

論文 デジタル打音検査によるコンクリート内部構造診断技術の開発

松永 嵩^{*1}・磯部 仁博^{*2}・吉村 忍^{*3}・山田 知典^{*4}

要旨：社会インフラの効率的な維持管理に向けた点検のデジタル化が進む中、センサを用いた打音検査（以下、「デジタル打音検査」という）により、コンクリートのひび割れ形状を定量的に評価するために、ひび割れ形状とデジタル打音検査結果の相互関係を把握し、データベース化することが望ましい。そこで、本研究では、ひび割れの表面長さや深さ方向の角度に注目して、打音検査時の振動を FEM 解析により再現し、その結果を機械学習することで、データベースを構築した。このデータベースにより、ひび割れがデジタル打音検査に及ぼす影響を包括的に把握可能となり、デジタル打音検査からそれらの定量的な推定が可能となった。

キーワード：打音法, デジタル化, AI, ひび割れ角度, ひび割れ長さ

1. はじめに

コンクリート構造物には様々な原因によりひび割れが生じることがある。ひび割れは塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の浸透を容易にし、鋼材腐食を助長する可能性が高いとされ、コンクリート構造物の耐久性を低下させる主な要因とされてきた。また、ひび割れの進展に伴う剥落により第三者被害に発展する可能性もある。

コンクリート構造物のひび割れに関する一般的な点検手法としては、目視検査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。

このような背景の中、コンクリートの変状に対し、センサを用いた打音検査（以下、「デジタル打音検査」という）の手法が開発²⁾されているが、実構造物においてはひび割れ形状（深さ、長さ、方向等）が多岐にわたるため、これらの影響を網羅的に整備することが難しい。ひび割れ形状を非破壊的に評価することが可能となれば、コンクリート構造物の耐久性の評価、補修方法の選定、コンクリート片の剥落による第三者被害リスクの正確な予測が可能となり、コンクリート構造物の健全性評価がより高度化されることが期待される。

ひび割れとデジタル打音検査の関係性については、魚本らによる研究³⁾があり、ひび割れ深さに伴い、縦波共振の周波数が低下することが明らかになっている。また、津野らの研究⁴⁾によれば、コンクリート部材の剥落の安全率を評価するためには、ひび割れ角度も重要な因子の一つであることが述べられている。

ひび割れが斜めに進展した場合、欠陥直上部だけでは

なく、ひび割れ位置から離れた位置のコンクリート表面の振動特性にも影響を及ぼす可能性が考えられるため、コンクリート表面の複数点の結果を総合的に評価することが有効であると考えられる。しかしながら、多種多様のひび割れ形状において、コンクリート表面の複数点の結果を系統的に整備することは多大な労力を要する。

そこで、本研究では、表面に開口部を有するひび割れを対象に、ひび割れ形状からコンクリート表面における振動特性を推定する AI（Artificial Intelligence）により、ひび割れ形状の推定に必要な、ひび割れ形状とデジタル打音検査の大規模データベースの構築を目的とした。

2. デジタル打音検査装置及び振動特性

2.1. デジタル打音検査装置

本研究で用いたデジタル打音検査装置を図-1 に示す。本装置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し、周波数分布を得る（図-2）。なお、着目する周波数範囲（1 k~10 kHz 程度）でフラットな感度を有する広帯域 AE センサを使用し、打撃物については、打撃部質量が 113 g、打撃面直径が 12 mm の点検ハンマーを用いた。



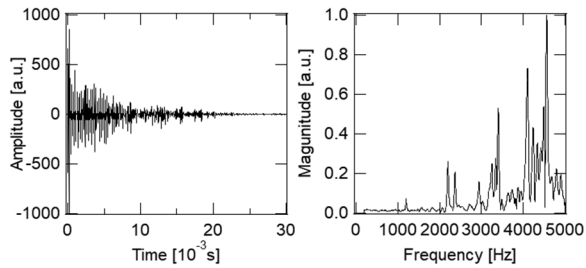
図-1 デジタル打音検査装置

*1 原子燃料工業（株） エンジニアリングサービス部 技師 修士（工学）（正会員）

*2 原子燃料工業（株） エンジニアリングサービス部 上席主幹 博士（工学）

*3 東京大学 工学系研究科システム創成学専攻教授 博士（工学）

*4 東京大学 工学系研究科システム創成学専攻准教授 博士（工学）



図－２ 振動波形及び周波数分布

2.2. コンクリートの振動特性

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振動周波数に着目した。

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⁹⁾。ひび割れにより、板厚方向において見かけのヤング率が低下する場合や、ひび割れ面とコンクリート表面のかぶり部においてたわみ振動が生じた場合、得られる周波数は健全状態の値より変化する。

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

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

f :固有周波数[Hz], E :弾性係数[Pa]

ρ :密度[kg/m³], V :弾性波速度[m/s], D :厚み[m]

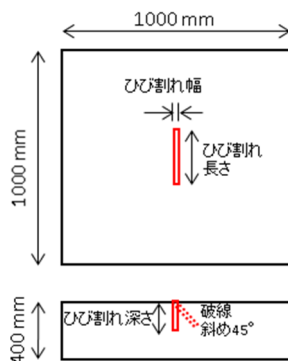
a, b :長方形板の寸法[m], h :剥離領域の厚み[m]

ν :ポアソン比, m, n :振動モードの次数

3. FEM 解析モデルの設計と妥当性確認

3.1. 妥当性確認用供試体の製作条件

妥当性確認用供試体のひび割れ形状の概要図を図－3に、製作条件を表－1に記載する。なお、圧縮強度は36 N/mm²とし、ひび割れ部は1 mm 厚のプラスチックプレートを埋め込んだ。供試体は2本の盤木を敷き、地面と接触しないような状態で設置した。



図－３ 妥当性確認用供試体のひび割れ形状概要図

表－１ 供試体の製作条件

No	内容	欠陥サイズ※1
1	健全	-
2	ひび割れ	200 mm×200 mm×1 mm
3		200 mm×100 mm×1 mm
4		100 mm×100 mm×1 mm
5		50 mm×50 mm×1 mm
6		200 mm×200 mm×1 mm (斜め 45°)

※1 ひび割れ長さ、深さ、ひび割れ幅の順に記載

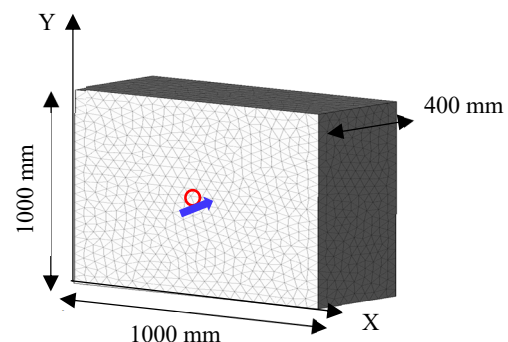
3.2. FEM 解析モデルの解析条件

FEM 解析には ADVENTURE Cluster を使い、妥当性確認用供試体と同様のひび割れ形状 (No.1～6) の解析モデルを構築した。解析モデル形状は、図－4 に示す。

解析条件については、先行研究⁹⁾を参考に、着目する周波数範囲 (1 k～10 kHz 程度) の振動特性を評価可能な表－2 に示す通りとした。また、使用した広帯域 AE センサが速度に応答することから、コンクリート表面垂直方向速度成分の振動波形を高速フーリエ変換し、着目する振動モードの周波数を得た。また、コンクリート部は一樣部材としてモデル化し、周囲の境界条件については、実験条件を模擬するため拘束せず自由端とした。

表－2 解析条件

メッシュ	基本節点間隔	50 mm
	要素	4 面体 2 次要素
物性値	弾性係数	37GPa
	密度	2400 kg/m ³
	ポアソン比	0.2
打撃荷重	荷重	100 N
	波形	三角波
	荷重付与時間	0.1 ms
解析時間条件	解析間隔	4μs
	解析最大時間	10 ms
	総ステップ数	2500step



出力点 (X, Y) = (500, 500) 赤丸

荷重位置 (X, Y) = (550, 500) 青矢印

図－４ FEM 解析モデル

3.3. 妥当性確認結果

FEM 解析から得られた周波数分布と実験で得られた周波数分布を比較した。図-5～図-6 は健全、ひび割れの一部の結果を示す。

実験と FEM 解析の周波数分布は、ピーク強度は異なるものの周波数ピーク位置は概ね一致している。強度が異なる要因としては、FEM 解析ではコンクリート部材は一樣部材として取り扱っていること、供試体におけるひび割れ模擬では厚さ 1 mm のプラスチックが埋め込まれているのに対し、FEM 解析では厚さ 1mm の空洞でひび割れを模擬していることが挙げられるが、特定のモードの周波数を特徴量とした評価への影響は限定的と考える。

また、図-5 については、縦波共振の固有振動ピークは式(1)から推測すると 5000 Hz 近傍のピークであると推測される。また、図-6 は特徴的な固有振動ピークが得られており、斜めに進展しているひび割れの直上部で特徴的な振動モードが生じていると考えられる。

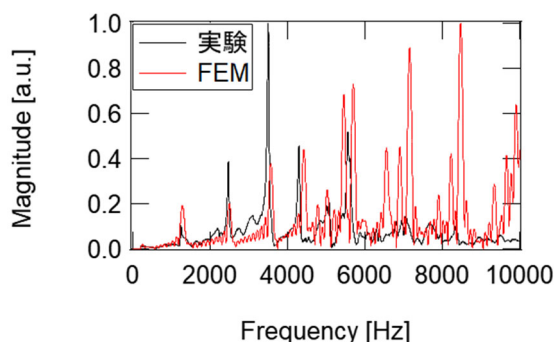


図-5 No. 1 の FEM 解析及び実験の周波数分布

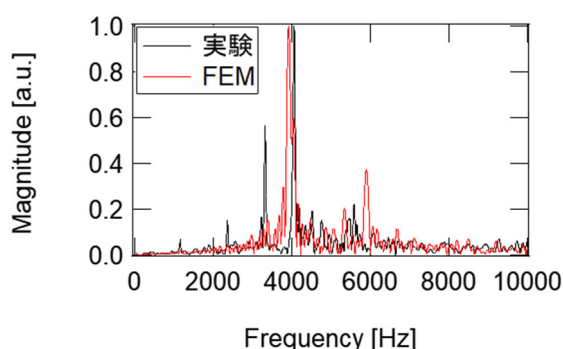


図-6 No. 6 の FEM 解析及び実験の周波数分布

ここで、供試体ごとに得られる供試体中央位置での周波数を図-7 に整理した。No.5(50×50)から No.2(200×200) とひび割れの規模が大きくなるにつれて、実験及び FEM 解析ともに縦波共振の周波数が低下していることがわかる。また、No.6 の 200×200 のひび割れが斜め 45°に導入されたものは、ひび割れ上面でたわみ振動が生じ、健全よりも 1000Hz 程度低い値となっている。これらの傾向

は、実験及び FEM で概ね一致しており、縦波共振の周波数及びたわみ振動の周波数を評価する場合において、今回設定した FEM 解析モデル及び解析条件は妥当であることが示された。

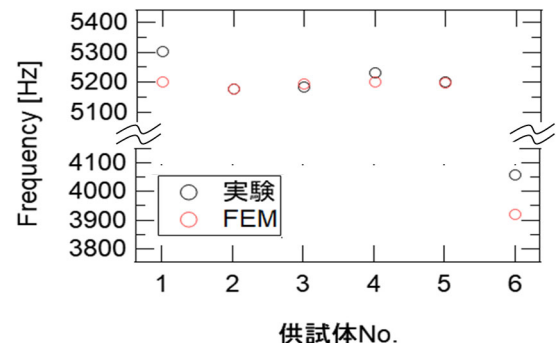


図-7 ひび割れ形状に伴う周波数変化

4. 実構造物を考慮した FEM 解析モデルの構築

4.1. 解析モデルの検討

妥当性確認モデルにおいては、FEM 解析モデル寸法を実験と同一としたが、橋梁やトンネル覆工などの実構造物においては、板厚と比較して平面寸法が大きい箇所が多く、健全状態であれば縦波共振の固有振動ピークが支配的となる環境にある⁷⁾。したがって、実験で検証したモデルの平面寸法を大きくし、実構造物では現れにくい曲げ等の振動モードの影響を軽減させた解析結果が実構造物への適用に有効であると考えられる。

そこで、本章では、解析モデル形状を大きくし、様々なひび割れのモデルを構築し、コンクリート表面で得られるデジタル打音検査結果を計算した。なお、解析条件、物性条件は 3 章の値を使用し、欠陥直上部と周囲の点の振動特性を評価した。

図-8 にモデル外観図を示し、打音検査による振動計測点（緑色の点）は、欠陥の種類によって対称性を考慮して 10 cm 格子で設定し、打撃による荷重点は計測点の右側 5 cm の赤色の矢印の位置とした。解析モデルについては、欠陥がないモデル及び、表-3、表-4 に示す欠陥形状をコンクリート表面中央部に模擬したモデルを構築した。

なお、対象の欠陥に応じて、対称性を考慮した解析パターンとなっているため、本章で示す面的測定結果のコンター図は、実解析の結果を折り返して表記している。

表-3 ひび割れ（垂直）欠陥形状

欠陥種類	欠陥長さ (mm)※1	深さ(mm)
ひび割れ (垂直)	200, 400, 600, 800, 1000	200

表-4 ひび割れ（斜め）の欠陥形状

欠陥種類	欠陥長さ (mm) ※1	コンクリート表面とひび割れ面のなす角度(deg.)※2
ひび割れ (斜め)	200	15, 30, 45, 60, 75
	1000	15

※1 ひび割れ幅は 1 mm, ひび割れ深さは 200 mm で固定

※2 ひび割れ進展方向は X 方向+側とする。

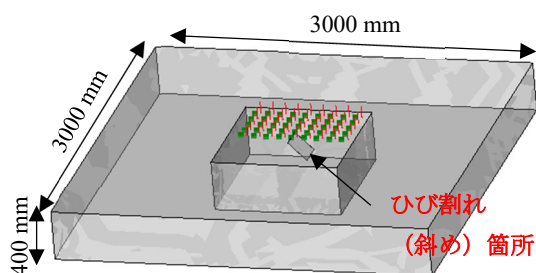


図-8 モデル外觀の例

4.2. 計算結果

(a) モデル中央部の周波数

モデル中央部における欠陥に伴う周波数変化を 図-9, 図-10 に示す。ひび割れ長さの増加及びひび割れ角度の減少に伴い周波数は減少する傾向が示された。ひび割れ長さの増加については、コンクリート構造物の見かけの弾性係数の低下により、縦波共振の周波数が低下したと考えられ、ひび割れ角度については、斜めに進展することで、コンクリート表面とひび割れ間でたわみ振動が生じていると考えられる。

これらの結果よりひび割れの発生及びその規模に応じて、得られる周波数が変化し、それらの傾向を定量的に把握することができた。また、中央 1 点のみの評価では、健全状態との差から何らかの異常を判定することは可能であるものの、欠陥の規模を推定することは難しいことを確認した。

(b) コンクリート表面での面的評価

コンクリート表面の複数点での振動解析結果より、得られた周波数のコンター図を 図-11 に示す。健全なモデルでは、一様に 5000 Hz 程度の周波数が得られるのに対し、ひび割れが斜めに進展した場合は、ひびわれ進展方向の複数点で周波数の低下が認められた。また、ひび割れ長さの増加に伴い、より広い範囲で周波数の低下が認められた。

これらの結果から、ひび割れの長さや進展方向に応じてコンクリート表面で得られる周波数が低下し、また周波数の低下の範囲がひび割れ形状によって変化することから、コンクリート表面の複数点で得られる周波数とひび割れ形状の関係性を定量的に把握することがひび割れ形状を正確に評価するために重要であることが示された。

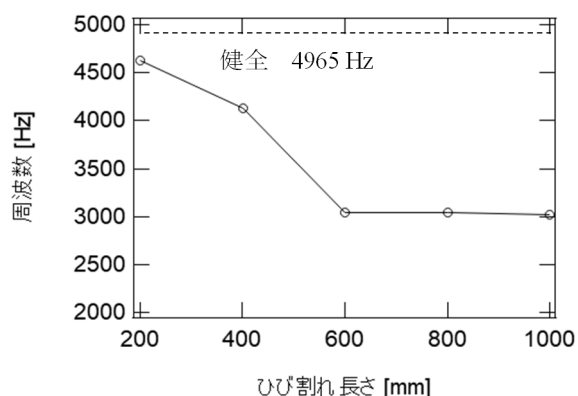


図-9 ひび割れ（垂直）モデルの中央部の周波数

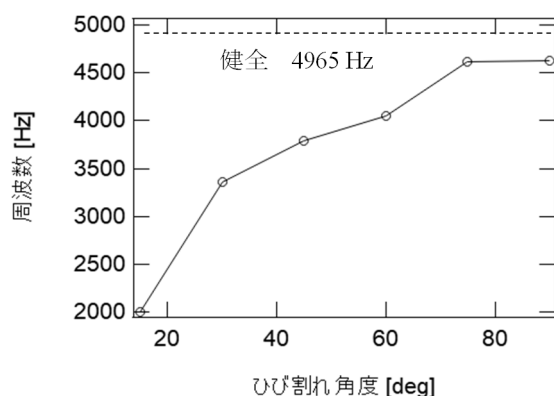


図-10 ひび割れ（斜め）モデルの中央部の周波数

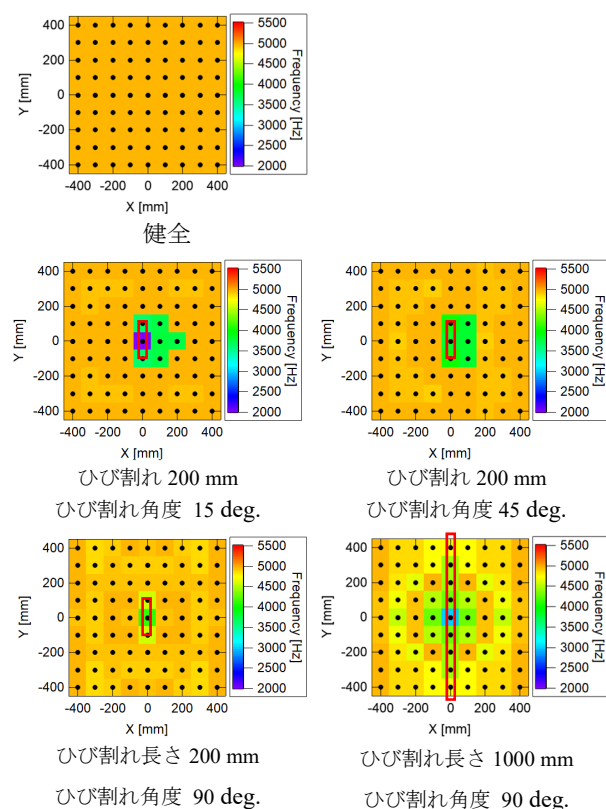


図-11 面的評価結果（赤枠は表面ひび割れ位置）

5. AI を用いた大規模データベース化

5.1. AI の設計

コンクリート表面のデジタル打音検査結果からひび割れ形状を推定するためには、ひび割れ形状とコンクリート表面の複数箇所の振動特性の大規模なデータベースが必要となるが、FEM 解析にて様々な条件で実行することは、計算コストが大きい。したがって、コンクリートのひび割れ形状と FEM 解析で得られるデジタル打音検査による面的な評価結果の関係を機械学習した。

全結合ニューラルネットワークに対し、ひび割れ長さ、ひび割れ角度を入力層に、コンクリート表面で得られる面的な周波数を出力層にし、既往の研究⁸⁾を参考に FEM 解析結果を機械学習させた。機械学習モデルの概要を図-12 に、学習条件を表-5 に記す。

なお、表-3 のモデルのうち、ひび割れ長さ 400 mm で角度が 90°とひび割れ長さが 200 mm で角度が 60°のモデルは検証データとし、それ以外の結果を学習させた。

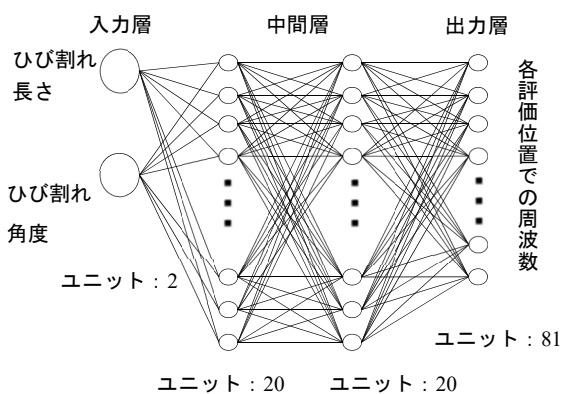


図-12 全結合ニューラルネットワークモデル

表-5 機械学習の学習条件

活性化関数	ReLU
最適化関数	Adam Learning rate=0.001 Beta1=0.9 Beta2=0.999 Decay=0
重みの初期化	Truncated normal distribution Mean=0.0 Standard deviation=0.05
損失関数	平均二乗誤差
Epoch	15000
入出力データの処理	標準化

5.2. 大規模データベース化

損失関数の推移を図-13 に示す。学習データの誤差と検証データの誤差は、概ねエポック数 2000 回程度まで急激に低減し、それ以降はそれぞれ漸減しており過学習となっていないことを確認した。

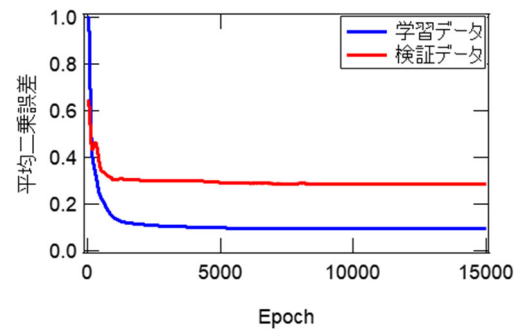
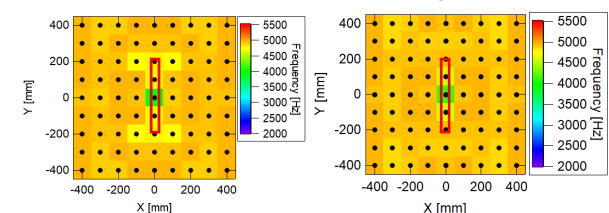


図-13 損失関数の推移

学習に用いていない検証データのコンター図と AI の推定結果のコンター図の比較を図-14 に示す。周波数低下量及びその広がり方は概ね一致しており、構築した AI が FEM 解析結果を再現可能であることが示された。

学習済みモデルにひび割れ長さおよびひび割れ角度を与えて周波数を予測した結果の例を図-15 に示す。このようにひび割れ長さと角度に関して包括的に確認することで、コンクリート表面とひび割れ角度都のなす角度が小さくなるほど、式(2)に示すたわみ振動が生じ、周波数は大幅に低下する傾向や、ひび割れ長さが長くなるにつれて、より広範囲で周波数が低下し、周波数の低下量も増大することがわかる。このようにひび割れ形状とデジタル打音検査で得られる周波数のマップの連続的なデータベースを構築することにより、ひび割れがデジタル打音検査に及ぼす影響を包括的に把握することが可能となり、本データベースを参照することでコンクリート表面の打音検査結果からひび割れ形状を推定することが可能となることがわかった。

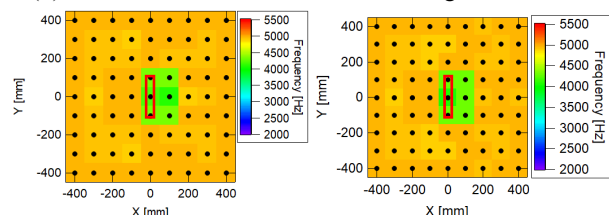
(i) ひび割れ長さ 400 mm, 角度 90 deg.の結果



AI の推定結果

実解析

(ii) ひび割れ長さ 200 mm, 角度 60 deg.の結果



AI の推定結果

実解析

図-14 検証データの AI 推定結果
(赤枠は表面ひび割れ位置)

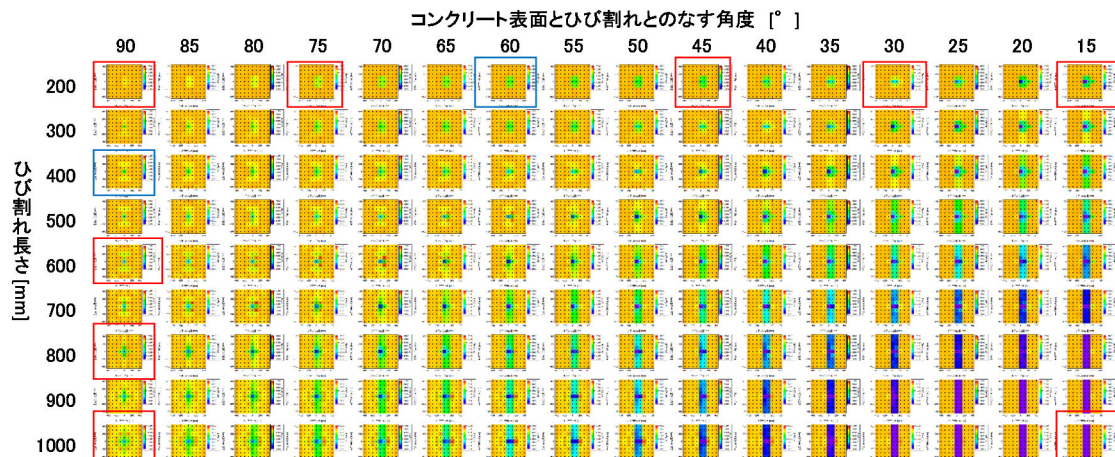


図-15 コンクリート表面のデジタル打音検査結果を学習したAIによる大規模データベース化例
赤枠は学習データ、青枠は検証データを示す

6. まとめ

本研究では、ひび割れの表面長さや深さ方向の角度に注目して、ひび割れ形状からコンクリート表面における振動特性を推定するAIを用いて、ひび割れ形状の推定に必要な、ひび割れ形状とデジタル打音検査の大規模データベースを構築した。今後の展開としては、ひび割れの深さや複数ひび割れ等の影響を取り入れ、ひび割れ形状推定の高精度化及び現場検証を進めていく計画である。以下、本研究で得られた知見を記す。

- 1) ひび割れを模擬した供試体を製作し、ひび割れによる周波数の低下を実験的に確認し、またその傾向を再現可能なFEM解析モデルを構築した。
- 2) 実構造物への適用を考慮し、寸法を大きくしたFEM解析モデルにて、ひび割れ長さ及び角度を変化させた場合の計算を実行し、ひび割れ長さ及び角度に伴う周波数変化の傾向を、コンクリート表面の複数点で総合的に評価することで、ひび割れ形状を定量的に評価しうる可能性を確認した。
- 3) FEM解析結果を機械学習させた、ひび割れ形状からコンクリート表面の複数点のデジタル打音検査結果を推定するAIを用いて、ひび割れ形状を連続的に変化した場合のデジタル打音検査結果の大規模データベースを構築した。
- 4) 構築したデータベースを参照することで、コンクリート表面の打音検査結果からひび割れ形状を推定可能であることが示された。

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知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) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp. 143-152, 1996.1
- 4) 津野究, 嶋本敬介: トンネル覆工打音調査時の振動特性を活用した剥落安全性評価に関する研究, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.75, No.1, pp. 26-38, 2019
- 5) 日本機械学会: 振動学, 一般社団法人 日本機械学会, p.70-78, 2005
- 6) 蒲原章裕, 川越健, 太田岳洋, 横山秀史, 石原朋和, 浦越拓野: 打音測定法の岩塊の安定性評価の検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.2, pp.108-118, 2015
- 7) American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, C1383-98a
- 8) J. Gu, Z. Wang, J. Kuen, L. Ma, A. Shahroudy, B. Shuai, T. Liu, X. Wang, G. Wang, J. Cai and T. Chen.: Recent advances in convolutional neural networks. Pattern Recognition. Vol. 77, pp. 354-377, May 2018