

耐久性に優れた GFRP ロッドの開発

Development of GFRP rods with high durability

杉 山 基 美*・魚 本 健 人**

Motoyoshi SUGIYAMA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

塩化物イオンの影響を受けるコンクリート構造物の多くは、その内部に埋設された鋼材の腐食により著しく劣化している。これらの問題を解決するために、電気防食の適用やエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用など多くの試みがなされてきたが、より抜本的に対処する方法として塩化物イオンによって腐食を生じない繊維強化プラスチック (FRP) の利用が注目されてきた。

日本では、FRP ロッドをコンクリートの補強材、特にプレストレス緊張材として利用するための研究が 1980 年頃から始められ、これまでガラス繊維、アラミド繊維、カーボン繊維を用いた FRP (GFRP, AFRP, CFRP) ロッドの強度と耐久性に関する多くの研究が行われてきた。AFRP, CFRP ロッドについては耐アルカリ性に優れるが、GFRP ロッドについてはアルカリによって耐久性が著しく低下することが知られている¹⁾。これまで GFRP ロッドの耐アルカリ性の改善として、ロッド中央部にガラス繊維、ロッド外周部にアラミド繊維を配置した二層構造の AGFRP ロッドが提案されている²⁾。また、GFRP ロッドは AFRP, CFRP ロッドに比べてクリープ特性が劣ることがわかっており³⁾、実用化には大きな課題を残していた。

本研究では、ガラス組成中の Si 分が少なく、耐薬品性に優れる Ti, Zr を含有した従来と異なる新しいガラス繊維を用いた GFRP ロッドを開発し、耐アルカリ試験とクリープ試験を行った。耐アルカリ試験はアルカリ溶液に浸漬したロッドの引張試験を行った。また、走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて劣化促進させたロッド内のガラス繊維の性状を確認し、ロッド内へのアルカリの浸透を確認するために劣化促進させたロッド断面のアルカリ分布状態を、電子線マイクロ分析装置 (EPMA) を用いて測定した。また、ガラス繊維/マトリックス樹脂界面と耐アルカリ性との関係を把握するために、アルカリ浸漬後のロッドの層間せん断強度を測定した。

2. 実験概要

実験に用いた GFRP ロッドの補強ガラス繊維は、E ガラス (従来ガラス) と開発ガラスの二種類である。各ガラス繊維の組成を表 1 に示す。また、マトリックス樹脂はビス系ビニルエステル樹脂を用いた。いずれの GFRP ロッドも直径 6 mm、長さ 40 cm の丸棒状で一方方向強化されており、繊維混入率 (Vf) は 66 % である。ロッドのアルカリ浸漬本体は、勝木らによって行われたものと同一のアクリル板からなる 10 × 10 × 20 cm の寸法のものを用いた。また、ロッドの浸漬は静的引張試験において引張区間 (20 cm) となる部分のみとし、定着部分 (両端 10 cm) はアルカリの影響を受けないようにした。アルカリはロッドの劣化を促進させるために、1 N 水酸化ナトリウム溶液を用い、また浸漬温度を 40°C にした。ロッドは、所要日数経過後 (7, 30, 60, 90 日) アルカリ溶液から取り出し、蒸留水で洗浄後 1 日間デシケータの中で乾燥させた。その後、ロッドの定着部表面には保護被覆を施すこととし、下地処理として不飽和ポリエステル樹脂を塗布した後、不飽和ポリエステル樹脂に鉄粉 (300 mesh) を質量比で 1 : 1.8 の割合で混合し均一になるよう塗布した。

引張試験は、変位制御型試験機 (オートグラフ: 98 KN) を用い、載荷速度を 5 mm/分とし、1 条件 10 本の試験体について行った。各試験体の引張強度は、最大荷重をその断面積 (平均直径: 6 mm) で除した値とした。なお、試

表 1 各ガラス繊維の組成

	E ガラス	開発ガラス
Si O ₂	54	44
Al ₂ O ₃	14	5
RO*	24	37
Ti O ₂	—	10
Zr O ₂	—	3
その他	8	1

RO*: アルカリ土類金属酸化物

*日本電気硝子 (株)

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

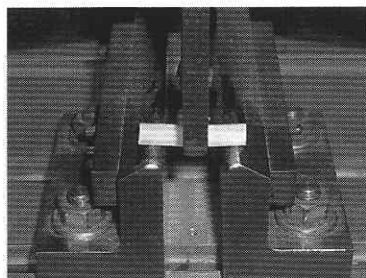


写真1 層間せん断試験

験は室温で行い、温度は 20 ± 5°C の範囲であった。

SEM を用いてアルカリ浸漬後のロッド中の繊維の観察を行い、また EPMA を用いてアルカリの浸透状況の観察を行った。

層間せん断強度は、ASTM D 4475 に従って測定し、スパン 24 mm (径の 4 倍)、クロスヘッドスピード 1.3 mm/分とし、(1) 式により求めた。

$$S = 0.849 P / D^2 \quad (1)$$

ここで、S : 層間せん断強度 (N/mm²)

P : 破壊荷重 (N)

D : ロッド径 (mm)

クリープ試験は、最大荷重 98 kN の荷重制御型サーボバルサを用いて行った。クリープ試験における持続応力は静的引張強度の 80 % から 95 % に設定した、各条件 8 本に対しクリープ試験を行った。なお、試験は室温で行い、温度は 20 ± 5°C の範囲であった。

3. 実験結果および考察

3.1 耐アルカリ試験

3.1.1 アルカリ浸漬後の引張試験結果

各種 GFRP ロッドのアルカリ浸漬後の引張強度、標準偏差、変動係数を表 2 に示す。また、図 1 にアルカリ浸漬後のロッドの引張強度保持率の結果を示す。

表 2、図 1 からわかるように、E ガラスを用いたロッドは明らかに強度低下を起し、浸漬日数が増加するにしたがいその強度低下率が増加していることが確認される。それに対して、開発ガラスを用いたロッドはアルカリ浸漬後もほとんど強度が低下していないことがわかる。また E ガラスを用いたロッドでは、アルカリ浸漬後の引張強度の変動係数が 0.070 ~ 0.175 と浸漬前の変動係数よりも大きく、引張強度のバラツキが大きくなっており、この結果からもアルカリによって劣化していることが推測される。それに対して、開発ガラスを用いたロッドでは、アルカリ浸漬前後で変動係数はほとんど変わらない。

アルカリ浸漬後の引張試験の結果から、E ガラスを用いたロッドはアルカリによって劣化し、開発ガラスを用いたロッドはアルカリによってほとんど劣化していないことがわかる。

表 2 各ロッドのアルカリ浸漬後の引張強度

	浸漬日数	7日	30日	60日	90日
E ガラス	引張強度	1136	919	783	675
	標準偏差	79	109	101	118
	変動係数	0.070	0.119	0.129	0.175
開発ガラス	引張強度	1201	1170	1183	1175
	標準偏差	36	52	58	47
	変動係数	0.030	0.044	0.049	0.040

(引張強度、標準偏差 : 単位 MPa)

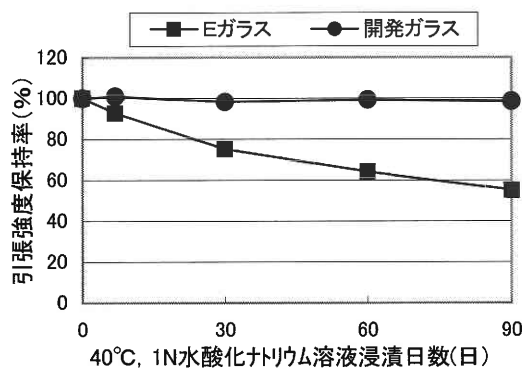
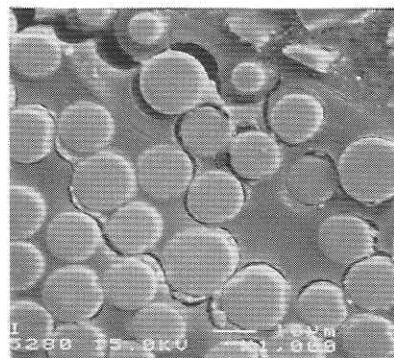
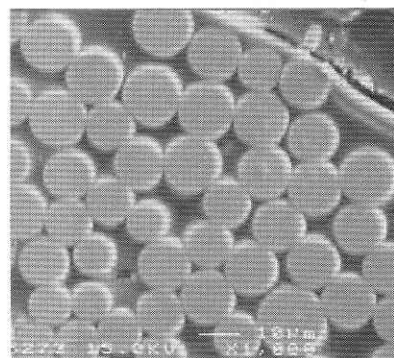


図 1 ロッドの引張強度変化



(a) E ガラス



(b) 開発ガラス

写真2 ロッド断面の SEM 観察結果

3.1.2 SEMによる観察

40°C, 1N水酸化ナトリウム溶液60日浸漬後のロッド外周部の断面をSEMによって観察した。その結果を写真2に示す。アルカリ浸漬前の健全なガラス繊維断面は、きれいな円形を成しているが、アルカリ浸漬後のEガラスを用いたロッド中の繊維は径が細くなっているものがあり、明らかに侵食されていることがわかる。また、繊維とマトリックス樹脂との付着切れもロッド外周部全域にわたって観察された。それに対して、開発ガラスを用いたロッドではEガラスで観察された繊維の侵食やマトリックス樹脂との付着切れがほとんど観察されなかった。

3.1.3 EPMAによる観察

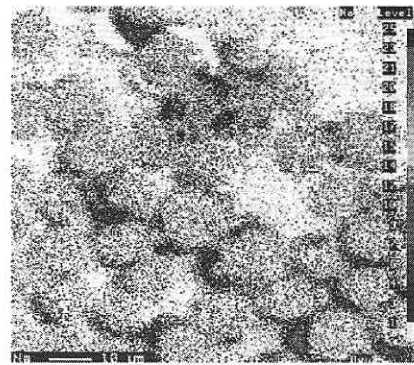
一般に、ガラス繊維の分子構造はOH基によって破壊されることが知られているが、この現象をEPMAを用いて視覚的にとらえることができない。そこで、OH基とNaは水分子と同時にロッド内に浸透すると考え、ロッド内に浸透したNaの分布領域をOH基の浸透領域と仮定することにした。

SEMと同じ箇所についてNa分布状態をEPMAにより観察した。その結果を写真3に示す。図中の黒い部分がNaのカウント領域である。Eガラスを用いたロッドでは、繊維とマトリックス樹脂の界面領域特に繊維とマトリックス樹脂の付着切れした部分にNaが多く分布し、繊維内部にはNaが存在しないことがわかる。したがってNaは繊維とマトリックス樹脂の界面に生じた拡散能力の高い劣化層を通してロッド外周部から内部に浸透したと考えられる。開発ガラスを用いたロッドでは、繊維とマトリックス樹脂の界面領域や繊維内部にNaの分布がほとんど観察されなかった。

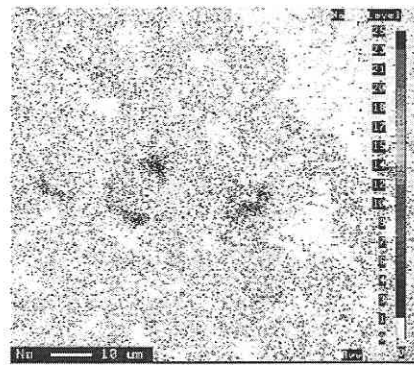
3.1.4 層間せん断強度の測定

図2にアルカリ浸漬後のロッドの層間せん断強度の結果を示す。図2からわかるように、Eガラスを用いたロッドはアルカリ浸漬日数が増加するにしたがい層間せん断強度が低下していることが確認される。それに対して、開発ガラスを用いたロッドはアルカリ浸漬前の層間せん断強度が高くアルカリ浸漬後もその高い層間せん断強度が保持されていることがわかる。

一般に層間せん断強度は、繊維/マトリックス樹脂界面の接着性を表していると考えられている。図2からEガラスを用いたロッドはアルカリ浸漬日数が増加するにしたがい層間せん断強度が低下し、界面の接着性が低下していることがわかる。それに対して開発ガラスを用いたロッドはアルカリ浸漬後も界面の接着性がほとんど変わらないことがわかる。以上のことから、Eガラスを用いたロッドはアルカリ浸漬によってガラス繊維/マトリックス樹脂界面領域が劣化していることがわかり、SEM観察、EPMA観察の結果と一致する。



(a) Eガラス



(b) 開発ガラス

写真3 EPMAによるNa分布測定結果

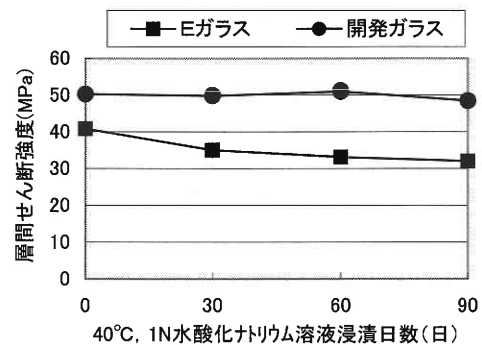


図2 ロッドの層間せん断強度変化

3.1.5 アルカリ劣化に関する考察

開発ガラスを用いたロッドの耐アルカリ性が、Eガラスを用いたロッドの耐アルカリ性よりも良かった理由として、ガラス組成の違いやガラス繊維/マトリックス樹脂界面の違いが挙げられる。開発ガラスは組成中にTi, Zrを含有し表面に膜を形成するため、SEM観察の結果からもわかるようにガラス繊維そのものの耐アルカリ性が向上している。また、開発ガラスの表面は、ガラス繊維製造時にシランカップリング剤とマトリックス樹脂との相溶性に優れたポリエステルで処理されており、図3に示す界面相を形成していると考えられる。シランカップリング剤がガラス繊維表面に化学的、物理的に吸着し、その上をマトリッ

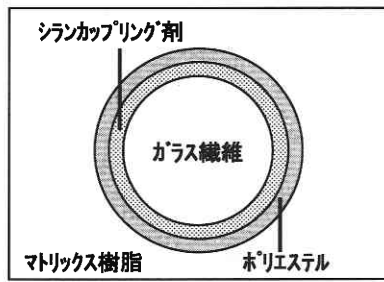


図3 ガラス繊維/マトリックス樹脂界面相模式図

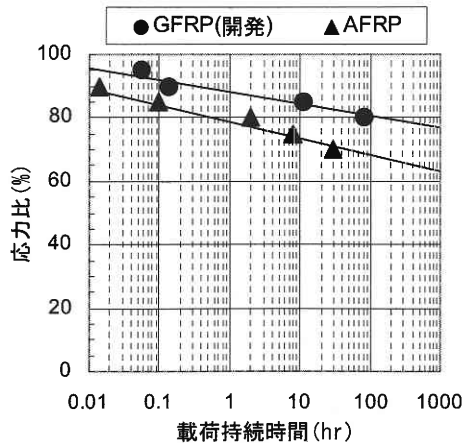


図4 応力比と载荷持続時間の関係

クス樹脂となじみの良いポリエステルが覆い界面層を形成している。開発ガラスはガラス組成中にアルカリ分を含まないため、ガラス繊維/マトリックス樹脂界面に良好な界面層が形成される。その結果、界面領域が改善されアルカリのロッド内部への浸透が抑えられたことが耐アルカリ性の向上につながったのではないかと推定される。

3.2 クリープ試験

引張強度に対する载荷応力の比である応力比と载荷持続時間との関係を図4に示す。

図4から開発ガラスを用いたGFRPロッドはAFRPロッドに比べて、同一応力比における破断までの载荷持続時間が長くなっていることがわかる。

これらの試験結果を用い、最小二乗法によりクリープ試験における载荷持続時間と応力比との関係を求めると(2)式、(3)式のようになる。

GFRP (開発) : $Y = 88.4 - 4.14 \times \log T$ (2)

AFRP : $Y = 79.8 - 5.67 \times \log T$ (3)

ここで、Y：応力比(%)、T：クリープ破断時間(hr)を表す。

相関係数は-0.95(GFRP(開発))、-0.99(AFRP)となり、各FRPロッドとも良い相関を示していることがわかる。クリープ特性が支配的なFRPロッドの供用期間の予測を上記の式を用いて行うことが可能である。供用期間を100年と仮定した場合のFRPロッドの限界载荷応力を計算

表3 層間せん断強度比較

	層間せん断強度(MPa)	界面接着性
GFRP(開発)	50.3	良い
AFRP	28.2	悪い

すると、GFRP(開発)ロッドに対し応力比で63.8%、AFRPロッドに対し応力比で46.1%となり、GFRP(開発)ロッドはAFRPロッドに比べて限界载荷応力比が高く、クリープ特性に優れることがわかる。

表3にGFRP(開発)ロッドとAFRPロッドの層間せん断強度の結果を示す。

表3からGFRP(開発)ロッドは、層間せん断強度が高くガラス繊維/マトリックス樹脂界面の接着性に優れることがわかり、このことがクリープ特性が良かった理由の一つとして考えられる。

以上のことから、GFRPロッドの場合、特にガラス繊維/マトリックス樹脂界面領域を改善することにより耐久性に優れたGFRPロッドを開発することが可能であると考えられる。

4. ま と め

開発ガラスを用いたロッドはアルカリ溶液浸漬後もほとんど強度低下がみられなかった。これは、SEM観察、EPMA観察の結果やロッドの層間せん断試験の結果からわかるようにガラス繊維そのものの耐アルカリ性が向上したこととガラス繊維/マトリックス樹脂の良好な界面形成によりアルカリのロッド内部への浸透が抑えられたためではないかと考えられる。また、開発ガラスを用いたロッドはAFRPロッドに比べてクリープ特性に優れており、これもガラス繊維/マトリックス樹脂界面の接着性が影響していると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたっては、東京大学生産技術研究所の西村次男氏に多大な御協力を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

(2004年3月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 勝木太, 魚本健人: アルカリ環境下におけるガラス繊維強化プラスチックロッドの耐久性評価, 土木学会論文集, Vol. 32, No. 544, pp. 101-107, 1996. 8
- 2) 西村次男, 魚本健人, 勝木太, 神吉正弥: 耐アルカリ性を改善したAGFRPロッドの開発, 土木学会第51回年次学術講演会概要集, V-483, pp. 964-965, 1996. 9
- 3) 西村次男, 魚本健人, : FRPロッドのクリープ破壊に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 547-550, 1995. 6