

福島高専 正山内 正司
 東北大学 佐武 正雄
 東北大学 新聞 茂

1. まえがき

AE波形は、材料の局所破壊に関する動的な情報を反映したものであり、検出波形から破壊源の特性も推定する手法も確立することは、材料の破壊機構も解明する上で重要な課題の一つであると考えられる。

本文では、以上の問題に対する基礎的なデータを得る目的のもとに、3次元半無限領域内のクラックが伝播する時の応答変位を解析し、破壊源と波形特性の関係、及び波形解析における計測上の問題点などについて考察した。

2. 解析手法

弾性体内部の面領域Σに変位のくい違い $[U]=U^*-U^-$ が生じた時、Σの応答変位は

$$u_i(x,t) = \int_{\Sigma} \int_0^t C_{k\ell p q} \nu_k n_{\ell} [U(\xi, \tau - t)] G_{ip, q}(x, \xi, \tau) d\tau d\Sigma \quad \text{----- (1)}$$

となる⁽¹⁾。ここに、 $C_{k\ell p q} = \lambda \delta_{k\ell} \delta_{p q} + \mu (\delta_{kp} \delta_{\ell q} + \delta_{k\ell} \delta_{p q})$ (λ, μ はラメの定数)、 ν_k Σの単位法線ベクトル成分、 n_{ℓ} くい違い変位の単位ベクトル成分、 $G_{ip, q} = \frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{ip}$; G_{ip} は動的グリーン関数であり、Johnson⁽²⁾により得られた3次元半無限領域の解を用いる。

$[U(\xi, t)]$ は震源過程関数と呼ばれ、本研究では静的クラック変位に伝播効果を取り入れ、一方向に一定破壊速度 V で伝播する矩形モデルを仮定した。

$$[U(\xi, t)] = 4\gamma \sqrt{\frac{\xi_1}{W} (1 - \frac{\xi_1}{W})} \cdot \left\{ H(t - \frac{\xi_1}{V}) - H(t - \frac{\xi_1}{V}) \sqrt{\xi_1 (vt - \xi_2)} + H(t - \frac{1}{V}) \sqrt{\xi_1 (L - \xi_1)} \right\} \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 γ は伝播方向に対するクラックアスペクト比 $H(t)$ はステップ関数である。

次に、動的グリーン関数 $G_{ip, q}$ は一般にデルタ関数の1回微分の項を含み、式(1)の形では数値積分上に問題がある。Johnsonの解において $G_{ip, q} = \frac{d}{dt} \overline{G_{ip, q}}$ として与えられるため、式(1)を部分積分によって変形し、式(2)を代入して変数変換 $\xi'_1 = \xi_1/L$, $\xi'_2 = \xi_2/W$ と行い、更に $\overline{G_{ip, q}}$ から $1/R\beta$ の項を取り出すと次式が得られる。

$$u_i(x,t) = \frac{ADV}{R\beta} u_i(t, L/R, W/L, \nu, n, \theta) = \frac{1}{R\beta} \frac{AD}{L/V} u_i(t, \cdot, \cdot, \cdot) \quad \text{----- (3)}$$

($A = nL$)

但し、 R は破壊開始点から観測点までの距離、 β はS波速度、 θ は入射角、 D は最終最大くい違い変位である。 AD は破壊源の強さを表わす量と考えられ、 L/V が破壊継続時間であるから、応答変位は破壊源の強さの平均増加・速度に比例すると解釈される。計算上の諸定数は、モルタルを仮定し、ポアソン比=0.2、P波、S波、破壊速度を各々、 $\alpha = 4310 \text{ m/s}$, $\beta = 2640 \text{ m/s}$, $V = 0.5\beta$ と定めた。計算は表面のΣ3方向変位 u_3 についてのみ行い、円柱供試体から発生するAEを想定しているため、表面波は対象外とした。

3. 結果と考察

エネルギー強度として、 $I = \int |u|^2 dt = (-\frac{ADV}{R\beta})^2 \bar{I}$, $\bar{I} = \int |u|^2 dt$ と定義すれば、 I は ADV/L の2乗に比例し、 $\bar{I}$ は放射形式に依存するパラメータとなる。図-3に、入射角が $\theta = 30^\circ$ の場合、観測点方向と破壊伝播方向とのなす角 Ω と $\bar{I}$ の関係を示す。 Ω の違いによって $\bar{I}$ が10オーダーで異なり、 I も ADV/L の推定パラメータとするためには、 Ω を正確に決定することが重要になる。

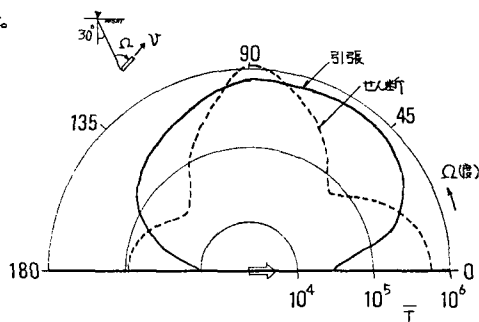


図-3 エネルギー強度 $\bar{I}$

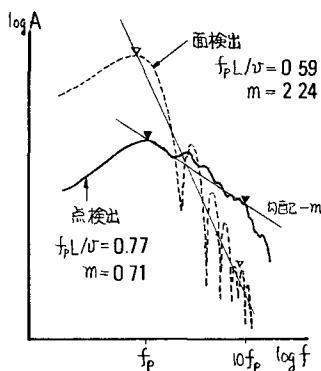


図-4 変位速度スペクトル (P波)

次に、P波の変位速度スペクトル特性について考察する。変位速度スペクトルの例も図-4に示す。図-5は Ω の変化によって周波数特性が変化するドップラー効果の影響を示したものである。縦軸は上図の場合、スペクトルピーフに対応する無次元化された周波数

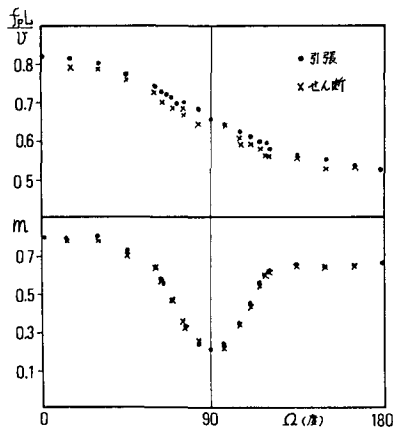


図-5 ドップラー効果による周波数特性の変化

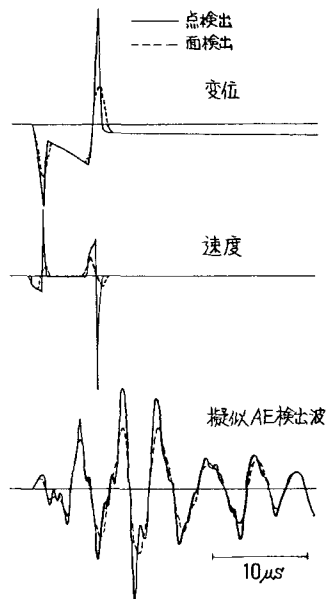
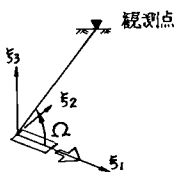


図-6 擬似AE検出波形



$f_p L/v$ を、下図では、便宜上図-4に示す様に定義した直線の勾配 m を表わしている。 Ω が 90° から 0° へ変化するに従って、みかけ上の破壊継続時間が短くなり、スペクトルのピーフは高周波数側へ移動する。これより、破壊伝播長 $L = (0.52 \sim 0.82) v/f_p$ によって推定することがができる。スペクトルの勾配 m と Ω の関係は破壊形式に依存せず、震源モデルに固有の関係であると考えられる。

最後に、実験で得られた検出波形から、 f_p, m を決定する際に生ずる問題点について考察する。変換子 (NE社 AE905S) の速度インパルス応答⁽³⁾を用いて計算された擬似AE波形を図-6に示す。 $(\theta=30^\circ, \Omega=45^\circ, R=4\text{cm}, L=0.2\text{cm})$ 点検出と考えた実験の擬似AE波形から f_p を決定する場合、変換子が位相遅れを伴った共振特性を持っているため、S波入力以前の波形も取り出し、フーリエ変換後、変換子の伝達関数によって補正する方法では、入力P波の真の f_p は得られない。時間変化する変換子の応答特性を考慮した補正手法をとる必要があると考えられる。次に、図-6の破線で示された波形は、入力波が検出面 (直径8mm) にわたって平均化されると考えた場合のもので、両者のスペクトルの違いは図-4のようになる。面検出の場合、フィルター効果により高周波数成分が相対的にカットされ、 f_p も変化する。入射角 θ が大きい程、変換子までの距離が短い程、この効果が著しい。波形特性のばらつきが、全く異なる震源過程によるものか、あるいは、以上の様なフィルター効果によるものか、今後検討を要する。

4 あとがき

本文で得られた結果を要約すると、1) ここで仮定した震源モデルに基づけば、破壊伝播長 L は $L = (0.52 \sim 0.82) v/f_p$ により推定されるが、検出波形から f_p を決定する方法に問題がある。また、2) 変換子の面検出による、波形構造が大きく変化した。異なる震源過程も推定する可能性がある。

最後に、本文で用いた震源モデルは、破壊速度 v と伝播長 L を独立に与える kinematic モデルに属する。実験によれば、き裂は加速・減速⁽⁴⁾、かつ、 L は平均破壊速度に関係し、力学的条件により決定される。この挙動を考慮した詳細な議論は、動的破壊力学に基づいたダイナミックモデルによるなければならない。

参考文献

- 1) Burridge, R & Knopoff, L.: BSSA, 54, 1825~1838 (1964), 2) Johnson, L R, Geophys J RAS., 37, 99~131, (1974)
- 3) 山内, 根岸; 福島高専誌, 19, 1, (1982), 4) Fast fracture and Crack arrest, ASTM, STP 627, (1977)