

論文 建築用仕上材料によるコンクリートの中性化抑制モデルに関する研究

兼松 学^{*1}・松下 哲郎^{*2}・朴 同天^{*2}・野口 貴文^{*3}

要旨：維持保全計画策定のための劣化予測を行うため、反応消費項を考慮した非定常拡散モデルによるコンクリートの中性化予測システムの構築を行った。中性化抑制効果を有すると考えられている建築用仕上材料あるいは補修材について、拡散モデルに基づく中性化抑制性能の定量的評価手法の構築を行った結果、本手法により既往の促進劣化試験を良好に模擬することが可能であり、精度の高い劣化予測が可能であることが明らかとなった。

キーワード：中性化, 仕上材, 中性化抑制効果, 拡散-溶解理論, 維持保全, 補修材

1. はじめに

近年、建設投資に占める維持管理投資は増加する傾向を強めており¹⁾, 今後高度成長期に建設された RC 建築物の更新時期を迎えることになることから、既存構造物を中心とした建築物の供用期間のコントロールは非常に重要な課題となるものと考えられる。

一方、鉄筋コンクリート造建築物の表面には、塗料系材料や複層材料、タイル、石材など様々な外装材料が施されることが多く、これらは意匠的要件のみならず、劣化因子の遮断性能を期待することが可能である。したがって、建築用仕上材料の躯体保護効果を適切に評価する事で、より合理的な補修材料の選定や補修後の維持保全計画の立案が可能となることが期待される。

とはいうものの、建築仕上材料の中性化抑制効果は古くから指摘があることで、従来の研究では $\sqrt{t}$ 則への実装を中心とした研究がなされてきた^{2),3),4)}。しかし、これらは新規打設されたコンクリートに施工した場合の統計的事実に基づく研究が主であり、既に中性化が進行したモデルへの適用および建築用仕上材料の劣化を考慮することは難しい。また、理論的研究としては福島らによる研究⁵⁾がなされているが、限られた境界条件下における厳密解の導出をこころみるもので、より自由度の高いモデルの構築が望

まれている。また、表層材料の中性化抑制効果がどれぐらいの期間保持されるかは、これらの効果を考慮する上でも中性化抑制効果を定量的な物性値として評価可能なモデルの提案が必要である。

そこで、本研究ではコンクリートに用いられる建築用仕上材料および補修材料の中性化抑制効果について、反応・拡散モデルを組立て、より自由度の高いモデルの提案を行うとともに、既往の研究との比較を通じて、その妥当性について検討を行う。図-1 に外装材の中性化抑制モデルの概要を示す。

2. コンクリートの中性化モデル

コンクリートの中性化は二酸化炭素がコンクリート中に侵入し、マトリックス中の水酸化カ

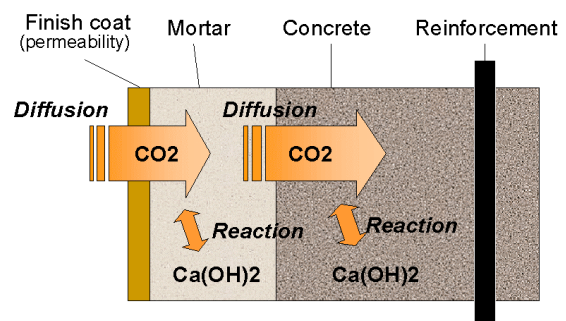


図-1 外装材料の中性化抑制モデルの概要

*1 東京大学 大学院工学系研究科 助手 博 (工) (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科 修 (工) (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科 助教授 博 (工) (正会員)

ルシウムと反応する事で最終的にコンクリートのアルカリ性が失われる現象である。しかし、これらの現象を理論的に説明するには、複雑に屈曲した気相を介しての拡散や、空隙孔における表面拡散、液水を介しての拡散が同時に起きていると考えられ、あわせて、水分の状況や空隙構造のモデル化が必要となる。現在、マトリックス部分の水分状況や他イオンなどを同時に評価しつつ pH の低下を評価するモデルが提案^{7),8)}されている。

本研究の範囲においては、これら精緻な現象説明の重要性を理解した上で、充分材齢が進んだコンクリートにおいては移流項は充分無視でき、かつ湿度に対して一意な見かけの拡散係数 D_{CO_2} で取り扱うことが可能であると判断し、二酸化炭素の移動は式 (1) に示す支配方程式に従うものと仮定した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{CO_2} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - Q_c \quad (1)$$

ここで、 C : 二酸化炭素濃度 [%], D_{CO_2} : 見かけの二酸化炭素の拡散係数 [m^2/s], Q_c : 二酸化炭素の消費項 [1/s]。

ここで消費項は、二酸化炭素と水酸化カルシウムの 1 次反応によるものと捉える梶田らの手法⁶⁾を採用するものとし、式 (2) で表現できるものとした。

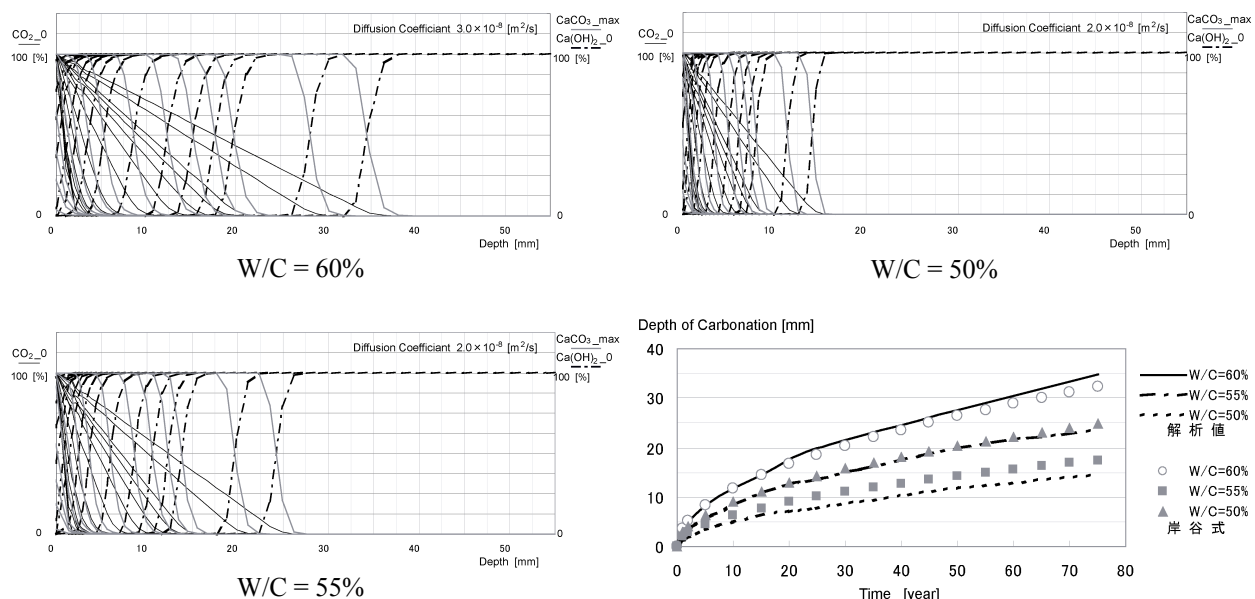
$$Q_c = \kappa_C \cdot C \cdot Ca \quad (2)$$

ここに、 κ_C : 水酸化カルシウムと二酸化炭素の見かけの反応速度係数 [$m^3/mol/s$], Ca : 水酸化カルシウム濃度 [%]。

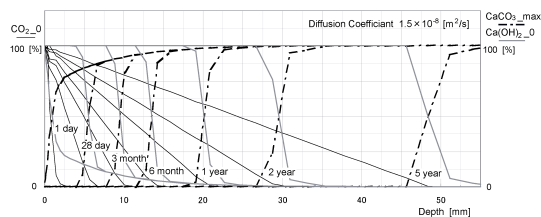
式 (2) は、二酸化炭素が水隙中に溶解し水酸化カルシウムと反応する現象は、二酸化炭素が水隙中に溶解するのは拡散に比べ充分早いものとみなし、溶解後の反応速度係数のみの議論が可能であるという仮定に拠ると説明される。このとき、水酸化カルシウムと二酸化炭素の見かけの反応速度係数は、反応が生じている地点に

表－１ 解析パラメータ

W/C	D_{CO_2} [m^2/s]	κ_C [$m^3/mol/s$]	Ca [mol/m^3]
50	1.0×10^{-8}	5.79×10^{-5}	1000
55	2.0×10^{-8}	5.79×10^{-5}	909
60	3.0×10^{-8}	5.79×10^{-5}	833



図－２ コンクリートの中性化予測解析結果



図－３ 普通モルタルの解析結果

おける空隙構造や水分状態などの物理化学的状況を加味した工学的パラメータであると考えられ、このような工学パラメータにより現象の表現が可能であることが報告されている。

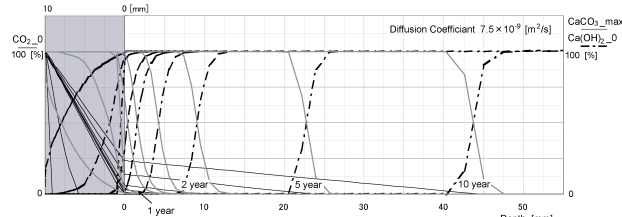
また、表面部における二酸化炭素濃度に関して式 (3) から求めるものとした。

$$C_{co_2,0} = \phi \cdot C_{CO_2,out} \quad (3)$$

ここに、 $C_{co_2,0}$: 表面二酸化炭素濃度 [%], ϕ : 浸透係数 [$\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{Pa}$], $C_{CO_2,out}$: 気体二酸化炭素分圧 [Pa]。

浸透係数に関しては、梶田らをはじめとする既往の研究では、対象とするコンクリートの細孔空隙率を与えており、本研究もそれに従い空隙率を与えた。また、拡散係数および反応速度係数は、想定する拡散モデルに依存してある程度幅のある値がとられているため、文献 6 および 7 の値に準じた。

以上より、今回の解析に用いたパラメータを表－1 に示す。また、これらを用いた場合の解析結果を図－2 に示す。グラフの縦軸は、左縦軸が $C_{co_2,0}$ を 100% とした場合の二酸化炭素濃度割合（実線）を示し、右軸は初期水酸化カルシウム濃度を 100% とした場合の水酸カルシウム濃度、およびと水酸化カルシウムが全量反応した場合の炭酸カルシウム濃度を 100% としたときの炭酸カルシウム濃度を表す。



アクリルモルタル-コンクリート

図－４ モルタル系材料の中性化抑制効果に関する解析結果の例

解析結果より、既往の文献の報告のとおり、岸谷式などとの良好な相関関係が見られた。

3. モルタルの二酸化炭素遮蔽性能

次に、モルタル部における中性化は、コンクリート部分と同様に、二酸化炭素の移動と水酸化カルシウムとの反応が同時に進むことが予測され³⁾、コンクリート部と同様に式 (1) および式 (2) が成り立つものと仮定し、30℃, 60%RH における W/C 60% のモルタルを想定し感度分析を行い、 D_{CO_2} を 1.5×10^{-8} とした。このとき、反応速度係数はコンクリートと同様の値を与えた。モルタル中の二酸化炭素拡散係数に関しては、あまり多くの研究がなされていないが、本研究に於いては多孔質系材料の拡散理論に論拠をおき、小林らの研究⁹⁾の酸素の拡散係数を分子量の平方根による補正を行いほぼ同値 ($1.0 \times 10^{-8} [\text{m}^2/\text{s}]$) であるとみなせることを確認した。

図－3 にモルタル系材料の促進試験における中性化抑制効果に関する解析結果を示す。この結果は例えば既往の中性化促進試験の結果¹⁴⁾ (W/C60% で 6 ヶ月で 17mm) とある程度一致する。また、コンクリートにモルタルを施した場合に関しても同様の解析を行った。アクリルモルタル-コンクリートの解析結果を図－4 に示す。尚、モルタルとコンクリート界面においては、それぞれの空隙中の二酸化炭素濃度が等しいものと仮定し、解析を行った。

4. 外装材の二酸化炭素遮蔽性能

建築仕上材料の多くはコンクリートの躯体保護性能を有するが^{2)~5)}, その効果は二酸化炭素の移動を抑制すること, そして, 仕上自体がセメント系の材料の場合, それ自体の中性化により内部への二酸化炭素の供給を著しく遅らせることにある。

建築用仕上材料中における移動現象は, 塗膜などの高分子系材料の場合, 外的環境中の劣化因子が材中に散在する化学エネルギー論的に粗な部分を移動するとともに, ミクロボイドやピンホールなどの空隙を移動するものと考えられている。また, 実験的事実としては仕上塗材を通過する気体の挙動は拡散現象として取り扱う事が可能であることが明らかとなっており^{10), 11)}, 仕上塗材を含む高分子材料の気体透過特性は溶解-拡散理論に従うものと考えられる。溶解-拡散理論は, 塗膜表面においては二酸化炭素が塗膜中に浸透する現象が式(4)に従うヘンリーの法則が適用できるとする考え方であり, 溶解後の移動現象は, Fick の拡散則に従うものとして式(5)に従う。

$$C_{s0} = S \cdot p \quad (4)$$

ここで, C_{s0} : 塗膜表面における二酸化炭素濃度 [%], S : 溶解度係数 [$\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{Pa}$], p : 塗膜近傍における二酸化炭素分圧 [Pa].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{SCO}_2} \frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2} \quad (5)$$

ここで, C_s : 塗膜中の二酸化炭素濃度 [%], D_{SCO_2} : 塗膜の見かけの二酸化炭素拡散係数 [m^2/s].

また気体透過係数および拡散係数は, 拡散セル法により測定され, 図-5 に示すように仕上塗材の表裏に圧力差を生じさせたときの裏面の初期圧力上昇曲線から式(6), 式(7) に示されるタイムラグ法により算定される¹¹⁾.

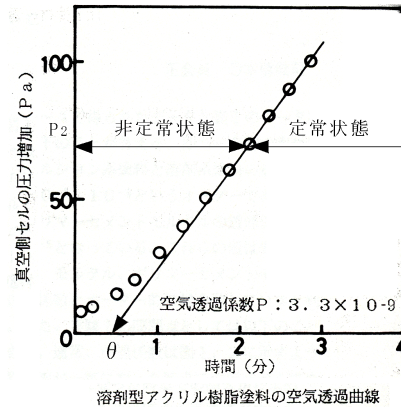


図-5 塗膜の拡散セルによる実験結果

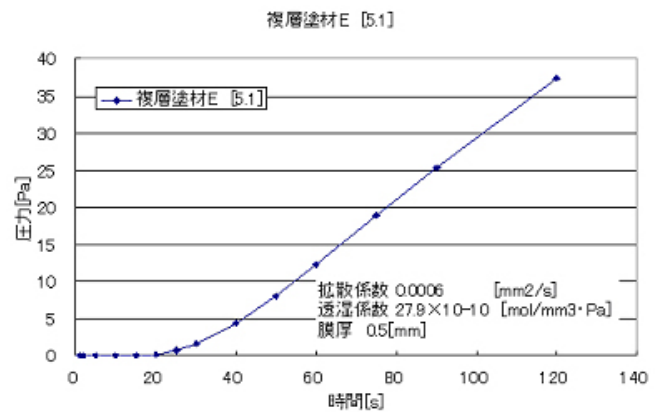


図-6 空気透過曲線の解析値

表-2 各種塗材の拡散係数および溶解度係数⁸⁾

	$D (\times 10^{-5})$ [mm^2/s]	$P (\times 10^{-7})$ [$\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg}$]	S ($= P / D$) ($\times 10^{-10}$) [$\text{mol}/\text{mm}^3 \cdot \text{Pa}$]
外装塗材 E	1.0	35000	3910000.0
マスチック A	1300	580	49.9
マスチック AE	95	2.4	2.8
複層塗材 E	60	15	27.9

$$D = \frac{l^2}{6 \cdot \theta} \quad (6)$$

$$P = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{l}{T(P_2 - P_0)} \quad (7)$$

ここで, D : 塗膜の拡散係数 [m^2/s], P : 気体透過係数 [$\text{mol} \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$], l : 膜厚 [m], θ : 遅れ時間(図-5 参照) [s].

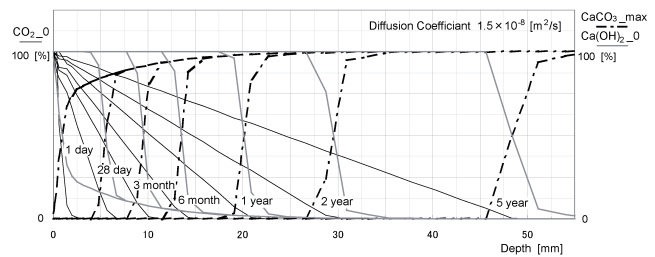
式 (7) において気体透過係数は、仕上塗材と気体に対して一意な値であるものと考えられ、 $D=P/S$ の関係にある。そこで本研究においては、宮木らの実験結果¹⁰⁾より、各種塗材の溶解度係数を数値的に求めた(表-2)。このとき、ここで得られた拡散係数および気体透過係数を用い、式 (5) を支配方程式とした FEM による非定常拡散解析を行った結果を図-6 に示す。当然のことながら拡散セル法における実験結果と良好に一致することを確認した。

次に、これらの塗材に対してモルタルを下地とした中性化促進試験の結果と FEM 解析結果とを比較した。このとき、モルタル表面の二酸化炭素濃度は、塗膜から浸透してきた二酸化炭素を C_{co2out} として用いる事で、式 (3) と同様に与えられるものとして算定した。

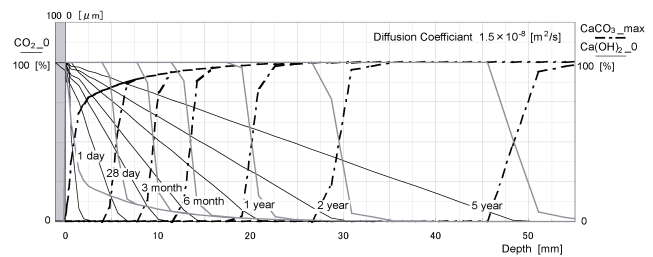
各種塗材に対し、以上より得られた物性値を用いた場合の解析結果を図-7 に示す。尚、モルタル面と仕上げ面の境界条件としては、モルタル面での空隙中の二酸化炭素濃度が、仕上材料中の二酸化炭素濃度と溶解理論によりつりあっているものと仮定し、解析を行った。解析結果より、一般的な膜厚の範囲で概ね宮木らの結果¹⁰⁾と同様の傾向を示す事を確認し、本手法の妥当性を確認した。

本研究で示した拡散-浸透理論に基づく建築用仕上塗材の評価手法は、非定常拡散解析の入力諸元として用いる事で外装材料の中性化抑制効果を良好に表現可能であり、中性化抑制効果を示す基礎物性値として用いる事が可能であることを示唆されたと考える。

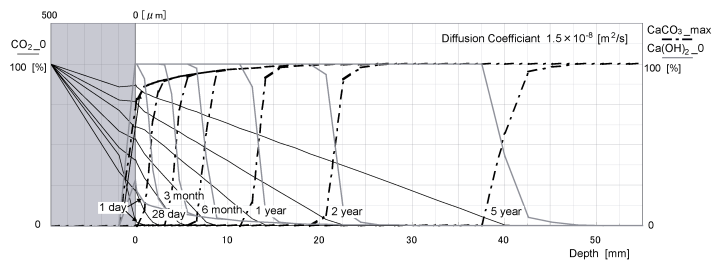
このことから、今後、これらの基礎物性値をもとに塗材の中性化抑制効果の耐久性などが評価可能となることが期待される。



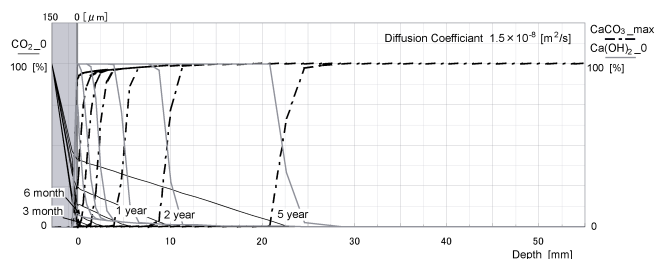
モルタルのみ



外装塗材 E



マスチック A



複層塗材 E

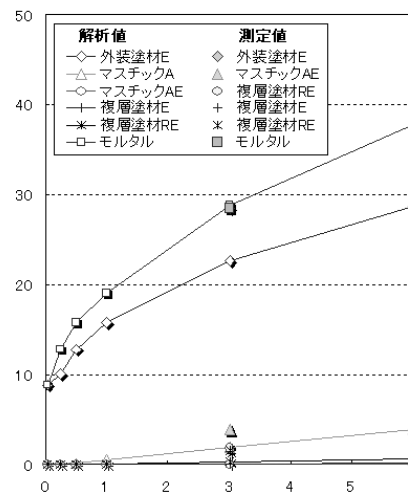


図-7 各種塗材の中性化拡散解析

5. 考察およびまとめ

本研究では、表面仕上材料の中性化抑制効果の理論的評価手法の構築を目的とし、非定常反応拡散解析モデルの提案を行った。その結果、得られた知見を纏めると以下のとおりである。

(1) 建築用仕上材料の中性化モデルとして、非定常拡散モデルの提案を行い、既往の拡散セル実験結果より、タイムラグ法により得られたパラメータを用いて、非定常拡散モデルを軸とした中性化予測システムのパラメータスタディを行い、良好な精度での解析が行えることを示した。

(2) 中性化は非定常拡散理論に従うものとし、特に反応消費項を系全体の見かけの反応消費項として取り扱う方法を採用した。その結果、コンクリートないしモルタルの中性化速度は、既往の文献値と良好な一致関係を得ることができた。

(3) 中性化保護効果を有すると考えられている建築用仕上材料について、拡散－浸透理論に基づく中性化抑制効果の定量的評価手法の構築を行った。その結果、本研究で示した拡散－浸透理論に基づく建築用仕上塗材の評価手法は、非定常拡散解析の入力諸元として用いる事で外装材料の中性化抑制効果を良好に表現可能であり、中性化抑制効果を示す基礎物性値として用いる事が可能であることを示唆された。

(4) 本手法に於いては、主に促進試験で得られた結果を用い、促進中性化試験の解析により本手法の妥当性を論じたが、実曝露環境における表面劣化機構の予測には、仕上材料の下地の水分状態に対する影響の把握が必須であり、今後水分の移動現象との連成が必要であると考ええる。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション, 大改修時代への備え方, 2003.10
- 2) 和泉意登志: コンクリートの中性化速度に基づく鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計手法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1991

- 3) 馬場明生, 千歩修: 各種の表面層をもつコンクリートの中性化深さ推定方法, コンクリート工学年次論文報告集, vol9, No.1, pp.333-338, 1987
- 4) 長谷川拓哉, 千歩修, 馬場明生ほか: モデル建物の11年屋外曝露試験結果に基づく表面仕上の中性化に対する保護効果, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.37-43, 2002
- 5) 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進行に及ぼす影響の定量的評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.434, pp.1-12, 1992
- 6) 梶田佳寛, 棚野博之: コンクリートの中性化進行予測モデル, コンクリート工学論文集, 2-1, 1991
- 7) 石田哲也: 微細空隙を有する個体の変形・損傷と物質エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム, 東京大学学位論文, 1999
- 8) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム 委員会報告書・論文集, 2003
- 9) 小林一輔, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, vol.24, No.12, 1986
- 10) 宮木宏明, 金津貢一: 外装仕上げ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, vol.A, pp.635-636, 1986
- 11) 本橋健司: 仕上げ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, vol.A, pp.529-530, 1988
- 12) 仲川勤: 包装材料のバリアー性能科学 包装学基礎講座<5>, 日本包装学会, 2003
- 13) 島添洋治, 白川敏夫, 麻生寛: シリカ質混和材を用いたモルタルの中性化に関する研究, コンクリート工学論文集, vol.22, No.1, pp.199-204, 2000
- 14) 本橋健司, 梶田佳寛: コンクリート仕上げ材料の中性化抑制性能評価における熱重量分析の応用, 日本建築学会構造系論文集, No.579, pp.15-21, 2004