

デジタル打音検査と機械学習によるコンクリート内部構造診断技術の拡張

Extension of Internal Structure Diagnosis of Concrete Structures Using Digital Hammering Inspection and Machine Learning

松永 嵩 (原燃工) 小川 良太 (原燃工) 匂坂 充行 (原燃工) 藤吉 宏彰 (原燃工)
石井 元武 (原燃工) 磯部 仁博 (原燃工) 吉村 忍 (東大・工) 山田 知典 (東大・工)
Takashi MATSUNAGA, Nuclear Fuel Industries, Ltd. Ryota OGAWA, Nuclear Fuel Industries, Ltd.
Mitsuyuki SAGISAKA, Nuclear Fuel Industries, Ltd. Hiroaki FUJIYOSHI, Nuclear Fuel Industries, Ltd.
Motomu ISHII, Nuclear Fuel Industries, Ltd. Yoshihiro ISOBE, Nuclear Fuel Industries, Ltd.
Shinobu YOSHIMURA, The University of Tokyo Tomonori YAMADA, The University of Tokyo
E-mail: tk-matsunaga@nfi.co.jp

An inverse analysis model was constructed to quantitatively evaluate the internal structure of concrete (internal defects, cracks, and loss of compressive strength) from natural frequency contour maps obtained from grid-points on the concrete surface using sensor-based hammering inspection. The constructed inverse analysis model was shown to be able to estimate the actual values with an error of roughly 15%.

1. はじめに

コンクリート構造物の施工時の品質管理や維持管理における一般的な点検手法としては、目視点検や打音点検が広く知られており、膨大な数の検査対象を短時間で合理的に調査可能な点検手法である。一方で、課題としては、点検者の経験、技量に依存することや、技能継承が適切に行われていないことが指摘されている¹⁾。

このような背景の中、センサを用いた打音点検技術（以下、「デジタル打音検査」という）によりコンクリートの変状を評価する手法が開発されているが²⁾、実構造物の変状の種類と規模が多岐にわたるため、これらの変状とデジタル打音検査結果を網羅的に整備することは難しい。

そこで、筆者らは先行研究³⁾として、内部空洞・剥離を模擬したコンクリート試験体での実験的検討、およびFEM解析による理論的検討を行い、実験を再現可能なFEM解析を実施した。また、機械学習を用いて内部空洞形状からデジタル打音検査結果を推定する順解析モデルを開発し、デジタル打音検査結果と内部空洞・剥離のデータベースを短期間で構築することが可能となった。本論文では、内部空洞・剥離以外の変状として、ひび割れや圧縮強度も含め、これらのデータベースを用いたコンクリート診断技術の現場適用を目標に、構築されたデジタル打音検査とコンクリート変状のデータベースを機械学習させることで、デジタル打音検査結果からコンクリートの変状を推定する逆解析モデルを構築した。

2. コンクリートの物性・振動特性

本研究で用いたデジタル打音検査システムで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 (Fig. 1)。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、縦波共振の固有振動数とたわみ振動の固有周波数に着目した。これらの固有振動数について、縦波共振の固有周波数は式(1)、たわみ振動は、例えば、長方形で周囲の境界条件が単純支持の場合、式(2)のように表せられる。各種変状により、板厚方向において見かけの弾性係数が低下する場合や、かぶり部においてたわみ振動が生じた場合、得られる周波数は変化する。

また、圧縮強度については、既往の研究⁴⁾により、式(3)の傾向があることが知られている。また、固有周波数は式(1)、(2)に

示す通り、弾性係数の平方根に比例する傾向があるため、圧縮強度を低下により、得られる固有周波数は低下する。

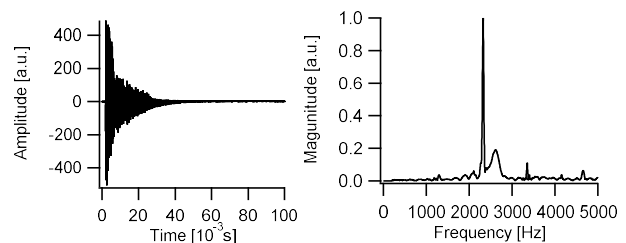


Fig. 1 Vibration waveform and frequency distribution

$$f = \frac{V}{2D} = \frac{1}{2D} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}} \quad (1)$$

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

$$E = 21000 \times \left(\frac{\gamma}{23} \right)^{1.5} \times \left(\frac{\sigma_B}{20} \right)^{0.5} \quad (3)$$

f : 周波数 [Hz], E : 弾性係数[Pa], ρ : 密度 [kg/m³],

V : 音速 [m/s], D : 厚み [m], a, b : 剥離部寸法 [m],

h : 剥離部かぶり厚さ [m], ν : ポアソン比

m, n : 振動モード次数, γ : 気乾単位容積重量[kN/m³]

σ_B : 圧縮強度[N/mm²]

3. 順解析モデルによるデジタル打音検査結果のデータベース化

コンクリートの内部構造とデジタル打音検査結果の非線形関係を機械学習し、変状の状態（内部空洞のサイズや位置、ひび割れ深さなど）から直接的にデジタル打音検査結果を推定する順解析モデルを設計し、データベースを構築した。機械学習には全結合ニューラルネットワークを採用した。ネットワークの構造及び解析条件は筆者らの先行研究の値を採用した。なお、圧縮強度の低下については、健全状態の解析結果から、式(1)と式(3)を用いてデータベースを構築した。構築したデータベースのうち、先行研究にて内部空洞のデータベースを導出しているため、本報では、ひび割れ、圧縮強度の変化に伴うデジタル打音検査によるコンクリート表面のマップ図の例を Fig. 2, Fig. 3 に示す。なお、ひび割れ角度については、コンクリート表面とひび割れ進展方向のなす角度とする。このように、コンクリート内部の劣化状態と面的なデジタル打音検査結果との定量関係が明確となった。

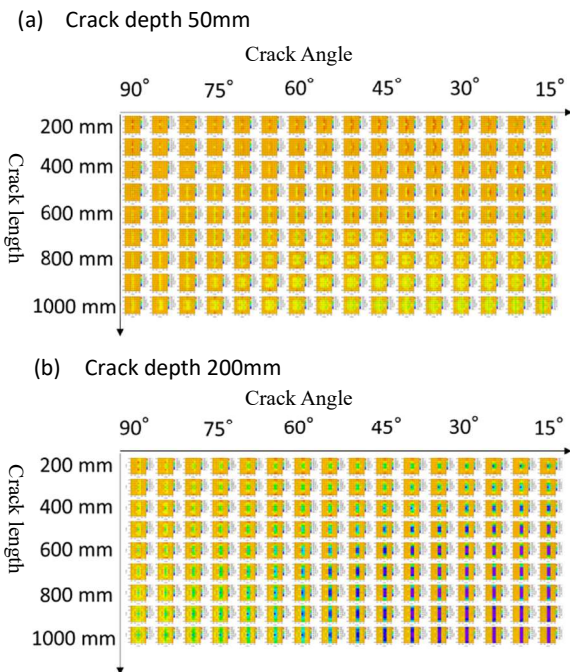


Fig. 2 Database of crack conditions and digital hammering inspection results

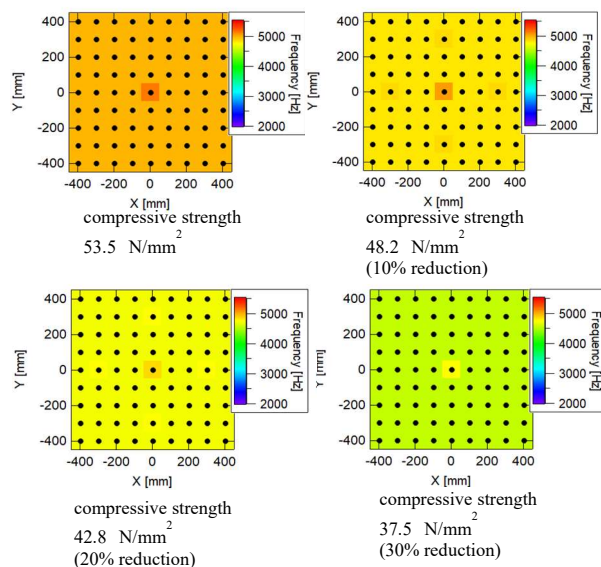


Fig. 3 Database of compressive strength and digital hammering inspection results

4. 逆解析モデルによる欠陥の定量評価

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固有周波数のマップから各種変状の状態を定量的に推定する逆解析モデルを構築した。本モデルはCNN(畳込みニューラルネットワーク)を用い、内部空洞評価の場合はサイズとかぶり厚、ひび割れ評価の場合は長さ、深さ、角度、圧縮強度評価の場合は圧縮強度をそれぞれ出力するモデルを構築した (Fig. 4)。

実際の値と推測値を対比したグラフ (Fig. 5) より、逆解析モデルの予測誤差は概ね 15%以内であった。また、ひび割れ角度の誤差は大きいものの、実際の値より小さい値と予想しており、保守的な評価の逆解析モデルであることが示された。

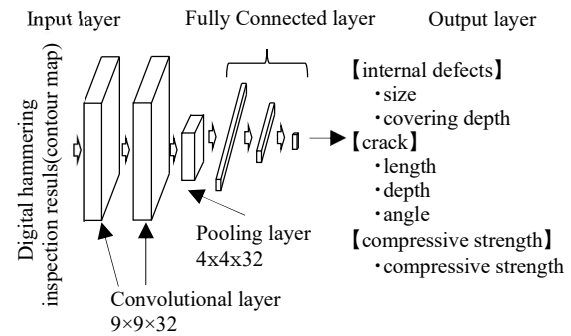


Fig. 4 Overview of inverse analysis model

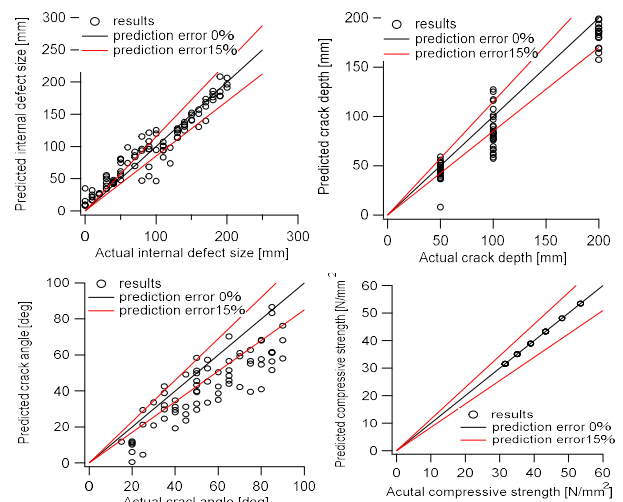


Fig. 5 Validation of inverse analysis model

7. まとめ

本研究の成果として、コンクリート構造物の変状とデジタル打音検査結果のデータベースを機械学習させることで、デジタル打音検査結果からコンクリートの変状を推定する逆解析モデルを開発した。本報では単一の欠陥が存在する場合の逆解析モデルであるが、今後、複数の欠陥が重畳した場合の逆解析モデルの構築や、実構造物への適用性検証を行う計画である。

6. 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) 舟波尚哉, 村上祐貴, 外山茂浩, 小海元暉: 熟達点検者の打音点検動作の形式化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1871-1876, 2019.7
- 2) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文, No.704, V-55, pp.65-79, 2002.5.
- 3) 山田知典, 吉村忍, 松永嵩, 藤吉宏彰, 小川良太, 匂坂充行, 磯部仁博, “デジタル打音検査と機械学習によるコンクリート内部構造診断技術の検討”, 土木学会 第24回応用力学シンポジウム講演概要集, S02C-02, 2021
- 4) 川上英男, “コンクリートの弾性係数と圧縮強度の関係についての一考察”, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006, pp. 449-454.