

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	打撃応答音を利用した外装タイル剥離診断法
Title(English)	
著者(和文)	添田智美
Author(English)	Tomomi Soeta
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11298号, 授与年月日:2019年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三上 貴正,横山 裕,坂田 弘安,五十嵐 規矩夫,鍵 直樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11298号, Conferred date:2019/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

打撃応答音を利用した外装タイル剥離診断法

令和元年度

東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系

添田 智美

打撃応答音を利用した外装タイル剥離診断法

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	3
1.2 既往の研究	7
1.3 本研究の目的および範囲	8
1.4 本論文の構成	9
参考文献	11
第2章 打撃応答音による剥離判定の有効性に関する基礎的検討	15
2.1 はじめに	17
2.2 模擬剥離試験体の概要	18
2.3 検査員および既存の剥離診断装置による検査	24
2.3.1 検査員による検査の概要	24
2.3.2 既存の剥離診断装置による検査の概要	26
2.3.3 検査員および既存の剥離診断装置による検査結果	27
2.4 鋼球による打撃応答音の解析	36
2.4.1 打撃方法および打撃応答音の収録方法	36
2.4.2 相対最大振幅および相対対数低減率による剥離判定	37
2.4.3 周波数解析による剥離判定	39
2.5 効率的な剥離診断装置の開発に向けた基礎的検討	41
2.5.1 打撃装置および打撃応答音収録機構の概要	41
2.5.2 剥離判定に用いるパラメータに関する基礎的検討	42
2.6 まとめ	50
参考文献	52

第3章	タイル剥離診断装置の設計・試作	
	および剥離判定パラメータに関する検討	55
3.1	はじめに	57
3.2	タイル剥離診断装置の基本構想	57
3.2.1	打撃機構および打撃力測定機構	58
3.2.2	打撃応答音収録機構	59
3.2.3	打撃力および打撃応答音の較正方針	60
3.3	検討手順	61
3.4	剥離診断装置の設計および試作	62
3.4.1	打撃機構	64
3.4.2	打撃応答音収録機構	64
3.5	装置の較正方法および剥離判定パラメータに関する検討	65
3.5.1	検討方法	65
3.5.2	較正を目的とした試験体の作製	65
3.5.3	試験体測定条件の設定	67
3.5.4	各試験体における打撃力波形および打撃応答音波形測定結果	69
3.5.5	剥離診断に用いる基本パラメータの設定	72
3.5.6	最大打撃力および第一波最大振幅の相対化	75
3.5.7	較正における標準値設定のための隙間条件に関する考察	76
3.5.8	剥離判定パラメータに関する基礎的検討	80
3.6	較正用試験体を用いた複数マイクの有効性の検証	82
3.7	まとめ	86
	参考文献	87
第4章	模擬剥離試験体を用いたタイル剥離診断装置の有効性の検証	89
4.1	はじめに	91
4.2	模擬剥離試験体	92
4.3	試験概要および剥離判定パラメータ	95
4.3.1	剥離診断装置の設定	95
4.3.2	装置の較正	96
4.3.3	打撃点の設定	97
4.3.4	剥離判定パラメータ	97

4.4	模擬剥離試験体測定結果	98
4.4.1	特徴点における計測波形および R_{AF} 算定結果	98
4.4.2	全試験体における R_{AF} 測定結果	103
4.4.3	剥離判定のためのしきい値に関する検討	110
4.4.4	複数マイクの有効性に関する確認	114
4.5	対向するマイク間の R_{AF} の差による打撃点の特徴の把握	117
4.6	剥離判定におけるソレノイドアクチュエータ駆動電圧の影響	121
4.7	まとめ	124
	参考文献	126
第5章 剥離範囲および剥離深さ推定方法の提示		127
5.1	はじめに	129
5.2	剥離範囲の推定方法	130
5.2.1	タイル割付法による推定剥離範囲の区画	130
5.2.2	三角形分割法による推定剥離範囲の区画	134
5.2.3	ワイヤフレーム等高線法による推定剥離範囲の区画	137
5.3	剥離深さの推定方法	149
5.3.1	R_{AF-max} による剥離深さの推定	149
5.3.2	対向するマイク間の R_{AF} の差による剥離深さの推定	153
5.4	推定剥離範囲の割り増し方法の提案	155
5.4.1	推定剥離範囲の割り増し方法の提案	155
5.4.2	対向するマイク間の R_{AF} の差による剥離深さの推定	157
5.5	まとめ	159
	参考文献	161
第6章 結論		163

本研究に関連して発表した論文	169
本研究に関連して発表した論文	171
その他外装タイルに関して発表した論文	173
付録	175
付 1 特殊シートを用いた模擬剥離試験体と 空隙を有する模擬剥離試験体との比較検討	177
付 2 診断位置認識・記録システム	180
謝辞	181

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

外装タイル張り仕上げは、我が国における代表的な建築物の外装仕上げの一つである。外装タイルは無機材料の陶磁器を素材としているために耐候性に優れており、また、高級感のある色調や趣のあるテクスチャーを有することなどから多くの人に好まれ、公官庁施設、教育施設、医療福祉施設、事務所ビルおよび集合住宅など、様々な建築物の外壁に採用されてきている。図 1.1 に外装タイルおよびモザイクタイルの出荷量の集計結果を示すが、最近 10 年は一時期より出荷量が減ってはいるものの、毎年 15 百万 m^2 もの外装を主用途とするタイルが出荷されており、日本国内に膨大な面積の外装タイル壁面がストックとして残されていることが認識できる¹⁾。

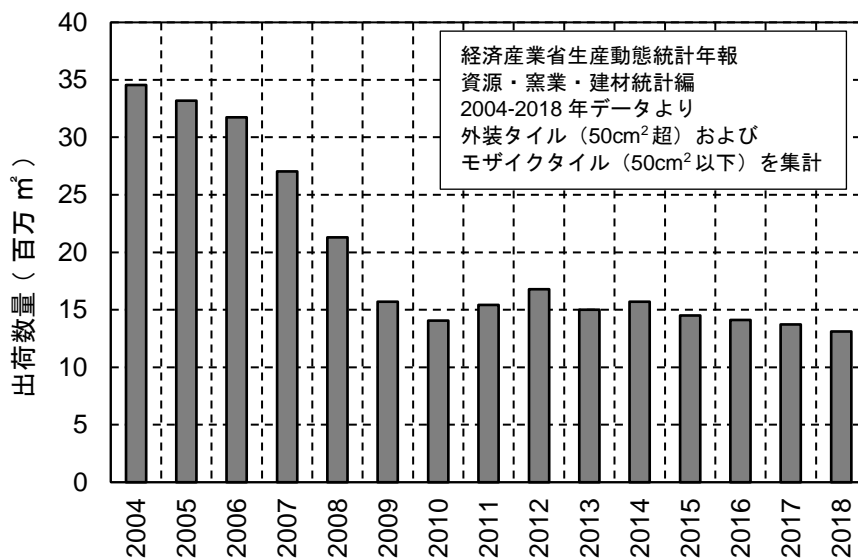


図 1.1 外装を主用途とするタイルの出荷量の推移

しかし、外装タイルは、素材自体の劣化はほとんど生じないものの、経年による剥離や剥落が問題となることが多い。その原因としては、タイル張り工事の計画および施工時における材料や工法選定の配慮不足や施工不良などにより、十分なタイル張り層の剥離防止性能を発揮することができず、タイル張り層間に作用するひずみ挙動の違い、すなわちディファレンシャルムーブメントによって経年で剥離に至ってしまうことが知られている。このディファレンシャルムーブメントには、日射や外気温の変化による温度ひずみや、コンクリート躯体に作用する荷重・乾燥収縮・クリープなどによる収縮ひずみ、モルタルの乾湿によるひずみなどがあげられ、これらが複合して影響しているものと考えられる。筆者らも、これ

らのうちで繰り返し回数が多いひずみ挙動の要因として、日間の温度変化に着目し、それがタイル挙動に与える影響について実測値をもとに考察した結果を報告している¹⁻²⁾。

経年変化によりタイル張り層が剥離に至った場合、その剥離状態を放置すると、写真 1.1 に示すように、剥落事故が生じてしまう危険性がある。日本国内においてもこれまでも多くの剥落事故が発生しており、死亡事故に至った事例も報告されている¹⁻³⁾。このような第三者災害を未然に防ぐためには、タイル張り層の剥離および剥落に対する安全性を配慮したうえで設計および施工を行い、その後の維持管理も適切に実施していくことが重要である。

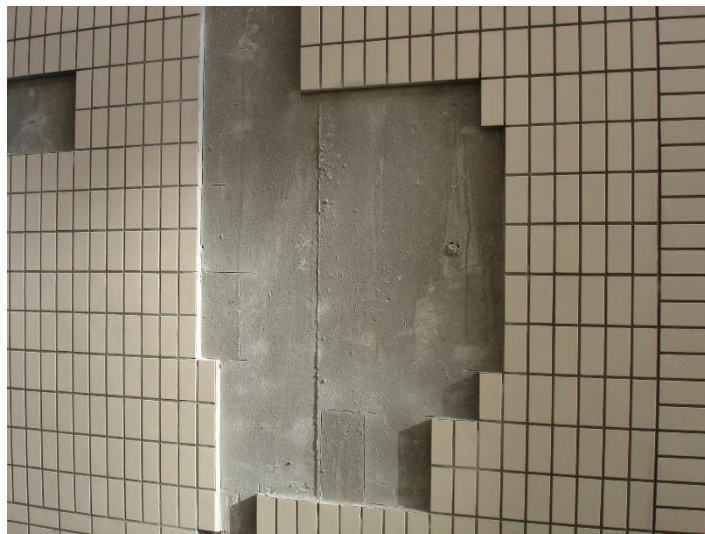


写真 1.1 外装タイルの剥落事例

タイル張り層の剥離メカニズムに関する研究やより剥離、剥落しにくい工法に関する開発研究はこれまで多く行われてきており^{例えば 1-4)~1-11)}、成果の一部やこれまでの経験に基づくノウハウ等は日本建築学会の建築工事標準仕様書¹⁻¹²⁾をはじめとして、公的な指針類にも掲載されている。特に最近では、有機系接着剤による張付け工法も剥離や剥落を削減できる工法として普及が進んでいる^{例えば 1-11)}。

一方で、新たに施工されるタイル張り外壁の剥離・剥落防止性能の向上は期待できたとしても、上述のようにこれまで施工されてきた外装タイルのストックは多く存在しており、これらの剥離の有無を精度よく診断し、タイル張り層が剥落に至る前に適切な補修および改修を実施することが、安心して安全な生活空間を確保するためには不可欠である。また、新築の案件においても、外装タイルの施工後に適切に施工されたかどうかを検査し、その状態が

経時的に変化していないことを診断することの重要性は言うまでもない。このような中、2008年4月の建築基準法改正により、第12条に基づく定期報告において、特定行政庁が指定する特殊建築物等のタイル外壁では10年経過毎の全面打診等による調査結果の報告が義務化されており¹⁻¹³⁾、タイル剥離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、実外壁のタイル剥離診断業務において最も多く用いられている手法は、検査員が打音検査用のハンマーを用いてタイルを打撃し、打撃応答音をもとに剥離を判定する方法、いわゆる打音法（または打診法）と呼ばれている手法であり¹⁻³⁾、前述の定期報告の際に用いる剥離診断手法としても規定されている¹⁻¹³⁾。この打音法は、写真1.2に示すような打音検査用のハンマーを用いて検査対象を直接打撃または擦過して生じる音をもとに判断するため、直接的に検査箇所の判断を行うことができるが、人の感覚で判断するため、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に差異が生じる問題がある。外装タイル剥離診断状況を写真1.3に示すが、ゴンドラ、高所作業車または足場等を作業床として、専門の検査員がハンマーを用いて外壁を打診検査し、その場でマスキングテープ等を用いて剥離判定範囲を区画することが多い。写真1.4に剥離判定範囲の区画例を示す。この剥離判定範囲を図面に描き移す必要があるが、剥離位置を図面化するのに非常に手間がかかるといった効率の問題も指摘されており、その際の転記ミスが生じる場合もあるとの指摘もある。



写真 1.2 打音検査用ハンマーの例

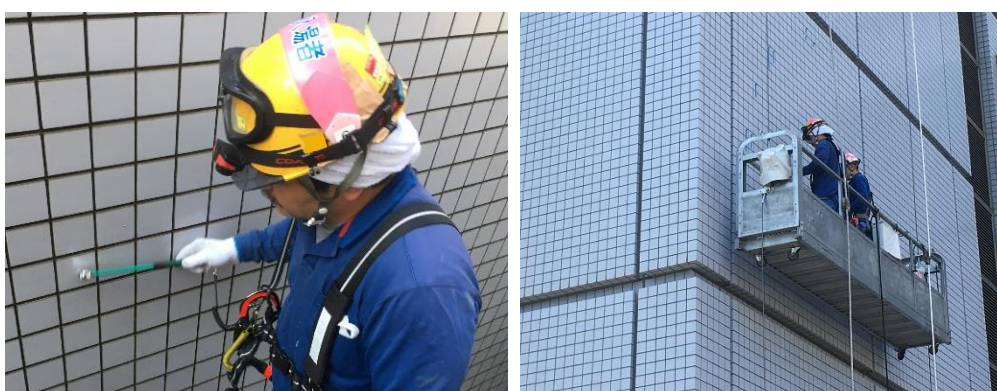


写真 1.3 打音検査状況の例



写真 1.4 剥離判定範囲の区画例

1.2 既往の研究

前述のような背景から、個人差のない客観的な剥離診断を目的として、各種装置を用いたタイル剥離診断方法に関する検討がこれまで行われてきている。その代表的な手法としては、打撃機構とマイクを併せ持つ装置によりタイル面を打撃した際の打撃応答音を解析した結果から剥離診断する方法^{1-14)~1-21)}、タイル面を加振した際の振動特性を解析した結果から剥離診断する方法^{1-22)~1-25)}、健全部と剥離部との熱抵抗の違いから日射や気温の変化に伴うタイル表面温度に生じる温度差を赤外線カメラにより計測した結果から剥離診断する方法^{1-26), 1-27)}などがあげられる。

打撃応答音や振動特性をもとにした剥離診断では、収録した音波形や振動波形の解析アルゴリズムや判定基準は、周波数解析によるもの、振幅値によるもの、振幅の実効値によるものなど多種多様であるが、打撃条件や打撃応答音収録条件および検証に用いた試験体条件等に関してあいまいな点も多い。また、開発された装置の精度検証を熟練工判定結果との対比により実施されている事例もあるが、熟練工の判定結果の確からしさが不明瞭な状況での検証であり、さらなる検討の余地があると思われる。

赤外線法は、無足場で大きな面積を効率よく診断できる点でメリットがあるが、建物等の影、周辺環境からの反射によるノイズ、タイル表面の放射率の違い等の影響を受けやすいため、診断精度を欠くことも指摘されている。また、装置が高価なため、汎用的に使用するには難がある。

一方、コンクリート構造物の非破壊検査に関する既往の研究においては、打音法を用いた場合に、打撃応答音波形における振幅異常値からコンクリート表層部の欠陥や、鋼・コンクリート合成床版の鋼板とコンクリート間の剥離などの異常を検知できること、周波数成分の解析により測定対象物の剛性の違いを検知できること、などの知見が得られている^{1-28)~1-31)}。これらの知見は外壁タイルの剥離判定にも活用できるものと考えられるが、タイルの剥離を対象として適した打撃方法、打撃応答音の解析方法、判定精度について具体的なデータは示されていない。

1.3 本研究の目的および範囲

1.1 研究の背景および 1.2 既往の研究に基づき、本研究は、「打撃応答音を利用した外装タイル剥離診断法」と題し、高精度、高効率でかつ汎用的に利用できるタイル剥離診断装置を開発し、剥離診断法を提示することを目的とした。装置の根幹をなす剥離診断方法としては、直接検査対象を打撃することで診断結果を得ることが最も合理的と考え、タイル面を打撃した際の打撃応答音解析による診断方法を採用することとした。

剥離診断業務の効率化のためには、剥離診断データを記録するシステムや前述したように剥離診断位置を認識して診断結果を図面化する技術も必要であるが、本研究の範囲外として別途検討を行うこととする。ただし、効率的な診断の実現に適した打撃方法や打撃応答音解析方法については、本研究の中で検討するものとする。

また、本論文では、剥離形状、剥離サイズおよび剥離深さが既知の模擬剥離試験体での検討をもとに剥離診断法を構築することを研究の範囲とし、実物件における検証は本論文で剥離診断法を構築した後に別途実施することとする。

1.4 本論文の構成

本論文は、以下の6章により構成する。

第1章「序論」では、代表的な外装仕上げの一つであるタイル張り仕上げが有する剥離および剥落に関する問題について取り上げ、剥離診断の重要性についての社会的背景について述べる。また、既往の研究を概観したうえで、より高精度で、効率性を保持できる剥離診断方法および装置の必要性について述べ、本研究の目的、範囲および本論文の構成を示す。

第2章「打撃応答音による剥離判定の有効性に関する基礎的検討」では、高精度で効率よく剥離を診断する手法に関する検討の第一段階として、タイル種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さを変化させた模擬剥離試験体を対象に、熟達した検査員および既存の剥離診断装置により模擬剥離試験体の剥離診断を実施し、検査員および既存の剥離診断装置の課題を抽出した結果を述べる。また、効率よくタイル壁面を高速で打撃できる打撃機構とマイクを併せ持つ装置を試作し、模擬剥離試験体を打撃した際の打撃応答音を収録した結果から、タイル種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さによる違いについて考察し、打撃応答音波形の第一波の振幅値をもとに剥離判定が可能であることを示す。

第3章「タイル剥離診断装置の設計・試作および剥離判定パラメータに関する検討」では、より実用的で安定した剥離判定を可能とするために、第2章および既往の研究を参考に、新たな構想に基づき、打撃力の測定が可能な連続打撃機構を有し、打撃点を中心に4方向均等に4つのマイクが配置された剥離診断装置を設計・試作した結果について述べる。また、標準試験体を用いた剥離診断装置の較正手法、剥離判定パラメータの算出方法、装置の有効性について実験的に検証した結果を述べる。

第4章「模擬剥離試験体を用いたタイル剥離診断装置の有効性の検証」では、第2章で作製した模擬剥離試験体に剥離深さおよび剥離面積の条件を変えた試験体をさらに追加し、これらの模擬剥離試験体を試験対象として、第3章で考案したタイル剥離診断装置および剥離判定パラメータを用いた実測を行い、製作した装置および剥離判定パラメータの有効性について考察した結果について述べる。また、模擬剥離試験体の実測結果をもとにしきい値設定について検討した結果およびそのしきい値によって剥離判定した結果について述べる。

第5章「剥離範囲および剥離深さ推定方法の提示」では、第4章で設定したしきい値をもとに剥離判定された打撃位置の点群をもとに剥離範囲を合理的にゾーニングする手法および当該剥離範囲の剥離深さを推定する手法について検討した結果を述べる。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括して述べる。

本研究の流れを図1.2に示す。

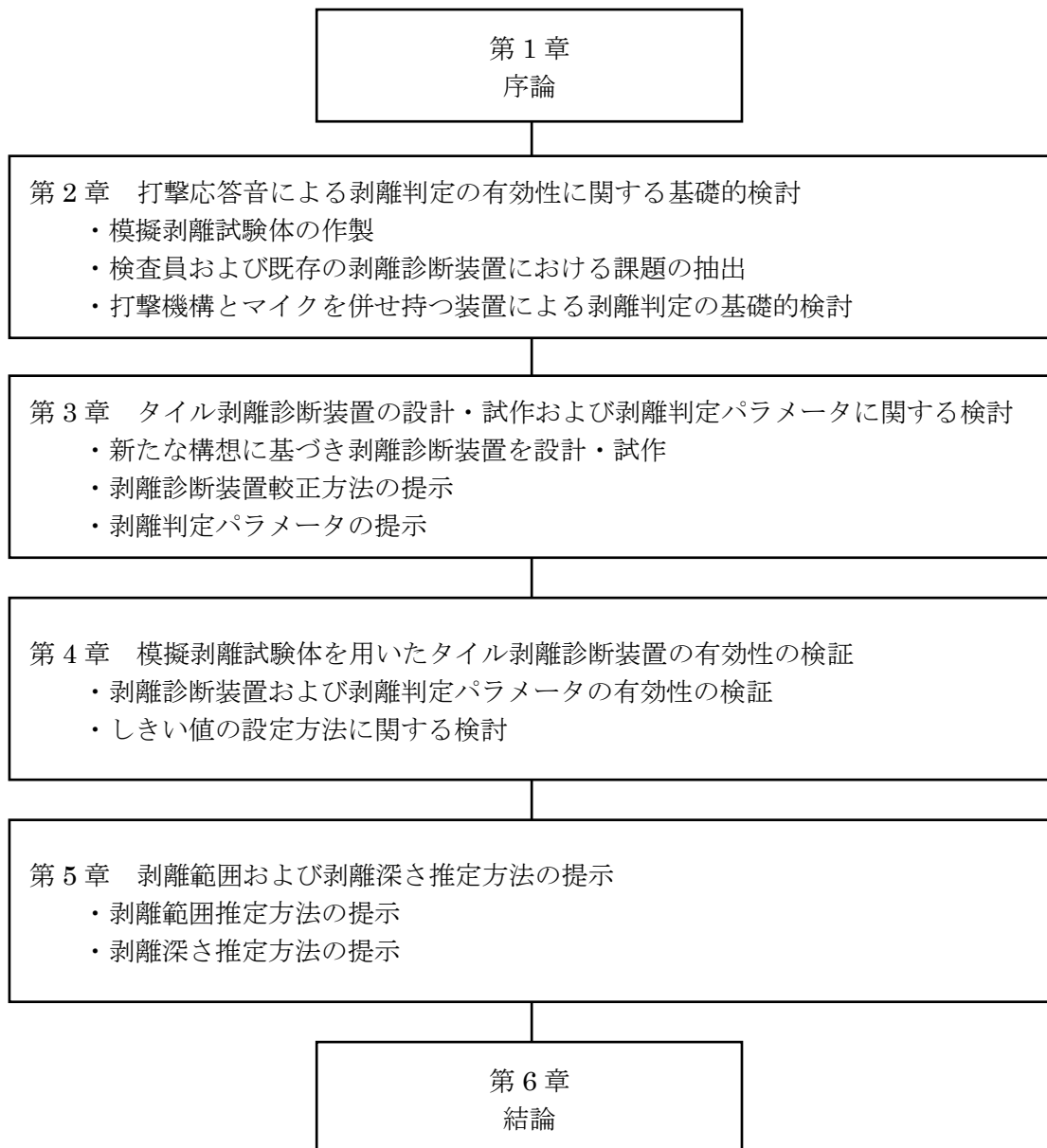


図1.2 本研究の流れ

参考文献

- 1-1) 経済産業省生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編 2004-2018年
- 1-2) 添田智美, 富田泰宇, 佐々木仁, 三上貴正: 日間の温度変化が外装タイルの挙動に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第694号, pp.2057-2064, 2013.12
- 1-3) 建築・設備維持保全推進協会(現 ロングライフビル推進協会): タイル外壁及びモルタル塗り外壁定期的診断マニュアル(改訂第3版), 2009年5月
- 1-4) 名知博司, 小野正: タイル直張り仕上げのひずみ追従性に及ぼすタイル要因の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第563号, pp.15-22, 2003.1
- 1-5) 名知博司, 小野正: 外装タイル張り仕上げのひずみ追従性設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第615号, pp.31-37, 2007.5
- 1-6) 起橋孝徳, 河野政典, 梶田佳寛: タイル張り仕上げの屋外暴露試験および熱冷繰返し試験における挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第661号, pp.465-470, 2011.3
- 1-7) 起橋孝徳, 梶田佳寛, 河野政典: タイル張り仕上げ剥離防止性能評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第668号, pp.1781-1786, 2011.10
- 1-8) 稲葉洋平, 佐々木正治, 閑田徹志: タイルの剥離評価に関する研究ーひずみ追従性試験および剥離モデルの提案ー, 日本建築学会構造系論文集, 第667号, pp.1577-1582, 2011.9
- 1-9) 稲葉洋平, 佐々木正治, 閑田徹志: タイルの剥離評価に関する研究 その2 ー確率論に基づく剥離率推定手法の提案ー, 日本建築学会構造系論文集, 第695号, pp.27-35, 2014.1
- 1-10) 熊谷敏男: 外装陶磁器質タイル張りの剥離故障分析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第422号, pp.15-25, 1991.4
- 1-11) 速水雅仁, 本橋健司, 橋向秀治, 和田高清, 鈴木伸吾: 有機系接着剤を利用した外装タイル・石張りシステムの開発 その26. 屋外暴露20年後のせん断試験 変位量の検証および引張り試験との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.941-942, 2016.8
- 1-12) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS19 陶磁器質タイル張り工事, 2012.7
- 1-13) 国土交通省告示第282号, 2008.3
- 1-14) 海老原正明, 矢島四朗: 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, A 電算利用, pp.993-994, 1987.10

- 1-15) 堂山敦弘, 井上康夫, 縄岡好人, 脇坂達也: 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, A 材料施工, pp.1125-1126, 1994.9
- 1-16) 堂山敦弘, 菱河恭一, 縄岡好人, 梶谷誠, 明愛国, 金森哉吏: タイル剥離有無の自動識別方法に関する検討, A-1 材料施工, pp.515-516, 1998.9
- 1-17) 堂山敦弘, 縄岡好人, 金子智弥, 汐川孝: 外壁タイル剥離診断ロボットシステムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.811-812, 1999.9
- 1-18) 堂山敦弘, 汐川孝, 井上文宏, 太田有: 外壁タイル剥離判定の自動化に関する研究 その1 ウェーブレットによるタイル打撃音の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 31-32, 2003.9
- 1-19) 布施幸則, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.813-814, 2015.9
- 1-20) B.L. Luk, K.P. Liu, F. Tong: Robotic impact-acoustics system for tile bonding integrity inspection, *Mechatronics* 19, pp. 1251-1260, 2009
- 1-21) B.L. Luk, K.P. Liu, F. Tong, K.F. Man: Impact-acoustics inspection of tile-wall bonding integrity via wavelet transform and hidden Markov models, *Journal of Sound and Vibration* 329, pp.1954-1967, 2010
- 1-22) 渡辺博司, 荘大作, 青柳隼夫, 三上文彦, 高橋拓: 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, A-1 材料施工, pp.679-680, 1995.8
- 1-23) 岩瀬昭雄: 剥離タイルの振動特性と触診型検知方法に関する研究: 模擬剥離タイルを用いた検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 455 号, pp.1-7, 1994.1
- 1-24) 金子稔, 岩瀬昭雄, 坂井孝, 山本耕三, 安田正雪, 荒金直樹: 弾性波法を用いたタイル剥離検知器の開発 その1. タイル剥離検知器の概要と基礎的実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.557-558, 2001.7
- 1-25) 荒金直樹, 岩瀬昭雄, 安田正雪, 金子稔, 坂井孝, 山本耕三: 弾性波法を用いたタイル剥離検知器の開発 その2. 実建物における試験的適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.559-560, 2001.7
- 1-26) 西川忠, 平野彰彦, 鎌田英治: 赤外線法によるタイル仕上げ外壁の剥離診断に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp.29-35, 2000.3
- 1-27) 西川忠: 中間波長帯を使用した赤外線法による外壁剥離診断の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 575 号, pp.31-36, 2004.1
- 1-28) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, *コンクリート工学論文集*, Vol.7, No.1, pp.143-152, 1996

- 1-29) 歌川紀之, 伴享, 北川真也 : 打音法における欠陥検知に関する一考察, 土木学会第58回年次学術講演会梗概集, V-383, pp.765-766, 2003.9
- 1-30) 伴享, 歌川紀之, 森濱和正 : RC構造物への打音法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1809-1814, 2004
- 1-31) 磯光夫, 久保田和徳, 越後滋, 橘吉宏, 伴享, 歌川紀之 : 打音法による合成床版の非破壊検査手法, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.249-254, 2008.6

第2章 打撃応答音による剥離判定の有効性 に関する基礎的検討

2.1 はじめに

序論でも述べたように、本研究は、高精度、高効率でかつ汎用的に利用できるタイル剥離診断装置を開発することを目的としている。本章では、検討の第一段階として、タイル種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さを変化させた模擬剥離試験体を作製し、熟達した検査員および既存の剥離診断装置により模擬剥離試験体の剥離診断を実施し、検査員および既存の剥離診断装置の課題を抽出した結果を述べる。また、効率よくタイル壁面を打撃できる打撃機構とマイクを併せ持つ装置を試作し、模擬剥離試験体を打撃した際の打撃応答音を収録した結果から、打撃応答音のタイル種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さによる違いについて考察し、打撃応答音波形の解析方法に関する基礎的知見を得ることを目的とする。

本章の検討方法は以下のとおりである。

- ① タイル種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さを変化させた模擬剥離試験体を作製する。
- ② 熟達した検査員および既存の剥離診断装置により模擬剥離試験体の剥離診断を実施し、検査員および既存の剥離診断装置の課題を抽出する。
- ③ 効率よくタイル壁面を打撃できる打撃機構とマイクを併せ持つ装置を試作し、模擬剥離試験体を打撃した際の打撃応答音を収録する。
- ④ 収録した打撃応答音のタイル種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さによる違いについて考察し、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。

なお、本章の範囲では、模擬剥離範囲はタイル種類ごとに一定とすることとした。また、剥離界面は張付け材裏と下地モルタル裏の2種類とし、タイル裏の剥離は対象としないこととした。

2.2 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は、表 2.1 に示す 8 種類とした。タイルは 3 種類を選定し、張付け材料はモルタルと有機系接着剤の 2 種類を選定した。下地モルタルの有無および剥離界面を変えることで、剥離深さを変化させることとした。作製した模擬剥離試験体の概要を図 2.1 に示す。タイル X はやや粗い面状の施釉磁器質タイル、タイル Y およびタイル Z は平坦な面状の無釉せっ器質タイルである。

壁体は、鉄筋コンクリート造とし、サイズは 900mm×750mm×厚 150mm とした。コンクリートの仕様は、水セメント比 51.8%、封かん養生での 4 週圧縮強度が 33.8N/mm² のものを使用した。壁体の設置は、厚 3mm 硬質ゴムシートを介して 2 本の溝型鋼 (C-100×50×5×7.5) 上にボルト (M16) で固定し、自立させた。また、モルタル塗付け等の施工に先立って、コンクリート壁体表面はサンダー掛けにより目荒らしを行い、剥離防止措置をとった。壁体の製作状況を写真 2.1 に示す。

模擬剥離範囲は、タイル種類ごとに一定とし、タイル 1 枚あたりの剥離面積が多様となるように剥離境界位置を設定した。

模擬剥離部の構成材として、図 2.2 および写真 2.2 に示す厚さ 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特殊シートを選定した^{2-17),2-18)}。この特殊シートを、写真 2.3 および図 2.3 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、その後塗付けるモルタル中に埋設することで剥離を再現した。なお、試験体 XMSw は、剥離代の大きいものを想定して、特殊シートを二重にして埋設したものである。

特殊シートのモルタルを塗り付ける側 (タイル側) は不織布の空隙中にモルタルが充填され、中心のポリエチレンフィルムとモルタルが一体化される。一方、反対側 (躯体側) は、両面テープにより下地側に張り付けられた状態であるため、不織布部に空気層が形成されることで剥離に近い状況が再現されるものと考えた。なお、

特殊シートを埋設するモルタルには、写真 2.4 に示すビニロン繊維製三軸メッシュを耐久性向上のための補強材として埋め込んだ。補強材埋め込み状況を写真 2.5 に示す。

下地モルタルの塗付けおよびタイルの張付けは、所定の剥離位置以外に剥離が生じないように、熟練工により入念に施工した。タイル張付け状況を写真 2.6 に、タイル張り施工後の試験体の状況を写真 2.7 に示す。

表 2.1 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*1	剥離深さ(mm)
XDH	磁器質(施釉) 50 二丁 モザイクタイル[X] 95×45×7	モルタル (2mm)	なし[D]	張付け材裏[H]	9
XMH			10mm [M]	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] (シート二重)*2[w]	19	
YDH	せり器質(無釉) 二丁掛タイル[Y] 227×60×13	有機系 接着剤 (1mm)	なし[D]	張付け材裏[H]	15
YMH			10mm [M]	張付け材裏[H]	15
YMS			10mm [M]	下地モルタル裏[S]	25
ZMS	せり器質(無釉) 二丁掛タイル[Z] 227×60×11	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, サイズ: 900×750×150mm ・使用コンクリート: W/C:51.8%, 圧縮強度(4週):33.8N/mm ² (封かん) ・設置方法: 硬質ゴムシート(厚 3mm)を介して 2本の溝型鋼(C-100×50×5×7.5)上にボルト(M16)で固定し, 自立させた				
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				

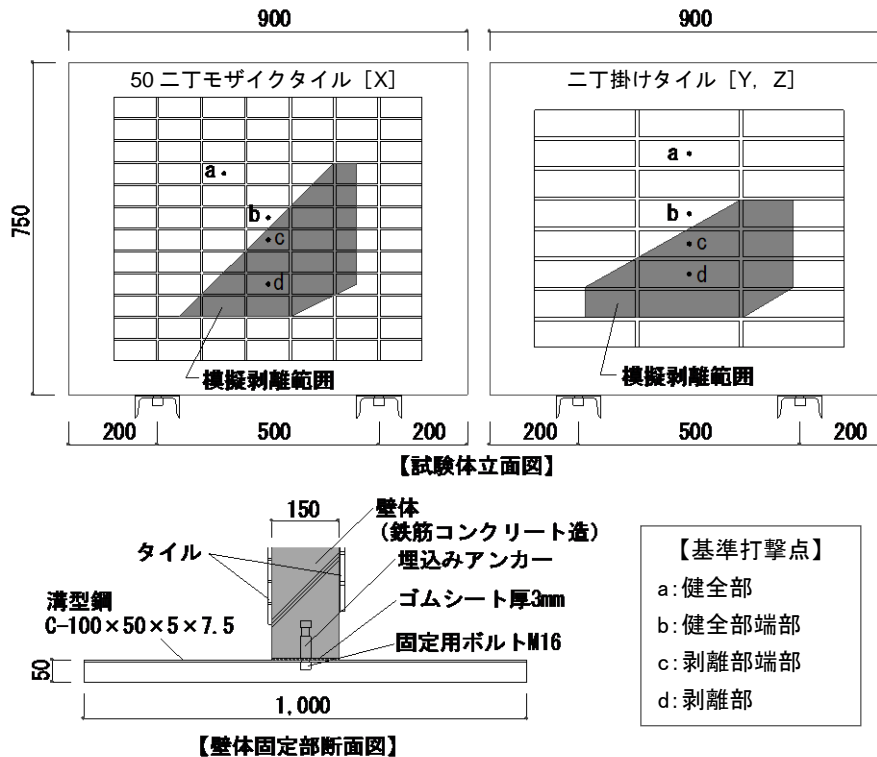


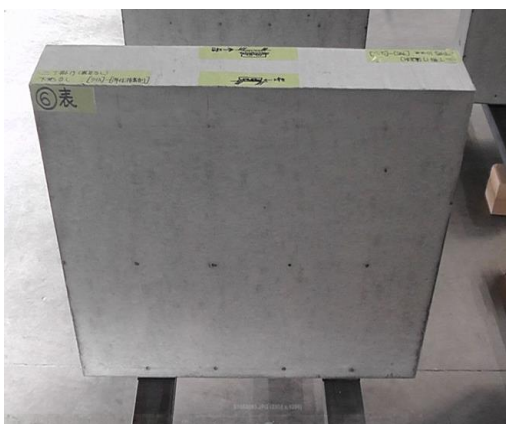
図 2.1 模擬剥離試験体の概要



型枠・配筋状況



コンクリート打設状況



脱型後状況



目荒らし状況

写真 2.1 コンクリート壁体製作状況

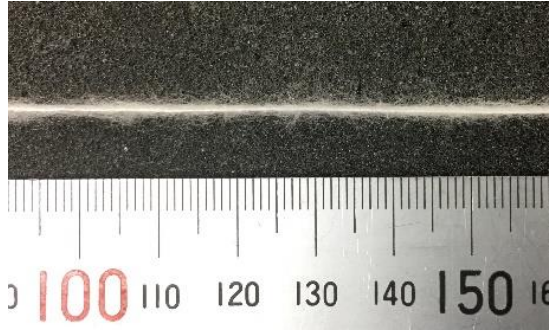
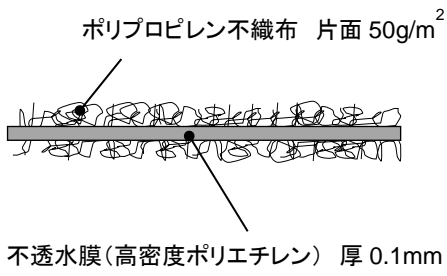


図 2.2 模擬剥離用特殊シート模式図

写真 2.2 模擬剥離用特殊シート



写真 2.3 模擬剥離用特殊シート埋設状況

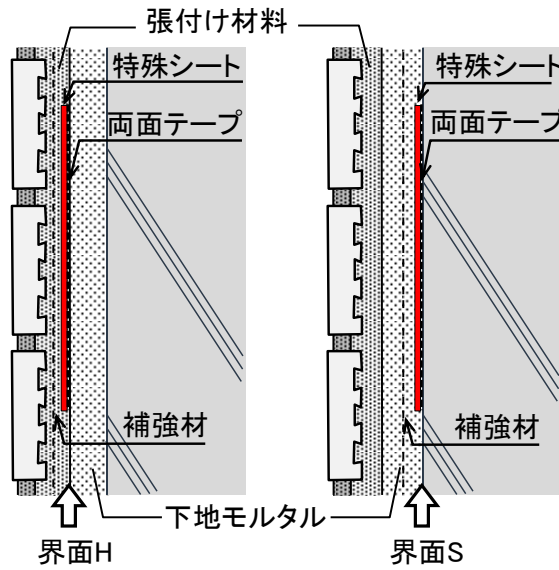
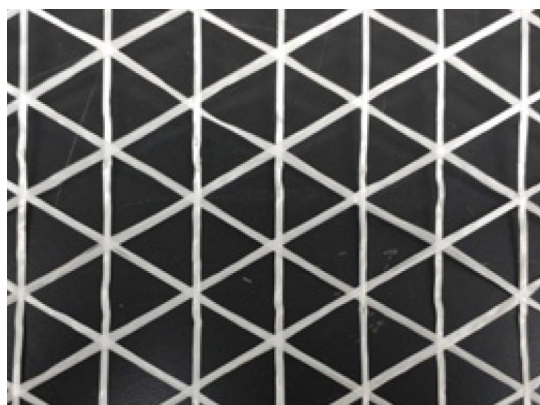


図 2.3 模擬剥離界面の模式図



20mm

写真 2.4 補強材



写真 2.5 補強材埋め込み状況



写真 2.6 タイル張付け状況



XDH



YDH



ZMS

写真 2.7 模擬剥離試験体外観

2.3 検査員および既存の剥離診断装置による検査

2.3.1 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 2.1 に示す全試験体に対し、表 2.2 に示す熟達した検査員 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。打音検査用ハンマーは写真 2.8 に示すものを使用し、打撃の仕方は各検査員に任せることとした。検査に費やす時間は、実際の建物外壁の検査を想定して実施するように依頼した。各検査員の検査状況は表 2.2 に示すとおり、擦過と打撃を併用して判定を行っており、特に、境界付近など不明瞭な部分については、打撃をする傾向が見受けられた。

検査員による検査状況の例を写真 2.9 に示す。

表 2.2 検査員による検査概要

検査員	概要	教示内容	検査状況
i	打音検査用ハンマーの打撃応答音により剥離判定（いずれも経験年数 20 年以上）	打撃の仕方は各検査員に任せる 費やす時間は実際の建物外壁検査を想定する	いずれの試験体でもハンマーヘッドの擦過によりおおよその位置を推定後、周辺を細かな打撃をして剥離判定
ii			i と同様に擦過と細かな打撃を併用したが、50 二丁は擦過を主とし、二丁掛けは細かな打撃を主として剥離判定
iii			i と同様に擦過と細かな打撃を併用したが、主としてハンマーヘッドの擦過により剥離判定



写真 2.8 打音検査用ハンマー



写真 2.9 検査員による検査状況

検査員による診断結果の例を図 2.4 に示す。検査員が剥離と判断してマッピングした範囲が図中の網掛け部分である。検査結果の判定精度の評価は、図 2.5 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。

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。

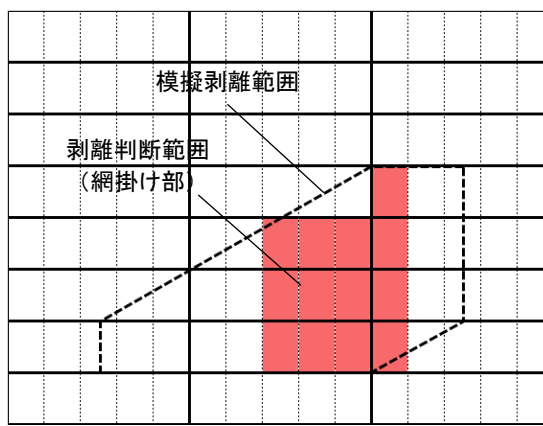


図 2.4 検査員 i による剥離診断例 (試験体 YMH)

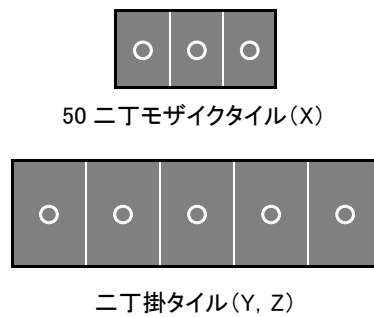


図 2.5 各タイルの評価点

2.3.2 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（以降、既存装置と呼ぶ）の診断精度の傾向を把握するため、表 2.3、写真 2.10 および写真 2.11 に示す既存装置 I および II を選定し、表 2.1 に示す全試験体に対して検査を実施した。いずれの既存装置も、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、判定結果をランプ表示する機能が付いている。このうち既存装置 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 2.4 に示した評価点を全タイトルで検査した結果を集計した。既存装置 II による診断結果の例を図 2.6 に示す。ここでは、「赤」が表示された評価点を「剥離」と判定することで図 2.6A 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 2.6B のとおり全面的に剥離と判定される結果となった。

表 2.3 既存の剥離診断装置による検査概要

検査方法	記号	概要
剥離診断装置	I	・打撃応答音の解析により剥離判定 ・剥離をランプ表示
	II	・打撃応答音の解析により剥離判定 ・剥離をランプ表示(剥離:赤, 正常:青, 中間:黄)



写真 2.10 既存装置 I



写真 2.11 既存装置 II

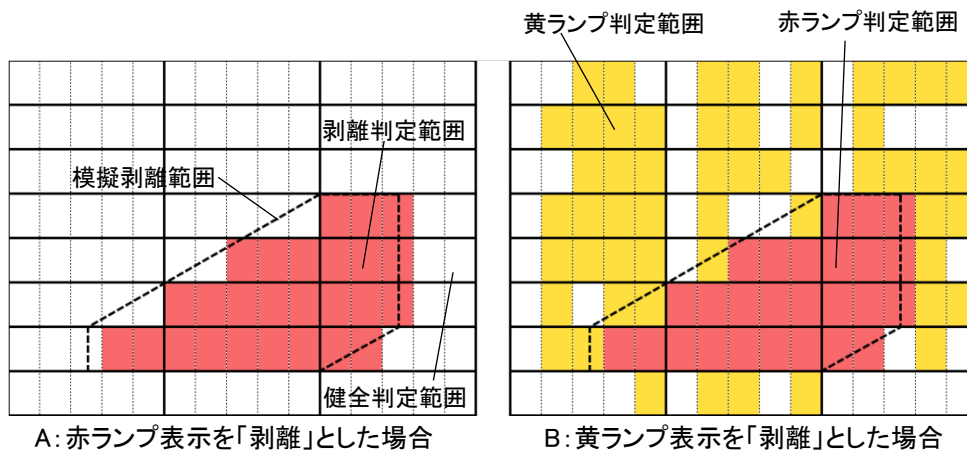


図 2.6 既存装置 II による剥離診断例（試験体 YMH）

2.3.3 検査員および既存の剥離診断装置による検査結果

(1) 各試験体における剥離診断結果

試験体ごとの検査員および既存装置による診断結果を図 2.7～図 2.14 に示す。これらの図より、次のことが確認された。

- ・ 検査員による剥離診断では、試験体 XDH, XMS, YDH の試験体などからわかるように、検査員によって剥離判定範囲に個人差が生じていることがわかる。
- ・ 装置による診断と比べて、検査員による診断は、特に XDH, YDH, YMH にみられるように、剥離範囲を狭く判定する傾向がある。
- ・ XDH, XMS, YDH, YMS の一部でみられるように、装置であっても剥離判定が十分ではない箇所がある。

(2) 検査員および既存装置の検査結果一覧

表 2.4 に、検査員および既存装置による検査結果の一覧を示す。正答率の欄には、正答率の値に加え、表下に示すグレースケールの該当色を付与した。また、図 2.15 に各検査員および既存装置の試験体ごとの健全部における正答率および誤診率を、図 2.16 に剥離部における正答率および誤診率を示す。誤診率 = 100 - 正答率 (%) である。これらの検査結果から、次のことが確認された。

- ・ いずれの検査員および既存装置においても、健全部正答率は概ね高い水準であった。
- ・ 有機系接着剤で張付けた試験体 ZMS においては、既存装置による健全部正答率がやや低下する傾向があり、その低下の程度は既存装置 I の方が大きかった。
- ・ いずれの検査員、既存装置においても、剥離部正答率は健全部正答率と比較して低く、剥離部誤診率は健全部誤診率よりも高い結果であった。剥離範囲を実際の剥離範囲よりも小さい範囲に判定する傾向からこの結果になったと考えられる。
- ・ 特に XDH および YMH においては、検査員における剥離部正答率が低く、正答率 50% を下回る（誤診率が 50% を上回る）組み合わせもあった。今回作製した模擬剥離試験体においては、張付けモルタル裏での剥離において、検査員による判定精度が低くなる傾向があった。
- ・ XMS および XMSw の検査員による剥離部正答率の差異は小さく、剥離代の厚さが剥離部正答率に与える影響は小さかった。
- ・ 既存装置による剥離部正答率は、最も低いもので 70% 程度であったが、タイル張り仕様による明確な差異は見られなかった。

検査員は、実際の外壁を検査する際には、ある程度限られた時間の中で検査をしていく必

要がある。そのため、効率の面から、1枚のタイル当たり複数の箇所を丁寧に1箇所ずつ打撃するのではなく、まずは打撃ハンマーでタイル面をこすことで擦過音を生じさせ、その擦過音の変化によって剥離部と健全部を区別し、音の変化を認識できた領域については、さらに注意深く打撃を加えて、境界を特定することが良く行われる。今回の検査も同様の動作が行われていたが、人によって診断結果に差が生じ、狭く判定される場合があった理由として、こする段階で変化を認識できなかった場合に、その軌跡において細かな打撃がされることなく、狭く判定がされてしまったものとする。一方、装置による試験では、測定箇所ごとに確実な打撃を行っていることから、良好な結果が得られたものとする。

以上のとおり、検査員による検査では装置と比較して剥離部をより狭く判定する傾向があり、客観的で高精度な剥離判定をするうえでは、装置の利用が有効であるといえる。

なお、今回、装置Ⅱでは「赤」ランプが表示された場合のみを「剥離」と判定することで比較的高い正答率が得られたが、剥離範囲が未知の外壁検査の場合には明確な判定基準が必要と考える。また、いずれの装置においても、より精度改善の余地があると思われる。

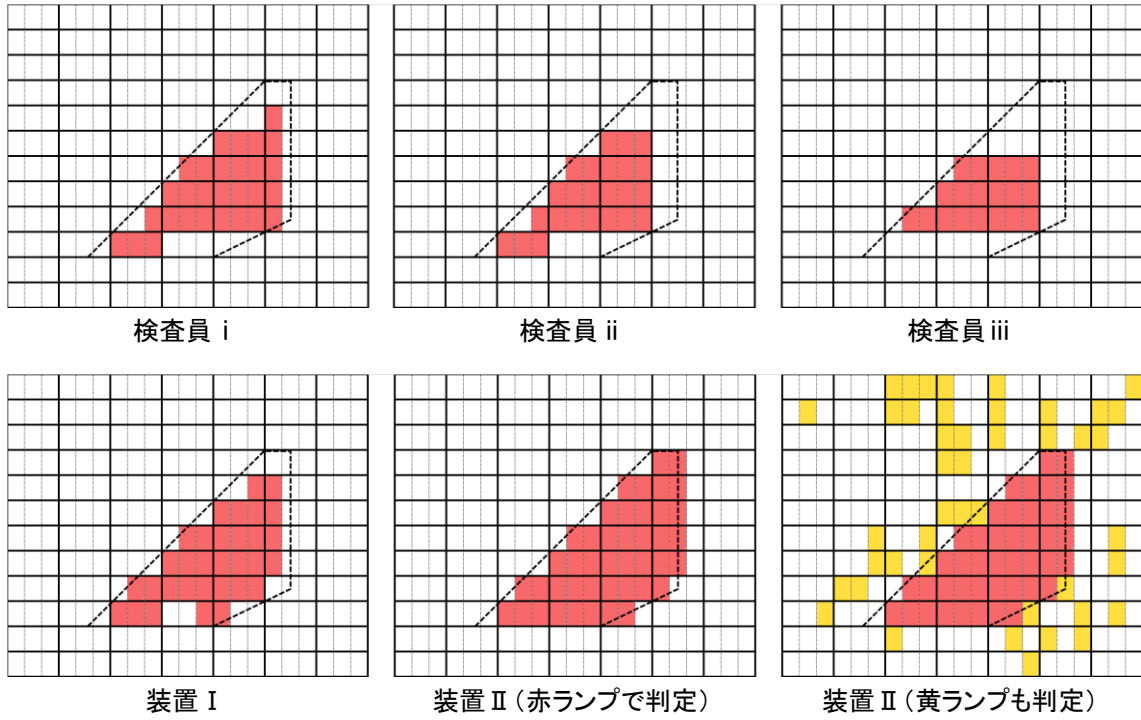


図 2.7 試験体 XDH における剥離診断結果

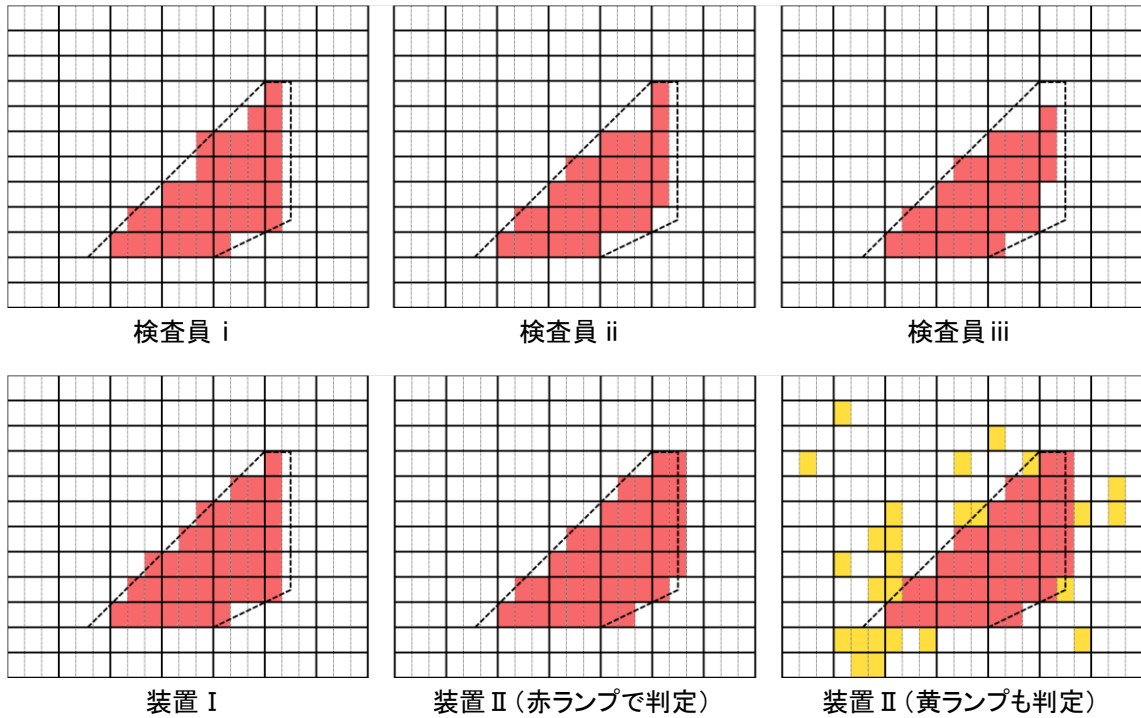


図 2.8 試験体 XMH における剥離診断結果

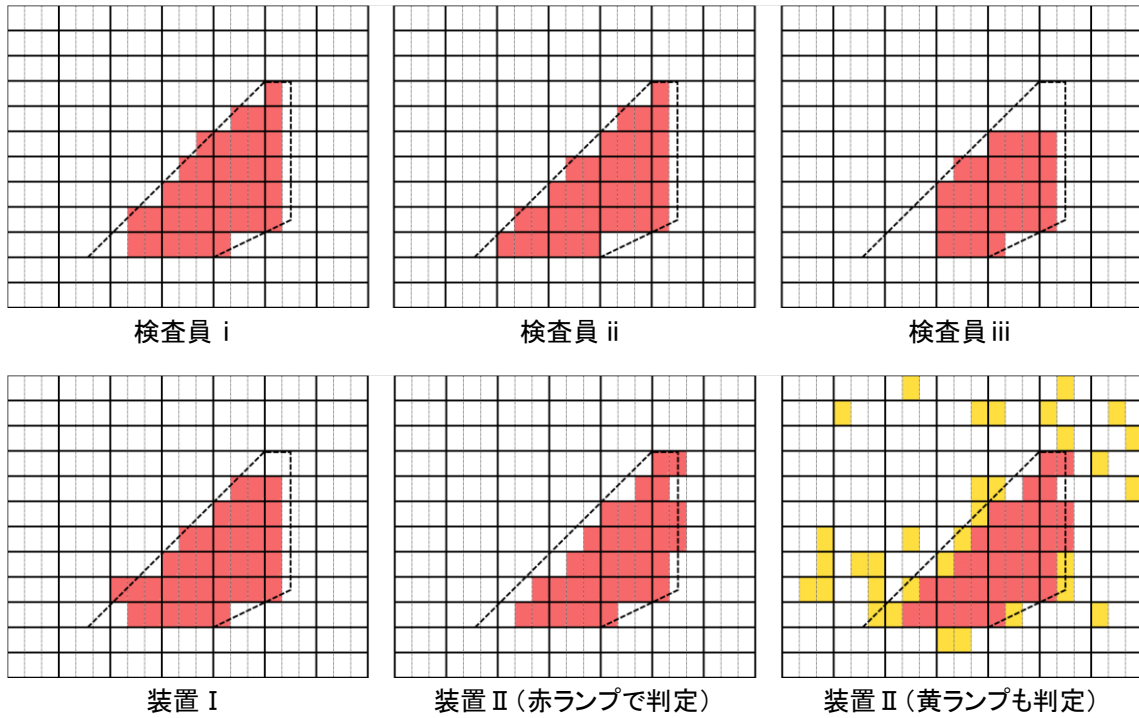


図 2.9 試験体 XMS における剥離診断結果

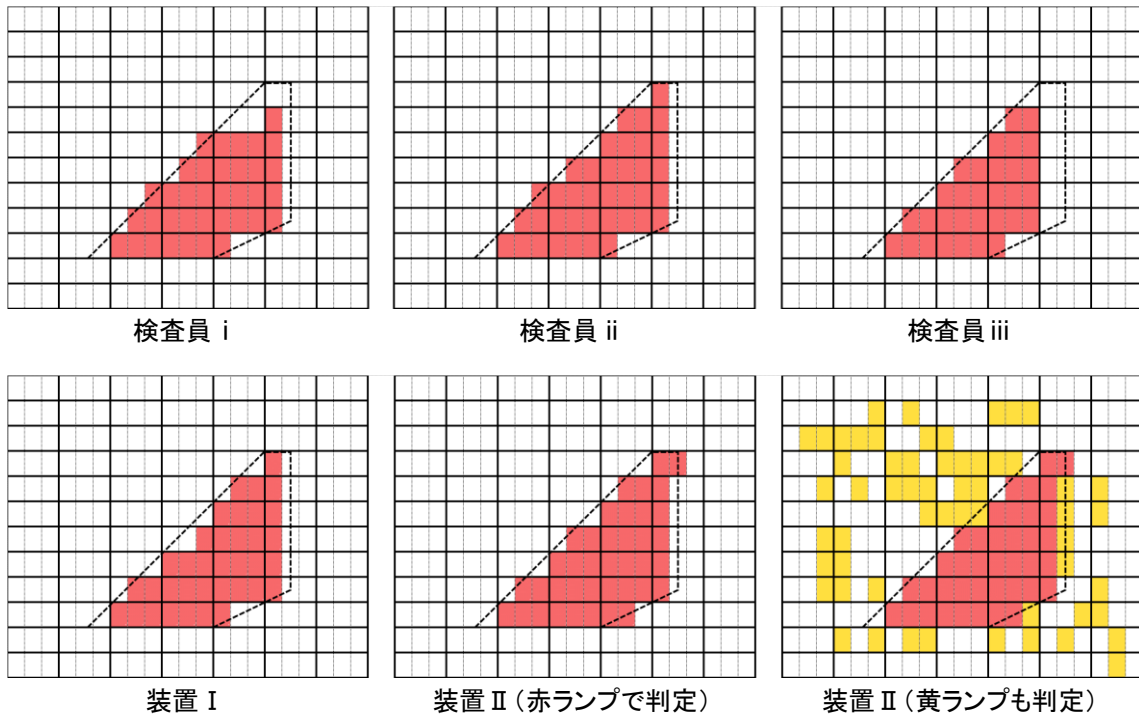


図 2.10 試験体 XMSw における剥離診断結果

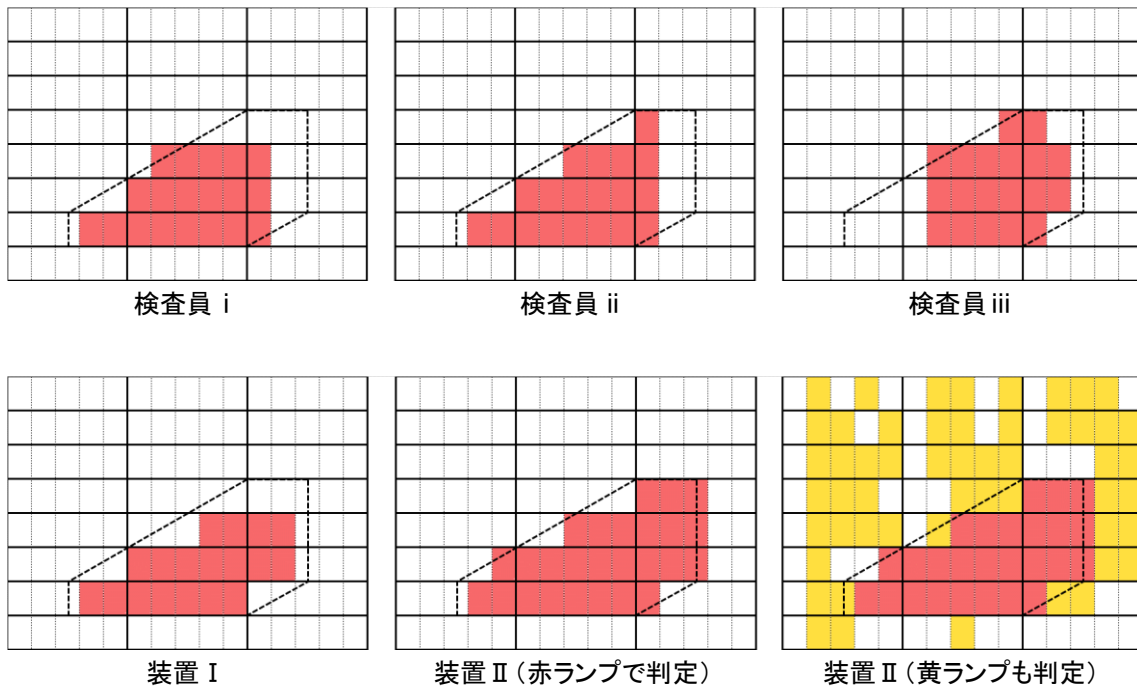


図 2.11 試験体 YDH における剥離診断結果

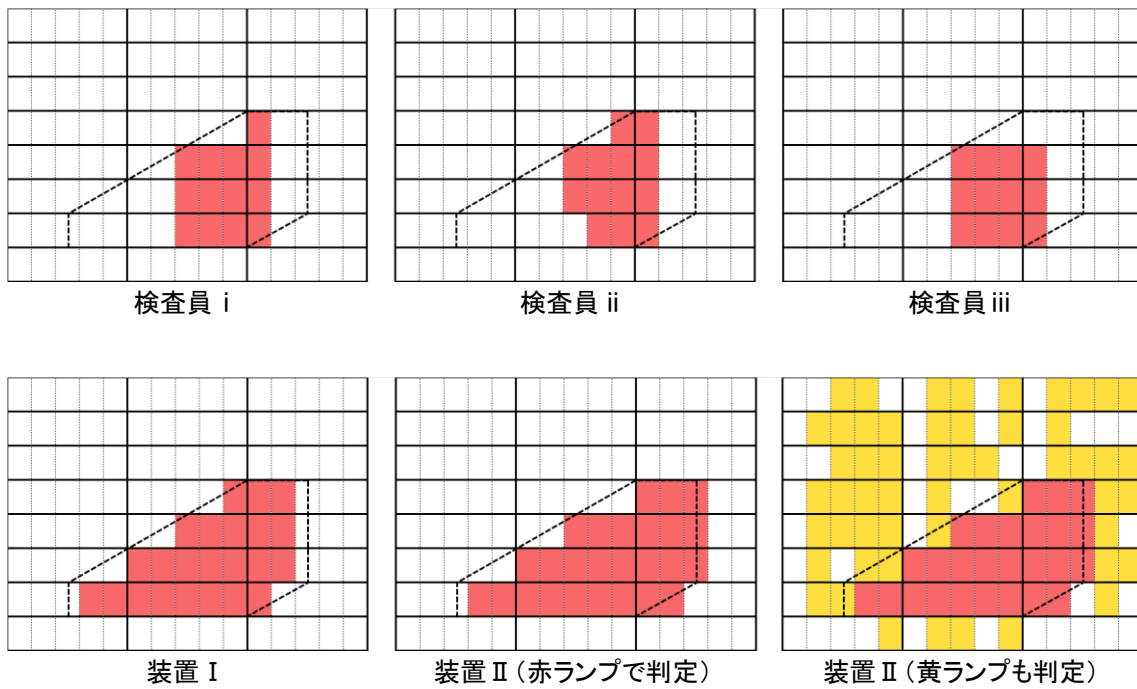


図 2.12 試験体 YMH における剥離診断結果

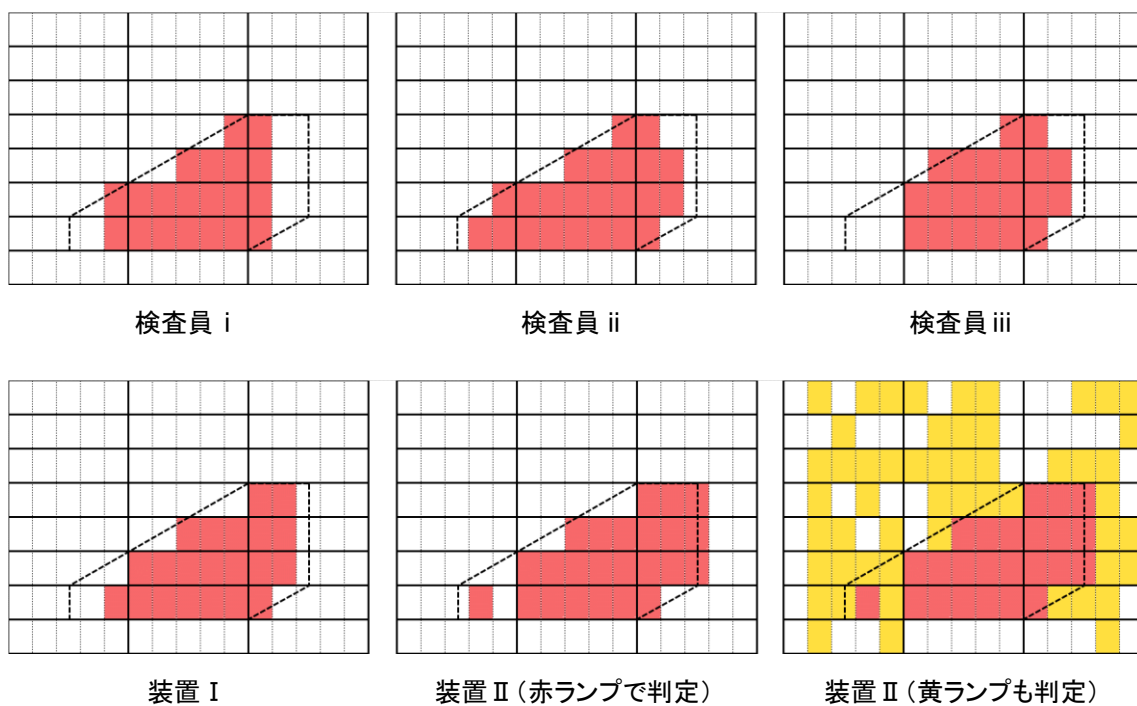


図 2.13 試験体 YMS における剥離診断結果

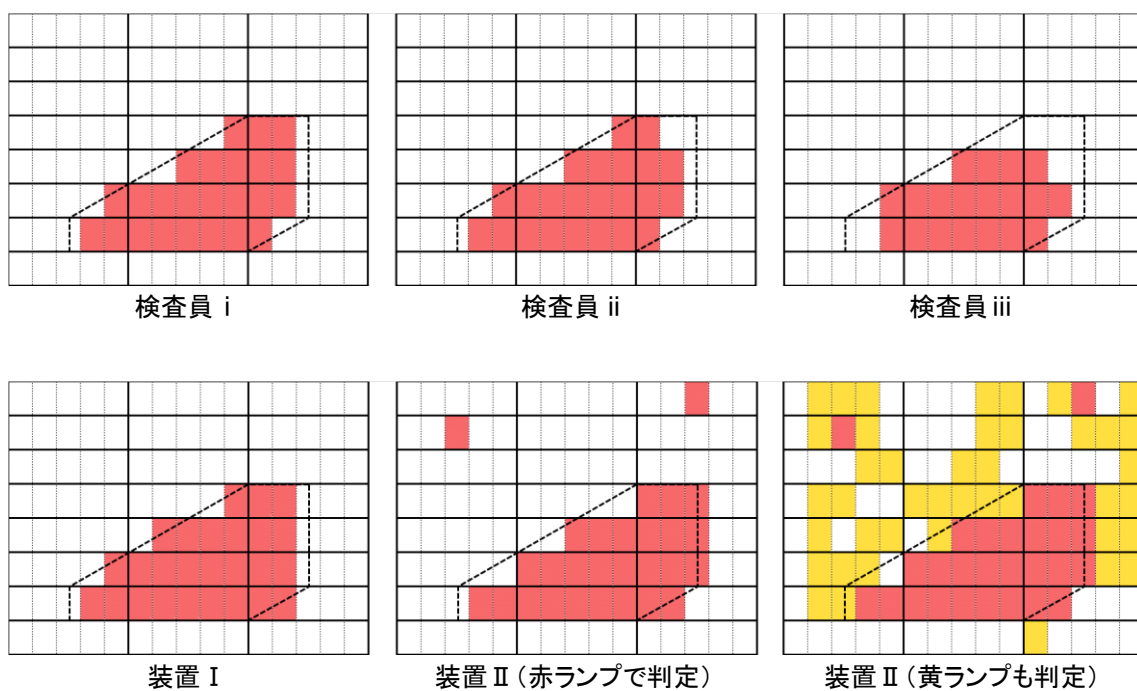
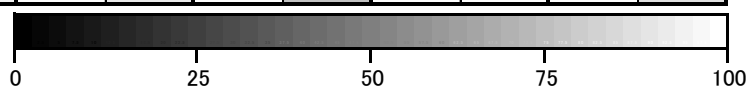


図 2.14 試験体 ZMS における剥離診断結果

表 2.4 各検査員および既存の剥離診断装置による検査結果

箇所	試験体 記号	評価 点数	検査員 i		検査員 ii		検査員 iii		既存装置 I		既存装置 II	
			正答数	正答率	正答数	正答率	正答数	正答率	正答数	正答率	正答数	正答率
健全部	XDH	204	203	99.5	204	100.0	199	97.5	204	100.0	204	100.0
	XMH	204	204	100.0	202	99.0	202	99.0	194	95.1	204	100.0
	XMS	204	199	97.5	204	100.0	203	99.5	204	100.0	204	100.0
	XMSw	204	200	98.0	194	95.1	200	98.0	204	100.0	204	100.0
	YDH	91	90	98.9	91	100.0	91	100.0	91	100.0	91	100.0
	YMH	91	91	100.0	91	100.0	91	100.0	91	100.0	90	98.9
	YMS	91	90	98.9	91	100.0	90	98.9	91	100.0	91	100.0
	ZMS	91	89	97.8	89	97.8	91	100.0	82	90.1	88	96.7
剥離部	XDH	41	29	70.7	24	58.5	19	46.3	32	78.0	37	90.2
	XMH	41	36	87.8	33	80.5	32	78.0	39	95.1	37	90.2
	XMS	41	37	90.2	36	87.8	28	68.3	37	90.2	32	78.0
	XMSw	41	36	87.8	38	92.7	31	75.6	36	87.8	37	90.2
	YDH	25	19	76.0	19	76.0	19	76.0	18	72.0	23	92.0
	YMH	25	12	48.0	13	52.0	12	48.0	23	92.0	22	88.0
	YMS	25	20	80.0	23	92.0	21	84.0	21	84.0	21	84.0
	ZMS	25	24	96.0	23	92.0	19	76.0	25	100.0	22	88.0

正答率におけるグレースケール



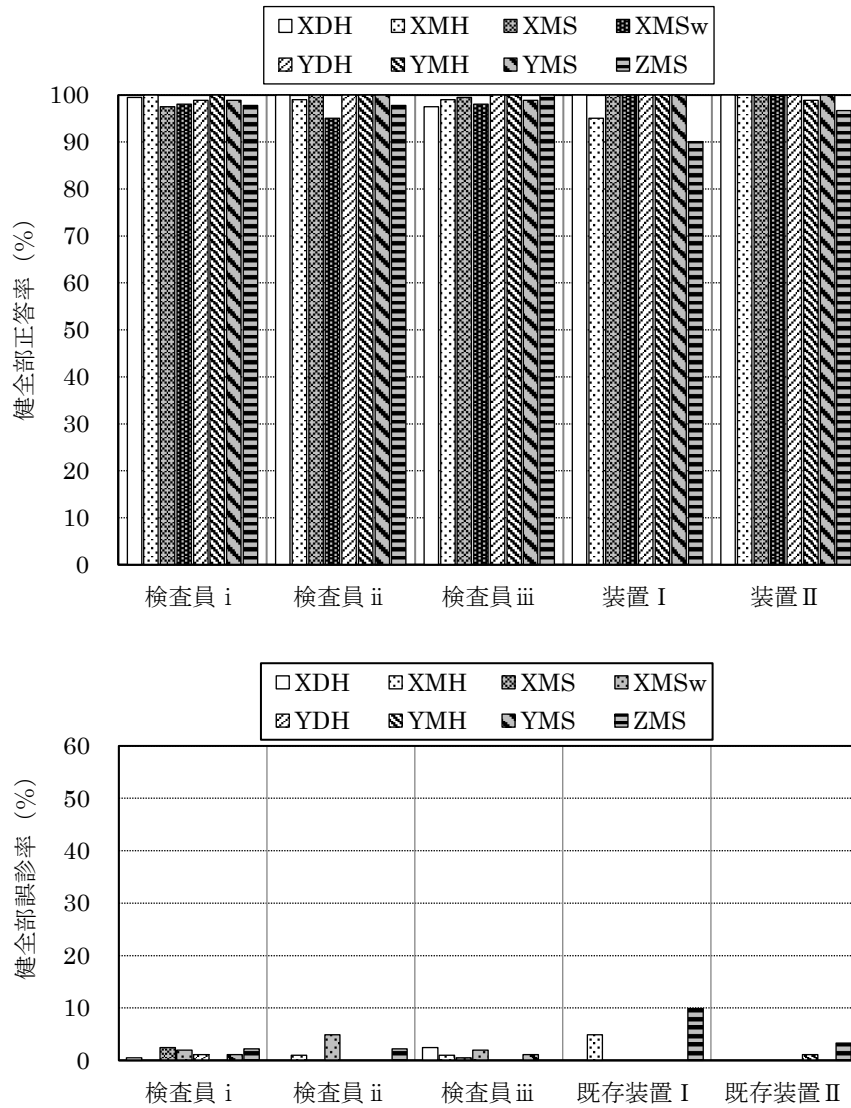


図 2.15 各検査員および既存装置の試験体ごとの健全部正答率および健全部誤診率

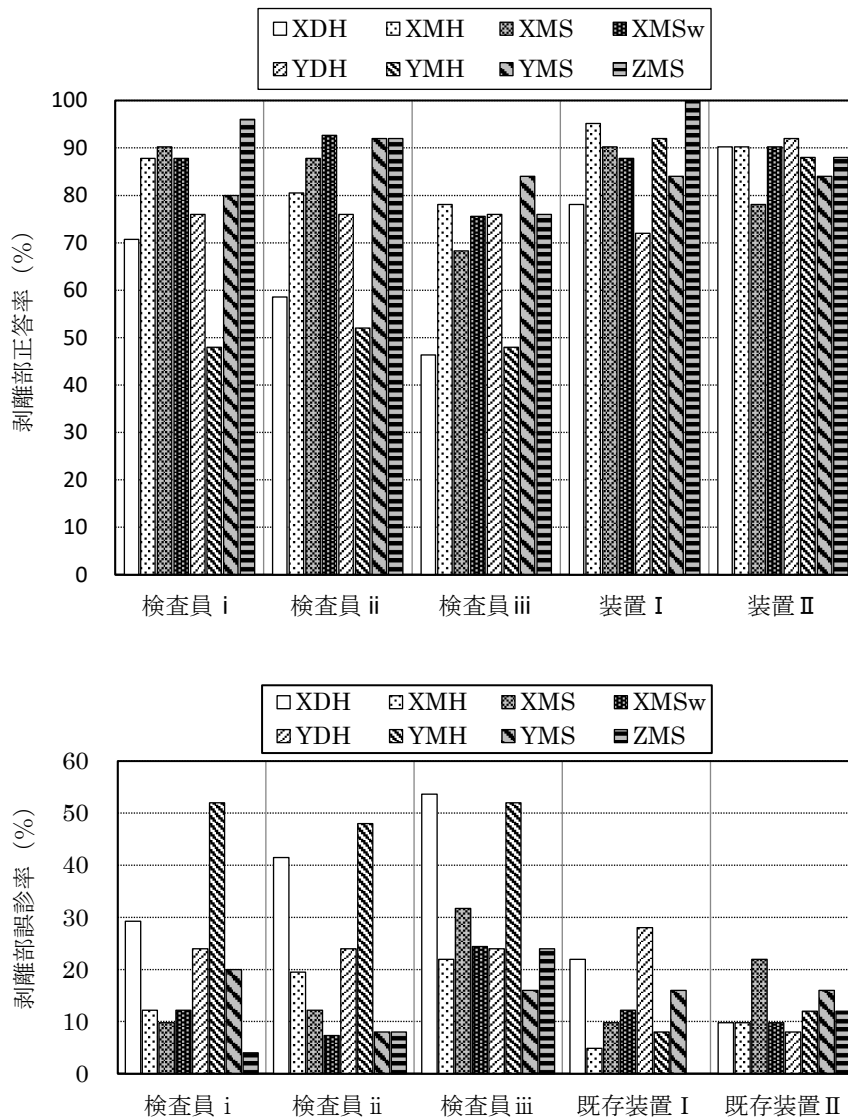


図 2.16 各検査員および既存装置の試験体ごとの剥離部正答率および剥離部誤診率

2.4 鋼球による打撃応答音の解析

2.4.1 打撃方法および打撃応答音の収録方法

本章で用いた診断装置 I, II を含め、既存の機器では剥離判定の仕組みが明らかでないものが多い。そこで、適した剥離判定方法を独自に模索するため、鋼球による打撃応答音を収録し、剥離判定に有効な解析手法やパラメータ等について基礎的検討を行うこととした。

写真 2.12 および図 2.17 に採用した打撃方法を示す。直径 0.23mm のポリエチレン製の糸の先端に直径 18mm の鋼球を固定し、高さ 100mm から軌道半径 200mm で振り子のよう運動させ、タイル表面に対して鋼球を垂直に衝突させることで、打音検査用ハンマーにより打撃する状態を模擬した形態として、一定の打撃が可能となる機構とした。

本方法における打撃点は、図 2.1 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 : 健全部端部, c : 剥離部端部, d : 剥離部

収録用マイクは、打撃部から 35mm の位置に、打撃点に向けて設置した。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。



写真 2.12 鋼球振り子式打撃装置

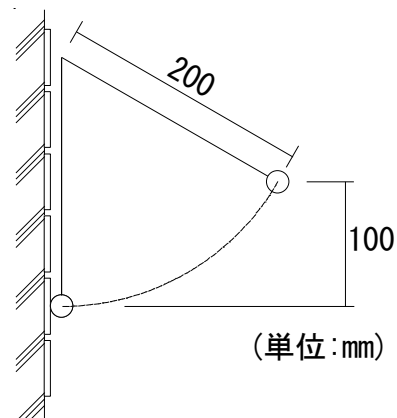


図 2.17 鋼球振り子式打撃装置模式図

2.4.2 相対最大振幅および相対対数低減率による剥離判定

図 2.18 に 2.4.1 に記した方法で収録した打撃応答音の時間波形の例を示す。ここで、「相対振幅」とは、全ての健全部の最大振幅を平均した値に対する相対値のことである。図 2.18 より、剥離部は健全部と比較して、相対振幅が大きく、また、振幅の低減が早いことがわかる。そこで、相対最大振幅を AR 、相対対数低減率を式 (2-1) に示すとおり Ld と定義し、算出することとした。

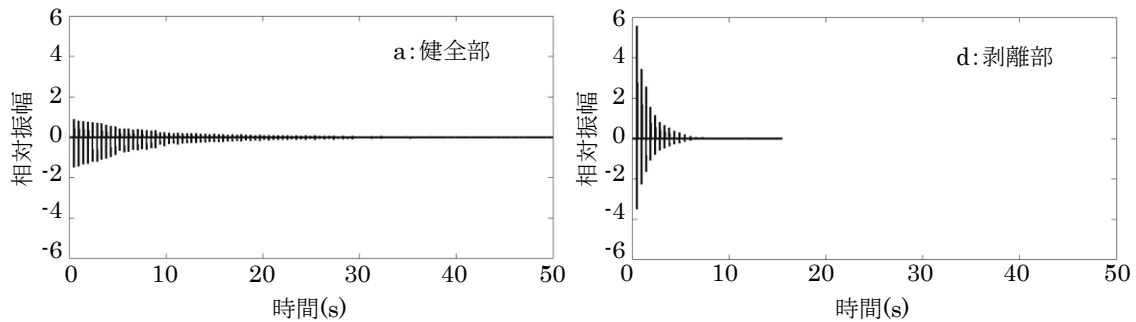


図 2.18 鋼球振り子式打撃応答音の時間波形の例 (XMS)

$$\text{相対対数低減率 } Ld = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \log \left(\frac{Am_k}{Am_{k+1}} \right) \quad (2-1)$$

ここで、 Am_k : k 撃目の相対最大振幅

全試験体の基準打撃点における AR の計測結果を図 2.19 に、 Ld の計測結果を図 2.20 に示す。また、 AR と Ld の関係を図 2.21 に示す。

図 2.19 より、剥離部 AR の値が健全部の AR の値を上回る傾向を示すことがわかる。しかし、XDH のように、健全部と剥離部の差が顕著でないものもあり、本手法をとるには、打撃方法や打撃応答音収録方法に工夫が必要と思われる。

また、図 2.20 より、 Ld においても剥離部の値が健全部の値を上回る傾向が確認できる。本手法による Ld の測定は、実際の測定には 1 箇所当たりの測定に時間がかかりすぎてしまうものの、健全部および剥離部の基本特性を把握するためには有効なものと考えられる。

図 2.21 に示した AR と Ld の関係から、両者には相関があることが確認でき、打撃応答音の低減の一因として、打撃により剥離層が振動され、音を発生することによるエネルギー損失が生じていることが考えられる。

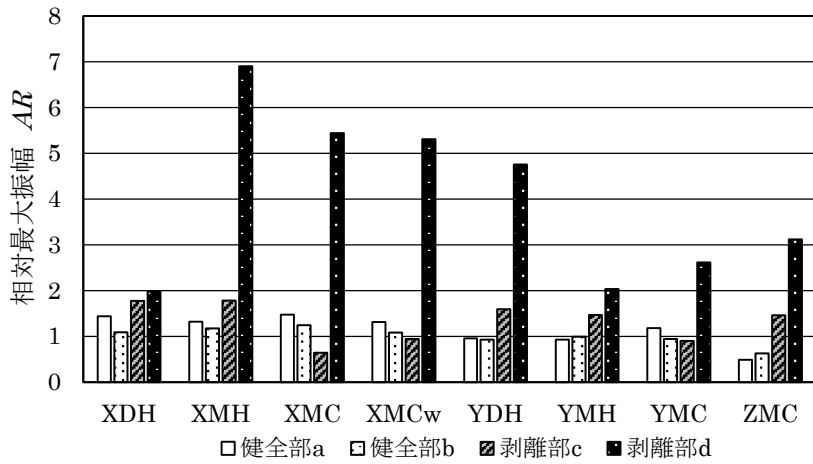


図 2.19 基準打撃点における相対最大振幅 AR

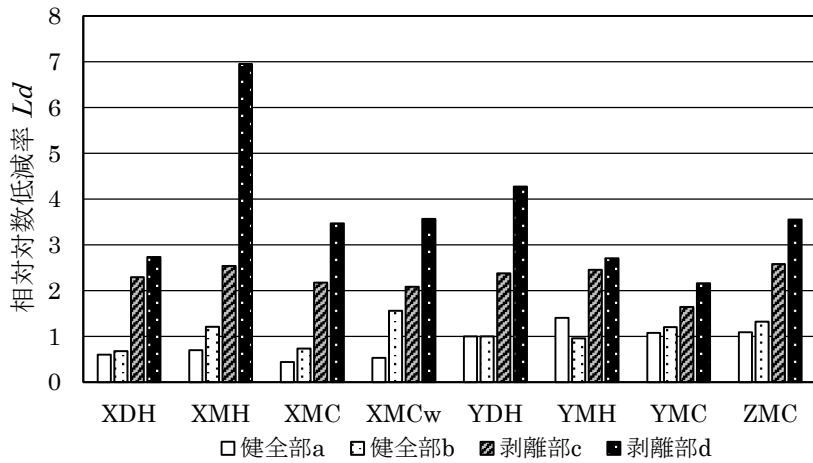


図 2.20 基準打撃点における相対対数低減率 Ld

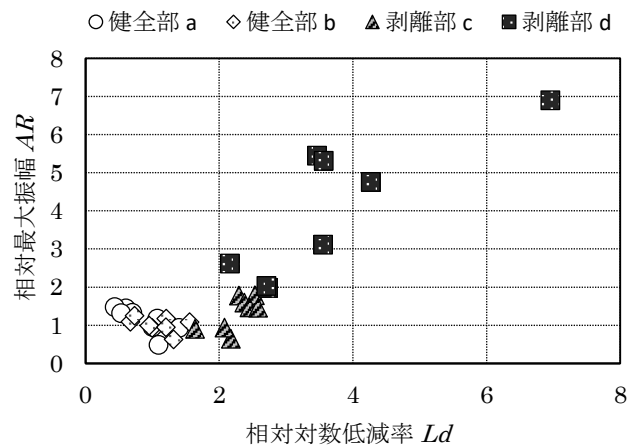


図 2.21 基準打撃点における相対最大振幅 AR と相対対数低減率 Ld の関係

2.4.3 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討するため、実験によって得られた時間波形の初回の打撃応答音波形の立ち上がりから 10ms の区間を高速フーリエ変換した。スペクトルの例を図 2.22 に示す。ここで、「相対パワースペクトル」は各スペクトルの 0-20kHz 帯のパワーに対する相対値と定義した。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 2.23 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、健全部の値がやや大きくなる傾向が確認された。

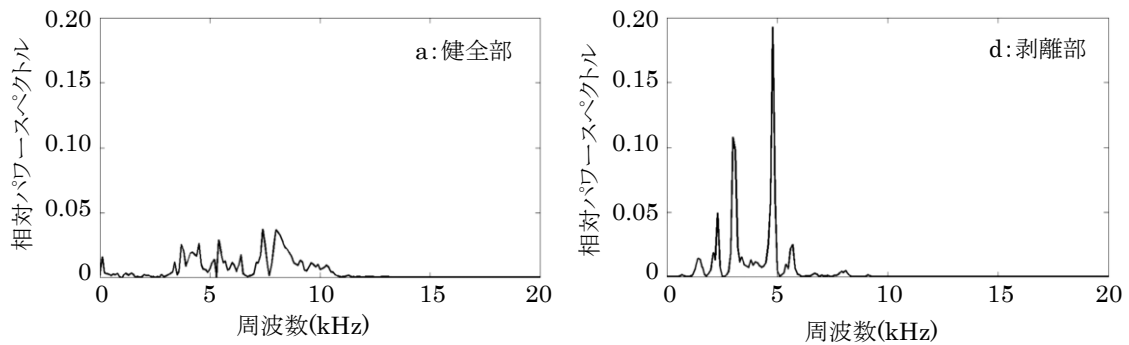


図 2.22 a 点および d 点におけるスペクトルの例 (XMS)

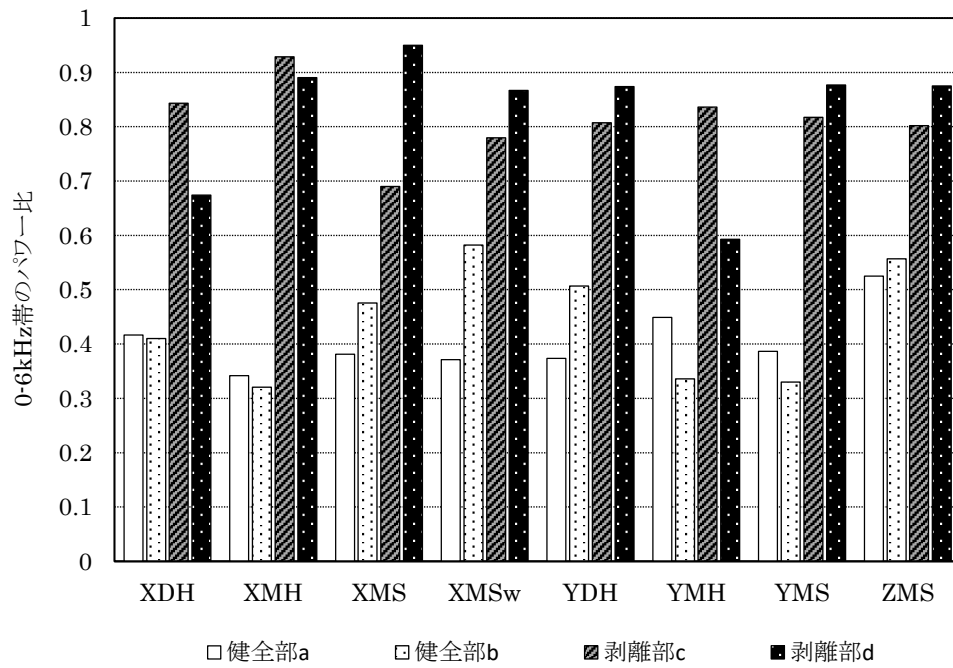


図 2.23 基準打撃点における 0-20kHz 帯のパワーに対する 0-6kHz 帯のパワー比

2.5 効率的な剥離診断装置の開発に向けた基礎的検討

2.5.1 打撃装置および打撃応答音収録機構の概要

簡易で素早く診断できる装置を開発するための試行的段階として、ソレノイドアクチュエータを有する打撃装置の適用性について検討した。ソレノイドアクチュエータは、高速連続動作が可能で単位時間あたりの打撃回数を多くすることができることから、効率的な検査に向いていると考えた。また、打撃ヘッドが試験体に衝突するまでの打撃ストロークを一定とすることで、安定した打撃力を得ることが可能である。

装置の概要を写真 2.13 および図 2.24 に示す。種々検討の結果、ステンレス製の直径 6mm のハンマーヘッドをソレノイドアクチュエータで駆動し、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を介して一体化させた。



写真 2.13 打撃装置および
打撃応答音収録機構

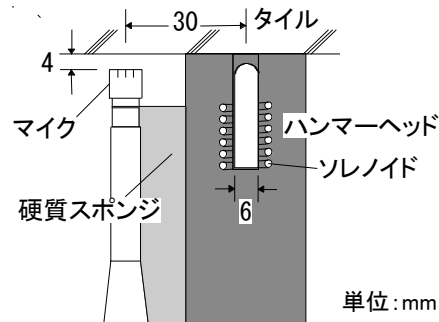


図 2.24 打撃装置および
打撃応答音収録機構模式図

2.5.2 剥離判定に用いるパラメータに関する基礎的検討

(1) 基準打撃点における測定結果および考察

試作した打撃装置を用いて、図 2.1 における基準打撃点 a：健全部，b：健全部（端部），c：剥離部（端部），d：剥離部を打撃した際の打撃応答音を収録した。

実験結果から得られた打撃応答音波形の一例を図 2.25 に示す。いずれの試験体においても、剥離部では打撃応答音の振幅が大きくなり、特に第一波の後半部にその傾向が顕著に見られるのに対し、健全部においては極端に振幅値が小さくなることが確認された。そこで、本実験においては、剥離判定に用いるパラメータとして第一波後半最大振幅を AL と定義し、タイル張付け仕様による違いについて考察することとした。

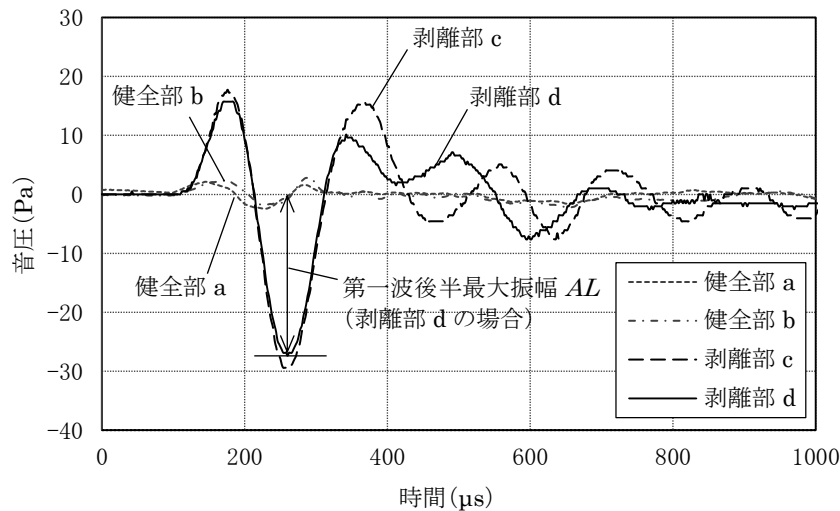


図 2.25 健全部と剥離部の打撃応答音の比較例 (YMH)

図 2.26 に、基準打撃点における第一波後半最大振幅 AL の測定結果を示す。いずれも 1 回の打撃における測定値である。図 2.26 より、健全部と剥離部とでは第一波後半最大振幅 AL に顕著な差があることがわかる。

図 2.26 における AL と、2.4 における鋼球による打撃時のパラメータ相対最大振幅 AR (図 2.19)、相対対数低減率 Ld (図 2.20)、および、周波数解析によって得られる 0-20kHz 帯のパワーに対する 0-6kHz 帯のパワー比 (図 2.23) のいずれの結果と比較しても、 AL が最も健全部と剥離部の差が明瞭であることがわかる。鋼球による打撃時の相対最大振幅 AR と図 2.26 で示した第一波後半最大振幅 AL は、いずれも振幅値をもとにしたパラメータであるが、鋼球による AR は、 $\phi 18\text{mm}$ の鋼球が露出された状態で打撃され、マイクが打撃点に向けられた状態で測定されるのに対し、打撃装置による AL は、 $\phi 6\text{mm}$ の打撃ヘッドが筐体でおおわれた状態で打撃され、マイクがタイル壁面側に向けられた状態で測定されるという差異がある。 AR に比べて AL の方が健全部と剥離部の差が明確に検出できた理由の一つとして、この打撃機構と打撃応答音収録機構の差異の影響が出ているものとする。

そこで、以降の検討においては、模擬剥離試験体全面において打撃応答音を収録し、全打撃点における第一波後半最大振幅 AL を用いて試験体仕様や打撃個所による違いについて考察することとした。打撃点は、図 2.27 に示すとおり、50 二丁モザイクタイルはタイル 1 枚あたり 6 分割、二丁掛けタイルは 10 分割した箇所中央とした。設定した打撃点は、タイル 1 枚当たりの打撃密度として十分と考える。

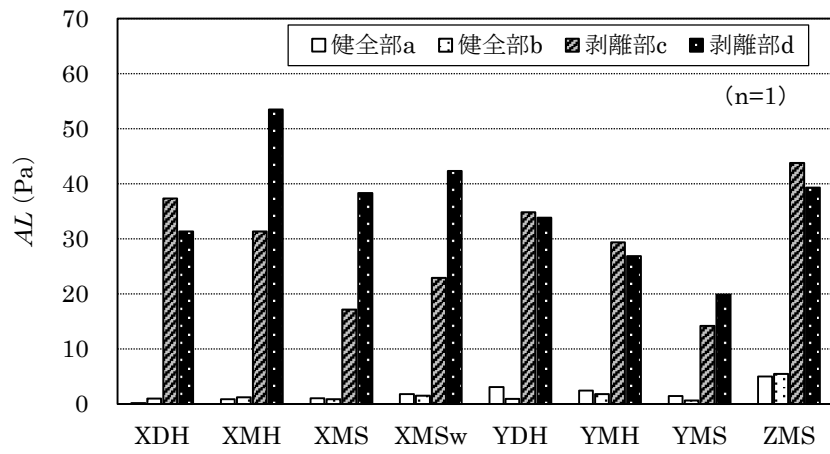


図 2.26 健全部と剥離部の打撃応答音の比較例 (YMH)

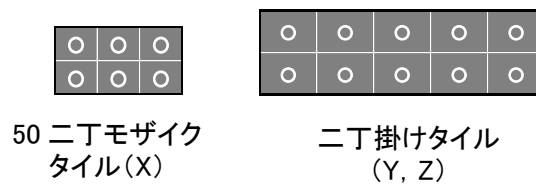


図 2.27 各タイルにおける打撃点

(2) 模擬剥離試験体全面における測定結果および考察

試験体 XDH の健全部打撃点における第一波後半最大振幅 AL の平均値を求め、その平均値に対する各打撃点の第一波後半最大振幅の比を相対最大振幅 ALR と定義した。

図 2.28 に、すべての打撃点における相対最大振幅 ALR を赤白の 2 色スケールで表示した結果を示す。赤白の 2 色スケールは、全体的な傾向を把握しやすくするため、相対最大振幅 ALR が 1 のときを「白」、40 のときを「赤」とし、1 から 40 の間をその値に応じた赤白の 2 色スケールとした。また、図 2.29 に各試験体の健全部および剥離部ごとの相対最大振幅 ALR の平均値を示すとともに、誤差範囲として最大値および最小値も示す。図 2.28 および図 2.29 より、次のことが確認された。

- ・ いずれの試験体においても、健全部の相対最大振幅 ALR よりも剥離部の相対最大振幅 ALR の方が大きく測定される傾向にあり、 ALR によって健全部と剥離部を比較的容易に判別できる。
- ・ 50 二丁モザイクタイル (X) と比較し、厚い二丁掛けタイル (Y) の方が、同じ張付け仕様、剥離界面で比較した場合、相対最大振幅 ALR が小さくなる傾向がある。
- ・ 50 二丁モザイクタイル (X) と二丁掛けタイル (Y) のいずれにおいても、剥離深さの浅い張付け材裏の剥離 (H) と比較して、剥離深さの深い下地モルタル裏の剥離 (S) の方が、相対最大振幅 ALR が小さくなる傾向がある。
- ・ 有機系接着剤で張付けた ZMS は、健全部における相対最大振幅 ALR が他のモルタル張りの試験体と比較して大きくなる傾向がある。ゴム弾性のある接着剤でタイルを張付けているため、健全であってもタイル面がわずかに振動するためと考えられる。
- ・ 剥離深さの設定値が同じで、剥離代が違う XMS と XMSw の剥離部における相対最大振幅 ALR を比較すると、XMSw の方が平均値および最大値とも若干大きいものの、分布の傾向はほぼ同様である。剥離代による差よりも剥離深さによる差の方が顕著であるものと考えられる。
- ・ 図 2.28 において、剥離部における相対最大振幅 ALR の分布の傾向として、剥離境界部近傍は ALR が小さく、その一回り内側では大きくなり、さらに中央部側はまた小さくなることが伺える。相対最大振幅 ALR の大きさは打撃を受けたタイル張り層の振動の大きさを反映していると考えられ、剥離境界近傍は振動しにくく、ある程度内部側に入った位置が最も振動しやすい状態になっているものと考えられる。

以上のとおり、打撃部が筐体で覆われ、マイクが筐体外部においてタイル壁面側に向けられた剥離診断装置によって測定される打撃応答音の第一波相対最大振幅を用いることで、比較的容易に剥離判定をできる可能性を確認した。本知見は、装置の仕様を具体化する上で有効な知見と考える。しかし、打撃応答音の振幅を扱う上では、打撃力の一定化もしくは打

撃力をもとにした打撃応答音の相対化, 標準化などの対策が必要なものと考えられる。この点をふまえた装置の構想については, 第3章において述べることとする。

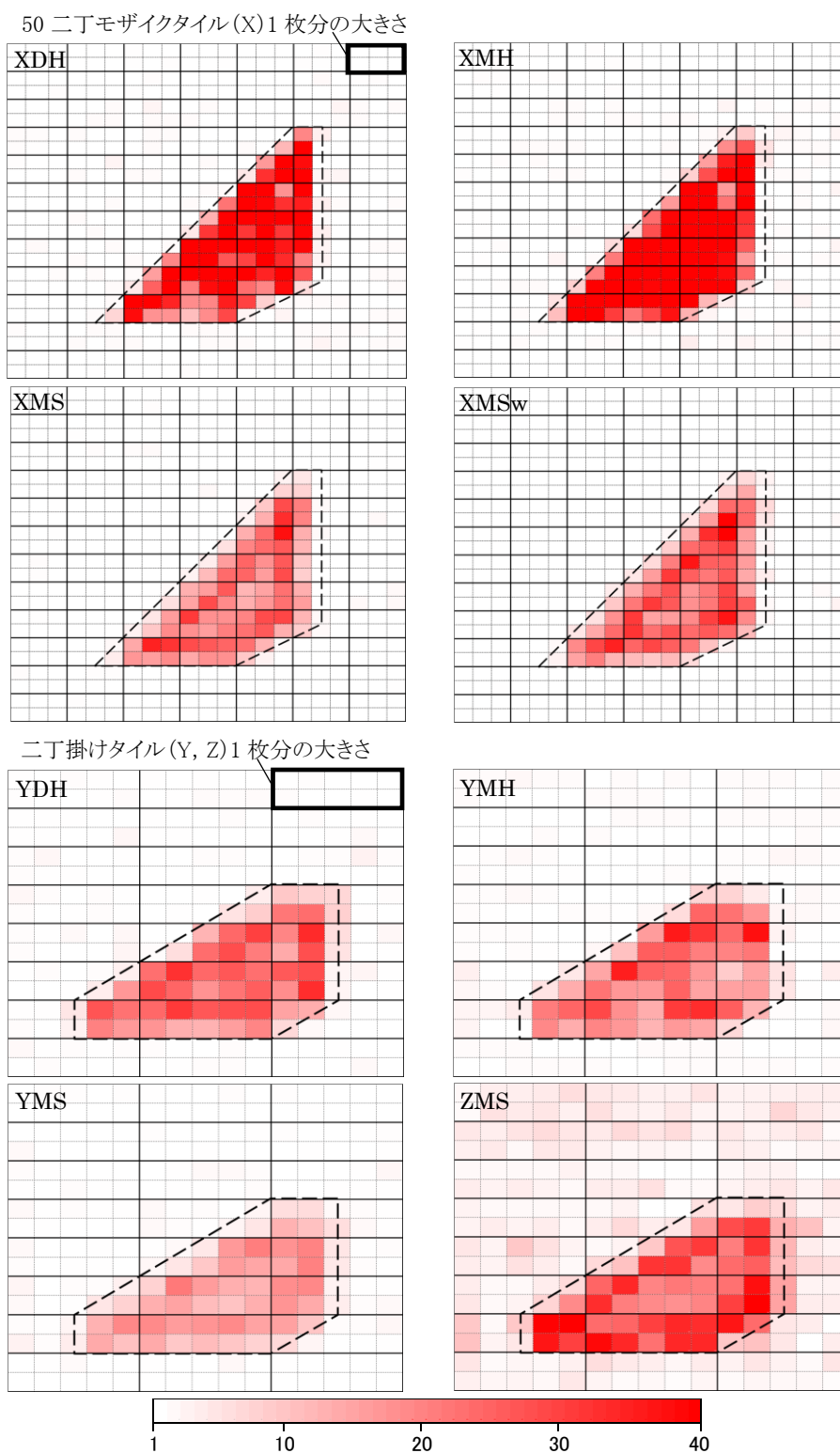


図 2.28 相対最大振幅 ALR 分布のグレースケールによる表示

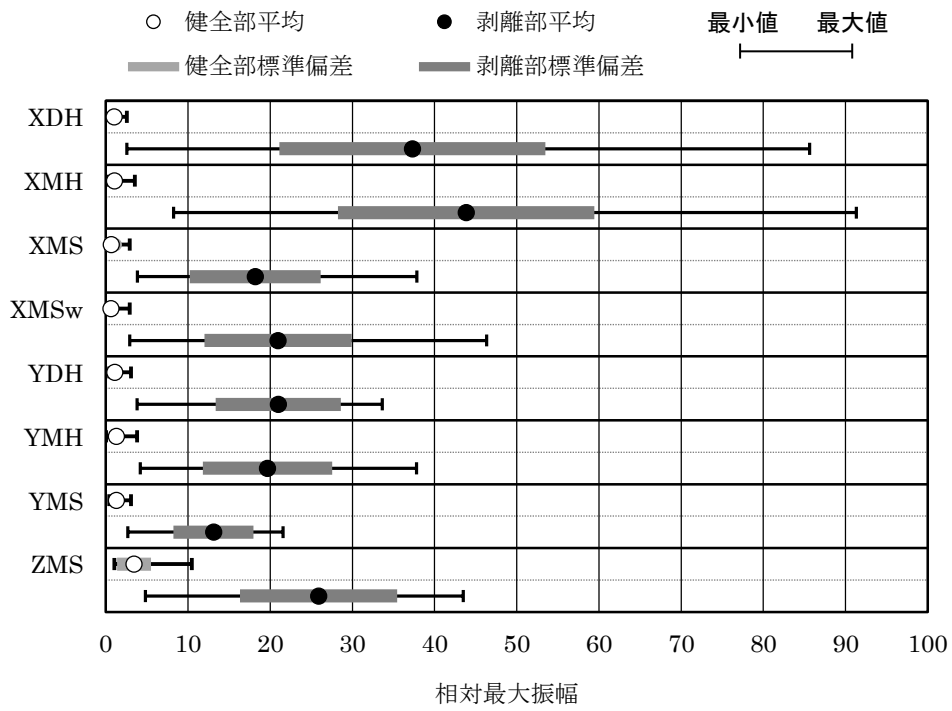


図 2.29 各試験体の健全部および剥離部ごとの相対最大振幅 ALR 平均値

(3) 相対最大振幅 *ALR* 平均値と模擬剥離深さの関係

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など、剥離の有無だけではなく剥離界面がどの深さにあるかを知ることは、改修方法の決定などに影響を及ぼすため²⁻²⁰⁾、剥離診断において有用である。そこで、剥離深さ予測手法の基礎的段階として、図 2.29 中に示した剥離部における相対最大振幅平均値と模擬剥離深さの関係を見ることとした。両者の関係を図 2.30 に示す。

図 2.30 から、剥離深さが深いものほど相対最大振幅平均値が小さく検出されることがわかる。本研究における最終的な剥離深さ推定手法については、剥離診断装置の仕様や剥離判定手法を定めた上で、本章における図 2.30 で示した知見を参考にして、第 5 章において述べることとする。

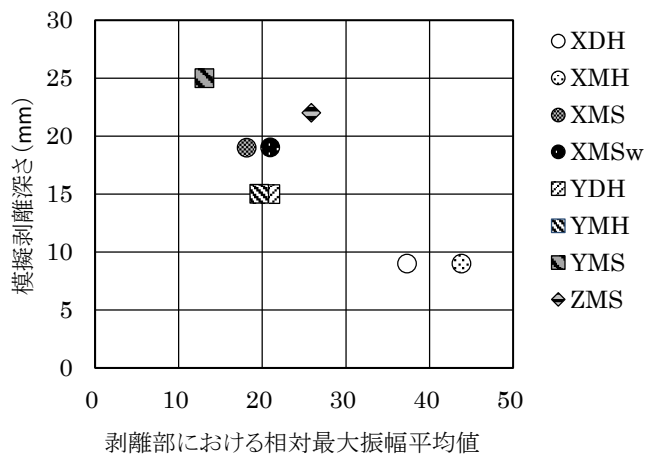


図 2.30 模擬剥離深さと剥離部の相対最大振幅平均値の関係

2.6 まとめ

本章では、タイルの種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さの異なる計8体の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。その結果、今回作製した試験体の範囲において、以下の知見を得た。

- ① 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た結果、検査員による診断では、同じ試験体であっても検査員によって剥離判定範囲に差異が生じる場合があることを確認した。
- ② 検査員および既存の装置ともに、健全部を健全と判定する健全部正答率は高い水準であったが、剥離部を剥離と判定する剥離部正答率は、低下することを確認した。
- ③ 検査員による剥離部正答率は、既存装置による剥離部正答率よりも低く、既存装置と比較して剥離部をより狭く判定する傾向があり、客観的で高精度な剥離判定をするうえでは、装置の利用が有効であることを確認した。
- ④ 装置を利用する上では明確な判定基準が必要なこと、および、装置の判定精度に改善の余地があることを確認した。
- ⑤ 鋼球による振り子方式の打撃応答音の測定により、相対最大振幅 AR 、相対対数低減率 Ld 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を算出した。基準打撃点におけるこれらのパラメータを比較した結果、いずれのパラメータにおいても健全部を剥離部が上回る結果を示し、剥離検知の可能性を把握した。
- ⑥ 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とマイクを有する打撃装置を試作した。打撃部は筐体で覆い、マイクは筐体外部においてタイル壁面側に向けた。本装置により収録した打撃応答音波形における相対最大振幅 ALR は、鋼球打撃によるパラメータと比較して、基準打撃点における健全部と剥離部の差異が顕著であり、剥離判定がよりしやすいことを確認した。
- ⑦ 模擬剥離試験体全面において相対最大振幅 ALR の測定を行った結果、いずれの試験体においても、健全部の相対最大振幅 ALR よりも剥離部の相対最大振幅 ALR の方が大きい傾向にあった。このことより、 ALR によって健全部と剥離部を比較的容易に判別できることを確認した。
- ⑧ 打撃応答音の振幅値は打撃力に伴い変化するので、振幅値をもとに剥離判定する上では、打撃力の一定化もしくは打撃力をもとにした打撃応答音の相対化などの補正が必要なものと考えられる。第3章において剥離診断装置を構想、設計および試作する際にはこの点を考慮することとした。

- ⑨ 剥離深さの浅い試験体と比較して、剥離深さの深い試験体の方が、相対最大振幅 ALR が小さくなる傾向があることを確認した。

参考文献

- 2-1) 海老原正明, 矢島四朗: 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, A 電算利用, pp.993-994, 1987.10
- 2-2) 堂山敦弘, 井上康夫, 縄岡好人, 脇坂達也: 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, A 材料施工, pp.1125-1126, 1994.9
- 2-3) 堂山敦弘, 菱河恭一, 縄岡好人, 梶谷誠, 明愛国, 金森哉史: タイル剥離有無の自動識別方法に関する検討, A-1 材料施工, pp.515-516, 1998.9
- 2-4) 堂山敦弘, 縄岡好人, 金子智弥, 汐川孝: 外壁タイル剥離診断ロボットシステムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.811-812, 1999.9
- 2-5) 堂山敦弘, 汐川孝, 井上文宏, 太田有: 外壁タイル剥離判定の自動化に関する研究 その1 ウェーブレットによるタイル打撃音の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 31-32, 2003.9
- 2-6) 布施幸則, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.813-814, 2015.9
- 2-7) B.L. Luk, K.P. Liu, F. Tong : Robotic impact-acoustics system for tile bonding integrity inspection, *Mechatronics* 19, pp. 1251-1260, 2009
- 2-8) B.L. Luk, K.P. Liu, F. Tong, K.F. Man : Impact-acoustics inspection of tile-wall bonding integrity via wavelet transform and hidden Markov models, *Journal of Sound and Vibration* 329, pp.1954-1967, 2010
- 2-9) 渡辺博司, 荘大作, 青柳隼夫, 三上文彦, 高橋拓: 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, A-1 材料施工, pp.679-680, 1995.8
- 2-10) 岩瀬昭雄: 剥離タイルの振動特性と触診型検知方法に関する研究: 模擬剥離タイルを用いた検討, 日本建築学会計画系論文集, 第455号, pp.1-7, 1994.1
- 2-11) 金子稔, 岩瀬昭雄, 坂井孝, 山本耕三, 安田正雪, 荒金直樹: 弾性波法を用いたタイル剥離検知器の開発 その1.タイル剥離検知器の概要と基礎的実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.557-558, 2001.7
- 2-12) 荒金直樹, 岩瀬昭雄, 安田正雪, 金子稔, 坂井孝, 山本耕三: 弾性波法を用いたタイル剥離検知器の開発 その2. 実建物における試験的適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.559-560, 2001.7
- 2-13) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, *コンクリート工学論文集*, Vol.7, No.1, pp.143-152, 1996

- 2-14) 歌川紀之, 伴享, 北川真也: 打音法における欠陥検知に関する一考察, 土木学会第58回年次学術講演会梗概集, V-383, pp.765-766, 2003.9
- 2-15) 伴享, 歌川紀之, 森濱和正: RC構造物への打音法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1809-1814, 2004
- 2-16) 磯光夫, 久保田和徳, 越後滋, 橘吉宏, 伴享, 歌川紀之: 打音法による合成床版の非破壊検査手法, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.249-254, 2008.6
- 2-17) 添田智美, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第729号, pp.1779-1787, 2016.11
- 2-18) 伊藤秀太郎, 添田智美, 藤沼智洋, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その4 特殊シートによる外装タイル模擬剥離の打音特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1175-1176, 2018.9
- 2-19) 添田智美, 藤沼智洋: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, フジタ技術研究報告, 第51号, pp45-50, 2015.12
- 2-20) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修, 一般財団法人建築保全センター編集: 建築改修工事監理指針/上巻 平成28年版

第3章 タイル剥離診断装置の設計・試作 および剥離判定パラメータに関する検討

3.1 はじめに

第2章では、試作した打撃装置および打撃応答音収録機構を用いて、打撃応答音波形の第一波最大振幅値による剥離判定の可能性を示した。本章では、より実用的で安定した剥離判定を可能とするために、第2章で得られた知見および既往の研究を参考に、新たな構想に基づき剥離診断装置を設計・試作した結果について述べる。また、剥離診断装置の較正手法、剥離判定パラメータの算出方法、装置の有効性について実験的に検討した結果についても述べる。

3.2 タイル剥離診断装置の基本構想

設計・試作するタイル剥離診断装置の詳細な仕様を決定する前段階として、第2章も含めた既往の研究を参考に装置が具備すべき要件について検討し、表3.1のとおり装置の基本構想を立てた。以下で本構想について説明する。

表 3.1 タイル剥離診断装置の基本構想

項目	要件	設計方針
I. 打撃機構および打撃力測定機構		
打撃機構	<ul style="list-style-type: none"> 安定した高速連続打撃 凹凸のあるタイル壁面への対応 	<ul style="list-style-type: none"> ソレノイドアクチュエータの採用 十分なストロークの確保
打撃力測定機構	<ul style="list-style-type: none"> 凹凸面操作時の打撃ストロークのばらつき、打撃力変動を補正 	<ul style="list-style-type: none"> 打撃力測定機構として圧電素子を取り付け
II. 打撃応答音収録機構		
剥離判定に用いるパラメータ	<ul style="list-style-type: none"> 比較的浅い深さでの剥離の検知 シンプルな判定 	<ul style="list-style-type: none"> 打撃応答音波形の第一波最大振幅値
マイクの配置方針	<ul style="list-style-type: none"> 打撃反響音などの影響回避 打撃位置とマイク位置および剥離部と健全部の関係を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 筒状筐体外部で、検査対象面近傍にマイクを配置 打撃点を中心として4方向均等に4つのマイクを配置
III. 打撃力および打撃応答音の較正方針		
装置の較正方法	<ul style="list-style-type: none"> 4つのマイクの出力の補正 複数装置の個体差補正 	<ul style="list-style-type: none"> 較正用試験体の作製 打撃力、打撃応答音較正方法構築

3.2.1 打撃機構および打撃力測定機構

(1) 打撃機構

第2章では、単位時間当たり多くの打撃が可能なソレノイドアクチュエータを有する打撃機構を採用した。ソレノイドアクチュエータは、一般に、他のアクチュエータと比較して、構造がシンプル、高速連続動作が可能、動作が静かといった特徴があり、そのため、軽量でコンパクトな高速連続打撃機構の構築に適していると考えられる。また、打撃ヘッドが試験体に衝突するまでの打撃ストロークが一定の場合には、安定した打撃力を得ることができる。

既往の研究においても、タイル剥離診断装置にソレノイドアクチュエータを用いた事例が報告されている³⁻¹⁾。しかし、その仕様について詳細な説明はない。また、その他の研究事例では、診断装置の打撃機構に関しては十分な記述はない^{例えば3-2)~3-8)}。

本研究では、安定した高速連続打撃を目的として、第2章と同様にソレノイドアクチュエータを採用する方針とした。

ここで、実建物の検査において、凹凸のあるタイル壁面を検査する場合でも空打ちを極力避けるためには、ソレノイドアクチュエータが十分な長さのストロークを有することが望ましい。そこで、本研究で試作する剥離診断装置では、十分なストロークと高速打撃を両立できるソレノイドアクチュエータを採用する方針とした。

(2) 打撃力測定機構

上記のように、凹凸のあるタイル壁面の検査において装置を速く動かす場合には、装置が傾いたり壁面から離れたりすることにより打撃ストロークにばらつきが生じ、それゆえ打撃力が変動することが考えられる。

既往の研究では、コンクリート構造物および合成床版における非破壊検査において、打撃力に変動が生じた場合でも安定した判定結果を得るための手法として、インパルスハンマにて打撃を行い、測定された打撃力データに対する打撃応答音の振幅の比によりコンクリートの健全性の評価を試みた事例が示されている^{3-9)~3-11)}。

このような打撃力により打撃応答音を補正する手法は、既往のタイル剥離診断の検討事例には見られないが^{3-1)~3-8)}、タイルの剥離診断にも応用できる有効な手法と考え、本研究で設計・試作する剥離診断装置にも打撃力測定機構を組み込む方針とした。

ここで、軽量かつ小型な機構で打撃力を測定する方法として、航空機分野における既存の装置³⁻¹²⁾を参考に、打撃ヘッドとソレノイドアクチュエータのシャフト間に圧電素子を取り付ける方針とした。

3.2.2 打撃応答音収録機構

(1) 剥離判定に用いるパラメータおよび打撃応答音収録方針

第2章では、打撃応答音波形の第一波最大振幅値により剥離判定が可能であることを示した。既往の研究でも、コンクリート構造物および合成床版における非破壊検査に、打撃応答音の振幅値を用いた事例が報告されている^{3-9)~3-11)}。この中で、NDIS 2426-3³⁻¹¹⁾には、浮きや空隙などのコンクリート内部の変状が浅い位置の場合や、鋼コンクリート合成部材における未充填部では、打撃によりたわみ共振が顕著に発生するため、振動振幅の大きさを評価が可能であることが記されている。しかし、明確な評価手順や評価指標は示されておらず、今後の懸案事項とされている。

本研究では、上記の既往の研究^{3-9)~3-11)}も参考に、第2章と同様に第一波最大振幅値に着目することとし、連続打撃時には打撃応答音波形の初期波形のみを収録する機構とする方針とした。この方針であれば、高速フーリエ変換やウェーブレット変換などにより打撃応答音波形を周波数解析するよりも、波形の収録時間、解析時間とも相対的に短時間で処理できる利点があり、判定アルゴリズムもシンプルに構築できると考えた。ただし、連続打撃しない場合には、実験的に長い区間の波形の収録も可能な機構とする方針とした。

(2) マイクの配置方針

第2章では、打撃機構を有する筒状の筐体の外部、かつ、検査対象面近傍にマイクを配置して打撃応答音を収録した。このような配置とすることで、打撃機構内の反響音などがマイク出力に及ぼす影響が小さいと考え、本研究においても同様の方針でマイクを配置することとした。

ここで、打撃応答音の振幅値をもとに安定した剥離診断を行ううえで、打撃位置とマイク位置の関係について十分な検討がなされた研究はこれまでに見当たらない^{3-1)~3-11)}。一方、コンクリート試験体を対象とした打撃法に関する基礎的研究の中には、マイク位置によって収録される打撃応答音振幅値が変化するとの見解が示されているものもある³⁻¹³⁾。このような知見や、装置試作のために予備的に実施した実験結果も踏まえ、本研究では打撃位置とマイク位置の関係に関して、以降に示す状況を考慮することとした。

タイル張り外壁の剥離検出を想定した場合、打撃位置とマイク位置および外壁タイルの剥離部と健全部の関係は、図3.1に示すように、次の4つの状況が想定される。

- CASE①： 打撃位置が健全部で、マイク位置も健全部の場合
- CASE②： 打撃位置が健全部で、マイク位置が剥離部の場合
- CASE③： 打撃位置が剥離部で、マイク位置が健全部の場合
- CASE④： 打撃位置が剥離部で、マイク位置も剥離部の場合

③と④のように打撃部が同じ剥離部上でも、マイクが健全部上と剥離部上とは打撃応答音には差が出ることが想定され、予備的に行った実験においてもそのような傾向が見受けられた。一方、②と④のようにマイクが同じ剥離部上にあっても、打撃位置が剥離部なのか健全部なのかによって、打撃応答音に差が出ることが想定される。また、①および②のように健全部を打撃した際に、マイクも健全部にある①と、マイクが剥離部にある②とではどのような差が生じるのかについても確認が必要である。

既往の研究における診断装置^{例えば2)~12)}は、いずれも打撃部1つに対してマイク1つで構成されている。しかし、③または④のいずれの場合でも検出漏れのない安定した剥離判定結果を得るためには、打撃点の両側に対称な位置でマイクを配置することが効果的と考えた。実際には剥離境界の存在する方向が未知であることを考慮し、打撃点を中心として4方向均等にマイクを配置する方針とし、①~④で示した4つの状況によって各マイクの測定結果にどのような差が生じるか検討できるようにすることとした。

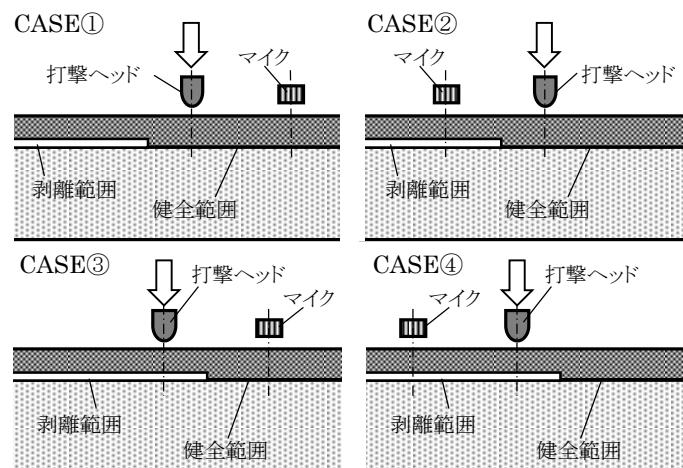


図 3.1 打撃位置およびマイク位置の概念図

3.2.3 打撃力および打撃応答音の較正方針

上述のとおり、本研究では4つのマイクを使用する方針としたため、同条件における4つのマイクの打撃応答音が同等となるように較正する必要がある。また、複数の剥離診断装置の個体差をなくすためにも、打撃力および打撃応答音の出力を適切に較正することが重要と考える。しかし、既往の研究においてこれらの較正方法について十分な記述がなされていない^{例えば3-1)~3-8)}。

本章では、較正に適した試験体を考案・作製し、この試験体を用いて装置の打撃力および打撃応答音を較正する方法を構築する方針とした。

3.3 検討手順

3.2 の基本構想をもとに、以下の手順で本章における検討を進めることとした。

- a) 基本構想に従い、下記の要件を満足するタイル剥離診断装置を設計・試作する(3.4)。
 - ・ 単位時間当たり多くの打撃が可能で十分なストロークを有するソレノイドアクチュエータを用いた打撃機構とする。
 - ・ 打撃力を測定するために打撃ヘッドとソレノイドアクチュエータのシャフト間に圧電素子を取り付ける。
 - ・ 打撃機構を内蔵する筒状の筐体の外部に、打撃点を中心にして4方向に均等にマイクを配置する。
- b) 試作した剥離診断装置の較正が可能な試験体を考案・作製し、その試験体をもとに打撃力および打撃応答音の出力特性を確認する。また、打撃力波形および打撃応答音波形から抽出する基本パラメータを設定し、基本パラメータの較正方法および適した剥離判定パラメータについて詳細に検討する。
- c) 4つのマイクの効果を較正用の試験体を用いた実験により検証する。
- d) 本研究における検討結果を総括するとともに、試作したタイル剥離診断装置の較正方法および剥離判定パラメータの算出手順を提案する。

3.4 剥離診断装置の設計および試作

3.2 の基本構想をもとに設計・試作した剥離診断装置の主要な仕様および構成を表 3.2 および図 3.2 に示す。また、試作した装置の外観を写真 3.1 に示す。設計の要点を 3.4.1 および 3.4.2 で説明する。

表 3.2 試作した剥離診断装置の主要な仕様

ソレノイドアクチュエータ	
最大打撃周波数	10Hz
ストローク	10mm
吸引力	0.21N 以上 (10mm stroke)
復帰スプリング圧	約 0.35 N (10 mm ストローク時)
駆動電圧 (D.V.)	可変 (3.5V, 4V, 5V, 6V, 8V)
打撃ヘッド	
材質	ステンレス製 (SUS304)
サイズ	φ6mm 円筒形, 先端球状(r=5mm)
打撃力センサ	
圧電素子 (Piezo)	5x5x5mm, 発生力 200N タイプ
マイク (Mic)	
個数	4 個
サイズ	φ6x3.4mm
仕様	無指向性バックエレクトリックコンデンサマイク インピーダンス: 2.2kΩ 以下 周波数: 50 - 16,000 Hz 感度: 1.5V で-3 dB 以内 S/N 比: 62dB 以上
打撃力センサおよびマイクのサンプリング周波数: 200kHz	

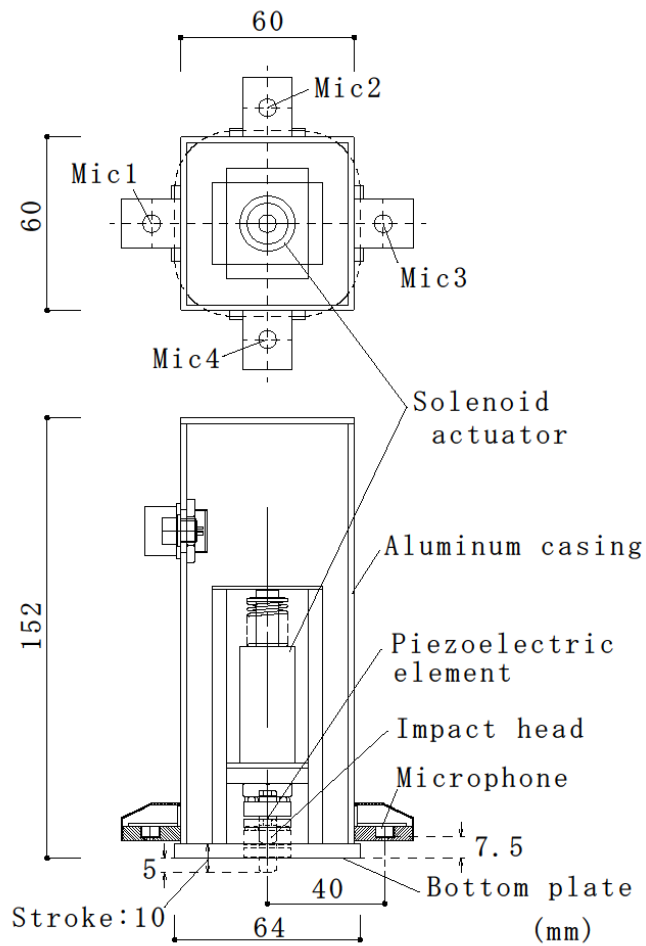


図 3.2 剥離診断装置の概略図

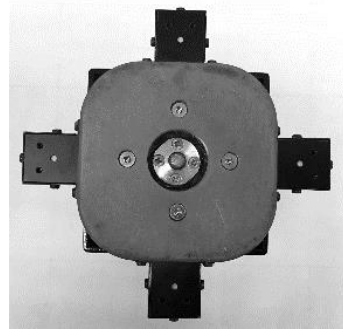


写真 3.1 剥離診断装置の外観

3.4.1 打撃機構

剥離診断装置の打撃機構の主要部として、最大打撃周波数 10Hz での高速打撃が可能で、かつ、ストローク 10mm のソレノイドアクチュエータを特注して用いた。ソレノイドアクチュエータの先端に取り付ける打撃ヘッドは、直径 6mm、先端曲率半径 5mm のステンレス鋼とした。最大ストローク時における打撃ヘッドの装置底板からの突出長を 5mm とし、多少の凹凸のあるタイル面でも打撃できるようにした。

打撃力センサとして、打撃ヘッドとソレノイドアクチュエータのシャフト間に圧電素子を取り付け、打撃時の圧電効果によって生じる電圧値を測定することとした。この打撃力センサを用いれば、打撃応答音を補正できるだけでなく、打撃力をトリガとして、打撃応答音の大小によらず測定を行うことができるため、高速連続打撃におけるデータ収録を的確に行える利点がある。

ソレノイドアクチュエータの駆動電圧は、3.5, 4, 5, 6, 8V の 5 段階で可変とし、打撃力が打撃応答音に与える影響について実験的に検討を行えるようにした。

3.4.2 打撃応答音収録機構

打撃応答音収録用のマイクとして、表 3.2 に示すとおり、小型かつ軽量で、十分な周波数特性を持つコンデンサマイクを選定した。

マイクの取り付け位置は、打撃機構を内蔵するアルミニウム製の筐体の外部とし、打撃点を中心に 4 方向均等となるように 4 個取り付けた。打撃点からマイク中心までの水平距離は 40mm (±0.5mm) とし、マイクと検査対象面との距離は、装置底板面を検査対象面に密着させた場合に 7.5 mm (±0.5mm) とした。

サンプリング周波数は、打撃力および打撃応答音の波形を適切に収録できるように、200kHz とした。

3.5 装置の較正方法および剥離判定パラメータに関する検討

3.5.1 検討方法

試作した剥離診断装置の出力特性を確認し、装置の較正方法および剥離判定パラメータを提案することを目的として、次のとおり検討を行うこととした。

- ・ 中心を打撃した際に4つのマイクに入力される打撃応答音が同等となり、打撃力および打撃応答音の再現性も高いことが期待できる形状と材質の試験体を作製する。
- ・ 既述のとおり、剥離診断装置が傾いたり壁面から離れたりする状況を想定し、装置と試験体表面の位置関係や打撃力などを種々変化させた測定条件を設定する。
- ・ 設定した各条件において試験体を打撃した際の打撃力および打撃応答音を測定し、それらの出力特性を確認するとともに、打撃力と打撃応答音の関係について考察する。
- ・ 打撃力波形および打撃応答音波形から抽出する基本パラメータを設定する。また、基本パラメータによる装置の較正方法について検討する。
- ・ 打撃力の変動によらず、安定して剥離判定ができるパラメータについて検討する。

3.5.2 較正を目的とした試験体の作製

剥離診断装置の出力特性の確認、および、打撃力および4つのマイクの振幅値の較正を目的として、表3.3に示す3種類の試験体を作製した。高精度で均質性を確保でき、陶磁器質タイルと似た物性とするを意図して、いずれの試験体も試験面はガラス製とした。当初、300mm角のガラス平板の4隅をスポンジで浮かせ、その中央を打撃する方法を試みたが、各マイク位置における打撃応答音の波形や位相、周期等が一定とならなかったため、 Q_{160} および G_{160} のように、周辺が円形かつ均等に拘束された試験体を考案した。

Q_{160} は、 $\phi 300\text{mm}$ 、厚さ60mmの円板状の石英ガラス製試験体である。裏面中央部には $\phi 160\text{mm}$ 、深さ50mmの空洞を設けた。結果として、試験体表面に厚さ10mmの試験面を残存させたものである。本試験体は、高精度で加工され、長期間変質することがないことから、装置較正のための標準試験体として位置づけたものである。

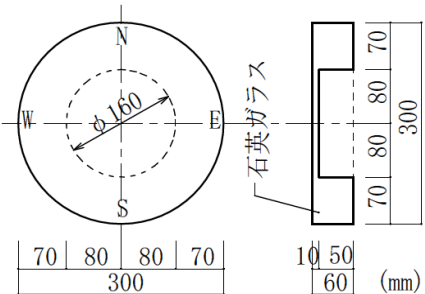
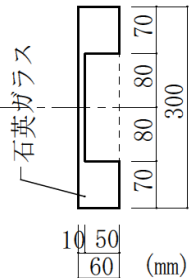
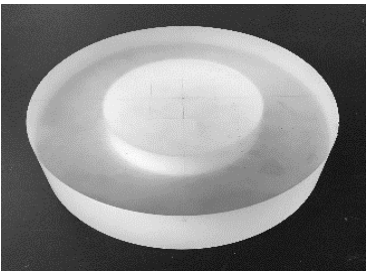
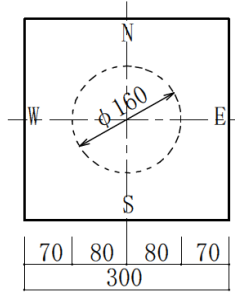
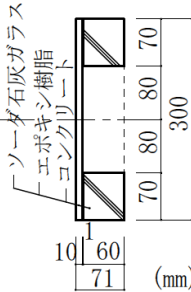
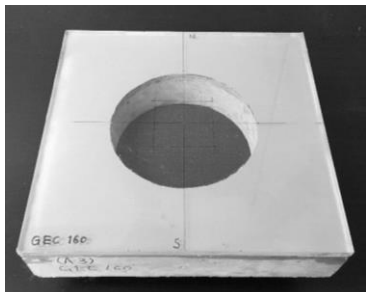
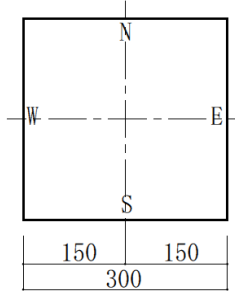
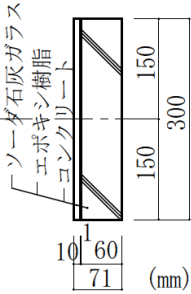
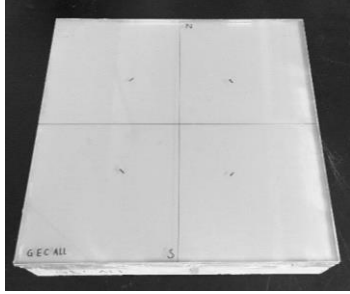
G_{160} は、300mm角、厚さ60mmのコンクリート平板の中央を $\phi 160\text{mm}$ でコア抜きしたものに、厚さ10mmのソーダ石灰ガラス（フロート板ガラス）を硬質のエポキシ樹脂系接着剤で接着（張代約1mm）した試験体である。本試験体は、タイルがコンクリートに張り付けられた状態に近い構成で剥離状態を模した試験体である。安価で作製可能なため、診断現場などで日常的に用いるのに適していると考ええる。

G_0 は、300mm角、厚60mmのコンクリート平板に、厚10mmのソーダ石灰ガラスをエポキシ樹脂系接着剤で全面接着（張代約1mm）した試験体である。本試験体は、タイルが

コンクリートに完全に接着され、剥離の生じていない健全状態を模したもので、 Q_{160} および G_{160} の比較対象用の試験体として作製したものである。

なお、本研究における装置の較正の位置づけは、標準となる試験体での試験値が「1」となるように打撃力および打撃応答音の振幅値を標準化することにある。

表 3.3 装置較正のためのガラス製試験体

記号	試験体の仕様		
Q_{160}	石英ガラス (φ300 mm × 厚 60 mm) 裏面中央に空洞付き (φ160 mm × 空洞深さ 50 mm, ガラス残厚 10 mm)		
			
G_{160}	ソーダ石灰ガラス (300mm 角, 厚 10mm) + 硬質エポキシ樹脂系接着剤 (厚 約 1mm) + コンクリート (300mm 角, 厚 60mm, コア抜き φ160mm)		
			
G_0	ソーダ石灰ガラス (300mm 角, 厚 10mm) + 硬質エポキシ樹脂系接着剤 (厚 約 1mm) + コンクリート (300mm 角, 厚 60mm)		
			
ガラスの仕様		石英ガラス	ソーダ石灰ガラス
比重		2.2	2.5
ヤング率 (GPa)		74	71.6
ポアソン比		0.17	0.23

3.5.3 試験体測定条件の設定

試験体の打撃箇所は、4つのマイクに対して均等な打撃応答音が入力されると想定される試験体中央部とした。ここで、剥離診断装置が傾いたり壁面から離れたりする状況として、表 3.4 に示すように装置底板と試験面との間に種々の隙間が生じた場合を想定した測定条件を設定した。表 3.4 に示す隙間条件「n1s1」とは、各試験体における装置底板と試験体表面間の隙間が、表 3.3 の各試験体平面図に示す N, E, S, W の4方向のうち N 方向は 1mm, S 方向は 1mm の状態であることを表す。この条件を満たすために、隙間が 0mm 以外の場合には、写真 3.2 に示すとおり、所定の厚みのスペーサーを装置底板の四隅の位置に挿入して測定を行った。

測定時における各マイクの向きは、N, E, S, W のすべての方向を向くように、写真 3.2 に示す要領で 90 度ずつ装置を回転させた。同一測定条件・方向における測定回数は各 2 回とした。

また、打撃力が打撃応答音に与える影響について考察するため、ソレノイドアクチュエータの駆動電圧は、3.5, 4, 5, 6, 8V の 5 通りとした。

表 3.4 測定時の装置底板と試験面間の隙間条件

隙間条件	隙間間隔 (mm)		装置底板と試験面間の隙間状態
	N 側	S 側	
n0s0	0	0	密着状態
n1s1	1	1	均等隙間状態
n1s3	1	3	傾斜隙間状態
n1s4	1	4	傾斜隙間状態
n2s0	2	0	片側密着状態
n2s1	2	1	傾斜隙間状態
n2s2	2	2	均等隙間状態
n2s3	2	3	傾斜隙間状態
n2s4	2	4	傾斜隙間状態
n3s3	3	3	均等隙間状態
4つのマイクの方向			N, E, S, W
駆動電圧 (D.V.) (V)			3.5, 4, 5, 6, 8

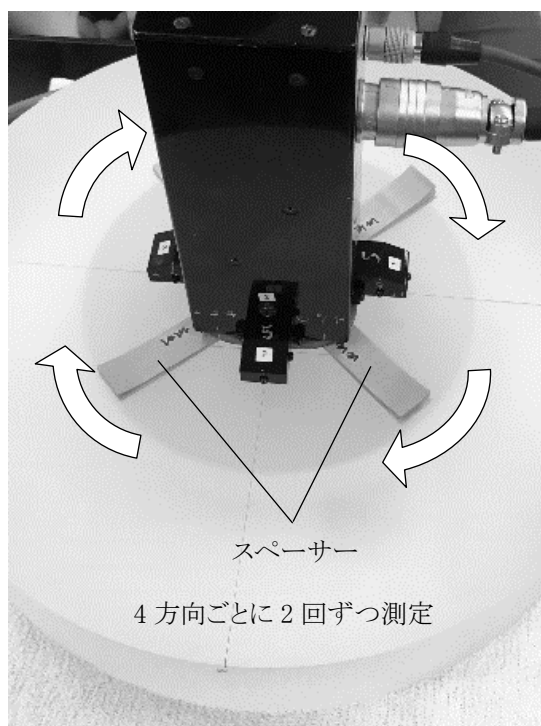


写真 3.2 試験状況

3.5.4 各試験体における打撃力波形および打撃応答音波形測定結果

駆動電圧 3.5V, 隙間条件 n1s1 (均等隙間状態: 1mm) の時の各試験体における打撃力波形および打撃応答音波形を図 3.3 に示す。図の(a)は Q₁₆₀, (b)は G₁₆₀, (c)は G₀ の波形である。各図の下段は収録した全時間域の波形の例であり, 上段は初期の時間軸を拡大して示した波形の例である。なお, 時刻 0 μ s は, 打撃力がトリガレベルに達した時刻から 100 μ s さかのぼった時刻とした。

図 3.3 (a)より, 均質な石英ガラスを高精度で加工した Q₁₆₀ を測定した波形から, 試作した剥離診断装置が次の特徴を持つことが確認できる。

- ・ 打撃力波形が立ち上がってから約 50 μ s 後に 4 つのマイクとも同じ時刻で打撃応答音波形が立ち上がっており, マイクの時間応答性に差がない。
- ・ 各マイクで収録された打撃応答音波形の振幅は, マイクの個体差あるいはマイク出力の増幅加減による差は若干あるものの, いずれのマイクにおいてもほぼ同等である。
- ・ 打撃応答音波形における位相および減衰の傾向は, いずれのマイクにおいてもほぼ同等であり, マイクによる差はみられない。

図 3.3 (b)より, コア抜きしたコンクリート板にソーダ石灰ガラスを接着した G₁₆₀ においても, Q₁₆₀ と同様に, 打撃力応答音波形の立ち上がり時刻, 振幅, 位相, 減衰傾向とも, 4 つのマイク間に差異はほとんどないことがわかる。なお, G₁₆₀ の打撃応答音第一波は Q₁₆₀ のそれとほとんど同じ振幅値であったが, G₁₆₀ では第二波・第三波の振幅の増幅量が Q₁₆₀ よりも小さく, その後の減衰の程度は大きかった。本報においてこの両者の差異について詳細な検討を行うことは範囲外とするが, 打撃応答音波形におけるマイク間の差異がほとんどないことから, Q₁₆₀ だけでなく, G₁₆₀ も装置較正用の標準試験体として適用できると思われる。

図 3.3 (c)より, コンクリート板にソーダ石灰ガラスを全面接着した G₀ は, G₁₆₀ と比較して打撃力は若干大きいものの, 打撃応答音の振幅が非常に小さいことがわかる。ガラス板の裏面に空隙がない G₀ では, 打撃によってガラス板の変形および振動がほとんど生じないためと考えられる。打撃応答音波形が非常に小さいことから, マイク出力を較正するための標準試験体として本試験体を用いることは適していないが, 図 3.3 (b)および図 3.3 (c)の結果から, 表面に施工した外装材裏面の剥離や空隙の有無を打撃応答音振幅値で判定することの有効性が改めて確認できる。

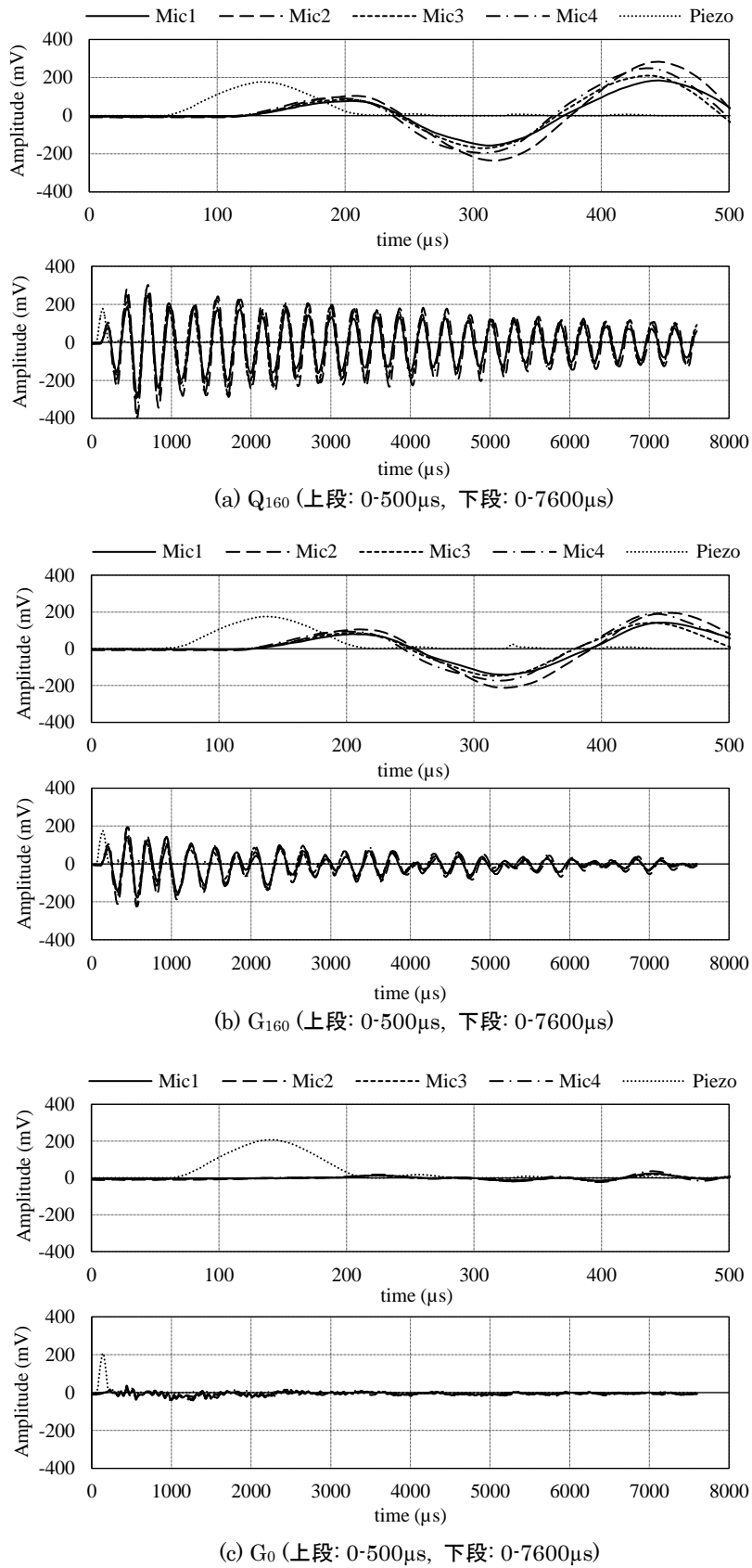
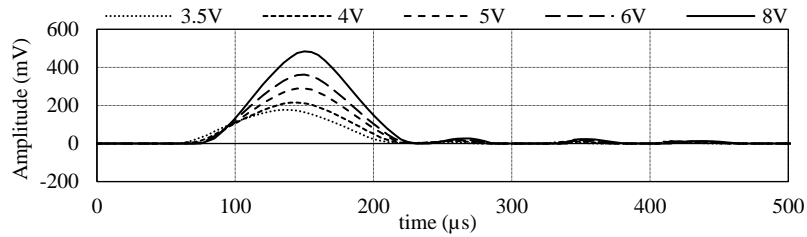
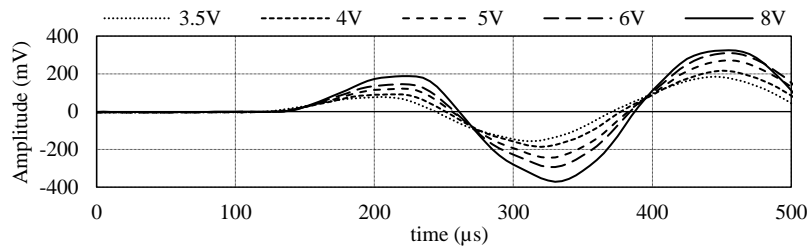


図 3.3 各試験体における打撃力波形および打撃応答音波形 (3.5V, n1s1)

Q₁₆₀ における打撃初期の打撃力波形および打撃応答音波形を、ソレノイドアクチュエータの駆動電圧ごとに図 3.4 に示す。図 3.4 より、駆動電圧が大きくなるに従い、打撃力および打撃応答音の振幅も大きくなるのがわかる。一方、打撃力および打撃応答音の波長にはほとんど変化がない。このように、打撃力に応じて打撃応答音の振幅が変化しており、本装置において、打撃力を計測して打撃応答音の振幅を補正できる可能性がうかがえる。



(a) 打撃力波形



(b) 打撃応答音波形

図 3.4 駆動電圧ごとの打撃初期打撃力波形および打撃応答音波形 (Mic1, n1s1)

3.5.5 剥離診断に用いる基本パラメータの設定

本章では、図 3.5 に示すように、打撃力波形における最大値を「最大打撃力 F 」、打撃応答音波形における第一波の前半極大値から後半極小値までの振幅を「第一波最大振幅 A 」と定義した。以降においては、打撃力波形および各マイクの打撃応答音波形から、これらの基本パラメータを抽出する方針とした。

試作した剥離診断装置によって測定される最大打撃力 F および 4 つのマイクにおける第一波最大振幅 A の再現性の程度を確認するため、同一条件において標準試験体 Q_{160} の中央部を駆動電圧 5V で 30 回試験し、基本パラメータごとに変動係数を算出した。隙間条件は、表 3.4 に示す n1s1 および n2s2 の 2 条件とした。

各条件における変動係数の算出結果を表 3.5 に示す。いずれの条件においても変動係数は 3% 未満であり、試作した剥離診断装置は、打撃ストロークが一定の条件下では、ばらつきが小さく高い再現性で基本パラメータを得られることが確認できた。

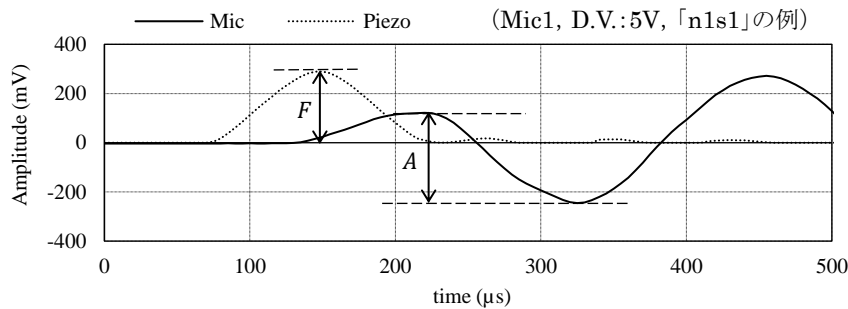


図 3.5 打撃力波形および打撃応答音波形から抽出するパラメータ

表 3.5 Q_{160} 試験時の A および F の変動係数（駆動電圧 5V, 30 回試験）

隙間条件	A の変動係数 (C.V.) (%)				F の C.V. (%)
	Mic1	Mic2	Mic3	Mic4	Piezo
n1s1	1.48	2.10	1.59	2.61	0.44
n2s2	0.65	1.34	2.36	2.35	0.65

(D.V.: 5V)

ここで、参考として、圧電素子によって計測される打撃力の実際の荷重値の程度を把握することを目的として、ロードセルの加力部を打撃することにより、ロードセルにより計測される荷重値と圧電素子により計測される電圧値との関係を把握することとした。

試験概要を図 3.6 に示す。ロードセルの加力部には、金属同士の衝突によるノイズ防止を意図して、セロハンテープ（厚約 0.05mm）を 1 枚貼り付けた状態で試験を行った。

荷重計測に用いたロードセルの種類、試験時における隙間条件および駆動電圧を表 3.6 に示す。圧電素子またはロードセルの計測可能範囲内において広範囲のデータが得られるように、表 3.6 の中から適宜条件を選択して試験を行った。試験は条件ごとに 3 回実施し、得られた波形の最大値の平均値を求めた。

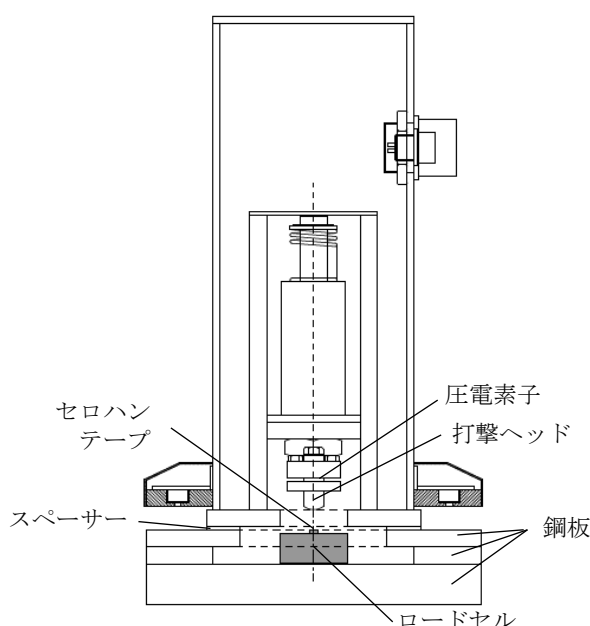


図 3.6 打撃力荷重計測試験状況の例

表 3.6 打撃荷重値計測試験条件

ロードセル	タイプ	超小型 圧縮型	超小型 圧縮型	超小型 圧縮型	超小型 圧縮型	小型 圧縮型	ビーム型
	容量	5kN	5kN	1kN	200N	5kN	200N
	固有振動数	約 50kHz	約 50kHz	約 50kHz	約 40kHz	約 1.1kHz	500Hz
打撃方向	鉛直	水平	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直
隙間条件	n0s0, n1s1, n2s2, n3s3 より適宜選択						
駆動電圧	3.5, 4, 5, 6, 8V より適宜選択						
測定値	ロードセル荷重値および圧電素子電圧値波形の最大値を測定						
繰り返し回数	3 回						

各ロードセルにおいて得られた荷重値と同時に計測された圧電素子の電圧値との関係を図 3.7 に示す。図 3.7 より、ロードセルの荷重値と圧電素子の電圧値との間には相関があることがわかるが、ビーム型のロードセルでは荷重が小さく計測され、超小型圧縮型の低容量のロードセルでは、圧電素子の出力が小さく計測されることがわかる。また、圧電素子の電圧値は、荷重と比例とは言えず、原点を通ると仮定すると、若干上に凸の曲線に近似する様相を示していることがわかる。なお、本試験と同じ時期に隙間条件 n1s1、駆動電圧 5V で試験体 Q₁₆₀ 中央部を試験した際の圧電素子電圧値は 284mV であるので、仮に超小型 1kN または 5kN のロードセルによる出力を元に換算すると、ピーク荷重として 100N 程度の打撃力が働いていることとなる。

ここで、打撃力測定値の物理的な意味の解明は、論理的に打撃応答音の発生現象を説明する上で、非常に重要で高度な課題であるものの、真の荷重値への変換について十分な説明ができていない状況である。[圧電素子出力電圧 F (mV)] \Leftrightarrow [打撃荷重値 (N)] \Leftrightarrow [音圧 (Pa)] \Leftrightarrow [マイク出力電圧 A (mV)] の一連の関係性について論理的に理解するためには、さらに高度な検討を要すると考えられ、打撃力計測に関するさらなる検討については本論文の範囲外とすることとした。本論文の範囲では、上の関係において、[圧電素子出力電圧 F (mV)] \Leftrightarrow [マイク出力電圧 A (mV)] の関係について直接扱うこととし、その際に変質することのない標準試験体 Q₁₆₀ に対する相対値として測定値を捉える方法をとることとした。物理的な意味は十分解明されていないものの、剥離判定をする上で有用性があるものと考えた。

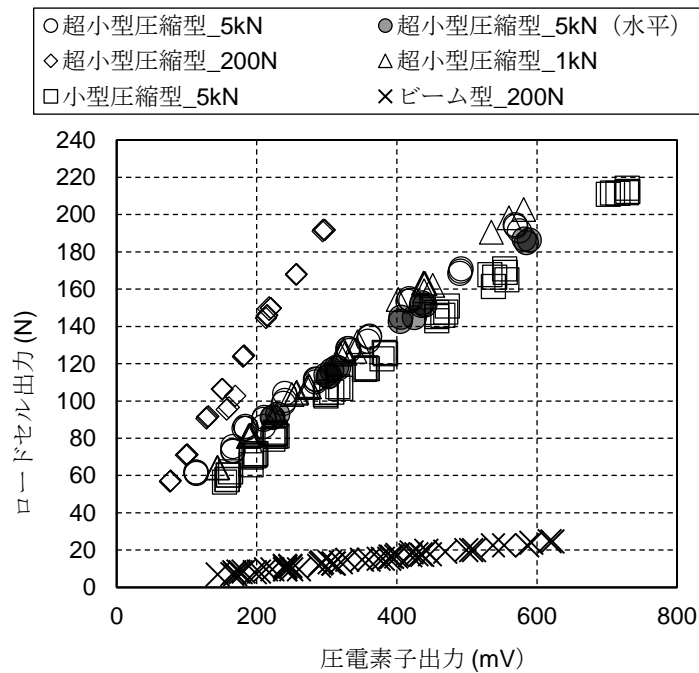


図 3.7 打撃力荷重計測試験概要

3.5.6 最大打撃力および第一波最大振幅の相対化

最大打撃力 F および第一波最大振幅 A を較正するための標準値として、標準試験体 Q₁₆₀ の試験体中央を測定した際の、最大打撃力 F を打撃力標準値 F_0 、また、第一波最大振幅 A を第一波最大振幅標準値 A_0 と定義した。なお、標準値 F_0 および A_0 は、駆動電圧ごとおよびマイクごとに設定することとした。

次に、上記の標準値を用いて、最大打撃力および第一波最大振幅を相対化することとし、式(1)、式(2)のとおり相対打撃力 F_r および相対最大振幅 A_r として定義し、算定することとした。

$$F_r = F/F_0 \quad (3-1)$$

$$A_r = A/A_0 \quad (3-2)$$

前述のとおり、装置底板と試験体表面との間に生じる隙間を想定して表 3.4 のとおり種々の隙間条件を設定したが、標準値 F_0 および A_0 として、どの隙間条件で測定した値を較正用の標準値とするかを以降において検討することとした。

3.5.7 較正における標準値設定のための隙間条件に関する考察

(1) 密着状態 (n0s0) を標準的な隙間条件として設定した場合

装置底板と試験体 Q₁₆₀ を密着させた状態 (n0s0) での測定値 F および A を標準値 F_0 および A_0 とした場合の、相対最大振幅 A_r と相対打撃力 F_r の関係を図 3.8 に示す。なお、図中(a)には、表 3.4 に示すすべての隙間条件の結果を示し、図中(b)には、装置を傾けない 4 種の隙間条件、n0s0, n1s1, n2s2, n3s3 のみの結果を示した。図 3.8 では、密着状態である隙間条件 n0s0 の時の F_r および A_r が 1 となる。

図 3.8 より、隙間厚が大きくなるとアクチュエータのストロークも増すために、相対打撃力 F_r も増大し、それに応じて相対最大振幅 A_r も増大する傾向があることがわかる。また、密着状態を標準条件とすると、隙間がある条件の A_r と F_r の関係において大きなばらつきが生じる。さらに、装置を傾けて片側だけを密着させた条件 (n2s0) では、装置底板と試験体表面が密着している側のマイクと、装置底板と試験体表面に隙間がある側のマイクとでは、収録・算出される A_r が大きく異なることがわかる。

(2) 隙間状態 (n1s1) を標準的な隙間条件として設定した場合

装置底板と試験体 Q₁₆₀ に均等に 1mm の隙間を設けた状態 (n1s1) での測定値 F および A を標準値 F_0 および A_0 とした場合の、相対最大振幅 A_r と相対打撃力 F_r の関係を図 3.9 に示す。

図 3.9 より、アクチュエータのストロークが増すことで F_r が増大し、それに伴い A_r も増大する傾向は図 3.8 と同様であるが、密着状態 (n0s0) および片側密着状 (n2s0) を除いた完全に隙間を空けた他の隙間条件においては、 A_r と F_r の関係におけるばらつきは小さく、より明確な関係性が認められる。

ただし、図 3.9 からわかるとおり、 A_r と F_r の関係は、原点を通るような比例関係ではないことがわかる。

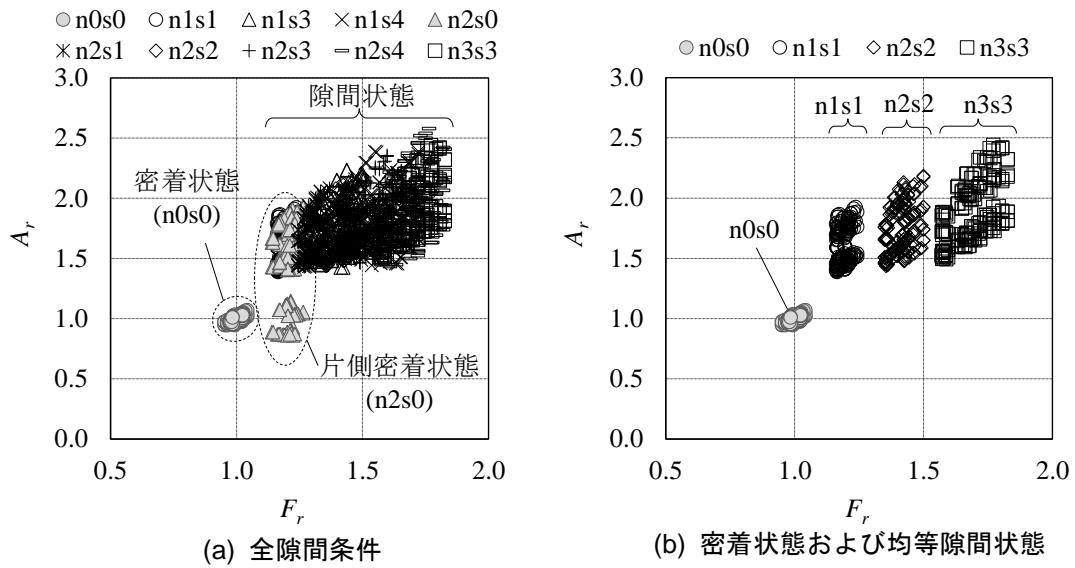


図 3.8 試験体 Q₁₆₀ における A_r と F_r の関係
 (密着状態 n0s0 での F および A を標準値 F_0 および A_0 とした場合)

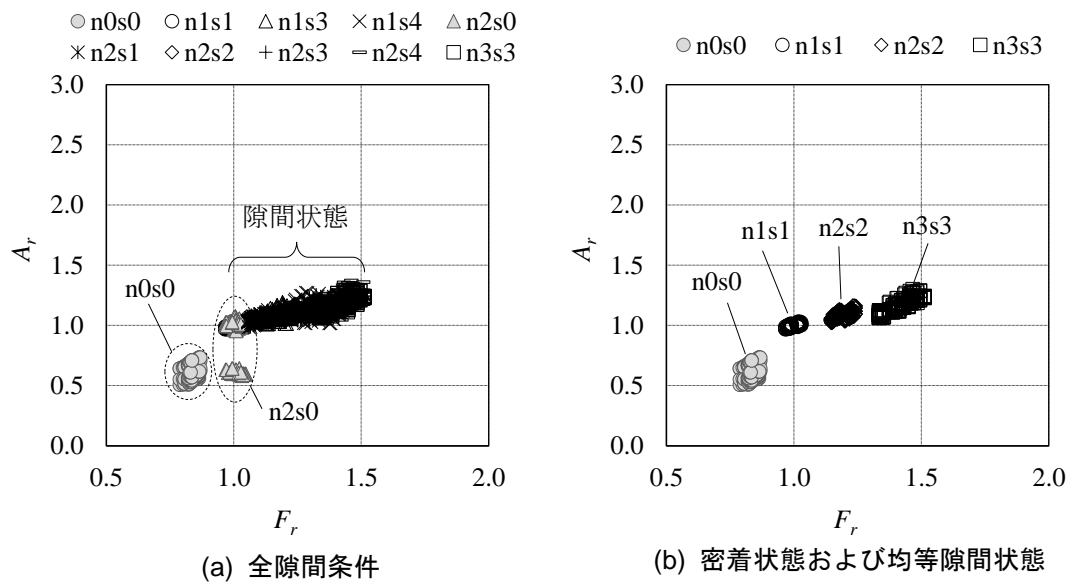


図 3.9 試験体 Q₁₆₀ における A_r と F_r の関係
 (均等隙間状態 n1s1 での F および A を標準値 F_0 および A_0 とした場合)

(3) 標準値 F_0 および A_0 を得るための標準隙間条件の設定

図 3.8 および図 3.9 の結果から、標準試験体を用いて剥離診断装置を較正する場合や、実際にタイル壁面を剥離診断する場合に、安定した A_r および F_r を得るためには、所定のスペーサーを装置底板に取り付けるなどして、測定時に常に隙間状態が保持されることが望ましいと考える。

一方で、隙間を大きくとりすぎると、アクチュエータのストロークの限界のため、打撃ヘッドは壁面を打撃しにくくなる。本報では種々検討の結果、隙間条件 n1s1 を標準隙間条件に設定した。

(4) Q_{160} (n1s1) による標準値 F_0 および A_0 を用いた場合の G_{160} および G_0 の F_r , A_r に関する考察

試験体 G_{160} における A_r と F_r の関係を図 3.10 に示す。標準値 F_0 および A_0 は、 Q_{160} の条件 n1s1 での測定値 F および A である。

図 3.10 より、 G_{160} における A_r と F_r の関係は、 Q_{160} の場合とほぼ同等であり、最大打撃力 F および第一波最大振幅 A については Q_{160} と G_{160} の差異がほとんどないことがわかる。なお、3.5.4 において、 Q_{160} だけでなく G_{160} も標準試験体として適用できる可能性について述べたが、図 3.10 の結果からも、 G_{160} を較正用標準体として使用することができるといえる。

次に、試験体 G_0 における A_r と F_r の関係を図 3.11 に示す。標準値 F_0 および A_0 は、図 3.10 と同様に、試験体 Q_{160} の条件 n1s1 での測定値 F および A である。

図 3.11 より、 G_0 の F_r は G_{160} のそれと比較して 15%程度大きい、 G_0 の A_r は非常に小さいことがわかる。

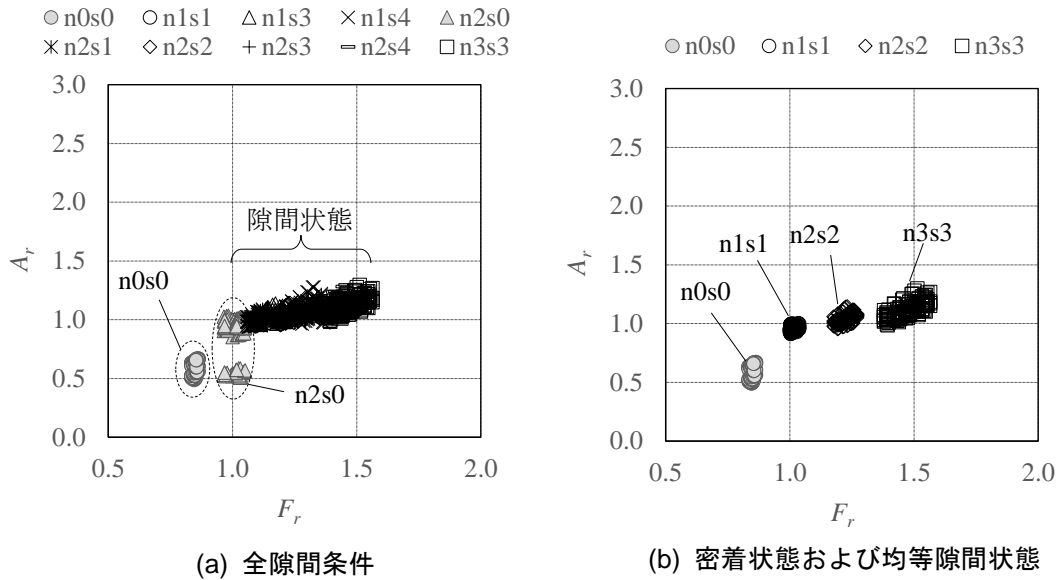


図 3.10 試験体 G_{160} における A_r と F_r の関係
(Q_{160} における均等隙間状態 n_{1s1} での F および A を標準値 F_0 および A_0 とした場合)

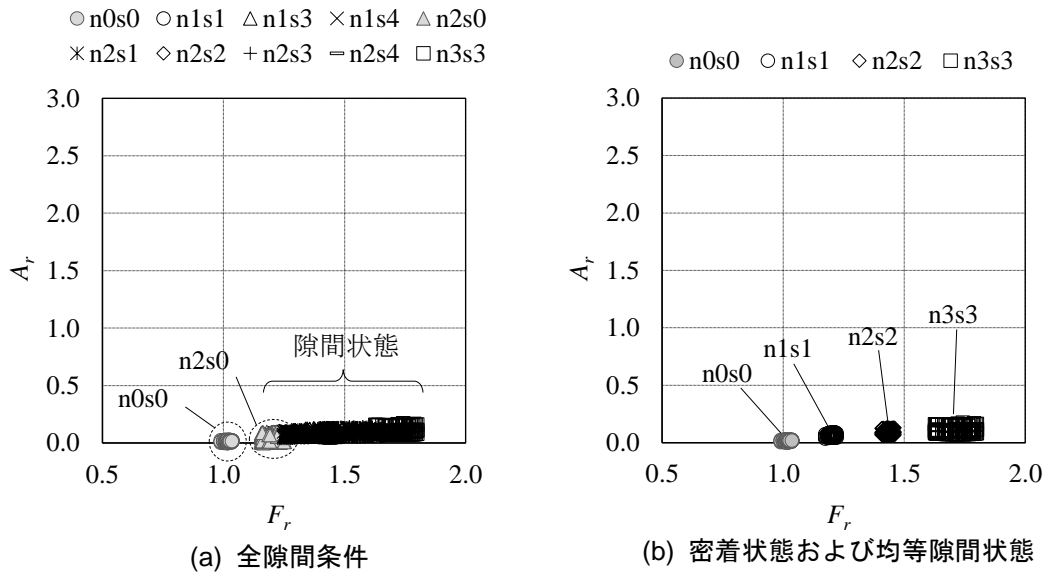


図 3.11 試験体 G_0 における A_r と F_r の関係
(Q_{160} における均等隙間状態 n_{1s1} での F および A を標準値 F_0 および A_0 とした場合)

3.5.8 剥離判定パラメータに関する基礎的検討

以上の検討結果をもとに、相対打撃力 F_r および相対最大振幅 A_r の関係を利用して、相対打撃力の変動によらず、安定して剥離判定ができるパラメータを検討することとした。

図 3.9 において、 A_r と F_r の関係が比例関係ではないことが確認されたが、 A_r と F_r の関係が原点を通るものと考えた場合、 $A_r = a F_r^b$ (a および b は正の数) という関係が成り立つものと仮定した。そこで、式(3-3)に示すとおり相対振幅評価値 R_{AF} (Ratio of sound amplitude to impact force) を定義した。

$$R_{AF} = (A_r)^i / (F_r)^j \quad (3-3)$$

本研究では、変数 i および j の値として、試行的に、式(3-4)および式(3-5)の 2 つの場合について、相対振幅評価値 R_{AF} と相対打撃力 F_r との関係を比較することとした。

$$\text{(Case 1)} \quad R_{AF} = A_r / F_r \quad (i=1, j=1) \quad (3-4)$$

$$\text{(Case 2)} \quad R_{AF} = A_r / \sqrt{F_r} \quad (i=1, j=1/2) \quad (3-5)$$

Q_{160} , G_{160} , G_0 の各試験体における Case 1 の場合の R_{AF} と F_r の関係を図 3.12 に示す。図 3.12 より、 F_r の増加に対して、 R_{AF} は減少傾向にあることがわかる。これは、図 3.9 および図 3.10 において、 A_r と F_r の関係が比例関係ではないためである。剥離判定パラメータは、駆動電圧や隙間条件により打撃力が変動した場合でも、変動せずに安定していることが望ましい。このことを考慮し、試行の結果得られた式が Case 2 である。

Case 2 の場合の R_{AF} と F_r の関係を図 3.13 に示す。図 3.13 より、いずれの試験体においても、隙間条件によらず、 R_{AF} はほぼ一定となることがわかる。したがって、本研究で試作した剥離診断装置においては、Case 2 の場合の R_{AF} を剥離判定パラメータとして用いることとした。

ここで、剥離判定パラメータ R_{AF} の分母にルートをとることの物理的な意味について、打撃力測定値と同様に厳密にはわかっていない状況である。この解明は、客観的かつ論理的に打撃応答音の発生現象を説明する上で非常に重要で高度な課題であるが、本論文においては、この解明は範囲外とし、標準試験体との比較値をもとにして、実験結果をもとに係数を合わせる手法で剥離判定パラメータを設定した。本手法でも、マイク間の出力差や装置間の出力差を最小限に抑えた剥離判定が可能なものとする。今後、剥離判定パラメータ算定値の物理的な意味の解明について、継続的な検討が必要である。

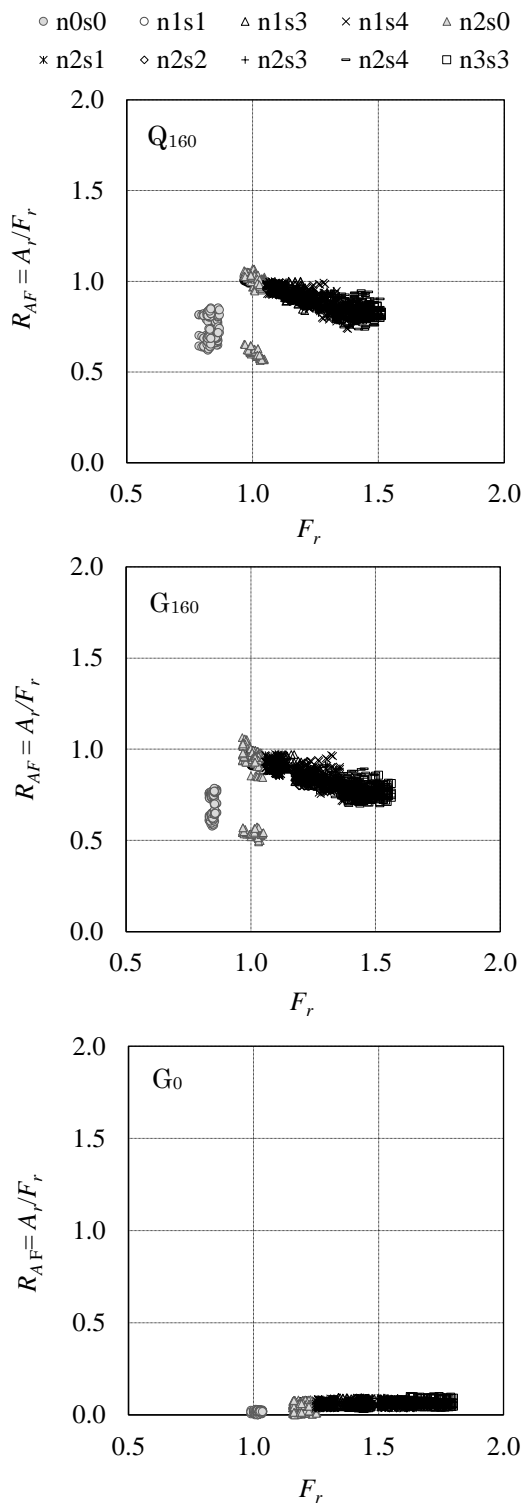


図 3.12 R_{AF} と F_r の関係
(Case 1 $R_{AF} = A_i/F_r$)

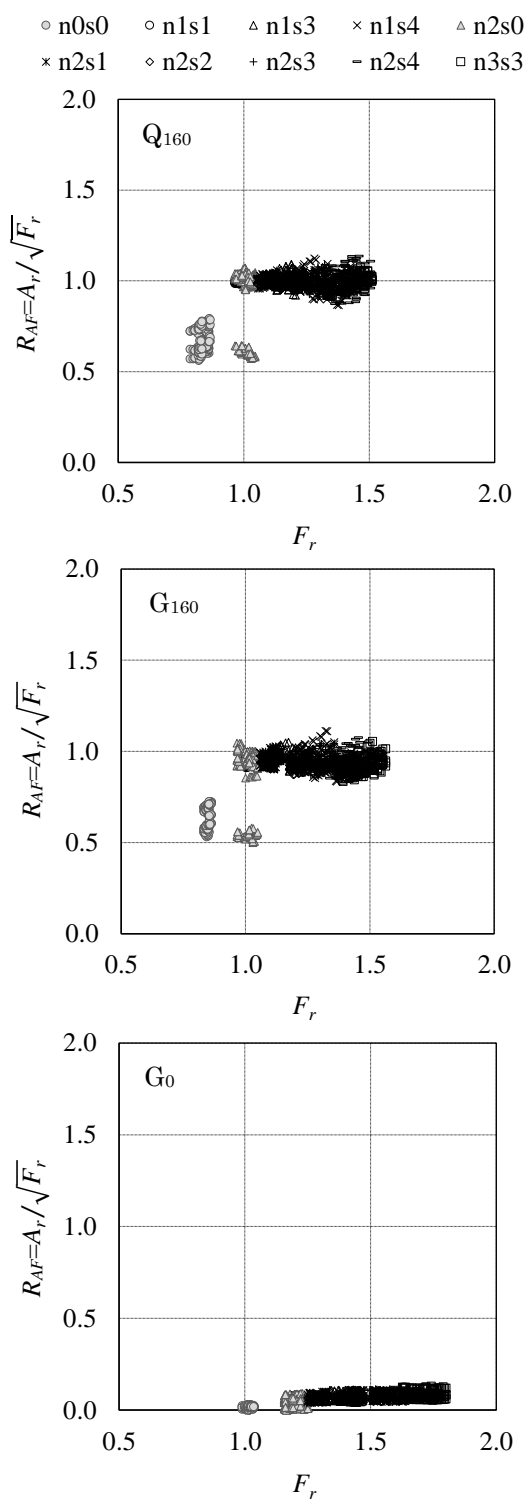


図 3.13 R_{AF} と F_r の関係
(Case 2 $R_{AF} = A_i/\sqrt{F_r}$)

3.6 較正用試験体を用いた複数マイクの有効性の検証

本章では、既述のとおり、剥離境界近傍における安定した剥離判定を目的として、マイクを4つ取り付けた剥離診断装置とした。その有効性について検証するため、試験体 Q₁₆₀ 表面の中心線 (N-S 線) 上を、10mm 間隔で計 21 点を打撃した際の R_{AF} ($= A_r/\sqrt{F_r}$) を測定した。測定は、隙間条件 n1s1 で実施した。

すべての打撃点について、各打撃点における4つのマイクの R_{AF} の測定結果を図 3.14 に示す。 R_{AF} の測定値は、各マイクの位置を中心とした円で示しており、円が大きいほど R_{AF} が大きいことを表す。また、円の直径は、試験体中央を打撃したときの値を基準とした相対値である。 R_{AF} の大きさを表示した円の中心位置は、試作した装置の構成のとおり、各打撃点を中心として N, E, S, W の各方向に 40mm 離れたマイクの位置に相当する。

図 3.14 より、打撃点が空洞部中央付近に近いほど、 R_{AF} は大きくなり、外周の空洞範囲外、すなわち、石英ガラスの厚板部分を打撃した場合 (N100, N90, S90, S100) は、空洞内にあるマイクも含めて、いずれのマイク位置においても R_{AF} は非常に小さいことがわかる。

また、空洞部の境界付近の内側を打撃した場合 (N70, N60, S60, S70)、空洞部の中心側にあるマイクの R_{AF} が大きいのに対し、空洞境界の外側にあるマイクの R_{AF} は非常に小さいことがわかる。

さらに、打撃点が空洞範囲内にある場合 (N70~S70)、4つのマイクのうち R_{AF} が最も大きくなるマイクは、空洞中心に最も近い位置にあるマイクであることがわかる。

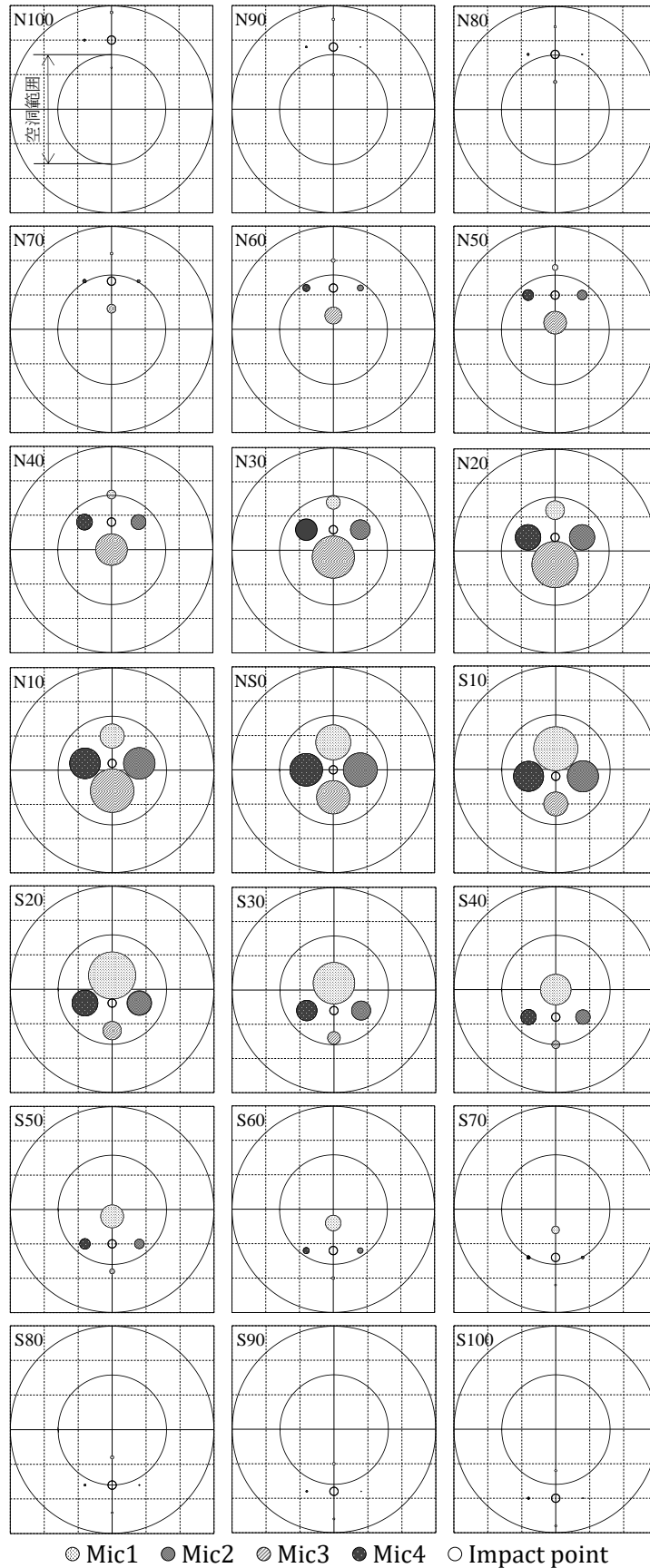


図 3.14 Q₁₆₀ の中心線 (N-S 線) 上の R_{AF} 測定結果

次に、 R_{AF} と打撃点との関係を図 3.15 に示す。同図の横軸は打撃点の N-S 方向の座標であり、縦軸はその時の 4 つのマイクの R_{AF} の値を打撃点の座標に集約して示したものである。したがって Mic1 は、打撃点よりも N 側に 40mm 離れた位置にあり、Mic3 は S 側に 40mm 離れた位置にある。Mic2 および Mic4 は、N-S 方向の座標は打撃点と同じであるが、それぞれ Mic2 は E 側に 40mm、Mic4 は W 側に 40mm 離れた位置にある。

図 3.15 より、打撃点が空洞範囲外にある場合、マイクが空洞範囲内にあつたとしても R_{AF} は小さいままであることがわかる。

また、 R_{AF} の最大値は、打撃点が空洞の中心から 20mm 離れた位置にあり、かつ、マイクが中心を挟んで打撃点の反対側にある場合に測定されることがわかる。

なお、空洞部中心を打撃した場合にガラス板の振動自体は最も大きくなると考えられるが、本研究で試作した剥離診断装置の場合、マイクが中心から 40mm 離れた位置にあるため、 R_{AF} は最大値にならないものと考えられる。

上記のように、 R_{AF} の大きさは、打撃点だけではなく、マイク直下の振動状態の影響を受けるものと考えられる。この特性を考慮すると、マイクが 1 つの場合には、打撃点が剥離範囲にあつたとしてもマイクが剥離範囲外にあると適切に剥離判定がなされない危険性があるといえる。検出漏れのない安定した剥離判定結果を得るためには、打撃点の両側に対称な位置でマイクを配置することが有効であり、さらに、実際には剥離境界の存在する方向が未知であることを考慮すると、打撃点を中心にして 4 方向に均等にマイクを複数配置することが有効であることが確認できた。

打撃点からマイク中心までの水平距離は 40mm としているが、ここで、打撃点からマイク中心までの水平距離を 30mm とした試作機を用いた場合の Q_{160} の中心線 (N-S 線) 上の R_{AF} 測定結果と打撃点の関係を図 3.16 に示す。マイク距離 40mm の装置では図 3.15 のとおり、空洞中央打撃時の R_{AF} 測定値 1.0 に対して、最大値が 1.4 程度、空洞の無い部分が 0.1 程度と、最大値と最小値の差が大きいものに対して、マイク距離 30mm の装置では、図 3.16 のとおり、同じ試験体の空洞中央打撃時の R_{AF} 測定値 1.0 に対して、最大値が 1.2 程度、空洞の無い部分が 0.2 程度となり、マイクを打撃部に近づけることで健全部に相当する箇所の R_{AF} が相対的に大きくなる傾向が確認された。マイクを近づけすぎると、健全部と剥離部との識別がしにくくなる傾向があるものと考えられる。一方、これ以上マイク距離を長くすると、小面積の剥離を検知しにくくなると考えられるため、マイク距離 40mm で検討を進めることとした。

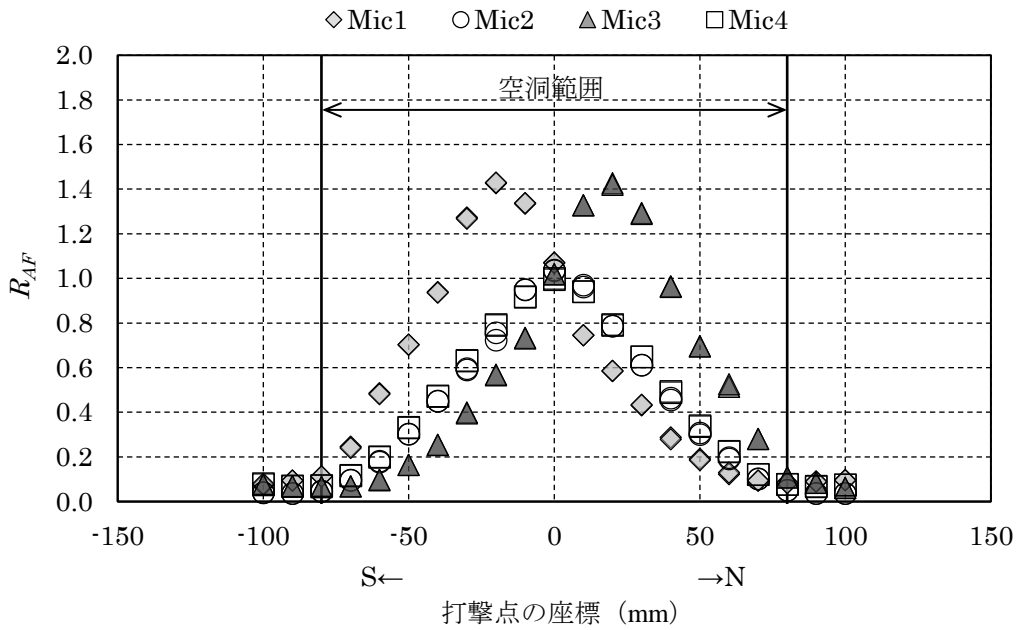


図 3.15 Q₁₆₀ の中心線 (N-S 線) 上の R_{AF} 測定結果と打撃点の関係

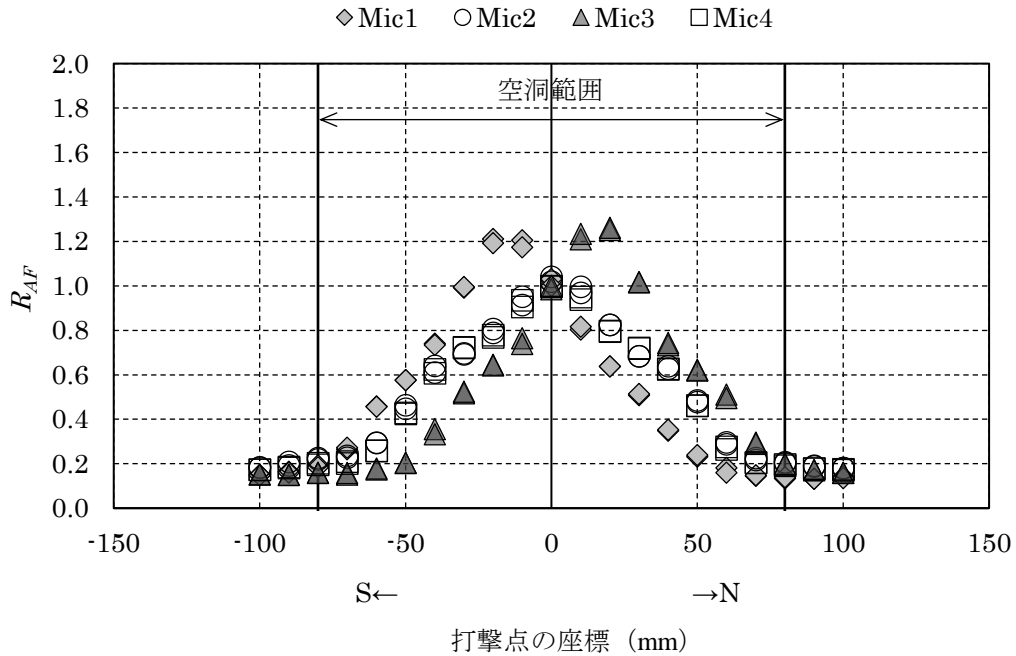


図 3.16 打撃点からマイク中心までの水平距離が 30mm の試作機における Q₁₆₀ の中心線 (N-S 線) 上の R_{AF} 測定結果と打撃点の関係

3.7 まとめ

本章では、実用的で安定した剥離判定が可能なタイル剥離診断装置を開発することを目的として、新たな構想を加えて剥離診断装置を設計・試作し、装置の較正方法、剥離判定パラメータの算出方法および装置の有効性について検討した。本章の結論を以下に示す。

- ① 既往の研究を参考にタイル剥離診断装置の基本構想を立て、剥離診断装置を設計・試作した。装置は、最大打撃周波数 10Hz での打撃が可能で 10mm のストロークを有するソレノイドアクチュエータを用いた打撃機構とし、打撃力を測定するために打撃ヘッドとソレノイドアクチュエータのシャフト間に圧電素子を取り付けた。また、打撃機構を内蔵する筒状の筐体の外部に、打撃点を中心にして 4 方向に均等にマイクを 4 個配置した打撃応答音収録機構とした。
- ② 試作した剥離診断装置を較正するための較正用の標準試験体として、試験体中央裏面に円形の空洞を有するガラス製の標準試験体を考案・作製した。
- ③ 試作した剥離診断装置によって収録される打撃力波形および打撃応答音波形から抽出する基本パラメータとして、最大打撃力 F および第一波最大振幅 A を定義し、装置の較正方法および適した剥離判定パラメータの算出方法について検討した。較正方法および剥離判定パラメータの算出手順を次のとおり提案する。
 - ・ 剥離診断装置の底板と標準試験体間の隙間をスペーサーにより均等に 1mm 開けた状態で、標準試験体 Q₁₆₀ の中央を打撃した際に得られる最大打撃力 F および第一波最大振幅 A を測定し、それぞれを打撃力標準値 F_0 および第一波最大振幅標準値 A_0 とする。 F_0 および A_0 は、駆動電圧ごとおよびマイクごとに設定する。
 - ・ 剥離診断装置底板に 1mm のスペーサーを取り付けた状態で検査対象面を検査する。
 - ・ 測定された F および A をそれぞれ標準値 F_0 および A_0 で除し、相対打撃力 $F_r (= F/F_0)$ および相対最大振幅 $A_r (= A/A_0)$ を算出する。
 - ・ F_r および A_r から、剥離判定パラメータとして、相対振幅評価値 $R_{AF} (= (A_r)^i / (F_r)^j)$ を算定する（本研究で製作した試験機では、 $i=1, j=1/2, R_{AF} = A_r / \sqrt{F_r}$ ）。
- ④ 剥離境界近傍において検出漏れのない剥離判定となることを意図して取り付けた 4 つのマイクの有効性を検証するため、作製した較正用標準試験体 Q₁₆₀ を用いた試験を行った。その結果、提案した剥離判定パラメータ R_{AF} の大きさは、打撃点だけではなく、マイク位置の影響も受けることを確認し、打撃位置を中心にして 4 方向に均等にマイクを配置することが有効であることを確認した。

参考文献

- 3-1) B. L. Luk, K. P. Liu, F. Tong: Robotic impact-acoustics system for tile bonding integrity inspection, *Mechatronics* 19, pp. 1251-1260, 2009
- 3-2) B. L. Luk, K. P. Liu, F. Tong, K. F. Man: Impact-acoustics inspection of tile-wall bonding integrity via wavelet transform and hidden Markov models, *Journal of Sound and Vibration* 329, pp. 1954-1967, 2010
- 3-3) 海老原正明, 矢島四朗: 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, A 電算利用, pp. 993-994, 1987. 10
- 3-4) 堂山敦弘, 井上康夫, 縄岡好人, 脇坂達也: 外壁タイル検査システムの開発 その 1 システム概要と試験的適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A 材料施工, pp. 1125-1126, 1994.9
- 3-5) 杉本弘道, 井上康夫, 堂山敦弘, 縄岡好人, 脇坂達也: 外壁タイル検査装置システムの開発 その 2 打音式検査装置の性能確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 93-94, 1995. 8
- 3-6) 堂山敦弘, 縄岡好人, 金子智弥, 汐川孝: 外壁タイル剥離診断ロボットシステムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 811-812, 1999. 9
- 3-7) 堂山敦弘, 汐川孝, 井上文宏, 太田有: 外壁タイル剥離判定の自動化に関する研究 その 1 ウェーブレットによるタイル打撃音の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 31-32, 2003. 9
- 3-8) 布施幸則, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 813-814, 2015. 9
- 3-9) 伴享, 歌川紀之, 森濱和正: R C 構造物への打音法の適用, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 26, No. 1, pp. 1809-1814, 2004
- 3-10) 磯光夫, 久保田和徳, 越後滋, 橘吉宏, 伴享, 歌川紀之: 打音法による合成床版の非破壊検査手法, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 249-254, 2008. 6
- 3-11) 社団法人日本非破壊検査協会: NDIS 2426-3 コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第3部: 打音法, 2009
- 3-12) 公益財団法人 日本航空技術協会: 航空技術, No. 678, pp. 34-40, 2011. 9
- 3-13) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.7, No. 1, pp. 143-152, 1996.1
- 3-14) 添田智美, 三上貴正: 打撃応答音第一波振幅値を利用したタイル剥離診断装置の設

計・試作および装置の有効性に関する基礎的検討外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第752号, pp. 1401-1410, 2018. 10

第4章 模擬剥離試験体を用いた タイル剥離診断装置の有効性の検証

4.1 はじめに

第2章では、打撃装置およびマイクを用いて、打撃応答音波形の第一波最大振幅値による剥離判定の可能性について示した。また、第3章では、打撃力の測定が可能な連続打撃機構を有し、打撃点を中心に4方向均等に4つのマイクが配置された装置を試作し、ガラス製の標準試験体を用いた装置の較正方法を示した。さらに、この装置によって測定される最大打撃力 F 、打撃力標準値 F_0 、第一波最大振幅 A および第一波最大振幅標準値 A_0 より算出される剥離判定パラメータとして、相対振幅評価値 R_{AF} を提示した。

本章では、第3章で考案したタイル剥離診断装置および剥離判定パラメータを用いて、外装タイル張り層の仕様ならびに剥離部の性状に関して種々の条件を変化させて作製した模擬剥離試験体を実測し、装置および剥離判定パラメータの有効性について考察した結果を報告する。

4.2 模擬剥離試験体

模擬剥離試験体の一覧を表 4.1 に示す。第 2 章で製作した 8 種の試験体（本章ではタイプⅡおよびタイプⅢとした）に加え、剥離深さおよび剥離面積を変化させた試験体 X0, X10, X20, X30 の 4 種（本章ではタイプⅠとした）を追加製作し、合計 12 種の試験体を用意した。X30 は下地モルタルの厚さを 30mm とした試験体であり、下地モルタルの塗り厚が非常に厚いものとして位置づけたものである。追加したタイプⅠの試験体の下地は第 2 章で使用した試験体と同じ仕様の鉄筋コンクリート壁体であり、タイルは第 2 章で使用した施釉磁器質 50 二丁モザイクタイル（タイル X）と同じロットの製品を使用した。タイル Y はモルタル張り用の無釉せつ器質二丁掛タイルであり、タイル Z は有機系接着剤張り用の無釉せつ器質二丁掛タイルである。タイル X およびタイル Y はポリマーセメントモルタルで張付けられ、タイル Z は有機系接着剤で張付けられたものである。タイル X の表面はやや粗い面状であり、タイル Y およびタイル Z は平坦な面状である。

試験体の形状を図 4.1 にしめす。模擬剥離範囲（以降、単に剥離範囲と呼ぶ）は、図中の斜線で示す範囲であり、タイプⅠでは 1 つの試験体面内に 4 つのパターン（L, M, S, T）の剥離範囲を設定した。このうち、L, M, S は、試験体面ごとに同じ模擬剥離深さ（以降、単に剥離深さと呼ぶ）とし、その剥離界面はいずれもコンクリート下地界面とした。一方、T は、タイル 1 枚の半分の面積とし、タイル裏面での模擬剥離とした。模擬剥離の作製方法は、L, M, S については、第 2 章で示したとおり、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した特殊シートを試験体内に埋め込むことで剥離を再現する方法とし、T については、写真 4.1 のように、あらかじめタイル裏面の半分の面積に特殊シートを両面テープにより張り付けておき、その状態でタイルの張付けを行った。

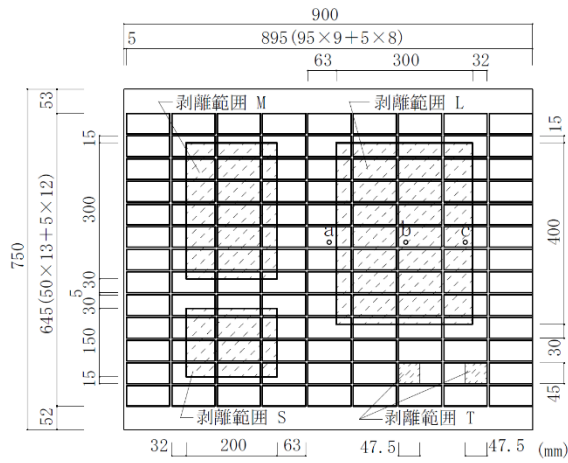
試験体の外観を写真 4.2 に示す。試験体は 2 本の溝形鋼上にボルトで固定して自立させた。

表 4.1 模擬剥離試験体一覧

試験体	タイル記号・ サイズ (mm)	張付け材 および厚さ (mm)	下地モル タル厚 (mm)	試験体 タイプ	剥離範囲 サイズ (mm)	剥離界面*1	剥離 深さ (mm)
X0	X 95×45×7	ポリマーセメ ントモルタル (2)	-	I	S (200×150) M (200×300) L (300×400)	張付け材 - コンクリート	9
					T (47.5×45)	タイル - 張付け材	7
10			S (200×150) M (200×300) L (300×400)		下地モルタル - コンクリート	19	
			T (47.5×45)		タイル - 張付け材	7	
20			S (200×150) M (200×300) L (300×400)		下地モルタル - コンクリート	29	
			T (47.5×45)		タイル - 張付け材	7	
30			S (200×150) M (200×300) L (300×400)		下地モルタル - コンクリート	39	
			T (47.5×45)		タイル - 張付け材	7	
XDH	X 95×45×7	ポリマーセメ ントモルタル (2)	-	II	張付け材 - コンクリート	9	
XMH					張付け材 - 下地モルタル		
XMSw			下地モルタル - コンクリート		19		
			下地モルタル - コンクリート (シート二重*2)				
YDH	Y 227×60×13	ポリマーセメ ントモルタル (2)	-	III	張付け材 - コンクリート	15	
YMH					張付け材 - 下地モルタル		
YMS			下地モルタル - コンクリート		25		
			ZMS			下地モルタル - コンクリート	22
壁体	・鉄筋コンクリート造、サイズ：900×750×150mm ・使用コンクリート：W/C:51.8%，圧縮強度(4週):33.8N/mm ² (封かん) ・設置方法：硬質ゴムシート(厚3mm)を介して2本の溝型鋼(C-100×50×5×7.5)上に ボルト(M16)で固定し、自立させた						
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						



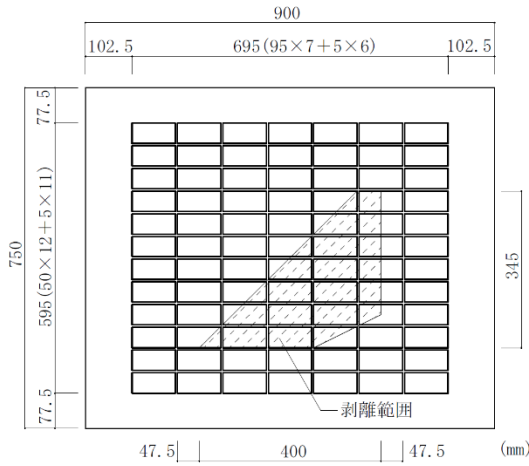
写真 4.1 模擬剥離範囲 T 部における特殊シート



タイプ I (X タイル)



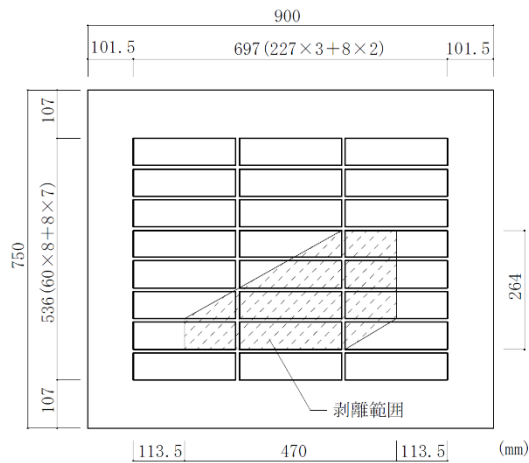
タイプ I (X10)



タイプ II (X タイル)



タイプ II (XDH)



タイプ III (Y・Z タイル)



タイプ III (YDH)

図 4.1 模擬剥離試験体の形状

写真 4.2 模擬剥離試験体の外観

4.3 試験概要および剥離判定パラメータ

4.3.1 剥離診断装置の設定

第3章において試作した試験機を図4.2に示す。安定した剥離判定パラメータを得るためには、装置底板と試験体面との間に所定の隙間を確保することが有効との知見を得たことから²⁾、写真4.3に示すとおり、装置の底板の四隅に厚さ1mmのスペーサーを取り付けた。打撃におけるソレノイドアクチュエータの駆動電圧は、第3章で実施した駆動電圧のうち、5Vに設定した。

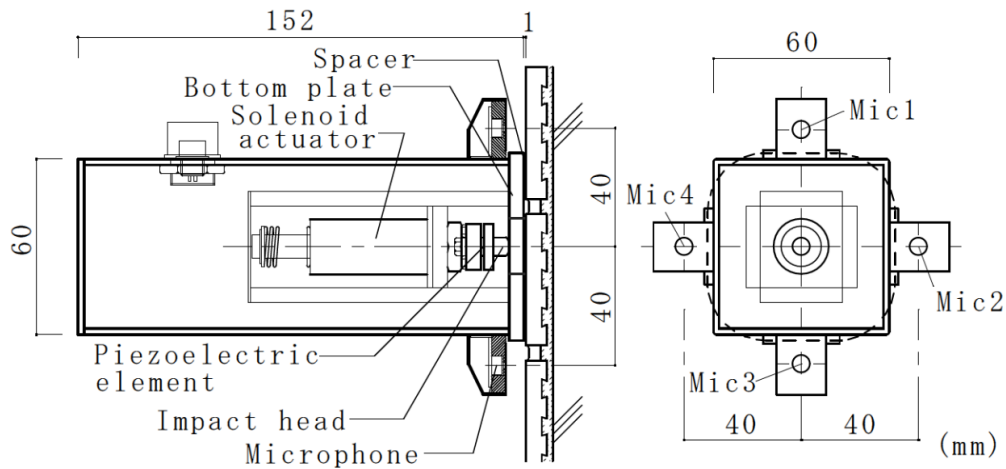


図4.2 剥離診断装置の概要

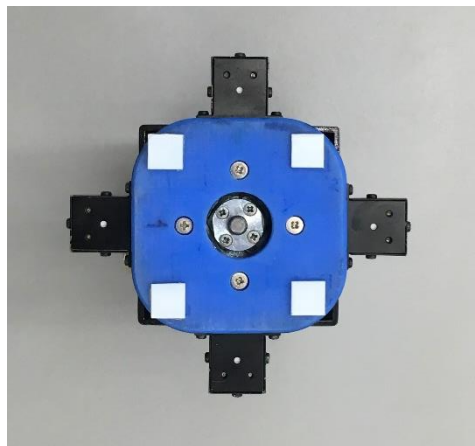


写真4.3 剥離診断装置の底板状況

4.3.2 装置の較正

表 4.1 に示す試験体の測定に先立ち、第 3 章で作製した較正用の試験体の中から図 4.3 および写真 4.4 に示す試験体 Q_{160} を標準試験体として選定し、この中心点において標準値の測定を行った。標準値の測定は、各マイクの向きが N, E, S, W のすべての方向を向くように、90 度ずつ装置を回転させて各方向で 2 回ずつ計 8 回行い、測定された最大打撃力 F の平均値を F_0 として設定し、第一波最大振幅 A の平均値をマイクごとに A_0 として設定した。標準試験体の中心点で測定された波形の例および F および A の定義は図 4.4 のとおりである。なお、標準値の計測は、模擬剝離試験体の測定日ごとに実施した。

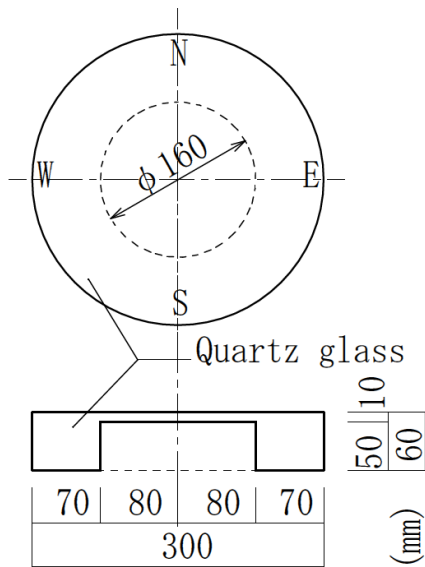


図 4.3 標準試験体 Q_{160}

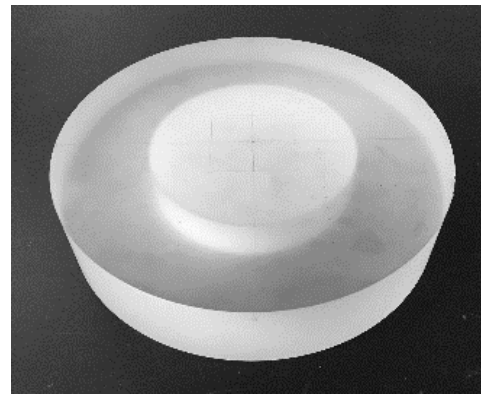


写真 4.4 標準試験体 Q_{160}

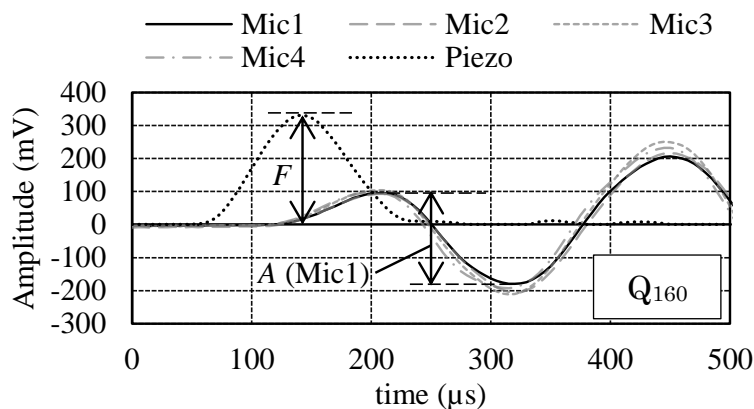


図 4.4 打撃力波形および打撃応答音波形における最大打撃力 F および第一波最大振幅 A の例

4.3.3 打撃点の設定

模擬剥離試験体での実測は、図4.5に示すように各タイルの打撃点で2回ずつ行い、最大打撃力 F および各マイクの第一波最大振幅 A を各回で測定した。測定時のマイクの向きは、マイク1が常に試験体の上側を向くようにした。

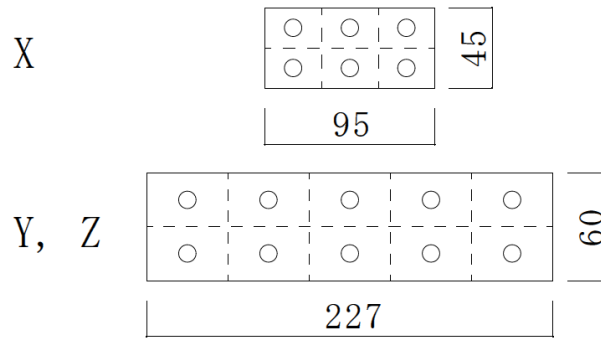


図4.5 各タイルにおける打撃点

4.3.4 剥離判定パラメータ

4.3.2 標準値および測定値から、式(4-1)、式(4-2)のとおり相対打撃力 F_r および相対最大振幅 A_r を算出し、さらに、式(4-3)のとおり相対振幅評価値 R_{AF} (Ratio of sound amplitude to impact force) をマイクごとに算出した。

$$F_r = F/F_0 \quad (4-1)$$

$$A_r = A/A_0 \quad (4-2)$$

$$R_{AF} = (A_r)^i / (F_r)^j \quad (i=1, j=1/2) \quad (4-3)$$

4.4 模擬剥離試験体測定結果

4.4.1 特徴点における計測波形および R_{AF} 算定結果

打撃点の特徴によって、計測される打撃力波形、打撃応答音波形や R_{AF} の算定結果にどのような違いが生じるか、それらの傾向を把握するために、タイプ I の剥離深さが異なる試験体 (X0, X10, X20, X30) において、打撃点の中から図 4.1 中に示す打撃点 a (健全範囲)、b (剥離範囲中央) および c (剥離範囲境界近傍) を 3 点ずつ特徴点として抽出した。

これらの特徴点において計測された時間波形を図 4.6 および図 4.7 に示す。図中の各波形の振幅は、 F_0 および A_0 で除した相対値で示した。図 4.6 および図 4.7 より、以下のことが把握できる。

- ・ 打撃力波形において、最大打撃力相対値は、おおよそ 0.7~1.2 の範囲にあり、標準試験体打撃時の最大打撃力と、実際に想定されるタイル外壁打撃時の打撃力とが、同程度の値で計測されることがわかる。このことから、第 3 章で考案した標準試験体がタイル剥離診断装置の打撃力の較正に適していることを再確認できる。
- ・ 打撃点によって最大打撃力に差異が生じているが、この要因として、タイル表面のテクスチャーやタイル間の目違いの影響により打撃点によってストロークに差異が生じることのほか、浅い剥離深さの打撃点においては打撃点の反発力が小さくなったことも考えられる。このような差異を補正するためにも打撃力の測定は有効なものとする。
- ・ X0, X10, X20, X30 のいずれの試験体においても、健全範囲である a 点では、打撃力振幅に対していずれのマイク位置においても打撃応答音振幅が非常に小さい。
- ・ 剥離範囲中央にある b 点では、健全部 a 点と比較して 4 つのマイクとも打撃応答音振幅が大きいことが明白で、かつ 4 つのマイク間の差が小さい。
- ・ 剥離範囲境界近傍の c 点では、マイク 4 の打撃応答音振幅が大きいのに対し、マイク 2 の打撃応答音振幅が小さい傾向がある。浅い剥離深さの試験体ほどこの両者の違いが顕著であり、最も剥離深さの深い X30 ではマイク 4 であっても振幅がかなり小さく、この傾向を把握しにくい。

剥離範囲中央に位置する b 点の測定結果をもとに、各試験体の剥離深さによる打撃応答音振幅への影響を比較すると、最も剥離深さが浅い X0 が最も打撃応答音振幅が大きく、X10, X20, X30 の順に、剥離深さが深くなるにつれて、打撃応答音振幅が小さくなっていく傾向がある。

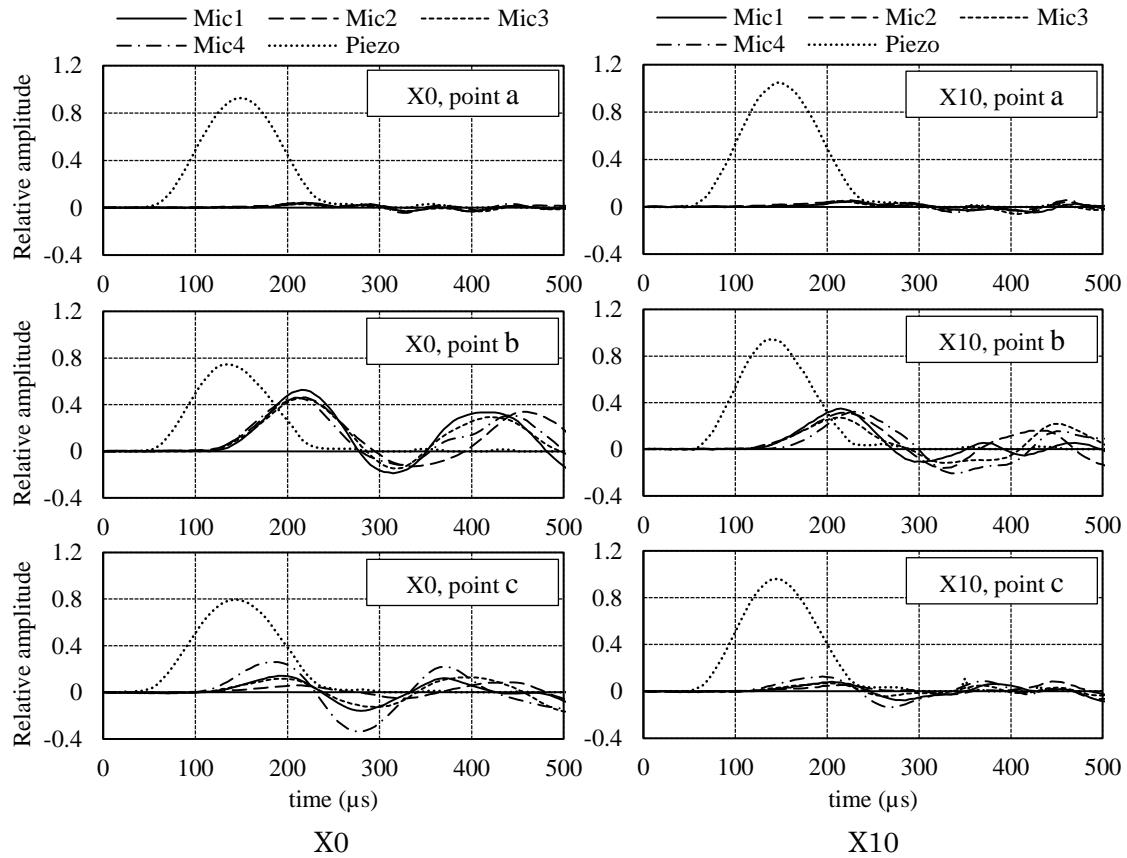


図 4.6 各試験体の特徴点における打撃力波形および打撃応答音波形 (X0, X10)

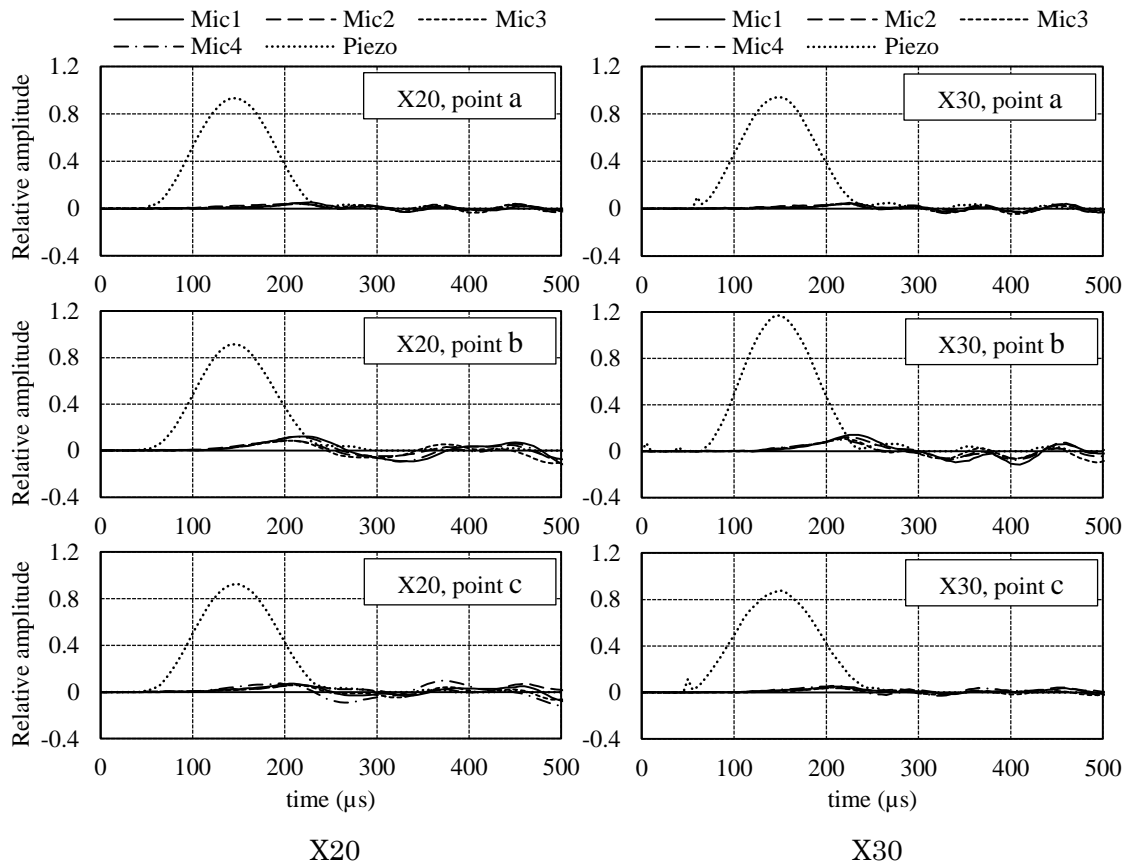


図 4.7 各試験体の特徴点における打撃力波形および打撃応答音波形 (X20, X30)

上記の波形をもとに算出された R_{AF} の結果を図 4.8 に示す。 R_{AF} はマイクごとに算出し、各マイクの位置を中心とした円の直径比として表示した。 R_{AF} の大きさを参照しやすいように、3 種類の参照値も図中の右上に点線円で付記した。このように打撃位置に対する各マイク位置に R_{AF} の大きさを表示することで、打撃位置、マイク位置および剥離境界の相互関係の中で、 R_{AF} の算出結果にどのような差異が生じるかを視覚的にわかりやすく把握することができる。図 4.8 より、以下のことが把握できる。

- ・健全範囲にある a 点では、いずれかのマイクが剥離範囲内に位置していたとしても、すべてのマイク位置において R_{AF} が非常に小さい。これは、健全部を打撃したとしても、剥離層にたわみを伴う振動⁴⁾⁵⁾が生じないためだと思われる。
- ・剥離範囲中央にある b 点では、同一試験体の a 点と比較して、4 つのマイクとも R_{AF} が大きく、その大きさは 4 つのマイクとも同程度である。剥離範囲中央付近では、打撃点を中心として、各マイク直下の剥離層の振動がほぼ同程度の振幅で生じているものと思われる。
- ・剥離範囲中央に位置する b 点の測定結果をもとに、各試験体の剥離深さによる R_{AF} への影響を比較すると、最も剥離深さが浅い X0 の R_{AF} が最も大きく、X10, X20, X30 の順で模擬剥離深さが深くなるにつれて、 R_{AF} が小さくなっていく。このように R_{AF} が小さくなる要因として、剥離層が厚くなることで振動しにくくなることが考えられる。
- ・剥離範囲境界近傍の c 点においては、剥離範囲の内部側に位置しているマイク 4 の R_{AF} が大きいのにに対し、境界近傍に位置するマイク 1 およびマイク 3 の R_{AF} は小さくなる。また、剥離範囲外に位置しているマイク 2 の R_{AF} はさらに小さくなる。これらは、剥離範囲境界近傍を打撃した際には、境界近傍では剥離層の振動の振幅が小さくなり、さらに健全部では振動がほとんど生じていないためだと考えられる。
- ・剥離境界をまたいで対向する内部側マイク 4 と外部側マイク 2 との R_{AF} の差は、浅い剥離深さの試験体ほど顕著であるが、剥離深さが深くなるにつれその差は把握しにくくなる。

このように、4 つのマイクがあることで、剥離部境界近傍において測定を行った場合でも、剥離範囲内部側に位置するマイクで検出される R_{AF} が他のマイクよりも大きい値で検出されることにより、剥離判定に有利であると考えられる。また、健全部を打撃した場合には、仮にマイクが剥離範囲に入っていたとしても、そのマイク位置での R_{AF} は他のマイクと同様に小さいという特徴を有することがわかる。

4 つのマイクから得られる R_{AF} の活用方法は、例えば、① 4 つのマイクの R_{AF} の平均値を打撃位置に表示する方法、② 4 つのマイクの最大値を打撃位置に表示する方法、③ 各マイクの位置に個々の R_{AF} を表示する方法、④ マイク間の R_{AF} の差から打撃位置の特徴を示

す方法など種々考えられるが、前述の4つのマイクの特長をふまえ、本章では、4つのマイクの R_{AF} の最大値を R_{AF-max} と定義し、この算定結果を打撃位置に表示する②の方法をとることとした。この方法であれば、剥離範囲内の境界近傍を打撃した場合でも剥離内部側にあるマイクにより打撃部が剥離部であることを検出しやすくなり、打撃部が健全部である場合に一部のマイクが剥離部に位置していたとしても、打撃部のみを健全と評価することができ、打撃点が剥離しているかどうかを単純に判定するのに適した手法と考えたためである。

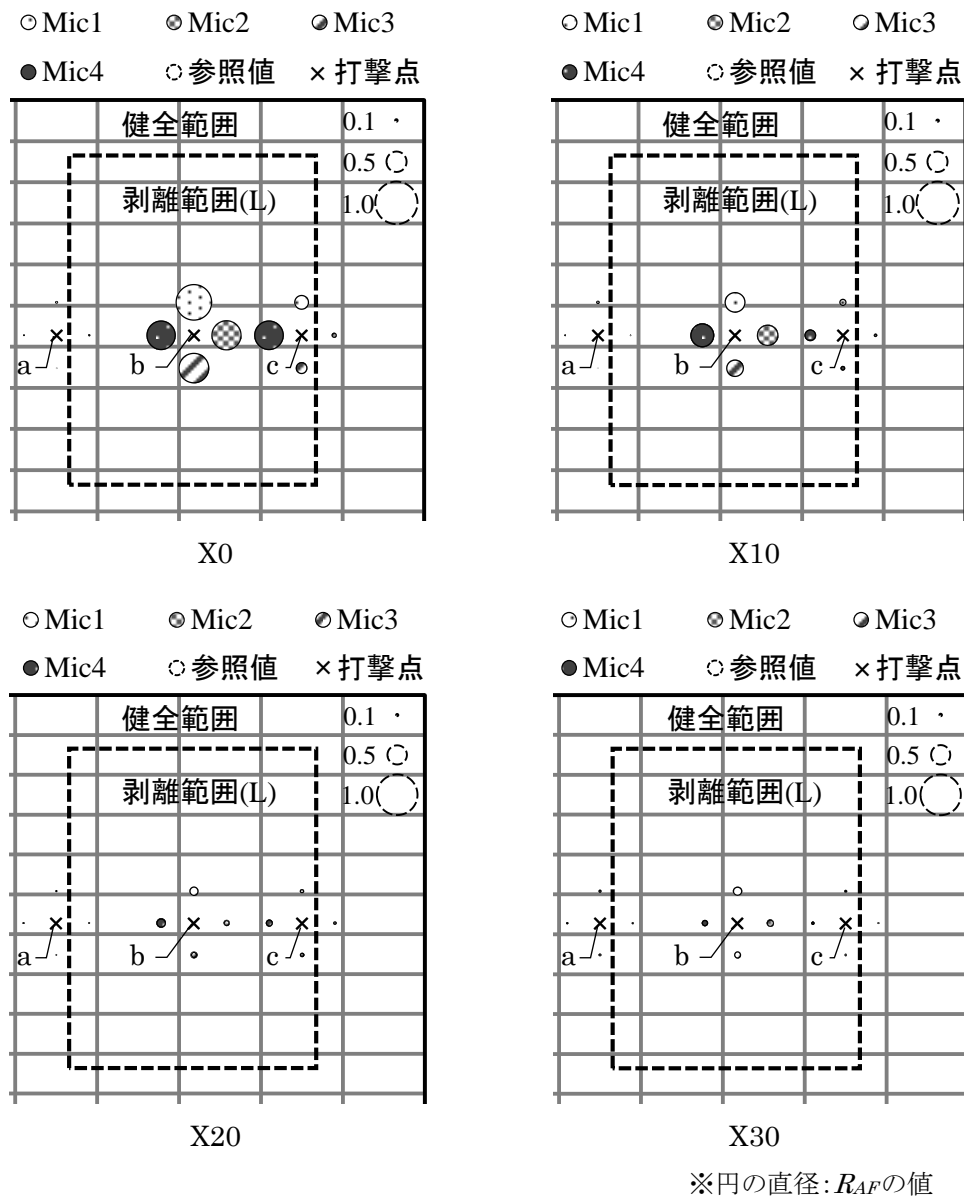


図 4.8 特徴点打撃時の各マイク位置における R_{AF} 測定結果

4.4.2 全試験体における R_{AF} 測定結果

図 4.9～図 4.11 に、全ての試験体における各打撃点における R_{AF-max} の測定結果を、参照値に対する直径比として、打撃点を中心とした半透明の円で表示した結果を示す。図 4.9～図 4.11 より、以下のことが把握できる。

- いずれの試験体においても、健全部の R_{AF-max} は、参照値として示した 0.1 と同等以下のものがほとんどである。
- X0 の剥離範囲 S, M, L や XDH, XMH のように、ある程度の面積を有し、浅い位置（模擬剥離深さ設定値 9mm）で剥離している試験体では、 R_{AF-max} が広範囲にわたって大きく検出される。
- タイル X を使用した試験体において、剥離深さが深くなるにつれ、剥離範囲内で検出される R_{AF-max} の値は小さくなっていき、剥離深さが深いものほど、剥離部境界付近と健全部との差が判別しにくくなる傾向がある。
- タイル Y においても、YDH および YMH（剥離深さ 15mm）と比較して、剥離深さが深い YMS（剥離深さ 25mm）の方が、 R_{AF-max} の値が小さくなる傾向がある。
- 浅い剥離の場合は、剥離境界部から剥離内部へ向かって急激に R_{AF-max} の値が増加するのに対し、深い剥離の場合は、 R_{AF-max} の境界からの増加の程度が小さい。また、比較的大きな剥離範囲では、剥離境界から剥離内部へ向かって R_{AF-max} の値が増加した後さらに中央に近づくと、また R_{AF-max} の値がやや小さくなる傾向がある。第 2 章でも考察したが、打撃した箇所およびマイク位置におけるタイル張り層の振動のしやすさが反映されているものと考えられる。
- 剥離範囲 T では、健全範囲と比べると大きな値の R_{AF-max} が計測されるものの、剥離深さが浅いにもかかわらず R_{AF-max} の値が大きくなりやすい。これは、剥離面積が小さいことが影響していると考えられる。なお、T のように剥離面積が小さい場合には、その剥離範囲内を的確に打撃できるだけの打撃密度を有することが重要と考える。
- X0, X10, X20, X30 の各試験体において剥離範囲 S, M, L を比較した場合、各剥離範囲内の R_{AF-max} の最大値および剥離境界からの R_{AF-max} の増加傾向とも、剥離範囲 S, M, L による傾向は概ね近似している。
- XMS および XMSw は、設定した剥離深さが同じで模擬剥離に使用した特殊シートの重ね枚数を変えて剥離代を変えた試験体であるが、剥離代によらず、同じように R_{AF-max} が分布している。
- X10, XMS および XMSw（剥離深さ 19mm）と比較して、これらよりも浅い剥離深さに設定した YDH および YMH（剥離深さ 15mm）の方が、若干 R_{AF-max} が小さい傾向がある。薄い 50 二丁モザイクタイル（X）と比較し、サイズが大きく厚い二丁掛けタイル

(Y)の方が、同じ張付け仕様、剥離界面で比較した場合、 R_{AF-max} が小さくなるものと考えられる。

- 一方、弾性を有する有機系接着剤で張付けた ZMS (剥離深さ 22mm) では、これよりも剥離深さの浅い YDH および YMH (剥離深さ 15mm) よりも R_{AF-max} が大きい傾向がある。以上の傾向から、今後、剥離深さを推定する際には、タイル種類や張付け仕様ごとに判断基準を調整する必要があると思われる。

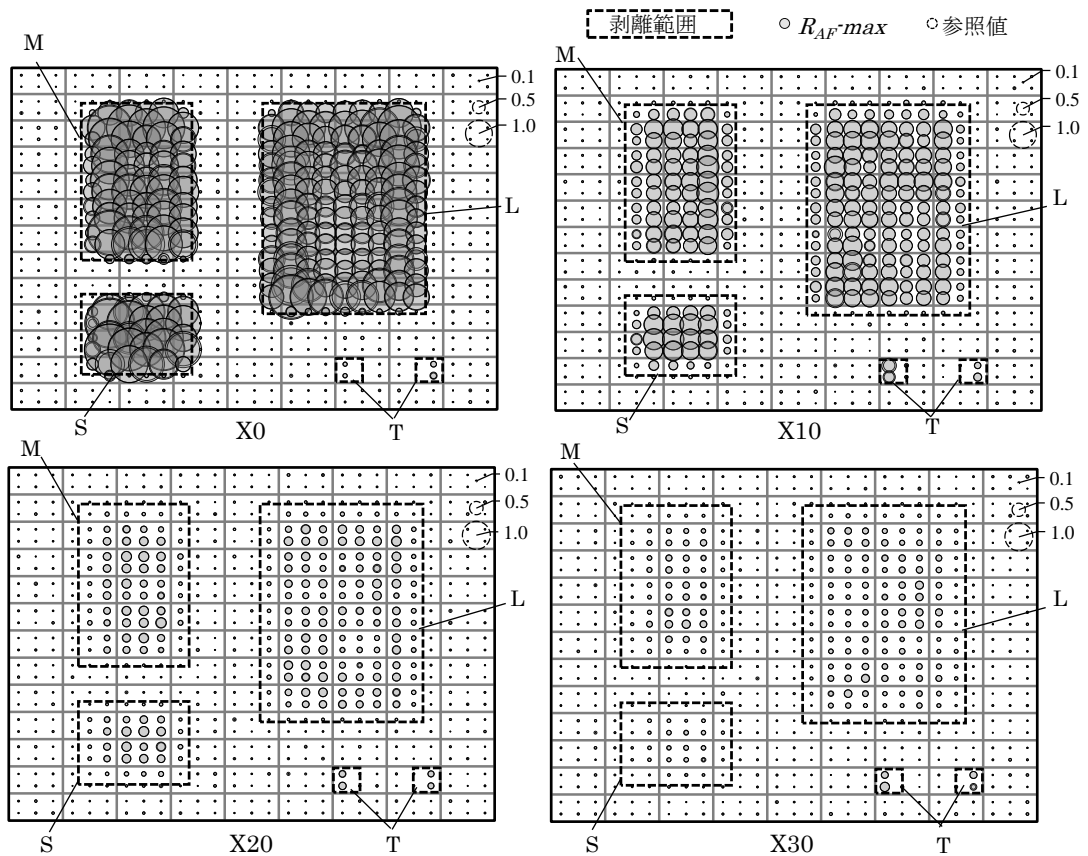


図 4.9 全打撃点における R_{AF-max} の測定結果 (タイプ I)

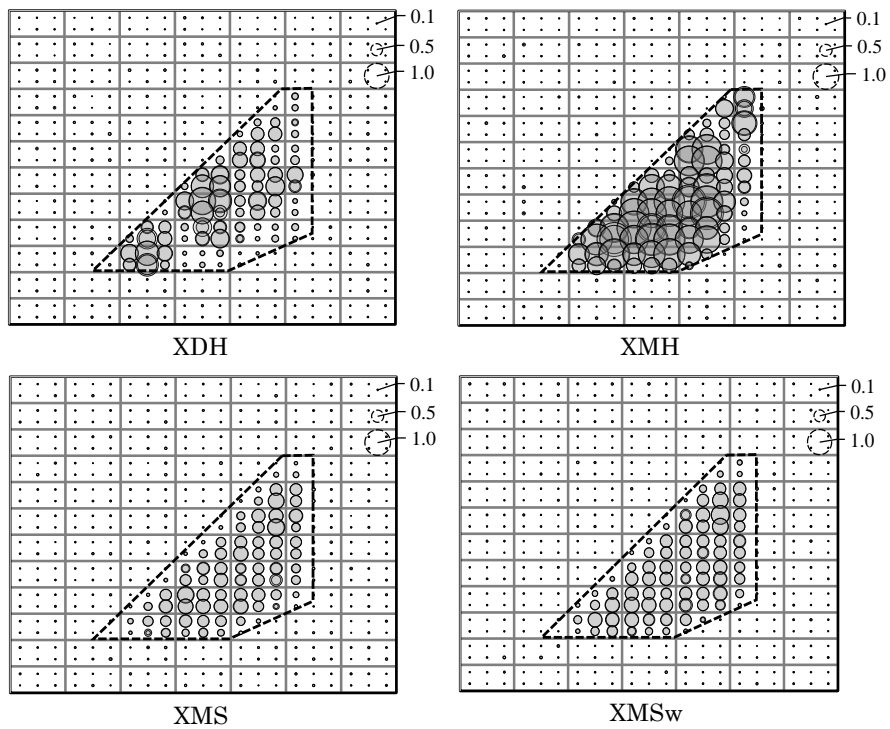


図 4.10 全打撃点における R_{AF-max} の測定結果 (タイプ II)

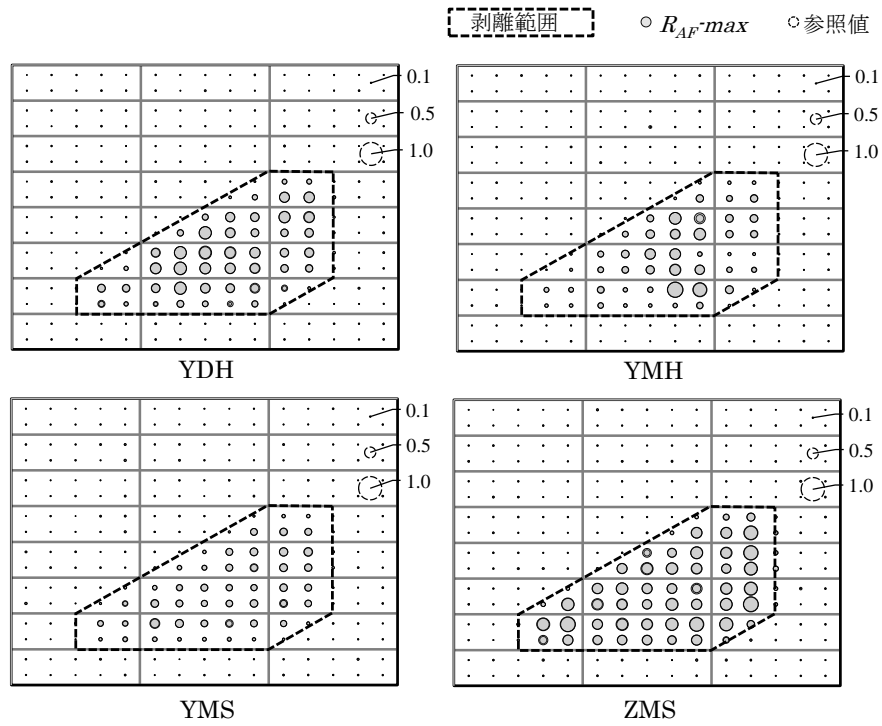


図 4.11 全打撃点における R_{AF-max} の測定結果 (タイプⅢ)

ここで、試験体ごとの R_{AF-max} の分布傾向を把握することを目的として、図 4.12～図 4.14 に示すとおり、試験体ごとに R_{AF-max} のヒストグラムを作成した。相対度数は、健全範囲および剥離範囲ごとに示し、剥離範囲のうち剥離境界から内部側 1 点目は剥離端部と位置づけ、この剥離端部に該当する相対度数の部分に網掛けで示した。また、健全範囲における平均値「 μ 」、標準偏差「 σ 」を示すとともに、健全範囲の R_{AF-max} の分布が正規分布するものと仮定し、「 $\mu+3\sigma$ 」の算定値も図中にあわせて表示した。なお、横軸の階級には各階級の上限値のみを示し、0.80 を超えるものは「over」としてまとめて表示した。ただし、タイプ I の剥離範囲 T については、度数が少ないことから、集計から除外した。図 4.12～図 4.14 より、以下のことがわかる。

- ・ 浅い剥離深さの試験体は、健全範囲と剥離範囲の同一階級での共存が少なく、相互の区別が比較的しやすい。一方、X20 や X30 のように、剥離深さが深いものは、特に 0.05-0.10 の階級および 0.10-0.15 の階級において健全範囲と剥離範囲の共存が多くなり、両者の区別がしにくくなる。
- ・ 剥離範囲において、前述のように同一階級で健全範囲と共存するもののほとんどは、剥離端部である。
- ・ 剥離深さが浅いものほど大きな階級に分布する傾向があり、表示した中で最も浅い剥離である X0, XDH, XMH (剥離深さ 9mm) では、0.80 を超える階級 (over) の割合が多くなる傾向がある。
- ・ 健全範囲における R_{AF-max} の平均値は、いずれの試験体においても 0.06 前後であり、試験体間の差異が小さい。

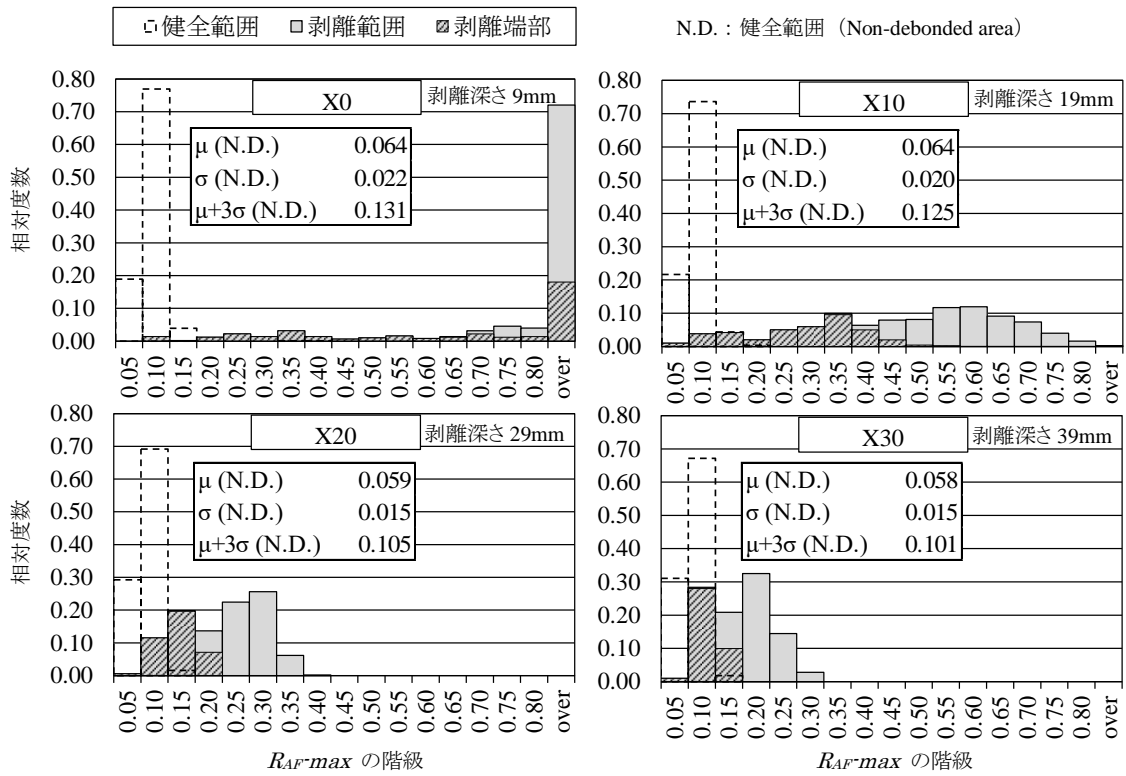


図 4.12 試験体ごとの R_{AF-max} のヒストグラム (タイプ I)

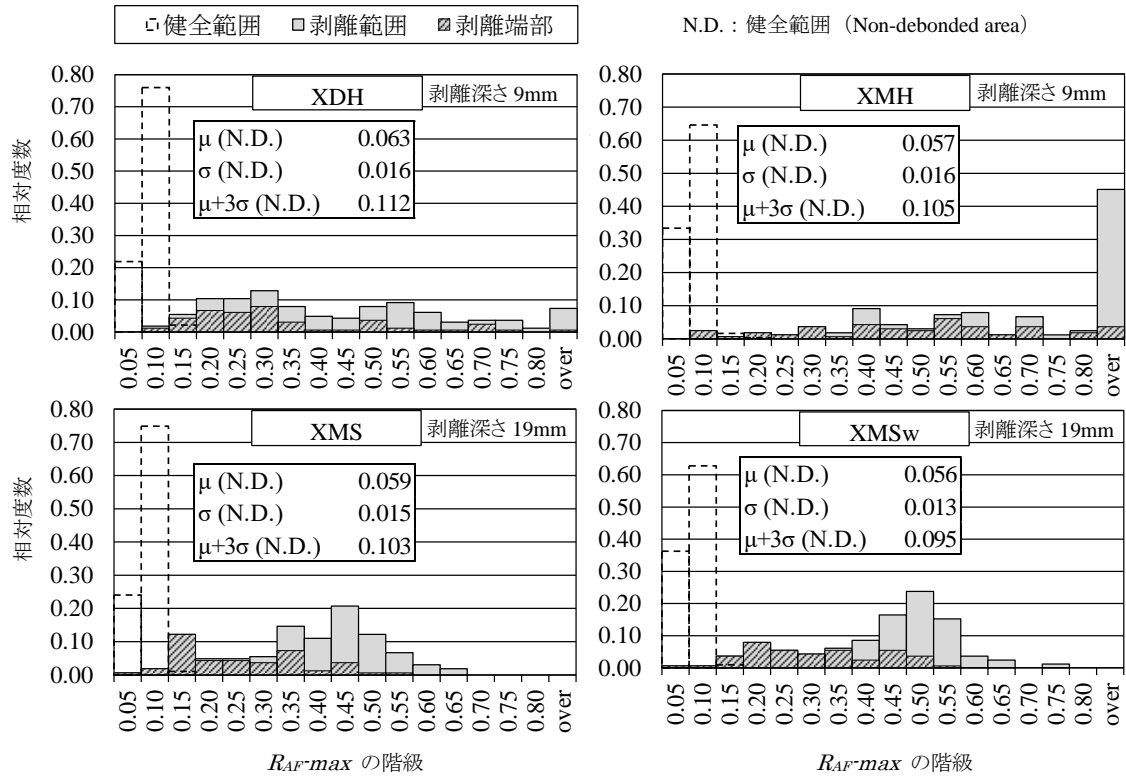


図 4.13 試験体ごとの R_{AF-max} のヒストグラム (タイプ II)

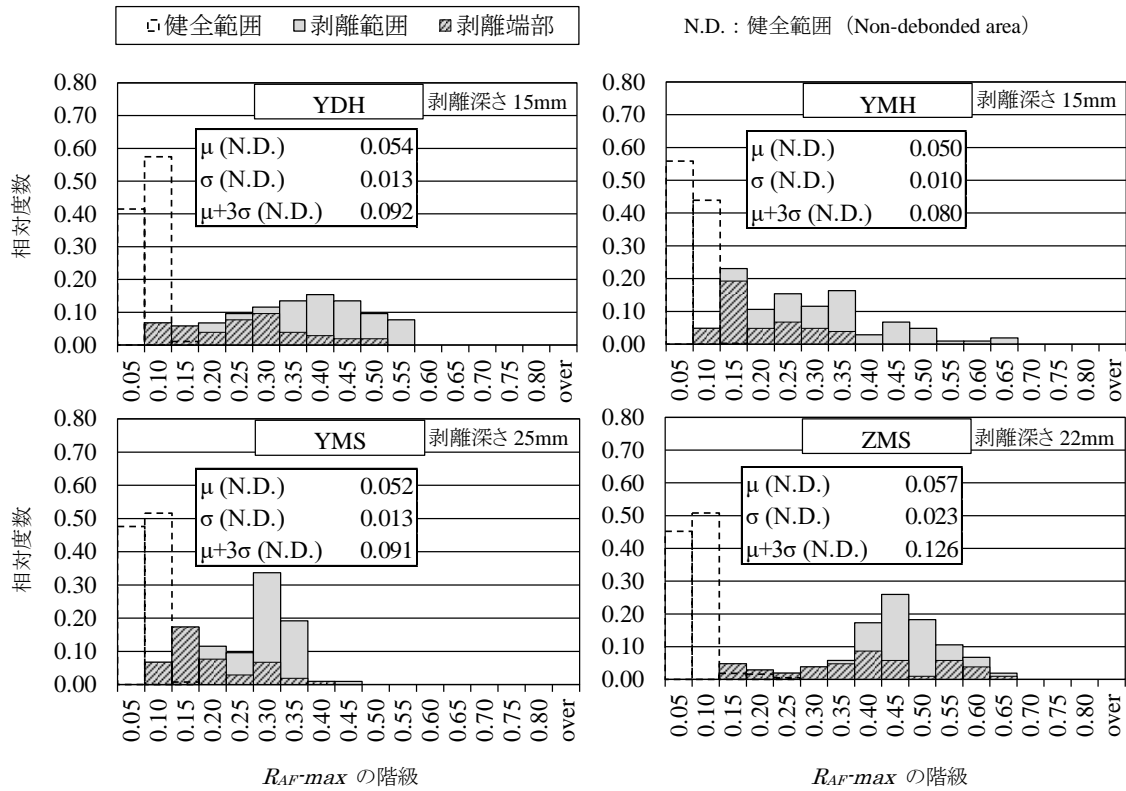


図 4.14 試験体ごとの R_{AF-max} のヒストグラム (タイプⅢ)

4.4.3 剥離判定のためのしきい値に関する検討

図 4.12～図 4.14 の結果をもとに、打撃点の剥離判定のためのしきい値の設定を試みることにした。本来、打撃点が健全か剥離しているかは未知であり、実際の調査案件においては、下地モルタルの厚さやタイルの張付け仕様などの情報も無い場合もありうることを考慮すると、検査面の仕様ごとに、あらかじめしきい値を設定することは困難であると考え。そこで、本報では、試験体によらず一律のしきい値を設定することを試みた。

設定するしきい値を大きくしすぎると、剥離範囲であるにもかかわらず健全であると判定される危険性が高くなる。一方、安全側に立ち、しきい値を小さくしすぎると、健全範囲内の打撃点であっても上位に分布するものを剥離と判定してしまうリスクがあるため、この設定には適度のバランスが必要であると考え。

前述のとおり、図 4.12～図 4.14 のヒストグラムにおいて、剥離範囲であるにもかかわらず健全範囲と同一階級に共存するもののほとんどが剥離端部に位置していることを考慮すると、打撃点の R_{AF-max} の結果をもとに剥離判定範囲をゾーニングする際に、 R_{AF-max} の分布の傾向をもとに、推定する剥離境界を適宜拡幅して剥離判定範囲を補完する等の措置をとることもできると考える。

上記を考慮して、本報では、各試験体の健全範囲において算出された「 $\mu+3\sigma$ 」を参考にしながら、試験体の中で最も剥離判定が困難と思われる X30 の剥離範囲 S 内の剥離判定個所が極力多くなり、かつ、健全部における剥離判定が極力されにくい値として、 R_{AF-max} のしきい値を「0.12」と設定し、この値以上の R_{AF-max} が検出された打撃点を剥離と判定することとした。

なお、運用上では、全面の診断結果を踏まえて、しきい値を再設定することも可能と考える。例えば、診断後のしきい値再設定方法の例として次の手順による設定が可能なものと考え。

【検査後のしきい値再設定方法の例】

- ・対象壁面の検査実施時は、事前に設定した R_{AF} のしきい値をもとに、壁面全面の検査実施し、そのしきい値による剥離箇所を認識しながら、打撃位置ごとの R_{AF} および R_{AF-max} の測定結果を収録する。
- ・タイル張付け仕様ごとに、すべてのタイルが剥離していることは無いとの仮定から、下位から 1～n 個のある個数の R_{AF} の平均値、または、下位から m% のある割合の R_{AF} の平均値を求めて、その値を健全部平均値 μ_{nd} と仮定する。
- ・次に、下位から 1～n 個のある個数の R_{AF} の標準偏差、または、下位 m% のある割合の R_{AF} の標準偏差を健全部標準偏差 σ_{nd} と仮定する。
- ・ $\mu_{nd} + \alpha \times \sigma_{nd}$ (α は正数) をしきい値として設定する。

この手法において、例えば、 α は3とするなど任意に設定できるが、 n 個または $m\%$ の健全部標本の全打撃個所数に対する割合や、検査結果の傾向を鑑みて、適宜 α を増減すると良いと考える。

R_{AF-max} の値がしきい値0.12以上となり剥離判定された打撃点における R_{AF-max} の測定結果を図4.15～図4.17に示す。表示方法は図4.9～図4.11と同様である。

図4.15～図4.17より、剥離深さの浅い試験体ほど、剥離境界近傍までの確に剥離判定されていることがわかる。剥離深さの深いX20およびX30の試験体においては、剥離境界近傍の打撃点において剥離判定がされにくくなるものの、実在するタイル張り仕上げ層の剥離深さとしてかなり深いレベルであるにもかかわらず、剥離の存在を比較的明確に把握できることがわかる。なお、剥離境界近傍のうち角部においては、直線状の剥離境界近傍よりも R_{AF-max} の値が小さくなりやすいため、剥離判定されにくい傾向がある。剥離深さが浅く、剥離面積が小さい剥離範囲Tでは、剥離範囲内にある打撃点2点のいずれにおいても剥離判定されていることがわかる。

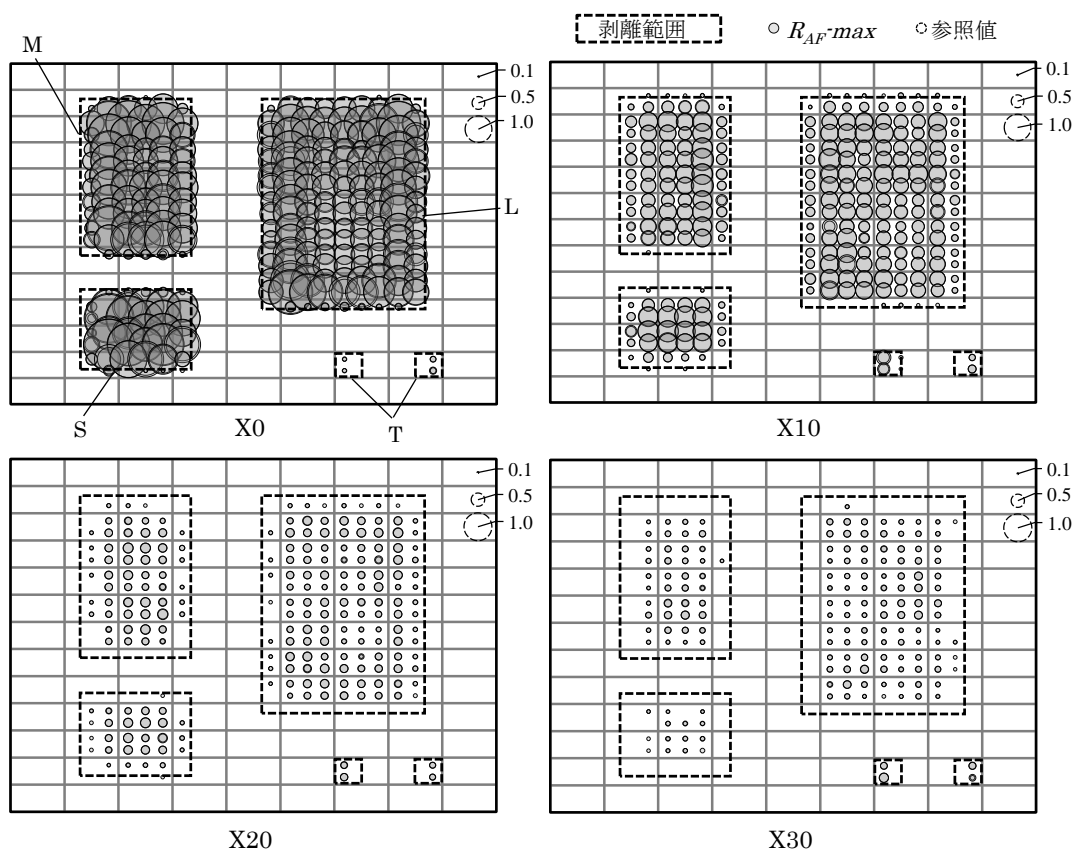


図 4.15 剥離判定された打撃点と R_{AF-max} の測定結果 (タイプ I)

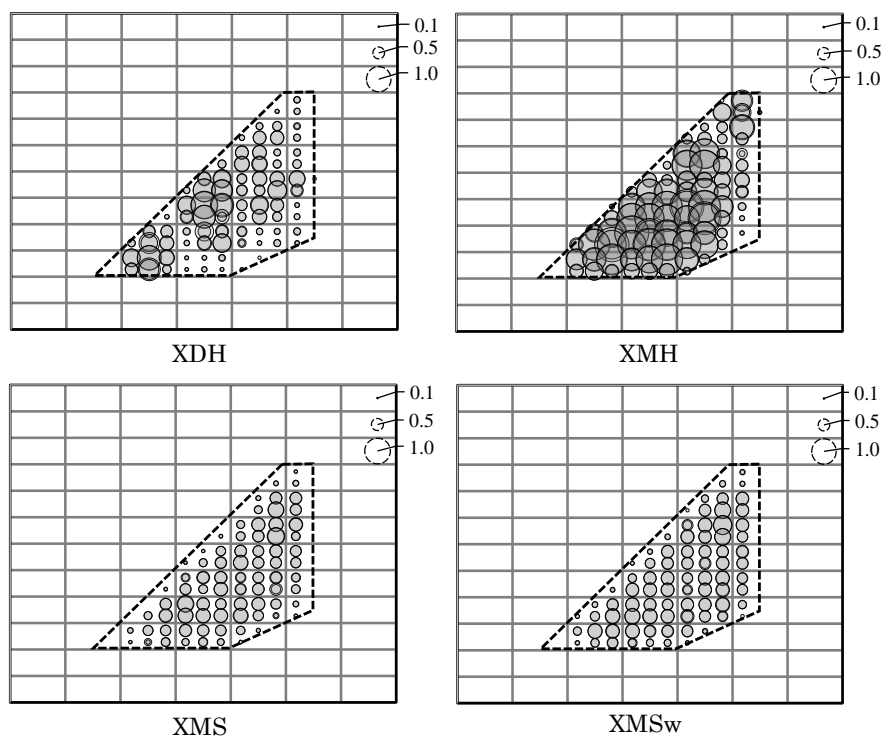


図 4.16 剥離判定された打撃点と R_{AF-max} の測定結果 (タイプ II)

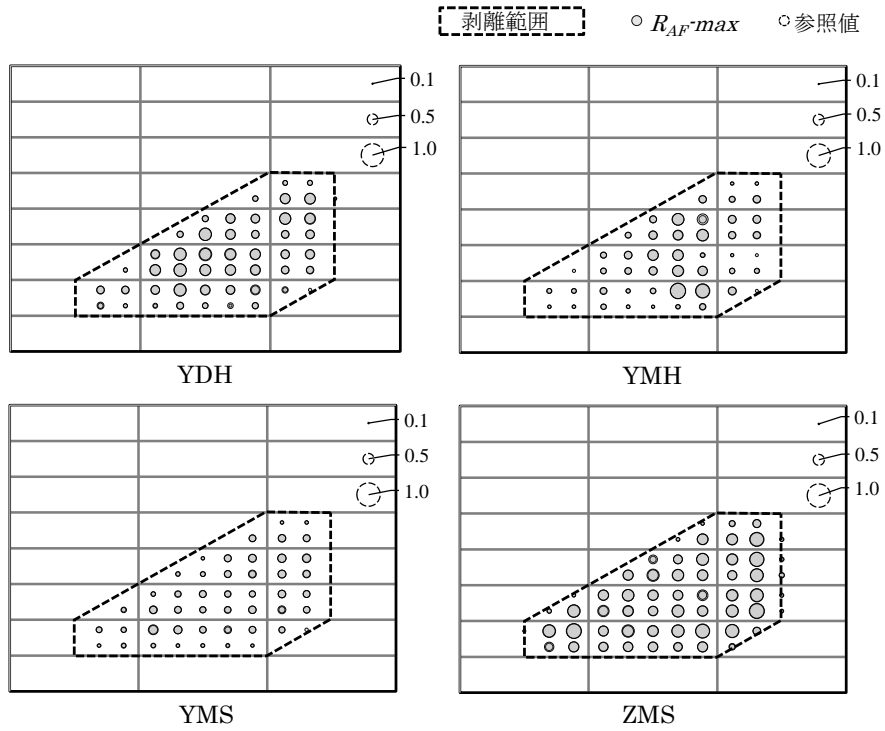


図 4.17 剥離判定された打撃点と R_{AF-max} の測定結果 (タイプⅢ)

4.4.4 複数マイクの有効性に関する確認

ここで、4つのマイクを利用した場合と1つのマイクしか使用しなかった場合の判定結果を比較することを目的として、各試験体においてマイク 2 のみを利用した場合に剥離判定された打撃点の R_{AF} の測定結果を図 4.18～図 4.20 に示す。図 4.15～図 4.17 と図 4.18～図 4.20 を比較すると、向かって右側のマイク 2 しか利用しない場合（図 4.18～図 4.20）、剥離深さが浅い試験体であっても剥離範囲右端部において剥離判定がされにくくなり、剥離深さが深い X20 や X30 になると、さらに剥離範囲内部においても剥離判定されないケースが生じている。また、剥離範囲 T においては、剥離範囲内を打撃しているにもかかわらず、剥離判定されないケースも生じていることがわかる。このように、打撃点を中心にして4つのマイクがあることが、より安定した剥離判定に有効であることを改めて確認できる。

以上のとおり、本研究において試作した剥離診断装置および設定した剥離判定パラメータは、作製した模擬剥離試験体の範囲では、剥離深さ 39mm まで剥離の存在を判定することが可能であり、想定した剥離範囲内で安定して剥離判定できることを確認できた。

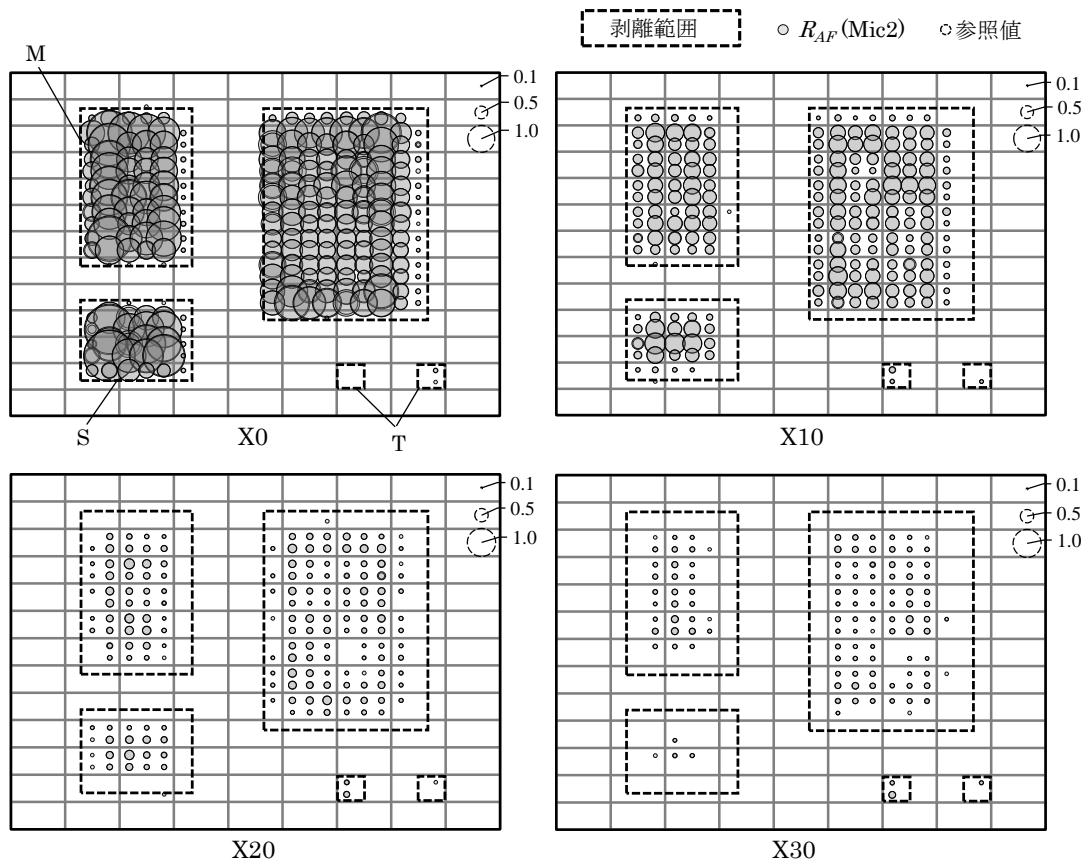


図 4.18 マイク 2 において剥離判定された打撃点と R_{AF} (Mic2) の測定結果 (タイプ I)

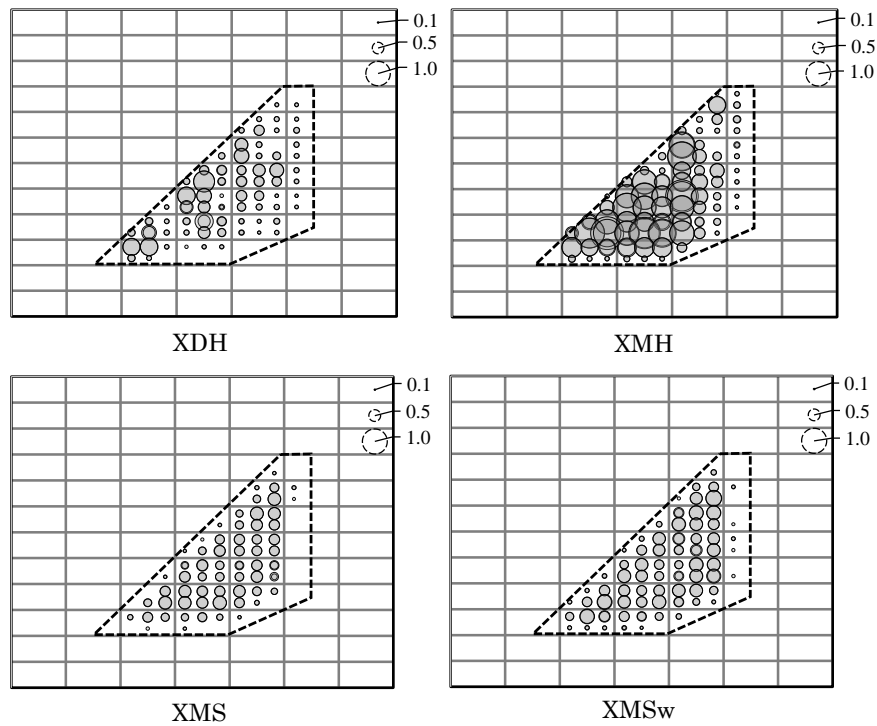


図 4.19 マイク 2 において剥離判定された打撃点と R_{AF} (Mic2) の測定結果 (タイプ II)

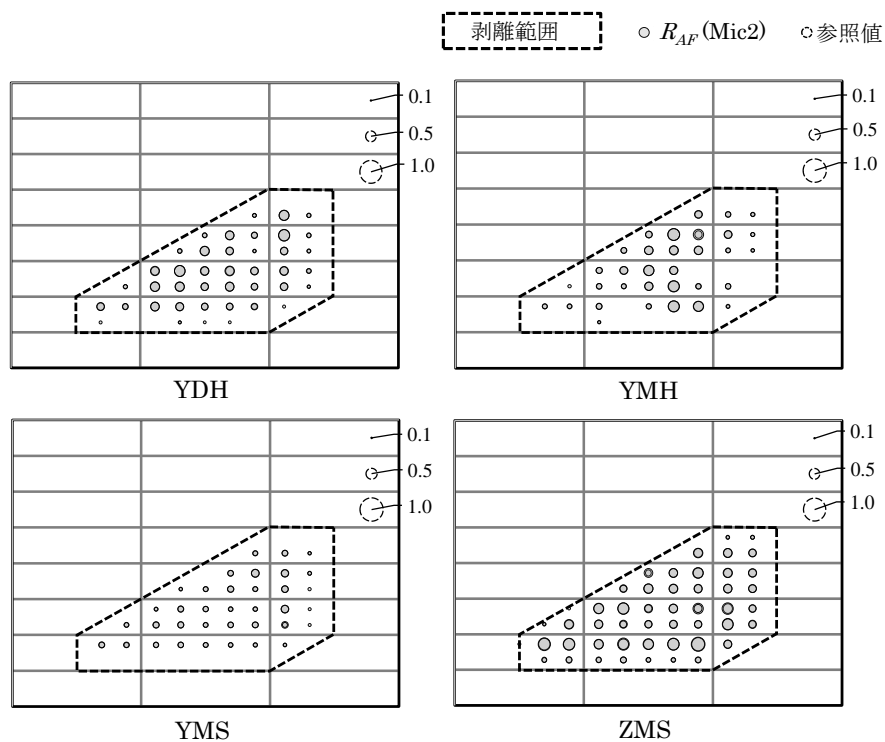


図 4.20 マイク 2 において剥離判定された打撃点と $R_{AF}(\text{Mic}2)$ の測定結果 (タイプⅢ)

4.5 対向するマイク間の R_{AF} の差による打撃点の特徴の把握

4つのマイクの R_{AF} の最大値 R_{AF-max} を用いて剥離判定する方法について述べてきたが、4.4.1の特徴点における測定において図4.8のとおり示したように、マイクが4つあることで、マイクごとの R_{AF} の値やマイク間の R_{AF} の差から、打撃点の特徴を把握できる可能性が示唆された。そこで、対向するマイク間の R_{AF} の差を「 R_{AF-dif} 」と定義し、剥離判定された全打撃点における R_{AF-dif} の測定結果をもとに、打撃点における特徴の把握の可能性について考察することとした。

図4.21～図4.23に、タイプI試験体の剥離判定打撃点における R_{AF-dif} の測定結果を示す。左図がマイク1-3間の R_{AF-dif} 、右図がマイク2-4間の R_{AF-dif} である。

図4.21～図4.23より、浅い剥離範囲の剥離境界付近では R_{AF-dif} が大きい値で測定され、中央付近になるとマイク間の差がなくなるため R_{AF-dif} が小さくなっていくことがわかる。また、境界付近における R_{AF-dif} の大きさは、剥離深さが深くなるにつれて小さくなる傾向があることがわかる。また、 R_{AF-dif} の正負によって、打撃点からみてどちら側に境界があり、どちら側に剥離範囲が広がっているのかを予測するのに役立つものと思われる。タイプIIおよびIIIの試験体の斜線状の剥離境界付近では、装置の向きに対して剥離境界線が斜めに配置されるが、内部側にあるマイクの R_{AF} がどちらも大きく測定されることで、マイク1-3間（左図）、マイク2-4間（右図）のいずれの図でも剥離境界付近の R_{AF-dif} が大きく測定される傾向があることがわかる。

R_{AF-dif} を用いた剥離深さの推定方法については、第5章で述べることとするが、打撃点ごとの R_{AF-max} および R_{AF-dif} の測定結果をもとに、剥離判定された打撃点の特徴を次のように予測できる可能性があると思われる。

- R_{AF-max} が大きく、 R_{AF-dif} の絶対値も大きいときは、打撃点が比較的浅い剥離範囲の境界付近であり、小さく測定されたマイクの方に境界があると予測する。
- R_{AF-max} が大きく、 R_{AF-dif} の絶対値が小さい場合は、打撃点が比較的浅い剥離範囲の内部に位置していると予測する。
- R_{AF-max} が小さく、 R_{AF-dif} の絶対値が小さい場合は、打撃点が比較的深い剥離範囲のいずれかの箇所だと予測する。

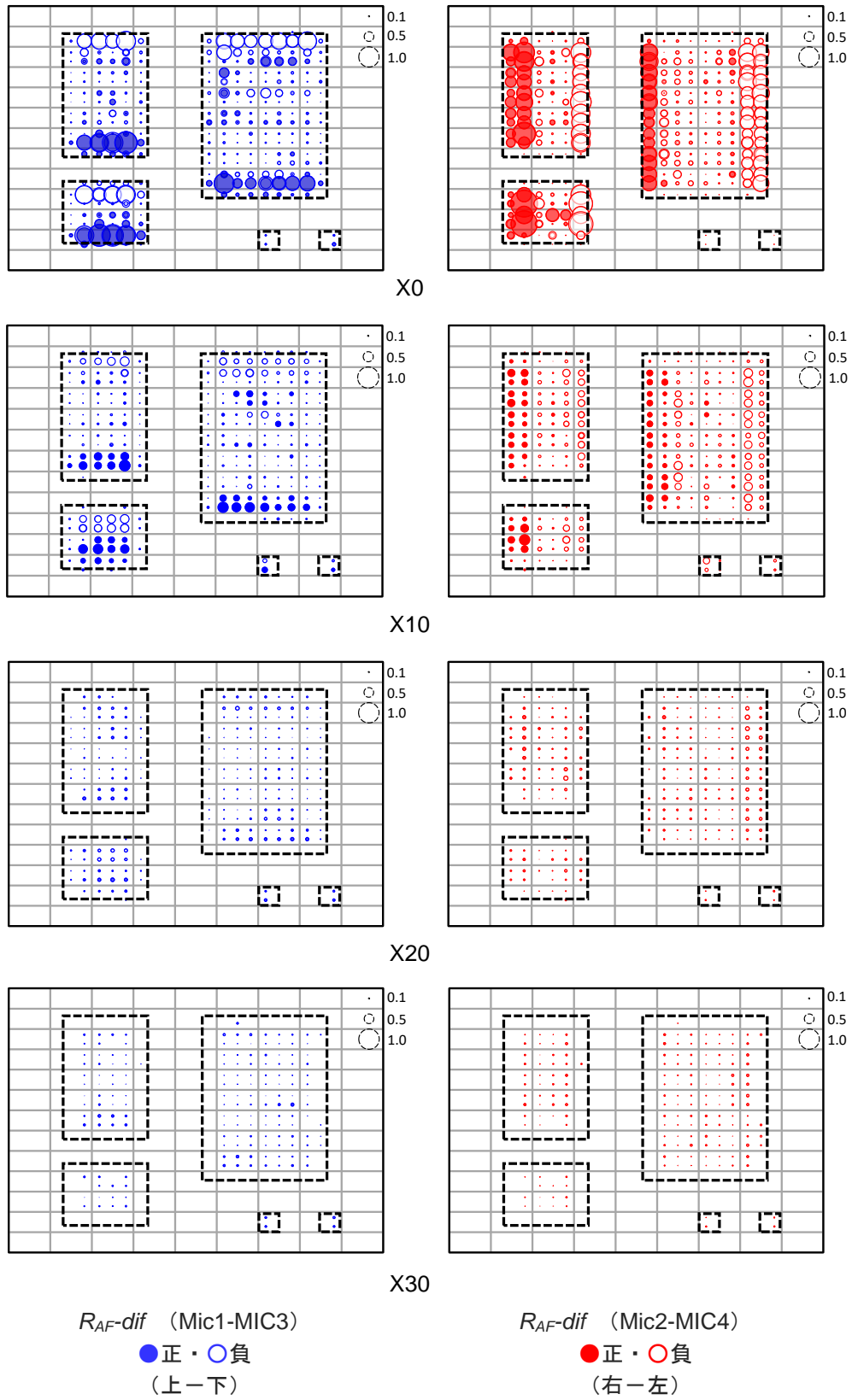


図 4.21 タイプ I 試験体の剥離判定された打撃点における R_{AF-dif} の測定結果

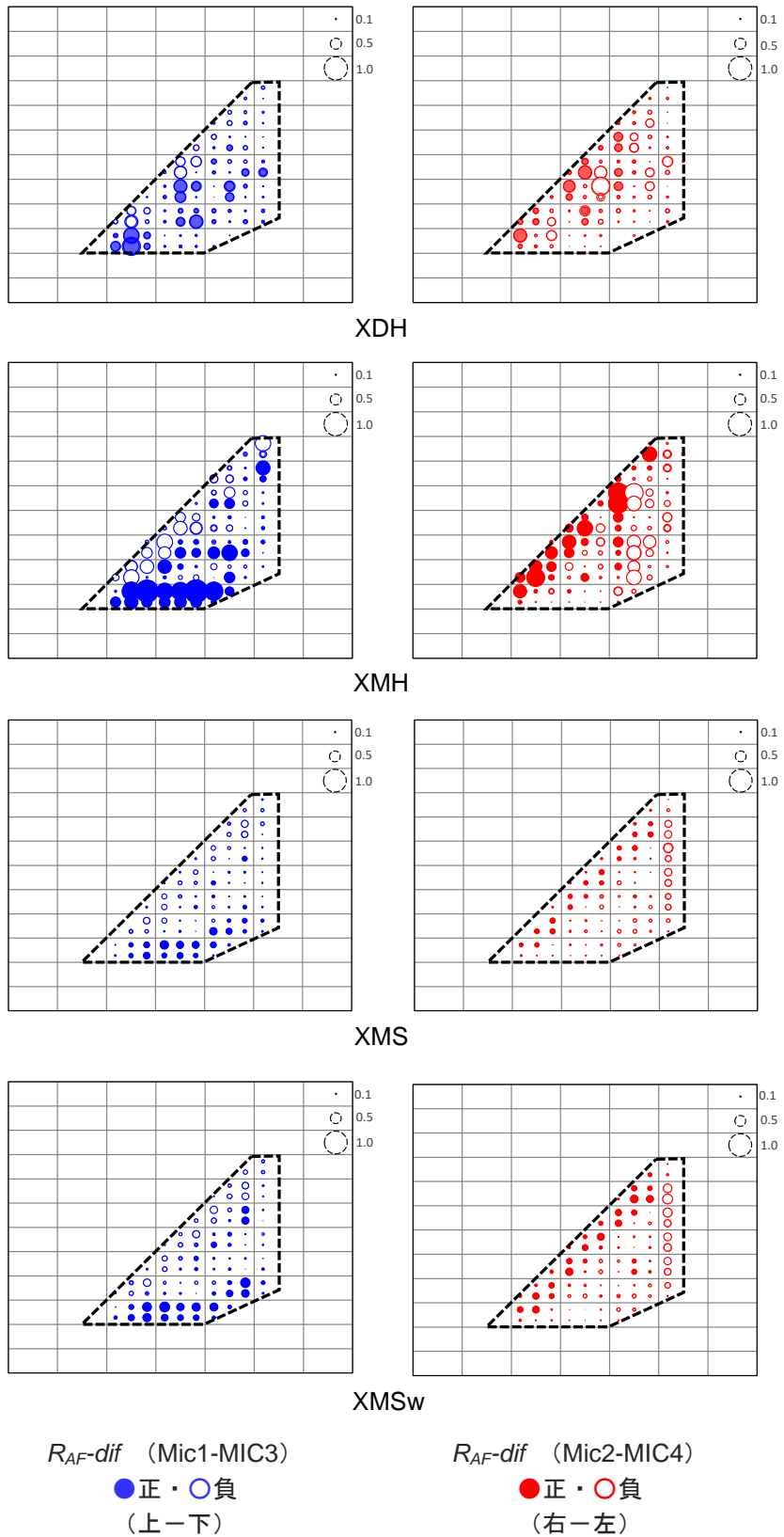


図 4.22 タイプ II 試験体の剥離判定された打撃点における R_{AF-dif} の測定結果

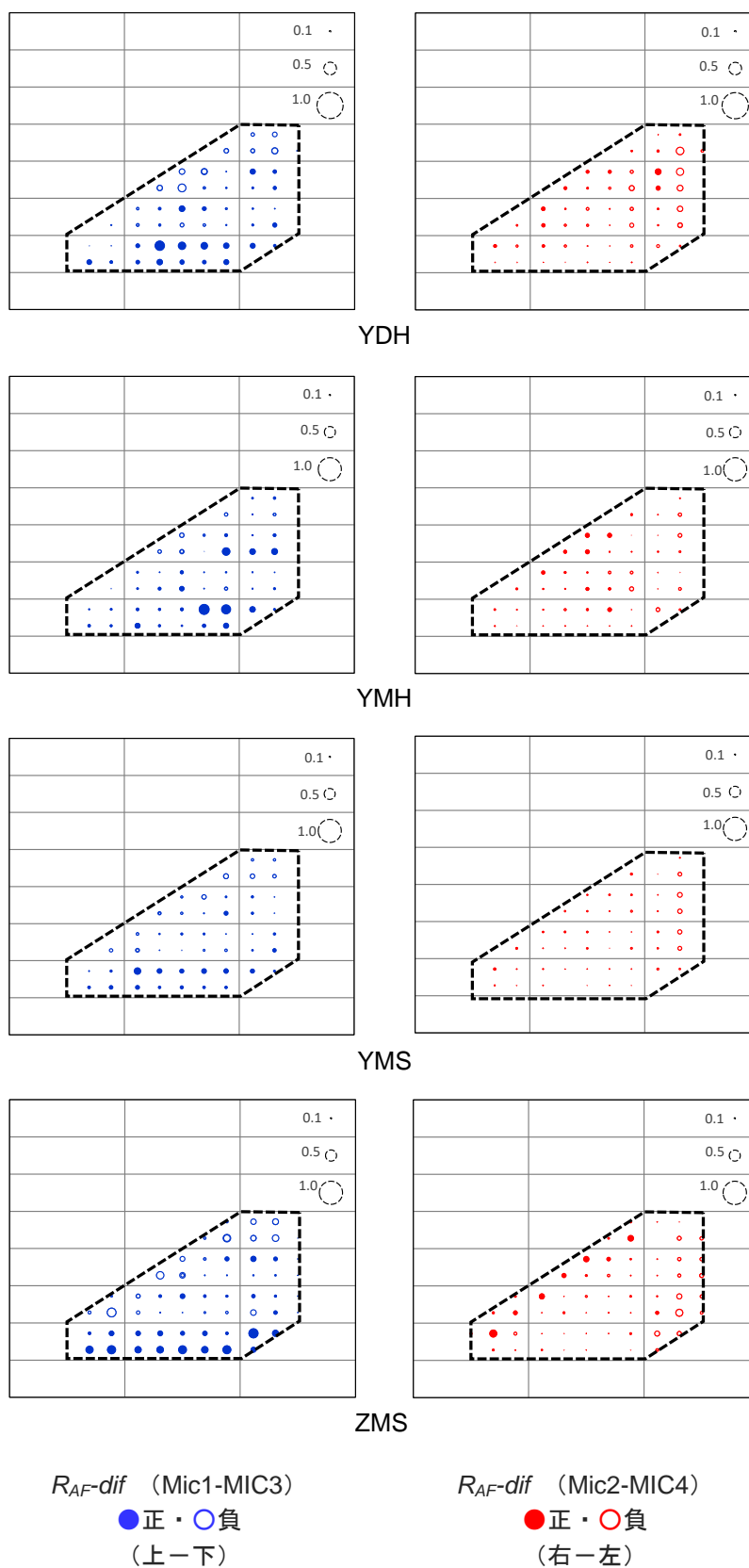


図 4.23 タイプⅢ試験体の剥離判定された打撃点における R_{AF-dif} の測定結果

4.6 剥離判定におけるソレノイドアクチュエータ駆動電圧の影響

ここまで、4章では、打撃におけるソレノイドアクチュエータの駆動電圧を5Vに設定して検討を行ってきた。これは、3章の標準試験体を対象とした試験において、打撃力によって補正をすることにより、剥離判定パラメータ R_{AF} の算定結果に駆動電圧による差がなくなることが確認されたためであるが、ここで、タイルを用いた模擬剥離試験体を用いて駆動電圧による影響について確認することとする。

駆動電圧の比較に用いる試験体はX30とし、前掲の駆動電圧5Vにおける結果と駆動電圧8Vの結果を比較することとした。これら比較条件の選定理由は、一般に、検査員が耳で打撃応答音を聴いて剥離を判断する際には、剥離層が厚いほどタイル面を強めにたたく必要があると考えられることと、4.4.3において、X30の試験体では剥離境界近傍における剥離判定がされにくくなる傾向があったため、その点が改善されるかどうかを確認したいと考えたためである。

打撃力およびマイクの較正は標準試験体Q₁₆₀を用いて、駆動電圧8Vにて標準値の F_0 および A_0 の測定を行った。

特徴点打撃時の R_{AF} 測定結果の比較を、図4.24に示す。5Vと8Vで大きな差は認められず、いずれもa点では非常に R_{AF} が小さく、b点になるといずれのマイクもa点よりも若干大きくなり、c点ではマイク2（右側）が小さくなるという傾向は同じである。

全打撃点における R_{AF-max} 測定結果の比較を図4.25に示す。図4.25を比較する限り、全体的な R_{AF-max} の分布傾向はほぼ同等である。

R_{AF-max} のヒストグラムの比較を図4.26に示す。剥離範囲における分布傾向はほとんど同じであることがわかる。健全範囲における分布は、駆動電圧8Vの方が、0~0.05の階級における分布の割合が0.05~0.10の階級における分布を上回っており、その分、健全範囲の平均値が小さくなっている。

ここで、剥離判定のためのしきい値は、4.4.3と同じく「0.12」とした。このしきい値によって剥離判定された打撃点および R_{AF-max} 測定結果の比較を図4.27に示す。いずれの打撃力においても剥離境界近傍における剥離検出結果はほとんど差が無く、駆動電圧を大きくしても、剥離深さが深い試験体の剥離境界近傍における検出傾向は特に変化がないことが確認された。

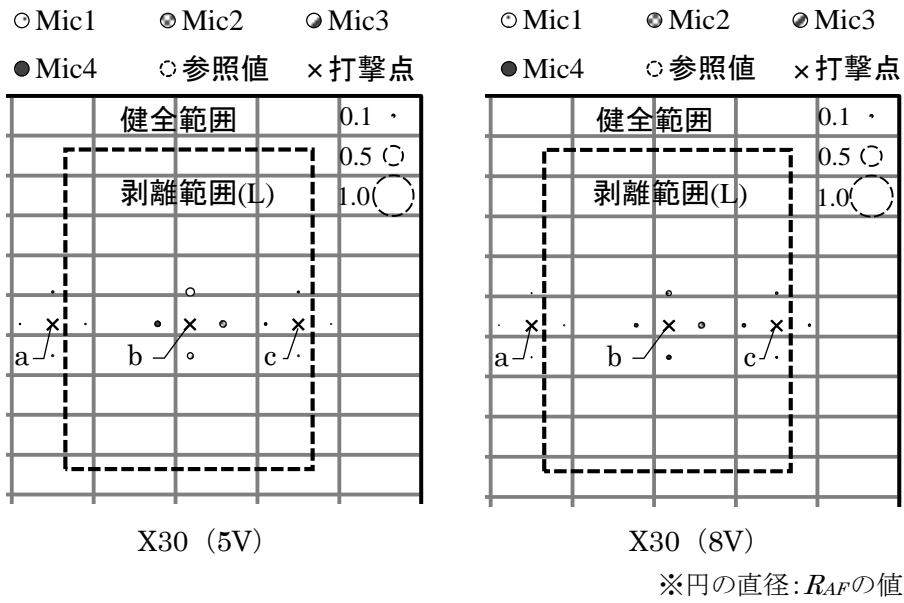


図 4.24 特徴点打撃時の R_{AF} 測定結果の比較

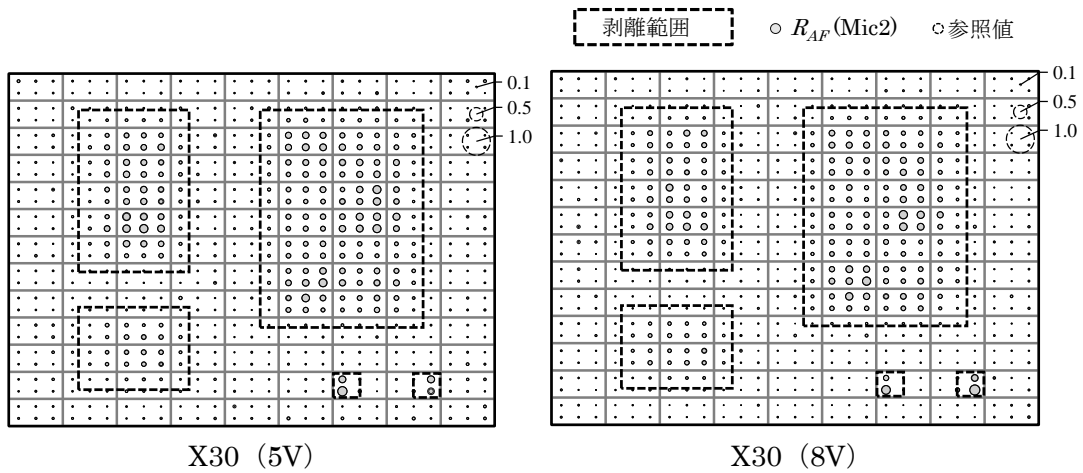


図 4.25 全打撃点における R_{AF-max} の測定結果の比較

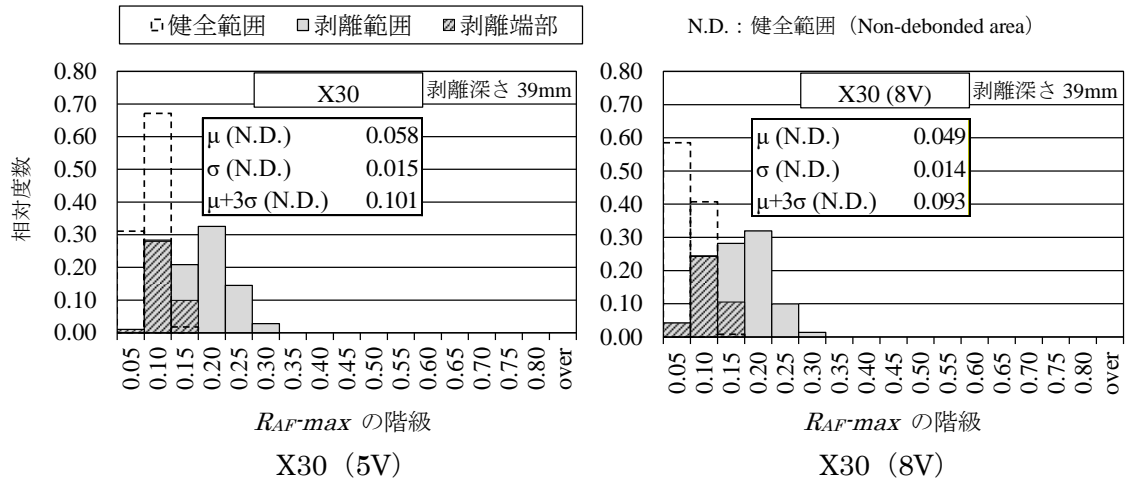


図 4.26 R_{AF-max} のヒストグラムの比較

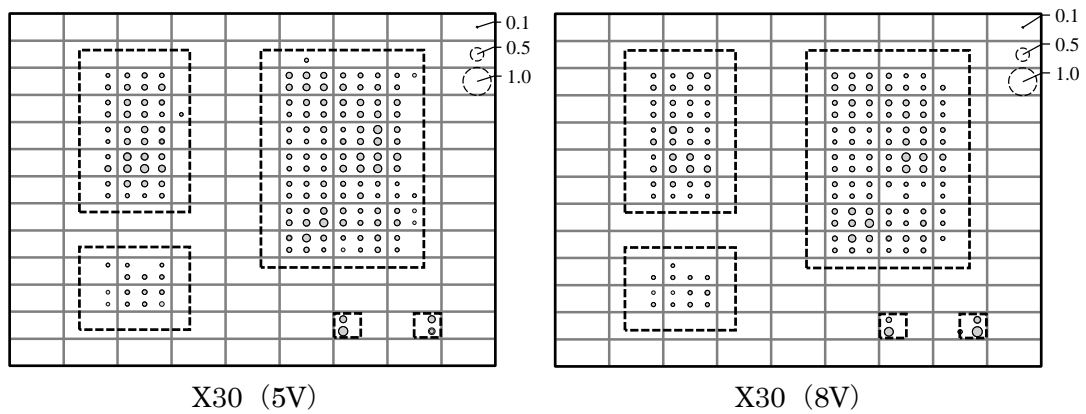


図 4.27 剥離判定された打撃点および R_{AF-max} 測定結果の比較

4.7 まとめ

本章では、第3章で考案したタイル剥離診断装置を用いて、タイル種類、張付け材、剥離深さ、剥離面積を変化させた12種類の模擬剥離試験体の全面を測定し、剥離判定パラメータである相対振幅評価値 R_{AF} をマイクごとに算出した。 R_{AF} の算出結果をもとに、剥離診断装置および剥離判定パラメータの有効性および活用方法について考察した。本章の結論を以下に示す。

- ① 打撃点の中から、剥離深さが異なる試験体 (X0, X10, X20, X30) において、健全範囲 (a)、剥離範囲中央 (b)、剥離範囲境界近傍 (c) の3つの特徴点を抽出し、これらの特徴点においてマイクごとに R_{AF} を計測した結果から以下のことを確認した。
 - ・ 剥離範囲中央では4つのマイクの R_{AF} とも健全範囲の R_{AF} と比較して十分大きく、かつ4つのマイクの R_{AF} の値はほぼ等しい。
 - ・ 剥離深さが深くなるにつれて、剥離範囲における R_{AF} が小さくなる。
 - ・ 剥離範囲境界近傍では剥離範囲内部側に位置するマイクで検出される R_{AF} が他のマイクよりも大きい値で検出されることにより剥離判定に有利である。
 - ・ 健全範囲を打撃した場合には仮にマイクが剥離範囲に入っていたとしても、いずれのマイク位置の R_{AF} とも小さい。
- ② 4つのマイクごとに得られる R_{AF} の活用方法として、本研究では4つのマイクの R_{AF} の最大値を R_{AF-max} と定義し、 R_{AF-max} の算定結果を試験体図中の打撃位置に表示することで、試験体による分布傾向の違いを考察した。
- ③ R_{AF-max} の分布をもとに R_{AF-max} のしきい値を設定し、剥離判定結果を試験体図中に表示した結果、剥離深さの浅い試験体では剥離境界近傍までの確に剥離判定が可能であること、剥離深さの深い試験体では剥離境界近傍において剥離判定がしにくくなるものの、剥離の存在を比較的明確に把握できることを確認した。
- ④ 本研究において試作した剥離診断装置および設定した剥離判定パラメータは、製作した模擬剥離試験体の範囲では、剥離深さ 39mm まで剥離の存在を判定することが可能であることを確認した。
- ⑤ 対向するマイク間の R_{AF} の差を R_{AF-dif} と定義し、剥離判定された全打撃点における R_{AF-dif} の測定結果をもとに、打撃点における特徴の把握の可能性について考察した。浅い剥離範囲の剥離境界付近では R_{AF-dif} が大きい値で測定され、中央付近になるとマイク間の差がなくなるため R_{AF-dif} が小さくなっていくこと、境界付近における R_{AF-dif} の大きさは、剥離深さが深くなるにつれて小さくなる傾向があることを確認した。

また、打撃点ごとの R_{AF-max} および R_{AF-dif} の測定結果をもとに、打撃点の特徴を予測できる可能性を確認した。

- ⑥ 打撃におけるソレノイドアクチュエータの駆動電圧を 5V とした時と 8V とした時の結果を比較した結果、いずれの駆動電圧であっても剥離検出結果に大きな差異はないことを確認した。

参考文献

- 4-1) 添田智美, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 729 号, pp. 1779-1787, 2016. 11
- 4-2) 添田智美, 三上貴正: 打撃応答音第一波振幅値を利用したタイル剥離診断装置の設計・試作および装置の有効性に関する基礎的検討外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻, 第 752 号, pp. 1401-1410, 2018. 10
- 4-3) 添田智美, 藤沼智洋, 伊藤秀太郎, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その 3 剥離診断における打撃位置と打撃応答音収録位置の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1173-1174, 2018. 9
- 4-4) 伊藤秀太郎, 添田智美, 藤沼智洋, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その 4 特殊シートによる外装タイル模擬剥離の打音特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1175-1176, 2018. 9
- 4-5) C. CHENG, M. SANSALONE: The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies, *Materials and Structures*, 26, pp. 274-285, 1993

第 5 章 剥離範囲および剥離深さ推定方法の 提示

5.1 はじめに

4章では、4つのマイクの R_{AF} の最大値 $R_{AF}max$ の算出し、健全範囲の $R_{AF}max$ の分布をもとに剥離判定のためのしきい値を設定して各打撃点を剥離判定した結果を述べた。

剥離診断の実務においては、打撃点ごとの剥離判定結果をもとに隣接する剥離判定点を統合していき、剥離範囲として区画する作業が必要となる。この作業を省力化するには、大面積の壁面における検査結果を一つ一つ人が見て判断して区画していくのではなく、ある一定の規則をもって自動的に区画される手法が望ましいと考える。そこで本章において、剥離判定された打撃位置の点群情報をもとに推定剥離範囲を区画する手法について検討することとした。

また、剥離の有無、剥離範囲の位置や面積だけでなく、タイル張付け層で剥離しているか、下地モルタルから剥離しているかなどの剥離深さに関する情報は、改修方法の決定に影響を及ぼすため^{5-1),5-2)}、外装タイルの剥離診断において非常に有効な情報である。例えば、タイル界面または張付けモルタル界面といったタイル張付け層で剥離している場合（一般に、タイル陶片浮きと呼ばれる）には、「タイル張替え工法」やタイル全数を個々に固定する「注入口付アンカーピンニングエポキシ樹脂注入タイル固定工法」などが採用される。一方、鉄筋コンクリートの躯体と下地モルタル間で剥離している場合（一般に、下地モルタル浮きと呼ばれる）には、所定の数量のアンカーピンニングとエポキシ樹脂注入を併用した工法などが採用され、その中で「注入口付アンカーピンニング部分エポキシ樹脂注入工法」が採用された場合のアンカーピンニングの本数は、一般部において9本/m²が標準とされている。

これまで、打音検査におけるタイル陶片浮きか、下地モルタル浮きかの判断は、検査員の経験と感覚によって判断されてきたのが現状である。既往のタイル剥離の自動診断システムに関する研究において、タイル陶片浮きか下地モルタル浮きかの判別を周波数フィルタにより実施した例も報告されているが^{5-3),5-4)}、判定基準の設定根拠や剥離深さの程度との関係性の面でさらなる検討の余地があるものと思われる。

そこで、本研究において剥離深さを推定する手法について検討し、提案することとした。

なお、剥離深さを推定するためには、区画された剥離範囲ごとに推定結果を提示する必要があるため、この点からも剥離範囲の推定方法を本研究内で提案することとする。

5.2 剥離範囲の推定方法

5.2.1 タイル割付法による推定剥離範囲の区画

推定剥離範囲の区画を単純に行う方法として、もともと区画されたタイルの割付をもとに区画する方法が考えられる。この手法を「タイル割付法」と称し、以下に手順を示す。

手順(1-1)：全打撃点をタイル割付図面上にプロットし、そのうち $R_{AF\cdot max}$ がしきい値以上となり剥離判定された点を「剥離判定点」とする。

手順(1-2)：剥離判定点のあるタイルを「剥離タイル」とする。

手順(1-3)：隣り合う「剥離タイル」を連結し、連結された範囲を「推定剥離範囲」、推定剥離範囲の外周を「推定剥離境界」とする。ここで、推定剥離境界はタイル目地芯上とする。

本手法によって推定剥離範囲を区画した結果を、図 5.1～図 5.3 に示す。

ここで、実験において各打撃点における測定は 2 回ずつ実施しているが、実建物において剥離診断装置を走査しながら剥離診断することを想定すると、1 打撃点あたり 1 回分のデータしか得られないことがほとんどと考えられる。そこで、2 回のうちの 1 回目の測定結果のみを用いた。また、図 5.1 に示すシリーズ I の試験体では 1 つの試験体面に複数の剥離範囲を設定しているため、推定剥離範囲が接する形となったが、実際のタイル壁面においてそれぞれが離れて分布したことを想定して、各推定剥離範囲の境界を赤線で区画して表示した。

タイル 1 枚当たり 1 点でも剥離判定された打撃点があるとそのタイルを剥離タイルと位置付けているため、タイル長手方向において、実際の模擬剥離範囲よりも広く区画される傾向があることがわかる。特にタイルサイズの大きい二丁掛タイル（タイプⅢ）ではその傾向が非常に強くなる。

しかし、剥離深さの深い X20（剥離深さ 29mm）および X30（剥離深さ 39mm）では、剥離部分があるにもかかわらず、推定剥離範囲内に含まれないタイルが生じることが確認された。このような場合は、剥離深さに応じて推定剥離範囲を割り増す必要があるが、その手順は 5.4.1 にて述べることとする。

ここで示した「タイル割付法」は、図 5.1～図 5.3 に示した通り、タイル 1 枚当たりの面積を基準に算定しているため、後述する割り増し法もあわせて、タイルの張替え時の必要枚数の算定などに向いているものと考えられる。

国土交通省の建築改修工事監理指針に基づいて改修工事を行う場合、1 箇所剥離面積の

大きさが 0.25m^2 以上か未満かによって選定される改修工法が変わってくる場合があるが^{5-1),5-2)}、大型のタイルが用いられている場合には、安全側にはなるものの、過剰に面積を算定してしまう場合も考えられるため、タイル割付によらず剥離範囲や剥離面積を把握したい場合には、以降に示す別の手法を選定すると良いと思われる。

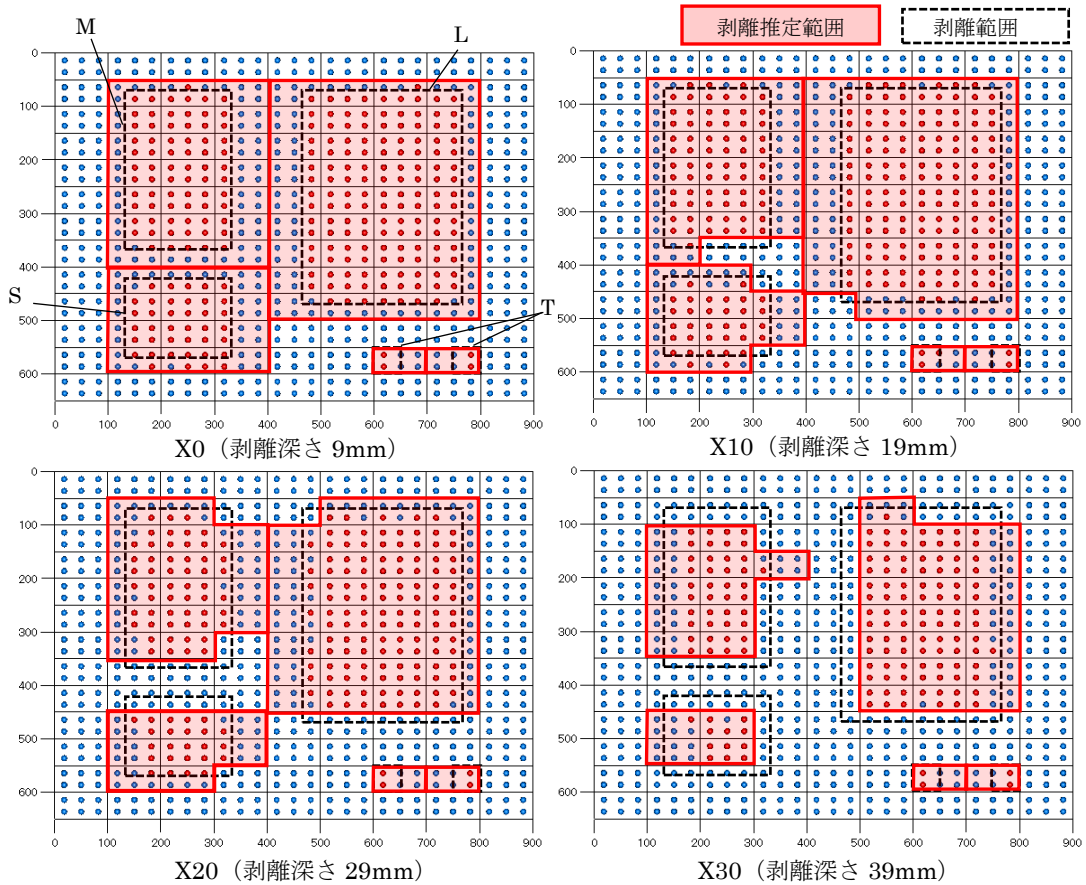


図 5.1 タイル割付法による推定剥離範囲区画結果 (タイプ I)

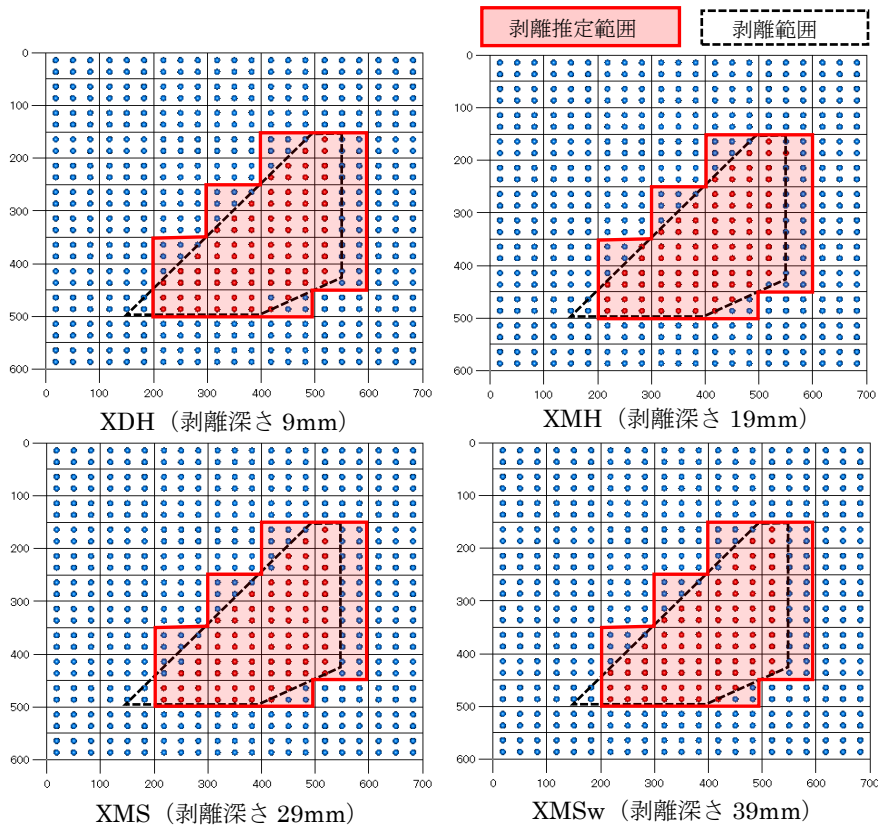


図 5.2 タイル割付法による推定剥離範囲区画結果 (タイプ II)

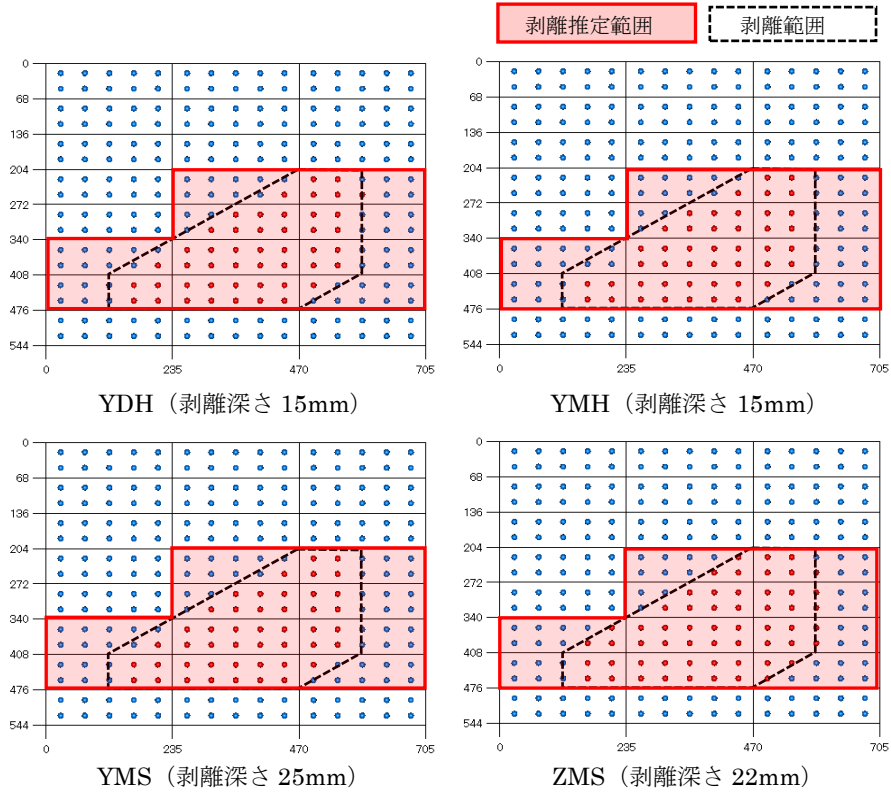


図 5.3 タイル割付法による推定剥離範囲区画結果 (タイプⅢ)

5.2.2 三角形分割法による推定剥離範囲の区画

離れた点群を領域に分割する手法の一つとして、ドロネー三角形分割法 (Delaunay triangulation) がある。この手法を利用した推定剥離範囲の区画法を検討した。本手法を「三角形分割法」と称し、以下に手順を示す。

- 手順(1) : 全打撃点を図面上にプロットし、そのうち R_{AF-max} がしきい値以上となり剥離判定された点を「剥離判定点」とする。
- 手順(2) : ドロネー三角形分割法により全打撃点を三角形の辺によって連結し、打撃点を頂点とした三角形の集合体として検査面を分割する。
- 手順(3) : 「剥離判定点」に接する三角形を「推定剥離判定三角形」とする。
- 手順(4) : 隣り合う「推定剥離判定三角形」を連結した範囲を「推定剥離範囲」とし、連結された範囲の外周を「推定剥離境界」とする。

本手法によって推定剥離範囲を区画した結果を、図 5.4～図 5.6 に示す。しきい値以上で剥離判定された剥離判定点を赤点、しきい値未満の健全判定点を青点で示した。

本手法による推定剥離範囲の区画は、剥離判定された打撃点から隣接する剥離判定されなかった打撃点に及ぶことになるため、比較的浅い模擬剥離においては、設定した模擬剥離境界の外部側に沿った推定剥離境界を得ることができ、安全側の推定でありつつも、大きく範囲を広げすぎずに区画できた。

ただし、最も剥離深さの深い X30 では、境界近傍での剥離判定が困難なため、模擬剥離境界の内部側に沿った推定剥離境界となっており、剥離深さに応じて推定剥離範囲を割り増す必要があるが、その手順は 5.4.2 にて述べることとする。

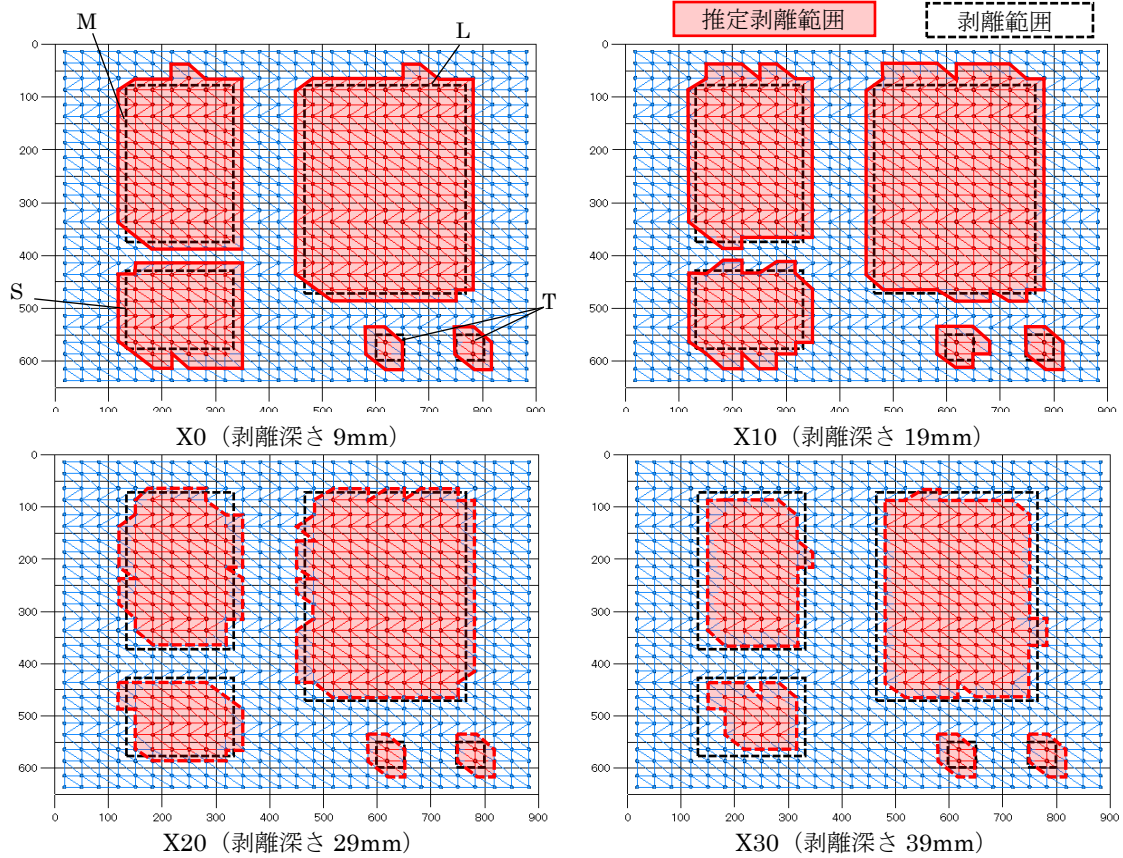


図 5.4 三角形分割法による剥離推定範囲区画結果 (タイプ I)

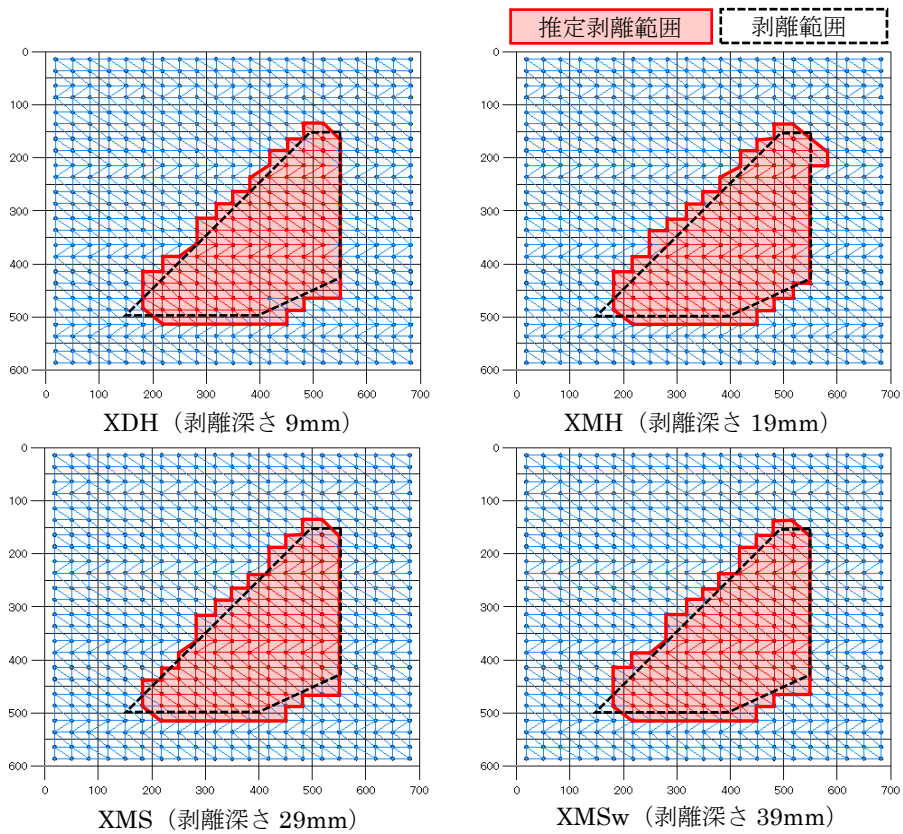


図 5.5 三角形分割法による剥離範囲区画結果 (タイプ II)

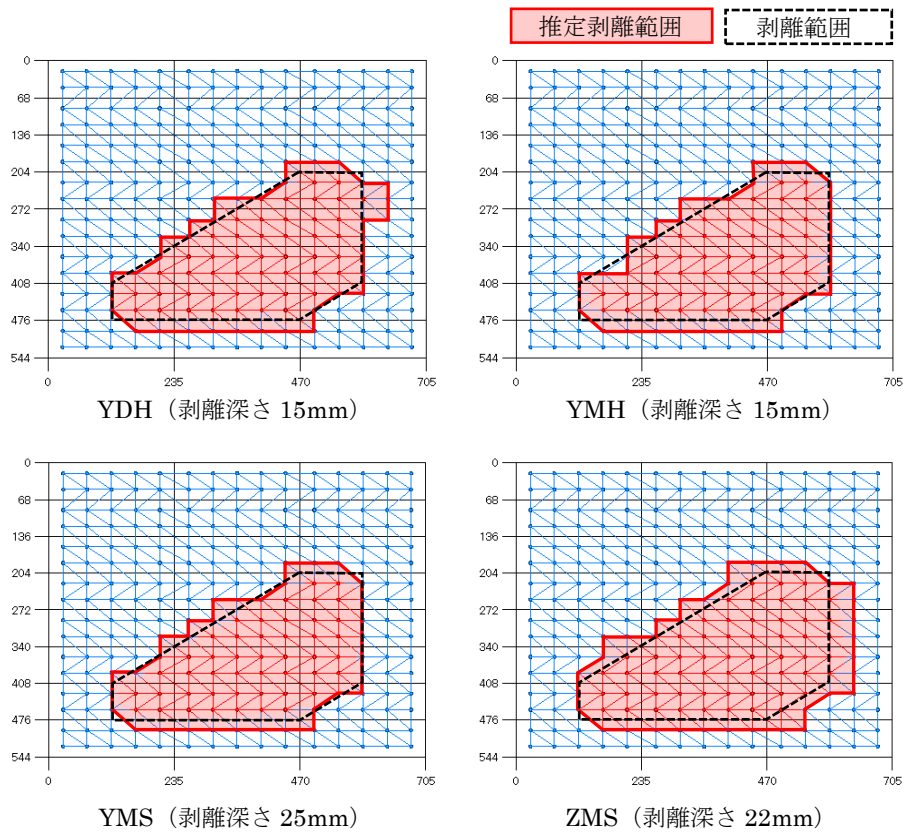


図 5.6 三角形分割法による剥離範囲区画結果 (タイプⅢ)

5.2.3 ワイヤフレーム等高線法による推定剥離範囲の区画

三角形分割法では、検査面上にある打撃点を平面的に連結して検査面の分割を行ったが、検査面の座標情報に加えて各打撃点の R_{AF-max} の値も検査面と垂直方向に表示することで診断結果を立体的なワイヤフレームを形成し、等高線を表示する手法を試みた。この手法を利用した推定剥離範囲の区画する手法を「ワイヤフレーム等高線法」と称し、推定剥離範囲の区画手順を検討した。

まず、ワイヤフレームの構築手順を以下に手順を示す。

手順(3-1)：検査対象壁面の打撃点の水平位置を x 軸に、鉛直位置を y 軸に、 R_{AF-max} の値を xy 平面と垂直な z 軸にプロットする。

手順(3-2)：ドロネー三角形分割法により全打撃点を三角形の辺によって連結し、 xyz 空間内に三角形の集合体であるワイヤフレーム立体を構築する。

手順(3-3)：指定した R_{AF-max} の値によりワイヤフレーム立体を切断した際の切断線を等高線として表示する。

ここで、各試験体の全打撃点の R_{AF-max} の値をもとにワイヤフレーム立体を構築し、等高線を表示した斜視図を図 5.7～図 5.9 に、平面図および立面図を図 5.10～図 5.12 に示す。等高線は R_{AF-max} の値 0.1 間隔で表示した。

4 章では R_{AF-max} の値を円の大ききで示したが、本章で示したこれらの図では空間上に連続した三角形の辺および等高線により剥離範囲を浮きあがらせるように表現できるため、剥離の有無および剥離深さの程度の違いを視覚的に把握しやすくなるものとする。

ワイヤフレームの立面図からわかることとして、剥離範囲が非常に狭い剥離範囲 T を除き、剥離境界近傍の立体の勾配は、剥離深さが浅いものほど急で、剥離深さが深いものほど緩やかである。また、健全部分では、多少のばらつき幅の中で R_{AF-max} が分布しており、この健全部分の R_{AF-max} 平均値による面をワイヤフレーム立体の底面と見なすことができるものとした。

このような知見をもとに、推定剥離範囲の区画手順を、前述のワイヤフレームの構築手順に加えて、次のとおり考案した。

手順(3-4)： R_{AF-max} のしきい値によって切断された切断線の xy 平面への投影線を「一次推定剥離境界線」とする。また、一次推定剥離境界線に囲まれた範囲を「一次推定剥離範囲」とする。

手順(3-5)：健全判定された打撃点の R_{AF-max} の平均値をもとに、ワイヤフレーム立体

の底面を構成する。

手順(3-6)：一次推定剥離境界近傍のワイヤフレーム立体の傾斜面の傾きをもとに、傾斜面と底面との接線を推定する。

手順(3-7)：得られた底面上の接線の xy 平面への投影線を「二次推定剥離境界線」とし、二次推定剥離境界線で囲まれた範囲を「二次推定剥離範囲」とする。

なお、本研究では、手順(3-5)における健全判定された打撃点の R_{AF-max} の平均値をもとに設定される底面の値を、4章における集計結果をもとに、一律で「0.6」と設定した。また、手順(3-6)における傾斜面と底面との接線を推定する手順を次のとおり設定した。ここでは二次推定剥離境界線を得るための考え方およびその一例を次のとおり示す。また、手順(3-6-1)および手順(3-6-2)におけるイメージを図 5.13 に示す。

【本研究における手順(3-6)の例】

手順(3-6-1)：剥離判定のための R_{AF-max} のしきい値 0.12 よりわずかに小さい 0.10 の等高線を引く。

手順(3-6-2)： $R_{AF-max}=0.12$ の等高線（一次推定剥離境界線）上の接点から $R_{AF-max}=0.10$ の等高線への接点から得られる稜線の傾きをもとに、稜線と底面との接点を推定する。

手順(3-6-3)：底面上の接点からなる線分を端点が接するように適宜伸縮させながら連結して輪郭を形成し、その輪郭の xy 平面への投影線を二次推定剥離境界線とする。また、二次推定剥離境界線に囲まれた領域を二次推定剥離範囲とする。

以上の手順により二次推定剥離境界を区画した結果を図 5.14～図 5.16 に示す。

図中の黄色の線のうち外部側の線が一次推定剥離境界を示し、赤い線が二次推定剥離境界を示している。試験体 X0 のように浅い模擬剥離範囲ほど黄色の一次推定剥離境界と赤い二次推定剥離境界とが近接しており、X20 や X30 のように深い模擬剥離範囲ほど一次推定剥離境界と二次模擬剥離境界が離れることがわかる。

最も模擬剥離深さが深い X30 の模擬剥離範囲では、概ね設定した模擬剥離境界線に沿って出入りする推定剥離境界を得られ、その他の試験体においては、作製した模擬剥離境界線の外部側に沿った推定剥離境界を得られることがわかる。このように、後述する推定剥離深さの推定結果を用いることなく推定剥離境界を得ることができるが、これは、剥離境界近傍における R_{AF-max} の変化率、すなわち形成したワイヤフレーム立体のしきい値近辺にお

る傾きが、剥離深さの影響を受けた物理量となるためだと考えられる。

なお、タイル枚数を集計する場合には、タイル割付図と二次推定剥離範囲とを照合し、二次推定剥離範囲が重なるタイルの枚数を集計すると良いと考える。

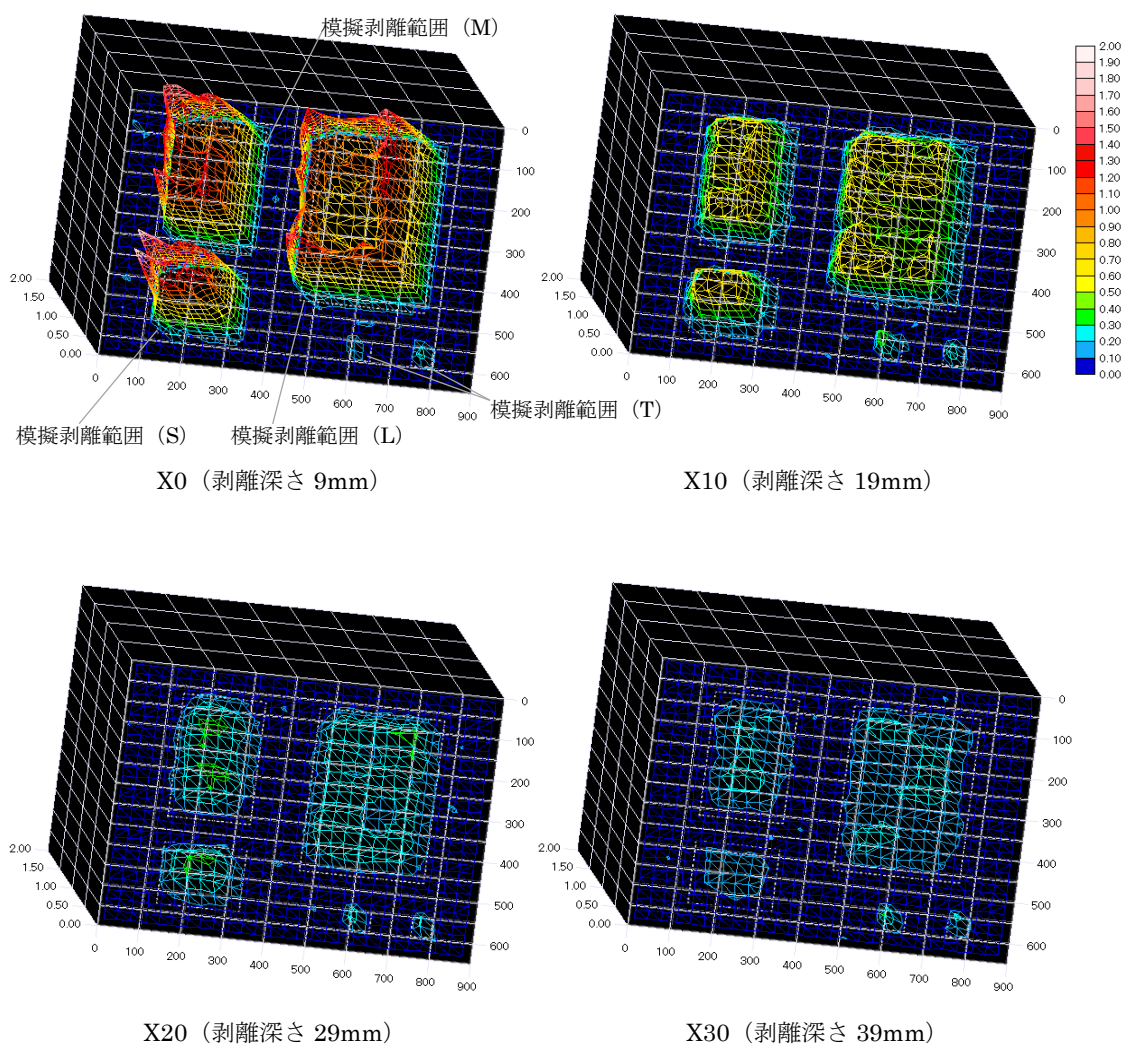


図 5.7 R_{AF-max} 測定値によるワイヤフレーム等高線図 (タイプ I)

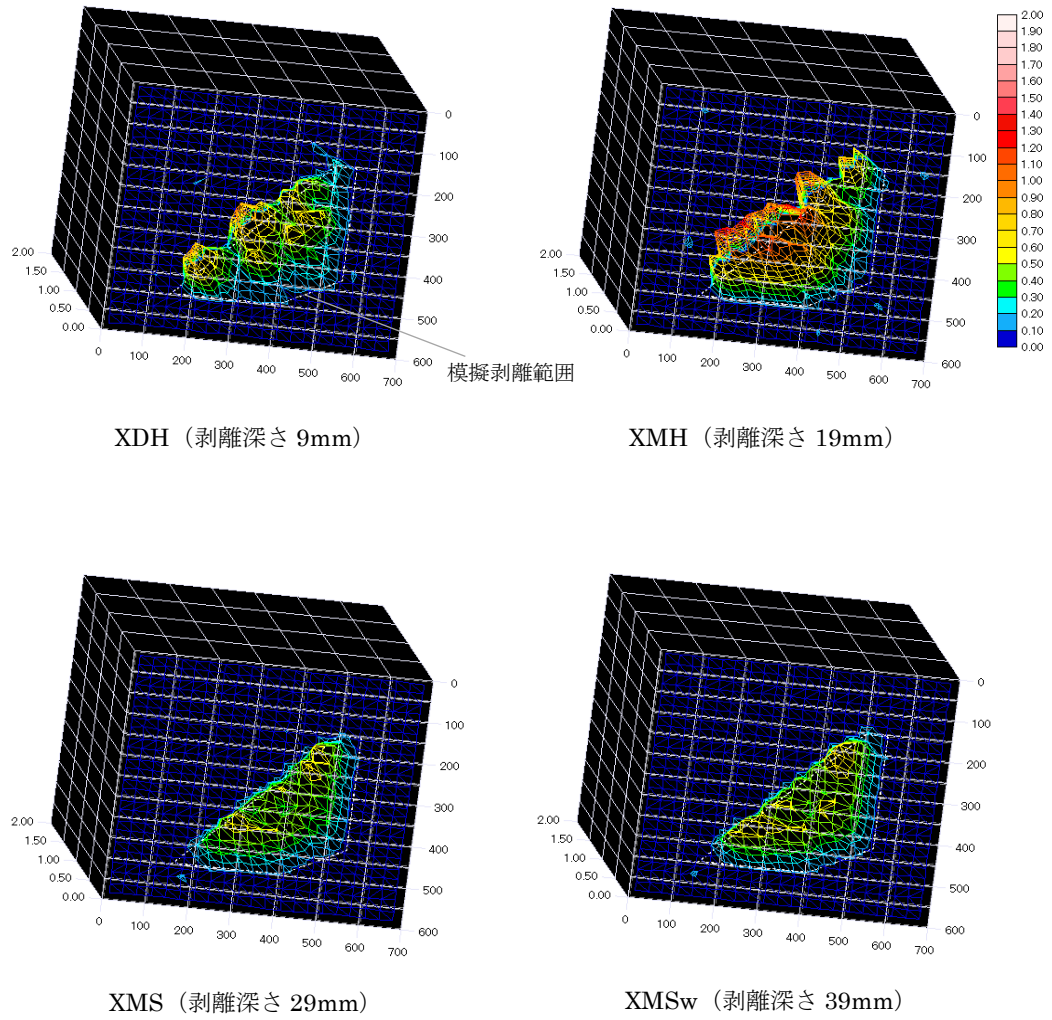


図 5.8 R_{AF-max} 測定値によるワイヤフレーム等高線図 (タイプ II)

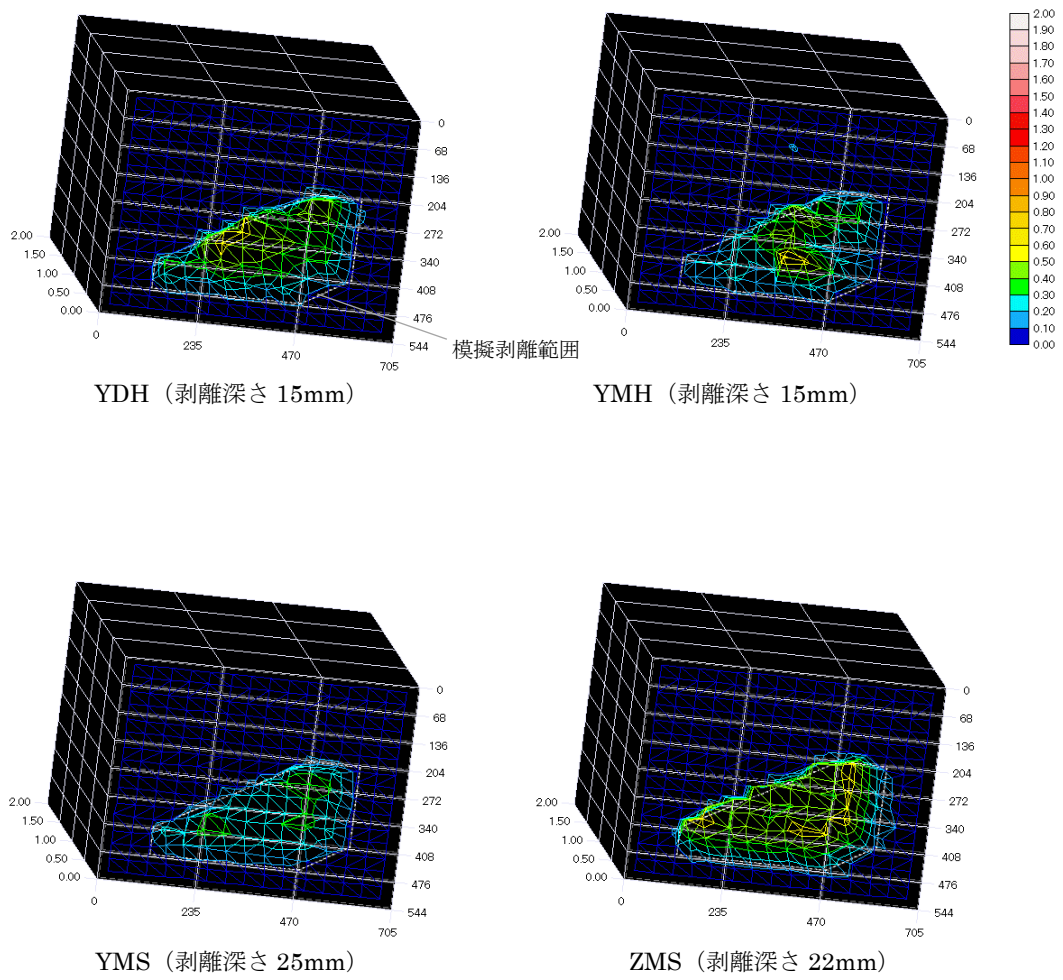


図 5.9 R_{AF-max} 測定値によるワイヤフレーム等高線図 (タイプⅢ)

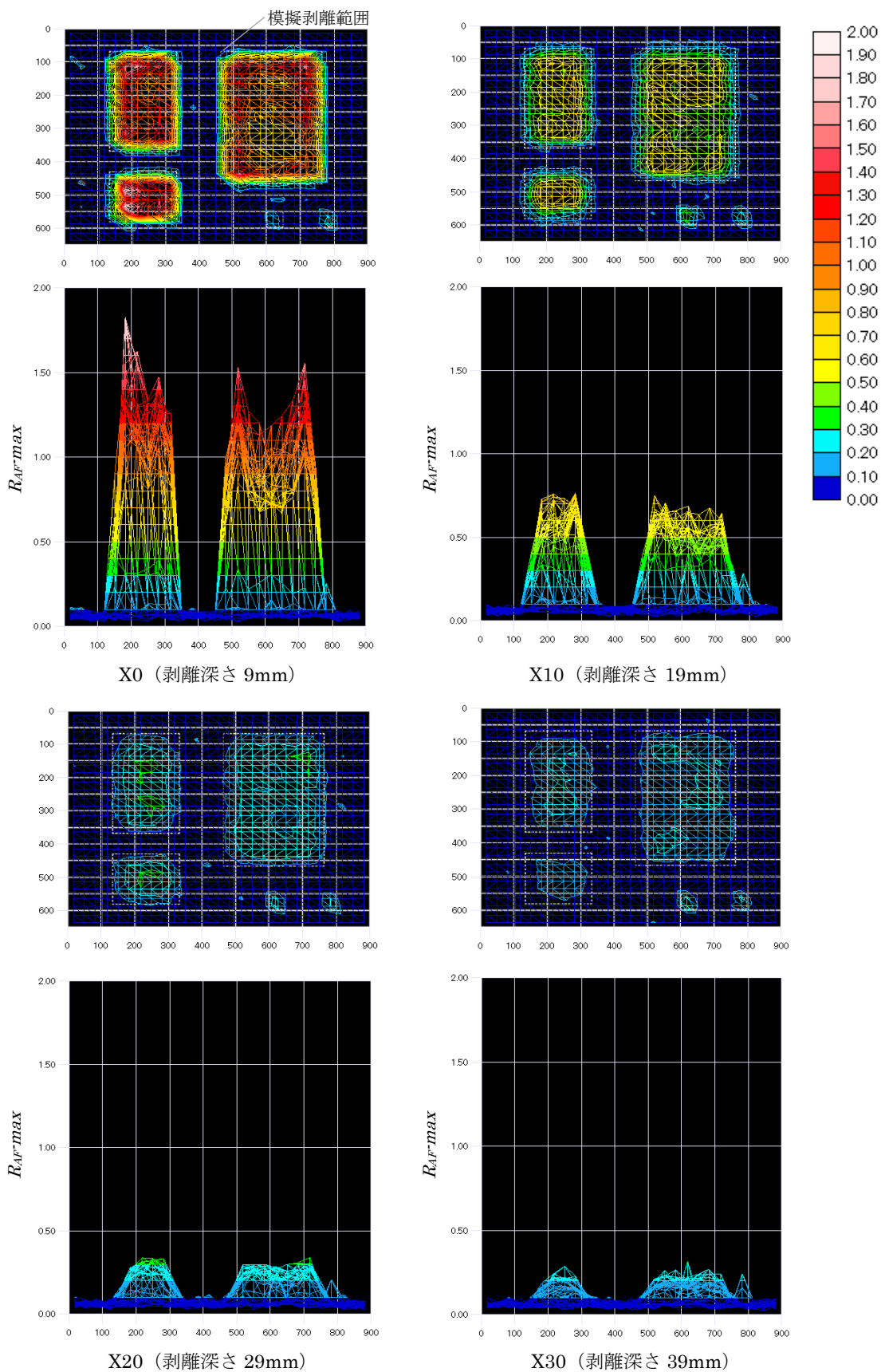


図 5.10 ワイヤフレーム等高線の平面図および立面図 (タイプ I)

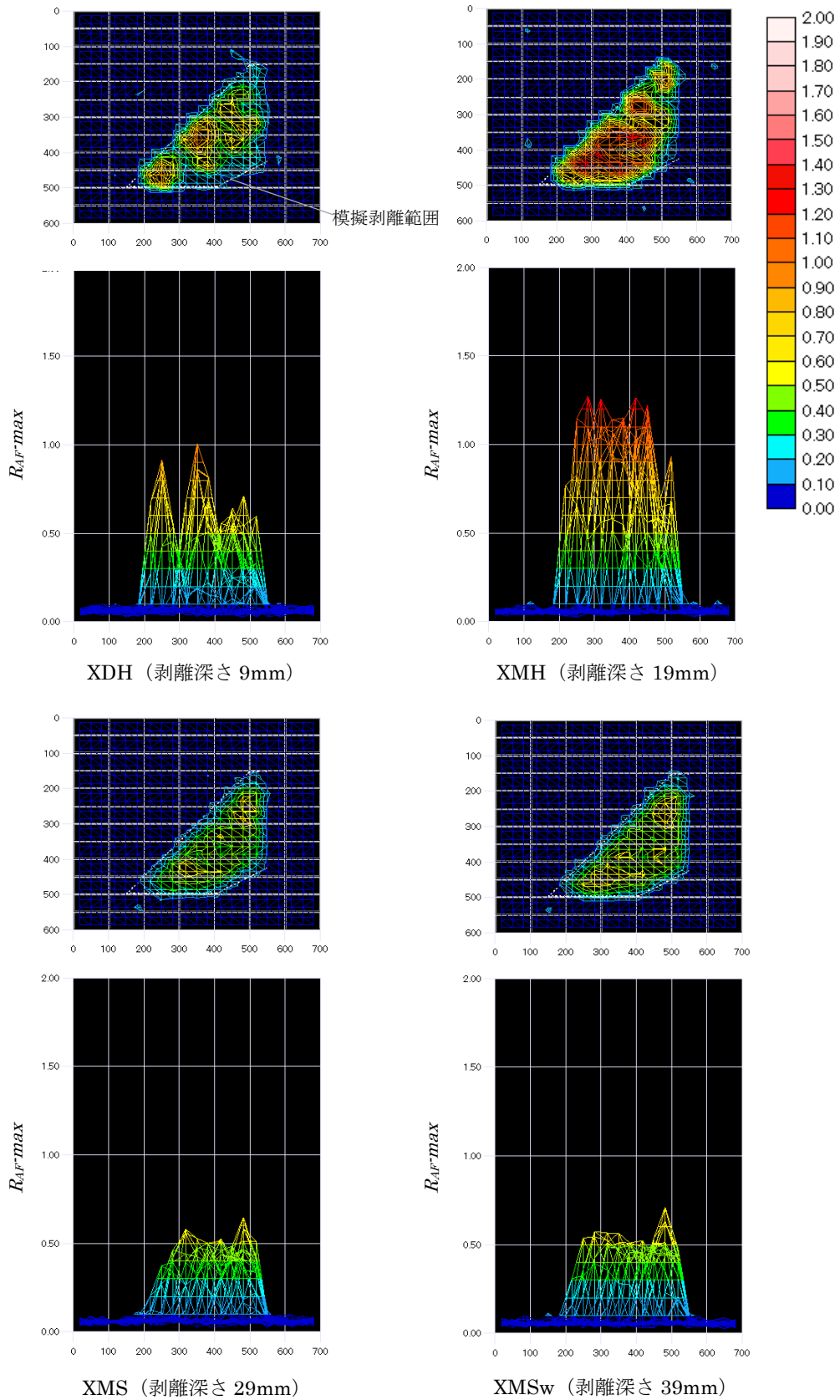


図 5.11 ワイヤフレーム等高線の平面図および立面図 (タイプ II)

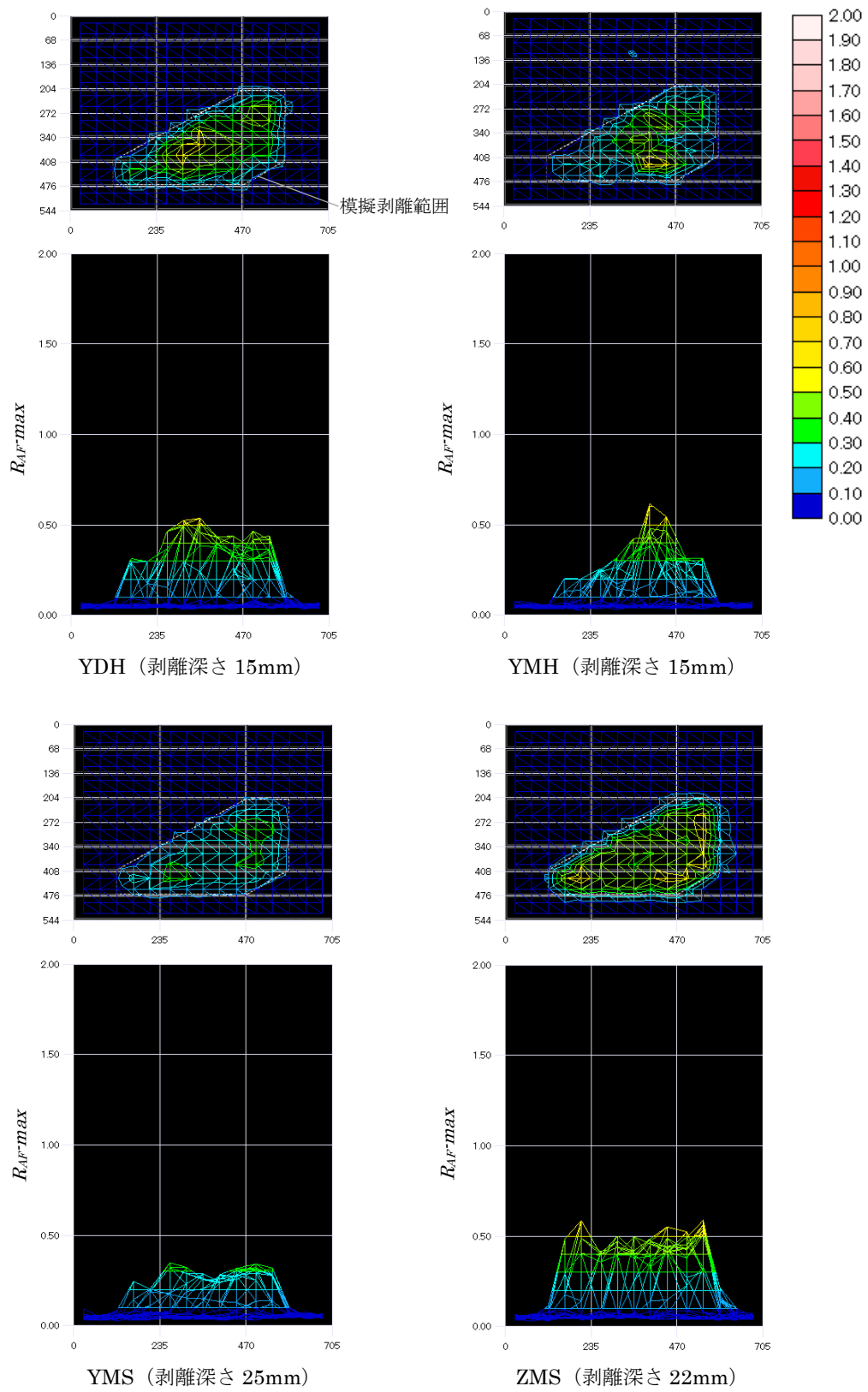


図 5.12 ワイヤフレーム等高線の平面図および立面図 (タイプⅢ)

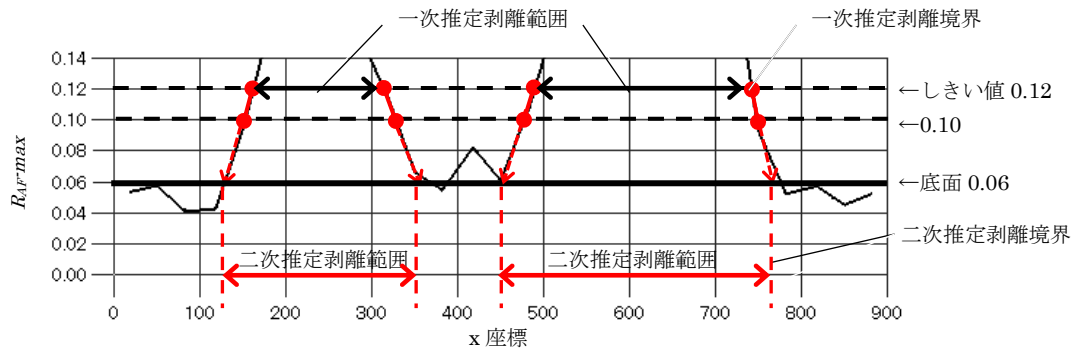


図 5.13 ワイヤフレーム等高線法による推定剥離範囲の区画法イメージ図

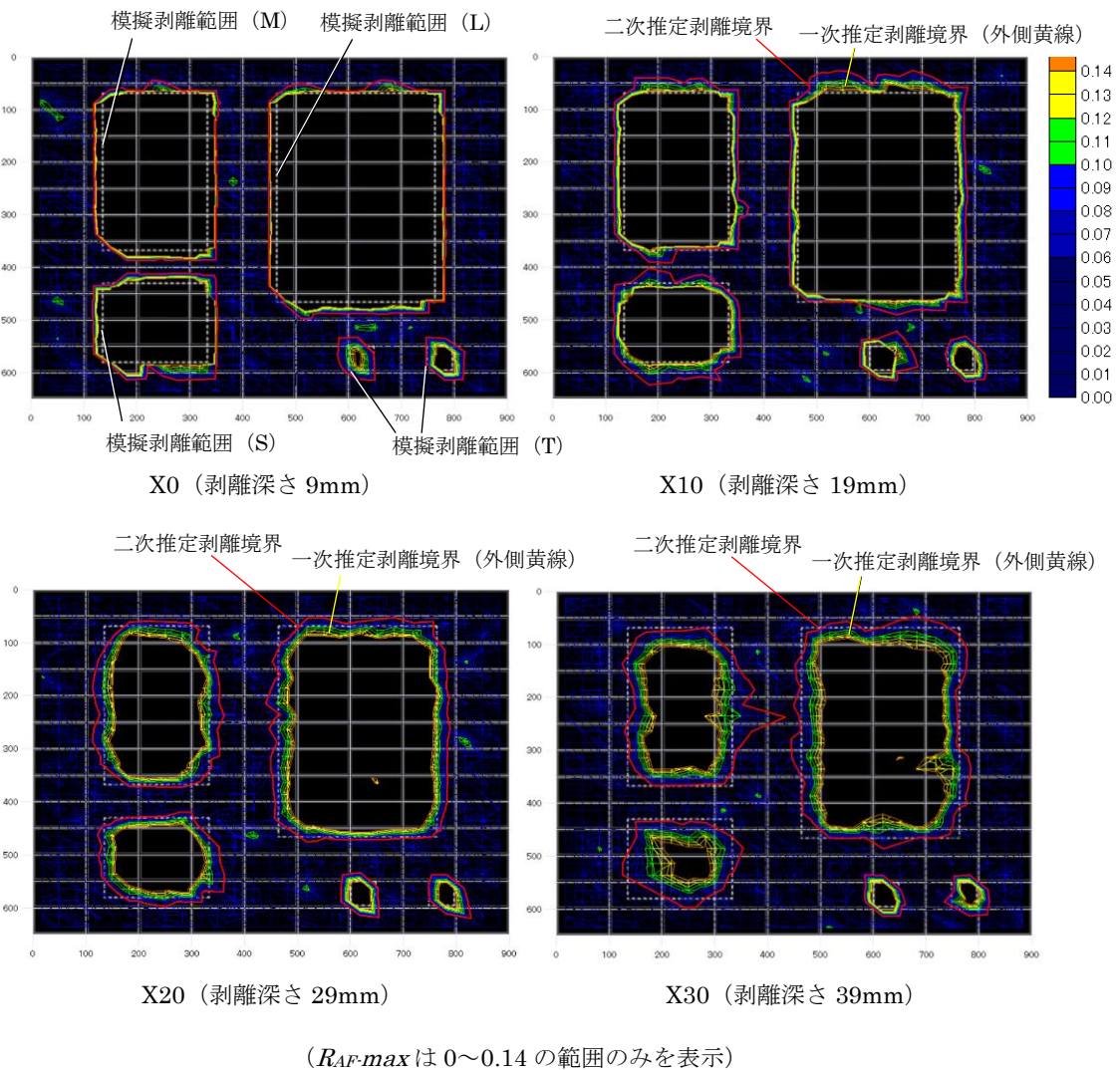


図 5.14 ワイヤフレーム等高線法による推定剥離範囲の区画結果 (タイプ I)

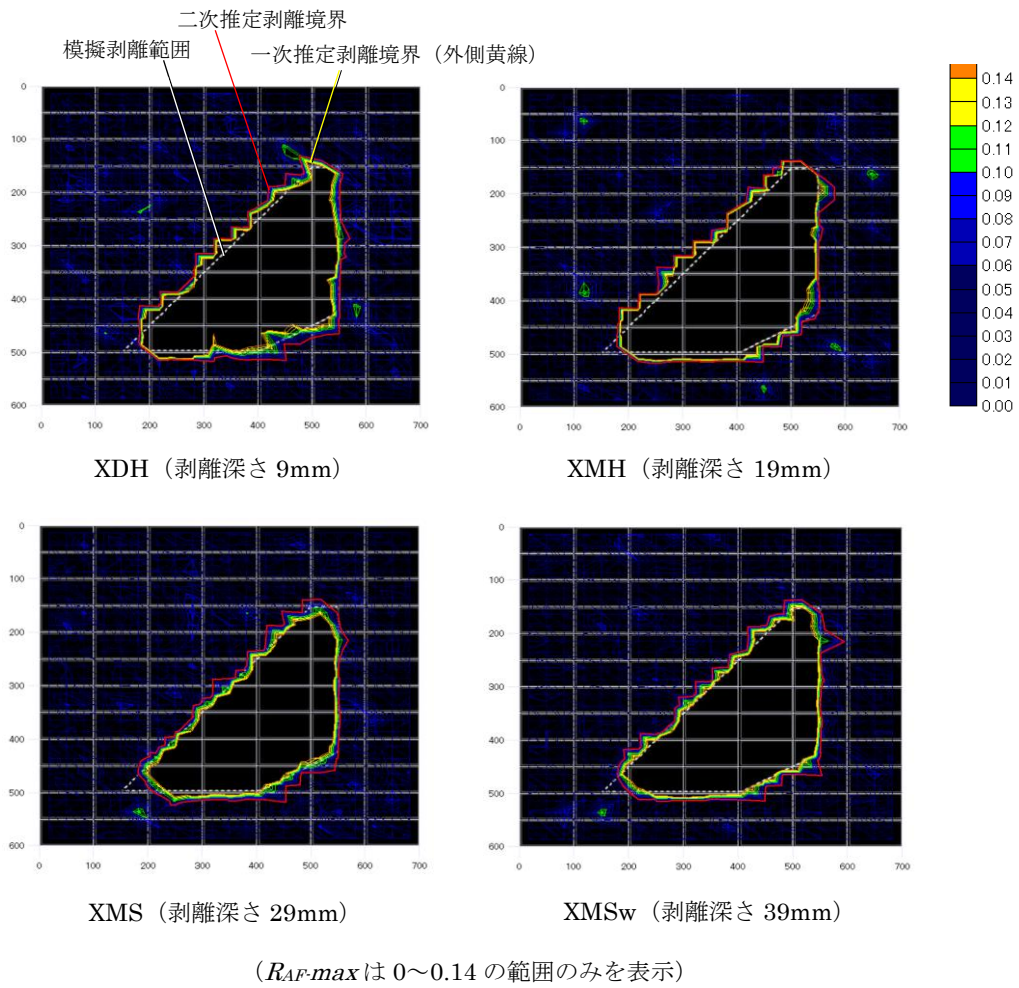


図 5.15 ワイヤフレーム等高線法による推定剥離範囲の区画結果 (タイプ II)

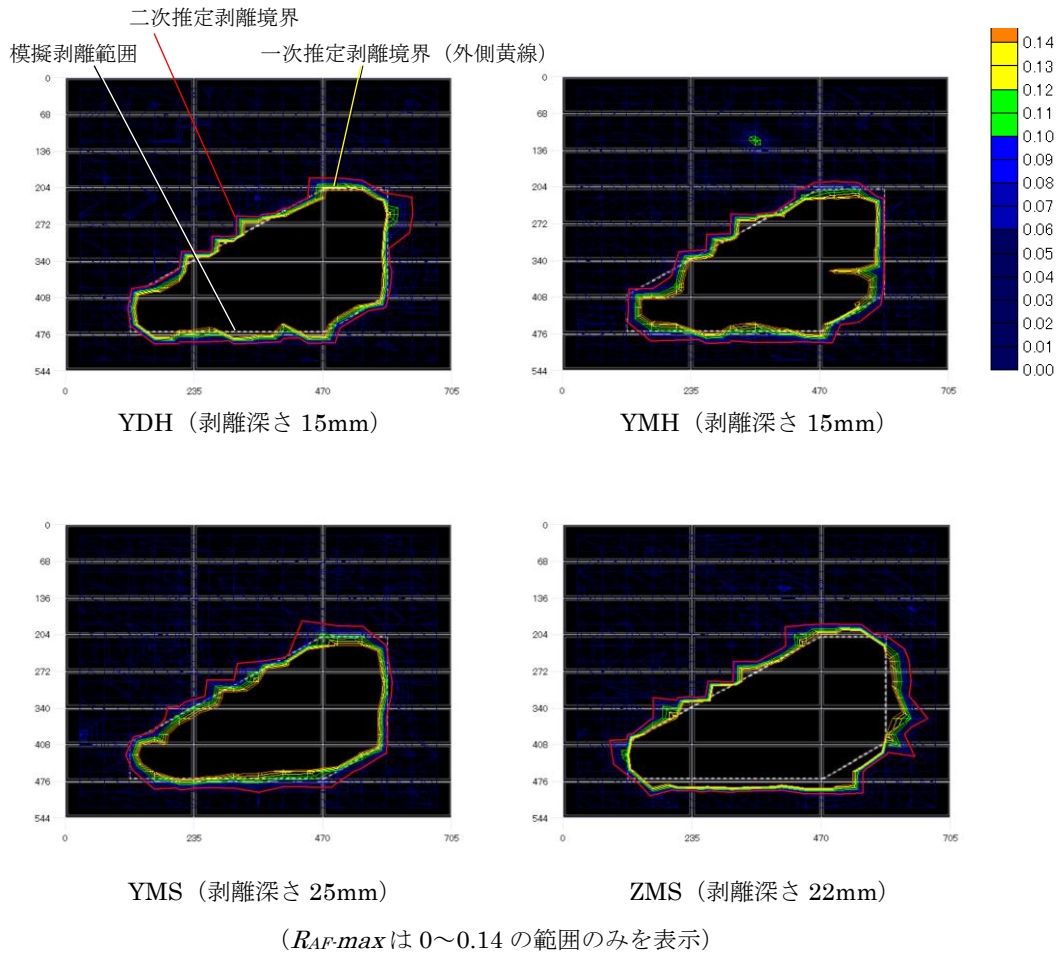


図 5.16 ワイヤフレーム等高線法による推定剥離範囲の区画結果 (タイプⅢ)

5.3 剥離深さの推定方法

5.3.1 R_{AF-max} による剥離深さの推定

2.5.2において、剥離深さが深い試験体ほど相対最大振幅平均値が小さく検出されることを示したが、ここでは、3章において製作したタイル剥離診断装置および考案した剥離判定パラメータを用いた剥離深さ推定方法について検討した結果を述べる。

図 5.7～図 5.12 で示したワイヤフレーム等高線図においても、浅い剥離深さの試験体ほど R_{AF-max} が大きな値で分布している傾向があることが確認されている。しかし、剥離判定された打撃点の中には、剥離境界近傍で小さい値で測定されるものも含まれるため、対象とする剥離範囲の剥離深さの傾向をより鮮明に表すためには、上位で計測された R_{AF-max} の値を用いることが望ましいと考えた。上位で計測される値としては、最大値を用いる方法、上位 n 番目までのデータの平均値をとる方法、上位 $m\%$ のデータの平均値を用いる方法などが考えられるが、本研究においては、 R_{AF-max} の上位 3% のデータの平均値 ($R_{AF-max3}$ と呼ぶ) をとることとした。

剥離深さと、区画された剥離範囲ごとの $R_{AF-max3}$ との関係を図 5.17 に示す。図 5.17 より、剥離面積が非常に小さい剥離範囲 T を除き、今回試験をした剥離範囲 S の面積以上の剥離範囲では、剥離面積の影響をほとんど受けることなく、剥離深さが深くなるほど $R_{AF-max3}$ が小さくなる関係性があることがわかる。

タイル種類による違いを比較すると、若干 Y タイルが小さく測定される傾向があるものの、実務的には、 X タイル、 Y タイル、 Z タイルとも同一の近似曲線によりおよそその剥離深さを推定しておく方が良いものとする。1 次的に図 5.17 の近似曲線をもとに剥離深さの傾向を推定しておき、破壊を伴う試験等、何らかの調査によって部分的に実際の剥離深さと $R_{AF-max3}$ の関係が判明した段階で、2 次的にタイル張付け仕様ごとに剥離深さを補正するなどの措置をすれば良いものとする。打撃点ごとや剥離範囲ごとに客観的な測定データを残しておくことが本研究の成果として重要なものとする。

ここで、剥離範囲 T のようにタイルの一部のみの小さい範囲での剥離は、 $R_{AF-max3}$ が小さく測定されるため、図 5.17 では剥離深さを推定することができない。剥離深さが浅いにもかかわらず $R_{AF-max3}$ が小さく測定される要因として、剥離範囲内のいずれの打撃点も境界に近接しているため打撃による剥離層の振動がしにくいこと、および、打撃位置とマイク位置が 40mm 離れているため、打撃点が剥離範囲内にあってもマイク位置が剥離範囲から外れた位置にあることが考えられる。そこで、図 5.17 の図に剥離面積情報も付加して、 $R_{AF-max3}$ 、剥離深さおよび剥離面積の関係について確認することとした。ただし、剥離面積は同じであっても、アスペクト比によって (例えば細長い場合と正方形の場合など)、打

撃応答音の性状は違ってくるものと思われる。そこで、本研究では、剥離範囲に内接する円の面積を剥離範囲の特徴を表す剥離面積と仮定した。図 5.18 に剥離範囲内接円の例を示すが、実際の剥離範囲内接円の面積を A_{ICR} (Area of inscribed circle of the real debonded range), 推定された剥離範囲の内接円の面積を A_{ICE} (Area of inscribed circle of the estimated debonded range) 呼ぶこととした。

図 5.19 に、 $R_{AF-max3}$, 剥離深さおよび実剥離範囲内接円面積 A_{ICR} の関係を示す。 A_{ICR} が剥離範囲 S の場合以上の範囲では、 A_{ICR} の影響をほとんど受けていないものの、剥離範囲 S 未満の範囲では、 A_{ICR} が小さくなっていった際にある時点で $R_{AF-max3}$ が前述の要因で低下傾向を示すものと思われる。この範囲内の詳細は作製した試験体の範囲では解明しきれないため今後の検討課題とするが、実務的には、推定された剥離範囲の内接円の面積 A_{ICE} が一定以下の面積の場合、もしくは、今回のようにタイルの割付に対して連続せず部分的に剥離判定された場合には、タイル裏面でのタイル陶片浮きとして推定しておく方が良いものとする。小さい面積の剥離では、浅い位置で剥離している場合の方がタイル単体で剥落するリスクがあるため、そのように推定しておく方が安全側の評価になると考えたためである。

上述のように、非常に狭い範囲の剥離については、剥離深さの推定は現時点では困難であるが、施工時の叩き込み不足などによって生じやすい小さくて浅い浮き（今回は $45\text{mm} \times 47.5\text{mm}$ ）も、その部分を打撃さえしていれば漏れなく検出できる能力があることが、現時点での本研究の成果としては重要と考える。

ここで、深い剥離と浅い剥離が混在する複層の剥離も実際には存在する。本論文で提案する剥離深さ推定では、 R_{AF-max} の上位値をもとに推定するため、両者が混在する場合には、浅い剥離として検出されることになると考えられる。仮に、剥離深さが深い剥離範囲に部分的に浅い剥離がある場合には、剥離範囲全体は R_{AF-max} が小さい値で分布しているのに対し、浅い剥離範囲だけ部分的に R_{AF-max} が大きな値で分布することで、その部分は両方の界面の剥離が存在する可能性があるが、その判断手法については今後の検討が必要である。逆に、浅い剥離が広く分布している中に深い剥離が存在している場合には、その深い剥離の存在の判別は困難なものとする。

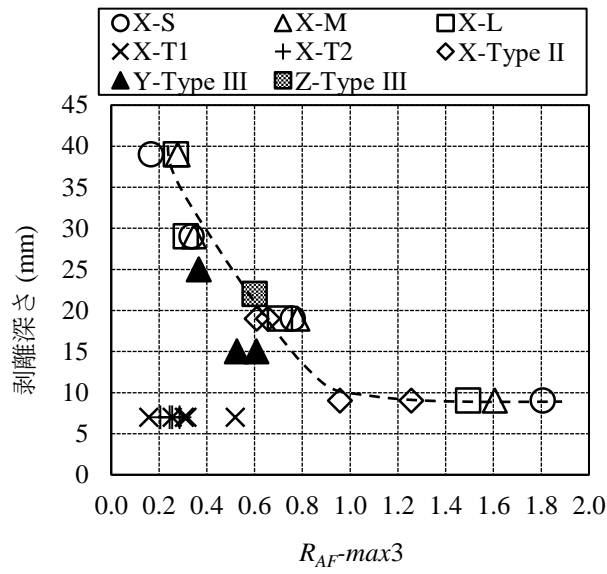


図 5.17 剥離深さと $R_{AF-max3}$ の関係

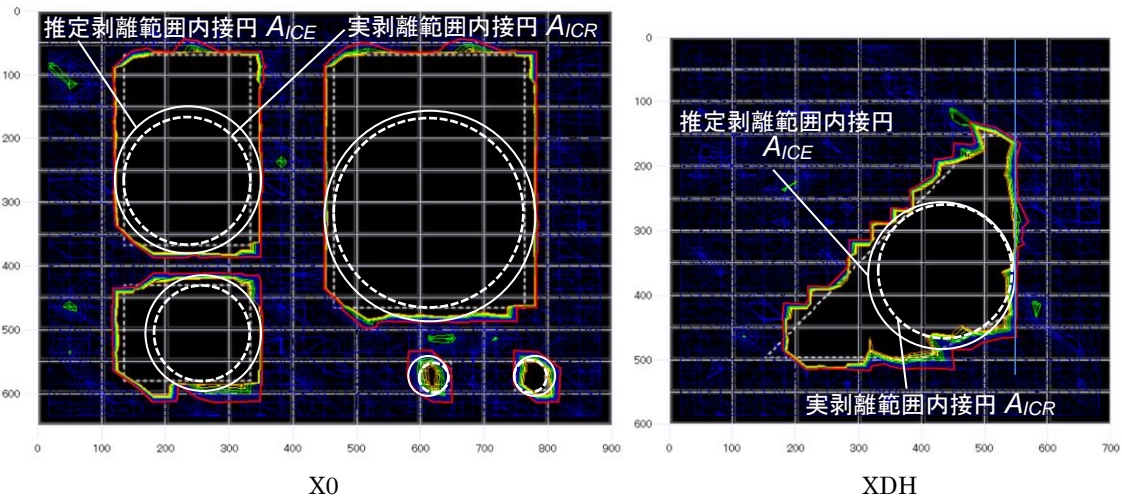


図 5.18 ワイヤフレーム等高線法による推定剥離範囲における内接円の例

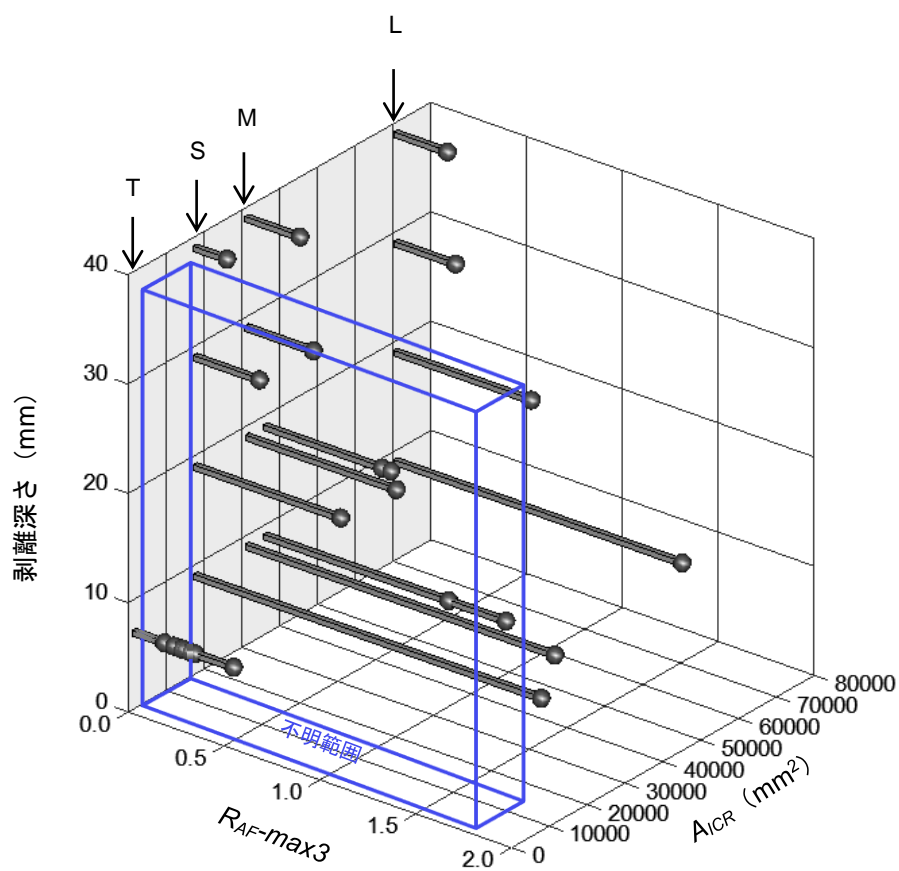


図 5.19 R_{AF-max_top5} , 剥離深さおよび実剥離内接円面積 A_{ICR} の関係

5.3.2 対向するマイク間の R_{AF} の差による剥離深さの推定

4.5において、対向するマイク間の R_{AF} の差を R_{AF-dif} と定義し、 R_{AF-dif} と打撃点の特徴との関係について考察したが、 R_{AF-dif} は剥離境界付近の打撃点において、剥離深さの浅い試験体ほど R_{AF-dif} の絶対値が大きくなることが確認された。

そこで、 R_{AF-dif} の絶対値の上位データと剥離深さとの関係から、剥離深さを推定する手法について検討した。 R_{AF-dif} の絶対値の上位データとして、上位 3% の平均値 ($R_{AF-dif3}$ と呼ぶ) を用いることとした。

剥離深さと $R_{AF-dif3}$ との関係を図 5.20 に示す。図 5.20 より、剥離範囲 T を除き、剥離深さが大きくなるほど $R_{AF-dif3}$ が小さくなることがわかり、 $R_{AF-max3}$ の場合と同様に、図中の近似曲線を用いておおよその剥離深さを推定することができるものとする。

また、剥離範囲 T で見られるような非常に小さい範囲における剥離に対する考え方については、5.3.1 で述べたとおりである。

ここで、 $R_{AF-dif3}$ と $R_{AF-max3}$ の関係を図 5.21 に示す。図 5.21 からわかるとおり、両者には高い相関関係にあり、どちらのパラメータを用いて剥離深さの推定を行っても同様の結果を得られることが改めて確認できる。この 2 つのパラメータのうち、 $R_{AF-max3}$ は、図 4.15～図 4.17 または図 5.7～図 5.12 でも示したように、浅い剥離では剥離境界からある程度内部側に入った位置から中央部にかけての測定値をもとに算出される場合が多いと考えられ、 $R_{AF-dif3}$ については、図 4.21～図 4.23 で示したとおり、剥離範囲境界近傍における測定結果をもとに算出される場合が多いと考えられる。少なくともいずれかの情報が得られれば剥離深さの推定ができるものと考えられる。

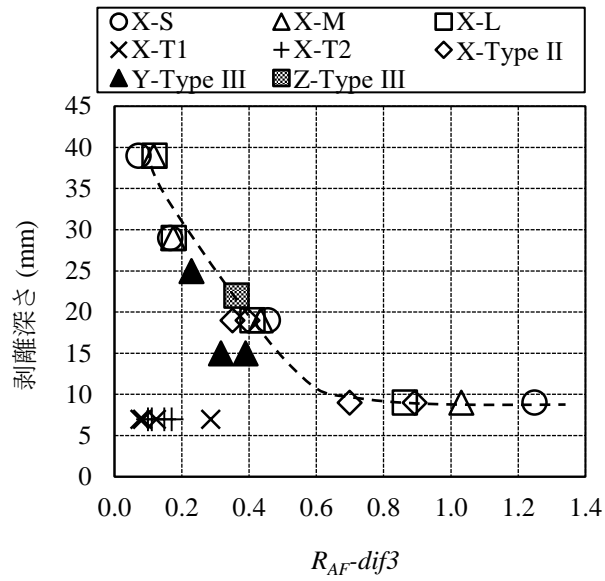


図 5.20 剥離深さと対向マイク $R_{AF-dif3}$ の関係

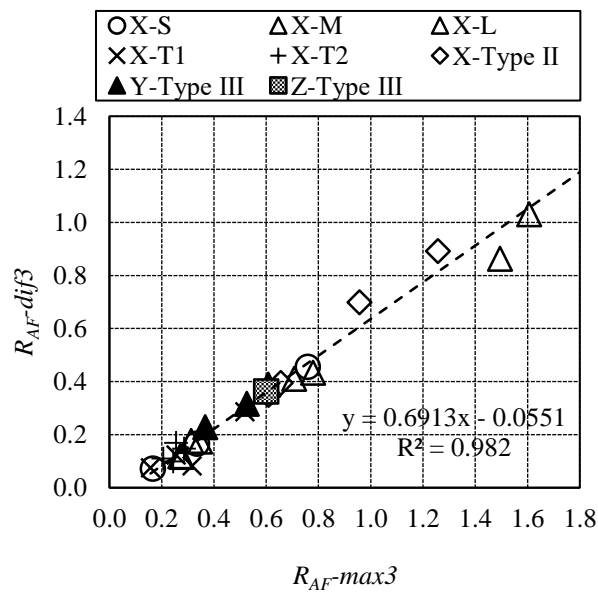


図 5.21 $R_{AF-dif3}$ と $R_{AF-max3}$ の関係

5.4 推定剥離範囲の割り増し方法の提案

5.4.1 タイル割付法における推定剥離範囲の割り増し方法

図 5.1 において、剥離深さの深い X20（剥離深さ 29mm）および X30（剥離深さ 39mm）では、剥離部分があるにもかかわらず、推定剥離範囲内に含まれないタイルが生じることが確認された。そこで、推定剥離深さが深い領域に判定された場合の推定剥離範囲の割り増し方法の一例として、次の手順を提案する。

割り増し手順：推定剥離深さが深く、かつ、剥離判定された打撃点と推定剥離境界線の距離が近い場合に、その推定剥離境界に隣接するタイルも推定剥離範囲に含める。

試験体 X20（剥離深さ 29mm）および X30（剥離深さ 39mm）の剥離範囲 L, M, S を例にして、剥離判定された打撃点と推定剥離境界線の距離が 20mm 以内の場合に推定剥離範囲を割り増すこととした。推定剥離範囲を割り増した結果を図 5.22 に示す。割り増された領域をオレンジ色で示しているが、境界部分において剥離判定されにくい剥離深さの深い試験体においても、本手法により模擬剥離範囲を概ね網羅した推定剥離範囲を得られることがわかる。ただし、今回実施した実験のように、タイル 1 枚当たりの打撃点が比較的多い場合は推定剥離境界から打撃点が近接し得るが、打撃密度が粗い場合には、推定剥離境界に近接する打撃点を得られにくいことが想定されるので、注意が必要である。

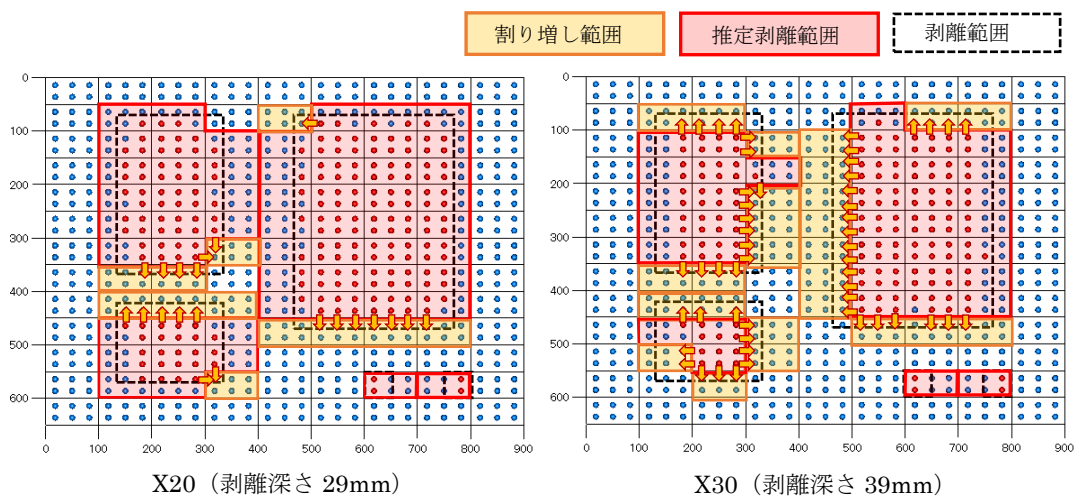


図 5.22 タイル割付法における剥離深さが深い場合の推定剥離範囲割り増し例

5.4.2 三角形分割法による推定剥離範囲の割り増し方法

図 5.4 において、剥離深さの深い X30（剥離深さ 39mm）では、境界近傍での剥離判定が困難なため、模擬剥離境界の内部側に沿った推定剥離境界となっている。この X30 のように剥離深さが深いと推定された場合の推定剥離範囲の割り増し方法の一例として、次の手順を提案する。

割り増し手順：剥離深さが一定以上深く判定された場合には、推定剥離境界に接する三角形もさらに推定剥離範囲として割り増して追加する。

本手法により推定剥離範囲を割り増した結果を図 5.23 に示す。図より、推定剥離範囲の割り増しによって、比較的浅い模擬剥離と同様に、概ね設定した模擬剥離境界の外部側に沿った推定剥離境界を得ることができた。なお、剥離面積に加えて、タイル枚数を集計する場合には、タイル割付図と割り増しも含めた推定剥離範囲とを照合し、推定剥離範囲が重なるタイルの枚数を集計すると良いと考える。

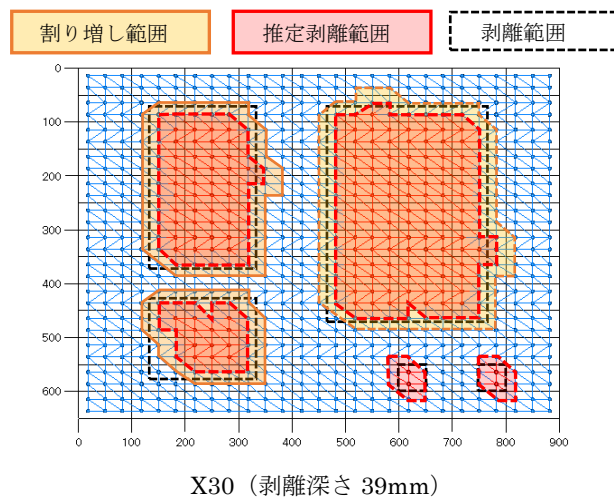


図 5.23 三角形分割法における剥離深さが深い場合の推定剥離範囲割り増し例

5.5 まとめ

本章では、4章で設定したしきい値に基づき剥離判定された打撃点の点群をもとに推定剥離範囲を区画する手法および剥離範囲の推定剥離深さを推定する手法について検討した結果を述べた。本章の結論を以下に示す。

- ① 推定剥離範囲の区画を単純に行う方法として、もともと区画されたタイルの割付をもとに区画する「タイル割付法」を提案した。本手法は、タイル1枚当たりの面積を基準に算定しているため、大型のタイルの場合には推定剥離面積を過剰に推定してしまう場合も考えられるものの、タイルの張替え時の必要枚数の算定などに向いているものと考えられる。ただし、剥離深さが深い場合には、剥離部分があるにもかかわらず、推定剥離範囲内に含まれないタイルが生じることがあるため、剥離深さに応じて推定剥離範囲を割り増す必要がある。
- ② 離れた点群を領域に分割するドロネー三角形分割法をもちいて推定剥離範囲の区画する「三角形分割法」を提案した。本手法による推定剥離範囲の区画は、剥離判定された打撃点から隣接する剥離判定されなかった打撃点に及ぶことになるため、比較的浅い模擬剥離においては、設定した模擬剥離境界の外部側に沿った推定剥離境界を得ることができるが、剥離深さが特に深い場合には、境界近傍での剥離判定が困難なため、推定剥離深さに応じて推定剥離範囲を割り増す必要がある。
- ③ 推定剥離深さの推定結果を用いることなく推定剥離境界を区画する手法として、「ワイヤフレーム等高線法」を提案した。本手法では、最も模擬剥離深さが深い模擬剥離範囲においても、推定剥離深さに応じた割り増し処理をすることなく、概ね作製した模擬剥離境界線に沿って出入りする推定剥離境界を得られ、その他の試験体においては、設定した模擬剥離境界線の外部側に沿った推定剥離境界を得ることができた。
- ④ 剥離面積が非常に小さい場合を除き、 $RAF\text{-}max$ の上位3%のデータの平均値 $RAF\text{-}max3$ をもとに、おおよその剥離深さを推定できる可能性を示した。実務的には、打撃点ごとおよび剥離範囲ごとにデータを残しておくことで、何らかの調査によって部分的に実際の剥離深さと $RAF\text{-}max3$ の関係が判明した段階で、2次的にタイル張付け仕様ごとに剥離深さを補正するなどの措置が可能であることを示した。
- ⑤ タイルの一部のみの小さい範囲での剥離は、 $RAF\text{-}max3$ が小さく測定されるため、剥離深さの予測が困難ではあるが、実務的には、推定された剥離範囲の内接円の面積が一定以下に小さい場合やタイルの割付に対して連続せず部分的に剥離判定された場合には、タイル裏面でのタイル陶片浮きとして推定しておくことを提案した。

- ⑥ 剥離面積が非常に小さい場合を除き，対向するマイク間の R_{AF} の差 R_{AF-dif} の絶対値の上位 3% 平均値 $R_{AF-def3}$ をもとに， $R_{AF-max3}$ の場合と同様に，おおよその剥離深さを推定できる可能性を示した。
- ⑦ 推定剥離範囲の割り増し方法として，タイル割付法および三角形分割法において剥離深さが一定条深いと推定された場合の推定剥離範囲の割り増し方法をそれぞれ例示した。

参考文献

- 5-1) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修，一般財団法人建築保全センター編集：建築改修工事監理指針/上巻 平成 28 年版
- 5-2) 日本建築仕上学会 タイル張り外壁の保全技術体系化委員会編：タイル張り仕上げ外壁の保全技術－調査から改修工事後の保全技術まで－，2013.2
- 5-3) 布施幸則，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，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.813-814，2015.9
- 5-4) 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，pp.151-154，2015.10

第 6 章 結論

本研究は、「打撃応答音を利用した外装タイル剥離診断法」と題し、高精度、高効率でかつ汎用的に利用できるタイル剥離診断装置を開発し、剥離診断法を提示することを目的として検討を行ったものである。

第2章では、タイルの種類、張付け材料、剥離界面、剥離深さの異なる計8体の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結果、以下の結論を得た。

- ・ 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た結果、検査員および既存の装置ともに、健全部を健全と判定する健全部正答率は高い水準であったが、剥離部を剥離と判定する剥離部正答率は、低下することが確認された。検査員による剥離部正答率は、既存装置による剥離部正答率よりも低く、既存装置と比較して剥離部をより狭く判定する傾向があり、客観的で高精度な剥離判定をするうえでは、装置の利用が有効であることを確認した。また、装置を利用する上では明確な判定基準が必要なこと、および、装置の判定精度に改善の余地があることを確認した。
- ・ 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とマイクを有する打撃装置を試作した。基礎的段階として、本装置により収録した打撃応答音波形における相対最大振幅 ALR により、剥離判定が可能であることを確認した。
- ・ 剥離深さの浅い試験体と比較して、剥離深さの深い試験体の方が、相対最大振幅 ALR が小さくなる傾向があることを確認した。

第3章では、実用的で安定した剥離判定が可能なタイル剥離診断装置を開発することを目的として、新たな構想を加えて剥離診断装置を設計・試作し、装置の較正方法、剥離判定パラメータの算出方法および装置の有効性について検討した結果、以下の結論を得た。

- ・ 既往の研究を参考にタイル剥離診断装置の基本構想を立て、剥離診断装置を設計・試作した。最大打撃周波数 10Hz での打撃が可能で 10mm のストロークを有するソレノイドアクチュエータを用いた打撃機構とし、打撃力を測定するために圧電素子を取り付けた。また、打撃機構を内蔵する筒状の管体の外部に、打撃点を中心にして4方向に均等にマイクを4個配置した打撃応答音収録機構とした。
- ・ 試作した剥離診断装置を較正するための較正用の標準試験体として、試験体中央裏面に円形の空洞を有するガラス製の標準試験体を考案・作製した。
- ・ 剥離診断装置によって収録される打撃力波形および打撃応答音波形から抽出する基本パラメータとして、最大打撃力 F および第一波最大振幅 A を定義し、標準試験体 Q_{160}

の中央を打撃した際に得られる最大打撃力 F_0 および第一波最大振幅 A_0 をもとに、相対打撃力 $F_r (= F/F_0)$ および相対最大振幅 $A_r (= A/A_0)$ を算出する較正手法を提示した。また、 F_r および A_r から、剥離判定パラメータとして、相対振幅評価値 $R_{AF} (= (A_r)^i / (F_r)^j)$ を提示した。(本報では、 $i=1, j=1/2, R_{AF} = A_r / \sqrt{F_r}$)

- ・ 剥離境界近傍において検出漏れのない剥離判定となることを意図して取り付けられた4つのマイクの有効性を検証するため、作製した較正用標準試験体 Q_{160} を用いた試験を行った。その結果、提案した剥離判定パラメータ R_{AF} の大きさは、打撃点だけではなく、マイク位置の影響も受けることを確認し、打撃位置を中心にして4方向に均等にマイクを配置することが有効であることを確認した。

第4章では、第3章で考案したタイル剥離診断装置および剥離判定パラメータを用いて、種々の条件を変化させて作製した模擬剥離試験体を測定し、装置および剥離判定パラメータの有効性について考察し、以下の結論を得た。

- ・ タイル種類、張付け材、剥離深さ、剥離面積を変化させた12種類の模擬剥離試験体を用意し、試作したタイル剥離診断装置を用いてすべての試験体の全面を打診し、既報で設定した剥離判定パラメータである相対振幅評価値 R_{AF} をマイクごとに算出した。
- ・ 健全範囲 (a)、剥離範囲中央 (b)、剥離範囲境界近傍 (c) の3つの特徴点におけるマイクごとの R_{AF} の測定結果から、剥離範囲中央では4つのマイクの R_{AF} が健全範囲の R_{AF} と比較して十分大きく、かつ4つのマイクの R_{AF} の値はほぼ等しいこと、剥離範囲境界近傍では剥離範囲内部側に位置するマイクで検出される R_{AF} が他のマイクよりも大きい値で検出されることにより剥離判定に有利であること、健全範囲を打撃した場合には、いずれのマイク位置の R_{AF} とも小さいことを確認した。
- ・ 4つのマイクの R_{AF} の最大値を R_{AF-max} と定義し、 R_{AF-max} によって試験体の傾向の違いを考察した。また、 R_{AF-max} のしきい値を設定し、剥離判定結果を試験体図中に表示した結果、剥離深さの浅い試験体では剥離境界近傍までの剥離判定が可能であること、剥離深さの深い試験体では剥離境界近傍において剥離判定がしにくくなるものの、剥離の存在を比較的明確に把握できること、非常に剥離面積の小さいタイル裏面での剥離も剥離判定できることを確認した。
- ・ 本研究において試作した剥離診断装置および設定した剥離判定パラメータは、製作した模擬剥離試験体の範囲では、剥離深さ 39mm まで剥離の存在を判定することが可能であることを確認した。
- ・ 対向するマイク間の R_{AF} の差を R_{AF-dif} と定義し、 R_{AF-dif} の測定結果をもとに打撃点における特徴の把握の可能性について考察した結果、浅い剥離範囲の剥離境界付近では

R_{AF-dif} が大きい値で測定され、中央付近になると R_{AF-dif} が小さくなっていくこと、境界付近における R_{AF-dif} の大きさは、剥離深さが深くなるにつれて小さくなる傾向があることを確認した。また、打撃点ごとの R_{AF-max} および R_{AF-dif} の測定結果をもとに、打撃点の特徴を予測できる可能性を確認した。

- ・ 打撃におけるソレノイドアクチュエータの駆動電圧を変えても剥離検出の傾向に大きな差異が無いことを確認した。

第5章では、第4章で設定したしきい値に基づき剥離判定された打撃点の点群をもとに推定剥離範囲を区画する手法および剥離範囲の推定剥離深さを推定する手法について検討し、以下の結論を得た。

- ・ 推定剥離範囲の区画を単純に行う方法として、タイルの割付をもとに区画する「タイル割付法」を提案した。本手法は、タイル1枚当たりの面積を基準にしているため、タイルの張替え時の必要枚数の算定などに向いているものと考えられる。ただし、剥離深さが深い場合には、剥離部分があるにもかかわらず、推定剥離範囲内に含まれないタイルが生じることがあるため、剥離深さに応じて推定剥離範囲を割り増す必要がある。
- ・ 離れた点群を領域に分割するドロネー三角形分割法をもちいて推定剥離範囲の区画する「三角形分割法」を提案した。本手法による推定剥離範囲の区画は、剥離判定された打撃点から隣接する剥離判定されなかった打撃点に及ぶことになるため、比較的浅い模擬剥離においては、設定した模擬剥離境界の外部側に沿った推定剥離境界を得ることができるが、剥離深さが特に深い場合には、境界近傍での剥離判定が困難なため、推定剥離深さに応じて推定剥離範囲を割り増す必要がある。
- ・ 推定剥離深さの推定結果を用いることなく推定剥離境界を区画する手法として、「ワイヤフレーム等高線法」を提案した。本手法では、最も模擬剥離深さが深い模擬剥離範囲においても、推定剥離深さに応じた割り増し処理をすることなく、概ね作製した模擬剥離境界線に沿って出入りする推定剥離境界を得られ、その他の試験体においては、設定した模擬剥離境界線の外部側に沿った推定剥離境界を得ることができた。
- ・ 剥離面積が非常に小さい場合を除き、 R_{AF-max} の上位3%のデータの平均値 $R_{AF-max3}$ をもとに、おおよその剥離深さを推定できる可能性を示した。タイルの一部のみの小さい範囲での剥離は、 $R_{AF-max3}$ が小さく測定されるため、剥離深さの予測が困難ではあるが、実務的には、推定された剥離範囲の内接円の面積が一定以下に小さい場合やタイルの割付に対して連続せず部分的に剥離判定された場合には、タイル裏面でのタイル陶片浮きとして推定しておくことを提案した。
- ・ 剥離面積が非常に小さい場合を除き、対向するマイク間の R_{AF} の差 R_{AF-dif} の絶対値の

上位 3% 平均値 $R_{AF-def3}$ をもとに、 $R_{AF-max3}$ と同様に、おおよその剥離深さを推定できる可能性を示した。

- ・ 推定剥離範囲の割り増し方法として、タイル割付法および三角形分割法において剥離深さが一定条深いと推定された場合の推定剥離範囲の割り増し方法をそれぞれ例示した。

以上のとおり、実用性や精度を考慮した新たな剥離診断装置を試作し、打撃応答音を利用したタイル剥離診断法を提案した。模擬剥離試験体を対象とした検証ではあるものの、本研究の成果である剥離診断法を用いることで、客観的で高精度の剥離診断が可能なものと考ええる。

今後は、本研究の成果を用いて様々な仕様の実際の外壁面における実測を行っていき、実際のタイル外壁の剥離部および健全部と診断結果との関係性を検証していく予定である。あわせて、未解明な事象についても継続的に検討していき、本研究成果をさらに発展させ、タイル外壁の適切な維持管理に貢献していきたい。

本研究に関連して発表した論文

本研究に関連して発表した論文

【審査論文】

- 1) 添田智美, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 729 号, pp. 1779-1787, 2016. 11 (第 2 章)
- 2) 添田智美, 三上貴正: 打撃応答音第一波振幅値を利用したタイル剥離診断装置の設計・試作および装置の有効性に関する基礎的検討外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻, 第 752 号, pp. 1401-1410, 2018. 10 (第 3 章)
- 3) 添田智美, 伊藤秀太郎, 藤沼智洋, 三上貴正: 模擬剥離試験体を用いたタイル剥離診断装置の有効性の検証, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中) (第 4 章)

【国際会議】

- 1) Takamasa Mikami, Takayuki Hamada, Tomomi Soeta, Tomohiro Fujinuma: A DIAGNOSTIC METHOD FOR EXTERIOR TILE DEBONDING, Structural Faults & Repair-2016 Conference, 16th International Conference, 2016.5
- 2) Tomomi Soeta, Takamasa Mikami : A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR EXTERIOR TILE DEBONDING - EFFECTS OF IMPACT AND PICKUP POSITIONS ON IMPACT SOUND ANALYSIS FOR DEBONDING DIAGNOSIS -, Sixth Japan-US NDT Symposium, 2018.7
- 3) Takamasa Mikami, Tomomi Soeta: A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR EXTERIOR TILE DEBONDING - DIAGNOSTIC POSITION RECOGNITION SYSTEM USING EXTERNAL TRIGGER CAMERA AND AR MARKERS -, The Sixth Japan-US NDT Symposium, 2018.7

【口頭発表】

- 1) 藤沼智洋, 添田智美, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その 1 検査員および既存診断装置の剥離診断精度の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1105-1106, 2017. 8
- 2) 添田智美, 藤沼智洋, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その 2 打撃応答音による剥離判定方法についての検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1107-1108, 2017. 8

概集, 材料施工, pp. 1107-1108, 2017. 8

- 3) 添田智美, 藤沼智洋, 伊藤秀太郎, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その3 剥離診断における打撃位置と打撃応答音収録位置の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1173-1174, 2018. 9
- 4) 伊藤秀太郎, 添田智美, 藤沼智洋, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その4 特殊シートによる外装タイル模擬剥離の打音特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1175-1176, 2018. 9
- 5) 藤沼智洋, 添田智美, 千葉拓史, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その5 外部トリガカメラと AR マーカーを用いた診断位置認識システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1177-1178, 2018. 9

その他外装タイルに関して発表した論文

【審査論文】

- 1) 添田智美, 富田泰宇, 佐々木仁, 三上貴正: 日間の温度変化が外装タイルの挙動に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第694号, pp.2057-2064, 2013.12

【口頭発表】

- 1) 佐々木仁, 添田智美, 佐藤幸博, 高森直樹, 片寄哲務, 寺岡勝: 超高強度コンクリート柱へのタイル先付け仕上げのひずみ追従性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 277-278, 2005. 7
- 2) 佐々木仁, 添田智美, 中山昌尚, 高山勝行: 外装タイル仕上げにおける剥離防止性能に関する基礎実験: その1 タイル先付け仕上げの単調圧縮載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 689-690, 2007. 7
- 3) 中山昌尚, 佐々木仁, 添田智美, 高山勝行: 外装タイル仕上げにおける剥離防止性能に関する基礎実験 その2 温度ひずみ解析に基づいた繰り返し型ひずみ追従性試験法の提案, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.691-692, 2007.7
- 4) 添田智美, 中山昌尚, 高山勝行, 佐々木仁: 外装タイル仕上げにおける剥離防止性能に関する基礎実験 その3 直張り仕上げの繰り返し型ひずみ追従性試験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.693-694, 2007.7
- 5) 添田智美, 高山勝行, 中山昌尚, 佐々木仁: 外装タイル直張り工法の剥離防止性能に及ぼす目荒らしおよび吸水調整材の影響 その1 単調圧縮載荷によるひずみ追従性試験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.105-106, 2008.7
- 6) 高山勝行, 添田智美, 中山昌尚, 佐々木仁: 外装タイル直張り工法の剥離防止性能に及ぼす目荒らしおよび吸水調整材の影響 その2 引張接着試験に代わる簡易試験方法の模索, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.107-108, 2008.7
- 7) 永井伴英, 寺西浩司, 日々野和樹, 佐々木仁, 添田智美, 石川靖晃: 外装タイルの変形・剥離挙動の FEM 解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.403-404, 2010.7
- 8) 日比野和樹, 寺西浩司, 渡会正典, 佐々木仁, 添田智美, 石川靖晃: 外装タイルの変形・剥離挙動の FEM 解析 その2 タイルのすべり・引張接着特性に関する実験および解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.879-880, 2011.7
- 9) 渡会正典, 寺西浩司, 日比野和樹, 佐々木仁, 添田智美, 石川靖晃: 外装タイルの変形・剥離挙動の FEM 解析 その3 解析対象を得るための実験および予備的な解析, 日本

建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.881-882, 2011.7

- 10) 富田泰宇, 添田智美, 佐々木仁: 屋外暴露試験における外装タイルの挙動に関する研究 その 1 日間の温度変化がタイル挙動に与える影響についての考察, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.885-886, 2011.7
- 11) 田口哲也, 寺西浩司, 日比野和樹, 中村雄一, 佐々木仁, 添田智美: 外装タイルの変形・剥離挙動の FEM 解析 その 4 下地・張付けモルタル界面の接着特性に関する実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1017-1018, 2012.9
- 12) 日比野和樹, 寺西浩司, 中村雄一, 田口哲也, 佐々木仁, 添田智美: 外装タイルの変形・剥離挙動の FEM 解析 その 5 従来工法で張り付けたタイルのひずみ追従性試験, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1019-1020, 2012.9
- 13) 中村雄一, 寺西浩司, 日比野和樹, 田口哲也, 佐々木仁, 添田智美, 石川靖晃: 外装タイルの変形・剥離挙動の FEM 解析, その 6 タイルのひずみ追従性試験を対象とした FEM 解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1021-1022, 2012.9
- 14) 添田智美, 富田泰宇, 佐々木仁, 三上貴正: 屋外暴露試験における外装タイルの挙動に関する研究 その 2 タイル拘束ひずみおよびひずみ拘束度についての検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 915-916, 2014.9

付 録

付 1 特殊シートを用いた模擬剥離試験体と空隙を有する模擬剥離試験体との比較検討

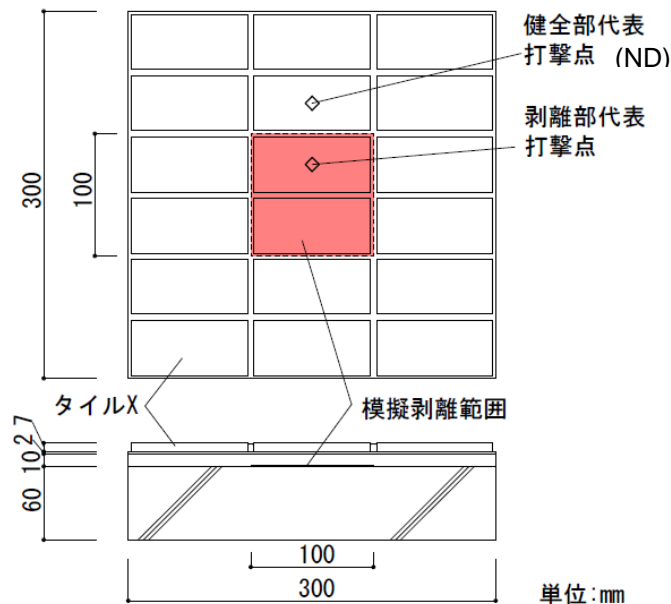
本論文で採用した特殊シートによる模擬剥離と実際の剥離との整合性について検討するため、実際の剥離に近い状態として、剥離界面に空隙を設けた模擬剥離試験体との比較検討を行っている。

付表 1.1 および付図 1.1 に特殊シート試験体および空隙試験体を示す。また、付図 1.2 に試験体作製方法を示す。SH が特殊シートによる試験体で、GAP がスペーサーを用いて空隙を設けた試験体である。GAP 試験体は、下地モルタル塗りの過程でスペーサーを挿入し、モルタル硬化後にスペーサーを引き抜くことで空洞を設けたものである。

付表 1.1 特殊シート試験体および空隙試験体

記号	模擬剥離構成	目標浮き代 (mm)	残厚平均 (剥離深さ) (mm)
SH	特殊シート		18.6
GAP01	空隙	0.1	19.8
GAP03		0.3	17.6
GAP05		0.5	17.2
GAP10		1.0	16.4

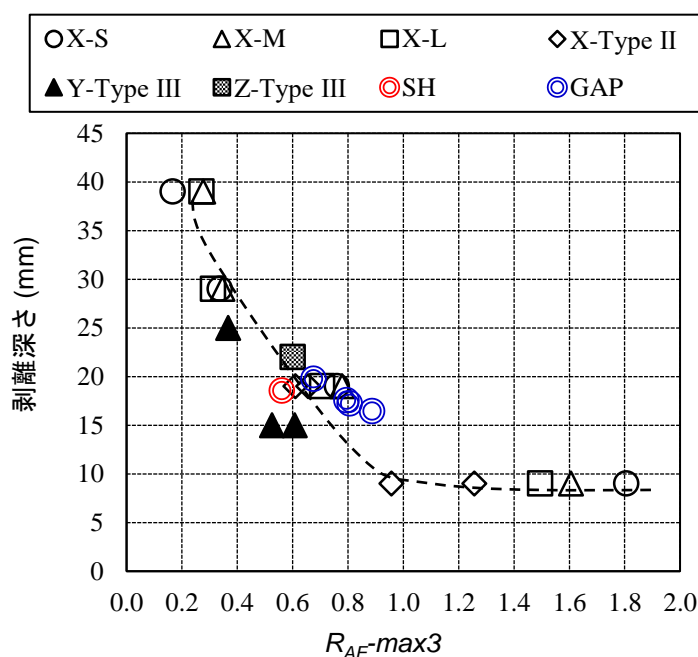
※残厚は検査終了後に試験体切断断面を測定



付図 1.1 模擬剥離試験体形状

残厚（剥離深さ）と $R_{AF\ max3}$ との関係を把握するために、付図 1.1 中の剥離範囲内を均一に 30 か所測定して $R_{AF\ max3}$ を算出し、付図 1.4 のとおり剥離深さ推定の図にプロットした。特殊シートによる試験体 (SH) およびスペーサーを引き抜いて作製した試験体 (GAP) とも、概ね同じ近似曲線上に乗っており、特殊シートを使用した SH は、GAP01 (0.1mm スペーサ) に近いことがわかった。

これらの結果から、特殊シートによる模擬剥離を採用しても、剥離判定の妥当性を論ずる上で、特に問題ないものと考えられる。



付図 1.4 剥離深さと $R_{AF\ max3}$ の関係

参考文献

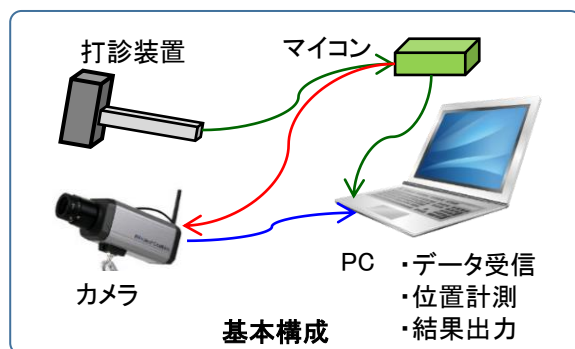
伊藤秀太郎, 添田智美, 藤沼智洋, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その4 特殊シートによる外装タイル模擬剥離の打音特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1175-1176, 2018. 9

付 2 診断位置認識・記録システム

剥離診断業務の効率化のためには、剥離診断位置を認識し、診断結果を記録・出力するシステムが必要である。別途検討を行っているシステムについて紹介する。

(1) 手動走査タイル剥離診断システム

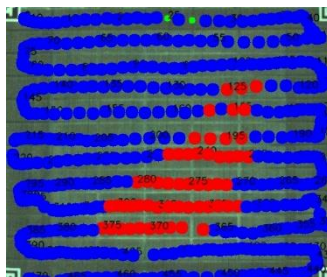
手動走査タイル剥離診断システムの基本構成図を付図 2.1 に、実施状況イメージを付図 2.2 に示す。本システムは、打診装置、打診の解析を行うマイコン、打診位置を撮像する外部トリガカメラおよびデータを集計・管理するパソコンで構成される。診断装置の打撃をトリガにしてカメラで壁面および装置を撮像し、画像処理により、壁面 AR マーカーからの装置 AR マーカーの相対位置を認識することで位置情報を得るものである。この位置情報と打診データを同期させて、画像上に診断結果を表示する。さらに、図面化や診断結果の集計および出力も可能である。付図 2.3 は、本システムを用いて模擬剥離試験体を診断した例であり、健全と判定された打撃点を青点、剥離判定された打撃点を赤点で示したものである。



付図 2.1 手動走査タイル剥離診断システムの基本構成



付図 2.2 実施状況イメージ



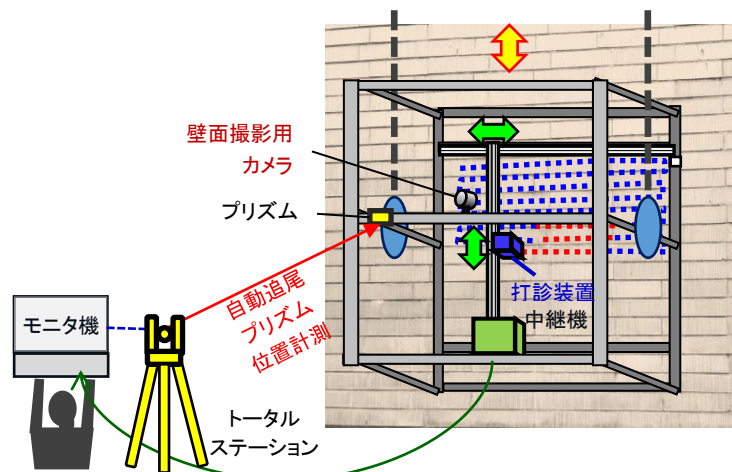
付図 2.3 模擬剥離試験体の診断例

参考文献

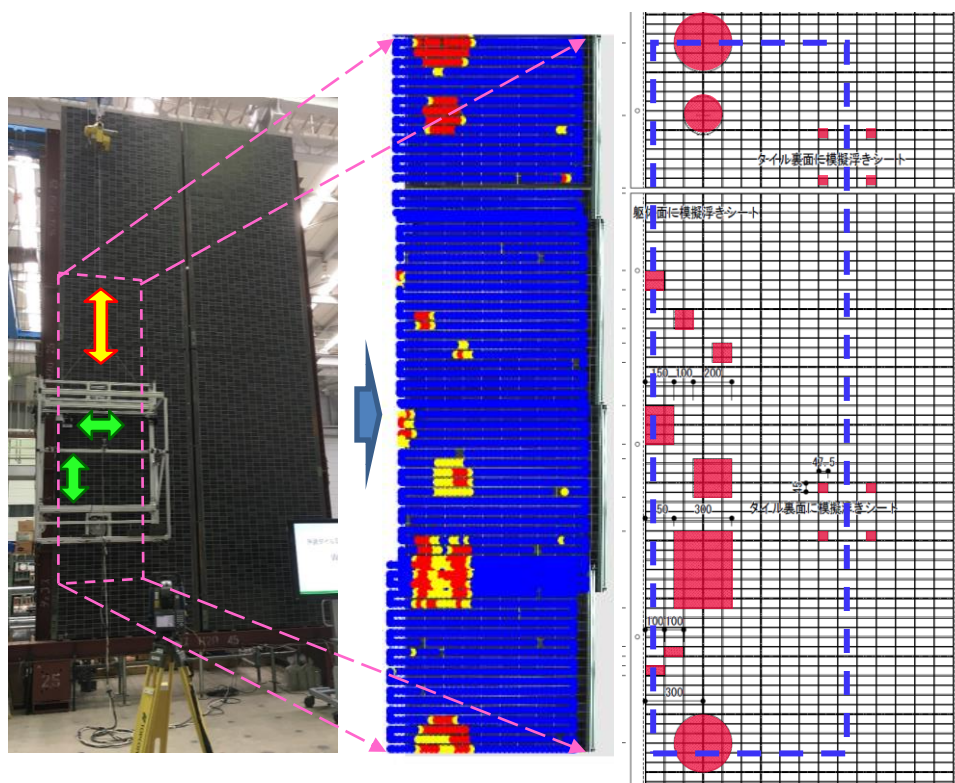
藤沼智洋, 添田智美, 千葉拓史, 三上貴正: 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎的検討 その 5 外部トリガカメラと AR マーカーを用いた診断位置認識システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 1177-1178, 2018. 9

(2) 自動走査タイル剥離診断システム

自動走査タイル剥離診断システムの概要を付図 2.4 に、試験状況および結果の例を付図 2.5 示す。フレーム内に、 x, y の 2 軸に可動のアクチュエータを有し、そこに打診装置が取り付けられたものである。フレーム内の x, y の位置は、アクチュエータに取付けられたエンコーダで計測し、フレームの位置 X, Y をトータルステーションで計測するものである。



付図 2.4 自動走査タイル剥離診断システムの概要



付図 2.5 試験状況および結果の例

謝辞

本論文は、東京工業大学環境・社会理工学院建築学系および株式会社フジタにおいて行った研究を取りまとめたものです。本研究を行うにあたり、東京工業大学環境・社会理工学院建築学系准教授三上貴正先生には、研究テーマの立ち上げから実験の遂行、論文の執筆に至るまで、終始一貫して的確な御指導、御助言と暖かい励ましをいただきました。また、本論文をまとめる機会もいただきました。三上貴正先生に心から感謝いたします。

筆者が論文をまとめることとなった最初のきっかけは、東京工業大学名誉教授故小野英哲先生から、頑張っで学位を取るように、との激励をいただいたことによります。修士課程時代に小野英哲先生の研究室に在席させていただいて以来、学会や研究会の場などを通じて多くの御指導、御鞭撻をいただきました。先生の御冥福をお祈りするとともに、心から感謝いたします。

東京工業大学環境・社会理工学院建築学系教授横山裕先生、坂田弘安先生、五十嵐規矩夫先生、鍵直樹先生には、本論文の審査を通じて、貴重な御助言と御教授をいただきました。心から感謝いたします。

また、材料・生産系ゼミを通じて、前掲横山裕先生、ものづくり大学教授高橋宏樹先生、東海大学准教授横井健先生、千葉工業大学准教授石原沙織先生、東京工業大学助教福田眞太郎先生には、貴重な御指導、御鞭撻をいただきました。さらに、東京工業大学名誉教授田中享二先生、日本大学教授湯浅昇先生、芝浦工業大学教授古賀純子先生、国立研究開発法人建築研究所宮内博之博士には、貴重な御助言と励ましのお言葉をいただきました。皆様に心から感謝いたします。

材料・生産系ゼミにおいては、各研究室の学生の皆様からの有益な御討論および御助言をいただきました。実験の実施に当たっては、金子堯宣氏、田中直樹氏、濱田崇行氏、石本達郎氏、野村大悟氏、坂野竜朗氏、伊藤秀太郎氏をはじめとする三上研究室の学生の皆様の御協力をいただきました。白権赫氏には、論文をまとめるにあたり、多くの励ましをいただきました。御協力、御支援いただいた皆様に深く感謝いたします。

剥離診断装置および診断システムの開発にあたっては、株式会社シスミック岸村雄平氏、CADEX 株式会社若井紀良氏、構造計画研究所角田宏一氏、中村保則氏、相川梓氏に多大なる御協力をいただきました。また、試験体の作製および実験の実施にあたっては、株式会社タナケン、日本化成株式会社、昭和電工建材株式会社、株式会社 LIXIL、株式会社マサル、富士見産業株式会社の方々をはじめとした多くの皆様からの御助言および御協力をいただきました。模擬剥離の作製につきましては、日本化成株式会社守屋善裕氏から貴重な御助言をいただきました。御協力、御支援いただいた皆様に深く感謝いたします。

株式会社フジタにおいては、本研究を進めるにあたり、常務理事小林勝巳博士、執行役員技術センター所長組田良則氏、技術センター副所長佐々木仁博士をはじめとした皆様に研究環境を整えていただき、研究開発業務を通じて貴重な御助言、御指導と暖かい励ましをいただきました。佐々木聡博士、佐々木康人氏、増田圭司博士、高森直樹氏には、親身な御助言および御支援をいただきました。また、関原弦氏、千葉拓史氏、富田泰宇氏、藤沼智洋博士、日村みのり氏には、本研究に関する調査や実験と一緒に取り組んでいただき、多くの御支援をいただきました。フジタビルメンテナンス株式会社永易修氏には、研究を進めていく中で多くの貴重な御助言および御協力をいただきました。その他多くの諸先輩方や後輩諸氏に御支援いただきました。御協力、御支援いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。

本論文は、多くの皆様の御協力と御支援に支えられて成し得たものです。ここに改めて皆様に感謝いたします。

令和元年 8月

添田 智美