

◇技術紹介 Technical Report

外壁タイル自動診断システム「点検虫」の開発 Development of Automated Inspection System for Wall Tile

堂山 敦弘 Atsuhiko Doyama
金子 智弥 Tomoya Kaneko
汐川 孝 Takashi Shiokawa
縄岡 好人 Yoshito Nawaoka

1. はじめに

タイルは建物の外壁に多く用いられているが、経年に伴い様々な劣化が生じてくる。劣化状態を放置しておくとう損や剥落を生じるため、定期的に診断を行う必要がある。この診断方法として、検査員によるハンマーでの打診が普及している。しかし、検査員による打診には、足場やゴンドラの設置などの仮設工事が必要となる。検査結果に個人差が生じる、検査が長時間にわたる場合には判断力の低下を招く、などの問題がある。

このような状況を背景として、外壁タイル診断の自動化と診断精度の向上を目的として診断ロボットシステムの開発を進めてきた。1992年に1号機¹⁾を開発し、数現場で試験適用を行った。試験適用を行った結果、診断結果や診断速度などの基本的な能力が不足していることが判明した。この結果を受け、1994年に、実用化を目指した2号機²⁾の開発を行い、数現場で試験適用を行った。試験適用を行った結果、診断機的能力不足や構成機械の小型化といった課題が判明し、1997年に実用機として3号機³⁾の開発を開始した。3号機では1、2号機とは異なる剥離判定方法を採用し、診断精度の向上に努めた。また、構成機械の小型・軽量化をはかり、実用的なシステムを目指した。さらに、制御回路を集約化し、配線上のトラブルの削減やメンテナンスの簡素化をはかった。

本報はこの3号機の概要と実建物への適用結果についてまとめたものである。

2. システムの概要

2.1 開発課題と目標

人手による外壁タイル診断作業には、前述したような問題点がある。これらの解決および外壁診断作業の省力化、省人化、安全性向上、コスト低減を目指して、システムの目標を次のように設定した。

- 1) 外壁診断ロボットは外壁のタイル面に沿って安定した姿勢で移動できる
- 2) 装置ユニットは小型・軽量で、持ち運びが容易である
- 3) 現地での検査装置の準備は主に地上作業とし、安全に、また短時間に準備できる
- 4) 診断性能（速度と精度）は熟練工に比べ、同等以上である

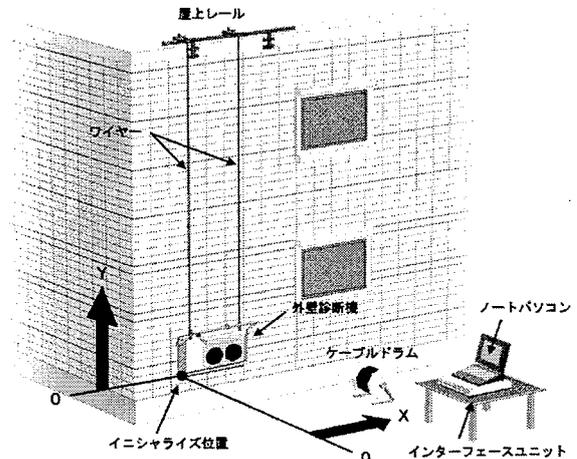


Fig. 1 システムの概要
Outline of System

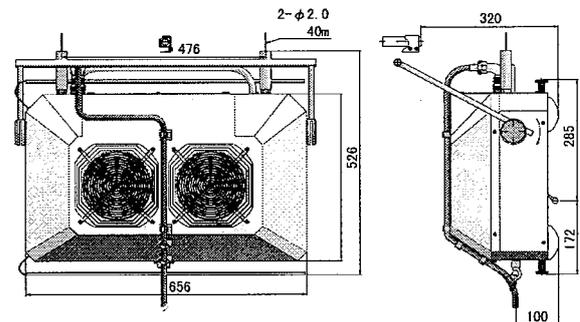


Fig. 2 外壁診断機の外形
View of Inspection Robot

Table 1 システムの諸元
Parameters of System

形 式		TA4525 N2
外形寸法	外壁診断機	W780×L526×H250 (mm)
	ケーブルリール	W314×L356×H435 (mm)
	インターフェースユニット	W310×L260×H50 (mm)
重量	屋上ユニット	26.5 kg
	外壁診断機	30 kg
	ケーブルリール	15 kg
	インターフェースユニット	3 kg
電 源		100V,50/60Hz
計 測 能 力		400m/8H
昇降早送り速度		15m/min (max)
ハンマ 横行量		450mm
壁面押しつけ力		1.3kgf
ワイヤー		線径φ2mm

2.2 システムの構成

システムの構成要素は外壁診断機、屋上レーン、インターフェースユニット、ノートパソコンなどである。システムの構成を Fig. 1 に示す。

外壁診断機は内部にウインチを配備し、このウインチが屋上ユニットより吊り下げた2本のワイヤーロープを巻き取り、送り出すことにより、壁面上を昇降する。外壁診断機は中央部に4枚羽根のファンを配備し、この後流による推力によって壁面に対して1kgf以上の付着力を保持しながら昇降する。外壁診断機の中央部には打音装置を配備し、この打音装置によってタイルを打撃し、打音データを得る。

得られた打音データは後述する方法で剥離・非剥離を判定する診断値を計算し、計算結果を地上のインターフェースユニットを経由してノートパソコンに送信する。ノートパソコンは外壁診断機との制御、建物情報の入力、診断結果の表示・印刷などをおこなう。外壁診断機の外形と寸法を Fig. 2 に、諸元を Table 1 に示す。

3. 剥離診断方法²⁾

3.1 オクターブバンド分析

検討の第一段階として、熟練工の診断方法の観察とヒアリング調査を行った。その結果、熟練工は打診棒を使用してタイル表面を打撃し、その打撃音の音圧の違いと音色の違いからタイルの剥離状態の有無を判断していることが判明した。診断値の算出にあたっては、この診断方法を参考にすることにした。タイル打撃音の音色を評価するには周波数分析を行う必要がある。

周波数を分析する手段として、様々な手法が考えられるが、今回、打撃音の信号特性やシステムの簡易性から1/3オクターブバンド分析器の仕組み、すなわち1/3オクターブフィルタを利用することにした。オクターブバンドとは上限周波数(f_2)と下限周波数(f_1)の比が2となるように分割した周波数帯域のことで、その中心周波数 f_c は、

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} \cdots \cdots (1)$$

となる。周波数を対数軸に取った場合、オクターブバンドは等間隔となるが、それをさらに1/nごとに分割した場合、それぞれの周波数帯域を1/nオクターブバンドという。オクターブバンド分析はこれらのオクターブバンドフィルタを用いて行う。実建物において各種のタイルを打撃し、その打撃音の周波数特性を分析した結果、全てのタイルが1kHzから8kHzの周波数に固有振動数を持っていることがわかった。したがって、システムに使用する1/3オクターブバンドフィルタとして、1kHz~10kHzの11種類のフィルタを用いることにした。

3.2 模擬壁面

検討に先立って、2種類のモルタル下地と3種類の工法および3種類のタイルで施工された模擬壁面を製作し

た。この模擬壁面には、剥離状態から正常な接着状態のタイルが混在しており、これらのタイルを打撃する事により、様々な接着状態のタイル打撃音を取得することが可能である。Table 2 に模擬壁面の概要を示す。

3.3 打撃音の周波数特性と診断値

外壁診断機の打音装置によってタイルを打撃し、得られた打音データから、打撃音の時間波形の主要部分である0~3msを切り出し、これに1kHz~10kHzの各1/3オクターブバンドフィルタを畳み込み、各バンド毎に実効値を求めた。Fig. 3 は模擬壁面の各グループの中から、剥離部と非剥離部の代表的な一枚について、1/3オクターブバンド実効値を求めたものである。

Fig. 3 を見ると、剥離部と非剥離部では周波数特性が異なることが分かる。非剥離部の周波数特性は、全体的に平坦であり、タイル間の差は小さい。一方、剥離部の周波数特性は、特定の周波数帯域が卓越する特性となっており、かつ、その周波数帯域は各タイルで異なる。これらの結果から、診断対象のタイル打撃音の1/3オクターブバンド実効値と、あらかじめ測定しておいた非剥離部のそれとの相関係数を計算し、この値に適正なしきい値

Table 2 模擬壁面の概要
Outline of Mock Wall

グループ	下地	工法	タイル種類	タイル寸法 mm
A	軽量モルタル	圧着張り	小口平	108*60
B	軽量モルタル	圧着張り	二丁掛け	227*60
C	普通モルタル	圧着張り	二丁掛け	227*60
D	普通モルタル	積上張り	二丁掛け	227*60
E	普通モルタル	圧着張り	小口平	108*60
F	普通モルタル	密着張り	小口平	108*60
G	普通モルタル	圧着張り	45角2丁	95*45

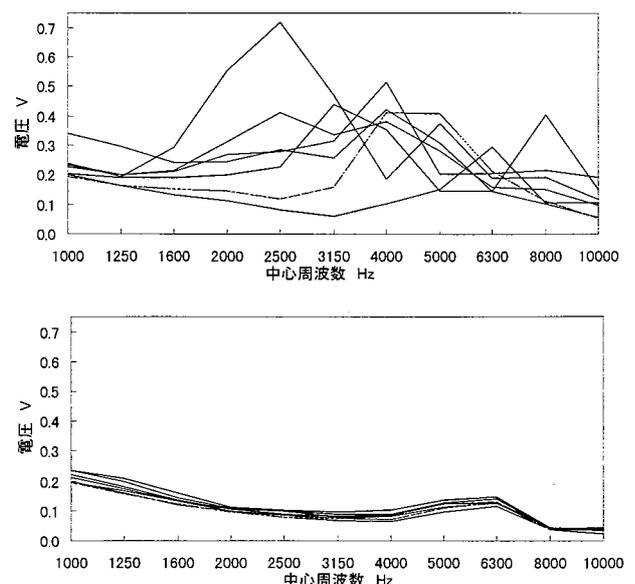


Fig. 3 打撃音の周波数特性 (上:剥離, 下:非剥離)
Frequency-Characteristics of Striking Sound

を設定することによって、剥離・非剥離の識別が可能であると判断した。

相関係数とは、2変量の特徴の相関を調べる方法で、(2)の式中の $\rho_{x,y}$ で表される。相関係数の計算値は-1から1の間で得られ、1に近づくほど相関度が強く、0に近づくほど相関は弱く、-1に近づくほど負の相関が強いことを示している。なお、 μ_x, μ_y は変量 X, Y の平均を、 σ_x, σ_y は変量 X, Y の標準偏差をそれぞれ示している。

非剥離部のタイルの1枚を教師データとして、Fig. 3で示したタイルの診断値を計算した結果をTable 3に示す。Table 3を見ると、非剥離部の診断値は0.987~0.998の範囲にあるのに対し、剥離部の診断値は0.580以下であることが分かる。よって、診断値に適正なしきい値を設定し、各データの診断値をこのしきい値と比較することにより、剥離有無の識別が可能であるといえる。

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (2)$$

3.4 診断値のしきい値

Table 2で示した模擬壁面と外壁タイル補修工事中の建物(以下、補修現場と略記)において実験を行い、非剥離状態と剥離状態との境界になる診断値(しきい値)について検討した。模擬壁面では各下地、工法、タイル種類から任意に239枚を、補修現場においては、非剥離部と剥離部が混在している箇所から428枚のタイルを選択し、それぞれのタイルの中央をシステムの打撃装置で打撃した。また、同時にタイル職人による剥離診断を行い、職人の診断結果をもとに、剥離タイルと非剥離タイルに分類して、診断値と熟練工の診断結果との関連を調べた。

Fig. 4は各診断値におけるタイルの累積度数を、熟練工が剥離、非剥離と判断したグループ別に示したものである。なお、教師データは、それぞれの壁面において、任意に選択した非剥離タイル10枚の加算化平均値とした。Fig. 4から、熟練工が非剥離タイルと診断したタイルの診断値は0.9以上に集中しているのがわかる。剥離、非剥離の境界値を0.9に設定した場合、模擬壁面では非剥離タイルの83%が識別可能であり、補修現場では87%が識別可能であるといえる。仮に、熟練工の診断結果を真であると仮定した場合、システムの診断精度は診断値が0.9の場合にピークとなるのがわかる。

3.5 診断値の有効性

Table 2に示した模擬壁面の各グループを熟練工の診断によって、以下の3つのグループに分類した。

- 1) タイルが剥離していない(健全)
- 2) タイル全面が剥離している
- 3) タイルの一部が剥離している

上記1), 2), 3)の各グループのタイルから3枚を選定し、システムによる診断と引張り試験を行った。システムに

よる診断はタイルを長手方向に65mmピッチで等分した各点に対して行った。Fig. 5に各タイルにおける打撃点を示す。引張り試験は同タイルに対して、建築工事共通仕様書³⁾に記載の接着力試験方法に則って行った。三者の診断結果の一致状況をまとめたものをTable 4に示す。なお、引張り試験においては、建築工事共通仕様書に合格と規定されている引張接着強度0.4N/mm²(4kgf/cm²)に満たないものを剥離とした。Table 4で三者の診断結果の一致状態に着目すると、全タイル63枚中、三者ともに判定方法が一致しているタイルが48枚、引張り試験結果のみが違っているタイルが4枚、熟練工の診断結果のみが違っているタイルが3枚、システムの診断結果のみが違っているタイルの枚数が他の2つの判定方法と比べて若干多くなっているものの、熟練工の診断と引張り試験結果にも食い違いがあることを考慮すれば、十分実用に耐えうるものといえる。なお、システムと熟練工の診断結果が食い違う理由として以下の3点が考えられる。

Table 3 各タイル診断値
Diagnostic Value of Each Tile

グループ	A	B	C	D	E	F	G
非剥離部	0.987	0.991	0.998	0.991	0.988	0.989	0.996
剥離部	0.073	0.031	-0.051	-0.210	0.208	0.030	0.580

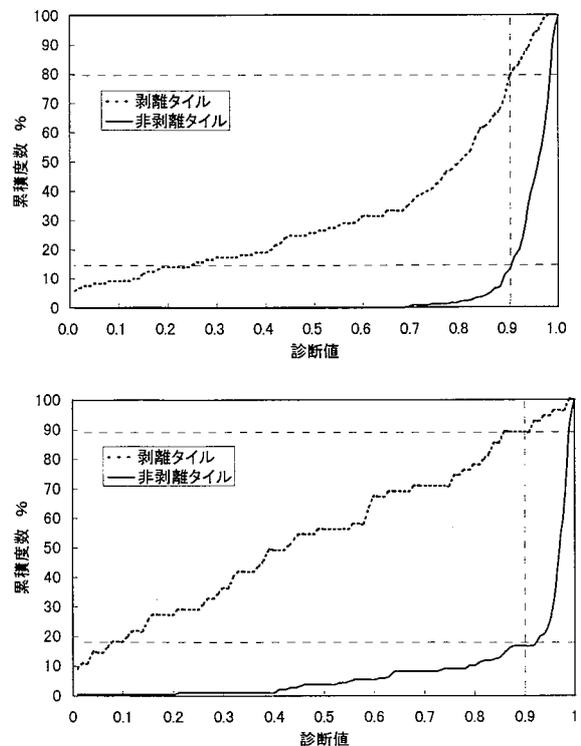


Fig. 4 各診断値におけるタイルの累積度数
(上:補修現場, 下:模擬壁面)
Cumulative Frequency of Each Diagnostic Value

- 1) システムでは特定点のみを打診しているのに対して、熟練工は各ゾーン内を連続的に打診している。このため、システムでは打撃してない箇所も熟練工は打撃する事ができる。
- 2) 剥離位置が深層部であるため、打撃対象がタイルと下地を含めた重量物の個体となるため、システムの打撃装置では打撃力が足りない。
- 3) タイルの施工状態、躯体のはらみ、および診断機の揺れなどによって、タイル壁面と打撃装置間の距離が大きくなり、所定の打撃力を得ることができない。

4. 性能確認試験と結果

4.1 試験概要

システムの作業性能検証のため、実建物においてシステムの適用試験を行った。Table 5 に現場概要を示す。

4.2 試験結果

Table 6 は適用試験における作業時間と面積をまとめたものである。作業時間は準備、片づけなどを含めたシステム稼働のために費やした全体時間を示す。動作時間はシステムが稼働していた時間を示す。診断能率は診断面積を作業時間で除した値を、診断能力は診断面積を動作時間で除した値をそれぞれ示す。

診断能力が 45 m²/h となり、開発目標を達成することができた。しかし、Table 6 において、作業時間と動作時間を比較してみると、作業時間 710 分に対して、動作時間が 296 分となっている。機械が実際に稼働している時間の倍以上の時間が準備、片づけ、盛り替えなどの段取のために費やされており、これら段取り時間の短縮が今後の課題といえる。ただし、性能確認試験をおこなった建物は、以下に示す点で条件が悪いものであり、その後の適用建物では、改善が見られた。

- 1) システムを適用した最初の現場であるため作業員が未習熟であった
- 2) 建物の構造上、外壁診断機を盛りかえる回数が通常建物よりも多かった

5. まとめ

外壁タイル自動診断システムを開発し、模擬壁面および実建物において適用した結果、以下のことが確認された。

- 1) 診断値のしきい値は 0.9 に設定した場合に、システムによる診断結果と熟練工の診断結果がもっとも多く一致する。その場合、熟練工とシステムで一致するタイルの枚数は全体の 80~90%であった。
- 2) システムの診断結果、熟練工の判断結果、引張り試験結果の 3 者を比較した結果、引張り試験結果のみが違っているタイルが 6.35%、熟練工の診断結果のみ

Table 4 各診断結果の一致状況
Matching Condition of Each Diagnostic Result

診断結果	タイル枚数
3者共に一致	48
引張り試験結果のみ相違	4
熟練工の診断結果のみ相違	3
システムによる診断結果のみ相違	8
合計	63

Table 5 システム適用現場の概要
Outline of Applicable Building

建築面積	1240.6 m ²
延床面積	11,496.30 m ²
規模	鉄骨鉄筋コンクリート造 地下1階, 地上9階, 塔屋1階
タイル種類	二丁掛け

Table 6 システムの作業時間と診断面積の関係
Operating Hours and Checking Area of System

	作業時間 min	動作時間 min	診断面積 m ²	診断能率 m ² /hour	診断能力 m ² /hour
初日	320	136	112.5	21.1	49.6
二日目	390	160	110	16.9	41.3
合計	710	296	222.5	18.8	45.1

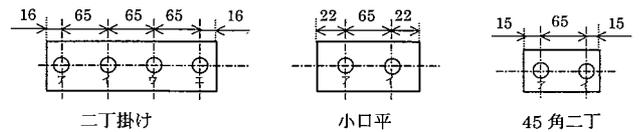


Fig. 5 各タイルにおける打撃点 (単位 mm)
Striking Point of Each Tile

が違っているタイルが 4.76%、システムの診断結果のみが違っているタイルが 12.7%であった。

- 3) システムの診断能力は 45.1 m²/hour となり、熟練工 1 人とほぼ同等である。
- 4) システムが実際に動作している時間以外に、準備、盛り替え、撤収に要する時間が必要である。現場によっては、準備、盛り替え、撤収に要する時間は、システムが実際に動作している時間を上回る場合もあった。

参考文献

- 1) 井上ほか：外壁タイル検査ロボットの開発，第5回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.407~412，1995
- 2) 堂山ほか：タイル剥離有無の自動識別方法に関する検討，日本建築学会大会梗概集（材料・施工），pp.515~516，1998.9，
- 3) 建設大臣官房官庁営繕部，建築工事共通仕様書平成9年版，公共建築協会，pp.197~198，1997