ガラス短繊維強化フェノール樹脂複合材の
機械特性に及ぼす成形法の影響*澤田 貴彦^{*1}, 青山 博^{*1}Effect of Molding Process on Mechanical Properties
of Glass Short Fiber/Phenolic Resin CompositeTakahiko SAWADA^{*2} and Hiroshi AOYAMA^{*2} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 312-0034 Japan

Bending strength test were carried out on injection-molded and transfer-molded short glass fiber reinforced phenolic resin composite. The effects of the short fiber content ($V_f=0\%$, 20% , 50%), distribution of fiber orientation on bending strength and elastic modulus were investigated in comparison with molding processes. The bending strength and elastic modulus became higher with increasing fiber content. Increasing rate of bending strength and elastic modulus on injection-molded were higher than transfer-molded. Mechanical properties evaluation diagram was prepared to predict the bending strength and elastic modulus with modified rule of mixtures proposed by Fukuda and Kawata, and Fukuda and Chou. By comparing the predicted elastic modulus and bending strength with experimental results, the validity of the diagram is examined with an maximum uncertainty of 15%.

Key Words: Short Fiber Reinforced Plastic, Molding Process, Mechanical Properties, Fiber Orientation

1. 緒 言

短繊維強化複合材 (SFRP) の弾性係数や強度は、強化繊維の含有率や配向分布に強く依存する。そのため、機械特性、疲労強度、き裂伝ば挙動におよぼす影響について国内外で多くの研究がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかし、いずれも強度あるいは弾性係数のいずれかに着目したものが多く、短繊維含有量や製造方法の影響にわたって研究されたものは少ない。SFRP の破壊挙動は金属材料と異なり、樹脂割れ、繊維の破断や抜けが絡んだ複雑な挙動を示す。従って、SFRP の機械特性に及ぼす各種因子の影響を系統的に把握し、設計者にとって扱い易い機械特性評価法を確立する必要がある。本研究は、SFRP の機械特性評価法を確立することを目的としたものである。本報告では、自動車用部品への適用が期待されているガラス短繊維強化フェノール樹脂複合材料 (以下、GF/Phenol) を対象として、成形法の違いが機械特性に及ぼす影響を明確化するとともに、繊維

長分布および繊維配向度を考慮した複合則⁽²⁾⁻⁽⁴⁾を用いて機械特性評価線図を作成した。

2. 試験片材料および試験方法

GF/Phenol の組成を表 1 に示す。ガラス繊維は日東紡製 CS-6-SK-406 (繊維長 6mm, 繊維径 $10\mu\text{m}$) を用いた。本研究では、ガラス短繊維体積含有率 (以下、 V_f) が 0% , 20% , 50% (以下、 $V_f=0.0, 0.2, 0.5$ と記す) のものを用いた。試験片製作に当たっては、汎用的な射出成形法 (以下、S 品) およびプレス成形法 (以下、P 品) の 2 種類を選択した。S 品の成形条件は、金型温度 $170\sim 190^\circ\text{C}$, シリンダー温度 $75\sim 95^\circ\text{C}$, 射出圧力 80MPa , 硬化時間 20sec , P 品の成形条件は、金型温度 $140\sim 160^\circ\text{C}$, プレス圧力 20MPa , 硬化時間 250sec で

Table 1 Material composition of GF/Phenol

Component	[%]	[%]	[%]
Glass Fiber	0	20	50
Phenolic resin	70~85	55~65	30~35
Phenol	1.0	←	←
Hexamethylene tetramine	3.0	←	←
Rock wool	10~20	←	←
Zinc stearate	1.0~2.0	←	←

* 原稿受付 2009 年 12 月 18 日。

*¹ 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒312-0034 ひたちなか市堀口 832-2)。

E-mail: takahiko.sawada.dy@hitachi.com

ある。試験片寸法は長さ100mm×幅10mm×板厚4.5mmである。

3. 試験片材料および試験方法

4点曲げ試験で取得した応力-ひずみ曲線を図1に示す。応力-ひずみ曲線は、 V_f や成形法によらず負荷直後は線形的な弾性挙動を示す。やがて弾性限度を超えた直後から、緩やかに上に凸の曲線を描く。破壊直前に至るまで可聴音等は発生せず、最大荷重値に到達直後、試験片は脆性破壊した。いずれも試験片下部の引張側から破壊する様相を示した。

次に4点曲げ強度、および曲げ弾性係数の V_f 依存性を図2、および図3にそれぞれ示す。図中の凡例は、 $V_f=0.0$ (○), 0.2 (△), 0.5 (□) をそれぞれ示しており、黒色がS品、白抜きがP品を示す。また、図中の直線は V_f 毎の平均値を結んだものを表している。図2から、4点曲げ強度は V_f の増加に対して増加傾向を示す。成形法毎に着目すると、P品よりもS品の方が V_f 増加に対する感度がやや高いことが分かる。図3から、曲げ弾性係数は V_f の増加に対して、4点曲げ強度ほど感度は高くなく、ある一定値に収束する傾向がある。特にP品

の場合においてその傾向が顕著となる。本節で取り上げた機械的特性の平均値は、いずれもP品がS品を下回った。その中でも4点曲げ強度において差が顕著に現れた。材料が同一であるという点を鑑みると、材料固有のものではなく、製法の差によって生じる欠陥寸法に依存したと考えられる。

4. 強度分布のワイブル解析

本材料のように強度が製造プロセスに依存する場合、その強度は材料固有のものではなく、材料に含まれる欠陥寸法に依存していると考えられる。ここで、4点曲げ強度試験で得られた破壊強度 $\sigma_{f,AB}$ に対して、最弱リンクモデルから導かれる式(1)の2母数ワイブル分布を仮定し、各試験片ごとのワイブル係数 m 、形状母数 β を推定した。なお、任意の破壊強度 $\sigma_{f,AB}$ に対応する破壊確率 P_f の割り付けは、メジアンランク法により式(2)で行った⁽⁵⁾。

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma_{f,AB}}{\beta}\right)^m\right\} \quad (1)$$

$$P_{fi} = \frac{i - 0.3}{k + 0.4} \quad (2)$$

Fig.1 Relationship between σ_{AB} and ϵ_{AB}

Fig.2 Effect of molding process between $\sigma_{f,AB}$ and V_f Fig.3 Effect of molding process between E_{AB} and V_f

4点曲げ強度のワイブルプロットを図4に示す。いずれの材料も近似直線とのかい離は殆ど無く、ワイブル分布に概ね一致する傾向が得られた。S品は、 $V_f=0.0$ の時 $m=23.0$, $V_f=0.2$ の時 $m=17.2$, $V_f=0.5$ の時 $m=17.9$ となり、 V_f が増大するにつれて m は低下する傾向を示した。これは、破壊起点となる短繊維量の増大によるものと思われる。一方、P品は $V_f=0.0$ の時 $m=12.8$, $V_f=0.2$ の時 $m=9.1$, $V_f=0.5$ の時 $m=33.6$ となり、S品に比べて強度分布のばらつきが大きい。また、 V_f と m の相関もS品ほど明確ではないため、ばらつきの観点からも製造プロセスによる明確な差が現れたことを示唆している。

Fig.4 Weibull plot of 4-point bending strength $\sigma_{f,AB}$

5. 複合則を用いた機械特性評価線図の作成

SFRP の機械特性は、成形法や短繊維含有量に強く依存する。このような材料を、機械設計者が取り扱い易くするためには、材料データベース、および繊維長分布や繊維配向度の効果を考慮した強度、弾性係数等の機械特性評価法が必要である。そこで、縦弾性係数 E_c を表す Fukuda-Kawada の式 (式 (3))^{(1),(2)}、および強度 σ_c を表す Fukuda-Chou の式 (式 (4))^{(3),(4)} を適用し、機械特性評価線図の作成を試みた。

$$E_c = \eta_\theta \eta_\ell E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3)$$

$$\sigma_{f,AB} = \sigma_f \left(1 - \frac{\ell_c}{2\ell}\right) \eta_\theta V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (4)$$

ここで E_f , E_m , V_f はそれぞれ繊維の弾性係数、母材の弾性および繊維の体積含有率を、 σ_f , σ_m , ℓ , ℓ_c はそれぞれ繊維の引張強度、樹脂の引張強度、繊維長、繊維の限界長さを表す。 η_θ は繊維配向を考慮した配向係数を示し、 η_ℓ は繊維長が短いために生じる低下率を示す。試験片長手方向からの繊維配向角度 α を顕微鏡観察により計測し、各サンプルについて図 5 に示す α のヒストグラムを取得した。詳細は文献に譲るが、 α のヒストグラムを用いて配向パラメータ f_p を計算し、 η_θ を求めた⁽²⁾。図 6 は、本実験で得られた曲げ強度 $\sigma_{f,AB}$ を縦軸に、弾性係数 E_{4B} を横軸に取った機械特性分布図を示す。また、Fukuda-Chou の式および Fukuda-Kawada の式を用いて求めた $\sigma_{f,AB}$ の予測値 σ_c および E_{4B} の予測値 E_c を結んだ機械特性評価線を点線で示す。 E_{4B} の予測値は、P 品、S 品のどちらの場合でも実験値と比較的よく合う傾向が得られた。一方、 $\sigma_{f,AB}$ の予測値は P 品の場合で最大 12%、S 品の場合で最大 2% の誤差が認められたが、ばらつきを考慮しても最大で $\pm 15\%$ 以内となった。GF/Phenol 材の強度は Fukuda-Chou の式、弾性係数は Fukuda-Kawada の式を適用すると、両者の相関を精度良く予測可能となる。

6. 結 言

成形法および V_f の異なる GF/Phenol の 4 点曲げ試験の結果、曲げ強度および弾性係数はいずれも成形法および V_f に依存することを明確化した。また、縦弾性係数に Fukuda-Kawada の式、4 点曲げ強度に Fukuda-Chou の式を適用した機械特性評価線図を作成し、最大誤差 $\pm 15\%$ で両者を予測可能となることを示した。

文 献

- (1) M. Kikuchi, T. Koizumi, J. Adachi, Fracture Toughness Measurement of Short-Glass Fiber Reinforced

Fig. 5 Frequency distribution of short fiber orientation for injection-molded GF/Phenol

Fig. 6 Relationship between $\sigma_{f,AB}$ and E_{4B} and diagram for mechanical characterizations.

Thermosetting Resin, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 62, No. 595 (1996), pp. 692-699.

- (2) Y. Sanomura, K. Hayakawa, M. Mizuno, M. Kawamura, Effect of Process Conditions on Young's Modulus and Strength of Extrudate in Short-Fiber-Reinforced Polypropylene, R. et al., *Transaction of the Japan Society of Polymer Processing*, Vol. 18, No. 4, (2006), pp. 293-299.
- (3) H. Fukuda, T. Chou, A Probabilistic theory of the strength of short-fiber composites with variable fiber length and orientation, *Journal of Material Science*, Vol. 17, (1982), pp. 1003-1011.
- (4) K. Tokaji, T. Ogawa, C. Hori, The Distribution of Tensile Strength and Its Simulation in Long-Carbon-Fiber Reinforced Plastic, *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, Vol. 44, No. 505, (1995), pp. 1267-1272.
- (5) K. Matsusue, K. Takahara, R. Hashimoto, Strength Evaluation Test of Hot-pressed Silicon Nitride at Room Temperature, *Yogyo-Kyokai-Shi*, Vol. 90, No. 4, (1982), pp. 168-174.