

I-27

複合材料中の繊維の界面剥離と
後続損傷のシミュレーション

東北大学工学部

○学生員 谷田貝 圭介

東北大学大学院工学研究科

正員 岩熊 哲夫

1. はじめに

複合材料は、構成する材料の特性や形状、混合比率を変えることにより多様な設計が可能のため、幅広い分野で使用されている。繊維強化材等の複合材料の設計を行う際には、介在する繊維の界面剥離や損傷による脆性化も考慮しなければならない。このような複合材料の挙動を、設計を念頭に置いて解析的平均化手法を用いた有限要素法でシミュレーションしてみる。

2. 構成モデル

(1) 森・田中理論による平均化

森・田中理論を概説すると、母材の弾性係数を C_M 、介在物の弾性係数を C_I 、介在物の体積比率を f としたとき、平均弾性テンソル $\bar{C}$ は、

$$\bar{C} = C_M \{C_M - (1-f)(C_M - C_I)S\}^{-1} [C_M - (C_M - C_I)\{S - f(S - I)\}] \quad (1)$$

となる。 I は単位テンソル、 S は母材のポアソン比と介在物の半径比とその方向で決まる Eshelby のテンソル¹⁾である。本研究では平面ひずみ問題としている。

(2) 剥離介在物の直交異方弾性係数と剥離基準

剥離のモデルは Zhao and Weng²⁾による横等方性材料による置換を用いる。つまり、剥離した介在物は、

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= 0 \\ \sigma_{22} &= \left(C_{22} - \frac{C_{21}C_{12}}{C_{11}}\right)\varepsilon_{22} + \left(C_{23} - \frac{C_{21}C_{13}}{C_{11}}\right)\varepsilon_{33} \\ \sigma_{33} &= \left(C_{32} - \frac{C_{31}C_{12}}{C_{11}}\right)\varepsilon_{22} + \left(C_{33} - \frac{C_{31}C_{13}}{C_{11}}\right)\varepsilon_{33} \\ \sigma_{23} &= C_{44}\varepsilon_{23}, \quad \sigma_{31} = 0, \quad \sigma_{12} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

という応力ひずみ関係になるものと近似する。また、界面剥離の条件は、介在物中の第一主（引張）応力が、材料特性によるある限界値を超えたときに、その第一主応力方向の界面で法線方向に剥離が起こるとした。この限界値である応力を剥離応力 σ_d とした。

(3) 後続損傷

界面剥離も破壊力学的に検討される場合があるが、ここでは剥離後の界面亀裂の発達に破壊力学的要因を用いた損傷でモデル化する。そこである損傷係数 g ($0 < g \leq 1$) を

$$g \equiv \exp(-H\varepsilon_M^{\text{eq}}) \quad (3)$$

と定義しよう。ここに $\varepsilon_M^{\text{eq}}$ は母材の相当塑性ひずみである。 H は何らかの材料パラメータである。これより g の発展則を文献³⁾を参考にして、

$$\dot{g} = -\frac{\sqrt{\pi d} \sigma_Y}{K_{IC}} \varepsilon_M^{\text{eq}} g \quad (4)$$

と書くことにする。つまり

$$H \equiv \frac{\sqrt{\pi d} \sigma_Y}{K_{IC}} \quad (5)$$

と置いた。ここに、 d は介在物の粒径、 σ_Y は母材の降伏応力、 K_{IC} は応力拡大係数である。

この損傷パラメータは初期の状態では1である。母材が剥離した後に徐々に0に近づいていくものとし、介在物のヤング率 E_{ini} を $E \equiv gE_{\text{ini}}$ として減少させることによって、介在物の脆性化をモデル化した。

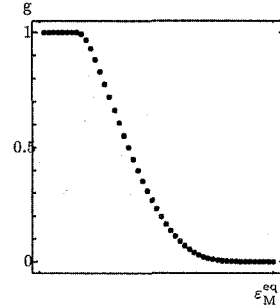


図-1 損傷係数 g

3. 解析例

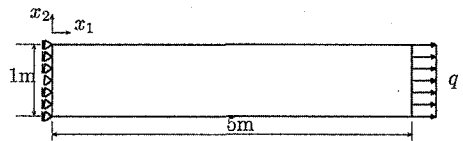


図-2 解析対象

図-2 のような桁高 1m、スパン 5m の領域の引張と曲げを対象とする。メッシュ分割数は x_1 方向に 30 分割、 x_2 方向に 6 分割、全体で 180 の正方形に分割した。材料定数は文献⁴⁾を参考に、母材、繊維介在物のヤング率、ポアソン比をそれぞれ $E_M = 60$ GPa、 $E_I = 450$ GPa、 $\nu_M = 0.3$ 、 $\nu_I = 0.2$ とした。介在物は、 x_1x_2 平面上で短軸と長軸の比が 1:5 の楕円柱とし、体積比率は 5% である。剥離応力 $\sigma_d = 200$ MPa、母材の降伏応力 $\sigma_Y = 290$ MPa とした。

(1) 引張

引張の載荷は図-2のようにし、図-3に荷重変位関係を示した。荷重が35 MN/mで剥離が起こり、55 MN/m付近で降伏した。図上で損傷なし、と記したのは前章で導入した損傷係数を考慮しない場合である。剥離、降伏後に損傷により剛性が低下していくことがわかる。

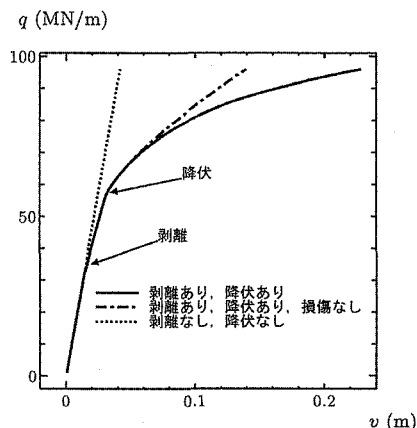


図-3 剥離、降伏と損傷の有無

次に、介在物のサイズ効果を示したのが図-5である。介在物の粒径 d を1～100 mmの範囲で変化させた。粒径以外の他のパラメータは、母材の降伏応力 $\sigma_Y = 290$ MPa, 応力拡大係数 $K_{IC} = 1.1$ MPa $\cdot\sqrt{m}$ としてある。材料全体の剛性を比較するため、弾性域から変位を0.06 m オフセットして荷重を算定して比較した。粒径 d が大きいほど、損傷による剛性低下の影響が強く出ることがわかる。

(2) 曲げ

図-2の載荷 q を鉛直方向下向きの等分布荷重とした。荷重が10 MN/mで付近から剥離が始まり、20 MN/m付近から降伏が始まった。前節の引張と比較して、荷重変位関係における傾きが非線形に変化していくのは、引張では界面剥離、母材の降伏がそれぞれ全ての領域で同時に発生したが、曲げの場合、界面剥離、母材の降伏が発生する領域が徐々に広がっていくためである。

介在物のサイズ効果を示したのが図-6である。弾性域から変位を0.4 m オフセットした荷重を算定して比較した。こちらも右下がりとなり、粒径 d が大きいほど、損傷による剛性低下の影響が強く出ることがわかる。

q (MN/m)

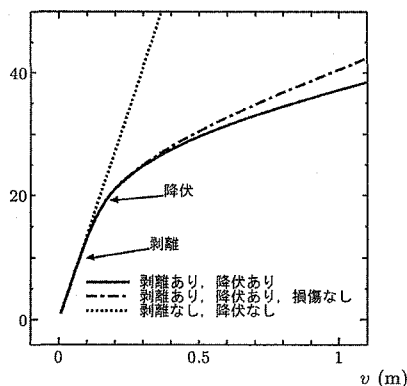


図-4 剥離、降伏と損傷の有無

q (MN/m)

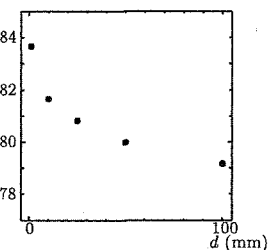


図-5 粒径 d (引張)

q (MN/m)

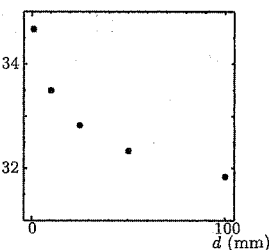


図-6 粒径 d (曲げ)

4. おわりに

界面剥離の後、母材が降伏した後の剛性の低下を考慮するモデルを提案し、解析的な平均化手法に Zhao and Weng²⁾の界面剥離モデルを組み込むことにより、界面剥離の発生と進行を予測することができた。さらに、損傷による剛性低下の影響を示すことができた。また、粒径が小さな介在物を材料とすることにより、上記影響を低減できることがわかった。

参考文献

- 1) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol.21, pp.571-574, 1973.
- 2) 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.
- 3) Mark F. Horstemeyer and, Arun M. Gokhale: A void-crack nucleation model for ductile metals, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.36, pp.5029-5055, 1999
- 4) 樋口耕平, 岩熊哲夫: 界面剥離モデルを組み込んだ複合材料有限要素, 応用力学論文集, Vol.8, pp.367-376, 2005.