

I-30

超音波によるクラック長と傾きの推定

 東北大学 学生員 ○竹内大樹
 東北大学 正 員 北原道弘

1. はじめに

超音波を利用して構造物材内部に存在するクラックの長さや傾きを推定することを考える。ここでの着目点はクラック端部であり、クラックの両端部から発生する散乱波の干渉周期を利用してクラック長と傾きの近似推定式を導く。トランスデューサーの角度を変えた二回の散乱波形計測結果をこの近似式に代入することにより、クラック長と傾きが比較的良好に推定できることを示す。

2. 水浸パルス・エコー計測

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パルス・エコー法を採用し、水中のトランスデューサーから超音波を送信する。この超音波は固体内に透過し、固体内のクラックにより散乱され、散乱された波動は再び送信と同一の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後方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とを示し、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。

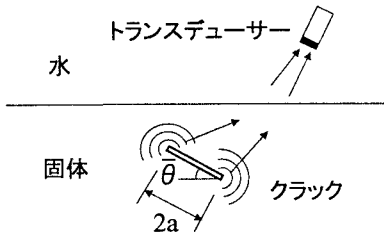


図-1 クラック端部による散乱

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、クラックに対す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。このとき、高周波と遠方という近似のもとで、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 $\Omega_F^\beta (\beta = L, T)$ について整理すると、次のようになる。

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

ここに $2a$ 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観測角である。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 が周期的に振動することを意味している。この式より、散乱振幅の極小値(または極大値)は Δ が次の関係を満足する場合に現れることがわかる。

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

4. クラック長と傾きの推定式

クラック長 $2a$ と傾き $\bar{\theta}$ の推定式をパルス・エコー法について導く。導出のポイントは二つのパラメータを決めるために、入射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、水中超音波の入射角 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 $\theta_\alpha (= \theta_\beta)$ 、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。

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

ここで、水中の入射角 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。

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

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に成立する次の関係を得る。

$$2ak_\gamma \sin(\theta_\gamma - \bar{\theta}) = n\pi \quad (6)$$

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。

$$\Delta f = \frac{c_\gamma}{4a \sin(\theta_\gamma - \bar{\theta})} \quad (7)$$

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。

$$2a = \frac{c_\gamma}{2\Delta f \sin(\theta_\gamma - \bar{\theta})} \quad (8)$$

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入射角 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。

$$\Delta f \sin(\theta_\gamma - \bar{\theta}) = \Delta f' \sin(\theta'_\gamma - \bar{\theta}) \quad (9)$$

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。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta f \sin \theta_\gamma - \Delta f' \sin \theta'_\gamma}{\Delta f \cos \theta_\gamma - \Delta f' \cos \theta'_\gamma} \right) \quad (\gamma = L \text{ or } T) \quad (10)$$

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。

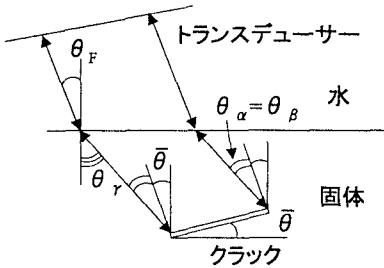


図-2 クラックの傾き $\bar{\theta}$ と幾何学的関係

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の周波数特性を図-3に示す。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。

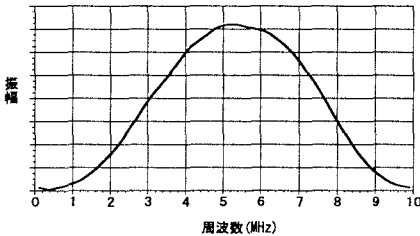


図-3 トランスデューサーの周波数特性

6. クラック長の推定

まず傾きが 0° の場合のクラック長を推定した結果を示す。ここで使用した材料はアルミである。図-4は $2a = 6\text{mm}$ のクラックに対して水中の入射角 $\theta_F = 10.0^\circ$ で超音波を送信した時の散乱振幅の理論計算値と計測値を比較したものである。周期性に関してはトランスデューサーの中心周波数を中心とした2MHzから8MHzの帯域で極小値により対応関係が認められる。表-1はアルミ材中に存在する6mm, 4mmのクラックについて計測結果とまとめたものである。

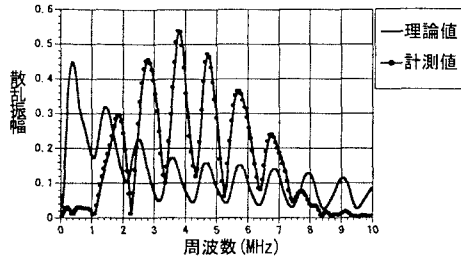


図-4 クラックによる散乱振幅($2a = 6\text{mm}$)

表 1 クラック長の推定(アルミ材)

$2a(\text{mm})$	θ_F	$\Delta f(\text{MHz})$	推定値 $2a'(\text{mm})$
6	10°	0.7019	6.071
4	15°	0.712	4.015

7. クラック長と傾きの推定

クラック長と傾きの推定では、二組の Δf と θ_γ (すなわち θ_F)が必要である。よって一つのクラックに対して入射角を変えて2回計測を行った。図-5に得られた散乱波形の一例を、表-2に一つのクラック(クラック長は6mm, 傾きは 45° の供試体)に対して 0° , 2.5° , 5° の入射角で推定した結果を示しておく。

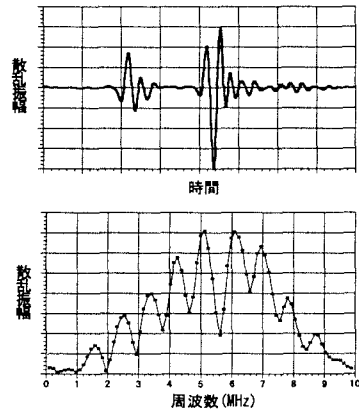


図-5 時間域波形と周波数域波形($2a = 6\text{mm}$, 傾き 45°)

表 2 クラック長と傾きの推定(アルミ材)

θ_F	θ'_F	$\Delta f(\text{MHz})$	$\Delta f'(\text{MHz})$	推定値 $2a'(\text{mm})$	推定値 $\bar{\theta}(\text{度})$
0°	5°	0.7499	1.3428	5.967	45.828
0°	2.5°	0.7499	0.9417	5.995	45.556
2.5°	5°	0.9417	1.3428	5.933	45.977

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.