

I - 604

界面の時間依存性を考慮した繊維複合材料の力学挙動

山梨大学工学部 正 員 平島 健一
山梨大学大学院 学生員 ○橋詰 良太

1. はじめに

本研究では、一方向に強化した繊維複合材料の粘弾性界面に、圧縮力・曲げ・ねじれ等によりせん断応力が生じたときの円柱状繊維(fiber)に関する軸方向有効せん断弾性係数およびクリープ・コンプライアンスの理論式を導き、代表的な計算を実施し、複合材料の力学挙動を定量的に解析することを試みたものである。

単軸応力を受ける粘弾性物質の挙動は弾性要素と粘性要素の組み合わせから成るモデルの挙動によって評価することが可能である。解析は、通常よく用いられる Maxwell, Kelvin, および Standardモデルを用いて、粘弾性界面をもった一方向強化繊維複合材料をモデル化した構成方程式を導く。なお, Standardモデルから、それに使われている力学定数を特殊化することによって MaxwellモデルまたはKelvin モデルに帰着させることが可能である。

ここで取り扱う複合材料の性質は界面厚に左右されるが、界面厚の厚さによってどのような影響があるかを定量的に解明することが、本論文の目的の一つである。なお、この種の問題はHashin(1991年)により、Maxwellモデルとした研究が発表されている。

2. 繊維複合材料のモデル化

図-1は、繊維複合材料の単位要素モデルの断面図であり、円柱の fiberとそれを取りまくmatrix, さらに、fiberとmatrixの間の粘弾性界面から成っているものとする。

図-2に示すように、Kelvinモデルはコイルばねとダッシュポットとが並列につながっているモデルである。粘弾性材料をKelvinモデルとしたときの構成方程式は次式で与えられる。

$$s_{kl} = G_i \cdot \varepsilon_{kl} + \eta_i \cdot \dot{\varepsilon}_{kl} \dots\dots\dots (1)$$

図-3に示すように、StandardモデルはKelvinモデルにさらに、ばねが直列につながったモデルであり、その場合の構成方程式は次のようになる。

$$(G_i + G_i') \cdot s_{kl} + \eta_i \cdot \dot{s}_{kl} = G_i G_i' \cdot \varepsilon + G_i' \eta_i \cdot \dot{\varepsilon} \dots\dots\dots (2)$$

3. 軸方向有効せん断弾性係数 $G_A^*(t)$ およびクリープ・コンプライアンス $g_A^*(t)$ の計算式

Standardモデルに関する理論式も得られているが、ここでは紙面の都合上、Kelvinモデルを適用した場合の $G_A^*(t)$ の理論式を示すことにすれば、二、三の解析過程によって、最終的に次式となる。

$$G_A^*(t) = G_m [C \cdot H(t) + (D - C) e^{-Ft}] \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに、} C &= C_1 / C_2, \quad C_1 = G_m (2 - v_m - 2v_f) \cdot (G_i + \rho G_f) + G_i G_f (v_m + 2v_f), \\ C_2 &= v_m G_i G_f + (G_i + \rho G_f) \cdot (2 - v_m) G_m, \\ D &= [G_f (v_m + 2v_f) + (2 - v_m - 2v_f) G_m] / [G_f v_m + (2 - v_m) G_m], \\ F &= [G_i G_f v_m + G_m (G_i + \rho G_f) \cdot (2 - v_m)] / [\eta_i \{G_f v_m + G_m (2 - v_m)\}], \\ \rho &= \delta / a. \end{aligned} \right\}$$

$H(t)$:ヘビサイド ステップ関数, G :せん断弾性係数, v :体積率,

(添字) A:軸方向, m:マトリックス, f:繊維, i:界面の特性, *:有効,

同様に、有効クリープ・コンプライアンス $g_A^*(t)$ については次のようになる。

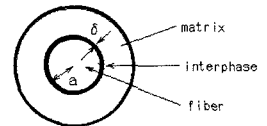


図-1 繊維複合材料の単位要素モデル
 δ :界面厚 (断面図)
 a :繊維の半径

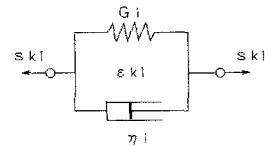


図-2 Kelvinモデル

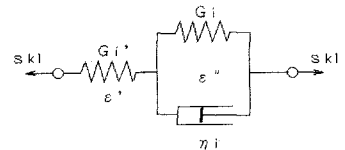


図-3 Standardモデル

s_{kl} :応力
 $\varepsilon', \varepsilon_{kl}, \varepsilon''$:ひずみ
 G_i', G_i :初期せん断弾性係数
 η_i :粘性係数

$$g_A^*(t) = [H(t)/C + (1/D - 1/C) e^{-t/\tau}] / G_m, \dots\dots\dots (4)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} I &= I_1 / I_2, \quad I_1 = G_1 G_f (v_m + 2 v_f) + G_m (G_1 + \rho G_f) \cdot (2 - v_m - 2 v_f), \\ I_2 &= \eta_1 \{ G_f (v_m + 2 v_f) + G_m (2 - v_m - 2 v_f) \}, \end{aligned} \right\}$$

4. 数値計算例

具体的な δ/a の値を与えたときの式(3)および式(4)をグラフ化したものが図-4, 図-5である。ただし, ここで用いる繊維複合材料は Nikalon fibers と BSi matrix から成り, fiberとmatrixの占める体積は同等とする。 $G_f=80.4$ GPa, $G_m=25.7$ GPa は既知であり, 計算の際には $G_1=1.0$ GPaと設定した。

同様に, Standardモデルを適用したときの $G_A^*(t)$, $g_A^*(t)$ をグラフ化したものが図-6および図-7である。計算の際には $\eta_1=4.2$ GPa・sec と設定し, その他の条件は Kelvinモデルのときと同様にした。

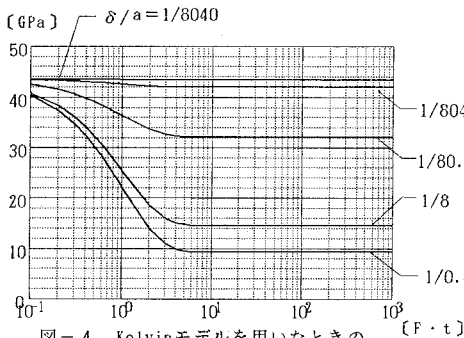


図-4 Kelvinモデルを用いたときの
 $G_A^*(t)$ の時間的変動

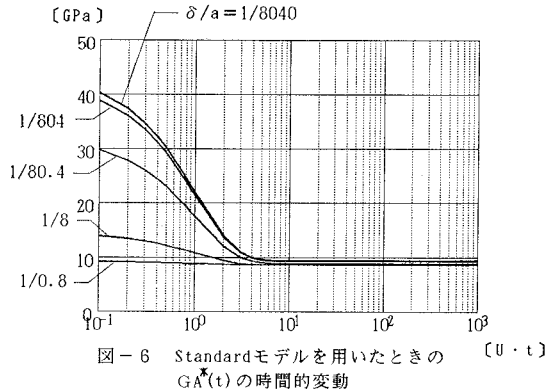


図-6 Standardモデルを用いたときの
 $G_A^*(t)$ の時間的変動

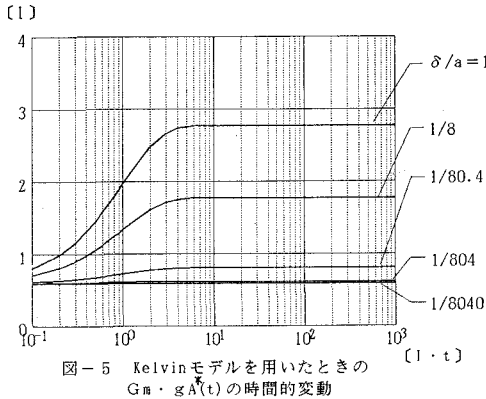


図-5 Kelvinモデルを用いたときの
 $G_m \cdot g_A^*(t)$ の時間的変動

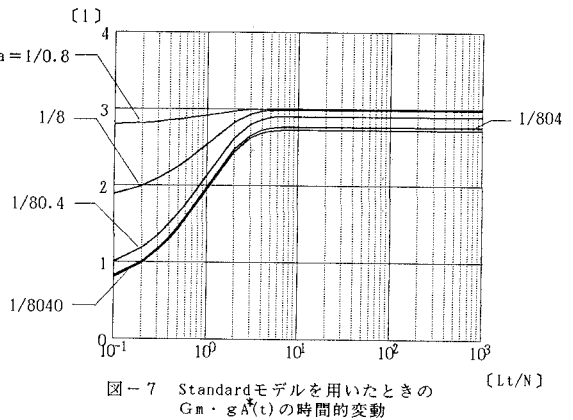


図-7 Standardモデルを用いたときの
 $G_m \cdot g_A^*(t)$ の時間的変動

5. おわりに

本研究では繊維複合材料の粘弾性界面にせん断応力を作用させたときの繊維に関する軸方向有効せん断弾性係数およびクリープ・コンプライアンスを求めた。その結果, 繊維複合材料の時間依存性力学挙動を定量的に解析することが可能になった。数値結果の詳細については学会当日発表する。

《参考文献》

Z.Hashin (1991):「Composite materials with viscoelastic interphase : Creep and relaxation」,
Mechanics of Materials 11 (1991) pp.135-148.