

1. はじめに

道路橋として最も一般的な RC 床版非合成橋梁では、設計上上フランジと RC 床版間の合成作用は考えられていない。しかし実際は、付着やスラブ止め等により RC 床版が主桁の一部として挙動を示しているとの報告が多数されており、これらによると実際に測定される応力は計算上の応力の 5~7 割程度である事がわかっている。膨大な数の既設橋を考えた場合、このような非合成橋梁の合成効果を有効活用できれば、最小限の構造補強等で十分な耐力を発揮する可能性があるため、安全性確保と社会資本の有効活用の観点からそれらの現状把握が必要である。そのために上フランジと RC 床版の材料界面を非破壊的に検査する方法が求められている。

そこで本研究では、超音波を用いた材料界面の剥離検出法の提案を目的として、上フランジと RC 床版をモデル化した試験体を用いた実験、解析を行う。モデル試験体（図 1；鋼-モルタル複合体：本来コンクリートである部分をモルタルに代用したのは材料の均質性のため）の材料界面には人工的に付着・剥離部分を作成し、表面波を利用した L-scan（図 2）を水浸法で行うことで得られるエコー高さや周波数の違いによって剥離領域を推定し、提案する非破壊検査手法の適用性について検討を行う。

2. 分散特性の解析

まず、図 3 に示すようなモデルを考えて表面波速度の周波数依存性つまり分散特性を明らかにする。なお、モルタルならびに鋼板は等方性材料として、紙面に垂直な方向では現象が一様であると考え、 x - z 平面での 2 次元問題として解析する。動弾性理論より、各媒体中の変位成分 u 、 w (x 、 z 方向の変位) および応力成分 σ_{zz} 、 σ_{xz} (直応力、せん断応力) は、P 波、SV 波に対する変位ポテンシャル、
(右下の添字は、ないのが鋼、0 が水、 c がモルタルをそれぞれ表わす) を用いて次のように表わせる。

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + 2\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z}$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left[2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right]$$

$$\phi = [Ae^{\xi\alpha z} + Be^{-\xi\alpha z}]e^{i\xi x - i\omega t}, \quad \psi = [Ce^{\xi\beta z} + De^{-\xi\beta z}]e^{i\xi x - i\omega t}$$

$$\phi_0 = [Re^{-i\xi\alpha_0 z} + e^{i\xi\alpha_0 z}]e^{i\xi x - i\omega t}$$

$$\phi_c = Ee^{i\xi\alpha_c z}e^{i\xi x - i\omega t}, \quad \psi_c = Fe^{i\xi\beta_c z}e^{i\xi x - i\omega t}$$

以上の式から鋼板上下面での境界条件を満たす式を立て整理するとマトリックスの形になる。一般に表面波の分散特性は固有値問題として定式化できるから、ここで得たマトリックスの行列式 (表面波速度 c と周波数 f の関数) がゼ

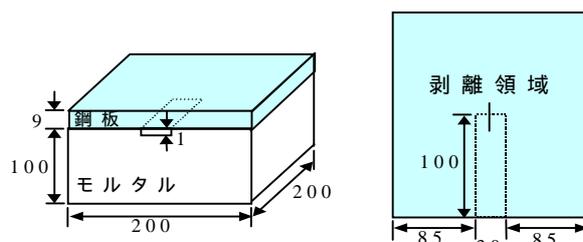


図 1 モデル試験体 (単位 mm)

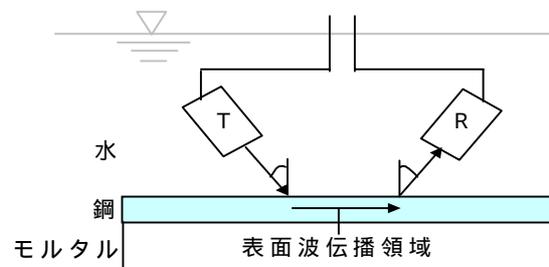


図 2 L-scan の探触子配置

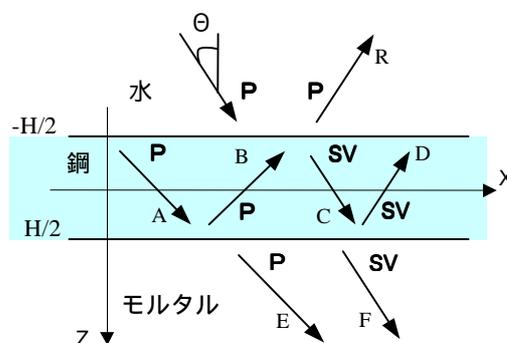


図 3 解析モデル

キーワード：モデル試験体、材料界面、表面波、分散特性、エコー高さ
連絡先：東京都目黒区大岡山 2 - 1 2 - 1 (TEL : 03-5734-2692)

口なる件を用いて分散曲線が求められる。解析上は行列式がゼロなる条件を厳密に満足させることは難しいが、 c と f を変化させて行列式が 0 に近づく時ラム波が発生していると考えて解析を行えば、図 5 に示すような表面波速度の周波数依存性すなわち分散特性を得る。

3. 超音波実験

図 1 に示すように部分的に剥離領域を持つ鋼 - モルタル複合体をモデル試験体として、水浸法を用いた表面波伝播実験 (図 2 ; L-scan 実験) を行った。

表面波伝播領域内における鋼 - モルタル材料界面の付着 - 剥離に対して探触子角度 θ をある値に固定した状態で、受信波形の振幅と周波数の関係を示したのが図 4 である。図 4 の極大値を示すエコー高さ時の周波数を探触子の角度 θ (すなわち位相速度 c) を変化させて解析結果と共にプロットしたものが図 5 である。実験結果と解析結果を比較すると完全ではないがよい対応をしていることがわかる。

図 4、図 5 より、付着と剥離の状態に応じて最大エコー高さとの周波数に違いがあることがわかる。そこで図 6 のように探触子を走査させて、それに伴うエコー高さとの最大エコー高さを示す周波数との関係を調べる実験を行った。この結果、付着領域と剥離領域のそれぞれに対するエコー高さの中間値をとる位置が剥離境界であるとすればエコー高さを利用して剥離領域の推定が可能であることがわかった。ただし、最大エコー高さを示す周波数すなわち表面波の分散特性を用いた判定はエコー高さを用いた方法に比べて精度上劣っている。

以上の結果から、エコー高さを利用して剥離領域の推定を行った。その結果、図 7 に示すようにほぼ実際の剥離領域を推定することができた。ただし、詳細に結果を見れば剥離領域を過小評価しており、その評価方法についてまだ検討する余地がある。

4. 結論

- ・表面波速度の周波数依存性を実験、解析結果より確かめられた。
- ・材料界面の付着部分と剥離部分のエコー高さをもとにして、剥離位置判定エコー高さを決定し L-scan を行うことで剥離領域の推定は可能であることがわかった。

参考文献

T.Kundu., M.Ehsani., D.Guo. and K.I.Maslov., in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.18, pp.1911-1918, (1999)

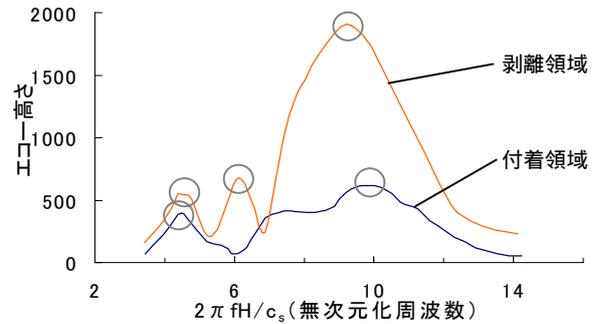


図 4 実験結果例

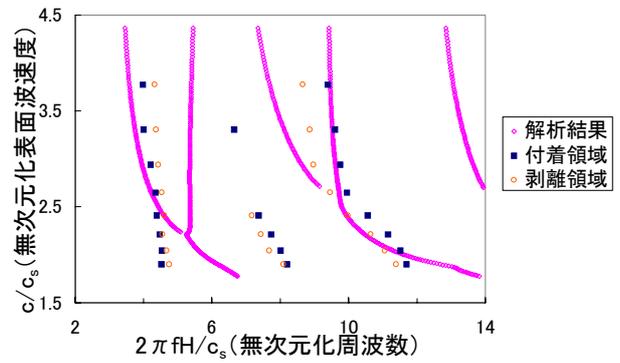
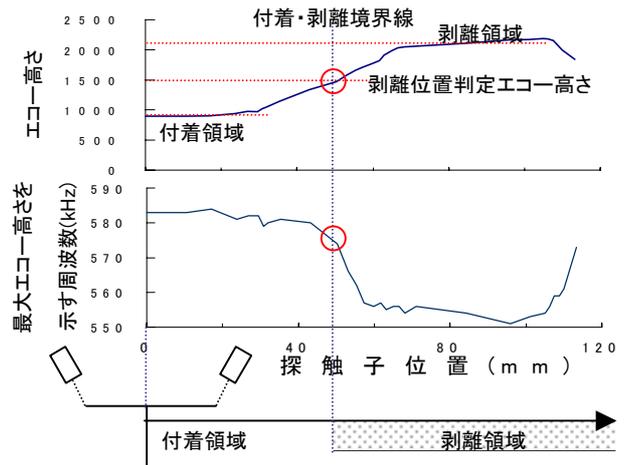


図 5 表面波の分散特性



表面波伝播領域の midpoint を基準

図 6 探触子位置とエコー高さ・周波数の関係

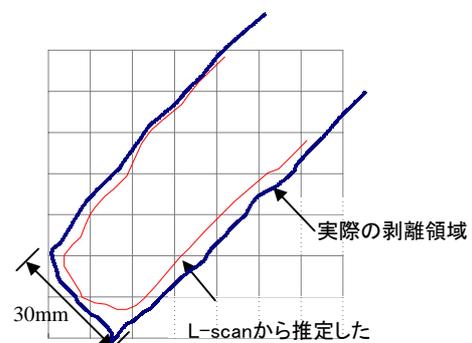


図 7 L-scan 結果