

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：92503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760355

研究課題名(和文) 打音検査しながら内部の健全性評価が可能な打音検査応答トモグラフィの開発

研究課題名(英文) Development of single-side access tomography for evaluating an internal state of concrete while hammering test

研究代表者

桃木 昌平 (MOMOKI, Shohei)

飛鳥建設株式会社技術研究所・副主任研究員

研究者番号：80463579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：弾性波トモグラフィ手法を用いることで、目視や打音検査では把握できないインフラ構造物内部の健全性をX線CTのように断面画像で包括的に評価できる。加えて研究代表者らは、構造物片面から内部の健全性を投影画像により面的に評価可能な、一面配置型の手法を確立した。本研究では、この手法に新たに打撃発信点波形推定手法、打撃発信点位置標定手法を実装し、任意かつ多数の打撃発信情報を逐一センサを設置することなく利用できる形式とした。この打音検査応答トモグラフィ手法により、簡易的な打音検査を行いながら、内部の健全性も投影画像による詳細な評価が可能となる。

研究成果の概要(英文)：The use of seismic tomography techniques, it can be evaluated comprehensively cross-sectional image as X-ray CT health infrastructure structure inside can not grasp the hammering test and visually. Which can be evaluated by surface projection image the soundness of the internal structure from one side, research leader we have established a method of one side arrangement type in addition. In this study, to obtain a form that can be used without having to implement hit the point of origin waveform estimation technique, a striking point of origin position location technique new to this technique, installing the sensor one by one blow outgoing lot of information and any. This hammering test response tomography technique, while performing hammering test simple, soundness of internal also allows a detailed evaluation by the projection image.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：打音検査 トモグラフィ 健全性評価

## 1. 研究開始当初の背景

1980年代初めに塩害やアルカリシリカ反応による早期劣化が発見されて以降、コンクリート構造物の信頼性を揺るがしかねない問題が相次いで発生している。特に1999年のトンネル覆工コンクリートの剥落を契機に、構造物管理者や施工者は新設・既設を問わず点検を一層強化している。

点検は、目視や打音検査による簡易点検と、X線や超音波などを用いた非破壊検査手法による詳細点検に大別される。目視や打音検査による簡易点検は、容易に実施できることから全数調査として実施される。しかし、目視や打音検査で評価できるのは構造物の表面からごく表層に限られ、内部の健全性まで評価はできない。

一方、非破壊検査手法による詳細点検は、内部の健全性を評価できるものもあり、利用者の安全を確実に確保するために、本質的には区別なく非破壊検査手法を用いて詳細に全数調査すべきである。ところが、昨今の景気低迷に伴う公共投資の削減や、少子高齢化に伴う投資余力の減少もあり、詳細に点検できる非破壊検査手法は局所的な実施に留まり、十分な維持管理は実現していない。また、全数調査が可能なほど効率的に実施できる非破壊検査手法は現状では見当たらない。

## 2. 研究の目的

研究代表者らはこれまでに、効率的に広範におよぶ詳細点検が可能な非破壊検査手法として期待される弾性波トモグラフィ手法の研究に取り組んできた。

弾性波トモグラフィ手法は、点検の対象となる構造物を弾性波パラメータの構造図として表現する手法であり、2次元平面または3次元空間における評価が可能である。弾性波パラメータは構造物の品質を評価できる指標であり、弾性波トモグラフィ手法を用いることで、大規模なコンクリート構造物の健全性を広範一括で評価できる。

さらに最近の研究成果において、構造物の片面からでも内部の健全性が評価できる表面波トモグラフィ手法も提案し、あらゆるコンクリート構造物への弾性波トモグラフィ手法による健全性評価を可能にした。

しかしながら、弾性波トモグラフィ手法では、対象領域における走査線間の情報量が重要であり、表面波トモグラフィ手法も例外ではなく、詳細に点検しようとするほど、多くのセンサの設置が必要となる。そのため、労力や費用を抑えるまでに至らず、他の非破壊検査手法と同様に局所的な適用に留まるという課題を残していた。

そこで本研究では、容易に全数調査が可能な打音検査を行いながら、打音検査では把握できない内部の健全性も、打音検査時の打撃信号を利用した表面波トモグラフィ手法によって評価できる打音検査応答形式の表面波トモグラフィ(打音検査応答トモグラフィ

手法)の開発を目的とし、研究を実施した。

## 3. 研究の方法

### (1) 打撃発信点波形の推定手法の検討

表面波トモグラフィ手法では、打撃により生成された発信点の波形が必要となる。これまでは、打撃発信点にセンサを設置し、センサ近傍で打撃することで打撃発信点の波形を直接的に取得していた。そのため、情報量が関わる検出精度と、効率性に関わるセンサ設置数はトレードオフであった。そこで、センサを設置することなく打撃発信点波形を受信点波形より推定する手法を検討した。

### (2) 打撃発信点の位置標定手法の検討

打撃発信点波形を受信点波形より推定することで、限られた受信センサの設置で、発信点数をセンサ数に制限されることなく増やすことが可能になる。しかし、予め打撃する位置を多数構造物に印すことは効率的ではない。そこで、非破壊検査手法であるAE法のAE源位置標定手法に倣って、打撃発信点の位置を標定する手法を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 距離減衰モデル回帰分析と最小位相推移関数を用いた打撃発信点波形推定手法の提案

ある時刻以前で振幅がゼロとなる波形(因果関数)の振幅と位相の間には相関性があり、ヒルベルト変換を用いることで、振幅から位相を一意的に決めることができる。こうして生成される信号は最小位相推移関数と呼ばれる。つまり、打撃発信点波形の振幅スペクトルを推定できれば、打撃発信点波形が最小位相推移関数により求められる。図1に本研究において提案した打撃発信点波形推定手法のフローを示す。

#### ① 距離減衰モデル回帰分析による打撃発信点振幅の推定

一つの打撃発信点の信号に対する各受信点波形のフーリエ振幅スペクトルを求め、周波数ごとに振幅の距離減衰モデルを作成し、回帰分析により周波数ごとに打撃発信点における振幅を推定する。本提案手法では、エネルギーの距離減衰を式(1)のように仮定した。周波数ごとに各受信点の振幅の2乗を近似曲線 $y=a/x^2-bx$ フィッティングし、係数 $a$ 、 $b$ を求めると、この周波数における打撃発信点波形の振幅 $A_0$ は式(2)により求められる。16個配置されたセンサで測定された受信点の振幅を用いた距離減衰モデル回帰分析の一例を図2に示す。

$$P(d) = \frac{P_0}{4\pi d^2} - \alpha d \quad (1)$$

ただし、 $P(d)$ はエネルギー密度、 $P_0$ はエネルギー、 $d$ は発信点からの距離、 $\alpha$ はエネルギー損失係数である。

$$A_0 = \sqrt{4\pi d} \quad (2)$$

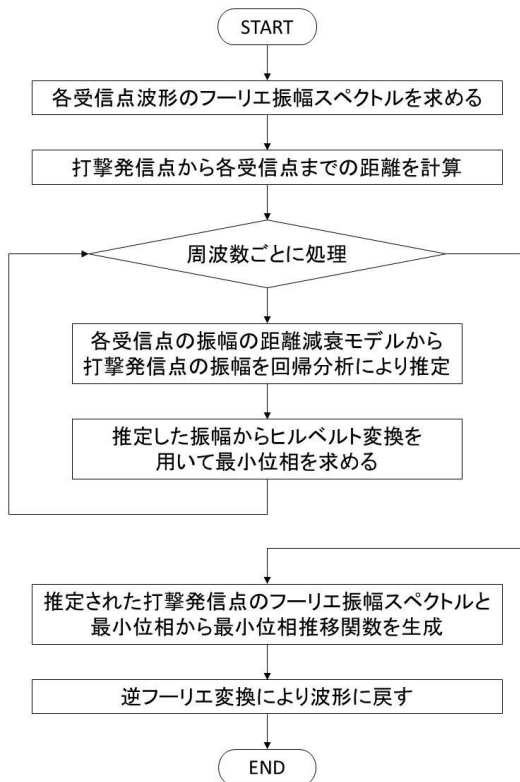
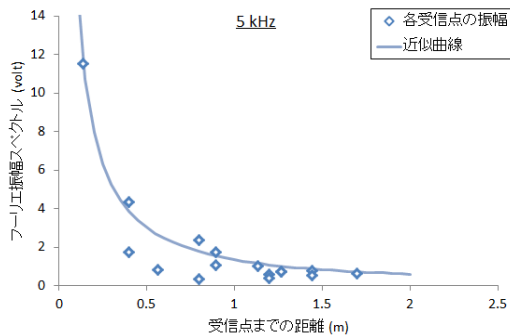
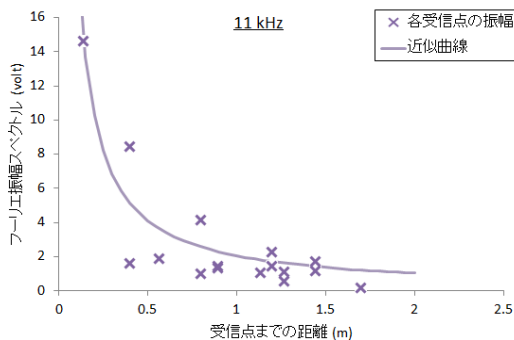


図1 打撃発信点波形推定手法のフロー



(a) 5 kHz の距離減衰モデル



(b) 11 kHz の距離減衰モデル

図2 周波数ごとの距離減衰モデル

② 最小位相推移関数による打撃発信点推定  
推定された打撃発信点のフーリエ振幅スペクトルに対しヒルベルト変換を用いて最小位相を求め、振幅と最小位相から生成した最小位相推移関数を逆フーリエ変換するこ

とで打撃発信点波形が推定される。本手法による推定打撃発信点波形の一例を、打撃発信点近傍センサ波形と併せて図3に示す。推定された打撃発信点波形は、時刻歴ゼロから始まる波形となるが、様々な打撃発信点近傍センサ波形と類似の位相となる波形が推定できることが確認された。

以上の手法により、センサを設置することなく、打撃発信点波形を受信点波形より推定可能となった。

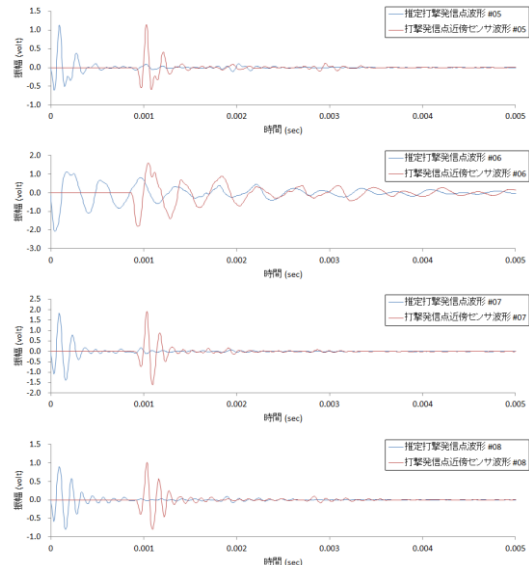


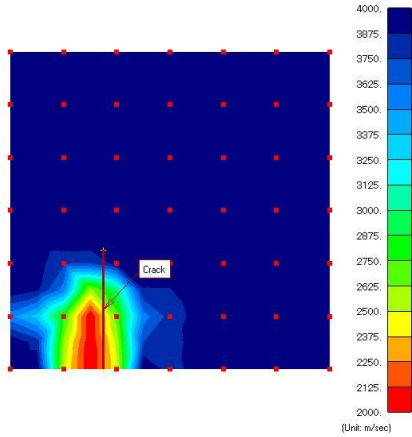
図3 推定打撃発信点波形

(2) 表面初動伝播速度構造を同時推定（反映）する打撃発信点位置標定の提案

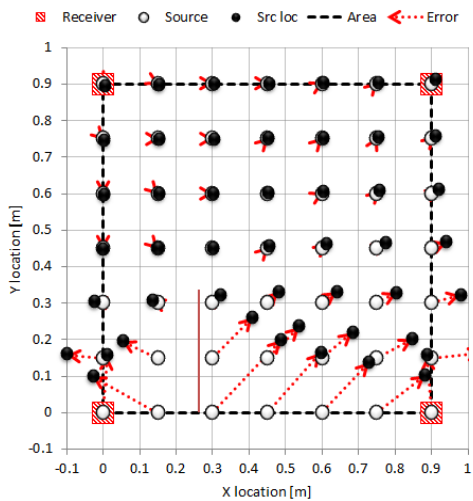
打撃発信点の位置は、受信位置および受信点波形における初動到達時刻から逆解析により推定が可能であり、AE 源位置標定などに用いられている。しかし、AE 源位置標定では、AE 波伝播速度は対象領域で一定、つまり均質であることを前提としており、本研究で対象領域となるコンクリート表面は、逆解析に用いる初動伝播速度を一定（均質前提）とすることは無理があり、位置標定には不均質性（初動伝播速度構造）を反映する必要がある。これに対し本研究では、対象領域の初動伝播速度構造を同時に推定しながら打撃発信点の位置を標定する手法を提案した。

本提案手法は、まず対象領域を、不均質性を表現できる要素分割モデルによって表し、受信位置および初動到達時刻からの逆解析は、要素分割モデルにおける節点を発信点候補とし、①波線追跡法により経路探索しながら発信点の最適解となる節点を求める。次に、②求められた節点を発信点としてトモグラフィ解析を行うことで、求めた発信点から受信点までの走時が、真値に対し誤差がある場合、モデルの各要素に与えられた支配物理量である速度が個々に補正される。こうして補正された要素分割モデルにおいて①を行うことで発信点が修正される。このように①、②を繰り返し行うことで、打撃発信点の位置

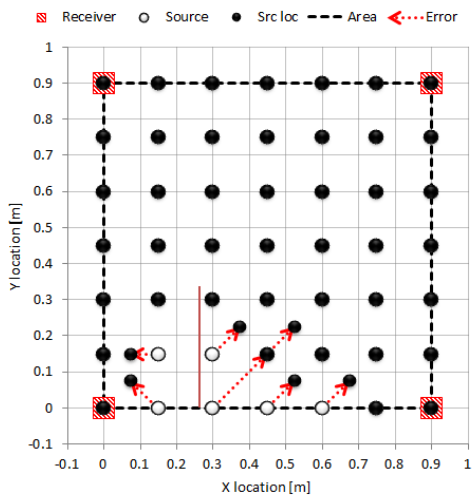
が、表面初動伝播速度構造と同時に求められる。図4に局部的にひび割れが存在する対象領域を想定したシミュレーションによる、従来の均質を前提とした場合の位置標定結果と、本提案手法による位置標定の結果を示す。表面初動伝播速度構造を同時に求める本提案手法により、不均質表面でも精度よく打撃発信点の位置標定が可能となった。



(a) ひび割れによる不均質性



(b) 従来手法 (均質前提) による位置標定



(c) 本提案手法による位置標定

図4 不均質表面の打撃発信点位置標定手法

(3) 打音検査応答トモグラフィ手法の現場検証

前節(1), (2)の手法を実装した打音検査応答トモグラフィ手法の有効性を、橋台構造物において検証した。図5に検証概要、写真1(a)は当該範囲における従来表面波トモグラフィ手法(16センサ, 打撃発信16点)であり、写真1(b)は本提案手法(4センサ, ランダム打撃発信)である。対象範囲に確認されるひび割れの検出精度を比較検証した。

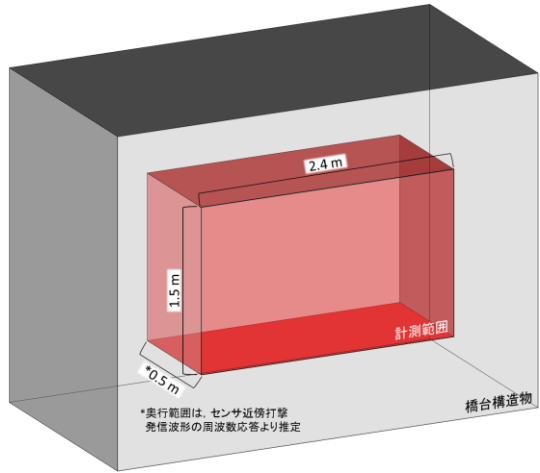


図5 現場検証概要



(a) 従来手法



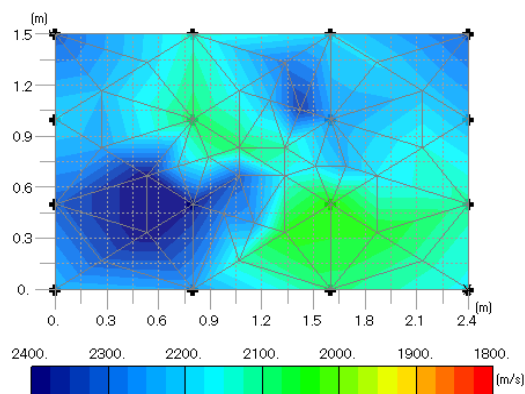
(b) 本提案手法

写真1 対象表面状態およびセンサ配置

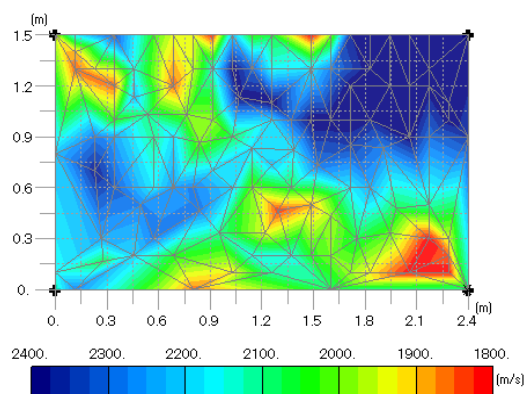
図6にトモグラフィ解析により得られた結果(表面波位相速度画像)を示す。本提案手法はセンサ設置数が少なく、ランダムに打撃



できることから、準備・計測に要した時間は従来手法の約4分の1であり、効率的かつ簡易な測定が可能にもかかわらず、ランダム打撃発信により多数の発信点情報を利用可能であることから、情報量に基づき解像度（要素分割数）も増やすことが可能となり、解像度が高い本提案手法の結果の方が、ひび割れの分布をより鮮明に示している。



(a) 従来手法



(b) 本提案手法

図6 表面波位相速度画像

既知の発信点情報を用いる従来手法と比べ、推定誤差の分精度が低下することになる。しかし、打音検査のように無数の打撃信号を用いることで、効率を低下させることなく従来よりも大幅に多い情報量を得るため、検出精度も従来手法と同等以上を保持できる。

以上の研究により、打音検査を行いながら、打音検査では把握できない内部の健全性も、打音検査時の打撃信号を利用した表面波トモグラフィ手法によって評価できる打音検査応答トモグラフィ手法が可能になった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

- ① 桃木 昌平, 小林 義和, 塩谷 智基, AEトモグラフィ法の開発-その2 模擬欠陥コンクリート試験体による検証-, 日本非破壊検査協会平成 26 年度春季講演大会講演概要集, 査読無, 2013, pp. 69-70

壊検査協会平成 26 年度春季講演大会講演概要集, 査読無, 2013, pp. 69-70

- ② 桃木 昌平, 小林 義和, 塩谷 智基, インフラ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, 査読無, 19 巻, 2013, pp. 57-60

[学会発表] (計 2件)

- ① 桃木 昌平, 小林 義和, 塩谷 智基, AE トモグラフィ法の開発-その2 模擬欠陥コンクリート試験体による検証-, 日本非破壊検査協会平成 26 年度春季講演大会, 2014 年 6 月 3 日~2014 年 6 月 5 日, アルカディア市ヶ谷
- ② 桃木 昌平, 小林 義和, 塩谷 智基, インフラ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, 2013 年 12 月 5 日~2013 年 12 月 6 日, 関西大学千里山キャンパス

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

桃木 昌平 (MOMOKI, Shohei)  
飛鳥建設株式会社・副主任研究員  
研究者番号: 8 0 4 6 3 5 7 9