

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1362 November 2019

那覇港臨港道路橋における表面被覆材および
エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリートの長期暴露試験

山路 徹
金城 信之
富山 潤

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 本検討の目的.....	4
1.2 長期暴露試験の実施に至った経緯	5
2. 表面被覆材が適用されたコンクリート試験体での長期暴露試験（波の上橋）	6
2.1 はじめに	6
2.2 試験概要.....	6
2.3 調査結果	8
2.4 まとめ	11
3. 表面被覆材が適用されたPC桁での長期暴露試験（波の上橋）	12
3.1 はじめに	12
3.2 実構造物概要.....	12
3.3 表面被覆材およびその適用状況.....	16
3.4 調査内容.....	16
3.5 調査結果	18
3.6 まとめ	25
4. エポキシ樹脂塗装鉄筋が埋設されたコンクリート試験体の長期暴露試験（なうら橋）	26
4.1 はじめに	26
4.2 暴露試験概要.....	26
4.3 調査結果.....	27
4.4 まとめ.....	29
5. まとめ	30
5.1 表面被覆材による耐久性向上方策（主に既設構造物を想定）	30
5.2 エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用による耐久性向上方策（主に新設構造物を想定）	32
参考文献	32

Long-term exposure test of concrete using surface coating materials and epoxy resin-coated rebar in Naha Port road bridge

Toru YAMAJI*
Nubuyuki KINJOH**
Jun TOMIYAMA***

Synopsis

In this study, in order to investigate the prevention effect for chloride attack of concrete by surface coating material and epoxy-resin coated rebar on a port road bridge located in the marine atmosphere of Naha Port, three types of long-term exposure test were carried out: 1) the concrete specimens with surface coating materials, 2) PC girders with surface coating materials, and 3) the concrete specimens with embedded epoxy-resin coated rebar. After a long time (1) 30 years, 2) 26 years, and 3) 25 to 26 years), various tests were conducted to evaluate the prevention effect and durability of each method. The results obtained by this study are as follows.

(1) For a long period of 30 years for the concrete specimens under the girder and 26 years for the test construction section of the actual PC girder of Naminoue bridge, the various coating materials maintained high salt barrier properties. As a result, the surface coating materials prevented the penetration of chloride ions into the concrete. It was confirmed that applying a suitable surface coating to concrete at a stage where a large amount of chloride ions did not penetrate was extremely effective as a countermeasure against chloride attack. In addition, it was confirmed that the expected service life (defined as “the period during which repainting is necessary”) greatly exceeds the existing knowledge (generally 10-15 years).

(2) In the results of exposure tests with two types of concrete specimens near the abutment of Naura bridge, it was confirmed that the epoxy resin did not deteriorate in a highly alkaline environment in concrete for a long period of 25 to 26 years. Here, the corrosion due to chloride ions was unable to be evaluated because a large amount of chloride did not penetrate the steel surface in this case.

Key Words: Marine environment, concrete structures, chloride attack, surface coating, epoxy-resin coated rebar

* Head, Materials Group, Structural Division
** Naha ports and airport office, Okinawa General Bureau
*** Associate professor, University of the Ryukyus
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5013 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yamaji-t@p.mpat.go.jp

那覇港臨港道路橋における表面被覆材および エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリートの長期暴露試験

山路 徹*・金城 信之**・富山 潤***

要 旨

本研究では、厳しい塩害環境下に位置している那覇港の海上大気中に位置する臨港道路橋において、表面被覆材およびエポキシ樹脂鉄筋によるコンクリートの塩害抑制効果について検討するため、1) 表面被覆材を適用したコンクリート試験体の長期暴露試験、2) 表面被覆材を適用した実 PC 桁における長期暴露試験、3) エポキシ樹脂塗装鉄筋を埋設したコンクリート試験体による長期暴露試験、の 3 種類の長期暴露試験を実施した。所定の年数が経過後 (1) は 30 年、(2) は 26 年、(3) は 25～26 年)、各手法の防食効果および耐久性の評価を目的として、各種調査を行った。

本研究により得られた成果を以下に示す。

(1) 波の上橋桁下でのコンクリート試験体では 30 年、実 PC 桁の試験施工部では 26 年の長期にわたり、各種被覆材は高い遮塩性を保持していた。結果として、表面被覆材はコンクリート中への塩化物イオンの侵入を抑制していた。多量の塩化物イオンが侵入していない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、その期待耐用年数(「再塗装が必要となるまでの期間」と定義)は既往の知見(一般的に 10～15 年とされる)を大きく上回ることが確認された。

(2) なら橋橋台付近での 2 種類の試験体による長期暴露試験結果において、25～26 年の長期にわたりエポキシ樹脂が高アルカリ環境下で劣化しないことが確認された。なお、今回の鋼材表面には多量の塩分が浸透していなかったため、塩化物イオンに起因する腐食に対する評価はできない状態にある。

キーワード：海洋環境，コンクリート構造物，塩害，表面被覆，エポキシ樹脂塗装鉄筋

* 構造研究領域 材料研究グループ長

** 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

*** 琉球大学 准教授

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5013 Fax：046-844-0255 e-mail: yamaji-t@p.mpat.go.jp

1. はじめに

本文は、コンクリート構造物の耐久性を向上させる2つの工法に関して、沖縄で30年近くにわたり継続実施された長期暴露試験の調査結果をまとめたものである。本章では、これらの長期暴露試験の結果の取りまとめが現在においても必要な理由、実施目的についてまず述べる。そして、各長期暴露試験の実施に至った経緯について補足説明を加える。

1.1 本検討の目的

コンクリート構造物には補強材として鋼材が用いられる。一方、鋼材は水と酸素が存在すると腐食する。ただし、コンクリート中は高アルカリ環境であるため、鋼材の周囲には不動態被膜が形成され、鋼材の腐食が抑制される。しかし、海水中の塩化物イオンが鋼材表面に浸透すると不動態被膜が破壊され、腐食が開始する。コンクリートは多孔質であるため、塩化物イオンはコンクリートを浸透する。この塩化物イオンの浸透速度（一般に見かけの拡散係数と呼ばれる）はコンクリート品質を向上させることで抑制でき、その結果として腐食が開始する時期を遅くすることが可能である^{例え1)}。一方で、コンクリートの品質が高品質であったとしても、かぶりが小さいと腐食は抑制できない^{例え2)}。このような場合、何らかの対策が必要となる⁴⁾。

コンクリート構造物の耐久性向上方策の代表的なものとして、新設構造物の場合はエポキシ樹脂塗装鉄筋、既設構造物の場合は表面被覆がある⁴⁾。前者のエポキシ樹脂塗装鉄筋は、鉄筋の表面にエポキシ樹脂（厚さ200 μ m程度）が塗装されたものであり、高い耐食性を有する¹⁾。栈橋上部工、スリットケーソンなどで適用が増えつつある。後者の表面被覆は、コンクリート表面に塗装を行うものである。橋梁、栈橋上部工の補修時（断面修復工法の適用時）などに広く適用されている。コンクリート構造物においては、1980年代頃から、塩害劣化に対する認識が高まり、特に対象環境が厳しい場合、極力早い段階から、対策が行われるようになった。

ライフサイクルコスト(LCC)の試算の際においては、材料・工法の耐用年数の設定が重要である。栈橋上部工の場合のLCC試算例を図-1.1に示す⁵⁾。この場合、表面被覆の期待耐用年数（塗替えまでの期間）は10年と設定されている。また、エポキシ樹脂塗装鉄筋については、エポキシ樹脂が鉄筋表面に存在しており、樹脂の下の鋼材面への塩分浸透が大幅に抑制され、長期間腐食を生じさせない結果として、長期にわたり補修が不要となる。

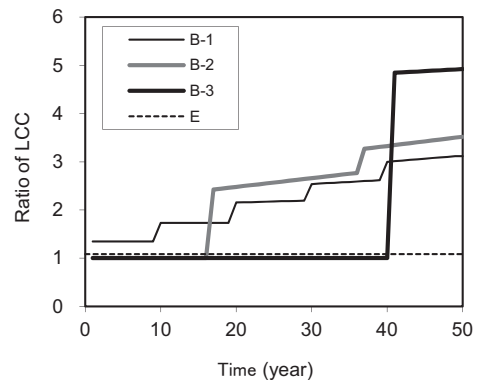


図-1.1 栈橋上部工の場合のLCC試算例
(文献5)を基に加筆修正)

(凡例 B-1: 当初から表面被覆, B-2: 15年後から断面修復,
B-3: 40年後から電気防食, E: エポキシ樹脂塗装鉄筋)

ただし、いずれの工法も長期経過後の耐久性の調査事例が少ない。こういう場合、期待耐用年数の設定は困難となる。

一方、沖縄県では、いくつかのPC橋が臨港道路として、厳しい塩害環境である海上大気中に建設された。まず、波の上橋は1980~1982年に建設された。当時、塩害に対する認識が各種の基準類においても十分なされておらず、当時の「道路橋示方書」に則り、波の上橋のPC桁では最小かぶりが35mmという、小さな値が設定されていた。建設後に、塩害の対策が重要であるとの判断がなされ、各種の検討を実施した結果、「表面被覆」が適用されることになった(詳しい経緯は1.2に示す)。この検討の中で、試験体の暴露試験(1988年開始)と、実橋での施工試験(1991年実施)がなされている。これらの長期暴露試験結果を用いることで、表面被覆の長期耐久性、期待耐用年数の検討が可能になる。

その後、コンクリート構造物に対する耐久性向上方策の必要性に関する理解が進み、エポキシ樹脂塗装鉄筋が広く用いられるようになった。1990~1992年に建設されたなうら橋では、日本でも先進的にエポキシ樹脂塗装鉄筋が大規模に使用された(日本で9番目)。ただし、当時エポキシ樹脂塗装鉄筋に対する長期経過後の性能を示した例は無く、なうら橋の建設と同時に、複数の試験体による長期暴露試験も開始された(1992年開始)。これらの長期暴露試験結果を用いることで、エポキシ樹脂塗装鉄筋の長期耐久性、期待耐用年数の検討が可能になる。

本文では、上述の2種類の長期暴露試験(表面被覆工法およびエポキシ樹脂塗装鉄筋)に基づき、各工法の防食効果とその耐久性に関する検討を行った。そして、長

期暴露試験結果を踏まえ、コンクリート構造物の耐久性向上方策についても述べる。

1.2 長期暴露試験の実施に至った経緯

(1)表面被覆材を適用したコンクリート試験体の暴露試験（波の上橋）（「平成 11 年度那覇港臨港道路塗装替工事誌作成業務報告書（本編）」より引用）

波の上橋（PC 橋）は「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」が制定される以前の 1980～1981 年に施工されており、厳しい塩害環境に位置しているにもかかわらず、最小かぶりが 35mm と設定されていた（1.1 参照）。

そこでこの PC 橋の今後の塩害対策方針を決めるために、「劣化実態調査」が 1985, 1986, 1987, 1989, 1990 年に行われた。また、これと並行して、塩害対策としての表面被覆材料を選定する際の基礎資料とすることを目的として「塗装材料相対評価試験」が 1987 年より行われた。

「劣化実態調査」の結果、PC 桁部にひびわれが発生していることが確認された。しかし、鉄筋位置（かぶり 35mm）における塩化物イオン量はまだ少なく、錆汁なども見られなかったため、塩害によるものではないと推定した。しかし、かぶり 20mm 付近においては 1～2kg/m³ 程度の塩化物イオンが浸透していたため、いずれ何らかの塩害対策を行う必要があるとした。「塗装材料相対評価試験」は、本文 2. の暴露試験のことであり、6 種類の塗装材をコンクリート表面に施し、波の上橋の橋桁下に暴露を行い、暴露後 1, 5, 8, 10, 15 年に調査が行われた。1 種類を除いては顕著な劣化は見られなかった。また、比較として、無塗装の場合について、コンクリート品質とかぶりを変化させ、これらの要因が耐久性に及ぼす影響についても検討がなされた^{2) 3)}。

「劣化実態調査」および「塗装材料相対評価試験」を踏まえ、1991 年度に橋梁 PC 桁に対して、「表面被覆材の試験施工」が実施された。ここで実施された 6 種類の被覆材料の中から、4 種類の被覆材料が選定され、1992～1995 年度に本施工が実施された。

本文では「塗装材料相対評価試験」の 30 年経過時、「表面被覆材の試験施工」の 26 年経過時に調査を行った。

(2)エポキシ樹脂鉄筋を用いたコンクリート試験体の暴露試験（なうら橋）（「那覇港暴露試験体調査計画について、那覇港工事事務所、1995 年 1 月」より引用）

前述のように、エポキシ樹脂塗装鉄筋は、鉄筋の表面にエポキシ樹脂（厚さ 200 μm 程度）が塗装されたものであり、高い耐食性を有する^{例え⁴⁾}。しかし、実構造物、特に港湾構造物に長期間適用されたものに対する調査事

例は少ない。そこで、なうら橋の PC 橋梁施工時において、エポキシ樹脂塗装鉄筋を埋設したコンクリートの暴露試験が開始された（1992 年）。当時の報告書には、試験の目的として、「浦添地区橋梁の上部工に試験施工されたエポキシ樹脂塗装鉄筋の効果確認を行う。」と記載されている。

本文では、2017 および 2018 年（試験開始後 25 および 26 年経過時）に調査を行った。

2. 表面被覆材が適用されたコンクリート試験体での長期暴露試験（波の上橋）

2.1 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⁶⁾」が改訂される前であったため、当時の「道路橋示方書」に則り、かぶりが35mm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（うち1種類は被覆材が激しく損傷したため、現存しているのは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⁷⁾。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。

2.2 試験概要

2.2.1 試験体⁷⁾

試験体形状を図-2.1に、コンクリート配合を表-2.1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。外寸は150×150×800mm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

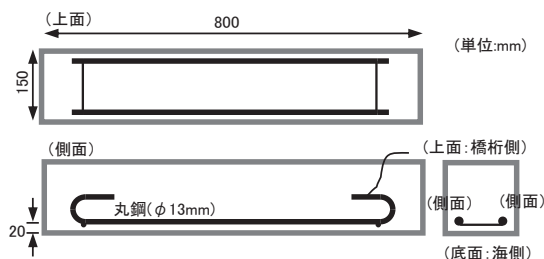


図-2.1 試験体

表-2.1 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	1,080

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-2.2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。

表-2.2 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	シリ系浸透剤*	0.30
	中塗	アクリル系ホリマーセメント	2.00
	上塗	塩素系ホ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	柔軟型ホリウレタン樹脂	0.12
3	下地調整	ホリマーセメント	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	クロロレンゴム	0.75
	上塗	クロロスルホン化ホリエチレン	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

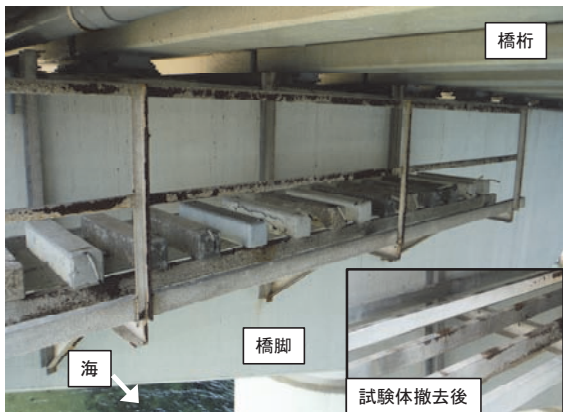


図-2.2 試験体暴露架台

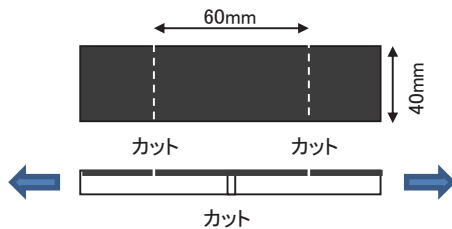


図-2.3 ひび割れ追従性試験

2.2.2 暴露環境

波の上橋の桁下となる 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図-2.2 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ため、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。

2.2.3 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-2.3 に示すように、JSCE-K 532 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-2.9 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。また、濃度分布を下式（Fick の拡散方程式の解）で回帰させることにより C_0 および D_{ap} を求めた。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right) \quad (2.1)$$

ここで、 $C(x,t)$ ：コンクリート表面からの距離 x (mm)、時間 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_0 ：表面($x=0$)における濃度(kg/m³)、 D_{ap} ：見かけの塩化物イオン拡散係数(cm²/年)、 t ：供用期間、 $\operatorname{erf}(s)$ ：誤差関数である。

c) EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)

被覆材中に浸透した Cl を把握することを主目的とし、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⁶⁾」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。被覆材+コンクリート（厚さ 1cm 程度）の試験体を切り出し、図-2.4 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⁸⁾。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-2.13 参照)については、被覆材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。

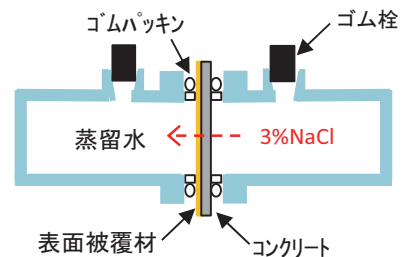


図-2.4 遮塩性試験⁶⁾⁸⁾

2.3 調査結果

2.3.1 外観観察

試験体外観を図-2.5 に、外観観察結果を表-2.3 に、はがれ (% : 面積比) の経時変化を図-2.6 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 ではは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。

2.3.2 付着強さ

図-2.7 に暴露期間と付着強さの関係を示す。なお、図中

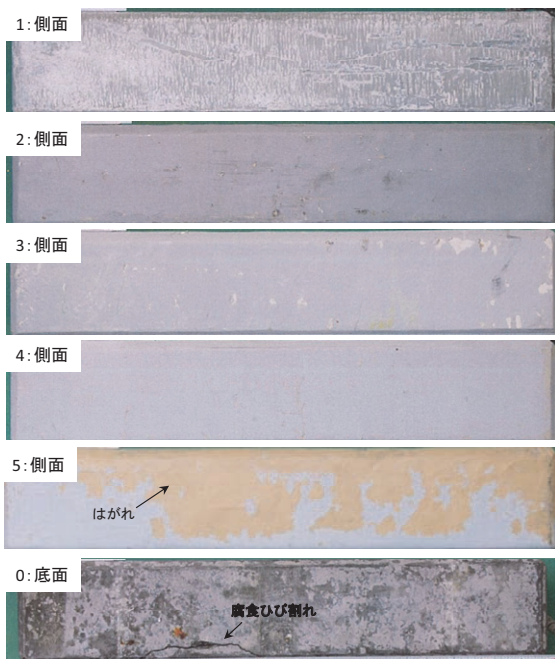


図-2.5 試験体外観

表-2.3 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	小さなはがれ	若干のはがれ
	浮き	側面にわずかに確認	
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	
4	はがれ	ほとんど無し	若干のはがれ
	浮き	特に無し	
5	はがれ	多数の小さなはがれ	上塗りのはがれが激しく進行
	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)

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。

2.3.3 ひび割れ追従性

図-2.8 にひび割れ追従性試験を行った際の破断時の伸

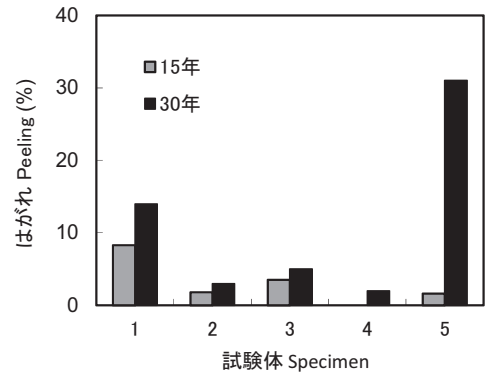


図-2.6 はがれ (面積比) の経時変化

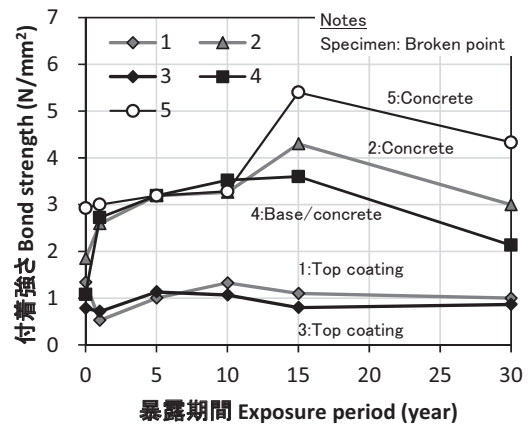


図-2.7 暴露期間と付着強さの関係

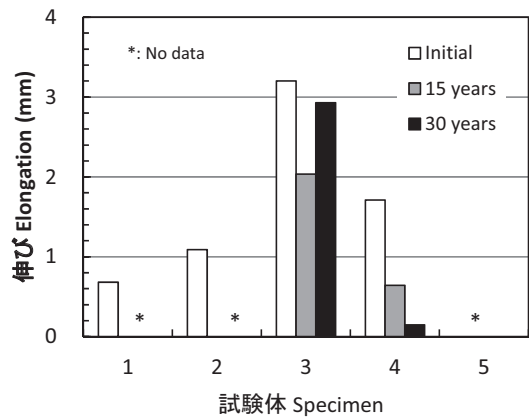


図-2.8 ひび割れ追従性試験結果

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能が低下した。

2.3.4 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-2.4に各試験体の塩化物イオン浸透深さ、図-2.9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-2.10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

表-2.4 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

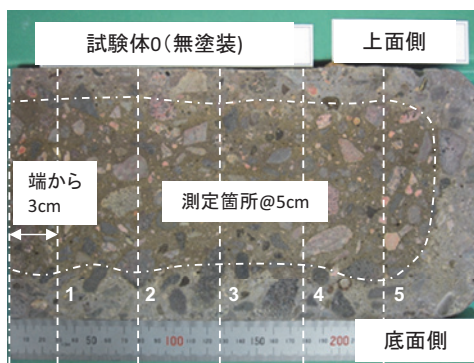


図-2.9 試験体0における塩化物イオン浸透深さ(点線：浸透深さ)

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-2.10の分布を Fick の拡散方程式の解(式(2.1)参照)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。なお、文献9)では、今回同様の環境(静岡県駿河海岸沖・海上大気中)に被覆系塗装が適用されたコンクリート試験体を暴露し、30年経過後に塩化物イオン濃度分布を測定しているが、その場合においても被覆系塗装が塩分浸透をほぼ抑制している。

(3) 被覆材中のCl濃度分布(EPMA)

EPMAによるClマッピング画像を図-2.11、Clの測定値をグラフ化したものを図-2.12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、隣接する下塗り剤の成分に含まれていた可能性が高いと推測される。

なお、文献10)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。

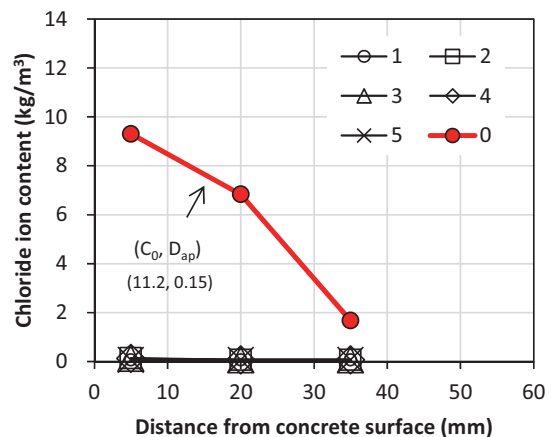


図-2.10 全塩化物イオン濃度分布

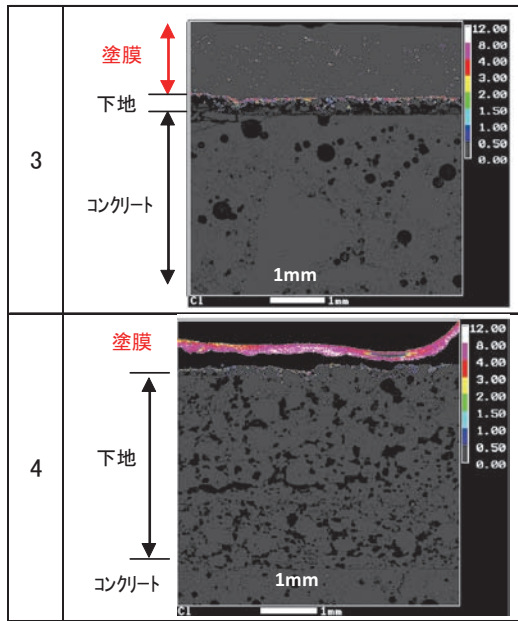


図-2.11 EPMAによるCIマッピング画像

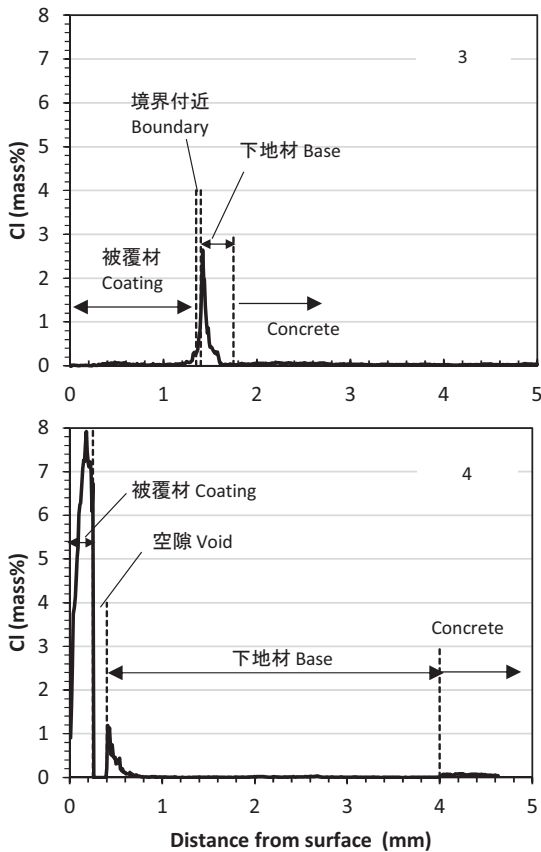


図-2.12 被覆材内のCI濃度分布

2.3.5 表面被覆材の遮塩性

図-2.13 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)⁶⁾」のAおよびB種における品質規格値 (10^{-2} mg/cm²/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-2.14 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(11)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(11)よりも長期経過しているが、文献(11)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 ($C_0=11.2$ kg/m³) 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

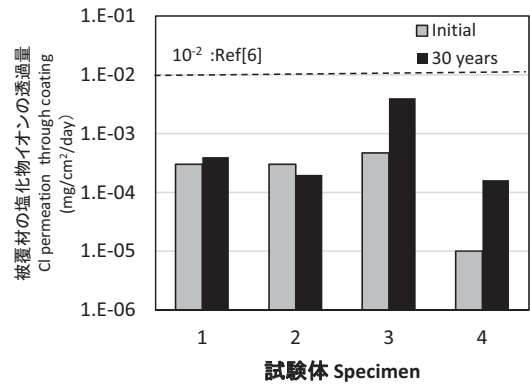


図-2.13 遮塩性試験結果

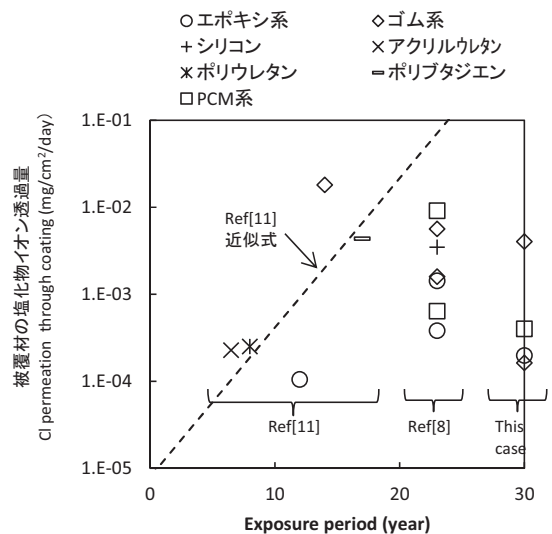


図-2.14 遮塩性の経時変化

表-2.5 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

については別途検証する必要がある。

2.3.6 鉄筋腐食状況

表-2.5 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。

2.4 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、中塗材を保護するための上塗材が劣化しているものがあつた。
- (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、被覆材自体の遮塩性は、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。

なお、今回用いた試験体 (100×100×800mm) の半分 (長さ 400mm 程度) を波の上橋の A2 橋台付近に再暴露を行っている。その状況を図-2.15 に示す。当初暴露から 40～50 年経過後に追跡調査を実施予定である。

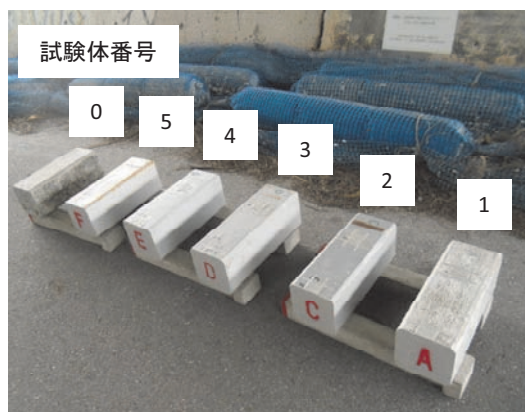


図-2.15 再暴露後の試験体 (2018/10/30～)

3. 表面被覆材が適用された PC 桁での長期暴露試験（波の上橋）

3.1 はじめに

1980～1981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⁶⁾」が改定される前であったため、かぶりが35mm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（うち1種類は被覆材が激しく損傷したため、現存しているのは5種類）の表面被覆を施した試験体の暴露試験が開始された（経緯は1.2参照）。暴露開始後15、30年時においては、これらの表面被覆材の塩害抑制効果を評価するため、試験体を解体し、詳細調査が行われた。また、実橋への試験施工（A～Fの6種類）が1992年に実施された。

本章では、実橋での調査結果（2018年で26年経過）

をとりまとめた。

3.2 実構造物概要

3.2.1 波の上橋概要

構造物に関する履歴、かぶりに関する情報を箇条書きで以下に示す。また、波の上橋の側面図および断面図の一例を図-3.1に示す。

(1) 構造物に関する履歴

- ・竣工（上部工）：1980～1981年度
- ・調査（塩化物イオンの侵入状況の確認等）：1989年度（1989.10以前に実施）、等。
- ・表面被覆の適用

A1-P1桁 1991.11.15～1992.3.31（竣工から11年経過と仮定）

P1-P3桁 1992.12.5～1993.3.31

- ・今回調査：2018.10.30～10.31（竣工から37年経過、表面被覆適用から26年経過と仮定）

(2) 構造物情報（かぶり）

- ・かぶり（設計値）

PC鋼材： 側面 75mm, 底面 85mm

スターラップ： 側面 35mm, 底面 55mm

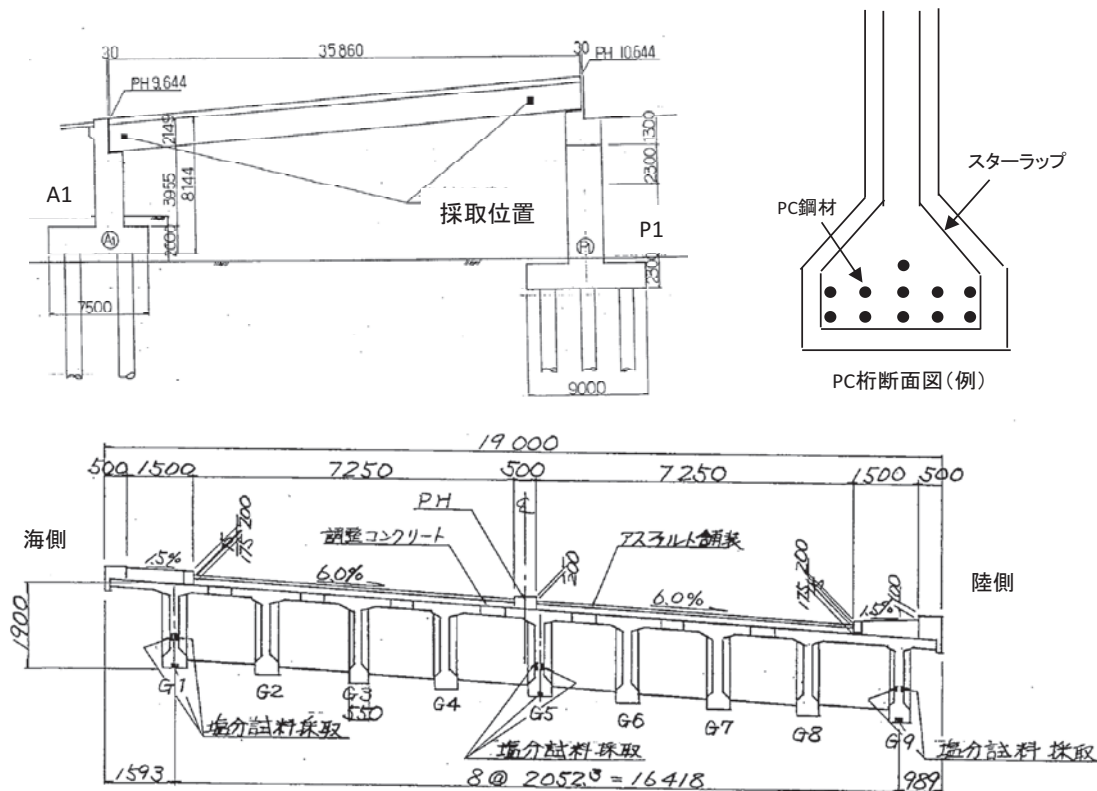


図-3.1 波の上橋側面図・断面図および塩分調査（コア採取）位置図（1989年度調査時）

3.2.2 表面被覆適用前におけるコンクリートの状況

(1) 外観

「平成 3 年度委員会報告書（那覇港臨港道路実態調査）」では、「外部から浸透した塩分による鉄筋腐食は発見されていない」という結論が示されている。このことより、鉄筋腐食に起因した変状（ひび割れ）は、表面被覆適用前において存在していなかったと推測される。

(2) 付着塩分量および飛来塩分量（1986 年度調査結果）

図-3.2 にコンクリート表面における付着塩分量、図-3.3 に飛来塩分量を示す。橋桁表面に供給される塩分量は泊大橋よりも波の上橋の方が多い傾向にある。また、波の上橋の中では、海側面において最も多くなり、また A1-P1 の方が P8-A2 に比べて多い傾向にある。

(3) コンクリート中の塩化物イオン濃度分布（1989 年度調査結果：竣工後 8 年経過）

A1-P1 間の 3 本の PC 桁の A1 側および P1 側、さらには海側面・陸側面・底面の計 6 箇所（図-3.1 参照）から採取したコア中の塩化物イオン濃度分布を図-3.4 に、濃度分布を式(2.1)で回帰することにより求めた表面塩化物イオン濃度 C_0 を図-3.5 に示す。なお、図-3.4 の●（A1-G9 海側）のみ試料採取間隔が 10mm（測定深度 0-10、10-20、20-30、30-40、40-50、50-60、60-70mm の 7 深度）で、他は 15mm 間隔（測定深度 0-15、15-30、30-45mm の 3 深度）である。そのため、●（A1-G9 海側）以外の結果は、特に表層部の濃度が平均化されている可能性が高い。そのため、濃度分布から得られるパラメータ（ C_0 および D_{ap} ）の推定精度は●（A1-G9 海側）に比べると劣る可能性が高い。

C_0 は場所によって大きくばらついているが、P1 側よりも A1 側の方が C_0 は大きいようである。風向きの影響が現れていると推測する。

なお、かぶり 35mm の位置で腐食発生限界濃度（ $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ ）を上回っている箇所はない。

3.2.3 鋼材位置の塩化物イオン濃度の予測

(1) 表面被覆を適用しない場合

表-3.1 に鋼材位置の塩化物イオン濃度の予測結果（37 年後（現時点）および 50 年後）を示す。なお、式(2.1)に C_0 および D_{ap} を代入することにより計算したものである。なお、前述のように、A1-G9 海側以外は C_0 および D_{ap} の推定精度が高くない可能性がある。

かぶり 35mm の場合、5/18 箇所（=27.8%）が腐食発生限界濃度（2.0 と仮定）を現時点（竣工後 37 年経過）で上回っている。なお、限界値を上回る割合は竣工 50 年後でも同様であった。一方、かぶり 75mm の場合、限界値を上回る箇所は、現時点でも 50 年後でも存在しなかった。

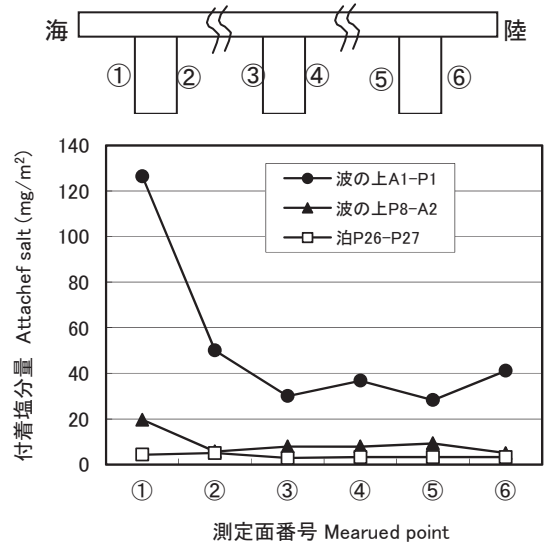


図-3.2 付着塩分量（1986 年度調査）

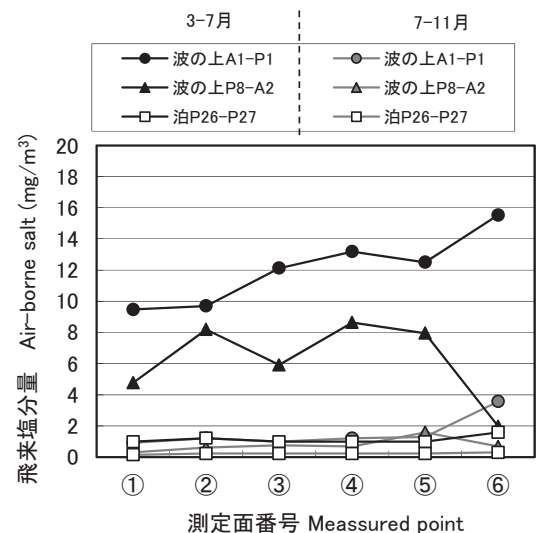


図-3.3 飛来塩分量（1986 年度調査）

PC 鋼材（設計かぶり 75mm）が今後腐食環境に至る可能性は低いと考えられる。

(2) 表面被覆を適用した場合

図-3.6 に表面被覆適用後の塩化物イオン濃度分布、鋼材位置の塩化物イオン濃度の予測結果を示す（計算方法は 5.2 参照。「被覆材が完全に外部からの塩化物イオンの侵入を防ぐ」と仮定）。なお、表-3.1 において、i) 塩害環境が最も厳しい場合（ C_0 の値が最大）、2 番目に厳しい場合（ C_0 の値が 2 番目）、の 2 ケースの結果を示した。

i) 塩害環境が最も厳しい場合（A1-G9 桁-海側）

かぶり 35mm の場合、表面被覆適用後の塩化物イオン濃度の増加は大幅に抑制されているが、適用前に侵入していた塩化物イオン濃度が高かったため、早い段階で腐

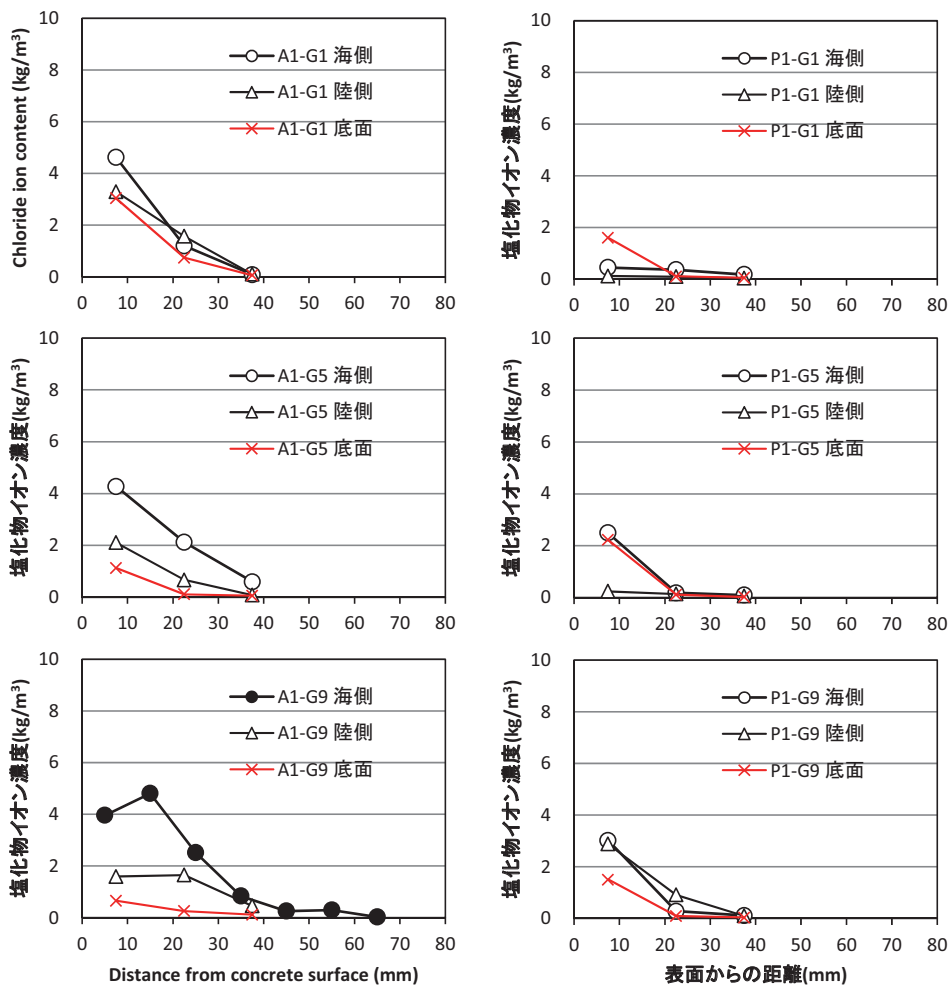


図-3.4 コア中の塩化物イオン濃度分布 (1989年度調査)

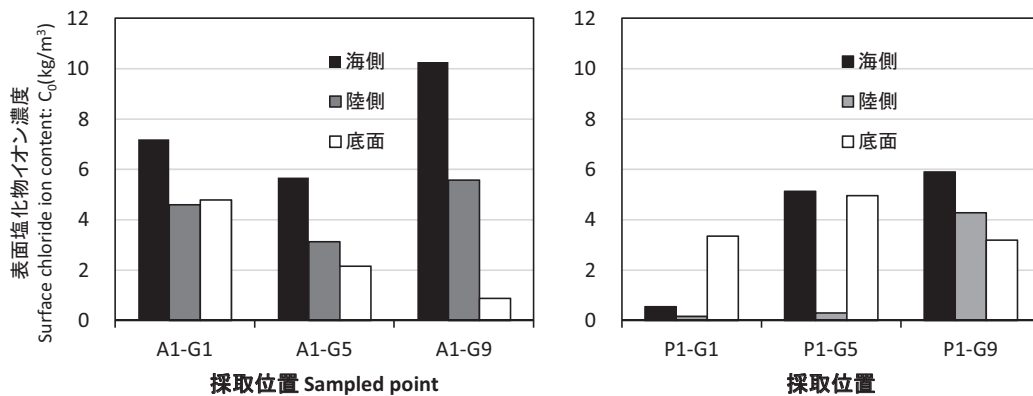


図-3.5 表面塩化物イオン濃度 C_0 (1989年度調査結果より算出)

食発生限界濃度 (2.0. 図中横線) を上回った. 一方, かぶり 70mm の場合, 表面被覆の適用の有無に関係なく, 50 年間は限界濃度を下回った.

ii) 塩害環境が 2 番目に厳しい場合 (A1-G1 桁-海側)

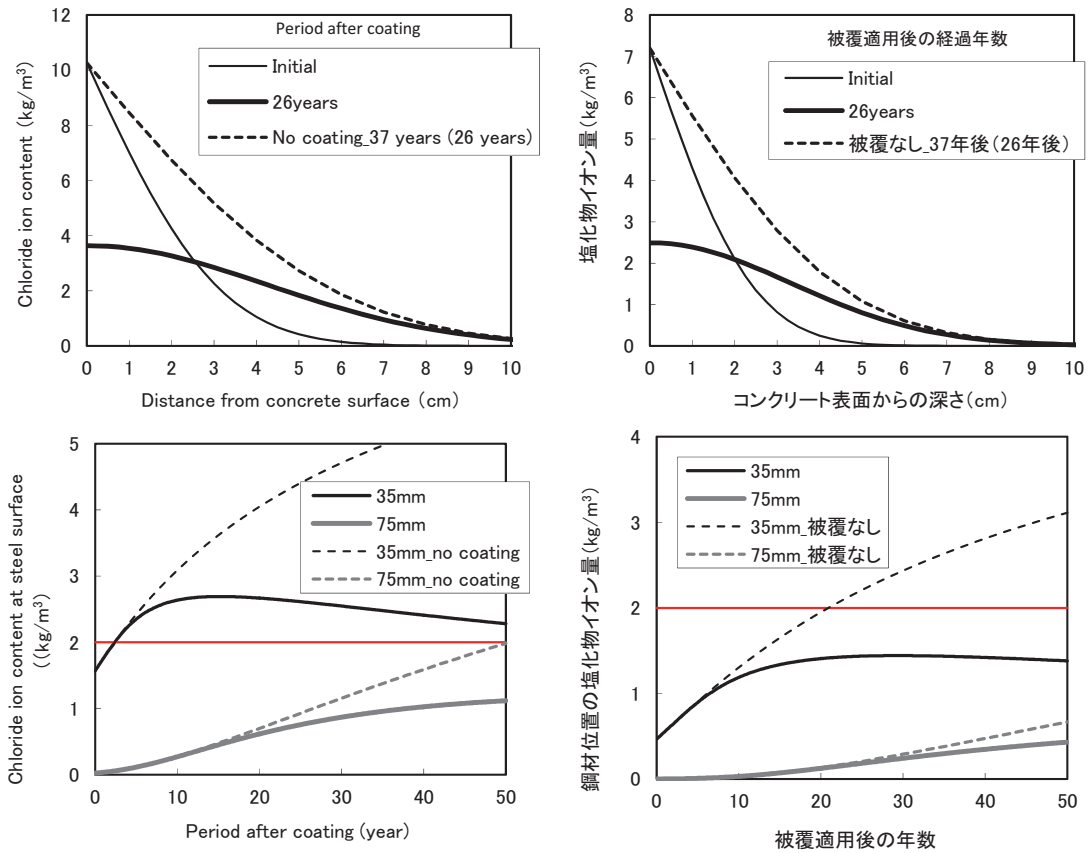
表面被覆を適用した場合, かぶりが 35mm であっても

限界濃度を上回らなかった. すなわち, C_0 の値が 2 番目以降については, 限界濃度を上回らないこととなる.

表-3.1 鋼材位置の塩化物イオン濃度の予測結果 (37年後 (現時点) および50年後)

			C ₀	D _{ap}	37年後	50年後				C ₀	D _{ap}	37年後	50年後
かぶり35mmの場合	A1-G1	海側	7.2	0.16	2.26	2.78	P1-G1	海側	0.5	1.17	0.39	0.41	
		陸側	4.6	0.29	2.07	2.37		陸側	0.2	0.91	0.11	0.11	
		底面	4.8	0.15	1.44	1.79		底面	3.3	0.07	0.42	0.63	
	A1-G5	海側	5.7	0.37	2.87	3.21	P1-G5	海側	5.1	0.07	0.67	0.99	
		陸側	3.1	0.20	1.14	1.36		陸側	0.3	0.54	0.18	0.19	
		底面	2.2	0.09	0.35	0.50		底面	5.0	0.06	0.50	0.78	
	A1-G9	海側	10.3	0.27	4.47	5.16	P1-G9	海側	5.9	0.08	0.92	1.31	
		陸側	5.6	0.29	2.51	2.88		陸側	4.3	0.20	1.55	1.85	
		底面	0.9	0.32	0.41	0.47		底面	3.2	0.07	0.38	0.58	

			C ₀	D _{ap}	37年後	50年後				C ₀	D _{ap}	37年後	50年後
かぶり75mmの場合	A1-G1	海側	7.2	0.16	0.22	0.46	P1-G1	海側	0.5	1.17	0.23	0.27	
		陸側	4.6	0.29	0.49	0.75		陸側	0.2	0.91	0.06	0.07	
		底面	4.8	0.15	0.13	0.27		底面	3.3	0.07	0.00	0.02	
	A1-G5	海側	5.7	0.37	0.87	1.24	P1-G5	海側	5.1	0.07	0.01	0.03	
		陸側	3.1	0.20	0.16	0.30		陸側	0.3	0.54	0.07	0.09	
		底面	2.2	0.09	0.01	0.02		底面	5.0	0.06	0.00	0.01	
	A1-G9	海側	10.3	0.27	0.97	1.55	P1-G9	海側	5.9	0.08	0.01	0.05	
		陸側	5.6	0.29	0.59	0.91		陸側	4.3	0.20	0.22	0.40	
		底面	0.9	0.32	0.11	0.16		底面	3.2	0.07	0.00	0.01	



i) 最大値 (A1-G9 桁-海側)

ii) 2番目の値 (A1-G1 桁-海側)

図-3.6 表面被覆適用後の塩化物イオン濃度分布, 鋼材位置の塩化物イオン濃度の予測結果

3.3 表面被覆材およびその適用状況

3.3.1 表面被覆材の種類

実桁に適用された表面被覆材一覧を表-3.2に示す。なお、被覆材Bは暴露試験体にも適用されていたが、試験体とは異なり、「補強用のシート」が中塗材内に挿入されている。伸びに対する抵抗性を増加させるためと推測される。

また、建設時に制定された「那覇港臨港道路における表面被覆材材料の品質規格(案)」を表-3.3に示す。なお、

表-3.2 実桁に適用された表面被覆材

記号	実桁	試験体	工程	使用材料	標準 使用量 (kg/m ²)	本施工への適用	
						波の上	泊
A		3	下地調整	アクリル系ポリマーセメント	-	○	○
			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	0.30		
B		4	下地調整	ゴムラテックス混入セメントペースト	4.30	○	○
			下塗	エポキシ変性合成樹脂	0.14		
			中塗	クロロレンゴム (補強材:シート)	0.87 1.15		
			上塗	クロロスルホン化ポリエチレン	0.58		
C			プライマー	エポキシ樹脂	0.11	-	-
			ハテ	無溶剤形エポキシハテ	0.60		
			中塗	弾性ウレタンゴム系	0.60		
			上塗	ふっ素樹脂	0.15		
D			プライマー	-	0.15	-	-
			ハテ	-	0.40		
			中塗	-	0.60		
			上塗	-	0.30		
E			断面修復工	-	0.60	-	○
			不陸調整	-	1.70		
			中塗	無機質弾性塗料	2.10		
			上塗	-	0.40		
F			プライマー	エポキシ樹脂	0.10	-	○
			ハテ	エポキシ樹脂系ハテ	0.50		
			中塗	超柔軟型エポキシ樹脂系	1.05		
			上塗	柔軟アクリルウレタン樹脂系	0.12		

表-3.3 那覇港臨港道路における表面被覆材の品質規格(案) (「平成5年度那覇港コンクリート構造物劣化度調査委託報告書」より引用)

項目	品質規格値(案)	試験方法
塗膜の外観	塗膜が均一で、流れ・むら・われ・はがれがないこと	JIS K 5400
耐候性	促進耐候性試験を300時間行ったのち、白亜化がほとんどなく、塗膜にわれ・はがれがないこと。	JIS K 5400
遮塩性	塗膜の塩素イオン透過量が 1.0×10^{-3} mg/cm ² ・日以下であること	
防水性(水透過阻止性)	塗膜の透水性率が20mg/cm ² ・日以下であること	
耐アルカリ性	水酸化カルシウムの飽和溶液に30日間浸漬しても、塗膜にわれ・はがれ・軟化・溶出がないこと。	JIS K 5400
コンクリートとの付着強さ	塗膜とコンクリートとの付着強さがA N/mm ² 以上であること。(Aが2以上:優, 1~2:良, 0.3~1:可と判定)	JIS A 6910 (建研式付着力試験)
ひび割れ追従性	0.6mm以上	日本道路協公団方式(ゼロスパン伸び試験)
透湿性	水蒸気の透過量がA g/m ² ・日以下であること。(Aが15以上:可, 5~15:良, 5以下:優と判定)	

表-3.4 区間毎の被覆材仕様

	施工年	仕様	平均塗膜厚(μm)
A1-P1	1991.11.15-1992.3.31	試験塗装	-
P1-P2	1992.12.5-1993.3.31	B	-
P2-P3		A	-
P3-P4	1994.10.1-1995.3.30	A	2,507
P4-P5		A	
P5-P6		B	406
P6-P7	1993.10.1-1994.3.25	B	403
P7-P8			
P8-A2			

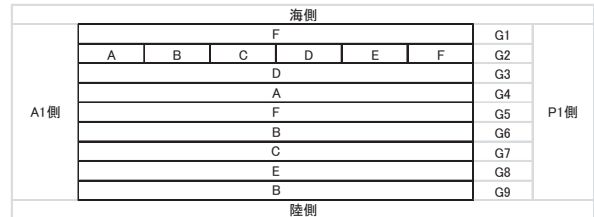


図-3.7 A1-P1 桁の被覆材仕様

この規格は、施工前の材料に適用されるものであり、長期経過後においても満足しなければならないものではない。

3.3.2 適用位置

区間毎の仕様を表-3.4に、試験施工区間を含むA1-P1桁の仕様を図-3.7に示す。

3.4 調査内容

実桁における試料採取箇所を図-3.8に示す。桁のウェブ(側面)からコアを採取した。以下、試験の概要を述べる。

(1) 外観観察

実橋における被覆材のはがれ、はく離、ひび割れの状況を目視により観察した。腐食ひび割れの状況も観察した。

(2) 付着性に関する試験(付着強度試験)

JIS A 6909に準拠し、引張用治具(40×40mm鋼製付着子)を実桁ウェブの表面に接着させ、塗膜面に対して垂直に引っ張り、その際の付着強度を測定した。試験の実施箇所は、図-3.8の試料採取位置の近傍である。

(3) ひび割れ追従性に関する試験

JSCE-K 532-1999「表面被覆材のひび割れ追従性試験方法」に準拠して行った(図-3.9参照)。採取したコア(φ75mm)から25×40×10mmで切り出した試験片に一部切込み(中央部のみ)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) 被覆材の劣化状況に関する試験(FT-IR試験)

FT-IR(フーリエ変換型赤外分光法)により、最表層の

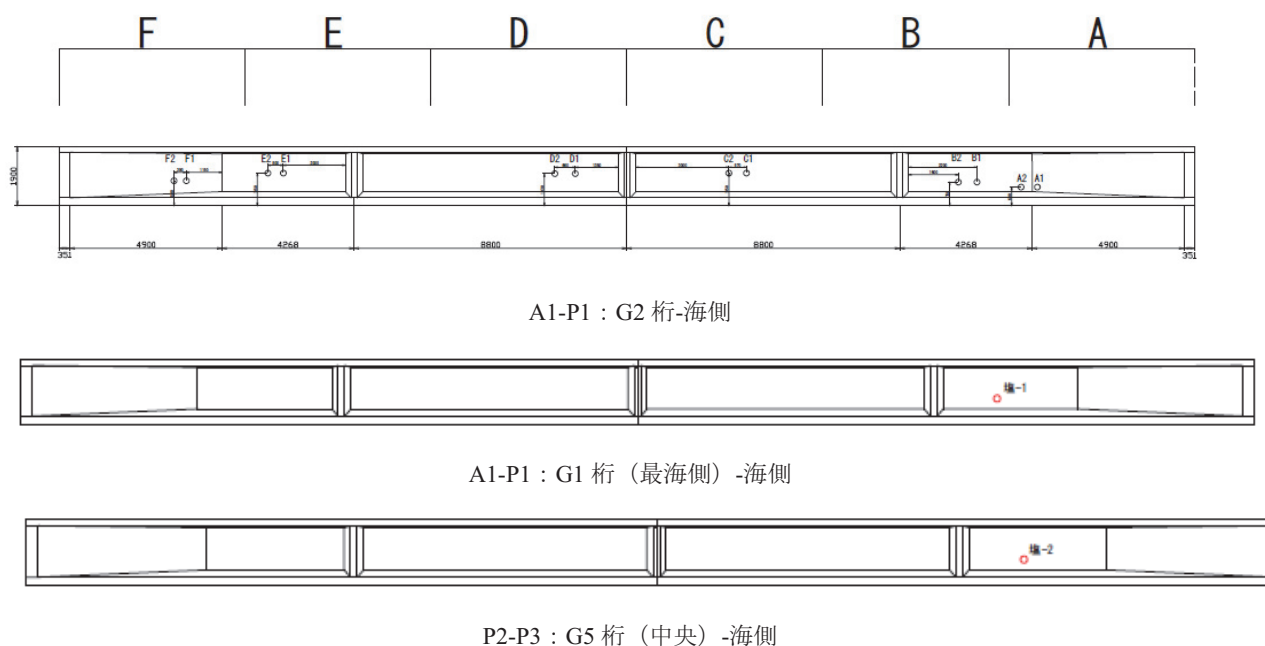


図-3.8 塩化物イオン濃度を測定した試料採取位置

被覆材（樹脂）の劣化状況の確認を行った。FT-IR 分析とは、物質に赤外光を照射し、透過または反射した光を測定することで、試料の構造解析や定量を行う分析手法である。なお、分析試料は A, B の 2 種類について実施した。

(5)被覆材の遮塩性に関する試験

被覆材の遮塩性を調べるため、遮塩性試験，EPMA 測定を行った。

①遮塩性試験

「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説⁶⁾」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。採取したコア（φ75mm）から、被覆材とコンクリートを両方含んだ厚さ 1cm 程度の試料を切り出し、図-3.10 のようにセットした後、3%NaCl 溶液側（コンクリート部）から蒸留水側（表面被覆材部）に透過した塩化物イオン量を測定した⁸⁾。なお、測定時期は 30 日後である。これにより、被覆材自体の遮塩性を評価可能となる。

②電子線マイクロアナライザー（EPMA：Electron Probe Micro Analyzer）

この試験は被覆材およびコンクリート中に含まれる元素の存在量の分布を調べるものである。今回は測定対象範囲を 5mm 角とし、Cl, S, K, Ca の 4 元素について行った。なお、分析試料は A, B, E, F の 4 種類について実施した。

(6)被覆効果の確認（全塩化物イオン量分析）

図-3.8 の「①A1-P1：G1 桁（最海側）-海側」および

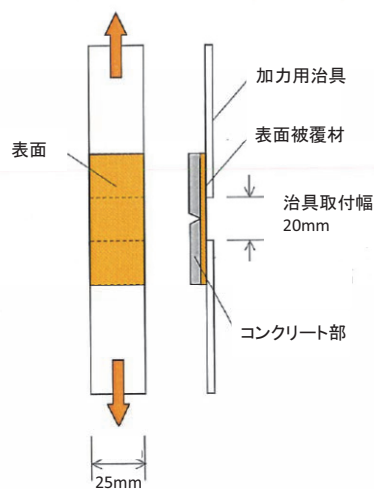


図-3.9 ひび割れ追従性試験

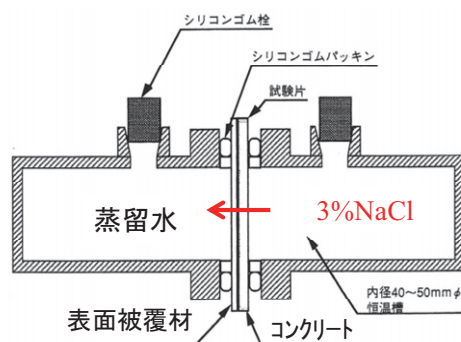


図-3.10 遮塩性試験

「②P2-P3 : G5 桁 (中央) -海側」の2か所からコアを採取し、JCI-SC4 に準拠して、コンクリート表面からの塩化物イオン濃度分布 (4~5 点) の測定を行った。なお、①については、3.2 で述べた「1989 年度調査」における試料採取箇所 (表-3.1 A1-G1 (海側) $C_0=7.2\text{kg/m}^3$) の近傍である。②については、図-3.11 に示す腐食ひび割れが生じた位置の近傍である。

また、ひび割れ追従性試験および遮塩性試験のために「A1-P1 : G2 桁」から採取したコアの、表面から 35mm (30-40mm の中点位置) の位置の試料についても行った。採取箇所を図-3.8 に示す。被覆材 A は最も A1 側であり、被覆材 F は最も P1 側である。

3.5 調査結果

3.5.1 外観観察結果

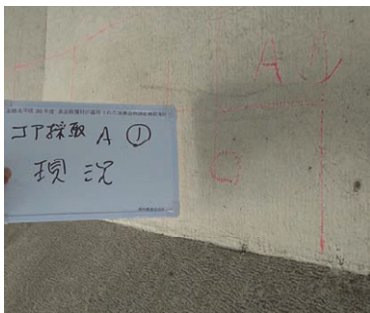
2012 年度に橋桁の補修工事が行われている。ただし、

今回の調査位置では大規模な補修・塗替えは行われていない。

P2-P3 桁内の一部において、腐食に起因したものと推測されるひび割れが確認された (図-3.11)。この桁のウェブの海側の面でコア採取+塩化物イオン濃度調査を行っている。



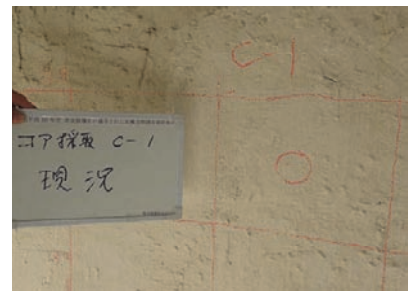
図-3.11 腐食ひび割れと推測されるひび割れ (P2-P3 桁)



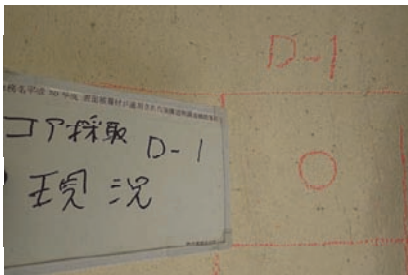
A1-P1 : G2 桁 (海側) (仕様 A)



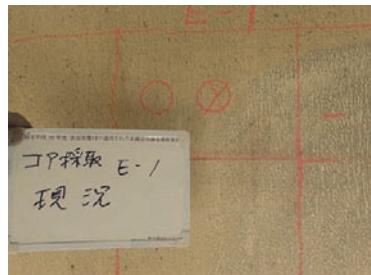
A1-P1 : G2 桁 (海側) (仕様 B)



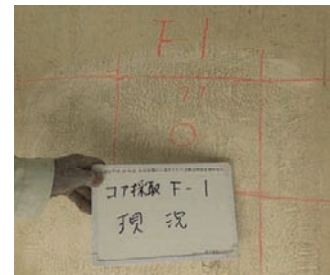
A1-P1 : G2 桁 (海側) (仕様 C)



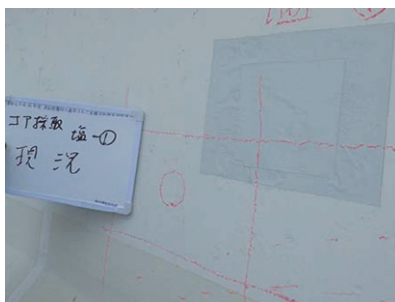
A1-P1 : G2 桁 (海側) (仕様 D)



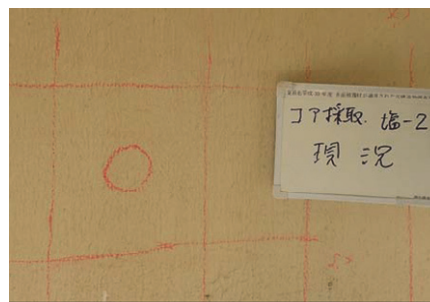
A1-P1 : G2 桁 (海側) (仕様 E)



A1-P1 : G2 桁 (海側) (仕様 F)



A1-P1 : G1 桁 (海側) (仕様 F)



P2-P3 : G5 桁 (海側) (仕様 A)

(※右上は補修部)

図-3.12 コア採取位置の写真

A1-P1 桁のコア採取位置周辺の状況の一例を図-3.12に示す。特に顕著な変状（はがれ、膨れ等）は確認されなかった。

3.5.2 付着強度

図-3.13に付着強度試験結果の関係を示す。なお、図中には主な破壊箇所を示した。今回の実構造物調査結果において、いずれも1N/mm²を上回っていた。表-3.3「那覇港臨港道路における表面被覆材料の品質規格（案）」によると、全て「良」以上と判定される。

一般的に、被覆材とコンクリートの付着の評価および将来予測は困難とされる。また、被覆材において最も重要な性能は、付着よりも劣化因子（塩分等）の浸透を抑制することである。そのため、付着性のみで被覆材の優劣を判断することはここでは行わない。

3.5.3 ひび割れ追従性

図-3.14は試験時の荷重-変位曲線、図-3.15に破断時の伸びの値を示す。波の上橋・泊大橋に適用されている主な仕様であるA(3)およびB(4)は、26年後においても高い伸び性能を有していた。なお、Bにおいては試験体の結果と大きく異なるが、これは、実部材には補強用のシートが用いられているためと考えられる。また、表-3.3「那覇港臨港道路における表面被覆材料の品質規格（案）」の値（0.6mm）、および「栈橋劣化調査・補修マニュアル¹²⁾」の品質規格値（0.4mm）をいずれも上回った。一方、被覆材C～Fについては0.4mmを満足していなかった。

3.5.4 FT-IR 分析

図-3.16に被覆材AおよびBのFT-IR分析結果を示す。なお、見やすくするため、A-2（表層から10μm）とB-2

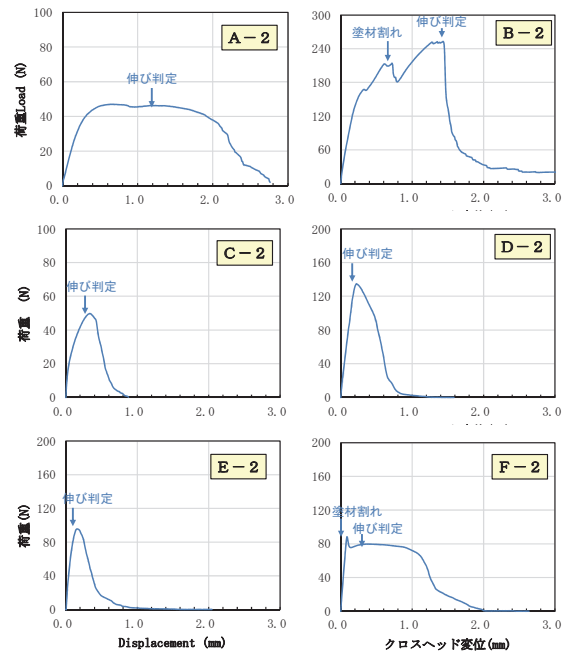


図-3.14 試験時の荷重-変位曲線

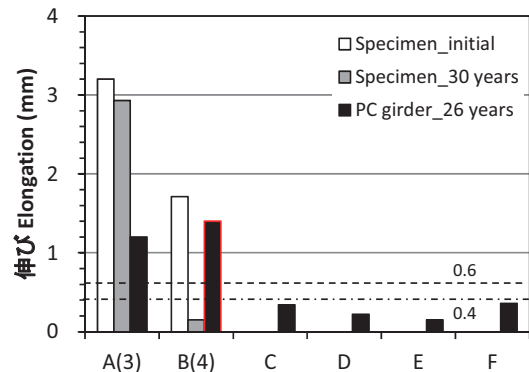


図-3.15 ひび割れ追従性試験結果

主な破壊部位

A(3)	被覆材内部	D	母材
B(4)	下地材内部	E	下地材内部
C	母材	F	治具or被覆材内部

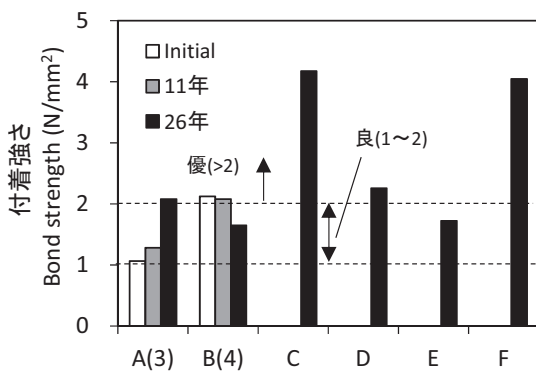


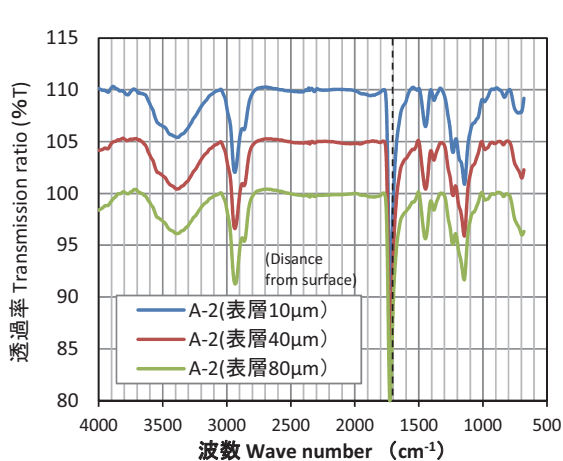
図-3.13 付着強度試験結果（凡例は破壊面）

（表層から10μm）の値は10%、A-2（表層から40μm）とB-2（表層から50μm）の値は5%上方に移動させている。ここで、透過率のピークが大きいほど（下向きに凸なほど）、また吸光度（透過率の逆数の常用対数）の色が明るいほど、測定対象となる物質量が減少していることを意味している。被覆材の表層部と内部で、透過率のスペクトル分布に顕著な違いは見られなかった。また、紫外線劣化が生じると、波数1,700(cm⁻¹)付近（C=O（カルボニル基）由来）の吸光度が増加するが、明確な変化はなかった。よって、被覆材表層部は長期間（26年間）経過しても特に劣化が進行していなかったと考えられる。

3.5.5 被覆材の遮塩性

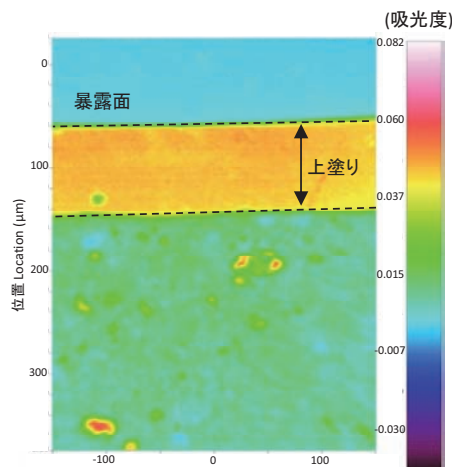
(1) 遮塩性試験

図-3.17に遮塩性試験結果を示す。いずれも、表-3.3

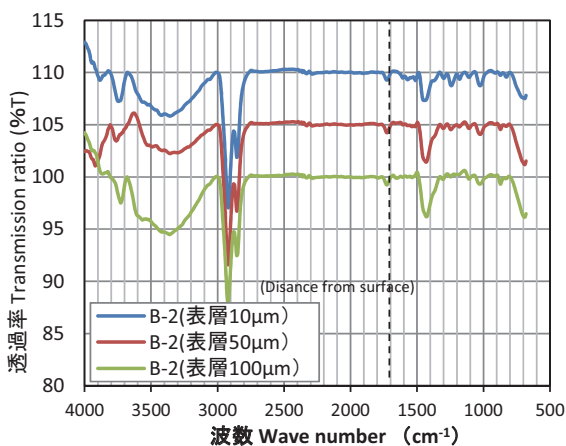


(a) スペクトル分布

(被覆材 A)

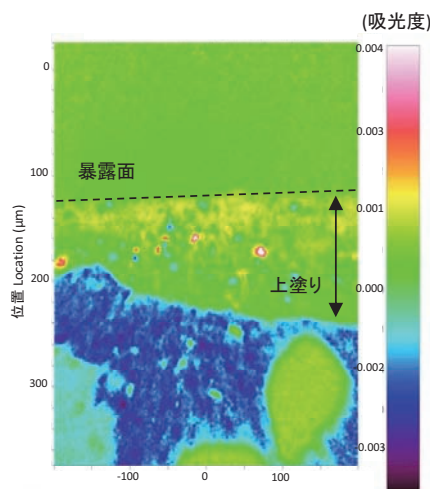


(b) 波数 1,700cm⁻¹ 付近の吸光度分布



(a) スペクトル分布

(被覆材 B)



(b) 波数 1,700cm⁻¹ 付近の吸光度分布

図-3.16 FT-IR 分析結果

「那覇港臨港道路における表面被覆材料の品質規格(案)」の値 (10^{-3} mg/cm²/日) を上回った。なお、この規格値は、「道路橋の塩害対策指針(案) ⁶⁾」の C 種(長期防錆型)における品質規格値と同じである。しかし、「道路橋の塩害対策指針(案) ⁶⁾」の A 種(プレストレストコンクリート部材用)および B 種(鉄筋コンクリート部材用)における品質規格値 (10^{-2} mg/cm²/日) は概ね満足していた。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。なお、B においては「試験体 30 年」の結果と大きく異なっている。この理由としては、実部材には補強用のシート(布状)が内部に用いられており、この繊維部および界面部を試験液(NaCl 溶液)が通りやすかったことも考えられる。

図-3.18 に遮塩性の経時変化を示す。文献 11) では時

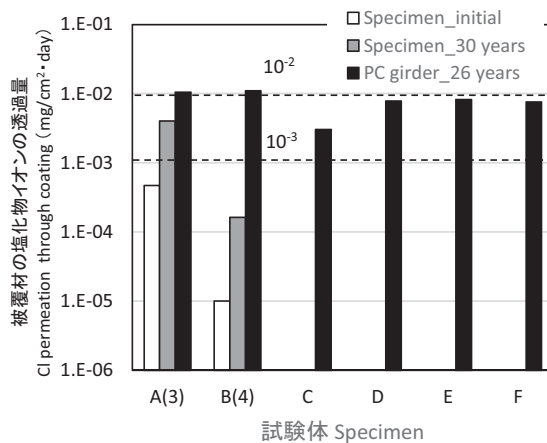


図-3.17 遮塩性試験結果

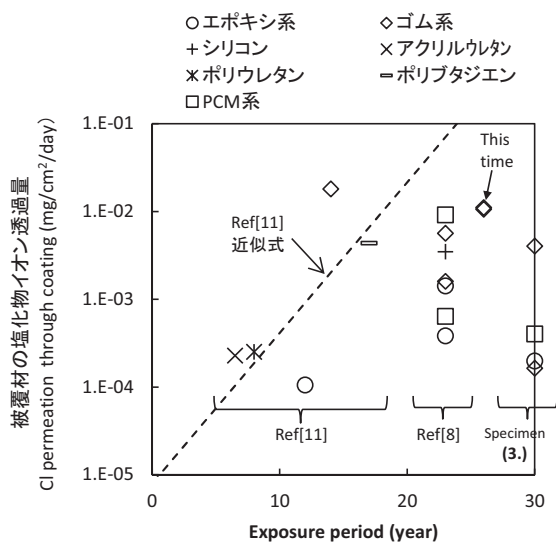


図-3.18 遮塩性の経時変化

間とともに遮塩性が低下する傾向を示している。一方、文献11)よりも長期経過した文献8) (土木研究所)の結果およびH29試験体(30年)の結果、および今回(26年)の結果は、その回帰式(直線式)の値との差が大きかった。また、被覆材料別の傾向も明確ではなかった。

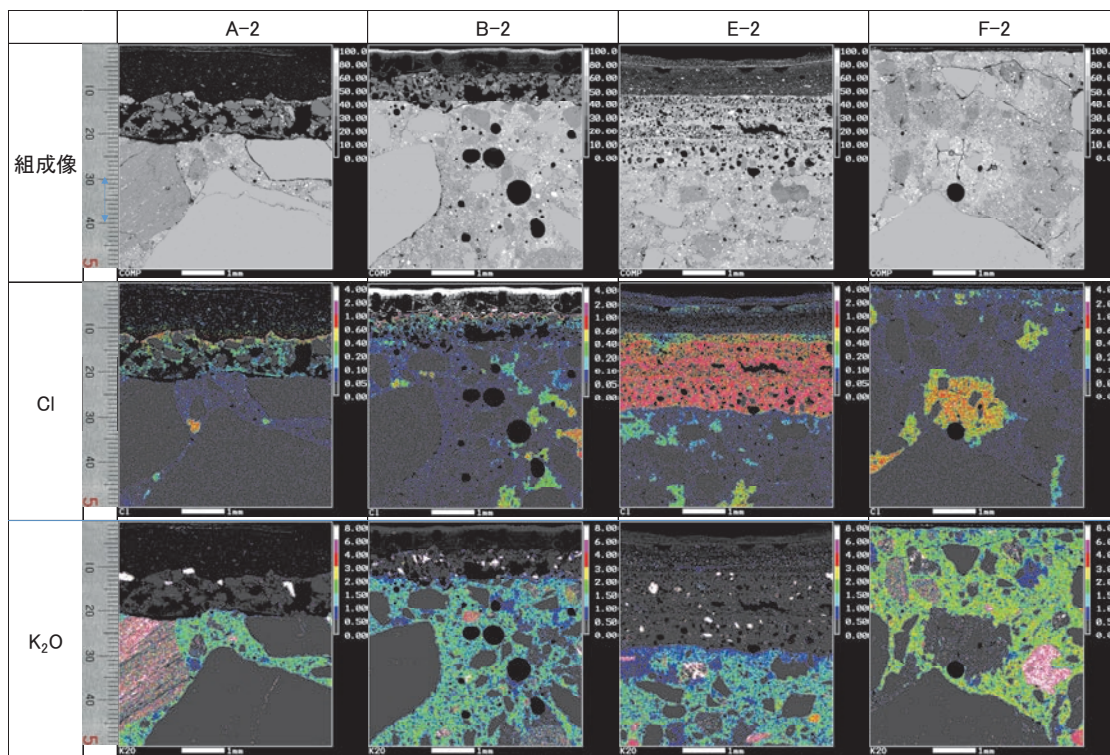
この理由としては、被覆材の種類によって、下地材、上塗材などの構成材料の組み合わせが異なることから、結局、被覆材の全体系(各材料の組み合わせ)によって、性能が異なると考えられる。上記のように、被覆材の遮塩性に関する経時変化は不明確な点が多く、今回の評価は今後も継続実施する予定である。

(2) EPMA 測定結果

マッピング画像を図-3.19、ClおよびKの結果をグラフ化したものを図-3.20に示す。また、比較として、2.の内塩分の無い試験体の結果を図-3.21に示した。以下、グラフを中心に考察を行う。なお、今回の試料は、表面被覆の適用前に塩分がある程度侵入しているため、その影響を踏まえて考察を行う。

1) 被覆材 A(試験体3)

樹脂部には比較的少量のClが確認された。モルタル層(下地材)の表層付近には、多量のClが確認された。メーカースクリーニングにより、このClはプライマー中に内在していたものが主と推測された。モルタル層の内部には、表層付近より少ないClが確認され、若干の濃度勾配が生じているようにも見える。一方、コンクリート部表層部には、高濃度のClは確認されなかった。なお、図-3.21の試験体3(A)の樹脂部とモルタル部においても上記と同



↑1目盛り=0.1 mm

図-3.19 元素マッピング画像(上端が最表面(図-3.21の0の位置))

備考: 図中の黒い丸状のもの(B-2, F-2中)は、元々コンクリート中に存在していた空隙(気泡)。

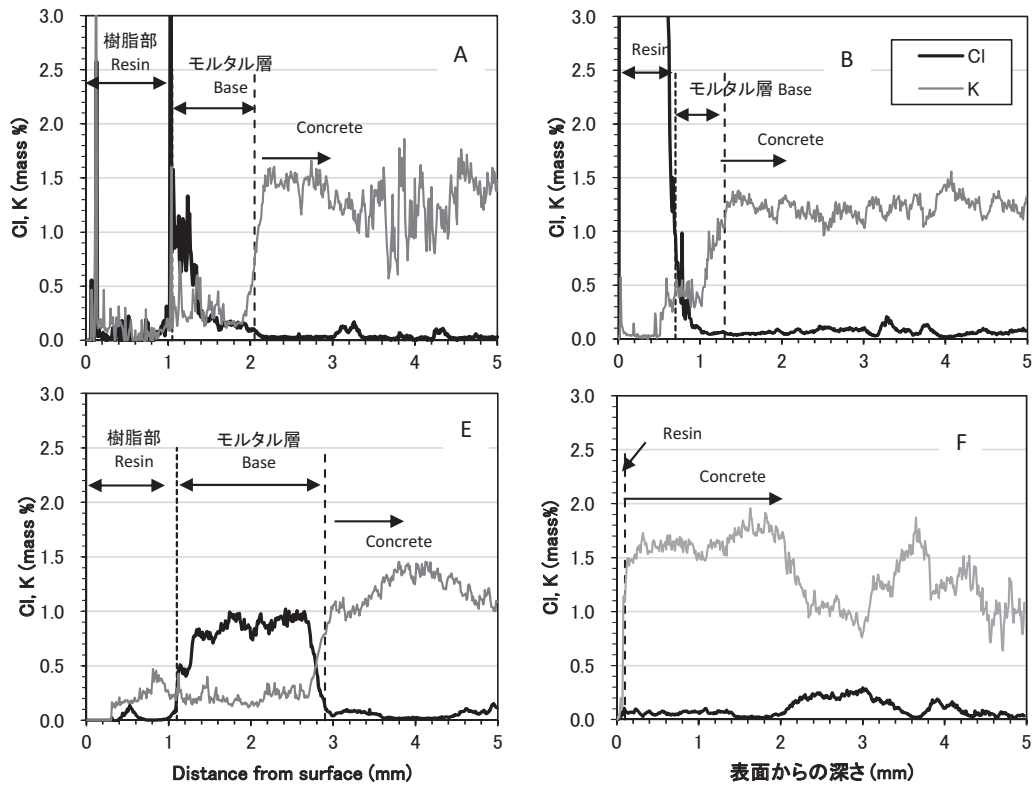


図-3.20 塗膜内の Cl および K 濃度分布 (26 年) : 実析

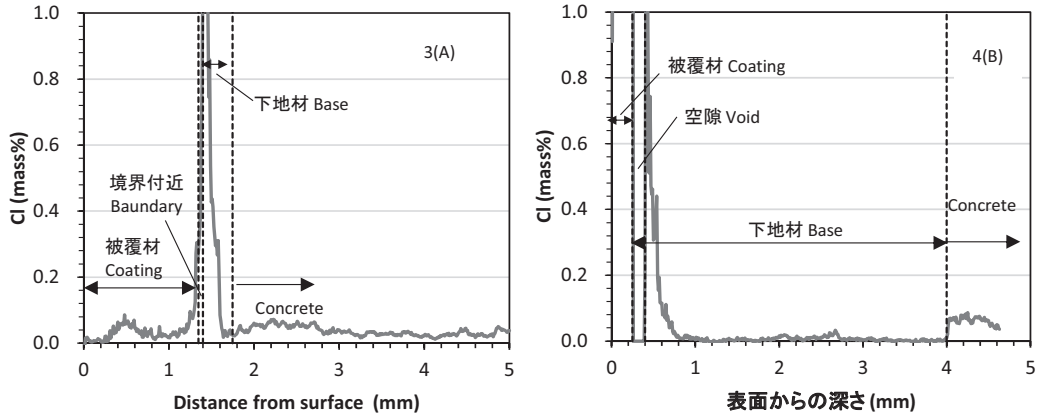


図-3.21 塗膜内の Cl 濃度分布 (30 年) : 試験体 (図-2.12 より引用)

様な傾向が見られた。

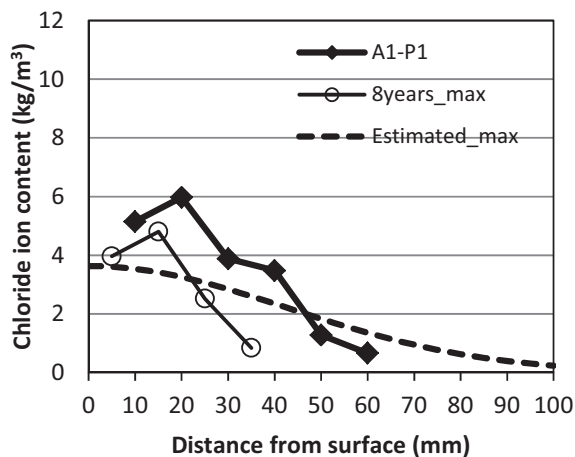
K については、コンクリート中には多量に存在しているが、暴露面側のモルタル部の K の濃度はかなり少なく、濃度分布は不連続なように見える。このことから、海水中に含まれていた K は、モルタルを通過してコンクリート中へは浸透していないと推測される。

2) 被覆材 B(試験体 4)

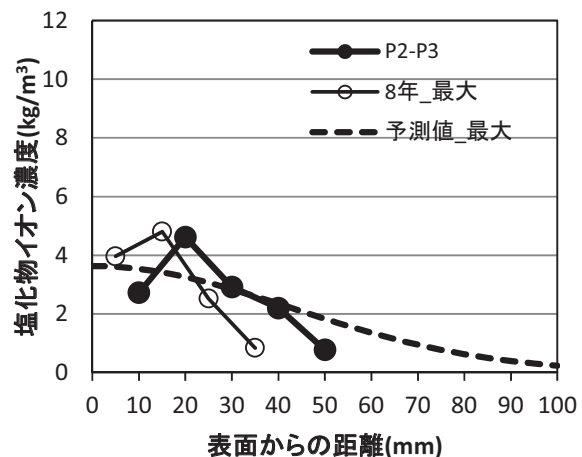
樹脂部に多量の Cl が確認された。メーカーヒアリングにより、この Cl は材料中に内在していたものが主と推測された。モルタル層 (下地材) 内には、A 同様、表層付

近に多量の Cl が確認された。メーカーヒアリングにより、この Cl は当時使用されていたプライマー中に内在していたものが主と推測された。モルタル層内部には比較的少量の Cl が確認され、若干の勾配が生じているようにも見える。一方、コンクリート部表層部には、高濃度の Cl は確認されなかった。なお、図-3.21 の試験体 4(B) の樹脂部とモルタル部においても上記と同様な傾向が見られた。

K については、コンクリート中には多量に存在しているが、暴露面側のモルタル部の K の濃度は少ない。この



i) A1-P1 : G1 桁 (最海側) -海側



ii) P2-P3 : G5 桁 (中央) -海側

図-3.22 コア中の塩化物イオン濃度分布 (実測値と解析値の比較)

ことから、海水中に含まれていた K は、モルタル部を通過してコンクリート中へは浸透していないと推測される。

3) 被覆材 E

樹脂部の内部には Cl はほとんど確認されなかった。モルタル層 (下地材) 内には高濃度の Cl が見られたが、同様な値を示しているため、外部から濃度勾配を持ちつつ浸透したものではなく、モルタルを構成する材料中に内在していたものと推測される。また、コンクリート部表層部には、高濃度の Cl は確認されなかった。

K については、コンクリート中には多量に存在しているが、暴露面側のモルタル部の K の濃度はかなり少なく、濃度分布は不連続なように見える。このことから、海水中に含まれていた K は、モルタル部を通過してコンクリート中へは浸透していないと推測される。

4) 被覆材 F

被覆材部は分析の前処理時に剥離し、精度の良い計測ができなかった。なお、コンクリート部表層部には高濃度の Cl は確認されなかった。K については、コンクリート中には多量に存在していた。

以上の結果をふまえると、外部からの Cl および K において、樹脂部やモルタル部を通過してコンクリート中まで浸透した量は全く無いとは断言できないものの、非常に少なかったということは確実なようである。この結果は、今回の各種被覆材は、26 年間の長期にわたり、コンクリート内への塩分浸透を十分に抑制していたことを示すものと考えられる。

なお、文献 10) において、海岸高架橋に適用され 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

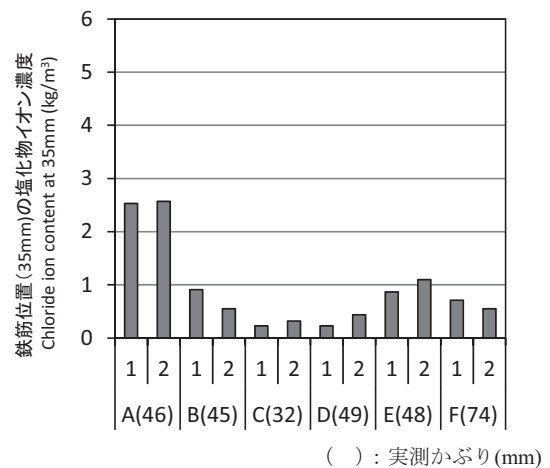


図-3.23 A1-P1 間 (G2 桁部-海側) の塩化物イオン濃度 (かぶり 35mm : 鉄筋位置)

れていない。

3.5.6 被覆材による塩害抑制効果の評価

(1) 被覆適用 26 年後の塩化物イオン濃度分布

図-3.22 に i) A1-P1 : G1 桁 (最海側)-海側および ii) P2-P3 : G5 桁 (中央)-海側における、被覆適用 26 年後の塩化物イオン濃度分布を示す (図中 ◆ ●)。3.5.5 の EPMA の結果より、塩化物イオンは塗膜および下地材中を透過していないと判断されたため、ここで測定されたものは、被覆適用前に侵入していた塩化物イオンが、コンクリート内部での濃度拡散により、高濃度であった表層から低濃度であった内部へ移動したものと考えられる。

また、図中の「予測値_最大」とは、3.2.3 における「1989 年度調査」で最も塩害環境の厳しい「A1-G9-海側」での実測値 (図-3.22 中の「8年_最大」) を基にした予測結果である。過去の調査の最大値を基にしたこの予測値は、

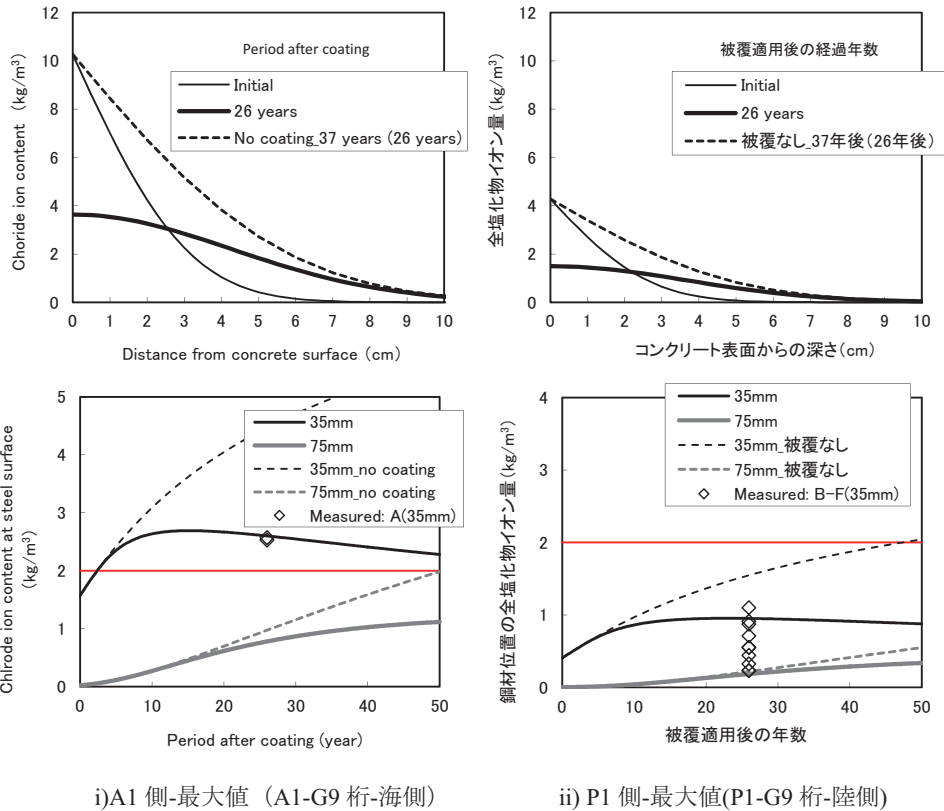


図-3.23 表面被覆適用後の塩化物イオン濃度分布，鋼材位置の塩化物イオン濃度の予測結果

図-3.22 の内部（かぶり 40-60mm 付近）における実測値と概ね同様な値を示した。i)と ii)の位置における被覆適用前の塩化物イオン濃度は、「8 年_最大」の測定値（図中○）と同程度以上であった可能性が高い。

(2)最小かぶり（35mm）位置での塩化物イオン濃度

図-3.23 に A1-P1 間（G2 桁部-海側）の塩化物イオン濃度（かぶり 35mm：鉄筋位置）を示す。かぶり 35mm の位置については、被覆材 A の位置（A1-P1 間の最も A1 側）で 2.0kg/m^3 を上回る塩化物イオンが存在しており、鉄筋が腐食する可能性の高い環境となっている。しかし、腐食は生じていなかった。なお、鋼材表面付近の濃度が 2kg/m^3 を上回っても腐食していないという事例は多い。一方、被覆材 B～F（測定点 12 点のうち 10 点（=10/12（38.3%））の位置については、限界値を大きく下回っており、腐食の可能性は低い。

なお、この結果のばらつきは、3.3 で述べたように、被覆適用前にコンクリート外部から供給された塩化物イオン量の違いによるところが大きい。場所によっては、被覆適用前に多量の塩化物イオンが既に存在していた可能性がある。ただし、今回の結果を見る限りでは、そのような場所の方が少ないようである。また、実際のかぶりは設計値より大きい場合が多くみられた（図中凡例参

照）。この場合、腐食が生じる可能性はさらに低くなる。

図-3.23 に表面被覆適用後の塩化物イオン濃度分布、鋼材位置の塩化物イオン濃度の予測結果を示す。なお、予測結果において、i)は表-3.1 における橋台 A1 側での最大値、ii)は表-3.1 における橋脚 P1 側での最大値を基に計算を行った、橋台 A1 側と橋脚 P1 側で分けた理由は、3.2.2 でも触れたように、外部から供給される塩分が、P1 側と A1 側で傾向が異なると推測されたためである。

被覆適用前に測定された橋台 A1 側における最大の濃度分布を基にした予測結果と、橋台 A1 側に位置し、高濃度であった被覆材 A のかぶり 35mm 位置での実測値（2 点）は同程度の値を示した。当時の実測値において対象環境で最も厳しい塩害環境下にあった部位に表面被覆を適用した場合でも、この程度の値に抑制されていたことを示唆するものとする。

一方、適用前に計測された橋脚 P1 側における最大の濃度分布を基にした予測結果と、橋脚 P1 側に位置し、低濃度であった被覆材 B-F の部位のかぶり 35mm 位置での実測値（10 点）は、 1kg/m^3 付近の比較的高濃度な場合については同程度の値を示した。 1kg/m^3 を大きく下回った箇所については、被覆適用前に供給された塩分が非常に少なかったことを示唆するものである。

これらの結果は、表面被覆の適用により塩化物イオンの供給が十分抑制されたことを改めて示すものである。また、今回採用した簡単な解析手法でも、ある程度将来予測が可能であることも示唆していると考える。

3.6 まとめ

波の上橋のPC桁に供用約11年が経過した後に各種表面被覆を行い、海上大気中で26年経過後に、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)現存している被覆材自体には、顕著な劣化は確認されなかった。

(2)各種被覆材の遮塩性は、26年後も基準値を概ね保持していた。

(3)外部からのClおよびKにおいて、樹脂部やモルタル部（下地材）を通過してコンクリート中まで浸透した量は全く無いとは断言できないものの、非常に少なかったということは確実なようである。この結果は、今回の被覆材は、26年間の長期にわたり、コンクリート内への塩化物イオンの浸透を十分に抑制していたことを示すものである。

(4)今回実施した、被覆適用後の塩化物イオン濃度分布の予測結果（差分法による）において、被覆材が外部からの塩分の浸透を完全に抑制した際の塩分浸透抑制効果は明確である。一方、今回においては、上述の(2)や(3)で示したように、被覆材の遮塩性は高い性能を保持し続けており、結果として外部からの塩化物イオンの浸透は十分抑制されていると推測された。すなわち、波の上橋の実橋において、表面被覆の適用により、塩化物イオンの浸透を抑制する効果は十分に発揮されていたと判断できる。

以上のことから、多量の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、26年程度（暴露試験体の場合は30年）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。

4. エポキシ樹脂塗装鉄筋が埋設されたコンクリート試験体の長期暴露試験（なうら橋）

4.1 はじめに

エポキシ樹脂塗装鉄筋は、鉄筋の表面にエポキシ樹脂（厚さ 200 μm 程度）が塗装されたものであり、高い耐食性を有する¹³⁾。しかし、実構造物、特に港湾構造物に長期間適用されたものに対する調査事例は少ない。そこで、なうら橋の PC 橋梁施工時において、エポキシ樹脂塗装鉄筋を埋設したコンクリートの暴露試験（小型・大型）が 1992 年に開始された。以下は、約 25 年が経過した 2017 年に実施された「小型試験体」の解体調査結果、約 26 年が経過した 2018 年に実施された「大型試験体」の解体調査結果をまとめたものである。

4.2 暴露試験概要

4.2.1 対象構造物および試験体

那覇港・なうら橋(5 径間連続 3 室箱桁橋:場所打ち 固定支保工, 本体工事: 1990.9~1992.3, 完成・開通: 1993.5)において、暴露試験が実施されている。暴露箇所および暴露状況を図-4.1 に示す。なお、本橋は、全国で 9 番目（沖縄では 3 番目）にエポキシ樹脂塗装鉄筋が本格的に

使用された橋梁である。小型と大型の 2 種類の試験体が暴露されている。

表-4.1 に小型試験体一覧を示す。試験体は 4 種類あり、塗装鉄筋、無塗装鉄筋、シース（PC 鋼材の保護管）の埋設本数が異なっている。各 1 体ずつを 2017 年 6 月 7 日に回収した。なお、表中の残存個数は今回回収後の数量である。

大型試験体（暴露面寸法：1,100×2,200mm）は、1992 年 2 月に暴露開始されており、約 26 年が経過した 2018 年 11 月に調査を実施した。なお、水平方向および鉛直方向に鉄筋が配置されている（図-4.2 参照）。

4.2.2 調査項目

(1) 塩化物イオン濃度分布測定

小型試験体においては、試験体④からコアを 3 本採取し、塩化物イオン濃度分布（表面から 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50mm の 5 点）を測定した。大型試験体においては、図-4.2 に示す位置からコア 3 本を採取し、塩化物イオン濃度分布（表面から 5-15, 15-25, 25-35, 35-45 および 45-55mm の 5 点）を測定した。また、濃度分布を式 (2.1) で回帰させることにより C_0 および D_{ap} を求め、それを用いて鉄筋位置の塩分濃度の将来予測を行った。



図-4.1 暴露場所および暴露状況

表-4.1 小型試験体一覧

試験体	鉄筋	寸法(mm)	シース	リード線	残存個数		
					台上	台下	計
試験体①	塗装鉄筋(D19): 3本	300×300×400	有	7本	2	0	2
	塗装鉄筋(D13): 3本						
試験体②	塗装鉄筋(D19): 3本	275×275×340	無	3本 (1カ所に集中)	3	2	5
	塗装鉄筋(D13): 3本						
試験体③	塗装鉄筋(D19): 3本	275×275×340	無	3本 (2カ所に分散)	1	2	3
	無塗装鉄筋(D13): 2本 塗装鉄筋(D13): 1本						
試験体④	無塗装鉄筋(D19): 3本	275×275×340	無	1本	2	2	4
	無塗装鉄筋(D13): 3本						

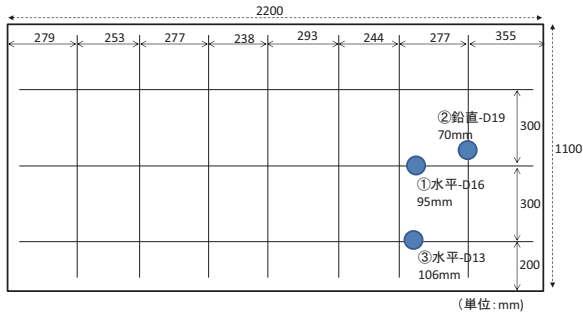


図-4.2 大型試験体配筋図

(2) 鉄筋腐食状況(目視観察)

小型試験体においては、試験体を全部はつり、鉄筋を全て取り出した後に、鉄筋の腐食状況を確認した。大型試験体においては、採取したコア3本の周辺(3箇所)をはつり、鉄筋の腐食状況を確認した。

(3) FT-IR 分析

FT-IR (フーリエ変換型赤外分光法) により、コンクリート内におけるエポキシ樹脂の劣化状況の確認を行った。FT-IR 分析とは、物質に赤外光を照射し、透過または反射した光を測定することで、試料の構造解析や定量を行う分析手法である。なお、分析試料は大型試験体から採取した鉄筋③(D13)を用いた。

4.3 調査結果

4.3.1 調査結果 (小型試験体)

(1) 目視調査

解体前のコンクリートの状況の一例を図-4.3に示す。コンクリート表面に目立った変状は確認されなかった。

(2) 塩化物イオン濃度分布

塩化物イオン濃度の測定結果を図-4.4に示す。なお、図中の「12年」とは、文献14)に掲載されていた過去の調査結果を示したものである。今回の中で最小のかぶり厚(鉄筋位置)における塩化物イオン濃度(最大値と推測される)が腐食発生限界塩化物イオン濃度(2.0 kg/m³¹⁵⁾)を下回っていた。これは、今回の鋼材周囲の環境は腐食が生じる環境になっていないことを意味する。なお、塩化物イオンの拡散係数 D_{ap} (図中凡例に記載)は非常に小さく(0.08 および 0.16 cm²/年)、塩化物イオン浸透性は低い(コンクリート品質は優れる)ことが確認された。上述のように鋼材周辺の塩化物イオン濃度が低いのはこのことが大きく影響している。

(3) 鉄筋腐食状況(目視観察)

解体後の鉄筋腐食状況を図-4.5に示す。エポキシ樹脂

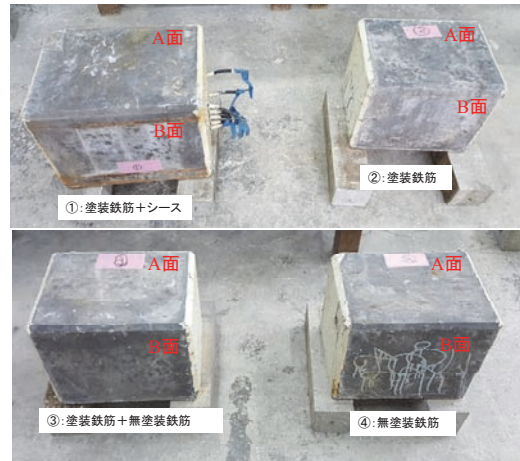


図-4.3 コンクリート試験体外観(解体前)

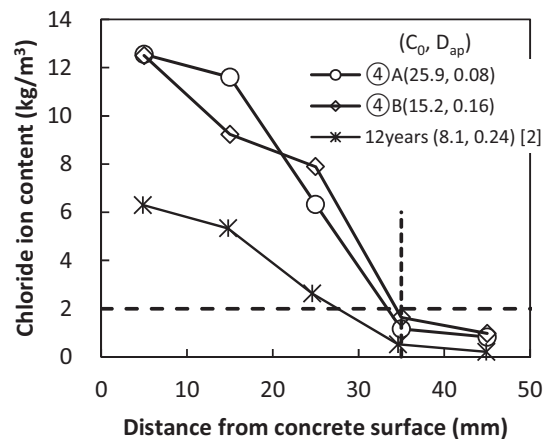


図-4.4 塩化物イオン濃度分布

塗装鉄筋については、リード線の接続部を除き、塗膜の劣化や鉄筋の腐食等の劣化は確認されなかった。なお、無塗装の鉄筋についても、ごく軽微な腐食しか確認されなかった。これは、鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度を上回っていないためと考えられる。

(4) まとめ

- エポキシ樹脂塗装鉄筋において、腐食は確認されなかった。なお、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の限界値を超えておらず、無塗装鉄筋の場合でも腐食が生じにくい環境であった。

- エポキシ樹脂部の劣化は確認されなかった(リード線の接続部は除く)。

本試験より、約25年間のエポキシ樹脂塗装鉄筋の有効性が確認された。

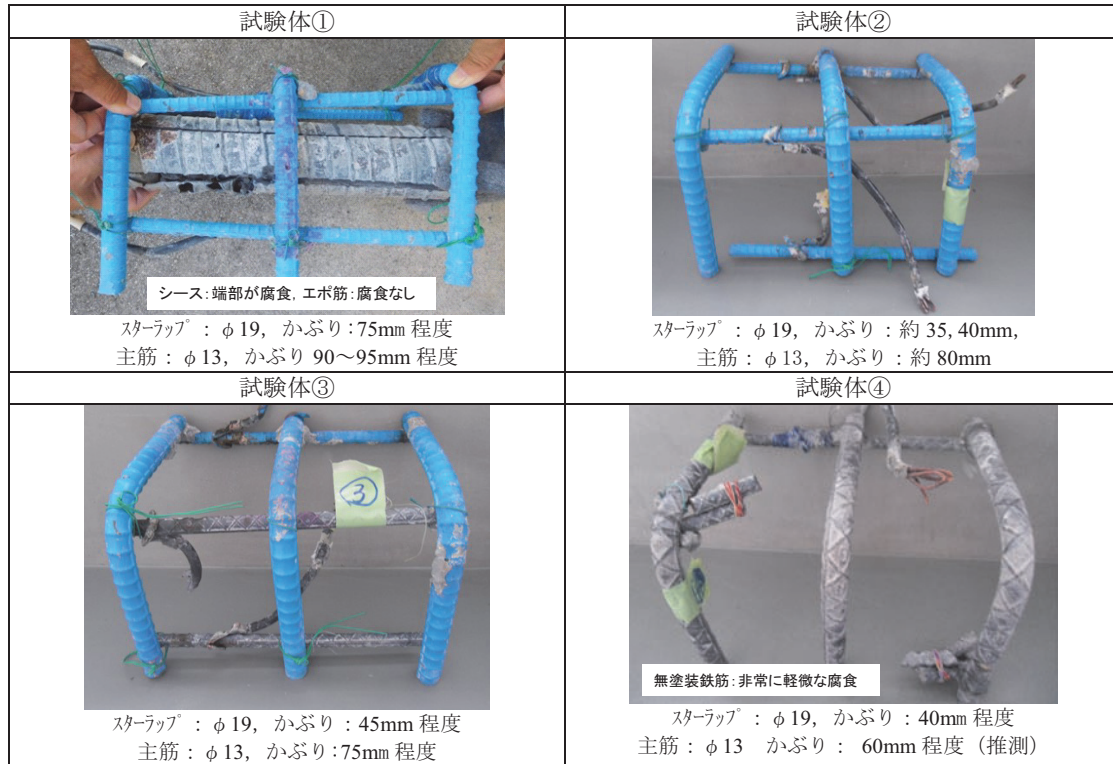


図-4.5 解体後の鉄筋の状況

4.3.2 調査結果 (大型試験体)

(1) 塩化物イオン濃度分布

塩化物イオン濃度分布の測定結果を図-4.6 に示す。表層付近には多量の塩化物イオンが供給されているが、表面から 40mm の位置以深では、鉄筋にエポキシ樹脂が被覆されていない場合の腐食発生限界塩化物イオン濃度 (2.0 kg/m^3 ¹⁵⁾ を下回っていた。これは、今回の鋼材周囲の環境 (最小かぶり 70mm) は、腐食が生じる環境になっていないことを意味する。なお、塩化物イオンの拡散

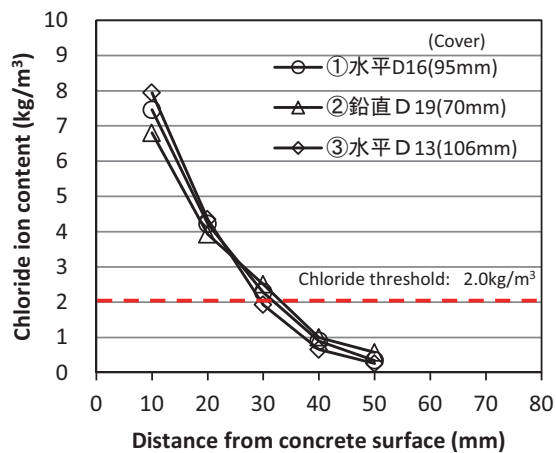


図-4.6 塩化物イオン濃度分布

係数 D_{ap} (図中凡例に記載) は非常に小さく ($0.08 \sim 0.14 \text{ cm}^2/\text{年}$), 塩化物イオン浸透性は低い (コンクリート品質は優れる) ことが確認された。上述のように鋼材周辺の塩化物イオン濃度が低いのはこのことに起因している。

次に図-4.7 は、式(2.1)を用い、鉄筋位置 (かぶり 70mm) における塩化物イオン濃度の将来予測を行った結果である。100 年後においても腐食発生限界濃度 (2.0) を上回らない結果となった。これは、今回条件 (試験体および暴露環境) では、鉄筋にエポキシ樹脂が被覆され

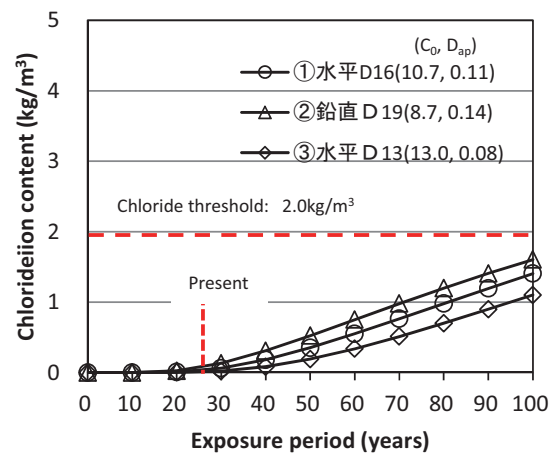


図-4.7 鉄筋位置 (かぶり 70mm) における塩化物イオン濃度の将来予測結果

ていない場合でも、暴露時点から 100 年経過しても腐食しないということを意味する。

(2)鉄筋腐食状況(目視観察)

解体後の鉄筋腐食状況を図-4.8 に示す。エポキシ樹脂塗装鉄筋については、塗膜の劣化や鉄筋の腐食等の劣化は確認されなかった。

(3)エポキシ樹脂の劣化状況 (FT-IR 分析)

図-4.9 に大型試験体より採取した試料 (D13) に対して実施した FT-IR 分析の結果を示す。なお、見やすくするため、D13 (表層から 10 μ m) の値は 20%, D13 (表層から 100 μ m) の値は 10% 上方に移動させている。ここで、透過率のピークが大きいほど(下向きに凸なほど)、また吸光度 (透過率の逆数の常用対数) の色が明るいほど、測定対象となる物質量が減少していることを意味している。エポキシ樹脂塗膜の表層部と内部で、透過率のスペクトル分布に顕著な違いは見られなかった。また、エポキシ樹脂部に劣化が生じると、波数 1,700(cm^{-1}) 付近 (C=O (カルボニル基) 由来) の吸光度が増加するが、明確な変化はなかった。よって、エポキシ樹脂塗膜部は、高アルカリ性のコンクリート環境に長期間 (26 年間) 接していても、特に劣化が進行していなかったと考えられる。

4.4 まとめ

なうら橋の橋台付近において、エポキシ樹脂塗装鉄筋を埋設したコンクリート試験体を 25~26 年暴露した後、各種調査を行った結果、以下の知見が得られた。

(1)エポキシ樹脂塗装鉄筋において、腐食は確認されな

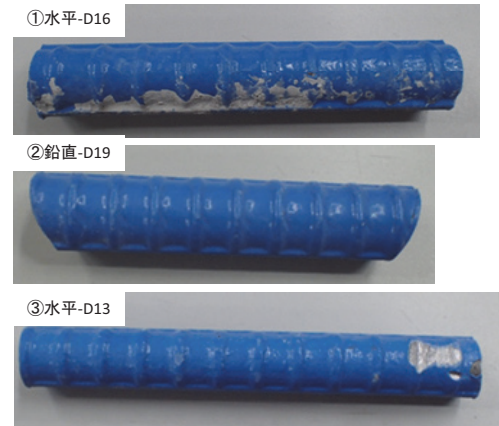
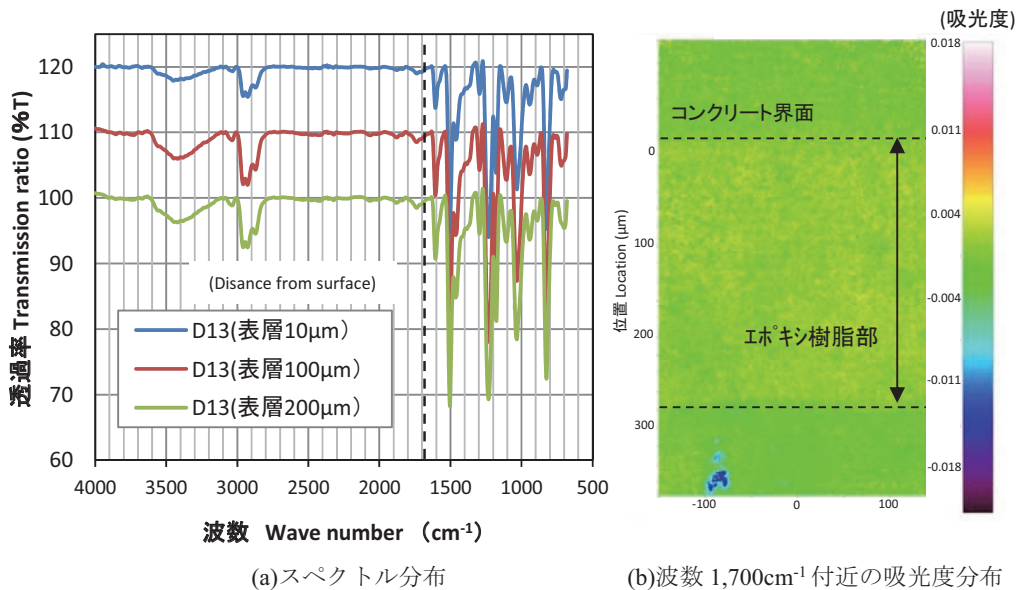


図-4.8 採取後の鉄筋の状況

った。なお、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の限界値を超えておらず、無塗装鉄筋の場合でも腐食が生じにくい環境であった。

(2)エポキシ樹脂の表層部は、高アルカリ性のコンクリート環境に長期間 (26 年間) 接していても、特に劣化が進行していなかった。アルカリ環境下で顕著に劣化が進行することはないようである。



5. まとめ

本章では、那覇港で実施したコンクリートの耐久性に関する長期暴露試験結果を基に、表面被覆材およびエポキシ樹脂塗装鉄筋による耐久性向上方策の効果と今後の課題について述べる。

5.1 表面被覆材による耐久性向上方策（主に既設構造物を想定）

(1) 表面被覆材の期待耐用年数

波の上橋での試験体による暴露試験結果においては30年、波の上橋の実桁における試験施工部では26年にわたり遮塩性を保持し、表面被覆材が塩化物イオンの侵入を抑制していた。

表面被覆材の期待耐用年数については、一般的に「再塗装が必要となるまでの期間」と定義される。表面被覆の適用後26年が経過した今回の結果においては、実桁の大半の部分においては、再塗装が不要な状態であった。この結果より、多量の塩化物イオンが侵入していない段階において、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、その効果（期待耐用年数）は一般的に言われている10～15年程度を大きく上回ることが示唆された。

図-5.1はLCC（ライフサイクルコスト）の経時変化のイメージである。従来だと、期待耐用年数が10～15年程度と言われていた。結果として、再塗装が必要となり、時間とともにLCCが増え続ける計算となる。今回、試験体での一例ではあるが、「海上大気中」において、30年程度にわたり、顕著に劣化することもなく、塩分の浸透を抑制し続けていた。このことを踏まえると、図-5.1のようにLCCの計算が従来と比べて大きく変わるようになる。

ただし、表面被覆材の長期にわたる効果の持続を期待するためには、確実な施工が前提である。特に、背後にひび割れがあり、さらにそこが水みちになっている場合、塗膜が膨れ、はがれが生じる場合がある。

(2) 表面被覆材の適用時の留意点（再塗装時も含む）

コンクリートに対して表面被覆を適用する段階で、既にコンクリート中に塩分が多量に侵入している場合においては、図-5.2のような再劣化が起こる。これは、表面被覆を行い外部から塩化物イオンの供給を抑制されていても、既に内部に浸透していた塩分がコンクリート内部で濃度拡散し、ある時間が経過した後に鉄筋位置での塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} を上回り、鉄筋腐食が開始・進行したことに起因する。

例えば、表面被覆適用前の塩化物イオン濃度分布が図-5.3中の点○であった場合、表面被覆を行って外部からの浸透を遮断すると、コンクリート表面部の濃度は減少する一方で、内部の値は時間の経過とともに増加し、図中の点●のような平坦な分布に変化する。よって、対策として表面被覆工法の適用を検討する際には、図-5.3のように、表面被覆を適用した後のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布の予測を行い、供用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度を上回らない（腐食が発生しない）ことを確認する必要がある。この際の予測方法は、文献16)17)や港湾の施設の維持管理技術マニュアル¹⁸⁾、港湾コンクリート構造物補修マニュアル¹⁹⁾等に記載されている。また、本文3.でも検討を行っている。

(3) 表面被覆材の再塗装の可否の判断（別工法の選択も含む）

現状では、表面被覆材が既に適用された構造物において、一般的な期待耐用年数である10～15年が経過した頃に、表面被覆材の再塗装の判断が求められる。また、表面被覆材のみでは効果が十分でないと判断された場合は、別工法の適用を検討する必要がある。

今回の試験体および実桁での調査結果において、暴露環境、被覆材の仕様、被覆材適用前のコンクリートの状況によっては、30年程度の長期においても表面被覆材は

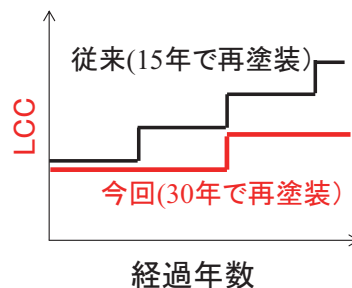


図-5.1 LCCの経時変化（イメージ図）



図-5.2 表面被覆適用後の再劣化事例（腐食ひび割れが発生）

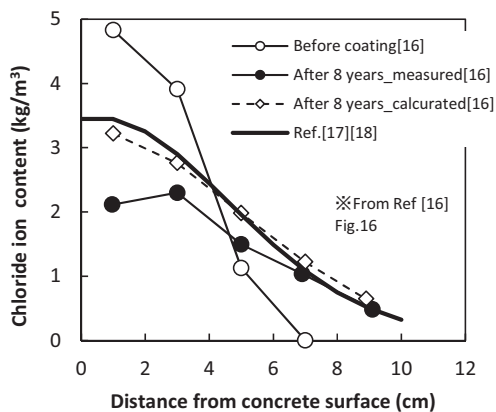


図-5.3 表面被覆適用後の塩分浸透予測例¹⁷⁾¹⁸⁾

遮塩効果を保持していた。この結果に基づくと、一般的な期待耐用年数10～15年を経過した場合でも、実構造物に適用された表面被覆材の遮塩効果を調査・診断することで、表面被覆材の再塗装の可否や、他の工法の適用の可否を検討することが可能になると考える。

実構造物に適用された表面被覆材の遮塩効果を調査・診断する際には、本文3.が参考になる。以下に、塩害環境下に位置しているコンクリート構造物に適用された表面被覆材の再塗装の可否の判断時（別工法の選択も含む）において、主要な調査項目案および留意点を示す。各項目の詳細については、本文3.や、港湾コンクリート構造物補修マニュアル²⁰⁾を参照されたい。

1) 外観調査

塗膜のはく離、膨れ、ひび割れ等を目視で確認する。特に、腐食に起因した変状（ひび割れ、浮き）の確認が重要である。

2) 表面被覆材の遮塩性

塩害環境下に位置しているコンクリート構造物に適用された表面被覆材に求められる性能のうち、最も重要なものが「遮塩性」である。構造物に適用された表面被覆材の遮塩性を評価するための試験方法については、3.を参照されたい。

なお、上述した1)～2)以外の、付着強度やひび割れ追従性についても、被覆材の劣化状況等を踏まえ、必要に応じて実施するとよい。

3) コンクリート中の塩化物イオン濃度分布（鋼材位置の塩化物イオン濃度の把握）

被覆材を適用し、外部からの塩化物イオン濃度の供給をある程度遮断していたとしても、被覆材の適用前に浸透していた塩化物イオンが内部で濃度拡散し鋼材位置の濃度が増加し、鋼材腐食発生限界濃度を上回る場合があ

る（特にかぶりが小さい場合）。また、調査時点では鋼材腐食発生限界濃度を上回っていないとしても、将来的に上回る可能性もある。よって、上述の1)や2)の調査を実施するだけでなく、実構造物から試料（例：コア）を採取し、現況のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を把握するとともに、想定された供用期間中に鋼材腐食発生限界濃度を上回るか否かを予測・評価する必要がある。予測手法については、5.1(2)や3.を参照されたい。なお、上記の調査結果次第では、再塗装でなく、別工法（電気防食工法など）の適用を検討する必要がある²⁰⁾。

(4) 今後の検討課題

表面被覆材による耐久性向上方策に関する今後の検討課題としては、以下のものが挙げられる。

2.での暴露試験体の調査（30年間）により、表面被覆適用前のコンクリート中に塩化物イオンが含まれていない場合において、本工法は30年程度の長期にわたり、非常に有効であることが確認された。また、3.の実桁調査（26年経過）より、表面被覆材自体の性能は、海上大気中においては26年にわたり保持されていた。

今後については、栈橋上部工等のように、コンクリートが湿潤環境にある場合の耐久性、また、コンクリート中に塩化物イオンが含まれている場合の効果について、実構造物調査を基にした調査を行うことが望まれる。

a) 表面被覆材自体の性能評価および劣化予測手法

特にコンクリートとの付着特性の評価・劣化予測は難しい。また、被覆材自体の劣化予測（例えば紫外線による劣化）も難しい。

遮塩性については、今回の海上大気中での暴露試験結果を見る限り、被覆材中には塩化物イオンがほとんど浸透していないようである。遮塩性試験の試験環境のように、常時水中に没していない限り、塩化物イオンは被覆材中へ浸透しにくいと推測される。

b) 被覆適用後のコンクリート中の塩分拡散性状の予測および鉄筋腐食の予測

被覆適用後のコンクリート中の塩分浸透性状の変化については、長期にわたり検証された例が非常に少ない。

腐食開始後の鋼材の腐食速度に関しても、暴露環境に大きく影響されるため、まだ明確になっていない。なお、腐食開始後の腐食速度が明確になると、被覆適用時に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度を上回っても、腐食ひび割れが開始するまでは〇年の猶予がある、ということが予測可能となる。

c) 期待耐用年数の確定

a)とも関連する。まだ明確でなく、更なるデータの蓄積が必要と考える（特に実構造物）。

5.2 エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用による耐久性向上方策（主に新設構造物を想定）

なうら橋での2種類の試験体による長期暴露試験結果において、25～26年の長期にわたりエポキシ樹脂が高アルカリ環境下で劣化しないことが確認された。ただし、今回の鋼材表面には多量の塩分が浸透していなかったため、塩化物イオンに起因する腐食に対する評価はできない状態にある。

今後の検討課題としては以下のことが挙げられる。実港湾構造物において長期にわたり適用された事例が少ないため、実構造物、実環境でのデータの蓄積が望まれる。

a)長期にわたる耐久性評価（期待耐用年数の設定）

高アルカリ環境、塩化物イオンを多量に含むコンクリート中での耐久性

b)ひび割れなどのコンクリートに変状がある箇所での耐久性

海水が直接接触するような高塩分環境での耐久性

c)エポキシ樹脂の損傷個所の耐久性

ピンホールなどの軽微な損傷が生じていた箇所での耐久性（特に、b)と複合した場合）

（2019年8月9日受付）

参考文献

- 1) 山路徹：海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性能照査手法に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1232，2011.6.
- 2) 山路徹，小牟禮建一，浜田秀則：塩害環境下に15年間暴露されたコンクリートの耐久性および表面被覆材による塩害防止効果，港湾空港技術研究所報告，第43巻第2号，2004.6.
- 3) 山路徹，小牟禮建一，濱田秀則：海洋環境に暴露されたコンクリートにおける酸素拡散性状と鉄筋腐食の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.813-818，2004.
- 4) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，中巻，p.599，日本港湾協会，2018.
- 5) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編]，コンクリートライブラリー116，pp.81-115，2005.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，1984.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 佐々木巖，櫻庭浩樹，西崎到，青山敏幸：海洋暴露30年経過したコンクリート表面保護工の調査報告，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol.24，pp.487-490，2015.10.
- 10) 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.
- 11) 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.832-843，2006.1.
- 12) 東京港埠頭株式会社：栈橋劣化調査・補修マニュアル，2012.
- 13) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版]，コンクリートライブラリー112，2003.
- 14) 文献13)，p.205，2003.
- 15) 文献4)，pp.486-489，2007.
- 16) 守分敦郎・長滝重義，大即信明，三浦成夫：既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性，土木学会論文集，No.520/V-28，pp.111-122，1995.8.
- 17) 山路徹，審良善和，小牟禮建一：Excelを用いたコンクリート構造物の塩害劣化予測手法，セメント・コンクリート，No.773，pp.22-28，2011.7.
- 18) (財)沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，pp.215-220，2007.
- 19) (一財)沿岸技術研究センター：港湾コンクリート構造物補修マニュアル，2018.
- 20) 文献19)，pp.35-36，2018.

謝辞

本研究の成果は沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所（当時は那覇港工事事務所），琉球大学，港湾空港技術研究所（当時は運輸省港湾技術研究所）が共同で開始し，継続実施した「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ある。皆様に対して厚くお礼申し上げます。

港湾空港技術研究所資料 No.1362

2019. 11

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2019) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています