

論文 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

親本 俊憲^{*1}・板谷 俊郎^{*2}・大岡 督尚^{*3}・長瀬 公一^{*4}

要旨：本報では、最近 20 年間を中心とした文献調査や独自に行った促進中性化試験の結果から、仕上げ材が持つ中性化抑制効果を評価し、各仕上げ材の中性化率を新たに提案した。また、複層塗材 E と防水形外装薄塗材 E を対象に、岸谷式及び和泉式を使って中性化進行予測を行い、実建物の調査データと比較して、値の妥当性を検証した。その結果、岸谷式で予測を行った場合には調査データより中性化の進行が早く、安全側の評価が行えることを確認した。一方、和泉式ではデータの回帰曲線に近く、予測精度が高いことを確認した。

キーワード：コンクリート、中性化、仕上げ、中性化率、予測

1. はじめに

一般に、コンクリート表面を被覆する仕上げ材は、打放しコンクリート面に比べ、躯体コンクリートの中性化を抑制する効果があると考えられている。この中性化抑制効果を適切に評価し、データを共有化することは、建物の新築時だけでなく、補修計画などを含めた維持管理計画の上からも、大変重要である。JASS5「鉄筋コンクリート工事(2003年版)」の「2.10 かぶり厚さ」の解説表 2.6 には、各種仕上げ材の中性化率が紹介されており、評価の目安として有効である¹⁾。しかし、この表が 1986 年版の中で提示されてから既に 20 年以上が経過しており、最近使用されている仕上げ材や、中性化抑制効果に関する最近の知見が反映されていない問題がある。

本報では、最近 20 年間に発表された文献を中心とした調査^{2),3)}や、独自に行った促進中性化試験の結果^{4),5)}から、仕上げ材が持つ中性化抑制効果を評価するとともに、具体的な数値を提案した。また、複層塗材 E と防水形外装薄塗材 E について、提案値に基づいた中性化進行予測を行い、実建物の調査データ^{6)~8)}と比較することで、値の妥当性を検証した。

なお、本研究は、社団法人建築業協会の「躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上材の評価研究会」(以下、評価研究会)の活動の一環として行われたものである。

2. 中性化抑制効果の評価方法

本報では、中性化抑制効果を「中性化率」という指標で評価した。中性化率は、仕上げを施さないコンクリート

の中性化深さに対する、各種仕上げ材を施したコンクリートの中性化深さの比であり、式(1)より求めた。

$$S(t) = \frac{C_C(t)}{C_B(t)} \quad (1)$$

ここで、 $S(t)$: 材齢 t (年) における中性化率、 C_C : 仕上げ塗材を施したコンクリートの中性化深さ (mm)、 C_B : 仕上げ塗材のないコンクリートの中性化深さ (mm) である。なお、中性化率は仕上げ材が持つ二酸化炭素の遮蔽性能に左右されるが、仕上げ材の劣化に伴ってこの値は増加することが予想される。本来であれば、同一の仕上げ材でも劣化の程度により中性化率を変える必要があるが、これらのデータが極めて少ないため、本報では劣化の有無を区別せず、後述の通り、中性化率の最大値を特定の仕上げ材の中性化率として採用した。

以下、中性化率を求める際に使用したデータの種類、対象とした仕上げ材の種類、及び本報で提案した中性化率の決定方法について述べる。

2.1 使用したデータの種類の

(1) 調査の対象となった文献

調査の対象となった文献は、一般論文集が 53 件 572 データと、評価研究会のメンバーが持ち寄った資料が

表-1 調査対象文献の一覧

論文名称	発行者	発行年	文献数	データ数
大会梗概集	日本建築学会	1971 ~ 04	31	302
シンポジウム	土木学会	2004	1	84
学術講演会研究発表論文	日本建築仕上げ学会	1990 ~ 95	4	32
		2001 ~ 04	4	39
セメント技術大会	セメント協会	1984 ~ 06	13	115
評価研究会メンバーの独自データ			21	144
合計			74	716

*1 鹿島建設(株)技術研究所(正会員)

*2 戸田建設(株)技術研究所

*3 東急建設(株)技術研究所 博士(工学)(正会員)

*4 大成建設(株)技術センター 博士(工学)(正会員)

21 件 144 データであった。収集したデータには、促進中性化試験、暴露試験及び既存建物の調査結果が含まれていた。調査対象文献の一覧を表-1に示す。ただし、本報では中性化率に基づいて中性化抑制効果の評価を行ったため、中性化率が明らかでないデータは分析対象からは除外した。従って、実際に分析に用いたデータ数は372であった。

(2) 促進中性化試験

表-1に示した文献には、下地調整塗材に関する調査・試験データがなかったため、下地調整材の中性化抑制効果を把握することはできなかった。そこで、評価研究会独自に促進中性化試験を実施した。

試験体の寸法は10×10×40cmである。上面(打込面)、底面及び端面にはアルミテープを貼り付けて炭酸ガスの進入を抑え、側面に下地調整塗材を施した。試験体の断面形状を図-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。

試験体は、コンクリート打設後、材齢4週まで標準水中養生した後、材齢8週まで温度20℃、相対湿度60%の環境で養生した。その後、下地調整塗材を施し、2週間乾燥養生させた。促進中性化試験はJIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて行い、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて中性化深さを測定した。なお、中性化深さの測定は、材齢4、13、21、26、52週で行った。

2.2 調査対象の仕上げ材の種類

評価の対象となった仕上げ材の種類を表-3に示す。複層塗材、薄付け仕上塗材、厚付け仕上塗材については、「JASS 23 吹付け工事」⁹⁾での呼び名を使用している。

評価は、複層塗材、薄付け仕上塗材、厚付け仕上塗材、塗膜防水材、塗料の5分類と、仕上げを構成する下地調整塗材1分類の、計6分類であり、実際の建物に広く使用されている材料を選定した。なお、下地調整塗材のうち、セメント系及びセメント系厚塗材は、塗り厚さ3mmのデータを使用した。

2.3 中性化率の決定方法

本報では、仕上げ材の種類毎の中性化率を提案するにあたり、仕上げ材別の中性化率が最大のものを提案値とした。これは、仕上げ材の劣化状況や使用材料、調合、試験条件、試験期間が一定ではない多くの文献からデータを抽出したため、中性化率として一つの値を決める場合、安全側に考慮することが適切と考えたためである。

なお、データの中から極端に大きい値(以下、外れ値)を選ぶため、図-2に示す箱ひげ図を描き、ひげの上端(上側四分位点+1.5×(四分位範囲))より大きい値は外れ値として除外した。

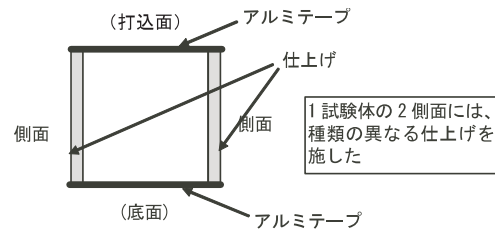


図-1 試験体断面形状

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
60	47.2	179	298	840	963

表-3 仕上げ材の種類

分類	仕上げの種類
複層塗材	複層塗材 E, 複層塗材 RE, 防水形複層塗材 E, 防水形複層塗材 RE, 可とう形複層塗材 CE, 防水形複層塗材 RS, 不明
薄付け仕上塗材	外装薄塗材 E, 可とう形外装薄塗材 E, 防水形外装薄塗材 E, 不明
厚付け仕上塗材	外装厚塗材 C, 外装厚塗材 E
塗膜防水材	アクリルウレタン系, アクリルゴム系, アクリル系, ウレタンゴム系, 外装塗膜防水材, ウレタン系
塗料	エナメル塗り, エマルジョンペイント塗り, ワニス塗り
下地調整塗材	セメント系 C-1 (厚さ 3mm), セメント系厚塗材 CM-1,2 (厚さ 3mm), 合成樹脂エマルジョン系

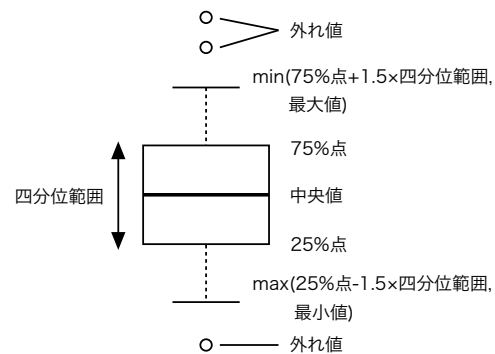


図-2 箱ひげ図の概要

3. 仕上げ材別の中性化率

以下に、表-3に示した仕上げ材毎の箱ひげ図と中性化率の最大値の表を示す。表中、Nはデータ数を、括弧内の数字は外れ値となったデータ数を表す。箱ひげ図は、データ数が2つ以下の仕上げ材は描くのを省略し、表中、中性化率の最大値のみを示した。

3.1 複層塗材

複層塗材の箱ひげ図を図-3、中性化率の最大値を表-4に示す。

複層塗材 E については、主材層が無く、上塗り材のみで促進中性化試験を行ったデータが含まれていた。このような試験体は、紫外線により劣化を促進させた場合に

中性化率が大きくなる傾向があった。ただし、複層塗材から主材を省き、上塗り材のみで材料を構成することは実際の工事では行われなため、複層塗材 E の中性化率は、主材層がないデータを除外して求めたものと、主材層がないデータも含んで求めたものの 2 つに分けた。なお、複層塗材全体の中性化率(図-3の右端)は、主材層がないデータを除外して求めた。

仕上げ材の種類別に見ると、データ数は少ないものの、可とう性複層塗材 CE、防水形複層塗材 RS がともに中性化率は 0.00 と、全く中性化していなかった。上記以外では、防水形複層塗材 RE が 0.08、他の複層塗材が 0.2~0.4、複層塗材全体でも 0.32 と、中性化抑制効果が高いことが明らかになった。なお、防水形複層塗材 E の中性化率(0.40)が複層塗材 E (0.22) より大きい理由として、防水形複層塗材 E のデータの多くが所定の塗り厚さの 1/2 であるため、中性化が早く進行したことが考えられる。

3.2 薄付け仕上塗材

薄付け仕上塗材の箱ひげ図を図-4、中性化率の最大値を表-5に示す。

図-4を見ると、図-3に比べて、いずれの仕上げ材も中性化率が広範囲に分布しており、また最大値も大きいことが分かる。仕上げ材別に見ると、防水形外装薄塗材 E の中性化率の最大値が 0.68 と最も小さいが、他は 0.86~1.02 であり、薄付け仕上塗材の中性化抑制効果は小さいか、ないことが確認できた。ただし、図-4の箱ひげ図に示された中央値(太い黒の横線)を見ると、不明を除けば全ての仕上げ材及び薄付け仕上塗材全体で 0.40 前後であり、ばらつきは大きいものの、薄付け仕上塗材のおよそ半分では中性化抑制効果は十分に期待できる結果となった。逆に、材料や施工法等の違いが中性化抑制効果に与える影響が大きいと考えられ、薄付け仕上塗材に中性化抑制効果を期待する場合は、事前に確認試験等を行う必要がある。なお、外装薄塗材 E の中性化率が 1.0 を超えているのは、測定時の誤差等が影響していると考えられる。

3.3 厚付け仕上塗材

厚付け仕上塗材の箱ひげ図を図-5、中性化率の最大値を表-6に示す。

厚付け仕上塗材に関しては、仕上材の種類やデータ数は少ないものの、中性化率の最大値は 0.3 程度であり、中性化抑制効果が高い。ただし、仕上げ材の種類は 2 種類、データ数は全体でも 9 個しかないため、この結果だけで厚付け仕上塗材の中性化抑制効果について結論付けることは難しい。調査・試験等を重ねてデータを充実させることにより、より信頼性の高い中性化率を求めることが必要である。

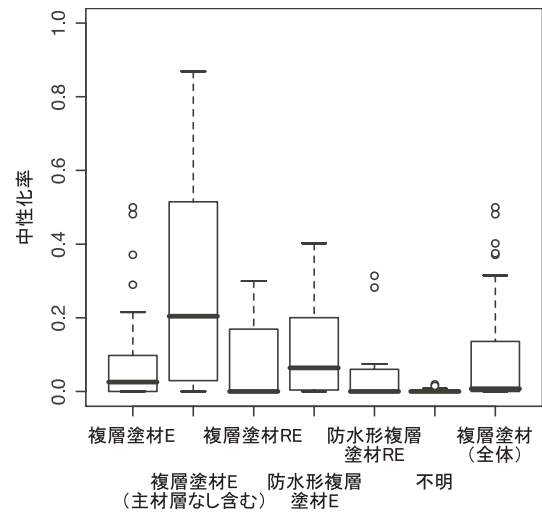


図-3 複層塗材の箱ひげ図

表-4 複層塗材の中性化率

仕上げの種類	仕上げの種類別		全体	
	N	中性化率	N	中性化率
複層塗材 E	19 (4)	0.22	112 (5)	0.32
複層塗材 E (主材層なしを含む)	47	0.87		
複層塗材 RE	20	0.30		
防水形複層塗材 E	40	0.40		
防水形複層塗材 RE	9 (2)	0.08		
可とう形複層塗材 CE	1	0.00		
防水形複層塗材 RS	2	0.00		
不明	18 (2)	0.01		

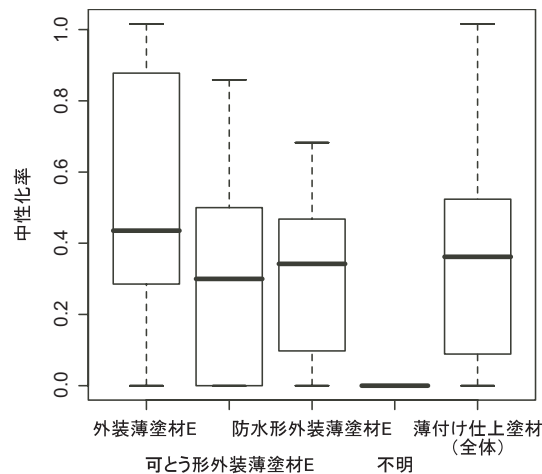


図-4 薄付け仕上塗材の箱ひげ図

表-5 薄付け仕上塗材の中性化率

仕上げの種類	仕上げの種類別		全体	
	N	中性化率	N	中性化率
外装薄塗材 E	32	1.02	76	1.02
可とう形外装薄塗材 E	17	0.86		
防水形外装薄塗材 E	24	0.68		
不明	3	0.00		

3.4 塗膜防水材

塗膜防水材の箱ひげ図を図-6、中性化率の最大値を表-7に示す。

塗膜防水材は中性化率が最も大きいアクリル系で0.32、全体でも0.10と中性化抑制効果が極めて高く、今回取り上げた仕上げ材の中で最も効果の高い材料であった。なお、アクリル系も6データ中4データの中性化率が0.00であった。データから外れ値を除いた最大値を中性化率とする本稿の定義では中性化率は0.32となるが、アクリル系のデータ全体の分布を見ると、中性化抑制効果の高い材料として期待できる。

3.5 塗料

塗料の箱ひげ図を図-7、中性化率の最大値を表-8に示す。

塗料に関しては、エナメル塗りの中性化率の最大値が0.12と、極めて高い中性化抑制効果が期待できる。また、エマルジョンペイント塗りは0.64と中性化抑制効果が高いが、ワニス塗りは0.81と、中性化抑制効果は低い。塗料全体では0.81となったが、仕上げ材の種類が中性化率に及ぼす影響が大きいため、材料の選定次第では、高い中性化抑制効果が期待できる結果となった。なお、エナメル塗りやワニス塗りはデータの箱ひげ図の箱の部分を見てもデータのばらつきは大きくないが、エマルジョンペイント塗りのばらつきは大きいことが分かる。エマルジョンペイント塗りに関しては、薄付け仕上げ塗材同様、材料や施工法等の違いが中性化抑制効果に与える影響が大きいと考えられるため、中性化抑制効果を期待する場合は、事前に確認試験等を行う必要がある。

3.6 下地調整塗材

下地調整塗材の箱ひげ図を図-8、中性化率の最大値を表-9に示す。

下地調整塗材も塗料同様、種類により大きな違いがあった。合成樹脂エマルジョン系は中性化の最大値が0.29と、極めて大きな中性化抑制効果が期待できるのに対して、セメント系厚塗材 C-1 (0.61) やセメント系厚塗材 CM-1, CM-2 (0.87) は効果が劣る結果になった。このことから、下地調整塗材についても、塗料同様、材料の選定次第では高い中性化抑制効果が期待できる。

4. 中性化進行予測と実建物調査との比較

3章で求めた各種仕上げ材の中性化比率の妥当性を検証するため、評価研究会メンバーが調査した、仕上げを施した実建物32棟の中性化深さと、同種の仕上げ材の中性化率を使って計算した中性化進行予測を比較した。

建物の竣工年は1978年～1997年であり、主に関東地方に存在する。調査した建物のうち、今回比較の対象としたのは、データ数の多い複層塗材E(アクリルタイル)を施した建物(63件)と防水形外装薄塗材E(単層弾性)を施した建物(27件)である。

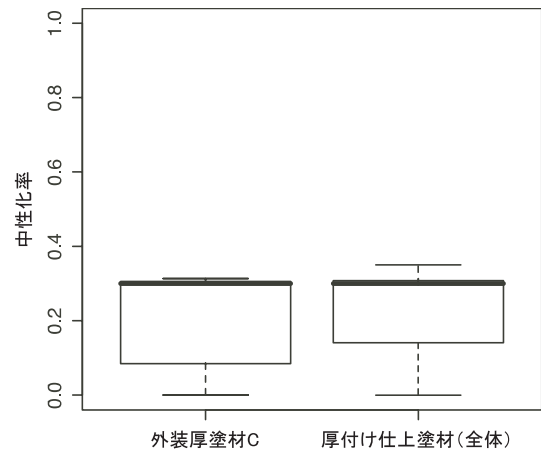


図-5 厚付け仕上げ塗材の箱ひげ図

表-6 厚付け仕上げ塗材の中性化率

仕上げの種類	仕上げの種類別		全体	
	N	中性化率	N	中性化率
外装厚塗材 C	8	0.31	9	0.35
外装厚塗材 E	1	0.35		

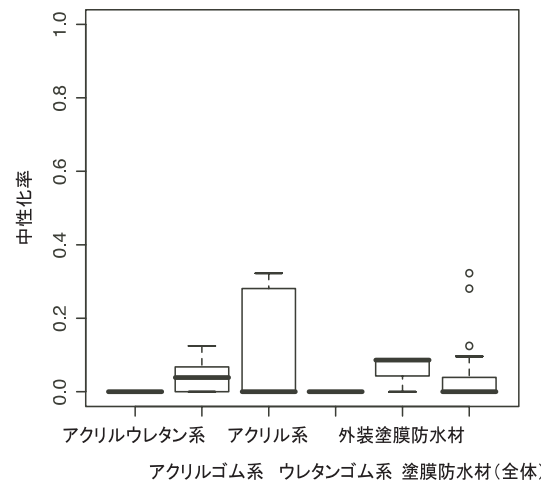


図-6 塗膜防水材の箱ひげ図

表-7 塗膜防水材の中性化率

仕上げの種類	仕上げの種類別		全体	
	N	中性化率	N	中性化率
アクリルウレタン系	6	0.00	25 (3)	0.10
アクリルゴム系	8	0.12		
アクリル系	6	0.32		
ウレタンゴム系	3	0.00		
外装塗膜防水材	3	0.09		
ウレタン系	2	0.00		

中性化進行予測は、式(2)に示す岸谷式と、式(3)に示す和泉式を用いて行った¹⁾。

$$C = \frac{s(4.6x - 1.76)}{\sqrt{7.2}} \sqrt{t} \times 10 \quad (2)$$

$$C = 4.91 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot s \cdot \sqrt{t} / 52 \quad (3)$$

ここで、C: 中性化深さ (mm), s: 本報で提案した中性化率, x: 水セメント比 (%/100), t: 経過年数 (年), R₁: セメント種類および水セメント比の影響係数 (普通

ポルトランドセメントの場合 $e^{3.34x-2.004}$), R_2 :セメントの種類および湿潤養生の影響係数(普通ポルトランドセメントの場合, $2.60M^{0.175}$, M は水中養生期間中の積算温度), R_3 :炭酸ガス濃度の影響係数($(CO_2/5)^{0.5}$), R_4 :温度の影響係数($0.017Tem+0.48$), R_5 :湿度の影響係数($(Hu(100-Hu)(140-Hu)=192000$, Hu は相対湿度)である。

予測にあたり, 水セメント比 x は水セメント比が明らかかな, 又は推定可能な実建物の平均値である 60%, 水中養生期間中の積算温度 M は(年平均気温 + 10°C) × 2 日, 炭酸ガス濃度 CO_2 は屋外 0.03%, 温度・相対湿度は気象庁発表データを参照し, 関東地方の 1 都 5 県(埼玉県を除く)の県庁所在地における 1980 から 1985 年の 6 年間のデータの平均値 14.0°C および 68.6%RH を使用した。

結果を図-9 と図-10 に示す。図中, 「改修あり」とした建物は, 供用期間中に上塗りのみ塗り直したものを示す。回帰曲線は, 図中の全データを最小 2 乗法により回帰した曲線を示す。

図を見ると, 複層塗材 E, 防水形外装薄塗材 E とともに和泉式と回帰曲線が近い位置にあり, 和泉式により予測した結果はプロットしたデータのほぼ中央を通る。このことから, 和泉式を用いた場合, 両仕上げ材ともに提案した中性化率で予測を行った場合, 精度よく予測できることが分かった。一方, 岸谷式で予測した結果は, 調査結果よりも中性化の進行が早く, 予測という点では和泉式よりも精度が劣るが, 安全側に評価したい場合には, 岸谷式のほうが適していることを確認した。

5. まとめ

本稿では, 現在広く普及している仕上げ材を対象に, 種類別の中性化率を文献調査や独自に行った促進中性化試験の結果にもとづき提案した。提案にあたっては, 仕上げ材の劣化の有無や安全側の評価になることを考慮して, 中性化率の最大値を提案値とした。結果を表-10 に示す。

本報で整理した仕上げの中では, 塗膜防水材の中性化抑制効果が極めて高いことが明らかとなった。また, 複層塗材, 厚付け仕上塗材の中性化抑制効果も高いことが明らかとなった。一方, 薄付け仕上塗材, 塗料, 下地調整塗材は, 中性化抑制効果が小さいことが明らかとなった。しかし, これらの中にも仕上げ材の種類によっては効果の高いものがあるため, 仕上げ材に中性化抑制効果を期待する場合には, 表-10 の種類別の中性化率を参考に仕上げ材を選定することも可能である。なお, 薄付け仕上塗材やエマルジョンペイント塗りのようなばらつきの大い(箱が上下に長い)仕上げ材は, 材料や施工法の違いが原因とも考えられるため, 建物への使用にあたっては, 事前に確認試験等を行う必要がある。

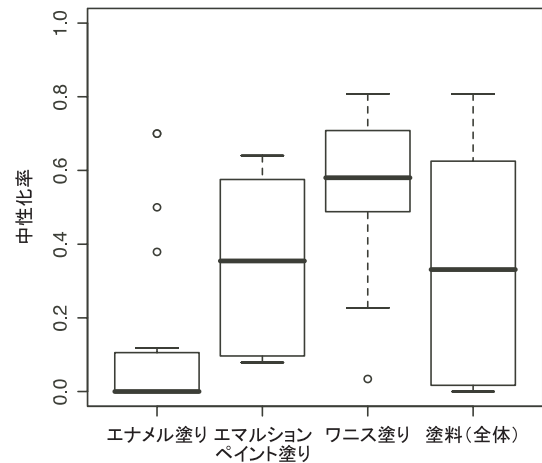


図-7 塗料の箱ひげ図

表-8 塗料の中性化率

仕上げの種類	仕上げの種類別		全体	
	N	中性化率	N	中性化率
エナメル塗り	17 (3)	0.12	44	0.81
エマルジョンペイント塗り	6	0.64		
ワニス塗り	17 (1)	0.81		

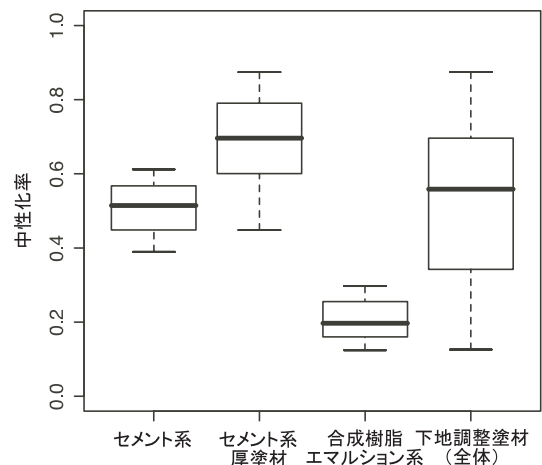


図-8 下地調整塗材の箱ひげ図

表-9 下地調整塗材の中性化率

仕上げの種類	仕上げの種類別		全体	
	N	中性化率	N	中性化率
セメント系 C-1 (厚さ 3mm)	5	0.61	20	0.87
セメント系厚塗材 CM-1,2 (厚さ 3mm)	10	0.87		
合成樹脂エマルジョン系	5	0.29		

また, 本報で設定した中性化率を使って中性化の進行予測を行った。実建物の調査データと比べると, 複層塗材 E と防水形外装薄塗材 E の 2 種類については, 岸谷式では安全側の予測結果となり, 和泉式ではデータから回帰した曲線に近い予測結果であった。

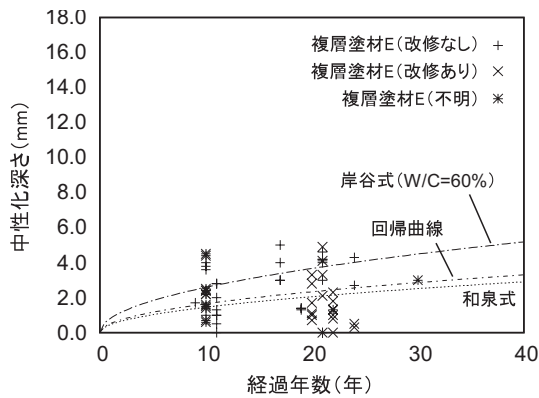


図-9 複層塗材 E の実建物調査結果と予測

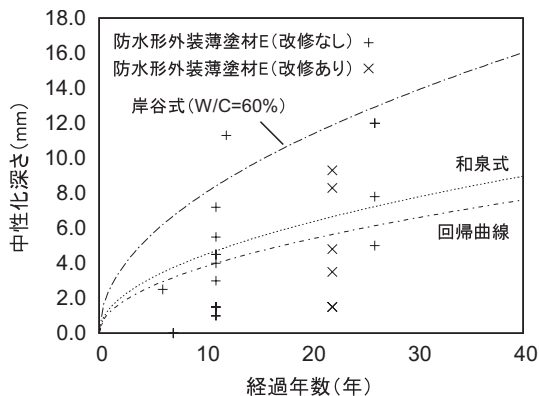


図-10 防水形外装薄塗材 E の実建物調査結果と予測

表-10 中性化率のまとめ

分類	分類別 中性化率	仕上げの種類	種類別 中性化率
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
下地調整塗材	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	0.29

注1：表中の数字は中性化率の最大値を示す

注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

参考文献

- 1) 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，丸善，2003
- 2) 長瀬公一ほか：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1～4，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1123-1130，2007.8
- 3) 久保田 浩ほか：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1～2，日本建築仕上学会 2007 年大会学術講演会研究発表論文集，pp.211-218，2007.10
- 4) 河野政典ほか：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7～8，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1135-1138，2007.8
- 5) 古賀一八ほか：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4 下地調整塗材の中性化抑制効果の確認実験，日本建築仕上学会 2007 年大会学術講演会研究発表論文集，pp.223-226，2007.10
- 6) 唐沢智之ほか：既存建物の調査事例に基づいた仕上塗材の中性化抑制効果に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.837-842，2007.7
- 7) 親本俊憲ほか：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5～6，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1131-1134，2007.8
- 8) 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3 既存建物調査事例に基づいた仕上塗材の中性化速度係数および中性化率，日本建築仕上学会 2007 年大会学術講演会研究発表論文集，pp.219-222，2007.10
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS23 吹付け工事，丸善，2006