

粘弾性・クリープ・損傷複合構成則による熱可塑性樹脂の非線形材料挙動の再現と評価

日大生産工(院)

○田口 尚輝

日大生産工

平山 紀夫

日大生産工(院)

松原 成志朗

サイバネットシステム(株)

山本 晃司

東北大災害研

寺田 賢二郎

1. 緒言

繊維強化プラスチック (以下, FRP) は, 比強度, 比剛性が高いため, 車体の軽量化を目的として, 自動車用構造部材等への使用が期待されている. なかでも, 熱可塑性樹脂を繊維で強化した繊維強化熱可塑性プラスチック (以下, FRTP) は, 比強度, 比剛性が高いだけでなく, 二次加工性やリサイクル性に優れることから, 活発な研究・開発が行われている.

しかしながら, FRTPは母材である熱可塑性樹脂の材料特性が温度や時間に依存した非線形特性を有するため, 異方性の非線形挙動が強く表れる. このため, FRTPを構造材料として使用する場合は, 母材である熱可塑性樹脂の非線形材料挙動を計測し, 適切な構成則を適用し材料定数を同定する必要がある.

そこで本研究では, 代表的な熱可塑性樹脂であるポリカーボネート (以下, PC) に対して, 動的粘弾性試験 (以下, DMA) と繰り返し負荷 - 除荷試験を行い, 2種類のデータから粘弾性・クリープ・損傷構成則のパラメータをカーブフィッティングによって同定した. そして, 同定した非線形挙動の再現精度について検証を行った.

2. 試験方法

2.1. 動的粘弾性試験

供試体は, PC (帝人(株)パンライトL1250-Y) を用い, $50 \times 10 \times 2$ mmの試験片を作成した. 試験機は, 粘弾性測定装置 ((株)日立ハイテクサイエンス, DMS6100) を用い, 測定モードは, 両持ち曲げ (正弦波振動) とした. 測定周波数は, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 Hz, 試験温度は30 ~ 160°C, 昇温速度は0.1°C/minとした.

2.2. 繰り返し負荷除荷試験

供試体は, DMAと同様の材料を用いて, JIS-K7161に準拠した試験片を射出成型により作成した. 試験機は, 恒温槽付き精密万能試験機 ((株)島津製作所, オートグラフAG-I) を用いた. 試験速度は, 1, 0.1, 0.015 mm/minの3水準, 試験温度は, 室温 (22.5°C), 60°C, 90°Cの3水準とした. また, 負荷時と除荷時の速度は同じ速度とした. 繰り返しの条件についてはまず, 変位が4 mm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. 同様に, 変位が5, 6 mmになるまで引張荷重による負荷と除荷を繰り返す試験を行った.

3. 粘弾性・クリープ・損傷複合構成則

熱可塑性樹脂の非線形挙動を再現するために, 本研究で使用した粘弾性・クリープ・損傷複合構成則について示す. なお, 本研究では簡単のため変形量は小さいと仮定し, 微小ひずみ理論を用いる.

全ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}$ は, (1)式のように弾性ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^e$, 粘性ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^v$, クリープひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^c$ に加算分解できると仮定する.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_\alpha^e + \boldsymbol{\varepsilon}_\alpha^v + \boldsymbol{\varepsilon}^c \quad (1)$$

したがって, 応力 $\boldsymbol{\sigma}$ は次式で求まる.

$$\boldsymbol{\sigma} = \sum_{\alpha=1}^n \gamma^\alpha \tilde{\mathbb{C}}^0(D) : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_\alpha^v + \boldsymbol{\varepsilon}^c) \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbb{C}}_{ij}^0(D) = (1 - S_{(ij)} D) \mathbb{C}_{ij}^0 \quad (3)$$

ここで, γ^α は Maxwell 要素 α の相対弾性率, $\tilde{\mathbb{C}}^0$ は損傷後の弾性係数テンソル, S は各方向の損傷の寄与度に関する値, D は後述する損傷変数, $\mathbb{C}^0$ は材料が損傷していない状態の弾性係数テンソルである.

3.1. 粘弾性構成則

DMA から得られる緩和弾性率 E を, Prony 級数によって次式のように近似する.

$$E(t) = E_e + \sum_{\alpha=0}^n E_\alpha e^{-t/\tau_\alpha} \quad (4)$$

ここで, E_α は Maxwell 要素 α の弾性率, τ_α は Maxwell 要素 α の緩和時間, E_e は平衡弾性率であり, 動的粘弾性試験の結果から同定する材料パラメータである. また, 本研究では Maxwell 要素の数 $n=13$ とした.

3.2. クリープ構成則

時間に依存する永久変形を表すクリープ構成則は, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 を単軸繰返し負荷 - 除荷試験の結果から同定する材料パラメータとし, 次のように定義した.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^c - \frac{\dot{\gamma}^c}{1-D} \boldsymbol{N} = 0, \quad \boldsymbol{N} = \boldsymbol{H} : \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\bar{\sigma}} \quad (5)$$

$$\dot{\gamma}^c = \dot{\bar{\varepsilon}}^c = C_1 (\bar{\sigma})^{C_2} t^{C_3} \exp\left(-\frac{C_4}{T}\right) \quad (6)$$

ただし, $\boldsymbol{N}$ は流れベクトル, $\boldsymbol{H}$ は Hill テンソル, γ^c はクリープ乗数, $\dot{\bar{\varepsilon}}^c$ は相当クリープひずみ速度, $\bar{\sigma} = \boldsymbol{H} : \boldsymbol{\sigma}$ は Hill 応力, t は時間, T は絶対温度である.

3.3. 損傷構成則

損傷構成則は, 材料の内部損傷を次式で定義する損傷変数を用いて(3)式のように弾性係数を低下させることで表現する.

$$D(\bar{\varepsilon}) = d_1 (\bar{\varepsilon}_{\max})^{d_2} \quad 0 \leq D < 1 \quad (7)$$

ただし, d_1 , d_2 は損傷変数であり, 繰返し負荷 - 除荷試験の結果から同定する材料パラメータ, $\bar{\varepsilon}_{\max}$ は材料が過去に経験した最大の等価ひずみである.

4. 材料パラメータの分離型同定

DMA と単軸繰返し負荷 - 除荷試験で得られたデータをそれぞれ用いて、カーブフィッティングによって3章で示した材料パラメータを同定した。具体的には、まずDMAの結果より得られた緩和弾性率をもとに、粘弾性のパラメータを同定する。次に、単軸繰返し負荷 - 除荷試験の応力 - ひずみ曲線をもとに、粘塑性、損傷のパラメータを同定する。このとき、粘弾性のパラメータは先の同定で求めた値を使用する。ここで、それぞれのカーブフィットによる同定に使用する誤差関数は、同定するパラメータを並べてベクトルとした変数 $\mathbf{x}$ を用いて式(8)のように表される。すなわち、(8)式を目的関数 $g(\mathbf{x})$ とする最小化問題となる。

$$g(\mathbf{x}) = \frac{1}{n_{\text{step}}} \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{step}}} \left(X^{[i]}(\mathbf{x}) - \hat{X}^{[i]} \right)^2 \right) \quad (8)$$

ただし、 n_{step} は抽出したデータ数、 $X^{[i]}(\mathbf{x})$ は同定したパラメータの値を用いて計算した緩和弾性率または応力の値、 $\hat{X}^{[i]}$ は緩和弾性率または応力の実験値である。また、同定には多点探索アルゴリズムである差分進化法 (DE) を用いた。

5. 試験および同定結果

Fig.1に、DMAの結果をもとに作成した緩和弾性率の曲線とパラメータ同定によって得られた曲線を示す。

Fig.1より、実験結果と同定曲線は良好に一致していることがわかる。

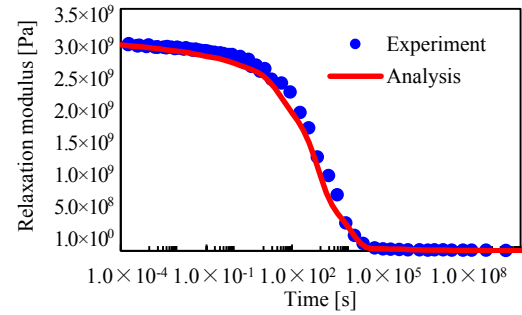


Fig.1 Relaxation Modulus of PC.

Fig.2 に、単軸繰返し負荷 - 除荷試験より得られた応力 - ひずみ曲線と、パラメータ同定より得られた応力 - ひずみ曲線を示す。Fig.2 より、解析値はPCの応力 - ひずみ関係や残留ひずみに関して、温度とひずみ速度の依存性を定性的に再現できていることがわかる。

6. 結言

PCに粘弾性・クリープ・損傷複合構成則を適用し、DMAおよび単軸繰返し負荷 - 除荷試験のカーブフィッティングによる物性値の同定を行った結果、温度、ひずみ速度によって変化する熱可塑性樹脂の複雑な挙動を定性的に再現することができた。

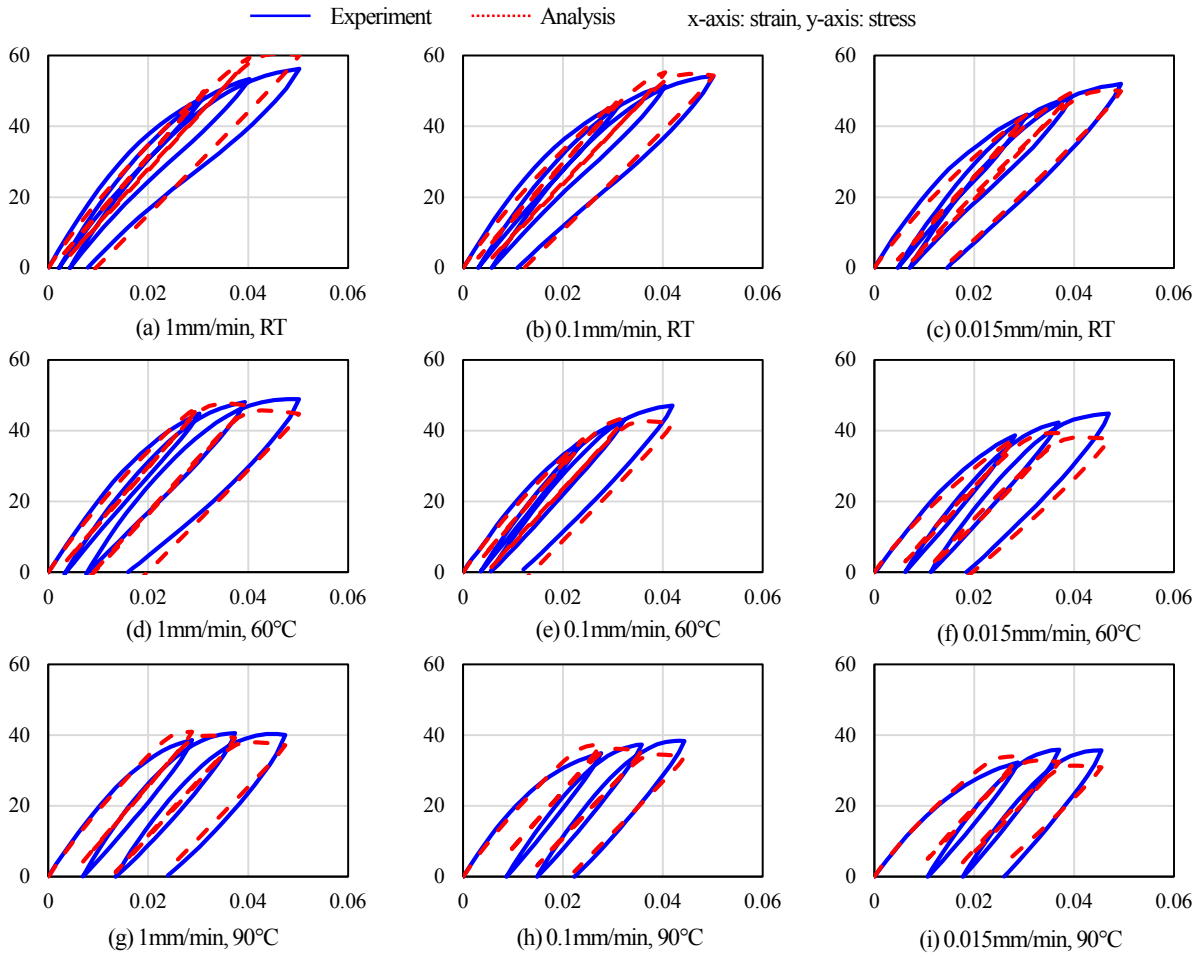


Fig.2 Stress strain curve of cyclic loading-unloading test of PC.