

I - 6

超音波による介在物の界面特性の評価

○東北大学 学生員 脇坂洋平
 東北大学大学院 正員 北原道弘
 東北大学大学院 正員 寺田賢二郎

1. はじめに

構造部材中に存在する介在物の界面特性を超音波を利用して評価するための一手法について考える。ここでは、母材と介在物の界面をバネモデルにより近似的に表現し、界面の材料特性の変化が遠方散乱場に及ぼす影響について検討した後、逆散乱解析を適用することにより界面の材料特性の評価を試みる。

2. 近似界面モデル

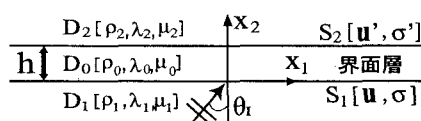
図-1 界面層 D_0

図-1 に示すように、無限弾性体 D_1 と D_2 の間に存在する厚さ h の界面層 D_0 を考える。この界面層も弾性的性質を有するものとし、界面層の密度とラメ定数を ρ_0, λ_0, μ_0 とする。入射角 θ_I で領域 D_1 内を伝播する平面波が界面層に入射するとき、図-1 に示す境界 S_1 と S_2 上の変位と応力の連続条件を用いると、 S_1 上の変位 u と応力 σ 、および S_2 上の変位 u' と応力 σ' の関係は次のように書ける。

$$[u_1, u_2, \sigma_{21}, \sigma_{22}]^T = B[u'_1, u'_2, \sigma'_{21}, \sigma'_{22}]^T \quad (1)$$

ここで、 B は入射角 θ_I 、界面層の厚さ h 、弾性定数等に関係したマトリックスである。

いま、界面層の厚さ h が波長に比べて十分小さい場合 ($k^0 h \ll 1$) を考える。このとき B は次のように書ける。¹⁾

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1/K_t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1/K_n \\ \omega^2 m_p & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \omega^2 m_n & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、

$$K_n = \frac{\lambda_0 + 2\mu_0}{h}, \quad K_t = \frac{\mu_0}{h} \quad (3)$$

$$m_n = \rho_0 h, \quad m_p = \left[1 - 4 \frac{\lambda_0 + \mu_0}{\lambda_0 + 2\mu_0} \left(\frac{k_I^1}{k_T^0} \sin \theta_I \right)^2 \right] \rho_0 h \quad (4)$$

であり、 K_n と K_t は界面バネ、 m_n と m_p は界面マスの影響を表す。また、 k_I^1 は領域 D_1 を伝播する入射波の波数、 k_T^0 は界面層内の横波の波数である。

さらに界面層内の厚さ h が小さいとして界面マスの影響を無視すると、式 (1) と (2) より界面上の変位と応力の関係は次のようになる。

$$\sigma'_{21} = K_t(u'_1 - u_1), \quad \sigma'_{22} = K_n(u'_2 - u_2) \quad (5)$$

$$\sigma'_{21} = \sigma_{21}, \quad \sigma'_{22} = \sigma_{22} \quad (6)$$

また式 (3) より、界面層 D_0 のヤング率 E_0 はバネ定数 K_n, K_t により次のように表される。

$$E_0 = \frac{K_t(3K_n - 4K_t)}{K_n - K_t} h \quad (7)$$

3. 遠方散乱場の解析

図-2 に示すように母材中に存在する円形介在物を考え、介在物の界面を式 (3) に示したバネモデルにより近似する。入射波は x_2 軸方向に伝播する平面縦波であるとする。この場合、母材側と介在物側の表面上で成立する境界積分方程式に界面バネとの連続条件を考慮することにより、母材-界面-介在物に対する積分方程式を定式化することができる。これを、境界要素法を用いて数値解析することにより、界面の剛性の変化が遠方散乱場に与える影響について検討する。

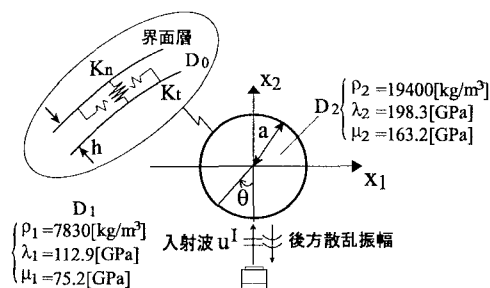


図-2 円形介在物と分布バネにより表現された界面

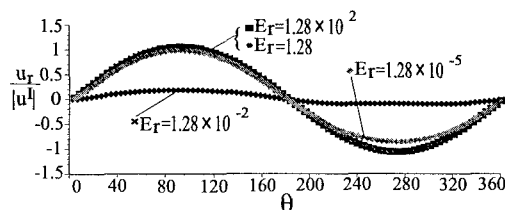
図-3 境界上の変位の法線成分 u_r (実部, $ak_L = 0.2$)

図-3 は境界要素解析により得た介在物境界上の変位 u の法線成分 u_r の実部を示したものである。

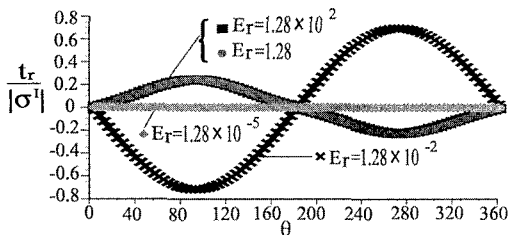


図-4 境界上の表面力の法線成分 t_r (実部, $ak_L = 0.2$)

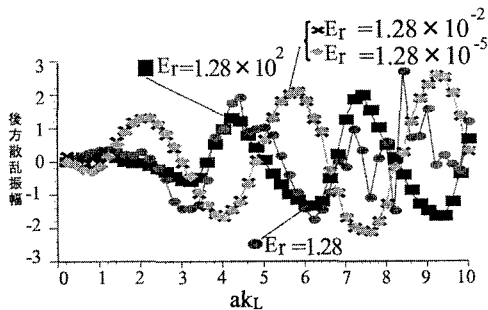


図-5 後方散乱振幅 (実部)

また、図-4は表面力 $\mathbf{t}$ の法線成分 t_r の実部を示している。これらの図において、横軸は入射波の進行方向に対する境界上の位置を示す角度 θ (図-2 参照) である。パラメータは母材 D_1 のヤング率 E_1 に対する界面層 D_0 のヤング率 E_0 の比 $E_r = E_0/E_1$ であり、 $E_r = 1.28 \times 10^2$, 1.28 , 1.28×10^{-2} , 1.28×10^{-5} 計4種類のヤング率比に対する結果を示している。

図-5は遠方散乱波の積分表現を利用して、後方散乱振幅の縦波成分をプロットしたものである。図の横軸は円形介在物の半径 a で無次元化した母材の縦波波数 ak_L である。

以上の結果に見られるように、 $E_r \leq 1.28 \times 10^{-2}$ すなわち、母材 D_1 のヤング率 E_1 に比べて界面層 D_0 のヤング率 E_0 が小さい場合、 E_r の変化に対する境界上の物理量 $\mathbf{u}$ と $\mathbf{t}$ の変化が大きいにもかかわらず、遠方場にはさほど影響を及ぼしていない。逆に $E_r \geq 1.28$ の場合、 E_r の変化に対して境界上の $\mathbf{u}$, $\mathbf{t}$ の変化が微小であっても、遠方場に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

4. 逆散乱解析

図-5に示した遠方場の後方縦波散乱振幅から、介在物界面の剛性に関する情報を得ることを考える。その手段として、ここでは逆散乱解析法を用いる。逆散乱法によれば、散乱振幅の逆フーリエ変換から散乱体の領域 (ボルン逆散乱法) と境界 (キルヒホフ逆散乱法) に関する情報²⁾ が得られる。

図-6と図-7は、それぞれボルン逆解析とキルヒホフ逆解析による結果を示している。両逆解析結果か

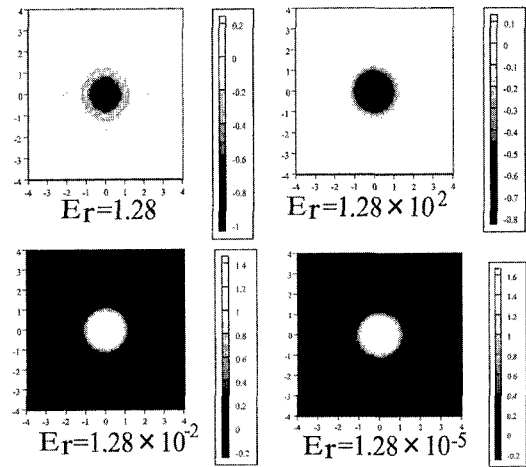


図-6 ボルン逆解析結果

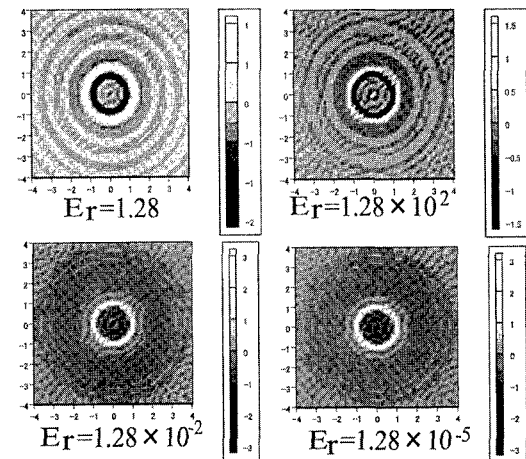


図-7 キルヒホフ逆解析結果

ら、母材に対する界面層のヤング率比 E_r が1より小さくなった場合には、界面剛性の変化を明確に検知することが可能であることがわかる。また、図-5の散乱振幅に変化が現れた $E_r = 1.28$ と $E_r = 1.28 \times 10^2$ の場合に対応する両逆解析結果を詳細に検討すると、逆解析結果にも散乱振幅の変化が反映されていることがわかる。

5. おわりに

遠方の散乱振幅の変化を反映した逆散乱解析結果と界面層の剛性の関係をより定量化することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 北原道弘, 印建華: 界面のモデル化と超音波の反射・透過特性, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.483-492, 1994.
- 2) 北原道弘, 中畑和之, 廣瀬壮一: 線形化逆散乱解析法の欠陥位置と形状再構成能に関する一検討, 応用力学論文集, Vol.1, pp.167-174, 1998.