等曲げ剛性を有する GRP, CRP プリプレグ シート積層板の疲労特性*

宮 入 裕 夫** 永 井 正 洋*** 村 松 篤 良**

Fatigue Properties of GRP, CRP and CRP/GRP Hybrid Laminates Having Equivalent Flexural Rigidity

by

Hiroo MIYAIRI, Masahiro NAGAI and Atsuyoshi MURAMATSU

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

Fiber reinforced plastics (FRP) are widely used in many fields because of their characteristics achieved by the combination of fibers of high strength and elasticity and excellent matrix. In this paper, a fundamental investigation was made to develop light weight composite materials with excellent spring properties from hybrids of glass/epoxy and carbon/epoxy laminates. As a result, the CRP/GRP hybrid structure was found to be superior in fatigue properties to any other GRP laminates. In this structure, fracture took place stepwise in slow motion. Furthermore, the relation between the flexural rigidity of the hybrid laminates and the spring constant was calculated using the number of plies as the structural factor of laminates. The result agreed with the experimental value. Therefore, it was confirmed that the CRP/GRP hybrid structure shows the excellent spring properties and can be used for a long time in a wide elastic region.

(Received May 11, 1979)

キー・ワード：FRPばね材，プリプレグシート使用積層数の算出，静的曲げ特性，剛性低下率

1 緒 言

繊維強化プラスチック (FRP) は，優れた強度特性を有するばかりでなく，種々の機能的特性を有することから，広い分野で使用されている。特に，最近では，カーボン繊維 (CF) およびガラス繊維 (GF) とのハイブリッド複合により，CRP あるいは GRP 単体にはみられない強度特性を示すこと^{1)~3)}から，構造用および機能的材料として優れた工業材料へと飛躍的な発展を遂げている。

例えば，オートメーション生産過程での製品運搬用ばね材として，鋼材に替り，優れた軽量性と機能的特性を有する FRP が新しい分野での用途として注目されている。これまでに，FRP 製ばねは自動車および多くの懸架装置などの応用に関し研究されている⁴⁾⁵⁾。特に，島村および宮入等は，自動車用鋼製懸架ばねと同一形状のものを FRP で試作し，その耐久性を検討した結果，その性能は鋼製のものにほぼ匹敵し，特に，

その軽量化は著しく改良されたことを報告している。

ここでは，FRP ばね材として，一方向強化 GRP および CRP，さらに，これらを複合化した 4 種類の積層型ハイブリッド板を取り挙げ，曲げに関する基礎的性能について検討を進めた。したがって，ここでは曲げ剛性を目標とした FRP 基材の構成について基礎的な検討を行ったものである。ここで取り扱う各種 FRP は板厚を変え，それぞれの設計目標である曲げ剛性を等値とし，そしてそれらの静的曲げおよび疲労特性を対象に基材の構成と板厚比に関し比較検討した。さらに，その結果得られる曲げ強度，疲労強度および破壊様相をもとに，ばね材として FRP ハイブリッド板の評価を行った。

2 等曲げ剛性板のプリプレグシート使用積層数の算出方法

ここで用いた GRP, CRP および各種ハイブリッド板は，Table I に示した素材を用いたプリプレグシートを積層し成形したものである。それらの積層構成は Table II に示すとおりであり，ここで表中の CF および GF プリプレグシートの積層数は次に述べる方法により算出した。

* 原稿受理 昭和54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

Table I. Type of prepreg-sheet and its thickness and elastic modulus.

Type of prepreg-sheet	Reinforcement	Matrix	Thickness (mm)	Elastic modulus (kg/mm ²)
GF	Glass fiber (Nittobo, RS 120 E-601)	Epoxy resin (Toray, #2500)	0.40	4 630
CF	Carbon fiber (Torayca T 300)	ditto	0.21	13 070

Table II. Constitution and thickness of GRP, CRP and hybrid laminates.

Specimen	Constitution	Number of plies	Thickness (mm)	
			Desired	Measured
GRP		9	3.60	3.66
CRP		12	2.52	2.61
Hy-A		1/7/1	3.22	3.06
Hy-B		2/5/2	2.84	2.73
Hy-C		3/3/3	2.46	2.53
Hy-D		(1/2/2) _s	3.24	3.12

Fig. 1. Dimension of the cross-section of hybrid laminates.

最初に, Fig. 1 (a) に示した寸法を有する Hy-A~C のハイブリッド板のみかけの曲げ剛性 $E_{II}I_{II} (=E_{II}bh^3/12)$ について考えると, このとき GRP 部の断面 2 次モーメントを I_g , CRP 部の断面 2 次モーメントを I_c とし, $E_{II}I_{II}$ は次のように示される.

$$E_{II}I_{II} = E_g I_g + E_c I_c \quad (1)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} I_g &= bh_g^3/12 \\ I_c &= b\{(h_g + 2h_c)^3 - h_g^3\}/12 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

なお, (1) 式の E_g , E_c はそれぞれ GRP, CRP 単体の弾性係数である. また, GF および CF のプリプレグシートの板厚をそれぞれ $(h_g)_0$, $(h_c)_0$ とすると, それらの使用積層数 n_g , n_c は

$$\left. \begin{aligned} n_g &= h_g/(h_g)_0 \\ n_c &= h_c/(h_c)_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と示される. したがって, $E_{II}I_{II}$ の要求値が決められると, CRP 部の板厚および使用積層数を予め設定することにより, h_g は (1), (2) 式を用いて求められ, さ

らに, GF プリプレグシートの使用積層数 n_g は (3) 式より算出される.

つぎに, Fig. 1 (b) に示した Hy-D の場合では, その曲げ剛性 $E_{II}I_{II} (=E_{II}bh^3/12)$ は次のように示される.

$$E_{II}I_{II} = E_g(I_{g1} + I_{g2}) + E_c I_c \quad (4)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} I_{g1} &= bh_{g1}^3/12 \\ I_{g2} &= b\{(h_{g1} + 2h_c + 2h_{g2})^3 \\ &\quad - (h_{g1} + 2h_c)^3\}/12 \\ I_c &= b\{(h_{g1} + 2h_c)^3 - h_{g1}^3\}/12 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

このようなハイブリッド板では, h_{g2} , h_c および n_{g2} ($=h_{g2}/(h_g)_0$), n_c を予め設定することにより, 前者と同様にして h_{g1} および n_{g1} ($=h_{g1}/(h_g)_0$) は算出される.

したがって, ここでは GRP 単体の曲げ剛性 $E_g I_g^*$ の値をもとに, $E_g I_g^* (=E_g bh_g^{*3}/12) = E_c I_c^* (=E_c b h_c^{*3}/12) = E_{II} I_{II} = E_{II} I_{II}$ として, CRP 単体およびハイブリッド板の等剛性を有するための板厚および使用積層数を算出した. なお, GRP 単体の板厚は $h_g^* = 3.6$ mm を目標としたので GF プリプレグシートの使用積層数は Table I より $n_g^* = 9$ 層となる. また, CRP 単体およびハイブリッド板の使用積層数の算出は, Table I の特性値を用い, 前述の方法により求められ, その結果を Table III に示した. 表中 n_c^* , n_g および n_{g1} の値において, 実際の使用積層数は, Table II に示したように小数点以下四捨五入したものを採用したが, 特に, Hy-C においては, 小数点以下を切捨て $n_g = 3$ 層とした. この理由は, $n_g = 4$ 層とすると, Hy-C の目標板厚が Hy-B のものを上回るからである.

Table III. Calculated thickness and number of plies of core GRP in hybrid laminates.

Specimen	h_g or h_{g1}	n_g or n_{g1}
GRP	$h_g^* = 3.60$	$n_g^* = 9.0$
CRP	$h_c^* = 2.56$	$n_c^* = 12.2$
Hy-A	2.64	6.6
Hy-B	1.98	5.0
Hy-C	1.50	3.7
Hy-D	1.48	3.7

3 試験片および試験方法

試験片は Table I に示したプリブレグシートの同時積層成形により作製したもので、このとき成形条件として、プレスキューは 7 kg/mm^2 、 120°C で 1 時間とし、アフタキュアは 130°C で 2 時間行った。試験片の構成および板厚は Table II に示すとおりであるが、それらの仕上り板厚 (10 個の平均値) は目標板厚にほぼ同様となり、満足される結果を得た。なお、GRP および CRP の繊維含有率 V_f は両者ともに $V_f=60\%$ である。

静的曲げおよび平面曲げ疲労試験片は Fig. 2 に示した形状寸法のものを用いた。静的曲げ試験は、支点間距離 120 mm、荷重点間距離 60 mm の 4 点曲げ試験方法を採用し、毎分 2.5 mm の負荷速度で行った。

Fig. 2. Flexural and fatigue specimens.

疲労試験は、東洋精機製作所製 RFFT-B-70 の疲労試験機を用い、両振り平面曲げ疲労試験により行った。また、試験片の疲労過程における剛性低下は、疲労試験機に取り付けた電磁式変位計により測定した。

4 試験結果および考察

4.1 静的曲げ特性

4.1.1 $P-\delta$ 線図および破壊様相 Fig. 3 は曲げ剛性を有する GRP, CRP および各ハイブリッド板の

4 点曲げ試験による曲げ荷重-たわみ線図 ($P-\delta$ 線図) を示したもので、横軸のたわみは荷重点におけるたわみを示す。このときの破壊様相は、GRP 単体では圧縮側より破壊が起り、徐々に曲げ荷重は低下するのに対し、CRP 単体では引張り側の破壊であり、一部圧縮側の座屈破壊も観察され、また、最大荷重を越えると、急激に分離破断を起し、ぜい性破壊を呈する。このように、GRP と CRP とでは破壊様相において差異がみられる。つぎに、ハイブリッド板について観察すると、Hy-A では引張り側の CRP 部が最初に破壊を起し、さらに最大曲げ荷重を越えると圧縮側 CRP 部の破壊も観察された。Hy-B および Hy-C では荷重点直下の引張り側 CRP 部の破壊となり、また、Hy-C では CRP/GRP 界面での離れも生じた。Hy-D では引張り側の心材 GRP/CRP 界面での離れと CRP 部での引張破壊とを生じた。

4.1.2 曲げ強度 Table IV は各試験片の曲げ特性を示したもので、表中数値はそれぞれ 5 個の試験片を用い、その平均値を示したものである。一般には、GRP は充分満足な強度を有するが、その縦弾性係数は比較的低いといわれる。Table IV に示されるように、GRP と CRP の曲げ特性を比較すると、曲げ強度に比べ、縦弾性係数においてかなりの差異がみられる。

Table IV. Flexural properties of GRP, CRP and hybrid laminates.

Specimen	Elastic modulus (kg/mm ²)	Proportional limit (kg/mm ²)	Flexural strength (kg/mm ²)
GRP	4 730	58.1	131.7
CRP	13 070	89.3	156.2
Hy-A	7 460	61.5	108.1
Hy-B	9 810	79.3	131.3
Hy-C	11 060	76.2	139.1
Hy-D	7 830	67.6	138.2

Fig. 3. $P-\delta$ diagrams, where the mark δ shows the proportional limit. (support span: 120 mm, load span: 60 mm)

したがって、両者の曲げ剛性を等値としたときの $P-\delta$ 線図において、Fig. 3 に示したように、GRP の破壊曲げ荷重が CRP のものに比べ高く現れる。

つぎにハイブリッド板の縦弾性係数は、CRP の効果が顕著に現れ、GRP 単体のものと比べると、Hy-A, Hy-B, Hy-C および Hy-D の順に約 58, 107, 134 および 66% とかなりの向上がみられた。また、ハイブリッド板の曲げ強度は、GRP 単体のものに比べ、縦弾性係数の場合ほど向上しない。これは、GRP と CRP との縦弾性係数の差異に比べ、それらの曲げ強度にあまり差異がみられないためである。しかし、比例限度は CRP の効果が現れ、GRP の単体と比べ 6 ~ 37% 向上した。

4・1・3 等曲げ剛性の評価 各試験片の曲げ剛性は試験片の板幅をそれぞれ等値し、Table IV に示した縦弾性係数および Table II に示した測定板厚を採用し求めたもので、その結果を Table V に示した。表に示されるように、Hy-C を除いて比較的満足される結果を得たが、Hy-C の場合は、GRP 部の使用積

層数 n_g は Table III に示したように $n_g=3.7$ 層と算出されたが、小数点以下を切捨て $n_g=3$ 層を採用したことに起因する。したがって、これらの実験結果から、FRP ばね材として目的に応じた曲げ剛性の設計は、はり理論の適用により充分期待できることを確認した。

Table V. The values of $EI/(EI)_{GRP}$.

Specimen	$EI/(EI)_{GRP}$
GRP	1.000
CRP	1.002
Hy-A	0.922
Hy-B	0.861
Hy-C	0.772
Hy-D	1.025

4・2 疲労特性

4・2・1 剛性低下率曲線 ($EI/(EI)_0-N$ 線図) および破壊様相 Fig. 4 は各試験片の破壊に至るまでの

Fig. 4. $EI/(EI)_0-N$ diagrams.

剛性低下率を示したものである。GRP 単体では、剛性低下率が20%を越えると急激な剛性低下を生じ破壊に至るのに対し、CRP 単体では30%の剛性低下率に至るまでゆるやかに低下する。このとき、これらの疲労破壊様相について述べると、表面層の繊維の破断は観察されず、Fig. 2 に示した試験片の厚板方向を見て、き裂はその両曲率部底上下部から試験片の中立面方向へ左右斜めに進展している。したがって、これが剛性低下の誘因を成したものと考えられる。特に、疲労試験後の試験片は両者とも層間はく離を生じていることから、急激な剛性低下を生ずる時点、すなわち、最終的な破壊は層間はく離によるものと考えられる。

つぎに、ハイブリッド板について述べると、GRP および CRP 単体とは異り、剛性低下が顕著に現れるのは、Hy-C、Hy-D を除くと、 $EI/(EI)_0$ の値が比較的高くほぼ 0.92 となっている。これは、CRP 部の破壊は CRP 単体と同様に起るが、両ハイブリッド板の CRP 部の板厚は比較的薄いため、曲率部底からのき裂の進展が CRP/GRP 界面に達するのは比較的早く、そして、そのき裂が CRP/GRP 界面ではなく離を誘引するためである。一方、Hy-C では、その破壊様相は Hy-A、Hy-B のものと同様であるが、これらのものに比べて CRP 部の板厚は大きいので、き裂の進展は充分に行われ、したがって、 $EI/(EI)_0-N$ 線図は CRP 単体のものと同様の傾向を示したものと考えられる。なお、これらのハイブリッド板では、すべて GRP 部の破壊は観察されない。さらに、Hy-D では、繰返し数の増加とともに、表面層の GRP/CRP 界面で順次広範囲にはく離現象を起し、剛性低下を招く。

4・2・2 S-N 線図 Fig. 5 は各試験片の S-N 線図を示したもので、このときの破壊に至るまでの繰返し数 N は、JIS K 7119 に準じ、Fig. 4 において $EI/(EI)_0=0.8$ のときとした。疲労強度は、図に示されるように、GRP 単体 Hy-D、Hy-A、Hy-B、Hy-C および CRP 単体の順に高くなり、特に、 $N=10^7$ 回

での疲労強度 σ_f を Table VI に示した。CRP 単体の $N=10^7$ 回での疲労強度は、GRP 単体のものに比べ 100% 高い値を示した。またハイブリッド板の疲労強度は、Hy-D を除いて、Table IV の静的曲げ強度の結果とは異り、CRP の優れた疲労特性が現れ、GRP 単体のものよりも 33~77% 向上した。しかし、Hy-D では、 $N=10^7$ 回近傍では GRP 単体のものとはほぼ同程度の疲労強度を示すようになり、長寿命を考慮すると、表面層に GRP を設けることは GRP/CRP 界面ではなく離現象を招くだけとなる。

一般に、材料の軽量性を評価するために比強度が用いられるが、ここでもばね材として軽量性を考慮した耐久性を検討するために、比疲労強度 σ_f/ρ の値を求め、その結果を Table VI に示した。CRP 単体の σ_f/ρ の値は GRP 単体の値と比べ 159% 高くなり、ハイブリッド板においても表面材 CRP の板厚が増加するほど、33~96% と優れた値を示した。

Table VI. Fatigue properties of GRP, CRP and hybrid laminates.

Specimen	ρ (density) (g/cm ³)	σ_f ($N=10^7$) (kg/mm ²)	σ_f/ρ ($\times 10^6$ cm)
GRP	1.97	27.5	1.40
CRP	1.52	55.0	3.62
Hy-A	1.96	36.6	1.87
Hy-B	1.88	42.0	2.23
Hy-C	1.78	48.6	2.73
Hy-D	1.91	29.7	1.56

5 等曲げ剛性板の耐久性能

ここでは、GRP 単体、CRP 単体および各種ハイブリッド板をばね材として試作し、それらの静的曲げおよび疲労特性を検討した。特に、ばね材の耐久性を評価する場合、安易に S-N 線図だけで評価するばかりでなく、実際に負荷される曲げ荷重の使用範囲が把握されねばならない。さらに、FRP ばね材の耐久性を評価する場合、その軽量性をも考慮し議論されねばならないものと考ええる。

そこで、ここでは、各試験片の単位幅当りの曲げモーメント-繰返し数線図 ($M_a/b-N$ 線図) を作製し、材料の曲げ荷重使用範囲を検討した。その結果は Fig. 6 に示すとおりである。図中縦軸 M_a/b の値は、Fig. 5 に示した S-N 線図上の応力振幅 σ_a と Table II の測定板厚を用い、 $M_a/b=h^2\sigma_a/6$ として算出した。図に示されるように、Fig. 4 の S-N 線図とは異り、GRP 単体の $M_a/b-N$ 線図が最上部に位置している。これは、Fig. 3 で示した P- δ 線図の結果と同様の理由による。したがって、曲げ荷重使用範囲は、板厚および軽量性を考慮しなければ GRP 単体が最も大きな

Fig. 5. S-N diagrams.

Fig. 6. $M_a/b-N$ diagrams.

ものとなる。また、繰返し数の少ない範囲では、Hy-A, Hy-D が良い結果を与え、さらに、 $N=10^7$ 回近傍では、CRP 単体が GRP 単体よりも高い値を示し、CRP の優れた耐疲労性が理解される。

つぎに、材料の重量を考慮した結果を述べる。Fig. 7 は各試験片の重量当りの耐曲げモーメント量を求め、GRP 単体の値に対する各試験片のその割合を示したものである。CRP 単体の $M_a(\rho h)_{\text{GRP}}/(M_a)_{\text{GRP}}\rho h-N$ 線図はかなり上部に位置している。したがって、CRP は GRP よりもきわめて優れた軽量ばね材といえる。一方、各種ハイブリッド板では、CRP を表面材とした構造メリットが現れ、 $M_a(\rho h)_{\text{GRP}}/(M_a)_{\text{GRP}}\rho h > 1$ となり、同様に優れた軽量ばね材であることが示された。また、繰返し数の増加とともにその特性はさらに向上する。なお、Hy-D の場合では、少ない繰返し数の範囲における $M_a(\rho h)_{\text{GRP}}/(M_a)_{\text{GRP}}\rho h$ の値は他のハイブリッド板の値とほぼ同じ傾向を示すが、繰返し数の増加とともにその値は次第に低下し、 $N=3 \times 10^6$ 回を越えると 1 以下となる。

Fig. 7. $M_a(\rho h)_{\text{GRP}}/(M_a)_{\text{GRP}}\rho h-N$ diagrams.

6 結 言

ばね材として試作した等曲げ剛性を有する GRP, CRP およびこれらを複合した 4 種類の積層型ハイブリッド板の疲労特性について、4 点曲げ試験および両振り平面曲げ疲労試験により検討した。それらの結果を要約すると次のとおりである。

(1) ばねの設計において、その曲げ剛性が設定されると、ばね材 GRP, CRP およびハイブリッド板に用いるプリプレグシートの使用積層数は、はり理論により算出できることを確認した。

(2) 疲労試験結果において、GRP では、剛性低下率がほぼ 20% を越えると、急激に剛性低下を生じ破壊に至るのに対し、CRP では、その剛性はほぼ 30% の剛性低下率に至るまでゆるやかに低下する。

(3) 一方、ハイブリッド板では、GRP および CRP 単体とは異り、剛性低下の顕著に現れるのは比較的小さく 8% で観察されるが、その値を越えても GRP 単体ほど急激には低下しない。

(4) CRP の疲労強度は $N=10^7$ 回で $\sigma_f=55.0 \text{ kg/mm}^2$ となり、GRP の約 2 倍の値を示した。また、ハイブリッド板においては、表面材 CRP の効果が現れ、その $S-N$ 線図は GRP 単体として CRP 単体との中間に位置し、CRP の積層が多くなるほど疲労強度は向上する。

(5) ばね材として実際の曲げ荷重による負荷を考えた場合、CRP, ハイブリッド板に比べ GRP の板厚は大きい欠点をもつが、 $S-N$ 線図とは逆に、GRP の荷重使用範囲が広がる。

(6) しかし、軽量性を考慮しその耐久性を検討すると、CRP はきわめて優れた特性を示し、また、ハイブリッド板においても、表面材 CRP の構造メリットが現れ、GRP よりも優れた特性を示す。

おわりに、試料を提供していただいた東レ(株)榎原完爾氏に厚くお礼申し上げる。

(昭和54年3月27日 第8回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Hayashi, T., Proc. 8th Inter. Reinforced Plastics Conf., 149 (1972).
- 2) 藤井太一, 田中健三, 材料, **21**, 906 (1972).
- 3) Shimamura, S., and H. Furue, Bull. Mech. Engg. Lab., No. 12 (1974).
- 4) Posniak, B., SPI, RP Div., Proc., 21 (1966).
- 5) 島村昭治, 宮入裕夫, 小山 博, 吉田真也, ばね技術研究会, ばね論文集, 第19号, 25 (1974).