

## 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究

添田 智美 藤沼 智洋

### 概 要

外装タイル張り仕上げは、経年による剥離や剥落が問題となることが多い。特に剥落事故が生じると第三者に危害を及ぼす危険性が高いため、外装タイルの剥離の有無を精度よく診断し、タイルの剥落を未然に防ぐ必要がある。そこで、高精度で高効率なタイル剥離診断装置を開発することを目的として基礎的検討を行った。まず、条件の異なる模擬剥離試験体を作製し、検査員による打診と既存の剥離診断装置による診断を実施して、検査員や既存の装置の課題を抽出した。次に、適した診断方法および剥離判定基準の設定方法を模索するため、鋼球を用いた比較的単純な打撃機構により試験体を打撃した際の打撃音を収録し、健全部と剥離部の応答の違いを実験的に検討した。さらに、高効率の打撃機構とマイクを併せ持つ装置を試作し、適した打音解析方法、剥離判定基準、剥離深さの予測方法について有効な手法を検討した。

### Basic Study into a Diagnostic System for Exterior Tile Debonding

#### Abstract

Exterior tile cladding sometimes suffers debonding or adhesive failures as it ages. Failures that lead to cladding tiles falling from the building are highly dangerous for people, and consequently, it is vital to be able to identify debonding defects at an early stage to prevent tiles falling. In this study, we examined the possibility of developing high-precision and efficient debonding detection apparatus. Initially, we prepared eight exterior-tile wall specimens with artificially-made debonding areas. Percussion tests were carried out by three professional testers, and diagnostic tests were also performed using two types of existing debonding detecting apparatus. From the results of these tests, we extracted some problems to be solved. Next, in order to study appropriate diagnosis methods and criteria for assessing debonding areas, we recorded and analyzed percussion sounds of steel-ball impact adopting a simple impacting mechanism, and experimented the differences of percussion sounds between debonded and non-debonded areas. We manufactured a prototype apparatus which has a highly efficient impact mechanism and a microphone, and examined suitable sound analysis methods and criteria for judging debonding, as well as an effective method for predicting depth of the debonded area.

キーワード： 外装タイル、剥離、診断、打音、剥離深さ

## §1. はじめに

外装タイル張り仕上げは、経年による剥離や剥落が問題となることが多い。特に剥落事故が生じると第三者に危害を及ぼす危険性が高いため、外装タイルの剥離の有無を精度よく診断し、タイルの剥落を未然に防ぐ必要がある。このような中、2008年4月の建築基準法改正により、3階建て以上のタイル外壁では10年毎の定期報告が義務化され<sup>1)</sup>、タイル診断のニーズがますます高まっている。

タイル剥離診断方法にはいくつかの種類があるが、最も一般的に用いられている手法は、検査員が打診ハンマーを用いてタイルを打撃し、打撃応答音によって剥離を判定する打音検査である。しかし、人による打音検査は、技量や経験および検査環境などによって診断結果に差異が生ずるなどの精度の問題や、剥離位置を図面化するのに手間がかかるなどの効率の問題がある。このような背景から、打撃機構とマイクを併せ持ち、マイクで収録した打撃音を解析して剥離の有無を機械的に判定する装置もこれまでも開発されてきており<sup>例え ば 2)3)</sup>、それらの解析のアルゴリズムや判定基準は多種多様であるが、より精度や効率を高める余地があると思われる。

また、タイル張付け層で剥離しているか、または、下地モルタルから剥離しているかにより、改修方法などに影響を及ぼすが<sup>4)</sup>、検査員および打診装置のいずれの診断においても、剥離界面の判定方法については、これまで十分な検討に基づく基準が示されているとは言い難い。

そこで、筆者らは、高精度で高効率なタイル剥離診断装置を開発することを目的として検討を行ってきた。本報告では、装置の根幹をなす剥離診断方法には打音法を採用し、高精度で効率よく剥離を診断する手法および剥離深さを判定する方法について基礎的検討を行った結果を報告する。

## §2. 検討方法

本研究では、次の通り検討を進めることとした。

- ① 模擬剥離試験体を作製し、熟達した検査員による診断と既存の剥離診断装置による診断を実施して、それらの課題を抽出する。
- ② 適した診断方法および剥離判定基準の設定方法を模索するため、鋼球を用いた比較的単純な打撃機構により試験体を打撃した際の打撃音を収録し、健全部と剥離部の応答の違いを実験的に検討する。
- ③ 打撃装置とマイクを併せ持つ装置を試作し、模擬剥離試験体を打診した結果を基に適した解析方法、剥離判定基準、剥離深さの予測方法について検討する。

## §3. 模擬剥離試験体の概要

模擬剥離試験体のタイル張付け仕様一覧を表1に示す。タイルは3種類を選定し、張付け材料、下地モルタルの有無、剥離界面、剥離深さを変化させた。作製した模擬剥離試験体の概要を図1に示す。剥離エリアは、タイル1枚あたりの剥離面積が多様となるように設定した。模擬剥離材として、厚さ0.1mmの高密度ポリエチレンフィルムの両面に不織布を一体成形させた厚さ1.1mmの特殊フィルムを選定し、写真1および図2に示す通り、想定する剥離界面の下地側に両面テープで張付けておき、その後に塗付けるモルタル中に埋め込むことで剥離を再現した。タイルの張付けは、熟練工により、所定の剥離位置以外に剥離が生じないように入念に施工した。

表1 模擬剥離試験体のタイル張付け仕様一覧

試験体名	タイル種類・寸法(mm)	張付け材料(張代)	下地モルタル	剥離界面 <sup>*1</sup>	剥離深さ(mm)
XDH	50 二丁モザイクタイル [X]	モルタル(2mm)	なし[D]	張付け材裏[H]	9
XMH				張付け材裏[H]	9
XMS				下地モルタル裏[S]	19
XMSw				下地モルタル裏[S] (剥離厚2倍) <sup>*2</sup> [w]	19
YDH	二丁掛タイル [Y]	モルタル(2mm)	なし[D]	張付け材裏[H]	15
YMH				張付け材裏[H]	15
YMS				下地モルタル裏[S]	25
ZMS	二丁掛タイル [Z]	有機系接着剤(1mm)	10mm [M]	下地モルタル裏[S]	22
壁体	鉄筋コンクリート造:900×750×150mm W/C:51.8%、圧縮強度(4週):33.8N/mm <sup>2</sup>				
備考	*1 特殊シートを埋め込むことで剥離再現 *2 特殊シートを二重にして埋め込み [ ] 内は仕様を表わす記号				

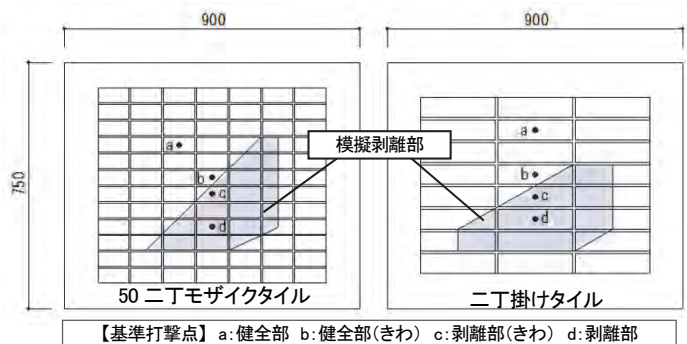


図1 模擬剥離試験体の概要



写真1 試験体作製状況

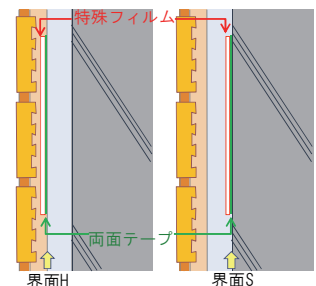


図2 模擬剥離界面の模式図

## §4. 検査員および既存の剥離診断装置による検査

### 4.1 検査員による検査の概要

検査員による打音診断精度の傾向を把握するため、表 1 に示す全試料に対し、熟達した検査員 3 名(記号: i、ii、iii)による打音検査を実施した。診断結果は、事前に用意したタイル割付け図面に剥離判定位置をマッピングしてもらうこととした。打診棒は写真 2 に示すものを使用し、打診の仕方は各検査員に任せた。

検査員による診断結果の例を図 3 に示す。図中の緑色の枠線内は模擬剥離範囲を表し、赤く示した部分は検査員が剥離と判断してマッピングした範囲である。

検査結果の判定精度の評価は、図 4 に示すように、50 二丁モザイクタイルはタイル 1 枚あたり 3 分割、二丁掛タイルは 5 分割した箇所の中央を評価点と位置付け、評価点の判定結果を診断結果から抽出して集計することとした。ただし、評価点がちょうど模擬剥離範囲の剥離境界にあたる箇所は判定精度評価の対象外とした。図 3 中の緑丸が剥離部における評価点に該当する。

ここで、健全部の評価点数に対する正答数の割合を「健全部正答率」、剥離部の評価点数に対する正答数の割合を「剥離部正答率」と定義して判定精度を評価することとした。

### 4.2 既存の剥離診断装置による検査の概要

既存の剥離診断装置の診断精度の傾向を把握するため、写真 3 および写真 4 に示す装置 I および II を選定し、表 1 に示す全試料に対して検査を実施した。いずれの装置も、判定の基準となる定量的な数値は示されていないものの、打音判定結果をランプ表示する機能が付いている。このうち装置 II は、剥離状態を「赤」、正常を「青」、その中間を「黄」のランプで表示するものとなっている。

診断装置による検査では、図 4 に示す評価点を全タイルで打診して結果を集計した。装置 II による診断結果の例を図 5 に示す。本報では、「赤」が表示された評価点を「剥離」と判定することで図 5A に示すように既知の剥離範囲と合う結果が得られた。しかし、仮に「黄」も「剥離」と判定した場合には、図 5B のとおり全面的に剥離と判定されることとなる。

### 4.3 検査員および既存の打診装置による検査結果

図 6 に各検査員および装置の健全部正答率を示す。結果は、タイルと剥離界面の組み合わせごとに集計した。図より、健全部正答率は概ね高い水準であることがわかる。しかし、有機系接着剤で張付けた試験体(Z\_S)では、装置(I、II)による健全部正答率がやや低下しており、健全箇所を剥離と判定してしまう場合がある。

図 7 に各検査員および装置の剥離部正答率を示す。いずれの検査員、装置においても、健全部と比較して剥離部

表 2 検査員および既存の剥離診断装置による検査概要

検査方法	記号	概要
熟練検査員	i	打診棒の打撃音により剥離判定 (経験年数 20 年以上)
	ii	
	iii	
剥離診断装置	I	打撃音解析により剥離判定、剥離をランプ表示
	II	

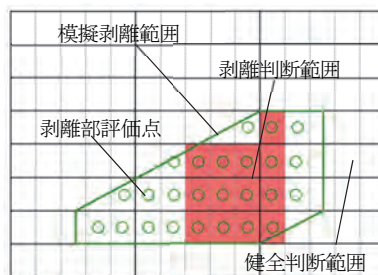


図 3 検査員 i による剥離診断例 (試験体 YMH)



写真 2 打診棒

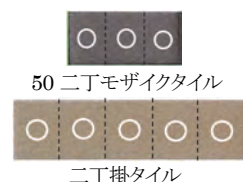


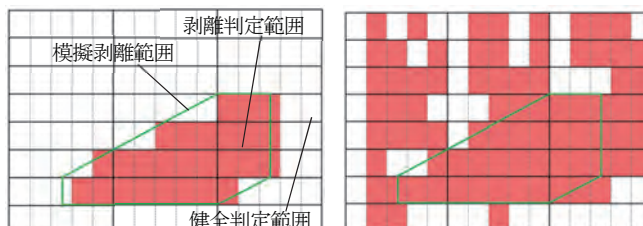
図 4 各タイルの評価点



写真 3 剥離診断装置 I



写真 4 剥離診断装置 II



A: 赤ランプ表示を「剥離」とした場合 B: 黄ランプ表示を「剥離」とした場合

図 5 診断装置 II による剥離診断例 (試験体 YMH)

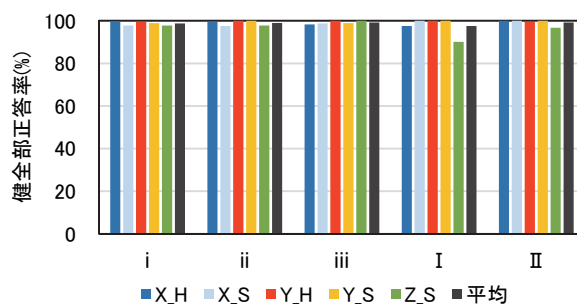


図 6 健全部正答率比較

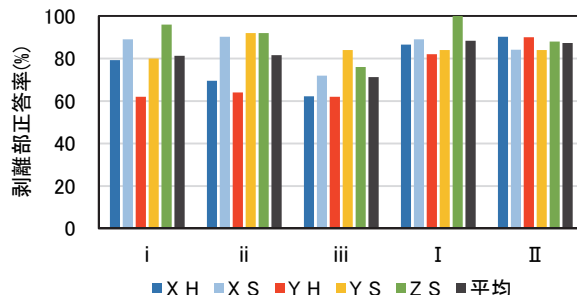


図 7 剥離部正答率比較

正答率が低い傾向にあることがわかる。実際の剥離範囲を健全部として判定してしまう誤診率は、検査員で最大約 40%、既存装置で最大約 20%であった。

今回、装置 II では「赤」表示のみを「剥離」と判定することで高い正答率が得られたが、剥離範囲が未知の外壁での検査の場合には明確な判定基準が必要である。

### §5. 鋼球による打撃音の解析

#### 5.1 打撃および打撃音の収録方法

適した剥離判定方法を模索するため、鋼球による打撃音を収録し、剥離判定に有効な解析手法やパラメータ等について検討した。

写真 5 および図 8 に採用した打撃方法を示す。直径 0.23mm の糸の先端に直径 18mm の鋼球を固定し、高さ 100mm から軌道半径 200mm で振り子のように運動させ、タイル表面に対して垂直に衝突させることで、一定の打撃入力が可能となる機構とした。本試験法における打撃点は、図1における a、b、c、d の 4 箇所を基準打撃点とした。各打撃点の位置づけは次の通りである。

a: 健全部、b: 健全部(きわ)、c: 剥離部(きわ)、d: 剥離部

収録用マイクは、打撃部から 35mm の位置に設置した。振り子方式で打撃すると、鋼球はタイル面での反発と振り子運動を繰り返すが、この運動が終了するまで打撃音の収録を継続した。図 9 に時間波形の例を示す。ここで、「相対振幅」とは、健全部の平均値に対する相対値のことである。図より、剥離部は健全部と比較して、相対振幅が大きく振幅の減衰率が大きいことがわかる。

#### 5.2 相対最大振幅および相対対数減衰率による剥離判定

ここで、相対最大振幅を  $Ar$ 、相対対数減衰率を式 1 に示すとおり  $Ld$  と定義した。

$$\text{相対対数減衰率 } Ld = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \log \left( \frac{Am_k}{Am_{k+1}} \right) \quad \dots \text{式 1}$$

$Am_k$ :  $k$  撃目の相対最大振幅

$Ar$  及び  $Ld$  の特性値を図 10 に示す。 $Ar$  において、剥離部の値が健全部の値を上回る傾向を示し、同様に  $Ld$  においても剥離部の値が健全部の値を上回る傾向を示した。

#### 5.3 周波数解析による剥離判定

周波数特性による剥離判定方法について検証するため、実験によって得られた時間波形の初撃部分 10ms を高速フーリエ変換した。スペクトルの例を図 11 に示す。ここで、「相対パワースペクトル」とは各スペクトルの 0-20kHz 帯のパワーに対する相対値のことである。健全部と剥離部の相対パワースペクトルの比較より、剥離部では特定の周波数の値が大きくなる傾向や 6kHz 以下のパワーが大きくなる傾向



写真 5 鋼球振り子式打撃装置

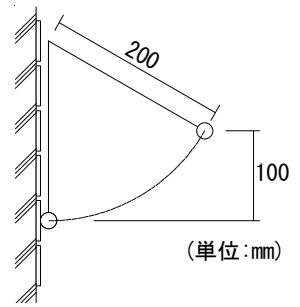


図 8 装置模式図

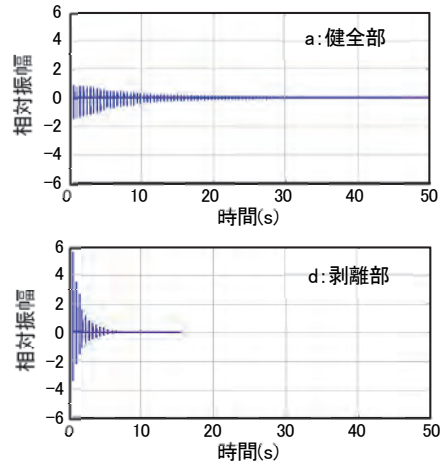


図 9 時間波形の例 (XMS)

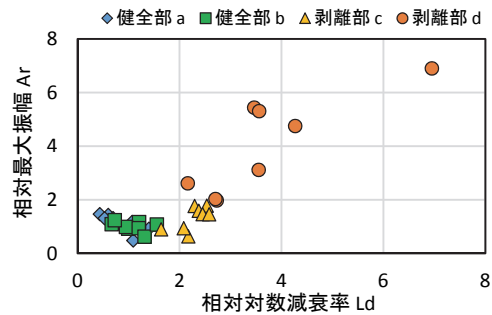


図 10 相対最大振幅と相対対数減衰率の特性値分布

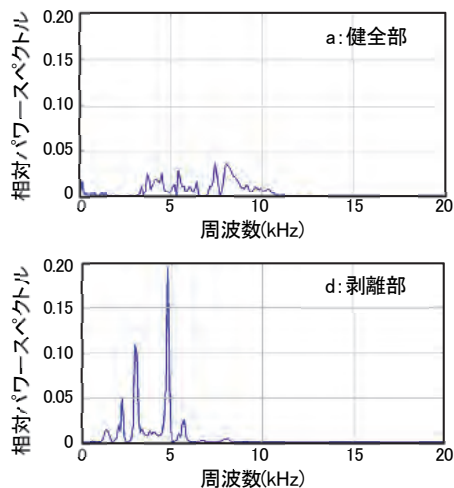


図 11 スペクトルの例 (XMS)

がみられた。そこで、0-20kHz 帯のパワーに対する0-6kHz 帯のパワー比を打撃点ごとに算出することとした。

結果を図 12 に示す。全体的に、健全部の値を剥離部の値が上回る傾向が見られた。また、有機系接着剤でタイルを張付けた ZMS では、モルタルで張付けた他の試験体と比較して、健全部の値が大きくなる傾向が確認された。

### §6. 効率的な剥離診断装置の検討および剥離深さ予測に関する検討

#### 6.1 剥離診断装置の概要

簡易で素早く診断できる装置とするために、単位時間あたりの打撃回数が多く、安定した打撃のできるソレノイドアクチュエーターを有する打撃装置の適用性について検討した。

装置の概要を写真 6 および図 13 に示す。種々検討の結果、ステンレス製の径φ6mm のハンマーヘッドによりタイル表面を垂直に打撃する機構とした。打撃応答音をハンマーヘッド中央から 30mm 離れたマイクで測定し、タイル表面とマイクの距離は 4mm とした。打撃装置とマイクは、振動の吸収が期待できる硬質スポンジにより一体化させた。

#### 6.2 剥離診断判定方法の検討

試作した打診装置を用いて、図 1 における打撃点 a、b、c、d を打撃し、打撃応答音を収録した。

実験結果から得られた時間波形の一例を図 14 に示す。図 10 の振り子方式での相対最大振幅と同様、本実験でも剥離部では最大音圧が大きくなり、特に第一波の後半の最大音圧にその傾向が顕著に見られた。そこで、タイル種類ごとの健全部における第一波後半の最大音圧平均値に対する相対値を「相対最大振幅」と定義した。各測定点における相対最大振幅の測定結果を図 15 に示す。健全部と剥離部とでは相対最大振幅に顕著な差があることがわかる。

相対最大振幅を試験体全面的で測定した結果の分布例を図 16 に示す。図は、二丁掛けタイル 1 枚あたり 10 点を打診した際の分布である。示した色は、健全タイル 2 枚分の振幅の平均値を「白」とし、平均値の 5 倍を「赤」としてカラースケールで示した例である。図のとおり、模擬剥離範囲を高精度で表示できることがわかる。

#### 6.3 剥離深さ予測方法に関する検討

50 二丁モザイクタイルの時間波形第一波部分の例を図 17 に示す。図から、剥離深さが深くなるにつれて、第一波における前半ピークと後半ピークとの波長が長くなる傾向がみられた。そこで、この区間を「ピーク間波長」と定義し、剥離深さとの関係を検討した。

各試験体の d 点における剥離深さとピーク間波長の関係を図 18 に示す。図から、タイル種類ごとに剥離深さと音圧比

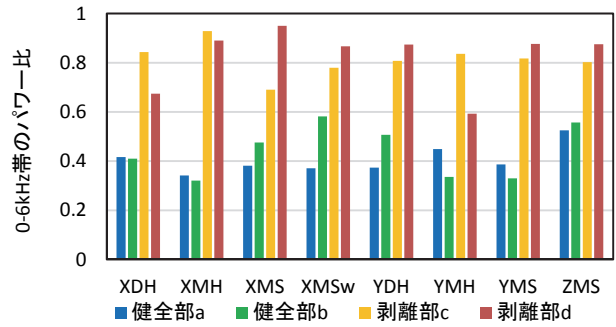


図 12 0-20kHz 帯のパワーに対する0-6kHz 帯のパワー比



写真 6 診断装置

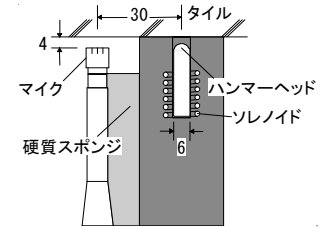


図 13 装置模式図

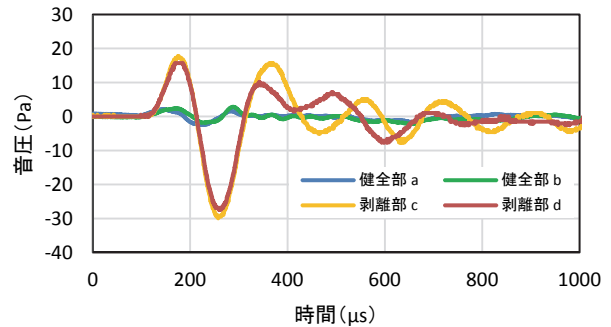


図 14 健全部と剥離部の音圧比較の例 (YMH)

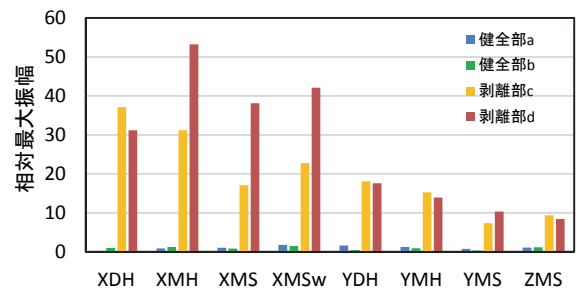


図 15 各測定点における相対最大音圧

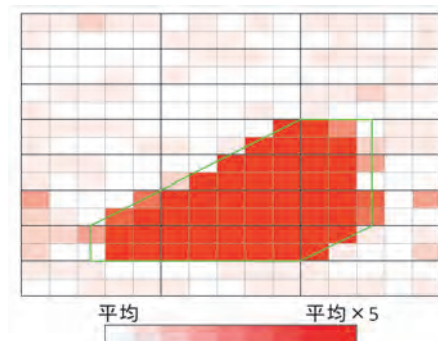


図 16 相対最大振幅による判定例 (試験体 YMH)

ーク間波長に相関関係があることが確認された。

剥離範囲におけるピーク間波長の分布を把握するため、模擬剥離範囲内にある打撃点でのピーク間波長を抽出し、その分布について検討した。図 19 にピーク間波長の分布例を示す。カラースケールは、ピーク間波長  $50 \mu s$  を「白」、 $150 \mu s$  を「青」として表示した。図より剥離深さが深い YMS は浅い YMH と比較して、全体的に濃い青が分布している。また、剥離範囲の境界近傍は、剥離中央部と比較して「白」に近く、ピーク間波長が短くなる傾向がある。

各試験体で抽出したピーク間波長を平均し、剥離深さとの関係を示したものが図 20 である。図のとおり、ピーク間波長と剥離深さとは、高い相関関係があることがわかる。

#### 6.4 剥離判定および剥離深さ予測方法の提案

検討の結果、打撃音をマイクで収録して得られた打音波形の第一波の振幅値により剥離を判定し、剥離判定された点におけるピーク間波長から剥離深さを予測することを提案する。本手法のメリットとして、剥離判定だけではなく剥離深さも予測できること、第一波のみの分析で判定するため、周波数解析による手法と比較して、より高速での打撃および解析が可能となることがあげられる。

### §7. おわりに

条件の異なる模擬剥離試験体を作製し、打音法による剥離診断装置に関する基礎的検討を行った。

実際の剥離範囲を健全部として判定してしまう誤診率は、検査員で最大約 40%、既存装置で最大約 20%であった。

鋼球による振り子方式の打音試験では、相対最大振幅、相対対数減衰率および 0-20kHz 帯のパワーに対する 0-6kHz 帯のパワー比のそれぞれのパラメータにより、剥離を検知できる可能性を確認した。

試作した打診装置では、相対最大振幅により明確に剥離判定ができることを確認した。さらに第一波のピーク間波長により、剥離深さを予測できることを確認した。なお、剥離判定のための閾値については、データ数を増やした上で検討していく予定である。

#### 謝 辞

本稿は、東京工業大学情報理工学研究科情報環境学専攻 三上貴正研究室との共同研究成果の一部です。ご指導いただいた三上貴正准教授、研究に協力いただいた研究室学生 濱田崇行氏、金子堯宣氏、田中直樹氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省告示第 282 号
- 2) 海老原他：打音解析によるタイル剥離診断装置、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.993~994、昭和 62 年 10 月

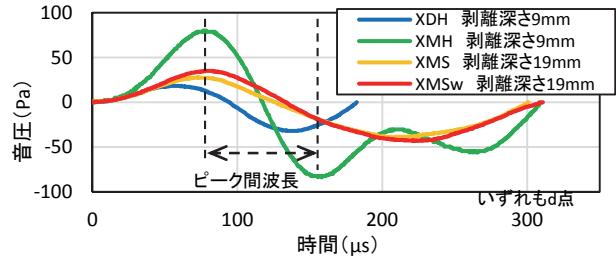


図 17 時間波形第一波部分の例

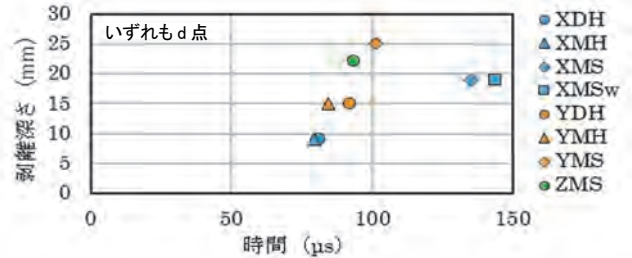


図 18 剥離深さとピーク間波長の関係

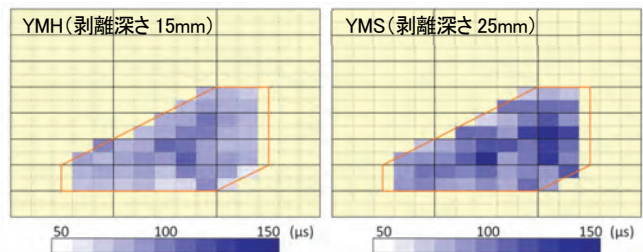


図 19 ピーク間波長の分布例

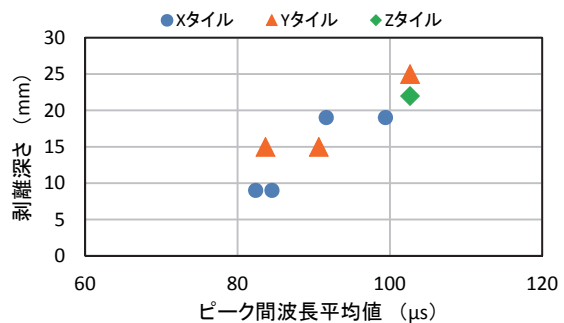


図 20 ピーク間波長と剥離深さの関係

- 3) 渡辺他：外壁タイル調査機の開発 その 1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.679~680、1995 年 8 月
- 4) 堂山他：外壁タイル検査システムの開発 その 1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1125~1126、1994 年 9 月
- 5) 国土交通省大臣官房官庁営繕部 監修 建築保全センター 編：建築改修工事監理指針 平成 25 年版



添田 智美

#### ひとこと

今後、タイル診断のニーズはますます高くなり、適切な診断結果を残すことが非常に重要になってくると思います。