

# 論文 繊維の損傷確率理論に基づく FRP ロッドのクリープ変形のモデル化

山口明伸\*1・加藤佳孝\*2・西村次男\*3・魚本健人\*4

**要旨：**著者らはこれまでに各種 FRP ロッドのクリープ特性について実験的な検討を行っている。しかし、その破壊機構には未だ不明な点が多く経験式が得られているに過ぎない。そこで本研究では、FRP ロッドに用いている繊維単体の時間依存性の破壊確率がワイブルの理論に基づき定式化可能であることを利用し、FRP ロッド内部の繊維全体の損傷度を考慮したクリープモデルの構築を試みた。その結果、特に AFRP については破壊までの経過時間を極めて精度良く推定できることが明かとなった。また、ロッドの実際の変形性状を定性的にはあるが表現できた。

**キーワード：**FRP ロッド、クリープ特性、ワイブル理論、繊維損傷度

## 1. はじめに

コンクリート用補強材として用いられる繊維補強プラスチック (FRP) ロッドは高強度、高耐食性、軽量、非磁性等の特徴を有することから、建設分野における適用性が高く、種々の検討がなされている。実構造物に適用する場合の重要な特性の一つに FRP ロッドの耐久性が挙げられ、著者らはこれまでに各種ロッドのクリープ特性、動的および静的疲労特性、リラクゼーション特性等について実験的な検討を行っている [1][2]。しかし、FRP ロッドは構成材料である繊維の強度のばらつきが大きく評価方法が難しいことや、特にクリープのような時間依存性の破壊機構に不明な点が多いこと等から、寿命予測や荷重低下率等の経験式を得るに留まっている。

FRP ロッドを緊張材として効率的かつ安全に利用するためには、動的および静的荷重載荷時におけるひずみや荷重等の経時的な変化を事前に推定し、その耐久性能を評価する必要がある。また、今後予想される様々な新繊維や複数の繊維を複合利用した新 FRP ロッドの開発 [3] に対しても、その耐久性能を定量的に評価する手法が必要となる。

そこで本研究では、FRP ロッドのクリープ破壊モデルを構築することを目的として、まず、FRP ロッドに使用されているアラミド繊維とガラス繊維の時間依存性破壊の特性を実験的に検討した。さらに、ワイブルの確率理論 [4] に基づくロッド内部の繊維の損傷度を考慮した時間依存型のクリープモデルの適用を試み、既往の実験結果との比較を行った。

## 2. 繊維の時間依存性破壊

### 2.1 実験概要と結果

実験に用いた繊維の材料特性と実験条件を表-1に示す。繊維の破壊実験は、台紙に張り付けた繊維のモノフィラメントに、分銅を用いて一定荷重を加える方法で行い、

表-1 材料特性と実験条件

	アラミド繊維	ガラス繊維
繊維直径 ( $\mu\text{m}$ )	12.15	12.77
平均強度 (MPa)	3577	3209
弾性係数 (GPa)	71	86
載荷応力比 (%)	73,79,87,93	70,80
試験本数 (本)	各30~40	各20

\*1 東京大学大学院 (正会員)

\*3 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助手 (正会員)

\*4 東京大学生産技術研究所教授、工博 (正会員)

繊維破断までの経過時間を AE センサーを利用して測定した(写真-1 参照)。載荷応力は、各繊維の静的引張試験における平均強度の 70~90% 程度の範囲である。なお、実験は室温(21±1℃)であり、各条件でそれぞれ繊維 20~40 本の試験を行った。

### 2.2 結果と考察

実験結果を、アラミド繊維とガラス繊維における各応力レベルの生存確率として図-1, 図-2 に示す。どちらの繊維の生存確率も載荷時間の対数に対して直線的に低下しており、両繊維の破壊が時間依存性の破壊機構を含んでいると考えられる。さらに、アラミド繊維の場合、載荷応力によってそれぞれ異なった確率直線を示しているのに対して、ガラス繊維の場合は載荷応力比が 70% と 80% の確率直線がほぼ一致していることが分かる。つまり、各繊維は時間依存性の破壊に対してそれぞれ特有の破壊機構を持っていると考えられる。一般にある材料にクリープ破壊が生じる場合、その破壊までに要する時間は載荷応力に依存すると考えられるため、アラミド繊維の場合はクリープ破壊を起こしている可能性が高い。しかし、ガラス繊維の場合は明らかに一般のクリープ破壊とは異なる特性を示しており、ガラスの破壊特性の一つである酸化による表面エネルギーの低下等による物理的性質の変化が生じている可能性がある[5]。

### 2.3 繊維の破壊時間推定方法

繊維の破壊を有限個の結合部分から成り立っている鎖の破壊として考えた場合、その強度はワイブル分布に従うことが分かっている[6]。同様に繊維全体の寿命は個々の結合部の寿命の最小値に一致すると考えると、下式のようなワイブル分布に従うと考えられる。

$$F(t) = 1 - \exp\{- (t/\alpha)^m\} \tag{1}$$

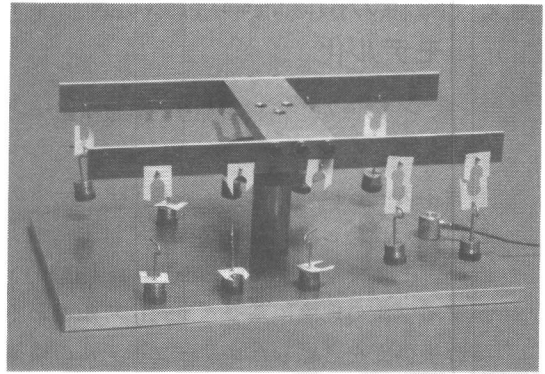


写真-1 試験台の外観

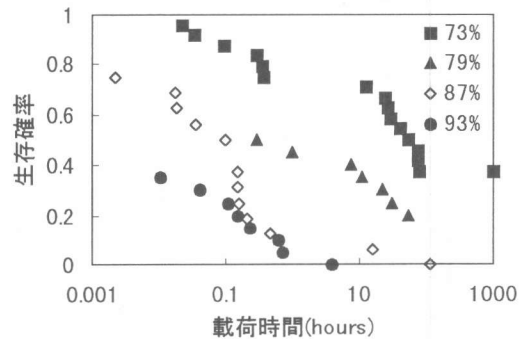


図-1 アラミド繊維の生存確率

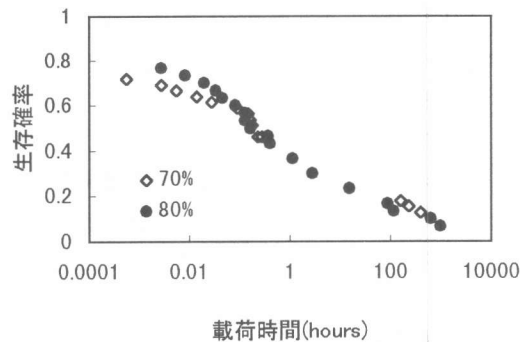


図-2 ガラス繊維の生存確率

ここで、 $F(t)$ は  $t$  時間後までに破壊する確率であり、 $\alpha$  および  $m$  はワイブル定数を示す。式(1)の両辺を2度対数をとり、

$$\ln(-\ln(1-F(t))) = m \ln(t) - m \ln(\alpha) \quad (2)$$

のような直線式に表すことにより、定数  $\alpha$  および  $m$  を求めることができる。式(2)を用いた各々の繊維の破壊確率を示したものが図-3、図-4 であり、全ての条件でほぼ直線となっていることから、繊維の時間依存性の破壊確率はほぼワイブル分布に従っていると言える。図-3 に示すアラミド繊維の場合は、図-4 のガラス繊維と異なり、载荷応力比が大きくなるに従って直線が左に移行しているのが分かる。これは、鎖の結合部数が増加していることを意味しており、アラミド繊維の場合は载荷応力によって繊維内部で破壊する可能性のある結合部数が増加することを示唆するものと考えられる。ここで、ある時間  $t$  で一つの結合部が破壊する確率  $f(t)$  を基準となる経過時間  $t_0$  (ここでは 1000 時間と設定) に対する比を用いて表すと、

$$f(t) = (t/t_0)^m \quad (3)$$

となり、このとき破壊の対象となる結合部数を  $n$  個とすると、

$$1 - F(t) = (1 - f(t))^n \quad (4)$$

が成り立つから、式(1)(3)(4)より、破壊する可能性のある結合部  $n$  は

$$n = (t_0/\alpha)^m \quad (5)$$

と表せる。両繊維の各载荷応力比におけるワイブル定数  $m$ 、 $\alpha$ 、ならびに対象結合部数  $n$  を表-2 に示す。また、载荷応力比に対する対象結合部数の変化を図-5 に示す。図のようにアラミド繊維は、载荷応力比 70%程度では対象結合部数

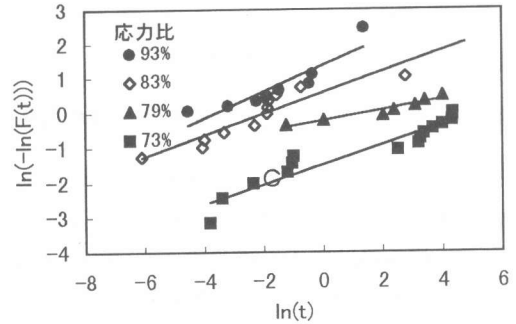


図-3 アラミド繊維のワイブル分布

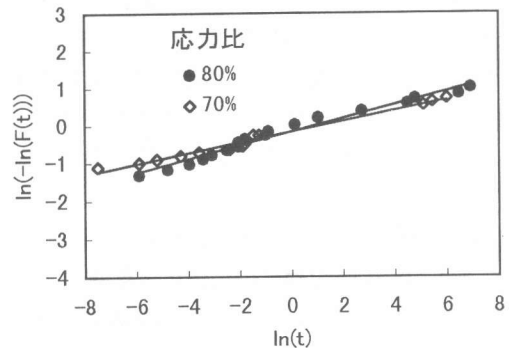


図-4 ガラス繊維のワイブル分布

表-2 ワイブル定数と対象結合部数

AFRP	$m$	$\alpha$	$n$
93%	0.38	0.03	3.89
87%	0.32	0.14	1.84
79%	0.15	0.20	1.28
73%	0.28	201.74	0.23
GFRP	$m$	$\alpha$	$n$
80%	0.18	2.56	0.84
70%	0.14	3.40	0.84

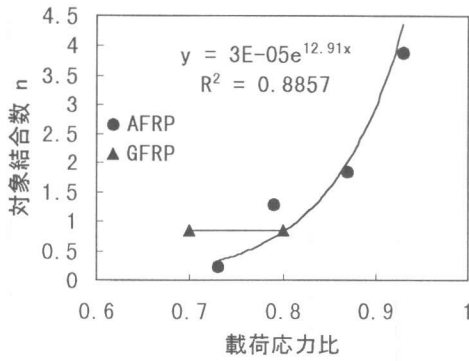


図-5 荷重応力比と対象結合部数の関係

がほぼ0であるが、その後急速に対象結合部数が増加していることが分かる。この傾向は、実際の繊維の試験で70%程度から1000時間経過しても破壊しない繊維がみられたこと、また、既往の研究によるAFRPロッドの平均持続時間が1000時間を越える荷重応力比が60~65%程度であること等とよく対応している[2]。従って、図-5中に示した近似式と式(5)を用いて、任意の応力比でのnおよび $\alpha$ を算出し、これを式(1)に代入することにより、

各応力比での荷重時間の経過に伴う繊維の生存確率が推定可能となる。生存確率の推定結果を図-6、図-7に示す。どちらの繊維の場合も実際の生存確率と推定結果はよく対応し、本手法により繊維の時間依存性の破壊特性を定量的に表現できたとと言える。

### 3. FRP ロッドのクリープモデル

#### 3.1 Curtinの繊維の損傷確率理論

Curtinらは、主に一方方向連続繊維によるセラミックス系複合材料、すなわちマトリックスと繊維の弾性係数 ( $E_m, E_f$ ) が  $E_m \geq E_f$  である複合材料について、繊維の損傷確率理論に基づくクリープモデルを提案している[7][8]。本研究では、この理論をFRPロッドに適用する事を試みた。以下にCurtinモデルの概要を簡単に説明する。

ある時刻  $t$  において、荷重された材料の任意の断面における全応力を  $\sigma_{com}(t)$  とすると、マトリックスの応力  $\sigma_m(t)$  と、断面内の全繊維が受け持つ応力の和  $\sigma_{f-total}(t)$  を用いて下式が成り立つ。

$$\sigma_{com}(t) = (1-f)\sigma_m(t) + \sigma_{f-total}(t) \quad (6)$$

$\sigma_{f-total}(t)$  は、未破断繊維が受け持つ引張応力だけでなく、破断した繊維とマトリックスの界面における、応力伝達長  $l_r$  内で生じるせん断応力  $\tau$  による短繊維補強効果も含む。Curtinは、(i)  $\pm l_r$  以内に二つ以上の破断箇所を持つ繊維の割合が比較的小さい、(ii) 繊維の破断に伴う応力集中がない、(iii) 繊維の引張強度のばらつきはワイブル分布に従う、の3つの仮定の下で以下のような関係式を導いている。

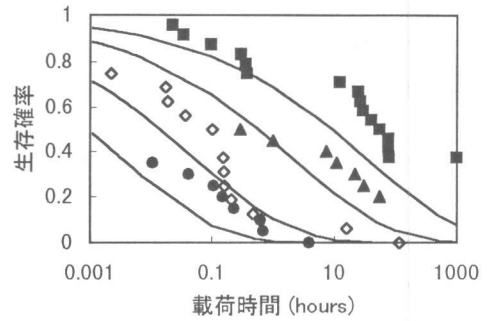


図-6 アラムド繊維の生存確率推定結果

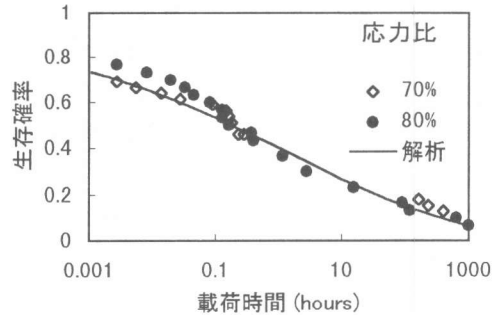


図-7 ガラス繊維の生存確率推定結果

$$\sigma_{f-total}(t) = (1 - (1/2)(\max \sigma_f(s) / \sigma_c)^{m+1}) f \sigma_f(t) \quad (7)$$

ここで、 $f$ は繊維混入率、 $\max \sigma_f(s)$ は $-\infty \leq s \leq t$ の範囲における未破断繊維の最大応力を表す。また、 $\sigma_c$ は繊維の最大強度であり、限界繊維長 $\delta_c$ のときの固有繊維強度である。

このモデルの利点は、確率理論に基づきロッド全体の応力から比較的容易に破断繊維と未破断繊維のそれぞれの応力分担を算出することができることにある。この Curtin モデルを FRP ロッドのクリープ解析への応用を試みた。

### 3.2 FRP ロッドへの適用

本研究で対象とする FRP ロッドは、繊維にアラミド (AFRP)、ガラス (GFRP) を用いた 2 種類のロッドである。マトリックスはすべてビニールエステル樹脂である。この 2 種類の繊維はそれぞれ特有の変形性状を持つと予想されるが、簡単のためにマトリックスと繊維をそれぞれ粘弾性体、弾性体と仮定し、さらに破壊時までの繊維とマトリックスの付着は完全であると仮定すると、任意の時間  $t$  におけるロッドのひずみは定数  $B$  を用いて下式によって表せる。

$$\varepsilon_{com}(t) = \sigma_f/E_f = \sigma_m/E_m + B \int (\sigma_m(s))^a ds \quad (8)$$

ここで、セラミックス系複合材料のような繊維とマトリックスの弾性係数の差が小さい場合、複合材料としてのクリープ変形は、粘弾性体であるマトリックスのリラクセーション特性に依存する。つまり、リラクゼーションにより低下したマトリックスの応力が間接的に繊維の応力を増加させるためである。一方 FRP ロッドのような構成材料の弾性係数に大きく差がある複合材料では、マトリックスの相対的な応力分担が極めて小さいために、Curtin モデルでは解析上クリープ変形もクリープ破壊も生じない。つまり、FRP ロッドのクリープ現象には上記の原因以外の要因が存在することになり、2. で明らかにした繊維単体における時間依存性の破壊特性がその一つであると考えられる。つまり、任意の载荷時間において、Curtin モデル上では未破断と判断される繊維の割合に対して、さらに繊維の時間依存性による破壊割合を考慮する必要がある。

そこで、2. に示した载荷応力比に依存するアラミド繊維の時間依存性の破壊特性を考慮して Curtin モデルを修正し、AFRP ロッドの破壊寿命と载荷応力比 80% におけるクリープ変形を推定した。その結果をそれぞれ図-8、図-9 に示す。図-8 に示した AFRP ロッドのクリープ寿命の推定結果は、既往の研究[2]における平均クリープ寿命と極めて良く一致しており、AFRP ロッドに対する本モデルの妥当性を示している。しかし、図-9 のクリープ変形に関しては、ひずみ量の推定値が実測値よりもかなり大きくなっているこ

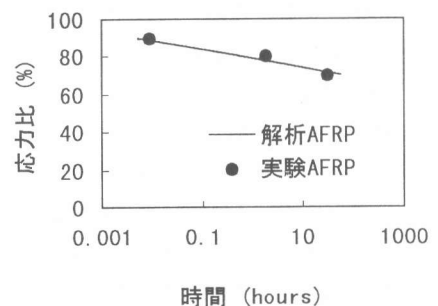


図-8 AFRP ロッドのクリープ寿命

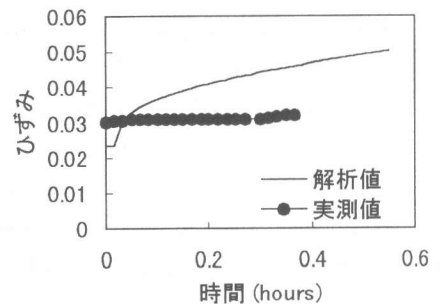


図-9 AFRP ロッドのクリープ変形

とが分かる。これは、セラミックス系複合材料と異なりマトリックスの弾性係数が非常に小さいために応力の伝達が不十分となり、破断繊維の周辺の未破断繊維に応力集中が起こっていること等が原因であると思われる。

また GFRP ロッドの場合、ガラス繊維の生存確率と载荷応力比との間に明確な関係が認められなかったため、本モデルを適用することができなかった。今後さらに実験を継続し、各種繊維に固有の破壊機構を明らかにすると共に、ロッド内部の局所的な変形および破壊特性を考慮したモデルを構築する必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究により以下のことが明かとなった。

(1) アラミド繊維、ガラス繊維は時間依存性の破壊を生じる。また、アラミド繊維の時間依存性の破壊確率は、载荷応力によって変化する破壊可能結合部の数  $n$  を算出することによって推定可能である。

(2) ロッド全体の損傷を考える Curtin の繊維損傷確率理論と繊維単体毎の時間依存性破壊確率に基づいて構築した FRP ロッドのクリープモデルにより、AFRP ロッドの変形性状およびクリープ寿命を推定することができた。特にクリープ寿命に関しては精度良く推定できることが確かめられた。

今後さらに、繊維およびロッドの破壊の諸要因を検討することにより各種 FRP ロッドのクリープ特性を評価することが可能であると考えられる。

**謝辞：**本研究費の一部は平成 8 年度科学研究費一般研究 A（課題番号 07405022、代表研究者：魚本健人）によるものであることを付記する。

#### [参考文献]

- [1] 魚本健人、西村次男：プレストレストコンクリート用 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 巻 1 号、pp.23-25、1994.1
- [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報告集、Vol.17、No.1、pp.547-550、1995.6
- [3] 魚本健人、西村次男、加藤佳孝：プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性(13)  
－耐アルカリ性を向上させた新 AGFRP 緊張材－、生産研究、第 48 巻 9 号、pp.457-460、1996.9
- [4] Weibull.W : A Statistical Distribution Function of Wide Applicability,  
Journal of Applied Mechanics, Vol.13, Sept.1951, pp.293-297
- [5] 横堀武夫：材料強度学、技報堂出版株式会社、1955.9
- [6] 山口明伸、西村次男、魚本健人：紫外線による各種繊維の劣化現象の評価方法に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.1161-1166、1996.6
- [7] Curtin.W.A : Theory of Mechanical Properties of Ceramic-Matrix Composites,  
J. Am. Ceram. Soc., Vol.74(11),pp.2837-45,1991
- [8] Fabeny.B and Curtin.W.A : Damage-enhanced Creep and Rupture in Fiber-reinforced Composites, Acta mater, Vol.44,No9,pp.3439-3415,1996