101 周期クラスターモデルによる繊維複合材料の界面はく離評価

Evaluation of Delamination along Fiber-Matrix Interface of Composites Using Periodical Cluster Model

正 渋谷 嗣 (秋田大)

Yotsugi SHIBUYA, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita

Mechanical behavior of the metal matrix composite is affected by microscopically distributed residual stress owing to interaction of fibers. A periodical cluster model is made to analyze both macro- and microscopic behavior of the composite. The fiber-matrix interface of the composite is modeled as Coulomb frictional contact under compressive residual stress. To solve for the perturbed displacement field of the composite, boundary integral formulation is introduced into the interface contact problem. The formulation enables simultaneous numerical calculations for macro- and microscopic fields to evaluate nonlinear mechanical behavior of composite.

Key Words: Fiber Composite, Cluster model, Delamination, Homogenization Theory

1. 緒言

複合材料の複合効果を高めるには強化繊維の含有率を大きくすることが有効であり、最も稠密な配列は六角形配列となる。繊維含有率の高い複合材料の繊維配列は、六角形配列に近い微視構造になるために、六角形配列の周期性を仮定した複合材料のモデルが、合理的なモデルとして取り扱われてきた。一方、実際の材料は繊維配列に不均一性を有することから、擬似的にランダムな繊維配列をボロノイセルで構成した複合材料の微視構造モデルが、繊維配列の不均一性を考慮する方法として提案されている¹⁾。しかし、界面の挙動は材料の残留応力と密接に関連するので、繊維干渉の効果をより明確にして検討する必要がある。

本研究では金属基複合材料の繊維の干渉の影響をより単純化したモデルを提案し、非線形挙動に対する繊維の干渉と界面の効果を明らかにした。実際の材料の持つ微視構造の不均一性と繊維干渉の効果を定量的に議論するために、周期的な六角形配列を基本として、繊維の偏心を考慮した微視構造モデルを採用した。

Fig.1 A periodical cluster model of fiber composite.

数値計算においては温度依存性のある非線形な応力、ひずみ関係におよぼす繊維の干渉と界面の効果を微視的な応力場の解析に基づき検討した。

2. 周期的クラスターモデル

実際の材料の持つ不均一性による繊維の偏りの影響を検討するために、ここでは正六角形の周期的な基本セルの内部で繊維に偏心が生じているとし、その複数のセルを1つのクラスターとして周期的に配列させたモデルを図1のように考える。このようなモデルを構成することにより、強化繊維の含有率を変えずに不均一な繊維分布による繊維の干渉の効果を検討することができる。

解析には繊維方向を x_3 軸とする直角座標系 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ と3つの六角形の基本セルからなるクラスターの内部に繊維方向を y_3 軸とする微視的な直角座標系 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3)$ を用いる。複合材料の境界は無視できるほど大きいとし、巨視的に一様なひずみ ε_{ij}^* が与えられている場合を考える。

均質化理論を適用するために、巨視的、微視的な2つの座標系 $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ を有する変位成分 u_i^λ をパラメータ λ の漸近展開で表示する。

$$u_i^\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = u_i^{(0)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \lambda u_i^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \lambda^2 u_i^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad (1)$$

ただし、 λ は微視組織の微細さを表わすパラメータである。 $u_i^{(0)}$ を巨視的な変位として考えると、微視的応力 $\sigma_{ij}^{(1)}$ に関して次のように得られる。

$$\sigma_{ij}^{(1)}(\mathbf{y}) = C_{ijkl}(\mathbf{y}) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k^{(1)}(\mathbf{y})}{\partial y_l} + \frac{\partial u_l^{(1)}(\mathbf{y})}{\partial y_k} \right) - \varepsilon_{kl}^T(\mathbf{y}, T) + \varepsilon_{kl}^*(\mathbf{x}) \right] \quad (2)$$

ここで、 ε_{kl}^T は熱ひずみ成分である。

3. 界面モデルと周期境界条件

微視的擾乱変位を境界積分方程式によって記述することができるので、複合材料の境界界面の挙動をより詳細に検討することが可能である。1つのクラスターに3個の繊維を含む

Fig.2 local coordinate systems in the cluster model.

図3のモデルにたいして、巨視的応力ひずみ関係を次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^*(x) = & \frac{1}{V} \left\{ \sum_{p=0}^3 \int_{\Gamma_{mp}} \frac{1}{2} C_{ijkl}^m [u_k^{m(1)}(y) n_l^{m(1)}(y) \right. \\ & + u_k^{m(1)}(y) n_l^{m(1)}(y)] d\Gamma(y) + V_m C_{ijkl}^m [\varepsilon_{kl}^*(x) - \varepsilon_{kl}^{Tm}] \\ & + \sum_{p=1}^3 \int_{\Gamma_{fp}} \frac{1}{2} C_{ijkl}^f [u_k^{f(1)}(y) n_l^f(y) \\ & + u_k^{f(1)}(y) n_l^f(y)] d\Gamma(y) + 3V_f C_{ijkl}^f [\varepsilon_{kl}^*(x) - \varepsilon_{kl}^{Tf}] \} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 n_k は境界の外向き単位法線ベクトル成分である。

その境界条件を与えるために単位セル内の微視的座標系に対して図3に示すように半径 a のそれぞれの繊維の中心を原点とする局所的な極座標系 (r_i, θ_i) ($i=1,2,3$) を用いる。また、単位セルの外側に対して、六角形の各辺の中央を原点とする局所座標系 ξ_i ($i=1,2,\dots,12$) をおくと、単位セル外側の境界条件は周期性を考慮して定めることができる。擾乱変位と表面力は y の関数であり周期性を有していることから、単位セルを1周期移動しても同じ状態にある。外側境界の境界条件を局所座標系 ξ_i ($i=1,2,\dots,12$) に沿って、次のように与えることができる。

$$u_i^{m(1)}(\xi_1) = u_i^{m(1)}(-\xi_6), \quad t_i^{m(1)}(\xi_1) = -t_i^{m(1)}(-\xi_6) \quad (4)$$

$$u_i^{m(1)}(\xi_2) = u_i^{m(1)}(-\xi_9), \quad t_i^{m(1)}(\xi_2) = -t_i^{m(1)}(-\xi_9) \quad (5)$$

$$u_i^{m(1)}(\xi_3) = u_i^{m(1)}(-\xi_8), \quad t_i^{m(1)}(\xi_3) = -t_i^{m(1)}(-\xi_8) \quad (6)$$

$$u_i^{m(1)}(\xi_4) = u_i^{m(1)}(-\xi_{11}), \quad t_i^{m(1)}(\xi_4) = -t_i^{m(1)}(-\xi_{11}) \quad (7)$$

$$u_i^{m(1)}(\xi_5) = u_i^{m(1)}(-\xi_{10}), \quad t_i^{m(1)}(\xi_5) = -t_i^{m(1)}(-\xi_{10}) \quad (8)$$

$$u_i^{m(1)}(\xi_7) = u_i^{m(1)}(-\xi_{12}), \quad t_i^{m(1)}(\xi_7) = -t_i^{m(1)}(-\xi_{12}) \quad (9)$$

境界積分方程式と巨視的応力(3)は境界に沿って離散化して求めることができるので、境界条件を考慮して解を得ることができる。

4. 計算結果と考察

基本セルを正六角形としたとき、基本セルの大きさと繊維の体積含有率 C_f との関係は次のように示すことができる。

$$C_f = \frac{2\pi a^2}{\sqrt{3} d_c^2} \quad (10)$$

ただし、 a は繊維の半径、 d_c は正六角形基本セルの内接円の直径に対応する。

数値計算に用いた繊維とTi合金について、繊維の横弾性係数とポアソン比は $\mu_f = 175 \text{ GPa}$, $\nu_f = 0.17$ を用いた。また、Ti合金は $\mu_m = 41.4 \text{ GPa}$, $\nu_m = 0.33$ とした。残留応力を評価するために、複合材料の作製温度 $T_r = 925^\circ\text{C}$ で残留応力が零であると仮定し、 20°C の温度で熱ひずみを求めた。

図3は温度 20°C 、繊維母材界面の摩擦係数 $k = 0$ として、繊維に対して横方向の引張り負荷に対する界面の開口の挙動を示したものである。図では界面の全体の領域に対する開口領域の割合 D_c を用いている。繊維の偏りによって繊維間隔 d_f が小さくなると、小さいひずみ段階から開口が生じる。また、繊維間隔が小さい場合には、界面に沿う応力分布の変動が大きいことから、開口の進展にも変動が見られる。繊維間隔が大きい場合は界面の開口が急激に生じ、巨視的応力、ひずみ関係に曲線の傾きの変化に関連すると考えることができる。

5. 結言

変位の漸近展開を用いた均質化理論を適用して複合材料の非線形挙動について繊維と界面の相互の影響を考慮して検討した。界面は繊維間隔が大きいほど開口が急激に進展することが明らかになった。

文献

- (1) Shibuya, Y., Thermo-Mechanical Behavior of Quasi-Random Fiber Composite and Its Modeling, Proc. 5th Int. Congress on Thermal Stresses, 1 (2003), MA10-4-1-4.

Fig.3 Extension of opened area along the fiber-matrix interface.