

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04015

研究課題名(和文) 打音検査の打撃音を顕在化させる打撃法とモデル同定による欠陥形状推定法の確立

研究課題名(英文) Hammering method for apparent sounds in hammering sound test and estimation method for defect shapes with model identification

研究代表者

鞍谷 文保 (Kuratani, Fumiyasu)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：00294265

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：打音検査はコンクリート構造物の欠陥検査に広く用いられている。打撃法として回転式打撃法を採用し、最初に欠陥検出を容易にするために、欠陥部での打撃音を顕在化させる打撃条件について検討した。その結果、回転打撃部の押付ばねのばね定数と押付力に適正値が存在することが明らかになった。次に機械学習を用いて、打音データから自動的に欠陥部を検出する方法を検討した。入力データとして各打撃位置での打撃音周波数スペクトルを用いて打音データをグループ分けし、周波数スペクトルの平均オーバーオール値が最も小さいグループを除外することで欠陥部を同定する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で用いた回転式打撃法は、打音検査を効率化し、かつ打撃力のばらつきを低減できる。研究成果では、回転打撃部の押付ばねのばね定数と押付力を適正に設定することで欠陥部での打撃音を顕在化できることを明らかにした。また、機械学習を用いて各打撃位置での打音データをグループ分けし、その後、欠陥判別指標を用いて健全部に相当するグループを取り除くことで欠陥部を自動的に検出することが可能となった。これらは、コンクリート構造物の打音検査の高度化に大きく寄与する。

研究成果の概要(英文)：Hammering sound test is most commonly used for defect inspection of concrete structures. In this study, we use a rotary hammering method and investigate hammering conditions for making the hammering sounds apparent to easily detect the defects. The results show that appropriate values are essential for the spring constant of a spring for pressing the rotary part and the pressing force. We propose a method for automatically detecting defects based on machine learning. The frequency spectra of hammering sounds at the hammering locations are used as input data and they are partitioned into some groups. The group with the smallest average overall value of frequency spectra is removed, resulting in identification of the defective parts.

研究分野：機械力学，振動工学，モード解析

キーワード：打音検査 コンクリート 回転式打撃法 機械学習 周波数スペクトル オーバーオール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の一部に早期劣化が顕在化し、重大な事故につながる危険性が指摘されている。このような状況において、橋梁やトンネル等は定期的な点検が義務付けられた。検査には、コンクリート表面を点検ハンマで打撃したときに発生する打撃音から浮きやはく離などの欠陥の有無を判別する打音検査が広く用いられている。この方法は簡便で迅速に実施できるが、広範囲の検査には多くの時間を要す。また、点検ハンマによる打撃では打撃力のばらつきが大きく、それが打撃音の違いにつながる。さらに、健全部と欠陥部の打撃音の違いは検査員の主観によって判別されるので、結果にばらつきが生じる。そこで、効率的に打撃が可能で、検査員の主観に依らない欠陥検出が可能な打音検査技術が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、打音検査における打撃を効率化し、かつ打撃力のばらつきを低減する方法として回転式打撃法を採用する。欠陥検出を容易にするために、回転式打撃法において欠陥部の打撃音を顕在化する打撃条件を明らかにする。加えて、検査員の主観に依らず、打撃音から欠陥部を自動的に検出するために機械学習を導入する。機械学習に入力する打音データ、機械学習を用いた打音データの分類法、さらに分類された打音データから欠陥部を同定するための判別指標を明らかにする。

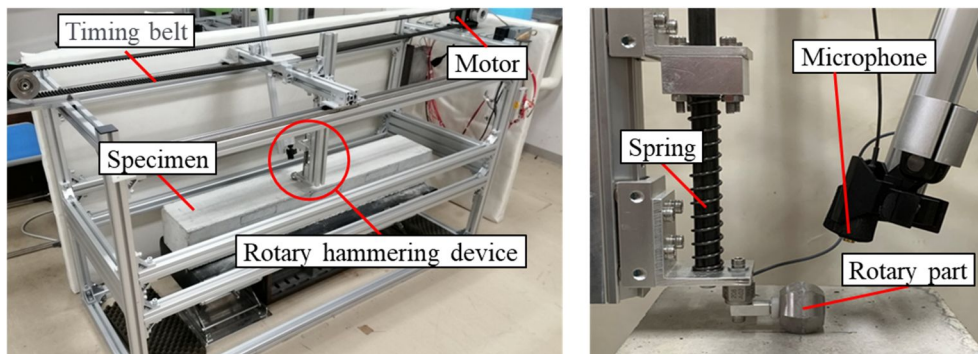
3. 研究の方法

(1) 回転式打撃法において欠陥部の打撃音を顕在化する打撃条件の明確化

図1に本研究で開発した回転式打音実験装置を、図2に3個の人工欠陥()を有するコンクリート試験体(断面図)を示す。回転式打撃法は、図1(b)中の六角形断面の金属製回転体をコンクリート表面に押し当てながら転がすことで、回転体の角部によりコンクリート表面を打撃する。この方法は、連続的に打撃位置を移動させることができるので打音検査の効率が大幅に向上し、さらにばねで回転体を一定の力で押し付けることで打撃力も安定する。押付力を付加するための押付ばねのばね定数と押付力を変えて、その適正値を調べる。

(2) 欠陥判別に適した判別指標と機械学習を用いた欠陥部の自動検出法の確立

機械学習法として自己組織化マップを採用する。打音実験で得られた各打撃位置での打音データを自己組織化マップでグループ分けし、そのグループをさらに健全部と欠陥部のデータに分けることで欠陥部を同定する。そのための自己組織化マップの入力データとして用いる打音データおよび健全部と欠陥部の判別に適した指標を検討する。



(a) 装置全体図

(b) 回転式打撃部

図1 回転式打音実験装置

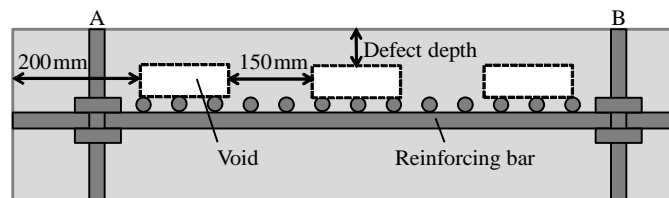


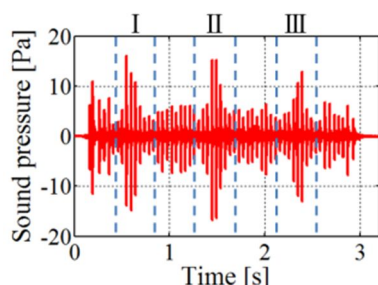
図2 コンクリート試験体

4. 研究成果

(1) 回転式打撃法において欠陥部の打撃音を顕在化する打撃条件の明確化

図3(a)に、図2のAからBの移動で測定された打撃音の時間波形を示す。横軸は時間で、縦軸は音圧である。約3秒間で55回の打撃が行われている。図中の破線は健全部と欠陥部の境界、は欠陥部を示す。押付ばねの適正なばね定数と押付力を評価する指標として、図3(b)の指標を提案した。この指標は、欠陥部()と健全部()における音圧のピーク値の平均値の比である。指標が大きいほど健全部と欠陥部の差が大きくなり、欠陥部

での打撃音が顕在化する．表 1 に押付ばねのばね定数と押付力の複数の組合せで得られた評価指標を示す．ばね定数 1.3N/mm と押付力 25N の組合せで指標が最も大きいことがわかる．したがって，押付ばねのばね定数と押付力には適正値が存在する．



$$E = \frac{p_d}{p_h}$$

p_d : 欠陥部音圧ピーク値の平均値

p_h : 健全部音圧ピーク値の平均値

(a) 打撃音時間波形 (b) 評価指標

図 3 ばね定数と押付力の評価指標

表 1 ばね定数と押付力の評価指標値

		Pressing force		
		20 N	25 N	30 N
Spring constant	0.66 N/mm	0.86	0.91	0.96
	0.98 N/mm	0.82	0.97	0.94
	1.3 N/mm	0.94	1.00	0.93
	2.9 N/mm	0.80	0.94	0.90

(2) 欠陥判別に適した判別指標と機械学習を用いた欠陥部の自動検出法の確立

打音実験結果

図 4 に欠陥深さ 10mm, 20 mm, 30 mm の試験体において，図 2 の A から B の移動で測定された打撃音の時間波形を示す．すべての欠陥深さで，健全部を打撃したときの音圧に比べて欠陥部(, ,)を打撃したときの音圧が高くなっている．また，欠陥深さが深くなるほど欠陥部での音圧が低くなり，健全部との差が小さくなっている．

図 5 に各欠陥深さの欠陥部における代表的な一打撃の打撃音時間波形のフーリエ変換で得られた周波数スペクトルを示す．横軸は周波数で 縦軸は音圧である．欠陥深さ 10mm では 3.7kHz 付近，20mm では 4.7kHz 付近，30mm では 5.5kHz 付近にピークが見られ，欠陥深さが深くなるほどピーク周波数が高周波側に移動する傾向にある．なお，健全部の打撃においては顕著なピークは見られない．

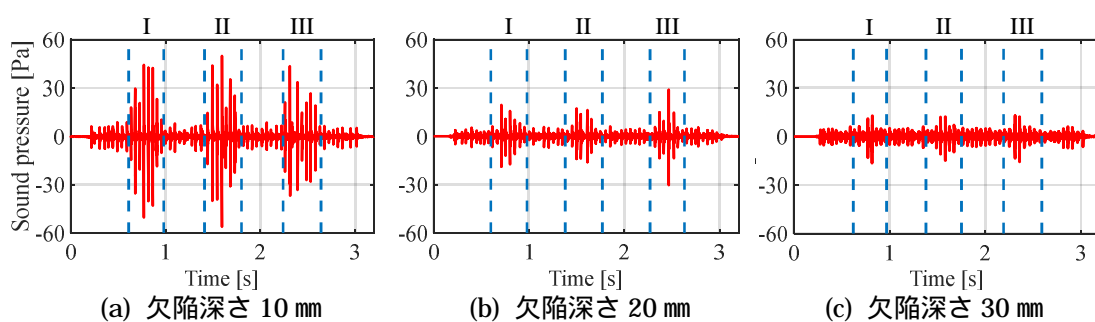


図 4 欠陥深さによる打撃音時間波形の違い

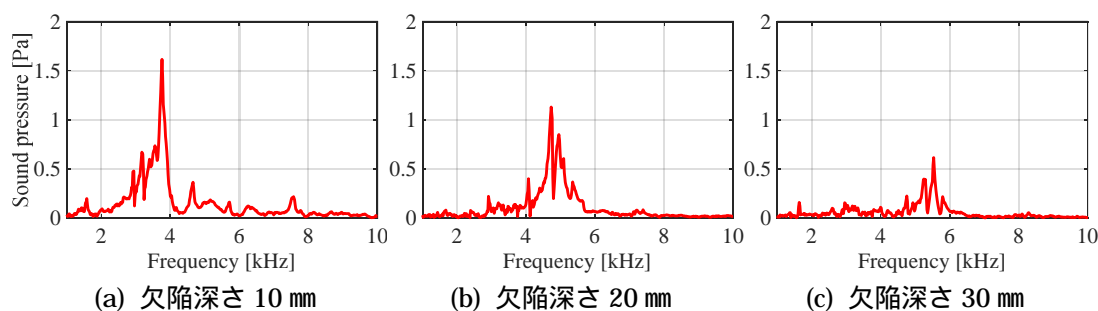


図 5 欠陥深さによる打撃音周波数スペクトルの違い

欠陥判別指標

図 6 に欠陥判別指標の比較を示す．(a)は図 4 の打撃音時間波形の 55 箇所の各打撃位置での最大振幅値，(b)は図 5 のような周波数スペクトルから算出した各打撃位置でのオーバーオール

値（スペクトルの総和で、打撃音のエネルギーに相当）を示す。横軸は打撃番号（打撃位置）である。両図とも欠陥部（I, II, III）の値が健全部と比べて大きな値になっているが、オーバーオール値では健全部での値が小さく、変動も小さい。その結果、欠陥部と健全部との判別が容易になる。したがって、欠陥判別指標としてオーバーオール値がより適切である。

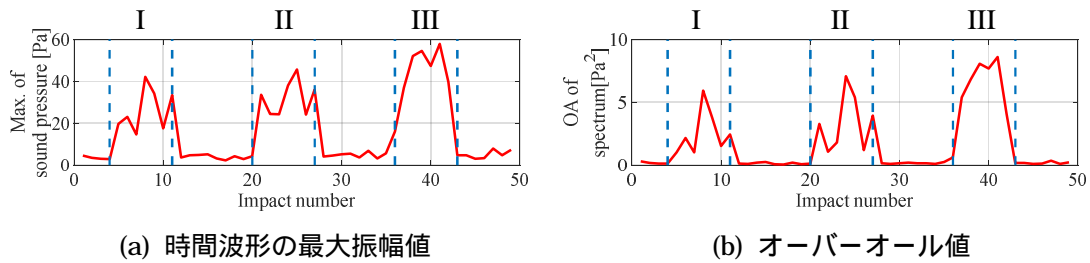


図 6 欠陥判別指標の比較（欠陥深さ 10 mm の場合）

機械学習を用いた欠陥検出

自己組織化マップの入力データとして、図 4 の打撃音時間波形、図 5 の周波数スペクトル、図 6(b) のオーバーオール値を用いて打音データを分類したところ、周波数スペクトルが入力データとして最も適していることがわかった。55 箇所の打撃位置で得られた周波数スペクトルを入力データとして機械学習を実行すると、55 個のデータが図 7 のように特徴が似ているグループに分けられる。各グループに含まれる打音データのオーバーオール値の平均値を求め、平均値が小さい順に並び変えると図 8 が得られる。横軸は打撃番号（打撃位置）で、縦軸は並び替え後のグループ（ユニット）番号である。平均オーバーオール値が最も小さいグループに含まれる打撃位置は健全部と見なせるので取り除くと、図 9 が得られる。すべての欠陥深さで欠陥部のデータのみが残り、欠陥部が同定できている。

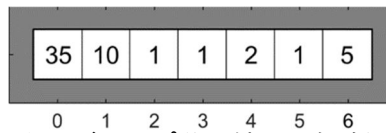


図 7 打音データのグループ分け結果（欠陥深さ 10 mm の場合）

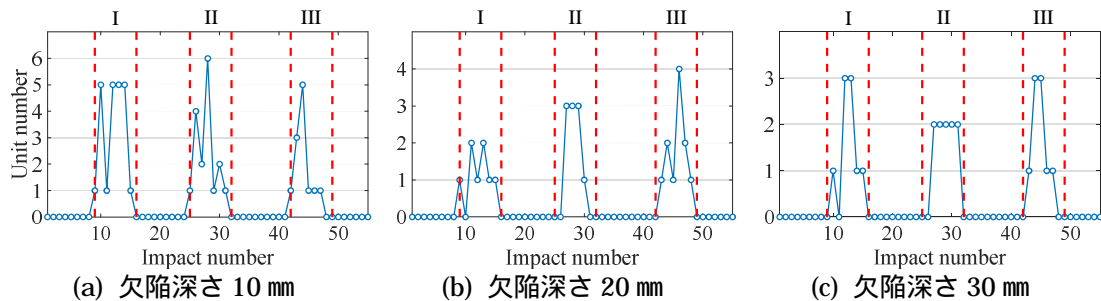


図 8 グループ（ユニット）に含まれる打撃位置

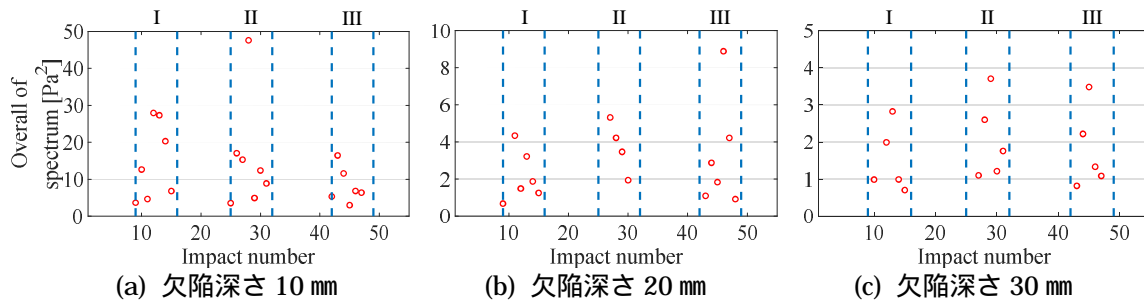


図 9 機械学習による欠陥検出結果

今後の展望

回転式打撃法において、回転打撃部の押付ばねのばね定数と押付力を適正に設定することで欠陥部での打撃音を顕在化できることがわかった。しかし、その理由が不明なので理論的に解明し、設定法を確立する必要がある。また、欠陥の平面形状は推定可能だが深さ方向の欠陥位置の推定は困難なので、機械学習と振動工学さらにモデル同定技術を組み合わせた欠陥深さ推定法を確立する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y.Hasebe, F.Kuratani, T.Yoshida, T.Morikawa	4. 巻 Vol.2 Chapter 28
2. 論文標題 An Effective Indicator for Defect Detection in Concrete Structures by Rotary Hammering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vibration Engineering for a Sustainable Future	6. 最初と最後の頁 211 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-48153-7_28	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N.Matsui, F.Kuratani, T.Yoshida, Y.Hasebe	4. 巻 -
2. 論文標題 An automatic detection method for concrete defects based on self-organizing map for rotary hammering test	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020)	6. 最初と最後の頁 Paper No.10054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長谷部友弥, 鞍谷文保, 吉田達哉, 森川大河	4. 巻 -
2. 論文標題 回転式打撃法を用いたコンクリートの打音検査と欠陥評価指標	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本設計工学会北陸支部令和元年度研究発表講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 Paper No.105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 森川大河, 吉見真, 鞍谷文保, 吉田達哉	4. 巻 -
2. 論文標題 コンクリート欠陥検知におけるインパクト打撃法と回転式打撃法の比較	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会北陸信越支部第56期総会・講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 Paper No.J021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 森川大河, 鞍谷文保, 吉田達哉, 吉見真	4. 巻 -
2. 論文標題 コンクリートの欠陥検知に適した回転式打撃条件の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2018 講演論文集	6. 最初と最後の頁 Paper No.605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 N.Matsui, F.Kuratani, T.Yoshida, Y.Hasebe
2. 発表標題 An automatic detection method for concrete defects based on self-organizing map for rotary hammering test
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Hasebe, F. Kuratani, T. Yoshida, T. Morikawa
2. 発表標題 An efficient indicator for defect detection in concrete structures by rotary hammering
3. 学会等名 The 18th Asia-Pacific Vibration Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷部友弥, 鞍谷文保, 吉田達哉, 森川大河
2. 発表標題 回転式打撃法を用いたコンクリートの打音検査と欠陥評価指標
3. 学会等名 日本設計工学会北陸支部令和元年度研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川大河, 吉見真, 鞍谷文保, 吉田達哉
2. 発表標題 コンクリート欠陥検知におけるインパクト打撃法と回転式打撃法の比較
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川大河, 鞍谷文保, 吉田達哉, 吉見真
2. 発表標題 コンクリートの欠陥検知に適した回転式打撃条件の検討
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 構造物の打音検査装置及び打音検査方法	発明者 鞍谷文保	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-177014	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	吉田 達哉 (Yoshida Tatsuya) (20734544)	福井大学・学術研究院工学系部門・准教授 (13401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------