

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1403 June 2022

港湾コンクリート構造物における表面被覆材の適用性に関する検討

山路 徹, 山本 真史

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 表面被覆工法に関する既往の検討例	4
1.2 表面被覆工法の適用時の留意点	5
1.3 本研究における検討課題	7
2. 表面被覆工法が適用された栈橋上部工における調査結果	8
2.1 概要及び経緯	8
2.2 対象施設および適用された材料	9
2.3 調査内容	9
2.4 調査結果	11
2.5 まとめ	17
3. 表面被覆材の適用効果が明確となる条件の整理	18
3.1 はじめに	18
3.2 影響要因に関する感度分析	18
3.3 表面被覆材の適用が有効である条件の整理	21
3.4 まとめ	25
4. おわりに	29
参考文献	29
付録	
付録A 表面被覆材適用前のコンクリートの劣化状況	
付録B Excelを用いたコンクリート構造物の塩害劣化予測手法の例	

Study of applicability of surface coating material in port concrete structures

Toru YAMAJI*

Masashi YAMAMOTO**

Synopsis

Port concrete structures may suffer chloride attack (rebar corrosion) due to chloride ions supplied from seawater. In the case of existing structures, a surface coating material may be applied for the purpose of preventing the progress of this deterioration. However, there are few cases in which it was investigated that the effect of this surface covering material was maintained for a long period of time. Based on the above, for the purpose of grasping the performance of the surface coating material (mainly organic materials such as epoxy resin) applied to the existing pier superstructure (made of reinforced concrete) for long period, various surveys (adhesion strength, salt-shielding properties, etc.) were conducted to the surface coating materials (epoxy resin-based, which can be cured in a moist environment) that had been applied to the existing pier superstructure (made of reinforced concrete) and had passed 18 years.

In addition, in this pier superstructure, various survey (visual inspection, chloride ion concentration in concrete, etc.) was conducted to evaluate the soundness of the structural members before applying the coating material. With reference to the survey results before this application and the survey results this time, we calculated various conditions in which the surface coating material can be effective. The main findings obtained from this study are shown below.

- 1) It was confirmed that the epoxy resin-based coating applied to the target pier superstructure (made of reinforced concrete) maintained its performance (salt-shielding property, etc.) for a long period of about 18 years.
- 2) Based on the survey results obtained from the actual structure (including the survey results before applying the covering material) and the existing prediction method, the conditions under which the application of the coating material can be effective are summarized.

Key Words: Port concrete structure, pier superstructure, surface coating material, chloride ion, rebar corrosion

* Head, Materials Group, Structural Engineering Department

** Yokohama Port Corporation Co., Ltd.

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

港湾コンクリート構造物における 表面被覆材の適用性に関する検討

山路 徹*・山本真史**

要 旨

港湾コンクリート構造物は、海水から供給される塩化物イオンに起因し、塩害（鉄筋腐食）が生じる場合がある。既設構造物の場合に、この劣化の進行を防ぐことを目的として表面被覆材を適用する場合がある。しかし、この表面被覆材による効果が長期にわたり保持されていることを調査した事例は少ない。以上を踏まえ、海洋環境下に適用され、長期間経過した後の表面被覆材（主としてエポキシ樹脂等の有機系材料）の性能を把握することを目的として、既設の栈橋上部工（鉄筋コンクリート製）に適用され、18年が経過した表面被覆材（エポキシ樹脂系、湿潤環境で硬化可能）に対する各種調査（付着強度、遮塩性等）を行った。

また、今回対象の栈橋上部工においては、被覆材適用前に構造部材の健全度を評価するための調査（目視、コンクリート中の塩化物イオン濃度等）が行われていた。この適用前の調査結果および今回調査結果を参考にしつつ、表面被覆材の適用の効果が現れる各種条件の試算および整理を行った。本検討より得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 今回対象の栈橋上部工（鉄筋コンクリート製）に適用されたエポキシ樹脂系塗装に関しては、18年程度の長期にわたり性能（遮塩性等）を保持していたことが確認された。
- 2) 実構造物で得られた調査結果（被覆材適用前の調査結果も含む）および既存の予測手法を基に、適用の効果が現れる条件について整理した。

キーワード：港湾コンクリート構造物、栈橋上部工、表面被覆材、塩化物イオン、鉄筋腐食

* 構造研究領域 材料研究グループ長

** 横浜港埠頭（株）

〒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

コンクリート中は強アルカリ性環境のため、鉄筋周囲には不働態被膜が形成されており、鉄筋表面に酸素や水が供給された場合でも腐食は抑制される。この特性を活用し、鉄筋コンクリート構造物はインフラ整備の際に多用されている。一方、海洋環境下に位置するコンクリートの場合、海水中の塩化物イオンがコンクリート表面に供給され、その後内部に侵入し、鉄筋の表面にある量以上到達すると腐食が開始・進展する。鉄筋の腐食が進行し、その膨張圧がかぶりが剥落した栈橋上部工の例を図-1 に示す。この例からも分かるように、コンクリート中の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。なお、一般的なコンクリート構造物の場合に、コンクリートの中性化（大気中のCO₂とセメント水和物が反応し、コンクリート中のpHが低下する現象）が懸念されることが多いが、港湾コンクリート構造物の場合は、比較的かぶりが大きいこと（標準で70mm以上）、湿潤環境では中性化の進行が遅いこと等の理由から、一般には問題になることはない。

新設構造物の場合、最近では鉄筋を高耐久性化する方法が採用されている。エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用する例は港湾でも増えつつある。一方、既設構造物の場合、鉄筋を高耐久性化することは、ごく一部の鉄筋を交換することは可能ではあるが、全体的には実質不可能である。この既設構造物における対策は、1) 塩化物イオンの進入を防ぐ、2) 劣化した部材を交換する、3) 電流を印加する（電気防食）、の大きく3つに分かれる。このうち最も手間がかからないのは、1) 塩化物イオンの進入を防ぐ方法である。

この塩化物イオンの侵入を防ぐ方法として、鋼構造物と同様に、コンクリート表面に表面被覆材（塗装など）が適用される場合がある¹⁾²⁾。一般に、エポキシ樹脂系が用いられることが多い。ここで、鋼構造物との大きな違いは、適

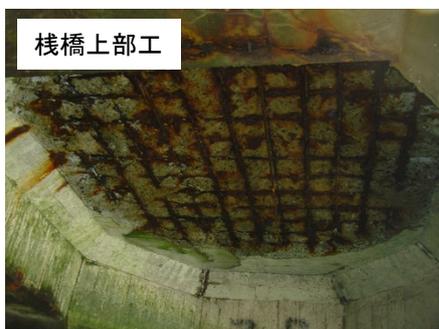


図-1 劣化した港湾コンクリート構造物（栈橋上部工）の例

用対象の鋼材（鉄筋）と表面被覆材の間に厚さ数 cm（一般的な港湾施設の場合は70mm以上）のコンクリートが存在する点である。

この表面被覆材の期待耐用年数として、コンクリートの場合は10～20年程度と比較的短く設定されている^{例え2)}。一方で、より長期にわたり性能を保持している場合もある³⁾。このような事例が蓄積されることで、信頼性が増し、表面被覆材がより使いやすくなると考える。

そこで、1. では、海洋環境下に位置するコンクリート構造物に表面被覆材が適用され、長期間供用された事例として、那覇港・海上大気中での調査結果を、1.1 でまず説明する。

また、コンクリート内に塩化物イオンが既に浸透していると、被覆材を適用し、塩化物イオン浸透の抑制効果が発揮されたとしても腐食を防ぐことができない。そのため、被覆材を適用する際の留意点を1.2 に示す。

最後に、本文での検討課題を1.3 に示す。

1.1 表面被覆工法に関する既往の検討例

コンクリートの表面を塗装などで覆うことで、外部からの塩化物イオンの侵入を防ぐことができ、塩害による劣化を抑制することができる⁴⁾。この表面被覆材に関して、実環境で長期間供用された際の挙動は不明確である。この長期挙動を評価するため、那覇港の臨港道路橋部において、試験体及び実桁での暴露試験が実施されている。この結果の概要⁴⁾を以下に述べる。

a) 那覇港暴露試験（試験体）⁴⁾

5種類の表面被覆を行ったコンクリート試験体の暴露試験が那覇港の海上大気中において実施中であり、30年経過時において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が行われている。表-1は適用された被覆材の仕様、図-2は30年経過時におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布である。なお、被覆厚は仕様3で1mm程度、仕様4で0.2mm程度であった⁴⁾。被覆材無し（凡例：0）の場合は多量の塩化物イオンが侵入しているが、一方、被覆材有（凡例：1～5）においては、被覆材の表面（上塗り材）に若干の劣化は見られるものもあったが、塩化物イオンの侵入は見られなかった。各種被覆材は30年にわたりコンクリート中への塩化物イオンの侵入を防いでおり、高い防食効果を保持していたことが分かる。

b) 那覇港波の上橋・試験施工（沖縄総合事務局での検討結果）⁴⁾

6種類の表面被覆が、供用後11年程度経過した波の上橋のPC（プレストレストコンクリート）桁部に適用された。適用26年後（竣工37年後）に調査を行っている。な

表-1 試験体に適用された表面被覆材

試験体	工程	使用材料	標準 使用量 (kg/m ²)
1	下塗	シラン系浸透剤*	0.30
	中塗	アクリル系ホリマーセメント	2.00
	上塗	塩素系ホリオリフィン系樹脂	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

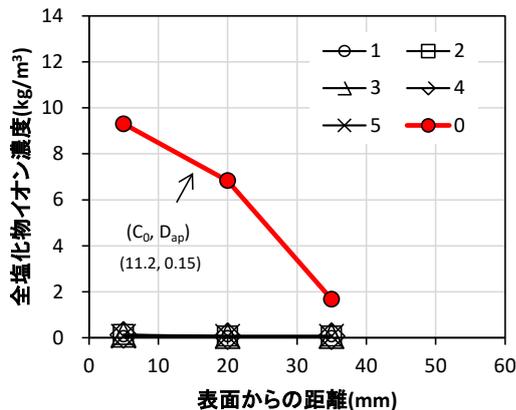


図-2 30年後の塩化物イオン濃度分布
(1～5: 表面被覆材有, 0: 被覆なし)

お、適用環境は桁下であり、直射日光は当たらない。ただし、海水飛沫の影響は受ける。表-2 は適用された被覆材の仕様、図-3 は遮塩性試験 (2.3 参照) の結果である。なお、被覆厚は仕様 A, B, E で 1mm 程度であった⁴⁾。26 年経過しても、各被覆材は高い遮塩性を保持していたことが分かる。また、一部の試料について、紫外線による劣化の有無を FT-IR 分析により確認したところ、明確な劣化は見られなかった。直射日光が当たらないことが影響している可能性が指摘されている。

表-2 実橋桁 (PC 製) に適用された表面被覆材

記号 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	アクリル系ホリマーセメント	-	○	○
		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	クロロスルホン化ホリエチレン	0.58		
C		プライマー	エポキシ樹脂	0.11	-	-
		パテ	無溶剤系エポキシパテ	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	-	-
		パテ	-	0.40		
		中塗	-	0.60		
		上塗	-	0.30		
E		不陸調整	-	1.70	-	○
		下塗	-	0.60		
		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	-	○
		パテ	エポキシ樹脂系パテ	0.50		
		中塗	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		

-:不明

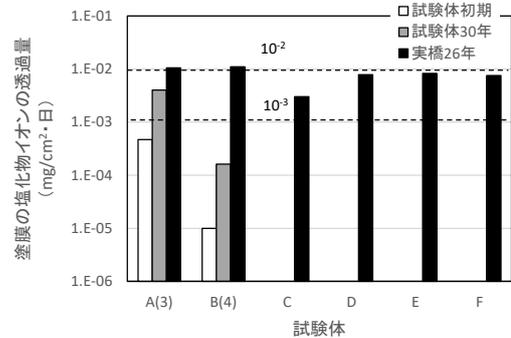


図-3 実橋桁 (PC 製) における 26 年経過後の表面被覆材の遮塩性

表面被覆材の耐用年数は一般に 10～15 年程度とされるが、上記の a) b) 2 つの事例は表面被覆材の耐用年数が 30 年程度となる場合もあることを示唆するものである。これはライフサイクルコストの試算結果に大きく影響を及ぼす。

ただし、表面被覆を適用する前に多量の塩化物イオンがコンクリート内に侵入していると、表面被覆適用後の腐食の開始は防げず、再劣化が生じる場合がある。そのため、適用前に適用の可否を確認する必要がある⁵⁾⁶⁾。このような再劣化が生じると予測された場合、一般には断面修復工法や電気防食工法の適用が推奨されている。

1.2 表面被覆材の適用時の留意点

まず、港湾コンクリート構造物における維持管理の流れ、そして、点検診断の結果を基に、対策工法を選定する際の流れを説明する。次に、対策工法として表面被覆材の

適用を検討する際の留意点について整理する。

1.2.1 港湾コンクリート構造物の維持管理の流れ

図-4 に港湾コンクリート構造物の標準的な維持管理の流れを示す⁶⁾。点検診断結果から施設の性能低下度を評価したのち、施設の将来の利用計画、重要度、財政上および将来の維持管理上の制約などを考慮し、必要に応じて実施すべき対策の方法及び実施時期を検討する⁹⁾。部材レベルで劣化が生じていても、施設の重要性が低い、今後の供用年数が短い等の理由から対策を行わない、あるいは対策レベルを下げるという判断する場合もあり得る。

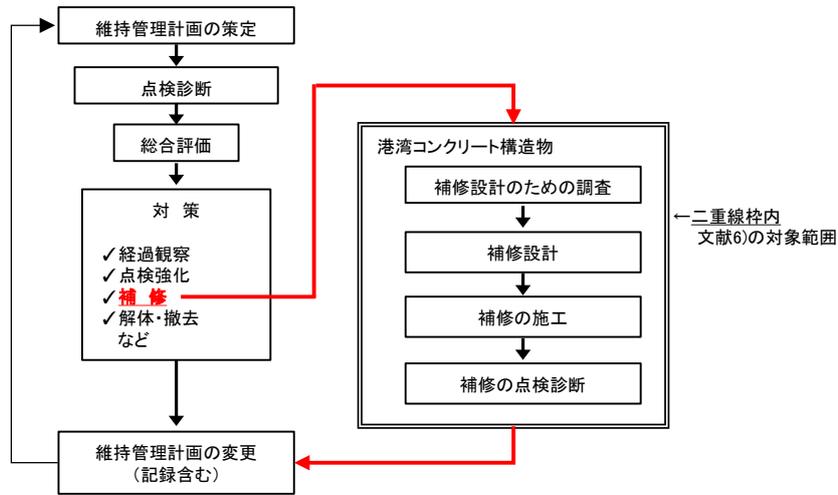


図-4 港湾コンクリート構造物の標準的な維持管理の流れ⁶⁾

図-5 は、「港湾コンクリート構造物補修マニュアル⁶⁾」に掲載されている、栈橋上部工（RC）を構成する部材の場合の、部材の性能低下が生じていない時点における対策工法（補修工法）の選定フローである。詳しくは 1.2.2 で説明する。

1.2.2 表面被覆の適用時の留意点

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-6 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

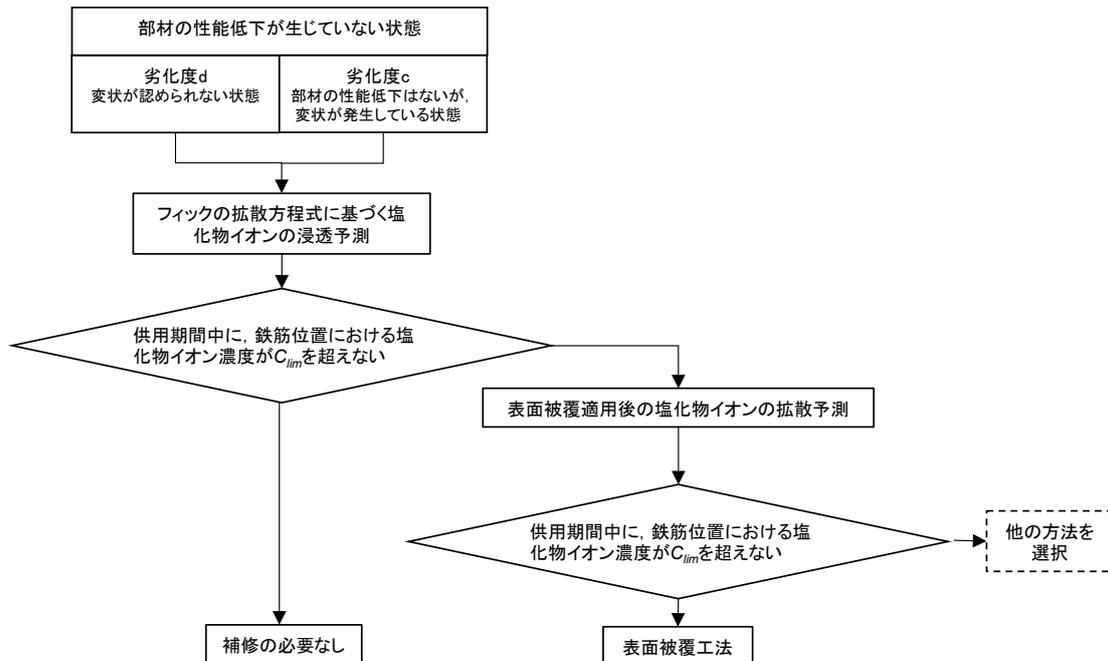


図-5 栈橋上部工（RC）を構成する部材の場合の対策工法の選定フローの例⁶⁾
（部材の性能低下が生じていない場合）



図-6 表面被覆適用後の再劣化事例

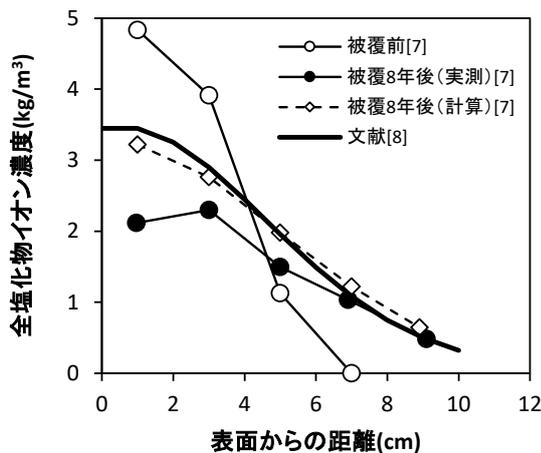


図-7 表面被覆適用後の塩分浸透予測例

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-7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、濃度拡散が生じるため、時間の経過とともに変化し、図中の点●(被覆8年後)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-7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。この予測の行為は、図-5中の「表面被覆適用後の塩化物イオンの拡散予測」に該当する。この際の予測方法の例は、文献7)8)や港湾の施設の維持管理技術マニュアル⁹⁾、港湾コンクリート構造物補修マニュアル⁹⁾等に記載されている。本文でも付録B中に掲載している。

上記のように、コンクリートに対して表面被覆を適用する際は、目視による劣化度がdやcで、部材の性能が低下していないと判定された場合でも、図-5のフロー中にあるように、塩化物イオンの拡散予測を行い、表面被覆の適用の可否を事前に判定する必要がある。

1.3 本研究における検討課題

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。

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、1.2で示した海上大気中での暴露試験結果においては、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(2.3参照)の試験環境のように、常時水中に浸していない限り、塩化物イオンは被覆材中へ浸透しにくいことが推測される。

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。

また、鉄筋腐食が開始する塩化物イオン濃度(図-5中の C_{lim} (腐食発生限界塩化物イオン濃度))や、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、未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 C_{lim} を上回っても、腐食ひび割れが開始するまでは○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。現状において、コンクリート構造物あるいは鋼構造物のいずれにおいても、被覆材自体の性能を調べる方法や、劣化を促進させる試験は存在しているが、それらの結果から、期待耐用年数を定める方法は確立されていない(例えば9)。現状では、実環境での暴露試験や、実構造物での実態調査等の実績を基にして、期待耐用年数の目安となるような値が提示される場合が多い⁹⁾¹⁰⁾。そのため、特に実構造物における、更なるデータの蓄積が必要と考える。また、この点が不明確なため、被覆材の適用の判断がしづらい状況にある。

前述(1.1)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、前述の実桁調査（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。

本検討では、上記の課題を検討することを主目的として、栈橋上部工（主として鉄筋コンクリート製）を対象とし、表面被覆材（主としてエポキシ樹脂等の有機系材料）の効果の持続性の確認を行うこととした。また、被覆材の適用効果がある条件の整理を、栈橋上部工を対象とし、簡易な予測計算により試みた。

2. 表面被覆が適用された栈橋上部工における調査結果

2.1 概要及び経緯

1. で挙げた課題を検討することを主目的として、被覆材が適用された既設栈橋上部工（主として鉄筋コンクリート製）を対象とし、被覆材の効果の持続性の確認を行うこととした。主に、表面被覆材（今回はエポキシ樹脂系）自体の効果が保持されているのかを確認することを目的としている。

なお、今回の調査対象施設において、表面被覆を適用する前に、調査および将来予測を行った結果、表面被覆の効果は十分期待できないことが確認されていた。ただ、施設的设计供用期間が残り20年程度であり、経済的な観点も

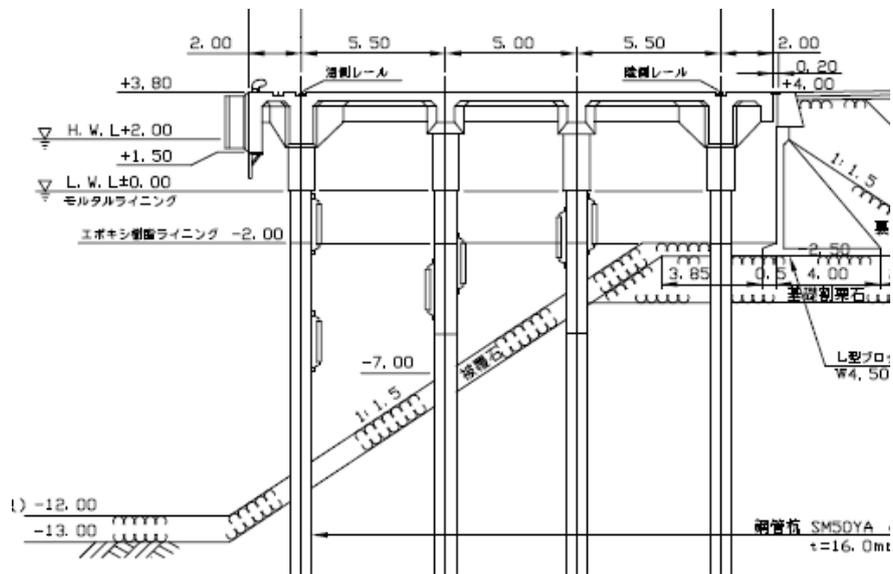


図-8 断面図

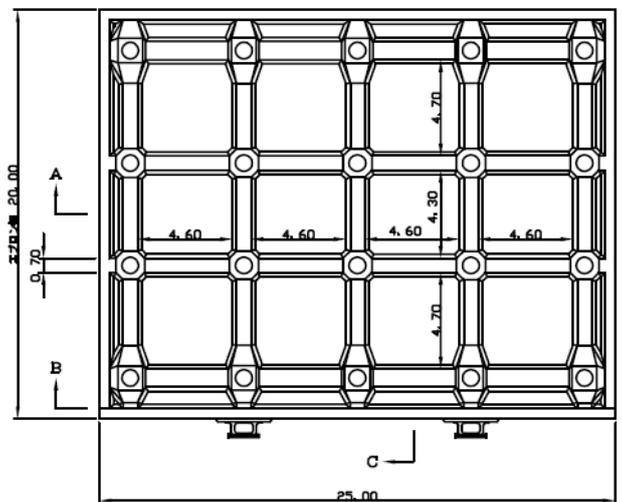


図-9 平面図

踏まえて総合的に判断した結果、対策工法の中では比較的安価な「表面被覆工法」が採用されている。

2.2 対象施設および適用された材料

対象構造物の断面図を図-8、平面図を図-9、補修履歴を表-3に示す。この施設は1970年に竣工（暴露開始）された。供用期間中に塩害による劣化が生じたため、まず1989年（竣工19年後）に棧橋上部工に無機系被覆（高炉スラグ微粉末を用いた材料）が適用されている¹¹⁾。次に、2001年（竣工31年後）に有機系被覆が適用されている。この被覆材は、湿潤環境で硬化するタイプのエポキシ樹脂系であり、厚さは約1mm程度である。なお、各補修時において、断面修復材が部分的に適用されている。今回調査は2020年に行っており、有機系被覆においては適用後約18年が経過している。2003年に実施された室内試験値（初期値）の一例を表-4に示す。

ここで、上述の「エポキシ樹脂」は、高分子材料である。この高分子材料の体積は占有体積と自由体積の和である。自由体積とは分子が運動することによって生じる空間であり、気体、水などはこの空間を移動することができる。ただし、自由体積のサイズは0.1~1nm程度と非常に微小

なため、移動速度は非常に遅い^{例えば12)}。また、高分子材料に紫外線が当たることにより、分子間の結合が切れ、劣化が進むとされている。この劣化が進行すると、そこにも空隙（微小なひび割れなど）が生じ、ここも気体などの移動経路となる。

2.3 調査内容

(1) 調査位置

図-10および図-11は棧橋上部工の平面図であり、図中に調査位置を示した。今回は全12ブロック中の2ブロック（11および12BL）で調査を実施した。なお、下が海側、上は陸側であり、陸側の黒太線はL型ブロックの法線である。また、12BLの右端の太線（灰色）には鋼甲板が存在している。これらの場所では、波が跳ね返っている可能性が高い。

表-5は、今回および過去の調査時に採取したコアの位置情報（高さ）を示している。なお、後述する塩化物イオンの拡散に関するパラメータ（ C_0 および D_{ap} ）の情報が得られたコアに限定している。塩化物イオン濃度を測定していないコアや、上記パラメータの算定が困難なひび割れ部から採取したコア（コアO）は除いた。

(2) 調査項目

a) 外観観察

試験体および実桁における被覆材のはがれ、はく離、ひび割れ等の状況を目視により観察した。

なお、付録Aに被覆材適用前におけるコンクリートの損傷状況の調査結果を示した。

b) 付着強度試験

JSCE-K531に準拠し、引張用治具（40×40mm 鋼製付着子）を試験体の上面あるいは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。

c) ひび割れ追従性

JSCE-K 532に準拠し、図-12に示すように、採取したコア（φ75mm）の表面側から25×40×10mmで試験片を切り出し、その試験片の一部に切込みを入れたのちに長軸方向に引っ張り、その際の被覆材の伸びを測定した。

d) 表面被覆材の遮塩性

文献4)に規定されている方法に準拠し、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-13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²⁾¹³⁾し、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-15参照）は、コンクリートを含まない被覆材のみの場合の結果である。

表-3 補修の履歴

内容	時期	経過年数	備考
竣工(暴露開始)	1970		
補修(無機系被覆)	1989	19	断面修復も一部実施
補修のための調査	2001	31	
補修(有機系被覆)	2002	32	断面修復も一部実施
今回調査	2020	50(18*)	

*有機系被覆適用後

表-4 有機系被覆の試験結果
(初期値は室内試験結果の一例)

項目	試験結果			
	初期値	今回		
塗膜厚さ(μm)	上塗り: 500 下塗り: 600	-		
塗膜の塩化物イオン透過量(mg/cm ² ・日)	1.10E-04	図-13中に記載		
ひび割れ追従性(mm)	0.50	スラブ	N	0.23
コンクリートとの付着強度(N/mm ²)	標準養生後: 2.3	スラブ	J	4.1
		はり	G_下面	5.3
			I_側面	5.2
			K_側面	4.6

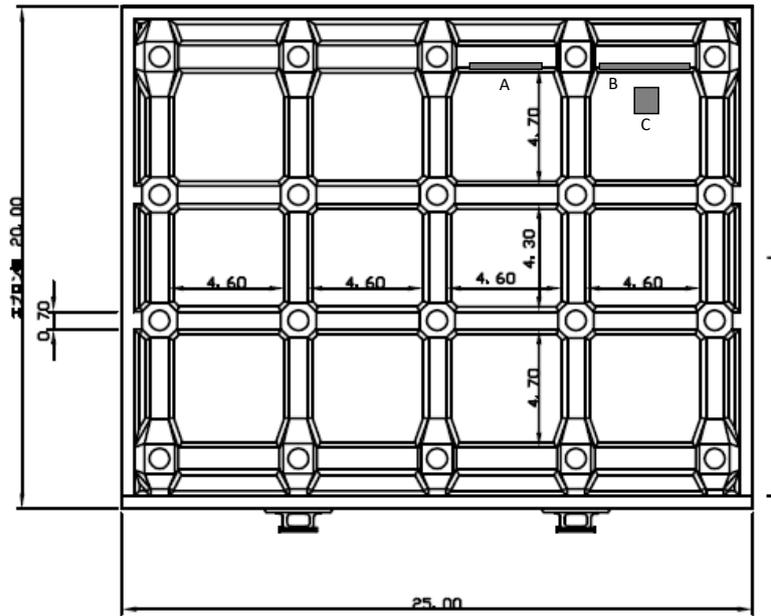


図-10 11BL 調査位置 (A~C : 3 か所)

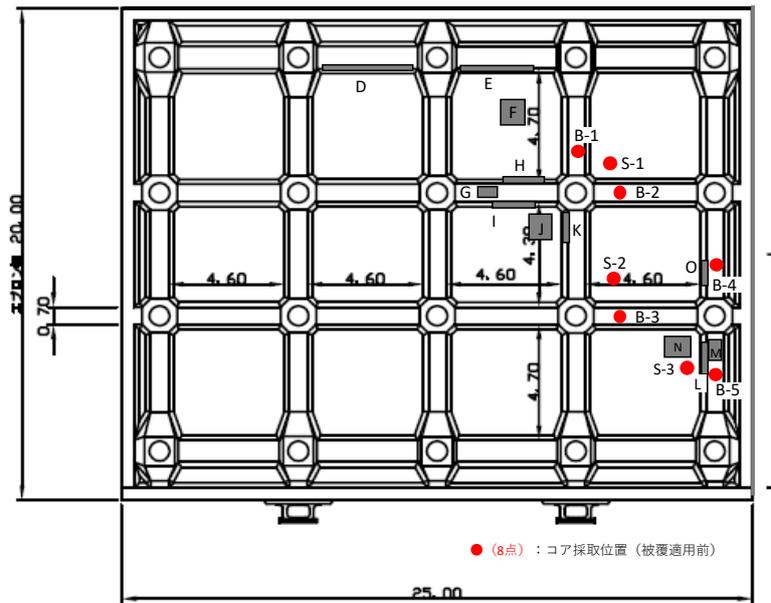


図-11 12BL 調査位置 (D~O : 12 か所)

e) 塗膜内への塩化物イオンの侵入状況の確認

EPMA (Electron Micro Probe Analyzer) により、塗膜内への Cl (塩素) の浸透状況の確認を行った。併せて、S (硫黄、分析の際は酸化物 SO₃ の状態で計測) の確認も行った。

f) コンクリート中の全塩化物イオン量分布

コアから所定の深度を切り出して試料を採取し、全塩化物イオン量の測定を JCI-SC4 に準拠して行った。

また、塩化物イオン濃度の分布を以下の式で近似し、表面塩化物イオン濃度 C_0 および見かけの拡散係数 D_{ap} の推定を行った。その推定方法の例を付録 B に示している。

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

ここで、 C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)、 x : コンクリート表面からの距離 (mm)、 D_{ap} :

表-5 コア採取位置及び C_0 および D_{ap} の算定結果

			コア採取位置(m)		$C_0(\text{kg/m}^3)$	$D_{ap}(\text{cm}^2/\text{y})$	
				H.W.Lからの距離(m)			
12	31年 被覆適用前	はり底面-法線直角	B-5(=M)	2.65	0.65	10.3	0.30
			B-4(≒K, O側)	2.65	0.65	2.4	0.34
			B-1	2.65	0.65	3.7	0.22
		はり底面-法線平行	B-3	2.65	0.65	17.3	0.33
			B-2(≒G側)	2.65	0.65	3.6	0.55
			スラブ	S-3(=N)	3.45	1.45	2.4
		S-2(≒J)		3.45	1.45	2.5	0.70
		S-1(≒F)		3.45	1.45	3.2	0.43
		50年 被覆適用後	主桁側面-法線平行	D	2.55	0.55	17.4
	E			2.75	0.75	11.2	0.55
	はり底面-法線直角			M	2.65	0.65	16.2
	はり底面-法線平行		G	2.65	0.65	2.8	0.51
	はり側面-法線直角		K-上	3.11	1.11	2.4	0.55
			K-下	2.81	0.81	3.1	0.79
			L	3.15	1.15	12.7	0.58
	はり側面-法線平行		H	2.95	0.95	13.6	0.45
スラブ			J	3.45	1.45	1.3	1.80
		N	3.45	1.45	2.6	0.43	
	F(断面修復材)*	3.45	1.45	8.9	0.03		
11	50年 被覆適用後	はり側面-法線平行	A	2.55	0.55	14.2	0.51
			B	2.55	0.55	13.0	0.45
			B	2.55	0.55	14.9	0.4
		スラブ	C	3.45	1.45	8.3	0.68

* $t=13\text{y}$ と仮定

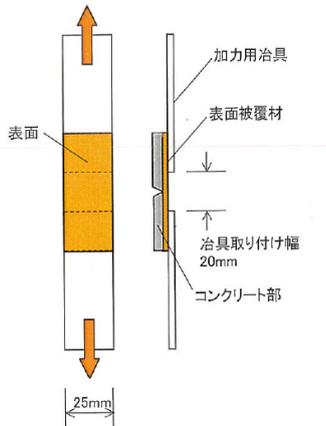


図-12 ひび割れ追従性試験

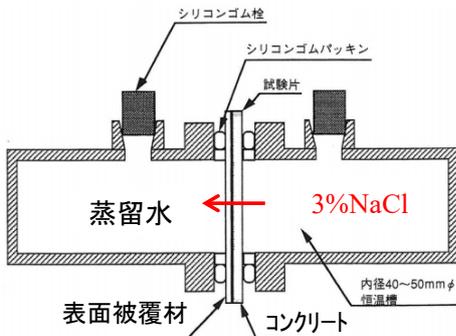


図-13 遮塩性試験

塩化物イオンに対する見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), t : 供用開始から調査時までの期間 (年), erf : 誤差関数, である。

g) 圧縮強度

採取したコアを用い、コンクリートの圧縮強度を測定した。

h) 中性化深さ

採取したコアを用い、コンクリートの中性化深さ測定した。

2.4 調査結果

2.4.1 外観

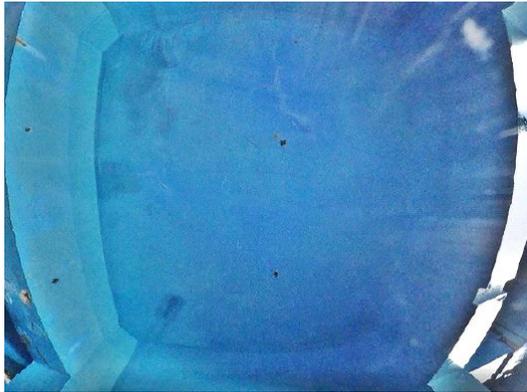
図-14に外観の一例を示す。被覆材自体の劣化に伴う、はく離・剥がれといった変状は確認されなかった。ただし、鉄筋腐食に伴う、コンクリートに生じた腐食ひび割れ、はく離については、多くの個所で確認されていた。被覆材の適用時点において、既に塩化物イオンがコンクリート中に浸透していたためと考えられる。なお、2.1で述べているように、今回このような劣化が一定程度生じることは、被覆材の適用を検討する際に想定されていた。

2.4.2 コンクリートに関する調査結果

コンクリートの圧縮強度を表-6に示す。40N/mm²近くの値を示しており、一般的な鉄筋コンクリートの場合の特性値21N/mm²を大きく上回っていた。

表-6 コンクリートに関する調査結果

ブロック	記号	採取位置	圧縮強度 (N/mm ²)	中性化深さ(mm)	
				平均	最大
11	B	はり側面	39.1		
12	E	はり側面	37.3	9.1	12.1



(スラブ底面)



(はり)

図-14 栈橋上部工外観の一例

コンクリートの中性化深さを表-4 に示す。対象箇所においては平均で9mm程度と比較的大きい。被覆適用前の期間(約32年間)に中性化が進行していたと考える。

2.4.3 付着試験

表-4 中に付着強度を示す。過去の初期値の一例(2.3)よりもかなり高い値を示した。

2.4.4 ひび割れ追従性試験

表-4 中に試験結果(破断時の伸び)を示す。試験時の伸びは、初期値(室内試験)の半分程度に減少していた。また、文献14)の目標値を下回っていた。

2.4.5 遮塩性に関する試験結果

(1) 遮塩性試験

図-15 に遮塩性試験結果(被覆材中を透過した塩化物イオン量)を示す。なお、比較としてコンクリート単体(被覆材無し)でも2試料実施した。初期値(室内試験)の値(0.11E-3)も示した。

今回の結果は「道路橋の塩害対策指針¹⁵⁾」のC種(長期防錆型)における品質規格値(1E-3以下)を満足していた。なお、被覆材E(測定値:1E-3)以外は、検出限界(0.7E-3)以下であったため、検出限界0.7E-3の値を表記している。

参考として、図-16 に遮塩性と経過年数の関係を示した

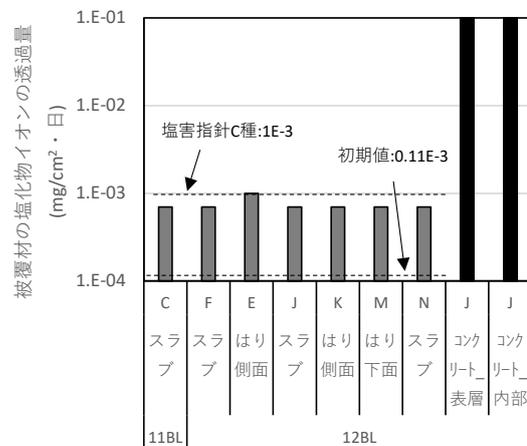


図-15 遮塩性試験結果

(既往の知見¹⁶⁾含む)。今回の結果は、他の結果と検出限界が異なるようであるが、比較的良好な値(低い値)を示している。

以上より、適用後18年が経過しても、今回の有機系塗装(エポキシ樹脂系)が高い遮塩性を保持していたことが確認された。

(2) EPMA

図-17 に Cl および S に関する測定結果を示す。なお、

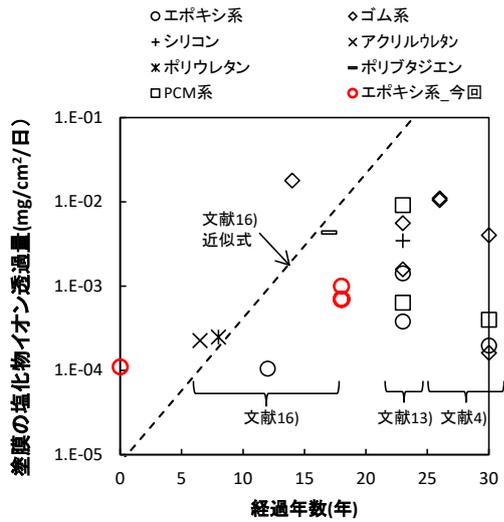


図-16 遮塩性と経過年数の関係

上段の値は質量比の測定値(%)に各材料の密度(kg/m^3)を乗じ、単位を変換した。また、塗膜下の材料は、はりの場合は未補修のコンクリート(塩化物イオンが多量に侵入)、スラブの場合は断面修復材であった。

いずれの塗膜内にも高濃度のClが存在していた。これ

は塗膜の顔料中に元々含まれていたものと推測される。

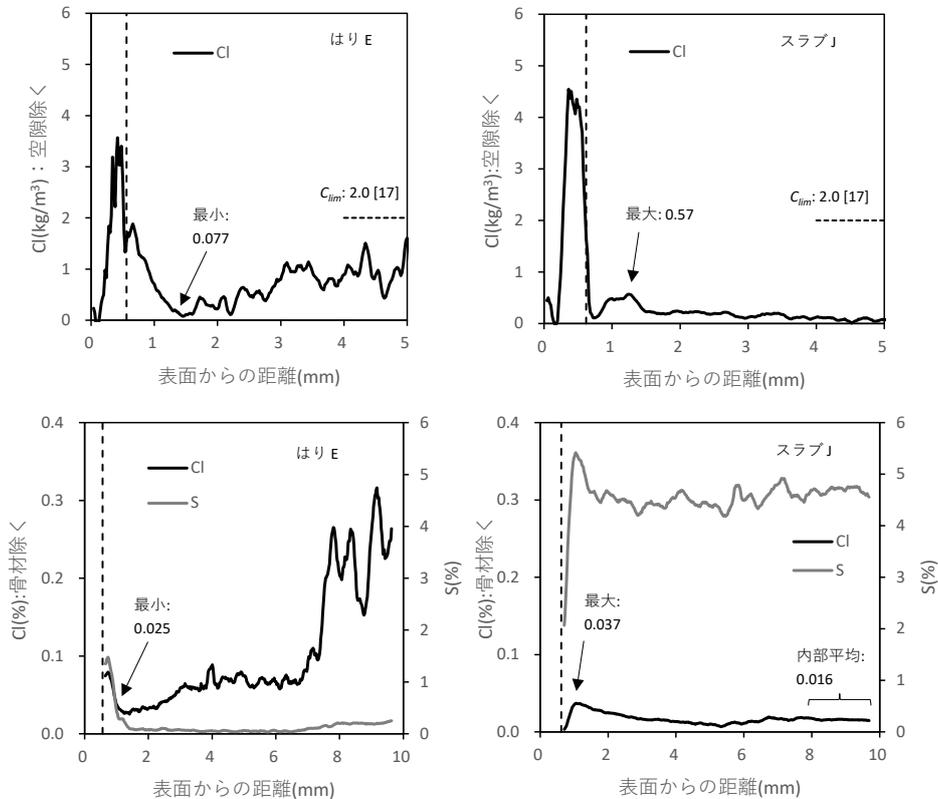
(a)はりの場合、塗膜直下付近のClは、コンクリート中の腐食発生限界濃度($C_{lim}=2.0\text{kg/m}^3$)¹⁷⁾を下回る低濃度であった。ただ、S濃度が非常に低く、コンクリートが中性化していることが分かる。中性化したコンクリートはClを多量に含むことができないため、この結果から塗膜がClの浸透を完全に防いでいると結論付けることは難しい。

(b)スラブの場合、塗膜下のClは、(a)同様、塗膜直下から内部まで低濃度であった。一方、Sはごく表層部を除き、表面から内部まで一様な濃度であり、断面修復材の大半は中性化していないと考えられる。この場合に断面修復材内にClが多量に含まれていないということは、塗膜がCl浸透を十分に防いでいたと判断できる。なお、長期間にわたり、塗膜内にClが浸透していないという知見は数例報告されている³⁴⁾。

2.4.6 コンクリートの塩化物イオン濃度分布

(1) 測定結果

今回調査時における塩化物イオン濃度分布の測定結果を図-18および図-19に示す。以下、ブロック、部位ごとに説明する。



(a) はり (コンクリート)

(b) スラブ (断面修復材)

図-17 EPMA 結果 (上段: 空隙除く, 下段: 骨材除く, 縦点線: 被覆材厚さ)

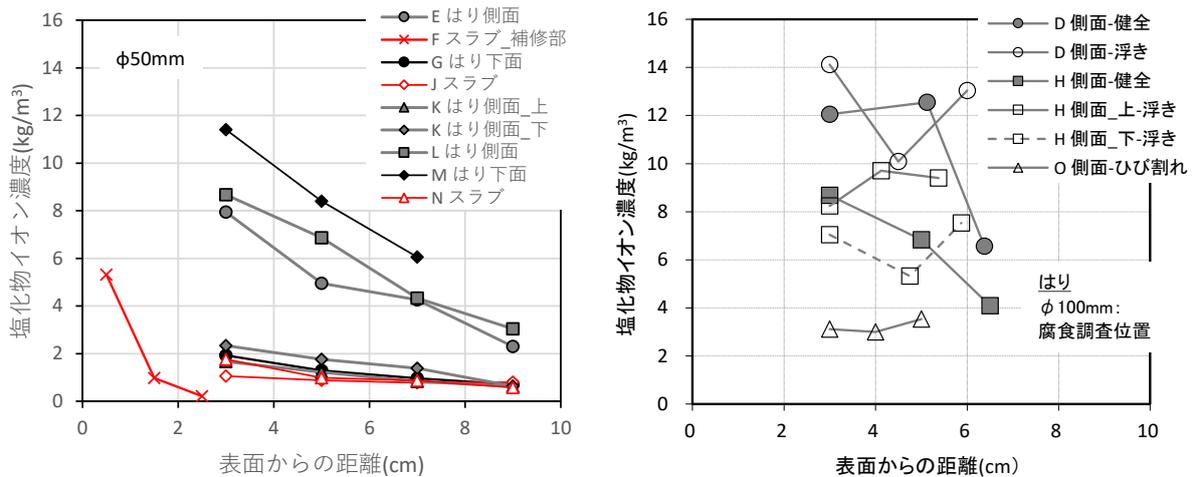


図-18 塩化物イオン濃度分布 (12BL)

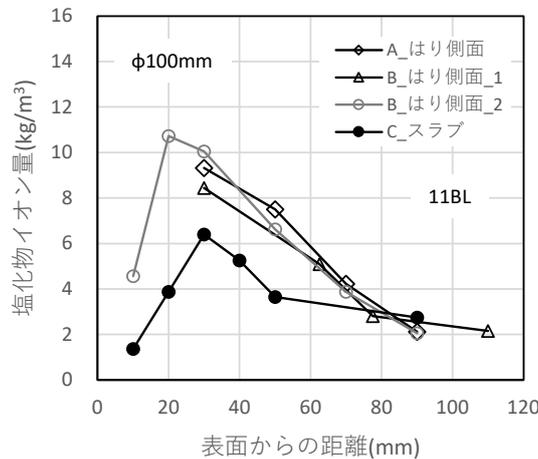


図-19 塩化物イオン濃度分布 (11BL)

a) 12BL・スラブ：

JおよびNは全体的に低濃度であった。一方で、Fの場合、被覆の直下に多量の塩分が存在している。Fの断面を観察したところ、断面修復材と推定される材料が確認されていた。このことから、被覆が適用される数年前に断面修復材が適用され、かつ表面被覆材が適用されていない状態の際に塩化物イオンが侵入したと推測される。ここで、コアFの C_0 および D_{ap} の算出時に、断面修復材を適用後の経過年数が必要であるが、ここでは13年(表-1の1989から2002まで)と仮定した。

b) 12BL・はり

M(はり下面), L(はり側面), E(はり側面), D(はり側面), H(はり側面)は高濃度であった。一方、G(はり下面), K(はり側面-上および下)はスラブと同程度の低い値であった。同じ栈橋内で、海面からの距離が同様に

あっても、供給される塩化物イオン量が異なることが分かる。

c) 11BL(無機系)

A(はり側面), B(はり側面), いずれも高濃度であった。12BL同様、対象部の近隣に鉛直壁面(L型ブロック)があり、反射波の影響が大きいと推測される。

一方、スラブにおいては、はりに比べると、表層に近い30-40mm付近の濃度は低濃度であった。なお、0-20mm付近の値が低下しているのは、中性化により、コンクリート中に塩化物イオンが固定されなくなった影響と考えられる。

(2) 被覆適用前と今回調査結果の比較

塩化物イオン濃度分布の測定結果について、被覆適用前と今回の比較を行う。スラブ、はり側面、はり下面と部位ごとにまとめたものを図-20に示す。なお、12BLのは

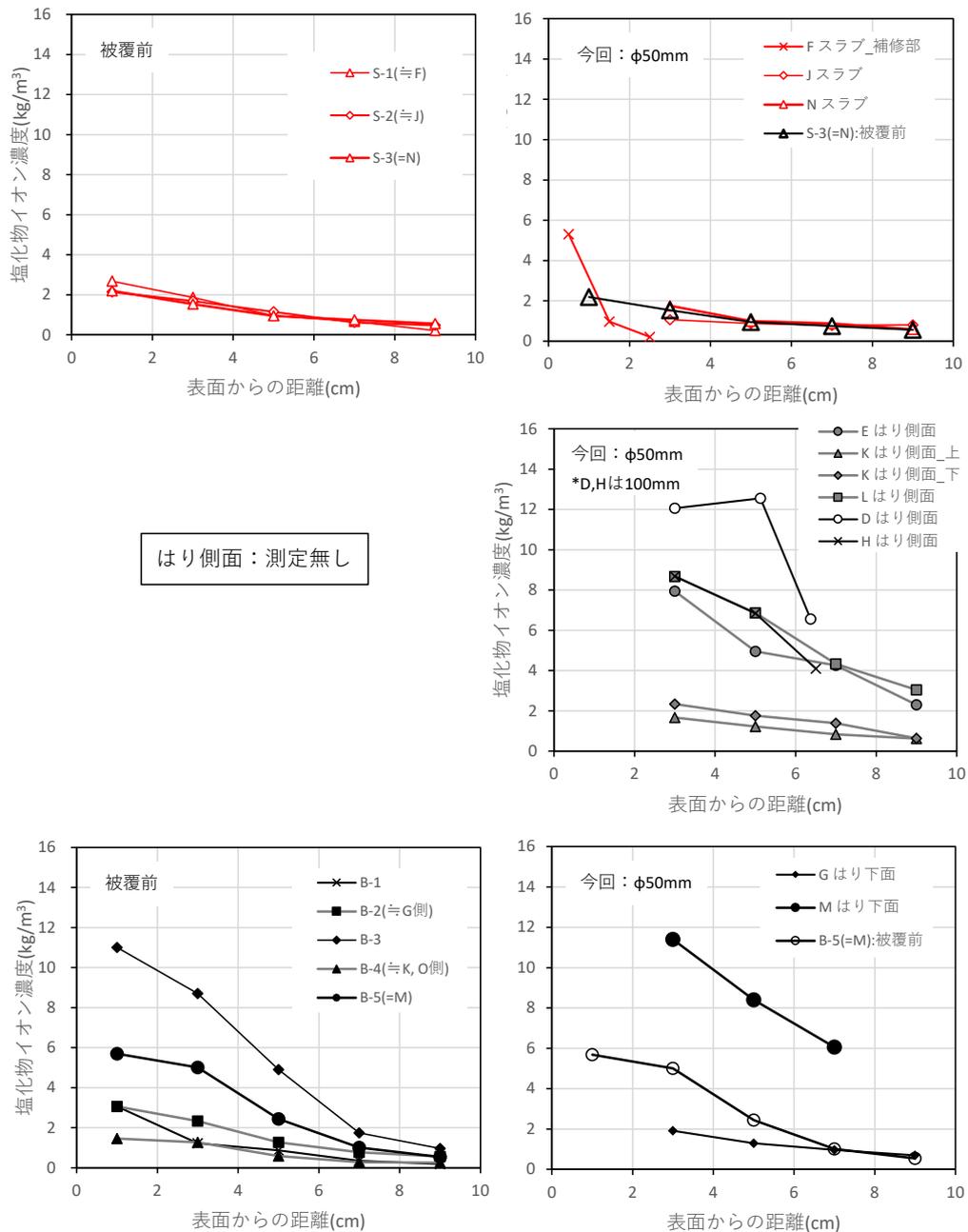


図-20 被覆適用前と今回調査結果の比較 (12BL)

り側面, 11BL については, 被覆適用前の測定結果が存在しない。

スラブにおいて, S-3 (被覆適用前) と N は同じ部材から採取したコアの結果であるが, ほとんど同じ値を示した。

一方, はり下面において, B-5 (被覆適用前) と M は同じ部材から採取したコアの結果であるが, 大きく異なった。この違いの主要因は, 値が極端に異なるため, 同じ部材であっても, 供給される海水の量が異なっていたためと考えている。なお, G については, 値が非常に小さい。

環境が比較的同様な B-2 の結果と同様な値を示した。

(3) C_0 に及ぼす海面からの距離の影響

図-21 に H.W.L.からの距離と表面塩化物イオン濃度 C_0 の関係を示す。なお, 文献 17)では, 両者には以下の関係があるとしている。この値を図中に直線として示した。

$$C_0 = -6.0 X + 15.1 \quad (2)$$

ここで, X : H.W.L.からの距離, である。

スラブについては, H.W.L.から距離が若干 (1.5m 程度) 離れていることもあり, C_0 が小さくなる傾向にある。は

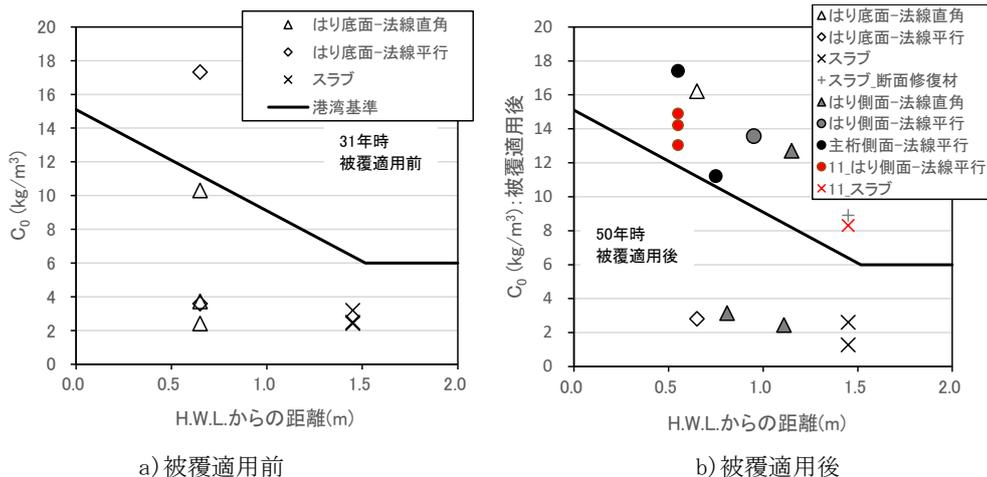


図-21 H.W.L.からの距離と表面塩化物イオン濃度 C_0 の関係

りについては、b) 被覆適用後においては、H.W.L.に近い場合に値が大きいものが増える傾向がみられる。ただし、a)b)いずれにおいても、スラブと同程度の低い値を示す場合もいくつか見られた。H.W.L.近くでも、近隣に作用する波の条件次第では、海水の供給が少ないことが推測される。はりの向き（法線平行・直角）や位置（海側・陸側）の影響は明確ではないが、対象部近隣における鉛直壁面（鋼矢板、L型ブロック）や杭の存在や波向きの影響を受けた結果、コンクリート表面に供給される海水の量が異なり、結果として、同じ高さでも C_0 がかなりばらついていると考えられる。

(4) 過去の結果からの予測値との比較

差分法を用いた簡易な手法により、被覆適用後の塩化物イオン濃度の予測を行い、今回の実測値との比較を行った。なお、予測手法の概要を付録Bに示した。

実測値及び予測結果を図-22に示す。以下、部位ごとに説明を加える。

- ・はり（高濃度のグループ）：図-22 上段

実測値（点）は、過去のはりでの最大値（B-3）の予測値（赤太線）と概ね同様な値を示した。

- ・はり（低濃度のグループ）：図-22 中段

実測値（点）は、過去のスラブでの最大値の予測値（赤太線）と、概ね同様な値を示した。

- ・スラブ：図-22 下段

実測値（点）は、過去のスラブでの最大値からの予測値（赤太線）と、概ね同様な値を示した。

被覆適用前の測定値は、今回のコア採取位置とは厳密には同じでないため、参考程度の比較となる。しかしながら、被覆の適用により、外からの供給は抑制された結果、表面付近の濃度増加は抑えられ、一方で、内部の濃度は増加する傾向を示しているようである。

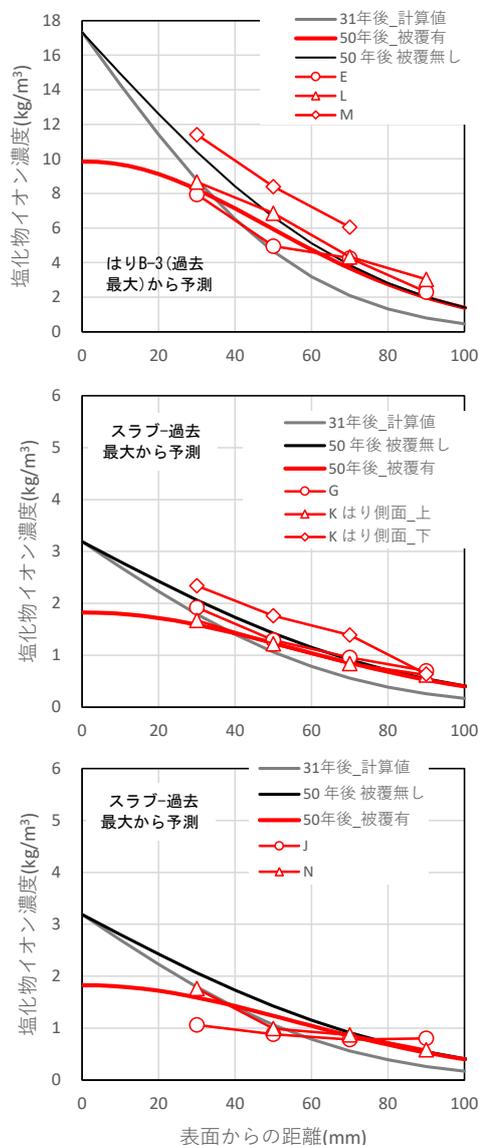


図-22 適用前の測定値からの予測値と今回実測値との比較 (12BL)

表-7 鉄筋腐食に関する調査結果一覧

BL	足場No.	区分	部材	位置	鉄筋区分	C ₀	D _{ap}	かぶり厚(mm)	鉄筋位置Cl濃度:計算値	腐食度区分			腐食状態	備考
11	通路	A	主桁	側面(海面)	縦	14.98	0.43	95	2.2	腐食なし	0	0	腐食を認めず	
	11-1	B	主桁	側面(海面)	縦	<i>12.34</i>	<i>0.53</i>	80	<i>3.4</i>	C	3	III	断面欠損の軽微な腐食	
					横	<i>12.34</i>	<i>0.53</i>	125	1.1	A	1	I	点錆程度の表面的な腐食	
12	通路	D	主桁	側面(海面)	縦			75	12.4	D	4	IV	断面欠損・大	浮き部
					縦	17.41	0.82	80	6.6	C	3	III	断面欠損の軽微な腐食	健全部
	12-1	E	主桁	側面(海面)	縦	11.21	0.546	100	2.0	C	3	III	断面欠損の軽微な腐食	
					縦	<i>11.21</i>	<i>0.55</i>	93	<i>2.3</i>	C	3	III	断面欠損の軽微な腐食	
		H	桁	側面(陸面)	縦			75	9.1	D	4	IV	断面欠損・大	浮き部
	縦						82	6.6	D	4	IV	断面欠損・大	浮き部	
	12-2	K	梁	側面	縦	13.57	0.45	75	3.6	A	1	I	部分的な腐食	健全部
					縦	3.15	0.794	70	1.4	A	1	I	部分的な腐食	
	12-3	L	梁	側面	縦	12.71	0.581	70	4.6	C	3	III	断面欠損の軽微な腐食	
					縦	2.61	0.434	70	0.8	B	2	II	全体に表面的な腐食	
通路	O	梁	側面	縦			60	3.2	B	2	II	全体に表面的な腐食	ひび割れ部	

斜体:類似部材の結果

斜体:類似部材の結果からの計算値

ここで、図中の黒太線は、被覆を適用しなかった場合の予測値である。内部(60-70mm以深)においては、被覆適用後の予測値(赤太線)と同様な計算結果となっている。また、今回の実測値(赤色の点)も、内部(60-70mm以深)においては、被覆無しの場合の予測値と概ね同様な値を示した。

以上の結果は、今回の内部(60-70mm以深)においては、被覆適用前にある程度以上の塩化物イオンが侵入していた場合、被覆材を適用した効果は、予測計算上はほとんどないことになる。どのような場合に、このような結果となり得るのか、3.で改めて検討を行う。

2.4.7 鉄筋腐食状況と鉄筋位置の塩化物イオン濃度の比較

表-7に目視で確認した鉄筋腐食状況(腐食度)と、塩化物イオン濃度分布から計算した「鉄筋位置の塩化物イオン濃度」を示す。なお、斜体の値は、近隣の類似部材の結果を基に計算したものである。腐食度の区分は文献18)を参考に行った。

図-23に鉄筋位置の塩化物イオン濃度(表中の計算値)と腐食状況(表中の区分を表す数字:0~4)の関係を示す。両者の間にはある程度の相関がみられた。なお、図中において、文献17)に記載されている腐食発生限界濃度 $C_{lim} = 2.0 \text{ kg/m}^3$ を上回っても腐食が認められない例(腐食状態0)が1例、点錆程度の表面的な腐食(腐食状態1)が1例ある。なお、 C_{lim} の値に関する既往の知見では、2.4¹⁹⁾や3.2²⁰⁾といった、2.0より大きい値を報告している例もある。 C_{lim} の値は、コンクリートの品質や環境によって異なると

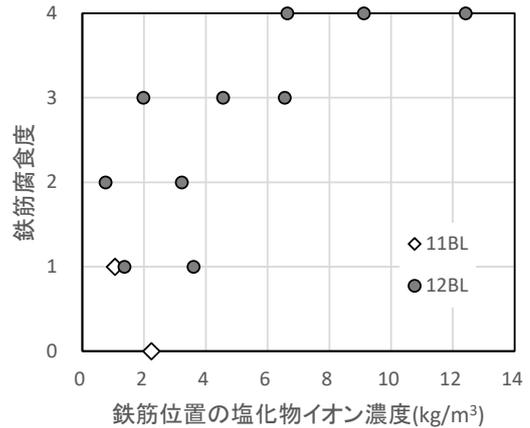


図-23 鉄筋位置の塩化物イオン濃度と鉄筋腐食度の関係

される。今回の環境においても、2.0より大きくなっている可能性もある。

2.5 まとめ

既設栈橋上部工(鉄筋コンクリート製)に適用され、長期間経過した表面被覆材の性能確認を目的として、各種調査を行った。その結果、今回対象の栈橋上部工に適用されたエポキシ樹脂系塗装に関しては、適用後18年経過した時点(建設後50年経過)でも高い性能(遮塩性、付着強度)を確保していた。

ただし、被覆適用時に高濃度の塩化物イオンが侵入していた箇所（例えば主桁はり部）においては、再劣化（鉄筋腐食の発生・進行）が生じている場合が見られた。一方、被覆適用時に低濃度の塩化物イオンしか侵入していない箇所（例えばスラブ）においては、そもそも塩化物イオンの供給が少なかったこともあり、現時点では、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の抑制効果は明確ではなかった。

表面被覆材の適用効果が、どのような場合に明確となるのか、3.において整理（試算）を行うこととする。

3. 表面被覆材の適用効果が明確となる条件の整理

3.1 はじめに

表面被覆材による遮塩効果は長期間にわたり保持されることが確認された。一方で、表面被覆材の適用の前の段階で、既に内在している塩化物イオン量によっては、内部で濃度拡散した塩化物イオン量が、鉄筋位置で限界値を超え、腐食が生じる場合がある。また、塩化物イオンの供給量、コンクリートの品質、かぶり、供用期間の長さ等の要因次第で、そもそも被覆の適用が不要な場合もある。

上記のように、表面被覆材の適用が有効である条件は、環境条件、コンクリートに関する条件（品質、かぶり等）、被覆の適用時期によって変化する。ここでは、栈橋上部工に特化し、表面被覆材の適用が有効である条件効果が明確に現れる条件を整理した。この際、まず、各パラメータを変化させ、感度分析を行った。次に、栈橋上部工に特化し、表面被覆材の適用が有効である条件効果が明確に現れる条件の整理を行った。

3.2 影響要因に関する感度分析

条件を変更させ、感度分析を行った。条件の一覧を表-8に示す。被覆の有無、塩化物イオン拡散係数、表面塩化物イオン濃度、かぶり、被覆適用時期を変化させた。

a) 予測結果

コンクリート中の塩化物イオン濃度分布（適用前、適用10、20および40年後、無塗装の5パターン）および鉄筋位置の塩化物イオン濃度の経時変化（塗装有・無、かぶり4および8cmの4パターン）の予測例を図-24および図-

25に示す。図-22と図-23は拡散係数が異なり、図-24は普通ポルトランドセメント（W/C=0.50）の場合、図-25は高炉セメントB種（W/C=0.50）の場合である。ここで、拡散係数の値は、文献17)中に示された式により求めた。また、(i)と(ii)では被覆材の適用時期が異なり、(i)は供用後10年時に適用、(ii)は供用後20年時に適用した場合である。さらに、それぞれ $C_0=15$ および 10kg/m^3 の場合の結果を示している。図の右段の、塗装（被覆材）の有無の結果に着目すると、かぶり4cmの方が両者の違いが大きいことが分かる。

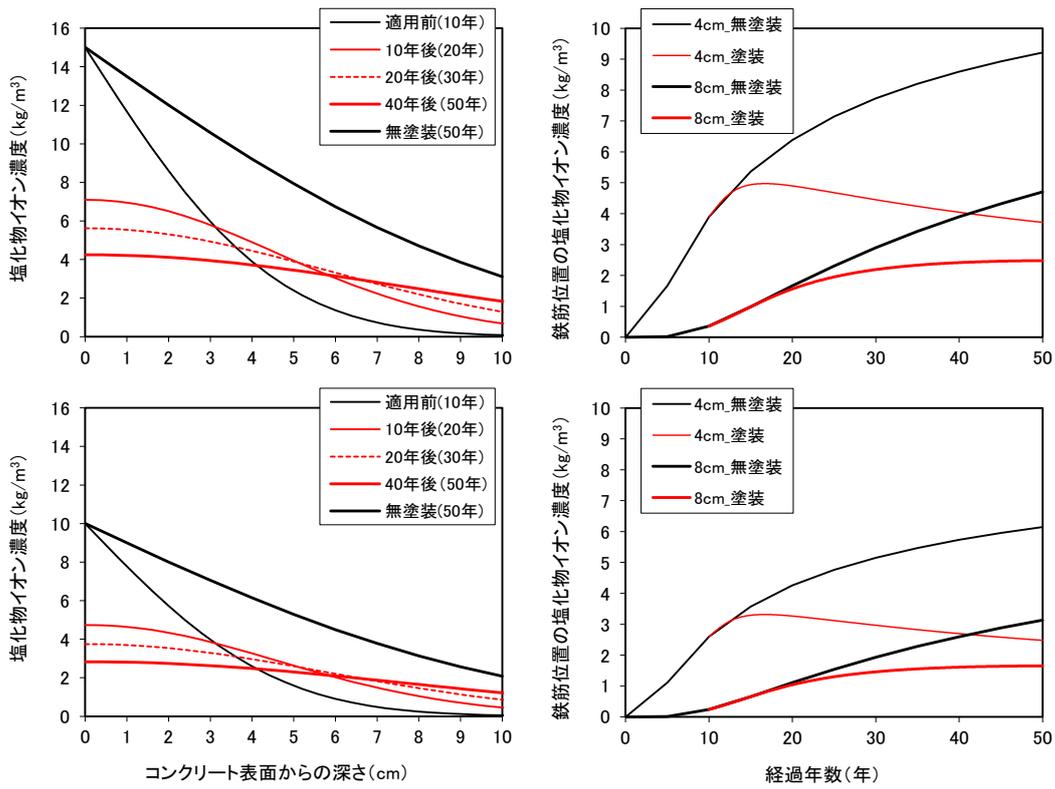
次に、各試算条件の場合の、50年後における鉄筋位置の塩化物イオン濃度の予測結果を図-26に示す。無塗装の場合、表面塩化物イオン濃度が大きい場合、拡散係数が大きい場合、かぶりが大きい場合ほど、濃度が大きくなっている。すなわち、早い段階で腐食が開始することを意味している。一方、被覆材を適用した場合、濃度が低下している。特に適用時期が10年の方が、その低下の程度が大きい。

b) 被覆材の適用効果（濃度の低減効果）

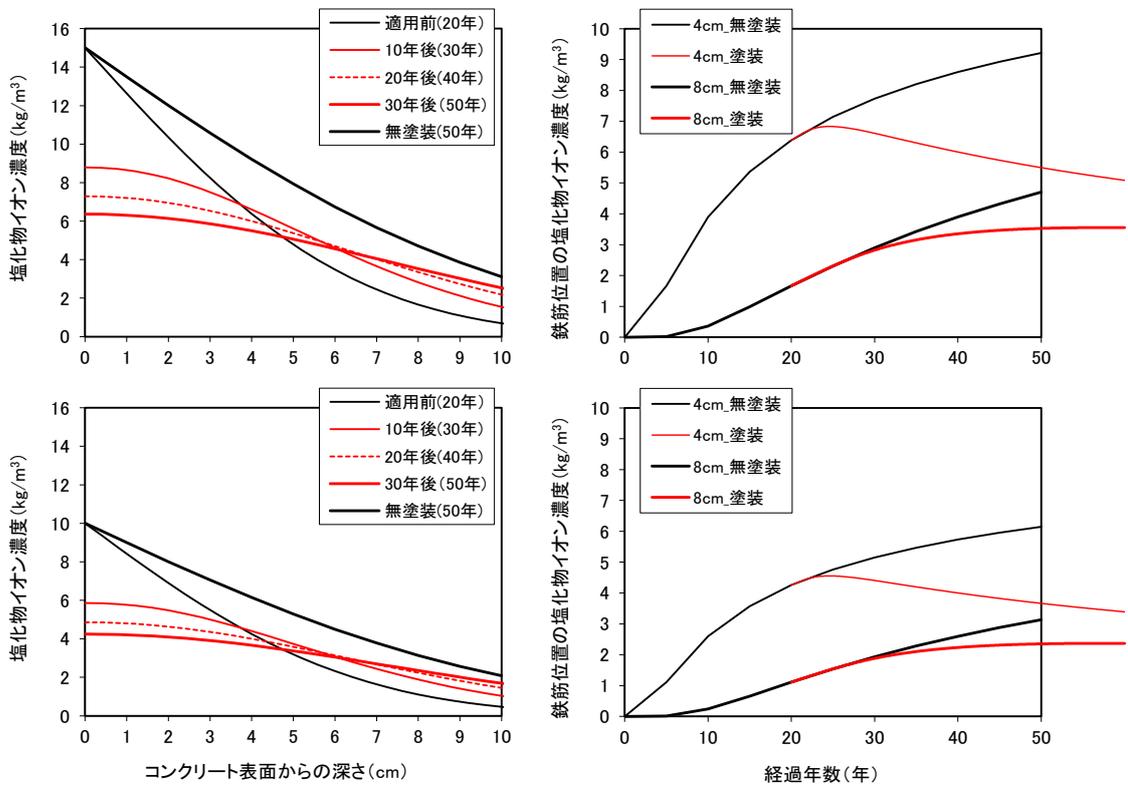
上述の被覆材の適用による低減の効果を、ここでは「50年時の鉄筋位置の濃度比」という指標を設定し、評価を試みる。その結果を図-27に示す。また、各因子の影響程度を表として図-27中に示した。先に述べたように、適用時期が10年の方が、濃度比は小さく、すなわち、効果が明確であると言える。また、かぶりの影響も大きいことが分かる。一方、拡散係数や表面塩化物イオン濃度については、濃度比に及ぼす影響は小さいことが分かる。

表-8 計算条件

被覆	D	C_0 (kg/m^3)	かぶり (cm)	適用時期(年)
有・無	0.28(BB-W/C=0.5) 0.63(N-W/C=0.5)	15, 10, 5	4, 8	10, 20

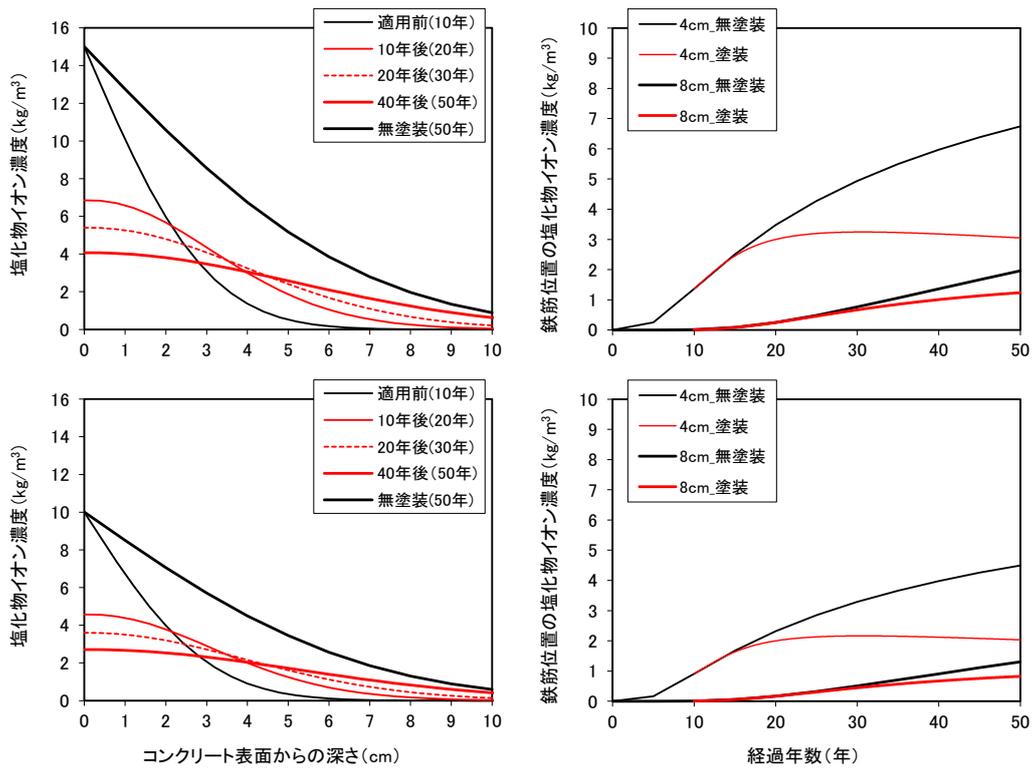


(i)適用時期：10年経過後の場合（上段： $C_0=15\text{kg/m}^3$ ，下段： 10kg/m^3 ）

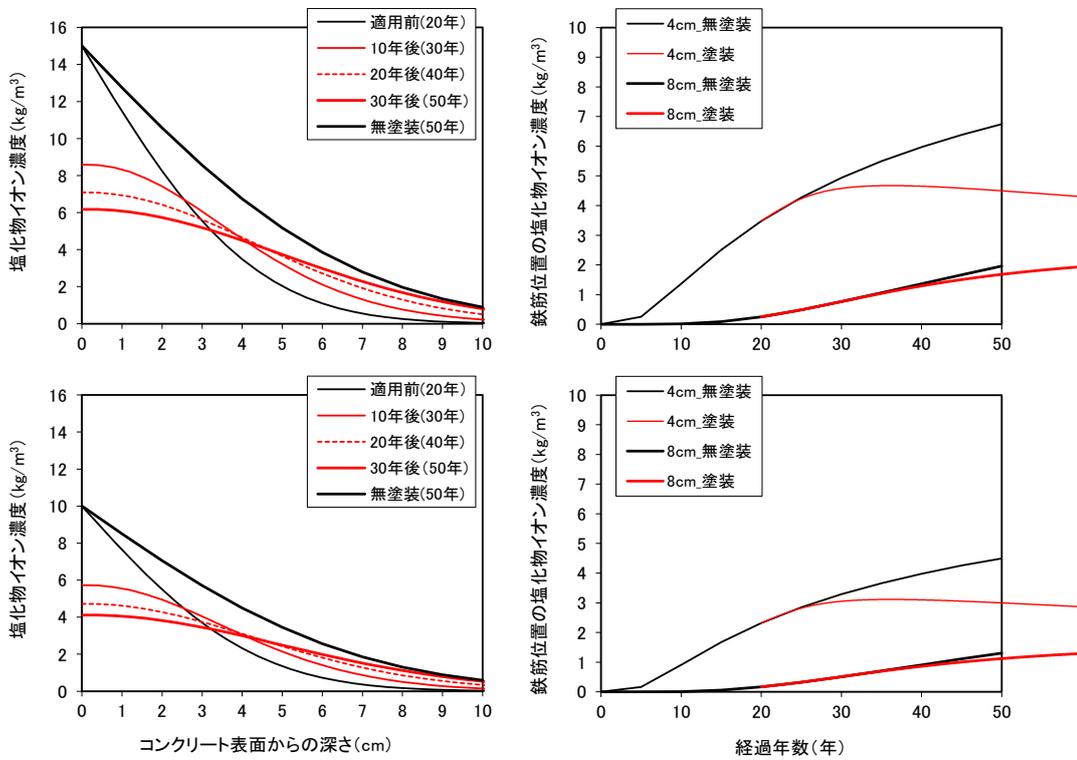


(ii)適用時期：20年経過後の場合（上段： $C_0=15\text{kg/m}^3$ ，下段： 10kg/m^3 ）

図-24 拡散係数 $0.63\text{cm}^2/\text{y}$ （セメント OPC, $W/C=0.50$ ）の場合の予測結果



(i)適用時期：10年経過後の場合（上段： $C_0=15\text{kg/m}^3$ ，下段： 10kg/m^3 ）



(ii)適用時期：20年経過後の場合（上段： $C_0=15\text{kg/m}^3$ ，下段： 10kg/m^3 ）

図-25 拡散係数 $0.28\text{cm}^2/\text{y}$ （セメント BB, $W/C=0.50$ ）の場合の予測結果

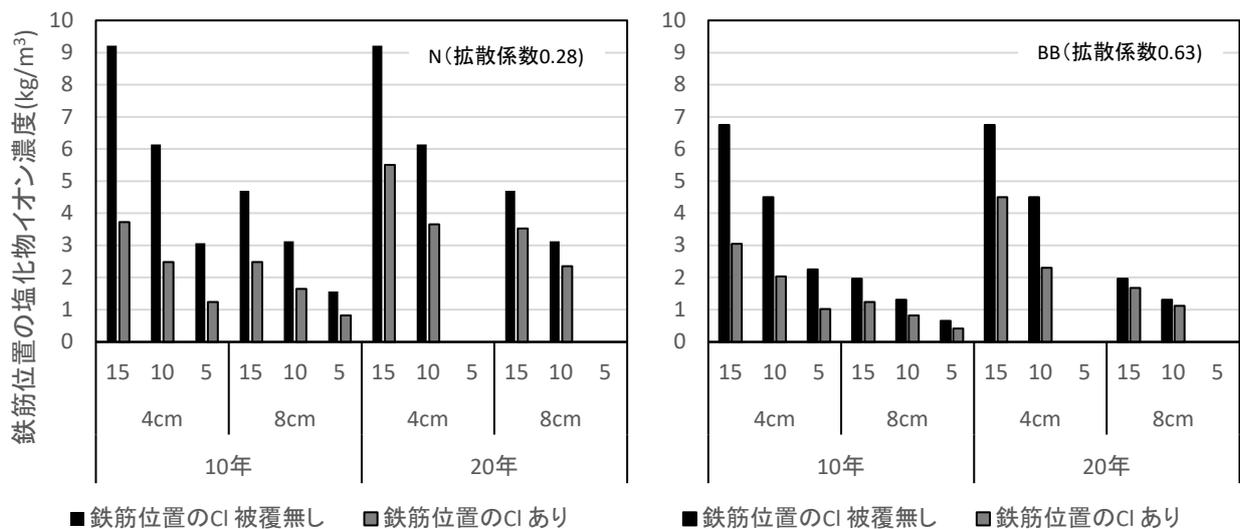


図-26 50年後における鉄筋位置の塩化物イオン濃度の予測結果

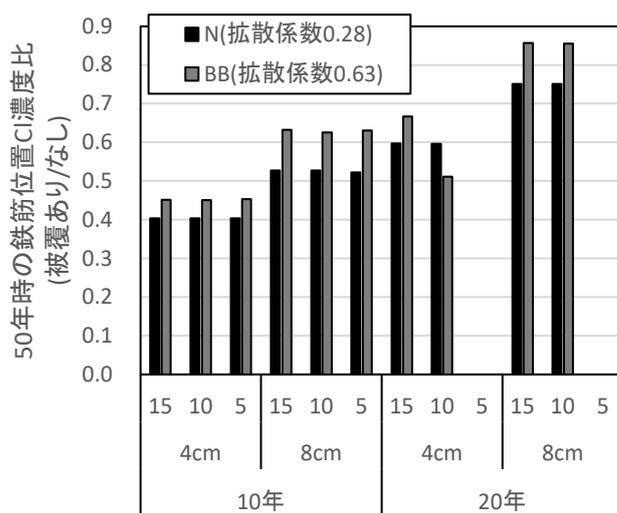


図-27 50年後における鉄筋位置の塩化物イオン濃度の濃度比

	濃度比への影響	値への影響
拡散係数	やや大きい	大きい
表面塩分	あまり無い	大きい
かぶり	大きい	大きい
適用時期	大きい	大きい

3.3 表面被覆材の適用が有効である条件の整理

3.2の結果を参考に、対象構造物を「栈橋上部工」に限定し、表面被覆材の適用が有効である条件を整理する。ここで、栈橋上部工の場合、式(2)で示すように、「海面(ここではH.W.L.)からの距離」により、塩害の厳しさを表す「表面塩化物イオン濃度 C_0 」の値が異なる。そのため、ここでも C_0 の影響因子である「H.W.L.からの距離」をパラメータとして、適用可能性に関する整理を行った。

(1) 計算条件

計算条件を表-9に示す。腐食が開始する条件(時期)については、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が、腐食発生限

界濃度 C_{lim} に到達する時期とした。ここで、文献17)では $C_{lim}=2.0$ が記載されているが、試算結果に及ぼす影響を把握することを目的として、 $C_{lim}=2.4$ の場合についても試算を行った(値の根拠は後述)。

被覆適用時期については、供用後10、15、20、25および

表-9 計算条件

被覆	セメント種類	W/C	かぶり(cm)	適用時期(年)
有, 無	N, BB	0.50, 0.55	7	10, 15, 20, 25, 30

び30年後の5水準とした。

かぶりについては、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に、かぶりの下限値として記載されている「70mm」に限定した。この理由としては、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成元年度）」に、かぶりの標準値（厳しい環境における下限値）として70mmが明記されており、それ以降の最近30年程度の期間であれば、港湾構造物において、少なくともこの値以上のかぶりが確保されていると考えたためである。

水セメント比 W/C については、0.50 および 0.55 とした。なお、2009 年の技術基準の改訂時に、水セメント比の上限値が 0.55 から 0.50 に変更されたため、両方を対象とした。セメント種類については、BB および N の 2 種類とした。なお、N の場合の W/C は 0.50 のみとした。

設計供用期間については 50 年が標準であるが、試算結果に及ぼす影響程度を把握することを目的として、100 年の場合についても試算を行った。

なお、文献 17)21)において、塩化物イオン拡散係数の設計値 D_d を設定する際に、以下の式のようにひび割れの影響を考慮する。ただし、今回の試算ではひび割れの影響は考慮していない。なお、実際の既設の港湾コンクリート構造物（栈橋上部工を想定）の場合には、顕著な曲げひび割れは生じていない場合が多い。

$$D_d = \gamma_c D_k + \lambda \left(\frac{w}{\ell} \right) D_0 \quad (3)$$

ここに、 γ_c ：コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としてよい。 D_k ：コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm^2/y)、 λ ：ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数。一般に、1.5 としてよい。 D_0 ：コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数。一般に $400 \text{ cm}^2/\text{y}$ としてよい。 w/ℓ ：ひび割れ幅とひび割れ間隔の比、である（詳細は文献 17) 21)を参照）。

(2)結果

図-28 は被覆適用時において 50 年後に腐食が開始する条件（H.W.L.からの距離）の場合における、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の経時変化の例である。なお、図-29 は、100 年後までの結果であり、それ以外の条件は図-28 と同じである。いずれの図も、比較として同一の C_0 の場合の無塗装の結果も併せて示した。また、上記の C_0 の際の、50 年あるいは 100 年経過後のかぶり 70mm の塩化物イオン濃度を図-30 に示した。3.2 の検討同様、条件によって適用の効果が異なることが分かる。環境によっては、被覆が不要な場合もある。適用時期が遅くなると、被覆の効果が

得られないケースもある。一方で、環境にもよるが、適用時期が早期な場合に、効果が現れる場合もある。以下、その条件の整理を行う。

図-31 は 50 年後に腐食が開始する条件 (C_0 および H.W.L.からの距離) と塗装適用時期との関係を整理し、例示したものである。なお、腐食発生限界濃度 $C_{lim}=2.0\text{kg}/\text{m}^3$ の場合である。図-32 は 100 年後の場合で、他の条件は同じである。いずれも塗装適用時期の影響が大きい。塗装の適用時期が遅くなると、適用の効果がなくなっている。また、配合によっても大きく変わっている。高品質な場合に、適用の効果が表れる条件がより厳しい条件にシフトしている (C_0 は上方、H.W.L.からの距離は下方)。すなわち、より厳しい条件でも適用可能となっている。

ここで、図-31 および図-32 中の水平線は、適用が不要な境界条件を意味する。図の上段（横軸が C_0 の場合）において、 C_0 の値が水平線より下の場合、表面被覆を適用しなくても、設計供用期間中に限界濃度 C_{lim} を超えないため、腐食が生じないこととなる。なお、図中の水平線（点線）は、 $C_0=6 \text{ kg}/\text{m}^3$ の場合であるが、これは文献 17)において、設計時に用いる値の下限値として記載されている値である。設計においてはこの値より下回る値を用いることは無いが、実際の維持管理時においては、測定値がこの値を下回る可能性もある（図-21 参照）。ここで、図の下段（横軸が H.W.L.からの距離の場合）においては上述と逆となる。水平線より上の場合、表面被覆を適用しなくても、設計供用期間中に限界濃度 C_{lim} を超えないため、腐食が生じないこととなる。なお、文献 17) において、上述のように、設計上の上限値を $C_0=6 \text{ kg}/\text{m}^3$ としているため、ここでは最大で 1.52 (式(2)に 6.0 を代入した値) としている。

一方、 C_0 の値が図中の点 (●●○) を結んだ線より上の場合、被覆を適用しても設計供用期間中に限界濃度 C_{lim} を超え、腐食が生じる。すなわち、表面被覆の効果が明確となる条件は、図中の灰色着色部となる。今回の試算結果（かぶり 70mm）においては、設計供用期間が 50 年までの場合は、適用時期が 10~15 年程度で、適用可能な条件（H.W.L.からの距離）は、配合によって異なることになる。また、コンクリートが高品質の場合（例えば BB-0.50 の場合）、設計供用期間が長い場合において、効果が表れやすくなる。なお、図の下段（横軸が H.W.L.からの距離の場合）においては上述と逆となる。

ここで、図-32 では、比較として、設計供用期間が 100 年までの場合の試算結果を示している。被覆の適用効果が現れる範囲が広がっていることが分かる。これは、供用期間が長くなると、被覆を適用しない場合により多くの

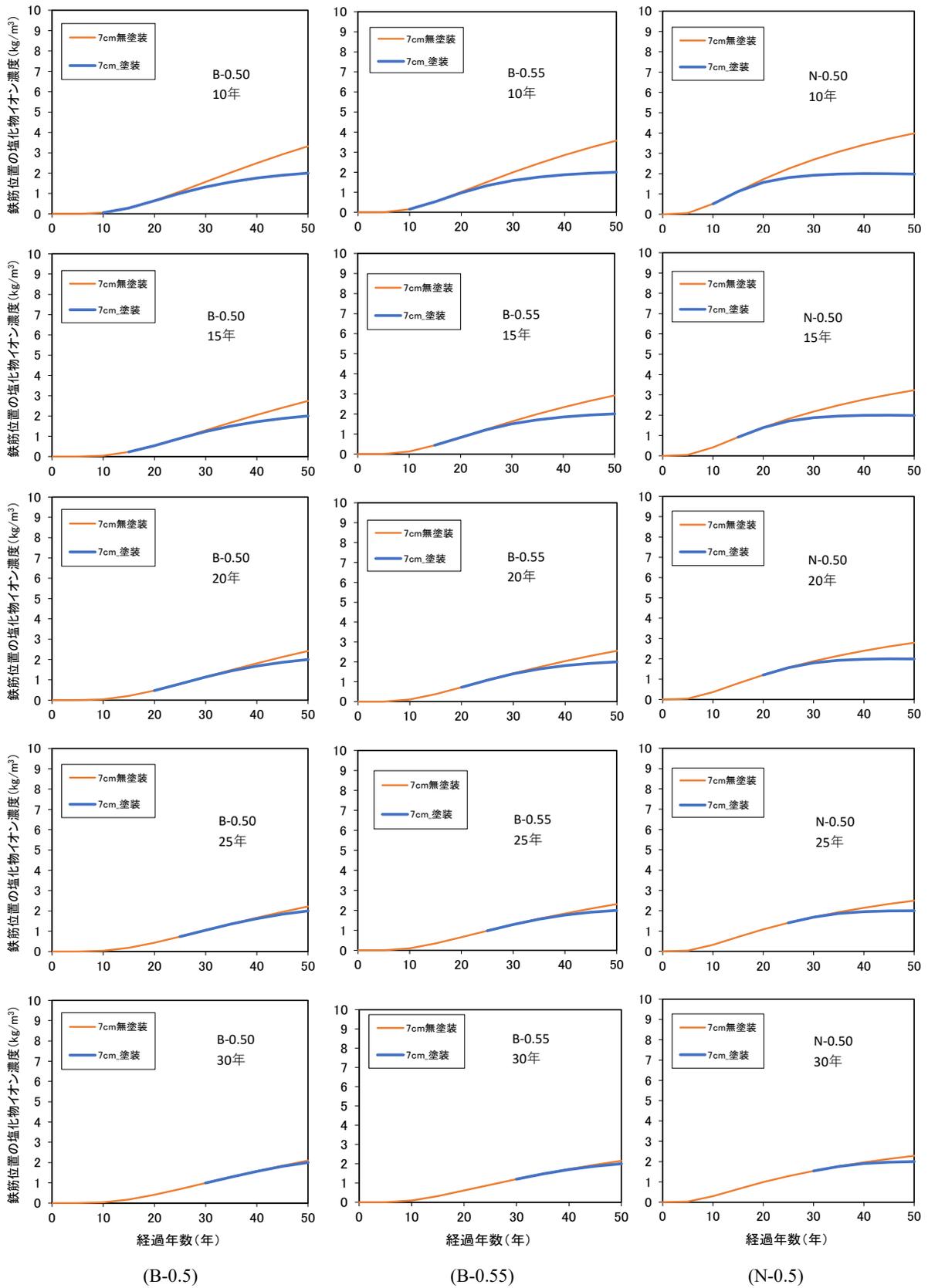
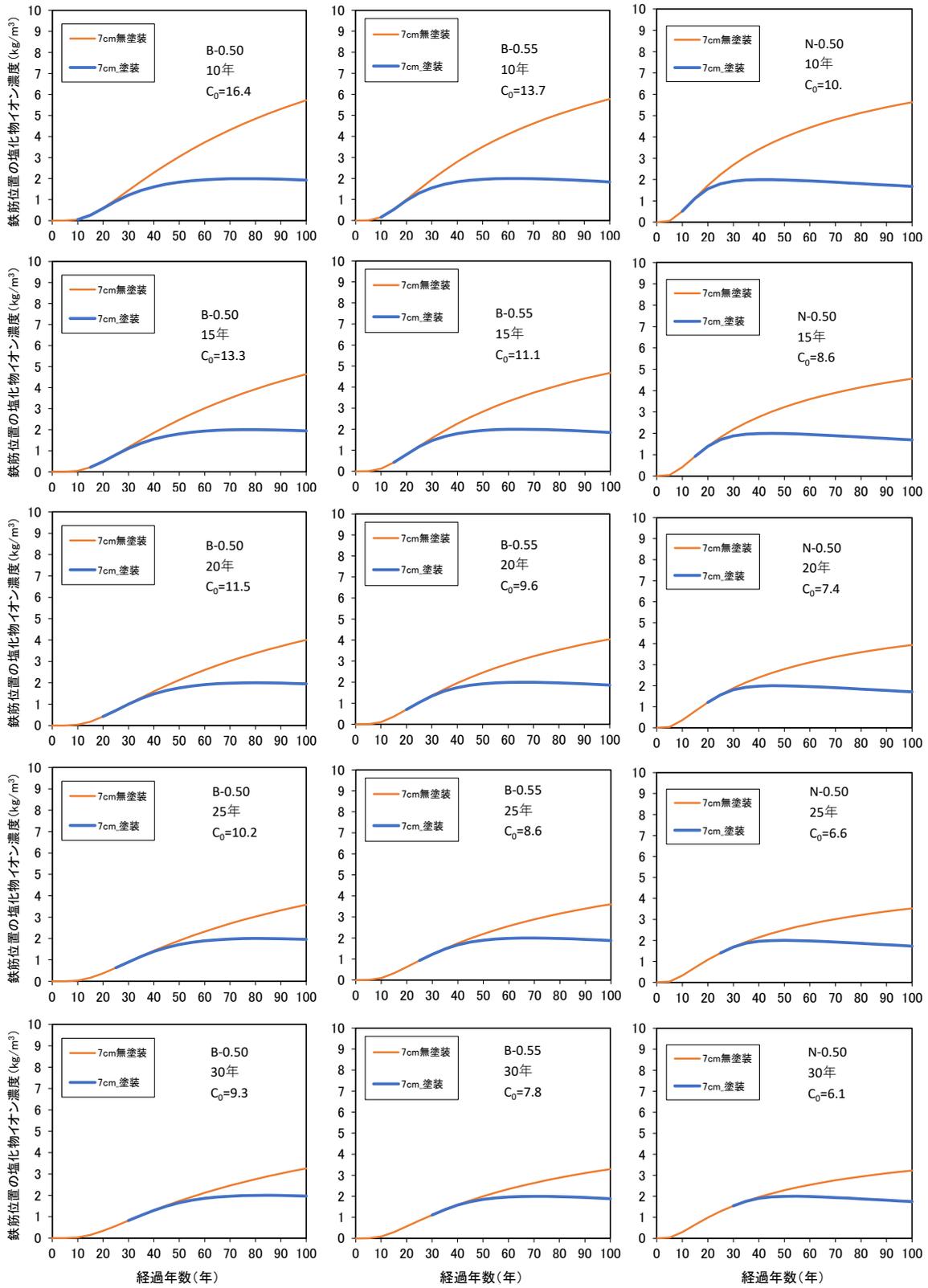


図-28 塗装適用時における鉄筋位置の塩化物イオン濃度の変化例 (かぶり 70mm・50年まで)
 (凡例 N, B : セメント種類, 0.50, 0.55 : W/C)



(B-0.5)

(B-0.55)

(N-0.5)

図-29 塗装適用時における鉄筋位置の塩化物イオン濃度の変化例 (かぶり 70mm・100年まで)

(凡例 N, B : セメント種類, 0.50, 0.55 : W/C)

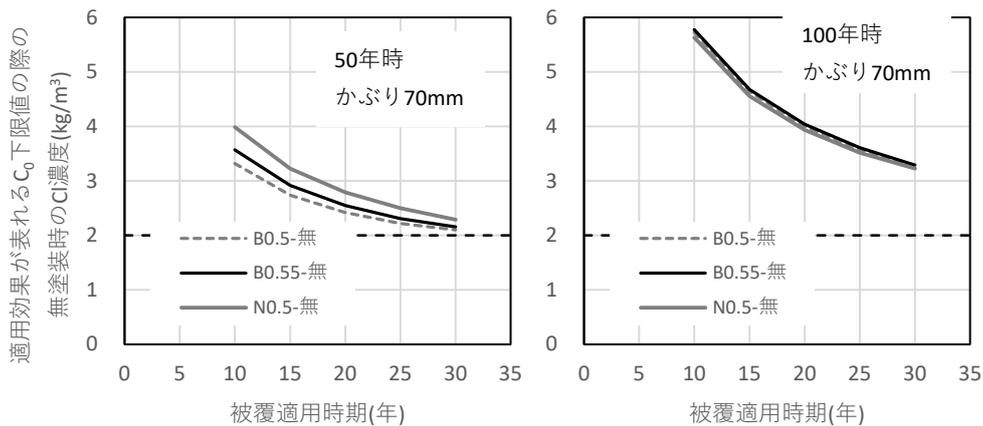


図-30 図-28 および図-29 中の「無塗装」の場合における
50年および100年経過後の鉄筋位置での塩化物イオン濃度の例（かぶり70mmの場合）

塩化物イオンが浸透し、被覆不要な条件が限定されるためである。なお、設計供用期間の延長は、被覆材が性能をある程度保持し続けることが前提であるが、ここではそのことは考慮していない。

(3) C_{lim} の影響程度

ここで、腐食が開始する条件（腐食発生限界濃度 C_{lim} ）は 2.0kg/m^3 としていた。ただし、実際のコンクリート構造物においては、この値を上回っても腐食していない場合もある。2.4.7の調査結果においても、その現象が示唆されている。また、仮に鉄筋腐食が開始していたとしても、ただちに構造性能が著しく低下するわけではない。そこで、試算結果に及ぼす C_{lim} の影響程度を把握することを目的として、 C_{lim} を変化（増加）させた際の試算を行う。ここで、 C_{lim} に関して、既往の知見¹⁹⁾で $1.2\sim 2.4\text{kg/m}^3$ 程度とある。また、文献²⁰⁾では 3.2kg/m^3 とある。ここでは、安全側の観点から $C_{lim}=2.4\text{kg/m}^3$ を設定した。

図-33 および図-34 は $C_{lim}=2.4\text{kg/m}^3$ の場合の試算結果の例である。計算条件は先と同様である。被覆材の適用可能な範囲（効果が発揮される範囲）が広がっていることが分かる。

(4) 栈橋上部工において適用の可否を整理した事例

図-35 は、実際の栈橋上部工3例²²⁾について、上述の試算結果に基づき、被覆適用の可否を整理したものである。ここで、表中の C_0 は式(2)を用いて算定した。また、適用可否の判定の際は、この C_0 の値を、図-31～図-34の上段の図に当てはめ、灰色着色部の範囲に該当した際に○（効果有）と判定した。なお、 C_{lim} は 2.0 および 2.4 のいずれについても行った。

この結果からも、条件によって、適用の要否が大きく異なることが分かる。なお、環境条件が比較的穏やかである a) のスラブ ($X=1.64$) の場合においては、表面被覆が不要となる条件も広がっている。ただし、共通しているのは、(2)でも述べているように、被覆適用時期が遅いと効果が現れにくくなるという点である。

なお、これらの検討結果は、ある条件を仮定して試算したものであるため、実際の栈橋上部工に対して表面被覆材の適用を検討する際は、改めて予測計算を行う必要がある。

3.4 まとめ

本章では、栈橋上部工に特化し、表面被覆材の適用が有効である条件の整理を行った。その結果、表面被覆材の適用の効果は、環境条件によって変わり、また、竣工後の年数が経過するほど現れにくくなるのが改めて確認された。以上のことから、栈橋上部工（エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用などの対策が行われている場合は除く）においては、10～15年程度経過した時点において、実際の調査結果を基に将来予測を行うことが望ましいと考えられる。

なお、被覆材適用後の供用期間が50年を上回る長期間となる場合、効果が表れる範囲が変わり、適用時期が多少遅くなくても効果が現れる場合がある。ただしこの際においては、被覆材の耐用年数が課題となる。

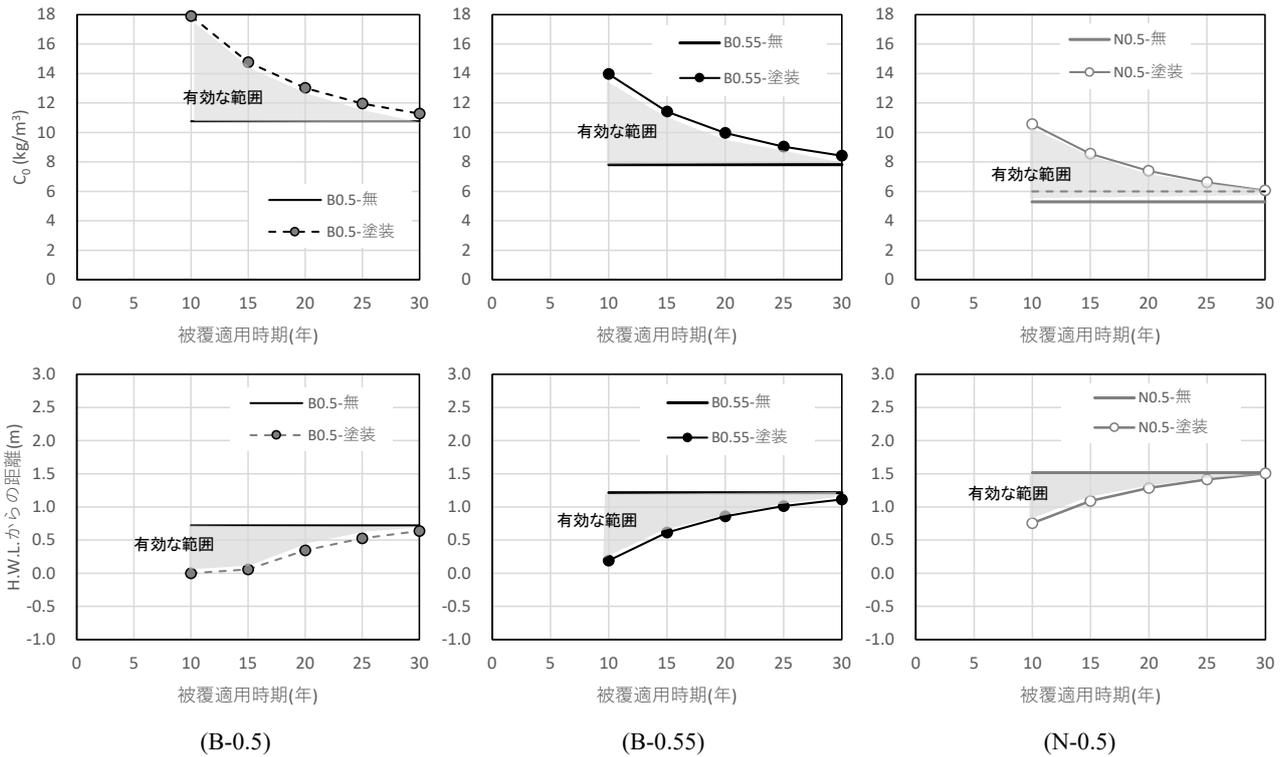


図-31 50年後に腐食が開始する条件 (C_0 およびH.W.L.からの距離) と塗装適用時期との関係の例
($c=70\text{mm}$, $C_{lim}=2.0\text{kg/m}^3$ の場合)

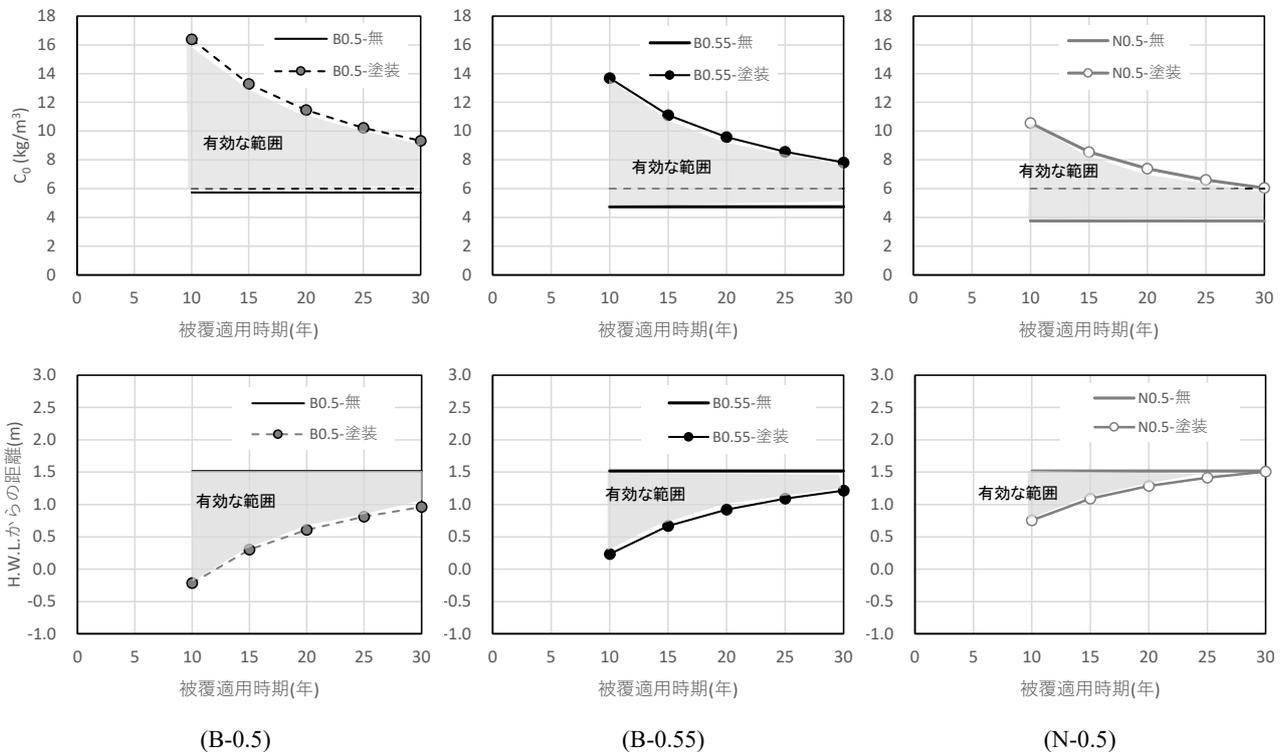


図-32 100年後に腐食が開始する条件 (C_0 およびH.W.L.からの距離) と塗装適用時期との関係の例
($c=70\text{mm}$, $C_{lim}=2.0\text{kg/m}^3$ の場合)

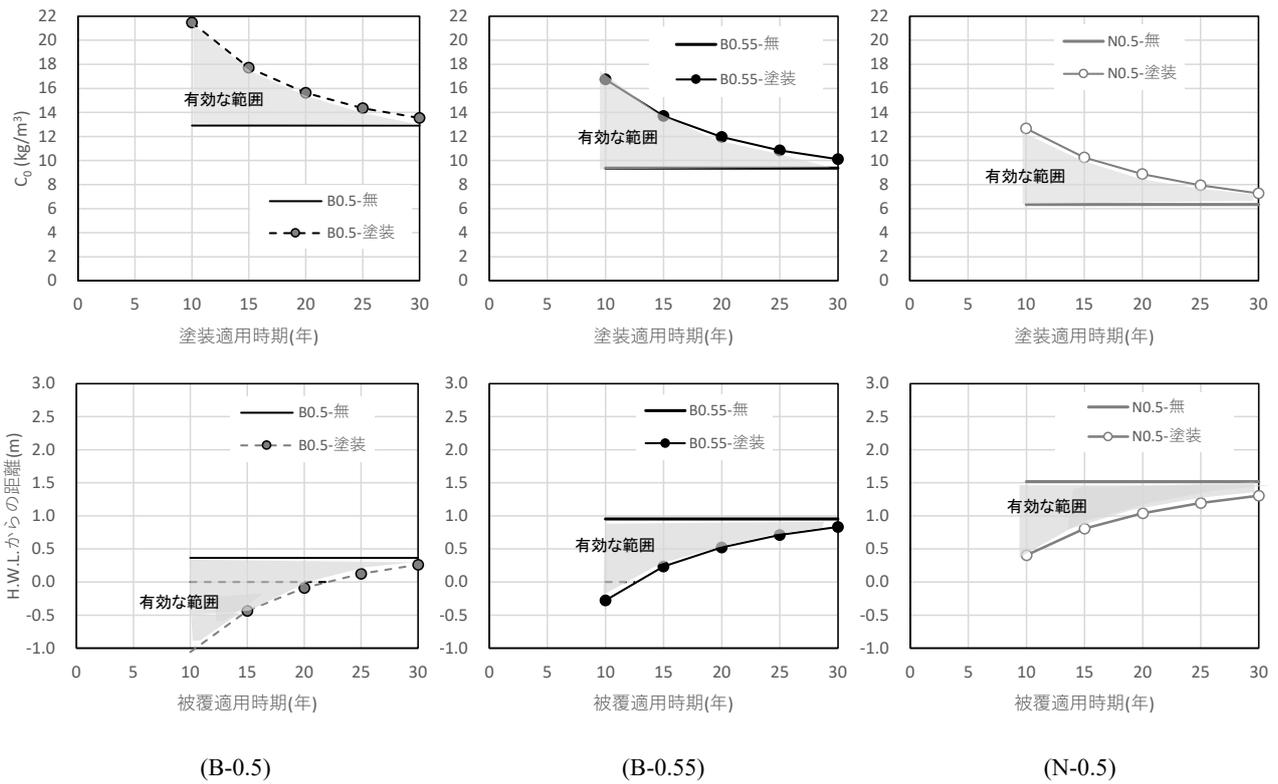


図-33 50年後に腐食が開始する条件 (C_0 およびH.W.L.からの距離) と塗装適用時期との関係の例
($c=70\text{mm}$, $C_{lim}=2.4\text{ kg/m}^3$ の場合)

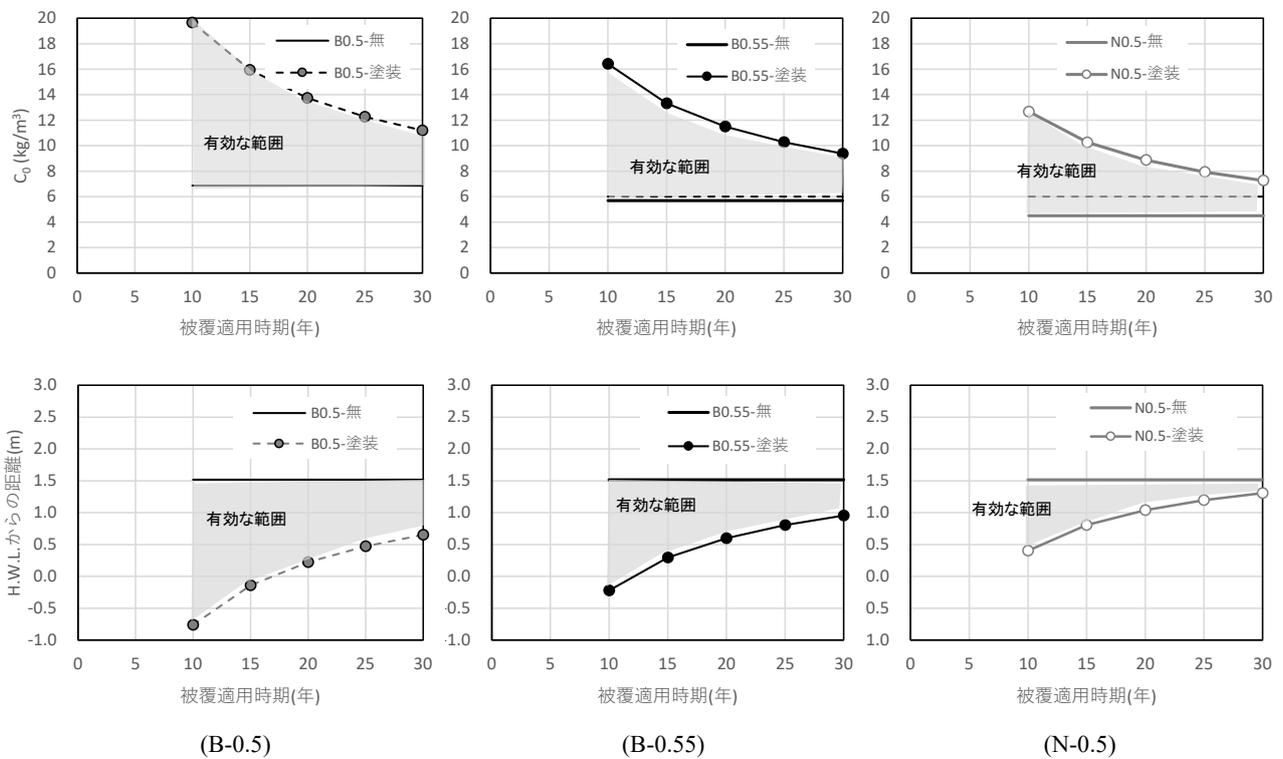
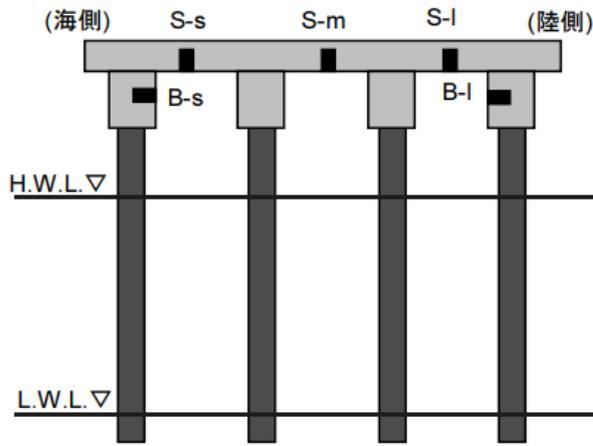


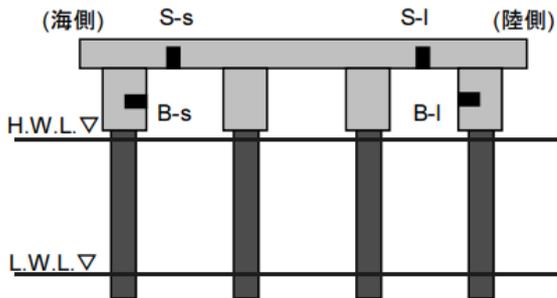
図-34 100年後に腐食が開始する条件 (C_0 およびH.W.L.からの距離) と塗装適用時期との関係の例
($c=70\text{mm}$, $C_{lim}=2.4\text{ kg/m}^3$ の場合)

a) 海面に遠い場合



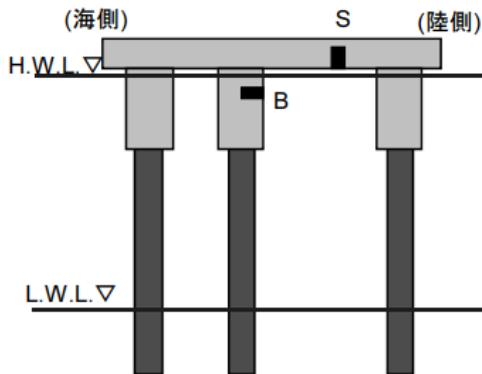
	X	C ₀	t	50			100			
				B0.5	B0.55	N0.5	B0.5	B0.55	N0.5	
C _{lim} =2.0	1.64	6 (5.3)	10	-	-	○	○	○	○	
			15	-	-	○	○	○	○	
			20	-	-	○	○	○	○	
			25	-	-	○	○	○	○	
	0.94	9.5	10	-	○	○	○	○	○	
			15	-	○	×	○	○	×	
			20	-	○	×	○	○	×	
			25	-	×	×	○	×	×	
	C _{lim} =2.4	1.64	6 (5.3)	10	-	-	-	○	○	○
				15	-	-	-	○	○	○
				20	-	-	-	○	○	○
				25	-	-	-	○	○	○
0.94		9.5	10	-	○	○	○	○	○	
			15	-	○	○	○	○	○	
			20	-	○	×	○	○	×	
			25	-	○	×	○	○	×	
				30	-	○	×	○	×	×

b) 中間の場合



	X	C ₀	t	50			100			
				B0.5	B0.55	N0.5	B0.5	B0.55	N0.5	
C _{lim} =2.0	1	9.1	10	-	○	○	○	○	○	
			15	-	○	×	○	○	×	
			20	-	○	×	○	○	×	
			25	-	×	×	○	×	×	
	0.39	12.8	10	○	○	×	○	×	×	
			15	○	×	×	○	×	×	
			20	○	×	×	○	×	×	
			25	×	×	×	○	×	×	
	C _{lim} =2.4	1	9.1	10	-	-	○	○	○	○
				15	-	-	○	○	○	○
				20	-	-	×	○	○	×
				25	-	-	×	○	○	×
0.39		12.8	10	-	○	×	○	○	×	
			15	-	○	×	○	○	×	
			20	-	×	×	○	×	×	
			25	-	×	×	×	×	×	
				30	-	×	×	×	×	×

c) 海面に近い場合



	X	C ₀	t	50			100			
				B0.5	B0.55	N0.5	B0.5	B0.55	N0.5	
C _{lim} =2.0	0.19	14.0	10	○	×	×	○	×	×	
			15	○	×	×	×	×	×	
			20	×	×	×	×	×	×	
			25	×	×	×	×	×	×	
	-0.8	15.1	10	○	×	×	○	×	×	
			15	×	×	×	×	×	×	
			20	×	×	×	×	×	×	
			25	×	×	×	×	×	×	
	C _{lim} =2.4	0.19	14.0	10	○	○	×	○	○	×
				15	○	×	×	○	×	×
				20	○	×	×	×	×	×
				25	○	×	×	×	×	×
-0.8		15.1	10	○	×	×	○	×	×	
			15	○	×	×	○	×	×	
			20	○	×	×	×	×	×	
			25	×	×	×	×	×	×	
				30	×	×	×	×	×	×

図-35 被覆適用条件の検討例 (-: 不要, ○: 効果有, ×: 効果なし)

4. おわりに

本文では、既設栈橋上部工（鉄筋コンクリート製）に適用され、長期間経過した表面被覆材（主としてエポキシ樹脂等の有機系材料）の効果の持続性の確認を目的として、各種調査を行った。その結果、今回対象の栈橋上部工に適用されたエポキシ樹脂系塗装に関しては、18年程度の長期にわたり性能を保持していたことが確認された。ただし、被覆材による抑制効果は、コンクリート構造物の場合、適用前に塩化物イオンが多量に浸透していないことを確認し、さらには将来の濃度変化を予測しておく必要があることも改めて確認された。

また、実構造物で得られたデータおよび、既存の予測手法を基に、適用の効果が現れる条件について整理した。その結果、表面被覆材の適用の効果は、環境条件によって変わり、また、竣工後の年数が経過するほど現れにくくなるのが改めて確認された。以上のことから、栈橋上部工（エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用などの対策が行われている場合は除く）においては、10～15年程度経過した時点において、実際の調査結果を基に将来予測を行うことが望ましいと考えられる。なお、今回の検討結果は、ある条件を仮定して試算したものであるため、実際の栈橋上部工に対して表面被覆材の適用を検討する際は、改めて予測計算を行う必要がある。

ここで、コンクリート構造物を解体・更新せず、長期間使用し続けることは、CO₂排出量低減にも大いに貢献する。表面被覆材の適用は、上記に資する対策としても有効な手段であると考え^{例えば23)}、表面被覆材がより適用しやすくなるためにも、本稿のような調査事例を引き続き蓄積する必要があると考えている。

(2022年4月26日受付)

謝辞

2.の栈橋上部工の調査においては、横浜港埠頭（株）、シーテック（株）、中国塗料（株）にご協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），CL.119，2005.4.
- 2) 土木研究所，コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料，第4343号，2016.8.
- 3) 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.

- 4) 山路徹，金城信之，富山潤：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，港湾空港技術研究所資料，No.1362，2019.11.
- 5) （一財）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（改訂版），2018.7.
- 6) （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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 例えば，（社）日本鋼構造協会：重防食塗装-防食原理から設計・施工・維持管理まで-，2012.
- 10) 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版），2009.
- 11) 根本正幸，福井靖治，早坂忠志，若杉伸一，駒井光明：超微粒子高炉スラグ系補修材塗装の海洋耐久性確認，土木学会第57回年次学術講演会概要集，2002.
- 12) 例えば，中道敏彦：陽電子消滅法によるポリマーの自由体積の評価，色材，Vol.71，No.1，pp.36-44，1988.
- 13) 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.
- 14) 東京港埠頭株式会社：栈橋劣化調査・補修マニュアル，2012.
- 15) （社）日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，1984.
- 16) 鬼束俊一，瀬下雄一，中川貴之，堤知明，岩波光保：塩害劣化した鉄筋コンクリートに対する補修効果の定量評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.832-843，2006.12
- 17) 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，2019.
- 18) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，pp.134-136，2018.
- 19) 土木学会：平成11年版コンクリート標準示方書 [施工編]-耐久性照査型-改訂資料，コンクリートライブラリー99，2000.1
- 20) 長谷一矢，横田弘，佐藤靖彦：劣化度マップを活用し

た稚内港北防波堤ドームの予防保全型維持管理, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 76 巻 4 号, pp.270-282, 2020.

- 21) 土木学会 : 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.156-164, 2017.
- 22) 山路徹 : 海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性照査手法に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1232, 2011.
- 23) Y.Kawabata, Puspitasari Surya Dewi, E.Kato, Y.Tanaka and H.Yokota: Optimization of maintenance strategy of port mooring facilities in terms of cost, benefit and carbon dioxide emissions, 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会概要集, V-73, 2021.

付録 A 表面被覆材適用前のコンクリートの劣化状況

1. はじめに

本文 2. で検討対象とした栈橋上部工において、表面被覆材の適用前に、対象栈橋の全ブロックの全部材について、コンクリートの損傷面積が調べられている。その損傷（劣化）の傾向を整理することで、どこ（陸側/海側等）で劣化が生じやすいのかが（ある程度）明確になると考える。また、一部ではあるが、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布が調べられており、この分布から塩害環境の厳しさの指標となる「表面塩化物イオン濃度 C_0 」が求められている（付録 B 参照）。

ここでは、劣化状況と対象部材に供給された塩化物イオンの量（塩害環境の厳しさ）の比較を行うため、損傷面積と C_0 との相関関係を整理を行った。

2. 損傷面積の調査結果（被覆材適用前）

付図-A.1 に調査対象の部材位置と記号、付図-A.2 にブロックごとの損傷数量を示す。また、付図-A.3 に、塩化物イオン濃度の調査が多数行われている 1BL と 12BL に特化し、同じブロック内での列ごとの損傷面積を整理したものを示す。以下、はりとはりスラブに分け、劣化損傷の傾向について述べる。大まかにではあるが、場所による劣化が生じやすさ（生じにくさ）の傾向が現れている。

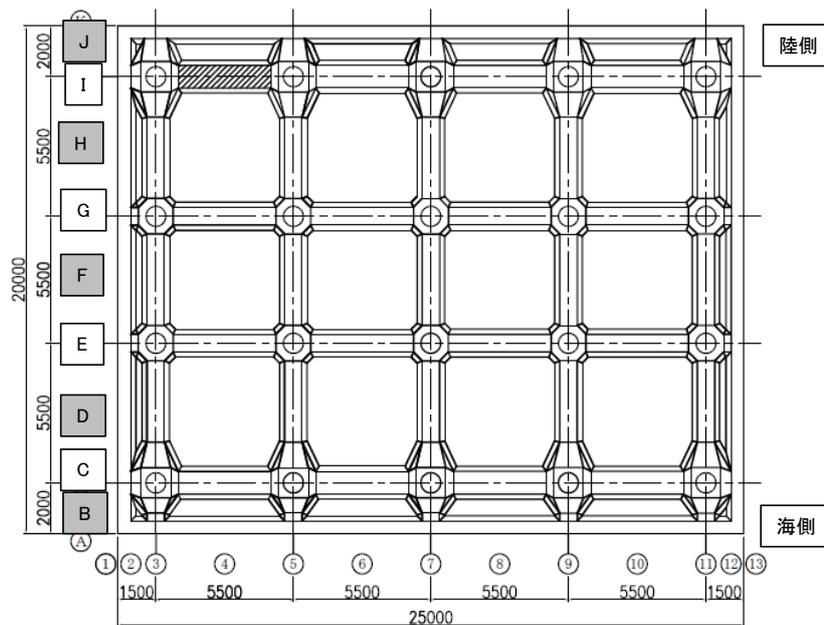
<はり> ※法線平行方向のみ

- ・I 通り（最陸側）で損傷数量が多い。
- ・E 通り, G 通りについてはばらついている。波の当たり具合がばらついていると推測される。

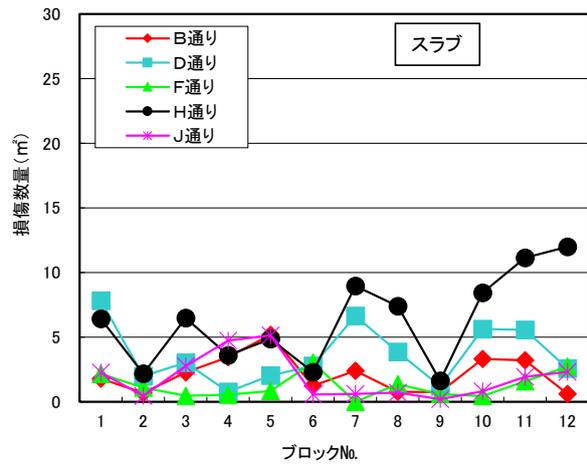
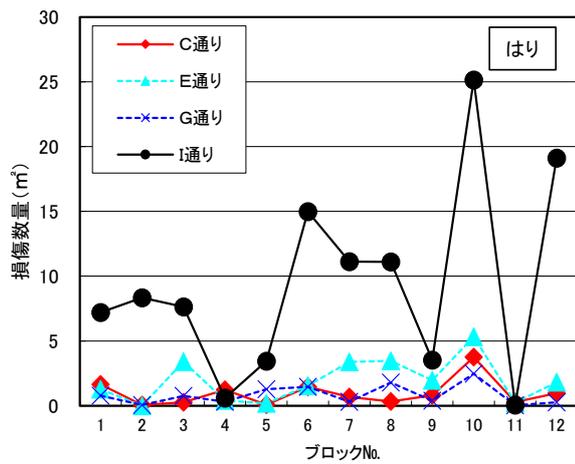
なお、法線直角方向に関する損傷面積については、過去の調査時において整理は行われていなかった。過去の調査結果を基に再整理を行うことで、法線直角方向における、劣化の傾向が把握できる可能性がある。

<スラブ>

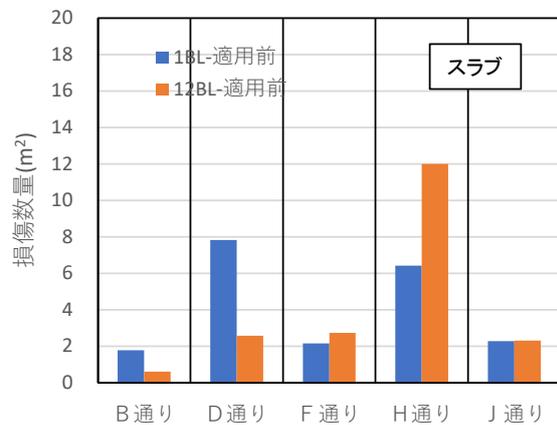
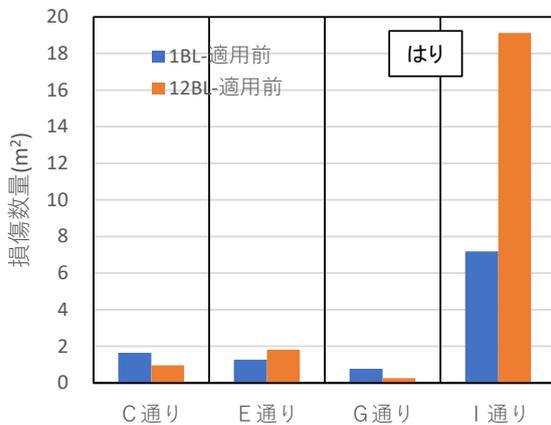
- ・H 通り（最陸側主桁の海側）で損傷数量が多い。はり同様、土留壁での反射波の影響が大きいと考えられる。
- ・1BL では D 通りにおいても損傷がやや多い。海側からの入射波の影響の影響を受けている可能性がある。



付図-A.1 部材位置と記号



付図-A.2 損傷面積（被覆適用前）



付図-A.3 損傷面積（被覆適用前）とブロック内の位置（海側/陸側）との関係

3. 塩化物イオン調査結果（被覆材適用前及び今回）

コア一覧を付表-A.1に示す。また、 C_0 とH.W.L.からの距離との関係で整理したものを付図-A.4に示す。なお、図中の直線は、「港湾の技術上の基準・同解説」に記載された C_0 の算定式（本文中の式(2)）である。はり、スラブいずれも、 C_0 が比較的多いグループ（図の上方）と、少ないグループ（図の下方）の2つに分かれている。このことから、現地において、部材に供給される海水（飛沫）の量が多いエリア（部材）と少ないエリア（部材）に明確に分かれていることが示唆される。

付図-A.5に C_0 とブロック内の位置（海側/陸側）との関係を整理したものを示す。はりの場合、法線平行方向については、I通り（最陸側）で C_0 が大きい。土留壁での反射波の影響が大きいと考えられる。また、はりの法線直角方向の場合に、海側のD通りの場合に C_0 が大きくなる傾向

がみられた。一方、スラブの場合、はり同様、陸側の場合（H通り）に C_0 が大きくなる傾向がみられた。

上述のように、ある程度ではあるが、 C_0 と損傷数量の間には相関がみられた。なお、 C_0 すなわち供給される海水（作用する波浪、波しぶき）は、おそらくは同一の部材（スラブやはり）の中でもばらついていると推測される。このことも、 C_0 と損傷数量の相関が明確になりにくい理由の1つと考えている。

付表-A.1 コア一覧

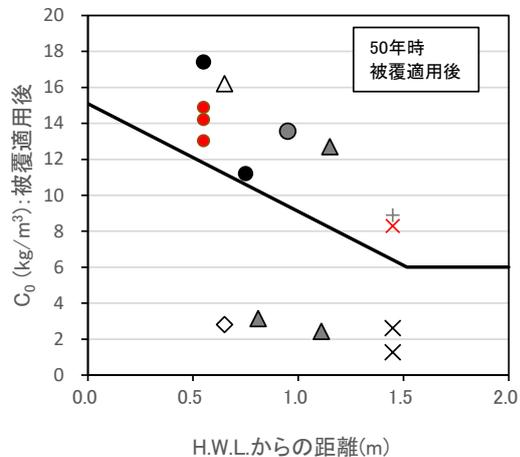
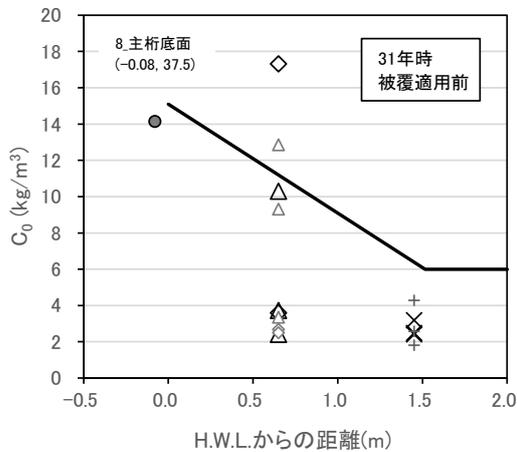
BL	調査時期	部位	名称	コア採取位置(m)	H.W.L.からの距離(m)	C ₀ (kg/m ³)	D ₉₀ (cm ² /y)
12	31年 被覆適用前	はり底面-法線直角	B-5(=M)	2.65	0.65	10.3	0.30
			B-4(≒K, O側)	2.65	0.65	2.4	0.34
			B-1	2.65	0.65	3.7	0.22
		はり底面-法線平行	B-3	2.65	0.65	17.3	0.33
			B-2(≒G側)	2.65	0.65	3.6	0.55
			スラブ	S-3(=N)	3.45	1.45	2.4
		S-2(≒J)		3.45	1.45	2.5	0.70
		S-1(≒F)		3.45	1.45	3.2	0.43
		50年 被覆適用後	主桁側面-法線平行	D	2.55	0.55	17.4
	E			2.75	0.75	11.2	0.55
	はり底面-法線直角		M	2.65	0.65	16.2	0.61
			G	2.65	0.65	2.8	0.51
	はり側面-法線直角		K-上	3.11	1.11	2.4	0.55
			K-下	2.81	0.81	3.1	0.79
	はり側面-法線平行		L	3.15	1.15	12.7	0.58
			H	2.95	0.95	13.6	0.45
	スラブ	J	3.45	1.45	1.3	1.80	
N		3.45	1.45	2.6	0.43		
F(断面修復材)*		3.45	1.45	8.9	0.03		
11	50年 被覆適用後	はり側面-法線平行	A	2.55	0.55	14.2	0.51
			B	2.55	0.55	13.0	0.45
			B	2.55	0.55	14.9	0.4
		スラブ	C	3.45	1.45	8.3	0.68

*t=13yと仮定

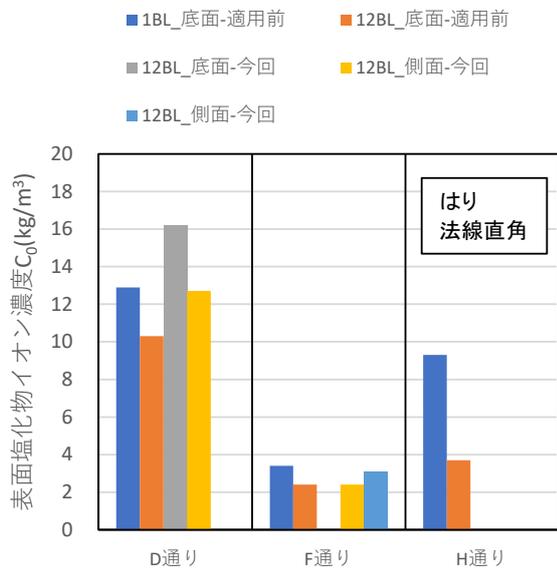
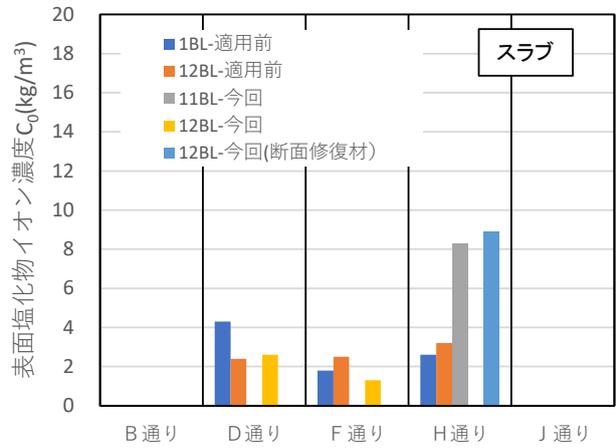
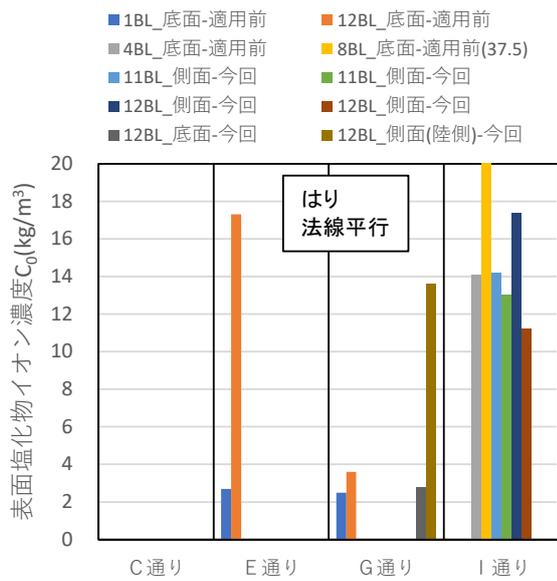
8	1	31年 被覆適用前	主桁底面-法線平行	I-8	1.92	-0.08	37.5	0.34
4				I-4	1.92	-0.08	14.1	0.57
はり底面-法線直角			D-7	2.65	0.65	12.9	0.65	
			F-7	2.65	0.65	3.4	0.48	
			H-7	2.65	0.65	9.3	0.58	
			E-6	2.65	0.65	2.7	0.58	
はり底面-法線平行			G-6	2.65	0.65	2.5	0.78	
			スラブ	D-6	3.45	1.45	4.3	0.68
F-6				3.45	1.45	1.8	0.75	
H-6				3.45	1.45	2.6	0.26	

- △ 12_はり底面-法線直角
- × 12_スラブ
- 4_主桁底面
- △ 1_はり底面-法線直角
- 港湾基準
- ◇ 12_はり底面-法線平行
- 8_主桁底面
- ◇ 1_はり底面-法線平行
- + 1_スラブ

- △ 12_はり底面-法線直角
- × 12_スラブ
- ▲ 12_はり側面-法線直角
- 12_主桁側面-法線平行
- × 11_スラブ
- ◇ 12_はり底面-法線平行
- + 12_スラブ 断面修復材
- 12_はり側面-法線平行
- 11_はり側面-法線平行



付図-A.4 H.W.L.からの距離と C₀との関係



付図-A.5 C₀とブロック内の位置（海側/陸側）との関係

付録B Excel を用いたコンクリート構造物の塩害劣化予測手法の例

1. はじめに

海水の供給を受けるコンクリートにおいて、海水中の塩化物イオン (Cl⁻) は徐々に内部へ浸透する (付図-B.1 参照). そして鉄筋位置の Cl⁻濃度がある濃度を上回ると腐食が開始する. この Cl⁻の浸透予測は, Fick の拡散方程式の解である式(B.1)を用いて行うのが一般的である¹⁾.

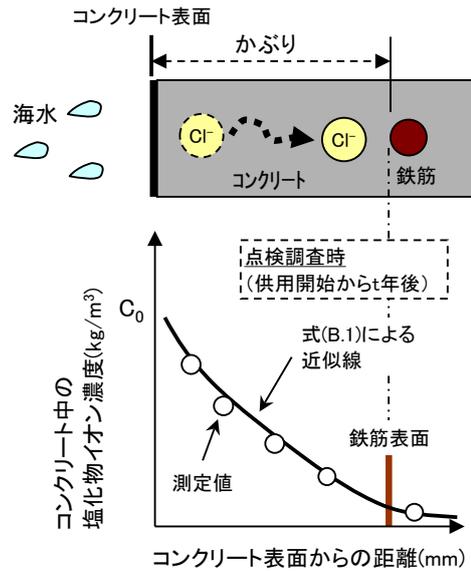
$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right) \quad (\text{B.1})$$

ここで, C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³) x : コンクリート表面からの距離 (mm) D_{ap} : 塩化物イオンに対する見かけの拡散係数 (cm²/年) t : 供用開始から調査時までの期間 (年), erf : 誤差関数

$$\left(\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \right) \text{である.}$$

“誤差関数 erf ” は, 上記のような複雑な数式で表記される. しかし, この“誤差関数 erf ” は, Excel 内のワークシート関数に含まれているため, “=ERF ()” とセル内に入力すれば計算が可能である. また, Excel にはその他にも様々な便利な機能 (ソルバー機能, ゴールシーク機能等) が含まれている. これらの Excel の諸機能を活用することで, コンクリート構造物の塩害劣化予測は容易に実施可能となる.

本文は, Excel を用いた鉄筋腐食開始時期の推定方法²⁾, Excel を用いて塩化物イオン濃度分布から C_0 および D_{ap} を推定する方法²⁾, Excel を用いた表面被覆後適用後の塩化



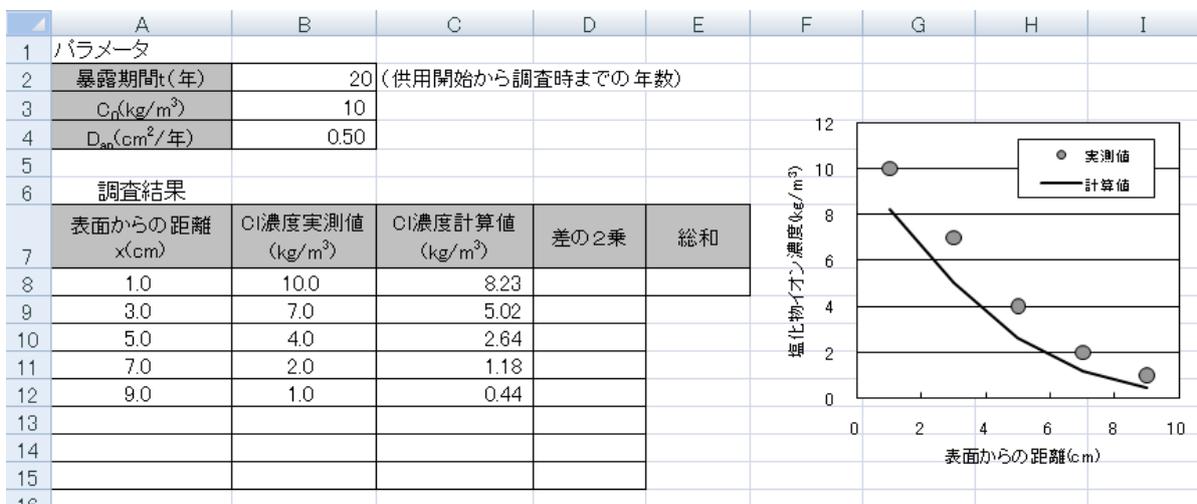
付図-B.1 コンクリート中での Cl⁻浸透のイメージ

物イオン浸透予測方法²⁾の例について紹介する. (注記: 本文中の Excel は MS-Excel の略称である. MS-Excel は Microsoft Corporation の登録商標である.)

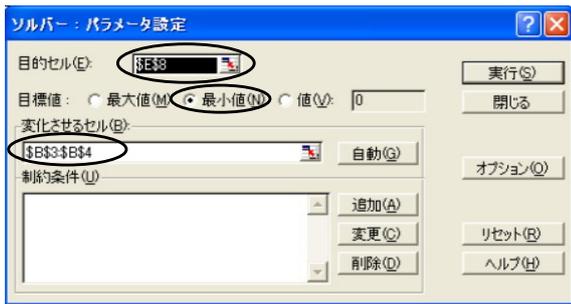
2. Excel を用いたコンクリート構造物の塩害劣化予測手法の例

2.1 コンクリート中の塩化物イオン濃度分布から C_0 と D_{ap} を推定する方法

コンクリート構造物中の Cl⁻濃度分布を測定した後, この分布から C_0 および D_{ap} を求め, コンクリート中の Cl⁻濃度の将来予測を行うことができる. この際, Cl⁻濃度分布を式(B.1)で近似させ, C_0 と D_{ap} を求める. この近似は, 実



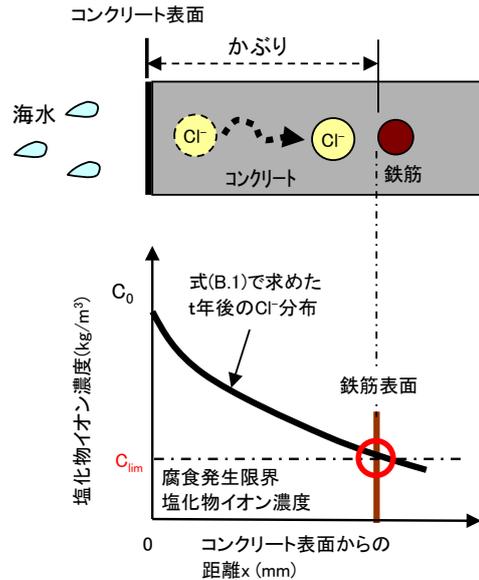
付図-B.2 Cl⁻濃度分布から C_0 と D_{ap} を推定する方法 (ソルバー実施前)



付図-B.3 ソルバー画面

測値と式(B.1)で求めた計算値の差の二乗和が最小となるように行われる（最小二乗法と呼ばれる）。この C_0 と D_{ap} の推計は、Excel 内の“ソルバー（条件を満たす複数の解を計算する機能）”という機能を用い、以下の手順で容易に実施できる³⁾。

- ①付図-B.2 のようなワークシートを作成する。A 列と B 列に Cl^- 濃度の実測値を入力する。また、暴露期間 t （供用開始から調査時までの期間）、 C_0 および D_{ap} を入力する欄も作成する。
- ②C 列の「計算値」のセルに、式(B.1)を入力する。例えば“セル C8”の欄には、“ $= \$B\$3 * (1-ERF(\$A8/2/ SQRT(\$B\$4*\$B\$2)))$ ”と入力する。なお、 t は供用開始から調査時までの期間を入力し、 C_0 と D_{ap} については、この段階では Cl^- 濃度の実測値と計算値が比較的近くなる値を適当に入力しておけばよい。
- ③D 列の“差の2乗”のセルに、“実測値と計算値の差の2乗”の値を入力する。例えば“セル D8”の欄には、“ $=(B8-C8)^2$ ”と入力する。
- ④“差の2乗の総和”を求める。この際、「総和」で示された“セル E8”に“ $=sum(D8:D13)$ ”と入力する。
- ⑤この段階でソルバーを使用する。メニューから「データ→ソルバー」で「ソルバー：パラメータ設定」というダイアログが表示される（付図-B.3）。ここで、「目的セル」に



付図-B.4 鉄筋腐食開始時期のイメージ

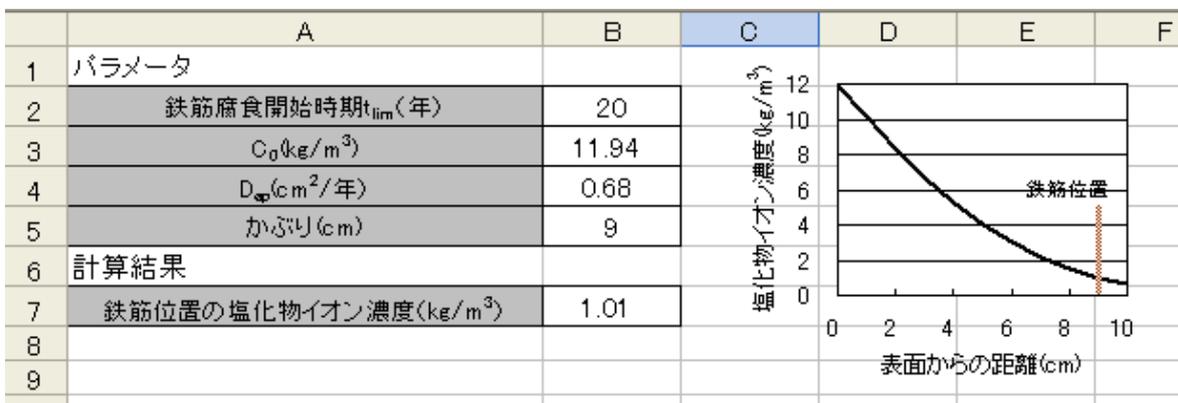
“総和（セル E8）”を入力し、「目標値」には“最小値”をチェックし、「変化させるセル」に C_0 と D_{ap} の値（セル B3 と B4）を入力する。そして「実行」をクリックすると、この条件を満たす C_0 と D_{ap} が求められる。なお、付図-B.2 の場合の解は $C_0=11.94$ および $D_{ap}=0.68$ となる。

2.2 鉄筋腐食開始時期の推定方法

ここでは、上述の方法等を用い、 C_0 および D_{ap} が求められた場合において、鉄筋腐食開始時期 (t_{lim}) を計算する方法の例を示す。

t_{lim} は鉄筋位置における Cl^- 濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{lim} に到達する時期である（付図-B.4 参照）。すなわち、式(B.1)に C_0 および D_{ap} を代入し、 x の箇所にかぶりの値を入力し、式(B.1)の左辺 $C(x,t)=C_{lim}$ となる t の値が t_{lim} である。

ここでは t_{lim} を算出する 2 つの方法を紹介する。



付図-B.5 鉄筋腐食開始時期の推定方法（ゴールシーク実施前）



付図-B.6 ゴールシーク画面

(1) ゴールシーク機能を用いた方法

t_{lim} を算出する作業は、Excel内の“ゴールシーク(条件を満たす1つの解を計算できる機能)”という機能を用い、以下の手順で簡単に実施可能である³⁾。

①付図-B.5のようなワークシートを作成する。 t_{lim} , C_0 , D_{ap} およびかぶりを入力する欄を作成する。なお、 t_{lim} については、この段階では適当な値を入力しておけばよい。そして、鉄筋位置のCl濃度の計算値(セルB7)を入力する(2.1参照)。

②この段階で「ゴールシーク」機能を使用する。メニューから「データ→What-If分析→ゴールシーク」と選択すると、付図-B.6のようなダイアログが表示される。ここで、“数式入力セル”に“鉄筋位置の塩化物イオン濃度(セルB7)”を選択し、目標値に“ C_{lim} (ここでは2.0²⁾)”を入力し、“変化させるセル”に“ t_{lim} (セルB2)”を入力し、“OK”を選択すると、この条件を満たす t_{lim} が表示される。なお、この場合、 $t_{lim}=31.3$ 年となる。

(2) 正規分布関数を用いた方法

誤差関数 $erf(s)$ と標準正規分布関数 $\Phi(s)$ には以下の関係がある⁴⁾。

$$erf(s) = 2 \Phi(s\sqrt{2}) - 1 \quad (B.2)$$

式(B.2)を用いると、式(B.1)は以下のように表される。

$$C(x,t) = 2 C_0 \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right) \right\} \quad (B.3)$$

Excel関数の‘NORMSDIST(標準正規分布)’および‘SQRT(平方根)’を使うと、式(B.3)は“ $=2*C_0*(1-NORMSDIST(x/SQRT(2*D*t)))$ ”とExcel上で表記される。

ここで、 $C(x,t) = C_{lim}$ となる t 、すなわち t_{lim} を求めたい場合、式(B.3)中の $(x/\sqrt{2Dt})$ の項を $\Phi(s)$ の外に出す必要がある。 $C(x,t) = C_{lim}$ として式(B.3)を展開すると式(B.4)となる。

$$\Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right) = 1 - \frac{C_{lim}}{2C_0} \quad (B.4)$$

Excel関数の‘NORMSINV(正規分布の逆関数)’を用いると、式(B.4)は式(B.5)で表される。

$$NORMSINV\left(1 - \frac{C_{lim}}{2C_0}\right) = \frac{x}{\sqrt{2Dt}} \quad (B.5)$$

(B.5)式の両辺を2乗し、 t について解くと、

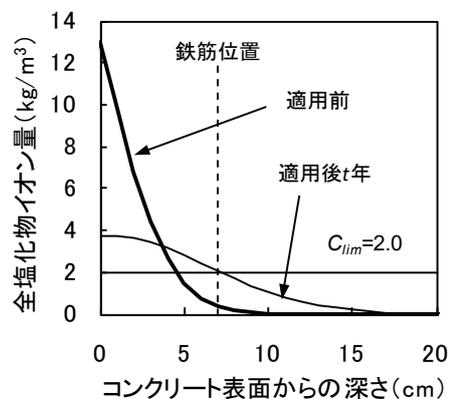
$$t = \left\{ \frac{x}{NORMSINV\left(1 - \frac{C_{lim}}{2C_0}\right)} \right\}^2 \cdot \frac{1}{2D} \quad (B.6)$$

これを用いることで、 $C(x,t) = C_{lim}$ となる $t = t_{lim}$ を求めることが可能となる。なお、式(B.6)を変形することにより、 $C(x,t) = C_{lim}$ となる x および D についても算出可能となる。

2.3 表面被覆適用後の塩化物イオン浸透予測方法(差分法による例)

コンクリート構造物の補修対策として表面被覆工法を行った場合、コンクリート内部に既に浸透しているClは、濃度拡散を駆動力としてコンクリート内部へ移動する。例えば、表面被覆適用前の分布が付図-B.7の太線であった場合、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し、一方、内部の値は時間の経過とともに増加し、細線のような平坦な分布に変化する。これは、外部からの新たなClの供給は無くなったものの、既に浸透していたClがコンクリート内部へ浸透するためである。そのため、表面被覆を行い外部からClの供給を抑制できたとしても、ある時間が経過した後に鉄筋位置でのCl濃度が C_{lim} を上回り、鉄筋腐食が開始する可能性がある。よって、補修対策として表面被覆工法の適用を検討する際には、表面被覆を適用した後のコンクリート中のCl濃度分布の予測を行う必要がある。

ここでは、表面被覆工法適用後における、コンクリート中でのClの浸透予測手法の例を紹介する。なお、塩化物イオンの浸透予測手法は多数存在しているが、本手法は、その中でも比較的簡便である「差分法」を採用している。



付図-B.7 表面被覆適用後の塩化物イオン濃度分布の一例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	BA	CY	EW	GU
1	計算に必要なパラメータ																
2	項目				単位				解析条件								
3	D_{ap}				cm ² /年				0.57								
4	C_0				kg/m ³				6.43								
5	経過年数				年				15 (供用開始から表面被覆適用前までの年数)								
6	距離の増分値 Δx				cm				0.5								
7	時間の増分値 Δt				年				0.2								
8	$D_{ap} \cdot \Delta t / \Delta x^2 (\leq 0.5)$								0.45 OK								
10	差分法による計算																
11	時間t(年):表面被覆適用後の年数																
12		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	10	20	30	40	
13	0	6.43	5.82	5.54	5.39	5.26	5.15	5.05	4.97	4.89	4.82	4.75	3.41	2.74	2.36	2.10	
14	0.5	5.81	5.82	5.54	5.39	5.26	5.15	5.05	4.97	4.89	4.82	4.75	3.41	2.74	2.36	2.10	
15	1	5.20	5.21	5.22	5.10	5.02	4.94	4.86	4.79	4.73	4.66	4.61	3.37	2.72	2.34	2.09	
16	1.5	4.61	4.62	4.61	4.50	4.42	4.34	4.27	4.21	4.15	4.09	4.03	2.83	2.32	2.00	1.80	
17	2	4.04	4.05	4.04	3.94	3.86	3.78	3.71	3.65	3.59	3.53	3.47	2.51	2.00	1.72	1.55	
18	2.5	3.50	3.52	3.51	3.42	3.34	3.26	3.19	3.13	3.07	3.01	2.95	2.19	1.72	1.48	1.35	
19	3	3.00	3.02	3.01	2.92	2.84	2.76	2.69	2.63	2.57	2.51	2.45	1.95	1.55	1.35	1.25	
20	3.5	2.55	2.57	2.56	2.47	2.39	2.31	2.24	2.18	2.12	2.06	2.00	1.65	1.30	1.15	1.08	
21	4	2.14	2.16	2.15	2.06	1.98	1.90	1.83	1.77	1.71	1.65	1.59	1.39	1.10	0.98	0.93	
22	4.5	1.77	1.79	1.78	1.69	1.61	1.53	1.46	1.40	1.34	1.28	1.22	1.07	0.84	0.75	0.71	
23	5	1.45	1.47	1.46	1.37	1.29	1.21	1.14	1.08	1.02	0.96	0.90	0.79	0.62	0.55	0.52	
25	6	0.94	0.95	0.94	0.85	0.77	0.69	0.62	0.56	0.50	0.44	0.38	0.32	0.24	0.20	0.18	
27	7	0.58	0.59	0.58	0.49	0.41	0.33	0.26	0.20	0.14	0.08	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	
29	8	0.34	0.35	0.34	0.25	0.17	0.09	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
31	9	0.19	0.19	0.18	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
33	10	0.10	0.10	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
53	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
73	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

付図-B.9 Excelによる差分近似計算例

b) 境界条件 (コンクリート表面部)

表面被覆適用前のコンクリートの場合、コンクリート表面のCl濃度を時間によらず一定 ($C(0,t) = C_0$ (定数)) とする方法が一般的である。

コンクリート表面に表面被覆を適用した場合については、表面被覆材の性能をどのように設定するかによって大きく異なる。主な設定手法には i) や ii) のようなものがある。なお、本文ではいずれも表面被覆材の劣化は考慮していない。

i) 表面被覆材が外部からの塩化物イオンの浸透を完全に防ぐとした場合

この場合、コンクリート表面 ($x=0$) においてCl⁻の移動がないことになる。すなわち、 $x=0$ の場合の境界条件は式(B.14)と仮定できる。本文の計算例ではこの境界条件を採用している。

$$\frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (t > 0) \quad (B.14)$$

この場合、式(B.9)の値は0となり、式(B.15)の境界条件が導かれる。

$$\frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = \frac{C(1,t) - C(0,t)}{\Delta x} = 0$$

$$C_{0,j} = C_{1,j} \quad (B.15)$$

ii) 表面被覆材中を塩化物イオンが浸透するとした場合

この場合、表面被覆材のCl浸透性(見かけの拡散係数)等を設定し、それを考慮した浸透予測が必要となる。この手法については、例えば、文献6)等で検討が行われているが、本文の方法は計算ができないため取り扱っていない。

c) 境界条件 (コンクリートの深さ方向に十分深い位置)

コンクリート表面部だけでなく、コンクリートの深さ方向に十分深い位置 ($x=\infty$) においても、境界条件を設定する必要がある。例えば、その場所まではCl⁻が浸透しないと考えた場合、 $x=\infty$ における境界条件は以下のように設定可能である。

$$C(\infty,t) = 0 \quad (t > 0) \quad (B.16)$$

(4) Excelによる計算方法例

以下の手順により計算が可能である。

① 計算条件の設定

付図-B.9のようなワークシートを作成する。対象となる構造物の調査結果および設計条件等から、見かけの拡散係数 D_{ap} 、表面塩化物イオン濃度 C_0 を入力する (セルG3~G4)。また、供用開始から表面被覆適用までの期間を「経過年数」として入力する (セルG5)。次に、 $D_{ap} \cdot \Delta t / \Delta x^2$ (セルG8) が0.5を上回らないように、 Δt および Δ

x を設定する（セル G6~G7）。

② 格子の作成

コンクリート表面からの距離 x および時間 t を Δx および Δt 毎に増加させ、計算を行う範囲まで表示させる。なお、付図-B.9 の場合、 x は Δx を 0.5cm として 30cm まで、 t は Δt を 0.2 年として 40 年まで表示させている。

③ 初期条件の設定

時間 $t=0$ の場合の Cl 濃度を入力する。なお、付図-B.9 の場合、セル C13~C73 に式(B.1)の値を入力している（入力方法は 2.1 参照）。

④ 境界条件の設定

距離 $x=0$ の場合と計算範囲の末端である $x=30$ においては境界条件の設定が必要となる。

付図-B.9 では、 $x=0$ の場合は式(B.15)を参考にし、 $C(0,t)=C(1,t)$ と入力している。すなわち、まずセル D13 に”=D14”と入力し、時間 t の最後のセル GU13 までコピーしている。

$x=30$ においては、式(B.16)を参考にし、 $C(30,t)=0$ と入力している。すなわち、セル D73~GU73 に”0”を入力している。

⑤ 差分近似計算

$1 \leq t \leq 40$ の範囲の各セルに、式(B.12)を入力し、各距離 x および各時間 t における Cl 濃度の値 C_{ij+1} を表示させる。付図-B.9 では、 $1 \leq x \leq 30$ および $1 \leq t \leq 40$ の全範囲（セル D14 : GU72 の範囲）について、式(B.12)を入力している。例えば、セル D17 には”=C17 + \$G\$8 * (C18 - 2 * C17 + C16)”と入力している。

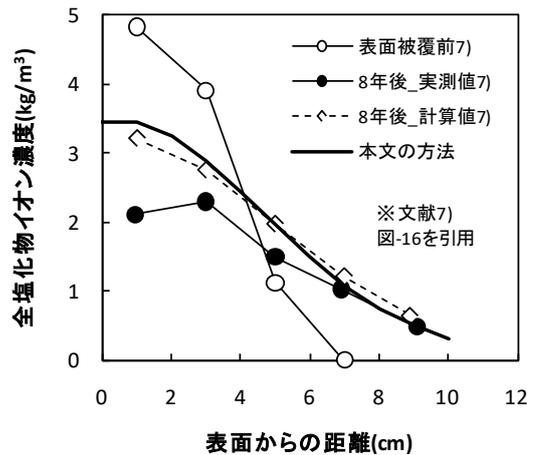
⑥ 塩化物イオン濃度分布および鉄筋位置の塩化物イオン濃度変化の表示

①~⑤の手順により、任意の距離 x および各時間 t における Cl 濃度の値が算出される。付図-B.10 の黒太線は、本文の方法を用い、表面被覆前の Cl 濃度（図中●）⁷⁾ を基に、表面被覆適用 8 年後の Cl 濃度を予測したものである。なお、付図-B.9 の $t=8$ 年の値である。図中○は表面被覆適用 8 年後の実測値であるが、本文の方法は実測値とよく一致している。また、図中の◇は文献 7) における計算値であるが、この値とも概ね一致している。

このように、本手法を用いることで、表面被覆を適用し、任意時間 t が経過した際の Cl 濃度分布を予測することが可能である。したがって鉄筋位置における Cl 濃度の時間変化を予測することも可能である。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編：本編]，p.119-121，2007.



付図-B.10 塩化物イオン濃度の実測値および差分法による予測結果（文献 7）との比較

2) (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，2007.10
 3) 上田太郎・近藤宏・瀧上美喜・澤田千晶：Excel できるデータ解析入門 一すぐに活用できる 13 事例一，同友館，2006.9
 4) 例えば，土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その 2），コンクリート技術シリーズ 40，p. 168，2000.12
 5) 例えば，鈴木肇著：Excel で学ぶ微分方程式，オーム社，2006.12
 6) 鬼束俊一，瀬下雄一，中川貴之，堤知明，岩波光保：塩害劣化した鉄筋コンクリートに対する補修効果の定量評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.832-843，2006.12
 7) 守分敏郎・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

港湾空港技術研究所資料 No.1403

2022.6

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/>

Copyright © (2022) 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。