CF/GF ハイブリッド複合材の層間せん断強度 と材料設計に関する一考察†

宮 入 裕 夫* 永 井 正 洋** 若 林 正***

Study on the Interlaminar Shear Strength of CF/GF Hybrid Composites

by

Hiroo MIYAIRI, Masahiro NAGAI

(Institute for Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University, Tokyo)

and Masashi WAKABAYASHI

(Yokohama Rubber Co., Hiratsuka)

According to the development of various new kinds of fiber with high strength and high rigidity suitable for reinforcing materials, active studies on the hybrid composite structures containing such fibers are being carried out lately. On the other hand, the fracture of interlaminae of hybrid composites comes into a problem as the hybridization of these materials becomes common. Therefore, it is necessary to consider the interlaminar shear strength so far as the two-dimensional woven stuffs such as the mat or the cloth reinforcement are employed.

So, in this paper, the interlaminar shear behavior of the carbon/glass hybrid construction (polyester matrix) consisting of symmetrical five laminations was studied. Since the interlaminar shear strength of hybrid composites generally depends on the combination of fiber reinforcement and resin matrix, the interlaminar shear stress in the CF/GF hybrid composites was analyzed by applying the composite beam theory and then the minimization of the shear stress of hybrid composites was examined.

As the results, a design guide for minimizing the interlaminar shear stress of the CF/GF hybrid composites was obtained. Furthermore, the improvement of their mechanical properties was discussed.

(Received May 11, 1983)

キー・ワード：層間せん断応力，破壊ひずみ，曲げ破壊，ショートビーム法，材料設計

1 緒 言

近年高強度，高弾性を有する各種強化用の繊維が開発されるにともない，それら各種繊維の特徴を組合せたハイブリッド構成の複合材料に関する研究も盛んになっている^{1)~5)}。そして強化材のハイブリッド化にともない曲げ強さ，引張強さの機械的特性は優れたものが実用化しているが，一方では積層構造のために生じる界面での層間せん断破壊は大きな問題となっている^{6)~8)}。そのためハイブリッド複合材の界面の層間せん断強度に関する検討は各種クロスやマットなど2次元の織布を使用する限り十分な配慮がなされねばならない。また，界面の層間せん断強度は強化材による力学的効果はほとんど期待できず，積層材内部に生じる層間せん

断応力は界面の位置や界面を構成する強化材およびマトリックスの弾性係数などにより大きな影響が現れる。

そこで，本研究ではカーボン/ガラス(CF/GF)を強化材とし，表面層にガラスマットを用いた実際に使用されている対称5層構造のハイブリッド複合材(GF/CF/GF/2)。について積層材の構成と層間せん断応力との関係について解析を行った。またマトリックスにははん用のオルソタイプの不飽和ポリエステル樹脂を用い，CF/GF ハイブリッド複合材の層間せん断強度を基礎に曲げ特性について検討を行った。そのためにまずせん断力をうけるハイブリッド材の界面に生じるせん断応力について中立面の最大層間せん断応力および各素材界面でのせん断応力を複合はり理論により解析し，ハイブリッド材の構成パラメータ(構成素材の材料特性と構成板厚で決まる値)による各種層間せん断応力の変化を調べた。その結果，構成素材の弾性係数比と板厚比により最大せん断応力の最小値の存在する

† 原稿受理 昭和58年5月11日

* 正会員 東京医科歯科大学医用器材研究所

東京都千代田区神田駿河台

** 東京医科歯科大学医用器材研究所 東京都千代田区神田駿河台

*** 正会員 横浜ゴム(株) 平塚市追分

Fig. 1. A section of CF/GF hybrid composites.

Fig. 2. $\tau_{\max}/\tau_0$, $(\tau_i)_1/\tau_0$ and $(\tau_i)_2/\tau_0-\alpha_1$ diagrams of CF/GF hybrid composites consisting of 5 plies.

Fig. 3. $\tau_{\max}/\tau_0$, $(\tau_i)_1/\tau_0-\alpha$ diagrams of CF/GF hybrid composites consisting of 3 plies.

ことを確認し、このようなことを考慮した CF/GF ハイブリッド材の曲げ特性について検討し、ハイブリッド複合材の材料設計に関し、設計の指針を与えたものである。なおハイブリッド複合材の層間せん断強度に関してはショートビーム法による曲げ試験により層間せん断破壊の機構を調べ、解析結果を実際の材料設計に十分適用できるように従来の理論式を修正し、層間せん断強度をもとに CF/GF ハイブリッド材の曲げ強度の向上に関し検討したものである。

2 層間せん断応力の解析

2.1 界面の層間せん断応力

CF/GF ハイブリッド材 (対称 5 層積層材) の層間せん断応力を中立面、外層の GF/CF および内層の CF/GF 界面について、それぞれの層間せん断応力を $\tau_{\max}$, $(\tau_i)_1$, $(\tau_i)_2$ として、構成板厚比、弾性係数比によって変化するこれらの応力について調べる。

Fig. 1 は対称 5 層のハイブリッド複合材の構成を示したもので、界面のせん断応力 $\tau_{\max}$, $(\tau_i)_1$, $(\tau_i)_2$ はパラメータ α_1 , α_2 および β_1 , β_2 を用いて表し、またそれぞれのせん断応力を均質材の層間せん断応力 τ_0 を用い無次元化して表す。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{\max}}{\tau_0} &= \frac{1}{\Phi} \left[(1-\alpha_1-\alpha_2)^2 + \beta_1 \{ (1-\alpha_2)^2 - (1-\alpha_1-\alpha_2)^2 \} + \beta_2 \{ 1 - (1-\alpha_2)^2 \} \right] \\ \frac{(\tau_i)_1}{\tau_0} &= \frac{1}{\Phi} \left[\beta_1 \{ (1-\alpha_2)^2 - (1-\alpha_1-\alpha_2)^2 \} + \beta_2 \{ 1 - (1-\alpha_2)^2 \} \right] \\ \frac{(\tau_i)_2}{\tau_0} &= \frac{1}{\Phi} [\beta_2 \{ 1 - (1-\alpha_2)^2 \}] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{ここで、} \Phi = (1-\alpha_1-\alpha_2)^3 + \beta_1 \{ (1-\alpha_2)^3 - (1-\alpha_1-\alpha_2)^3 \} + \beta_2 \{ 1 - (1-\alpha_2)^3 \}$$

なおこのときのパラメータ α_1 , α_2 および β_1 , β_2 は次式で示される。

$$\alpha_1 = \frac{h_c}{h}, \quad \alpha_2 = \frac{h_{g2}}{h}, \quad \beta_1 = \frac{E_c}{E_{g1}}, \quad \beta_2 = \frac{E_{g2}}{E_{g1}} \quad (2)$$

Fig. 2 は積層構成 (M300+CF6151B+M600/2) の CF/GF ハイブリッド材について $\beta_1=2.56 (=2230/870)$, $\beta_2=0.95 (=830/870)$ とし、 $\alpha_2=0.2$ の場合について、界面に生じる層間せん断応力を α_1 を変数として表示したものである。ここで各界面のせん断応力に関し $(\tau_i)_1$ は単調増加、 $(\tau_i)_2$ は単調減少の関数であるが、中立面の最大せん断応力は α_1 のある範囲で τ_0 より小さくなり、心材のせん断応力の分担は減少する。したがって、 α と β で決まるこのような範囲 (α_1 , α_2) を適用することによりハイブリッド材の層間せん断強度は向上する。また $\tau_{\max}/\tau_0$ の最小値は β_1 が大きいものほど小さくなる。

Fig. 3 は 3 層で構成される CF/GF ハイブリッド材に式(1)を適用し、パラメータ $\alpha_2=\beta_2=0$, $\alpha_1 \rightarrow \alpha$, $\beta_1 \rightarrow \beta$ として、各界面に生じるせん断応力 ($\tau_{\max}/\tau_0$ および $(\tau_i)_1/\tau_0$) を求めたものである。したがって各せん断応力は β をパラメータとし α を変数として表示される。

その結果は 5 層のハイブリッド材に比べて $\tau_{\max}/\tau_0$ の α に対する低下は大きく、また 5 層ハイブリッド材と同じく、 β の増加にともない $\tau_{\max}/\tau_0$ は α の低い領域で大きく低下する。

2.2 構成板厚比と最大せん断応力

層間のせん断応力が α_1 , α_2 および β_1 , β_2 の関数となることから、ここでは β_1 , β_2 を固定して、心材のせん断応力の分担が小さくなる $\tau_{\max}/\tau_0 \leq 1$ の α_1 , α_2 の範囲を求める。ただし、 α_1 の下限は $\tau_{\max}/\tau_0$ が最小値をとる (α_1 , α_2) とする。

まず、 $\tau_{\max}/\tau_0$ の最小値を求めるために $\tau_{\max}/\tau_0$ を α_1 , α_2 でそれぞれ偏微分し式(3)の条件を満たす α_1 , α_2 を求める。

$$\frac{\partial(\tau_{\max}/\tau_0)}{\partial\alpha_1} = \frac{\partial(\tau_{\max}/\tau_0)}{\partial\alpha_2} = 0 \quad (3)$$

ここで α_1 で偏微分したものは α_1 の3次式, α_2 で偏微分したものは α_2 の4次式となる。また $\tau_{\max}/\tau_0$ を最小にする α_1, α_2 は式(3)を満足する解であればよい。そこで、計算の簡略化を計るためにまず α_1 の3次方程式 (α_2 をパラメータとして) を解き、このときの α_1, α_2 の値を α_2 の4次方程式に代入して、式(4)の条件を満たした場合、式(3)を満足したとする。

$$|F(\alpha_1, \alpha_2)| < 1 \times 10^{-5} \quad (4)$$

ここで $F(\alpha_1, \alpha_2) = \partial(\tau_{\max}/\tau_0)/\partial\alpha_2$

このときの α_1, α_2 の数値解を結んだものとそれを回帰分析によって直線化したものを Fig.4 に示す。こ

Fig. 4. Approximation of α_2 - α_1 diagram by using revolutionary analysis.

こで実線は回帰分析による直線で、破線は数値解による曲線であり、このときの直線の式は式(5)で表される。

$$\alpha_2 = 0.357 - 1.357\alpha_1 \quad (5)$$

ここで、 α_2 を表す各係数の有効数字が3けたであることを考えると、式(4)の条件は式(5)を得るのに十分であることが確認できる。

なお、式(5)は $\tau_{\max}/\tau_0$ が最小値をとるときの α_1, α_2 の数値解を与えたもので、 β_1, β_2 に対する α_1, α_2 の下界を示したものである。また、 $\beta_1 = 2.56, \beta_2 = 0.95$ では $\alpha_1 = 0.07 \sim 0.22$ の範囲が適用範囲となる。

Fig. 5. $\tau_{\max}/\tau_0, \alpha_1$ - α_2 diagram.

そして、ここで得られた α_1, α_2 は β_1, β_2 を定数として求めたものであるが、 β_1, β_2 の差が大きくなるほど α_1, α_2 の変化は大きくなる。

つぎに $\tau_{\max}/\tau_0 \leq 1$ となる α_1 の上限は

$$\frac{\tau_{\max}}{\tau_0} = 1.0 \quad (6)$$

のときである。これは2次方程式となり、 α_2 をパラメータとして解けばよい。Fig.5 は $\tau_{\max}/\tau_0$ の最小値と1.0を上下界として $\tau_{\max}/\tau_0$ と α_1 と α_2 の関数として表示したものである。ここで一点鎖線は、 α_1 と α_2 との関係を示したもので、この曲線の上側が $\tau_{\max}/\tau_0 = 1.0$ となる領域 (α_1, α_2) で、下側が $\tau_{\max}/\tau_0$ の最小値をとるときの領域 (α_1, α_2) を示したもので、この領域内の (α_1, α_2) の組合せを選べば実線で示された線図の領域内に $\tau_{\max}/\tau_0$ はおさまリ、 $\tau_{\max}/\tau_0$ は1.0より小さな値となる。そして、この範囲の領域 (α_1, α_2) を選べば、ハイブリッド複合材の中立層に生じる層間せん断応力は小さく、したがって、外から加えられるせん断力に対し、それだけ優れたせん断強度を有するハイブリッド材が得られる。

3 層間せん断応力を考慮した曲げ特性

3.1 構成板厚比と材料の破壊

曲げモーメントをうけるはりに生ずる垂直ひずみ (以後ひずみと略す) は中立軸からの距離に比例して生じる。したがって最外層のひずみを ε_0 とすると中立軸からの距離 y に生じるひずみ ε_x は

$$\varepsilon_x = 2\varepsilon_0 \frac{y}{h} \quad (7)$$

となる。そこで、ハイブリッド材の曲げ破壊のクライテリアとして、各層に生じるひずみ量を考え、ハイブリッド材の全体の曲げ破壊はそれぞれ各層の破壊ひずみで生じると仮定する。するとCFの破壊ひずみはGFの破壊ひずみに比べて小さいので、最外層の板厚比 α_2 によっては内層のCFでも、最外層のGFのひずみがGFの破壊ひずみ ε_{0b} に達する以前にCFのひずみがCFの破壊ひずみ ε_{cb} に達することがある。そこで、内層のCFに生じる最大ひずみ ε_c をGFの破

Fig. 6. Fracture domain expressed with α_2 - $\varepsilon_{cb}/\varepsilon_{0b}$ diagrams.

壊ひずみ ε_{0b} で表すと

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{0b}(1 - \alpha_2) \quad (8)$$

となる。したがって、式(8)に CF の破壊ひずみ ε_{cb} を適用すると ε_{cb} の値により、CF/GF ハイブリッド材の破壊の状況は異なり、素材の破壊ひずみ ε_{0b} 、 ε_{cb} と破壊部位との関係は次式によって表される。

すなわち

最外層 GF の破壊では

$$\varepsilon_{0b}(1 - \alpha_2) < \varepsilon_{cb} \quad (9)$$

内層 CF の破壊では

$$\varepsilon_{0b}(1 - \alpha_2) > \varepsilon_{cb} \quad (10)$$

となる。Fig. 6 は CF/GF がハイブリッド材の破壊状況を判別するために式(9)、(10)を用いて α_2 と $\varepsilon_{cb}/\varepsilon_{0b}$ との関係を図示したもので、構成素材の破壊領域は α_2 と $\varepsilon_{cb}/\varepsilon_{0b}$ とで表示される。すなわち α_2 、 $\varepsilon_{cb}/\varepsilon_{0b}$ の両軸と式(8)で囲まれた領域では CF 層の破壊となり、両軸と式(8)の上部との領域では GF 層（最外層）の破壊となる。

3・2 最大層間せん断応力の最小化とハイブリッド材の曲げ応力

ハイブリッド材の曲げ破壊が構成素材の破壊ひずみと板厚構成とで決まることを述べたが、ここではこのような破壊が各層で生じる際のハイブリッド材の曲げ応力について考える。

そこで、 $\varepsilon_{cb}/\varepsilon_{0b}$ と α_2 とでハイブリッド材の破壊様相の異なることが判明したので、 $(\tau_{\max}/\tau_0)_{\min}$ と $\tau_{\max}/\tau_0 = 1.0$ の条件を満足し、かつ素材の曲げ破壊の状況とハイブリッド材の曲げ強度 σ_{Hy} との関係について検討する。

まず、CF 層の破壊についてハイブリッド材の見かけの強度 σ_{Hy} との関係を調べると、心層 GF の破壊ひずみ ε'_{0b} を用いて σ_{Hy} と心層 GF の曲げ応力 σ_{GRP} との関係は次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_{Hy}}{\sigma_{GRP}} = \frac{\varepsilon_{cb}\Phi}{\varepsilon'_{0b}(1 - \alpha_2)} \quad (11)$$

また、CF 層の破壊と同様に、GF 最外層の破壊の場合には

$$\frac{\sigma_{Hy}}{\sigma_{GRP}} = \frac{\varepsilon_{cb}\Phi}{\varepsilon'_{0b}} \quad (12)$$

となる。なお式(11)および(12)での Φ は(1)で与えられる。そこで、Fig. 5 で求めた $\tau_{\max}/\tau_0$ と α_1 、 α_2 の関係を各構成素材の破壊ひずみ ε_{0b} 、 ε_{cb} を用いて表示するとハイブリッド材の曲げ破壊は $\alpha_2 = 1 - \varepsilon_{cb}/\varepsilon_{0b}$ で異なるのでここでは $\varepsilon_{0b} = 2.34\%$ 、 $\varepsilon_{cb} = 1.93\%$ 、 $\varepsilon'_{0b} = 2.10\%$ を用いて σ_{Hy}/σ_{GRP} と α_1 、 α_2 との関係は Fig. 7 のように表される。したがって、 $(\tau_{\max}/\tau_0)_{\min}$ および $\tau_{\max}/\tau_0 = 1.0$ の条件を考慮したハイブリッド材の強度 σ_{Hy} は図中の斜線を施した領域で表される。

Fig. 7. σ_{Hy}/σ_{GRP} , $\alpha_1 - \alpha_2$ diagrams.

なお、縦の点線の左側は $(\tau_{\max}/\tau_0)_{\min}$ の解析で、方程式の根が虚根となり条件を満たす解の得られなかった領域である。またここで示した対称5層のハイブリッド材では (α_1, α_2) の範囲によって、曲げ破壊の機構が異なるため、 $\sigma_{Hy}/\sigma_{GRP} - \alpha_2$ 線図は不連続な曲線になる。

4 試験片の構成および試験方法

4・1 試験片の構成

Table I は CF/GF ハイブリッド複合材の構成とその構成素材の複合材としての特性を示したもので、従来、M-R 構成として構造用 GRP に使用されていたロービングクロス層に代って CRP を採用した構成となっている。

Table I. Constitution and base materials of CF/GF hybrid composite.

Hybrid composite	Constitution		
Hy	[M300+CF(6151B)+600/2)] _s		
Constitutional material	Thickness (mm/ply)	E(kg/mm ²)	$\varepsilon_{0b}(\%)$
GRP(M300)	0.67	830	2.34
GRP(M600)	1.33	870	2.10
CRP(6151B)	0.18	2230	1.93

したがって、このような対称5層の CF/GF ハイブリッド材は CF の耐衝撃性を補う意味からも軽量性、高強化を目指す新しいハイブリッド構造として検討されている。またマトリックスにははん用のオルソタイプの不飽和ポリエステルを用いたもので Fig. 4~7 に示した例もすべてこのような構成の CF/GF ハイブリッド材となっている。そこで、ハイブリッド材の成形は実際の使用に合せすべてハンドレイアップにしたが行ったものである。

4・2 試験方法

静的曲げ試験は JIS K7203 に準じ、3点曲げ方式に従って行い、スパン l は $l = 25h$ (h : 板厚)、負荷

速度 5 mm/min として行った。また層間せん断試験は ASTM D2344 に準じ、ショートスパンの曲げ試験方法を採用し、スパン l は $l=4h$ 、負荷速度 1.5 mm/min として行った。なお試験の繰返しは最小 5 回以上として、その特性値は試験結果の平均値で表した。

5 試験結果および考察

CF/GF ハイブリッド複合材料の層間せん断応力を考慮した解析結果を基にまず先に述べた実際に使用されているハイブリッド材とここで検討した層間せん断強度を考慮した CF/GF ハイブリッド材との機械的特性について検討し、解析結果の妥当性について検討を行う。

5.1 構成素材の機械的特性

ここで用いた CF/GF ハイブリッド材の構成素材について、その機械的特性を示すと Table I のとおりである。

構成素材の特性に関してはハイブリッド材の曲げ特性を議論に要求される 1 層当りの板厚をはじめ、弾性係数および破壊ひずみを示したものである。なお、CF/GF ハイブリッド材の破壊基準を設定するため、素材の破壊ひずみも表示した。

5.2 層間せん断応力を考慮したハイブリッド材

Table II は Fig. 5 の (α_1, α_2) 領域内に存在する α_1, α_2 の組合せを選び、層間せん断応力を考慮して作製したハイブリッド材 $(Hy)_0$ と先の Hy とについてパラメータ α, β と層間せん断強度、曲げ強度および板厚とを示したものである。なお $(Hy)_0$ はハイブリッド材の構成素材はすべて Hy と同じものを用い、構成板厚比のみを変えて層間せん断応力の発生の少ない構成としたものである。

Table II. Mechanical properties of CF/GF hybrid composites.

Hybrid composite	β_1/β_2	α_1/α_2	τ_{Hy} (kg/mm ²)	σ_{Hy} (kg/mm ²)	h (mm)
Hy	2.56/0.95	0.12/0.44	1.87	20.4	6.88
$(Hy)_0$	2.56/0.95	0.21/0.10	2.71	24.2	13.5

その結果、 $(Hy)_0$ の層間せん断強度、曲げ強度は Hy に比べてそれぞれ 45%, 21% と向上する。そして $(Hy)_0$ の層間せん断強度は心層 GF のマット (M600) 基材単体の層間せん断強度 2.78 kg/mm² に近く、CF/GF ハイブリッド材の層間せん断強度は中立軸心層の層間せん断強度に依存する。また、 $(Hy)_0$ の曲げ破壊は Hy が GF 層の破壊であったが、最初に CF 層から破壊し最外層 GF へと破壊が移行し、破壊のクライテリアの設定が妥当で解析結果の適用の可能性を確認することができる。(Fig. 6 参照)

Fig. 8 は CF/GF ハイブリッド材の層間せん断応力

Fig. 8. Comparison between analytical and experimental results (σ_{Hy}/σ_{GRP} , τ_{max}/τ_0) of CF/GF hybrid composites.

が最小になるような条件を設定し、そのときの素材の構成比と曲げ強度比を示したもので、ここでは素材の材料特性はすべて決められているので、ここに示されるように、板厚の構成、曲げ強度比は線図上で一義的に定められる。また、図中には実験値と計算値とを示したもので黒丸は計算値、白丸が実験値となっている。 σ_{Hy}/σ_{GRP} は計算値が実験値よりも 15% 程度高くなっているが、計算結果は実験結果をほぼ満足した形で得られている。

つぎに $(Hy)_0$ と Hy の層間せん断応力の状況について調べる。Fig. 9 は $(Hy)_0$ と Hy の板厚内に分布するそれぞれの層間せん断応力分布を破壊応力を基に表示したもので、実線は $(Hy)_0$ 、一点鎖線は Hy を表す。

Fig. 9. Comparison of shear stress distribution of CF/GF hybrid composites.

その結果は図に示されるように $(Hy)_0$ では Hy に比べ、中立面、GF/CF 界面でのせん断応力の分担が軽減されることが分る。したがって、このような界面、中立面での応力の低下が、CF/GF ハイブリッド材の層間せん断強度の向上となっていることが確認される。

ここで示されるように同じ構成基材であっても、構成板厚比を変えることにより、層間せん断強度のみならず、曲げ強度の向上、曲げ破壊機構の異なる構成が可能であることが明らかになった。したがって、このような考えを拡張して、構成基材も変え得るならばさらに優れた機械的特性を有するハイブリッド材の展開が可能であろうと考えている。

6 結 言

一般に積層構成による複合材料の層間せん断強度はマトリックスのレジンの接着強度に依存する。ここでははん用の不飽和ポリエステルをマトリックスとするCF/GF ハイブリッド複合材に関し、基材の構成板厚比や弾性係数比を考慮することにより、中立面や界面に生ずる層間せん断応力の軽減について検討を加えた。そして展開のせん断強度の向上と曲げ強度さらには曲げ破壊の様相などについて解析を行った。また解析結果の妥当性を調べるため、層間せん断応力を考慮した具体的なCF/GF ハイブリッド材を作製し、その機械的特性について解析結果の検討を行った。その結果を要約すると次のとおりである。

(1) CF/GF ハイブリッド材を構成する構成素材の板厚比 $\alpha_1(=h_c/h)$, $\alpha_2(=h_g/h)$ と弾性係数比 $\beta_1(=E_c/E_{g1})$, $\beta_2(=E_{g2}/E_{g1})$ によって、中立面および界面のせん断応力比の分担を軽減することができ、その状況はそれぞれのせん断応力と α , β との関係を図表に表示するとともに、その領域の指定が可能である。

(2) 層間せん断応力の軽減を目的として得られた線図内の指定領域 (α_1 , α_2) から選択した構成板厚比を有する (Hy)₀ ハイブリッド材の層間せん断強度はその領域外のハイブリッド材 Hy に比べ、45%の層間せん断強度を得ることができた。

(3) α_1 , α_2 の選択によって CF/GF ハイブリッド

材の層間せん断強度は中立面に使用した心層 GF の層間せん断強度に近づけることができる。

(4) 構成素材の破壊ひずみと最外層 GF の板厚比 α_2 とによってハイブリッド材の曲げ破壊の様相は異なる。

(5) 層間せん断応力を考慮した素材の構成板厚比を選択したとき、ハイブリッド材の曲げ強度は図表により推定できることを確認した。

おわりに CF/GF ハイブリッド材の試料提供にご協力を頂いた東レ(株)近藤昇一氏に対し厚くお礼を申し上げます。

(昭和58年3月24日 第20回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) K. M. Hardaker and M. O. W. Richardson, 35th Annual Technical Conference, 1980 Reinforced Plastics/Composites Institute, Section 17-F, 1
- 2) M. G. Phillips, Composites, **12**, 2, 113 (1981).
- 3) J. Summerscales and D. Short, Composites, **9**, 3, 157 (1978).
- 4) K. E. Hofer, Jr. and R. Porte, J. Elastomers and Plastics, **10**, 271 (1978).
- 5) K. M. Hardaker and M. O. W. Richardson, Polym. Plast. Technol. Eng., **15**, 2, 169 (1980).
- 6) 金原 勲, 竹鼻三雄, 鈴木敏夫, 大沢 勇, 第5回FRPシンポジウム前刷, p.22 (1976).
- 7) D. F. Sims and H. E. Wilson, Composites, **9**, 3, 185 (1978).
- 8) 宮入裕夫, 村松篤良, 永井正洋, 第3回FRPシンポジウム前刷, p.109 (1974).
- 9) ASTM D2344, Apparent Horizontal Shear Strength of Reinforced Plastics by Short Beam Method
- 10) 植村益次, 井上向史, 山口芳子, 強化プラスチック, **24**, 1, 13 (1978).