

外壁タイル打診調査支援システムの拡充

－打診調査におけるタイル状態の自動判定技術－

A Support System for Wall Finish Tile Inspections

- Technology for Automated Assessments Based on Impact Acoustics -

柳沼勝夫* 起橋孝徳** 稲留康一* 岸本 剛***

要 旨

特殊建築物の外壁タイル仕上げは、10年ごとに全面打診調査の実施が義務付けられている。近年、人手不足が社会問題になってきており、熟練したタイル調査員も減少することが予想されることから、外壁タイル仕上げの状態（健全か浮き）を自動で判定する技術を開発した。さらに、既開発の「外壁タイル調査支援システム」に開発した自動判定技術を組み込み、システムを拡充した。自動判定技術は、打診棒で建物の外壁タイル仕上げを加振した際に発生する音の周波数特性の違いから判定する技術である。今回、実建物において、自動判定技術の判定精度を検証した結果、調査専門業者の調査結果と約9割対応していることを確認できた。

キーワード：外壁タイル 打診調査 自動判定技術

1. まえがき

建物の外壁タイル仕上げは、剥落が重大事故につながることから、特殊建築物では10年ごとに全面打診調査の実施が建築基準法第12条によって義務付けられている。

タイル打診調査は、調査用ロボットを利用して行われている例もあるが、写真-1に示すように打診棒でタイルを加振することにより発生した音から、調査員が聴感によりタイルが健全であるか浮いているかの状態を判定することが一般的である。このような現状を踏まえ、調査結果の記録と、まとめ作業を省力化することを目的として、これまでに調査結果の記録を支援する「外壁タイル調査支援システム」（以下、支援システム）を開発している²⁾。

打診調査は、タイル加振によりタイルの浮きを判定できる熟練した調査員が行う必要がある。しかし、近年、人手不足が社会問題になってきており、熟練したタイルの調査員も今後減少することが予想される。このため、調査員の熟練度を問わずに一定精度でタイルの浮きを判定する技術が望まれる。

以上の背景から、タイルの状態（健全か浮き）を自動で判定する技術（以下、自動判定技術）を開発した。さらに、既開発の支援システムに自動判定技術を組み込み、支援システムを拡充した。

本報では、開発した自動判定技術と自動判定技術を組



写真-1 現状の打診調査状況（例）

み込んだ支援システムについて報告する。

2. 既開発の支援システム

既開発の支援システムは、タイルに生じた各種の異常状態（浮き、ひび割れ、白華など）を調査員が目視や聴感により判定し、その位置をその場で電子情報化することにより、結果の記録と調査後の整理作業を迅速化・省力化するシステムである。

*技術研究所環境研究グループ **建築本部建築部 ***技術研究所建築研究グループ

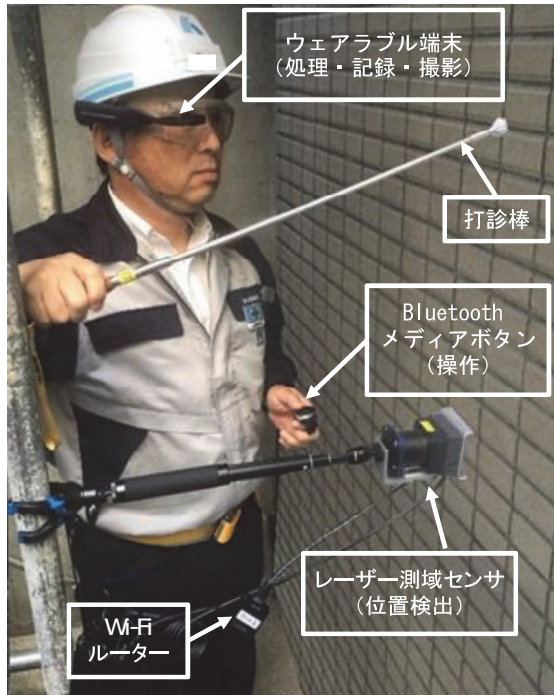


写真-2 支援システムを用いた調査状況

支援システムを用いた調査作業の状況を、写真-2に示す。支援システムは、レーザー測域センサとウェアラブル端末、操作用の Bluetooth メディアボタン等で構成されている。調査員が指定した位置をレーザー測域センサで読み取り、Wi-Fi ルーターでウェアラブル端末に送信後、タイルの浮きやひび割れなどの状態を紐づけて記録する。レーザー測域センサは、タイル面と平行方向にレーザーを照射し、レーザーの反射によってセンサから打診棒（反射物）の角度と距離を求める機器である。ウェアラブル端末は、カメラを内蔵しているため、状況写真を調査場所に紐づけて撮影することもできる。電子情報化された調査結果の集計や整理には、市販の一般的な表計算ソフトと CAD ソフトを用いる。

3. 自動判定技術

自動判定技術では、タイルを打診棒で擦り加振した時に発生する音（以下、打診音）をマイクで集音し、周波数分析結果を統計処理して健全タイルと浮きタイルを即時判定する。以下、技術の概要を述べる。

3.1 健全タイルと浮きタイルの周波数特性

健全タイルは、下地モルタルを介して下地と一体化されているため、タイルの種類、施工条件、加振条件が同じであれば、打診音は類似した周波数特性を示す。一方、浮きタイルの状態は、大別して図-1に示すように、タイルが張り付けモルタルと剥離する陶片浮き、下地調整モルタルと張り付けモルタルもしくは躯体と剥離する下地浮きの2種類ある。剥離の位置、範囲により打診音の

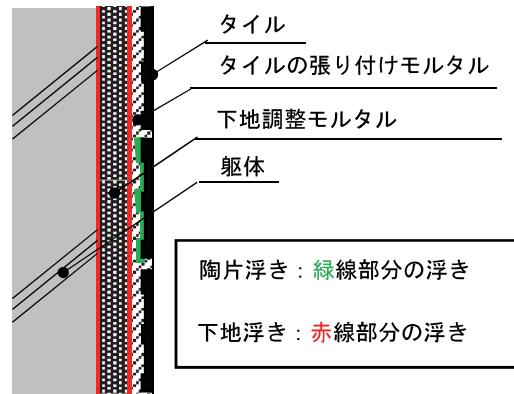


図-1 タイルの浮き位置



写真-3 打診棒

周波数特性が大きく変化することが予想される。そこで、写真-3に示す打診棒の先端回転部を擦るようにしてタイルを加振（以下、擦り加振）し、打診音を測定した。

図-2、図-3は、それぞれ異なる建物で RC 躯体に張り付けられた 45 二丁タイルの打診音の測定結果である。打診調査に習熟した作業員による状態の判定結果は、図-2の浮きタイルは陶片浮き、図-3の浮きタイルは下地浮きであった。いずれの建物でも、健全タイルの打診音は周波数特性や発声音レベルが類似しているが、浮きタイルの打診音は健全タイルと明確に異なる傾向を示している。陶片浮きでは、タイルの個体ごとに若干異なるが、卓越周波数は 4kHz 帯域～8kHz 帯域に集中している。これは、陶片浮きの場合、加振による影響がタイル 1 枚よりも狭い範囲に限定されることにより、振動体の大きさや質量が小さくなるためと考えられる。下地浮きでは、陶片浮きに比べて剥離の範囲がタイルサイズに限定されないことや、張り付けモルタルや下地モルタルも一体となって振動することに加えて、浮きの範囲によって加振による影響範囲も変わるため、周波数特性や卓越する周波数はタイルごとに大きく異なる。浮きタイルの卓越周波数は、浮き方だけではなく、タイルの大きさにも依存するものと考えられるが、健全タイルと比べ周波数特性が大きく異なることが、判定できる根拠となる。

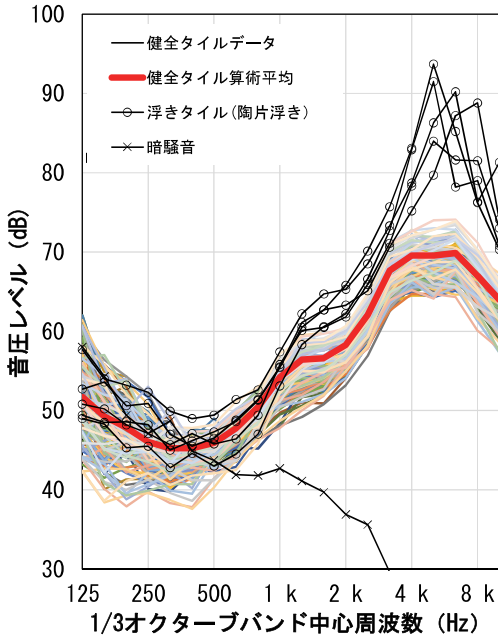


図-2 タイル擦り加振時の発生音 (例1)

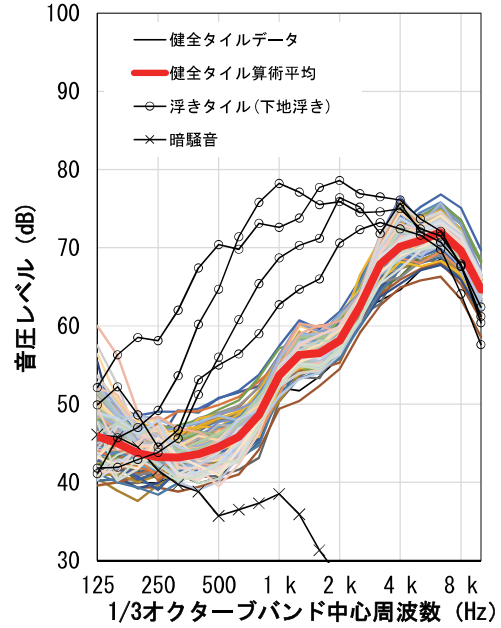


図-3 タイル擦り加振時の発生音 (例2)

3.2 判定方法

健全タイルの打診音を現場ごとに複数取得し、ここから導き出した周波数特性を基準として、検査対象タイルの打診音の周波数特性と基準との違いを検出し、タイルの状態を判定する。

a. 判定基準となる事前の健全タイルデータの取得

判定基準となる事前の健全タイルデータの取得フローを、図-4に示す。検査前の健全タイルデータの取得では、調査員が健全と考えるタイルを様々な位置で擦り加振し、打診音を30枚分取得する。ここから1/3オクターブバンドレベルを算出し、正規化によって加振力の違いをキャンセルした周波数特性データ(相対レベル)を、階層クラスター分析(Ward法)³⁾によって2グループに分類する。分類した2グループそれぞれにおける各データの相互関係から、タイル状態が浮きであるか否かを判定し、基準となる健全タイルデータを決める。同じ仕様の外壁タイル状態(健全タイルのグループまたは浮きタイルグループ)の判定には、個々の健全タイル打診音の周波数特性が類似する特徴を利用する。

判定事例を表-1に示す。ここでは、下記i~viの周波数帯域の組み合わせで、グループ内個々のデータとグループ平均値との相関係数をそれぞれ算出し、周波数特性の違いを相関で識別する。これは、周波数帯域全体ではなく、細かくグループ分けした周波数帯域の組み合わせで計算することにより相関係数が分散され、タイルの状態をより識別しやすくする意図で行っている。なお、評価周波数は測定結果(図-2、図-3)を参考に、暗騒音の影響が少ない800Hz帯域~10kHz帯域とした。

- i. 「800Hz帯域、1kHz帯域、1.25kHz帯域、1.6kHz帯域、2kHz帯域、2.5kHz帯域」

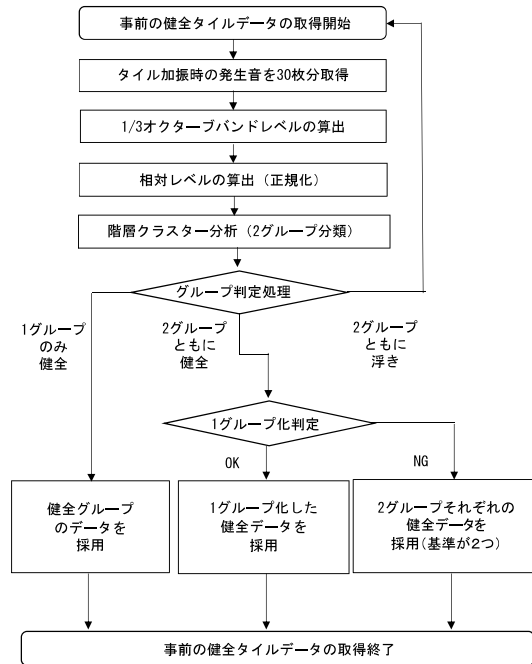


図-4 事前の健全タイルデータの取得フロー

表-1 相関係数算出例

グループ	相関係数算出パターン						最小相関係数	判定	グループ判定
	i	ii	iii	iv	v	vi			
グループ1 (データ数25)	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.96	健全	健全
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	健全	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	健全	
グループ2 (データ数5)	0.99	1.00	0.99	1.00	0.97	0.66	0.66	浮き	浮き
	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.96	0.96	健全	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	1.00	1.00	0.96	1.00	0.92	0.74	0.74	浮き	

- ii. 「800Hz 帯域、1kHz 帯域、1.25kHz 帯域、3.15kHz 帯域、4kHz 帯域、5k Hz 帯域」
- iii. 「800Hz 帯域、1kHz 帯域、1.25kHz 帯域、6.3kHz 帯域、8kHz 帯域、10kHz 帯域」
- iv. 「1.6kHz 帯域、2kHz 帯域、2.5kHz 帯域、3.15kHz 帯域、4kHz 帯域、5kHz 帯域」
- v. 「1.6kHz 帯域、2kHz 帯域、2.5kHz 帯域、6.3kHz 帯域、8kHz 帯域、10kHz 帯域」
- vi. 「3.15kHz 帯域、4kHz 帯域、5kHz 帯域、6.3kHz 帯域、8kHz 帯域、10kHz 帯域」

i ~ vi の相関係数が全て閾値以上の場合に、そのデータを健全判定とする。そして、グループ内のデータが全て健全判定の場合に、グループデータの判定を健全とする。閾値は、6 帯域の値で相関係数を求めることから、標本数 6 個による 5%有意水準の 0.811 とした。なお、グループ内データ数が少ない場合、健全データや浮きデータに関わらず、グループ平均値と個々のデータの相関が高くなるため、一定のデータ数（例えば 5 データ）に満たないグループは判定処理から除外する。

上記の処理により、いずれのグループも浮きと判定または判定処理から除外された場合は、場所を変えて再度打診音の取得作業からやり直す。1 グループのみ健全と判定された場合は、そのグループデータを健全タイルの打診音として基準に用いる。2 グループともに健全と判定された場合は、健全タイルデータを階層クラスター分析によって無理に分類している可能性がある。そのため、下記 vii と viii の判定を行い、1 グループ化が可能か判定する。少なくとも vii と viii のどちらか一方の結果が NG の場合は、仕様が異なる健全タイルの打診音とし、2 つの基準とする。

vii. 一方のグループ平均値がもう一方のグループデータのバラつき範囲内であるか判定する。なお、判定処理の詳細は、次の b 項(a) の 1 次判定で述べる

viii. 2 グループのデータをまとめて i ~ vi の相関係数を算出し、閾値に対する判定を行う

b. 本検査

本検査の判定フローを図-5 に示す。

本検査では、取得した検査タイルの 1/3 オクターブバンドレベルを正規化し、事前に取得した複数の健全タイルデータとの周波数特性の違いについて 1 次判定と 2 次判定を行う。2 次判定まで閾値を満たした場合に検査タイルを健全判定とする。

(a). 1 次判定

式 (1) を確認し、周波数帯域ごとに健全タイルデータのバラつき範囲内に該当する事を判定する。

$$\bar{x}_i - \alpha \times u_i \leq X_i \leq \bar{x}_i + \alpha \times u_i \quad \dots (1)$$

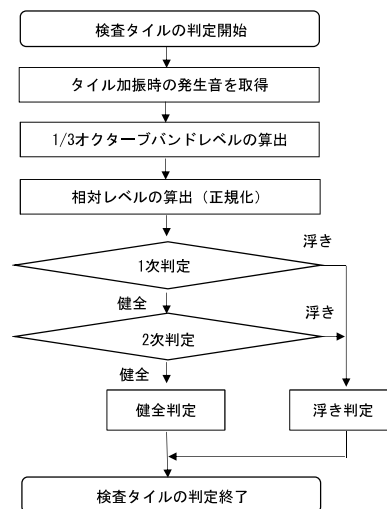


図-5 本検査の判定フロー

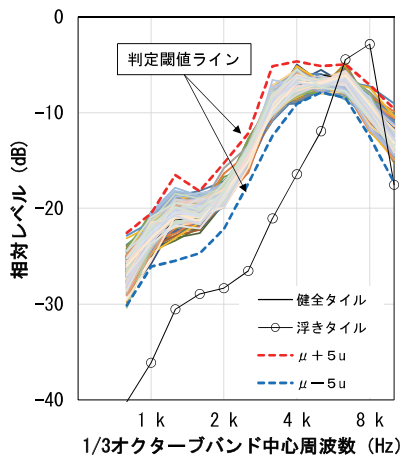


図-6 1 次判定事例

ただし、 X_i : 検査タイルデータの相対レベル (dB)、 \bar{x}_i : 事前に取得した健全タイルデータの平均値 (dB)、 α : 5 (係数)、 u_i : 事前に取得した健全タイルデータの不偏標準偏差

式 (1) の α は、状態が既知のタイル打診音の周波数データに基づいて決定した。一例として、図-2 の周波数データによる検討結果を、図-6 に示す。係数 α を 5 とした場合に、健全タイルデータが判定閾値ラインに収まり、浮きタイルデータはラインから外れて浮き判定となる。この係数については、今後も精度の検証を続けて最適値を求めていきたい。

(b). 2 次判定

a 項で述べた判定方法と同様に、i ~ vi の周波数帯域の組み合わせで検査タイルのデータと事前に取得した健全タイルデータの平均値との相関係数をそれぞれ算出し、閾値 0.811 と照らし合わせて判定を行う。

以上の自動判定技術をプログラムしたソフトウェアを開発し、既開発の支援システムに組み込んだ。

4. 自動判定技術を組み込んだ支援システム

自動判定プログラムを組み込んだ支援システムによる調査状況を、写真-4に示す。

システムの機器構成は、既開発の支援システムの機器に携帯端末と、集音用に風防付の指向性マイクを追加した。打診音分析や浮きの判定、位置情報取得等の処理は携帯端末で行い、ウェアラブル端末は作業性を鑑みた携帯端末画面のモニタとして使用する。ウェアラブル端末とレーザー測域センサ、Bluetooth メディアボタンは携帯端末を中心に無線で接続するが、電波障害によるデータ未取得を防ぐため、集音用マイクは有線で携帯端末に接続する。

打診調査時には、タイルを擦り加振する時に発生する音が暗騒音レベルと一定のレベル差を生じることによって、自動で測定が開始される。判定結果は写真-5に示すように、「健全」と「浮き」の2種類のいずれかがウェアラブル端末の画面にリアルタイムで表示される。



写真-4 支援システムを利用した調査状況

5. 自動判定の精度

実建物において、自動判定技術を組み込んだ支援システムによるタイルの浮き判定精度を検証した。

対象建物は、RC 造の躯体にモルタルでタイル張りされており、タイル種類は磁器質 45 二丁タイルであった。検証対象のタイル枚数は約 2500 枚である。

判定精度の評価は、打診調査専門の業者による調査結果と、打診調査に不慣れな社内職員が支援拡充システムによって判定した結果の比較によって行った。調査専門業者の結果と自動判定結果の照合率を、表-2に示す。

調査専門業者が判定した結果と自動判定結果の照合率は約9割であった。判定結果が異なるタイルは、調査員が健全と判定したタイルを自動判定は浮きと判定したものであった。打診棒で加振しにくい位置やR形状の外壁では、調査員が健全タイルと判断した位置でも自動判定では浮きと判定する傾向があり、今後の検討課題である。



ウェアラブル端末

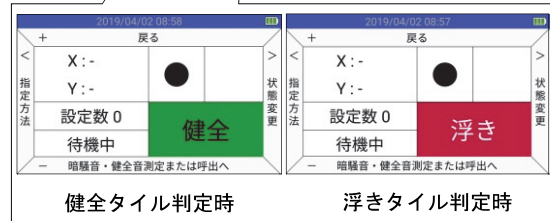


写真-5 判定表示画面

表-2 調査専門業者の判定と自動判定の照合率

業者判定	健全		浮き		総 タイル数
	健全	浮き	健全	浮き	
自動判定	健全	浮き	浮き	健全	
計	2296	46	180	0	2522
照合率 (%)	93		7		-

6. まとめ

打診棒で外壁タイルを加振した際に発生する音の周波数特性の違いにより、タイルの状態（健全や浮き）を自動で判定する技術を開発した。さらに、自動判定技術を既開発の「外壁タイル調査支援システム」に組み込み、システムを拡充した。

タイルの種類は多く、躯体や接着方法との組み合わせ条件も多岐にわたる。このため、今後も継続して様々な条件でタイル打診音の周波数特性を検証し、判定技術をさらに向上させたい。

【参考文献】

- 1) 例えば、名知博司、船越貴恵、高橋周男、「外装タイル張りの打音検査における自動診断システムの試行」、日本建築仕上学会 2015 年大会学術講演会、2015、pp.151-154
- 2) (株)奥村組社長室広報課、「外壁タイル打診調査の省力化 調査結果を電子情報化」、建築技術、2018.7、p.70
- 3) 栗原伸一、「入門統計学—検定から多変量解析・実験計画法まで—」、オーム社、pp.259-266、2011