研究論文

先進複合材料の曲げ試験法における3点, 4点曲げ方式の問題点

岩井 宏*, 植村 益次**, 林 徹***

(1991年4月22日受付)

Issues of 3-Point and 4-Point Modes in Flexural Testing Methods for Advanced Composite Materials

H. IWAI,* M. UEMURA** and T. HAYASHI***

(Received April 22, 1991)

The flexural testing methods for advanced composite materials have not yet been authorized internationally. In the present paper, the effects of various factors such as loading mode, span length, specimen size, radius of loading nose and control mode of loading *etc.* on the static and fatigue flexural properties were discussed in the experiments under the 3-point, 4-point bendings and pure bending. The specimens were the unidirectional carbon-fiber-reinforced plastics and the failures took place beneath the loading noses due to stress concentration in both 3-point and 4-point bending methods and the finite element method analysis were performed in order to explain the experimental results. Accordingly, it was found that the pure bending testing method is the best and the 3-point and 4-point methods are not recommended. If the experiment in 3-point or 4-point bending is inevitably performed, a film should be inserted beneath a loading nose which gives the reasonable strength by alleviating the stress concentration.

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、評価試験法に多くの問題があり、国際的に規格化された材料試験法は少ない。国内では最近、静的曲げ試験法に関しては JIS 規格¹⁾が制定され、3点、4点曲げを用いるように規定されたが、疲労試験法は確立されていない。そこで目下 VAMAS 計画²⁾として先進7か国が協力し、先進複合材

料の評価技術に関する国際基準を検討中であり、本報告はその一環として行ったものである。本研究では曲げ試験法を取り上げ、一方向強化材を試験片として静的・疲労試験を行い、試験片スパン・板厚寸法、曲げ負荷方式、負荷制御方式、圧子半径および負荷点での接触条件(クッション材)等の影響を実験的に明らかにすると共に、有限要素法による数値計算も行って実験結果を説明し、先進複合材料に、3点、4点曲げ方式を用いた場合の問題点および留意すべき点を指摘する。

2. 試験要領

試験片は、異方性の極端な場合を検討しておけば、問題点が明らかになりやすいので、静的試験・疲労試験の両方共に、特に高強度・高剛性で異方性が強い材料としてトレカ T800 H/#3631 ($E_f=285$ GPa, $F_f=5.5$ GPa) の一方向強化 CFRP ($V_f=60\%$) を用いた。板厚は $t=2.2$ mm (CU2 材), $t=3.3$ mm (CU3 材) の2種、共に幅 $b=10$ mm で試験片長はスパン長 $l+30$ mm 以上とした。

静的試験では、同一因子の組合せごとに3~5本試験を行い、4点曲げでは1/3スパン方式を採用した。試験

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

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

* 助手 Assistant, ** 教授 Professor

*** 川崎重工業航空宇宙事業本部航空宇宙技術本部技術部構造技術課 (504 岐阜県各務原市川崎町1番地)
Structure Engineering Section, Aerospace Engineering Division, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 1, Kawasaki-cho, Kakamigahara 504, Japan

速度は中央の歪み速度が $0.01/\text{min}^{39}$ とした。疲労試験は片振形式で行い，試験周波数 10 Hz ，応力比 $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.15$ とし，疲労破壊の定義としては，剛性低下 20% の時点とした。

3. 静的曲げ試験^{4,5)}

3.1 曲げ負荷方式の影響

3点曲げと4点曲げの比較試験では，支点圧子半径 R_S ，負荷点圧子半径 R_L を 5 mm 一定とし ($R=R_S=R_L$ とする)，スパン l および板厚 t を変化させて試験した。Fig. 1 に各材料，各負荷方式での曲げ強さ F_b とスパンの関係を示す。両板厚とも4点曲げに比べ3点曲げの強度値が大きい。これは，3点曲げの F_b は中央1点のみの最大モーメント値で定義されているが，破壊は大局的応力分布に依存するので，破壊確率から考えて向上したためと思われる。破壊様相は，Fig. 2 に示すように両者共負荷圧力直下の応力集中で破壊したため，応力集中を回避する必要がある。そのため応力集中を回避する一つの方法として，次の機会に述べる純曲げ負荷治具を試作して試験を行った結果⁶⁾ では，一定モーメント

Fig. 1 Variations of flexural strengths with span in various loading methods.

Fig. 2 Local fracture behavior beneath loading point in 4-point bending.

Fig. 3 Variations of flexural modulus with span length under 4-point bending.

域で破壊し， F_b は Fig. 1 に示すように大きい値を示した。これより先進複合材料では，純曲げ方式が望ましいことを示している。Fig. 3 に一例として4点曲げでの各材料でのヤング率とスパンの関係を示すが，ヤング率は微小変形域より求めているため一定値を示した。また3点曲げ，純曲げにおいても，ヤング率についてはスパンに関係なく上記の値と同じの一定値を示した。

3.2 スパン，板厚等試験片寸法の影響

Fig. 1 より CU2 材，CU3 材共に3点，4点曲げ共にスパン/板厚比 (l/t) = 40 程度で F_b が最大値を示し，補正の必要もなく，はり理論で計算ができ， F_b の定常値が得られることから，スパン/板厚比は 40 程度が妥当だと思われる。CU3 材の4点曲げでの大スパン域では， F_b が低下しているが，筆者の一人が提出した大たわみを考慮した (1) 式⁷⁾を用いて修正すると，一点鎖線で示すようにほぼ一定値となる。3点，4点曲げで CU3 材の厚板のほうが F_b が小さいのは，板厚の2乗に比例して破壊荷重値が大きくなり，局部破壊しやすいこと，また応力勾配が小さく，高応力域が広いことによる破壊確率の増加と低応力域による支持効果の減少 (応力勾配効果) によるためと考えられる。

$$F_b = \left. \begin{aligned} & \frac{3Pl}{2bt^2} \left[1 + 6 \left(\frac{\delta}{l} \right)^2 - 6 \left(\frac{R}{l} \right) \left(\frac{\delta}{l} \right) - 4 \left(\frac{\delta}{l} \right) \left(\frac{t}{l} \right) \right] && \text{3点曲げ} \\ & \frac{Pl}{bt^2} \left[1 + \frac{4644}{529} \left(\frac{\delta}{l} \right)^2 - \frac{324}{23} \left(\frac{R}{l} \right) \left(\frac{\delta}{l} \right) - \frac{180}{23} \left(\frac{\delta}{l} \right) \left(\frac{t}{l} \right) \right] && \text{4点曲げ} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3.3 圧子半径の影響

3点，4点曲げでは，破壊が負荷圧子直下の応力集中で発生しているので，スパン $l=80\text{ mm}$ ，CU2 材を用い

Fig. 4 Variations of flexural strengths with radius of loading nose.

て圧子半径の影響をみるため試験を行った。Fig. 4 に① $R=R_s=R_L$ として3点、4点曲げで、 R を変化した場合と②4点曲げのみで $R_s=3\text{ mm}$ 一定で R_L を変化した場合の R_L と F_b の関係を示す。① $R=R_L=R_s$ の場合には、3点、4点曲げ共に曲げ強さ F_b が R と共に大きくなるのがわかる。また②4点曲げで $R_s=3\text{ mm}$ 一定では、 $R_L=3\text{ mm}$ 以下では F_b は R_L と共に増加するが、 $R_L=3\text{ mm}$ 以上ではほぼ一定値を示している。破壊様相は、 R_L が小さいときには、応力集中により負荷点直下で脆性的に破壊しており、 R_L が大きくなるにつれて応力が緩和され、 F_b が増大すると考えられる。4点曲げについて言えば① $R=R_L=R_s$ で R が変化する場合は、② $R_s=3\text{ mm}$ 一定で R_L が変化する場合より F_b が大きい。これは R_s が大きくなるにつれ、接触点移動で実際のスパンが減少し、破壊荷重が大きくなるため見かけの曲げ強さが大きくなるためと考えられ、この効果も考慮した(1)式⁷⁾で補正すると、 $R_s=3\text{ mm}$ 一定の場合とほぼ同値となる。

3.4 クッション材の影響

3点、4点曲げでは、負荷点での応力集中の影響が大きいという上述の結果を考慮して、4点曲げで $R_L=R_s=3\text{ mm}$ とし、負荷点圧子と試験片の間に塩化ビニリデン、アルミ、ポリエチレンの3種類のクッション材を挿入し、クッション材の厚さを変化した試験を行った。

Fig. 5 に曲げ強さ F_b とクッション材全厚 t_f の関係を示す。クッション材の材質に関係なく、 t_f が 0.05 mm 以下では、 F_b は略一定で、クッション材としての応力集中緩和の効果は見られない。 t_f が $0.05\sim 0.1\text{ mm}$ の範囲では、クッション材の厚さにほぼ比例して F_b が増加し、 t_f が 0.1 mm 以上で一定値となる。この強度値は、純曲げ試験での結果とほぼ同値で、真の曲げ強さ

Fig. 5 Variations of flexural strengths with total thickness of various films.

を示していると思われる。また t_f が 0.05 mm 以上では、破壊様相も負荷点直下での脆性破壊から試験片中央域の一定モーメント部での破壊に移行しており、局部応力集中が緩和されていることが明らかであり、 t_f と共に F_b が増加することは以前指摘された結果⁹⁾と一致する。

4. 有限要素法による数値計算による考察

前述の実験から明らかのように、先端複合材料の破壊は、負荷点圧子直下での局部応力集中によっていることを実証するため、一例として4点曲げでCU2材でのFEMによる数値計算を行い、スパン、圧子半径、クッション材の影響について検討を行った。計算では、接合要素⁹⁾およびベナルティ法¹⁰⁾を用い、圧子・クッション材も要素として取り扱った。計算結果として、負荷点近傍でのスパン方向の応力 σ_x と、板厚方向の応力 σ_y およびせん断応力 τ_{xy} の板厚方向の分布を示すが、 σ_x, τ_{xy} ははり理論の最大値で無次元化して示している。

4.1 スパンの影響

Fig. 6(a) に曲げモーメント $M=1\text{ Nm}$ のときの各応力分布に及ぼすスパンの影響を示すが、スパンが短く荷重が大きくなると、はり理論による応力分布と極めて異なるようになり、スパンが長く荷重が小さくなるにつれて負荷点近傍での各応力成分が緩和されていることがわかる。破壊はこれらの複雑な組合せ応力の下での各種の破壊メカニズムによって起こると考えられるが、いずれにしてもスパンが長くなるにつれ、負荷点付近の応力集中値が低下して曲げ強さが増加したと考えられる。

4.2 負荷点圧子半径 R の影響

Fig. 6(b) にスパン $l=80\text{ mm}$ で、負荷荷重 $P=100\text{ N}$ の場合について、 $R=R_L=R_s$ として R を変化した場合の負荷点近傍での各応力分布を示す。これより、 R が大きくなると共に当然のことながら応力集中が緩和さ

Fig. 6 Variations of thicknesswise distributions of stress components in the vicinity of loading point under 4-point bending.

れ、曲げ強さ F_b の増加に寄与している。

4.3 クッション材の影響

FEM の計算は、4.2 の場合と同様に、スパン $l=80$ mm で、負荷荷重 $P=100$ N の場合について、クッション材の影響に関する試験の場合と同じく $R=R_L=R_S=3$ mm として行った。Fig. 6 (c) にポリエチレン $t_f=0$ mm, 0.1 mm および 0.2 mm の場合の結果について示す。 t_f の増加にともない σ_x , σ_y , τ_{xy} の各応力が緩和されていることがわかり、圧子半径の場合と同様に、 F_b の増加に寄与していることがわかる。

5. 曲げ疲労試験

前章の静的試験の結果より、各種因子の影響が明らかにされたが、曲げ疲労試験でも同様な検討を行う。静的試験の場合と同様に疲労試験においても $l/t=40$ 程度が良いと考えられるが、試験機の性能の都合上、たわみを小さくするためスパン $l=50$ mm, 60 mm と短くし、

Fig. 7 Variations of fatigue stress amplitudes with span length under 3-point bending.

圧子半径は $R_L=R_S=2$ mm, 5 mm で試験を行った。

5.1 スパンの影響

Fig. 7 に CU3 材の 3 点曲げ、変位制御の場合について、線形はり理論が適用できるように、スパン $l=50$ mm, 60 mm の 2 種類の場合の応力振幅 $\sigma_a (= (\sigma_{\max} -$

(a) Case of load control.

(b) Case of deflection control.

Fig. 8 Effects of specimen thickness on fatigue stress amplitudes under two kinds of control methods.

$\sigma_{\min})/2$ と繰返し回数 N の関係 (疲労曲線) を示す。静的試験と同様に、CU3 材では、この程度のスパン変化では疲労特性に及ぼす影響はあまり見られなかった。

5.2 曲げ負荷方式の影響

Fig. 8(a) に荷重制御方式での、(b) に変位制御方式での疲労曲線を示す。CU2 材の場合、負荷制御方式に関係なく、静的試験と同様に 3 点曲げでの σ_a が 4 点曲げより大きい値を示している。これは前述の静的試験の場合と同じ理由と考えられる。また低下勾配は 3 点、4 点曲げ共に同程度である。CU3 材の場合も CU2 材ほど顕著ではないが、静的試験の結果と同様に 3 点曲げの疲労強さ σ_a のほうが 4 点曲げよりも大きい。

5.3 板厚の影響

Fig. 8 から曲げ負荷方式に関係なく CU2 材の場合には、CU3 材の場合より σ_a の値が大きい。これも静的試験の場合と同様に、厚板の場合には板厚の 2 乗に比例して荷重値が大きくなり、負荷点直下での応力集中が大きいこと、応力勾配効果により σ_a が低下するためと考えられる。

5.4 圧子半径の影響

Fig. 9 に CU2 材で、圧子半径を変化させた場合の疲労曲線を示す。これより圧子半径が小さいほうが疲労強さが低下しており、静的試験と同様に疲労破壊メカニズムが局部応力集中によることがわかる。

5.5 負荷制御方式の影響

Fig. 8 より試験片板厚、曲げ負荷方式に関係なく、変位制御での寿命が荷重制御方式を上回っている。Fig. 10(a), (b) に一例として、3 点曲げ方式での疲労破損直前の変位と荷重の変化を示す。当然予想できるように変位制御のほうが荷重制御より低下曲線が緩やかであることがわかる。これらより荷重制御の場合クラックが入ることにより実質的な σ_a が一定荷重の下で増加し、一気に破壊するのにに対し、変位制御方式ではクラックの進

Fig. 9 Effects of nose radius and flexural loading methods on S-N curves.

行と共に σ_a が実質上減少し、徐々に破壊していくため破壊寿命が当然増加したと考えられる。

6. ま と め

一方向強化 CFRP など異方性が大きい先端複合材料の曲げ試験法を検討するため、静的試験、疲労試験で、曲げ負荷方式、負荷制御方式、試験片板厚、圧子半径、負荷点接触条件の影響について実験を行うと共に、FEM 数値計算も行って検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 問題点

4 点曲げと 3 点曲げは共に線形は理論を適用できるような通常寸法の板厚では、負荷点直下の局部応力集中で破壊し、いわゆる曲げ破壊ではないので、曲げ試験法としては望ましくなく、応力集中を回避する必要がある。純曲げ試験では、局部破壊がなく、高い真の曲げ強さを示し、軸応力によるいわゆる曲げ破壊が得られるので望ましい。(純曲げ試験については、次の機会に報告したい。)

(2) 3, 4 点曲げを行う場合に応力集中などの影響を回避するために留意する点

① 4 点曲げのほうが 3 点曲げより、負荷点圧子一つに

(a) Variations of maximum strain $\varepsilon_{\max}$ under load control.

(b) Variations of maximum stress $\sigma_{\max}$ under deflection control.

Fig. 10 Stiffness loss curves during fatigue under two kinds of control methods.

加わる荷重が小さく、負荷点間でせん断力がない純曲げ状態が存在するので、局部応力の増加による破壊が減少し望ましい。しかし、4点曲げでは、高応力領域が広いことによる破壊確率論的原因で曲げ強さは低下する。

②4点曲げ方式による場合には、大たわみによる補正の必要もなく、はり理論で十分精度よく曲げ強さを計算できるためには、スパン/板厚比=40程度が妥当である。

③板厚3mm材は板厚2mm材に比べ、負荷点に加わる荷重の増大により局部応力が大きいこと、高応力勾配効果が小さく、高応力域が大きいことにより低強度を示すと思われ、試験片板厚の選択には実際の構造の板厚を考慮しつつ、これらに注意する必要がある。

④負荷点圧子半径 R_L を大きくすると、負荷点直下での局部応力集中が減少するため局部破壊を緩和し、曲げ強度が増大するが、接触点の移動、4点曲げでの支持点-負荷点間距離の減少を考慮して、3点曲げで $R_L=5\text{mm}$ 、4点曲げで $R_L=3\sim 5\text{mm}$ 程度が妥当だと考えられる。支点圧子半径 R_s も接触点の移動によるスパンの減少を考慮して3mm程度が妥当だと考えられる。

⑤クッション材は、厚さ0.05mm以上で応力集中の緩和に効果があり、0.1mm以上で一定の曲げ強さが得られ、JIS K 7074でも言及されているように真の曲げ

強さを求めるのに有用である。

⑥曲げ疲労試験において、荷重制御のほうが変位制御よりも曲げ疲労強さは小さいが、実際の構造物の運用状況を考慮すると、荷重制御のほうが望ましい。

参考文献

- 1) JIS K 7074 (1988).
- 2) Versailles Project on Advanced Materials and Standards; VAMAS Report (1988.4).
- 3) ASTM: ASTM D 790 (1986).
- 4) 岩井 宏, 植村益次, 林 徹: 第18回 FRPシンポジウム前刷集 (1989.3.16), pp. 113-116.
- 5) 岩井 宏, 植村益次, 土佐俊一: 第15回複合材料シンポジウム前刷集 (1990.10.19), pp. 77-80.
- 6) 土佐俊一, 植村益次, 岩井 宏: 第20回 FRPシンポジウム前刷集 (1991.3.19), pp. 133-136.
- 7) 植村益次: 日本複合材料学会誌, 7, 2 (1981), 74-81.
- 8) 北条正樹, 野口祐成, 古江治美, 松井醇一: 第28回構造強度に関する講演会前刷集 (1986), pp. 370-373.
- 9) 山田嘉昭, 江澤良孝: 日本大学生産工学部報告, 31, 6 (1979), 1-6.
- 10) 石鍋雅夫: 構造工学における数値解析シンポジウム, 10 (1986), 449-454.