

I-31

二探触子法によるクラック長と傾きの推定

東北大学 学生員 ○武地真一
東北大学 正 員 北原道弘

1. はじめに

超音波により構造部材内部に存在するクラックの長さや傾きを推定する。送信用と受信用の二つのトランスデューサーを用いた場合について、クラックの長さや傾きの近似推定式を示し、クラックから得られる散乱波形計測結果を近似推定式に代入し、クラックの長さや傾きが推定できることを示す。

2. 二探触子法（水浸ピッチ・キャッチ法）

図-1に示したように長さ $2a$ のクラックが部材表面と角度 $\bar{\theta}$ だけ傾いて存在している場合を考える。ここでは超音波の計測法として水浸ピッチ・キャッチ法を採用する。送信用のトランスデューサーから入射した超音波は固体内を透過し、クラックにより散乱され、散乱された波動はある角度で設置された受信用トランスデューサーで受信される。ここで受信されたクラックからの散乱波形にはクラックの長さや傾きに依じた周波数特性が存在する。この特性を利用したクラック長と傾きの定量化策について考える。

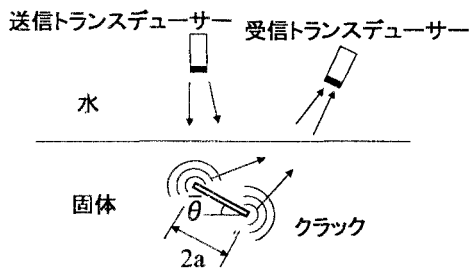


図-1 ピッチ・キャッチ法による計測

3. 散乱振幅の周期特性

クラック長の推定式はすでに文献¹⁾に示されているが、今回の実験に対応してクラック長と傾きを求める推定式に拡張する。このため、クラック端から生じる散乱波の周期特性を要約する。固体中のクラックにより散乱された波動による水中の圧力場 p^{sc} に対する積分表現は次のようになる。

$$p^{sc}(x) = \int_S T_{jk}^n G_k(x, y) [u_j(y)] ds_y \quad (1)$$

ここに $[u_j(y)]$ はクラックの開口変位であり、 $T_{jk}^n G_k$ は表面力核である。この積分表現中の開口変位に高周波近似を導入し、さらに表面力核に遠方近似を導入すると、上記積分は解析的に積分できる。最終結果を水中散乱超音波の散乱振幅 Ω_F^β ($\beta = L, T$) について整理すれば、次のようになる。

$$\begin{aligned} \Omega_F^\beta &\approx 2ak_\beta \frac{\sin \Delta}{\Delta} \\ &= 2ak_\beta \frac{\sin(k_\alpha \sin \theta_\alpha + k_\beta \sin \theta_\beta)a}{(k_\alpha \sin \theta_\alpha + k_\beta \sin \theta_\beta)a} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $2a$ はクラックの長さ、 k_α と θ_α はクラックに対する入射波の波数と入射角、 k_β と θ_β はクラックにより散乱された散乱波動成分の波数と入射角である。また、 Ω_F^β はクラックにより散乱された固体中の縦波 ($\beta = L$) と横波 ($\beta = T$) の水中の散乱圧力波への寄与成分を表す。上式 (2) は、 $k_\alpha = k_\beta$ かつ $\theta_\alpha = -\theta_\beta$ の場合を除き、散乱振幅 Ω_F^β は周期的に振動することを意味している。散乱振幅の極値は Δ が次の関係を満足する場合に現れることがわかる。

$$\Delta = a(k_\alpha \sin \theta_\alpha + k_\beta \sin \theta_\beta) = n\pi \quad (\alpha, \beta = L, T) \quad (3)$$

4. クラック長と傾きの推定式

クラック長 $2a$ と傾き $\bar{\theta}$ の推定式をピッチ・キャッチ法について導く。導出のポイントは二つのパラメータを決めるために、観測角を変えた二回の計測を行うことにある。図-2に示した幾何学的関係に注意して、受信トランスデューサーの角度 θ_F と固体内の屈折角 θ_γ の関係を考慮すると、クラックへの入射角 θ_α 、クラックからの散乱波の角度 θ_β 、クラックの傾き $\bar{\theta}$ 、屈折角 θ_γ 及び波数について次の関係が成立する。

$$\theta_\alpha = \bar{\theta}, k_\alpha = k_L, \theta_\beta = -(\theta_\gamma - \bar{\theta}), k_\beta = k_\gamma \quad (4)$$

ここで、水中の観測角 θ_F と固体内の屈折角 θ_γ はスネルの法則で結ばれている。

$$\theta_\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{c_\gamma}{c_F} \sin \theta_F \right) \quad (\gamma = L \text{ or } T) \quad (5)$$

関係式 (4) を式 (3) に代入して、クラックが部材表面に対して $\bar{\theta}$ だけ傾いている場合、次の関係を得る。

$$a\{k_L \sin \bar{\theta} + k_\gamma \sin(\bar{\theta} - \theta_\gamma)\} = n\pi \quad (6)$$

波数と周波数の関係 $k_\gamma = 2\pi f/c_\gamma$ より、上式は散乱振幅の極小値間の周波数差 Δf について次のように書き換えられる。

$$\Delta f = \frac{1}{2a \left[\frac{\sin \bar{\theta}}{c_L} + \frac{\sin(\bar{\theta} - \theta_\gamma)}{c_\gamma} \right]} \quad (7)$$

上式をクラック長 $2a$ の推定式として書き直すと次のようになる。

$$2a = \frac{1}{\Delta f \left[\frac{\sin \bar{\theta}}{c_L} + \frac{\sin(\bar{\theta} - \theta_\gamma)}{c_\gamma} \right]} \quad (8)$$

いま、トランスデューサーの角度を変えた二回の計測を行い水中の観測角 θ_F に対して周波数差 Δf が、

θ'_F に対して $\Delta f'$ が計測されたとする。このとき、 θ_F に対応する固体内の屈折角を θ_γ 、 θ'_F に対して θ'_γ とする。また、 $c_\gamma = c'_\gamma$ に注意すると次式を得る。

$$\Delta f \left[\frac{\sin \bar{\theta}}{c_L} + \frac{\sin(\bar{\theta} - \theta_\gamma)}{c_\gamma} \right] = \Delta f' \left[\frac{\sin \bar{\theta}}{c_L} + \frac{\sin(\bar{\theta} - \theta'_\gamma)}{c_\gamma} \right] \quad (9)$$

上式 (9) から、クラックの傾き $\bar{\theta}$ の推定式を次のように得る。

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{c_\gamma} (\sin \theta_\gamma \Delta f - \sin \theta'_\gamma \Delta f')}{\frac{1}{c_L} (\Delta f - \Delta f') + \frac{1}{c_\gamma} (\cos \theta_\gamma \Delta f - \cos \theta'_\gamma \Delta f')} \right\} \quad (10)$$

上式 (10) からクラックの傾き $\bar{\theta}$ が決定されると、クラック長 $2a$ は式 (8) から決定できる。

$$2a = \left[\Delta f \frac{\sin \bar{\theta}}{c_L} + \frac{\sin(\bar{\theta} - \theta_\gamma)}{c_\gamma} \right]^{-1} \quad (11)$$

受信トランスデューサー 送信トランスデューサー

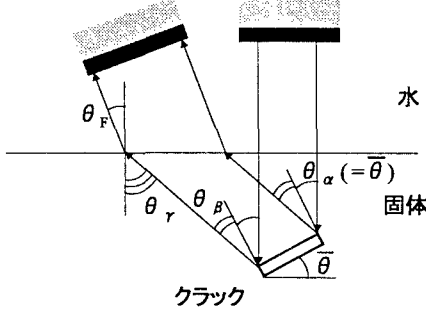


図-2 クラックの傾き $\bar{\theta}$ と幾何学的関係

5. トランスデューサーの周波数特性

計測に使用したトランスデューサーは公称中心周波数が $f_c = 5(\text{MHz})$ の広帯域型である。トランスデューサーの周波数特性を図-3 に示す。

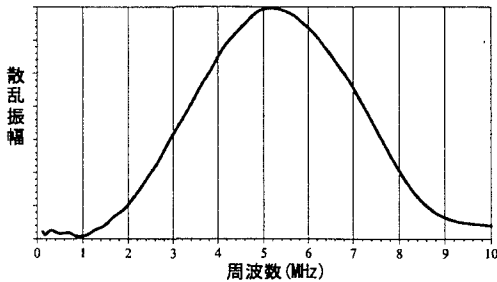


図-3 トランスデューサーの周波数特性

6. 実験結果

クラック長と傾きの推定は、 Δf と θ_γ (すなわち水中の観測角 θ_F) が各々二つずつ必要である。ここで、アルミニウム供試体に存在する長さ 6mm 、傾き 45° のクラックに対し、水中の観測角 θ_F を 1.5° と 4.5° に設定した場合に得られた散乱振幅の周波数特性を図-4 と図-5 に示す。両図共に、散乱振幅の周期特性が確認出来る。周波数 $f = 2\text{MHz} \sim 8\text{MHz}$ の間で散乱振幅の極小値間の周波数差の平均を取り、この周波数差と水中の観測角を式 (10) と式 (11) に代入することにより得られたクラックの長さ $2a$ と傾き $\bar{\theta}$ を表 1 に示す。

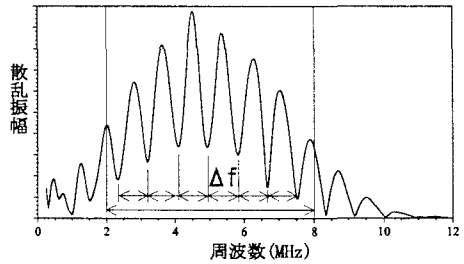


図-4 周波数域波形 ($2a = 6\text{mm}$, $\bar{\theta} = 45^\circ$, $\theta_F = 1.5^\circ$)

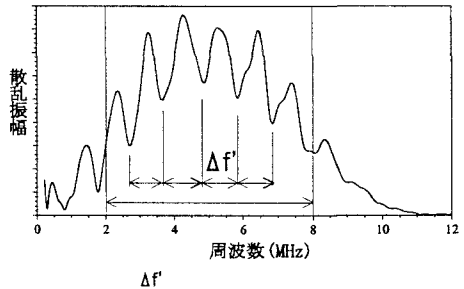


図-5 周波数域波形 ($2a = 6\text{mm}$, $\bar{\theta} = 45^\circ$, $\theta'_F = 4.5^\circ$)

表 1 クラック長と傾きの推定 (アルミ材)

θ_F	θ'_F	Δf	$\Delta f'$	$2a(\text{推定値})$	$\bar{\theta}(\text{推定値})$
1.5	4.5	0.824MHz	1.068MHz	6.12mm	42.9°

7. 結論

二探触子法によるクラック長と傾きの推定式を示し、計測散乱振幅の周期特性から得た周波数差を、この推定式に適用する事により、実際のクラック長と傾きが近似的に求まることが確かめられた。

参考文献

- 1) 北原道弘, 印 建華: 超音波による界面クラック長の一回推定, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.357-364, 1996.