

I - 26

介在物の幾何特性の変化が複合材料の
巨視的降伏に及ぼす影響

東北大学大学院工学研究科 ○学生員 湯本 健寛
東北大学大学院工学研究科 正 員 岩熊 哲夫

1. まえがき

複合材料は幅広い分野で活用されており、例えば、繊維補強材料を用いた構造物も作られている。構造物を設計する場合、古典的弾塑性論やそれを拡張した現象論的モデルを用いるのが主流である。一種の複合材料といえる鋼の場合、von Mises の降伏条件によってその降伏挙動を工学的範囲で予測できることは実験で確かめられている。このように、複合材料において巨視的な降伏挙動を解析的に知ることが出来れば便利である。森・田中理論¹⁾を増分型の弾塑性定式化に当てはめたものを、更に多相複合材料について解析できるように拡張したモデルを用いて、介在物の幾何特性や分布が複合材料の巨視的降伏特性に及ぼす影響を考察する。

2. 一般化した増分型の定式化

多数の楕円体介在物が様々な半径比や体積比率・方向・材料特性を持つような多相複合材料について解析できるように森・田中理論¹⁾を一般化した定式化を示す。多相複合材料に巨視的応力増分 $\dot{\sigma}_i$ が作用した場合、介在物内の応力増分 $\dot{\sigma}_i$ は

$$\dot{\sigma}_i = B_i \dot{\sigma} + \left\{ L_i \sum_j (D_{ij}) - M_i \right\} \dot{\epsilon}_M^p + M_i \dot{\epsilon}_i^p - L_i \sum_j (D_{ij} \dot{\epsilon}_j^p) \dots\dots\dots (1)$$

のように解析的に表現できる。 B_i , D_i , L_i , M_i は母材と介在物の材料定数、介在物の形状や体積比率・方向で決まる4階のテンソルで、添え字 ' i ' が付くものは介在物の種類によって求められる。

3. 2相複合材料の巨視的降伏面

ここでは文献²⁾を参考にして、2124Al を SiC で補強した複合材料を想定した。同文献²⁾より母材の材料定数はヤング率を $E_M = 60$ GPa、ポアソン比を $\nu_M = 0.3$ で降伏しないものとし、介在物の材料定数はヤング率を $E_i = 450$ GPa、ポアソン比を $\nu_i = 0.2$ 、単軸引張初期降伏応力を $\sigma_y^i = 700$ MPa とした。また、介在物の体積比率は13.2%で、介在物は von Mises の降伏条件で降伏するものとする。

(1) 半径比の影響

x_1, x_2, x_3 軸方向の半径をそれぞれ a_1, a_2, a_3 とした場合、図-1 は、半径比 $a_1/a_2 = 1, a_3/a_1 = 1/2$ の扁平形介在物を含む2相複合材料の降伏面のコンター図で、コンター線は巨視的静水圧 $\bar{p} = -2, -1, 0, 1, 2$ GPa の場合の降伏面を表している。また、図-2 は、介在物の形状が $a_1/a_2 = 1, a_3/a_1 = 2$ の扁長形である場合のコンター図である。図中の座標軸のメモリは $\sqrt{2}J_2$ MPa の値を表している。それぞれの図で、コンター線の等しい楕円形状をしており、 $\bar{p}$ が変化する事で降伏面が $\bar{\sigma}_3$ 軸方向に変化する。このことから、降伏面の中心軸は巨視的静水圧軸と一致していないので、巨視的静水圧によって降伏する可能性がある。介在物が扁平形状の場合、図-1 では $\bar{p}$ が大きくなるとコンター線は図面上方向に変化している。それに対して、扁長形の場合、図-2 のコンター線は図面下方向に変化しており、巨視的静水圧軸に対して降伏面の中心軸が反対方向に傾いている。これは、介在物への形状によって応力集中が異なるためである。なお、中心軸上の巨視的応力状態では、介在物内が静水圧状態となるために、この方向への载荷によって複合材料は降伏しない。

(2) 介在物の方向による影響

図-3 は、半径比 1:1:2 の介在物の長軸が x_3 軸に対して x_1 軸方向に 30 度傾いている場合の降伏面のコンター図で、図中に降伏面の中心軸も示した。介在物の方向が変化する事によって、介在物への応力集中係数が変化するために、中心軸の方向も変化する。介在物の座標系と巨視的座標系が異なる場合、巨視的直応力によって介在物内にせん断力が生じる。そのため、 $|\bar{p}|$ が大きくなるほど楕円形状をしたコンター線の半径が小さくなり、閉じた降伏面になっていると考えられる。

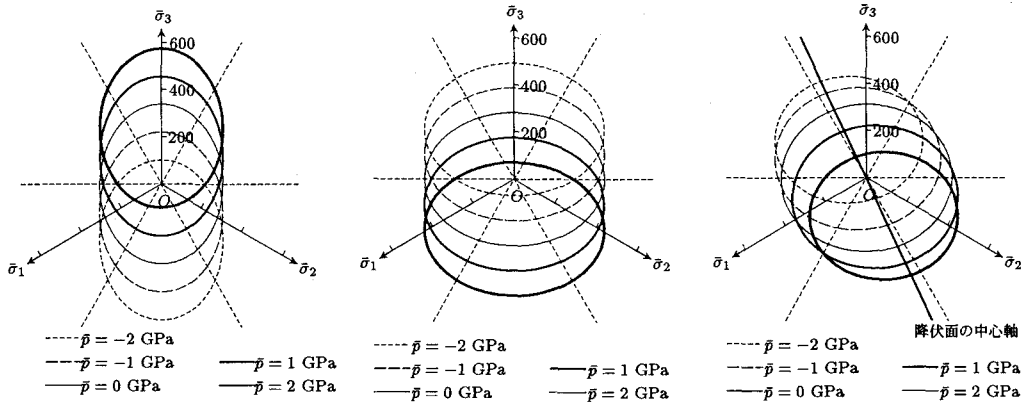


図-1 扁平形介材物 $a_3/a_1 = 1/2$ の場合 図-2 扁平形介材物 $a_3/a_1 = 2$ の場合の 図-3 介在物の方向が30度傾いた場合の降伏面 ($a_3/a_1 = 2$)

(3) 巨視的降伏条件

巨視的座標系と介在物の座標系が一致している場合、降伏面の中心軸の方向ベクトルを (n_1, n_2, n_3) とすると、

$$(\sigma_i^y)^2 = \left[Q_i \left(\frac{\bar{\sigma}_1}{n_1} - \frac{\bar{\sigma}_2}{n_2} \right)^2 + R_i \left(\frac{\bar{\sigma}_2}{n_2} - \frac{\bar{\sigma}_3}{n_3} \right)^2 + S_i \left(\frac{\bar{\sigma}_3}{n_3} - \frac{\bar{\sigma}_1}{n_1} \right)^2 \right] + \left[2T_i \bar{\sigma}_{23}^2 + 2U_i \bar{\sigma}_{31}^2 + 2V_i \bar{\sigma}_{12}^2 \right] \dots\dots (2)$$
 のように表せる。方向ベクトルの成分と各パラメータは式(1)の B_i の成分で表現できる。また、巨視的座標系と介在物の座標系が異なる場合、上式の巨視的応力に対して座標変換則を用いることによって、降伏条件は求まる。

4. 多相複合材料の巨視的降伏面

方向の異なる半径比 1:1:2 の扁平形介材物を 13 種類含む多相複合材料の巨視的降伏面は図-4の実線となる。なお、一つの介在物の体積比率は 13.2/13 % とし、3つの巨視的座標軸に対して介在物の配置が対称になるように方向を決めた。

同図中の点線は13種類の介在物のうち1種類のみを含む2相複合材料の降伏面である。巨視的降伏面は、点線の最も内側の線によって決定され、その線は巨視的座標軸方向に長軸を持つ3種類の介在物のいずれかの場合の降伏面である。介在物の形状効果によって、その長軸方向に応力が集中し、3種類の介在物のいずれかが3軸引っ張りもしくは3軸圧縮状態で降伏するので、巨視的降伏面はTrescaを30度回転したような6つの角を持つ形状となる。また、 $0 < |\bar{p}| < 2 \text{ GPa}$ の範囲で 200 MPa 毎に降伏面のコンター線を描き、 π 平面を若干斜めから眺めると、図-5のように主応力空間における降伏面の立体的挙動を見ることが出来る。

5. まとめ

2相複合材料の巨視的降伏面は静水圧軸に対して「傾いた」中心軸を持ち、その「傾き」が介在物の形状や方向により異なることを示した。また、介在物が J_2 によって降伏する場合について、2相複合材料についての巨視的降伏条件を解析的に表現した。更に、多相複合材料の巨視的降伏曲面の立体形状を確認した。

参考文献

- 1) Mori, T. and Tanaka, K.: Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall.*, Vol.21, pp.571-574, 1973.
- 2) Sun, L.Z. and Ju, J.W.: Effective elastoplastic behavior of metal matrix composites containing randomly located aligned spheroidal inhomogeneities. Part II: applications, *Int. J. Solids Structures*, Vol.38, pp.203-225, 2001.

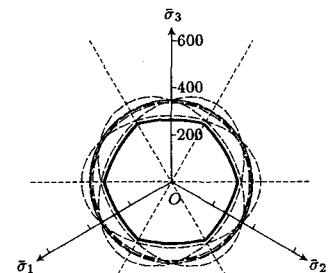


図-4 介材物がランダム分布した場合の降伏面

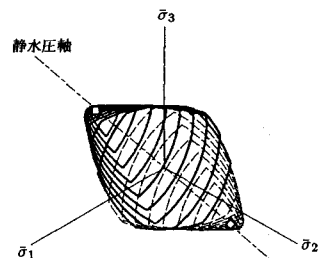


図-5 介材物がランダム分布した場合の降伏面の立体図