

接触法によるステンレスクラッド鋼界面に存在するクラック長の推定

東海大学大学院 学生員 ○羽田 幸寿
東海大学海洋学部 正 員 北原 道弘

1. はじめに

耐食性鋼材のより積極的活用を支援する事を目的として、ステンレスクラッド鋼の界面に存在するクラック長を超音波により推定することを試みる。クラッド鋼を水中に沈め、水中センサーを利用してクラック長を推定した研究に文献[1]があるが、本研究では、実用性の観点から接触型センサーを利用した接触法を採用する。接触法により、クラック端から発生する散乱波の干渉による散乱振幅の周期性を計測し、界面に存在するクラック長を推定した結果を示す。このとき、超音波の入射角の相異によるクラック長の推定精度について検討するため、入射角を変えた計測を行った。

2. クラック長の推定法

本研究で採用した接触法の概要を図1に示す。図に示すように、センサーにはセンサーの角度を調節するための半円形のアクリルが取り付けられてある。送信センサー(T)から超音波(縦波)を発信し、ステンレスクラッド鋼界面に存在するクラック端からの散乱波を送信と同一のセンサー(R)で受信し、受信した散乱波の特性からクラック長を推定したい。

センサー角度の選定が重要となるが、ここではアクリル内を伝播する縦波がステンレス内では横波にモード変換するように、アクリル内の波動の入射角を縦波の臨界角以上、横波の臨界角以下になるように選んだ。

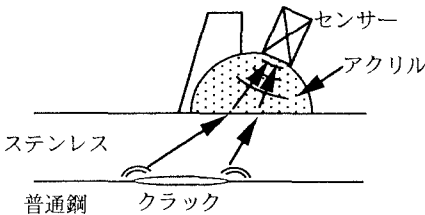


図1 接触法

クラック長の推定法について要約するため、クラックへの入射波形としてバースト波を送信する場合を考える。パルス波を送信した場合も要点は同じである。図2にクラック端への入射波とクラック端からの散乱波形を示す。図2の上側が伝播経路、下側はセンサーの受信時間波形であり、受信波形は2つのクラック端 (tip1 と tip2) からの散乱波の合成となる。受信散乱波形の振幅は送搬周波数によって変動する。この振幅変動は、2つのクラック端への(からの)伝播経路差 $2\Delta l$ により生じる散乱波の干渉に起因している。

$$2\Delta l = 2 \cdot 2a \sin \theta_T \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $2a$ がクラック長、 θ_T はステンレス内の横波の屈折角である。上記経路差に伴う位相差 $\Delta\phi$ は次のようになる。

$$\Delta\phi = k_T 2\Delta l = 4ak_T \sin \theta_T \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k_T はステンレス内の横波の波数である。またアクリルとステンレス界面上の位相の適合条件は次のように書ける。

$$k_L \sin \theta_x = k_T \sin \theta_T \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 k_L はアクリル中の縦波の波数、 θ_x はアクリル内の入射角(=観測角)である。これより、位相差 $\Delta\phi$ は次のように表現できる。

$$\Delta\phi = 4ak_L \sin \theta_x = 8\pi f a \sin \theta_x / c_L \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 f は周波数、 c_L はアクリル中の縦波の波速である。この位相差 $\Delta\phi$ が周期 2π と一致するときの周波数間隔を Δf と書くことにすれば、 Δf は次のようになる。

$$\Delta f = c_L / \{4a \sin \theta_x\} \dots\dots\dots (5)$$

この関係式(5)は、クラック長 $2a$ の推定式として次のように書き直すことができる。

$$2a = c_L / \{2\Delta f \sin \theta_x\} \dots\dots\dots (6)$$

アクリル内での超音波の縦波の波速 c_L は既知であるから、送信センサーの角度 θ_x 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間の周波数間隔 Δf を計測すれば、式(6)からクラック長 $2a$ を推定することができる。

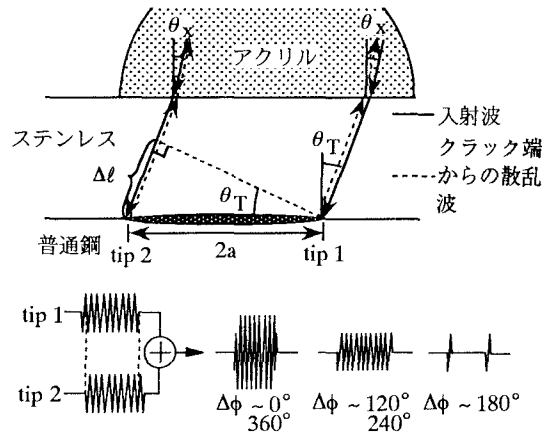


図2 受信散乱波の干渉による振幅変動

3. 実験概要

計測にはパルサー・レーザーを使用し、これをパソコンで制御することにより、パルス波を送信しクラック

端からの散乱波を受信してパソコン上で周波数域の散乱振幅に変換し、散乱振幅の周波数に対する周期特性 Δf を観測した。

計測では、厚さ3mmのステンレス(SUS316L)と厚さ7mmの普通鋼からなるクラッド鋼を使用した。ステンレスと普通鋼の界面に存在するクラックのモデルは、放電加工によりクラッド鋼界面に放電線(0.2mm)を貫通させて作成した(図3)。

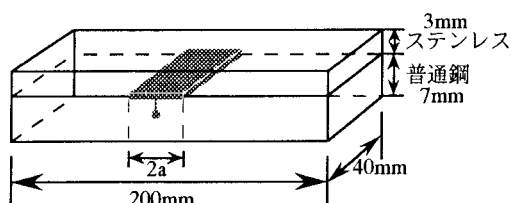


図3 ステンレスクラッド鋼と模擬界面クラック

ここで使用したセンサーは角度可変型接触探触子であり、中心周波数5MHzの広帯域型探触子である。図4はこのセンサーの周波数特性を表しており、ステンレス材表面からの反射波の時間波形を周波数域に変換してその振幅を表示したものである。また、センサーの亚克力部とステンレス表面の接触媒質としてはシリコングリースを採用している。

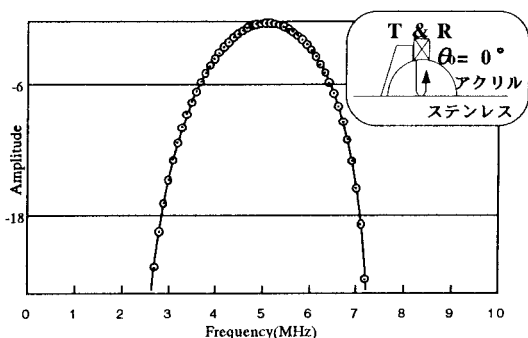


図4 センサーの周波数特性

4. クラッド鋼界面クラック長の推定結果

亚克力/ステンレス内の縦波の臨界角は約 $\theta_x^{cr(L)} = 27.5^\circ$ 、横波の臨界角は約 $\theta_x^{cr(T)} = 59.5^\circ$ であり、計測においては接触型センサーの入射・観測角を $28^\circ, 30^\circ, 33^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ に設定して超音波の送信と散乱波の受信を行った。この入射角は、亚克力内の縦波がステンレス内に入射すると横波にモード変換するように選んだ。図5は、一例として入射角 30° 、長さ $2a=2.1\text{mm}$ のクラックに対して受信された散乱波の散乱振幅を周波数に対して図示したものである。図より、センサーの帯域内における散乱振幅の規則的な周期性がわかる。表1はそれぞれの入射角において、センサーの帯域内における散乱振幅の極小値間の周波数間隔の平均 $(\Delta f_{min})_{av}$ を算定し、推

定式(6)を利用してクラック長を推定した結果 $(2a')$ をまとめたものである。表から、入射角が大きくなるにつれて周波数間隔の平均 $(\Delta f_{min})_{av}$ が小さくなるという特徴が読み取れる。また、どの角度においても比較的良くクラック長が推定できている。このことから、縦波と横波の臨界角の間で入射角 θ_x を大きくするほうがセンサーの周波数帯域内でより多くの周期構造を生成できるというメリットはあるが、入射角が小さくてもセンサーの帯域内で散乱振幅の周期性が計測できておればクラック長の推定結果はさほど変わらないことがわかる。

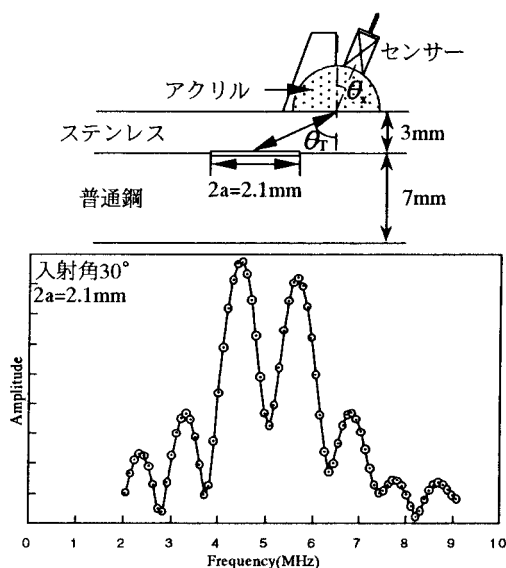


図5 散乱振幅

表1 界面クラック長の推定結果
 $2a=2.1\text{mm}$

θ_x	θ_r	$(\Delta f_{min})_{av}$	$2a'(\text{mm})$
28°	33.0°	1.42	2.01
30°	35.5°	1.27	2.10
33°	39.2°	1.10	2.23
35°	41.8°	1.07	2.17
40°	48.3°	0.98	2.11
45°	55.2°	0.84	2.25

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

謝辞

本研究の遂行にあたり、(社)鋼材倶楽部より平成8年度教育助成を受けました。記して感謝の意を表します。

参考文献

[1] 羽田, 北原; ステンレスクラッド鋼の界面クラック長の推定, 中部支部研究発表会講演概要集, pp.23-24, 1996.