

論文 FRP ロッドのクリープ破壊に関する基礎的研究

西村次男*1・魚本健人*2

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繊維強化プラスチックロッドのクリープ特性に着目し、各繊維ごとの変形特性及びクリープ破壊特性を明らかにすることを目的としたもので、土木学会の「連続繊維補強材のクリープ破壊試験方法（試案）」に準拠して実施した実験結果をまとめたものである。本研究の結果、載荷時間が1000時間を越えても破壊しないクリープ強度を近似直線から推定すると、AFRPロッドは約104kgf/mm²、GFRPロッドは約82kgf/mm²、CFRPロッドは約136kgf/mm²であることが明らかとなった。

キーワード：FRPロッド、クリープ破壊、変形特性、クリープ限界

1. はじめに

この数年来、新素材の一つであるFRPロッドは、高強度で耐食性に優れ、軽量でありまた非磁性体という特徴を有し、土木および建築分野において注目されている。これをプレストレストコンクリート用緊張材としてまたコンクリート構造物の補強材として、従来の鋼材の代替えとして用いるための研究が活発に進められている。また、土木学会の「連続繊維補強材のクリープ破壊試験（試案）」では¹⁾、100万時間後のクリープ破壊限界荷重比を求めることが検討されている。

筆者らは、各種FRPロッドの引張強度特性、応力-ひずみ曲線、引張強度と試験本数との関係、疲労強度に及ぼす応力振幅と平均応力の影響についてはすでに報告している^{2)、3)}。

本研究では、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、プレストレスト用緊張材として用いる場合の重要な特性であるクリープ特性に着目し、土木学会の試験方法（試案）に基づき、クリープ破断荷重（応力）を求めるとともに、変形特性が使用する繊維によってどのように異なっているのかを明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

実験に使用したFRPロッドの補強繊維は、表-1 載荷条件

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55%である。また、マトリックス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、試験本数は各条件とも10本以上行った。なお実験においてクリープ載荷時間は1000時間を上限として終了させた。また載荷条件は表1に示す。

AFRP(Vf=55%) σ=169kgf/mm ²		GFRP(Vf=55%) σ=152kgf/mm ²		CFRP(Vf=55%) σ=139kgf/mm ²	
応力比 (%)	応力 (kgf/mm ²)	応力比 (%)	応力 (kgf/mm ²)	応力比 (%)	応力 (kgf/mm ²)
90.0	152.1	94.5	143.7	106.0	147.4
85.0	143.7	88.9	135.2	101.2	140.7
80.0	135.2	83.4	126.8	96.4	134.0
75.0	126.8	77.8	118.3		
70.0	118.3	72.3	109.9		
65.0	109.9	66.7	101.4		

*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)

クリープ試験の試験片は長さ40cmに成形したAFRP、GFRP、CFRPロッドについて実験を行い、定着具は小林らが⁴⁾開発した2つ割りチャックを用いた。実験に使用した試験機は10tonサーボパルサ（荷重制御で試験を実施）を用い、クリープ荷重設定までの載荷速度は20~22kgf/secとした。変形特性を求めめるため普通ワイヤーストレインゲージ（長さ2mm）を用い、荷重載荷前にロッド中央部表面に貼付ただけでなく、クリープ荷重載荷開始直後に中央部表面に貼付し測定を行った。なお、試験は温度は $22 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で行った。

3. クリープ試験結果と考察

3. 1 載荷応力とクリープ載荷時間

図-1は、クリープ試験によって求めたAFRPロッド、GFRPロッドおよびCFRPロッドの載荷応力と、クリープ破断時間との関係を片対数で示したものである。横軸はクリープ破壊確率50%の破断時間の値を、縦軸に載荷応力を示した。

この図より、いずれのロッドにおいても載荷応力を低下させると応力の差はあるもの破断時間は直線的に増加する傾向となる。これらのロッドの回帰直線を求めると次のようになる。

$$\text{AFRP} : \sigma = 131.57 - 9.23 \text{Log}T \quad (r=0.99778)$$

$$\text{GFRP} : \sigma = 117.34 - 11.8 \text{Log}T \quad (r=0.98924)$$

$$\text{CFRP} : \sigma = 142.78 - 2.44 \text{Log}T \quad (r=0.90151)$$

[r: 相関係数]

載荷時間が1000時間のクリープ破壊強度を推定すると、AFRPロッドでは約104kgf/mm²以上、GFRPロッドでは約82kgf/mm²以上の応力でクリープ破断することが明らかとなった。一方、CFRPロッドは他のロッドとは異なり平均引張強度が低くバラツキも大きいためクリープ試験の設定を行うのが非常に困難であるにも関わらず、1000時間後のクリープ強度を推定すると約136kgf/mm²となりAFRPロッドよりも高いクリープ強度を有していることが分かった。

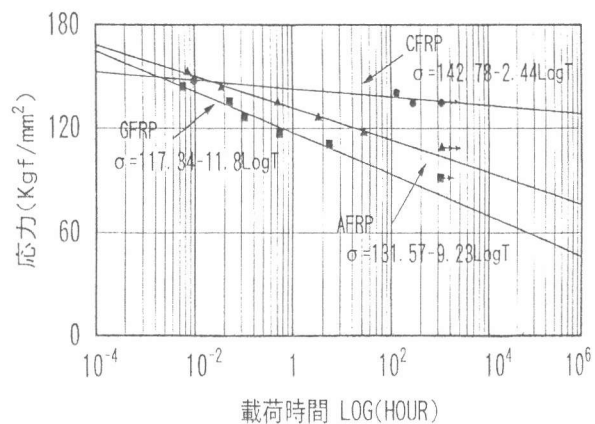


図-1 載荷応力とクリープ破断時間との関係

土木学会の「連続繊維補強材のクリープ試験

方法（試案）」によれば、クリープ破壊をしない限界応力が存在しないと仮定して求められた近似直線から100万時間（114年）後の応力を推定することが提案されている。この（試案）を本実験の結果に適用し、応力と載荷時間との関係から100万時間（約114年）後のクリープ破壊限界応力を推定すると、AFRPロッドは約76kgf/mm²（応力比45%）、GFRPロッドは約46kgf/mm²（応力比30%）、CFRPロッドは約130kgf/mm²（応力比93%）となる。

3. 2 クリープ破壊形式

一般に、FRPロッドでは繊維の破損、マトリックスの割れ、繊維とマトリックスの界面剥離または部分剥がれ、縦割れなど多くの破壊モードが存在し、条件によって異なった破壊が生じる。

本研究で行った各種FRPロッドのクリープ破断性状の一例を写真1-(a)、(b)、(c)に示す。写真1-(a)はAFRPロッド、(b)はGFRPロッド、(c)はCFRPロッドを

示したものである。

静的引張試験ではAFRPロッドおよびGFRPロッドは強度に関係なく定着部分の抜けと繊維破断が同時に生じるほぼ同様な破壊形式²⁾であったが、クリープ実験の結果、写真(a)のAFRPロッドは荷重時間の経過とともに瞬時にクリープ破断が生じ静的引張試験と同様な破壊形式を示した。しかし定着部分の抜け性状を観察すると定着部の付着が大きい場合には、ロッドの外側と内側で部分的な付着破壊が先行し、クリープ強度が低下することがある。このためクリープ強度を求める場合、定着具の影響をも考慮する必要があることが分かった。写真(b)のGFRPロッドは、AFRPロッドとは異なった破断性状がみられた。すなわちAFRPロッドと同じ荷重応力であっても、GFRPロッドは荷重時間の経過とともにロッドの一部分に小さな亀裂が段階的に発生し、これらが

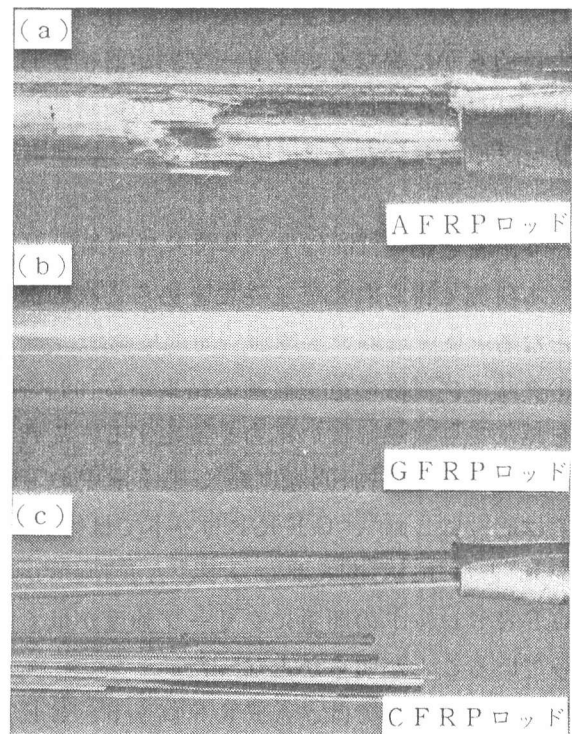


写真-1 各種FRPロッドの破断性状の一例

大きな亀裂となり破断すると同時に抜けによる破断となった。写真(c)のCFRPロッドは静的引張試験と同様にクリープ試験でも応力集中による定着部近傍での繊維破断と、繊維とマトリックスの界面破壊が主であった。これは、CFRPロッドの場合、繊維の伸び率が1%程度と小さく、定着部の応力集中による影響を受けやすいことが原因であると推定される⁵⁾。

3.3 クリープひずみと荷重時間

図-2~4は、各種FRPロッドの結果、クリープひずみと荷重時間との関係の一例を示したものである。これらの図から明らかなようにいずれのロッドも異なったクリープひずみ曲線を示していることが分かる。また、図-2のAFRPロッドおよび図-3のGFRPロッドは時間の経過とともにひずみが急激に増加している箇所がみられる。これはロッドに亀裂が生じたためロッドの有効断面積が減少して応力が増加し、それにともなってクリープひずみが急激に上昇したものと考えられる。

AFRPロッドは鋼材と同様な傾向、すなわち初期段階でクリープひずみが急激に増加する第1期、その後ひずみは時間とともに減少し一定となる第2期、破壊寸前になるとふたたびひずみが急激に増加し、クリープ破断にいたる第3期とに分けられることが明らかとなった。

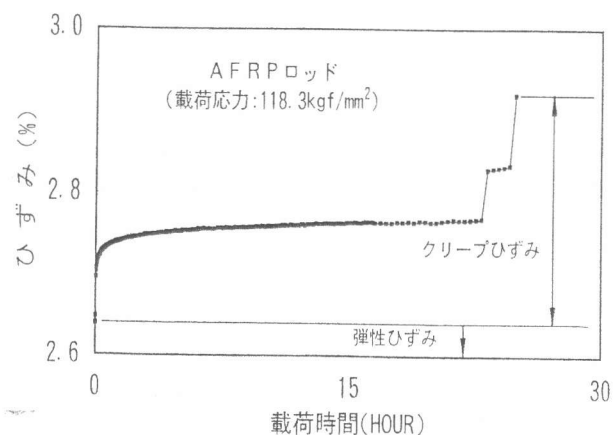


図-2 AFRPロッドのクリープひずみと荷重時間との関係

GFRPロッドはAFRPロッドとは異なり、クリープひずみは微小ではあるが一定の傾きを示しながら増加していることが分かる。また、亀裂が生じるごとにその勾配は増えクリープ破断にいたることが明らかとなった。一方、CFRP

ロッドはAFRPロッドおよびGFRPロッドとは明らかに異なり、クリープ開始直後からクリープひずみはほぼ一定となりその後瞬時にクリープ破断にいたることが分かる。

4. まとめ

本研究で得られたことをまとめると次の通りとなる。

- ①クリープ試験の近似直線の結果から1000時間を越えても破壊しない応力を推定すると、AFRPロッドでは約104kgf/mm²、GFRPロッドでは約82kgf/mm²、CFRPロッドでは約136kgf/mm²となり、CFRPロッド、AFRPロッド、GFRPロッドの順番にクリープ強度が低くなっていることが明らかとなった。
- ②本実験の範囲では、AFRPロッド、GFRPロッドおよびCFRPロッドの応力と荷重時間の関係は直線で近似することができる。
- ③破壊性状は、いずれのロッドにおいても基本的には静的引張強度とほぼ同様な破壊形式となり、定着具の影響を含めたクリープ特性の評価をする必要があると考えられる。
- ④クリープひずみ曲線は、AFRPロッド、GFRPロッド、CFRPロッドとも異なったものとなることが明らかとなった。

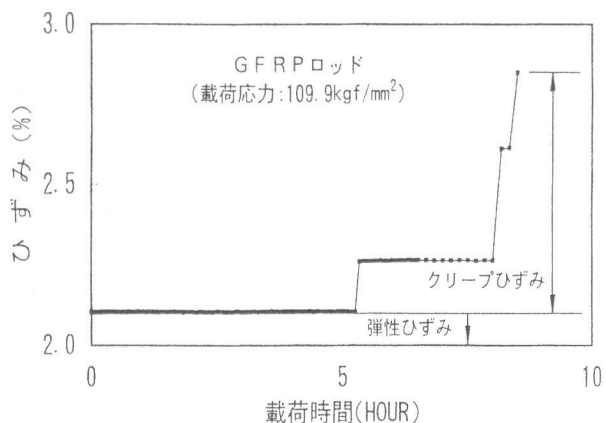


図-3 GFRPロッドのクリープひずみと荷重時間との関係

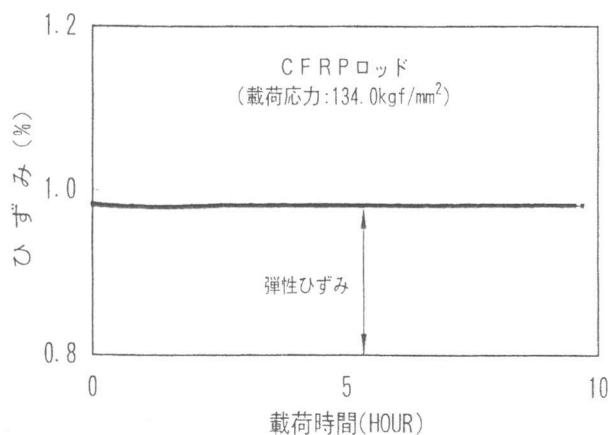


図-4 CFRPロッドのクリープひずみと荷重時間との関係

謝辞

本研究をまとめるのにあたり、実験に協力していただいた芝浦工業大学卒論生西井康人君に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 「連続繊維補強材のクリープ破壊試験(試案)」土木学会コンクリート委員会資料
- 2) 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
- 3) 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、平成6年9月
- 4) 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
- 5) H. HODHOD、T. UOMOTO: Effect of state of stress at the grips and matrix properties on tensile strength of FRP rods. 土木学会論文集 No. 451/V-17、pp. 245-253、1992. 8