FRP の 機 械 的 性 質*

(直交配列に基づく諸因子の影響)

黒 田 寿 紀** 小 牧 和 夫**
 浜 輝 之*** 日 高 利 雄***

Mechanical Properties of Fiber-Glass Reinforced Plastics
 (Experiments Designed in an Orthogonal Array)

by

Toshinori KURODA, Kazuo KOMAKI,
 (Government Industrial Research Institute, Osaka, Ikeda)
 Teruyuki HAMA and Toshio HIDAHA
 (Kobe Steel Works Ltd., Kure Plant, Kure)

Polyester resin laminates reinforced with glass fibers have recently been put to good use for industrial purposes, for instance to form mechanical members of electric apparatuses and automobiles, to substitute metals. Although the mechanical properties of the laminates have often been reported, few are really the results of experiments based on studied method and design.

Our investigation was carried out using the orthogonal array table type L_{16} . Eight factors were chosen and examined with reference to the two levels :

- (A) The kind of resin,
- (B) The style of weaving the glass fabric,
- (C) Whether finishing touches to be given to the glass fabric or not.
- (D) The molding method,
- (E) The hardening velocity,
- (F) Whether to use the filler or not to,
- (G) Whether to cure the laminate or not to,
- (H) Whether the dipping of the laminates in the sea water to be processed or not.

The tests were carried out in the atmosphere of $20 \pm 1^\circ\text{C}$, $65 \pm 3\%$ RH.

The main results obtained are as follows :

- 1) Isophthalic acid polyester produces favorable effect on bent members, especially so under repeated stress.
- 2) Satin-like style of weaving produces better effect than plain style of weaving.
- 3) The volan finishing touches given to the glass fibers show better effect than in the case of no finishing touches ever being given them.
- 4) The laminates containing the filler fare worse than those without the filler.
- 5) The effect of interaction $A \times C$ and of that $F \times D$ is large on breaking stress.
- 6) The effect of interaction $A \times E$ is large on fatigue strength.
- 7) The effect of interaction $A \times D$ is large on moduli.
- 8) No effect of either G or H is recognized either on breaking stress or on moduli.

(Received July 12, 1965)

1 緒 言

FRP はそれが誕生して15年以上も経過した現在においては、自動車工業や電気工業をはじめとして、もはや金属の代用品として従来他の合成樹脂材料では使

用されていなかった分野にまで広く用いられている。

FRP に関する文献はすでに相当多く報告されているが、¹⁾それらは静的機械的性質を表わしたものが多く、疲労特性については数が少ない。また、静的機械的性質においてもそれらが確率的に実験され、整理されたものは少ない。

著者らは、推進器用材としての FRP についての最

* 原稿受理 昭和40年7月12日

** 正 会 員 大阪工業技術試験所 池田市緑丘1丁目

*** (株)神戸製鋼所呉工場 呉市昭和通5丁目

Table I. The factors and levels in orthogonal array.

Factor	Symbol	Level	
		0	1
Kind of resin	K R	K R ₀ : Fumaric acid polyester (a)	K R ₁ : Isophthalic acid polyester (b)
Glass cloth	Weave	G W ₀ : Cr. satin	G W ₁ : Plain
	Finish	G F ₀ : Volan finish	G F ₁ : Finishless
Molding method	M M	M M ₀ : Hand lay up	M M ₁ : Vacuum casting
Hardening rate	H R	H R ₀ : Cat. 1.0wt%, prom. 0.5wt %	H R ₁ : Cat. 0.5 wt %, prom. 0.3 wt %
Filler	F I	F I ₀ : Without filler	F I ₁ : SiO ₂ powder 40 wt% mixed (c)
Curring	C U	C U ₀ : No curring	C U ₁ : 100°C, 2hr cured
Dipping	D I	D I ₀ : No dipping	D I ₁ : 3months dipping in the sea water

(a) Glasron Scf 270

(b) Glasron H 250

(c) 280~300 mesh, specific gravity: 2.65

Table II. The orthogonal array table and factorial effects for experiments.

Column No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Experiment No.
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	9
3	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	11
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	5
5	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	10
6	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	2
7	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	6
8	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	13
9	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	15
10	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	4
11	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	7
12	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	12
13	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	3
14	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	16
15	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	14
16	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	8
Factorial effects	K R	H R	G W	F I	D I	H R	C U	K R	H R	G W	F I	K R	G F	K R	M M	
		X						X		X		X		X		
		F I		M M		M M		H R		H R		G F		M M		

適条件を見だし、あるいは報告されている結果の再確認の目的で実験計画法に基づき実験を行なった。その結果を報告する。

2 実 験 方 法

2・1 因子および割りつけ

実験は、Table I にみられるような因子および水準を用い、L₁₆型直交配列表に Table II のように割りつけた。この因子の中で樹脂の種類としてフタル酸系ポリエステルと比較するため、イソフタル酸系ポリエステルを採用したのは、すでに著者らが予備実験をした結果、イソフタル酸系ポリエステルが疲労に強いと

いう結果が得られているからである。また、浸漬の因子を加えたのは、この研究の目的の一つは推進器用材としての FRP を作ることであり、海水浸漬の影響を調べるためである。

2・2 試験機および実験方法

実験に用いたテストピースは、ガラスクロス10枚を積層して成型を行ない、これらの板状試料から経糸方向と平行にとった。これらの形状は Fig. 1 に示すとおりである。

引張試験は、Instron 社製万能試験機を用いて AS TM D638-61T に基づき試験速度 0.5cm/min で行な

Fig. 1. Shapes of each test specimen.

い、弾性率の測定には Baldwin 社製エクステンソメータを使用した。曲げ試験も同機を用いて ASTM D790-63 に基づき試験速度 0.1 cm/min で行なった。疲労試験は Wiedmann-Baldwin 社製 SF-02-U型万能疲労試験機にて ASTM D671-63T B法に準じて行なった。この場合試験速度は 1800 rpm で、平均応力は 0 kg/mm² である。これらの試験は JIS に定められた 20±1℃, 65±3%RH の恒温恒湿のふんい気で試験片を試験前48時間以上放置した後、上記環境内で行なった。

3 実験結果および考察

3・1 諸因子の影響

以上のようにして行なった実験の結果は Table III, IV に示してある。これらから分散分析を行なった結果、信頼率95%以上有意であると認められたもののみを Fig. 2~6 に示してある。これらの図から各因子の

Table III. The statical mechanical properties of each sample.

Column No.	Tensile (kg/mm ²)		Flexural (kg/mm ²)	
	Strength	Modulus	Strength	Modulus
1	35.91	2 238	42.85	1 987
2	23.00	2 452	21.17	1 720
3	47.31	2 604	23.70	2 174
4	28.85	2 458	34.94	1 688
5	18.08	1 954	28.08	1 586
6	24.65	1 290	20.92	1 139
7	14.84	1 220	16.41	833
8	30.67	2 287	27.56	2 056
9	14.98	1 542	20.15	1 282
10	17.55	1 552	28.36	1 263
11	16.87	1 493	25.01	1 347
12	31.16	1 536	18.07	1 197
13	34.70	2 373	42.38	1 920
14	22.77	2 436	36.81	2 021
15	32.89	2 998	43.96	2 341
16	24.60	2 201	23.68	1 539

Table IV. The fatigue properties of each sample.

Column No.	Flexural fatigue strength (kg/mm ²)				
	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
1	14.80	12.90	11.15	10.02	9.37
2	13.15	8.89	7.12	6.46	5.82
3	13.30	10.27	8.63	7.94	7.85
4	14.80	10.98	9.32	8.27	7.16
5	12.33	9.59	8.11	7.04	6.34
6	9.25	6.23	5.22	4.67	4.24
7	6.67	5.18	4.34	4.10	3.90
8	8.75	7.95	7.59	6.96	6.60
9	7.06	6.36	5.69	5.21	4.90
10	7.90	6.40	5.80	5.35	5.07
11	8.68	7.97	7.33	6.78	6.34
12	7.16	5.96	5.07	4.34	3.71
13	13.00	12.06	11.20	10.32	9.75
14	10.44	9.83	9.30	8.70	8.10
15	12.43	11.72	11.43	11.29	11.12
16	9.75	8.72	7.69	7.17	6.84

Fig. 2. The unbiased estimations of population means for tensile strengths.

Fig. 3. The unbiased estimations of population means for tensile moduli.

及ぼす影響のうち、主たるものは次のとおりである。

3・1・1 樹脂の種類(KR) この影響は主効果単独では現われないで、すべて交互作用で現われてきている。強度(引張強度、曲げ強度、疲労強度を含めて)にはガラス繊維の処理方法との交互作用で現われている。これは破断が樹脂とガラス繊維とはく離から生

Fig. 4. The unbiased estimations of population means for flexural strengths.

Fig. 5. The unbiased estimations of population means for flexural moduli.

じているからと考えられる。曲げ強度には、イソフタル酸系ポリエステル（イソフタル酸系ポリエステルを使用した製品のことを意味し、以下同じ表現で表わす）がよい結果が得られるが、特に疲労強度への効果は著しく、予備実験で予想したとおりであった。交互作用で現われるもののうち、重要なものについては他の因子の項で説明する。

3・1・2 ガラス繊維の織り方 (GW) この影響はすべての機械的性質に現われている。もちろん朱子織がよいことは従来からいわれていることであり、引張強度で 10kg/mm^2 、曲げ強度で 10kg/mm^2 、疲労強度 (10^7 回の時間強度) で 3kg/mm^2 、引張弾性率で 1100kg/mm^2 、曲げ弾性率で 600kg/mm^2 程度平織より強いようである。

3・1・3 ガラス繊維の処理方法 (GF) この影響もガラス繊維の織り方と同様にすべての機械的性質に現われている。すなわち、ボラン処理を施したものはボラン処理を施さないものよりもよい結果がでている。強度には樹脂の種類との交互作用で現われているがこれはすでに述べたとおりである。弾性率には主効果で現われており、引張弾性率、曲げ弾性率それぞれにおいて 300kg/mm^2 ほどボラン処理を施したものは施さないものより大きいようである。

3・1・4 成型方法 (MM) この影響は強度には充てん剤との交互作用で現われている。これは、充てん剤はいることにより成型方法の困難さが現われてくるためと思われる。引張強度には硬化速度との交互作

Fig. 6. The unbiased estimations of population means for flexural fatigue properties.

用でも現われており、硬化速度の速い場合手積法が特に悪い。これは硬化速度が早い場合、手積法で行なった場合積層中にゲル化が進行して良好な製品が作りたいためと考えられる。弾性率には引張りの場合にも、曲げの場合にも樹脂の種類との交互作用で現われており、注型法のほうがいずれの場合も約 400kg/mm^2 程度高く、その影響はフタル酸系ポリエステルのほうに著しい。

3・1・5 硬化速度(HR) この影響は一般に交互作用で現われることが多く、硬化速度の遅いほうが機械的性質に良好な結果を与える。曲げ強度、疲労強度で示されるように、イソフタル酸系ポリエステルのようにその影響は著しい。

3・1・6 充てん剤(FI) 充てん剤を入れないほうがよいことは当然であり、充てん剤を入れることにより、後に述べる工程推定の組み合わせを行なったものよりも、引張強度で約35%、曲げ強度で約30%、疲労強度(10⁷回の時間強度)で約15%、引張弾性率で約5%、曲げ弾性率で約10%の減となる。この結果から充てん剤を入れることにより原料価格が低下できるため、疲労強度が問題になる部材または弾性率に支配される部材には、コスト的に考えて充分使用できる場合もあることと思われる。

3・1・7 キュアー(CU) 試験片を製作した後、長時間後実験を行なったので、アフターキュアーと同様な効果になったためか、全然効果が現われてこなかった。

3・1・8 浸漬(DI) すべての機械的性質に効果が現われなかった。もし機械的性質等に影響が認められたとすると、海水中の機械的性質が空気中の機械的性質と変わるといえるが、影響が認められないとて、この実験は海水で行なったのでないで、海水中の機械的性質が空気中と同じといえない。もし湿式で行なえば相当の影響があるのではないかと考えられる。

3・2 工程推定

各因子の水準の組み合わせ方によって、そのときの工程推定に大きな差が現われる。各因子の主効果あるいは交互作用が大きなものをよいとし、これらを組み

Table V. The estimates of mechanical properties for optimum production processes.

		Combinations	Estimates of process (kg/mm ²)
Tensile	Strength	KR ₀ GW ₀ GF ₀ MM ₁ HR ₀ FI ₀	46.44±3.47
	Modulus	KR ₀ GW ₀ GF ₀ MM ₁ HR ₁ FI ₀	2 873±182
Flexural	Strength	KR ₁ GW ₀ GF ₀ MM ₀ HR ₁ FI ₀	53.93±4.23
	Modulus	KR ₀ GW ₀ GF ₀ MM ₁ HR ₀ FI ₀	2 467±174
Fatigue strength (10 ⁷)		KR ₁ GW ₀ GF ₀ MM ₀ HR ₁ FI ₀	12.09±0.32

Table VI. The fatigue strength vs. flexural strength of each samples.

Column No.	Fatigue strength (%)
	Flexural strength
1	21.8
2	27.5
3	33.1
4	20.5
5	22.6
6	20.3
7	23.8
8	23.9
9	24.3
10	17.9
11	25.4
12	20.6
13	23.0
14	22.0
15	25.3
16	28.9

合わせると Table V のようになる。

これを見てもわかるように、実験に使用した水準のみを使用しても、かなりの機械的に良好な製品が得られることがわかる。

3・3 疲労強度について

疲労強度(10⁷回における時間強度をいい、以下このことをさす)と曲げ強度の比を採れば Table VI のようになる。この表には載せてないが、曲げ強度を最大にする水準の組み合わせによる工程推定の結果からもこの値は約22.4%となる。これらからわかるように、疲労強度と曲げ強度の比は、ほぼ20±5%の範囲にはいつている。すでに著者らが、熱可塑性樹脂について実験を行なった結果、この値が20±5%の範囲にはいることを述べたが、これら熱硬化性樹脂についてもこの範囲にはいることがわかる。

4 結 言

以上のように、その目的用途に応じて適当な樹脂の種類、成型方法、硬化速度などは異なるが、共通していえることは下記のとおりである。

- (1) 曲げのかかる部材、特に繰返し荷重のかかる部

材には、イソフタル酸系ポリエステルを用いるほうがよい。

(2) ガラス繊維の織り方は平織よりも朱子織のほうがよい。

(3) ボラン処理を施したものは施さないものよりもよい。

(4) 充てん剤を入れないほうがよい。

(5) 充てん剤と成型方法および樹脂の種類とガラス繊維の処理方法の二つの交互作用は強度に大きな影響を及ぼす。

(6) 樹脂の種類と硬化速度の交互作用は曲げ強度や

疲労強度に対して大きな影響を及ぼす。

(7) 樹脂の種類と成型方法の交互作用は弾性率に影響を及ぼす。

(8) キュアーや浸漬の効果は機械的性質に影響を及ぼさない。

(昭和40年5月19日 日本材料学会第14期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば、強化プラスチック協会・FRP技術データ集 (1962) .
- 2) 黒田寿紀, 小牧和夫, 材料, **14**, 172 (1965).

訂 正

下記論文 (第14巻第142号547ページ) の式中に誤りがありましたので訂正します。

遊離フェライト中に硬質領域が存在する鋼の下降伏点

曾 山 義 朗・多 賀 谷 正 義

$$\text{正 } \sigma = m_p \tau_p = m_p (\tau_f + k_s \alpha_1^{-1/2})$$

(2)

$$\text{誤 } \sigma = m_p \tau_p = (\tau_f + k_s \alpha_1^{-1/2})$$

(2)