

FEMによる異方性複合材料構造体の構造解析（第1報）

－ FRP の構造解析用物性値の検証 －

山岸 暢, 吉田 光則, 鈴木 耕裕
 中西 洋介, 成田 吉弘*, 山下 信博**
 横山 光紀**

Structural Analysis of Anisotropic Composite Structures by FEM (Part I)

－ Examination on Mechanical Properties for Structural Analysis of FRP －

Tohru YAMAGISHI, Mitunori YOSHIDA, Takahiro SUZUKI
 Yohsuke NAKANISHI, Yoshihiro NARITA*, Nobuhiro YAMASHITA**
 Mitunori YOKOYAMA**

抄録

FEMによるFRPの構造解析用の各物性値を算出する各種の理論の検証を行い、各物性値に最適な理論式を選定した。またラミナの破壊強度の測定により、線形解析可能な範囲、繊維強度、破損則の適用性の検討を行った。

1、はじめに

FRPは、軽量で高強度、高耐食性等の特徴を活かし、建設資材、住宅機材、船艇・船舶、自動車・車輻、タンク・容器、工業機材に幅広く用いられている。

本研究では、FRPの各種の成形技術の中で、最も強度の信頼性の高い製品が得られるフィラメントワインディング(FW)法により成形される構造体を設計・構造解析するために必要な物性値の測定及び検証を行った。FW法では連続長繊維を用いるため、構造体は材料異方性を有するラミナから構成される。異方性複合材料の構造解析は非常に複雑であるため、FEM(有限要素法)等の構造解析法が最適である。FW法で成形されたFRPをFEMで弾性領域の範囲内で構造解析するために必要な物性値は、一方向に並んだ強化繊維方向の引張弾性率 E_L 、ポアソン比 ν_{LT} 、強化繊維と直角方向の引張弾性率 E_T 、およびせん断弾性率 G_{LT} である。これらの物性値は、一方向繊維強化のFRP板(一方向材)について各種の材料試験を行うことで得られるが、繊維含有率等の製造条件が異なる度に測定を行うのは効率的でない。そこ

で、繊維とマトリックス樹脂の物性値および繊維含有率から、複合化されたFRP材料の物性値を簡単に算出できることが望ましい。一方向材のこれらの物性値を繊維とマトリックス樹脂の物性値から求めるものとして、材料力学的手法から導いた複合則や、各種のモデルによる計算式が提案されている¹⁾²⁾。本研究では、一方向材の E_L 、 ν_{LT} 、 E_T 、 G_{LT} を測定し、各理論値との比較検証を行った。

第2報で報告するFEM解析の手法は、汎用FEMプログラムI-DEASの線形モジュールを使用するので、FRP材料の応力-ひずみ線図での弾性領域内のみ適用可能であり、破壊近傍での非線形領域には適用出来ない。本研究では、各繊維配向角の試験材の応力-ひずみ線図から、FEMの線形解析手法の適用可能な範囲を実験的に求めた。

異方性複合材料の破壊強度は、一方向材の積層板の強度として考えると、各ラミナが同じだけひずむならば最弱層から破壊する。複合材料全体としては、構造破壊には至らないが、内部で既に破壊が進行しているため繰り返し使用するには不安が伴う。一方向材のラミナの強度を予測するために、破損則と呼ばれる各種の理論が提案されている³⁾⁴⁾。本研究では、一方向材の各繊維配向角の方向の引張強度を実験で求め、各破損則により検証した。

* 北海道工業大学 ** サッポロ産機(株)

2. 実験方法

2.1 試験材成形方法

図1に、一方向材の製造方法を示した。図中のマンドレルに、樹脂を含浸させたガラス繊維をフープ巻きで一層巻き付けて板材を成形した。樹脂として、昭和高分子(株)のリポキシ R-802を用いた。性状は、粘度：5poise (25℃)、ゲルタイム：6.3分 (キュメンハイドロパーオキシド 1.0部、ナフテン酸コバルト 0.4部、80℃)であった。また、表面の硬化不良防止のため、空気硬化剤 (スチレンモノマー/パラフィン=19/1) を5部添加した。硬化は常温で行った。ガラス繊維として番手 4630g/km のロービングを用いた。

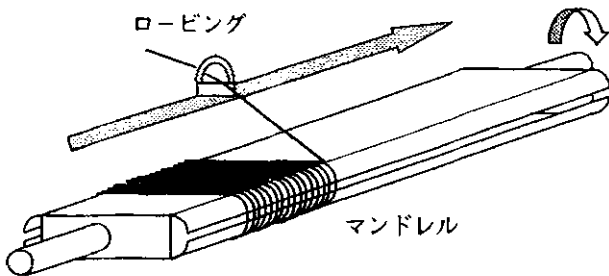


図1 一方向材の製造方法

2.2 物性評価方法

物性評価は、JIS K7054 に準拠して引張試験を行った。試験片は、前節の方法で得られた一方向材から、ガラス繊維方向を0°として、各繊維配向角の方向に長さ200mmの短冊状に切り出し、両端にタブを接着し試験片とした。試験片幅は、0°方向は10mm、それ以外の方向は25mmとした。弾性率の測定用試験片には、ひずみゲージ (KYOWA, KFG-5-120-D16-23) を試験片中央に貼った。また、厚み4mm、20cm角の樹脂注型板を作製し、JIS K7113の1号形試験片に切削加工し、樹脂の評価試験片とした。試験は、万能材料試験機 (オートグラフ DSS-10T-S) により、試験速度 1mm/min で行った。ガラス繊維含有率は、JIS K7052 に準拠し測定した。

3. 一方向材の弾性率

3.1 複合材料の弾性率の理論

一方向材の繊維方向の弾性率 E_L は、繊維とマトリックス樹脂の弾性率 E_f と E_m をそれぞれ繊維体積含有率 V_f と樹脂含有率 $V_m = 1 - V_f$ に比例配分する式

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

により得られる。繊維と樹脂は繊維方向には並列に並んでいるので、式 (1) は並列モデルと呼ばれる。FEM 解析で必

要な他の弾性率は、ポアソン比 ν_{LT} 、強化繊維と直角方向の引張弾性率 E_T 、およびせん断弾性率 G_{LT} である。これらの係数は、式 (1) のように並列または直列に配置されたモデルの考え方を拡張できる。その算出式は一般に、各構成要素の線形加算の形式

$$Y^n = V_f X_f^n + V_m X_m^n \quad (2)$$

で表される。ここで Y は複合化された材料の弾性率、 V と X はそれぞれの添字の表す構成要素の体積比と弾性率を示す。 X と Y につく「べき乗数 n 」は、 $n = 1$ は並列モデル、 $n = -1$ は直列モデルを表す。式 (1) に与えた E_L は、並列モデルの有効性が広く受け入れられている。他の係数については、 E_T と G_{LT} は直列モデル、 ν_{LT} は並列モデルが適用され、その結果、

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m} \quad (3)$$

$$G_{LT} = \frac{G_f G_m}{G_m V_f + G_f V_m} \quad (4)$$

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (5)$$

が得られる。

ここで、 $G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)}$ 、 $G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$ (6)

である。式 (1)、(3) ~ (5) は一般に材料力学的手法と呼ばれる。

Tsai²⁾ は、 E_T と G_{LT} に関し繊維が一部接触する効果を考慮して、繊維接近率 C という係数により、繊維同上が完全に孤立 ($C = 0$)、または接触した ($C = 1$) 場合を重ね合わせて2つの極端な場合の中間状態を表す式を提案した。 E_T 、 G_{LT} は以下の式で算出される。

$$E_T = 2 [1 - \nu_f + (\nu_f - \nu_m) V_m] \times \{ (1 - C) \times \frac{K_f (2 K_m + G_m) - G_m (K_f - K_m) V_m}{(2 K_m + G_m) + 2 (K_f - K_m) V_m} + C \times \frac{K_f (2 K_m + G_f) + G_f (K_m - K_f) V_m}{(2 K_m + G_f) - 2 (K_m - K_f) V_m} \} \quad (7)$$

$$G_{LT} = (1 - C) G_m \times \frac{2 G_f - (G_f - G_m) V_m}{2 G_m + (G_f - G_m) V_m} + C G_f \times \frac{(G_f + G_m) - (G_f - G_m) V_m}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m) V_m} \quad (8)$$

ここで、 $K_f = \frac{E_f}{2(1 - \nu_f)}$ 、 $K_m = \frac{E_m}{2(1 - \nu_m)}$ (9)

である。

Tsai はエポキシ樹脂による一方向材について 63 ~ 76vol% の範囲で弾性率を実測し、繊維接近率の値として $C = 0.2$ 程度を推奨している。

植村¹⁾らは、材料力学的手法と繊維接近率の概念を組み合わせて、以下の式を提案した。

$$E_T = (1 - C) \times \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f V_m} + C (E_f V_f + E_m V_m) \quad (10)$$

$$G_{LT} = (1 - C) \times \frac{G_f G_m}{G_m V_f + G_f V_m} + C (G_f V_f + G_m V_m) \quad (11)$$

ここで、Cは繊維含有率 V_f への依存性を考慮し、エポキシ樹脂による一方向材について39~65vol%の範囲で実験的に求めた以下の式を用いた。

$$C = 0.4V_f - 0.025 \quad (12)$$

3.2 結果および考察

複合別の式(1)~(12)を用いて各弾性率を計算するに当たって、ガラス繊維の弾性率は、製造元のカタログ値である

$$E_f = 73.6 \text{ GPa}$$

$$\nu_f = 0.23$$

を用いた。樹脂の弾性率は、ビニルエステル樹脂注型板の測定結果から

$$E_m = 4.14 \text{ GPa}$$

$$\nu_m = 0.36$$

を使用した。各物性値と繊維含有率の関係を正確に求めるため、繊維の体積含有率 V_f は試験片毎に測定した。

図2は、 E_L と V_f の関係を示した。図中のプロットは、試験片毎の測定値を示した。実線は式(1)により得られた計算値であり、測定値とよく一致しており、 E_L に並列モデルを適用することの妥当性が裏付けられた。

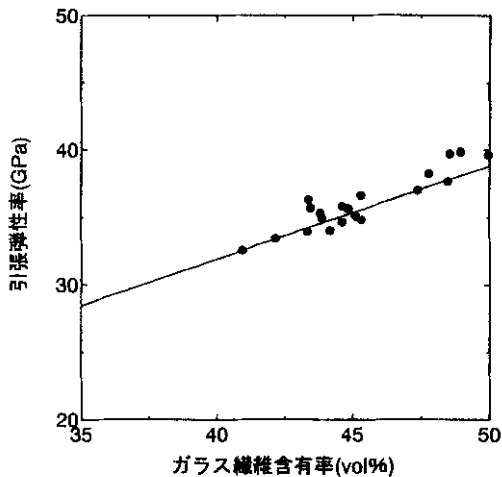


図2 0°方向引張弾性率とガラス繊維含有率の関係

図3は、 E_T と V_f の関係を示した。実線は式(3)による計算値であり、測定値とはかなり異なっている。点線はTsaiの式(7)を $C = 0.2$ を用いて計算したものと、植村の式(10)による計算結果であるが、植村の式が測定値に最も近

い値を与えている。Tsaiの式において、Cに0.2より大きな数値を与えれば測定値に近づくが、Tsaiは繊維含有率が63~76vol%の試験材による実験で0.2の数値を得ており、本研究で用いた40~50vol%程度の試験材では、ガラス繊維の占める割合が小さいので、CにTsaiの結果より大きな数値を与えるのは矛盾が生じる。

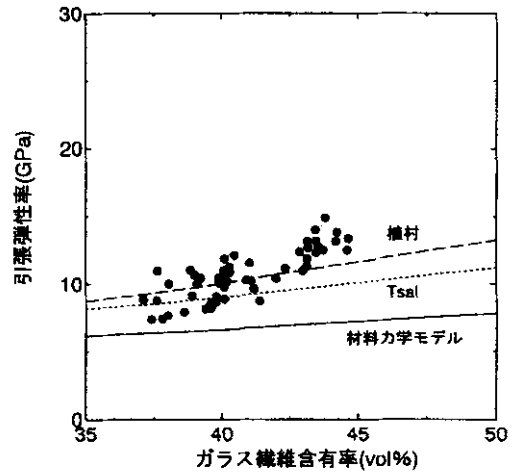


図3 90°方向引張弾性率とガラス繊維含有率の関係

図4は、 G_{LT} と V_f の関係を示した。実線は式(4)による計算値であり、測定値とはかなり異なっている。点線はTsaiの式(8)を $C = 0.2$ を用いて計算したものと、植村の式(11)による計算結果であるが、植村の式が測定値に最も近い値を与えている。

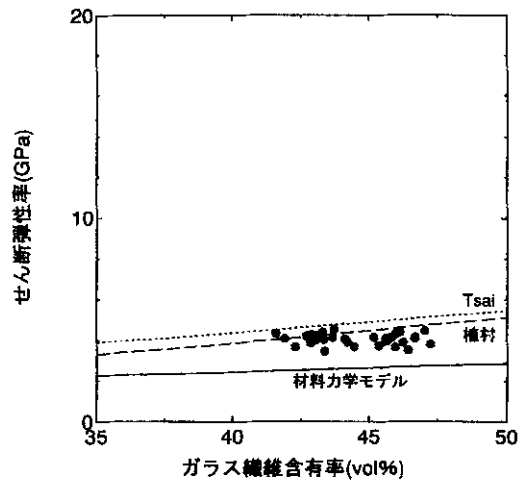


図4 せん断弾性率とガラス繊維含有率の関係

図5は、 ν_{LT} と V_f の関係を示した。実線は式(5)により得られた計算値であり、測定値とよく一致している。

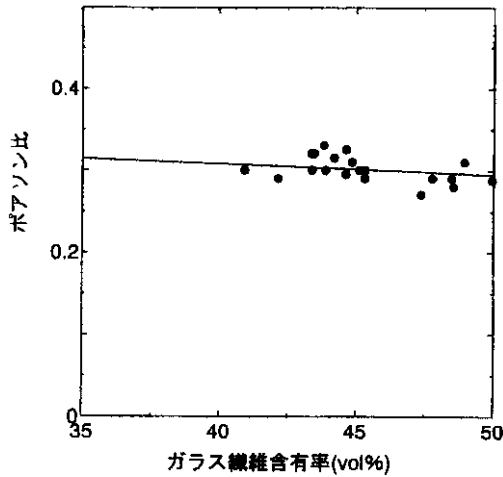


図5 ポアソン比とガラス繊維含有率の関係

以上の結果より、FEM解析を行う際には、 E_L と ν_{LT} は材料力学的手法を、また E_T と G_{LT} は植村の式を用いるのが妥当である。

4. 一方向材の強度

4.1 複合材料の強度の理論

繊維方向の強度 F_L は、樹脂よりも先に繊維が破断するので、繊維強度 F_f と破断時の樹脂の応力 σ_m および V_f から以下の式で表される。

$$F_L = F_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (13)$$

これは一般に、強度の複合則と呼ばれる。

一方向材を均質体とみなし、 F_L 、 F_T 、(繊維と直角方向の強度)、 F_{LT} (せん断強度)が既知のとき、繊維方向に対し θ の方向に斜めに力が作用した場合の強度を予測するものとして、破損則と呼ばれる各種の理論が提案されている。破損則の中でよく用いられるのは、最大応力説、最大ひずみ説、Tsai-Hill則⁽³⁾⁽⁴⁾であり、以下にこれらの理論を示す。

・最大応力説

$$\sigma < \frac{F_L}{\cos^2 \theta}, \quad \sigma < \frac{F_T}{\sin^2 \theta}, \quad \sigma < \frac{F_{LT}}{\sin \theta \cos \theta} \quad (14)$$

最大応力説は、上式中の条件のうちどれかを破ったとき破壊とみなすものである。

・最大ひずみ説

$$\sigma < \frac{F_L}{\cos^2 \theta - \nu_{LT} \sin^2 \theta}, \quad \sigma < \frac{F_T}{\sin^2 \theta - \nu_{TL} \cos^2 \theta},$$

$$\sigma < \frac{F_{LT}}{\sin \theta \cos \theta} \quad (15)$$

最大ひずみ説も、上式中の条件のうちどれかを破ったとき破壊とみなすものである。

・Tsai-Hill則

$$\frac{1}{\sigma_x^2} = \frac{\cos^4 \theta}{F_L^2} + \left(\frac{1}{F_{LT}^2} - \frac{1}{F_L^2} \right) \times \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{F_T^2} \quad (16)$$

4.2 結果および考察

4.2.1 応力によるひずみの変化

第2報で記述するFEM解析の手法は、FRP材料の応力-ひずみ線図での線形領域にのみ適用可能であり、破壊近傍での非線形領域には適用できない。そこで、各繊維配向角の試験材の応力-ひずみ線図から、本研究で用いた材料の、比例限度内と見なせるひずみの範囲を実験的に求めた。

図6, 7, 8, 9, 10にそれぞれ $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の繊維配向角の方向に引っ張ったときの応力-ひずみ線図を示した。図中の点線で、比例限度におけるひずみの範囲を示した。また、表1に、これらの値を示した。

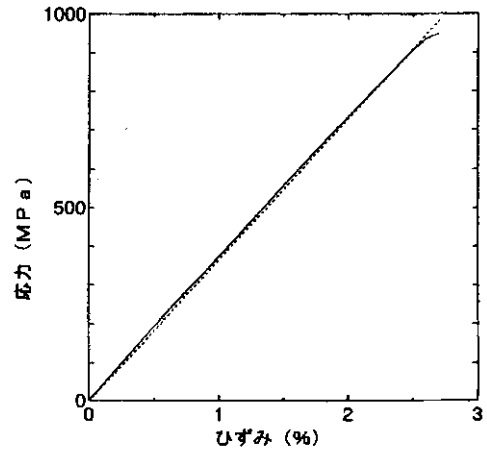


図6 0°方向の応力-ひずみ線図

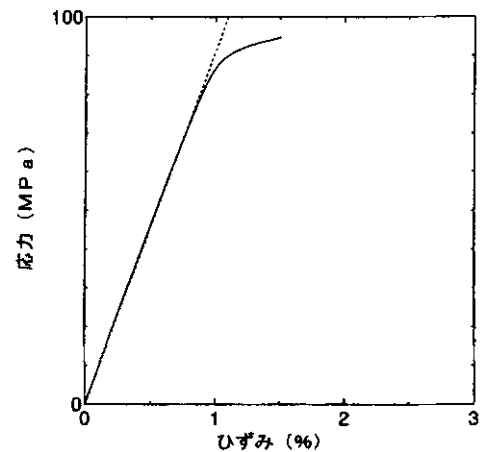


図7 30°方向の応力-ひずみ線図

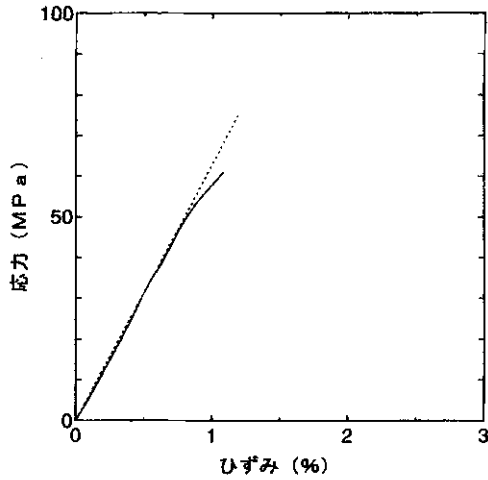


図8 45°方向の応力-ひずみ線図

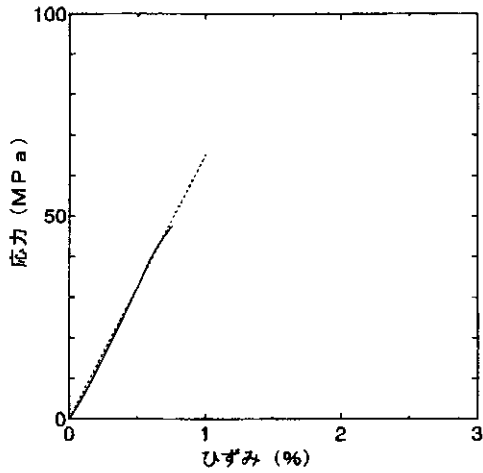


図9 60°方向の応力-ひずみ線図

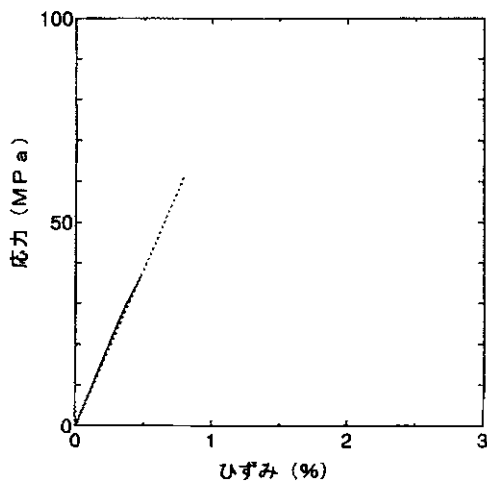


図10 90°方向の応力-ひずみ線図

表1 繊維配向角とひずみ

角度 (°)	0	30	45	60	90
ひずみ (%)	2.5	0.7	0.6	0.6	0.5

繊維配向角が大きくなる程、比例限度内と見なせるひずみの範囲は小さくなり、最も小さい90°方向においては0.5%程度である。

4.2.2 一方向材の強度評価

第2報で記述する天然ガス自動車用燃料容器の設計例では強度判定基準として、 F_f (繊維強度)が必要となるが、 F_f は直接測定するのが困難なので、 F_L の実測値と(13)式に示す複合則の式から F_f を求めることとした。

図11に一方向材の破断時の伸びとガラス繊維含有率の関係を示した。伸びはほぼ一定で平均は、2.7%であった。樹脂は、2.7%の伸びではまだ破壊しないので、 σ_m には、伸びが2.7%のときの応力を与えなければならない。

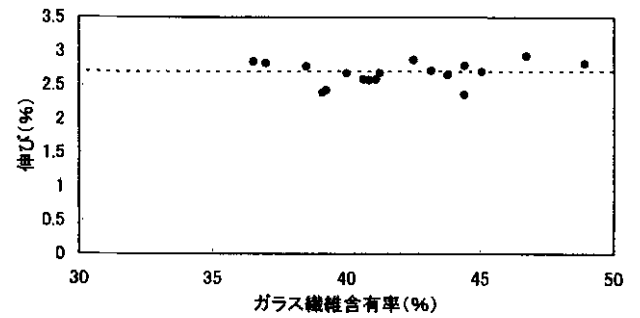


図11 ガラス繊維含有率と破断伸びの関係

図12に樹脂単体の応力-ひずみ線図の例を示した。試験片10本で、伸びが2.7%のときの応力を求め平均し、 σ_m を算出すると56MPaであった。

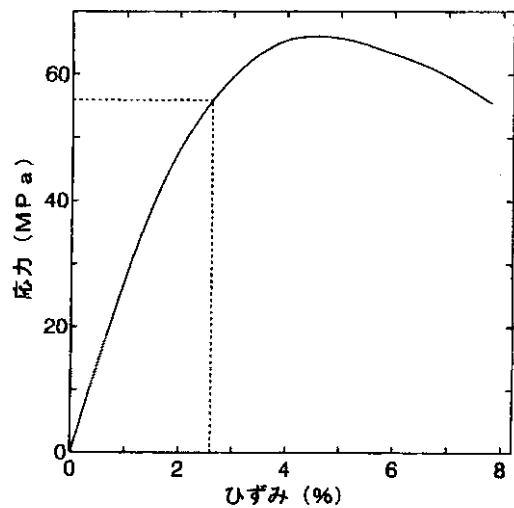


図12 樹脂の応力-ひずみ線図

図13に F_L とガラス繊維含有率の関係を示した。 F_f に、1.8、1.9、2.0、2.1、2.2GPaを代入し、複合則の式から算出した値を各線に示した。図より、 F_f を約2.1GPaとすると、最も実験値に近似された。

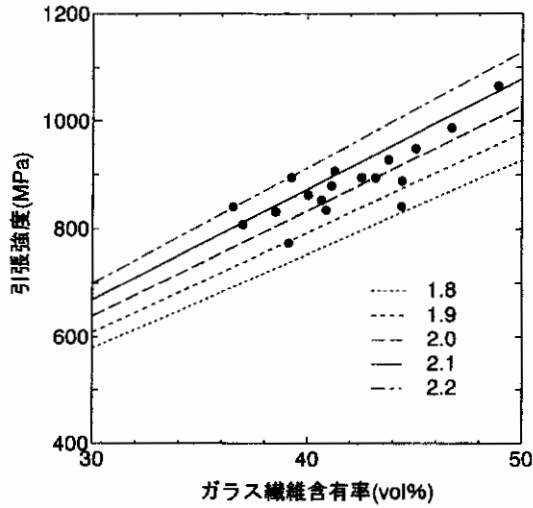


図13 引張強度とガラス繊維含有率の関係

脂の界面の強度に依存するため、ガラス繊維含有率に依存せず、ほぼ一定の値であった。

4.2.3 破損則の検討

各破損則の中で、比較的使用頻度の高い最大応力説、最大ひずみ説、Tsai-Hill則に F_L 、 F_T 、 F_{LT} の実験値を与え、ガラス繊維含有率40%のときの計算値と各角度の方向の実験値を比較した。図14および15より、 F_T 、 F_{LT} はガラス繊維含有率が変化してもほぼ一定であることから、計算には、平均値の34MPa (F_T)、28MPa (F_{LT})を用い、 F_L には854MPa、ポアソン比には、実測値 $\nu_{LT} = 0.31$ 、 $\nu_{TL} = 0.09$ を用いた。

図16に30°、図17に60°の方向の引張強度とガラス繊維含有率の関係を示した。強度はガラス繊維含有率が変化してもほぼ一定であり、実験値は平均値を用いることとした。

図18に、各破損則の計算値と各角度での実験値を示した。図より、何れの理論値も実験値とほぼ一致した。

各破損則は、今回用いた試験材に充分適用できることが明らかになった。

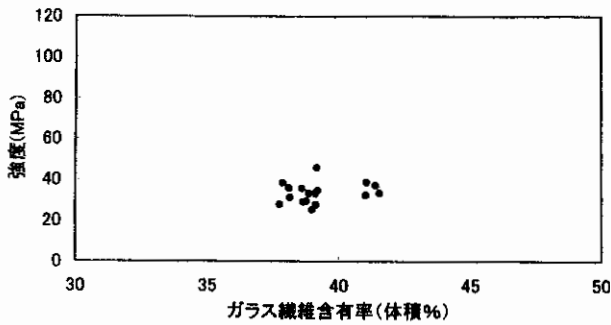


図14 90° 方向の引張強度

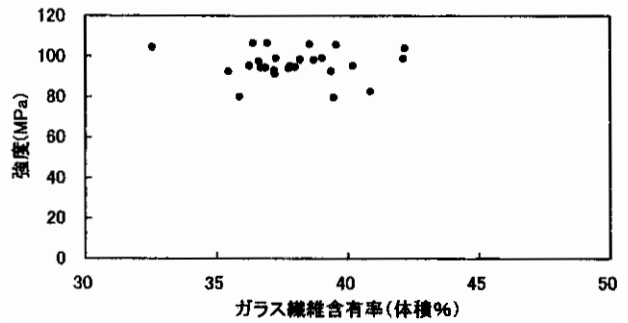


図16 30° 方向の引張強度

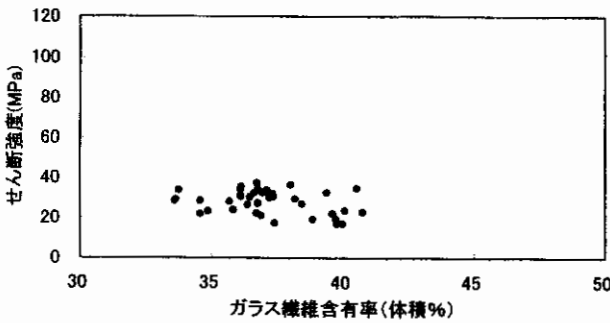


図15 ガラス繊維含有率とせん断強度の関係

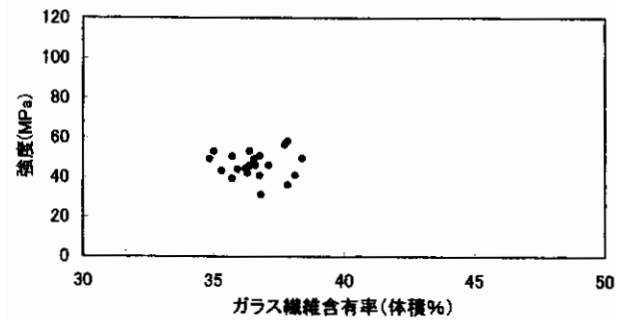


図17 60° 方向の引張強度

各破損則において、繊維と任意の角度の方向の強度は、(14)～(16)式から、繊維の方向の強度 F_L 、繊維と直角方向の強度 F_T 、せん断強度 F_{LT} で表される。図14に F_T 、図15に、 F_{LT} とガラス繊維含有率の関係を示した。 F_T や F_{LT} は、マトリックス樹脂の強度や繊維とマトリックス樹

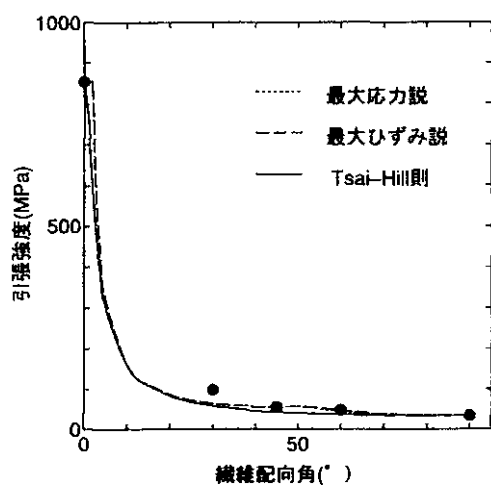


図18 各繊維配向角での引張強度

5. まとめ

一方向材の弾性率および強度を実験的に評価し、各種の理論で検証した結果、以下の知見が得られた。

- (1) FEM解析を行う際には、 E_L と G_{LT} は材料力学的手法を、また E_T と G_{LT} は植村の式を用いるのが妥当である。
- (2) 各繊維配向角の試験材の応力-ひずみの関係から、比例限度内のひずみの範囲は、 0° 方向は 2.5%、 30° 方向は 0.7%、 45° 方向は 0.6%、 60° 方向は 0.6%、 90° 方向は 0.5%であった。
- (3) 複合則からの検証により、実測が困難なガラス繊維の強度は、2.1GPaにすると実験値に最もよく近似した。
- (4) 一方向材を各繊維配向角の方向に引っ張ったときの強度は、最大応力説、最大ひずみ説、Tsai-Hill則のいずれの破損則でも理論的に算出できることが明らかになった。

引用文献

- 1) 植村益次，山脇弘一；東京大学宇宙航空研究所報告 Vol.4, No.3(B), Oct.(1968)
- 2) S.W.Tsai ; Structural Behavior of Composite Materials, NASA CR-71 (1964)
- 3) 藤井太一，座古勝；複合材料の破壊と力学，(1988)，実教出版
- 4) 森口幹郎，金原勲，福田博；複合材料，(1988)，日刊工業新聞社