

論文 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

山路 徹*1・小牟禮建一*2・濱田 秀則*3

要旨：塩害対策を目的として、表面被覆を行ったコンクリート試験体を海洋環境に 15 年間暴露させた後の被覆材の性能（付着性、ひび割れ追従性、遮塩性）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、被覆材表面に一部劣化は見られたものの、塩化物イオンはほとんど浸透しておらず、鉄筋は腐食していなかった。また、被覆材の付着性に関する各種試験を行い、付着性の評価方法についても考察を行った。

キーワード：海洋環境、表面被覆、塩害、付着性、遮塩性

1. はじめに

昭和 55~58 年に那覇港の臨港道路に施工された PC 橋である A 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」が改定される前であったため、かぶりが 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。しかしながら、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、A 橋と同一環境において、5 種類の表面被覆を施したコンクリート試験体の暴露試験が開始された。本論文ではこれらの表面被覆材の塩害防止効果を評価するため、暴露 15 年後の試験体に対して、外観、付着性、ひび割れ追従性、遮塩性に関する各種試験を行った。また、付着性に関しては、3 種類の試験結果の比較を行い、付着性の評価方法についての考察も行った。

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%）、練混ぜ水は水道水である。なお、使用した骨材はアルカリ骨材反応性を有していない。また、試験体内部には鉄筋（φ13mm）がかぶり 20mm で 2 本ずつ埋設されている。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い、その後、コンクリート表面に被覆を行った。被覆材一覧を表 2 に示す。なお、比較として無塗装の試験体も作製している。塗装は湿度 70% 以下、温度 15~25℃ の状態で行った。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ていたようであるが、詳細は不明である。

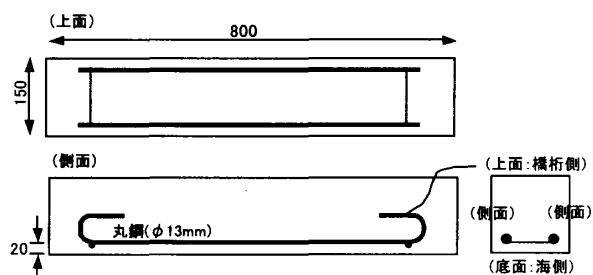


図-1 試験体

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

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A橋のものと同一とした。

2. 実験概要

2.1 試験体

*1 独立行政法人港湾空港技術研究所 材料研究室 研究官 工修（正会員）

*2 独立行政法人港湾空港技術研究所 材料研究室 研修生（正会員）

*3 独立行政法人港湾空港技術研究所 材料研究室長 工博（正会員）

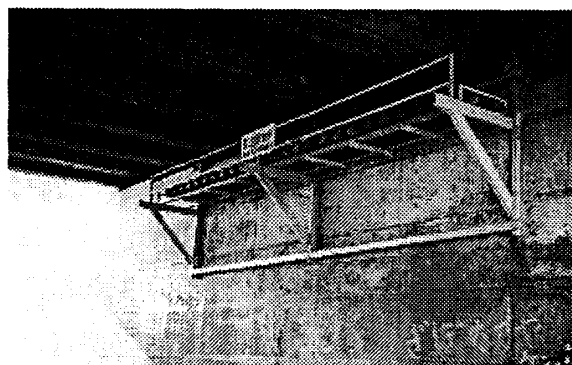
表－２ 被覆材仕様一覧

記号	工程	使用材料	標準 使用量 (kg/m ²)
1	下塗	シリコン系浸透剤*	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	0.50
4	下地調整	コ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

2.2 暴露環境

A橋の橋脚側面に架台を作成し、その上に試験体を設置した。その状況を写真—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が、日陰であるため直射日光が当たらず、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。



写真—1 暴露状況

2.3 試験項目

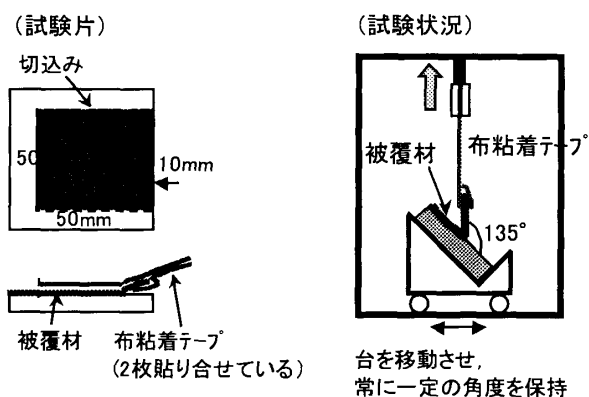
(1) 外観観察

被覆材のはがれ、はく離、ひび割れの状況を目視により観察した。

(2) 付着性に関する試験

被覆材の付着性を調べるため、付着強さ試験、

Xカット試験、見かけのはく離強さ試験¹⁾を行った。付着強さ試験はJSCE-K 531, Xカット試験はJIS K 5400に準拠し、試験体の上面で行った。付着強さ試験は引張用治具を表面に接着させ、塗膜面に対して垂直に引っ張るものである。Xカット試験はカッターナイフで塗膜表面にX状の切傷を付け、そこにセロテープを貼り、はがした際のX部の状況により塗膜の付着性を評価するものである。なお、上塗り材にはがれ等の劣化が顕著な試験体1, 3, 5については、劣化の見られる箇所（劣化部）および劣化が見られない箇所（健全部）の2箇所を実施した。見かけのはく離強さ試験は、試験体側面から試験片を切り出して採取し、図—2に示すように被覆材端部(50×10mm)をはがし、被覆材表面(50×50mm)に切込みを入れた後、布粘着テープを被覆材表面とはがした面の両面に貼り、布粘着テープを一定の角度(135°)に保ちながら被覆材を一定速度で引きはがした際のはく離強さ（見かけのはく離強さ）およびはく離箇所を調べるものである。詳細については文献1)を参照されたい。



図—2 見かけのはく離強さ試験

(3) ひび割れ追従性試験

試験体3および4の上面から試験片を120×40×10mmで切り出し、試験片中央部に深さ8mmの切り込みを入れた後（図—3参照）、JSCE-K 532に準拠してひび割れ追従性試験を行った。

(4) 浸透性に関する試験

被覆材の浸透性を調べるため、全塩化物イオン量分析、中性化深さ、透水性試験、EPMA測定を行った。全塩化物イオン量分析は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、JCI-SC4に準拠して行った。中性化深さは試験体端部を切断し、その断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、平均深さを測定した。透水性試験は試験体側面の劣化の見られない箇所（健全部）から試験片を切り出して採取し、JIS K 5400に準拠して行った。なお、試験体3においては劣化の見られる箇所（劣化部）についても実施した。試験状況を図-4に示す。ロータ($\phi 75\text{mm}$)の開口部分を被覆材表面に接着し、ロータの先端に目盛りがついたメスピペットを取り付け、ロータとメスピペット内を水で満たし、この水の浸透状況を調べることで、塗膜の透水性を評価するものである。EPMAは試験体底面から4cm角の試験片を採取して行った。

(5) 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。

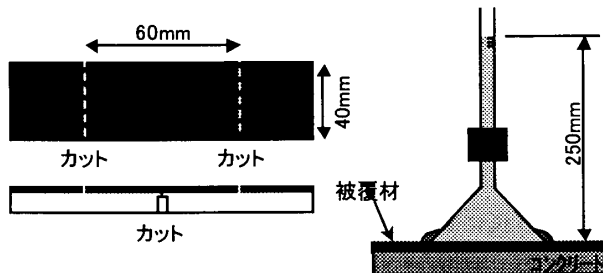


図-3 ひび割れ追従性試験

図-4 透水性試験

3. 実験結果

3.1 外観観察結果

外観観察結果を表-3に示す。1, 3, 5については小さなはがれが多数見られ、保護塗膜である上塗り層の劣化が進んでいるようであるが、2, 4では劣化が少なかった。なお、3および4は、同様の仕様の表面被覆を行った試験体の海洋暴露実験（期間は4.5年間）²⁾が行われてい

表-3 外観観察結果

項目	状況
1	はがれ 全面に見られる。特に上面で激しい。
浮き	側面にわずかに見られる程度。
ひび割れ	側面にわずかに見られる程度。
2	はがれ 小さな剥がれが多数見られる。
浮き	側面にわずかに見られる程度。
ひび割れ	角で少し見られる。
3	はがれ 上面は少ないが、側面には多い。
浮き	側面にわずかに見られる程度。
ひび割れ	全面に小さなひび割れが見られる。
4	はがれ ほとんど見られない。
浮き	特に無し。
ひび割れ	特に無し。
5	はがれ 小さな剥がれが多数見られる。
浮き	角で少し見られる。
ひび割れ	特に無し。

る。これによると、3と同様の仕様のものはやはり表面のはがれが見られており、被覆材相互の相性に問題があるとしている。4と同様の仕様のものは特に変状は見られていない。

3.2 付着性

(1) 付着強さ試験

図-5に材齢と付着強さの関係を示す。なお、図中には主な破壊箇所を示す。2, 4, 5には低下は見られなかった。また、5においては5N/mm²の比較的大きな値まで増加していた。この理由として、コンクリートのW/Cが37%と小さいために引張強度が大きいこと、引張用治具を接着する前の下地処理方法が以前と異なり、接着面の付着性が向上したこと等が考えられる。一方、外観において劣化の多かった1, 3は10年以降においてやや低下傾向にあった。

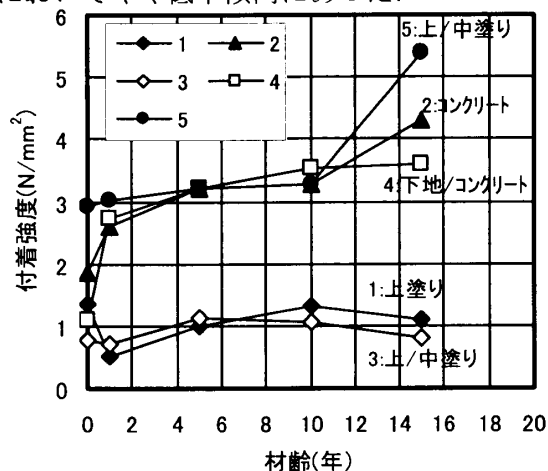


図-5 付着強さ試験結果

(2) Xカット試験

表－4にXカット試験結果を示す。いずれも3箇所での平均値であり、値が低いものほど多く塗膜がはがれたことを示している。付着強さの大きかった2, 4, 5について、上塗り層に劣化があまり見られなかった2と4はほとんどはがれなかったが、上塗り層においてははがれが目立っていた5は多くはがれた。一方、付着強さが比較的小さかった1, 3について、上塗り層全面においてははがれが見られた1は大部分がはがれたが、試験面である試験体上面においてははがれの少なかった3においては、ほとんどはがれなかった。以上のことから、Xカット試験は定量的な評価方法とは言えないものの、被覆材、特に上塗り層の劣化状況にある程度把握することが可能であると言える。

表－4 Xカット試験結果

	健全部	劣化部	外観	付着強さ (N/mm ²)
1	－	0	はがれ激しい	1.1
2	9	－	健全	4.3
3	10	10	はがれ少ない(上面)	0.8
4	10	－	健全	3.6
5	4	3	はがれ多数	5.4

－: 該当箇所無し

(3) 見かけのはく離強さ試験

表－5に見かけのはく離強さ試験結果を示す。3における主はく離面は上塗り層と中塗り層の界面であり、付着強さ試験における主破壊面と同様であった。また、4における主はく離面は中塗り層と下地調整材の界面であるが、付着強さ試験における主破壊面は下地調整材とコンクリート界面であり、異なる結果となった。これは垂直に作用する力に対する抵抗性とはがす力に対する抵抗性は異なることを意味していると考えられる。一方、1, 2, 5については、試験開始後すぐに中塗り層で折れ、同時に上塗り層も破断し、塗膜をほとんどはがすことができなかった。これは中塗り層が折れた際に生じた変形に対して上塗り層が追随できず、破断したものと考えられる。このような場合は評価が困難ではあるが、

上塗り層の脆化を捉えている可能性もある。

被覆材の付着性を評価する方法としては、はがす力に対する抵抗性の方が実際の状況を良く表していると考えられ、比較的柔軟性のある被覆材に関しては、見かけのはく離強さ試験を行うことで、被覆材のはがれに対する抵抗性の定量的な評価が可能となる。ただし、被覆材の破断強度や延性の影響も受けるため、多種類の材料の比較よりも、同じ材料の経年劣化の評価の方がより適していると考えられる。

表－5 見かけのはく離強さ試験結果

	はく離面積 (mm ²)	はく離部の 仕事量 (Nmm)	見かけの はく離強さ (N/mm)	主はく離面
1	87.5	165.5	2.03*	接着面/上塗り
2	49.5	166.5	3.36*	接着面/上塗り
3	450	1764	3.94	上塗り/中塗り
4	1688	2716	1.77	中塗り/下地
5	76.5	533.5	7.20*	接着面/上塗り

*: 試験開始直後に上塗り・中塗り層が破断した場合

(4) 付着性に関するまとめ

1, 5については、上塗り部は劣化し、付着性が低下していた。一方、2, 4については上塗り部についても健全な状態を保っていた。また、実際の劣化状況と付着強さの値を比較すると、特に5において相関が見られなかった。付着強度試験のみでは多様な被覆材の付着性を評価することは困難であることが指摘されており¹⁾、付着強度試験に加えて、被覆材、特に上塗り部のはがれに対する抵抗性を評価可能なXカット試験や、被覆材のはく離に対する抵抗性を評価可能な見かけのはく離強さ試験などを行うことによって、より正確な被覆材の付着性の評価が可能となると考える。

3.3 ひび割れ追従性

表－6にひび割れ追従性試験を行った際の伸びの値を示す。3については15年間暴露された現在においても高い伸び性能を有している。

表－6 ひび割れ追従性試験結果

	3	4
伸び(mm)	2.035	0.645

3.4 浸透性

(1) 塩化物イオン量

図-6に全塩化物イオン量分布を示す。被覆材有りのものに関してはコンクリート中に塩化物イオンが浸透しておらず、被覆材により浸透が抑制されていることが分かる。一方、無塗装の試験体については、鉄筋位置において 2.0kg/m^3 程度の塩化物イオンが浸透しており、鉄筋が腐食する可能性の高い結果となっている。

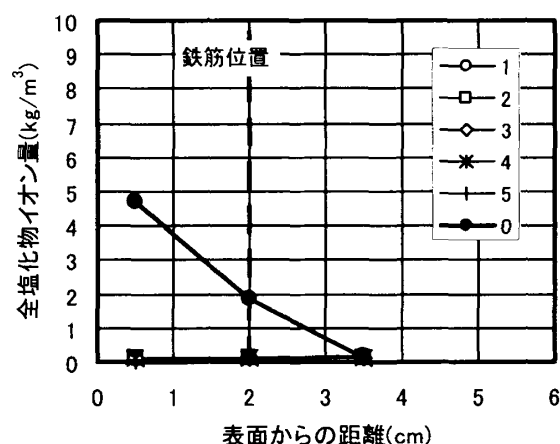


図-6 全塩化物イオン量

(2) 中性化深さ

表-7に中性化深さを示す。被覆材有りのものに関しては全て中性化深さが0であった。一方、無塗装の場合については、表層付近のみであるが中性化が認められた。

表-7 中性化深さ

	1	2	3	4	5	0
平均	0	0	0	0	0	1.5
最大	0	0	0	0	0	6.9

(単位: mm)

(3) 透水性

表-8に被覆材およびコンクリートに浸透した透水量を示す。いずれも健全部においては透水量は非常に少なく、遮水性を保持していることが分かる。また、3のみについて、劣化部においても透水量を測定しているが、無塗装の場合と同程度の多量の水が浸透していた。すなわち、3の劣化部では塩化物イオンの浸透あるいは中性化が起こっている可能性も考えられる。なお、3以外の劣化部については透水性試験を

行っていないため不明である。

表-8 透水量測定結果

	1	2	3	4	5	0
健全部	0.20	0.18	0.15	0.15	0.10	2.50
劣化部	-	-	>2.90	-	-	-

(単位: ml/24h)

(4) EPMA

図-7に塩素 Cl における EPMA 結果を示す。図-6と同様に、コンクリート中への塩分の浸透はほとんどないことが分かる。3については境界部にやや高濃度の箇所が見られるが、被覆材部分との濃度の連続性がないため、プライマーなど被覆材に含まれている Cl が検出されていると考える。4については中塗りのクロロプレンゴム等に含まれている Cl が検出されていると考える。

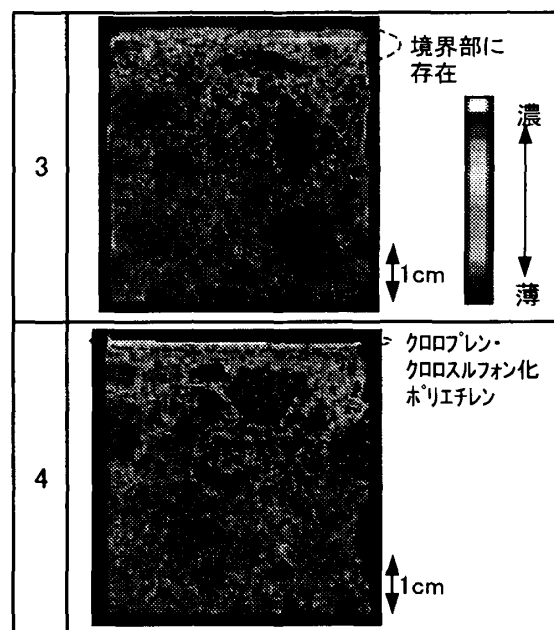


図-7 EPMA 結果 (塩素 Cl)

3.5 鉄筋腐食状況

表-9に鉄筋腐食面積率を示す。結果は全て2本の平均値である。被覆材有りの試験体に関しては塩化物イオンが浸透していないため全く腐食していない。一方、無塗装の試験体については、鉄筋位置に多量の塩化物イオンが浸透していたため腐食が発生していた。

表-9 鉄筋腐食面積率

	1	2	3	4	5	0
鉄筋腐食面積率(%)	0	0	0	0	0	14.9

3.6 総合評価

ここでは外観、付着性、遮塩性から各被覆材の性能の総合評価を試みた³⁾⁴⁾。表-10は今回の試験結果を元に被覆材の性能を耐久性（外観、付着性）と耐塩害性（遮塩性）の2つの観点から総合評価を行ったものである。耐塩害性という点では各被覆材ともに優れていた。一方、保護塗膜である上塗りの劣化が見られた1, 3, 5においては、現状では耐塩害性は確保しているものの、将来的には2や4に比べて早く塩化物イオンが浸透し、腐食が開始する可能性があり、被覆材の耐久性という点では劣るものと考えられる。

表-10 被覆材の総合評価

	耐久性 (外観, 付着性)	耐塩害性 (遮塩性)
1	△	◎
2	○	◎
3	△	○
4	◎	◎
5	△	◎

※◎:非常に優れる, ○:優れる,
△:やや劣る, ×:劣る, とした。

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に15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。また、これらの劣化状況の違いは付着強さ試験、Xカット試験、見かけのはく離強さ試験を組み合わせることで、より正確な評価が可能となる。
- (2)被覆材に激しい劣化の見られた場合を除いて、各種被覆材はコンクリート中への塩化物イオンの浸透を防いでおり、高い耐塩害性を確保していたことが確認された。しかしなが

ら、保護塗膜である上塗り層に劣化が生じている試験体もあり、その場合には近い将来塩化物イオンの侵入が開始する可能性もあると判断された。

- (3)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、15年相当の長期においてもその効果が十分に維持されていた。

謝辞

本研究の成果は沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所が実施した「コンクリート耐久性対策調査」の一環として行われた暴露試験の結果をまとめたものであり、関係者の方々の多大なるご尽力により得られたものです。また、土木学会「コンクリート構造物への表面被覆および表面改質技術の適用性研究小委員会」の皆様には様々なご助言等頂きました。また、ショーボンド建設(株)材料研究室、(財)日本塗料検査協会の皆様には実験の遂行の際にご協力いただきました。皆様に対して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 樺山好幸ほか：コンクリート構造物の塗装系防食材の性能評価手法の提案，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2巻，2002.10
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書（Ⅲ），1996.10
- 3) 濱田秀則ほか：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，港湾技研資料，No.706，1991.7
- 4) 成田一徳ほか：塩害により劣化した港湾施設の表面被覆工法による補修，コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム，1992.10