

界面剥離を考慮したハイブリッド複合材料モデルに対する解析的平均挙動評価

東北大学大学院工学研究科 学生員 片野 俊一
東北大学大学院工学研究科 正員 岩熊 哲夫

1. まえがき

複合材料は複数の材料の長所を同時に発揮できる高機能材料であり、最近では複合材料の積層化や複数の種類の介在物で補強したハイブリッド複合材料の開発も行われている。一方界面剥離による損傷等の新たな問題が生じ、解析的平均挙動予測手法の研究が進んでいる。例えば、文献¹⁾では仮想介在物と剥離による応力再配分手法を用いることで剥離の発生と進展をよく表現できているが、剥離応力を確定論的に決めているため実現象を再現できていない点もある。そこで本研究ではこの手法において剥離応力のばらつきを考慮し、2相・ハイブリッド複合材料に対する解析例からその有用性を示す。

2. N 相複合材料に対する平均化手法

母材中に $N - 1$ 種類の回転楕円体介在物が分布する N 相複合材料を森・田中理論で平均化する。母材は弾性体とし、介在物のみが Prandtl-Reuss の関連流れ則に従って降伏する場合、マクロ増分応力ひずみ関係は

$$\dot{\sigma} = \left(\bar{C} - \sum_{k=1}^{N-1} A_k Y_k \right) \dot{\varepsilon} \quad (1)$$

となる。 \bar{C} は平均弾性係数、 A_i 、 Y_i は係数テンソルであり、母材と介在物の材料特性、体積比率、介在物形状および方向によって決まる4階のテンソルであるが、その具体的な定義は省略する。さらに、体積比率を零にした母材の剛性を適切に選択することで精度の良い予測が可能な仮想母材理論²⁾を用いる。本研究では、この仮想母材剛性を self-consistent 法に基づいて設定する選択法を用いて解析を行う。

3. 界面剥離モデルと剥離基準

本研究では Zhao and Weng の界面剥離モデル³⁾を用い、剥離した介在物を剥離方向に応力を伝達しない仮想介在物が完全付着している状態に置き換えることで剥離現象を表現する。剥離は介在物の最大引張主応力が剥離応力 σ^d に達したときにその主方向に直交する界面で発生すると仮定する。ただし実際は場所や材料によって剥離応力にばらつきが生じるため、Weibull 乱数を用い

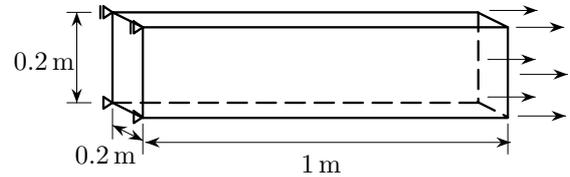


図-1 解析対象

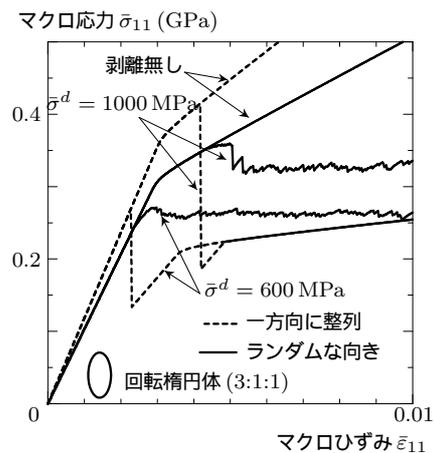


図-2 剥離現象の材料特性による影響

て剥離応力がランダムに与えられるモデルを対象とする。また、剥離の発生により応力が急激に開放されるため、周りの母材・介在物への応力再分配を行う。

4. 2相複合材料の一軸引張解析

図-1のような柱を2500要素に分割し、左端に強制変位を与える一軸引張問題を考える。SiC/5456Al複合材料を解析対象とし、5456Alの材料定数をヤング率 $E_1 = 73$ GPa、ポアソン比 $\nu_1 = 0.33$ 、降伏応力 $\sigma_1^y = 230$ MPa、硬化パラメータ $h_1 = 68$ MPa、 $n_1 = 0.135$ とする。また、SiCはヤング率 $E_2 = 485$ GPa、ポアソン比 $\nu_2 = 0.20$ 、体積比率を20%とする。

(1) 剥離現象の材料特性による影響

図-2に、半径比3:1:1の回転楕円体SiC介在物の長軸が引張方向に整列した場合とランダムに向いている場合のマクロ応力ひずみ曲線を示す。平均剥離応力 σ^d は600 MPaと1000 MPaの2つを考え、ばらつきは無いとする。この結果より、整列している場合はすべての要素で同時に剥離が発生し急激に応力が低下するのに対し、ランダムに向いている場合は各载荷ステップ毎に剥

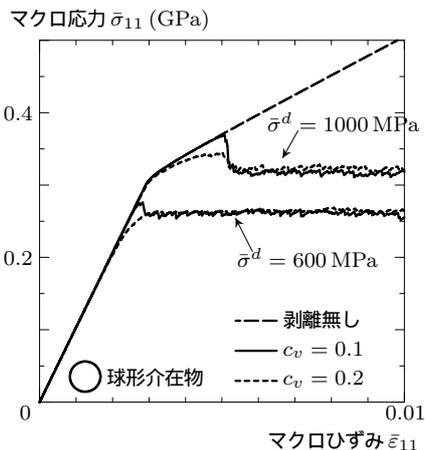


図-3 変動係数 c_v による影響

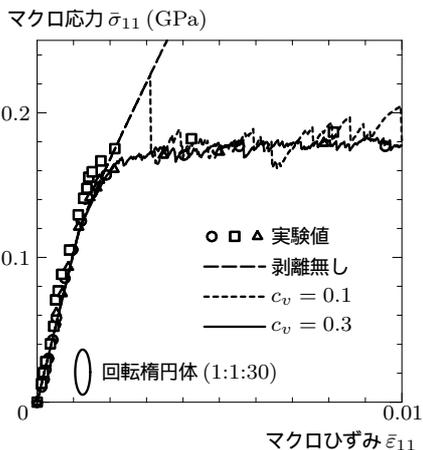


図-4 実験結果との比較

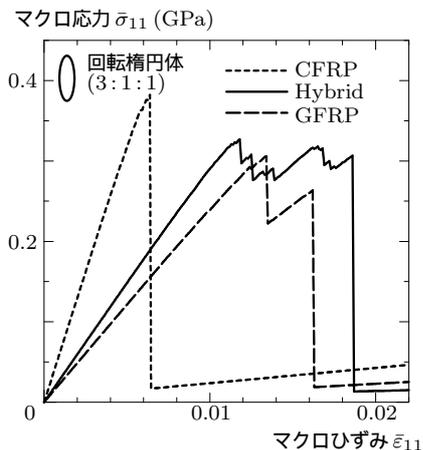


図-5 ハイブリッド化による効果

離が徐々に発生し、ほぼ同じ応力レベルを維持しながら変形が進んでいく。そのため、剥離前の剛性は整列したものより小さくなるものの、ランダムに向いている方が残留強度は高くなる。

(2) 剥離応力の変動係数による影響

実現象では剥離応力にばらつきが生じるため、介在物が整列している場合や球形の場合にも徐々に剥離が発生する。そこで、ここでは剥離応力の変動係数 c_v による影響を示す。SiC 介在物は球形とし、2つの平均剥離応力 $\sigma^d = 600 \text{ MPa}$, 1000 MPa について、それぞれ2種類の変動係数 $c_v = 0.1, 0.2$ を与えたときのマクロ応力ひずみ曲線を図-3に示す。この結果を見ると、要素毎に剥離応力がランダムに決まっているため、徐々に剥離が発生していることが確認できる。また、 $c_v = 0.1$ の場合は変動が小さいため剥離の初期段階で大きく応力が低下するが、 $c_v = 0.2$ の場合は大きな応力低下は無くゆっくりと剥離が進展するのがわかる。

(3) 実験値との比較

本手法の有用性を示すため、ボロン/2024Al 複合材料の一軸引張試験⁴⁾との比較を行う。2024Al の材料定数は $E_1 = 55.85 \text{ GPa}$, $\nu_1 = 0.32$, $\sigma_1^y = 79.29 \text{ MPa}$, $h_1 = 68 \text{ MPa}$, $n_1 = 0.135$ とする。一方、ボロンは $E_2 = 379.23 \text{ GPa}$, $\nu_2 = 0.20$ であり、体積比率は $f_2 = 34\%$ とする。ボロンは半径比 1:1:30 の楕円体介在物とし、引張方向と直交するように整列している。平均剥離応力は $\sigma^d = 600 \text{ MPa}$ と設定し、2種類の変動係数 $c_v = 0.1, 0.3$ を考える。マクロ応力ひずみ曲線における実験・解析結果の比較を図-4に示した。異なる c_v による結果は、初期剥離時こそ異なるものの、その後はどちらも一定のマクロ応力を維持しながら変形が進んでおり、実験値を良く再現できていることがわかる。

5. ハイブリッド複合材料の一軸引張解析

不飽和ポリエステルをガラスファイバー (GF) とカーボンファイバー (CF) の2種類の介在物で補強したハイブリッド複合材料を例にして考える。不飽和ポリエステル, GF, CF のヤング率をそれぞれ $E_1 = 4 \text{ GPa}$, $E_2 = 74 \text{ GPa}$, $E_3 = 235 \text{ GPa}$, ポアソン比をすべて 0.3 とし、簡単のためすべて弾性体とする。体積比率は $f_2 = 40\%$, $f_3 = 17\%$ とし、半径比 3:1:1 の回転楕円体介在物がランダムに向いているとする。GF, CF の平均剥離応力をそれぞれ $\sigma^d = 1.3 \text{ GPa}$, 1.8 GPa , 変動係数をどちらも $c_v = 0.3$ とした場合のマクロ応力ひずみ曲線は図-5のようになる。この結果より、単繊維複合材料である CFRP や GFRP は剥離が生じると急激に剛性が低下するが、ハイブリッドにすることで一方の介在物が剥離しても他の介在物が補強材として働くため剛性が高まることがわかる。

6. まとめ

剥離応力のばらつきを考慮した解析的界面剥離モデルを提案し、2相複合材料の剥離の発生と進行を追跡することができた。また、単繊維複合材料とハイブリッド複合材料のマクロ挙動を比較し、ハイブリッド化による効果と本モデルの有用性を示した。

参考文献

- 1) グエン デュイ シン, 斉木功, 岩熊哲夫: 解析的平均化手法に界面剥離を組み込んだ複合材料要素, 応用力学論文集, Vol.10, pp.415-423, 2007.
- 2) 小山茂, 片野俊一, 大上俊之, 岩熊哲夫: 複合材料や多結晶金属の平均弾塑性挙動予測の一手法, 土木学会論文集, Vol.64, pp.121-132, 2008.
- 3) 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.
- 4) Adams, D.F.: Inelastic analysis of a unidirectional composite subjected to transverse normal loading, *J. Composite Materials*, Vol.4, pp.310-328, 1970.