

報告 海上大気中に 30 年間暴露されたコンクリートにおける表面被覆材の塩害防止効果

山路 徹^{*1}・富山 潤^{*2}・金城 信之^{*3}

要旨：5 種類の表面被覆を行ったコンクリート試験体を海洋環境（海上大気中）に 30 年間暴露した後、被覆材の性能およびコンクリートの劣化状況に関する調査を行った。その結果、被覆材の表面（上塗り材）では劣化の程度にはばらつきがあったが、各種被覆材は 30 年にわたりコンクリート中への塩化物イオンの侵入を防いでおり、高い防食効果を確保していたことが確認された。また、塗膜自体の遮塩性についても、30 年後において高い性能を保持していた。

キーワード：海洋環境、塩害、表面被覆、遮塩性、ひび割れ追従性

1. はじめに

海洋環境下に位置するコンクリートの劣化は、主に塩害による鉄筋腐食が原因である。この鉄筋腐食を開始させる要因は、外部から侵入してくる塩化物イオンである。鉄筋の腐食開始を防ぐ、もしくは開始時期を遅らせるためには、塩化物イオンの侵入を防ぐことが重要である。

1980~1982 年に那覇港の臨港道路に施工された PC 橋である泊大橋および波の上大橋は、海上に位置し、常時波しぶきや潮風の影響を受ける厳しい塩害環境であるにもかかわらず、「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説¹⁾」が改訂される前であったため、かぶり厚が 3.5cm で施工されていた。この状態ではコンクリートが高品質であっても長期耐久性の確保は困難であるため、塩害対策としてコンクリートに表面被覆を実施することが決定された。しかし、当時表面被覆の選定基準などは明確ではなかったため、選定の際の基礎資料となるデータを収集することを目的として、コンクリート表面に 6 種類（現時点で残存しているのは 5 種類）の表面被覆を施した試験体の暴露試験が 1988 年に開始された。そして、この試験結果等を参考にして被覆材が選定され、実橋に対して表面被覆の施工が 1991~1994 年に実施された。

暴露試験において、暴露 15 年後に表面被覆材の塩害防止効果を評価するため、各種の調査が行われた²⁾。この調査において、15 年にわたり表面被覆材が外部からの塩分浸透を抑制していたことが確認された。しかし、塗膜自体の遮塩性の経時変化については検討されていなかった。本文では、暴露後 30 年が経過した試験体に対し、特に表面被覆材の遮塩性とその経時変化に着目し、検討を行った。

2. 試験概要

2.1 試験体²⁾

試験体形状を図-1 に、コンクリート配合を表-1 に示す。W/C は 37% である。これは、前述の波の上大橋のコンクリートと同じ値である。使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は台湾産川砂（密度 2.66g/cm³、吸水率 1.17%）、粗骨材は酒匂川産砕石（密度 2.76g/cm³、吸水率 1.06%）、水は水道水である。打設後 1 日で脱型し、材齢 3 日まで湿潤養生、材齢 28 日まで室内気中養生を行った。外寸は 15×15×80cm であり、試験体内部には鉄筋（φ13mm 丸鋼）がかぶり 20mm で 2 本ずつ埋設されている。

試験体は打設後 1 日で脱型し、材齢 3 日まで湿潤養生、材齢 28 日まで室内気中養生を行い、その後、コンクリート表面に被覆を行った（打設時期：1987 年 12 月下旬、被覆時期：1988 年 1 月下旬~2 月中旬）。被覆材一覧を表

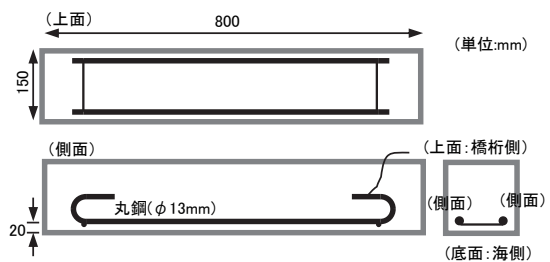


図-1 試験体

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
37	36.4	178	481	609	1080

*1 港湾空港技術研究所 材料研究グループ 工博（正会員）

*2 琉球大学 准教授 工博（正会員）

*3 内閣府沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所 港湾空港技術対策官

表-2 表面被覆材

試験体	工程	使用材料	標準 使用量 (kg/m ²)
1	下塗	シリル系浸透剤*	0.30
	中塗	アクリル系ポリマーセメント	2.00
	上塗	塩素系ポリオレフィン系樹脂	0.20
	〃	シリコンエマルジョン	1.00
	〃	シリコン樹脂	0.15
2	プライマー	エポキシ樹脂	0.10
	パテ	〃	0.60
	中塗	柔軟型厚膜エポキシ樹脂	0.35
	上塗	柔軟型ポリウレタン樹脂	0.12
3	下地調整	ポリマーセメント	1.50
	プライマー	エポキシ樹脂	0.30
	中塗	アクリルゴム	2.00
	上塗	アクリルウレタン樹脂	0.34
4	下地調整	ゴムラテックス混入セメントペースト	3.75
	下塗	エポキシ変性合成樹脂	0.12
	中塗	クロロプレンゴム	0.75
	上塗	クロロスルホン化ポリエチレン	0.50
5	プライマー	エポキシ樹脂*	0.10
	パテ	〃	0.30
	中塗	ガラスフレーク添加ビニールエステル樹脂	1.10
	上塗	アクリルウレタン樹脂	0.12
0	-	無塗装	-

*:含浸材

一2に示す。比較として無塗装の試験体も作製している。なお、試験体3および4については前述の実橋において採用されているものと同じ系統の材料である。塗装は湿度70%以下、温度15~25℃の室内で行った。表面塗装時の含水率に関しては、所定の含水率を設定して行ったとの記録があるが、詳細は不明である。

2.2 暴露環境

波の上大橋の桁下となるP4橋脚側面に架台を作成し、その上に試験体を設置した(設置時期:1988年3月下旬)。試験体暴露架台の概況を写真-1に示す。この架台は海面上約6~7mの高さに位置し、飛来塩分が付着する厳しい塩害環境にある。なお、架台の底面は開放されており、試験体底面にも海水飛沫が供給されている。一方で、上部に橋桁があり、被覆材を劣化させる一因である紫外線や雨が当たりにくいこと、被覆材の耐候性にとっては必ずしも厳しい環境ではない。

2.3 調査内容

(1) 外観観察

被覆材のはがれ、はく離、ひび割れ等の状況を目視により観察した。なお、はがれの全面積を求め、試験体表面積に対する割合(%)を算出した。

(2) 付着強さ

JSCE-K531に準拠し、試験体の上面で行った。

(3) ひび割れ追従性

図-2に示すように、JSCE-K532に準拠し、コンクリート試験体上面から120×40×10mmで切り出した試験



写真-1 試験体暴露架台

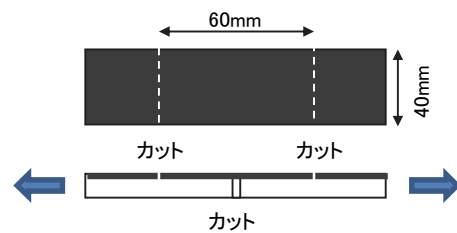


図-2 ひび割れ追従性試験

片に一部切込みを入れて長軸方向に引っ張り、その際の被覆材の伸びを測定した。

(4) コンクリート内への塩分の浸透状況

コンクリートの内への塩分の浸透状況を調べるため、塩分浸透深さ測定、全塩化物イオン量分析、EPMA測定を行った。

a) 塩分浸透深さ

試験体半分の軸方向に対して切断したコンクリート表面(約30×15cmの範囲(図-7参照))に0.1mol/Lの硝酸銀溶液を噴霧し、試験体の上面と底面からの塩分浸透深さを、5cm間隔で5点ずつ計10点測定した。

b) コンクリート中の全塩化物イオン量分布

試料をコンクリート底面から0-10、15-25、30-45mmの3箇所から採取し、全塩化物イオン量の測定をJCI-SC4に準拠して行った。

c) EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)

被覆材中に浸透したClを把握することを目的とし、試験体底面から被覆材を含む試験片を採取してEPMA分析を行った。測定対象範囲は5mm角、対象元素はCl,S,K,Caの4元素として行った。

(5) 表面被覆材の遮塩性

「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説¹⁾」に規定されている方法に準拠して、表面被覆材の遮塩性の評価を行った。塗装+コンクリート(厚さ1cm程度)の試験体を切り出し、図-3のように試料のコンクリート面を

3%NaCl 溶液側に、被覆材面を蒸留水側に配置した³⁾。設置 30 日後に、透過した塩化物イオン量を測定した。なお、初期値(図-11 参照)については、塗装のみで実施したものである。

(6) 鉄筋腐食状況

鉄筋をはつり出した後、透明フィルムに腐食部分を写し取り、腐食面積を測定した。

3. 調査結果

3.1 外観観察

試験体外観を写真-2 に、外観観察結果を表-3 に、はがれ(%:面積比)の経時変化を図-4 に示す。試験体 1 は全面的に白亜化が進行していた。試験体 2 および 3 は若干のはがれが見られた程度であった(15 年時より若干進展)。試験体 4 は端部に若干のはがれが見られた。試験体 5 では剥がれが著しく進展していた。なお、試験体 0 (無塗装)については、腐食ひび割れが発生していた。

3.2 付着強さ

図-5 に暴露期間と付着強さの関係を示す。なお、図

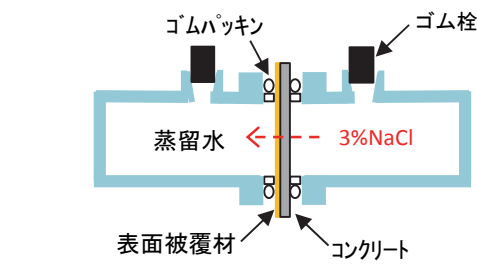


図-3 遮塩性試験¹⁾³⁾

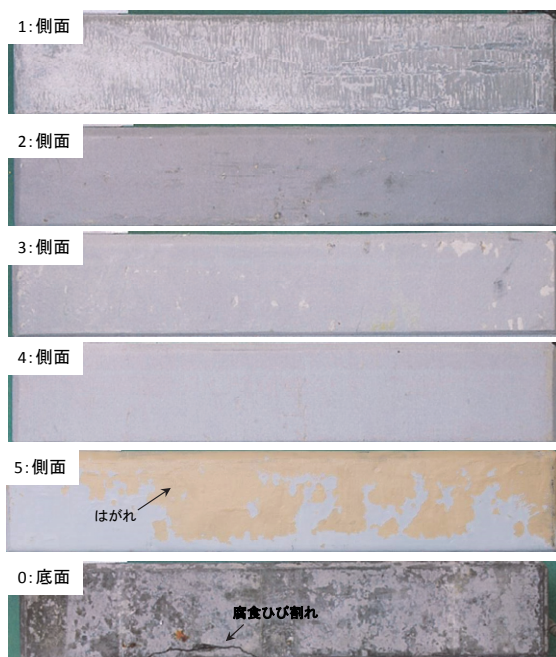


写真-2 試験体外観

中には主な破壊箇所を示す。それぞれ値の変動はあるが、初期値と同程度以上の値を保持していた。なお、上塗りの劣化状況と付着強さの相関は明確ではなかった。

3.3 ひび割れ追従性

図-6 にひび割れ追従性試験を行った際の破断時の伸びの値を示す。試験体 3 は 30 年時においても高い伸び性能を有していた。一方、試験体 4 は時間とともに伸び性

表-3 外観観察結果

記号	状況		
	15年		30年
1	はがれ	全面で発生	上塗り全面にわたり白亜化が進行
	ひび割れ	側面にわずかに確認	
2	はがれ	小さな剥がれ	若干のはがれ
	浮き	側面にわずかに確認	
	ひび割れ	角で少し見られる。	
3	はがれ	上面:少, 側面:多	若干のはがれ
	浮き	側面にわずかに確認	
	ひび割れ	全面に小さなひび割れ	
4	はがれ	ほとんど無し	若干のはがれ
	浮き	特に無し	
	ひび割れ	特に無し	
5	はがれ	多数の小さな剥がれ	上塗りは剥離が激しく進行
	浮き	角で少し見られる。	
	ひび割れ	特に無し	

(試験体 0: 腐食ひび割れ発生)

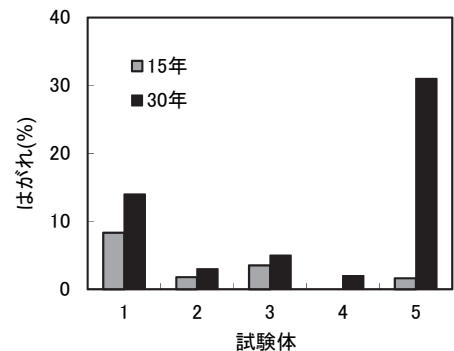


図-4 はがれ(面積比)の経時変化

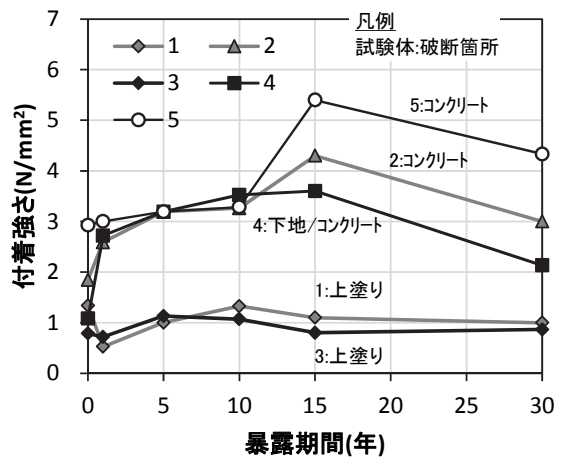


図-5 暴露期間と付着強さの関係

能が低下した。

3.4 コンクリート中への塩分浸透状況

(1) 塩化物イオン浸透深さ

表-5 に各試験体の塩化物イオン浸透深さ、図-7 に試験体 0 の場合の塩化物イオン浸透深さを示す。試験体 0(無塗装)の場合、20-30mm 程度の範囲まで浸透が確認された。一方、表面被覆有(試験体 1~5)の場合は浸透が

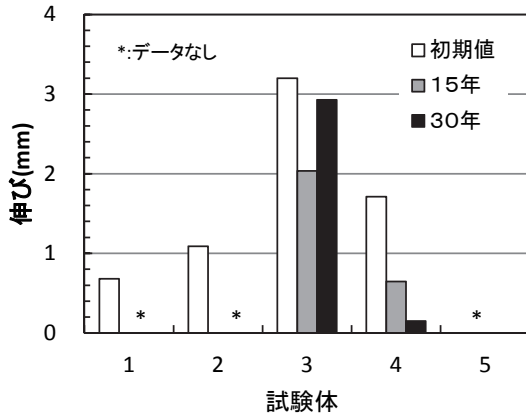


図-6 ひび割れ追従性試験結果

表-5 塩分浸透深さ

記号	測定位置	塩分浸透深さ(mm)					平均
		点1	点2	点3	点4	点5	
1	上面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	底面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
2	上面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	底面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	上面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	底面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	上面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	底面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	上面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	底面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	上面	19.9	20.0	21.9	22.0	28.4	22.4
	底面	27.7	28.4	34.4	24.6	27.4	28.5

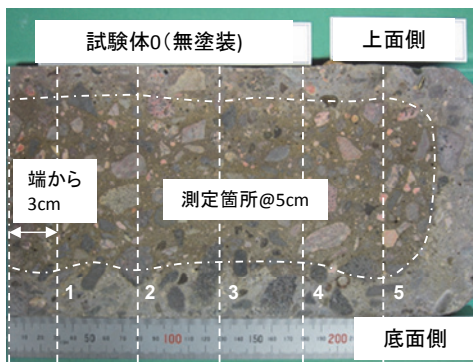


図-7 試験体 0 における塩化物イオン浸透深さ (点線：浸透深さ)

見られなかった。表面被覆材は局所的ではなく、広範囲にわたり、塩分の浸透を抑制していたことが分かる。また、今回程度の上塗り材の劣化は、塩化物イオンの侵入には大きな影響を及ぼしていなかったと言える。

(2) コンクリート中の塩化物イオン濃度分布

図-8 に全塩化物イオン量分布を示す。試験体 0(無塗装)の場合、鉄筋位置 (20mm) において多量の塩化物イオンが侵入しており、鉄筋が腐食する可能性の高い環境となっている。なお、腐食環境の厳しさを表す表面塩化物イオン濃度 C_0 および見かけの拡散係数 D_{ap} については、図-8 の分布を Fick の拡散方程式の解で近似することにより、それぞれ 11.2kg/m^3 、 $0.15\text{cm}^2/\text{年}$ と算出された。

一方、表面被覆有の場合は、30 年が経過してもコンクリート中に塩化物イオンが侵入しておらず、被覆材により浸透が抑制されていることが分かる。今回程度の塩害

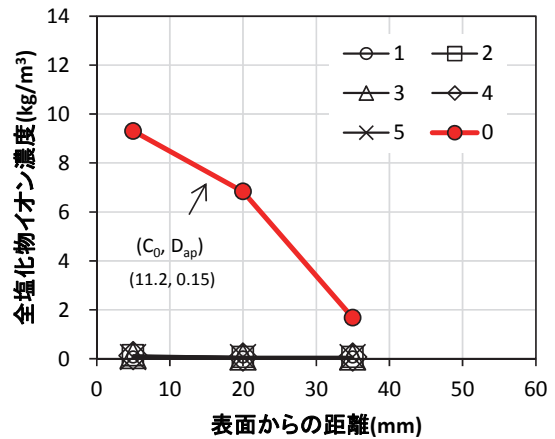


図-8 全塩化物イオン濃度分布

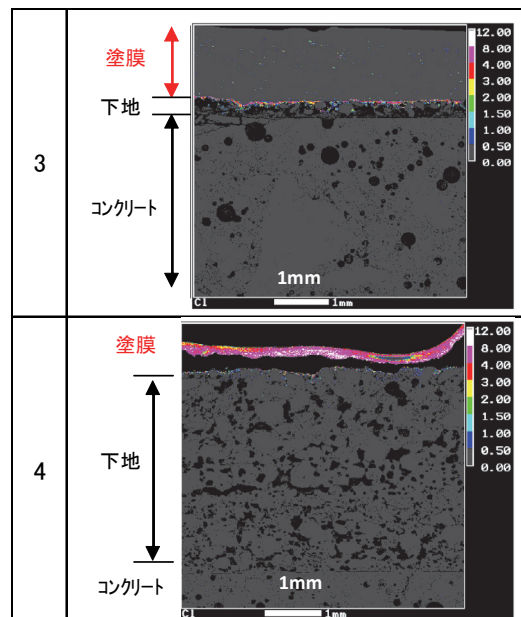


図-9 塩素 Cl におけるマッピング

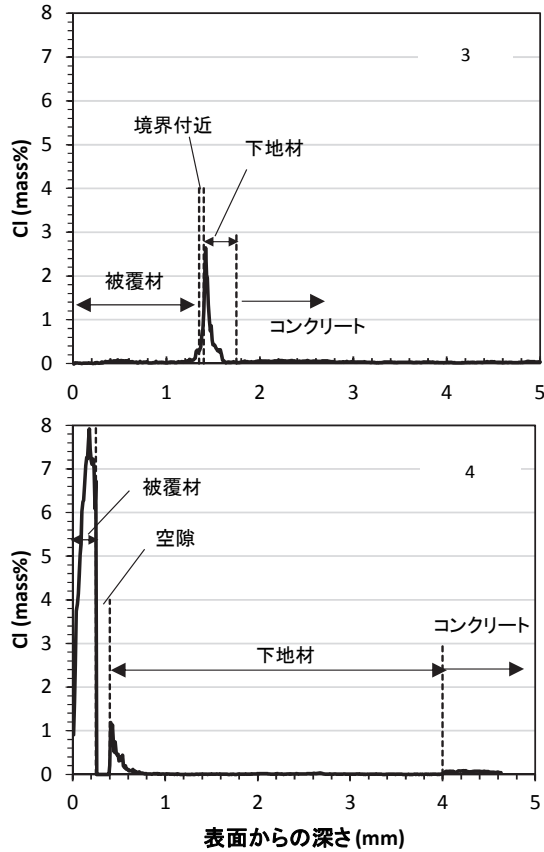


図-10 塗膜内の Cl 濃度分布

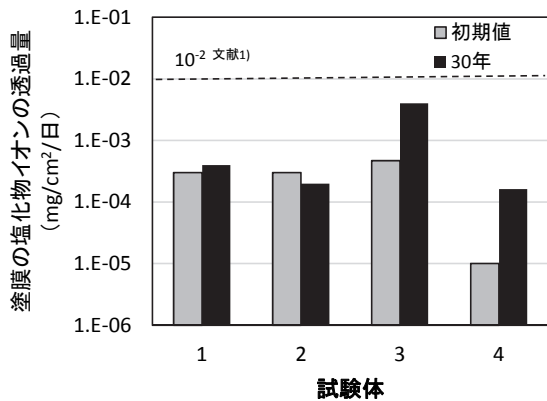


図-11 遮塩性試験結果

環境 ($C_0=11.2\text{kg/m}^3$) においては、30年にわたり、塩分浸透が抑制されていたと言える。

(3) 被覆材中の Cl 濃度分布 (EPMA)

塩素 Cl におけるマッピングを図-9, Cl の測定値をグラフ化したものを図-10 に示す。

試験体 3 は、被覆材中の Cl は確認されなかった。下地材のごく表層部 (0.1mm 程度) に Cl が見られるが、被覆材中に Cl が存在していないことから、隣接するプライマーの成分中に含まれていたものと推測される。試験体 4 は、被覆材中に Cl が多量に確認された。これは元々素材

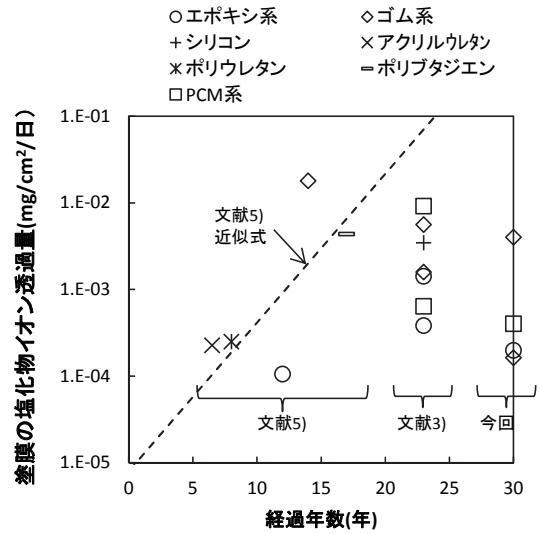


図-12 遮塩性の経時変化

表-6 鉄筋腐食面積率 (単位: %)

	1	2	3	4	5	0(無塗装)
15年	0	0	0	0	0	14.9
30年	0	0	0	0	0	腐食ひび割れ発生*

*腐食面積率は未測定

中に含まれていたものである。また、試験体 3 同様、下地材のごく表層部 (0.2mm 程度) に Cl が見られる。被覆材を浸透した Cl が検出された可能性もあるが、ごく狭い範囲にしか存在していないことから、試験体 3 同様、隣接する下塗りの成分中に含まれていた可能性が高いと推測される。

なお、文献 4) で、海岸部の高架橋に適用され 28 年間経過した表面被覆材に対し EPMA 分析を実施しているが、その場合においても塗膜内への Cl の浸透が確認されていない。

3.5 表面被覆材の遮塩性

図-11 に遮塩性試験結果を示す。いずれも、「道路橋の塩害対策指針 (案) ¹⁾」の A および B 種における品質規格値 ($10^{-2}\text{mg/cm}^2/\text{日}$) を満足していた。30 年経過しても高い遮塩性を確保していたことが分かる。

図-12 に遮塩性の経時変化を示す。飛沫帯環境に位置する栈橋上部工等に適用された被覆材について調査した文献 5) では、時間とともに遮塩性が低下する傾向を示している。一方、今回と同様の海上に位置する道路橋において調査した文献 3) および今回の結果は、文献 5) よりも長期経過しているが、文献 5) のデータの近似式を下回る傾向が見られた。今回、時間の経過に伴う遮塩性の低下傾向が明確でなかった理由としては、紫外線等により

上塗りは多少劣化しても、その下の中塗りについては劣化が進行していなかったこと等が考えられる。

今回程度の遮塩性を有し、今回程度の海上大気中環境 ($C_0=11.2\text{kg/m}^3$) であれば、被覆材は 30 年程度の長期にわたり塩分浸透を抑制し続けていた。一方、多量の海水が供給される干満帯、飛沫帯環境においては、施工条件および暴露環境のいずれも今回条件よりも厳しいため、その場合の長期経過後において、どの程度の遮塩性を有するのかについては別途検証する必要がある。

3.6 鉄筋腐食状況

表-6 に鉄筋腐食面積率を示す。結果は全て鉄筋 2 本の平均値である。試験体 1~5 は塩化物イオンが侵入していないため全く腐食していなかった。一方、試験体 0 (無塗装) については、15 年の時点で鉄筋位置に 2.0kg/m^3 程度の塩化物イオンが侵入していたため腐食が発生していた。30 年の時点ではさらに腐食が進行し、腐食ひび割れが発生していた。

4. まとめ

5 種類の表面被覆を行ったコンクリート試験体を海洋環境 (海上大気中) に 30 年間暴露した後、被覆材の性能およびコンクリートの劣化状況に関する調査を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) 被覆材の劣化状況はその仕様によって異なり、ほとんど劣化が見られないものと、保護塗膜である上塗り部が劣化しているものがあった。

(2) 被覆材はいずれも 30 年にわたりコンクリート中への塩化物イオンの侵入を防いでおり、高い防食効果を確保していたことが確認された。また、塗膜自体の遮塩性は、30 年後においても高い性能を保持していた。

以上のことから、塩化物イオンが侵入していない初期

段階において、コンクリートに適切な表面被覆を行うことは塩害対策として非常に有効であり、今回のような条件 (被覆材仕様、施工条件、暴露環境等) においては、30 年相当の長期においてもその効果が維持されることが確認された。

謝辞

本研究は、内閣府沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所、琉球大学および港湾空港技術研究所が連携して開始し、継続実施した暴露試験の結果を取りまとめたものである。関係各位に厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説，1984.
- 2) 山路徹，小牟禮建一，濱田秀則：海洋環境に 15 年間暴露されたコンクリートにおける表面被覆の塩害防止効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.833-838，2003.
- 3) 佐々木巖，西崎到，守屋進：塩害環境におけるコンクリート表面被覆材料の長期耐久性，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第 10 巻，pp.57-64，2010.
- 4) 加藤真一，東田典雅，斉藤正司，小川正幸，野上克宏：海岸高架橋に適用したコンクリート塗装等の 28 年目の評価，土木学会第 71 回学術講演会概要集，V-393，pp.785-786，2016.
- 5) 鬼束俊一，瀬下雄一，中川貴之，堤知明，岩波光保：塩害劣化した鉄筋コンクリートに対する補修効果の定量評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.832-843，2006.12