

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

Research on Strength and Durability of GFRP Rods Made of New Glass Fiber

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、海洋構造物などの海洋環境下に建設されている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。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 ロッドの強度と耐久性の検討を行った。特に、緊張材の分野では重要と考えられている疲労特性、クリープ特性について評価した。

2. 静的引張強度と弾性係数

2.1 実験概要

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2種類である。各ガラス繊維の組成を表2.1に示す。また、マトリックスは表2.2に示すビス系ビニルエステル樹脂Ripoxyl R-802である。いずれのGFRP ロッドも直径6 mm、長さ40 cmの丸棒状で一方向強化され

ており、繊維混入率 (Vf) 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(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。この保護皮膜の厚さは約300 μmとした。

引張試験は、変位制御型試験機(オートグラフ: 10 t)を用い、載荷速度を5 mm/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: 6 mm)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、

表2.1 各ガラス繊維の組成

| | Tガラス | 新ガラス |
|--------------------------------|------|------|
| SiO ₂ | 65 | 35 |
| Al ₂ O ₃ | 24 | 1 |
| MgO | 10 | — |
| CaO | — | 6 |
| BaO | — | 27 |
| TiO ₂ | — | 10 |
| ZrO ₂ | — | 3 |
| SrO | — | 5 |
| Nb ₂ O ₅ | — | 9 |
| その他 | 1 | 4 |

表2.2 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 |

*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

温度は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲であった。

2.2 引張強度試験結果と考察

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 2.3 に示す。

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かなり低いことがわかる。弾性係数については大きな差はない。

表 2.4 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、載荷速度は 0.5 mm/分 とした。

一般に FRP のような複合材料の場合には、以下の様な「混合則」が成り立つと考えられている。

$$E = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

表 2.3 GFRP 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 | 1078 |
| | 標準偏差 | 119.6 | 58.7 |
| | 変動係数 | 0.069 | 0.055 |
| 弾性係数 (MPa) | 平均値 | 59035 | 56085 |
| | 標準偏差 | 992 | 334 |
| | 変動係数 | 0.017 | 0.006 |

表 2.4 各種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 | 1701 |
| | 標準偏差 | 853 | 649 |
| | 変動係数 | 0.347 | 0.382 |
| 弾性係数 (MPa) | 平均値 | 83780 | 86091 |
| | 標準偏差 | 15964 | 21063 |
| | 変動係数 | 0.191 | 0.245 |

表 2.5 混合則による計算値と実験値の比較

| | 項目 | T ガラス | 新ガラス |
|------------|------|-------|-------|
| 引張強度 (MPa) | 実験値① | 1735 | 1078 |
| | 計算値② | 1624 | 1122 |
| | ①/② | 1.07 | 0.96 |
| 弾性係数 (MPa) | 実験値① | 59035 | 56085 |
| | 計算値② | 55295 | 56820 |
| | ①/② | 1.07 | 0.99 |

$$\sigma = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

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

E_m : マトリックスの弾性係数

σ : ロッド全体としての強度

σ_f : 繊維強度

σ_m : マトリックス強度

V_f : 繊維混入率

なお、表 2.2、表 2.4 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次のように近似することができる。

$$E \doteq E_f V_f$$

$$\sigma \doteq \sigma_f V_f$$

表 2.5 にそれぞれの GFRP 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。

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 $0.96 \sim 1.07$ 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。

3. 疲労特性とクリープ特性

3.1 実験概要

(1) 疲労試験

疲労試験は、最大荷重 10 t 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 80% 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 $50, 100, 250, 500 \text{ MPa}$ と変化させた。周波数は 1 から 10 Hz の間に設定し、各条件 7 本に対し、疲労試験を行った。図 3.1 に応力振幅 100 MPa 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がわかる。なお、試験は室温で行い、温度は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲であった。

(2) クリープ試験

クリープ試験は、最大荷重 10 t 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 80% 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 10 本に対しクリープ試験を行った。図 3.2 に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がわかる。なお、試験は室温で行い、温度は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲であった。

研 究 速 報

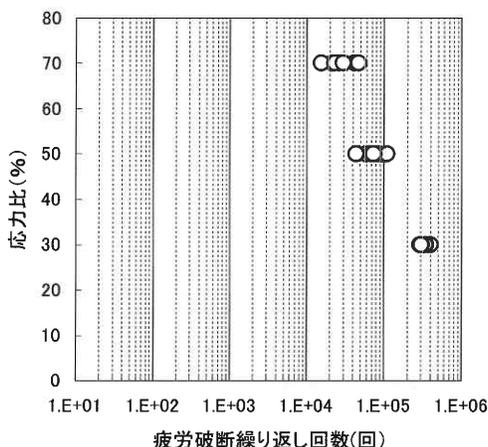


図 3.1 GFRP ロッドの疲労試験結果

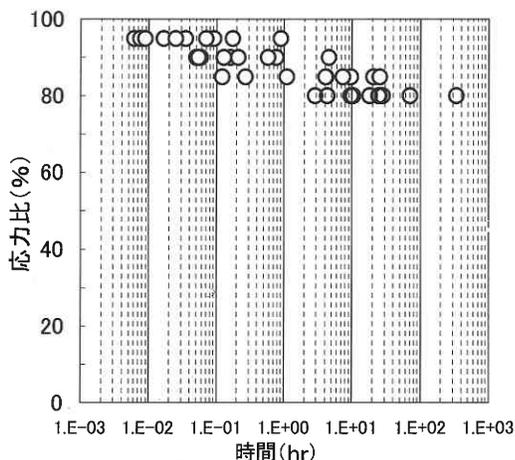


図 3.2 GFRP ロッドのクリープ試験結果

3.2 GFRP ロッドの疲労特性とその評価

GFRP ロッドの応力振幅と疲労破断繰り返し回数の関係を図 3.3 に示す。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 50 MPa から 500 MPa 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，T 30%，T 50%，T 70% 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り返し回数は減少し，さらに応力振幅の増加により疲労破断繰り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り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り返

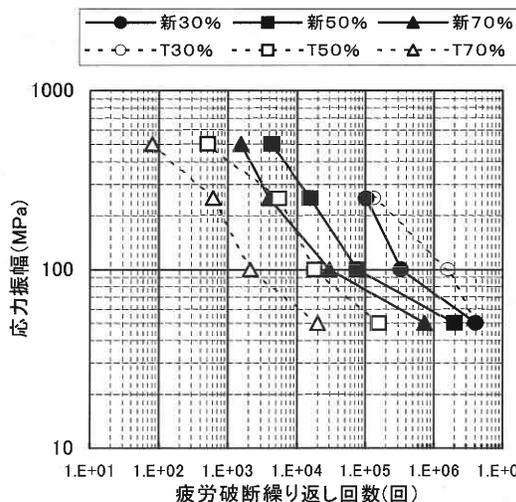


図 3.3 応力振幅と疲労破断繰り返し回数の関係

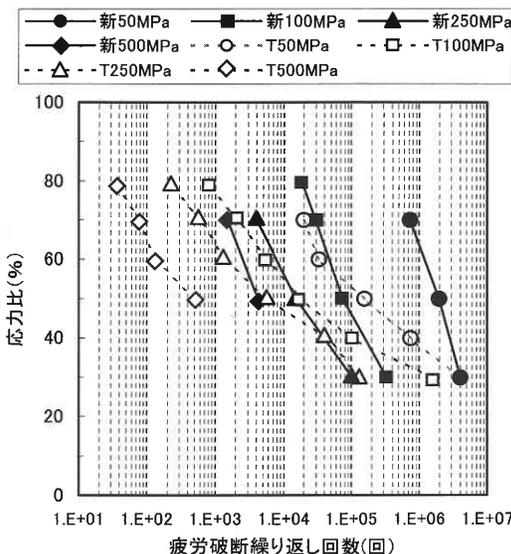


図 3.4 応力比と疲労破断繰り返し回数の関係

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り返し回数の差異が生じている。図 3.4 に GFRP ロッドの応力比と疲労破断繰り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り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り返し回数の低下する割合が小さくなっている。

3.3 GFRP ロッドのクリープ特性とその評価

図 3.5 に引張強度に対する載荷応力の比である応力比と載荷持続時間との関係を示す。なお，AFRP および CFRP については魚本らの結果²⁾を用いた。応力比で比較した

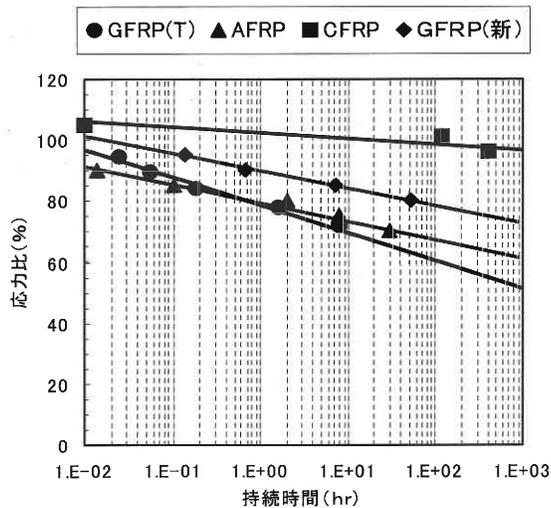


図 3.5 応力比と荷重持続時間の関係

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おり、CFRP ロッドはさらに破断時間は長くなっている。CFRP ロッドの場合、静的引張強度の 95% 程度の応力を荷重した場合においても 400 時間まで破断しない結果となっている。

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荷重持続時間と応力比との関係を求めると以下のようなになる。

$$\text{GFRP (T)} : \sigma_{\text{applied}} / \sigma_{\text{tensile}} = 79.2 - 8.29 \times \log T$$

$$\text{AFRP} : \sigma_{\text{applied}} / \sigma_{\text{tensile}} = 79.8 - 5.67 \times \log T$$

$$\text{CFRP} : \sigma_{\text{applied}} / \sigma_{\text{tensile}} = 102 - 1.91 \times \log T$$

$$\text{GFRP (新)} : \sigma_{\text{applied}} / \sigma_{\text{tensile}} = 89.7 - 5.63 \times \log T$$

ここで、 σ_{applied} : 荷重応力 (MPa), σ_{tensile} : 静的引張強度 (MPa), T : クリープ破断時間 (hr) を表す。

相関係数は、-0.984 (GFRP (T) ロッド), -0.987 (AFRP ロッド), -0.913 (CFRP ロッド), -0.995 (GFRP (新) ロッド) 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 ロッドの限界荷重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%, AFRP ロッドに対し応力比で 46.1%, CFRP ロッドに対し応力比で 91.1%, GFRP (新) ロッドに対し応力比で 56.2% となり、用いる繊維により所要の供用

期間における限界荷重応力 (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、限界荷重応力 (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考えられる。

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が、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) GFRP 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荷重持続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なっている。この理由として、ガラス組成の違いのみだけでなく、ガラス/マトリックス界面の違いも考えられる。

今後、新しいガラス繊維を用いたロッドの耐アルカリ性についても検討する必要がある。

謝 辞

本研究の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。

(2002 年 10 月 3 日受理)

参 考 文 献

- 1) 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)
- 2) 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集, Vol.17, No.1, pp.547-550 (1995)