## 時系列応答波形を用いたコンクリート構造物の内部空洞の評価

# 1. 目的

衝撃弾性波法は主として板状構造物を対象として, 厚さ方向に生成される多重反射の定在波の周波数か ら,板厚や内部欠陥等を検出する技術として確立さ れている<sup>1)</sup>. しかしながら, 測定対象が板状とみなせ ない場合や測定対象の設置環境により, 衝撃弾性波 法の適用ができない場合もある.しかし,衝撃弾性波 法が適用できない対象に対しても,対象構造物の形 状が同一で,入力点,受信点の位置が同じであり,か つ構造物の内部状況が変わらなければ、観測される 応答波形は同一であることから、構造物内部に何か しらの欠陥が存在すれば、その応答に変化が生じる. 著者らは,時間領域差分法(以下,FDTD法)による 数値シミュレーションにより, 健全時と非健全時に 算出される時系列応答波形の変化から、内部空洞の 大きさや位置を評価することを目的とした評価手法 の研究を行っている<sup>2)</sup>. 先行研究では, 空洞直下の応 答波形の変化から内部空洞の平面位置の特定、入力 面と平行な空洞幅を評価できる可能性を確認したが, 空洞高さにおいては、その変化量が小さく、空洞高さ を評価するまでには至っていない.本論では時系列 応答波形解析での空洞高さの評価について、入力点 や受信点を変更し、多数点で観測される時系列応答 波形の変化から空洞高さを評価するための基礎検討 を行った.

#### 2. 解析手法

FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法は差分法の 1つである.この手法は、マクスウェル方程式を差分 法で定式化し時間領域で解析する数値シミュレーシ ョン法として提案された手法であるが、固体中を伝 搬する弾性波における波動方程式も同様に FDTD 法 により定式化されている<sup>3)</sup>. 図1に数値シミュレー ションに用いた健全時モデルを示す. PML 境界 (Perfectly Matched Layer)を含めた解析領域を示して おり、図1の外枠破線部は PML 領域を表している. この PML 境界は測定対象モデル外の境界条件を設 定する領域であり,本論では縦弾性波の反射波が境 界条件による減衰等が生じないように空気領域とし て設定した. 計算領域は, 高さ 400mm, 長さ 1900mm の2次元空間となっており、それを10.0mm×10.0mm の正方形要素にてメッシュ分割した. PML 境界の各 辺から 50mm 内に, 高さ 300mm, 長さ 1800mm のコ ンクリート板を設置した.入力信号は1波長分の正 弦波信号とし、その周波数を 6.00kHz とした.入力 点はコンクリート板左端 500mm から 100mm ピッチ で 900mm までを入力点とし、これにより発生した



図1 解析モデル図(非健全時モデル A)

<b>美</b> 1	<b>鼦折</b>	3-1-	 4
ৰহ ।	円牛 101 /	ヽノハー	 ₽.

密度	2000kg/m <sup>3</sup>	
ラメ定数 λ	8.00GPa	
ラメ定数 <i>μ</i>	12.0GPa	
減衰係数	0.03	
サンプリング周波数	4.00MHz	
入力周波数	6.00kHz	
メッシュサイズ	10.0mm	

弾性波の応答波形をコンクリート板の底面に 100mm 間隔で配置した 17 個のセンサで受信し,これを健全 時の応答波形とした.この健全時モデルと同一条件 で,内部空洞を板左端から 900mmの位置に,幅 30mm, 板底面 150mm から 10mm 間隔で高さ h を 30mm か ら 150mm まで増加させた非健全時モデル A と,空 洞サイズを幅 30mm,高さ 100mm に固定し,空洞の 深さ位置を板底面からの距離を 75mm から 175mm ま で変化させた非健全時モデル B での応答波形を求め, それぞれを健全時で算出された応答波形と比較した.

表1に解析パラメータの一覧を示す.内部を伝搬 する縦弾性波速度 $V_P$ は、一般的なコンクリートの密 度 $\rho$ =2000kg/m<sup>3</sup>、ポアソン比v=0.2 および、弾性係数 から $V_P$ =4000m/s とした.サンプリング周波数は 4.00MHz、計算ステップは10000stepで、測定時間に 換算すると2.50msとなる.時系列応答波形の変化量 は各受信点で観測された応答波形から式(1)を用いて 差分値Dを求めた.

$$D_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (f_i - f_i')^2 \tag{1}$$

ここで, *f*<sub>i</sub>はセンサ毎の健全時における時系列応答 波形, *f*'<sub>i</sub>はセンサ毎における非健全時での時系列応 答波形, 差分値 *D* の添え字の*j*はセンサ番号 (0ch~

キーワード 衝撃弾性波法,内部欠陥探査,非破壊検査,FDTD 法

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部 TEL 03-3259-0575

16ch) である. 算出のために用いたデータ数 N は 8000 個とし,算出された差分値から空洞高さの評価 を試みる.

## 3. 結果

コンクリート板中央 X=900mmで入力し,空洞高 さを 30mmから 150mmまで変化させ, 各受信点で 算出された差分値を図2に示す.図の横軸はコンク リート板左端からの距離,縦軸は算出された差分値 である. コンクリート板中央の受信点において, 空洞 高さ 100mm から差分値が増加する傾向が確認でき るが、100mm未満ではその差が明瞭に確認できない. 一方で, 受信点 400mm の位置で, 空洞高さ 30mm か ら 80mm の範囲で差分値の変化が確認できるが, 90mm 以上ではその変化は小さい.これらからコンク リート板中央で入力を行った場合には, 複数点で算 出される差分値から空洞高さの大小関係程度の評価 は可能であると考えられる. 図3に入力点を変化さ せ、空洞位置をコンクリート板中央900mm、深さを 150mm とし、各入力点上で算出された差分値の結果 を示す. 図の横軸は空洞高さ, 縦軸は差分値, 凡例の 数値は入力点の X 座標を示す. 図からコンクリート 板中央で入力した場合に差分値が大きく算出される ことが確認できるが、空洞高さ 90mm 以下では変化 が小さいことがわかる.一方で、コンクリート板左端 から 500mm と 700mm を入力点とした結果では,空 洞高さの増加に伴い差分値が増加していることがわ かる.これにより,空洞直下以外での入力点,受信点 における時系列応答波形の変化から、本解析モデル においては空洞高さを評価することが可能であると 考えられる. 次いで, 空洞サイズを幅 30mm, 高さ 100mm に固定し,空洞位置を 900mm, 深さ位置を入 力面から空洞まで 75mm から 175mm まで 25mm 間 隔で変化させ算出された差分値の結果を図4に示す. 図より空洞の深さが変化した場合、入力点によって は差分値が変化することが確認できる.500,800mm では空洞深さによって算出される差分値が変化する ため、空洞の深さが変化することで空洞高さの評価 に影響が生じる可能性がある.一方で、入力点 600、 700mm では空洞深さの変化による差分値の影響が小 さいため、空洞の深さ変化に関わらず、空洞高さを評 価できる可能性が示唆される.

# 4. まとめ

本論では, FDTD 法によるシミュレーションによって観測された時系列応答波形の変化量を算出し, その差分値を用いて内部空洞の高さ評価について基礎的な検討を行った.空洞の高さや深さ,入力点,受 信点を変化させ,多数点で算出された差分値に着目した結果,以下のことがわかった.

- 空洞高さ100mm以上では、空洞直下で差分値が 増加した。
- 空洞高さ100mm 未満では、空洞直下以外での差 分値が変化した.
- ③ 入力点の変化によって,空洞高さの増加に伴う差 分値の増加を確認できた.

④ 入力点の位置によっては空洞深さの影響が少な い条件もあることが確認された。

以上の結果から次のように空洞高さを評価できる見 込みがある.

- (1) 空洞直下で入力した場合,多数点で受信された差 分値から空洞高さの大小関係の評価が可能であ ると考える.
- (2)入力点を変化させることで、その入力点上で算出 される差分値から、空洞高さを評価することが可 能であると考える。

(3) 入力点の条件によっては,空洞深さの変化に関わ

らず,空洞高さを評価できる可能性が示唆される. 0.140 - 30mm -40mm 0.120 -50mm 0.100 60mm - 70mm 波形差分 0.080 - 80mm 0.060 90mm 100mm 0.040 -110mm 0.020 -120mm -130mm 0.000 140mm 900 1200 1500 1800 0 300 600 -150mm センサ距離(mm)

図 2 入力点 900mm における差分値



図3 入力条件毎の入力点直下における差分値



図4 空洞深さ変化における入力点直下の差分値

#### 参考文献

- NIDS 2426-2: コンクリートの非破壊試験 弾性波法-第 2部: 衝撃弾性波法, (2014)
- 池端宏太、小林義和、小田憲一:応答波形による内部欠 陥探査に関する基礎検討、(一社)日本非破壊検査協会秋 季講演大会講演概要集,pp.29-32,(2018)
- 3) 藤岡豊太,永田仁史,阿部正人:インパルスハンマを用いた非破壊診断のための時間領域差分法によるケーソンの衝撃弾性波解析,日本音響学会誌,71(2), pp. 53-64, (2015)