

## [93] 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

正会員 小林 一輔 (東京大学生産技術研究所)

正会員 ○ 趙 力采 (読売東京理工専門学校)

神吉 正弥 (帝人(株)繊維企画開発部)

### 1. は し が き

この数年来、日本では海岸などの海洋環境下に配置されているプレストレストコンクリート構造物の緊張材(高張力鋼)の塩分腐食による劣化が問題となっている。

この劣化でとくに注目すべき点は建設後比較的早い時期のものが含まれていることと、この種の劣化が全国にわたって生じていることである。この緊張材の腐食が鉄筋コンクリート部材における鉄筋の場合と基本的に異なる点は、鋼材自体の降伏点が著しく高いこと(通常  $150 \text{ kg}/\text{mm}^2$  程度)とこれに常時  $80 \sim 90 \text{ kg}/\text{mm}^2$  の引張応力度を与えているために応力腐食割れによって破断を招きやすい点にあり、プレストレストコンクリート部材の崩壊につながる危険性が高いという点である。

本研究は塩分環境下に建設されるプレストレストコンクリート構造物の抜本的な防食策として、現在の高張力鋼とほぼ同等の引張耐力を有する緊張材を、FRP製緊張材におきかえる方法を取りあげ、これを実用化するために必要な検討を行おうとするものである。今回は各種の繊維を用いてつくったFRPロッドの温度依存性、ならびにリラクゼーション試験の中間結果(8カ月)について報告する。

### 2. 緊張材としてFRPを用いることの利点と問題点

高張力鋼の代りに一方向強化FRPをプレストレストコンクリート用緊張材に用いることの利点は防食性にすぐれているので腐食環境下においてもコンクリートの被覆厚さを特別に大きくする必要がなく、またFRP自体の比重が鋼材の1/6程度であるため、部材の軽量化を図り得ることである。さらにFRPのヤング率は鋼材の約1/4程度であるため、応力損失も著しく小さくて済むというメリットがある。

このために緊張材としてFRPを用いることを目的とした研究は、1950年から60年代にわたり、米国、英国及びソ連などにおいて行われているが、FRPに引張荷重を継続して加えた場合、複合体中の個々のガラス繊維に生ずる引張応力度が一様でないために、時間の経過とともに引張荷重が低下する現象、即ち、“静的疲労”の壁にさえぎられて研究は中断状態となっていた。しかし、近年になって、等断面のFRP製品を一定の張力を加えつつ集束・成形・強化せしめるPultrusion方法<sup>1)</sup>(図-1参照)が開発され、上記の静的疲労による荷重低下は大巾に改善される見通しが得られた。緊張材として高張力鋼の代りにFRPを用いる場合のもう1つのネックは、緊張ならびに定着方法の問題である。FRPは一方向のみ強化されているので、これを高張力鋼のチェックを用いて引張ると、引張応力と同時に横方向の圧縮応力とこれにともなってせん断応力を発生し、途中で破壊するのである。このためFRPロッドの緊張ならびに定着装置についても従来からいくつかの提案が行われているが、実用に供し得るようなものは開発されていない。そこで、本研究でもこの問題について検討を行ない、ほぼ実用に供し得るような装置を開発した。

### 3. 使用材料

本実験では、ガラス繊維、アラミド繊維及び炭素繊維をそれぞれ容積百分率で65%使用した3種のFRPロッド(以下、それぞれGFRP、AFRP及びCFRPと記す)を使用した。なお、各ロッドの直径は約6mmであり、マトリックスはアクリルエポキシ樹脂である。

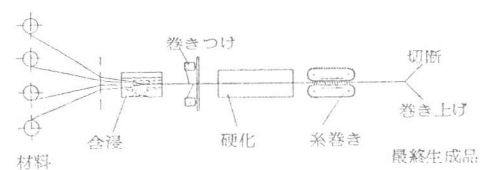


図-1 Pultrusion方法の概念図<sup>1)</sup>

表-1 に繊維素材の諸元ならびにFRPロッドの引張強度及び弾性係数を示す。

表-1 繊維素材及びロッドの諸元

繊維の諸元				ロッドの諸元				
種別	直径(mm)	引張強度(kg/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(kg/mm <sup>2</sup> )	種別	直径(mm)	比重	引張強度(kg/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(kg/mm <sup>2</sup> )
ガラス繊維	15	150	7400	GFRP	5.60	2.03	114	3600
アラミド繊維	12	310	7500	AFRP	5.51	1.28	152	4100
炭素繊維	7	300	21500	CFRP	5.61	1.52	183	9260

#### 4. 緊張及び定着装置の検討

FRPロッドを緊張材に用いる場合、問題となるのはロッドに引張力を与えるグリップにどのようなものを使用すべきかということである。このことはロッド自体の引張試験の段階ですでに問題となることであるが、これを緊張したとき、引張応力に加えてせん断応力および圧潰応力などの組合わさった応力がグリップ近辺に生じその附近で破壊するのである。このためロッドの引張強度を完全に発揮させるような定着グリップの設計は非常に難しく、このことが現在の重要な研究課題となっている。

これまでに種々の工夫がなされているが、代表的なものとしては、クリープの非常に小さい接着剤で、金属性の定着パイプ中にロッドを固結する接着型グリップ(図-2参照<sup>2)</sup>)や、PC鋼線に用いられているようなクサビと外とう管による圧縮摩擦型グリップなどがある。前者は相当に長い定着長さを要するのみでなく、長期荷重の場合は特にロッドと定着パイプ先端部附近からの漸進的な剥離などが問題となる。

一方、後者の場合でロッド自体の引張強度の約93%に相当する引張応力に耐えるものが得られたと報告されている。

本実験では後者すなわち圧縮摩擦型グリップによる方法を検討した。写真-1は本研究で開発したクサビと外とう管を示したものであり、写真-2はFRPロッドを装填した状態を示したものであるが、2つ割りのクサビの先端部は外とう管から2cm突出した状態となり、グリップ先端部でロッドが破壊するのを防いでいる。

また、写真-3は緊張用に開発した、写真-1のクサビを内蔵したセンターホールジャッキによるFRPロッドの緊張作業状況を示したものであり、検討した緊張及び定着装置がFRPロッドのプレストレスングに適用可能なことが確かめられた。

#### 5. FRPロッドの引張特性の温度依存性

本報告では環境温度を-10℃、0℃、20℃、40℃及び60℃の5段階に変化させ、3種のFRPロッドの引張特性に及ぼす温度依存性を検討した。試験は写真-4に示すような変位制御型引張試験機に恒温ボックスを設置して行った。

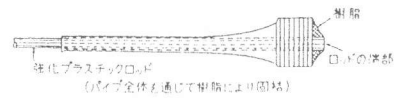


図-2 接着型グリップの1例<sup>2)</sup>

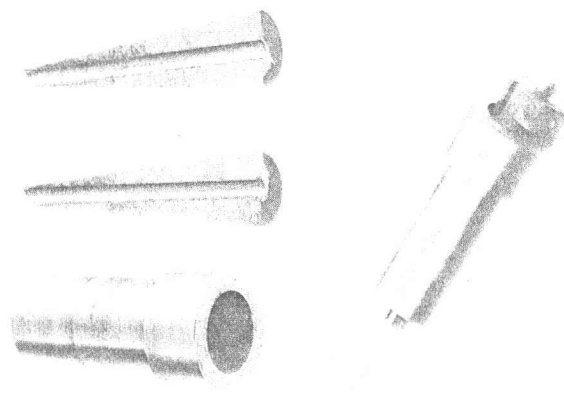


写真-1 開発した圧縮摩擦型グリップ(2つ割りクサビと外とう管)

写真-2 FRPロッドの装填状況

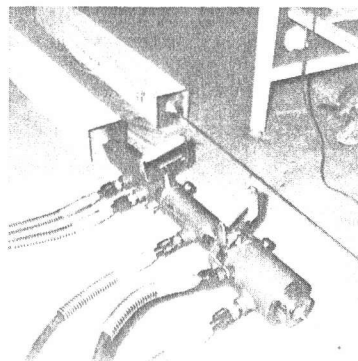


写真-3 試作したセンターホールジャッキによるプレストレスング状況

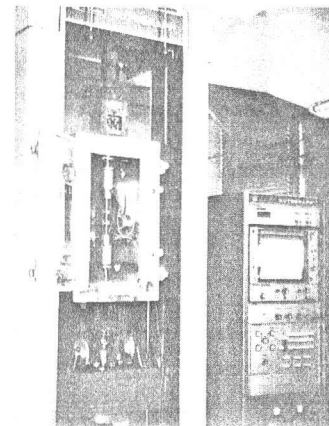


写真-4 引張特性の温度依存性試験装置

図-3は常温(20°C)での3種のFRPロッドの応力-ひずみ曲線を示したものであるが、破断時の伸びはAFRP(3.8%)、GFRP(3.3%)及びCFRP(1.7%)の順に小さく、いずれも破断時までほぼ直線的であることがわかる。繊維素材の破断時伸びはアラミド繊維が4.2%、ガラス繊維が4.0%ならびに炭素繊維が1.3%であり、FRPロッドも繊維素材とほぼ同等の伸びを示していることがわかる。

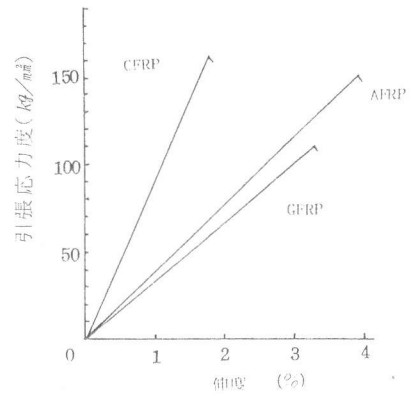


図-3 各種FRPロッドの応力-ひずみ曲線

一方、図-4は3種のFRPロッドの引張強度の温度依存性を示したものである。この図より明らかなことは、1)常温(20°C)においては、GFRPが114 kg/cm<sup>2</sup>、AFRPが152 kg/cm<sup>2</sup>ならびにCFRPが183 kg/cm<sup>2</sup>の順に強度が高く、後2者は160 kg/cm<sup>2</sup>級の冷間引抜PC鋼材と同等以上の引張強度が得られていること、2)いずれのFRPロッドも環境温度が低くなるに従って、ほぼ直線的に引張強度が増大すること、などである。1)の結果において、GFRPの値が最も低いのは表-1の繊維素材の引張強度からも明らかである。

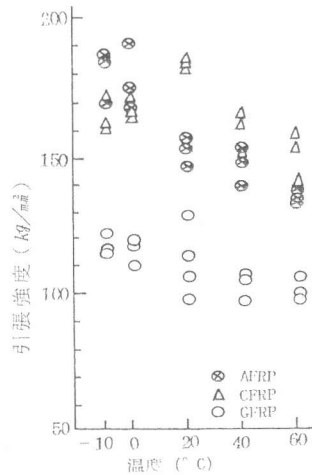


図-4 各種ロッドの引張強度の温度依存性

一方、CFRPとAFRPの結果が、繊維素材の引張強度の関係(表-1参照)と一致しないのは以下の理由によるものと思われる。すなわち、アラミド繊維は炭素繊維に比し弾性係数が約1/3、言い換えれば同一強度に達する時の伸びは後者の3倍であるため、炭素繊維の場合に比し繊維とマトリックスである合成樹脂との付着特性の影響を大きく受けたことによるものと思われる。また、2)の結果は、一般のFRP

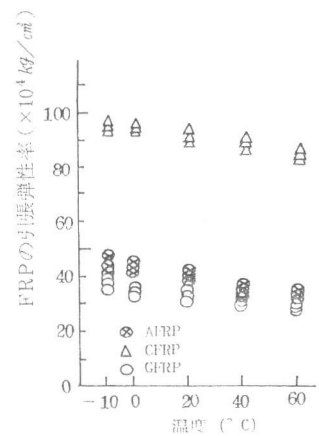


図-5 弾性係数の温度依存性

における場合と同様に、引張特性の温度依存性は繊維よりもマトリックスである合成樹脂によって左右されるためであると考えられる。なお、CFRPの結果が環境温度0°C以下において、AFRP及びGFRPの傾向と異なり、温度が低くなるにつれて低下する傾向を示している理由は現時点では明らかでないが、炭素繊維の伸びが他の繊維に比し小さい(約1/3程度)ことの影響が低温下において顕著に表われたものと考えられる。図-5は弾性係数に及ぼす温度依存性を示したものである。この場合も引張強度における場合と同様に、いずれのFRPロッドも温度の低下と共に弾性係数が直線的に増大している。また、この増加率は繊維材質による差がない。一方、環境温度が低下するにつれて弾性係数が増加する理由は引張強度における場合と同様に、本質的にはマトリックスである合成樹脂の温度特性によってきまるためであろう。

#### 6. FRPロッドのリラクセーションとその評価

本報告では初期荷重を最大引張荷重の70%に相当する荷重として表-1に示した3種のFRPロッドのリラクセーション試験を実施した。試験時の温度は20±2°Cとし、試験機のつかみ装置間の距離は300mm(直径の50倍)とした。引張荷重の変化はロードセルによって検出し、一定間隔ごとに自動記録した。写真-5は装置ならびに試験中のFRPロッドを示している。

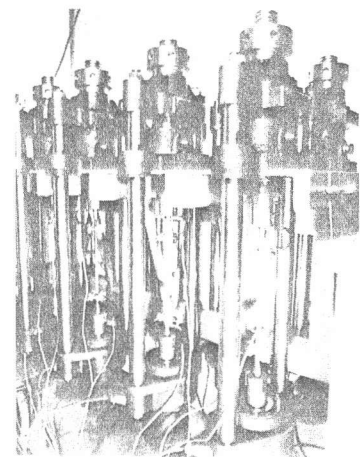


写真-5 リラクセーション試験状況

図-6及び図-7はそれぞれ3種のFRPロッドの約8カ月間のリラクゼーション試験で得られた引張荷重と時間との関係及びリラクゼーション率と時間との関係を示したものである。これらの図より、本実験に用いたFRPロッドの引張荷重と時間(対数軸)との関係はいずれも直線関係となることならびに30年後までもこの関係が成立すると仮定した場合のリラクゼーション率の推定値はいずれの場合も約1.4%程度であることがわかる。一般にPC鋼棒の純リラクゼーション率は約7%程度であるのでFRPロッドは相当大きい値となる。

ここで、これらのFRPロッドをPC用緊張材として使用した場合とPC鋼線ならびにPC鋼棒を使用した場合の緊張材引張力の減少量を試算してみれば以下になる。

いま、FRPロッド(AFRP及びGFRPの場合)及びPC鋼材のヤング係数をそれぞれ $4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ と $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、ヤング係数 $3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートに $80 \text{ kg/cm}^2$ のプレストレスを導入したときの緊張材の引張応力度を $100 \text{ kg/cm}^2$ とする。

コンクリートのクリープ及び乾燥収縮によるFRP緊張材の引張応力の減少量はPC鋼材における場合の約1/4となり、緊張材のヤング率の小さいことが、応力損失の面で有利になる。

一方、緊張材のリラクゼーションによる引張応力度の減少量を考慮しなければならないが、FRPロッドの見掛けのリラクゼーション率の値が現時点では定められないのでここではPC鋼材も純リラクゼーション率を用いて比較する。PC鋼線の場合、純リラクゼーション率は1.5%程度であり、FRPロッドの場合と同等の値となるのに対して、PC鋼棒の場合、純リラクゼーション率が7%程度と小さく、FRPロッドの場合の値の約1/2となる。結果的には緊張材の弾性係数の影響が卓越するので、緊張材の応力損失に関しては、PC鋼線と比べるとFRPロッドは顕著に有利であり、またPC鋼棒とはほぼ同等の値となる。

## 7. ま と め

本研究では、FRPロッドの温度依存性ならびにリラクゼーション試験を実施し、Pultrusion方法によるFRPロッドが現在の高張力鋼とほぼ同等の引張耐力を有することを確かめると共に、純リラクゼーション率は比較的大きいが、FRPロッドをPC用緊張材として使用した場合の応力損失がPC鋼材とほぼ同等となることを示した。さらに、FRPロッドの緊張及び定着装置を開発し、FRPロッドをPC緊張材として利用する場合の基本的な課題を解決した。今後、さらに部材に適用した場合の力学的特性を検討する予定である。

最後に、適切な御助言を頂いたオリエンタルコンクリート機技術部、鈴木素彦氏ならびに緊張及び定着装置の設計製作に関して熱心に御尽力頂いた東大生研試作工場の古屋七郎氏に深謝致します。なお、本研究は昭和58年度科学研究費(試験研究(2))の補助を受けたことを付記する。

参考文献：1) Kotulla, B., und Gropp, M.: Unveröffentlichte Berichte über rechnerische Untersuchungen zur Vorspannung von Betontragwerken mit Polystal, 2) N. F. Sones, Magazine of Concrete Research, Vol. 15, No. 45, November 1963.

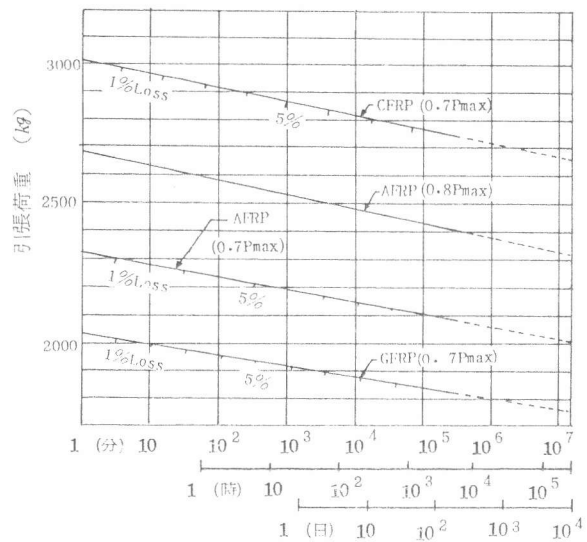


図-6. リラクゼーション試験による引張荷重と時間との関係

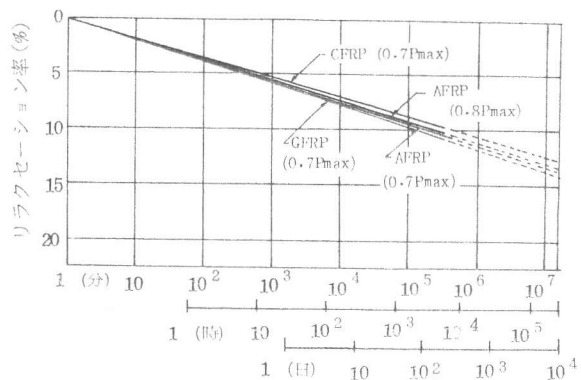


図-7 純リラクゼーション率と時間との関係