

湿式外断熱外壁の非破壊診断の可能性に関する検討

Study on the Possibility of Non-Destructive Diagnosis for Wet Type External Heat Insulation Outer Wall

齊藤 隆典¹⁾, 谷口 円²⁾, 高橋 光一³⁾, 足立 裕介⁴⁾, 小浦 孝次⁵⁾

Takasuke Saito¹⁾, Madoka Taniguchi²⁾, Koichi Takahashi³⁾, Yusuke Adachi⁴⁾, Koji Koura⁵⁾

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部
北方建築総合研究所

Northern Regional Building Research Institute
Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

¹⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ 研究主任 ²⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ 研究主幹

³⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ 研究職員 ⁴⁾ 北海学園大学工学部建築学科 教授 ⁵⁾ 株式会社 JSP

¹⁾ Researcher of Building Engineering System Group ²⁾ Senior Research Manager of Building Engineering System Group

³⁾ Researcher of Building Engineering System Group ⁴⁾ Professor of Hokkai-Gakuen University ⁵⁾ JSP Co., Ltd.

概要 Abstract

湿式外断熱外壁の非破壊診断の可能性に関する検討 Study on the Possibility of Non-Destructive Diagnosis for Wet Type External Heat Insulation Outer Wall

齊藤 隆典¹⁾, 谷口 円²⁾, 高橋 光一³⁾, 足立 裕介⁴⁾, 小浦 孝次⁵⁾
Takasuke Saito¹⁾, Madoka Taniguchi²⁾, Koichi Takahashi³⁾, Yusuke Adachi⁴⁾, Koji Koura⁵⁾

キーワード : 長寿命化、湿式外断熱外壁、非破壊診断

Keywords : *Prolonged lifetime, Wet type external heat insulation outer wall,
Non-destructive diagnosis*

1. 研究概要

1) 研究の背景

- ・ 建造物の長寿命化は必須の課題であり、長く使うためには、適切な点検・診断が欠かせない。
- ・ 外断熱工法は建物の長寿命化に有効とされ、大規模修繕のスパンも延長できるとされている。
- ・ 2015年台風時に苫小牧の外断熱改修後30年経過した市営住宅で、外断熱外壁の脱落事故が発生した。
- ・ 再発防止には、点検等による診断が必要であるが、外断熱外壁の経年変化を非破壊で継続的に評価する手法が確立されていない。
- ・ 長寿命化、外断熱工法の信頼性の向上においても、診断方法の開発は喫緊の課題である。

2) 研究の目的

湿式外断熱外壁の浮き等の欠陥部分を検出できる非破壊診断方法の可能性について検討する。

2. 研究内容

1) 外断熱工法と外壁診断手法の分類・課題の整理 (H30年度)

- ・ ねらい：本研究で対象とする湿式密着工法を含む各種外断熱工法について、生じる欠陥と現在用いられている外壁診断手法を整理し、課題を明らかにする。
- ・ 試験項目等：メーカーヒアリング、文献調査

2) 小型試験体による非破壊診断の可能性検討 (H30年度)

- ・ ねらい：2005年共同研究「発泡プラスチック系断熱材を用いたRC造断熱工法の設計情報構築」において作製した300mm×300mm×厚さ150mmの外断熱外壁模擬コンクリート試験体を用いて、使用材料種別の検出可能性等予備検討を行う。
- ・ 試験項目等：熱画像カメラ、電磁波レーダー、打診棒

3) 模擬壁による非破壊検査装置での浮き診断可能性の検討 (H30～R1年度)

- ・ ねらい：2005年共同研究「発泡プラスチック系断熱材を用いたRC造断熱工法の設計情報構築」で作製した実大建物の経年劣化の進行したRC壁を用いて、欠陥部の厚さ、面積を実験水準として、模擬浮き箇所等を設けた湿式外断熱の施工を行った後、各種非破壊検査装置を用いて浮き診断の検証を行う。
- ・ 試験項目等：熱画像カメラ、電磁波レーダー、打診棒

¹⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ 研究主任 ²⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ 研究主幹

³⁾ 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ 研究職員 ⁴⁾ 北海学園大学工学部建築学科 教授 ⁵⁾ 株式会社 JSP

¹⁾ Researcher of Building Engineering System Group ²⁾ Senior Research Manager of Building Engineering System Group

³⁾ Researcher of Building Engineering System Group ⁴⁾ Professor of Hokkai-Gakuen University ⁵⁾ JSP Co., Ltd.

3. 研究成果

1) 外断熱工法と外壁診断手法の分類・課題の整理 (H30 年度)

・文献調査等より、各種外断熱工法の分類や現在用いられている外壁診断手法について整理を行った。

2) 小型試験体による非破壊診断の可能性検討 (H30 年度)

・コンクリート小型試験体を対象に電磁波レーダーを用いた予備検討を行い、深さ方向の使用材料種別の検出が可能であることを確認した。

3) 模擬壁による非破壊検査装置での浮き診断可能性の検討 (H30~R1 年度)

- ・北総研内の屋外実験棟に、接着層に模擬浮きを設けた外断熱外壁試験体を作製した (図1, 写真1)。
- ・各種非破壊検査機器 (熱画像カメラ・打診棒・電磁波レーダー) を用いた模擬浮きの検出を実施した。
- ・熱画像カメラや打診棒を使用した場合、外断熱パネルを構成する断熱材の下にある接着層の浮き箇所を熱や音の情報を用いて判別することは困難であることを明らかにした。
- ・電磁波レーダーを使用した場合、点付けの接着部、全面接着の 3.0 mm 厚さの浮きを判別することができた (図2)。櫛引接着では、接着層の凹凸で発生する反射波の干渉により、浮き検出は困難であった。
- ・電磁波レーダーの数値データから浮きを分布表示するプログラムを作成した。既存の探査機器では検出が難しい浮きについても、検出の可能性を示した (図3)。

< 具体的データ >

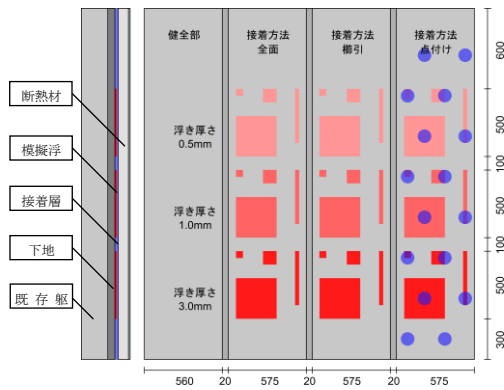


図1 模擬浮き配置状況



写真1 外壁試験体の外断熱施工前および施工後の状況

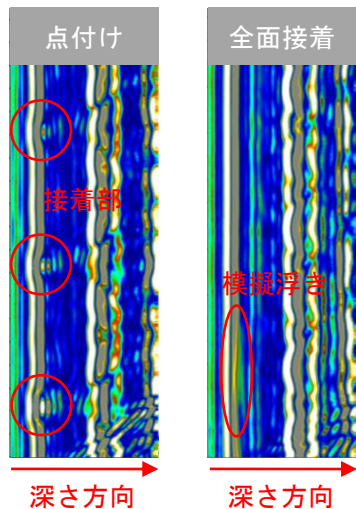


図2 電磁波レーダーの検出例

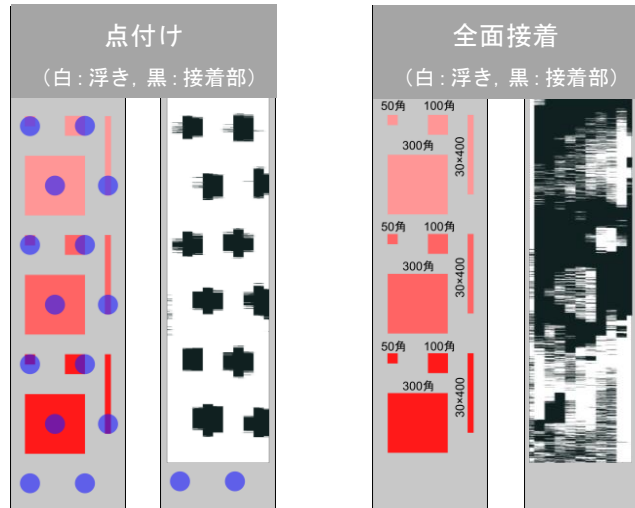


図3 電磁波レーダーデータの浮き分布の表示結果

4. 今後の見通し

- ・作製した外断熱外壁試験体は、今後の診断技術者の育成や技術向上に活用される。
- ・非破壊診断機器メーカーに浮き判別の方法や条件に関する情報提供を行い、診断機器への実装を促す。

目 次

1. 研究概要	
(1) 研究の背景.....	1
(2) 研究の目的.....	1
2. 外断熱工法と外壁診断手法の分類・課題	
(1) 外断熱工法の分類・課題	1
(2) 外壁診断手法の分類・課題	4
3. 非破壊検査装置による浮き検出の可能性の検討	
(1) 小型コンクリート試験体を対象とした浮き検出の予備検討	5
(2) 実大壁を対象とした模擬浮き検出の可能性の検討.....	5
4. 電磁波レーダー探査装置を用いた外断熱外壁浮き診断の可能性の検討	
(1) 模擬浮き検出データの分析手法	22
(2) 分析プログラムを用いた模擬浮き検出の可能性の検討.....	24
5. まとめ.....	26

1. 研究概要

(1) 研究の背景

近年、建物の長寿命化が社会的に重要な課題となっている。この長寿命化の実現には、適切な調査や診断に基づく建物の維持管理が必須である。外断熱工法は建物の長寿命化に有効とされ、大規模修繕のスパンも延長できるとされているが、2015年の台風時に外断熱改修後30年経過した道内の市営住宅で、外断熱外壁の脱落事故が発生した。この再発防止には、点検等による診断が必要であるが、外断熱外壁の経年変化を非破壊で継続的に評価する手法は確立されていないのが現状であり、建物の長寿命化や外断熱工法の信頼性向上の観点からも、診断方法の開発は喫緊の課題である。

(2) 研究の目的

湿式外断熱外壁の浮き等の欠陥部分を検出できる非破壊診断方法の可能性について検討する。

2. 外断熱工法と外壁診断手法の分類・課題

(1) 外断熱工法の分類・課題

外断熱工法の分類を表2-1に示す。この表は文献2-1を参考にして各種使用材料や納まりなどを整理するとともに、長期使用により発生する恐れのある変状を記載したものである。以下、工法の分類ごとに長期使用における工法性能確保の観点から想定される課題を示す。

乾式密着工法には図2-1に示すような主にパネルを用いる工法が多く、それらをファスナーにより留めつけている。ファスナーが金属製の場合は、それらが環境温度変化により伸縮することで、表面仕上げにひび割れ等が発生する可能性がある。表中の番号3~6の工法に関してはシーリングを使用しているため、シーリングの劣化により内部に水が侵入し、断熱材の性能を低下させる可能性がある。

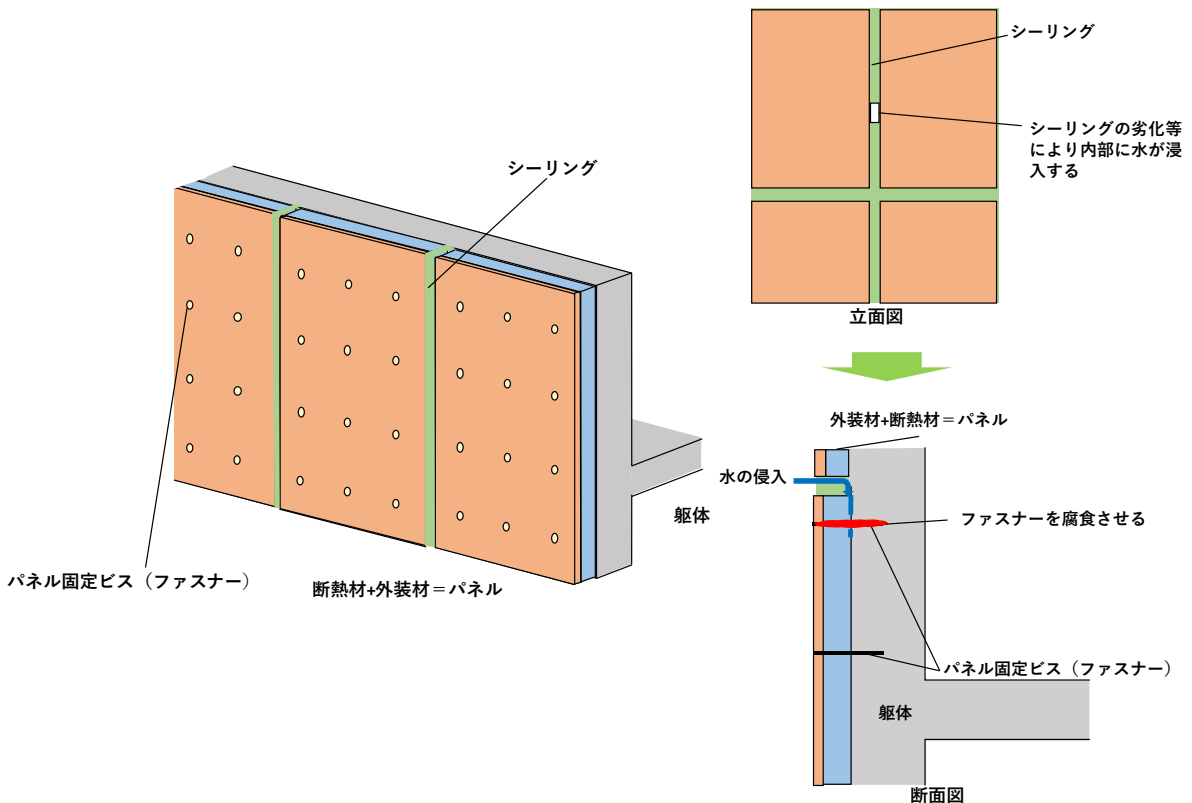


図 2-1 乾式密着工法の概要

表 2-1 外断熱工法の分類

工法分類	番号	名称・企業名	シーリング有無	躯体留付			通気層有無	使用可能外装材					工法の特徴・注意点
				接着	部分	全面		サイディング	金属板	磁器タイル	レンガ	塗り材	
乾式 密着工法	1	DDタイルウォールシステム：㈱INAX	x	○	○	通気層有	○	○	○	○	○	○	タイル剥離の危険性あり
	2	セブパネル(通気層タイプ、透湿タイプ)：㈱テスク	x	不明	○	通気層有	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	3	フレイッシュジュパネル(通気層タイプ、密着タイプ)：岩倉化学工業㈱	○	不明	○	通気層有	○	○	○	○	○	○	ハネル、ハネル間をシーリングで納めているため、シーリングの劣化により、内部に水が侵入し、耐久性を低下させる可能性があると考えられる。
	4	FRC-GHVパネル：㈱北日本タイエイ	○	不明	○	通気層有	○	○	○	○	○	○	
	5	ダンウォール・ドライKSS-Tパネル工法：㈱ヤブ原	○	不明	○	通気層有	○	○	○	○	○	○	
	6	ダンウォール・ドライKSS-Tパネル通湿工法(通湿、密着工法)：㈱ヤブ原	○	不明	○	通気層有	○	○	○	○	○	○	
乾式 通気層工法	7	NoiW工法、旭化成建材㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	8	無彩外断熱工法 ㈱イースト企工	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	
	9	ATH外断熱システム：㈱INAX・㈱ノザワ	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	
	10	スタットボードG3・G4：岩倉化学工業㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	
	11	イージーバント工法、㈱栗林商会・パラマウント硝子工業	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	12	セラミックサイディング外断熱通気工法：新日経㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	
	13	CH外断熱工法：㈱セテック・ハウス研究所	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	
	14	そとだんかべメイト：ダウ化学	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	
	15	LLH外断熱通気層システム：㈱ツツキ	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	
	16	バジンプウォール(等圧空気層タイプ)：野原産業㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。 毛管現象の懸念
	17	ノバリック・スタットボード併用工法：㈱よねざわ工業	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	18	外断熱れんがシステムIR-70：北海道農材工業㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	湿式 密着工法	19	ゼオンサイディング、ゼオン化成㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○
20		アージュレックス工法：アスカ工業	x	不明	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
21		ほたて漆喰そとかべ ピオンエール：岩倉化学工業㈱、あいもり㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
22		ドライゼットアウターレージョン工法：㈱サンクピット	x	不明	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
23		Sto Essence：Sto Japan㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
24		Sto Essence classic：Sto Japan㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
25		ウッドプライース外断熱工法：㈱高木コーポレーション	x	不明	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
26		外断熱工法「エコサム」：東邦レオ㈱	x	不明	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
27		ハンジンプウォール(透湿タイプ)：野原産業㈱	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
28		ロックセルボード、フジ化成工業㈱	x	不明	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
湿式 通気層工法	29	アルセコ外断熱システム：㈱北沢 アルセコ事業部	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	30	ダンウォール・ウォレット工法：㈱ヤブ原	x	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	31	ドレスウォール改付・左官工法：㈱ヤブ原	○	○	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
	32	ドレスウォール タイル工法(通気ネット工法)：㈱ヤブ原	○	○	○	通気ネット	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。
33	VSE工法：第一工業㈱	x	不明	○	無	○	○	○	○	○	○	フラスナーにステンレス指定がないため、フラスナーの腐食が懸念される。	

また、ファスナーにステンレス指定がされない場合には、内部に浸入した水がファスナーを腐食させる恐れがあるため、ファスナーの腐食状況や耐荷力に留意する必要がある。

乾式通気層工法には、図 2-2 に示す通り主に胴縁で断熱材・外装材を留める仕様が多い。いずれも表層がシームレスに仕上がるため、内部への水の浸入の可能性は乾式密着工法と比較して低い。また、例え外装材表層から水が浸入したとしても、外装材背面に通気層があるため、材料が湿潤状態を長く維持する可能性は低い。但し、通気層を閉塞し、層内湿度が長く高湿度となる場合には、鋼材腐食が懸念されるため、十分に留意する必要がある。番号 18 の工法では外装材としてレンガが指定されており、レンガを引き金物で躯体と固定するタイプである。面外変形を起こさないよう引き金物の数量等に注意して施工する必要がある。

湿式密着工法は図 2-3 に示すように、主にメッシュコートに塗り仕上げを施したタイプであり、軀

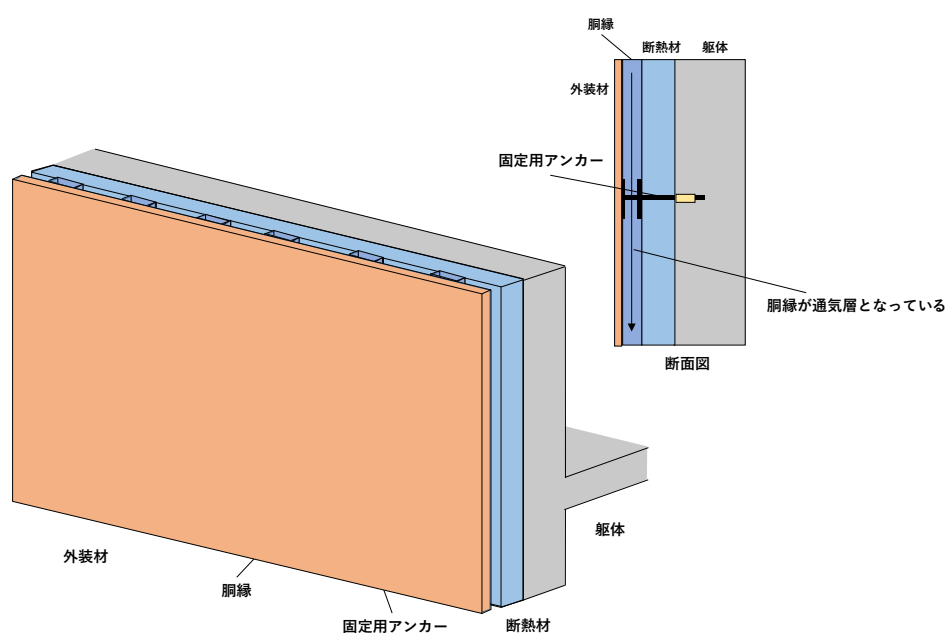


図 2-2 乾式通気層工法の概要

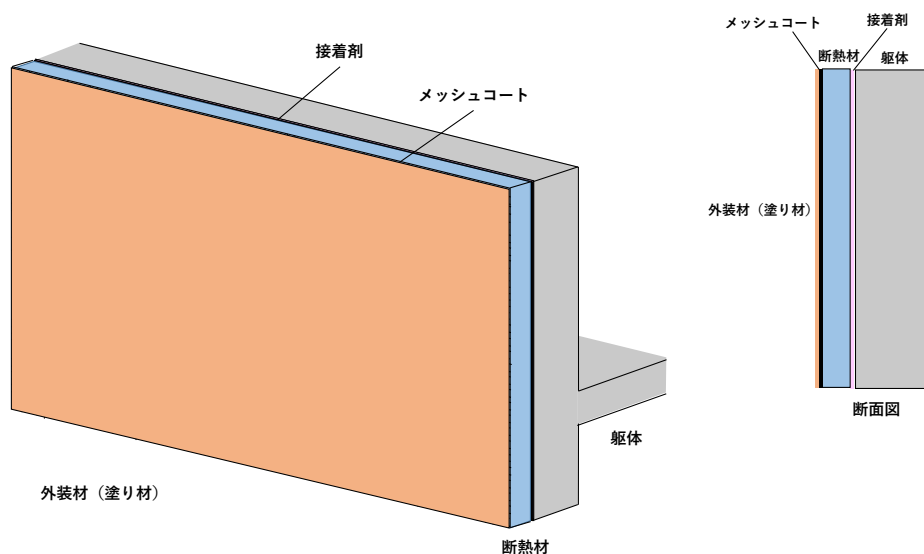


図 2-3 湿式密着工法の概要

体に透湿性能の高い断熱材を接着剤で貼付けるものである。乾式通気層工法と同様に表層がシームレスに仕上がるため、内部への水の浸入の可能性は乾式密着工法と比較して低い。また、金属材料を使用していないため、それらの腐食に伴う性能低下がないことも特徴である。

湿式通気層工法は、図 2-4 に示すように断熱材にスリットを設けた仕様である。スリットにより水蒸気の通り道を作り、空気の動きを確保することができる。ファスナーを使用する工法に関しては、水分が内部に浸入して腐食する恐れがあるため、ステンレス指定がされない場合には、水分からファスナーを保護することが重要であると考えられる。

(2) 外壁診断手法の分類・課題

我が国の外壁診断手法は、昭和 55～59 年に実施された建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」をベースとして体系化されている。外断熱の耐久性については体系化されていないが、外断熱に使用される外装材およびその他材料は表 2-1 に示す通り多岐に渡るため、上記プロジェクトの成果である「外装仕上げの耐久性向上技術²⁻²⁾」「建築防水の耐久性向上技術²⁻³⁾」「鉄骨造建築物の耐久性向上技術²⁻⁴⁾」、外装材については、それらの発展版である建築研究所「建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究²⁻⁵⁾」を参考としながら、前節において指摘した項目を念頭に置いて、診断を実施していくことが現実的であると考えられる。いずれの診断においても、目視観察による 1 次診断、目視、指触または簡易な器具等による 2 次診断、専用の測定器具による 3 次診断に分類されており、上位診断ほど専門性が要求される。

外断熱工法においては、工法ごとに材料や留付け方法が異なっているため、それらをどのように体系化していくかが一つ目の課題である。また、外断熱工法は建物全体を覆う工法であるため、外断熱内面の状況の調査が困難となってしまうことが二つ目の課題である。供用中に外断熱を破壊して調査することは難しいため、外壁表面から非破壊で調査できる方法があればそのニーズは高いものと考えられる。

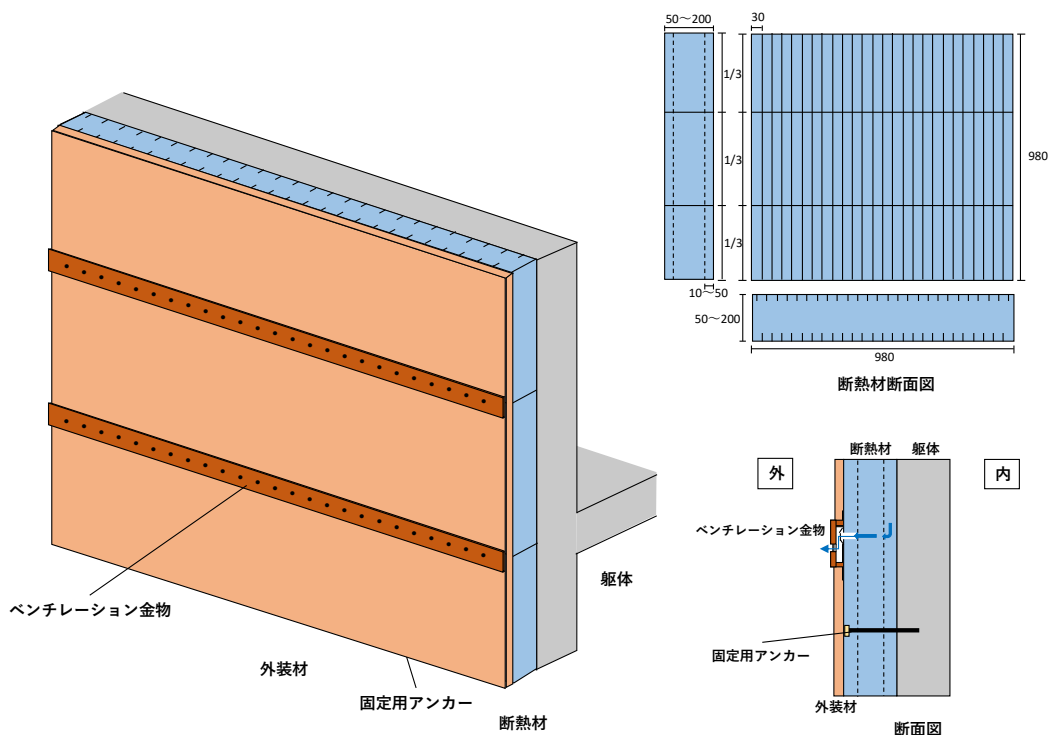


図 2-4 湿式通気層工法の概要

3. 非破壊検査装置による浮き検出の可能性の検討

本章では、外断熱外壁を対象に、既存の非破壊検査装置を用いた浮き検出の可能性の検討について示す。はじめに、外断熱外壁を模擬した小型試験体の浮き検出の予備検討を行い、次に、意図的に浮きを設けた外壁を対象とした浮き検出について検討を行った。外断熱改修時の既存建物の状況把握を行う場合や、外断熱パネル脱落事故の防止に不可欠な点検での非破壊検査装置の活用を想定し、モルタル外壁内部に浮きがある場合と外断熱接着層に浮きがある場合を対象とする。

(1) 小型コンクリート試験体を対象とした浮き検出の予備検討

既存の外断熱外壁を模擬した、W:300mm×L:300mm×H:150mm サイズの小型コンクリート試験体（2005年共同研究「発泡プラスチック系断熱材を用いた RC 造断熱工法の設計情報構築」において作製）を用いて、電磁波レーダー装置を用いた使用材料種別の検出可能性等について予備検討を行った。

写真 3-1 に小型コンクリート試験体を対象とした探査の様子を示す。検出結果より、断熱材と躯体における誘電率の差によって検出波形の変化が認められたことから、電磁波レーダーを用いて断熱材と躯体コンクリートの区別は可能であることの示唆が得られた。また、剥離や浮き等のある場合、それらのデータから健全部のデータを減算することで、欠陥部の検出の可能性があると考えられる。

(2) 実大壁を対象とした模擬浮き検出の可能性の検討

1) 模擬浮きを設けた外壁試験体の作製

北方建築総合研究所内の実験街区に建設されている RC 実験棟（2005年共同研究「発泡プラスチック系断熱材を用いた RC 造断熱工法の設計情報構築」において作製）の北面に、模擬浮きを設けた外壁試験体を作製した。RC 実験棟の概要および施工位置を図 3-1 に、施工前の RC 実験棟北面の状況を写真 3-2 に示す。図 3-1 中の①施工面（北面西側）には、外断熱改修時に下地となるモルタル外壁内部に模擬浮きを設けた試験体を作製した。②施工面（北面東側）には、外断熱改修後の非破壊検査装置による点検を想定して、外断熱パネル接着層に模擬浮きを設けた外壁試験体を作製した。

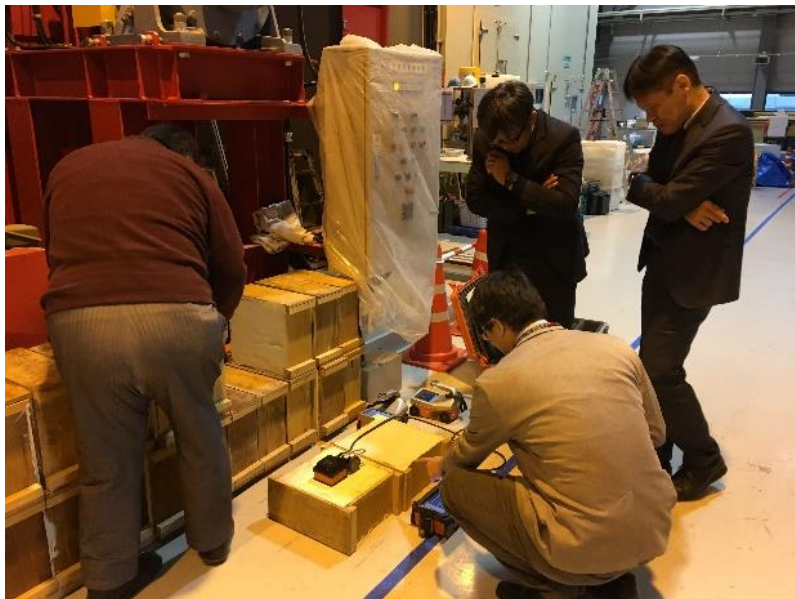


写真 3-1 小型コンクリート試験体の電磁波レーダー探査の様子

図 3-2 にモルタル外壁試験体の模擬浮きの施工計画，表 3-1 に試験体の試験水準を示す。模擬浮きとして採用した材料は，文献 3-1) を参考とし，発泡ポリエチレンシート(ミラマット：(株)JSP 社製)を使用した。試験水準としては，浮きの厚さを 2 水準，浮きの面積を 3 水準設定した。浮き位置の深さが検出に及ぼす影響を検討するため，モルタル厚さは 10 mm, 20 mm, 30 mm の 3 水準とした。また，比較用に健全部（モルタル厚さ 10 mm）を同時に施工した。

試験体の施工では，既存躯体の塗膜除去および清掃を行った後，下地調整剤（カチオン性アクリル樹脂エマルジョン：東亜合成(株)）を塗布した。調整剤の乾燥後，模擬浮きとする発泡ポリエチレンシートを計画した大きさにカットし，既存躯体に墨出しを行った上で，所定の位置に接着剤を使用して貼付けた（写真 3-3）。発泡ポリエチレンシートの貼付け後，模擬浮きを下地内部に伏せ込むかたちで，厚さ 10 ～30 mm のモルタル外壁を段階的に施工した（写真 3-4）。仕上げは全面コテ仕上げとし，エフロレッセンス抑制用シーラー（合成樹脂アクリルエマルジョン：関西ペイント(株)）を塗布した。

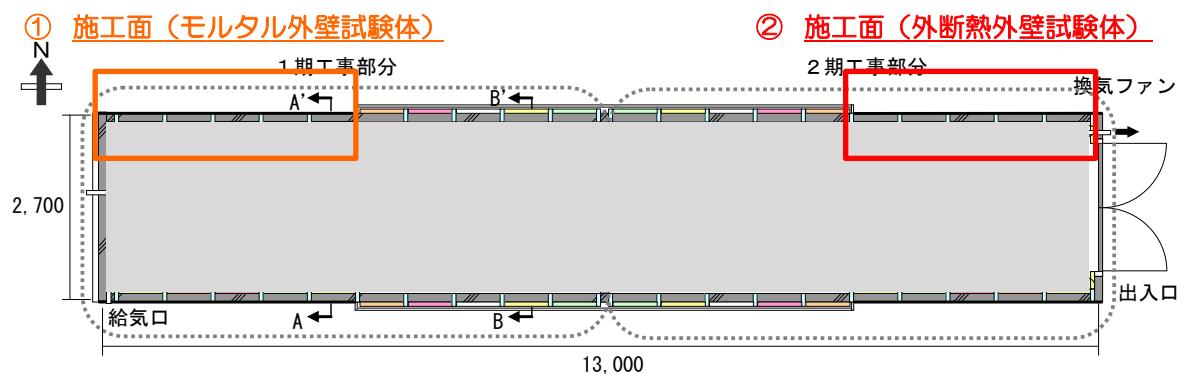


図 3-1 RC 実験棟の概要および外壁試験体の施工箇所



写真 3-2 施工前の RC 実験棟北面の状況

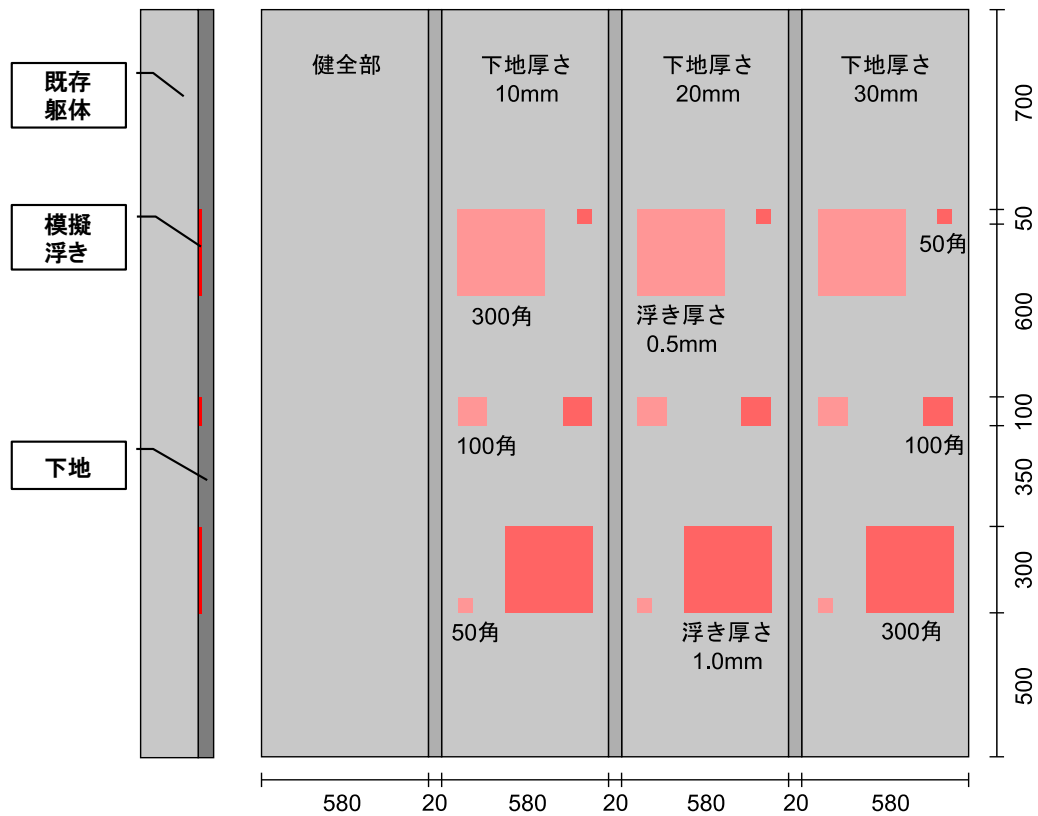


図 3-2 モルタル外壁試験体の模擬浮きの施工計画

表 3-1 モルタル外壁試験体の試験水準

	①	②	③	④
模擬浮き厚さ	健全部	0.5 mm, 1.0 mm		
模擬浮き面積	(模擬浮き無)	50 mm×50 mm, 100 mm×100 mm, 300 mm×300 mm		
モルタル厚さ	10 mm		20 mm	30 mm
仕上げ	全面コテ仕上げ			



写真 3-3 模擬浮き貼付状況 (モルタル外壁試験体)



写真 3-4 施工の様子

RC 実験棟の施工面（北面東側）に外断熱外壁試験体を作製した。下地となるモルタル外壁（モルタル厚さ 10 mm）の施工を行った上で、この下地と外断熱パネル間の接着層に模擬浮きを設けた外断熱外壁試験体を作製した。写真 3-5 に外断熱パネル施工前の状況を示す。

図 3-3 に外断熱外壁試験体の模擬浮きの施工計画、表 3-2 に試験体の試験水準を示す。模擬浮きとして採用した材は、モルタル外壁試験体の作製同様に発泡ポリエチレンシート（ミラマット：(株)JSP）



写真 3-5 外断熱パネル施工前の状況

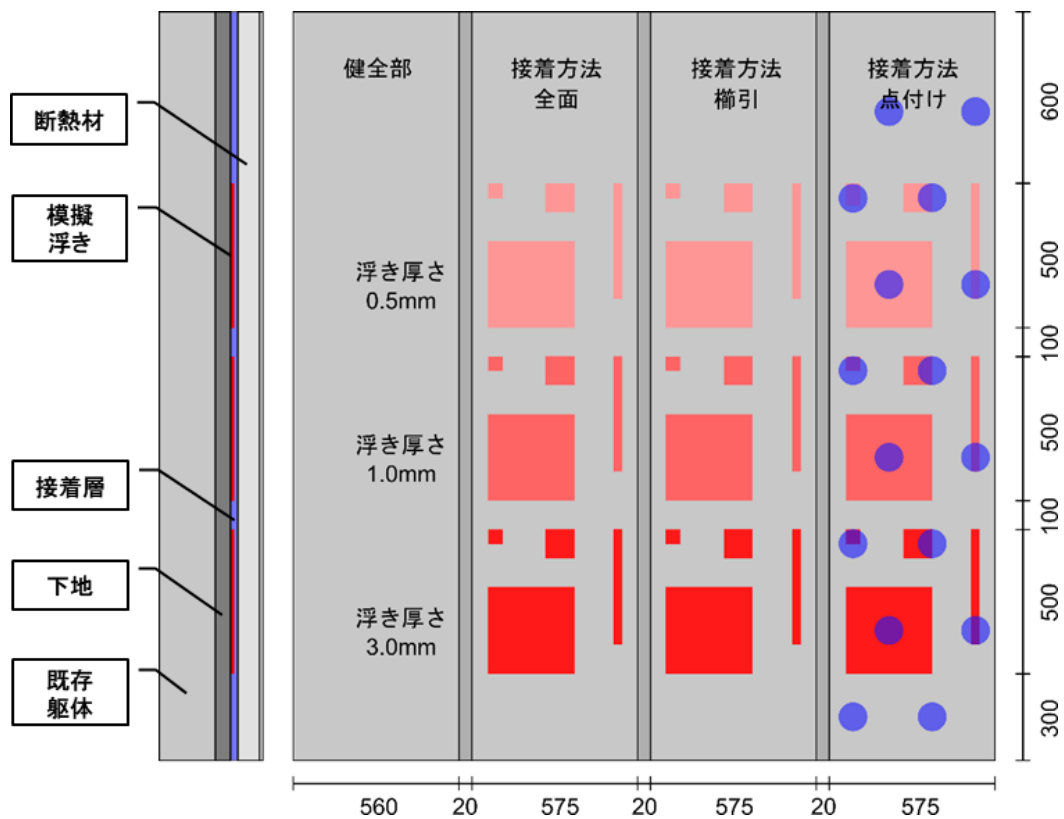


図 3-3 外断熱外壁試験体の模擬浮きの施工計画

を使用した。試験水準としては、浮きの厚さを3水準、浮きの面積を4水準設定した。外断熱パネルの接着方法の違いが浮き検出に及ぼす影響を検討するため、接着用モルタルを全面コテで塗布した「全面接着」、接着層に櫛目状の凹凸を設けた「櫛引接着」、ダンゴ状の接着部を複数設けた「点付け接着」の計3種類の接着方法を設定した。また、比較用に模擬浮きを持たない健全部を設定し、この箇所の接着方法は「点付け接着」とした。

写真 3-6 に模擬浮きの貼付状況を示す。模擬浮きとする発泡ポリエチレンシートを計画した大きさに事前にカットし、モルタル下地に墨出しを行った上で、所定の位置に接着剤を使用して貼付けた。外断熱パネルは各試験水準を設定した外壁ごとに作製した。施工面や試験体としての作製精度の観点から、外断熱パネルを事前施工した後に壁体に接着する方法を採用した。写真 3-7 に外断熱パネルの施工過程を示す。施工に使用する EPS ボード (写真 (a)) に、現場で混合した樹脂モルタル (写真 (b)) を全体的に塗布 (写真 (c)) し、補強用のファイバーメッシュの貼付けを行った (写真 (d))。ファイバーメッシュを EPS ボード裏面まで巻き返した場合、非破壊検査機器による深さ方向の検出を複雑化させる可能性があったため、共同研究者との協議の上で、ファイバーメッシュは写真 (d) に示すように EPS ボード側面までの貼付けとした。樹脂モルタルを使用してメッシュを伏せ込み (写真 (e))、ベース塗材を塗布した後、フィニッシュコートによる仕上げを行った (写真 (f))。

表 3-2 外断熱外壁試験体の試験水準

外断熱接着方法	点付け	全面接着	櫛引接着	点付け
模擬浮き厚さ	健全部 (模擬浮き無)	0.5 mm, 1.0 mm, 3.0 mm		
模擬浮き面積		50 mm×50 mm, 100 mm×100 mm, 300 mm×300 mm, 30×400 mm		
モルタル下地厚さ	10 mm			
外断熱パネル	EPS (H2550×W575×D89), ファイバーメッシュ, ドライビット工法			



写真 3-6 模擬浮きの貼付状況 (外断熱外壁試験体)



(a) EPS ボードの確認



(b) 樹脂モルタルの混合



(c) EPS ボードへの樹脂モルタルの塗布



(d) ファイバーメッシュの貼付け



(e) ファイバーメッシュの伏塗



(f) フィニッシュコートの施工

写真 3-7 外断熱パネルの施工過程

写真 3-8 に外断熱パネルの各種接着の様子と外断熱外壁試験体の施工後の状況について示す。全面接着（写真（a））では、外断熱パネルの接着面に樹脂モルタルをコテで均一に塗り付け、模擬浮きを設けたモルタル下地の上から接着した。櫛引接着（写真（b））では、櫛目の付いた専用の鰹を用いて外断熱パネルの接着面に櫛目状に樹脂モルタルを塗り付け、モルタル下地に接着を行った。点付け接着では、先の図 4-2 中で示した青丸部分が接着部となるように位置を墨出しの上、カットした塩化ビニル管（呼び径 75 mm）を型枠として使用し、樹脂モルタルを配置した（写真（c））。尚、下地への接着時に点付け部が潰れ広がることを考慮に入れ、樹脂モルタルの接着前高さは 20 mm とした。これは接着層の厚さが 10 mm となった時に接着部の直径が約 100 mm となるようなサイズとしている。すべての外断熱パネルの接着完了後、各パネル間や外周部にシーリングを施し、上部に水切り金物を施工して外断熱外壁試験体の作製を完了した（写真（d））。



(a) 全面接着の様子



(b) 櫛引接着の様子



(c) 点付け接着の様子



(d) 外断熱パネル施工後の状況

写真 3-8 各種接着方法の様子および外断熱施工後状況

2) モルタル外壁試験体の浮き検出の可能性の検討

a. 熱画像カメラを用いた浮き検出

模擬浮きを設けたモルタル外壁試験体を対象に、熱画像カメラによる模擬浮きの検出を行った。熱画像の撮影条件を表 3-3 に、写真 3-9 に表中の条件下において撮影した試験体の熱画像を示す。撮影時間が午前中のために外気温が上昇していく段階であること、撮影面が直射日光の当たらない北面であることなどから、熱容量の大きい模擬浮き部の表面温度が躯体コンクリート部と比べて高くなると

表 3-3 モルタル外壁試験体の熱画像撮影条件

撮影機材	InfReC R300SR (日本アビオニクス㈱社製)
撮影日時	2019年6月10日10時48分
気温 (気象庁観測データ)	17.0℃ (10時, 旭川) 18.1℃ (11時, 旭川)
天候	晴
撮影距離	約5 m
測定温度範囲	+20.0℃~+23.0℃



写真 3-9 モルタル外壁試験体の撮影熱画像

表 3-4 モルタル外壁試験体の熱画像カメラによる模擬浮き検出結果

モルタル厚さ	10 mm					
浮き面積	50×50 mm		100×100 mm		300×300 mm	
浮き厚さ	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm
判定	○	○	○	○	○	○
モルタル厚さ	20 mm					
浮き面積	50×50 mm		100×100 mm		300×300 mm	
浮き厚さ	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm
判定	×	×	○	○	○	○
モルタル厚さ	30 mm					
浮き面積	50×50 mm		100×100 mm		300×300 mm	
浮き厚さ	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm
判定	×	×	△	△	○	○

考えられる。熱画像からも模擬浮き部における表面温度が浮きのない箇所と比べて、高く表示されていることが読み取れる。熱画像から判定を行った模擬浮きの検出結果について、表 3-4 に示す。300×300 mm 面積の浮きについては、浮き厚さおよび下地厚さによらず、熱画像による検出が可能であった。モルタル厚さ 10 mm の場合には、すべての試験水準の模擬浮きを検出できたが、モルタル厚さが厚くなるに従って、浮き面積が小さいものから検出ができなくなる傾向が見られた。

b. 打診棒を用いた浮き検出

模擬浮きを設けたモルタル外壁試験体を対象に、打診棒（パルハンマー）による模擬浮きの検出を行った。写真 3-10 に打診棒による模擬浮き検出の様子を示す。使用した打診棒は鋼球タイプとし、外壁全面を打撃することによる打音の変化から浮き箇所の検出を行った。表 3-5 に打診棒による模擬浮きの検出結果を示す。モルタル厚さ 10 mm の場合、100×100 mm、300×300 mm サイズの模擬浮きの検出が可能であった。モルタル厚さが 20 mm 以上では、検出可能な模擬浮きは浮き面積が大きく、浮き厚さが厚くなる傾向が見られた。50×50 mm サイズの模擬浮きはいずれのモルタル厚さにおいても、打音による検出は困難であった。



写真 3-10 モルタル外壁試験体の打診棒による浮き検出

表 3-5 モルタル外壁試験体の打診棒による模擬浮き検出結果

モルタル厚さ	10 mm					
浮き面積	50×50 mm		100×100 mm		300×300 mm	
浮き厚さ	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm
判定	×	×	○	○	○	○
モルタル厚さ	20 mm					
浮き面積	50×50 mm		100×100 mm		300×300 mm	
浮き厚さ	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm
判定	×	×	△	○	○	○
モルタル厚さ	30 mm					
浮き面積	50×50 mm		100×100 mm		300×300 mm	
浮き厚さ	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	0.5 mm	1.0 mm
判定	×	×	×	×	○	○

c. 電磁波レーダー探査装置を用いた浮き検出

模擬浮きを設けたモルタル外壁試験体を対象に、電磁波レーダー探査装置による模擬浮きの検出を行った。探査位置を図 3-4 に示す。調査には、KEYTEC 社製の電磁波レーダー探査装置 SIR-EZ HR（周波数 2600 MHz、探査深度 300 mm、測定距離 20 m）を使用した。水平探査は外壁試験体の G.L.+100 mm から+2100 mm までの範囲について 50 mm ピッチで実施した。浮き直上を通る一部の箇所では、探査画像の解像度を上げるために、25 mm ピッチでの探査を実施している。水平探査は合計 45 測線にて実施した。鉛直探査は外壁試験体の右端部+50 mm の位置から 500 mm の範囲に対して、50 mm ピッチで実施した。鉛直探査は合計 11 測線にて実施した。

図 3-5 にモルタル厚さ 30 mm の健全部と模擬浮き部における水平探査結果の一例を示す。No. 014 の探査画像においては、横軸 100 mm～400 mm、深さ 30 mm 付近に健全部である No. 001 では確認されない

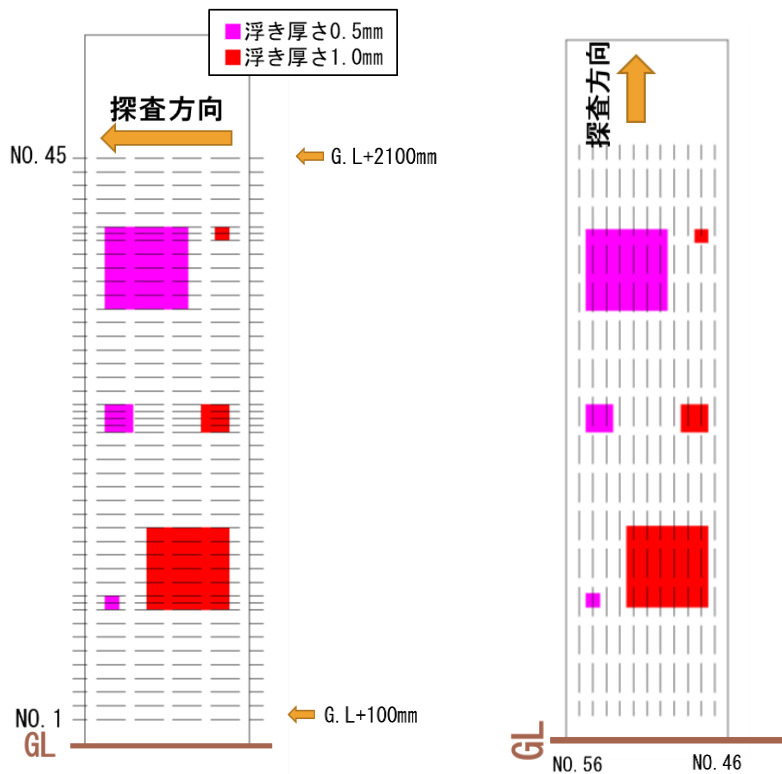


図 3-4 電磁波レーダー装置の探査範囲

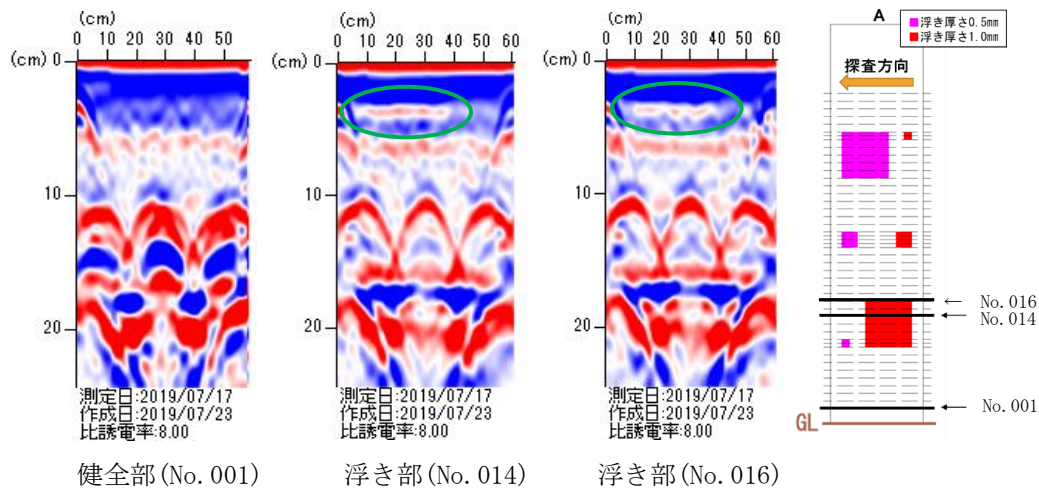


図 3-5 モルタル外壁の健全部と浮き部における水平探査結果の比較例（モルタル厚さ 30 mm）

波形（図中の緑丸内）が認められ、これが模擬浮きであると考えられる。また、No. 016 に示すように、波形が途切れ、大きさを把握しにくいものや全く波形が現れないものも確認された。

探査画像における各模擬浮き位置における判定について、「浮きの大きさまで確認できる」、「浮きを確認できるが、途切れ等により大きさが判別しにくい」、「浮きを確認できない」の3段階で評価した。図3-6～3-8に評価結果を示す。モルタル厚さの影響が顕著であり、モルタル厚さ10mmでは浮きを確認できなかった（図3-6）。モルタル厚さ20mmの場合（図3-7）には、50mm角の浮きは検出できず、100mm角の浮きは1箇所（16.7%）で浮きを確認できたものの、大きさの判別は困難であった。300mm角の浮きについては、浮き厚さ1.0mmで大きさを判別できたものが存在するが、浮き厚さ0.5mmでは大きさを判別できなかった。モルタル厚さ30mmの場合（図3-8）では、模擬浮きの厚さに関わらず、大きさまで判別できるものが見られる結果となった。

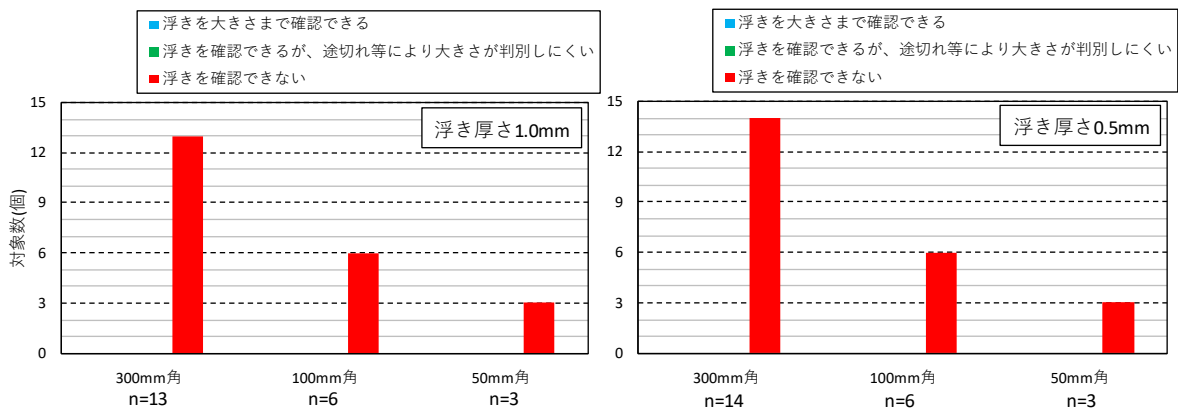


図 3-6 探査画像による模擬浮き確認結果（モルタル厚さ 10 mm）

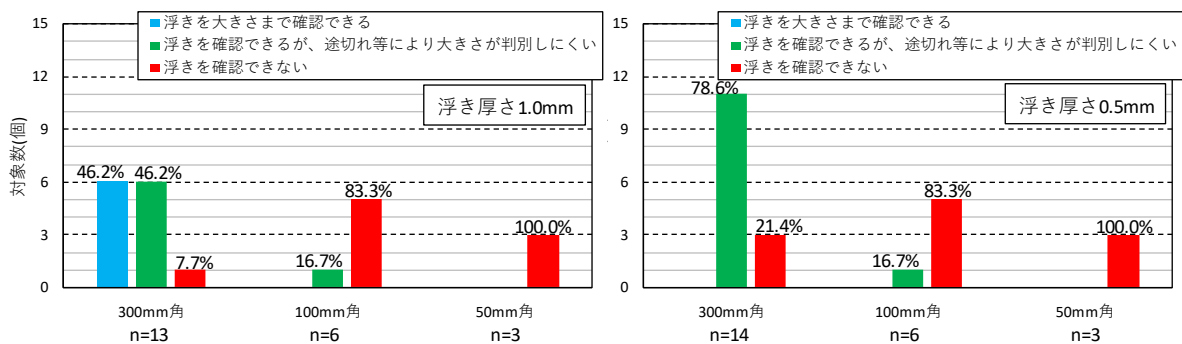


図 3-7 探査画像による模擬浮き確認結果（モルタル厚さ 20 mm）

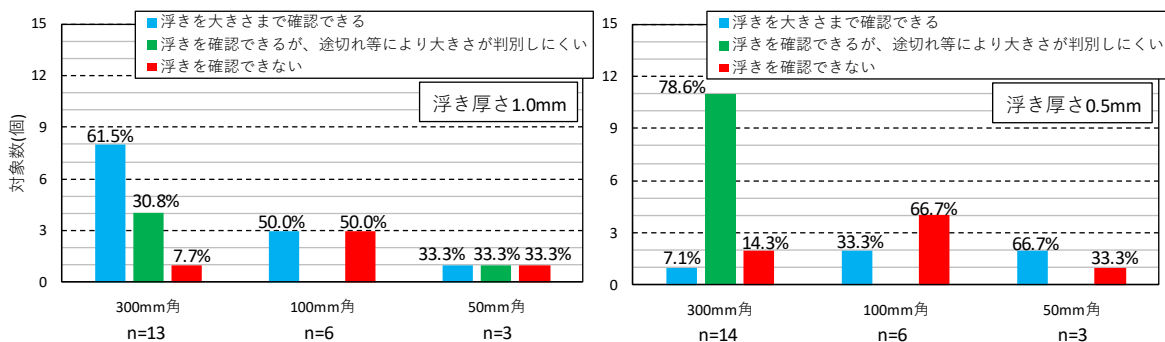


図 3-8 探査画像による模擬浮き確認結果（モルタル厚さ 30 mm）

3) 外断熱外壁試験体の浮き検出の可能性の検討

a. 熱画像カメラを用いた浮き検出

外断熱外壁試験体を対象に、熱画像カメラによる模擬浮きの検出を行った。熱画像の撮影条件を表 3-6 に、撮影した熱画像を写真 3-11 に、浮きの検出結果を表 3-7 に示す。画像からもわかるように、いずれの外断熱パネルの表面温度にも違いは見られない。本研究でターゲットとする、EPS ボード下の接着層に存在する浮きを熱画像カメラにより判別することはできなかった。尚、撮影条件が異なる別日での検出も試みたが、同様に浮きの判別は困難であった。

表 3-6 外断熱外壁試験体の熱画像撮影条件

撮影機材	InfReC R300SR (日本アビオニクス(株)製)
撮影日時	2019年11月11日9時54分
気温 (気象庁観測データ)	3.1°C (9時, 旭川) 4.4°C (10時, 旭川)
天候	曇
撮影距離	約 5 m
測定温度範囲	+3.0°C~+9.0°C

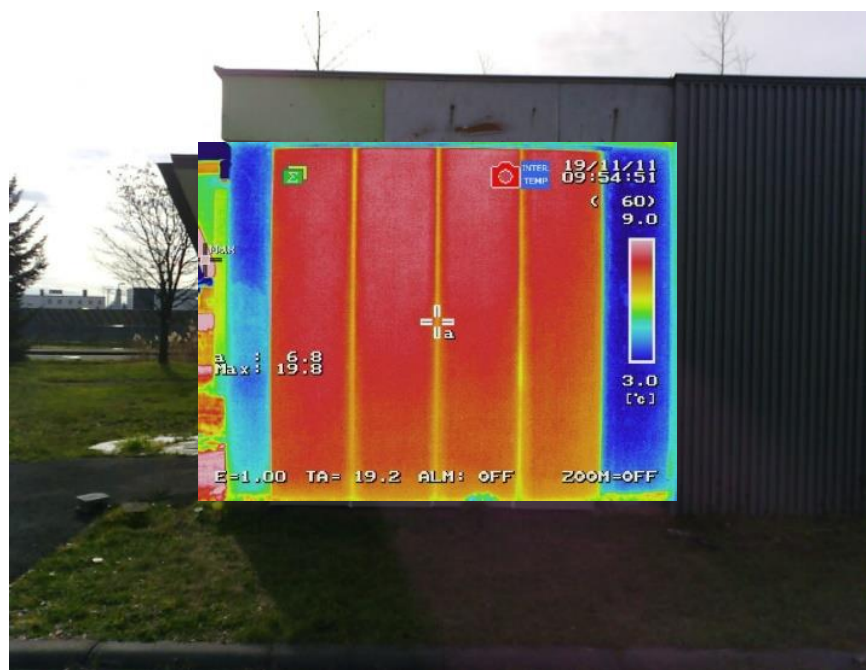


写真 3-11 外断熱外壁試験体の撮影熱画像

表 3-7 外断熱外壁試験体の熱画像カメラによる模擬浮き検出結果

接着方法	全面接着
判定	× : いずれの試験水準についても浮き判別はできない
接着方法	楯引接着
判定	× : いずれの試験水準についても浮き判別はできない
接着方法	点付け接着
判定	× : いずれの試験水準についても浮き判別はできない

b. 打診棒を用いた浮き検出

外断熱外壁試験体を対象に、打診棒（パルハンマー）による模擬浮きの検出を行った。写真 3-12 に打診棒による模擬浮き検出の様子を示す。使用した打診棒は鋼球タイプとし、外断熱外壁表面の打音の変化から浮き箇所の検出を行った。

表 3-8 に打診棒による検出結果を示す。いずれの接着方法においても、EPS ボード下の接着層に存在する浮きの位置および大きさを打診棒によって判別することはできなかった。点付け接着では、健全部および模擬浮き有のいずれについても、接着部での打音の変化が認められた。接着部の形状等を把握するまでには至らないものの、接着部の有無の判別は可能であることがわかった。



写真 3-12 外断熱外壁試験体の打診棒による浮き検出

表 3-8 外断熱外壁試験体の打診棒による模擬浮き検出結果

接着方法	全面接着
判定	×：いずれの試験水準についても浮き判別はできない
接着方法	楯引接着
判定	×：いずれの試験水準についても浮き判別はできない
接着方法	点付け接着
判定	×：いずれの試験水準についても浮き判別はできない △：接着部有無の判別は可能
接着方法	点付け接着（健全部）
判定	△：接着部有無の判別は可能

c. 電磁波レーダー探査装置を用いた浮き検出

外断熱外壁試験体を対象に、電磁波レーダーによる模擬浮きの検出を行った。写真 3-13 に電磁波レーダーを用いた外断熱外壁の探査の様子を示す。調査には、KEYTEC 社製の電磁波レーダー探査装置 SIR-EZ XT（周波数 2700 MHz、探査深度 600 mm、測定距離無制限）を使用した。

電磁波レーダー探査装置による探査位置を図 3-9 に示す。水平探査は模擬浮きを設けた各外壁および健全部の G.L. +200 mm から +2100 mm までの範囲に対して基本的に 50 mm ピッチで実施した。一部の



写真 3-13 電磁波レーダーによる外断熱外壁の探査の様子

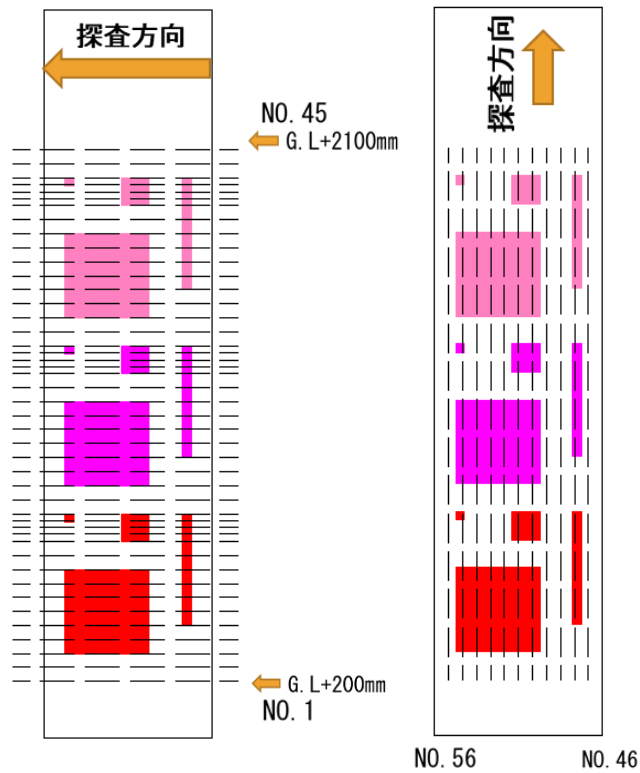


図 3-9 電磁波レーダーの探査範囲および探査方向

箇所については、浮きの直上を通る探査画像を多く得るために、25 mm ピッチでの探査を実施している。水平探査は合計 45 測線にて実施した。

鉛直探査は模擬浮きを設けた各外壁および健全部の右端部+50 mmから右端部+550 mm までの範囲に対して 50 mm ピッチで実施した。鉛直探査は合計 11 測線にて実施した。

図 3-10 に、点付け接着の場合の健全部と模擬浮き部の探査画像の比較の一例を示す。図より、深さ 30~40 mm 付近の波形に白い帯が確認され、所々が山形になっていることがわかる。これは点付け接着部の位置と一致する。その他、健全部と模擬浮き部の画像を比較からは、明確な変化は認められず、模擬浮きに波形変化は確認できなかった。

図 3-11 に、櫛引接着における健全部と模擬浮き部の探査画像の比較の一例を示す。櫛引接着の場合、接着層に櫛目状の凹凸が存在するため、この箇所が発生すると推測されるレーダー反射波の干渉による影響により、健全部と模擬浮き部での明確な波形変化は確認できなかった。

図 3-12 に、全面接着での健全部と模擬浮き部の探査画像の比較の一例を示す。画像中の波形（灰色帯）に変化が見受けられる箇所（図中の赤丸部分）があり、3.0 mm 厚の浮き箇所の位置と大きさが概ね対応することから、模擬浮きによる影響を捉えたものと考えられる。

各探査画像における模擬浮き位置の判定について、「浮きの大きさまで確認できる」、「浮きを確認できるが、大きさが判別しにくい」、「浮きを確認できない」の 3 段階で評価した。判定結果を図 3-13~3-15 に示す。いずれの接着方法でも浮きの厚さが 1.0 mm 以下の場合、浮きの面積に関わらず、電磁波レーダー画像からは模擬浮きを判別することは困難であった。

一方、全面接着における浮き厚さ 3.0 mm の場合には、一部の模擬浮きを除いて、浮きの有無について判別できることがわかった。また、図 3-16 に示すように、点付け接着における接着部については、電磁波レーダーを用いて概ね判別が可能であることを確認した。

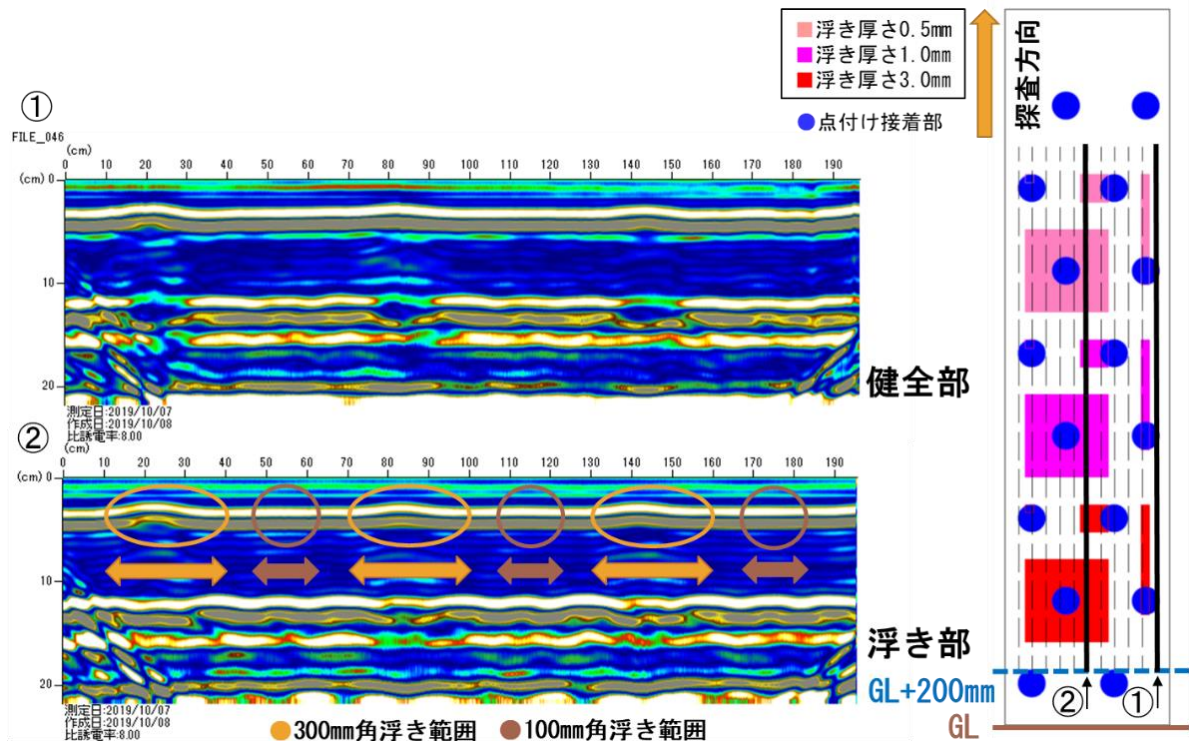


図 3-10 健全部と模擬浮き部分の探査画像の比較例（点付け接着）

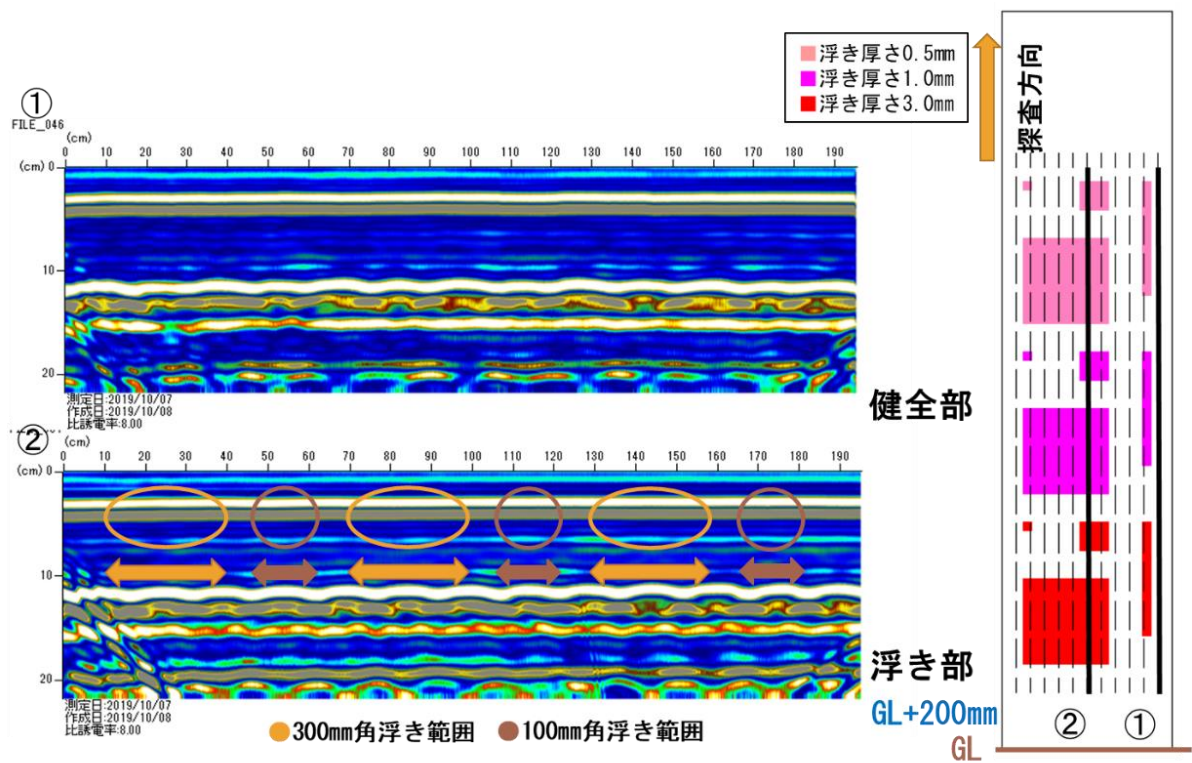


図 3-11 健全部と模擬浮き部分の探査画像の比較例（楕引接着）

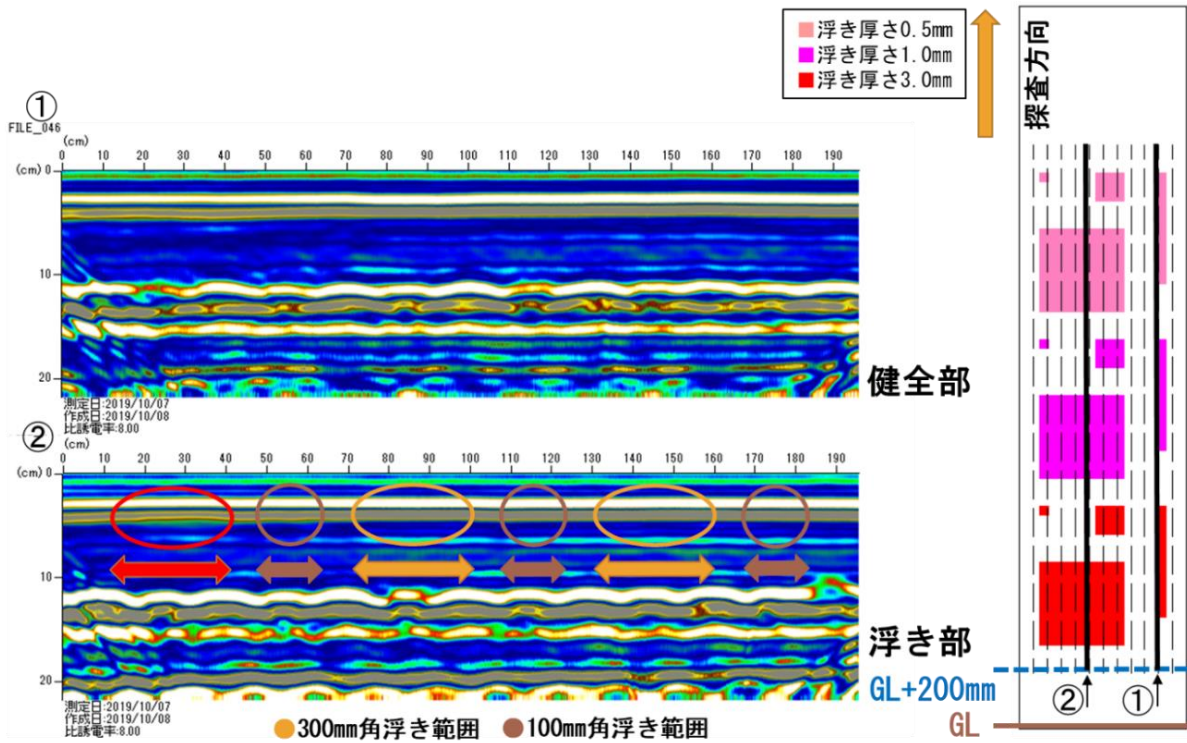


図 3-12 健全部と模擬浮き部分の探査画像の比較例（全面接着）

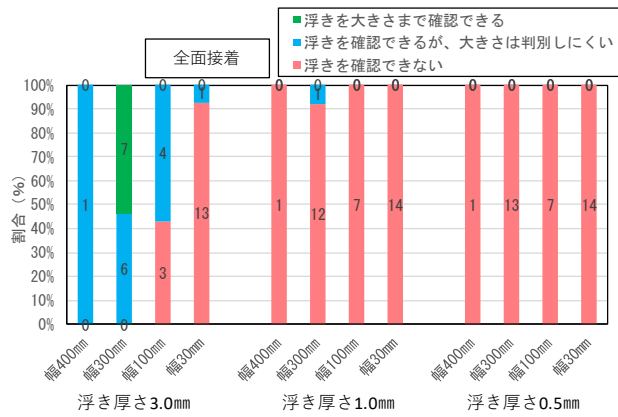


図 3-13 全面接着における探査画像の浮き判定結果

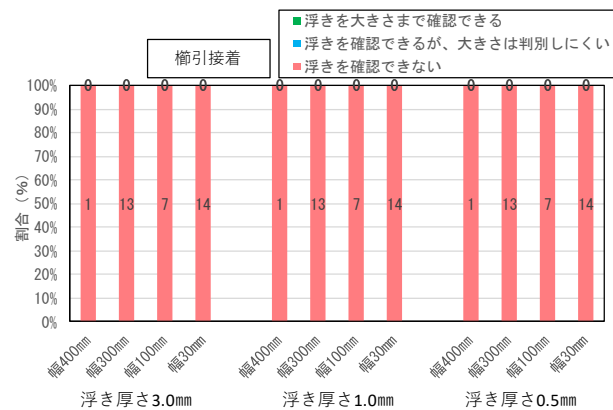


図 3-14 楯引接着における探査画像の浮き判定結果

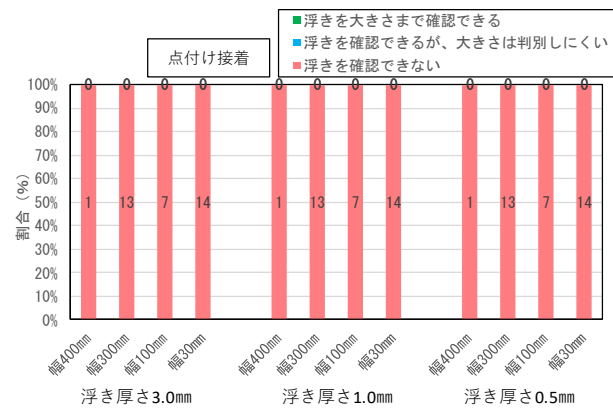


図 3-15 点付け接着における探査画像の浮き判定結果

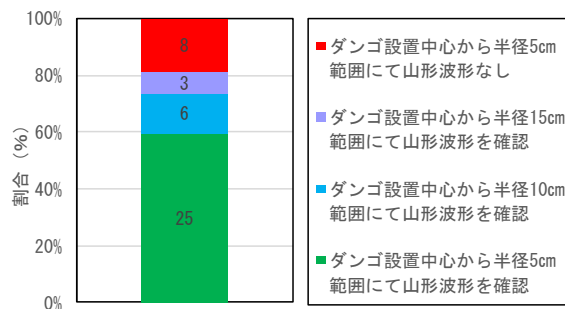


図 3-16 点付け接着における探査画像の接着部の判定結果

4. 電磁波レーダー探査装置を用いた外断熱外壁浮き診断の可能性の検討

(1) 模擬浮き検出データの分析手法

前章において、電磁波レーダー探査装置を用いて、点付け接着の接着部および全面接着における厚さ 3.0 mm の模擬浮きは検出できる可能性があることを明らかとした。前章で用いた探査画像は、受信した電磁波の反射波形をコンタ図に変換して連続的に表示したものである。これは検出結果を即座に表示理解するためには有効であるものの、詳細な数値データの分析に用いることはできない。本章では、探査画像上では明確な変化が確認できない場合でも、反射波形には何らかの模擬浮きの影響による変化が生じているものと推測し、反射波のデータ分析による浮き検出の可能性の検討を行った。

1) 数値データ抽出ソフトウェア：dztDumpw (KEYTEC株式会社製)

電磁波レーダーにより測定されたデータは、探査装置の内部処理により探査画像を自動生成しているが、そのままでは数値データとして取り扱うことができない。本ソフトウェアを用いることにより、検出画像データから数値分析が可能なデータ (CSV ファイル) を抽出することができる。本節では、このソフトウェアにより得られた数値データを用いて検討を行った。探査では装置の走査方向に対して 1.25 mm ピッチで反射波形 1 波を得ている。反射波形 1 波分には深さ方向に 510 点の数値データを保持している。尚、本ソフトウェアは KEYTEC ㈱ から許諾を受け、研究目的に限り使用することができる。

2) 分析方法

図 4-1 に分析対象とした探査位置を示す。探査した測線のうち、図中に表示した全面接着の No. 52

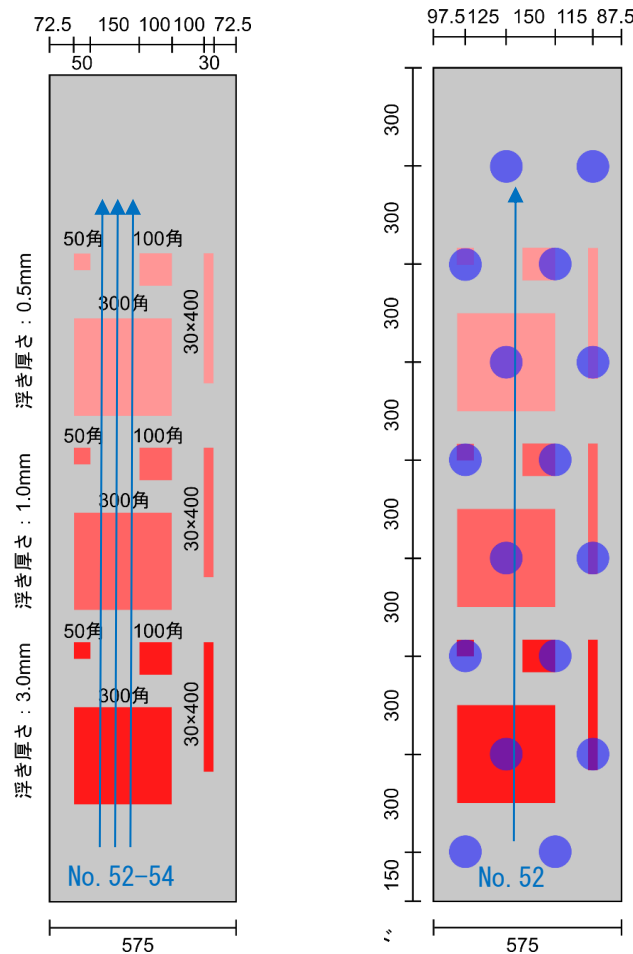


図 4-1 分析対象とした側線位置 (左：全面接着，右：点付け接着)

～54 位置および点付け接着の No. 52 位置を対象とした。各測線を健全部(灰色部分), 模擬浮き部(浮き厚さ 0.5 mm, 1.0 mm, 3.0 mm: 薄赤色～赤色部分), 点付け接着部分(青丸部分)に分け, 該当範囲の反射波形の平均波形を算出し, その変化の傾向について比較した。

図 4-2 に全面接着における波形の比較を示す。図中には模擬浮きの無い探査位置および各浮き厚さを通る探査位置における検出結果の平均波形をそれぞれ示している。この図より, ある程度の深さ(図中では 50 mm程度(比誘電率:8 の場合))までは, いずれの波形も概ね同形状を示すものの, それよりも深部では浮きの厚さに応じて健全部との波形に違いが見られた。図中の青丸で示した, 形状に差が見られ始めた最初のピーク位置に着目すると, 浮きの厚さが 0.5 mm, 1.0 mmの場合, ピーク位置の位相は健全部と大きな差は見られないが, 振幅の違いが見られることが読み取れる。探査画像上においても浮きの検出が確認された厚さ 3.0 mmの場合では, ピーク位置の振幅は健全部よりも小さくかつ

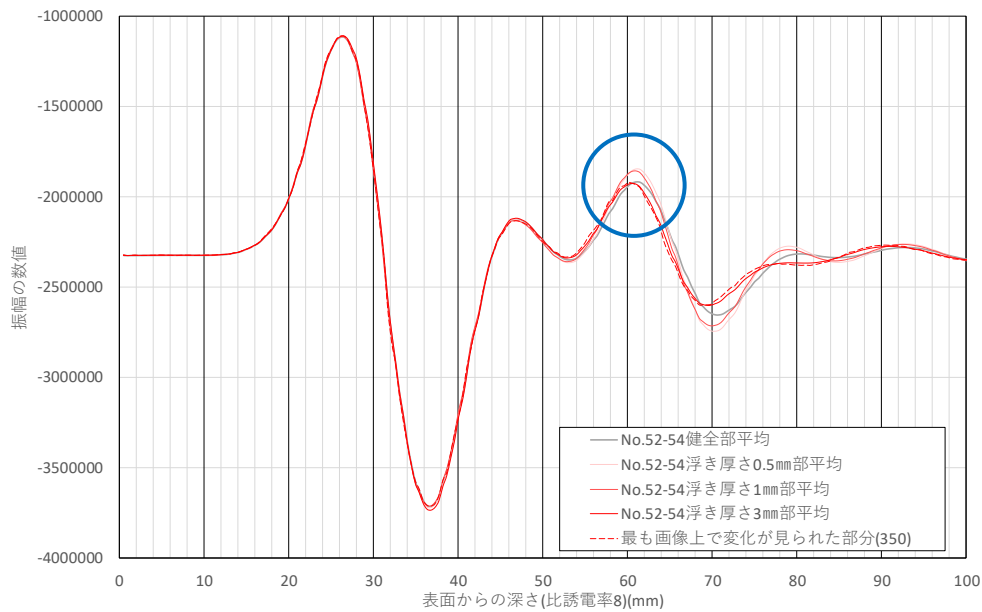


図 4-2 全面接着における検出波形の比較

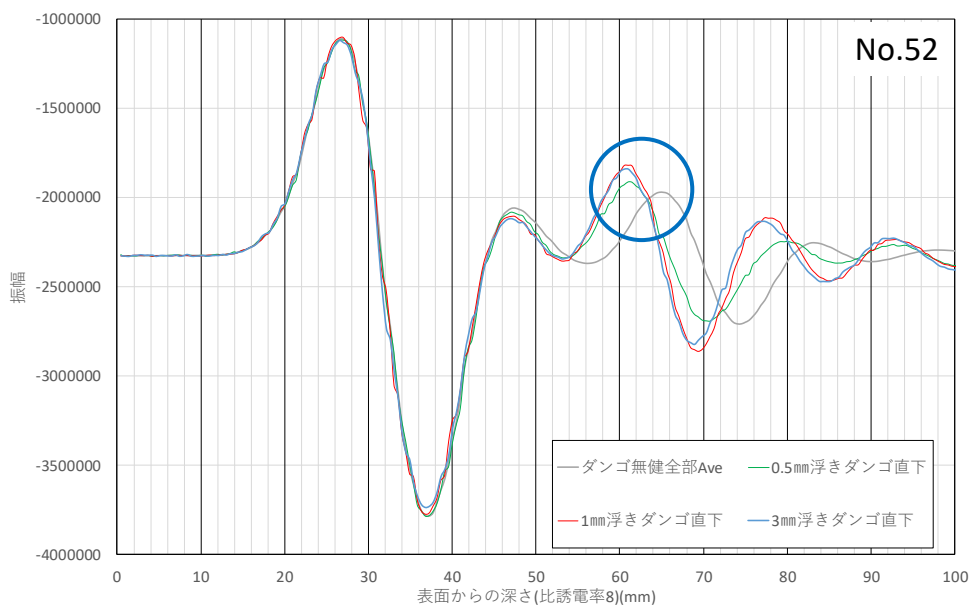


図 4-3 点付け接着における検出波形の比較

位相が浅部側に移動していることがわかる。これらピーク位置の変化を判別条件として利用することで、既存の電磁波レーダー装置で出力される検出画像では判別が困難な浮きについても、判別の可能性があると考えられる。

図 4-3 に点付け接着における検出波形の比較を示す。図中には、各厚さの模擬浮きの直上に接着部がある探査位置と模擬浮きおよび接着部がいずれも無い探査位置における検出結果の平均波形をそれぞれ示している。全面接着での比較と同様に、図中の青丸で示している波形の相違が確認された最初のピーク位置について見てみると、接着部での検出結果は、模擬浮きおよび接着部がいずれも無い箇所と比較して、ピーク位置の位相が浅部側にずれており、明確に波形が異なることが読み取れる。点付け接着の場合についても、これらピーク位置の変化を判別条件として利用することで、接着部位置の詳細な判別が可能になるものと考えられる。

(2) 分析プログラムを用いた模擬浮き検出の可能性の検討

前節で検討した電磁波レーダー検出データの特徴に基づき、浮き等の検出結果について分布表示が可能な分析プログラムを作成した。分析プログラム作成にあたっての基本方針を以下に示す。

- ・前節の分析で判明した、波形に差が表れる最初のピーク位置の振幅と位相を判別条件とする。
- ・接着方法により波形の特徴が異なるため、現状では接着方法ごとに個別の判別条件を設定する。
- ・判別条件から、浮き箇所を白色（1）、接着部を黒色（0）の二値で表示する。
- ・数値計算言語は Matlab (Octave) を使用し、汎用性を考慮して特殊な関数等は使用しない。

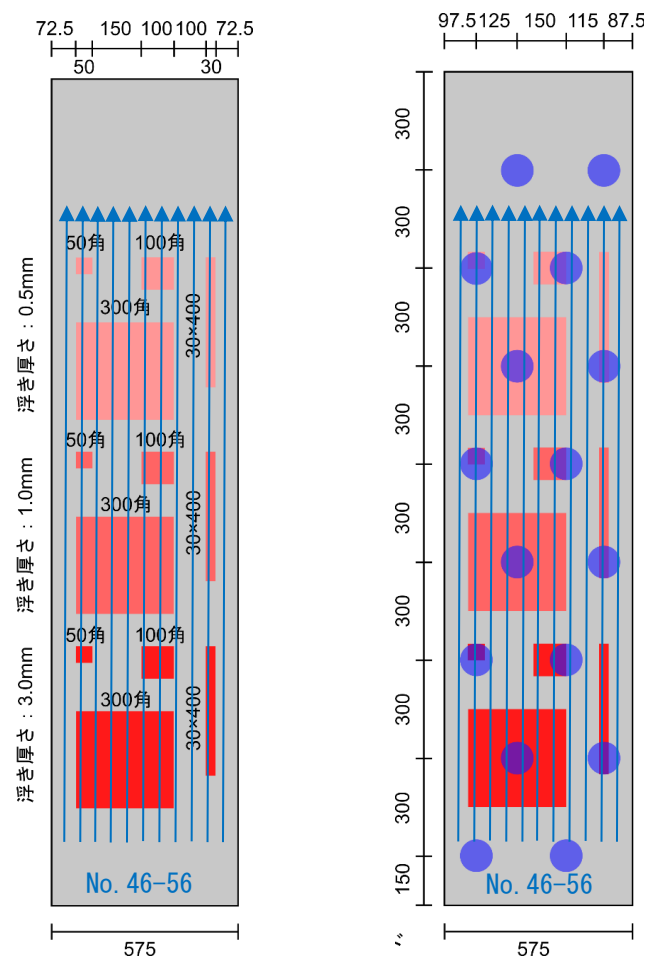
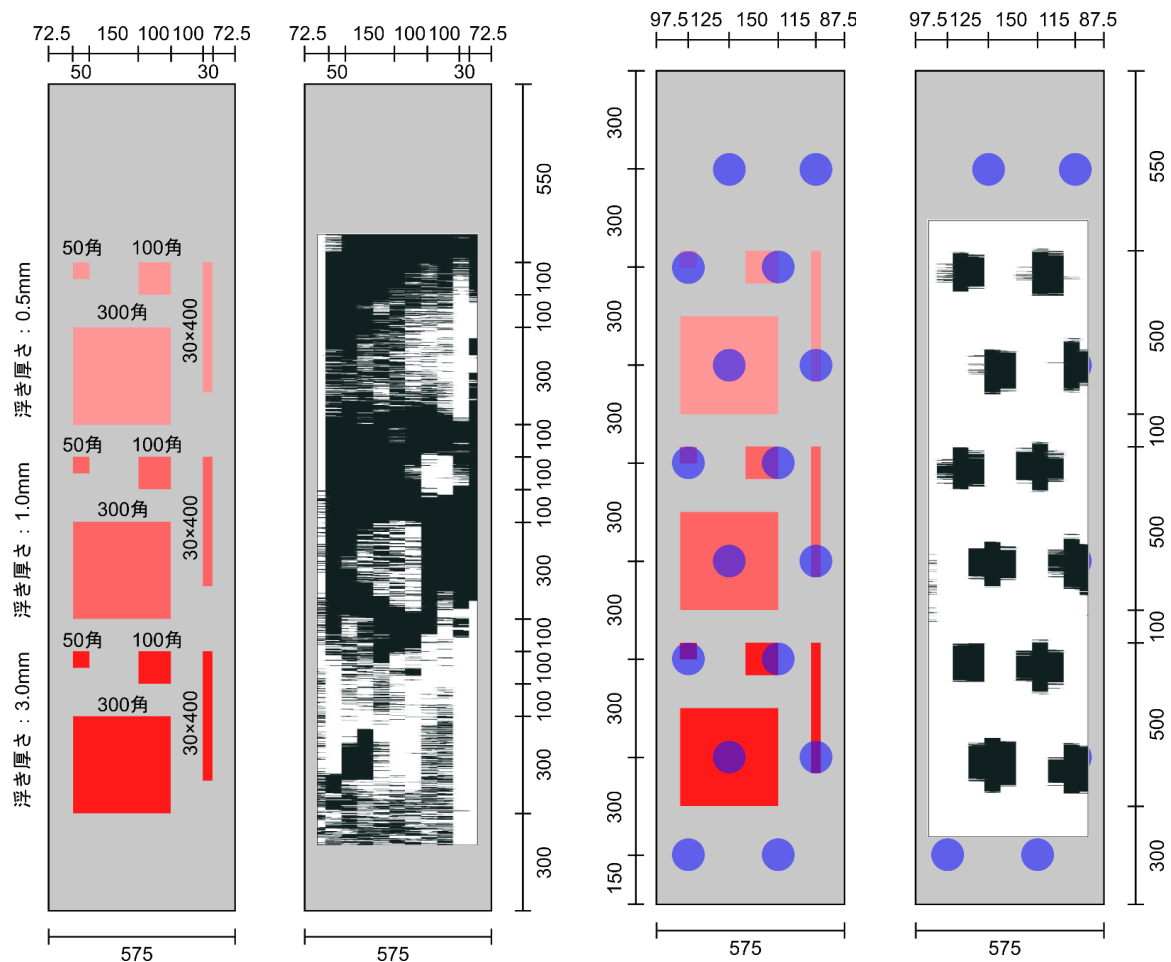


図 4-4 浮き分布表示の対象とした側線位置（左：全面接着，右：点付け接着）

図 4-4 に、分析に使用した電磁波レーダーの側線位置を示す。全面接着，点付け接着のいずれも，鉛直方向に探査した No. 46-56 の計 11 側線の探査データを CSV ファイルとして変換した数値データを使用した。各側線が持っている検出点（外壁試験体全体：510 点×11 側線 = 5610 点）について，検出波形の該当するピーク位置を分析プログラムにより自動抽出し，ピーク位置の振幅および位相の値と各接着方法の判別条件に基づいて，二値データに変換した。

分析プログラムにより表示した浮きの分布図を図 4-5 に示す。全面接着の場合は，形状の明確な判別とまではいかないものの，浮き箇所を大まかに表示していると思われる。特に既存の電磁波レーダー装置による検出画像では判別ができなかった，厚さ 0.5 mm および 1.0 mm の浮き箇所について，一部のサイズの模擬浮きで検出結果の対応が見られる。点付け接着の場合については，接着部位置や大きさの判別が可能であった。模擬浮き箇所については，今回使用した判別条件下では接着部直下や空隙部ともに判別することはできなかった。

自動的に分布表示を行うことができれば浮き箇所をより直感的に理解できるため，将来的にこの種の技術を使用した作業を想定した場合，検出結果の見落としの軽減や作業経験不足をカバーする効果も期待できる。尚，本研究では浮きの検出可能性の検討が目的のため，現状での浮きの判別条件については，いずれの接着方法でも検討の余地が残されている。複数の判別条件の組み合わせや今回検討していないピーク位置による判別条件等が有効であると思われるため，今後の検討によって判別精度の向上の可能性は十分にあると考えられる。



(a) 全面接着の場合

(b) 点付け接着の場合

図 4-5 分析プログラムを用いた電磁波レーダーデータの浮き分布表示結果

5. まとめ

外断熱外壁内部の浮き等の非破壊検査装置による検出可能性について検討を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) モルタル外壁内部および外断熱接着層に模擬浮きを設けた外壁試験体を、北方建築総合研究所内のRC実験棟に作製した。今後の浮き検出の検討等に必要なベンチマークとしての活用や診断技術者の育成および技術向上において活用される。
- 2) 非破壊検査機器の一種である熱画像カメラおよび打診棒による浮き検出の検討を行った。外断熱改修時の下地を想定したモルタル外壁の浮き検出においては有効性が認められるものの、外断熱パネル施工後では、断熱材の下にある接着層の浮き箇所を熱や音の情報を用いて判別することは困難であることを明らかにした。
- 3) 電磁波レーダー探査装置を使用した浮き検出について検討した。モルタル外壁試験体を対象とした検出から、モルタル厚さ 10 mm での浮き検出はいずれの試験水準でも困難であること、モルタル厚さ 30 mm、浮き面積 300 mm 角の条件下では、判別可能な浮きが 80 %以上となること等を示した。外断熱接着層に模擬浮きを設けた試験体の検討から、点付けの接着部および全面接着における 3.0 mm 厚さの浮きを既存の電磁波レーダー探査装置で判別できることを示した。櫛引接着では、接着層の凹凸面での反射波が干渉する影響があると考えられ、明確な浮き検出は困難であった。
- 4) 電磁波レーダーの検出データから、浮き箇所を分布表示可能な分析プログラムを作成した。波形ピーク位置の振幅および位相を判別条件とした分析を行うことで、現状の電磁波レーダー探査装置では判別が困難であった、全面接着における 1.0 mm および 0.5 mm 厚さの浮きについても、検出の可能性を示した。

[参考文献]

- 2-1) 北海道建築技術協会：RC 造外断熱改修工法ハンドブック，2011. 1
- 2-2) 国土開発技術研究センター編：外装仕上げの耐久性向上技術，技報堂出版，1987. 3
- 2-3) 国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会編：建築防水の耐久性向上技術，技報堂出版，1987. 4
- 2-4) 国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会編：鉄骨造建築物の耐久性向上技術，技報堂出版，1986. 6
- 2-5) 古賀純子，根本かおり，濱崎仁，鹿毛忠継，本橋健司，大久保孝昭，田中享二：建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究，建築研究資料，No. 145，2013. 8
- 3-1) 守屋義裕，河辺伸二，鹿毛忠継，眞方山美穂，小川晴果，名知博司：タイル外壁診断装置を評価する浮き試験体の標準化（その1．浮き試験体の作製方法の検討），日本建築学会学術講演梗概集（材料施工），pp. 1101-1102，2017