

Cruciform Specimen による複合材料界面強度評価

東京理科大学 荻原 慎二, 梅崎 岳

Evaluation of Interfacial Strength using Cruciform Specimens

Shinji OGIHARA* and Takashi UMEASAKI**

Abstract: The validity of usage of a cruciform specimen as an evaluation method of interfacial strength is discussed. The advantage of the cruciform specimens is that it can avoid the stress singularity at the free edge. Moreover, to discuss the relation between the interfacial normal stress and the interfacial shear stress when debonding occurs, a specimen which changed the fiber angle to direction of tensile loading is designed. Both experimental approach and analytical approach are employed to discuss the validity of the method. The initiation and propagation of interfacial debonding in both cruciform specimens and straight specimens are experimentally clarified. Stress analysis using finite element method is conducted.

Keyword : Interfacial Strength, Finite Element Analysis, Debonding, Cruciform Specimen

1. 緒言

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。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。

本研究では、界面はく離の発生、進展挙動を観察するため SUS304 を繊維として用い、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。

また、引張方向に対して繊維の角度を変えた Cruciform-75, Cruciform-60 試験片を作成し、はく離が起きるときの引張応力とせん断応力の関係を調べる。すなわち、Cruciform-90 試験片、Cruciform-75 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(FEM)を用いた応力解析を行う。

2. 実験方法

実験には、単繊維複合材料を用いる。繊維に SUS304(直径 100 μ m, Nilaco 社製)、マトリックス(エポキシ)にはエピコート 828 (Japan Epoxy Resin 製) を主剤に TETA(Triethylenetetramine, 昭和化学社製)を硬化剤にしたものを用いた。試験片形状としては、引張荷重方向に直角な方向に繊維を持つ Straight 試験片と Cruciform-90 試験片、引張荷重方向に対し 75 $^{\circ}$ 、60 $^{\circ}$ の角度に繊維を持つ Cruciform-75, Cruciform-60 試験片を用意した。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(z 方向)に両端から光を当てた。引張速度は 0.1mm/min で行った。

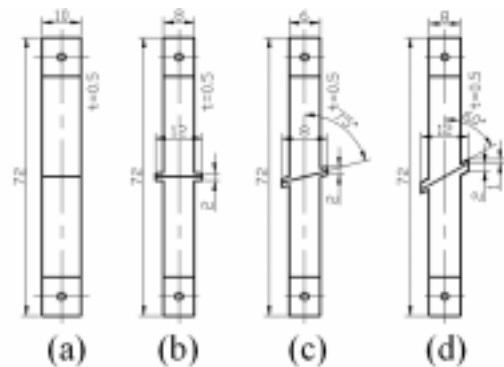


Fig.1 Schematic of specimens

(a) Straight (b) Cruciform-90 (c) Cruciform-75 (d) Cruciform-60

*Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science

**Graduate Student, Tokyo University of Science

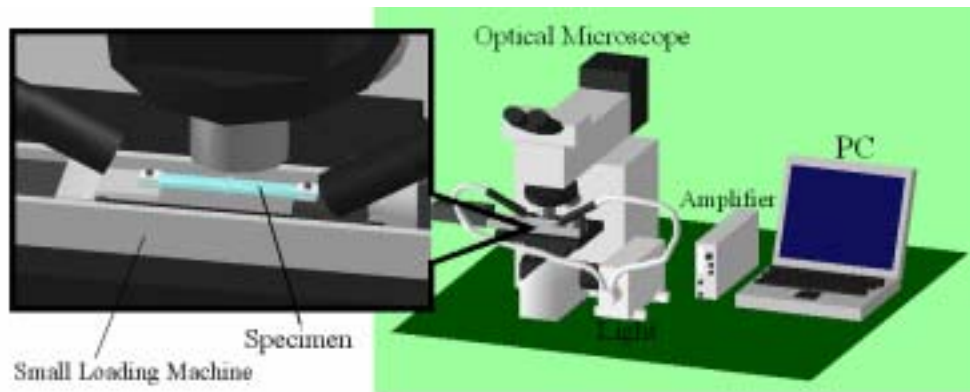


Fig.2 Schematic illustration of the observation system

3 . FEM 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。Straight 試験片, Cruciform-90 試験片は x, y, z 方向に対称な形状であるため, 1/8 モデルにし, Cruciform-75, Cruciform-60 試験片は x 方向に対称な形状であるため, 1/2 モデルに設定した。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, Cruciform-90 試験片は y 方向に 0.1mm の変位をモデルの上部に与え, Cruciform-75, Cruciform-60 試験片については y 方向に 0.1mm の変位をモデル上部に 1MPa の応力を与え, モデル下部を拘束した。材料定数と要素数を Table1 に示す。

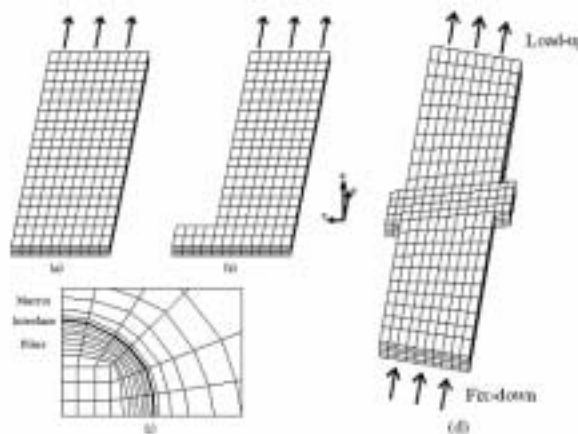


Fig.3 Schematic of finite element analysis models

(a)Straight (b)Cruciform-90 (c)enlarged view of fiber/matrix interface region (d)Cruciform-75, Cruciform-60

Table1 Material properties and Number of elements

	E (GPa)	ν	Number of elements			
			Straight	Cruciform-90	Cruciform-75	Cruciform-60
SUS304	200	0.3	1653	2280	9120	13680
Epoxy	3.94	0.4	4785	7560	18960	29640

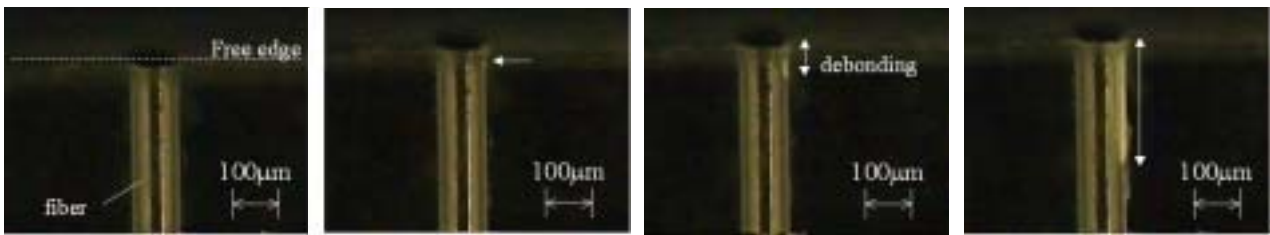
4 . 結果および考察

Fig.4 ~ 7 に単繊維複合材料引張試験において, それぞれの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-90 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-90 試験片, Cruciform-75 試験片, Cruciform-60 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かった。

FEM の結果を以下に示す。ここで界面垂直応力を試験片平均応力(繊維部より離れた平行部での応力, specimen average stress と呼ぶ)で正規化した値(応力比と呼ぶ)を用いる。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分かる。また Cruciform-90 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示唆される。Cruciform-90 試験片での応力比は中央部分で 1.44 となった。Cruciform-75 試験片の界面垂直応力及び界面せん断応力の繊維方向での変化を示す。Cruciform-75 試験片での界面垂直応力の応力比は中央部分で 1.33，せん断応力の応力比は 0.45 となった。Cruciform-60 試験片での界面垂直応力の応力比は中央部分で 1.05，せん断応力の応力比は 0.75 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。

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及び，Cruciform-90 試験片，Cruciform-75 試験片，Cruciform-60 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，界面せん断応力の平均値は 4.77MPa ,39.2MPa ,56.5MPa ,25.9MPa ,42.9MPa ,57.1MPa ,19.0MPa ,20.0MPa となった。これより，この系での界面引張強度は 56.5MPa と見積もられる。



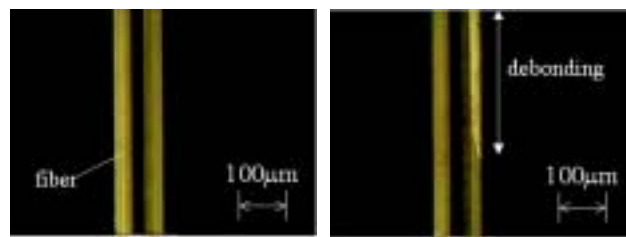
(a) 0MPa

(b) 17.9MPa

(c) 20.7MPa

(d) 31.2MPa

Fig.4 Debonding initiation and progress in a Straight specimen



(a) 0MPa

(b) 24.6MPa

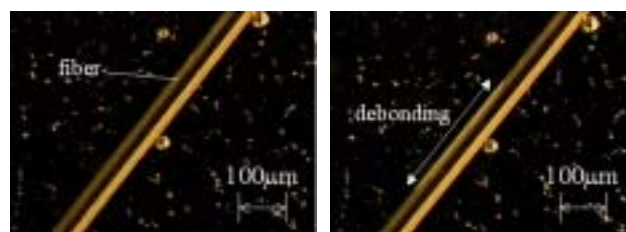
Fig.5 Debonding initiation and progress in a Cruciform-90 specimen



(a) 0MPa

(b) 37.8MPa

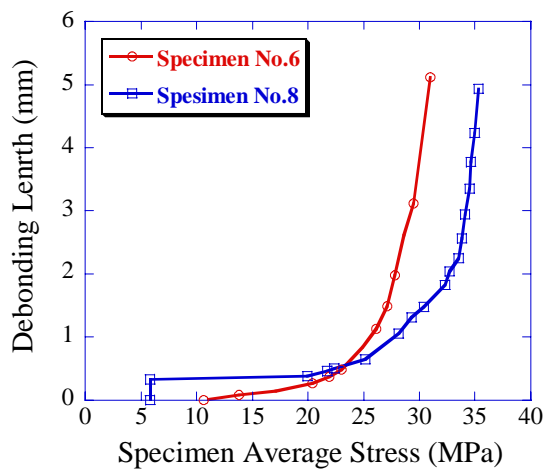
Fig.6 Debonding initiation and progress in a Cruciform-75 specimen



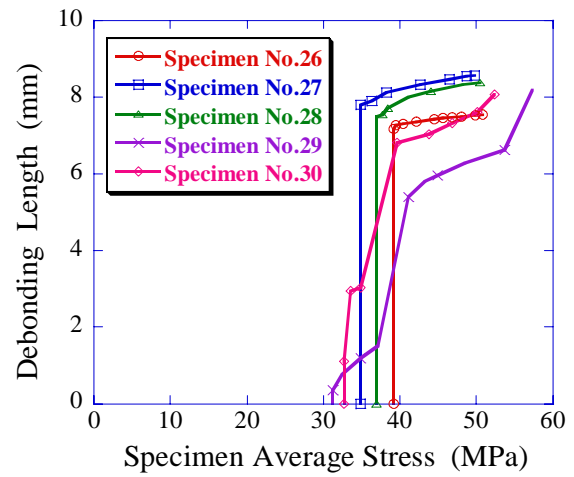
(a) 0MPa

(b) 31.0MPa

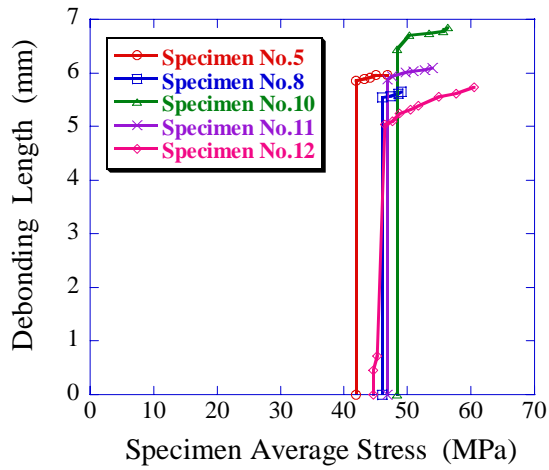
Fig.7 Debonding initiation and progress in a Cruciform-60 specimen



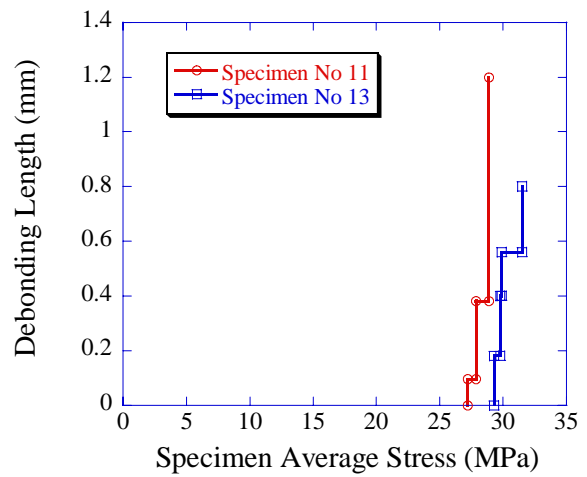
(a) Straight specimen



(b) Cruciform-90 specimen

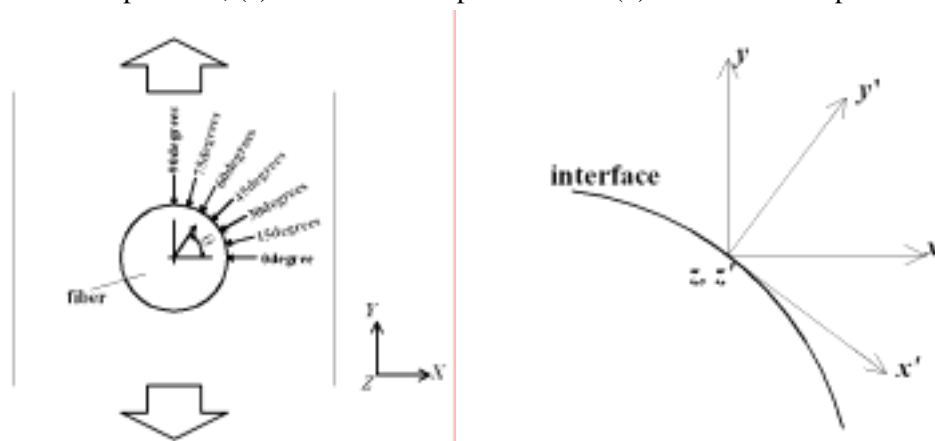


(c) Cruciform-75 specimen



(d) Cruciform-60 specimen

Fig.8 Relation between debonding length and specimen average stress in (a) Straight specimen, (b) Cruciform-90 specimen, (c) Cruciform-75 specimen and (d) Cruciform-60 specimen

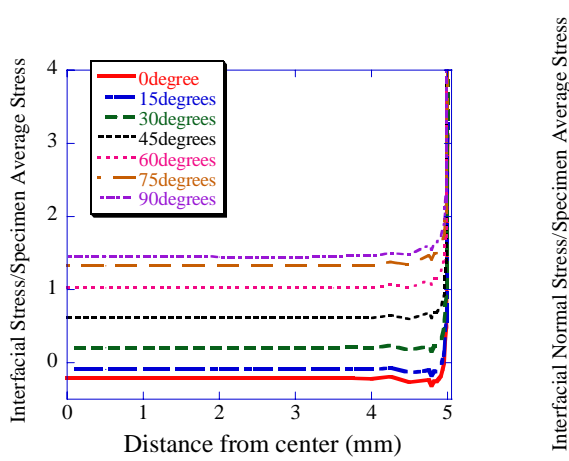


Interfacial Normal Stress : $\sigma_{y'y'}$

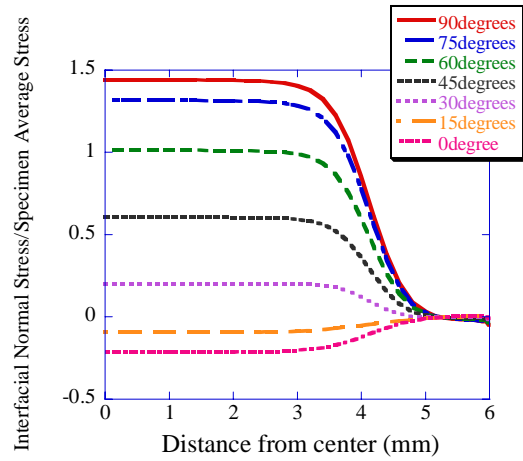
Interfacial Shear Stress : $\tau_{y'z'}$

Specimen Average Stress : Far Field Average Stress

Fig.9 Stress evaluation sites

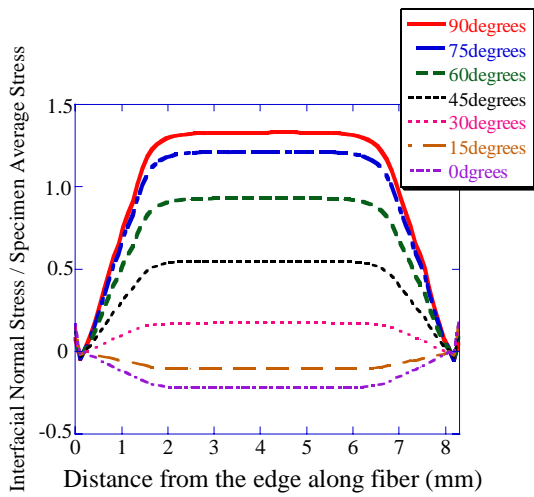


(a) Straight specimen

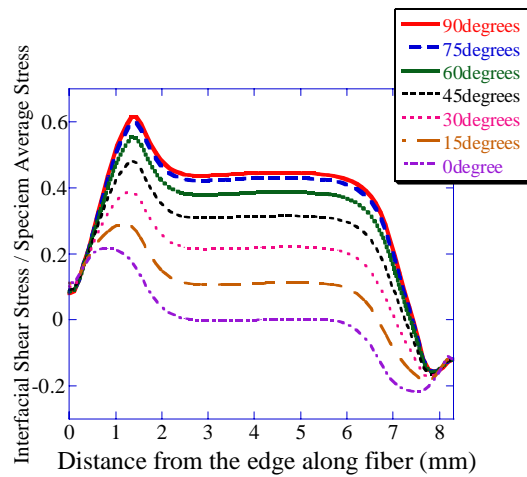


(b) Cruciform-90 specimen

Fig.10 Change in interfacial normal stress along the fiber in the (a) Straight specimen and (b) Cruciform-90 specimen

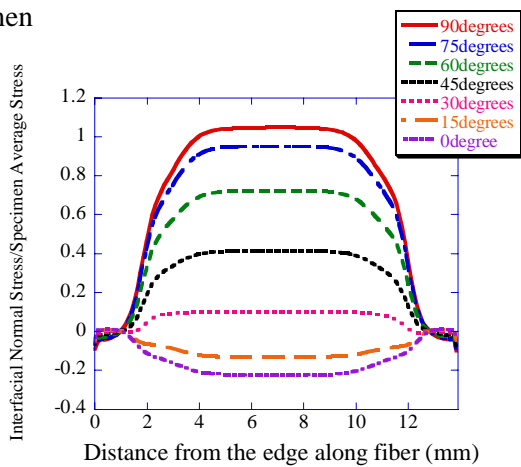


(a) Normal stress ratio

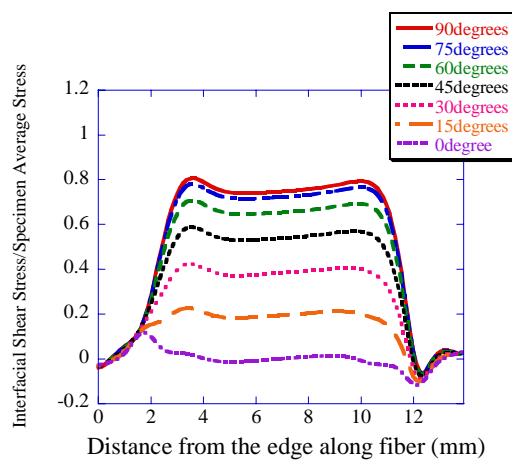


(b) Shear stress ratio

Fig.11 Relation between interfacial stress ratio and distance from the edge along fiber in the Cruciform-75 specimen



(a) Normal stress ratio



(b) Shear stress ratio

Fig.12 Relation between interfacial stress ratio and distance from the edge along fiber in the Cruciform-60 specimen

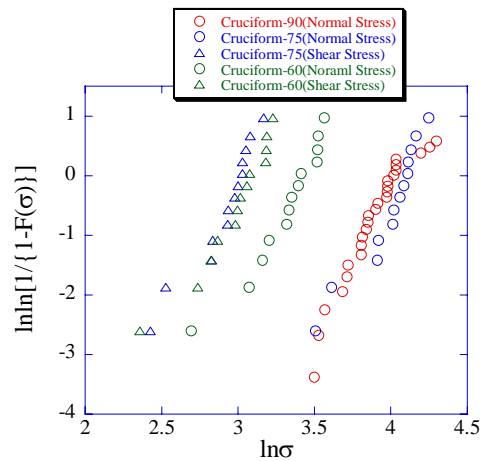
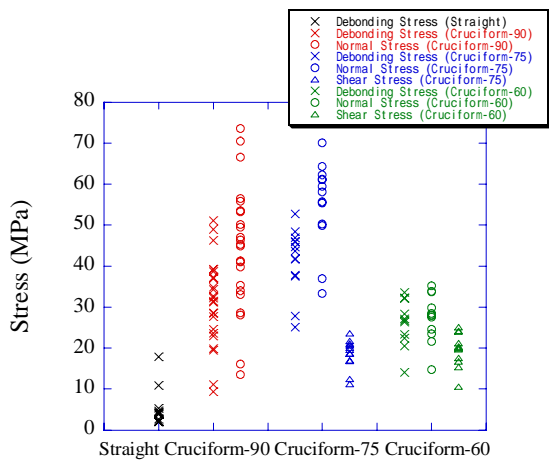


Fig.13 Debonding initiation stress and modified stress values by the stress ratio obtained the finite element analysis Fig.14 Weibull plot of interfacial strength

Table2 Parameter of Weibull plot

	Scale parameter σ_0 (MPa)	Shape parameter m
Interfacial normal strength (Cruciform-90)	57.4	4.79
Normal stress at debonding (Cruciform-75)	60.3	4.63
Shear stress at debonding (Cruciform-75)	20.5	4.63
Normal stress at debonding (Cruciform-60)	31.0	4.19
Shear stress at debonding (Cruciform-60)	22.1	4.19

5. 結言

SUS304/Epoxy モデル複合材料を用いて界面はく離の発生，進展挙動を観察した．また，FEM 解析を用いて応力解析を行い，以下の結論を得た．Straight 試験片及び Cruciform 試験片における界面はく離の発生，進展挙動の差異を明らかにし，Cruciform 試験片により界面引張強度を評価した．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の影響を避け，界面の引張強度を評価できることを示した．Cruciform-75, Cruciform-60 試験片のように角度を変えることではく離発生時の界面引張応力とせん断応力との関係を調べることができると考えられる．

参考文献

- [1] G.P. Tandon, R.Y. Kim and V.T. Bechel, Evaluation of Interfacial Normal Strength in a SCS-0/Epoxy Composite with Cruciform Specimens, *Composites Science and Technology*, 60, (2000), 2281-2295.
- [2] S.G. Warrier, D.B. Gundel, B.S. Majumdar, and D.B. Miracle, Interface Effects on the Micromechanical Response of a Transversely Loaded Single Fiber SCS-6/Ti-6Al-4V Composite, *Metallurgical and Materials Transactions*, 27A, (1996), 2035-2043.
- [3] D.B. Gundel, B.S. Majumdar, and D.B. Miracle, Evaluation of the Transverse Response of Fiber-Reinforced Composite Using a Cross-Shaped Sample Geometry, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 33, 12, (1995), 2057-2065.
- [4] B.S. Majumdar, D.B. Gundel, R.E. Dutton, S.G. Warrier, and N.J. Pagano, Evaluation of the Tensile Interface Strength in Brittle-Matrix Composite Systems, *J.Am.Ceram.Soc.*, 81, 6, (1998), 1600-1610