

## 機械学習を用いたコンクリート構造物の内部空洞定量評価技術の開発

原子燃料工業株式会社 正会員 ○松永 嵩, 小川 良太, 匂坂 充行, 磯部 仁博  
 東京大学 吉村 忍, 山田 知典

### 1. はじめに

コンクリート構造物では、施工時の打込みや締固めが不十分な場合や、材料の選定ミスによる流動性不足、材料分離等によって、コンクリート内部に空洞が生じる。内部空洞は鉄筋を保護するかぶりコンクリートとしての機能不足を生じさせ、コンクリート構造物の耐久性、耐荷性の低下につながる。また、プレストレスが導入され一般的に耐久性が高いといわれる PC 構造物では、シーす内の PC グラウトの充填不足により PC 鋼材の腐食が発生し、破断に至る恐れがある<sup>1)</sup>。こうしたコンクリート構造物の内部空洞については、通常点検での検知は一般的に困難である。

そこで、筆者らは、AE センサを用いた打音検査（以下、「デジタル打音検査」という）を用いて、コンクリートの内部空洞の定量評価技術を開発している。先行研究<sup>2)</sup>においては、デジタル打音検査結果の FEM 解析での再現や、FEM 解析のサロゲートモデルとして機械学習を用い、内部空洞のサイズや深さの変化に伴うデジタル打音検査結果の変化をデータベース化している。本報では、そのデータベースを CNN（畳み込みニューラルネットワーク）で学習させることで、コンクリート表面の複数個所のデジタル打音検査結果のマップから直接的に内部空洞のサイズや深さを定量評価した結果について報告する。

### 2. デジタル打音検査システムの概要

本研究で用いたデジタル打音検査システムと得られる振動波形、周波数分布を図-1 に示す。本システムは測定対象を打撃し、励起された振動を広帯域 AE センサで捉える。この振動波形を高速フーリエ変換することで、周波数分布を得る。コンクリート表面をデジタル打音検査することで得られる周波数分布のうち、本研究では、縦波共振の固有周波数とたわみ振動の固有周波数に着目した。縦波共振の固有周波数及び単純支持平板のたわみ振動の固有周波数の式をそれぞれ式 (1)、式 (2) に示す。

### 3. デジタル打音検査の面的評価とデータベース

図-2 は、3000 mm×3000 mm×400 mm のコンクリート平板の中央、かぶり深さ 100 mm の位置に 100 mm の立方体の空洞がある場合において、欠陥直上位置±400 mm の範囲でデジタル打音検査し周波数を抽出した FEM 解析結果である。このように内部空洞が存在するコンクリート表面をデジタル打音検査した場合、欠陥直上部

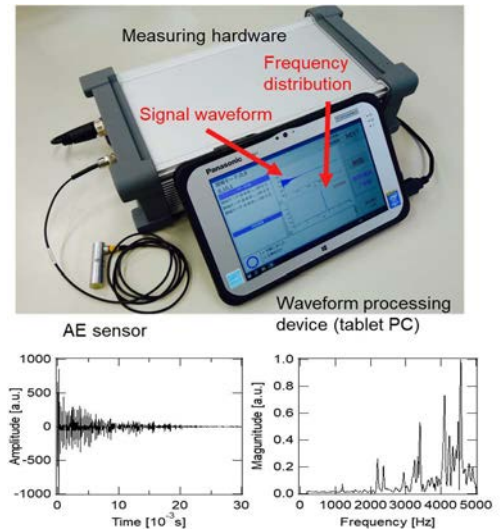


図-1 デジタル打音検査の概要

$$f = \frac{V}{2D} \quad (1)$$

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \left[ \left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right] \quad (2)$$

$f$ : 固有周波数 [Hz],  $E$ : 弾性係数 [Pa]  
 $\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $V$ : 音速[m/s]  
 $D$ : 厚さ [m],  $a, b$ : 剥離寸法 [m],  
 $h$ : かぶり厚 [m],  $\nu$ : ポアソン比,  
 $m, n$ : 振動モード

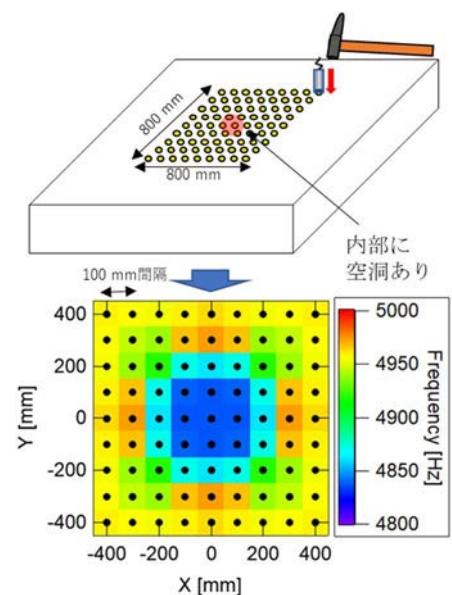


図-2 デジタル打音検査の面的評価

キーワード AI, AE センサ, デジタル打音検査, コンクリート, 内部空洞, 機械学習  
 連絡先 〒590-0481 大阪府泉南郡熊取町朝代西一丁目 950 番地 原子燃料工業株式会社 TEL072-452-7221

で最も周波数が低下し、その周辺まで影響を及ぼす。FEM 解析でこのような面的評価結果を出力する際には、各測定箇所と打撃箇所を設定してシミュレーションする必要がある。膨大な労力を要する。そこで、先行研究においては、FEM 解析の結果を機械学習させることで図-3 に示す空洞平面サイズや、空洞かぶり厚が変化した際の面的評価結果を直接的に算出するサロゲートモデルを構築し、大規模なデータベースを瞬時に出力することを可能にした。

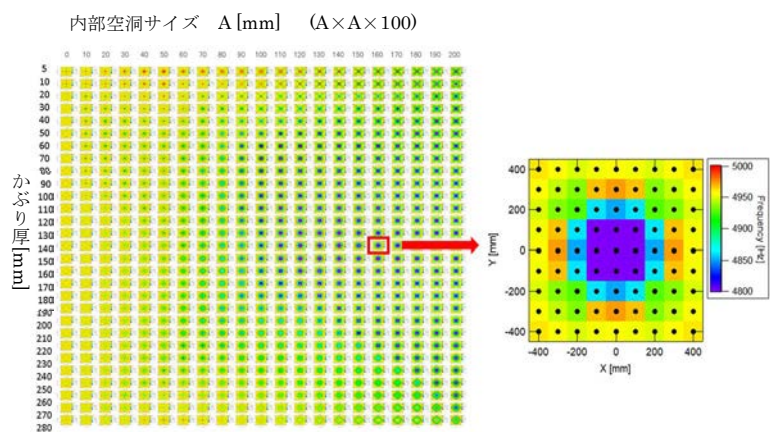


図-3 面的評価結果のデータベース化

#### 4. 逆解析モデルの構築と検証

コンクリート表面の複数箇所のデジタル打音検査から得られる面的評価結果から内部空洞サイズ、かぶり厚を推定する逆解析モデルを図-4 に示す。本モデルは CNN (畳み込みニューラルネットワーク) で構成した。具体的には、100mm 格子で 9×9 の面的なデジタル打音検査結果を入力層に、出力層には内部空洞のサイズとかぶり厚を学習させた。

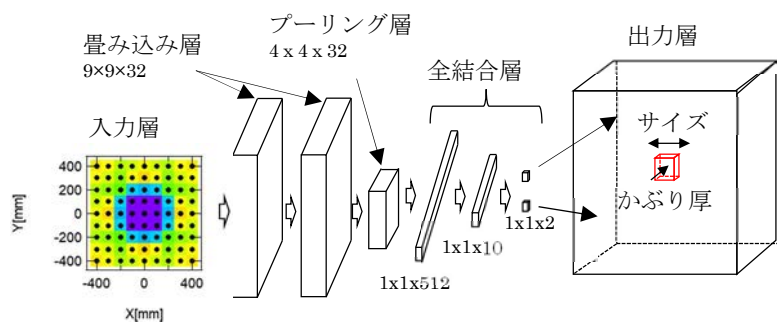


図-4 CNN を用いた逆解析モデルの概要

A x B x C は各プロセス後のサイズを示す

CNN による逆解析モデルにて、内部空洞サイズ及びかぶり厚を推定した結果を図-5 に示す。予測誤差は概ね 15%以内であり、実運用では、施工情報等も考慮して総合的に判断することで、欠陥サイズおよび欠陥かぶり厚を特定することが可能となる。

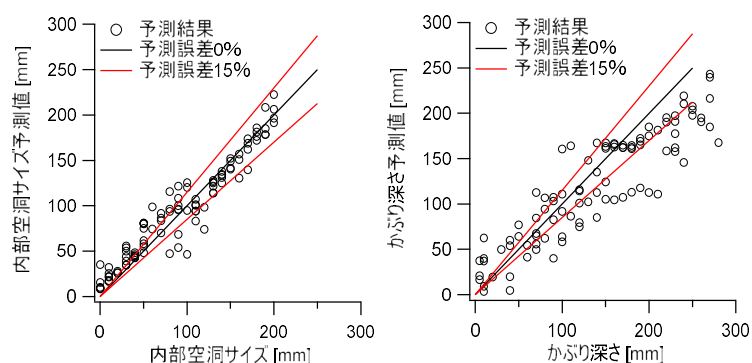


図-5 検証結果

#### 5. まとめ

本研究の成果として、FEM 解析と機械学習を用いて構築した、様々な内部空洞の状態におけるデジタル打音検査の面的評価結果のデータベースを CNN で学習させることで、デジタル打音検査結果からコンクリートに内在する内部空洞のかぶり厚やサイズを定量的に評価する逆解析モデルを開発した。現在、実構造物の試験データを用いて、開発した逆解析モデルの妥当性を検証している。

#### 謝辞

本研究は国土交通省令和元年度～2年度建設技術研究開発助成制度により実施した「デジタル打音検査と AI・シミュレーションの統合的活用によるコンクリート内部構造診断の実現」の成果の一部である。

#### 参考文献

- 1) 服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 朝倉響, 寺澤広基: 弾性波の入力方法と PC グラウト未充填部の検出能力との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.73, No. 2, pp.239-250, 2017.
- 2) 松永嵩, 小川良太, 匂坂充行, 藤吉宏彰, 石井元武, 磯部仁博, 山田知典, 吉村忍: 機械学習のデジタル打音検査高度化への適用, Transactions of JSCES, Paper No.20211002