解 説

高分子基複合材の強度試験法—V. ——層間強度試験法——

武田 展雄*, 高坂 達郎**

1. はじめに—ショートビーム

3点曲げ法とその問題点

一方向強化材またはクロス材を積層して用いる一般的な複合材料積層板では、板厚方向に強化繊維がないことから、当然のことながら層間剪断あるいは引張強度が低く、実際の設計では常に注意を払う必要がある。ところが、単純応力状態の層間強度を測定することは多くの場合きわめて困難であり、信頼に足る試験法が確立されていないのが現状である。

層間剪断強度試験法として規格化されているのは、JIS-K-7057, ASTM D-2344, などの3点曲げ(SBS-short beam shear)法である¹⁾。この方法は図1に示すように、スパン/厚さ比が4~7程度の短い梁の、3点曲げに伴い層間に発生する剪断応力により破壊させようとするものである(表1)。みかけの層間剪断強度 $\tau_b = (3/4) P_{\max}/bh$ ($P_{\max}$: 最大荷重, b : 試験片幅, h : 試験片厚さ)は、梁の中立面で剪断応力が最大となる初等梁理論を前提として求められている。しかし、剪断応力以外に曲げ応力がかかっていること、さらに重要なことは、材料異方性に伴う、負荷部近傍の応力の複雑さと高い剪断応力集中の存在^{2,3)}(図2)により、梁中立面での純粋な剪断破壊はほとんど不可能であるという問題点をもつ。SBS法は簡便であり、層間剪断強度の相対的な違いや品質管理上では役に立つが、定量的な評価法とは言えない。この問題点を克服するためにいくつかの層間強度試験法が提案されてきた。以下に、改善を目指した試験法を示す。

2. 層間剪断強度試験に関する研究動向

2.1 3点, 4点, 5点曲げによる改良方法

曲げ荷重により、純粋に近い層間剪断破壊を生じさせるには、負荷部近傍の応力の複雑さと高い剪断応力集中を避ける必要がある。最も単純な改善方法は板厚を増加することである。たとえば、50層程度の圧肉にすること⁴⁾により層間剪断破壊を支配的にすることが可能である。

また、16:1程度のスパン/厚さ比の4点曲げを用いる^{5,6)}ことにより、荷重点と破壊を生じさせる場所を離すくふうがなされている。ただし、破損発生・進展過程を微視的に観察してみると、見かけのうえでは層間剪断破壊が支配的な場合の多くが、圧縮側の負荷点からの垂直き裂の発生が最初に生じた後に層間剪断破壊が誘起されていた。破壊モードを支配する因子は数多いが、負荷部ローラーの直径の影響がきわめて重要であることが指摘されている⁶⁾。

さらに、5点曲げにより、試験片のかなり広い領域に曲げ応力を生じさせずに高い層間剪断応力を発生させるくふうも試みられている⁷⁾。SBS法に比べ長所もあるが、負荷の対称性など解決すべき点は多い。

2.2 V-Notched beam (Iosipescu) specimen を用いた層間剪断試験

Iosipescu法は、元来、面内剪断強度試験法として開発されたものであり、面外の層間剪断破壊試験にもいくつか適用されている^{8~11)}。

Gipple and Hoyns¹⁰⁾は、AS4/3501-6とS2 glass/3501-6について、圧肉(19mm)の一方向材とクロスプライ材からV-Notched beam (Iosipescu) specimenを製作し、modified Wyoming 治具(図3)を用いて、面外方向の剪断応答(一方向材は繊維方向を1方向として2-3方向のみ)を求めた。剪断歪測定には、通常のゲージ部長手方向から45°傾いた直交 rosette gage だけでなく、

* Nobuo TAKEDA: 東京大学大学院工学系研究科 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

** Tatsuro KOSAKA: 東京大学大学院工学系研究科 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

表 1 層間剪断強度試験法の規格¹⁾

規格 番号	制定年	剪断の 種類	試験片 寸法 (mm)	厚さ (mm)	スパン/厚さ (曲げの 場合)	試験速度 (mm/ min)	状態調節	寸法測定 精度 (mm)	実験形態	FRPの 記述	試験片 の数	負荷部 の半径 r_1 (mm)	支持部 の半径 r_2 (mm)
JIS K 7057	1987	層間	A形 長さ $l=7h$ 幅 $b=6$ B形 長さ $l=18$ 幅 $b=6$ 曲率 $r=73$	A形 $h=1.5\sim6$ B形 $h=3\sim6$	A形 7 B形 18	1 ± 0.5	23±2°C 50±5% 48時間 以上	0.01 (幅, 厚さ に対して)	ショート ビーム	GFRP	5本以上	A形 3~5 (±0.1) B形 3 (±0.1)	A形 2~4 (±0.1)
ISO DIS 4585	1985	層間	曲げ $l=18\pm0.5$ $b=10\pm0.2$	$h=3\pm0.2$	6	1 ± 0.5	23±2°C 50±5% 16時間 以上	長さ 0.5 厚さ 0.2	ショート ビーム	GFRP (紡織 ガラス 繊維)	5本以上	3~5 (±0.1)	2~3 (±0.2)
FS No. 406 Method 1042	1961	層間	引張り $l=8$ インチ $b=1$ インチ	$1/8$ インチ	2~3分で 破断する ように				目違い切 欠き付の 層間引張 り	なし (接着強 さ)	10本		
ASTM D 2344	1976	層間	曲げ $l=6h$ または $7h$ (リング) (フラット) $b=6.35$ (フラット) $b=6.4$	(リング) $h=6.5$ (フラット) $h=6.4$	4または 5	1.3	23±1°C 50±10% D 618-A に準拠	0.025	ショート ビーム	一方向強 化FRP	10本	3.2	1.6
NF T 57-104	1974	層間	曲げ $l=6h$ $b=10$		5	1	23±2°C 50±5% 48時間 以上	0.02	ショート ビーム	紡織 GFRPの 曲げはく 離試験法	10本	5+0.1	2±0.2
JHPC (案)	1986	層間	曲げ $l=21$ $b=6$	$h=3$	5(ただし h は平均 厚さとす る)	1~2	23±2°C 50±20% 48時間 以上	0.01	ショート ビーム	GFRP	10本	5	2
B法	1986	層間	圧縮 $L=77$ $b=12$ 切欠き部 幅=1.0 深さ= $h/2$ 切欠間隔 $l=5.0$	$h=3$	1~2		23±1°C 50±10% D 618-A に準拠	(幅) 0.01 (溝幅) 0.05 (溝深) 0.1	目違い切 欠き付の 層間圧縮	GFRP	10本

(単位: mm)

試験片の部位	(1) A形試験片	(2) B形試験片
長さ l	$7h$	18.0
幅 b	6.0	6.0
高さ h	1.5~6.0	3.0~6.0
曲率半径 r	—	73

図 1 JIS K 7057 ショートビーム層間剪断試験法¹⁾

図 2 3点曲げを受ける直交異方性弾塑性ショートビームの剪断応力分布²⁾

ゲージ部全体にわたる平均剪断歪を測定するためにバージニア工科大学で開発された全幅ゲージも用いた。また、ゲージ部での剪断歪の詳細な分布を調べるためにモアレ干渉法も用いた。一方向材の例(図4)では、ある程度不均一な剪断歪分布を示すため、ゲージ部中央に直交 rosette gage を貼る従来の測定法では、剪断弾性率が低めに評価されるが、補正係数を求めてやればよいことが示された。

同様な試験は Zhou et al.¹¹⁾ も行っているが、試験片厚さは 4 mm で圧肉ではなく、その代わりに CFRP クロス材をタブとして接着している(図5)。一方向材、クロスプライ材、擬似等方性材の 1-2, 1-3, 2-3 方向すべての剪断試験を行った。図6に剪断応力-歪線図の例を示す。た

図 3 Modified Wyoming 治具に取り付けられた V-notched beam specimen¹⁰⁾

図 4 AS4/3501-6 材の V-notched beam specimen のゲージ部の剪断歪分布のモアレ干渉法による測定結果¹⁰⁾

図 5 クロス材をタブとして接着した V-notched beam specimen¹¹⁾

だし歪測定は通常の直交 rosette gage によっている。面外剪断応力-歪線図には、見かけ上、面内の 1-2 方向と同様な非線形性が見られるが、面外剪断においては、最終破壊に至るずっと前に、内部に損傷が発生したことに對

図6 タブ付き V-notched beam specimen の層間剪断応力-歪線図¹¹⁾

図8 側面に溝を入れた圧縮型ダブルノッチ剪断試験片¹²⁾

図7 圧縮型ダブルノッチ剪断試験

応して可聴音が生じ、それ以後、損傷の進展に伴い、接線弾性率は徐々に減少していくことに特徴がある。

2.3 圧縮型ダブルノッチ剪断試験

圧縮型ダブルノッチ剪断試験 (Double-Notched Shear, DNS) は図7のように、試験片の表裏両面から板厚の半分の深さの2つのノッチを、ある間隔 L をあけて互い違いに入れた試験片を、厚さ方向変形を拘束しつつ圧縮し、間隔 L にわたり剪断破壊させるものである。板厚方向には圧縮応力がかかっているため、引張りに比べ、層間剪断強度に近い値が得られると期待される^{12,13)}。

図9 層間引張強度測定用平板試験片¹⁴⁾
(a) 全側面接着, (b) 端部断面減少

Jordan et al.¹²⁾ は、スペースシャトルの固体ロケットモータのノズルに用いられる、カーボン繊維織布強化フェノール複合材料とガラス繊維織布強化フェノール複合材料の接着界面剪断強度に及ぼす水分含有量や繊維表面処理などの効果を調べるために、圧縮型の DNS 試験を行った。図8に示すように確実に層間剪断破壊させるために、試験片側面から溝を入れている。

3. 層間引張強度試験に関する研究動向

層間引張試験は、試験法が困難であるため、あまり一般的には行われていない。このため、たとえば一方向強化材では、通常は2-3面内の等方性を仮定して、90°方向強度で置き換えていることが多い。これまで提案されてきた層間引張試験は、平板またはリング状(主としてFW材)試験片を用いるものである¹⁴⁾。まず平板試験片には、

図 10 層間引張強度測定用断面積減少平板試験片¹⁴⁾。(a) 円弧状応力集中部、(b) 円筒状ゲージ部

(a) 短い場合 (b) 長い場合
図 11 層間引張強度測定用リング状試験片¹⁴⁾

最も単純に二つの金属金具に試験片をそのまま接着するもの(図9)と層間引張破壊をゲージ部で生じさせるために断面減少を行ったもの(図10)とがある。図9(a)の大きな欠点は試験片自由縁での応力集中であり、図9(b)のように接着面側端部を切断した金具を接着後に、空きスペースに樹脂を充填して、応力集中を部分的に軽減している。図10のような試験片は、供試体が薄いと製作が困難であるが、供試体と金属金具を接着後、一体物として加工することが望まれる。またリング状の試験片(図11)も同様に提案されている。

また、有限幅のアングルブライ積層板の、自由縁に発生する層間引張応力 σ_z により層間引張破壊を生じさせることも提案されている。積層構成は $[\pm\theta/90^\circ]$ ¹⁵⁾や $[\pm\theta/-\theta_2/+\theta/90^\circ]$ ¹⁶⁾($\theta=25-26^\circ$)などが使用されている。この方法の最大の問題点は、 σ_z 以外に層間剪断応力

図 12 層間引張強度測定用 L 型試験片¹⁷⁾

図 13 L 型試験片の 4 点曲げによる層間引張強度試験¹⁹⁾

τ_{yz} も存在し、層間剥離が σ_z が最大となる中央面($z=0$)ではなく、 τ_{yz} が最大となる 90° と $\pm\theta$ の界面で発生することである。

Jackson and Martin¹⁷⁾は、図12のような L 型試験片を用いて、層間引張応力により破壊させる試験法を提案している。平板状の試験片に比べ試験片製造が困難であること、形状に依存する残留応力の存在、などの問題点があるが、純粋な層間引張強度に近いものが得られる。

同様に、C型¹⁸⁾試験片を用いた試験法も提案されている。

Ifju et al.¹⁹⁾は、2-D braiding や 3-D 織物複合材料の層間引張強度試験法として、図13に示す、中央に曲がり部をもつI型試験片の4点曲げ試験を提案している。試験片製造の困難さはあるものの、試験自体は簡便である。異方性弾性理論に基づいて計算された、厚さ方向の歪 ϵ_z は、曲げの中立軸付近で最大引張りとなる。

4. お わ り に

以上、規格化されているショートビーム3点曲げ法の問題点をまとめ、それを改善し、より純粋な層間剪断強度を得ようとしている試みを紹介するとともに、同様に重要な層間引張強度の測定に関する研究動向をまとめた。層間強度測定の重要さは複合材料が開発された当初から指摘されているのにも関わらず、いまだ十分信頼に足る試験法が確立されていない。実際の複合材料構造の破損においては、ほとんどすべての場合、何らかの形で層間剪断ないしは層間引張りによる破壊が寄与しているが、設計に必要な層間剪断強度、層間引張強度の正確な値が十分把握されていないため、信頼性のある設計ができないのが現状である。層間強度試験の研究に、これまで以上の強い関心が注がれることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 日本複合材料学会編：複合材料ハンドブック，日刊工業新聞社，V.1.3.4 層間せん断試験 (1989)。
- 2) C.A. Berg, J. Tirosh & M. Israeli : *Composite Materials: Testing and Design (2nd Conf.)*, ASTM STP 497 (1972), pp. 206-218.
- 3) J.M. Whitney : *Compos. Sci. Tech.*, **22** (1985), 167-184.
- 4) J.M. Whitney & C.E. Browning : *Exp. Mech.*, **25**, 3 (1985), 294-300.
- 5) C.E. Browning, F.L. Abrams & J.M. Whitney : *Composite Materials: Quality Assurance and Processing*, ASTM STP 797 (1983), pp. 54-74.
- 6) W.C. Cui, M.R. Wisnom & M. Jones : *J. Strain Analysis*, **27**, 4 (1992), 235-243.
- 7) W.C. Kim & C.K.H. Dharan : *Compos. Struct.*, **30** (1995), 241-251.
- 8) D.F. Adams & D.E. Walrath : *J. Compos. Tech. Res.*, **9**, 3 (1987), 88-94.
- 9) F. Matthews, J. Hodgkinson & S. Ayache : *Proc. ECCM-CTS 1*, Amstredam (1992), pp. 277-286.
- 10) K.L. Gipple & D. Hoyns : *J. Compos. Mater.*, **28**, 6 (1994), 543-572.
- 11) G. Zhou, E.R. Green & C. Morrison : *Compos. Sci. Tech.*, **55** (1995), 187-193.
- 12) K. Jordan, R. Clinton & S. Jeelani : *J. Mater. Sci.*, **26** (1991), 6016-6022.
- 13) 木村浩巳，武田展雄，久保村健二：日本接着学会誌，**31**, 4 (1995), 136-144.
- 14) Yu. M. Tarnopol'skii & T. Kincis : *Static Test Methods for Composites*, Van Nostrand Reinhold Co., Ltd., New York (1984), pp. 74-77.
- 15) N.J. Pagano & R.B. Pipes : *Int. J. Mech. Sci.*, **15**, 8 (1973), 679-688.
- 16) A. Harris & O. Orringer : *J. Compos. Mater.*, **12** (1978), 285-289.
- 17) W.C. Jackson & R.H. Martin : *Composite Materials: Testing and Design (11th Vol.)*, ASTM 1206 (1993), pp. 333-354.
- 18) C.C. Hiel, M. Sumich & D.P. Chappell : *J. Compos. Mater.*, **25** (1991), 854-868.
- 19) P.G. Ifju, J.E. Masters & W.C. Jackson : *Compos. Sci. Tech.*, **53** (1995), 155-163.