

I-10

新たな界面剥離モデルを含んだ
3次元複合材料有限要素

東北大学大学院工学研究科 ○学生員 河原 佳武
東北大学大学院工学研究科 正員 岩熊 哲夫

1. はじめに

比較的軟らかい弾塑性の母材に硬い介在物が分散している複合材料では、母材の塑性変形に加えて、母材と介在物の剥離現象が生じ、材料特性に大きな影響を及ぼすことが知られている。Zhao and Weng が提案した界面剥離モデル¹⁾は、解析的な平均化手法に直接組み込むことができ便利である。そこで、既往の研究²⁾の3次元化を行うと同時に、界面剥離による材料挙動の不連続性を表現するために、巨視的な接線剛性の変化に着目し、界面剥離による応力変化を新たに考慮に入れた解析手法を確立し、いくつかの解析例からその有用性を確認する。

2. 平均化手法と弾塑性構成関係

本研究では森・田中理論³⁾に増分型 J_2 流れ理論を組み込んだ弾塑性モデルを用いる。巨視的な応力ひずみ関係は

$$\dot{\sigma} = \left[\bar{C}^{-1} + F \left\{ I - \frac{1}{H_M} \frac{\sigma'_M \otimes \sigma'_M}{4(J_2)_M} D \right\}^{-1} \frac{1}{H_M} \frac{\sigma'_M \otimes \sigma'_M}{4(J_2)_M} A \right]^{-1} \dot{\varepsilon} \quad (1)$$

と表される。ここで、添え字“M”は母材を表し、 $\bar{C}$ は巨視的な弾性係数、 F, D, A は母材と介在物の応力ひずみ関係を表すパラメータで、 H_M は母材の硬化係数である。

3. 界面剥離モデルと剥離基準

本研究では、等方介在物がある方向に剥離する剥離現象を、その方向には応力を伝達しない直交異方性を持った仮想介在物が完全付着している現象に置き換えて表現するZhao and Wengの界面剥離モデルを採用している。介在物の界面法線方向の引張応力がある剥離応力 σ_d に達したときに剥離が起こるであろうことから、介在物の第1主応力が σ_d に達した時、その主方向に一致する法線を持つ界面上で剥離が発生すると仮定する。また、剥離が発生したときに生じる剛性の急変に伴う応力再分配量を求め、剥離による介在物の応力解放を近似している。

4. 解析例

(1) 1軸引張問題

材料特性を調べるために、図-1のような片持ち梁の右端に引張等分布荷重を載荷した場合の解析を行った。材料は、2124Al母材中に1:1:2の半径比のSiC介在物がランダムな向きで20%介在している複合材料を想定している。材料定数は、 $E_M = 60 \text{ GPa}$ 、 $\nu_M = 0.3$ 、硬化パラメータ $h_M = 700 \text{ GPa}$ 、 $n = 0.55$ 、降伏応力 $\sigma_M^y = 180 \text{ MPa}$ 、 $E_i = 450 \text{ GPa}$ 、 $\nu_i = 0.2$ とする。剥離応力 $\sigma_d = 100 \text{ MPa}$ 、 300 MPa の場合についての荷重変位関係を図-2に示す。当然、 $\sigma_d = 100 \text{ MPa}$ の場合よりも $\sigma_d = 300 \text{ MPa}$ の方が剥離が遅れて発生する。 $\sigma_d = 300 \text{ MPa}$ の場合のように、塑性領域に入ってから剥離した場合は、接線剛性の違いから求められる変位量は塑性変形の影響を受けるため、荷重変位曲線の不連続性が大きくなる。載荷荷重が $p = 350 \text{ MPa}$ を超えて $\sigma_d = 100 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_d = 300 \text{ MPa}$ とともに全要素で剥離と降伏が起こると、剥離応力が異なっても平均剛性は等しくなるので、変形過程により多少の違いがあるものの、それぞれの接線剛性はほぼ等しくなっている。

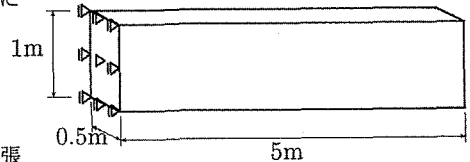


図-1 解析対象

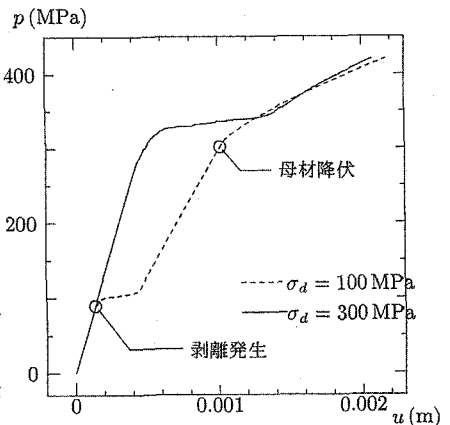


図-2 剥離応力 σ_d が異なる場合の荷重変位関係

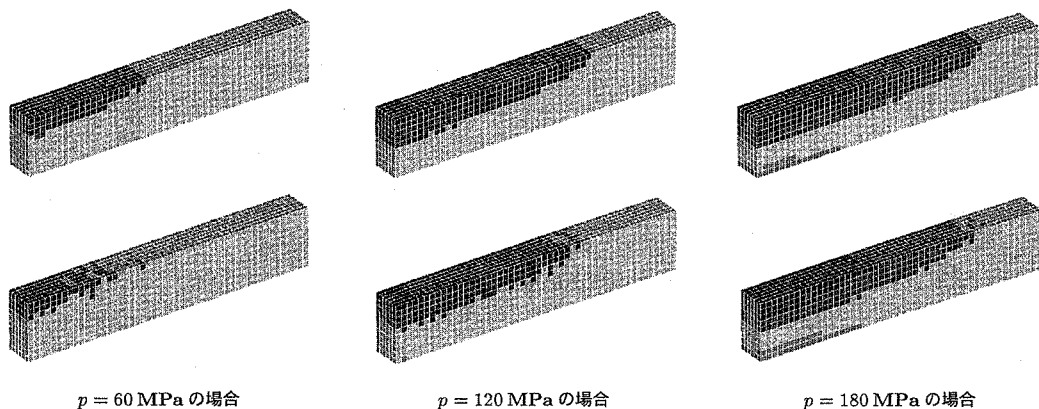


図-3 介在物長軸の向きが異なる場合の状態図（上段：橋軸方向に整列，下段：ランダム分布）

(2) 片持ち梁の曲げ

次に、図-1の右端に鉛直下向きに分布荷重を載荷した曲げ問題の解析を行った。図-3はそれぞれの荷重状態ごとの各要素の状態図を表している。黒い部分は剥離 & 降伏、濃い灰色は剥離のみ、薄い灰色は降伏のみ、白い部分は弾性状態を表している。荷重が進むに連れて、上層に剥離領域が広がっていくことがよくわかる。介在物がランダムな向きの場合には剥離要素の拡がりにもばらつきが見られる。介在物の向きによる荷重変位関係の違いを示したものが図-4である。曲げに対して抵抗するように介在物が整列した場合の方が高い剛性が得られることがわかる。

剥離応力 σ_d が異なる場合の荷重変位関係を図-5示した。剥離応力が高くなるに連れて剥離の発生が遅れることがわかる。 $\sigma_d = 300$ MPa の場合は、母材の降伏と同時に剥離が発生するため、全体剛性の違いによって発生する変位量が大きくなり、 $\sigma_d = 100$ MPa や $\sigma_d = 200$ MPa の場合と比べて剥離後の剛性の低下が著しい。そして、ある程度剥離が進んだ荷重荷重 $p = 200$ MPa 以降になるとその変形挙動には剥離応力の影響が少ない。

5. 終わりに

仮想介在物という概念を用いた界面剥離モデルを解析的な平均手法と組み合わせ、新たに剥離基準を仮定することで、3次元的な剥離の発生と進行を予測する手法を提案した。そして、直感的に分かりやすい問題を例に解析した結果、次の知見を得た。

- 3次元的な解析対象、介在物分布の境界値問題でも剥離や降伏の発生と進行を良好に予測できた。
- 接線剛性の違いに注目することで、界面剥離による介在物の応力解放を近似することができた。

参考文献

- 1) Zhao, Y.H. and Weng, G.J.: Transversely isotropic moduli of two partially debonded composites, *Int. J. Solids Structures*, Vol.34, pp.493-507, 1997.
- 2) 樋口耕平, 岩熊哲夫: 界面剥離を組み込んだ複合材料有限要素, 応用力学論文集, Vol.8, pp367-376, 2005.
- 3) Mori T. and Tanaka K.: Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *ACTA Metal.*, Vol.21, pp.571-574, 1973.

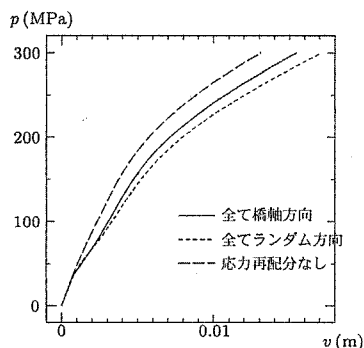


図-4 介在物の向きが異なる場合の荷重変位関係

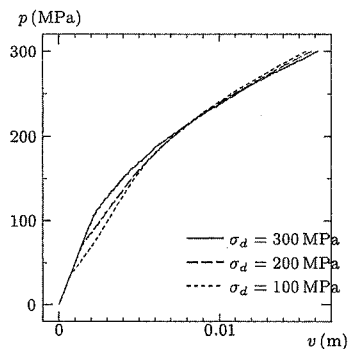


図-5 剥離応力 σ_d が異なる場合の荷重変位関係