

非弾性構成則による熱可塑性樹脂の非線形力学挙動の推定

日大生産工 (院)
サイバネットシステム(株)

○染宮 聖人
山本 晃司

日大生産工
名古屋大
東北大 IRIDeS

平山 紀夫
松原 成志朗
寺田 賢二郎

1. 緒言

近年, 生産性やリサイクル性に優れた繊維強化熱可塑性プラスチック (FRTP ; Fiber Reinforced ThermoPlastic) の研究開発が活発に行われている. このFRTPのマトリックス樹脂である熱可塑性樹脂は, 時間や温度によって材料特性が変化する非線形特性を有するため, FRTPは異方的な非線形力学挙動が顕著に表れる. したがって, FRTPを構造部材に適用する際には, マトリックス樹脂である熱可塑性樹脂の非線形力学挙動を計測し, 適切な材料構成則を適用して, 材料パラメータを同定する必要がある. 従来から, マトリックス樹脂の非線形力学挙動を推定する研究はなされているが, 特定の条件下で計測された単軸引張試験のデータを用いて, 塑性やクリープなどといった単一の材料構成則により非線形特性を表現する例がほとんどである.

そこで本研究では, 様々な構造部材への適用が期待されている現場重合型熱可塑性アクリル樹脂の非線形力学挙動を研究対象とし, 複数のひずみ水準下での単軸繰返し負荷-除荷試験を行った. そして, この非線形力学挙動が弾塑性, クリープ・損傷の3つ構成則で表現できると仮定し, 最適化手法を用いて複合構成則の非線形材料パラメータを同定した.

2. 現場重合型熱可塑性アクリル樹脂

一般的な熱可塑性樹脂の多くは, 熔融粘度と熔融温度が非常に高いため, 強化繊維への十分な含浸が困難であった. この問題を解決するために, 現場重合型熱可塑性アクリル樹脂が開発された²⁾. この現場重合型アクリル樹脂は, 主剤であるElium190に対して3wt%の有機過酸化物を添加することで, MMAモノマーからPMMAポリマーへとラジカル重合する. この現場重合型熱可塑性アクリル樹脂の可使時間は, 有機過酸化物を添加してから10時間と非常に長く, 室温では粘度が100 mPa・sと非常に低粘

度であることから, FRTPのマトリックス樹脂として様々な分野で用いられている. 成形条件は, 圧力4MPa, 加熱温度35°Cで3時間, 加熱温度80°Cで1時間の条件下でプレス成形を行い, 試験片を作成した.

3. 単軸繰返し負荷-除荷試験

試験機は, 恒温槽付き精密万能試験機 (株式会社津製作所, オートグラフAG-I) を用いた. 試験速度は, 1.0, 0.5, 0.1mm/minの3水準とし, 除荷時の試験速度は負荷時と同じ速度に設定した.

繰返し負荷試験では, 試験片中央部に接着したひずみゲージのひずみが破断ひずみの65%になるまで負荷を行った後, 荷重がゼロになるまで除荷を行った. そして, ひずみが破断ひずみの75%, 90%になるまで引張荷重による負荷と除荷を繰返す試験を行った. ここで, 基準とした破断ひずみは, 試験速度1 mm/min, 室温下で単軸引張試験を実施したときの破断ひずみ3.24%とした.

4. 非弾性構成則

マトリックス樹脂の非線形力学挙動を表現するために, 本研究では, 実試験のひずみ領域が微小であると仮定し, 等方性弾塑性・クリープ・損傷複合構成則を用いた³⁾. 全ひずみ ϵ は, 次式に示すように, 弾性ひずみ ϵ^e と塑性ひずみ ϵ^p , クリープひずみ ϵ^c に加算分解されるものとする.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^c \quad (1)$$

熱可塑性樹脂の速度非依存の塑性変形は, von-Misesの降伏関数を用いた関連流れ則と等価硬化則を採用した. 硬化関数と流れ則を次式に示す.

$$\sigma_y(\alpha^p) = \sigma_0^y + H\alpha^p + R_0(1 - \exp(-\beta\alpha^p)) \quad (2)$$

Estimation of Nonlinear Mechanical behaviour in - Situ Polymerizable Thermoplastic resin by inelastic constitutive law.

Masato SOMEMIYA, Norio HIRAYAMA, Koji YAMAMOTO,
Seishiro MATSUBARA and Kenjiro TERADA.

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\gamma}_p \mathbf{N} \quad (3)$$

ここで、 σ_0^0 は初期降伏応力、 H 、 R_0 、 β は硬化パラメータ、 γ は塑性乗数、 \mathbf{N} は流れベクトルである。また、クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ についても、流れベクトル \mathbf{N} を用いて式(3)の関連流れ則と同様に定義した。クリープの発展則については、次の関数形を定義した

$$\dot{\epsilon}^c = C_1 (\bar{\sigma})^{C_2} \exp\left(-\frac{C_3}{T}\right) t^{C_4} \quad (4)$$

ここで、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 はクリープの材料パラメータ、 T は絶対温度、 t は時間、 $\bar{\sigma}$ はvon-Misesの相当応力である。

また、損傷モデルは熱可塑性樹脂の内部損傷によって、弾性係数のみが式(5)の関数形に従って低減されるモデルとした。

$$D(\bar{\epsilon}) = d_1 (\bar{\epsilon}_{\max})^{d_2} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (5)$$

ここで、 D は弾性係数の損傷具合を表す損傷変数、 d_1 、 d_2 は損傷パラメータ、 $\bar{\epsilon}_{\max}$ は材料が過去に経験した最大の等価ひずみである。

また、内部損傷によって低減された弾性係数 E は初期弾性係数 E_0 を用いて次式のように定義した。

5. 同定結果

複合構成則の材料パラメータの同定には、差分進化法アルゴリズムを使用した。同定した材料パラメータを Table1 に示す。また、Table1 の同定値を用いて、計算した3つの非線形力学挙動を Fig.1 に示す。Fig.1 より、試験速度が大きいほど最大応力値が高く、除荷後の残留ひずみが小さいという粘塑性挙動を適切に表現することができた。一方で、3つの試験速度における実験値と解析値をそれぞれ比較すると、全体的な非線形力学挙動を再現できているものの、Fig.1(a)からわかるように、解析で求めた除荷後の残留ひずみは、実験値よりも0.001%小さい値であり、再現性に乏しい結果となった。この再現性については今後の課題としたい。

6. 結言

本研究では、現場重合型熱可塑性アクリル樹脂の単軸繰り返し負荷—除荷試験の非線形力学挙動から等方性弾塑性・クリープ・損傷複合構成則の材料パラメータを同定した。その結果、材料パラメータで熱可塑性樹脂の非線形力学挙動を良好に再現することが可能であった。

Table1 Identification of material parameters.

Parameter	Symbol	Value
Initial tensile modulus (MPa)	E	2750
Poisson's ratio (-)	ν	0.350
Initial yield stress (MPa)	σ_0^y	19.22
Hardening parameter (MPa)	H	303.8
	R_0	400
	β	150.1
Creep parameter	C_2	10.799
	C_3	-0.100
	C_4	15351
Damage parameter	d_1	18.00
	d_2	1.114

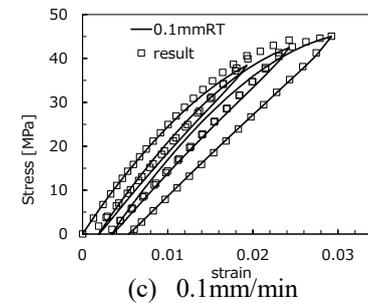
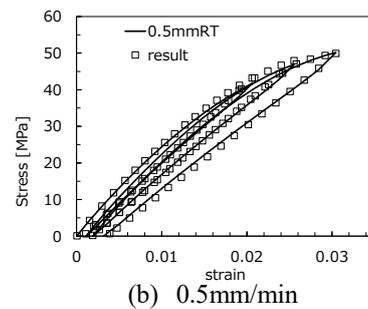
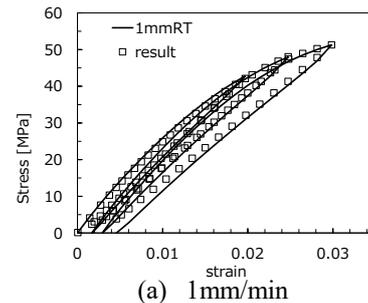


Fig.1 Comparing numerical results with experiments.

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 濱名康彰, 平山紀夫, 繊維強化プラスチックの粘弾性マルチスケール解析手法, 日本機械学会論文集 A編, 75巻, 760号, (2009), pp.1674-1683.
- 2) 有浦芙美, アクリル系現場重合型熱可塑性コンポジットマトリクス, 強化プラスチック, 65, 8, (2019), pp.329-334.
- 3) 松原成志朗, 弾塑性・クリープ・損傷複合モデルによる繊維強化プラスチックの分離型マルチスケール解析, 日本計算工学会論文集, 2014巻 (2014).