

異種材料界面剥離長の推定に関する実験と解析

東海大学大学院 学生員 ○横井 幹仁
東海大学海洋学部 学 生 稲垣 寿隆
東海大学海洋学部 正 員 北原 道弘

1. はじめに

異種材料間の界面剥離の検出・評価法を確立しておくことは、クラッド鋼などの耐腐食鋼板の長期にわたる信頼性の保証という非破壊評価の観点からの重要課題の一つと考える。

昨年度の研究⁽¹⁾においては、送信側センサーからパースト波を発生し、パ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について検討した。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剥離長を推定することを試みる。以下、問題の設定、界面剥離長の近似推定式、計測による剥離長の推定結果について要約する。

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、界面剥離部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剥離部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剥離部により散乱され、固体内を伝播して再び固体/水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、剥離部の両端部により回折された後方への散乱波に着目し、剥離部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剥離長を関係付けることを考える。この回折超音波の干渉現象と剥離長、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、剥離長を推定することができる。

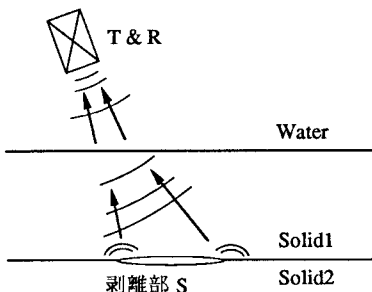


Fig.1 パルス・エコー法による界面剥離部の検出

3. 剥離長の推定式

剥離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前報告(参考文献(1))ですすでに行っているが、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。

固体中の剥離部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、 $[u_j(\mathbf{y})] = u_j(\mathbf{y}) - \bar{u}_j(\mathbf{y})$ は剥離面Sの開口変位であり、 $T_{jk}^n G_k$ は表面力核である。この積分表現中の剥離面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は入るが、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 $\Omega_F^s(\alpha = L, T)$ について整理すると、次のようになる。

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

ここに、 a は剥離部の半分の長さであり、 k_α と θ_α は剥離部により散乱された散乱波動成分の波数と伝播角であり、 k_γ と θ_γ は剥離部への入射波の波数と入射角である。また、 Ω_F^L と Ω_F^T は剥離部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_F^s が周期的な振動現象を示すことを意味している。

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

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：

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

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・エコー法の実験に利用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)を剥離長 $2a$ 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、同じセンサーにより剥離部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)より剥離長 $2a$ の推定値を得ることができる。

4. 剥離長の推定

Fig.2に使用した計測装置の構成図を示す。計測はバルサー・レシーバーで得られた受信散乱波から、剥離部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を計測する。計測に使用したトランスデュー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。トランスデューサーの中心周波数付近2~6MHzで、特に良い対応関係が見られることがわかる。Table 1は、ここで導出した剥離長の推定式(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 $\Delta f_{\min}$ よりクラック長を推定したものであり、Table右端の $2a'$ が推定値である。Table 2はステンレス材とスチール材の場合に水中の入射角 $\theta_0=15^\circ$ で計測を行った結果である。どちらの場合も、ほぼクラック長が推定できていることがわかる。

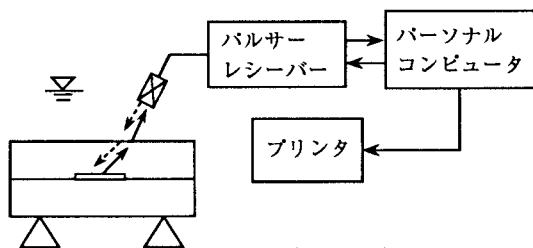


Fig.2 測定装置構成図

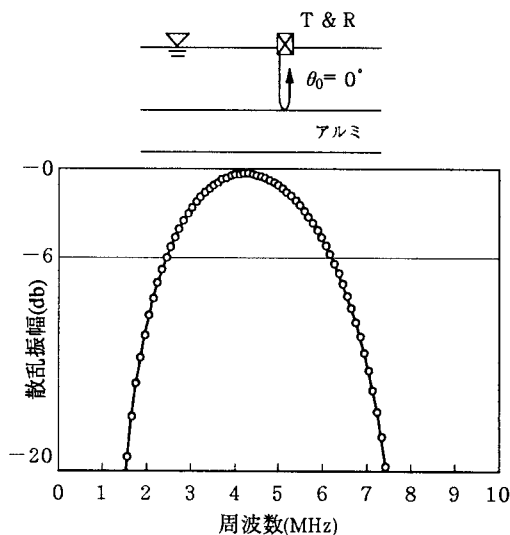


Fig.3 トランスデューサーの周波数特性

参考文献

(1) 横井幹仁, 川相哲男, 北原道弘: 端部干渉効果を利用したクラック長の推定, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.7-8, 1994.

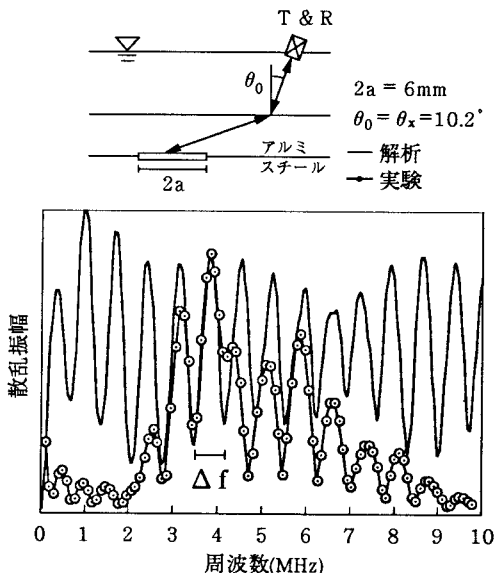


Fig.4 散乱振幅の周期性

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

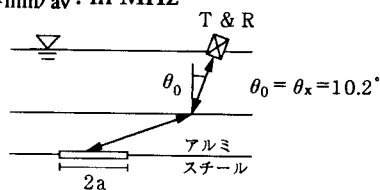


Table 2 クラック長の推定 (ステンレス/スチール)

$2a(\text{mm})$	$\theta_0 = \theta_x$	$(\Delta f_{\min})_{\text{av}}$	$2a'(\text{mm})$
6	15°	0.49	5.88
4	15°	0.71	4.01
2	15°	1.48	1.92
1	15°	2.52	1.13

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

