

AFRP ロッドの PC 構造物への応用

則 武 邦 具*
本 間 秀 世**
迎 邦 博***

1. はじめに

もし、PC 鋼材が2次処理を施すことなく発錆するものでなければ、その用途や使われ方ももっと広く、自由なものとなろう。すなわち、PC 構造物を例にとってみると、アルカリ骨材反応や塩分腐食といった材料の問題やグラウトの注入精度などの施工の問題に対してもっとその耐久性を保証することができることになり、さらに自由な緊張材の配置が、そして自由な構造の形式が可能となるであろう。また、緊張材との複合構造物としての挙動を考えたとき、もっとコンクリートとなじみが良く、しかも取扱いが簡単な材料のものがあれば PC 構造物の応用はもっと広がるであろう。このような観点から PC 鋼材に替わる新素材の研究が今着実に進められている。

発錆しない新素材の土木、建築分野への応用範囲は広い。特に、高分子系、炭素系、ガラス系といった繊維材料はその高張力性から各種の応用が試みられている。

著者らは、まず手初めとして、連続繊維による一方向強化材—FRP ロッド—を PC 鋼材の代替として、その実用化を目指し開発を進めている。この FRP ロッドの基礎的物性特性、力学特性などや素材改善については、東京大学生産技術研究所（小林一輔教授）の指導のもとに共同研究開発を行ってきた。ここで本開発の主眼としている研究開発項目を挙げてみると大別して以下の項目になる。

- ① テンドンとしての品質保証および定着方法の確立
- ② コンクリート複合試験による各種性能および力学的性能の把握と耐久性試験
- ③ 大型試験による設計法および施工法の確立

なお、実用化に際してさらに問題となる従来の PC 鋼材によるものとのコスト比較、また代替あるいは新規の構造物への適用でのこの新素材の付加価値の評価の示方や経済性についても、合せて研究開発を行っていることはいうまでもない。

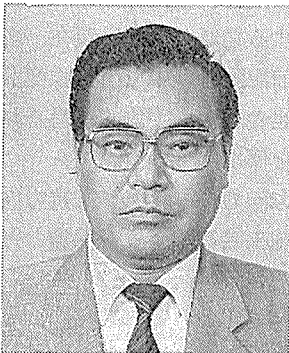
ここでは、特に現在先行下にあるアラミド繊維による FRP ロッド（AFRP ロッド）を主眼にその実用化について報告する。

2. AFRP ロッド

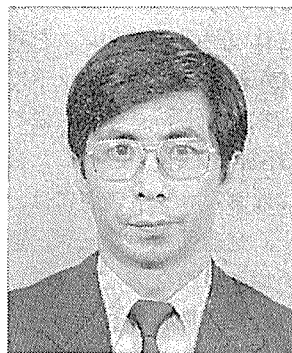
このアラミド繊維による FRP ロッドは、帝人株式会社と共同開発しているものであり、繊維そのものは PC 鋼材よりはるかに高い強度特性を持ち、耐薬品性に優れている。この AFRP ロッドは、直径 12 μm アラミド繊維を束ね、含浸液（マトリックス材）に浸し、金型を通して成形するプルトルージョン方式で所定の形状に製造される。プルトルージョン方式とは、等断面の FRP 製品を一定の張力を加えつつ、収束、成形、強化させる製造方法であり、これにより従来問題とされていた時間とともに引張力が低下する静的疲労が大幅に改善された。

緊張材として AFRP ロッドを使用するにあたり、従来の PC 鋼材に要求されている特性値や高い緊張力を保

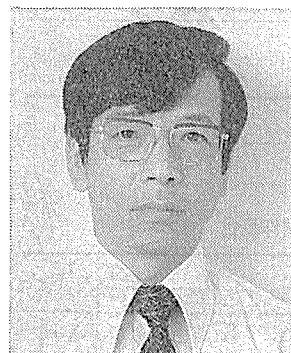
持する定着具が必要となる。この緊張材に要求される各種性能は表-1 にみられるように物理特性値、耐薬品性および品質保証などであり、AFRP ロッドの開発はこれらの項目を解決していくことから始めた。FRP ロッドの各種性能を決定づけるものとしては、マトリックス材として使われている樹脂の種類が大き



* Kunitomo NORITAKE
住友建設（株）土木部次長



** Hideyo HOMMA
住友建設（株）土木部開発課長



*** Kunihiko MUKAI
住友建設（株）技術研究所主任研究員

表—1 各種確認項目

物理特性	耐薬品性	設計諸数値	構造細目	施工上	品質
降伏点強度 引張強度 破断伸び リラクセーション 弾性係数 線膨張係数 比重 曲げ引張強度 せん断強度 層間せん断強度 横圧縮強度 衝撃強度 疲労強度 付着強度 温度依存性 暴露耐久性	耐アルカリ性 耐酸性 耐塩性 耐油性 耐火性	摩擦係数 張力導入レベル 導入中 導入直後 設計荷重時 見かけのリラクセーション 弾性係数 スベリ (部材としてのじん性)	最小曲げ半径 定着具最小間隔 定着具縁端距離 ケーブル間隔 ケーブルかぶり グリット筋 シース径 ケーブル保持間隔 定着体部の構造	切断方法 グラウト材 シース材 運搬方法 保管方法 ロッドの展開方法	寸法および許容値 断面精度 単位重量 きずに対する保証値 直線性

く影響する。

マトリックス材としての樹脂には、多種のものが存在するが、表—2 に示すごとくエポキシ樹脂に比して耐食性、成形性、接着性のバランスがとれているビニールエステル（エポキシアクリレート）樹脂を採用した。

緊張材として用いる AFRP ロッドは、それが持っている理論強度を十分に引き出し効率的で、かつ安全に定着されなければ確実にならない。そのための基本物性を把握するために繊維と樹脂の接着性、出来上りロッドの剛性評価を基準とし、焦点を絞って表—3 に示す配合により試作を行った。

試作ロッドの試験結果を図—1 に示す。

引張強度の高いロッドほど横方向圧縮破壊耐力・層間せん断耐力（ILSS）、および曲げ強度は低い値を示して

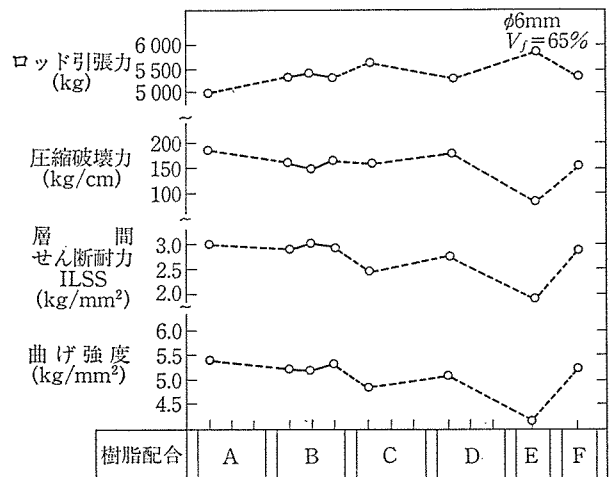
表—2 マトリックス材の評価

	耐食性	成形性	接着性 (対Aramid)
不飽和 ポリエステル	× △ エステル基含有	硬化速度(速) ◎ 含浸性(低粘度)	×
エポキシ	耐アルカリ性 ◎ 耐酸性 ×	硬化速度(遅) × 引抜抵抗大 (⇒引抜には不適)	○
エポキシ アクリレート	◎ 均一硬化物 機械強度↑, 伸度↑	△ 硬化速度(中) ○	○

エポキシアクリレートをメインに検討

表—3 ロッド試作配合

	A (基本配合)	B	C	D	E	F
樹脂	T社製	T社製	S社製	S社製	S社製	A社製
硬化剤	T社製	T社製	S社製	T社製	S社製	A社製
混合物	炭カル	なし	なし	なし	なし	なし
成形時系張力 (g/6000 De)	大	大中小	大	大	—	—



図—1 樹脂配合によるロッド引張力と曲げ特性

いる。

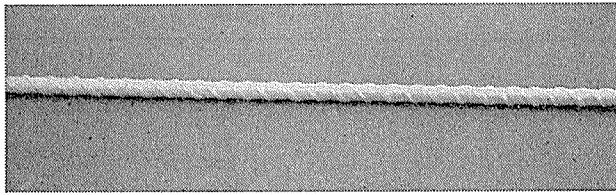
一般に横方向圧縮破壊耐力が高い値を示すものは ILSS および曲げ強度に関しても高い値を示す傾向にある。

緊張材としての使用を考える場合、引張に適した樹脂選定を行うべきであるが、荷姿、運搬、施工等を考慮した場合は、横方向圧縮力やせん断、曲げ耐力を軽視することはできない。したがって樹脂配合にあたっては、それぞれの耐力のバランスを考慮する必要があり、現在、当社が使用しているロッドは、前記配合の中で引張強度が高くてものをベースにその他の耐力が平均的に得られる配合を改良、改善したものを使用している。

なお、ロッド表面には、横方向力に対する抵抗力向上、定着効率のアップ、運搬施工時等のロッド保護のため樹脂被膜を施している。

次に異形ロッドについて述べる。

異形ロッドとは、写真—1 に示すようにストレートロッド周囲に糸状のアラミド繊維を螺旋状に巻き付け樹脂固定したものである。



写真—1 異形ロッド

異形ロッドで問題となるのは、ストレートロッドと巻付け繊維を固定する樹脂との接着性能である。普通のストレートロッドに繊維を樹脂固定しても付着力はわずしか得られず、ロッド表面の下地処理が必要である。

試作では、ストレートロッドの表面処理、異形形状、製造方法をパラメータにとり付着試験により効果を確認した。試作実験結果を図—2 に示す。

- ① ストレートロッド表面をサンド処理することにより、ワインディング繊維との付着を十分にとることができる。
- ② 異形リブの形状については、巻きピッチ、巻き高さに最適値があり、高くし過ぎても、狭く巻いても効果は少なかった。また、クロス巻きも行ったがシングルで十分との結果がでている。
- ③ ストレートロッドの表面処理をせず製作工程内で未硬化の状態にワインディングを施し、付着効果を十分得ることができた。

以上の結果、ストレートロッドはコンクリートとの付着、樹脂との付着強度が弱く、アンボンド緊張材として使用し、異形ロッドは付着を期待した使用ができる結果

を得た。

3. 定着体について

3.1 くさび定着

くさび定着は、従来の PC 鋼線等の定着に用いられているようなくさびと外筒管からなる定着方法である。

AFRP の定着においては、従来のくさび式定着を用いた場合、ロッドの損傷が著しく低荷重下において定着具部分で破断をひき起こす。これは、AFRP ロッドのような一方向強化材の場合、横方向圧縮破壊耐力が小さく、くさび内面で応力集中を受けるため、低荷重破断の原因となっていると考えられる。

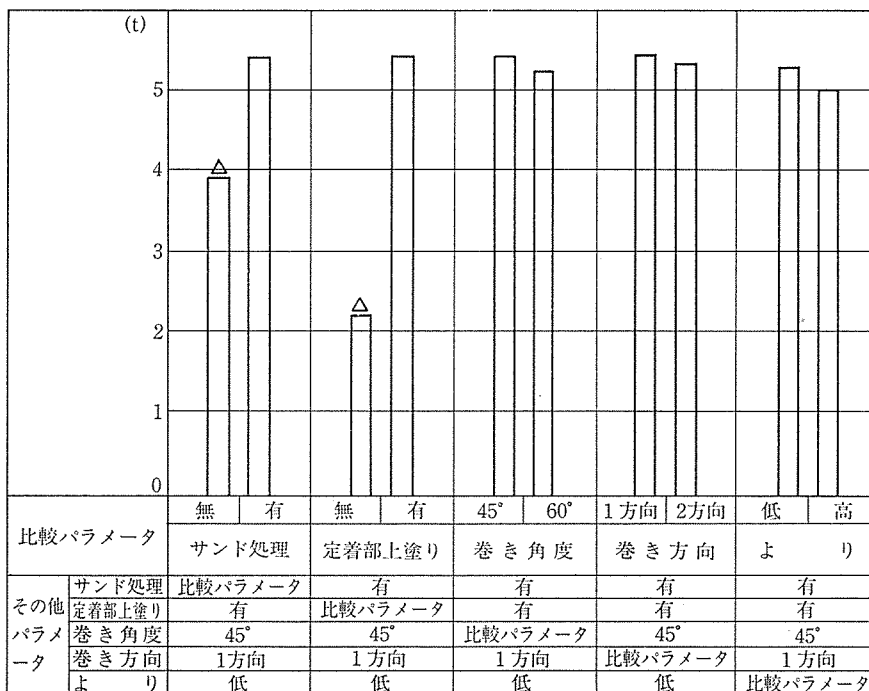
そこで、横方向集中力を緩和するために、ロッド表面の損傷を少なくする特殊な加工を施したくさびを開発した。また、ロッドとくさびの間にロッドを保護するクッション層を設けることにより、さらに定着効率を高められることを実験により確認した。このクッション材には、ポリエステル樹脂系のものを用いており、前記くさびにて引張試験を行った結果、クッション材のないものに比べ 10% 程度耐力が改善された。

3.2 付着定着

付着型定着は、ロッドを付着材中に埋め込み、その付着力によって定着する方法である。付着材には、樹脂やセメント系の材料を使用している。

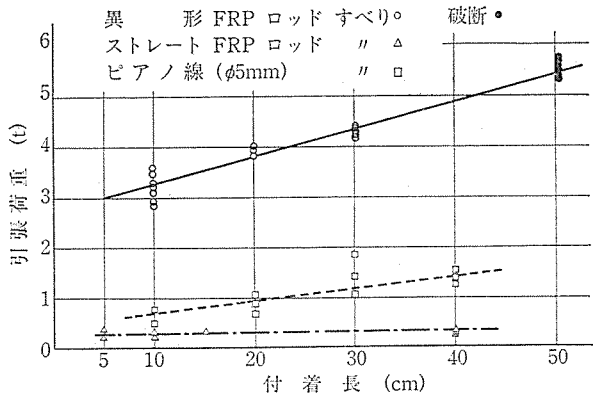
通常、ストレートロッドは付着がほとんど期待できない。付着を改善する方法としては、ロッドの異形化であり、リブ付き、より線化あるいは組紐化することが考えられる。ここでは、前述したストレート AFRP ロッドにアラミド繊維を巻き付け異形化したロッド(写真—1)をセメント系付着材中に埋め込み埋込み長をパラメータにして引張試験を行った。試験結果を図—3 に示す。

図中、ストレートロッドでは付着がほとんど得られてないが、異形ロッドでは埋込み長の増加とともに引抜け荷重が増加し、付着長 50 cm では付着部での引抜けが生じずロッド自体が切断している。つまり、AFRP ロッドを異形化することで付着が改善され、付着による定着が可能で



△ はすべり抜けを示す。

図—2 異形ロッド付着定着性能



図—3 付着長と引張荷重の関係

ある。なお、その他の各種の実験理論検証から付着定着性状が判明してきたので、よりコンパクトなもの開発に取り組んでいる。

4. 部材試験

AFRP ロッドを緊張材として実用化するためには、ロッドの性能およびその定着装置を開発するほかに、部材に適用した場合についても把握しておく必要がある。

このコンクリート複合試験では、部材としての力学的性能や耐久性について研究を行い、さらに AFRP ロッドを使用した構造物の設計法や施工法について検討を加えている。その中の曲げ破壊試験について述べると、試験体の種類および形状寸法は、表—4、図—4 に示すとおりであり、各試験体とも緊張材の導入張力は通常の PC 鋼材の使用状態とほぼ同等の $0.5\sigma_u$ としている。試験は、支間長 320 cm とし、載荷スパン 40 cm の静的 2 点載荷とした。測定項目としては、荷重、変位、鉄筋およびコンクリートのひずみ、ひびわれ進行状況である。

表—4 試験体の種類

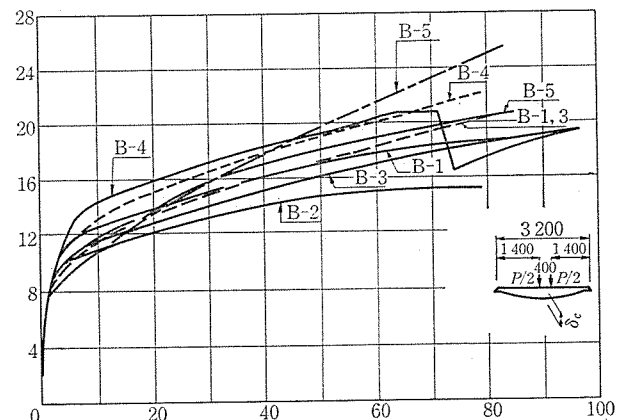
	引張鉄筋比	グラウト	シー ス
B-1	0.15% (2×D10)	有	ワインディング
B-2	0.15%	無	ワインディング
B-3	0.15%	有	硬質ポリエチレン
B-4	0.3% (2×D13)	有	ワインディング
B-5	0.15% (ロッド使用)	有	ワインディング

試験結果は、表—5、図—5 に示すように、曲げ破壊耐力は従来の PC 部材で行われている算定方法による計算値とほぼ同じ値を示している。

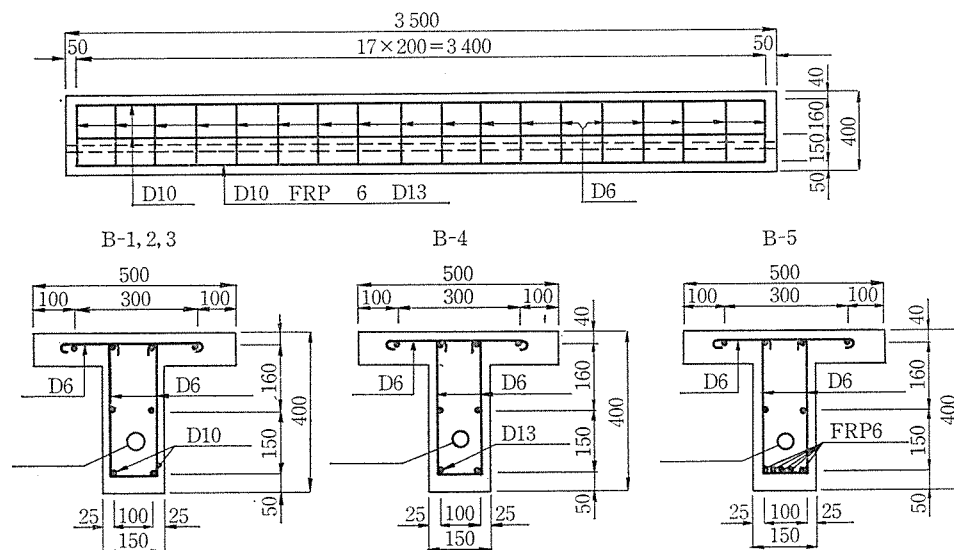
このようにこれらの試験結果をみると、AFRP ロッ

表—5 曲げ破壊荷重

	実験値 (ton)	計算値 (ton)	ロッド張力 (kg/mm ²)
B-1	19.3	30.7	202
B-2	15.4	15.6	139
B-3	19.6	20.7	202
B-4	21.3	21.9	199
B-5	20.8	26.0	188



図—5 荷重—変位曲線



図—4 試験体形状寸法

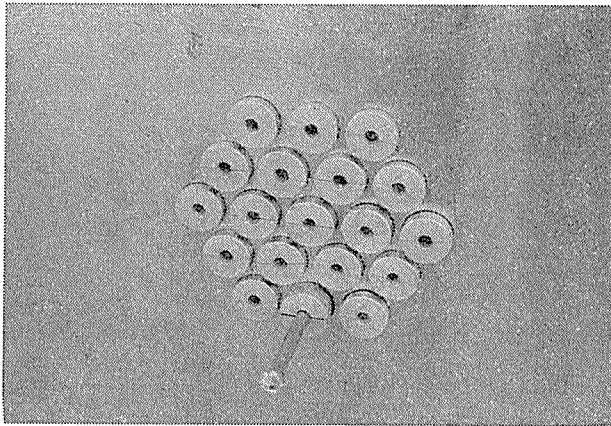


写真-2 モノグリップ方式による定着体

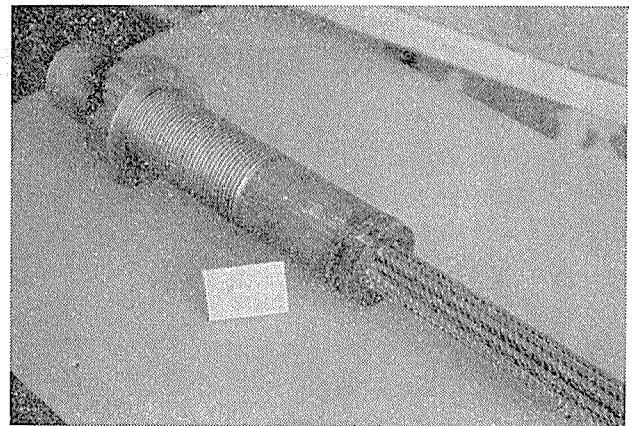


写真-3 付着方式による定着体

ドを用いた PC 部材でも従来の設計法と同じように部材の耐力計算が可能であり、また、力学的挙動も充分実用的に問題はないと考えられる。

5. 実用化

AFRP ロッドを実際に構造物に実用化していくには AFRP ロッドが構造材料として求められる物理的、化学的、力学的といった材料特性が各種の試験によって実証されなければならないのはもちろんであるが、実際の使用形態に合わせた一つの工法として確立していく必要がある。

本開発では、実用段階に入るにあたり、その経済性とあいまって設計上、施工上求められてくる、例えば、ケーブルの張力レベルとか、それに合わせた定着方法や緊張方法、さらにはその運搬方法や配置方法の取扱い方について研究を進めている。AFRP ロッドについては、その形状を丸形ロッドとか異形ロッド、定着体については、モノグリップ方式による大容量定着体 (80 t クラス、写真-2) とか、付着方式による大容量定着体 (80 t クラス、写真-3) を開発し、両者とも、疲労試験において 200 万回の繰返し回数をクリアーしており、ほぼ実用化の段階まで達している。

また AFRP ロッドは従来の PC 鋼材に比べ付加価値の高い材料であるが、現在のところロッド、定着体とも単品生産のためかなり高価なものであるため、ロッドの製造方法、定着体などの生産方法によるコストダウンを検討中である。

6. あとがき

以上、新素材、特に AFRP ロッド材を新しい緊張用の構造材料としての実用化について述べたが、その適用

分野の範囲は、これまでの PC 構造物に用いられる PC 鋼材の分野のみならず、厳しい腐食環境中やこれまで防錆処理を必要としていた構造材 (たとえば斜張橋の斜材) など多岐にわたっており、さらに新しい構造物も考えられてくるであろう。

経済性の面からみると、現在検討を行っている段階では、将来、従来の PC 鋼材と同一緊張力当りの工事費を 20% 程度の価格差におさえられ、例えば、30 m のポストテンション桁の桁製作費でみると 5% 程度の価格差におさえられそうである。AFRP ロッドのもっている高付加価値もさることながら、その使用形態上のいくつかの特点、例えば、軽いか取扱いの容易さなどを考え合わせるとこの新素材の用途は実に広いと考えられる。

本開発は、東大生産技術研究所 (小林一輔教授) と帝人との共同研究開発であるが、ひとつの成果を終えた現段階で、なお一層その実用化への確信を深めている。以上、アラミド繊維による FRP ロッドについて述べたが、ガラス繊維、炭素繊維についても開発に取り組む予定である。近い将来、これらが実用化されることを願ってやまない次第である。

参考文献

- 1) 小林, 趙, 西村:「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 (その1), (その2)」, 東京大学生産技術研究所, 生産研究, Vol. 36, No. 8, Vol. 37, No. 6
- 2) 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」, 第8回コンクリート工学年次講演会, 1986
- 3) 小林:「コンクリート用補強材」, コンクリート工学, Vol. 24, No. 3, 1986
- 4) 小林, 迎, 本間, 藤田:「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」, 土木学会第42回年次学術講演会, 1987

【昭和 63 年 5 月 31 日受付】