発泡樹脂/Al 三層積層材の曲げ剛性の実験的評価 — 温度、支持スパン長、負荷速度の効果 —

Experimental Estimation on Flexural Rigidity of a Porous Resin/Al Laminate — Effects of Temperature, Support Length and Loading Rate —

○学 岡本城彦 (京工繊大院), 正 荒木栄敏 (京工繊大), 正 杉本明男 (神戸製鋼)

Shirohiko OKAMOTO, Graduate school of K.I.T.

Shigetoshi ARAKI, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585.

Akio SUGIMOTO, Mechanical Engineering Reserch Lab., KOBE STEEL, LTD.

In the previous study, flexural rigidity of a porous resin/Al laminate was estimated experimentally and the change in the magnitude of flexural rigidity of the laminate was convex with respect to its forming magnification. The neutral band model was devised for explanation of the experimental result and its analytical results were good agreement with the experimental ones irrespective of the magnitude of forming magnification. In the present study, effects of degree of experimental temperature, support length of the 3-points bending test, and loading rate on the flexural rigidity of a porous resin/Al laminate are examined experimentally and experimental values of the flexural rigidity are compared with the expected ones obtained from the neutral band model.

Key Words: Porous resin/Al laminate, 3-points bending test, Flexural rigidity, Neutral band model, Neutral band factor

1. 緒 言

輸送機器の軽量化に対して、著者らは発泡樹脂/Al 三層積層材に着目しており、その比剛性の高さ故にパネル材としては極めて有望であると考え、開発を進めている。この積層材は、Fig.1 に示すように固体発泡剤を含むポリプロピレンシートをAl (1200-O 材) 薄板で挟み込んで接着したものを加熱し、発泡剤を発泡させて作成するものであり、前報¹⁾では三点曲げ試験を行ってその曲げ剛性を評価した。その結果、発泡樹脂の発泡倍率 $\alpha = h/h_0$ の増加につれて曲げ剛性は上に凸の傾向を示し、剛性を最大にするある最適な発泡倍率が存在することがわかった。これを説明するために、はりの中立面近傍で伸び縮みのない中立バンドと名付けた領域が存在するモデルを構築した。この中立バンドモデルによる解析結果は定量的には過大評価になるものの、定性的には実験結果と良く一致する傾向を示すことがわかった。これを受けて本研究では、試験温度、三点曲げの支持スパン長さ及び負荷速度を変えて実験を行うことで発泡樹脂/Al 三層積層材の曲げ剛性を評価するとともに、中立バンドモデルからの推定値との比較を行うことでその有効性を吟味することを目的とする。

Fig.1 Forming process of a porous resin/Al laminate.

2. 発泡樹脂/Al 三層積層材の曲げ剛性

2.1 試験片と三点曲げ試験 三点曲げ試験片の寸法は、長さ 120mm、幅 $b = 20\text{mm}$ であり、内部に発泡によって生じた多数の空孔を含んでいる。試験装置は、オートグラフ AG - 50kNG (島津製作所製、ひょう量 50kN) に ASTM-E399 に準拠した三点曲げ試験治具 (島津製作所製、支点間距離 $2l = 100\text{mm}$) を取り付けたものを使用し、恒温槽 (TCL - N382、設定温度精度 $\pm 1^\circ\text{C}$) 内で実験を行った。荷重と変位の測定は、オートグラフからのアナログ出力を TEAC 製 DR-F3 (サンプリング周波数 200kHz、分解能 16bit) を用いて、荷重 100N、変位 15mm を 16bit で分解し、サンプリング周波数 10Hz で A/D

Fig.2 Flexural rigidity P/δ of porous resin/Al laminate ($T = 20^\circ\text{C}$, $l = 100\text{mm}$, crosshead speed = 2mm/min).

変換して記録した。試験条件は、試験温度を -40°C , 20°C , 80°C 、三点曲げの支持スパン長さ $2l$ を 75, 100, 150, 200mm、負荷速度を 2, 20, 40, 80mm/min と変化させた。

2.2 実験結果 Fig.2 に試験結果の一例を示す。図の横軸は発泡倍率 α 、縦軸は曲げ剛性 P/δ であり、●印が実験結果である。図より、曲げ剛性 P/δ は α が増加するにしたがって増加するが、 $\alpha = 6$ 付近で最大値を示した後に、 α の増加につれて緩やかに減少するという上に凸の傾向を示すことがわかる。このような傾向は、試験条件を変えた本実験全てにおいて見られた。したがって、曲げ剛性が最大となる条件がどのように推移するかを把握し易くするために、これらを等高線図にまとめて整理した。紙面の都合上、試験温度の結果のみを Fig.3 に示す。Fig.3 の縦軸は試験温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、横軸は発泡倍率 α である。図の両端の空白は試験データが存在しない領域である。図より、曲げ剛性は低温側では発泡倍率 9 程度で最大となっているが、温度が上昇するにしたがって、図の中央付近に移動しており、 20°C では 6 程度、 80°C では 4 程度となっていることがわかる。

3. 中立バンドモデルによる曲げ剛性の推定

3.1 中立バンドモデル Fig.4 に中立バンドモデルの概念図を示す。図示したように、中立バンドモデルははりの中立面を挟んで伸びも縮みもしない領域が存在すると仮定し、はりの長手方向にせん断変形が生じることで結果的に平面保持の条件が

Fig.3 Contours of flexural rigidity P/δ (change in T).

Fig.4 Neutral band model.

破られるというモデルであり、曲げ剛性は最終的に、

$$\frac{P}{\delta} = \frac{6(E_{Po}I_{Po} + E_{Al}I_{Al})}{l^3 \left[1 + \frac{3h^2}{4l^2} (1 + \nu_{Po}) \left\{ (1-k)^2 + 4 \frac{E_{Al}}{E_{Po}} (1-k + \frac{t}{h}) \frac{t}{h} \right\} \right]} \quad (1)$$

となる¹⁾。ここで E_{Al} は Al の弾性係数、 E_{Po} と ν_{Po} は発泡樹脂の弾性係数とポアソン比で、著者らの一般解²⁾から、

$$\frac{E_{Po}}{E} = \frac{1}{1 + (1 + \nu) \frac{f}{1-f} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{10(1+\nu)}{7-5\nu} \right\}} \quad (2a)$$

$$\nu_{Po} = \frac{\nu + (1 + \nu) \frac{f}{1-f} \left\{ -\frac{1}{2} + \frac{5(1+\nu)}{7-5\nu} \right\}}{1 + (1 + \nu) \frac{f}{1-f} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{10(1+\nu)}{7-5\nu} \right\}} \quad (2b)$$

となる。 E と ν はそれぞれポリプロピレンの弾性係数とポアソン比、 f は空孔含有率である。 I_{Al} と I_{Po} はそれぞれ Al 板と発泡樹脂の断面二次モーメントであり、試験片の幅 b を用いて、

$$I_{Po} = \frac{bh^3}{12} (1-k)^3, \quad I_{Al} = \frac{bh^3}{12} \left\{ \left(1-k + \frac{2t}{h} \right)^3 - (1-k)^3 \right\} \quad (3)$$

となる。これ以外の記号は Fig.1 に記載している。中立バンド係数 k は、中立バンドの厚さを発泡樹脂全体の厚さで除したもので、前報の結果から、

$$k^3 - 3 \left(1 + \frac{4tE_{Al}}{hE_{Po}} + \frac{2}{1+\nu_{Po}} \frac{l^2}{h^2} \right) k + 2 \left\{ 1 + \frac{6E_{Al}}{E_{Po}} \left(1 + \frac{t}{h} \right) \frac{t}{h} \right\} = 0 \quad (4)$$

なる三次方程式の根の内、 $0 \leq k \leq 1$ を満足する実根である¹⁾。

3.2 曲げ剛性の推定 Fig.2 に組合せばりモデル (黄色)、重ね板モデル (水色)³⁾ と共に紫色の線で中立バンドモデルの解析結果を示す。図のように、中立バンドモデルは実験結果と定性的にはよく一致しているが、発泡倍率 α のいかに拘わら

Fig.5 Ratios of the experimental results to the analytical ones.

Fig.6 Contours of expected values of flexural rigidity P/δ (change in T).

ず常に過大評価となっている。このため、これを補正する係数を求めてみる。Fig.5 はその結果であり、Fig.2 の実験結果を曲線近似して解析結果との比を求め、それを中立バンド係数 k で整理したものであり、中立バンドモデルが成立しにくい $k=0$ または $k=1$ 近傍の領域を除いてほぼ一定となっていることがわかる。しかしながら、特にこの点を考慮せずにこれらを単純平均すると 0.76 となる。試験条件のいかに拘わらずこの補正係数を適用し、中立バンドモデルによる解析結果にこの値を乗じたものを推定値と呼ぶことにする。

Fig.6 は先の実験結果 Fig.3 に対応する推定値の等高線図である。色分けの区分は実験結果と完全に同一であり、これらの結果を比較すると推定値は実験結果と極めて良く一致していることがわかる。これより、発泡樹脂/ Al 三層積層材の曲げ剛性は、本解析で提案した方法で推定することが可能であることがわかった。

4. 結 言

本研究では、試験温度、三点曲げの支持スパン長さ及び負荷速度を変えて三点曲げ試験を行い、発泡樹脂/ Al 三層積層材の曲げ剛性を実験的に評価し、各試験条件に対して曲げ剛性が最大となる発泡倍率が容易に把握できる等高線図を求めた。さらに、この実験結果と中立バンドモデルから得られた推定値とを比較すると、両者は極めて良く一致したため、発泡樹脂/ Al 三層積層材の曲げ剛性は、本研究の方法で推定することが可能であることがわかった。

参 考 文 献

- (1) 荒木, 浅井, 杉本, 機論 A, Vol.75(2009), 掲載予定.
- (2) 荒木, 山下, 機論 A, Vol.74, No.745(2008), pp.1227-1234.
- (3) 中原, 材料力学 上巻, (1997), pp.185-192, 養賢堂.