

“打音検査” 応答形式の弾性波トモグラフィ計測技術の開発

Development of Elastic Wave Tomography Measurement Technology that uses Hammering Test

桃 木 昌 平^{*1}

Shohei Momoki

塩 谷 智 基^{*2}

Tomoki Shiotani

小 林 義 和^{*3}

Yoshikazu Kobayashi

【要旨】

インフラ構造物の健全性評価手法の確立は喫緊の課題である。著者らは、構造物の健全性を包括的に評価可能な弾性波トモグラフィの実用化研究を進めてきた。弾性波トモグラフィは、多数の走査線情報の集約である。走査線情報の取得には発信点・受信点へのセンサ設置が必須であり、センサの多数配置または配置換えを要していた。そこで本研究では、発信点にセンサを必要としないトモグラフィ計測技術の開発を行った。検査者が任意で行う発信の情報を受信情報から推定するもので、最小限のセンサ配置で多数の走査線情報が取得可能となる。これにより、さらに多くの構造物で実施される打音検査も利用できる効率的な弾性波トモグラフィ計測が可能となった。

【キーワード】 打音検査 弾性波トモグラフィ インフラ構造物 健全性評価

1. はじめに

近年、インフラ構造物の老朽化、それに起因する第三者被害の発生に直面し、インフラ構造物の点検を一層強化する動きが見られる。一方、点検の基本となる目視および打音検査で評価可能なのは表面からごく表層に限られるため、インフラ構造物内部の評価には、別途さまざまな非破壊評価技術の適用が必要とされているが、費用や労力の制限により限られたインフラ構造物への適用に留まっている。

筆者らはこれまでにインフラ構造物の健全性を、内部を含め広域的に評価できる弾性波トモグラフィの実用化研究に取り組んできた¹⁾。最近の研究成果では、構造物の片面のみのセンサ配置でも内部の健全性を評価できる一面配置型の弾性波トモグラフィ²⁾を確立し、さらに多くのインフラ構造物への適用を可能とした。しかしながら、この一面配置型の弾性波トモグラフィによる評価は対象領域における走査線間の情報量が大きく影響し、詳細に点検しようとするほど、情報量を増やすために発信点を多数設定しなければならず、発信点情報を取得するためのセンサの設置数も必然的に増加する。そのため、多大な労力や時間を要することとなり、詳細点検のための適用は局所的に留まるという課題を残していた。この課題に対し、本研究では、打音検査時の打撃を発信

信号とし、発信点情報は受信データから推定することで、多数の打撃信号を最小限のセンサ設置数で取得できると同時に、打音検査をしつつ内部の健全性も一面配置型の弾性波トモグラフィにより包括的に点検できる計測技術を開発した。

2. 一面配置型の弾性波トモグラフィの概要

構造物の表面において鋼球等での打撃により励起された弾性波の波動は、波の振動方向や進行方向によって縦波（P波）や横波（S波）などいくつかの成分に分類される。一般的な弾性波トモグラフィ法で利用する成分は縦波の伝播速度であった。これに対し、弾性波動の中で

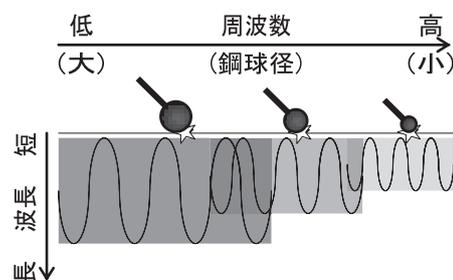


図-1 表面波の振動と進行方向

1. 建設事業本部 技術研究所 研究開発 G 第一研究室

2. 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 インフラ先端技術共同研究講座

3. 日本大学 理工学部

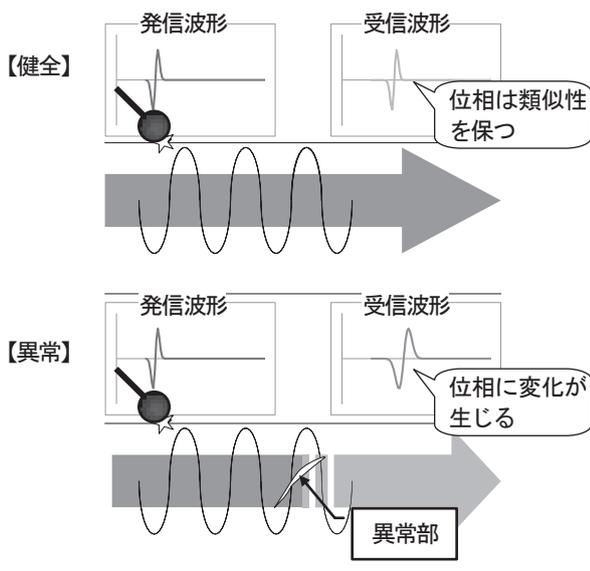
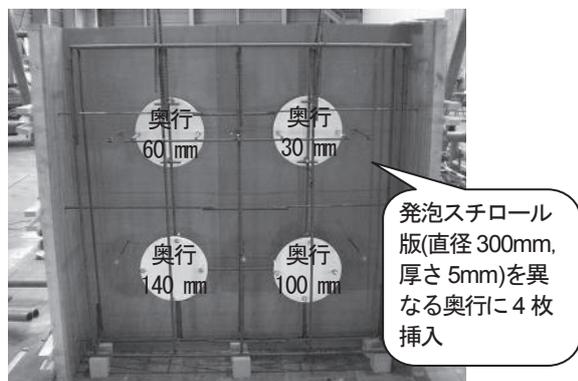
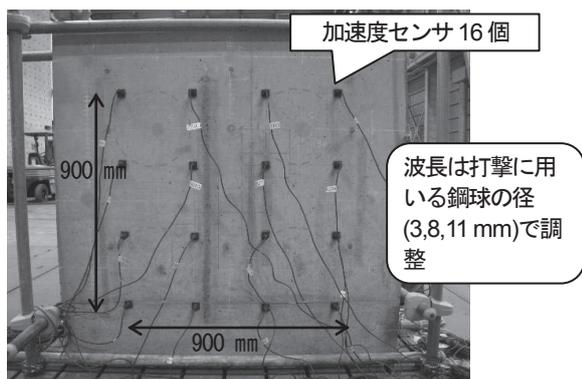


図-2 表面波による健全性評価イメージ



(a) 試験体型枠組立状況



(b) センサ配置

写真-1 コンクリート試験体概要

表面を伝播する表面波（レイリー波およびラム波，ここでは主にレイリー波を指す）に注目した。

図-1に示すように，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奥行方向の状態に応じて変化を示す．つまり，図-2に示すように，走査線に奥行が加わる表面波の振動範囲にひび割れや空

洞などの異常部が存在する場合，表面上を伝播する縦波の伝播速度には変化が無くても，表面波は異常部における反射や散乱により位相に変化が生じる．この変化を把握することで構造物の片面のみのセンサ配置でも内部の健全性を評価できると考えた．表面波の変化を示す指標として表面波の位相速度を式(1)により求め，弾性波トモグラフィに適用した．

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

ただし， π ：円周率， V_{ph} ：位相速度（m/s）， Δx ：走査線間距離（m）， $\Delta\phi$ ：発信波形と受信波形の周波数（Hz）における位相差（radian）， f ：表面波の卓越周波数（Hz）

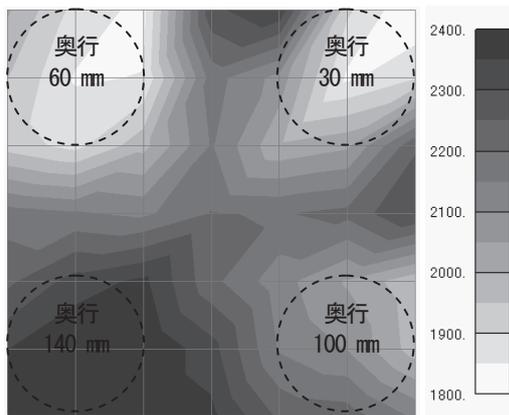
模擬欠陥（発泡スチロール版）を有するコンクリート試験体（写真-1）において得られた一面配置型の弾性波トモグラフィによる表面波の位相速度分布図を図-3に示す．波長は発信波形における表面波の卓越周波数より推定した．推定された波長よりも奥行が浅い位置に存在する模擬欠陥が，位相速度の低速度領域として検出されており，片面のみのセンサ配置による内部の健全性評価が可能であることが確認できる．

3. 任意の打撃信号を利用する計測技術の開発

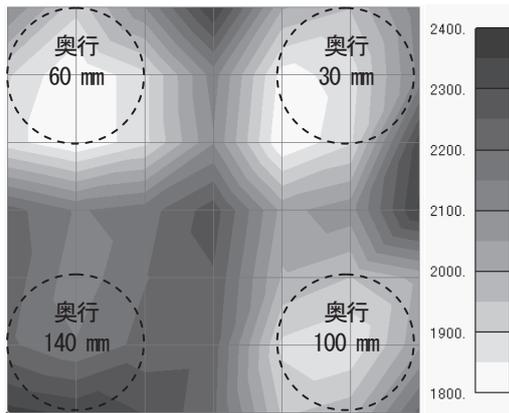
3.1 概要

図-3に示す一面配置型の弾性波トモグラフィによる位相速度の分布図は，16個の加速度センサの配置で，各センサ近傍での打撃により発信点情報（発信時刻，発信波形），残り15個のセンサにより受信点情報（受信時刻，受信波形）を取得し，走査線240本（発信点16×受信点15）の位相速度を基に解析を行い得られた結果である．つまり，これまでの技術は発信点情報を取得するために打撃位置にもセンサの設置を必要としているため，労力や時間を削減するためにセンサ設置数を減らすと，情報量が少なくなり（図-4左），低解像度の結果しか得られない．逆に，より高解像度の結果を得るためにはセンサ設置数を増やさなければならず，さらに多大な労力や時間を要することになる．

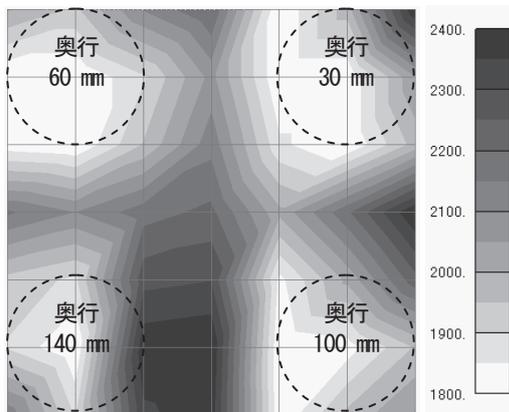
この課題に対し，本研究において開発した技術では，図-4右に示すように，発信点情報を受信点情報から推定することにより，任意の打撃信号を，センサ設置数を増やすことなく取得できる．一面配置型の弾性波トモグラフィにおいて必要となる発信点情報は，発信波形，発信位置および発信時刻であり，以下に，それぞれの受信点情報からの推定手法について述べる．



(a) 鋼球径 3 mm (波長 110 mm)



(b) 鋼球径 8 mm (波長 180 mm)



(c) 鋼球径 11 mm (波長 240 mm)

図-3 一面配置型の弾性波トモグラフィによる表面波位相速度分布図

3.2 発信波形の推定

一面配置型の弾性波トモグラフィでは、発信波形が必要となる。ここでは、受信波形から発信波形を推定する手法について述べる。

ある時刻以前で振幅がゼロとなる波形は因果関数³⁾と呼ばれ、この関数のフーリエスペクトルの振幅と位相の間には相関性があり、ヒルベルト変換⁴⁾を用いることによって、振幅から位相を一意的に決めることができる。こうして決定される波形は最小位相推移関数と呼ばれる⁵⁾。つまり、発信波形のフーリエスペクトルを推定できれば、発信波形が最小位相推移関数として得られる。この

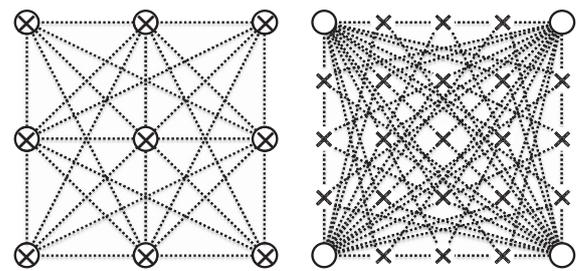


図-4 従来技術(左)と開発技術(右)のイメージ (×: 発信点, ○: 受信点)

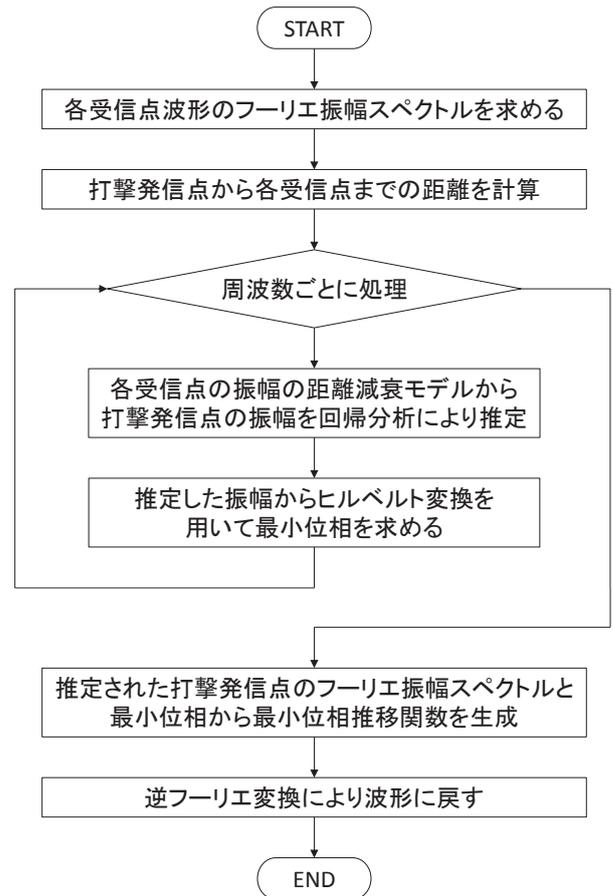


図-5 発信波形推定フロー

ことを踏まえ、図-5に当開発技術における発信波形推定のフローを示す。

初めに、一つの打撃信号に対する受信波形のフーリエ振幅スペクトルをそれぞれ求める。次に、発信位置と各受信位置との距離を用いて、周波数ごとに振幅の距離減衰モデルを作成し、回帰分析により各周波数の発信点における振幅を推定する。得られた発信点の振幅に対しヒルベルト変換を用いて位相を求め、振幅と位相から生成した信号を逆フーリエ変換することで、発信波形が最小位相推移関数として推定される。図-6に打撃点近傍に設置したセンサで得られた波形と、当手法により受信波形から推定された最小位相推移関数を示す。最小位相推移関数は時刻歴においてゼロから始まる波形となるが、

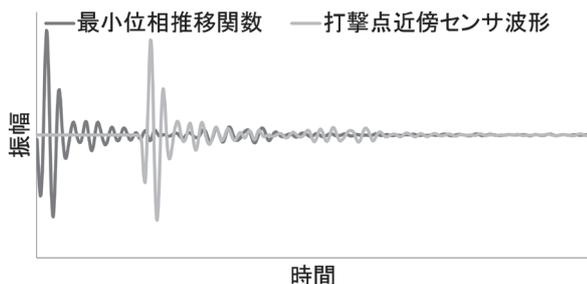


図-6 最小位相推移関数と打撃点近傍センサ波形

従来の一面配置型の弾性波トモグラフィで用いた発信波形（打撃点近傍に設置したセンサで得られた波形）と類似する波形が得られていることがわかる。

以上の手法を取り入れることにより、これまでのように打撃点近傍にセンサを設置することなく、発信波形を推定し、一面配置型の弾性波トモグラフィに適用することが出来る。ただし、本手法は発信位置が既知である必要があり、発信位置の測量を事前あるいは事後に行わなければならない。効率性の大幅な向上にはつながらない。そこで、次節において発信位置を各受信波形から推定する手法について述べる。

3.3 発信位置および発信時刻の推定

発信位置および発信時刻は、受信位置および受信波形における初動の到達時刻から逆解析により推定する。これは非破壊評価技術であるアコースティック・エミッション(AE)法で一般的に行われる手法である⁶⁾。しかし、従来のAE法による発信位置および発信時刻の推定では、対象範囲が均質（伝播速度が一定）という前提で行われる。したがって、この前提条件で推定された発信位置および発信時刻が、不均質である経年劣化した構造物に対しては、真値と乖離することが十分想定される。

これに対し、当開発技術ではAEトモグラフィ法を用

いて発信位置および発信時刻を推定する。AEトモグラフィ法の詳細なアルゴリズムについては参考文献⁷⁾に譲り本稿では割愛する。このAEトモグラフィ法による発信位置および発信時刻の推定は、対象範囲の伝播速度構造も同時に推定する手法であり、伝播速度構造で示される対象範囲の不均質性を反映した、より精度の高い推定が可能となる。

図-7にシミュレーションを用いた従来手法とAEトモグラフィ法による発信位置の推定結果を示す。全49点の発信点(×)と領域端部の4点における受信データを想定し、それぞれ逆解析により発信位置および発信時刻を推定した。図-7(a)に示すように、対象範囲に異常が存在する場合、波動は回折して伝播するため、到達時刻に遅れが生じる。従来手法(図-7(b))ではこれが反映されないため、真の発信位置(□)と一致しないものが多い。一方、AEトモグラフィ法(図-7(c))による発信位置の推定結果は、従来手法に比べ、より正確であることがわかる。

以上の手法を一面配置型の弾性波トモグラフィに実装することで、これまでのように打撃点近傍にセンサを設置することなく、発信波形、発信位置および発信時刻を推定し、打音検査のような多数かつ任意の打撃信号を、最小限のセンサ設置での一面配置型の弾性波トモグラフィに適用することができる。

4. 実構造物による検証

当開発技術の妥当性を実構造物を用いて検証した。対象は橋台構造物で、評価範囲は縦1.5m×横2.4m(写真-2)とした。対象範囲には対角線に沿うようにひび割れが確認できる。このひび割れを異常部として検出できるかどうかを検証の目的とした。当開発技術におけるセンサの配置は対象範囲の端部4点とし(写真-2)、鋼球型ハンマを用いてランダムに打撃を行い計測した。センサは圧電型加速度センサ(SAF51、富士セラミックス社

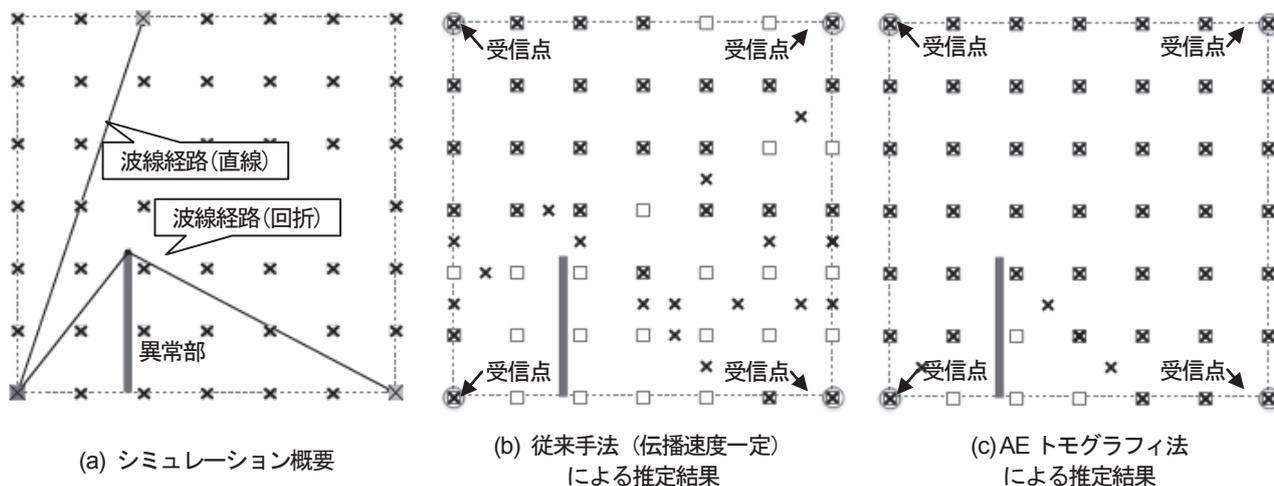


図-7 従来手法とAEトモグラフィ法による発信位置(×)の推定結果(□:真の発信位置)

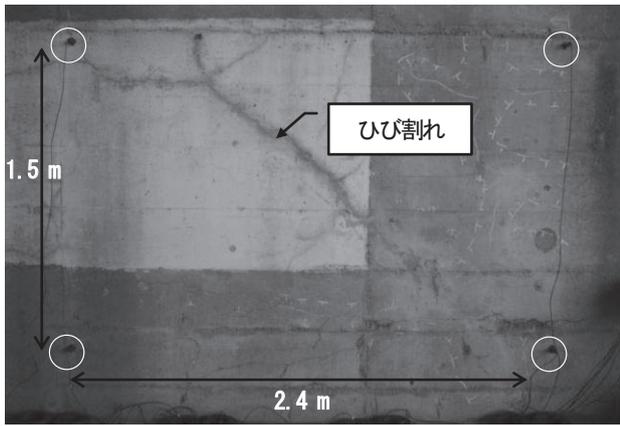


写真-2 センサ配置
(任意打撃による発信, センサ数4個)

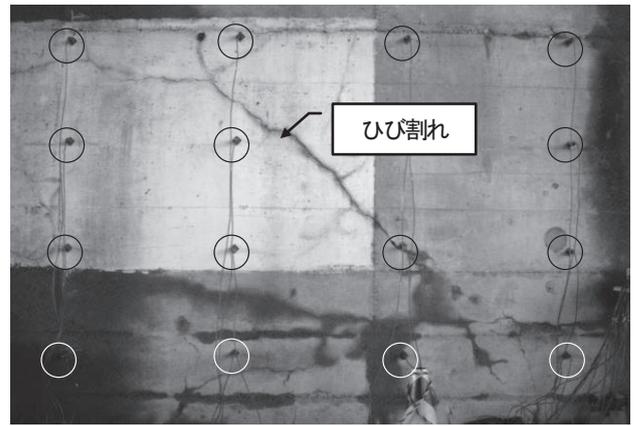


写真-3 センサ配置
(従来技術, センサ数16個)

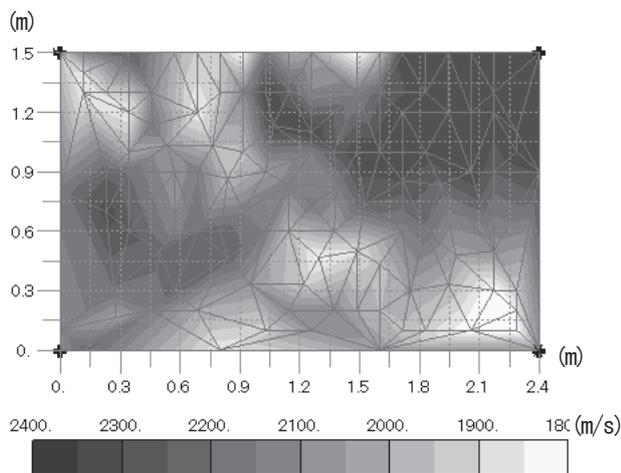


図-8 任意の打撃信号による位相速度分布図

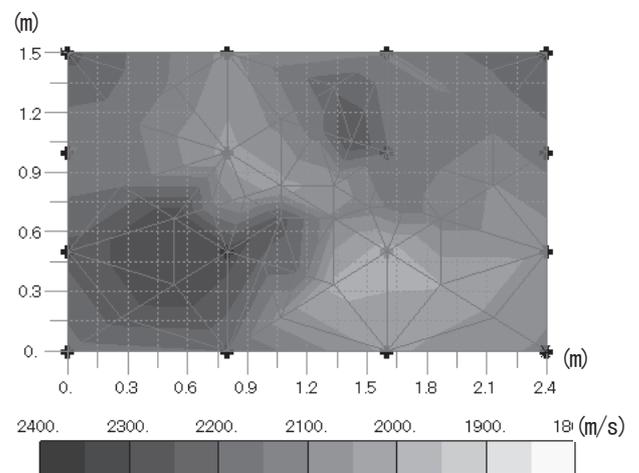


図-9 従来技術による位相速度分布図

製, 共振周波数 45 kHz) を用いた. 比較検証のため同位置に縦 0.5 m, 横 0.8 m 間隔, 計 16 個のセンサを配置し (写真-3), 従来の一面配置型の弾性波トモグラフィによる分析も実施した.

図-8, 図-9 に当開発技術による位相速度分布図および従来の一面配置型の弾性波トモグラフィによる位相速度分布図を示す. 検証における準備と計測に要した時間は, 従来技術で約 1 時間に対し, 当開発技術は 4 分の 1 にあたる 15 分程度であった. また, 検証において AE トモグラフィ法により推定された発信位置は 107 点であり, 走査線数は 428 本 (発信点 107 × 受信点 4) となり, 従来技術 (240 本) の約 2 倍の情報量を得ている. 情報量に基づき要素数を増やし解像度を高めることも可能となった. 両結果ともにひび割れに沿うように低速領域が示されているが, 解像度が高い当開発技術による位相速度分布図の方が, ひび割れの分布をより鮮明に示した.

以上のことより, 打音検査のような多数かつ任意の打撃信号を利用し, 多くのセンサ設置を要することなく適

用できる当開発技術は, 実施に要する労力や時間を削減できるだけでなく, より多くの情報量に基づいた高解像度の結果を得られることも示された.

5. まとめ

本研究では, 一面配置型の弾性波トモグラフィの省力化と精度向上を目的に, 打音検査のような多数かつ任意の打撃信号を利用する新たな計測技術の開発を実施した. 得られた知見を以下に示す.

- ① 発信波形は, 距離減衰モデルによる回帰分析とヒルベルト変換を用いた最小位相推移関数により推定可能である.
- ② 発信点情報として必要となる発信位置および発信時刻は, AE トモグラフィ法を用いることで, より正確に推定できる.
- ③ ①, ②により, 多数かつ任意の打撃信号を多くのセンサ設置を要することなく利用できることで, 実施に要する労力や時間を削減できる. さらに, 多くの打撃信号による情報量に基づき, 解像度の高い結

果を得ることも可能であることが、実構造物での検証により示された。

謝辞：

本研究は、JSPS 科研費 24760355 の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) Chai, H.K., Aggelis, D., Momoki, S., Kobayashi, Y. and Shiotani, T.: Single-side access tomography for evaluating interior defect of concrete, Construction and

Building Materials, pp. 2411-2418, 2010.

- 3) A. ハポリス : 工学のための応用フーリエ積分, オーム社, pp. 251-267, 1967.
- 4) Papoulis, A.: Fourier integral and its applications, McGraw-Hill, pp. 192-209, 1962.
- 5) 辰巳安良, 佐藤忠信 : 地震波の因果性を用いた 1979 Imperial Valley 地震の多重震源解析, 土木学会論文集, 第 380 号/I-7, pp. 475-484, 1987.
- 6) 石田毅 : 岩盤破壊音の科学, 近未来社, pp. 80-86, 1999.
- 7) 桃木昌平, 小林義和, 塩谷智基 : インフラアセットモニタリングのための AE トモグラフィの開発～その 1 アルゴリズム構築～, 第 19 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 57-60, 2013.

Summary Establishment of integrity assessment method of infrastructure construction is a pressing issue. The authors, has been promoting the practical application of research seismic tomography that can be evaluated in a comprehensive manner the soundness of the structure. Seismic tomography is an aggregate of the scan line a lot of information. Sensor installation to the point of origin and receiving point is essential for the acquisition of the scan line information, I was required relocation or mass deployment of the sensor. In this study, I have developed a tomography measurement technology that does not require the sensor to the originating point. The one that estimated from the received information of the information dissemination examiner carried out at any scan line information of a larger number can be acquired by the sensor placement minimal. This made it possible seismic tomography measurements efficient available also hammering test carried out in any structure.

Key Words : *Hammering test, Seismic tomography, Infrastructure construction, Integrity Assessment*