

2-5

一軸配向FRPの粘弾性的性質

京都大学工学部 高分子化学教室 川端孝雄

○相模博士

室関義隆

1. 目的

我々は一軸配向FRPの弾性定数の複合則を明らかにしてきた¹⁾が、粘弾性的性質に関する複合則について、川端はFRPの弾性的性質での複合則における弾性定数を動的弾性定数に置き換えることにより、そのまま粘弾性的性質での複合則に適用できうることを示している²⁾。しかし弾性的性質における複合則として簡易式を用いているため、誤差があり厳密な実験値との比較ができなかった。従って、明らかになった弾性的性質での複合則を用いて粘弾性的性質の複合則に拡張する上記手法の精度を検討するための実験を行った。

2. 理論

応力 σ_{ij} とひずみ ϵ_{ij} は弾性的には次式のような線型関係で表わされる。

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (1)$$

一方、粘弾性的にも同様に応力 σ_{ij}^* とひずみ ϵ_{ij}^* に次のような線型関係を仮定する。

$$\sigma_{ij}^* = E_{ijkl}^* \epsilon_{kl}^* \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (2)$$

ここで E_{ijkl}^* の各要素は複素表示され物質の粘弾性的性質を示す。一軸配向FRPの弾性定数のうち、その複合則の推定の困難な繊維に直角方向の弾性率 E_2 について検討すると、例えば単純直列モデルによる複合則(3)式を仮定したとき粘弾性的性質(4)式が得られる。

$$E_{s1} = \frac{E_p E_f}{V_f E_p + V_p E_f} \quad (3)$$

$$E_{s1}^* = \frac{E_p^* E_f^*}{V_f E_p^* + V_p E_f^*} \quad (4)$$

ここで E_p , E_f は樹脂、繊維の弾性率、 V_p , V_f は各々の体積分率(但し $V_p + V_f = 1$)である。しかし、(3)式の精度が悪いために、われわれは有限要素法による解析から(3)式の修正係数 C_1 すなわち $E_1 = C_1 E_{s1}$ として C_1 を次式のように誘導した。

$$C_1 = \frac{E_1}{E_{s1}} = 1 + \frac{E_p}{E_f} + (0.74 + 0.254 \frac{E_p}{E_f}) V_f - 8.51 \frac{E_p}{E_f} V_f^2 + \exp[12.38 \{ \nu_p - 0.59 + (0.226 - 1.44 \frac{E_p}{E_f}) V_f \}] \quad (5)$$

ここで ν_p は樹脂のポアソン比である。そして(3)式から(4)式を仮定しているのと同様に(5)式において E_p , E_f , ν_p を各々複素表示した(6)式が得られる。

$$C_1^* = \frac{E_1^*}{E_{s1}^*} = 1 + \frac{E_p^*}{E_f^*} + (0.74 + 0.254 \frac{E_p^*}{E_f^*}) V_f - 8.51 \frac{E_p^*}{E_f^*} V_f^2 + \exp[12.38 \{ \nu_p^* - 0.59 + (0.226 - 1.44 \frac{E_p^*}{E_f^*}) V_f \}] \quad (6)$$

ところで一軸配向FRPの粘弾性測定は温度範囲内においては、ガラス繊維の動的性質における虚数部はほとんど無視でき、また樹脂のポアソン比についてもその虚数部は(6)式の計算上ほとんど寄与をせず、そして完全ではないが実験的に虚数部が小さかったために無視すると、FRPを構成する二成分の粘弾性特性は次のようになる。

$$E_f^* = E_f, \quad \nu_f^* = \nu_f, \quad E_p^* = E_p + j E_p'', \quad \nu_p^* = \nu_p \quad (7)$$

すると(6)式は(8)式となる。

$$C_1 = \frac{E_1}{E_{s1}} = 1 + \frac{E_p}{E_f} + (0.74 + 0.254 \frac{E_p}{E_f}) V_f - 8.51 \frac{E_p}{E_f} V_f^2 + \exp \left[12.38 \{ \nu_p - 0.59 + (0.226 - 1.44 \frac{E_p}{E_f}) V_f \} \cos(17.83 \frac{E_p}{E_f} V_f) \right. \\ \left. + j \left[\frac{E_p}{E_f} + 0.254 \frac{E_p}{E_f} V_f - 8.51 \frac{E_p}{E_f} V_f^2 - \exp \left[12.38 \{ \nu_p - 0.59 + (0.226 - 1.44 \frac{E_p}{E_f}) V_f \} \sin(17.83 \frac{E_p}{E_f} V_f) \right] \right] \right] \quad (8)$$

すなわち、FRPの粘弾性的性質はそれを構成している樹脂の粘弾性的性質のみの影響を(8)式によって受けることになる。

3. 実験

実験に用いた一軸配向FRPの繊維と樹脂の種類、弾性定数の実験値、およびその測定方法を次に示す。

繊維(ガラス繊維)

E_f ; $74.6 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 引張り試験

樹脂(エポキシ樹脂, エピコート 828)

硬化剤 BF₃-モノエチルアミン錯体 3phr

硬化条件 120°C, 3hr アフタキュア 180°C, 1hr

E_p ; 長さ 40mm 巾 5mm 厚み 1mm の板の強制振動法

ν_p ; 0.377 ひずみゲージによる実測(但し 22°C)

FRP

上記繊維と樹脂を上記樹脂と同条件で硬化させ、 E_1 の測定方法は上記樹脂と同様

図1に10cpsでのエポキシ樹脂の複素弾性率と繊維に直角方向の複素弾性率の温度特性を示す。破線は樹脂のポアソン比を22°Cにおける実験値 $\nu_p=0.377$ として(8)式より計算し、ゴム状領域における1点鎖線は樹脂がゴム状になったときのポアソン比として $\nu_p=0.5$ を用いて計算したものである。図2はガラス転移温度付近の E_p' と E_p'' の周波数特性である。これらから各々の時間-温度換算則を点検するため、Shift factor を求めたのが図3である。

4. 考察

図1より実験値と(8)式の良好一致は(8)式の妥当性を示している。また(8)式に従えば樹脂とFRPのShift factor は一致するという結論が導かれるが実験はその事実を示している。

文献

- 1) 川端, 相模, 宝関, 小川, 第1回複合材料シンポジウム講演要旨集 p16 (1975)
- 2) S.Kawabata, Proc. Southampton Conference "Structure Solid Mechanics and Engineering Design" Wiley-Interscience, Part 1 p833 (1971)

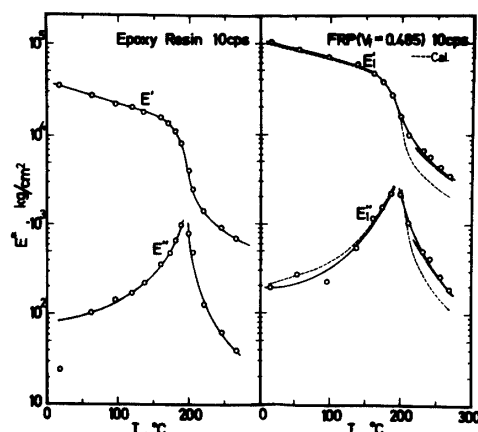


図1

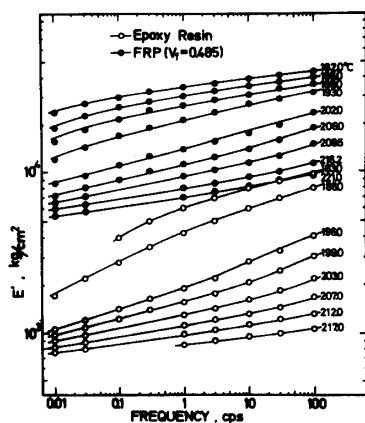


図2

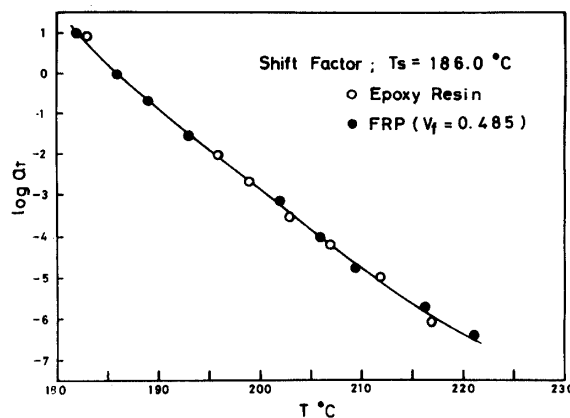


図3