

## コンクリート構造物の内部欠陥位置推定に関する基礎的研究

A fundamental study on estimating the position space of internal defects in concrete structures

宮崎大学 准教授 李 春鶴

### (研究計画ないし研究手法の概略)

打撃反射信号の位相差検出による内部欠陥の空間位置を推定し、その形状を確定することを目的とする(図-1)。

本研究では、a.内部欠陥をコンクリートの構成物質と扱い、b.コンクリートという媒質と内部欠陥との境界面を音源とする打撃反射信号の位相差分析を通じて、音源の空間位置を推定する発想である。コンクリート構造物において、コンクリートという媒質とひび割れや空洞などの内部欠陥は、コンクリートと鉄筋のように明確な境界面が存在しているため、不連続な物質構成と考えられる。すなわち、内部欠陥も鉄筋のようにコンクリート構造物の一つの構成物質と捉えることが可能である。本研究では音源位置の推定に用いられる位相差検出手法をコンクリート構造物に応用・拡張し、また、空間位置の推定が可能な打音信号の「位相差」に着目して、構成物質における境界面の空間位置を推定する。打音信号の周波数スペクトルおよびその位相差が構成物質の境界面での不連続性の定量化を、双曲線に基づいた幾何学的な情報数理モデル(図-2)を用いて解決する。

### (実験調査によって得られた新しい知見)

#### 1. 問題定義

内部欠陥の「信号取得」要素においては、インフラ検査の効率化を目的とした、「相互相関関数法を用いた二次元欠陥方向推定モデル」を提案する。

#### 2. 二次元欠陥方向推定モデルの設計方法

本研究では入力信号として打撃信号を採用する。また、双曲線の近似モデルは点波源の推定手法である。構造物のコンクリート壁面で検査することを想定した時、打撃信号は壁面を打撃することで入力し、振動の取得も同じ壁面で行うこととなる。そのため、双曲線の近似モデルをそのまま適用すると、欠陥ではなく打撃点の方向を推定することになる。コンクリート内部の欠陥はあくまで反射波源であるため、信号の到来方向を推定するだけではなく、どの信号が反射波源によるものか判断する必要がある。本研究においては欠陥の有無による対照実験によって欠陥からの反射波を抽出し、相互相関関数法を用いて位相差取得すること

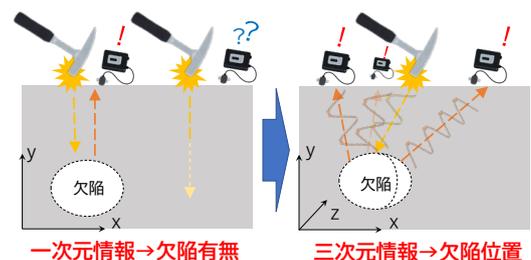


Fig.1 本研究の概要

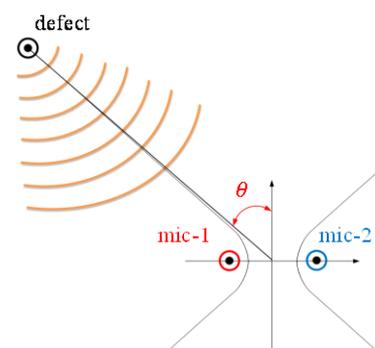


Fig.2 双曲線に基づいた幾何学的な位置推定手法

を前処理、信号の到来方向推定を後処理とする。また、前処理と後処理を総合して「相互相関関数法を用いた二次元欠陥方向推定モデル」定義し、以下呼称する(図-3)。

### 3. 反射波および位相差の抽出(前処理)

#### 3.1 コンクリート構造物内における反射波の定義づけ

欠陥信号抽出モデルの開発のためには、反射波を何とするかが重要になる。欠陥ありなしのみを供試体の異なる性質にすることで、打撃入力による欠陥からの出力が反射波として最も近いといえる。よって、反射波は打撃入力から欠陥の有無のみによって出力された振動のことであると定義する。

#### 3.2 反射波抽出に適した打撃点およびマイクの配置

反射波の抽出方法のアプローチは二つのマイクの位相差に着目した手法である。ここで、反射波の抽出について説明するため、図4(a)に示すような配置で打撃点とマイク及び欠陥が配置されていると仮定する。マイクが二つあるとき、打撃点に近いマイク1が振動を最初に受信し、打撃点から遠いマイク2がその次に受信すると予想される。そのときの波形は図4(b)に示すように反射などによる影響がなければ、マイク1による波形が先行すると考えられる。ここで、図4(a)に示すように、マイク2の付近に欠陥がある場合を考える。欠陥によって反射した振動は打撃点の方向に伝搬し、最初にマイク2に到達する。その後マイク1に到達する。そのため、反射波による位相差は打撃点から欠陥に向けて振動が伝播した時と逆になると考えられる。つまり、打撃点やマイクの配置を工夫することにより、反射波の位相差を取得できると考える。

反射波の抽出および位相差の取得に最適な打撃点とマイクの配置を考える。どの信号が反射波源によるものか判断するには、打撃の入力による振動と、打撃の入力によって生じる、欠陥からの反射波振動といった出力を分ける必要がある。本研究では、欠陥からの出力による、位相差の取得が必要となるため、図5のような打撃点およびマイクの配置が適切であると考えた。打撃点とマイク1、2との距離を同じにすることで、打撃による振動入力時間を同じにすることができる。そして、欠陥とマイク1、2間の距離は異なるため、欠陥からの出力による振動入力時間は異なる。よって、欠陥の反射波による位相差のみを抽出することが容易である。よってマイク1、2の打撃信号の入力時間は共通となる。また、図5を側面から見た場合、図6のように考える。なぜなら、欠陥の真上とそうでない場所の音の違いがあるからだ。現場のトンネル検査員の

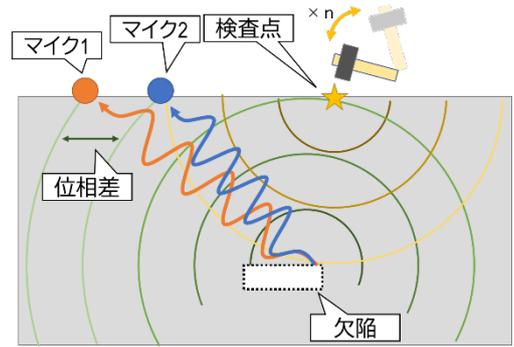


Fig.3 推定モデルのコンセプト



打撃点 マイク1 マイク2 欠陥

Fig.4(a): Hypothetical relative relationship between microphone, strike point and defect

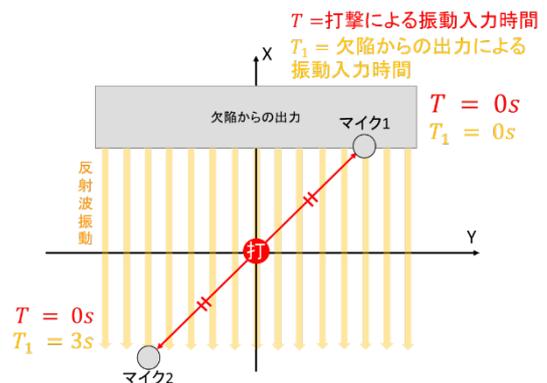


Fig.5: Suitable striking points and microphone placement for acquisition of reflected waves (x,y-axis)

内部欠陥における検査方法は、打撃音の違いを聞き取ることであるため、周知の事実である。欠陥の有無による周波数の違いは、反射波の抽出時に求められる。

### 3. 3 相互相関関数法

相互相関関数法の詳細について既存にある技術であるため、簡単に説明する。同じサンプル数 $M$ からなる2種類の周期信号 $x(n)$ 、 $y(n)$ がある。この二つの信号の類似性を定義するのが、次式(1)で表せる相互相関関数法である。

$$\phi_{xy}(m) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M x(n)y(n+m) \quad (1)$$

図7に示すように、式(1)は

- (1)  $x(n)$ に対して、 $y(n)$ を一定時間  $m$  だけずらして $y(n+m)$ とする。
- (2)  $x(n)$ と $y(n+m)$ の積を各時刻において求める。
- (3) それらを加え合わせ、平均を求める。

の操作によって、2つの信号間の類似性を定義している。

この式(1)にマイク 1、2 から得た反射波の信号を $x(n)$ 、 $y(n)$ として代入し、計算を行うと、 $m(\text{sample})$ といった位相差を得る。

$x(n)$ 、 $y(n)$ に代入すべく、反射波の信号を取得するためには、対照実験が必要である。提案する手法の評価実験時に、反射波信号の特性も抽出する。以上が前処理における反射波および位相差の抽出方法である。

### 3. 4 信号到来方向推定

次に後処理で用いる定義及び表記について説明する。図8に示すとおり、任意のコンクリートの平面上に原点 $O_M$ をもつ $\vec{x}\vec{y}$ 平面を定義する。二つのマイクはそれぞれ $M_1$ 及び $M_2$ とし、 $M_1$ 、 $M_2$ は $\vec{x}$ 軸上の $O_M$ を挟んで対称の位置に設置する。また、その際の $M_1$ と $M_2$ の距離を $d_M$ とおく。反射波源 $S_r$ は同じ平面上の第一象限及び第二象限の任意の箇所が存在する。また、 $S_r$ によって反射し、 $M_1$ 及び $M_2$ で取得した弾性波信号を

前処理に通した信号をそれぞれ $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ とする。さらに、 $M_1$ 及び $M_2$ の $S_r$ からの距離に応じて $e_1(n)$ と $e_2(n)$ が到来する時間に遅れが生じる。本論文において、この時間遅れを到来時間差とし、 $t_{12}$ と定義する。また、到来時間差に振動の伝播速度 $v$ を掛け合わせた値を到来距離差 $d_{12}$ と定義する。欠陥方向 $\theta_{defect}$ は $O_M$ を頂点とする角であり、双曲線の近似モデルと同様に、 $+\vec{y}$ 方向を $0^\circ$ としたときに、第一象限方向へ $+90^\circ$ 、第二象限方向へ $-90^\circ$ の範囲で定義され

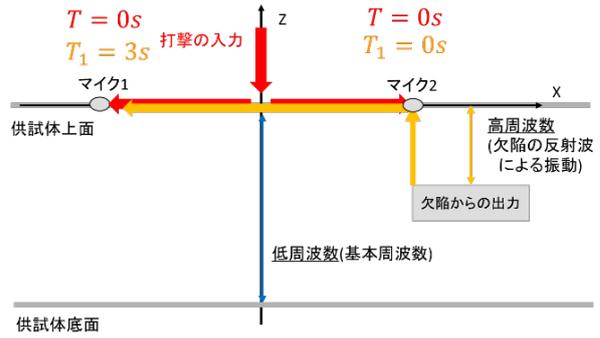


Fig.6: Suitable striking points and microphone placement for acquisition of reflected waves (x.z-axis)

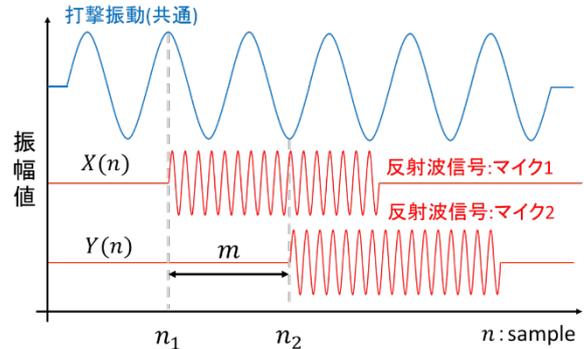


Fig.7: Adaptation to reflected waves in cross-correlation function method

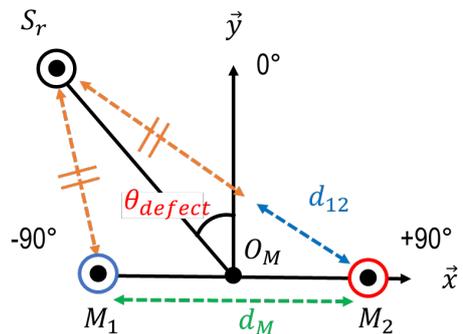


Fig.8: Signal arrival direction estimation model

る。

前処理によって、二つのマイクにより欠陥からの反射信号が得られる。これらの反射信号は離散信号であり、 $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ とする。これらの信号から信号の到来距離差 $d_{12}$ を求め、 $d_{12}$ 及びマイク間距離 $d_M$ を双曲線の近似モデルに代入することで、欠陥方向の推定を行う。初めに、 $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ 間の遅延を算出する。二つの信号波形の間の遅延は相互相関関数 $\phi_{12}(m)$ を用いることで導出することが可能である。相互相関関数とは二つの信号の類似性を定義する関数である。 $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ のサンプル数がともに $M$ のとき $\phi_{12}(m)$ は以下の式で求めることができる。

$$\phi_{12}(m) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M e_1(n)e_2(n+m) \quad (2)$$

また、 $\phi_{12}(m)$ が最大となる引数 $m$ を $\delta_{12}$ とすると、 $\delta_{12}$ は以下の式で求められる。

$$\delta_{12} = \operatorname{argmax}_m(\phi_{12}(m)) \quad (3)$$

この $\delta_{12}$ が $e_1(n)$ 及び $e_2(n)$ の相互相関関数が最大になり、二つの信号が一致したときの遅延サンプル数になる。マイクによるサンプリング周波数を $f_s$ とすると、到来時間差 $t_{12}$ は次式で求められる。

$$t_{12} = \frac{\delta_{12}}{f_s} \quad (4)$$

また、信号の伝播速度を $v$ とおいたとき、 $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ における到来距離差 $d_{12}$ は、以下の式で求められる。

$$d_{12} = vt_{12} \quad (5)$$

以上の式(2)から式(5)により、二つのマイクで受信した $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ から、到来距離差 $d_{12}$ を求める事ができる。次に双曲線の近似モデルにマイク間距離差 $d_M$ 及び二つの信号の到来距離差 $d_{12}$ を導入し、欠陥の方向を求める。双曲線の近似モデルにおける $d_A$ は後処理における $d_M$ 、 $d_e$ は $d_{12}$ とそれぞれ対応している。そのため、式(4)において $d_A = d_M$ 、 $d_e = d_{12}$ とすると、以下の式で欠陥の方向 $\theta_{\text{defect}}$ を推定することができる。

$$\theta_{\text{defect}} = \operatorname{Arctan2} \left( \frac{d_{12}}{2}, \sqrt{\left(\frac{d_M}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{12}}{2}\right)^2} \right) \quad (6)$$

$\theta_{\text{defect}}$ は欠陥からの反射信号 $e_1(n)$ 、 $e_2(n)$ から得られた、反射信号の到来方向であり、欠陥の方向を指していると考えられることができる。

#### 4. 評価実験

##### 評価実験

##### 4. 1 ソレノイド周期打撃機の概要

反射波の抽出および、提案する手法の有効性を検証するために、打撃装置、記録装置、モデルのアルゴリズム動作環境の実装を行う。開発した打撃装置の外観を図9に示す。打撃装置の基本的な仕組みはソレノイドに鉄芯を取り付けた機構により、鉄芯を持ち上げ、落下させることで打撃を行う。鉄芯が落下する高さは毎回一定となるため、毎回一定の打撃力を生成することができる。

##### 4. 2 記録装置・アルゴリズム動作環境

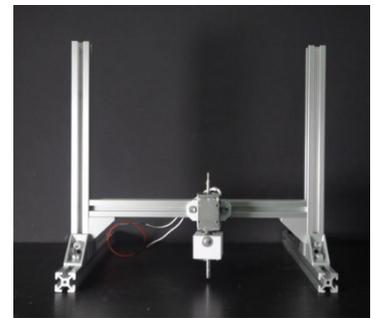


Fig.9: Solenoid Cycle Striking Machine

記録装置としては株式会社ズーム製フィールドレコーダーF8nを使用する。また、同期して録音することができるため録音時に複数のマイクで記録の開始を揃えることができる。打撃信号を実際に取得するための受信器として Adeline 社製 AD-35 ミニピエゾピックアップを用いる。レコーダによって記録した振動は非圧縮音声ファイルとして保存される。音声ファイルの読み込み、加工及び提案するモデルのアルゴリズムの実装については MathWorks 社製 matlab2022b を用いて行う。

#### 4. 3 供試体概要

反射波の抽出および、提案する手法の有効性を検証するために、コンクリート供試体を用いた実験を行う。欠陥なしコンクリート供試体の外観を図 12(a)に示す。3つの供試体の配合強度は、 $22.2 \text{ N/mm}^2$  であり、同じ性質の普通コンクリートを使用している。以下より、“欠陥なし供試体”、“欠陥あり供試体”、“伝搬速度取得用の供試体”をそれぞれ、供試体 1、2、3とする。欠陥として空隙を選択した理由は、供試体を打撃したときに、欠陥の有無による音の違いが他の供試体と比べて明瞭であったからだ。また、コンクリートと空気の反射率はほぼ 100%であり、欠陥からの反射波が受け取りやすいといった点も、考慮している。

#### 4. 4 提案したモデルの評価実験

まず、打撃点とマイクの配置および打撃実験の環境設定を行う。打撃点とマイクを図 10 のように供試体 1、2 に配置する。

供試体 1 と供試体 2 の、マイク 1 で取得した信号波形をそれぞれ Waveform 1、Waveform 2 とする。

MATLAB を用いて、信号波形のパワースペクトルを取得した。図 11 から周期  $T_1 > T_2$  であり、 $T_1$  の範囲で約 4000Hz と

約 9000Hz の dB 値が大きく出ている。よってこの周波数帯を反射波の一部として抽出する。

供試体 1 のマイク 2 で取得した信号波形を Waveform3 とし、Waveform 1、3 の波形を使用する。相互相関関数法を適応する場合、コンクリート供試体は連続体であるため、打撃入力から時間経過が少ないうちに、実施したほうが良い。時間が経過するほど減衰及び壁面からの反射波による合成波が入ってくる。よって、ピーク 1、2 間でのみ、相互相関関数法を適応する。(図 12) I より、waveform1、3 の FFT 変換結果 (図 13) から、4000Hz 及び

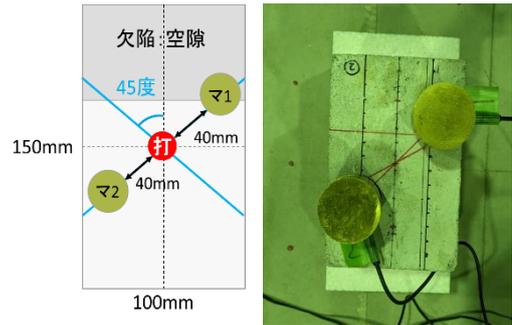


Fig.10: Place microphone 1 and microphone 2 and striking points on EUT 1 and 2

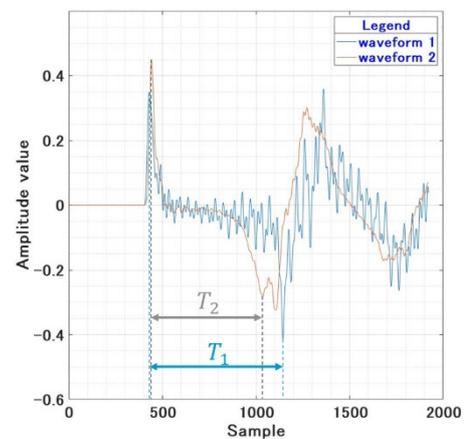


Fig.11: Waveform 1 of specimen with defect and waveform 2 of specimen without defect

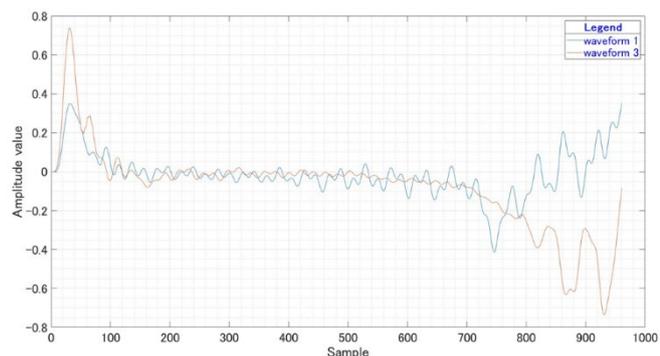


Fig.12: Waveforms of specimens with and without defects cut between the first and second peaks

9000Hz 帯の卓越周波数に着目する。

卓越周波数として、`waveform1` の 3937.5Hz と `waveform3` の 3750Hz、`waveform1`、`3` の 9187.5Hz 同士で相互相関関数法を使用する。到来距離差  $d_{12}$  は式 (3)(4) より、4000Hz 帯では 14.6cm、9000Hz 帯では 4.5cm と算出した。

二次元欠陥方向推定モデルにおける式 (6) に、求めた到来距離差  $d_{12}$  およびマイクロ間距離  $d_A$  を代入する。よって、4000Hz 帯では  $\theta_{defect}$  が算出できず、9000Hz 帯では  $\theta_{defect} = 45.2$  度と算出された。

他に 30 度、60 度の場合の予測を行い、それぞれ 32.2 度、64.9 度の結果と算出された。以上のことから、誤差はあるものの、欠陥の方向をおおまかに算出できたといえる。よって、有効性があるといえる。

今後の研究では、卓越周波数によって、周波数を決めるのではなく、パワースペクトルを重視した前処理を行うことが重要であり、モデルの精度を改善する必要がある。

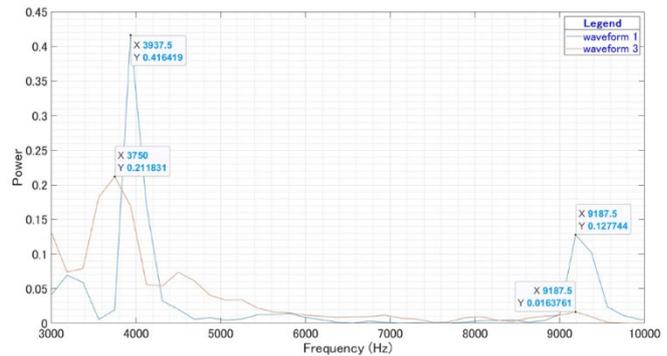


Fig.13: Results of FFT analysis of waveforms of flawed and flawless specimens

### ( 発 表 論 文 )

1. 魚住龍太郎, 李根浩, 李春鶴, 坂口聖弥, 平江海人:トンネルの打音検査の自動化を目的とした打音検査ロボットの開発 (第 1 報), 精密工学会 2022 年度精密工学会秋季大会学術講演会, pp.55-56, 2022.9.9(オンライン)
2. 坂口聖弥, 李根浩, 李春鶴, 岡部光汰, 相澤綾一:可変する 4 脚クローラー機構を用いた地面移動, 2022 年度電子情報通信学会九州支部学生会講演会, B-20(p.1), 2022.9.22 (オンライン)
3. Geunho Lee, Kouki Ogata, and Chunhe Li: “Autonomous shape-variable crawler: One-dimensional displacement coordination for constant upper frame posture”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 23(9), pp.14968-14977, September 2022 (DOI: 10.1109/TITS.2021.3135347)
4. 魚住龍太郎, 李根浩, 李春鶴, 坂口聖弥, 平江海人, 河野哲也:コンクリート構造物における欠陥方向推定のための反射波特定手法(第一報), 日本機械学会九州支部第 54 回卒業研究発表講演会, pp.(606)1-2, 2023.3.3 (@宮崎大学工学部)
5. 河野哲也, 糸田守, 魚住龍太郎, 李根浩, 李春鶴:コンクリート構造物の内部欠陥位置推定に関する基礎的研究, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, VI-006, pp.721-722, 2023.3.4 (熊本大学)