

熱可塑性樹脂の非線形材料構成則物性値の分離型同定

日大生産工(院)

○田口 尚輝

平山 紀夫

日大生産工(院)

染宮 聖人

東北大・工(院)

石橋 慶輝

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

母材の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、F RTP）は、FRPと同様に、高比強度、高比剛性であるだけでなく、二次加工性やリサイクル性に優れることから、自動車をはじめとする、製品の軽量化を目的として、構造部材等への使用が期待され、研究が活発に行われている。

F RTP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、F RTPは異方性の非線形挙動が強く表れる。このため、F RTP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・損傷構成則のパラメータを同定する分離型同定手法を用い、同定精度の検証を行った。

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とした。試験温度は30~170°Cとし、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、60°Cの2水準とし、負荷時と除荷時の速度は同じ速度とした。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・損傷構成則物性値の分離型同定

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。

$$E(t) = E_e + \sum_{i=0}^n E_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

ここで、同定すべき材料物性値は E_i , τ_i , E_e である。また、本研究ではMaxwell要素の数 $n=10$ とした。

3. 2 損傷構成則

損傷構成則とは、材料の内部損傷を、弾性率の低下によって表現する構成則であり、応力-ひずみ関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma &= C : \varepsilon \\ &= (I - D) : C^0 : (I - D) : \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 C は損傷を考慮した弾性係数テンソル、 C^0 は損傷していない初期状態の弾性係数テンソルである。 D は損傷の程度を表す変数であり、フォーメット表記では、 6×6 行列の対角項に $0 \leq D_{1 \sim 6} \leq 1$ である変数、非対角項は0で表される。 $D_{1 \sim 6}$ は、損傷がない場合は0、損傷し、応力を生じなくなった場合は1とする。

損傷発展の閾値である降伏関数は次式で表される。

$$g(Y(D), \kappa(\delta)) = \hat{g}(Y(D)) - \hat{\kappa}(\delta) \quad (3)$$

ここで、 \hat{g} は相当熱力学的応力、 $\hat{\kappa}$ は硬化変数 δ による硬化関数である。硬化関数については、次式で表す。

$$\hat{\kappa}(\delta) = \kappa(\delta) + \kappa_0 = c_1 (\exp(\delta/c_2) - 1) + \kappa_0 \quad (4)$$

ここで、 $\kappa_0 > 0$ は損傷発展の閾値の初期値、 $c_1 > 0, c_2 < 0$ は損傷発展時の特性を表す材料物性値である。

Separate type identification of nonlinear constitutive law of Thermoplastic resins

Naoki TAGUCHI, Norio HIRAYAMA, Masato SOMEIYA,

Yoshiteru ISHIBASHI, Koji YAMAMOTO and Kenjiro TERADA

3. 3 物性値の同定

DMAと繰り返し負荷・除荷試験とのそれぞれの実験で得られたデータを用いて、本章で示した物性値を同定した。同定に使用する誤差関数は、物性値をベクトルとした変数 \mathbf{x} を用いて式(5)のように表される。したがって、物性値の同定は、式(5)を目的関数とする最小化問題となる。

$$g(\mathbf{x}) = \frac{1}{n_{\text{step}}} \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{step}}} \left(A^{[i]}(\mathbf{x}) - \hat{A}^{[i]} \right)^2 \right) \quad (5)$$

ここで、 n_{step} は抽出したデータ数、 $A^{[i]}(\mathbf{x})$ は同定したパラメータの値を用いて計算した値、 $\hat{A}^{[i]}$ は実験値であり、DMAであれば緩和弾性率、繰り返し負荷・除荷試験であれば応力である。また、同定手法として、多点探索型手法である差分進化(DE) アルゴリズムを使用した。

4 同定結果

4. 1 動的粘弹性試験と粘弹性構成則

Fig.1に、DMAから得られた緩和弾性率と、一般化Maxwell要素の同定により得られた線図を示す。この図から、同定曲線は、試験結果と良好に一致していることが分かる。

4. 2 繰り返し負荷・除荷試験と損傷構成則

Fig.2に、繰り返し負荷・除荷試験の結果と、DMAの同定から得られた粘弹性構成則の物性値を用いて、損傷構成則の物性値を同定した結果を用いて計算した応力・ひずみ曲線を示す。ただし、DMAの結果より、60°Cにおけるシフト量がゼロであったため、物性値の同定は室温の結果のみを行った。

Fig.2より、解析値は室温、60°Cのどちらの実験値とも誤差は大きいため、同定精度が悪いと言える。実験値より、試験速度が遅いほど最大応力が小さく、残留ひずみが大きいことが分かる。同様に、温度が高いと最大応力が小さく、残留ひずみが大きいことが分かる。また、試験速度1、0.1 mm/minにおける残留ひずみについて、実験値では存在するが、解析結果ではほとんど存在しない。そのため、残留ひずみは粘弹性によるものだけではないことが推測され、同定精度の向上には塑性や粘塑性の構成則が必要であると考えられる。

5 結言

粘弹性・損傷構成則の物性値同定による、繰り返し負荷・除荷試験のカーブフィッティングは精度が悪く、粘弹性・損傷構成則は、PCの挙動を再現するのに不十分な構成則であった。

実験結果より、残留ひずみの温度・ひずみ速度依存性が見られたため、今後の研究課題として、本研究で使用した構成則に粘塑性構成則を追加し、粘弹性構成則・粘塑性・損傷構成則の分離型同定を行い、同定精度の検証を行う予定である。

「参考文献」

- 1) 藤川 正毅, 三上 貴央, 隆 雅久, 三原 康子, 小林 卓哉, 線形粘弹性特性係数関数の実用的近似法, 日本機械学会論文集 A編, 72巻, 723号, (2006) p. 1703-1710
- 2) Hao. L, Ke. P and June. W, An anisotropic damage criterion for deformation instability and its application to forming limit analysis of metal plates, Engineering Fracture Mechanics, Volume 21, Issue 5, (1985) p.1031-1054

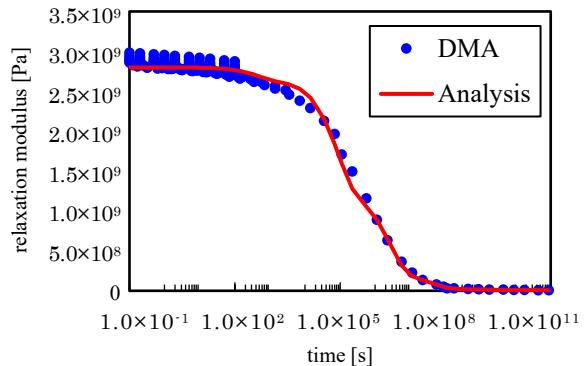


Fig.1 relaxation modulus of PC

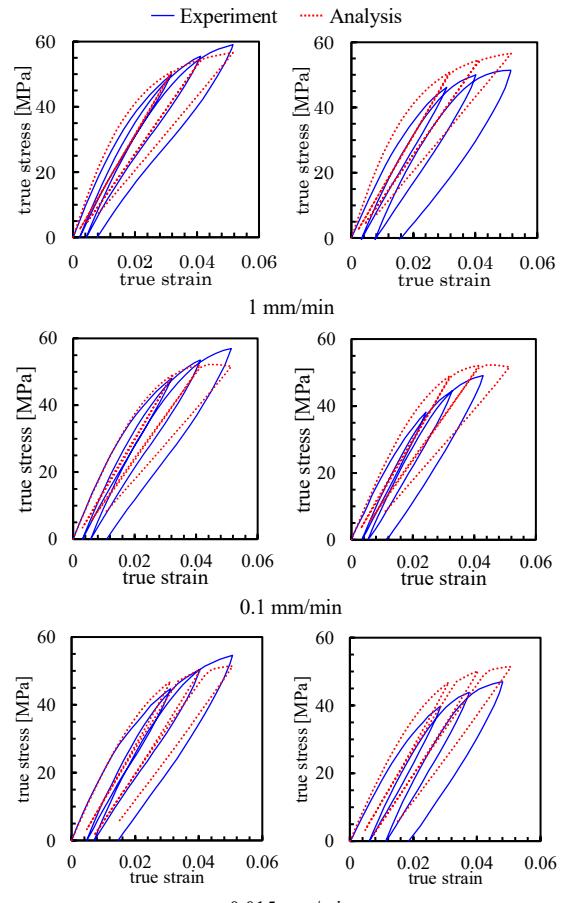


Fig.2 stress strain curve of cyclic loading-unloading test
(left: RT, right: 60°C)