ガラスクロス積層強化プラスチックの破壊基準*

芳 我 攻** 林 則 行*** 粕 谷 一 雄***

Failure Criterion of Glass Fabric Reinforced Plastic Laminates

by

Osamu HAGA, Noriyuki HAYASHI and Kazuo KASUYA

(Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba)

Tension, compression and combined tension-compression biaxial tests were performed on three types of glass fabric reinforced plastic laminates, and the applicability of an interaction formula was investigated. Based on these results a new combined tension-compression biaxial failure criterion have been derived. The results obtained are as follows;

(1) The interaction formula can be used practically as the uniaxial failure criterion of glass fabric laminates when it is transformed into the equation containing tensile or compressive strength in the direction having an angle of 45 degree to one of the anisotropic axes.

(2) In the case of closely woven plain fabrics, the interaction formula can be applied as the combined tension-compression biaxial failure criterion, but in the case of coarsely-woven plain fabrics, the calculated values do not agree well with the experimental results.

(3) The values calculated according to the new combined tension-compression biaxial failure criterion agree fairly with the experimental results. When this criterion is applied to the case of uniaxial loading, the formula becomes the same as that of the uniaxial failure criterion given in (1).

(Received Sep. 22, 1975)

1 緒 言

一般に連続長繊維強化プラスチックは、繊維を一方方向に引きそろえた一方方向強化材、あるいはそれをさらに直交あるいは斜交させて積層して得られる積層材と、ガラスクロスなどのように繊維組織をもつ強化基材にプラスチックマトリックスを含浸させて積層するものがある。前者のような材料の組合せ応力での降伏-破壊に関する理論的ならびに実験的な研究は^{1)~4)}かなり行なわれているが、後者のガラスクロス積層板を直接対象とする研究はほとんど見当たらない。

ガラスクロス積層板の強度は、強化材としてのガラス繊維束の織方によるうねりの程度、織目の粗密、糸のよりの有無などにより、複雑な影響を受けると考えられ、一方方向強化材やその積層板などとはかなり違った特性を有する。筆者らは種々異なる織方のガラス繊維を強化材とする積層強化プラスチックの二軸応力破壊基準に関する研究を進めているが、本報では引張-圧縮二軸組合せ応力場での破壊基準について実験的

に検討した結果を報告する。

2 破 壊 基 準

2・1 一軸引張りと一軸圧縮の破壊基準

ガラスクロス積層強化プラスチックの引張破壊基準を構成材料の性質を用いて表わそうとする試みが発表されているが⁵⁾、繊維の織方の影響が全然考慮されていないので、異なる織方のガラスクロス積層板に対して一般的に拡張することはむずかしいと思われる。しかしながら強度に対して織方の影響を考慮することはきわめて困難であろう。そこで筆者らは織方の影響をも含んだものを複合材料の基礎強度と⁶⁾考えて、Norrisによって提案された Interaction formula を多少変形した基準を採用した。Fig.1の座標系に対して異方性主軸 L と θ なる角度をなす X 方向の応力 $\sigma(\theta)$ は、interaction formula に座標変換則を適用して、(1)式のように書ける。

$$\sigma(\theta) = \frac{F_L F_T S_{LT}}{\sqrt{l^4 F_T^2 S_{LT}^2 + m^4 F_L^2 S_{LT}^2 + l^2 m^2 F_L^2 F_T^2}} \quad (1)$$

(1)式によると θ が 45° に近づくに従い実測値と合わなくなることが多いので、 $\theta = 45^\circ$ のときの引張りまたは圧縮強度を F_{45} としてせん断強度 S_{LT} の代わり

* 原稿受理 昭和50年9月22日

** 正 会 員 千葉大学工学部 千葉市弥生町

*** 千葉大学工学部 千葉市弥生町

Fig. 1. Coordinate system of the glass fabric reinforced plastic laminates.

に用いる式を導く。すなわち(1)式に $\theta=45^\circ$ を代入して S_{LT} について解き、これを再び(1)式に代入すれば、

$$\sigma(\theta) = \frac{1}{\sqrt{(l^2-m^2)\left(\frac{l^2}{F_L^2} - \frac{m^2}{F_T^2}\right) + \left(\frac{2lm}{F_{45^\circ}}\right)^2}} \quad (2)$$

強化二方向につき強度の等しい材料の場合、(2)式で $F_L=F_T=F$ とおくと次のような簡単な式となる。

$$\sigma(\theta) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{F} \cos 2\theta\right)^2 + \left(\frac{1}{F_{45^\circ}} \sin 2\theta\right)^2}} \quad (2')$$

(2) または (2') 式によれば異方性主軸方向およびそれと 45° をなす方向の引張りまたは圧縮強度が与えられれば、その間の任意の方向での破壊強度が計算できる。

2・2 引張-圧縮組合せ二軸破壊基準

前報⁷⁾では二軸試験結果の破壊モードを検討し、その結果に基づいて破壊基準を導いたが、本報ではそれを改良し以下に示す条件により破壊が生ずると考えた。

(1) σ_x または σ_y が(2)式で表わされる一軸引張強度 $\sigma_t(\theta)$ または一軸圧縮強度 $\sigma_c(\theta)$ に達したとき。すなわち、

$$\sigma_x = \sigma_t(\theta) \quad \text{または} \quad \sigma_y = \sigma_c(\theta) \quad (3)$$

(2) せん断応力 τ_{LT} が複合材としてのせん断強度 S_{LT} に達したとき。本研究では引張-圧縮組合せ二軸の場合であるから $\tau_{xy}=0$ とすることにより、この場合の破壊時の σ_x と σ_y の関係は次のようになる。

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{S_{LT}}{lm} \quad (4)$$

(3) 異方性主軸 L, T に関する垂直応力とその間のせん断応力の両者の影響を考慮して $\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$ なる合成応力を考え、 σ_e がその方向 $\tan \beta = \tau/\sigma$ に対応する方向の一軸引張強さ $\sigma_t(\beta)$ または一軸圧縮強度 $\sigma_c(\beta)$ に達したとき。異方性主軸 L, T に関する合成応力を σ_{eL}, σ_{eT} 、そのおのおのの方向を β_L, β_T とし $\sigma_x/\sigma_y = -\varphi$ とおくと、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{eL} &= \sqrt{\sigma_L^2 + \tau_{LT}^2} = \sigma_x \sqrt{l^2 + \frac{m^2}{\varphi^2}} \\ \sigma_{eT} &= \sqrt{\sigma_T^2 + \tau_{LT}^2} = \sigma_x \sqrt{m^2 + \frac{l^2}{\varphi^2}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_L &= \tan^{-1} \frac{\tau_{LT}}{\sigma_L} = \tan^{-1} \frac{(\varphi+1)lm}{\varphi l^2 - m^2} \\ \beta_T &= \tan^{-1} \frac{\tau_{LT}}{\sigma_T} = \tan^{-1} \frac{(\varphi+1)lm}{\varphi m^2 - l^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(2), (5), (6)の各式より

$$\sigma_x = \frac{\sigma_t(\beta_L)}{\sqrt{l^2 + \frac{m^2}{\varphi^2}}} \quad \text{または} \quad \sigma_x = \frac{\sigma_c(\beta_T)}{\sqrt{m^2 + \frac{l^2}{\varphi^2}}} \quad (7)$$

ここに $\sigma_t(\beta_L)$ および $\sigma_c(\beta_T)$ は(9)式で得られる β_L または β_T を(5)式に代入して得られる値である。

以上(3), (4), (7)の最小値により破壊するとした。

3 実験方法

ガラスクロスは三種類の平織の物を用いた。Fig. 2 はこれらの織物の形態を示す写真である。(1)はほとんどよりのない太いロービングを織ったもの、(2)は細いねん糸を密着させて織ったもの、(3)は(2)とほとんど同じ太さのねん糸を目抜織としたものである。ここでは(1)(2)(3)をおのおのロービングクロス、平織クロス、目抜平織クロスと呼ぶことにする。試験片はマトリックス樹脂として不飽和ポリエステルを用い、ハンドレイアップ法により製作した。硬化剤は B. P. O 1.5 重量%, 硬化条件は 90°C 4 時間とした。クロスを交互に直交させつつ積層し、積層板の二方向の強度が等しくなるようにした。

Fig. 2. Types of glass fabric.

(a) Uniaxial tension and biaxial tension-compression test specimen
(b) Uniaxial compression test specimen

Fig. 3. Dimensions of test specimen.

試験片の寸法, 異方性主軸方向の取方を Fig. 3 に示す。(a)は一軸引張りと組合せ二軸試験用, (b)は一軸圧縮用である。一軸試験片の寸法は予備実験で座屈破壊を生じないことを確認した上で Fig. 3 (b)のように決定した。

引張-圧縮組合せ二軸試験機についてはすでに詳細を報告した。

4 実験結果および検討

Fig. 4 (a)~(c)と Fig. 5 (a)~(c)は試験片の異方性主軸の一つが, 引張りまたは圧縮方向となす角 θ と破壊応力の関係を示したものである。すべての試験片は二つの弾性主方向に対する強度が等しくなるように作られているので, 計算には(2)'式を用いている。圧縮に関する実験は結果のバラツキが大きいため, 4~5点の試験を行ない, その最大値と最小値を示してある。

計算値と実測値は良く一致するようであるが, 圧縮の場合, 含有率の低いものおよびロービングクロスを強化材としたものでは角度 θ による影響がなく, ほぼ一定値を示すようであった。このように一軸の破壊基準としては(2)'式が実際と良く合うことがわかったが, (2)'式(あるいは(2)式)は一般に試験方法が確定していなくて, 測定値のバラツキの多いせん断強度を含んでいず, 試験の簡単な引張強度または圧縮強度のみによって表わされるので実用的であろう。

ところで(2)または(2)'式からは破壊の物理的意味は得られない。ガラスクロス積層板の破壊機構は, 一方強化材の引張りや圧縮の破壊とはかなり違っており, 物理的意味を有する破壊基準は繊維含有率, 繊維-マトリックス間の引張り, 圧縮, せん断などの界面強度, などの他にガラス繊維織物特有の種々の因子により表わされるものと考えられるが, このような基準を導く

(a) Coarse plain woven glass cloth
(b) Close plain woven glass cloth
(c) Roving glass cloth

Fig. 4. The comparison of uniaxial failure criterion with the experimental results under uniaxial tensile load.

ことはきわめて困難であろう。

つぎに引張-圧縮組合せ二軸破壊基準についてはすでに前報で述べたように interaction formula の F_L を引張強度, F_T を圧縮強度, S_{LT} をせん断強度としてこれを目抜平織クロス積層板に適用したところ実験とのあまり良い一致はみられなかった。また(1)式からわかるように, 一軸引張りの状態を組合せ二軸引張りの特別な場合とみるか, または組合せ引張-圧縮の特別な場合とみるかによって一軸強度が異なる値となる矛盾を含んでいる。しかし interaction formula は非常に簡単な形であるので実用上は便利である。

そこで interaction formula を平織クロスとロービングクロス積層板の場合に適用してみた。Fig. 6 (a)~(d)は計算結果と実験値との比較である。図に示されているように両者はかなり良い一致を示し, 目のつまっ

Fig. 5. The comparison of uniaxial failure criterion with the experimental results under uniaxial compressive load.

平織クロスやロービングクロスに対する破壊基準として用いることは実用上差しかえないと思われる。

つぎに新たに導いた破壊基準(3), (4), (7)の各式を用いた結果と実験結果を比較したものが Fig. 7 (a)~(c)である。目抜平織クロスの場合については両者は良く一致するようであるが、ロービングクロスや平織クロスのように糸の太いものや目のつまったものに対しては、 $\theta=0^\circ$ の場合に L , T 方向応力成分 σ_L , σ_T の相互の影響が現われてくるためか、両者は良くは一致しないようである。このことは圧縮強度の低いものほどその傾向が著しいようであった。圧縮強度は目抜平織クロス、平織クロス、ロービングクロスの順に低下するが、これは織目の粗密と糸の太さ、つまり布を構成している糸の屈曲の大小の順位と一致し、屈曲の大きいものほど σ_L , σ_T の相互干渉が大きいのではないかと考えられる。

(a), (b) Close plain woven glass cloth, V_f is 45% and 35%, respectively
(c), (d) Roving glass cloth, V_f is 45% and 35%, respectively

Fig. 6. The comparison of calculated values by interaction formula with the experimental results under biaxial loading.

すべての場合についてせん断応力で破壊する場合を示す(4)式は実測値と良く一致した。そして異方性主軸間の純粋せん断応力状態では(たとえば Fig. 8 (a)における $\theta=45^\circ$, $\varphi=-1$ に当たるところ)ロービングクロス、平織クロスなどのように繊維方向の引張強度の1/3、圧縮強度の1/2程度の応力で容易にせん断破壊してしまう点は充分注意しなければならないことであろう。

垂直応力とせん断応力の相互の影響を表わす(7)式も傾向としては実測値と一致するようであるが、ここでもやはり L , T 方向の垂直応力成分間の相互の影響が

(a) Coarse plain woven glass cloth, $V_f=45\%$
 (b) Close plain woven glass cloth, $V_f=35\%$
 (c) Roving glass cloth, $V_f=35\%$

Fig. 7. The comparison of failure criterion, eqs. (6), (7), (10), with the experimental results under biaxial loading.

認められるようである。

5 結 言

三種類のガラス繊維織物で強化されたプラスチック積層板の引張り, 圧縮, および引張-圧縮組合せ二軸

試験を行ない, 一般に使用されている Interaction formula の適用性を検討するとともに, その結果に基づいて新たな引張-圧縮組合せ二軸破壊基準を導いた。

得られた結論は次のとおりである。

(1) せん断強度の代わりに異方性主軸と 45° をなす方向の引張りまたは圧縮強度を用いるように変形された Interaction formula はガラスクロス積層板の一軸破壊基準として実用できる。

(2) Interaction formula は引張-圧縮組合せ二軸破壊基準として目のつまった平織物の積層板に対しては適用できるが, 目の粗い平織物の積層板に対しては実験結果と良くは一致しない。

(3) 破壊モードを検討し新たな引張-圧縮組合せ二軸破壊基準を導いた。計算値と実験値は傾向的に一致した。なおこれを一軸の場合に適用すると Interaction formula のせん断強度の代わりに異方性主軸と 45° をなす方向の引張りまたは圧縮強度を用いた式となる。

終わりに本研究を遂行するに当たり終始ご指導いただいた東京工業大学精密工学研究所の白鳥英亮教授, 池上皓三助教授に深謝する。

(昭和50年5月20日 日本材料学会第24期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 大平博一, 九大工学集報, **42**, 454 (1969).
- 2) 河田幸三, 材料, **20**, 881 (1971).
- 3) Puppo, A. H., and H. A. Evensen, AIAA Journal, **10**, 468 (1972).
- 4) Wu, E. M., and J. K. Scheublein, ASTM STP, **546**, 188 (1974).
- 5) 網島貞男, 小南晴紀, 材料, **22**, 1017 (1973).
- 6) Norris, C. B., Forest Products Laboratory Report, 1816 (1962).
- 7) 芳我 攻, 林 則行, 粕谷一雄, 材料, **24**, 776 (1975).
- 8) 白鳥英亮, 池上皓三, 服部敏雄, 材料, **22**, 1802(1973).