

独立行政法人港湾空港技術研究所

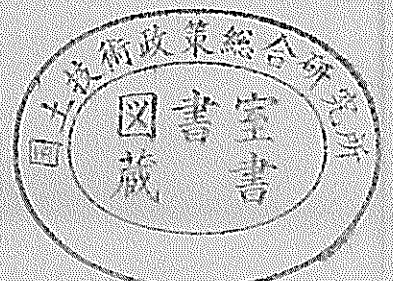
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.43 No.2 June 2004

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 43 卷 第 2 号 (Vol. 43, No. 2), 2004 年 6 月 (June 2004)

目 次 (CONTENTS)

1. 臨海部の複層都市空間における MARS 法を用いた高精度な浸水解析
..... 安田 誠宏・平石 哲也 3
(Highly Accurate Inundation Simulation by MARS Method on Compound Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)
2. 盤洲干潟周辺海域における底生系と浮遊系のカップリングに関する研究
..... 中村 由行・野村 宗弘・神尾 光一郎 35
(Field observation and analysis of benthic-pelagic coupling in Banzu tidal flat and the adjoining coastal area of
Tokyo Bay
..... Yoshiyuki NAKAMURA, Munehiro NOMURA, Koichiro KAMIO)
3. 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
..... 山路 徹・小牟禮 建一・濱田 秀則 73
(Durability of 15-year Old Concrete Specimens with Surface Coating under Marine Environments
..... Toru YAMAJI, Ken-ichi KOMURE, Hidenori HAMADA)

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

山路 徹*・小牟禮建一**・濱田 秀則***

要 旨

昭和50年代後半に那覇港の臨港道路に施工されたプレストレストコンクリート橋は、海上に位置し、厳しい塩害環境であるにもかかわらず、その設計・施工が道路橋の塩害対策に関する指針が改訂される前であったため、かぶりが3.5cmで施工されていた。そのため、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、当時表面被覆材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を収集することを目的として、コンクリート表面に異なる6種類の表面被覆を施した試験体の暴露試験が那覇港において1987年に開始された。本論文は、試験体暴露開始後15年時において、これらの表面被覆材の塩害防止効果を評価するため、被覆材外観、付着性、ひび割れ追従性、遮塩性等に関する各種試験を行い、その結果をまとめたものである。また、被覆を行っていないコンクリート試験体も現地に暴露し、コンクリートの耐久性に及ぼす水セメント比、鉄筋かぶりおよび暴露環境の影響に関する検討も行った。以上の検討より得られた知見を以下に示す。

表面被覆を行っていないコンクリート試験体の場合、コンクリート中への塩化物イオンの浸透および鉄筋の腐食を抑制するためには、コンクリートの水セメント比を低減させることおよびかぶり厚さを増加させることが非常に有効であることが確認された。また、水セメント比や暴露環境等の違いによりコンクリートの酸素拡散性状が異なった場合、鉄筋の腐食速度は異なり、鉄筋表面における酸素供給量と鉄筋の腐食速度の間には良い相関が認められた。すなわち、コンクリートの酸素拡散性状を考慮することで、鉄筋の腐食速度が推定される可能性が示された。

表面被覆を行ったコンクリート試験体の場合、表面被覆材の劣化状況は、その仕様によって大きく異なっていた。また、被覆材の付着性については、15年後においても顕著な低下は見られなかった。しかしながら、表面に劣化が見られた被覆材においても、コンクリート中への塩化物イオンの浸透はほとんど無く、その結果として、コンクリート中の鉄筋は15年後においても腐食していなかった。以上のことから、塩化物イオンが浸透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、今回のような条件においては、15年間の長期においても塩害防止効果が十分に維持されることが確認された。

キーワード：港湾コンクリート構造物，耐久性，塩化物イオン，鉄筋腐食，表面被覆

* 地盤・構造部 主任研究官

** 前地盤・構造部 材料研究室 客員研究員（現ショーボンド建設株式会社営業本部）

*** 地盤・構造部 材料研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail:yamaji@pari.go.jp

Durability of 15-year Old Concrete Specimens with Surface Coating under Marine Environments

Toru YAMAJI* Ken-ichi KOMURE Hidenori HAMADA*****

Synopsis

Two series of exposure test were carried out at Naha port in Okinawa, Japan. Series 1 is to investigate the effect of water-to-cement ratio, cover depth and exposure environment on the durability of concrete without surface coating. Series 2 is to evaluate the effect of protection against chloride attack by surface coatings. The results obtained in this study are summarized below.

The results of series 1 are 1) it was confirmed that to lower the water-to-cement ratio and to increase the cover depth were very effective for the durability enhancement of concrete, 2) the oxygen supply was a main parameter controlling the corrosion rate of steel bar in concrete and 3) it was shown that the corrosion rate of steel bar can be evaluated considering the oxygen supply to embedded steel bar.

The results of series 2 are 1) the durability of surface coating materials depends on their specification, 2) the adhesion between the surface coating and concrete was not decreased significantly, 3) chloride ion ingress was not observed in the concrete with appropriate surface coating. In this case, no steel corrosion was observed. From these results, it was confirmed that surface coating was very effective for the durability enhancement of concrete, and the effect of protection by surface coatings was maintained at least for 15 years.

Key Words: port concrete structures, durability, chloride ion, steel corrosion, surface coating

*Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Ex-Visiting Researcher, Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
(Sho-Bond Corporation)

*** Head, Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5061 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yamaji@pari.go.jp

目 次

要 旨	73
1. 序論	77
1.1 背景および目的	77
1.2 本論文の構成	77
2. 塩害環境下に 15 年間暴露されたコンクリートの耐久性	77
2.1 はじめに	77
2.2 試験体	78
2.3 暴露環境	78
2.4 試験内容	79
2.5 試験結果	80
2.6 まとめ	85
3. 塩害環境下に 15 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	86
3.1 はじめに	86
3.2 試験体	86
3.3 暴露環境	86
3.4 試験内容	86
3.5 試験結果	90
3.6 まとめ	94
4. まとめ	94
謝辞	95
参考文献	95
付録	
付録 A 暴露初期に試験体 50X-35 に浸透した塩化物イオン量	97
付録 B 波の上橋および泊大橋における付着塩分量および飛来塩分量	97
付録 C 試験体外観（表面被覆無し）	98
付録 D 電気化学的測定結果	99
付録 E 見かけのはく離強さ試験方法	101
付録 F 試験体外観（表面被覆有り）	103
付録 G 現地試験施工追跡調査結果	109

1. 序論

1.1 背景および目的

港湾コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート中の鉄筋が腐食することにより、構造物の機能が低下する現象である。鉄筋の腐食は、海水中に含まれる塩化物イオン Cl^- がコンクリート中を浸透し、ある限界量以上の Cl^- が鉄筋表面に到達すると開始する。この限界量は「腐食発生限界塩化物イオン濃度」と呼ばれ、「コンクリート標準示方書（施工編）¹⁾」では、コンクリート 1m^3 あたり塩化物イオンが $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 含まれていると腐食が開始するとしている。そして腐食開始後は酸素 O_2 の供給の下で腐食は進行する。そのため、外部からの Cl^- や O_2 の供給を抑制することにより、腐食の開始時期や進行速度を遅くすることが可能となる。 Cl^- や O_2 の供給を抑制する方法として、コンクリート表面にエポキシ樹脂などを塗装する表面被覆工法は有効な塩害対策工法として現在広く用いられている。

昭和 50 年代後半に那覇港の臨港道路に施工されたプレストレストコンクリート橋（以下、PC 橋）である泊大橋・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²⁾」が改訂される前の設計・施工であったため、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、比較的早い時期に鉄筋位置での塩化物イオンが腐食発生限界塩化物イオン濃度に到達するため、長期耐久性の確保は困難である。そこで、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、コンクリート表面に異なる 6 種類の表面被覆を施した試験体の長期暴露試験が 1987 年に開始された。

本論文は、試験体暴露後 15 年時において、これらの表面被覆材の塩害防止効果を評価するため、被覆材外観、付着性、ひび割れ追従性、遮塩性等に関する各種試験を行い、その結果をまとめたものである。

また、この表面被覆材の塩害防止効果評価試験と同時に、被覆を行っていないコンクリート試験体も現地に暴露し、コンクリートの耐久性に及ぼす水セメント比 W/C および鉄筋かぶりの影響に関する検討も行った。そして、暴露環境を考慮した港湾コンクリート構造物における劣化予測手法に関する検討も行った。

なお、本論文において行われた長期暴露試験は、沖縄

総合事務局那覇港港湾空港工事事務所（開始当時は那覇港工事事務所）が実施した「昭和 62 年度那覇港臨港道路 PC 橋の劣化対策調査³⁾」の中で「塗装材料相対評価試験」および「劣化度診断試験」として計画され、開始されたものである。また、材齢 1 年目までの結果をとりまとめた文献⁴⁾を基に、内容を発展させたものである。

1.2 本論文の構成

本論文は、大きく分けると 2 つの内容から成る。1 つは、コンクリートの耐久性に及ぼす水セメント比 W/C およびかぶり厚さの影響を検討したものである（2 章）。もう 1 つは、コンクリートに表面被覆を施した際の塩害防止効果について検討したものである（3 章）。4 章では、以上の 2 つの検討結果を踏まえ、コンクリート構造物の耐久性向上方策について考察を行っている。

2. 塩害環境下に 15 年間暴露されたコンクリートの耐久性

2.1 はじめに

コンクリート構造物の耐久性は鉄筋腐食に依存することが非常に多い。海洋環境に位置するコンクリート構造物において、この鉄筋腐食を開始させる要因となるのは外部から浸透してくる塩化物イオンである。鉄筋腐食開始時期を遅くするためには、塩化物イオンの浸透を防ぐことが重要である。また、鉄筋腐食の進行速度は、主に鉄筋への酸素の供給量の影響を受ける。すなわち、コンクリート中への酸素の透過を防ぐことにより、鉄筋腐食の進行は遅くなる。塩化物イオンや酸素の透過性を小さくするためには、 W/C を小さくし、コンクリートの組織構造を緻密にすることが非常に有効である。また、鉄筋かぶりを大きくすることで、鉄筋位置に劣化因子が到達する時間を長くすることも非常に有効である。本章では、 W/C およびかぶりを変化させたコンクリート試験体を那覇港に 15 年間暴露を行い、その際の劣化状況について調査を行った。また、暴露環境の違いが劣化状況に及ぼす影響についても検討を行った。なお、本章において実施された暴露試験は、文献³⁾において「劣化度診断試験」として計画され、開始されたものである。本試験は、現地構造物（泊大橋・波の上橋）における塩化物イオンの浸透状況や鉄筋の腐食状況をモニタリングすることを主目的として開始された。

2.2 試験体

試験体形状を図-2.1に、試験体配合を表-2.1に示す。W/Cは37%および50%の2種類である。このW/C=37%は実橋の配合に準じている。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。なお、使用した骨材はいずれもアルカリ骨材反応性を有していない。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った。また、試験体は150*150*800mmの角柱であり、主鉄筋が2本（φ13mmの丸鋼）埋設されている。かぶりは20および35mmの2種類である。また、主鉄筋には電気化学的測定を実施するためのリード線が接続されている。試験体一覧を表-2.2に示す。暴露後8、10、12および15年時に各1~2体ずつ試験に供した。なお、50X-35において、試験体に鉄筋腐食ひび割れが生じていたものは50X-35(C)、健全なものは50X-35(S)と呼ぶこととする。また、37-20は3章における無塗装の試験体（試験体0）と同一の試験体であるが、便宜上ここではこのように呼

ぶことにする。この37-20と37-35で耐久性に及ぼすかぶりの影響の検討を行い、37-35と50-35で耐久性に及ぼすW/Cの影響の検討を行った。

2.3 暴露環境

沖縄県那覇港の臨港道路にある波の上橋の橋脚P1およびP4の側面に架台を設置し、その上にコンクリート試験体を暴露した。その状況を図-2.2に示す。実構造物において表面被覆を行う対象は橋桁であるため、橋桁のできるだけ近くに台が設置されている。この場所は海上約6~7mの位置にあり、常時波しぶきや潮風の影響を受ける非常に厳しい塩害環境にある。

なお、試験体50X-35については、初期に塩化物イオンを多く浸透させるため、那覇港内の波除堤壁面（干満帯）に1ヶ月間暴露後、P1橋脚に移動させ、暴露を開始させた。P1橋脚に暴露する前の塩化物イオン量は付録Aに示した。コンクリート表面にフジツボ等の貝類の付着跡が残っていたことから、その当時海水に浸漬していた時間は比較的長かったものと推測される。また、暴露箇所はP1橋脚とP4橋脚の2箇所であるが、P1付近の付着塩分量および飛来塩分量を付録Bに示した。同じ波の上橋のP8-A2あるいは近隣の泊大橋のP26-P27と

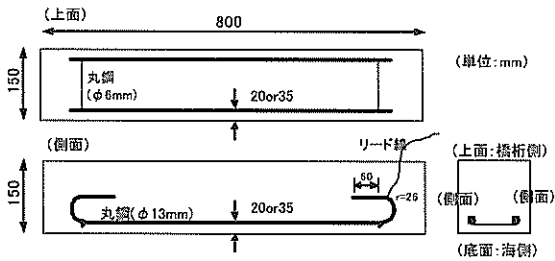


図-2.1 試験体形状

表-2.1 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
37	36.4	178	481	609	1080
50	44.5	165	330	804	1061

表-2.2 試験体一覧

試験体	W/C (%)	かぶり (mm)	暴露環境	各調査時の試験体状況						
				8年	10年	12年	15年			
37-20*	37	20	P4	S	-	S	S	-	S	-
37-35	37	35		S	S	S	S	S	S	-
50-35	50	35	P1	S	S	S	C	S	S	C
50X-35	50	35		S	S	S	S	S	S	C

*:3章の試験体0と同じ S:健全, C:ひび割れ発生

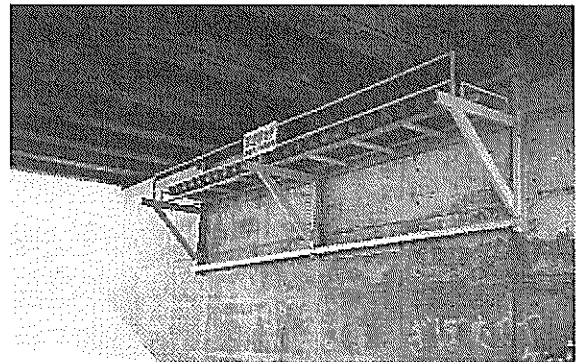
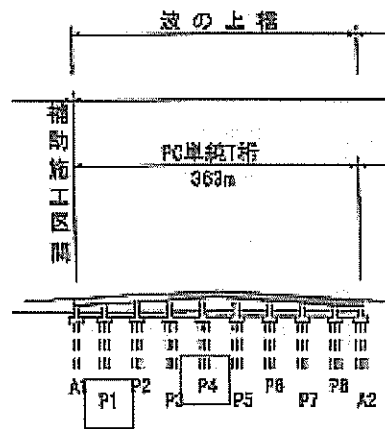


図-2.2 暴露箇所略図および暴露状況

比較して付着塩分量および飛来塩分量が多くなっている。これは、橋脚 P1 は他の橋脚に比べて海面に近く、また汀線に近いことなどにより、他の場所と比べて海水飛沫を受けやすい環境にあると考えられる。

2.4 試験内容

暴露開始時に「劣化度診断試験³⁾」として計画され、材齢 8, 10 および 12 年に実施された試験項目は、外観観察、全塩化物イオン量および鉄筋腐食状況であった。今回測定においては、コンクリート自体の劣化状況や、鉄筋腐食速度に大きく影響を及ぼす酸素拡散性状について検討を行うため、上記項目の他にも試験を追加して行った。

(1) 外観観察

コンクリート表面に生じた鉄筋腐食ひび割れなどの観察を行った。

(2) 圧縮強度

材齢 15 年時に採取したコア (φ68mm) を用い、JIS A 1108 に準拠して圧縮試験を行った。

(3) 中性化深さ

材齢 15 年の試験体の切断面に対して、フェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧後、中性化深さを 20 点測定し、その平均値を求めた。

(4) 全塩化物イオン量

試験体底面(海側)のひび割れの無い箇所からコア (φ68mm) を採取し、全塩化物イオン量を JCI-SC4 に準拠して測定した。試料採取位置は 0~10, 15~25, 30~40, 50~60mm の 4 点である。なお、採取の際はコンクリートカッターなどで切り出してから、粗骨材も含めて全粉碎した。そして、得られたコンクリート粉から塩化物イオンを抽出し、電位差滴定法により測定した。

上記測定により得られた塩化物イオン濃度分布を Fick の第 2 法則の解である (1) 式で回帰させ、表面塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見かけの拡散係数を算出した。

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1)$$

ここで、 C : コンクリート表面から x 離れた位置の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 : コンクリート表面での塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 x : コンクリート表面からの距離 (cm)、 D : 見かけの拡散係数 (cm^2/s)、 t : 時間 (s)、 erf : 誤差関数である。

(5) コンクリートの酸素拡散係数

材齢 15 年の試験体底面 (海側) のひび割れの無い箇所から採取したコア (φ68mm) を用い、JCI-DD5 に準

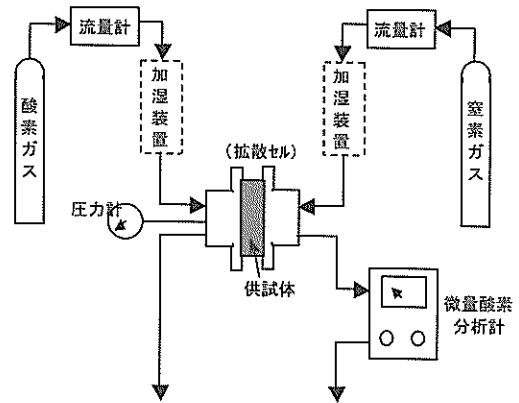


図-2.3 酸素拡散試験

拠してコンクリートの酸素拡散係数の測定を行った。測定状況を図-2.3 に示す。なお、試験体数は 1 体である。コンクリート試験体の片方から一定圧力・流量の酸素ガスを流し、反対側に出てくる酸素濃度を測定するものである。この濃度が定常状態になったときの値を式(2)に代入し、酸素拡散係数が算出される。

$$D_{O_2} = \frac{Q \cdot L}{S \cdot \Delta C} \quad (2)$$

ここで、 D_{O_2} : 酸素拡散係数 (cm^2/s)、 Q : 1 気圧下で供試体を通る酸素の流量 (cm^3/s)、 L : 供試体厚さ (4 cm)、 S : 供試体の測定部分の面積 (12.6 cm^2)、 ΔC : 供試体両面の酸素濃度差 (≈ 1.00) である。酸素拡散係数の値はコンクリートの含水状態により値が変化するため、含水率を設定する必要があるが、現地の状態が不明なため、特に含水率の調整は行わず、試験体を切り出した後、室内に約 2 ヶ月間放置した後、試験を行った。なお、含水率の測定は試験後の重量、飽和時および絶乾時の重量を測定することにより求めた。

(6) 微細構造分析

材齢 15 年の試験体底面からコアを採取し、その表面部 (0-10mm) および内部 (50-60mm) の 2 箇所において、細孔径分布測定および粉末 X 線回折試験を行った。細孔径分布測定は、粗骨材を取り除きながら 5mm 程度に砕いたモルタル片を採取し、水銀圧入法により行った。なお、測定した細孔径の範囲は 0.003-400 μm である。粉末 X 線回折試験は、骨材を除去しながら微粉碎したものを試料として測定を行い、コンクリート中に生成している結晶性物質の同定を行った。

(7) 鉄筋腐食状況

a) 埋設鉄筋の腐食状況

コンクリート中の鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率を測定した。また、材齢 15 年時においては、一部腐食減量の測定も行った。腐食面積率の測定は腐食した箇

所(点錆も含む)を透明フィルムに写し取るにより行った。腐食減量の測定は、腐食が認められなかった鉄筋の減量から、鉄筋をクエン酸水素二アンモニウム 10% 溶液に 1 日浸漬させ、錆をワイヤブラシで除去した際の重量を減じることにより算出した。

b)電気化学的方法による鉄筋の腐食状況の測定

暴露 15 年後の試験体に対して、(株)四国総合研究所製鉄筋腐食診断器を用い、自然電位および分極抵抗の測定を行った。測定の際は、コンクリート表面を十分に湿潤させた後、センサ部をコンクリート表面に静置して行った。測定は 10cm 間隔で行い、主鉄筋 1 本につき 5 点である(1 体につき 10 点)。自然電位は銀塩化銀電極(Ag/AgCl 電極)を用い測定した。分極抵抗は高低 2 種類(10Hz/20mHz)の交流電圧を鉄筋に印加し、その際の応答電流を測定することにより求めた。また、得られた分極抵抗 R_p は次式により、腐食速度(腐食電流密度) I_{corr} に換算される。

$$I_{corr} = \frac{K}{R_p} \quad (3)$$

ここで、 I_{corr} : 腐食速度 ($\mu A/cm^2$)、 R_p : 分極抵抗 (Ω)、 K : 定数 ($K=0.026(V)$) である。

2.5 試験結果

(1)外観

表-2.2 に調査時の試験体外観状況を示す。また、付録 C に暴露 15 年後の試験体の状況を示した。50-35 においては、暴露 10 年後の 2 体のうち 1 体と暴露 15 年後の 1 体において鉄筋腐食ひび割れが見られた。最大ひび割れ幅はそれぞれ 1.6, 1.1mm であった。50X-35 においては、暴露 15 年後までは鉄筋腐食ひび割れは見られず、暴露 15 年後の 2 体のうち 1 体に鉄筋腐食ひび割れが発生していた。最大ひび割れ幅は 0.7mm であった。一方、37-20, 37-35 についてはひび割れなどの変状は認められなかった。

(2)圧縮強度

図-2.4 に材齢 15 年時に各試験体から採取したコアの圧縮強度を示す。37-35 (W/C=37%)は 50-35 (W/C=50%) および 50X-35(C)の約 2 倍となっており、W/C の影響が明確に現れている。

(3)中性化深さ

図-2.5 に平均中性化深さを示す。全体的に値は小さいが、50-35 が最も深くまで中性化しており、圧縮強度同様に W/C の違いが現れている。しかしながら、50X-35(C)の値は 37-35 に比べて小さくなっている。これは、暴露環境 P1 は P4 よりも海水飛沫を受けやすい、すなわ

ちより湿潤した環境であったことが影響していると考えられる。また、初期に 15 ヶ月間干満帯に暴露されており、その際にコンクリートの微細構造がより緻密になっていた可能性も考えられる。

(4)塩化物イオン量

図-2.6 に全塩化物イオン量測定結果を示す。W/C=50%に比べて、W/C=37%の方が内部への浸透量は少なくなっている。また、37-35 の鉄筋位置(かぶり

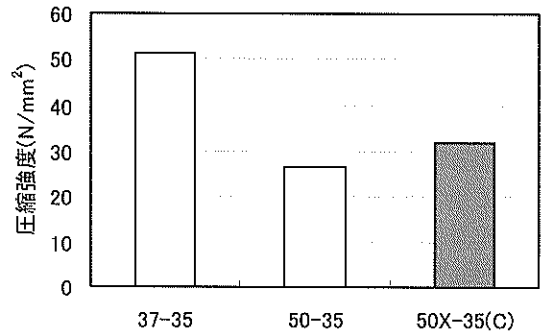


図-2.4 圧縮強度

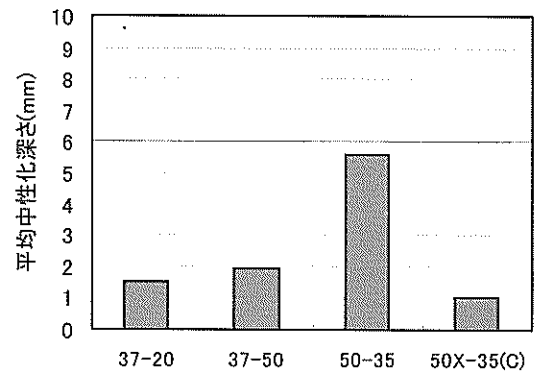


図-2.5 中性化深さ

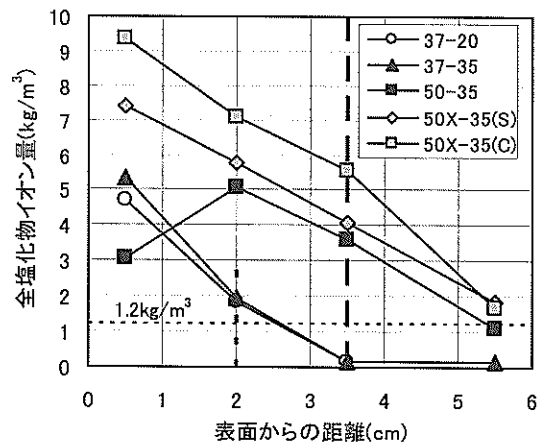


図-2.6 全塩化物イオン量分布(暴露 15 年後)

35mm)においては、「コンクリート標準示方書(施工編)¹⁾」に記載されている腐食発生限界塩化物イオン量 1.2kg/m^3 をかなり下回っているが、かぶり 20mm と小さい37-20の鉄筋位置においては、 2.0kg/m^3 程度の塩化物イオンが存在しており、厳しい腐食環境となっている。一方、50-35については、コンクリート表面部で塩化物イオン量が減少している。これは中性化により、セメント水和物中に固定化されていた塩分が溶解し、コンクリート内部へ移動したためと考えられる⁵⁾。鉄筋位置においては、 3.0kg/m^3 以上の塩化物イオンが存在しており、かなり厳しい腐食環境にある。50X-35において

は、鉄筋腐食ひび割れが生じた50X-35(C)の方が、50X-35(S)より多く内部へ浸透していた。また、同じW/Cである50-35と比べて、表面・内部のいずれにおいても量が多くなっている。この理由としては、初期に干満帯に暴露されていたことが考えられる。また、暴露環境P1の方が、50-35が暴露されているP4橋脚の環境よりも飛来塩分が多い可能性も考えられる(2.3および付録B参照)。

図-2.7に全塩化物イオン量の経時変化を示す。50-35において、材齢12年時は表面部で値が最大となっているが、材齢15年時においては、前述のように表面部の値が低下している。このことから、表面部に固定されていた塩化物イオンが中性化の影響により溶解し、コンクリート内部へ移動しはじめたのは、材齢12年以降と推測される。

図-2.8および図-2.9に、図-2.6の結果を式(1)で回帰分析させて求めた表面塩化物イオン量 C_0 および見かけの拡散係数 D の値を示す。なお、算出の際に50-35の表面部のデータは無視した。 C_0 はコンクリート外部の環境により決まるため、暴露環境の異なる50X-35が他と比

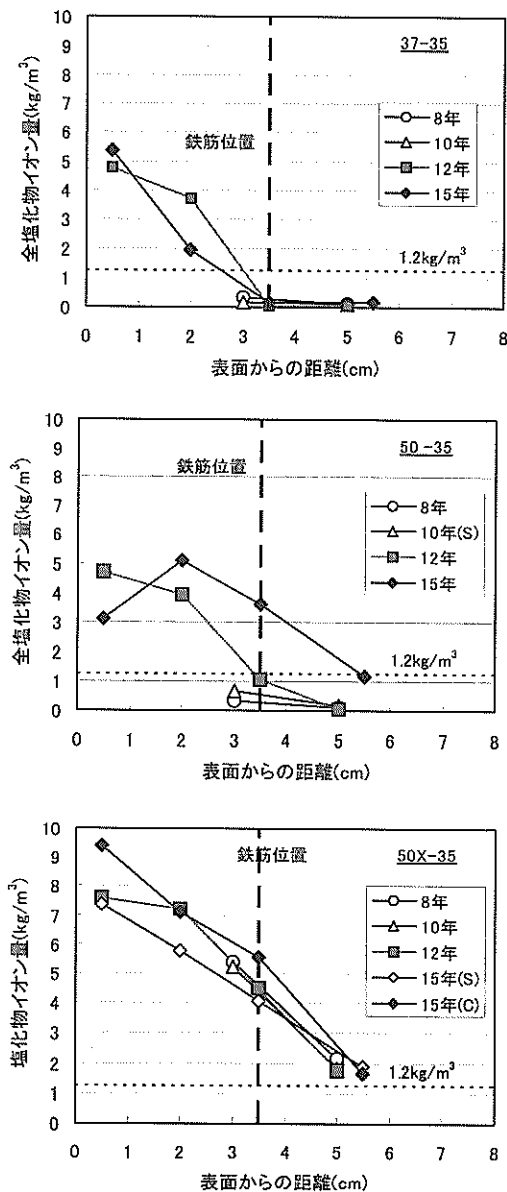


図-2.7 全塩化物イオン量分布の経時変化

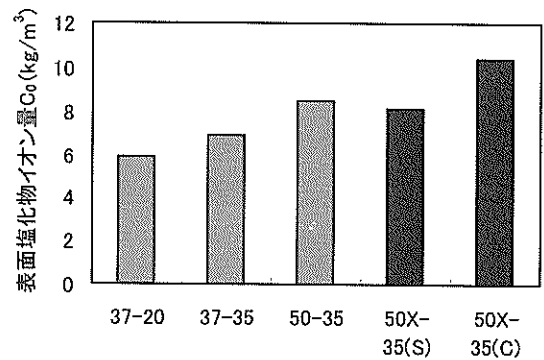


図-2.8 表面塩化物イオン量

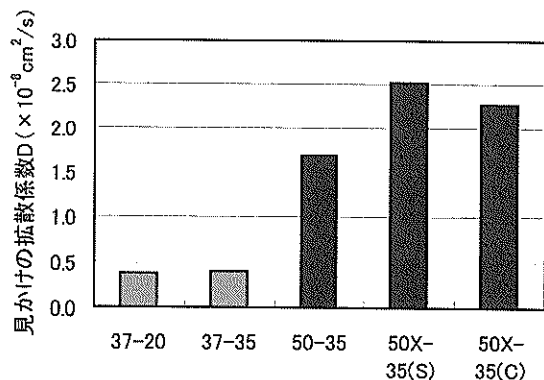


図-2.9 塩化物イオンの見かけの拡散係数

べて大きな値を示す傾向にある。見かけの拡散係数 D については、外部環境ではなく、コンクリートの品質の影響を大きく受けるため、W/Cの小さいW/C=37%の方が拡散係数は小さくなっており、W/C=50%と比べて約1/6～1/4程度である。このことより、W/Cが塩化物イオンの浸透に対して非常に大きな要因となっていることが分かる。

(5) 酸素拡散性状

図-2.10 に酸素拡散係数の値を示す。W/Cの小さい37-35において酸素拡散係数が小さくなっている。一方、W/Cが同じである50-35と50X-35(C)を比較すると、50X-35(C)の方が小さくなっている。

図-2.11 にコンクリートの含水率と酸素拡散係数の関係を示す。なお、コンクリートが水で飽和している時は含水率を100%とした。試験体によって含水率の値は異なっており、含水率が大きいほど酸素拡散係数は小さくなっている。また、図中に文献6)における結果を示して

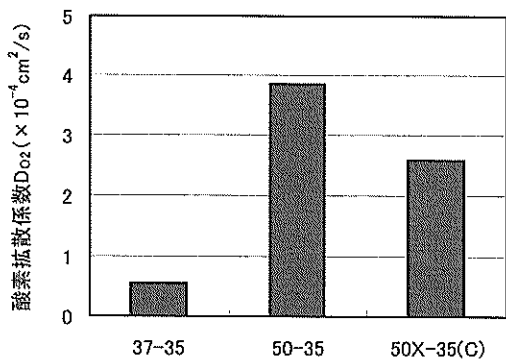


図-2.10 酸素拡散係数

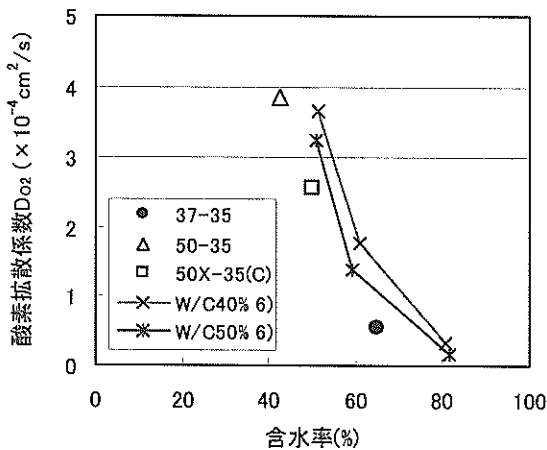


図-2.11 含水率と酸素拡散係数の関係

いるが、今回の結果はほぼ同様な傾向を示した。コンクリートの含水状態が試験体によって異なっていた理由としては、W/Cおよび暴露環境が異なっていたことに起因していると考えられる。すなわち、W/Cが小さいもの(37-35)は組織が緻密であるために、現地環境において乾燥を受けにくかったものと考えられる。50-35と50X-35(C)の違いは、暴露環境の違いに起因したものと考えられる。

また、今回試験体搬入から試験実施まで約半年間が経過していたため、この含水率の値は現地における値と必ずしも同じでない可能性がある。しかしながら、試験体は搬入後の全ての期間において同じ環境に置かれていたため、搬入時と試験時において含水率が異なっていたとしても、少なくとも3試験体間における含水状態の相対関係は、現地の状況と試験時において同様であると推測される。よって、今回得られた酸素拡散係数の相対関係は現地においても同様であると考える。

(6) 微細構造分析

a) 細孔径分布

細孔径分布測定結果を図-2.12に示す。W/Cの小さい37-35の空隙率は他に比べて小さくなっている。また、50-35と50X-35(C)を比較すると、50X-35(C)の方が0.003-0.05 μm 付近の微細な空隙の量が多い。これは、初期に比較的湿潤な環境に暴露されていたため、組織が緻密になっていると考える。

b) X線回折結果

X線回折結果を表-2.3に示す。水和生成物関連鉱物として、フリーデル氏塩、水酸化カルシウム、エトリンガ

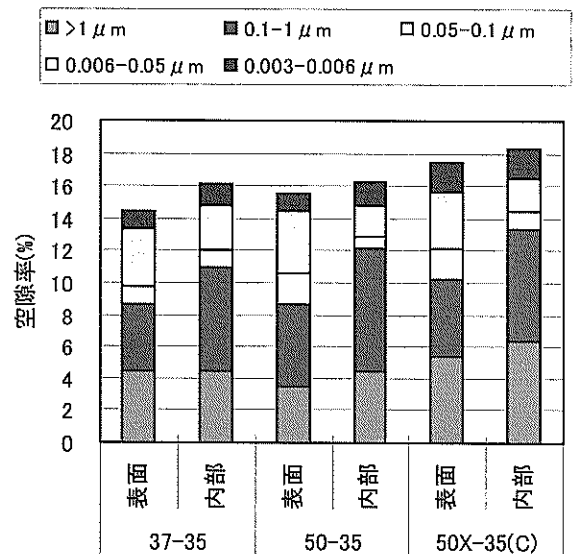


図-2.12 細孔径分布測定結果

表-2.3 X線回折試験結果

試料名 確認鉱物	37-35		50-35		50X-35(C)	
	0-10mm	50-60mm	0-10mm	50-60mm	0-10mm	50-60mm
水酸化カルシウム Ca(OH) ₂	○	○	×	○	○	○
エトリンガイト 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O	△	△	×	△	△	△
フリーデル氏塩 3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaCl ₂ ·10H ₂ O	△	×	×	×	○	△
カルサイト CaCO ₃	○	○	○	△	○	×
バテライト CaCO ₃	×	×	△	×	×	×
C-S-H CaO·mSiO ₂ ·nH ₂ O	×	×	×	△	△	△

○:はっきりと確認される, △:わずかに確認される, ×:確認されず

イト, C-S-H およびそれらの炭酸化生成物であるカルサイト, バテライトが確認された。いずれの試料においても水酸化カルシウムは試験体内部の「50-60mm」で明確に確認され, 試験体表面に近い「0-10mm」では水和生成物の炭酸化により生成したカルサイトが顕著に確認された。この傾向は炭酸化の進んでいる試験体 50-35 で最も顕著である。

初期に比較的海水に多く接触する環境に暴露されていた試験体 50X-35(C)ではフリーデル氏塩が明確に確認された。炭酸化の激しい試験体 50-35 では, 「0-10mm」でフリーデル氏塩が確認されないのは, 生成したフリーデル氏塩が炭酸化により分解されている可能性が考えられる。

(7) 鉄筋腐食状況

材齢 15 年時における, 鉄筋腐食面積率および腐食減量の測定結果を図-2.13 に, 鉄筋位置での塩化物イオン量と鉄筋腐食面積率の関係を図-2.14 に示す。鉄筋位置における塩化物イオン量が「コンクリート標準示方書(施工編)¹⁾」に記載されている腐食発生限界塩化物イオン量 1.2kg/m³ をかなり下回っている 37-35 は腐食が進行していない。一方, 鉄筋位置における塩化物イオン量が 1.2kg/m³ を上回っている 37-20 および 50X-35(S) については腐食が進行している。また, 鉄筋位置における塩化物イオン量がかなり多く, 既に鉄筋腐食ひび割れが発生している 50-35 および 50X-35(C) を比較すると, 鉄筋位置での塩化物イオン量が少ない 50-35 の方が腐食量は多くなっていた。通常, 鉄筋位置での塩化物イオン量が多い方が鉄筋腐食は進行していると考えられるが, 今回において逆の傾向が見られたのは, 前述したコンク

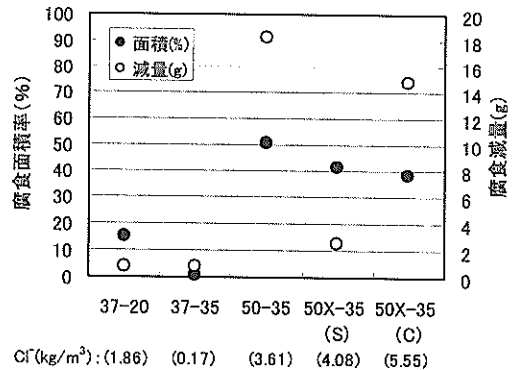


図-2.13 腐食面積率および腐食減量

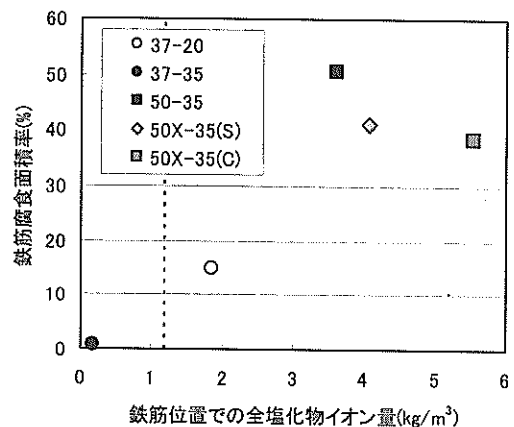


図-2.14 鉄筋位置での塩化物イオン量と腐食面積率の関係

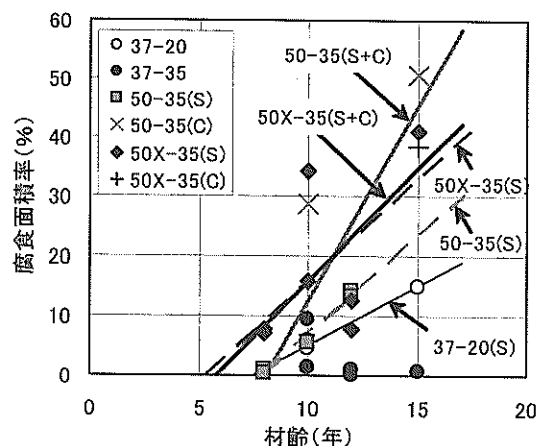


図-2.15 材齢と腐食面積率の関係

リートの酸素拡散性状の違いが影響したものと考える。また、50X-35(S)と50X-35(C)を比較すると、腐食面積はほとんど同じであったが、腐食減量においては、50X-35(C)の方が多かった。

図-2.15 に材齢と腐食面積率の関係を示す。なお、図中の直線は各材齢のデータを最小二乗法により直線近似させた結果であり、健全な場合(S)と、ひび割れが発生した場合(C)も含めた場合(S+C)の2種類について示した。腐食がまだ進行していない37-35を除いて、腐食面積率は概ね直線的に増加する傾向にある。また、材齢10年頃までは50X-35の方が腐食量は多いが、材齢10年頃以降では50-35の方が腐食は多くなる傾向が見られた。これは、50X-35の方が塩化物イオン拡散係数が大きいため、腐食が開始する材齢が早い、50-35においても腐食発生限界Cl濃度を超え、腐食が開始すると、酸素拡散係数の大きい50-35の方が腐食の進行速度が速くなったものと考えられる。また、健全な場合(C)とひび割れが発生した場合(S)を比較すると、50X-35では明確な差が見られないが、50-35においてはひび割れが発生している方が腐食の進行が早くなる傾向にある。

図-2.16 に酸素拡散係数より算出した酸素流束と腐食面積率および腐食減量の増加速度の関係を示す。なお、酸素流束 J は以下の式により求めた。

$$J = \frac{D_{O_2} \cdot C_{O_2}}{\delta} \quad (4)$$

ここで、 J : 酸素流束(mol/m²/s)、 D_{O_2} : 酸素拡散係数(m²/s)、 C_{O_2} : 表面酸素濃度(mol/m³)、 δ : かぶり(m)である。なお、表面酸素濃度 C_{O_2} は気体中や水中のものではなく、コンクリート表面近傍の酸素濃度を用いる必

要がある。そのため、コンクリートの空隙率(図-2.12から算出)と含水率の値を用い、以下の式から算出した⁷⁾。

$$C = \phi [(1-S) \cdot \rho_{gO_2} + S \cdot \rho_{dO_2}] \quad (5)$$

ここで、 ϕ : コンクリートの空隙率、 S : コンクリートの含水率、 ρ_{gO_2} : 気体酸素密度(8.93×10⁻²mol/cm³⁸⁾、 ρ_{dO_2} : 溶存酸素密度(2.77×10⁻²mol/cm³⁸⁾である。縦軸の腐食面積率の増加速度は図-2.15中の近似直線の傾きであり、腐食減量の増加速度は図-2.13の腐食減量を腐食開始後の経過時間で除すことにより求めた。なお、腐食開始後の経過時間は、暴露年数(15年)から腐食開始時期(図-2.15中の近似直線の横軸切片)を減じたものとした。また、図-2.16中の直線は各データを最小二乗法により直線近似させた結果であり、健全な場合(S)と、ひび割れが発生した場合(C)も含めた場合(S+C)の2種類について示した。

図-2.16において、腐食面積率および腐食減量の増加速度のいずれにおいても、酸素流束との間には良い相関関係が見られ、腐食の進行には鉄筋表面への酸素供給量が影響を及ぼすことが確認された。この傾向は(S)の場合だけでなく、(S+C)の場合においても同様であった。これは、ひび割れが生じた後も、ひび割れ近傍におけるコンクリート部分の酸素拡散性状の影響があるためと考えられる。

以上の結果から、コンクリートの酸素拡散係数およびコンクリート表面の酸素量を考慮することで、鉄筋の腐食速度が推定される可能性が示された。ただし、腐食ひび割れ発生以降については、より詳細な検討が必要である。また、本論文において、鉄筋の腐食速度に及ぼす塩化物イオンの影響については考慮しなかったが、その影響程度についても今後の検討が必要である。

(8) 鉄筋腐食状況と電気化学的測定結果の比較

ここでは、腐食状況と電気化学的測定結果の比較を行う。なお、腐食状況を表す腐食面積率1点に対して、電気化学的測定結果は10点の平均値を用いた。なお、全測定結果は付録Dとして示した。

自然電位と腐食面積率の関係を図-2.17に示す。ASTM C 876によれば、鉄筋の自然電位が-230(mV vs Ag/AgCl)を下回っていた場合、90%以上の確率でその鉄筋は腐食していると判定される。今回の結果はこの判定基準に合致している。また、鉄筋位置における塩化物イオン量と自然電位の関係を図-2.18に示す。両者の間には良い相関が認められる。

分極抵抗より求めた腐食速度と腐食面積率の関係を図-2.19に示す。両者の間には良い相関が認められる。

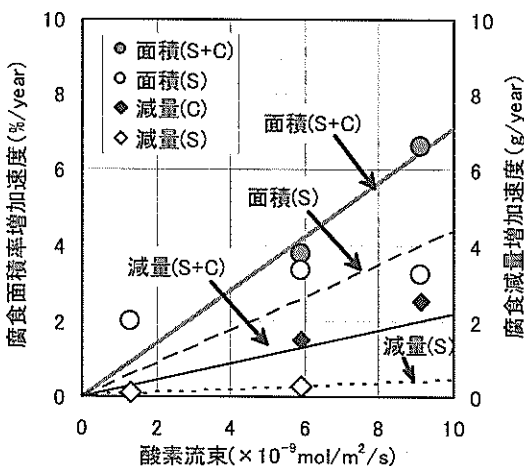


図-2.16 酸素流束と腐食面積率・腐食減量の増加速度の関係

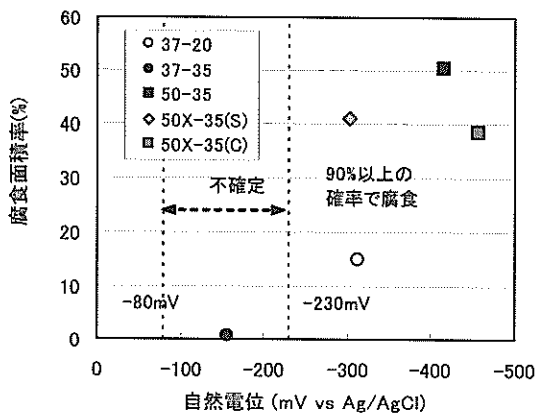


図-2.17 自然電位と腐食面積率の関係

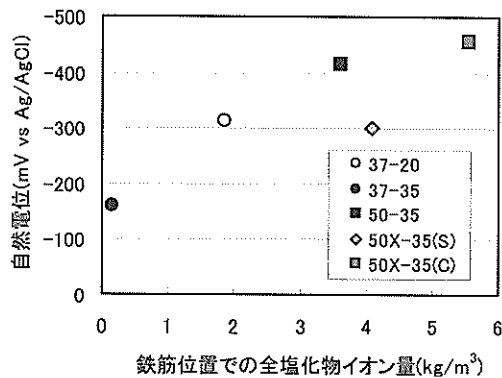


図-2.18 鉄筋位置での塩化物イオン量と自然電位の関係

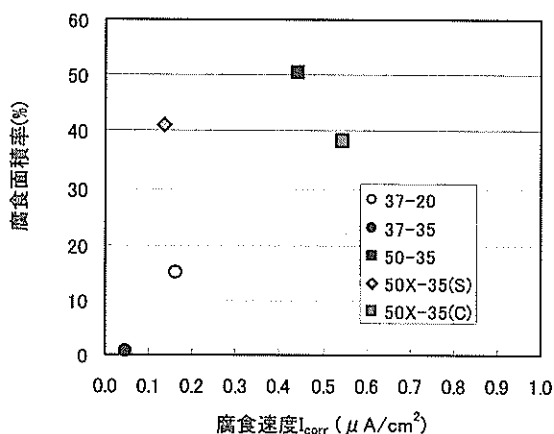


図-2.19 分極抵抗より求めた腐食速度と腐食面積率の関係

以上のことから、電気化学的測定方法は鉄筋の腐食状況および鉄筋付近の塩分の浸透状況をモニタリングする手段として有効であることが示された。

2.6 まとめ

塩害環境下に 15 年間暴露されたコンクリート試験体を用いて各種調査を行った結果、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) コンクリートにおける中性化深さ、塩化物イオン浸透状況および酸素拡散性状は水セメント比の影響を大きく受けており、水セメント比が小さいほどコンクリートの性能は優れていた。すなわち、水セメント比を低減させることはコンクリート自体の品質向上に極めて有効であることが確認された。
- 2) コンクリートにおける中性化深さ、塩化物イオン浸透状況および酸素拡散性状は暴露環境の影響を大きく受けていた。
- 3) コンクリート中の鉄筋の腐食開始時期は、水セメント比が小さく、かぶり大きい方が遅かった。すなわち、鉄筋の腐食を防ぐあるいは進行を抑制するためには、コンクリートの W/C を低減させることと、かぶり厚を増やすことが非常に有効であることが示された。
- 4) コンクリートの酸素拡散係数より推定した鉄筋表面における酸素供給量と鉄筋腐食速度の間には良い相関が認められた。すなわち、コンクリートの酸素拡散係数およびコンクリート表面の酸素量を考慮することで、鉄筋の腐食速度が推定される可能性が示された。ただし、更なるデータの蓄積および今後の検討が必要であり、また、腐食ひび割れが発生した以降については、より詳細な検討が必要である。
- 5) 自然電位および分極抵抗より求めた腐食速度と腐食面積率の間には良い相関が認められた。よって、これらの電気化学的手法はコンクリート中の鉄筋の腐食状況をモニタリングする手段として有効であることが示された。

本章の結果より、コンクリート中の鉄筋の腐食を防ぐあるいは進行を抑制するためには、コンクリートの W/C を低減させることと、かぶり厚を増やすことが有効であることが確認された。また、かぶり厚が小さい場合はコンクリートの品質が優れていても比較的早い時期に腐食が開始・進行することも示された。このような場合は、塩分があまり浸透していない早い時期にコンクリート

表面を被覆するなどの対策が必要である。

また、コンクリートの酸素拡散係数およびコンクリート表面の酸素量を考慮することで、鉄筋の腐食速度が推定される可能性が示された。ただし、更なるデータの蓄積が必要および詳細な検討が必要である。

3. 塩害環境下に 15 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

3.1 はじめに

コンクリート構造物の塩害の劣化因子である塩化物イオンや酸素の浸透は、コンクリートに表面被覆を施すことで防ぐことが可能となる。本章では、6種類の表面被覆を施したコンクリート試験体を那覇港に15年間暴露し、その際のコンクリートおよび表面被覆材の劣化状況を調査し、表面被覆材の性能の評価を行った。なお、本章において実施された暴露試験は、文献 3)において「塗装材料相対評価試験」として計画され、開始されたものである。本試験は、各種被覆材の長期耐久性能を確認することを目的として開始された。

3.2 試験体

試験体形状を図-3.1 に、コンクリート配合を表-3.1 に示す。配合は2章の W/C=37%のものと同じである。使用材料も同様である。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。コンクリート打設後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6種類の被覆を行った。表面被覆材仕様一覧を表-3.2 に示す。比較として無塗装の試験体も作成している。なお、DおよびEについては現地での実施において採用されているものと同じ系統の材料である。表面被覆作業は湿度70%以下、温度15~25℃の環境条件下で行った。作業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。

那覇港臨港道路における表面被覆仕様の品質規格(案)⁹⁾を表-3.3 に、各被覆材の初期性能一覧を表-3.4 に示す。なお、Aについては上塗り・下塗りの塗布量が今回試験体のものと若干異なっており、BおよびFについては資料が残っていなかったため不明である。遮塩性²⁾については、Dのみ測定可能なオーダーであり、A、C、Eは測定限界値以下のオーダーであった。酸素透過阻止性については、A、C、D、Eはほとんど同程度であった。水蒸気透過阻止性については、A、C、Dはほぼ同程度であり、Eのみ1オーダー大きい。ひび割れ追従性につ

いてはDおよびEが高い追従性を示した。

現在における各材料の使用状況であるが、CおよびEはほぼ同系統のものが現在も使用されている。AおよびDは、上塗りが耐候性や付着性に劣ることが判明したため、上塗りのみ別のものが用いられている。Bは断面修復材としては用いられているが、表面被覆材としては用いられていない。Fは当時試験的に用いられたものであり、現在は用いられていない。

3.3 暴露環境

2章の試験と同様に、波の上橋のP4橋脚側面に架台を作成し、その上に試験体を設置した。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、被覆材を劣化させる紫外線があまり当たらないため、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。

3.4 試験内容

暴露開始時に「塗装材料相対評価試験」として計画され、材齢1、5、8および10年に実施された試験項目は、外観観察、付着強さ、全塩化物イオン量および鉄筋腐食状況であった。今回測定においては、被覆材の性能および劣化状況をより詳細に検討するため、上記項目の他にも試験を追加して行った。そのため、今回の結果のみでは性能の時間変化を追えないものもあるが、次回以降の材齢においては検討可能となる。

(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。なお、本試験は材齢1、5、8および10年時にも実施されている。

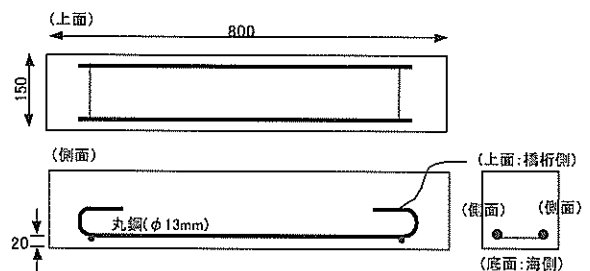


図-3.1 試験体形状

表-3.1 配合

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

表-3.2 表面被覆材仕様一覧

仕様	工程	使用材料	塗装回数	標準 使用量 (kg/m ³)	次工程までの 施工間隔	塗装方法
A	下塗	シリ系浸透剤*	2	0.30	1時間以上	ハケ、ローラー
	中塗	アクリル系ポリマーセメント	1	2.00	18時間以上	コテ
	上塗	塩素系ポリオレフィン系樹脂	1	0.20	1時間以上	ハケ、ローラー
	〃	シリコンエマルジョン	1	1.00	18時間以上	ハケ、吹付け
	〃	シリコン樹脂	1	0.15	5時間以上	ハケ、吹付け、ローラー
B	下塗	ケイ酸リウム*	2	0.40	1日以上	ハケ、ローラー、吹付け
	中塗	亜硝酸塩系特殊浸透性防錆剤*	2	0.50	1日以上	〃
	上塗	SBR系ポリマーセメントモルタル	1	22.50	7日以上	乾式吹付け
C	プライマー	エポキシ樹脂	1	0.10	1日以上	ハケ、ローラー
	パテ	〃	1	0.60	〃	コテ、ヘラ
	中塗	柔軟型厚膜エポキシ樹脂	1	0.35	〃	ハケ、ローラー、エアレス
	上塗	柔軟型ポリウレタン樹脂	1	0.12	〃	ハケ
D	下地調整	ポリマーセメント	1	1.50	3日以上	コテ
	プライマー	エポキシ樹脂	2	0.30	2時間以上	吹付け
	中塗	アクリルゴム	2	2.00	1日以上	〃
	上塗	アクリルウレタン樹脂	2	0.50	〃	〃
E	下地調整	ゴムラテックス混入セメントペースト	1	3.75	2日以上	コテ
	下塗	エポキシ変性合成樹脂	1	0.12	1時間以上	ローラー、ハケ
	中塗	クロロレンゴム	3	0.75	3時間以上	ハケ
	上塗	クロルスルホン化ポリエチレン	2	0.50	2.5時間以上	ハケ
F	プライマー	エポキシ樹脂*	1	0.10	2時間以上	コテ
	パテ	〃	1	0.30	16時間以上	ヘラ
	中塗	ガラスフレーク添加ビニールエステル樹脂	2	1.10	〃	ハケ
	上塗	アクリルウレタン樹脂	1	0.12	1日以上	ハケ
0	-	無塗装	-	-	-	-

*:含浸材

表-3.3 那覇港臨港道路における表面被覆仕様の品質規格(案)⁹⁾

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 $1.0 \times 10^{-3} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下であること	
防水性(水透過阻止性)	塗膜の透水率が $20 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{日}$ 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 $A \text{ N/mm}^2$ 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 $A \text{ g/m}^2 \cdot \text{日}$ 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 初期性能一覧

項目	試験条件	A		B		C		D		E		F	
		塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	同上	-	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。		
塗膜の外観	標準養生後	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	同上	-	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	-	
	促進耐侯性試験後	白亜化は無く、塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	同上	-	白亜化は無く、塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	白亜化は無く、塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	白亜化は無く、塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	-	
	温冷繰り返し試験後	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	同上	-	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	塗膜にふくれ・われ・はがれが無い。	-	
	耐アルカリ性試験後	同上	同上	同上	-	同上	同上	同上	同上	同上	同上	-	
遮塩性 (mg/cm ² ・day)	標準養生後	0.3 × 10 ⁻³ 以下	0.3 × 10 ⁻³ 以下	-	-	0.3 × 10 ⁻³ 以下	0.3 × 10 ⁻³ 以下	0.47 × 10 ⁻³	0.47 × 10 ⁻³	0.01 × 10 ⁻³ 以下	0.01 × 10 ⁻³ 以下	-	
酸素透過 阻止性 (mg/cm ² ・day)	標準養生後	4.0 × 10 ⁻²	4.0 × 10 ⁻²	-	-	4.7 × 10 ⁻²	4.7 × 10 ⁻²	4.8 × 10 ⁻²	4.8 × 10 ⁻²	3.0 × 10 ⁻²	3.0 × 10 ⁻²	-	
	標準養生後	0.5	0.5	-	-	0.3	0.3	0.5	0.5	3.2	3.2	-	
水蒸気透過 阻止性 (mg/cm ² ・day)	標準養生後	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	
	中性化促進試験後	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	
コンクリートとの 付着性	標準養生後	付着強さ (N/mm ²)	主な 破断場所	付着強さ (N/mm ²)	主な 破断場所	付着強さ (N/mm ²)	主な 破断場所	付着強さ (N/mm ²)	主な 破断場所	付着強さ (N/mm ²)	主な 破断場所	付着強さ (N/mm ²)	主な 破断場所
	促進耐侯性試験後	1.2	塗布材内の凝集破壊	-	-	1.9	母材破壊	2.1	塗布材内の凝集破壊	2.5	-	-	-
	温冷繰り返し試験後	1.7	塗布材内の凝集破壊	-	-	1.9	母材破壊	2.4	基板破壊	2.4	-	-	-
	耐アルカリ性試験後	1.1	塗布材内の凝集破壊	-	-	1.8	母材破壊	1.5	基板と塗布材の界面破壊	2.3	-	-	-
ひび割れ 追従性	標準養生後(常温時)	0.68	最大値	-	-	1.09	一部破断	3.20	一部破断	1.71	-	-	
	標準養生後(低温時)	0.34	最大値	-	-	0.34	破断	0.43	一部破断	1.24	-	-	
	促進耐侯性試験後(常温時)	0.44	一部破断	-	-	0.54	破断	1.31	一部破断	1.56	-	-	
	現在の使用状況	現在も使用。ただし、上塗りは耐侯性に劣るため、別の仕様に変更。		「表面被覆材」としては未使用。		現在も使用。ただし、下地材は作業性改善のため変更。		現在も使用。ただし、上塗りは別の仕様に変更。那覇港臨港道路にも適用。		現在も使用。那覇港臨港道路にも適用。		現在は未使用。	
備考	下塗り・上塗りの塗付量が若干異なる。		元々「断面修復材」として使用。		-		-		-		試験的に使用された。経緯不明。		

(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¹⁰⁾を行った。

a) 付着強さ試験

JIS A 6920 に準拠して、試験体の上面3箇所で行った。この試験は、鋼製付着子(40×40mm)を表面に接着させ、塗膜面に対して垂直に引っ張り、その際の付着強さを測定するものである(図-3.2 参照)。なお、本試験は材齢1, 5, 8および10年時にも実施されている。

b) Xカット試験

JIS K 5400 に準拠して、試験体の上面3箇所で行った。カッターナイフで塗膜表面にX状の切傷(図-3.3 参照)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した(表-3.5 参照)。なお、セロテープと被覆材との付着性が悪いものがあったため、参考としてガムテープでも実施した。

c) 見かけのはく離強さ試験

試験体側面から試験片を切り出して採取し、図-3.4 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。詳細は付録Eに示している。

(3) ひび割れ追従性試験

JSCE-K 532 に準拠して行った(図-3.5 参照)。この試験は、本来切り欠きの入った試験体に塗装を行った後、試験体を引っ張った際の伸びを測定するものであるが、今回はそれが不可能であるため、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。なお、本測定はDおよびEの2つについて行った。

(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。

a) 全塩化物イオン量分析

試験体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、2.4(4)と同様、JCI-SC4に準拠して行った。なお、本試験は材齢1, 5, 8および10年時にも実施されている。

b) 中性化深さ

試験体端部における切断面(10×10mm)にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。

c) 透水性試験

試験体側面から試験片を切り出して採取し、JIS A 6910 に準拠して行った。ロート(φ75mm)の開口部分を被覆材表面に接着し、ロートの先端に目盛りがついたメスピペットを取り付け、ロートとメスピペット内を水で満たし、この水の浸透量を調べることで、塗膜の透水性を評価するものである(図-3.6 参照)。

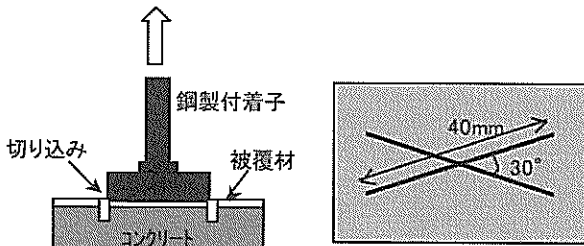


図-3.2 付着強さ試験

図-3.3 Xカット試験

表-3.5 Xカット試験の評価基準

評価点数	Xカット部の状態	現象
10	はがれが全くない。	
8	交点にはがれがなく、Xカット部にわずかにはがれがある。	
6	Xカット部の交点からいずれかの方向に、1.5mm以内のはがれがある。	
4	Xカット部の交点からいずれかの方向に、3.0mm以内のはがれがある。	
2	テープをはったXカット部の大部分に、はがれがある。	
0	Xカット部よりも大きくはがれる。	

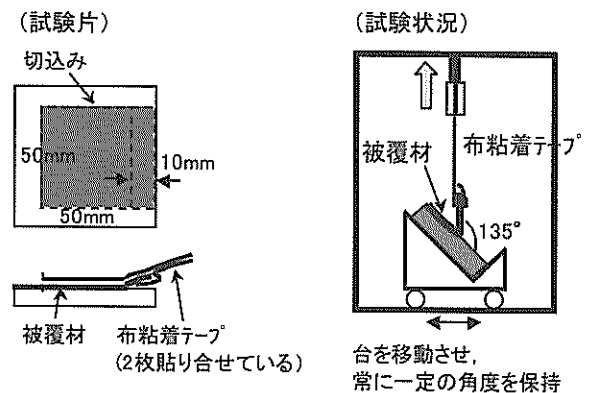


図-3.4 見かけのはく離強さ試験

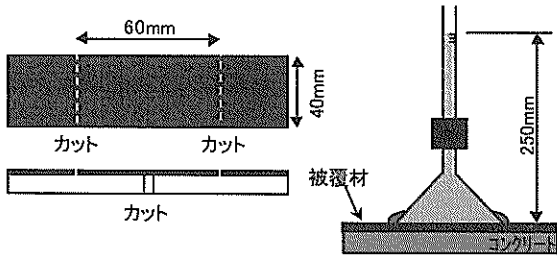


図-3.5 ひび割れ追従性試験 図-3.6 透水性試験

d) EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) 測定¹⁾
 試験体底面から 4cm の深さまで試験片を切り出して行った。この試験は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 Cl, C, K, Na の 4 元素について行った。なお、本測定は D, E および 0 (無塗装) の 3 つについて行った。

e) 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。

3.5 試験結果

(1) 外観観察結果

材齢 15 年時における外観観察結果を表-3.6 および図-3.7 に示す。また、外観状況の写真を付録 F に掲載している。なお、図-3.7 におけるはがれおよび浮きは被覆材全表面積に対する割合で表しており、ひび割れは合計長さとして表したものである。B では激しいはく離・ひび割れが見られた。これらはポリマーセメントモルタルに生じた乾燥収縮に起因するものと思われる。なお、材齢 8 年時においては浮きが発生しており、材齢 10 年時において既にはく離が発生していた。B は元々断面修復材として用いられるものであるため、以降評価対象から除くこととする。A では上塗り層のはがれが顕著であった。C, D, F については上塗り層に小さなはがれが多数見られた。また D についてはひび割れが多数見られた。なお、A, C, D および F に見られるこれらの変状は、材齢 1, 5, 8 年時には見られず、材齢 10 年時において初めて観察された。しかしながら、これらの変状は、試験体下面における台との接触部において目立っており、試験体の移動時などに生じた可能性もある。一方、E では材齢 15 年時においてもほとんど劣化が見られなかった。

また、付録 G に掲載しているように、現地の橋梁において D および E と同系統の仕様のものが実際に適用されている。試験体において劣化のほとんど見られなかった E と同仕様のものは、同様に劣化が観察されなかった。

また、試験体において小さなひび割れが多数観察された D と同仕様のものにおいても、ひび割れ等の劣化は観察されなかった。これは、3.2 および付録 G に述べられているように、上塗り材の仕様が変わり、その接着性が向上したことに起因していると考えられる。

表-3.6 劣化状況

項目	状況	
A	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
B	はがれ	3割程度剥がれ落ちている
	浮き	残りの部分はほとんど浮いている
	ひび割れ	角で見られる
C	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
D	はがれ	側面に多く見られる
	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
E	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
F	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

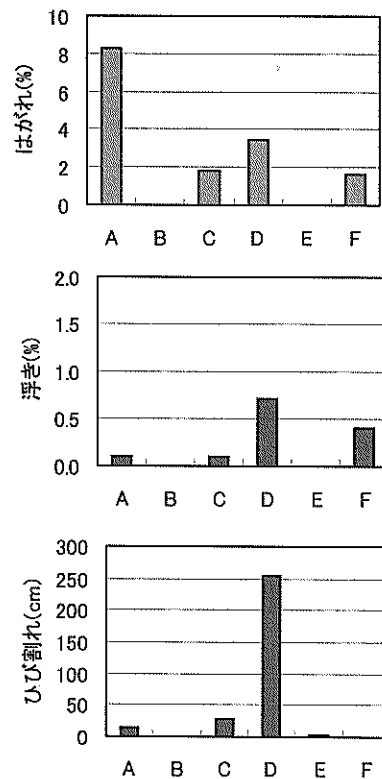


図-3.7 劣化状況

今回の暴露環境は、橋桁の直下であるため、被覆材の劣化因子である紫外線は比較的当たりにくい環境にあった。また、施工を行ったのは室内であり、試験体の形状も大きくないため、施工条件はかなり良い状況であった。今回劣化が比較的少なかったのは、これらのことも影響している可能性がある。

(2) 附着性

a) 附着強さ試験

図-3.8 に材齢と附着強さ試験結果の関係を示す。なお、図中には主な破壊箇所を示す。C, E, F には値の低下は見られない。また、外観において比較的劣化の多かった A, D は材齢 10 年以降においてやや低下傾向にあるが、初期の値とほぼ同程度である。なお、B については表面の凹凸やはく離などの影響のため、1 年目以降は計測を行っていない。

b) Xカット試験

表-3.7 に X カット試験結果を示す。いずれも 3 箇所平均値であり、値が低いものほど多くはがれたことを示している (表-3.5 参照)。

通常のセロテープによる結果においては、附着強さの大きかった C, E, F について、C と E はほとんどはがれなかったが、F は多くはがれた。附着強さが比較的小さかった A と D に関しては、A はほぼ全面はがれたが、D ははがれなかった。

ガムテープによる結果においては、附着強さの大きかった C, E, F について、C はセロテープの場合と同様にほとんどはがれなかったが、F に加えて、E も多くはがれた。附着強さが比較的小さかった A と D に関しては、A はセロテープの場合よりもはがれる程度が小さくなり、F はセロテープの場合よりも多くはがれた。

今回 X カット試験に関する初期値が存在していないため、初期に比べて劣化しているかどうかは判定できない。しかしながら、外観観察においてははがれが多く見られた A や F においては X カット試験でも多くはがれており、上塗り材の劣化状況にある程度捉えているものと考えられる。

c) 見かけのはく離強さ試験

表-3.8 に見かけのはく離強さ試験結果を示す。なお、試験後の状況を付録 E に示している。D における主はく離面は上塗りと中塗りの間であり、附着強さ試験における主破壊面と同様であった。また、E における主はく離面は中塗りと下地調整材の間であるが、附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間であり、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っていること

を意味しているものと考えられる。一方、A, C, F については、中塗り層で折れ、同時に上塗り層も破断し、ほとんどはがすことができない結果となった。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、その一方で上塗り層の脆化を捉えている可能性もある。

被覆材の附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

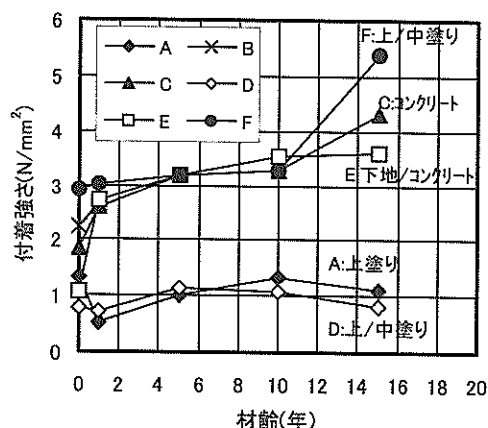


図-3.8 附着強さ試験結果

表-3.7 X カット試験結果

	セロテープ		ガムテープ		附着強さ (N/mm ²)
	健全部	劣化部	健全部	劣化部	
A	-	0	-	6	1.1
C	9	-	9	-	4.3
D	10	10	8	1	0.8
E	10	-	1	-	3.6
F	4	3	1	1	5.4

-: 該当箇所無し

表-3.8 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	附着強さ試験主破壊面
A	87.5	166	2.03*	接着面/上塗り	上
B	-	-	-	-	-
C	49.5	167	3.36*	接着面/上塗り	コンクリート
D	450	1764	3.94	上塗り/中塗り	上/中
E	1688	2716	1.77	中塗り/下地	下地/コンクリート
F	76.5	534	7.20*	接着面/上塗り	上/中

*: 試験開始直後に上塗り・中塗り層が破断した場合

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。

d) 外観の変状と付着性の関係に関するまとめ

今回付着強さが小さいA, Dについては、外観観察において上塗り部は劣化しているが、付着強さに顕著な低下は見られなかった。一方、付着強さが比較的大きい値を保っているC, E, Fについては、Eは外観観察において劣化はほとんど認められなかったが、C, Fについては、外観観察において上塗り部に小さなはがれが多数存在していた。

付着強さ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いる¹⁰⁾。今回は付着強さ試験に加えて、被覆材のはく離に対する抵抗性を評価が可能であるXカット試験や見かけのはく離強さ試験も行ったが、初期値が存在していないこともあり、今回の結果のみから被覆材の劣化と関連付けることは困難であった。今後暴露20年時に各種試験を行う予定であり、その際は今回の結果との比較を行うことで、劣化の進行が評価できる可能性がある。

(3) ひび割れ追従性

表-3.9にひび割れ追従性試験を行った際の伸びの値を示す。表-3.3の那覇港臨港道路における表面被覆仕様の品質規格(案)⁹⁾においては、0.6mm以上のひび割れ追従性を必要としているが、DおよびEのいずれも材齢15年時においてこの条件を満足していた。

(4) 浸透性

a) 塩化物イオン量

図-3.9に材齢15年時における全塩化物イオン量分布を示す。表面被覆が行われた試験体においては、激しい劣化が見られたB以外はコンクリート中に塩化物イオンがほとんど浸透しておらず、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/m³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環境となっている。また、暴露環境により定まる表面塩化物イオン量C₀は、式(1)を用いた回帰分析を無塗装の試験体0について行うことにより、6.14kg/m³と算定された。

今回使用した被覆材自体の遮塩性²⁾は、表-3.4において最大値を示したD仕様において0.47×10⁻³mg/cm²dayであった。材齢15年時の値の評価は困難であるが、被覆材に著しい損傷が無い場合は、今回程度の暴露環境(C₀=6.14kg/m³)において、D仕様程度の遮塩性(0.47×10⁻³mg/cm²day)を有していれば、15年間の長期においてほとんど塩化物イオンを浸透させないこ

とが確認された。

b) 中性化深さ

表-3.10に中性化深さを示す。B以外の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。これにより、被覆材によって中性化が抑制されていることが分かる。

c) 透水性

図-3.10に被覆材およびコンクリートに浸透した透水量の値を示す。なお、図中には文献¹²⁾における規準値の上限値を参考として示した。A, C, D, E, Fの健

表-3.9 ひび割れ追従性試験結果

	A	B	C	D	E	F
伸び(mm)	-	-	-	2.035	0.645	-

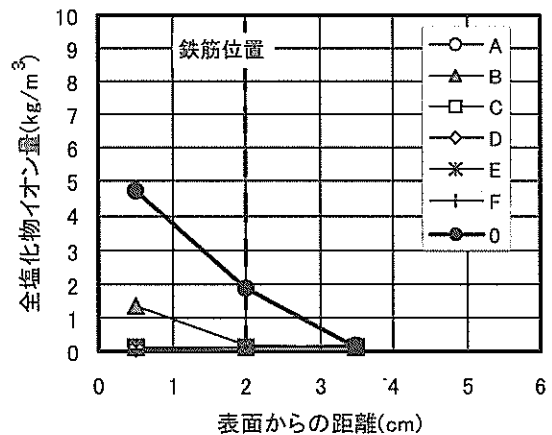


図-3.9 全塩化物イオン量分布

表-3.10 中性化深さ

	A	B	C	D	E	F	0
平均	0	0.4	0	0	0	0	1.5
最大	0	2.4	0	0	0	0	6.9

(単位:mm)

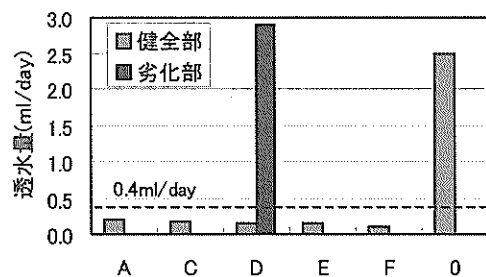


図-3.10 透水性試験結果

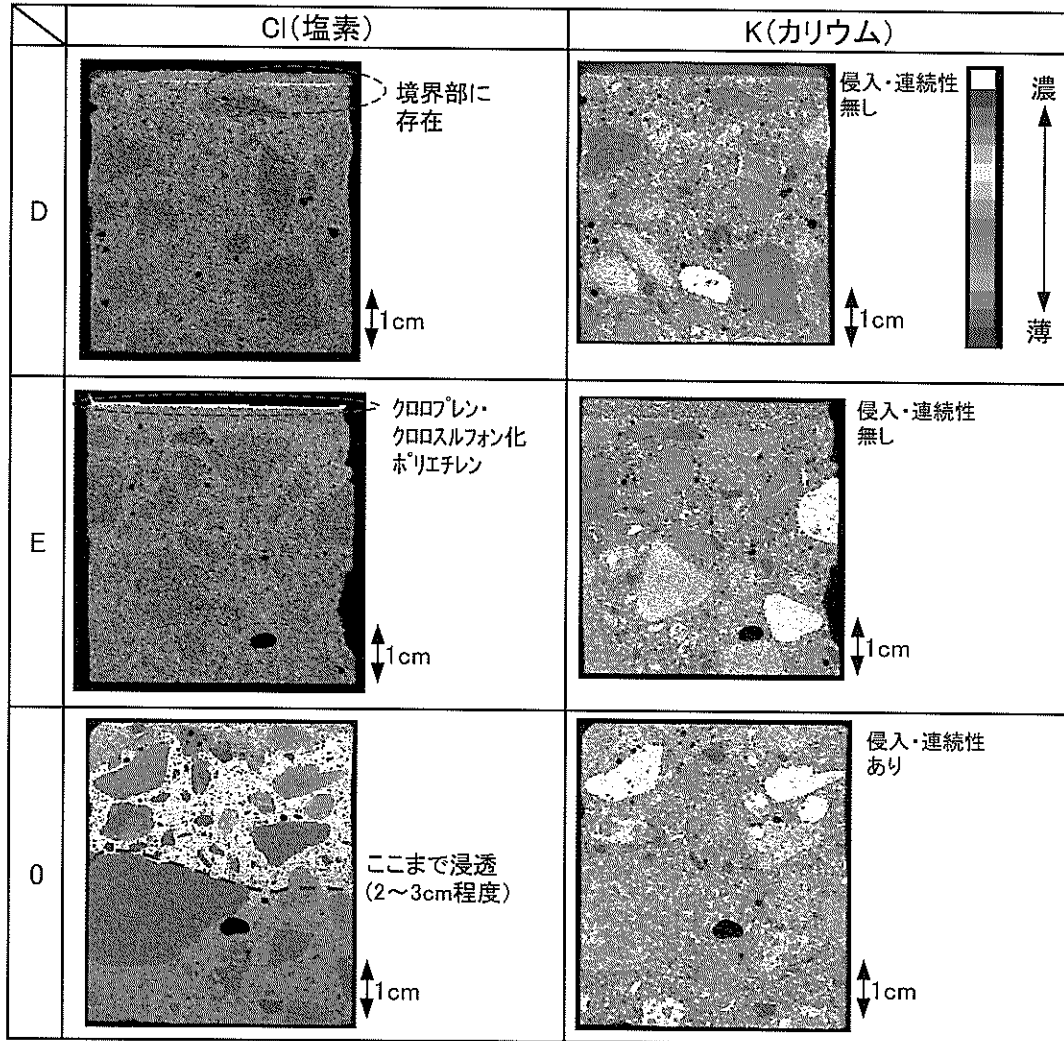


図-3.11 EPMA 結果 (上がコンクリート表面側)

全部については規準値を下回っており、高い遮水性を保持している。一方、上塗りに小さなひび割れが多く見られた D の劣化部では無塗装の場合と同程度の多量の水が浸透していた。これは、D の中塗りであるアクリルゴムは吸水性を有するため、上塗りのひび割れ部を浸透した水がアクリルゴム中に浸透したためと考えられる。

d) EPMA 測定結果

試験体 D, E および 0 (無塗装) において、塩素 Cl およびカリウム K について EPMA 測定を行った結果を図-3.11 に示す。試験体 D, E においては、図-3.9 と同様にコンクリート中への塩素の侵入はほとんどないことが分かる。一方、試験体 0 においては、図-3.9 と同様にコンクリート表面から 2~3cm 程度の深さまで塩素が浸透していることが分かる。また、カリウムについても外から浸透しており、表面から連続して分布していることがわかる。試験体 D については境界部にやや高濃度の箇所が見られるが、カリウムの結果において被覆材部分と

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。E 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。ただし、これらの Cl はコンクリート中に浸透しないため、鉄筋腐食には影響しない。

(5) 鉄筋腐食状況

表-3.11 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。A~F は塩化物イオンが浸透していないため腐食が発生していない。一方、無塗装の試験体については、鉄筋位置に 2.0kg/m³ 程度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-3.11 鉄筋腐食面積率

	A	B	C	D	E	F	0
鉄筋腐食面積率(%)	0	0	0	0	0	0	14.9

(6) 次回調査における検討課題

今回各種試験を行ったが、被覆材自体の性能およびその時間的変化を定量的に評価できるとは言い難い。次回調査においては、以下の点に留意する必要があると考える。

a) 被覆材自体の劣化状況の評価方法

今回までは主に目視による外観観察により、被覆材、特に上塗り材の劣化状況を判定していた。しかしながら、目視では、その変状が上塗り自体が劣化（紫外線劣化による膜厚減少）したためなのか、上塗りと中塗りの付着性が低下したためなのかを判断することは難しい。また、劣化状況を定量的に評価することも困難である。より詳細かつ定量的に評価する方法としては、被覆材表面の走査電子顕微鏡（SEM）観察¹³⁾や被覆材の電気抵抗¹⁴⁾を測定する方法等が考えられる。

b) 被覆材の付着性の評価方法

被覆材の付着性については付着強さにより主に検討してきた。しかしながら、付着性は付着強さのみで評価することは困難であることが言われている¹⁰⁾。そこで今回、Xカット試験および見かけのはく離強さ試験を行ったが、今回以前に実施していないため、これらの試験により得られた結果が初期から同じものなのか、あるいは性能が低下しているのか判断は困難であった。次回に再度調査を行うことで、付着性能の時間的な変化を追跡することが可能であると考える。

c) 被覆材の遮塩性

表面被覆材がコンクリートの塩害防止対策に用いられる場合、最も必要とされる性能は遮塩性である。通常遮塩性の試験は、被覆材単体で試験体を作成し、試験が行われる²⁾。そのため、現地構造物に適用された被覆材の遮塩性を評価するためには、塗装された被覆材のみを採取しなければならないため、実施は非常に困難である。そのため、通常コンクリート中に浸透した塩化物イオン量を測定することにより遮塩性が評価されるが、今回のように材齢15年目まで全く浸透していない場合は、15年間塩化物イオンを浸透させなかったという確認は可能であるが、被覆材の遮塩性自体が変化しているかについては不明である。

以上述べたように、現地構造物に適用された被覆材自体の遮塩性の評価は非常に困難であるが、被覆材とコンクリートを合わせた状態での塩化物イオンの見かけの拡散係数としての評価であれば、塩化物イオンの浸透を促進させる電気泳動試験¹⁵⁾等により行える可能性がある。

3.6 まとめ

各種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。なお、適用方法が適切でなかったことにより、激しい劣化の見られた被覆材（仕様B）については、対象から除いた。

(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、保護層である上塗り部にはがれやひび割れがみられるものがあった。

(2) 被覆材の付着性について、上塗り部が劣化していた場合においても、付着強さはいずれも初期からの大きな変化は見られなかった。

(3) 各種被覆材はコンクリート中への塩化物イオンの侵入を防いでおり、今回の暴露条件（表面塩化物イオン量は 6kg/m^3 程度）において高い耐塩害性を確保していたことが確認された。

(4) 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、15年相当の長期においてもその効果が十分に維持されることが確認された。ただし、今回の施工は室内で行われていたため、施工条件が良好であり、また、現地環境は直射日光を受けにくい環境であったため、被覆材が劣化しにくい環境であったことも影響している可能性がある。

4. まとめ

那覇港で実施したコンクリート構造物の長期暴露試験結果により、港湾コンクリート構造物の耐久性向上に関する知見として、2章ではコンクリートの品質に関する知見、3章ではコンクリートの表面被覆に関する知見が得られた。ここでは、それぞれについて簡単にまとめる。また、今後の課題についてもまとめる。

(1) コンクリートの品質向上による

港湾コンクリート構造物の耐久性向上方策

水セメント比 W/C を低減させることはコンクリート自体の品質向上に有効であることが確認された。また、鉄筋の腐食を防ぐあるいは進行を抑制することにおいても、W/C を低減させることが有効であることが確認された。

土木学会「コンクリート標準示方書（施工編）¹⁾」において、コンクリートの品質を考慮した耐久性の照査方

法が制定されている。この方法は、性能規定の考え方に基づいて制定されており、構造物の材料設計を行う際に、供用年数や使用環境に応じて、セメントの種類や W/C を選定することが可能となっている。一方で「港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁶⁾」においては、海洋環境に位置する鉄筋コンクリート構造物については最大水セメント比が 55% と記述されているのみである。これは厳しい環境に位置しているにもかかわらず、比較的大きな値である。今後より高耐久な港湾コンクリート構造物を建設し、維持管理にかかる費用を削減するためには、供用年数や使用環境に応じて、材料設計および施工方法の検討を行うべきである。

(2) 表面被覆による港湾コンクリート構造物の耐久性向上方策

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ることが確認された。ただし、今回暴露した試験体において、表面被覆を行う作業は室内という施工条件の良い環境で行われているため、実施工の場合よりも優れた結果が得られている可能性も考えられる。表面被覆工法は、被覆前のコンクリートの表面処理方法や表面の湿潤状況などの施工時に起こった不具合が原因でその性能が大きく低下することがある。表面被覆工法の適用にあたっては、材料の選択に加えて、施工時の品質管理が極めて重要である。

(3) 今後の課題

a) 鉄筋腐食の予測手法について

鉄筋腐食開始時期の推定に関しては様々なデータが蓄積されつつあるが、環境や鉄筋周囲の状況によって影響を受けるため、必ずしも明確になっていない。また、腐食開始後の進行速度に関しても、暴露環境に大きく影響されるため、明確になっていないのが現状である。両者に関して、今後よりデータを蓄積させ、コンクリート構造物の耐久性設計あるいは維持管理にフィードバックさせていく必要がある。

b) 表面被覆工法の性能評価および劣化予測手法

表面被覆工法の性能評価および劣化予測手法は、被覆材自体の寿命予測や、構造物との付着性の経時変化の予測を行わねばならないため、現状では非常に困難である。よって、表面被覆を行ったコンクリート構造物の耐用年数を保証することは難しいというのが現状である。

また、表面被覆工法がコンクリート構造物に適用される際は、今回のような塩化物イオンが浸透していない初期段階だけでなく、ある程度塩化物イオンが浸透した段階で被覆が行われるケースの方が多いたが現状である。

この場合、既に塩化物イオンがコンクリート中に存在しているため、表面被覆のみで既に進行している腐食を抑制することは困難な場合もある。この場合に、どの程度の劣化状況であれば表面被覆工法のみでの適用で劣化を抑制することが可能なのか、あるいはその時にどの程度の性能（酸素透過阻止性等）が必要なのかについてはまだ必ずしも明確にはなっておらず、今後の課題である。

謝辞

本論文において行われた長期暴露試験は、沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所（試験開始当時は那覇港工事事務所）が実施した「昭和 62 年度那覇港臨港道路 PC 橋の劣化対策調査³⁾」の中で「塗装材料相対評価試験」および「劣化度診断試験」として計画され、1987 年に開始されたものである。

また、各材齢における評価試験は、沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所のご協力の下で、元運輸省港湾技術研究所材料研究室長大即信明氏、福手勤氏および当時材料研究室に在籍していた研究室員の皆様により実施されたものである。なお、暴露材齢 20 年（最終材齢）における評価試験は 2006 年に実施する計画である。

また、土木学会「コンクリート構造物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などを頂きました。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) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），2002
- 2) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，1984.2
- 3) 沖縄総合事務局那覇港工事事務所・（財）沿岸開発技術研究センター：昭和 62 年度 那覇港臨港道路 PC 橋の劣化対策調査報告書，1988.3
- 4) 濱田秀則他：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
- 5) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.1-14，1991.8
- 6) 小林一輔・出頭圭三：各種セメント材料の酸素の拡散性状に関する研究，コンクリート工学，Vol.24，No.12，1986.12
- 7) 石田哲也：微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析シス

テム, 東京大学博士論文, 1999.3

- 8) 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（Ⅱ），pp100, 1994.10
- 9) 沖縄総合事務局那覇港工事事務所・（財）沿岸開発技術研究センター：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, 1994
- 10) 樺山好幸他：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
- 11) 例えば, 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'01[基礎編], pp.136-139
- 12) 鉄道総合技術研究所：建造物保守管理の標準 コンクリート構造物, 1987.9
- 13) （社）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），pp.40, 1996.10
- 14) 守分敏郎他：既設コンクリート構造物に施工した表面塗装材料の耐久性評価, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.99-110, 1995.8
- 15) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, コンクリート技術シリーズ 55, pp.5-13, 2003.9
- 16) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上）, 1999.4

付録 A 暴露初期に試験体 50X-35 に浸透した塩化物イオン量

試験体 50X-35 は、暴露初期において那覇港浦添地区の波除堤付近に 15 ヶ月間設置されていた。暴露 11 ヶ月後の実測値およびその結果から推定した 15 ヶ月後の予測値を図-A.1 に示す。表面における塩化物イオン量は 20kg/m^3 近くになっており、外部からの海水の供給が非常に多いことが分かる。なお、15 ヶ月後以降は P1 橋脚側面の台上に移動されている。

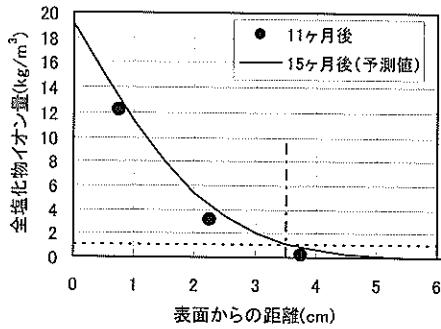


図-A.1 初期に試験体 50X-35 に浸透した塩化物イオン量

参考文献

沖縄総合事務局那覇港湾工事事務所・オリエンタルコンクリート：昭和 63 年度那覇港 PC 橋暴露試験体調査委託報告書，pp43，1989

付録 B 波の上橋および泊大橋における付着塩分量および飛来塩分量

図-B.1 に付着塩分量，図-B.2 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くなる傾向にある。また、波の上橋の中でも、より海側に近い①面において最も多くなり、また A1-P1 間の方が P8-A2 間に比べて多くなる傾向にある。

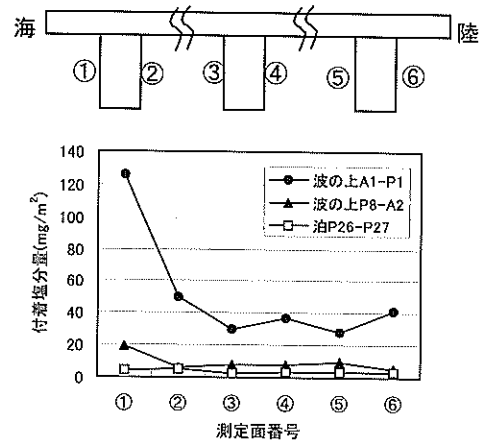


図-B.1 付着塩分量

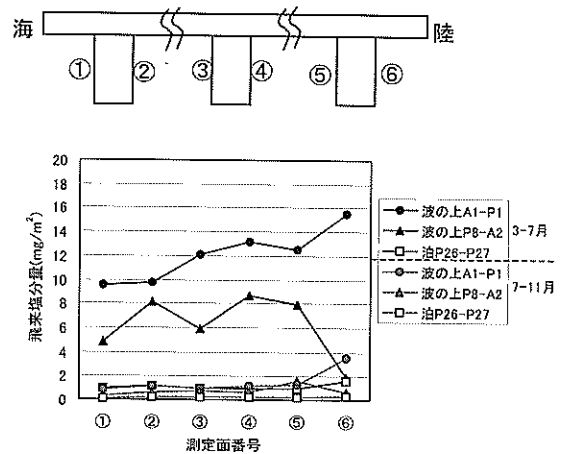


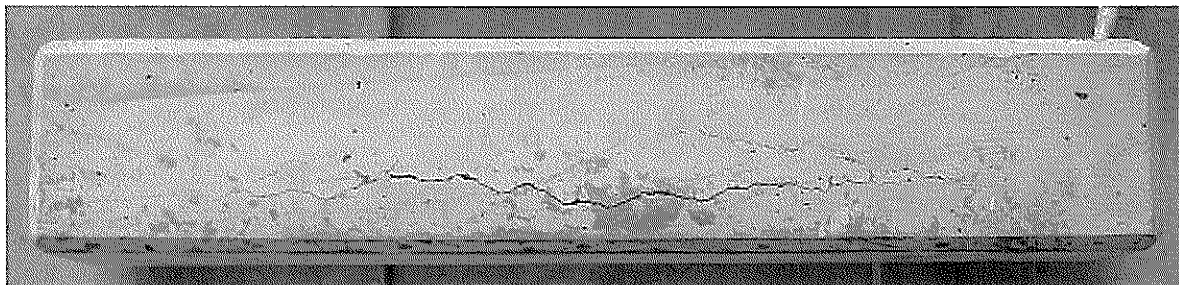
図-B.2 飛来塩分量

参考文献

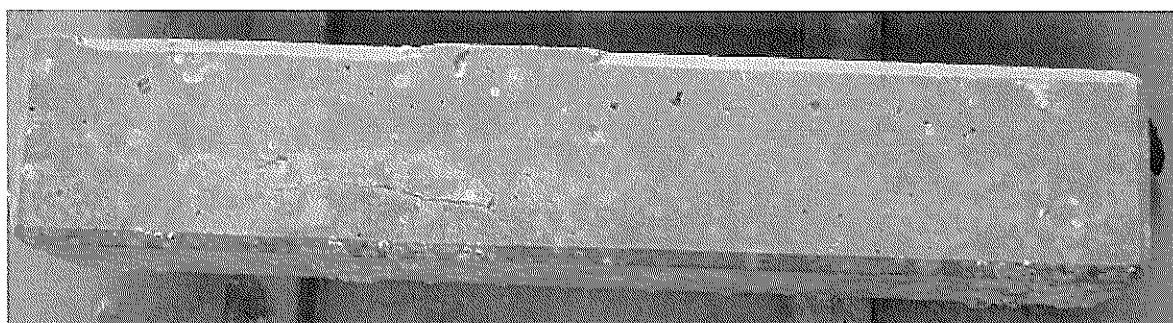
沖縄総合事務局那覇港湾工事事務所・財団法人沿岸開発技術研究センター：平成 11 年度那覇港臨港道路塗装塗替工事誌作成業務報告書（本編），pp15-16，2000

付録C 試験体外観（表面被覆無し）

50-35：腐食ひび割れ発生

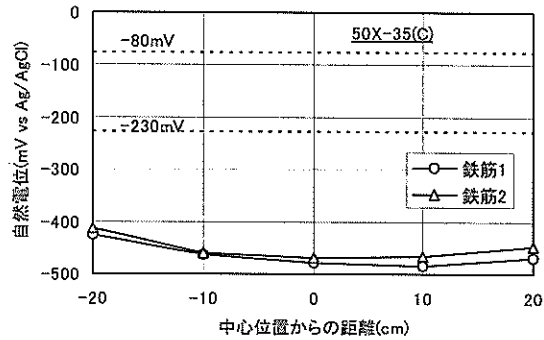
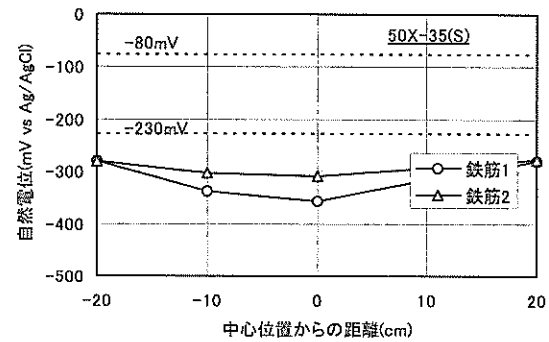
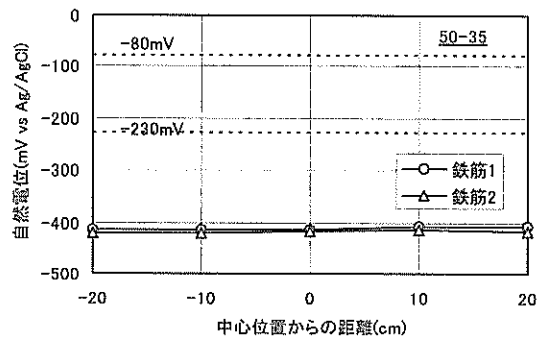
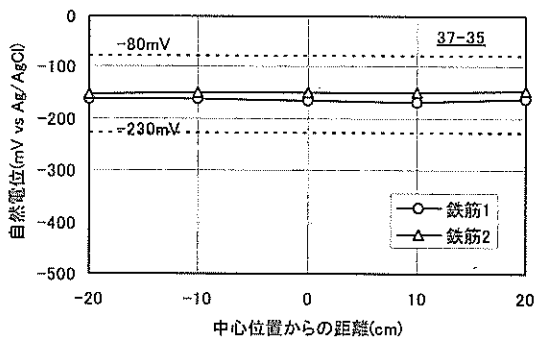
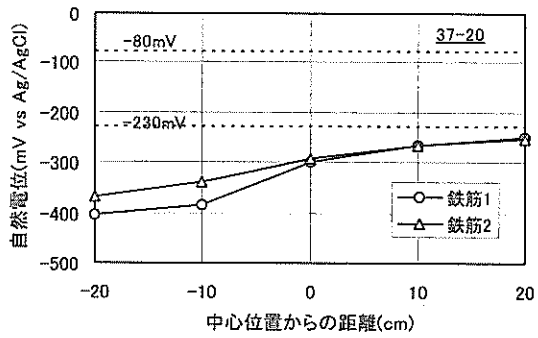


50X-35(C)：腐食ひび割れ発生

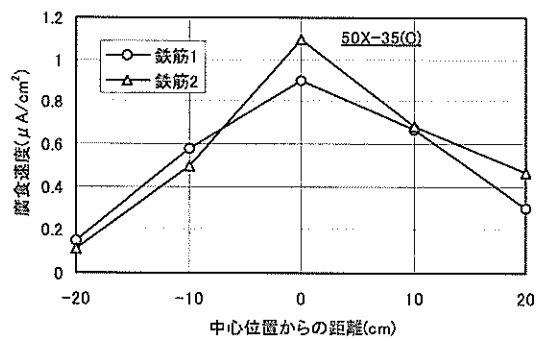
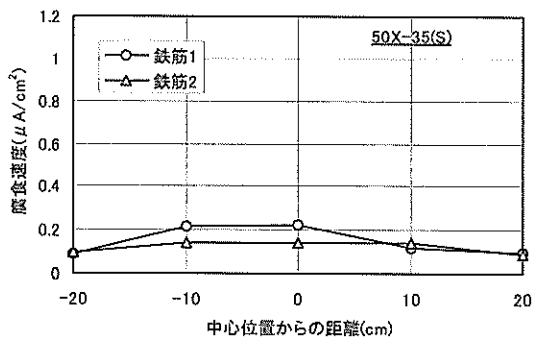
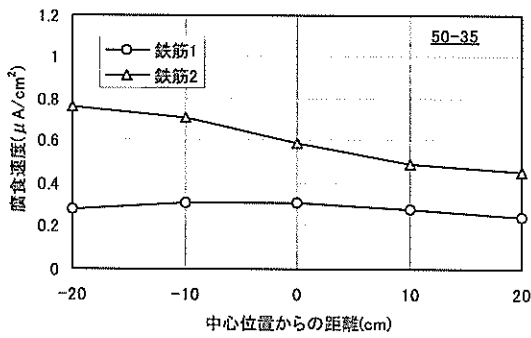
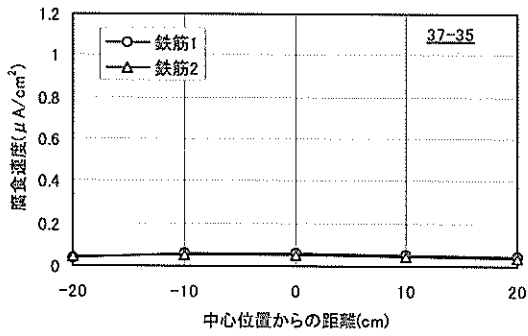
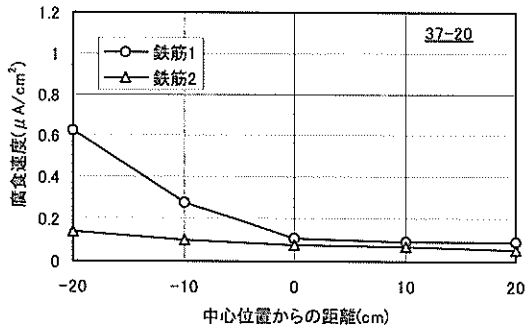


付録D 電気化学的測定結果

①自然電位分布図



②分極抵抗より求めた腐食速度分布図



付録 E 見かけのはく離強さ試験方法

(1) 試験片 (供試体) の準備 (図-E.1 参照)

- ① 試験片に 50×60mm の素地に達するカットを行う。
- ② カットを行った後、稜線から 10mm の部分を試験板と塗膜の界面からカッターナイフで強制的にはく離する。
- ③ 次に②で強制的にはく離した塗膜の下面に、幅 50mm、長さ 210mm の JIS Z 1524 包装用布粘着テープに規定する布粘着テープを貼り、塗膜を固定させる。
- ④ ①でカットした塗膜の上面に、幅 50mm、長さ 260mm の布粘着テープを貼り、③で貼り込んだ布粘着テープとの間に塗膜を挟み込むように固定する。

(2) 試験方法

- ① (1)で準備した試験体を装置にセットし、布粘着テープの長さが 150mm になるように 135 度方向へ折り曲げて上部つかみに挟み固定する。(図-E.1 参照)
- ② 毎分 100±10mm の速さで引張力を加え、塗膜を挟み込んだ布粘着テープを試験体から引きはがす。この時のはく離に要した仕事量(N・mm)を測定する。

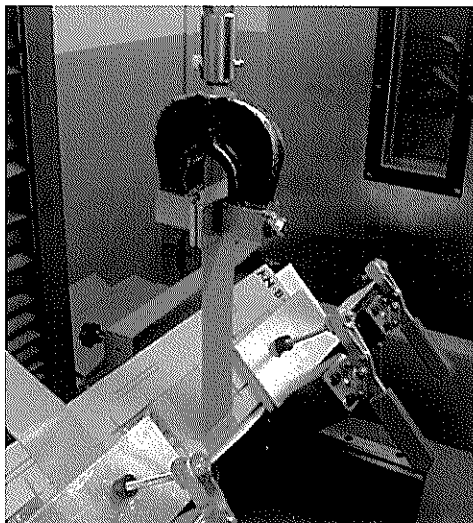
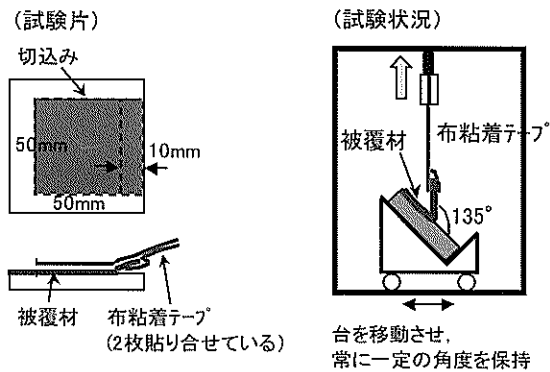


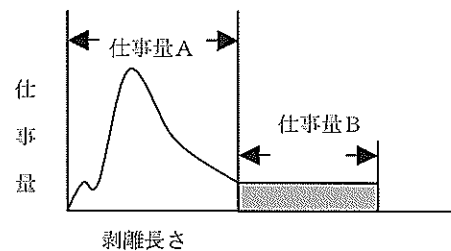
図-E.1 見かけのはく離強さ試験

(3) 見かけのはく離強さの計算方法

- ① 試験より得られた仕事量と変位の関係を元に仕事量 A を算出する (図-E.2 参照)。
- ② 塗膜のはく離に直接関与していない部分があれば、その仕事量を仕事量 A から差し引く。これは図-E.3 に示す未はく離面 C に相当するものである。
- ③ 塗膜のはく離した部分 (図-E.3 に示すはく離面) の面積(mm²)を求める。
- ④ ②で算出したはく離に用いた仕事量(N・mm)を③で測定したはく離面積(mm²)で除して見かけのはく離強さ(N/mm)を算出する。

以下に算出に必要な式をまとめる。

- ・ はく離に用いた仕事量(N・mm) = 仕事量 A (N・mm) - 未はく離面 C の仕事量(N・mm)
- ・ 未はく離面 C の仕事量 = ガムテープと上塗り材との見かけのはく離強さ(N・mm/mm²) × 未はく離面積 C (mm²)
- ・ ガムテープと上塗材との見かけのはく離強さ(N・mm/mm²) = 仕事量 B (N・mm) ÷ 未はく離面 D (mm²)
- ・ はく離面積 (mm²) = (50mm × a mm) - 未はく離面 C (mm²)
- ・ 未はく離面 C (mm²) = 実測
- ・ 未はく離面 D (mm²) = (50mm × b mm)



剥離長さ

図-E.2 塗膜のはく離仕事量

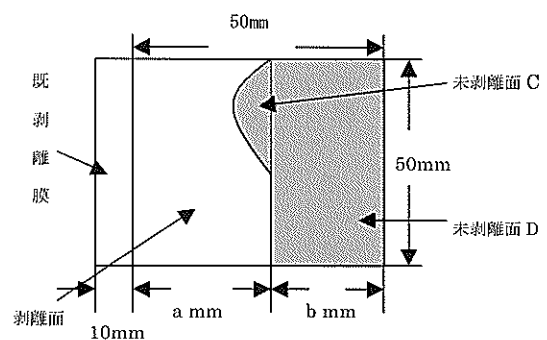
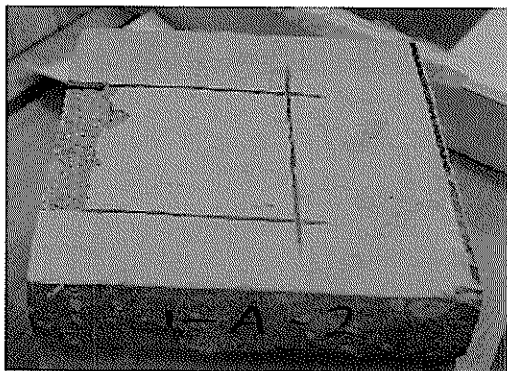
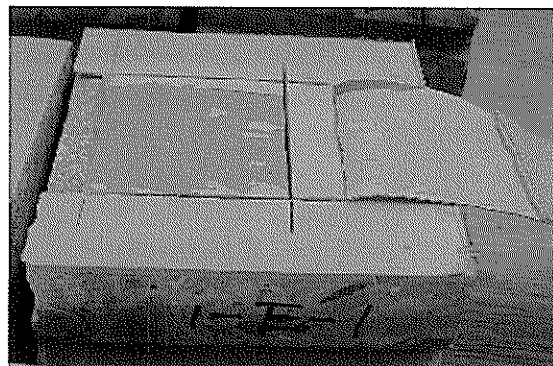


図-E.3 はく離面積

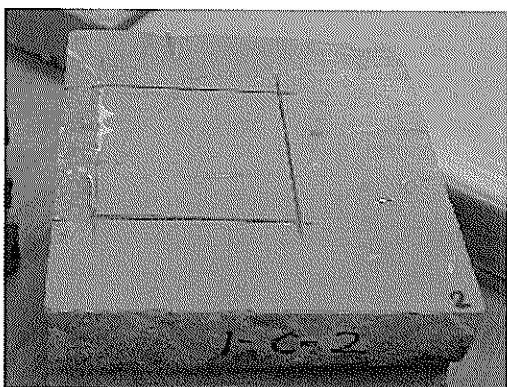
(4) 見かけのはく離試験後の試験体状況



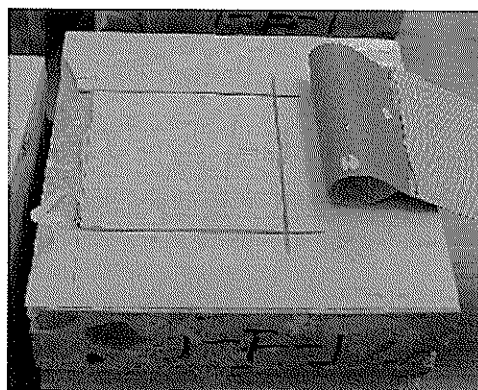
試験体 A 既はく離面近くで折損



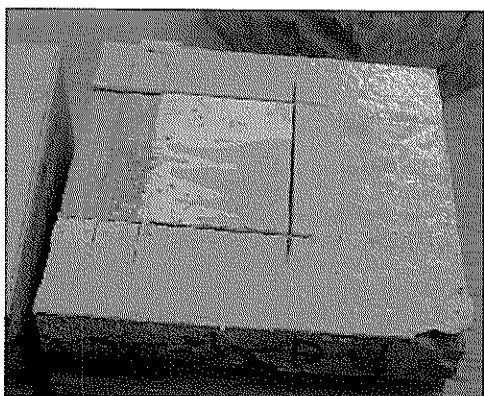
試験体 E 中塗り層がはく離



試験体 C 既はく離面近くで折損



試験体 F 既はく離面近くで折損

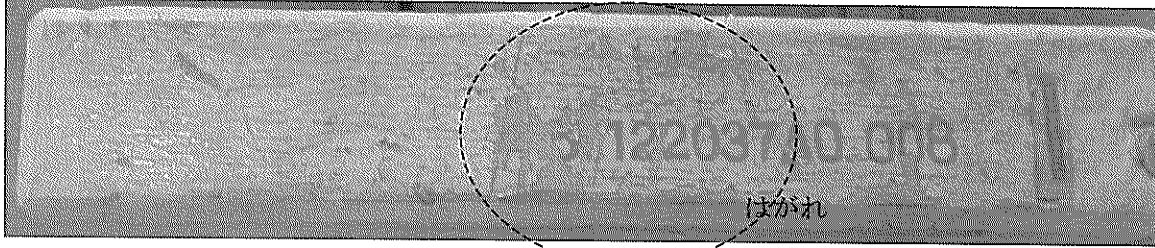


試験体 D 既はく離面近くで折損後、
上塗り層ははく離

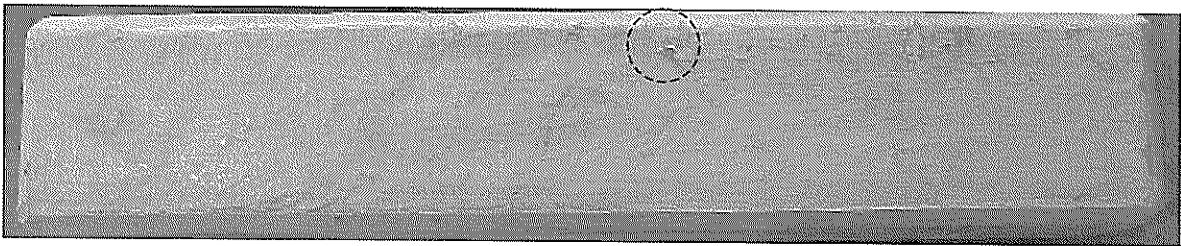
付録F 試験体外観（表面被覆有り）

試験体A

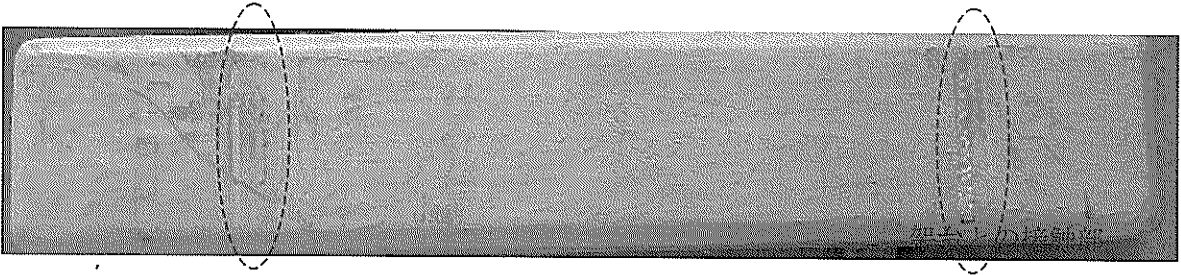
上面



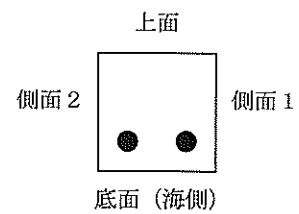
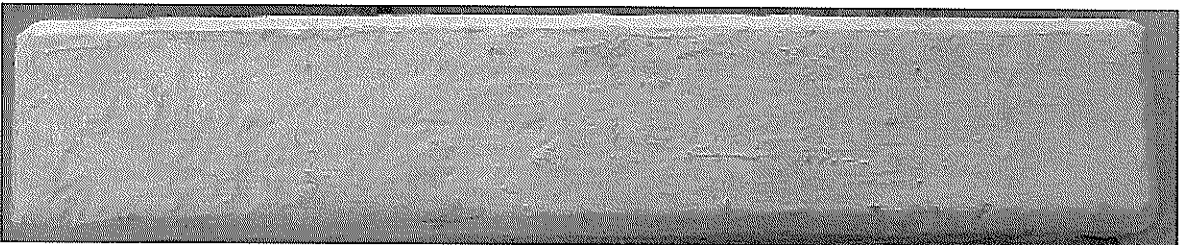
側面1



底面

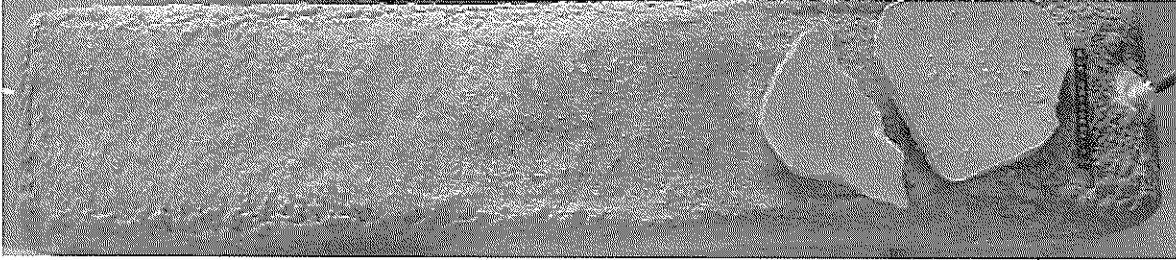


側面2

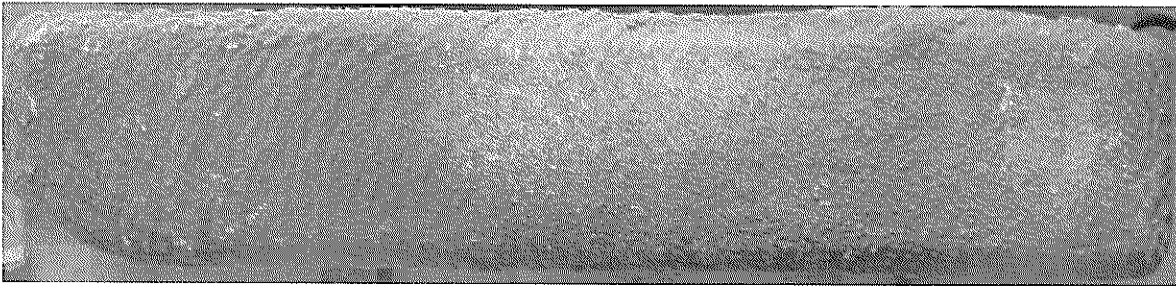


試験体 B

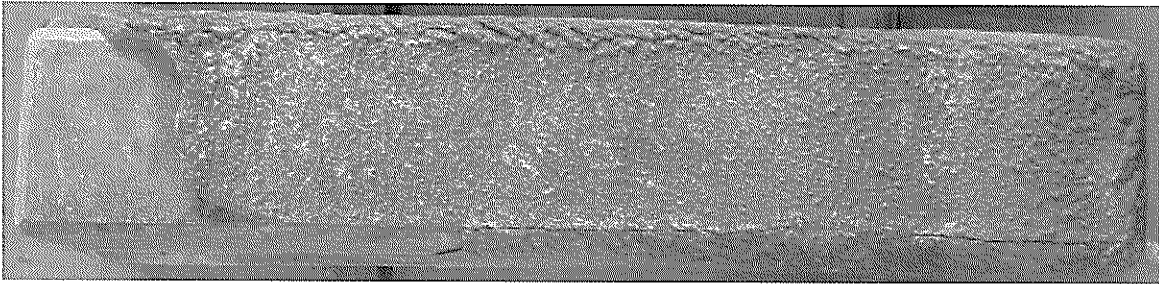
上面



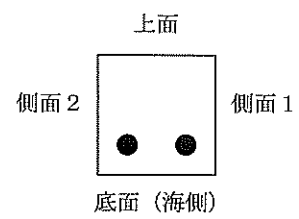
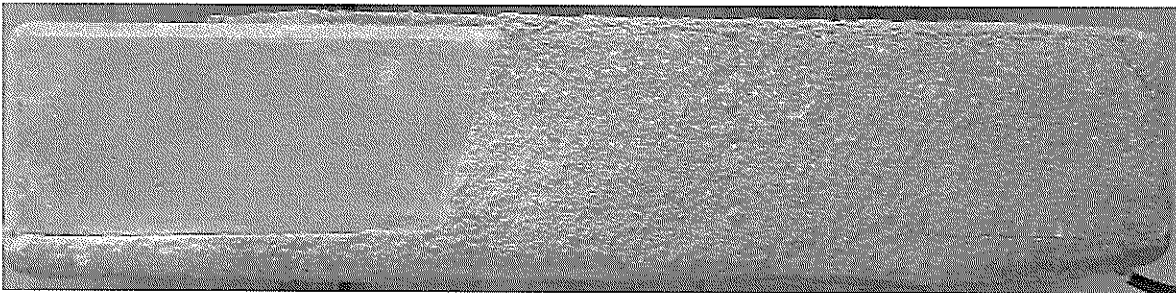
側面 1



底面

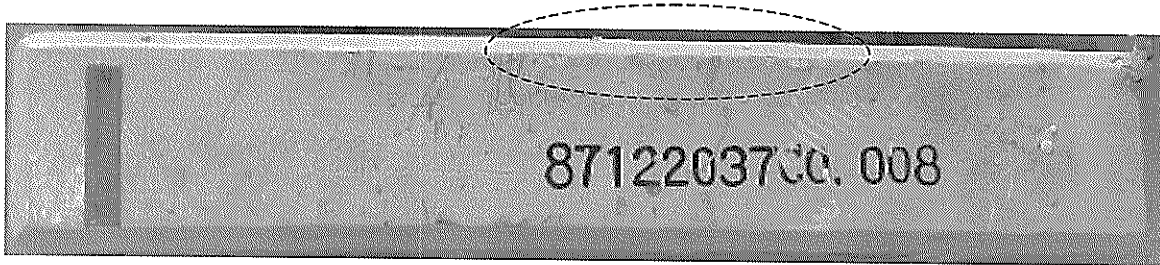


側面 2

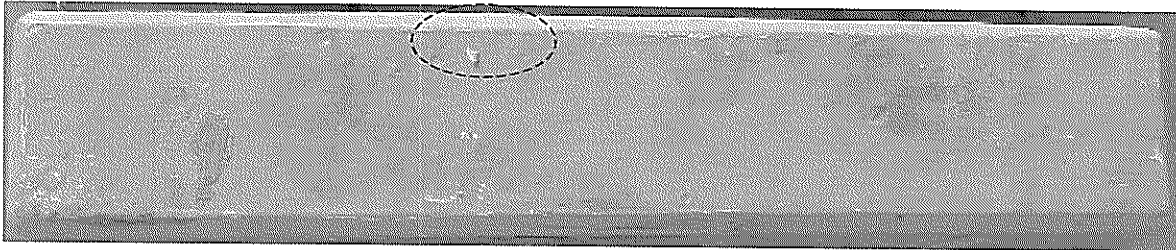


試験体 C

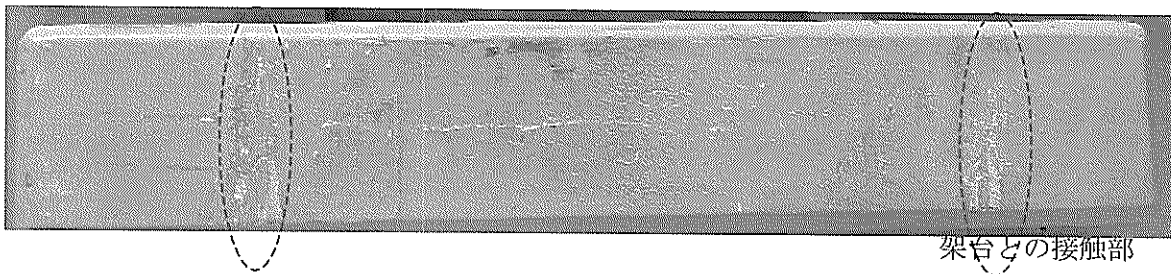
上面



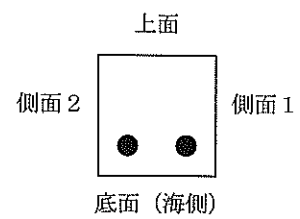
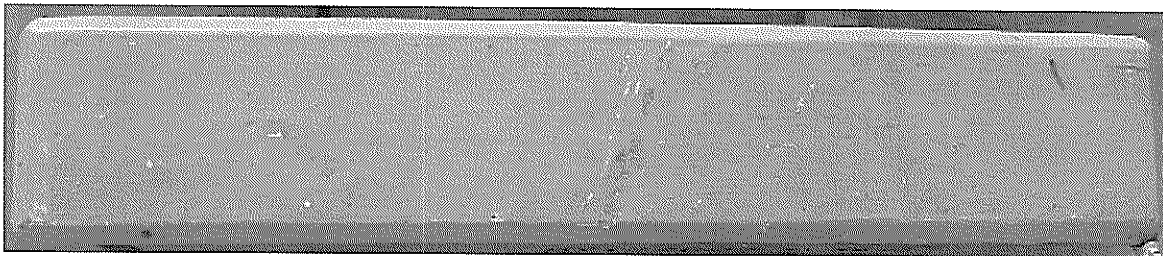
側面 1



底面



側面 2

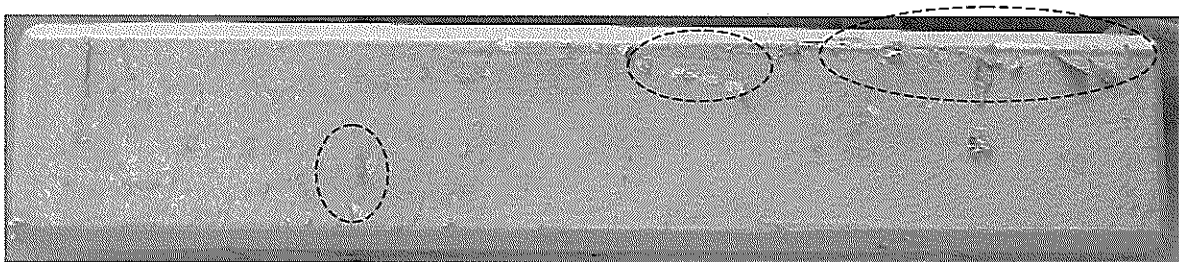


試験体 D

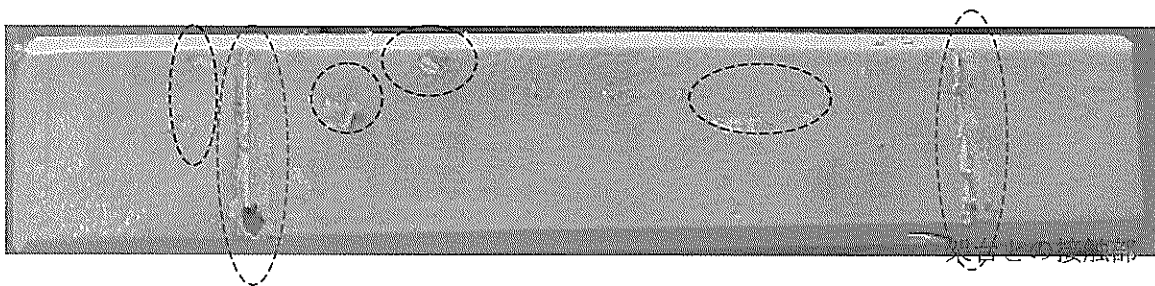
上面



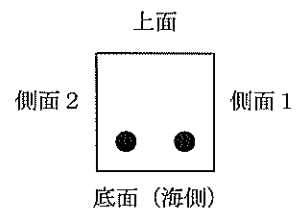
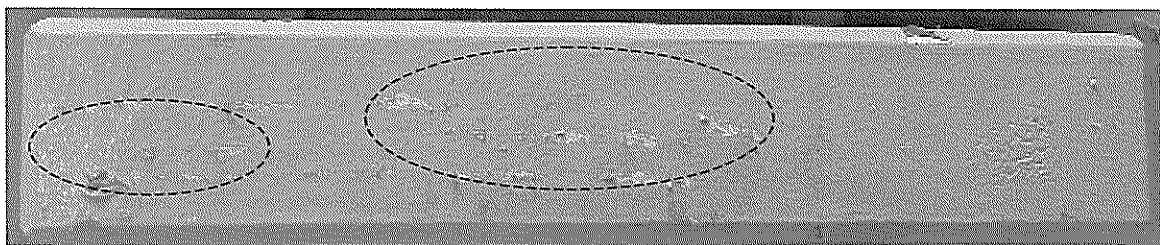
側面 1



底面

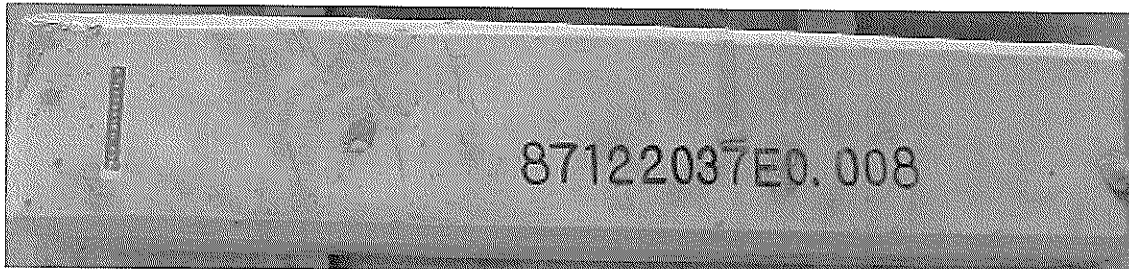


側面 2

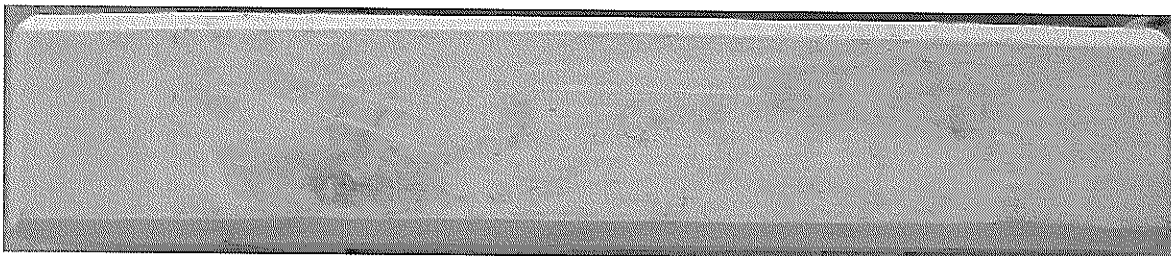


試験体 E

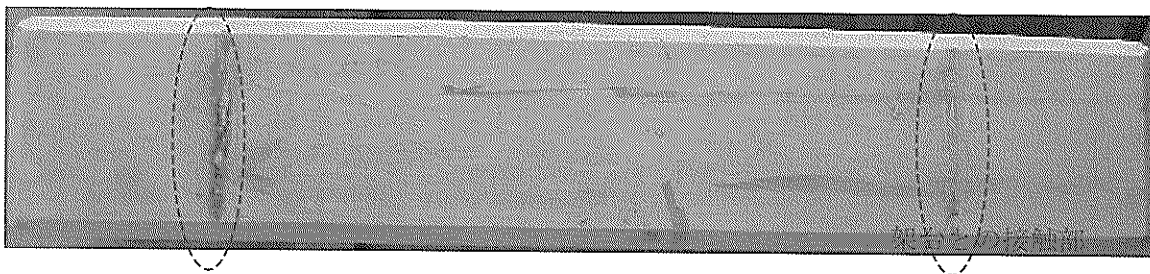
上面



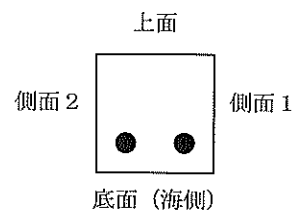
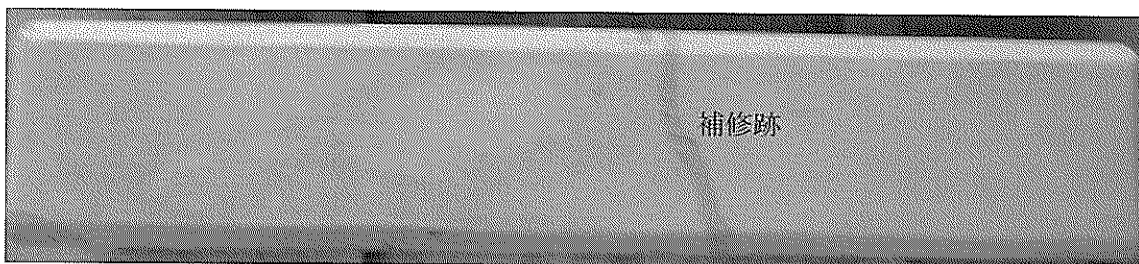
側面 1



底面

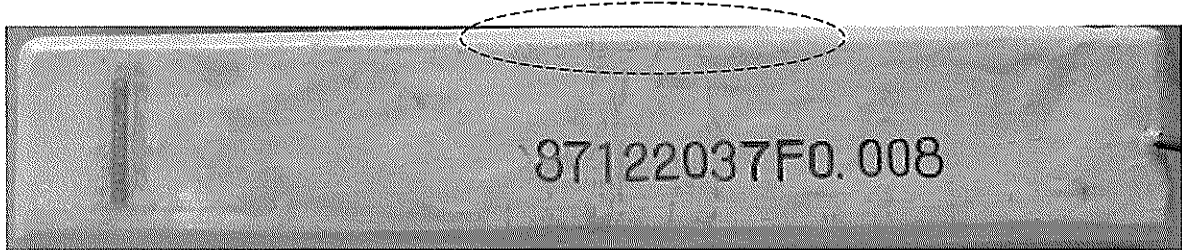


側面 2

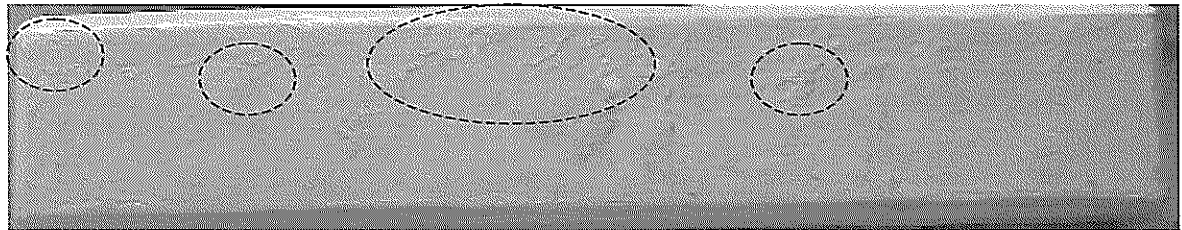


試験体 F

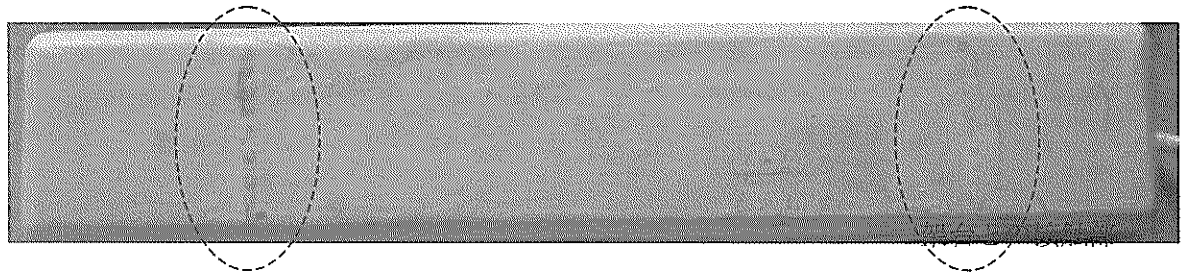
上面



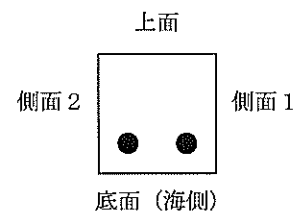
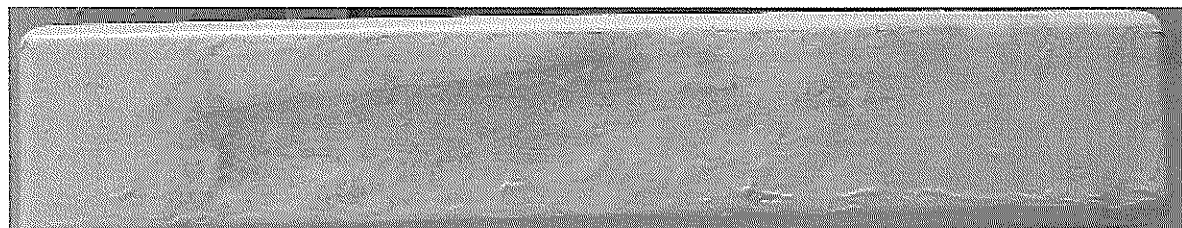
側面 1



底面



側面 2



付録 G 現地試験施工追跡調査結果

(1) 現地構造物概要

昭和 56 年に建設された波の上橋の橋桁において、表面被覆工法の試験施工が平成 4 年に行われた。付図 G.1 に表面被覆が行われる前に行われた可溶性塩化物イオン量の調査結果を示す。塩化物イオン量は増加傾向を示しており、平成 4 年の試験施工時において、鉄筋位置付近では既に腐食発生限界塩化物イオン量に到達していた可能性もある。しかしながら、橋桁表面に鉄筋腐食に起因するひび割れは見られなかった。

波の上橋において、下地処理をサンドブラストを用いた場合とディスクサンダーを用いた場合の 2 種類で行った後、6 種類の表面被覆材の試験施工が行われた。このうち 2 種類は 2 章のコンクリート試験体暴露試験における D および E と同系統の仕様である。表面被覆材の仕様を付表 G.1 に示す。なお、仕様 1 の上塗り材については、樹脂種類は同じであるが、湿潤環境下での付着性が向上されたものである。一方、仕様 2 では、補強材としてシート状のものが中塗りの間に追加で挿入されている。

(2) 調査概要

試験体における結果と現場施工による結果の比較を行うため、これら仕様 1 および 2 の 2 種類の表面被覆材について、目視観察および付着強さ試験を行った。付着強さ試験は、試験体の場合と同様、JSCE-K 531 に準拠して行った。調査時期は平成 15 年であり、施工後約 11 年が経過していた。

(3) 調査結果

a) 目視観察

仕様 1 については、試験体における仕様 D と異なり、ひび割れ等の劣化は観察されなかった。これは上塗り材の接着性が向上したことに起因していると考えられる。仕様 2 については、試験体における仕様 E 同様に劣化が観察されなかった。

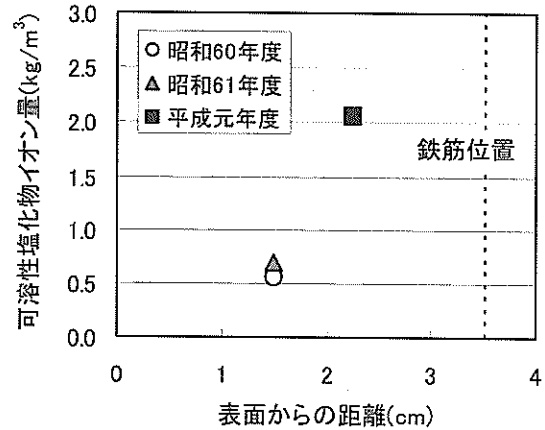
b) 付着強さ

付図 G.2 に初期および材齢 11 年時における付着強さの測定結果を示す。なお、材齢 11 年時の試験実施箇所における下地処理方法は不明である。仕様 1 の破壊面は上塗りと中塗りの境界面、2 は中塗りとコンクリートの境界面あるいは補強材と中塗りの境界面であった。いずれも初期とほぼ同等の値を確保しており、特に劣化はしていないと判断された。

参考文献

沖縄総合事務局那覇港湾工事事務所：平成 11 年度那覇

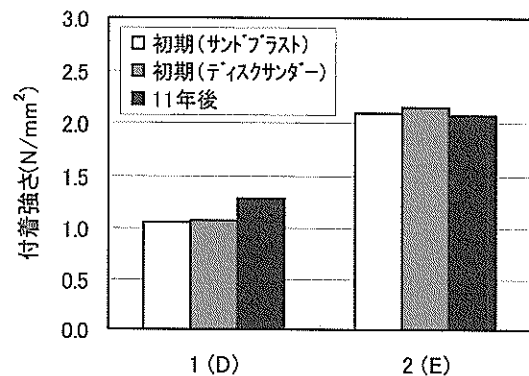
港臨港道路塗装塗替工事誌作成業務報告書（本編），2000.3



付図 G.1 実橋における可溶性塩化物イオン量

付表 G.1 試験施工における表面被覆仕様

仕様	表-3.2 における 記号	工程	使用材料	標準 使用量 (kg/m ²)
1	D	下地調整	アクリル系ポリマーセメント	3.00
		下塗り	エポキシ樹脂	0.20
		中塗り	アクリルゴム	2.00
		上塗り	アクリルウレタン樹脂	0.30
2	E	下地調整	ゴムラテックス混入セメントペースト	4.30
		下塗り	エポキシ変性合成樹脂	0.14
		中塗り	クロロプレンゴム	0.29
		補強材	ビロン繊維織布	1.15
		中塗り	クロロプレンゴム	0.58
	上塗り	クロロスルホン化ポリエチレン	0.58	



付図 G.2 実橋における表面被覆材の付着強さ