

論文

[1089] コンクリート表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について

正会員 ○浜田秀則 (運輸省港湾技術研究所)
 正会員 福手 勤 (運輸省港湾技術研究所)
 阿部正美 (運輸省港湾技術研究所)
 正会員 山本邦夫 (運輸省港湾技術研究所)

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害防止対策としてこれまでに種々のものが考えられているが、コンクリートの表面被覆もその一つである。これは塩素イオン、水分、酸素といった鋼材腐食の原因となる物質のコンクリートへの侵入を防止することを目的としている。コンクリートの表面被覆材料としては、これまでに種々のものが考案され、徐々に実績も増えつつある。しかしこれらの被覆材料の海洋環境下における耐久性、塩害防止効果は定量的に十分把握されているとは言い難く、また各種材料の規格、評価方法等も確立されてはいない。以上の状況に鑑み、以下に列挙する項目を主目的として一連の実験を実施した。

- ①異なる数種の塗膜の海洋環境下における耐久性、および塩害防止に関する各種性質の把握
- ②塩害防止を主眼とした各種塗装材料の評価方法の検討

実験はRC供試体を用いて行い、上記の目的に加え以下に示す項目についても検討を行った。

- ③コンクリート中の鉄筋の電気化学的測定の有効性 ④塗膜の色彩測定の有効性
- ⑤コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響要因

本文は、実験の概要およびそれより得られた知見を取りまとめるものである。

2. 実験の概要

2.1 概要

実験はRC供試体を用いて実施した。

コンクリート表面に塗膜を有する供試体を港湾技術研究所構内の飛沫部シミュレーション装置に暴露し、暴露1年後に種々の評価試験を行った。一方、これと比較する意味で乾湿繰り返し腐食促進試験も実施した。本文では前者を「シリーズ1」、後者を「シリーズ2」と称する。

2.2 供試体

供試体の形状を図-1に示す。図に示すとおり、かぶり厚20mmの位置に2本の鉄筋を有する角柱型RC供試体である。

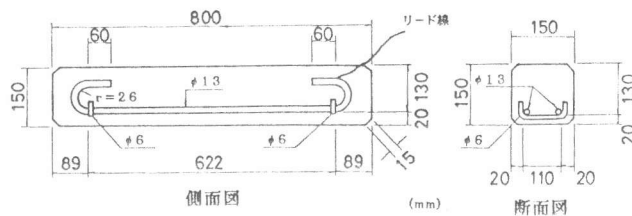


図-1 供試体の形状、寸法

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE減水剤
20	8±2.5	37	36.4	178	481	609	1080	2.405
20	12±2.5	50	44.5	165	330	804	1061	3.300

供試体製作に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は砕石及び砕砂、また練りませ水として水道水を使用した。供試体の全表面に表-2に示す材料ならびに仕様で塗装を行った。なお、用いた材料は既に市販されており、かつ比較的実

表-2 塗装材料および仕様

システム	工程	使用材料	塗装回数	標準使用量 (kg/m ²)
A	下中上塗	シラン系ポリマー	2	0.3
		シリコン系樹脂	1	0.0
		アクリル系樹脂	1	0.2
		エポキシ樹脂	1	1.0
		シリコン系樹脂	1	0.15
B	下中上塗	けい酸系樹脂	2	0.4
		亜硝酸系樹脂	2	0.5
		SBR系樹脂	1	2.2
C	下中上塗	エポキシ樹脂	1	0.1
		エポキシ樹脂	1	0.6
		エポキシ樹脂	1	0.35
D	下中上塗	ポリマーセメント	1	1.5
		エポキシ樹脂	2	0.3
		アクリル樹脂	2	2.0
E	下中上塗	ゴムラテックス	1	3.75
		セメント	1	0.12
		エポキシ樹脂	3	0.75
F	下中上塗	エポキシ樹脂	1	0.1
		エポキシ樹脂	2	0.3
		エポキシ樹脂	1	1.1

績のあるものを選択した。塗装はコンクリートが十分硬化した後に、コンクリート表面が乾燥した状態で実施した。また、一部の供試体には表面の塗膜が十分に硬化、乾燥した後に、曲げ荷重によりひびわれを導入した。このひびわれは、荷重時のコンクリートの最大ひびわれ幅が0.2mmになるように導入した。表-3に供試体の一覧を示すが、シリーズ1が14体、シリーズ2が16体、合計30体である。

2. 3 飛沫部シミュレーション暴露環境と
乾湿繰り返し腐食促進試験

写真-1に飛沫部シミュレーション装置での供試体の暴露状況を示す。本装置では、供試体は1日に2回、1回あたり3時間の海水のスプレーを受ける。また、比較的直射日光を受ける環境である。図-2に乾湿繰り返し腐食促進試験の試験条件¹⁾を示す。この乾湿繰り返しを20サイクル実施した。

2. 4 試験項目及びその方法

表-4に試験項目の一覧を示す。各試験の試験方法の概要を以下に示す。

(1) 外観観察および塗膜の色彩測定

供試体表面を水道水で洗浄した後、ひびわれ、浮き、剥離等の表面劣化に特に注意して塗膜の目視観察を行った。その後、色彩計を用いて、塗膜表面の色の三刺激値 (X、Y、Z)²⁾を測定した。

(2) 塗膜の電気抵抗

海水中に供試体を浸漬し、対極としてステンレス鋼板(30×50cm)を用い、コンクリート中の鉄筋とステンレス鋼板間の抵抗を交流(100Hz)により測定した。本文においては、本測定値を塗膜

表-3 供試体の一覧

供試体番号	W/C	塗装システム
シリーズ1	SE-A-1,2	A
	SE-B-1,2	B
	SE-C-1,2	C
	SE-D-1,2	D
	SE-E-1,2	E
	SE-F-1,2	F
	SE-O-1,2	無塗装
シリーズ2	A-A-1,2	A
	A-B-1,2	B
	A-C-1,2	C
	A-D-1,2	D
	A-E-1,2	E
	A-F-1,2	F
	A-O37-1,2	無塗装
A-O50-1,2	無塗装	

* 1 : No.1 ひびわれなし
No.2 ひびわれあり

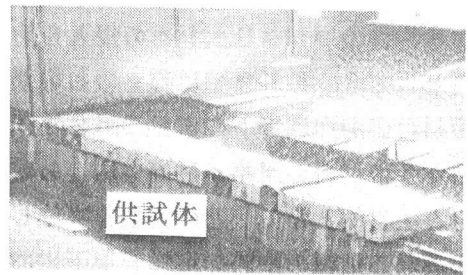


写真-1 飛沫部シミュレーション装置

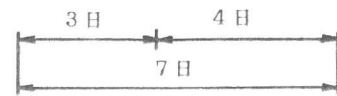


図-2 促進試験条件(1サイクル)

表-4 試験項目

試験項目	
シリーズ1	1 外観観察
	2 塗膜の色彩計測
	3 塗膜の電気抵抗
	4 埋設鉄筋の自然電極電位
	5 動電位分極曲線 (不動電位のグレイド)
	6 定電位ステップ法
	7 コンクリート中の塩分含有量
	8 鉄筋の発錆面積率
シリーズ2	1 外観観察
	2 埋設鉄筋の自然電極電位
	3 動電位分極曲線 (不動電位のグレイド)
	4 コンクリート中の塩分含有量
	5 鉄筋の発錆面積率

の電気抵抗として取り扱った。

(3) 内部鉄筋の電気化学的測定

測定項目は自然電極電位、動電位分極曲線、定電位ステップ法の3種類である。測定はいずれも供試体を海水に浸漬した状態で3電極方式により実施した。参照電極として銀-塩化銀電極を、対極としてステンレス鋼板を使用した。動電位分極曲線の測定結果の一例を図-3に示す。自然電極電位をスタートとして、+1000mVと-1000mVの間を掃引速度40mV/minで掃引した。この分極曲線より鉄筋の不動態のグレイド³⁾を判定した。

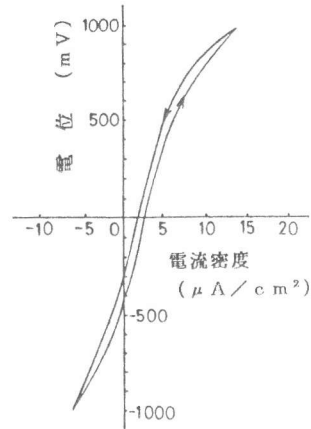


図-3 動電位分極曲線

定電位ステップ法の測定結果の一例を図-4に示す。鉄筋の電位を-1000mVに保持した時の電流の経時変化を計測した。図よりわかるとおり、測定開始後十分に時間が経てば、電流値は一定値に収束し、この時の電流量は鉄筋への酸素の供給量に支配される。⁴⁾すなわち、鉄筋への酸素の供給量が多くなる程電流量が大きくなる。本実験では、測定開始後10時間における電流値を読み取った。以後、この電流値を電流密度に換算したものを定電位電流密度と称する。

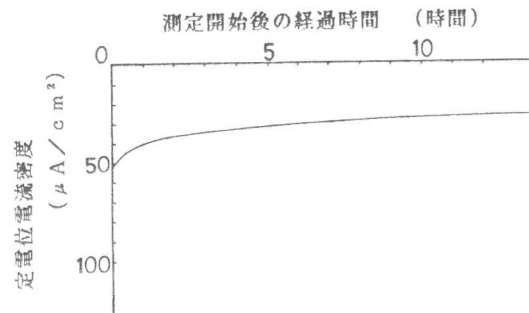


図-4 定電位ステップ法

(4) 鉄筋の観察 (発錆面積率の算定)

(1)~(3)の試験終了後、コンクリートを破碎して内部鉄筋を取り出した。その状況を観察し、発錆面積率(発錆面積/全表面積)を求めた。

(5) コンクリートの塩分含有量

コンクリートの破碎に際して所定のかぶり位置からコンクリート塊を塩分定量用試料として採取した。これを微粉砕したものを用いて、JCI規準に準拠して可溶性塩分含有量を求めた。

3. 実験結果

3.1 外観性状および色彩測定

塗装システムBの塗膜の耐久性が極めて悪かった。暴露試験の場合、暴露開始後2か月で大きなひびわれが生じ、ほどなくすべて剥落した。その他の塗膜は一部のものにその色が白色から黄色へと変色したのが見られたが、浮き、剥離、はがれといった塗膜の劣化は認められなかった。なお、その変色は暴露時に海水噴霧と直射日光に最も曝されている供試体上面が顕著であった。

促進試験の場合も塗装システムBの塗膜の耐久性が悪く、試験開始後数サイクルで大きなひびわれが生じ、その後、試験期間中にすべての塗膜が剥落した。その他の塗膜には大きな劣化は認められなかったが、一部には暴露試験の場合と同様に変色するものがあった。表-5に塗膜表面の色彩測定結果を示す。なお塗膜Bの場合は塗膜剥落後の測定結果である。

表-5 色彩測定結果

供試体 番号	上面*1)			側面*1)			底面*1)		
	Y	x*2	y*2	Y	x	y	Y	x	y
SE-A-1	31.25	0.36	0.37	37.76	0.32	0.34	40.50	0.31	0.32
SE-B-1	22.77	0.32	0.33	31.94	0.34	0.35	30.52	0.32	0.32
SE-C-1	28.80	0.40	0.39	34.60	0.34	0.35	34.94	0.35	0.35
SE-D-1	31.62	0.39	0.38	37.20	0.35	0.36	39.95	0.34	0.34
SE-E-1	46.62	0.31	0.33	39.89	0.34	0.36	42.99	0.33	0.34
SE-F-1	34.09	0.40	0.39	39.42	0.36	0.37	48.88	0.32	0.33
SE-O-1	20.97	0.33	0.35	20.13	0.33	0.36	18.58	0.35	0.36

*1: 上面、側面、底面=暴露時の状態を示す
*2: $x = X/(X+Y+Z)$, $y = Y/(X+Y+Z)$, X, Y, Z=色の三刺激値

表-6 試験結果一覧

供試体 番号	電位 (mV)	電気抵抗 (kΩ)	不動態の グレイド	定電位電流密度 (μA/cm ²)	発錆面積率 (%)	塩分含有量 (%*)			
						30mm	50mm	70mm	
シリーズ1	SE-A-1	-184	0.41	4	2.8	0.0	0.003	0.005	0.005
	-2	-50	1.23	5	0.7	0.0	0.005	0.003	0.003
	SE-B-1	-466	0.04	2	10.8	0.1	0.009	0.003	0.005
	-2	-494	0.04	2	10.8	2.4	0.009	0.003	0.005
	SE-C-1	-547	0.76	4	0.2	0.0	0.005	0.003	0.005
	-2	-450	1.63	4	1.2	0.0	0.006	0.003	0.005
	SE-D-1	-258	1.55	5	3.4	0.2	0.005	0.005	0.005
	-2	-265	1.41	4	0.1	0.0	0.005	0.005	0.005
	SE-E-1	-463	0.10	3	0.4	0.0	0.005	0.005	0.005
	-2	-466	0.14	4	2.7	0.0	0.005	0.005	0.005
	SE-F-1	-493	0.22	5	0.1	0.0	0.005	0.003	0.005
	-2	-330	7.15	5	0.1	0.0	0.005	0.005	0.005
	SE-O-1	-487	0.05	3	4.3	1.9	0.013	0.005	0.006
	-2	-411	0.04	2	10.8	3.6	0.017	0.006	0.005
シリーズ2	A-A-1	-125		5		0.0	0.005		
	-2	-119		4		0.1	0.008		
	A-B-1	-563		3		0.0	0.020		
	-2	-576		2		0.0	0.016		
	A-C-1	-294		4		0.0	0.005		
	-2	-417		4		0.1	0.008		
	A-D-1	-89		5		0.0	0.005		
	-2	-244		5		0.0	0.006		
	A-E-1	-236		5		0.0	0.005		
	-2	-265		5		0.0	0.005		
	A-F-1	-514		5		0.3	0.006		
	-2	-330		4		0.0	0.005		
	A-037-1	-42		4		0.5	0.019		
	-2	-245		2		0.0	0.053		
A-050-1	-301		2		1.9	0.131			
-2	-304		2		1.0	0.126			
					4.1	0.276			

* : NaCl v.s. コンクリート (in weight)

3. 2 塗膜の電気抵抗

表-6に測定結果を示す。無塗装のコンクリートでは約50Ωであるが、塗膜を有すると100Ω～数1000Ωになる。また、塗膜の種類によりその抵抗値にはかなりの差がある。

3. 3 電気化学的測定

電気化学的測定結果を同じく表-6に示す。自然電極電位は、シリーズ1よりシリーズ2の方がバラツキが大きく出ているものの、両シリーズともに塗膜の種類の違いによる影響が若干認められる。塗装システムAとDの供試体の電位は他のものに比べて貴となる傾向がある。不動態のグレイドは両シリーズともに塗装の有無の影響が明確に認められる。塗膜を有する場合はいずれもグレイドが4ないし5となり、比較的良好な状態の不動態が存在することが推察されるが、塗膜を有しない場合のグレイドは2程度であり、不動態はかなり破壊されていることが推察される。定電位電流密度も塗膜の有無の影響が顕著である。これより、塗膜を有することにより酸素の侵入がかなり抑制されていることがわかる。なお、すべての塗膜が剥落した塗装システムBは、いずれの測定値も無塗装供試体とほぼ同等の結果を示した。

3. 4 鉄筋の発錆面積率

鉄筋の発錆面積率を表-6に示す。両シリーズともに発錆量自体は軽微なものであった。特に、塗膜を有する場合は鉄筋の発錆はほとんど見られなかった。一方、無塗装および塗装システムBの場合、わずかに点錆が認められたものの発錆面積率で数%のオーダーであった。

3. 5 コンクリート中の塩分含有量

表-6に塩分含有量の測定結果を示す。かぶり厚50mmと70mmにおいては塗膜の有無の影響が認められないが、30mmの場合は無塗装のコンクリートは塗膜を有する場合に比べて約2倍の塩分含有量を示した。また、無塗装供試体でシリーズ1とシリーズ2を比較してみると、シリーズ2の方が幾分塩分含有量は大きかった。また水セメント比の違い(37%と50%)の影響は大きく、50%の方が約2倍の塩分含有量を示した。

4. 考察

4. 1 コンクリート表面被覆の塩害防止効果

今回の実験より、塗膜Bを除いて、塗膜が存在することによりコンクリート中への塩分の侵入および酸素の拡散が抑制され、内部鉄筋の腐食も抑制されていることが確認された。これより、塗膜Bを除いて、コンクリート表面被覆は塩害防止に寄与していると言える。

4. 2 塗膜表面の色彩測定の有効性

図-5に色彩測定より得られた色度図の一例を示す。これは黄変が認められた塗膜Aのものである。これより、黄変した塗膜と黄変していない塗膜とでその領域が明確に分けられることがわかる。これより、今回実施した色彩測定は、塗膜の変色を定量化する上で有効であるものと考えられる。

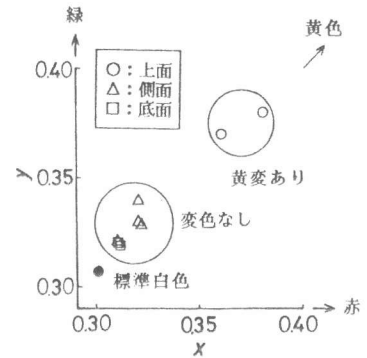


図-5 色度図 (塗膜A)

4. 3 内部鉄筋の電気化学的測定の有効性

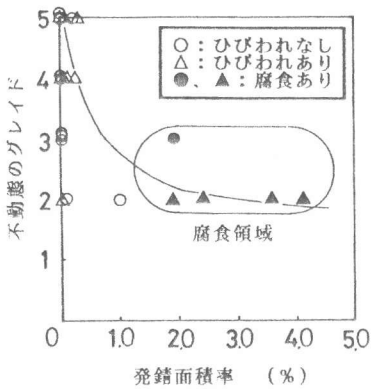


図-6 不動態のグレードと発錆面積率の関係

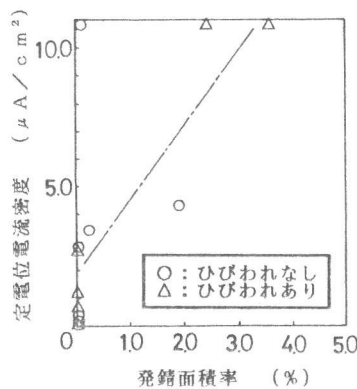


図-7 定電位電流密度と発錆面積率の関係

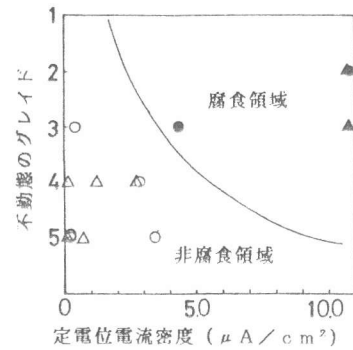


図-8 内部の鉄筋の腐食判定図

図-6に不動態のグレードと発錆面積率の関係を、図-7に定電位電流密度と発錆面積率の関係を示す。不動態のグレードの場合、発錆の生じている鉄筋のグレードは2~3と比較的低くなる傾向が見られた。一方、定電位電流密度の場合、電流密度が大きくなるほど発錆面積も増加する傾向が見られた。これらの結果をもとに、コンクリート内部鉄筋の腐食状況を推定する方法として、図-8に示す図を考案してみた。鉄筋の不動態の状態と鉄筋への酸素の供給量は鉄筋腐食を支配する大きな要因である。したがって、本図中に腐食領域と非腐食領域が概ね設定できるものと考えた。同図中に本実験における測定結果をプロットしたところ、図-8のようになった。これについては、今後さらにデータを積み重ね、より正確なものとしていく予定である。

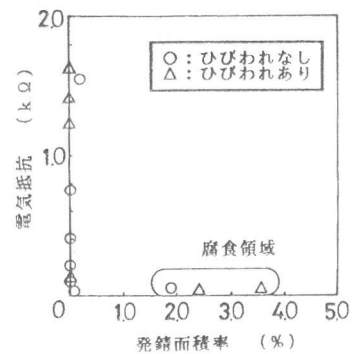


図-9 塗膜の電気抵抗と発錆面積率の関係

4. 4 鉄筋腐食に及ぼすその他の影響要因

図-9に塗膜の電気抵抗と発錆面積率の関係を示す。腐食の生じた鉄筋はいずれも塗膜の抵抗が小さい(塗膜を有しない)供試体に存在した。また、図-10にコンクリートの塩分含有量と発錆面積率の関係を示すが、塩分量の増加に伴い発錆面積率も増加する傾向が認められた。これよりこの両者は内部鉄筋の腐食に関する影響要因の一つであると考えられる。

4. 5 塗装システム(塗膜)の評価方法

一連の実験より、塗膜を評価するにあたっては使用環境下での塗膜自身の耐久性(耐候性)、ならびに耐塩害性の双方から評価することが必要であることがわかった。そこで、著者らは図-11に示すような図を考案してみた。図中の耐久性指標というのは、塗膜の耐変色性等を総合的に評価する指標であり、耐塩害性というのは、遮塩性、酸素不透過性、不透水性、等を総合的に評価する指標である。本図を4つの領域に区分し、塗装システムの評価を行うことを考えた。現時点では両指標を定義することは難しいが、今後合理的な指標を設定できればと考えている。

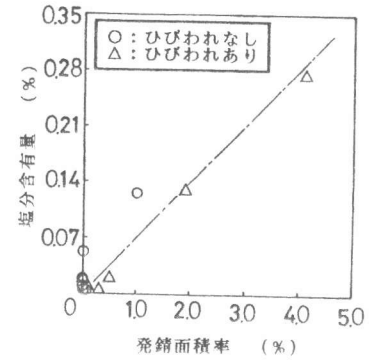


図-10 塩分含有量と発錆面積率の関係

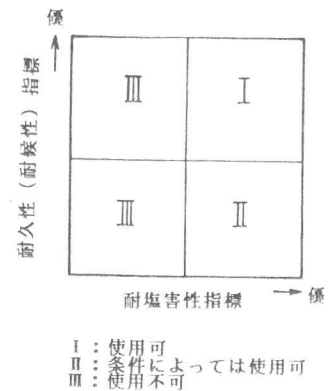


図-11 塗装システムの評価図(概念図)

5. 結論

一連の実験より得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 今回試験を実施した塗装システムは、一部に例外はあったものの、全体的に見てその耐久性もよく、かつ塩害防止効果が認められた。
- (2) 内部鉄筋の電気化学的測定は、鉄筋の腐食状況の推定に有効であり、また、コンクリートの表面塗装の効果を間接的に評価する手法としても有効である。
- (3) 塗膜表面の変色を定量化する上で、色彩測定は有効である。
- (4) コンクリート中の塩分含有量ならびに塗膜の電気抵抗は、内部鉄筋の腐食に影響を及ぼす要因の一つであると考えられる。
- (5) 塗装システムを適切に評価するためには、耐久性(耐候性)および耐塩害性の双方を総合的に評価することが必要である。

[参考文献]

- 1) 宮川豊章、片脇清：コンクリート中鋼材の塩化物腐食調査及び試験方法、コンクリート工学 Vol.19、No.3、1981.3
- 2) 池田光男：色彩工学の基礎、朝倉書店
- 3) 大即信明：コンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究、港湾技術研究所報告、第24巻、第3号、1985.9
- 4) 福手勤、浜田秀則：水中不分離性コンクリート中に埋設された鉄筋の腐食について、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、1990.8