

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ため、樹脂のパラメータが求めれば、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 の左) と粘塑性モデル (図 1 の右) の 2 つを用いた。まず、弾塑性クリープ複合モデルが満たす構成則は以下のようになる。

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

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

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

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

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

$$C_4 = \frac{Q}{R} \quad (6)$$

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る。降伏点までは式 (2) により弾性ひずみ ε^e と応力は線形関係であり、降伏後は、式 (3) に従って、塑性ひずみ ε^p に依存して硬化する。そして同時に式 (5) に従って応力 σ 、時間 t 、活性化エネルギー Q (R は気体定数)、温度 T に依存した速度でクリープひずみ ε^c が生じる。弾塑性クリープ複合モデルは、後述する粘塑性モデルと異なる点が 2 点ある。1 つは速度依存性をクリープとしている点であり、全ひずみ ε は弾性ひずみ ε^e と塑性ひずみ ε^p 、クリープひずみ ε^c の和となり (式 (1))、速度依存性はクリープひずみとして現れる。もう 1 つは初期降伏応力 k に達する前から速度依存性を有する点であり、クリープひずみは応力を加え始めた瞬間の弾性領域でも増加する。

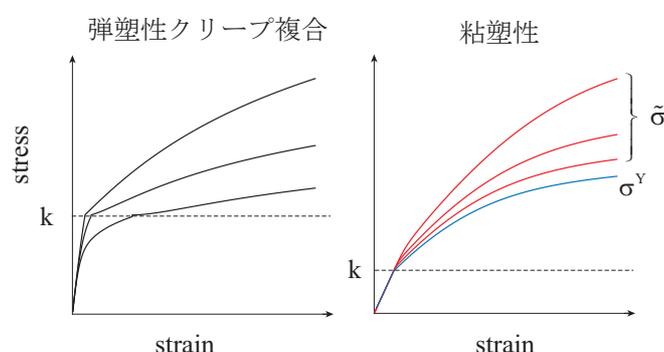


図-1 樹脂の挙動を表すモデル

次に、粘塑性モデルが満たす構成則は以下のようになる。

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (7)$$

$$\sigma = E\varepsilon^e$$

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

$$\tilde{\sigma} = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\gamma}\right)^m\right] \sigma^Y \quad (8)$$

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

粘塑性モデルは、速度非依存である弾塑性モデルにおいて、塑性ひずみの速度に伴って材料内部に発生する応力が変化すると考えるものである。このモデルは、弾塑性クリープ複合モデルと異なり、速度依存性を示すのは応力であり、応力は降伏後の塑性ひずみ速度に依存する。この塑性ひずみからクリープひずみを分離することはできない。粘塑性モデルの場合、式 (2) の降伏応力 σ^Y は、速度非依存性の降伏応力という意味で静的降伏応力と呼ばれる。式 (8) のように塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}^p$ と粘塑性パラメータ γ 、速度感度パラメータ m に依存した数値を割り増し係数として静的降伏応力 σ^Y に乗じることで動的降伏応力 $\tilde{\sigma}$ が評価される。

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

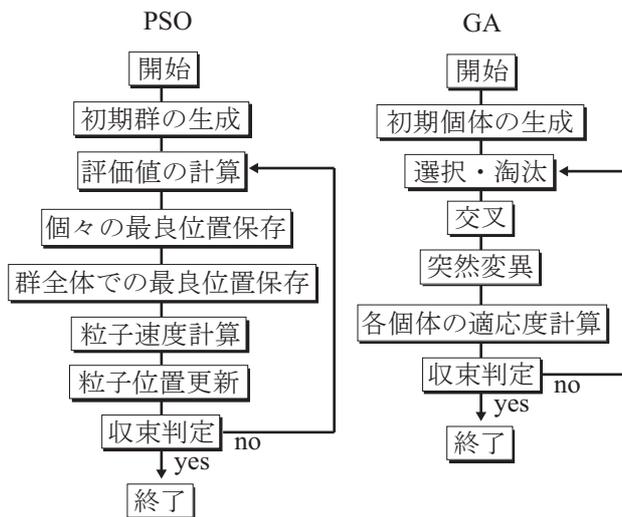


図-2 GA と PSO のフローチャート

チャートは図-2 のようになる。

3.1 GA

GA は遺伝的アルゴリズムのことであり、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。適応度は実験における応力値とモデルを用いた解析から算出される応力値の誤差関数である。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にパラメータ空間内を探索する。その結果、パラメータが最適値に収束していく。

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-ひずみ曲線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-ひずみ曲線は材料パラメータを適当に定めて順解析から算

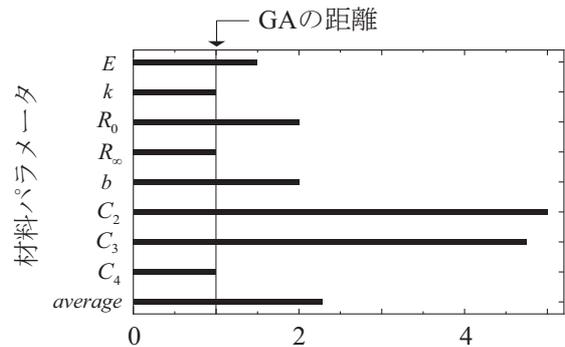


図-3 GA に対する PSO の探索可能領域

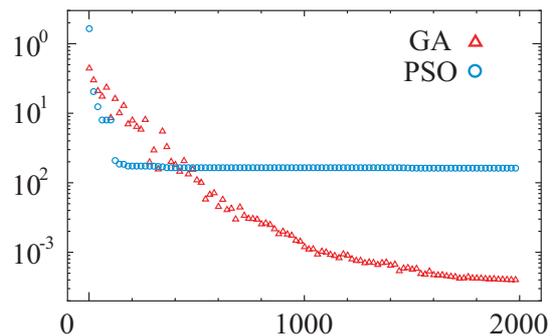


図-4 繰り返し計算回数と評価値の推移

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 は一定精度まで収束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 の距離に対する 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、粘塑性モデルでの検証・比較を行うにあたり、GA で個体を生成する段階でパラメータの生成範囲を非常に真値に近くしない限り同定不能であるため、GA の適用は不可能であると判断した。一方、弾塑性クリープ複合モデルに対して同定を行うと、PSO が局所解に陥ることがあり、同じ条件で同定を行った GA の方が精度よく収束する場合がある。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評価値をプロットしたものであるが、GA が収束し続けるのに対して PSO は完全に収束が停止していることが分かる。しかし、PSO が最適解まで到達するとき、GA の評価値より 4 桁も小さい値まで収束する。一回の同定時間や PSO の最適解への収束確率から判断し、弾塑性クリープ複合モデルでは PSO がより適した同定法であることが確認できた。

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，2006
- 2) 伊庭育志：進化論的計算手法，オーム社 / 出版局，2004