繊維複合材料の界面強度評価

荻原慎二^{*1}, 鹿島彰浩^{*2}, 五十嵐雄一^{*2}
小柳潤^{*3}, 渡辺賢一^{*4}, 上野一郎^{*1}

Evaluation of Interfacial Strength in Fiber Reinforced Composite

Shinji Ogihara^{*3}, Akihiro Kashima, Yuichi Igarashi, Jun Koyanagi, Kenichi Watanabe and Ichiro Ueno

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510, Japan

Glass/epoxy interfacial tensile strength is investigated by the cruciform specimen method. A cruciform specimen which has large width only around fiber embedded in transverse direction can potentially prevent the stress singularity problem. The cruciform specimen geometry is first discussed by means of finite element analysis considering experimental conditions. Transverse tensile test is conducted and interfacial debonding which initiates at the middle of specimen not at edge is observed using the cruciform specimens. The interfacial tensile strength can be obtained by the value of stress concentration factor at interface times specimen stress. The location at which the debonding initiates is discussed and the validity of the evaluation method in this study is verified on an assumption that interfacial tensile strength is as high as or lower than interfacial shear strength.

Key Words : Composite Materials, Interfacial Debonding, Glass Fiber, Epoxy Resin

1. 結 言

繊維強化複合材料において、繊維とマトリックス間の界面は複合材料の力学的特性に重要な役割を果たしている。よって繊維強化複合材料をいっそう優れた材料として活用するためには、界面のより高精度な評価が必要である。界面特性を評価する手法として、様々なものが用いられている。このうち、Cruciform 試験片を用いた界面の引張強度を求める方法は端面での応力特異性の影響を避ける事に特徴がある¹⁻³⁾。

本研究では、GF を繊維、エポキシをマトリックスとしたモデル材料について Cruciform 試験片の有用性を実験的及び解析的に検証することを目的とする。すなわち、Cruciform 試験片及び、通常の試験片 (Straight 試験片) の界面はく離発生、進展挙動を実験的に明らかにする。また、有限要素法を用いた応力

解析を行う。

2 実 験 方 法

実験には、引張荷重方向に直角な方向に繊維を持つ単繊維複合材料を用いた。本研究では繊維に GF (直径 13 μ m)、マトリックス (エポキシ) にはエポコート 828 を主剤に TETA (Triethylenetetramine) を硬化剤にしたものを用いた。試験片形状としては、Straight 試験片と Cruciform 試験片を用意した。

Fig.1 Schematic of specimens
(a) Straight specimen and (b) Cruciform specimen

^{*1} 正員, 東京理科大学 (〒278-8510 野田市山崎 2641)

^{*2} 東京理科大学大学院, ^{*3} 正員, JAXA, ^{*4} 三菱レイヨン

E-mail: ogihara@rs.noda.tus.ac.jp

Fig.1 にそれぞれの試験片形状を示す。それぞれの試験片について、引張試験を光学顕微鏡のステージに取り付けた小型負荷装置を用いて行った。負荷過程における界面はく離発生、進展のプロセスを光学顕微鏡により観察した。繊維から反射される光を強調するために繊維に垂直に両端から光を当てた。引張速度は0.05mm/minで行った。

3. F E M 解析

実験で用いた試験片形状での応力分布をFEM解析(MSC.Marc.)によって調べた。Cruciform試験片のモデル図をFig.2に示す。試験片はx, y, z軸に対称な形状であるため、1/8モデルにし、応力勾配の大きい領域である端面と界面の周辺は要素を細かく設定した。要素は8節点立体要素を使用し、線形弾性問題として解析した。拘束条件はそれぞれの対称面に拘束し、y方向に1%のひずみをモデルの上部に与えた。解析に用いた材料特性と要素数をTable1に示す。

Fig.2 Schematic of a finite element analysis models

Table 1 Material properties and number of elements				
	Young's modults E (GPa)	Poisson's ratio ν	Number of elements	
			Straight-GF	Cruciform-GF
GF	70	0.2	1026	1995
Epoxy	4.28	0.42	3510	5325

4 実験結果および考察

4.1 引張試験 Fig.3 及び Fig.4 にそれぞれ Straight 試験片及び Cruciform 試験片で観察された界面はく離発生、進展の状態を示す。Straight 試験片では、Cruciform 試験片に比較して低応力で端面からはく離が発生し、応力の増大とともに進展していく様子が観察された。Cruciform 試験片では Straight 試験片に比較し、高応力ではく離が発生するが、その際、試験片端面からの発生ではないことが確認できた。また、発生後のはく離の進展は Straight 試験片に比較して急激であった。

Fig.3 Debonding initiation and progress in a Straight specimen

Fig.4 Debonding initiation and progress in a Cruciform specimen

4.2 FEM 解析 Fig.5 は Straight 試験片及び Cruciform 試験片についての界面垂直応力の繊維方向での変化を示す。界面垂直応力は試験片平均応力 (Specimen average stress と呼ぶ) によって正規化した値 (応力比と呼ぶ) を使用している。Straight 試験片では、試験片端面での応力特異性の影響を受け、試験片端面付近では応力が非常に大きくなっていることがわかる。また Cruciform 試験片では、試験片端面での応力がゼロに近く、Straight 試験片のように端面での応力特異性の影響を受けないことが窺える。これより実験で得られたはく離発生挙動が証明される。また Cruciform 試験片での応力比は中央部分で1.46となった。よって、はく離発生時の平均応力にこの応力比をかけることで、はく離発生時の界面垂直応力(界面引張強度)を求めることができると考えられる。Fig.6 に実験により得られた、はく離発生時の Straight 試験片の試験片平均応力、Cruciform 試験片の平均応力及びそれに応力比をかけて求めた界面垂直応力を示す。それぞれの平均値は10.9MPa,

30.8MPa, 45.5MPa となった。これより、この系での界面引張強度は 45.5MPa と推定される。

3) B.S. Majumdar, et al., J.Am.Ceram.Soc., 81, 6, (1998), 1600-1610

Fig.5 Relation between interfacial stress/specimen average stress

Fig.6 Debonding initiation stress and modified stress values by the stress ratio

5 結 言

GF/Epoxy モデル複合材料を用いて界面はく離の発生、進展挙動を観察し、Straight 試験片及び Cruciform 試験片におけるそれらの差異を実験的に明らかにした。また、FEM 解析により Cruciform 試験片を用いることで Straight 試験片にあるような端面の応力特異性影響を避け、界面の引張強度を評価できることを示した。

参 考 文 献

- 1) G.P. Tandon, et al., Composites Science and Technology, 60, (2000), 2281-2295.
- 2) D.B. Gundel, et al., Scripta Metallurgica et Materialia, 33, 12, (1995), 2057-2065.