

論文 繊維の応力比を考慮したFRP ロッドのクリープ破壊モデル

山口明伸^{*1}・西村次男^{*2}・魚本健人^{*3}

要旨 : FRP ロッドの定量的なクリープ破壊モデルを構築することを目的として, まず, 主な FRP ロッド用各種繊維のクリープ破壊特性を実験的に検討するとともに, ワイブルの確率理論と破壊エネルギー理論に基づく定量的評価を試みた. ここで, 同じ強度分布をもつ繊維群ならば載荷応力とクリープ破壊確率から推定される引張強度により, 個々の繊維ごとの応力比が算出できることに着目し, これにより繊維固有の算出応力比とクリープ破壊時間の関係が決定できることを明らかにした. さらに, その関係式を FRP ロッドに拡張するために, まず繊維束のクリープ破壊モデルを構築することを試みた.

キーワード : FRP ロッド, クリープ破壊, 繊維の応力比, ワイブル理論

1. はじめに

FRP ロッドを実構造物に適用する場合の重要な特性の一つにFRP ロッドのクリープ特性が挙げられ, 著者らはこれまでに, 各種ロッドおよび繊維のクリープ特性について実験的研究を行い, その結果を報告している¹⁾. 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ため, その破壊機構には未だ不明な点が多い. 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クリープ破壊特性を定量的に評価することを試みた. さらに, その結果をFRP ロッドに拡張することによりFRP ロッドのクリープ破壊モデルを構築することを試み, 既往の実験結果との比較を行った.

2. 繊維のクリープ破壊特性の定量化

2.1 繊維のクリープ破壊

繊維の破壊試験から得られたアラミド繊維とガラス繊維の, クリープ破壊時間と載荷応力比の関係を図-1 に示す. ここで, 載荷応力比は各繊維

の静的な平均引張強度に対する持続載荷応力の比を表している. なお図中には, 各載荷応力比における個々の繊維の破壊時間に加えて, それらの平均的な破壊時間として繊維全体の破壊確率が50%となるときの持続時間も併せて示した. なお, 繊維長は25mmである.

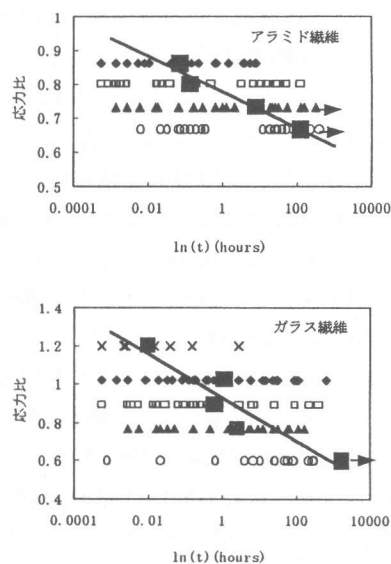


図-1 繊維のクリープ破壊

*1 東京大学大学院 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所技術官 (正会員)

*3 東京大学生産技術研究所教授, 工博 (正会員)

どちらの繊維の場合も、載荷応力比が小さくなるにしたがって載荷時間が長くなる傾向があり、定性的にはAFRP ロッド、GFRP ロッドのクリープ破壊曲線とほぼ同様の傾向を示しているものの、そのばらつきはFRP ロッドの場合と比べて極めて大きい。したがって、これらの繊維を使用したFRP ロッドのクリープ特性を評価するためには、繊維の破壊特性を定量的に評価する手法が必要となる。なお、炭素繊維の場合、載荷直後に破壊しなかった繊維は、全ての載荷応力比で試験期間中の破壊を生じなかった。

2.2 ワイブル理論による破壊時間の推定

前節の繊維のクリープ破壊時間を、ワイブルの理論に基づいて確率的に推定することを試みた²⁾。

繊維全体の寿命は個々の結合部が有する寿命の最小値に一致すると仮定すると、 t 時間後に繊維が破壊する確率は下式のように表せる。

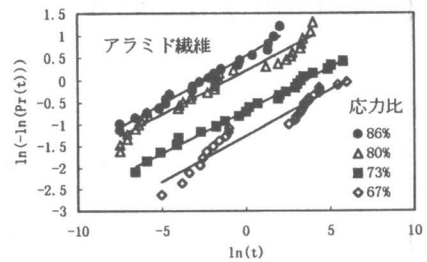
$$F(t) = 1 - \exp\{- (t/\alpha)^m\} \quad (1)$$

ここで、 $F(t)$ は繊維が t 時間後までに破壊する確率であり、 α および m はワイブル定数である。なお、 $F(t)$ は載荷応力で瞬時に破壊する繊維の破壊確率も含んだ、繊維の母集団全体に対する破壊確率である。(1)式の両辺の対数を2度とり、

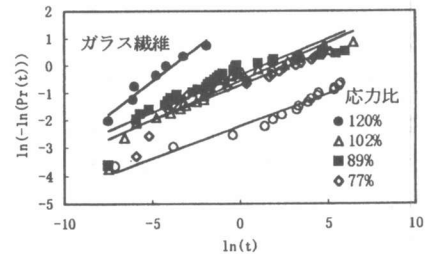
$$\ln(-\ln(1-F(t))) = m \ln(t) - m \ln(\alpha) \quad (2)$$

のような直線式に表すことにより、直線の傾きおよび y 切片から定数 α および m を求めることができる。(2)式を用いてアラミド繊維とガラス繊維の破壊確率を示したものが図-2であり、全ての条件でほぼ直線となっていることから、繊維のクリープ破壊確率はほぼワイブル分布に従っているといえる。これは、各繊維がそれぞれ固有の破壊エネルギーを持つと仮定すると、繊維内部に蓄えられるエネルギーの増加率が時間の関数であることを示しており、ある経過時間の破壊確率は、その時間までに蓄えられたエネルギーで破壊する確率と等しいことを意味する。ここで、 t 時間後に、ある一つの結合部が破壊する確率 $f(t)$ を、基準時間 t_0 （ここでは1000時間と設定）に対する比を用いて表すと、

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



a) アラミド繊維



b) ガラス繊維

図-2 クリープ破壊のワイブル分布

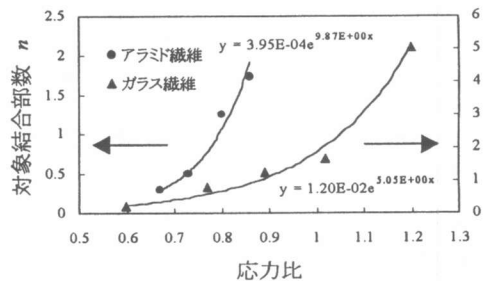


図-3 繊維の対象結合部数

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、 t 時間後に繊維が破壊しない確率は、

$$1 - F_{\text{fail}} = (1 - f(t))^n \quad (4)$$

となるから、(1), (3), (4)式より、 t 時間後に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。載荷応力比に対する対象結合部数 n の変化を図-3に示す。図から分かるように、応力比60%以下では対象結合部数 n がほぼ0であるが、載荷応力の増加に伴い対象結合部数が急激に増加している。これは、アラミド繊維やガラス繊維の時間依存破壊が載荷応力に大きく影響されていること示しており、この傾向は既往の研究によるAFRP、GFRP ロッドの平均持続時間が1000時

間を越える場合の载荷応力比が 60~65%程度であることと対応していると考えられる¹⁾。

これらの結果から得られた各繊維の载荷応力と対象結合部数 n の関係が、任意の応力状態で成立すると仮定すると、図-3 中に示した近似式と(5)式を用いて、任意の応力比での n および α を算出し、これを(1)式に代入することにより、ある一定応力下における繊維の生存確率の経時変化を推定できる。生存確率の推定結果を図-4 に示す。

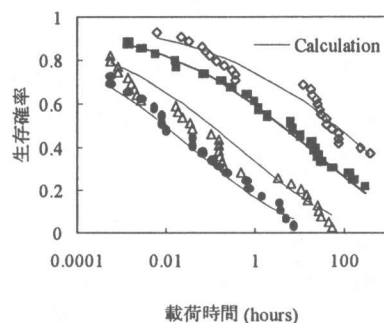
アラミド繊維、ガラス繊維のどちらの場合も、実験による生存確率と推定結果はよく対応しており、本手法により繊維単体のクリープ破壊特性を定量的に表現できるといえる。

(2) 個々の繊維の応力比と破壊時間の関係

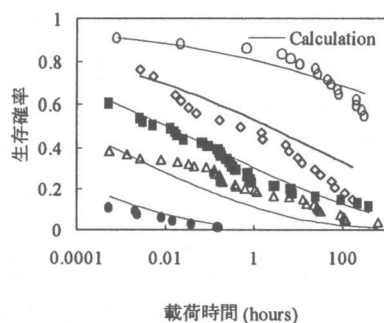
ワイブル理論に基づく繊維の生存確率は、任意の一定応力を载荷したときのその応力下における生存確率を示したものであるが、実際の FRP ロッドの破壊を考える上では、先に破壊した繊維等の存在により未破壊繊維にかかる応力は経時的に変化すると考えられる。そこで、応力の変化に伴う、生存確率の連続性を考えやすくするために、個々の繊維の応力比と破壊時間の関係についてより詳細に検討した。

繊維の平均応力比と破壊時間の関係については既に示したが、繊維の引張強度にはばらつきがあるため、一定の応力を载荷した場合、個々の繊維の応力比にも同様のばらつきが生じることになる。

ここで、全繊維の弾性係数が一定であり、繊維のクリープ破壊は個々の応力比の大きいものから生じると仮定すると、クリープ破壊確率と静的引張破壊確率が等しいとき、両繊維の引張強度は等しいと考えることができる(図-5 参照)。したがって、ワイブル理論によって求めたクリープ破壊確率を静的破壊確率へ変換することにより、クリープ破壊した個々の繊維の引張強度を推定し、その繊維の実質载荷応力比を算出することができる。図-6 にアラミド繊維とガラス繊維の実質応力比とクリープ破壊時間の関係を示す。図のように、いずれの繊維の場合も、繊維の破壊時間は载荷応力比が小さくなると時間の対数に対してほぼ直線



a) アラミド繊維



b) ガラス繊維

図-4 繊維の生存確率

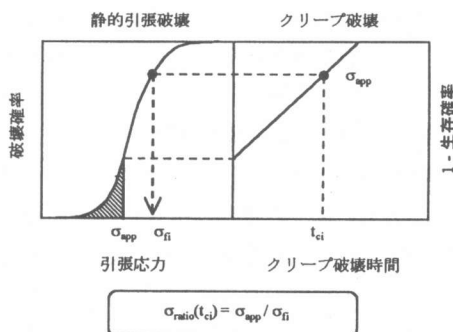


図-5 繊維の実質応力比算出方法

的に長くなっている。繊維のクリープ破壊時間は、载荷応力ではなく、各々の繊維の強度に応じた実質的な载荷応力比にしたがって変化することが明らかとなった。繊維の実質応力比とクリープ破壊時間との関係を最小二乗法により求めると下式のようなになる。

$$\text{アラミド: } \sigma_{\text{app}} / \sigma_{\text{fs}} = 0.776 - 0.023 \cdot \ln(t) \quad (6)$$

$$\text{ガラス: } \sigma_{\text{app}} / \sigma_{\text{fs}} = 0.831 - 0.022 \cdot \ln(t) \quad (7)$$

ここで、 σ_{fs} は個々の繊維の推定引張強度 (MPa)

である。なお、アラミド繊維に比べ、ガラス繊維の場合、若干のばらつきが生じているが、これは実際のガラス繊維の弾性係数にばらつきが大きいいため、個々の繊維の推定強度に誤差が生じるためであると考えられる。

3. FRPロッドのクリープモデル

3. 1 繊維のクリープ破壊特性式の拡張

FRP ロッドのクリープ破壊を考える場合、考慮しなければならない問題は、ロッドに使用する繊維の繊維長に応じた静的引張強度分布および弾性係数分布、繊維のひずみ速度、マトリックス樹脂の引張強度と弾性係数、マトリックス樹脂と繊維のせん断力、マトリックスの応力緩和など多くの要因があげられる。そこで、前章で得られた繊維の実質応力比とクリープ破壊時間の関係式を拡張しこれらの要因を考慮することにより、FRP ロッドのクリープ破壊モデルを構築することを試みた。その概念を図-7 に示す。

まず、繊維の弾性係数のばらつきに関しては前節で説明したとおり、繊維の弾性係数にばらつきがある場合は特性曲線もそれに応じたばらつきを持つ。つまり、弾性係数のばらつきが大きいほど太くなり、少ないほど細くなる。例えばアラミド繊維の場合とガラス繊維の場合を比べると、ガラス繊維の方が弾性係数のばらつきが大きいために曲線は太くなり、同一応力比におけるクリープ破断時間のばらつきも大きくなることになる。これは弾性係数が変われば、同じ応力を与えたとき弾性ひずみ量とクリープひずみ速度が変化するためである。次に、繊維の強度分布が変化する場合を考える。FRP ロッドにある程度以上の応力を与えると、繊維がその応力を分担することになるが、強度が分担応力よりも低い繊維はロッド内部で破断する。しかし、シェアラグ理論により破断した繊維もマトリックス樹脂との界面に働くせん断力によりある程度の応力をうけると考えられる³⁾(図8 参照)。

このせん断力を介することにより、破断した繊維もある程度の伝達長(臨界伝達長)を経た位置

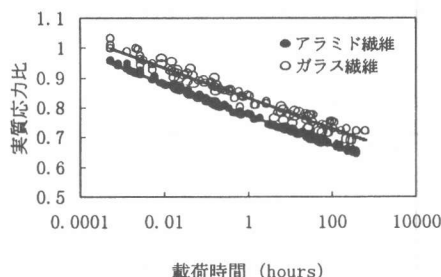


図-6 繊維の実質応力比と载荷時間の関係

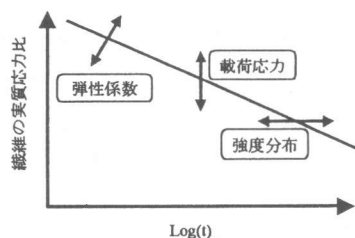


図-7 クリープ特性曲線の概念

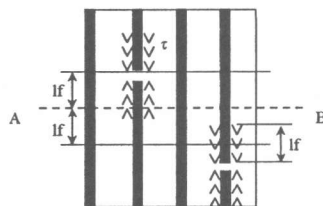


図-8 せん断力による破断繊維の寄与

では未破断繊維の分担応力まで回復し、その臨界伝達長さ以上の位置では破断していない繊維として扱うことができる。逆にいえば、ある断面における応力分布を考えた場合、その断面の応力状態に影響するのはその断面から臨界伝達長さだけ離れた部分までの範囲における繊維の状態のみとなる。この臨界伝達長さはマトリックス樹脂のせん断応力に依存するため、マトリックス樹脂にリラクセーションによる応力緩和が生じせん断力が低下した場合は、それに応じて臨界伝達長さは長くなる。伝達長の変化は繊維長の変化と同義であるから、繊維長の変化により繊維の強度分布が変化することになる。载荷応力が一定で強度のみが変化した場合、クリープひずみ速度は一定で繊維が破断する最大クリープひずみ量が変化する。し

たがって、強度が変化した繊維に対する曲線は時間軸に水平に移動することになる。

最後に、臨界伝達長の範囲内で繊維が破断した場合を考えると、未破断繊維の分担応力が増加するために载荷応力が変化する。このとき繊維の強度分布は一定のままと考えれば、個々の繊維は新しい分担応力に応じた応力比まで応力軸に平行に移動する。このとき、過去の応力比において蓄積されたひずみエネルギーは保存されたまま移動すると考えれば、過去の応力比におけるクリープ破断時間に対する時間の割合が等しい場所に移動することになる。

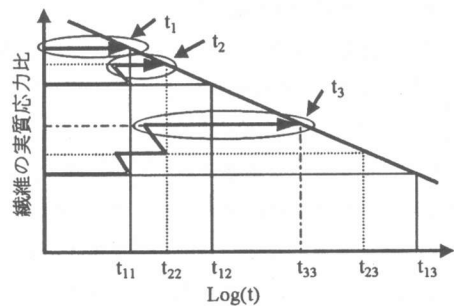
以上のように、繊維のクリープ破壊曲線を、クリープ開始時の繊維の初期条件、クリープ応力载荷中のロッド内の繊維の応力状態に応じて変動させることにより、FRP ロッドのクリープ破壊へ拡張することが可能であると考えられる。

3.2 繊維束のクリープ破壊

まず簡単のためにマトリックスが応力伝達を考慮しないときのある長さの繊維の束に一定荷重を与えた場合、つまり繊維束のクリープ破壊について考える。弾性係数がすべて等しいと仮定すると、全体にある応力を载荷した場合の各繊維の分担応力は等しくなる。繊維の強度は強度分布にしたがってばらついているから、繊維束の中で最も強度が低い繊維、つまり実質応力比が最も大きいものがまず破断する。その繊維が壊れることによりにより各繊維の分担応力が一律に増加するため、図-9に示したようにそれぞれ実質応力比が変化する。このとき、各繊維がそれまでの応力比で蓄えたひずみエネルギーを保持した状態で、高い実質応力比の座標に移動する（図-10 参照）。その後、次の繊維が破断する時間まで、各繊維はその実質応力レベルでエネルギーを蓄えることになる。強度の順番に繊維が破断する度に同一の作業を繰り返す、最後の繊維が破断するまでに要した時間が繊維束の破壊時間となる。

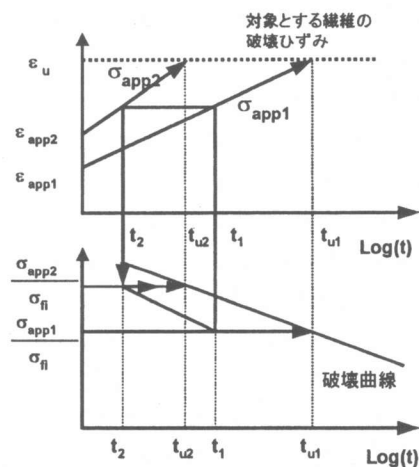
繊維 1000 本（繊維長：25mm）のアラミド繊維束とガラス繊維束における、推定破壊時間と実験による破壊時間とを比較した結果を図-11 および

図-12 に示す。



ロッドのクリープ破断時間 = $\sum t(I)$

図-9 ロッドのクリープ破壊時間の算出例



$$t_2 = \frac{t_1}{\sigma_{app1}} \times \left(\frac{\epsilon_u - \epsilon_{app1}}{\sigma_{app2} - \sigma_{app1}} \right) \times t_{u1}$$

図-10 破壊曲線上での移動概念

アラミド繊維の場合、载荷応力比 50% における実験値と解析値は極めて良く対応しており、解析による推定結果 1.14 時間に対して、実験値の平均クリープ破壊時間は 1.35 時間となっている。したがって、アラミド繊維束のクリープ破壊に関しては、本モデルの妥当性を示していると考えられる。

一方、ガラス繊維束の場合の実験結果における平均破壊時間は、载荷応力比 0.35 および 0.24 でそれぞれ 1.4 分と 14 分となっており、推定結果は定性的な破壊時間の傾向を表現しているものの、

いずれの場合も大きな違いが生じた。この原因としては、主に破壊曲線の誤差が考えられる。つまり、ガラス繊維のクリープひずみ量はアラミド繊維に比べて極めて少ないため、アラミド繊維に比べてクリープ破壊がほぼ瞬間的に生じる応力比の範囲が広く、クリープ破壊曲線の算出に際して、実際よりも静的破壊強度を小さく、すなわち実質応力比を大きく見積もっているためであると考えられる。これは、ガラス繊維の破壊がアラミド繊維よりも、応力比に敏感であることを示しているものと考えられる。したがってガラス繊維の場合は、どの程度までの応力比で瞬間的破壊からクリープ破壊に転じるかを明らかにする必要があり、そのための実験データの蓄積と検討を要すると考えられる。

3. 2 FRP ロッドへの拡張

以上の繊維束のクリープ破壊モデルをFRP ロッドに拡張するには、さらに本モデルにマトリックス樹脂の影響を考慮した、複合材料としての破壊モデルを構築する必要がある。そのためには図-8で示したような構成材料同士の直列および並列の影響を考える必要がある。

本研究では、主に構成材料ごとのクリープ特性を明らかにするとともに、繊維束の場合のクリープ破壊モデルを構築したが、今後繊維とマトリックス樹脂の間のせん断力や、断面方向の応力伝達速度等についての実験および解析的検討を行いその結果を本モデルに加味することにより、複合材料としてのFRP ロッドのクリープ破壊モデルを構築することが可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究により以下のことが明らかとなった。

- (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、これらの繊維のクリープ破壊確率は、応力比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) クリープ時間と繊維の生存確率を繊維全体の静的破壊確率に変換することにより、個々の繊維の実質応力比とクリープ破壊時間の関係式を求め

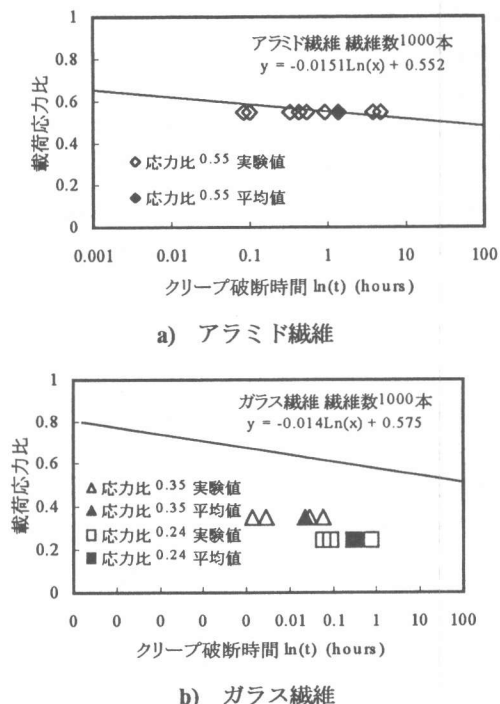


図-10 クリープ破壊時間の推定結果

ることが可能であり、これを弾性係数のばらつき、強度分布の変化、応力比の変化等の影響を考慮して拡張することにより、繊維束のクリープ破壊時間を推定することが可能である。

- (3) 今後さらに、マトリックス樹脂による伝達応力、せん断力および臨界伝達長の経時変化等を検討し、繊維の破壊曲線によるクリープ破壊モデルに導入することにより、FRP ロッドクリープ破壊モデルを構築することが可能であると考えられる。

謝辞 本研究を行うに当たりご協力頂いた、金田修一氏 (芝浦工業大学)、加藤佳孝氏 (東大生研・助手) に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 例えば、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
- [2] Weibull. W : A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, Vol.13, Sept.1951, pp.293-297
- [3] Curtin. W. A : Theory of Mechanical Properties of Ceramic-Matrix Composites, J. Am. Ceram. Soc., Vol.74(11), pp.2837-45, 1991