一方向繊維強化プラスチックの硬化収縮挙動*

船 橋 正 弘**, 池 上 皓 三***

The Shrinkage Behavior of Unidirectional Fiber Reinforced Plastics in the Hardening Process

by Masahiro FUNABASHI and Kozo IKEGAMI

This paper presents the shrinkage behavior of unidirectionally reinforced plastics with glass fibers or carbon fibers in the hardening process. The matrix material is vinyl ester resin. The strains of fibers in the reinforced plastics during the hardening process were measured by strain gauges bonded on the surface. The shrinkage amounts in the hardening process were estimated by the apparent change of the density. The hardening model of fiber reinforced plastics was proposed, including the constraint effect of hardening the resin. The shrinkage strains calculated with the model were compared with the experimental results.

Key Words: Composite Materials, Fiber Reinforced Plastics, Curing, Shrinkage, Residual Stress

1. 緒 言

構造物や機械要素に繊維強化プラスチック（以下、FRP と呼ぶ）が広く利用されており、今後、さらに用途の拡大が見込まれる。FRP に多用される熱硬化性樹脂は、液体からゲル状、そして固体へと変化する過程において体積変化と力学的性質の変化を示す。このため硬化した樹脂内部に内部応力が発生し、FRP 成形品では、き裂の発生⁽¹⁾、ひけによる寸法誤差の問題⁽²⁾が生じることが知られている。これまで、FRP に対して、繊維と樹脂の異方性収縮から内部応力を求めた例⁽³⁾、繊維と樹脂の熱変形に加えて樹脂の粘弾性挙動を考慮して内部応力を求めた例⁽⁴⁾などがあるが、内部応力の発生時期、生成過程を明らかにした研究はほとんど見当たらない。内部応力の発生原因を明らかにするためには、樹脂の硬化過程での挙動を知ることが必要である。そこで、本研究では、FRP 成形品に発生する内部応力および硬化収縮量を予測するための基礎資

料を得るため、FRP のうち特に、長繊維を一方に配向した一方向繊維強化プラスチックをとりあげ、この硬化過程における硬化収縮の挙動を調べた。まず、一方向繊維強化プラスチック試験片を用いて、試験片内部の樹脂の体積変化を測定した。次に、これらの測定値を、繊維、樹脂の力学的性質および樹脂だけを硬化させたときの硬化過程での体積変化を用いて表すようなモデルの検討を行った。さらに、測定値と計算値の比較を行い、モデルの妥当性を確かめた。

2. 一方向繊維強化プラスチックの 硬化過程の実験

2・1 硬化条件 一方向繊維強化プラスチックの硬化収縮の実験に用いた試験片（以下、試験片と呼ぶ）の、ガラス繊維、カーボン繊維およびビニルエステル樹脂の物性値を表 1 に示す。樹脂の硬化条件は、樹脂に硬化剤クメンハイドロパーオキシドを混入し室温で約 24 時間硬化させた後に、電気炉を用いて 80°C、5 時間の熱サイクル（以下、キュアリングと呼ぶ）を加え、その後は、炉中で室温まで冷却するものとした。試験片中の繊維に生じたひずみの測定は、繊維の一部を樹脂で固め、その部分に抵抗線ひずみゲージを貼付して行った。

* 昭和 61 年 6 月 21 日 東北支部秋田地方講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 12 月 25 日。

** 正員、工業技術院繊維高分子材料研究所（〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1-4）。

*** 正員、東京工業大学（〒227 横浜市緑区長津田町 4259）。

2・2 樹脂の体積収縮率 図1に、樹脂が自由収縮するときの体積収縮率 $\beta(t)$ の時間に対する変化を示す。図中の○印が測定値で、この結果は、

$$\beta(t) = -B_1[1 - \exp\{-b(t-t_0)\}] - B_2 \dots\dots(1)$$

でほぼ表せる。ここで、 B_1, B_2, b, t_0 は定数で、本実験の場合

$$B_1 = 0.0205$$

$$B_2 = 0.00333$$

$$b = 0.0025 \quad 1/\text{min}$$

$$t_0 = 250 \quad \text{min}$$

である。図中の実線は、式(1)による計算結果である。

キュアリング中には、樹脂が熱膨張するので、体積収縮率の測定が困難である。そこで、体積収縮率はキュアリング直前とキュアリング後でのみ考え、両者の体積収縮率の差を β_c とする。ここで、樹脂の自由収縮によって生じるひずみは、体積収縮率の1/3とし、キュアリングまでのひずみ $\epsilon_0(t)$ は、

$$\epsilon_0(t) = \beta(t)/3 \dots\dots(2)$$

で、またキュアリング中に生じるひずみの変化量 ϵ_c は、

$$\epsilon_c = \beta_c/3 \dots\dots(3)$$

表1 実験に用いた材料物性値

	Matrix	Fiber	
	RIPOXY R-802	E GLASS	TORAYCA T-400
Young's modulus E GPa	3.50	72.5	225
Shear modulus G GPa	1.29	29.5	132
Poisson's ratio ν	0.36	0.23	0.30
Density ρ g/cm ³	1.134	2.54	1.78
Coefficient of thermal expansion $\alpha \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$	54	5.0	-1.0

図1 樹脂の体積収縮率（キュアリングまで）

で表す。

2・3 硬化過程中に繊維に生じるひずみ 図2に硬化実験に用いた一方向繊維強化プラスチックの試験片形状、寸法および座標を示す。試験片の厚さは5 mm、繊維の体積含有率は、約30%である。これを長方形金型内で硬化させ、試験片に貼付したひずみゲージで、硬化過程中的ひずみの変化を測定した。金型の内面には離型剤を塗布した。

図3と図4に、ガラス繊維を用いた試験片を硬化させたとき各位置で生じたひずみの測定結果を示す。図中の●印などがキュアリング直前の測定値、○印などがキュアリング終了後の値を表す。繊維方向ひずみ、繊維直角方向ひずみともに、どの測定位置でも、ほぼ一様にキュアリングまでに圧縮ひずみを生じ、キュアリングによりさらに圧縮ひずみが増加している。図中の実線と破線は、それぞれキュアリング前と後の測定値の平均値を表す。

図5と図6に、ガラス繊維を用いた試験片内部の繊維に生じるひずみの時間に対する変化を示す。試験片は、繊維に張力を加えたまま硬化させた。図5は、キュアリングまでのひずみの変化を表す。横軸は、樹脂に硬化剤を加えてからの時間、縦軸は、繊維のみの状態を零とした繊維方向ひずみである。 t が250分近傍までは、一度、引張ひずみを生じているが、その後は、一様に圧縮ひずみを生じ、値が増加している。図6は、キュアリング中のひずみの変化を表す。横軸は、キュアリング開始時刻からの時間である。縦軸は、キュアリング終了後に、キュアリングと同じ熱サイクルを与え、そのとき変化したひずみを、熱ひずみと仮定し、測定値からこの熱ひずみを差し引いたひずみ ϵ_L を表す。 t が30分近傍までは、ひずみの値が急激に圧

図2 金型の寸法と座標

縮方向へ増加し、その後は、キュアリング終了後まで、ほぼ一様の値を示している。

2・4 硬化過程中的収縮量 一方向繊維強化プラスチックの硬化収縮量を、繊維の体積含有率を変えて調べた。硬化収縮により試験片内部の繊維に生じるひずみは、樹脂の自由収縮量に比べて、十分小さいと考えられるので、一方向繊維強化プラスチックの硬化収縮量は、樹脂だけの体積変化によって生じると仮定す

る。すなわち、試験片の硬化収縮量は、樹脂だけのみかけの密度変化を求めて評価した。キュアリング直前およびキュアリング後の試験片の重量を空气中、水中でそれぞれ測定し、樹脂のみかけの密度 ρ_m を、

$$\rho_m = \frac{W_a - W_f}{(W_a - W_w)/\rho_w - W_f/\rho_f} \quad \text{.....(4)}$$

で計算した。ここで、 W_a , W_w はそれぞれ試験片の空

図 3 繊維に生じるひずみの分布 (1)

図 5 繊維に生じるひずみ (キュアリングまで)

図 4 繊維に生じるひずみの分布 (2)

図 6 繊維に生じるひずみ (キュアリング中)

気中、水中での重量、 W_f はあらかじめ測定しておいた試験片中の繊維の重量、 ρ_w, ρ_f は水および繊維の密度を表す。

図7と図8に、それぞれガラス繊維、カーボン繊維の試験片に対し、繊維含有率 V_f を変えたときに、式(4)から求めた樹脂の密度の測定結果を示す。図中の○印、●印がそれぞれキュアリング直前、キュアリング後の測定値を表す。

3. 一方向繊維強化プラスチックの硬化収縮モデル

一方向繊維強化プラスチックの硬化過程において、内部の繊維に生じるひずみを、キュアリングの前後に分けて考察した硬化収縮モデルを用いて定式化した。

図7 樹脂のみかけの密度（ガラス繊維）

図8 樹脂のみかけの密度（カーボン繊維）

3.1 キュアリング前の硬化収縮モデル キュアリングまでは、樹脂だけが硬化するときの体積収縮（以下、自由収縮と呼ぶ）、硬化過程で繊維に力を加えながら収縮する樹脂の割合（以下、拘束率と呼ぶ）、樹脂が一方方向に拘束を受けたとき、その方向に収縮する硬化収縮量の割合（以下、拘束収縮比と呼ぶ）の時間変化を考えた図9のモデルを用いる。ここで、拘束率と拘束収縮比をそれぞれ時間の関数として $\alpha(t)$ 、および $r(t)$ で表す。

すなわち、図9(a)のように、ある時刻 η において、単位断面の繊維に断面 $\alpha(t)$ の樹脂①が接着されているとき、微小時間 Δt 後には、図9(b)のように、あらたに断面 $\Delta\alpha$ の樹脂②が繊維に接着されると仮定する。この②の樹脂に生じる繊維方向ひずみは、これ以後、繊維に生じるひずみと等しいと仮定する。このとき、樹脂は繊維に力を加えながら収縮するが、繊維方向の収縮率は、樹脂の自由収縮率に拘束収縮比を掛けた値とする。例えば、時刻 η から時刻 t まで、樹脂が繊維に力を加えながら収縮するときに生じる樹脂の収縮ひずみは、

$$\int_{\eta}^t r(x) \dot{\epsilon}_b(x) dx \quad \dots\dots\dots (5)$$

とする。ここで、 $r(x)$ は、拘束収縮比、 $\epsilon_b(x)$ は、樹脂の自由収縮によるひずみを表す。また、関数の上のドットは時間による微分を表す。いま、時刻 $t(>\eta)$ に繊維に生じるひずみを $\epsilon_f(t)$ とすると、時刻 η から時刻 t までに、図9(b)の②の樹脂が繊維の拘束を受けるときと受けないときに生ずるひずみの差は、式(5)を用いて、

$$\epsilon_f(t) - \epsilon_f(\eta) - \int_{\eta}^t r(x) \dot{\epsilon}_b(x) dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表される。②の樹脂は、時刻 η までは繊維に拘束を受けずに収縮するので、時刻 t_0 から時刻 t までに、繊維に拘束されている樹脂が繊維に加えた力は式(5)に

図9 キュアリング前の硬化収縮モデル

樹脂の断面積 $\Delta\alpha$ と縦弾性係数 E_m を掛けた値

$$\Delta\alpha E_m \left\{ \varepsilon_f(t) - \varepsilon_f(\eta) - \int_{\eta}^t r(x) \dot{\varepsilon}_b(x) dx \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

を、 t_0 から t まで積分した値となる。繊維に生じている張力(圧縮力)は、繊維の断面積を1としたので繊維に生じているひずみ $\varepsilon_f(t)$ と繊維の縦弾性係数 E_f との積となる。いま、 $\Delta\alpha = \dot{\alpha}(\eta)\Delta\eta$ とし、また、繊維方向の外力が作用していないとすると、繊維方向の力のつりあいから、

$$\varepsilon_f(t)E_f + \int_{t_0}^t \dot{\alpha}(\eta)E_m \left\{ \varepsilon_f(t) - \varepsilon_f(\eta) - \int_{\eta}^t r(x) \dot{\varepsilon}_b(x) dx \right\} d\eta = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。積分下限 t_0 は樹脂が力学的変化をはじめる時刻とする。式(8)の被積分項を変形すると、

$$\varepsilon_f(t)E_f + \int_{t_0}^t \dot{\alpha}(\eta)E_m \int_{\eta}^t \{ \dot{\varepsilon}_f(x) - r(x) \dot{\varepsilon}_b(x) \} dx d\eta = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

が得られ、さらに、部分積分を行って、

$$\varepsilon_f(t)E_f + \left[\alpha(\eta)E_m \int_{\eta}^t \{ \dot{\varepsilon}_f(x) - r(x) \dot{\varepsilon}_b(x) \} dx \right]_{t_0}^t + \int_{t_0}^t \alpha(\eta)E_m \{ \dot{\varepsilon}_f(\eta) - r(\eta) \dot{\varepsilon}_b(\eta) \} d\eta = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

が導かれる。 $\alpha(t_0)=0$ より、式(10)の第2項は、零となるので、

$$\varepsilon_f(t)E_f + \int_{t_0}^t \alpha(\eta)E_m \{ \dot{\varepsilon}_f(\eta) - r(\eta) \dot{\varepsilon}_b(\eta) \} d\eta = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。式(11)を時間 t で微分すると、

$$\dot{\varepsilon}_f(t)E_f + \alpha(t)E_m \{ \dot{\varepsilon}_f(t) - r(t) \dot{\varepsilon}_b(t) \} = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

となり、 $\dot{\varepsilon}_f(t)$ に関して解くと、

$$\dot{\varepsilon}_f(t) = \frac{r(t) \dot{\varepsilon}_b(t) \alpha(t)}{E_f/E_m + \alpha(t)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

さらに時間 t で積分して、

$$\varepsilon_f(t) = \int_{t_0}^t \frac{r(x) \dot{\varepsilon}_b(x) \alpha(x)}{E_f/E_m + \alpha(x)} dx \quad \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。ただし、 $\varepsilon_f(t_0)=0$ より、式(14)の積分定数は零とした。

3.2 キュアリング中の硬化収縮モデル キュアリング中には、樹脂の自由収縮、拘束率のキュアリング前後の変化量と温度差による熱変形を考慮した図10のモデルを用いた。すなわち、キュアリング前には、図10(a)のように単位断面積の繊維に断面積 α_B の樹脂①が接着されており、残りの断面積 $(\alpha_A - \alpha_B)$ の樹脂②は繊維に力学的影響を与えないとする。ここで α_A, α_B はそれぞれキュアリング後およびキュアリング

直前の拘束率を表す。キュアリング中には、図10(b)のように室温とキュアリング温度(80°C)の差 ΔT により、繊維と樹脂は熱膨張し、その状態で、熱膨張した②の樹脂と接着されると考える。さらに、キュアリング終了後、室温に戻る過程においても熱収縮を生じて、図10(c)の状態になる。ここで、キュアリング中に樹脂の自由収縮によって生じるひずみの変化量 ε_c は、図10(a)から図10(b)に移るまでに、そのすべてが生じると仮定する。図10(a)から図10(b)の間に生じるひずみを ε'_f とし、繊維方向に外力が作用していないとすれば、繊維方向の力のつりあいから、

$$(\varepsilon'_f - \alpha_f \Delta T)E_f + (\varepsilon'_f - \varepsilon_c - \alpha_m \Delta T)\alpha_B E_m = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

が得られる。ここで、 α_f, α_m は、繊維および樹脂の線熱膨張係数を表す。式(15)を ε'_f に関して解くと

$$\varepsilon'_f = \frac{(\alpha_f E_f / E_m + \alpha_m \alpha_B) \Delta T + \varepsilon_c \alpha_B}{E_f / E_m + \alpha_B} \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。また、図10(a)から図10(b)の間に②の樹脂に生じるひずみを ε'_m とすると、

$$\varepsilon'_m = \alpha_m \Delta T + \varepsilon_c \quad \dots\dots\dots (17)$$

と表される。図10(b)の状態では、②の樹脂が繊維と接着されると仮定すると、室温で、 $(\varepsilon'_m + \varepsilon'_f)$ のひずみを②の樹脂に与えたのと同じ状態であると考えられる。したがって、図10(a)から図10(c)の間に繊維に生じたひずみを ε_f^c とすると、繊維、①の樹脂、②の樹脂に生じる力は、それぞれ、

$$\varepsilon_f^c E_f \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$(\varepsilon_f^c - \varepsilon_c) \alpha_B E_m \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$(\varepsilon_f^c + \varepsilon'_m - \varepsilon'_f) (\alpha_A - \alpha_B) E_m \quad \dots\dots\dots (20)$$

と表される。繊維方向に外力が作用していないとすると繊維方向の力のつりあいから、これらの合力は零となるので、式(18)から式(20)を用いて、

$$\varepsilon_f^c E_f + (\varepsilon_f^c - \varepsilon_c) \alpha_B E_m + (\varepsilon_f^c + \varepsilon'_m - \varepsilon'_f) (\alpha_A - \alpha_B) E_m = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

図10 キュアリング中の硬化収縮モデル

と表せる。式(21)を ϵ_f^c に関して解くと、

$$\epsilon_f^c = \frac{1}{E_f/E_m + \alpha_A} \{ \epsilon_c \alpha_B + (\epsilon_m' - \epsilon_f') (\alpha_A - \alpha_B) \} \quad \dots\dots\dots (22)$$

が得られる。さらに、式(22)に、式(16)と式(17)を代入すると、

$$\epsilon_f^c = \frac{1}{E_f/E_m + \alpha_A} \left[(\alpha_A - \alpha_m) \Delta T \right. \\ \left. \times \frac{(\alpha_A - \alpha_B)}{1 + \alpha_B E_m/E_f} \left\{ 2\alpha_B - \alpha_A + \frac{\alpha_B(\alpha_A - \alpha_B)}{E_f/E_m + \alpha_A} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。

3.3 拘束率 図11に拘束率の定義に用いたモデルを示す。図11(a)のように、一方向繊維強化プラスチックに対して、繊維の一端が固定された状態を考える。繊維の断面積を A_f 、縦弾性係数を E_f とし、繊維に張力 W を加えたときに繊維に生じる繊維方向ひずみを ϵ_w^0 とすると、

$$W = \epsilon_w^0 A_f E_f \quad \dots\dots\dots (24)$$

の関係がある。

次に、図11(b)のように、図11(a)と同じ繊維に断面積 A_m 、縦弾性係数 E_m の樹脂が接着された状態を考える。この状態で、繊維に張力 W を加えたときに繊維と樹脂に生じる繊維方向ひずみがともに ϵ_w であるとする、

$$W = \epsilon_w (A_f E_f + A_m E_m) \quad \dots\dots\dots (25)$$

の関係がある。式(24)と式(25)より張力 W を消去すると、

$$\frac{A_m}{A_f} = \frac{E_f}{E_m} \left[\frac{\epsilon_w^0}{\epsilon_w} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (26)$$

を得る。

いま、樹脂に硬化剤を混入してから時間 t を考え、樹脂の断面積 A_m および、ひずみ ϵ_w を時間 t の

関数 $A_m(t)$ 、 $\epsilon_w(t)$ と表す。このとき、樹脂と断面積 $A_m(t)$ と繊維の断面積 A_f との比 α は、

$$\alpha(t) = \frac{A_m(t)}{A_f} = \frac{E_f}{E_m} \left[\frac{\epsilon_w^0}{\epsilon_w(t)} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (27)$$

と表される。ここで、 $\alpha(t)$ と表した断面積比を樹脂の繊維に対する拘束率と定義する。

3.4 拘束収縮比 硬化過程中的樹脂はゲル状であるので、樹脂の硬化収縮をある方向に対して拘束すると、拘束した方向の自由収縮量のうち、拘束に逆らって収縮するのは一部分であり、残りの収縮は、拘束方向と直角に生じると考えられる。この拘束に逆らって収縮する割合を拘束収縮比と呼び $r(t)$ で表す。前節の拘束率は、樹脂が繊維に与える力学的影響の割合であるから、拘束収縮比はキュアリング終了後の拘束率 α_A に対する、硬化過程中的拘束率 $\alpha(t)$ の比に比例すると考え、キュアリングまでの拘束収縮比 $r(t)$ を拘束率を用いて、

$$r(t) = \frac{\alpha(t)}{R\alpha_A} \quad \dots\dots\dots (28)$$

で表す。ここで、 R は比例定数である。

4. 実験結果との比較

4.1 拘束率 拘束率の測定には、樹脂を含浸させた繊維を試験片として用い、張力は、繊維に一定の重さのおもりをつり下げることにより与えた。拘束率は、おもりをつり下げたとき繊維に生じたひずみ $\epsilon_w(t)$ を測定し、式(27)を用いて求めた。図12にガラス繊維の試験片に対する $\epsilon_w(t)$ の測定結果を示す。図中の○印が測定値である。図中の実線は拘束率を、

$$\alpha(t) = \alpha_B [1 - \exp\{-2b(t - t_0)\}] \quad \dots\dots\dots (29)$$

によって表し、式(27)に代入し、 $\epsilon_w(t)$ を計算した値である。ここで、 α_B 、 b 、 t_0 および ϵ_w^0 の定数は本実験の場合、

$$\begin{aligned} \alpha_B &= 2.75 \\ b &= 0.0025 \quad 1/\text{min} \\ t_0 &= 250 \quad \text{min} \\ \epsilon_w^0 &= 900 \quad \mu \end{aligned}$$

である。図13に、図12から求めた拘束率を示す。図中の○印は、図12の測定値を式(27)に代入して求めた結果である。図中の実線は、実験式(29)による計算結果である。図中の一点鎖線は、 α_B 、破線は、キュアリング後の拘束率、

$$\alpha_A = 4.44$$

を表している。拘束率 $\alpha(t)$ は、 $t=250$ 分から、700分近傍まで急激に変化し、その後は、ほぼ一定の値をとる傾向を示す。また、キュアリングにより、拘束率が

図11 拘束率のモデル

増加することが認められた。

4.2 硬化過程に繊維に生じるひずみ 硬化収縮中に繊維に生じているひずみ $\varepsilon_f(t)$ を計算するため式(12)に式(2), 式(28), 式(29)などを代入すると,

$$\begin{aligned} \varepsilon_f(t) = & \frac{\alpha_B B_1}{3R\alpha_A} (H^3 - 1) - \frac{\alpha_B B_1}{R\alpha_A} \\ & \times \left(\frac{E_f}{\alpha_B E_m} - 1 \right) (H - 1) - \frac{\alpha_B B_1}{2DR\alpha_A} \\ & \times \left(\frac{E_f}{\alpha_B E_m} \right)^2 \ln \left| \frac{(H-D)(1+D)}{(H+D)(1-D)} \right| \\ & \begin{cases} H = \exp\{-b(t-t_0)\} \\ D = [1 + E_f/\alpha_B E_m]^{1/2} \end{cases} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (30)$$

を得る。式(30)を適用したときの計算結果の例を図5の実線で示してある。ここで、定数は、表1の値と、

$$\begin{aligned} \alpha_A &= 4.44 \\ \alpha_B &= 2.75 \\ \Delta T &= 60 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \varepsilon_c &= -3100 \text{ } \mu \end{aligned}$$

を用いた。計算値は、キュアリング後の測定値 ($t=1200$ 分近傍) とほぼ一致している。

4.3 樹脂のみかけの密度 一方向繊維強化プラスチックの硬化過程における体積変化が、樹脂だけの体積収縮によって生じると仮定して、樹脂のみかけの体積収縮を拘束率と樹脂の自由収縮によって表した。すなわち、キュアリングまでの樹脂のみかけの体積収縮率 β_B とキュアリング後の樹脂のみかけの体積収縮率 β_A を、それぞれ、

$$\beta_B = m\alpha_A\beta_t \dots\dots\dots (31)$$

$$\beta_A = n\alpha_A\beta_c + \beta_B \dots\dots\dots (32)$$

と表した。ここで、 β_t はキュアリングまでに樹脂が自由収縮したときの体積収縮率、 β_c はキュアリング中に樹脂が自由収縮したときの体積収縮率の変化量を表す。また、樹脂の繊維直角方向の収縮量を実験的に得ることが困難であったため、樹脂のみかけの体積収縮率は、硬化終了後の拘束率に比例すると仮定し、キュアリングまで、キュアリング中に対し、それぞれ比例定数 m, n を用いて表した。一方、樹脂のみかけの体積収縮率を β_m とすると、樹脂のみかけの密度 ρ_m との関係は、樹脂の液体のときの密度 ρ_0 を用いて、

$$\rho_m = \frac{\rho_0}{1 + \beta_m} \dots\dots\dots (33)$$

と表される。ガラス繊維、カーボン繊維の試験片に対し式(31)から式(33)を用いた計算結果の例を図7, 図8の図中に示した。図中の実線が β_B の計算値、一点鎖線が β_A の計算値を表している。本実験では、

$$\begin{aligned} \beta_t &= -0.0698 \\ m_g &= 0.160 \\ m_c &= 0.154 \\ n_g &= 0.296 \\ n_c &= 0.375 \end{aligned}$$

の定数を用いた。ここで、添字 g はガラス繊維、添字 c はカーボン繊維を表す。いずれの繊維でも計算値は、測定値の傾向をよく表している。

5. 結 言

熱硬化性樹脂を用いた一方向繊維強化プラスチックをとりあげ、樹脂の硬化過程の体積収縮挙動を調べ

図 12 張力を加えたとき繊維に生じるひずみ

図 13 拘束率

た。まず、ガラス繊維およびカーボン繊維にビニルエステル樹脂を用いた試験片に対し、繊維に生じるひずみと体積変化の測定を行った。次に、繊維に生じるひずみと樹脂の体積変化を表すモデルを考察した。さらに、測定値と計算値の比較を行い、モデルの妥当性を確かめた。以下の結論が得られた。

(1) 一方向繊維強化プラスチック内部の繊維には、キュアリングまでに圧縮ひずみが生じ、キュアリングにより、そのひずみはさらに増加する。

(2) 樹脂の繊維に対する拘束率は、時間とともに増加し、キュアリングまでにほぼ一定の値になる。キュアリングにより拘束率はさらに増加する。

(3) 樹脂だけの体積収縮と拘束率に拘束収縮比を加えて、硬化過程に試験片内部の繊維に生じるひずみを定式化することができた。

(4) 一方向繊維強化プラスチック内部の樹脂のみかけの密度を、種々の繊維含有率に対して、拘束率を用いて定式化することができた。

文 献

- (1) 白鳥・ほか3名, 機論, 40-340 (昭49), 3298.
- (2) 杉林・ほか3名, 機論, 47-416, C (昭56), 466.
- (3) 宮崎・ほか2名, 機論, 48-436, A (昭57), 1585.
- (4) Weitsman, Y., *J. Appl. Mech.*, 46 (1979), 563.