

プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (14)

—繊維の損傷確率理論による FRP ロッドのクリープ特性のモデル化—

Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete (14)
—The Statistical Model for Creep Property of FRP Rods—

山口 明 伸*・西村 次 男*・加藤 佳 孝*・魚 本 健 人*
Toshinobu YAMAGUCHI, Tsugio NISHIMURA, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

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、建設分野における利用の可能性が高く、種々の検討が成されている。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)~3)}。しかし、これら載荷条件下の FRP ロッドの破壊メカニズムにはまだ不明な点も多く、実験により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実際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歪みや荷重等の経時的な変化を推定し、その耐久性能を評価できることが望ましい。さらに、今後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⁴⁾も予想され、それらの種々の材料や載荷条件下におけるロッド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として、ワイブルの確率理論⁵⁾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、実験結果との比較を行った。

2. Curtin の繊維の損傷確率理論

Curtin らは、一方向連続繊維によるセラミックス系複合材料、すなわち $E_m \leq E_f$ 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⁶⁾。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 の確率理論の概要を説明する。

*東京大学生産技術研究所 第5部

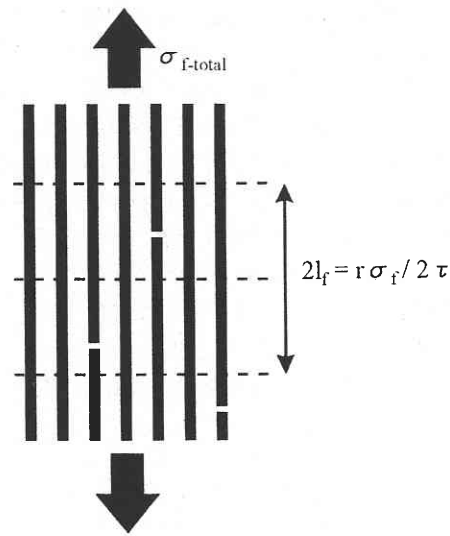


図1 破断繊維と未破断繊維の概要

載荷された材料の任意の断面における全応力 $\sigma_{com}(t)$ は、マトリックスの応力と、断面内の全繊維が受け持つ応力の和 $\sigma_{f-total}(t)$ を用いると複合則により下式のようなになる。

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

$\sigma_{f-total}(t)$ 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生じるせん断応力 τ による短繊維補強効果も含む。このとき界面のせん断応力によって伝達される破断繊維の引張応力は $0 \sim \sigma_f$ の範囲に存在するが、破断繊維の応力が未破断繊維の応力と等しくなるために必要なせん断力の伝達長さを l_f とすれば、 $\pm l_f = r \sigma_f / 2 \tau$ が成り立つ (図1参照)。従って、 $\sigma_{f-total}(t)$ は、少なくとも $\pm l_f$ 以内に破断のない繊維の応力と、 $\pm l_f$ 以内に破断した繊維の応力の総和であり、

$$\sigma_{f-total} = f((1-q) \sigma_f + (2\tau/r) \langle L \rangle q) \quad (2)$$

となる。ここで、 f は繊維混入率、 $\langle L \rangle$ は破断繊維長の平均、 q は全繊維量に対する破断繊維量の比を示す。

Curtin は、ある断面から $\pm l_f$ の範囲に 2 つ以上の破断箇所をもつ繊維の割合が十分に小さい場合、破断繊維近辺に応力集中は生じないものとし、かつ繊維の強度分布は Weibull 分布で表現できることから $\Phi(L, \sigma)$ を利用して、任意の時間 t における繊維の損傷確率考慮した繊維全体の受け持つ応力を下式のように導いている。

$$\sigma_{f-total}(t) \doteq (1 - (1/2)(\max \sigma_f(s) / \sigma_c)^{m+1}) f \sigma_f(t) \quad (3)$$

ここで、 $\max \sigma_f(s)$ は $-\infty \leq s \leq t$ の範囲における繊維の最大応力を表す。以下に、この $\sigma_{f-total}(t)$ を用いた FRP ロッドのクリープモデルを説明する。

3. クリープモデル

本研究で扱う FRP ロッドは連続繊維により一方向強化されたものであり、繊維にアラミド (AFRP)、ガラス (GFRP)、カーボン (CFRP) を用いた 3 種類である。マトリックスはすべてビニールエステル樹脂である。ここに挙げた 3 種類の繊維はそれぞれ特有の破壊機構を持つと考えられるが、簡単のためにマトリックスと繊維をそれぞれ粘弾性体、完全弾性体と仮定すると、歪み速度は各々以下のようなになる。

$$\dot{\epsilon}_m(t) = M(\sigma_m, \dot{\sigma}_m) = B(\sigma_m)^a + \dot{\sigma}_m / E_m \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_f(t) = M(\sigma_f, \dot{\sigma}_f) = \sigma_f / E_f \quad (5)$$

ここで、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 における両者の歪みは下式によって表せる。

$$\epsilon_{com}(t) = \sigma_f / E_f = \sigma_m / E_m + B \int_0^t (\sigma_m(s))^a ds \quad (6)$$

また、繊維の破壊強度は、材料の破壊を n 個の結合数からなる鎖と見なした Weibull の weakest-link 仮説により定量的に評価できることが確認されている。この仮説によれば、ある応力 σ で一つの結合が破壊する確率を $F(\sigma)$ 、 n 個の結合数を持つ鎖の破壊確率を $F_n(n, \sigma)$ とすると、

$$F(\sigma) = (\sigma / \sigma_0)^m \quad (7)$$

$$F_n(L, \sigma) = 1 - \exp(-nF(\sigma)) \quad (8)$$

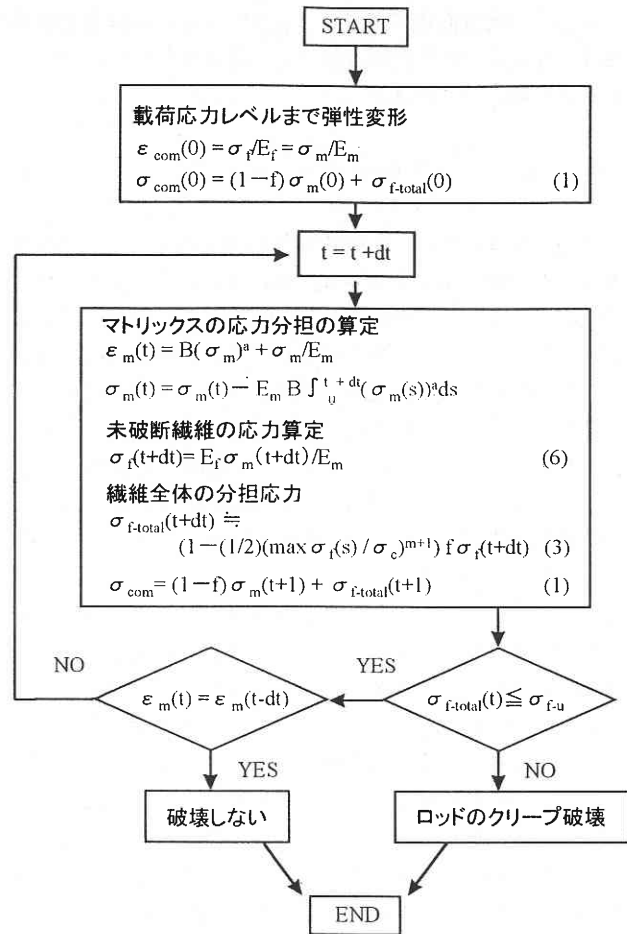


図 2 クリープモデルの流れ図

と表せる。従って、長さ L の繊維が応力 σ で破壊する結合数 $\Phi(L, \sigma)$ は、Weibull 分布により以下のようなになる。

$$\Phi(L, \sigma) = (L/L_0) (\sigma/\sigma_0)^m \quad (9)$$

ここで、 m は Weibull 係数、 L_0 は繊維強度が最大応力 σ_0 の時の繊維長である。任意の断から $\pm l_f$ の範囲における破断繊維の割合 q は、 $\Phi(2l_f, \sigma_f)$ に等しく、さらに、繊維の破断位置は一様分布とし $\langle L \rangle = l_f$ とすると、(2)式より $\sigma_{f-total}(t)$ の最大値 σ_{f-u} は

$$\sigma_{f-u} = f \sigma_c (2 / (m+2))^{1/(m+1)} (m+1) (m+2) \quad (10)$$

となる。ここで、 σ_c は、 $\Phi(L, \sigma) = 1$ となる限界繊維長 δ_c のときの固有繊維強度であり、以下の式に表せる。

$$\sigma_c = [\sigma_0 \tau L_0 / r]^{1/(m+1)} \quad (11)$$

研究速報

よって、荷重直後に破壊する FRP ロッドの静的破壊強度は、 $\sigma_{f-total}(t)$ がその最大値 σ_{f-u} を越えるときの応力であり、以下の式で示される。

$$\sigma_{com-u}(t) = (1-f)\sigma_m(t) + \sigma_{f-u} \quad (12)$$

ロッドが荷重時直後に破壊しない場合のクリープ変形は、繊維が完全弾性体である場合、主にマトリックスのクリープ性状に依存すると考えられる。すなわち、クリープ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。従って、マトリックスの受け持つ応力が0まで低下した時の繊維全体の受け持つ応力とその最大値 σ_{f-u} との大小により、クリープ破壊の有無が決定することになる。また、 σ_{f-u} や、 $\sigma_{f-total}(t)$ が σ_{f-u} に達するのに要した時間 t により、クリープ強度、クリープ寿命等を推定することができる。

図2にクリープモデルによるロッドのクリープ破壊までの流れ図を、解析に使用したロッドとその構成材料である繊維およびマトリックスの材料特性を表1に示す。

本モデルによる応力レベルとクリープひずみの関係についての解析と実験の比較を図3、図4に示す。図から分かるように、解析結果はクリープ変形特性を定性的にはよく表しており、本クリープモデルの適用性が確認できた。しかし、本解析は応力レベル毎の経時的な変形は表現しているものの、そのひずみ量は実際よりも小さい値となっており、またクリープ破断にも至っていない。この原因は、今回用いた解析条件に、繊維単独のクリープひずみ、ロッド断面での応力集中等についての影響を考慮していないためであると考えられ、今後これらの影響についてさらに実験的な検討を行う必要がある。

4. ま と め

Weibull の Weakest-link 理論と Curtin の繊維損傷確率理論に基づくクリープモデルを構築し、連続繊維による一方向強化された FRP ロッドのクリープ変形およびクリープ破壊時間を推定した。その結果、変形性状については実際の変形性状を定性的に表現できることが分かった。今後さらに、ロッドのクリープ破壊の諸原因を考慮することにより FRP ロッドのクリープ破壊時間等を評価できると考えられる。
(1996年11月29日受理)

参 考 文 献

1) 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, pp 77-86, 1993.8.

表1 FRP ロッドの概要

	AFRP	CFRP	GFRP
ロッドの径 (mm)	6		
繊維混入率 (%)	55		
繊維の弾性係数 (MPa)	71000	240000	86000
樹脂の弾性係数 (MPa)	3150	4000	3150
繊維の強度 (MPa)	3890	3350	2510
ロッドの強度 (MPa)	1690	1390	1690

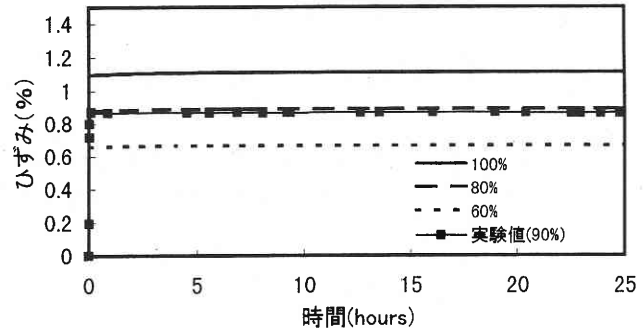


図3 CFRP ロッドクリープ変形

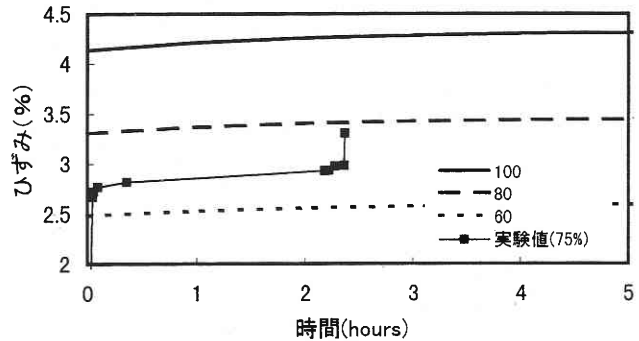


図4 AFRP ロッドクリープ変形

2) 魚本, 西村: プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性(3)—応力—ひずみ曲線—, 生産研究, 第43巻 5号, pp. 247-249, 1991.5.
 3) 西村, 魚本: 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.
 4) 魚本, 西村, 加藤: 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.
 5) W. Weibull: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. Journal of Applied Mechanics, Vol. 13, Sept. 1951, pp. 293-297.
 6) W. A. Curtin: Theory of Mechanical Properties of Ceramic-Matrix Composites: J. Am. Ceram. Soc., Vol. 74 (11), 2837-45, 1991