

論文 繊維の破壊確率に立脚した FRP ロッドのクリープ破壊シミュレーション

山口明伸^{*1}・西村次男^{*2}・魚本健人^{*3}・武若耕司^{*4}

要旨: 各種 FRP のクリープ破壊機構を定量的に解明し, その長期耐久性の評価手法を提案することを目的として, FRP の構成材料である繊維およびマトリックス樹脂の個々の特性を考慮した破壊確率理論に基づくクリープ破壊シミュレーションモデルの構築を試みた。シミュレーションは AFRP, GFRP, CFRP の 3 種類の FRP ロッドについて行い, 解析結果を実験データと比較することにより, 本モデルの妥当性を確認した。その結果, 本手法により各種 FRP の静的破壊およびクリープ破壊の定量的な評価が可能であることがわかった。

キーワード: クリープ破壊, FRP ロッド, 繊維, マトリックス樹脂, ワイブル理論

1. はじめに

繊維強化プラスチック (FRP) がコンクリート用補強・緊張材として注目されるようになって久しく, 現在では, これまでの各種研究成果や実施工への適用例に基づき, FRP を用いた建造物の設計・施工に関する基準類等についての整備が整いつつある¹⁾。しかし, 現状の長期耐久性に関する評価手法は, 経験則による定性的なものに留まっているため, その定量的な評価手法の確立が求められている。特に FRP の一定荷重下における時間依存的な破壊, いわゆるクリープ破壊は, 補強・緊張材における重大な問題の一つであり, その破壊機構の解明が必要である。

FRP のクリープ破壊は, 変形量が小さく, しかも加速期がないまま突然破壊に至ることが多く, クリープひずみからの破壊予知は極めて困難である。このような現象を理解するためには, 構成材料である繊維およびマトリックス樹脂の個々の特性を考慮した微視力学的モデルに基づく解析やシミュレーションによる検討が必要であると考えられる。

そこで本研究では, 既に報告した繊維および樹脂の変形・破壊特性を考慮した FRP のクリープ破壊シミュレーションモデルを構築することを試みた²⁾。また, AFRP (アラミド繊維), CFRP (炭素繊維), GFRP

(ガラス繊維) の 3 種類の FRP ロッドについて, シミュレーション結果と実現象の比較を行い, 本モデルの適用性を検討した。

2. FRP ロッドの静的破壊シミュレーション

2.1 解析モデルの概要

クリープ破壊モデルの構築に先立ち, まず, 静的破壊シミュレーションモデルの構築を試み, その妥当性を検討した。以下にその詳細を示す。

2.2 繊維の静的破壊確率

繊維の強度分布はワイブルの最弱環理論により下式に表せる³⁾。

$$P(\sigma) = 1 - (1 - (\sigma/\sigma_0)^m)^n \quad (1)$$

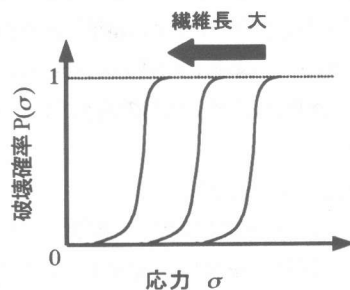


図-1 繊維の破壊確率

*1 鹿児島大学工学部 助手 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 技術官 (正会員)

*3 東京大学国際産・学共同研究センター 教授 工博 (正会員)

*4 鹿児島大学工学部 助教授 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)

$P(\sigma)$: 応力 σ の繊維の破壊確率, m : ワイブル係数,
 n : 繊維内環数, σ_0 : 固有強度

図-1は繊維強度分布の概念図を示したものであり、図のように、全体の強度分布は、繊維長が長くなるに従って低下することが分かっている。最弱環理論ではこれを繊維長の増加に伴う環の数 n の増加として表現している。つまり、繊維の強度分布は、有効繊維長 L_f によって変化することになる。

2.3 破断繊維の応力分担

マトリックスが存在する場合、シアラグ理論に基づき、破断繊維もマトリックス界面のせん断力によって応力を分担する⁴⁾。図-2に示すように、破断繊維の応力は破断位置から離れるに従って分担応力が大きくなり、臨界伝達長 L_f を超えると生存繊維と等しくなる。つまり、繊維が破断した場合、その影響は破断位置から距離 L_f 以内のみで生じる。言い換えれば、図-3に示すように、A-A'面をロッドの破壊面と考えた場合、ロッドの破壊に影響を及ぼすのはA-A'から L_f 以内のみとなる。また、 L_f 以内で破断した場合、繊維の破断位置によって、A-A'面における破断繊維の分担応力 σ_{fb} は、

$$0 < \sigma_{fb} < \sigma_f \quad (2)$$

の範囲でランダムに決定する⁴⁾。

2.4 応力分配機構

ロッド内部の繊維の配置を六角格子状と想定した場合、図-4に示すように、ある繊維が破壊すると、その破壊応力 σ_f は繊維とマトリックス樹脂の界面におけるせん断力を介して周囲の繊維に分配されると考える。ただし、破断繊維も界面のせん断力により応力 σ_{fb} を分担するため、周囲の繊維が受ける分配応力 σ_{fadd} は、

$$\sigma_{fadd} = (\sigma_f - \sigma_{fb}) / N_f \quad (3)$$

となる。ここで、 N_f は周囲の生存繊維数。なお、FRPの場合、一般的に繊維に比べてマトリックス樹脂の弾性係数が非常に小さいため、応力分配の可能範囲は破断繊維の周囲一層のみとした(図-5(a)参照)。

さらに、応力の分配等によって隣接する二つの繊維のひずみ差が限界量を超えると、その両者間の樹脂が界面の剥離を生じてせん断力が消失すると考えた。したがって周囲にせん断力が無い個所がある場

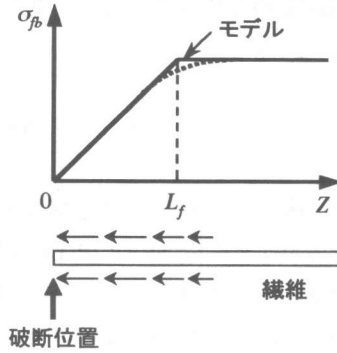


図-2 破断繊維の応力状態

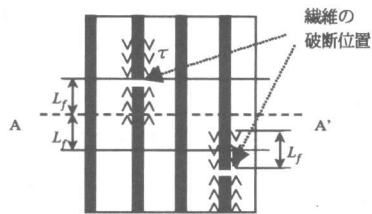


図-3 破断繊維の影響範囲

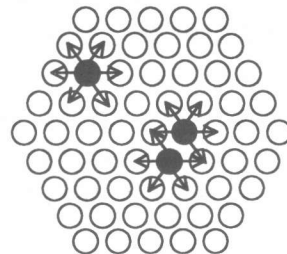
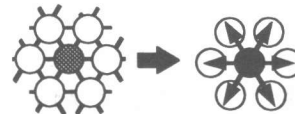
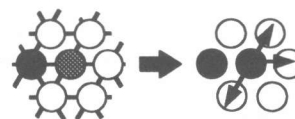


図-4 FRP ロッド断面モデル

- 生存繊維
- 破断繊維
- 応力分配前の破断繊維



(a) 界面の剥離なし



(b) 界面剥離部が存在

図-5 破断繊維の応力分配モデル

合、繊維破断時の応力分配の対象となるのは、せん断力と生存繊維の二つの条件を満たすことが条件となる(図-5(b)参照)。

2.5 生存繊維の強度変化

前節のように、生存繊維周囲のマトリックス樹脂が一部剥離あるいは降伏し、界面のせん断力が減少した場合、その繊維の臨界伝達長 L_f は大きくなると考えられる(図-6参照)。本モデルの場合、各繊維の周囲に六つの界面が存在すると考えるため、有効界面数を I_{mf} とすれば臨界伝達長 L_f' は、

$$L_f' = (6/I_{mf}) \cdot L_f \quad (4)$$

となり、それに伴って繊維強度 σ_{fu}' は、

$$\sigma_{fu}' = (L_f'/L_f)^{1/m} \cdot \sigma_{fu} = (6/I_{mf})^{1/m} \cdot \sigma_{fu} \quad (5)$$

となる。有効界面数が0の場合は、繊維がロッドから抜け落ちたものと見なし、繊維強度も0とした。なお、破断繊維の分担応力 σ_{fb} もせん断力に依存しているため、

$$\sigma_{fb} = (L_f/L_f') \cdot \sigma_{fb} = (I_{mf}/6) \cdot \sigma_{fb} \quad (6)$$

となる。

2.6 結果と考察

以上の各要因を考慮した、各種FRPロッド(緒元表-1参照)についての静的破壊シミュレーション結果を図-7に示す。なお、界面剥離条件の検討のために、界面剥離が起きる際の隣接する繊維間の限界ひずみ差として、3種類の条件でそれぞれシミュレーションを行った。各シミュレーション結果の最大値と

実験平均値の比較から、CFRPロッドの場合、最終的な破壊に至る前にロッド内部である程度界面の剥離が生じ、限界ひずみ差が小さい可能性が高く、逆にGFRPロッドの場合、ほとんど界面の剥離を生じないまま破壊に至る(限界ひずみ差が大)ことが予想できる。また、AFRPおよびCFRPロッドの場合、今回の界面剥離条件だけでは実測値との破壊強度の

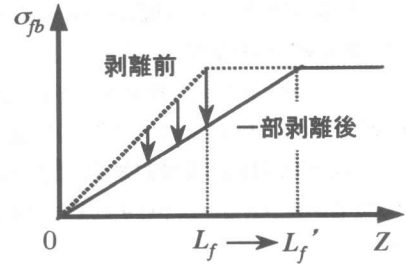


図-6 界面剥離に伴う臨界伝達長の変化

表-1 各種FRPロッドと繊維の緒元

	AFRP	GFRP	CFRP
平均引張強度 (MPa)	1656	1656	1313
弾性係数 (GPa)	44.8	51.1	132.6
直径 (mm)	6		
繊維混入率	0.55		
繊維の種類	アラミド繊維	ガラス繊維	炭素繊維
直径 (μm)	12.15	12.18	6.68
平均引張強度 (MPa)	3810	2540	3230
弾性係数 (GPa)	81.9	83.8	22.3
ワイブル係数 m	14	4.97	6.58
臨界伝達長 (μm)	600	410	345

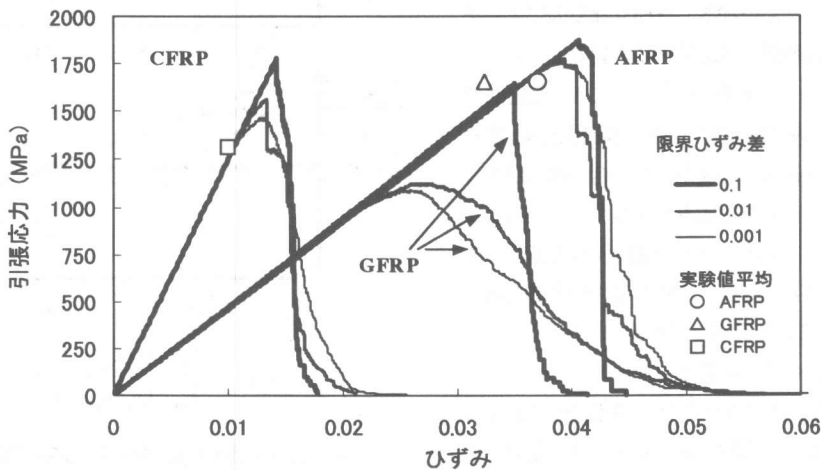


図-7 各種FRPの静的破壊のシミュレーション結果

整合がやや低い。これは、本モデルにおいて、界面の破壊が連結し広範囲の繊維がまとめて抜ける現象を加味していないためと考えられる。しかしながら、いずれのFRP ロッドの場合も、実際と同様に脆性的な破壊現象を表現できており、また破壊応力や破壊ひずみ等の整合性も比較的高く、本モデルの妥当性を示していると考えられる。

3. FRP ロッドのクリープ破壊シミュレーション

3.1 解析モデルの概要

クリープ破壊モデルは、静的破壊モデルと同様の諸要因に加えて、繊維におけるクリープ現象とマトリックス樹脂の応力緩和現象が並列に進行する影響を考慮する必要がある。以下にそれぞれの考え方を示す。

3.2 繊維のクリープ破壊確率

ガラス繊維とアラミド繊維は、単体でクリープ破壊を生じ、そのクリープ破壊特性はワイブル理論を拡張することにより定量的に表現することが可能であることは既に報告した⁵⁾。また、両繊維の静的強度試験における破壊確率分布とクリープ試験における破壊確率分布を連結させることにより算出した、繊維の実質応力比とクリープ破壊時間の関係より、繊維のクリープ破壊時間は、応力比ではなく実質応力比によって線形に変化することを明らかにした(図-8および図-9参照)。

一方、繊維単体の試験とは異なり、FRP ロッド内部の各繊維は、前章で検討した様々な要因によりその分担応力と繊維強度が経時的に変動する。従って、上記の繊維のクリープ特性を基に、応力と強度が連続的に変化する際のクリープ破壊時間を算出する。

まず繊維の分担応力が変化した場合、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、新しい応力のクリープ速度曲線と新しい実質応力比に対応したクリープ時間に移動する(図-10参照)。従って、分担応力が大きくなるとクリープ破壊時間が早まることになる。

次に、臨界伝達長の変化に伴い繊維の強度が変化した場合、クリープ速度曲線は変化しないため、クリープ時間を維持したままで、新しい実質応力比に

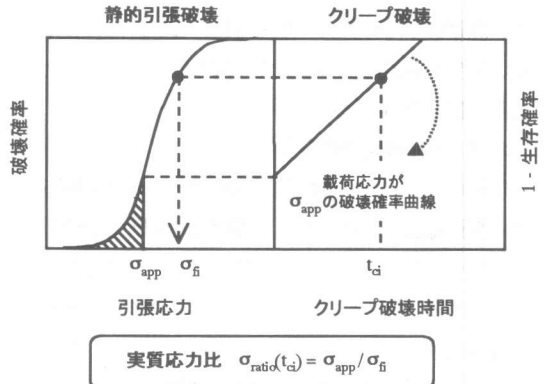


図-8 繊維の実質応力比算出方法

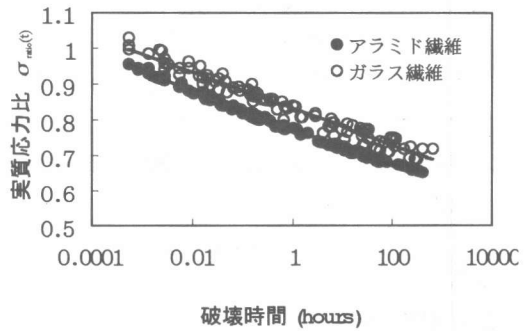


図-9 繊維の実質応力比と荷重時間の関係

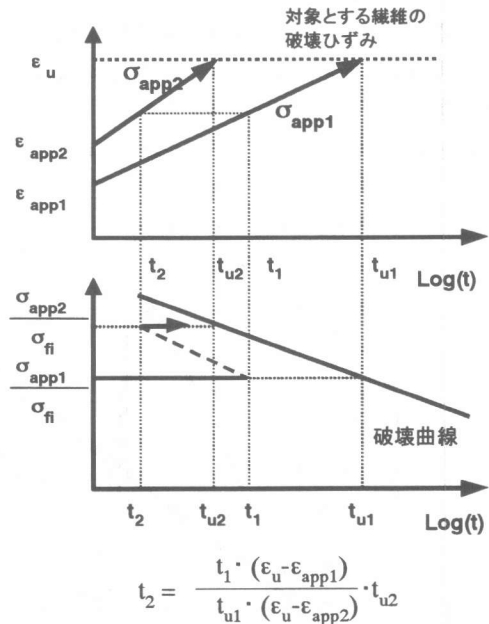


図-10 応力変化後のクリープ破壊時間

$$t_2 = \frac{t_1 \cdot (\epsilon_u - \epsilon_{app1})}{t_{u1} \cdot (\epsilon_u - \epsilon_{app2})} \cdot t_{u2}$$

移動する。従って、強度が低下するとクリープ破壊時間が早まることになる（図-11 参照）。

以上のように、強度あるいは応力の変化によってクリープ破壊時間を再設定し、クリープ破壊曲線に到達するまでの時間がクリープ破壊時間とすることができる。

3.3 マトリックス樹脂の応力緩和

マトリックス樹脂は繊維に比べてクリープひずみが大きいので、FRP ロッド内では逆に応力緩和現象が生じる。すなわち、破断繊維に作用する界面せん断力の緩和により破断繊維の分担応力が減少すると共に、臨界伝達長の増加に伴う生存繊維の強度低下が生じ、結果的にロッド全体のクリープ破壊を誘発することになる。

マトリックスの応力緩和は、樹脂のクリープ試験結果を基に、マトリックスの弾性係数が経時的に低下すると想定して表現した。

樹脂のクリープひずみを ε_{mc} 、弾性ひずみを ε_m とすると、

$$\sigma_m = E_{mc} \cdot (\varepsilon_m + \varepsilon_{mc}) = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (7)$$

$$E_{mc} = E_m \cdot \varepsilon_m / (\varepsilon_m + \varepsilon_{mc}) \quad (7')$$

ここで、界面が剥離していなければ、マトリックスと繊維のひずみは等しいと仮定すれば、 t 時間後の各繊維の臨界伝達長 L_f' は、

$$L_f' = (1 + (\varepsilon_{mc} / \varepsilon_f)) \cdot L_f \quad (8)$$

となる。それに伴って繊維強度 σ_{fu}' は、

$$\begin{aligned} \sigma_{fu}' &= (L_f' / L_f)^{1/m} \cdot \sigma_{fu} \\ &= (1 + (\varepsilon_{mc} / \varepsilon_f))^{1/m} \cdot \sigma_{fu} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。なお、破断繊維の分担応力 σ_{fb} もせん断力に依存しているため、

$$\begin{aligned} \sigma_{fb} &= (L_f / L_f') \cdot \sigma_{fb} \\ &= (\varepsilon_f / (\varepsilon_{mc} + \varepsilon_f)) \cdot \sigma_{fb} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

3.4 結果と考察

以上の要因を考慮した、FRP ロッドのクリープ破壊シミュレーション結果を図-12、図-13 に示す。各条件におけるクリープ破壊時間が、ほぼ実現象に即した結果が得られており、本モデルの妥当性が確認できた。ここで、AFRP ロッドのクリープ破壊時間は、応力比との関係については非常に良い結果を

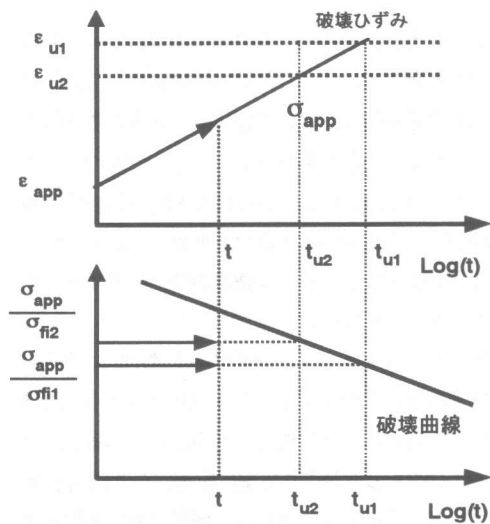


図-11 強度変化後のクリープ破壊時間

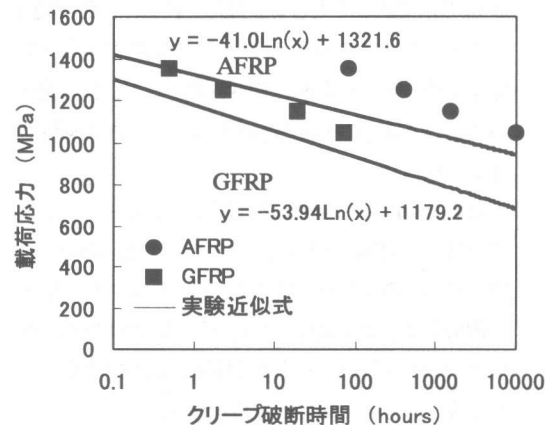


図-12 載荷応力と破壊時間の関係

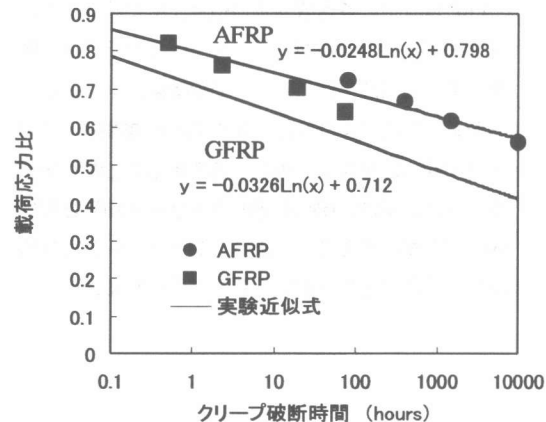


図-13 応力比と破壊時間の関係

示しているが、載荷応力との関係については、やや整合性が落ちている。これは前述のように、静的強度におけるモデルについて修正すべき点が残されていることによると考えられる。また、GFRP ロッドのクリープ破壊時間は、載荷応力と応力比の二つの関係どちらも同程度の実験値とのずれが認められ、本モデルにおける一般的な破壊条件に修正すべき点があると考えられる。

図-14 に AFRP と GFRP の場合における、クリープひずみと時間の関係を示す。FRP のクリープに特徴的な階段状のひずみ増加が再現されているだけでなく、GFRP の方がより急激に破壊に至る傾向も現れている。この若干の違いは、繊維における臨界伝達長と強度の関係の違い、即ち両繊維のワイブル係数 m の差によって生じると考えられる。また、実際の AFRP ロッドの場合は、アラミド繊維のクリープによる曲線的なひずみの増加が認められるが、現段階においてはその影響を加味しなかったため表現できていない。

なお、CFRP ロッドの場合は、シミュレーション上でクリープ破壊に至らなかった。これは、実験における CFRP のクリープ破壊が、他のロッドのクリープ破壊形式とは異なり、チャック部における断面方向の変形やそれに伴う応力集中等が原因であることを示唆するものであると考えられる。

4. まとめ

FRP ロッドの各構成要素の相互作用を考慮した、複合材料としての破壊シミュレーションモデルを構築しその妥当性を検討した。その結果、本シミュレーション手法により各種 FRP の静的破壊およびクリープ破壊の定量的な評価が可能であることがわかった。今後、繊維と樹脂の界面の力学的挙動等を実験的に明らかにすることにより、シミュレーション精度を向上させることができると考えられる。

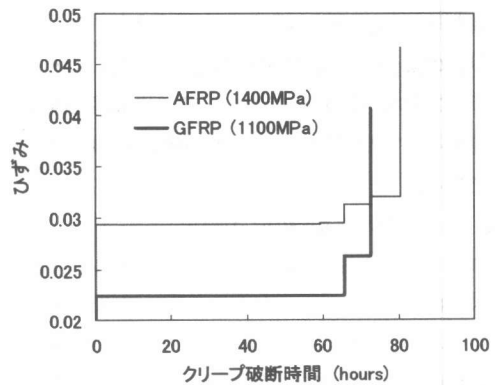


図-14 クリープひずみと時間の関係

謝辞：本シミュレーションモデルを構築するにあたり、用皆大輔君（鹿児島大学4年）の協力を得ました。感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 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，コンクリートライブラリー72号，1992.4
- 2) 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
- 3) Weibull. W : A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, Vol.13, Sept.1951, pp.293-297
- 4) Curtin. W. A : Theory of Mechanical Properties of Ceramic-Matrix Composites, J. Am. Ceram. Soc., Vol.74(11),pp.2837-45,1991
- 5) 山口明伸，西村次男，魚本健人：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.271-276，1998