

# 超音波ガイド波を用いた鋼板接着補強した RC 床版の滞水検出

## DETECTION OF WATER PONDING IN STEEL-PLATE-BONDED CONCRETE SLAB USING ULTRASONIC GUIDED WAVES

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

我が国の道路橋の損傷事例としては、腐食損傷とともに床版の劣化損傷が大きな割合を占めている。特に 1970 年以前に施工されたコンクリート床版には交通車両による疲労損傷が頻繁に発生し、その補強方法として「鋼板接着工法」が多く採用されてきた。しかし、この工法が採用されてから 30 年以上が経過し、鋼板接着床版が再劣化した事例が報告されており、今後さらに増加することが予想される。そのため、筆者らは鋼板接着床版を効率的に非破壊検査する方法として、レーザー差動干渉法を用いたレーザーリモートセンシングシステムを開発した。しかし、室内実験において水で満たされた剥離部分については、これまでの着目周波数では剥離と滞水を判別することが困難であることがわかった。床版内への水の侵入は、鋼板の腐食やコンクリート床版の劣化に影響を与える非常に重要な因子である。そこで、本研究では、鋼板とコンクリートの間で剥離し、そこに滞水した水の存在を合理的に精度良く検出するため、開発したレーザー差動干渉法と併用して用いる超音波ガイド波による新たな検査法について検討を行った。本稿では超音波ガイド波を用いて行った数値解析と実験について示す。

キーワード：鋼板接着床版，レーザーリモートセンシング検査，超音波ガイド波，分散特性

### 1. まえがき

日本の道路橋は、高度経済成長期に数多く建設されたが、当時施工された鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）は現在の基準と比較して疲労耐久性が劣っており、車両の返し荷重による疲労損傷が問題となった。劣化した RC 床版の補強方法が研究<sup>1)</sup>され、床版の下面に鋼板を樹脂で接合し耐荷力を改善する「鋼板接着工法」が多く採用され、数十年以上使用されてきた。しかし、近年、鋼板接着補強された RC 床版は鋼板とコンクリート間の剥離など再劣化が報告されている<sup>2)</sup>。そのため、鋼板の剥離を検出するための効率的な非破壊検査として、レーザー差動干渉法を用いたレーザーリモートセンシングシステムを開発した<sup>3)-5)</sup>。模擬損傷試験体を用いた数値解析と室内実験によって比較的低い周波数帯のレーザー計測による損傷を検出することができた。また、供用中の橋梁床版計測により本システムの適用性を確認した<sup>6)</sup>。

弾性周波数帯での室内実験において水で満たされた剥離部分での、板曲げ振動の検出では面積に依存し複雑な境界条件の判定が難しい。ただし、水が鋼板の腐食やコンクリート床版の劣化に影響を与える非常に重要な因子であることから、本研究では鋼板とコンクリートの間

で剥離した部分の滞水を検出するために超音波ガイド波を用いて検証することを目的とした。まず、鋼板、水、エポキシ、コンクリートのいくつかの階層モデルに伝播するガイド波の分散特性を数値的に分析する。その後、数値結果を検証するために室内実験を実施した。その結果、超音波ガイド波は、鋼板の背後に滞水した水層を検出できる可能性が高いことを確認した。

### 2. レーザー差動干渉法による損傷検出

#### 2.1 模擬損傷試験体

図-1 に鋼板接着補強 RC 床版をモデル化した模擬損傷試験体の概要図を示す。鋼板およびエポキシ樹脂の厚さは、設計要領や施工実績などから、それぞれ 4.5mm、5mm とした<sup>7)</sup>。試験体は、鋼板と樹脂との剥離および樹脂の充填不良を想定した空隙の模擬損傷試験体と健全部の 3 体とした。模擬損傷試験体のダメージ領域のサイズは 200x200mm<sup>2</sup> とし、RC 床版中の水分が停滞した状態を再現するために、鋼板に孔を開けて損傷領域に水を注入できるようにした。

#### 2.2 計測条件

鋼板接着補強された供用中の道路橋 RC 床版を下側か

\* 技術本部 技術研究室

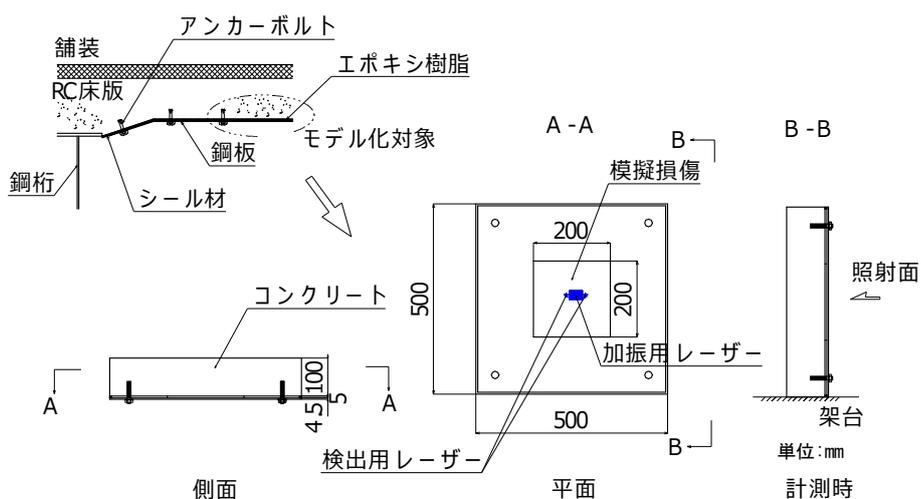


図-1 鋼板接着床版をモデル化した模擬損傷試験体とレーザー加振および検出点

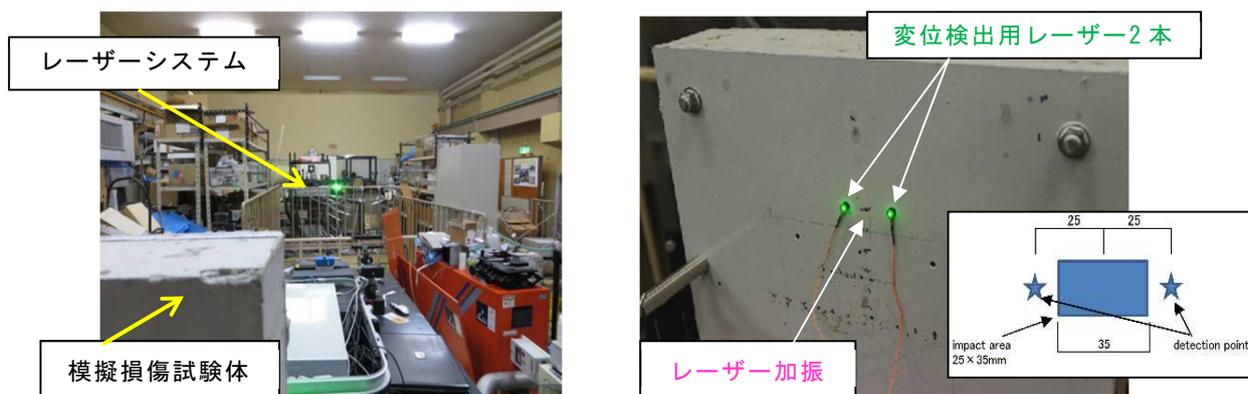


写真-1 (写真左) レーザーシステム(左写真奥)より8mm離れた試験体  
(写真右) 試験体表面に2本の検知用レーザーと加振用レーザーを照射した状況

ら非接触で非破壊検査することを想定し、室内実験では写真-1の左側に示すように、試験体をレーザーシステムから8m離れた位置に設置した。このシステムは、振動を与えるためのレーザーとその加振によるゆれを検知するレーザーの2種類で構成している。写真-1の右側に示すように、レーザーによる振動励起は、鋼板の25×35mm<sup>2</sup>の矩形部分にCO<sub>2</sub>レーザーを照射して垂直な表面力を与えた。一方、鋼板表面に発生した振動は、加振部の中心に対して25mmずつ左右に離れた2本の検出用レーザーにて変位を計測する。実際の床版は交通振動などにより大きく振動しており、レーザー加振による小さな振動を検出用レーザーの変位差分によって検出可能とした。

### 2.3 レーザー差動干渉法の計測結果

図-2(a)～(e)は、試験体が(a)健全部、(b)コンクリートと鋼板の間の空隙(樹脂なし)、(c)コンクリートと鋼板の間の空隙に水で飽和させた状態、(d)鋼

板と樹脂との間の剥離、(e)鋼板と樹脂との間の剥離に水で飽和させた状態における、それぞれに観察された波形(上図)と周波スペクトル(下図)を示している。図-2(b)～(e)の計測位置は、図-1に示すようにほぼ損傷領域の中心にあり、励起用レーザーは(x, y)=(10,10)[mm]の位置とした。

図-2(a)、(b)、(d)の比較から、図-2(b)、(d)の波形は、レーザー励起直後の振幅が大きく、図-2(a)の波形はノイズレベルに相当するほど振幅が非常に小さい。図-2(b)では、特に、鋼板の空隙部の振動により長時間にわたって大きく複雑な波形が継続する。周波数スペクトルに関しては、図-2(a)に示すように、欠陥のない試験体は1kHz以下の周波数成分を示しているのに対して、欠陥のある試験体では、図-2(b)および(d)では5kHzまでの周波数成分が見られる。一方、健全部と空隙部に水が飽和した状態とを比較すると、図-2(a)と

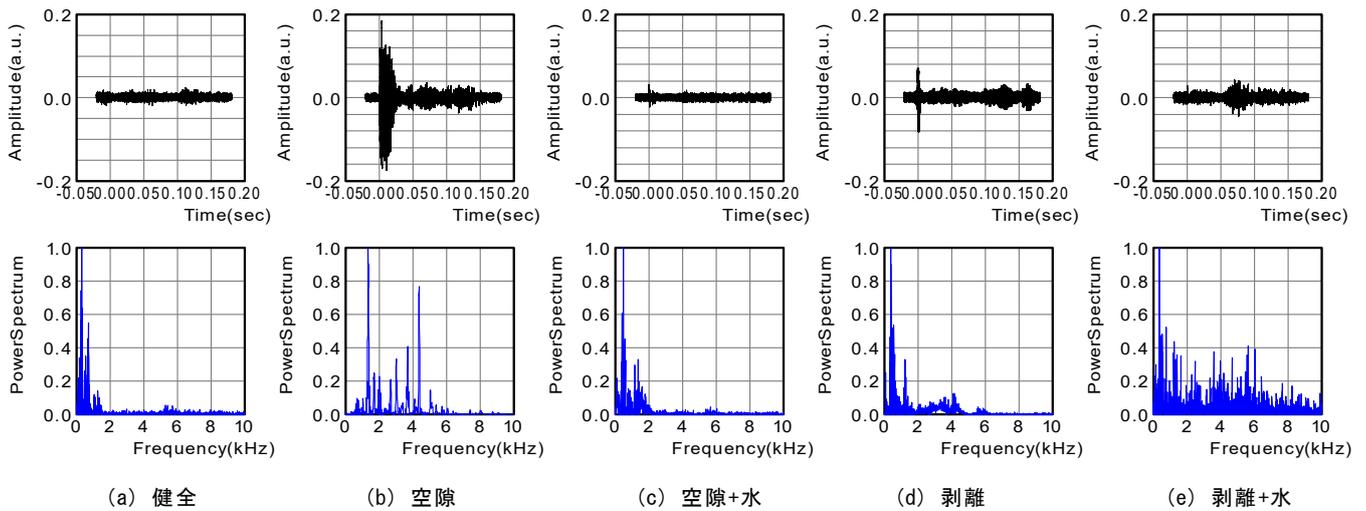


図-2 健全, 空隙および剥離試験体をレーザー差動干渉法で測定した波形（上）と周波数スペクトル（下）。空隙と剥離は' + 水' は水で飽和した試験体を示す。

表-1 分散解析のための材料特性

	鋼板	水	エポキシ樹脂	コンクリート
縦波速度 (mm/ $\mu$ s)	5.87	1.50	2.50	4.00
横波速度 (mm/ $\mu$ s)	3.14	—	1.11	2.45
密度 ( $10^{-3}$ g/mm <sup>3</sup> )	7.85	1.00	1.12	2.50
厚さ (mm)	4.5	$h_w$	5.0	$\infty$

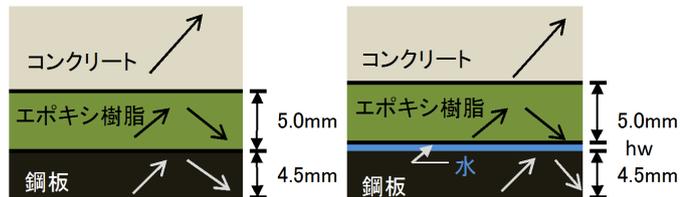


図-3 (a) 健全部の各層モデル（鋼板-エポキシ樹脂-コンクリート：SEC）  
(b) 滞水部の各層モデル（鋼板-水-エポキシ樹脂-コンクリート：SWEC）。

(c) が示すように、波形と周波数スペクトルの両方においてほとんど差がない。ただし、図-2 (e) の周波数スペクトルは図-2 (c) とは異なる特性である高周波域においても比較的大きな値を示している。したがって、レーザー差動干渉法を用いた弾性波での非接触での非破壊検査において、健全部と水が充填された欠陥部を区別することは時には先見情報や数多くのキャリブレーションデータが必要となることがわかった。

鋼板接着補強 RC 床版の鋼板とコンクリートの間にある滞水は、床版の耐荷力および耐久性に大きな影響と与えることから床版の損傷状態を判断する上で非常に重要な要素である。したがって、損傷検出の高精度化、効率化を図りながら水の状態を識別するために、別のアプロ

ーチとして超音波ガイド波を用いた検出法について、次節にて提案する。

### 3. 超音波ガイド波を用いた新たな検出法

#### 3.1 ガイド波について

一般的にガイド波<sup>8)</sup>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大きく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、ある材料にガイド波を伝搬させた場

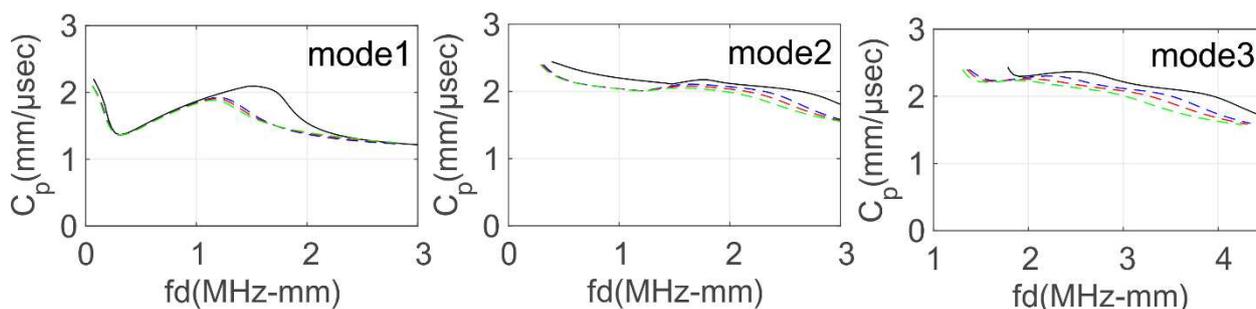


図-4 SECモデル（黒線）および異なる水の厚さを有する SWECモデルにおけるガイド波の最初の3つのモードに対する位相速度  $C_p$  対無次元波数  $fd$  の分散曲線（青：0.5mm，赤：1.0mm，緑：1.5mm）。

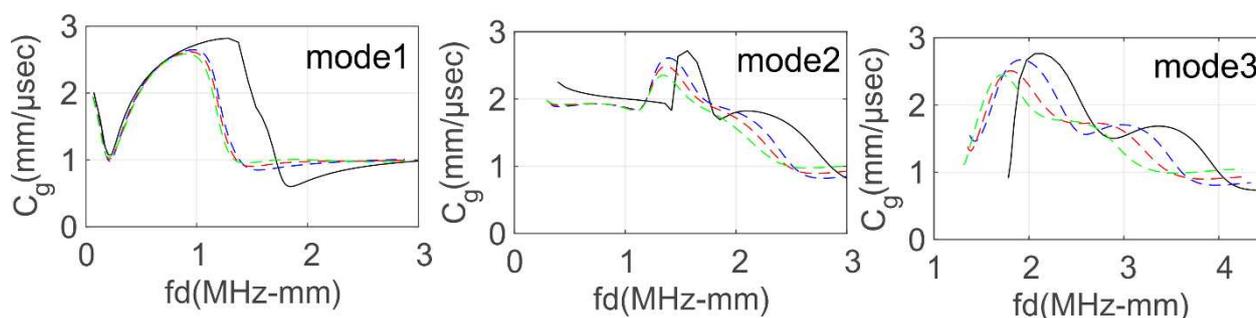


図-5 図-4に対応する群速度  $C_g$  の分散曲線。

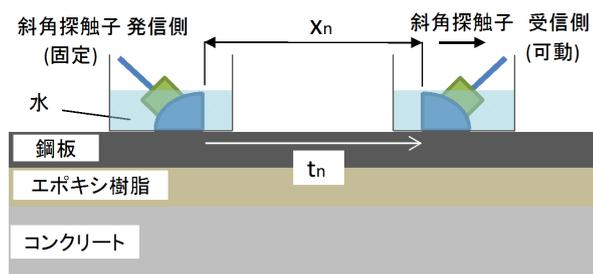


図-6 ガイド波計測時の概略図。

合、どのようなモードが発生し、速度はいくつであるかを表した図で位相速度と群速度の2種類の図で表される。分散曲線を導出する手順としては対象とする構造体を数値モデル化し、その特性方程式を求めることで位相速度の分散曲線が求められる。また、群速度は位相速度のデータを用いて導出される。

### 3.2 超音波ガイド波の理論解析モデル

鋼板接着領域を伝搬するガイド波の分散に対する水層の影響を確認するために、図-3に示すような2つのモデルを考える。図-3(a)は「鋼板-エポキシ-コンクリート (SEC)」の健全部をモデル化した3層モデルであり、図-3(b)は鋼板とエポキシ樹脂の間に滞水層を追加した4層モデル (SWEC) で水層厚さ  $h_w$  を 0.5, 1.0, 1.5mm とした、それぞれの材料特性を表-1に示す。

### 3.3 超音波ガイド波の理論解析結果

図-4および図-5は、図-3(a)および(b)に示す SEC

および SWECモデルにおけるガイド波の特性方程式にて求めた位相速度  $C_p$  および群速度  $C_g$  の分散曲線をそれぞれ示している。各図において、横軸は周波数  $f$  (MHz) と鋼厚  $d$  の半分 (2.25mm) との積である無次元波数  $fd$  であり、縦軸はそれぞれの速度を示している。図-4および図-5において滞水の有無による速度差を位相速度と群速度で比較すると、図-5の mode1 が最も大きな速度差を示していることがわかる。以上のことから、水の影響は  $fd=1\sim 1.8$  付近に現れた mode1 の群速度差を検出することが健全と滞水状態を識別する上で重要であると言える。一方、ガイド波に対する水の影響は水層の厚さの影響を受けないため、図-5の mode1 で水層厚の違いによる群速度  $C_g$  はほぼ一致しており、群速度  $C_g$  の変化を利用して水層のみの存在を認識することは可能であるが、水層の厚さを推定することは別途検討が必要となることが分かった。

表-2 SWEC モデル, SEC モデルおよび剥離モデル(鋼板のみ)の計測条件

周波数 (kHz)	S W E Cモデル					S E Cモデル			
	400	450	500	550	600	500	550	600	650
入射角 $\theta$ (°)	57.32	54.29	52.30	52.36	56.11	50.71	48.73	47.11	45.83
探触子間の間隔 $X_n$ / 移動間隔 $\Delta x$ (cm)	10-14/1	10-14/1	10-14/1	10-14/1	10-14/1	10-14/1	10-14/1	10-14/1	10-14/1

健全モデル (鋼板のみ)			
周波数 (kHz)	500	550	600
入射角 $\theta$ (°)	17.50	18.50	20.10
探触子間の間隔 $X_n$ / 移動間隔 $\Delta x$ (cm)	10-20/1	10-20/1	10-20/1

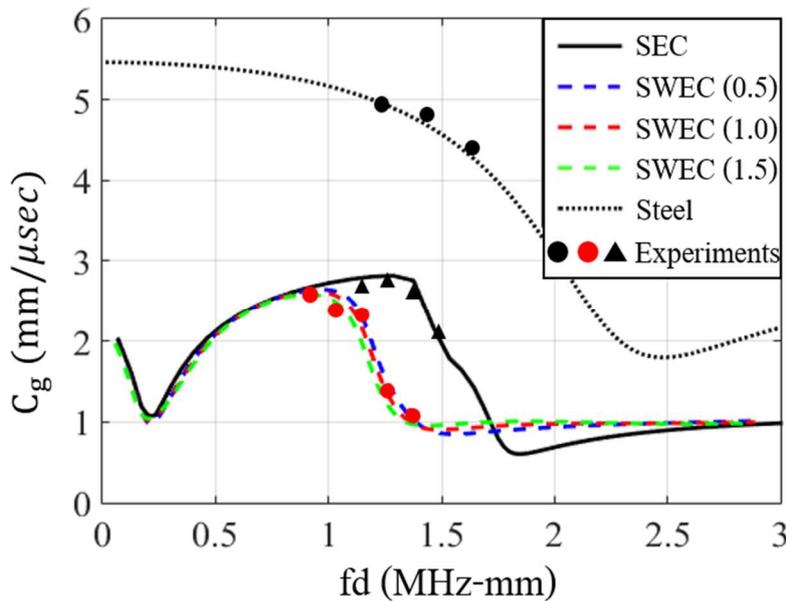


図-7 解析と実験で得られた群速度の比較

3.4 群速度の測定のための実験状況

理論解析の結果より、実験にて超音波ガイド波の群速度の測定し、理論解析の分散曲線と比較して状態の判別を行う。群速度の計測は、図-6 に示すように2つの斜め超音波探触子(送信・受信用)を用いて計測を行った<sup>9)</sup>。斜め超音波探触子は、公称周波数 500kHz を用いてそれぞれのモデルにおいて表-2 に示す 400-650kHz の周波数を有する 10 サイクルの正弦波信号によって励起され、無次元周波数  $fd = 0.9 \sim 1.46$  に対応させた。入射角は、理論解析によって求めた位相速度  $C_p$  より、スネルの法則  $\theta = \sin^{-1}(C_w/C_p)$  を用いて設定した。ここで、 $C_w$  は水中の速度である。さらに、 $x_n$  の範囲と最小値を表-2 に示し、正弦波信号の電圧は 400V とした。

送信用の斜め超音波探触子を固定した状態で受信用の斜め超音波探触子を動かして測定した。2つの斜め超

音波探触子間の距離  $X_n$  に対するガイド波の移動時間  $t_n$  とする。次に、 $(x_1, t_1)$  と  $(x_2, t_2)$  の2つのデータセットを使用して、群速度  $C_g$  を以下の式から導き出すことができる。

$$C_g = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \tag{1}$$

群速度の測定実験は、図-3 (a) および (b) に示す SEC および SWEC モデル、さらには水なしの剥離モデルである鋼板のみを対象とした。図-3 (b) の SWEC モデルの実験では、水の厚さを  $hw = 1.0\text{mm}$  とした。

3.5 群速度の計測実験結果と理論解析の比較

計測実験(記号)によって得られた群速度と model1 における理論解析によって得られた群速度の分散曲線(線)とを比較した結果を図-7 に示す。実験と解析は良好な一致を示し、3つのモデルの群速度は周波数  $fd = 1.0 \sim 1.5$

の範囲で異なる値を示すことが分かった。従って、超音波ガイド波の測定により、水を含む損傷条件を特定することができると言える。

#### 4. あとがき

本研究で紹介した、レーザー差動干渉法を用いたレーザーの検査システムは、交通を中断することなく鋼板とRC床版の接合状態を遠隔検査するために非常に有効なツールと言える。実験室内実験で得られた波形および周波数振幅から、健全部、鋼板とエポキシ樹脂間の剥離、空隙の3つの条件を区別することができた。しかし、欠陥部が水で満たされたときに欠陥を検出するには事前のキャリブレーションデータや先見情報などが判定に必要となり困難であることが判明した。そこで本研究では、ガイド波を用いた別の手法を提案した。解析と実験から、特定の周波数範囲のガイド波の群速度は、水の有無にかかわらず層状モデルに対して異なる値を示すことが確認されている。超音波ガイド波において、鋼板上の水の有無によって群速度差が顕著に表れることから、鋼板の背後の滞水を検出する可能性が高いと結論付けられる。今後は、水層厚の検証とガイド波の遠隔測定にレーザー方式を適用する予定である。

#### 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先生、古川先生、(公財)レーザー技術総合研究所の島田氏、オレグ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) 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, pp247-254, 1986.9
- 2) 前川敬彦, 久利良夫, 佐々木一則, 飛ヶ谷明人, 青木康素: 鋼板接着補強RC床版の維持管理に関する検討, 第7回床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.13-18, 2012.6
- 3) H. Tachibana, K. Nakamoto, Yamaguchi & S. Hirose : Quantitative non-destructive evaluation of damages in a steel plate bonding method, the 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2014), pp.622-627, 2014.7
- 4) Y. Shimada, O. Kotyaev, S. Hirose, H. Tachibana, K. Nakamoto, N. Misakiand, H. Takinami: Actual Laser-based Methods for Remote Inspection of Shinkansen Tunnels and Highway Bridges, Proc. the Fifth US-Japan NDT Symposium - Emerging NDE Capabilities for a Safer World, The American Society for Nondestructive Testing, pp.212-218.2014.6
- 5) 橋 肇, 山口雄也, 中本啓介, 島田義則, オレグコチャエフ, 廣瀬壮一: レーザー法を用いた鋼板接着コンクリート床版の損傷部の検出, 構造工学論文集 Vol.61A, 土木学会, pp.544-551, 2015.3
- 6) 橋肇, 中本啓介, 島田義則, 廣瀬壮一, 八ツ元仁: 鋼板接着コンクリート床版の劣化に対する非破壊検査法の研究開発, 第八回床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.225-228, 2014.10
- 7) 阪神高速道路公団: 道路構造物の補修要領, 2005.4
- 8) 西野秀郎: 非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望, 非破壊検査第52巻12号, pp654-661, 2003.12
- 9) W.Zhu, J.L.Rose, J.N.Barshinger, V.S.Agarwala :Ultrasonic Guided Wave NDT for Hidden Corrosion Detection, Research in Nondestructive Evaluation, Vol.10, No.4, pp. 205-225, 1998