FRP における強度とその変動の複合則について*

藤井 太一** 前川 善一郎**

On the Mixture Laws of Strength and Variation in FRP

by

Taichi FUJII and Zenichiro MAEKAWA

(Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka)

The fiber reinforced plastics (FRP) are now available for increased use in structural materials. FRP are, however, generally characterized by a considerable scatter in mechanical properties. Understanding the sources and nature of these variabilities is the key to better utilization of these composite materials. This paper deals with the two typical types of glass fiber reinforced composites (GRP) which are reinforced by plain-woven glass cloth and chopped strand glass mat. The main results obtained in this work are summarized as follows;

(1) The mixture law of strength is applied to the modeled laminate which consists of three parts; the first part is the unidirectional layer aligned parallel to the load direction, the second is the layer which does not contribute to tensile strength and the third is the matrix layer. The mixture laws of the average and the variation of tensile strength are developed under an assumption that the fracture strengths of the first and third layers and the fiber volume content are random variables.

(2) The average and the coefficient of variation of fracture strength in the first and third layers can be obtained by use of the bundle theory and the weakest link theory. The coefficient of variation of fiber volume content is given by the combination of the coefficient of variation of volume of reinforced material and that of thickness of laminate.

(3) The calculated results of the average of fracture strength are found to agree well with the experimental whether each of the random variables are independent or not. But the coefficient of variation of strength is dependent on the correlation of each variables.

(Received May 27, 1978)

キー・ワード：FRP，強度の複合則，平均値，変動係数，感度

1 緒 言

繊維強化プラスチック (FRP) は近年構造用部材として用途が拡大しつつあり、それに伴い FRP の強度の信頼性について関心が急速に高まりつつあるのが現状であると考えられる。さて FRP は複合材料の一つであり、異種材料を複合成型にすることにより製作するため、強度のばらつきの要因が単一材料からなるものより多くなり、強度のばらつきの大きい材料の一つであると考えることができる。しかるにこれまでの FRP の研究の中で FRP の強度のばらつきを取り扱った研究には、牧²⁾、Halpin³⁾、Knight⁴⁾ 等があるが、比較的少いのが現状であり、とりわけ FRP の強度のばらつきと FRP を構成する各要素のもつ強度のばらつきとの関連について言及した研究はなされていない。そ

こで本研究においては FRP の中でも特に多く用いられている 2 種類の FRP (チョップドストランドマット GRP, 平織クロス GRP) を取上げ、それらの引張強度のばらつきを調べ、各構成素材との関係について言及し、強度の平均値および変動の複合則についての一提案を行い、実験値との比較を行ったものである。

2 理 論

2・1 強度の平均値および変動の複合則

複合材料は分散相材料とマトリックス材料とから構成されており、それぞれが非常に性質が異なる異種材料であるので、各構成素材のもつ特性のばらつきと複合成型することによる特性の変動などが材料特性に大きい影響を及ぼすことになり、複合材料の強度および強度のばらつきの推定は厳密には非常にむずかしい問題となる。とくに繊維強化複合材料の場合、強化繊維層の形態の相違によって荷重伝達の機構が異なるため、本

* 原稿受理 昭和53年5月27日

** 正 会 員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本町

材料の強度を統一的に表現する理論は存在しないが、その中で最も基本的なものの一つとして強度の複合則 (Mixture Law) がある。この法則は複合材料の繊維強化層とマトリックス層とが荷重方向に対して並列構造をなし、各層のひずみ分布が同一であるときに、適用されるものであり、荷重軸と繊維方向とが平行な一方方向繊維強化複合材料およびクロス強化複合材料、そして等方性材料として考えられるマッド強化複合材料等の推定に一般に用いられているが、荷重軸と繊維方向が異なる場合でも主方向の引張強度およびせん断強度の比率が、繊維層の含有率に依存しない場合には強度の複合則を拡張して使用できるけれども、その範囲は限られている。そこで本研究においては複合則を基盤としているために適用の範囲も上述したものに限定している。さて強度の複合則は一般に次式で表現され、臨界繊維含有率 (V_{cr} , 一般に数パーセント) 以上で用いられる。

$$S_c = \zeta S_f V_f + S_m^* V_m \quad (1)$$

ここで S_c , S_f はそれぞれ複合材および繊維の破壊応力である。 S_m^* は繊維の破壊ひずみに対するマトリックスの応力であって、 S_m をマトリックスの破壊応力とすると一般に FRP においては $S_m^* \approx S_m$ と考えられる。 ζ は繊維の形態によって決まる係数であって、1 方向強化の場合は 1.0、直交方向強化の場合は 0.5、繊維方向がランダムな場合は 0.375 を用いている。 V_f ⁶⁾ はファイバおよびマトリックスの体積含有率である。

さて本研究において Fig.1 に示すごとく、繊維強化型複合材料の構造を繊維強化層 (I) (II) およびマトリックス層におきかえる。I 強化層は荷重方向に繊維が配向した一方方向繊維強化層から成り、破壊荷重の大部分を負担し、II 強化層は荷重が増加する初期段階で破壊する層で、破壊荷重には直接寄与しないものと考えられる。例えば、クロス GRP において荷重方向に垂直に配向されている繊維層が II 層に相当するものと考えられる。さていま κ プライの積層板から、板幅 b 、長さ l_s 、板厚 t をもつ試験片を切り出し、I 層、II 層、マトリックス層の体積含有率をそれぞれ V_{f1} , V_{f2} , V_m とすると、これらの層のあいだに次式の関係が成立する。

$$V_{f1} = \zeta V_f, \quad V_m = 1 - V_f \quad (2)$$

前述の $S_m \approx S_m^*$ および (2) 式を (1) 式に代入すると強度の複合則として次式が成り立つ。

$$S_c = S_f \cdot \zeta V_f + S_m (1 - V_f) \quad (3)$$

つぎに繊維強化型複合材料の強度の平均値とそのばらつきについて考える。(3) 式において確率変数として S_f , S_m , V_f が考えられる。そこで各変数の平均値、変動係数、相関係数をそれぞれ μ , C , ρ で表し、各変数を添字で示すものとする。例えば S_f の平均値、

変動係数は μS_f , $C S_f$ また S_f と S_m との相関係数は $\rho S_f S_m$ で表す。さて FRP の強度の平均値 μS_c , 変動係数 $C S_c$ を求めるために (3) 式を各変数の平均項の近傍でテーラー展開すると 3 次以上の項はすべて 0 となり、次式が得られる。

$$\begin{aligned} S_c = & \mu S_f \zeta \mu V_f + \mu S_m (1 - \mu V_f) + \zeta \mu V_f (S_f - \mu S_f) \\ & + (1 - \mu V_f) (S_m - \mu S_m) \\ & + (\zeta \mu S_f - \mu S_m) (V_f - \mu V_f) \\ & + \zeta (S_f - \mu S_f) (V_f - \mu V_f) \\ & - (S_m - \mu S_m) (V_f - \mu V_f) \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式より S_c の平均値は次のようになる。

$$\begin{aligned} \mu S_c = & \mu S_f \zeta \mu V_f + \mu S_m (1 - \mu V_f) \\ & + C V_f \mu V_f (\zeta \rho S_f V_f C S_f \mu S_f - \rho S_m V_f C S_m \mu S_m) \end{aligned} \quad (5)$$

また S_c の変動係数を 2 次近似すると次のようになる。

$$\begin{aligned} C S_c^2 = & \frac{1}{\mu S_c^2} [C S_f^2 (\zeta \mu S_f \mu V_f)^2 + C S_m^2 \{\mu S_m (1 - \mu V_f)\}^2 \\ & + C V_f^2 \{\mu V_f (\zeta \mu S_f - \mu S_m)\}^2 \\ & + 2 C S_f C S_m \{\zeta \rho S_f S_m \mu S_f \mu S_m \mu V_f (1 - \mu V_f)\} \\ & + 2 C S_f C V_f \{\zeta \rho S_f V_f \mu S_f \mu V_f (\zeta \mu S_f - \mu S_m)\} \\ & + 2 C S_m C V_f \{\rho S_m V_f \mu S_m \mu V_f (1 - \mu V_f) \\ & (\zeta \mu S_f - \mu S_m)\}] \end{aligned} \quad (6)$$

いまそれぞれの確率変数が独立であると仮定すると、

$$\rho S_f S_m = \rho S_f V_f = \rho S_m V_f = 0 \quad (7)$$

(7) 式を (5), (6) 式に代入すると、強度の平均値、変動係数は次のように簡単化される。

$$\mu S_c = \mu S_f \zeta \mu V_f + \mu S_m (1 - \mu V_f) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C S_c^2 = & \frac{1}{\mu S_c^2} [C S_f^2 (\zeta \mu S_f \mu V_f)^2 + C S_m^2 \{\mu S_m (1 - \mu V_f)\}^2 \\ & + C V_f^2 \{\mu V_f (\zeta \mu S_f - \mu S_m)\}^2] \end{aligned} \quad (9)$$

(6), (9) 式は FRP の強度の変動係数と各構成要素の強度および体積含有率との関係を表す式であって、Fig. 1 に示すごとく 3 相で構成されると考えた繊維強化型複合材料の強度の変動の複合則と考えることができる。

Fig. 1. Modeled laminate which is consisted of three parts.

2・2 各変数の平均値と変動係数

つぎに FRP の強度の変動の複合則 ((6), (9) 式) を適用するために三つの確率変数 S_f , S_m , V_f の平均値と変動係数とをそれぞれ決定しなければならない。

2・2・1 I 繊維強化層の破壊強度 FRP における

分散相材料としてはミクロンオーダーのファイバを用いる場合が多く、ガラス繊維の場合には 5~13 μ 径の繊維を約 200 本まとめたストランドユニットとして取り扱い、これらをさらに複数本引き揃えたものを織ったり、切断したものからガラスクロス・マットが作られる。いまストランドが n_b 個集束したガラス繊維のバンドルの引張強度 S_{fu} の分布を次式で示すような 2 母数ワイブル分布で表すものとする。

$$P[S_{fu} < s] = F_{S_{fu}}(s) = 1 - \exp\left[-I_s \left(\frac{s}{\beta_f}\right)^{\alpha_f}\right] \quad (10)$$

ここで α_f , β_f はそれぞれ単位長さのバンドルのもつ形状母数, 尺度母数を示す。そこでバンドルの強度の平均値, 変動係数は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{S_{fu}} &= \beta_f I_s^{-1/\alpha_f} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_f}\right) \\ C_{S_{fu}}^2 &= \frac{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha_f}\right) - \left\{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_f}\right)\right\}^2\right]}{\left\{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_f}\right)\right\}^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

いまストランドの断面積を a_s , I 繊維強化層内にある上記バンドルの個数を η とすると, 次式の関係が得られる。

$$\eta = \frac{\xi t b V_f}{n_b a_s} \quad (12)$$

ここでバンドルが荷重方向に並列に並んでいるものと考え、Daniels のバンドル理論を用いて、繊維強化層の強度の平均値, 分散は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{S_f} &= s_0 \{1 - F_{S_{fu}}(s_0)\} \\ \sigma_{S_f}^2 &= \frac{1}{\eta} s_0^2 F_{S_{fu}}(s_0) \{1 - F_{S_{fu}}(s_0)\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで s_0 は $s\{1 - F_{S_{fu}}(s)\}$ の値が最大となる s の値である。いま $F_{S_{fu}}(s)$ が (10) 式で表される場合, I 繊維強化層の強度の平均値と変動係数は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{S_f} &= \beta_f (I_d e)^{-1/\alpha_f} \\ C_{S_f} &= \sqrt{\frac{1 - e^{-1/\alpha_f}}{1 - e^{-1/\alpha_f}}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

C_{S_f} と η との関係を Fig. 2 に示す。 η および α_f が大きくなるに従い, S_f の変動係数は小さくなること がわかる。

Fig. 2. Relation between coefficient of variation of strength of the first layer, C_{S_f} and number of bundle, η .

2・2・2 マトリックス層の破壊強度 FRP において一般に用いられるマトリックス材料として不飽和ポリエステル樹脂, エポキシ樹脂などのぜい性材料でつくられる場合が多いため, マトリックス層の引張強度分布を次式に示す 2 母数ワイブル分布で表す。

$$P[S_m < s] = 1 - \exp\left[-bt I_s V_m \left(\frac{s}{\beta_m}\right)^{\alpha_m}\right] \quad (15)$$

ここで, α_m , β_m は単位体積におけるマトリックス強度の形状母数, 尺度母数である。よってマトリックス層の強度の平均値, 変動係数は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{S_m} &= \beta_m (bt I_s V_m)^{-1/\alpha_m} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_m}\right) \\ C_{S_m}^2 &= \frac{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha_m}\right) - \left\{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_m}\right)\right\}^2\right]}{\left\{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_m}\right)\right\}^2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(16) 式の第 2 式における C_{S_m} と α_m との関係を Fig. 3 に示す。

Fig. 3. Relation between coefficient of variation of strength of matrix, C_{S_m} and shape parameter, α_m .

2・2・3 繊維体積含有率 V_f 繊維体積含有率 V_f は次式で与えられる。

$$V_f = \frac{bt I_s v_f}{bt I_s t} = \frac{v_f}{t} \quad (17)$$

ここで v_f は積層板の単位面積当りの強化材の体積を示す。(17) 式において v_f , t は互いに独立な確率変数と考えられるため, 変数の平均値のまわりでテラー展開し一次近似を行うと, 繊維体積含有率の平均値, 変動係数は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{V_f} &= \frac{\mu_{v_f}}{\mu_t} \\ C_{V_f} &= \sqrt{C_{v_f}^2 + C_t^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

しかるに v_f の変動係数は強化材の占める断面積に依存すると考えられるが, 強化材 1 プレイ当りの単位面積当りの変動係数を $C_{v_{f1}}$ とすると C_{v_f} との間に次の関係がある。

$$C_{v_f} = \frac{C_{v_{f1}}}{\sqrt{bp}} \quad (19)$$

3 実験材料および実験方法

本実験で用いた材料はクロス GRP と マット GRP の 2 種類であり, それぞれの強化材は平織ガラスクロ

Table I. Experimental data in Cloth GRP and Mat GRP.

Type of laminate	Fiber content (Vol.%)	Ply number	Sample size	Thickness of laminate		Tensile strength	
				Sample average (mm)	Sample coefficient of variation (%)	Sample average (kg/mm ²)	Sample coefficient of variation (%)
Cloth GRP	25.9	18	30	5.61	2.01	17.8	5.11
	37.1	28	30	6.09	2.70	24.9	5.30
	41.2	30	30	5.87	2.21	26.0	5.80
Mat GRP	15.3	5	30	5.81	2.90	8.3	11.93
	20.1	7	30	6.09	3.82	11.3	6.28
	23.1	8	30	6.14	4.01	12.1	8.84

ス (MG 253, 旭硝子), チョップドストランドマット (CM 455, 旭硝子) であり, マトリックスは飽和ポリエステル樹脂 (#3272, 武田薬品) である. 成型法はハンドレイアップ法であるが, 最も信頼性の高い手法の一つとされている. 常温硬化後24時間放置し, 80℃, 4時間のアフタキュアを行った. 本研究で用いたクロス GRP, マット GRP のファイバ体積含有率は一般に用いられている範囲の中からそれぞれ3種類を選び, Table I にそれらの値を示す.

実験方法としてはインストロン型引張試験機を用いて, クロスヘッド速度 1.5 mm/min, 常温で引張試験を行った. 試験片形状を Fig. 4 に示すが, 平行部の断面積は 36mm² である.

Fig. 4. Geometry of test specimen.

またマトリックス層のみの引張強度を調べるために不飽和ポリエステル樹脂板を上記2種類の積層板と同じ成型条件で製作し, 試験片形状および試験方法とも前述と同じである.

4 実験結果および考察

Table I に引張試験から得られた引張強度の平均値と変動係数の値を示す. ハンドレイアップ法によるクロス GRP, マット GRP の引張強度の変動係数はそれぞれ5~6%, 6~12%である.

つぎにこれらのデータを強度の平均値の複合則 (8) 式, 強度の変動の複合則 ((6), (9) 式) から得られる計算結果と比較するものとする. まず, I 繊維強化層の破壊強度の算出にあたり, 基準となるストランドとして直径 10 μ のフィラメントが200本集束したものを選び, (12) 式の n_b を1とする. このガラスファイバのバンドルの強度として仁木, 田尻のデータから¹⁰⁾ (10) 式における2母数ワイブル分布の2母数として $\alpha_f = 7.74$, $\beta_f = 267.1$ kg/mm² の値を用い, ストランドの断面積として $a_s = 1.47 \times 10^{-2}$ mm², また $l_s = 28$ mm を使用した.

そこでI繊維強化層の破壊強度において $\mu_{S_f} = 117.2$ kg/mm² が得られ, また C_{S_f} はバンドルの個数が100以上で3.7%以下となり, そのばらつきは急激に小さくなる. つぎにマトリックス層の引張強度の平均値, 変動係数は (16) 式から得られるが, 不飽和ポリエステル樹脂板の引張試験からデータに2母数ワイブル分布をあてはめ, 2母数を決定した. すなわち (15) 式において $V_m = 1.0$ とおいた場合のワイブル分布において $\alpha_m = 9.37$, $\beta_m = 6.35$ kg/mm² を得た. そこで (16) 式から C_{S_m} は12.79%となる. つぎに繊維体積含有率 V_f の平均値および変動係数は (18), (19) 式を用いて得られる. 強化材1プライ当りの単位面積当りの変動係数 C_{v_f1} を求めるために, 平織クロス, マット布とも直径 8 mm の円板をそれぞれ20個切り出し, 重量測定を行った結果, クロス布, マット布の変動係数はそれぞれ7.12%, 9.31%である. これらの数値を $\sqrt{\pi \cdot 8^2 / 4}$ 倍することで C_{v_f1} を求めた. なおここでガラスの比重を一定としている. また板厚のばらつきを表す C_t の実測値を Table I に示す. そこで本研究ではそれらの平均値をとり, クロス GRP, マット GRP の C_t をそれぞれ2.3%, 3.6%とした. これらの数値を (18) 式に代入し, 得られた V_f と C_{v_f} との関係を Fig. 5 に示す. V_f が増加するに従い V_f のばらつきが小さくなる傾向にあることがわかる.

さてこれまでに求めた各確率変数の平均値, 変動係数を FRP の強度の複合則 ((8) 式) に代入し, 実験値に比較した結果を Fig. 6 に示す. GRP の強度の平均値はマトリックスの強度から出発し, 繊維体積含有率

Fig. 5. Relation between coefficient of variation of fiber content, C_{v_f} and fiber content.

Fig. 6. Relation between average of tensile strength and fiber content.

の増加に伴い、線型に強度が増加し、クロス GRP、マット GRP とも計算結果と実験値とのあいだに良好な一致がみられる。ここで含有率が 0 をこえて臨界繊維含有率までは前述のごとく複合則が適用できないため、計算結果は意味をもたない。さらに以後の Fig. 7~10 においても同じことがいえる。さて(8)式は各変数が独立を考えた場合であり、厳密には(5)式を用いて計算しなければならない。いま相関係数 ρ には次の関係がある。

$$-1 \leq \rho \leq 1 \quad (20)$$

そこで(5)式と(8)式を比較するために(5)式において、 $\rho = \pm 1, 0$ としたときの GRP の強度の計算結果を Table II に示す。この表から強度の平均値に関しては(5)式と(8)式との計算結果に差異はほとんどなく、各変数が独立 ($\rho=0$) と考えた(8)式で充分であると考えられる。

つぎに各確率変数の平均値、変動係数を FRP の強度の変動の複合則 ((6)式) に代入し、実験値と比較した結果を Fig. 7, 8 に示す。これらの図において相関係数 ρ をパラメータとしている。強度の平均値の場合と異なり、相関係数の影響は繊維体積含有率が小さい範囲で大きく、含有率が大きくなるに従いその影響は小さくなる。そして $\rho \geq -0.5$ の範囲では強度の変動係数

Table II. Calculated results of average of tensile strength under coefficient of correlation $\rho = 0, \pm 1$.

Fiber content (Vol. %)			0	20	40	60
Tensile strength (kg/mm ²)	Cloth GRP	$\rho = -1$	3.13	14.37	25.60	36.81
		$\rho = 0$	3.13	14.38	25.61	36.82
		$\rho = 1$	3.13	14.39	25.62	36.83
	Mat GRP	$\rho = -1$	3.13	11.57	19.54	27.73
		$\rho = 0$	3.13	11.58	19.55	27.74
		$\rho = 1$	3.13	11.60	19.56	27.75

ρ : Coefficient of correlation

はマトリックスの変動係数から出発し、繊維体積含有率が大きくなるにつれて小さくなる傾向にある。そして実験点が少いため断定はむずかしいが、クロス GRP、マット GRP とも強度の変動係数が $|\rho| \leq 0.5$ の範囲内 (図中の斜線部) にほぼ実験点を包含しており、この範囲で GRP の強度の推定ができるものと考えられる。さらに強度の変動の中心的傾向は $\rho=0$ といった(9)式を用いて計算することができると思われる。

Fig. 7. Relation between coefficient of variation of tensile strength and fiber content in Cloth GRP.

Fig. 8. Relation between coefficient of variation of tensile strength and fiber content in Mat GRP.

つぎに複合材料の強度の平均値および変動係数に及ぼす各変数の影響を示すために、各確率変数の感度 (sensitivity) を求める¹¹⁾。例えば μ_{S_f} の μ_{S_c} に及ぼす感度 $SN(\mu_{S_c}, \mu_{S_f})$ および C_{S_f} の C_{S_c} に及ぼす感度 $SN(C_{S_c}, C_{S_f})$ は S_c の平均値、変動係数に(8)、(9)式を用いた場合次のように表される。

各感度と繊維体積含有率との関係を Fig. 9, 10 に示す。

$$\begin{aligned}
 SN(\mu_{S_c}, \mu_{S_f}) &= \left| \frac{\partial \mu_{S_c} / \mu_{S_c}}{\partial \mu_{S_f} / \mu_{S_f}} \right| = \frac{\zeta \mu_{V_f} \mu_{S_f}}{\mu_{S_c}} \\
 SN(C_{S_c}, C_{S_f}) &= \left| \frac{\partial C_{S_c} / C_{S_c}}{\partial C_{S_f} / C_{S_f}} \right| \\
 &= \left(\frac{\zeta C_{S_f} \mu_{S_f} \mu_{V_f}}{C_{S_c} \mu_{S_c}} \right)^2
 \end{aligned}$$

同様にして

$$SN(\mu_{S_c}, \mu_{S_m}) = \frac{\mu_{S_m} (1 - \mu_{V_f})}{\mu_{S_c}}$$

$$\left. \begin{aligned} SN(C_{S_e}, C_{S_m}) &= \left\{ \frac{C_{S_m} \mu_{S_m} (1 - \mu_{V_f})^2}{C_{S_e} \mu_{S_e}} \right\}^2 \\ SN(\mu_{S_e}, \mu_{V_f}) &= \frac{\mu_{V_f} (\zeta \mu_{S_f} - \mu_{S_m})}{\mu_{S_e}}, \\ SN(C_{S_e}, C_{V_f}) &= \left\{ \frac{C_{V_f} \mu_{V_f} (\zeta \mu_{S_f} - \mu_{S_m})}{C_{S_e} \mu_{S_e}} \right\}^2 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

これらの図において感度が大きいということは、その変数の影響が大きいことを示すが、Fig. 9 において GRP の強度の平均値に及ぼす μ_{S_f} , μ_{V_f} の感度は V_f が大きくなるに従って大きくなり、他方 μ_{S_m} の感度は小さくなる。しかるに Fig. 10 における GRP の強度の変動係数の場合は異り、 C_{V_f} の影響は V_f が大きくなると大きくなり、 C_{S_m} の影響は反対に急激に小さくなるが、 C_{S_f} の影響は全般に小さく、その感度にピークがあり、強度の平均値の場合と傾向が大きく異っている。そしてクロス GRP、マット GRP とも同じ傾向をもっている。これらの事からマトリックスの強度とそのばらつきは V_f の小さい範囲で大きな影響力をもつが、 V_f が大きい範囲では、繊維強化層の強度およびその含有率が GRP の強度に大きな影響をもち、他方 GRP の強度のばらつきには繊維含有率のばらつきが大きな要因を占めていることが判明する。

5 結 論

繊維強化プラスチックの強度のばらつきの要因は構成素材のばらつき、複合成型することによるばらつき等種々のものが考えられるが、繊維強化プラスチ

クスの強度の変動に関する本研究において次のような結論が得られた。

(1) 繊維強化プラスチック積層板の構造を荷重方向に繊維が配向しているⅠ繊維層、強度に関与しないⅡ繊維層およびマトリックス層から成るものとし、強度の複合則を適用する。そしてⅠ繊維層、マトリックス層の破壊強度、繊維体積含有率を確率変数として取り扱い、強度の平均値の複合則、強度の変動の複合則を導いた。

(2) 繊維層、マトリックス層の破壊強度の平均値、変動係数をバンドル理論、最小値理論を用いて求め、また繊維体積含有率の変動係数を強化材のみの体積と積層板の厚さの変動係数の関係として求めることができた。

(3) 強度の平均値の複合則および強度の変動の複合則における計算結果と実験値との比較から、強度の平均値の場合各変数の相関の影響は小さく、各変数を独立とした場合の計算結果と実験値との良好な一致が見られるが、他方強度の変動係数の場合、各変数の相関の影響は大きく、 $|\rho| \leq 0.5$ の範囲で、実験値との一致が見られた。さらに各変数の感度を計算し、積層板の強度に及ぼす各変数の影響を明確にすることができた。

(4) 本研究において強度の複合則を基盤としているために適用の範囲も限定されるが、それ以外の場合例えば荷重軸と繊維方向が平行でない繊維強化複合材料等の強度の変動と各構成素材の特性値の変動の関係についての考察などについては今後の研究課題とする所存である。

(昭和53年3月24日 日本材料学会第7回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 藤井太一, 材料, **25**, 927 (1976).
- 2) 牧 広, 第1回複合材料シンポジウムテキスト, 441 (1968).
- 3) Halpin, J. C., J. R. Kopf, and W. Goldberg, J. Compos. Mater., **4**, 462 (1970).
- 4) Halpin, J. C., J. Compos. Mater., **6**, 208 (1972).
- 5) Knight, M., and H. T. Hahn, J. Compos. Mater., **9**, 77 (1975).
- 6) 藤井太一, 材料, **25**, 199 (1976).
- 7) Daniels, H. E., Proc. Royal Society (London), 183A (1945).
- 8) Jones, B. H., Composite Materials, **8**, 33 (1975).
- 9) 例えば, 三上 操, 統計的推測, 107 (1969) 筑摩書房
- 10) 仁木栄次, 田尻雅一, 複合材料シンポジウム論文集, 11 (1976).
- 11) 岩壺卓三, 成松 徹, 第1回設計における信頼性工学シンポジウム, 17 (1977).

Fig. 9. Relation between sensitivity of μ_{S_f} , μ_{V_f} , μ_{S_m} and fiber content.

Fig. 10. Relation between sensitivity of C_{S_f} , C_{V_f} , C_{S_m} and fiber content.