

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

(1) AI による順問題解析

A study on internal structure diagnosis of concrete structures incorporated with digital hammering inspection, AI and simulation technologies
(1) Direct problem analysis using AI

原子燃料工業	匂坂 充行	Mitsuyuki SAGISAKA	Member
原子燃料工業	松永 嵩	Takashi MATSUNAGA	Member
原子燃料工業	小川 良太	Ryota OGAWA	Member
原子燃料工業	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member
東京大学	吉村 忍	Shinobu YOSHIMURA	Member
東京大学	山田 知典	Tomonori YAMADA	Member

In the future social infrastructure diagnosis for concrete structures such as bridges, tunnels and buildings, it is expected that the digital hammering inspection, which is objective, quantitative, and recordable to the conventional hammering inspection, will play a significant role. However, since there are a wide variety of defects due to poor construction and age-related deteriorations in the concrete structures, they have not been quantitatively identified enough by the digital hammering inspection in terms of their scales (size, depth from the surface, etc.). Also, establishing the data base of defects and deteriorations by mockup testing is not practical. As an application of machine learning, an alternative model is proposed in this study that complements the experimental data of digital hammering inspections with the FEM analysis model and further expands the data by machine learning.

Keywords: Digital Hammering Inspection, Simulation, Machine Learning, Concrete Structure

1. はじめに

コンクリート構造物は、原子力を含む電力施設、社会インフラ施設等において主要な構造物であり、その構造物に要求される機能を供用期間にわたり維持する観点から、構造物に対する点検が行われている。例えば道路インフラのうち橋梁では、建設後 30 年を超える施設の割合が 50% を超え、その約半数には注意が必要な変状が発生しており長期的な健全性維持のため点検・補修等を行っている^[1]。また原子力発電所のコンクリート構造物では高経年化技術評価において構造安全性、遮蔽性に影響を及ぼす劣化要因について、定期的な点検を通じて長期健全性を評価している^[2]。

コンクリート構造物の一般的な点検手法として目視検査や打音点検が広く知られているが、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

ことが指摘されており^[3]、健全性を的確に把握するための点検のあり方の検討が喫緊の課題となっている。

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^[4]されているが、実構造物においては変状が多岐にわたるため、それら変状に対応する面的な打音検査時の振動現象の解明が望まれる。しかしながら、その解明には複数の固有振動モードの関係把握のための大規模データベース(DB)の構築が必要であり、構築には膨大なモックアップ試験を要するのが実情である。

そこで本研究では、FEM 解析によるシミュレーションにより実験結果を補完し、機械学習によりさらにデータを拡充する代替モデルを活用することで、デジタル打音検査によるコンクリートの内部構造診断に資する大規模 DB を短期間で構築することを目指す。これにより内在する欠陥のサイズと表面からの深さ等に対して、面的な打音検査を実施した場合に計測される振動現象を明確にする。そのことにより、個別の計測点における信号から健全性に係わる特徴的な指標を評価するだけではな

く、面方向と深さ方向に広がりがある内部欠陥に対する振動現象が解明され、結果として検査精度の向上に寄与することが期待される。同時に、モックアップ試験では製作が困難な複雑な形態の施工不良と変状に対してもシミュレーションとその機械学習により DB を構築することが可能となる。

本研究では、コンクリート構造物に多い変状として挙げられるコンクリートの内部空洞、ひび割れを対象として、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、欠陥の推定に必要な欠陥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 Fig.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 (Fig.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。

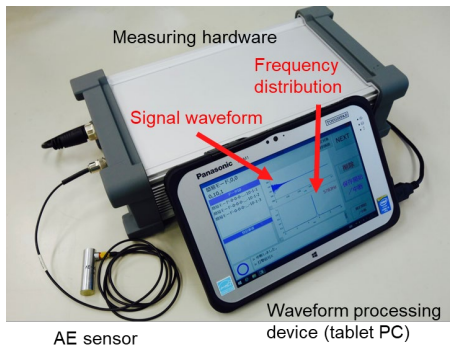


Fig. 1 AE digital hammering inspection system

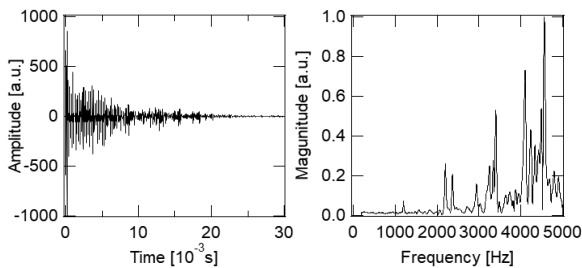


Fig. 2 Typical examples of frequency distributions of hammering inspection applied to concrete mockups.

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。内部空洞や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、得られる周波数は健全状態より変化する。

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

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

f : natural frequency.[Hz], E : Young's modulus[Pa]
 ρ : density[kg/m³], V : elastic wave velocity[m/s], D : thickness [m]
 a, b : rectangular defect size[m], h : thickness of spalling[m]
 ν : Poisson's ratio, m, n : Order of vibration mode

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における欠陥付与の概要図を Fig.3 に示す。また内部空洞、ひび割れを付与した供試体の製作条件を Table 1 および 2 に示す。

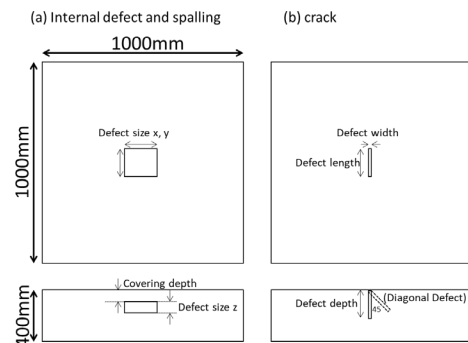


Fig. 3 conditions of concrete mock-ups (a) internal defect and spalling, (b) crack.

Table 1 Production conditions of concrete mock-ups for internal defect and spalling.

Mock-up No.	Defects	Defect size (mm)	Covering depth (): depth from back surface
1 (16)	Sound	-	-
2 (17)		-	100 (200)
3 (18)	Internal defects	100 x 100 x 100	50 (250)
4 (19)			20 (280)
5 (20)			150 (200)
6 (21)			50 (300)
7 (22)			20 (330)
8 (23)	Spalling	200 x 200 x 1	20
9 (24)		100 x 100 x 1	20
10 (25)		50 x 50 x 1 Note No.25: 50x50x50	20

Design compressive strength: 1-15 (36 N/mm²), 16-30 (18 N/mm²)

Table 2 Production conditions of concrete mock-ups for cracks.

Mock-up No.	Defects	Defect size (mm)
1	Sound	-
2	Crack	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 (inclined at 45 degrees)

Design compressive strength: 18 N/mm²

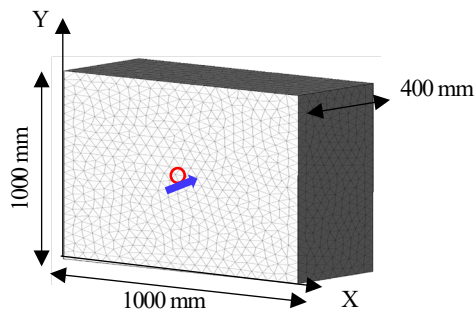
3.2 FEM 解析モデルの解析条件

FEM 解析には ADVENTURE Cluster を用い、妥当性確認用供試体と同様の欠陥（内部空洞及びひび割れ）の解析モデルを構築した。解析モデルを Fig.4 に示す。

解析条件については、先行研究⁵⁾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 Table 3 に示す通りとした。また、使用した広帯域 AE センサが速度に应答することから、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様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。

Table 3 FEM analysis conditions.

Mesh	Basic node spacing	50 mm and 200 mm
	Elements	Quadratic tetrahedral elements
Material parameters	Young's modulus	37GPa (Mock-up No.1-10 in Table1 and No.1-6 in Table2) 33GPa (Mock-up No.16-25 in Table1)
	Density	2400 kg/m ³
	Poisson's ratio	0.2
Hammering load	Load	100 N
	Waveform	Triangular wave
	Loading time	0.1 ms
Time related conditions	Analysis interval	4μs
	Max analysis time	10 ms
	Total steps	2500 step



Evaluated position (X, Y) = (500, 500) red circle
Load position (X, Y) = (550, 500) blue arrow

Fig. 4 Mesh model for FEM analysis

3.3 妥当性確認結果

健全コンクリート供試体 (No.1) における 1000 mm x 1000 mm の平面の中心位置の周波数分布に関して、実験と FEM 解析を比較した (Fig. 5)。実験と FEM 解析で周波数強度に差があるが、周波数ピーク位置は良い一致を示している。

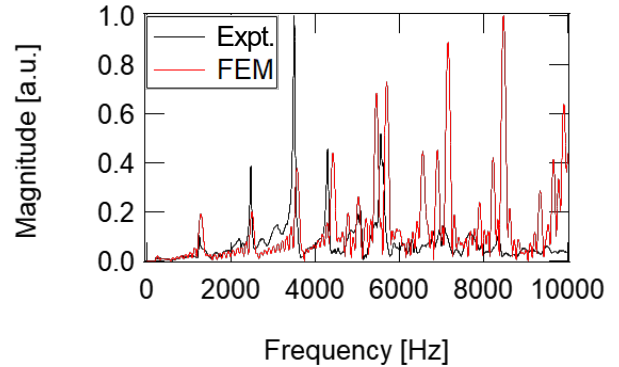


Fig. 5 Comparison of frequency distributions obtained by an experiment and FEM analysis for a sound mock-up.

供試体ごとに得られる供試体中央位置での周波数を Fig.6 に整理した。Fig. 6(a-1)には、内部空洞を模擬した供試体の縦波共振周波数を、Fig. 6(a-2)には剥離を模擬した供試体のたわみ振動周波数を示すが、モックアップ試験結果と FEM 解析結果は概ね良い一致を示している。

Fig.6(b)には、ひび割れを模擬した供試体の縦波共振周波数を示す。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 解析で概ね一致しており、縦波共振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。

4. 実構造物を考慮した FEM 解析モデル

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による固有振動ピークが支配的となる環境にある。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

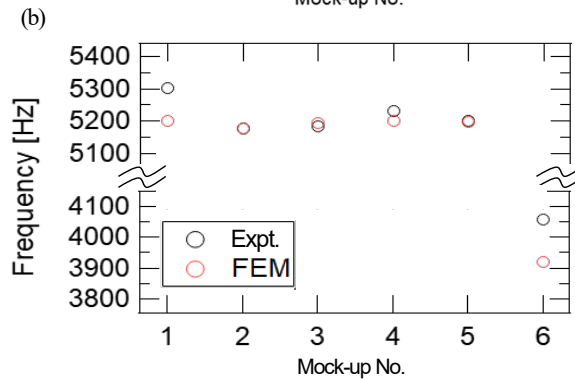
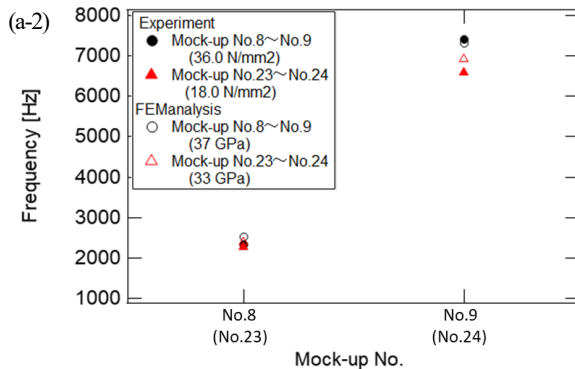
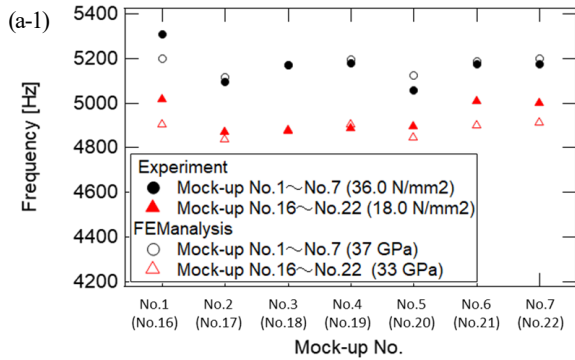


Fig. 6 Comparison of results obtained by mockup tests and FEM analysis.

(a) for internal defects and spalling
(a-1) longitudinal wave resonance
(a-2) flexural resonance

(b) for cracks, longitudinal wave resonance

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.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。

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。モデル外観図の例をFig.7に示す。解析モデルについては、欠陥がないモデル及び、内部欠陥、ひび割れ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。

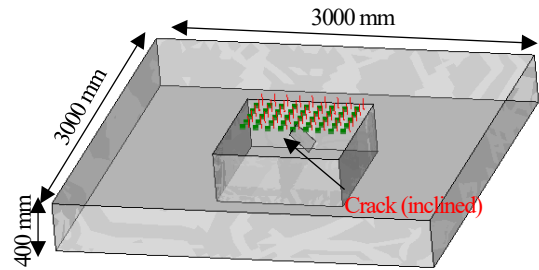


Fig. 7 An example of analysis model large-scale DB construction (crack).

4.2 計算結果（モデル中央部の周波数）

(a) 内部空洞及び剥離

空洞直上部の周波数変化をFig.8に示す。空洞サイズが200 x 200 x 100の場合、かぶり厚30 mm程度まではたわみ振動が支配的で、かぶり厚30 mm程度から徐々に縦波共振周波数が明確になり、かぶり厚50 mmで縦波共振周波数が得られる。空洞サイズが100 x 100 x 100の場合、かぶり厚15 mm程度まではたわみ振動が支配的で、かぶり厚20 mm以降は、縦波共振周波数が得られる。空洞サイズが50 x 50 x 100の場合、かぶり厚5 mmではたわみ振動が支配的で、かぶり厚10 mm以降は、縦波の共振周波数が得られる。

このように、空洞直上部1点であっても、空洞のサイズおよびかぶり厚に応じて、得られる周波数が非線形に複雑に変化しているため、機械学習による大規模DB化において学習データの選定が重要であることがわかる。

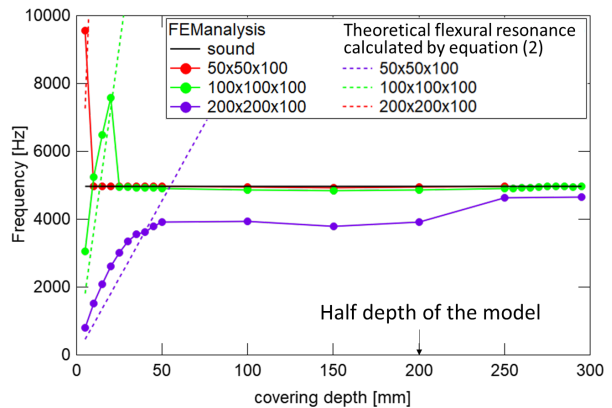


Fig. 8 Evaluation of vibration modes at the inspection center for sound and internal defect conditions as a function of covering depth of the defects.

(b) ひび割れ

モデル中央部における欠陥に伴う周波数変化を Fig.9 及び Fig.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。

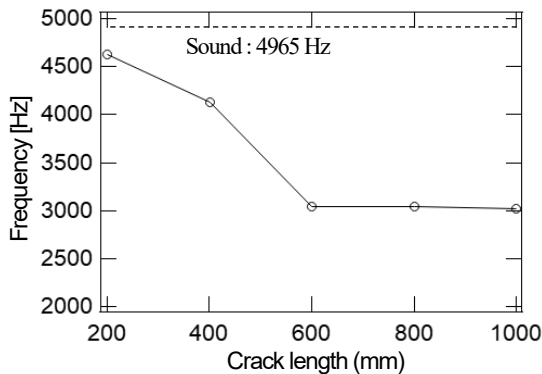


Fig. 9 Evaluation of longitudinal wave resonance peak frequency at the inspection center for crack conditions as a function of crack length.

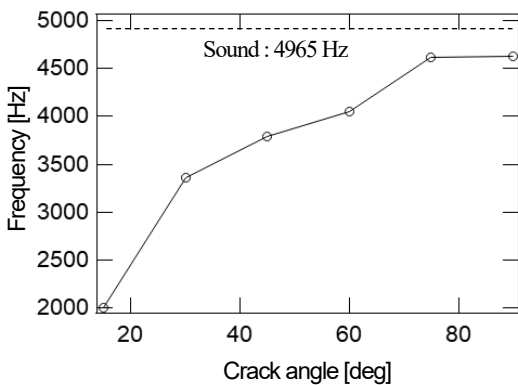


Fig. 10 Evaluation of longitudinal wave resonance peak frequency at the inspection center for crack conditions as a function of crack angle.

4.3 計算結果 (コンクリート表面での面的評価)

(a) 内部空洞及び剥離

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 Fig.11 に示す。

健全なモデルでは、4950 Hz 近傍の周波数が一様に広がっており (Fig. 11(a))、内部空洞の平面サイズが 100 mm x 100 mm、並びに 200 mm x 200 mm であるモデルでは、空洞直上部および周囲の固有周波数が低下しており、200 mm x 200 mm であるモデルがより低下を示していることがわかる (Fig.11(c),(d))。しかしながら、内部空洞の平面サイズが 50 mm x 50 mm のモデルでは、かぶり厚が 5mm の場合には中央において健全なモデルより高い固有周波数を示すが、かぶり厚が 150 mm の場合には他の内部空洞平面サイズの結果と比較して変化が少ないことがわかる (Fig. 11(b))。

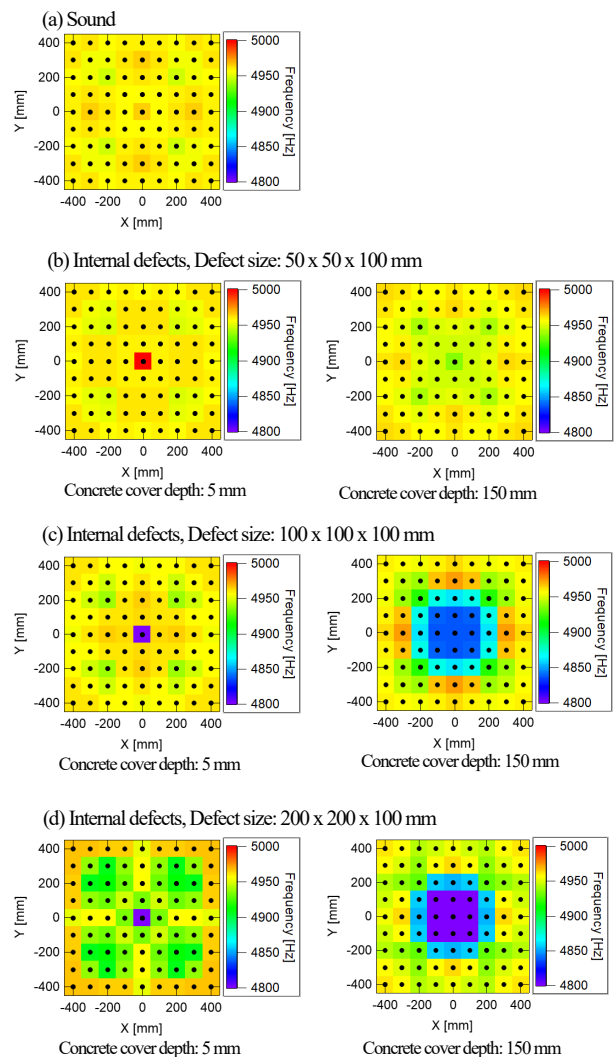


Fig. 11 Examples of planar evaluations obtained by FEM analysis for sound and internal defect conditions.

(b) ひび割れ

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 Fig.12 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わかる。

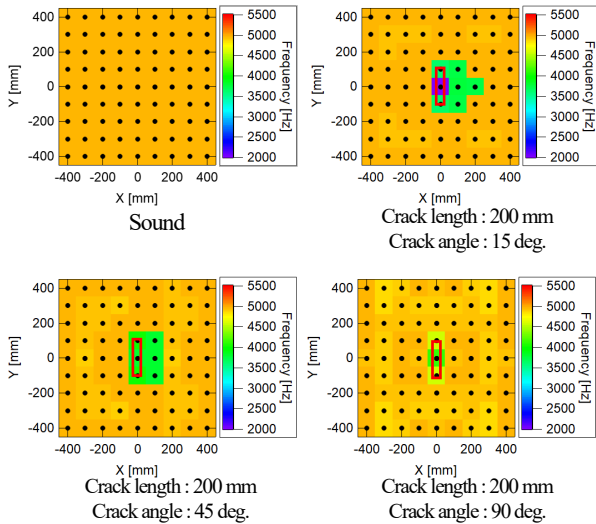


Fig. 12 Examples of planar evaluation obtained by FEM analysis for sound and crack conditions.

4. AI を用いた大規模 DB 化

4.1 AI モデルの設計

欠陥の形状や位置に応じて、得られる周波数が非線形に複雑に変化することを考慮し、コンクリートの欠陥形状と 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、内部空洞とひび割れのそれぞれについて、既往の研究(8)を参考に FEM 解析結果を機械学習させた。内部空洞については空洞長さとかぶり厚を、ひび割れについてはひび割れ長さとしひび割れ角度を、それぞれ入力層とした。出力層は、コンクリート表面で得られる面的な周波数とした。機械学習モデルの概要を Fig.13 に、学習条件を Table 4 に記す。

なお、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。

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 Fig.14 に示す。内部空洞、ひび割れに関する結果について、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。

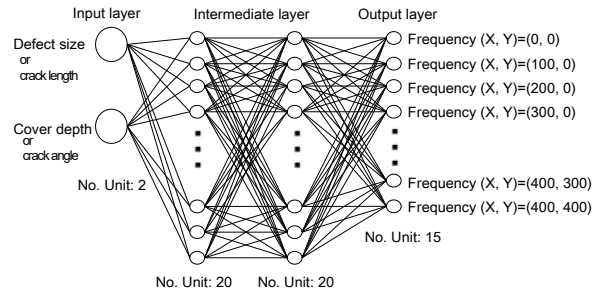


Fig. 13 Machine learning conditions for the planar evaluations of digital hammering inspections.

Table 4 Machine learning conditions.

Activation function	ReLU $f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases}$
Optimizer	Adam Learning rate=0.001 Beta1=0.9 Beta2=0.999 Decay=0
Weight initialize	Truncated normal distribution Mean=0.0 Standard deviation=0.05
Bias initialize	Zero
Loss function	Mean squared error
Epoch	15000
Regularize	L2, $\lambda=0.01$

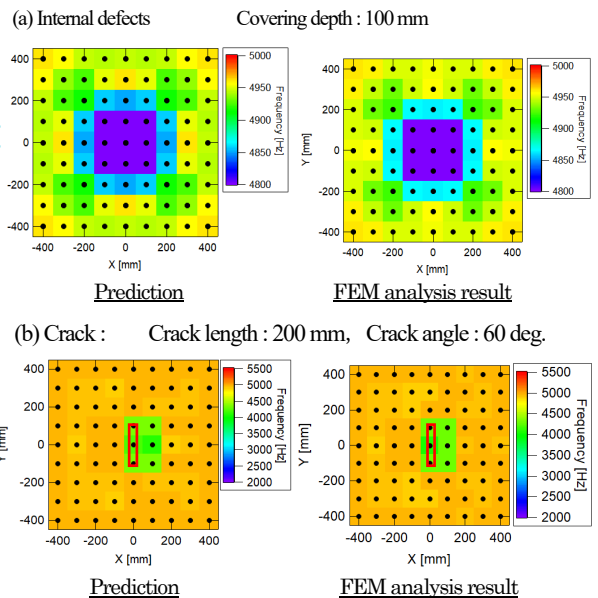


Fig. 14 Comparison of prediction by machine learning and actual FEM analysis results (Defect size 200x200x100).

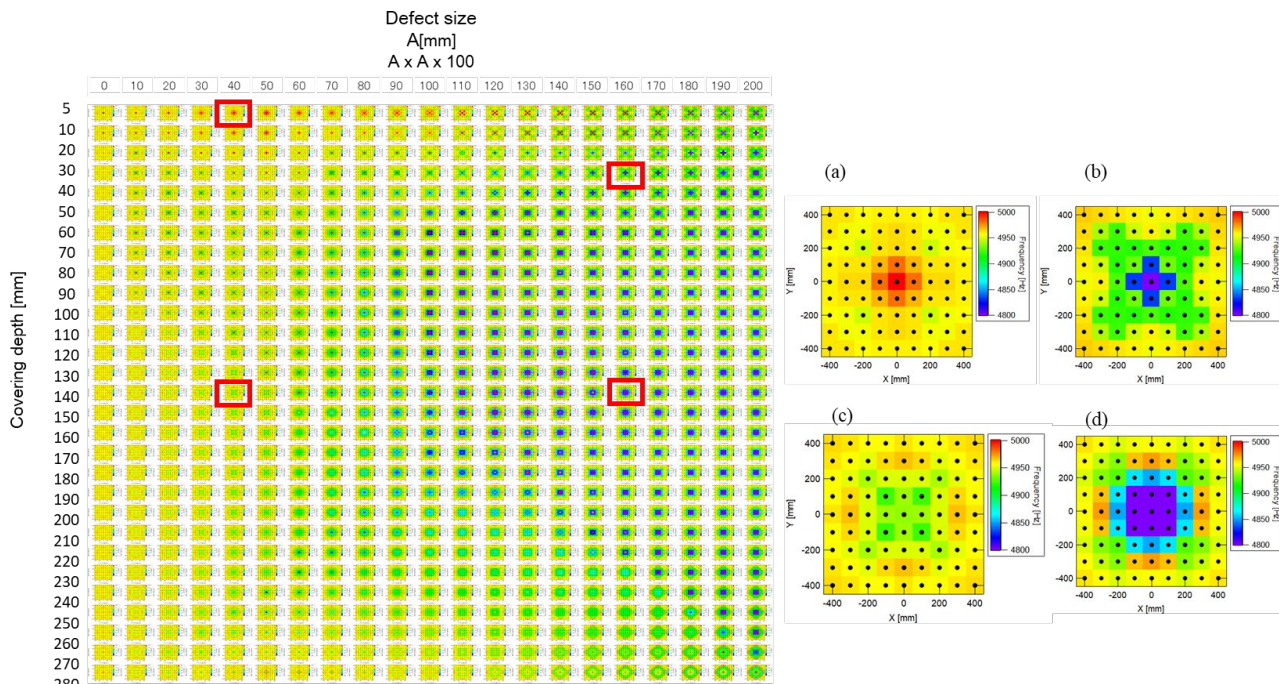


Fig. 15 An example of large-scale DB construction with internal defects through machine learning trained by FEM simulations.

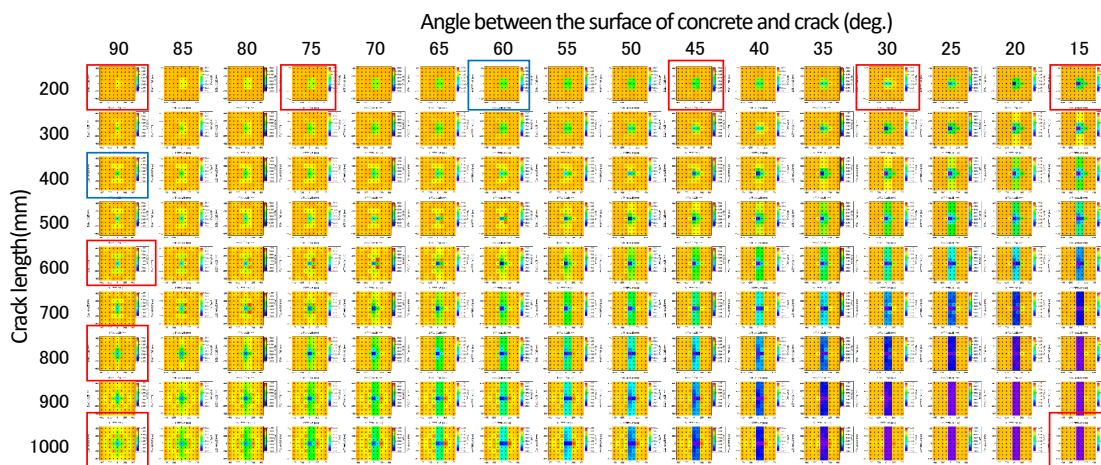


Fig. 16 An example of large-scale DB construction with cracks through machine learning trained by FEM simulations.

内部空洞に関する学習済みモデルについて、内部検査の高さを100mmとした学習済みモデルに空洞サイズおよびかぶり厚を与えて周波数を予測した結果の例を Fig. 15 に示す。内部空洞サイズの増加に伴いモデル中央部の周波数が低下する傾向が読み取れる。またひび割れに関する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 Fig.16 に示す。ひび割れ長さや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。

これらの例に示す通り、欠陥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、欠陥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ることがわかった。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの内部空洞、剥離の状態、ひび割れの表面長さや深さ方向の角度に注目して、欠陥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、欠陥形状の推定に必要な、欠陥形状とデジタル打音検査の大規模データベースを構築する手法を示した。以下、本研究で得られた知見を記す。

- 1) 欠陥を模擬した供試体を製作し、欠陥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、欠陥形状を変化させた場合の計算を実行し、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、欠陥の状態を定量的に評価する可能性を確認した。
- 3) FEM解析結果を機械学習させた、欠陥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、欠陥形状を連続的に変化させ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。

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] 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, 2015.
- [2] 島本龍, 森下友一郎, 北川高史, “コンクリート構造物の劣化影響評価について”, 日本原子力学会誌, Vol.61, No.2, 2019, pp.27-30.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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