

後方散乱振幅スペクトルの周期性を利用したステンレスクラッド鋼 界面クラック長の計測

SIZE ESTIMATION OF INTERFACE CRACK IN STAINLESS CLAD STEEL BY THE PERIODICITY OF BACKSCATTERING SPECTRUM

北原道弘*・羽田幸寿**

Michihiro KITAHARA and Yukihisa HADA

*正会員 工博 東北大学教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**正会員 工修 神鋼アイ・イー・テック株式会社 製造部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 41)

It has been known that the spectrum of the backscattering signal from a crack exhibits the periodic nature caused by the interference of the signals from edges of the crack. In this paper the size of an interface crack in stainless clad steels is estimated by using the periodicity of the spectrum for the observed backscattering signal from the crack. Agreement of the periodicity between theoretical scattering amplitudes and experimentally observed spectra is first checked for the immersed model specimen with an artificial interface crack. Then the size estimation of the interface crack is performed experimentally for both specimens with immersed and contact transducer configurations.

Key Words : *interface crack, crack sizing, ultrasonics, spectrum, stainless clad steel*

1. はじめに

耐食性を生かしたライフサイクルコスト低減の観点からステンレスクラッド鋼の橋梁部材への適用に関する研究が、溶接加工性¹⁾、疲労²⁾、残留応力³⁾をはじめ様々な角度から進められている⁴⁾。

本論文では、ステンレスクラッド鋼のステンレスと母材の界面上に存在するクラックの長さを、超音波を利用して推定することを実験計測的に試みる。異種材料界面に存在するクラック面の法線から零でないある角度をもって超音波を送信すると、異種材料の材質によらず受信散乱波の散乱振幅は高周波数域において周期性を示すことが Hirose 等⁵⁾によって理論的に明らかにされている。水浸法による界面クラック長の推定を意図して、Hirose 等⁵⁾による研究を水/上層固体/界面クラック/下層固体問題に拡張したものに文献 6) があり、散乱振幅の周期性は現実にはかなりの低周波数域に至るまで保持されていること、またバースト波の搬送周波数を変えた超音波の送受信によりクラック長が計測可能であることが示されている。ここでは、散乱振幅の周期性に関する文献 6) の結果を基にしてステンレスクラッド鋼界面クラック長の計測を行う。このとき、ステンレスクラッド鋼はステンレス部が外表面となるように使用されるため、ステンレス側から界面クラック長の推定が可能となるように計測上の修正を行う。ステンレス部の厚さは通常数ミリと薄く、搬送周波数特性を保持するようにバースト波の搬送時間を保とうとすると、上部薄層ステンレス内での多重反射が

界面クラックからの散乱波に重なって受信散乱波の周波数特性に影響を及ぼすことが懸念される。このため、ここでは送信時間の短いパルス波を送信し、界面クラックからの受信後方散乱波をフーリエ変換することにより、フーリエスペクトルの周期性を利用して界面クラック長を推定することを試みる。

材料内に存在する欠陥による散乱波のスペクトルが周期特性を示すことは、平底穴試験片に対して Gericke⁷⁾により、水中に置かれた円柱状試験片に対して Adler と Whaley⁸⁾等により実験計測的に知られており、Achenbach 等^{9),10)}により円形及び楕円形クラックの大きさの推定に利用されている。また、クラック端からの回折波を利用したクラック形状の推定法が Achenbach 等¹¹⁾や Schmerr 等¹²⁾により提案されている。各種欠陥による散乱波の諸特性については Tittmann¹³⁾により、また、クラック長の各種推定法については Rehbein 等¹⁴⁾によって詳述されている。

2. 遠方散乱場の積分表現と近似関係式

後に述べる散乱波動計測において、パルス波を送信した場合、受信散乱振幅スペクトルの周期性について解析結果と計測結果の対応関係を周波数軸上で確認した上で、実際に計測で使用するトランスデューサーの利用周波数帯域を決定したい。ここでは水浸法に対する遠方散乱圧力場の積分表現と遠方散乱場の性質を表す近似関係式を後の利用のためにまとめる。

2.1 水中遠方圧力場の積分表現

図-1に示すような水/ステンレス/母材(普通鋼)のステンレスと母材の界面に長さ $2a$ のクラック S が存在している場合を考える。送信側トランスデューサ T から超音波を送信し、受信側トランスデューサ R でクラックからの散乱波を受信し、受信散乱波の周期特性からクラック長 $2a$ を推定したい。この問題の理論・数値解析的扱いは既に文献6)に詳述されているため、ここでは後にパルス波を送信した場合の計測結果を理論解析結果と比較するために必要となる水中遠方圧力場の表現式のみを要約する。

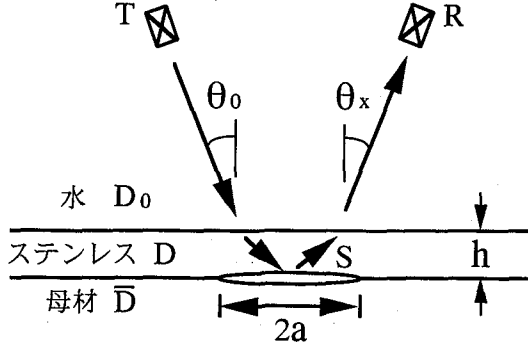


図-1 長さ $2a$ のクラッド鋼界面クラック S

界面上に存在するクラック S により生じた水中の散乱圧力場 p^{sc} は次のように表現できる。

$$p^{sc}(x) = \int_S T_{jk}^n G_k(x, y) [u_j(y)] ds_y, \quad x \in D_0 \quad (1)$$

ここで、 $[u_j] = u_j - \bar{u}_j$ は界面クラックの開口変位であり、 $G_k(x, y)$ はステンレス D 内の点 y に作用する k 方向の単位の集中力によって生じた水中(D_0)の点 x における圧力場を表すグリーン関数である。また、 $T_{jk}^n G_k$ はグリーン関数の応力の意味の微分を表す。式(1)中のグリーン関数 $G_k(x, y)$ は次のように書ける⁶⁾。

$$G_k(x, y) = \sum_{\alpha=L, T} \{ D_k^\alpha(x, y) + \sum_{\beta=L, T} R_k^{\beta\alpha}(x, y) \} \quad (2)$$

上式中の D_k^α はステンレス内の点 y から水中の点 x に直接伝播する波動成分 $\alpha = L$ (縦波), T (横波)であり、 $R_k^{\beta\alpha}$ は各 $\beta = L$ (縦), T (横)波が界面で反射した後に α 波として点 x に伝播する波動成分を表している。

いま、 k_F を水中超音波の波数として $k_F|x| \gg 1$ の意味で遠方近似を導入すると、式(2)に示したグリーン関数は近似的に評価できて、式(1)の遠方表現を次のように得る。

$$p^{sc}(x) \approx \sum_{\alpha=L, T} \Omega_F^\alpha(k_F, \theta_x) \sqrt{\frac{2}{\pi k_F |x|}} e^{i(k_F |x| - \frac{\pi}{4})} \quad (3)$$

ここで、 Ω_F^α は水中の遠方における散乱圧力場の円筒波成分の振幅を表しており、具体的には次のようである。

$$\Omega_F^\alpha(k_F, \theta_x) = \int_S T_{jk}^n \{ \hat{D}_k^\alpha e^{ik_\alpha p^+ \cdot y} + \sum_{\beta=L, T} \hat{R}_k^{\beta\alpha} e^{ik_\beta p^- \cdot y} \} |_{\zeta=\sin \theta_x} [u_j(y)] ds_y \quad (4)$$

上式(4)中の指標 α は水中の散乱圧力場の生成に寄与した固体 D 内の波動モード($\alpha = L, T$)を表している。また、 $\hat{D}_k^\alpha$ と $\hat{R}_k^{\beta\alpha}$ はグリーン関数の遠方近似の過程で生じた平面波成分の振幅に対応する量であり、次のようになる。

$$\hat{D}_k^\alpha = \frac{i}{4\mu c_F} \left(\frac{c_T}{c_\alpha} \right)^2 \frac{\nu^F}{\nu^\alpha} R^{\alpha F} d_k^{+\alpha} \quad (5)$$

$$\hat{R}_k^{\beta\alpha} = \frac{i}{4\mu c_F} \left(\frac{c_T}{c_\beta} \right)^2 \frac{\nu^F}{\nu^\beta} R^{\alpha F} R^{\beta\alpha} d_k^{-\beta} \quad (6)$$

ここで、 $R^{\alpha F}$ はステンレス中の平面 $\alpha(=L, T)$ 波から水中超音波への透過率であり、 $R^{\beta\alpha}$ はステンレスと母材の界面における平面 $\beta(=L, T)$ 波から平面 α 波への反射率である。また、 c_L と c_T はステンレス中の縦波と横波の波速、 c_F は水中超音波の波速である。散乱振幅 Ω_F^α の表現式(4)~(6)において、散乱波の伝播方向を表す $p^{\pm\alpha}$ 、また偏向方向を表す $d^{\pm\alpha}$ は次のように表される。

$$p^{\pm\alpha}(\zeta) = (c_\alpha \zeta / c_F, \pm \nu^\alpha(\zeta)) \quad (7)$$

$$\nu^\alpha(\zeta) = [1 - (c_\alpha \zeta / c_F)^2]^{1/2}, \quad \Im(\nu^\alpha) > 0 \quad (8)$$

$$d^{\pm\alpha}(\zeta) = \begin{cases} p^{\pm\alpha}(\zeta) & \text{for } \alpha = L \\ e_3 \times p^{\pm\alpha}(\zeta) & \text{for } \alpha = T \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 $\zeta = \sin \theta_x$ であり、 θ_x は水中の散乱波の観測角である。

2.2 高周波近似の導入と遠方散乱場の周期特性

式(4)に示した散乱振幅の表現式は界面クラック S 上の積分を含んでいる。散乱振幅の高周波数域における性質を明らかにするため、界面クラックの開口変位にキルヒホフ近似¹⁵⁾を導入し、式(4)の積分を近似的に評価する。

現問題に対し、開口変位のキルヒホフ近似は次のように書ける(図-2参照)。

$$[u_j(y)] \approx f_j(\theta'_\gamma) e^{ik'_\gamma \sin \theta'_\gamma y_1}, \quad \gamma = L, T \quad (10)$$

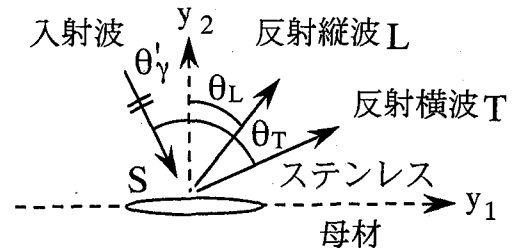


図-2 開口変位のキルヒホフ近似

ここで、 k'_γ と θ'_γ はクラックに対する入射波の波数と入射角である。また $f_j(\theta'_\gamma)$ は入射波の偏向ベクトル、反射縦波と横波の反射率と偏向ベクトルに関する関数であるが、波動の入射角にのみ関係し、クラック面上の位置 y_1 についてみれば定数となる関数である。開口変位の高周波域近似(10)を水中の散乱振幅の表現(4)に

代入すると、クラック面上の積分は解析的に評価できて結果は次のようになる。

$$\Omega_F^\alpha \propto 2ak_\alpha \frac{\sin \Delta}{\Delta} \quad (11)$$

ここに、

$$\sin \theta_\alpha = c_\alpha \sin \theta_x / c_F \quad (12)$$

$$\Delta = (k_\alpha \sin \theta_\alpha + k'_\gamma \sin \theta'_\gamma) a \quad (13)$$

である。上式中の θ_α ($\alpha = L, T$) はクラック面での反射角であり、この角はステンレス内の反射波動成分 α ($= L, T$) の水中への入射角と一致する。また、 k_α はこれら波動成分の波数である。

上記結果(11)より、散乱振幅 Ω_F^α は $k_\alpha = k'_\gamma$ かつ $\theta_\alpha = -\theta'_\gamma$ の場合 (垂直入射の場合) を除き、高周波数域では周期的に振動することがわかる。また、散乱振幅の極小値 (あるいは極大値) は、式(11)の Δ が次の関係を満足する毎に現れる。

$$\Delta = (k_\alpha \sin \theta_\alpha + k'_\gamma \sin \theta'_\gamma) a = n\pi \quad (14)$$

3. 水浸法による解析と計測結果の比較

実際の波動計測においては使用するトランスデューサーが周波数特性を有しているため、計測波形を基にしたクラック長の算定に当たり、前もってどの程度の周波数帯域を考慮すれば良いかの目安があれば便利である。ここでは、前節にまとめた散乱振幅の表現式(4)を基に数値解析を行った結果とパルス波を送信して界面クラックからの後方散乱波形を計測した結果を比較検討することにより、本研究において計測上使用する周波数帯域を決定した後、水浸法に基づいた界面クラック長の一推定結果について述べる。

3.1 計測システム

図-3にパルサー・レシーバを基本とした超音波計測システムの概要を水浸法について示す。パルサーにより発信されたパルス波は、広帯域トランスデューサーに送られる。トランスデューサーにより変換された超音波パルスはステンレスと母材間の界面に存在するクラックへと伝播する。界面クラックにより散乱された波動は、発信と同一のトランスデューサーにより受信され、受信された信号はレシーバに送られA/D変換ボードを介してPCに転送される。受信散乱波はPC内で時間域波形からFFTにより周波数域波形に変換され、後方散乱振幅の周波数域スペクトルが計測される。図-4に本研究で計測に使用した中心周波数 $f_c = 4\text{MHz}$ の広帯域型トランスデューサーの周波数特性を示す。これはトランスデューサーをクラッド鋼のステンレス側の表面に対して垂直に配置し、ステンレス表面からの反射波形を周波数域に変換したものである。

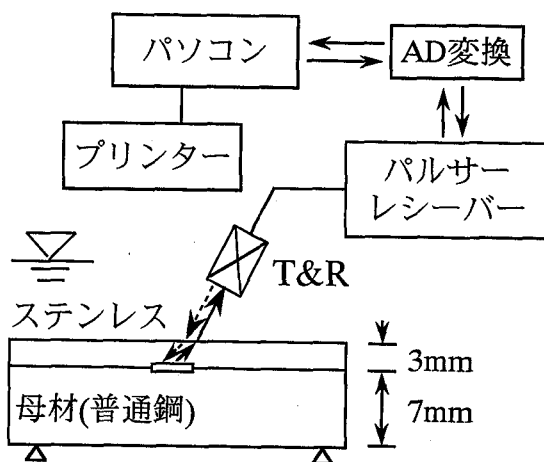


図-3 計測システム

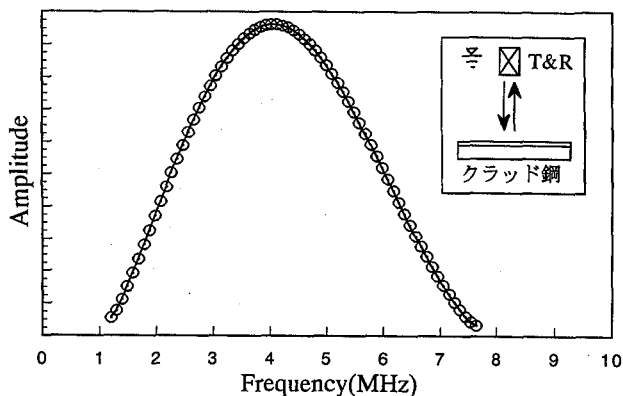


図-4 トランスデューサーの周波数特性

3.2 解析と計測による散乱振幅の周期特性の確認

ここでは、上記計測システムで計測された散乱波形を前節にまとめた散乱振幅の解析により得られた結果と比較することにより、計測と解析による散乱振幅の周期特性の対応関係を確認する。

図-5は上側が厚さ3mmのステンレスで下側が厚さ7mmの普通鋼の界面に長さ $2a$ のクラックが入った試験片に対する散乱振幅の計測状況を示したものである。実際の試験片はクラック長が $2a=6\text{mm}$, 4mm , 2mm , 1mm と4種類の長さの人工クラックが入った試験片を作成した。先の節2.1にまとめた解析においては厚みのないクラックを解析対象としているが、ここで作成した人工クラックは加工上、 0.2mm 程度の厚みを有している。図-6は水中の入射角と観測角を $\theta_0 = \theta_x = 20^\circ$ と選んだ場合のクラック長 $2a=6\text{mm}$ と 4mm に対する散乱振幅の計測値と解析値の比較を示したものであり、上側が長さ6mmの場合、下が4mmの場合である。なお、図-6における水中超音波の入射角 $\theta_0 = 20^\circ$ は、水中超音波がステンレス内で横波にモード変換するように、縦波の臨界角と横波の臨界角の間の角度に選んでいる。計測値は白丸の入った実線、解析値は実線で表示してある。トランスデューサーの中心周波数 4MHz

を中心にトランスデューサーの周波数帯域2MHzから6MHz内では散乱振幅の周期性に良い対応関係が見られることがわかる。計測と解析による振幅値の相違は、計測では図-4に示したようにトランスデューサー自身に周波数特性が存在すること、現実の材料には減衰等が存在することなどの理由が考えられる。ここでは、散乱振幅の振幅値ではなく散乱振幅の周期特性からクラック長を推定する手法について考えるため、トランスデューサーの帯域内における散乱振幅の周期特性だけの一致を確認すれば十分である。この意味において、界面クラック長の推定においては、2MHzから6MHzの周波数帯域において散乱振幅の周期性を利用することにする。

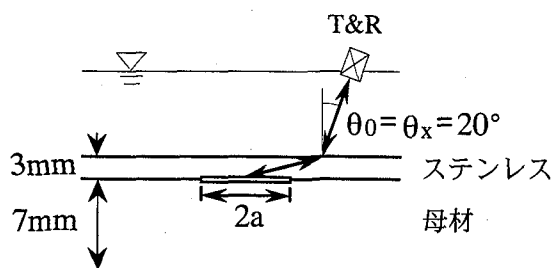


図-5 界面クラックによる後方散乱振幅の計測状況

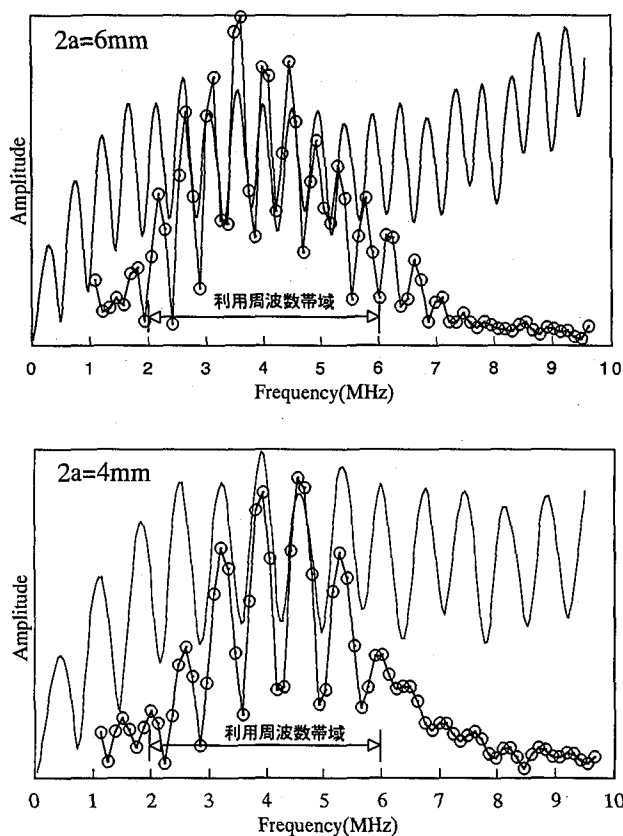


図-6 クラッド鋼界面クラックによる散乱振幅
 $\theta_0 = \theta_x = 20^\circ$ (白丸付き実線：計測値，実線：解析値)

3.3 界面クラック長の近似推定式

散乱振幅の極値間の近似関係式(14)は、ステンレス内の各波動モードの波数と界面クラックに対する各波動成分の入射角と反射角で記述されている。この近似関係式を水中の入射角と観測角及び水中超音波の波速で書き直しておくと、近似関係式が計測したい材料によらず利用できるという意味において、計測上都合がよい。

水とステンレス間の界面上で成立する各波動成分の位相に関する適合条件を利用し、水中の波数 k_F と周波数 f の関係 $k_F = 2\pi f/c_F$ を用いて、関係式(14)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。

$$2a = c_F / \{\Delta f (\sin \theta_0 + \sin \theta_x)\} \quad (15)$$

ここで、 Δf は散乱振幅の極値間の周波数間隔である。図-5に示したように、同一のトランスデューサーで超音波の送受信を行う場合には $\theta_0 = \theta_x$ と置いて、上式は次のようになる。

$$2a = c_F / \{2\Delta f \sin \theta_0\} \quad (16)$$

3.4 水浸法による界面クラック長の推定

節3.2の図-6に示した計測散乱振幅の極小値間の周波数間隔 Δf を読み取り、先に示した界面クラック長の推定式(16)からクラック長を算定した結果を表-1にまとめた。ここで、散乱振幅の極小値間の周波数間隔 Δf はトランスデューサーの帯域2MHz-6MHz内に存在する散乱振幅の極小値間の周波数を平均した値 $(\Delta f_{\min})_{av}$ を用いた。表-1の結果は長さ6mmと4mmのクラックについては図-6に示した散乱振幅の計測結果を基に推定したクラック長であり、長さ2mmと1mmのクラックに対する結果も含めて、界面クラック長の推定結果を $2a'$ として表示している。全てのクラック長に対してほぼ実際のクラック長が推定できていることがわかる。

表-1 界面クラック長の推定結果(水浸法)

クラック長 $2a(\text{mm})$	周波数間隔 $(\Delta f_{\min})_{av}$	推定 クラック長 $2a'(\text{mm})$
6	0.37	5.93
4	0.56	3.92
2	1.13	1.94
1	2.43	0.92

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

4. 接触法による界面クラック長の推定

現実性を考えると、シリコングリース等の接触媒質を介することにより、トランスデューサーをステンレス表面に直接接触させて散乱波動計測を行うことが望ましい。ここでは、角度可変型斜角探触子を利用したステンレスクラッド鋼界面クラック長の推定結果について要約する。

4.1 接触法における計測上の変更点

波動計測システム等は先の水浸法において用いたものを利用できるため、ここでは接触法に係わる点についてだけ述べる。

図-7に示したように、角度可変型探触子にはトランスデューサーの角度を調節するための半円形の亚克力板が取り付けられている。図-7に示したトランスデューサー以外の機器構成は図-3に示した水浸法で利用した機器構成と全く同じである。ここで使用した角度可変接触型トランスデューサーは中心周波数が $f_c=5\text{MHz}$ の広帯域型であり、中心周波数が 5MHz に移動する点を除けば、図-4に示した水浸型トランスデューサーの周波数特性とほぼ同様な周波数特性を有している。このため、散乱波形スペクトルの周期特性を調べるここの目的のためには、 5MHz を中心とした 3MHz から 7MHz の周波数帯域を採用した。また、計測においてはトランスデューサーの角度の選定が一つのポイントとなるが、ここでは亚克力内を伝播する縦波がステンレス内で横波にモード変換するように、亚克力内の波動の入射角を縦波の臨界角以上で横波の臨界角以下になるように選んだ。

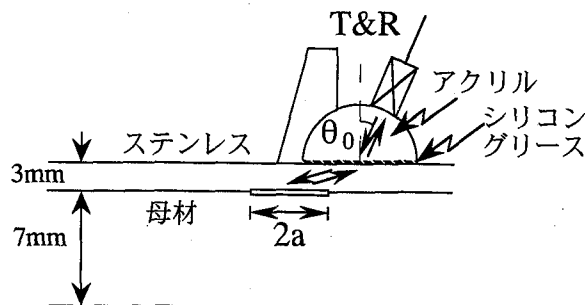


図-7 接触法による計測概要

クラック長の推定式は、節3.3で述べた水浸法の場合と同様に、亚克力とステンレス間の波動モードの関係を整理することにより、次のように書くことができる。

$$2a = c_{L(a)} / \{2\Delta f \sin \theta_0\} \quad (17)$$

ここで、亚克力内超音波の縦波の波速は $c_{L(a)} = 2670\text{m/s}$ と既知であるから、水浸法の場合と同様に送信トランスデューサーの角度 θ_0 を決めて超音波を送信

し、同一のトランスデューサーで受信した散乱振幅の極小値間の周波数間隔 Δf を計測すれば、上式からクラック長 $2a$ を推定できる。

4.2 接触法による界面クラック長の推定

水浸法と接触法では用いたトランスデューサーが異なるため、完全な対応は取れないが、ステンレス内でモード変換した横波の屈折角が水浸法と接触法で一致するように、接触法における亚克力内の入射角を決めることは可能である。ここでは、ステンレス内の横波の屈折角が表-1に対するものと同じになるように、亚克力内の入射角を $\theta_0 = 38^\circ$ に調整し、この場合の界面クラック長の推定結果をまとめたものが表-2である。ここで、クラック長の推定に用いた人工クラックを有するステンレスクラッド材は表-1で使用したものと同じである。また、散乱振幅の極小値間の周波数間隔 Δf は接触型トランスデューサーの帯域 3MHz - 7MHz 内に存在する散乱振幅の極小値間の周波数間隔を平均した値 $(\Delta f_{\min})_{av}$ を式(17)に用いている。接触法においても、 6mm 、 4mm 、 2mm 、 1mm の界面クラック長がほぼ推定できていること、また水浸法における表-1の結果と比較しても推定結果に有意な差は無いことがわかる。

表-2 界面クラック長の推定結果(接触法)

クラック長 $2a(\text{mm})$	周波数間隔 $(\Delta f_{\min})_{av}$	推定 クラック長 $2a'(\text{mm})$
6	0.36	5.98
4	0.55	3.92
2	1.05	2.06
1	1.98	1.09

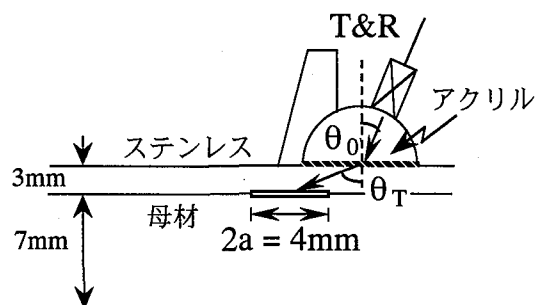
$(\Delta f_{\min})_{av} : \text{in MHz}$

4.3 入射角に関する検討

ステンレス内での横波の屈折角はステンレスと母材間の界面に存在するクラックに対する入射角となるため、亚克力内の入射角を大きく取る方が使用トランスデューサーの周波数帯域内でより多くの周期構造を計測できるという意味において有利と考えられる。ここでは、ステンレス内でモード変換した横波だけが伝播するように、亚克力内の入射角を縦波と横波の臨界角の間で変化させた場合の界面クラック長の推定結果を比較してみた。比較結果を長さ 4mm の界面クラックについてまとめたものを表-3に示す。表にはアク

リル内の入射角に対応するステンレス内の屈折角も参考値として挿入してある。トランスデューサーの周波数帯域内で散乱振幅の周期性が計測されており、この周波数間隔の平均値 $(\Delta f_{min})_{av}$ を使う限りにおいては、入射角が変化しても界面クラック長の推定結果に有意な差は認められず、どの入射角においてもほぼクラック長が推定できていることがわかる。

表-3 入射角に関する検討結果(接触法)



アクリル 入射角 θ_0	ステンレス 屈折角 θ_T	周波数間隔 (Δf_{min}) _{av}	推定 クラック長 2a'(mm)
28°	33.0°	0.69	4.09
30°	35.5°	0.67	4.01
33°	39.2°	0.61	4.03
35°	41.8°	0.58	4.02
40°	48.3°	0.52	3.99
45°	55.2°	0.46	4.08

(Δf_{min})_{av} : in MHz

5. まとめ

ステンレスクラッド鋼界面に存在するクラックの長さを超音波を利用して推定するために、まず水浸法に対し、散乱振幅スペクトルの周期特性に関する解析結果と計測結果の対応関係を確認しながら計測上の利用周波数帯域を確定し、界面クラック長を推定した。さらに水浸法における結果を接触法に拡張することにより、接触法により界面クラック長の推定を行った。このとき、水浸法と接触法共に、ステンレスクラッド鋼のステンレス側表面の法線からステンレス内で波動が横波にモード変換するような入射角を選定し、超音波パルスを送信した。

水浸法により得られた結果を要約すると、1) 使用したトランスデューサーの中心周波数を中心とする数メガヘルツ(ここで示した例では4MHzを中心とする計4MHz)の帯域において、散乱振幅スペクトルの周期特

性は解析と計測で比較的良好一致を示した。2) 計測散乱振幅スペクトルの周波数間隔をもとに界面クラック長を推定した結果、実際の界面クラック長をほぼ推定できた。この計測手法を接触法に応用した結果、3) 接触法においても界面クラック長を比較的良好に推定できることがわかった。

ここで行った散乱波形計測はステンレスクラッド鋼の界面に作成された完全に開口した人工クラックモデルに対するものであり、現実には発生した界面クラックに関する計測ではない。現実のクラックは界面や表面に拘わらず、全面あるいは部分的に閉じている可能性が高く、このようなより現実的な場合に対する解析・計測手法の拡張は今後の課題として残っている。

謝辞： 本研究は、土木学会鋼構造委員会新技術小委員会耐久性WG内の活動の一つである損傷検出評価技術に関する研究の一部として行ったものであり、計測に用いたステンレスクラッド鋼の提供をはじめ、WG委員の方々から多くの有益なご助言を頂きました。委員の皆様方に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 後藤信弘, 関口信雄, 松田英光, 藤田泰, 安波博道, 藤井 堅, 三木千壽: ステンレスクラッド鋼を用いた実寸断面橋梁部材の試作について, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.965-974, 1996.
- 2) 藤井 堅, 三木千壽, 木村秀途, 中川 茂, 安波博道: ステンレスクラッド鋼を用いた箱桁の曲げ疲労実験, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1041-1050, 1997.
- 3) 藤井 堅, 三木千壽, 寺田宏行, 田中和成, 有尾一郎: ステンレスクラッド鋼の材料特性および残留応力とその発生メカニズム, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.103-114, 1998.
- 4) 土木学会 鋼構造新技術小委員会 最終報告書(耐久性研究), 土木学会, 1996.
- 5) Hirose, S. and Kitahara, M.: Scattering of elastic waves by interface cracks between dissimilar materials, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.12, pp.1467-1474, 1993.
- 6) 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.
- 7) Gericke, O.R.: Determination of the geometry of hidden defects by ultrasonic pulse analysis testing, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.35, pp.364-368, 1963.
- 8) Adler, L. and Whaley, H.L.: Interference effect in a multifrequency ultrasonic pulse echo and its application to flaw characterization, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.51, pp.881-887, 1972.
- 9) Achenbach, J.D., Adler, L., Lewis, D.K. and McMaken, H.: Diffraction of ultrasonic waves by penny-shaped cracks in metals: Theory and experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.66, pp.1848-1856, 1979.
- 10) Adler, L. and Achenbach, J.D.: Elastic wave diffraction by elliptical cracks: Theory and experiment, *J. of Nondestructive Evaluation*, Vol.1, pp.87-99, 1980.
- 11) Achenbach, J.D., Viswanathan, K. and Norris, A.: An inversion integral for crack-scattering data, *Wave Motion*, Vol.1, pp.299-316, 1979.
- 12) Schmerr, L.W., Sedov, A. and Chiou, C.P.: A unified constrained inversion model for ultrasonic flaw sizing,

- Res. Nondestr. Eval.*, Vol.1, pp.77-97, 1989.
- 13) Tittmann, B.R.: Scattering of elastic waves from simple defects in solids, a review, *Wave Motion*, Vol.5, pp.299-306, 1983.
- 14) Rehbein, D.K., Thompson, R.B. and Buck, O.: Crack length determination by ultrasonic methods, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.12, pp.2159-2165, 1993.
- 15) Achenbach, J.D., Gautesen, A.K. and McMaken, H.: *Ray Methods for Waves in Elastic Solids*, Pitman Pub., Boston, 1982.

(1998 年 9 月 18 日 受付)