研究論文

先進複合材料の曲げ試験法における純曲げ方式の検討

岩井 宏*, 植村 益次**, 植村 寧夫***

(1993年4月13日受付)

Development of Pure Bending Testing Methods
for Advanced Composite Materials

H. IWAI,* M. UEMURA** and S. UEMURA***

(Received April 13, 1993)

The bending testing methods for advanced composite materials have not yet been authorized internationally. The 3-point and 4-point bending methods are not adequate because of local fracture due to stress concentration just beneath the loading points. In the present paper, the three kinds of zig were developed for trial, which could apply the uniform pure bending moment without shear force through the span. Three are, (1) Sliding Frame (SF) type, (2) Rack & Pinion (RP1) type and (3) Rack & Pinion (RP2) type. Both SF and RP1 types have the disadvantages to need corrections for the flexural strength and deflection due to the changes of reaction direction or span length, respectively. However, specimens used in experiments using RP2 broke into pieces under axial stress in the fiber direction between both tabs without stress concentration. Flexural strength values under pure bending were more than 30%-50% higher than those under 3-point and 4-point bending methods.

1. はじめに

先進複合材料は異方性が強く、高強度、高剛性のほかに多くの破壊メカニズムを持つため、評価試験法には多くの問題点があり、国際的に規格化された試験法は少ない。そこで前報¹⁾では、一般的に多用されている3点、4点曲げ試験法での問題点や留意すべき点を指摘した。この3点、4点曲げ試験法を先進複合材料に流用すると、Fig.1に示すように負荷点直下での応力集中により局部破壊し、いわゆるはりの曲げ応力式で定義される軸応力による曲げ破壊とはいえない。そこで圧子半径を大きくしたり、圧子直下にクッション材を挿入したり、試験片の板厚を薄くするなどの負荷荷重の分散・低下をはかると、曲げ強さは著しく増大するという結果からみても、3点、4点曲げ試験法は先進複合材料には好ましく

ない方法である¹⁾。したがって応力集中がなく、試験領域全域でせん断応力成分もなく、均一な純曲げ応力を負荷できる試験法によって、初めて真の曲げ特性が得られると思われる。そこで今回は純曲げ治具を試作して実験を行い、3点、4点曲げ試験法との比較・検討を行い、純曲げ方式が真の曲げ特性を得る望ましい試験法であることを指摘する。

2. 純曲げ試験法

2.1 実験要領

試験片は、特に高強度・高剛性で異方性が大きい材料として、トレカ T 800/#3631 による一方向材強化 CFRP を用いた。板厚は $t=2.2\text{ mm}$ (CU 2 材), $t=3.3\text{ mm}$ (CU 3 材) の2種類で、ともに幅 $b=10\text{ mm}$ のものを用い、スパン l を $35\text{ mm}\sim 110\text{ mm}$ に各種変化させ、各条件ごとに5本ずつの試験片で実験を行った。

2.2 4点曲げ方式の純曲げ治具 (SF 型) による曲げ実験²⁾

(1) 治具の概要

まず単純に純曲げが負荷できる方法として Fig.2 に示すように、4点曲げ試験での一定曲げモーメント部を利用したような4点曲げ方式の SF 型純曲げ治具を試作し

*,** 日本大学生産工学部機械工学科 (275 習志野市泉町 1-2-1)

College of Industrial Technology, Nihon University, Mechanical Engineering, 1-2-1, Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba 275

* 専任講師 Lecturer, ** 教授 Professor

*** 富士重工業(株) (320 宇都宮市陽南 1-1-1) Fuji Heavy Industries Ltd.

Fig.1 Local fracture behavior beneath loading point in 4-point bending.

Fig.2 Sliding frame (SF) type zig.

Fig.3 Load-displacement curves obtained by using SF type zig.

た²⁾。この試験治具は、試験片④の両端部の上下面を当て板⑤で挟み、ボルトで負荷枠③に固定する。当て板には試験領域端部での応力集中を回避するため、滑らかな曲率が付与されている。また治具は曲げモーメントをつたえるだけでなく、試験片に軸力が発生しないように、支持脚⑥と負荷枠③の接点には、ローラーベアリングを用いており、負荷枠の軸方向の滑動が可能である。

Fig.4 Variations of flexural strengths with span obtained by using SF type zig.

Fig.5 Sliding frame (SF) type zig.

(2) 曲げ実験結果

実験結果の一例として、CU 2 材での荷重とスパン中央たわみの関係線図を Fig.3 に示す。これより、スパンが大きい場合には、たわみが大きくなるにつれ、荷重が低下している。曲げ実験で得られた見かけの破壊時曲げモーメントを M_0 とし、次式より求めた見かけの曲げ強さ $F_{b,a}$ の平均値とスパンの関係を示す。

$$F_{b,a} = \frac{M_0}{Z} = \frac{6M_0}{bt^2} \quad (1)$$

ここで、

$$M_0 : \text{破壊時の見かけの曲げモーメント} = \frac{P_m}{2} \times l_a$$

P_m : 破壊時荷重

l_a : モーメントアームの長さ (Fig.5 参照)

b : 試験片幅

t : 試験片板厚

これより、スパンが大きくなるにつれて、曲げ強さ $F_{b,a}$ は見かけ上低下していることがわかる。また曲げ弾性係数は、ひずみ、たわみの微小変形域より求めている。

Fig.6 Rack and Pinion (RP1) type zig.

るので、当然スパンに関係なくほぼ同じ値 (160 GPa) を示した。圧縮、引張側のどちらかの縁で最終破壊したかの破壊様相は確認できないが、瞬間的にバラバラに全体破壊し、明らかに局所的な応力集中ではなく、高い軸応力による繊維破壊を伴う曲げ破壊であった。

(3) 考 察

治具の構造により、たわみが大きくなるにつれて Fig. 5 に示すように、負荷枠の回転により反力 N の方向が変化し、測定荷重 P が小さくなる。実際の曲げモーメント M は $N \times l a'$ ($l a' = l a / \cos \theta$) であるので、試験片のスパンの両端での傾斜角を θ とすると次式で示される。

$$M = N l a' = \frac{P}{2 \cos \theta} \cdot \frac{l a}{\cos \theta} \quad (2)$$

$$= \frac{M_0}{\cos^2 \theta} = M_0 (1 + \tan^2 \theta)$$

したがって、実際の曲げ強さ F_b は、通常変形はり理論 (1) 式より求める曲げ強さを、負荷枠の回転を考慮した次式で修正し、実験結果を補正して求める必要がある。

$$F_b = \frac{M}{Z} = \frac{6 M_0}{b t^2} (1 + \tan^2 \theta) \quad (3)$$

補正の結果を Fig. 4 に CU 2 材を△印、CU 3 材を▲印で合わせ示す。これより曲げ強さ F_b は、スパンに関係なく CU 2 材、CU 3 材ともにほぼ一定の値 (2.4 GPa) を示し、真の曲げ強さを与えると思われる。

このように、SF 型では、治具の構造上、見かけ上荷重が低下してしまう問題が残った。

2.3 ラック & ピニオン型 I (RP1 型) による曲げ実験^{2,3)}

SF 型では、上述のように負荷とともに反力方向等が変化するため、曲げ強さの補正をしなければならなかった。そこで補正の必要がない純曲げ治具に改良し、実験を行った。

(1) 治具の概要

Fig.6 にラック & ピニオン型 I (PR1 型) 治具を示

Fig.7 Rack and Pinion (RP1) type model.

Fig.8 Coordinates in RP1 type zig.

す。SF 型の純曲げ治具からの改良点は、モーメント (回転) を与えるために、ラック⑥と歯車④を用いて上下方向の運動を回転運動に変えて負荷枠にモーメントを与えており、モーメント M は負荷荷重と歯車のピッチ円半径より求まる。したがってモーメント M は反力方向に依存しないで一定であり、(3) 式のような補正の必要はない。また試験片の軸方向の軸力の発生を防ぐため、前述の 4 点曲げ方式の純曲げ治具での負荷枠滑動の代わりに負荷枠⑧と当て板の間の接続にはベアリングを用いており、試験片が軸方向に自由に滑動できるようにしている。

(2) 曲げ実験結果

Fig.7 に RP1 型の概念図を示すが、この場合、ダイヤルゲージで測定する変位には、当て板の滑り込み分の変位も加わっており、Fig.8 に示すように試験片に沿う座標系を取ると、大たわみの有限変形を考慮するとモーメントの釣合式は次式で表される。

$$EI_z \frac{d^2 w}{ds^2} + M = 0 \quad (4)$$

ここで、

E : 軸方向ヤング率

I_z : 断面 2 次モーメント

M : 曲げモーメント

w : 試験片のたわみ

s : 試験片に沿う支持点左側からの距離

純曲げによる曲率半径を $R (= EI_z / M)$ とすると、中央たわみ $w_{\max}$ および端部の最大たわみ角 $\theta_{\max}$ は、次式で表される。

$$w_{\max} = R - R \cos \left(\frac{l}{2R} \right) \quad (5)$$

Fig.9 Load-displacement curves obtained by using RP1 type zig.

Fig.10 Variations of flexural strengths with span obtained by using RP1 type zig.

$$\theta_{\max} = \pm \frac{l}{2R} \quad (6)$$

実際には、上式の $w_{\max}$ に試験片の摺り込み部の滑り込み量加わるので、実験により測定できるたわみは次式となる。

$$w_{\max} = R - R \cos\left(\frac{l}{2R}\right) + \frac{l}{2} \left\{ 1 - \frac{2R}{l} \sin\left(\frac{l}{2R}\right) \right\} \tan \theta_{\max} \quad (7)$$

荷重-たわみ線図の一例を Fig.9 に示す。SF 型での反力方向の変化を考慮する必要がないため、荷重の低下はみられないが、理論値との差が大きい。

Fig.10 に各スパンでの曲げ強さを示す。RP1 型治具では反力方向が変化せず、応力集中がないために、スパン、板厚に関係なく一定の高い F_b 値が得られ、Fig.4 に示した補正値が直接得られている。また曲げ弾性係数は、SF 型と同様に微小変形域より求めているため、ひずみより求めた値は、スパンに関係なくほぼ同じ値 (160

Fig.11 Rack and Pinion (RP2) type zig.

Fig.12 Rack and Pinion (RP2) type model.

GPa) を示した。破壊様相は、前述の SF 型の場合と同様にもちろん曲げ破壊を示している。

(3) 考 察

SF 型で問題となった荷重の低下は起こらなくなったが、上述のように実験で求めた荷重-たわみの関係と理論値の差が大きい。これは当て板の滑り込みの変位や試験片の軸方向への滑り込みが潤滑に行われていないためと考えられる。したがって次に述べるように治具の改良を行った。

2.4 ラック & ピニオン型 II (RP2 型) による曲げ実験³⁾

RP1 型では、荷重の低下は起こらなくなったが、滑り込み部が長くて、その影響が大きく、たわみの実験値が理論値と一致しなかったため、軸方向の滑り込み方法を変更した。

(1) 治具の概要

Fig.11 にラック & ピニオン II 型 (RP2 型) 治具を示す。RP2 型は基本的に RP1 型と同じであるが、Fig.12 に示すように変更し、治具全体が軸方向に動くようにした。これによりたわみの理論式は(5)式となり、当て板の滑り込みの影響はなくなった。

(2) 曲げ実験結果

Fig.13 に荷重とたわみの関係の一例を示すが、RP1 型に比べて理論値と実験結果はよい一致がみられるようになった。Fig.14 に各スパンでの曲げ強さを示す。RP2 型では、RP1 型と同様に反力方向が変化せず、応力集中がないために、スパンに関係なく一定値の高い F_b 値が得られている。また曲げ弾性係数は、微小変形

Fig. 13 Load-displacement curves obtained by using RP2 type zig.

Fig. 14 Variations of flexural strengths with span obtained by using RP2 type zig.

域より求めているため、たわみ、ひずみより求めた値は、スパンに関係なくほぼ同じ値 (160 GPa) を示した。破壊様相を見ると、SF 型や RP1 型は同様にもちろん曲げ破壊をしていることがわかる。

(3) 考 察

SF 型、RP1 型での問題点は、RP2 型にすることによりすべて解決されており、RP2 型が最もよい曲げ治具と考えられる。

3. 3点、4点曲げ試験法と純曲げ試験法の比較

Fig. 15 に各種スパンでの3点、4点曲げと純曲げによる曲げ強さの実験値を比較して示す。3点、4点曲げに比べ、純曲げ試験での曲げ強さは30%以上大きい。3点、4点曲げ試験での破壊は、応力集中によるものであったのに対し、純曲げ試験では応力集中がないため、軸応力による真の曲げ強さが得られたものと思われる。

曲げ弾性係数は、各試験法とも微小変形域より求めているので、同値が得られている。

Fig. 15 Variations of flexural strengths with span obtained by using various loading methods.

4. ま と め

先進複合材料に適応可能な適切な曲げ試験法を提案するために、純曲げ試験治具を試作、改良して実験を行ったが、下記の結果を得て曲げ特性評価方法として、他の試験法より望ましいことがわかった。

- ① 純曲げ試験では従来の3点、4点曲げ試験のように局部応力集中による破壊は起こらない。
- ② 純曲げ試験法での曲げ強さは3点、4点曲げと比べ30%以上高く、スパンに関係なく一定値が得られた。
- ③ 純曲げ試験法の弾性係数はスパン、板厚に無関係に一定値が得られた。
- ④ SF型治具は、たわみの大きさに従い荷重方向が変わってしまい補正の必要がある。
- ⑤ RP1型治具は、荷重の補正の必要はないが、測定するたわみに掴み部の変位が加わるので、たわみを補正する必要がある。
- ⑥ RP2型治具では、荷重、たわみの補正の必要もなく応力集中もないので、先端複合材料の曲げ試験法として最もよい曲げ治具と考えられる。また本論文では記述しなかったが、疲労試験に応用することも可能である。

参 考 文 献

- 1) 岩井 宏, 植村益次, 林 徹: 日本複合材料学会誌, 18, 2 (1992), 60-65.
- 2) 岩井 宏, 植村益次, 土佐俊一: 1991年度研究発表講演会 (1991. 5. 14), pp. 51-52.
- 3) 岩井 宏, 植村益次: 第34回構造強度に関する講演会 (1992. 7. 15), pp. 70-73.