

# 道路橋鉄筋コンクリート床版下面にある 鋼板上の滞水状態の推定

## ESTIMATION OF WATER PONDING ON STEEL PLATE ATTACHED TO THE BOTTOM SURFACE OF REINFORCED CONCRETE SLAB OF HIGHWAY BRIDGES

橋 肇\* 中本 啓介\*  
Hajime Tachibana Keisuke Nakamoto

これまで、筆者らは劣化損傷した鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の補強方法として多く採用されてきた鋼板接着工法の非破壊検査法について検討を行ってきた。前号では、超音波ガイド波を用いて鋼板接着工法にて補強された道路橋RC床版の損傷部に滞水した水の有無について検証した結果を報告した。本稿では、鋼板接着床版と同様に下面を鋼板で覆われた鋼コンクリート合成床版やI形鋼格子床版も想定して、異なる鋼板厚と滞水層厚を様々な組合せたモデルについてガイド波の分散特性に関する理論解析を行い、実験にて提案手法の有効性を検証した結果を報告する。

キーワード：鋼板接着床版，剥離，超音波ガイド波，分散特性，滞水検出

### 1. まえがき

これまで、道路橋、床版、トンネルなどのRC構造物の補強方法として多くの研究が実施され、鋼板接着工法が採用されてきた<sup>1)~3)</sup>。鋼板接着工法は、一般的にエポキシ樹脂およびアンカーボルトにてRC構造物に鋼板を一体化させ耐力・耐久性を向上させる工法であるが、補強された構造物の再劣化が課題となっている。RC構造物の劣化・損傷状況は、一般的にコンクリート表面のひび割れ状況について目視にて点検を行う。しかし、鋼板接着工法にて補強されたRC構造物はコンクリート表面が鋼板で覆われているため直接コンクリート部の劣化状態を確認することができない。これまでも点検方法や補修方法<sup>4)~6)</sup>について研究が行われてきたが、より合理的に損傷状況を調査する検査技術の確立が望まれている。特に、道路橋のRC床版の耐久性については、輪荷重やその走行回数と共に床版の内部に雨水などの水が浸入すると、疲労耐久性が著しく損なわれることが既存の研究で報告<sup>7)</sup>されており、鋼板上の滞水の有無は床版の維持管理上重要な要素である。これまでの研究で、鋼板上の滞水の有無を検知するには、20kHz以下の比較的低い周波数帯では困難であることがわかり<sup>8)</sup>、前号において、超音波ガイド波<sup>9)~11)</sup>を用いて損傷部が満水状態の場合に水の有無を検出する可能性が高いことを報告した。

そこで本研究では、超音波ガイド波の伝搬特性を用いて鋼板上の滞水の有無および滞水厚を検出することとした。鋼板接着床版と同様に床版下面に鋼板を有する鋼コンクリート合成床版やI形鋼格子床版も想定し、異なる

鋼板厚と滞水層厚を様々な組合せた水-固体の層状モデルに対して超音波ガイド波の分散曲線を理論解析によって導出した。その結果、層状モデルの超音波ガイド波分散特性は滞水層厚に対する感度が非常に強いことがわかった。これによって、超音波ガイド波の分散特性を調べることで、鋼板上での水の存在の有無や水の層厚を推定することができることが示唆された。そこで、実験室にて鋼板上の滞水を再現したモデルや実橋から撤去した鋼板接着補強されたRC床版（鋼板厚4.5mm）を、二つの超音波斜角探触子を用いて計測することにより水-鋼の層状試験体中を伝搬するガイド波を測定した。実験と理論との間に良好な一致が得られ、鋼板裏の水検出のための効率的な非破壊検査法を構築することができたので、ここに報告する。

### 2. 超音波ガイド波を用いた滞水の検出法

#### 2.1 ガイド波について

一般的にガイド波とは、物理的な境界により形成された導波路に沿って伝搬する波動のことで、低減衰で遠距離を伝搬させることができるとされている。一方でガイド波は周波数によって位相速度が異なる分散性や一つの周波数に対して多くの伝搬モードが存在する性質である重畳性を有する。このような複雑な特性を理解し正しく使う必要があり、そのためには分散曲線が必要となる。分散曲線とは、ガイド波の伝搬モードの分散特性（周波数と速度の関係）を表す図である。分散曲線を導出する手順としては、まず構造体を形成する媒質ごとにポテン

\* 技術本部 技術研究室

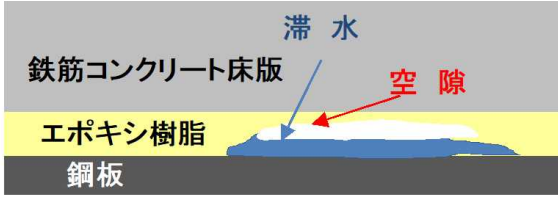


図-1 鋼板接着補強した RC 床版の滞水状態の断面図

シャル関数を定義し、それらを用いて変位と応力を表現する。次に、変位と応力に関する境界条件を用いて、ポテンシャル関数の係数に対する連立一次方程式を導出する。最後に、その方程式の非自明解を求める。得られた解をプロットすることで、位相速度に関する分散曲線が得られる。

## 2.2 鋼板上の滞水モデルにおける超音波ガイド波の固有方程式

ここでは、鋼板接着補強した RC 床版を例に、損傷を受けた部分の鋼板上面に満水状態ではなく部分的に滞水した場合の断面図を図-1 に示す。このように滞水の上になぜかな空隙があると仮定すると、空隙より上部のエポキシ樹脂や RC 床版には超音波が伝搬しないため、図-2 に示すように損傷部を超音波ガイド波が  $x_1$  方向に伝搬する水と鋼板の 2 層の 2 次元層状モデルとして解析することができる。層状物質が均質で等方性で弾性的であると仮定すると、それぞれの層（水の場合は  $n = w$ 、鋼板の場合は  $n = s$ ）の縦波速度  $c_L^n$  と横波速度  $c_T^n$  はそれぞれ式 (1)、(2) となる。

$$c_L^n = \sqrt{(\lambda^n + 2\mu^n)/\rho^n} \quad (n = w \text{ or } s) \quad (1)$$

$$c_T^n = \sqrt{\mu^n/\rho^n} \quad (n = s) \quad (2)$$

ここで、 $\lambda^n$ 、 $\mu^n$  と  $\rho^n$  は  $n$  層におけるラメ定数と密度を示す。水中には横波が存在しないため、滞水層 ( $n=w$ ) に対して、 $\mu^w = 0$  であり、横波速度  $c_T^w$  は定義されない。式(1)、(2)で定義した速度を用いて  $n$  層における波動のポテンシャル関数  $\varphi^n$ 、 $\psi^n$  はそれぞれ式(3)、(4)のように表される。

$$\begin{aligned} \varphi^n = & A^n e^{ikx_1 + i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_L^n}{\omega}\right)^2} x_3} \\ & + B^n e^{ikx_1 - i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_L^n}{\omega}\right)^2} x_3} \end{aligned} \quad (n = w \text{ or } s) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \psi^n = & C^n e^{ikx_1 + i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_T^n}{\omega}\right)^2} x_3} \\ & + D^n e^{ikx_1 - i\sqrt{k^2 - \left(\frac{c_T^n}{\omega}\right)^2} x_3} \end{aligned} \quad (n = s), \quad (4)$$

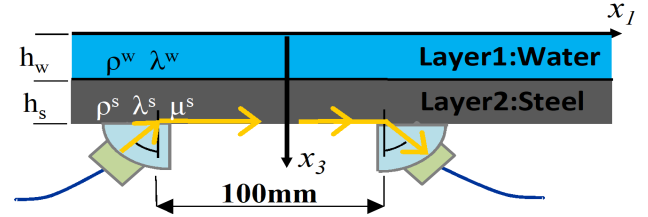


図-2 鋼板接着補強した RC 床版の滞水状態のモデルと超音波ガイド波計測の概念図

ここで、 $k$  と  $\omega$  はそれぞれ水平方向の波数と角周波数であり、 $A^n$ 、 $B^n$ 、 $C^n$  および  $D^n$  は未知の定数である。式(3)、(4)に示すポテンシャル関数を用いれば、変位成分  $u_1^n$  と  $u_3^n$  と応力成分  $\sigma_{ij}^n$  は、以下の式のように表すことができる。

$$u_1^n = \frac{\partial \varphi^n}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi^n}{\partial x_3}, \quad u_3^n = \frac{\partial \varphi^n}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi^n}{\partial x_1} \quad (5),(6)$$

$$\sigma_{ij}^n = \lambda^n \left( \frac{\partial u_1^n}{\partial x_1} + \frac{\partial u_3^n}{\partial x_3} \right) \delta_{ij} + \mu^n \left( \frac{\partial u_i^n}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^n}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

ここで、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。各層の境界条件と水と鋼板との間の界面条件は、以下の通りとなる。

$$\sigma_{33}^w = 0 \quad (x_3 = 0) \quad (8)$$

$$\sigma_{13}^s = 0, \quad \sigma_{33}^w = \sigma_{33}^s, \quad u_3^w = u_3^s \quad (x_3 = h_w) \quad (9-11)$$

$$\sigma_{13}^s = 0, \quad \sigma_{33}^s = 0 \quad (x_3 = h_w + h_s) \quad (12),(13)$$

式(8)-(13) に式(3)-(7)を代入し、整理すれば、式(14)に示す行列形式の方程式が得られる。

$$\mathbf{\Sigma}(k, \omega) \mathbf{C} = \mathbf{0} \quad (14)$$

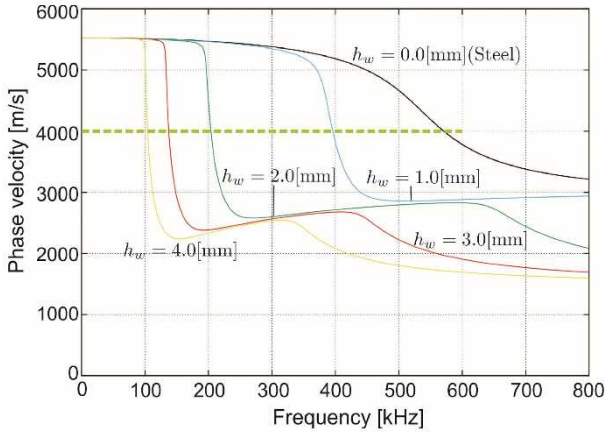
ここで、 $\mathbf{\Sigma}$  は水平波数  $k$  と角周波数  $\omega$  の関数を成分とする  $6 \times 6$  の行列であり、 $\mathbf{C}^T = \{A^w, B^w, A^s, B^s, C^s, D^s\}$  となる。式(14)が非自明な解  $\mathbf{C} \neq \mathbf{0}$  を持つための条件として、以下のようにガイド波の特性方程式が得られる。

$$|\mathbf{\Sigma}(k, \omega)| = 0 \quad (15)$$

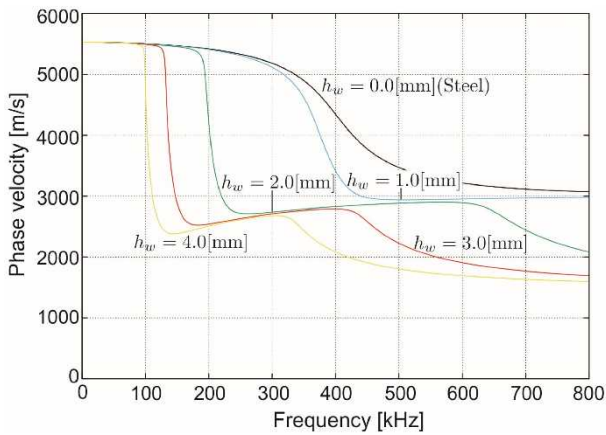
式(15)から  $k$  と  $\omega$  との関係が得られ、位相速度  $C_p = \omega/k$  を求めることができる。

## 3. 鋼板上の滞水層厚の推定方法

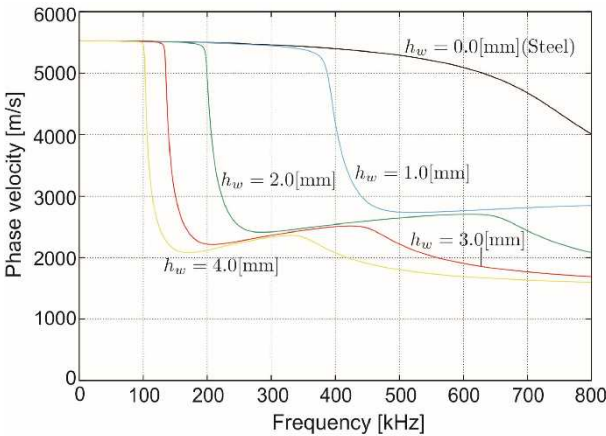
前節の固有方程式において、鋼板層 (Layer2) の厚さ  $h_s$  を、鋼板接着床版、鋼コンクリート合成床版および I 形格子床版のそれぞれの板厚である 4.5、6.0、3.2mm とし、滞水層である液体層 (Layer1) の厚さ  $h_w$  を、0.0、1.0、2.0、



(a) 鋼板厚  $h_s=4.5\text{mm}$  の場合 (鋼板接着補強した RC 床版)



(b) 鋼板厚  $h_s=6.0\text{mm}$  の場合 (鋼コンクリート合成床版)



(c) 鋼板厚  $h_s=3.2\text{mm}$  の場合 (I 形格子床版)

図-3 様々な鋼板厚  $h_s$  と滞水層厚  $h_w$  の組合せによる水-鋼板モデルでのガイド波の基本モードの位相速度  $C_p$  の分散曲線 ( $h_w=0.0\text{mm}$  (黒),  $1.0\text{mm}$  (青),  $2.0\text{mm}$  (緑),  $3.0\text{mm}$  (赤),  $4.0\text{mm}$  (黄))

3.0, 4.0mm と変化させると、図-3(a)-(c)の実線に示す基本モードの位相速度の分散曲線を得ることができる。ここで液体層の密度、縦波速度をそれぞれ  $\rho^w=1000\text{kg/m}^3$ ,

$c_L^w=1500\text{m/s}$ , 鋼板層の密度、縦波速度及び横波速度をそれぞれ  $\rho^s=7850\text{kg/m}^3$ ,  $c_L^s=5940\text{m/s}$ ,  $c_T^s=3200\text{m/s}$  としている。図-3(a)-(c)に示されるように、いずれの床版も位相速度  $C_p$  が  $3000\sim 5000\text{m/s}$  の範囲にあれば、液体層つまり滞水層の厚さに応じて伝搬する超音波ガイド波の位相速度の分散特性が大きく異なることがわかった。これより、超音波ガイド波の分散特性による滞水層厚の推定の可能性が示唆される。

例えば、鋼板厚が  $h_s=4.5\text{mm}$  の場合に、図-3(a)の黄緑の点線に沿うように、位相速度を  $C_p=4000\text{m/s}$  に固定して周波数を変化させたとする。このとき、ガイド波は黄緑の点線が分散曲線と交わった周波数において励起される。一方、分散曲線は滞水層の厚さによって異なることから、様々な滞水層厚に対して分散曲線を求めて滞水層厚とガイド波の励起周波数の関係を求めると、両者の間に図-4に示すような一対一の関係が得られる。これより、ガイド波が発生したときの周波数から滞水層厚を求めることができる。

図-5(a)-(c)の実線は、図-3(a)-(c)のそれぞれのモデルに対応して、3つの位相速度  $C_p = 3000, 4000, 5000\text{m/s}$  に対して滞水層厚とガイド波の励起周波数の関係を示したものである。いずれの場合も滞水層厚とガイド波の励起周波数の間に一対一の関係を見出すことができ、ガイド波の励起周波数が得られれば、滞水層の厚さ  $h_w$  を求められることがわかる。

位相速度  $C_p$  はスネルの法則より  $C_p = C_{wedge} / \sin \theta$  ( $C_{wedge}$ : 斜角探触子のウェッジ内の縦波速度,  $\theta$ : 図-2に示す斜角探触子の角度)によって決まる。そこで図-2に示すように、一対の斜角探触子の角度  $\theta$  を固定して、位相速度  $C_p$  を一定に保ったまま周波数を変化させてガイド波の伝搬計測を行い、ガイド波の振幅が最大となる周波数をガイド波の励起周波数として得る。一例として、鋼板厚を  $h_s=4.5\text{mm}$  とし、滞水層厚を  $h_w=2.0\text{mm}$  とした場合の受信波形群を図-6に示す。周波数を  $140\text{kHz}$  から  $290\text{kHz}$  まで変化させたときに得られた波形を並べたものであり、受信波形の振幅が最大となる周波数を調べた結果、 $220\text{kHz}$  であった。従って、この場合はガイド波の励起周波数を  $220\text{kHz}$  とした。

#### 4. 実験結果と解析結果の比較

##### 4.1 鋼板上の滞水計測について

写真-1に示すように、鋼板上に所定の滞水層厚となるように水を湛え、鋼板の下面に一対の斜角探触子を  $100\text{mm}$  の距離を隔てて接触させて、ガイド波の送受信を行った。斜角探触子は測定周波数の範囲に応じて、中

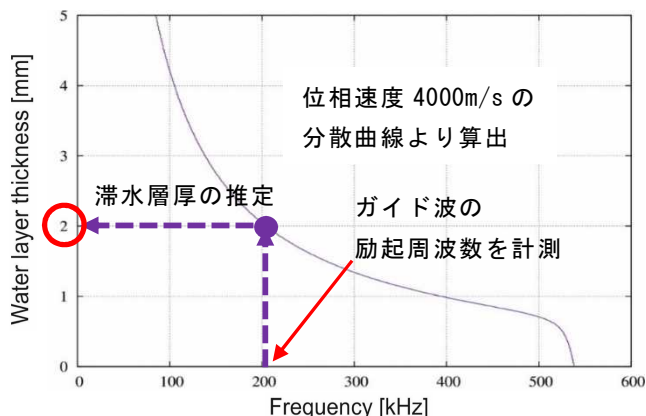


図-4 ガイド波の励起周波数と滞水層厚の関係  
(鋼板厚  $h_s=4.5\text{mm}$ , 位相速度  $4000\text{m/s}$  の場合)

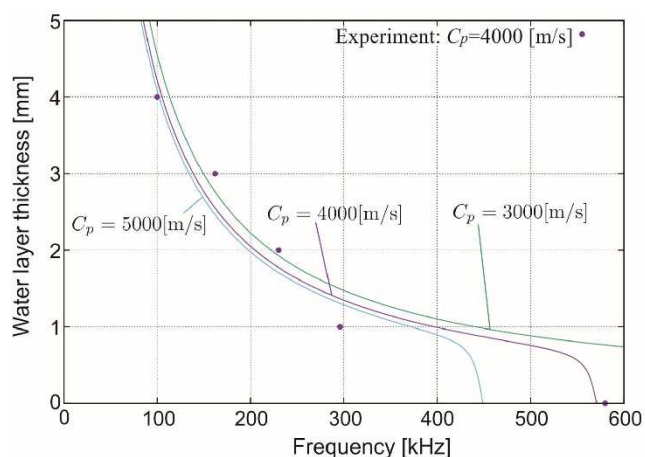
心周波数が  $200\text{kHz}$  あるいは  $500\text{kHz}$  のものを用いて、 $90\sim 800\text{kHz}$  の周波数帯で加振した。鋼板厚と滞水層厚は図-3 あるいは図-5 の理論解析に符号するように表-1 に示す組合せとし、位相速度が  $4000\text{m/s}$  となるように入射角を  $43^\circ$  とした。

鋼板厚と滞水層厚の組合せに対して得られたガイド波の励起周波数を図-5 のグラフ内に●で示した。鋼板厚に対する滞水層厚の比が小さい場合は、理論値から大きく異なる周波数でガイド波が励起されていることがわかる。この原因は、実験において表面張力の影響で水層厚を精密に設定できなかったことにあると考える。特に滞水層厚が小さい時、図-5 の曲線の傾きが小さくなっており、わずかの滞水層厚の違いがガイド波の励起周波数に大きな影響を与える。このような課題はあるものの、図-5 に示した実験結果から推定される滞水層の厚さの誤差は  $\pm 0.5\text{mm}$  以内にあり、提案する滞水層厚の推定手法は実用上十分な精度を持っていると言える。

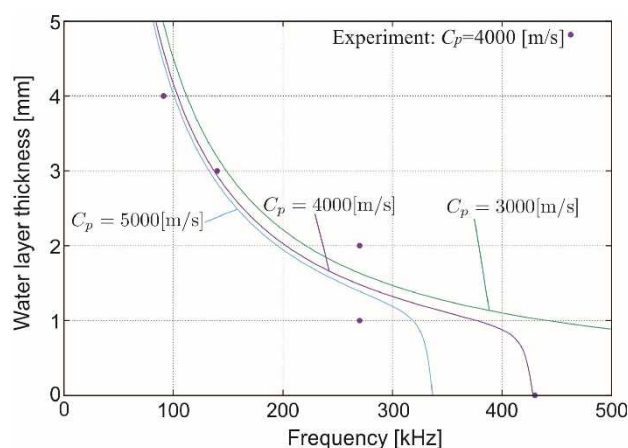
#### 4.2 撤去床版の計測について

鋼板上に滞水させた計測と同様に、一对の斜角探触子を撤去床版の下面から用いて位相速度の計測を行った状況を写真-2 に示す。写真-3 は撤去床版裏面での計測箇所(赤あるいは黄の円)を示している。番号 5, 7, 9 の赤円は打音によって異音が観測された箇所、番号 6, 8 の黄円は打音によって健全部であると判断された箇所である。番号 5, 7, 9 の打音による異音箇所に対しては、まず乾燥状態で計測をし、その後、床版上面に水を張って滞水状態を再現し、再度計測を行った。なお、滞水によって番号 7, 9 の近傍の貫通孔からは漏水が見られたが、番号 5 の異音部では漏水は見られなかった。

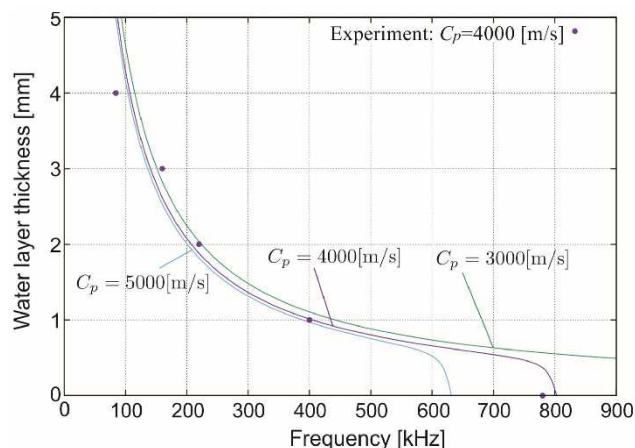
図-7 の実線は撤去床版に接着された鋼板の厚さを  $4.5\text{mm}$  として求めたガイド波の位相速度の分散曲線で、図-3(a) と同じ図である。図-7 の番号付きの小点は、写真-3 に示した撤去床版裏面の計測箇所における実験結



(a) 鋼板厚  $h_s=4.5\text{mm}$  の場合(鋼板接着補強した RC 床版)



(b) 鋼板厚  $h_s=6.0\text{mm}$  の場合(鋼コンクリート合成床版)



(c) 鋼板厚  $h_s=3.2\text{mm}$  の場合 (I 形格子床版)

図-5 図-3(a)-(c)の3種類の鋼板による水-鋼板モデルの滞水層厚  $h_w$  とガイド波の励起周波数の関係(実線)及び測定結果(点)

果を示している。異音部の番号 5, 7, 9 に対しては、位相速度を  $4000\text{m/s}$  に設定して、滞水の前と後で計測を行った。図-7 における赤点と青点は、それぞれ滞水の前と後の結果を表す。番号 5 では滞水の前後でガイド波の励起周波数に変化が生じていない。このことは番号 5 の近傍で漏水が見られ



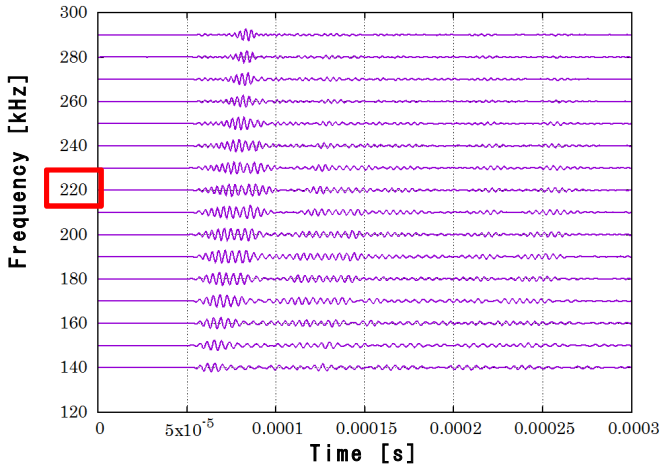


図-6 鋼板厚  $h_s=4.5\text{mm}$  の鋼板に  $2\text{mm}$  滞水させた試験体に対して周波数を変化させて得た測定波形

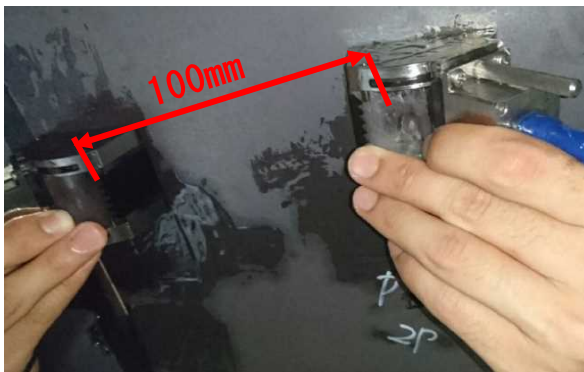
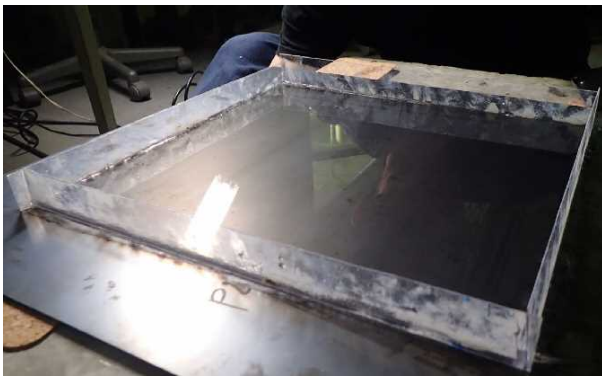


写真-1 鋼板上に水を滞水させた状態（上）と一対の超音波斜角探触子（下）による測定状況

なかった事実と合致する。一方、番号 7, 9 では、滞水後の周波数が滞水前よりも低周波数側に移動していることがわかる。その変化がわずかであることから、鋼板上に薄い滞水層が存在したことが推察される。番号 6, 8 の健全部に対しては、位相速度を  $1800\text{m/s}$  に設定して周波数を掃引した。理論曲線に符合して、 $120\text{kHz}$  と  $230\text{kHz}$  の近傍の 2 つの周波数においてガイド波の発生が認められた。なお、番号 6, 8 の健全部に対して位相速度を  $4000\text{m/s}$  に設定して実験を実施してもガイド波の発生は見られなかった。

表-1 滞水層厚を測定するための実験条件

鋼板厚 $h_s$ [mm]	3.2, 4.5, 6.0			
滞水層厚 $h_w$ [mm]	1.0	2.0	3.0	4.0
位相速度 [m/s]	4000			
入射角 [degree]	43			



写真-2 撤去床版の位相速度計測状況

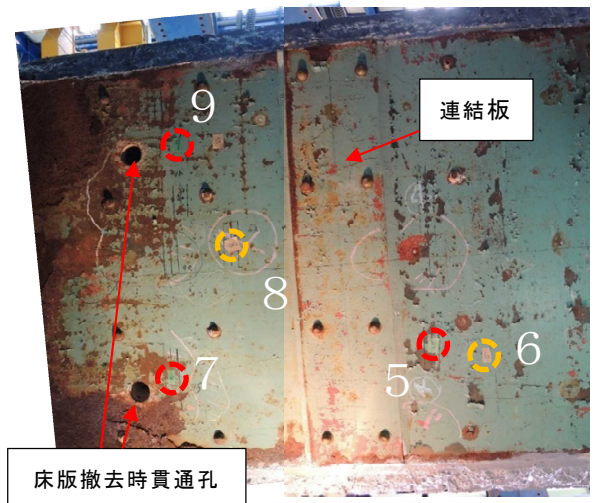


写真-3 撤去床版裏面での計測箇所

なお、測定結果が理論曲線の右側にずれているのは、理論値は鋼板厚  $4.5\text{mm}$  で求められているのに対し、撤去床版の鋼板厚が腐食によって減少しているためであると考えられる。実際に超音波板計を用いて撤去床版の鋼板厚を測った結果、いずれの計測箇所でも  $4.5\text{mm}$  以下になっていた。そこで、減厚が分散曲線に及ぼす影響を確認するため滞水のない鋼板厚  $4.3\text{mm}$  の鋼板に対するガイド波の位相速度の分散曲線を図-7 の紫色の点線によって示す。これより本手法の計測精度を高めるためには、事前に鋼板厚を正確に測定しておくことが必要であることがわかった。

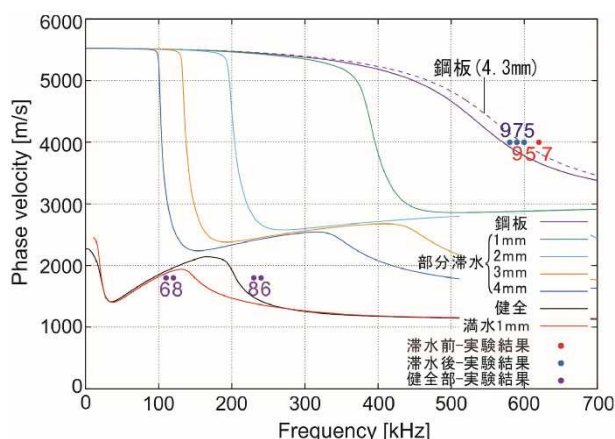


図-7 撤去床版に対するガイド波の基本モードの位相速度の分散曲線と実験結果（番号は計測箇所の番号を表し、番号5, 7, 97の赤点は滞水前の結果、青点は滞水後の結果を示す。）

## 5. あとがき

本研究では、道路橋 RC 床版の下面に鋼板を有する鋼板接着補強した RC 床版、鋼コンクリート合成床版および I 形鋼格子床版を想定し、鋼板上の滞水状態について超音波ガイド波を用いて解析的および実験的に検討を行った。その結果、以下に本研究で得られた結論を示す。

- ・鋼板上の滞水状態を再現した水と鋼板の 2 層状モデルに対して超音波ガイド波の分散曲線を理論解析によって導出した。その分散曲線より鋼板上の滞水層厚と周波数の関係を導き、超音波ガイド波による滞水層厚の推定手法を提案した。
- ・超音波斜角探触子を用いた計測実験において、鋼板厚に対する滞水層厚の比が小さい場合は、鋼板上の滞水層厚の推定精度が低下するものの、その誤差は ±0.5mm 以内にあり、提案した推定手法が、実用上十分な推定精度を持っていることを示した。

以上のことから、道路橋 RC 床版の底面に鋼板を有する構造物の鋼板面から超音波ガイド波を用いた非破壊検査にて鋼板上の滞水層厚を定量的に推定することが可能であることがわかった。今後は、本研究成果を実橋床版において鋼板上の滞水状態を容易に検出できるようにレーザーを用いた非接触での検査手法に展開したいと考える。

## 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)の補助を受けて実施しました。また、共同研究者の東京工業大学の廣瀬壯一先生、古川陽先生、(公財)レーザー技術総合研究所の島田義則氏、オレグ

コチャエフ氏には掲載にあたって多大な協力を図って頂きました。ここに記して謝辞といたします。

## 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国土技術政策総合研究所資料, 第 28 号, 2002.3.
- 2) 阪神高速道路公団: コンクリート構造物の健全度に関する調査研究業務報告書, 1982.3.
- 3) 朝倉俊弘, 安東豊弘, 小俣富士夫, 若菜和之, 松浦章夫: 欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果, 土木学会論文集 No.493/III-27, pp.89-98, 1994.6.
- 4) 松井繁之, 栗田章光, 中井博, 黒山泰弘: 鋼板接着工法により補強した RC 床版の疲労性状, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.247-254, 1986.9.
- 5) 園田 恵一郎, 沖野真, 林 秀侃, 喜田浩: 道路橋 RC 床版に対する鋼板接着補強工法の信頼性に関する研究, 土木学会論文集 No.398, I-10, pp.245-254, 1988.10.
- 6) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集 Vol.7, No.1, pp.143-152, 1996.1.
- 7) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集 9(2), pp.627-632, 1987.
- 8) H. Tachibana, S. Hirose, A. Furukawa, Y. Shimada, O. Kotyaev, K. Nakamoto: Detection of Water Ponding in Steel-plate-bonded Concrete Slab Using Ultrasonic Guided Waves, NDE/NDT for Highways and Bridges: Structural Materials Technology 2016, 2016.8.
- 9) 永溝久志, 村瀬守正: 円管周方向に伝搬するガイド波による配管等の非破壊検査, 非破壊検査 Vol.52, pp.679-682, 2003.12.
- 10) J.L.Rose: Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge Univ. Press, pp.154-175, 1999.
- 11) Y. Shen, S. Hirose, Y. Yamaguchi: Dispersion of ultrasonic surface waves in a steel-epoxy-concrete bonding layered medium based on analytical, experimental, and numerical study, Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation Vol.2, pp.49-63, 2014.