

界面剥離と後続損傷の簡易モデルを用いた複合材料の強度予測

Strength of composite materials with a model of damage after debonding

谷田貝圭介*
Keisuke YATAGAI

*構造強度学研究室 (指導教員: 岩熊哲夫 教授)

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。しかし、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を提案し、剥離とその後の損傷の効果を定量的に考察した。

Key Words: 複合材料, 界面剥離, 有限要素

1. 森・田中理論をもとにした解析モデル

(1) 森・田中理論による平均化

森・田中理論を概説する。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 のテンソルである。本研究では平面ひずみ問題とし、これを弾塑性増分理論に拡張したものに基づいて、要素を定式化する。

(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 Weng¹⁾ 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、材料特性としての限界値を超えたときに、その第一主応力方向を法線とする界面で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 と記す。

(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

$$g \equiv \exp(-H\varepsilon_M^d) \quad (3)$$

と定義しよう。ここに ε_M^d は剥離後の損傷のレベルを代表する母材の非弾性ひずみのパラメータで、本研究では具体的には、相当塑性ひずみ ε_M^{eq} とした場合と、剥離した方向の伸びひずみ成分の塑性成分 ε_{dd}^p (d は剥離面の法線方向) の場合の2種類検討した。 H は何らかの材料パラメータである。これより g の発展則は $\dot{g} = -Hg\dot{\varepsilon}_M^d$ となる。文献²⁾でも同様のモデルが検討され、

$$H = \frac{\sqrt{\pi}d\sigma_Y}{K_{IC}} f(\sigma) \quad (4)$$

が用いられている。これは剥離部分を亀裂と考え、その破壊力学的規準で損傷が支配されると考えたからである。ここに d は介在物の粒径、 σ_Y は母材の降伏応力、 K_{IC} は母材の破壊靱性である。また、荷重の影響を考慮する関数 $f(\sigma)$ は、ここでは1とした。

この損傷パラメータは初期の状態では1とする。界面が剥離した後に降伏状態にあれば、徐々に0に近づいていくものとし、介在物のヤング率 E_{im} を $E \equiv gE_{im}$ とし、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。

2. 解析例

(1) 引張試験

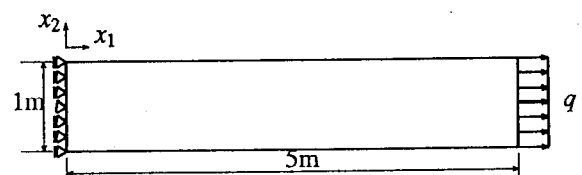


図-1 解析対象

まず、モデルが示す材料特性を把握するために図-1のような桁高1m、スパン5mの領域を引張った。メッ

シユ分割数は 30×6 の 180 の正方形に分割した。材料定数は 2124Al と SiC のものを用いて、母材と繊維介在物の、ヤング率とポアソン比をそれぞれ $E_M = 60 \text{ GPa}$, $E_1 = 450 \text{ GPa}$, $\nu_M = 0.3$, $\nu_1 = 0.2$ とした。介在物は、 x_1x_2 平面上で短軸と長軸の比が $1:5$ の楕円柱で、長軸が x_2 方向を向いているとし、体積比率は 5% である。剥離応力は $\sigma_d = 200 \text{ MPa}$ で、母材の降伏応力を $\sigma_Y = 290 \text{ MPa}$ とした。母材の破壊靱性は $K_{IC} = 1.1 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ とした。

図-2 に荷重変位関係を示した。荷重が 200 MN/m で剥離が起こり、 360 MN/m 付近で降伏した。したがって、本モデルでは降伏後に損傷によって剛性が低下していくはずであるから、図の1点鎖線と実線の差が損傷の影響を示している。

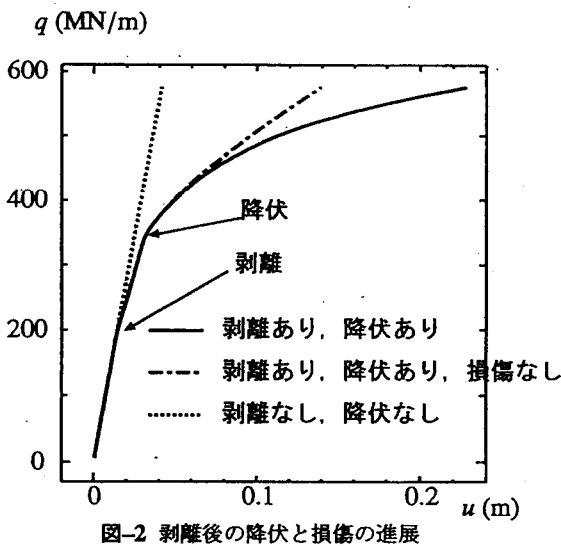


図-2 剥離後の降伏と損傷の進展

次に、介在物のサイズ効果をみるために、 $1 \sim 100 \text{ mm}$ の範囲の異なる粒径 d を持つ複合材料で引張試験をした結果が図-3 である。式 (4) で粒径の平方根に比例して剛性を弱くしているため、粒径が大きい程剛性が低下している。強度の目安として、図に破線で示したように、 0.06 m オフセット変位を用いたレベルでの q の値 q_Y を定義して比較する。これを $\{q_Y - q_Y(\text{損傷無し})\}$ で図-4 に示した。これも式 (4) の影響を強く受け、 d のほぼ平方根に比例して強度も小さくなることが示されている。

(2) 曲げ

次に損傷の進展を検討するため、図-1 の領域を片持ち梁と考へて、鉛直方向下向きの等分布荷重 q を作用させた。荷重変位曲線は図-2 とほぼ同じであった。そのとき g が 0.2 以下になった要素数の割合を図-5 に示した。中立軸より下方は圧縮状態となるため、 $q = 50 \text{ MN/m}$ あたりから損傷の増加率は減少しているが、実験で観察される損傷の進展と定性的には同様の傾向を示している。

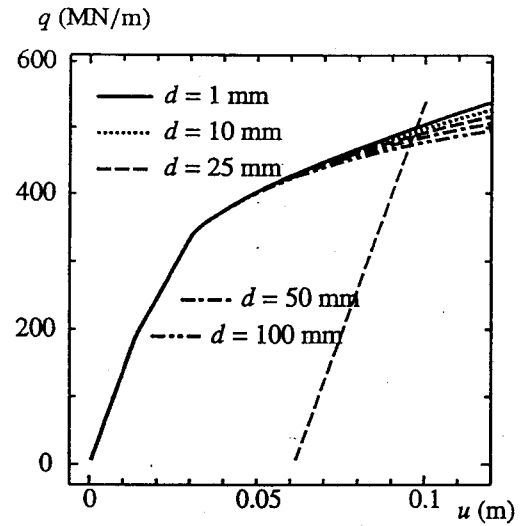


図-3 粒径 d による影響 1

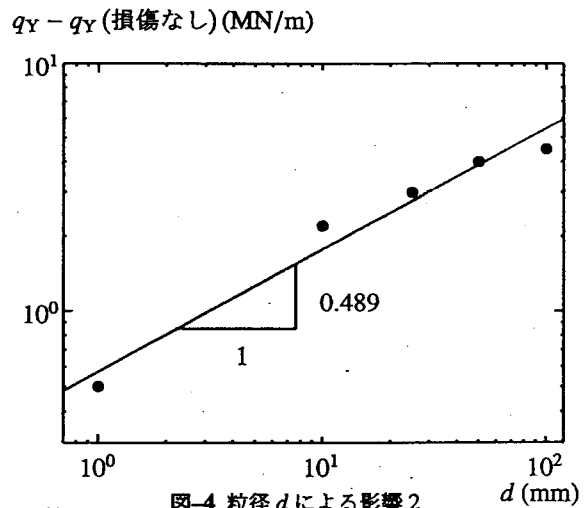


図-4 粒径 d による影響 2

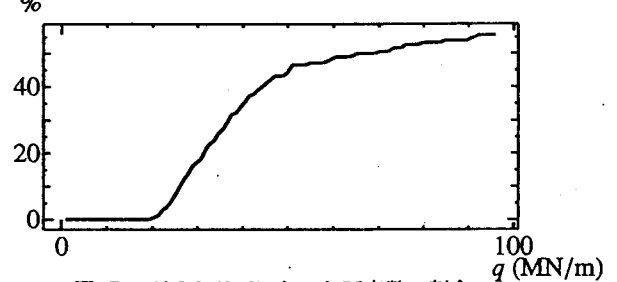


図-5 g が 0.2 以下になった要素数の割合

3. 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損傷として考慮し、剥離の進展を予測するモデルを提案した。損傷による剛性や強度の低下への影響を定性的に示すことができた。

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) Horstemeyer, M.F. and Gokhale, A.M.: A void-crack nucleation model for ductile metals, *Int. J. Solids Structures*, Vol.36, pp.5029-5055, 1999.

(2006年2月14日提出)