

セラミックス基複合材料の繊維架橋効果の2次元 BEM 解析

Two-dimensional Elastostatic BEM Analysis of Bridging Effect in Fiber Reinforced Ceramics

結 城 良 治*・劉 玉 付*
Ryoji YUUKI and Yu-Fu LIU

1. 緒 言

最近、セラミックス基や金属基などの先進複合材料の開発・応用が進む中で、特に界面はく離およびそれを伴う繊維のブリッジング効果のより定量的な解析・評価が強く求められ、活発な研究が見られる^{1)~7)}。セラミックス基複合材料 (FRC) の高靱性化機構には、ブリッジング、相変態およびマイクロクラックなど種々のものが考えられているが、なかでも、繊維によるブリッジング機構が高靱化に最も大きな効果があるものと期待されている³⁾。FRC の繊維とマトリックスの界面は相対的に弱く強化相としての繊維の破壊に先立って、界面のはく離と滑りが生じ、それが繊維のブリッジング機構の必要条件になっているが、それらの定量的な評価法はまだ確立していないのが現状である。

そこで、本研究では長繊維強化複合材料の界面はく離を想定した2次元モデルのBEM弾性解析を行い、FRCにおけるブリッジング機構を定量的に評価するとともにその破壊過程のシミュレーションを試みた。

2. 解析モデルと解析方法

本研究では図1に示す長繊維で一方向に強化された複合材料が繊維方向に一様引張負荷を受ける場合を想定する。マトリックス中のき裂が界面に到達し、界面はく離が生じた場合と繊維を通過してブリッジングが生じた場合の二つのケースについて、BEM弾性解析(2次元平面ひずみ)を行い、界面き裂およびブリッジングしたき裂の応力拡大係数や界面上の応力などを解析する。本解析には著者らが開発したBEM2次元弾性解析コードBEM2D/EWSを用いた⁸⁾。本解析に用いた材料定数を表1に示す。ここではセラミックス基複合材料FRC (Al₂O₃/SiC)⁵⁾を選んだ。なお、本解析ではマトリックスと繊維ともに等方性材とした。

図1のモデルにおいて、繊維およびマトリックスに負

荷される引張応力を σ_f , σ_m とすると、一様引張変位を受ける状態を想定し、平面ひずみ条件下で次式の関係が成立する。

$$\sigma_f = \frac{E_f}{E_m} \frac{(1-\nu_m^2)}{(1-\nu_f^2)} \sigma_m \quad (1)$$

ここで E_f , ν_f は繊維, E_m , ν_m はマトリックスのそれぞれヤング率とポアソン比である。また、繊維の幅 d , マトリックスの幅 b は複合材料中の繊維体積率 V_f から決められ、本解析では、 $b = 2d$, $H/W = 2.5$ と取った。これは $V_f = 1/3$ に対応する。

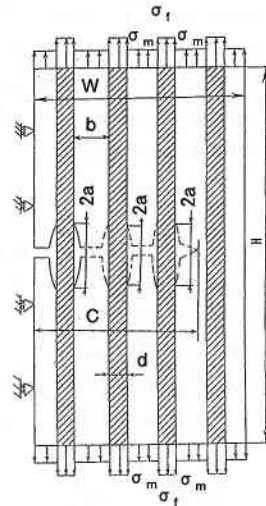


図1 繊維強化複合材の2次元モデル

表1 解析に用いたFRCの材料定数

Materials (matrix / fiber)	FRC (Al ₂ O ₃ / SiC)
Young's modulus (GPa)	400 / 550
Poisson's ratio	0.23 / 0.19

*東京大学生産技術研究所 第1部

3. 解析結果

3.1 ブリッジング効果

マトリックスき裂が繊維を通過し、ブリッジングが生じている場合のマトリックスき裂の K_I を界面はく離がなし、界面はく離のき裂半長 $a/d=1.0$, $a/d=2.0$ の三ケースについて解析し、その結果を $\sigma_m \sqrt{\pi c}$ で無次元化して図2に示す。同じように無次元化して図3には繊維が破断したとして、ブリッジングが作用しない (No Bridging) の場合の K_I の解析結果も示している。この K_I とブリッジングを有するマトリックスき裂の K_I との差ないし比がいわゆるブリッジング効果である。繊維が破断すると、繊維の負担していた応力があるままマトリックスに負荷されるため、ブリッジングがないと、 K_I がきわめて大きくなる。

一方、図2のブリッジングが生じている場合は、マトリックスき裂が成長するにつれ、ブリッジングしている繊維も増え、ブリッジング効果が著しく増大することがわかる。また、マトリックスき裂の先端の位置によりブリッジング効果は大きく変化し、繊維の中間付近位置で

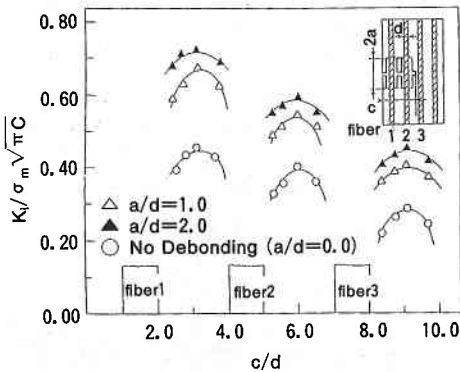


図2 繊維がブリッジングした場合の K_I 値

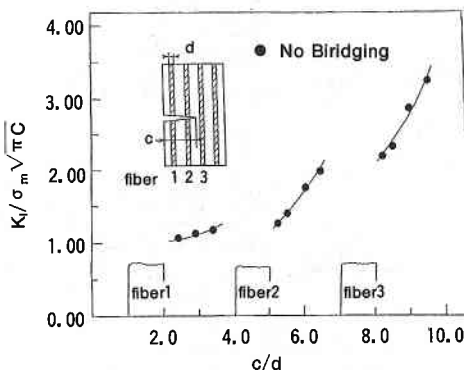


図3 繊維が破断した場合の K_I 値

K_I が最大となる。以上のことからこのブリッジング効果は界面はく離長さに強く依存し、界面はく離長さが大きいほど小さくなることが明らかになった。したがって、FRCのような脆性マトリックスの複合材では、界面はく離を適切に評価することがきわめて重要となり、最近、Evansらを中心にFRCの界面はく離を考慮したブリッジング効果の解析・評価に関する活発な研究が見られる^{4)~7)}。また、この界面はく離の評価法として界面破壊力学の応用が注目されている。以下ではこの界面はく離の生成進展過程について検討する。

3.2 界面はく離の生成機構

マトリックスき裂が繊維に近接した場合の繊維とマトリックスの界面上の応力分布の解析結果を σ_m で無次元化して図4に示す。マトリックスき裂が進むにつれ、界面はく離応力が増大し、このはく離応力の集中により界面はく離を誘起するものと考えられる。

図5はマトリックスき裂が繊維の界面に到達した時点のき裂先端近傍の接線応力 σ_θ の分布を σ_m で無次元化して示す。この σ_θ は r に依存し、ここでは $r/d=0.10$, 0.20 , 0.35 をとった場合の応力分布を示す。界面に到達したき裂は直進して繊維を破断するか界面に沿ってはく

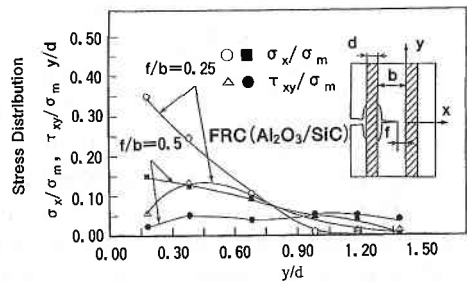


図4 マトリックスき裂が繊維に近接した場合の界面上の応力分布

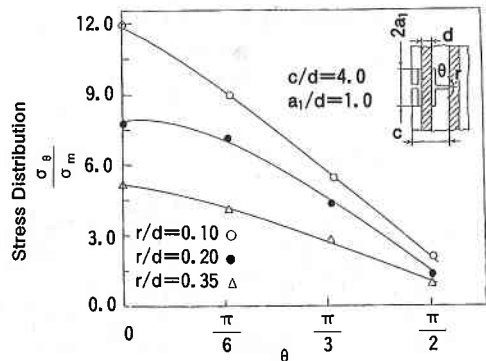


図5 マトリックスき裂が繊維の界面に到達した時点のき裂先端近傍の接線応力の分布

研究速報
 離を生じるかの2通りが考えられるが、この破壊が σ_θ に支配されるものとする、図5から $\sigma_\theta(\theta = \pi/2) / \sigma_\theta(\theta = 0) = 0.20 \sim 0.30$ となるので、繊維の破断に先行し、ブリッジング効果が生じるためには界面強度/繊維強度の比を0.20~0.30より小さくする必要がある。すなわち繊維のブリッジング効果が生じるためには界面強度をある程度弱くする必要がある。なお、従来の研究でも^{6),7)}この比を0.25としている。

3.3 界面はく離の進展の評価

次に繊維とマトリックスの界面はく離が進展する場合の解析も行った。界面き裂先端近傍の応力場は次式で定義される。^{8)~10)}

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l}\right)^{i\epsilon} \quad (2)$$

ここで、 ϵ は応力の振動特異性の強さを表すパイメタル定数であり、 Al_2O_3/SiC 系複合材料では、 $|\epsilon| = 0.01233$ となる。また、 l は基準長さであり、ここでは $l = 2a$ にとった。上式の K_1 と K_2 が界面き裂の応力拡大係数であり、本研究ではBEM解析および応力外挿法により、この K を求めた^{8)~10)}。

なお、この応力拡大係数と界面に沿うき裂進展に伴う全エネルギー解放率 G_T とは次式の関係がある。

$$G_T = \frac{1}{16 \cos^2(\epsilon\pi)} \left[\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\kappa_2} \right] (K_1^2 + K_2^2) \quad (3)$$

ここで、 $\kappa_1 = 3 - 4\nu_1$ (平面ひずみ) とし、 μ_1, ν_1 は母材の、 μ_2, ν_2 は強化材(繊維)のせん断弾性係数、ポアソン比である。

図6、7にこの界面き裂の応力拡大係数 K_1, K_2 と K_2 の解析結果を $\sigma_m \sqrt{\pi c}$ で無次元して示す。図6は一本の繊維のみ、図7は2本の繊維に界面はく離が生じた

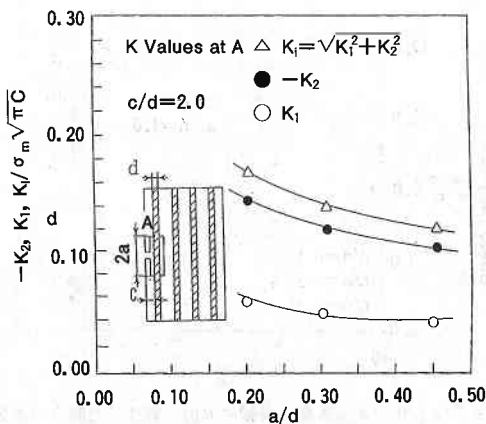


図6 界面き裂の応力拡大係数(1本繊維のブリッジング)

場合である。

図6、7からこの界面き裂の K は K_2 が支配的であり、 K_1 は小さいことがわかる。またエネルギー解放率 G_T に対応する K_i ははく離長さの増加とともに減少している、 K_i ないし G が界面き裂の進展を支配するとすれば、界面はく離はやがて停止し、はく離が成長する限界長さが存在するものと思われる(これについては後述する)。

4. 破壊プロセスのシミュレーション

以上の解析結果によりFRCのブリッジング効果に及

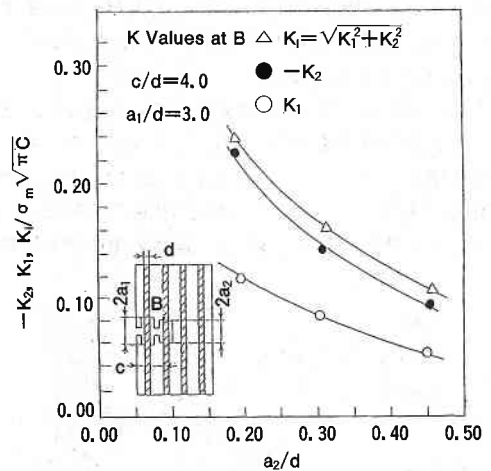


図7 界面き裂の応力拡大係数(2本繊維のブリッジング)

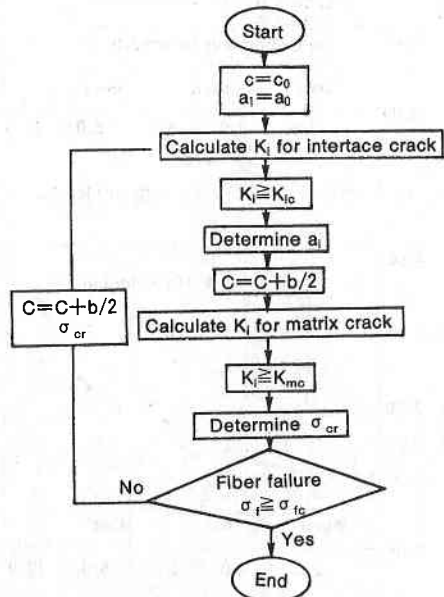


図8 シミュレーションのフローチャート

はす界面はく離の影響および界面はく離の基本的な特性が明らかになったが、FRC の高靱性化機構を解明するためにはマトリックスと繊維の強度のみならず界面強度およびそのクライテリオンも考慮した総合的な評価が必要となる。試みに FRC の破壊過程を本解析の結果を用いてシミュレーションした一例を以下に示す。

4.1 シミュレーションの方法

図 8 に本研究で行ったシミュレーションの方法を示す。まずマトリックスき裂が界面に達した状態を想定し、界面き裂の解析により以下のクライテリオンを用いて界面はく離長さを決定する。

$$K_i \cong K_{ic} \quad (4)$$

ここで K_i はエネルギー解放率に対応する力学パラメータ、 K_{ic} は実験により得られる界面の強度値とする。

次にマトリックスき裂を進展させ、繊維中間位置での応力拡大係数 K_I を解析し、マトリックスき裂が進展し始める荷重を次式により算出する。

$$K_I \cong K_{mc} \quad (5)$$

ここで、 K_I はマトリックスき裂のモード I の応力拡大係数、 K_{mc} はマトリックス単体の破壊靱性値とする。また、この荷重でのブリッジングしている繊維の負荷応力 σ_f を計算し、次式を満たせば繊維が破断し、急速破壊に至ると考える。

$$\sigma_f \cong \sigma_{fc} \quad (6)$$

ここで、 σ_f は繊維の受ける反力、 σ_{fc} は繊維の引張り強さとする。(6)式を満たさなければ上述の操作を繰り返すものとする。

4.2 シミュレーションの結果

4.2.1 はく離長さのシミュレーション 本研究では、 $K_{ic} = 0.1K_{mc}$ 、 $0.15K_{mc}$ の界面強度値を想定した。前述の手法により求めた各繊維に生じる界面はく離の長さの解析結果を図 9 に示す。マトリックスき裂の進展に伴い、生じる界面はく離長さは徐々に小さくなる。また界面強度が大きいほど界面はく離長さが小さくなるのがわかる。

4.2.2 R 曲線のシミュレーション (5)式でマトリックスき裂が進展し始める荷重を算出し、それを σ_{cr} とする。このき裂の進展荷重 σ_{cr} を用いて次式で定義する見かけ上の応力拡大係数 K_{app} を計算し、き裂進展 ΔC に対してプロットすると図 10 に示す R 曲線が得られる。

$$K_{app} = \sigma_{cr} \sqrt{\pi(C_0 + \Delta C)} \quad (7)$$

この図から界面強度が強い方が破壊靱性・抵抗が大き

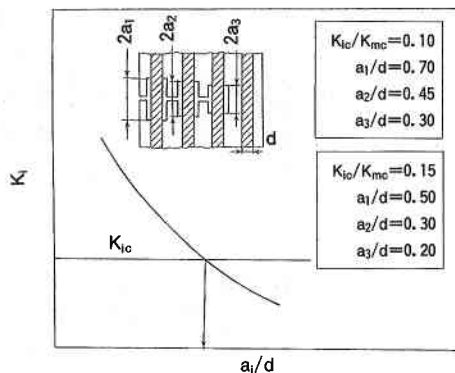


図 9 はく離長さのシミュレーションの結果

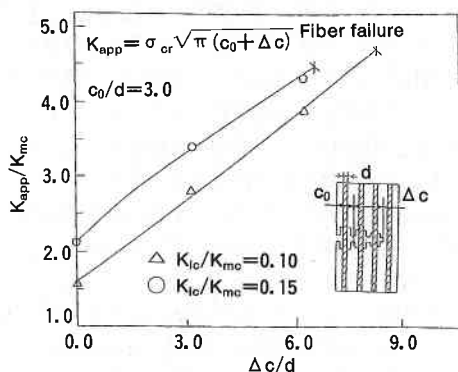


図 10 R 曲線のシミュレーションの結果

くなるが、繊維破断を考慮すると、繊維が破断し不安定破壊に達する限界き裂進展量は界面強度が弱い方が大きく、それゆえ、見かけ上の限界 K_{app} も大きくなること*明らかになった。

以上の結果から FRC の高靱性化を図るためには界面強度を適切にする材料設計の重要性が示唆される。

5. 結 言

本研究では、FRC 複合材料 (Al_2O_3/SiC) の 2 次元モデルについて BEM 解析を行い、界面はく離の繊維のブリッジング効果に及ぼす影響を定量的に明らかにした。また、繊維とマトリックスおよび界面の破壊クライテリオンを導入し、ブリッジング効果および破壊プロセスのシミュレーションの一例を示した。

(1993年 6 月 2 日受理)

参 考 文 献

- 1) D. B. Marshall and B. N. Cox, Acta Metall., Vol. 33, No. 11, 2013, 1985
- 2) M. D. Thouless, Acta. Metall., Vol. 37, No. 9, 2297, 1989 (以下, 略)