

表面波の減衰特性に基づくコンクリートのひび割れ深さの推定に関する解析的検討

富山県立大学 学生会員 ○青沼 拓朗, 正会員 内田 慎哉, 非会員 高橋 朋暉

1. はじめに

コンクリートのひび割れ深さを非破壊で推定する手法として、縦波¹⁾や表面波^{2),3),4)}を利用する方法が提案されている。縦波を利用する方法は、伝搬時間を利用して幾何的に算出しているものの、ひび割れ面の局所的な接触により、深さを過小評価する¹⁾。一方、表面波は、界面の接触の影響を受けにくく、エネルギーが大きいため、実構造物での測定に期待されている。しかしながら、実験的/経験的側面から、研究機関ごとに、手法が提案されているに過ぎない。

そこで、本研究では、FDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いて表面波の伝搬をシミュレートし、既存手法^{2),3),4)}を検証することで、その有用性を解析により把握することを目的とした。

2. 解析概要

2次元 FDTD 法の支配方程式は、フックの法則と運動方程式を応力と粒子速度で表現した式である。

解析モデルを図1に示す。コンクリートのモデルは400mm×3000mm、その周辺に厚さ10mmの空気層を設定した。ひび割れは、コンクリートモデル端部からx軸方向に1450mmの位置に、幅2mmの空気層として模擬した。深さは25, 40, 50, 60, 75, 90, 100mmの7種類である。

弾性波の入力は、図1中の赤矢印の位置とした。入力波形を式(1)および式(2)に示す。

$$y(t) = 1 - \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{T_R} = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{0.0043D} \quad (2)$$

ここで、 f : 表面波の周波数、 T_R : 表面波の周期、 T_c : 接触時間、 D : 鋼球直径である。本研究では、鋼球直径20mmでの入力を想定し、 $f=11627\text{Hz}$ とした。ただし、解析上では、式(1)の入力波形を時間微分し、振幅を±1で正規化した1波長分とした。一方、弾性波の出力は、図1中の青矢印4箇所を設定した。ひび割れを中心にx軸方向にそれぞれ±200mmの節点に、出力2および出力3を設けた。ひび割れからの弾性波の反射を考慮して200mmとした。なお、出力1および出力4については、入力された表面波の波長の0.5倍、1倍および3倍となるように、図1

に示す l の距離を設定することにした。具体的には、まず、次式から表面波の波長 λ を算出した。

$$\lambda = \frac{C_R}{f} \quad (3)$$

ここで、 C_R : 表面波の位相速度である。表面波の位相速度を2000m/sとすると、表面波の波長は172mmとなる。続いて、この波長に基づき、端数を切り上げ、距離 l を100mm(0.5倍)、200mm(1倍)、600mm(3倍)とした。

以上より、解析では、ひび割れ深さ7種類、出力距離3種類、計21種類のモデルを対象とした。なお、解析条件は、表1のとおりである。

3. 解析結果および考察

図2に、ひび割れ深さ25mm、距離 $l=100\text{mm}$ の出力波形を示す。弾性波を入力した節点から距離が大きくなるほど減衰が大きく、特に、ひび割れ前後で減衰が顕著である。出力波形から、斎藤らの既往の研究²⁾を参考に、以下に示す手順により振幅減衰 F を算出した。すなわち、まず、各出力点における波形から、表面波の1.5周期程度の波形を抽出する。続いて、抽出した波形に対して、高速フーリエ変換(FFT)を行い、周波数スペクトルを算出する。その後、周波数スペクトル上で卓越した周波数の振幅

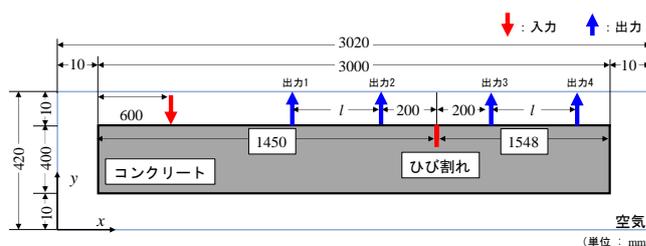


図1 解析モデル

表1 解析条件

空間離散間隔	$\Delta d = 0.001$ [m]	
時間ステップ間隔	$\Delta t = 0.1$ [μs]	
空気	密度	$\rho_a = 1.205$ [kg/m^3]
	体積弾性率	$\kappa_a = 0.140$ [MPa]
	減衰定数	$\beta_a = 0$
コンクリート	密度	$\rho_c = 2300$ [kg/m^3]
	ラメ定数	$\lambda_c = 12040.97$ [MPa]
		$\mu_c = 12379.53$ [MPa]
	減衰定数	$\beta_c = 0.5$
	縦波速度	$C_p = 4000$ [m/s]
	横波速度	$C_s = 2320$ [m/s]

キーワード ひび割れ深さ, 非破壊試験, 表面波, 減衰特性, FDTD 法

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

を読取る。最後に、次式から振幅減衰 F を算出した。

$$F = \frac{A3 + A4}{A1 + A2} \quad (4)$$

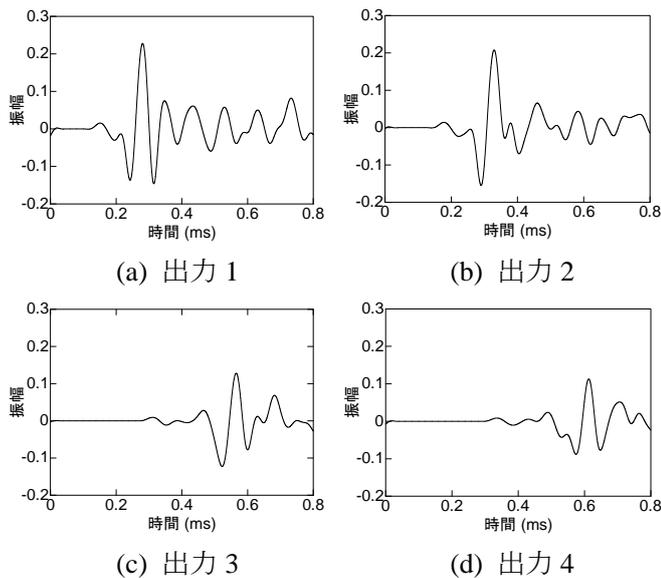


図2 出力波形の例

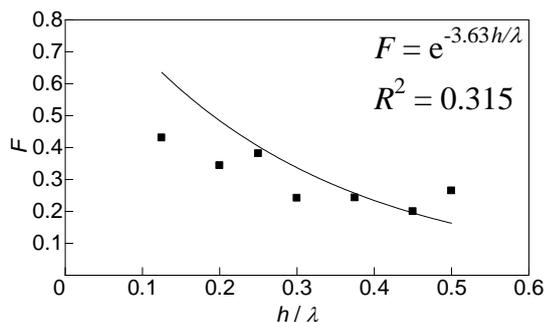
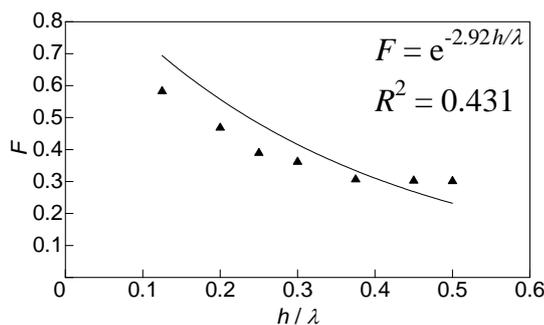
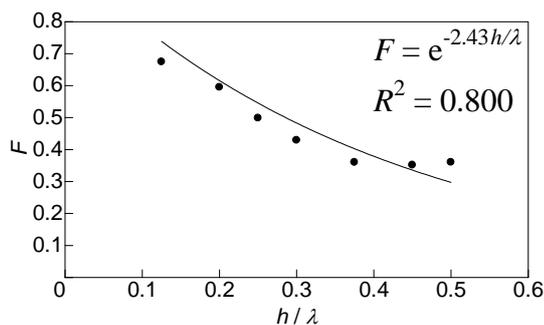


図3 F と h/λ との関係

ここで、 $A1$ ：出力1の卓越周波数の振幅、 $A2$ ：出力2の卓越周波数の振幅、 $A3$ ：出力3の卓越周波数の振幅、 $A4$ ：出力4の卓越周波数の振幅である。

図3に、振幅減衰 F と、表面波の波長 $\lambda=200\text{mm}$ と解析上で設定したひび割れ深さ h との比 (h/λ) の関係を、距離 $l=100, 200$ および 600mm についてそれぞれ示す。図中の近似曲線は、 $h/\lambda=0$ のとき $F=1$ を通る指数関数で近似したものである。図より、距離 l が小さくなると、決定係数が大きくなるのがわかる。図に示す近似曲線から、ひび割れ深さ h は、波長 λ と振幅減衰 F から求めることができる。

$$h = -a\lambda \ln F \quad (5)$$

ここで、 a ：定数である。定数 a は、距離 $l=100\text{mm}$ ：0.412、 $l=200\text{mm}$ ：0.342、 $l=600\text{mm}$ ：0.275 となった。斎藤らの実験では $a=0.4^2$ となり、決定係数が最も高い $l=100\text{mm}$ の定数と概ね同じ値である。しかしながら、振幅減衰 F の算出において、波形の振幅を用いて計算する方法も提案されている³⁾⁴⁾。この方法では、研究者ごとに定数は異なる（蔡らは 0.381～0.398³⁾、呉らは 0.7429⁴⁾）。また定数に与える影響として、表面波の波長 λ の推定方法（実測値/計算値）、ひび割れが発生していない場合の表面波の減衰特性も考えられる。この点は今後の検討課題としたい。

4. まとめ

FDTD 法により、斎藤らが提案しているひび割れ深さ推定式の妥当性が検証された。幾つかの課題はあるものの、本研究の範囲内では、表面波の減衰特性の利用は、有用であると考えられる。

謝辞

FDTD 法の実施にあたり、岩手大学理工学部システム創成工学科知能・メディア情報コース 藤岡豊太先生にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎, 内田慎哉: コンクリート構造物の診断における非破壊検査の適用の現状と今後の展望, 物理探査, 第60巻, 第3号, pp.253-263, 2007.6.
- 2) 斎藤秀樹ら: 表面波によるトンネル覆工コンクリートひび割れ診断法の基礎的検討, 物理探査学会第129回学術講演会論文集, pp.47-50, 2013.
- 3) 蔡 華堅ら: Rayleigh 波減衰特性によるコンクリートひび割れの定量評価に関する基礎研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第9巻, pp.25-30, 2009.
- 4) 呉 佳曄ら: 表面波を用いたひび割れ深さの新しい測定技術: コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集, pp.243-252, 2003.