

ステンレスクラッド鋼の界面クラック長の推定

東海大学海洋学部 学 生 ○羽田 幸寿
東海大学海洋学部 正 員 川上 哲太郎
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目的で、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た。推定法の要点は、クラック端から発生する散乱波の干渉周期の利用にある。推定法について要約した後、いくつかのクラック長に対する推定結果を示す。また、本推定法の短所について触れ、短所のうちの一つの克服策について考える。

2. 推定法の要点⁽¹⁾

異種材料界面に存在する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手法の要点は同じである。

図1にクラック端への入射波とクラック端からの散乱波形の概略を示す。図の上側が伝播経路、下側はセンサーの受信波形であり、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バースト波の送搬周波数によって変動する。この振幅変動は、次式に示す伝播経路差により生じる散乱波の干渉に起因している。

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 = 2a(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (1)$$

この経路差に伴う位相差は次のようになる。

$$\Delta \phi = k_1 \Delta l_1 + k_2 \Delta l_2 = 2a(k_1 \sin \theta_1 + k_2 \sin \theta_2) \quad (2)$$

水浸法を利用する場合、上部固体と水の界面上の位相適合条件は次のように書ける。

$$k_1 \sin \theta_1 = k_F \sin \theta_0, \quad k_2 \sin \theta_2 = k_F \sin \theta_x \quad (3)$$

ここで、 k_F は水中の波数、 θ_0 は水中の入射角、 θ_x は水中の観測角である。これより、位相差 $\Delta \phi$ は次のように書ける。

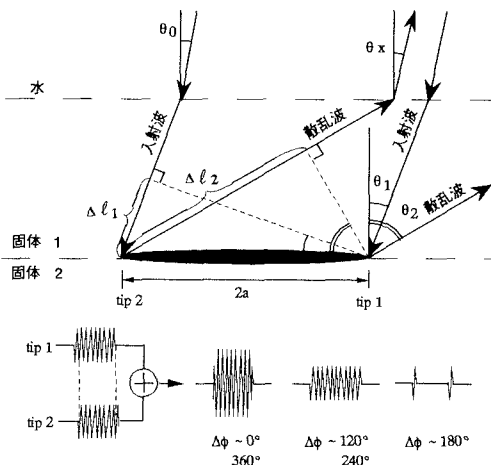


図1 受信散乱波の干渉による振幅変動

$$\Delta \phi = 2ak_F(\sin \theta_0 + \sin \theta_x) = 4\pi fa(\sin \theta_0 + \sin \theta_x)/c_F \quad (4)$$

ここで、 f は周波数、 c_F は水中の波速である。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。

$$\Delta f = c_F / \{2a(\sin \theta_0 + \sin \theta_x)\} \quad (5)$$

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。

$$2a = c_F / \{\Delta f(\sin \theta_0 + \sin \theta_x)\} \quad (6)$$

入射角と観測角が一致するパルス・エコー法($\theta_0 = \theta_x$)の場合、推定式は次のようになる。

$$2a = c_F / \{2\Delta f \sin \theta_0\} \quad (7)$$

水中超音波の波速は $c_F \approx 1480\text{m/s}$ と既知であるから、送信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間の周波数間隔 $\Delta f_{\min}$ を計測すれば、式(7)からクラック長 $2a$ を推定することができる。

3. クラッド鋼に対する推定結果

図2は、ステンレスクラッド鋼のステンレス(SUS316L)と普通鋼の界面に存在するクラック長の推定結果をまとめたものである。

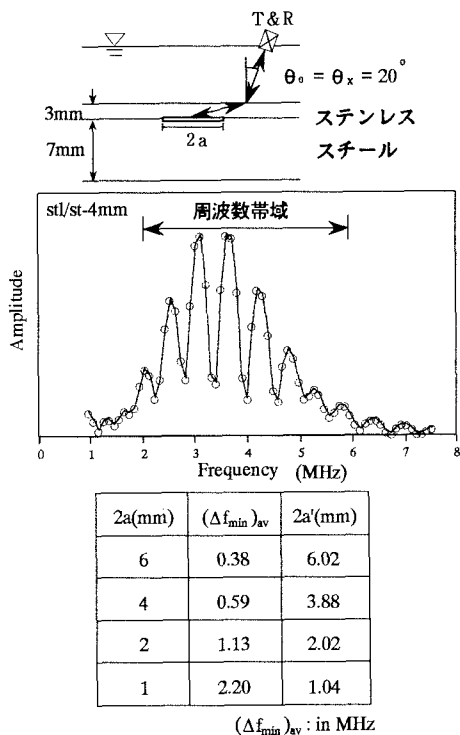


図2 クラック長の推定 (ステンレスクラッド)

最上部の図は計測概要を示しており、厚さ 3mm のステンレスと厚さ 7mm の普通鋼界面上のクラックに対して、水中センサーの入射・観測角を 20° 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、鋼材内に入射する波動成分が横波にモード変換するように選ばれている。中央の図は、一例として、長さ $2a=4\text{mm}$ のクラックに対して受信された散乱波形の散乱振幅を周波数に対して図示したものである。用いたセンサーは、中心周波数 4MHz（公称）の広帯域型であり、帯域を図中に矢印で書き込んでいる。散乱振幅が周期的に変動している様子がわかる。最下部の表は、6mm, 4mm, 2mm, 1mm 計 4つのクラックについて、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、式 (7) 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。比較的良くクラック長を推定していることがわかる。

4. 推定法の問題点

本報告で使用したクラッド鋼については、図 2 にまとめたように比較的良好にクラック長を推定できたが、さらなる応用を考えると、以下の問題点が指摘できる。

- (a) 上部ステンレスの厚さがさらに薄くなった場合、薄層ステンレス内部の多重反射モードがクラック端からの散乱波の干渉効果に影響を与える（干渉効果を弱める或いは打ち消す）可能性がある。
- (b) クラック長の推定式 (6) と (7) から明かであるが、送信・受信センサーの角度が鋼材表面に垂直（入射角と観測角が零度）な場合には、本手法は利用できない。
- (c) これも、式 (6) と (7) から明かであるが、クラック長が短くなってくると、散乱振幅の変動周期間隔 Δf は大きくなり、現時点において実際に入手できるセンサーの有効帯域に問題が生じる。

5. 表層厚が薄くなった場合の散乱波動場の一特性

上記 4. にまとめた 3つの問題点のうち、(a) と (b) に関する対応策について考えるため、図 3 に示すように上部固体内の多重反射モードを考慮に入れて、水 (D_0) / 固体 (D) / 固体 ($\bar{D}$) からなる 3 層体の固体間の界面に存在するクラックによる散乱波動場の解析を行った結果を図 4 に示す。この場合、センサーの水中入射・観測角は $\theta_0 = \theta_x = 0^\circ$ と設定した。

上側の図は全体的状況を確認したもので、 $dk_L = \pi$ 付近に上部固体間の多重反射による共振ピークが存在している。下側の図は、低周波数域 ($0 < dk_L < 1$) に存在する小さな変動部分を拡大したものであり、クラック長 $2a$ に比較して上部固体の厚さ d が小さくなると、低周波数域に散乱振幅のピークが生じてくるのがわかる。

この低周波域における散乱振幅のピークは、クラックと水の間の薄層固体部が薄板的に挙動するモードにより生じたものであり、今後さらに対応関係を整理する事により、薄層界面に存在するクラックに対してもクラック長の推定が可能となるよう改良を加えたい。

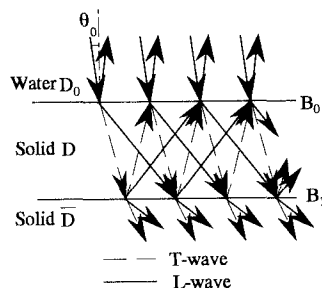


図 3 上部固体内の多重反射モード

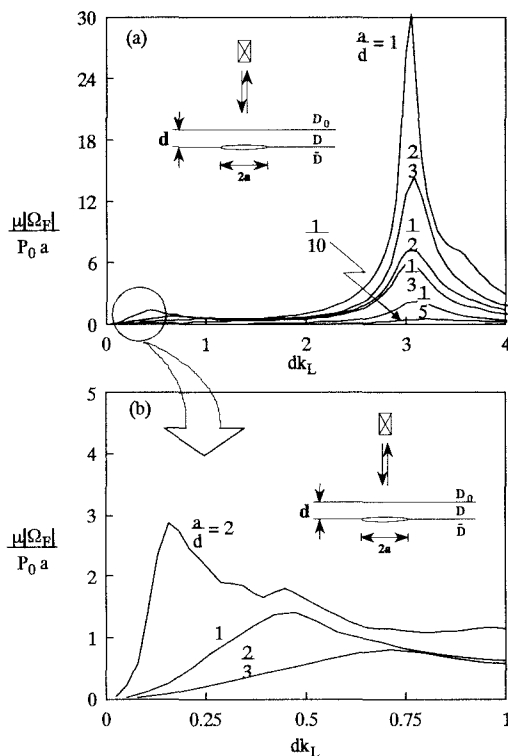


図 4 無次元化波数 dk_L に対する水中散乱振幅 $\mu | \Omega_F | / P_0 a$

参考文献

- (1) 横井, 稲垣, 北原; 異種材料界面剥離長の推定に関する実験と解析, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.5-6, 1995 年 3 月。