる。

今後は荷重速度が一樣でない時の組紐ロッドの応力-ひずみ関係を組紐構造および複合材としての 2つの観点から詳細に検討する必要があると思われ、また、繰り返し荷重下における組紐ロッドとコンクリートとの付着追従性について研究する予定である。

(記号の説明)

(1)、(2) 式において

$\bar{\tau}_0$: 純付着力 (1kgf/cm²と仮定) ν_c : コンクリートのポアソン比 r_1 : ロッドの半径 (cm)
 X : 部材端からの距離 (cm) ν_s : ロッドのポアソン比 r_2 : 供試体の半径 (cm)
 σ_{se} : ロッドの初期緊張応力 (kgf/cm²) μ : 摩擦係数 n : 弾性係数比

$$\phi = \frac{\nu_s \cdot \sigma_{se}}{1 - \nu_s + n(1 + \nu_c)} \quad \phi = \frac{\nu_s + n\kappa\nu_c}{1 - \nu_s + n(1 + \nu_c)} \quad \kappa = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

図-14および(3)、(4)、(5)、(6) 式において

ε_p : 梁破壊時のロッドのひずみ ($\times 10^{-6}$) ε_{pe} : 初期緊張時のロッドのひずみ ($\times 10^{-6}$)
 ε_{ou} : 梁上縁コンクリートの圧縮破壊ひずみ ($\times 10^{-6}$) ε_{op} : 緊張材位置のコンクリートのひずみ ($\times 10^{-6}$)
 σ_{ou} : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²) σ_p : ε_p に対応する応力 (kgf/cm²)
 E_{r1} : ロッドの荷重保持前弾性係数 (kgf/cm²) E_{r2} : ロッドの荷重保持後弾性係数 (kgf/cm²)
 x : 中立軸から梁上縁までの距離 (cm) f : 付着係数 γ : $1 - r$
 r : ロッドの純リラクセーション率 d : 梁の有効高さ (cm) b : 梁の幅 (cm)

A_f : ロッドの断面積(cm^2)

α : コンクリートの応力-ひずみ曲線の形状に関する係数 (0.82)

β : 応力-ひずみ曲線の図心から上縁までの距離と x との比 (0.42)

(参考文献)

- 1) 長滝重義、佐藤良一「GFRP-BARで緊張したPC部材の力学的特性」東京工業大学土木工学研究報告, NO.17, 12月, 1974, pp 33~46
- 2) 小林一輔、趙力采、神吉正弥「繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究」コンクリート工学年次論文報告集 6, 1984, pp 369~372
- 3) 石田、小林、趙、則武「FRPロッドを用いたプレストレストコンクリート構造に関する研究」コンクリート工学年次論文報告集 8, 1986, pp 657~660
- 4) 魚本健人、西村次男、加藤久男「AE計測によるFRPロッドの疲労特性評価」土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, V-186, 1988, pp 420~421
- 5) 福沢、沼尾、吉本、野崎「FRPロッドを緊張材としたレジンコンクリートはりの曲げ性状」土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, V-75, 1987, pp 188~189
- 6) Arie Gerritse, Hans J Schurhoff「Prestressing With Aramid Tendon」Technical Contribution to FIP 10th Congress New Delhi 1986
- 7) 内藤英晴、高木兼士「FRPロッドの見掛けのリラクセーション率に関する研究」土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, V-76, 1987, pp 190~191
- 8) 小泉徹、加場重正、高桑信一「炭素繊維補強コンクリートの練り混ぜと強度特性」コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988, pp 641~646
- 9) 古川、辻、大谷、小島「高炉スラグ微粉末を用いた短炭素繊維補強モルタルの性状」コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988, pp 635~640
- 10) 岡本直、松原澄行、谷垣正治「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, pp 529~530
- 11) 加藤正利、三上浩、林寿夫「組紐状AFRPロッドを用いたPC梁の静的耐荷挙動」土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, V-165, 1988, pp 378~379
- 12) 山下、木内、犬飼、岩崎「新素材によるPC橋-新宮橋の建設」プレストレストコンクリート Vol.31 NO.2, Mar. 1989, pp 71~78
- 13) 秋浜繁幸、末永龍夫、中川裕章「3次元織物コンクリート部材の力学的特性」コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988, pp 677~682
- 14) 寺田、鳥取、涌井、宮田「FRPをせん断補強に用いたRCはりの破壊性状について」コンクリート工学年次論文報告集10-3, 1988, pp 541~546
- 15) 辻、斎藤、関島、小川「FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状」コンクリート工学年次論文報告集10-3, 1988, pp 547~552
- 16) 関島謙蔵、二川稔、岡村甫「格子状FRPを用いたプレストレストコンクリートの開発研究」コンクリート工学年次論文報告集10-2, 1988, pp 689~694
- 17) 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
- 18) 猪股俊司著「プレストレストコンクリートの設計および施工」土木学会監修 技報堂 pp 260~269
(1989年10月 2日受付)