

# 外壁タイル診断の自動化技術

中村 聡\* 上野 隆雄\*\*

**要約：** 外壁タイル診断は、点検用ハンマをタイルに接触させる事で発生する音の違いにより判定される剥離診断と、目視によるひび割れ調査を作業員が高所にて行うのが一般的である。従来の外壁タイル診断は、タイルの剥離・ひび割れ位置が定量的に把握し難いことや診断結果に検査者の主観が入ること、診断記録が残り難い等の問題点があった。また、高所作業のために診断作業時の危険性が高い作業であった。

今回、多様な外装仕上げ形状に対応するため擦過式・打診式両方の診断動作機能を有すると共に、検査状況を再現可能なデータとして記録し、解析を行うことで外壁タイルの状態を判定できる外壁タイル診断装置を新たに開発した。本論文では装置開発時に行った基礎実験と、建物における実証試験結果について記す。

**キーワード：** 外壁タイル診断, 打音, 擦過音, ウェーブレット変換

- 目次：**
- |                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| 1. はじめに           | 4. 外壁タイル診断音の解析       |
| 2. 圧電素子式外壁タイル診断装置 | 5. 新型外壁タイル診断システム実証試験 |
| 3. 打音による外壁タイル診断   | 6. まとめ               |

## 1. はじめに

近年、昭和40年代の高度成長期に建てられた多くの建築物は、老朽化が進み更新時期を迎えている。またバブル経済崩壊後、建築物に対する考え方も変化しつつあり、従来の「スクラップアンドビルド」から「ストック」へと社会の価値観も変化してきている。このような社会的背景のもと建築物リニューアル工事における外壁面の診断・補修工事は建物の長寿命化だけでなく、外壁面の崩壊等による災害を防止する手段として重要である。一般に外壁タイル診断は、点検ハンマによって発生する打音や擦過音からタイルの剥離についての判断を検査者の感覚に頼って行われるため、定量的な判断が困難である上に、診断結果を記録に残し難いなど問題点があり、作業の自動化が望まれているテーマの1つであった。

メカトロ研究室は外壁面での作業を自動化・無足場化する各種装置の開発に取り組み、作業の安全性向上、生産性向上を図っている。新たに開発した外壁タイル診断装置(写真1)は、前述の問題点を解決する手段として、研究を進めている外壁面作業を自動化する技術と、これまでの外壁タイル診断技術<sup>1)2)</sup>を応用・発展させたものである。当該装置は、人が行うようなタイル面を叩いたり、擦ったりという点検時の動作を行う事ができ、この動作により発生した打音もしくは擦過音をある一定の周波数に限定し解析することで外壁タイルの剥離を定量的に判定するものである。また、診断しているタイルの状況及び診断音、位置情報は映像として記録され再現性のあるデータとして保存することが可能となっている。本論文は、タイル診断の基礎実験および診断システムの実証試験として建物の外壁タイル診断に適用した結果について記す。

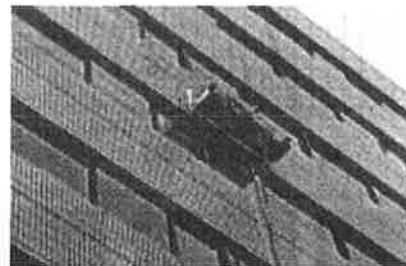


写真1 新型外壁タイル診断装置

## 2. 圧電素子式外壁タイル診断装置

メカトロ研究室は以前、圧電素子を用いた壁面タイル診断装置を開発した。圧電素子は電圧信号を発生する事で振動し、また反対に振動を受ける事で電圧信号を発生する。発信側素子によって一定の周波数でタイル面を振動させ、受信側素子によって受信し電圧信号として出力する(写真2)。剥離しているタイル壁面にはタイルの背面に空洞があるため、健全全部タイルが健全部に比べ大きく振動し、受信側素子から出力される電圧信号も健全部に比べ高い波高値となる。

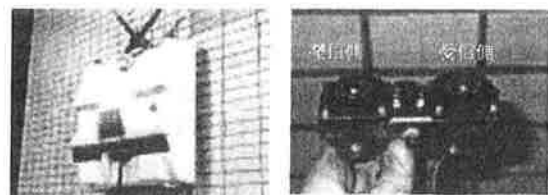


写真2 外壁タイル診断装置と圧電素子

診断性能を再確認するため、圧電素子式外壁タイル診断装置を用いて模擬タイル壁面（図1）での実験を行った。この模擬タイル壁面はタイルの一部を人工的に壁躯体と剥離させ浮きを作り出したものである。

この実験によりタイル壁面での健全部と不健全部（浮き部）の受信波形の違いを確認した（図2）。また、以下のような知見が得られた。1) 模擬タイル壁面でタイル浮き部が最も大きく振動し、受信電圧の波高値が最も大きくなるのは、2,000Hzの振動を与えた時であった。2) タイル浮き部の振動が最も大きくなる共振周波数はタイルの種類や形状等によって異なるが、同様のタイルであれば共振周波数も同じである。3) 発信波には正弦波が適している。矩形波を発信した場合、受信波のゲインが少なく受信波に変調波が含まれるため判別しにくい。

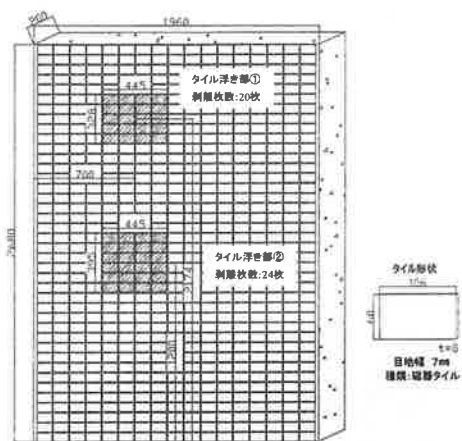


図1 模擬タイル壁面

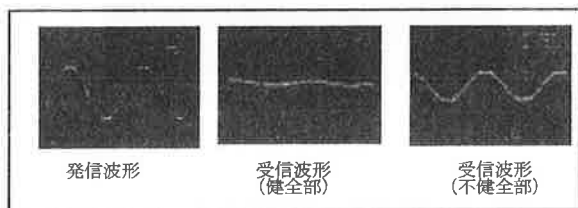


図2 圧電素子出力信号波形

### 3. 打音による外壁タイル診断

圧電素子を用いた外壁タイル診断装置の開発・現場適用後、リニューアル工事におけるコスト削減や工期短縮に対する要求が高まり、診断作業のスピードアップが必要となった。

外壁タイル診断装置の診断速度向上を図るため、点検ハンマでタイル面を擦ったり、叩いたりして発生する音の違いを聞き分け、健全部と不健全部を判別する人力による診断の原理を診断装置へ応用できないか検討を行った。

タイルの健全部、不健全部を叩いて発生する音の違いを比較するため、図1で示した模擬タイル壁面を点検ハンマ（パ

ルハンマ）で叩いた時の打音を健全部と浮き部（不健全部）で記録し、得られたタイル壁面の打音の周波数分析を行った（図3）。図から、模擬タイル壁面の健全部、不健全部において、1,000Hz～3,000Hzの周波数帯域で打音波形の明らかな違いが見られる。不健全部ではこの周波数帯域の音圧レベルが健全部よりも大きいことを確認した。このように、ある周波数帯域における音圧レベルの違いが、打音を聞いた時に感じる音の差異であると推測される。

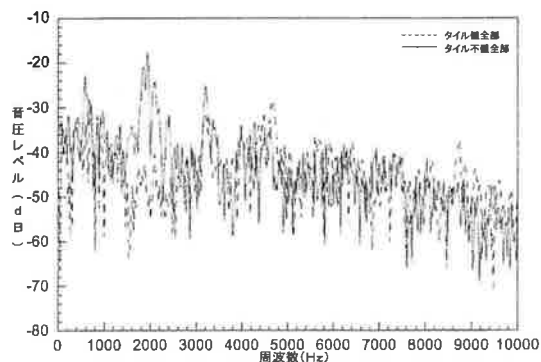


図3 タイル打音の周波数分析結果

### 4. 外壁タイル診断音の解析

模擬タイル壁面において健全部と不健全部の打音波形の差が顕著だった2,000Hzを中心とした打音は、圧電素子式タイル壁面診断装置の実験で確認されたタイル浮き部共振周波数とほぼ一致する。タイル共振周波数付近における打音や擦過音を解析する事により、打音、擦過音によるタイル壁面診断装置においても定量的にタイルの浮きを検出する事が可能であると考え、打音、擦過音の解析方法について検証を行った。

打音、擦過音を解析するにあたり、時間と共に変化するタイル壁面の打音、擦過音波形を局部的に表すためウェーブレット変換<sup>3)</sup>を用いた。ウェーブレット変換式を式(1)に示す。打音、擦過音波形をウェーブレット変換により2,000Hz付近の周波数に限定した解析を行い、健全部、不健全部における打音、擦過音波形の違いを比較した。

$$(W_{\Psi f})(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (1)$$

$a$ : scale,  $b$ : translation,  $\Psi$ : motherwavelet

模擬タイル壁面の健全部、不健全部の打音波形をウェーブレット変換したものを図4、図5に示す。図4は健全部打音、図5は不健全部の1打分の打音波形であり、グラフの縦軸が音圧レベル、横軸が時間を表している。図中の上段に示したグラフは変換前の打音波形、下段に示したグラフはウェーブレット変換を行い2,000Hzの周波数付近の波形を示したものである。

また、図6、図7に模擬タイル壁面の健全部、不健全部のタ

イル擦過音について変換前の波形とウェーブレット変換した波形を打音波形と同様に示す。

図4、5の上段に示したタイル健全部と不健全部における変換前の打音波形からは、健全部、不健全部の明確な音圧レベルや波形の差が見られない。そのため、元の打音を比較するだけでは健全部、不健全部であるか判定することが困難である。

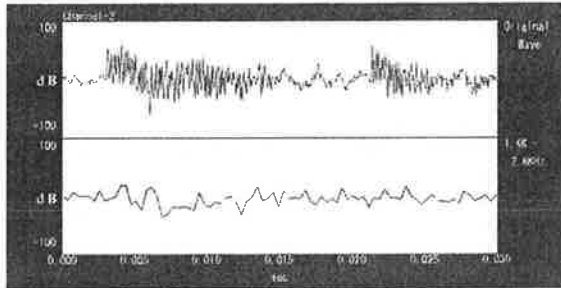


図4 タイル健全部打音

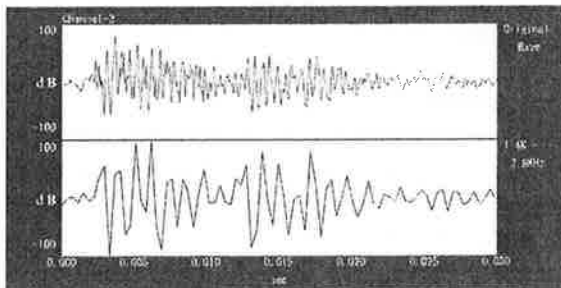


図5 タイル不健全部打音

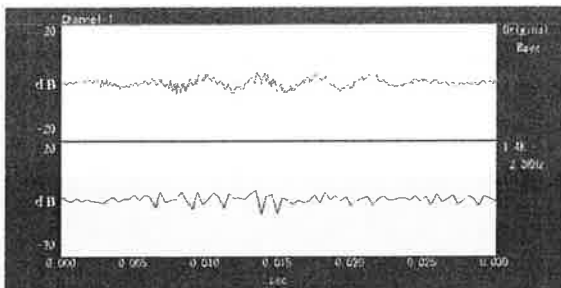


図6 タイル健全部擦過音

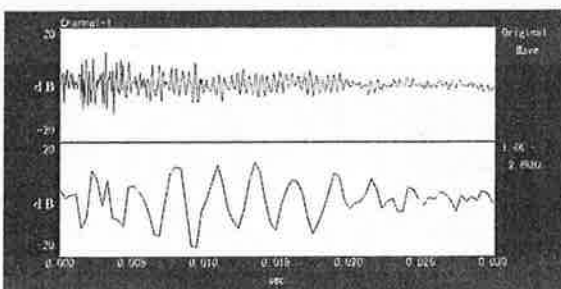


図7 タイル不健全部擦過音

次に、図4、5の下段に示したウェーブレット変換したタイル共振周波数付近の打音について比較すると、タイル健全部と不健全部では共振周波数付近の音圧レベルに明確な差があることがわかる。これは擦過音についても同様なことから、外壁タイル診断において対象建物のタイル共振周波数が既知であればウェーブレット変換を用いた診断音の解析が有効であることを確認した。

## 5. 新型外壁タイル診断システム実証試験

### 5.1 システムの概要

診断音の解析手法を基に打音や擦過音による診断が可能な、新しい外壁タイル診断システムを構築した。当該システムはマイクによって診断音を収集するため、短時間にデータ採取ができることや、打音・擦過音を再現性のあるデータとして記録できる特長がある。

システム構成は、建物屋上に設置し診断装置本体の揚重を行う「吊り装置」、「診断装置本体」、診断装置から送られてくる診断音データと画像データを地上で記録する「記録装置」の3つから構成される(図8)。

診断装置本体には、点検ハンマを動作させるハンマ駆動装置、打音・擦過音を収集するマイク、壁面の映像を撮影するカメラ、診断位置を計測するエンコーダが内蔵されている(写真3、図9)。

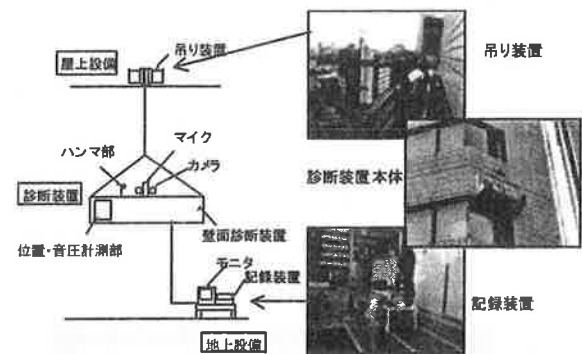


図8 タイル壁面診断システム概要

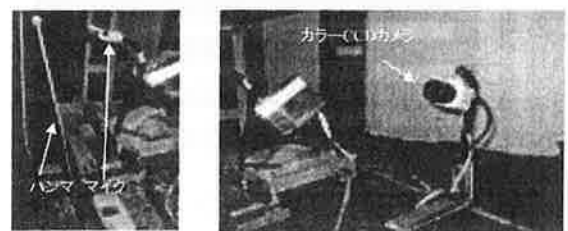


写真3 診断装置搭載機器

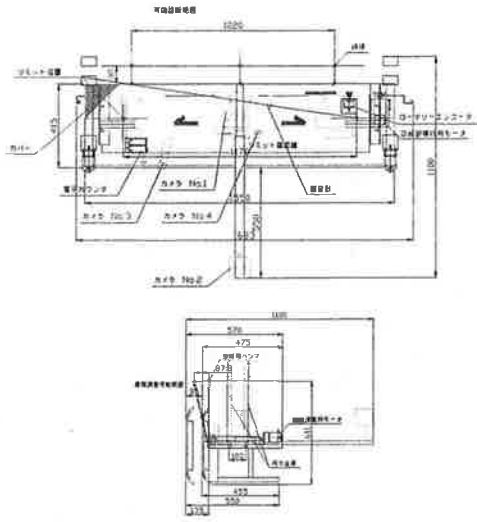


図9 壁面診断装置本体形状

本診断装置による診断動作は外壁タイルを点検ハンマで叩いて打音を発生させる打診動作と、外壁タイルに点検ハンマを左右に擦り擦過音を発生させる擦過動作の2種から選択でき、この2種の動作を組み合わせることで人間による診断動作に近い診断が可能となっている。

### 5.2 実証試験内容

本システムによる外壁タイル診断結果の妥当性を確認するため、実際の建物外壁タイルにて実証試験を行った。対象建物は鉄筋コンクリート造の地下1階、地上9階建てのオフィスビルで、竣工後19年経過している。実証試験を行うにあたり、外壁面の窓等を除いたタイルの面積約 626.12 m<sup>2</sup> を診断実証試験範囲とした(図10, 写真4)。

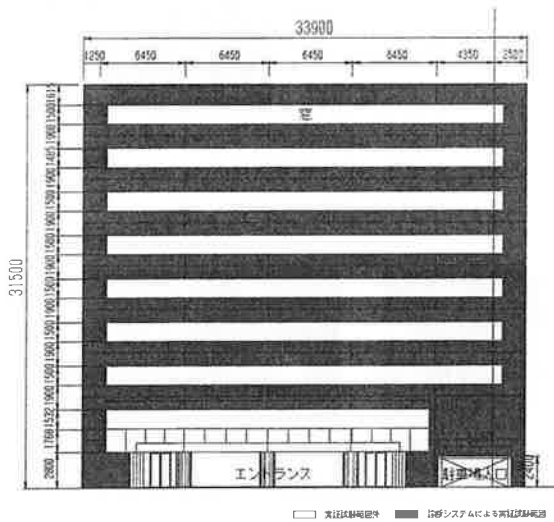


図10 実証試験対象建物の外壁タイル診断範囲

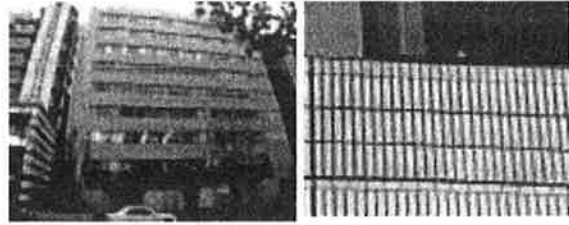


写真4 実証試験対象建物及びタイル形状

実証試験は、①タイル浮き判定の基準となるタイル健全部および不健全部の診断音データを記録するキャリブレーション作業を含めた「事前準備作業」、②診断時のデータを記録する「診断作業」、③記録した診断音データを基にタイル不健全箇所の特定をする「解析作業」の順に実施した。診断システムによる診断後、人力による外壁タイル診断を行い診断システムによる診断結果と比較することでシステムによる診断結果の妥当性を確認するものとした。

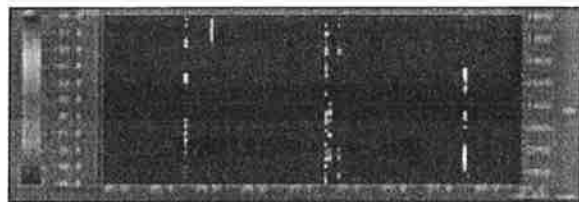
今回の実証試験においては、タイルの凹凸が大きい等の理由により擦過音ではなく打音による打診を選択した。

### 5.3 実証試験結果

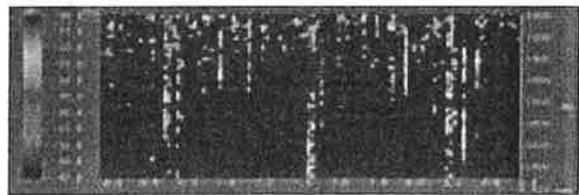
キャリブレーション時に収集したタイル健全部診断音基準データと、不健全部診断音基準データをタイル共振周波数付近の音圧レベル毎に色分けしたグラフを図11に示す。縦軸を周波数、横軸を時間としている。

健全部と不健全部の打音音圧レベル比較した結果、2,000Hz付近で顕著な差が確認された。また、暗騒音等の影響が大きい屋外の環境下においてもタイル健全部、不健全部の判定がこの診断システムによって可能なことが確認された。

この結果から、実証試験対象建物における壁面のタイル共振周波数を2,000Hzと設定し、タイル浮きを2,000Hz付近の打音音圧レベルの強弱によって判定することとした。



健全部打音データ (打診3回分表示)



不健全部打音データ (打診3回分表示)

図11 キャリブレーション時の打音データ

診断システムにより収集された打音データを基に、対象建物の外壁タイルの共振周波数である 2,000Hz 付近の音圧レベルの強弱によって解析した結果を図 12 に示す。図 12 に示した解析結果は、診断システムの打診 1 回を 0.036 m<sup>2</sup>のタイル面積として換算し、解析によってタイル不健全箇所と判定された箇所を四角枠で図示したものである。診断システムの移動距離は横 15 cm、縦 24 cm に設定、1 回の打診で診断する面積 0.036 m<sup>2</sup> は、対象建物の外壁タイル 2 枚分に相当する。

実証試験時の診断システムによる外壁タイル診断では、外壁タイル面積 626 m<sup>2</sup>に対して 8.71 m<sup>2</sup> (外壁タイル全体の 1.4%) のタイルが不健全と判定された。

次に、診断システムによる診断結果の妥当性を確認するため、打音の解析によってタイル浮きと判定されたタイル不健全部位と、足場上から人力によりタイル壁面の診断を行いタイル不健全と判定された位置を重ね合わせたものを図 13 に、診断結果の一致、不一致の面積と比率を表 1 に示す。

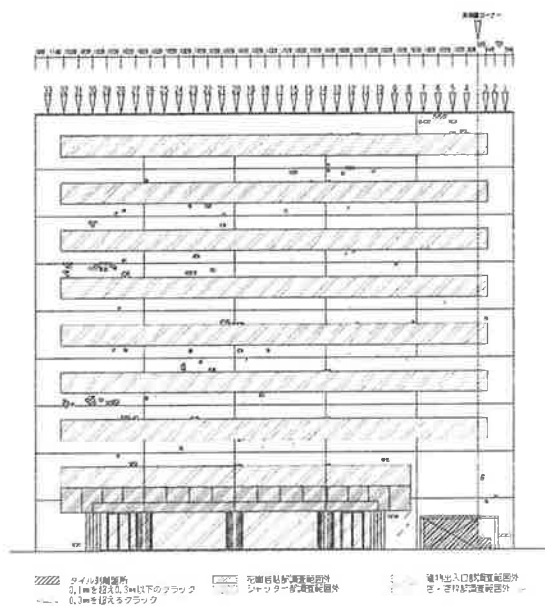


図 12 診断システムによる外壁タイル診断結果

表 1 診断システムと人力による診断結果一致の面積と割合

	健全部	不健全部
診断システム	617.30 m <sup>2</sup>	8.83 m <sup>2</sup>
人力	616.85 m <sup>2</sup>	9.27 m <sup>2</sup>
診断結果一致	616.64 m <sup>2</sup>	8.71 m <sup>2</sup>
比率	-	94.0%
診断結果不一致	0.21 m <sup>2</sup>	0.56 m <sup>2</sup>
比率	-	6.0%

626.12 m<sup>2</sup>の外壁タイル面積に対し、人力によってタイル不健全と判定された面積は 9.27 m<sup>2</sup>であった。この内、診断システムによる診断結果と人力による診断結果が一致した面積は 8.71 m<sup>2</sup> (不健全部と判定された面積の 94%) であった。また、診断装置による診断結果が一致しない箇所は、健全部、不健全部の面積を合わせ 0.77 m<sup>2</sup>という結果になった。

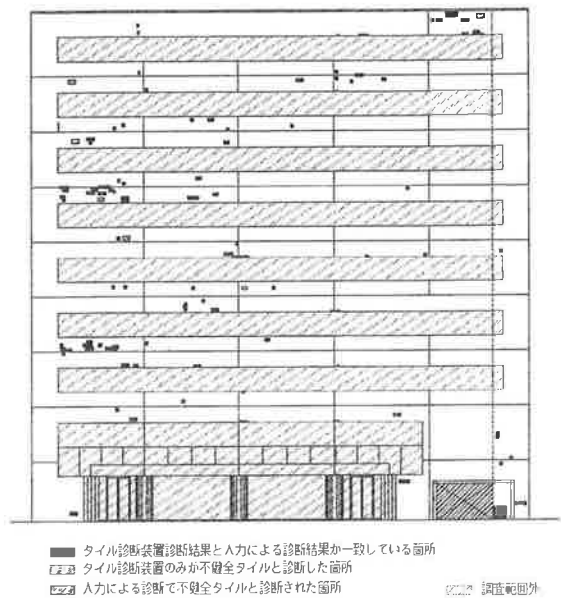


図 13 システム診断結果と人力診断結果照合図

#### 5.4 実証試験考察

今回行った実証試験において、外壁タイル診断システムによってタイルの打音を記録し、ウェーブレット変換解析することで外壁タイルの不健全箇所を判定できることを確認した。また、診断システムによる診断結果が人力による診断結果と一致する比率が 94%と高く、診断システムによる診断結果の妥当性についても確認された。しかし、診断システムによる診断結果と人力による診断結果において一致しない箇所が 6.0%程度発生した。診断結果が一致しない原因としては、診断装置によって点検ハンマを外壁タイルに接触させる際にタイル端部や目地等に接触し通常と異なる打音が発生したこと、診断するピッチが荒く診断装置が不健全箇所を診断せずに通過したことなどが考えられる。

#### 6. まとめ

今回行った実証試験結果より、以下の事項を確認した。

- (1)対象とするタイルの共振周波数を特定し、建物外壁タイルの診断音をウェーブレット変換することによりタイル不健全箇所の判定が可能
- (2)外壁タイル診断システムの診断結果と人力の診断結果が

94%の比率で一致し、診断システムの診断結果は信頼性が高い  
今後は、タイルのみの剥離とタイル下地であるモルタル層の剥離など、剥離箇所の違いによる診断音の違いについても解析

を進め、解析時にタイル不健全要因についても判定できる診断システムの構築を進める。また、今回の実証試験で結果が一致しなかった要因について検討を進め、さらに信頼性の高い診断システム構築を目指す。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、多大な御協力を頂きました東急リニューアル株式会社の関係各位に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 後久卓哉・坂本浩一：壁面作業ロボットの開発（その3）、東急建設技術研究所報，No.23，1997年9月
- 2) 鷹巣征行・福田澄男：壁面診断ロボットの開発 - タイル剥離検知と補修のシステム化 -，東急建設技術研究所報，No.19，1993年10月
- 3) 神原 進：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電機大学出版局，1995年11月

## AUTOMATION OF BUILDING OUTER WALL TILE INSPECTION

S.Nakamura and T.Ueno

As for inspection of building outer wall tile, it is common that an inspector sees cracks and strike tiles with a hammer, and listen to that echo. In this method, it is difficult to be evaluated quantitatively and to be decided by inspector's subjectivity. It is danger that an inspector inspects tiles in the high place.

A tile inspection system that can be diagnosed various type of tiles by striking tiles with a hammer and scratching those, is developed. This system is able to record and review results of inspection.

This paper shows results of fundamental test and on-site test of a tile inspection system.