

樹脂材料の速度依存型非弾性構成モデル に対するパラメータ同定手法

○ 東北大学工学部 学生員 荒川 裕介
東北大学大学院 正 員 寺田 賢二郎
東北大学大学院 正 員 京谷 孝史
日東紡績株式会社 非正員 平山 紀夫

1. はじめに

樹脂が母材となる繊維強化プラスチック (FRP) を構造成用材料に使用するとき, より効率的な設計には, FRP の正確な力学挙動予測が必要である. FRP のマクロパラメータは弾性材の繊維よりも速度依存性を示す樹脂による影響の方が大きい, 樹脂のパラメータが定まれば, その挙動予測も容易である. 本研究では, 樹脂のパラメータを求めるために GA や PSO^{1, 2)} という最適化手法を適用する.

2. 速度依存型非弾性構成モデル

樹脂の力学挙動を表すモデルとして本研究では弾塑性クリープ複合モデル (図-1) を用いた. このモデルにおける構成則の関数形は以下になる.

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

$$\sigma = E\varepsilon^e \quad (2)$$

$$\sigma^Y = k + R_0\varepsilon^p + R_\infty(1 - \exp(-b\varepsilon^p)) \quad (3)$$

$$f(\sigma, \sigma^Y(\varepsilon^p)) = |\sigma| - \sigma^Y(\varepsilon^p) \leq 0 \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}^c = C_1\sigma C_2 t^{C_3} \exp\left(-\frac{C_4}{T}\right) \quad (5)$$

弾塑性クリープ複合モデルは弾塑性挙動とクリープ挙動を組み合わせたモデルであり, 全ひずみ ε は (1) の通りに弾性ひずみ ε^e と塑性ひずみ ε^p , クリープひずみ ε^c の和として与えられる. また, 応力 σ が初期降伏点 k に達するまでは (2) により弾性ひずみ ε^e と応力 σ は弾性係数 E を比例定数として線形関係になるが, 降伏後は, 塑性ひずみ ε^p を用いた硬化則 (3) に従って硬化し, 同時に式 (5) に従って応力 σ , 時間 t , 温度 T に依存した速度でクリープひずみ ε^c を生ずる. 弾塑性クリープ複合モデルは, ひずみ速度に依存してクリープひずみ量に差が生じ, この差を速度依存性挙動としている. なお, 用いられる材料パラメータは赤字で示した $E, k, R_0, R_\infty, b, C_1 \sim C_4$ の 9 つであり, (4) は降伏条件, σ^Y は降伏応力を表す.

3. GA と PSO の性能検証及び比較

本研究では材料パラメータ同定手法として GA と PSO に着目する. GA 及び PSO は最適化問題における最適解の探索アルゴリズムであり, 例えば最近では構造工学分野の離散的な最適設計法や経済分析などに応用される研究も進められていて, その適用範囲は幅広い. この 2 つの探索アルゴリズムは両者ともに逆解析を基にした順序を経て設

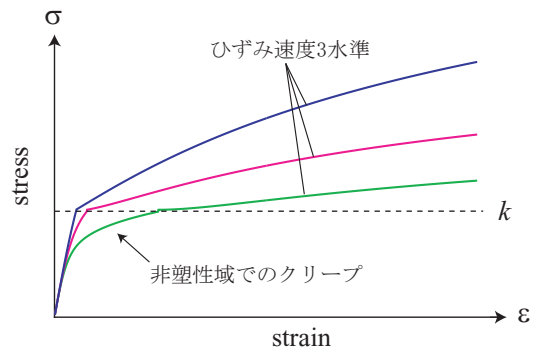


図-1 樹脂の挙動を表すモデル

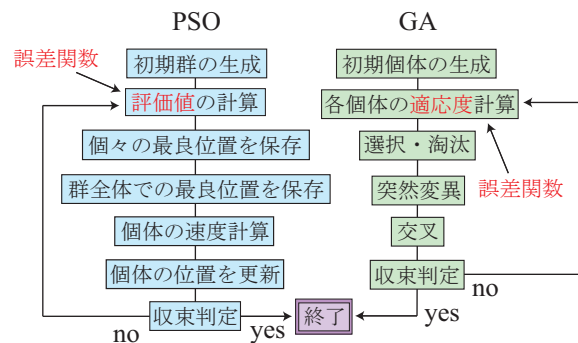


図-2 GA と PSO のフローチャート

計変数の値を決定する. その 2 つのアルゴリズムのフローチャートは図-2 のようになる.

3.1 GA

GA (遺伝的アルゴリズム) は, 生物の遺伝子の継承及び進化の過程と工学的な最適解の探索を関連付けてモデル化したアルゴリズムである. 本研究における材料パラメータ同定の場合, 個体とは m 次元 (m は材料パラメータ数) パラメータ空間内の位置ベクトルと考えることができ, ベクトルの成分として適当なパラメータ値を持つ. さらにパラメータの可動域にはスカラー場を定義する. 各個体の位置ベクトルに対応するスカラー値が適応度であり, 生物でいうところの環境への適応能力である. 適応度は (6) のように表され, 実験における応力値とモデルの構成則を用いた解析から算出される応力値の誤差関数となる.

$$E_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(\hat{\sigma}_i)^2} (\hat{\sigma}_i - \sigma_i)^2 \quad (k \text{ は個体番号}) \quad (6)$$

キーワード: FRP, クリープ, 弾塑性, GA, PSO, 数値材料試験

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL 022-795-7425, FAX 022-795-7423

誤差関数が小さければ小さいほど、選択・淘汰の過程で個体内のパラメータ値が次ステップへと継承されやすい。こうした計算手順を繰り返すことにより各個体内のパラメータは最適値に収束していく。

3.2 PSO

PSO は粒子群最適化のことであり、生物が群れを成して行動（探索）する方が一個体で行動するよりも高い知能を発揮するという生物学的見解を行動理論として工学的にモデル化したアルゴリズムである。GA と同様に各粒子はパラメータ空間内の位置ベクトルとして表され、スカラー量である評価値がそれに対応する。この評価値も GA と同じ誤差関数を使用する。各粒子は群の全粒子中で最小誤差関数値を持った位置（最良位置）と自分自身の中で最小の誤差関数値を持った位置に引き寄せられるような速度 (7) を持って反復計算を行うことでパラメータ空間内を探索する。

$$v_{n+1}^{[i]} = wv_n^{[i]} + c_1 R_1 \frac{x_{pbest}^{[i]} - x_n^{[i]}}{\Delta t} + c_2 R_2 \frac{x_{gbest} - x_n^{[i]}}{\Delta t} \quad (7)$$

その結果パラメータが最適値に収束していく。ただし、 n は時間ステップ数である。

3.3 検証・比較

本研究では、GA と PSO の性能検証及び比較として真値が既知の応力-ひずみ応答データに対してパラメータ同定を行い、精度やその他の性能を確かめた。真値が既知の応力-ひずみ応答データは材料パラメータを適当に定めて構成則の陰的解法による順解析から算出し、これに対して最適解へ到達可能な設定範囲や繰り返し計算回数と精度の推移、同定精度のばらつきなどの同定を何度か行い、検証・比較した。

例えば、図-3 は誤差関数が 10^{-3} 未満の一定精度まで収束することが可能な各パラメータの初期範囲設定の最大距離を表している。横軸はその GA の距離を 1 とした際の PSO の距離の比であり、平均で 2 倍以上の長い範囲をとっても一定値まで収束することが分かる。

また、図-4 は横軸に繰り返し計算回数を、縦軸に各計算回数での最良誤差関数値をプロットしたものである。PSO があるとき突然収束速度が増し、収束し続けるのに対して GA は完全に収束速度が減衰している。突然収束速度が増すのは PSO の特徴であり、ある個体がパラメータ空間内においてたまたま誤差関数が最小となる位置の近くに達したことに起因する。最終的に PSO は反復計算回数が 2000 回の時点で GA よりも 4 桁近くも小さい値まで収束した。

4. 実験データに基づくパラメータ同定と数値材料試験

本研究では、樹脂材料の実用的なパラメータ同定手法の確立を目的として、エポキシ樹脂の単軸引張試験の結果に基づく検討を行った。PSO を用いて同定を行った結果の最終的な同定パラメータを用いて算出した応力-ひずみ応答データと実験データとの比較は図-5 に示す。なお、PSO での同定は同定するごとに決定するパラメータの値がある程度ばらつくため、最終的な同定値は 20 回同定を行い、そ

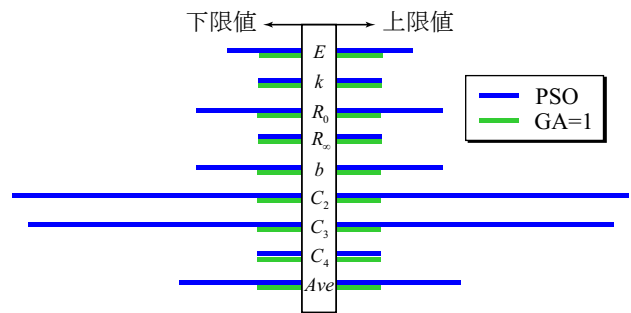


図-3 GA に対する PSO の探索可能領域

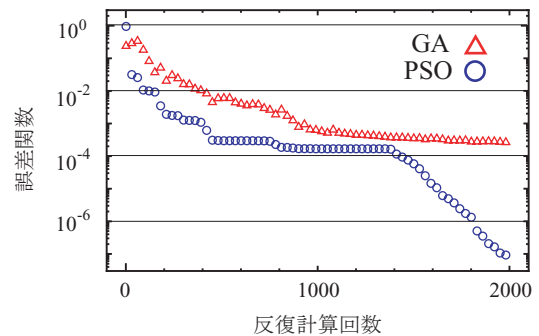


図-4 反復計算回数と誤差関数の推移

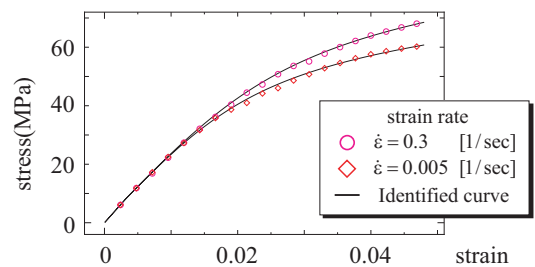


図-5 応力-ひずみ曲線の比較

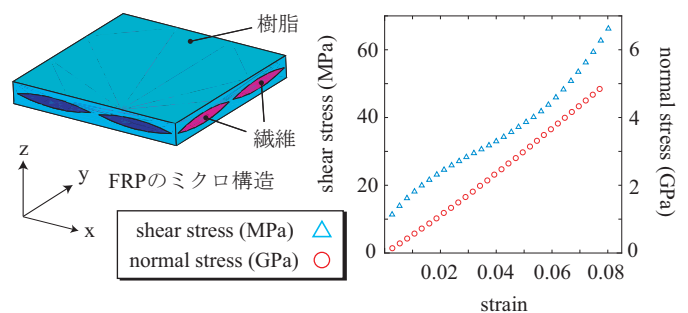


図-6 FRP のマクロ挙動

の平均値とした。同定した樹脂の挙動をもとに数値材料試験を行い、得られた FRP の異方的なマクロ挙動 (x 方向直応力, xy 方向せん断応力) の一例を図-6 に示す。

参考文献

- 1) 江本久雄：メタヒューリスティクスによる最適設計と逆解析の構造工学への適用に関する研究，山口大学大学院理工学研究科学位論文，2006
- 2) 伊庭育志：進化論的計算手法，オーム社 / 出版局，2004