

報告 異なった環境条件で暴露した各種 FRP ロッドの引張強度特性

西村 次男*¹・魚本 健人*²・加藤 佳孝*³・勝木 太*⁴

要旨：本研究は、アラミド、ガラス、炭素繊維で一方向強化された FRP ロッドを取り上げ、異なった環境条件下（内陸部暴露、海洋環境下暴露、凍結融解）で試験を実施し、塩分、紫外線、乾湿の繰り返しおよび温度変化などが各種 FRP ロッドの引張強度におよぼす影響について明らかにした。その結果、GFRP ロッドの海洋暴露を除くと、内陸部および海洋環境下暴露においていずれのロッドも強度低下することが明らかとなった。また、凍結融解試験より 300 サイクル後の引張強度は、AFRP および CFRP ロッドでは強度低下は余り見られなかったが、GFRP ロッドでは約 8% の強度低下が生じた。

キーワード：FRP ロッド、暴露試験、凍結融解、引張強度

1. はじめに

コンクリート用補強材として用いられる繊維補強プラスチック（FRP）ロッドは、一般に鋼材のような塩分による腐食を生じないことからコンクリート構造物の耐久性を著しく増加させる補強材料として期待されている。また、高強度、高耐食性、軽量、非磁性等の特徴を有することから、建設分野における利用の可能性が高く、特にこの FRP ロッドをプレストレストコンクリート用緊張材またはコンクリート構造物用補強材として用いるための研究が精力的に行われ、その適用性について種々の検討が加えられている。

筆者らは、各種繊維を用いた各種 FRP ロッドの弾塑性的特性、引張強度特性、引張強度と試験本数との関係、耐アルカリ性、疲労性状等について検討を加えてすでに報告している^{1)~3)}。しかし、各種 FRP ロッドの自然環境下における耐候性（実環境暴露試験および凍結融解試験）に関する研究報告はあまり見られず、本格的に実用化するためには検討を要する課題が残されている。

そこで本研究は、アラミド繊維、ガラス繊維、炭素繊維で一方向強化された繊維強化プラスチックロッド（それぞれ AFRP ロッド、GFRP ロッド、CFRP ロッドと略記する）を取り上げ、凍結融解試験ならびに日本コンクリート工学協会(JCI)で提案されている、暴露試験の環境区分に関する基準（案）⁴⁾に準じ、塩分、紫外線、乾湿の繰り返しならびに温度変化などが異なる自然環境下において暴露し、環境条件が各種 FRP ロッドの引張強度に及ぼす影響に関する実験的考察を行った。

2. 実験概要

実験に使用した FRP ロッドの補強繊維は、アラミド繊維、ガラス繊維、カーボン繊維の 3 種類であり繊維混入率(Vf)はいずれも 66% である。また、マトリックスには全てビニルエステル樹脂が用いられている。いずれの FRP ロッドも一方向強化された直径 6mm の丸棒状である。

*1 東京大学生産技術研究所 技術官 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 教授 (正会員)

*3 東京大学生産技術研究所 助手 (正会員)

*4 東急建設(株)技術本部土木技術部 工修 (正会員)

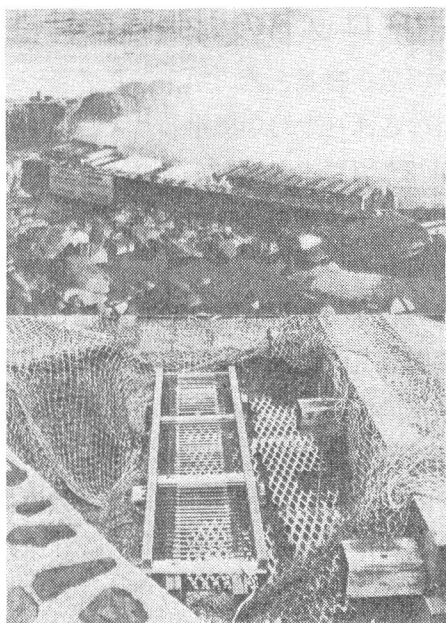


写真-1(a) 伊豆海洋公園暴露試験場 (JCI-SC7の区分A) -塩化物イオンや酸素の供給を受ける場所-

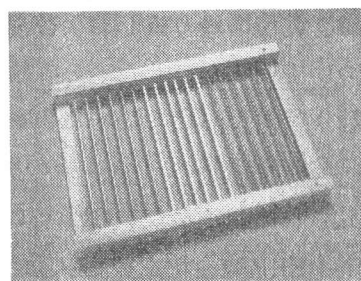
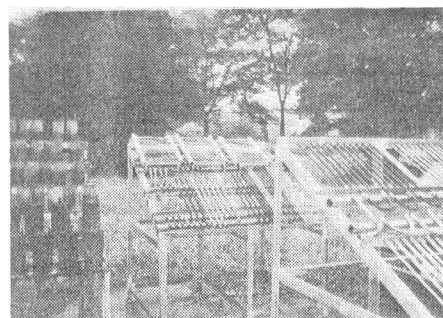


写真-1(b) 内陸部暴露試験場 (JCI-SC7の区分D) -潮風などによる影響がない場所- (西千葉実験所)

自然環境下での暴露試験は、写真-1(a)に示す静岡県伊東市の伊豆海洋公園暴露試験場 (JCI-SC7の区分A) 「飛沫帯、あるいはこれに準ずる環境条件」 (試験体に直接海水が接するなどして外部から常に塩化物イオンおよび酸素の供給があるような環境条件におかれた場所。例えば暴露試験場が海上に位置し、常に試験体に波しぶきがかかる場合、あるいは、干満の影響で試験体が海中に没したり、完全に海上に現れたりするような繰返しを受ける場合) と、写真-1(b)に示す千葉市の西千葉実験所での内陸部暴露試験場 (JCI-SC7の区分D) 「内陸部、あるいはこれに準ずる環境条件」 (試験体が潮風などの外部環境条件による影響が少ない場所、あるいは影響を与えない場所におかれる場合) の2ヶ所で実施した。暴露期間はそれぞれ6ヶ月、1年、3年とし、一条件につきいずれのロッドも6本ずつ暴露した。なお、海洋暴露 (3年間) した供試体については、電子線マイクロ分析装置 (EPMA) によってロッド内部に塩分が浸透しているか否かについて測定を行った。

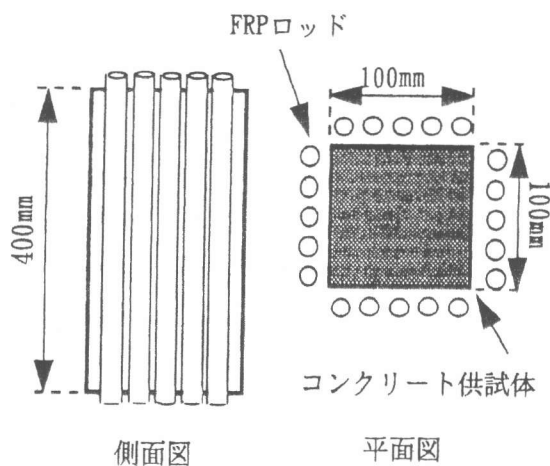


図-1 凍結融解試験体概要図

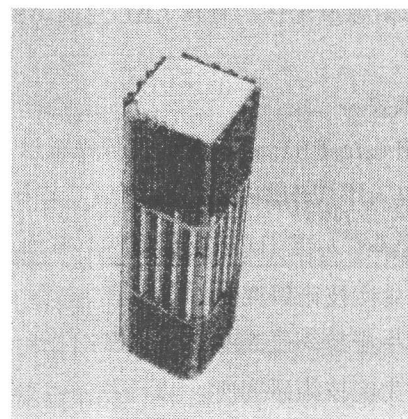


写真-2 凍結融解試験体

凍結融解試験は一般にコンクリートの凍結融解試験で用いられている水中凍結水中融解装置を使用し、試験体は図-1 および写真-2 に示すように、100×100×400mm のコンクリート供試体（空気量約5%）の周りにFRP ロッドを巻き付けて作成した。各条件とも試験体本数は5本とした。試験体の温度履歴は、-20℃～15℃を目標として管理を行った。また、凍結融解試験は300 サイクルまで行い、50,100,200,300 サイクルごとに引張強度、質量の測定および0,200,300 サイクルごとに外観の観察を行った。

引張試験は、いずれの試験においても土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法（案）」に基づいて実施し、定着具は小林らが開発した2つ割りチャック5）を用いた。試験は変位制御型試験機（オートグラフ：10ton）を用い、載荷速度は5mm/min とし室温 22±1℃で行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 暴露実験

表-1 に内陸部と海洋暴露下の年間気象条件を示す。また、図-2 に内陸部および海洋環境下における月平均気温の年間推移を示す。

表-1 より、内陸部（西千葉実験所）および伊豆海洋暴露場では年間降水量を除くと、年間平均気温、湿度、および日射時間はさほどの差は見られない。しかし、図-2 の月平均気温の年間推移では夏期（5月～7月）にかけて内陸部（西千葉実験所）の方が約2℃～4℃月平均気温が高く、逆に冬季（12月～3月）にかけて気温は約1℃～2℃低く、季節によって内陸部と海洋部では気温は逆転していることがわかる。

写真-3 に、3年間海洋暴露(a)および内陸部暴露(b)させたFRP ロッドを示す。この写真より内陸部暴露(b)の供試体は日照及び風雨に曝されたためか表層の樹脂がとれロッド表面から繊維が飛び出していることが分かる。一方、海洋暴露(a)では、内陸暴露と比べロッド表面に繊維はそれほど飛び出していない。この原因として、海洋暴露の場合には繊維および樹脂が波によって洗い流されたものと考えられる。また、海水飛沫を常時受けるためにロッド表面に塩分の付着が見られる。

写真-4 (a)、(b)は、海洋環境下(3年間)に暴露したFRP ロッドを電子線マイクロ分析装置

表-1 内陸部および海洋環境下の年間気象条件

	平均気温	平均湿度	年間降水量	年間日射時間
内陸部暴露場	15.4℃	69%	1600mm	1800h
海洋暴露場	16.3℃	72%	2300mm	1700h

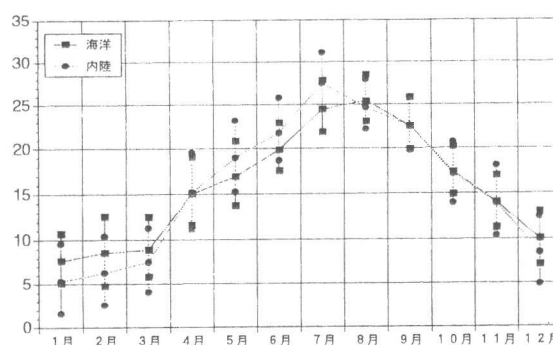
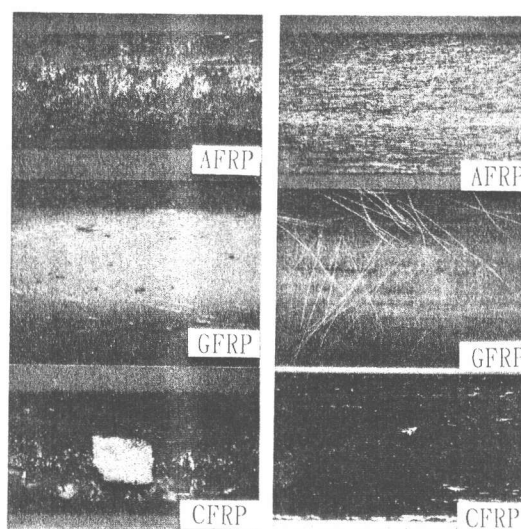


図-2 内陸部と海洋環境下における月平均気温の年間推移(1993)



(a) 海洋環境下暴露 (b) 内陸部暴露

写真-3 (a),(b) 海洋環境下および内陸部暴露3年後のFRPロッドの性状

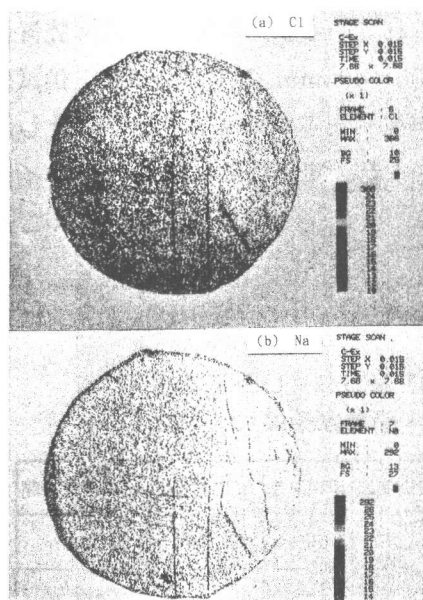


写真-4 海洋環境に3年間
暴露したFRPロッドのEPMA
分析結果の一例

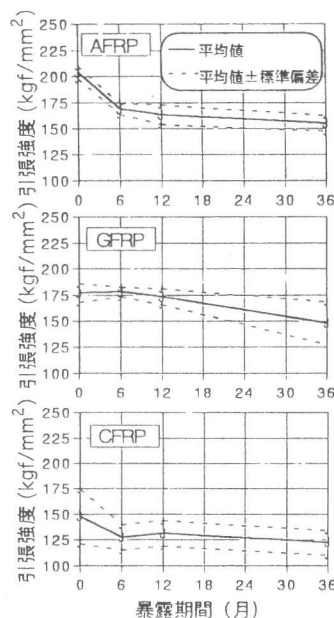


図-3 内陸部（西千葉実験所）
の暴露期間と引張強度との関係

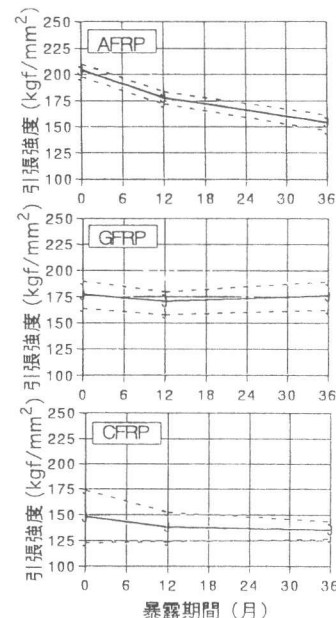


図-4 海洋環境下暴露の暴露
期間と引張強度との関係

(EPMA)によってClならびにNaの分析結果の一例を示したものである。この分析結果よりClならびにNaは、いずれのロッドにおいても内部への浸透はほとんど認められないことが明らかとなった。

図-3は、内陸部暴露場（西千葉実験所）で暴露した各種FRPロッドの各暴露期間と引張強度との関係を示したものである。この図より、AFRPロッドは、暴露6ヶ月で約20%の強度低下となり長期暴露36ヵ月になるに従って強度低下は約30%に増大することが明らかとなった。また、GFRPロッドでは、AFRPロッドとは異なり暴露12ヵ月まではほとんど強度低下は認められない。しかし長期暴露36ヵ月では約19%強度低下することが明らかになった。一方、CFRPロッドでは暴露6ヶ月で約16%強度低下するが、その後の暴露においてほとんど変わらない強度となることが明らかとなった。

図-4は、海洋暴露場（伊豆海洋公園）で暴露した各種FRPロッドの各暴露期間と引張強度との関係を示したものである。この図より、AFRPロッドでは内陸部と同様に、暴露6ヵ月以降強度低下が見られ長期暴露36ヶ月では約32%の強度低下となり内陸部より若干大きくなることが明らかとなった。この原因としては、塩分の浸透による劣化の影響ではなく、高分子繊維からできているアラミド繊維の紫外線劣化によって強度低下したものと考えられる。またGFRPロッドでは、AFRPロッドとは異なり長期暴露36ヶ月で約1%程度

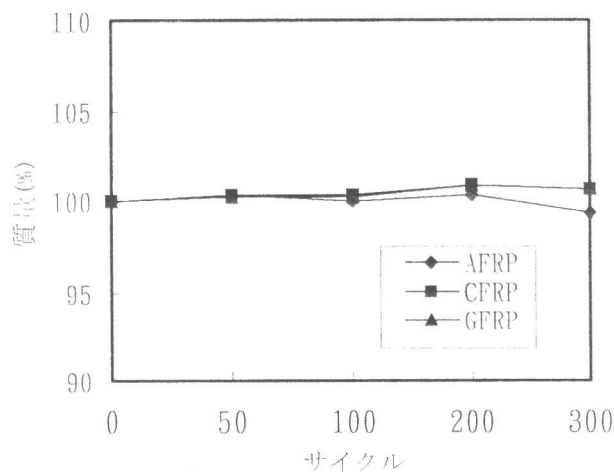


図-5 質量の変動

の強度低下となり暴露開始強度とほぼ同程度で、暴露による強度低下はあまり認められないことが明らかとなった。

一方、CFRP ロッドは、暴露 12ヵ月で約 9%強度低下するものの内陸部暴露と比べ強度低下が少なく、その後の暴露においてはほぼ同等の強度を保っていることが明らかとなった。

3. 2 凍結融解実験

図-5に各サイクルにおける FRP ロッドの質量変化を 0 サイクル時の質量を 100%として示す。この図より明らかのように、凍結融解試験 300 サイクル中の質量の変化はほとんどなく、一定であることがわかる。また、図-6は凍結融解試験後の各サイクルにおける FRP ロッドの引張強度変化(0 サイクル時の引張強度を 100%とした)を示したものである。AFRP ロッドおよび CFRP ロッド引張強度は、各サイクルとも 0 サイクル時の引張強度を維持していることがわかる。また、GFRP ロッドは他のロッドに比してサイクルとともに減少傾向を示し、300 サイクル後では約 8%の強度低下が見られる。

以上のことから、FRP ロッドは、凍結融解 300 サイクル程度では、強度的にはほぼ初期状態を保っており、劣化しないということが明らかとなった。また、写真-5に 0 サイクル、200 サイクル、300 サイクル後の各 FRP ロッドの外観を示す。この写真より 200 サイクル後の各ロッドを観察してみると、ロッドを形成している繊維自体に劣化現象は見られないが、若干ロッド表面の色素が落ちていることがわかる。これは、ロッド周辺をとりまいている非常に薄い樹脂が、凍結融解によって剥がれたものと考えられる。さらに 300 サイクル後を観察すると、ロッドをコーティングしていた樹脂が剥離し、極表層部の繊維が剥がれ始めていることがわかる。以上のことは、全てのロッドにおいて同様な変化が見られる。しかし、上記のように引張強度はいずれのロッドも 0 サイクル

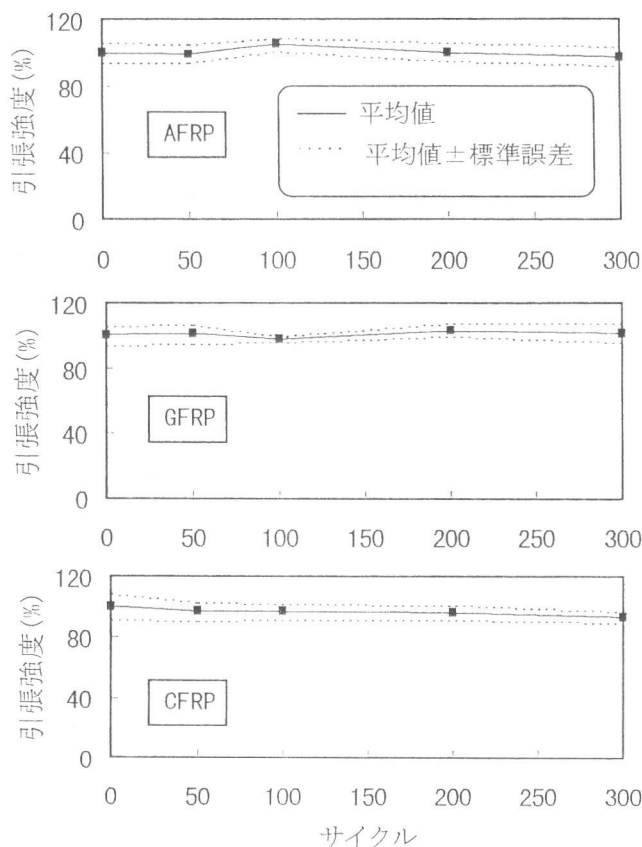


図-6 凍結融解試験後の引張強度

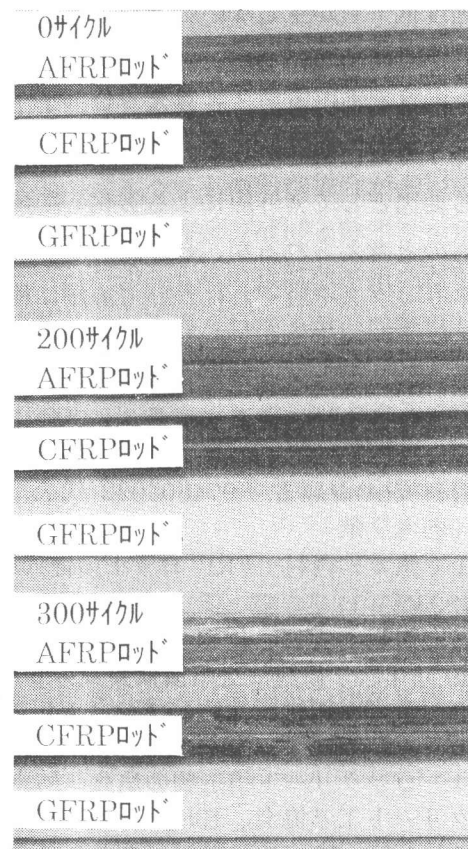


図-7 凍結融解試験後の各種 FRP ロッドの外観写真

時とほぼ変化しないことから、外観に見られるような劣化は極表層部においてのみ起こる現象であり、凍結融解作用はロッド内部まで及んでいないと考えられる。

4. まとめ

各種 FRP ロッドを凍結融解試験ならびに 2 つの自然環境下で暴露した結果より、環境条件が引張強度に及ぼす影響について明らかになった結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 海洋環境下で暴露したものよりも内陸部で暴露した方が、いずれの FRP ロッドも強度低下が顕著にみられる。
- 2) AFRP ロッドは、3 年間に陸部暴露、海洋暴露のいずれも約 20%~32%の強度低下が見られる。その原因は紫外線による劣化が主であると考えられる。
- 3) GFRP ロッドは、内陸部暴露の場合暴露期間 3 年で強度低下することが明らかとなったが、海洋環境下の暴露ではほとんど強度低下を示さず、海洋環境下での劣化が認められないことが明らかとなった。
- 4) CFRP ロッドは、定着具における定着部の応力集中等によって強度のバラツキはあるものの、内陸部暴露の方が海洋環境下で暴露したよりも強度低下することが明らかとなった。
- 5) 海洋環境下での暴露実験より、ロッド内部への塩分浸透を電子線マイクロ分析装置(EPMA)によって分析したが、いずれのロッドも塩分浸透は認められなかった。
- 6) 凍結融解作用(300 サイクル程度)によって AFRP ロッドおよび CFRP ロッドの引張強度はほとんど低下せず、最も大きな強度低下を示した GFRP ロッドにおいても 300 サイクル後で約 8%の強度低下しか生じないということがわかる。また、300 サイクル後の各ロッドの表層部分は繊維が剥がれ始めているが、強度に対する影響はほとんどないものと考えられる。

環境条件の異なった暴露実験結果より、GFRP ロッドの海洋暴露を除くと、内陸部および海洋環境下暴露においていずれのロッドも強度低下することが明らかとなった。また、強度低下に影響する要因として紫外線による劣化、乾湿繰返しによる低下あるいは温度変化等によって低下が生じたものと考えられるが、その機構については明らかにすることが出来なかった。今後は繊維およびマトリックスそれぞれについて詳細に検討していく必要がある。

謝辞

本件究をまとめるにあたり、実験に協力して頂いた芝浦工業大学卒論生西井康人君(現:第一復建(株))に感謝の意を表す。なお、本研究費の一部は、平成 7 年度文部省科学研究費補助金(一般研究(A)課題番号 074505022 代表:魚本健人)によったものであることを付記する。

〔参考文献〕

- 1) 魚本、西村:FRP ロッドの静的強度と弾性係数、土木学会論文集、No.472/V-20、pp77-86、1993.8
- 2) 西村、大賀、魚本:FRP ロッドの疲労強度に及ぼす応力振幅と平均応力の影響、土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集第 5 部、1994.9
- 3) 魚本、西村、宮崎:プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性(6)アルカリによる強度低下とバラツキ、生産研究、Vol45.No.5、1993.5
- 4) コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案):社団法人 日本コンクリート工学協会、1987.4
- 5) 小林一輔:FRP 製プレストレストコンクリート緊張材用定着装置、生研リーフレット、No.158、1987