

# 表面波の特性を用いた一面配置型弾性波トモグラフィの開発

## Development of Single-side Access Tomography Using Surface Wave Characteristics

桃木 昌平<sup>\*1</sup>      蔡 華 堅<sup>\*2</sup>      寄川 光 博<sup>\*3</sup>  
Shohei Momoki      Hwakian Chai      Mitsuhiro Yorikawa  
望月 泰彦<sup>\*4</sup>      塩谷 智基<sup>\*5</sup>      小林 義和<sup>\*6</sup>  
Yasuhiko Mochizuki      Tomoki Shiotani      Yoshikazu Kobayashi

### 【要旨】

非破壊評価技術である「弾性波トモグラフィ」は、大規模なコンクリート構造物の健全性（ひび割れや空洞の有無等）を広域的に可視化して評価することが可能で、これまで品質確認や補修・補強による改良効果の確認などに適用してきた。しかしながら、これまでの弾性波トモグラフィでは、計測対象を挟み込むようにセンサを配置することが必要であり、センサの配置が片側表面に制限される構造物（例えば、トンネル覆工等）には適用が困難であった。以上のことから、表面波（主にレイリー波）の特性に着目した非破壊評価技術として、「一面配置型弾性波トモグラフィ」を開発した。これまで評価が困難であった構造物の片側表面に配置されたセンサで収録した波形データから、内部または背面側の健全性を広域的に評価することができる。本研究では、模擬欠陥を有する試験体を用いて、片側表面からのアプローチで、表面波成分の卓越周波数に応じた位相速度を算出し、トモグラフィを適用することで、構造物の健全性評価が可能であることを検証した。

【キーワード】    コンクリート構造物    トモグラフィ    表面波    位相速度

### 1. はじめに

近年、橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物の老朽化が顕在化し、2030年頃には建設後50年以上経過するコンクリート構造物の割合が約50%に及ぶと推測されている<sup>1)</sup>。広範におよぶコンクリート構造物の現状を余すことなく評価し、適切な補修や補強によって可能な限り延命化させることが、これからの維持管理に求められる重要な命題である。

この命題に対し、筆者らはこれまでコンクリート構造物の直接見ることができない内部の健全性を広域的に評価でき、かつ補修による改良効果を定量的に確認できる弾性波トモグラフィの研究開発を進めてきた<sup>2), 3)</sup>。しかしながら、これまでの弾性波トモグラフィは構造物を挟み込むようにセンサを配置する必要があり、評価対象となる構造物の背面側へのアプローチが困難である場合、弾性波トモグラフィの適用は不可能であった。

そこで本研究では、波長分に相当する深さまで、片側表面から評価できる表面波に着目し、この表面波の特性を利用することで、片側表面から広域的に構造物内部の健全性を評価できる一面配置型弾性波トモグラフィ技術の開発を実施した。

### 2. 一面配置型弾性波トモグラフィ開発への着手

#### 2.1 従来の弾性波トモグラフィとその問題点

1本の走査線において弾性波を透過させて伝播時間を計測し、算出した弾性波伝播速度から健全性の情報を得ようとしても、その走査線間（発信点から受信点までの間）の平均的な伝播速度しか得られず、相対評価から不健全と評価されても、どの位置に不健全な箇所があるのかを評価することはできない。しかし、センサを複数配列して多方向の伝播時間を取得し、これらを基にマトリクス演算を行うことで、構造物を任意の小領域（セル）

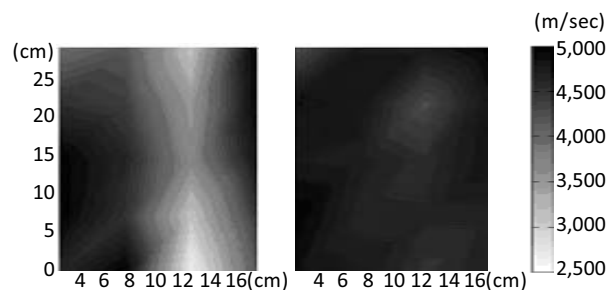


図-1 弾性波トモグラフィによる健全性評価例  
(左: 補修前, 右: 補修後)

※低速領域（ひび割れ）が補修後減少している

1. 建設事業本部 技術研究所 第一研究室    2. University of MALAYA    3. 首都圏土木支店 千葉火力その2作業所  
4. 大阪支店 新幹線高架橋作業所    5. 京都大学大学院 工学研究科    6. 日本大学 理工学部

に分割した解析モデルにおいて、各セルの弾性波伝播速度を逆解析問題の一種として得ることができる。このようにして図-1に示すように、伝播速度をコンター図等で表すことで、対象領域の健全性分布図が推定でき、内部にひび割れ等の欠陥が存在する場合には、それらの位置や規模、または補修による効果をわかりやすく把握できる<sup>2)</sup>。このような手法のことをトモグラフィ (Tomography) という。医療などで利用される CT スキャン (Computed Tomography) は弾性波伝播速度の代わりにエックス線の吸収率を分布図化するこの手法の代表例である。

このように従来の弾性波トモグラフィでは、構造物を透過する弾性波の初動伝播速度やエネルギー減衰比<sup>3)</sup>を用いていた。しかし、対象となる構造物を挟み込むようにセンサを配置する必要があり、センサの配置が片側表面に制限される構造物、例えばトンネルの覆工や地下構造物、橋梁床版などには適用が困難であった。

## 2.2 弾性波の表面波の特性

図-2に示すように、構造物の表面において鋼球やハンマなどのインパクトで打撃して励起された弾性波の波動は、振動方向や波の進行方向によって縦波 (P波、図-2 (a)) や横波 (S波、図-2 (b)) など幾つかの成分に分類される<sup>4)</sup>。従来の弾性波トモグラフィで利用するのは初動、すなわち縦波を利用したものであった。本研究では、この弾性波動の中で表面を伝播する表面波 (レイリー波、およびラム波、ここでは主としてレイリー波を示す、図-2 (c)) に着目した。

図-3 (a) に示すように、この表面波は表面近傍で楕円状に振動しながら伝播する。この楕円状の振動の範囲は表面波の波長に等しく、表面波は波長に相当する深さ方向の状態に応じて変化を示す (図-3 (b))。この特性を利用することで、片側表面に配置したセンサによる測定で構造物内部の健全性評価が可能になる<sup>5)</sup>。

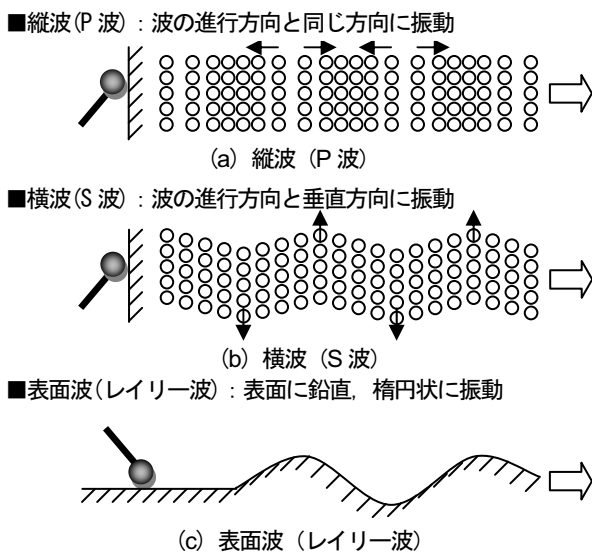


図-2 弾性波の種類と波の進行方向に対する振動

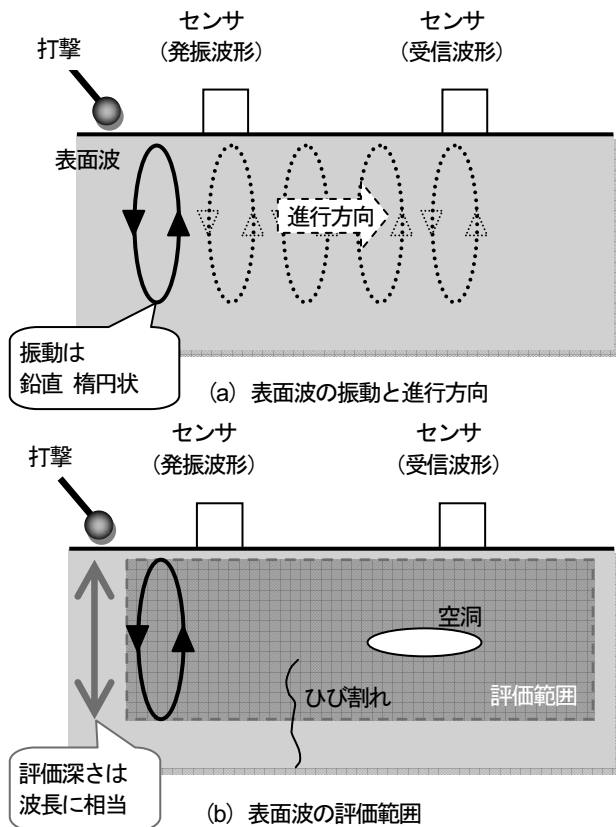


図-3 表面波の特性と健全性評価イメージ

## 2.3 表面波位相速度のトモグラフィへの適用

例えば、振動の範囲にひび割れや空洞などの欠陥が存在する場合、表面波は反射、または散乱するため、伝播経路は最短距離の直線にならない。その結果、表面波の初動、あるいは位相が遅れ、受信点まで長い伝播時間を要することになり、伝播経路を直線と仮定して計算すると伝播速度は低下することになる。したがって、構造物の片側表面に配置されたセンサで収録した波形データから、表面波の卓越周波数に応じた伝播速度 (表面波位相速度) を算出してトモグラフィを適用することで、アプローチが片側表面に制限される構造物においても内部または背面側の健全性を広域的に評価できる。このとき、卓越周波数から求められる波長に相当する深さが、表面波の最大評価深さと考えられる。表面波位相速度は数式 (1) によって求められる。

$$V_{ph} = \lambda f = \left( \frac{2\pi \Delta x}{\Delta \phi} \right) f \quad (1)$$

ここで、 $V_{ph}$  は表面波位相速度 [m/sec]、 $\lambda$  は波長 [m]、 $f$  は表面波の卓越周波数 [Hz]、 $\Delta x$  は走査線間距離 [m]、 $\Delta \phi$  は走査線間の卓越周波数に応じた位相差 [radian] を示す。

しかしながら、実際に計測される波形データ (図-4) から卓越周波数を求める場合、図-5に示すように表面波の周波数成分以外にも構造物境界面からの反射や回折による周波数成分が混在すると考えられる。そこで本研

究では、表面波が卓越している波形のみを抽出し（図-6）、抽出された波形の周波数成分（図-7）から表面波位相速度の算出に用いている。

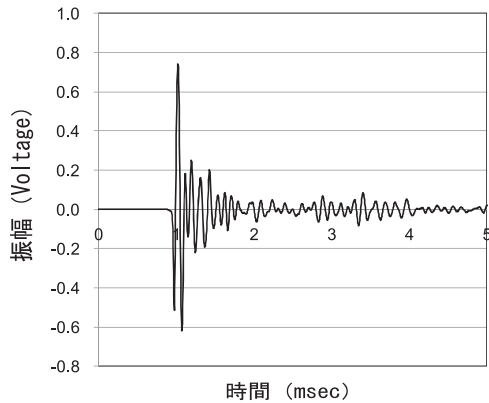


図-4 実測波形データ

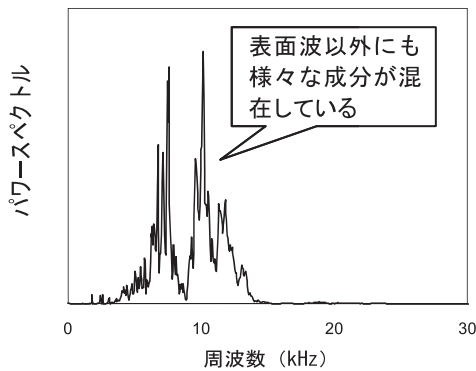


図-5 実測波形データの周波数分布

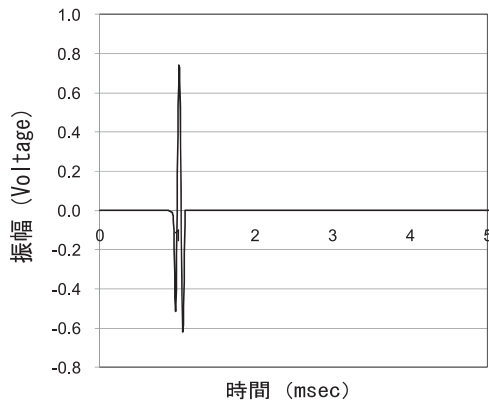


図-6 表面波の抽出波形データ

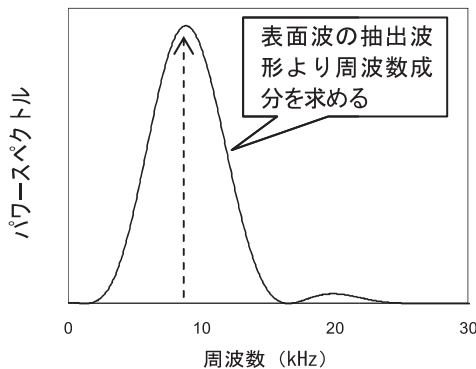


図-7 抽出波形データの周波数分布

### 3. 内部欠陥模擬試験体による検証試験

#### 3.1 試験体の概要と計測方法

写真-1は、一面配置型弾性波トモグラフィの検証に用いたコンクリート試験体の型枠組立状況である。1,500×1,500×300 mmの床版試験体表面に対し水平なひび割れや空洞等の欠陥を模擬し、厚さ5 mmの発泡スチロール版を4箇所埋設し打設した。センサを配置する試験体表面からの深さは30 mm, 60 mm, 100 mmおよび140 mmである。

弾性波を計測する加速度センサは写真-2に示すように、4行4列、計16個配置した。センサ間隔は300 mmである。鋼球型のハンマによってそれぞれのセンサ近傍で打撃を与える。このとき、近傍のセンサで得られた波形を発振波形、残り15個のセンサで得られた波形を受信波形とする。すなわち、全てのセンサ近傍で打撃して得られる走査線は $16 \times 15 = 240$ 本となる。このようにして、評価する領域を網羅する多数・多方向の各走査線における表面波位相速度を算出し、それらを基にトモグラフィ解析によって表面波位相速度の分布図を算出する。

鋼球での打撃によって励起される弾性波の周波数は、鋼球の球径、および打撃されるコンクリート表面の状態（弾性係数）に影響を受けることが知られている。本検証試験では、3種類の鋼球ハンマ（球径3 mm, 8 mm, 11 mm）を用いて、実際に得られる発振波形から抽出した表面波に対して高速フーリエ変換（FFT）解析を行い、表面波の卓越周波数を求め波長を算出した。

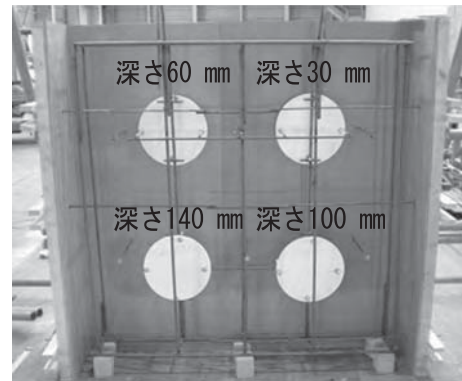


写真-1 試験体型枠組立状況

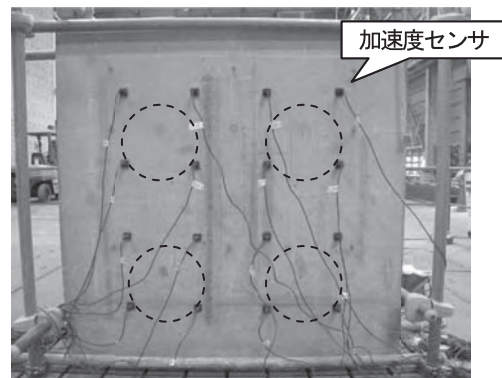


写真-2 センサ配置

### 3.2 試験結果

図-8, 9, 10は各鋼球ハンマで得られた抽出波形のFFT解析結果である。FFT解析より、球径3 mm, 8 mm, 11 mmの鋼球ハンマで励起された表面波の卓越周波数および波長は、それぞれ20 kHz (110 mm), 12 kHz (180 mm), 9 kHz (240 mm)と算出された。

図-11, 12, 13は各鋼球ハンマによる計測で得られた波形を基にトモグラフィ解析によって算出された表面波位相速度の分布図である。算出された波長よりも浅い位置に存在する模擬欠陥が、表面波位相速度の低速度領域として検出されており、本研究で開発した一面配置型弾性波トモグラフィによって、片側表面でのセンサ配置で構造物内部の健全性評価が可能であることが実証された。また、異なる深さに存在する模擬欠陥に対する、各分布図での表面波位相速度の程度から、評価範囲が波長に応じて確認された。

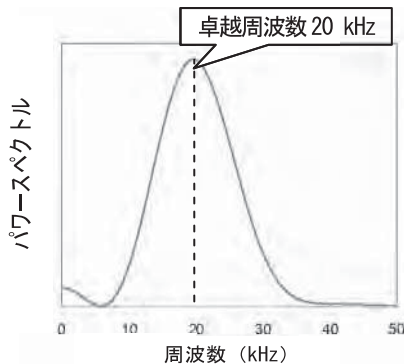


図-8 FFT解析結果 (鋼球径 3 mm)

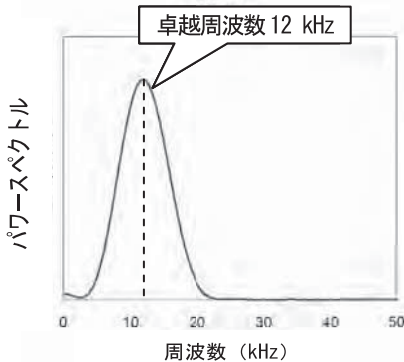


図-9 FFT解析結果 (鋼球径 8 mm)

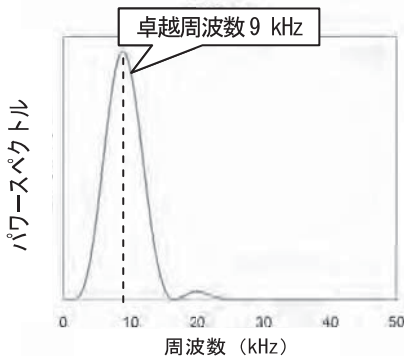


図-10 FFT解析結果 (鋼球径 11 mm)

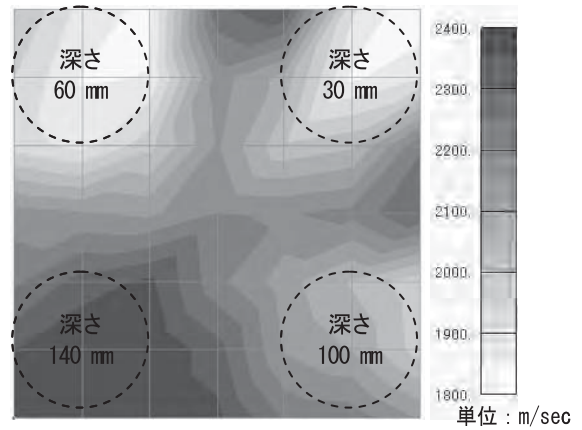


図-11 表面波位相速度分布図 (鋼球径 3 mm)

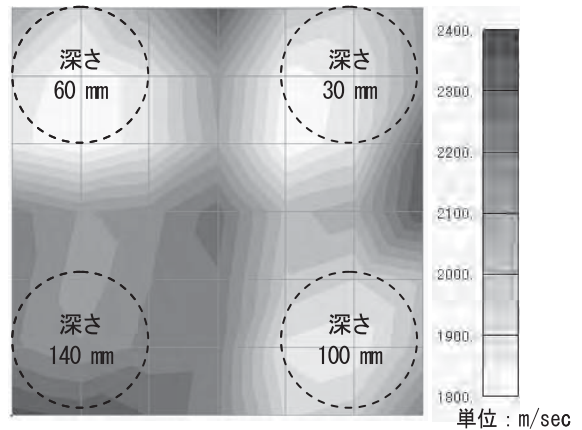


図-12 表面波位相速度分布図 (鋼球径 8 mm)

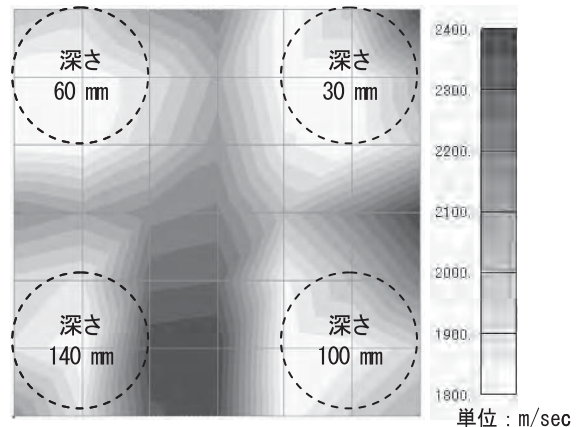


図-13 表面波位相速度分布図 (鋼球径 11 mm)

## 4. 一面配置型弾性波トモグラフィの適用事例

### 4.1 背面側劣化のスクリーニング調査

写真-3は、背面側にひび割れやジャンカを模擬した部分を要するコンクリート床版試験体 (寸法: 1,200×1,200×300 mm) である。この模擬欠陥を、実構造物においてアプローチが不可能な背面側の劣化と想定し、健全である対面側表面にセンサを写真-2と同様に4行4列で (センサ間隔 300 mm) で配置し、トモグラフィ計測・解析を行った。当計測では表面波の波長は約 250 mm であり、床版厚さの8割程度の深さを評価範囲としている。結果を図-14に示す。淡色部が健全な表面波位相

速度に対し低下が見られた箇所であり、背面側のジャンカやひび割れの位置と概ね合致していた。

ここで、配置したセンサを用いて一般的な衝撃弾性波法である多重反射法により床版の厚さ測定を実施した。多重反射法による厚さ測定は数式(2)により求める。

$$T = V_p / 2f \quad (2)$$

ここで、 $T$  は厚さ [m]、 $V_p$  は縦波伝播速度 [m/sec]、 $f$  は波形データのピーク周波数 [Hz] を示す。

図-15に多重反射法により各センサの波形データから得られた周波数分布を示す。模擬ジャンカを有する箇所の真上にあるセンサ(#06)のみが、床版厚さよりも浅い(床版厚さに相当する周波数よりも高い周波数が卓越している)ことが認められた<sup>9)</sup>。

多重反射法は、内部または背面側の劣化位置や、表面からの厚さまたは欠陥までの深さを定量的に評価するのに有効な非破壊評価技術である。ただし、基本的には打撃を実施した点の直下の評価となることから、広域的に調査を実施する場合は、計測領域において高密度に多数の点で測定する必要があるが、この事例のように、一面配置型弾性波トモグラフィによって、予め広域をスクリーニング調査し、多重反射法や他の詳細検査手法(コア採取やX線調査など)を要する箇所を絞り込むことで、比較的大規模なコンクリート構造物の調査を、より効率的に実施できる。

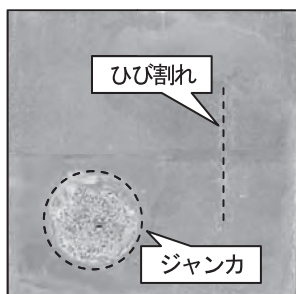


写真-3 背面劣化試験体

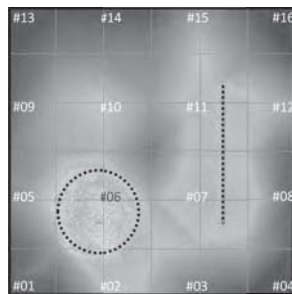


図-14 トモグラフィ結果

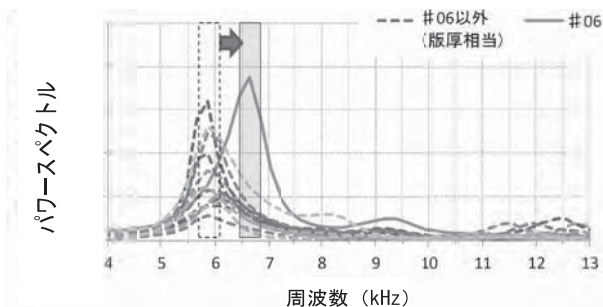


図-15 波形データの周波数分布

#### 4.2 断面修復工法の施工品質の確認

図-16は、橋梁床版下面の断面修復工法によるリニ

ューアル工事において、その施工品質の確認に一面配置型弾性波トモグラフィを適用した事例のイメージである。通常、断面修復工法によるリニューアル工事を施工した場合、施工した現物の任意の箇所において付着強度試験を行い(写真-4)、母材層と断面修復層との界面の付着状況を定量的に確認する<sup>7)</sup>。しかしながら、断面修復が施工された表面は一様であり、付着強度試験を実施する箇所を選定する動機付けが得られず、また、付着強度試験は破壊を伴うため多点で実施することはできない。したがって施工品質の評価は局所的とならざるを得ない。

そこで、断面修復された表面にセンサを配置して、母材との界面を照準として一面配置型弾性波トモグラフィを適用した。一面配置型弾性波トモグラフィで算出される表面波位相速度は、付着強度を直接的に推定できるものではないが、空洞化など重大な施工不良の有無を広域的に確認することは可能である。図-17は実際にトモグラフィ計測で得られた結果であり、表面波位相速度分布図から欠陥を示唆する箇所は確認されなかった。

次に付着強度試験を実施する箇所を、一面配置型弾性波トモグラフィで得られた表面波位相速度分布図を用いて選定した。分布図は各セルに割り当てられた表面波位相速度を基に描画されるものであり、付着強度試験を実施する箇所は、各セルの表面波位相速度の中で最も低い箇所を選定した。これは、欠陥を示唆するほどの低下率では無いが、周囲と比較して何らかの理由で低下している可能性を考慮したものである。結局、付着強度試験の結果は異常なしであり、許容できる誤差の範囲内だったと考えられる。

このように任意の点ではなく一面配置型弾性波トモグラフィで得られた分布図を根拠として現物確認を行うことで、破壊を最小限に留め、かつより信頼度の高い確認を行うことができる。

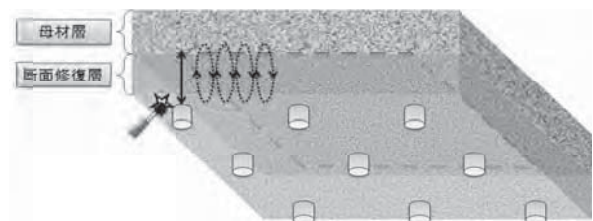


図-16 断面修復工法の施工品質確認イメージ



図-17 トモグラフィ結果



写真-4 付着強度試験

## 5. 結論

本研究ではコンクリートを伝播する弾性波の表面波の特性を利用した一面配置型弾性波トモグラフィの開発を行い、片側表面からのトモグラフィによる構造物内部の健全性評価について検証した。以下に知見を示す。

- ① 表面波をトモグラフィに適用することで、片側表面にアプローチが制限される構造物においても広域的に内部の健全性を評価できる。
- ② 一面配置型弾性波トモグラフィでは、走査線間で計測された表面波位相速度を基に解析を行う。この表面波位相速度は、表面波の抽出波形から得られる卓越周波数より算出する。
- ③ 一面配置型弾性波トモグラフィを用いることで、表面から直接見ることのできないコンクリート内部の水平欠陥の検出が可能である。また、波長を調節することで欠陥深さの定量的な把握も可能である。
- ④ 背面側へのアプローチが不可能な構造物に対し、広域的にスクリーニング調査を行い、多重反射法やその他の詳細検査手法を要する箇所を絞り込むのに有効である。
- ⑤ また、断面修復工法などリニューアル工事における施工品質の確認に適用しトモグラフィで得られる健全性分布図を活用することで、破壊を伴う検査を最小限に留め、かつ信頼度の高い品質確認を行うことができる。

今後は実構造物での試験施工によってデータを蓄積し、構造物の維持管理・リニューアル工事における品質確認等に積極的に展開していく。

## 【参考文献】

- 1) 国土交通省 道路局 :社会資本整備重点計画の見直し, 2010. <<http://www.mlit.go.jp/common/000121192.pdf>>
- 2) 桃木昌平, 蔡華堅, 塩谷智基, 小林義和, 宮永孝志 : 三次元弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価, 構造工学論文集 Vol. 57A, pp. 959-966, 2011.
- 3) 桃木昌平, 蔡華堅, 塩谷智基, 小林義和 : 弾性波の減衰特性を用いたコンクリート内部損傷可視化技術の開発, とびしま技報 No. 58, pp. -27-32, 2009.
- 4) 日本非破壊検査協会 : アコースティック・エミッション試験 I, pp. 8-9, 2006.
- 5) 呉 佳暉, 堤 知明 : コンクリートひび割れ深さの NDT 検証方法, 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, pp. 231-238, 2008.
- 6) Mary J. Sansalone, William B. Streett : IMPACT-ECHO, BULLBRIER PRESS, pp. 83-98, 1997.
- 7) 藤原申次, 上田洋, 佐々木孝彦 : 吹付け工法により施工したポリマーセメント系断面修復材の付着・充填性状評価, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, pp. 247-248, 2003.

**Summary** Seismic tomography, a non-destructive evaluation technique, enables the wide-area visualization of soundness (freedom from cracking or voids) of large concrete structures for evaluation. The technique has been applied to quality verification and to the confirmation of the effects of improvement by repair or retrofit. Conventional seismic tomography, however, requires the installation of sensors on both sides of the structure to be monitored and is therefore difficult to apply to structures with sensors installable only on one side (e.g. tunnel lining). Then, seismic tomography with sensors on one side was developed as a non-destructive evaluation technique focusing on the characteristics of surface waves (mainly Rayleigh waves). The technique enables wide-area evaluation of soundness inside or behind the structure for which evaluation has been difficult, based on the waveform data that is collected by sensors installed on one side of the structure. In this study, phase velocity was calculated according to the predominant frequency of surface wave by approaching from the surface on one side using specimens with simulated defects. Tomography was applied to verify that it could enable the evaluation of structural soundness.

**Key Words :** Concrete structures, Tomography, Surface waves, Phase velocity