

繊維補強プラスティックロッドの時間依存的特性の評価

魚本健人¹・西村次男²・山口明伸³・大賀宏行⁴

¹正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第5部 (〒106-0032 東京都港区六本木7-22-1)

²正会員 東京大学技術官 生産技術研究所第5部 (〒106-0032 東京都港区六本木7-22-1)

³正会員 工博 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

⁴正会員 工博 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻

(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

FRPロッドのプレストレストコンクリート用緊張材としての適用性を検討するための基礎的な研究として、ガラス繊維、アラミド繊維、炭素繊維を用いたFRPロッドの疲労試験およびクリープ試験を行い、平均応力、応力振幅、持続載荷応力の影響について検討するとともに、これら時間依存性を有する特性の破壊機構について検討を加えた。疲労破断繰返し回数は平均応力および応力振幅の増大とともに減少し、ガラス繊維を用いたFRPロッドに対しては、平均応力および応力振幅を用いることにより疲労破断繰返し回数を推定することが可能であることを示した。クリープによる破断時間は、載荷応力の増大とともに減少するが、応力比を用いることにより、破断時間の予測が可能であることを示した。

Key Words : FRP rods, carbon fiber, aramid fiber, glass fiber, fatigue properties, creep properties

1. はじめに

繊維補強プラスティックロッド(以下、FRPロッドとする)は、高強度、高耐食性、軽量、非磁性など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あり、種々の検討がなされている¹⁾。特に、このFRPロッドをコンクリート構造物用補強材あるいはプレストレストコンクリート用緊張材として用いるための研究が精力的に行われ、FRPロッドの適用性について検討が加えられている。筆者らも各種繊維を用いたロッドの弾塑性的特性、破壊性状、耐アルカリ性、疲労特性、耐候性などについて検討を加えており^{2)~11)}、FRPロッドのプレストレストコンクリート用緊張材としての適用性を明らかにしている。FRPロッドを実構造物へ適用する際には、静的な強度特性のみならず、疲労特性やクリープ特性などの時間依存性のある強度特性や耐久性についても、繊維自身の特性と関連させ検討を加える必要のあることも明らかである。

そこで本研究は、FRPロッドのプレストレストコンクリート用緊張材としての適用性を明らかにするための基礎的研究として、ガラス繊維、アラミド

繊維および炭素繊維を用いたFRPロッドの疲労破壊特性とクリープ破壊特性について検討を加えるとともに、時間依存性に着目して、これら特性の評価を行ったものである。

2. 実験概要

(1) 使用材料

本研究で用いたFRPロッドは、直径6mm、長さ400mmの円断面一方向強化プラスティック(特注品)であり、繊維として、ガラス繊維、アラミド繊維および炭素繊維を用いた。各繊維の直径、引張強度および弾性係数は、

12.77 μm, 251 kgf/mm², 8551 kgf/mm²
(ガラス繊維)

12.15 μm, 389kgf/mm², 8355kgf/mm²
(アラミド繊維)

6.68 μm, 335kgf/mm², 22730kgf/mm²
(炭素繊維)

である。

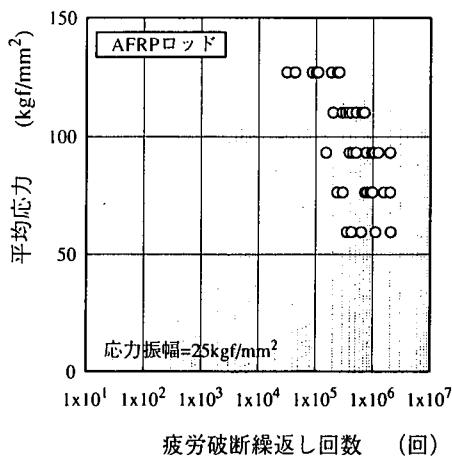


図-1 FRP ロッドの疲労試験結果

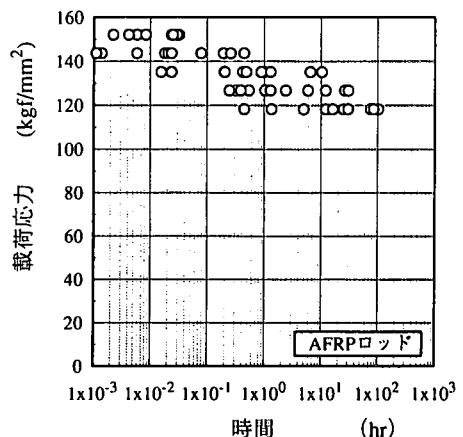


図-2 FRP ロッドのクリープ試験結果

繊維混入率を 55% (vol.) 一定とし、マトリックスとしてビニルエステル樹脂を用いた。ガラス繊維、アラミド繊維および炭素繊維を用いた FRP ロッドを、以下 GFRP ロッド、AFRP ロッド、CFRP ロッドと略記する。定着具は小林らが開発した 2 つ割りチャック^{(12), (13)}を用いた。このチャックはもともと AFRP ロッドの引張試験用として開発され、GFRP および CFRP の引張試験にも用いてその適用性が確認されているが⁽¹¹⁾、疲労試験およびクリープ試験にも適用上大きな問題はないと考え使用した。なお、ロッドの定着部表面には引張試験と同様、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のち、不飽和ポリエステル樹脂に鉄粉 (300mesh) を重量比で 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小林らの結果⁽¹¹⁾を考慮して約 300 μm とした。

(2) 疲労試験

疲労試験は、最大荷重 10ton 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 20% から 100% とした。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 FRP ロッド 100 本の静的引張試験の結果において、破壊確率が 50% となる引張強度を用いた⁽¹¹⁾。静的引張試験における平均引張強度およびその標準偏差は、

GFRP ロッドで 169kgf/mm² および 8.5kgf/mm²
AFRP ロッドで 169kgf/mm² および 14.8kgf/mm²
CFRP ロッドで 134kgf/mm² および 11.2kgf/mm²

であった。

応力振幅は 5, 10, 25, 40 および 50 kgf/mm² と変化させた。周波数は、1 から 10Hz の間に設定し、5 本から 10 本に対し疲労試験を行った。

図-1 に AFRP ロッドの疲労試験結果の一例を示すが、同一平均応力(最大応力と最小応力の平均値)においても疲労破断繰返し回数は大きく異なることから、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た。疲労試験は、温度 20 ± 3 °C に制御した室内において実施した。

(3) クリープ試験

クリープ試験は、最大荷重 10 ton 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、GFRP ロッドに対しては静的引張強度の 66.7% から 94.5% に設定し、AFRP ロッドに対しては 70% から 90%，CFRP ロッドに対しては 96.4% から 101.2% に設定した。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-2 に AFRP ロッドのクリープ試験結果の一例を示すが、同一載荷応力においてもクリープ破断持続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た。クリープ試験は、温度 20 ± 3 °C に制御した室内において実施した。

なお、疲労試験およびクリープ試験における FRP ロッドの破壊形状としては、縦割れ破壊、部分破壊によるチャック部(定着部)の抜け、チャック部(定着部)の応力集中による破断などがあったが、破壊形式にかかわらず破壊として扱った。

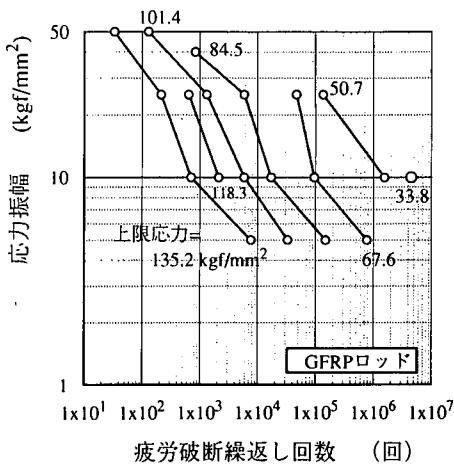


図-3 応力振幅と疲労繰返し回数の関係
(GFRP ロッド)

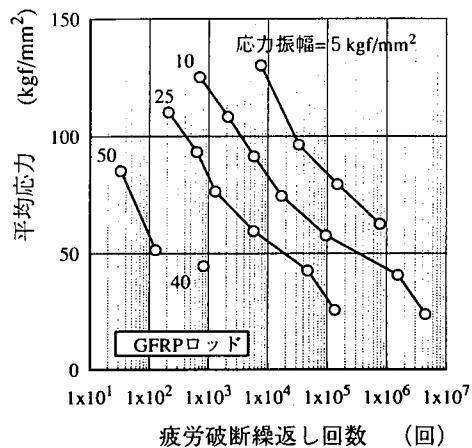


図-4 平均応力と疲労繰返し回数の関係
(GFRP ロッド)

チャック部(定着部)の応力集中による破断はほとんどなく、本実験で用いたチャックは静的引張試験だけでなく疲労試験やクリープ試験にも適用できるものと考えられる。

3. F R P ロッドの疲労破壊特性とその評価

G F R P ロッドの応力振幅と疲労破断繰返し回数の関係を図-3に示す。上限応力を静的引張強度(169 kgf/mm^2)の20% (33.8 kgf/mm^2)から80% (135.2 kgf/mm^2)まで10%ごとに設定し、各上限応力ごとに応力振幅を 5 kgf/mm^2 から 50 kgf/mm^2 に設定し疲労試験を行った。図中の数字は上限応力の値を示す。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ほぼ直線的に減少している。

図-4にG F R P ロッドの平均応力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。G F R P ロッドの場合、疲労試験における平均応力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。応力振幅が低減するに従い、平均応力の低減による疲労破断繰返し回数の増大する割合は大きくなっている。

ここで、応力比(静的引張強度に対する平均応力の比)が50%および70%の場合(平均応力が 84.5 kgf/mm^2 および 118.3 kgf/mm^2 の場合)の疲労破断繰返し回数を図-4から読み取り、この疲労破断繰返し回数と応力振幅の関係を図-5に示す。疲労試験時の応力振幅の増加とともに疲労破断繰返し回数は減少し、応力比が50%と70%では、1オーダー程度の疲

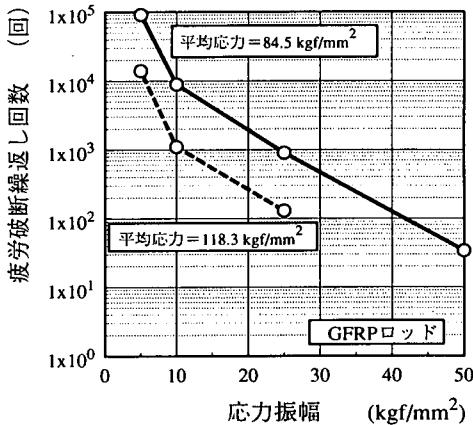


図-5 疲労特性に及ぼす応力振幅の影響
(GFRP ロッド)

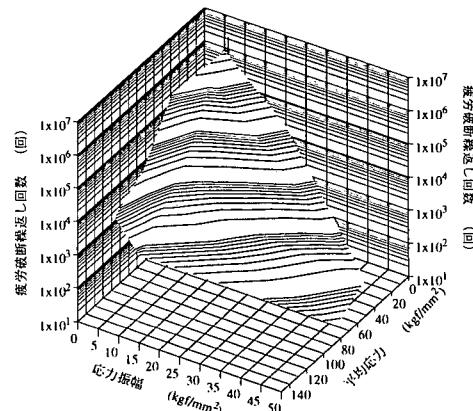


図-6 疲労特性に及ぼす応力振幅および平均応力の影響 (GFRP ロッド)

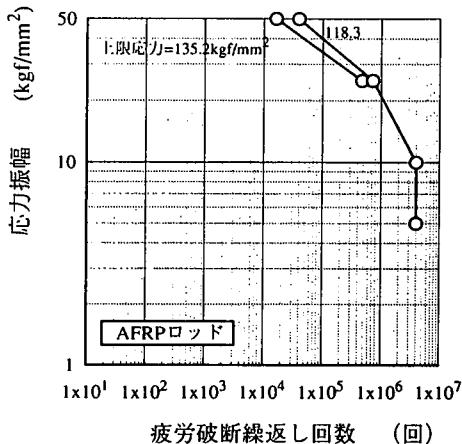


図-7 応力振幅と疲労繰返し回数の関係
(AFRP ロッド)

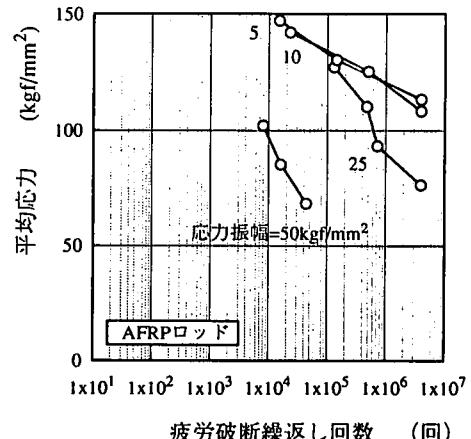


図-8 平均応力と疲労繰返し回数の関係
(AFRP ロッド)

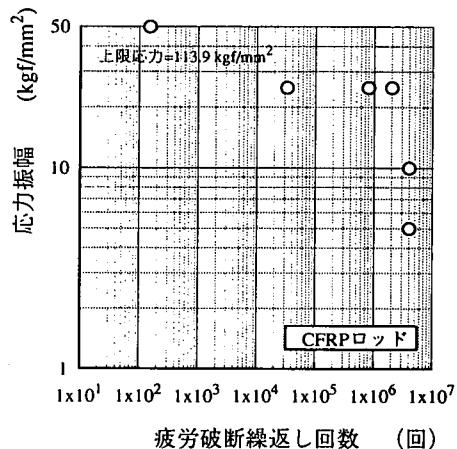


図-9 応力振幅と疲労繰返し回数の関係
(CFRP ロッド)

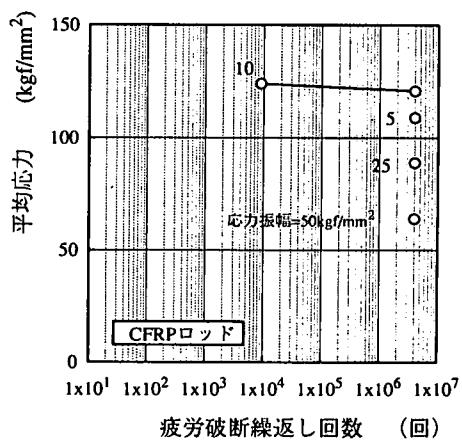


図-10 平均応力と疲労繰返し回数の関係
(CFRP ロッド)

労破断繰返し回数の差異が生じている。

GFRP ロッドの応力振幅および平均応力と疲労破断繰返し回数の関係を図-6 に示す。上述のように応力振幅および平均応力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することから、これら 3 者の関係はほぼ平面で表される。

図-7 に上限応力が 118.3 kgf/mm² および 135.2 kgf/mm² (応力比で 70% および 80%) の場合の AFRP ロッドの疲労破断繰返し回数に及ぼす応力振幅の影響を示す。上限応力を一定にした場合、応力振幅の低減とともに疲労破断繰返し回数は増加し、上限応力が 118.3 kgf/mm² (応力比で 70%) で応力振幅が 10 kgf/mm² 以下では 400 万回以上の疲労破断繰返し回数を示している。AFRP ロッドの場合の疲労破断繰返し回数と平均応力の関係を図-8 に示す。GFRP

ロッドと同様に、平均応力の増加や応力振幅の増加にともなって疲労破断繰返し回数はそれぞれ直線的に減少している。ただし、応力振幅が 10 kgf/mm² までと 25 kgf/mm² 以上とでは、疲労破断繰返し回数と平均応力の関係は異なる傾向を示している。応力振幅が 10 kgf/mm² までに比べ 25 kgf/mm² 以上では、平均応力の減少にともなう疲労破断繰返し回数の増加の割合が小さくなっている。さらに、応力振幅が 10 kgf/mm² までは応力振幅の影響はほとんど認められないが、25 kgf/mm² 以上では、応力振幅の増加とともに疲労破断繰返し回数は大きく減少している。

上限応力が 113.9 kgf/mm² (応力比で 85%) の場合の CFRP ロッドの応力振幅と疲労破断繰返し回数の関係を図-9 に、平均応力と疲労破断繰返し回数の関係を図-10 に示す。GFRP ロッドおよび AFRP

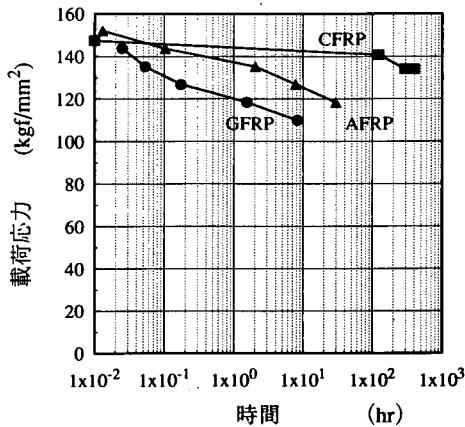


図-11 クリープ試験結果

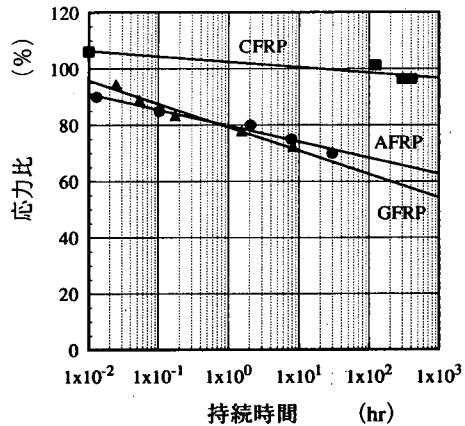


図-12 応力比と載荷持続時間の関係

P ロッドとは異なり、ほとんどの場合400万回以上の疲労破断繰り返し回数を示している。ただし、静的引張強度の場合と同様¹¹⁾、疲労試験の場合にも C F R P ロッドの破壊形状は多岐にわたっており、図-9 に示すように若干の応力の変化で疲労特性が異なる可能性がある。なお、疲労試験における F R P ロッドの破壊形状としては、箒状の完全破断、縦割れ破壊、部分破断によるチャック部(定着部)の抜け、チャック部(定着部)の応力集中による破断などであった。

4. F R P ロッドのクリープ破壊特性とその評価

図-11にクリープ試験における載荷応力と破断までの載荷持続時間との関係を示す。用いた繊維の種類によって、F R P ロッドのクリープ破壊特性は異なり、同一載荷応力において、C F R P ロッド、A F R P ロッド、G F R P ロッドの順に破断までの載荷持続時間は長くなっている。繊維自体の引張強度やクリープ破壊特性に、F R P ロッドのクリープ破壊特性は影響を受けると考えられるので、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図-12に示す。応力比で比較した場合、A F R P ロッドとG F R P ロッドはほぼ同様のクリープ破壊特性を示しているが、C F R P ロッドは、A F R P ロッドおよびG F R P ロッドに比べ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。C F R P ロッドの場合、静的引張強度の95%程度の応力を載荷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載荷持続時間と応力比との関係を求める以下のようにになる。

$$\sigma_{\text{applied}} / \sigma_{\text{tensile}}$$

$$= 79.2 - 8.29 \times \log T \quad \text{for GFRP ロッド} \quad (1)$$

$$= 79.8 - 5.67 \times \log T \quad \text{for AFRP ロッド} \quad (2)$$

$$= 102 - 1.91 \times \log T \quad \text{for CFRP ロッド} \quad (3)$$

ここで、 σ_{applied} : 載荷応力 (kgf/mm^2)

σ_{tensile} : 静的引張強度 (kgf/mm^2)

T : クリープ破断時間 (hr)

上式による予測値と実験値との相関係数は、

G F R P ロッドに対して -0.984

A F R P ロッドに対して -0.987

C F R P ロッドに対して -0.913

となり、各F R P 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F R P 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F R P ロッドの限界載荷応力を上式を用いて計算を行うと、

G F R P ロッドに対し

45.6 kgf/mm^2 (応力比で 30.0%)

A F R P ロッドに対し

77.9 kgf/mm^2 (応力比で 46.1%)

C F R P ロッドに対し

127 kgf/mm^2 (応力比で 91.1%)

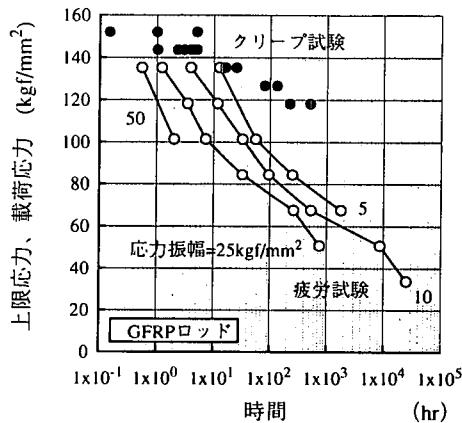


図-13 疲労試験結果とクリープ試験結果の関係
(GFRP ロッド)

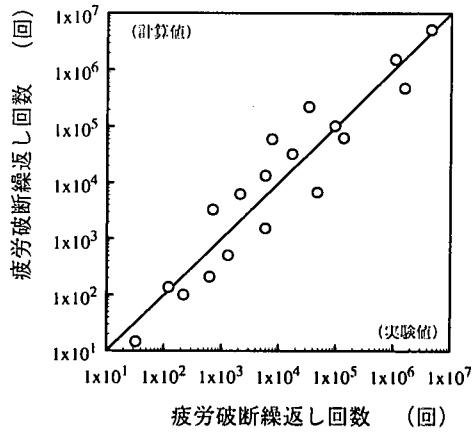


図-14 疲労破断繰返し回数の予測

となり、用いる繊維により、所要の供用期間における限界載荷応力(限界応力比)の値は大きく異なる結果となっている。

5. F R P ロッドの時間依存的特性の評価

G F R P ロッドのクリープ試験の載荷応力と載荷持続時間の関係を図-13の●印で示す。図中には疲労試験における上限応力と繰返し回数を周波数を用いて換算した時間(繰返し回数／周波数)との関係も同時に示す(図中○印)。クリープ試験においても、載荷応力の増加とともに破壊までの載荷持続時間は減少しているが、載荷応力の増大とともに載荷持続時間の減少量は疲労試験に比べ多くなっている。また、疲労試験の結果に比べ同一載荷応力(上限応力)において載荷持続時間が増大している。特に、応力振幅が大きい場合にその差は顕著となっている。すなわち、疲労破壊性状は、応力振幅が小さい程、クリープ破壊性状に近づいている。このことから、「3. F R P ロッドの疲労破壊特性とその評価」で述べた破壊は、持続荷重による損傷の累積と荷重の繰返しによる損傷の累積により生じたものと考えられ、疲労試験における応力振幅を低減させることにより、持続荷重による損傷の累積が破壊の支配的な要因になるとを考えられる。

「3. F R P ロッドの疲労破壊特性とその評価」における検討結果より、F R P ロッドの疲労破壊特性は平均応力、応力振幅および繰返し回数に影響を受けることから、疲労試験における繰返し回数と応力振幅および平均応力との関係を、実験的に以下のように仮定する。

$$\sigma_m \cdot \Delta \sigma = a \cdot N^b \quad (4)$$

ここで、
 σ_m : 平均応力 (kgf/mm^2)
 $\Delta \sigma$: 応力振幅 (kgf/mm^2)
 N : 繰り返し回数
 a, b : 定数

G F R P ロッドの実験結果を用い最小二乗法により定数を求めると、 $a = 4.83$, $b = -0.226$, 相関係数 $=-0.943$ となる。上式を用いた計算値と実験値との比較を図-14に示す。上式より求めた計算値と実験値が良い相関を示していることから、上式を用いることにより平均応力および応力振幅を考慮して繰り返し回数を推定できると考えられる。

A F R P ロッドのクリープ試験の載荷応力と載荷持続時間の関係を図-15および図-16の●印で示す。図-15中には疲労試験における上限応力と繰返し回数を周波数を用いて換算した時間(繰返し回数／周波数)との関係を、図-16中には疲労試験における平均応力と繰返し回数を周波数を用いて換算した時間(繰返し回数／周波数)との関係を同時に示す(両図中○印)。

A F R P ロッドの場合、疲労試験の結果に比べ同一載荷応力(上限応力)においてクリープ試験の持続時間は減少している。一方、平均応力で比較した場合、疲労試験における応力振幅が 10 kgf/mm^2 までは載荷応力(平均応力)と時間の関係はクリープ試験の場合とほぼ同じである。ただし、応力振幅が 25 kgf/mm^2 以上ではG F R P ロッドと同様に、載荷応力の増大とともに載荷持続時間の減少量はクリープ試験結果よりも少なくなっている。これらの破壊性状の差異は、繊維自身の破壊機構の差異に起因する可能性

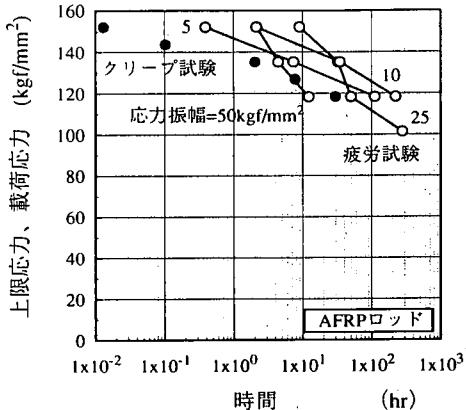


図-15 上限応力による疲労試験結果の評価
(AFRP ロッド)

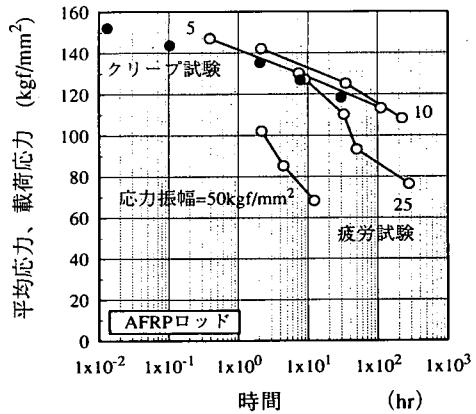


図-16 平均応力による疲労試験結果の評価
(AFRP ロッド)

もあり、さらなる検討が必要である¹⁵⁾。

C F R P ロッドのクリープ試験の載荷応力と載荷持続時間の関係を図-17の●印で示す。図中には疲労試験における上限応力と繰返し回数を周波数を用いて換算した時間(繰返し回数/周波数)との関係も同時に示す(図中○印)。C F R P ロッドの場合には、G F R P ロッドと同様に、疲労試験の結果に比べ同一載荷応力(上限応力)においてクリープ試験の載荷持続時間が増大している。ただし、疲労試験結果と同様に、クリープ試験におけるC F R P ロッドの破壊形状は「2. 実験概要」「(3) クリープ試験」で述べたように多岐にわたっており、若干の応力の変化でクリープ特性が大きく異なる可能性がある。全体的には、疲労試験結果よりクリープ試験結果の方が破断までに長い持続時間を示している。

6. 結論

ガラス繊維、アラミド繊維および炭素繊維を用いたF R P ロッドの疲労特性に及ぼす平均応力と応力振幅の影響およびクリープ破壊特性に及ぼす載荷応力の影響について、実験的に検討を加えるとともに、疲労破壊特性とクリープ破壊特性についてその評価を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) F R P ロッドの疲労およびクリープによる破壊形態が試験体により異なるため、同一応力をえた場合でも結果に大きなばらつきを生じる可能性がある。
- (2) F R P ロッドの疲労破壊断繰り返し回数は、疲労

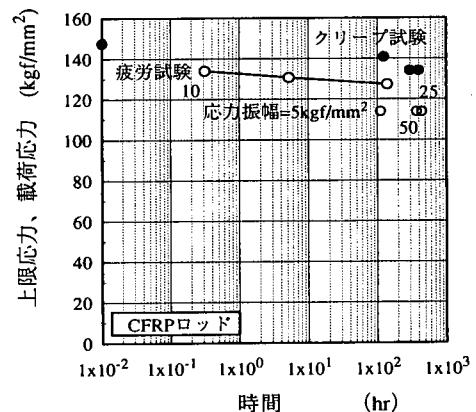


図-17 疲労試験結果とクリープ試験結果の関係
(CFRP ロッド)

試験における平均応力および応力振幅に影響を受ける。G F R P ロッドの場合、平均応力および応力振幅の増大にはほぼ比例して対数で表した疲労破断繰り返し回数は低下する。

(3) 平均応力および応力振幅を考慮した実験式を用いることにより、G F R P ロッドの疲労破断繰り返し回数を推定することができる。

(4) 対数で表したクリープによる破断時間は載荷応力の増大にはほぼ比例して減少する。

(5) クリープ試験における応力比と対数で表した持続載荷時間とはほぼ比例関係にあるが、用いる繊維の種類によってその傾きは異なる。

(6) クリープ試験における応力比と対数で表した持続載荷時間との比例関係を利用してF R P ロッドのクリープによる限界応力を推定することができる。

参考文献

- 1) たとえば、土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、コンクリート技術シリーズ1, 1992.4.
- 2) 魚本健人, 西村次男：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(1)－引張強度とバラツキー，生産研究, 第42卷, 第5号, 1990.5.
- 3) 魚本健人, ホッサム・ホドホド：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(2)－Behaviour of Fibers for FRP Rods Under Tensile Loading－, 生産研究, 第43卷, 第3号, 1991.3.
- 4) 魚本健人, 西村次男：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(3)－応力－ひずみ曲線－, 生産研究, 第43卷, 第5号, 1991.5.
- 5) ホッサム・ホドホド, 魚本健人：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(4)－モンテカルロ法を用いたCFRPロッドの理論強度の推定－, 生産研究, 第44卷, 第4号, 1992.4.
- 6) 魚本健人, 西村次男, ホッサム・ホドホド：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(5)－引張強度と試験本数－, 生産研究, 第44卷, 第8号, 1992.8.
- 7) 魚本健人, 西村次男, 宮崎太：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(6)－アルカリによる強度低下とバラツキー－, 生産研究, 第45卷, 第5号, 1993.5.
- 8) 魚本健人, 宮崎太：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(7)－アルカリによるガラス繊維劣化のモデル化－, 生産研究, 第45卷, 第9号, 1993.9.
- 9) 魚本健人, 西村次男：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(8)－FRPロッドの動的疲労特性－, 生産研究, 第46卷, 第1号, 1994.1.
- 10) 魚本健人, 大賀宏行, 西村次男：プレストレスコンクリート用FRP緊張材の特性(9)－GFRPロッドの疲労特性に及ぼす平均応力と応力振幅の影響－, 生産研究, 第46卷, 第6号, 1994.6.
- 11) 魚本健人, 西村次男：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, pp.77-86, 1993.8.
- 12) 小林一輔：繊維強化複合材料プレストレスコンクリート用緊張材の開発研究、昭和59年度科学的研究費(試験研究2)研究成果報告書, 1984.
- 13) 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.
- 14) 小林一輔, 趙力采, 西村次男：アラミッド繊維を用いたFRP緊張材の樹脂被覆が引張強度に及ぼす影響, 生産研究, 第41卷, 第4号, 1989.4.
- 15) Hodod, H. and Uomoto, T.: Size Effect for the Reinforcing Fibers of FRP Rods, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.14, No.1, pp.1155-1160, 1992.

(1997.3.21受付)

EVALUATION OF TIME-DEPENDENT PROPERTIES OF FIBER REINFORCED PLASTIC RODS

Taketo UOMOTO, Tsugio NISHIMURA, Toshinobu YAMAGUCHI
and Hiroyuki OHGA

As a fundamental study on applicability of fiber reinforced plastic rods (FRP rods) to prestressing tendons, fatigue and creep tests were performed for FRP rods using glass, aramid and carbon fibers, and the effect of mean stress, stress amplitude and applied stress on the fatigue and creep properties were investigated. A number of fatigue cycles to be ruptured was decreased with an increase in mean stress and stress amplitude for GFRP rods, and could be estimated using these parameters. Failure time due to creep is decreased with an increase in applied stress. The ratio of applied stress to tensile strength is in proportion to sustained time in logarithm, and the threshold value of applied stress in a service life could be estimated by the relationship.