

ガイド波を用いた鋼板上の滞水層厚の推定

○東京工業大学 学生会員 松野壮展
東京工業大学 正会員 古川 陽
東京工業大学 正会員 廣瀬壮一

1. はじめに

近年, 高度経済成長期に建設されたインフラの劣化が問題となっているが, 鋼部材に対する水の有無は部材の劣化において重要な要素である. 例えば, 橋梁床版の補強方法として鋼板接着工法があるが, 剥離した鋼板上面における滞水の有無は, 補強橋梁の耐久性に大きな影響を及ぼす. また一方で平面や境界面を長手方向に伝搬する超音波モードであるガイド波を用いた非破壊評価手法の開発が期待されている. そこで, 本研究ではガイド波を用いて定量的に滞水層厚の推定手法を検討した. はじめに, 鋼板上に滞水層が生じている状態を数理モデル化し, その固有方程式を求めることで分散曲線を導いた後, ガイド波の分散性を利用した滞水層厚の推定可能性を示し, 計測実験により確認した.

2. 水-鋼板モデルにおけるガイド波の固有方程式

鋼板上に滞水層が生じている状態を図1に示す2次元層状モデルによって表す. 各層はそれぞれ材料定数が図のように与えられた均質等方弾性体とする. 材料定数から縦波速度 $c_L^n = \sqrt{(\lambda^n + 2\mu^n)/\rho}$ と横波速度 $c_T^n = \sqrt{\mu^n/\rho^n}$ が求まり, これを用いて第 n 層における波動のポテンシャル関数 ϕ^n, ψ^n を式(1),(2)のように表す. また, ポテンシャル関数 ϕ^n, ψ^n を用いて変位 u_1^n, u_3^n は式(3)のように表される¹⁾. なお, n は層の番号であり, $n = 1, 2$ である.

$$\phi^n = C_1^n e^{ikx_1 + i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_T^n}{\omega}\right)^2} x_3} + C_2^n e^{ikx_1 - i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_T^n}{\omega}\right)^2} x_3} \quad (1)$$

$$\psi^n = C_3^n e^{ikx_1 + i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_T^n}{\omega}\right)^2} x_3} + C_4^n e^{ikx_1 - i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_T^n}{\omega}\right)^2} x_3} \quad (2)$$

$$u_1^n = \frac{\partial \phi^n}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi^n}{\partial x_3} \quad u_3^n = \frac{\partial \phi^n}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi^n}{\partial x_1} \quad (3)$$

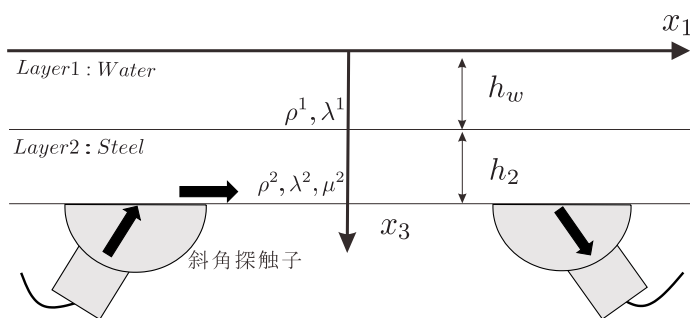


図1 水-鋼板モデル

また, 式(4)に示す変位 u_1, u_3 とひずみの関係とフックの法則より応力 σ_{ij}^n は式(5)で表される.

$$\varepsilon_{ij}^n = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^n}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^n}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}^n = \lambda^n \nabla^2 \phi^n \delta_{ij} + 2\mu^n \varepsilon_{ij}^n \quad (5)$$

ここでの δ_{ij} は Kronecker のデルタである. 第1層が液体であることを考慮すると以下の境界条件が得られる¹⁾.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{33}^{(1)} &= 0 & (x_3=0) \\ \sigma_{13}^{(2)} &= 0 \\ \sigma_{33}^{(1)} &= \sigma_{33}^{(2)} \\ u_3^{(1)} &= u_3^{(2)} \end{aligned} \right\} (x_3=h_w) \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{13}^{(2)} &= 0 \\ \sigma_{33}^{(2)} &= 0 \end{aligned} \right\} (x_3=h_w+h_2)$$

これらの6つの境界条件に式(1)~式(5)を代入すると $\mathbf{AC} = \mathbf{0}$ (ただし, $\mathbf{C}^T = \{C_1^1, C_2^1, C_3^1, C_4^1, C_3^2, C_4^2\}$) のような固有方程式が得られ, $\mathbf{C}$ が非自明解をもつことを考慮すると, 式(7)に示す式からガイド波の周波数 f と波数 k の関係が得られ, 分散特性が明らかになる.

$$|\mathbf{A}(f, k)| = 0 \quad (7)$$

3. 水-鋼板モデルにおける滞水層厚の推定手法

前節で得られた水-鋼板モデルの固有方程式において, 滞水層厚を $h_w=0.0$ (Steel 板のみ), 1.0, 2.0, 3.0, 4.0[mm] と変化させると, 図2に示す基本モードの位相速度分散曲線を得る. ここで第1層の密度, 縦波速度は $\rho_1 = 1000[\text{kg/m}^3]$, $c_{L1} = 1500[\text{m/s}]$, 第2層の密度と層厚, 縦波速度, 横波速度はそれぞれ $\rho_2 = 5700[\text{kg/m}^3]$, $h_2 = 0.045[\text{m}]$, $c_{L2} = 5940[\text{m/s}]$, $c_{T2} = 3200[\text{m/s}]$ とした. 図2より, 固定された位相速度が 3000~5000[m/s] の範囲にあれば, 滞水層厚に応じて基本モードが現れる周波数に差が生じる. この滞水層厚の違いによる分散性の違いを利用して滞水層厚を推定することを考える.

まず, 実験では図1に示すような一対の斜角探触子を用いて, ガイド波の発生の有無を確認する. 送受信の斜角探触子の角度を決めて位相速度を固定する. 次に, 位相速度を一定に保ったまま周波数を変化させると先ほどの分散曲線

Key Words: ガイド波, 分散曲線, 滞水層厚

2-12-1, Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8552, JAPAN TEL: +81-3-5734-3587 FAX: +81-3-5734-3587

表 1 実験条件

h_w [mm]	2.0	3.0	4.0
位相速度 [m/s]	4000		
入射角 [°]	43		

に対応する周波数においてガイド波が計測される．図 3 の 3 つの実線は，固定された 3 つの位相速度 $c_p=3000, 4000, 5000$ [m/s] に対して周波数を変化させた時にガイド波の基本モードが発生する周波数と滞水層厚の関係を示したものである．これより，一对の斜角探触子の送受信角度を固定し，周波数を掃引して，ガイド波が発生する周波数を求めれば滞水層厚の推定が可能となることが分かる．

4. 実験結果

前節で述べた手法を用いて水-鋼板供試体における滞水層厚を推定した．用いた斜角探触子の中心周波数は 500kHz である．目的の位相速度に合わせてスネルの法則 $\left(\frac{\sin \theta}{C_{air}} = \frac{\sin 90}{C_p}\right)$ を用いて送受信角度を設定し，表 1 に示す実験条件において周波数を 90kHz～300kHz で変化させてガイド波の伝搬実験を行った．滞水層厚 $h_w = 2$ mm の条件での伝搬実験における各周波数ごとの波形の変化を図 4 に示す．図 4 よりこの条件におけるガイド波が発生する対応周波数を 220kHz と決定することができ，図 3 に示す位相速度 $C_p = 4000$ [m/s] のグラフより滞水層厚はおおよそ 1.8mm であると推定することができる．同様に $h_w = 3$ mm, 4mm の条件においてもそれぞれ伝搬実験を行った結果を図 3 における●で示す．縦軸は実験を行った滞水層厚の条件，横軸は計測された周波数を表す．各条件に対して，± 0.5mm の範囲内で層厚の推定ができた．よって水-鋼板モデルに対して，斜角探触子によるガイド波を用いた滞水層厚の推定が可能であることが確認できた．

5. 結論

本研究では鋼板上の滞水の層厚を推定するため，水-鋼板モデルを用いてその固有方程式からガイド波の基本モードの分散曲線を求めた．そして求められた分散曲線より滞水層厚と周波数の関係を導き，ガイド波による滞水層厚の推定手法を示すとともに斜角探触子を用いた実験計測によって手法の有効性を確認した．今後は鋼板の条件を変化させた場合の手法の有効性を確認すると共に，鋼板接着法を適用した道路橋床版の鋼板剥離部に対するレーザーを用いた非破壊評価手法の開発への応用を検討していきたい．

REFERENCES

- 1) J.L.Rose. *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, ch. 12(1999), pp.154-175

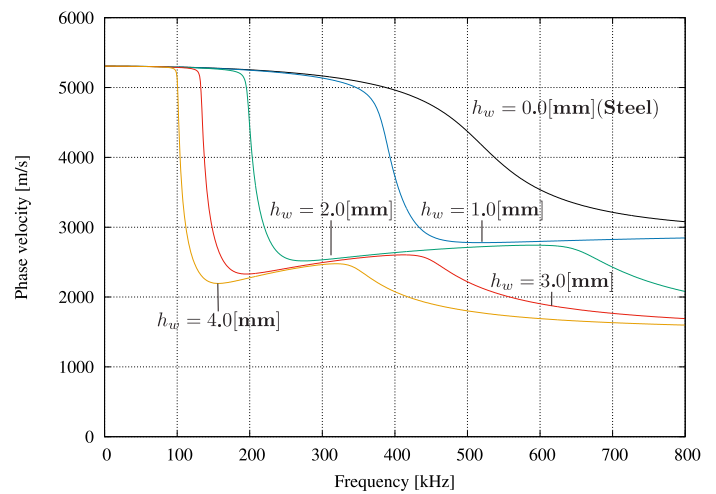


図 2 水-鋼板モデル位相速度分散曲線

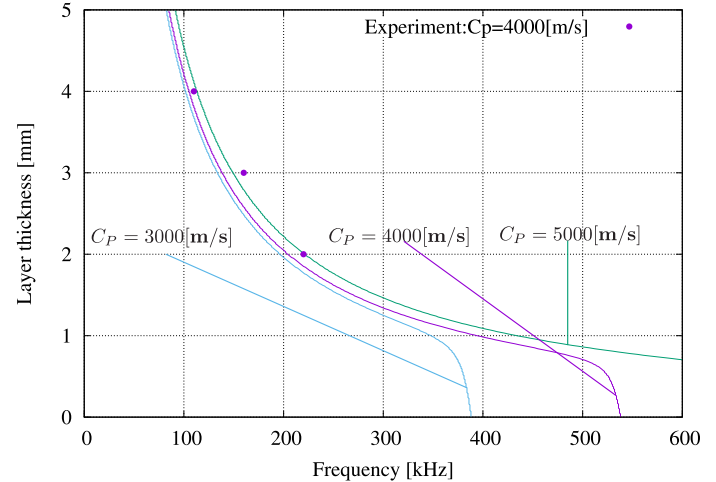


図 3 滞水層厚に対応した周波数の変化と計測結果

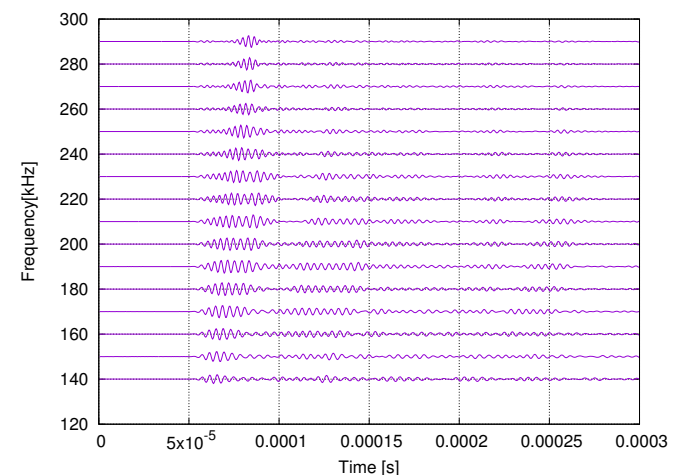


図 4 対応周波数の判別