

RC 外壁診断における打音検査判定結果の相違 と新技術による高度化に関する研究

関 和彦¹・岩佐 宏一²・堤 洋樹³

¹正会員 アイセイ株式会社 技術開発部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2 丁目 40 番 3 号)
E-mail: seki-k@eyesay.co.jp (Corresponding Autor)

²正会員 アイセイ株式会社 代表取締役 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2 丁目 40 番 3 号)
E-mail: iwasa-k@eyesay.co.jp

³非会員 前橋工科大学 准教授 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番 1 号)
E-mail: tutumi@maebashi-it.ac.jp

今後の人口減少、少子高齢化により、労働人口の減少は熟練を有するインフラ点検技術者の不足を招くことは必至である。さらに点検技術者の減少と反比例して構造物の老朽化が加速している。限られた予算、技術者で効率的に最適な維持管理を進めるためには、構造物の状態を把握する基盤となる点検・調査データの品質向上および定量化は重要な課題である。

社会インフラ診断技術として従来から打音検査は広く利用されているが、打音検査の手法および判定は点検員の主観と経験に基づいている。本研究では点検員の経験や技術に左右されずに正確に損傷箇所の抽出が可能な技術開発を目的とし、打音検査の実証実験を行い得られた判定結果を検査実施者の年代や経験年数ごとに分類、整理した。これによって、新技術への適応可能性について課題を整理した。

Key Words: *Hammering Inspection, maintenance, Heat Map, SfM(Structure from Motion), MVS(Multi View Stereo)*

1. はじめに

(1) 背景

建築基準法第 12 条の「定期報告制度」における外壁の定期的な調査では、2008 年の法改正により、落下により歩行者等の第三者に危害を加える恐れのある箇所については、原則として竣工後 10 年ごとに全面打診等による調査を実施することとなった。全面打診をする場合は仮設足場等を設置する必要があるため、費用的な問題や時間的な制約などから調査を実施しないことも少なくない¹⁾。

今後、国内社会インフラ構造物の老朽化が急速に進む中²⁾で、従来の打音検査を高度化するための研究が実施されている。しかし、コンクリート構造物の施工不良や変状は多岐にわたっているため、打音検査時の点検技術者の判定結果と実構造物の振動現象の関係性は明確にはなっていない。そのため、模擬供試体を用いて実証実験を行い解明することを多くの研究者が実施している³⁾⁴⁾が、模擬供試体の製作費用および実験に多くの労力を要

している。そのような苦労のもと検証を実施しても模擬供試体が様々な架設環境や設計、製作情報のもと施工された実構造物に適用することが難しい状況となっている。

(2) 研究目的

そこで本研究では、広く活用されている現状の打音検査の持っている判定結果のばらつきを実証実験を用いて整理する。その上で、その技術の高度化、定量化を検討することを目的として、従来点検技術の打音検査による判定結果について、実証実験を行う。

実証実験の結果をふまえて、技術の高度化および定量化するための課題を整理することで、新技術の適用可能性を検証する。

(3) 研究の実施手順

本研究の実施手順を以下に示す。RC 構造の民間集合住宅において、実証実験を行い。打音検査の判定結果について、検査実施者の検査時間や年齢および業務経験年数などに着目して考察を行う。その結果をふまえて打音

検査の定量化や高度化をはかる技術として、外壁面を3次元計測を実施して不陸をもとめる手法について適応可能性について、検証を行う。

2. 実施概要

(1) 対象構造物および対象の外壁

a) 民間集合住宅

実証実験では、都内にある民間集合住宅にて、検査実施者総勢18名で実施した。対象建物は、築年月1977年11月のRC構造地上9階建てを選定した。対象建物の外観写真を図-1に示す。

b) 検査対象

対象箇所はタイル外壁となっている2箇所を選定して実施した。検査対象を図-2に示す。この建物は、今年度、大規模修繕工事が予定されているため実証実験で得られた判定結果について、修繕工事を実施した結果を確認することで妥当性を検証することを計画している。

(2) 検査方法

a) 打音検査

本館および別館にて、1m四方の範囲（タイル100枚程度のエリア）において打音検査を実施した。検査実施者は打診棒を用いて外壁を検査し、うきなどの異常を確認したところに、チョークでマークをつけるように実施し、検査開始から終了までの時間をそれぞれ計測を行い。検査後のチョークでマーキングしたあとの写真を撮影して記録をとった。検査作業終了後に、実施者にそれぞれヒアリングを実施することもあわせて実施した。検査を



図-1 実証実験対象建物



(左) 本館 (右) 別館

図-2 検査対象のタイル外壁

実施している状況は、他の実施者には、見ることがないようにして実施し、マーキングした結果は検査後にウエスで拭き取り、次の実施者が前の実施者の判定結果がわからないように注意して実施した。別館の作業状況写真を図-3に示す。また、検査結果の記録写真を図-4に示す。

この打音検査を、18名で実施し判定結果の傾向を分析するために、年代および実務経験年数（レベル）が異なるように選任した。実施者について表-1に示す。

年代については、音の違いを聞き分ける検査手法であ

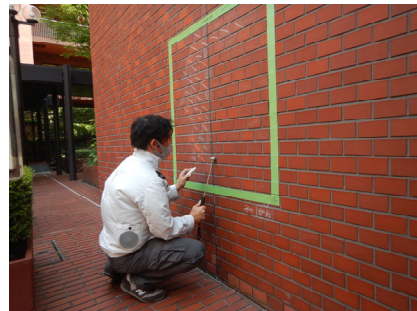


図-3 作業状況写真（別館：実施者C）



図-4 検査終了後のマーキング状況写真（別館：実施者C）

表-1 打音検査実施者と所属、年代、経験年数

No	所属	年代	経験年数 (レベル)
A	点検調査会社	40代	熟練者
B	点検調査会社	40代	熟練者
C	点検調査会社	30代	熟練者
D	点検調査会社	30代	熟練者
E	点検調査会社	40代	中級者
F	教員	40代	中級者
G	点検調査会社	30代	中級者
H	点検調査会社	30代	中級者
I	点検調査会社	30代	中級者
J	点検調査会社	20代	中級者
K	点検調査会社	40代	初級者
L	教員	30代	初級者
M	点検調査会社	30代	初級者
N	点検調査会社	20代	初級者
O	点検調査会社	20代	初級者
P	点検調査会社	20代	初級者
Q	学生	20代	初級者
R	学生	20代	初級者

り、人の聴力は加齢に伴い低下することが言われているため20代から40代までを10歳ごとで区切り分類することとした。次に経験年数は、熟練者は実務経験を5年以上とした。また中級者は、実務経験が5年未満で打音検査業務の実務経験あることとした。初級者は、打音検査の実務経験がないものとした。ただし、初級者に関しては検査実施前に熟練者より簡単な実施方法および清音部と濁音部の音の違いなどの講習を実施してから検査を開始した。

b) 差分解析による外壁面の不陸調査

外壁面の不陸を3次元点群データを取得して基準面との不陸状況を解析的に検証をした。計測には、カメラと地上設置型レーザスキャナ（Terrestrial Laser Scanner：以下、TLS と言う）およびワイヤレスハンドヘルドスキャナ（Wireless Handheld Scanner：以下、WHS と言う）を用いる。カメラで撮影した画像あるいは動画を用いる場合は、一定間隔で画像を切り出し、画像から形状を復元する SfM/MVS（Structure from Motion/ Multi View Stereo）処理を行い3次元点群データを生成する。

(3) 検査機器

打音検査では、回転打音器を用いて実施した。また、差分解析による外壁面の不陸調査では、カメラ2機種と TLS および WHS を表-2 に使用した機器を示す。検査機器の写真を図-5 に示す。

(4) 評価方法

全実施者による判定結果において、うきと判定したタイル枚数をヒストグラムで表し（図-6）、全体から大きく枚数が少ない実施者2名の結果は、全体の考察からは除外することとした。残りの16名分の判定結果についてうきと判定した結果を図-7 に示すように Microsoft Excel にて整理をした。次に判定結果のばらつきや傾向を分析、整理するために、基準となるデータを熟練者4名（A～D）の結果に関して4名中3名がうきと判定した箇所をリファレンス情報とすることとした。リファレンス情報は、工学的に明確にうきと判断したところにすべきであるが、明確に判断するための手段がとれなかったためである。本館、別館の判定結果を図-8,9 に示す。

このリファレンスに対して、実施者ごとにF値を算出して整理をした。リファレンスと一致した箇所の中でうきと判定した箇所の一致枚数：TP を黒で表し、健全と判定している一致枚数：TN を白で表している。また、リファレンスと一致しなかった箇所でもリファレンスがうきと判定したが比較する実施者がうきと判定しなかった見落としに該当する箇所の枚数：FN を赤で表し、リファレンスが健全としている箇所に対してうきと判定している過検出に該当する箇所の枚数：FP を青で表示して

表-2 検査機器

No	名称	型番	用途
①	回転打音器	Dr コロリン	打音検査
②	カメラ	GoPro Hero7	差分解析 (SfM/MVS)
③	スマートフォン	iPhone 12 Pro	差分解析 (SfM/MVS)
④	TLS	Focus 3D S350	差分解析
⑤	WHS	Artec LEO	差分解析



①回転打音器[Drコロリン]



②アクションカメラ[GoPro Hero7]



③スマートフォン[iPhone 12 Pro]



④TLS[Focus 3D S350]



⑤WHS[Artec LEO]

図-5 検査機器

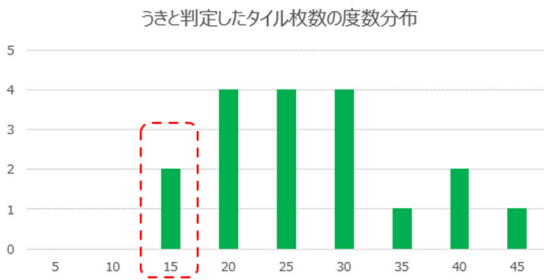


図-6 全実施者のうき判定枚数の分布 (本館)

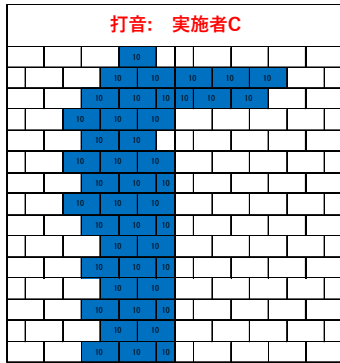


図-7 実施者Cのうき判定箇所 (別館)

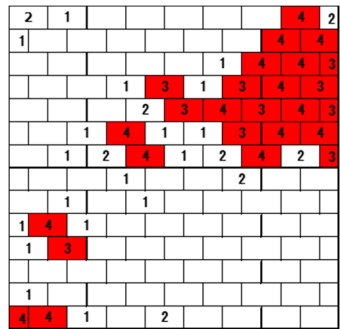


図-8 熟練者がうきと判定した箇所 (本館)

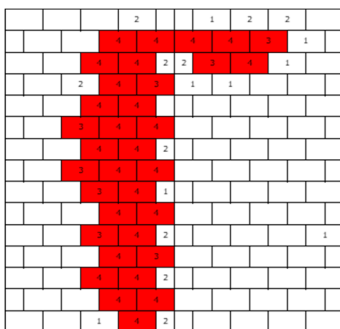


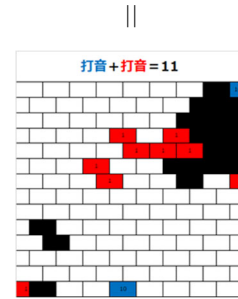
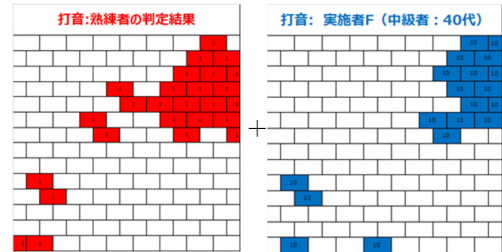
図-9 熟練者がうきと判定した箇所 (別館)

整理した。この関係を表にまとめたものが図-10である。本研究では、打音検査実施者が打音と判定した箇所を評価する指標として F 値を用いる。F 値の算出方法を式(1)に示す。実施者 F の本館における判定結果に関し算出した F 値および各値を図-11に示す。

		予測値 (実施者)	
		YES (うき)	NO (健全)
リアレンス 正解値	YES (うき)	TP: True Positive	FN: False Negative
	NO (健全)	FP: False Positive	TN: True Negative

図-10 TP, FN, FP, TN の関係

$$F \text{ 値}(\%) = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \times 100 \quad (1)$$



TP	FP	FN	TN
17	2	9	98
F 値			
75.6%			

図-11 実施者FのF値算出 (本館)

3. 打音検査に関する実験結果とその考察

はじめに、図-12に計測時間と F 値の関係を示す。本館では、計測時間は最短で1分未満から最長で3分未満という結果となり平均で2分程度となった。別館については、本館より平均値で20秒ほど長くなった。本館、別館のいずれも計測時間の長短による F 値の傾向はあまり見られなかった。別館のほうが計測時間が長くなった理由として、作業終了後のヒアリングで別館の方が判定が難しいという実施者が多かった。音による違いが判別しづらいため、入念に検査作業をして判定をしようとしたためだと考えられる。また、年代別、経験年数別に傾向をみたがいずれも傾向は特に見られなかった。

次に、経験年数と F 値の関係を図-13に示す。本館、別館とも熟練者が初級者と比べて8%~10%高い結果となった。初級者と中級者に関しては大きな差が見られない結果となった。事前に簡易な作業方法を説明することで中級者と同等の判定結果に近づけられる手法と言える。

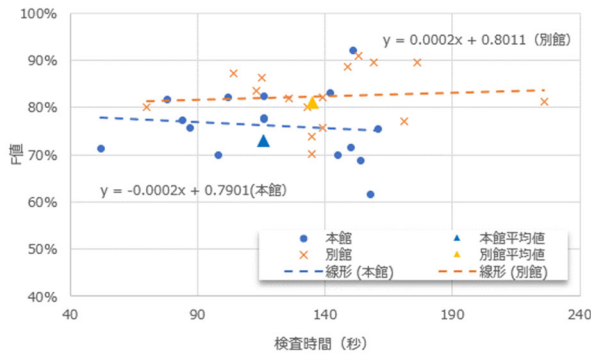


図-12 検査時間とF値の関係

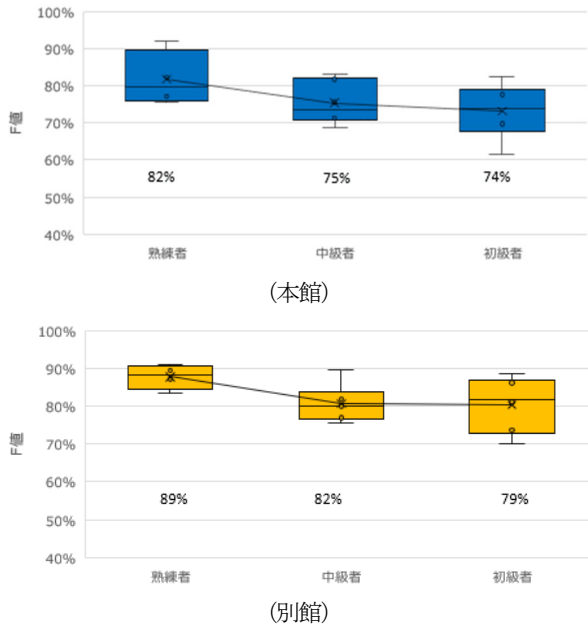


図-13 経験年数とF値の関係

図-14 に、16名の検査実施者による判定結果を実施者のレベル（経験年数）、年代、F値（緑色のデータバー）および判定した箇所をTP、FN、FP、TNにより色分けをした図で整理した。

初級者は、中級者と熟練者に比べて見落としに該当する赤い箇所が多く見られる傾向となった。別館は先に述べたように判定が本館よりも難しいと答えた熟練者が多かったため、経験年の少ない初級者は微妙な音の違いが判別できていないと考えられる。中級者の6名はばらつきが少ないが、30代以下は過検出に該当する青い箇所が多く見られた。熟練者の4名では30代に過検出が見られた。逆に40代は見落としに該当する箇所が数枚見られた。

このように、熟練者は90%近いF値が出ているのは、もちろんのことであるが、初級者と中級者も70%以上のF値が出ていることから、簡易な方法で、広く活用できる手法であることが確認された。一方、確定的な判断が難しい点もあるため、安全側でうきと判定する場面もあることが、ヒアリング結果でわかった。このような経験知

が判定結果にいかされている点を、新技術で補助することで、計測時間の短縮、補修補強工事費の削減につなげられると考える。

4. 差分解析結果を用いた従来点検技術の高度化に関する適応可能性について

ここでは、前章で説明した新技術による打音検査の補助について、検討した結果を報告する。

表-2に示した機器で、3次元点群データを取得し、点群処理をすることによって、外壁面の不陸をヒートマップで表示した。そのヒートマップと、打音検査結果で用いたリファレンスデータと比較し、同様にF値で検証を行った。図-15に検査機器ごとに作成したヒートマップを示す。健全と判定した箇所を3点選択してリファレンス平面を作成し、その面と偏差をヒートマップ表示した。今回の結果では、最大で4.97mm、最小で-3.73mmとなった。WHSの結果以外は、同様の傾向を表している。ヒートマップ作成には、点群の位置合わせや基準面の作成などの設定の違いにより、表現されるヒートマップの傾向が変わることがわかっている。そのため、このことを整理することで、この違いは少なくなると考えている。

図-16に打音検査結果のリファレンスデータとヒートマップの情報とを、同様にF値を算出した。いずれも過検出領域が大きくあらわれる結果となり、F値は40%台にとどまった。差分解析では、非常に微小な値の差が表現されているため、点検技術者が聞き分けている音や打診棒からの振動の違い以上のものを表していることが考えられる。またヒートマップ作成するときの閾値設定によっても、F値は左右される。点検技術者が判断しているうきの境界と不陸の閾値について、検証をする必要がある。このことを明らかにすることで、定性的に判断していた打音検査に対して、定量的な裏付けや記録性が実現できる可能性があると考えられる。今回、点検技術者が外壁の打音検査を実施するときに、外壁面に生じている不陸などを1つの手がかりにして、うきやはく離などの変状を疑い打音検査を実施するというのをうけて不陸とうきやはく離の関連性が見いだせないかを検証した。今回の検証結果では、それらの関連性は見つけられなかったが、不陸のある箇所に対して、うきやはく離が打音検査の判定に影響をあたえるのかどうかについて、検証をする必要があることがわかった。また、不陸だけではなくうきやはく離から生じるひびわれなどの変状をヒートマップで捉えられればうきやはく離箇所の特定を支援する技術として有効であるという意見が熟練者にあった。

レベル	初級者		初級者		初級者		初級者	
年代	20代		20代		20代		30代	
リファレンス 熟練者がつきと判定した箇所	F値： 82.2%		F値： 86.2%		F値： 88.6%		F値： 70.2%	

(初級者)

レベル	中級者		中級者		中級者		中級者	
年代	20代		30代		30代		40代	
リファレンス 熟練者がつきと判定した箇所	F値： 80.0%		F値： 89.5%		F値： 75.6%		F値： 77.0%	

(中級者)

レベル	熟練者		熟練者	
年代	30代		40代	
リファレンス 熟練者がつきと判定した箇所	F値： 87.2%		F値： 89.5%	

(熟練者)

図-14 実施者ごとの判定結果およびF値 (別館)

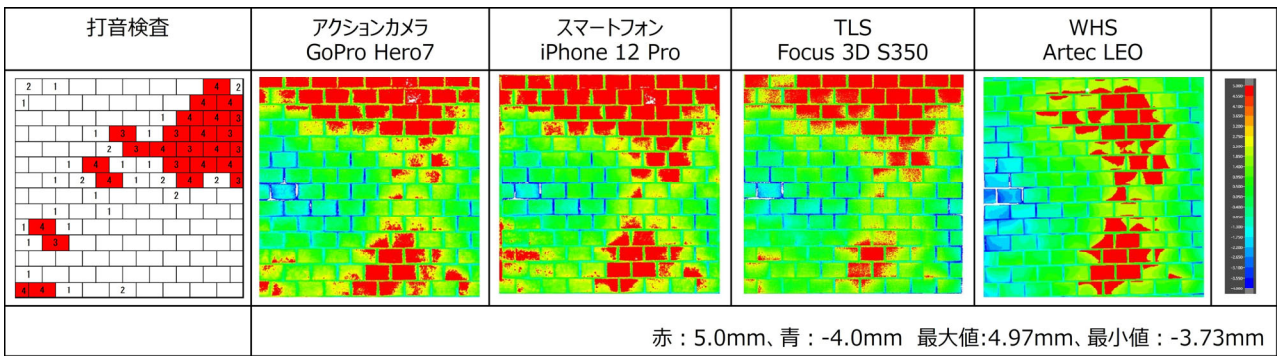


図-15 検査機器ごとの差分解析結果 (本館)

リファレンス 熟練者がつきと判定した箇所	アクションカメラ GoPro Hero7	スマートフォン iPhone 12 Pro	TLS Focus 3D S350	WHS Artec LEO
	F値： 37.4%	F値： 35.0%	F値： 38.8%	F値： 33.4%

図-16 打音検査判定結果と差分解析結果のF値 (本館)

5. おわりに

本研究では、RC 構造の民間集合住宅のタイル外壁を対象に、打音検査の高度化および定量化を目指して、打音検査を実施し判定結果を計測時間や経験年数などに着目して妥当性や評価のばらつきについて考察を行った。

以下に、得られた知見を示す。

- 検査者の年代ごとの打音検査判定結果に、有意な差は見られなかった。加齢にともなう聴力の低下は一般的に高周波数側にあらわれる。打音検査で得られる打撃音は比較的low周波数側の音を聞き分けているため年代による差は見られなかったと考えられる。
- 打音検査をほぼ実施したことがない検査者でも、事前に簡易講習を実施することで、熟練者の判定結果に対してF値の平均値74%となった。初級者と中級者には、大きな差が見られなかったが、熟練者とは8%から10%の差が見られた。
- 中級者と熟練者の計測時間に傾向は見られず、検査者ごとに2倍の時間差が見られた。初級者は事前講習を受けた直後の検査であったため、ほぼ同じ計測時間になっていた。経験を積むことで計測手順の違いや判定までのプロセスに至るまでの、検査時間に差があらわれていると考えられる。
- 検査判定に迷うような場合は、熟練者はいきの可能性ありと判断する傾向にある。そのため判定が明確な場合に比較して、多くのタイルがいきとして判定される。そのため熟練者の判定結果を基準とする場合に、他者の判定結果を検証するとF値が高くなる傾向となる。

最後に新技術を適用するとき、技術者の判断基準・根拠が使用している機器・機材で得られる情報以外の要因が含まれていることに留意することが重要である。

例えば、打音検査では音以外の情報である打診棒から腕に伝わる反動や振動および目視による検査対象面に生じているひびわれや欠損、不陸等の画像情報を組合せて総合的に評価をしている。さらには、構造物の3次元的な構造情報や架設年や工事履歴情報などの事前に得られる机上調査などによる知見や経験知もその中に含まれている。

そのため、複数のセンサから得られる計測値および諸

元情報を統合的に判断するアルゴリズムや装置、システムの開発が必要である。

本研究の成果をふまえて今後振動センサーの開発、画像診断 AI の開発を進める予定である。また、それぞれが判定した結果を、どのように総合的に評価することが望ましいかについて、近年研究が進められている機械学習のアンサンブル型手法を用いて研究を進めることとしている。このような計画で、これらの研究開発を進めるときに、開発する機器やソフトウェアの検証が必要になる。そのときの最確値として打音検査の判定結果がどの程度の信頼性、ばらつきがあるかを整理しておくことは重要である。

今後、実証実験を実施した建物で大規模修繕工事が予定されている。修繕工事において、今回の検証でうきと判定した箇所を確認することとしている。その状況を判定結果に反映しさらに打音検査の判定結果に関する妥当性および有効性を検証する計画である。

謝辞：本研究は、公益財団法人東京都中小企業振興公社「次世代イノベーション創出プロジェクト 2020 助成事業」の助成制度により実施した活動の一環である。本研究の遂行にあたっては、早稲田大学創造理工学部の石田研究室の皆様およびウォールナット社には貴重なご意見とご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 眞方山美穂, 建築物の外壁の定期調査における新たな技術の適用に向けて, 2019.
- 2) 国土交通省: 老朽化対策の取り組み, <<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>>, (入手 2021.5.7)
- 3) 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, 本間仁, 機械学習のデジタル打音検査高度化への適用, 日本計算工学論文集, 2021.
- 4) 社会資本整備審議会 道路分科会, 道路の老朽化対策の本格実施に関する提言, 2014.
- 5) 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, 2019, pp.1871-1876.

(Received September 30, 2021)

(Accepted January 10, 2022)

A STUDY ON THE DIFFERENCES IN THE JUDGMENT RESULTS OF SOUND HUMMING INSPECTION IN THE DIAGNOSIS OF RC EXTERIOR WALLS AND ITS IMPROVEMENT BY NEW TECHNOLOGY

Kazuhiko SEKI, Koichi IWASA and Hiroki TSUTSUMI

It is inevitable that a decrease in the working population will lead to a shortage of skilled infrastructure inspection engineers due to the declining population, low birthrate, and aging population. Furthermore, the aging of structures is accelerating in inverse proportion to the decrease in the number of inspection technicians. In order to promote efficient and optimal maintenance management with limited budgets and engineers, it is important to improve and quantify the quality of inspection and survey data, which is the basis for understanding the condition of structures.

Although percussion inspection has been widely used as a diagnostic technique for social infrastructure, the method and judgment of percussion inspection are based on the subjectivity and experience of inspectors. The purpose of this study is to develop a technology that can accurately identify damage without being affected by the experience and skills of the inspector. We conducted a demonstration test of percussion inspection and classified and organized the judgment results obtained according to the number of years of experience and work procedures. The results were classified and organized according to the number of years of experience and work procedures. The requirements and issues regarding the adaptability to new technologies were also identified.