強化プラスチックの強度特性*

藤 井 太 一**

Strength of Glass Fiber Reinforced Plastics

by

Taichi Fujii

(Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka)

As widely known, glass fiber reinforced plastics have very great value of strength weight ratio and many other excellent properties, being heat and water proof and having electric resistance among others. Hence glass fiber reinforced plastics are attracting the attention of the engineering world. The investigation about the strength of glass reinforced plastics is performed by many researchers from different standpoints, the summarizing consideration there of being required by many engineers. The present paper proposes to give such summarizing considerations about the strength of glass fiber reinforced plastics to meet the above mentioned requirement. (Received Feb. 11, 1965)

1 緒 言

強化プラスチックは広い意味では強化処理をされたプラスチック全部を指すものと考えられるが、われわれが普通強化プラスチックと呼んでいるものは、ガラス繊維をもって補強されたプラスチックを意味する場合が多く、Glass fiber reinforced plastics あるいは略して FRP と呼んでいる。FRP の強度特性

を金属材料と比較してまず気づくことは強度～重量比が著しく大きいことである。すなわち Table I に見られるように朱子織ガラスクロスを用いた FRP (ガラス重量含有率 $\beta=60\%$ 、樹脂はポリエステル) の引張強度は 33kg/mm^2 で構造用炭素鋼に迫り、引張強度～比重比は 3 倍以上になっている。また、その強度は補強材であるガラス繊維の含有率によって大きく変わ

Table I. Comparison of mechanical properties of FRP and other materials.

Material	Tensile strength (kg/mm ²)	Young's modulus (kg/mm ²)	Compression strength (kg/mm ²)	Bending strength (kg/mm ²)	Shear strength (kg/mm ²)	Impact value (Charpy) (kg-cm/cm ²)	Specific weight	Tensile strength Specific weight
FRP $\beta=60\%$ (Satin woven glass cloth)	33	2 200	28	50	11~14	130	1.8	18.3
FRP $\beta=50\%$ (Robing glass cloth)	26	2 000	18.4	30	16.3	220	1.7	15.3
FRP $\beta=30\%$ (Plane woven glass cloth)	26	1 600	24.3	30	10	100	1.7	15.3
FRP $\beta=30\%$ Mat	10	1 000	23 27	14 18	8~10	100	1.6	6.25
Carbon steel SS-41	42	21 000	—	—	—	1 500	7.8	5.39
Aluminium alloy 24S-T	47	7 000	—	—	28	260~290	2.8	16.2
Aluminium alloy 52S-O	19	7 000	—	—	12.7	830	2.8	6.78
Polyester	4.1	380	15.8	11.5	6.6	1.1	1.1	3.72
Vinyl	6.0	300	10	10	4 0	3.0	1.4	4.28
Metacrylic resin	7.2	280	10	10	4.4	3.0	1.4	5.13

* 原稿受理 昭和40年2月11日

** 正会員 大阪市立大学工学部 大阪市北区西扇町

るので、目的によって適当な強度のものを選択することができるとも特徴と思われる。以上のほか電気絶縁性、耐食性もすぐれているので、これらの性質を生かして、各方面に広く用いられつつあることは周知のところであろう。

さて、補強材料として用いられるガラス繊維はガラスフィラメントのままで用いられる場合もあるが、普通朱子織、平織等の布にして用いられている。また、繊維をある長さに切断しマット状にしたもの、繊維を多数たばねて幅の広い繊維束いわゆるロープを形成し、これにより布を織ったもの（ロービング布）を用いられている。なお、補強材としてビニロン布、あるいは金属線条が用いられる場合もある。

さて、強化プラスチックが基材と補強材とによって構成された複合体であることを考えると、その強度特性は基材と複合体それぞれの特性とかなり異なったものとなることが予想される。したがって、強化プラスチックの強度特性を決定する要因として種々のものが考えられているが、そのおもなものをあげると、

- (a) 樹脂(基材)と補強材それぞれの強度特性
- (b) 補強材の含有率
- (c) 成形方法、条件等
- (d) 作用する負荷の種類、負荷条件

等である。

2 静 的 強 度

強化プラスチックの構成材料は前項に述べたようにガラス繊維クロス、樹脂であるが、強度を要求される場合に広く用いられているものとして、朱子織ガラスクロス、ポリエステル（またはエポキシ）の積層材

Fig. 1. Static strength of glass-cloth-polyester FRP.

があげられる。Fig.1 はポリエステル、朱子織ガラスクロスの静的強度をまとめたもので、ガラス繊維容積含有率を横軸に、縦軸に破壊応力をとれば、図から認められるように、体積含有率で約60%まで、強度が増加していることがわかる。引張強度は、積層面に沿う方向、補強材の主方向に引張った場合で、含有率零、すなわちポリエステルの引張強度を基点としてはほぼ直線的に強度が増加し、含有率が60%を越えると急激な強度低下を示している。これは60%以上の成形は実際問題として困難であり、FRP 内部に成形による損傷が生ずるためと思われる。しかし、含有率に関して強度が増大していく傾向を延長すると後述する曲げ飽和強度に近づくようである。次に図に示された曲げ強度は A~B の傾向をたどる曲げ軸が積層面に平行な場合と、A~C の傾向を示す曲げ軸が積層面に直角な場合とに分けることができる。前者の傾向は補強クロスがほぼ単純引張りに近い状態となると思われるので、クロスの強度を示唆しているものと思われる。ガラス繊維のみの強度は約 200kg/mm² であるからクロスとしたことによる強度低下は非常に大きく、約 1/5 となる。圧縮強度は積層面に直角な方向に圧縮した場合を示した。積層面に平行な方向に圧縮した場合はその強度は約 23kg/mm² でガラス含有率による強度増加は認められない。ガラス繊維含有率は実際には重量含有率で示される場合が多いが、強度特性を表わすためには容積含有率で示したほうが直線的傾向がよく表わされる。^{*}せん断強度については資料が少ないので、その傾向をはっきり示すことができないが、積層面に平行にせん断を与えた場合は樹脂のせん断抵抗が主体となると思われる。綾織ガラスクロス、ポリエステル FRP (ガラス繊維重量含有率、62%) に対する実験の結果によれば¹⁾

*1 ガラス繊維の強度について

ガラス繊維は細いほど強度が大となることが知られていて、近似的に次式で強度を求めている。

$$\sigma_B \approx 1500/d \text{ kg/mm}^2$$

ただし d ; ガラス繊維の直径 (ミクロン)

ガラス繊維の直径は 50~100 本程度束にしてストランドにするものは 5~10 ミクロンであるが、長いフィラメントとして用いるものには、10~20 ミクロンのものも用いられる。なお、ガラスの材料によってもその強度が変わることはいうまでもない。たとえば

無アルカリガラス繊維 (E ガラス) 国産品

$$\sigma_B = 350 \text{ kg/mm}^2, E = 7400 \sim 7700 \text{ kg/mm}^2$$

米国の Owens-Corning Fiberglass 社の

Low alkali magnesia alumina silicate glass

$$\sigma_B = 455 \text{ kg/mm}^2, E = 8400 \sim 8800 \text{ kg/mm}^2$$

*2 ガラス繊維重量含有率 α と体積含有率 β の関係

$$\beta = \alpha \frac{\rho_F}{\rho_g}$$

ただし ρ_F ; 強化プラスチックの比重

ρ_g ; ガラス繊維の比重

ρ_F は次式で計算される。

$$\rho_F = (\rho_g - \rho_r) \beta + \rho_r$$

ρ_r ; FRP 中の硬化した樹脂の比重

積層面に平行方向のせん断強度 3.5kg/mm^2

(積層面間せん断)

同上 (積層面内せん断) 6.4kg/mm^2

であることが報告されている。

3 強化プラスチックの静的破壊機構

ガラスクロス、ポリエステル FRP の引張試験を行なうとその荷重と変形の関係はほぼ直線的であり顕著な降伏現象を示さず破壊に至っている。しかし、少し詳しく観察すると途中に折点のあることが認められる。Fig.2 は前述のせん断試験に用いられたものと同一の材料について引張試験を行なった結果である。このような結果を説明するために種々の考察が行なわれているが、それらのうちで最も簡単な考え方は Fig.3 に示すように荷重 P が作用したときの見かけの応力を σ 、補強材の分担荷重および応力を P_g 、 σ_g 、樹脂の分担荷重および応力を P_r 、 σ_r とし樹脂層とガラス繊維層とを別個に考えて、両者の変形が等しくなるように、分担荷重を受け持つと考える。したがって

Fig. 2. Load-deflection diagram of FRP (Glasses cloth-polyester FRP).

Fig. 3. Mechanical model of FRP.

$$\sigma F = \sigma_r F_r + \sigma_g F_g$$

ただし、 F は断面積、ガラス繊維体積含有率を β とすると

$$\beta = F_g / F$$

したがって

$$\sigma = \sigma_r (1 - \beta) + \sigma_g \beta$$

見かけの応力と分担応力の比を求めてみると

$$\frac{\sigma}{\sigma_g} = \beta + (1 - \beta) \frac{\sigma_r}{\sigma_g} = \beta + (1 - \beta) \frac{E_r}{E_g}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_r} = (1 - \beta) + \beta \frac{\sigma_g}{\sigma_r} = (1 - \beta) + \beta \frac{F_g}{F_r}$$

となる。^{*3} ただし、 E_r 、 E_g はそれぞれ樹脂層、ガラス繊維層の弾性係数である。

補強材と樹脂の強度をそれぞれ σ_{g*} 、 σ_{r*} としその比を n とすると

$$n \frac{\sigma_g}{\sigma_{g*}} \left\{ \beta + (1 - \beta) \frac{E_r}{E_g} \right\} = \frac{\sigma_r}{\sigma_{r*}} \left\{ (1 - \beta) + \beta \frac{E_g}{E_r} \right\}$$

いま、樹脂の部分がさきに破壊したとすると

$$\sigma_r / \sigma_{r*} = 1.0$$

したがって

$$\sigma_g / \sigma_{g*} = (1/n) E_g / E_r$$

この値が1に等しければ樹脂と補強材は同時に破壊し、1より大であれば補強材のほうがさきに破壊することになる。

樹脂部が破壊するときの見かけの応力と σ_{g*} との比を求めると

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{g*}} \right)_1 = \frac{1}{n} \left\{ \beta \frac{E_g}{E_r} + (1 - \beta) \right\} = \frac{1}{n} \frac{E_g}{E_r} \beta$$

全体が破壊するとき

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{g*}} \right)_2 = \beta$$

樹脂と補強材が同時に破壊するとき

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{g*}} \right)_2 = \beta + \frac{1 - \beta}{n}$$

補強材がさきに破壊するとき

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{g*}} \right)_1 = \beta + (1 - \beta) \frac{E_r}{E_g}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{g*}} \right)_2 = \frac{1 - \beta}{n}$$

Fig.4 は以上の関係を定性的に示したものである。以上の取り扱いにおいては、たとえば樹脂層が破壊限界

*3 $(\sigma_r / \sigma_g) \approx (E_r / E_g)$ について

FRP の見かけのひずみ ϵ が、樹脂層およびガラス繊維層と同一であり、横ひずみの影響を無視すると上記の関係が成立する。なお、見かけの縦弾性係数を E とすると

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \left(\frac{d\sigma_r}{d\epsilon} \right) (1 - \beta) + \left(\frac{d\sigma_g}{d\epsilon} \right) \beta$$

$\rho_r = f(\epsilon_r)$ 、 $\sigma_g = g(\epsilon_g)$ とおくと

$$E = \left\{ \left(\frac{df(\epsilon)}{d\epsilon} \right)_0 + \left(\frac{d^2 f(\epsilon)}{d\epsilon^2} \right)_0 \epsilon + \dots \right\} (1 - \beta) + \left\{ \left(\frac{dg(\epsilon)}{d\epsilon} \right)_0 + \left(\frac{d^2 g(\epsilon)}{d\epsilon^2} \right)_0 \epsilon + \dots \right\} \beta$$

したがって

$$E = E_r (1 - \beta) + E_g \beta = (E_g - E_r) \beta + E_r$$

- (I) Preceding crack occurs at the layer of resin
 (II) Crack occurs at the same time
 (I)' Layer of resin yield
 (III) Preceding crack occurs at the layer of reinforcement

Fig. 4. Stress-strain relation of FRP.

に達すると、もはや負荷を分担しなくなると考えたのであるが、実際には樹脂はある程度（降伏後）の分担荷重を受け持ち続けると考えられる。Shaffer は上記の模型と同様の考えの下に、樹脂層の降伏を考慮して次式を得ている。

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{gs}}\right)_1 = \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_{gs}} \left\{ 1 + \beta \left(\frac{E_g}{E_r} - 1 \right) \right\}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{gs}}\right)_2 = \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_{gs}} + \beta \left(\frac{\sigma_{gs}}{\sigma_{gs}} - \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_{gs}} \right)$$

ただし、 σ_{rs} 、 σ_{gs} ：樹脂層、ガラス繊維層の降伏応力

以上は、FRP の負荷時の挙動を簡単な模型で考察したもので σ_{gs} 、 n を適当に選定することによってその破壊荷重をある程度説明することができるが、一方、FRP の本質的な破壊の様相を観察すると多くの複雑な問題があることが認められる。Besal と McGarry の研究によれば初荷重を与えたときの応力-ひずみ曲線において“Knee”と呼ばれる部分があり、この部分で弾性係数の急激な変化を生ずることが指摘されている。その理由として、たとえば朱子織ガラスクロスのように繊維が互に上下を通るように織られている場合には、引張荷重がかかると繊維がまっすぐになろうとしてその周囲の接着部分に高い引張応力とせん断応力を起こし、この局部的ひずみがポアソンひずみと結びついて樹脂がもろいときに破壊を起こし、“Knee”現象を生ずるものとしている (Fig.5 参照)。

しかしながら光学顕微鏡を用いて観察した結果によれば朱子織ガラスクロス、ポリエステル FRP ($\beta=40\%$) の引張試験において“Knee”点は $4\sim 6\text{kg/mm}^2$ であるが樹脂層には異常が認められず、横繊維内に顕著なき裂が生じていることが報告されている。Fig.6 は負荷前の断面と 8.3kg/mm^2 の負荷を与えた後の断

Fig. 5. Model of creation of crack by Besal and McGarry.

(a) Before loading

(b) After loading

(Cracks observed in the transvers strand of glass fibers)

Fig. 6. Creation of cracks by loading.

面の比較を示したもので、“Knee”現象を横繊維におけるき裂生成による剛性変化と考えると“Knee”以前の初期弾性係数 E_1 と、“Knee”後の弾性係数 E_2 の差 ΔE は次式となる。

$$\Delta E = E_g \epsilon / 2$$

ただし E_g ：ガラス繊維束の横方向応力に対する弾性係数

Fig.7 は朱子織ガラスクロス、ポリエステル FRP の β と ΔE の関係を縦軸に ΔE 、横軸に β をとって表わし

*4 ΔE の式について

縦ガラス繊維の弾性率を E_g 、断面積を A とすると

$$\epsilon E_1 A = \epsilon (1 - \beta) A E_r + \epsilon \frac{\beta}{2} A (E_g + E_g)$$

$$\therefore E_1 = E_r + \frac{\beta}{2} (E_g + E_g - 2E_r)$$

同様に

$$E_2 = E_r + \frac{\beta}{2} (E_g - 2E_r)$$

$$\therefore \Delta E = E_g \frac{\beta}{2}$$

Fig. 7. Variation of elasticity.

た結果で、かなりばらつきが認められるが ΔE は β とともに増加している。以上は、静的破壊の初期の過程であるが、負荷の増加とともに樹脂き裂が引き続いて起こり、縦ガラス縦維の切断とともに破断に至っている。Fig.4 に示した“Ⅰ”の点と上記の“Knee”点とは同一と考えてよいと思われるが、観察結果が少ないのでなお検討を要するものと思われる。

4 強化プラスチックの静的強度に及ぼす他の要因について

FRP の静的強度がガラス繊維含有率の影響を受けることを主として述べてきたが、このほかにも種々の要因によって影響を受ける。

4.1 補強材の種類の影響

補強材は朱子織ガラスクロスほかにロービングクロス、マット等が広く用いられているが、その強度はかなり異なったものとなる。Fig.8 はその一例である。

4.2 補強材の主方向と負荷方向の影響

ガラスクロスを補強材に用いるとその力学的特性は

Fig. 8. Effect of the kind of glass fiber construction.

Fig. 9. Effect of unisotropy of glass fiber.

顕著な異方性を示し、強度も負荷の方向によって異なったものとなる。しかしながら、マットのようなものを補強材として用いるとほぼ等方性となる。Fig.9 は方向の影響を示した例である。

4.3 耐候性、強度の経年変化

ガラス繊維で強化された FRP は、耐食性、耐候性がすぐれているとされている。すなわち、高い湿度や水に触れると表面から拡散現象的に吸湿するが一般にその量はわずかであって、長時間暴露した場合でも 0.5~1.0% 以下の重量増加にすぎない。Fig.10 は引張強度および曲げ強度の経年変化を示した例である。

Fig. 10. Effect of exposing period.

4.4 応力集中による強度低下

FRP 板に円孔、あるいは切欠きを設けると、その部分に局部的に応力集中を生ずる。したがって強度低下を生ずる。これは非常に重要な問題であるが、この分野に関する研究は比較的少ないようである。Fig.11 は帯板に円孔を設けた場合の結果で、円孔が小さいほど強度が増加している。

4.5 その他

Fig. 11. Effect of stress concentration by a circular hole.

以上の要因以外に重要なものとして温度の影響があるが、これは温度が増加するほど強度が低下するので、アメリカ規格では 160°F での曲げ強度は室温で要求される値の80%以上でなければならないとしている。温度低下は逆に強度を増加させ、-150℃ぐらまでその傾向があるとされている。¹⁾

成形条件（アフターキュアを含めて）の影響、使用する樹脂の影響等も無視できないが、ここでは割愛し、最後に試験方法について考えてみよう。

試験規格の制定はアメリカにおいて最も早く行なわれ空軍規格 MIL-R-7575, 連邦規格 FS-LP-406b 等が

Table II. Standard of static strength test (FS standard LP-406b, U.S.A.)

	Form of test piece	Dimensions (mm)	Error	Remarks of test
Tension test		$t \leq 6$ $6 < t \leq B$ $t > 13$ W 13 20 25 G 50 50 50 C 20 28 38 L 215 260 305 D 110 115 135	mm +0.0 -0.1 +0.3 -0.0 ±0.5	Loading rate is 5.8~6.3mm/min
Bending test		$L \geq 16t$ $C \geq 13mm$ Where $C > 1/8 L$ $C = 1/8 L$		(1) Minimum reading of scale is 1/100 mm to the thickness and width at the central section of testpiece and 1/10 mm to the spanlength of supports. (2) Rate of bending speed (Deflection at center) is 5.8~6.3mm/min.
Compression test		Slenderness ratio = 11~15 $d < t$ $\rho = 0.289d$ $d > t$ $\rho = 0.289t$		(1) Minimum reading of scale is 1/100 mm to the cross section and 1/10 mm to the length. (2) Rate of compression is lower than 1.3 mm/min.

ある。Table II は後者による試験片形状である。

試験の際には気温、湿度、荷重速度等に留意しなければならないことはいまでもないが、標準状態と湿潤状態^{*5}とを規定して試験を行なう場合もある。Fig.12 はアメリカの艦船用 FRP 規格 MIL-P-17549A に示されている、静的特性の標準の値である。

5 強化プラスチックの疲労強度

強化プラスチックの疲労強度は静的強度に比べてかなり低い値となる。Fig.13は、朱子織ガラスクロス、ポリエステル FRP の片振引張疲労試験の結果であって、ガラス含有率を変えたFig.14に示すような板状の試験を用いて実験を行なった結果である。試験速度は

毎分 1500~1900 で、試験機は、Schenck PHOD 疲労試験機を用いた。Fig.13からわかるように疲労強度もガラス繊維含有率βの影響を受け、βが大きいくほど強度が大きくなっている。Fig.15は以上の結果に基づいて縦軸に強度比、横軸に繰返数を取って表わしたもので、ほぼ同一曲線上にあり、静的荷重に対する強度低下率はほぼ同じ値になっている。¹⁰⁾

FRP の S-N 曲線は Boller の指摘したように繰返数Nの増加とともに下にさがり、いわゆる疲労限度は存在していないようである。しかしガラスクロスを一定にして、樹脂の性質を変化させて実験を行なった結果によると S-N 曲線が繰返数の大きいところでほぼ水平となり、強度もかなりあることが報告されている。¹¹⁾

強化プラスチックの疲労強度については、非常に重要な問題であるので最近多くの研究者によって、実験研究が行なわれているが、金属材料に比べると、資料の集積という点でははるかに少ないようである。筆

*5 標準状態と湿潤状態について

試験前と試験中の室温は23±1℃、50±4%RH 試験前の温度調整時間は1/8またはそれ以下の厚みの試料で48hr それ以上の厚みのものは96hr (FS-LP-406b, 1952)

湿潤状態は

沸騰水中に48hr浸漬後、上の標準状態の部屋で試験する。

Fig. 12. Standard of MIL.

Fig. 13. S-N curve of satin woven glass fiber cloth - polyester FRP under pulsating tensile load.

Fig. 14. Form of test piece.

者の数少ない経験から気づいた点をあげてみる。

5・1 荷重の負荷形式の影響および剛性変化

強化プラスチック構造物に作用する負荷は単純な引張り、圧縮でなく曲げが組み合わされたり、せん断

Fig. 15. Lowering of strength by fatigue.

Fig. 16. Effect of glass fiber contents to the fatigue strength of FRP.

が加わったりする 경우가多い。したがって繰返引張り
と曲げそれぞれに対して疲労強度がどの程度異なるか
を知る必要がある。Fig. 16は、片振引張り¹²⁾と片持曲げ¹²⁾
試験結果をそれぞれの静的強度に比較した結果で、曲
げの場合、定たわみ試験のほうが定荷重より寿命が長
くなっているが剛性変化の影響によるものと思われる。
実験に用いた材料は朱子織ガラスクロス、ポリエステル
FRPである。また、剛性変化がかなり大きくなる
場合が多いので剛性低下をある値に規定して疲労強度
とすることも¹²⁾ある。

5・2 荷重繰返速度の影響

強化プラスチックの試験方法は大きく分けて繰返引張
りと繰返曲げ(平面曲げ、回転曲げ)の2種類である
が、繰返速度は統一されておらず“Schenck”試験機
では1500~3000cpm ASTM D671-51Tでは1720
±25cpm “Boldwin”試験機では1800cpm となっ
ている。試験速度は速いほうが実験効率をよくする点で
望ましいのであるが強化プラスチックの場合は、か
なり粘弾性的特質を有しているので2000cpm 以上で
試験すると発熱が著しく結果がよくないようである。

5・3 応力集中の影響

静的強度の項において述べたような強度低下が疲労の場合にも著しい。円孔試験片の強度低下は平滑試験片の82% ($\beta=50\%$)⁸⁾~79% ($\beta=25\%$)⁸⁾である。

5・4 変動荷重の影響

Minner の仮設が¹⁸⁾あてはまらず、積算繰返数比は一般に1以下である。

5・5 温度の影響

温度が上昇すると疲労強度は減じ、逆に低温では強度が増加しており、静的強度と同様の傾を示している。^{14), 15)}

5・6 成形条件の影響

成形の際の真空脱泡の影響、アフターキュアの影響等であるが、片持曲げ試験によって求めた前者の影響をFig.17に示す。¹⁶⁾

Fig. 17. The effect of removal of bubble by vacuum pump.

以上のほか、補強材の異方性の影響¹⁹⁾、平均応力の影響¹⁰⁾、運転休止の影響等¹⁷⁾も報告されている。

なお、疲労破壊の機構については光学顕微鏡による観察結果もあるが、今後の研究に待つ点が多いように思われる。

以上、静的強度、疲労強度を中心に述べたのであるが、強度特性の他の項目として衝撃強度、ほふく強度、等についても多くの研究が行なわれている。

6 む す び

強化プラスチックの強度に関して、主としてガラス繊維クロスを補強材として用いた場合について考察したのであるが十分に意を尽くすことができなかった。金属材料と比較するとかなり異なった性質を有してお

り、長短相半ばしているように思われるが、その長所を生かして利用すれば、非常にすぐれた材料として役だちうるものと思われる。

(昭和39年10月3日 第13回レオロジー討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 林毅, 旭ファイバーグラス研究資料, p.16(1960).
- 2) Shaffer, B.W., Stress Strain Relations of Reinforced Plastics. J. AIAA, **2**, 348 (1964).
- 3) Besal, M.B., and F.J. McGarry, Failure Mechanisms in Glass Fiber Reinforced Plastics, ASTM Bulletin (TP 156) (1959).
- 4) 藤井太一, 増田雄市郎, 第5回構造の軽量化シンポジウム前刷, 187 (1964).
- 5) 田部井清, 強化プラスチック, **8**, 184 (1962).
- 6) 旭ファイバーグラス, FRP 資料-1, p.20 (1961).
- 7) Strauss, E.L., Plastic Technology, **8**, 35(1958).
- 8) 藤井太一, 築添正, 大槻茂寿, 第3回構造の軽量化シンポジウム前刷 (1962).
- 9) MHBK-17, Plastics for flight vehicles, I, Reinforced Plastics, 29 (1959).
- 10) Boller, K.H., Fatigue Properties of fibrous glass reinforced plastics laminates subjected to various conditions, Modern Plastics, p. 163 (1957).
- 11) 仁木正夫, FRP の疲れ強さに及ぼす樹脂の影響 (1965) 強化プラスチック研究会
- 12) 藤井太一, 強化プラスチックの工業的利用とその設計に関する講習会前刷, 143 (1963).
- 13) 藤井太一, 大槻茂寿, 水川清, 増田雄市郎, 第5回構造の軽量化シンポジウム前刷, 179 (1964).
- 14) 遠藤吉郎, 強化プラスチックの疲れ強さに及ぼす温度の影響, (1964) 強化プラスチック研究会
- 15) 島村昭次, 強化プラスチック, **5**, 302 (1952).
- 16) 大槻茂寿, 多田弘, 強化プラスチックの疲れ強さに及ぼす成型条件の影響, (1964) 強化プラスチック研究会
- 17) 藤谷景三, 強化プラスチックの疲れ強さに及ぼす運転休止の影響, (1964) 強化プラスチック研究会