

I - 35

複合材料の初期降伏曲面の予測手法

東北大学工学部

○学生員 田辺 将樹

東北大学大学院工学研究科

正 員 岩熊 哲夫

東北大学大学院工学研究科

正 員 後藤 文彦

1. まえがき

コンクリートや岩盤・地盤をはじめ土木材料のほとんどが複合材料であり、この巨視的挙動を微視的な観点から予測する研究は、高性能・高機能な材料を作るため古くから行われてきた。その際に必要となるのは異種材料間の相互作用である。本研究では材料どうしの相互作用を森・田中理論に基づいて考慮し、材料の形状や材料定数を変化させた様々な複合材料の微視的平均降伏を巨視的な降伏として予測することを試みる。

2. 微視的弾性挙動の巨視的弾性挙動への変換

材料はすべて等方弾性体とし、母材に n 種類の回転楕円体介在物が不規則に分布している複合材料を仮定したとき、森・田中理論¹⁾²⁾より微視的平均応力 σ_M 、 σ_i と巨視的平均応力 $\bar{\sigma}$ の関係は以下のように求められる。

$$\sigma_M = [I + \sum_{i=1}^n f_i C_M (S_i - I) \{C_M - (C_M - C_i) S_i\}^{-1} (C_M - C_i) C_M^{-1}]^{-1} \bar{\sigma} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_i = [I + C_M (S_i - I) \{C_M - (C_M - C_i) S_i\}^{-1} (C_M - C_i) C_M^{-1}]^{-1} [I + \sum_{i=1}^n f_i C_M (S_i - I) \{C_M - (C_M - C_i) S_i\}^{-1} (C_M - C_i) C_M^{-1}]^{-1} \bar{\sigma}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

ここに C, S, f はそれぞれ弾性テンソル、Eshelby のテンソル、介在物の体積比率であり、下添え字の M, i はそれぞれ母材部分、介在物内部の諸量であることを示す。Eshelby のテンソルは母材のポアソン比と介在物の形状により決定され、このテンソルを通して、母材に含まれている介在物の形状や向きを変えることができる。

von Mises の降伏条件に上式を適用すると、弾性内において微視的平均弾性挙動を巨視的弾性挙動で表わした初期降伏までを予測できる。図-1 に材料 A, B から構成される複合材料の、材料 A が初期降伏するときの曲面を平面ひずみ状態で示した。介在物は x_3 軸方向に無限に長い円柱形状である。ここでは弾性定数の大きい材料 B を母材とみなした降伏曲面を弾性的上界と呼び、それが外側の実線に当たる。また弾性定数の小さい材料 A を母材とみなした降伏曲面を弾性的下界と呼び、それが内側の実線に当たる。材料 A より弾性定数の大きな材料 B が複合材料中に存在するため、両曲線ともに材料 A のみの降伏曲線の外側に存在しており、複合材料の初期降伏曲面はこの間に存在すると予測できる。

一方、図-2 では図-1 の弾性的下界とそれを偏差応力で表示したものを比較したものである。 J_2 流れ則に基づいた von Mises の降伏関数を定義すると、降伏挙動は等方応力に依存しないため偏差応力で降伏関数を表示しても変わらないはずであるが、図-2 では降伏曲面が実線と点線と異なっていることが興味深い。これは複合材料中に存在する材料 A の微視的な降伏自体には静水圧の影響がないが、材料 A の降伏を複合材料全体の巨視的な降伏で示すと、円柱介在物が存在していることにより材料に異方性が生じ、静水圧分だけ降伏値が増したからである。

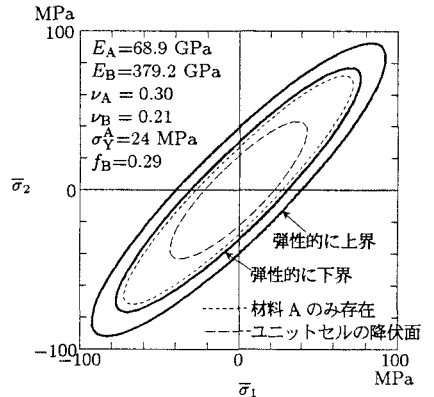


図-1 円柱介在物を含む複合材料の初期降伏面

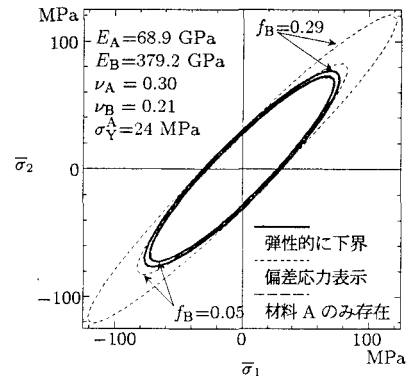


図-2 静水圧の影響

3. 実験値との比較

図-3はAlにSiを入れた非均質材料の0.2% オフセット耐力の実験値⁴⁾と本研究による非均質材料のAlの初期降伏値を比べたものである。本研究の弾性的上下界が非均質材料の0.2% オフセット耐力に近い値を示している。特にSiが9.7%のときそれが顕著に示されている。一方図-1の破線は非線形均質化理論による非均質弾塑性体のマルチスケール構造解析³⁾で求められた、材料定数の等しいユニットセルの初期降伏曲面であり、本研究における複合材料の弾性的上界と弾性的下界の値に比べユニットセルの降伏値が小さいことがわかる。以上のことから、本研究による微視的平均弾性挙動の巨視的降伏値は複合材料のマルチスケール構造解析で求められた局所的な降伏値に比べ、複合材料0.2% オフセット耐力により近い値を示すことが言え、複合材料中の微視構造のより厳密な降伏挙動を平均的に解析できる結果に至った。

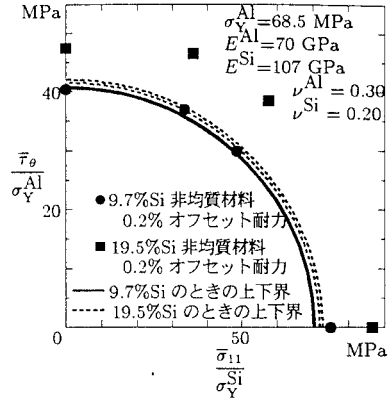


図-3 0.2% オフセット耐力との比較

4. 不規則な方向性を持つ介在物の初期降伏

図-4の実線は、 x_1x_2 平面において方向が異なり、 x_3 軸に無限に長い楕円柱介在物を含んだ複合材料の降伏曲面を示したものである。介在物はそれぞれ材料定数が等しく体積比率が0.099であり、18度ずつ角度の違うものが10種類存在している。一方図-4の点線は体積比率が0.099で、材料定数の等しい同形状の1種類の介在物を18度ずつ回転させたときの降伏曲面である。実線、点線ともに介在物の降伏曲面を重ねると、方向が異なる介在物の挙動が共有する降伏曲面が表わされる。もし介在物の方向が各介在物の滑り線であると仮定すると、この領域は滑り面を考慮した介在物のみかけの初期降伏曲面を示せたことになる。点線の2相問題では、1種類の介在物を回転させることで10方向を向いた介在物が存在していることをモデル化しているため、母材と介在物の相互作用しか考慮できないが、実線の11相問題では方向の異なる介在物を10種類点在させていることから、介在物どうしの相互作用とそれぞれの介在物の異方性も考慮できているため、より正確な予測ができるようになった。次に図-5では1%存在する母材のヤング率を変えたものを示した。点線と破線を比べると、母材のヤング率の大きさが介在物のみかけの降伏曲面にほとんど影響しないことが興味深い。この結果は鋼等の滑り線を有する複合材料の降伏の予測に寄与すると考える。

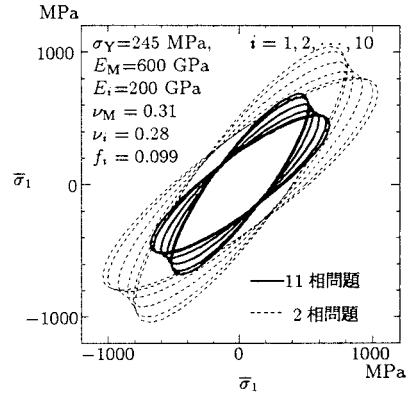


図-4 方向の異なる介在物を含む複合材料の初期降伏曲面

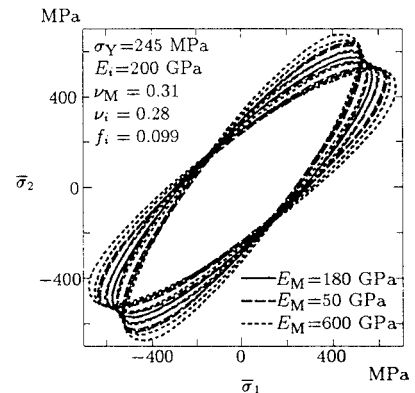


図-5 母材のヤング率の違いの影響

参考文献

- 1) Mura, T.: *Micromechanics of Defects in Solids*, Martinus Nijhoff Publ, 1982.
- 2) 岩熊哲夫・堀宗朗・森勉・村外志夫: 複合材料の平均的な硬化係数と延性の評価, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.435-442, 1991.
- 3) 松井和己・寺田賢二郎・京谷孝史・岩熊哲夫: 弾塑性複合材料のミクロ構造を反映した巨視的な降伏曲面の評価, 土木学会論文集, 投稿中.
- 4) Sun, L. Z. and Ju, J. W.: Effective elastoplastic behavior of metal matrix composites containing randomly located aligned spheroidal inhomogeneities. Part II: applications, *International Journal of Solids and Structures*, 38, pp.203-225, 2001.