

超音波による界面クラック長と傾きの推定

中電工事 正員 〇横井 幹仁
東海大学海洋学部 正員 北原 道弘

1. はじめに

超音波の代表的計測法には、センサーの配置に着目するとピッチ・キャッチ法とパルス・エコー法、送信波形に着目するとトーンバースト波とパルス波の利用が考えられる。文献[1]においては、送信側センサーからパルス波を发射し、バースト波の送搬周波数を変化させる毎に受信側センサーで散乱振幅を計測し、送搬周波数に対する散乱振幅の周期性を観測するピッチ・キャッチ法による界面クラック長の推定法が検討されている。

現実問題としては、超音波の送信と受信に同一のセンサーを利用するパルス・エコー法のほうが便利と思われる。ここでは、パルス・エコー法の機器構成のもとでパルス波を送信し、受信散乱波をFFTにより周波数域に変換して散乱振幅の周波数に対する周期性を観測して、この周期性から界面クラック長を推定することを試みる。以下、問題の設定、界面クラック長の近似推定式、計測によるクラック長の推定、クラック長と傾きの推定法への応用について要約する。

2. 問題

Fig.1はパルス・エコー法を基にした超音波の送信と、界面クラックによる散乱波の受信の様子を描いたものである。図のように Solid1 と Solid2 からなる異種材料の界面に長さ $2a$ のクラック S が存在している。この部材を水中に沈め、水中のセンサー (T) から超音波を送信する。この水中超音波は、水/固体界面で固体内の波動（弾性波）として固体中に透過して異種固体界面に入射する。この入射波は固体界面上に存在するクラックにより散乱され、固体内を伝播して再び水/固体界面で固体中の波動から水中の超音波にモード変換して送信と同一のセンサー (R) で受信される。

本研究では、クラックの両端部により散乱された後方散乱波に着目し、クラックの両端から受信センサーに至る伝播経路の差に起因する散乱波の干渉現象とクラック長を関係付けることを考える。この後方散乱超音波の干渉現象とクラック長、超音波の入射角（＝観測角）の間に存在する関係式を明らかにすれば、入射角を決めて超音波を送信し、受信散乱波の干渉周期を計測することにより、クラック長を推定することができる。

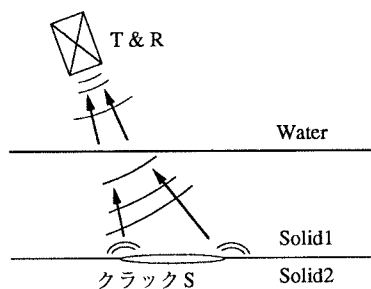


Fig.1パルス・エコー法による界面クラック長の推定

3. クラック長の推定式

クラック長の推定式の導出過程の要約はピッチ・キャッチ法について文献[1]ですすでに行われているが、今回の実験に対応したパルス・エコー法への変更に係わる要点のみを再記する。

固体中のクラック S により散乱された波動による水中の圧力 p^{sc} に対する積分表現は次のようになる。

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

ここに、 $[u_j(\mathbf{y})] = u_j(\mathbf{y}) - \bar{u}_j(\mathbf{y})$ はクラック S 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 $\Omega_p^s(\alpha = L, T)$ について整理すると、次のようになる。

$$\Omega_p^s \approx 2ak_\alpha \frac{\sin \Delta}{\Delta} = 2ak_\alpha \frac{\sin(k_\alpha \sin \theta_\alpha + k_\gamma \sin \theta_\gamma)a}{(k_\alpha \sin \theta_\alpha + k_\gamma \sin \theta_\gamma)a} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $2a$ はクラックの長さ、 k_α と θ_α はクラックにより散乱された散乱波動成分の波数と伝播角、 k_γ と θ_γ はクラックへの入射波の波数と入射角である。また、 Ω_p^L と Ω_p^T はクラックにより散乱された固体中の縦波 (L) と横波 (T) の水中の散乱圧力波への寄与成分を表す。上式は、 $k_\alpha = k_\gamma$ 、 $\theta_\alpha = -\theta_\gamma$ の場合を除き、サインの引数が次の条件を満たすとき、散乱波の振幅 Ω_p^s が周期的な振動現象を示すことを意味している。

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

上式 (3) を水/固体間のモード変換による各波動の位相に関する適合条件：

$$k_\alpha \sin \theta_\alpha = k_F \sin \theta_x, \quad k_\gamma \sin \theta_\gamma = k_F \sin \theta_0 \dots\dots\dots (4)$$

を利用して書き直すと次のようになる。

$$k_F a (\sin \theta_0 + \sin \theta_x) = n\pi \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 k_F は水中超音波の波数、 θ_0 は水中の入射角、 θ_x は水中の観測角である。

上式 (5) をパルス・エコー法の実験に変更するには次のようにすればよい。パルス・エコー法では水中の入射角と観測角は等しく $\theta_0 = \theta_x$ となる。また、波数 k_F と周波数 f の関係 $k_F = 2\pi f/c_F$ から、散乱振幅の最小値の1周期分に対応する周波数を Δf_{min} とすると、この Δf_{min} を用いて式 (5) をクラック長 $2a$ の推定式として書き直することができる。

$$2a = c_F / \{2\Delta f_{min} \sin \theta_0\} \dots\dots\dots (6)$$

上式 (6) において、水中超音波の波速は $c_F \approx 1480\text{m/s}$ と既知である。これより、発信側水中センサーの角度 θ_0 を決めて超音波を送信し、同じセンサーでクラックによる散乱振幅の極小値の1周期分に対応する周波数 Δf_{min} を計測すれば、式 (6) よりクラック長 $2a$ の推定値を得ることができる。

4. クラック長の推定

Fig.2 に使用した計測装置の構成図を示す。計測はパルサー・レーザバーで得られた受信散乱波から、クラックによる散乱波を取り出して、フーリエ変換により周波数に対する散乱振幅の変動を計測する。計測に使用したセンサーのアルミ材の表面反射による周波数特性を Fig.3 に示す。Fig.4 はアルミ材とスチール材の界面上に存在する長さ $2a=6\text{mm}$ のクラックに対して、水中の入射角 $\theta_0 = 10.2^\circ$ で超音波を送信し、受信散乱波をフーリエ変換した結果（丸印）を散乱振幅の理論計算値（実線）と比較したものである。計測値と理論値では振幅は異なるが、センサーの中心周波数付近 2~7MHz で、散乱振幅の最小値が生じる位置に良い対応関係が見られる。Table 1 は、クラック長の推定式 (6) を用いて、アルミ材とスチール材の界面に存在する 6mm, 4mm, 2mm, 1mm のクラックについて、水中の入射角 $\theta_0 = 10.2^\circ$ で計測した $\Delta f_{\min}$

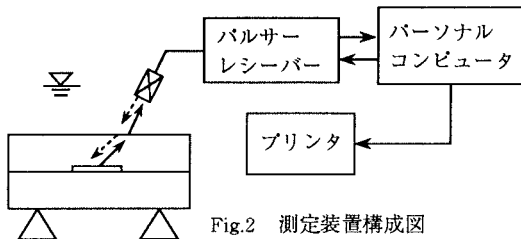


Fig.2 測定装置構成図

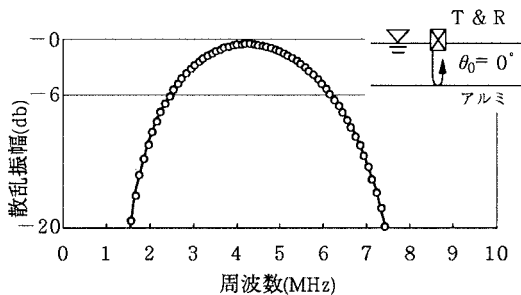


Fig.3 トランスデューサーの周波数特性

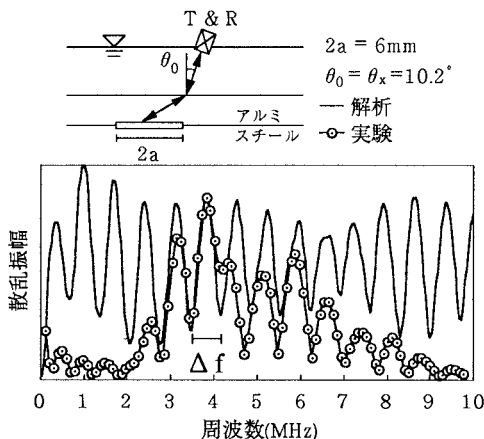
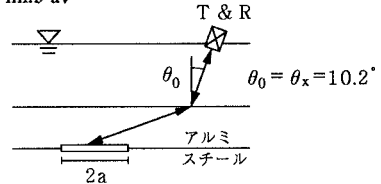


Fig.4 散乱振幅の周期性

Table 1 クラック長の推定（アルミ/スチール）

$2a(\text{mm})$	$\theta_0 = \theta_x$	$(\Delta f_{\min})_{\text{av}}$	$2a'(\text{mm})$
6	10.2°	0.71	5.89
4	10.2°	1.08	3.88
2	10.2°	2.27	1.84
1	10.2°	3.50	1.20

$(\Delta f_{\min})_{\text{av}}$: in MHz



よりクラック長を推定したものである。Table 右端の $2a'$ が推定値であり、ほぼクラック長が推定できていることがわかる。

5. クラックの長さや傾きの推定

界面に対してクラックが傾いて存在する場合、クラック長 $2a$ とクラックの傾き α は、一つのクラックに対して観測角を変えて二回計測を行うことにより推定することができる。一回の計測において、固体内の縦波の入射角 θ_L に対して Δf が計測され、他の一回の計測において θ_L に対して $\Delta f'$ が計測されたとする。このとき、クラックの傾き α とクラック長 $2a$ は次のように推定できる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\Delta f \sin \theta_L - \Delta f' \sin \theta'_L}{\Delta f \cos \theta_L - \Delta f' \cos \theta'_L} \right] \quad (7)$$

$$2a = \frac{c_L}{2\Delta f |\sin(\theta_L - \alpha)|} \quad (8)$$

Table 2 にこの推定式を利用して、ステンレス材の界面より 45° の傾きで長さが 4mm のクラックが入っている場合の傾き α と長さ $2a$ の推定結果を示す。

Table 2 クラック長と傾きの推定

θ_L	$\Delta f(\text{MHz})$	θ'_L	$\Delta f'(\text{MHz})$	α	$2a(\text{mm})$
20°	1.80	5°	1.15	43.4°	4.2
5°	1.15	-10°	0.90	44.7°	4.1
-10°	0.90	20°	1.80	43.8°	4.1

average					44.0° 4.1
$\alpha = 45^\circ$					
$2a = 4\text{mm}$					
$\theta_L = 20^\circ, 5^\circ, -10^\circ$					

参考文献

- [1] 横井幹仁, 北原道弘:水浸法による材料界面に存在するクラック長の推定式, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集 第 1 部 A, pp.594-595, 1994.