

建築用仕上塗材の二酸化炭素透過性及び透湿性が
中性化抑制効果に与える影響に関する研究

2016.3 川村 康晴

要旨

建築用仕上塗材の二酸化炭素透過性及び透湿性が 中性化抑制効果に与える影響に関する研究

性能規定化の流れの中で、建築物の耐久性にも性能明示が要求されつつあり、また、地球環境問題等を背景として、環境負荷を低減するため、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性を向上させ長期耐用化を進める動きが強まっている。鉄筋コンクリート造建築物の多くは、外壁に仕上げが施されており、塗料及び建築用仕上塗材はもっとも一般的な外装の仕上材である。

仕上材は躯体保護効果の一つとしてコンクリートの中性化抑制効果を有している。市場には多種多様な仕上材があるため、それぞれの中性化抑制効果の評価は不十分であるのが現状である。

今後、コンクリート造建築物の長期耐用化及び性能明示の流れの中で、製品ごとの中性化抑制効果の評価は重要性を増してくると考えられる。

これまでも仕上材の中性化抑制効果を評価する方法として、コンクリートの促進中性化試験や仕上材の透気性を評価することで中性化の抑制効果を予測しようとする試みが種々検討されている。しかしながら既往の方法には、それぞれ一長一短があり、多種多様な仕上材の中性化抑制効果を評価するには精度と効率の面で十分とはいえない。仕上材の二酸化炭素透過性の評価方法を確立することで、鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計手法を提案できれば、合理的な建築物の耐久性能の設計が容易となり建築物の長期耐用に大きく寄与すると考えられた。

本研究では、最も基本的な耐久性の評価指標であるコンクリートの中性化を劣化対象として、仕上材の二酸化炭素透過性を効率よく定量的に測定する方法を提案する。

また、促進中性化試験による仕上材の中性化抑制効果を確認した。促進中性化試験の中で試験体の含水率が増加することを確認し、仕上材の透湿性が含水率へ影響を与えることを示した。その結果、促進中性化試験での評価では、仕上材の中性化率と透湿性の間に相関性が出ることを示し、促進中性化試験がもつ潜在的な問題を示唆した。

本論文は、8章から形成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、本論文における研究の背景と目的を示した。また、本研究が対象とする塗料及び建築用仕上塗材の範囲について示した。

第2章では、主に仕上材の中性化抑制効果に関する既往文献、中性化抑制効果の評価方法に関する既往文献の調査を行った。調査の結果、仕上材の多様性から製品ごとの抑制効果を評価するため、簡易で迅速な評価方法を提案する必要性を見出した。文献調査から仕上材の二酸化炭素の透過性を評価する方法の確立する必要性、二酸化炭素透過性と透湿度との中性化抑制効果へ及ぼす影響を示す必要性を確認した。

第3章では、カップ法、ボックス法を用いて仕上材の二酸化炭素透過性を評価する方法の開発及び試験を行った。二酸化炭素の吸収剤として使用した水酸化カルシウムの反応に水分が大きく影響することを明らかにし、調湿条件、試薬量の条件などを整え、ボックス法として二酸化炭素の透過性を定量的に評価できる方法を提案した。

第4章では、仕上材の透湿性に関する実験として、JIS法に準拠した透湿カップ法を用いた透湿性の評価を行うとともに、二酸化炭素透過性のデータと比較し仕上材の種類・形状が透湿性、二酸化炭素透過性に与える影響を考察した。

第5章では、仕上材の促進中性化試験を行い仕上材の中性化抑制効果について評価を行いその傾向を明らかにした。また、今回評価を行った仕上材の中性化深さの推移より、仕上材の中性化抑制効果を中性化率として示した。また、薄塗材 E など製品ごとに中性化率が異なることを明らかにし、仕上材の製品ごとに中性化抑制効果を確認する必要性を示した。

第6章では、含水率の測定を行いながら、仕上材の促進中性化試験を行った。促進中性化試験の中でコンクリートの含水率が増加することを確認した。また、湿度条件ごとにコンクリートの平衡含水率の測定を行い、促進試験中のコンクリートの含水率が高湿度条件下でのコンクリートの含水率のように高い状態で推移していることを確認した。

第7章では、第3章から6章までの結果を踏まえ、促進中性化試験における仕上材の中性化抑制効果と仕上材の透湿性および二酸化炭素透過性との関係をもとめ、透湿性と仕上材の中性化抑制効果には全体的に高い相関を示すことを明らかにした。

また、仕上材の透湿性がコンクリートの中性化抑制効果への影響を及ぼす過程として、促進中性化試験におけるコンクリートの含水率と透湿性とに相関があることを明らかにした。また、促進中性化試験においては中性化のなかで発生する水分の影響を受け、透湿性の寄与が大きくなることを確認した。

第8章では、総括として各章で得られた知見をとりまとめ今後の課題を示した。

建築用仕上塗材の二酸化炭素透過性及び透湿性が 中性化抑制効果に与える影響に関する研究

目次

第1章 序論

- 1.1 研究の背景と目的
 - 1.2 本研究が取り扱う範囲
 - 1.3 本研究の構成と概要
- 第1章の参考文献

第2章 仕上材の中性化抑制効果及び評価方法に関する既往研究調査

- 2.1 はじめに
 - 2.2 仕上材の種類及び生産量に関する調査
 - 2.3 仕上材の中性化抑制効果に関する既往研究調査
 - 2.3.1 文献調査の範囲
 - 2.3.2 仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する既往研究調査
 - 2.3.3 仕上材の気体透過性と中性化抑制効果に関する既往研究調査
 - 2.3.4 仕上材の中性化抑制効果を評価した中性化予測式に関する既往研究調査
 - 2.4 ガス透過性試験装置による透気性試験
 - 2.5 まとめ
- 第2章の参考文献

第3章 仕上材の二酸化炭素透過性の測定方法に関する検討

- 3.1 はじめに
- 3.2 カップ法による仕上材の二酸化炭素透過性の測定
 - 3.2.1 検討の概要
 - 3.2.2 実験因子と水準
 - 3.2.3 仕上材の種類及び塗装仕様と試験片
 - 3.2.4 試験方法
 - 3.2.5 評価方法
 - 3.2.6 実験結果と考察
- 3.3 ボックス法による仕上材の二酸化炭素透過性の測定
 - 3.3.1 検討の概要
 - 3.3.2 実験因子と水準

3.3.3 仕上材の種類及び塗装仕様と試験片

3.3.4 試験方法

3.3.5 評価方法

3.3.6 実験結果と考察

3.4 まとめ

第3章の参考文献

第4章 仕上材の透湿性と気体透過性に関わる実験と考察

4.1 はじめに

4.2 仕上材の透湿性の評価

4.2.1 検討の概要

4.2.2 仕上材の種類及び塗装仕様と試験片

4.2.3 カップ法による透湿度の測定結果

4.3 仕上材の透湿性と二酸化炭素透過性に関して

4.3.1 仕上材の透湿度と二酸化炭素透過度の比較

4.3.2 仕上材の塗料構成からみる透湿性と二酸化炭素透過性への影響

4.3.3 仕上材の透湿度と中性化率の比較

4.4 まとめ

第4章の参考文献

第5章 仕上材の中性化抑制効果に関する実験

5.1 はじめに

5.2 実験概要

5.2.1 実験因子と水準

5.2.2 試験体の作製方法

5.2.3 塗装仕様

5.2.4 中性化深さの測定方法

5.3 実験結果と考察

5.3.1 促進中性化試験における中性化深さの傾向

5.3.2 仕上材の中性化抑制効果の評価

5.3.3 仕上材の中性化速度係数と中性化率

5.3.4 仕上材の中性化率の文献値との比較

5.3.5 仕上材が中性化抑制効果に及ぼす樹脂量の影響

5.4 まとめ

第5章の参考文献

第6章 仕上材の促進中性化試験における含水率の影響

6.1 はじめに

6.2 実験概要

6.2.1 試験体について

6.2.2 促進中性化試験と含水率の測定方法

6.3 実験結果と考察

6.3.1 中性化深さの測定結果

6.3.2 促進中性化試験における含水率の推移

6.3.3 コンクリートの含水率と中性化率の関係

6.4 まとめ

第6章の参考文献

第7章 ボックス法及び透湿カップ法による仕上材の透気性が中性化抑制効果へ与える影響

7.1 はじめに

7.2 仕上材の二酸化炭素透過性及び透湿性と促進中性化試験における中性化率との関係

7.3 促進中性化試験における透湿性とコンクリートの含水率

7.4 促進中性化試験におけるコンクリートの含水率と中性化率

7.5 まとめ

第7章の参考文献

第8章 総括

8.1 各章のまとめ

8.2 今後の課題と展望

謝辞

付属資料 ボックス法による仕上材の二酸化炭素透過度の測定方法（案）

（発表論文）

第 1 章

序論

第 1 章 序論

1.1 研究の背景と目的

地球環境問題等を背景とし、スクラップアンドビルドからの脱却、持続可能な循環型社会へと移行するため、建築物の耐久性を向上させ、長期耐用化していくことは重要な課題となっている。

日本ではこれまで鉄筋コンクリート造建築物は、機能、性能の陳腐化や経済的な判断により取り壊されているのが大部分であり¹⁻¹⁾、建築物の物理的な劣化が原因で壊されることはまれであった。長期耐用化をはかり、ストックの有効活用が必要とされる現在、100年以上のタイムスパンで鉄筋コンクリート造の耐用を保っていく技術が必要とされてきている。

しかしながら鉄筋コンクリート造建築物の歴史はようやく 100 年を経過したばかりであり、こういう条件であれば確実に 100 年以上はもつという技術は未だ実証されていないのが現状である。そのため、100 年以上もたせるためには、鉄筋コンクリート造の劣化を適切に把握し、予測を行い、適切な補修を行っていくことが重要である。

鉄筋コンクリート構造物の劣化は二酸化炭素、塩化物イオン、酸素、水などの劣化因子が、コンクリートの表面から内部へと移動することに起因している場合が多く、中性化、塩害、アルカリシリカ反応、凍害などを引き起こす。

特に鉄筋コンクリート造の物理的な寿命は、コンクリートの中性化とそれに伴う鉄筋腐食により論じられることが多い。鉄筋コンクリート造は、圧縮に強く引張に弱いコンクリートを引張に強い鉄筋で補強した複合構造である。健全なコンクリートの内部環境は、セメントの水和反応で生成される水酸化カルシウムにより強いアルカリ性 (pH12~13) を示す。鋼材は pH が 10 以上の場合、アルカリと溶存酸素の存在によって不動態化傾向を示す。これにより健全なコンクリート中では鉄筋は表面に不動態被膜が形成され鉄筋を腐食から保護している。やがてコンクリート表面より空気中の二酸化炭素が浸透・作用することにより、徐々にコンクリートのアルカリ性が失われ pH10 以下となると、鉄筋の不動態被膜が破壊され保護機能が失われてしまう。これが中性化である。中性化が鉄筋位置まで進行したコンクリート中にある鉄筋は、そのアルカリ性による保護効果を失い、徐々に酸素と水による鉄筋腐食が生じる。鉄筋の腐食反応は膨張反応であり、約 2.5 倍もの体積膨張を生ずることになる。これにより、コンクリートにひび割れや表面の剥離が生じさらに鉄筋の腐食速度が加速し、外観及び機能の低下、かぶり部分のコンクリートの剥落等の事故につながるようになる。また腐食した領域の鉄筋は力を受け持たず、コンクリート間と付着力も低下するため、腐食した鉄筋コンクリート構造物の耐荷力は低下する。

コンクリートの中性化は、材料の性質上、必ず起こる劣化現象である。そうした観点から中性化を把握し、制御していくことが、鉄筋コンクリート造の物理的な寿命を延ばすことにつながる重要な技術といえる。

また、性能規定化の流れの中で、建築物の耐久性にも性能明示が要求されつつある。耐久性の性能明示や建築物の長寿命化に対して、企画・設計の段階から建築物の耐用年数を明確にして、共用期間を通して建物の安全性や使用性、美観などの性能を確保するために、その間の建物の劣化進行を予測する技術が必要である。このような背景の中、日本建築学会より、性能設計の概念を取り入れた「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)・同解説」¹⁻²⁾ が発刊され耐

久設計法の基本的な概念、方向性が示されている。

鉄筋コンクリート造建築物の多くは、外壁に仕上げが施されており、塗料及び建築用仕上塗材（以下、仕上材）はもともと一般的な外装仕上材である。仕上材には意匠性、美観性の他、躯体の保護機能が求められる場合がある。仕上材の保護機能としては主に防水が挙げられるが、この他にも鉄筋コンクリート造建築物の最も基本的な耐久性の評価指標であるコンクリートの中性化を抑制する性能を有することが報告^{1・3)}されている。また、仕上材の種類ごとに中性化の抑制効果が異なることも報告されている。コンクリート造建築物の長寿命化に要求される耐久性・耐用性に答えるためには、コンクリートの材料自体の品質とともに仕上材の選定が重要となる。

しかしながら市場には多種・多様な仕上材があり、それぞれの材料規格での分類・種類における中性化抑制効果の評価が不十分な現状では、製品ごとの中性化抑制効果の評価が必要である。

これまでも仕上材の中性化抑制効果を評価する方法は種々検討^{1・4~1・8)}されている。しかしながら既往の方法には、それぞれ一長一短があり、多種多様な仕上材の中性化抑制効果を効率よく定量的に評価するには十分とはいえない。

本研究では、以上のような点をふまえ、鉄筋コンクリート造の劣化現象として最も一般的と考えられるコンクリートの中性化に関して、仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果を迅速かつ簡易に評価するべく、仕上材の二酸化炭素透過性の定量的な測定方法の開発に取り組んだ。併せて、種々の仕上材において二酸化炭素透過性及び透湿性の測定を行い、コンクリートの促進中性化試験による中性化抑制効果に与える二酸化炭素透過性および透湿性の影響について検討を行った。検討の中で促進中性化試験中のコンクリートの含水率について着目し、実際に測定を行い、促進中性化試験の試験結果と仕上材の二酸化炭素透過性及び透湿性との関係性を示している。

1.2 本研究が取り扱う範囲

(1) 仕上材

JIS A 6909「建築用仕上塗材」をはじめとする各種塗装材料及び JIS K 5663「合成樹脂エマルジョンペイント」及び JIS K 5670「アクリル樹脂系非水分散形塗料塗り」に規定される塗料を主な対象とし、建築用仕上塗材及び塗料を含め本研究では仕上材と定義した。中性化に対して有効な仕上材としてはタイル、モルタル仕上げなども挙げられるが、本研究では対象外とした。

(2) 劣化現象

仕上材の鉄筋コンクリート造に対する保護機能は、中性化抑制効果の他、耐久性評価の対象となる塩分の浸透性についても抑制効果を有すると報告される。本研究としては、仕上材の中性化抑制効果について取り扱い、鉄筋コンクリート造躯体における、それ以外の乾燥収縮、凍害、塩害、アルカリ骨材反応などの劣化については対象外とする。仕上材の劣化についてもチョーキング・ひび割れ・剥がれなど考えられるが、本研究においては、仕上材の根源的な中性化抑制効果の評価を行うことを目的として検討の対象外とした。

1.3 本研究の構成と概要

本研究では、鉄筋コンクリート造の劣化現象として最も一般的と考えられるコンクリートの中性化に関して、仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果を迅速かつ簡易に評価するべく、仕上材の二酸化炭素透過性の定量的な測定方法の開発に取り組んだ。併せて、種々の仕上材において二酸化炭素透過性及び透湿性の測定を行い、コンクリートの促進中性化試験による中性化抑制効果に与える二酸化炭素透過性および透湿性の影響について検討を行った。検討の中で促進中性化試験中のコンクリートの含水率について着目し、実際に測定を行い、促進中性化試験の試験結果と仕上材の二酸化炭素透過性及び透湿性との関係性を示している。

第1章は序論であり、本研究における研究の背景と目的を示した。また、本研究が対象とする仕上材の範囲について示した。

第2章では、主に仕上材の中性化抑制効果に関する既往文献、中性化抑制効果の評価方法に関する既往文献の調査を行った。調査の結果、仕上材の多様性から製品ごとの抑制効果を評価するため、簡易で迅速な評価方法を提案する必要性を見出した。文献調査から仕上材の二酸化炭素の透過性を評価する方法を確立する必要性、二酸化炭素透過性と透湿性との中性化抑制効果へ及ぼす影響を把握する必要性を確認した。

第3章では、カップ法、ボックス法を用いて仕上材の二酸化炭素透過性を評価する方法の開発及び試験を行った。二酸化炭素の吸収剤として使用した水酸化カルシウムの反応に水分が大きく影響することを明らかにし、調湿条件、試薬量の条件などを整え、ボックス法として二酸化炭素の透過性を定量的に評価できる方法を提案した。

第4章では、仕上材の透湿性に関係する実験として、JIS Z 0208 に準拠した透湿カップ法を用いた透湿性の評価を行うとともに、二酸化炭素透過性のデータと比較し仕上材の種類・形状が透湿性、二酸化炭素透過性に与える影響を考察した。

第5章では、仕上材の促進中性化試験を行い仕上材の中性化抑制効果について評価し傾向を明らかにした。また、今回評価を行った仕上材の中性化深さの推移より、仕上材の中性化の抑制効果を中性化率として示した。また、薄塗材 E など製品ごとに中性化率が異なることを明らかにし、仕上材の製品ごとの中性化抑制効果を確認する必要性を明らかにした。

第6章では、含水率の測定を行いながら、仕上材の促進中性化試験を行った。促進中性化試験の中でコンクリートの含水率が増加することを確認した。また、湿度条件ごとにコンクリートの平衡含水率の測定を行い、促進試験中のコンクリートの含水率が高湿度条件下でのコンクリートの含水率のように高い状態で推移していることを確認した。

第7章では、第3章から6章までの結果を踏まえ、促進中性化試験における仕上材の中性化抑制効果と仕上材の透湿性および二酸化炭素透過性との関係をもとめ、透湿性と仕上材の中性化抑制効果には全体的に高い相関を示すことを明らかにした。

また、仕上材の透湿性がコンクリートの中性化抑制効果への影響を及ぼす過程として、促進中性化試験におけるコンクリートの含水率と透湿性とに相関があることを明らかにした。また、促進中性化試験においては中性化のなかで発生する水分の影響を受け、透湿性の寄与が大きくなることを確認した。

第8章では、総括として各章で得られた知見をとりまとめた。

本研究の構成概要を図 1.3.1 に示す。

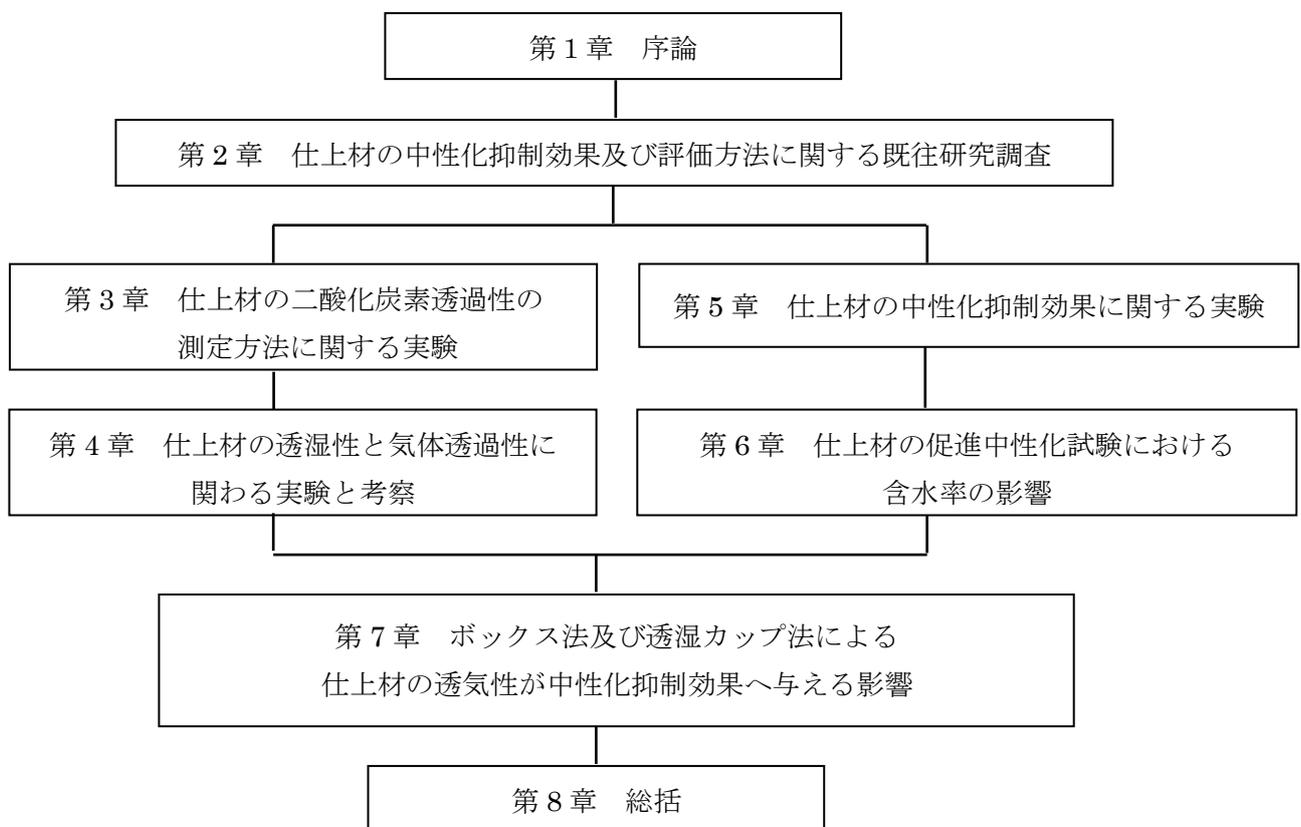


図 1.3.1 本研究の構成概要

参考文献

- 1-1) 例えば、建設省総合技術開発プロジェクト「社会資本の維持更新・機能向上技術の開発」、1993.3
- 1-2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説、2004
- 1-3) 建設大臣官房技術調査室監修、(財)国土開発技術センター建築物耐久性向上普及委員会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術、技報堂出版、1986.6
- 1-4) 千歩修, 馬場明生, 小俣一夫, 松島泰幸：コンクリートの外装仕上げ材料の躯体保護効果(水分移動性状と中性化抑制効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.159-160, 1990
- 1-5) 宮木宏明, 金津貢一：外装仕上塗材の気体透過性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.635-636, 1986.8
- 1-6) 須田ゆうみ, 小村理恵：建築用外装仕上塗材の透湿性と中性化抑制機能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1001-1002, 1996.9
- 1-7) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子：建築用仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第 609 号, pp.23-30, 2006.11
- 1-8) 唐沢智之, 古賀一八, 浦川和也, 河野政典：仕上塗材の中性化抑制効果と透気性に関する考察, コンクリート工学年次講演会論文集 vo30, No.1, pp645-650, 2008

第2章

仕上材の中性化抑制効果及び
評価方法に関する既往研究調査

第2章 仕上材の中性化抑制効果及び評価方法に関する既往研究調査

2.1 はじめに

本章では、仕上材の中性化抑制効果について検討するにあたり、一般的に使用されている仕上材の現状を把握するため仕上材の種類毎の生産量の調査を行った。また、仕上材の中性化抑制効果及び仕上材の透湿抵抗、透気抵抗、二酸化炭素透過性に関する既往の研究を調査した。

調査の結果から、現在の仕上材の中性化抑制効果に関する研究段階を把握し、建築物の耐久性評価に仕上材による中性化抑制効果を加味するために必要な研究項目、研究範囲の検討を行った。

2.2 仕上材の種類及び生産量に関する調査

建築用仕上塗材は比較的厚膜で施工される材料で、模様、色、機能など多種多様であり、JIS A 6909に規定されている。その種類は30種類以上に上り、外装向けの仕上塗材に限っても22種類が規定されている。その施工方法も多様で吹付け、ローラー塗り、コテ塗りなどで施工され、立体的な造形性をもつ模様に仕上げる事が出来る材料である。

塗料は、数十マイクロン単位での施工が行われるごく薄く下地表面を被覆するものであるが、使用される樹脂の種類、反応硬化の種類、塗面のつやの程度などによって様々に分類される。

多様な仕上材の現状を日本建築仕上材工業会の統計²⁻¹⁾をもとに建築用仕上塗材の生産数量から確認した(表2.2.1)。2014年の生産量の実績によれば、上位8種の材料で90%近い占有率を示す。このうち生産量が最も多い可とう形改修塗材Eは、2003年のJIS A 6909の改訂から加えられた改修を対象とした、塗替え用の塗材であり、既存の塗膜上に施工を行う材料となり、近年の改修市場の活況がうかがえる。また、上位8種材料の中で、厚塗材Eや石材調塗材は、非常に厚膜で施工するため、生産量としては多いが施工面積から見ると占有率は低いものとなる。よって市場に多く流通している建築用仕上塗材としては、外装薄塗材E、複層塗材E、防水形複層塗材E、防水形外装薄塗材E、可とう形外装薄塗材Eの5種類に絞ることが出来る。これら5種類の生産量を併せると全体の約半数を占めることになる。

しかし、外装薄塗材Eにおいては、いわゆる砂壁状の模様を付ける吹付け材のリシン、着色骨材を使用した吹付け材のスキン、ローラー仕上げを可能にしたローラーリシンなどがあり、同じ種類に分類される材料の中でも多様を極める。そのため材料種別の評価だけではなく製品種類ごとの個別の性能評価も重要になると考えられる。

他にも、特徴ある建築用仕上塗材としてポリマーセメント系の材料があり、自身のセメント成分によって中性化の進行を遅延させ、高い中性化抑制効果が期待される可とう形複層塗材CEなどがある。

一方で、建築用塗料における種類別の生産量を統計データから知ることは難しい。品種別生産量の統計が日本塗料工業会²⁻²⁾によりまとめられているが建築、構造物、船舶、道路車両、機械等非常に広範で使用されている全体の統計データであり建築分野のみの統計ではないが、建築部門に占める比率は高く、この統計データにも大きく影響を与えていると考えられる。2014年度の塗料の生産数量においては、水系であるエマルジョンペイント(EP)の比率が12.5%と高い比率を示している。

以上より、本検討では建築用仕上塗材から外装薄塗材 E として、リシン、スキン、ローラーリシンを、複層塗材 E、防水形複層塗材 E、防水形薄塗材 E、可とう形薄塗材 E、可とう形複層塗材 CE を、塗料からはエマルジョンペイントをつやの有無と樹脂種別から選択し主な評価材料とした。

表 2.2.1 2014 年 建築用仕上塗材の生産数量（外装用仕上塗材）

種類*	呼び名	生産量(t)
1 可とう形合成樹脂エマルジョン系改修用仕上塗材	可とう形改修塗材 E	65,270
2 合成樹脂エマルジョン系薄付け仕上塗材	薄塗材 E	36,762
3 合成樹脂エマルジョン系複層仕上塗材	複層塗材 E	33,774
4 防水形合成樹脂エマルジョン系複層仕上塗材	防水形複層塗材 E	18,068
5 防水形外装合成樹脂エマルジョン系薄付け仕上塗材	防水形外装薄塗材 E	11,724
6 合成樹脂エマルジョン系厚付け仕上塗材	厚塗材 E	10,532
7 可とう形外装合成樹脂エマルジョン系薄付け仕上塗材	可とう形外装薄塗材 E	10,366
8 石材調仕上塗材	石材調塗材	9,240
9 セメント系厚付け仕上塗材	厚塗材 C	4,165
10 反応硬化形合成樹脂エマルジョン系複層仕上塗材	複層塗材 R E	3,091
11 可とう形反応硬化形合成樹脂エマルジョン系改修用仕上塗材	可とう形改修塗材 R E	3,075
12 けい酸質系複層仕上塗材	複層塗材 S i	2,664
13 防水形反応硬化形合成樹脂エマルジョン系複層仕上塗材	防水形複層塗材 R E	1,946
14 セメント系薄付け仕上塗材	薄塗材 C	1,165
15 合成樹脂溶液系薄付け仕上塗材	薄塗材 S	1,022
16 けい酸質系薄付け仕上塗材	薄塗材 S i	274
17 可とう形外装けい酸質系薄付け仕上塗材	可とう形外装薄塗材 S i	214
18 ポリマーセメント系複層仕上塗材	複層塗材 C E	147
19 可とう形ポリマーセメント系改修用仕上塗材	可とう形改修塗材 C E	104
20 防水形ポリマーセメント系複層仕上塗材	防水形複層塗材 C E	78
21 可とう形ポリマーセメント系複層仕上塗材	可とう形複層塗材 C E	68
22 けい酸質系厚付け仕上塗材	厚塗材 S i	24
23 防水形合成樹脂溶液系複層仕上塗材	防水形複層塗材 R S	4
建築用仕上塗材	合計	213,777
上位 8 種 占有率		91.6%

*建築用仕上塗材の種類は、石材調仕上塗材を除き JIS A 6909 に準じたもの。

2.3 仕上材の中性化抑制効果に関する既往研究調査

2.3.1 文献調査の範囲

本論文の主とする研究対象は、仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果である。また、コンクリートの中性化抑制効果には気体透過性が大きく影響を与えることが分かっている。

このため文献調査は、仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果及び仕上材の二酸化炭素透過性及び透湿性などの気体透過性と中性化抑制効果に関する研究、仕上材の中性化抑制効果を評価した中性化予測式に関する研究を中心に、中性化抑制効果に関する研究について実施した。

2.3.2 仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する既往研究調査

仕上材の中性化抑制効果について、社団法人建築業協会（BCS）の研究会による、既往の文献調査と実態調査に基づく研究成果²⁻³⁾が、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009」²⁻⁴⁾に記載されている(表 2.3.1)。ここには、仕上材の種類による中性化の差異が大きいことが示されている。JASS 5において、JIS A 6909 の複層塗材、厚付け仕上塗材及び塗膜防水材は中性化率が低く高い中性化抑制効果を有しているとされる。一方で、薄塗材及びエマルジョンペイント、セメント系の下地調整材は中性化率が高く、コンクリートの最小かぶり厚さの設計において、耐久性上有効な仕上材とされない。市場でよく流通している仕上材は中性化率が高いことがわかった。

表 2.3.1 既往文献における各種仕上材の中性化率²⁻⁴⁾

分類	分類別 中性化率 ⁽¹⁾	仕上げの種類	種類別 中性化率 ⁽²⁾
複層塗材	0.32	複層塗材 E	0.22
		複層塗材 RE	0.30
		防水形複層塗材 E	0.40*
		防水形複層塗材 RE	0.08
		可とう形複層塗材 CE	0.00
		防水形複層塗材 RS	0.00
薄付け仕上塗材	1.02	外装薄塗材 E	1.02
		可とう形外装薄塗材 E	0.86
		防水形外装薄塗材 E	0.68
厚付け仕上塗材	0.35	外装厚塗材 C	0.31
		外装厚塗材 E	0.35
塗膜防水材	0.10	アクリルウレタン系	0.00
		アクリルゴム系	0.12*
		アクリル系	0.32*
		ウレタンゴム系	0.00
		外装塗膜防水材	0.09
		ウレタン系	0.00
塗料	0.81	エナメル塗り	0.12
		エマルジョンペイント塗り	0.64
		ワニス塗り	0.81
下地調整材	0.87	セメント系 C-1	0.61
		セメント系厚塗材 CM-1.2	0.87
		合成樹脂エマルジョン系 E	0.29

- [注] (1) 表中の数字は中性化率の最大値を示す。
 (2) 種類別中性化率のうち、分類別中性化率で外れ値となったものには、*を付けた。
 (3) 防水形複層塗材Eは、促進試験で所定の1/2の厚さで試験したものであるため、安全側の数値である。

促進条件における仕上材の中性化抑制効果に関する研究では、実際にコンクリート表面に仕上材を施工して促進中性化試験を実施し、各仕上材の中性化抑制効果を評価している例が多い。

これらの方法はコンクリートにおける中性化深さを実際に測定できるため二酸化炭素の拡散傾向を評価しやすい。例えば、福島ら²⁻⁵⁾、向井ら²⁻⁶⁾、千歩ら²⁻⁷⁾、土江ら²⁻⁸⁾においても仕上塗材をコンクリート表面に施して促進中性化試験を実施し、各仕上塗材の中性化抑制効果を評価している。福島らの試験を除き、いずれも10×10×40cmのコンクリートを基材として用いている。

促進試験の条件としては、温湿度が20もしくは30℃で60%R.H.となり、二酸化炭素濃度は5%で評価されている。これらの試験体形状及び促進条件は現状JIS A 1153に規定されるコンクリートの促進中性化試験方法の条件と同様であるため、本検討においてはJISに準拠して仕上材によるコンクリートの中性化試験を実施した。

表2.3.2に試験体形状及び促進試験条件、試験結果を示す。ここでの中性化率は促進試験最終材齢の中性化深さの測定値から求めた。

表 2.3.2 既往文献における仕上塗材を施したコンクリートの中性化率

	試験体形状	促進試験条件			薄付仕上塗材			複層仕上塗材			
		温度 湿度	CO ₂ 濃度	材齢	薄塗材E	可とう形 薄塗材E	防水形 薄塗材E	複層塗材CE (マスキックCE)	複層塗材E	複層塗材RE	防水形 複層塗材E
福島ら ²⁻⁵⁾	10×10×13cm	30℃ 60%	5%	8か月	1.06	-	-	0.37	0.36	0.5	-
向井ら ²⁻⁶⁾	10×10×40cm	30℃ 60%	5%	3か月	-	0.17,0.10	0.08	0.12	0.04	-	0.09
千歩ら ²⁻⁷⁾	10×10×40cm	20℃ 60%	5%	6か月	0.47	-	0	0.34	0	0.18	0
土江ら ²⁻⁸⁾	10×10×40cm	20℃ 60%	5%	1ヶ月	0.59	-	0.15	-	0.15	-	0.09

塗装仕様、試験条件の違いにより変化するとも考えられるが、福島らと千歩らの試験による複層塗材Eの試験結果は同様の数値を示すのに対し、薄塗材Eや複層塗材Eの数値は大きく異なるなど、同じ種類の仕上材を評価してもそれぞれ異なった挙動を示すことが分かる。使用する製品によって、分類・種類が同じであっても中性化率の傾向が変わっているとも考えられる。従来、JIS A 6909などの材料規定によって分類された製品系統で評価・管理がされてきたが、製品ごとの中性化率の性能評価も必要であろう。今後、コンクリートの長期耐用化をかなえるためにも、仕上材を製品ごとに性能評価を行い、その中性化抑制効果を知ることは非常に重要である。

しかしながら、JISによるコンクリートの促進中性化試験方法や既往文献での試験時間を見ると、仕上材の中性化抑制効果を評価するためには、26週（6か月）程度を要している。その試験体も非常に大きく仕上材メーカーが簡易に行える試験方法とは言い難い。

市場に多数ある仕上材の製品ごとの中性化抑制効果を評価するには、より簡易で迅速に評価する方法が必要であると考えられる。

2.3.3 仕上材の気体透過性と中性化抑制効果に関する既往研究調査

仕上塗材による中性化抑制効果では透湿性、二酸化炭素透過性、空気透過性などの気体透過性との相関が指摘されている。ここでは気体透過性と中性化抑制効果について検討された報告について調査を行った。主な研究の内容を以下に示す。

(1)笠井らは 2-9), 2-10), 2-11)、コンクリートの中性化速度はコンクリートへの二酸化炭素の拡散速度によって決まり、鉄筋の錆の成長速度は酸素の到達量に支配され透気性と密接な関係にあると考え、仕上塗材を塗装した場合の透気性の測定を行っている。

(2)千歩ら 2-7), 2-12)の研究によると、吸湿試験及び吸い上げ吸水試験、放湿試験を行うとともに、中性化促進試験（温度 30℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%）を行い、透湿度と中性化速度係数の間に相関が見られたことを示している。

(3)宮木ら 2-13)の研究によると、中性抑制効果について仕上塗材の気体透過性及び水蒸気透過性に着目し、ガス透過性測定装置により各種仕上塗材の二酸化炭素透過性及び水蒸気透過性を測定している。測定方法は各種仕上材の塗膜をフリーフィルムとして作成しフィルム両面に圧力差をかけ、差圧の増加率に応じて透過係数を求める方法である。また、促進中性化試験（温度 30℃、湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%）も実施され二酸化炭素透過性との比較も行っている。その結果、二酸化炭素透過性と中性化深さには比例関係があり、仕上塗材の二酸化炭素の透過性により中性化深さを予測することが出来ることが示されている。

(4)本橋ら 2-14), 2-15)の研究においてもガス透過性測定装置により仕上塗材の空気透過性の測定が行われている。また、空気透過性とカップ法（JIS Z 0208）によるデータ、宮木らの水蒸気透過係数の値がオーダー的に合致していることを示すとともに、ウェザーメーターによる促進劣化処理を実施した防水形の仕上塗材において空気透過性にほとんど変化がないことを示している。

(5)須田ら 2-16)の研究において、各種仕上塗材について透湿性と中性化抑制効果を確認するためカップ法（JIS Z 0208）による透湿度試験と促進中性化試験（温度 20℃、湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%）を行っている。尚、透湿度試験の試験体は塗膜のフリーフィルムが使用されている。

(6)長谷川ら 2-17)の研究において、吸い上げ吸水試験、仕上学会法 2-18)による透湿度試験及び透気試験、促進中性化試験が行われている。文献値及び実験値より透湿量とコンクリートの中性化抵抗との間に相関を見出している。尚、透湿度試験及び透気試験における試験体は、ろ紙を基材として、仕上塗材を塗装した試験体を用いて行われている。

(7)唐沢ら 2-19)の研究において仕上塗材および下地調整材を施工したコンクリートの促進中性化

試験とトレント法による透気試験を行い、仕上塗材が施工されている場合の透気係数と中性化率に高い相関があることを見出している。但し、実建物データに見られるように仕上塗材の凹凸模様により空気漏れがおり測定誤差を生じることがある。

(8)井原ら²⁻²⁰⁾の研究では二酸化炭素の透過性をプラスチック・フィルム及びシート・ガス透過度試験方法-第1部：差圧法（JIS K 7126-1）に準拠して評価しており、複層の仕上塗材と塗膜防水材の促進中性化試験の結果に相関を見出している。

以上の報告を、透気性の評価項目、試験体の形状及び測定方法などの条件で表 2.3.3 まとめた。

表 2.3.3 既往文献における仕上塗材の気体透過性の評価方法

	透気性評価項目	試験体の形状	測定方法	圧力条件
笠井ら ^{2-9),2-10),2-11)}	空気透過性	ケイ酸カルシウム板及びスレート板に塗装	透気試験機	加圧
千歩ら ^{2-7),2-12)}	透湿性	コンクリートに塗装	吸放湿試験、吸い上げ吸水試験	大気圧
宮木ら ²⁻¹³⁾	二酸化炭素透過性	フリーフィルム	ガス透過性測定装置	加圧
	水蒸気透過性(透湿性)	フリーフィルム		
本橋ら ^{2-14),2-15)}	空気透過性	フリーフィルム	ガス透過性測定装置	加圧
	透湿性	不明	JIS Z 0208に準拠	大気圧
須田ら ²⁻¹⁶⁾	透湿性	フリーフィルム	JIS Z 0208に準拠	大気圧
長谷川ら ²⁻¹⁷⁾	透湿性	ろ紙上に塗装	仕上学会法	大気圧
	空気透過性	ろ紙上に塗装	透気試験機	加圧
唐沢ら ²⁻¹⁹⁾	空気透過性	コンクリート	トレント法	減圧
井原ら ²⁻²⁰⁾	二酸化炭素透過性	フリーフィルム	JIS K 7126-1 プラスチックフィルム及びシート -ガス透過度試験方法- 第一部:差圧法	減圧

仕上材の透気性と中性化抑制効果には相関があることは上述するように多数の報告が行われている。

評価される気体としては、透湿性もしくは水蒸気透過性、二酸化炭素透過性、空気透過性の3種類が行われている。試験体の形態については、フリーフィルムであったり、ろ紙上に塗装していたり、コンクリートやケイ酸カルシウム板などの基材に塗装しているものがある。

また、測定の際の圧力条件においても塗膜に圧力がかかるもの、大気圧下で行うことができるものがある。

上述した既往文献での仕上材の透気性の測定方法は、大きく分けて図 2.3.1 に示すような体系として分類と整理ができる。

透湿性については、カップ法や仕上学会法及びガス透過性測定装置で測定が可能となる。

コンクリートの中酸化に直接的に影響を与える二酸化炭素の透過性を評価する方法はガス透過性測定装置のみであり、特殊な試験装置を必要として汎用的な測定方法とは言えない。また、圧力条件下での測定しかできない。

空気透過性についても、ガス透過性測定装置かトレント法など、特殊な試験装置を必要として圧力条件下でしか測定できない。大気圧下で気体透過性を評価する方法は、カップ法もしくは仕上学会法などの透湿性の評価のみであることが分かる。

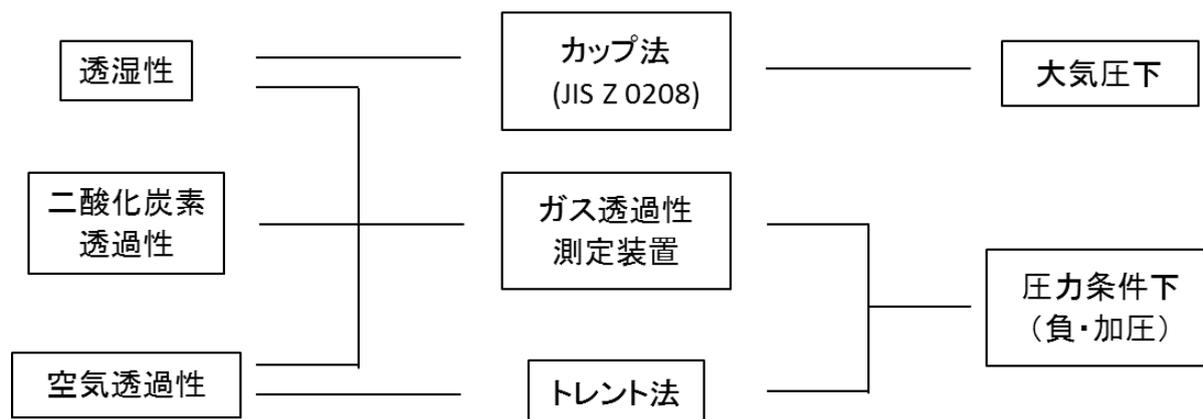


図 2.3.1 仕上材の透気試験法の分類

2.3.4 仕上材の中性化抑制効果を評価した中性化予測式に関する既往研究調査

仕上材による中性化抑制効果をコンクリートの中性化予測式に組み込む方法の一つとして、中性化速度係数へのかけ算の組み込みがある。嵩、和泉ら²⁻²¹⁾は経年 RC 構造物の中性化調査から仕上材ごとの中性化率を導き、仕上材の施されていないコンクリートの中性化速度にこの中性化比率を乗じて、仕上塗材が施された場合の中性化速度として、中性化深さを算出する方法を報告している。式(2.3.1、2.3.2)尚、嵩らの報告には仕上材の一つとして塗料の中性化比率は示されているが、建築用仕上塗材は示されていない。

$$C = A\sqrt{t} \quad (2.3.1)$$

$$A = \alpha \times \beta \times \gamma \quad (2.3.2)$$

ここに、

C : 中性化深さ

A : 定数

t : 経過年数

α : 環境条件による係数

β : 仕上材による係数 (モルタル :0.28、ペイント :0.8、タイル0.07)

γ : コンクリートの内的因子による係数

また、福島ら²⁻²²⁾は、有機高分子系仕上塗材の理論的解析に基づいて、中性化速度係数と中性化遅延深さの両方を考慮し、中性化進行を表す方法を提案している。式(2.3.3)に示す。各係数は高分子仕上塗材の物性定数である仕上材中の二酸化炭素の有効拡散係数、仕上材表面における二酸化炭素の平衡定数、仕上材の厚さなどからあらわされる。

$$C = A\sqrt{t} + B \quad (2.3.3)$$

ここに、

C : 中性化深さ(mm)

A : 中性化速度係数

t : 材齢

B : 中性化深さに対応するパラメーター(mm)

また、高田ら²⁻²³⁾は、促進試験の結果に基づき、二酸化炭素濃度がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響として式(2.3.4)を提案している。

$$D = (0.742 - 0.224 \log C) A \sqrt{\frac{C}{0.07} t} \quad (2.3.4)$$

ここに、

D : 中性化深さ (mm)

A : 中性化速度係数

t : 経過時間

C : 二酸化炭素濃度

馬場、千歩²⁻²⁴⁾らは、仕上塗材の効果について表面層をもつコンクリートとして、仕上塗材による中性化進行の遅延傾向を深さ（定数項）で評価する方法を提案している。式（2.3.5）は仕上材自体が中性化するセメント系の仕上材の場合であり、式（2.3.6）は非セメント系仕上材の場合である。

$$C = A(\sqrt{t} - R) \quad (2.3.5)$$

$$C = A(\sqrt{t + R^2} - R) \quad (2.3.6)$$

ここに、

C : 中性化深さ

A : コンクリートの中性化速度係数 (mm/年^{1/2})

t : 経過年数

R : 各仕上材における中性化抵抗 (年^{1/2})

また、長谷川ら²⁻¹⁷⁾は、促進中性化試験において仕上塗材の透湿性により、馬場らの提案した式（2.3.5）における中性化抵抗を導く事ができ、中性化抑制効果を予測できるとしている。式（2.3.7）に示す。

$$R = \frac{\alpha}{w} \quad (2.3.7)$$

ここに、

R : 促進中性化試験による中性化抵抗(年^{1/2})

α : 実験定数 (137.5)

w : 透湿量(g/m²・24h JIS Z 0208・20°C相当)

2.4 ガス透過性試験装置による透気性試験

2.3.3 節において、ガス透過性試験装置を用いることによって、仕上塗材の透湿性、二酸化炭素透過性、空気透過性の3種の透気性について評価されていることが分かった。

そこで写真 2.4.1 に示したガス透過性の試験装置にて、二酸化炭素透過性と水蒸気透過性（透湿性）を測定した。



試験装置全景

(手前：ガス分析装置、奥：透過装置)



透過装置

(中央部：試験体ホルダー)

写真 2.4.1 ガス透過性試験装置の写真

評価を行った材料は、JIS K 5660、JIS K 5663、JIS K 5670 に規定される塗料及び、JIS A 6909 の建築用仕上塗材に規定される薄付け仕上塗材と複層仕上塗材の中から選択した。外装薄塗材Eについては、いわゆるリシン、スキン、ローラーリシンの3種類を確認することとした。塗料としてはエマルジョンペイントを4種類、比較としてアクリル樹脂系非水分散型塗料（NAD）を1種類評価した。塗料の施工はJASS18に、仕上塗材の施工はJASS23に準じてろ紙に塗装した。塗装後、温度 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $50\pm 5\%$ の条件で2週間養生した。この際、複層仕上塗材の塗装はベース吹きのみとし模様付けは行わなかった。試験体の塗装仕様及び平均膜厚については表 2.4.1 に示す。試験結果を表 2.4.2 に示す。

表 2.4.1 塗装仕様

試験体略称	仕上の種類及び呼び名		塗付け量 (kg/m^2)	平均膜厚 (mm)
薄塗E-1	外装薄塗材E	リシン	1.00	1.28
薄塗E-2	外装薄塗材E	スキン	1.30	1.11
薄塗E-3	外装薄塗材E	ローラーリシン	0.64	0.48
可とう薄E	可とう形外装薄塗材E	弾性リシン	0.74	1.16
防薄E	防水形外装薄塗材E	単層弾性	0.70	0.57
複層E	複層塗材E	吹付タイル	1.21	0.76
可とう複CE	可とう形複層塗材CE	平たん状	1.20	1.13
防複E	防水形複層塗材E	弾性タイル	1.10	0.88
EPG-1	つや有りアクリルエマルジョンペイント		0.22	0.23
EPG-2	つや有り弾性アクリルエマルジョンペイント		0.21	0.22
EP-1	つや消しアクリルエマルジョンペイント		0.22	0.23
EP-2	つや消しアクリルシリコンエマルジョンペイント		0.22	0.23
NAD	アクリル樹脂系非水分散型塗料		0.20	0.21

表 2.4.2 仕上塗材の水蒸気透過性及び二酸化炭素透過度

試験体略称	仕上の種類及び呼び名		水蒸気透過性 (g/m ² ・24h)	二酸化炭素透過度 (cc/m ² ・24h・atm)
薄塗E-1	外装薄塗材E	リシン	×	×
薄塗E-2	外装薄塗材E	スキシ	×	×
薄塗E-3	外装薄塗材E	ローラリシン	△	△
可とう薄E	可とう形外装薄塗材E	弾性リシン	×	×
防薄E	防水形外装薄塗材E	単層弾性	1.638	1.479 × 10 ⁻³
複層E	複層塗材E	吹付タイル	2.906	2.862 × 10 ⁻³
可とう複CE	可とう形複層塗材CE	平たん状	1.582	△
防複E	防水形複層塗材E	弾性タイル	0.684	3.972 × 10 ⁻³
EPG-1	つや有リアクリルエマルシヨソポイント		△	△
EPG-2	つや有リ弾性アクリルエマルシヨソポイント		△	△
EP-1	つや消リアクリルエマルシヨソポイント		△	△
EP-2	つや消リアクリルシリコソエマルシヨソポイント		△	△
NAD	アクリル樹脂系非水分散型塗料		△	△

×: 表面形状により測定不能

△: 圧力を保持できないため測定不能

仕上材の表面形状が粗く凹凸が大きい場合、試験体ホルダーに設置する際に O リングとの間に隙間が生じるため測定自体が出来なかったものや、試験体ホルダーに設置は出来ても、試験時の圧力負荷に耐えられず安定した測定が出来なかったものが多数あった。

結果として、二酸化炭素透過性を測定できたものは 3 種類のみであった。本章の 2 項でも述べたが、市場にある仕上塗材は多種・多様であるが、それらを評価することが出来る汎用的な試験方法の提案が必要であると認識を得た。

2.5 まとめ

本章では、建築用仕上塗材及び塗料の種類による生産量、仕上塗材の中性抑制効果に関する論文調査を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 塗料においては、エマルションペイント（EP）が、建築用仕上塗材については、薄塗材 E、複層塗材 E、防水形複層塗材 E、防水形薄塗材 E、可とう形薄塗材 E の重要性が高いことが確認出来た。但し、建築用仕上塗材においては同じ種類の塗材でもその使用方法、形状が異なるため、製品ごとに評価する必要がある。
- (2) 仕上材のコンクリートの中性化抑制効果を評価する既往研究は多いが、仕上材の種類ごとの実験値においてその中性化率に大きく開きがあることが分かった。また、仕上材によるコンクリートの促進中性化試験についても試験期間、手間が非常に大きくかかるものであり、迅速かつ簡易に仕上材の中性化抑制効果を評価できるとは言い難い。
- (3) 仕上材の透気性と中性化抑制効果には相関があることが確認出来た。しかしながら透気性を評価する方法は様々で、透湿性、空気透過性、二酸化炭素透過性の気体の種類の違い、圧力条件の違いなど統一された方法がない。また、コンクリートの中性化の主要因となる二酸化炭素の透過性を測定する方法は、評価可能な材料に大きな制限があることが分かった。
- (4) 仕上材の中性化抑制効果を表す式には、その遅延効果を速度係数へのかけ算の組み込みとして表す方法と遅延傾向を深さで（定数項）評価する方法の2種類に分けられることが多いことが分かった。

これまで、仕上材に求められるコンクリートの中性化抑制効果は、仕上材の分類・種類により論じられることが多い。しかし仕上材の製品は多種・多様あり、それぞれの製品ごとに中性化抑制効果が異なるのは当然である。それら個々の製品ごとの中性化抑制効果の評価が不十分な現状では、より簡易で迅速に中性化抑制効果の評価が行える評価方法の開発、提案が必要である。これまでも仕上材の中性化抑制効果を効率的に評価する方法は種々検討されている。しかし、既往の方法には、それぞれ一長一短があり、多種多様な材料を評価するには十分とはいえない。

そこで本研究では、塗材の中性化抑制効果を予測するため、次に挙げる特徴を有する、二酸化炭素の透過性を評価する方法の提案を試みた。

1. 短期間での中性化抑制効果の評価が可能
2. 多種多様な形状の材料を評価可能
3. 直接、塗材の CO₂ の透過性を測定出来ること
4. 試験方法及び装置が一般的で測定が簡易であること

ついで、仕上材の二酸化炭素透過性及び透湿性の試験結果と、コンクリートの促進中性化試験の結果とを併せ、仕上材の透気性と中性化抑制効果への影響を確認した。

参考文献

- 2-1) 日本建築仕上材工業会：建築用仕上塗材生産数量（平成21年～24年）、日本建築仕上材工業会ホームページ (http://www.nsk-web.org/siagenurizai_3.html) ,2015.9
- 2-2) 日本塗料工業会：平成26年度（4月～3月）塗料生産・販売（出荷）・在庫数量及び平均単価表、日本塗料工業会ホームページ (<http://www.toryo.or.jp/jp/data/data.html>) , 2015.9
- 2-3) 長瀬公一, 河野政典, 竹内博幸, 古賀一八, 板谷俊郎ほか：躯体コンクリートの中酸化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価 その1～その8, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1123-1138, 2007.8
- 2-4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp. 194-203, 2009
- 2-5) 福島敏夫, 福士勲, 友澤史紀, 田中斉：表面仕上材のコンクリートの中酸化抑制効果の定量的評価, セメント・コンクリート論文集 No.44, pp.448-453, 1990
- 2-6) 向井毅, 菊池雅史, 福田泰久, 宮本俊次：外装仕上材の躯体保護に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.353-354, 1986.8
- 2-7) 千歩修, 馬場明生, 小俣一夫, 松島泰幸：コンクリートの外装仕上げ材料の躯体保護効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.609-610, 1989
- 2-8) 土江堅治, 重倉祐光, 古賀一八：RC造集合住宅のライフサイクルコストに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.505-506, 1998.9
- 2-9) 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典, 蒲原博行：コンクリートの透気・透水性に関する研究（その1. 透気・透水性試験方法について）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.115-116, 1982.10
- 2-10) 蒲原博行, 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典：コンクリートの透気・透水性に関する研究（その2. 透気・透水性試験結果）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.117-118, 1982.10
- 2-11) 笠井芳夫, 松井勇, 堀孝廣, 長野基司：コンクリート用塗料および吹付材の透気性に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.573-574, 1983.9
- 2-12) 千歩修, 馬場明生, 小俣一夫, 松島泰幸：コンクリートの外装仕上げ材料の躯体保護効果(水分移動性状と中酸化抑制効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.159-160, 1990
- 2-13) 宮木宏明, 金津貢一：外装仕上塗材の気体透過性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.635-636, 1986.8
- 2-14) 本橋健司：仕上塗材の通気性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.529-530, 1988.10
- 2-15) 本橋健司, 尾藤正勝, 酒井芳彦：ウェザーメーターにより促進劣化処理を実施した外装塗膜防水材・防水形仕上塗材の空気透過性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.35-36, 1989.10
- 2-16) 須田ゆうみ, 小村理恵：建築用外装仕上塗材の透湿性と中酸化抑制機能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1001-1002, 1996.9
- 2-17) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子：建築用仕上塗材の中酸化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第609号, pp.23-30, 2006.11
- 2-18) 千歩修：「透湿性材料の透湿性・透水試験方法（原案）」, 共通試験の概要及び「透湿性材料の透湿性試験方法（案）の提案」, FINEX, pp.11-18, 1996.3
- 2-19) 唐沢智之, 古賀一八, 浦川和也, 河野政典：仕上塗材の中酸化抑制効果と透気性に関する考察, コンクリート工学年次講演会論文集 vo30, No.1, pp645-650, 2008
- 2-20) 井原健史, 松原道彦, 大澤悟：塗装によるコンクリートの中酸化抑制に関する研究 その1 塗膜

- の二酸化炭素透過度と中性化抑制との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.553-554, 2011
- 2-21) 嵩英雄, 和泉意登志, 友澤史紀, 福士勲: 経年RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp181-184, 1984
- 2-22) 福島敏夫, 福士勲: 高分子仕上塗材がコンクリートの中性化深さ進行に及ぼす影響の定量的評価
鉄筋コンクリート造建築物外壁の耐久性予測法に関する研究(その2), 日本建築学会構造系論文集
第434号, pp.1-10, 1992.4
- 2-23) 高田良章, 魚本健人: 炭酸ガス濃度がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響, コンクリート工学
論文集第1巻第1号, pp85-93, 1990.1
- 2-24) 馬場明生, 千歩修: 各種表面層を持つコンクリートの中性化深さ推定方法に関する一考察, コンク
リート工学年次講演会論文集 vol9, No.1, pp333-338, 1987

第3章

仕上材の二酸化炭素透過性の測定方法に関する検討

第3章 仕上材の二酸化炭素透過性の測定方法に関する検討

3.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物の寿命は経年による中性化が鉄筋位置まで進行した時点とされることが多い。コンクリートの長寿命化を図るため仕上材によって中性化を抑制することは一般的であり、仕上材を施したコンクリートの中性化抑制効果について、促進中性化試験及び屋外暴露試験の結果による多数の報告事例がある。

それらの報告の中には、同じ仕上材の分類、種類にも関わらず異なる中性化率を取ることが多い。このことは評価する際の試験体仕様や促進条件などが異なるためとも考えられるが、同じ分類にあっても異なる製品・材料であるためと考えるのが妥当である。

性能規定化の流れの中、分類別、種類別による中性化率の設定では不十分であり、製品・仕様ごとに中性化抑制効果を明示することが必要であると考えられる。仕上材の中性化抑制効果を評価する際、多くはコンクリートの促進中性化試験が行われる。しかしながら、仕上材の製品は多種・多様であり、個々の製品の中性化抑制効果を評価するためには時間と労力をかなり費やす必要がある。より簡易で迅速に仕上材の中性化抑制効果を測定できる方法の開発がなされることが望ましい。

仕上材による中性化抑制効果は気体透過性との相関が指摘^{3-1), 3-2)}され、二酸化炭素透過性及び空気透過性、透湿性を評価する方法^{3-3)~3-7)}が報告されている。これらの報告における、ガス透過性測定装置や透気試験機による測定では、加圧条件下で実施されるため試験体の面精度が重要であり凹凸などの意匠が施される仕上塗材及び透気係数の大きな仕上材の場合には誤差を生じやすく、測定自体も困難である。

JIS Z 0208 の透湿度試験や仕上学会法による透湿性の測定では大気圧下で測定を行うため実際に施工される意匠のまま試験を行うことが可能である。しかしながら、透湿度が低い場合には、中性化抑制効果との相関が見られないなど検討の余地が残されている。

一方、中性化はコンクリート中の水分に、大気中の二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムが溶解して反応が進行する炭酸化反応である³⁻⁸⁾。仕上材の透湿性による間接的な評価よりも、二酸化炭素の透過性を直接評価する方がより正確な中性化の抑制効果を予測できると考えられる。しかしながら、これまで報告されている二酸化炭素の透過性の評価方法としては、試験体の片面に圧縮した二酸化炭素を送りもう片面をポンプにより吸引し負圧をかけて、透過した二酸化炭素を測定する差圧法を用いたものであり³⁻⁴⁾、塗膜と試験装置の間の気密性が十分高くないと測定が出来ないなど問題がある。多様な形状を持つ仕上材の評価を行うには適用範囲が狭すぎるといえる。

そこで本章では、仕上材の中性化抑制効果を予測するため、次に挙げる特徴を有する、二酸化炭素透過性の測定方法の提案を試みた。

1. 短期間での中性化抑制効果の評価が可能
2. 多種多様な形状の材料を評価可能
3. 直接、塗材の二酸化炭素の透過性を測定出来ること
4. 試験方法及び装置が一般的で測定が簡易であること

3.2 カップ法による仕上材の二酸化炭素透過性の測定

3.2.1 検討の概要

仕上材の気体透過性を大気圧条件下で測定できる試験方法は透湿試験が挙げられる。透湿試験には JIS Z 0208 に規定される防湿包装材料の透湿度試験方法（カップ法）及び仕上学会法³⁻⁹⁾がある。前者の試験方法では装置の中に吸湿剤として塩化カルシウムを入れて、仕上材が透過する水分を捕捉し質量増加分を透湿量として評価するものである。後者は水を入れたカップの上面に仕上材を設置し装置の中から蒸発する水分量を透湿度として評価する方法である。

二酸化炭素の透過性を評価するに当たり、カップ法による透湿度試験を応用して、吸湿剤の代わりに、二酸化炭素を吸着できる材料を使用することを考えた。二酸化炭素の吸収剤としては、ゼオライトやアミン液などが挙げられるがその吸着反応が可逆反応であり、一般的に入手しやすいとは言えない。

安価で簡易に入手できる二酸化炭素の吸収剤として、コンクリートの中性化の主反応である式(3.2.1)の反応に着目して、水酸化カルシウムの使用が出来ないかと考えて検討を行った。



図 3.2.1 に試験体のイメージを試験体の外観を写真 3.2.1 に示す。仕上材の透湿試験においては、下地の透湿性（透気性）により大きく透湿度の値が影響を受けることが知られている。^{3-2),3-3)} 極めて透湿性の高い下地でなければ仕上材自体の透湿性を評価することが困難である。

本研究において、フリーフィルムでの試験体作成の検討も行っている。複層塗材や防水形などのような厚膜で比較的柔軟なタイプの仕上材では、十分なフィルムを得ることが出来たが、EP や EP-G、薄塗材などは、ハジキやワレなどが起こり試験に通用するフィルムの作製が困難であった。

そこで、試験体の作製方法は、多様な仕上材を評価するための汎用性を考え、ろ紙を下地にして仕上材のフィルムを作製することにした。その際、下地の透気性の影響を極力なくするために JIS P 3801 : 1995 に規定されている中で、最も目の粗い 5 種 A のろ紙を用いた。

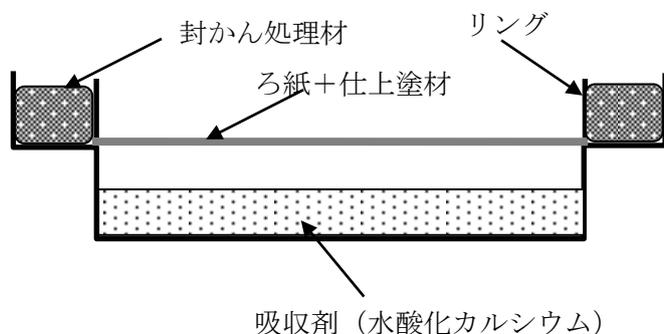


図 3.2.1 試験体イメージ



写真 3.2.1 試験体外観

3.2.2 実験因子と水準

実験因子と水準及び試験体記号を表 3.2.1 に示す。仕上材種類としては、ろ紙のみ及び仕上材 6 種類、アルミ箔の計 8 種類を試験に供した。

促進養生条件として、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%を固定条件として行った。また、封かん材の種類による二酸化炭素の透過性の違い、水酸化カルシウムと二酸化炭素の反応において発生する水の影響を評価するためカップ中に吸湿剤としてシリカゲルを入れた吸湿条件でも評価を行った。

表 3.2.1 実験因子と水準

因子	水準
仕上材種類	仕上材なし(ろ紙のみ),仕上塗材6種類
封かん処理	封ろう剤(パラフィンワックス)
	ウレタンシーリング(JIS A 5758の1成分形ウレタンシーリング(PU-1 F20LM-8020))
吸湿処理	なし
	シリカゲル
吸収剤	水酸化カルシウム粉末試薬(JIS K 8575, 和光純薬工業(株))
促進条件	温度20℃、相対湿度60%R.H.二酸化炭素濃度5%

3.2.3 仕上材の種類及び塗装仕様と試験片

仕上材の種類と塗装仕様を表 3.2.2 に示す。仕上材は使用実績を考慮して、外装薄塗材E、防水形外装薄塗材E、複層塗材E、防水形複層塗材Eを選定した。また、セメント系材料による二酸化炭素の消費について評価を行うため、防水型複層塗材CE及び可とう形複層塗材CEを加え計 6 種類の仕上材を評価した。

塗付量は JASS23 吹付け工事の標準所要量を参照してろ紙に塗装した。塗装後、温度 23±2℃、相対湿度 50±5%の条件で2週間以上養生した。試験器具に設置するため、仕上材の塗装後、養生を終了した試験体を透湿カップに設置できるように直径 70mm 程度の円形に切り抜いた。各試験片は仕様と評価材齢ごとに3枚ずつ切り取って試験に供した。

表 3.2.2 仕上材の種類と塗付量

仕上の種類	塗付量(kg/m ²)		試験体厚み(mm)
	主材	上塗材	
仕上材なし(ろ紙のみ)	—	—	0.2
外装薄塗材E(リシン)	1.4	—	1.7
防水形外装薄塗材E	1.2	—	0.7
複層塗材E	2.4	0.3	1.5
防水形複層塗材E	2.2	0.3	1.2
可とう形複層塗材CE	2.4	0.3	1.5
防水形複層塗材CE	2.4	0.3	1.5
アルミ箔	—	—	0.05

3.2.4 試験方法

JIS Z 0208 防湿包装材料の透湿度試験方法（カップ法）を応用した二酸化炭素の透過性評価として、図 3.2.3 に示す試験器具を用いて行なった。試験の操作手順を以下の表 3.2.3 に示す。

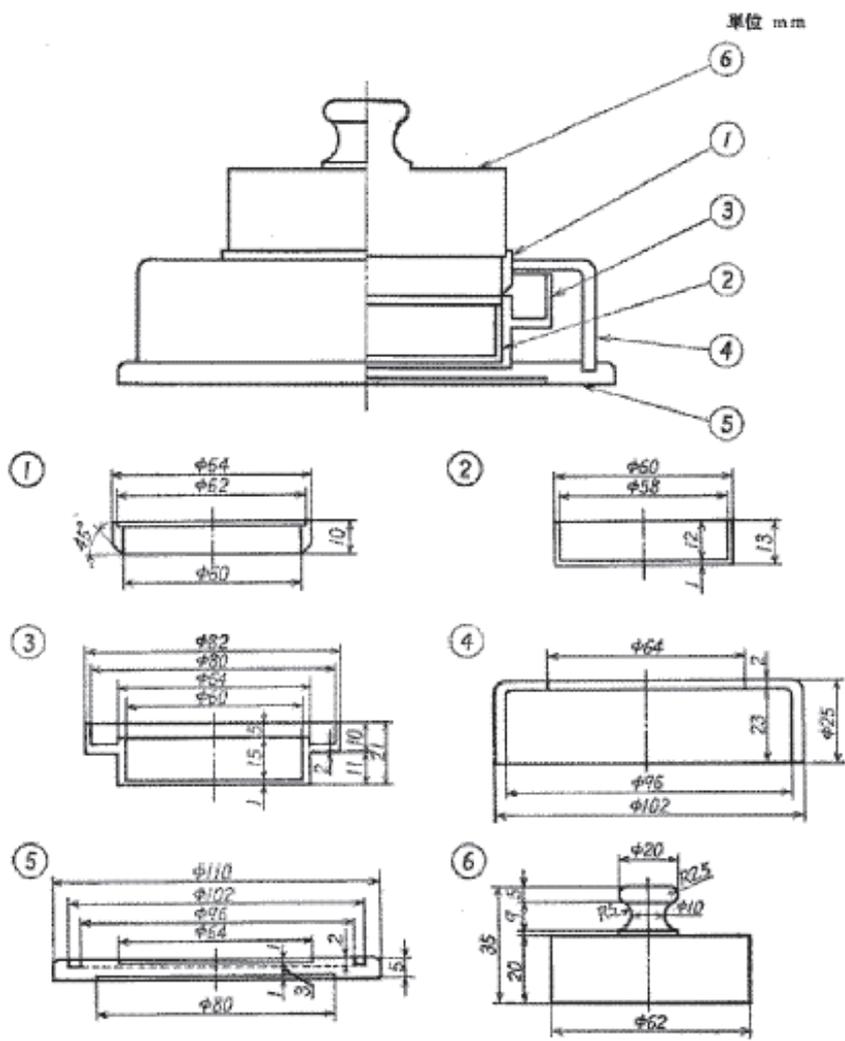


図 3.2.3 試験器具

表 3.2.3 操作方法

手順	操作内容
1	カップの清浄を行う。
2	吸収剤を計量し、皿に入れて表面を平らにならす。
3	試験片をカップと同心円となるように設置する。
4	ガイドを設置しリングを取り付けおもりを乗せる。 この際、リングと試験片の隙間に空隙がないようにしっかりとリングを押し込む。
5	ガイドを取り外し封かん剤をカップ周辺の溝に流し込み試験片のふちを封かんする。 この際、確実に封かんでできるように亀裂、泡などの巻き込みに注意する。
6	封かん剤の固化後おもりを取り除き試験体を促進養生する。
7	適当な養生間隔で、促進養生室から試験体を取り出し後、ただちにカップから試験片を取り外す。 皿から吸収剤を取り出して、吸収剤が二酸化炭素により中和された量を評価した。

3.2.5 評価方法

汎用的な二酸化炭素透過性の評価方法とするため、水酸化カルシウムの炭酸カルシウムへの変化量を定量的に求める方法として、酢酸による滴定分析と熱重量分析による方法の 2 種類の分析方法で炭酸カルシウムへの変化量の分析を行うこととした。

分析の前処理として、試験体から取り出した水酸化カルシウムは乳鉢に移して均一に混合・攪拌を行い分析試料とした。

(1) 中和滴定法

中和滴定は以下の手順により行った。

滴定手順

- 1) 分析試料を、50～200mg 秤量しビーカーに入れる。そこに、精製水 50ml で希釈する。スターラー攪拌を行い水溶液に調整する。
- 2) 調整した水溶液をフェノールフタレインにて呈色させた後、0.1M 酢酸水溶液をビュレットにて滴下し中和滴定による分析を行った。
- 3) 滴定の終点は、フェノールフタレインの呈色が 60 秒以上消える点とした。滴定量をもとに Ca(OH)_2 の炭酸化率を式(3.2.2)～式(3.2.4)により求めた。

$$S_{(d)} = \frac{(C_{(0)} - C_{(d)})}{C_{(0)}} \times 100 \quad (3.2.2)$$

$$C_{(t)} = \frac{M_{(t)}}{M_{(w)}} \times 100 \quad (3.2.3)$$

$$M_{(t)} = \frac{V_{(t)}}{1000} \times F \times 0.5 \times 74.09 \quad (3.2.4)$$

ここに、

$S_{(d)}$: 炭酸化率(%)

$C_{(d)}$: 養生期間(day)における Ca(OH)_2 濃度(wt%)

$C_{(0)}$: 初期の Ca(OH)_2 濃度(wt%)

$M_{(w)}$: Ca(OH)_2 の秤量した質量(g)

$M_{(t)}$: Ca(OH)_2 の滴定による質量(g)

$V_{(t)}$: 酢酸水溶液の滴定量(ml)

F : 酢酸水溶液の力価 (ファクター)

中和滴定の試験の様子を写真 3.2.2～3.2.5 に示す。



写真 3.2.2 試料の前処理風景



写真 3.2.3 試料の秤量と呈色風景



写真 3.2.4 滴定風景

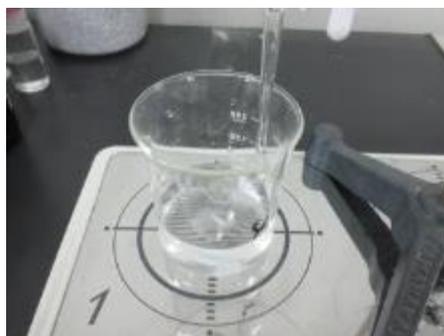


写真 3.2.5 滴定の終点

(2) 熱重量分析

熱重量分析を利用したモルタル中性化度の定量の方法が報告³⁻¹⁰⁾されている。示差熱重量同時測定装置 TG/DTA6300（セイコーインスツルメンツ製）を用いて、水酸化カルシウム試薬の炭酸カルシウムへの変化量を炭酸化率として分析した。測定条件は 40℃から 1000℃までを毎分 20℃の割合で昇温し、分析試料の重量変化を測定した。

今回の評価試料中に含まれる成分は、水、水酸化カルシウム、炭酸カルシウムの 3 成分のみと単純であり、それぞれの成分を分析する為に、各温度付近で起きる試薬の重量変化率を測定した。表 3.2.4 にその温度条件と重量減少の要因を示す。熱重量分析の例として、水酸化カルシウム試薬と炭酸カルシウム試薬の試薬を 1：1 で混合した試料の分析結果を図 3.2.4 に示す。今回、一部のサンプルについて熱重量分析を実施したサンプルについては、図 3.2.4 に示すような混合試薬のピーク同様に、3 成分のみの簡単なピークが確認出来ている。

表 3.2.4 熱示差分析での重量減少について

温度条件	重量減少の起因現象
< 150℃	水分の蒸発
350~500℃	水酸化カルシウムからの脱水 $\text{Ca(OH)}_2 \longrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \quad (3.2.5)$ 式量 74 56 18
> 550℃	炭酸カルシウムからの脱炭酸 $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \quad (3.2.6)$ 式量 100 56 44

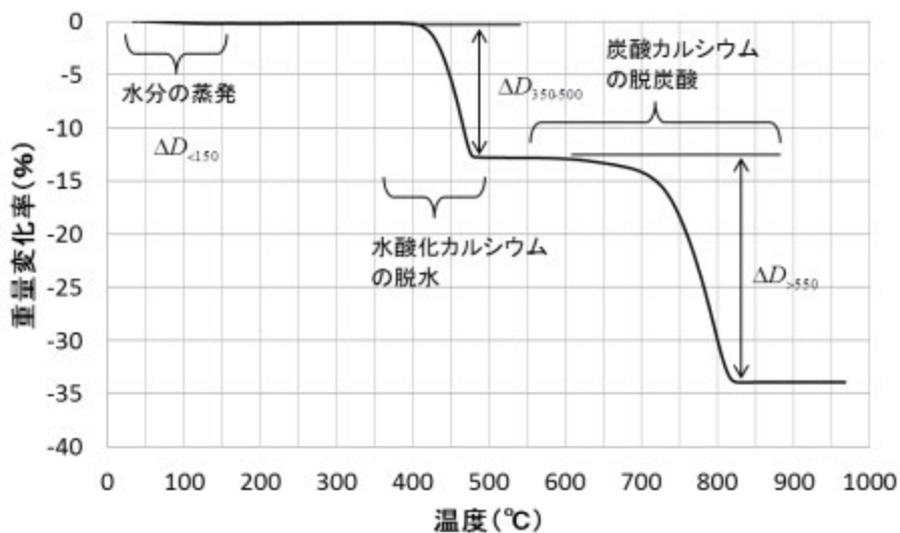


図 3.2.4 Ca(OH)₂ と CaCO₃ の試薬を 1:1 で混合した試料の分析結果

図 3.2.4 において、炭酸カルシウムの熱分解反応の重量変化 (ΔD) から試料中に含まれる炭酸カルシウム、水分、水酸化カルシウムの割合を式(3.2.7)～式 (3.2.10) より求めた。また、各養生期間における炭酸カルシウムの濃度から初期の炭酸カルシウムの濃度を差し引いた値を炭酸化率とした。

$$S_{(d)} = (C_{(d)} - C_{(0)}) \quad (3.2.7)$$

$$C_{(H_2O)} = \Delta D_{<150} \quad (3.2.8)$$

$$C_{(Ca(OH)_2)} = \Delta D_{350-500} \times \frac{74}{18} \quad (3.2.9)$$

$$C_{(CaCO_3)} = \Delta D_{>550} \times \frac{100}{44} \quad (3.2.10)$$

ここに、

$S_{(d)}$: 炭酸化率(%)

$C_{(d)}$: 養生期間(day)における $CaCO_3$ 濃度(wt%)

$C_{(0)}$: 初期の $CaCO_3$ 濃度(wt%)

$C_{(H_2O)}$: 水分量(wt%)

$C_{(Ca(OH)_2)}$: $Ca(OH)_2$ 濃度(wt%)

$C_{(CaCO_3)}$: $CaCO_3$ 濃度(wt%)

ΔD : 各温度での重量変化(%)

(3) 中和滴定及び熱重量分析による結果の確認

熱重量分析及び中和滴定による評価結果の整合性の確認として、水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの試薬を一定の割合で混合してそれぞれの方法で分析した。分析結果を比較して図 3.2.5 に示す。系中に存在する化学種が少ないこともあり、非常に高い相関を示した。どちらの分析方法を用いても評価可能であること、精度の高い結果を得られることが確認出来た。

そこで本研究においては、分析時間が短くかつ簡易に行える中和滴定を主な分析方法として評価を行うこととした。

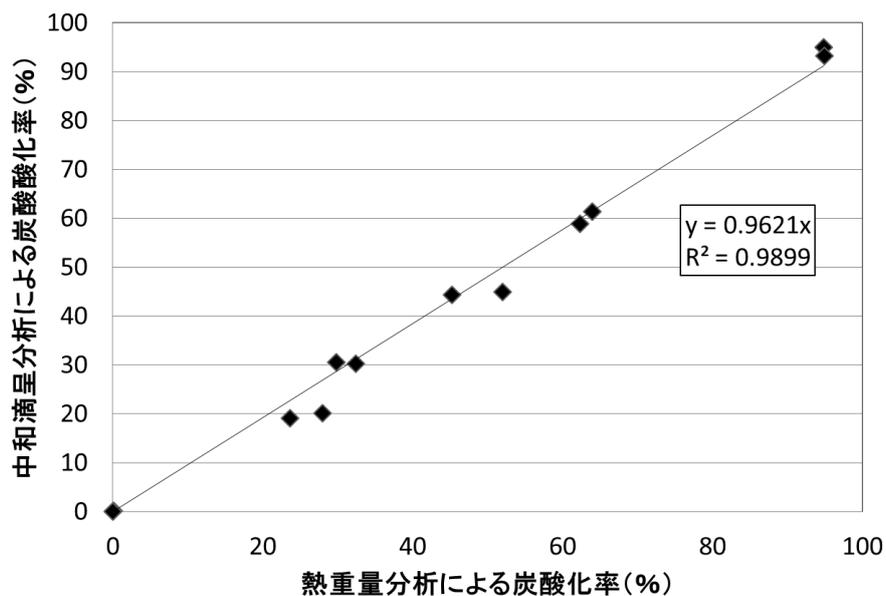


図 3.2.5 中和滴定と熱重量分析の評価結果の比較

3.2.6 実験結果と考察

(1) 標準条件における実験結果

各種仕上材の各材齢における中和滴定分析による炭酸化率の推移を表 3.2.5、図 3.2.6 に示す。各試験体で炭酸化率は経時により増加しているため、試験体を透過した二酸化炭素はカップ内の水酸化カルシウムと反応していることが確認出来る。

試験開始から 2 日目までの極めて初期においては、ろ紙のみの仕様よりも、炭酸化率が高い試験体もなく、炭酸化率の値も防水形の外装薄塗材Eが低いなど想定する透気抵抗と相違ない傾向を示した。

また、約 1 ヶ月間測定した場合にも、ろ紙のみの仕様は、炭酸化率に大きな変化がなく、60%程度で頭打ちすることが確認出来た。

しかし、4 日目以降、仕上材を塗装した試験体では炭酸化率の加速度的な増加がみられる。それらの試験体では、ろ紙のみの仕様よりも炭酸化率の値が大きくなることが確認出来た。試験面からの二酸化炭素の透過が起これないと考えられるアルミを用いた仕様においても、炭酸化率の加速度的な増加がみられる。

表 3.2.5 各種仕上材の炭酸化率の測定結果

試験体仕様	炭酸化率 (%)							
	1日	2日	4日	6日	7日	14日	21日	28日
ろ紙		43.6	55.4		54.6	60.8	64.0	64.7
外装薄塗材E	2.9	17.1	91.2	92.5		93.3	94.9	94.1
防水形外装薄塗材E	2.6	8.4	30.4	89.4				
複層塗材E	2.8	16.5	90.6					
防水形複層塗材E	2.6	6.7	29.1	19.3	90.7			
可とう形複層塗材CE	3.6	14.4	92.0					
防水形複層塗材CE	2.4	9.0	92.2	92.4	93.7			
アルミ	1.4	4.8	20.1	70.2	97.9			
なし	15.0	30.8	45.5	66.1	48.5			

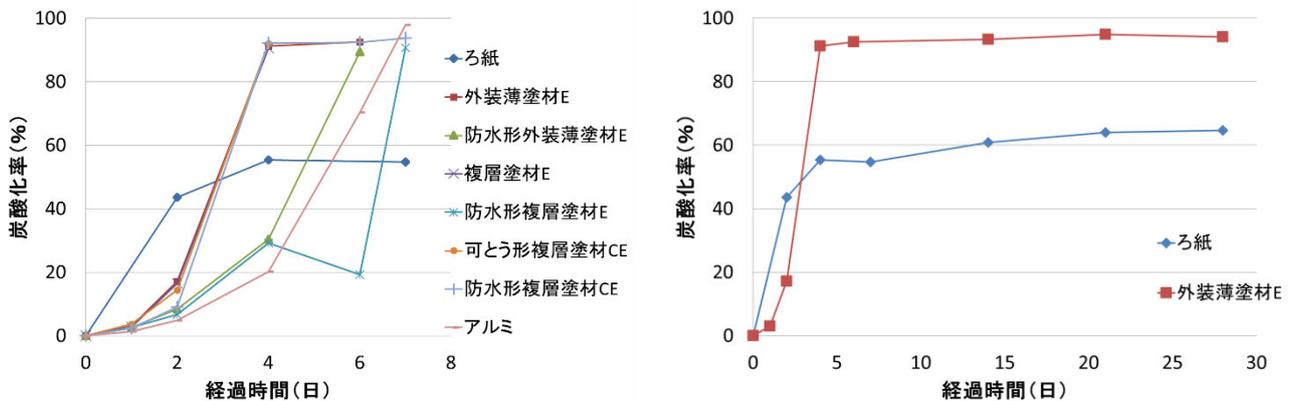


図 3.2.6 各種仕上材の炭酸化率の推移

これらの加速度的な炭酸化率の上昇がみられた試験体の水酸化カルシウム試薬は、カップ内で塊状に固化していた。写真 3.2.6 及び写真 3.2.7 に示す。

状況から、水酸化カルシウムの炭酸化に伴い発生する水によって水酸化カルシウムが湿潤状態となり、しっくいのような二酸化炭素との硬化反応をしていると想定した。



カップの全体状況

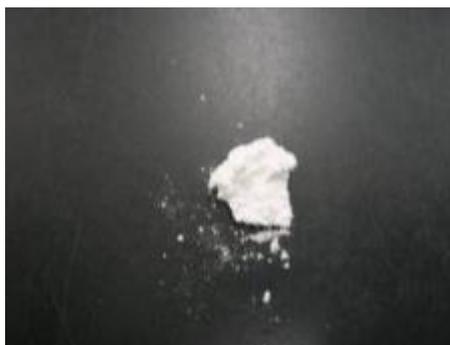


水酸化カルシウムの状況

写真 3.2.6 材齢 4 日目のろ紙のみの試験体状況



カップの全体状況



水酸化カルシウムの状況

写真 3.2.7 材齢 4 日目の外装薄塗材 E の試験体状況

(2)試験体内部の水分量の影響

前述した加速度的な炭酸化率の上昇がみられた試験体において、示差熱重量分析により水分量を分析した。図 3.2.7～図 3.2.10 に示す。炭酸化率の上昇とともに水分量も増加していることが確認出来た。

仕上材においては、炭酸化率の頭打ちとともに水分量も低下している。これはカップ内での炭酸化にともなう水分の増加が無くなり、カップ内から外へ水分が蒸発することによって起きていると考えられる。

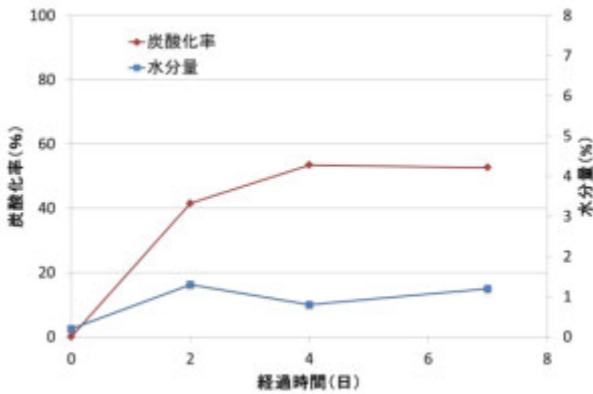


図 3.2.7 ろ紙の炭酸化率と水分量

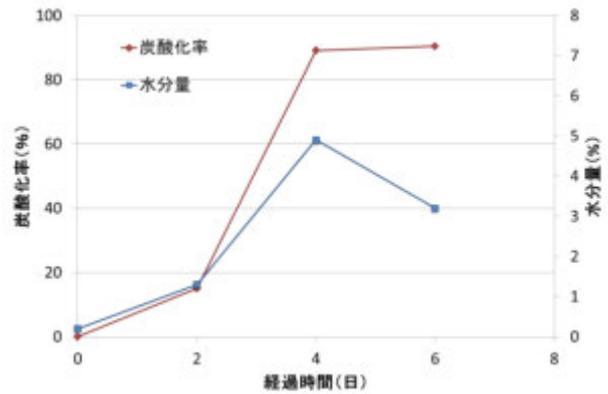


図 3.2.8 外装薄塗材 E の炭酸化率と水分量

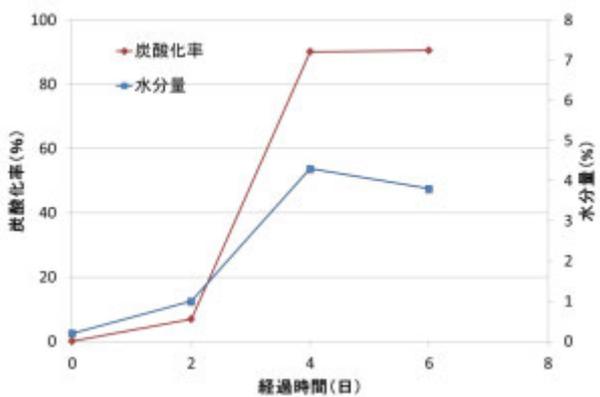


図 3.2.9 防水型複層 CE の炭酸化率と水分量

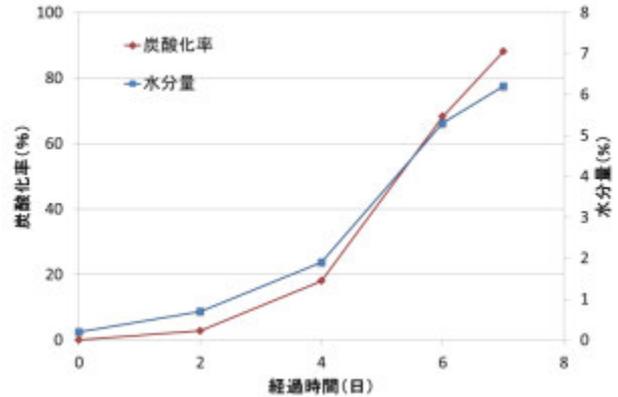


図 3.2.10 アルミの炭酸化率と水分量

固相-気相での水酸化カルシウムと二酸化炭素の反応は、湿度条件により大きく変化することが報告³⁻¹¹⁾されている。本研究では、透湿カップ自体は、温度 20℃、相対湿度 60%R.H.、二酸化炭素濃度 5% の促進条件下で試験を行っているが、カップ内に透過した二酸化炭素と水酸化カルシウムとの反応で発生する水分が、カップ内に留まり試験槽内の湿度よりも上昇することで、炭酸化率の値に影響を与えていると考えられる。

(3)吸湿条件の影響

カップ内における、水酸化カルシウムと二酸化炭素の反応により発生する水分の影響を除いた評価を行うために、水酸化カルシウムにシリカゲル 2g を加えた吸湿条件で試験を行った。試験結果を表 3.2.6 及び図 3.2.11 に示す。

吸湿条件の場合は、ほとんどの試験体で、ろ紙のみの試験体と比べても炭酸化率の値が低く推移し、炭酸化の進行はかなり遅くなることが確認され試験装置内での湿度条件のコントロールの重要性が確認できた。しかし、外装薄塗材Eにおいて、16日目の測定で炭酸化率の急激な増加がみられた。この試験体のカップ内のシリカゲルを確認すると吸湿により変色が起きており、水酸化カルシウムも吸湿堅固した状態となっていた。カップ法においては、封入できるシリカゲルの容量にも限りがあるため、透湿カップ法に変わる新しい試験方法で検討を行う必要性が確認出来た。

表 3.2.6 吸湿条件における炭酸化率の推移

試験体番号	炭酸化率(%)					
	1日	4日	7日	16日	25日	49日
ろ紙	4.7	47.8	49.6	56.4	60.2	60.6
外装薄塗材E	5.8	8.6	13.1	90.9	89.8	83.4
可とう形複層CE	10.1	11.9	16.1	18.5	15.5	44.2
防水形複層CE	6.8	8.2	8.4	12.4	20.8	51.0
防水形複層E	5.3	7.9	7.1	8.5	7.2	14.8
アルミ箔	3.9	5.2	7.2	12.4	12.8	28.7

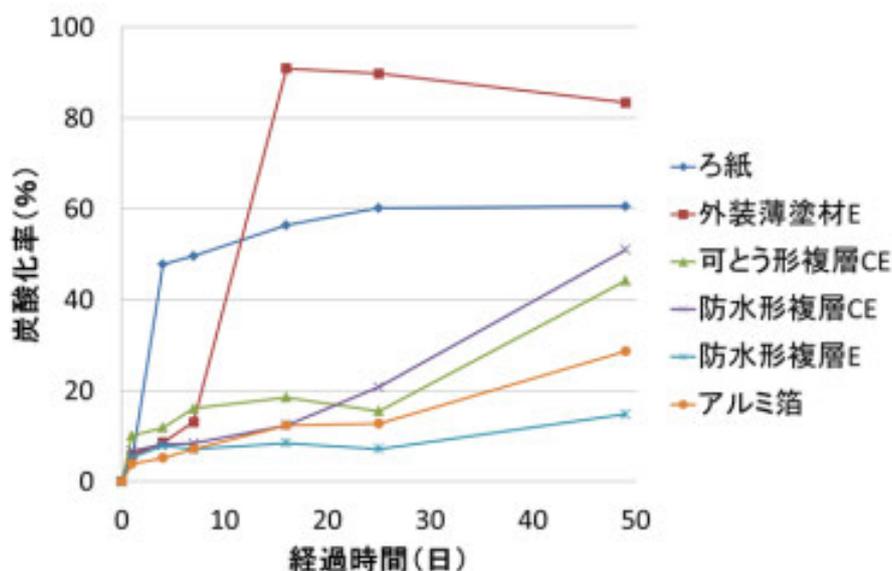


図 3.2.11 各種仕上材の吸湿条件（シリカゲル）における炭酸化率の傾向

(4) 封かん材の影響

これまでアルミ箔を試験体に用いた条件においても、水酸化カルシウムの炭酸化の進行が見られている。これは封かん材として用いているパラフィンの二酸化炭素の透過性が無視できないものであることが予想される。そこで透気性のないアルミ箔を試験体に用いて、封かん材の条件をパラフィンと1成分形ウレタンシーリング(PU-1 F20LM-8020)の2種類について確認した。試験結果を表 3.2.7 及び図 3.2.12 に示す。その結果ウレタンシーリングを使用した方が二酸化炭素の透過性が低く、気密性に優れていることが確認出来た。

表 3.2.7 封かん材の違いにおける炭酸化率の推移

封かん材	炭酸化率(%)					
	1日	4日	7日	16日	25日	49日
パラフィン	3.9	5.2	7.2	12.4	12.8	28.7
ウレタンシーリング	4	5.7	7.6	7.3		9.7

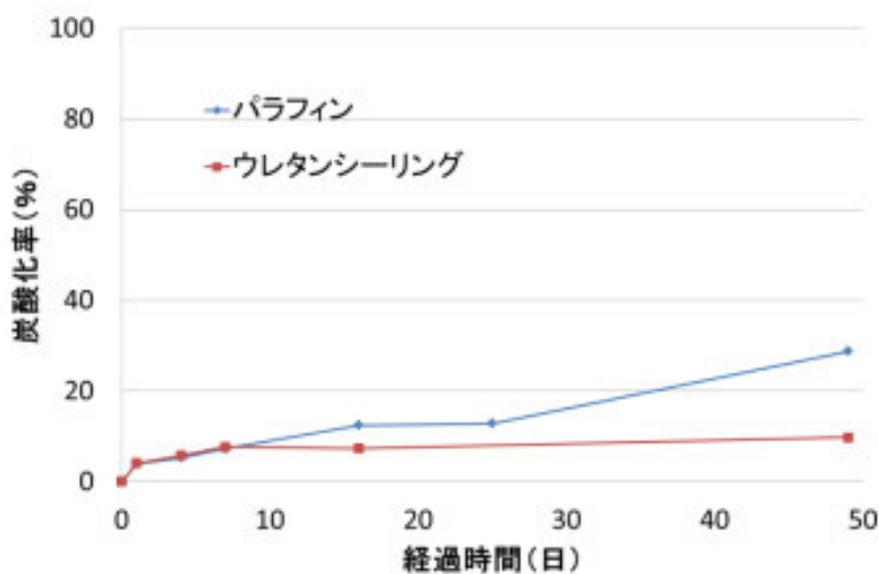


図 3.2.12 封かん材の違いにおける炭酸化率の傾向

(5) 考察

以上の結果をまとめると次のようなことが分かった。

- ・水酸化カルシウムを二酸化炭素の吸収剤として用いることが可能である
- ・その際、試験結果はカップ内で発生する水分の影響をうけるため、湿度調整が重要である。
- ・封かん材については、パラフィンよりもウレタンシーリングが効果的である。

結果をふまえ次項において、湿度調整を行いながら試験を行える装置の検討を行うことにした。また、詳細な試験データを表 3.2.8～表 3.2.27 に示す。

表 3.2.8 ろ紙の中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	ろ紙	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度 C ₍₀₎	炭酸化率 S _(d)
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.		
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7		
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
2日	1	0.1753	25.5	0.0998	0.0013	0.0942	53.8	54.0	95.7	43.6
	2	0.1729	25.4	0.0998	0.0013	0.0939	54.3			
	3	0.1774	25.9	0.0998	0.0013	0.0957	54.0			
4日	1	0.1891	21.7	0.0998	0.0011	0.0802	42.4	42.7	95.7	55.4
	2	0.1816	21.2	0.0998	0.0011	0.0784	43.1			
	3	0.1832	21.1	0.0998	0.0011	0.0780	42.6			
7日	1	0.1891	21.9	0.0998	0.0011	0.0809	42.8	43.5	95.7	54.6
	2	0.1816	21.5	0.0998	0.0011	0.0795	43.8			
	3	0.1449	17.2	0.0998	0.0009	0.0636	43.9			
14日	1	0.1909	19.7	0.0998	0.0010	0.0728	38.1	37.5	95.7	60.8
	2	0.1804	17.8	0.0998	0.0009	0.0658	36.5			
	3	0.1870	19.2	0.0998	0.0010	0.0710	37.9			
21日	1	0.1990	17.8	0.0998	0.0009	0.0658	33.1	34.5	95.7	64.0
	2	0.1819	17.6	0.0998	0.0009	0.0650	35.8			
	3	0.1913	17.9	0.0998	0.0009	0.0662	34.6			
28日	1	0.1470	14.0	0.0998	0.0007	0.0517	35.2	33.8	95.7	64.7
	2	0.1890	16.9	0.0998	0.0008	0.0625	33.0			
	3	0.1758	15.7	0.0998	0.0008	0.0580	33.0			

表 3.2.9 外装薄塗材Eの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	外装薄塗材E	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.1683	42.4	0.0998	0.0021	0.1567	93.1	92.9	95.7	2.9
	2	0.1944	48.9	0.0998	0.0024	0.1807	93.0			
	3	0.1781	44.7	0.0998	0.0022	0.1652	92.8			
2日	1	0.1891	40.2	0.0998	0.0020	0.1486	78.6	79.4	95.7	17.1
	2	0.1816	38.8	0.0998	0.0019	0.1434	79.0			
	3	0.1450	31.6	0.0998	0.0016	0.1168	80.5			
4日	1	0.1861	4.1	0.0998	0.0002	0.0152	8.1	8.4	95.7	91.2
	2	0.1501	3.4	0.0998	0.0002	0.0126	8.4			
	3	0.1568	3.7	0.0998	0.0002	0.0137	8.7			
6日	1	0.1603	3.1	0.0998	0.0002	0.0115	7.1	7.2	95.7	92.5
	2	0.1590	2.9	0.0998	0.0001	0.0107	6.7			
	3	0.1529	3.2	0.0998	0.0002	0.0118	7.7			
14日	1	0.1654	2.7	0.0998	0.0001	0.0100	6.0	6.5	95.7	93.2
	2	0.1676	3.2	0.0998	0.0002	0.0118	7.1			
	3	0.1916	3.3	0.0998	0.0002	0.0122	6.4			
21日	1	0.1473	3.1	0.0998	0.0002	0.0115	7.8	4.9	95.7	94.9
	2	0.2024	2.2	0.0998	0.0001	0.0081	4.0			
	3	0.1814	1.4	0.0998	0.0001	0.0052	2.9			
28日	1	0.1130	1.7	0.0998	0.0001	0.0063	5.6	5.6	95.7	94.1
	2	0.1510	2.3	0.0998	0.0001	0.0085	5.6			
	3	0.2127	3.3	0.0998	0.0002	0.0120	5.6			

表 3.2.10 防水形外装薄塗材Eの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	防水形外装薄塗材E	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.0816	20.8	0.0998	0.0010	0.0769	94.2	93.2	95.7	2.6
	2	0.0648	16.1	0.0998	0.0008	0.0593	91.5			
	3	0.0921	23.4	0.0998	0.0012	0.0865	93.9			
2日	1	0.0911	22.0	0.0998	0.0011	0.0811	89.1	87.7	95.7	8.4
	2	0.1766	42.5	0.0998	0.0021	0.1571	88.9			
	3	0.1221	28.1	0.0998	0.0014	0.1039	85.1			
4日	1	0.1967	35.2	0.0998	0.0018	0.1301	66.1	66.6	95.7	30.4
	2	0.2103	38.5	0.0998	0.0019	0.1423	67.7			
	3	0.1472	26.3	0.0998	0.0013	0.0972	66.0			
6日	1	0.1901	4.6	0.0998	0.0002	0.0170	8.9	8.5	95.7	91.2
	2	0.1749	4.1	0.0998	0.0002	0.0152	8.7			
	3	0.1812	3.8	0.0998	0.0002	0.0140	7.8			

表 3.2.11 複層塗材Eの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	複層塗材E	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.0646	16.3	0.0998	0.0008	0.0601	93.0	93.0	95.7	2.8
	2	0.0519	13.1	0.0998	0.0007	0.0484	93.3			
	3	0.1204	30.2	0.0998	0.0015	0.1116	92.7			
2日	1	0.1384	30.3	0.0998	0.0015	0.1120	80.9	79.9	95.7	16.5
	2	0.1399	30.1	0.0998	0.0015	0.1112	79.5			
	3	0.1773	38.0	0.0998	0.0019	0.1404	79.2			
4日	1	0.1926	4.6	0.0998	0.0002	0.0170	8.8	9.0	95.7	90.6
	2	0.1005	2.4	0.0998	0.0001	0.0089	8.8			
	3	0.1155	2.9	0.0998	0.0001	0.0107	9.3			

表 3.2.12 防水形複層塗材Eの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	防水形複層塗材E	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.1188	30.1	0.0998	0.0015	0.1112	93.6	93.2	95.7	2.6
	2	0.1045	26.5	0.0998	0.0013	0.0979	93.7			
	3	0.1493	37.3	0.0998	0.0019	0.1379	92.3			
2日	1	0.1384	34.2	0.0998	0.0017	0.1264	91.3	89.3	95.7	6.7
	2	0.1317	31.9	0.0998	0.0016	0.1179	89.5			
	3	0.1421	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	87.1			
4日	1	0.1965	37.0	0.0998	0.0018	0.1368	69.6	67.9	95.7	29.1
	2	0.1742	31.7	0.0998	0.0016	0.1172	67.3			
	3	0.1352	24.4	0.0998	0.0012	0.0902	66.7			
6日	1	0.1621	33.1	0.0998	0.0017	0.1223	75.5	77.2	95.7	19.3
	2	0.1852	38.4	0.0998	0.0019	0.1419	76.6			
	3	0.1962	42.2	0.0998	0.0021	0.1560	79.5			
7日	1	0.2041	5.1	0.0998	0.0003	0.0188	9.2	8.9	95.7	90.7
	2	0.2052	4.9	0.0998	0.0002	0.0181	8.8			
	3	0.1902	4.4	0.0998	0.0002	0.0163	8.6			

表 3.2.13 可とう形複層塗材CEの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	可とう形複層塗材CE	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.1382	34.3	0.0998	0.0017	0.1268	91.7	92.3	95.7	3.6
	2	0.1641	41.0	0.0998	0.0020	0.1515	92.3			
	3	0.1004	25.2	0.0998	0.0013	0.0931	92.8			
2日	1	0.1017	22.7	0.0998	0.0011	0.0839	82.5	81.9	95.7	14.4
	2	0.1100	24.5	0.0998	0.0012	0.0906	82.3			
	3	0.1001	21.9	0.0998	0.0011	0.0809	80.9			
4日	1	0.1061	2.2	0.0998	0.0001	0.0081	7.7	7.6	95.7	92.0
	2	0.1056	2.1	0.0998	0.0001	0.0078	7.3			
	3	0.1081	2.3	0.0998	0.0001	0.0085	7.9			

表 3.2.14 防水形複層塗材CEの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	防水形複層塗材CE	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.1389	35.4	0.0998	0.0018	0.1308	94.2	93.4	95.7	2.4
	2	0.0938	23.7	0.0998	0.0012	0.0876	93.4			
	3	0.1323	33.2	0.0998	0.0017	0.1227	92.7			
2日	1	0.1272	30.0	0.0998	0.0015	0.1109	87.2	87.1	95.7	9.0
	2	0.1150	26.8	0.0998	0.0013	0.0991	86.1			
	3	0.1278	30.5	0.0998	0.0015	0.1125	88.1			
4日	1	0.1225	2.4	0.0998	0.0001	0.0089	7.2	7.5	95.7	92.2
	2	0.0905	2.2	0.0998	0.0001	0.0081	9.0			
	3	0.1261	2.1	0.0998	0.0001	0.0078	6.2			
6日	1	0.1271	2.3	0.0998	0.0001	0.0085	6.7	7.3	95.7	92.4
	2	0.1450	3.2	0.0998	0.0002	0.0118	8.2			
	3	0.1355	2.6	0.0998	0.0001	0.0096	7.1			
7日	1	0.1591	2.1	0.0998	0.0001	0.0078	4.9	6.0	95.7	93.7
	2	0.1843	3.6	0.0998	0.0002	0.0133	7.2			
	3	0.1478	2.4	0.0998	0.0001	0.0089	6.0			

表 3.2.15 アルミの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	アルミ	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.1814	45.7	0.0998	0.0023	0.1689	93.1	94.4	95.7	1.4
	2	0.1829	46.8	0.0998	0.0023	0.1730	94.6			
	3	0.1757	45.4	0.0998	0.0023	0.1678	95.5			
2日	1	0.1975	47.8	0.0998	0.0024	0.1767	89.5	91.1	95.7	4.8
	2	0.1427	36.2	0.0998	0.0018	0.1338	93.8			
	3	0.2023	49.3	0.0998	0.0025	0.1822	90.1			
4日	1	0.1969	40.0	0.0998	0.0020	0.1478	75.1	76.5	95.7	20.1
	2	0.1318	28.2	0.0998	0.0014	0.1042	79.1			
	3	0.1149	23.4	0.0998	0.0012	0.0865	75.3			
6日	1	0.1128	9.0	0.0998	0.0004	0.0333	29.5	28.6	95.7	70.2
	2	0.1099	8.4	0.0998	0.0004	0.0310	28.2			
	3	0.1534	11.6	0.0998	0.0006	0.0429	27.9			
7日	1	0.2049	1.1	0.0998	0.0001	0.0041	2.0	2.0	95.7	97.9
	2	0.1395	0.9	0.0998	0.0000	0.0033	2.4			
	3	0.1777	0.8	0.0998	0.0000	0.0030	1.7			

表 3.2.16 仕上材なしでの中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	なし	吸湿処理	なし

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1911	49.7	0.0998	0.0025	0.1837	96.1	95.7	-	-
	2	0.1997	51.9	0.0998	0.0026	0.1918	96.1			
	3	0.1977	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.0			
1日	1	0.2097	45.2	0.0998	0.0023	0.1671	79.7	81.4	95.7	15.0
	2	0.2054	46.1	0.0998	0.0023	0.1704	83.0			
	3	0.1787	39.4	0.0998	0.0020	0.1456	81.5			
2日	1	0.1561	27.7	0.0998	0.0014	0.1024	65.6	66.2	95.7	30.8
	2	0.1151	20.4	0.0998	0.0010	0.0754	65.5			
	3	0.1149	21.0	0.0998	0.0010	0.0776	67.6			
4日	1	0.1888	26.4	0.0998	0.0013	0.0976	51.7	52.2	95.7	45.5
	2	0.1837	26.3	0.0998	0.0013	0.0972	52.9			
	3	0.1938	27.2	0.0998	0.0014	0.1005	51.9			
6日	1	0.1712	15.1	0.0998	0.0008	0.0558	32.6	32.5	95.7	66.1
	2	0.1788	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	31.8			
	3	0.1996	17.8	0.0998	0.0009	0.0658	33.0			
7日	1	0.1813	23.9	0.0998	0.0012	0.0883	48.7	49.3	95.7	48.5
	2	0.1911	25.4	0.0998	0.0013	0.0939	49.1			
	3	0.1756	23.8	0.0998	0.0012	0.0880	50.1			

表 3.2.17 ろ紙+シリカゲル条件での中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	ろ紙	吸湿処理	シリカゲル

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1998	50.7	0.0998	0.0025	0.1874	93.8	95.4	-	-
	2	0.2054	53.7	0.0998	0.0027	0.1985	96.6			
	3	0.1962	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.7			
1日	1	0.1909	48.0	0.0998	0.0024	0.1774	92.9	90.9	95.4	4.7
	2	0.1995	48.4	0.0998	0.0024	0.1789	89.7			
	3	0.1975	48.1	0.0998	0.0024	0.1778	90.0			
4日	1	0.2095	29.1	0.0998	0.0015	0.1076	51.3	49.8	95.4	47.8
	2	0.2052	27.8	0.0998	0.0014	0.1027	50.1			
	3	0.1785	23.2	0.0998	0.0012	0.0857	48.0			
7日	1	0.1559	20.0	0.0998	0.0010	0.0739	47.4	48.1	95.4	49.6
	2	0.1149	15.2	0.0998	0.0008	0.0562	48.9			
	3	0.1147	14.9	0.0998	0.0007	0.0551	48.0			
16日	1	0.1886	20.4	0.0998	0.0010	0.0754	40.0	41.6	95.4	56.4
	2	0.1835	21.1	0.0998	0.0011	0.0780	42.5			
	3	0.1936	22.2	0.0998	0.0011	0.0821	42.4			
25日	1	0.1710	17.8	0.0998	0.0009	0.0658	38.5	38.0	95.4	60.2
	2	0.1898	19.1	0.0998	0.0010	0.0706	37.2			
	3	0.2106	21.8	0.0998	0.0011	0.0806	38.3			
49日	1	0.1988	20.7	0.0998	0.0010	0.0765	38.5	37.6	95.4	60.6
	2	0.1817	18.2	0.0998	0.0009	0.0673	37.0			
	3	0.1911	19.3	0.0998	0.0010	0.0713	37.3			

表 3.2.18 外装薄塗材E + シリカゲル条件での中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	外装薄塗材E	吸湿処理	シリカゲル

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1998	50.7	0.0998	0.0025	0.1874	93.8	95.4	-	-
	2	0.2054	53.7	0.0998	0.0027	0.1985	96.6			
	3	0.1962	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.7			
1日	1	0.1923	46.7	0.0998	0.0023	0.1726	89.8	89.8	95.4	5.8
	2	0.2021	49.4	0.0998	0.0025	0.1826	90.3			
	3	0.2066	50.0	0.0998	0.0025	0.1848	89.4			
4日	1	0.1909	46.2	0.0998	0.0023	0.1708	89.4	87.2	95.4	8.6
	2	0.1995	46.3	0.0998	0.0023	0.1711	85.8			
	3	0.1975	46.1	0.0998	0.0023	0.1704	86.3			
7日	1	0.1812	40.8	0.0998	0.0020	0.1508	83.2	82.9	95.4	13.1
	2	0.1827	41.4	0.0998	0.0021	0.1530	83.8			
	3	0.1755	38.8	0.0998	0.0019	0.1434	81.7			
16日	1	0.1973	4.4	0.0998	0.0002	0.0163	8.2	8.7	95.4	90.9
	2	0.1425	3.6	0.0998	0.0002	0.0133	9.3			
	3	0.2021	4.7	0.0998	0.0002	0.0174	8.6			
25日	1	0.1967	4.9	0.0998	0.0002	0.0181	9.2	9.7	95.4	89.8
	2	0.1316	3.9	0.0998	0.0002	0.0144	11.0			
	3	0.1147	2.8	0.0998	0.0001	0.0103	9.0			
49日	1	0.1468	6.8	0.0998	0.0003	0.0251	17.1	15.8	95.4	83.4
	2	0.1888	8.2	0.0998	0.0004	0.0303	16.1			
	3	0.1756	6.8	0.0998	0.0003	0.0251	14.3			

表 3.2.19 可とう形複層塗材CE+シリカゲル条件での中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	可とう形複層塗材CE	吸湿処理	シリカゲル

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1998	50.7	0.0998	0.0025	0.1874	93.8	95.4	-	-
	2	0.2054	53.7	0.0998	0.0027	0.1985	96.6			
	3	0.1962	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.7			
1日	1	0.1116	25.8	0.0998	0.0013	0.0954	85.4	85.7	95.4	10.1
	2	0.1209	27.9	0.0998	0.0014	0.1031	85.3			
	3	0.1642	38.4	0.0998	0.0019	0.1419	86.4			
4日	1	0.2159	49.5	0.0998	0.0025	0.1830	84.7	84.0	95.4	11.9
	2	0.1505	34.1	0.0998	0.0017	0.1260	83.7			
	3	0.2087	47.2	0.0998	0.0024	0.1745	83.6			
7日	1	0.1909	42.2	0.0998	0.0021	0.1560	81.7	80.0	95.4	16.1
	2	0.1995	43.1	0.0998	0.0022	0.1593	79.8			
	3	0.1975	41.9	0.0998	0.0021	0.1549	78.4			
16日	1	0.1387	28.4	0.0998	0.0014	0.1050	75.7	77.7	95.4	18.5
	2	0.0936	20.2	0.0998	0.0010	0.0747	79.8			
	3	0.1321	27.8	0.0998	0.0014	0.1027	77.8			
25日	1	0.1270	27.2	0.0998	0.0014	0.1005	79.2	80.6	95.4	15.5
	2	0.1148	25.4	0.0998	0.0013	0.0939	81.8			
	3	0.1276	27.9	0.0998	0.0014	0.1031	80.8			
49日	1	0.1002	14.4	0.0998	0.0007	0.0532	53.1	53.2	95.4	44.2
	2	0.1015	14.8	0.0998	0.0007	0.0547	53.9			
	3	0.1098	15.6	0.0998	0.0008	0.0577	52.5			

表 3.2.20 防水形複層塗材CE+シリカゲル条件での中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	防水形複層塗材CE	吸湿処理	シリカゲル

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1998	50.7	0.0998	0.0025	0.1874	93.8	95.4	-	-
	2	0.2054	53.7	0.0998	0.0027	0.1985	96.6			
	3	0.1962	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.7			
1日	1	0.1223	29.8	0.0998	0.0015	0.1101	90.1	88.8	95.4	6.8
	2	0.0903	21.6	0.0998	0.0011	0.0798	88.4			
	3	0.1259	30.0	0.0998	0.0015	0.1109	88.1			
4日	1	0.1269	29.6	0.0998	0.0015	0.1094	86.2	87.5	95.4	8.2
	2	0.1448	34.3	0.0998	0.0017	0.1268	87.5			
	3	0.1465	35.2	0.0998	0.0018	0.1301	88.8			
7日	1	0.1701	41.4	0.0998	0.0021	0.1530	90.0	87.4	95.4	8.4
	2	0.1953	44.8	0.0998	0.0022	0.1656	84.8			
	3	0.1788	42.3	0.0998	0.0021	0.1563	87.4			
16日	1	0.1380	30.9	0.0998	0.0015	0.1142	82.8	83.6	95.4	12.4
	2	0.1639	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	85.0			
	3	0.1002	22.5	0.0998	0.0011	0.0832	83.0			
25日	1	0.1016	21.4	0.0998	0.0011	0.0791	77.8	75.6	95.4	20.8
	2	0.1098	21.8	0.0998	0.0011	0.0806	73.4			
	3	0.0999	20.4	0.0998	0.0010	0.0754	75.5			
49日	1	0.1603	19.7	0.0998	0.0010	0.0728	45.4	46.7	95.4	51.0
	2	0.1494	18.9	0.0998	0.0009	0.0699	46.8			
	3	0.1627	21.1	0.0998	0.0011	0.0780	47.9			

表 3.2.21 防水形複層塗材E + シリカゲル条件での中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	防水形複層塗材E	吸湿処理	シリカゲル

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1998	50.7	0.0998	0.0025	0.1874	93.8	95.4	-	-
	2	0.2054	53.7	0.0998	0.0027	0.1985	96.6			
	3	0.1962	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.7			
1日	1	0.1059	26.1	0.0998	0.0013	0.0965	91.1	90.3	95.4	5.3
	2	0.1054	25.3	0.0998	0.0013	0.0935	88.7			
	3	0.1079	26.6	0.0998	0.0013	0.0983	91.1			
4日	1	0.1186	28.8	0.0998	0.0014	0.1064	89.8	87.8	95.4	7.9
	2	0.1043	24.2	0.0998	0.0012	0.0894	85.8			
	3	0.1491	35.5	0.0998	0.0018	0.1312	88.0			
7日	1	0.1382	33.4	0.0998	0.0017	0.1234	89.3	88.6	95.4	7.1
	2	0.1315	31.8	0.0998	0.0016	0.1175	89.4			
	3	0.1531	36.1	0.0998	0.0018	0.1334	87.1			
16日	1	0.2075	48.3	0.0998	0.0024	0.1785	86.0	87.2	95.4	8.5
	2	0.1852	43.9	0.0998	0.0022	0.1623	87.6			
	3	0.1662	39.6	0.0998	0.0020	0.1464	88.1			
25日	1	0.1619	38.8	0.0998	0.0019	0.1434	88.6	88.5	95.4	7.2
	2	0.1853	44.2	0.0998	0.0022	0.1634	88.2			
	3	0.1951	46.8	0.0998	0.0023	0.1730	88.7			
49日	1	0.1079	24.2	0.0998	0.0012	0.0894	82.9	81.3	95.4	14.8
	2	0.1187	25.9	0.0998	0.0013	0.0957	80.6			
	3	0.1155	25.1	0.0998	0.0013	0.0928	80.3			

表 3.2.22 アルミ+シリカゲル条件での中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	パラフィンワックス
仕上材種類	アルミ	吸湿処理	シリカゲル

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1998	50.7	0.0998	0.0025	0.1874	93.8	95.4	-	-
	2	0.2054	53.7	0.0998	0.0027	0.1985	96.6			
	3	0.1962	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.7			
1日	1	0.2036	50.0	0.0998	0.0025	0.1848	90.8	91.7	95.4	3.9
	2	0.2051	51.3	0.0998	0.0026	0.1896	92.4			
	3	0.1900	47.2	0.0998	0.0024	0.1745	91.8			
4日	1	0.1751	43.8	0.0998	0.0022	0.1619	92.5	90.4	95.4	5.2
	2	0.1727	41.1	0.0998	0.0021	0.1519	88.0			
	3	0.1772	43.5	0.0998	0.0022	0.1608	90.7			
7日	1	0.1889	44.2	0.0998	0.0022	0.1634	86.5	88.5	95.4	7.2
	2	0.1814	44.5	0.0998	0.0022	0.1645	90.7			
	3	0.1830	43.8	0.0998	0.0022	0.1619	88.5			
16日	1	0.1889	43.4	0.0998	0.0022	0.1604	84.9	83.6	95.4	12.4
	2	0.1814	41.1	0.0998	0.0021	0.1519	83.7			
	3	0.1559	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	82.0			
25日	1	0.2019	45.7	0.0998	0.0023	0.1689	83.7	83.1	95.4	12.8
	2	0.1914	43.1	0.0998	0.0022	0.1593	83.2			
	3	0.1980	44.2	0.0998	0.0022	0.1634	82.5			
49日	1	0.0999	18.4	0.0998	0.0009	0.0680	68.1	68.0	95.4	28.7
	2	0.1059	19.7	0.0998	0.0010	0.0728	68.8			
	3	0.1055	19.2	0.0998	0.0010	0.0710	67.3			

表 3.2.23 アルミ+シリカゲル+ウレタンシーリング条件での中和滴定法による試験結果

試験器具	カップ	封かん処理	ウレタンシーリング
仕上材種類	アルミ	吸湿処理	シリカゲル

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1998	50.7	0.0998	0.0025	0.1874	93.8	95.4	-	-
	2	0.2054	53.7	0.0998	0.0027	0.1985	96.6			
	3	0.1962	50.8	0.0998	0.0025	0.1878	95.7			
1日	1	0.1419	35.0	0.0998	0.0017	0.1294	91.2	91.6	95.4	4.0
	2	0.1963	48.3	0.0998	0.0024	0.1785	90.9			
	3	0.1740	43.6	0.0998	0.0022	0.1611	92.6			
4日	1	0.1350	32.5	0.0998	0.0016	0.1201	89.0	89.9	95.4	5.7
	2	0.1619	39.7	0.0998	0.0020	0.1467	90.6			
	3	0.1850	45.1	0.0998	0.0022	0.1667	90.1			
7日	1	0.1960	48.2	0.0998	0.0024	0.1781	90.9	88.1	95.4	7.6
	2	0.2039	47.6	0.0998	0.0024	0.1759	86.3			
	3	0.2050	48.3	0.0998	0.0024	0.1785	87.1			
16日	1	0.1900	46.4	0.0998	0.0023	0.1715	90.3	88.4	95.4	7.3
	2	0.1751	42.1	0.0998	0.0021	0.1556	88.9			
	3	0.1712	39.9	0.0998	0.0020	0.1475	86.1			
49日	1	0.1772	40.5	0.0998	0.0020	0.1497	84.5	86.1	95.4	9.7
	2	0.2039	48.7	0.0998	0.0024	0.1800	88.3			
	3	0.2162	50.1	0.0998	0.0025	0.1852	85.6			

表 3.2.24 ろ紙

条件		0日			2日			4日			7日		
因子	Temp.(C)	TG(%)	Δ D(%)	C(wt%)									
水	<150	-0.20	0.20	0.20	-1.32	1.32	1.32	-0.80	0.80	0.80	-1.20	1.20	1.20
水酸化カルシウム	350-500	-23.69	23.49	96.57	-14.62	13.30	54.68	-10.92	10.12	41.60	-11.52	10.32	42.43
炭酸カルシウム	>550	-24.61	0.92	2.09	-33.81	19.19	43.61	-35.36	24.44	55.55	-35.63	24.11	54.80
合計		98.86			99.61			97.95			98.42		
炭酸化率		0.00			41.52			53.45			52.70		

表 3.2.25 外層薄塗材E

条件		0日			2日			4日			6日		
因子	Temp.(C)	TG(%)	Δ D(%)	C(wt%)									
水	<150	-0.20	0.20	0.20	-1.30	1.30	1.30	-4.90	4.90	4.90	-3.20	3.20	3.20
水酸化カルシウム	350-500	-23.69	23.49	96.57	-20.79	19.49	80.13	-5.33	0.43	1.77	-3.72	0.52	2.14
炭酸カルシウム	>550	-24.61	0.92	2.09	-28.32	7.53	17.11	-45.46	40.13	91.20	-44.43	40.71	92.52
合計		98.86			98.54			97.87			97.86		
炭酸化率		0.00			15.02			89.11			90.43		

表 3.2.26 防水形複層C E

条件		0日			2日			4日			6日		
因子	Temp.(C)	TG(%)	Δ D(%)	C(wt%)									
水	<150	-0.20	0.20	0.20	-1.00	1.00	1.00	-4.30	4.30	4.30	-3.80	3.80	3.80
水酸化カルシウム	350-500	-23.69	23.49	96.57	-22.69	21.69	89.17	-4.54	0.24	0.99	-4.34	0.54	2.22
炭酸カルシウム	>550	-24.61	0.92	2.09	-26.63	3.94	8.95	-45.12	40.58	92.23	-45.11	40.77	92.66
合計		98.86			99.12			97.51			98.68		
炭酸化率		0.00			6.86			90.14			90.57		

表 3.2.27 アルミ

条件		0日			2日			4日			6日			7日		
因子	Temp.(C)	TG(%)	Δ D(%)	C(wt%)												
水	<150	-0.20	0.20	0.20	-0.72	0.72	0.72	-1.90	1.90	1.90	-5.34	5.34	5.34	-6.20	6.20	6.20
水酸化カルシウム	350-500	-23.69	23.49	96.57	-23.39	22.67	93.20	-20.61	18.71	76.92	-10.95	5.61	23.06	-6.81	0.61	2.51
炭酸カルシウム	>550	-24.61	0.92	2.09	-25.54	2.15	4.89	-29.47	8.86	20.14	-41.89	30.94	70.32	-46.48	39.67	90.16
合計		98.86			98.81			98.96			98.72			98.87		
炭酸化率		0.00			2.80			18.05			68.23			88.07		

3.3 ボックス法による仕上材の二酸化炭素透過性の評価

3.3.1 検討の概要

前節において、仕上材の二酸化炭素の透過性を評価する方法として、JIS Z 0208 の防湿包装材料の透湿度試験方法で規定されているカップを用いて検討を行った。検討の内容としては、通常、仕上材を透過する水分を塩化カルシウムに吸収させその重量変化を測定し透湿度を求める方法を応用して、二酸化炭素を吸収させるために水酸化カルシウムの利用を試みたものである。結果として、二酸化炭素は水酸化カルシウムと反応し炭酸カルシウムとなることが確認できたが、カップ内の湿度条件を調整する必要性を確認した。また、カップ内に十分な容積がないため、調湿材を十分な量を装置内に仕込むことが難しいことを確認できた。この検討では、仕上材の透湿抵抗を測定する方法として ASTM C 355³⁻¹²⁾による箱型の試験器具を使用した透湿度試験方法（ボックス法）の器具を応用することで装置内の容積を確保できるようにした。

また、JIS A 1475 : 2004 建築材料の平衡含水率測定方法を参照し 20°Cでの相対湿度が約 60%となる臭化ナトリウム飽和水溶液をボックスの底部に入れることでボックス内の湿度を一定に保ちつつ検討を行えるように意図した。これらの対策により本節においても仕上材の二酸化炭素透過性を評価する方法の提案を試みた。図 3.3.1 に試験体のイメージを試験体の外観を写真 3.3.1 に示す。尚、仕上材の透湿度を評価する方法としては、仕上学会法³⁻¹²⁾もあるがこの方法においても試験器具の中の容積が十分確保できないと考え検討の対象外とした。

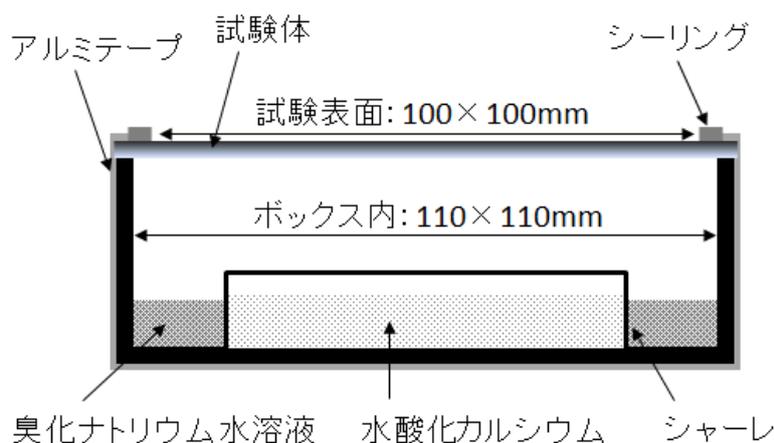


図 3.3.1 ボックス法試験装置の概要

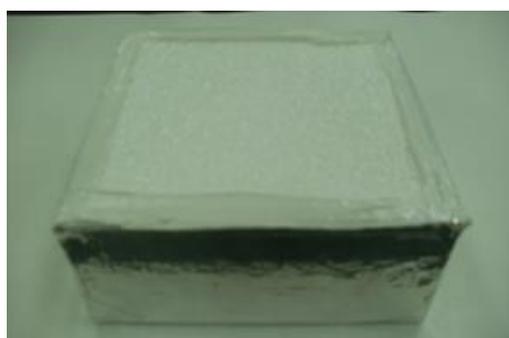


写真 3.3.1 ボックス法試験の外観

3.3.2 実験因子と水準

実験因子と水準及び試験体記号を表 3.3.1 に示す。仕上材の種類は仕上塗材 8 仕様、塗料 5 仕様とし吸湿処理の条件として吸湿剤を 5 水準確認した。また、使用する二酸化炭素の吸収剤としての水酸化カルシウムの試薬量を増減させ 4 水準確認した。促進養生条件としては、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%を固定条件とした。

表 3.3.1 実験因子と水準

因子	水準
仕上材種類	仕上塗材8仕様 塗料5仕様
吸湿処理	標準を臭化ナトリウム飽和水溶液のほか吸湿条件を4水準
吸収剤	水酸化カルシウム粉末試薬 (JIS K 8575, 和光純薬工業株) を使用 使用量は8gを標準として、4g、20g、25gの4水準
促進条件	温度20℃、相対湿度60%R.H.二酸化炭素濃度5%

3.3.3 仕上材の種類及び塗装仕様と試験片

評価を行った材料は、JIS K 5660、JIS K 5663、JIS K 5670 に規定される塗料及び、JIS A 6909 の建築用仕上塗材に規定される薄付け仕上塗材と複層仕上塗材の中から表 3.3.2 に示す材料を選択した。また、外装薄塗材Eについては、いわゆるリシン、スキン、ローラーリシンの3種類を確認することとした。塗料としては水系のエマルジョンペイントを4種類、比較として弱溶剤系のアクリル樹脂系非水分散型塗料（NAD）を1種類評価した。

表 3.3.2 仕上材の種類と塗付量

試験体略称	仕上の種類及び呼び名		塗付け量 (kg/m ²)	平均膜厚 (mm)
薄塗E-1	外装薄塗材E	リシン	1.00	1.28
薄塗E-2	外装薄塗材E	スキン	1.30	1.11
薄塗E-3	外装薄塗材E	ローラーリシン	0.64	0.48
可とう薄E	可とう形外装薄塗材E	弾性リシン	0.74	1.16
防薄E	防水形外装薄塗材E	単層弾性	0.70	0.57
複層E	複層塗材E	吹付タイル	1.21	0.76
可とう複CE	可とう形複層塗材CE	平たん状	1.20	1.13
防複E	防水形複層塗材E	弾性タイル	1.10	0.88
EPG-1	つや有リアクリルエマルジョンペイント		0.22	0.23
EPG-2	つや有リ弾性アクリルエマルジョンペイント		0.21	0.22
EP-1	つや消リアクリルエマルジョンペイント		0.22	0.23
EP-2	つや消リアクリルシリコンエマルジョンペイント		0.22	0.23
NAD	アクリル樹脂系非水分散型塗料		0.20	0.21

3.2 節に続き本節においても、JIS P 3801 に規定される 5 種Aのろ紙を基材として使用した。塗料の施工は JASS18 に、仕上塗材の施工は JASS23 に準じて塗装した。塗装後、温度 23±2℃、相対湿度 50±5% の条件で 2 週間養生した。この際、複層仕上塗材の塗装はベース吹きのみとし模様付けは行わなかった。試験体の塗装仕様及び平均膜厚を表 3.3.2 に示す。

仕上塗材の塗装後、養生を終了した試験体をボックス上部に設置できるように 120mm 程度の正方形に切り抜いた。各試験片は仕様ごとに 3 枚ずつ切り取って試験に供した。

3.3.4 試験方法

ボックス法による仕上材の二酸化炭素透過性を評価する操作手順を以下の表 3.3.3 に示す。

前節において、二酸化炭素の遮断にアルミ箔とウレタンシーリングの有用性を確認したため、ボックスの周囲と封かん材としてアルミテープ及びウレタンシーリングを用いている。促進条件としては、JIS A 1153 に規定されるコンクリートの促進中性化試験に準拠した条件（温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%）とした。

また、ボックス内における湿度条件が評価結果に及ぼす影響を把握するため、標準条件とする臭化ナトリウム飽和水溶液の他に表 3.3.4 に示す調湿材を使用して、それぞれの湿度条件で評価を行った。試薬量として、0.1mol (8g)を標準条件として試験を行った。また、試薬量による反応速度の影響を確認するため表 3.3.5 に示す条件に変更を行い検討した。

表 3.3.3 操作方法

手順	操作内容
1	器具の準備
2	ボックスの周囲にアルミテープを貼り付けた。
3	調湿剤(臭化ナトリウム等の塩飽和水溶液)を結晶共存状態で40mlをボックスの底部に入れた。
4	シャーレの中に水酸化カルシウム試薬(JIS K 8575:和光純薬工業株)を秤量していた。
5	水酸化カルシウムの表面を平滑に均して、ボックスの底中央にシャーレを設置した。
6	試験片をボックス上部に設置してアルミテープで取り付けた。
7	アルミテープと試験片表面の凹凸の隙間を塞ぐように、JIS A 5758の1成分形ウレタンシーリング(PU-1 F20LM-8020)を用いて、試験装置の封かん処理を行った。この際、ウレタンシーリングの塗付けは試験片の隅から10mmまでとし、試験片の表面を幅100mm×奥行100mmで露出させた。
8	試験体を促進条件(温度20℃、相対湿度60%、CO2濃度5%)で養生した。
9	適当な養生間隔で、促進養生室から試験体を取り出し後、ただちにカップから試験片を取り外す。皿から吸収剤を取り出して、吸収剤が二酸化炭素により中和された量を評価した。

表 3.3.4 調湿材の種類

湿度条件(%)	調湿材の種類	相対湿度*(%)
100	水	100
80	塩化アンモニウム飽和水溶液	79.23±0.44
60	臭化ナトリウム飽和水溶液	59.14±0.44
33	塩化マグネシウム飽和水溶液	33.07±0.18
0	塩化カルシウム粉末	0

* 20℃条件下の値(JIS A 1475、JIS Z 8806を参照)

表 3.3.5 水酸化カルシウム使用量の条件

水酸化カルシウム 質量(g)	mol量*
4	0.05
8	0.1
20	0.25
25	0.31

*経時により炭酸カルシウムとなるため
試薬純度は一律95%で計算

3.3.5 評価方法

前節において中和滴定分析および示差熱重量分析のどちらの方法を用いても、系中に存在する化学種が少ないこともあり、分析結果は非常に高い相関を示した。そのため、どちらの分析方法を用いても評価可能であること、精度の高い結果を得られることが確認出来た。そこで本節においては、分析時間が短くかつ簡易に行える中和滴定により評価を行うこととした。

3.3.6 実験結果と考察

(1)標準条件下の結果

各種仕上材の標準試験条件における炭酸化率の経時変化による測定結果を表 3.3.6 に示す。その傾向を仕上塗材と塗料に分けてそれぞれ図 3.3.2 及び図 3.3.3 に示す。

図 3.3.2 から、炭酸化率の値は 60%程度で頭打ちするまでは、ほぼ直線的に進行することが確認出来た。また、図 3.3.2、3.3.3 をみると、建築用仕上塗材及び塗料の炭酸化率の推移は、その種類及び分類により大きく変化することが分かった。大まかに分類すると、薄塗材 > 塗料 > 複層塗材の分類順で炭酸化の進行が速い。これは JASS5³⁻¹³⁾ に記載される中性化率と同様の傾向である。

また、仕上塗材については、可とう形や防水形のように弾性系の材料になるにつれて炭酸化の進行が遅くなることが分かった。

図 3.3.2、3.3.3 から、薄塗 E-1、薄塗 E-2 と可とう薄 E を除き、ほぼ直線的に炭酸化率が增加することがわかる。薄塗 E-1、薄塗 E-2 と可とう薄 E についても、炭酸化率が 60%程度で頭打ちするまでは、ほぼ直線的に増加する。

各試験体の炭酸化率の変化を比較するため、炭酸化率の頭打ちが見られない養生期間 3 日目までの値を元に、各試験体の経過時間（日）に対する炭酸化率の傾きを最小二乗法によりもとめ、表 3.3.7 にまとめた。

表 3.3.7 をみると、試験体の炭酸化率の推移は、その種類及び分類により大きく変化する。薄付け仕上塗材 は、おおむね 10 以上となり、塗料が 6~3、複層仕上塗材が 6~0 となった。大きく分けると薄付け仕上塗材 > 塗料 > 複層仕上塗材の順番で炭酸化率が大きくなる。

表 3.3.7 において、薄塗 E-1~3 のように JIS A 6909 の種類では、外装薄塗材 E となる材料の中で、その炭酸化率の変化が大きく異なる材料があることが確認出来た。外装薄塗材 E の中性化率は大きく耐久性上有効な仕上げと考えられていない。しかし、中性化抑制効果があるとされる複層 E と比較して、薄塗 E-3 の様に外装薄塗材 E であっても傾きが小さい材料があることが分かった。このことは、現状の材料規格における種類での中性化率の評価結果だけでは不十分であり、個々の製品ごとの評価が必要であることが確認出来たといえる。

表 3.3.6 各種仕上材の標準条件下における炭酸化率の変化

試験体略称	炭酸化率(%)						
	1日	2日	3日	5日	7日	8日	9日
薄塗E-1	25.6	40.0	55.3	-	56.3	-	-
薄塗E-2	24.0	34.4	50.1	59.4	57.8	-	-
薄塗E-3	2.9	4.4	7.2	15.5	-	-	27.8
可とう薄E	10.4	25.1	44.6	-	56.2	-	-
防薄E	11.0	23.0	31.0	-	57.5	-	-
複層E	-	15.2	15.9	-	31.7	-	-
可とう複CE	0.0	0.0	0.0	-	0.0	-	0.0
防複E	2.7	-	3.0	-	5.3	-	7.3
EPG-1	5.9	-	9.8	19.0	-	26.4	-
EPG-2	0.5	6.5	13.3	-	22.3	-	-
EP-1	8.8	-	16.1	15.7	-	25.0	-
EP-2	7.0	-	11.1	20.1	-	41.6	-
NAD	4.7	-	8.5	12.6	-	18.9	-

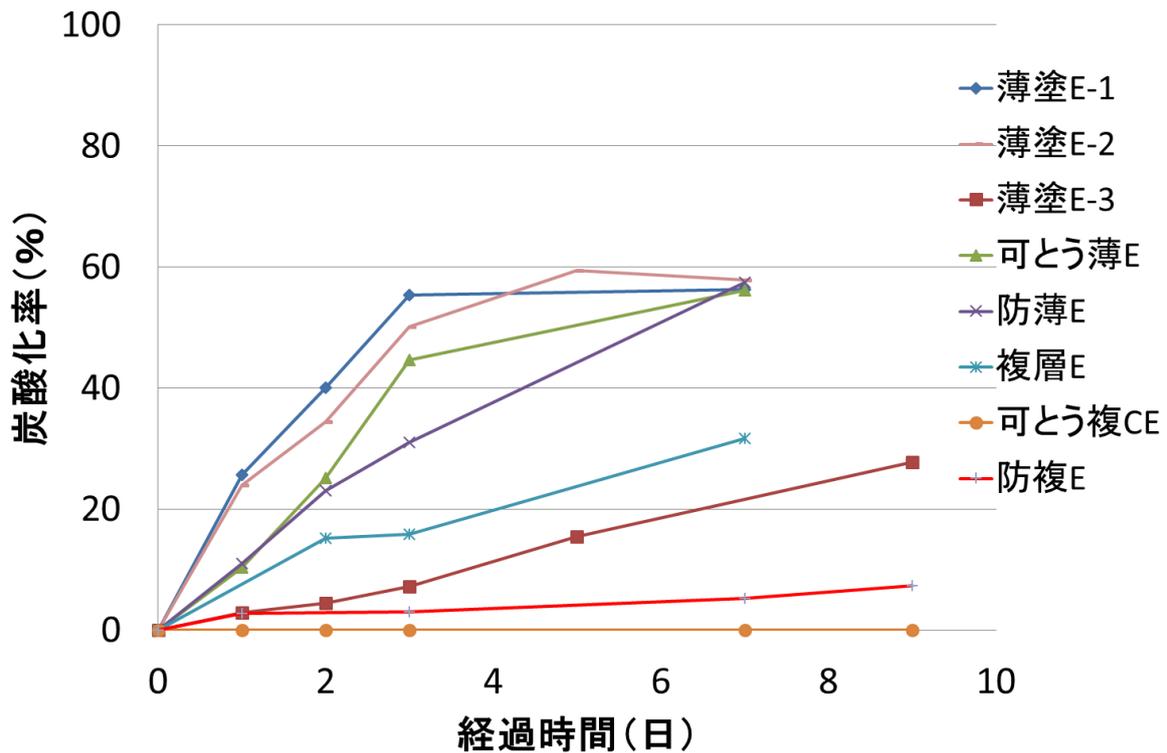


図 3.3.2 建築用仕上塗材 (JIS A 6909) における炭酸化率の傾向

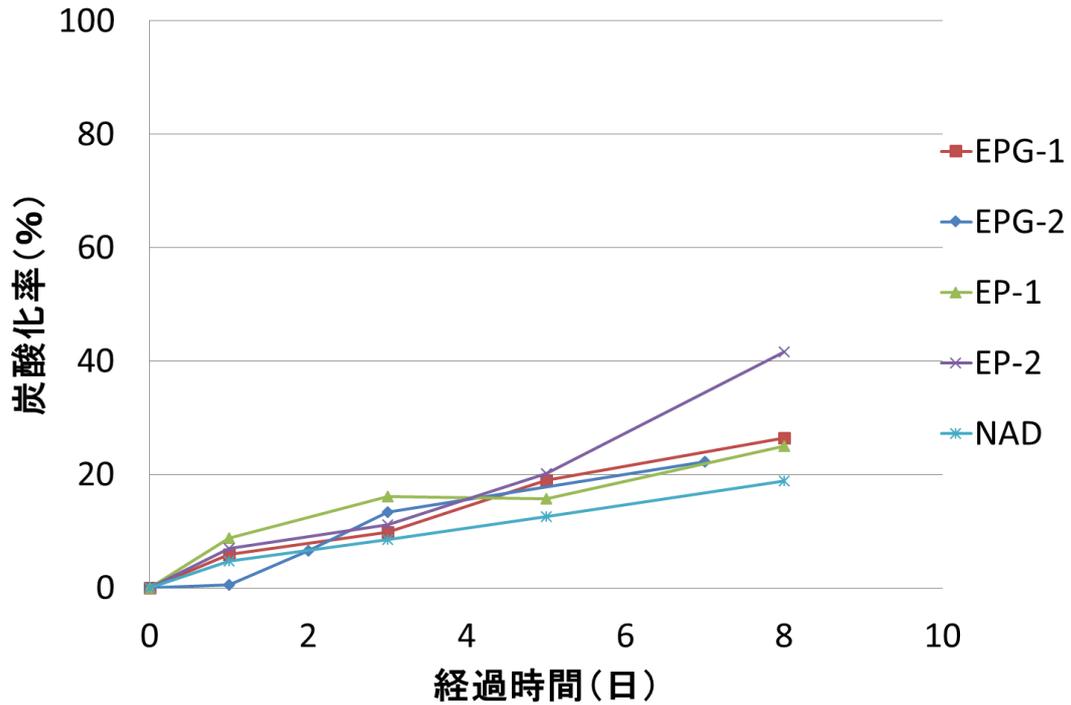


図 3.3.3 塗料（JIS K 5660 及び JIS K 5663、JIS K 5670）における炭酸化率の傾向

表 3.3.7 各材料による標準条件での炭酸化率の傾き*

試験体略称	傾き*
薄塗E-1	19.4
薄塗E-2	17.4
薄塗E-3	2.4
可とう薄E	13.9
防薄E	10.7
複層E	6
可とう複CE	0
防複E	1.2

試験体略称	傾き*
EPG-1	3.5
EPG-2	3.8
EP-1	5.7
EP-2	4
NAD	3

*養生期間3日目までの値から算出

(2)湿度条件の影響

ボックス法試験装置内の湿度条件が試験結果に及ぼす影響を確認するため、表 3.3.4 に示す湿度条件で試験を行った。

標準条件下での結果を受け、湿度条件の影響が顕著に表れると予想して、試験体は薄塗 E-1～3 及び可薄 E を用いた。試験結果を図 3.3.4～3.3.7 に示す。

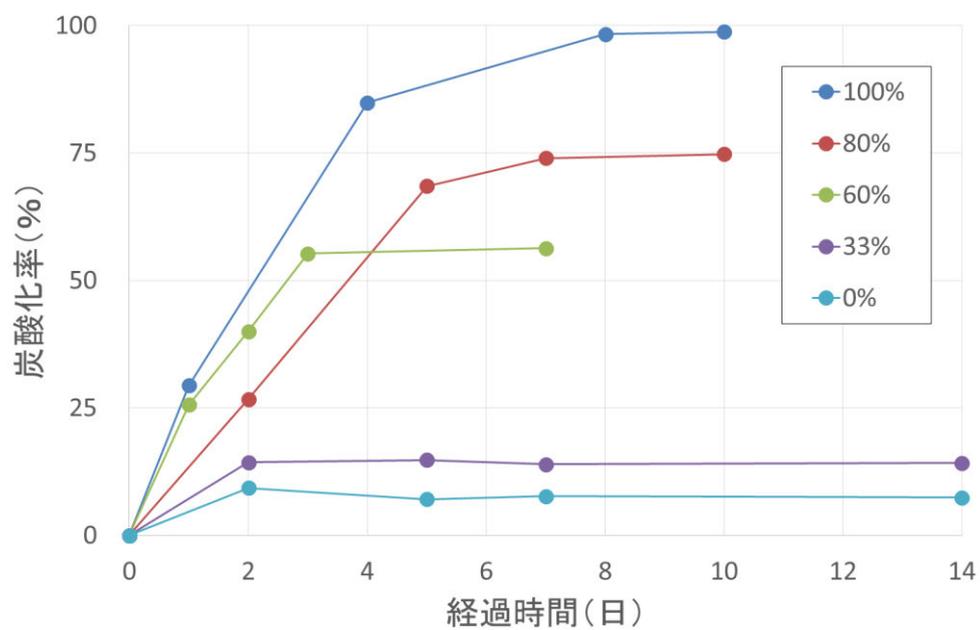


図 3.3.4 薄塗 E-1 の湿度依存性

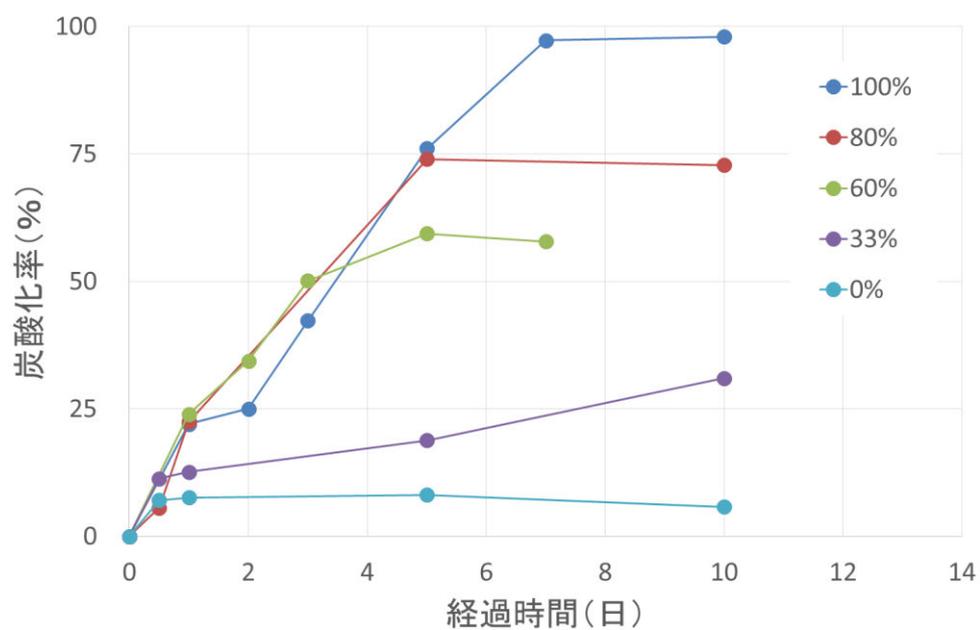


図 3.3.5 薄塗 E-2 の湿度依存性

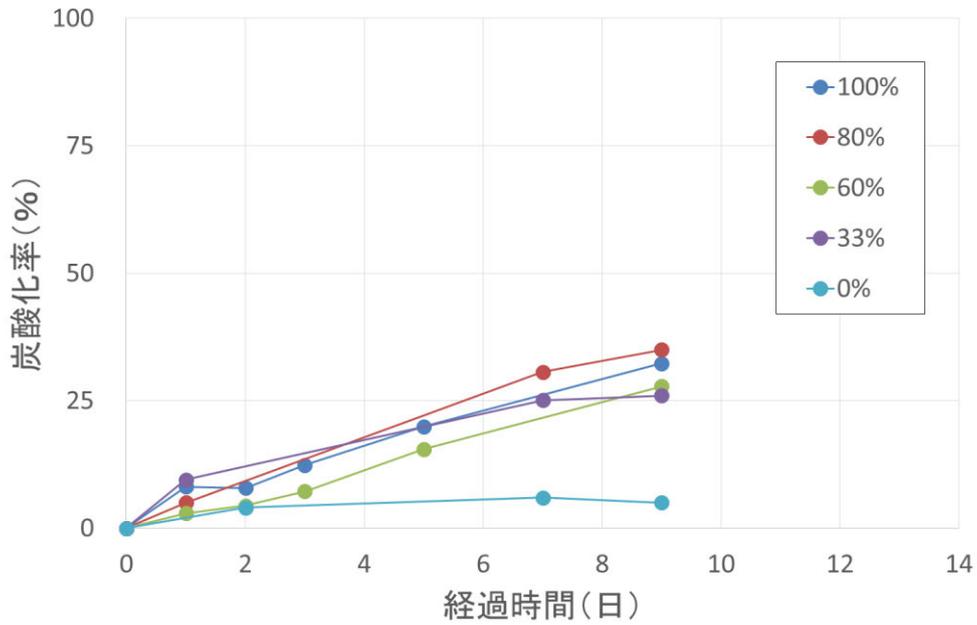


図 3.3.6 薄塗 E-3 の湿度依存性

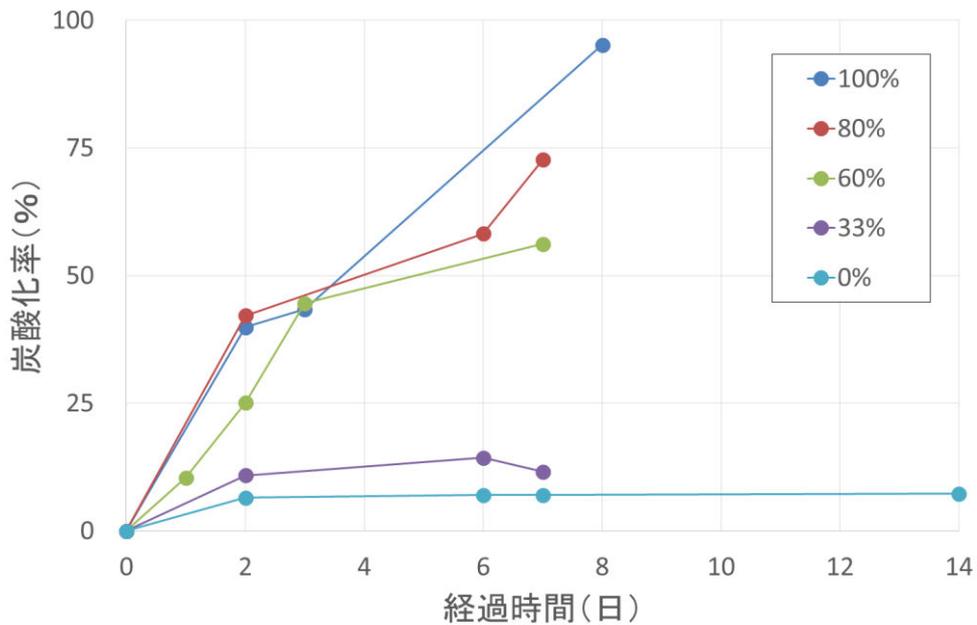


図 3.3.7 可とう薄 E の湿度依存性

図 3.3.4、3.3.5 の試験結果から、炭酸化率は湿度条件により頭打ちする値が変わることが確認出来た。その割合は湿度条件 100%のときに炭酸化率もほぼ 100%となった。そして湿度条件が 80%、60%と低くなるにつれて、炭酸化率が頭打ちする値も段階を追って減少することが分かった。塩化カルシウム粉末を用いて、ボックス内の水分を吸湿させた条件下では炭酸化率の変化がほとんど見られなかった。この評価方法での水酸化カルシウムと二酸化炭素の反応には、水分が不可欠であることを示す結果である。

図 3.3.4～3.3.7 から、薄塗 E-1 の湿度条件 80% の場合を除いて、炭酸化率が頭打ちするまでは、湿度条件に依存せずほぼ一定の傾きを示した。また、炭酸化率が 100% 進行する場合においても、直線的に炭酸化率が推移することから、二酸化炭素の水酸化カルシウム粒子内での拡散・浸透過程は十分に早いことが確認できた。反応の仮想モデルとして、各湿度条件に応じて水酸化カルシウム粒子表面での水分の浸透があり、その水分を媒介し二酸化炭素が拡散・浸透することで反応が進行していると考えられる。その際、それぞれの相対湿度における水蒸気圧により、発生する水の量に違いが出ることで、また、発生した水の蒸発量についても湿度が高い場合は抑制され水酸化カルシウムの粒子内での二酸化炭素の拡散に影響を与えると予測される。これはカップ法において蒸発が妨げられた際に水酸化カルシウム試薬がカップ内で吸湿堅固し炭酸化率がほぼ 100% になった試験体があったことから、反応による水分の影響を受けることが想定できる。

その結果、水酸化カルシウムと二酸化炭素の反応割合が変わり、湿度条件により炭酸化率の上限値に違いが出ていると予想される。よって、反応速度自体は湿度条件には依存しないため、以後、コンクリートの促進条件にならない、湿度条件 60% に調整した条件を標準条件として設定し、炭酸化率が頭打ちするまでのデータを元に二酸化炭素透過性の傾向を判断することにした。

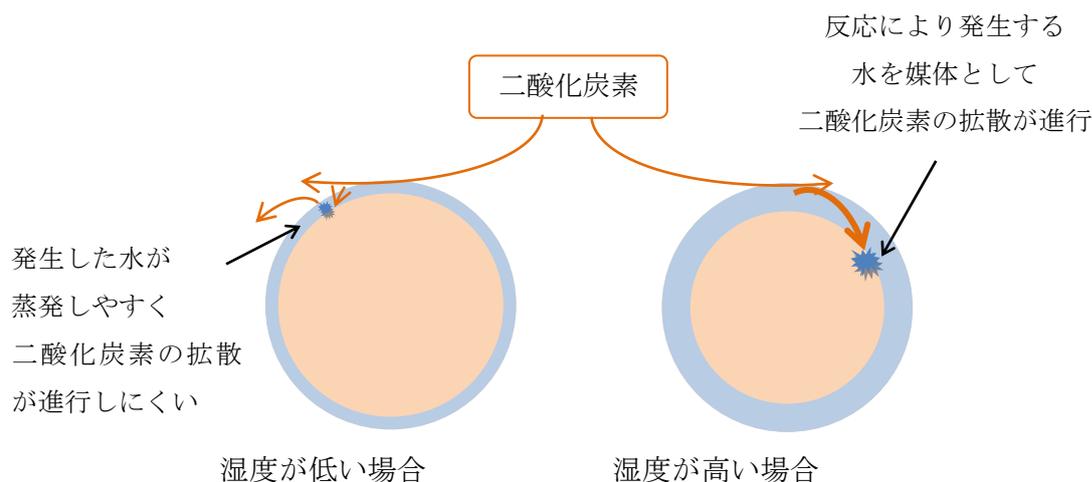


図 3.3.8 反応の仮想モデル

(3)吸収剤（水酸化カルシウム）の量による影響

炭酸化率が頭打ちするまでは、ボックス内での水酸化カルシウムと二酸化炭素の反応は十分速く、その変化は直線的に進む。このことから、炭酸化率の傾きは塗料及び仕上塗材の単純な二酸化炭素の透過性に依存していると予想される。

そこで試験体を透過した二酸化炭素が水酸化カルシウムと定量的に反応しているか確認するために、ボックス内にいれる水酸化カルシウム試薬量を変更することにした。試薬量は表 3.3.5 に示した条件で変更した。ボックス内の湿度条件は 60%として試験を行い、炭酸化率が頭打ちするまでの値を抽出して最小二乗法を用いてそれぞれの試験体の炭酸化率の傾きを求めた。3.1 で示した標準条件下での試験結果により、炭酸化率の傾きの大きな薄塗 E-1、薄塗 E-2 と、中程度の防薄 E、中程度の可薄 E、小さな薄塗 E-3 を選びその結果を図 3.3.9～3.3.13 に示す。

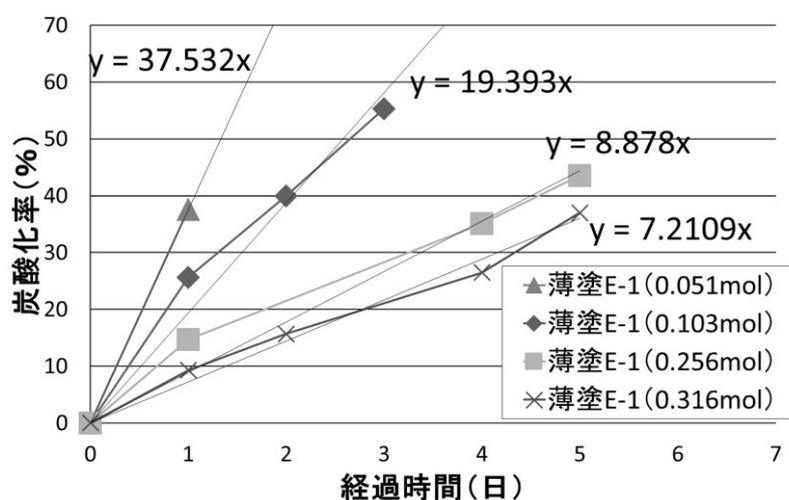


図 3.3.9 薄塗 E-1 試薬量の影響

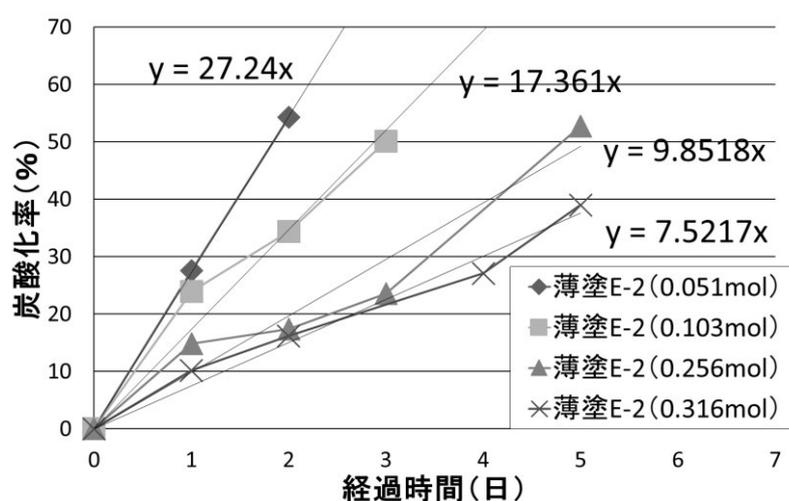


図 3.3.10 薄塗 E-2 試薬量の影響

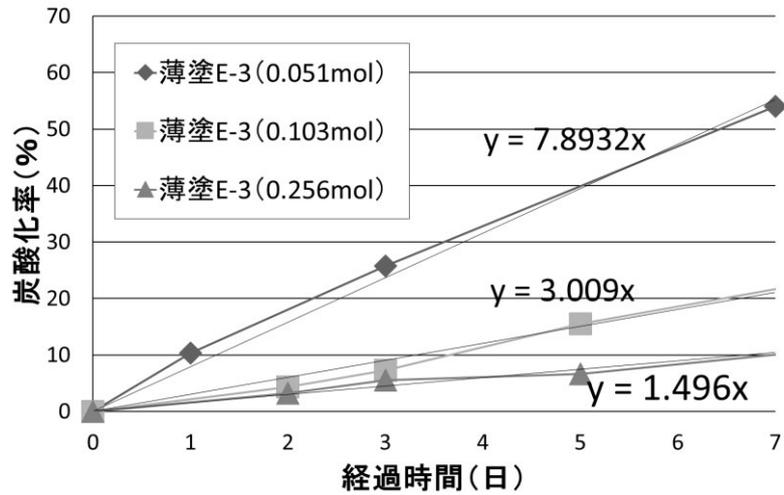


図 3.3.11 薄塗 E-3 試薬量の影響

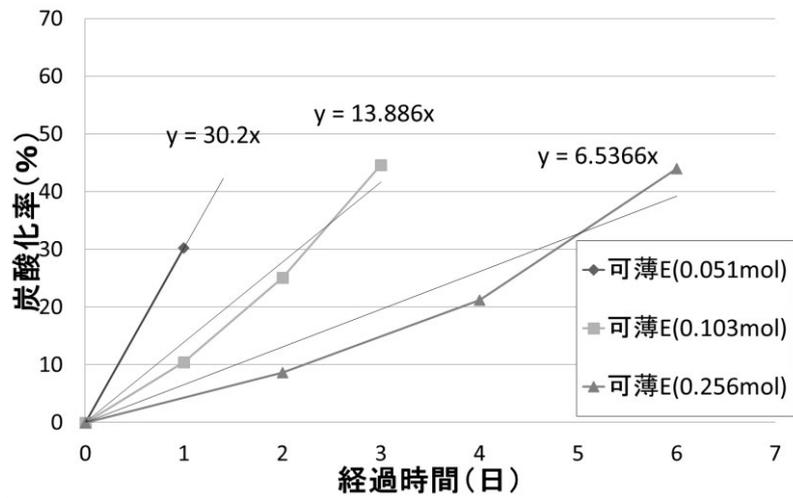


図 3.3.12 可薄 E 試薬量の影響

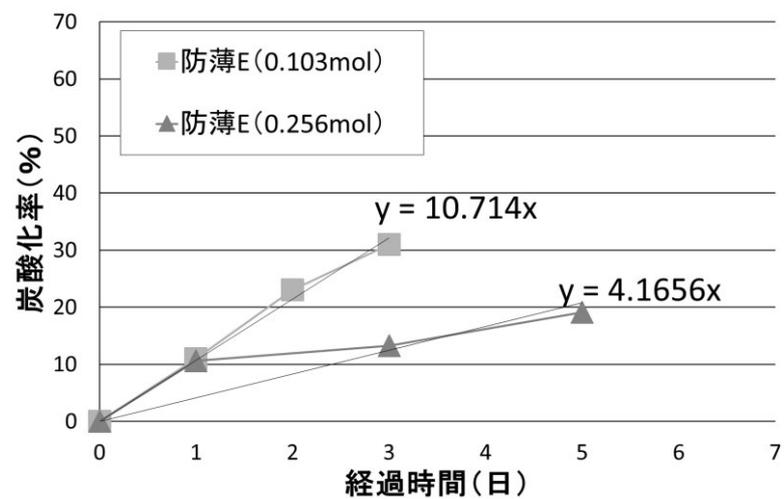


図 3.3.13 防薄 E 試薬量の影響

図 3.3.9 の結果より、試薬量が半分になれば、傾きがほぼ 2 倍程度に大きくなるといった、反比例に近い関係が見られることが分かった。これは図 3.3.10～3.3.13 においても同様の傾向が確認出来る。

試験体を透過した二酸化炭素と水酸化カルシウムとが定量的に反応しているならば、試薬量に関わらずに時間当たりの炭酸カルシウムの生成量は一定となる。そこで炭酸化率の傾きと水酸化カルシウム試薬量から、24 時間当たりの炭酸カルシウム生成量(mol/24h)を求め Y 軸にとり、水酸化カルシウム試薬量(mol)を X 軸にとってそれらの関係を図 3.3.14 に示す。

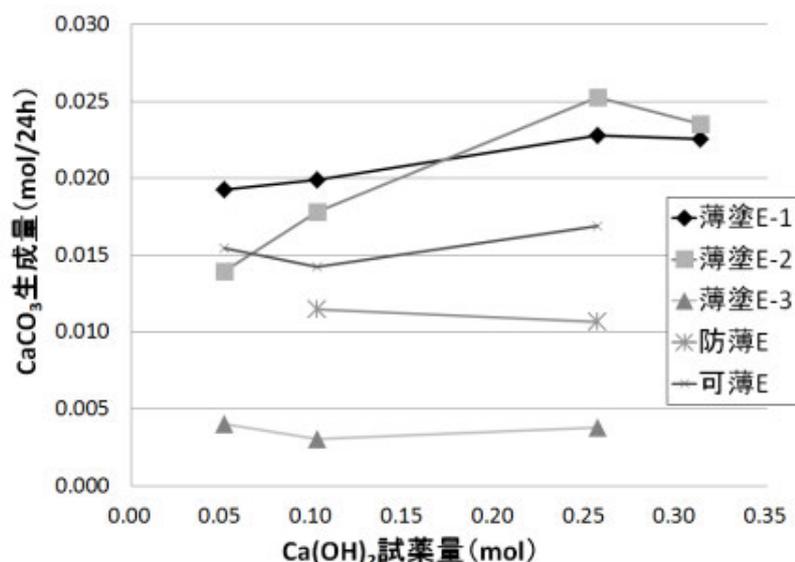


図 3.3.14 速度と試薬量 (mol) の関係

図 3.3.14 より、薄塗 E-1 や薄塗 E-2 のように、炭酸化率の傾きが大きく二酸化炭素透過量が多い試験体では、使用する水酸化カルシウム試薬の量が多くなるにつれて、炭酸カルシウムの生成速度も徐々に上がることが分かった。その増加傾向は、水酸化カルシウム試薬量が 0.25mol 程度で頭打ちすることが確認できた。

この結果から、試験体の二酸化炭素透過量が多い場合には、ボックス試験装置内で、水酸化カルシウム試薬と反応しきれずに二酸化炭素が余る。そのため、水酸化カルシウム試薬の量を増やすことで二酸化炭素の余剰分を無くし、二酸化炭素の透過量を定量的に評価できることを示している。

一方、薄塗 E-3 及び防薄 E などの炭酸化率の傾きが中程度か小さい試験体では、炭酸カルシウムの生成速度は試薬量に依存せず、一定の値をとる。この結果は、薄塗 E-3 及び防薄 E では、水酸化カルシウムの試薬量が 0.1mol 程度で十分に二酸化炭素透過量を定量的に評価できることを示す。

これらの結果より、ボックス法によって仕上げ材の二酸化炭素透過性を定量的に評価できる可能性を見出した。

また、詳細な試験データを表 3.3.8～表 3.3.47 に示す。

表 3.3.8 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材 E-1	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	27.6	0.0998	0.0014	0.1020	88.9	89.5	-	-
	2	0.1317	32.0	0.0998	0.0016	0.1183	89.8			
	3	0.1222	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	89.8			
1日	1	0.0509	10.2	0.0998	0.0005	0.0377	74.1	66.6	89.5	25.6
	2	0.0892	14.3	0.0998	0.0007	0.0529	59.3			
	3	0.0662	11.9	0.0998	0.0006	0.0440	66.4			
2日	1	0.0725	10.4	0.0998	0.0005	0.0384	53.0	53.7	89.5	40.0
	2	0.0477	7.2	0.0998	0.0004	0.0266	55.8			
	3	0.0531	7.5	0.0998	0.0004	0.0277	52.2			
3日	1	0.0686	7.7	0.0998	0.0004	0.0285	41.5	40.0	89.5	55.3
	2	0.0639	6.8	0.0998	0.0003	0.0251	39.3			
	3	0.0802	8.5	0.0998	0.0004	0.0314	39.2			
7日	1	0.1080	11.1	0.0998	0.0006	0.0410	38.0	39.1	89.5	56.3
	2	0.0962	11.00	0.0998	0.0005	0.0407	42.3			
	3	0.1689	16.95	0.0998	0.0008	0.0626	37.1			
28日	1	0.1120	12.00	0.0998	0.0006	0.0444	39.6	38.0	89.5	57.6
	2	0.1294	13.30	0.0998	0.0007	0.0492	38.0			
	3	0.1170	11.50	0.0998	0.0006	0.0425	36.3			

表 3.3.9 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6	-	-
	2	0.1369	34.5	0.0998	0.0017	0.1275	93.1			
	3	0.1602	41.2	0.0998	0.0021	0.1523	95.1			
1日	1	0.0837	16.5	0.0998	0.0008	0.0610	72.9	71.3	94.6	24.6
	2	0.0993	19.1	0.0998	0.0010	0.0706	71.1			
	3	0.1013	19.2	0.0998	0.0010	0.0710	70.1			
2日	1	0.0940	14.8	0.0998	0.0007	0.0547	58.2	61.9	94.6	34.6
	2	0.1465	24.3	0.0998	0.0012	0.0898	61.3			
	3	0.1388	24.9	0.0998	0.0012	0.0920	66.3			
3日	1	0.1121	13.2	0.0998	0.0007	0.0488	43.5	47.2	94.6	50.1
	2	0.1267	15.8	0.0998	0.0008	0.0584	46.1			
	3	0.1188	16.7	0.0998	0.0008	0.0617	52.0			
5日	1	0.0801	9.9	0.0998	0.0005	0.0366	45.7	46.9	94.6	50.4
	2	0.0974	10.7	0.0998	0.0005	0.0395	40.6			
	3	0.0672	9.9	0.0998	0.0005	0.0366	54.4			
7日	1	0.1424	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	40.0	40.0	94.6	57.8
	2	0.1139	12.1	0.0998	0.0006	0.0447	39.3			
	3	0.1010	11.1	0.0998	0.0006	0.0410	40.6			

表 3.3.10 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-3 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-3	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6	-	-
	2	0.1369	34.5	0.0998	0.0017	0.1275	93.1			
	3	0.1602	41.2	0.0998	0.0021	0.1523	95.1			
1日	1	0.1113	28.5	0.0998	0.0014	0.1053	94.6	91.9	94.6	2.9
	2	0.0854	21.0	0.0998	0.0010	0.0776	90.9			
	3	0.0939	22.9	0.0998	0.0011	0.0846	90.1			
2日	1	0.1013	25.4	0.0998	0.0013	0.0939	92.7	90.5	94.6	4.4
	2	0.1190	28.9	0.0998	0.0014	0.1068	89.8			
	3	0.1096	26.4	0.0998	0.0013	0.0976	89.0			
3日	1	0.0585	14.3	0.0998	0.0007	0.0529	90.3	87.8	94.6	7.2
	2	0.0902	21.2	0.0998	0.0011	0.0784	86.9			
	3	0.0879	20.5	0.0998	0.0010	0.0758	86.2			
5日	1	0.0610	13.6	0.0998	0.0007	0.0503	82.4	79.9	94.6	15.5
	2	0.0961	20.6	0.0998	0.0010	0.0761	79.2			
	3	0.0714	15.1	0.0998	0.0008	0.0558	78.2			
9日	1	0.0601	11.6	0.0998	0.0006	0.0429	71.3	68.4	94.6	27.8
	2	0.0519	9.7	0.0998	0.0005	0.0359	69.1			
	3	0.0566	9.9	0.0998	0.0005	0.0366	64.6			

表 3.3.11 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.0797	18.5	0.0998	0.0009	0.0684	85.8	85.6	-	-
	2	0.0708	16.3	0.0998	0.0008	0.0602	85.1			
	3	0.0533	12.4	0.0998	0.0006	0.0458	86.0			
1日	1	0.0507	10.4	0.0998	0.0005	0.0384	75.8	76.7	85.6	10.4
	2	0.0811	15.7	0.0998	0.0008	0.0580	71.5			
	3	0.0585	13.1	0.0998	0.0007	0.0484	82.8			
2日	1	0.0621	12.5	0.0998	0.0006	0.0462	74.4	64.1	85.6	25.1
	2	0.0588	9.3	0.0998	0.0005	0.0344	58.5			
	3	0.0572	9.2	0.0998	0.0005	0.0340	59.4			
3日	1	0.0695	7.1	0.0998	0.0004	0.0262	37.8	47.4	85.6	44.6
	2	0.0790	9.9	0.0998	0.0005	0.0366	46.3			
	3	0.0574	9.1	0.0998	0.0005	0.0334	58.3			
5日	1	0.1118	10.6	0.0998	0.0005	0.0390	34.9	37.5	85.6	56.2
	2	0.1126	10.8	0.0998	0.0005	0.0399	35.4			
	3	0.1180	13.5	0.0998	0.0007	0.0497	42.1			
28日	1	0.1585	13.6	0.0998	0.0007	0.0503	31.7	36.5	85.6	57.4
	2	0.2316	22.5	0.0998	0.0011	0.0832	35.9			
	3	0.1500	17.0	0.0998	0.0008	0.0628	41.9			

表 3.3.12 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における防水形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	防水形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	27.6	0.0998	0.0014	0.1020	88.9	89.5	-	-
	2	0.1317	32.0	0.0998	0.0016	0.1183	89.8			
	3	0.1222	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	89.8			
1日	1	0.0881	19.1	0.0998	0.0010	0.0706	80.1	79.7	89.5	11.0
	2	0.0995	20.5	0.0998	0.0010	0.0758	76.1			
	3	0.0724	16.2	0.0998	0.0008	0.0599	82.7			
2日	1	0.1178	21.2	0.0998	0.0011	0.0784	66.5	68.9	89.5	23.0
	2	0.1194	22.4	0.0998	0.0011	0.0828	69.3			
	3	0.1094	21.0	0.0998	0.0010	0.0776	70.9			
3日	1	0.1028	17.1	0.0998	0.0009	0.0632	61.5	61.8	89.5	31.0
	2	0.1554	25.1	0.0998	0.0013	0.0928	59.7			
	3	0.1136	19.7	0.0998	0.0010	0.0728	64.1			
7日	1	0.1227	13.2	0.0998	0.0007	0.0488	39.8	38.0	89.5	57.5
	2	0.2059	20.3	0.0998	0.0010	0.0750	36.4			
	3	0.0995	10.2	0.0998	0.0005	0.0377	37.9			
28日	1	0.1006	10.1	0.0998	0.0005	0.0373	37.1	38.2	89.5	57.4
	2	0.1253	13.4	0.0998	0.0007	0.0495	39.5			
	3	0.1426	14.6	0.0998	0.0007	0.0540	37.8			

表 3.3.13 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における複層塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	複層塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1167	30.2	0.0998	0.0015	0.1116	95.6	90.2	-	-
	2	0.1192	28.3	0.0998	0.0014	0.1046	87.7			
	3	0.1014	23.9	0.0998	0.0012	0.0883	87.1			
2日	1	0.1052	22.5	0.0998	0.0011	0.0832	79.0	75.9	89.5	15.2
	2	0.1043	21.1	0.0998	0.0011	0.0780	74.8			
	3	0.1044	20.9	0.0998	0.0010	0.0772	74.0			
3日	1	0.0912	18.2	0.0998	0.0009	0.0673	73.8	75.3	89.5	15.9
	2	0.0867	18.9	0.0998	0.0009	0.0699	80.6			
	3	0.0985	19.1	0.0998	0.0010	0.0706	71.7			
7日	1	0.0843	15.8	0.0998	0.0008	0.0584	69.3	61.2	89.5	31.7
	2	0.1032	16.8	0.0998	0.0008	0.0621	60.2			
	3	0.1277	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	54.1			

表 3.3.14 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形複層塗材 CE の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形複層塗材CE	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	27.6	0.0998	0.0014	0.1020	88.9	89.5	-	-
	2	0.1317	32.0	0.0998	0.0016	0.1183	89.8			
	3	0.1222	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	89.8			
1日	1	0.1271	31.0	0.0998	0.0015	0.1146	90.1	89.7	89.5	0.0 (-0.1)
	2	0.0863	20.7	0.0998	0.0010	0.0765	88.7			
	3	0.1029	25.1	0.0998	0.0013	0.0928	90.2			
2日	1	0.1564	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	89.3	89.5	89.5	0.0
	2	0.1515	37.0	0.0998	0.0018	0.1368	90.3			
	3	0.1533	36.9	0.0998	0.0018	0.1364	89.0			
3日	1	0.1047	24.9	0.0998	0.0012	0.0920	87.9	89.5	89.5	0.0
	2	0.1022	25.1	0.0998	0.0013	0.0928	90.8			
	3	0.1078	26.2	0.0998	0.0013	0.0968	89.8			
7日	1	0.0847	21.0	0.0998	0.0010	0.0776	91.6	89.5	89.5	0.0
	2	0.0890	21.5	0.0998	0.0011	0.0795	89.3			
	3	0.0882	20.9	0.0998	0.0010	0.0772	87.6			
9日	1	0.0923	22.1	0.0998	0.0011	0.0817	88.5	89.8	89.5	0.0 (-0.3)
	2	0.0925	22.8	0.0998	0.0011	0.0843	91.1			
	3	0.0964	23.4	0.0998	0.0012	0.0865	89.7			

表 3.3.15 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における防水形複層塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	防水形複層塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	27.6	0.0998	0.0014	0.1020	88.9	89.5	-	-
	2	0.1317	32.0	0.0998	0.0016	0.1183	89.8			
	3	0.1222	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	89.8			
1日	1	0.1057	24.8	0.0998	0.0012	0.0917	86.7	87.1	89.5	2.7
	2	0.1098	26.0	0.0998	0.0013	0.0961	87.5			
	3	0.0921	21.7	0.0998	0.0011	0.0802	87.1			
3日	1	0.1047	22.9	0.0998	0.0011	0.0846	80.8	86.9	89.5	3.0
	2	0.1930	44.5	0.0998	0.0022	0.1643	85.1			
	3	0.1394	35.7	0.0998	0.0018	0.1319	94.7			
7日	1	0.1441	31.3	0.0998	0.0016	0.1157	80.3	84.9	89.5	5.1
	2	0.1327	30.6	0.0998	0.0015	0.1131	85.2			
	3	0.1233	29.8	0.0998	0.0015	0.1101	89.3			
9日	1	0.1824	41.8	0.0998	0.0021	0.1545	84.7	83.0	89.5	7.3
	2	0.1789	39.4	0.0998	0.0020	0.1456	81.4			
	3	0.1811	40.6	0.0998	0.0020	0.1501	82.9			

表 3.3.16 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における EPG-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	EPG-1 / つや有りアクリルエマルジョンペイント	水酸化カルシウム量	8g (0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6	-	-
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.7	0.0998	0.0017	0.1283	93.7			
1日	1	0.1225	29.0	0.0998	0.0014	0.1072	87.5	89.0	94.6	5.9
	2	0.1084	26.3	0.0998	0.0013	0.0972	89.7			
	3	0.0905	22.0	0.0998	0.0011	0.0813	89.8			
3日	1	0.1186	27.5	0.0998	0.0014	0.1016	85.7	85.3	94.6	9.8
	2	0.1293	29.0	0.0998	0.0014	0.1072	82.9			
	3	0.0876	20.7	0.0998	0.0010	0.0765	87.3			
5日	1	0.1015	21.5	0.0998	0.0011	0.0795	78.3	76.6	94.6	19.0
	2	0.0644	13.1	0.0998	0.0007	0.0484	75.2			
	3	0.0880	18.2	0.0998	0.0009	0.0673	76.4			
8日	1	0.0999	19.7	0.0998	0.0010	0.0728	72.9	69.6	94.6	26.4
	2	0.0944	17.4	0.0998	0.0009	0.0643	68.1			
	3	0.0938	17.2	0.0998	0.0009	0.0636	67.8			

表 3.3.17 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における EPG-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	EPG-2/つや有り弾性アクリルエマルジョンペイント	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.0797	18.5	0.0998	0.0009	0.0684	85.8	85.6	-	-
	2	0.0708	16.3	0.0998	0.0008	0.0602	85.1			
	3	0.0533	12.4	0.0998	0.0006	0.0458	86.0			
1日	1	0.1090	26.5	0.0998	0.0013	0.0979	89.9	85.2	85.6	0.5
	2	0.0515	11.7	0.0998	0.0006	0.0432	84.0			
	3	0.0741	16.4	0.0998	0.0008	0.0606	81.8			
2日	1	0.0562	13.0	0.0998	0.0006	0.0480	85.5	80.0	85.6	6.5
	2	0.0750	15.8	0.0998	0.0008	0.0582	77.6			
	3	0.0636	13.3	0.0998	0.0007	0.0490	77.0			
3日	1	0.0588	12.2	0.0998	0.0006	0.0451	76.7	74.2	85.6	13.3
	2	0.0725	14.9	0.0998	0.0007	0.0551	76.0			
	3	0.0496	9.4	0.0998	0.0005	0.0347	70.0			
7日	1	0.0895	16.9	0.0998	0.0008	0.0623	69.6	66.5	85.6	22.3
	2	0.1161	21.4	0.0998	0.0011	0.0791	68.1			
	3	0.1183	19.8	0.0998	0.0010	0.0732	61.9			
28日	1	0.1568	16.9	0.0998	0.0008	0.0625	39.8	38.4	85.6	55.2
	2	0.1715	18.0	0.0998	0.0009	0.0665	38.8			
	3	0.0768	7.6	0.0998	0.0004	0.0281	36.6			

表 3.3.18 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における EP-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	EP-1 / つや消しアクリルエマルジョンペイント	水酸化カルシウム量	8g (0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6	-	-
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.7	0.0998	0.0017	0.1283	93.7			
1日	1	0.0814	18.9	0.0998	0.0009	0.0699	85.8	86.3	94.6	8.8
	2	0.0992	23.4	0.0998	0.0012	0.0865	87.2			
	3	0.0892	20.7	0.0998	0.0010	0.0765	85.8			
3日	1	0.1021	22.5	0.0998	0.0011	0.0832	81.4	79.4	94.6	16.1
	2	0.0955	20.3	0.0998	0.0010	0.0750	78.6			
	3	0.0847	17.9	0.0998	0.0009	0.0662	78.1			
5日	1	0.1053	22.9	0.0998	0.0011	0.0846	80.4	79.8	94.6	15.7
	2	0.1010	22.5	0.0998	0.0011	0.0832	82.3			
	3	0.1037	21.5	0.0998	0.0011	0.0795	76.6			
8日	1	0.0798	15.5	0.0998	0.0008	0.0573	71.8	70.9	94.6	25.0
	2	0.0655	11.7	0.0998	0.0006	0.0432	66.0			
	3	0.0834	16.9	0.0998	0.0008	0.0625	74.9			

表 3.3.19 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における EP-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	EP-2/つや消しアクリルシリコンエマルジョンペイント	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6	-	-
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.7	0.0998	0.0017	0.1283	93.7			
1日	1	0.1339	33.0	0.0998	0.0016	0.1220	91.1	87.9	94.6	7.0
	2	0.1035	24.2	0.0998	0.0012	0.0894	86.4			
	3	0.0814	19.0	0.0998	0.0009	0.0702	86.3			
3日	1	0.1094	25.0	0.0998	0.0012	0.0924	84.5	84.0	94.6	11.1
	2	0.0910	20.6	0.0998	0.0010	0.0761	83.7			
	3	0.0968	22.0	0.0998	0.0011	0.0813	84.0			
5日	1	0.0741	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	76.8	75.5	94.6	20.1
	2	0.0849	17.1	0.0998	0.0009	0.0632	74.4			
	3	0.0902	18.4	0.0998	0.0009	0.0680	75.4			
8日	1	0.1058	16.7	0.0998	0.0008	0.0617	58.3	55.3	94.6	41.6
	2	0.0901	12.7	0.0998	0.0006	0.0469	52.1			
	3	0.1028	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	55.4			

表 3.3.20 湿度 60%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%におけるアクリル樹脂系非水分散型塗料の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	アクリル樹脂系非水分散型塗料	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6	-	-
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.7	0.0998	0.0017	0.1283	93.7			
1日	1	0.1022	24.6	0.0998	0.0012	0.0909	89.0	90.1	94.6	4.7
	2	0.1101	26.9	0.0998	0.0013	0.0994	90.3			
	3	0.1327	32.7	0.0998	0.0016	0.1209	91.1			
3日	1	0.1274	30.0	0.0998	0.0015	0.1109	87.0	86.6	94.6	8.5
	2	0.0984	22.9	0.0998	0.0011	0.0846	86.0			
	3	0.1011	23.7	0.0998	0.0012	0.0876	86.6			
5日	1	0.1001	22.9	0.0998	0.0011	0.0846	84.6	82.7	94.6	12.6
	2	0.1321	29.3	0.0998	0.0015	0.1083	82.0			
	3	0.1411	31.1	0.0998	0.0016	0.1149	81.5			
8日	1	0.1311	28.1	0.0998	0.0014	0.1039	79.2	76.7	94.6	18.9
	2	0.1298	26.5	0.0998	0.0013	0.0979	75.5			
	3	0.1255	25.6	0.0998	0.0013	0.0946	75.4			

表 3.3.21 湿度 0%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-1	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化カルシウム粉末	湿度	0%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.1158	26.9	0.0998	0.0013	0.0994	85.9	85.8	94.6	9.3
	2	0.1014	23.4	0.0998	0.0012	0.0865	85.3			
	3	0.1013	23.6	0.0998	0.0012	0.0872	86.1			
5日	1	0.0508	11.9	0.0998	0.0006	0.0440	86.6	87.8	94.6	7.1
	2	0.0629	15.2	0.0998	0.0008	0.0562	89.3			
	3	0.0831	19.7	0.0998	0.0010	0.0728	87.6			
7日	1	0.0906	21.4	0.0998	0.0011	0.0791	87.3	87.3	94.6	7.7
	2	0.0786	18.6	0.0998	0.0009	0.0687	87.5			
	3	0.0654	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	87.0			
14日	1	0.0672	16.00	0.0998	0.0008	0.0591	88.0	87.5	94.6	7.4
	2	0.0570	13.80	0.0998	0.0007	0.0510	89.5			
	3	0.0690	15.90	0.0998	0.0008	0.0588	85.2			

表 3.3.22 湿度 33%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-1	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化マグネシウム飽和水溶液	湿度	33%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.0932	20.3	0.0998	0.0010	0.0750	80.5	81.1	94.6	14.3
	2	0.0960	21.2	0.0998	0.0011	0.0784	81.6			
	3	0.0816	17.9	0.0998	0.0009	0.0662	81.1			
5日	1	0.0809	17.6	0.0998	0.0009	0.0650	80.4	80.6	94.6	14.8
	2	0.1060	23.2	0.0998	0.0012	0.0857	80.9			
	3	0.0643	14.0	0.0998	0.0007	0.0517	80.5			
7日	1	0.0916	20.9	0.0998	0.0010	0.0772	84.3	81.4	94.6	13.9
	2	0.1078	23.8	0.0998	0.0012	0.0880	81.6			
	3	0.1209	25.6	0.0998	0.0013	0.0946	78.3			
14日	1	0.0723	16.1	0.0998	0.0008	0.0595	82.3	81.2	94.6	14.2
	2	0.0598	12.9	0.0998	0.0006	0.0477	79.7			
	3	0.1020	22.5	0.0998	0.0011	0.0832	81.5			

表 3.3.23 湿度 80%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-1	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化アンモニウム水溶液	湿度	80%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.0780	15.1	0.0998	0.0008	0.0558	71.6	69.3	94.6	26.7
	2	0.0781	14.4	0.0998	0.0007	0.0532	68.1			
	3	0.0840	15.5	0.0998	0.0008	0.0573	68.2			
5日	1	0.0696	5.4	0.0998	0.0003	0.0200	28.7	29.8	94.6	68.5
	2	0.0922	8.2	0.0998	0.0004	0.0303	32.9			
	3	0.0693	5.2	0.0998	0.0003	0.0192	27.7			
7日	1	0.1296	8.3	0.0998	0.0004	0.0307	23.7	24.6	94.6	74.0
	2	0.1342	9.0	0.0998	0.0004	0.0333	24.8			
	3	0.0744	5.1	0.0998	0.0003	0.0188	25.3			
10日	1	0.0778	4.7	0.0998	0.0002	0.0174	22.3	23.9	94.6	74.8
	2	0.1054	7.2	0.0998	0.0004	0.0266	25.2			
	3	0.1233	8.0	0.0998	0.0004	0.0296	24.0			

表 3.3.24 湿度 100%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-1	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	水	湿度	100%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	95.7	95.0		
	2	0.2830	73.5	0.0998	0.0037	0.2717	96.0			
	3	0.0740	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	93.4			
1日	1	0.1707	31.4	0.0998	0.0016	0.1161	68.0	67.1	95.0	29.4
	2	0.1151	21.4	0.0998	0.0011	0.0791	68.7			
	3	0.1640	28.6	0.0998	0.0014	0.1057	64.5			
1.4日	1	0.1326	23.2	0.0998	0.0012	0.0857	64.7	63.8	95.0	32.8
	2	0.1377	23.3	0.0998	0.0012	0.0861	62.5			
	3	0.1098	19.1	0.0998	0.0010	0.0706	64.3			
4日	1	0.0886	3.5	0.0998	0.0002	0.0129	14.6	14.3	95.0	84.9
	2	0.1019	4.1	0.0998	0.0002	0.0152	14.9			
	3	0.0986	3.6	0.0998	0.0002	0.0133	13.5			
8日	1	0.1713	1.1	0.0998	0.0001	0.0041	2.4	1.6	95.0	98.3
	2	0.1217	0.4	0.0998	0.0000	0.0015	1.2			
	3	0.1180	0.4	0.0998	0.0000	0.0015	1.3			
10日	1	0.1474	0.3	0.0998	0.0000	0.0011	0.8	1.2	95.0	98.8
	2	0.1040	0.3	0.0998	0.0000	0.0011	1.1			
	3	0.2189	1.0	0.0998	0.0000	0.0037	1.7			

表 3.3.25 湿度 0%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化カルシウム粉末	湿度	0%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
0.5日	1	0.0710	17.2	0.0998	0.0009	0.0636	89.5	87.9	94.6	7.1
	2	0.0874	20.1	0.0998	0.0010	0.0743	85.0			
	3	0.0945	22.8	0.0998	0.0011	0.0843	89.2			
1日	1	0.0710	16.8	0.0998	0.0008	0.0621	87.5	87.4	94.6	7.6
	2	0.0874	20.6	0.0998	0.0010	0.0761	87.1			
	3	0.0945	22.4	0.0998	0.0011	0.0828	87.6			
5日	1	0.0762	17.8	0.0998	0.0009	0.0658	86.3	86.9	94.6	8.1
	2	0.0562	13.1	0.0998	0.0007	0.0484	86.2			
	3	0.0699	16.7	0.0998	0.0008	0.0617	88.3			
10日	1	0.0642	15.6	0.0998	0.0008	0.0577	89.8	89.1	94.6	5.8
	2	0.0872	20.9	0.0998	0.0010	0.0772	88.6			
	3	0.0637	15.3	0.0998	0.0008	0.0565	88.8			

表 3.3.26 湿度 33%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化マグネシウム飽和水溶液	湿度	33%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
0.5日	1	0.0809	18.5	0.0998	0.0009	0.0684	84.5	83.9	94.6	11.3
	2	0.0696	15.7	0.0998	0.0008	0.0580	83.4			
	3	0.0886	20.1	0.0998	0.0010	0.0743	83.8			
1日	1	0.0704	15.7	0.0998	0.0008	0.0580	82.4	82.7	94.6	12.6
	2	0.0535	12.0	0.0998	0.0006	0.0444	82.9			
	3	0.0643	14.4	0.0998	0.0007	0.0532	82.8			
5日	1	0.0867	18.0	0.0998	0.0009	0.0665	76.7	76.8	94.6	18.8
	2	0.0997	20.4	0.0998	0.0010	0.0754	75.6			
	3	0.1194	25.2	0.0998	0.0013	0.0931	78.0			
10日	1	0.0699	12.5	0.0998	0.0006	0.0462	66.1	65.2	94.6	31.0
	2	0.0939	16.5	0.0998	0.0008	0.0610	64.9			
	3	0.1080	18.9	0.0998	0.0009	0.0699	64.7			

表 3.3.27 湿度 80%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化アンモニウム水溶液	湿度	80%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
0.5日	1	0.1372	34	0.0998	0.0017	0.1257	91.6	89.3	94.6	5.6
	2	0.0494	11.7	0.0998	0.0006	0.0432	87.5			
	3	0.0791	19.0	0.0998	0.0009	0.0702	88.8			
1日	1	0.1003	20.3	0.0998	0.0010	0.0750	74.8	73.3	94.6	22.5
	2	0.0855	16.1	0.0998	0.0008	0.0595	69.6			
	3	0.1131	23.1	0.0998	0.0012	0.0854	75.5			
5日	1	0.1325	8.7	0.0998	0.0004	0.0322	24.3	24.5	94.6	74.0
	2	0.1111	7.5	0.0998	0.0004	0.0277	25.0			
	3	0.0999	6.6	0.0998	0.0003	0.0244	24.4			
10日	1	0.1027	7.6	0.0998	0.0004	0.0281	27.4	25.7	94.6	72.8
	2	0.0996	6.9	0.0998	0.0003	0.0255	25.6			
	3	0.1434	9.4	0.0998	0.0005	0.0347	24.2			

表 3.3.28 湿度 100%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	水	湿度	100%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
1日	1	0.0832	16.3	0.0998	0.0008	0.0602	72.4	73.8	94.6	22.0
	2	0.1432	30.0	0.0998	0.0015	0.1109	77.4			
	3	0.0858	16.6	0.0998	0.0008	0.0614	71.5			
2日	1	0.0891	17.4	0.0998	0.0009	0.0643	72.2	70.9	94.6	25.0
	2	0.1250	24.2	0.0998	0.0012	0.0894	71.6			
	3	0.0718	13.4	0.0998	0.0007	0.0495	69.0			
3日	1	0.1268	19.7	0.0998	0.0010	0.0728	57.4	54.6	94.6	42.3
	2	0.0611	9.4	0.0998	0.0005	0.0347	56.9			
	3	0.0784	10.5	0.0998	0.0005	0.0388	49.5			
5日	1	0.0869	4.9	0.0998	0.0002	0.0181	20.8	22.6	94.6	76.1
	2	0.0769	4.5	0.0998	0.0002	0.0166	21.6			
	3	0.0740	5.1	0.0998	0.0003	0.0188	25.5			
7日	1	0.1602	1.1	0.0998	0.0001	0.0041	2.5	2.6	94.6	97.3
	2	0.1996	1.3	0.0998	0.0001	0.0048	2.4			
	3	0.2019	1.5	0.0998	0.0001	0.0055	2.7			
10日	1	0.1151	0.9	0.0998	0.0000	0.0033	2.9	1.9	94.6	98.0
	2	0.1529	0.6	0.0998	0.0000	0.0022	1.5			
	3	0.1036	0.4	0.0998	0.0000	0.0015	1.4			

表 3.3.29 湿度 0%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-3 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-3	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化カルシウム粉末	湿度	0%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.0575	14.3	0.0998	0.0007	0.0529	91.9	90.8	94.6	4.0
	2	0.0891	20.6	0.0998	0.0010	0.0761	85.5			
	3	0.0812	20.9	0.0998	0.0010	0.0772	95.1			
7日	1	0.1725	41.3	0.0998	0.0021	0.1526	88.5	88.9	94.6	6.0
	2	0.1473	35.2	0.0998	0.0018	0.1301	88.3			
	3	0.1365	33.2	0.0998	0.0017	0.1227	89.9			
9日	1	0.0925	22.4	0.0998	0.0011	0.0828	89.5	89.8	94.6	5.0
	2	0.0844	20.4	0.0998	0.0010	0.0754	89.3			
	3	0.0861	21.1	0.0998	0.0011	0.0780	90.6			

表 3.3.30 湿度 33%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-3 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-3	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化マグネシウム飽和水溶液	湿度	33%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
1日	1	0.0585	13.3	0.0998	0.0007	0.0492	84.0	85.6	94.6	9.5
	2	0.0695	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	81.9			
	3	0.0647	15.9	0.0998	0.0008	0.0588	90.8			
7日	1	0.0807	14.3	0.0998	0.0007	0.0529	65.5	70.9	94.6	25.1
	2	0.0572	11.7	0.0998	0.0006	0.0432	75.6			
	3	0.0827	16.0	0.0998	0.0008	0.0591	71.5			
9日	1	0.1241	23.9	0.0998	0.0012	0.0883	71.2	70.0	94.6	26.0
	2	0.1375	26.1	0.0998	0.0013	0.0965	70.2			
	3	0.1422	26.4	0.0998	0.0013	0.0976	68.6			

表 3.3.31 湿度 80%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-3 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-3	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化アンモニウム水溶液	湿度	80%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
1日	1	0.1098	27.1	0.0998	0.0014	0.1002	91.2	89.9	94.6	5.0
	2	0.0480	11.2	0.0998	0.0006	0.0414	86.2			
	3	0.0698	17.4	0.0998	0.0009	0.0643	92.1			
7日	1	0.0975	19.0	0.0998	0.0009	0.0702	72.0	65.7	94.6	30.6
	2	0.1158	20.2	0.0998	0.0010	0.0747	64.5			
	3	0.1088	17.8	0.0998	0.0009	0.0658	60.5			
9日	1	0.0962	16.1	0.0998	0.0008	0.0595	61.9	61.5	94.6	35.0
	2	0.0899	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	63.3			
	3	0.0924	14.8	0.0998	0.0007	0.0547	59.2			

表 3.3.32 湿度 100%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-3 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-3	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	水	湿度	100%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
1日	1	0.0835	19.6	0.0998	0.0010	0.0724	86.8	86.9	94.6	8.1
	2	0.0888	20.8	0.0998	0.0010	0.0769	86.6			
	3	0.1145	27.1	0.0998	0.0014	0.1002	87.5			
2日	1	0.0785	18.4	0.0998	0.0009	0.0680	86.6	87.1	94.6	7.9
	2	0.1147	27.5	0.0998	0.0014	0.1016	88.6			
	3	0.0984	22.9	0.0998	0.0011	0.0846	86.0			
3日	1	0.0980	22.4	0.0998	0.0011	0.0828	84.5	82.9	94.6	12.4
	2	0.1063	23.9	0.0998	0.0012	0.0883	83.1			
	3	0.0916	20.1	0.0998	0.0010	0.0743	81.1			
5日	1	0.0959	19.9	0.0998	0.0010	0.0735	76.7	75.8	94.6	19.9
	2	0.0763	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	74.6			
	3	0.1186	24.4	0.0998	0.0012	0.0902	76.0			
9日	1	0.0681	12.0	0.0998	0.0006	0.0444	65.1	64.1	94.6	32.3
	2	0.0623	10.8	0.0998	0.0005	0.0399	64.1			
	3	0.0986	16.8	0.0998	0.0008	0.0621	63.0			

表 3.3.33 湿度 0%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化カルシウム粉末	湿度	0%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.0918	22.4	0.0998	0.0011	0.0828	90.2	88.4	94.6	6.5
	2	0.0536	12.6	0.0998	0.0006	0.0466	86.9			
	3	0.0800	19.1	0.0998	0.0010	0.0706	88.2			
6日	1	0.0904	21.4	0.0998	0.0011	0.0791	87.5	87.9	94.6	7.0
	2	0.0794	19.0	0.0998	0.0009	0.0702	88.4			
	3	0.0761	18.1	0.0998	0.0009	0.0669	87.9			
7日	1	0.0634	14.8	0.0998	0.0007	0.0547	86.3	88.0	94.6	7.0
	2	0.0604	14.7	0.0998	0.0007	0.0543	90.0			
	3	0.0607	14.4	0.0998	0.0007	0.0532	87.7			
14日	1	0.0607	14.4	0.0998	0.0007	0.0532	87.7	87.7	94.6	7.3
	2	0.0915	21.8	0.0998	0.0011	0.0806	88.1			
	3	0.0750	17.7	0.0998	0.0009	0.0654	87.2			

表 3.3.34 湿度 33%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化マグネシウム飽和水溶液	湿度	33%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.0606	14.0	0.0998	0.0007	0.0517	85.4	84.3	94.6	10.9
	2	0.0944	21.6	0.0998	0.0011	0.0798	84.6			
	3	0.0838	18.8	0.0998	0.0009	0.0695	82.9			
6日	1	0.1277	27.8	0.0998	0.0014	0.1027	80.5	81.0	94.6	14.3
	2	0.0636	14.2	0.0998	0.0007	0.0525	82.5			
	3	0.0540	11.7	0.0998	0.0006	0.0432	80.1			
7日	1	0.0640	14.5	0.0998	0.0007	0.0536	83.7	83.6	94.6	11.6
	2	0.0522	11.9	0.0998	0.0006	0.0440	84.3			
	3	0.0688	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	82.7			

表 3.3.35 湿度 80%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	塩化アンモニウム水溶液	湿度	80%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.0944	12.5	0.0998	0.0006	0.0462	48.9	54.7	94.6	42.2
	2	0.0665	8.4	0.0998	0.0004	0.0310	46.7			
	3	0.0600	11.1	0.0998	0.0006	0.0410	68.4			
6日	1	0.0746	7.6	0.0998	0.0004	0.0281	37.7	39.5	94.6	58.2
	2	0.0848	6.8	0.0998	0.0003	0.0251	29.6			
	3	0.0519	7.2	0.0998	0.0004	0.0266	51.3			
7日	1	0.0793	5.3	0.0998	0.0003	0.0196	24.7	25.8	94.6	72.7
	2	0.0917	6.5	0.0998	0.0003	0.0240	26.2			
	3	0.0585	4.2	0.0998	0.0002	0.0155	26.5			

表 3.3.36 湿度 100%、試薬量 0.1mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	8g(0.103mol)
調湿材の種類	水	湿度	100%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.8	0.0998	0.0019	0.1397	96.0	94.6		
	2	0.1312	33.5	0.0998	0.0017	0.1238	94.4			
	3	0.1369	34.6	0.0998	0.0017	0.1279	93.4			
2日	1	0.1167	18.3	0.0998	0.0009	0.0676	58.0	56.8	94.6	39.9
	2	0.0790	12.0	0.0998	0.0006	0.0444	56.1			
	3	0.1011	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	56.3			
3日	1	0.0758	11.8	0.0998	0.0006	0.0436	57.5	53.6	94.6	43.4
	2	0.0897	12.1	0.0998	0.0006	0.0447	49.9			
	3	0.0977	14.1	0.0998	0.0007	0.0521	53.3			
8日	1	0.1033	0.6	0.0998	0.0000	0.0022	2.1	4.5	94.6	95.2
	2	0.0819	0.8	0.0998	0.0000	0.0030	3.6			
	3	0.1239	2.6	0.0998	0.0001	0.0096	7.8			

表 3.3.37 湿度 60%、試薬量 0.051mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-1	水酸化カルシウム量	4g(0.051mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	95.7	95.0		
	2	0.2830	73.5	0.0998	0.0037	0.2717	96.0			
	3	0.0740	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	93.4			
1日	1	0.1036	16.4	0.0998	0.0008	0.0606	58.5	59.4	95.0	37.5
	2	0.0721	10.6	0.0998	0.0005	0.0392	54.3			
	3	0.1084	19.2	0.0998	0.0010	0.0710	65.5			
4日	1	0.1219	12.1	0.0998	0.0006	0.0447	36.7	36.9	95.0	61.2
	2	0.1464	14.7	0.0998	0.0007	0.0543	37.1			
	3	0.1743	17.4	0.0998	0.0009	0.0643	36.9			
5日	1	0.1044	11.4	0.0998	0.0006	0.0421	40.4	37.6	95.0	60.5
	2	0.1040	10.1	0.0998	0.0005	0.0373	35.9			
	3	0.1428	14.1	0.0998	0.0007	0.0521	36.5			
11日	1	0.1829	19.9	0.0998	0.0010	0.0735	40.2	38.0	95.0	60.0
	2	0.1374	13.5	0.0998	0.0007	0.0499	36.3			
	3	0.1300	13.2	0.0998	0.0007	0.0488	37.5			

表 3.3.38 湿度 60%、試薬量 0.256mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-1	水酸化カルシウム量	20g(0.256mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	95.7	95.0		
	2	0.2830	73.5	0.0998	0.0037	0.2717	96.0			
	3	0.0740	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	93.4			
1日	1	0.1291	29.2	0.0998	0.0015	0.1079	83.6	81.1	95.0	14.7
	2	0.1668	36.6	0.0998	0.0018	0.1353	81.1			
	3	0.1140	24.2	0.0998	0.0012	0.0894	78.5			
4日	1	0.1513	31.4	0.0998	0.0016	0.1161	76.7	61.6	95.0	35.1
	2	0.1439	21.5	0.0998	0.0011	0.0795	55.2			
	3	0.1228	17.6	0.0998	0.0009	0.0650	53.0			
5日	1	0.0998	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	69.3	53.6	95.0	43.6
	2	0.1344	16.4	0.0998	0.0008	0.0606	45.1			
	3	0.1235	15.5	0.0998	0.0008	0.0573	46.4			
11日	1	0.1267	12.4	0.0998	0.0006	0.0458	36.2	33.2	95.0	65.1
	2	0.1126	9.4	0.0998	0.0005	0.0347	30.9			
	3	0.1395	12.3	0.0998	0.0006	0.0455	32.6			

表 3.3.39 湿度 60%、試薬量 0.316mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-1 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-1	水酸化カルシウム量	25g(0.316mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	95.7	95.0		
	2	0.2830	73.5	0.0998	0.0037	0.2717	96.0			
	3	0.0740	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	93.4			
1日	1	0.1245	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	88.2	86.2	95.0	9.3
	2	0.1866	43.5	0.0998	0.0022	0.1608	86.2			
	3	0.1223	27.9	0.0998	0.0014	0.1031	84.3			
2日	1	0.1103	23.4	0.0998	0.0012	0.0865	78.4	80.1	95.0	15.7
	2	0.1453	31.4	0.0998	0.0016	0.1161	79.9			
	3	0.0978	21.7	0.0998	0.0011	0.0802	82.0			
4日	1	0.1430	27.7	0.0998	0.0014	0.1024	71.6	69.9	95.0	26.5
	2	0.1426	26.2	0.0998	0.0013	0.0968	67.9			
	3	0.1492	28.3	0.0998	0.0014	0.1046	70.1			
5日	1	0.0897	15.5	0.0998	0.0008	0.0573	63.9	59.9	95.0	37.0
	2	0.1201	18.6	0.0998	0.0009	0.0687	57.2			
	3	0.0884	14.0	0.0998	0.0007	0.0517	58.5			
11日	1	0.1104	10.1	0.0998	0.0005	0.0373	33.8	36.5	95.0	61.6
	2	0.0926	10.0	0.0998	0.0005	0.0370	39.9			
	3	0.1298	12.6	0.0998	0.0006	0.0466	35.9			

表 3.3.40 湿度 60%、試薬量 0.051mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	4g(0.051mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6		
	2	0.1369	34.4	0.0998	0.0017	0.1271	92.9			
	3	0.1600	41.2	0.0998	0.0021	0.1523	95.2			
1日	1	0.0807	15.2	0.0998	0.0008	0.0562	69.6	68.5	94.6	27.6
	2	0.0799	14.6	0.0998	0.0007	0.0540	67.5			
	3	0.0720	13.3	0.0998	0.0007	0.0492	68.3			
4日	1	0.0898	10.6	0.0998	0.0005	0.0392	43.6	43.2	94.6	54.3
	2	0.0806	9.3	0.0998	0.0005	0.0344	42.6			
	3	0.0834	9.8	0.0998	0.0005	0.0362	43.4			
6日	1	0.0749	8.6	0.0998	0.0004	0.0318	42.4	42.8	94.6	54.8
	2	0.0820	9.3	0.0998	0.0005	0.0344	41.9			
	3	0.0638	7.6	0.0998	0.0004	0.0281	44.0			

表 3.3.41 湿度 60%、試薬量 0.256mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	20g(0.256mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6		
	2	0.1369	34.4	0.0998	0.0017	0.1271	92.9			
	3	0.1600	41.2	0.0998	0.0021	0.1523	95.2			
1日	1	0.1071	23.5	0.0998	0.0012	0.0869	81.1	80.6	94.6	14.8
	2	0.1088	24.3	0.0998	0.0012	0.0898	82.5			
	3	0.1377	29.1	0.0998	0.0015	0.1076	78.1			
2日	1	0.1034	23.8	0.0998	0.0012	0.0880	85.1	78.1	94.6	17.4
	2	0.1706	35.3	0.0998	0.0018	0.1305	76.5			
	3	0.1440	28.4	0.0998	0.0014	0.1050	72.9			
3日	1	0.0947	18.0	0.0998	0.0009	0.0665	70.3	72.2	94.6	23.6
	2	0.1140	21.9	0.0998	0.0011	0.0809	71.0			
	3	0.1201	24.5	0.0998	0.0012	0.0906	75.4			
5日	1	0.1073	12.1	0.0998	0.0006	0.0447	41.7	44.6	94.6	52.8
	2	0.1119	12.3	0.0998	0.0006	0.0455	40.6			
	3	0.0945	13.2	0.0998	0.0007	0.0488	51.6			
7日	1	0.1300	15.2	0.0998	0.0008	0.0562	43.2	40.2	94.6	57.5
	2	0.1124	12.4	0.0998	0.0006	0.0458	40.8			
	3	0.1496	14.8	0.0998	0.0007	0.0547	36.6			

表 3.3.42 湿度 60%、試薬量 0.316mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-2 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-2	水酸化カルシウム量	25g(0.316mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6		
	2	0.1369	34.4	0.0998	0.0017	0.1271	92.9			
	3	0.1600	41.2	0.0998	0.0021	0.1523	95.2			
1日	1	0.1245	29.1	0.0998	0.0015	0.1076	86.4	85.0	94.6	10.2
	2	0.1866	42.5	0.0998	0.0021	0.1571	84.2			
	3	0.1223	27.9	0.0998	0.0014	0.1031	84.3			
2日	1	0.1103	23.1	0.0998	0.0012	0.0854	77.4	79.3	94.6	16.2
	2	0.1453	31.1	0.0998	0.0016	0.1149	79.1			
	3	0.0978	21.5	0.0998	0.0011	0.0795	81.3			
4日	1	0.1430	27.4	0.0998	0.0014	0.1013	70.8	68.9	94.6	27.1
	2	0.1426	25.8	0.0998	0.0013	0.0954	66.9			
	3	0.1492	27.9	0.0998	0.0014	0.1031	69.1			
5日	1	0.0897	14.3	0.0998	0.0007	0.0529	58.9	57.7	94.6	39.0
	2	0.1201	18.1	0.0998	0.0009	0.0669	55.7			
	3	0.0884	14.0	0.0998	0.0007	0.0517	58.5			
11日	1	0.1104	10.5	0.0998	0.0005	0.0388	35.2	37.6	94.6	60.3
	2	0.0926	10.3	0.0998	0.0005	0.0381	41.1			
	3	0.1298	12.8	0.0998	0.0006	0.0473	36.4			

表 3.3.43 湿度 60%、試薬量 0.051mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-3 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-3	水酸化カルシウム量	4g(0.051mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6		
	2	0.1369	34.4	0.0998	0.0017	0.1271	92.9			
	3	0.1600	41.2	0.0998	0.0021	0.1523	95.2			
1日	1	0.0582	14.1	0.0998	0.0007	0.0521	89.5	84.8	94.6	10.3
	2	0.0879	20.5	0.0998	0.0010	0.0758	86.2			
	3	0.0657	14	0.0998	0.0007	0.0517	78.8			
3日	1	0.0777	14.9	0.0998	0.0007	0.0551	70.9	70.2	94.6	25.8
	2	0.0804	15.4	0.0998	0.0008	0.0569	70.8			
	3	0.0838	15.6	0.0998	0.0008	0.0577	68.8			
7日	1	0.0599	6.8	0.0998	0.0003	0.0251	42.0	43.5	94.6	54.0
	2	0.0620	8.2	0.0998	0.0004	0.0303	48.9			
	3	0.0817	8.8	0.0998	0.0004	0.0325	39.8			

表 3.3.44 湿度 60%、試薬量 0.256mol、二酸化炭素濃度 5%における外装薄塗材 E-3 の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	外装薄塗材E-3	水酸化カルシウム量	20g(0.256mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1456	37.7	0.0998	0.0019	0.1393	95.7	94.6		
	2	0.1369	34.4	0.0998	0.0017	0.1271	92.9			
	3	0.1600	41.2	0.0998	0.0021	0.1523	95.2			
2日	1	0.1090	27.1	0.0998	0.0014	0.1002	91.9	91.4	94.6	3.3
	2	0.1334	33	0.0998	0.0016	0.1220	91.4			
	3	0.1198	29.5	0.0998	0.0015	0.1090	91.0			
3日	1	0.0783	18.9	0.0998	0.0009	0.0699	89.2	89.3	94.6	5.6
	2	0.1130	26.7	0.0998	0.0013	0.0987	87.3			
	3	0.0728	18.0	0.0998	0.0009	0.0665	91.4			
5日	1	0.0637	15.5	0.0998	0.0008	0.0573	89.9	88.3	94.6	6.7
	2	0.0958	23.0	0.0998	0.0011	0.0850	88.7			
	3	0.0704	16.4	0.0998	0.0008	0.0606	86.1			
9日	1	0.0765	17.4	0.0998	0.0009	0.0643	84.1	81.8	94.6	13.5
	2	0.0830	17.9	0.0998	0.0009	0.0662	79.7			
	3	0.0602	13.3	0.0998	0.0007	0.0492	81.7			

表 3.3.45 湿度 60%、試薬量 0.051mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	4g (0.051mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	95.7	95.0	95.0	
	2	0.2830	73.5	0.0998	0.0037	0.2717	96.0			
	3	0.0740	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	93.4			
1日	1	0.1049	18.4	0.0998	0.0009	0.0680	64.8	66.3	95.0	30.2
	2	0.1139	19.9	0.0998	0.0010	0.0735	64.6			
	3	0.0929	17.5	0.0998	0.0009	0.0647	69.6			
4日	1	0.0811	8.2	0.0998	0.0004	0.0303	37.4	39.3	95.0	58.7
	2	0.0915	9.2	0.0998	0.0005	0.0340	37.2			
	3	0.1257	14.7	0.0998	0.0007	0.0543	43.2			

表 3.3.46 湿度 60%、試薬量 0.256mol、二酸化炭素濃度 5%における可とう形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	可とう形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	20g(0.256mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	95.7	95.0		
	2	0.2830	73.5	0.0998	0.0037	0.2717	96.0			
	3	0.0740	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	93.4			
2日	1	0.1431	32.3	0.0998	0.0016	0.1194	83.4	86.9	95.0	8.6
	2	0.0960	23.8	0.0998	0.0012	0.0880	91.6			
	3	0.0954	22.1	0.0998	0.0011	0.0817	85.6			
4日	1	0.1194	25.1	0.0998	0.0013	0.0928	77.7	74.9	95.0	21.2
	2	0.0946	18.4	0.0998	0.0009	0.0680	71.9			
	3	0.1402	28.5	0.0998	0.0014	0.1053	75.1			
6日	1	0.1498	20.8	0.0998	0.0010	0.0769	51.3	53.2	95.0	44.0
	2	0.0694	10.3	0.0998	0.0005	0.0381	54.9			
	3	0.1135	16.4	0.0998	0.0008	0.0606	53.4			

表 3.3.47 湿度 60%、試薬量 0.256mol、二酸化炭素濃度 5%における防水形外装薄塗材 E の試験結果

試験器具	ボックス	二酸化炭素濃度	5%
仕上材種類	防水形外装薄塗材E	水酸化カルシウム量	20g(0.256mol)
調湿材の種類	臭化ナトリウム飽和水溶液	湿度	60%

養生期間	No.	評量質量	滴定量	力価	Ca(OH) ₂ 滴定量		Ca(OH) ₂ 濃度		初期濃度	炭酸化率
		Mw(g)	Vt(ml)	F	mol	Mt(g)	C _(t) (wt%)	Ave.	C ₍₀₎	S _(d)
0日	1	0.1147	29.7	0.0998	0.0015	0.1098	95.7	95.0		
	2	0.2830	73.5	0.0998	0.0037	0.2717	96.0			
	3	0.0740	18.7	0.0998	0.0009	0.0691	93.4			
1日	1	0.1001	23.5	0.0998	0.0012	0.0869	86.8	85.0	95.0	10.6
	2	0.1433	33.2	0.0998	0.0017	0.1227	85.6			
	3	0.1038	23.2	0.0998	0.0012	0.0857	82.6			
3日	1	0.1092	24.2	0.0998	0.0012	0.0894	81.9	82.4	95.0	13.3
	2	0.1093	24.0	0.0998	0.0012	0.0887	81.2			
	3	0.1649	37.5	0.0998	0.0019	0.1386	84.1			
5日	1	0.1526	32.5	0.0998	0.0016	0.1201	78.7	76.8	95.0	19.1
	2	0.1869	40.3	0.0998	0.0020	0.1489	79.7			
	3	0.1189	23.2	0.0998	0.0012	0.0857	72.1			

3.4 まとめ

上述の検討結果から、湿度条件により炭酸化率が頭打ちするまでのデータを用いること、二酸化炭素の透過量が多い試験体については水酸化カルシウム試薬量を増やすことが必要となるが、ボックス法を用いることで試験体が透過する二酸化炭素の定量的な評価が可能であると考えられる。

そこで、試験体の単位面積(m²)での1日当たりの二酸化炭素透過量(mol)を、(3.4.1)式により二酸化炭素透過度として求めた。

$$\beta = \frac{\left((C_{(0)}) - (C_{(t)}) \right) \times M}{A \times T \times 100} \quad (3.4.1)$$

ここに、 β : 二酸化炭素透過度(mol/ m²・24h)

A : 二酸化炭素の透過面積(m²)、 T : 養生期間(day)

M : シャーレに入れた Ca(OH)₂ 試薬量(mol)

$C_{(t)}$: 養生期間(day)における Ca(OH)₂ 濃度(wt%)

$C_{(0)}$: 初期の Ca(OH)₂ 濃度(wt%)

各仕上材の二酸化炭素透過度を、上式により求め表 3.4.1 に示す。また、JASS5³⁻¹³)に記載されている中性化率の値をも併せて示す。

表 3.4.1 より、今回評価した塗材の二酸化炭素透過度はおよそ 0~2.6mol/m²・24h となることが分かった。可とう複 CE は、二酸化炭素透過度がゼロと試験体の中で最も小さい値を示し、防薄 E についても二酸化炭素透過度は 1.04 で中程度の値であった。

表 3.4.1 の値をもとに、二酸化炭素透過度と中性化率の関係を図 3.4.1 に示した。

表 3.4.1 ボックス法による二酸化炭素透過度と中性化率

試験体略称	二酸化炭素透過度 (mol/m ² ・24h)	JASS5における 種類別中性化率
薄塗E-1	2.14*	1.02
薄塗E-2	2.38*	
薄塗E-3	0.28	
可とう薄E	1.36	0.86
防薄E	1.04	0.68
複層E	0.47	0.22
可とう複CE	0	0
防複E	0.08	0.4
EPG-1	0.32	0.64
EPG-2	0.34	
EP-1	0.33	
EP-2	0.47	
NAD	0.25	0.12**

*試薬量20gにおける透過係数の値

**エナメル塗りの値

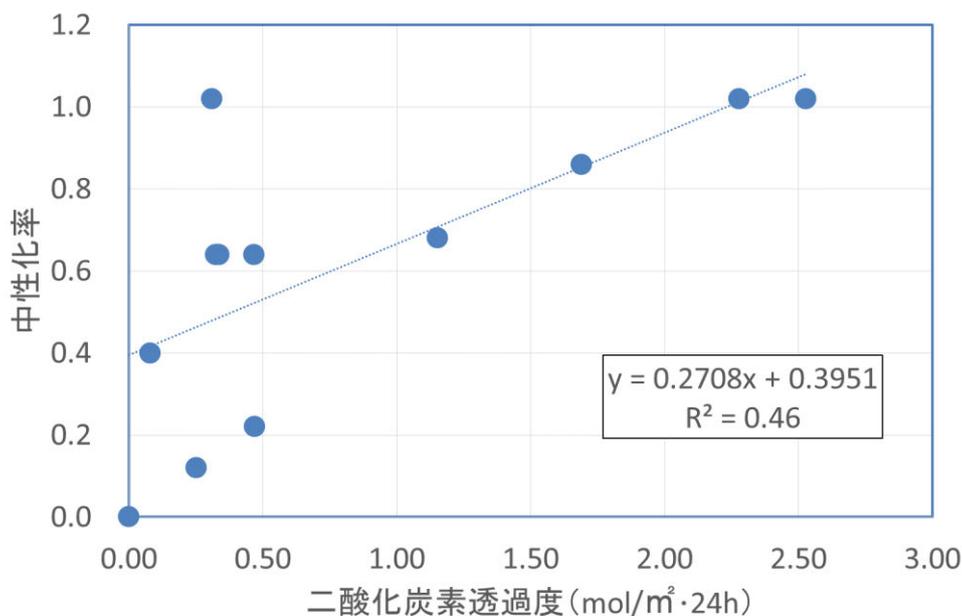


図 3.4.1 二酸化炭素透過度と中性化率の関係

二酸化炭素透過度と中性化率の関係による重相関は 0.46 と正の相関が得られた。実際に 5 章において中性化促進試験を行い、仕上材の中性化抑制効果と、二酸化炭素透過性の相関を確認するが、ボックス法によって仕上材の二酸化炭素透過度を測定することでより高い精度での中性化抑制効果を予測できる可能性を見出した。

ボックス法は試験期間が 1 週間程度と非常に短い期間で仕上材の二酸化炭素の透過性を評価可能である。また、大気圧条件下で透過性の測定が行えるため、表面の凹凸が大きな外装薄塗材 E でも薄膜のエマルジョンペイントなど多様な仕上材に対応できる。湿度・試薬量の条件を調整することで仕上材の二酸化炭素透過性を定量的に評価することが可能な測定方法である。当初、目標とした仕上材の中性化抑制効果を予測するための二酸化炭素透過性の測定方法として十分な条件を満たすものを確立できたと考える。そこで、本研究の付属資料として作成し論文の末尾に「ボックス法による仕上材の二酸化炭素透過度の測定方法 (案)」として規格案を取りまとめた。

参考文献

- 3-1) 千歩修, 馬場明生, 小俣一夫, 松島泰幸: コンクリートの外装仕上げ材料の躯体保護効果(水分移動性状と中性化抑制効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.159-160, 1990
- 3-2) 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典, 蒲原博行: コンクリートの透気・透水性に関する研究(その1. 透気・透水性試験方法について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.115-116, 1982.10
- 3-3) 蒲原博行, 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典: コンクリートの透気・透水性に関する研究(その2. 透気・透水性試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.117-118, 1982.10
- 3-4) 宮木宏明, 金津貢一: 外装仕上塗材の気体透過性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.635-636, 1986.8
- 3-5) 千歩修, 大楽隆男, 三森敏司, 羽木宏, 馬場明生: 仕上材料の透湿性評価試験法に関する研究, 日本建築仕上学会論文報告集 vol5, pp-7-13, 1998.3
- 3-6) 須田ゆうみ, 小村理恵: 建築用外装仕上塗材の透湿性と中性化抑制機能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1001-1002, 1996.9
- 3-7) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子: 建築用仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第609号, pp.23-30, 2006.11
- 3-8) 小林一輔, 宇野祐一: コンクリートの炭酸化のメカニズム, コンクリート工学論文集, 第1巻第1号, pp37-48, 1990.1
- 3-9) 千歩修: 「透湿性材料の透湿性・透水試験方法(原案)」, 共通試験の概要及び「透湿性材料の透湿性試験方法(案)の提案」, FINEX, pp.11-18, 1996.3
- 3-10) 本橋健司, 梶田佳寛, 羽木宏: 熱重量分析を利用したモルタル中性化度の定量と仕上塗材の中性化抑制機能評価への評価, 日本建築学会大会梗概集, pp.157-158, 1990.10
- 3-11) 浅野駿吉, 杉田達三, 山際康暎, 井上嘉亀: 水酸化カルシウムの炭酸化反応, 窯業協会誌, 79(3), pp82-91, 1971
- 3-12) The American Society for Testing and Materials: ASTM C355-64 Test Methods for Test for Water Vapor Transmission of Thick Materials (1982)
- 3-13) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp. 194-203, 2009

第4章

仕上材の透湿性と気体透過性に関する実験と考察

第4章 仕上材の透湿性と気体透過性に関わる実験と考察

4.1 はじめに

仕上材の中性化抑制効果については、透気性と関係があることが既往の研究より知られている⁴⁻¹⁾。従来、透気性の評価としてはガス透過性試験機を用いた加圧条件での測定で二酸化炭素の透過性および透湿性、空気透過性の測定や、カップ法などを用いた常圧下での透湿性の測定が行われてきている。第3章に示した、ボックス法を開発出来たことで多様な仕上材の二酸化炭素透過性を常圧下で短期間に定量的な測定ができるようになった。

本章では、二酸化炭素透過性を測定した仕上材についてカップ法により透湿度の測定を行う。また、仕上材の透湿度及び二酸化炭素透過度という2つの気体の透過性の違いについて比較を行った。

4.2 仕上材の透湿性の評価

4.2.1 検討の概要

仕上材の透湿性を評価する方法としては、JIS Z 0208に規定される防湿包装材料の透湿度試験方法(カップ法)、仕上学会法⁴⁻²⁾透湿試験がある。前者の試験方法では装置の中に吸湿剤として塩化カルシウムを入れて、仕上材が透過する水分を捕捉し質量増加分を透湿量として評価するものである。後者は水を入れたカップの上面に仕上材を設置し装置の中から蒸発する水分量を透湿度として評価するものである。

第3章において二酸化炭素の透過性を測定する方法として、装置内に吸収剤として水酸化カルシウムを使用した方法を提案している。そのため本章においては、同様に吸湿剤を用いるカップ法を用いて透湿度の測定を行うこととした。

図4.2.1に試験体のイメージを試験体の外観を写真4.2.1に示す。前章でも述べたが透湿試験においては、下地により大きく透湿度の値が影響を受けることが知られており^{4-3),4-4)}、極めて透湿性の高い下地でなければ仕上材自体の透湿性を評価することが困難である。本検討においては、下地の影響を極力なくするためにJIS P 3801:1995に規定されている中で、最も目の粗い5種Aのろ紙を用いた。また、試験はJISに準拠して、温度 $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $90\pm 2\%$ に設定した恒温恒湿槽に静置し測定を行なった。

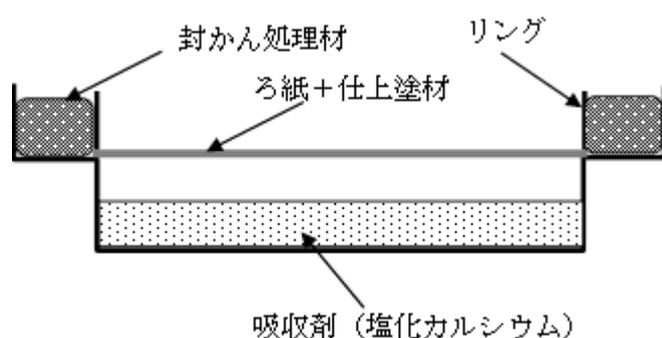


図 4.2.1 試験体イメージ



写真 4.2.1 試験体外観

4.2.2 仕上材の種類及び塗装仕様と試験片

評価を行った材料は、JIS K 5660、JIS K 5663、JIS K 5670 に規定される塗料及び、JIS A 6909 の建築用仕上塗材に規定される薄付け仕上塗材と複層仕上塗材の中から選択した。外装薄塗材Eについては、いわゆるリシン、スキン、ローラーリシンの3種類を確認することとした。塗料としてはエマルジョンペイントを4種類およびアクリル樹脂系非水分散型塗料（NAD）を1種類評価した。塗料の施工はJASS18に、仕上塗材の施工はJASS23に準じて塗装した。塗装後、温度 23±2℃、相対湿度 50±5%の条件で2週間養生した。この際、複層仕上塗材の塗装はベース吹きのみとし模様付けは行わなかった。試験体の塗装仕様及び平均膜厚については表 4.2.2 に示す通り、二酸化炭素の透過性を評価した試験体と同様の水準で作製した。

表 4.2.2 仕上材の種類と塗付量

試験体略称	仕上の種類及び呼び名		塗付量 (kg/m ²)	平均膜厚 (mm)
薄塗E-1	外装薄塗材E	リシン	1.00	1.28
薄塗E-2	外装薄塗材E	スキン	1.30	1.11
薄塗E-3	外装薄塗材E	ローラーリシン	0.64	0.48
可とう薄E	可とう形外装薄塗材E	弾性リシン	0.74	1.16
防薄E	防水形外装薄塗材E	単層弾性	0.70	0.57
複層E	複層塗材E	吹付タイル	1.21	0.76
可とう複CE	可とう形複層塗材CE	平たん状	1.20	1.13
防複E	防水形複層塗材E	弾性タイル	1.10	0.88
EPG-1	つや有りアクリルエマルジョンペイント		0.22	0.23
EPG-2	つや有り弾性アクリルエマルジョンペイント		0.21	0.22
EP-1	つや消しアクリルエマルジョンペイント		0.22	0.23
EP-2	つや消しアクリルシリコンエマルジョンペイント		0.22	0.23
NAD	アクリル樹脂系非水分散型塗料		0.20	0.21

4.2.3 カップ法による透湿度の測定結果

カップ法による透湿度の試験結果を表 4.2.3 に示す。その傾向を図 4.3.1 に示す。

表 4.2.3 仕上材の透湿度

試験体略称	仕上の種類及び呼び名		透湿度(g/m ² ・24h)
薄塗E-1	外装薄塗材E	リシン	173.6
薄塗E-2	外装薄塗材E	スキン	119.3
薄塗E-3	外装薄塗材E	ローラーリシン	133.4
可とう薄E	可とう形外装薄塗材E	弾性リシン	79.5
防薄E	防水形外装薄塗材E	単層弾性	26.7
複層E	複層塗材E	吹付タイル	96.6
可とう複CE	可とう形複層塗材CE	平たん状	69.2
防複E	防水形複層塗材E	弾性タイル	49.1
EPG-1	つや有りアクリルエマルジョンペイント		82.3
EPG-2	つや有り弾性アクリルエマルジョンペイント		55.5
EP-1	つや消しアクリルエマルジョンペイント		110.2
EP-2	つや消しアクリルシリコンエマルジョンペイント		59.9
NAD	アクリル樹脂系非水分散型塗料		105.1

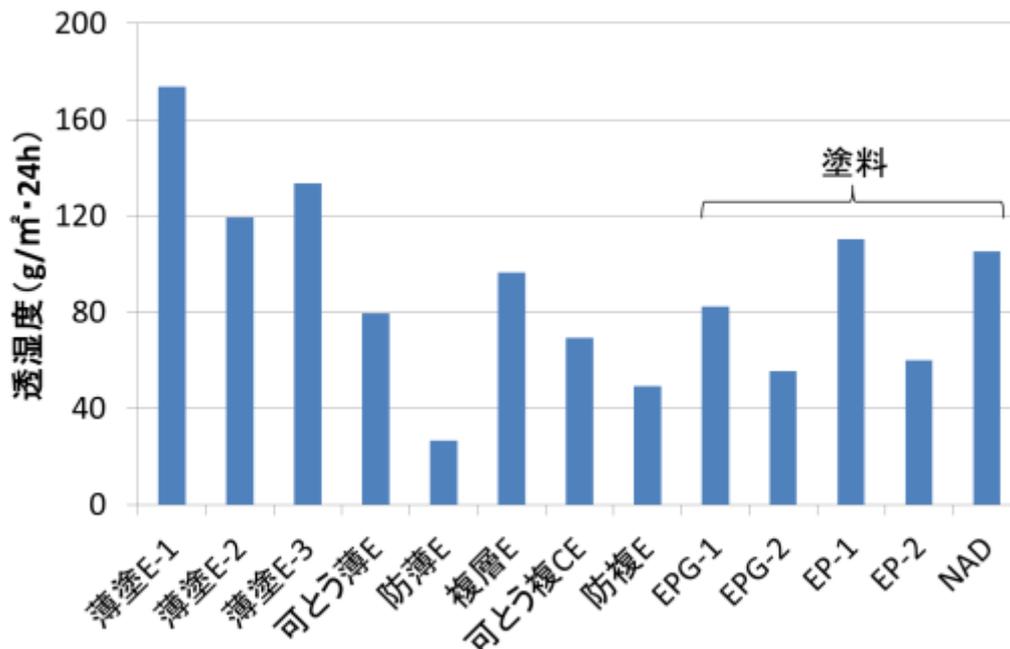


図 4.2.3 仕上材の透湿度の傾向

図 4.2.3 に見られるように、透湿度の傾向としては外装薄塗材 E の薄塗 E-1～3 が大きく、すべて 100g/m²・24h 以上の透湿度を示した。また、防水形薄塗材 E、防水形複層塗材 E の防水形の材料で透湿度の低い傾向が確認出来る。特徴的な点として、EP、EP-G などの塗料においては二酸化炭素の透過性はほぼ同じ傾向を示していたが、透湿度の場合は、種類により違いがみられた。

4.3 仕上材の透湿性と二酸化炭素透過性に関して

4.3.1 仕上材の透湿度と二酸化炭素透過度の比較

カップ法による透湿度の値と、第3章において求めたボックス法による二酸化炭素透過度の値の一覧を表4.3.1に、その関係を図4.3.1に示す。全体として、透湿度と二酸化炭素透過度の関係をみると重相関は0.2と低いことが確認出来た。また、図中で示すように、薄塗材 E-1 (リシン)、薄塗材 E-2 (スキン)、可とう薄 E (弾性リシン)、防薄 E (単層弾性) の傾向と、その他の材料の傾向にひらきが見える。仕上材の水蒸気透過性と二酸化炭素透過性を評価した数少ない報告として宮木ら⁴⁾⁵⁾の報告がある。宮木らの報告を表4.3.2に示す。その数値を見ると、水蒸気の透過係数よりも二酸化炭素の透過係数の方が数値の幅が大きく、外装薄塗材 E と伸長形複層塗材など材料によって数桁のオーダーで違いが出ている。本検討においても、透湿度よりも二酸化炭素透過度の方が数値の幅が大きく、外装薄塗材 E と防水形複層塗材 E など数十倍の差が見られる。既往の報告とも傾向が似ていることから本検討における透湿度および二酸化炭素透過度の測定結果の信頼性はあると考えられる。また、仕上材の気体透過性について、水蒸気よりも二酸化炭素の方が、透過性に幅が出ることが分かった。

表 4.3.1 仕上材の透湿度及び二酸化炭素透過度一覧

試験体略称	透湿度 (g/m ² ・24h)	二酸化炭素透過度 (mol/m ² ・24h)
薄塗E-1	173.6	2.28
薄塗E-2	119.3	2.53
薄塗E-3	133.4	0.31
可とう薄E	79.5	1.69
防薄E	26.7	1.15
複層E	96.6	0.47
可とう複CE	69.2	0.00
防複E	49.1	0.08
EPG-1	82.3	0.32
EPG-2	55.5	0.34
EP-1	110.2	0.33
EP-2	59.9	0.47
NAD	105.1	0.25

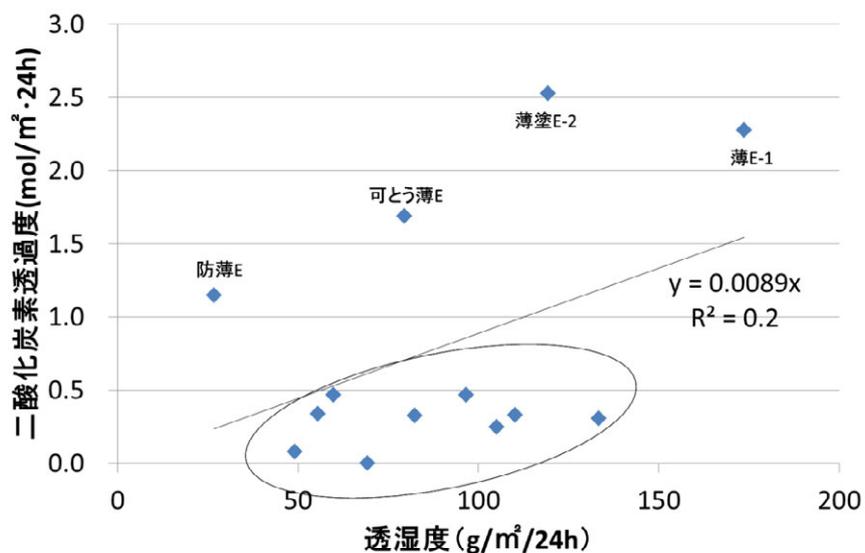


図 4.3.1 仕上材の透湿度及び二酸化炭素透過度一覧

表 4.3.2 二酸化炭素と水蒸気の透過係数⁴⁾⁵⁾

	透過係数 × 10 ⁻⁷ (cm ³ (STP)cm/s·cm ² ·cmHg)	
	水蒸気	二酸化炭素
外装薄塗材E	6000	350000
マスチックA	400	580
マスチックAE	1.9	2.4
複層塗材E	28	15
複層塗材RE	84	41
伸長形複層塗材	0.88	0.041
伸長形複層塗材	1.6	0.082
呼気形仕上塗材	640	260

4.3.2 仕上材の塗料構成からみる透湿性と二酸化炭素透過性への影響

仕上材の塗膜を構成材料でとらえると、その内訳は合成樹脂やセメントなどの結合材で形成された膜の中に、さまざまな顔料や骨材などが存在している。顔料は有機顔料や酸化鉄などの着色顔料、酸化チタンなどの白色顔料の他、充填材としての炭酸カルシウムやタルク、クレーなどといった数ミクロン以下の無機顔料が入り込む。粒子径が大きくなると骨材と呼ばれる。数十ミクロンから数ミリの骨材を使うことで建築用仕上塗材では様々な模様を作り出し、リシンやスキンなどの粗面状のパターンを表現する。また、粒子径が数ミクロン～十数ミクロンの骨材を使用することで塗料の表面に微細な凹凸を作り出し、塗面の光沢を無くすように調整するとつや消し塗料となる。各材料の概念的な塗膜断面のイメージを示す。(図 4.3.2～4.3.5)

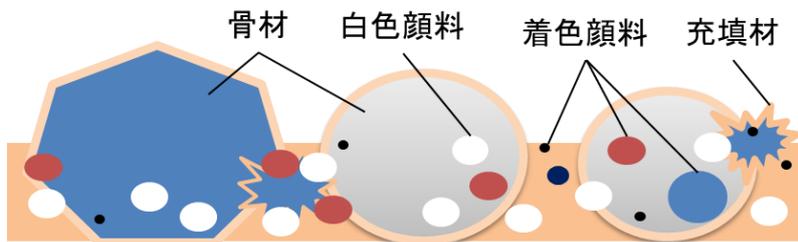


図 4.3.2 薄塗材系の塗膜断面イメージ

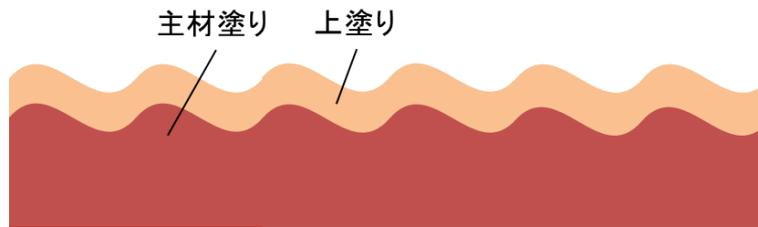


図 4.3.3 複層塗材系の塗膜断面イメージ

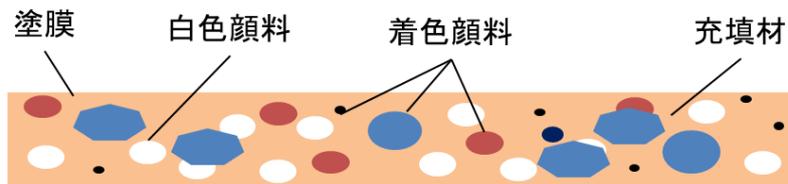


図 4.3.4 つや有り系塗料の塗膜断面イメージ

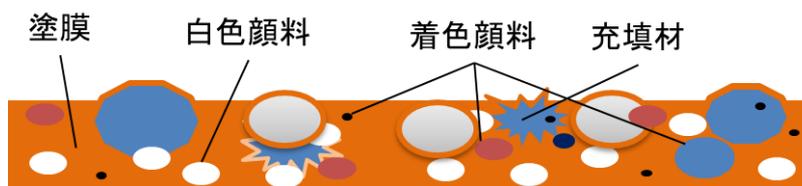


図 4.3.5 つや消し系塗料の塗膜断面イメージ

気体が仕上材のような高分子膜を透過する際、気体は顔料や骨材などの無機系の結晶構造をもつ部分より、非晶質の樹脂成分を通して透過すると考えられる^{4-6),4-7)}。概念モデルを図 4.3.6 に示す。

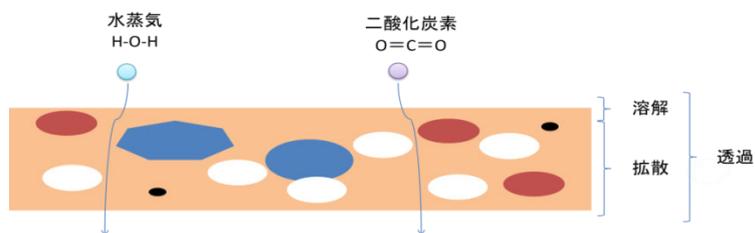


図 4.3.6 塗膜の気体の透過性

上記の考えに基づくと、塗膜中での気体の透過性は、仕上材の中に含まれる樹脂の割合により影響を受けるはずである。配合設計からもとめた仕上材中に含まれる樹脂含有率および透湿度と二酸化炭素透過度の一覧を表 4.3.4 に示す。また、透湿度と樹脂含有率との関係を図 4.3.7 に示す。

透湿度と樹脂含有率の関係を見た場合、樹脂量の増加とともに透湿度が下がる傾向がみられた。また、この傾向は塗料に限定するとより良い相関がみられた。(図 4.3.8)

表 4.3.4 仕上材の樹脂含有率および透湿度と二酸化炭素透過度の一覧

	樹脂含有率 (%)	透湿度 (g/m ² ・24h)	二酸化炭素透過度 (mol/m ² ・24h)
薄塗E-1(リジ)	10	173.6	2.28
薄塗E-2(スキ)	7	119.3	2.53
薄塗E-3(ローリジ)	8	133.4	0.31
可とう薄E	11	79.5	1.69
防薄E	24	26.7	1.15
複層E	3	96.6	0.47
可とう複CE	10	69.2	0.00
防複E	33	49.1	0.08
EPG-1	26	82.3	0.32
EPG-2	31	55.5	0.34
EP-1	9	110.2	0.33
EP-2	21	59.9	0.47
NAD	13	105.1	0.25

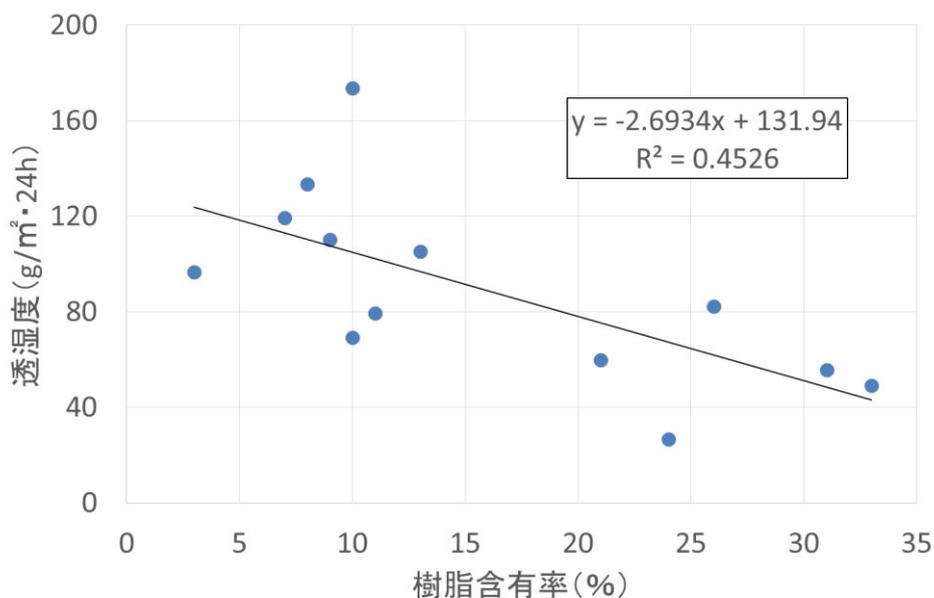


図 4.3.7 透湿度と樹脂含有率の関係

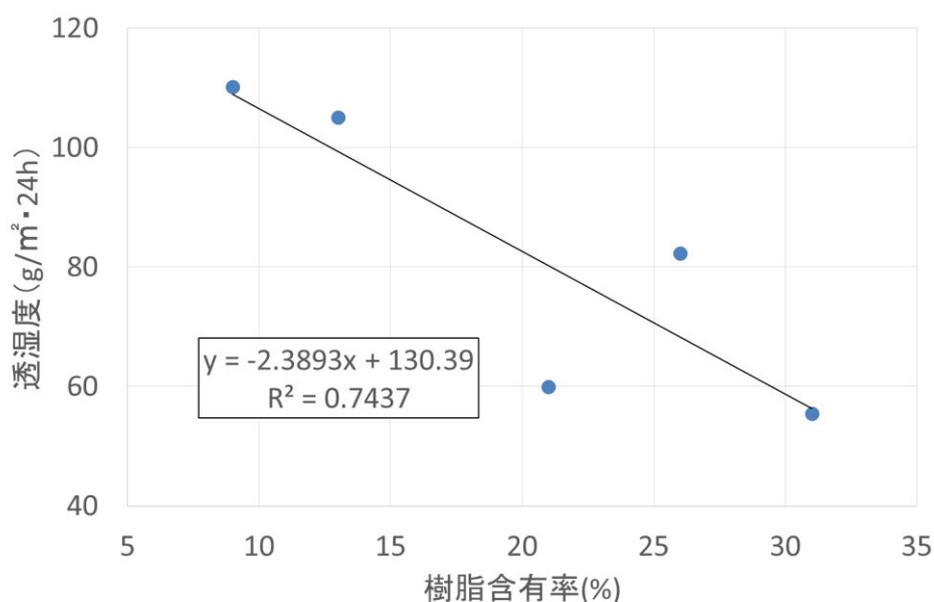


図 4.3.8 塗料における透湿度と樹脂含有率の関係

一方、二酸化炭素透過度については、樹脂量の影響がほとんど確認できなかった。外装薄塗材 E のリシンおよびスキン、可とう形薄塗材の弾性リシンなどのような表面形状が粗いものが高く、それらを除くと横並びの傾向になることがわかった。(図 4.3.9) リシンなどの粗い骨材を吹き付ける材料であり、表面積が大きくなり、塗膜中に泡を抱えやすくなる、今回の結果はそれらの影響を受け、二酸化炭素の塗膜への取り込みや塗膜の欠損部分を通りやすくなっていると予想する。

いずれにせよこれまで常圧下では透湿度しか測定できなかった仕上材の気体透過性であるが、二酸化炭素の透過性を測定することが可能になった。その結果、仕上材の透湿度と二酸化炭素透過性は異なる傾向を示すことが確認できた。

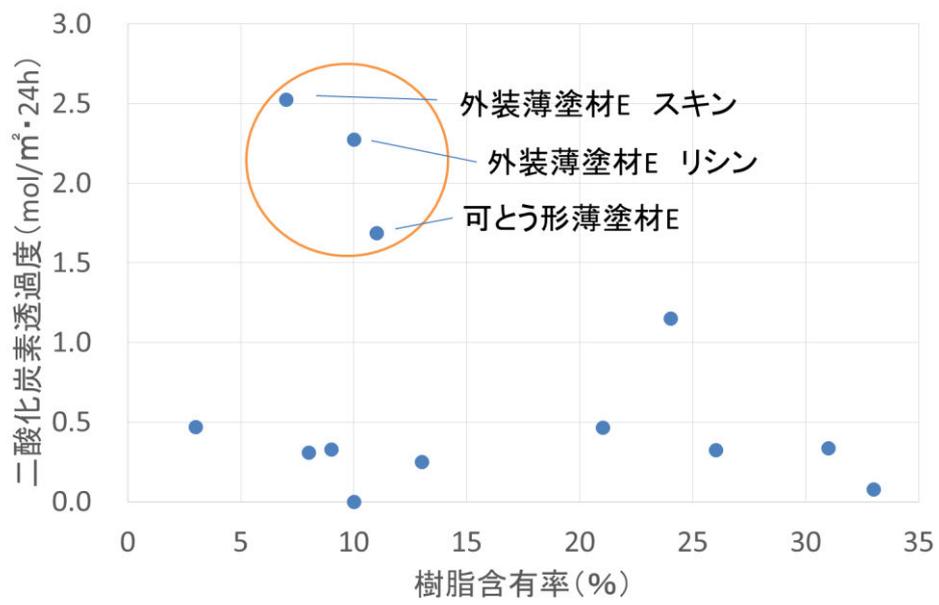


図 4.3.9 二酸化炭素透過度と樹脂含有率の関係

4.3.3 仕上材の透湿度と中性化率との比較

仕上材の透湿度と中性化率の間には相関がみられるとの報告がある。今回求めた透湿度と中性化率の一覧を表 4.3.5 に、その関係を図 4.3.10 に示した。

第 3 章で示したが、二酸化炭素透過度と中性化率との相関は決定係数で 0.46 と、相関が得られていたのに対して、透湿度と中性化率の関係は決定係数で 0.09 と相関がみられなかった。

表 4.3.5 透湿度と中性化率

試験体略称	透湿度 (g/m ² ・24h)	JASS5における 種類別中性化率
薄塗E-1	173.6	1.02
薄塗E-2	119.3	
薄塗E-3	133.4	
可とう薄E	79.5	0.86
防薄E	26.7	0.68
複層E	96.6	0.22
可とう複CE	69.2	0
防複E	49.1	0.4
EPG-1	82.3	0.64
EPG-2	55.5	
EP-1	110.2	
EP-2	59.9	
NAD	105.1	0.12*

*エナメル塗の値

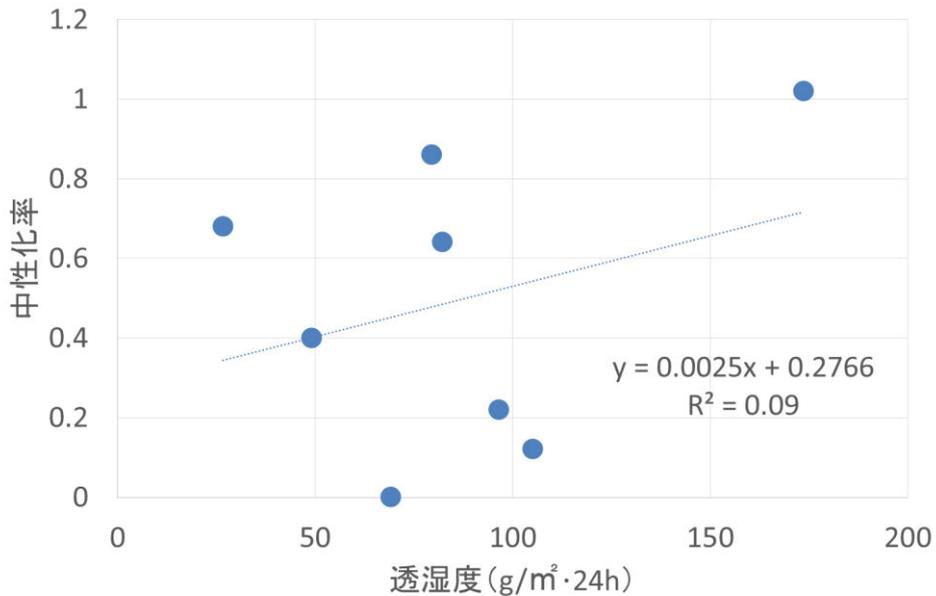


図 4.3.10 透湿度と中性化率の関係

4.4 まとめ

これまで塗膜形状などの影響を受け多様な仕上材の二酸化炭素透過性の定量的な測定方法がなかったため、仕上材の透湿性と二酸化炭素透過性の比較はほとんどなされていない。そこで、本章では、カップ法を用いて仕上材の透湿性を測定した。第3章においてボックス法という仕上材の二酸化炭素透過性の測定方法を確立したことで、透湿度と二酸化炭素透過度の測定結果の比較を行うことができた。

仕上材の気体透過性はコンクリートの中酸化抑制効果に大きく影響を与える指標であり、なかでも直接的に中酸化の原因となる二酸化炭素の透過性は重要であろう。これまで仕上材の透湿性をもって気体透過性および中酸化抑制効果が論じられることが多かったが、本検討の結果、仕上材の透湿性と二酸化炭素透過性とは異なる傾向を示すことが分かった。

仕上材の透湿性と二酸化炭素透過性の比較の中で、特に薄塗材というリシンやスキンという粗めの骨材を含んだ仕上材が外れた傾向を示すことが分かった。測定結果の解析を行う中で透湿度については、仕上材に含まれる樹脂量に影響を受けている可能性を確認した。一方で、仕上材の二酸化炭素透過性については、材料により異なる傾向が見られたが明確な関係性を示すことはできなかった。

これまで気体透過性としては透湿性を尺度とした材料の提案が行われてきている。ボックス法を開発したことで二酸化炭素透過性が直接測定可能となり、今後は二酸化炭素透過性を尺度とした材料の開発も行えるようになる。

仕上材の透湿性および空気透過性とコンクリートの中酸化抑制効果に相関があることは報告^{4-1)、4-8)}されている。しかし、二酸化炭素透過性とコンクリートの中酸化抑制効果について評価が行われた事例は少なく^{例えば 4-6)}、二酸化炭素透過性と透湿性の両側面から評価が行われた事例はない。本検討では、仕上材を塗装してコンクリートの促進中酸化試験についても検討を行い次章以降にまとめる。

参考文献

- 4-1) 千歩修, 馬場明生, 小俣一夫, 松島泰幸: コンクリートの外装仕上げ材料の躯体保護効果(水分移動性状と中性化抑制効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.159-160, 1990
- 4-2) 千歩修: 「透湿性材料の透湿性・透水試験方法(原案)」, 共通試験の概要及び「透湿性材料の透湿性試験方法(案)の提案」, FINEX, pp.11-18, 1996.3
- 4-3) 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典, 蒲原博行: コンクリートの透気・透水性に関する研究(その1. 透気・透水性試験方法について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.115-116, 1982.10
- 4-4) 蒲原博行, 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典: コンクリートの透気・透水性に関する研究(その2. 透気・透水性試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.117-118, 1982.10
- 4-5) 宮木宏明, 金津貢一: 外装仕上塗材の気体透過性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.635-636, 1986.8
- 4-6) 井原健史, 松原道彦, 大澤悟: 塗装によるコンクリートの中性化抑制に関する研究 その1 塗膜の二酸化炭素透過度と中性化抑制との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.553-554, 2011
- 4-7) 仲川勤: 膜のはたらき(気体透過膜を中心に), 共立出版株式会社, pp.27-41, 1985
- 4-8) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子: 建築用仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第609号, pp.23-30, 2006.11

第5章

仕上材の中性化抑制効果に関する実験

第5章 仕上材の中性化抑制効果に関する実験

5.1 はじめに

既往の文献調査・実態調査により仕上材の中性化抑制効果（中性化率）に関してデータの共有化が図られ⁵⁻¹⁾、そのデータを基に「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009」に各種仕上材の中性化率が記載されている⁵⁻²⁾。しかし、そこに示された値の多くが文献調査から得た値のため、各条件の違いがしっかり考慮されているわけではない。また、仕上材は多種多様であり、例えば、外装薄塗材 E であってもリシン、スキン、ローラーリシンなどと多くの製品が含まれる。これらの製品の違いによって中性化率にも変化が生じるはずである。そのため個々の評価が必要であろう。

一方で、既往の研究で仕上材による中性化抑制効果は、二酸化炭素の透過性および透湿性と相関があり、気密性が高いほど中性化抑制効果が高いことが報告されている。⁵⁻³⁾ 第3章にて二酸化炭素透過性の測定方法を確立し各種仕上材の二酸化炭素透過度を測定している。また、第4章にて各種仕上材の透湿度についても測定を行い、仕上材の持つ気体透過性についてとりまとめた。本章では、気体透過性を評価した各種の仕上材と統一した材料で促進中性化試験及び屋外曝露試験を行い仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果を確認している。なお、一部の材料については屋外曝露試験も実施しているが材齢が浅く傾向が不明瞭なため本研究では促進中性化試験の結果のみ取りまとめている。

また、中性化抑制効果の低い（中性化率の値が高い）とされる仕上材でも、塗付量の変化によっては十分な中性化の抑制効果が生じるのか、樹脂量の違いで抑制効果に違いが生じるのか、上塗の有無（劣化を考慮した場合）の違いによる効果の違いが生じるかなどの施工条件や経年劣化に対するデータは余り見られない^{例えば 5-4)}、本研究では、塗付量・樹脂量の違い、上塗りの有無（劣化を想定）などの条件の違いによる中性化抑制効果も併せて確認を行った。

5.2 実験概要

5.2.1 実験因子と水準

実験因子と概要及び水準を表 5.2.1 に示す。仕上材の種類は仕上塗材 10 仕様、塗料 2 仕様を選定した。塗付け量は標準仕様の中央値を標準塗りとし、上限量で塗装したものを厚塗り、下限量で塗装したものを薄塗りとした。また、複層塗材においては、上塗りの劣化状態を想定して上塗りの有無での中性化抑制効果について確認を行うことにした。基材に用いたコンクリートは水セメント 50%と 60%の 2 水準とした。養生条件としては、促進中性化によるもの、屋外曝露において雨がかりの有無による中性化の進行程度を確認しているが、本研究においては促進中性化試験の試験分のみを取りまとめた。

表 5.2.1 実験因子と概要及び水準

因子		概要・水準
仕上塗材	種類	仕上塗材なし 仕上塗材10種類 塗料2種類
塗装条件	塗布量	標準塗り 薄塗り 厚塗り
	上塗り	塗装あり 塗装なし
基材条件	水セメント比	50%、65%
養生条件	促進中性化	温度20℃、湿度60%、二酸化炭素濃度5%
	屋外曝露	雨がかりあり 雨がかりなし

5.2.2 試験体の作製方法

試験に供した下地コンクリートは、セメント比 50%調合と 65%調合の 2 種類とした。各塗装仕様における中性化抑制効果の傾向を早くつかむため 65%の調合を主に作成し試験を実施した。調合及び材料を表 5.2.2、表 5.2.3 に基礎性状を表 5.2.4 に示す。試験体作成の流れとして、下地コンクリートを 100×100×400 の大きさの型枠を用いて打設した。型枠を取り外した後、材齢 4 週まで、温度 20±2℃の条件下で水中養生を行う。その後、材齢 8 週まで、相対湿度 60±5%、温度 20±2℃の条件下で気中養生を行った。その後、コンクリートの側型枠面に、JIS A 6916 に規定される下地調整塗材 C-1 で穴埋め処理を行い 1 週間の養生後、仕上材を塗装した。塗装後 2 週間養生した後、無塗装面をアルミテープで覆い、JIS A 1153 に準じて促進中性化試験を行った。また、屋外曝露に供した試験体の無塗装面にはエポキシ樹脂を塗り付け、乾燥後屋外に設置した。試験体概要を図 5.2.1 に示す。

表 5.2.2 コンクリートの調合

	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				セメント質量比(%)	
			C	W	G	S	Ad1	Ad2
水セメント比 50%調合	50	43.3	356	178	984	745	0.25	0.003
水セメント比 65%調合	65	46.4	274	178	968	829	0.25	0.0025

表 5.2.3 使用材料

材料	記号	仕様	
セメント	C	太平洋セメント社製普通ポルトランドセメント (密度：3.16g/cm ³)	
水	W	上水道水	
粗骨材	G	茨城県桜川市産硬質砂岩砕石 (表乾密度：2.64g/cm ³ 、吸水率：0.68%、粗粒率(F.M.)：6.80)	
細骨材	S	静岡県掛川市産陸砂 (表乾密度：2.58 g/cm ³ 、吸水率：1.81%、粗粒率(F.M.)：2.97)	
混和剤	AE減水剤	Ad1	BASFポゾリス製リグニンスルホン酸塩系AE減水剤標準形 (I種)
	AE助剤	Ad2	BASFポゾリス製変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表 5.2.4 コンクリートの基礎性状

	空気量 (%)	スランプ (cm)	フロー (mm)	材齢28日強度 (N/mm ²)
水セメント比 50%調合	4.6	19	335×310	41.7
水セメント比 65%調合	4.6	20	365×340	29.2

5.2.3 塗装仕様

評価に用いた材料（下塗、主材、上塗）はすべて、結合材にアクリル樹脂系を使用した製品とした。

仕上塗材は、JIS A 6909 建築用仕上塗材に規定される外装材の中で合成樹脂エマルジョンを使用した材料から主に選択した。薄付け仕上塗材から 5 種類、複層仕上塗材の中から 5 種類を選択した。複層仕上塗材の 5 種類の中には、ポリマーセメント系材料を 2 種類含め評価を行った。

塗料は、JIS K 5660 に規定される、つや有合成樹脂エマルジョンペイント(EP-G) と JIS K 5670 に規定されるアクリル樹脂系非分散系塗料(NAD) を選択した。施工は、JASS23 及び JASS18 に準じて行った。塗装仕様及び塗付け量を表 5.2.5 に示す。また、試験体の概要を図 5.2.1 に示す。各塗装仕様で実施した試験条件を表 5.2.6 に示す。尚、複層仕上塗材の塗装はベース吹きのみとし模様付けは行わなかった。塗付け量は、単位面積当たりの質量より実際の塗付け量を計算した。コンクリートの打設から上塗りの施工までの一連の流れを写真 5.2.1～5.2.10 に示す。

表 5.2.5 塗装仕様及び塗付け量

仕上塗材種類及び呼び名		塗装仕様	試験体略称	塗付け量 (kg/m ²)		
				下塗	主材	上塗
外装薄塗材E	リシン	標準	薄塗E-1	0.1	1.4	
		厚塗り	薄塗E-1厚	0.1	1.7	
		薄塗り	薄塗E-1薄	0.1	1.0	
	スクイン	標準	薄塗E-2	0.1	2.3	
	ローラーリシン	標準	薄塗E-3	0.1	0.5	
可とう形外装薄塗材E	弾性リシン	標準	可とう薄E	0.1	1.2	
防水形外装薄塗材E	単層弾性	標準	防薄E	0.1	0.9	
		厚塗り	防薄E厚	0.1	1.1	
		薄塗り	防薄E薄	0.1	0.8	
複層塗材E	吹付けタイル	標準	複層E	0.1	1.0	0.2
可とう形複層塗材CE	セメントタイル	標準	可とう複CE	0.1	1.2	0.2
防水形複層塗材CE	セメントタイル	標準	防複CE	0.1	0.9	0.2
防水形複層塗材E	弾性タイル	標準	防複E	0.1*	1.0	0.2
		上塗りなし	防複Eなし	0.1*	1.0	
	弾性タイル	標準	防複E-2	0.1*	1.4	0.2
		上塗りなし	防複E-2なし	0.1*	1.4	
つや有り合成樹脂エマルジョンペイント	EP-G	標準	EP-G-1	0.1		0.2
アクリル樹脂系非水分散系塗料	NAD	標準	NAD	0.1		0.2
ブランク(仕上げなし)	—	—	ブランク	—	—	—

*下塗材の種類が違う、**塗付け量からの計算値

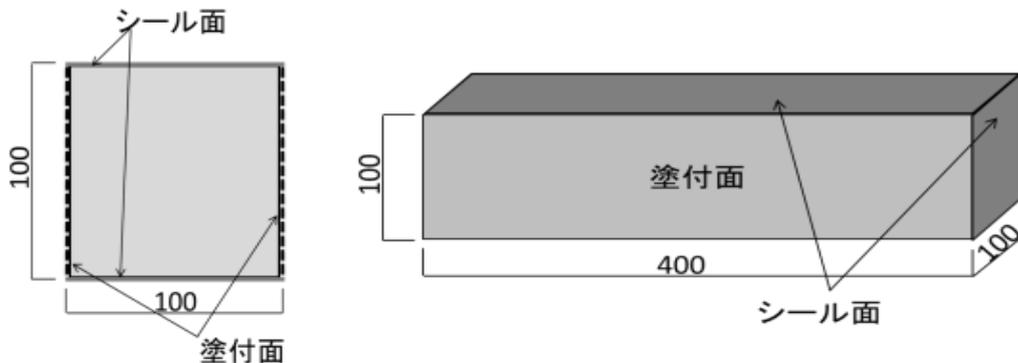


図 5.2.1 試験体概要

表 5.2.6 塗装仕様における試験条件

	促進中性化		屋外曝露:雨がかりあり		屋外曝露:雨がかりなし	
	W/C:65%	W/C:50%	W/C:65%	W/C:50%	W/C:65%	W/C:50%
薄塗E-1	○	○	○	○	○	○
薄塗E-1厚	○					
薄塗E-1薄	○					
薄塗E-2	○					
薄塗E-3	○					
可とう薄E	○	○	○	○	○	○
防薄E	○	○				
防薄E厚	○					
防薄E薄	○					
複層E	○					
可とう複CE	○					
防複CE	○					
防複E	○					
防複Eなし	○					
防複E-2	○					
防複E-2なし	○					
EP-G-1	○					
NAD	○					
ブランク	○	○	○	○	○	○



写真 5.2.1 コンクリートの混練



写真 5.2.2 コンクリートの打設



写真 5.2.3 コンクリートのならし



写真 5.2.4 水中養生



写真 5.2.5 下地調整



写真 5.2.6 下地調整塗材 C-1 塗布状況



写真 5.2.7 下塗り施工



写真 5.2.8 吹付け作業状況



写真 5.2.9 仕上材施工状況



写真 5.2.10 促進中性化試験体

5.2.4 中性化深さの測定方法

コンクリートの中性化深さは、JIS A 1152 に準拠してコンクリートの中性化深さを測定した。試験体の端部から約 60mm の位置を試験体の長さ方向と直角に割裂する。その後、割裂した面を測定面として、フェノールフタレイン溶液を吹き付け、非発色部分を電子ノギスで計測。測定は、各試験体の 2 面、10 か所の平均値を 3 体分算出して、3 体分の平均値を最終的な中性化深さとした。なお、中性化深さは、中性化深さと同様に算出した膜厚を引いた値とした。試験体の測定位置の概要を図 5.2.2 に示す。割裂の様子を写真 5.2.11 にフェノールフタレイン溶液による着色の様子を写真 5.2.12 に示す。

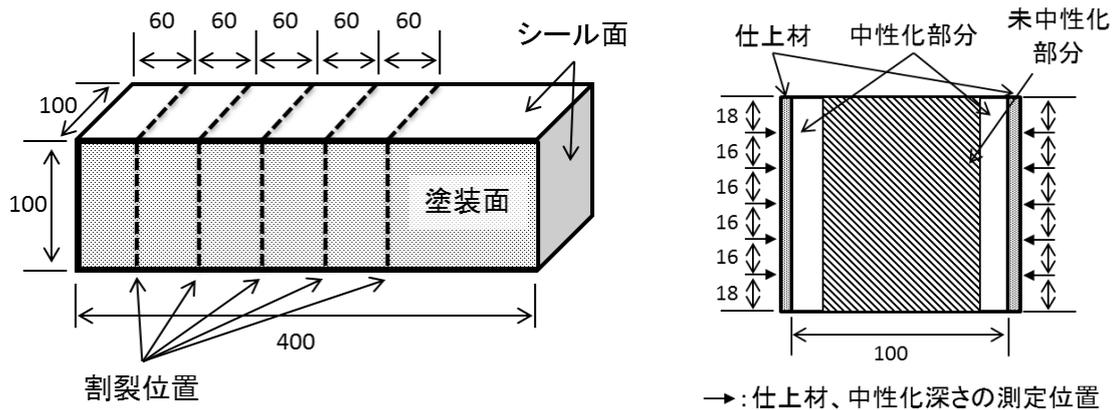


図 5.2.2 中性化深さの測定位置概要

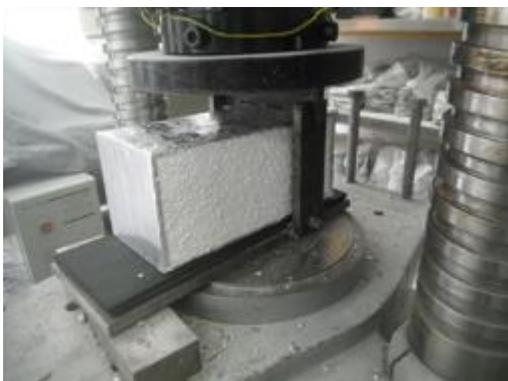


写真 5.2.11 割裂の様子



写真 5.2.12 割裂した試験体



写真 5.2.12 フェノールフタレインによる着色



写真 5.2.13 中性化深さの測定

5.3 実験結果と考察

5.3.1 促進中性化試験における中性化深さの傾向

促進中性化試験における1週、2週、4週、8週、13週、26週での各試験体の中性化深さの測定結果と仕上材の平均膜厚について、下地コンクリートが水セメント比65%のものを表5.3.1、50%のものを表5.3.2に示す。また、各試験体の中性化深さと促進期間の関係を表したグラフを図5.3.1～5.3.7に示す。

図5.3.1～5.3.3において、仕上材の分類で大きく傾向をとらえると、薄塗材に分類される試験体の中性化深さが深く、複層塗材、塗料の中性化深さはほとんど同じような傾向を示した。

図5.3.1の薄塗材E-1、薄塗材E-2、薄塗材E-3では、JISA6909では同じ種類に分けられる材料においてもその中性化深さが異なることが確認出来た。

また、図5.3.4において、薄塗材E-1の塗付け量の違いによる中性化深さの傾向を示したが、薄塗りの場合には大きく中性化深さが大きくなる傾向を示すが、厚塗りと標準塗りでは、塗り厚が中性化深さに与える影響は小さくなる傾向が見られた。

図5.3.5において、防水形薄塗材Eでの塗付け量の影響を確認した。本研究結果から、防水形薄塗材Eの塗付け量による影響は小さいことが確認出来た。

図5.3.2のように、複層塗材の中性化深さの傾向としては、複層塗材Eのみがやや大きく、他の防水形複層塗材Eや可とう形複層塗材CE、防水形複層塗材CEの値はほとんど同じ傾向を示した。また、既往文献^{例えば5-4)}によると、セメント系材料は仕上材自身の中性化が進行し、その後躯体コンクリートの中性化が始まるとされている。本研究における結果において、その傾向を確認することは出来なかった。これは今回使用したポリマーセメント系複層塗材が可とう形及び防水形の性能を保持するためモルタルや複層塗材CEと比べ、樹脂が豊富に使用されているため単純に塗膜としての中性化抑制効果のみ現れていると考えられる。

また、図5.3.6に見られるように、上塗りの有無による中性化抑制効果を確認したが、防水形複層塗材においては、上塗り層の影響がほとんど見られないことが確認出来た。

既往の報告によると溶剤塗料のエナメル塗りとエマルジョンペイント塗りの中性化抑制効果は大きく異なり、エマルジョンペイントの中性化抑制効果は低いとされていた。しかし、図5.3.3を見ると、塗料の種類による影響はほとんど見られないことがわかる。これは、比較として評価したものが弱溶剤であったことも理由の一つであろうが、エマルジョンペイント自体の性能、特にエマルジョン樹脂の性能が向上しているためと考えられる。

表 5.3.1 各種仕上材の中性化深さ（下地コンクリート：水セメント比 65%）

試験体略称	中性化深さ(mm)						平均膜厚 (mm)
	1週	2週	4週	8週	13週	26週	
薄塗E-1	1.4	1.6	2.9	3.7	5.7	8.3	0.71
薄塗E-1厚	1.5	1.5	2.3	2.1	5.1	7.5	0.80
薄塗E-1薄	1.9	2.8	3.9	4.6	9.7	13.0	0.65
薄塗E-2	1.6	1.7	2.6	2.6	4.8	7.7	1.28
薄塗E-3	1.1	1.4	2.6	2.6	4.0	6.1	0.45
可とう薄E	1.2	1.2	1.7	1.6	3.0	4.7	0.84
防薄E	1.2	1.4	1.3	1.0	1.8	2.2	0.54
防薄E厚	0.8	1.1	0.9	1.4	1.5	2.0	0.55
防薄E薄	1.2	1.3	1.8	1.1	2.1	3.2	0.43
複層E	1.4	1.8	2.2	1.9	4.3	7.6	0.74
可とう複CE	1.1	0.9	1.2	1.5	2.0	2.9	0.75
防複CE	1.0	1.0	1.2	0.9	1.6	3.3	0.59
防複E	0.8	0.9	1.4	1.5	1.9	2.3	0.59
防複Eなし	1.0	1.0	1.7	1.8	2.6	4.8	0.53
防複E-2	0.7	1.1	1.3	1.3	2.1	2.7	0.75
防複E-2なし	0.8	0.9	1.3	1.5	2.2	3.1	0.67
EP-G-1	1.2	1.3	1.7	1.9	2.7	3.6	0.07
NAD	1.4	1.4	1.9	1.8	2.3	2.6	0.07
ブランク	7.1	8.4	11.5	14.0	17.9	22.9	-

表 5.3.2 各種仕上材の中性化深さ（下地コンクリート：水セメント比 50%）

試験体略称	中性化深さ(mm)						平均膜厚 (mm)
	1週	2週	4週	8週	13週	26週	
薄塗E-1	0.5	0.3	0.4	0.9	3.2	4.9	0.53
可とう薄E	0.2	0.4	0.5	0.4	0.7	1.7	0.66
防薄E	0.4	0.3	0.4	0.3	0.7	0.8	0.38
ブランク	2.9	3.3	3.4	4.5	7.5	10.1	-

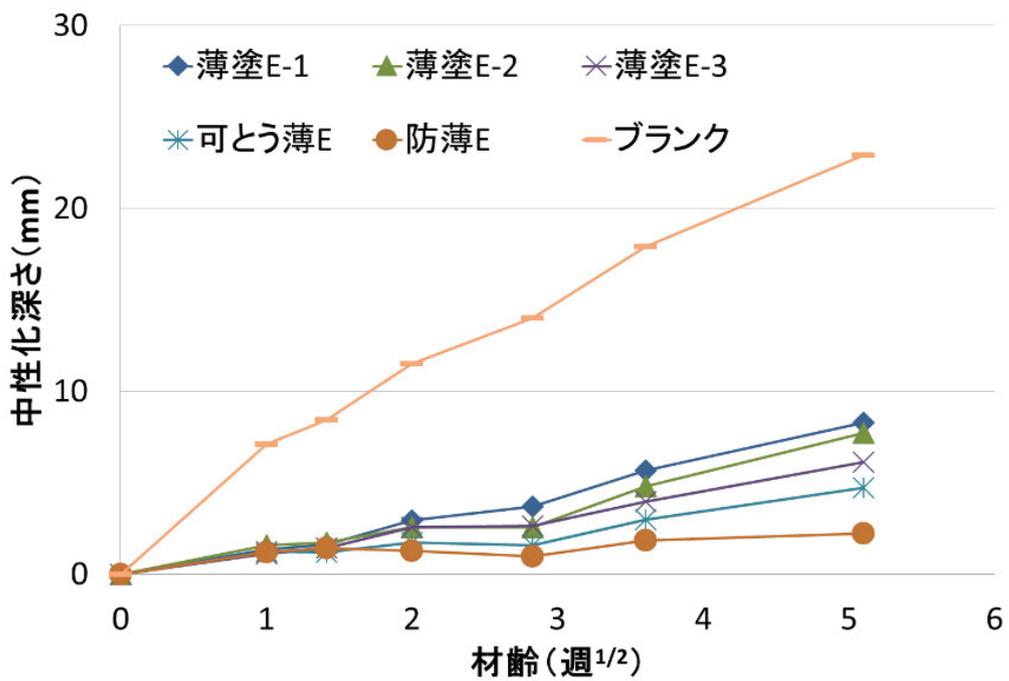
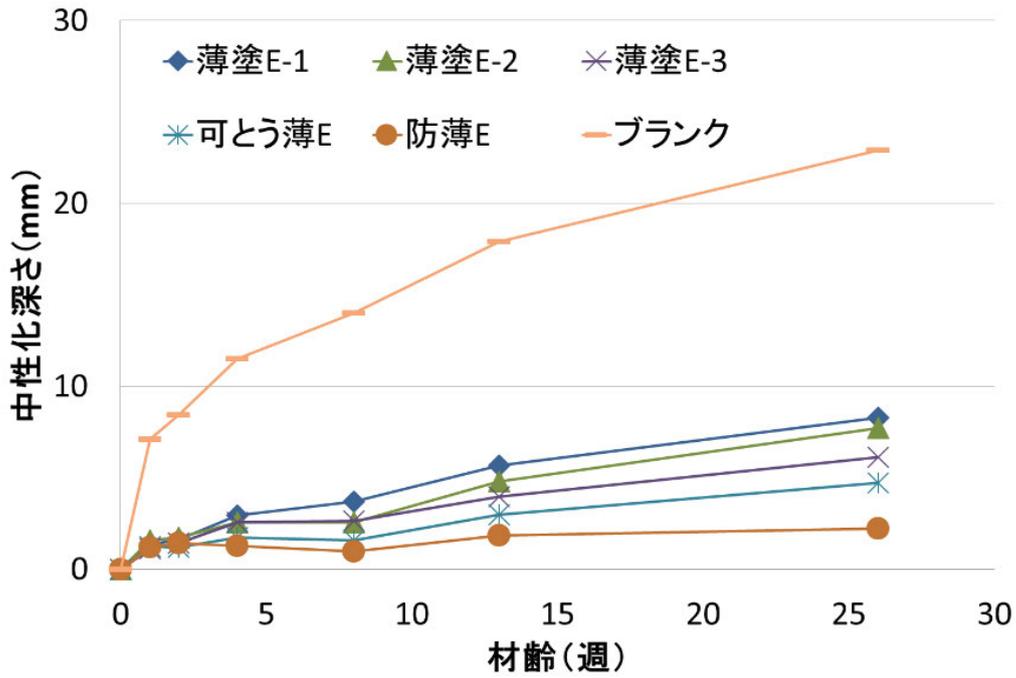


図 5.3.1 中性化深さの傾向 薄塗材標準仕様 (水セメント比 65%)

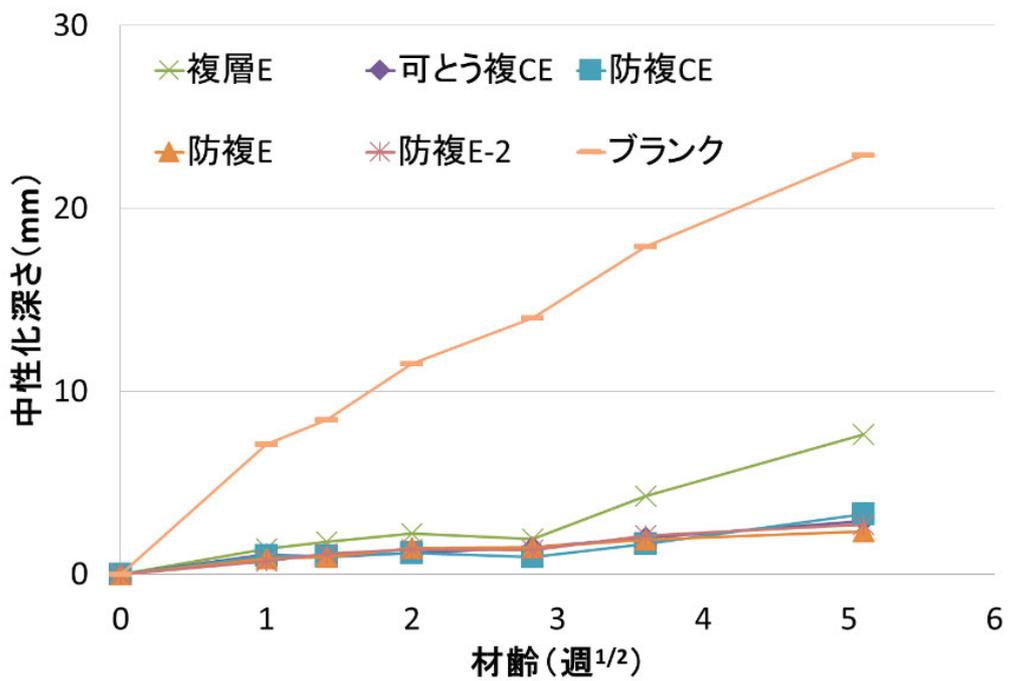
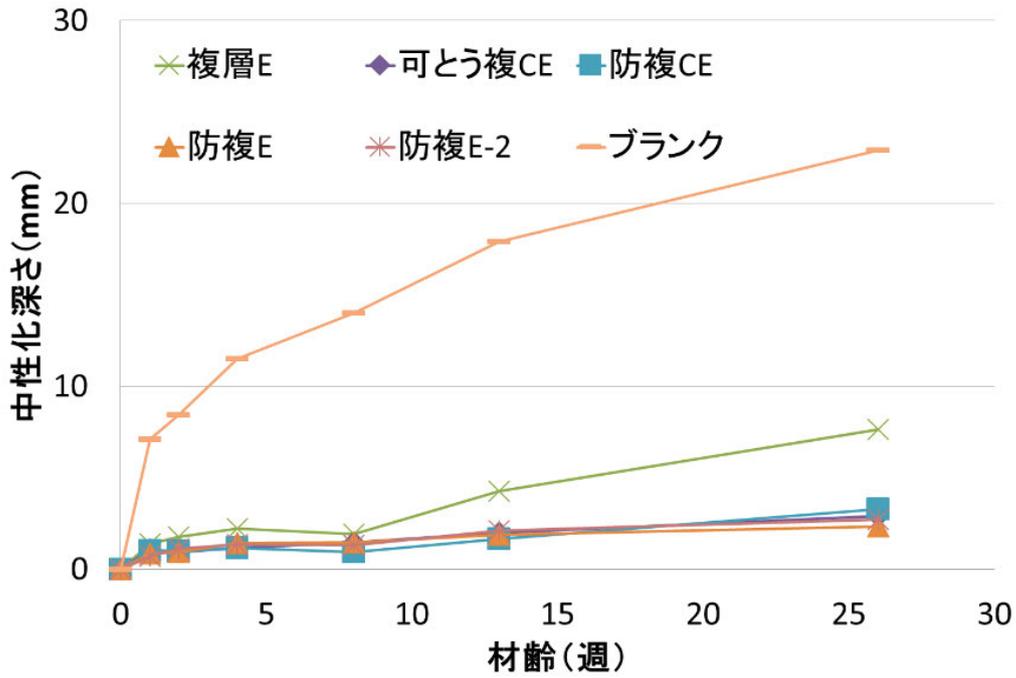


図 5.3.2 中性化深さの傾向 複層塗材・標準仕様（水セメント比 65%）

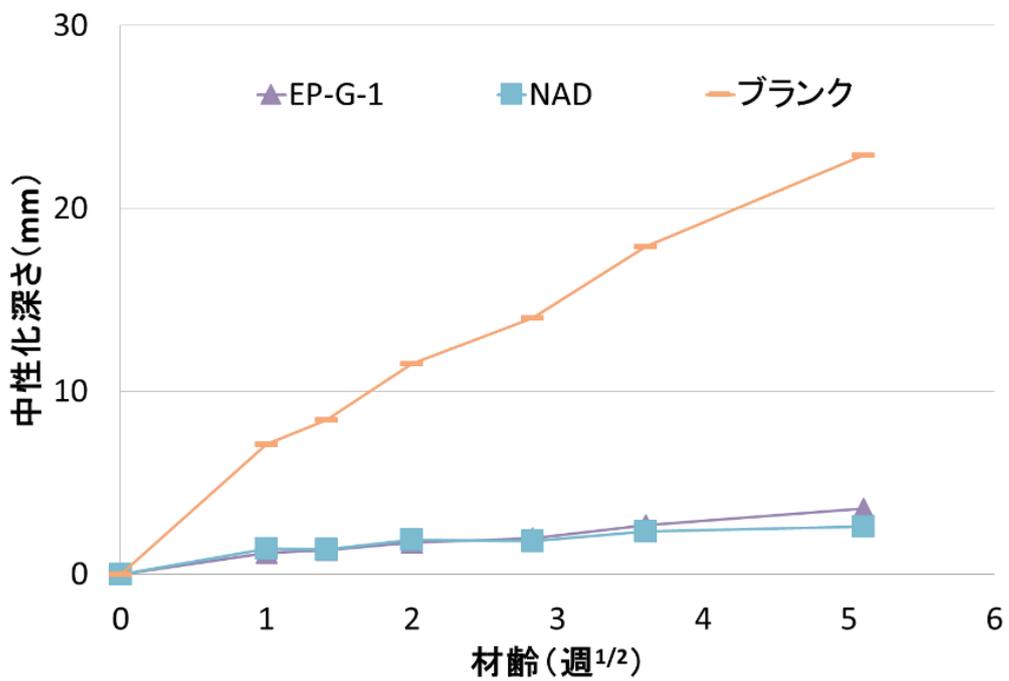
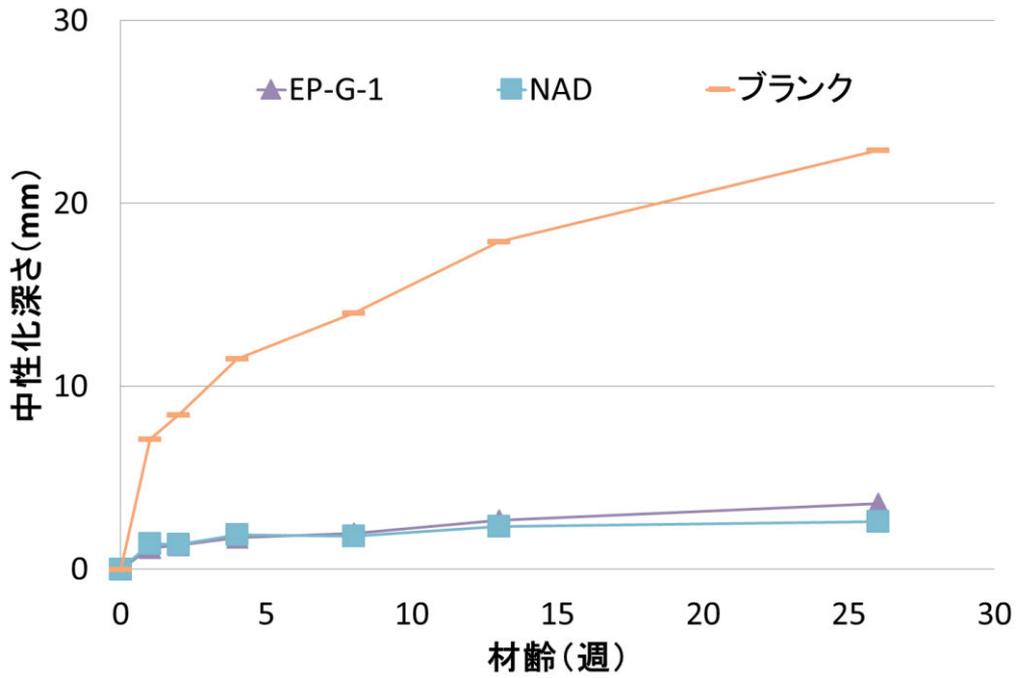


図 5.3.3 中性化深さの傾向 塗料 (水セメント比 65%)

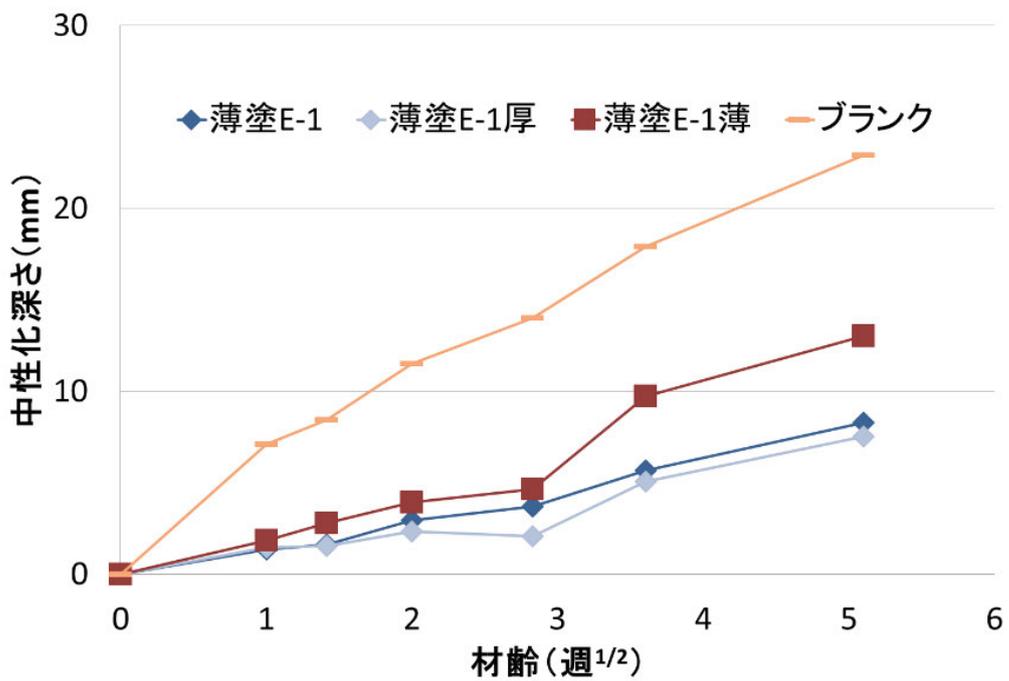
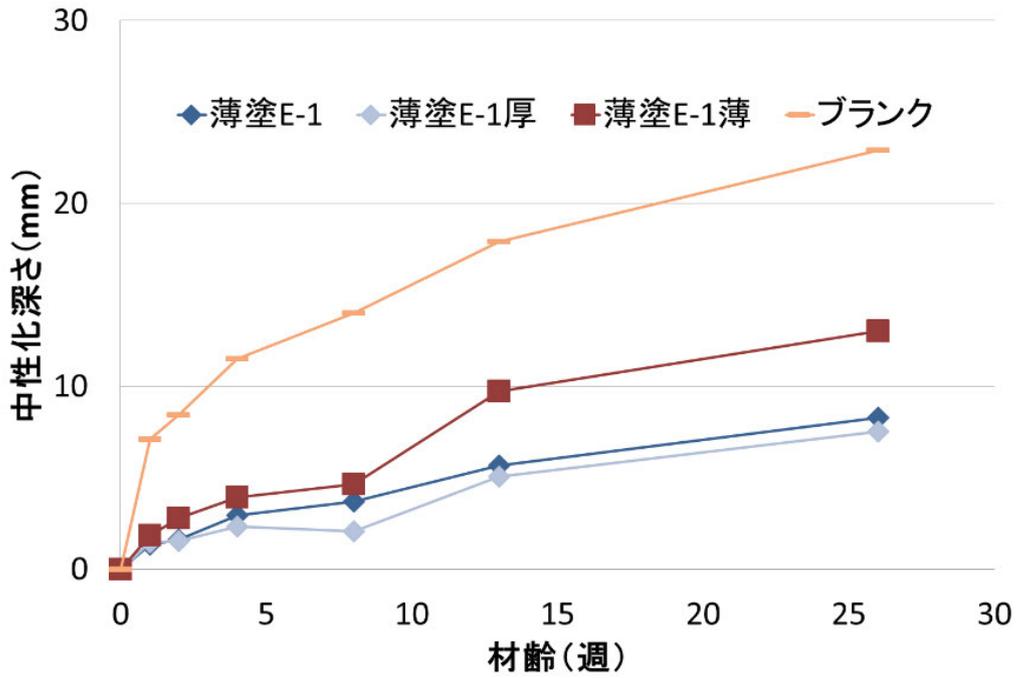


図 5.3.4 中性化深さの傾向 薄塗材 E 塗付け量の影響 (水セメント比 65%)

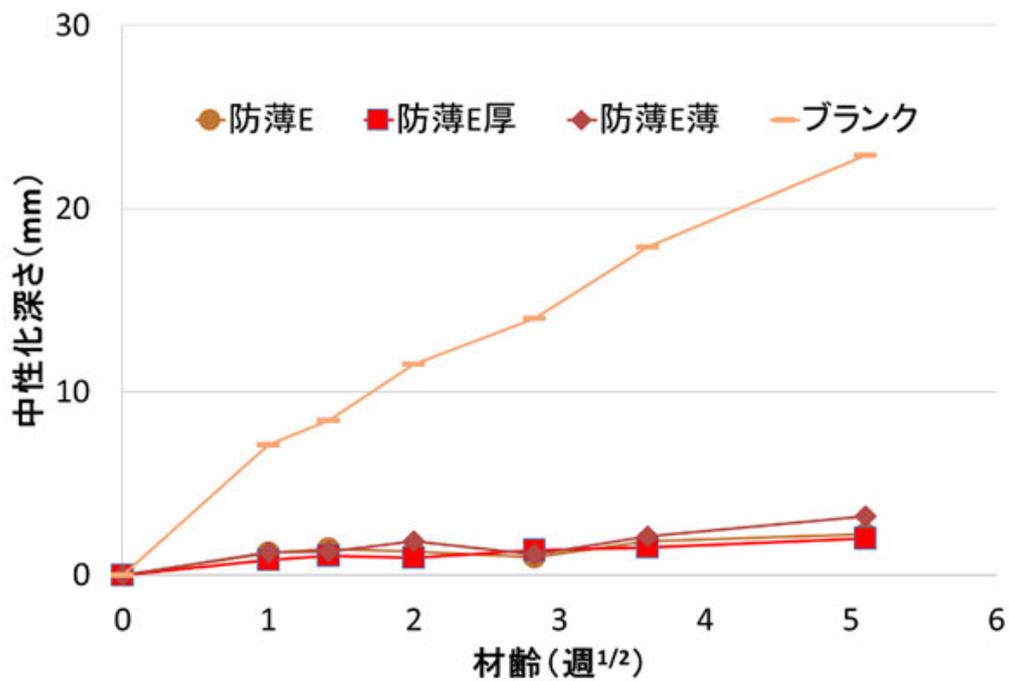
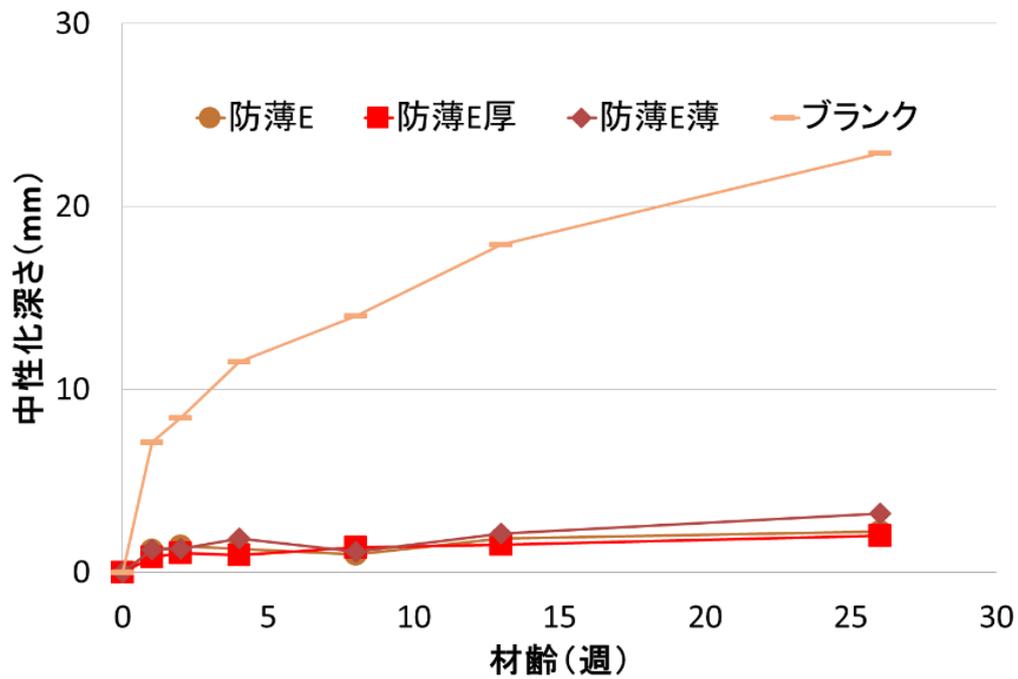


図 5.3.5 中性化深さの傾向 防水形薄塗材 E 塗付け量の影響 (水セメント比 65%)

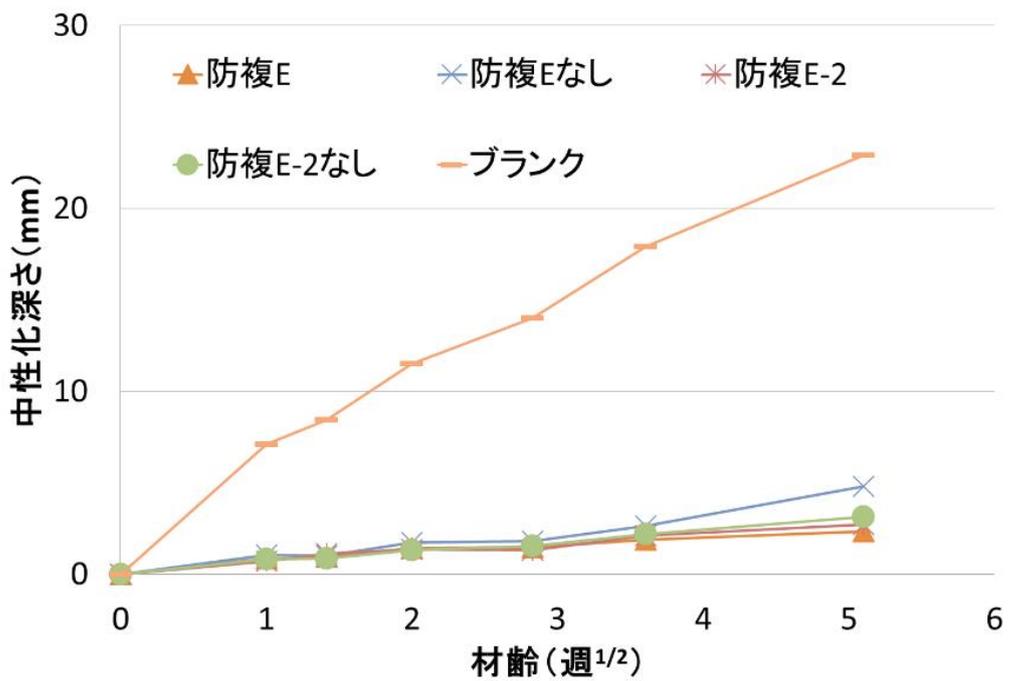
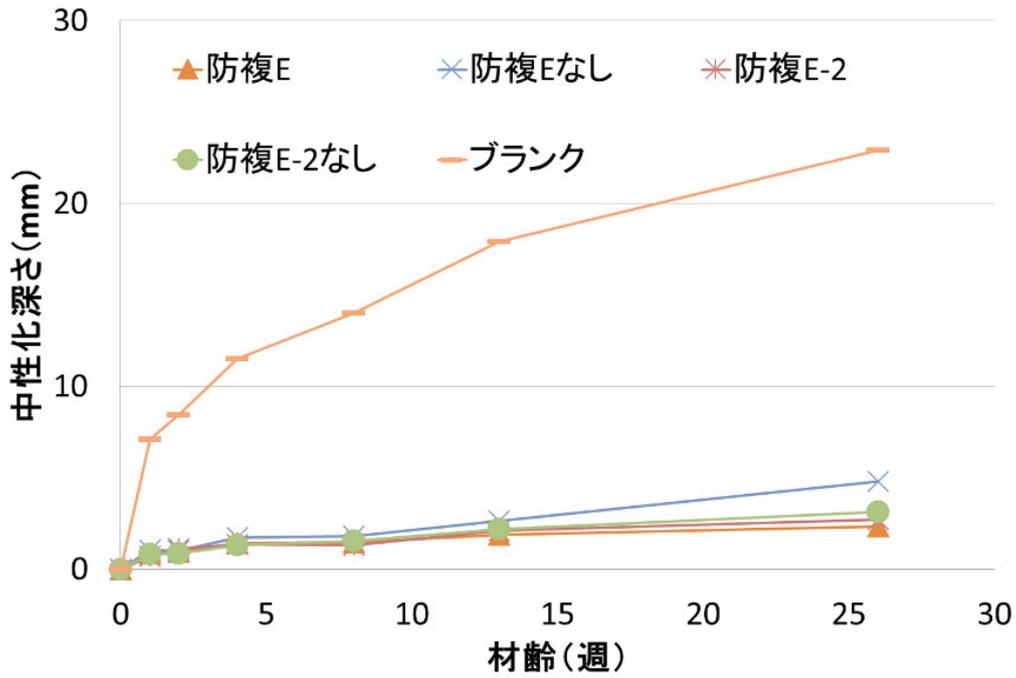


図 5.3.6 中性化深さの傾向 防復 E 上塗りの影響 (水セメント比 65%)

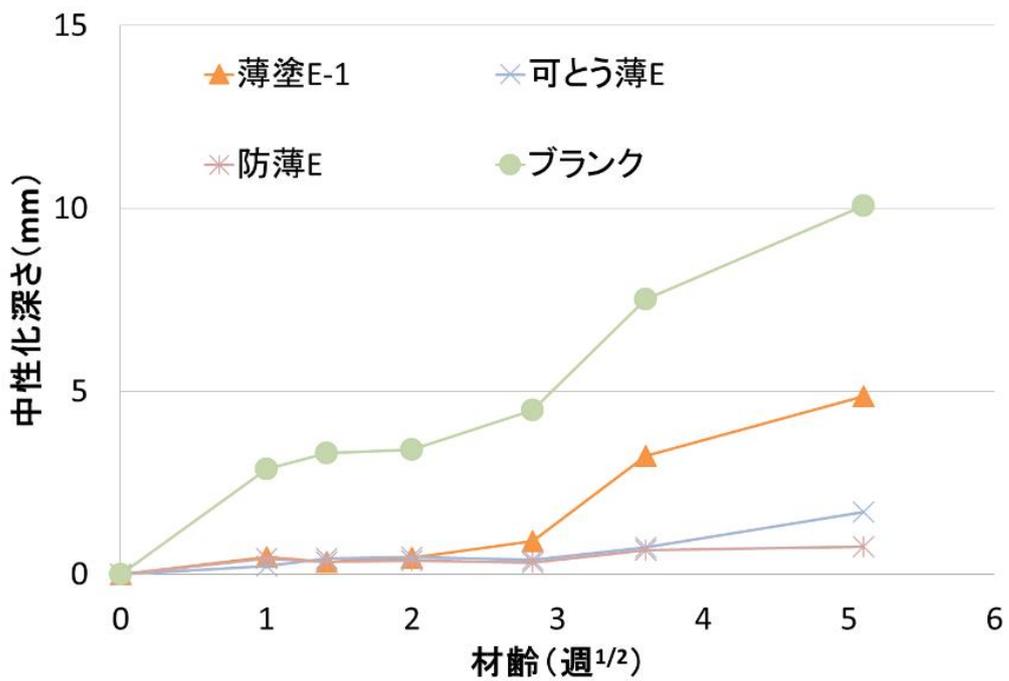
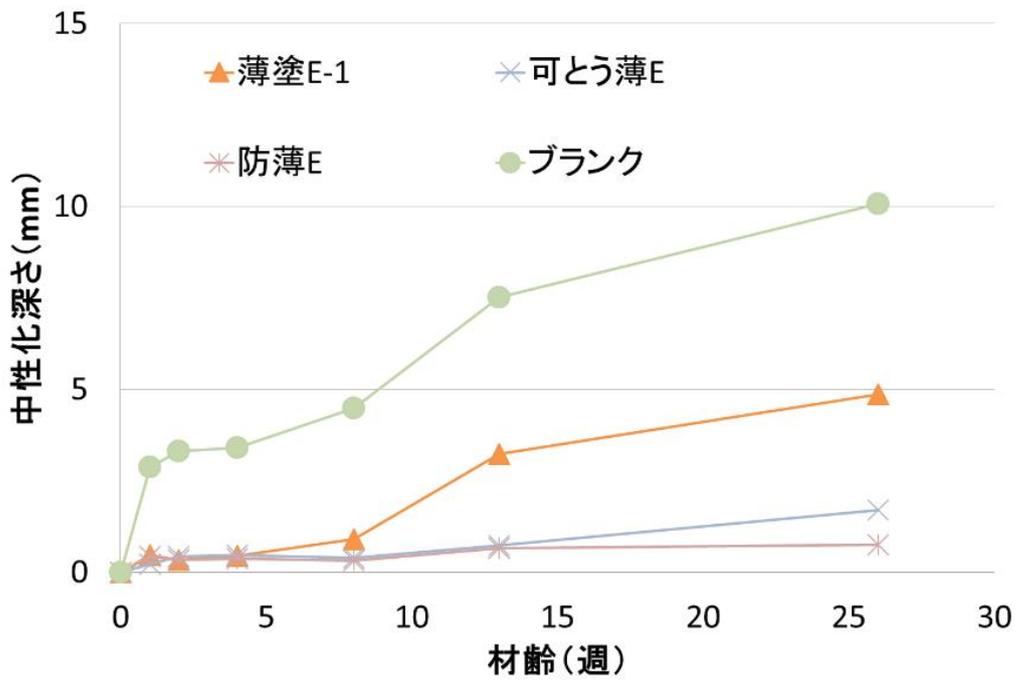


図 5.3.7 中性化深さの傾向 (水セメント比 50%)

5.3.2 仕上材の中性化抑制効果の評価

仕上材による中性化抑制効果の評価するため中性化速度係数と中性化率をもとめた。この際、馬場、千歩ら⁵⁻⁵⁾は、仕上材を施工したコンクリートの中性化進行は、セメント系、非セメント系により違いが生じるとして、図 5.3.8 の中性化進行の概念と式 5.3.1～5.3.4 を示している。①は仕上材を施さないコンクリートを示し、②はコンクリートの中性化速度係数 A が仕上材の中性化率 S を乗じた分だけ低減された値となっていると考えた場合である。また、③はセメント系仕上材の場合であり、自身が持つセメント成分の中性化が進行し、その後躯体コンクリートの中性化が始まるといわれている。非セメント系仕上材の場合は、紫外線や風雨により仕上材の劣化が進行し、徐々に中性化抑制効果が失われ、進行が大きくなるとして④の式が提案されている。

本研究においては、促進中性化の傾向で確認したようにセメント系材料においても中性化進行の遅れは見られず、中性化深さの進行も直線的に進行していることから、式 5.3.2 に示す仕上材の中性化予測式に基づき中性化速度係数と中性化率をもとめた。

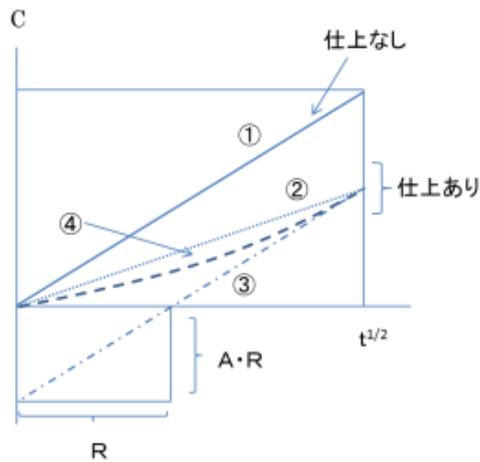


図 5.3.8 表面仕上層の種類別のコンクリート中性化傾向⁵⁻⁴⁾

$$\textcircled{1} C = A\sqrt{t} \quad (5.3.1)$$

$$\textcircled{2} C = A \times S\sqrt{t} \quad (5.3.2)$$

$$\textcircled{3} C = A(\sqrt{t} - R) \quad (5.3.3)$$

$$\textcircled{4} C = A(\sqrt{t - R^2} - R) \quad (5.3.4)$$

ここに、

C : 中性化深さ

A : コンクリートの中性化速度係数 ($\text{mm} \cdot \text{週}^{1/2}$)

t : 経過年数

S : 仕上材の中性化抑制効果の係数、仕上材の中性化率

R : 中性化抵抗 ($\text{週}^{1/2}$)

5.3.3 仕上材の中性化速度係数と中性化率

1 週から 26 週までの各材齢における測定結果をもとに、中性化速度係数と、仕上材の中性化率をもとめた。試験結果と速度係数を表 5.3.3、表 5.3.4 にまとめる。

今回の試験結果ではいずれの試験体においても、0.6 以下の中性化率を持つことが確認できた。また、可とう形、防水形の材料で中性化率が 0.2 を下回った。防水形複層塗材 E で見られるように上塗りが無い場合は、多少中性化率が大きくなるがそれでも十分低い値であった。また水セメント比が 50%のものより 65%のものは、中性化速度係数は高くなる傾向があった。今回確認した 3 種類の仕上材では、同様の傾向が見られた。(図 5.3.9)

表 5.3.3 中性化速度係数及び仕上材の中性化率 (水セメント比 65%)

試験体略称	中性化速度係数 (mm/週 ^{1/2})	中性化率
薄塗E-1	1.53	0.31
薄塗E-1厚	1.31	0.27
薄塗E-1薄	2.37	0.49
薄塗E-2	1.35	0.28
薄塗E-3	1.13	0.23
可とう薄E	0.84	0.17
防薄E	0.49	0.10
防薄E厚	0.44	0.09
防薄E薄	0.63	0.13
複層E	1.26	0.26
可とう複CE	0.57	0.12
防複CE	0.56	0.11
防複E	0.52	0.11
防複Eなし	0.83	0.17
防複E-2	0.56	0.11
防複E-2なし	0.61	0.13
EP-G-1	0.74	0.15
NAD	0.62	0.13
ブランク	4.87	—

表 5.3.4 中性化速度係数及び仕上材の中性化率 (水セメント比 50%)

試験体略称	中性化速度係数 (mm/週 ^{1/2})	中性化率
薄塗E-1	0.76	0.39
可とう薄E	0.26	0.13
防薄E	0.16	0.08
ブランク	1.95	—

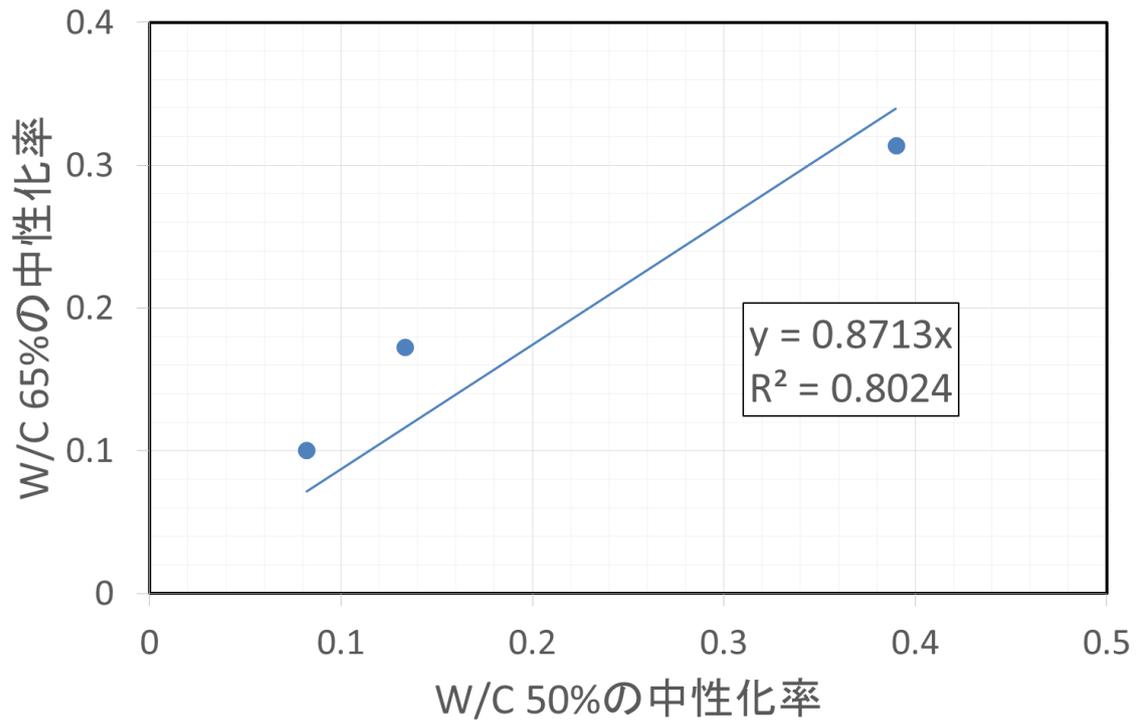


図 5.3.9 水セメント比の違いによる中性化率の比較

5.3.4 仕上材の中性化率の文献値との比較

本研究における促進中性化試験で求めた中性化率と文献値として JASS 5⁵⁻²⁾に記載される中性化率の比較を行った。表 5.3.5 に実験値と文献値に記載される中性化率を一覧として示し、図 5.3.5 にその関係を示す。今回ほとんどすべての試験体で JASS5 に記載される値よりも低い中性化率を示すことが分かった。また、標準的な仕様での●マークのものだけをピックアップして関係性を見ると、決定係数が 0.19 となり、塗装厚みなどの条件を変え仕様数を増やした×マークのものでも決定係数が 0.35 と非常に相関が低い。原因として、この結果は促進中性化試験の結果であり、経年時の外的因子による仕上塗材の劣化を考慮していない。実際はもっと中性化率が高くなると考えられる。JASS5 の中性化率は、促進中性化試験及び屋外曝露試験の結果を反映しているため、今回の試験結果も今後の屋外曝露試験との相関を調べる必要がある。

表 5.3.5 実験値と文献値における中性化率の一覧

試験体略称	実験値	文献値*	図中でのマーク	
			●	×
薄塗E-1	0.31	1.02	●	×
薄塗E-1厚	0.27	1.02	●	×
薄塗E-1薄	0.49	1.02		×
薄塗E-2	0.28	1.02		×
薄塗E-3	0.23	1.02		×
可とう薄E	0.17	0.86	●	×
防薄E	0.10	0.68	●	×
防薄E厚	0.09	0.68		×
防薄E薄	0.13	0.68		×
複層E	0.26	0.22	●	×
可とう複GE	0.12	0.00	●	×
防複GE	0.11	0.40	●	×
防複E	0.11	0.40	●	×
防複E-2	0.11	0.40	●	×
EP-G-1	0.15	0.64	●	×
NAD	0.13	0.12**	●	×

*JASS5 に記載、**エナメル塗りの値

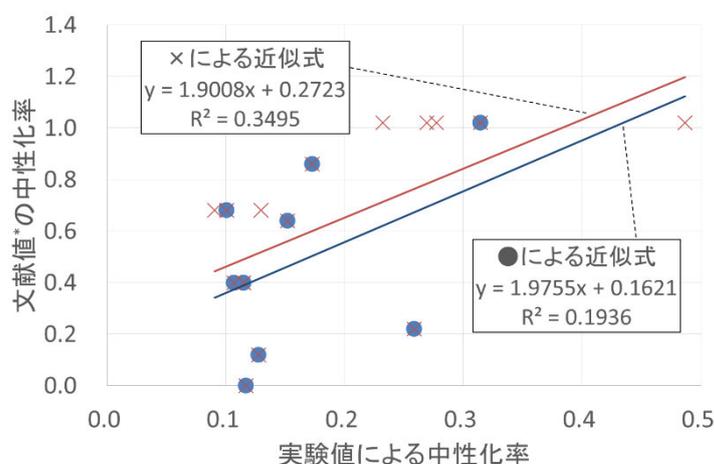


図 5.3.5 実験値と文献値における中性化率の比較

5.3.5 仕上材が中性化抑制効果に及ぼす樹脂量の影響

既往の研究では、仕上材の二酸化炭素透過性を評価する良い方法が確立されていないこともあり、仕上材の透気性の評価方法として透湿性の評価が行われ、透気性及び透湿性と相関があり、気密性が高いほど促進中性化試験での相関性が高いことが報告されている⁵⁻³⁾。

本研究の中性化率と実際の二酸化炭素透過性および透湿性との関係は第7章にて論ずるが、ここでは仕上材における気密性は、使用される樹脂の割合や量に密接に関係すると考え、仕上材の中性化抑制効果に及ぼす樹脂量の影響を把握することにした。

まず、表5.3.6に今回行った試験体の仕上材については主材部分を、塗料については上塗部分の樹脂含有率を示す。併せて、各層の塗付け量をもとに計算し足し併せた単位面積あたりの樹脂量を塗付け樹脂量として中性化率とともに示す。図5.3.6に中性化率と樹脂含有率との関係を図5.3.7に中性化率と塗付け樹脂総量との関係を示す。中性化率と樹脂含有率との間に比較的良好な相関性が見られた。第4章の中で、樹脂含有率と透湿度は良好な相関を見せていたことから促進試験においては透湿性の影響を受けている可能性がありそうである。一方で塗付け樹脂量との間にはあまり良好な相関性が見られなかった。

表 5.3.6 試験体の樹脂含有率及び塗付け樹脂量、中性化率の一覧

試験体略称	樹脂含有率(%)	塗付け樹脂量 (kg/m ²)	中性化率
薄塗E-1	10	0.14	0.31
薄塗E-1厚	10	0.18	0.27
薄塗E-1薄	10	0.10	0.49
薄塗E-2	7	0.18	0.28
薄塗E-3	8	0.06	0.23
可とう薄E	11	0.15	0.17
防薄E	24	0.22	0.10
防薄E厚	24	0.26	0.09
防薄E薄	24	0.19	0.13
複層E	3	0.10	0.26
可とう複CE	10	0.18	0.12
防複CE	31	0.29	0.11
防複E	33	0.41	0.11
防複E-2	24	0.42	0.11
EP-G-1	26	0.09	0.15
NAD	13	0.08	0.13

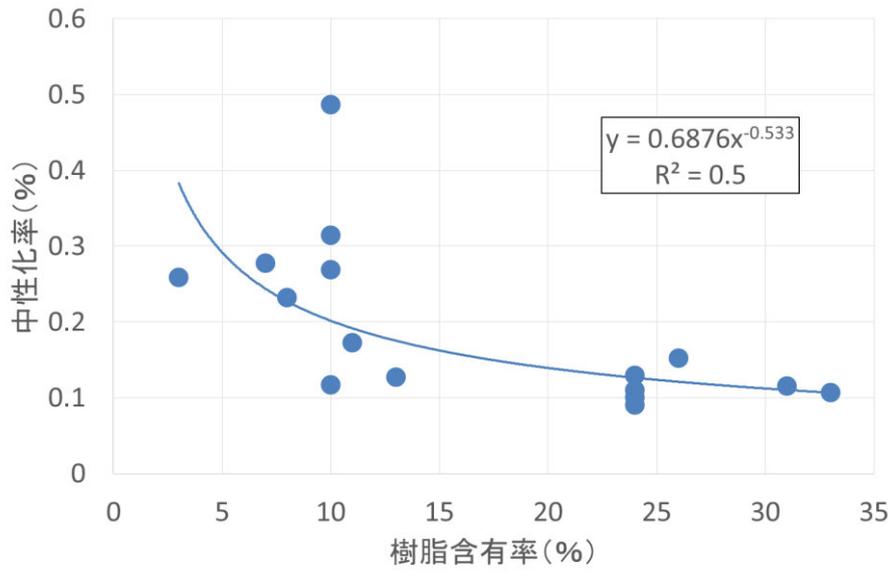


図 5.3.6 中性化率と樹脂含有率との比較

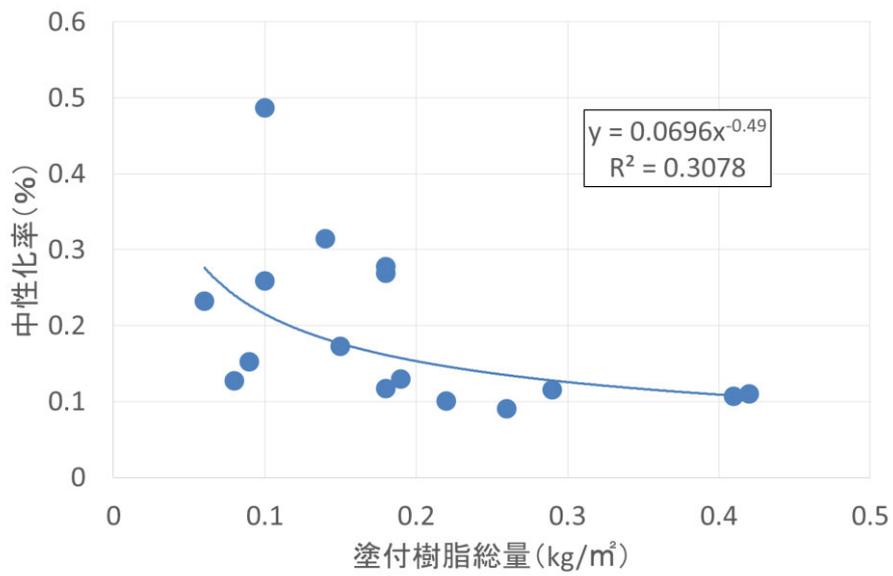


図 5.3.7 中性化率と塗付け樹脂量との比較

5.4 まとめ

本章では、仕上塗材 10 仕様、塗料 2 仕様の中性化試験を行い、それらの中性化抑制効果及び中性化抑制係数の確認を行った。

材齢 1～26 週における中性化深さよりそれぞれ速度係数を求めることが出来た。その際、ポリマーセメント系の仕上塗材においても各材齢での中性化深さの推移が直線的に進行していたことから、仕上塗材の中性化予測効果をかけ算として中性化予測式に組み込み、仕上材の中性化率を求めた。

上塗り材が劣化した状況を想定して、防水形複層塗材の上塗り塗料の有無での促進中性化試験を行ったが、中性化深さに大きな差が見られなかった。

薄塗材 E-1 (リシン)、薄塗材 E-2 (スキン)、薄塗材 E-3 (ローラーリシン) に見るように、JISA6909 では同じ種類に分けられる材料においてもその中性化深さ、中性化抑制係数が異なることが確認出来た。

仕上材の塗付け量の影響を確認した際に、薄塗材 E-1 で標準施工の使用量のなかで下限での施工をした試験体については、中性化抑制効果が低く今回確認を行った塗装仕様、塗装材料の中で一番悪い中性化低減効果を示した。しかし、その中性化低減係数は 0.49 であり、十分な抑制効果を持つことを確認しており、文献値^{5・1・5・6)}による薄塗材 E の値と大きなギャップが見られる。

また、JASS 5 によると、中性化率がおおよそ 0.6 以下であれば中性化抑制効果があるとされる。今回の試験結果ではいずれの試験体においても、0.6 以下の中性化率を持つことが確認できた。また、防水形複層塗材 E で見られるように上塗りが無い場合は、多少中性化率が大きくなるが十分な中性化抑制効果を示すことが確認できた。一方で、各材料での中性化率の実験値と文献値に記載されている値との間の相関が低いことが確認できた。この結果は促進中性化試験の結果の比較であるため、実際の屋外曝露試験の結果での相関を調べる必要があると考えられる。

また、仕上材が中性化抑制効果に及ぼす樹脂量の影響として中性化率と仕上材の樹脂の含有率に一定の相関性が見られた。第 4 章にて樹脂の含有率は仕上材の透湿度と相関を示すことを確認している。そこで仕上材の透湿性の影響を見るうえでも第 6 章において、中性化試験における含水率の推移を調査することにした。

参考文献

- 5-1) 長瀬公一, 河野政典, 竹内博幸, 古賀一八, 板谷俊郎ほか: 躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価 その1～その8, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1123-1138, 2007.8
- 5-2) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp. 194-203, 2009
- 5-3) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子: 建築用仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第609号, pp.23-30, 2006.11
- 5-4) 河野政典: 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果に関する研究, 日本建築仕上学会 2008年大会学術講演会研究発表論文集, pp.215-218, 2008.10
- 5-5) 馬場明生, 千歩修: 各種表面層を持つコンクリートの中性化深さ推定方法に関する一考察, コンクリート工学年次講演会論文集 vol9, No.1, pp333-338, 1987

第6章

仕上材の促進中性化試験における含水率の影響

第6章 仕上材の促進中性化試験における含水率の影響

6.1 はじめに

第5章において、仕上材を施したコンクリートにて促進中性化試験を実施した。実験により求めた仕上材の中性化率は既往文献調査と実態調査⁶⁻¹⁾によってまとめられたJASS 5⁶⁻²⁾に記載される数値よりも低く、各仕上材で低めであったり高めであったりと傾向に違いがあることが確認できた。これらの結果は、仕上材の製品の種類による違いが出ている可能性も考えられるし、実際の曝露条件とは異なるため傾向が変わった可能性も考えられる。また、促進中性化試験の中性化率の傾向は仕上材の樹脂割合と一定の関係性がみられ、仕上材の透湿性に影響を受けている可能性がある。実際に第7章にて示すが、促進中性化試験における中性化率の値と二酸化炭素透過度および透湿度の関係を見ると、透湿度との相関性のほうが二酸化炭素透過度よりも高いことが確認された。

これまでもコンクリートの中性化への影響として、湿度条件⁶⁻³⁾やコンクリートの含水率および乾燥状態⁶⁻⁴⁻⁶⁾によって中性化抑制効果に影響が出ることが報告されている。長谷川ら⁶⁻⁷⁾は、仕上材の透湿性の影響として含水率の保持があるとし、コンクリート乾燥を遅延することで、コンクリートの中性化が抑制される期間が持続するとしている。

本章では実際に仕上材の透湿性がコンクリートの促進中性化試験に及ぼす影響を把握するため、再びコンクリートの促進中性化試験を行い、第2シリーズとして、促進中性化試験中におけるコンクリートの含水率の変化を確認することにした。

6.2 実験概要

6.2.1 試験体について

第5章に示す方法や材料を用いて検討を行っているが、本章では水セメント比65%のコンクリートのみを下地として用いた。

試験体はJIS A 1153に規定される方法で打設、脱型を行い、材齢4週まで水中養生を行った。次いで、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ で材齢8週まで気中養生した。調合及び性状と使用材料を表6.2.1～6.2.2に示す。

その後、コンクリートの側型枠面に、JIS A 6916に規定される下地調整塗材C-1で穴埋め処理を行い1週間の養生後、仕上材を施工した。評価を行った仕上材材料は、JIS K 5660に規定される塗料と、JIS A 6909の建築用仕上塗材に規定される薄付け仕上塗材と複層仕上塗材の中から表6.2.3に示す仕上材を選択した。

仕上材は、JASS18及びJASS23に準拠して施工した。仕上材の施工後2週間養生した後、無塗装面にアルミテープを貼り付け試験に供した。

表 6.2.1 コンクリートの調合及び性状

実験 シリーズ	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				空気量 (%)	スランブ ^o (cm ²)
			C	W	G	S		
1	65	46.4	274	178	968	829	4.6	20
2							4.6	19

表 6.2.2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	太平洋セメント社製普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)
水	W	上水道水
粗骨材	G	茨城県桜川市産硬質砂岩砕石 (表乾密度:2.64g/cm ³ 、吸水率:0.68%、粗粒率(F.M.):6.80)
細骨材	S	静岡県掛川市産陸砂 (表乾密度:2.58 g/cm ³ 、吸水率:1.81%、粗粒率(F.M.):2.97)

表 6.2.3 仕上材の種類一覧

試験体略称	仕上材の種類及び呼び名		塗付け量(kg/m ²)		
			下塗	主材	上塗
薄塗E-1	外装薄塗材E	リシン	0.1	1.0	
薄塗E-3	外装薄塗材E	ローラーリシン	0.1	0.5	
可とう薄E	可とう形外装薄塗材E	弾性リシン	0.1	1.2	
防薄E	防水形外装薄塗材E	単層弾性	0.1	0.9	
複層E	複層塗材E	吹付タイル	0.1	1.0	0.2
防複E	防水形複層塗材E	弾性タイル	0.1*	1.0	0.2
EP-G-1	つや有リアクリルエマルションペイント		0.1		0.2

*下塗材の種類が違う

6.2.2 促進中性化試験と含水率の測定

JIS A 1153 に準じて促進中性化試験を行い、材齢 1 週、2 週、4 週、8 週、13 週、26 週での中性化深さを測定した。中性化深さは、第 5 章と同様に、JIS A 1152 に準拠して測定し、図 6.2.1 に示す 2 面 10 カ所の平均値を求めた。また、中性化深さと同じ測定位置で仕上材の塗膜厚みも測定を行った。

含水率の測定方法は、中性化深さ測定後に割裂した試験体を 100℃の恒温槽で乾燥させた。試験体の重量変化を測定し恒量となるまで乾燥させた。その前後の試験体重量の減量分をコンクリートの含水率とした。

また、下地コンクリート自体の 20℃の温度下で相対湿度を 60、70、80、98%RH の各湿度条件にて養生を行い、それぞれの平衡含水率も測定を行った。この際、下地コンクリートは 100mm 幅で割裂し、側面以外をアルミテープでシールし恒温恒湿槽で養生した。含水率の平衡の判定は重量変化の測定を行い、変化が収束してから 3 日後に含水率を求め平衡含水率とした。

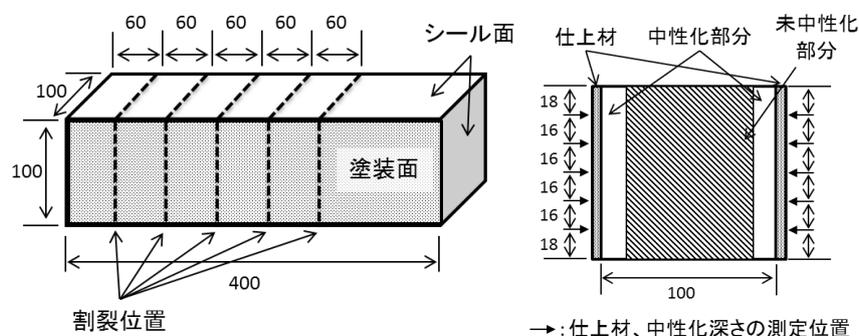


図 6.2.1 中性化深さの測定位置

6.3 実験結果

6.3.1 中性化深さの測定結果

本章における促進中性化試験の結果を表 6.3.1 に示す。中性化深さの推移は、第 5 章における結果と類似していたことから、同様に中性化の速度係数と中性化率を求めた。また、第 5 章における中性化率の値と本章の中性化率の値の関係性を図 6.3.1 に示す。決定係数で 0.91 と高い相関性が認められるため、コンクリートの促進中性化試験として、再現性が高いことを確認できている。図 6.3.2 に中性化深さの傾向をまとめる。

表 6.3.1 促進中性化試験の測定結果

試験体略称	平均膜厚 (mm)	中性化深さ(mm)						速度係数 (mm/週 ^{1/2})	中性化率
		1週	2週	4週	8週	13週	26週		
薄塗E-1	0.7	2.4	1.8	2.9	4.2	8.0	13.8	2.25	0.47
薄塗E-3	0.5	1.2	0.9	1.2	1.5	2.7	5.6	0.87	0.18
可とう薄E	0.8	1.3	1.4	1.6	1.6	1.8	4.0	0.70	0.15
防薄E	0.5	1.2	1.2	1.5	1.3	1.3	2.9	0.54	0.11
複層E	0.7	1.4	1.4	1.8	1.7	2.2	4.5	0.78	0.16
防複E	0.5	1.2	1.2	1.2	1.3	1.7	3.4	0.59	0.13
EP-G-1	0.2	0.9	1.2	1.2	1.4	1.7	4.8	0.73	0.15
ブランク	-	5.9	7.7	10.2	13.8	17.5	23.0	4.75	1.00

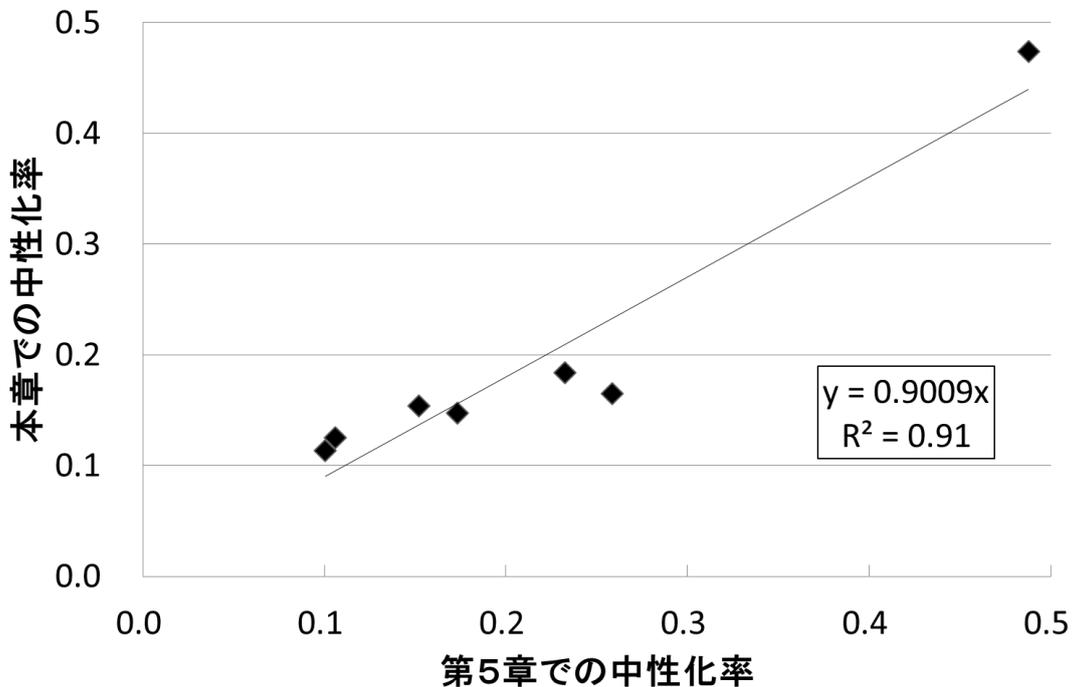


図 6.3.1 第 5 章との中性化試験の再現性確認

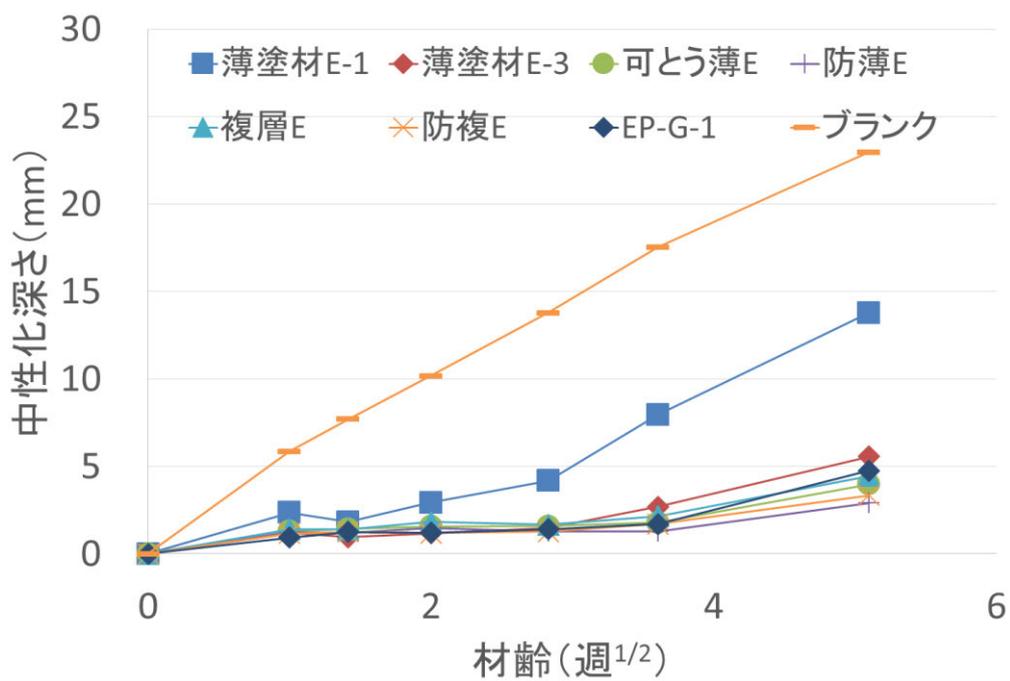
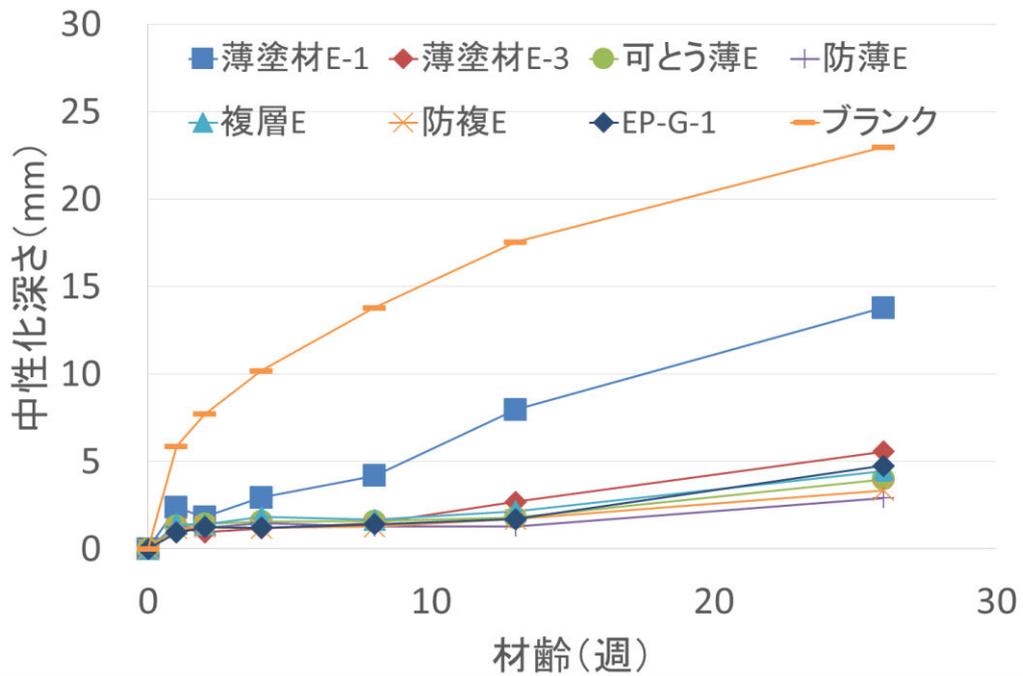


図 6.3.2 中性化深さの傾向

6.3.2 促進中性化試験における含水率の推移

本章における促進中性化試験における各材齢での試験体の平均含水率を表 6.3.2 に示す。またその推移を図 6.3.3 に示す。また使用した下地コンクリートの各湿度条件における平衡含水率を表の結果を表 6.3.3 に示す。

仕上材を施したコンクリートの促進中性化試験の含水率は、試験開始から急激に上昇していき、2週目をピークに徐々に低下していく。また、仕上材を施した試験体では全ての試験期間において含水率が相対湿度 60%の際のコンクリートの平衡含水率よりも高い状態にあることが分かった。ブランクの試験体についても一度含水率が上昇し時間とともに平衡含水率に達することが確認出来た。

既往の報告^{6,7)}では、コンクリートの表面に透湿性の低い材料を施工した場合、コンクリートの深部の水の影響をうけ、コンクリートの表面含水率が上昇し中性化の進行が遅くなるとされているが、本検討ではコンクリート全体の含水率が増加することが確認出来た。

通常、水蒸気などの気体は濃度勾配により拡散・浸透する方向が決定され濃度の高い方から低い方へ移動する。湿度 60%の平衡含水率よりも高い含水状態のコンクリートからは乾燥方向への水蒸気の移動が起こるはずで、外部から内部へ水が移動することは考えにくい。水の発生経路として二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムとの中和反応により生成する水分によってコンクリートの含水率が上昇していると考えられる。促進中性化試験における含水率増加のメカニズムを図 6.3.4 に示す。二酸化炭素濃度が高い場合は、仕上材を通してコンクリート内部に入り込む二酸化炭素の透過量が多くなり、コンクリート内部で反応する二酸化炭素と水酸化カルシウムとの中和反応が加速され、発生した水分がコンクリート内部から仕上材を通して放出される量よりも、内部にとどまる量が増えるためコンクリートの含水率が増加すると考えられる。そのため、促進試験の初期段階では特に含水率が高く、徐々にコンクリート内での二酸化炭素の拡散過程が大きくなる試験の後半では中性化反応も遅くなり、含水率も落ち着くと考えられる。仕上材を施さないブランクのコンクリートでは 26 週における含水率が相対湿度 60%RH の時の平衡含水率と同様の値を示す。

表 6.3.2 促進中性化試験における含水率の測定結果

試験体略称	含水率(%)					
	1週	2週	4週	8週	13週	26週
薄塗材E-1	3.74	4.30	4.02	3.86	2.97	2.95
薄塗材E-3	3.71	4.36	4.18	4.09	3.28	3.20
可とう薄E	3.70	4.22	4.12	4.11	3.22	3.15
防薄E	3.67	4.18	4.18	4.12	3.38	3.25
複層E	3.80	4.23	4.23	4.03	3.16	3.03
防複E	3.85	4.27	4.18	4.06	3.28	3.22
塗料	3.60	4.02	3.90	3.86	3.15	3.11
ブランク	3.50	3.80	3.88	3.72	2.75	2.64

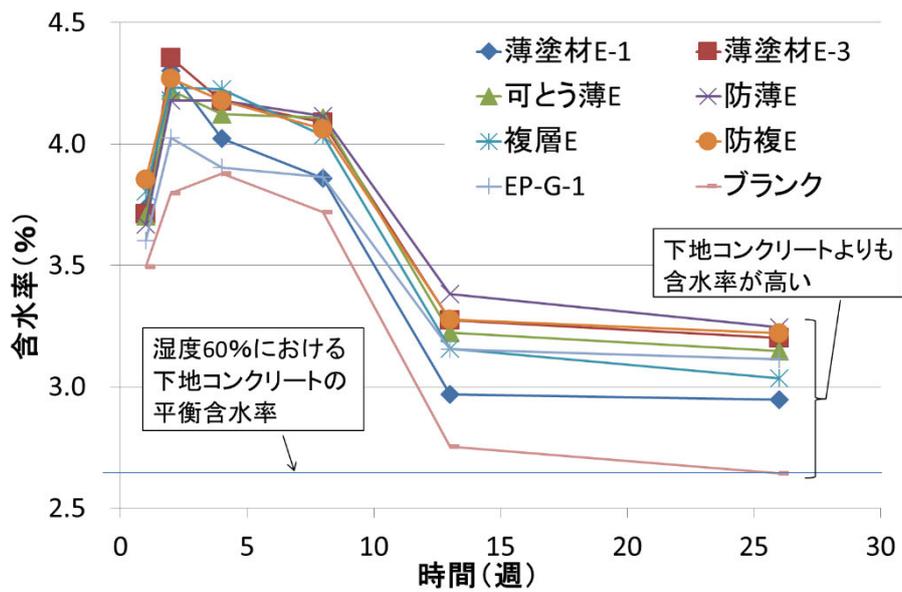


図 6.3.3 促進中性化試験における含水率の推移

表 6.3.3 各湿度条件におけるコンクリートの平衡含水率

湿度条件(%R.H.)	60	70	80	90	98
含水率(%)	2.64	2.78	3.02	3.10	3.14

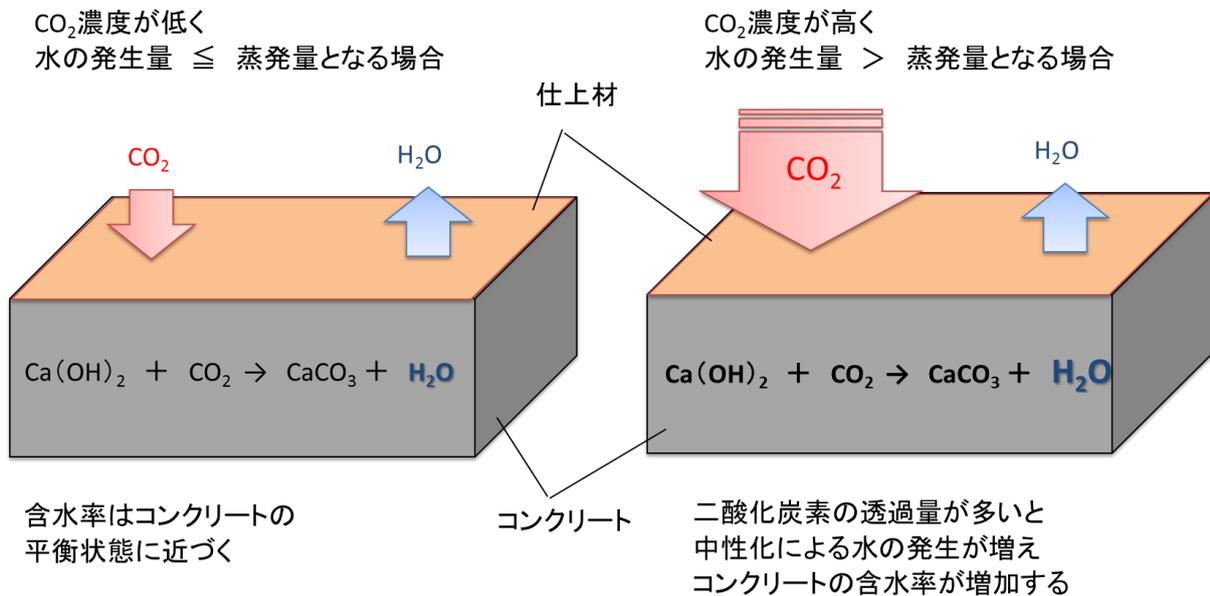


図 6.3.4 コンクリートの含水率増加のメカニズム

6.3.3 コンクリートの含水率と中性化率の関係

本章で測定した中性化率と材齢 26 週でのコンクリートの含水率の一覧を表 6.3.4 に、その関係を図 6.3.5 に示す。決定係数で 0.64 と相関性が確認できる。その際、含水率が低くなるにつれ、中性化率の値にばらつきが大きくなる傾向がみられる。

既往の報告においても、阿部ら⁶⁻³⁾は、促進試験の湿度が中性化速度に及ぼす影響を報告している。湿度が約 40%のときに最大となり、60%、80%となるにつれて徐々に速度が遅くなるとしている。他にも大岸ら⁶⁻⁴⁾、依田ら⁶⁻⁵⁾、申ら⁶⁻⁶⁾の報告でもコンクリートの含水率が高くなるほど中性化速度が遅くなるという結果が示されている。これはコンクリート中での二酸化炭素の拡散が、コンクリートの空隙中に存在する水によって阻害されるためであると考えられている。促進中性化試験における仕上材の透湿度の影響として、コンクリート中に発生した水分の蒸発の抑制効果があり、その結果中性化が抑制されていると考えられる。

表 6.3.4 各試験体のコンクリートの含水率（材齢 26 週）と中性化率の一覧

試験体略称	含水率	中性化率
薄塗材E-1	2.95	0.31
薄塗材E-3	3.20	0.23
可とう形薄E	3.15	0.17
防薄E	3.25	0.1
複層E	3.03	0.26
防複E	3.22	0.11
EP-G-1	3.11	0.15

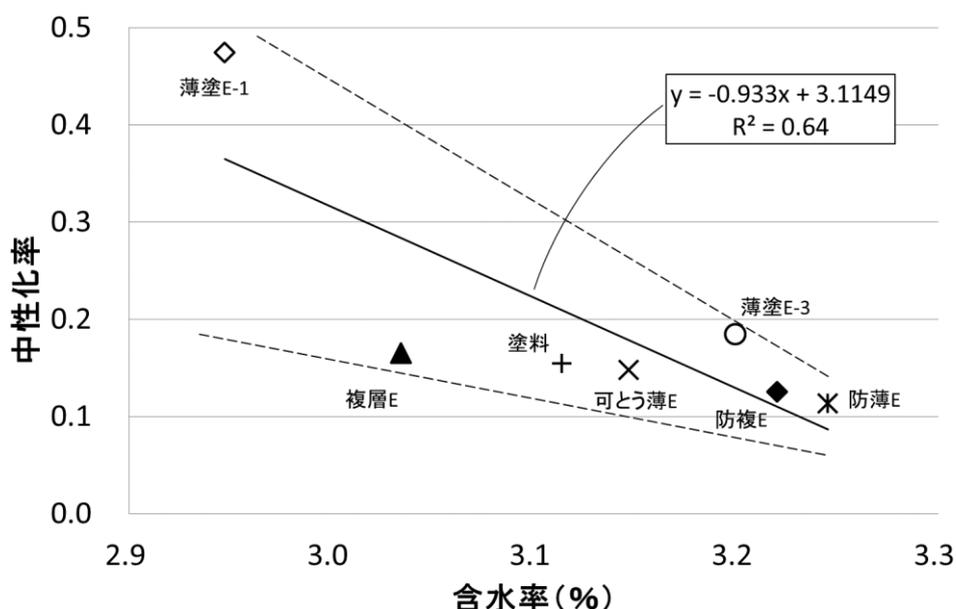


図 6.3.5 各試験体のコンクリートの含水率と中性化率の関係

6.4 まとめ

本章では、試験体の含水率を測定しながら促進中性化試験を行った。促進中性化試験として第5章の中性化率と本章で得られた中性化率との相関が高いことから促進中性化試験での仕上材の中性化抑制効果について再現性を高く試験できることが確認できた。

含水率の変化に着目すると、仕上材を施したコンクリートの含水率は仕上材なしのブランクの含水率よりも高く、また、同湿度における同じ下地コンクリートの平衡含水率よりも高いことが確認できた。含水率の増加は、コンクリートの中和反応により発生する水の影響だと考えられる。

高含水率の領域では、コンクリートの中性化反応は抑制される。実際、材齢 26 週でのコンクリートの含水率と中性化率との間に相関性が確認できた。

既往の報告からもコンクリートの含水率が中性化へ影響を与えることは確かだと考える。

また、促進中性化試験において、仕上材の効果は含水率の保持が考えられており、コンクリートの乾燥時間を遅延することでコンクリートの中性化が抑制されると期間が持続するとされてきたが、今回の検討によって、促進中性化試験においては、中和反応によって水が発生することで、コンクリートの含水率自体が増加していることが確認できた。

気象庁のデータによると、近年の大気中の二酸化炭素濃度は約 400ppm に及ぶが、促進中性化試験における二酸化炭素濃度 5% という条件は凡そ 125 倍の濃度になる。単に仕上材を通過する二酸化炭素の量は、ヘンリーの法則によると塗膜の両面の分圧差に依存し、仕上材を通過する二酸化炭素の透過量は濃度に比例するはずである。また、高田ら⁶⁾⁸⁾の提案では、中性化速度に二酸化炭素濃度は $\sqrt{\quad}$ で効いてくるとしている。実際に高田らの予測式をもとに計算すると凡そ 23 倍の速度で中性化が進行する。促進中性化試験においては、本来の大気中での中性化の進行とはかなり違った含水状態であると考えられる。

裏を返すと、コンクリートの中性化抑制効果を確認する方法として一般的な促進中性化試験であるが、仕上材の中性化抑制効果を確認するためには、コンクリート中の含水率が増加し正しい評価ができない可能性を示唆しているといえる。

第7章において第3章、第4章で得た、仕上材の二酸化炭素透過度と透湿度より、コンクリートの中性化へ及ぼす影響を確認する。

参考文献

- 6-1) 長瀬公一, 河野政典, 竹内博幸, 古賀一八, 板谷俊郎ほか: 躯体コンクリートの中酸化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価 その1～その8, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1123-1138, 2007.8
- 6-2) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp. 194-203, 2009
- 6-3) 阿部道彦, 榊田佳寛, 田中斉, 柳啓, 和泉意登志, 友沢史紀: コンクリートの促進中酸化試験の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集第409号, 1990年3月
- 6-4) 大岸佐吉, 楊静: 促進法によるコンクリートの長期中酸化推定の試み, セメント・コンクリート, No.533, pp.41-48, 1991
- 6-5) 依田彰彦, 横室隆: コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究(その2, 草津温泉水による浸漬したコンクリートについて), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.191-192, 1983
- 6-6) 申雪寒, 長谷川寿夫: コンクリートの乾燥程度を考慮した外断熱建物躯体の中酸化速度予測式の提案, コンクリート工学年次論文集 vol.27, No.1, pp625-630, 2005
- 6-7) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子: 建築用仕上塗材の中酸化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第609号, pp.23-30, 2006.11
- 6-8) 高田良章, 魚本健人: 炭酸ガス濃度がコンクリートの中酸化速度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集第1巻第1号, pp85-93, 1990.1

第7章

ボックス法及び透湿カップ法による
仕上材の透気性が中性化抑制効果へ与える影響

第7章 ボックス法及び透湿カップ法による 仕上材の透気性が中性化抑制効果へ与える影響

7.1 はじめに

仕上材の中性化抑制効果に影響を及ぼすと考えられる二酸化炭素の透過性とコンクリートの中性化抑制効果について実際に検証されたデータは少ない。また、二酸化炭素透過性と透湿性の両側面からコンクリートの促進中性化試験との関係を明らかにした報告はみられない。これまで第3章において仕上材の二酸化炭素透過性を評価する方法としてボックス法の開発を行い仕上材の二酸化炭素の透過性を二酸化炭素透過度という形で取りまとめた。第4章において仕上材の透湿性のデータをカップ法により取得した。第5章、第6章にて促進中性化試験における仕上材の中性化率及びコンクリートの含水率のデータを取得している。本章では、透気性が中性化率へ与える影響を明らかにするべく、仕上材の二酸化炭素の透過性及び透湿性による中性化率および含水率への影響について検証を行った。

7.2 仕上材の二酸化炭素透過性及び透湿性と促進中性化試験における中性化率との関係

仕上材の二酸化炭素の透過度および透湿度と第5章で得た中性化率を表7.2.1に示す。

仕上材の二酸化炭素透過度と中性化率の関係を図7.2.1に、仕上材の透湿度と中性化率の関係を図7.2.2に示す。図7.2.1によると二酸化炭素の透過度と中性化率の重相関は0.40であり正の相関を示すが精度よく中性化抑制効果を予測できるとは言えない。一方、図7.2.2によると透湿度と中性化率の相関は高く重相関で0.84を示す。第3章及び第4章で示した文献値⁷⁻¹⁻²⁾に記載されている中性化率との相関性は二酸化炭素透過度の方が高かったのに対して逆の傾向となっている。単純に透湿度及び二酸化炭素透過度の数値のみで中性化率を予測しようとするならば透湿度を元にした方が精度の高い予測が可能であるという結果である。長谷川ら⁷⁻³⁾も促進中性化試験において、透湿性により中性化抑制効果を予測することが出来るとして透湿度を定数として組みこんだ評価式の提案を行っている。

表 7.2.1 二酸化炭素透過度及び透湿度と中性化率の一覧

	二酸化炭素 透過度 (mol/m ² ・24h)	透湿度 (g/m ² ・24h)	第5章での 中性化率
薄塗材E-1	2.14	173.6	0.49*
薄塗材E-2	2.38	119.3	0.28
薄塗材E-3	0.28	133.4	0.23
可とう薄E	1.36	79.5	0.17
防薄E	1.04	26.7	0.10
複層E	0.47	96.6	0.26
可とう複CE	0.00	69.2	0.12
防複E	0.08	49.1	0.11
EP-G-1	0.32	82.3	0.15

*塗付量を併せるため薄塗材E-1薄の値

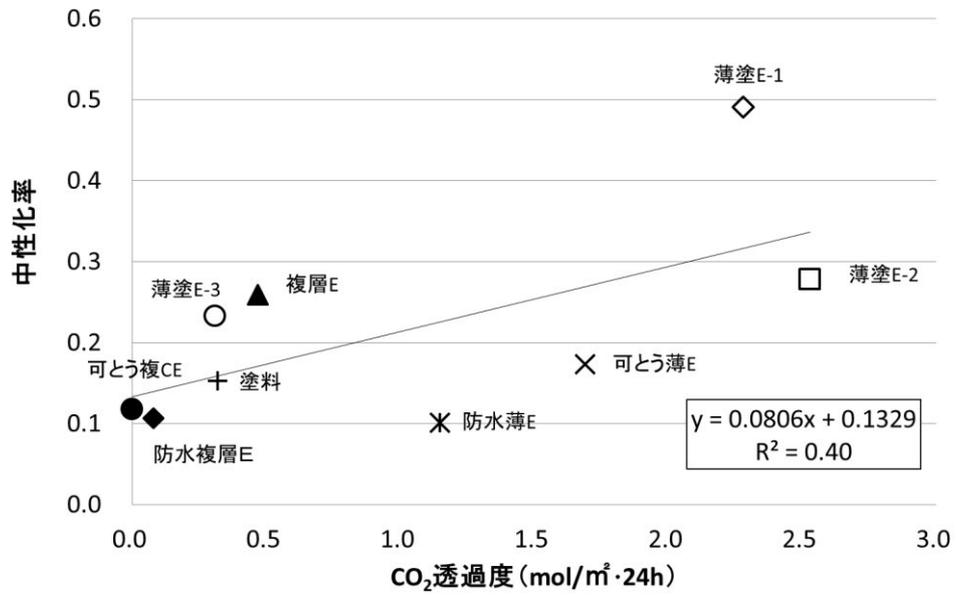


図 7.2.1 二酸化炭素透過度と中性化率との関係

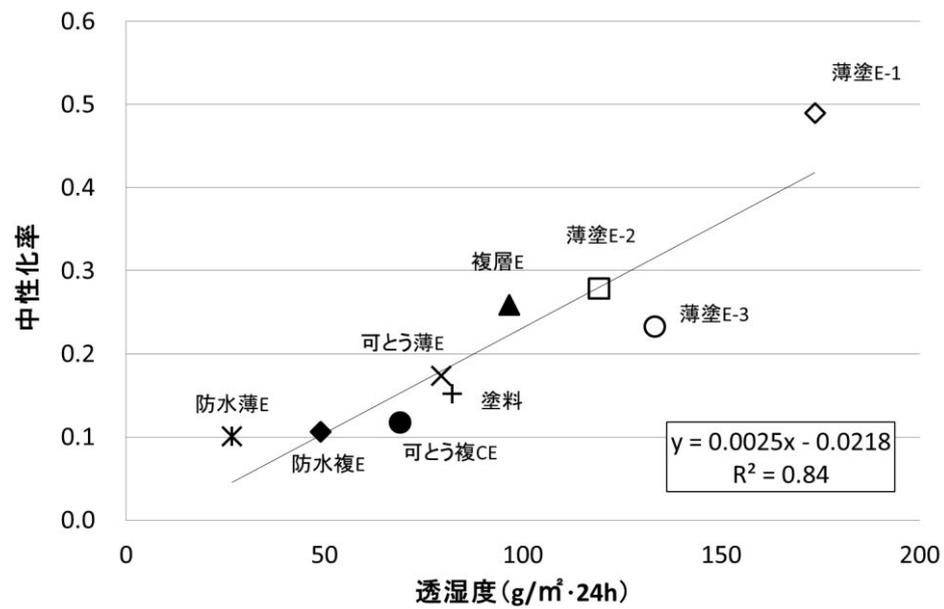


図 7.2.2 透湿度と中性化率との関係

7.3 促進中性化試験における仕上材の透湿性とコンクリートの含水率

コンクリートの中性化反応は、コンクリート中の水酸化カルシウムが大気中の二酸化炭素と反応することで、炭酸カルシウムと水へと中和され、コンクリート中のアルカリ成分が失われることに起因する現象である。

第6章において、促進中性化試験における試験体の含水率の変化に着目して検討を行い、試験体の含水率が増加することを確認した。促進試験中の含水率の値は、60%RHの湿度条件下（二酸化炭素濃度は大気濃度）での下地コンクリートの平衡含水率よりも高い状態にあることも確認できた。試験中に含水率の増加がみられることから、コンクリートのアルカリ分と二酸化炭素との中和反応により発生する水の影響で含水率が増加していると考えられる。

特に促進中性化試験での二酸化炭素濃度が5%という条件は、大気中の400ppm（0.04%）という濃度に比べ100倍以上の違いがあり、中性化速度で計算すると凡そ23倍の速度で中性化が進行する⁷⁻⁴。促進中性化試験においては、本来の大気中での中性化の進行と比べかなり中和反応により発生する水の影響を受けると考えられる。

高含水率の領域では、コンクリートの中性化反応は抑制されることは知られている⁷⁻⁵⁻⁸。含水率の推移を追ったところ材齢26週でのコンクリートの含水率はブランクのコンクリートがちょうど下地コンクリートの湿度60%における平衡含水率と同程度となり、仕上材を塗装してある試験体の含水率はピークよりは下がっているがすべてブランクのものよりも高い結果となっている。第6章の図6.3.3参照のこと。

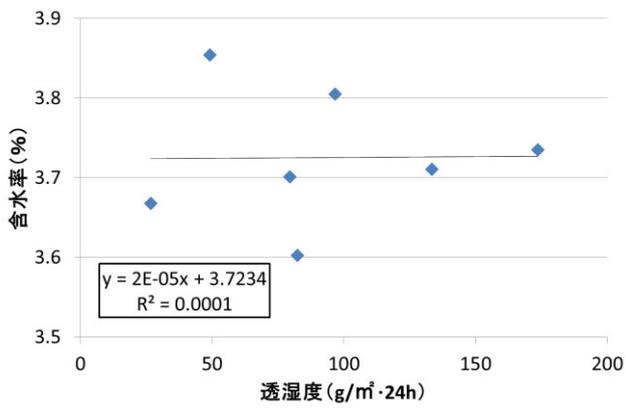
中性化の進行が大きく水の発生量が多いはずのブランクよりも、仕上材を施工してある試験体の含水率が高い理由としては、中和により発生した水分が仕上材の透湿性により蒸発が阻害されるためと考えられる。その結果、コンクリートが高含水率状態で保たれ中性化の進行が抑制されていると考える。

そこで、材齢1週から26週までの各材齢での仕上材の透湿度とコンクリートの含水率の関係を図7.3.1に、その一覧を表7.3.1に示す。材齢1週など初期においてはほとんど相関がみられないが、材齢を経るごとに徐々に透湿度と含水率の間に相関性が現れてくる。最終的に材齢26週の時に決定係数で0.56と一定の相関性を示すことから、コンクリートの含水率は仕上材の透湿度の影響を受けると考えられる。

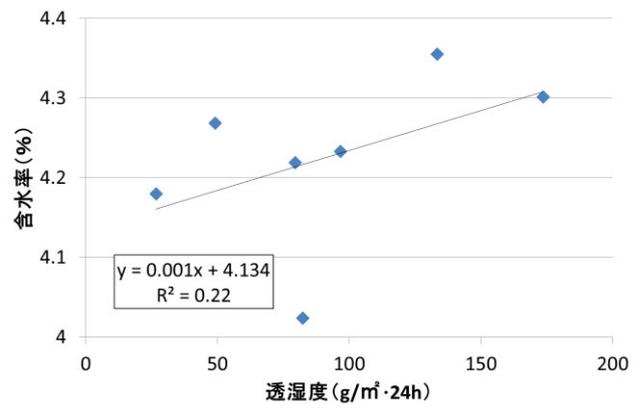
試験初期において相関がみられないのは、仕上材が透過する二酸化炭素の量が異なるため中和反応の速度に違いがあり、発生する水の量が変わる影響を受けると考えられる。

二酸化炭素の透過量と水分発生量の関係性の定量的な解析も試みたが、仕上材を通して二酸化炭素が透過し、コンクリート中へ浸透する過程。コンクリート中での二酸化炭素とアルカリ成分の中和による水分の発生量と速度。水分の影響による拡散の抑制。コンクリートから仕上材を通して水分が放散される過程が複雑に絡み合っており解明には至らなかった。

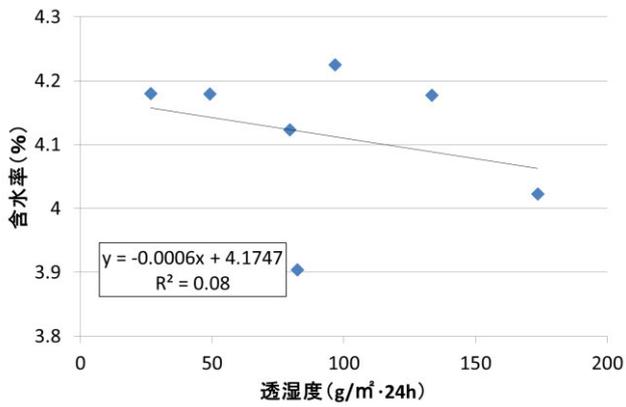
いずれにせよコンクリートの含水率は仕上材の透湿性の影響を受けていると考えられる。ただし、表面に透湿性の低い材料を施工した場合、コンクリートの深部の水の影響をうけ、コンクリートの表面含水率が上昇し中性化の進行が遅くなると考えられていたが、促進中性化試験の期間中にコンクリート全体の含水率が増加することから、促進中性化試験により発生した水が仕上材の透湿性により蒸発が妨げられ高い含水率が維持される。その結果として促進中性化試験においては仕上材の透湿度が中性化率と高い相関を示すことになると考えられる。



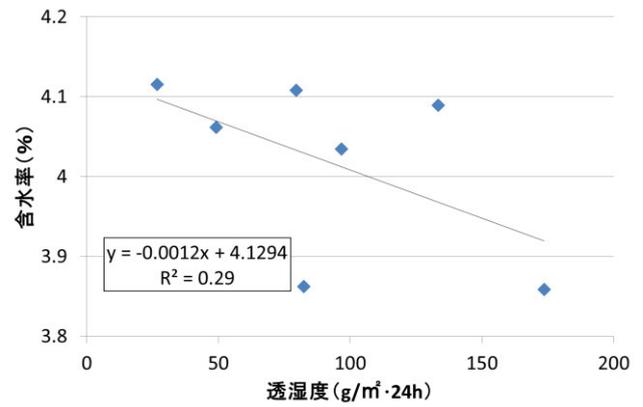
材齢 1 週における関係



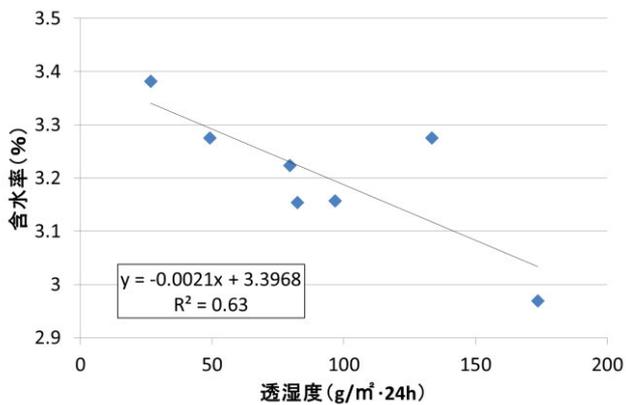
材齢 2 週における関係



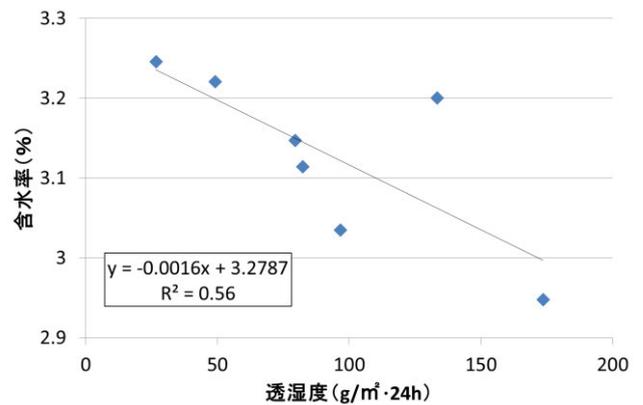
材齢 4 週における関係



材齢 8 週における関係



材齢 13 週における関係



材齢 26 週における関係

図 7.3.1 各材齢におけるコンクリートの含水率と仕上材の透湿度の関係

表 7.3.1 各材齢におけるコンクリートの含水率と仕上材の透湿度の一覧

試験体略称	含水率(%)							透湿度 (g/m ² ·24h)
	1週	2週	4週	8週	13週	20週	26週	
薄塗材E-1	3.74	4.30	4.02	3.86	2.97	3.02	2.95	173.6
薄塗材E-3	3.71	4.36	4.18	4.09	3.28	3.37	3.20	133.4
可とう形薄E	3.70	4.22	4.12	4.11	3.22	3.28	3.15	79.5
防薄E	3.67	4.18	4.18	4.12	3.38	3.44	3.25	26.7
複層E	3.80	4.23	4.23	4.03	3.16	3.22	3.03	96.6
防複E	3.85	4.27	4.18	4.06	3.28	3.26	3.22	49.1
EP-G-1	3.60	4.02	3.90	3.86	3.15	3.23	3.11	82.3
ブランク	3.50	3.80	3.88	3.72	2.75	2.85	2.64	-

7.4 まとめ

仕上材の二酸化炭素の透過性と透湿性の両側面から、促進中性化試験における中性化抑制効果への影響を確認した。仕上材の二酸化炭素透過度と透湿度をもとに中性化率との比較を行ったことより、中性化反応に直接的に影響すると考えられる二酸化炭素透過度よりも、透湿度の方が中性化率との相関が高いことが分かった。

促進中性化試験においては、二酸化炭素濃度 5%は大気中の二酸化炭素濃度が 400ppm であるのに対し 100 倍以上高い。当然、二酸化炭素濃度が高い場合はコンクリート中で発生する水分は多くなり、コンクリートの含水率への影響を及ぼしやすくなると考えられる。

実際、促進中性化試験においてコンクリートの含水率自体が増加しており、各材齢による含水率の推移と仕上材の透湿度との間に相関がみられることから、コンクリートの含水率は仕上材の透湿性の影響を受けていると考えられ、透湿性は発生した水の蒸発に関与している。透湿性が高いと含水率は低くなり、透湿性が低いと含水率が高くなる。

透湿性が低く、含水率が高いとコンクリート中での二酸化炭素の拡散が阻害され中性化の進行が遅くなり、透湿性と中性化率との相関ができてくる。結果として仕上材の二酸化炭素透過度よりも透湿度の方が中性化率との相関が高くなると考えられる。

また、二酸化炭素の透過量と水分発生量の関係性の定量的な解析も試みたが、いろいろな過程が複雑に絡み合っており解明には至らなかった。

いずれにせよコンクリートの含水状態と中性化傾向および仕上材の透湿性には密接な関係が見られる。ただし、透湿性は中性化抑制効果と相関が直接あるのではなく、含水率の増減に関与し間接的に中性化速度に影響を与えると考えられる。

また、直接的に中性化に関与すると考えられる仕上材の二酸化炭素透過度であるが、二酸化炭素はコンクリートの含水率が増加することでコンクリート中での拡散が阻害される。そのため含水率の影響を受けやすくなる促進中性化試験においては、二酸化炭素透過度と中性化率との相関が低くなると考えられる。

今回の検討によって、実曝条件でのコンクリートの含水率は促進中性化試験における含水率よりも低い状態で推移すると考えられる。その場合には、コンクリートの中性化は仕上材の透湿性の影響より二酸化炭素透過性の影響を受けやすくなると考えられ、仕上材の二酸化炭素透過度と中性化率との間の相関は大きくなると考えられる。

実際の検証が前提になるが、実曝による条件下では、ボックス法により測定することが可能になった仕上材の二酸化炭素透過度によりコンクリートへの二酸化炭素の透過性を想定し、透湿度により、コンクリート内部の含水状態を補正することでより精度の高い仕上材の中性化率の予測が可能になると考えられる。

参考文献

- 7-1) 長瀬公一, 河野政典, 竹内博幸, 古賀一八, 板谷俊郎ほか: 躯体コンクリートの中酸化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価 その1～その8, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1123-1138, 2007.8
- 7-2) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp. 194-203, 2009
- 7-3) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子: 建築用仕上塗材の中酸化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第 609 号, pp.23-30, 2006.11
- 7-4) 高田良章, 魚本健人: 炭酸ガス濃度がコンクリートの中酸化速度に及ぼす影響, コンクリート工学論文集第 1 巻第 1 号, pp85-93, 1990.1
- 7-5) 阿部道彦, 榊田佳寛, 田中斉, 柳啓, 和泉意登志, 友沢史紀: コンクリートの促進中酸化試験の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集第 409 号, 1990 年 3 月
- 7-6) 大岸佐吉, 楊静: 促進法によるコンクリートの長期中酸化推定の試み, セメント・コンクリート, No.533, pp.41-48, 1991
- 7-7) 依田彰彦, 横室隆: コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究 (その2, 草津温泉水による浸漬したコンクリートについて), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.191-192, 1983
- 7-8) 申雪寒, 長谷川寿夫: コンクリートの乾燥程度を考慮した外断熱建物躯体の中酸化速度予測式の提案, コンクリート工学年次論文集 vol.27, No.1, pp625-630, 2005

第8章

総括

第8章 総括

8.1 各章のまとめ

性能規定化の流れの中で、建築物の耐久性にも性能明示が要求されつつあり、また、地球環境問題等を背景として、環境負荷を低減するため、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性を向上させ長期耐用化を進める動きが強まっている。鉄筋コンクリート造建築物の多くは、外壁に仕上げが施されており、塗料及び建築用仕上塗材はもっとも一般的な外装仕上材である。

仕上材は躯体保護効果の一つとしてコンクリートの中酸化抑制効果を有している。市場には多種多様な仕上材があるため、それぞれの中酸化抑制効果の評価は不十分であるのが現状であろう。

コンクリート造建築物の長期耐用化及び性能明示化への動きの中で、製品ごとの中酸化抑制効果の評価は重要性を増してくると考えられる。

これまでも仕上材の中酸化抑制効果を評価する方法は種々検討されている。しかしながら既往の方法では、それぞれ一長一短があり、多種多様な仕上材の中酸化抑制効果を効率よく定量的に評価するには十分とはいえない。仕上材の二酸化炭素透過性及び透湿性とコンクリートの中酸化抑制効果との関係を明らかにすることで、仕上材の二酸化炭素透過性を評価し鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計手法を提案できれば、合理的な建築物の耐久性能の設計が容易となり建築物の長期耐用に大きく寄与すると考えられる。

本研究では、最も基本的な耐久性の評価指標であるコンクリートの中酸化を劣化対象として、仕上材の二酸化炭素透過性を効率よく定量的に測定する方法を提案する。また、促進中性化試験による仕上材の中酸化抑制効果を確認した。促進中性化試験の中で試験体の含水率が増加することを確かめ、仕上材の透湿性が含水率へ影響を与えることを示した。その結果、促進中性化試験での評価では、仕上材の中酸化率と透湿性の間に相関性が出ることを示し、促進中性化試験がもつ潜在的な問題を示唆した。

第1章は序論であり、本論文における研究の背景と目的を示した。また、本研究が対象とする塗料及び建築用仕上塗材の範囲について示した。

第2章では、仕上材の生産量からみる市場でのトレンドを確認し評価する材料の重要度をはかった。また、仕上材の中酸化抑制効果に関する既往文献、中酸化抑制効果の評価方法に関する既往文献の調査を行った。

調査の結果、仕上材の中酸化抑制効果の報告は数例あるが、同じ種類の仕上材を評価してもそれぞれ異なった中酸化抑制効果を示していた。また、同じ種類の塗材でも、その使用方法・形状が異なるため製品ごとに仕上材の中酸化抑制効果を評価する必要性を認識した。

仕上材の中酸化抑制効果と透気性、透湿性、二酸化炭素透過性を評価した論文の中では透湿性をもとに中酸化抑制効果を評価しているものが多かった。仕上材の透気性、二酸化炭素透過性の測定については、すべて加負圧がかけられた条件で行われており、測定できる試験体に制約があり多種多様な仕上材への適応が困難であることが分かった。

実際に既往の方法と同様の装置を用いて仕上材の二酸化炭素の透過性を測定したが、多様な仕

上材への展開は難しいことを確認した。また、透湿性により仕上材の中性化抑制効果の予測を行い、予測式を提案している報告は数例みられるものの、二酸化炭素透過性と透湿性の両方の尺度により中性化抑制効果を評価した報告は見られなかった。

文献調査から仕上材の二酸化炭素の透過性を評価する方法の確立する必要性、二酸化炭素透過性と透湿度との中性化抑制効果へ及ぼす影響を明らかにする必要性が明確になった。

第3章では、仕上材の二酸化炭素透過性を測定する方法の検討を行った。初めに透湿カップ法を応用した方法で検討を行った。透湿カップを用いた二酸化炭素透過性の測定方法の検討において、二酸化炭素の吸収剤として使用した水酸化カルシウムと二酸化炭素との反応に水分が多分に影響することが明らかになり、装置内で中和反応により発生する水分の調整が重要であることが分かった。そこで装置内に調湿剤を設置できるボックス形の試験装置と測定方法を考案して、ボックス法として二酸化炭素の透過性の測定方法を開発した。

ボックス法においては調湿条件、試薬量の条件などを整え二酸化炭素の透過性を定量的に評価できる方法として新規の試験方法として提案した。

第4章では、仕上材の透気性に係わる実験として、透湿カップ法を用いて仕上材の透湿度を測定し取りまとめを行った。また、第4章にて、求めた仕上材の二酸化炭素透過度のデータより、仕上材の種類や形状による透湿性と二酸化炭素透過性への影響を考察した。

第5章では、仕上材の促進中性化試験を行い仕上材の中性化抑制効果について評価を行いその傾向を明らかにした。また、今回評価を行った各種仕上材の中性化深さの推移より、仕上材の中性化の速度係数をもとめた。ブランクの試験体との中性化速度係数との比より各仕上材の中性化率をもとめた。検討の中で、薄塗材 E など同じ分類に示される材料でも製品ごとに中性化率が異なることなどを確認した。その他、仕上材に含まれる樹脂の割合と中性化率との間に一定の相関性があることを見出した。

第6章では、試験体の含水率の推移を測定しながら促進中性化試験を行った。促進中性化試験の中で試験体の含水率が増加することを明らかにした。中性化率と含水率との間に相関性を見出し、含水率の値が中性化率へ影響を与えていることを示唆した。また、促進中性化試験のなかで仕上材を施工した試験体の含水率が同一湿度条件下でのコンクリートの平衡含水率よりも高くなることから、促進中性化試験による仕上材の中性化抑制効果の評価について潜在的な問題を抱えていることを示唆した。

第7章では、促進中性化試験における仕上材の中性化抑制効果と仕上材の透湿性および二酸化炭素透過性との関係を明らかにし、透湿性と仕上材の中性化抑制効果には全体的に高い相関を示すことを明らかにした。また、仕上材の透湿性がコンクリートの中性化抑制効果への影響を及ぼす過程として、促進中性化試験におけるコンクリートの含水率と透湿性とに相関があることを明らかにし、促進中性化試験においては中性化のなかで発生する水分の影響を受け、透湿性の寄与

が大きくなることを示唆した。

二酸化炭素の透過性の評価としては、大気中の二酸化炭素濃度であればより高い相関を示すものと予想される。

第8章では、総括として各章で得られた知見をとりまとめ、今後検討すべき課題を示した。

8.2 今後の課題と展望

本研究では、仕上材の二酸化炭素透過性と透湿性の両側面からコンクリートの中性化抑制効果についての相関を確認した。促進中性化試験においては透湿性と中性化率との間に高い相関性を確認出来た。コンクリートの含水率の追跡の結果、二酸化炭素濃度が高すぎるため発生する水分の影響を受けていると推定する。

本研究の今後の課題として、実曝による中性化試験の検討が必要である。二酸化炭素透過性と透湿性の両側面から中性化抑制効果への関係性を解明することが必要である。

また、本検討の結果より、降雨の影響を考えた場合、透湿性の高い仕上材ほどコンクリート中への水の透過が発生し中性化を抑制する因子として働く可能性が懸念される。屋曝の試験体として雨がかりの有無による曝露を実施している。仕上材の中性化抑制効果と二酸化炭素透過性および透湿性との関係を明らかにしながら、精度の高い仕上材の中性化抑制効果を予測する方法を確立していく必要がある。

謝辞

本論文は、筆者が2011年4月から2014年3月まで芝浦工業大学大学院地域環境システム専攻博士後期課程での在学期間中の3年間と、2015年末まで行った研究をとりまとめたものです。

本論文を作成するにあたり、終始様々なご指導ご鞭撻を頂きました芝浦工業大学 工学部 建築工学科 本橋健司教授に心より感謝いたします。また、ご多忙中にもかかわらず本論文をご精読頂きご指導ご助言を頂きました、芝浦工業大学 工学部 建築工学科 秋元孝之教授、蟹澤宏剛教授、椛山健二教授、並びに明治大学 理工学部 建築学科 小山明男教授に深謝いたします。

第5章ならびに第6章の中性化試験の実施に関しては、国立研究開発法人建築研究所で試験を行っており、濱崎仁主任研究員（現芝浦工業大学準教授）、土屋直子研究員にご指導ご協力を賜りました。深く感謝いたします。また、本橋研究室の皆様方に実験を手伝って頂いたおかげで有用なデータを取得することができました。心より感謝いたします。

また、筆者が社会人学生として大学で研究をまとめる機会を与えてくださった菊水化学工業株式会社の遠山真人前代表取締役社長並びに山口均代表取締役社長および当時の技術開発部阿南修一取締役、加藤圭一部長には厚く御礼を申し上げます。

コンクリートの耐久性に関する研究は、実験中心となり多くの労力と時間を伴います。当初の仮説や実験水準が間違っていた場合に取り返しのつかない結果をまねくことを痛感しております。間違いに気づいた時点では、すでに過ぎ去った試験開始の時点には戻れないからです。本論文では当初第5章でのデータをもとに論文を取りまとめられると考えていましたが、第6章に示す追加の実験を行うこととなり、かなりの時間を費やすこととなりました。たくさんの方々のご協力を得てどうにか本論文にそれらの成果としてまとめることができましたことは喜びにたえません。ここに改めて感謝申し上げます。

最後に菊水化学工業株式会社に入社後今日に至るまで見守り続けてくれた、妻ならびに父、母に深い感謝の意を表したいと思います。

2016年3月吉日

川村康晴

ボックス法による仕上材の二酸化炭素透過度の測定方法（案）

1. 適用範囲

この規格は、建築用仕上塗材、塗料などの建築用外装材料の二酸化炭素透過性を試験するため透湿ボックスを用いて評価する方法について規定する。

2. 定義

二酸化炭素透過度とは、一定時間に単位面積の膜状物質を通過する二酸化炭素量とする。この規格では 20℃において、仕上材を境界面として、一方の側の二酸化炭素濃度を 5%としたとき、24 時間でこの境界面を通過する二酸化炭素透過量 (mol) を、その材料 1 m²辺りに換算した値をその材料の二酸化炭素透過度と定める。

3. 装置

3.1 透湿ボックス

透湿ボックス（以下、ボックスという）は以下に示す条件を満たすものでなければならない。尚、ボックス及び装置の一例を図 3.1 に示す。

- (1) 材質は二酸化炭素・水蒸気が不透過性のものであって、かつ試験条件において腐食などを生じないものであること。
- (2) 操作中に変形しないような十分な剛性を持つものであること。
- (3) 試験片の周縁の密封が完全に出来るものであること。
- (3) 透湿面積は 100cm² 以上とし、その透湿面積を規定できるようなものであること。透湿面積は周縁の密封材の内法から計算すること。

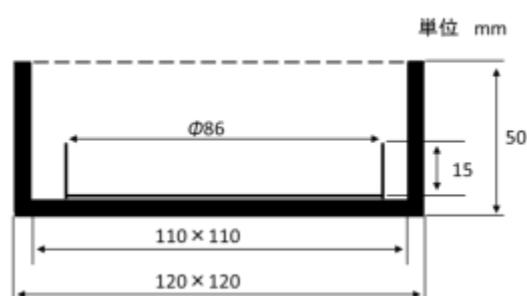


図 3.1

3.2 試薬皿

試薬皿（以下、シャーレ）は、二酸化炭素の吸着材として用いる水酸化カルシウムを入れることができるものであること。

- (1) 材質は二酸化炭素・水蒸気が不透過性のものであって、かつ試験条件において腐食などを生じないものであること。

(2) 操作中に変形しないような十分な剛性を持つものであること。

3.3 CO₂ インキュベーター

規定の温湿度、二酸化炭素濃度に保つことが出来る装置であること。

4. 用剤

4.1 吸着材

JIS K 8575 に規定される水酸化カルシウムの粉末を用いること。

4.2 調湿材

JIS Z 8806 に規定される調湿材（金属塩）を用いてボックス内の湿度を一定に保つことが出来る。

湿度条件により二酸化炭素の透過性に影響はないが、CO₂ インキュベーターの湿度条件に併せ、臭化ナトリウム飽和水溶液を用いる。

4.3 中和滴定

中和滴定は、水酸化カルシウムを精製水で希釈の後、フェノールフタレインエタノール溶液で呈色し、0.1M 酢酸水溶液を用いて行う。

5. 密封材

JIS A 5758 の 1 成分形ウレタンシーリング(PU-1 F20LM-8020)及びアルミテープなどの試験体とボックスを密封できる材料を用いる。

6. 試験片

試験片は、JIS P 3801 に規定される 5 種 A のろ紙を基材として使い、評価材料の標準仕様に定められた方法により塗装を行うものとする。塗装後、温度 23±2℃、湿度 50±5%RH の条件で 2 週間以上養生したものを試験片として用いる。

7. 操作

ボックス底部へ調湿材を 40ml 入れる。その際、調湿材の湿度条件を確保するため、必ず塩飽和水溶液は結晶共存状態に入れる。試験前に滴定により濃度を求めた水酸化カルシウムをシャーレに 20g 程秤量し、表面を均一にし、ボックス底部に設置する。試験片をボックス上部に取り付けアルミテープ、ウレタンシーリングにより密封する。

試験体を、CO₂ インキュベーター内で静置し、適当な養生間隔で試験体を取り出し、シャーレから水酸化カルシウムを取り出し、滴定操作を行い水酸化カルシウム濃度を求める。

滴定により求めた水酸化カルシウム濃度から、式 3.5.1 によって二酸化炭素透過度を求める。

$$\beta = \frac{\left((C_{(0)}) - (C_{(t)}) \right) \times M}{A \times T \times 100} \quad (3.5.1)$$

ここに、 β ：二酸化炭素透過度($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$)

A ：二酸化炭素の透過面積(m^2)、 T ：養生期間(day)

M ：シャーレに入れた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 試薬量(mol)

$C_{(t)}$ ：養生期間(day)における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度($\text{wt}\%$)

$C_{(0)}$ ：初期の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度($\text{wt}\%$)

発表論文

《査読審査付き論文》

学術論文

- 1) 川村康晴, 本橋健司: 迅速な建築用仕上塗材及び塗料の二酸化炭素透過性の評価方法, 日本建築学会技術報告集第 43 号 2013.10
- 2) 川村康晴, 本橋健司: 仕上材の二酸化炭素透過性と透湿性がコンクリートの中性化へ与える影響, 日本建築学会技術報告集第 51 号 2016.6 掲載決定

国際会議発表

- 1) Y.Kawamura, K.Motohashi, “QUICK METHOD FOR EVALUATING CONCRETE CARBONATION SUPPRESSIVE PERFORMANCE OF COATING MATERIALS”, The International Structural Engineering And Construction Society New Developments in Structural Engineering and Construction.2013.6

《査読なしの発表》

学会発表

- 1) 川村康晴, 本橋健司, 濱崎仁: 塗料及び仕上塗材の中性化抑制効果に及ぼす樹脂量の影響, 日本建築学会大会, 2013.8
- 2) 川村康晴, 本橋健司: 迅速な塗料及び建築用仕上塗材の中性化抑制効果評価方法 その2 試薬量、湿度の影響, 日本建築仕上学会大会, 2012.10
- 3) 川村康晴, 本橋健司: 建築用仕上塗材の中性化抑制効果の迅速な評価方法, 日本建築学会大会, 2012.9
- 4) 川村康晴, 本橋健司: 迅速な塗料及び建築用仕上塗材の中性化抑制効果評価方法, 日本建築仕上学会大会, 2011.10