

## 周波数解析により算出したレイリー波速度と コンクリート内部の欠陥評価への適用に関する実験的検討

富山県立大学 学生会員 ○青沼 拓朗  
リック株式会社 正会員 岩野 聡史  
富山県立大学 正会員 内田 慎哉

### 1. はじめに

コンクリート部材はさまざまな要因によって内部に空隙、空洞などの変状（欠陥）が発生することがある。これらの内部欠陥の有無を非破壊試験により判断することは、コンクリート構造物の品質管理、維持管理において有効であると考えられる。この試験方法として、さまざまな非破壊試験の手法が検討されており、その方法の一つに衝撃弾性波法がある。その方法による主なコンクリート内部の欠陥探査手法に、コンクリート表面から入力した弾性波のうち、入力面と対向する背面（対向面）などで反射した縦波の往復時間を測定する多重反射法がある<sup>1)</sup>。コンクリート部材の片面のみから測定できること、また、内部の鉄筋の影響を受けにくいこと、という特徴があり、さらに、他の非破壊試験の手法と比較してより深部に存在する内部欠陥の有無を判断できる。しかしながら、欠陥の大きさが小さく、欠陥の位置が深いと、反射源が小さく多重反射が起こりにくくなり、評価が困難となる。既往の研究では<sup>2)</sup>、評価可能な欠陥の深さに対する大きさ（直径）の比（直径/深さ）の最小値は、おおよそ1.0であることが明らかになっている。

そこで本研究では、円盤状の模擬欠陥を埋設したコンクリート供試体を対象に、2点の異なる位置で受信した信号を周波数解析することにより位相差を求め、その結果から位相速度（レイリー波速度）を求める方法について検討した。加えて、レイリー波はコンクリート表面からある程度の深さを伝搬する性質があり、内部に欠陥が存在すれば、測定されるレイリー波速度は低下すると考えられる。この特徴を利用して、既存の方法では評価困難な欠陥（直径/深さ<1.0）をレイリー波速度で評価できるのか検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体

供試体の寸法は高さ 3000mm×長さ 6000mm×幅 300mm

で、RC床版を模擬した供試体である。

模擬欠陥の配置状況を写真-1に示す。RC床版内部の水平ひび割れを模擬するため、厚さ 20mm の円盤状の発泡スチロールが埋設されている。今回は、既存の方法では評価困難な欠陥を評価することを目的としているため、模擬欠陥の直径は  $\phi 50\text{mm}$ 、埋設深さ 100mm および 150mm での結果についてのみ報告する。



写真-1 模擬欠陥の配置状況

#### 2.2 測定方法

本法の測定状況の模式図を図-1に示す。ch1とch2の間の内部に模擬欠陥が存在するように測定点を設定した。比較のため、模擬欠陥が存在しない健全部でも測定した。健全部の測定点は、供試体の長さ方向の中央付近で、模擬欠陥が存在する高さ位置（計5箇所）に設定した。使用した鋼球は直径 10mm とした。受信点に設置した加速度計の周波数応答 ( $\pm 3\text{dB}$ ) は周波数 0.2~20000Hz である。加速度計で受信した信号は、サンプリング時間間隔 0.5 $\mu\text{s}$ 、

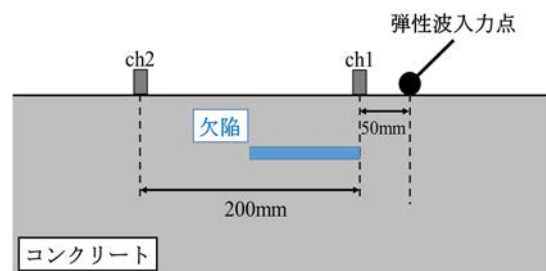


図-1 測定状況の模式図

キーワード 非破壊試験, 内部欠陥, 衝撃弾性波法, レイリー波, 位相差, 位相速度

連絡先 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180 富山県立大学 工学部 環境・社会基盤工学科 TEL0766-56-7500

データ数 4000 個でデジタル化した後に、測定器で記録した。

### 2.3 レイリー波速度算出方法

加速度計で測定された加速度波形から台形積分により速度波形を求め、その波形に対して式(1)および式(2)によりフーリエ変換を行い、各周波数成分の初期位相を式(3)により求めた。

$$S_f = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi ft) dt \quad (1)$$

$$C_f = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (2)$$

$$\theta_f = \tan^{-1}(S_f/C_f) + 2\pi k \quad (3)$$

ここで、 $f$ : 周波数 (kHz),  $S_f$ : 周波数  $f$  のフーリエ正弦係数,  $C_f$ : 周波数  $f$  のフーリエ余弦係数,  $x(t)$ : 時刻  $t$  での測定波形の振幅,  $T$ : 測定時間長さ,  $\theta_f$ : 周波数  $f$  の初期位相 (rad),  $k$ : 設定方法を後述する補正係数である。なお、本研究で採用したフーリエ変換は、周波数間隔がサンプリング時間間隔とデータ数から自動的に決定される高速フーリエ変換ではなく、任意に設定可能な方法<sup>2)</sup>である。計算対象とした周波数は 8kHz~20kHz であり、周波数間隔は 0.1kHz である。

ch1 で測定した初期位相と ch2 で測定した初期位相との差 (位相差) には、式(4)に示す関係が成立する。この関係と本法ではレイリー波を測定対象としていることから、各周波数成分の位相速度を式(5)により算出した。

$$\Delta T_f = \Delta \theta_f / 2\pi f \quad (4)$$

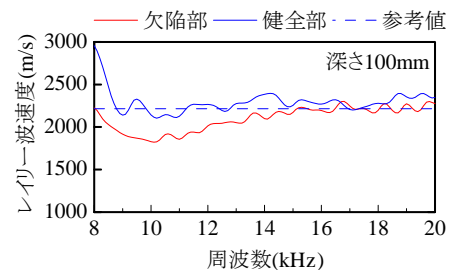
$$V_f = L / \Delta T_f \quad (5)$$

ここで、 $\Delta T_f$ : 周波数  $f$  の振動の ch1, ch2 間での伝搬時間差 (s),  $\Delta \theta_f$ : 周波数  $f$  の振動の ch1, ch2 間での位相差 (rad),  $V_f$ : 周波数  $f$  の振動の ch1, ch2 間での位相速度 (m/s),  $L$ : ch1, ch2 間での振動の伝搬距離差であり今回は 200mm である。式(3)の補正係数  $k$  は、本測定対象がレイリー波であることを考慮し、式(5)により算出される速度が 2500m/s を超えない範囲で、最も大きくなるように周波数毎に設定した。

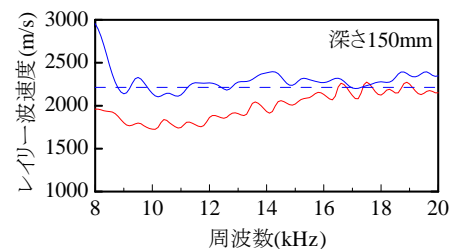
### 3. 測定結果および考察

各周波数成分の位相速度 (レイリー波速度) の測定結果を図-2に示す。図-2に示す参考値は、健全部で測定されたレイリー波速度の下限值である。測定されたレイリー波速度が参考値より小さくなっていけば、欠陥の存在が測定結果に影響したと判断できる。図-2より、模擬欠陥の直径が  $\phi 50$ mm であるのに対して、埋設深さ 100mm,

150mm とともに測定されたレイリー波速度が、周波数 8kHz 程度~16kHz 程度の範囲において参考値よりも小さくなった。今回対象とした欠陥は、いずれも、欠陥の深さに対する直径の比は 1.0 以下である。そのため、既往の研究では評価困難な欠陥を評価できる可能性があることが示唆された。



(a) 模擬欠陥直径  $\phi 50$ mm, 埋設深さ 100mm



(b) 模擬欠陥直径  $\phi 50$ mm, 埋設深さ 150mm

図-2 測定結果

## 4. まとめ

周波数解析により 2 点間の信号の位相差および位相速度 (レイリー波速度) を求める方法を提案し、既存の方法では評価困難な内部欠陥を検出できることを明らかにした。

## 謝辞

本研究は、富山第一銀行奨学財団の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 中山和也, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 大西弘志: 衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
- 2) 三谷宗平, 内田慎哉, 岩野聡史, 久保元樹: 周波数解析方法の違いが衝撃弾性波法によるコンクリートの圧縮強度および部材厚さの評価に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1957-1962, 2017