

論文 新しいガラス繊維を用いたGFRPロッドの強度と耐久性に関する研究

杉山 基美*1・魚本 健人*2

要旨：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を含有した新しいガラス繊維を用いたGFRPロッドの耐久性を明らかにするために，疲労特性，クリープ特性，耐アルカリ性について検討した。また，走査電子顕微鏡(SEM)を用いてアルカリ浸漬後のロッド中の繊維の観察も行った。その結果，クリープ特性については従来のガラス繊維を用いたGFRPロッドに比べて大幅に改善されていることがわかった。また，アルカリ浸漬後もほとんど強度低下が見られず，SEM観察からも繊維の侵食がみられなかった。

キーワード：GFRPロッド，疲労特性，クリープ特性，耐アルカリ性

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。この問題は日本のみならず諸外国においても起こっており，海洋構造物や融雪剤が多量に散布される橋梁などのコンクリート構造物の腐食は大きな問題となっている。

これらの問題を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ロッド(GFRP，AFRP，CFRP)の強度と耐久性に関する多くの研究がなされてきた。これまでの研究結果から，GFRPについてはAFRP，CFRPに比べて耐アルカリ性，疲労特性，クリープ特性が劣り，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

の耐久性を明らかにするために，疲労特性，クリープ特性，耐アルカリ性について検討した。また，SEMを用いてアルカリ浸漬後のロッド中の繊維の微視的な観察も行った。

2. 実験概要

2.1 静的引張試験

実験に用いたGFRPロッドの補強ガラス繊維は，Tガラス，新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。なお，新ガラス繊維の表面にはシランカップリング剤とポリエステル樹脂の混合液を0.5wt%処理した。また，マトリックスは表-2に示す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6mm，長さ40cmの丸棒状で一方向強化されており，繊維混入率(V_f)は66%である。GFRPロッドの引張試験は，土木学会の連続繊維補強材の引張試験方法に従って実施し，定着具は小林らが開発した2つ割りチャック¹⁾を用いた。なお，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(300mesh)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。

*1 日本電気硝子(株) ガラス繊維事業部 (正会員)

*2 東京大学教授 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 工博 (正会員)

引張試験は、変位制御型試験機(オートグラフ 98KN)を用い、载荷速度を 5mm/分とし、1 種類につき 100 本の引張試験を行った。各試験片の引張強度は、最大荷重をその断面積(平均直径:6mm)で除した値とし、ひずみはストレインゲージで測定した。なお、試験は室温で行い、温度は 20±5℃の範囲であった。

表一 1 各ガラス繊維の組成

	T ガラス	新ガラス
SiO ₂	65	44
Al ₂ O ₃	24	5
RO*	10	37
TiO ₂ +ZrO ₂	—	13
その他	1	1

RO*: アルカリ土類金属酸化物

表一 2 FRPマトリックスの特性

	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	破断時伸び (%)
平均値	83.2	3048	5.22
標準偏差	1.13	36.3	0.11
変動係数	0.014	0.012	0.021

2.2 疲労試験

疲労試験は、最大荷重 98KN の荷重制御型サーボパルサーを用いて行った。疲労試験における最高応力(上限応力)は静的引張強度の 30%から 70%にした。なお、ここで用いる静的引張強度は疲労試験の試験体と同一寸法、同一繊維混入率の GFRP ロッド 100 本の静的引張強度の結果において、破壊確率が 50%となる引張強度を用いた。応力振幅は 50, 100, 250, 500MPa と変化させた。周波数は 1 から 10Hz の間に設定し、各条件 7 本に対し疲労試験を行った。なお、試験は室温で行い、温度は 20±5℃の範囲であった。

2.3 クリープ試験

クリープ試験は、最大荷重 98KN の荷重制御型サーボパルサーを用いて行った。クリープ試験における持続応力は静的引張強度の 70%から 95%に設定した。なお、ここで用いる静的引張強度は疲労試験と同様の引張強度を用いた。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℃の範囲であった。

2.4 耐アルカリ性試験

ロッドの浸漬試験本体は勝木らによって行われたものと同じの亚克力板からなる 10×10×20cm の寸法のものを用いた²⁾。また、ロッドの浸漬は静的引張試験において引張区間(20cm)となる部分のみとし、定着部分(両端 10cm)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、1N 水酸化ナトリウム溶液を用い、また浸漬温度を 40℃にした。ロッドは所要日数経過後(7, 30 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、ロッドの定着部分に保護被覆を施し、変位制御型オートグラフ(98KN)を用いて载荷速度 5mm/分で引張試験を行った。

また、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た。

3. 実験結果

3.1 静的引張強度と弾性係数

各種 GFRP ロッドの引張強度と弾性係数の平均値、標準偏差、変動係数を表一 3 に示す。

表一 3 ロッドの引張強度と弾性係数

	種類	T ガラス	新ガラス
引張強度 (MPa)	平均値	1735	1192
	標準偏差	119.6	73.1
	変動係数	0.069	0.061
弾性係数 (MPa)	平均値	59035	58839
	標準偏差	992	462
	変動係数	0.017	0.008

新ガラスを用いた GFRP ロッドの引張強度は、T ガラスを用いた GFRP ロッドの引張強度に比べて低いことがわかる。弾性係数については大きな差はない。表一 4 に各種繊維の引張強度と弾性係数の平均値、標準偏差、変動係数を示す。なお、引張試験は、JIS-R-7601 に

したがって行い荷重制御型オートグラフを用いて行った。引張試験は1条件50本とし、载荷速度は0.5mm/分とした。

表－4 繊維の引張強度と弾性係数

	種類	Tガラス	新ガラス
引張強度 (MPa)	平均値	2460	2044
	標準偏差	853	497
	変動係数	0.347	0.243
弾性係数 (MPa)	平均値	83780	86091
	標準偏差	15964	21063
	変動係数	0.191	0.245

一般にFRPのような複合材料の場合には、混合則が成り立つと考えられ、**表－2**、**表－4**からわかるようにマトリックスの弾性係数および強度が、繊維の弾性係数および強度に比べてはるかに小さいことから、式(1)、式(2)のように近似することができる。

$$E = E_f \times V_f \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_f \times V_f \quad (2)$$

ただし、E：ロッド全体としての弾性係数

E_f ：繊維の弾性係数

σ ：ロッド全体としての強度

σ_f ：繊維強度

V_f ：繊維混入率

表－5にそれぞれのGFRRPロッドの実験値と計算値ならびにその比(実験値/計算値)を示す。

表－5 混合則による実験値と計算値の比較

	種類	Tガラス	新ガラス
引張強度 (MPa)	実験値	1735	1192
	計算値	1624	1349
	その比	1.07	0.88
弾性係数 (MPa)	実験値	59035	58839
	計算値	55295	56820
	その比	1.07	1.04

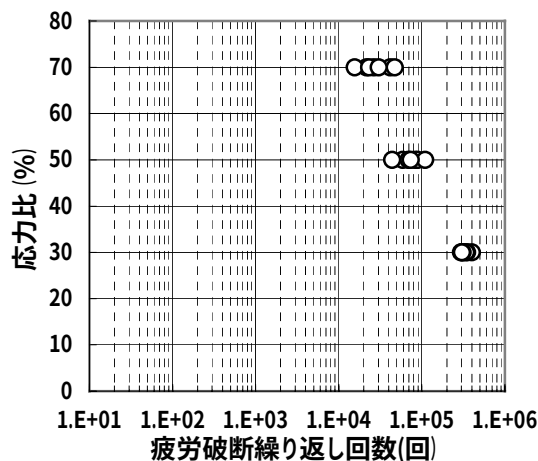
この表から明らかなように、引張強度、弾性係数とも実験値は計算値の0.88～1.07の範囲に入っており、混合則を用いてロッドの値を求

めてもほぼ実験値と等しい値を得ることが可能であると考えられる。ただし、引張強度については繊維とマトリックスとの付着が完全であっても繊維そのものの強度のばらつきが大きいこと、ロッド定着部での応力集中の影響があることから必ずしも計算値に近い値とはならない。

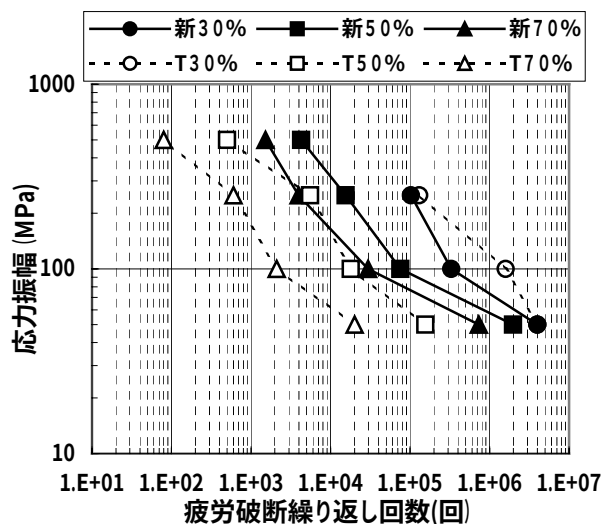
3.2 疲労特性

図－1に新ガラスを用いたロッドの応力振幅100MPaの疲労試験の結果を示すが、同一応力比においても疲労破断繰返し回数は異なることから破壊確率が50%となる繰返し回数を疲労破断繰返し回数と定義し、疲労破断繰返し回数を求めた。**図－2**にロッドの応力振幅と疲労破断繰返し回数の関係を示す。上限応力を静的引張強度の30%、50%、70%に設定し、各上限応力ごとに応力振幅を50MPaから500MPaに設定し疲労試験を行った。疲労試験は400万回まで行った。なお、図中の新30%、新50%、新70%は新ガラスを用いたロッドで応力比30%、50%、70%をそれぞれ表わし、T30%、T50%、T70%はTガラスを用いたロッドで応力比30%、50%、70%をそれぞれ表わしている。

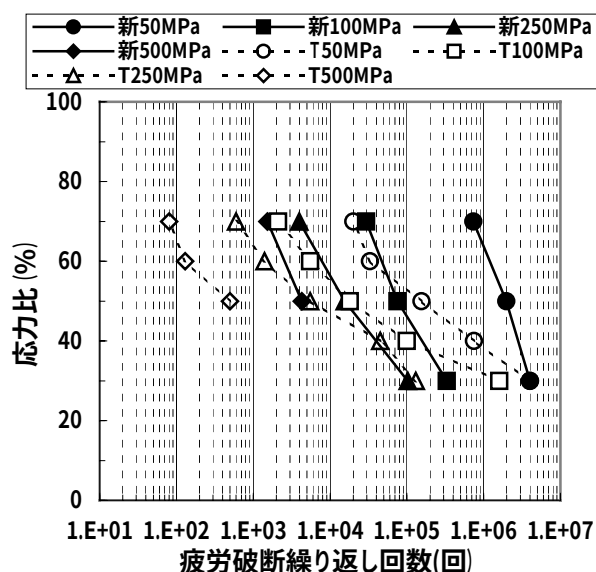
新ガラス、Tガラスを用いたロッドとも上限応力の増加とともに疲労破断繰返し回数は減少し、さらに応力振幅の増加により疲労破断繰返し回数は減少している。応力比30%では、新ガラス、Tガラスを用いたロッドとも同じような疲労破断繰返し回数の結果を示しているが、応力比50%、70%では新ガラスを用いたロッドのほうがTガラスを用いたロッドに比べて疲労破断繰返し回数が増加している。特に応力比70%では、1オーダー以上の疲労破断繰返し回数の差異が生じている。**図－3**にロッドの応力比と疲労破断繰返し回数との関係を各応力振幅ごとに示す。応力比の増加とともに疲労破断繰返し回数はほぼ直線的に減少している。新ガラスを用いたロッドのほうがTガラスを用いたロッドに比べて、応力比の増加による疲労破断繰返し回数の低下する割合が小さくなっている。



図一 1 疲労試験結果
(新ガラス, 応力振幅: 100MPa)



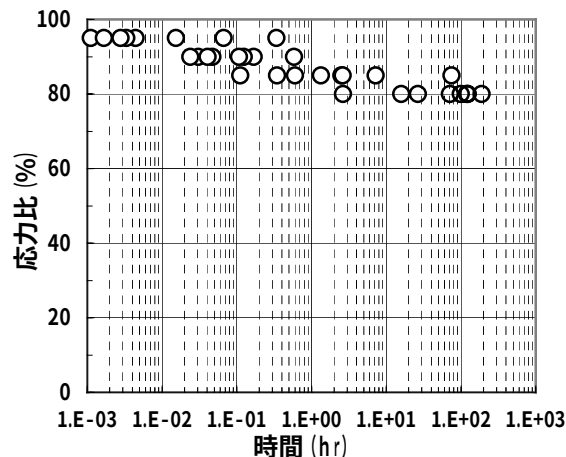
図一 2 応力振幅と疲労破断繰返し回数の関係



図一 3 応力比と疲労破断繰返し回数の関係

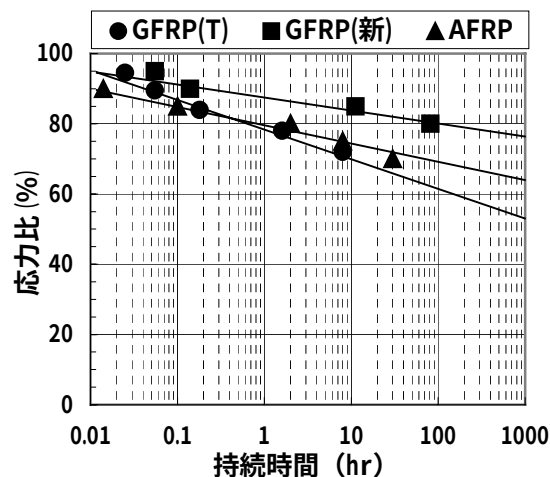
3.3 クリープ特性

図一 4 に新ガラスを用いたロッドのクリープ試験の結果を示すが, 同一応力比においてもクリープ破断時間は大きく異なることから, 破壊確率が 50%となる持続時間をクリープ破壊時間と定義し, 破壊時間を求めた。



図一 4 クリープ試験結果(新ガラス)

図一 5 に引張強度に対する荷重応力の比である応力比と荷重持続時間との関係を示す。なお, AFRP(アミド繊維強化プラスチック)については魚本らの結果³⁾を用いた。応力比で比較した場合, AFRPロッドとGFRP(T)ロッド(Tガラスを用いたGFRP)はほぼ同様のクリープ性状を示している。GFRP(新)ロッド(新ガラスを用いたGFRP)は同一応力比におけるクリープによる破断時間は長くなっている。



図一 5 応力比と荷重持続時間の関係

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式(3)、式(4)、式(5)のようになる。

$$\text{GFRP(T)} : Y = 79.2 - 8.29 \times \log T \quad (3)$$

$$\text{GFRP(新)} : Y = 88.4 - 4.14 \times \log T \quad (4)$$

$$\text{AFRP} : Y = 79.8 - 5.67 \times \log T \quad (5)$$

ここで、Y：応力比(%), T：クリープ破断時間(hr)を表わす。

相関係数は-0.98(GFRP(T)), -0.95(GFRP(新)), -0.99(AFRP)となり、各FRPロッドとも良い相関を示している。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上式を用いて計算を行うと、GFRP(T)ロッドに対し応力比で30.0%, GFRP(新)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、用いる繊維により所要の供用期間における限界载荷応力(限界応力比)の値は大きく異なる結果となっている。また、同じGFRPロッドでも用いるガラス繊維の種類により、限界载荷応力(限界応力比)の値は大きく異なることがわかる。

新ガラスを用いたロッドのクリープ特性がTガラスを用いたロッドのクリープ特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／マトリックス界面の違いが挙げられる。新ガラスの表面は、シランカップリング剤とマトリックスとの相溶性に優れるポリエステル樹脂で処理されており図-6の模式図に示す界面相(interphase)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、その上をマトリックスとなじみの良いポリエステル樹脂が覆い界面相を形成している。このガラス／マトリックスの良好な界面形成がクリープ特性の向上につながったのではないかと推定される。

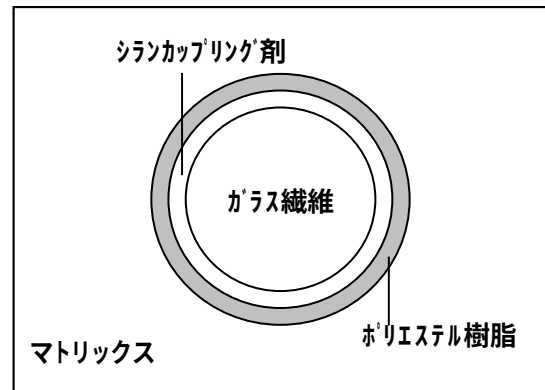


図-6 ガラス／マトリックス界面相模式図

3.4 耐アルカリ性

図-7にアルカリ浸漬後のロッドの引張試験結果を示す。表中に示す引張強度保持率は、試験本数10本の平均値から計算したものである。T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、新ガラスを用いたロッドは水酸化ナトリウム溶液浸漬後もほとんど強度が低下していないことがわかる。

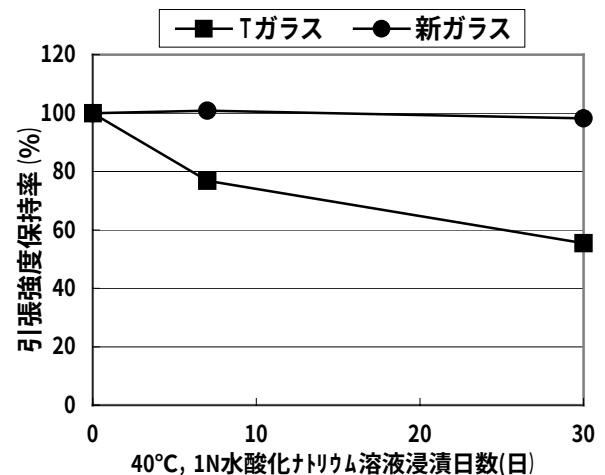
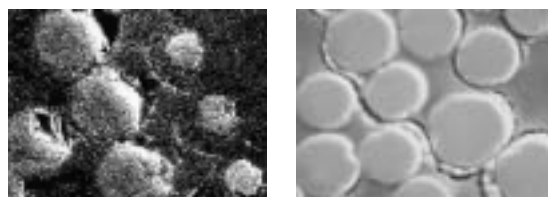


図-7 各種FRPロッドの引張強度変化

40°C, 1N 水酸化ナトリウム溶液30日浸漬後のロッド外周部の断面をSEMによって観察した。その結果を図-8に示す。



(a) Tガラス 侵食 (b) Tガラス 付着切れ



(c) 新ガラス

図一8 ロッド断面のSEM観察結果

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Tガラスを用いたロッド中の繊維は径が細く、明らかに侵食されていることがわかる(写真(a))。また、繊維とマトリックスとの付着切れも観察された(写真(b))。それに対して、新ガラスを用いたロッドは繊維の侵食やマトリックスとの付着切れが観察されなかった(写真(c))。アルカリはガラス繊維とマトリックスの界面に生じた劣化層を通して浸透することが報告されている²⁾。新ガラスを用いたロッドは、クリープ特性でも述べたように良好な界面層を形成していると考えられ、これも耐アルカリ性の良かった理由の一つと考えられる。今後、アルカリ浸漬日数を増加させたときの引張強度保持率ならびにガラス／マトリックスの界面が耐アルカリ性に及ぼす影響について検討する必要がある。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1)新ガラスを用いたロッドの引張強度は、Tガラスを用いたロッドの引張強度よりも低い、これは繊維そのものの強度に起因していると考えられる。混合則を用いてロッドの引張強度、弾性係数を求めてもほぼ実験値と等

しい値を得ることが可能である。

- (2)ロッドの疲労破断繰返し回数は、疲労試験における平均応力および応力振幅に影響を受け、平均応力および応力振幅の増大にほぼ比例して対数で表わした疲労破断繰返し回数は低下する。新ガラスを用いたロッドは、Tガラスを用いたロッドに比べて応力比70%では1オーダー以上疲労破断繰返し回数が増加している。
- (3)クリープ試験における応力比と対数で表わした載荷時間とほぼ比例関係にあるが、用いる繊維の種類によりその傾きは異なり、新ガラスを用いたロッドはTガラスを用いたロッドに比べてその傾きは小さく、クリープ特性が向上している。この理由の一つとして、新ガラス／マトリックスの良好な界面形成が考えられる。
- (4)新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低下がみられず、SEM観察からも繊維の侵食がみられなかった。

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。また、繊維の引張試験の実施にあたっては、鹿児島大学の山口明伸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。

参考文献

- 1) 小林一輔：FRP製プレストレス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
- 2) 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
- 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