

論文 モデル建物の 30 年屋外暴露試験に基づく仕上材の劣化状況と中性化抑制効果

米谷 怜*1・千歩 修*2・北垣 亮馬*3・根本 かおり*4

要旨: コンクリート試験体に各種仕上材を施したモデル建物を 30 年間屋外暴露し、仕上材の劣化状況および中性化抑制効果の経年変化について検討を行った。この結果、各種仕上材の実環境における中性化抑制効果が明らかになったが、塗膜表面の目視による劣化状況だけでは仕上材の劣化による中性化抑制効果の低下を説明できないことが示された。また、仕上材の劣化状況と中性化率の経年変化に異なるパターンが認められ、各種仕上材の経年変化パターンの分類を行った。

キーワード: 仕上材, 屋外暴露試験, 中性化

1. はじめに

鉄筋コンクリート造部材の長期耐用化を行うためにはコンクリート表面に施工された仕上材, 含浸材等の中性化抑制効果, 鉄筋腐食抑制効果といった躯体保護効果を明らかにする必要がある。このような躯体保護効果についてこれまで多くの研究が報告されているが, 長期的な屋外暴露に基づく検討は少ないのが現状である。

各種仕上材をコンクリートに施工した試験体で構成されるモデル建物の屋外暴露が行われており, 屋外暴露 11 年目, 20 年目の仕上材の劣化状況, 中性化抑制効果, 鉄筋腐食抑制効果について報告されている^{1), 2), 3)}。

本論文では, これらの報告に引き続き実験を行い, このうちモデル建物の屋外暴露 30 年目における仕上材の劣化状況, 中性化抑制効果について検討を行った。

2. 屋外暴露試験概要

図-1 に示すモデル建物を屋外暴露し, 仕上材の劣化状況を把握するとともに, 中性化深さとコロージョンインジケータ法⁴⁾による鉄粒子の腐食状況を測定するため試験体を作製した。本論文は, このうち仕上材の劣化状況および中性化抑制効果について検討するものである。

表-1 にモデル建物に使用したコンクリート試験体の種

別, 表-2 に試験体に用いたコンクリートの調合及び基礎性状を示す。

モデル建物は, 各種仕上材を施工したコンクリート試験体を四周に積み上げ構成している。建物上部には試験体屋外面+数 mm の寸法の金属板の箱を設置し, 北側への傾斜屋根となっており, 室内に雨がかりはない状態である。また, 室内の温湿度の制御等は行っていない。

本試験に用いられた仕上材の種類及び使用量を表-3 に, 試験体に施工された仕上材の配置を図-2 に示す。仕上材等の名称は JIS および文献⁵⁾の呼び名等を簡略化したものである。なお, 図-2 中の数字は表-3 中の番号に対応しており, 図-2 中の(X), (Y)は図-1 中の平面図と対応し, 各面の仕上材の配置を示す。仕上材は, 鉄筋コンクリート造用仕上材として一般的と考えられる塗膜系の白色の仕上材(仕上塗材, 塗料)を選定したものであり, 材料および施工については標準的なものとした。また, 一部塗膜系以外に浸透材(含浸材)やアルカリ回復材も使用した。仕上げ面は, 図-3 に示すように 90×100mm の形の仕上材を 4 種類, 専門の技術者が施工を行った。試験体は, 脱型後試材齢 28 日まで 20°C水中養生を行い, 材齢 42 日まで 20°C, 60%R.H.で気中養生を行った後, 仕上材の施工を行った。仕上げ面の反対の面

表-1 モデル建物に使用した
コンクリート試験体の種別

用途 記号	中性化		コロージョンインジケータ					
	A	B	C	D	E	F	G	
W/C(%)	55	70	55	70				
塩化物イオン(kg/m ³)	-	-	-	-	0.3	0.6	1.2	
設置箇所	東*	西*	南*	北*	●	○	●	
	西左	-	○	●	-	-	-	

○: 前中性化処理なし
●: 前中性化処理あり(2ヶ月間 CO₂濃度 5%で促進中性化)

*: 東面は 11 年目まで, 北面は 20 年目まで暴露

表-2 使用したコンクリートの調合および基礎性状

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (cc)	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	
				C	S	G	CI	CI ⁻					
A	55	44.5	176	320	790	1000	-	-	800.0	18.5	3.7	38.2	
B	70	47.5		251	871	977	-	-	628.6		4	22.9	
C	55	45.5		320	632	1000	420	-	800.0	15.5	3.4	40.5	
D	-	-		-	-	-	-	-	-		3.7	27.4	
E	70	47.5		251	697	977	461	0.3	628.6	16.0	3.6	29.5	
F											0.6	3.6	27.6
G											1.2	3.5	29.1

セメント(C): 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³), 細骨材(S): 小笠原砂(表乾密度 2.60g/cm³)
粗骨材(G): 富士川砂利(表乾密度 2.64g/cm³), 混和剤: AE 減水剤(リゲニル系)

CI: 鉄粒子(粒度 2.5~0.15mm, 密度 6.9g/cm³), CI⁻: 塩化物量(NaCl 量に換算して使用)

- *1 北海道大学 大学院工学院空間性能システム専攻 (学生会員)
- *2 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門教授 工博 (正会員)
- *3 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門准教授 工博 (正会員)
- *4 国土交通省国土技術政策総合研究所 住宅研究部住宅生産研究室 博士(工学) (正会員)

は打放しコンクリートとし、仕上げ面を屋外側、反対の面を屋内側とした。また、鉄筋腐食抑制効果を検討するため、コロージョンインジケータ法を用い、鉄粒子を混入した試験体を作製するとともに、一部に Cl 量が 0.3, 0.6, 1.2kg/m³ となるよう塩化ナトリウムを混入した。さらに各条件であらかじめ中性化処理(試験体養生後、20℃、60%RH、CO₂ 濃度 5%で2ヶ月間の促進中性化)を行った

た試験体を作製した。

モデル建物は、茨城県つくば市にある建設省(暴露開始当時。現国立研究開発法人)建築研究所に屋外暴露した。測定は暴露 11, 20, 30 年目に行った。測定の概要を表-4 に示す。仕上材の劣化状況は文献⁶⁾に準拠し、0(劣化なし)から5(劣化大)の6段階のデグリーを用い、複数の専門技術者によって評価した結果を用いた。

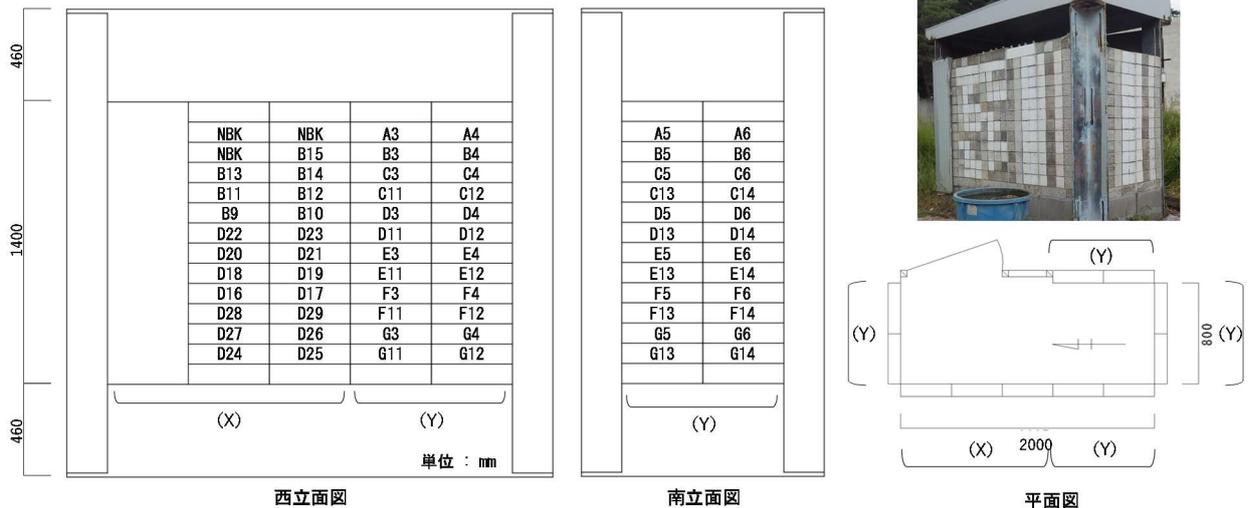


図-1 モデル建物の概要および外観写真

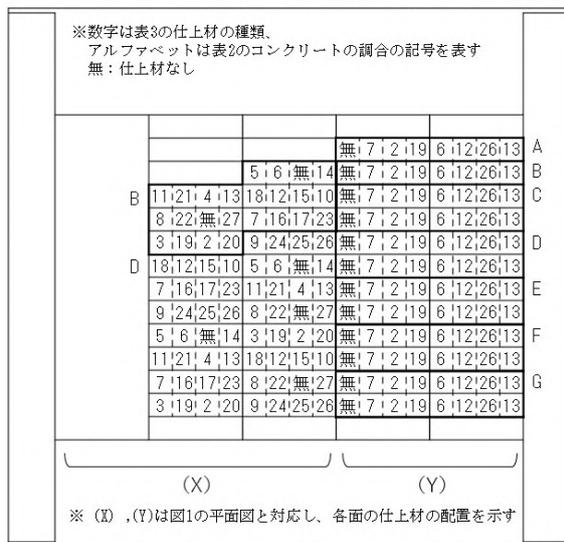


図-2 仕上材の配置

表-3 使用した仕上材等の種類と使用量

仕上材種類	名称・呼称	番号	種類と塗布量・使用量(kg/m ²)		つや		
			主材	上塗材			
複層	複層E	2	水系 0.08	2.35*	アクリル系 0.22*	有	
仕上塗材	複層CE	3	水系EVA 0.15	1.6	アクリル系 0.22*	無	
	複層RE	4	エポキシ 0.01	1.85*	ウレタン系 0.46*	無	
薄塗材	防水形E-1(防水形複層E)	5	水系 0.08	1.92*	ウレタン系 0.32*	無	
	防水形E-2(防水形薄塗E)	6	水系 0.08	1.43*	—	有	
	薄塗材E	7	0.08	1.1	吹付	—	無
	可とう系薄塗材E	8	水系 0.08	1.2	吹付	—	無
	薄塗材C	9	—	1.80*	吹付	—	無
	薄塗材Si	10	—	1.3*	—	—	無
	MR-A(マステックA)	11	—	1.7	—	—	無
	防水形通気性(防水通気)	12	—	1.52*	—	—	有
厚塗材	厚塗材E	13	水系 0.08	3.65*	吹付	—	無
	厚塗材C	14	—	7.20*	吹付	—	無
塗料系	シリカペイント	15	—	—	—	0.26*	無
	EP	16	水系 0.08	—	—	0.27*	有
	GP(つやありEP)	17	水系 0.08	—	—	0.23*	有
	RP(厚付EP)	18	水系 0.18*	—	—	0.51*	無
	アクリルエナメル	19	—	—	—	0.29*	有
	塩ビエナメル	20	—	—	—	0.4*	有
	ウレタンエナメル	21	—	—	—	0.26*	有
	アクリルシリコンエナメル	22	プライマー 0.15	—	—	0.3*	有
	フッ素エナメル	23	プライマー 0.13	—	—	0.23*	有
	含浸材系	浸透剤(エポキシ系)	24	0.24*	—	—	—
浸透剤(アクリル系)		25	0.19*	—	—	—	—
浸透剤(シラン系)		26	0.2*	—	—	—	—
アルカリ回復剤		27	回復材 0.25	—	—	PCM 2mm厚	—

*: 2回に分けて施工。施工方法の記載のないものはローラーまたは刷毛による。
 ※: 光沢度は評価しているが、光沢がつかずに消しに近く、ここではつや無しに分類
 塗料系でシリカペイントは、結合材として珪酸塩結合材を使用した塗料である。
 また、EP: 合成樹脂エマルジョンペイント、GP: つや有合成樹脂エマルジョンペイント
 RP: リフレッシュペイント(URで標準化されたもの)である。

表-4 モデル建物の測定の概要

対象	測定範囲			概要
	11年時	20年時	30年時	
仕上材の劣化状況	全面	北面	南面 西面	目視、スケッチ*1、写真記録*2: (変退色、光沢度低下、汚れ、 膨れ、割れ、剥がれ、摩耗) 布拭き試験*3: 白亜化 (劣化状況はデグリーで評価)
		西面		
中性化深さ	東面	北面	JIS A 1152に準拠して測定	
鉄粒子腐食深さ		北面	鉄粒子腐食深さを 目視にて判断し測定	

*1: 20年時のみ実施
 *2: 試験体全体写真に加え、30年時のみデジタル顕微鏡による拡大写真を撮影
 *3: 30年時は手拭き試験により評価

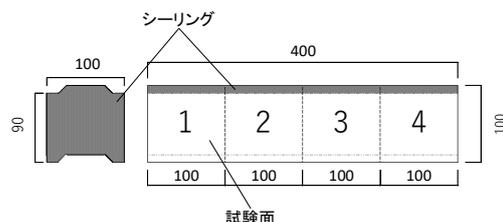


図-3 試験体の概要

仕上材の劣化状況の調査を行った後、暴露 11 年目に東面、20 年目に北面、30 年目に南面・西面の試験体を取り外し、割裂後、JIS A 1152 に準拠し中性化深さを測定した。なお、暴露 11 年目に東面、20 年目に北面をそれぞれ取り外した際、合板を取り付け壁面とした。

3. 試験結果および考察

3.1 仕上材の劣化状況

劣化後の試験体写真を図-4 に示す。また、仕上材の劣化状況の経年変化を薄塗材系（図-5）、複層・厚塗材系（図-6）、塗料系（図-7）にわけて、はがれ、割れ、白亜化について示す。方位による顕著な差は見られなかったため、各方位の平均で検討を行った。

薄塗材系では、暴露 30 年目では薄塗 C と薄塗 Si で剥がれのデグリーが大きい傾向が見られた。これらは砂壁状の仕上げであり、塗膜に含まれる骨材周辺に欠陥が生じ、剥がれが生じたものと思われる。しかし、同じ薄塗材系の薄塗 E や可とう系薄塗 E では 30 年目に剥がれはみられず、これらの仕上塗材は骨材界面に欠陥が生じにくいことが考えられる。また、暴露 30 年目において防水形 E-2、防水形通気性（以下防水通気）、MR-A の割れのデグリーが大きい結果となった。うち、防水通気と防水形 E-2 では白亜化のデグリーも大きく、仕上材の劣化が進行していると考えられる。

複層・厚塗材系では暴露 20 年目の複層 E で剥がれのデグリーが大きくなったものの、すべての仕上材で暴露 30 年目においては顕著な劣化はみられなかった。複層 E、

複層 CE、防水形 E-1 では暴露 11 年から 20 年の間に割れのデグリーが急激に大きくなっている。また、複層 RE については暴露 11 年時点で割れのデグリーが最大まで達しており、早期に顕著な割れが生じている。これら複層系は白亜化のデグリーも比較的大きい傾向がみられた。一方、厚塗材では剥がれ、割れは暴露 30 年においてもほとんどみられなかった。白亜化のデグリーも厚塗 C では 3 程度であったが、厚塗 E では 1 程度と比較的小さく、大きな劣化はみられなかった。

塗料系では、シリカペイントが剥がれで暴露 20 年、白亜化で 11 年の時点でデグリーが最大の 5 に達しており、割れも暴露 20 年以降比較的大きく、早期に劣化が進行しているといえる。アクリルエナメルでは暴露 20 年以降、剥がれ、割れ、白亜化のすべてでデグリーが 3 程度と比較的大きく、劣化が進行していると考えられる。ウレタンエナメルは、暴露 20 年までは剥がれ、割れのデグリーは 1 程度と比較的小さかったものの、30 年では劣化が進行し、アクリルエナメルと同程度のデグリーを示した。一方で、RP は暴露 30 年まで剥がれ、割れ、白亜化のいずれも 0 から 1 程度の小さいデグリーを示し、高い



図-4 試験体写真の例 (B13, 暴露 30 年目)

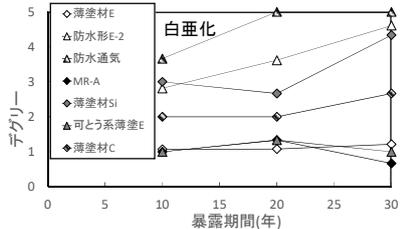
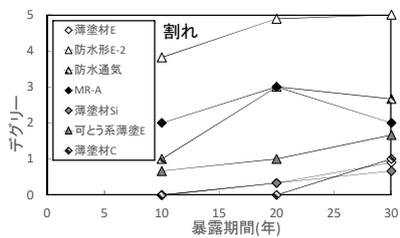
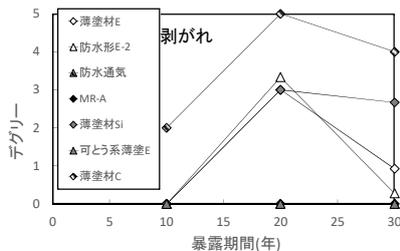


図-5 仕上材の劣化状況 (薄塗材系)

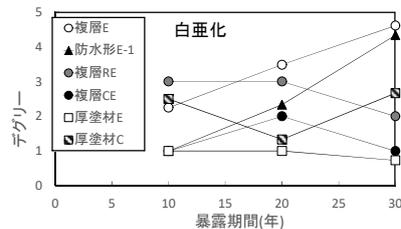
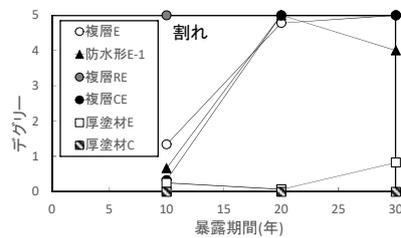
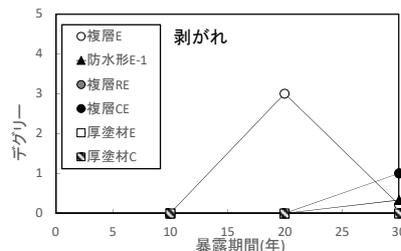


図-6 仕上材の劣化状況 (複層・厚塗材系)

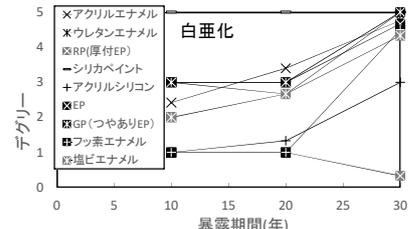
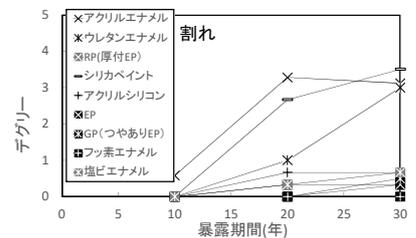
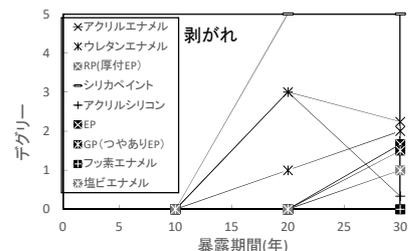


図-7 仕上材の劣化状況 (塗料系)

耐候性を確認できた。ふっ素エナメルについても暴露 20 年目までは同様の傾向がみられたが、30 年目に白亜化のデグリーが急激に上昇しており、劣化が進行したものと考えられる。これらの図の一部で 30 年目にデグリーが回復するものが見られた。劣化が中長期にわたり回復することは考えられず、図-4 に示されるように目視により劣化を評価するデグリー法では評価者の個人差が大きくなりやすく判定にばらつきが生じたものと考えられる。

3.2 中性化抑制効果

暴露 30 年目までの各試験体の中性化深さの経年変化を図-8 (W/C55%)、図-9 (W/C70%) に示す。屋内および屋外側の仕上材なし(凡例：なし)の回帰直線を図中にあわせて示す。図より、浸透材シランと防水通気を除く仕上材では屋外側仕上げなしのものより中性化深さが小さい結果となり、中性化抑制効果が確認された。浸透材シランと防水通気は屋外側仕上げなしより中性化深さが大きく、中性化を促進する傾向がみられたが、これらの仕上材はコンクリート外部からの水分の浸透を防ぐ一方で内部の水分を放出する性質があり、コンクリートの含水率を低下させるために仕上材なしより中性化が進行したものと考えられる。また、W/C55 では暴露 30 年時を除き、浸透材シラン、防水通気の中性化深さは屋内側仕上げなしと同程度であった。W/C70 では暴露 11 年以降どちらの仕上げも屋内側仕上げなしの中性化深さを下回ったが、これは仕上材の劣化により上述の中性化を促進する効果が小さくなったためと考えられる。また、厚塗 E は W/C55 では暴露 30 年目まではほぼ中性化が進行しておらず、W/C70 でも 11 年目までは同様であったが、暴露 20 年目で仕上材なしと同程度まで中性化の進行がみられた。この理由は明確でないが、仕上材の界面剥離などが考えられる。防水形 E-2 は、暴露 20 年まで W/C50 の方が W/C70 よりも中性化深さが大きく、一般的な傾向とは異なる結果がみられた。この原因も明確でないが、防水形 E-2 は比較的透湿性の小さい仕上げである⁷⁾ことから、コンクリート内部の水分が外へと発散しにくく、W/C70 の方が含水状態が高くなり、中性化の進行が遅れたことが考えられる。

コンクリートの中性化進行は、一般に経過時間の平方根に比例することが知られており、仕上げを施したものは仕上材ごとの中性化抑制効果を表す中性化率 s ^{8) 9)} を乗じた以下の式(1)を用いることがある。

$$C = As\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、C：中性化深さ(mm)

A：中性化速度係数(mm/√年)

t：経過時間(年)

s：中性化率

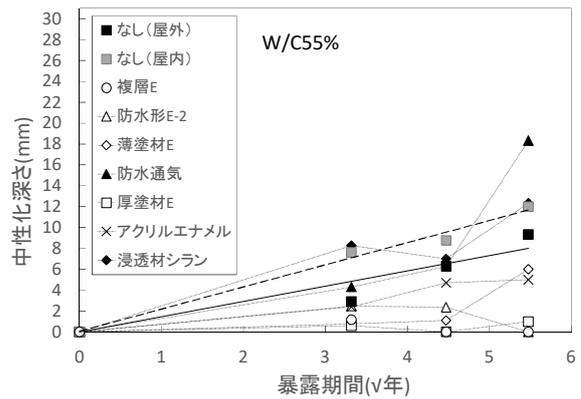


図-8 中性化深さ W/C55%

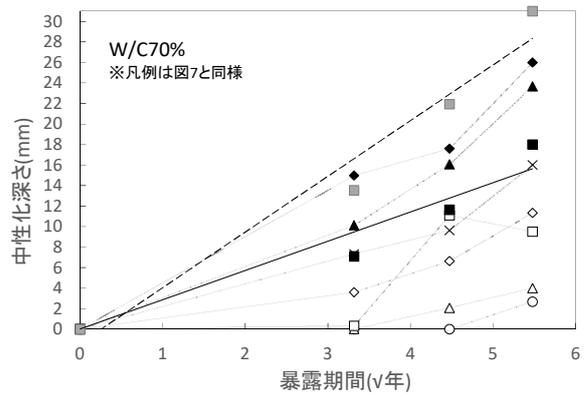


図-9 中性化深さ W/C70%

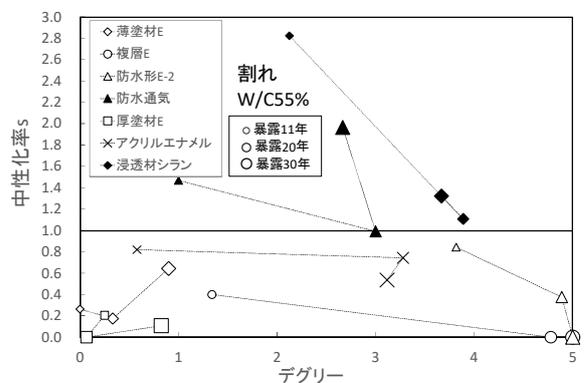


図-10 割れのデグリーと中性化率の関係

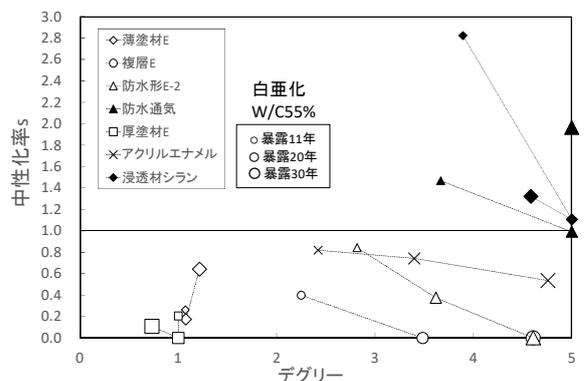


図-11 白亜化のデグリーと中性化率の関係

ここで、仕上材ごとに算出した中性化率 s と割れ、白亜化のデグリーとの関係の例 (W/C55%試験体) をそれぞれ 図-10, 図-11 に示す。図より、仕上材の劣化デグリーが大きくなるほど中性化率が大きくなる傾向はみられないか、逆に仕上材の劣化デグリーが大きくなるほど中性化率が小さくなる傾向を示すものがみられた。実際には、劣化の進行に伴って仕上材の中性化抑制効果は低下し、中性化率は大きくなると考えられる。このことから、目視等により塗膜表面の劣化を評価する方法では仕上材の劣化による中性化抑制効果への影響を上手く評価できないものと考えられる。そこで、塗膜の深さ方向へのひび割れの進展を考慮し、ひび割れの深さを仕上材ごとの塗布量で除した値と中性化率 s の関係を 図-12 に示す。なお、ひび割れ深さは仕上材表面をデジタル顕微鏡で撮影した写真から算出した平均ひび割れ幅の 1/2 (ひび割れの深さ方向への角度を 45 度と仮定) として算出した。防水形 E-2 を除く仕上げの回帰直線を図中にあわせて示す。図より、防水形 E-2 を除く仕上げでは塗布量に対するひび割れ深さが大きくなるほど中性化率が大きくなっており、相関関係がみられた。仕上材の劣化による中性化抑制効果の低下には仕上材表面の劣化はあまり影響せず、深さ方向へのひび割れの進展が大きく影響すると考えられる。防水系 E-2 は上記の相関から外れたが、全仕上塗材のうち防水系 E-2 だけが、親水性の高い水系シーラーの下地と防水性の高い薄塗用の主材により構成されている。今後の検討が必要であるが、例えば、シーラーと主材の界面剥離といった特殊な相互作用が働いたことにより、主材のひび割れが進展してもシーラーが破壊されず、ガスバリア性状が維持された可能性が考えられる。

本暴露試験による中性化率の経年変化と、同一条件の試験体の促進中性化試験⁷⁾ (2, 4, 6ヶ月) に基づく結果をあわせて 図-13 に示す。なお、W/C70%の試験体の一部は暴露 30 年目のみ測定を行った。図より、暴露 30 年目において、浸透材シランと防水通気に加え、アクリル系浸透材、エポキシ系浸透材、シリカペイント、薄塗材 C では仕上材なしのものより中性化深さが大きく、中性化率が 1 を越えた。アクリル系およびエポキシ系の浸透材では、シラン系と同様、コンクリート外部からの水分侵入を防ぐ一方で内部の水分を放出する性質から、コンクリートの含水率が低下し、中性化が進行したものと考えられる。シリカペイントおよび薄塗 C で中性化率が 1 を越えた理由は明確ではないが、剥がれのデグリーがともに暴露 20 年、シリカペイントは加えて白亜化のデグリーが暴露 11 年に最大の 5 となっており、早期に顕著な劣化が生じていることから、暴露 30 年時点で中性化抑制効果がほとんど失われていた可能性がある。

塗膜の劣化状況 (図-5~7) および中性化率の経年変

化 (図-13) より、各種仕上材を、(a)中性化率が 1 を越え、中性化を促進する効果のあるもの (浸透材シラン, 防水通気), (b)塗膜の経年劣化が小さく、中性化抑制効果の変化も軽微なもの (厚塗 E, 薄塗 E), (c)塗膜の劣化は顕著であるが、中性化抑制効果への影響は小さいもの (防水形 E-2, 複層 E), (d)塗膜の劣化が大きく、中性化抑制効果への影響も大きいもの (アクリルエナメル) の 4 つに分類した。(a)は撥水性と通気性によって乾燥しやすく、中性化が促進されたと考えられる。(b)は暴露 30 年時点でデグリーが 1 程度と劣化が軽微であり、中性化率も比較的小さい傾向がみられた。しかし、W/C55 の暴露 30 年目に薄塗 E, W/C70 の暴露 20 年目に厚塗 E で中性化率が大きく上昇しており、界面剥離などが生じた結果中性化が大きく進行したものと考えられる。(c)の塗膜は暴露 20 年時点で割れのデグリーが最大の 5 か近い値となっており、白亜化のデグリーも比較的大きい傾向を示した。しかし、W/C55 の暴露 11 年目に比較的大きな値となったものの、中性化率は小さく、塗膜劣化の中性化抑制効果への影響は小さいものと考えられる。(d)のアクリルエナメルは暴露 11 年時点で白亜化が 2.5 程度と比較的早期に劣化が現れ、暴露 20 年時点では剥がれ、割れ、白亜化のいずれも 3 前後と大きな劣化がみられた。中性化率は暴露 11 年目から 1 に近く大きい値であり、中性化抑制効果への塗膜劣化の影響が大きいものと考えられる。

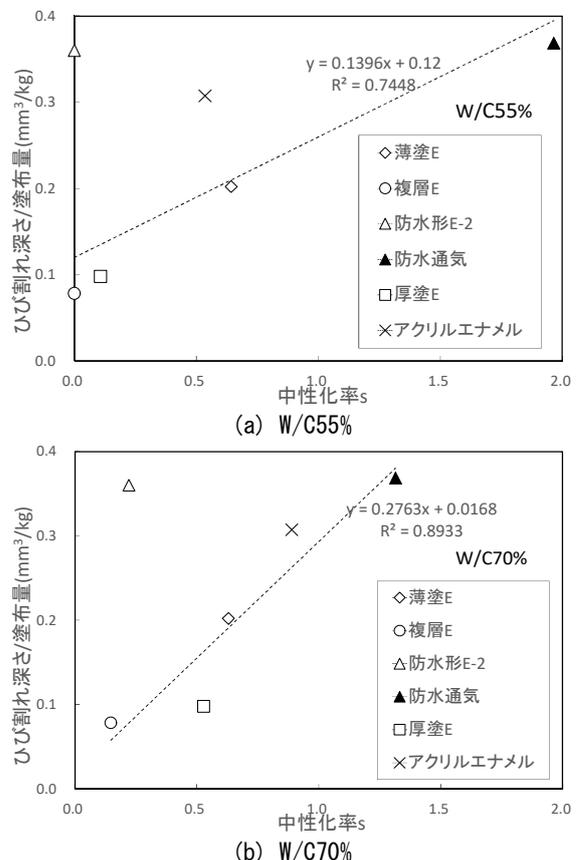
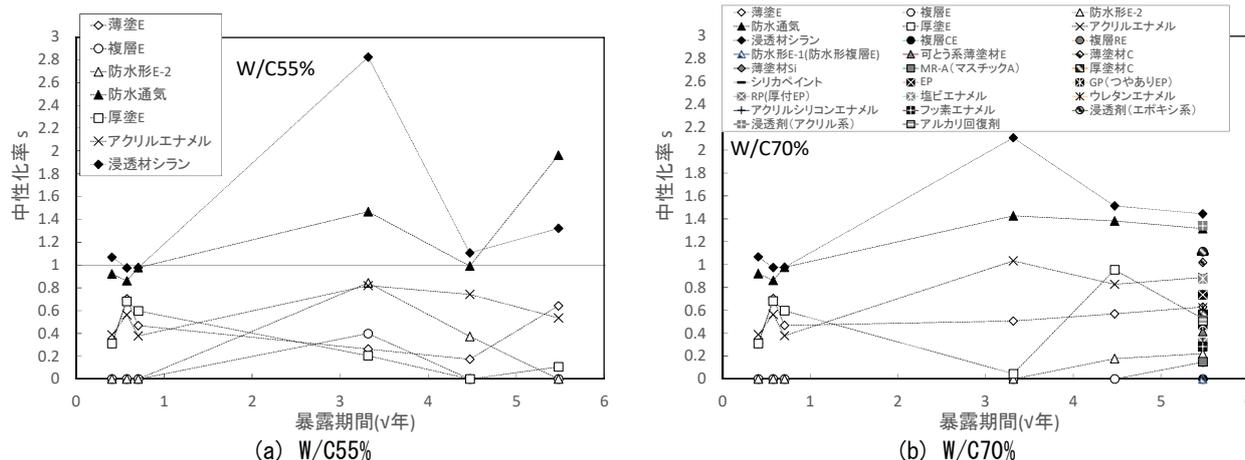


図-12 中性化率とひび割れ深さ/塗布量の関係



図一13 促進試験と暴露試験による中性化率の経年変化

4. まとめ

各種仕上材（含浸材等含む）を施工したコンクリート試験体により構成されたモデル建物の30年屋外暴露試験における仕上材の劣化状況および中性化抑制効果について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 屋外暴露30年において、薄塗材系では砂壁状仕上げで剥がれが生じやすく、防水形E-2や防水通気、MR-Aでは割れが多くみられた。複層系仕上では、複層E、複層CE、防水形E-1で顕著な割れがみられたが、厚塗材では大きな劣化は認められなかった。塗料系ではシリカペイントの劣化が特に顕著であったほか、暴露30年目にアクリルシリコン、RPを除く塗膜で顕著な白亜化が認められた。
- 2) 各種仕上材の中性化抑制効果を把握した。浸透材シランと防水通気は、仕上材なしの試験体より中性化深さが大きく、中性化を促進する効果が認められた。
- 3) 塗膜表面の劣化を目視等により評価する方法では、塗膜の劣化による中性化抑制効果への影響を評価できない可能性がある
- 4) 塗膜のひび割れ幅から算出したひび割れ深さにより、塗膜の劣化による中性化抑制効果への影響を評価できる可能性が示された
- 5) 塗膜の劣化状況および中性化率の経年変化より、仕上材の劣化による中性化抑制効果への影響から仕上材の分類を行った。

謝辞

試験体は建設省（当時）の官民連帯共同研究「外装材の補修・改修技術の開発」（昭和61～63年度）で作製されたものである。仕上材の劣化評価は、日本建築仕上材工業会関係各位の協力を得た。実験では、近田真記子氏（本学学部生）らの協力を得た。ここに記し謝意を示す。

参考文献

- 1) 長谷川拓哉, 千歩修, 馬場明生, 渡部嗣道: モデル建物の11年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上材の中性化に対する保護効果, 日本建築学会構造系論文集, 第555号, pp. 37-43, 2002.5
- 2) 長谷川拓哉, 千歩修, 馬場明生, 渡部嗣道: モデル建物の11年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上材の鉄筋腐食抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第560号, pp. 27-33, 2002.10
- 3) 長谷川拓哉, 千歩修, 福山智子, 井上照郷: モデル建物の20年屋外暴露試験に基づく仕上材の劣化状況・中性化および鉄筋腐食抑制効果, 日本建築学会構造系論文集, 第733号, pp. 337-346, 2017.3
- 4) 千歩修, 馬場明生, 松島泰幸: コンクリート中の鉄筋腐食抑制効果の評価試験方法の一提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 289-290, 1987.10
- 5) 日本建築仕上材工業会編, 建築用仕上塗材ハンドブック2007年版, 2007.9
- 6) 建設大臣官房技術調査室監修, (財)日本建築センター, (財)建築保全センター: 塗り仕上げ外壁の補修・改修技術, (財)経済調査会, 1992.7
- 7) 千歩修, 馬場明生, 松島泰幸, 小俣一夫, 「仕上げ塗材の躯体保護効果に関する研究」, 日本建築仕上学会, 1990, pp.77-80
- 8) (財)国土開発技術研究センター建築物の耐久性向上技術普及委員会編, 建設大臣官房技術調査室監修: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, pp. 279-282, 技報堂出版(1986)
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針(案)・同解説(2004)