

B 1 8 衝撃荷重を受ける MMF 試験片の動的挙動

Dynamic Behavior of a MMF Specimen Subject to Impact Load.

○学 新田 芳郎 (鹿児島大学) 正 有富 正男 (鹿児島大学)
 正 小田 美紀男 (鹿児島大学) 正 戸谷 眞之 (鹿児島大学)

Yoshiro NITTA, Masao ARITOMI, Mikio ODA and Masayuki TOYA
 Kagoshima University, 1-20-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima

Key Word : Energy Release Rate, Fracture Mechanics, Delamination, Impact, End Crack

1. まえがき

図1に示すようなMMF試験片は、静的および動的混合モード破壊靱性値を測定するときに用いられている。しかし、従来の研究⁽¹⁾では、動的混合モード破壊靱性値を測定する場合、はく離部を無視した解析モデルで計算を行い、破壊靱性値を求めている。静的問題でははく離部分を無視したモデルで解析を行っても問題は無いが、動的問題でははく離部に慣性力が作用するので、はく離部を無視して正確な値が測定できるかは疑問が残る。そこで、本研究では、はく離部を考慮して解析を行い、応力拡大係数に及ぼすはく離長さの影響を調べ、はく離部を無視したモデルでの破壊靱性値の測定法の有効性を確かめる。

2. 理論解析

2.1 基礎式 図1に示すような時間的に変動する荷重 $P(t)$ を受けるMMF試験片を考える。はりの支点間距離を L 、幅を上下のはりともに b 、厚さ、ヤング率および密度を、上のはりについては E_1, ρ_1 、下のはりについては E_2, ρ_2 とする。領域①のたわみを w_1 、領域②のたわみを w_2 、領域③のたわみ w_3 をとする。

領域におけるはりの諸量を以下のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} I_i &= \frac{bh_i^3}{12}, A_i = bh_i, m_i = \rho_i A_i, D_i = E_i I_i \\ h &= h_1 + h_2, A = A_1 + A_2, m' = m_1 + m_2 \\ D' &= D + \frac{E_1 h_1 E_2 h_2 b h^2}{4(E_1 h_1 + E_2 h_2)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

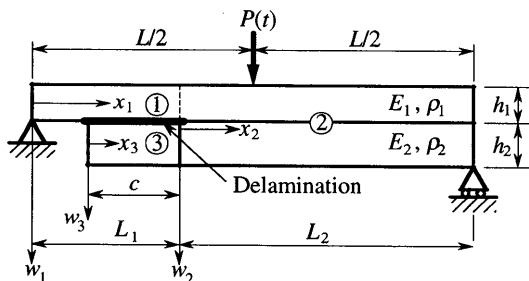


Fig. 1 MMF Specimen

3つの部分のはりの自由振動時の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} D_1 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x_1^4} + m_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} &= 0 \\ D' \frac{\partial^4 w_2}{\partial x_2^4} + m' \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} &= 0 \\ D_2 \frac{\partial^4 w_3}{\partial x_3^4} + m_2 \frac{\partial^2 w_3}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

たわみの一般解は

$$w_i(x_i) = \sum_{n=1}^{\infty} X_{in}(x_i)(B_{1n} \cos p_n t + B_{2n} \sin p_n t) \quad (3)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} X_{in}(x_i) &= C_{i1n}(\sinh \xi_{in} + \sin \xi_{in} x_i) \\ &\quad + C_{i2n}(\cosh \xi_{in} + \cos \xi_{in} x_i) \\ &\quad + C_{i3n}(\sinh \xi_{in} - \sin \xi_{in} x_i) \\ &\quad + C_{i4n}(\cosh \xi_{in} - \cos \xi_{in} x_i) \\ \xi_{1n}^4 &= \frac{m_1}{D_1} p_n^2, \xi_{2n}^4 = \frac{m'}{D'} p_n^2, \xi_{3n}^4 = \frac{m_2}{D_2} p_n^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 p_n は固有角振動数である。

任意の n 次モードにおける正規関数 $X_{1n}(x_1), X_{2n}(x_2), X_{3n}(x_3)$ に境界条件および連続条件を適用し、 $C_{12n}=0, C_{14n}=0, C_{33n}=0, C_{34n}=0$ を考慮すると

$$[M]\{C\} = \{0\} \quad (5)$$

ここで、 $[M]$ は 8 行 8 列の正方行列である。これより振動数方程式は

$$|M| = 0 \quad (6)$$

2.2 直交性の証明 式(3)の正規関数において異なる次数 n 次および m 次に対する $X_n(x)$ と $X_m(x)$ を考える。 n 次における二つの運動方程式およびはりの境界条件と連続条件を用いることにより、

$$\begin{aligned} m_1 \int_0^{L_1} X_{1n} X_{1m} dx_1 + m' \int_0^{L_2} X_{2n} X_{2m} dx_2 \\ + m_2 \int_0^c X_{3n} X_{3m} dx_3 = 0 \quad (n \neq m) \end{aligned} \quad (7)$$

となり正規関数が直交性を有することが証明される。

2.3 衝撃荷重 静止したはりに垂直な強制力 $Q(x_i, t)$ が作用する場合、直交性を利用するとたわみは正規関数 $X_{in}(x_i)$ を用いて、

$$w_i(x_i, t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_{in}(x_i) \left[B_{1n} \cos p_n t + B_{2n} \sin p_n t + \frac{\int_0^t Q_n(\tau) \sin p_n(t-\tau) d\tau}{p_n \left(m_1 \int_0^{L_1} X_{1n}^2 dx_1 + m_2 \int_0^{L_2} X_{2n}^2 dx_2 + m_3 \int_0^c X_{3n}^2 dx_3 \right)} \right] \quad (8)$$

となる。本研究では、はりの負荷点 ($x_2 = L/2 - L_1$) に集中荷重が作用していると仮定しているので、

$$Q_n(t) = P(t) X_{2n} \left(\frac{L}{2} - L_1 \right) \quad (9)$$

となる。

本研究では、 $P(t)$ を図2のようなステップ関数と仮定し、立ち上がり時間 T_p を変化させて応力拡大係数におよぼすはく離長さの影響について検討する。また、10次モードまで固有振動数を求め、10項近似で解析を行った。

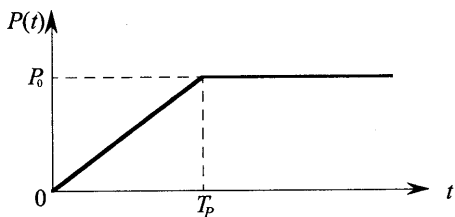


Fig.2 P(t) Model.

2.4 エネルギー解放率の解析 Suo および Hutchinson⁽²⁾は一般の負荷を受けている単位幅の積層はりのはく離についてエネルギー解放率を与える公式を二次元弾性論に基づいて導いた。彼らの結果に基づいて、エネルギー解放率を計算した。

3 数値解析および考察

解析モデルは上層にアルミ合金、下層にアクリル材を貼り合わせた異種材積層はりとし、厚さを上下ともに $h_1 = h_2 = 3$ mm、幅を $b = 20$ mm、スパンを $L=480$ mm、 $L_1=160$ mm、 $L_2=320$ mm とする。ここで、アルミ合金の縦弾性係数は $E_1=75.0$ GPa、密度は $\rho_1=2700$ kg/mm³、アクリル材の縦弾性係数は $E_2=3.5$ GPa、密度は $\rho_2=1200$ kg/mm³ である。

図3に $P_0=1$ N、 $T_p=0.516$ ms、 $c=80$ mm のときのモードIの応力拡大係数の時間変動図の一例を示す。この図より、応力拡大係数は時間とともに変動していることがわかる。この変動図よりモードI 応力拡大係数の最大値 $K_{I\max}$ を求め、 $K_{I\max}/K_{Ist}$ と T_p/T の関係を図4に示す。ここで、 K_{Ist} は静的問題におけるモードI破壊の応力拡大係数、 T は1次振動モードにおける固有振動数である。この図より、 T_p/T が1より大きい場合、応力拡大係数の最大値は静的の応力拡大係数と同じ大きさであることが分かり、 T_p/T が1より小さくなると急激に応力拡大係数が大きくなることが分かる。また、はく離長さ c が大きいほど応力拡大係数が大きくなっていることが分かる。図5はモードII破壊の応力拡大係数の最大値 $K_{II\max}/K_{Ist}$ と T_p/T の関係を示す。この結果からモードII破壊においても $T_p/T=1$ で静的と動的問題の境界があることが分かる。また、 c が大きいほど応力拡大係数が小さくなっていることが分かる。図6に動的問題と考えられる $T_p/T=0.1$ のときの $K_{I\max}/K_{Ist}$ 、 $K_{II\max}/K_{Ist}$ と c の関係を示す。この図より、 c が0から30mmまでは約5%内にあり、この範囲では、はく

離部分を無視した解析モデルを用いて応力拡大係数が算出できると思われる。

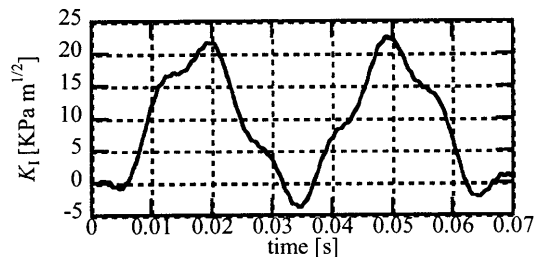


Fig.3 Variation of K_I with time.

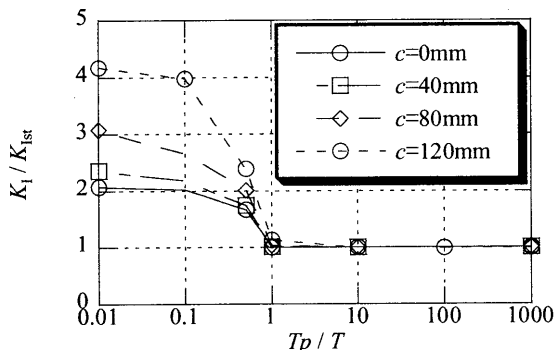


Fig.4 Variation of $K_{I\max}/K_{Ist}$ with T_p/T .

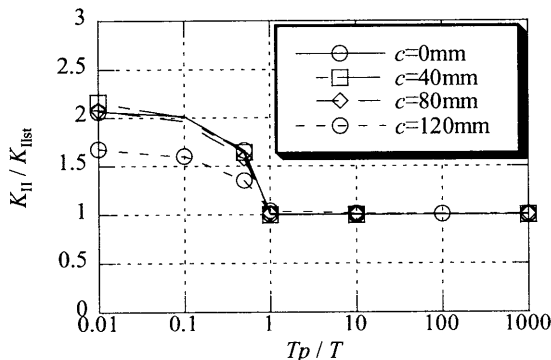


Fig.5 Variation of $K_{II\max}/K_{Ist}$ with T_p/T .

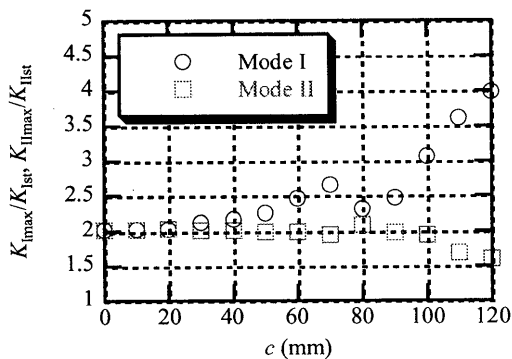


Fig.6 Variation of $K_{I\max}/K_{Ist}$ and $K_{II\max}/K_{Ist}$ with c .

参考文献

- 1) 日下貴之・他3名, 材料, Vol.50, No.3, pp.235-241
- 2) Suo, Z. and Hutchinson, J. W., Int. J. Fract., 43(1990), 1-18