

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 13 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京理科大学 工学部建築学科

氏 名 : LI YUTONG

研究課題名 : タイル壁面の接着一体性評価における打音検査の自動化技術
に関する研究

助成金額 : 94 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

タイル壁面の接着一体性評価における

打音検査の自動化技術に関する研究

A Study on the Automation Detection Technology of Hammering Test
for Evaluating Tile-Wall Adhesion Integrity

東京理科大学工学部建築学科 嘱託助教 LI YUTONG

（研究計画ないし研究手法の概略）

● はじめに

外壁タイルの接着状態は、建築物の安全性および耐久性に直結する重要な要素である。特に、経年劣化や施工不良により発生するタイルの浮き・剥離は、落下事故の原因となるため、定期的な点検が不可欠である。

現在、外壁タイルの点検には打音検査および赤外線サーモグラフィ法が広く用いられているが、打音検査は作業者の経験に依存する主観的な評価であり、定量性や再現性に課題がある。また、近年では ALC パネルや GRC パネルなどの薄肉部材が用いられるケースも増加しており、従来の RC 下地とは異なる応答特性が問題となっている。このような背景から、打音検査の定量化および自動化に向けた技術開発が重要な課題となっている。

本研究では、外壁タイルの打音検査における音響信号に着目し、多指標に基づく定量評価手法を構築するとともに、実構造物における適用性を検証し、さらに自動化検査技術への展開可能性について検討することを目的とした。

● 研究方法

本研究では、試験体実験および実構造物調査の双方を対象とし、以下の条件で評価を行った。

- 下地条件：Thick（100 mm）および Thin（30 mm）
- 欠陥条件：健全（Intact）、タイルーモルタル剥離（Debonded 1）、モルタルー下地剥離（Debonded 2）

- 検査手法：打診法（Impact sound）、掃引打音（Sweep sound）、赤外線法

打音信号は、96 kHz・32 bit の条件で収録し、1 打撃あたり約 0.1 秒（約 9600 点）の信号を解析対象とした。また、各タイルについて 3 回の打撃を行い、平均値を代表値とした。

抽出した特徴量は、以下の 3 領域に分類される。

- 時間領域（4 指標）：MAX, Root Mean Square (RMS), Energy, Crest Factor
- 包絡線領域（6 指標）：Envelope area, Early energy ratio, Decay coefficient 等
- 周波数領域（12 指標）：Spectral centroid, Roll-off, Entropy, Flatness 等

合計 22 指標を用いて多角的な解析を行った。

評価には ROC 解析（Receiver Operating Characteristic 解析）を用い、AUC（Area Under the Curve）を指標として、各手法および各特徴量の識別性能を定量的に比較した。なお、本研究で用いる AUC 値は 0～1 の範囲を取り、1 に近いほど識別性能が高く、0.5 はランダム判定に相当する。一般に、AUC が 0.9 以上であれば非常に高い識別性能、0.8 以上であれ

ば実用的に十分な性能を有すると評価される。

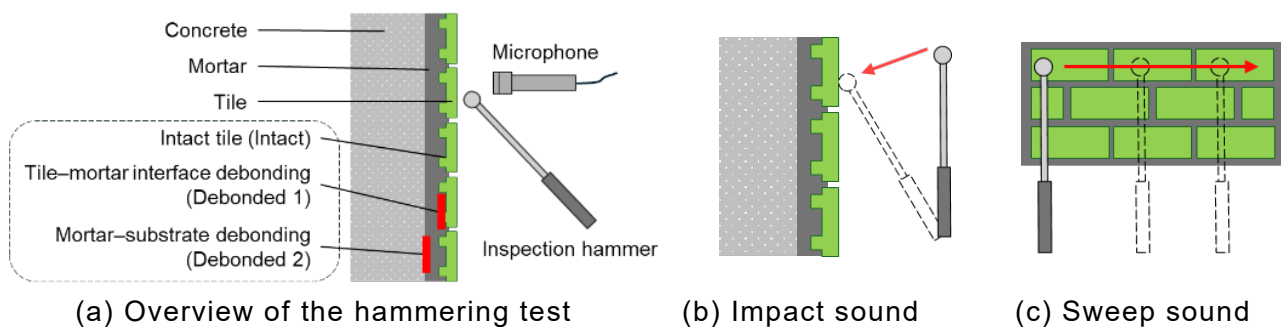


図 1. 打音の概要

(実験調査によって得られた新しい知見)

● 研究成果

(1) 検査手法の検出性能と適用条件

打診法および赤外線法について、欠陥サイズ (10-20 cm) および下地条件 (Thick / Thin) を考慮した比較を行った。

その結果、打診法は Thick 条件において $AUC \approx 0.99$ と非常に高い識別性能を示したが、Thin 条件では $AUC = 0.67-0.82$ まで低下した。一方、赤外線法は 15-20 cm の欠陥に対して $AUC = 0.94-0.98$ と高い性能を示したが、10 cm では $AUC \approx 0.70$ に低下した。

これらより、

- 打診法：厚肉部材に有効、小欠陥で有利
- 赤外線法：大欠陥に有効、薄肉部材でも安定

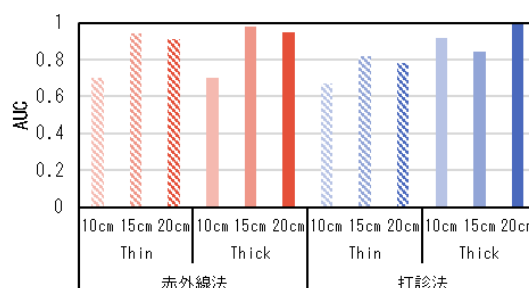


図 2. AUC (識別性能) の比較

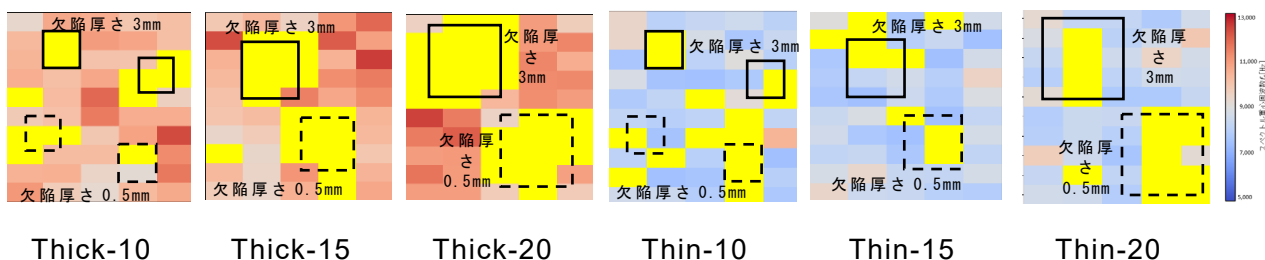


図 3. 浮き判定後のスペクトル重心周波数 ヒートマップ (打診法)

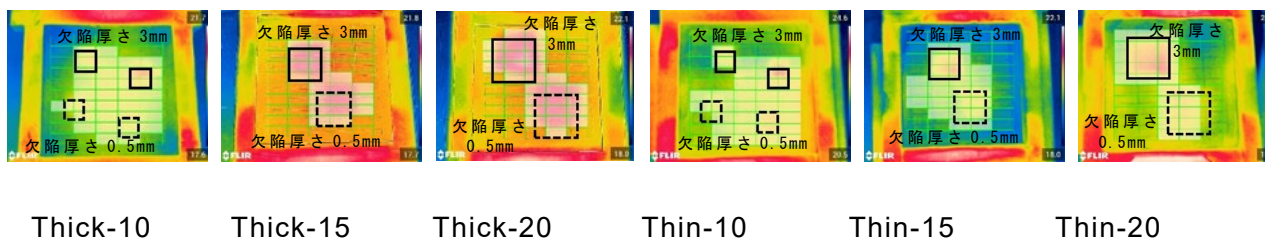


図 4. 浮き判定後の熱画像 (赤外線法)

という特性差が明確となった。

(2) 多指標音響解析による定量評価手法

打音信号の詳細解析により，接着状態に応じた明確な物理的差異が確認された。

剥離部では：

- RMS・Energy：健全部の約 3～4 倍
- Envelope area：約 3.9 倍
- Early energy ratio：約 0.3 倍
- Spectral centroid：約 1/2 に低下

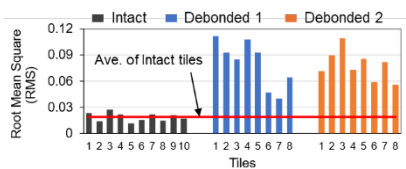
といった顕著な変化が確認された。

また，周波数分布においては：

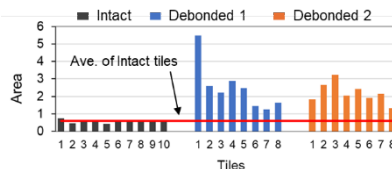
- 健全部：5-11 kHz 帯にエネルギー集中
- 剥離部：2-8 kHz 帯にシフト

する傾向が明確に観測された。

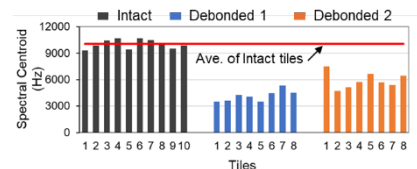
さらに，一部の指標 (Spectral flatness, Bandwidth 等) により，Debonded 1 と Debonded 2 の識別可能性も示された。



(a) RMS

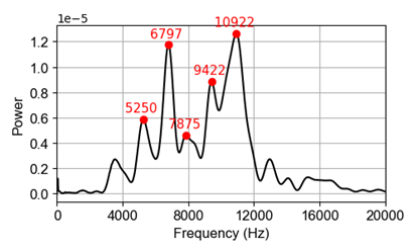


(b) Envelope area

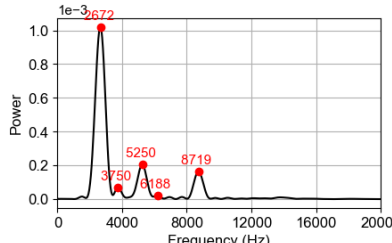


(c) Spectral centroid

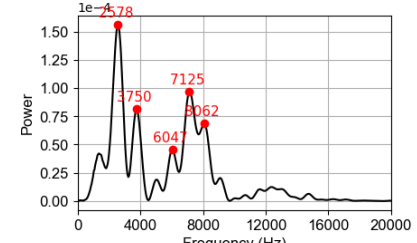
図 5.指標結果の例



(a) Intact



(b) Debonded 1



(c) Debonded 2

図 6.周波数分布結果の例

(3) 掃引打音を含む実構造物への適用性

実構造物 (RC 造 10 階建て) において，Impact sound および Sweep sound を適用し，識別性能を評価した。

その結果：

- Impact sound：全指標で AUC > 0.93
- Sweep sound：全指標で AUC > 0.88

となり，掃引打音においても十分な識別性能が確認された。

特に Sweep sound では：

- 健全部：低振幅・安定波形
- 剥離部：高振幅・持続振動

という特徴が確認され，大面積スクリーニング手法として有効であることが示された。

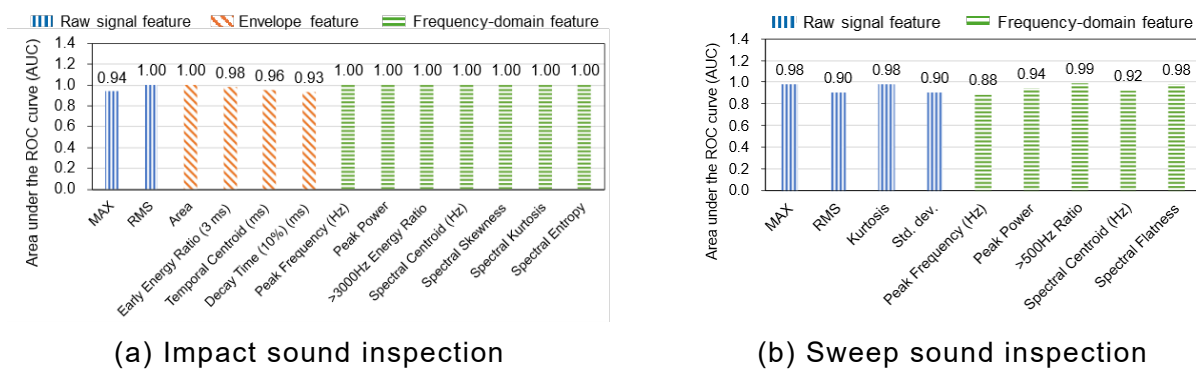


図 7.各種打音方法における AUC の結果

● 本研究の特徴

本研究の主な特徴は以下の通りである。

- (1) 打診法・赤外線法・掃引打音を統一的に評価し、検査手法間の特性差を定量的に明らかにした点
- (2) Thin (30 mm) および Thick (100 mm) の両条件を対象とし、薄肉部材における適用限界を示した点
- (3) 22 種類の音響指標を用いた多指標解析により、単一指標の限界を克服した点
- (4) 健全・剥離 1・剥離 2 の 3 状態を対象とし、剥離形態の識別可能性を示した点
- (5) 実構造物において Impact および Sweep の両検査手法を検証し、自動化検査への適用可能性を示した点

● 結論

本研究により、以下の知見が得られた。

- (1) 打診法および赤外線法の検出性能は、下地条件および欠陥規模に強く依存することが明らかとなった。
- (2) 多指標音響解析により、外壁タイルの接着状態を定量的に評価可能であることを示した。
- (3) 剥離部では低周波化およびエネルギー増大が顕著であり、これらは有効な識別指標となる。
- (4) 掃引打音においても AUC 0.88 以上の性能が確認され、大面積検査への適用可能性が示された。

今後は、複数指標を統合した機械学習モデルの構築により、識別精度のさらなる向上を図る。また、ロボットやドローンを用いた自動打音検査システムへの応用に向けて、測定条件の標準化およびデータ拡充を進める必要がある。

(発 表 論 文)

(10.5 点)

- (1) **Yutong Li**, Kei-ichi Imamoto, Chizuru Kiyohara, Masato Sato, Takaaki Ohkubo, Kazuya Sugiyama, Kohichi Umeda, Tatsuya Sugiyama, Multi-Indicator Evaluation of Tile–Wall Integrity Based on Hammering Tests toward Automated Inspection, Journal of Asian Concrete Federation, accepted (in press).
- (2) **Yutong Li**, Kei-ichi Imamoto, Chizuru Kiyohara, Masato Sato, Takaaki Ohkubo, Kazuya Sugiyama, Kohichi Umeda, Tatsuya Sugiyama, Acoustic-Based Automated Evaluation of Tile Debonding on Building Facades, 5th ACF Symposium on “Advancing Sustainable Solutions from Concept to Concrete”, November 14-16, 2025, Civil & Environment Engineering, National University of Singapore (NUS), Singapore.
- (3) **Yutong Li**, Kei-ichi Imamoto, Chizuru Kiyohara, Masato Sato, Takaaki Ohkubo, Kazuya Sugiyama, Kohichi Umeda, Tatsuya Sugiyama, Towards Automated Acoustic Inspection for Exterior Tile Debonding Using In-situ Impact and Sweep Sounds, fib Congress 2026, June 14-19, Lisbon, Portugal.
- (4) 佐藤雅斗, 今本啓一, **李雨彤**, 清原千鶴, ROC 解析によるタイル張り薄肉パネルに対する打診・赤外線サーモグラフィ法の検出性能比較, 2025 年度日本建築学会関東支部研究報告 I, 2026 年 3 月
- (5) 佐藤雅斗, 今本啓一, **李雨彤**, 清原千鶴, ROC 解析によるタイル張り薄肉パネルに対する打診・赤外線サーモグラフィ法の検出性能比較, コンクリート工学年次論文集, 2026 年 7 月
- (6) 佐藤雅斗, 今本啓一, **李雨彤**, 清原千鶴, 杉山達哉, 杉山和也, ROC 解析によるタイル張り薄肉パネルに対する打診・赤外線サーモグラフィ法の検出性能比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) 2026 年 9 月