粒子分散複合材料における粒子寸法効果とはく離損傷を考慮した有限要素解析とき裂先端場の評価

藤井朋之^{*1}, 東郷敬一郎^{*1}, 加藤大輔^{*2}, 伊東 悠^{*3}, 島村佳伸^{*1}

Finite Element Analysis of a Crack-tip Field Taking Account of Particle Size Effect and Debonding Damage in Particulate-Reinforced Composites

Tomoyuki FUJII^{*4}, Keiichiro TOHGO, Daisuke KATO, Yu Ito and Yoshinobu Shimamura

^{*4} Shizuoka univ. Dept. of Mechanical Engineering
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, 432-8561, Japan

This study deals with an analysis of a crack-tip field of particulate-reinforced composites which can describe the evolution of debonding damage, matrix plasticity and particle size effect on deformation and damage. Numerical analysis was carried out on a crack-tip field in elastic-plastic matrix composites reinforced with elastic particles. The particle size effect on deformation is realized by introducing dislocation plasticity for stress-strain relation of in situ matrix in composites using the Nan-Clarke's simple method, and the particle size effect on damage is described by a critical energy criterion for particle-matrix interfacial debonding. The stress distribution ahead of the crack-tip field shifts upward with decreasing particle size. The debonding damage initiates from a crack tip and progresses ahead of the crack-tip. The larger the particle size is, the larger the damage zone is. The stress distribution shifts downward in the progressive damage zone.

Key Words : Particulate-reinforced composite, Debonding Damage, Size effect, Crack-tip field

1. 結 言

マトリックス中に粒子を分散させることにより機械的特性を改善した粒子分散複合材料の開発が行われている。粒子分散複合材料では、マトリックスと粒子のはく離、強化材の割れ損傷が進行し機械的特性に大きな影響を及ぼす。実部材として複合材料を使用する場合には、き裂や切欠の応力集中部が存在するため、応力集中部の応力/ひずみ場はマトリックスの塑性変形や粒子の損傷の影響を受け、破壊挙動は複雑になる。粒子分散複合材料の応力集中部ではなく離損傷挙動や粒子寸法効果の解明が重要である。

本研究では、粒子寸法効果と強化材のはく離損傷を考慮した有限要素法の開発を行い、平均粒子寸法の異なる粒子分散複合材料のき裂先端場の解析を行い、き裂先端場におけるはく離損傷および平均粒子寸法の影響の検討を行った。

2. 解析方法

2・1 増分形損傷理論 Tohgo らは、Eshelby の等価介在物法と Mori-Tanaka の平均場理論に基づき、はく離損傷が進行する複合材料の損傷理論を開発した¹⁾。はく離した粒子の応力は解放され、その粒子は載荷能力を失うためボイドと見なされる。つまり損傷の進行は粒子体積率の減少およびボイド体積率の増加により記述される。増分変形前の状態は、完全な粒子の体積率 f_p 、はく離した粒子の体積率 f_d で表される。次増分の間にはく離損傷を起こす粒子の体積率を df とすると、変形後の状態は、完全な粒子の体積率 $f_p - df$ 、はく離した粒子の体積率 $f_d + df$ で表される。増分変形に対する複合材料のひずみ増分、応力増分の関係は次式のように記述される。

$$d\varepsilon_{kk} = \frac{1}{3\kappa_t} d\sigma_{kk} + \frac{1}{3\kappa_d} \sigma_{kk}^p df \quad (1)$$

$$d\varepsilon_{ij}' = \frac{1}{2\mu_t} d\sigma_{ij}' + \frac{1}{2\mu_d} \sigma_{ij}'^p df \quad (2)$$

ここで、 $\kappa_t, \kappa_d, \mu_t, \mu_d$ はマトリックス、粒子の弾性係数により与えられる定数である。

2・2 粒子寸法効果 複合材料の損傷理論に機械的特性の粒子寸法効果を導入するために、Nan-Clarke の方法を用いた²⁾。複合材料のマトリックスの相当応力-相当ひずみ関係は、Ramburg-Osgood の式で表される。

^{*1} 正員, 静岡大学 (〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)

^{*2} 学生員, 静岡大学 工学部

^{*3} キャタピラージャパン(株)

E-mail: tfujii@ipc.shizuoka.ac.jp

$$\varepsilon_e^0 = \frac{\sigma_e^0}{E_0} + \lambda \frac{\sigma_0^0}{E_0} \left(\frac{\sigma_e^0}{\sigma_0^0} \right)^{1/n} \quad (3)$$

ここで、 E_0 、 σ_0^0 、 n は、それぞれ、ヤング率、降伏応力、加工硬化指数で、 λ は材料定数である。Nan-Clarkeは、マトリックス材料の応力-ひずみ関係は複合材料中では粒子の影響を受けるとし、 σ_0^0 に対して以下の修正を行った。

$$\sigma_0^0 = (\sigma_0^0)_{\text{Bulk}} + \Delta\sigma_0^0 \quad (4)$$

$$(\Delta\sigma_0^0)^2 = (\Delta\sigma_{OR}^0 + \Delta\sigma_{EN}^0)^2 + (\Delta\sigma_{ISO}^0)^2 + (\Delta\sigma_{CTE}^0)^2 \quad (5)$$

$$= \left(\xi \mu_0 b \sqrt{\frac{4f_p}{\pi d^2}} + \eta \mu_0 \sqrt{\frac{f_p \varepsilon_e^{op} b}{d}} \right)^2 + \left(\zeta \mu_0 f_p \sqrt{\frac{\varepsilon_e^{op} b}{d}} \right)^2 + \left(\gamma \mu_0 b \sqrt{\frac{6\Delta T \Delta \alpha f_p}{bd(1-f_p)}} \right)^2$$

ここで、 μ_0 、 b は、それぞれマトリックスのせん断弾性係数、バーガースベクトル、 d は粒子直径、 ΔT は熱処理時の温度と室温の温度差、 $\Delta \alpha$ はマトリックス材料と粒子の熱膨張係数差である。 ξ 、 η 、 ζ および γ は定数である。

2・3 粒子寸法分布の考慮 粒子寸法の分布は、対数正規分布に従うとして、次式を用いた。

$$p(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta d} \exp \left[-\frac{(\ln d - \phi)^2}{2\delta^2} \right] \quad (6)$$

複合材料の巨視的特性に及ぼす各粒子の影響は、体積割合 $p_V(d)$ が有効であると推測でき、次式で表される。

$$p_V(d) = \frac{1}{\int d^3 p(d) dd} d^3 p(d) \quad (7)$$

複合材料の応力などの諸量 A は、次式より与えられる。

$$A = \int p_V(d) A(d) dd \quad (8)$$

ここで、 $A(d)$ は粒子寸法 d の複合材料の諸量の値である。

2・4 はく離損傷 複合材料中の粒子-マトリックス界面のはく離損傷は破壊靱性により規定されると仮定すると、はく離損傷の限界応力と粒子直径の関係は、エネルギーバランスにより次式で表される。

$$\sigma^{\text{cr}} = \frac{K_{\text{IC}}}{\sqrt{d}} \quad (9)$$

ここで、 K_{IC} は限界応力拡大係数である。

2・5 有限要素解析 有限要素法に粒子寸法効果とはく離損傷を考慮した増分損傷理論を導入した。有限要素解析では四角形八節点アイソパラメトリック要素を用い平面ひずみ条件で解析を行った。各ガウス積分点において、はく離が生じる場合には損傷量に応じて、応力増分の低下を算出した。さらに、式(4)(5)により粒子体積率に応じて降伏応力の算出を行った。

図1に3点曲げ試験と要素分割を示す。対称性を考慮して1/2モデルの解析を行った。なお、数値解析手法としてき裂先端での応力特異性の算出を避けるため、鋭い切欠きをき裂とみなした。また3点曲げ負荷における荷重-変位関係より簡便法を用いてJ積分の算出を行った。

2・6 解析条件 解析対象はSiC粒子強化アルミニウム合金複合材料15vol%SiC/A356-T4である。マトリックスであるアルミニウム合金A356-T4の材料特性は $E_0=70\text{GPa}$ 、 $\nu_0=0.33$ 、 $(\sigma_0^0)_{\text{Bulk}}=86\text{MPa}$ 、 $n=0.212$ 、 $b=0.283\text{mm}$ 、 $\lambda=3/7$ とした。SiC粒子の材料特性は $E_p=427\text{GPa}$ 、 $\nu_p=0.17$

である。粒子体積率 f_{p0} は15%とし、 $\alpha=19.3 \times 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$ 、 $\Delta T=520^{\circ}\text{C}$ とした。また式(5)における定数 ξ 、 η 、 ζ 、 γ はそれぞれ1.8、0.4、2.0、1.8とした。

粒子寸法分布は平均粒径 $\bar{d}=7.5\mu\text{m}$ ($\delta=0.55$ 、 $\phi=1.864$) および $\bar{d}=16\mu\text{m}$ ($\delta=0.27$ 、 $\phi=2.735$)とした。本条件では、粒子寸法の標準偏差を $4.46\mu\text{m}$ で一定である。図2に粒子寸法分布を示す。解析においては、粒子寸法 $d=0\sim 70\mu\text{m}$ を100分割、すなわち $d=0.7\sim 69.3\mu\text{m}$ までの粒子が $0.7\mu\text{m}$ 刻みで複合材料中に分散していると見なした。

3. 解析結果と考察

図3に変形の進行に伴うき裂先端の応力およびボイド体積率の分布を示す。粒子のはく離損傷を考慮しない場合を点線、はく離損傷を考慮した場合を実線で示す。また黒線および色線はそれぞれ平均粒径 $\bar{d}=7.5\mu\text{m}$ 、 $16\mu\text{m}$ の結果である。両寸法ともにはく離損傷を考慮しない場合、変形の進行とともにき裂近傍で高い応力を保持していることがわかる。一方、はく離損傷を考慮した場合では、き裂先端近傍からはく離損傷が進行した。はく離損傷によって粒子が载荷能力を失うため、応力分布がはく離損傷を考慮しない場合に比べて低下した。粒子のはく離損傷領域と応力の低下領域が対応しており、変形が進行するにつれて、はく離による応力の低下の影響が大きくなっていることがわかる。

Fig. 1. Three-point-bending specimen and its finite element mesh.

Fig. 2. Distribution of particulate size.

Fig. 3. Distributions of stress and void volume fraction ahead of a crack-tip.

平均粒径 $\bar{d} = 7.5 \mu\text{m}$ と $16 \mu\text{m}$ の結果を比較すると、平均粒子寸法が大きいほうが、はく離損傷の進行が負荷初期で生じることが分かる。さらに平均粒径の増大に伴い、はく離損傷による応力の低下が大きくなるとともに、損傷領域も大きくなった。

図4, 5 は平均粒径 $\bar{d} = 7.5 \mu\text{m}$ と $16 \mu\text{m}$ の解析結果におけるき裂近傍の相当応力およびボイド体積率の分布を示す。図より応力集中部で最もボイド体積率が高くなり、はく離損傷域がき裂先端部から広がっていることが分かる。また、上述のようにはく離損傷領域に対応して応力が低下した。前述のように、平均粒子寸法の増大に伴い、はく離損傷により応力が低下するとともに、損傷領域も切欠き先端近傍に大きく広がっており、き裂先端場における粒子寸法効果が顕著に表れることが確認できた。

Fig. 4. Damage zone and equivalent stress around a crack-tip ($\bar{d} = 7.5 \mu\text{m}$, $J = 4.9 \times 10^2 \text{ J/m}^2$).

Fig. 5. Damage zone and equivalent stress around a crack-tip ($\bar{d} = 16 \mu\text{m}$, $J = 4.9 \times 10^2 \text{ J/m}^2$).

3. 結 言

粒子分散複合材料において、粒子寸法効果と強化材のはく離損傷を考慮した有限要素法により、き裂先端場の解析を行い、き裂先端場におけるはく離損傷の影響の検討を行った。得られた結果を以下に示す。

1. 切欠き先端からはく離損傷が発生し、はく離損傷を考慮しない場合に比べ、はく離損傷が発生した部分において応力の低下が生じた。
2. 平均粒子寸法が大きいほうが、はく離損傷の進行が負荷初期で生じることが分かる。さらに平均粒径の増大に伴い、はく離損傷による応力の低下が大きくなるとともに、損傷領域も大きくなった。き裂先端場における粒子寸法効果が変形・破壊挙動に大きな影響を及ぼすことが示唆される。

文 献

- 1) Tohgo K, Itoh Y, Shimamura Y, A constitutive model of particulate-reinforced composites taking account of particle size effects and damage evolution, Composites Part A, 2010, Vol. 41, pp. 313-321.
- 2) Nan CW, Clarke DR, The influence of particle size and particle fracture on the elastic/plastic deformation of metal matrix composites, Acta Materialia, 1996, Vol. 44, pp. 3801-3811.