SH波を利用した円管表面クラックの位置と長さの推定

1. はじめに

円管の軸方向に偏向した SH 波を利用して円管表面に存 在するクラックの位置と長さを推定するために,表面に設 置した SH 波探触子から生成される入射波動場とクラック の存在により生じる散乱波動場を可視化することにより, 探触子で受信される散乱波形とクラックとの関係を明らか にすることを試みた結果について報告する.曲率を有する 円管表面に沿って伝播・散乱する波動場を可視化するため に境界要素法を採用する.ここで,探触子表面上に作用す る表面力を時間差を設けて駆動することにより入射波を生 成する.このとき,時間差の与え方により入射波の波面を 制御することが可能となる.

2. 数值解析手法

2.1 面外問題の積分方程式



図-1 円管外側表面付近の欠陥への入射波 図-1に示すような円管外側表面付近に存在する欠陥を考 える.このとき外側境界 *S_h*,探触子面 *S_t*,および欠陥表 面 *S*上の積分方程式は以下のようになる.

$$C(\boldsymbol{x})u(\boldsymbol{x}) = \int_{S_h} \left\{ U(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})t(\boldsymbol{y}) - T(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})u(\boldsymbol{y}) \right\} dS_y$$

+
$$\int_{S_t} \left\{ U(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})\overline{t}(\boldsymbol{y}) - T(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})u(\boldsymbol{y}) \right\} dS_y$$

+
$$\int_{S} \left\{ U(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})t(\boldsymbol{y}) - T(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})u(\boldsymbol{y}) \right\} dS_y,$$

$$\boldsymbol{x} \in S_h + S_t + S \qquad (1)$$

ここで, \bar{t} は入射波面を制御するために探触子面上で時間 差を付けて与える表面力であり,円管の外側と欠陥表面上 が無応力状態であれば, S_h とS上でt = 0となる.

2.2 斜角入射

斜角探触子の表面から固体内に入射波が角度 α で入射す る場合を考える.図-2のように探触子の表面 S_t において 節点 $z_1 \sim z_n$ の各節点間の距離を Δz とする.時間域にお いて $z_1 \sim z_n$ の順に, Δt ずつ時間をずらして円筒波を発 生させれば,角度 α 方向に平面波が形成される.この時間 間隔 Δt は $\Delta t = \Delta z \sin \alpha / c_T$ と表される.いま, z_1 にお ける時間域入射波の時間関数を $f_1(t)$ とすると,m 番目の

東北大学大学院	学生員	平元邦幸
東北大学大学院	正員	北原道弘



図-2 探触子による斜角入射

節点の時間関数 $f_m(t)$ は , $f_m(t) = f_1(t - (m - 1)\Delta t)$ となる.ここで,時間関数 $f_1(t)$ を Fourier 変換した周波数域の表現は次のようになる.

$$F_1(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{i\omega t} dt$$
 (2)

同様に $f_m(t)$ を Fourier 変換し, m 番目の節点 z_m の周波 数域の表現を求めると次のようになる.

$$\begin{split} F_m(\omega) &= e^{i\omega(m-1)\Delta t}F_1(\omega) = e^{ik_T(m-1)\Delta z\sin\alpha}F_1(\omega) \ (3) \\ & \bot$$
式は, z に依存する部分

$$\bar{t}(z_m) = e^{ik_T(m-1)\Delta z \sin\alpha} \tag{4}$$

と,依存しない部分 $F_1(\omega)$ の積である.ここで,式 (4) を 式 (1) の表面力として円管外側境界の探触子面 S_t 上で与 えることにより入射波が表現できる.

2.3 時間域波形の計算法

図−3に示すように,定常解を境界要素法によって求め ておき,非定常解を求める過程において,時間域波形の Fourier 変換項 *F*₁(*ω*) を掛けて逆変換すれば,任意点の時 間域波動場を求めることができる¹⁾.



3. 数值解析結果

上記手法を用いて数値解析を行い,散乱波動場を可視化 すると共に探触子位置における時間域散乱波形を求めた. 図-4の上側の図は,探触子面 S_tの幅を 10a として,探 触子面の中央から x₁ = -27a の位置に長さ 7a の表面ク

キーワード:SH波,散乱問題,クラック,可視化,定量化,斜角入射

^{〒 980-8579} 仙台市青葉区荒巻字青葉 06, TEL 022-217-7126, FAX 022-217-7127 URL: http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/



図-4 円管外側表面クラックによる散乱波動場

ラックが存在する場合について,散乱波動場を可視化した 結果を示している.このとき,入射波は探触子面から円管 の外側表面に沿って伝播するように生成している.この図 において, がクラックを通過した後の入射波であり, はクラックからの反射波である.また,クラック端からは

回折波 が伝播している様子がわかる.図-4の下図は,探 触子面の中央で得られた時間域の波形である.入射波およ びクラックからの反射波と回折波が重なった後方散乱波形 が確認できる.



図-5 表面クラックと探触子の幾何学的関係

図-5はクラックが円管の外側表面に存在する場合(上図) と内側表面に存在する場合(下図)について,探触子面中 央で得られた後方散乱波形を探触子とクラックの幾何学的 位置関係と共に示したものである.クラックが外側表面に 存在する場合には回折波が反射波の後部に重なるが,ク ラックが内側表面に存在する場合には回折波とクラックの ルート部からの反射波が分離した波形が得られる.

クラックが外側表面上に存在する場合,今回の入射波の 送信形態では反射波と回折波を分離できなかったが,反射 波と回折波が分離できると,図-5の上図右に示す幾何学的 関係から以下の関係式を得る.この関係式を利用して,ク ラック位置 \bar{x}_1 とクラック長 d が推定できる.

$$\cos\theta = 1 - \frac{L_1^2}{2R^2} \Rightarrow \bar{x}_1 = R\sin\theta \tag{5}$$

$$Rd^{2} - L_{1}^{2}d + R(L_{1}^{2} - L_{2}^{2}) = 0$$
(6)

クラックが内側表面上に存在する場合,同様に図-5の下図に示す幾何学的関係から,クラック位置 \bar{x}_1 とクラック長dを推定する関係式は下のようになる.

$$\cos\theta = \frac{R^2 + r^2 - L_2^2}{2Rr} \Rightarrow \bar{x}_1 = r\sin\theta \tag{7}$$

$$d^{2} + 2(r - R\cos\theta)d + R^{2} + r^{2} - 2Rr\cos\theta - L_{1}^{2} = 0 \quad (8)$$

4. 計測実験結果

アルミニウム製供試体を用いて計測実験を行い,得られた計測波形の一例を図-6と図-7に示す.これらの散乱波の観測時間を基に,推定式(5)及び推定式(7),(8)を用いて位置と長さを推定した結果($\bar{x}_1 \ge \bar{d}$)を表-1に示す.



図-6 外側表面クラック (d=6mm,x₁=20mm)



図-7 内側表面クラック (d=6mm,x₁=20mm)

表−1 クラックの位置・長さの推定結果

model B

model A

		model D		modelii
$d(\mathrm{mm})$	$x_1(\mathrm{mm})$	$\bar{d}(mm)$	$\bar{x}_1(\text{mm})$	$\bar{x}_1(\text{mm})$
4	20	3.3	20.1	19.9
6	20	5.2	20.1	19.6
8	20	7.1	20	20.2

内側及び外側表面クラックの位置 x_1 は精度良く推定で きており,また内側表面クラックについては,おおよその クラック長を推定できていることがわかる.

5. 結論

円管外側表面クラックによる散乱波動場を可視化した結 果,表面SH波の伝播・散乱挙動が明らかになり,また数 値解析の妥当性を示すために計測実験を行った結果,内側 及び外側表面クラックの位置は精度良く推定可能であり, 内側表面クラックについては,おおよその長さの推定が可 能であることがわかった.外側表面クラック長の推定手法 の考案が今後の課題である.

参考文献

 中畑和之,小田島淳,北原道弘:厚肉円管内の散乱波動場の可視 化と内側表面き裂の深さ推定,構造工学論文集,Vol.49A,pp. 153-160,2003.