431 モデル複合材料を用いたガラス繊維 / エポキシ樹脂 界面破壊基準の検討

Fracture Criterion of Glass Fiber/Epoxy Interface using Model Composite

○ 正 北條正樹 (京都大) 学 五十嵐泰昭 (京都大・院)
飯田行寛 (京都大・院) 正 落合庄治郎 (京都大)

Masaki Hojo, Mesoscopic Materials Res. Ctr., Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan
Yasuaki Igarashi, Graduate Student, Kyoto University
Yukihiro Iida, Graduate Student, Kyoto University
Shojiro Ochiai, Mesoscopic Material Res. Ctr., Kyoto University

The measured values of interfacial strength much depend on the test method. One of the reason for this is the discrepancy between the actual fracture process and the applied mechanical criterion of the fracture, and the quantitative evaluation of interfacial strength has not yet been established. Couple Fiber Shear Method is a new method to evaluate the fiber/matrix interfacial strength. This model composite is composed of two filaments and one resin pocket, and is suitable for the in-situ observation in SEM. Interfacial stress was analyzed using finite element analysis including the influence of thermal stress. In the present study, the effect of fiber diameter was investigated. Experimental results were analyzed using the intensity of stress singularity, K_{ij} . The possibility of the evaluation of the interfacial strength using the parameter, K_{ij} , was discussed.

1. はじめに

複合材料の破壊プロセスにおいて、界面の力学特性は重要な役割を果たす。複合材料のメゾメカニクスの確立において、界面強度の定量的評価がきわめて重要である。しかし、これまで行われてきた界面強度評価は、境界条件が実際の複合材料と大きく異なることが多く、定性的に相对比较をする程度にとどまっている。さらに、問題点としてこれまでの界面強度評価において、破壊を支配する基本的な力学的プロセス、すなわち応力集中部の取り扱い、き裂進展の有無についても、十分な検討が加えられていない。

これまで、著者らはひとつのアプローチとして、実際の複合材料に近い境界条件を与えるマイクロコンポジット法を用いた研究を行ってきた^[1]。しかし、この方法では界面が露出しないため、その場観察によって界面の破壊機構を考察することができないという欠点を有している。

本研究では、以上の経緯により考案した方法 (Couple Fiber Shear法) を用いて試験を行い、ガラス繊維/エポキシ樹脂界面の破壊基準の検討を行った。ここでは界面端近傍の応力特異場に注目し、界面の破壊挙動を把握したうえで、試験片破壊時の応力特異場強さを用いて試験片破壊条件を整理し、界面強度を定量的に評価することが可能かどうかを検討した。

2. 実験および解析方法

2.1 Couple Fiber Shear 法 Couple Fiber Shear 法は Fig. 1 に示すような試験片を用い、2本の繊維に互いに逆向きの引張荷重をかけて界面を破壊させることで界面強度を評価する方法である。この方法により、その場観察によって界面の破壊挙動を直接観察することが可能となった。本研究では、繊維には直径 20 μ m および 30 μ m のガラス繊維 (E ガラス) を用いた。またマトリックスにはビスフェノール A 系エポキシ樹脂エポコート 828 を用い、硬化剤としてトリエチレンテトラミン (C₆H₁₈N₄) を用いた。

Table 1. Material properties.

	Glass fiber	Epoxy resin
Elastic modulus (GPa)	76	4
Poisson's ratio	0.22	0.4
Coefficient of thermal expansion (K ⁻¹)	5 $\times 10^{-6}$	6.2 $\times 10^{-5}$

Fig. 1. Schematics of specimen for Couple Fiber Shear Test.

2.2 3次元有限要素解析 本研究では、3次元モデルを用いて有限要素解析を行った。樹脂付着長さ L、繊維間距離 δ をパラメータとし、解析には有限要素法の汎用解析コード MARC-K7.3.2 およびプリポストプロセッサ Mentat3.3.2 を用いた。解析に用いた材料定数を Table 1 に示す。温度条件として、

樹脂硬化温度を 373K と仮定し、室温 296K までの 77K の温度差を与えた。解析方法は 8 節点 6 面体要素を用いた大変位微小ひずみ解析とした。モデルの要素数は、 L 、 δ によるが、15000–20000 である。

3. 結果および考察

3.1 その場観察による微視観察 静的引張試験を SEM 中で行い破壊挙動をその場観察した。初期欠陥のない試験片の場合のほとんどは破壊が始まると一気にき裂が進展し破壊した。これは、起点となるき裂が入るのに大きな荷重を必要とし、一旦き裂が入るとき裂進展抵抗に比べて十分高い荷重を受けるためと考えられる。これは始め安定破壊した後不安定破壊に至るマイクロコンポジット法とはプロセスが大きく異なる^[1]。また Fig. 2 に界面端近傍の破面写真を示す。マイクロコンポジットの破面^[1]と比較すると、全体的に平坦な破面を呈していることがわかる。したがってこの場合の界面破壊は全般的に開口モードによる破壊が支配的であると考えられる。

3.2 界面端近傍の応力の理論解 3.1 で述べたように、この試験法ではほとんどの場合、一旦き裂が入るとき裂が安定伝ばすることなく不安定破壊する。したがってき裂が発生する条件を把握することが重要であり、本研究では界面き裂なしがない状態での応力特異場の解析を行うことにした。過去に行った界面き裂を考慮に入れた解析^[2]や、その場観察の結果から開口モードによる破壊が支配的であることに着目し、界面に垂直な方向の界面強度の評価を試みた。

材料の組み合わせや界面端の形状から、2次元半無限体の場合の界面端近傍での応力 σ_{ij} は次式で表される^{[3][4]}。

$$\sigma_{ij}(\rho) = \frac{(K_{ij})_N + (K_{ij})_T}{\rho^{0.3689}} + (K_{ijpa})_T \quad (1)$$

ここで $(K_{ij})_N$ 、 $(K_{ij})_T$ は応力特異場強さ、 $(K_{ijpa})_T$ は r に依存しない特解を表す（添字 N、T はそれぞれ外荷重、熱収縮により生じることを表す）。また $r=z/d_f$ (d_f : 繊維直径) は界面端からの距離 z を無次元化したものである。特解 $(K_{ijpa})_T$ は界面に垂直な成分 (rr 成分) については有限要素解析を行った結果、 $(K_{mpa})_T = 16.8\text{MPa}$ (平面ひずみ) と求められた。本研究ではこの 2 次元での解を近似的に 3 次元に適用し、応力特異場強さは、界面の応力分布に式をあてはめて算出した。以下、 $(K_{ij})_N + (K_{ij})_T$ を K_{ij} とおいた。

3.3 実験結果への適用 試験片のパラメータ L 、 δ の値をもとに有限要素モデルを作成し、実験で得られた試験片破壊時の引張応力から、応力特異場強さ K_{ij} を計算し、それを界面強度 $(K_{ij})_f$ としてプロットした結果を Fig. 3 と Fig. 4 とに示す。熱残留応力の有無で比較すると、熱残留応力を考えることで $(K_{ij})_f$ が平均して約 20MPa 増加した。 $(K_{ij})_f$ の分布形状はそれほど変化しないため、熱残留応力を考慮に入れなくても $(K_{ij})_f$ の定性的な評価は可能であるが、定量的に評価するためには熱残留応力を考慮に入れる必要があることがわかった。Fig. 3 と Fig. 4 とをみると $(K_{ij})_f$ は樹脂付着長さや繊維間距離、繊維直径といったパラメータに依存していない分布となっている。また界面き裂を考えた場合の計算も行ったが^[2]、データのばらつきは今回のほうが小さくなっており、この $(K_{ij})_f$ が界面強度のクライテリアとしてより適切ではないかと考えられる。

(結言省略)

参考文献

1. 寺島他, 第 28 回 FRP シンポジウム講演論文集 (1999) 202–203
2. 五十嵐・寺島・北條・落合, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集 Vol. 1 (2000) 575–576

3. 結城編著, 界面の力学, 培風館 (1993) 11–48
4. 井上・古口・矢田, 機論 A-61, 581 (1995) 65–72

Fig. 2. Scanning electron micrograph of fracture surface near the onset point of fracture.

Fig. 3. Relation between intensity of stress singularity at fracture and adhesion length.

Fig. 4. Relation between intensity of stress singularity at fracture and maximum fiber space.