

衝撃を受けるCFRPの粘弾性特性
(粘弾性モデルの同定)

愛媛大学工学部 ○曾我部雄次 都築正之
大阪大学工学部 岸田敬三
村田製作所 大森長門

1. 緒言

繊維強化複合材料は、数々の優れた力学的特長を有しており、多くの分野で有効に利用されている。その理由は、単に比弾性率、比強度に優れているというだけでなく、複合材料の持つ大きな振動減衰能に注目して、これを制振材、あるいは緩衝材として積極的に活用しているからに他ならない。

このような複合材料については、破壊や疲労特性に関する研究はかなり進んでいるが、動力学的特性、特に減衰能に注目した粘弾性的性質を調べた研究例は、極めて少ないのが現状である。

本研究では、平織りクロスを芯型に巻いて成形した繊維方向の異なる2種類のCFRP棒を試料として、縦衝撃試験を行い、波動伝ばのフーリエ周波数解析から、一軸応力状態下での材料の粘弾性特性、粘弾性モデルを同定する。また同様に、ねじり衝撃試験も合わせて行い、せん断応力状態下での粘弾性特性、粘弾性モデルを同定する。

2. 試料

試料は繊維方向の異なる2種類の円筒状CFRP棒であり、その形状および外観をそれぞれ表1、図1に示す。試料I、試料IIは繊維方向が異なるだけで、いずれも同じ平織りクロス(プリプレグ名:東レP06343-05)を芯型に巻いて成形したものである。なお、炭素繊維は、東レ・トレカT300-3000、マトリクスはエポキシ樹脂で、繊維の体積含有率は $V_f = 51\%$ である。

表2は、静的引張り試験から求めた各試料の機械的性質を示したものである。試料Iはぜい性破断し、一方、試料IIはやや延性を示す。なお、表2中の密度 ρ の値は、水中での浮力を利用して測定した。

3. 粘弾性特性の同定法

3.1 単軸(一軸)特性¹⁾

細く一様な、十分長い試料棒の一端に縦衝撃を与え、試料棒上を伝ばするひずみパルスを数ヶ所の地点 x_j ($j=0, 1, 2, \dots, n$) で $\varepsilon_j(t)$ として測定する。材料を粘弾性体と仮定すれば、各ひずみ-時間関係 $\varepsilon_j(t)$ のフーリエ変換 $\bar{\varepsilon}_j(\omega)$ の間には、

$$\bar{\varepsilon}_j(\omega) = \bar{\varepsilon}_0(\omega) \cdot \exp[-(\alpha + i f) x_j] \quad (1)$$

が成立する。ただし、 ω は角周波数である。 α 、 f はそれぞれ減衰係数、速度係数であり、材料の粘弾性特

性の一種である複素コンプライアンス(単軸成分)

$$J(\omega) = J_1(\omega) - i J_2(\omega) = \bar{\varepsilon}(\omega) / \bar{\sigma}(\omega) \quad (2)$$

と次のような関係が成り立っている。

$$\left. \begin{aligned} f^2 - \alpha^2 &= \rho \omega^2 J_1(\omega) \\ 2\alpha f &= \rho \omega^2 J_2(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

J_1, J_2 を決定するには、実験で得た $\bar{\varepsilon}_j(\omega)$ を式(1)に用い、最小二乗法により α, f を求め、その結果を式(3)に代入すればよい。さらに、 J_1, J_2 -周波数関係より、粘弾性モデル、粘弾性定数を定める。

3.2 せん断特性²⁾

せん断特性を同定するには、ねじり衝撃試験を行い、試料棒上表面でのせん断ひずみ波形 $\gamma_j(t)$ を数ヶ所の地点で測定する。以下、同様の解析処理を行い、せん断成分に対する複素コンプライアンス

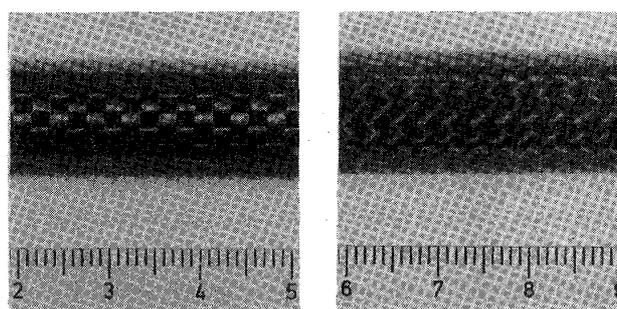
$$J'(\omega) = J'_1(\omega) - i J'_2(\omega) = \bar{\gamma}(\omega) / \bar{\tau}(\omega) \quad (4)$$

を求め、さらに粘弾性モデル(せん断成分)を同定する。

なお、単軸成分と区別するため、せん断成分の諸量には、記号(')を付ける。

表1 試料形状

Specimen	Fiber orientation	Fiber orientation angle with rod axis	Length mm	Outer diameter mm	Inner diameter mm
I		0°, 90°	1430	15.0	7.0
II		±45°	1462	15.0	7.0



(a) 試料I (b) 試料II

図1 試料の外観

表2 試料の機械的性質および密度

Specimen	Young's modulus E GPa	Poisson's ratio ν	Yield stress σ_y MPa	Yield strain ε_y $\mu\text{m/m}$	Rupture strength σ_R MPa	Density ρ kg/m ³
I	51.5	0.18	-	-	185.0	1.41 × 10 ³
II	13.1	0.65	105.0	1.01 × 10 ⁴	164.0	1.37

4. 実験方法

本研究で試料として用いたCFRP棒は比較的減衰能が小さく、1.5m程度の長さ(表1参照)ではひずみ波形があまり変化せず、第3章で示した方法そのままでは、精度の良い実験・解析結果が期待できなかった。そこで、実験方法を以下のように工夫した。

4.1 縦衝撃試験

図2のように、空気圧で加速されたストライカで試料の一端に衝撃を与え、試料上中央部のひずみゲージで往復するひずみ波形を測定し、デジタル・メモリからパーソナル・コンピュータに格納する。図3(a)は試料Iについての実験結果の一例で、ひずみ波形は試料端面で反射する度に位相を反転させている。このように実際のひずみ波は、試料棒を往復しているが、これを仮想的に十分長い棒中を連続的に伝ばしてゆくひずみ波に置き換えて考え、図3(b)のようにパーソナル・コンピュータ内で処理する。以下は第3章で述べた手順で解析し、単軸成分の粘弾性特性を定める。

なお、軸方向と同時に、周方向にもひずみゲージを貼り、動的荷重下でのポアソン比を測定した。

4.2 ねじり衝撃試験

図4のように、弾性入力棒(Al合金:2017-T4)内に蓄えられたねじりトルクを瞬時に解放させることによってねじり応力波を発生させ、試料棒表面上2ヶ所のひずみゲージでせん断ひずみ波形を観測する。図5(a)は、やはり試料Iについての実験結果の一例であるが、ひずみ波形は試料右側端面での反射によって位相を反転させている。試料左側端面での反射は入力棒によって影響されるため、ねじり衝撃試験では波動の1往復分のみ測定して図5(b)のように処理し、解析からせん断成分の粘弾性特性を求める。

5. 結果および考察

5.1 試料I

図6(a)に縦衝撃試験から得られた、試料Iの単軸応力状態に対する複素コンプライアンス J_1 , J_2 を示す。プロットは、 $\epsilon_1(t)$ (図3(a)参照)のピーク値を、300~1200 $\mu\text{m/m}$, パルス幅を50~100 μsec の範囲で変化させた種々の実験条件下での30個の平均値を示し、幅はその際の変動(バラツキ)の範囲を \pm [標準偏差]で表して

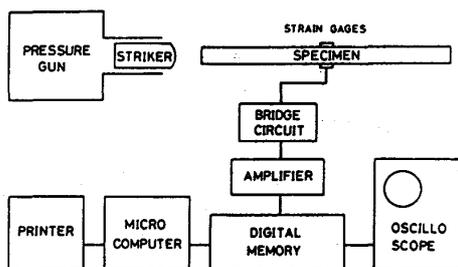
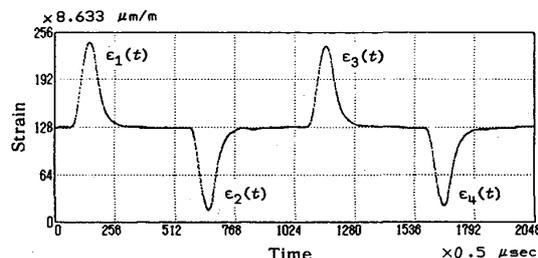
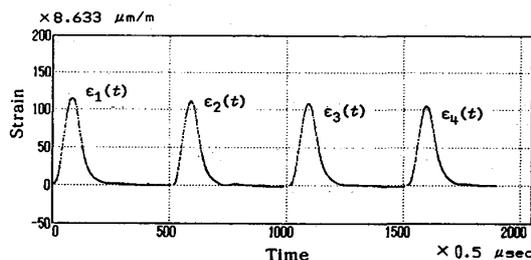


図2 縦衝撃試験方法

いる。一方、図6(b)は、ねじり衝撃試験から得られた試料Iのせん断応力状態に対する複素コンプライアンスである。この場合の実験条件は、 $\gamma_1(t)$ のピーク値



(a) 測定されたひずみ波形



(b) コンピュータ処理後のひずみ波形

図3 縦衝撃試験によるひずみ波形(試料I)

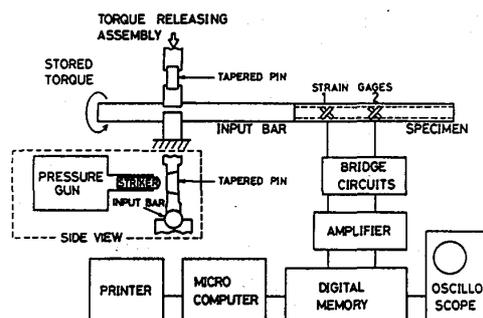
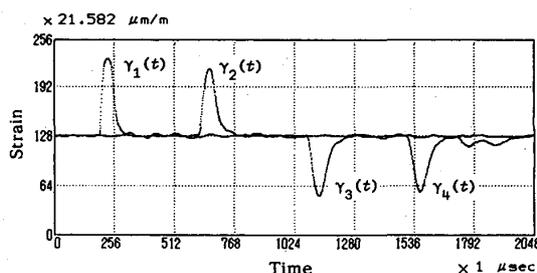
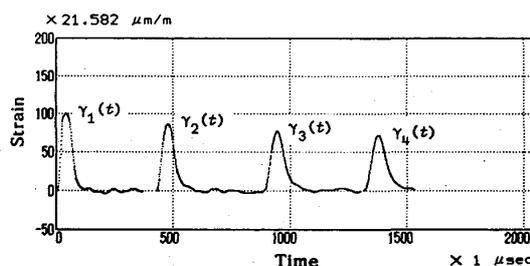


図4 ねじり衝撃試験方法



(a) 測定されたひずみ波形



(b) コンピュータ処理後のひずみ波形

図5 ねじり衝撃試験によるひずみ波形(試料I)

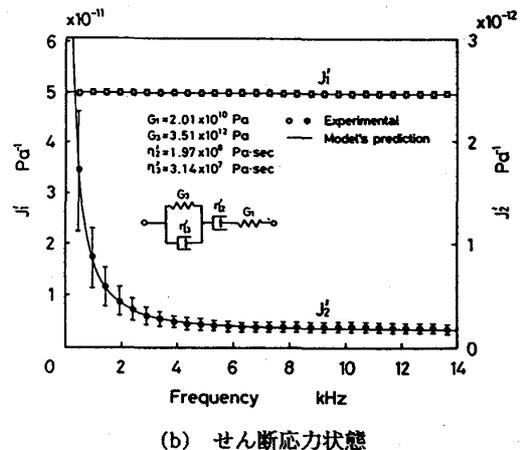
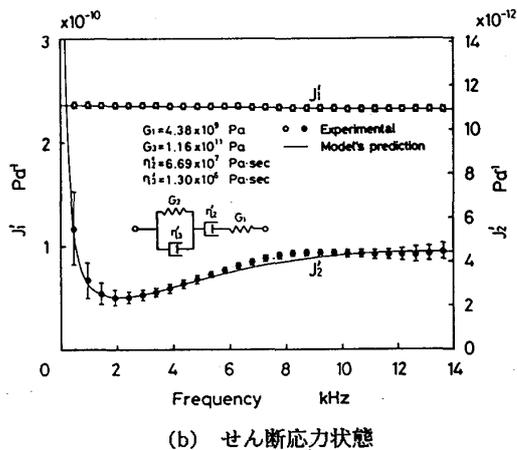
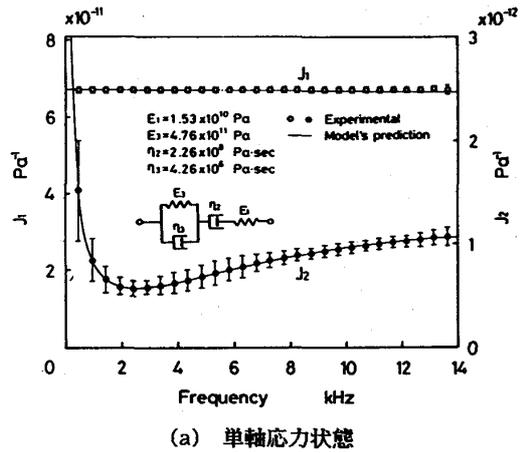
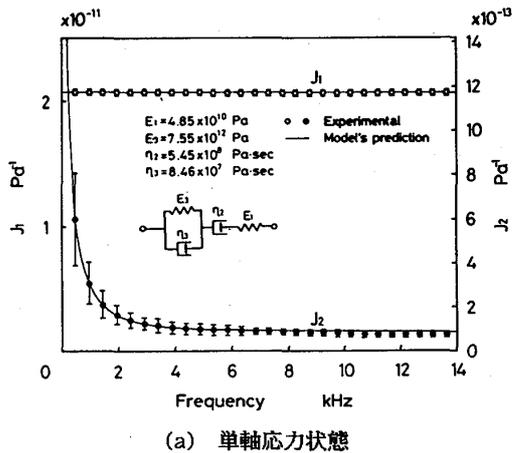


図6 試料Ⅰの複素コンプライアンス

図7 試料Ⅱの複素コンプライアンス

を800~2400 $\mu\text{m/m}$, パルス幅を70~120 μsec の範囲内で変化させている。また、実験数は先と同様30個である。

図6(a), (b)いずれについても、複素コンプライアンスの実験値の傾向を、図中の4要素モデルで近似することが可能である。図6(a), (b)の実験値のそれぞれから、4要素モデルの粘弾性定数(単軸成分 E_1, η_2, E_3, η_3 ; せん断成分 $G_1, \eta_2', G_3, \eta_3'$)を定めると、図6(a), (b)に付記する値となった。このように決定された粘弾性モデルの J_1, J_2 および J_1', J_2' の予測値を図中に実線で示す。図6(a), (b)いずれの場合も、実験値とモデル予測値は良く一致している。

また、縦衝撃試験によって測定した動的ポアソン比は、周波数によらずほぼ一定の値 $\nu=0.2$ となった。これは、静的ポアソン比(0.18)に比べ、やや大きくなっている。

5.2 試料Ⅱ

試料Ⅱの単軸、およびせん断に対する複素コンプライアンスを、それぞれ図7(a), (b)に示す。平均をとる際の実験条件は、試料Ⅰの場合とほぼ同様である。図7(a), (b)両者とも、複素コンプライアンスの実験値の傾向は、やはり4要素モデルで近似できる。モデルの粘弾性定数を求めると図中の値となった。また、動的

ポアソン比は、周波数によらず $\nu=0.6$ の一定値となった。試料Ⅱの場合は、静的な値(0.65)に比べ、やや小さくなっている。

図6(a)と図7(b)の傾向が似ているのは、静水圧成分がほぼ弾性的であると仮定すれば、試料Ⅰの単軸応力状態と試料Ⅱのせん断応力状態とが、CFRPの異方性主軸(繊維方向)から見れば、ほぼ類似した応力状態であるからと思われる。同様の理由により、図6(b)と図7(a)の傾向も良く似ている。

6. 結 言

(1) 本研究で用いたCFRPの動的挙動は、試料Ⅰ、試料Ⅱ両者とも、単軸およびせん断のいずれの応力状態に対しても、4要素モデルが0~14kHzの周波数範囲で有効に適用できる。

(2) 動的ポアソン比は周波数によらず一定値を示し、試料Ⅰでは $\nu=0.2$ 、試料Ⅱでは $\nu=0.6$ の値となる。

今後、材料の異方性を考慮して、単軸特性、せん断特性、ポアソン比等の各粘弾性特性の方向依存性について検討したい。

文 献

- 1) 曾我部・都築, 機論(A), 51-472(1985), 2738.
- 2) 曾我部・ほか2名, 機論(A), 53-486(1987), 348.