

2つの新技術開発を通じた
建築外壁の長寿命化に関する研究
(Study on long-life technology for external building
walls through the two new technical methods)

2016年3月

毛利 聡

参考文献.....	42
第4章 可視化試験法による注入性状に及ぼす施工要因の検討	
4.1 はじめに.....	44
4.2 試験概要.....	44
4.2.1 試験要因.....	44
4.2.2 ひび割れ内部形状の影響.....	46
4.2.3 ひび割れ幅と向きの影響.....	46
4.2.4 施工時外気温の影響.....	47
4.2.5 注入圧力の影響.....	47
4.2.6 樹脂粘度の影響.....	48
4.3 試験結果と考察.....	48
4.3.1 注入性状の評価方法.....	48
4.3.1.1 注入面積拡大停止時の補修材の充填形状の評価.....	48
4.3.1.2 注入完了後の補修材の垂れの評価.....	50
4.3.2 ひび割れ内部形状の影響.....	52
4.3.3 ひび割れ幅と向きの影響.....	59
4.3.4 施工時外気温の影響.....	68
4.3.5 注入圧力の影響.....	75
4.3.6 樹脂粘度の影響.....	77
4.4 注入性状へ及ぼす施工要因の検討.....	85
4.4.1 施工要因と注入性状の関係.....	85
4.4.2 ひび割れ注入工事における留意点.....	86
4.5 注入性状評価試験としての有用性に関する考察.....	87
4.6 まとめ.....	88
参考文献.....	89
第5章 木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の活用効果の検討	
5.1 はじめに.....	90
5.2 実験概要.....	90
5.2.1 検討する性能.....	90
5.2.2 実験に用いた防水紙.....	91
5.2.3 使用材料.....	91
5.2.4 下地板とラスモルタルとの接着一体性の評価実験.....	94
5.2.5 促進劣化試験による接着一体性の耐久性評価.....	95
5.2.6 小型試験体による乾燥収縮ひずみ計測実験.....	97

5.2.7	大型試験体による屋外曝露実験.....	98
5.2.8	ステーブル防錆性の評価実験.....	101
5.2.9	振動実験によるラスモルタルの剥落性の評価.....	102
5.3	実験結果および考察.....	104
5.3.1	下地板とラスモルタルとの接着一体性に関する実験結果.....	104
5.3.1.1	接着一体性の初期値.....	104
5.3.1.2	促進劣化試験後の接着一体性.....	110
5.3.1.3	大型試験体の引張強度.....	113
5.3.2	ラスモルタルの乾燥収縮に関する実験結果.....	115
5.3.2.1	小型試験体による乾燥収縮ひずみの計測結果.....	115
5.3.2.2	大型試験体による乾燥収縮ひび割れ発生状況.....	118
5.3.3	ステーブルの防錆性に関する実験結果.....	125
5.3.4	振動実験によるラスモルタルの剥落性に関する実験結果.....	131
5.3.4.1	地震動入力時の試験体の剥離状況.....	131
5.3.4.2	加速度測定結果による剥離の判定.....	138
5.4	粘着型防水紙の活用効果に関する考察.....	142
5.5	まとめ.....	143
	参考文献.....	143
第6章	結論	144
	謝辞.....	149

第 1 章 序論

第1章 序論

1.1 はじめに

我が国では、社会経済の成熟化や地球環境問題への対応を背景として、建築ストックを活用することが課題となって久しい。国土交通省公表の「建築物ストック統計（平成27年1月1日現在）」によると、日本国内の建築物ストックは約73億6567万m²であり、対前年比で約0.5%の増加、5年前の平成22年との比較では、2.7%の増加となっている^{1.1)}。このように建築物ストックが増加している中で、これらを長期に利用するための技術や制度の開発が求められている。

建築物の長寿命化には、新築においては、的確な耐久設計とその設計思想を実現するための材料や施工技術が必要となる。一方、既存建築物に対しては、調査、診断、補修、改修に渡る維持管理を合理的に行うことが重要となる。これらの事柄を背景として、建物の耐久性や維持管理に関する研究や技術開発は1980年代より行われてきており、実際の建物への適用も進んでいる。しかし、建築物に生じる劣化の発生要因は複雑であり、また既存建築物の維持管理については、建物の諸元や状態は幅広い。従って、耐久性を考慮した設計や施工、調査、診断や補修、改修には、現場における経験や実績に基づいた技術が多い。一方で、高度経済成長期に大量に供給されてきた建築ストックを限られた予算や人的資源で維持管理しなければならない時代に来ている。そこで建築物、部材の劣化や損傷のメカニズムを明らかにし、それを踏まえたより合理的な長寿命化技術を建築物のライフサイクルにおいて適用することが必要である。

本研究は、建築物の長寿命化に大きく関わる外壁部材について、長寿命化に貢献する技術を提案することを目的として、中でも劣化した部材の補修技術の客観的な評価技術開発および外壁部材の耐久性向上のための技術開発に的を絞り研究を行っている。

具体的には、RC外壁のひび割れ注入工法を対象に、ひび割れへの補修材の注入性状の評価手法の確立および施工計画段階において有用なデータを収集することを目的に、注入性状を可視化した試験体を用いた評価技術を提案し、それを用いた注入性状に関わる施工要因の評価を行っている。

また、木造建築物のラスモルタル外壁を対象に、地震時のラスモルタルの剥落防止および経年劣化に対する耐久性向上を目的に、弾性・粘着層を有する新規防水紙の活用を提案し、活用効果を実験的に検討している。

1.2 論文の構成

本論文は、以下に示す第1章から第6章までで構成されている。図1.1に構成と概要を示す。

第1章では、建築物の長寿命化に大きく関わる建築外壁について、長寿命化の必要性および既往の研究、技術開発は経験や実績に基づいたものが多くより合理的な技術開発が必要であることを研究背景とし、建築外壁の長寿命化に貢献する技術を開発、提案することを本研究の目的として示している。

第2章では、外壁部材の耐久性向上および維持管理手法に関する既往技術・研究を整理し、現状の課題および本研究の位置付けを明確にしている。

RC外壁のひび割れ補修に関しては、注入工法の計画、施工管理の現状の問題点および補修材の注入性状を評価することを目的とした既往研究を示し、それらを踏まえて補修材の注入性状を、ひび割れ内部形状を統一した上で可視化することを提案する技術の目標としている。

木造ラスモルタル外壁の品質向上に関しては、ラスモルタルの経年劣化と地震時の剥落の問題および品質改善を目的とした既往技術・研究を示し、それらを踏まえて地震時のラスモルタルの剥落防止および経年劣化に対する耐久性向上を提案する技術の目標としている。

第3章では、提案した建築外壁の長寿命化に貢献しうる技術の概要を示している。

RC外壁補修におけるひび割れ注入性状の可視化試験法は、3Dスキャナ、3Dプリンタを用いて同一のひび割れ形状を透明な樹脂素材に切削したものを型枠とし、モルタルを打設してそのふたつを重ね合わせたものをひび割れ再現試験体として隙間に補修材を注入するものであり、統一したひび割れ形状で補修材の注入性状を可視化して評価できる。

木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の活用技術は、構成材料のひとつである防水紙に粘着層を有する粘着型防水紙を活用するものであり、活用効果としてモルタルの乾燥収縮ひずみの低減によるひび割れの抑制（両面に粘着層を有するもの）、ステーブル釘穴のシール性の向上、下地に対する接着性の向上、モルタルに対する接着性の向上（両面に粘着層を有するもの）を想定している。

第4章では、提案した注入性状の可視化試験法を用いて、補修材の注入性状と施工要因との関係の評価および可視化試験法の注入性状評価手法としての有用性の検討を行っている。試験の結果、補修材のひび割れ内での広がり方や垂れはひび割れ内部形状や幅や向き、施工時外気温、注入圧、補修材種類といった施工要因の影響を受けて変化することを示している。また、注入性状がひび割れ内部形状の影響を受けることからひび割れ形状を統一して注入性状を評価することの必要性を示している。

第5章では、木造ラスモルタル外壁への粘着型防水紙の活用による効果について実験的に検討を行っている。実験の結果、粘着型防水紙をラスモルタル外壁の構成材料として適用することでステーブルの耐久性および地震時の剥落抑制性の向上においてラスモルタル外壁の長寿命化に貢献できる一方、面内方向に対する接着一体性の確保およびモルタルの乾燥収縮抑制にはメタルラス、ステーブルとの併用が必要であることを示している。

第6章では、本研究の成果を総括している。

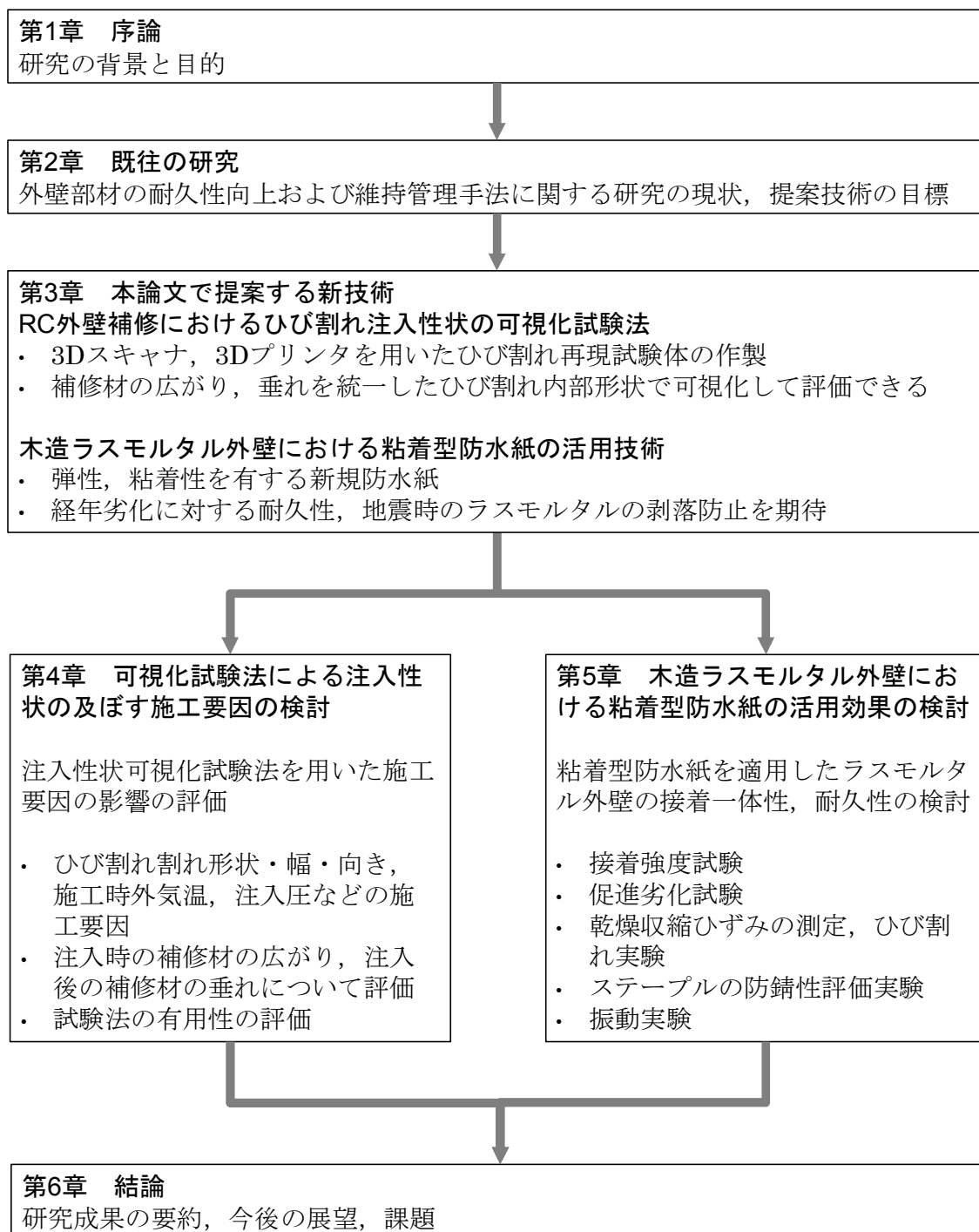


図 1.1 本論文の構成と概要

参考文献

- 1.1) 国土交通省 総合政策局 建設経済統計調査室：建築物ストック統計（平成 27 年度 1 月 1 日現在）（暫定値）の公表，2015.7.30

第2章 既往の研究

第2章 既往の研究

2.1 はじめに

本章では、外壁部材の耐久性向上および維持管理に関する制度や、技術開発、研究を整理し、現状の課題および本研究の位置付けを明確にする。

2.2 外壁部材の耐久性向上に関する制度および規準に関する現状

我が国では、優良な建築ストックを形成し、長期に渡り使用することを目標に、循環型社会形成推進基本法、品確法、長期優良住宅制度などの行政施策や、内外装改修工事指針（案）（日本建築学会編著）やコンクリートのひび割れ調査・補修指針（案）、コンクリート診断技術（ともに日本コンクリート工学会編著）などの技術規準や指針が定められている。

長期優良住宅制度とは、「長期優良住宅の普及と促進に関する法律」を柱とする制度であり、長期にわたり良好な状態で使用するための措置が講じられた住宅を長期優良住宅として認定し、税の特例措置を施すものである。認定のための技術基準の例として木造および鉄筋コンクリート造の住宅の劣化の軽減に関する評価項目をまとめると、3等級（住宅が限界状態に至るまでの期間が3世代以上となるための必要な対策）については表2.1、2.2のとおりである。表2.1に示すように、木造については、腐朽および蟻害による木材の劣化を対象としている。一方、RC造については表2.2に示すように、コンクリートの中酸化による鉄筋の発錆および凍結融解作用によるコンクリートの劣化を対象としている。

また、日本建築学会編著の「内外装改修工事指針（案）」では、外装仕上げについては、湿式構法によるセメントモルタル塗り、陶磁器質タイル張り、塗装仕上げ、建築用仕上塗材仕上げを適用範囲として、調査・診断、改修設計、改修工事、改修後の維持管理についての指針を示している^{2.1)}。

以上の他にも様々な行政施策や技術規準、方針があるが、その中で示されている部材の耐久性や補修・改修技術の性能評価に関するデータの蓄積は少なく、研究や技術開発は途上であり、今後も検討が必要であるといえる。

表 2.1 劣化の軽減に関する評価基準（木造，等級3）^{2.2)}

評価項目	
a 外壁の軸組等	通気構造となっているか，軸組・外壁下地材の規格，防腐・防蟻処理
b 土台	土台材の規格，防腐・防蟻処理
c 浴室及び脱衣室	防水上有効な仕上げの有無，浴室ユニットの規格
d 地盤	べた基礎など内周部の地盤をコンクリートで覆ったものになっているのか
e 基礎	地面から基礎上端までの高さ
f 床下	床下の防湿性能
g 小屋裏	小屋裏の換気能力
h 構造部材等	建築基準法施行令における構造躯体等の劣化軽減に関する基準を満たしているか

表 2.2 劣化の軽減に関する評価基準（鉄筋コンクリート造等，等級3）^{2.2)}

評価項目	
a セメントの種類	セメントの規格
b コンクリートの水セメント比	水セメント比の下限，水セメント比や部材に対応する最小かぶり厚さ
c 部材の設計・配筋	施工誤差を考慮した設計かぶり厚さが設定されているか
d コンクリートの品質	コンクリート強度，スランプ，単位水量の上限，空気量
e 施工計画	密実に充填するための方法，打継ぎ部の処理，養生方法
f その他の構造部材等	建築基準法施行令における構造躯体等の劣化軽減に関する基準を満たしているか

2.3 RC 外壁のひび割れ補修技術に関する現状

鉄筋コンクリート部材の変状には表 2.3 に示すものがある。これらの変状に対する補修工法には図 2.1 に示すものがある。中でもひび割れは，劣化現象のひとつであるだけでなく，漏水や鉄筋腐食の原因にもなる。

コンクリートに生じたひび割れの補修は，ひび割れによるコンクリート構造物の耐久性や防水性などの性能の低下を回復させる目的で行われる。補修工法として，日本コンクリート工学会編著の「コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2013」では，図 2.2 に示すような補修工法があるが，以下に各補修工法の概要を示す。

表 2.3 鉄筋コンクリート部材の変状^{2.3)}

変状の種類	変状の内容
初期欠陥	豆板 コールドジョイント 内部欠陥 砂すじ 表面気泡
経年劣化	ひび割れ 浮き 剥落 錆汁 エフロレッセンス 汚れ(変色) すり減り
構造的変状	たわみ 変形 振動

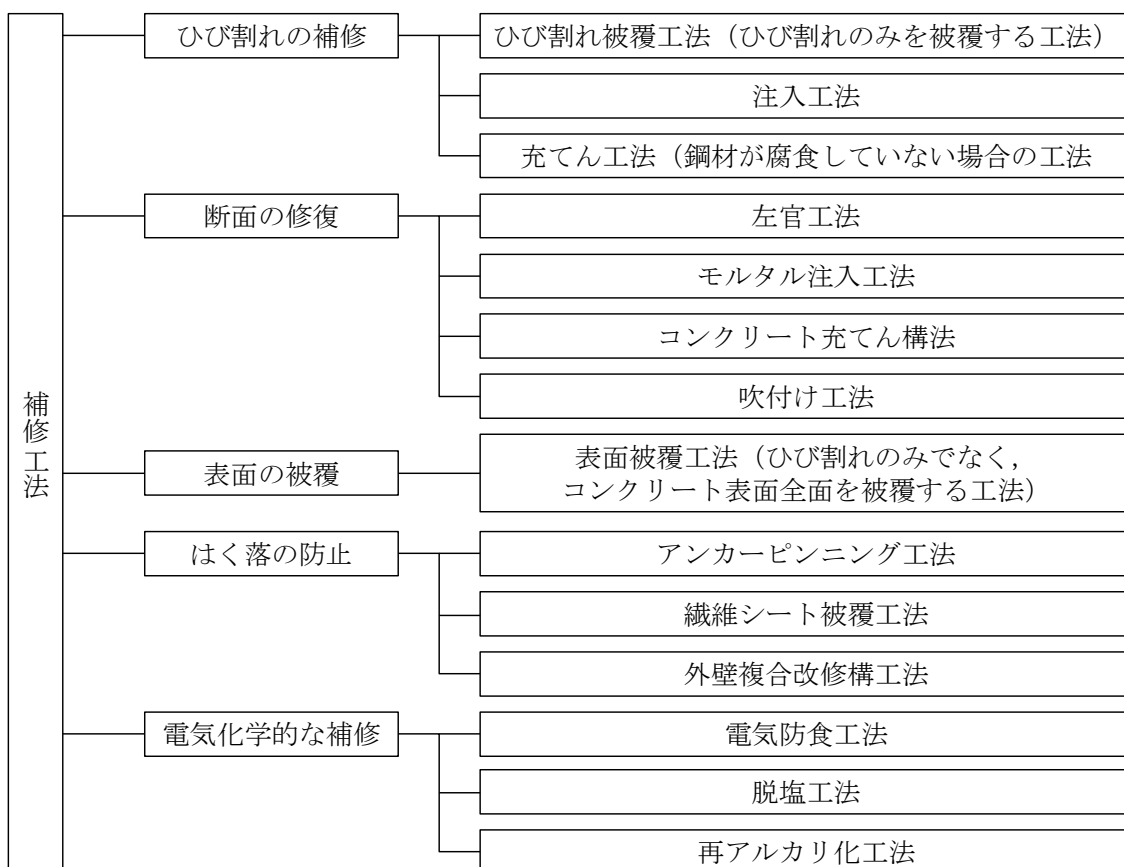
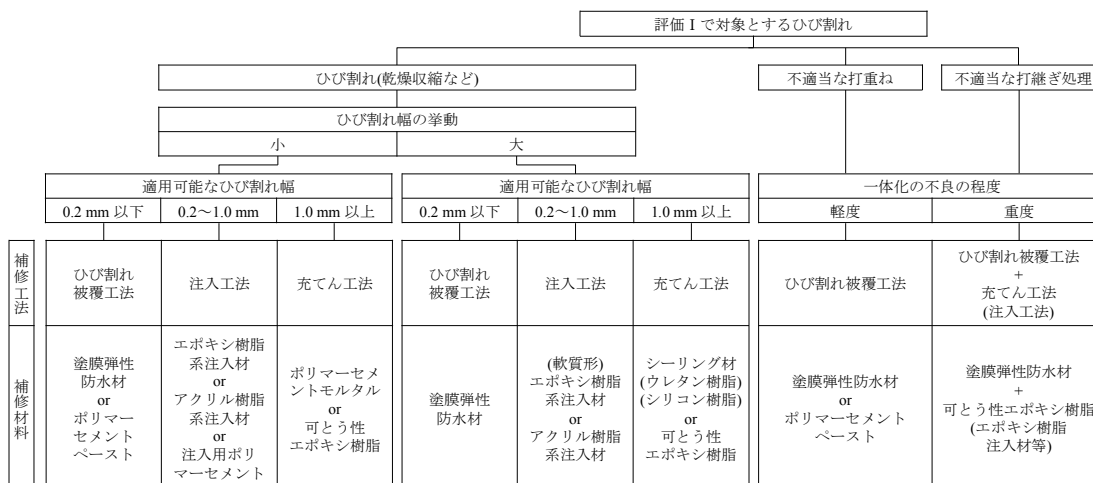


図 2.1 主な補修工法の種類^{2.4)}



※「評価Ⅰで対象とするひび割れ」とは乾燥収縮や水和熱によるひび割れなど、竣工から数年以内には収束すると考えられるひび割れをさす。

図 2.2 ひび割れの補修工法の選定例 2.4)

a. ひび割れ被覆工法

微細なひび割れ（一般には幅 0.2mm 以下）の上に塗膜を構成させ、防水性，耐久性を向上させる目的で行われる工法で，ひび割れのみを被覆する方法である（図 2.3）。

b. 注入工法

ひび割れに樹脂系あるいはセメント系の材料を注入して，防水性，耐久性を向上させるものであり，仕上材がコンクリートの躯体から浮いている場合の補修にも採用される（図 2.4）。

c. 充てん工法

0.5~1.0mm 程度以上の比較的大きなひび割れ，かつ，鋼材が腐食していない場合の補修に適する工法で，ひび割れに沿って U 字形にコンクリートをカットし，その部分に補修材を充てんする方法である（図 2.5）。

上記の補修工法は部材ごとに，ひび割れの主たる原因，評価・判定結果，オーナーによる期待延命期間および回復目標の程度を踏まえ選定すべきであり，ひび割れ幅やひび割れの挙動から選定する場合は図 2.2 のような選定を行うとよいとされる。

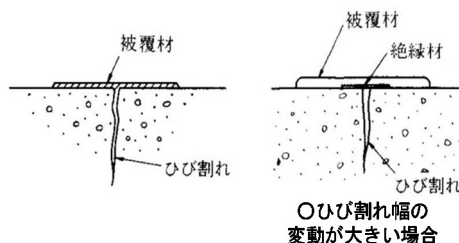


図 2.3 ひび割れ被覆工法 2.4)

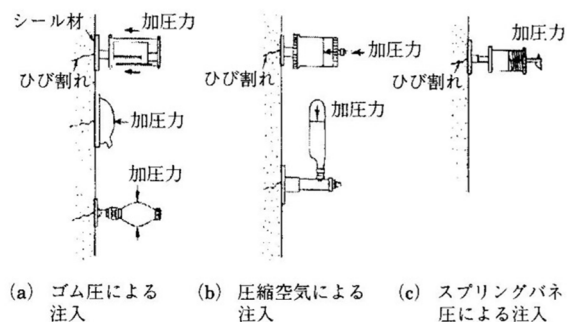


図 2.4 注入工法（低圧低速注入工法）^{2.4)}

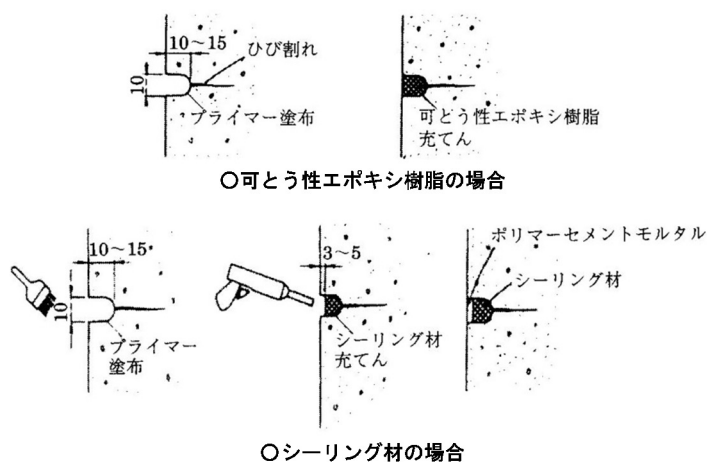


図 2.5 充てん工法^{2.4)}

2.4 注入工法に関する現状

2.4.1 工法の概要

前述のとおり、注入工法はひび割れに補修材を注入する補修工法であるが、従来の注入工法では、手動や足踏み式の機械注入方式で行われていたが、注入量や圧力の制御が難しく、品質が作業員の熟練度に左右されるなどの問題があった。現在では、ゴム圧や圧縮空気により容器内の補修材を自動的に注入できる器具を用いる自動式低圧注入工法による方法が主流となっている。

注入工法に用いられる補修材には、エポキシ樹脂やアクリル樹脂などの有機系、セメント系、ポリマーセメント系がある。

注入工法の手順を図 2.6 に示す。

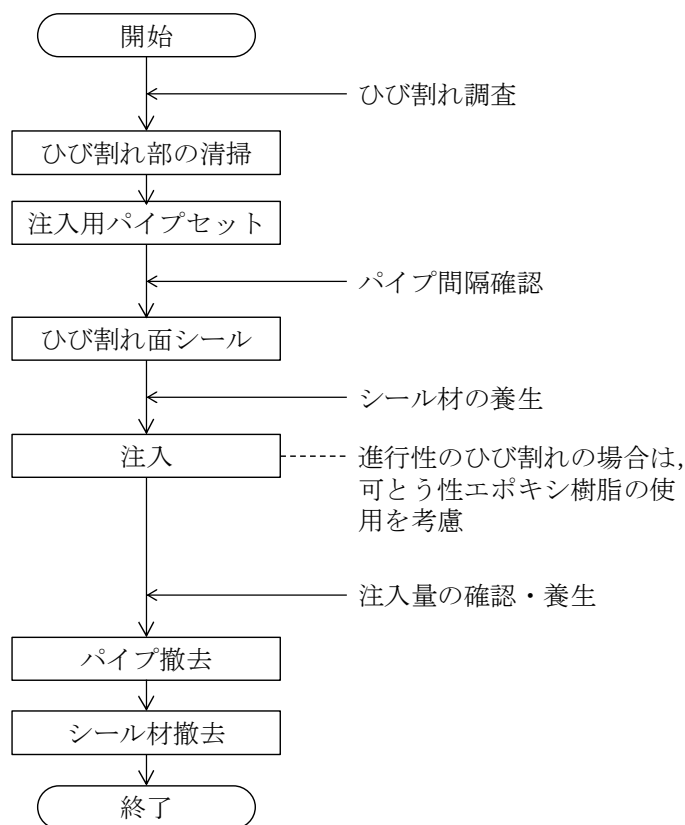


図 2.6 注入工法のフローチャート 2.4)

2.4.2 注入工法によるひび割れ補修工事における品質管理の現状

「公共建築改修工事標準仕様書（建築工事編）平成 25 年度版」では，注入工法（樹脂注入工法）をひび割れ補修工事に採用する場合，表 2.4 に示す項目について規定されている 2.5)。使用材料や工法の他には，注入口の間隔や注入圧力などが規定されている。施工後の検査としては，適用は特記によるとされているが，注入した箇所のコア抜き取りが定められている。また，（独）都市再生機構監修「保全工事共通仕様書平成 26 年度版」においては，コア抜き取りと注入器具の補修材の残量から注入量の確認を行うことが定められている 2.6)。

表 2.4 樹脂注入工法における規定^{2.5)}

項目	規定
(a) 注入量の測定	各ひび割れごとに使用した注入量を測定し監督職員に報告する。
(b) 工法の種類	以下の工法とし、適用は特記による。特記がなければ自動式低圧エポキシ樹脂注入工法とする。 (1) 自動式低圧エポキシ樹脂注入工法 (2) 手動式エポキシ樹脂注入工法 (3) 機械式エポキシ樹脂注入工法
(c) 自動式低圧エポキシ樹脂注入工法	(1) ひび割れに沿って幅50mm程度の清掃をする。 (2) 注入間隔は特記による。特記がなければ200~300mm間隔とする (3) 注入器具は又は台座はひび割れの中心に来るように取り付ける。 (4) 仮止めシール材の材料は製造所の仕様による。 (5) 仮止めシールはひび割れに沿って幅30mm, 厚さ2mm程度にシールする。 (6) エポキシ樹脂の注入量は特記による。 (7) エポキシ樹脂注入材料は、製造所の仕様により、主剤と硬化剤を正確に計量し、均一になるまで混練りする。 (8) 注入圧を0.4N/mm ² 以下として注入する。 (9) 注入時は、台座やシール部からの漏れをチェックし、注入器具内のエポキシ樹脂の減量状態を確認して、足りない場合は補充する。 (10) エポキシ樹脂空乳剤の効果を見計らい仮止めシール材及び注入器具を撤去し、清掃を行う。
(d) 手動式エポキシ樹脂注入工法	(1) 注入口間隔は、特記による。注入位置をスケールで測定しマーキングする。 (2) ひび割れ部に座金付き注入パイプを取り付ける。注入口を穿孔する場合、は穿孔内の切粉を圧さく空気等で除去する。 (3) 混練りしたエポキシ樹脂を手動式注入器に入れ、注入器のノズルを注入口のゴムパッキンに押し付け、ゆっくり注入する。 (4) 注入時は、題材やシール部からの漏れをチェックし、注入圧の加減をする。垂直方向のひび割れは、下部の注入口から上部へ順次注入する。水平方向のひび割れは、片端部の注入口から他端へ順次注入する。注入完了後は注入口を密封したまま硬化養生する。 (5) (1)から(4)まで以外は、(c) (1), (4)から(7)まで及び(10)による。
(e) 機械式エポキシ樹脂注入工法	(1) 注入口間隔は、特記による。注入位置をスケールで測定しマーキングする。 (2) 注入口を設けるため、注入口位置にテープやゴムパッキン等を取り付ける。注入口になる箇所が目詰まりしている場合は、サンダーやドリル等を用いて注入口を確保する。 (3) エポキシ樹脂の主剤と硬化剤を注入機の所定の箇所に入れて、注入機のノズルを注入口に押し当てて、エポキシ樹脂を注入する。 (4) (1)から(3)まで以外は、(c) (1), (4)から(6)まで及び(10)並びに(d) (4)による。
(f) 確認	コア抜き取りによるひび割れ部の注入状況の確認は、次により、適用は特記による。なお、確認結果を監督職員に提出する。 (i) 抜き取り個数は、特記による。特記がなければ長さ500mmごと及びその端数につき1個のコアを採取する。 (ii) コア形状は、径50mm, 深さ70mmとする。 (iii) 抜き取り部分の補修方法は、特記による。

このように、注入工法は補修材がひび割れ内部へ充填されていることが前提であるので、設計量と使用量との比較やコア抜きによる管理、検査が行われている。しかし、設計量と使用量の比較は受動的な方法である上、精度が低い。一方コア抜き取りは、部材の破壊を伴うこと、比較的大きな装置が必要となることがあり、より効果的な検査方法として以下に示すようなものが提案されている。

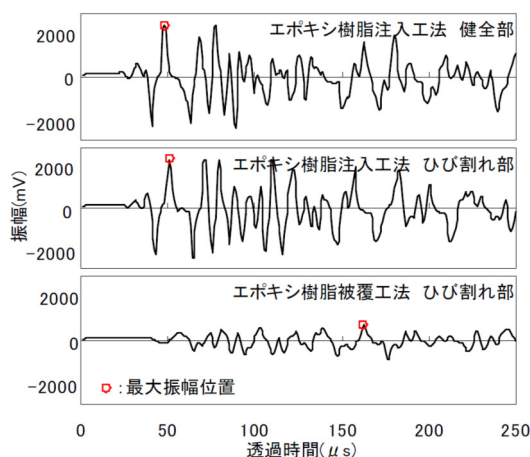
深町らは、コンクリートに穿孔した直径 14.5mm の小径のドリル孔に挿入した構造物検

査用内視鏡により孔内を観察，測定することで，注入前のひび割れの状況の評価と，注入後の充填状況の確認を行う方法を提案している（図2.7）^{2.7)}。

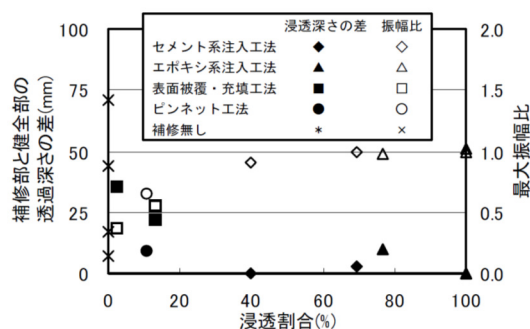


図2.7 内視鏡による測定の様子（左）とひび割れ幅の計測状況（右）^{2.7)}

また，非破壊的な手法については，超音波法により充填状況の良否を調査する手法が数多く提案されている^{例えば 2.8)・2.12)}。その中で，濱崎らは，コンクリートひび割れ補修部を再現した試験体に対して二探触子法で透過波形を測定することによる充填状況の評価を実施している。透過波形の測定結果より，ひび割れ部の補修材の充填状況は健全部との超音波の立ち上がり時間差や，健全部での最大振幅とひび割れ部の透過波形の最大振幅の比の組み合わせにより評価が可能であるとしている^{2.8)}。



(a) 超音波の透過波形の例



(b) 補修材の浸透割合と浸透深さの差および最大振幅比の関係

図2.8 超音波測定結果^{2.8)}

2.4.3 注入工法における補修材の注入性状に影響を及ぼす要因の検討に関する研究の現状

注入工法は補修材がひび割れ内部へ充填されていることが前提であるが、ひび割れ内部の形状や深さは明瞭でない。加えて、ひび割れ幅や向き、施工時の気温などの施工要因が、補修材のひび割れ内部での広がり方や注入後の垂れ（注入性状とする）に影響を及ぼす。

例えば、村中らは北海道内の橋梁を中心としたコンクリート構造物のひび割れ注入工法で補修された部材の充填状況をコア抜き取りによって実態調査している。その結果、図 2.9 に示すように季節によって充填率が低下することを示している。ここで、10月の充填率が低くなった原因として積雪寒冷地では一般に11月から施工時の防寒対策が実施されるが、10月施工の場合、日中の気温が高くてコンクリート内部温度が低くなっており、注入材の流動性が低下することを挙げている^{2.13)}。

一般には補修材の注入量や注入器具の間隔を設計する際には補修材はひび割れ内部で同心円状に広がり、注入された補修材は垂れが生じないと仮定して注入量等の施工計画を行うが、補修材粘度やひび割れ幅によっては鉛直方向のひび割れへの注入後に垂れが生じ、ひび割れ内部に空隙ができ欠陥となる恐れがある。そのため、補修材の注入性状に係る様々な要因を考慮し、施工状況に応じた適切な補修仕様を選定することが施工計画段階において重要である。

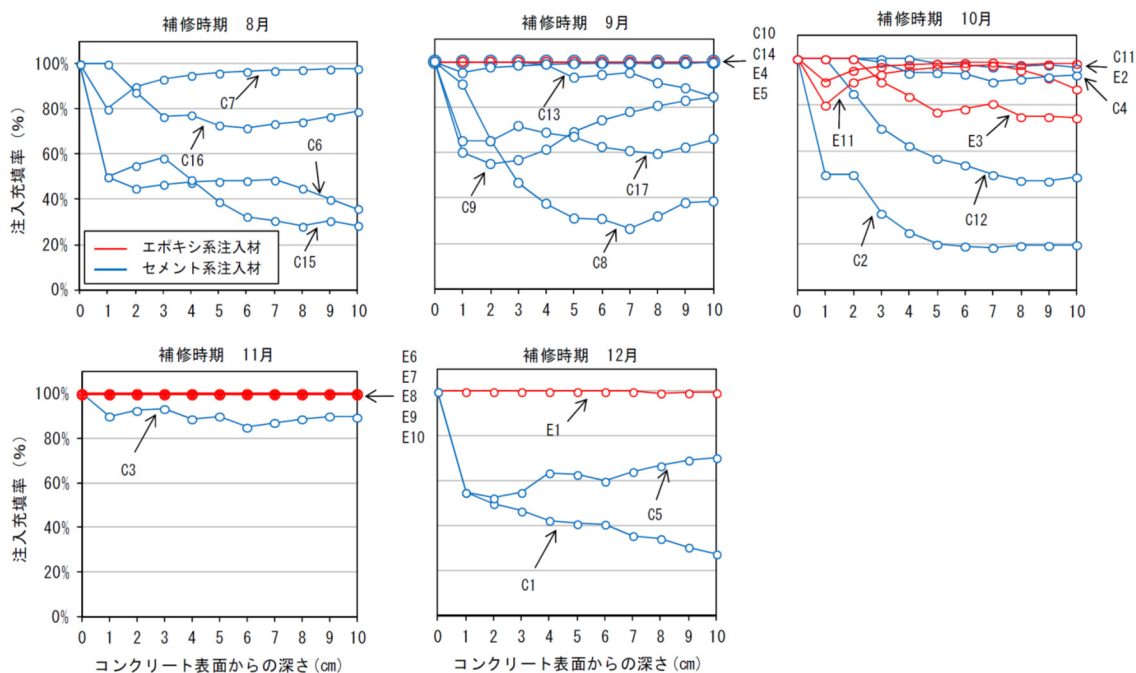


図 2.9 補修時期と表面から 10cm までの深さ毎の注入充填率^{2.13)}

注入工法における補修材の注入性状の評価を目的とした研究はいくつか行われてきている。

上村らは、注入樹脂の充填程度を支配するものとしてひび割れ幅、樹脂の物性、注入圧に着目し、ガラス板スリットによるモデルおよびコンクリート円柱供試体を割裂した試験体へのエポキシ樹脂の注入実験を行っている。

ガラス板スリットによるモデルへの注入実験において試験体となったモデルは、図 2.10 に示す 2 枚のガラス板にスペーサーを挟み合わせたものであり、垂直に設置し、試験体の側面中央から注入材料を注入している。注入材の広がり の観察の結果、注入材は注入口を中心に同心円状に広がり、実験の範囲のスリット幅 (0.1 ~ 1mm) では注入時のだれ (垂れ) は広がり に影響しない程度と述べている。そして樹脂の広がり の面積の経時変化は直線に回帰でき、面積速度は注入材粘度の逆数、スリット幅および注入圧に比例することを明らかにしている (2.14)。

コンクリート円柱供試体の割裂ひび割れへの注入実験において、試験体はφ15×30cm の円柱供試体を割裂したものであり、コンタクトゲージでひび割れ幅を調整し、スペーサーを挟んで所定のひび割れ幅としている。注入は図 2.11 に示すように試験体の側面中央から行い、注入完了後に試験体を 2 つに割り、注入形状を観察している。観察の結果、樹脂の広がり はほぼ同心円状であり、また面積速度についても、ガラス板を用いた場合と同様に図 2.12 に示すように粘度の逆数、注入圧とは直線に、ひび割れ幅とは 2 次曲線にそれぞれ回帰できることを確認している。そして、圧力勾配を直線に、ひび割れ幅方向の速度分布を放物線と仮定し、ナビエ・ストークスの非圧縮性流体の運動方程式を円筒座標系に変換し、面積速度の理論式を求めている (2.15)。

加えて、上記の 2 つの実験では注入完了後の樹脂のだれの経時変化も観察している。そして観察結果より、だれの進行速度を粘度の逆数とひび割れ幅の 3 乗に比例するとし、理論式を求めている (2.15)。文献 (2.15) において示されている面積速度の理論式を式 (2.1) に、だれの進行速度の理論式を式 (2.2) に示す。

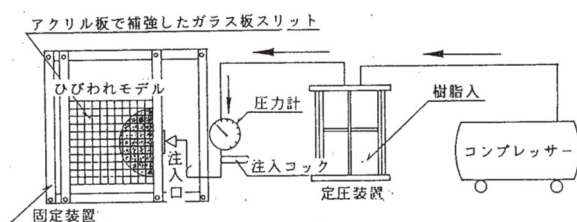


図 2.10 ガラス板スリットへの注入 (2.14)

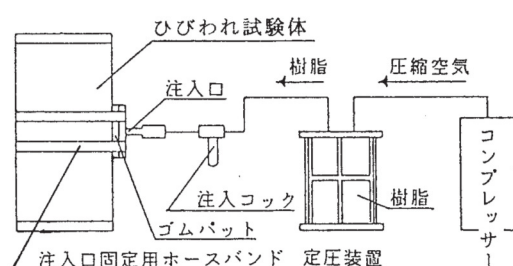
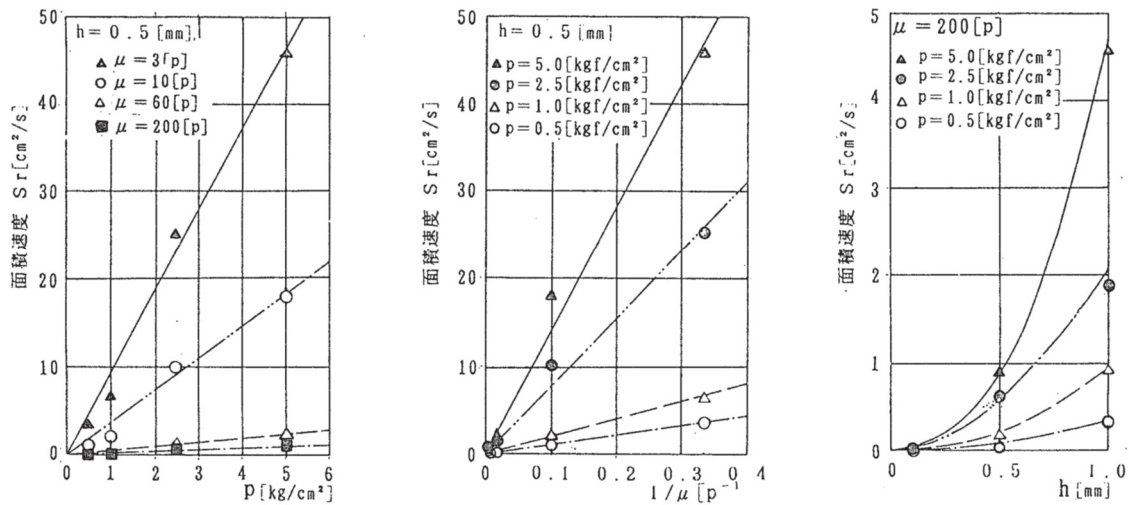


図 2.11 コンクリート供試体への注入 (2.15)



(a) 樹脂粘度の違いによる注入圧と面積速度
 (b) 注入圧の違いによる樹脂粘度の逆数と面積速度
 (c) 注入圧の違いによるひび割れ幅と面積速度

図 2.12 試験条件と面積速度との関係 ^{2.15)}

$$S_r = a \frac{\pi h^2 p}{12\mu} \tag{2.1}$$

ここで、 S_r : 面積速度 (cm²/s), h : ひび割れ幅 (cm), p : 注入圧 (gf/cm²), μ : 樹脂粘度 (g/cm・s), a : 材料による異なる特性値

$$D_r = \frac{2.45 \times h^3}{\mu} \tag{2.2}$$

ここで、 D_r : だれ速度 (cm/s), h : ひび割れ幅 (cm), μ : 樹脂粘度 (g/cm・s)

また、上村らは当時用いられていた注入工法に対してコンクリート円柱供試体での注入実験を行い、各工法は文献 ^{2.15)} の面積速度の理論式とほぼ対応していることを確認している ^{2.16)}。

加藤らは、無機系注入材の性能評価のひとつとして注入性の評価を行っている。図 2.13 に示すコンクリート板とガラス板の間にスペーサーを挟んで重ね合わせて、ひび割れを模擬した試験体としている。そしてガラス板側を上にして水平に設置した試験体に注入材を注入し、注入開始時からの注入状況を写真撮影しながら試験体全面に充填されるまで注入している。面積速度を求めて評価した結果、注入材料の水セメント比(粘度)やひび割れ幅によっては注入圧が高い方、あるいはひび割れ内の水湿し(水洗い)を行う方が必ずしも面積速度が大きく施工性がよいとは限らないと述べている ^{2.17)}。

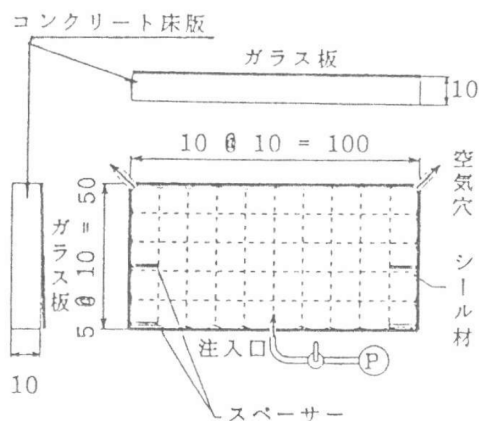


図 2.13 注入性試験ひびわれモデル^{2.17)}

また、菊池らは、前述の図 2.13 と同様の試験体を用いて様々な種類、試験条件における無機系注入材の注入性を評価し、前述の上村らの研究を参考にして無機系注入材の注入面積速度は指数関数で近似できるとし、注入幅、注入圧、注入材料の粘度で表す (2.3) 式を提案している^{2.18)}。

$$V_A = 10^{bP(1-e^{-(\frac{1}{\mu})ahP})} \quad (2.3)$$

ここで、 V_A : 面積速度 (cm²/s), h : 注入幅 (mm), P : 注入圧 (kgf/cm²), μ : 練り混ぜ直後の樹脂粘度 (dPas), a, b : 材料係数

飯坂、鷺見らは、無機系注入材の注入性の評価を図 2.14 に示す 2 枚のガラス板にスペーサーを挟み合わせた試験体を用いて行っている。試験体は注入口側を所定の幅にして反対側を閉じた V 字形であり、垂直に設置し、注入は注入口からの自然流下である。注入材の先端到達位置の経時変化の測定より、注入材料の粘度より注入到達位置の時間を推定することができる^{と述べている}^{2.19)}。

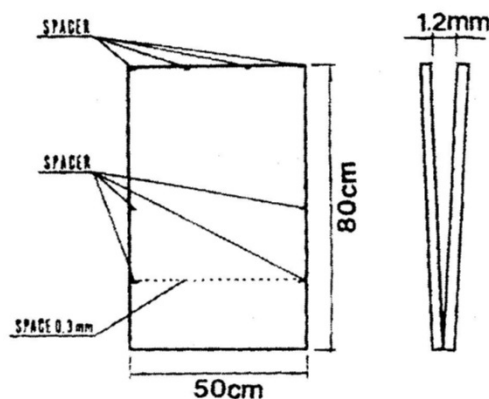


図 2.14 注入性状評価に用いたガラス板試験体^{2.19)}

三好らは、アクリル樹脂系補修材の注入性評価を行っている。2枚のガラス板にスペーサーを挟み合わせた試験体を水平に設置し注入材を注入し、試験体内での広がり撮影している。注入材の面積の経時変化を求めた結果、注入材は注入口を中心に半円状に広がり、粘性が高い注入材は注入幅が広すぎると注入完了までにかかる時間が長くなる傾向があること、注入完了までの時間が注入圧の影響を受けることを述べている^{2.20)}。

瀬野らは、ポリウレタン樹脂および無機系補修材の注入性状の評価を、図 2.15 に示すアクリル板に透明フィルムや壁用クロス材を貼付けてひび割れ内部の粗さを考慮した試験体を用いて行っている。注入実験の結果、それぞれの補修材の面積速度は前述した上村らが示した面積速度の理論式で表現することができ、試験体内部の粗さは平均粗さなどの指標として理論式に考慮することが出来ることを示している^{2.21)・2.22)}。

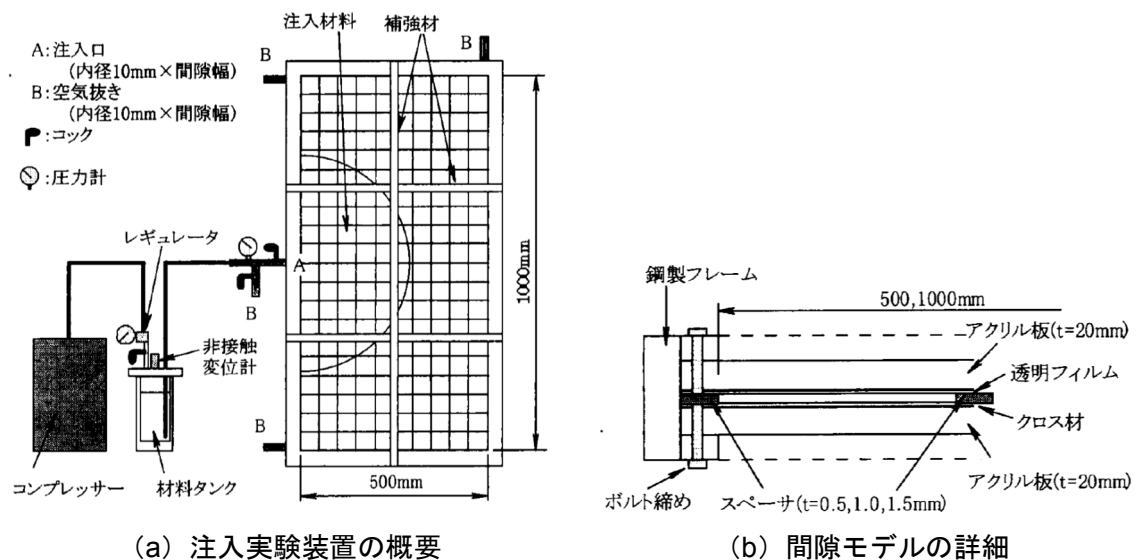
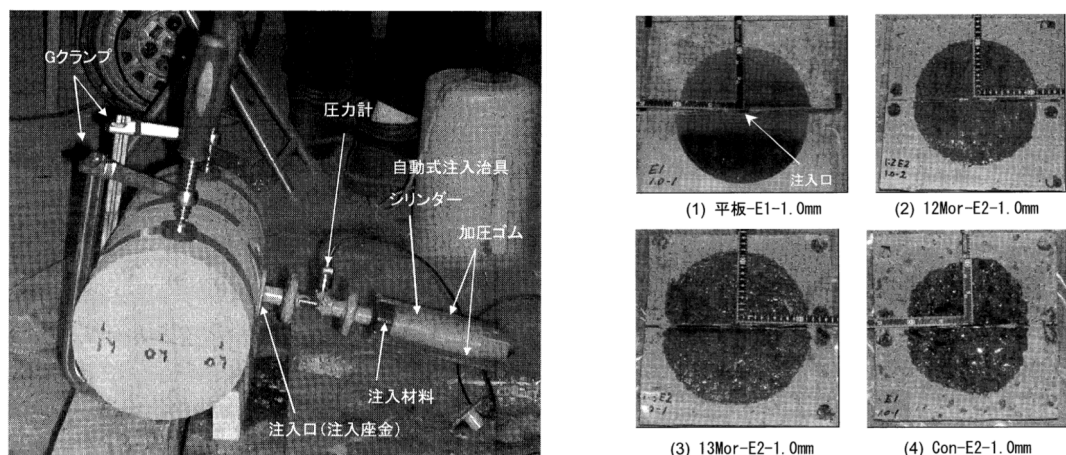


図 2.15 注入実験装置^{2.21)}

後に瀬野らは、補修材の注入速度に影響を及ぼす要因としてひび割れ幅、補修材の粘度、注入圧に加えて、ひび割れ面（ひび割れ内部）の粗さに着目して、図 2.16 に示すようにコンクリートおよびモルタルで作製した円柱供試体の割裂試験体とコンクリート JIS 平板を重ね合わせた試験体へのエポキシ樹脂の注入実験を行っている。実験の結果、面積速度は他の既往研究と同様にひび割れ幅の 2 乗、注入圧、材料粘度の逆数に比例することを確認した上で、図 2.17 に示すような表面の粗さが異なる試験体の結果より、面積速度はひび割れ面の粗さの影響を受ける可能性があること、また、そのひび割れ面の粗さの影響の程度はひび割れ幅の影響を受ける可能性があることを述べている。さらに、面積速度を精度よく算出するためには注入圧の圧力損失を考慮する必要があるとしている^{2.23)}。



(a) 注入実験状況 (b) 注入後の補修材の広がりの観察

図 2.16 注入実験の状況^{2.23)}

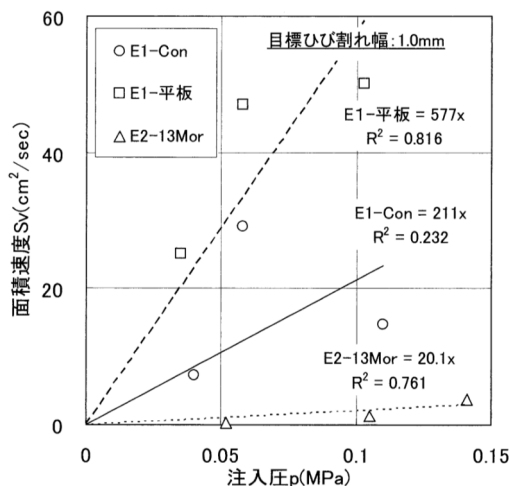


図 2.17 注入圧 p と面積速度 S_v ^{2.23)}

以上のように、これらの既往研究では、補修材の注入圧力、材料粘度、ひび割れ幅やひび割れ内部の粗さと注入速度（面積速度）との関係を検討しているものが多い。

また、補修材の広がりを観察するための試験体としては、図 2.10, 2.13, 2.14, 2.15 に示したようなガラスやアクリルといった透明な素材でできた平板を重ねたものや、コンクリートのひび割れ内部形状を模擬するために、図 2.11, 2.16 に示すような PC 板や円柱供試体の割裂面を用いたものがある。PC 板やコンクリート割裂面を用いた試体については、例えば図 2.16 に示すように、硬化剤を混和していない樹脂を注入し、注入完了後に試験体を開いて観察している。しかし、平板を重ね合わせた方法ではひび割れ面の凹凸を考慮できない。また、コンクリート供試体の割裂面を用いる手法では、割裂時の偶然性により各試験体のひび割れ形状が異なるため、注入性状を異なる凹凸面のひび割れ供試体で相対比較せざるを得ないと考えられる。

そこで本研究では、注入時の外部環境やひび割れの向きなどの施工要因が注入性状に及ぼす影響を評価すること、注入完了時のひび割れ内部の補修材の広がりだけで無く、注入完了後の補修材の垂れまでを観察すること、ひび割れの内部形状の違いを考慮し、形状を統一して評価できること、注入工法の性能評価試験法のひとつとして適用できること、を提案する技術の目標とした。

2.5 木造モルタル外壁に関する現状

2.5.1 構工法の概要

モルタル外壁は、左官仕上げの流れをくむ伝統的かつ身近な外装材である。木造建築物においてはモルタル外壁により防水性、防火性が向上し、意匠性にも優れていることから、わが国で木造住宅において普及が進んできた。一般的なラスモルタル外壁の概略図を図2.18に示す。柱、間柱に下地板（ラス下地板）または面材を打ち付けて下地とし、防水紙、メタルラスをステープルで留め付けて、上からモルタルを塗り付けるものであり、メタルラス、モルタル、防水紙部はステープルによって下地板に留め付けられている構造となる。

現在、戸建て住宅外壁の仕上げには、サイディング、モルタル、ALC パネルなどが使用されており、日本サッシ協会、「平成 27 年 3 月版住宅用建材使用状況調査」によると、戸建住宅の外壁仕上材料の割合は、「窯業サイディング」の 78.3%に次いで、「モルタル」は 8.1%となっているが、モルタル外壁の割合は減少傾向にあるとされている^{2.24)}。

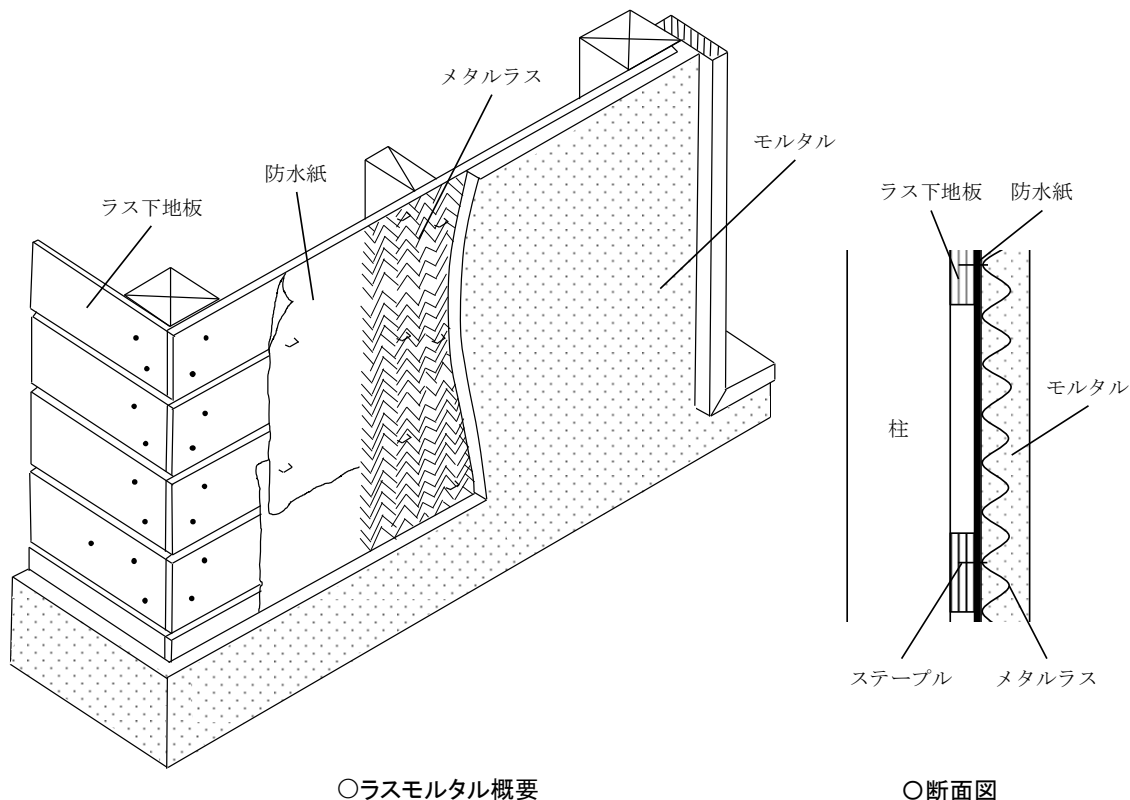


図 2.18 ラスモルタル外壁の概略（文献 2.25）をもとに作成）

2.5.2 木造モルタル外壁の耐久性、耐震性に関する現状

モルタル外壁の割合が減少傾向にある理由として、工期が比較的掛かることや左官工事業者の減少の他に、雨水侵入の不具合が多い、地震時に剥落する恐れがあることも挙げられる。

モルタル外壁はその材料の特性上表面にひび割れが発生しやすく、ひび割れが生じた箇所から雨水の壁内への侵入が生じる。外壁からの雨水の侵入により、メタルラス、ステープレの腐食や、木製下地材の腐朽による固定度の低下などの劣化が生じる恐れがある。そして、最悪の場合地震の際に、モルタルが剥落すると、下地材、躯体が露出することとなり延焼、類焼しやすくなり、広域火災にもつながる恐れがある。

湿式仕上技術センター著「既調合軽量セメントモルタル仕上げ外壁の構造性能に関する調査研究報告書」では、既存木造住宅のモルタル外壁の耐震性について近年の地震被害（中越地震、中越沖地震、東北地方太平洋沖地震（東日本大震災））の調査結果を基に考察している。図 2.19 に調査結果としてラスモルタル外壁の剥落被害の一部を示す。考察の結果、木造住宅でラスモルタル外壁の剥落が生じたものは、ラス下地板に打ち付けるステープレの足長、間隔や、メタルラスの重量が、標準化されている仕様書に適合した施工仕様でないものや、メタルラス、ステープレの腐食や下地材の腐朽が認められたものであったと述べている^{2.26)}。したがって、地震時にラスモルタルの剥落を防止するためには、仕様書の準拠に加えて、モルタルのひび割れやメタルラス、ステープレの腐食、下地材の腐朽などの劣化に対する耐久性や剥落に対する固定度を向上させることが重要である。



(a) リラス結束線腐食
(中越地震)



(b) 下地の腐食
(中越地震)



(c) サッシ取り合い部からの漏水による下地およびステープル・メタルラスの腐食
(中越沖地震)



(d) メタルラスの破断による剥落
(東日本大震災)

図 2.19 地震時のラスモルタル外壁剥落被害 ^{2.26)}

2.5.3 モルタル外壁の品質向上に関する取り組みの現状

モルタル外壁の耐久性や耐震性などの品質向上に関する取り組みとしては、構成材料の品質や構工法の改善などを目的としたものがある。

モルタルの品質に関しては現在、モルタル外壁の軽量化および施工品質の安定化を目的として主に中塗り材に既調合軽量モルタルの使用が多く、(社)日本建築学会編著「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事」(以下、「JASS15」)においても、「JASS 15 M-102 ラス系下地用既調合軽量セメントモルタルの品質基準」が定められている ^{2.27)}。

また、森田、坂下らは、ラスモルタルの乾燥収縮ひび割れの抑制を目的として用いられている材料、工法の効果を体系的に比較することを目的として壁面試験体の屋外曝露後のひび割れ観察を実施している。試験体のひび割れ量およびひび割れ幅の比較の結果、図 2.20 に示すモルタル内に繊維ネットを伏せ込んだものや、図 2.21 に示す収縮低減剤を混和した

ものは一般的な材料，仕様に比べてひび割れ量を低減することができることを確認している(2.28)・(2.29)。

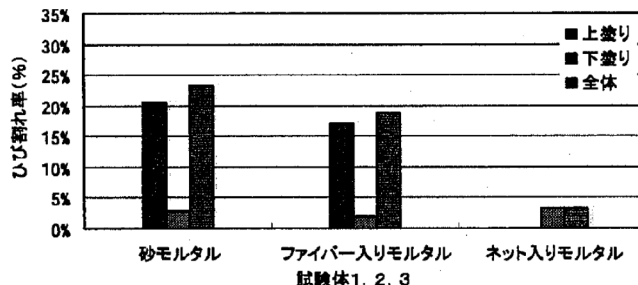


図 2.20 ひび割れ抑制に対するファイバーおよびネットの効果 (2.28)

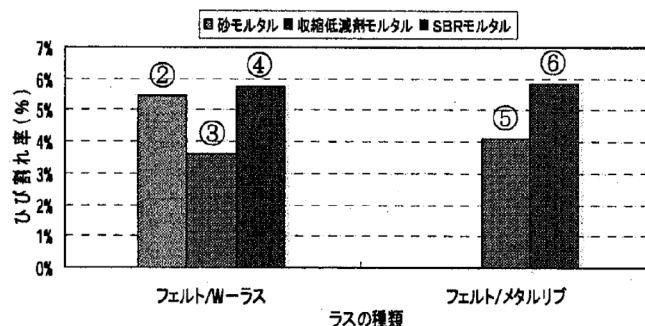
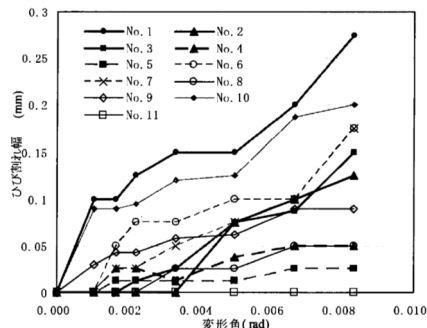


図 2.21 ひび割れ抑制に対するモルタル種類の効果 (2.29)

大原らは，構造体の動きによるラスモルタルのひび割れの防止について，開口部を設けた試験体の水平加力試験を通して検討している。試験の結果，図 2.22 に示すように補強用の平ラスや耐アルカリ性ガラス繊維ネットを開口部の四隅に伏せこむことで，ひび割れを低減することができる」と述べている (2.30)。

試験体 No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
補強材	無し	平ラス 1号	平ラス 1号	平ラス 4号	平ラス 4号	平ラス 1号
開口部への配置方法	—	隅部外側にハの字状に設置	周囲を帯状に囲う	隅部外側にハの字状に設置	周囲を帯状に囲う	隅部外側にハの字状に、ステップで下地に固定
補強材の寸法	—	300×450mm	幅 300mm	300×450mm	幅 300mm	100×200mm
モルタル表面の耐アルカリ性ガラス繊維ネット	無し	無し	無し	無し	無し	無し

試験体 No.	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11
補強材	平ラス 1号	平ラス 4号	無し	耐アルカリ性ガラス繊維ネット	平ラス 4号
開口部への配置方法	隅部外側にハの字状に、ステップで下地に固定	隅部外側にハの字状に設置	—	下塗り時、隅部外側にハの字状に設置	隅部外側にハの字状に設置
補強材の寸法	150×450mm	200×450mm	—	150×450mm	200×450mm
モルタル表面の耐アルカリ性ガラス繊維ネット	無し	無し	有り	表面は無し	有り



(a) 開口補強の使用

(b) 変位 0 状態のひび割れ幅

図 2.22 水平加力試験後のひび割れ観察結果 (2.30)

鈴木らは、防水紙の性能評価方法の確立を目的とし、釘穴シール性、耐アルカリ性、低温における耐折り曲げ性に関する評価試験法を提案している。JIS A 6005 規格品（アスファルトフェルト 430）と改質アスファルトフェルトとを評価試験で比較した結果、表 2.5 に示すように改質アスファルトフェルトの方が各性能においてアスファルトフェルト 430 を上回ることを示している^{2.31)・2.32)}。

表 2.5 各種試験結果^{2.32)}

			改質アスファルトフェルト		アスファルトフェルト 430				品質
			A	B	C	D	E	F	
引張 強さ	無処理 (N/cm)	長手	93.5	76.9	80.0	74.2	88.3	75.6	40 以上
		幅	61.2	37.8	49.0	49.0	42.2	49.0	20 以上
	7% 浸漬後(%)	長手	108.5	86.4	81.3	79.6	89.5	93.4	無処理の 80% 以上
		幅	109.2	100.5	94.8	88.0	96.7	93.1	無処理の 80% 以上
引張強さ(N)		長手	12.5	14.8	5.8	3.7	4.9	4.0	7 以上
		幅	14.0	18.5	7.0	4.1	5.3	4.1	7 以上
低温折り曲げ性 (合格数試験体数)			10/10	10/10	5/10	4/10	1/10	2/10	10 個中 9 個以上に 亀裂が生じないこと
寸法安 定性(予 備試験)	釘穴シール性 (合格数試験体数)	10/10	実施 せず	6/10	実施せず			10 個中 8 個以上に 漏水が無いこと	
	変形量(mm)	3.0		24.5				5 mm 以下	

構工法については、従来の外壁直張りラスモルタル下地に加えて、胴縁による通気層を設ける工法が JASS 15 や（独）住宅金融支援機構編著「フラット 35 対応 木造住宅工事仕様書」に記載されるようになった^{2.27)・2.33)}。通気胴縁による通気工法の概要を図 2.23 に示す。直張り工法の場合、雨水が浸入すると防水紙やラス下地板の部分に水分が滞留しやすく劣化の恐れがあるが、通気工法の場合、構造躯体とラス下地板との間に設けた通気層を通して侵入した水分が屋外へ排出されやすいため、メタルラス、ステーブル、ラス下地板の劣化を低減できるとされている。

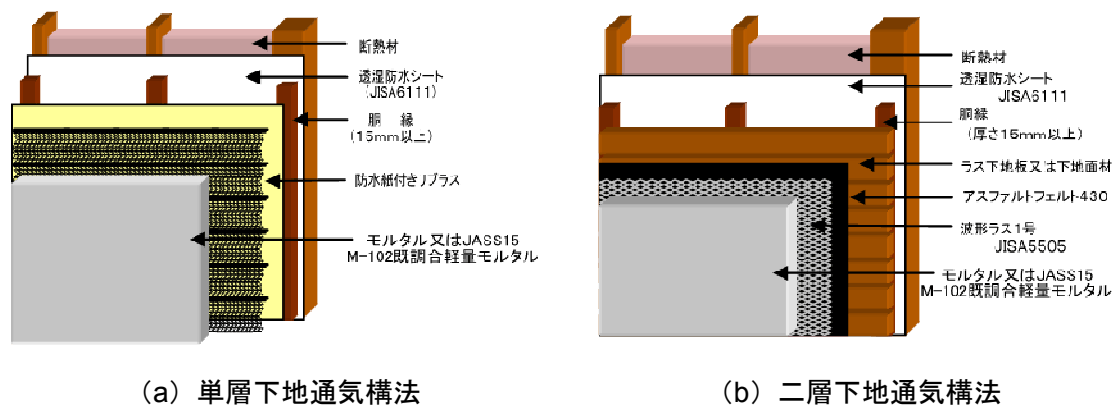


図 2.23 通気胴縁を用いた通気工法^{2.34)}

古賀らは一連の研究において、既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造特性の把握を目的に、試験体の水平加力試験を行っている。試験の結果、通気工法では通気胴縁の釘の抜け出しや割裂が生じた際に変形が大きくなるなどの特徴があるが、最大耐力は直張り構法の標準的な仕様と比べても問題はないことを確認している^{2.35)・2.45)}。

平岡らは突起のついた防水紙（突起付防水紙）を用いることで通気胴縁を施工することなく通気工法と同様の排湿効果を得られるのか検討を行っている。実大実験用建屋の壁に各工法で施工したラスモルタル外壁の下地合板と防水紙との間の温湿度および合板の含水率の測定結果、突起付防水紙を用いた仕様の外壁は通気胴縁を用いた仕様と同様の排湿効果があることを確認している^{2.46)}。

以上のように、これらの既往研究では、モルタルの乾燥収縮ひび割れの抑制、地震時のひび割れの防止、メタルラス、ステーブルの腐食および下地材の腐朽に対する耐久性の向上を目的としたものが多い。しかし、各劣化現象に対して個別に改善技術を提案しているのが現状である。加えて、地震時のラスモルタルの剥落に対しては下地との保持力向上を目的とした取り組みは少ない。

そこで本研究では、地震時のラスモルタルの剥落防止および様々な経年劣化に対する耐久性向上同時に達成することを目的に、ラスモルタル外壁の構成材料のひとつである防水紙に着目してラスモルタル外壁の耐久性、剥落防止性を改善、向上し得る防水紙を検討することとする。

参考文献

- 2.1) (社) 日本建築学会：内外装改修工事指針（案）・同解説，丸善出版（株），2014.9
- 2.2) 平成13年国土交通省告示第1347号，最終改正平成21年国土交通省告示第354号，評価方法基準，pp.48-60
- 2.3) (社) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'15 基礎編，(社) 日本コン

- クリート工学会, pp.5, 2015.2
- 2.4) (社)日本コンクリート工学会:コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013-, (社)日本コンクリート工学会, 2014.3
- 2.5) 国土交通省大臣官房官庁営繕部:公共建築改修工事標準仕様書(建築工事編)平成25年度版, 平成26年3月改定, pp54-62
- 2.6) (独)都市再生機構住宅営繕部:保全工事共通仕様書平成26年度版, (財)都市再生共済会, pp.95-96, 2014.10
- 2.7) 深町卓也, 原田耕司, 伊藤幸広:構造物検査用内視鏡を用いたひび割れ注入管理技術の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1519-1524, 2011
- 2.8) 濱崎仁, 伊野仁士, 三浦雅仁, 佐藤大輔:非破壊試験によるひび割れおよび浮き等の補修効果の確認方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1847-1852, 2006
- 2.9) 横田理, 長尾光雄, 前畑尚行, 女屋裕, 小山潔, 星川洋:コンクリートに発生した欠陥への補修材注入に関する研究, 圧力技術, 第49巻2号, pp.44-52
- 2.10) 周藤将司, 緒方英彦, 石神暁郎, 金田敏和:凍害劣化の生じたRC開水路側壁のひび割れに対する注入工法の適用性と超音波法による充填部の評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.295-302, 2012
- 2.11) D.G. Aggelis, T. Shiotani: Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements, Cement and Concrete Composites 27, pp.700-711, 2007
- 2.12) D.G. Aggelis, S. Hadjiyangou, H.K. Chai, S. Momoki, T. Shiotani: Longitudinal waves for evaluation of large concrete blocks after repair, NDT and E International, 44, pp.61-66, 2011
- 2.13) 村中智幸, 内藤勲, 田口史雄:実構造物におけるひび割れ注入後の品質管理に関する検討, 土木研究所寒地土木研究所平成24年度技術研究発表会, 2013.2
- 2.14) 上村克郎, 小西敏正, 橘高義典, 高塩美佐子:鉄筋コンクリート造のひびわれ補修における樹脂注入工法 その1) 充てん材料に関する基礎的実験, 日本建築学会大会学術梗概集(北海道)A, pp.701-702, 1986.8
- 2.15) 上村克郎, 小西敏正, 橘高義典, 小林敏泰:鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究 (その1 樹脂の注入過程の数式化), 日本建築学会大会梗概集(近畿)A, pp.395-396, 1987.10
- 2.16) 上村克郎, 小西敏正, 橘高義典, 三浦信一:鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究 (その2 各種注入工法の性能比較), 日本建築学会大会梗概集(近畿)A, pp.397-398, 1987.10
- 2.17) 加藤利美, 菊地憲司, 梅原秀哲, 田彌智:無機系ひびわれ注入材料による梁の補修効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.345-350, 1991

- 2.18) 菊地憲司, 梅原秀哲, 野沢文明, 田彌智: コンクリートひびわれ注入材料の基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp.981-986, 1992
- 2.19) 飯坂武男, 菊川浩治, 鷺見高典: ひび割れ補修材の注入性状について, セメント・コンクリート論文集 No.46, pp.988-993, 1992
- 2.20) 三好学, 飯坂武男, 福島浩一, 梅原秀哲: コンクリート補修材料としてのアクリル樹脂の特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.401-406, 1998
- 2.21) 瀬野康弘, 渡邊弘子, 大西聡: ポリウレタン樹脂の平行間隙モデルへの注入実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.359-363, 1998
- 2.22) 瀬野康弘, 渡邊弘子, 井澤哲也: 無機系注入材料の平行間隙モデルへの注入実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.223-228, 1999
- 2.23) 瀬野康弘, 魚本健人: ひび割れ注入補修における注入性状に影響を及ぼす要因に関する実験的検討, コンクリート工学論文集, 第19巻, 第1号, pp.11-20, 2008.1
- 2.24) (一社)日本サッシ協会: 平成27年度3月版「住宅用建材使用状況調査」の概要, 2015.5.1
- 2.25) (社)日本建築学会: 構造用教材, 丸善(株), 2005.2
- 2.26) 特定非営利活動法人湿式仕上技術センター: 既調合軽量セメントモルタル仕上げ外壁の構造性能に関する調査研究報告書, pp.9-22, 2013.7
- 2.27) (社)日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS15 左官工事, 丸善(株), 2007.6
- 2.28) 森田翔, 坂下明, 大久保孝昭, 松本慎也, 山中豊茂: 木造住宅におけるラスモルタルのひび割れ制御に関する研究 その1 ラスの種類の影響とファイバー, ネットの効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1, pp.899-900, 2006.9
- 2.29) 坂下明, 森田翔, 大久保孝昭, 松本慎也, 山中豊茂: 木造住宅におけるラスモルタルのひび割れ制御に関する研究 その2 モルタルの種類の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1, pp.901-902, 2006.9
- 2.30) 大原信二, 上村昌樹, 小嶋秀典, 渡部嗣道: 木造軸組構造の変形に起因するラスモルタル外壁のひび割れ防止に関する実験, 日本建築仕上学会 2011年大会学術講演会, pp.81-84, 2011
- 2.31) 鈴木崇裕, 古賀一八, 深川信二, 神谷慎吾, 佐々木健一, 牧田均: 改質アスファルトフェルトの性能評価 (その1) 特長と期待される性能, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 材料施工, pp.421-422, 2012.9
- 2.32) 深川信二, 古賀一八, 神谷慎吾, 佐々木健一, 牧田均, 鈴木崇裕: 改質アスファルトフェルトの性能評価 (その2) 結果と考察, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 材料施工, pp.423-424, 2012.9
- 2.33) (独)住宅金融支援機構: フラット35対応木造住宅工事仕様書平成26年度版, (株)

井上書院, 2015.6

- 2.34) 近畿メタルラス工業組合ホームページ : <http://www.lath.jp/example/index.html>, 2015.12.17 最終アクセス
- 2.35) 古賀一八, 井上照郷, 宮村雅史, 小野泰, 田原賢, 中尾方人 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その1) 全体概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, pp.309-310, 2010.9
- 2.36) 山中豊茂, 稲垣和宏, 田原賢, 小野泰, 中尾方人, 伏木剛志 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その2) 試験体仕様, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, pp.311-312, 2010.9
- 2.37) 稲垣和宏, 鈴木光, 守屋善裕, 山中豊茂, 大原信二 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その3) 試験体作製, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, pp.313-314, 2010.9
- 2.38) 石井壮一郎, 田原賢, 宮村雅史, 小野泰, 中尾方人, 山崎肇 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その4) 面内せん断試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, pp.315-316, 2010.9
- 2.39) 田原賢, 中尾方人, 宮村雅史, 小野泰, 古賀一八 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その5) 開口部の変形挙動と耐力の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, pp.317-318, 2010.9
- 2.40) 小野泰, 田原賢, 中尾方人, 宮村雅史, 古賀一八 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その6) 耐震性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, pp.319-320, 2010.9
- 2.41) 山中豊茂, 鈴木光, 古賀一八, 稲垣和宏, 小野泰, 守屋善裕 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その7) 第2回水平加力試験の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造Ⅲ, pp.1-2, 2012.9
- 2.42) 田原賢, 小野泰, 中尾方人, 稲垣和宏, 守屋善裕, 大原信二 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その8) 直交壁の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造Ⅲ, pp.3-4, 2012.9
- 2.43) 中尾方人, 小野泰, 田原賢, 山中豊茂, 伏木剛志, 水上幸男 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その9) ラスの下地材の違いが構造性能に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造Ⅲ, pp.5-6, 2012.9
- 2.44) 石井壮一郎, 小野泰, 中尾方人, 田原賢, 山中豊茂, 伏木剛志, : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その10) 通気胴縁の材料・ラス張り方向の違いによる耐力性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造Ⅲ, pp.7-8, 2012.9
- 2.45) 小野泰, 田原賢, 中尾方人, 古賀一八, 宮村雅史, 井上照郷 : 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その11) 耐震性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造Ⅲ, pp.9-10, 2012.9

- 2.46) 平岡真由美, 名波直道, 入口泰尚: 突起付防水紙を用いた外壁工法の開発 その1 実大実験棟における外壁仕様比較実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), C-1, pp.145-146, 2001.9

第 3 章 本論文で提案する新技術

第3章 本論文で提案する新技術

3.1 はじめに

本章では、第2章で示したひび割れ注入工法および木造ラスモルタル外壁に関する現状を踏まえて本論文で提案した新技術について示す。

ひび割れ注入工法における注入性状の検討に関しては、注入性状を統一したひび割れ内部形状に対して可視化して評価し、注入工法の性能評価試験法のひとつとして確立することを目標として、可視化試験体による注入性状の評価試験法を提案する。また木造ラスモルタルの高品質化に関しては、地震時のラスモルタルの剥落防止および経年劣化に対する耐久性向上を目標として、部材の構成材料に弾性、粘着性のある防水紙の活用を提案する。

3.2 RC 外壁補修におけるひび割れ注入性状の可視化試験法

3.2.1 試験方法の概要

鉄筋コンクリート構造物に生じたひび割れの補修工法として汎用されている注入工法では、ひび割れ性状（幅、向き）、補修材の物性、注入圧及び施工時の気温など多くの要因が補修材の注入性状に影響を及ぼす。この工法は補修材がひび割れに全面的に注入されることを前提としているが、補修材が十分に充填されていることを施工後に確認することは難しい。加えて、注入された補修材は垂れが生じないと仮定して注入量等の施工計画を行うが、補修材粘度やひび割れ幅によっては鉛直方向のひび割れへの注入後に垂れが生じ、ひび割れ内部に空隙ができ欠陥となる恐れがある。したがって、施工計画段階において、補修材の注入性状に係る様々な要因を考慮し、施工状況に応じた適切な補修仕様を選定することが重要である。

注入工法における補修材の注入性状に影響を及ぼす要因の検討に関する研究は第2章で示したようにいくつか行われてきており、補修材の充填程度や面積速度に及ぼす、ひび割れ幅、注入圧および樹脂粘度等の影響を明らかにしている^{例えば 3.1)・3.8)}。

これまでの研究では、ひび割れを模擬する方法として、平板を重ね合わせる方法^{3.1)・3.4)・3.8)}やコンクリート供試体の割裂面を用いる方法^{3.5)・3.8)}が採用されている。しかし、平板を重ね合わせた方法ではひび割れ面の凹凸を考慮できない。また、コンクリート供試体の割裂面を用いる手法では、割裂時の偶然性により各試験体のひび割れ形状が異なるため、注入性状を異なる凹凸面のひび割れ供試体で相対比較せざるを得なかった。

本論文では、注入時の外部環境やひび割れの向きなどの施工要因が注入性状に及ぼす影響を、ひび割れの内部形状の違いを考慮し、形状を統一して評価できること、注入工法の性能評価試験法のひとつとして適用できることを目標に注入性状評価試験法を提案した。

提案する評価試験法は、近年普及がめざましい3D スキャナ、3D プリンタを用いて同一の凹凸面のひび割れを作製する手法により、各試験体のひび割れの内部形状を同一にして

補修材の注入性状を評価するものである。加えて、試験体の一部を透明な樹脂素材で作製することで注入性状の可視化によって簡便に補修仕様を評価する技術の確立を目指した。本評価手法では、注入初期から注入完了以降も注入性状の経時変化を観察できるため、補修材の注入状態や垂れの違い等を簡便に相対評価することができる。

3.2.2 ひび割れ再現試験体の作製方法

本試験方法におけるひび割れ再現試験体の作製手順を以下に示す。

- ① $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のコンクリート円柱供試体を、割裂引張試験と同様の方法で割裂二分する。
- ② 3D スキャナを用いて円柱供試体の一方の割裂面を読取る。
- ③ 読取った 3D スキャンデータを基に、3D プリンタによりアクリル樹脂板に割裂面の形状を切削してひび割れ凹凸面を再現する。
- ④ 手順③で切削したアクリル板を型枠としてモルタルを打設して、硬化後にモルタルをアクリル板から脱型する。脱経時アクリル板に付着した汚れ等は取り除く。
- ⑤ 手順④のモルタルとアクリル板を、両端に所定厚のスペーサを挟んだ上で噛み合わせてクランプで締め上げ、ひび割れ幅を調節してひび割れ再現試験体とする。

以上のように、ひび割れで分断された片面を透明なアクリル樹脂で作製することで注入性状を可視化できる。また、同じ凹凸面のアクリル板を複数枚作製することで、複数の試験体間のひび割れ条件をほぼ同様にして実験が可能となる。

ひび割れ凹凸面をスキャンするために割裂したコンクリート円柱供試体の調査を表 3.1 に、割裂した円柱供試体を写真 3.1 に示す。本研究で使用した 3D スキャナ、3D プリンタは写真 3.2 に示すものであり、部品を付け替えることでスキャン機能と切削機能とを兼用する。表 3.2 に各性能を示す。3D スキャナはピエゾセンサを用いた接触式スキャンを行うものであり、読取り精度 0.25mm でスキャンを行った。アクリル板の切削には、3D プリンタの径 3.0mm の平刃のドリルを用い、同一形状のひび割れ凹凸面を複製した。切削したアクリル板には表 3.3 に示す調合のモルタルを打ち込んだ。図 3.1 に本実験で用いたひび割れ凹凸面のスキャナ画像を示す。写真 3.3 に切削したアクリル板を型枠としてモルタルを打ち込み、硬化後に二分した試験体を示す。脱型時、アクリル板に付着した微量のノロは取り除いた。モルタルとアクリル板を噛み合わせる際に、本実験ではマイクロスコープを用いてひび割れ幅を調整した。写真 3.4 にひび割れ幅 0.2mm に調整した試験体のひび割れ部をマイクロスコープで撮影したものを示す。

3.2.1 節および本節で示したように、本実験手法では統一した形状のひび割れ凹凸面に対する補修材の注入直後から硬化までの補修材の広がりや垂れを経時的に目視観察することが可能である。

提案したひび割れ再現試験体は、注入性状の可視化を主眼としているが、コンクリート、モルタル、アクリルの素材に対する補修材の浸透性の違いを考慮できていない。例えば、セメント系補修材を注入する際にひび割れ再現試験体内での補修材の挙動と比べて実際のコンクリートひび割れ内では、コンクリートの吸水により挙動が大きく異なる可能性がある。また、モルタルとアクリルとの濡れ性の違いにより注入した補修材がいずれかの面上で優先して広がることや、片側のみに補修材が付着する可能性もある。このように、注入する補修材によっては試験体の素材の相違が注入性状に影響を及ぼすことが考えられ、素材に対する補修材の浸透性の相違について検討することは今後の課題とする。

表 3.1 コンクリート調合

W/C (%)	S/C (%)	調合質量 (kg/m ³)				
		水	セメント*	細骨材**	粗骨材***	AE減水剤
46	47	175	383	791	912	3.06

* セメント: 普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm³)

** 細骨材: 東広島市黒瀬産砕砂 (密度2.58g/cm³, 吸水率0.96%)

*** 粗骨材: 東広島市黒瀬産碎石 (密度2.64g/cm³, 実積率59.2%)



写真 3.1 割裂した円柱供試体

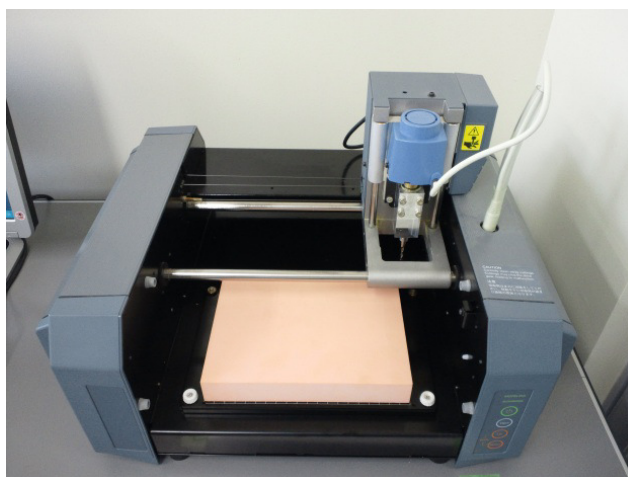


写真 3.2 3D スキャナ, 3D プリンタ

表 3.2 3D スキャナ, 3D プリンタの性能

3Dスキャナ			3Dプリンタ	
センサ	ピエゾセンサ プローブ長さ60mm 先端球形半径0.08mm		切削精度	0.025mm/ステップ
スキャン方式	接触型メッシュポイント高さ検出方式		主軸回転数	6500rpm
スキャンピッチ (括弧内は 試験体作製時 の設定)	長辺方向 (X軸方向)	0.05~5.00mm(0.25mm)		
	短辺方向 (Y軸方向)	0.05~5.00mm(0.25mm)	切削刃物	径3.0mm平刃
	高さ方向 (Z軸方向)	0.025mm(0.025mm)		

表 3.3 モルタル調合 (質量比)

セメント	細骨材	水
1	2	0.34

(表3.1と同じ材料を使用)

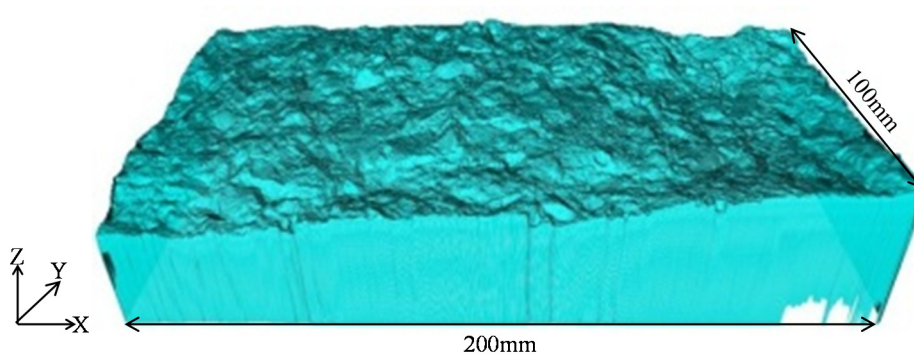


図 3.1 3D スキャナで読取ったひび割れ凹凸面

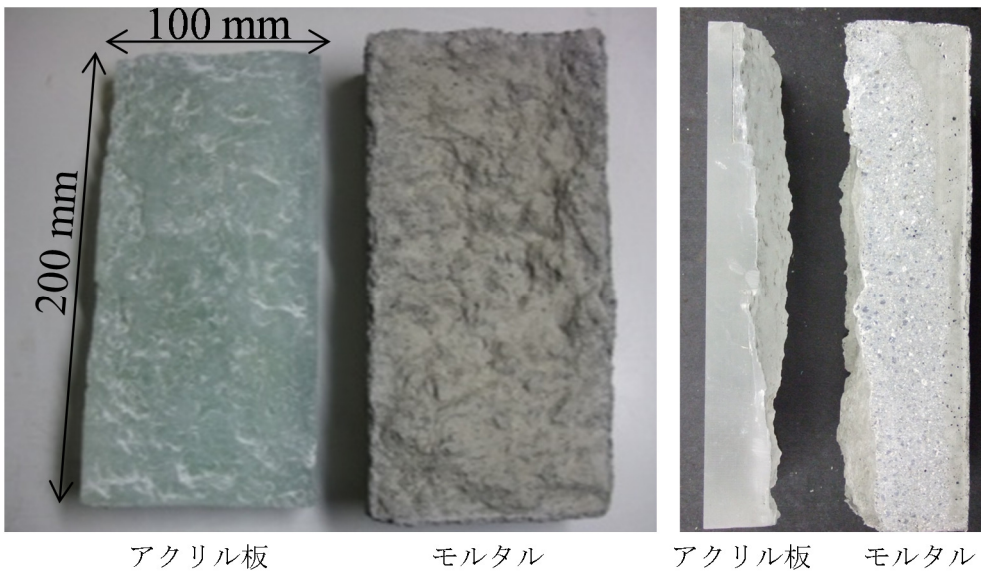


写真 3.3 ひび割れ再現試験体（左：切削面，右：側面）

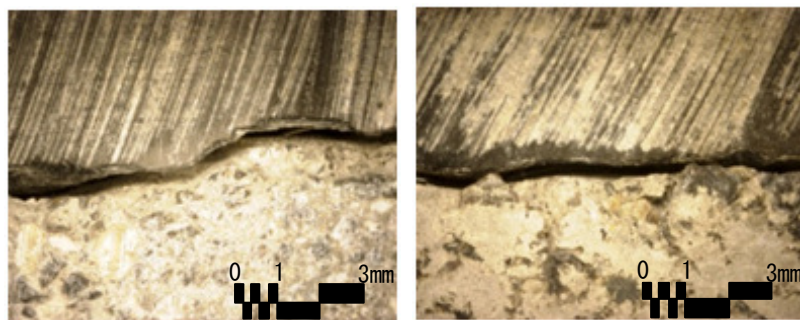


写真 3.4 ひび割れ幅 0.2mm に調節した試験体（左：注入面，右：裏面）

3.2.3 本可視化試験方法の手順

本試験は貫通ひび割れを対象に注入時の補修材の挙動と注入完了後の補修材の垂れの影響を考察することを目的として行った。注入方法は自動低圧樹脂注入工法^{3.9)}のうち、輪ゴムの復元力を利用する注入器具を用いた工法を採用した。写真3.5に使用する注入器具を示す。この工法は加圧ゴムの本数によって3段階に注入圧力を調整することが可能である。補修材の注入量は、注入器具の容量50mLに対して、試験体から補修材があふれず、観察が行いやすいようにするために、ひび割れ幅からあらかじめ必要量を計算し注入した。注入性状の試験は下記の手順で実施した。

- ① エポキシ樹脂系接着剤により注入口面以外の3面をシールする。
- ② 注入用の座金を取付け、注入口面をシールする。
- ③ 補修材を入れ加圧ゴムを取付けたシリンダーを取付け、ストッパーを外して注入を開始する。注入開始と同時にアクリル板の方向からビデオカメラによる撮影を開始する。撮影の様子を写真3.6に、注入開始直前の試験体の様子を写真3.7に示す。
- ④ 撮影した画像から注入範囲(面積)や垂れ量を算定する。

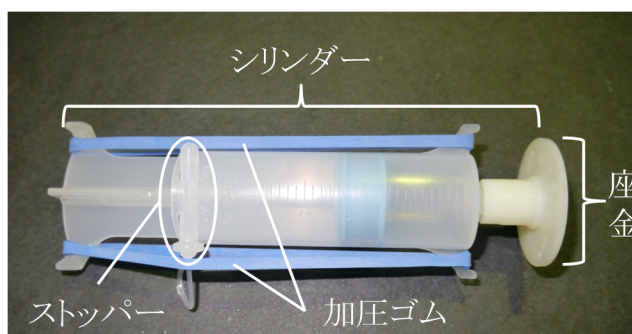


写真 3.5 注入器具

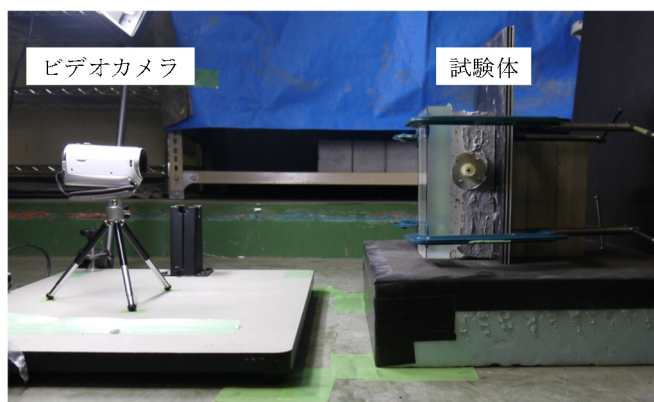


写真 3.6 試験体撮影状況

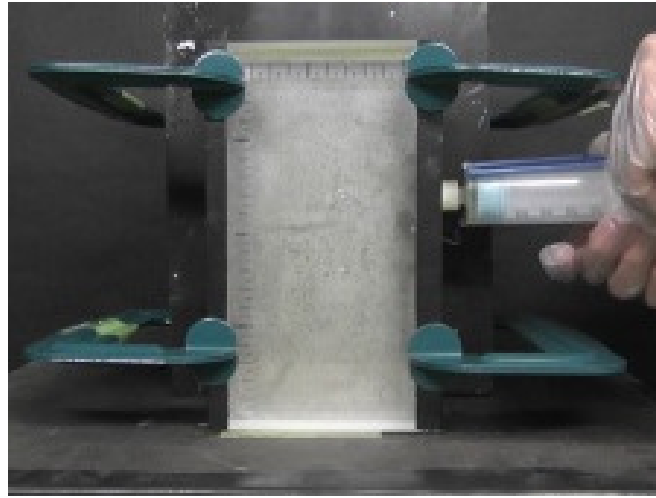


写真 3.7 注入開始直前の試験体写真

3.2.4 ひび割れ形状の評価

3D スキャナ，3D プリンタによるひび割れ再現試験体のひび割れ形状の再現性の評価を目的に，ひび割れ再現試験体のモルタル部分と，試験体の基準としたコンクリート割裂面とのひび割れ形状の比較を行った。比較には，それぞれのひび割れ形状を3D スキャナで読取った値（高さ）について，図 3.2 に示す位置の値を $95 \times 195\text{mm}$ の範囲で用いた。

図 3.3 に $Y=50\text{mm}$ 上のコンクリート割裂面の底面からの高さの測定値を示す。図中の平均線は曲線までの偏差の2乗和が最小になるように定めている。ひび割れ形状の評価では，それぞれの測定結果における平均線を基準線とした高さ（高さ曲線）について評価した。図 3.4 に $Y=50\text{mm}$ 上のコンクリート割裂面の測定値について基準線からの高さとして表したものを示す。

$Y=50\text{mm}$ および $X=100\text{mm}$ 上のひび割れ再現試験体のモルタルと，コンクリート割裂面の高さの関係を図 3.5，3.6 にそれぞれ示す。いずれの測定位置の高さについても相関が高く，コンクリート割裂面のひび割れ形状を良く再現していることが分かる。

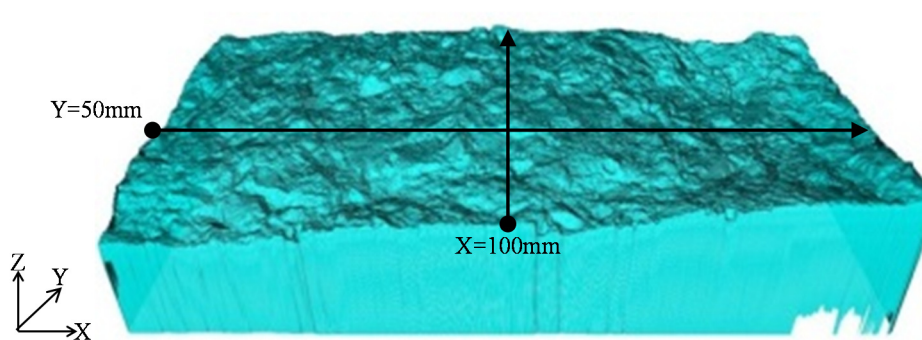


図 3.2 形状評価を実施した箇所

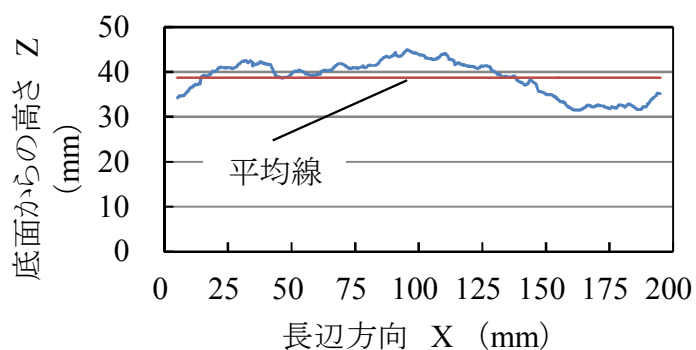


図 3.3 Y=50mm 上のコンクリート割裂面の底面からの高さの測定値

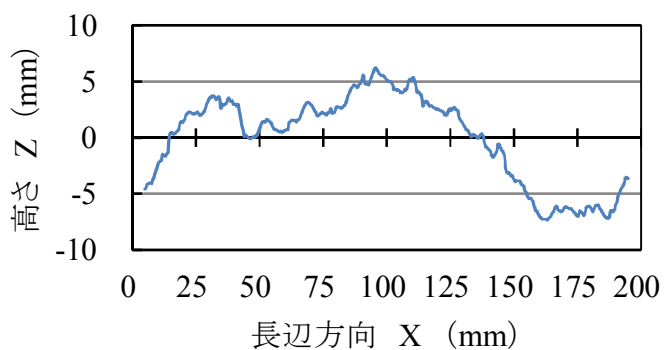


図 3.4 Y=50mm 上のコンクリート割裂面の高さ曲線

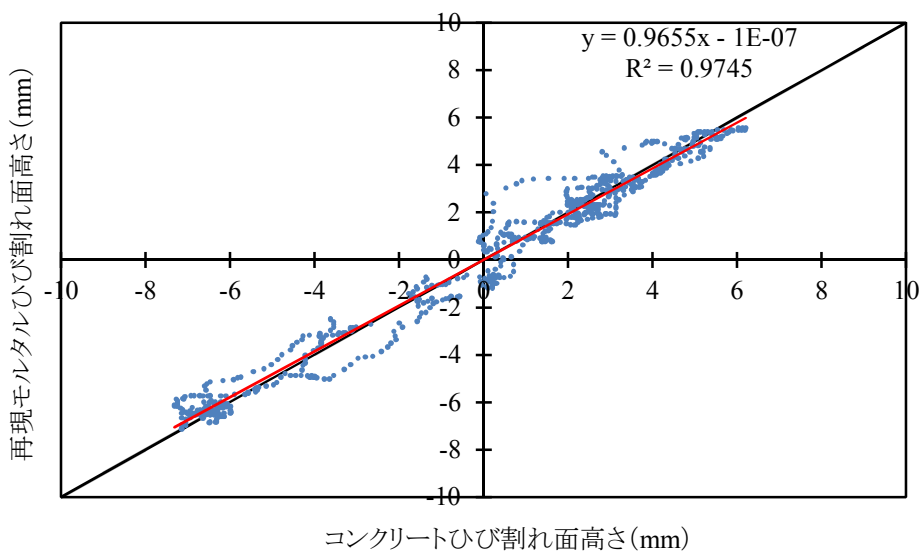


図 3.5 Y=50mm 上のひび割れ再現試験体モルタル，コンクリート割裂面の高さの関係

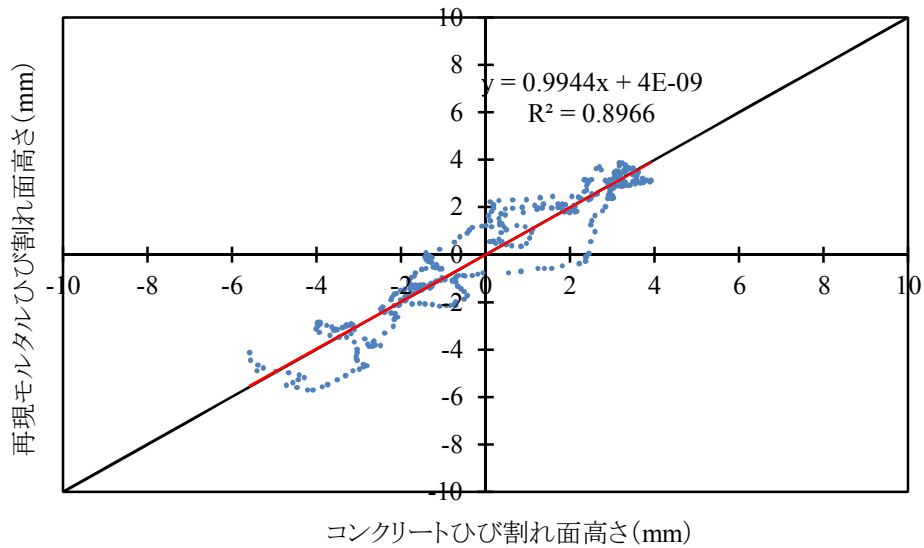


図 3.6 X=100mm 上のひび割れ再現試験体モルタル，コンクリート割裂面の高さの関係

より詳細に相関を評価することを目的に，以下に示すひび割れ面の粗さの指標を用いて検討した。

(1) 曲線長

各方向の高さ曲線の長さ。本検討において平滑面の場合，X 軸に平行な方向の曲線長は 190mm，Y 軸に平行な方向の曲線長は 90mm となる。

(2) 算術平均粗さ R_a

基準線からの高さ曲線を図 3.7 に示すように関数 $Z = f(x)$ とした場合に，式 (3.1) で算出される値である。

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| dx \quad (3.1)$$

ここで， R_a ：算術平均粗さ (mm)， $f(x)$ ：高さ曲線， ℓ ：測定区間 (mm)

(3) 最大高さ R_{max}

ある測定間隔の高さ曲線において，基準線からの高さの最大値と最小値の絶対値の差。

(4) 平均表面粗さ

高さ曲線の凹凸を不規則な波形と考えた場合，高さ曲線には比較的長い周期のうねりと，比較的周期の短い表面粗さの成分によって形成されていると言える。高さ曲線におけるうねり成分を除去し表面粗さを評価するために，文献 3.10) における手法を用いる。具体的には各測定値の移動平均を結んだものをうねり曲線とするものである。図 3.8 にコンクリート割裂面の X=100mm における高さの測定値と移動平均によるうねり曲線を示す。ここで，移動平均の区間は求めようとする点とその両端 5 点の 11 点とした。そして，各点の高さの測定値と移動平均との差の絶対値を平均したものを平均表面粗さとした。

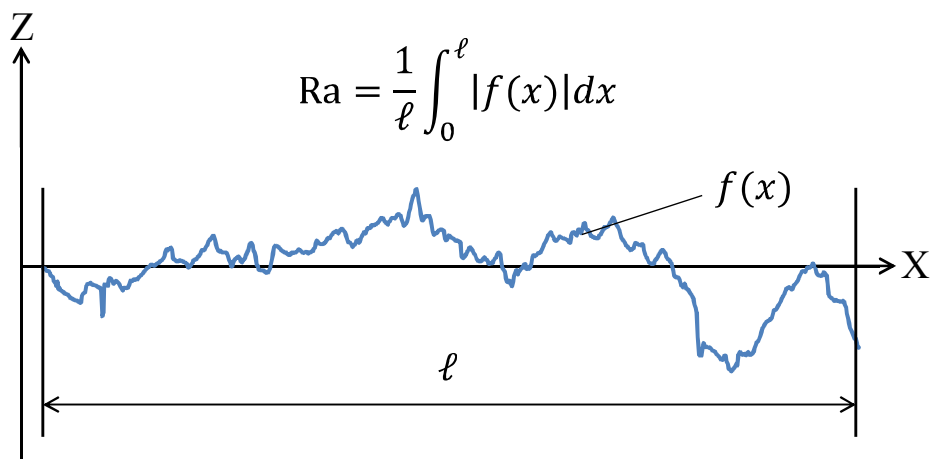


図 3.7 算術平均粗さ算出の模式図

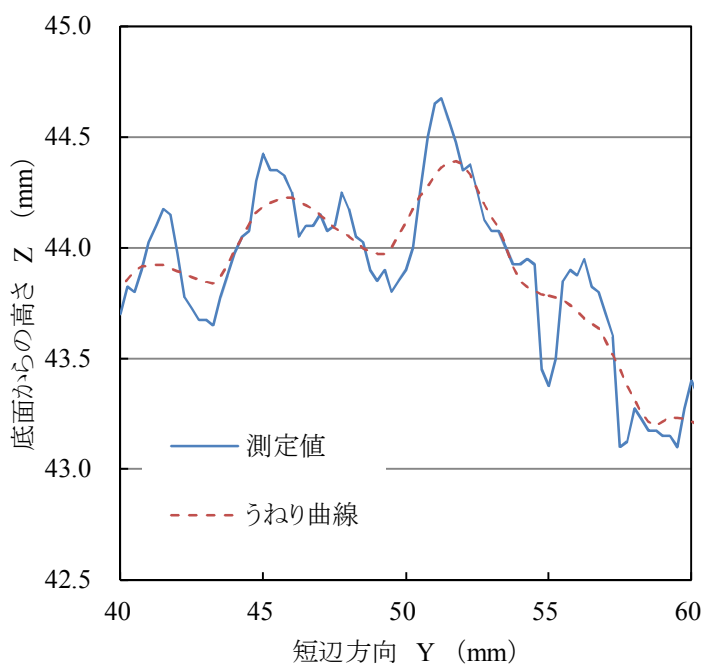


図 3.8 高さの測定値と移動平均によるうねり曲線

各指標を表 3.4 にまとめて示す。コンクリート割裂面と再現試験体のモルタルとを比較すると、測定位置 $X=100\text{mm}$ における算術平均粗さを除いて、コンクリート割裂面の方が各指標の値が大きく、再現試験体のひび割れ形状は試験体作製の過程でコンクリート割裂面より比較的滑らかになる傾向がある。また、測定位置 $X=100\text{mm}$ における算術平均粗さについて、再現試験体のモルタルの方が値が大きい要因については、評価し難く今後の課題とする。しかし、先に示した測定値の相関が高いことから、おおむねコンクリート割裂面

のひび割れ形状を再現していると判断している。

このように、提案したひび割れ再現試験体はコンクリートのひび割れ内部形状を精度良く再現しているが、前述のとおり、素材に対する補修材の浸透性の相違については考慮できていない。

表 3.4 試験体のひび割れ表面形状の粗さ指標

測定方向	Y軸方向 (Y=5~95mm)		X軸方向 (X=5~195mm)	
測定位置	X=100mm		Y=50mm	
試験体	コンクリート	再現モルタル	コンクリート	再現モルタル
曲線長 (mm)	100.70	97.37	212.28	202.50
算術平均粗さ (mm)	1.65	2.35	7.07	7.06
最大高さ (mm)	10.88	9.58	13.53	12.70
平均表面粗さ(mm)	0.11	0.09	0.19	0.15

3.3 木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の活用技術

3.3.1 提案技術の概要

木造ラスモルタル外壁は表面に生じたひび割れなどからの雨水の壁内への侵入と滞留によりメタルラス、ステーブルの腐食や、木製下地材の腐朽による固定度の低下などの劣化が生じる恐れがある。そして、最悪の場合地震の際に、モルタルが剥落すると、下地材、躯体が露出することとなり延焼、類焼しやすくなり、広域火災にもつながる恐れがある。地震時にラスモルタルの剥落を防止するためには、仕様書の準拠に加えて、モルタルのひび割れやメタルラス、ステーブルの腐食、下地材の腐朽などの劣化に対する耐久性や剥落に対する固定度を向上させることが重要である。

既往の研究では、第2章で示したように、モルタルに関しては既調合軽量セメントモルタルの使用^{3.11), 3.12)}、ポリマーや収縮低減剤等の混和材料の混入^{3.13)}、モルタル層内へのネット擦り込みによる補強^{3.14), 3.15)}等が挙げられる。また、構工法については、構造躯体にラス下地板、防水紙、メタルラス、モルタルの順に施工する従来^{3.11), 3.12), 3.15)}の工法（直張り工法）に対して、乾式仕上げ外壁と同様に構造躯体とラス下地板との間に胴縁を留め付ける通気工法^{3.11), 3.12), 3.15)}、または突起の付いた防水紙を用いることで通気層を設ける^{3.16)}工法などが開発されている。

本論文では、地震時のラスモルタルの剥落防止および経年劣化に対する耐久性向上を目的に、弾性・粘着性を有する新規防水紙の活用を提案した。ラスモルタル外壁に粘着型防水紙を活用することで、木製下地板との接着一体性、地震動に対する剥落抑制性能、メタルラスおよびステーブルの防錆性の向上や乾燥収縮の低減が期待できる。

3.3.2 ラスモルタル外壁の劣化と剥落のメカニズム

ラスモルタル外壁への粘着型防水紙の活用を提案するに際して、図 3.9 に示すような劣化メカニズムを想定した。ラスモルタル外壁の劣化は、健全状態 (①) から、モルタル表面に生じた乾燥収縮ひび割れから内部に雨水が浸入する。ここで、ひび割れが防水紙まで達していない場合や、達していても防水紙とモルタルが十分に密着している場合は水の侵入はそこで止まる (②)。しかし、モルタルと防水紙が密着していないとひび割れから侵入した水はモルタルと下地材の空隙に水または湿気として滞留する (③)。滞留した水分がステープル釘穴より下地材まで侵入することで下地に打ち付けられているステープルからメタルラスに渡って腐食する (④)。ここで、ラスモルタルと下地材の間に滞留する水分などにより木製下地材が腐朽することも考えられるが、本研究ではメタルラス、ステープルの腐食に的を絞って、下地材の腐朽については検討の対象外とした。

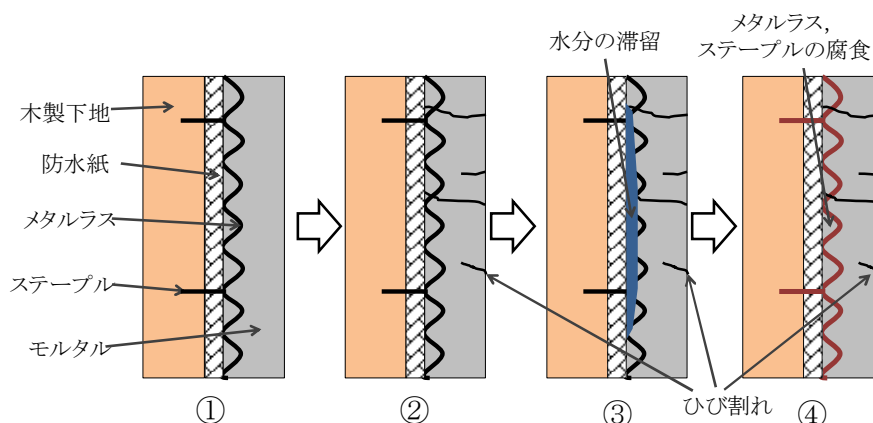


図 3.9 想定したラスモルタル外壁の劣化メカニズムの概要

3.3.3 ラスモルタル外壁の改善に必要な特性

3.3.2 節で示したラスモルタル外壁の劣化メカニズムにおける各劣化段階について改善のために必要とされる特性を整理して表 3.5 に示す。モルタルの乾燥収縮ひび割れの発生に対してはモルタルの乾燥収縮を低減させることや伸び能力の付与などのモルタルの品質向上が必要となる。モルタル、メタルラスと下地材との間への雨水の浸入、滞留に対しては、防水紙とモルタルとの密着性やステープル釘穴のシール性の向上が必要となる。地震動などの外力によるラスモルタルの剥落に対しては、ステープルによるモルタルの下地材への保持力を補助する接着性が必要となる。本論文では表 3.5 に示した特性をラスモルタルへ付与することができる技術を目指し、防水紙部分に粘着型防水紙の活用を提案する。

表 3.5 ラスモルタル外壁の劣化段階と改善に必要な特性

劣化段階	改善に必要な特性
乾燥収縮ひび割れの発生	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタルの品質向上 ・モルタル内のひずみを緩和
雨水の侵入, 滞留	<ul style="list-style-type: none"> ・防水紙とモルタルの密着性 ・釘穴シール性
地震力によるモルタルの剥落	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタルの下地材への保持力の向上

3.3.4 提案する粘着型防水紙とその活用効果

提案する粘着型防水紙とは、住宅屋根の下葺材や壁開口部回りの雨仕舞材として一般的に使用されているものである。アスファルトを含浸させた紙や不織布の片面または両面に粘着層を有し、粘着性と弾力性が付与されている。図 3.10 および写真 3.8 に両面に粘着層を有する防水紙（両面粘着型防水紙）の断面構成と製品写真をそれぞれ示す。

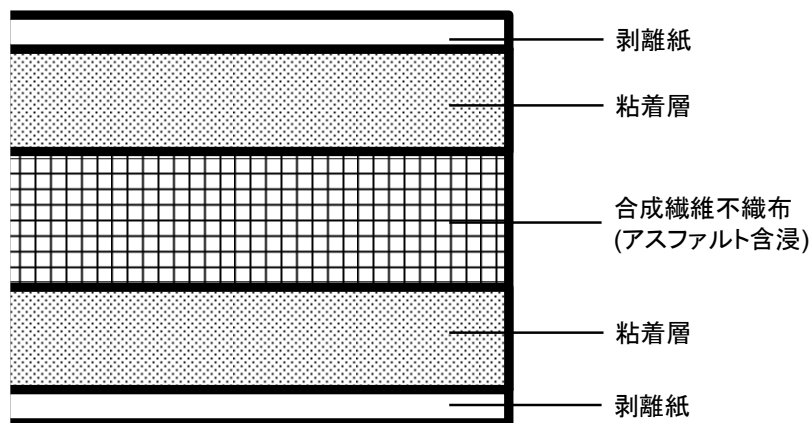


図 3.10 両面粘着型防水紙の断面構成（例）



写真 3.8 両面粘着型防水紙（例）

ラスモルタル外壁に粘着型防水紙を活用することで以下に示す効果が期待できると考えた。

- I モルタルの乾燥収縮ひずみの緩和によるひび割れの抑制（両面に粘着層を有するもの）
- II ステープル釘穴のシール性の向上
- III 下地に対する接着性の向上
- IV モルタルに対する接着性の向上（両面に粘着層を有するもの）

第5章で後述するように、本研究では両面粘着型の防水紙と片面粘着型の防水紙に対して、ラスモルタル外壁への活用効果を検討したが、上記のIおよびIVは両面粘着型の防水紙にのみ期待した効果である。

粘着型防水紙を活用することによるラスモルタル外壁部材の耐用年数の増加については、メタルラス、ステープル、モルタルの材料性能やラス下地板間隔、モルタル塗り厚並びに地震動に対しては軸組の部材や接合方法などによっても変わるが、JASS19や木造住宅工事仕様書に適合する仕様の場合、100年程度が目標使用年数となることから粘着型防水紙の耐久性および剥落抑制性の向上により120年から150年程度に延ばすことができると考えている。

3.4 まとめ

本章では、ひび割れ注入工法における注入性状の検討に関して、可視化試験体による注入性状の評価試験法を提案した。本手法では統一した形状のひび割れ凹凸面に対する補修材の注入直後から硬化までの補修材の広がりや垂れを経時的に目視観察することが可能である。また、可視化試験体のひび割れ形状の再現性の検討を行い、3D スキャナ、3D プリ

ンタによりコンクリート割裂面のひび割れ形状の再現が可能であることを確認した。

木造ラスモルタルの高品質化に関して、部材の構成材料に弾性、粘着性のある防水紙（粘着型防水紙）の活用を提案した。粘着型防水紙をラスモルタルへ活用するによりモルタルの乾燥収縮の緩和、ステーブル釘穴のシール性の向上、下地、モルタルに対する接着性の向上が期待できる。

参考文献

- 3.1) 上村克郎, 小西敏正, 橘高義典, 高塩美佐子: 鉄筋コンクリート造のひびわれ補修における樹脂注入工法 その1) 充てん材料に関する基礎的実験, 日本建築学会大会学術梗概集 (北海道) A, pp.701-702, 1986.8
- 3.2) 飯坂武男, 菊川浩治, 鷺見高典: ひび割れ補修材の注入性状について, セメント・コンクリート論文集 No.46, pp.988-993, 1992
- 3.3) 飯坂武男, 鷺見高典, 梅原秀哲: 無機系補修材料の注入性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No.599/V-40, pp.49-57, 1998.8
- 3.4) 三好学, 飯坂武男, 福島浩一, 梅原秀哲: コンクリート補修材料としてのアクリル樹脂の特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.401-406, 1998
- 3.5) 上村克郎, 小西敏正, 橘高義典, 小林敏泰: 鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究 (その1 樹脂の注入過程の数式化), 日本建築学会大会梗概集 (近畿) A, pp.395-396, 1987.10
- 3.6) 上村克郎, 小西敏正, 橘高義典, 三浦信一: 鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究 (その2 各種注入工法の性能比較), 日本建築学会大会梗概集 (近畿) A, pp.397-398, 1987.10
- 3.7) 菊地憲司, 梅原秀哲, 野沢文明, 吉田彌智: コンクリートのひびわれ注入材料の基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.981-986, 1992
- 3.8) 瀬野康弘, 魚本健人: ひび割れ注入補修における注入性状に影響を及ぼす要因に関する実験的検討, コンクリート工学論文集, 第19巻, 第1号, pp.11-20, 2008.1
- 3.9) 低圧樹脂注入工法協議会: 自動低圧樹脂注入工法ガイドブック (2013年度版), 低圧樹脂注入工法協議会, 2013.12
- 3.10) 氏家勲, 浅井文貴, 佐藤良一: ひび割れ表面粗さとひび割れ部の透気・透水性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.841-846, 1999
- 3.11) 古賀一八, 井上照郷, 宮村雅史, 小野泰, 田原賢, 中尾方人: 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その1) 全体概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), C-1, pp.309-310, 2010.9
- 3.12) 山中豊茂, 稲垣和宏, 田原賢, 小野泰, 中尾方人, 伏木剛志: 既調合軽量モルタル塗り通気工法外壁の構造性能 (その2) 試験体仕様, 日本建築学会大会学術講演梗

概集（北陸），C-1，pp.311-312，2010.9

- 3.13) 坂下明，森田翔，大久保孝昭，松本慎也，山中豊茂：木造住宅におけるラスモルタルのひび割れ制御に関する研究 その2 モルタルの種類の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp.901-902，2006.9
- 3.14) 森田翔，坂下明，大久保孝昭，松本慎也，山中豊茂：木造住宅におけるラスモルタルのひび割れ制御に関する研究 その1 ラスの種類の影響とファイバー，ネットの効果，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp.899-900，2006.9
- 3.15) 上村昌樹，三森敏司，渡部嗣道，中根義彦，橋爪修，須賀健太郎，小嶋秀典：木造外壁モルタル塗り工法の内部結露に関する研究，日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集，pp.151-154，2009.10
- 3.16) 平岡真由美，名波直道，入口泰尚：突起付防水紙を用いた外壁工法の開発 その1 実大実験棟における外壁仕様比較実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），C-1，pp.145-146，2001.9

第 4 章 可視化試験法による注入性状に及ぼす施工要因の検討

第4章 可視化試験法による注入性状に及ぼす施工要因の検討

4.1 はじめに

本章では、第3章で提案した注入性状の可視化試験法を用いて、補修材の注入性状と施工要因との関係の評価および可視化試験法の注入性状評価手法としての有用性の検討を行う。試験要因として、ひび割れ内部形状、幅および向き、施工時外気温、注入圧、補修材種類を挙げて、補修材のひび割れ再現試験体内での広がりや垂れについて評価する。

4.2 試験概要

4.2.1 試験要因

本試験では、表4.1に示す施工条件や補修仕様を試験要因として注入性状の評価を行った。試験体記号と試験要因を表4.2に示す。補修材は表4.3に示す「JIS A 6024:2008 建築補修用エポキシ樹脂」に規定されている硬質形の低粘度と中粘度のものを用いた。注入工法は、自動低圧樹脂注入工法^{4.1)}のうち輪ゴムの復元力を利用する注入器具を用いた工法とした。加圧ゴムによる注入圧は、メーカーの指定仕様の一つであるゴム本数2本および約2倍の注入圧になるゴム本数4本とした。

ここで表4.3に示すように、使用した低粘度と中粘度のエポキシ樹脂補修材の可使時間が異なる。しかし、本実験の補修材の注入開始から垂れの観察終了まで時間は各補修材の可使時間よりもかなり短いため、補修材の可使時間の違いが注入性状に与える影響は小さいものと判断し、この影響を無視して評価を行った。

注入する補修材の量は、ひび割れ再現試験体全体に生じている空隙の約30%とした。ひび割れ幅0.2mmに対しては試験体の空隙を、試験体寸法とひび割れ幅より、 $100 \times 200 \times 0.2 = 4000 \text{mm}^3$ (4mL)としてその30%の1.2mL程度、同様に、ひび割れ幅0.5mmに対しては試験体の空隙を、 $100 \times 200 \times 0.5 = 10000 \text{mm}^3$ (10mL)としてその30%の3mL程度がひび割れ部に注入されるように計画した。すなわち、注入量はひび割れ幅に比例させて増やした。注入量が異なることで注入器具の輪ゴムの伸び量、すなわち注入圧力に違いが生じるが、伸び量の差は約2.7mmと微小でありその影響は考慮しないこととした。

表 4.1 試験要因と水準

因子	水準
ひび割れ内部形状	パターン1, パターン2, 平滑板
ひび割れ幅	0.2mm, 0.5mm
ひび割れの向き	水平 (0度), 斜め (45度), 鉛直 (90度)
施工時外気温	6.5°C (冬季), 20°C (中間期), 29°C (夏季)
注入圧	注入用ゴム2本, 4本
補修材種類	低粘度エポキシ樹脂, 中粘度エポキシ樹脂

表 4.2 試験体記号と試験要因

試験体 記号	ひび割れ再現試験体			施工時外気温	注入圧	補修材種類
	内部形状	ひび割れ幅	ひび割れ向き			
①	パターン1	0.2mm	水平	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
②	パターン1	0.2mm	斜め	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
③	パターン1	0.2mm	鉛直	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
④	パターン1	0.5mm	水平	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑤	パターン1	0.5mm	斜め	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑥	パターン1	0.5mm	鉛直	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑦	パターン1	0.2mm	鉛直	6.5°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑧	パターン1	0.2mm	鉛直	29°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑨	パターン1	0.2mm	鉛直	20°C	ゴム4本	低粘度 エポキシ樹脂
⑩	パターン2	0.2mm	鉛直	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑪	平滑板	0.2mm	鉛直	20°C	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑫	パターン1	0.2mm	鉛直	20°C	ゴム2本	中粘度 エポキシ樹脂
⑬	パターン1	0.5mm	鉛直	20°C	ゴム2本	中粘度 エポキシ樹脂

表 4.3 補修材の物性

補修材	JIS A 6024 による区分	可使用時間	粘度 (23±0.5°C)
低粘度 エポキシ樹脂	硬質形 (I) 低粘度形	30±10分	580mPa・s
中粘度 エポキシ樹脂	硬質形 (I) 中粘度形, 揺変性	40±10分	12000mPa・s チキソトロピック係数:5

4.2.2 ひび割れ内部形状の影響

提案したひび割れ再現試験体は同一のひび割れ形状について注入性状を評価することができるが、ひび割れ内部形状の違いの影響を評価することを目的に表 4.4 に示す要因について試験を行った。ひび割れ再現試験体は、それぞれ 2 体のコンクリート円柱供試体をそれぞれ割裂二分した割裂面から 2 種類作製した（以下、パターン 1, 2）。加えてアクリル板の切削をせず平滑のまま型枠としてモルタルを打設した試験体（以下、平滑板）を作製した。パターン 1 および 2 のコンクリート割裂面のひび割れ表面形状の粗さ指標を表 4.5 に示す。

表 4.4 試験要因と試験体記号（ひび割れ内部形状）

試験体記号	ひび割れ再現試験体			施工時外気温	注入圧	補修材種類
	内部形状	ひび割れ幅	ひび割れ向き			
③	パターン1	0.2mm	鉛直	20℃	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑩	パターン2					
⑪	平滑板					

表 4.5 試験体のひび割れ表面形状の粗さ指標

測定方向	Y軸方向 (Y=5~95mm)		X軸方向 (X=5~195mm)	
測定位置	X=100mm		Y=50mm	
試験体	パターン1	パターン2	パターン1	パターン2
曲線長 (mm)	100.70	105.38	212.28	213.49
算術平均粗さ (mm)	1.65	2.30	7.07	2.81
最大高さ (mm)	10.88	8.00	13.53	5.88
平均表面粗さ(mm)	0.11	0.13	0.19	0.20

4.2.3 ひび割れ幅と向きの影響

自動低圧樹脂注入工法により低粘度エポキシ樹脂を効果的に注入することができるひび割れ幅は一般に 0.5mm 未満とされている^{4.1)}。また、構造物に生じるひび割れは様々な方向に生じる。そこで、ひび割れ幅と向きの影響を評価することを目的に表 4.6 に示す要因について試験を行った。ひび割れ幅は 0.2mm と 0.5mm の 2 種類とした。ひび割れの向きは水平（地面に対して 0 度）斜め（45 度）と鉛直（90 度）の 3 種類とした。

表 4.6 試験要因と試験体記号（ひび割れ幅・向き）

試験体 記号	ひび割れ再現試験体			施工時外気温	注入圧	補修材種類
	内部形状	ひび割れ幅	ひび割れ向き			
①	パターン1	0.2mm	水平	20℃	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
②			斜め			
③			鉛直			
④		0.5mm	水平			
⑤			斜め			
⑥			鉛直			

4.2.4 施工時外気温の影響

エポキシ樹脂の粘度や硬化時間は温度の影響を受ける。そこで、施工時の外気温の影響を評価することを目的に表 4.7 に示す要因について試験を行った。試験時の温度は、冬季（6.5℃）、中間期（20℃）、夏季（29℃）を想定した。試験体、補修材を各温度（誤差±1℃）に制御した試験室（湿度は65±5%で一定）に十分な時間静置した後に注入を行った。

表 4.7 試験要因と試験体記号（施工時外気温）

試験体 記号	ひび割れ再現試験体			施工時外気温	注入圧	補修材種類
	内部形状	ひび割れ幅	ひび割れ向き			
③	パターン1	0.2mm	鉛直	20℃	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑦				6.5℃		
⑧				29℃		

4.2.5 注入圧力の影響

注入圧力の影響を評価することを目的に表 4.8 に示す要因について試験を行った。本試験で用いる注入器具は使用する輪ゴム（加圧ゴム）の本数により注入圧力を調整することができる。加圧ゴムによる注入圧は、メーカーの指定仕様であるゴム本数 2 本と、その約 2 倍の注入圧になるゴム本数 4 本とした。

表 4.8 試験要因と試験体記号（注入圧力）

試験体 記号	ひび割れ再現試験体			施工時外気温	注入圧	補修材種類
	内部形状	ひび割れ幅	ひび割れ向き			
③	パターン1	0.2mm	鉛直	20℃	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑨					ゴム4本	

4.2.6 樹脂粘度の影響

補修材の種類のうち、主に樹脂粘度の影響を評価することを目的に表 4.9 に示す要因について試験を行った。補修材は JIS A 6024 に規定されている硬質形低粘度および中粘度とし、各補修材の物性は前述の表 4.3 に示すとおりである。

表 4.9 試験要因と試験体記号（補修材種類）

試験体 記号	ひび割れ再現試験体			施工時外気温	注入圧	補修材種類
	内部形状	ひび割れ幅	ひび割れ向き			
③	パターン1	0.2mm	鉛直	20℃	ゴム2本	低粘度 エポキシ樹脂
⑥		0.5mm				
⑫		0.2mm				中粘度 エポキシ樹脂
⑬		0.5mm				

4.3 試験結果と考察

4.3.1 注入性状の評価方法

4.3.1.1 注入面積拡大停止時の補修材の充填形状の評価

ひび割れ再現試験体へ注入された補修材の注入性状の評価について、本試験法で評価した補修材の注入性状は、注入工法の実務において補修材の注入量、注入時間、注入器具の間隔、注入後の垂れの可能性を予測する際の指標となる。既往研究^{例えば 4.2)、4.3)}では補修材の注入完了までの注入性状の評価方法として、試験体内の補修材の充填形状の寸法を測定して面積を求め、注入量や注入速度（面積速度）を算定しているものが多い。本試験では注入面積や面積速度に加えて、主に注入量や注入器具間隔に関係する補修材のひび割れに沿った方向やひび割れ深さの方向への広がりやすさを評価することとする。

試験体への補修材の注入を開始すると、補修材はひび割れ部に充填されてその面積は拡大していく。各試験体とも注入開始後のある時点でこの拡大は一旦停止する。注入開始から注入範囲の拡大が停止するまでの補修材の充填形状については、ひび割れに平行な方向（横方向）とひび割れ深さ方向の比を「変形率」と定義して定量的な評価を行った。変形率は図 4.1 に示す注入性状の模式図において横方向到達半径 r_w と深さ方向到達半径 r_d の比を取り（4.1）式で求める。

$$\text{変形率} = \frac{r_w(\text{横方向到達距離})}{r_d(\text{深さ方向到達距離})} \quad (4.1)$$

変形率の値が 1 を上回る場合には補修材は注入口から見てひび割れに平行な方向に沿って横方向に広がりやすく、また逆に 1 より小さな値をとる場合には、ひび割れの深さ方向

に広がりやすいといえる。

また、試験体へ注入された補修材の広がりやすさを、注入面積の経時変化より面積速度を求めて評価する。図 4.2 に示すように各試験体の注入面積の経時変化は直線に増加していると仮定し、経時変化曲線を 1 次の直線で回帰した時の傾きとして求めた。ここで、既往研究では、面積速度はひび割れ幅、補修材粘度、および注入圧力と関係があることが示されている。文献 4.2) によると、面積速度はひび割れ幅の 2 乗、注入圧、材料粘度の逆数に比例すると述べられている。文献 4.3) ではひび割れ面の粗さで面積速度を比較すると、ひび割れ面が粗い試験体の方が速度は抑制されると述べられている。

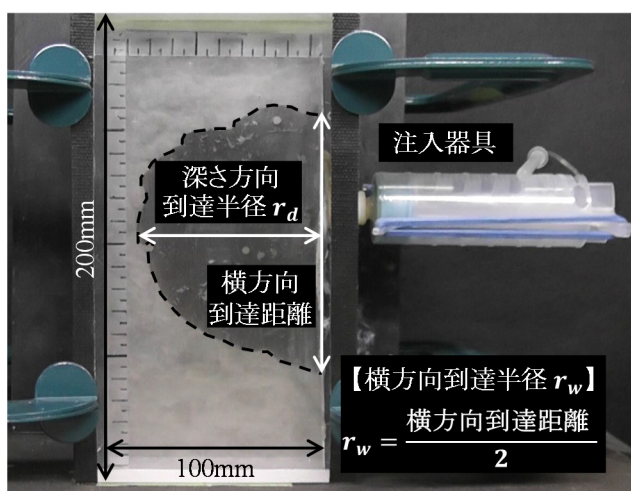


図 4.1 横方向到達半径と深さ方向到達半径

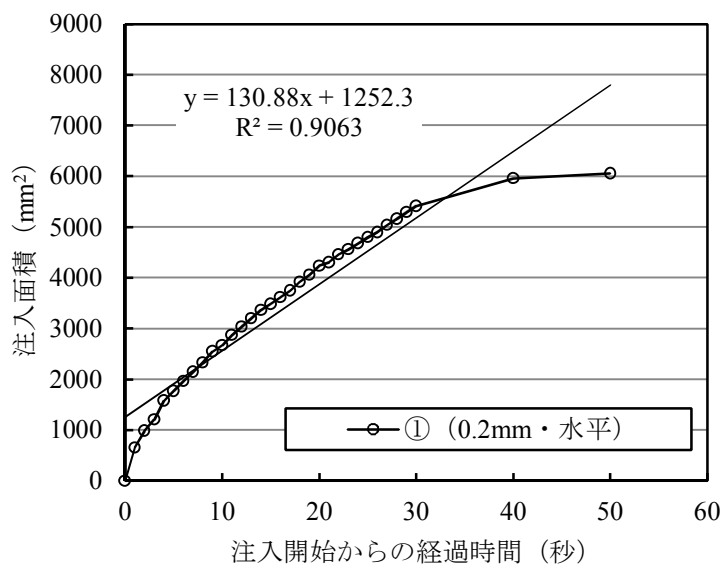


図 4.2 注入面積の経時変化 (試験体①)

4.3.1.2 注入完了後の補修材の垂れの評価

注入完了後、試験要因によってはひび割れ内部で補修材の垂れが生じる。本試験法では補修材の垂れは、垂れによる補修材形状の経時変化から評価することができるが、本試験では図4.3に示すように注入範囲の拡大が止まった時の形状を基準として、補修材が下部で鉛直方向に垂れる距離を「垂れ進行距離」として経時変化を測定した。ここで、本試験においては試験体寸法を超える範囲の補修材の垂れは評価できない。したがって、垂れの先端が試験体下端に達した時点までの評価とした。なお試験体下端に達するまでの時間は注入初期の注入範囲の大きさに依存することは明らかである。垂れ進行距離の経時変化の例を図4.4に示す。本試験では、垂れ進行距離で評価し、垂れた補修材の量については評価していない。しかし、補修材が垂れたことによりアクリル板とモルタルのいずれか片方に付着した結果、隙間が生じた箇所が図4.5に示すように白くなるので、その箇所の面積から垂れた量の推定が可能であると考えられ、空隙部の面積と垂れ量の関係の検討については今後の課題とする。

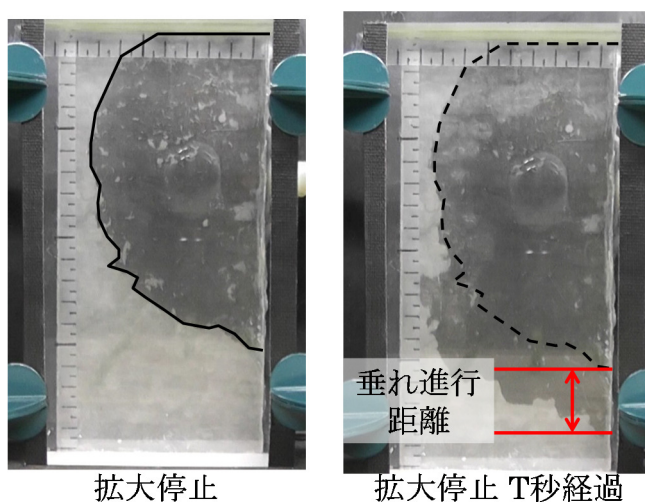


図4.3 垂れ進行距離

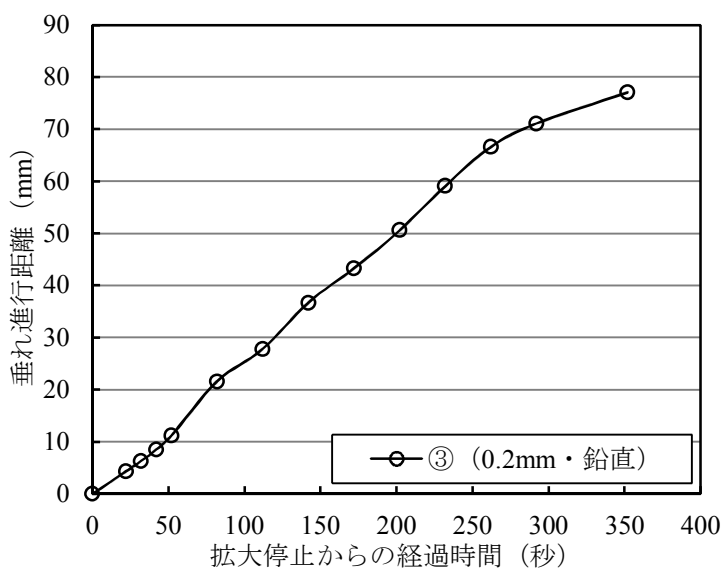


図 4.4 垂れ進行距離の経時変化 (試験体③)

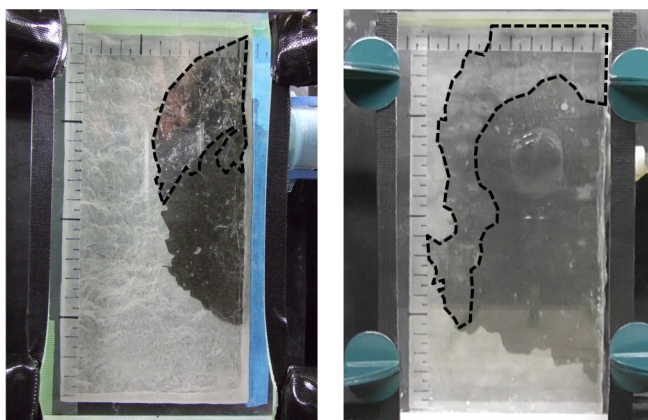


図 4.5 補修材の垂れた箇所 (破線で囲まれた箇所に隙間が生じている)

補修材の垂れ進行距離の経時変化から垂れの進行速度の算出を試みる。試験体③の垂れ進行距離の経時変化は図 4.4 に示すように、垂れ発生初期は経過時間に対してほぼ直線に増加している。本実験では注入開始から 60 秒経過時の垂れ進行距離から垂れ進行速度を求めた。垂れ進行距離の式を (4.2) 式に示す。

$$\begin{aligned}
 & \text{垂れ進行速度 (mm / sec.)} \\
 & = \frac{\text{注入開始から 60sec. 経過時の垂れ進行距離 (mm)}}{60 \text{ (sec.)} - \text{注入開始から注入範囲の拡大停止までの時間 (sec.)}} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

例えば、試験体③の場合、注入開始から注入範囲の拡大停止までの時間は 8 秒であり、注入開始から 60 秒経過時、すなわち拡大停止から 52 秒経過時の垂れ進行距離は 11.2mm

であったので、垂れ進行距離は 0.215mm/sec となる。

ただし、ひび割れ向きが斜めの試験体や、ひび割れ向きが鉛直のものでも補修材が試験体下端へ到達する直前には垂れの進行が緩やかになっている。したがって、(4.2) 式で求められる垂れ進行速度はひび割れ向きが鉛直の試験体における初期の垂れの評価に用いる。

既往研究では垂れ進行速度はひび割れ幅、補修材粘度と関係があることが示されている(4.2)。

補修材の注入については、いずれの試験体においても目標の注入量の補修材が注入された。注入器具の取り付け位置は、ひび割れ向きが水平の場合、試験体の中央(端部より 100mm)とした。一方ひび割れ向き鉛直と斜めの場合、当初は補修材の垂れを長時間観察するために試験体下端より 145mm の位置に設置して実験を実施したが、かえって注入された補修材が試験体上端に達し、適切な充填形状が得ることができなくなる恐れから、途中から試験体下端より 125mm に変更した。従って、ひび割れ向き鉛直と斜めにおいて、注入器具の取り付け位置が 2 種類混同しているが、補修材の垂れ進行距離は試験体個別で評価するので問題無いと判断した。各試験体における注入器具の取り付け位置は図中に「◎」印で示す。

4.3.2 ひび割れ内部形状の影響

○注入面積拡大停止時の補修材の充填形状

ひび割れ内部形状が異なる各試験体の注入開始から注入範囲拡大停止までの注入性状を写真 4.1~4.3 に、注入範囲拡大停止時の各補修材の形状を写真 4.4 にそれぞれ示す。注入直後の性状について、注入範囲拡大停止時で比較すると、写真 4.4 に示すように試験体③(パターン 1)と試験体⑪(平滑板)は変形率が 1 より大きくひび割れに沿った方向に広がりやすい傾向である一方、試験体⑩(パターン 2)の変形率は 1 を下回り、ひび割れに沿った方向よりも深さ方向に広がりやすい傾向を示した。また、注入範囲の拡大停止までに要した時間は試験体によって大きく異なった。

注入面積の経時変化を図 4.6 に、面積速度を表 4.10 に示す。それぞれの試験体で面積速度が大きく異なっており、面積速度がひび割れ内部形状の影響を受けていることが確認できる。しかし、コンクリートひび割れを模擬した試験体③、⑩よりも平滑板である試験体⑪の面積速度の方が小さくなる傾向を示した。

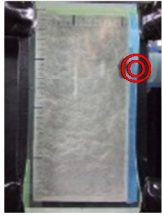
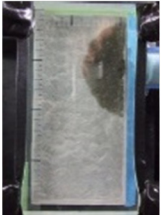
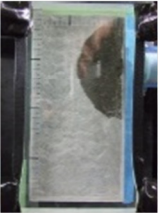
記号	③			
水準	パターン1・0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	3142mm ²	3751mm ²	
変形率	0.000	1.073	1.073	

写真 4.1 試験体③の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状



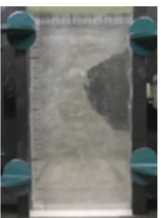
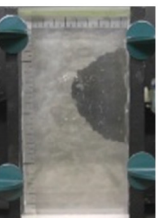
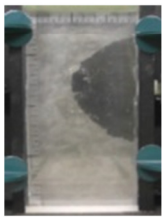
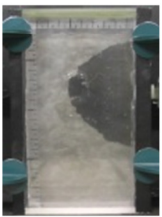
記号	⑩			
水準	パターン2・0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	1616mm ²	2558mm ²	3462mm ²
変形率	0.000	0.929	0.931	0.904
経過時間	注入開始16秒	注入開始20秒 (拡大停止)		
充填形状				
注入面積	4222mm ²	4517mm ²		
変形率	0.905	0.893		

写真 4.2 試験体⑩の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状


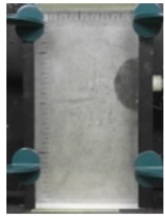

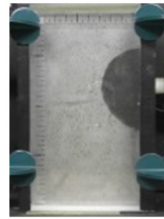

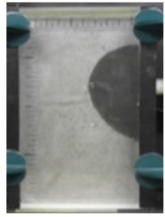

記号	⑪			
水準	平滑板・0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	965mm ²	1621mm ²	2163mm ²
変形率	0.000	1.143	1.143	1.157
経過時間	注入開始16秒	注入開始20秒	注入開始30秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	2660mm ²	3146mm ²	4225mm ²	
変形率	1.152	1.137	1.186	

写真 4.3 試験体⑪の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

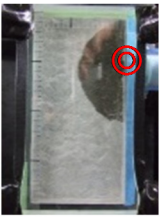
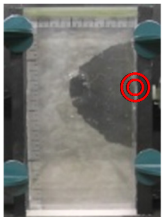
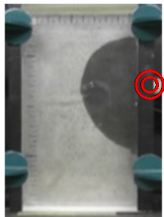
記号	③	⑩	⑪
水準	パターン1	パターン2	平滑板
拡大停止時	8秒	20秒	30秒
充填形状			
注入面積	3751mm ²	4517mm ²	4225mm ²
変形率	1.073	0.893	1.186

写真 4.4 各試験体の拡大停止時の注入性状（ひび割れ内部形状）

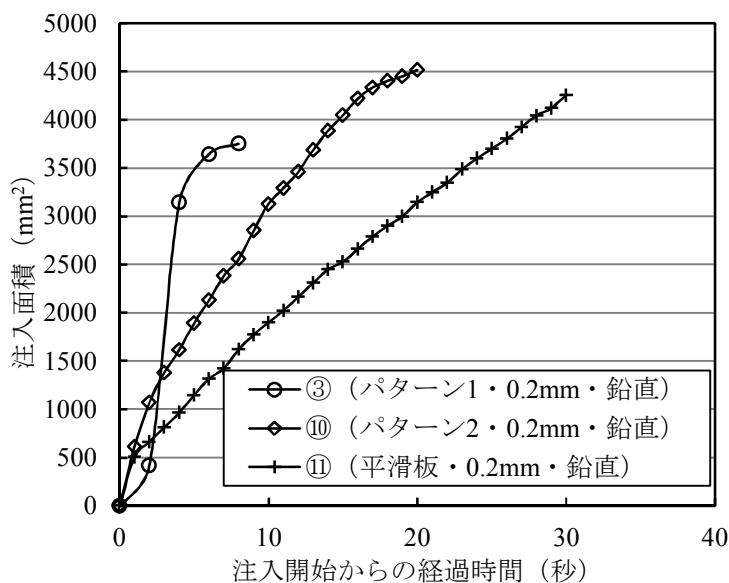


図 4.6 注入面積の経時変化（ひび割れ内部形状）

表 4.10 面積速度（ひび割れ内部形状）

記号	③	⑩	⑪
水準	パターン1	パターン2	平滑板
面積速度 (mm ² /sec)	536	216	131

○注入完了後の補修材の垂れ

各試験体の垂れについて写真 4.5～4.7 に、垂れ進行距離の経時変化を図 4.7 にそれぞれ示す。本実験においては試験体寸法を超える範囲の補修材の垂れは評価できない。したがって、垂れの先端が試験体下端に達した時点までの評価とし、各写真においては試験体下端への到達以降の垂れ進行距離は「—」で表した。なお試験体下端に達するまでの距離と時間は注入初期の注入範囲の大きさに依存することは明らかである。垂れ進行距離は、実験条件ごとにその値の大小を比較することは意味がないものと考えている。図 4.6 において、試験体で注入開始から注入範囲の拡大が停止するまでの時間が異なるので（試験体③は 8 秒、⑩は 20 秒、⑪は 30 秒）、グラフの横軸を「拡大停止からの経過時間」として表した。補修材の垂れの進行もひび割れ内部形状によって大きく異なる。パターン 1, 2 とともに形状はランダムなものであるが、この結果からひび割れの内部形状が異なる試験体を使用する場合、ひび割れの内部形状の影響を受けることが明らかであり、一律な評価を行うことが難しいと考えられる。したがって、注入性状を検討する場合には同一のひび割れ形状で比較することが必要であることが分かる。

垂れ進行速度を表 4.11 に示す。それぞれの試験体で面積速度が大きく異なっており、垂

れ進行速度がひび割れ内部形状の影響を受けていることが確認できる。また、コンクリートひび割れを模擬した試験体③、⑩よりも平滑板である試験体⑪の速度の方が大きくなる傾向を示し、面積速度での傾向とは異なった。

4.3.3 節以降の試験は注入性状に及ぼすひび割れ内部形状の影響を考慮して、ひび割れパターン 1 の試験体に統一して実施した。しかし、本試験で得られた試験要因と注入性状との関係に関する知見は使用する試験体のひび割れ内部形状によって変わる可能性がある。注入工法の評価試験法として様々な施工要因の注入性状を相対評価するためには複数種類のひび割れ内部形状でパターン化した実験を行うか、ひび割れの内部形状が補修材の注入性状に及ぼす影響を詳細に検討した上でひび割れ形状を標準化する必要があると考えられ、今後の課題とする。


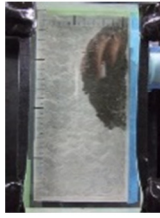

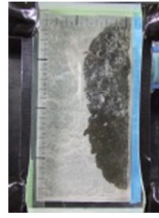
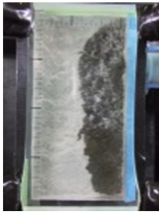

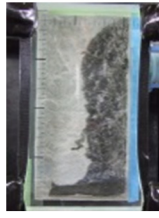
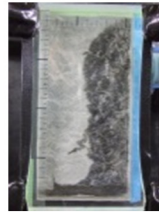
記号	③			
水準	パターン1・0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	4.3mm	11.2mm	43.3mm	71.1mm
経過時間	注入開始 360秒 (下端到達)	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	77.1mm	—	—	—

写真 4.5 試験体③の補修材の垂れの経時変化





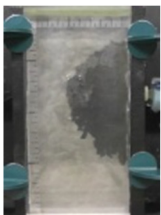



記号	⑩			
水準	パターン2・0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	1.7mm	3.3mm	9.4mm	12.1mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒 (下端到達)
充填形状				
垂れ進行距離	14.1mm	23.6mm	30.2mm	53.8mm

写真 4.6 試験体⑩の補修材の垂れの経時変化









記号	⑩			
水準	平滑板・0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	0.0mm	16.3mm	21.0mm	23.9mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒 (下端到達)	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	28.9mm	34.0mm	51.2mm	—

写真 4.7 試験体⑩の補修材の垂れの経時変化

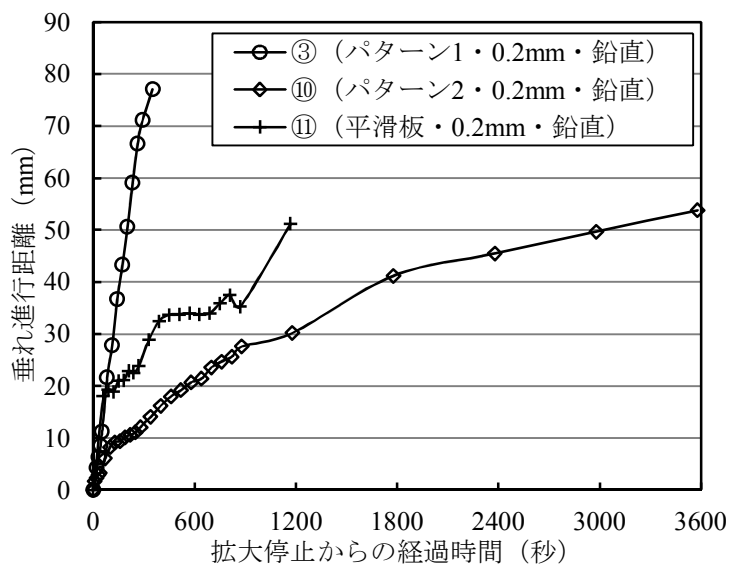


図 4.7 垂れ進行距離 (ひび割れ内部形状)

表 4.11 垂れ進行速度（ひび割れ内部形状）

記号	③	⑩	⑪
水準	パターン1	パターン2	平滑板
垂れ速度 (mm/sec)	0.215	0.083	0.543

4.3.3 ひび割れ幅と向きの影響

○注入面積拡大停止時の補修材の充填形状

ひび割れ幅と向きを変化させた試験体の注入開始から注入範囲拡大停止までの注入性状を写真 4.8～4.13 に、注入範囲拡大停止時の各補修材の形状を写真 4.14 にそれぞれ示す。ひび割れ幅 0.2mm でひび割れ向きが斜めの試験体②の充填形状は写真 4.9 に示すように他と比べて変形率が極端に小さく同心円状には広がっておらず、試験体の噛み合わせなど試験時の不具合が考えられる。注入直後の性状について、注入範囲拡大停止時においてひび割れ幅の違いで比較すると、写真 4.14 に示すようにひび割れ幅 0.2mm の試験体は、変形率は 1 よりも若干大きな値を示しており、ひび割れに沿った方向に広がる傾向がある。一方、ひび割れ幅が 0.5mm の試験体の変形率は 1 よりも小さく、ひび割れ深さ方向に補修材が広がりやすいことが分かる。ひび割れの向きで比較すると、変形率の大きな違いはなく、補修材の広がり方はひび割れ向きよりひび割れ幅の影響の方が支配的であることが分かる。

注入面積の経時変化を図 4.8, 4.9 に、面積速度を表 4.12 に示す。試験体②の結果は考察から除外している。同じひび割れ方向でひび割れ幅の違いで比較すると、ひび割れ幅 0.5mm の試験体の方が面積速度は大きい。ひび割れの向きで比較すると、面積速度の大小関係がひび割れ幅によって異なっている。面積速度はひび割れ幅およびひび割れ向きの影響も受けることは確認できたが、その傾向については今後より詳細に検討する必要がある。ただし、注入範囲拡大停止時の注入面積は、ひび割れ幅 0.2mm の試験体より 0.5mm の試験体の方が大きい。注入量はひび割れ幅が大きくなった分だけ増やしているためひび割れ内に補修材が充填されているのであれば注入範囲の形状は異なっても注入面積はほぼ同じになるはずである。ひび割れ幅 0.5mm の試験体の注入面積が大きくなった原因としては、注入初期から補修材がアクリル板またはモルタルのいずれか片側に付着して広がっていったことが推察される。撮影した写真からは明確に隙間が生じたことは観察できなかったが、本実験で用いた試験体、補修材、注入方法の範囲ではひび割れ幅 0.5mm への注入において補修材が十分に充填されない可能性があることが考えられる。原因として、第 3 章 3.2.2 節で示した通り、モルタルとアクリルとの濡れ性が異なることが挙げられるが、ひび割れ再現試験体のひび割れ幅を大きくすると、ひび割れ再現試験体全体に生じている空隙の約 30%の注入量では補修材がひび割れに充填されず、充填形状を適正に評価ができなくなる可能性がある。


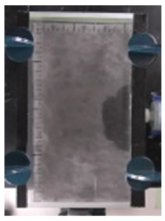
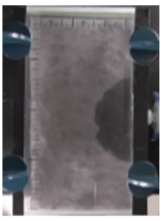
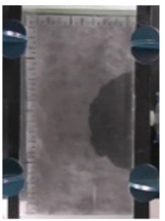
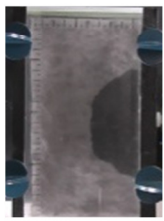
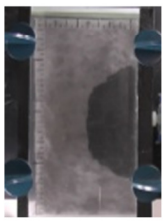
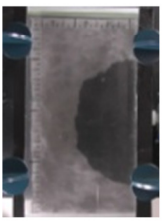
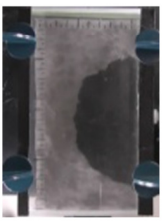
記号	①			
水準	0.2mm・水平			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	1576mm ²	2329mm ²	3033mm ²
変形率	0.000	1.284	1.158	1.212
経過時間	注入開始16秒	注入開始20秒	注入開始30秒	注入開始50秒 (拡大停止)
充填形状				
注入面積	3612mm ²	4234mm ²	5412mm ²	6052mm ²
変形率	1.207	1.187	1.150	1.093

写真 4.8 試験体①の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状


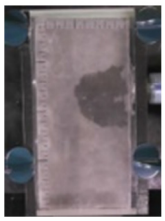
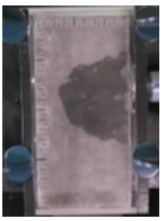
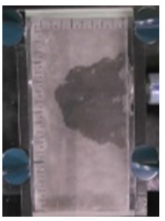
記号	②			
水準	0.2mm・斜め			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始9秒 (拡大停止)
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	2764mm ²	4765mm ²	4933mm ²
変形率	0.000	0.535	0.667	0.682

写真 4.9 試験体②の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

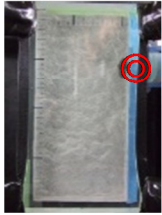
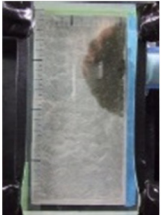
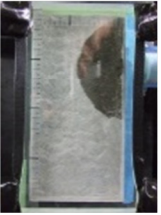
記号	③			
水準	0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	3142mm ²	3751mm ²	
変形率	0.000	1.073	1.073	

写真 4.10 試験体③の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

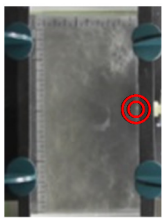
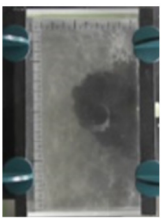
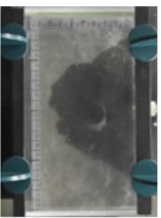
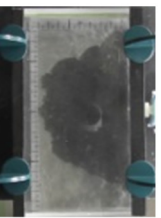
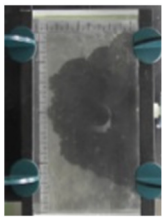
記号	④			
水準	0.5mm・水平			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	4620mm ²	7770mm ²	10348mm ²
変形率	0.000	0.933	0.949	0.907
経過時間	注入開始13秒 (拡大停止)			
充填形状				
注入面積	10516mm ²			
変形率	0.904			

写真 4.11 試験体④の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

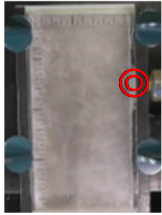
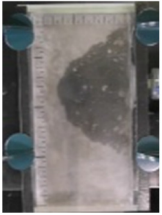
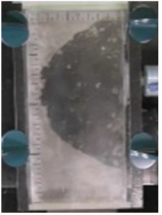
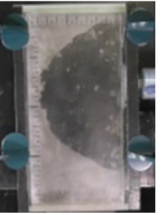
記号	⑤			
水準	0.5mm・斜め			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始9秒 (拡大停止)
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	6434mm ²	9321mm ²	9407mm ²
変形率	0.000	0.877	0.949	0.990

写真 4.12 試験体⑤の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状






記号	⑥			
水準	0.5mm・鉛直			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	4067mm ²	7009mm ²	8924mm ²
変形率	0.000	0.913	1.020	0.924
経過時間	注入開始13秒 (拡大停止)			
充填形状				
注入面積	9207mm ²			
変形率	0.925			

写真 4.13 試験体⑥の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

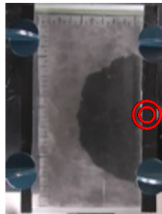


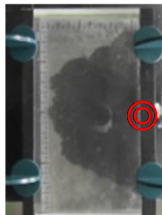
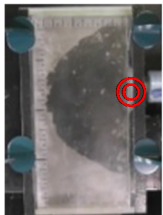

記号	①	②	③
水準	0.2mm・水平	0.2mm・斜め	0.2mm・鉛直
拡大 停止時	50秒	9秒	8秒
充填 形状			
注入 面積	6052mm ²	4933mm ²	3751mm ²
変形率	1.093	0.682	1.073
記号	④	⑤	⑥
水準	0.5mm・水平	0.5mm・斜め	0.5mm・鉛直
拡大 停止時	13秒	9秒	13秒
充填 形状			
注入 面積	10516mm ²	9407mm ²	9207mm ²
変形率	0.904	0.990	0.925

写真 4.14 各試験体の拡大停止時の注入性状（ひび割れ幅・向き）

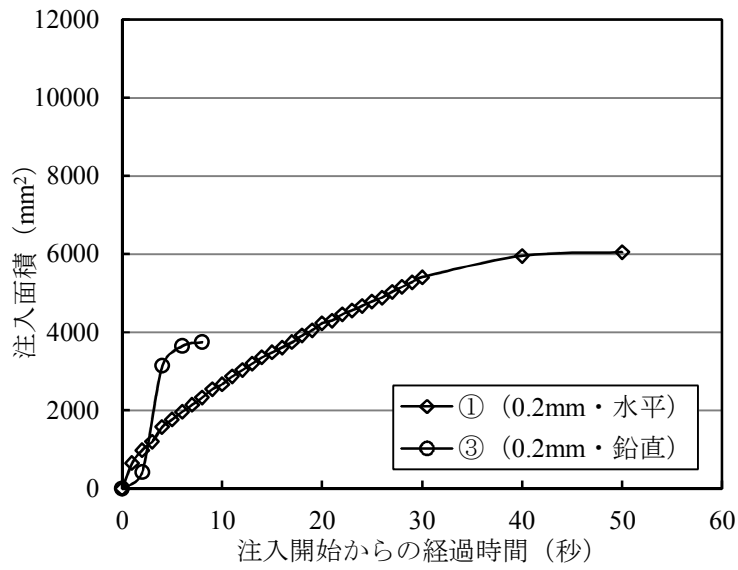


図 4.8 注入面積の経時変化（ひび割れ幅 0.2mm）

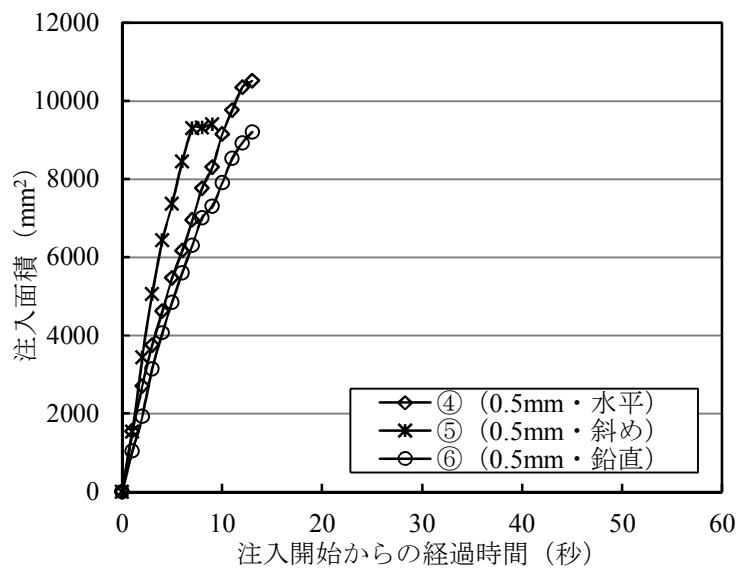


図 4.9 注入面積の経時変化（ひび割れ幅 0.5mm）

表 4.12 面積速度（ひび割れ幅・向き）

記号	①	③	④	⑤	⑥
水準	0.2mm		0.5mm		
	水平	鉛直	水平	斜め	鉛直
面積速度 (mm ² /sec)	131	536	793	1088	709

○注入完了後の補修材の垂れ

各試験体の垂れについて写真 4.15～4.17 に、垂れ進行距離の経時変化を図 4.10 にそれぞれ示す。補修材の垂れについて、ひび割れ幅の違いで比較すると、垂れの進行は大きな違いはない。ひび割れの向きで比較すると、ひび割れの向きが鉛直の試験体では、垂れの進行距離が時間にほぼ比例して直線的に増加していることが分かる。一方ひび割れの向きが斜めの試験体は、徐々に垂れの進行が緩やかになっている。このことより、ひび割れの向きと補修材の垂れには相関があることが分かる。なお、ひび割れの向きが水平の試験体については、垂れは全く生じなかった。

垂れ進行速度を表 4.13 に示す。ひび割れ幅の違いで比較すると、ひび割れ幅 0.5mm の試験体の方が垂れ進行速度は大きく、面積速度同様に垂れ進行速度もひび割れ幅の影響を受けることを確認した。

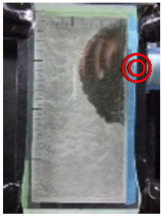
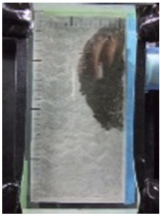
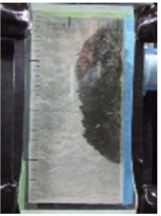

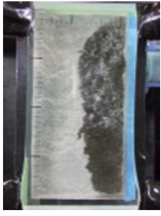
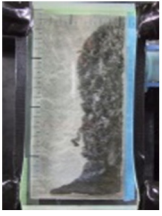
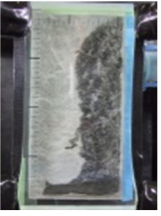
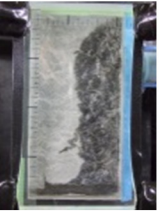
記号	③			
水準	0.2mm・鉛直			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	4.3mm	11.2mm	43.3mm	71.1mm
経過時間	注入開始 360秒 (下端到達)	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	77.1mm	—	—	—

写真 4.15 試験体③の補修材の垂れの経時変化

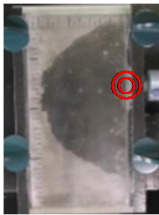
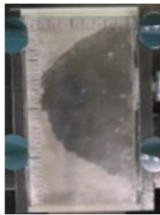
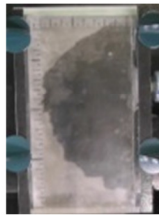
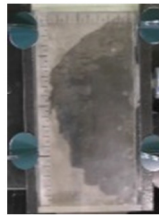


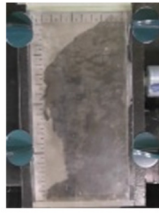

記号	⑤			
水準	0.5mm・斜め			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒 (下端到達)
充填形状				
垂れ進行距離	3.7mm	15.9mm	24.2mm	31.3mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	—	—	—	—

写真 4.16 試験体⑤の補修材の垂れの経時変化



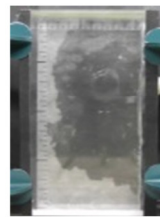
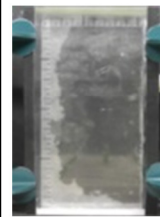



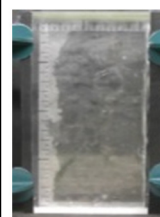
記号	⑥			
水準	0.5mm・鉛直			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒 (下端到達)
充填形状				
垂れ進行距離	5.8mm	11.6mm	32.6mm	46.6mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	—	—	—	—

写真 4.17 試験体⑥の補修材の垂れの経時変化

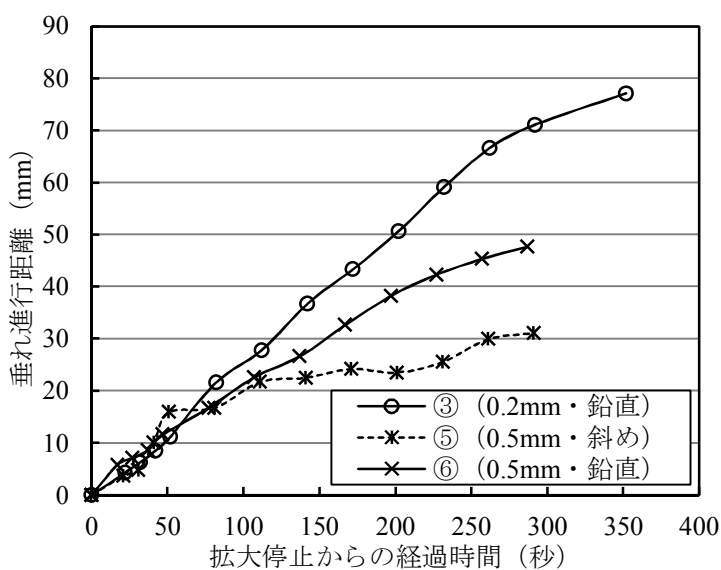


図 4.10 垂れ進行距離（ひび割れ幅・向き）

表 4.13 垂れ進行速度（ひび割れ向き）

記号	③	⑥
水準	0.2mm	0.5mm
	鉛直	鉛直
垂れ速度 (mm/sec)	0.215	0.247

4.3.4 施工時外気温の影響

○注入面積拡大停止時の補修材の充填形状

施工時外気温を変化させた試験体の注入開始から注入範囲拡大停止までの注入性状を写真 4.18～4.20 に、注入範囲拡大停止時の各補修材の形状を写真 4.21 にそれぞれ示す。注入直後の性状について、注入範囲拡大停止時と比較すると、写真 4.21 に示すように変形率は試験体⑦（6.5℃）を最小に気温が高くなるにしたがい大きくなる傾向を示した。この原因として、気温の上昇に伴いエポキシ樹脂の粘度が低下し、ひび割れに沿った方向へ広がりやすくなったことが考えられる。また、注入範囲の拡大が停止するまでの時間は、気温が低くなるにしたがい長く、補修材がゆっくり広がっていく傾向を示し、この原因も気温の変化に伴う樹脂粘度の変化が考えられる。

注入面積の経時変化を図 4.11 に、面積速度を表 4.14 に示す。面積速度は試験体③（20℃）が最大となり、温度が低い試験体⑦（6.5℃）、温度が高い試験体⑧（29℃）のいずれでも速度が小さくなった。温度が低い試験体⑦については前述のとおり補修材の樹脂粘度が低温で増加し遅くなったことが考えられる。一方、温度が高い試験体⑧については、補修材の樹脂粘度は低下していることおよび注入初期で硬化反応の変化については影響がないことが考えられ、面積速度が遅くなった要因としては本実験の範囲では明らかにできなかった。

第4章 可視化試験法による注入性状に及ぼす施工要因の検討


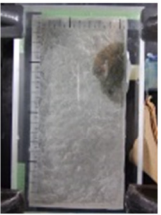
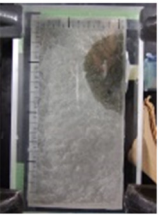




記号	⑦			
水準	0.2mm・鉛直・6.5℃			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	1520mm ²	2472mm ²	3317mm ²
変形率	0.000	1.003	1.090	1.031
経過時間	注入開始16秒	注入開始20秒	注入開始26秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	4133mm ²	4761mm ²	5113mm ²	
変形率	0.962	0.983	0.960	

写真 4.18 試験体⑦の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

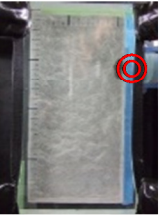
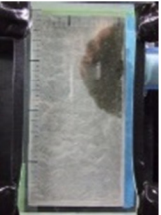
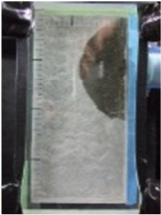
記号	③			
水準	0.2mm・鉛直・20℃			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	3142mm ²	3751mm ²	
変形率	0.000	1.073	1.073	

写真 4.19 試験体③の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

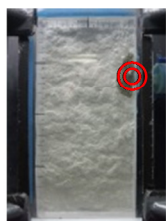
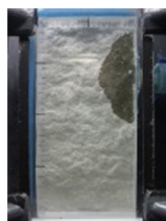
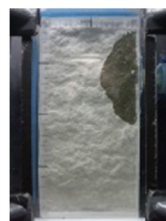
記号	⑧			
水準	0.2mm・鉛直・29℃			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始6秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	3142mm ²	3751mm ²	
変形率	0.000	1.073	1.212	

写真 4.20 試験体⑧の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状



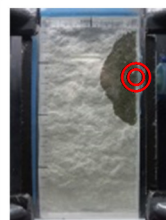
記号	⑦	③	⑧
水準	6.5℃	20℃	29℃
拡大停止時	26秒	8秒	6秒
充填形状			
注入面積	5113mm ²	3751mm ²	3751mm ²
変形率	0.960	1.073	1.212

写真 4.21 各試験体の拡大停止時の注入性状 (施工時外気温)

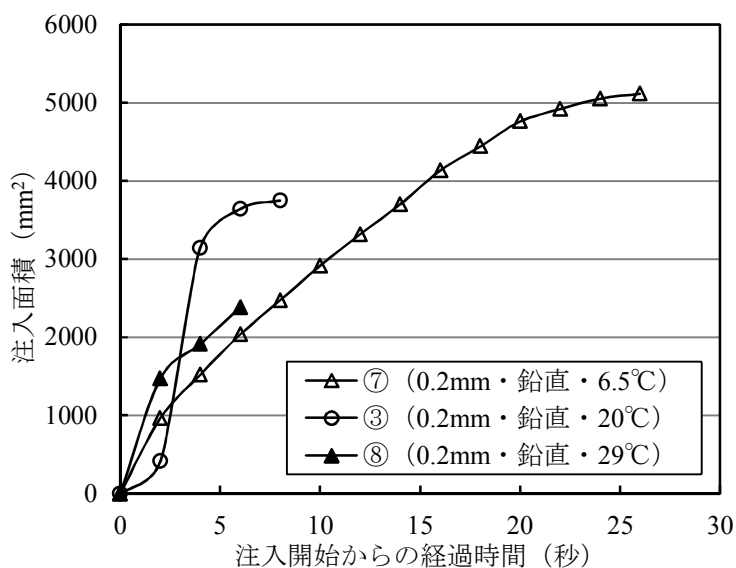


図 4.11 注入面積の経時変化（施工時外気温）

表 4.14 面積速度（施工時外気温）

記号	⑦	③	⑧
水準	6.5°C	20°C	29°C
面積速度 (mm ² /sec)	192	536	380

○注入完了後の補修材の垂れ

各試験体の垂れについて写真 4.22～4.24 に、垂れ進行距離の経時変化を図 4.12 にそれぞれ示す。補修材の垂れについて、試験体③（20°C）に比べて試験体⑦（6.5°C）、⑧（29°C）の垂れの進行が緩やかである。垂れの進行が緩やかになった原因として試験体⑦については、低温のため補修材の粘度が増大したことが考えられる。また、試験体⑧については、グラフより拡大停止からの経過時間約 2400 秒以降から垂れ進行距離の勾配が緩やかになっていることから、高温のため補修材の硬化反応は早まったことが考えられる。

垂れ進行速度を表 4.15 に示す。試験体③（20°C）の垂れ進行速度が試験体⑦（6.5°C）、⑧（29°C）より大きく、低温および高温による樹脂の物性変化が垂れに影響を及ぼしたことが垂れ進行速度の違いからも確認できる。



記号	⑦			
水準	0.2mm・鉛直・6.5℃			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	0.8mm	1.6mm	5.6mm	10.0mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3000秒 (下端到達)
充填形状				
垂れ進行距離	12.0mm	24.6mm	39.7mm	72.9mm
経過時間	注入開始 3600秒			
充填形状				
垂れ進行距離	—			

写真 4.22 試験体⑦の補修材の垂れの経時変化

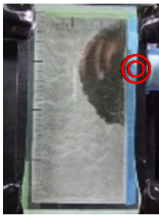
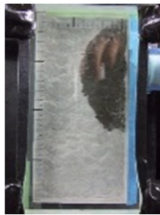
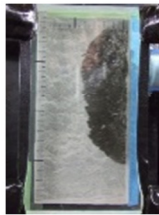
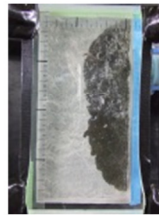
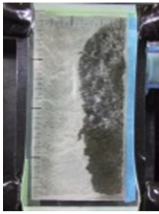

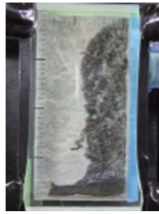

記号	③			
水準	0.2mm・鉛直・20℃			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	4.3mm	11.2mm	43.3mm	71.1mm
経過時間	注入開始 360秒 (下端到達)	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	77.1mm	—	—	—

写真 4.23 試験体③の補修材の垂れの経時変化




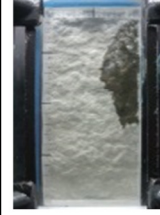



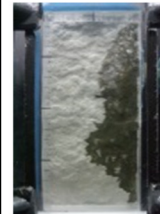
記号	⑧			
水準	0.2mm・鉛直・29℃			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	7.2mm	7.9mm	10.7mm	18.9mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒 (下端到達)
充填形状				
垂れ進行距離	21.2mm	31.4mm	46.9mm	85.0mm

写真 4.24 試験体⑧の補修材の垂れの経時変化

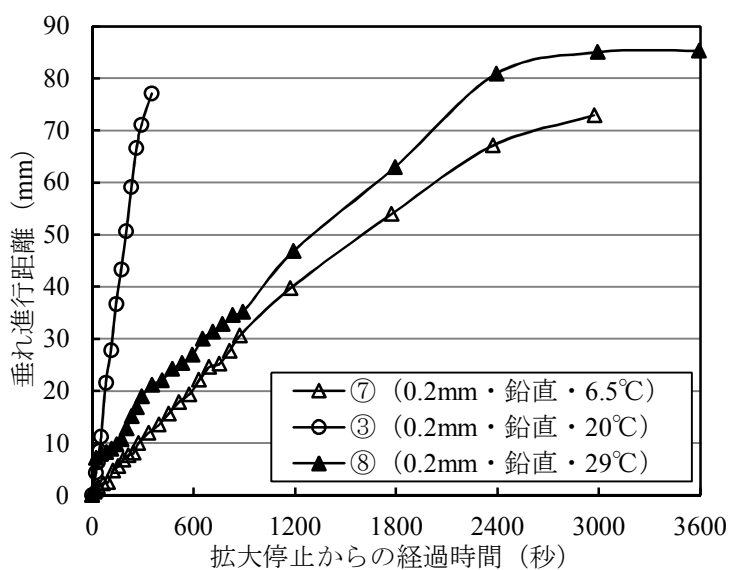


図 4.12 垂れ進行距離 (施工時外気温)

表 4.15 垂れ進行速度（施工時外気温）

記号	⑦	③	⑧
水準	6.5℃	20℃	29℃
垂れ速度 (mm/sec)	0.047	0.215	0.146

4.3.5 注入圧力の影響

○注入面積拡大停止時の補修材の充填形状

注入圧力を変化させた試験体の注入開始から注入範囲拡大停止までの注入性状を写真 4.25, 4.26 に、注入範囲拡大停止時の各補修材の形状を写真 4.27 にそれぞれ示す。注入圧力については、補修材の垂れとは関係がないと判断し注入直後の性状のみの評価とした。注入直後の性状について、注入範囲拡大停止時で比較すると、写真 4.27 に示すように試験体③（ゴム 2 本）と試験体⑨（ゴム 4 本）では、注入圧を高くした試験体⑨の方が変形率の値が小さく、注入圧が高い方がひび割れの深さ方向に補修材が広がりやすいことが分かる。

注入面積の経時変化を図 4.13 に、面積速度を表 4.16 に示す。注入圧力で比較すると、試験体⑨の方が面積速度は大きく、面積速度は注入圧力の影響を受けることを確認した。


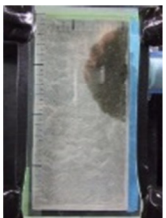

記号	③		
水準	0.2mm・鉛直・ゴム2本		
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒 (拡大停止)
充填形状			
注入面積	0.0mm ²	3142mm ²	3751mm ²
変形率	0.000	1.073	1.073

写真 4.25 試験体③の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状




記号	⑨			
水準	0.2mm・鉛直・ゴム4本			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始7秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	2528mm ²	3763mm ²	
変形率	0.000	0.842	0.912	

写真 4.26 試験体⑨の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状

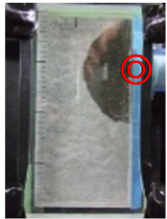

記号	③	⑨	
水準	ゴム2本	ゴム4本	
拡大停止時	8秒	7秒	
充填形状			
注入面積	3751mm ²	3763mm ²	
変形率	1.073	0.912	

写真 4.27 各試験体の拡大停止時の注入性状（注入圧力）

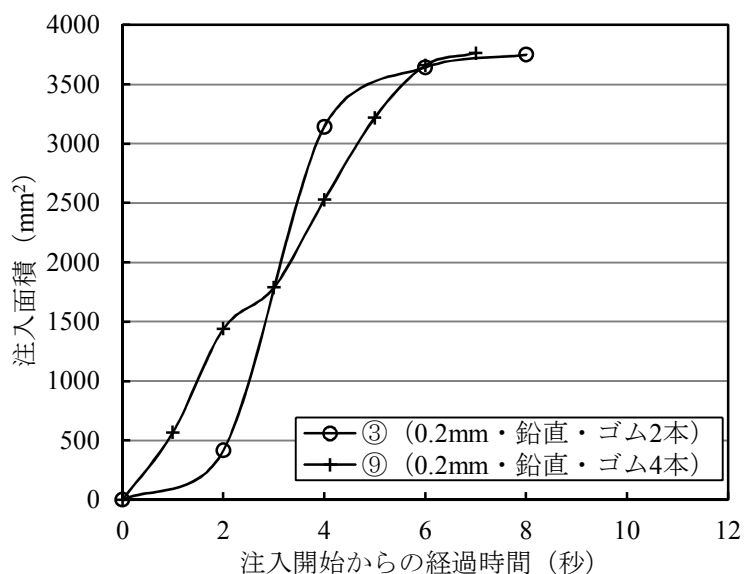


図 4.13 注入面積の経時変化（注入圧力）

表 4.16 面積速度（注入圧力）

記号	③	⑨
水準	ゴム2本	ゴム4本
面積速度 (mm ² /sec)	536	570

4.3.6 樹脂粘度の影響

○注入面積拡大停止時の補修材の充填形状

補修材の樹脂粘度を変化させた試験体の注入開始から注入範囲拡大停止までの注入性状を写真 4.28～4.31 に、注入範囲拡大停止時の各補修材の形状を写真 4.32 にそれぞれ示す。注入範囲拡大停止時において同じひび割れ幅で変形率を比較すると、写真 4.32 に示すように試験体③（低粘度）と試験体⑫（中粘度）では、試験体⑫の方が変形率の値が若干小さい。この傾向は試験体⑥と⑬を比べる場合に明確である。以上のように、樹脂粘度が大きいほど補修材はひび割れの深さ方向に充填しやすいことが確認できる。

注入面積の経時変化を図 4.14 に、面積速度を表 4.17 に示す。樹脂粘度の違いで比較するといずれのひび割れ幅においても中粘度エポキシ樹脂を注入した試験体の面積速度の方が低粘度エポキシ樹脂を注入したものより小さく、樹脂粘度の増大により面積速度が低下する傾向を確認した。

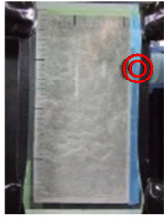
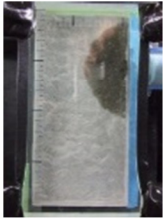
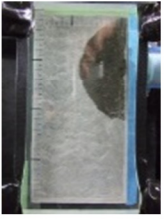
記号	③			
水準	0.2mm・鉛直・低粘度			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	3142mm ²	3751mm ²	
変形率	0.000	1.073	1.073	

写真 4.28 試験体③の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状






記号	⑥			
水準	0.5mm・鉛直・低粘度			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	4067mm ²	7009mm ²	8924mm ²
変形率	0.000	0.913	1.020	0.924
経過時間	注入開始13秒 (拡大停止)			
充填形状				
注入面積	9207mm ²			
変形率	0.925			

写真 4.29 試験体⑥の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状




記号	⑫			
水準	0.2mm・鉛直・中粘度			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	2789mm ²	3902mm ²	
変形率	0.000	1.074	1.013	

写真 4.30 試験体⑫の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状




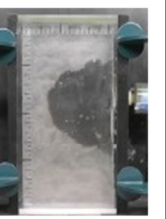


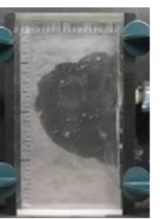
記号	⑬			
水準	0.5mm・鉛直・中粘度			
経過時間	注入開始0秒	注入開始4秒	注入開始8秒	注入開始12秒
充填形状				
注入面積	0.0mm ²	2254mm ²	3923mm ²	5235mm ²
変形率	0.000	0.797	0.750	0.733
経過時間	注入開始16秒	注入開始20秒	注入開始21秒 (拡大停止)	
充填形状				
注入面積	6339mm ²	7313mm ²	7526mm ²	
変形率	0.698	0.735	0.742	

写真 4.31 試験体⑬の注入開始直後から注入範囲拡大停止までの注入性状





記号	③	⑥	⑫	⑬
水準	0.2mm・低粘度	0.5mm・低粘度	0.2mm・中粘度	0.5mm・中粘度
拡大停止時	8秒	13秒	8秒	21秒
充填形状				
注入面積	3751mm ²	9207mm ²	3902mm ²	7526mm ²
変形率	1.073	0.925	1.013	0.742

写真 4.32 各試験体の拡大停止時の注入性状（樹脂粘度）

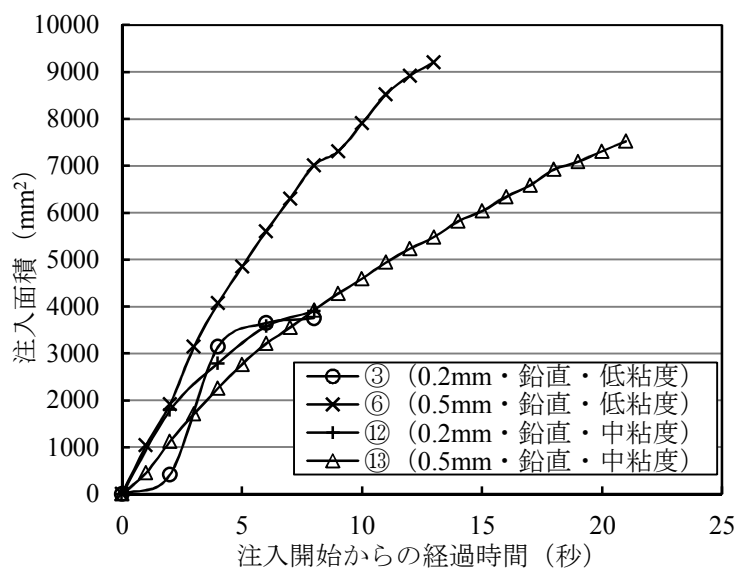


図 4.14 注入面積の経時変化（樹脂粘度）

表 4.17 面積速度（樹脂粘度）

記号	③	⑥	⑫	⑬
水準	0.2mm	0.5mm	0.2mm	0.5mm
	低粘度		中粘度	
面積速度 (mm ² /s)	536	709	480	348

○注入完了後の補修材の垂れ

各試験体の垂れについて写真 4.33～4.36 に示す。試験体③, ⑥（低粘度）では垂が生じた一方, 試験体⑫, ⑬（中粘度）の場合には, いずれのひび割れ幅でも垂れの進行がほとんど認められなかった。すなわち, 本実験で用いた凹凸形状のひび割れに関しては, 中粘度エポキシ樹脂が適していることが視覚的にも明白であることが分かる。




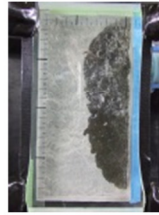
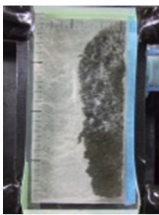

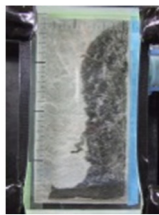

記号	③			
水準	0.2mm・鉛直・低粘度			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	4.3mm	11.2mm	43.3mm	71.1mm
経過時間	注入開始 360秒 (下端到達)	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	77.1mm	—	—	—

写真 4.33 試験体③の補修材の垂れの経時変化









記号	⑥			
水準	0.5mm・鉛直・低粘度			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒 (下端到達)
充填形状				
垂れ進行距離	5.8mm	11.6mm	32.6mm	46.6mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	—	—	—	—

写真 4.34 試験体⑥の補修材の垂れの経時変化








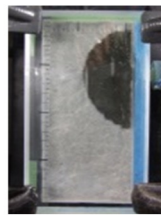
記号	⑫			
水準	0.2mm・鉛直・中粘度			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	1.3mm	1.3mm	1.5mm	1.6mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	1.6mm	1.9mm	1.9mm	2.0mm

写真 4.35 試験体⑫の補修材の垂れの経時変化

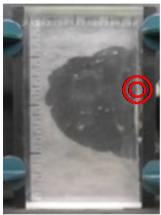



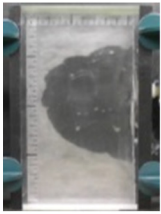
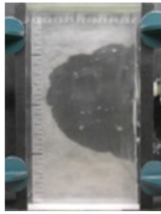
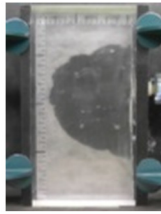
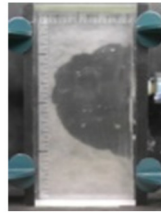
記号	⑬			
水準	0.5mm・鉛直・中粘度			
経過時間	注入開始 30秒	注入開始 60秒	注入開始 180秒	注入開始 300秒
充填形状				
垂れ進行距離	0.8mm	1.1mm	1.3mm	1.4mm
経過時間	注入開始 360秒	注入開始 720秒	注入開始 1200秒	注入開始 3600秒
充填形状				
垂れ進行距離	1.4mm	1.4mm	1.7mm	1.7mm

写真 4.36 試験体⑬の補修材の垂れの経時変化

4.4 注入性状へ及ぼす施工要因の影響

4.4.1 施工要因と注入性状の関係

注入性状の評価試験の結果，得られた施工要因と注入性状との関係についての知見を以下に示す。

(1) 注入時の補修材の挙動

- 1) 補修材の広がり方や拡大速度（面積速度）はひび割れ内部形状の影響を受ける。
- 2) ひび割れ幅 0.2mm と 0.5mm で比較すると，補修材は 0.2mm の方が，深さ方向よりもひび割れに沿った方向に広がりやすい。面積速度はひび割れ幅 0.5mm の方が大きい。
- 3) 施工時の気温の違いで比較すると，エポキシ樹脂補修材は温度の上昇に伴いにより粘度が低下するのでひび割れに沿った方向に広がりやすい。また，温度の低下に伴い粘度が増大するので補修材の注入範囲の拡大が停止するまでの時間が長くなる。
- 4) 注入器具の注入圧力の違いで比較すると，注入圧が高い方がひび割れの深さ方向に補修材が広がりやすい。面積速度は注入圧が高い方が大きい。
- 5) 補修材の粘度を低粘度と中粘度で比較すると，中粘度の補修材の方が横方向よりも深さ方向に広がりやすい。面積速度は中粘度の補修材の方が小さい。

(2) 注入完了後の補修材の垂れ

- 1) 補修材の垂れの進み方や速度（垂れ進行速度）はひび割れ内部形状の影響を受ける。
- 2) 本試験で使用した低粘度エポキシ樹脂をひび割れ補修に用いる場合，鉛直方向に生じた幅 0.2mm から 0.5mm のひび割れにおいては補修材の垂れが生じる。
- 3) 本試験で使用した中粘度エポキシ樹脂をひび割れ補修に用いる場合，鉛直方向に生じた幅 0.2mm から 0.5mm のひび割れにおいては補修材の垂れは生じない。
- 4) ひび割れの向きの違いで比較すると，ひび割れの向きが鉛直の場合，補修材の垂れは経過時間に比例して直線的に進行する一方，向きが斜めの場合，初期の垂れは経過時間に比例して進行するが次第に緩やかになる。
- 5) 施工時の気温の違いで比較すると，エポキシ樹脂補修材は温度の上昇に伴いにより粘度が低下するのでひび割れに沿った方向に広がりやすい。また，温度の低下に伴い粘度が増大するので補修材の注入範囲の拡大が停止するまでの時間が長くなる。

ただし，上記の傾向は，1種類のひび割れ内部形状のみに対しての試験より得られたものである。

また，面積速度と施工要因との関係については，ひび割れ幅の違いで比較すると，ひび割れ幅が大きい方が，注入圧力の違いで比較すると，注入圧が高い方が，それぞれ面積速度は大きくなることを確認した。また，樹脂粘度の違いで比較すると，粘度が高い方が面積速度は小さくなることを確認した。この傾向は文献 4.2) で示されている傾向と同じで

あった。しかし、ひび割れの内部形状の違い、特に平滑板とコンクリート割裂面との違いにおいて内部形状が粗いコンクリートの方が面積速度は大きくなり、文献 4.3) で示されている内容と異なる傾向となった。また、ひび割れ向きや施工時外気温と面積速度との関係も明確にできなかった。また、垂れ進行速度については、文献 4.2) 同様にひび割れ幅が大きい方が速度は大きくなることを確認した。今後は、本試験で面積速度との関係が明確にできなかったひび割れ内部形状、ひび割れ向き、施工時外気温に関して試験水準を増やすなどより詳細な実験的検討が必要であると考ええる。

4.4.2 ひび割れ注入工事における留意点

本試験では、前節に示す施工要因と注入性状との関係を視覚的なデータとして収集することができた。得られた傾向は実際のひび割れ補修工事を行う際の計画において有益な知見であると考ええる。1種類のひび割れ内部形状のみに対しての試験結果からの知見ではあるが、本試験結果の範囲内で考えられるひび割れ注入工事における留意点を以下に示す。

A. 注入器具の設置

注入器具の設置間隔は、一般的に補修材がひび割れ内部で同心円状に広がると仮定し計画されているが、本試験の結果を考慮すると、ひび割れ深さ方向へ補修材が広がりやすい傾向がある施工仕様、環境の場合には注入器具の間隔を狭くすることが望ましい。

B. 注入量

補修材の注入量はひび割れ内部で同心円状に広がる仮定を踏まえてひび割れ幅と壁厚から計算される。注入量は注入器具の設置間隔とも関係があるが、ひび割れに沿った方向へ補修材が広がりやすい傾向がある施工仕様、環境の場合にはひび割れの奥へ充填させるために注入半径を割り増して算出することが望ましい。また、注入後に垂れが生じる可能性がある場合には注入量を割り増すことが望ましい。

C. 注入圧力

注入圧力を高くすることでひび割れの奥へ充填されやすくなるが、ひび割れに沿った方向への充填を考慮して注入間隔を狭くすることを検討する。

D. 補修材種類

自動低圧樹脂注入工法においてはひび割れ幅 0.5mm 以下の場合には低粘度および中粘度のエポキシ樹脂の使用を推奨されているが、本試験の範囲内では低粘度エポキシ樹脂の場合に 0.2mm 程度のひび割れ幅において補修材の垂れが生じる可能性がある。注入量や注入器具の設置においては垂れの発生を考慮して計画することが望ましい。また、エポキシ樹脂は低温、高温のいずれの温度環境においても粘度および硬化反応が変化することで、ひび

割れ内部での広がりや垂れに影響を及ぼすので補修材選定の際には施工時の外気温を考慮すべきである。

4.5 注入性状評価試験法としての有用性に関する考察

第3章 3.2 節および本章で示した内容を踏まえて、提案した注入性状可視化試験法の注入工法の性能評価試験法としての有用性について考察する。

ひび割れ再現試験体は、3D スキャナ、3D プリンタでコンクリートのひび割れ形状を複製する手法で作製することで統一したひび割れ形状で補修材の注入性状を評価することを開発の目標としたが、切削した試験体表面と元のコンクリート割裂面とで粗さを比較した結果、ひび割れ再現試験体はコンクリート割裂面のひび割れ形状を再現していると判断できる。そして、ひび割れ形状を統一して再現した試験体内で補修材の挙動を目視観察できることは既往の試験法と比べてより合理的な注入性状の評価が可能になると考えられる。

しかし、注入性状の評価試験として確立するためには次のような課題が存在する。

本試験体は試験体の素材に対する補修材の浸透性の違いを考慮することができていない。加えて、2種類のひび割れ形状および平滑板とで注入性状を比較した結果、ひび割れ形状の違いが注入性状に影響を及ぼすことが確認されたことから、提案したひび割れ再現試験体を用いた注入性状の評価手法を確立するためには、試験体の素材の相違やひび割れ内部形状が注入性状に及ぼす影響を評価し、試験体によるコンクリートひび割れ内の補修材の注入性状の再現性を検討する必要がある。検討には複数種類のひび割れ形状および素材で試験体を作製し注入試験を行うと同時に、接触角やひび割れ表面の粗さに関する物性値などを得て解析的に検討することも必要であると考えている。そして、検討の結果を踏まえて、評価する補修材に対する本再現試験体による注入性状評価の可否の把握や、試験体の素材の検討を行った上で、ひとつまたは複数の種類にひび割れ形状を標準化することを今後の課題とする。また、ひび割れ幅に対応して注入面積がほぼ同じになるように注入量を調整することになっているが、ひび割れ幅を大きく設定した場合、補修材がひび割れに充填されず、充填形状を適正に評価ができなくなる可能性があることが試験より示され、ひび割れ再現試験体を用いた注入性状評価にひび割れ幅の適用範囲を設定する必要があると考えられる。しかし、ひび割れ再現試験体のひび割れ面の面積を大きくし、補修材注入量を増やすことで0.5mm以上の比較的大きいひび割れ幅についても注入性状が評価できると考えられる。

本試験では、注入面積拡大停止までの注入性状について、注入された補修材の充填形状の面積の経時変化およびひび割れに沿った方向とひび割れ深さ方向の到達距離の比を変形率として評価した。特に変形率は補修材が広がりやすい方向を簡便に数値化しており、注入量や注入器具間隔の計画の参考となる指標である。注入性状評価試験法として実用する際には、変形率を補修材が同心円状に広がるとされる1に近づけるように施工仕様を選定するといった試験の進め方が想定される。しかし、試験結果をより注入工法の計画策定に

活かすためには、注入口を中心に各方向（例えば 30° 毎）への到達距離を測定することでより詳細に補修材の広がり方を評価する必要もあると考えられる。また、注入完了後の補修材に垂れについては、垂れ進行距離の経時変化として評価したが、補修材の垂れた量とひび割れ面に付着して残った量の把握は注入量や補修材種類の計画において有用であり、垂れによって生じた空隙の観察から推定が可能であると考えられ、空隙部の面積と垂れ量の関係の検討が必要であると考えられる。そして、これらの注入性状の評価指標の上限値、下限値などの基準を定めることはひび割れ形状の標準化や注入性状の定量的な評価のためには必要となる。

本試験の試験要因は注入性状に影響を及ぼす可能性の高い施工要因の中から選択したものであり、試験の結果、前節に示した通りの知見を得ることができたが、実用の評価試験の試験項目とするためにはより詳細な検討が必要と考える。具体的には例えば、注入圧力については注入器具とひび割れ再現試験体との間に圧力計を取り付け、圧力変化を測定することで注入性状と注入圧力との関係を詳細に検討すべきと考える。また、補修材の物性については本実験では粘度の違いに着目したが、試験前の粘度測定は行っておらず、カタログ値でしか物性を示すことができていない。試験時の温度環境において粘度計等であらかじめ補修材の粘度を測定することでより詳細な評価が可能となると考える。加えて、本試験では試験要因としなかったものの、注入性状に影響を及ぼす可能性のある施工要因も多く存在する。例えば、ひび割れ内部の水分の有無、床裏に生じたひび割れ等を模擬したひび割れ角度への注入、ひび割れ深さ方向に対するひび割れ幅の変化、チキソトロピック係数や降伏値などの補修材の物性値などがある。これらの要因も提案した試験法により評価が可能であると考えられるが、試験結果の蓄積や数値解析によって実用において一部の試験要因に対する結果から注入性状を推定できるように試験項目を設計することも必要である。

また、本試験結果は各試験水準に対して1回の試験より得たものであり、試験結果の再現性についても検討する必要がある。

4.6 まとめ

本章では、提案したひび割れ再現試験体を用いてひび割れ注入工法において施工条件や補修仕様などがエポキシ樹脂系補修材の注入性状へ及ぼす影響の評価を行った。1種類のひび割れ内部形状に対する試験ではあるが、補修材の広がり方や垂れは、注入圧力やひび割れの向き、施工時の気温などの影響を受けることが明らかになり、それらの傾向を視覚的なデータとして収集することができた。

本試験法は同一のひび割れ形状への補修材の注入性状の違いを可視化することにより、簡便に注入した補修材の広がりや垂れを評価することができ、合理的な注入性状評価手法確立の見通しを得た。しかし、注入性状の評価試験として確立するためには、試験体のひび割れ形状の標準化、注入性状の評価方法および試験項目、試験結果の再現性について詳細な検討が必要であり今後の課題とする。

参考文献

- 4.1) 低圧樹脂注入工法協議会：自動低圧樹脂注入工法ガイドブック（2013年度版），低圧樹脂注入工法協議会，2013.12
- 4.2) 上村克郎，小西敏正，橘高義典，小林敏泰：鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究（その1 樹脂の注入過程の数式化），日本建築学会大会梗概集（近畿）A，pp.395-396，1987.10
- 4.3) 瀬野康弘，魚本健人：ひび割れ注入補修における注入性状に影響を及ぼす要因に関する実験的検討，コンクリート工学論文集，第19巻，第1号，pp.11-20，2008.1

第 5 章 木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の
活用効果の検討

第5章 木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の

活用効果の検討

5.1 はじめに

本章では、第3章で示した木造ラスモルタル外壁へ粘着型防水紙の活用効果の検討を行う。想定した活用効果を踏まえて壁体を模擬した試験体を作製し性能評価実験を行う。本章では、実験の概要と結果と考察を示す。

5.2 実験概要

5.2.1 検討する性能

粘着型防水紙の活用効果の確認を目的に実験的検討を行った。第3章で示した粘着型防水紙の活用により期待できる効果を以下に再掲する。

- I モルタルの乾燥収縮ひずみの緩和によるひび割れの抑制（両面に粘着層を有するもの）
- II ステープル釘穴のシール性の向上
- III 下地に対する接着性の向上
- IV モルタルに対する接着性の向上（両面に粘着層を有するもの）

ただし、上記のIおよびIVは両面粘着型の防水紙にのみ期待した効果である。上記の想定した活用効果を踏まえて図5.1に示す項目について検討を行った。

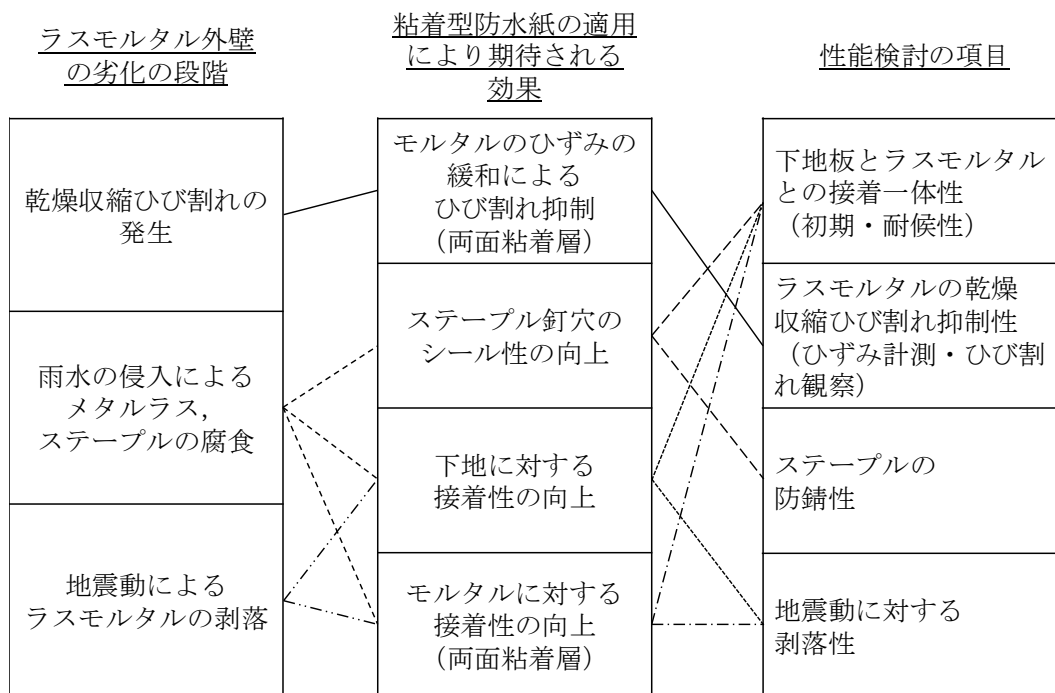


図 5.1 検討する性能

5.2.2 実験に用いた防水紙

実験の対象とした防水紙の種類と断面構成を表 5.1 に示す。各防水紙には以下に示す特徴を有している。

- N JIS A 6005 :2005 アスファルトルーフィングフェルトの「アスファルトフェルト 430」適合品で汎用アスファルト系普通防水紙。本実験では性能の比較のために使用した。
- SS 本来は粘着層付ルーフィング材として使用されている(片面粘着タイプ)。本実験では下地材に対して粘着層側を貼り付けて使用した。
- BS1 サッシ周りなど複雑な形状の雨仕舞に使用されている(両面粘着タイプ)。
- BS2 屋根下葺材として使用されている(両面粘着タイプ)。
- BS3 BS1 同様、サッシ周りの雨仕舞材だが、ブチルゴム系の粘着層を有している(両面粘着タイプ)。

5.2.3 使用材料

検討実験ではラスモルタル外壁を模擬した試験体を作製した。防水紙以外の使用材料について、モルタルの調合を表 5.2 に示す。後述の乾燥収縮ひずみの計測実験では、収縮低減剤を混和した SRA モルタルの他にグリコールエーテル系誘導体の塗布型収縮低減剤(塗布型 SRA) を塗布した試験体も作製した。メタルラスおよびステープレの種類を表 5.3 に示す。メタルラス、ステープレはそれぞれ、「JIS A 5505 :1995 メタルラス」、「JIS A 5556 :2012

工業用ステープル」に適合し、溶融亜鉛めっき鋼板または溶融亜鉛めっき鉄線製である。実験シリーズごとに試験体のメタルラス，ステープルは同種類のものを使用した。波形ラス，力骨付き平ラスの写真写真を写真 5.1 に示す。

表 5.1 実験の対象とした防水紙

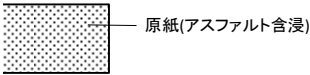
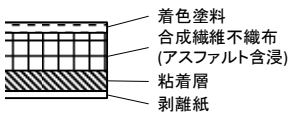

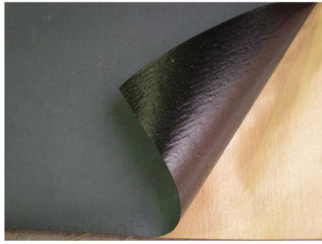
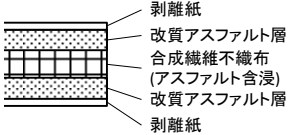
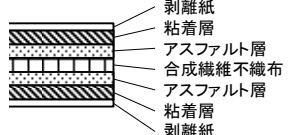
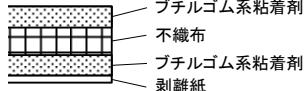
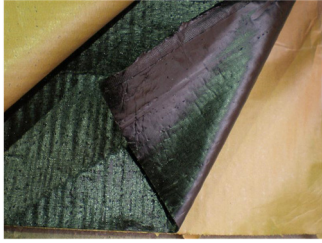
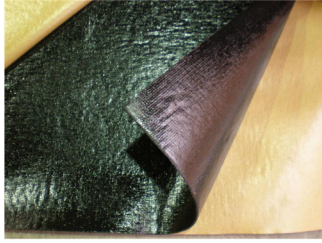
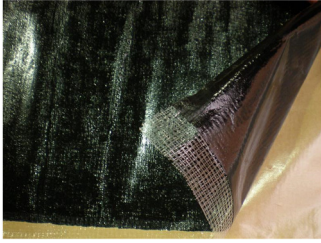
呼称	N	SS	
	普通防水紙	片面粘着型防水紙	
種類	アスファルトフェルト (普通防水紙 430)	改質アスファルト系 粘着層	
構成図	 原紙(アスファルト含浸)	 着色塗料 合成繊維不織布 (アスファルト含浸) 粘着層 剥離紙	
写真			
厚さ	0.6mm	0.6mm	
呼称	BS1	BS2	BS3
	両面粘着型防水紙		
種類	改質アスファルト系粘着層		ブチルゴム系 粘着層
構成図	 剥離紙 改質アスファルト層 合成繊維不織布 (アスファルト含浸) 改質アスファルト層 剥離紙	 剥離紙 粘着層 アスファルト層 合成繊維不織布 アスファルト層 粘着層 剥離紙	 ブチルゴム系粘着剤 不織布 ブチルゴム系粘着剤 剥離紙
写真			
厚さ	1.1mm	1.5mm	0.5mm

表 5.2 モルタルの調合（質量比）

	セメント*	砂**	水	EVA***		SRA****
EVA モルタル	1	2.8	0.47	0.1	ポリマーセメント比 (質量比)	-
					4.5%	
SRA モルタル	1	2.8	0.45	0.1	ポリマーセメント比 (質量比)	0.02
					4.5%	

* 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)

** 東広島市黒瀬砕砂(密度 2.58g/cm³, 吸水率 0.96%, 粗粒率 2.7(JIS A 5005適合品))

*** エチレン酢酸ビニル系混和材料

**** 低級アルコールアルキレンオキシド付加物系収縮低減剤

表 5.3 メタルラス，ステーブルの種類

材料	種類	仕様				
		種別	山のピッチ	山の高さ	質量	
メタルラス	波形ラス	JIS A 5505 1号		33mm	10mm	0.7kg/m ²
		使用材料, 種別			力骨間隔	質量
	力骨付き 平ラス	力骨	JIS G 3547 SWM GS-2 φ1.6mm		150mm	0.7kg/m ²
		平ラス	JIS A 5505 1号			
ステーブル		幅	足長			
	1019J	10mm	19mm			
	1013J	10mm	13mm			



(a) 波形ラス



(b) 力骨付き平ラス

写真 5.1 使用したメタルラス

5.2.4 下地板とラスモルタルとの接着一体性の評価実験

ラス下地板と防水紙を含めたラスモルタルとの接着一体性を静的に比較することを目的として試験体の直接引張試験と一面せん断試験を行った。試験体の形状を図 5.2 に示す。ステープルは試験片の中心に 1 本打ち込んだ。メタルラスは波形ラスを、ステープルは 1019J を使用した。モルタルは EVA モルタルとし、養生は 20℃、60%RH 気中養生で 28 日間とした。

試験体記号と試験要因を表 5.4 に示す。両面粘着型防水紙については防水紙のみの接着力の評価を目的としてメタルラス、ステープルの無い試験体も作製した。試験体数は各強度試験で 3 体ずつとした。

直接引張試験は写真 5.2 に示す日本建築仕上学会認定の接着力試験機を、一面せん断試験は写真 5.3 に示すせん断試験機を用いて行った。計測された最大荷重を防水紙、メタルラスの面積 (40×40mm²) で除してそれぞれ引張、せん断強度とした。また、一面せん断試験では各水準 1 体について試験時のモルタル試験片の変位を測定した。

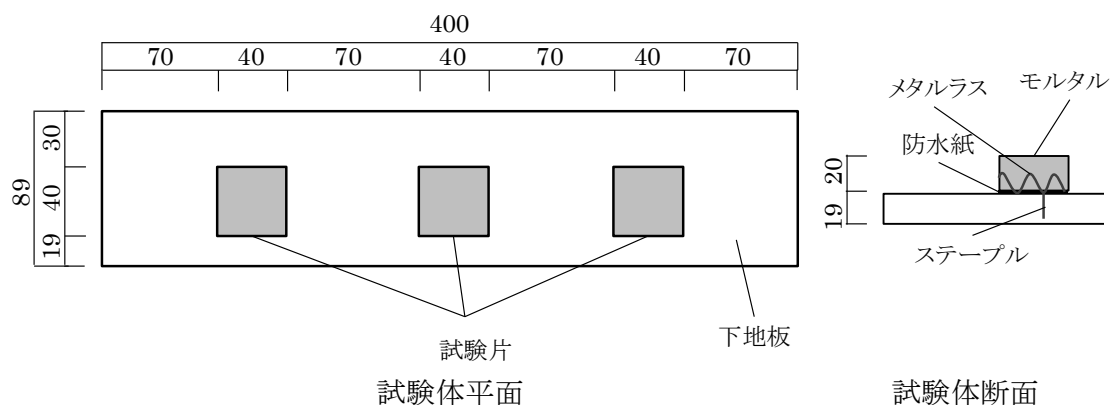


図 5.2 接着一体性実験の試験体 (単位 : mm)

表 5.4 試験体記号と試験要因 (接着一体性実験)

試験体記号	防水紙	メタルラス・ステープル
A1	N	有り
A2	SS	
A3	BS1	
A4	BS2	
A5	BS3	
A6	BS1	無し
A7	BS2	
A8	BS3	

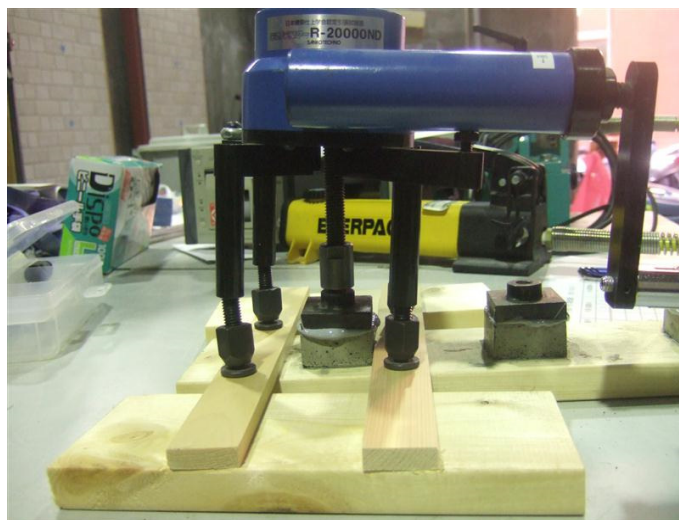


写真 5.2 直接引張試験の状況

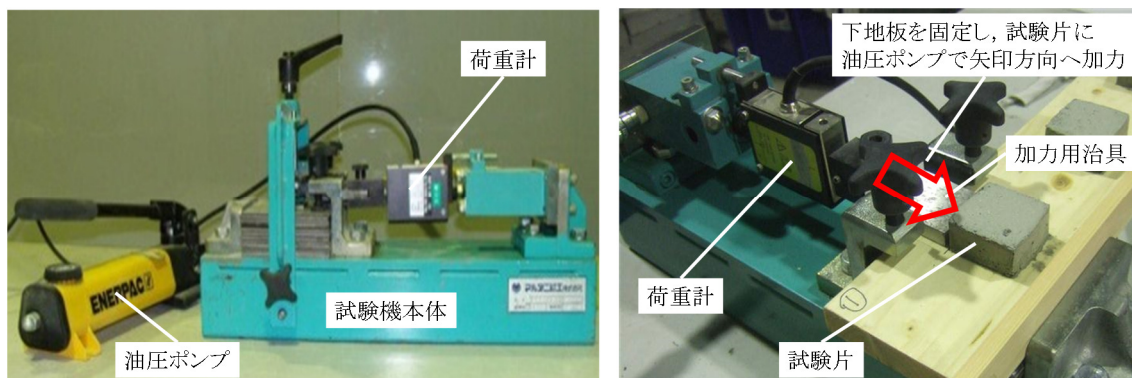


写真 5.3 一面せん断試験の状況

5.2.5 促進劣化試験による接着一体性の耐久性評価

ラス下地板とラスモルタルとの接着一体性の耐候性の比較を目的として試験体に促進劣化外力を与えた後に直接引張試験と一面せん断試験を行った。

試験体の形状を図 5.3 に示す。試験体は使用する促進耐候試験機の都合で図 5.2 の試験体とは形状が異なる。メタルラスは波形ラスを、ステーブルは 1019J を使用した。モルタルは EVA モルタルとし、養生は 20℃、60%RH 気中養生で 28 日間とした。本実験はモルタル表面に対する屋外環境を想定した熱、水による促進劣化に加えてより過酷な劣化条件で試験することを目的として試験体側面からの水分の侵入を許容した。

ラス系下地板と防水紙、ラスモルタルの接着一体性に関する標準化された促進劣化試験はないため、本実験では、「JIS A 6111 : 2004 透湿防水シート」における耐久性試験および「JIS A 1415 : 2013 高分子系建築材料の実験室光源による暴露試験方法」を参考に促進耐候性試験機に試験体をセットし、表 5.5 に示す試験条件にて劣化外力を与えた。表 5.5 に示す劣化外力に関し、紫外線は接着一体性の劣化にはほとんど影響せず、水噴霧と温冷の繰

り返しが促進劣化に影響すると考えている。促進劣化後に直接引張試験と一面せん断試験を行い、計測された最大荷重を防水紙、メタルラスの面積（ $40 \times 40 \text{mm}^2$ ）で除してそれぞれ引張、せん断強度とした。一面せん断試験では試験時の変位を測定した。

試験体記号と試験要因は5.2.3節と同様であり、表5.6に示す。ただし、促進劣化試験の都合で、試験体数は各強度試験で1体ずつとした。

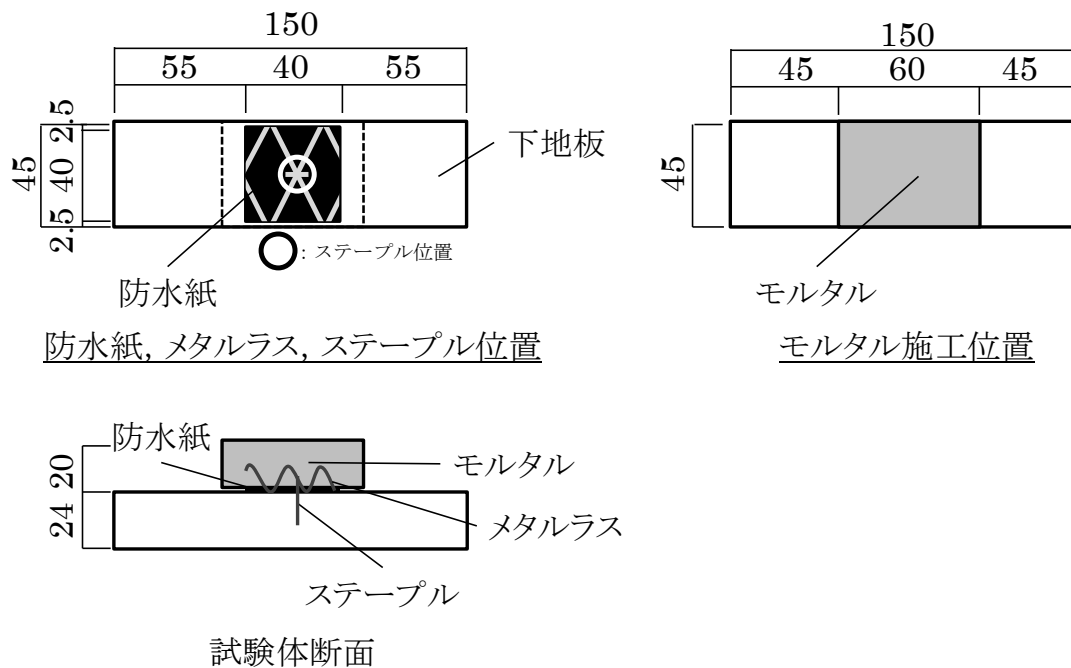


図 5.3 促進劣化試験の試験体（単位：mm）

表 5.5 促進劣化試験条件

光源	キセノンアークランプ 記号：WX-A
放射照度	60W/m^2 （波長域 300～400nm）
BPT	63℃
相対湿度	50%
水噴霧サイクル	102分照射後、18分照射および水噴霧
試験時間	紫外線照射量が 44MJ/m^2 に到達するまで（約200時間）

表 5.6 試験体記号と試験要因（促進劣化試験）

試験体記号	防水紙	メタルラス・ステープル
A1	N	有り
A2	SS	
A3	BS1	
A4	BS2	
A5	BS3	
A6	BS1	無し
A7	BS2	
A8	BS3	

5.2.6 小型試験体による乾燥収縮ひずみ計測実験

粘着型防水紙を使用することによるモルタル部分の乾燥収縮ひずみの変化を評価することを目的としてラスモルタル試験体表面の乾燥収縮ひずみを計測した。試験体の形状と、ひずみゲージ（ポリエステル箔ゲージ，ゲージ長 10mm）による計測位置を図 5.4 に示す。使用した材料はあらかじめ 20℃，60%RH に設定した恒温恒湿室に静置しておき，同室内でモルタルの練り混ぜ，塗り，養生を行った。メタルラスは波形ラスを，ステープルは 1019J を使用した。モルタル塗りは JASS 15 におけるラス下地セメントモルタル塗りの工程（2 回塗り）にしたがって施工した。塗布型 SRA は材齢 1 日で十分な量（約 100g/m²）を 1 回で塗布した。上塗り後材齢 1 日でひずみゲージを試験体の中央に貼り付け，30 日間の収縮ひずみを計測した。ひずみゲージの貼り付けにあたっては，モルタルからの水分の影響を考慮し，ポリエステル系接着剤でモルタル表面をコーティングして，硬化後にその上からポリエステル系接着剤でひずみゲージを貼り付けた。

試験体記号と試験要因を表 5.7 に示す。防水紙の種類の違いの他にメタルラス，ステープルの有無の違いおよびモルタル種類の違いについても検討した。

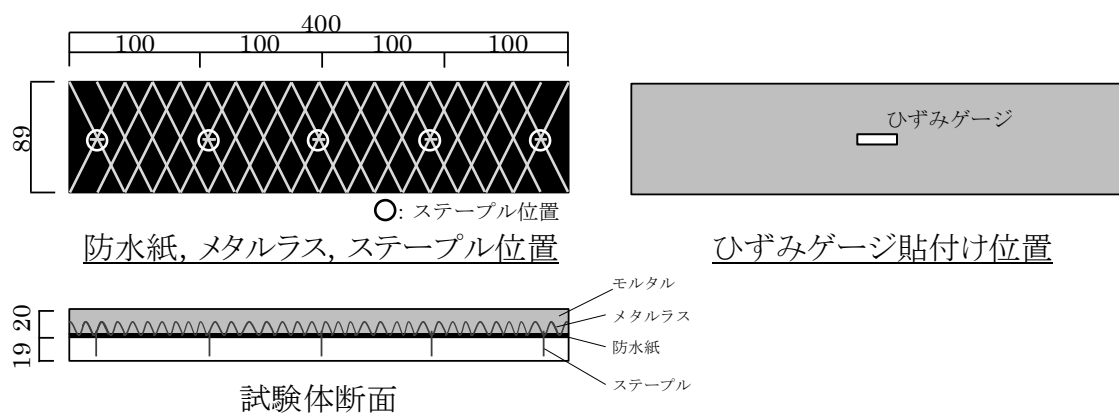


図 5.4 乾燥収縮ひずみ計測実験試験体（単位：mm）

表 5.7 試験体記号と試験要因（乾燥収縮ひずみ計測実験）

試験体記号	防水紙	メタルラス・ステープル	モルタル
B1	N	有り	EVAモルタル
B2	SS		
B3	BS1		
B4	N	無し	
B5	BS1		
B6	N	有り	SRAモルタル
B7			EVAモルタル・塗布型SRA
B8		無し	SRAモルタル
B9			EVAモルタル・塗布型SRA

5.2.7 大型試験体による屋外曝露実験

①乾燥収縮ひび割れの観察実験

粘着型防水紙の利用がモルタルの乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響を検討することを目的として図 5.5 に示す大型試験体を作製し、屋外曝露養生後にひび割れを観察した。当初、目視による試験体全体のひび割れ観察では、本実験期間ではひび割れがほとんど観察できなかったため、防水紙の種類の影響を検討するために、試験体中央の開口部から 30mm の範囲を目視に加えて、マイクロスコープを用いた微細なひび割れの観察を行った。

メタルラスは力骨付き平ラスを使用し、ステープルは 1019J を 100mm 間隔で打ち込んだ。モルタルは、セメント：砂が 1:3 の既調合の普通モルタルを、水結合材比 0.67 として用いた。モルタル塗りは JASS 15 におけるラス下地セメントモルタル塗りの工程（2 回塗り）にしたがって施工し、塗り厚は約 20mm とした。下塗りモルタルは約 10mm 厚とし、表面は刷毛引きとした。下塗り後の工程時間間隔は 14 日として、下塗りモルタルに水湿しを施してから上塗りを行った。また、開口部のモルタルの納まりについては、開口部に設けた枠を見切りとしてモルタルを塗った。試験体記号と試験要因を表 5.8 に示す。試験体数は各試験体記号 1 体ずつとした。

試験体完成から約 1 年後にひび割れの観察を行い、観察範囲についてひび割れをトレースしひび割れ分布図を作成した。分布図をもとに試験体平面を 10×10mm²のメッシュに分割し、(5.1) 式に示すひび割れ率を求めてひび割れ量を評価した^{5.1)}。また、各試験体に生じたひび割れの幅の計測も行った。

$$\text{ひび割れ率} = \frac{\text{ひび割れが存在するメッシュの数}}{\text{メッシュの総数}} \times 100 (\%) \tag{5.1}$$

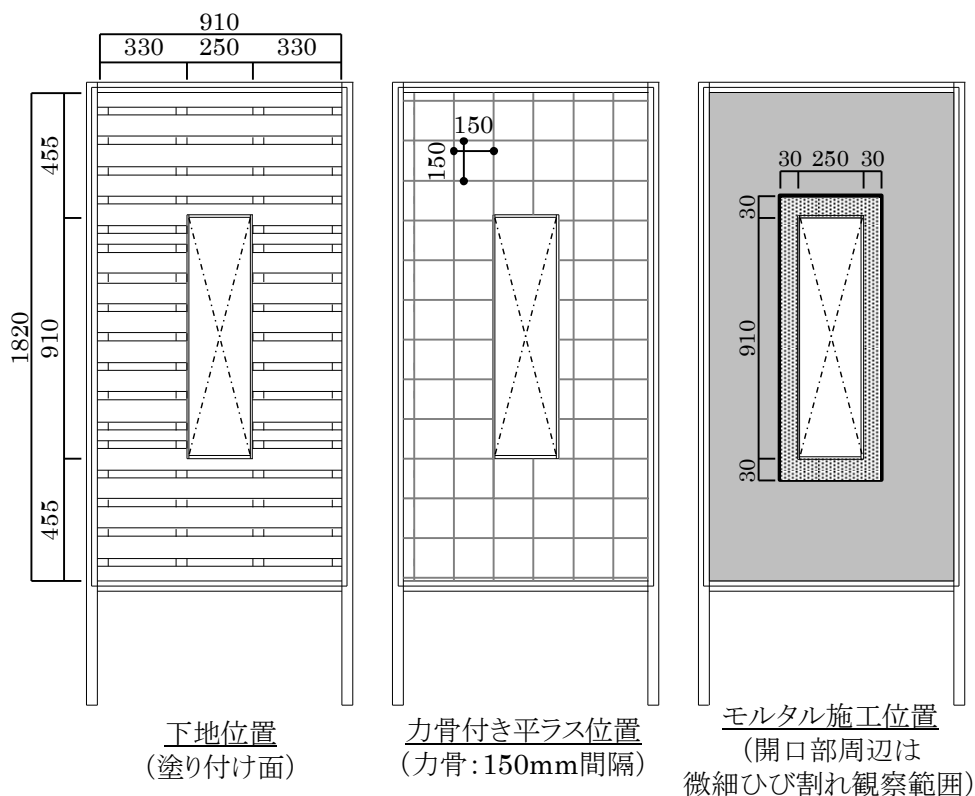


図 5.5 大型試験体 (単位 : mm)

表 5.8 試験体記号と試験要因 (ひび割れ観察実験)

試験体記号	防水紙	メタルラス・ステーブル
C1	N	有り
C2	BS1	
C3	BS3	

②ラスモルタルの直接引張試験

大型試験体完成から約 2 年後に試験体をラス下地板とラスモルタルとが一体となった状態で切り出し、直接引張試験による接着強度試験を行った。試験体は図 5.6 左に示す着色部の範囲を電動のこぎりで切り出した上に、図 5.6 右に示すように 330×300mm²の大きさでモルタルカッターを入れモルタル部分のみを切断した。直接引張試験で用いた試験装置を写真 5.4 に示す。330×300mm²の大きさ部分に治具をエポキシ樹脂系の接着剤で張り付け、治具を油圧ジャッキで引っ張ることで試験を行った。計測された最大荷重をラスモルタル部の面積 (330×300mm²) で除して引張強度とした。

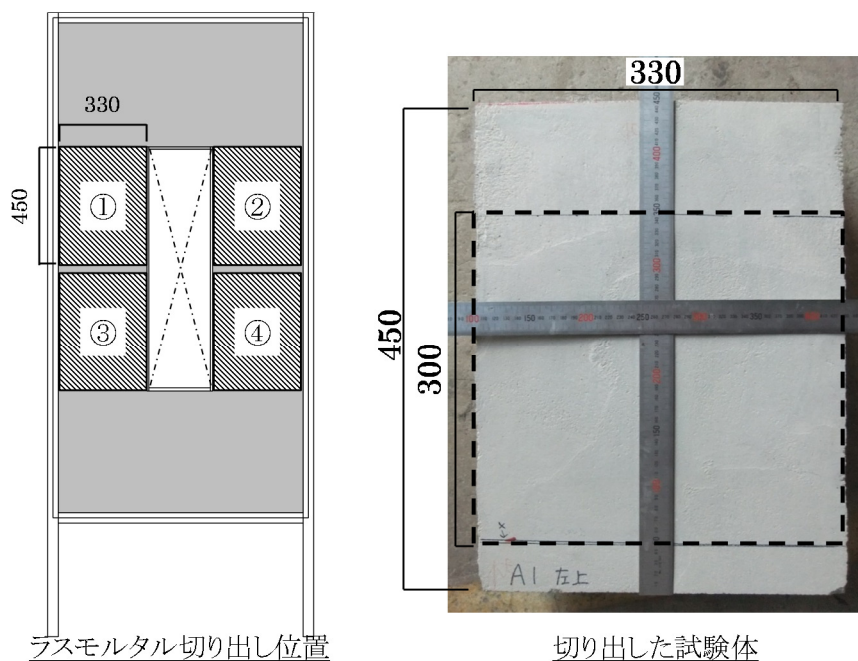


図 5.6 引張試験位置 (単位 : mm)

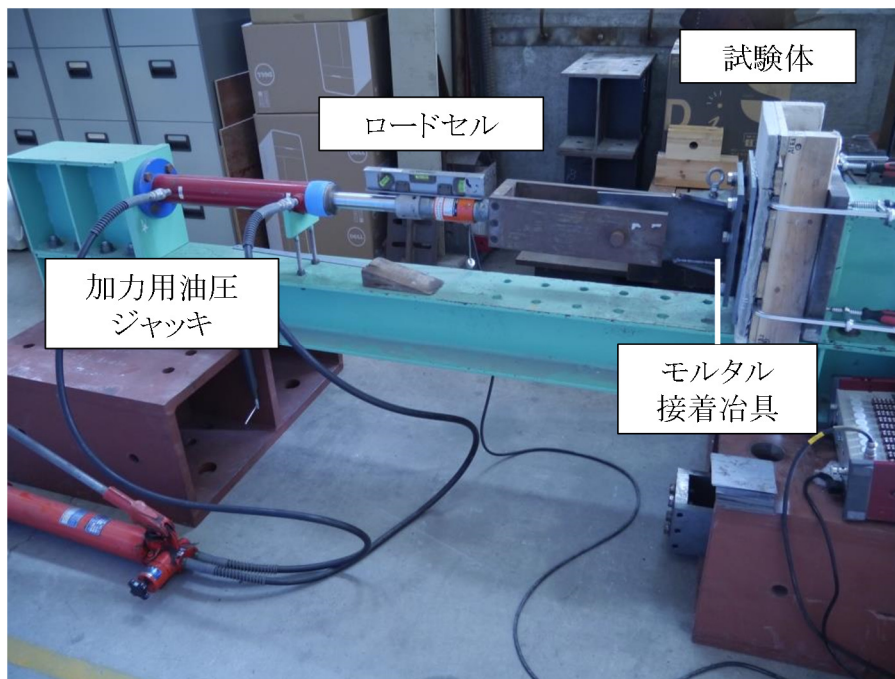


写真 5.4 大型試験体の引張試験装置

5.2.8 ステープルの防錆性の評価実験

粘着防水紙とラス下地板との密着による止水性と釘穴のシール性によるステープルの防錆性能の評価を目的として試験体を繰返し塩水に浸漬させ、腐食の程度の観察を行った。

試験体の形状を図 5.7 に示す。メタルラスは波形ラスを、ステープルは 1019J を使用した。モルタルは EVA モルタルとし、塗り厚は 20mm とした。20℃、60%RH で 28 日間の気中養生後に実験に供した。なお、本実験も促進劣化試験と同様に、より過酷な劣化条件で試験することを目的として試験体側面からの水分の侵入を許容した。

試験体記号と試験要因を表 5.9 に示す。試験体数は各試験体記号 1 体ずつとした。塩水浸漬と試験体観察のスケジュールを図 5.8 に示す。観察①では、試験体の端から 150mm の位置でモルタル部のみを切断、解体し、ステープルと防水紙をマイクروسコープにより観察した。観察②では、残りのモルタル部を解体し観察した。

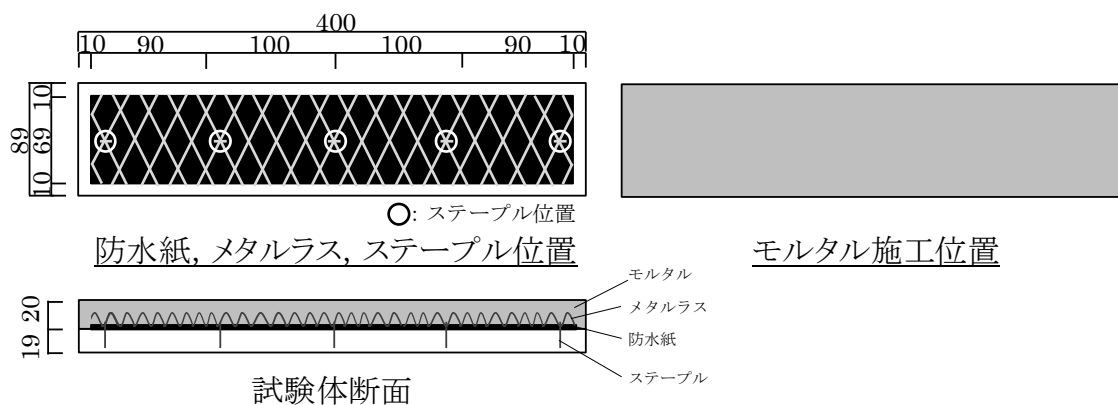


図 5.7 防錆性評価実験の試験体（単位：mm）

表 5.9 試験体記号と試験要因（防錆性試験）

試験体記号	防水紙	メタルラス・ステープル
D1	N	有り
D2	SS	
D3	BS1	
D4	BS2	
D5	BS3	

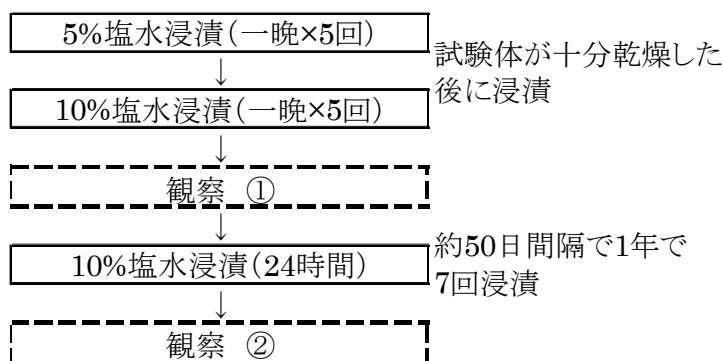


図 5.8 試験体の塩水浸漬と試験体観察のスケジュール

5.2.9 振動実験によるラスモルタルの剥落性の評価

粘着型防水紙の粘着層によるラスモルタルの剥落抑止性について、地震時のラスモルタルの下地からの剥落は、振動応答による慣性力が主たる要因であると考え、振動台による振動実験を行うことで評価した。

試験体形状を図 5.9 に示す。ラス下地板と躯体を模擬した部分は写真 5.5 に示すように金具によって接合して振動に対して一体的に挙動するようにした。メタルラスは力骨付き平ラスを、ステーブルは 1013J を 100mm 間隔で打ち込んだ。1013J を用いたのは、ラスモルタルの剥落を生じやすくして、試験体の相互比較を行うためである。モルタルは、セメント：砂が 1:3 の既調合の普通モルタルを、水結合材比 0.63 とし、塗り厚 20mm とした。養生は 28 日間の気中養生とした。振動台へは、写真 5.6 に示すように同じ仕様の試験体 2 体を載せて下部をボルトで固定した。さらに木板で上部を連結し木板の上に試験体一体当たり約 2360N の荷重を載荷して振動実験を行った。この荷重は、実際の木造壁面にかかる荷重を考慮して定めた。

試験体記号と試験要因を表 5.10 に示す。地震動は JMA 神戸 NS 波を面内方向 (y 軸方向) に 20%, 50%, 70%, 100% の順に入力した。また、写真 5.6 中の丸印の位置に無線 3 軸加速度センサを取り付け、振動台上と試験体の下地材、ラスモルタル部の加速度を計測し、得た加速度波形からモルタルの剥離発生を判断した。

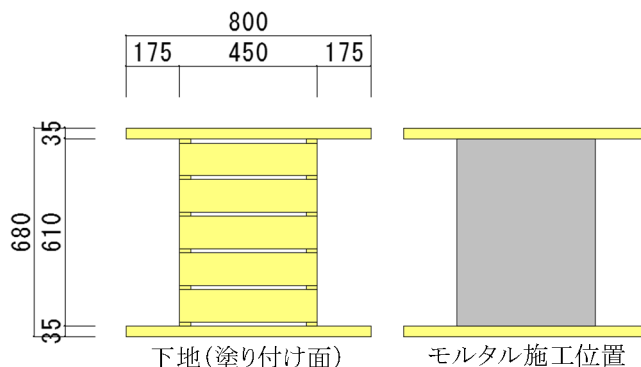


図 5.9 振動実験試験体 (単位 : mm)



写真 5.5 下地の接合状況

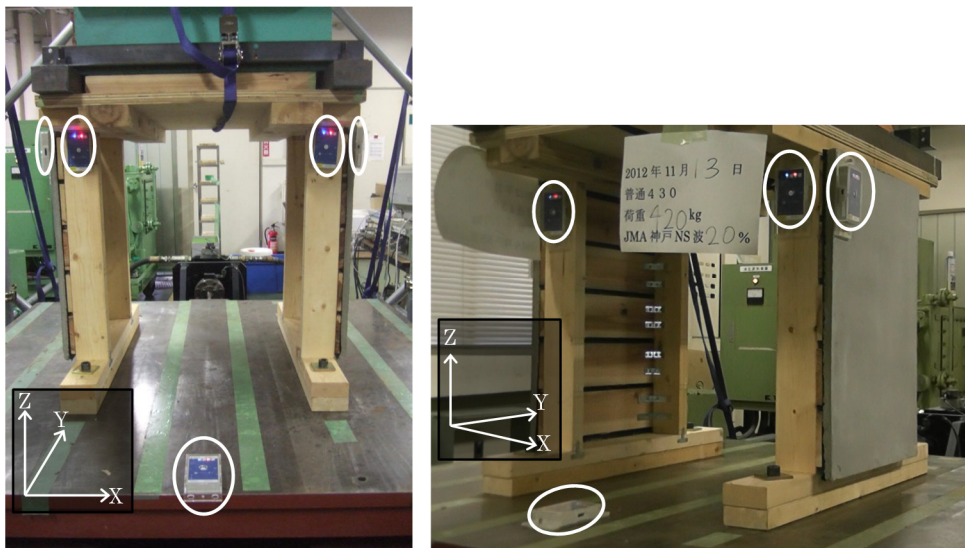


写真 5.6 試験体および加速度センサ設置状況

表 5.10 試験体記号と試験要因（振動実験）

試験体記号	防水紙	メタルラス・ステーブル
E1	N	有り
E2	BS1	
E3	BS3	

5.3 実験結果および考察

5.3.1 下地板とラスモルタルとの接着一体性に関する実験結果

5.3.1.1 接着一体性の初期値

①直接引張試験結果

各試験体の引張強度を図 5.10 に示す。図中の棒グラフは平均強度を、エラーバーは最大、最小値を示す。下地とラスモルタルとの接着強度については引張、せん断ともに仕様書等で強度の判定基準は定められてはいない。しかし、ステープルに JASS15 や木造住宅工事仕様書で規定されている 1019J を使用していることから、普通防水紙を用いた A1 試験体の強度は標準的なものであると判断し、それを基準として各試験体と相対的に比較した。

メタルラス、ステープルを取り付けた試験体について引張強度を比較すると、普通防水紙を用いた A1 試験体に比べて、粘着型防水紙を用いた A2～A5 試験体の引張強度は高い値を示した。また、両面粘着型防水紙を用いた試験体についてメタルラス、ステープルの有無を比較すると、強度には大きな違いは無い。このことから粘着型防水紙が面外方向に対する接着一体性の向上に効果があることが確認できる。加えて、表 5.11 に示す試験体の破断位置および表 5.12 に示す試験体の状況から、両面粘着型防水紙を用いた試験体は最大荷重到達後も防水紙の粘着層が糸を引いて粘ることによってラス下地板への保持力が高いことが考えられる。

片面粘着型防水紙を用いた A2 試験体と両面粘着型防水紙を用いた A3～A5 試験体とを比較すると、A3～A5 試験体の方が、強度が高い値を示している。試験体の破断位置は、表 5.11 に示すように防水紙内のものがほとんどであった。このことは、両面粘着型防水紙において、粘着層の上に濡れた状態で塗りつけたモルタルが、硬化後粘着層によって、防水紙と接着していることを示している。

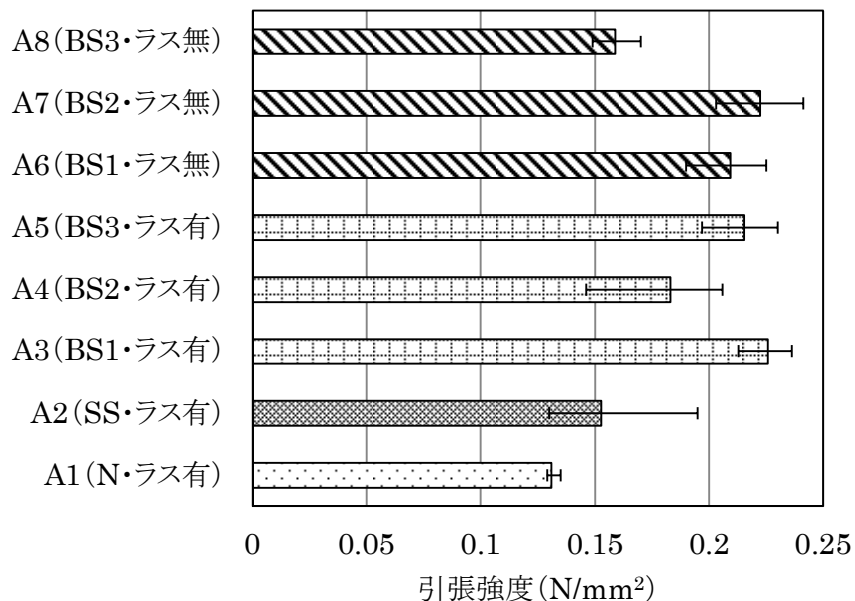








図 5.10 引張強度

表 5.11 試験体破断位置 (引張試験)

試験体記号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
防水紙	N	SS	BS1	BS2	BS3	BS1	BS2	BS3
メタルラス ステーブル	有り					無し		
1	b	a	c	c	c	c	c	b
2	b	a	c	c	c	c	c	b
3	b	a	c	c	c	c	c	b

※破断位置 a:モルタルー防水紙間, b:防水紙ー下地材間, c:防水紙内

表 5.12 試験後の試験体写真（引張試験）

試験体	A1	A2
水準	N, メタルラス・ステープル有り	SS, メタルラス・ステープル有り
写真		
試験体	A3	A5
水準	BS1, メタルラス・ステープル有り	BS3, メタルラス・ステープル有り
写真		
試験体	A6	A8
水準	BS1, メタルラス・ステープル無し	BS3, メタルラス・ステープル無し
写真		

②一面せん断試験結果

各試験体のせん断強度を図 5.11 に示す。図中の棒グラフは平均強度を、エラーバーは最大、最小値を示す。メタルラス、ステープルを取り付けた試験体についてせん断強度を比較すると、試験体間で大きな違いは認められなかった。このことは、粘着型防水紙も粘着層が前述のとおりラスモルタル外壁の面外方向に対する接着一体性の向上に効果があるものの面内方向のせん断強度に関してはほとんど寄与しないことを示している。また、両面粘着型防水紙を用いた試験体についてメタルラス、ステープルの有無を比較すると、せん断強度はメタルラス、ステープルを取り付けた A3～A5 試験体の方が高い値を示している。このことはステープルが面内方向のせん断強度の上昇に役立っていることを示している。

せん断試験時に各水準 1 体について測定した荷重と試験片の変位の関係を図 5.12, 5.13 に示す。メタルラス、ステープルを取り付けた試験体について比較すると、A1（普通防水紙）、A2（片面粘着型防水紙）試験体と比較して、両面粘着型防水紙を用いた試験体のうち、A3, A4 試験体は変位 0.5mm までの荷重の急激な上昇がない。このことから、A3, A4 試験体では初期のせん断荷重を粘着防水紙において吸収、負担していたと考えられる。一方、図 5.13 に示すメタルラス、ステープルが取り付けられていない試験体のせん断荷重と変位との関係において、A6, A7 試験体のせん断強度は小さいことより、粘着型防水紙にせん断

力を負担させるためにはステープルによる下地への固定が必要であることが考えられる。また、両面粘着型防水紙 BS3 を用いた試験体 (A5, A8) においては、ラスの有無にかかわらず変位 0.5mm までの強度の急激な上昇が生じている。C3 はブチルゴム系の粘着層であり、防水紙の材料特性によるものであると考えられる。

試験体の破断位置を表 5.13 に、試験後の試験体を表 5.14 に示す。各水準の試験体の破断位置は表 5.11 に示す引張試験時のものと同じ傾向であった。

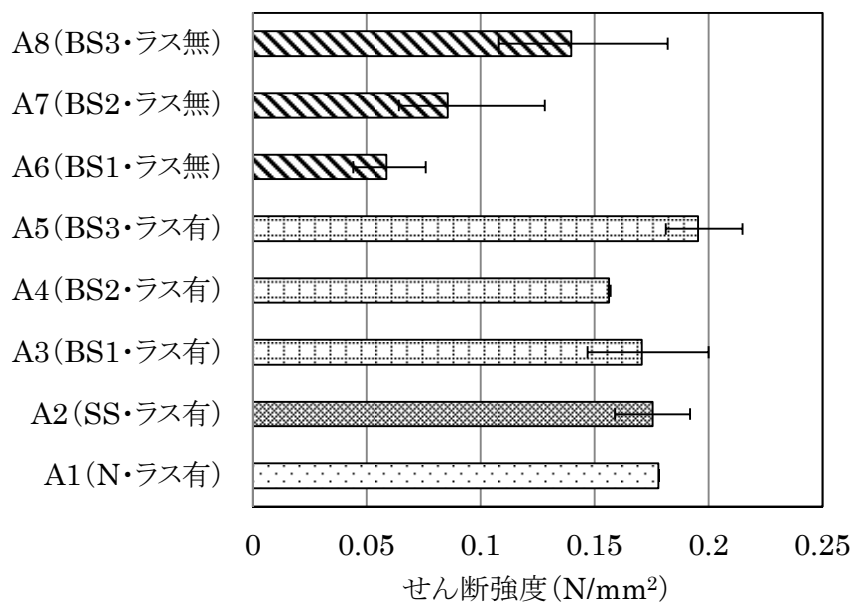


図 5.11 せん断強度

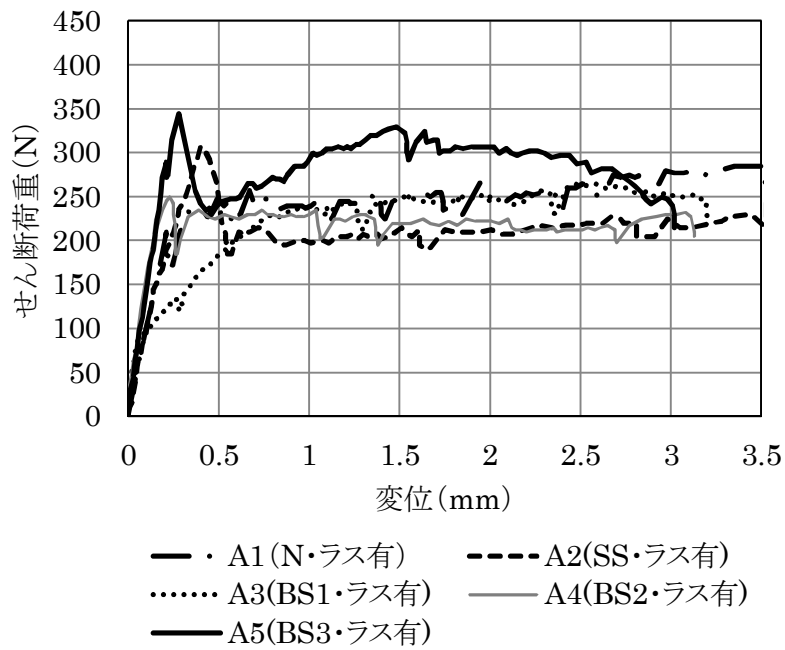


図 5.12 せん断強度と変位の関係 (メタルラス・ステーブル有り)

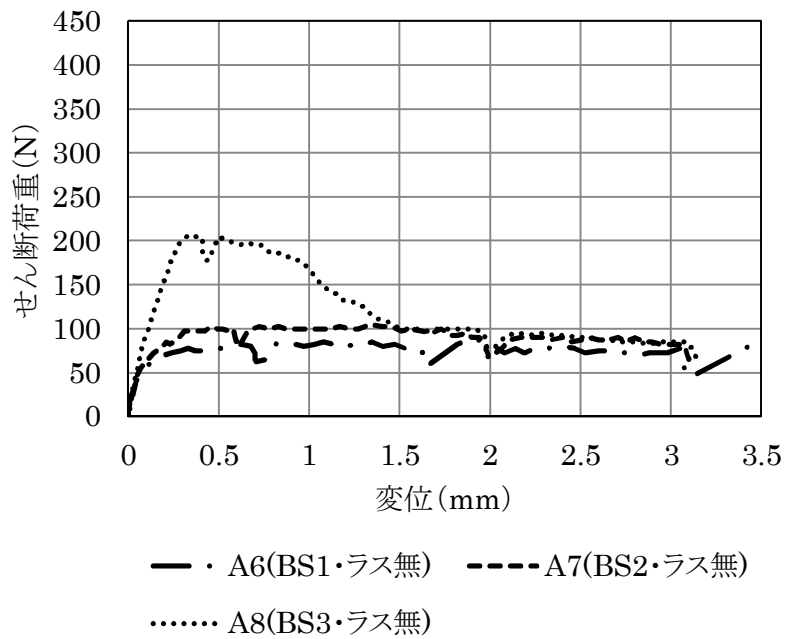


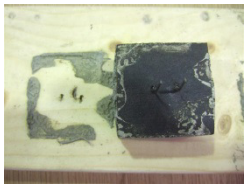



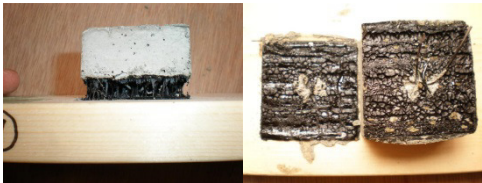
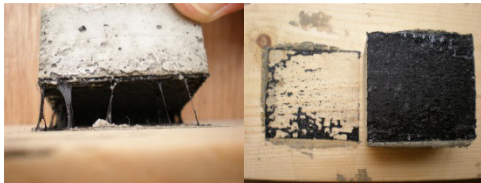
図 5.13 せん断強度と変位の関係 (メタルラス・ステーブル無し)

表 5.13 試験体破断位置 (せん断試験)

試験体記号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
防水紙	N	SS	BS1	BS2	BS3	BS1	BS2	BS3
メタルラス ステーブル	有り					無し		
1	b	a	c	c	c	c	c	b
2	b	a	c	c	c	c	c	b
3	b	a	c	c	c	c	c	b

※破断位置 a:モルタルー防水紙間, b:防水紙ー下地材間, c:防水紙内

表 5.14 試験後の試験体写真 (せん断試験)

試験体	A1		A2	
水準	N, メタルラス・ステーブル有り		SS, メタルラス・ステーブル有り	
写真				
試験体	A3		A5	
水準	BS1, メタルラス・ステーブル有り		BS3, メタルラス・ステーブル有り	
写真				
試験体	A6		A8	
水準	BS1, メタルラス・ステーブル無し		BS3, メタルラス・ステーブル無し	
写真				

5.3.1.2 促進劣化試験後の接着一体性

促進劣化試験後の各試験体の引張強度，せん断強度（図中，「劣化後」）を前節で示した初期値（図中，「劣化前」）と並べて図 5.14 に示す。表 5.15 に試験体の破断位置と試験後のステーブルの観察結果を示す。また，表 5.16，5.17 に試験後の試験体写真を，表 5.18 に試験後解体した試験体中のステーブルをマイクロ스코ープにて撮影したもの示す。

メタルラス，ステーブルを取り付けた試験体について劣化後の強度を比較すると，図 5.14 左に示すように引張強度は，普通防水紙を用いた A1 試験体が最も大きな値を示し，A2 試験体も初期値に比べて引張強度が大きく増大した。試験体観察の結果，表 5.18 に示すように普通防水紙，片面粘着型防水紙をそれぞれ用いた A1，A2 試験体は，促進劣化後にはステーブルの頭部，脚部に赤錆が発生していた。この赤錆によりステーブルとラス下地板との摩擦力が増加したため引張強度が上昇したと推察できる。一方，両面粘着型防水紙を用いた試験体では錆の発生は確認されず強度の増加も認められなかった。

図 5.14 右に示すせん断試験結果も，引張試験結果と同様の傾向を示したが，メタルラス，ステーブルが取り付けられていない両面粘着型防水紙を用いた A6～A8 試験では，初期値（図中，「劣化前」）に比べて劣化後の A8 試験体のせん断強度が多少低下した。試験体側面からの水分の侵入などにより劣化した可能性があるが，表 5.15 および 5.17 に示すように，A8 試験体を含め，両面粘着型防水紙を用いた試験体の破断位置は防水紙内であり，本実験の範囲の劣化外力に対して劣化後もラス下地板とモルタルに対して接着性を保持していたことが確認できた。

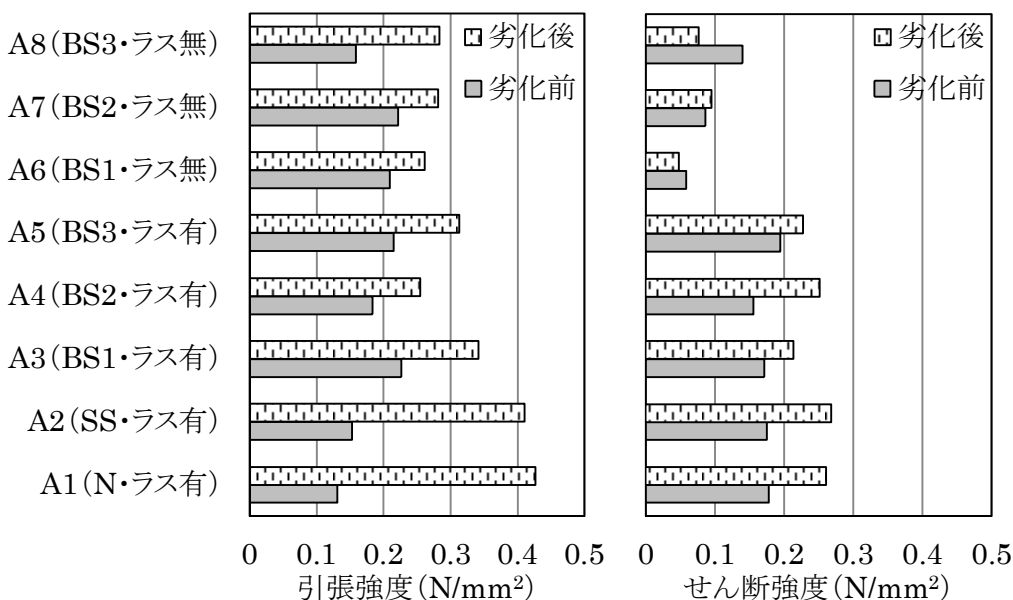


図 5.14 促進劣化試験後の接着強度（左：引張強度，右：せん断強度）

表 5.15 試験体破断位置と試験体観察結果（劣化試験後）

試験体記号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
防水紙	N	SS	BS1	BS2	BS3	BS1	BS2	BS3
メタルラス ステーブル	有り					無し		
引張	破断	b	a	c	c	c	c	c
	鏝	頭, 脚	頭, 脚	無し	無し	無し	-	-
せん断	破断	b	a	c	c	c	c	c
	鏝	頭, 脚	頭, 脚	無し	無し	無し	-	-

※破断位置 a:モルタルー防水紙間, b:防水紙ー下地材間, c:防水紙内

表 5.16 試験後の試験体写真（引張試験）


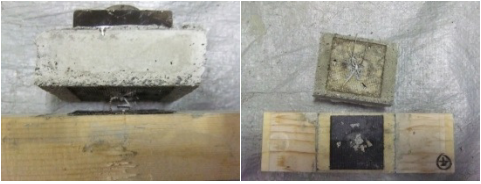



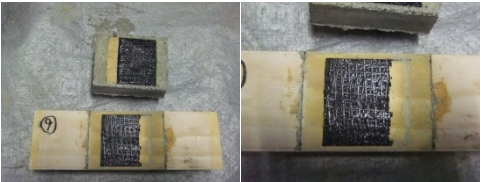
試験体	A1		A2	
水準	N, メタルラス・ステーブル有り		SS, メタルラス・ステーブル有り	
写真				
試験体	A3		A5	
水準	BS1, メタルラス・ステーブル有り		BS3, メタルラス・ステーブル有り	
写真				
試験体	A6		A8	
水準	BS1, メタルラス・ステーブル無し		BS3, メタルラス・ステーブル無し	
写真				

表 5.17 試験後の試験体写真（せん断試験）

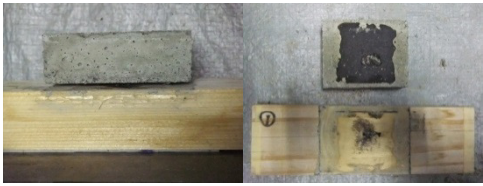


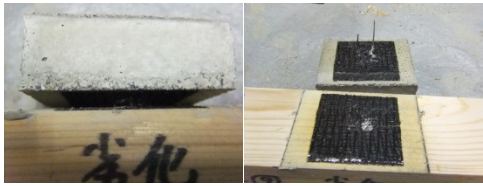
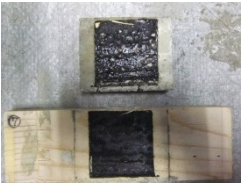





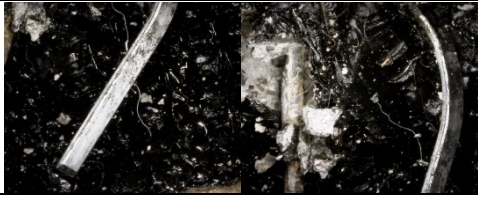
試験体	A1	A2
水準	N, メタルラス・ステープル有り	SS, メタルラス・ステープル有り
写真		
試験体	A3	A5
水準	BS1, メタルラス・ステープル有り	BS3, メタルラス・ステープル有り
写真		
試験体	A6	A8
水準	BS1, メタルラス・ステープル無し	BS3, メタルラス・ステープル無し
写真		

表 5.18 ステープル観察写真

試験体	A1		A2	
水準	N, メタルラス・ステープル有り		SS, メタルラス・ステープル有り	
写真				
試験体	A3		A4	
水準	BS1, メタルラス・ステープル有り		BS2, メタルラス・ステープル有り	
写真				
試験体	A5			
水準	BS3, メタルラス・ステープル有り			
写真				

5.3.1.3 大型試験体の引張強度

各試験体の引張強度を図 5.15 に示す。図中の棒グラフは 4 体の平均強度を、エラーバーは最大、最小値を示す。普通防水紙を用いた C1 試験体に対して、粘着型防水紙を用いた C2, C3 試験体の引張強度が高い。また、引張試験後の C3 試験体を写真 5.7 に示す。写真 5.5 に示すようにラス下地板に粘着層が付着している破断性状であることから、前述の要素試験体の直接引張試験の結果と同様に粘着型防水紙が面外方向に対する接着一体性の向上に効果があり、加えて両面粘着型防水紙はモルタルに対しても接着性を発揮することが確認できる。

ただし、直接引張試験の結果と比較すると、強度が大幅に下がっている。これは、試験体の下地材が外部環境に曝されており、しかも壁面周囲の防水処理を行わなかったため断面内に雨水が侵入しラス、ステープル、下地材の腐朽が促進したことが影響していると考えられる。

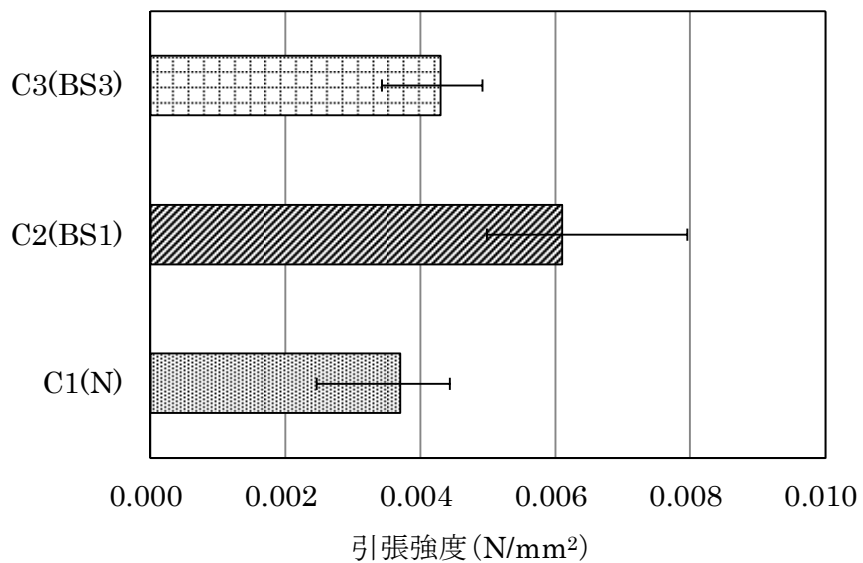


図 5.15 大型試験体の引張強度



写真 5.7 引張試験後の試験体 (C3 防水紙 : BS1, 左 : モルタル, 右 : ラス下地板)

5.3.2 ラスモルタルの乾燥収縮に関する実験結果

5.3.2.1 小型試験体による乾燥収縮ひずみの計測結果

計測開始から 30 日までの各試験体の乾燥収縮ひずみの経時変化を図 5.16～5.19 に示す。

乾燥収縮ひずみの大きさをメタルラス，ステープルの有無で比較すると，図 5.16 に示すように，メタルラス，ステープルを取り付けた B1，B3 試験体のひずみの方が，メタルラス，ステープルが取り付けられていない B4，B5 試験体のものより小さく，メタルラスは乾燥収縮ひずみを抑制する効果があることが明らかである。

防水紙の種類で比較すると，図 5.17 に示すように，ひずみの差はわずかであったが，普通防水紙を用いた B1 試験体に比べ，粘着型防水紙を用いた B2，B3 試験体の方が，乾燥収縮ひずみが小さくなっている。粘着型防水紙を用いることで乾燥収縮ひずみが小さくなった要因として，粘着層の弾力性によるひずみの緩和や粘着面からのモルタルの脱水が少なくなったことが考えられる。しかし，図 5.16 に示すメタルラスが取り付けられていない B4，B5 試験体の比較では粘着型防水紙を用いた試験体の方が，ひずみが大きくなっている。両面粘着型防水紙を用いた場合，モルタルは仕上げ面のみからの片面乾燥状態となり，メタルラスやステープルによる拘束がないときには反りが生じたと考えている。すなわち，本実験の範囲では，両面粘着型防水紙の活用が乾燥収縮や，それに伴うひび割れの抑制に有効であるという結論は得られなかった。この点に関しては今後，検討を続けたいと考えている。

一方，モルタルの種類で比較すると，図 5.18，5.19 に示すように，塗布型 SRA，SRA，EVA の順でひずみが小さく，特に塗布型 SRA については，経過日数 10 日後から収縮ひずみがほぼ一定になっている。このことより，ラスモルタル外壁の乾燥収縮の低減のためには，収縮低減剤を有効に使用することが重要であることが示された。

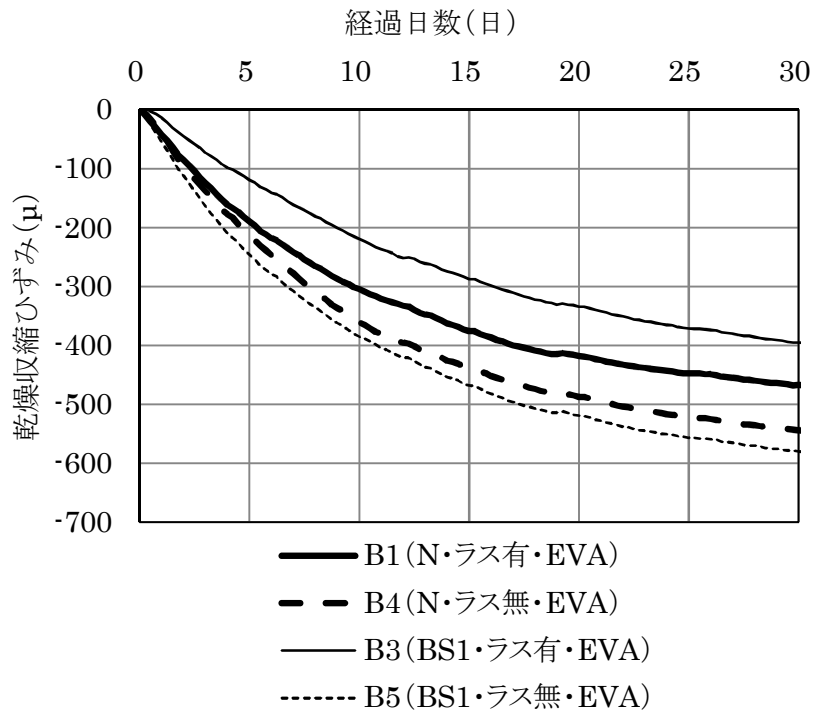


図 5.16 乾燥収縮ひずみ経時変化 (メタルラス・ステーブルの有無)

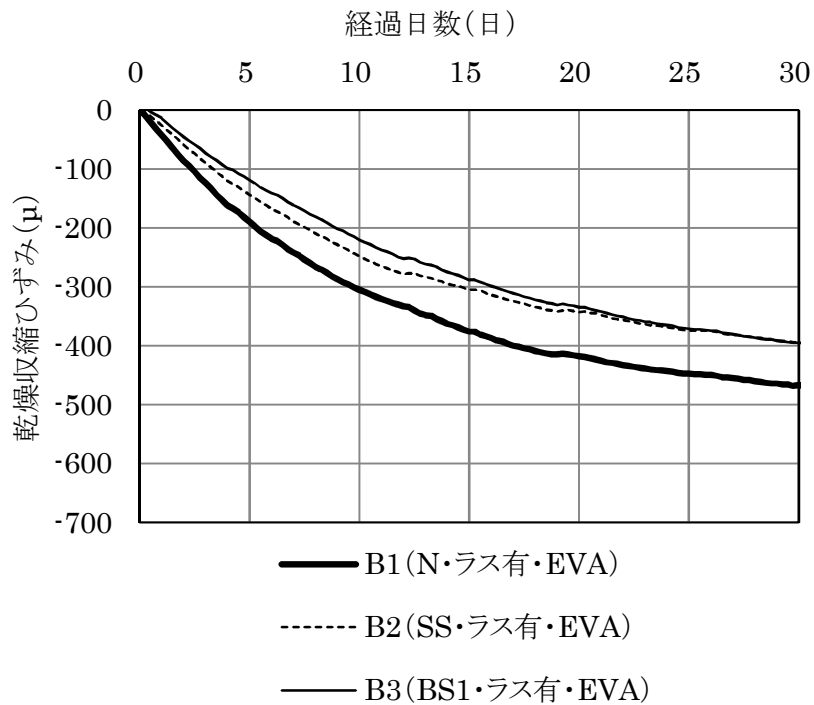


図 5.17 乾燥収縮ひずみ経時変化 (防水紙種類別)

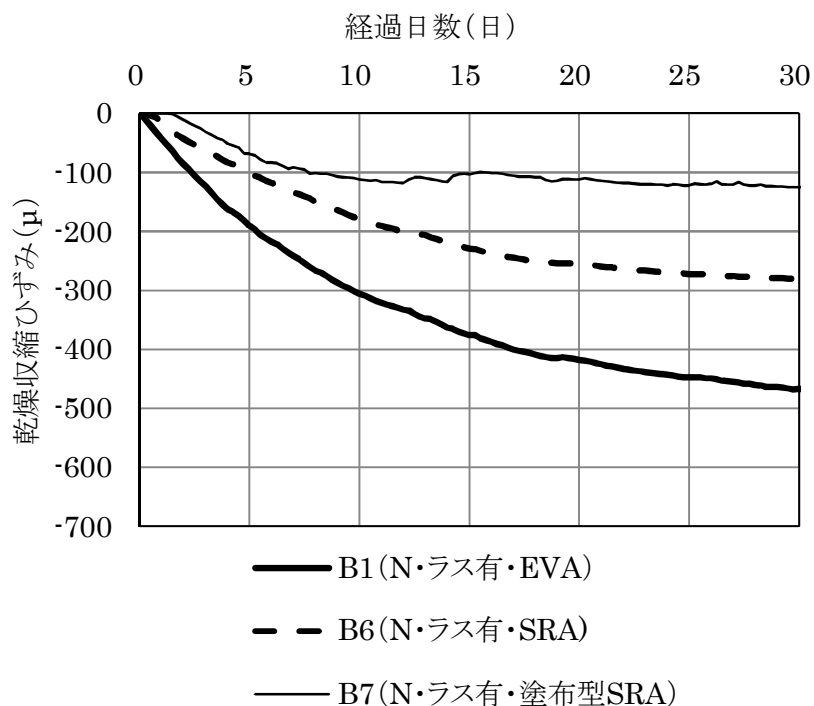


図 5.18 乾燥収縮ひずみ経時変化 (モルタル種類別)

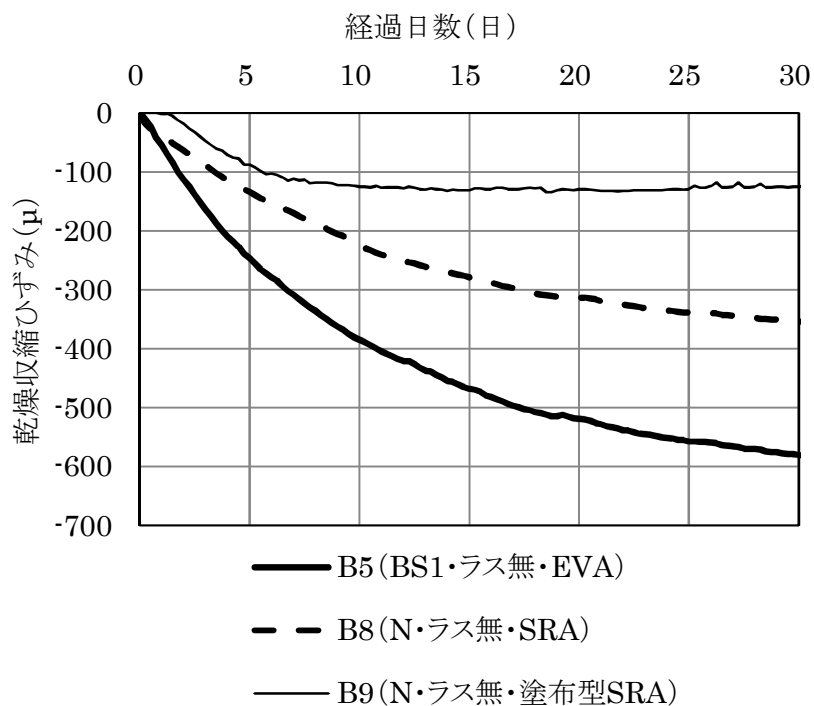


図 5.19 乾燥収縮ひずみ経時変化 (モルタル種類別, メタルラス・ステーブル無し)

5.3.2.2 大型試験体による乾燥収縮ひび割れ発生状況

ひび割れ観察時の試験体の写真を表 5.19～5.21 に示す。試験体全体を目視で観察した結果、ひび割れの発生を観察することができなかった。そのため、マイクروسコープを用いて開口部から 30mm の範囲で微細なひび割れを観察した。開口部回りのひび割れ分布図および、ひび割れ率とひび割れ幅の計測結果を表 5.22～5.24 に示す。ひび割れ分布図中の着色されたメッシュがひび割れ部に相当する。ひび割れ観察範囲内で生じ外へ伸びたひび割れについても分布図中に示し、ひび割れ率やひび割れ幅の結果に含めている。

普通防水紙を用いた C1 試験体（表 5.22）に比べて、粘着型防水紙を用いた C2, C3 試験体（表 5.23, 5.24）は短いひび割れが各所に分散しているが、ひび割れ率には大きな違いはなく、ひび割れ量の抑制とはなっていないことが分かる。平均ひび割れ幅については粘着型防水紙を用いた試験体の方が若干小さくなっている。これらのことより、粘着型防水紙を用いることで試験体のひび割れの発生に変化が生じたことが確認できたが、先にも示したように乾燥収縮ひび割れの抑制効果の有効性は確認できなかった。

表 5.19 屋外暴露後の試験体 (C1, 防水紙 : N)

試験体記号	C1	
防水紙	N	
全体		
開口部周辺		
		

表 5.20 屋外暴露後の試験体 (C2, 防水紙 : BS1)

試験体記号	C2	
防水紙	BS1	
全体		
開口部周辺		
		

表 5.21 屋外暴露後の試験体 (C3, 防水紙 : BS3)

試験体記号	C3	
防水紙	BS3	
全体		
開口部周辺		
		

表 5.22 ひび割れ観察結果 (C1, 防水紙 : N)

試験体 記号	C1
防水紙	N
ひび割れ 分布図	
ひび割れ率 (%)	4.0
平均ひび 割れ幅 (mm)	0.032

表 5.23 ひび割れ観察結果 (C2, 防水紙 : BS1)

試験体 記号	C2
防水紙	BS1
ひび割れ 分布図	
ひび割れ率 (%)	3.7
平均ひび 割れ幅 (mm)	0.014

表 5.24 ひび割れ観察結果 (C3, 防水紙 : BS3)

試験体 記号	C3
防水紙	BS3
ひび割れ 分布図	
ひび割れ率 (%)	4.2
平均ひび 割れ幅 (mm)	0.025

5.3.3 ステープルの防錆性に関する実験結果

先に示した図 5.8 の観察時期①および②において、マイクロスコップで撮影したステープルの写真とステープルの発錆状況を表 5.25～5.29 に示す。ステープルの一部に錆が生じている場合、その箇所を丸印で示している。

普通防水紙を用いた D1 試験体については表 5.25 に示すように観察時期①の頃からステープルに錆が見られ、観察時期②においてはその錆が全体に進展していた。一方、粘着型防水紙を用いた D2～D5 試験体は表 5.26～5.29 に示すように観察時期①には発錆が確認されず、観察時期②にはわずかな発錆が確認されたものの、普通防水紙を用いた試験体のものに比べて錆の程度は非常に小さかった。なお、片面粘着型防水紙を用いた D2 試験体に関しては、観察時期①においては先に示した表 5.18 の A2 試験体の結果とは異なりステープルの腐食はほとんど認められなかった。ただし、観察時期②では、ステープルの頭部と脚に腐食が認められた。これは片面粘着型であるためモルタルと防水紙との間から塩水が浸入したことが考えられ、両面粘着型防水紙を用いた D3～D5 試験体に比べて腐食の程度は大きかった。また、両面粘着型防水紙の違いで比較すると、本実験の範囲の劣化条件ではステープルの防錆性は同程度であると判断した。

表 5.25 試験体観察結果 (D1, 防水紙 : N)

試験体記号	D1	
防水紙	N	
観察時期	観察①	観察②
試験体全体		
ステーブル		
		
発錆位置	脚の一部	全体

表 5.26 試験体観察結果 (D2, 防水紙 : SS)

試験体記号	D2	
防水紙	SS	
観察時期	観察①	観察②
試験体全体		
ステープル		
		
発錆位置	無し	頭, 脚の一部

表 5.27 試験体観察結果 (D3, 防水紙 : BS1)

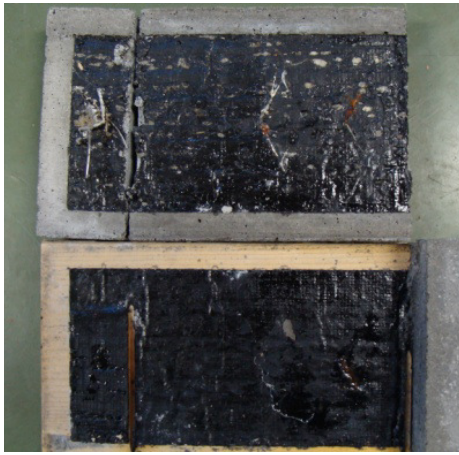

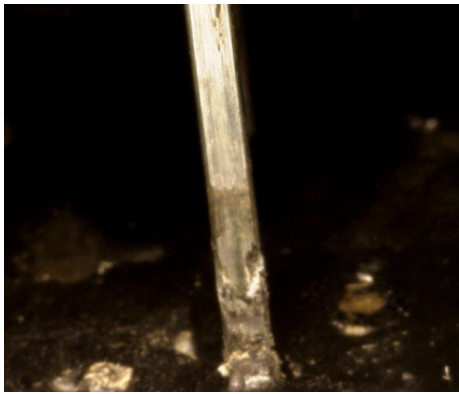


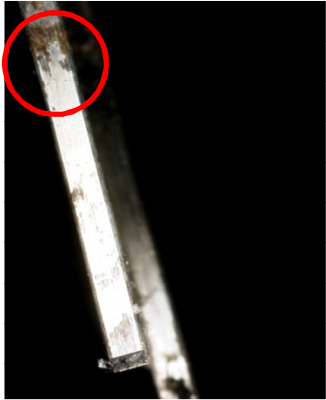
試験体記号	D3	
防水紙	BS1	
観察時期	観察①	観察②
試験体全体		
ステーブル		
		
発錆位置	無し	釘穴部分, 脚

表 5.28 試験体観察結果 (D4, 防水紙 : BS2)

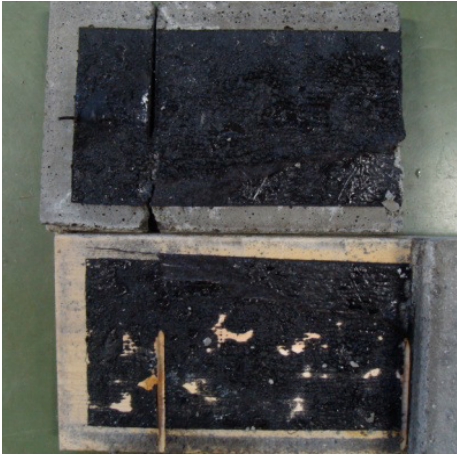
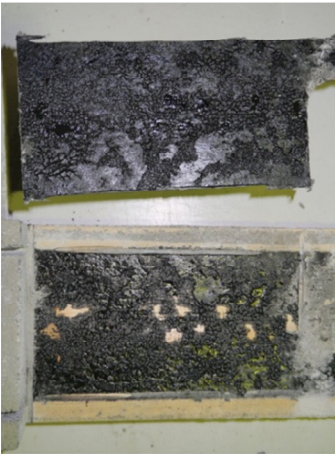




試験体記号	D4	
防水紙	BS2	
観察時期	観察①	観察②
試験体全体		
ステーブル		
		
発錆位置	無し	釘穴部分

表 5.29 試験体観察結果 (D5, 防水紙 : BS3)

試験体記号	D5	
防水紙	BS3	
観察時期	観察①	観察②
試験体全体		
ステーブル		
		
発錆位置	無し	脚

5.3.4 振動実験によるラスモルタルの剥落性に関する実験結果

5.3.4.1 地震動入力時の試験体の剥離状況

各試験体のラス下地板からの剥離の状況と剥離が生じた地震動の入力レベルを表 5.30～5.35 に示す。ここで、各要因 2 体ずつの試験体を区別するために試験体記号の末尾に「-1」および「-2」を付け加えている。普通防水紙を用いた E1 試験体では表 5.30, 5.31 に示すように 2 体とも 50%の地震動入力時にモルタルとラス下地板との間で剥離が生じたのに対して、両面粘着防水紙 BS1 を用いた E2 試験体では表 5.32, 5.33 に示すように 100%入力時で 2 体とも剥離が生じなかった。また、BS3 を用いた E3 試験体では表 5.34 に示すように 100%入力時で 1 体に剥離が生じた。表 5.34 に E3-1 試験体に剥離が生じたときの様子を示しているが、粘着層が糸を引いて粘っていることが観察された。このことより、粘着型防水紙を使用することで地震動に対するモルタルの剥落の抑制性能が向上することが確認できる。粘着型防水紙の違いで比較すると、BS3 を用いた E3 試験体は 1 体で剥離が生じたが、BS2 を用いた E2 試験体は JMA 神戸 NS 波 100%を入力しても剥離は生じなかった。

表 5.30 試験体の剥離状況 (E1-1, 防水紙 : N)





試験体記号	E1-1	
防水紙	N	
剥離の有無	50%入力で剥離	
剥離状況 50%入力後		
		

表 5.31 試験体の剥離状況 (E1-2, 防水紙 : N)

試験体記号	E1-2	
防水紙	N	
剥離の有無	50%入力で剥離	
剥離状況 50%入力後		
		

表 5.32 試験体の剥離状況 (E2-1, 防水紙 : BS1)





試験体記号	E2-1	
防水紙	BS1	
剥離の有無	剥離発生せず	
剥離状況 100%入力後		
		

表 5.33 試験体の剥離状況 (E2-2, 防水紙 : BS1)





試験体記号	E2-2	
防水紙	BS1	
剥離の有無	剥離発生せず	
剥離状況 100%入力後		
		

表 5.34 試験体の剥離状況 (E3-1, 防水紙 : BS3)





試験体記号	E3-1	
防水紙	BS3	
剥離の有無	100%入力で剥離	
剥離状況 100%入力後		
		

表 5.35 試験体の剥離状況 (E3-2, 防水紙 : BS3)

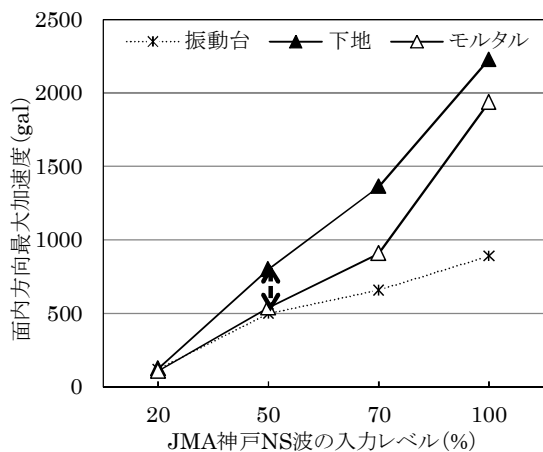
試験体記号	E3-2	
防水紙	BS3	
剥離の有無	剥離発生せず	
剥離状況 100%入力後		
		

5.3.4.2 加速度測定結果による剥離の判定

試験体の各入力地震動に対して測定した応答加速度波形について、最大加速度で整理したものを図 5.20～5.25 に示す。試験体に剥離が生じた場合にはモルタルと下地材の最大加速度に差が生じると考え、加速度測定結果により試験体剥離が判定できるのかを検討した。図 5.20～5.25 のグラフの下には各試験体の観察結果より判断した剥離の有無を示している。また、モルタルと下地材の最大加速度に差が生じた箇所はグラフ中に両矢印で示している。

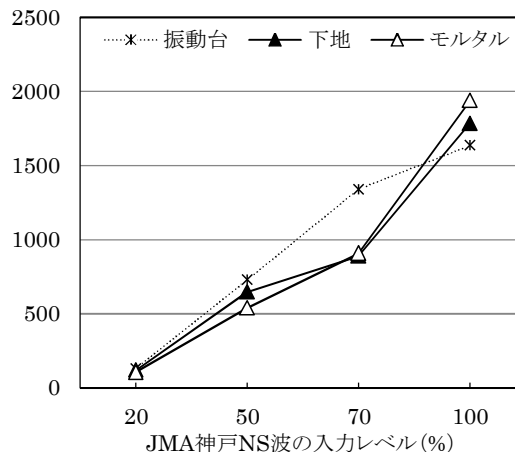
前節で示した目視観察の結果、剥離が発生した E1-1, E1-2, E3-1 試験体については、それぞれ面内方向 50%入力時 (図 5.20 (a)), 面外方向 50%入力時 (図 5.21 (b)), 面内方向 100%入力時 (図 5.24 (a), 5.25 (a)) に最大加速度に差が生じており試験体観察結果と対応している。一方で、図 5.22 (b), 5.23 (a) 示す E2 試験体のように目視観察では剥離の発生を確認できなかった場合でも最大加速度に差が生じていたものがあった。明らかな下地材からの剥離ではないものの、地震動によりモルタルに部分的な浮きが生じていた可能性が考えられる。

これらの測定結果は、加速度センサ等を用いてモルタルと下地材の振動特性を測定・解析することでモルタルの剥離の有無を簡便に診断することができることを示唆している。



(a) E1-1

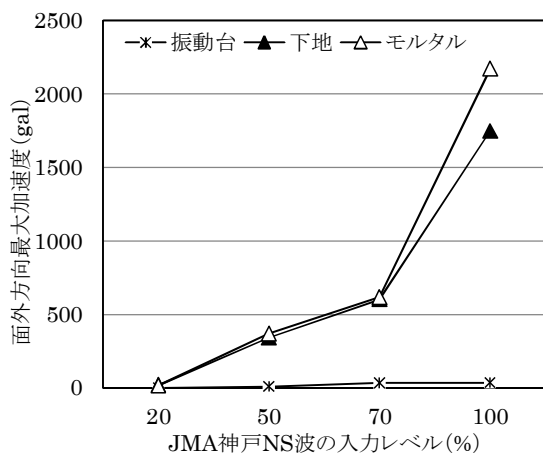
(50%入力で剥離)



(b) E1-2

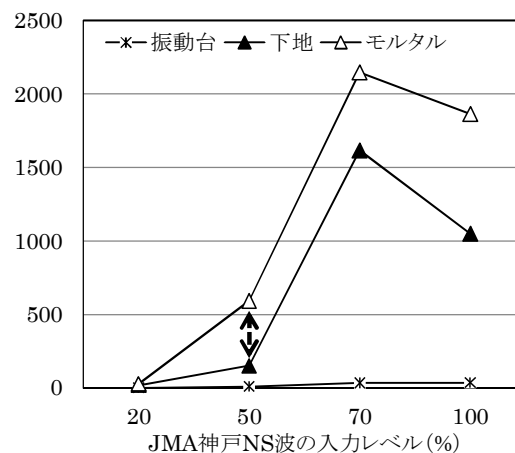
(50%入力で剥離)

図 5.20 面内方向 (y 軸方向) 最大加速度推移 (E1 防水紙 : N)



(a) E1-1

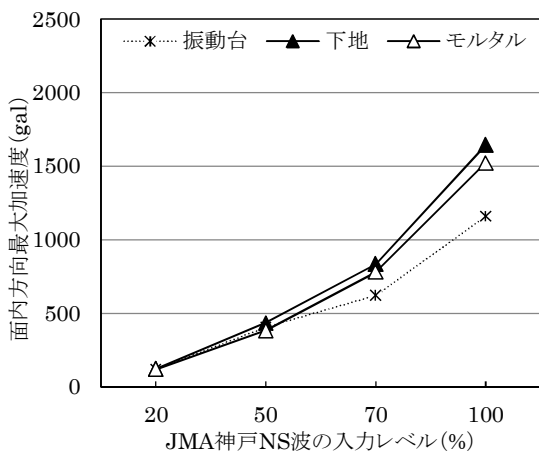
(50%入力で剥離)



(b) E1-2

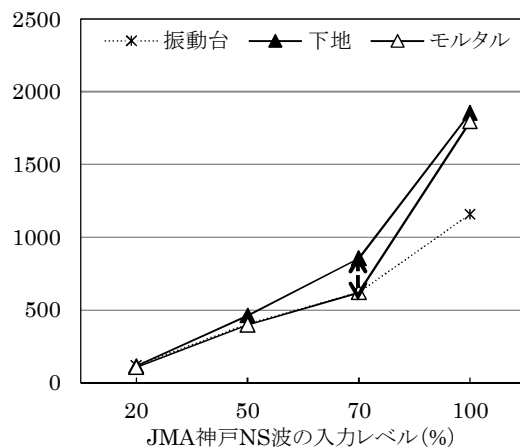
(50%入力で剥離)

図 5.21 面外方向 (x 軸方向) 最大加速度推移 (E1 防水紙 : N)



(a) E2-1

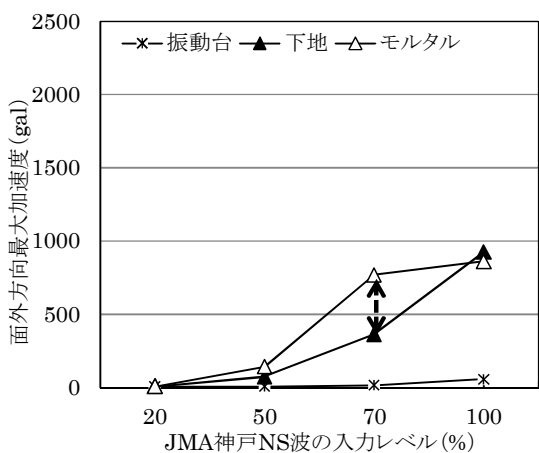
(剥離発生せず)



(b) E2-2

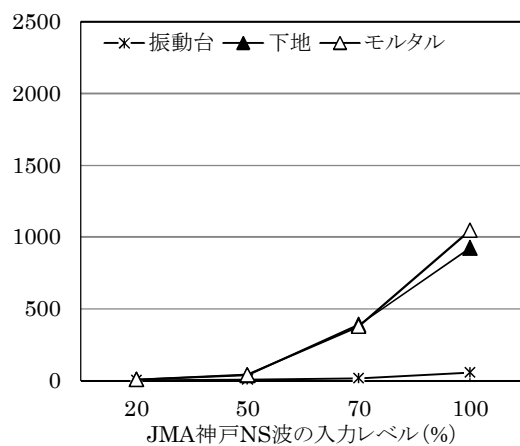
(剥離発生せず)

図 5.22 面内方向 (y 軸方向) 最大加速度推移 (E2 防水紙 : BS1)



(a) E2-1

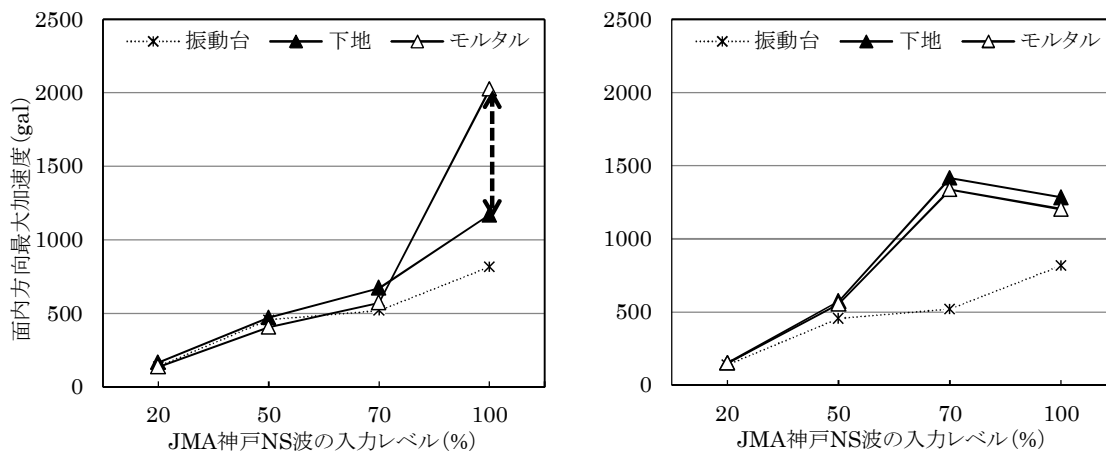
(剥離発生せず)



(b) E2-2

(剥離発生せず)

図 5.23 面外方向 (x 軸方向) 最大加速度推移 (E2 防水紙 : BS1)



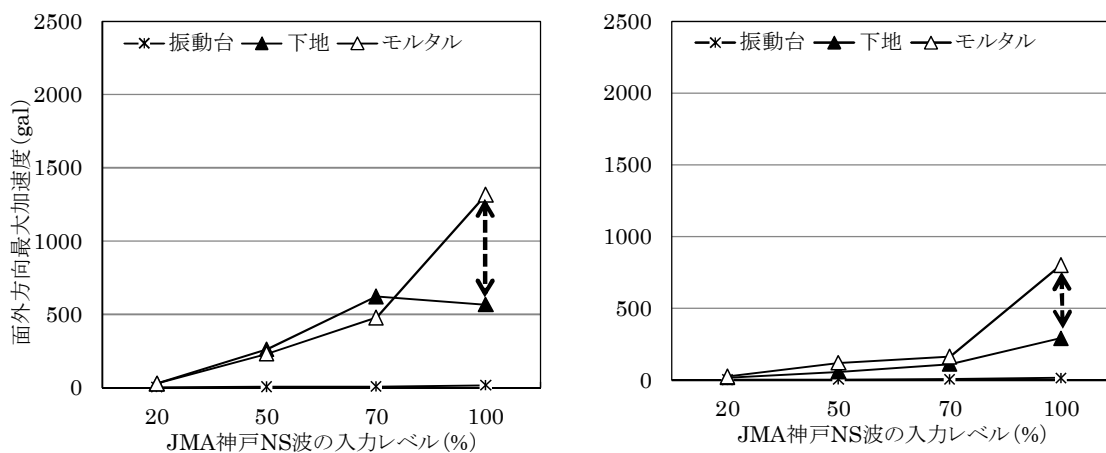
(a) E3-1

(100%入力で剥離)

(b) E3-2

(剥離発生せず)

図 5.24 面内方向 (y 軸方向) 最大加速度推移 (E3 防水紙 : BS3)



(a) E2-1

(100%入力で剥離)

(b) E2-2

(剥離発生せず)

図 5.25 面外方向 (x 軸方向) 最大加速度推移 (E3 防水紙 : BS3)

5.4 粘着型防水紙の活用効果に関する考察

本章における実験結果から得られた成果を、想定した粘着型防水紙の活用の効果を踏まえて以下にまとめる。

I モルタルの乾燥収縮ひずみの緩和によるひび割れの抑制

小型試験体による実験において、メタルラス、ステーブルを取り付けた試験体では、両面粘着型防水紙を用いた試験体は普通防水紙を用いた試験体と比較して、乾燥収縮ひずみは小さくなったが、メタルラス、ステーブルを取り付けていない試験体では、両面粘着型防水紙を用いた試験体は普通防水紙を用いた試験体よりもひずみが若干大きくなった。また、大型試験体による実験では、乾燥収縮ひび割れに関し、両面粘着型防水紙と普通防水紙を用いた試験体との間に有意差は認められなかった。すなわち、本実験の範囲では、両面粘着型防水紙の活用が乾燥収縮や、それに伴うひび割れの抑制に有効であるという結論は得られなかった。

II ステーブル釘穴のシール性の向上

塩水浸漬および乾燥によって促進劣化させた小型試験体について、粘着型防水紙を用いた試験体は、普通防水紙を用いた試験体と比較して、錆の発生を抑制できることを確認した。また、両面粘着型防水紙と片面粘着型防水紙とを比較すると、両面粘着型防水紙を用いた試験体の方がステーブルの腐食は小さいことを確認した。

III 下地に対する接着性の向上

小型試験体を用いた実験では、面外方向の引張試験に関しては、ラス下地板と防水紙とが接着する粘着型防水紙を用いた試験体の初期強度が高くなることを確認した。しかし、この効果は面内方向のせん断強度の向上には影響せず、ステーブルの効果が著しいことを確認した。また、地震時を想定した振動実験では、普通防水紙を用いた試験体と比較して両面粘着型防水紙を用いた試験体の方が剥離発生の抑制効果が明らかに高いことを確認した。

IV モルタルに対する接着性の向上

実験計画の段階では、両面粘着型防水紙の上に濡れた状態で塗り付けられたモルタルが接着しないことを危惧していたが、本実験の結果からモルタルの硬化後には粘着層によって防水紙と接着一体化することを確認した。本実験の範囲ではモルタルと防水紙との接着強度の方が防水紙とラス下地板との接着強度よりも高いことが引張試験や振動実験から明らかになった。

以上より、ラスモルタル外壁に粘着型防水紙を適用することで、ステーブルの防錆性、

ラスモルタルの下地との面外方向に対する接着一体性および地震動に対する剥離抑制性能の向上に効果があると判断している。そして、それらの効果は片面粘着型防水紙の方が片面粘着型防水紙と比べて高いと判断している。

外壁部材の耐用年数という視点で見ると、本研究の範囲では具体的な年数を示すことはできなかったが、第3章で示した120年から150年程度の想定に対して、モルタルの乾燥収縮ひび割れについて抑制効果は期待できず、ひび割れが生じた場合、水分侵入によるメタルラス、ステーブルの腐食よりもモルタル部の強度や美観の低下の点から想定より耐用年数が短くなると考えられる。加えて、剥離抑制性については向上効果があるが剥離が生じた場合の壁面全体の撤去、モルタルの塗り直しを伴わない部分的な補修方法を開発することも耐用年数を延ばすためには必要であると考ええる。

5.5 まとめ

本章では、提案した木造ラスモルタル外壁へ粘着型防水紙の活用について、その活用効果の実験的検討を行った。実験の結果、粘着型防水紙をラスモルタル外壁へ活用することでステーブルの防錆性やラス下地板とモルタルとの面外方向に対する接着一体性の向上に関しては活用の効果を発揮できることを確認できた。

しかし、モルタルの乾燥収縮抑制に関して、粘着型防水紙を用いた試験体では乾燥収縮ひずみの経時変化やひび割れの発生に変化が生じたが、乾燥収縮の抑制に有効であるという結論は得ることはできず、粘着型防水紙適用時の乾燥収縮のメカニズムの解明も含めて今後も検討を続けたいと考えている。

参考文献

- 5.1) 大久保孝昭, 猪原崇, 松本慎也: 下地コンクリートに拘束される左官モルタルのひび割れにおよぼす施工時期の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第673号, pp.333-340, 2012.3

第 6 章 結論

第6章 結論

本研究では、建築外壁の長寿命化に貢献する技術として、RC外壁のひび割れ注入工法の評価技術としての補修材の注入性状可視化試験法および木造建築物のラスモルタル外壁の品質向上を目的とした粘着型防水紙の活用を提案した。

各章の概要と得られた知見を以下にまとめる。

第1章 序論

建築物の長寿命化に大きく関わる建築外壁について、ストック型社会への転換が進行していることおよび建築ストックを限られた予算、人的資源で維持管理しなければならない時代が到来しつつある現状と、建築外壁の長寿命化に関する研究、技術開発について、経験や実績に基づいたものが多くより合理的な技術開発が必要であることを研究背景として示した。そして、建築外壁の長寿命化に貢献する技術を開発、提案することを研究の目的として示した。

第2章 既往の研究

本研究の位置付けを明確にすることを目的に既往の研究について整理した。

RC建築物のひび割れ補修に関しては、注入工法について工法の概要、特徴と、注入量および充填程度の管理は受動的であり精度が高くないこと、施工条件によっては補修材が十分充填されない可能性があることを現状の問題として示した。これらの現状の問題から、注入工法における補修材の注入性状に影響を及ぼす施工要因を事前に把握しておくことは重要であり、補修材の注入性状を評価することを目的とした既往研究では、ひび割れの再現方法として透明な平板を重ねる方法やコンクリート供試体の割裂面を用いる方法を用いて検討していることを示した。そして、注入工法における現状および既往研究を踏まえて、本研究では注入時の補修材の広がりから注入完了後の補修材の垂れまで目視で観察できること、試験体間のひび割れ内部形状の違いを考慮し、形状を標準化して評価できること、注入工法の性能評価試験法のひとつとして適用できることを提案する技術の目標とした。

木造ラスモルタル外壁に関しては、ラスモルタル外壁の概要と、劣化現象としてモルタルのひび割れから侵入した雨や結露などの水分が壁内に滞留することでメタルラス、ステープルの腐食や下地板の腐朽により部材の固定度の低下が生じ、地震時に大面積で剥落することで第三者被害や木部の露出による延焼の危険性が生じることを問題点として示した。木造ラスモルタル外壁の耐久性や耐震性などの品質改善に関する既往技術・研究には、混和材料や繊維ネットによるモルタルのひび割れ防止や通気工法などによる水分の侵入、滞留の防止を目的としたものがあることを示した。そして、ラスモルタル外壁における現状および既往技術・研究を踏まえて、地震時のラスモルタルの剥落防止および経年劣化に対

する耐久性向上を提案する技術の目標とした。

第3章 本論文で提案する技術

第2章で示した目標を踏まえて、提案した建築外壁の長寿命化に貢献する技術の概要を示した。

○RC 外壁補修におけるひび割れ注入性状の可視化試験法

提案した技術は3D スキャナ, 3D プリンタを用いてコンクリート円柱供試体の割裂により作製したひび割れ形状を読み取り, 透明な樹脂素材に切削したものを型枠とし, モルタルを打設してそのふたつを重ね合わせたものをひび割れ再現試験体として隙間に補修材を注入するものである。提案した試験法はひび割れ形状を複写することで統一したひび割れ形状に対して注入性状を評価することができる。加えて透明な素材を用いて試験体を作製することで補修材の注入性状を目視で観察することができる。

本研究ではコンクリート円柱供試体の引張割裂面からひび割れ再現試験体を作製したが, 再現試験体のひび割れ形状ともとの割裂面とを比較した結果, 再現試験体はもとのコンクリートのひび割れ形状を精度良く再現していることが確認できた。

○木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の活用技術

提案した技術は木造ラスモルタル外壁の構成材料のひとつである防水紙に粘着層を有する新規防水紙(「粘着型防水紙」)を活用するものである。粘着型防水紙は屋根葺材や雨仕舞材に使用されているもので粘着層があることで弾性および粘着性があるのが特徴である。粘着型防水紙の活用により期待できる効果として, モルタルの乾燥収縮ひずみの低減によるひび割れの抑制(両面に粘着層を有するもの), ステープル釘穴のシール性の向上, 下地に対する接着性の向上, モルタルに対する接着性の向上(両面に粘着層を有するもの)を想定した。

第4章 可視化試験法による注入性状に及ぼす施工要因の検討

提案した注入性状の可視化試験法を用いて, 補修材の注入性状と施工要因との関係の評価および可視化試験法の注入性状評価手法としての有用性の検討を行った。試験要因として, ひび割れ内部形状, ひび割れ幅, ひび割れ向き, 施工時外気温, 注入圧, 補修材種類を挙げ, 補修材の注入開始から注入範囲の拡大が停止するまでの補修材の広がり方については主にひび割れに沿った方向またはひび割れ深さ方向への広がりやすさの比較や注入範囲の拡大停止までに要した時間によって評価した。注入完了後からの補修材の垂れについては垂れ進行の経時変化によって評価した。主に1種類のひび割れ形状に対しての試験ではあるが, 本試験の範囲では以下に示す知見を得た。

- 1) 補修材の広がり方や垂れはひび割れ内部形状の影響を受けることを確認した。
- 2) ひび割れ幅について, 0.2mm と 0.5mm との比較ではひび割れ幅が小さい0.2mm の方がひび割れに沿った方向へ補修材が広がりやすい傾向を示した。補修材の垂れについ

- ては低粘度エポキシ樹脂を注入した試験体では、0.2mm, 0.5mmともに垂れが生じた。
- 3) ひび割れ向き（地面に対して水平，斜め 45 度，鉛直）については補修材の広がり方に及ぼす影響は小さいことを確認した。補修材の垂れについてはひび割れ向きが鉛直の試験体では垂れの進行が時間と共に直線的に進行する一方，ひび割れ向きが斜めの試験体では垂れの進行が時間とともに緩やかに進行する傾向を示した。
 - 4) 施工時外気温（6.5℃，20℃，29℃）については，エポキシ樹脂系補修材を使用していることから粘度や硬化時間が温度の影響を受けて変化して，補修材の広がり方については温度の上昇に伴いひび割れに沿った方向へ広がりやすい傾向を示した。補修材の垂れについては 20℃と比較して，6.5℃では樹脂粘度が増大し垂れが緩やかになり，一方で 29℃では硬化反応が速まることで垂れが緩やかになる傾向を示した。
 - 5) 注入圧（注入用ゴム 2 本，4 本）については，注入圧が高い方がひび割れの深さ方向に補修材が広がりやすい傾向を示した。
 - 6) 補修材種類（低粘度エポキシ樹脂，中粘度エポキシ樹脂）については，粘度の増大に伴いひび割れ深さ方向へ広がる傾向を示した。補修材の垂れについては低粘度エポキシ樹脂を注入した試験体では垂れが生じた一方，中粘度エポキシ樹脂を注入した試験体ではひび割れ幅 0.2mm，0.5mm ともに垂れが生じなかった。
 - 7) 提案した注入性状可視化試験法は補修材の注入性状を視覚的なデータとして収集でき，加えて注入性状に影響を及ぼすひび割れ形状を統一して評価することができるので注入性状の評価試験法として有用性があることを確認した。しかし，評価試験法として確立するためには，試験体のひび割れ形状の標準化，注入性状の評価方法および試験項目，試験結果の再現性について詳細な検討が必要である。

第5章 木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の活用効果の検討

提案した木造ラスモルタル外壁への粘着型防水紙の活用効果を検討することを目的として，普通防水紙 1 種類，片面粘着型防水紙 1 種類，両面粘着型防水紙 3 種類を用いて壁体を模擬した試験体を作製し実験を行った。下地板とラスモルタルとの接着一体性，ラスモルタルの乾燥収縮やそれに伴うひび割れ，ステープルの防錆性，地震動に対する剥落性について検討を行った結果，以下に示す知見を得た。

- 1) 接着強度試験の結果，粘着型防水紙は面外方向の接着一体性の向上に効果がある一方で面内方向の接着一体性には向上効果はなく，接着一体性の確保にはメタルラス，ステープルとの併用が必要であることを確認した。
- 2) モルタルの乾燥収縮ひずみの測定実験の結果，メタルラス，ステープルにより乾燥収縮が抑制されることを確認した一方で，粘着型防水紙により普通防水紙と比べて乾燥収縮の進行に変化が生じたが，乾燥収縮ひずみの低減効果があるとは判断できなかった。
- 3) モルタルの乾燥収縮ひび割れの観察実験の結果，粘着型防水紙により普通防水紙と比

べて試験体のモルタルのひび割れは分散して発生したが全体のひび割れ量としては普通防水紙を用いた試験体と変わらず、乾燥収縮ひび割れの抑制効果があるとは判断できなかつた。

- 4) 促進劣化試験および塩水浸漬試験の結果、粘着型防水紙によりステープルの防錆性および接着強度の耐候性が向上することを確認した。
- 5) 振動実験の結果、粘着型防水紙により地震動に対する剥落抑制性が向上し、剥離時も粘着層により下地に対してモルタルが保持されることを確認した。

以下に本研究の総括および今後の展望、課題について述べる。

本論文で提案した技術のうち、RC 外壁ひび割れ補修の注入性状可視化試験法は、経験や実績に基づいた計画や受動的な管理が行われてきたひび割れ注入工法において重要な補修材のひび割れ内部での注入性状を客観的に評価することを目的に開発した。注入性状の評価に関する既往研究を踏まえ、試験体のひび割れ形状を複写して統一することを主眼に置いたものであるが、本研究で実施した試験の結果、注入性状がひび割れ内部形状の影響を受けることが認められ、ひび割れ形状を統一して注入性状を評価することが望ましいと考えられる。また、現状では注入工法の工事計画において、補修材はひび割れ内部で同心円状に広がり、注入後には垂れは生じない仮定の下で注入量や注入間隔が計画されているが、試験要因によっては補修材が同心円状に広がる場合やひび割れ内で垂れが生じる場合があることが明らかになり、補修材の注入性状を材料や工法の性能の判断指標として評価することが必要であると考えられる。提案した可視化試験法をひび割れ注入工法の性能評価試験のひとつとして確立することができれば、補修材の物性、注入方法、施工条件と注入性状との相関を客観的に検討することが可能となり、新たな補修材や注入工法の開発に貢献できると考えられる。加えて、可視化試験法により注入性状に関するデータを収集して整理することで補修工事の計画においてひび割れの性状や施工時の気温などの与条件から使用する補修材料や注入間隔などを合理的に選定することを可能にし、注入工法の確実性の向上や材料ロスの低減などの点において注入工法の高度化に貢献できると考えられる。しかし、本研究の成果は1種類のひび割れ内部形状のみに対しての試験より得られたものである。提案した可視化試験法を注入工法の性能評価試験法として確立するためには、前述のとおり試験体のひび割れ形状の標準化、注入性状の評価方法および試験項目、試験結果の再現性について詳細な検討が必要である。

一方、木造ラスモルタル外壁における粘着型防水紙の活用技術は、地震時のラスモルタルの剥落防止および経年劣化に対する耐久性向上を目的として開発した。粘着型防水紙の活用効果の検討結果、粘着型防水紙をラスモルタル外壁の構成材料として適用することでステープルの耐久性および地震時の剥落抑制性の向上においてラスモルタル外壁の長寿命化に貢献できると考えられる。しかし、実験を通してメタルラス、ステープルが面内方向

に対する接着一体性の確保およびモルタルの乾燥収縮抑制に大きく寄与していることが明らかとなり、粘着型防水紙をメタルラス、ステーブルの代替にすることはできず、これらの材料は併用することが必要であると考えられる。施工の面においては従来のラスモルタル外壁と比較して新たに工程が増えることはなく、さらに粘着層により防水紙を下地に張り付けることができることで作業性が向上するので、実務へ導入しやすい技術であると考えられる。本研究では片面粘着型防水紙1種類と両面粘着型防水紙3種類を対象としたが、本研究の検討の範囲では両面粘着型防水紙の方が上述の性能の向上効果が高いと判断している。また、両面粘着型防水紙3種類の間では性能の向上効果の違いを明らかにすることができなかった。本研究では屋根葺材や雨仕舞材で使用されている粘着型防水紙を使用した。今後はラスモルタル外壁の構成材料としての使用を前提とした粘着型防水紙の開発を目標とした検討が必要であると考ええる。特に、モルタルの乾燥収縮に対する粘着型防水紙の抵抗のメカニズムの把握などラスモルタル特有の性能検討を詳細に行う必要がある。本技術を JASS19 や木造住宅工事仕様書に適合する仕様において用いた場合、部材の耐用年数は仕様書で目標とされている100年から20,30年程度延ばすことが可能であると考えられる。しかし、モルタルの乾燥収縮ひび割れへの対策として収縮低減剤や繊維ネットといった他の技術との併用や、地震時に剥離が生じた場合の補修技術の確立によって耐用年数をより延ばすことが可能であると考ええる。

本論文の研究成果は建築外壁の長寿命化に関して限定された範囲である上、前述の通り実務に適用するためには数多くの課題が存在するものの、提案した技術は建築外壁の長寿命化に貢献する見通しを得たと考えている。今後、建築外壁の長寿命化ためには部材の外部環境による劣化や損傷のメカニズムを踏まえて定量的な耐用年数を定めた上に設計、施工、維持管理、補修・改修を計画的に行うことが重要である。そして、それらの各工程を効果的かつ簡便に実施するために市中の新技术を効果的に応用した技術を確立することも必要であると考ええる。

謝 辭



謝 辞

本論文は、博士課程後期の 3 年間の研究成果をまとめたものです。本論文をまとめるにあたり、多くの方々のご支援とご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。

本論文審査の主査を務めていただいた広島大学大学院工学研究院 教授 大久保 孝昭 先生には、前職を辞した著者に再び研究室に属して本研究に携わる機会を与えていただきました。そして、研究の全般にわたり終始丁寧なご指導とご助言を賜りました。また、研究者としてどのような姿勢で研究に向き合うべきかにつきましても種々ご教示をいただきました。本研究をまとめることができたのも、ひとえに先生にご助力いただいたお陰です。心から深くお礼申し上げます。今後ともご指導のほどよろしくお願い申し上げます。

本論文審査の副査を務めていただいた広島大学大学院工学研究科 教授 河合 研至 先生、同 教授 田川 浩 先生、並びに同 准教授 近藤 一夫 先生には論文の査読に貴重な時間を割いていただき、ご指導や貴重なご意見を賜りました。

本研究における注入性状可視化試験法の開発および試験に実施におきまして、宇都宮大学大学院工学研究科 准教授 藤本 郷史 先生（前 広島大学大学院工学研究院 助教）の助言を賜りました。また、粘着型防水紙の活用効果の検討実験の実施におきまして、建材試験センター西日本試験所 流田 靖博 氏、田島応用化工（株）開発部 高橋 芳徳 氏、同 根元 央希 氏には試験装置などの機材および材料の提供など多大なるご協力をいただきました。

本論文作成におきまして、広島大学大学院工学研究院 建築材料学研究室 助教 寺本 篤史 先生から数多くの貴重なご意見を賜りました。また、実験の実施およびデータ収集におきまして、広島大学大学院工学研究科 建築材料学研究室 博士課程後期 李 亮 氏をはじめとした研究室の学生の皆様並びに卒業生、修了生の皆様には多大なるご協力をいただきました。

舞鶴工業高等専門学校におきまして、建設システム工学科長である教授 四蔵 茂雄 先生をはじめとする皆様には本研究の遂行に対してご理解とご支援をいただきました。

上記に方々に心から感謝いたします。

最後に、いつも暖かく見守ってくれた両親に深く感謝いたします。

2016 年 2 月

毛利 聡