

部材裏面クラックによる超音波後方散乱場の解析

東海大学海洋学部 学生員 ○梅田 耕一
東海大学海洋学部 学生員 森口 哲行
東海大学海洋学部 正 員 北原 道弘

1. はじめに

構造部材の裏面に存在するクラックの検出・評価を目的として、部材裏面にに対し垂直に入った表面クラックによる後方散乱場の解析を行ったので報告する。これは、波動の到達時間と振幅情報だけでなく、波動の時間波形と周波数域の波形成分をより積極的にクラックの検出と評価のために利用しようとする一つの試みである。実験と解析の対応の取り方については前年度報告¹⁾に詳しいので、ここでは解析上の要点と解析結果について示す。

2. 後方散乱波形

Fig.1 に示すように、深さ a の表面クラックが部材の裏面に垂直に入った場合を考える。このクラックの深さ a を非破壊的に推定したい。このために、水中圧電型トランスデューサーにより、部材内でクラックに対し 45° で入射する横波にモード変換するように、トランスデューサーの角度を部材法線に対し 18.9° に設定し、水中超音波（縦波）を発信する。このとき、発信と同一のトランスデューサーで受信されるクラックによる後方散乱場は、周波数域で次のように書ける。

$$Y_{\text{exp}}(\omega) = T_o H_w H_b H_{w_s} H_{\text{crack}}^{\text{exp}} H_{s_w} H_w T_r \quad (1)$$

ここに、 $T_o(\omega)$: 発信トランスデューサーの影響、 $H_w(\omega)$: 超音波水中経路の影響、 $H_b(\omega)$: 水中における超音波ビーム特性の影響、 $H_{w_s}(\omega)$: 水→固体界面の影響、 $H_{\text{crack}}^{\text{exp}}(\omega)$: 固体内における弾性波のクラックとの相互作用、 $H_{s_w}(\omega)$: 固体→水界面の影響、 $T_r(\omega)$: 受信トランスデューサーの影響、である。

いま、固体内における弾性波のクラックとの相互作用を除いて、実験に完全に対応する解析が出来たとする。このとき、解析的なトランスデューサーでの受信後方散乱場は次のように書ける。

$$Y_{\text{theory}}(\omega) = T_o H_w H_b H_{w_s} H_{\text{crack}}^{\text{BEM}} H_{s_w} H_w T_r \quad (2)$$

ここに、 $H_{\text{crack}}^{\text{BEM}}(\omega)$ は固体内での弾性波のクラックとの相互作用を表し、この項は積分方程式法により評価する。

いま、解析波形(2)に実験波形(1)に対応した波形処理を加えるため、部材コーナー部での反射波形を参照信号として選ぶ。このとき、トランスデューサーの位置、角度などは Fig.1 と全く同一の状態に配置されており、固体内のクラックが 45° のコーナーに置き換えられた点だけ異なるものとする。このコーナーでの反射参照信号は次のように書ける。

$$X_{\text{ref}}(\omega) = T_o H_w H_b H_{w_s} H_{\text{cor}} H_{s_w} H_w T_r \quad (3)$$

ここで、 $H_{\text{cor}}(\omega)$ は固体内における弾性波のコーナー部での反射を表し、この項 $H_{\text{cor}}(\omega)$ は解析的に評価できる。解析波形(2)を参照信号(3)で割算し、解析波形 $Y_{\text{theory}}(\omega)$ について整理すると次のようになる。

$$Y_{\text{theory}}(\omega) = \frac{X_{\text{ref}}(\omega)}{H_{\text{cor}}(\omega)} H_{\text{crack}}^{\text{BEM}}(\omega) \quad (4)$$

上式(4)は、固体内での弾性波のクラックによる後方散乱場 $H_{\text{crack}}^{\text{BEM}}(\omega)$ を、水中超音波パスの影響を表す項 $X_{\text{ref}}(\omega)/H_{\text{cor}}(\omega)$ で補正したものを、解析波形 $Y_{\text{theory}}(\omega)$ とすることを意味している。以後、式(4)の意味における $Y_{\text{theory}}(\omega)$ を解析波形と呼ぶ。

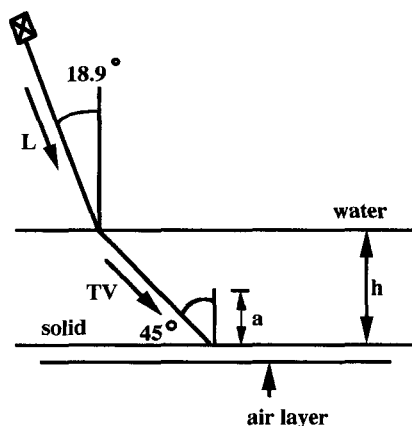


Fig.1 Surface breaking crack of depth a in a steel plate

3. 固体内後方散乱場の表現

式(4)の表現を用いて解析波形を決めるためには、固体内のクラックによる後方散乱場 $H_{\text{crack}}^{\text{BEM}}(\omega)$ を求める必要がある。このために、半無限弾性体内のグリーン関数 $\bar{\sigma}_{\alpha\beta\gamma}^G$ を利用した次の後方散乱場の表現を採用する。

$$u_{\gamma}^{SC}(\bar{x}_p) = \int_{\Gamma_c^+} \bar{\sigma}_{\alpha\beta\gamma}^G(\bar{x}; \bar{x}_p) \Delta u_{\alpha}(\bar{x}) n_{\beta}(\bar{x}) dS \quad (5)$$

ここに、 u_γ^{SC} が後方散乱場、 Δu_α はクラックの開口変位、 n_β はクラック面上の単位法線ベクトル、 Γ_C^+ はクラックの表面である。上式 (5) において、遠方 ($|\bar{x}_p| \rightarrow \infty$) 近似を導入すれば、散乱場は次のように書ける。

$$u_\gamma^{SC}(\bar{x}_p) = u_\gamma^B(\bar{x}_p) + u_\gamma^R(\bar{x}_p), \quad (|\bar{x}_p| \rightarrow \infty) \quad (6)$$

ここに、 u_γ^B は散乱波 u_α^{SC} の縦波 (L) と横波 (TV) の成分を、 u_γ^R は表面波 (R) の成分を表しており、これらは次のように書ける。

$$u_\gamma^B(\bar{x}_p) = \sum_{\xi=L,T} \frac{U_\gamma^\xi(\bar{x}_p)}{(8\pi k_\xi |\bar{x}_p|)^{1/2}} \exp\left(ik_\xi |\bar{x}_p| + i\frac{\pi}{4}\right), \quad |\bar{x}_p| \rightarrow \infty \quad (7a)$$

$$u_\gamma^R(\bar{x}_p) = \sum_{\xi=L,T} U_\gamma^{\xi R\pm}(\bar{x}_p) \exp(ik_\xi k^{\xi R\pm} \cdot \bar{x}_p), \quad \bar{x}_{p1} \rightarrow \pm\infty \quad (7b)$$

ここに、 U_γ^ξ と $U_\gamma^{\xi R\pm}$ は次のようである。

$$U_\gamma^\xi = \int_{\Gamma_C^+} S_{\alpha\beta\gamma}^\xi(\bar{x}; \bar{x}_p) \Delta u_\alpha(\bar{x}) n_\beta(\bar{x}) dS \quad (8a)$$

$$U_\gamma^{\xi R\pm} = \int_{\Gamma_C^+} S_{\alpha\beta\gamma}^{\xi R\pm}(\bar{x}) \Delta u_\alpha(\bar{x}) n_\beta(\bar{x}) dS \quad (8b)$$

上式中の $S_{\alpha\beta\gamma}^\xi$ と $S_{\alpha\beta\gamma}^{\xi R\pm}$ の具体的な表現は省略するが、クラック上のソース点 $\bar{x}$ 、遠方の観測点 $\bar{x}_p$ の位置関係により決まる量であり、これらの表現に積分項は存在しない。

実験波形 (1) と解析波形 (4) を比較することを考えた場合、クラックの深さ a が比較的大きいときには、クラックの開口変位 Δu_α を用いた散乱場の表現 (6)~(8) は実際の実験波形をよく近似すると予想される。クラックの深さ a が小さい場合、実験で用いるクラックは小さいながらも有限の幅を有しており、このクラック幅の影響が散乱場に現れると考えられる。そこで、クラック幅の影響を考慮できるノッチに対する解析散乱波形も計算できるようプログラム化した。この場合、式 (8) において、クラックの開口変位 Δu_α の代わりに、ノッチ表面上の変位 u_α を用いれば、遠方散乱場の表現 (6)~(8) は、そのままノッチの場合にも適用できる。

4. 解析結果

クラックの深さ a が 0.6mm から 2.4mm まで、0.1mm 毎にクラックの深さを変え、計 19 ケースについて式 (4) に基づき、後方散乱場の時間域の波形と周波数域の波形を生成した。Fig.2 に時間域の波形の一部を、Fig.3 に周波数域の波形の一部を示す。

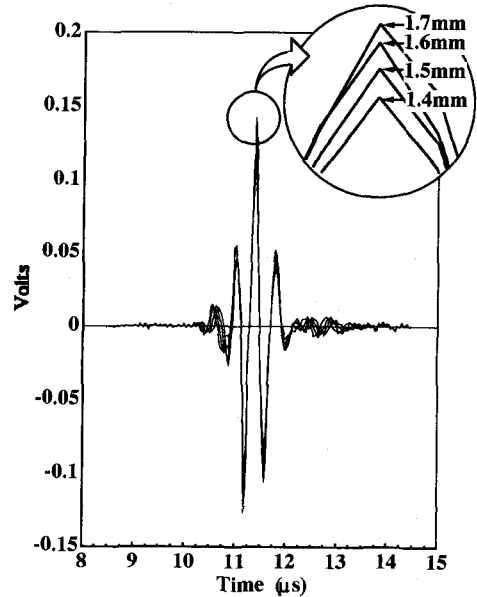


Fig.2 Backscattered waveform (Time domain)

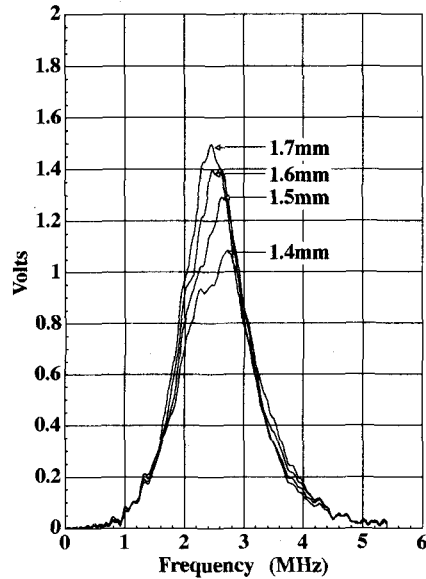


Fig.3 Backscattered waveform (Frequency domain)

5. おわりに

ここで作成したクラックによる後方散乱波動場は、ニューラルネットワークのトレーニング用知識ベースとして活用することを考えている。

参考文献

- 森口, 田中, 北原: 表面クラックによる散乱波動場解析, 平成2年度土木学会中部支部研究発表会概要集, pp.4-5, 1991