

論文 大規模栈橋における塩害劣化の評価と補修工法の選択

福手 勤*¹・大野皓一郎*²・川田秀夫*³・峰松敏和*⁴

要旨: 塩害環境下に存在し、ある程度劣化した大規模な構造物を、その後維持管理して行くためには、その劣化状況や環境を的確に把握し、これを分析・解析した後、劣化程度や塩化物含有量等に応じた補修方法を選択、経済性等も加味した全体的な補修計画を立案し、総合的に維持管理を行う必要がある。この考え方を大井埠頭栈橋に適用し、塩害劣化の評価として、目視による構造物全体の劣化程度の評価、含有塩化物量の評価および拡散方程式を用いた今後の塩化物量の移動予測等を行い、表面被覆、断面修復および電気防食の各種補修工法を選択した総合補修計画を作成した。また、これに基づいた施工を実施した。

キーワード: 塩害劣化, 耐久性評価, 補修計画, 拡散予測, 表面塗装工法, 電気防食工法

1. はじめに

大井埠頭は我が国を代表するコンテナ埠頭で、RC栈橋部上面で115,000m²を有している。本栈橋は比較的穏やかな塩害環境と位置付けられている東京湾に位置しているが、防波堤開口部が卓越風向である南側に位置していることや船舶の航行による波浪の影響を直接受けるため、供用開始後、時間の経過とともにコンクリート中の鉄筋の腐食並びにこれに起因するコンクリートの剥離・剥落等の塩害が認められ始めた。この対策として、劣化部の調査と補修を適宜実施してきたが、その規模が拡大してきたため、合理的な全体補修計画を作成し、一定の基準に従って、適正な補修工事を実施することが必要となった。そこで、これまでに実施した劣化度調査や各種補修工法の適用性の検討を行うとともに、非補修箇所の調査および補修箇所の追跡調査やこれらの解析を行い、マニュアル(案)¹⁾を作成した。

本論文は、このマニュアル(案)作成において検討した劣化度の評価方法や補修工法選択の考え方を紹介するものである。

2. 大井埠頭栈橋の概要

大井コンテナ埠頭は総面積 866,000m²を有し、その栈橋部は1970～1973年に建設され、1972～1975年に供用が開始された水深-12mの直杭式横栈橋で、図-1に示すように1つの栈橋長が250mまたは300mの8パース(船席)で構成されている。また、各栈橋の奥行きは、

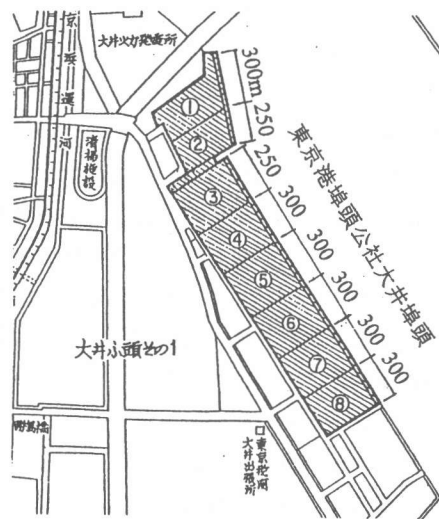


図-1 大井埠頭栈橋の概要
(①～⑧はパース番号)

*1 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室室長 工博(正会員)

*2 (財)東京港埠頭公社埠頭建設部施設第一課課長

*3 (財)東京港埠頭公社埠頭建設部施設第一課課長代理

*4 (株)ニッカイ技術部部长 工博(正会員)

20m, 36m, 70m の 3 種類があり, 形状寸法の異なる前, 中, 後棧橋で構成されている。さらに, 本棧橋の海面からの位置関係は, コンテナの積み降しに用いるガントリークレーンのレール下の桁 (以下クレーン桁と呼ぶ) と他の桁では設計外力の違いから桁高が異なり, クレーン桁下部は満潮時には海中に水没する。また, 桁と床版は海面からの高さが異なり, これらが各部材への塩化物浸透量の違いとなり, その結果, 劣化損傷程度の違いへと繋がると思われる。

なお, これらの桁および床版を対象とした塩害対策対象面積は延べ 160,000m² 程度である。

3. 塩害劣化程度の評価

劣化損傷程度を評価するための調査は, 小形ボート上からの目視を中心とし, たたき点検および測長によって, 以下の項目の調査を行った。

- ①コンクリートのひび割れの形状と幅および長さ, 豆板等の位置と大きさ。
- ②錆汁の滲出位置とその大きさ。
- ③かぶりコンクリートの浮き, 剥離, 剥落の位置や形状, 鉄筋のかぶり。
- ④鉄筋の露出位置と範囲, 腐食程度, 腐食鉄筋の径, 破断している場合はその数。
- ⑤既に補修された箇所がある場合はその位置と面積等。

調査結果は 19,878 の部材 (桁, 床版, 杭頭) ごとに取りまとめ, 文献²⁾ の劣化度判定の標準を参考として新たに作成した大井埠頭棧橋劣化度の判定基準に基づいて劣化度を評価した。評価の一例を図-2 に示す。その結果, 以下のような劣化度の傾向を把握することができた。

- ①クレーン桁 > 桁 > 杭頭 > 床版
- ②前棧橋 > 後棧橋 > 中棧橋

また, 構造物の独立単位であるブロックごとに, 劣化度Ⅲ以上の占める割合を求め, 補修工事に着手する順番の参考に用いることとした。

4. 既補修箇所の追跡調査

大井埠頭においては, 劣化損傷が確認された

1984 年に損傷部位の調査を開始し, 1985 年から損傷程度の大きい箇所から適宜補修を行い, 1991 年までに約 4,500m² の補修を行った。これらの補修箇所におけるその後の状況を調査・検討することは, 今後実施して行く補修の工法選択上の重要な資料となるため, これを実施した。

4. 1 断面修復工法

断面修復工法は, 概ね, かぶりコンクリートの剥離や剥落等の損傷が顕著な箇所への適用を行ってきたが, 1カ所の断面修復の対象面積が大きい場合 (以下大断面) には型枠を設置したプレパックドコンクリートまたはモルタルグラウトで, 対象面積が小さい場合 (以下小断面) には左官での施工を行った。なお, 適用した補修材料は, 大断面および小断面修復の双方とも, ポリマーセメント系およびセメント系モルタルで, 双方とも各 3 種類を検討した。調査の結果, 以下のような傾向を把握することができた。

外観調査の結果としては, 使用材料の如何に関わらず, 補修箇所の約半数に乾燥収縮や外力および温度応力に起因すると考えられるひび割れが認められ, ひび割れ部からの塩化物の浸透が懸念され, その対策を講じる必要があることが判明した。

図-3 は断面修復部およびその近傍の塩化物

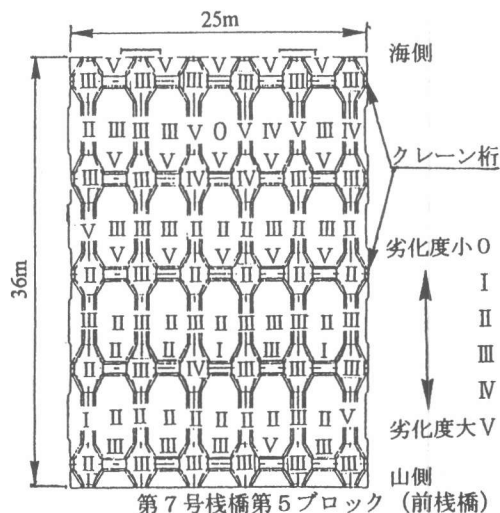


図-2 劣化度調査結果の一例

含有量を測定した結果で、断面修復部の表層には既にかかなりの塩化物が浸透しており、また、大断面修復部と非補修部の境界には非補修部よりも多量の塩化物が確認された。

図-4は断面修復部とその近傍の自然電位の測定結果で、この結果に基づくと、補修部と非補修部の境界において、マクロセルに起因する自然電位の変化が認められ、腐食の進行を伺うことができる。特に、桁部の断面修復部およびその近傍の自然電位は-500mV(vs. CSE)より卑な部位が存在し、現状、外観上の損傷は認められないが、今後、腐食の進行に伴う劣化の顕在化が懸念される。

これらの補修箇所をはつり出し、鉄筋の腐食状況を確認した結果は、概ね、自然電位の卑化傾向と一致しているようであった。

これらの断面修復部の調査結果に基づくと、断面修復のみでは補修後の再劣化の可能性があるかと判断でき、補修部のひび割れ対策として表面塗装を併用することやマクロセル腐食対策としての電気防食法の適用や確実な鉄筋の防錆処理等の対策が必要と判断される。

4.2 表面塗装工法

表面塗装工法は、比較的損傷の小さい箇所や断面修復を行った部位への適用を試みた。適用した塗装材はエポキシ樹脂系3種類、アクリルゴム系1種類、シリコン系1種類で、また、塗膜厚さは200~1500 μ の範囲であった。

表面塗装部の外観調査の結果、全体的な傾向としては比較的軽微な損傷であったが、ふくれや剥離が認められ、塗膜のひび割れも一部に認められた。なお、これらの欠陥においては塗膜自体の変質が認められなかったことから、下地処理や不陸修正不足が主な原因と考えられる。また、これらの塗膜の損傷は塗膜厚さが小さいものほど大きくなる傾向が認められ、表面塗装材にはある程度の厚さが必要と判断される。

表面塗装材による遮塩効果を把握するため断面修復部に表面塗装を行った箇所での塩化物量の測定を行った。測定対象は表面塗装材と断面

修復材との組み合わせで7種類、深さ10mmおよび30mmで測定した。その結果、深さ10mmでは0.07~2.09kg/m³、30mmで0.04~1.15kg/m³の塩化物の浸透が認められ、図-3の表面塗装のない断面修復部の塩化物量と比較すると、深さ10mmではいずれもかなり小さくなっているが、30mmでは一部(表面塗装材と断面修復材との組み合わせで2種)に断面修復材のみの場合より大きくなるものがあった。この結果に基づくと、表面塗装材による遮塩効果は、概ね、

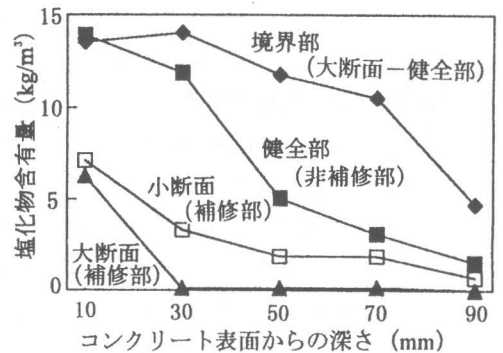


図-3 断面修復部の塩化物含有量(塗装なし)

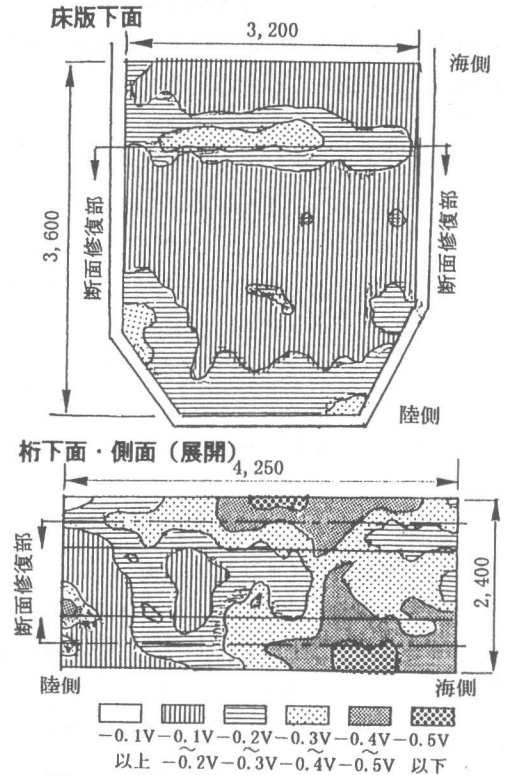


図-4 断面修復部近傍の自然電位分布

良好と判断されるが、塗膜の種類や厚さで効果に差があり、また、断面修復材自体の塩化物の浸透性能が総合的な遮塩効果に影響することも確認できた。

4.3 電気防食工法

電気防食工法は、1989年に外部電源方式としてチタンメッシュ方式約150m²および導電性塗料方式約60m²、流電陽極方式である亜鉛シート方式約70m²をRC構造の前栈橋とI形鋼格子床版の中栈橋での試験施工を行った。施工の概要については文献³⁾等を参照されたい。

電気防食箇所における外観調査およびたつき点検の結果として、チタンメッシュ方式では前栈橋部の桁角部に陽極被覆材の厚さ不足に起因する最大20×30cm程度の浮きが6カ所認められ、導電性塗料方式ではコンクリートのひび割れに付随する最大幅0.4mm程度の縦方向ひび割れおよび中栈橋部にはI形鋼を被覆した後付けモルタルの浮きが合計で約1m²(8カ所)認められた。また、亜鉛シート方式ではシートの取り付けキャップの脱落やボルト部からの錆汁および中栈橋部の亜鉛シートの間詰めモルタル部に変色が認められた。

これらの外的損傷箇所および健全部のコンクリートをはつり、鋼材の腐食状況を確認した結果、中栈橋においてI形鋼に直接陽極を設置した亜鉛シート方式以外は、いずれも腐食の進行を確認することはできず、他の工法での補修箇所と比較して、より健全であった。

また、電気防食部の塩化物量を測定した結果、電気防食の副次的効果である塩化物の移動を明確に確認することもできた。

5. 塩化物イオン量とその評価

5.1 塩化物イオン量の調査

大井埠頭栈橋においては、外観観察の結果、位置や部材によって顕在化している劣化損傷程度が異なることが確認されたが、これらの原因となると考えられるコンクリート中の塩化物イオン量の調査を実施した。

図-5は各栈橋における桁および床版部の深さ方向への塩化物量の分布の平均値で、位置や部材によって塩化物含有量が異なり、外観目視結果を裏付けるような傾向にあった。また、これらの個々の塩化物含有量とはつり出した鉄筋の腐食度との間には、明確な相関を認めることができた。

5.2 拡散方程式による将来予測

深さ方向への塩化物量分布の個々の測定結果にフィックの拡散則を適用し、表面塗装工法の適用の可否やその将来予測を行うこととした。

その手法は文献⁴⁾に示すように、まず、逆解析により各部の表面塩化物イオン濃度(C₀)および拡散係数(D)を求め、表面塩化物イオン濃度が比較的類似した環境条件(位置および部材)ごとの群として設計表面塩化物イオン濃度(C_{0d})を求めた。また、非補修部のコンクリートの品質を全て同一と仮定して塩化物イオンの設計拡散係数(D_d)を求めた。なお、将来予測の判定に用いる発錆限界塩化物イオン量は、大井埠頭での調査結果に基づき、Cl⁻=0.82% (≒1.88kg/m³)とした。

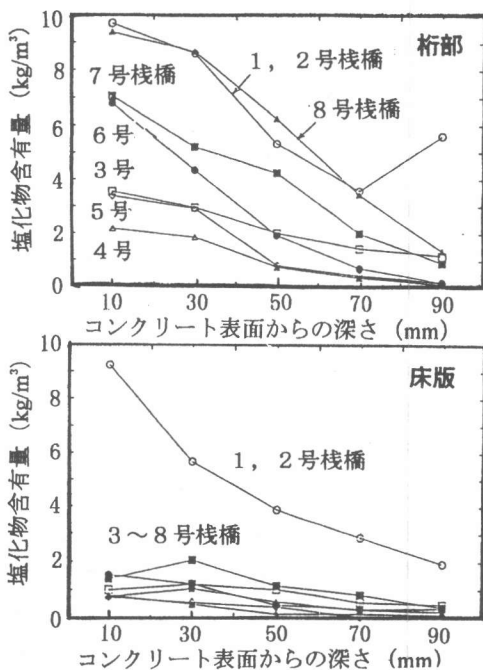


図-5 栈橋各部の塩化物イオン量

解析の結果、比較的劣化環境が穏やかな部位と推察されている箇所においては、図-6に示すように、今後補修を行わず、塩化物の浸透が続いた場合でも30年にわたり発錆限界に満たない箇所が存在することや図-7に示すように、今後の塩化物の浸透によって発錆限界を超える箇所となる部位に分類できた。

図-7の箇所に表面塗装を施した場合の将来予測を行った結果は図-8となり、表面塗装により塩化物の浸透がなく、また、コンクリート中の塩化物はその後コンクリート全体に拡散するため、発錆限界値を下回り、防錆効果が期待できることから、これらの箇所には表面被覆工法の適用が可能と判断できる。

一方、比較的多量の塩化物を既に含有している箇所に表面塗装を適用した場合の将来予測を行うと、表面塗装工法では防食効果が全く期待できず、他の工法を選択しなければならないことが明らかであった。

6. 補修工法の選択

補修工法の選択にあたっては、4.、5.に述べた各項目を総合的に判断し、断面修復工法、電気防食工法、表面塗装工法のいずれかを選択することとした。図-9に補修工法選択の流れを示す。なお、ここで補修工法を3種類に限定したのは、補修後の維持管理を念頭に置き、その後の調査があまり煩雑とならないようにするためである。また、適用する工法には、以下のような基本条件を付けることとした。

- ①表面塗装工法は、将来予測において有効と判断された塩化物含有量の箇所に適用するが、使用材料の品質規格値を別途定め、十分な遮塩性、ひび割れ追従性等を有するものを適用する。
- ②電気防食工法は、今後の劣化の進行が懸念される箇所への適用を基本とするが、クレーン桁下面や杭頭等の満潮時に海中となる箇所で、流木等による防食装置の破損が懸念される箇所への適用は避けることとする。
- ③断面修復工法は、剝離や剥落および鉄筋腐食

によるひび割れが顕著な箇所並びに重要性の高い箇所や干満時に海中となる箇所への適用を行うが、修復材自体のひび割れや塩化物イオン拡散係数等の品質規格を満足するとともに、断面修復箇所には表面塗装を行うことを基本とし、さらに、補修部と非補修部の境界に生じるマクロセル腐食対策として電気防食を併用する。

表-1に大井埠頭における各部位に適用する基本の補修工法の選定結果を示す。なお、この結果は、位置や部材ごとの概略の選定結果であり、実際の補修工事に際しては、その後の劣化

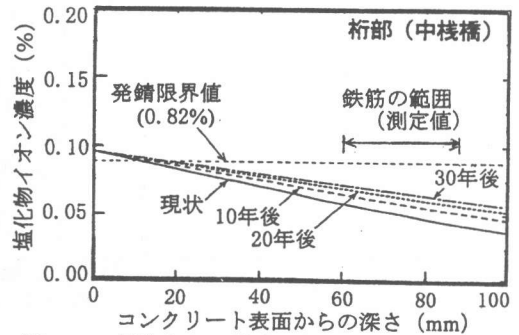


図-6 補修なしの場合の拡散予測 (補修不要)

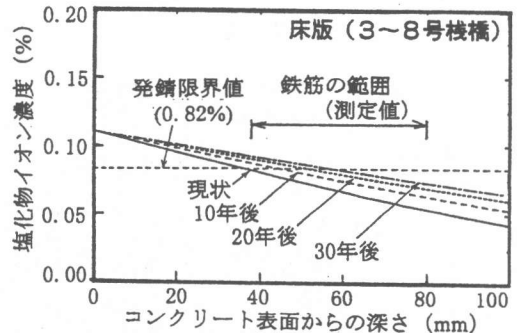


図-7 補修なしの場合の拡散予測 (要補修)

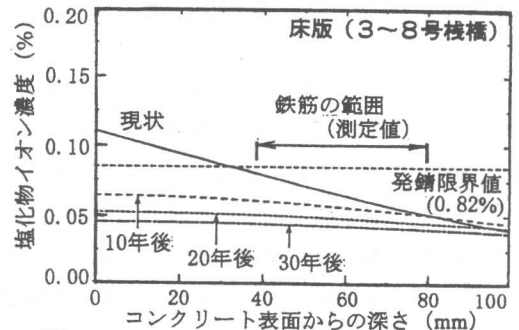


図-8 表面塗装を行った場合の拡散予測

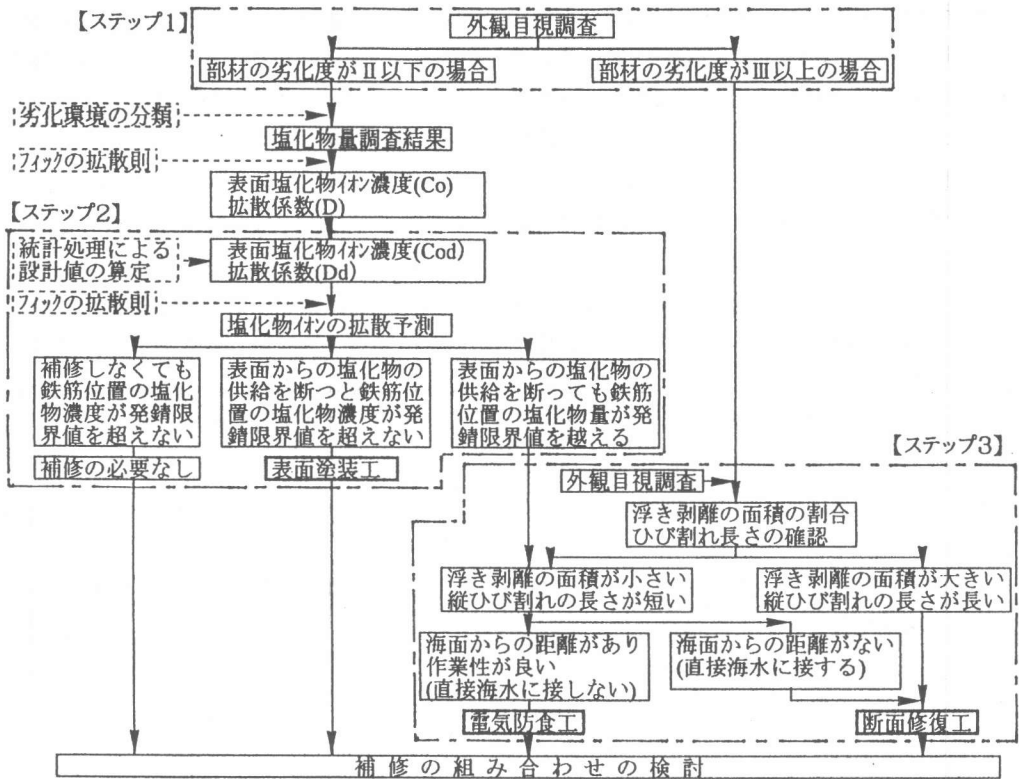


図-9 補修工法選択の流れ

の進行も考慮し、図-9に当てはめ、補修工法を決定することとしている。

(3) 塩化物含有量の調査はそのための有効な手段であり、これに基づく将来予測が補修計画作成の目安となると考えられる。

表-1 選択した基本補修工法

部材		栈橋 No.	1	3	4	6	7	8
			2	5	5	5	5	5
床版			電	塗	塗	塗	塗	塗
桁	前栈橋	底面	断	断	断	断	断	断
		側面	電	電	電	電	電	電
	クレーン桁以外の桁		電	電	電	電	電	電
	中栈橋		-	塗	塗	-	-	-
後栈橋		-	電	電	電	電	-	
杭頭ハンチ			断	断	断	断	断	断

断；断面修復+表面塗装，
電；電気防食，塗；表面塗装

7. まとめ

本論文の結果を以下のように取りまとめる。

(1) 塩害劣化を受ける大規模構造物においては、劣化損傷の程度が部位によって異なることがあり、劣化程度に応じた対策が必要である。

(2) 補修対策としては、損傷程度に応じた経済的な工法を選択するシステムを用い、総合補修計画を立案する。

参考文献

- (財) 東京港埠頭公社：大井埠頭栈橋劣化調査・補修マニュアル(案)一，1994.3
- (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書-劣化防止・補修マニュアル(案)一，1984.9
- 川俣孝治・峰松敏和・川田秀夫・高橋久衛：電気防食法による港湾コンクリート構造物中の鋼材の防食，コンクリート工学年次論文集，Vol.12-1，pp.511-516，1990.6
- 守分敦郎・長瀬重義・大即信明・関博・福手勤：塩害を受けた栈橋に対する表面処理工法の設計法に関する検討，土木学会論文集，第534号，VI-30，pp.109-123，1996.3