

論文 予防保全としての表面被覆が適用された栈橋上部工の耐久性と維持管理に関する検討

羽瀧 貴士^{*1}・小林 孝範^{*2}・土屋 武史^{*3}・岩崎 淳^{*4}

要旨：東京湾内の厳しい海洋環境にて 23 年前に建設された栈橋上部工において、建設 3 年後に予防保全としての有機系被覆工法を用いた表面被覆が実施された。本文では、表面被覆後 20 年までの詳細な調査結果に基づいて表面被覆工法の性能を評価し、本構造物の耐久性および栈橋上部工の予防保全の考え方について考察した。その結果、建設後早期に有機系被覆工法を適用することで栈橋上部工本体および表面被覆工法ともに長期にわたり高い耐久性を維持することができ、予防保全の方法として非常に有効であることがわかった。

キーワード：栈橋上部工, 塩害劣化, 予防保全, 表面被覆, 耐久性, 劣化予測, 付着強度

1. はじめに

塩害環境にあるコンクリート構造物において、表面被覆は鋼材への腐食因子の供給量を低減し腐食進行を抑制できる工法として有効であり、構造物の予防保全のために適用可能であると考えられる¹⁾。また、海洋での厳しい塩害環境に曝されている栈橋上部工においては、表面被覆による十分な補修効果を得るためにはその適用時期が重要であることが指摘されている²⁾。

一方、コンクリート構造物の維持管理にあたっては、ライフサイクルコストを考慮して対策を立てることが重要との考え方がある。ライフサイクルコストを最小にするような維持管理計画の策定を適切に行うためには、鉄筋コンクリートとしての耐久性だけではなく、補修した部材の耐久性を精度良く評価することが不可欠である。しかし、既存工法として多くの実績を有する表面被覆工法においても補修後の耐久性を詳細に検討された例は少ない^{2),3)}。

本文では、塩害に対する予防保全としての有機系被覆工法を用いた表面被覆が建設 3 年後に実施された栈橋上部工について、同環境において建設 14 年後に劣化損傷が確認された後に部分

断面修復と併用して同仕様の表面被覆が実施された栈橋上部工を比較対象として、その後 20 年が経過するまでの間に実施された調査結果をもとに表面被覆工法の性能評価を行い、またその結果から長期的な性能低下の傾向について推測することで表面被覆部の劣化曲線を整理し、維持管理に反映する考え方について示した。

2. 構造物の概要と表面被覆の仕様

検討対象とした構造物は、図-1 に示すように東京湾内に約 400m 突出した位置に建設された 2 つの鉄筋コンクリート製の栈橋上部工（プラットフォーム）である。各栈橋上部工の概要と表面被覆を実施した経緯を表-1 に、使用されたコンクリートの配合を表-2 に示す。なお、両栈橋の上部工の構造はほぼ同様で、いずれも海上大気中に位置している。

建設時期は栈橋 A の方が栈橋 B よりも約 12 年早く、栈橋 A においては建設後約 14 年で梁と床版に鉄筋腐食や剥離・剥落が確認されたために補修（劣化部のみを鉄筋裏側まではずり取って断面修復した後に、部材全体に表面被覆）が行われた。これに対し、当時まだ建設後 3 年であ

*1 東亜建設工業（株）技術研究開発センター新材料・リニューアル技術室長 博(工) (正会員)

*2 東亜建設工業（株）東京支店千葉工事事務所

*3 東亜建設工業（株）技術研究開発センター施工情報化技術室主任研究員 (正会員)

*4 東京ガス（株）袖ヶ浦工場施設部主幹

表-1 調査対象とした栈橋上部工の概要と表面被覆を実施した経緯

栈橋	建設年	塗装の実施年	最新の調査の実施年	補修部材の位置	H. W. L.	波高 (m)	表面被覆を実施した経緯
				(L. W. L. +, m)			
A	1970	1985	1998	+4.80 ~+5.75	+2.00	0.3	建設後約14年で鉄筋腐食や剥離・剥落が確認されたため、部材全体に適用(部分断面修復と併用)。
B	1982	1985	2005	+4.80 ~+5.75	+2.00	0.3	栈橋Aに隣接する栈橋であり、栈橋Aの劣化状況を考慮して、予防保全を目的として実施。

表-2 コンクリートの示方配合

栈橋	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						C	W	S	G	Ad1	Ad2
A	25	12.0	50.0	4.0	41.8	302	151	795	1120	0.121	—
B	25	21.0	55.0	4.0	50.2	298	164	936	948	0.745	2.98

※使用材料 C: 普通ポルトランドセメント, S: 山砂, G: 川砂利 (配合Bでは碎石と混合)
Ad1: AE 減水剤, Ad2: 流動化剤

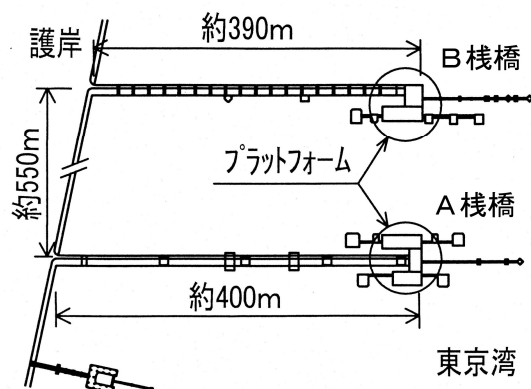


図-1 栈橋の平面配置

り外観上全く健全な状態であった栈橋Bにおいても、何らかの対策を施さないと将来的に劣化が顕在化することが想定されたために、予防保全を目的として栈橋Aと同じ仕様の表面被覆が部材全体に実施された。

表面被覆の仕様を表-3に示す。中塗材には遮塩性やひび割れ追従性に優れた厚膜型ポリブタジエン樹脂 (膜厚 1000 μm), 上塗材には耐候性に優れたアクリルウレタン樹脂 (膜厚 60 μm) が用いられている。この仕様は17種類の仕様に対する各種の性能評価試験の結果をもとに選定されており⁴⁾、現在も比較的多く用いられている。

3. 調査項目と方法

調査は、表-4に示すように、各栈橋上部工の下面において外観目視による塗膜の変状確認、

表-3 塗装仕様

構成	材料・方法	目標膜厚
下地処理	サンダー処理	—
前処理	エポキシ樹脂プライマー	—
	エポキシ樹脂パテ	—
中塗り (2層)	ポリブタジエン樹脂	500 μm
	ポリブタジエン樹脂	500 μm
上塗り (2層)	アクリルウレタン樹脂	30 μm
	アクリルウレタン樹脂	30 μm

表-4 調査項目と方法

調査項目	方法	
外観目視	塗膜変状の目視確認	
鉄筋の健全度	はつり出しによる確認	
塩化物イオン量	コアφ50mm, JCI-SC4法	
塗膜	付着強度	建研式付着試験機
	ひび割れ追従性	零スパン伸び試験 ⁴⁾
	遮塩性	拡散セル浸透試験 ⁴⁾
	酸素遮断性	製化研式フィルム酸素透過率計
	鏡面光沢度	JIS Z 8741, 45°

塗膜の付着強度試験・光沢度測定、鉄筋のはつり調査を行い、コア抜きにより採取した塗膜に対して実験室においてひび割れ追従性試験、遮塩性試験、酸素透過性試験、コンクリートコアの塩化物イオン量測定などを実施した。

4. 調査結果と考察

4.1 外観目視の状況

これまでの外観目視調査で確認された塗膜の

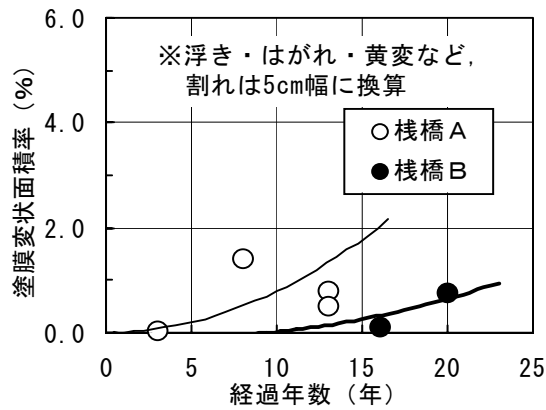


図-2 塗膜の変状面積率の経時変化

変状（浮き，はがれ，割れなど）を面積として表し，塗装された表面積に対する変状面積率を算定した結果を図-2に示す。なお，塗膜の割れに関しては，幅と長さに乗じた面積を劣化面積とすると割れの影響範囲を過小評価しすぎると考え，割れを生じた部分の塗膜を補修する場合の補修幅（約 5cm）も考慮して，割れの長さに 5cm を乗じた値を変状面積と考えることとした。また，断面修復部での鉄筋の再腐食による塗膜の損傷は，塗膜自体の性能低下に起因しないことから除外した。

各調査年次によって調査範囲が異なっていることから若干ばらつきは見受けられるが，時間の経過とともに変状面積率が増加する傾向が確認できた。橋脚Aでは表面被覆の 13 年後まで，橋脚Bでは 20 年後まで，塗膜自体の劣化面積率は 1%以下程度に留まっており，外観上の劣化進行は長期にわたって緩やかであることがわかった。橋脚上部工の下面に適用された塗膜は，直射日光の影響を受ける範囲が限られており，紫外線劣化による黄変などを生じる可能性が小さいことや，乾湿の繰返しや温度変化の程度も陸上部に比較して小さいことが，塗膜に変状を来たしにくい原因として考えられる。

さらに，橋脚Aよりも橋脚Bの方が明らかに外観変状の増加は緩やかであり，外観上劣化が進行した部材（部分的に断面修復された部材）に対してよりも，健全な部材に対して表面被覆を行った方が，外観上は長期にわたって健全な状態を保つことができたと考えられる。

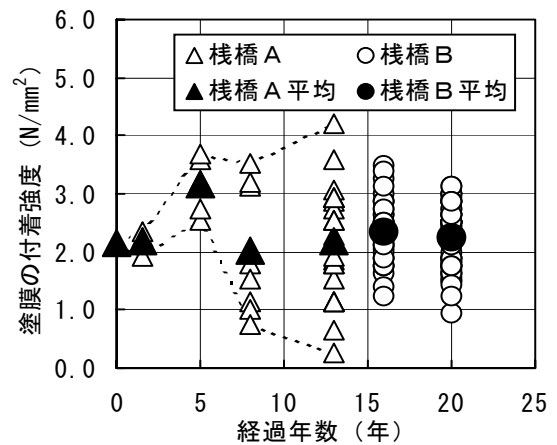


図-3 塗膜の付着強度の経時変化

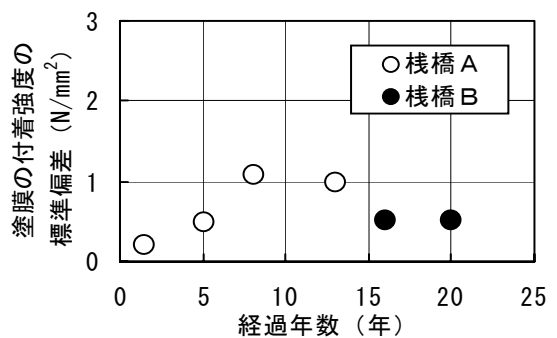


図-4 塗膜の付着強度の標準偏差

4.2 塗膜の付着強度

これまでに得られた塗膜の付着強度の測定結果および標準偏差を図-3，4に示す。

付着強度に関しては塗膜の性能の中ではその低下が最も顕著に生じる可能性が高いことが指摘されており⁵⁾，劣化が顕在化した後に表面被覆がなされた橋脚Aにおいては，経年とともに付着強度のばらつきが大きくなる傾向を示した。これに対して，橋脚Bにおいては表面被覆後 20 年が経過したにも関わらず，全て 1.0N/mm²以上の十分な付着強度を有しており，測定値の標準偏差は橋脚Aの 8~13 年後での値の 1/2 程度と小さく，性能低下の傾向は顕著には見られない。

この違いの原因は明確ではないが，表面被覆の下地となるコンクリートの健全度または表面状態の違いによる下地処理の精度・施工性や躯体表面付近の強度の違いが影響しているものと推測される。このことから，塗膜の付着強度は，健全な状態のコンクリートに対して表面被覆を行った場合の方が，長期にわたって高い値を維

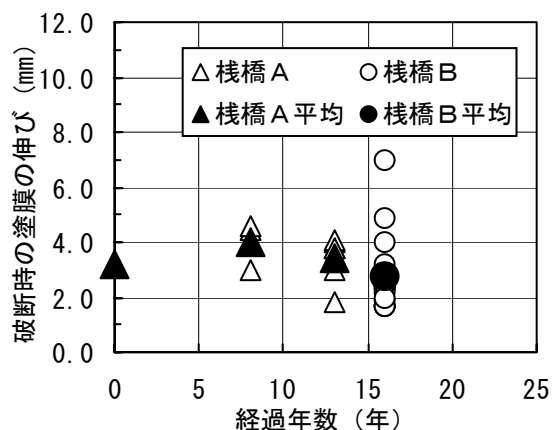


図-5 塗膜のひび割れ追従性の経時変化

持することができるものと考えられる。

4.3 塗膜のひび割れ追従性

塗膜のひび割れ追従性は、採取したφ50mmのコアの表層20mmに対して塗膜を損傷しないようにコンクリートに切り込みを入れて、治具(鋼板)に取り付けて両引き試験を行い、塗膜の破断した時点の伸び量で評価した⁴⁾。これまでに得られた測定値を図-5に示す。

この結果、橋梁Bの塗膜は表面被覆後16年が経過した時点でも全て1.7mm以上の十分な伸び性能を有していた。平均値としては16年後には若干の低下が確認されたものの、橋梁AとBの比較としては顕著な傾向の違いは認められず、その値は初期値(カタログ値)と同程度であり、ひび割れ追従性としては、施工直後からの性能の変化は大きくないものと推察された。

4.4 塗膜の遮塩性

塗膜の遮塩性は、採取したφ100mmのコアの表層20mmを用いて、拡散セル法(3%食塩水と蒸留水を使用)により30日間浸透させた後の蒸留水中の塩化物イオン量を測定することにより評価した⁴⁾。その結果、橋梁Bの表面被覆16年後での測定値は $(0.34 \sim 1.36) \times 10^{-3} \text{mg/cm}^2/\text{日}$ であり、若干ばらつきはあるものの、橋梁上部工の塩害対策の場合によく用いられる比較的厳しい品質管理基準値 $(1.0 \times 10^{-3} \text{mg/cm}^2/\text{日})$ ⁶⁾と同程度以下であり、表面被覆されて16年経過した塗膜においても十分な遮塩性を有していた。

このような塗膜の遮塩性能がコンクリート中

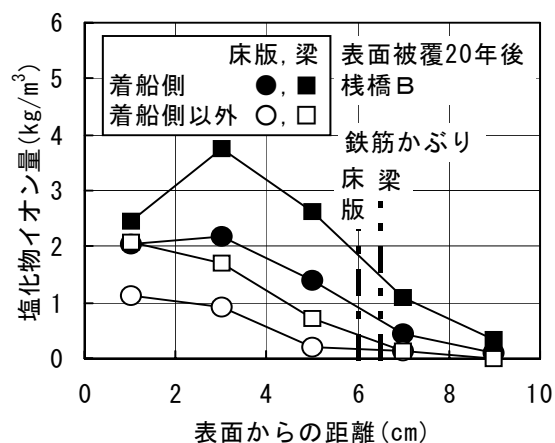


図-6 コンクリート中の塩化物イオン量分布

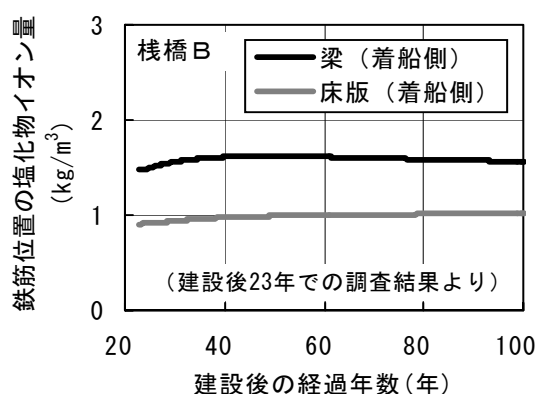


図-7 塩化物イオンの浸透予測結果

の塩化物イオン量分布に及ぼす影響について検討した。橋梁Bの梁と床版における表面被覆20年後のコンクリート中の塩化物イオン量分布を図-6に示す。さらに、塩分浸透量が比較的大きかった着船側の梁と床版のデータに対して、鉄筋位置の塩化物イオン量の経時変化を一次元差分法²⁾により推定した結果を図-7に示す。ここでは、塗膜を通して常に $1.36 \times 10^{-3} \text{mg/cm}^2/\text{日}$ (測定された最大値)の塩化物イオンが供給されることを考慮した。将来の遮塩性の低下の程度は予測できないものの、表面被覆後16年においても十分な値を維持していたことからこの値を採用した。なお、この計算に用いたコンクリート中の塩化物イオン拡散係数は、表面被覆されていない橋梁上面の塩化物イオン量分布より求めた値 $(6.27 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec})$ とした。

図-6において塩化物イオン量が最も多かった着船側の梁の鉄筋位置での塩化物イオン量は、 1.6kg/m^3 以下の値を推移する結果となった。この

値は土木学会コンクリート標準示方書に示される腐食発生限界塩化物イオン量 (1.2kg/m^3)⁶⁾を上回っているものの、栈橋上部工を対象として設定された腐食発生限界値 (1.88kg/m^3)⁷⁾よりも小さく、同時に実施された鉄筋の健全度調査においても全く腐食は確認されなかった。

栈橋Bは建設後3年の時点で表面被覆がなされたため、図-6に示す塩化物イオンのほぼ全てが建設後3年までの間に浸透したものと考えられる。従って、 $1.36 \times 10^{-3}\text{mg/cm}^2/\text{日}$ 程度の塗膜の遮塩性が確保されれば、図-7に示すように鉄筋位置付近においては現状の塩化物イオン量と同等の値で推移するものと考えられ、将来においても鉄筋が腐食する可能性は小さいと推測された。これらのことから、建設後3年という早期に表面被覆を行ったことによって、この栈橋において鉄筋腐食を生じさせないように維持管理できる可能性が高いものと考えられる。ただし、今後もこの程度の値を維持できるかどうかは不明であり、この妥当性については継続的な点検により確認する予定である。

4.5 塗膜の酸素遮断性

塗膜の酸素遮断性を評価するため、採取したφ50mmのコアの表層から、塗膜を傷付けないようにスライスカットしてφ18mmの試料を作製し、付着している下地材を研掃したものについて、製化研式フィルム酸素透過率計を用いて単位時間単位面積あたりの酸素透過量を測定した。

その結果、栈橋Aの表面被覆13年後での平均値は $1.27 \times 10^{-2}\text{mg/cm}^2/\text{日}$ 、栈橋Bの16年後では $1.96 \times 10^{-2}\text{mg/cm}^2/\text{日}$ であった。これらの値は、栈橋上部工の塩害対策のために設定された比較的厳しい品質管理基準値 ($1.0 \times 10^{-2}\text{mg/cm}^2/\text{日}$)⁶⁾を若干上回る程度であり、本測定方法では現地から採取した塗膜に対する試料の成形が非常に難しいことを考慮すると、塗膜の酸素遮断性の低下は小さいと考えられた。

4.6 塗膜の耐候性（鏡面光沢度）

上塗材への重要な要求性能である耐候性に関して定量的に評価を行い、維持管理のための基

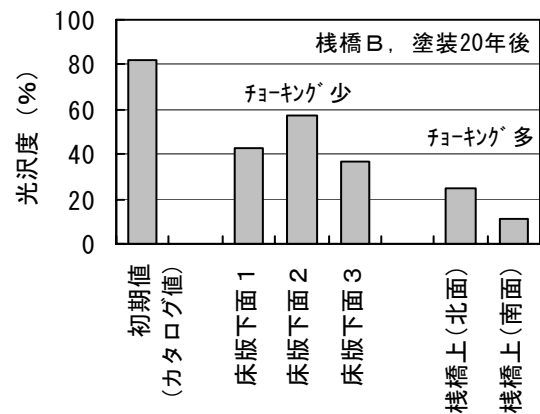


図-8 塗膜の鏡面光沢度

礎データとすることを目的として、栈橋Bの表面被覆20年後の塗膜に対して鏡面光沢度を測定した。その結果を図-8に示す。

この結果より、栈橋下面での20年間の暴露により床版下面では光沢度が1/2程度に低下していたことが確認された。しかし、栈橋上面に適用された同仕様の塗膜と比較すると、光沢度も大きく、チョーキングの程度も少なかった。これは、栈橋下面では日射や紫外線の影響が少ないためと考えられた。今後はさらにデータを蓄積して、光沢度の値とチョーキングの程度や目視調査をもとにした再塗装の必要性の判断などとの関連を整理していくことで、有効な評価指標となる可能性があると考えられる。

4.7 表面被覆部の劣化曲線と維持管理

以上の調査結果より、建設後3年の時点で表面被覆がなされた栈橋Bにおいては、主として中塗材の性能に依存すると思われるひび割れ追従性、遮塩性、酸素遮断性に関しては20年後においても十分な性能を有していると考えられた。

一方、下地の性能や母材コンクリートの状態などの影響を受けやすいと思われる塗膜の付着強度は、栈橋Bにおいては表面被覆20年後の時点でも顕著な低下傾向は見られないが、平均値が若干低下しており、栈橋Aにおいては著しい低下傾向を示していたことから、今後の性能低下傾向に関して十分な管理が必要である。

さらに、塗膜の外観上の変状については、表面被覆20年後まででわずかの範囲にしか確認されていないものの、これに関しても増加傾向に

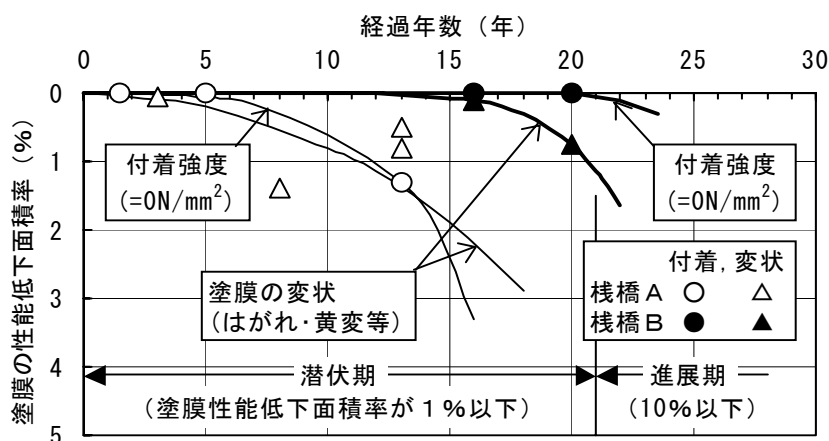


図-9 表面被覆部の劣化曲線

あることから目視点検の継続が必要と思われた。また、上塗材の性能に依存すると思われる耐候性（ここでは光沢度）に関してもチョーキングの進行とともに低下する傾向があり、点検によってデータを蓄積しながら適切な時期に再塗装を含めた維持管理対策を検討する必要がある。

これらの結果から、栈橋A、Bともに、表面被覆工法に関して今後は外観目視で確認される変状、付着強度および鏡面光沢度の変化を中心に点検を進めることが適切と考えられた。

そこで、点検結果から性能低下傾向を把握し、維持管理に生かすために、表面被覆部の劣化曲線の整理を試みた。なお、現時点では鏡面光沢度の低下に関しては十分なデータがないため、外観目視で確認される塗膜の変状と付着強度に着目して整理した。また、性能低下の認められなかったひび割れ追従性などの性能に関しては対象外とした。その結果を図-9に示す。ここで付着強度に関しては、既往の文献⁵⁾と同様に測定結果のばらつきが正規分布に従うと仮定して、 $0N/mm^2$ を下回る確率を求め、塗膜の変状に関しては図-2の変状面積率の推移から求めた。このような劣化曲線を参考にして、点検時期や点検項目などの維持管理計画を合理的、効率的に進めることができると考えている。

5. まとめ

本検討の結果をまとめると以下ようになる。

(1) 塩分浸透量が少なく外観上の劣化のなかつ

た建設後3年の時点で、ポリブタジエン樹脂とアクリルウレタン樹脂を用いた有機系被覆工法の適用された栈橋上部工では、上部工本体および表面被覆工法ともに20年以上にわたり高い耐久性が維持されていた。

(2) 構造物が健全でかつ浸透した塩分によって将来的にも鉄筋腐食を生じない時期に十分な性能を有する表面被覆工法を適用することは、塩害に対する予防保全の方法として非常に有効である。

参考文献

- 1) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，pp.110-111，2001.1
- 2) 守分敦郎ほか：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
- 3) 堤知明ほか：塩害を受けた火力発電所コンクリート構造物の補修に関する研究，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，日本材料学会，第2巻，pp.255-260，2002.10
- 4) 守分敦郎ほか：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
- 5) 奥平幸男ほか：栈橋上部工に適用された塩害劣化補修工法の耐久性評価について，日本コンクリート工学協会・複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム論文集，pp.97-104，2001.5
- 6) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.24-26，2002.3
- 7) (財)東京港埠頭公社：栈橋劣化調査・補修マニュアル，p.49，2004.6