

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

守分敦郎¹・長滝重義²・大即信明³・関博⁴・福手勤⁵

¹正会員 東京工業大学博士課程(東亜建設工業勤務)(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 工博 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒160 東京都新宿区大久保3-4-1)

⁵正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 材料研究室(〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

本研究は、栈橋構造物の塩害対策として実施される表面処理工法の適用方法について検討したものである。ここでは、塩化物イオンの浸透がフィックの拡散則に従うものと仮定し、鉄筋位置の塩化物イオン量と塩化物イオンの発錆限界値を比較することにより、表面処理工法の補修効果の判定を行った。また、この検討に必要な腐食環境の評価は表面塩化物イオン量(C_0)を、構造物の耐久性の評価は塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D)を用いて行った。さらに、ばらつきを持つこれらの数値を確率論的に設定することを提案するとともに、具体的な表面処理工法の適用方法を示した。

Key Words: design, concrete surface coating, chloride diffusion, fick's law, difference equation, evaluation of chloride environment, evaluation of durability

1. はじめに

厳しい塩害環境にさらされる栈橋構造物においては、これまでも塩害劣化や補修の事例が数多く報告されてきた^{1),2)}。しかし、補修方法に関する系統立った考え方が示された例は少ないようである。

塩害劣化を受けた構造物の補修を効果的に行うためには、腐食環境や構造物の保有する耐久性を適切に評価し、構造物に求められる供用年数を考慮に入れた補修方法の検討を行う必要がある。即ち、「構造物が暴露されている腐食環境の評価」「構造物の保有する耐久性の評価」あるいは「補修工法(材料等)の耐用年数の評価」を系統立てて行うことが重要となる。しかし、実構造物における腐食環境を評価する場合、部材の位置(例えば、海面からの距離等)や供用状態によって大きく異なる場合が多く、その評価は大変複雑となる。

一方、構造物の塩害に対する耐久性についても、「かぶり」や「コンクリートの塩化物イオンの浸透性状(例えば、見掛けの拡散係数)」等も構造物の耐久性を評価する上で重要な指標となるものと考えられるが、測定点ごとのばらつきが大きく、その評価法について確立されたものがないのが現状である。

筆者らは、これまで既設構造物における塩害の調査や、

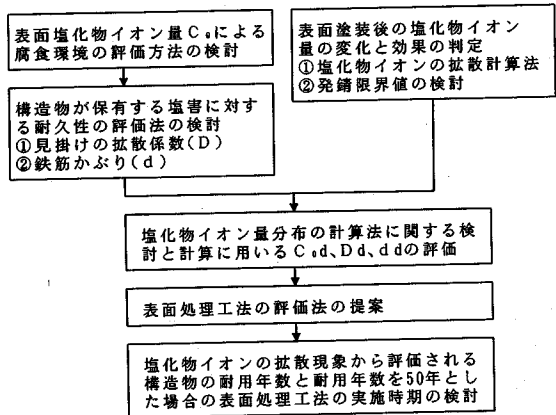


図-1 研究のフロー

表面塗装を施工した後の補修効果について追跡調査を実施してきた^{3),4)}。これらの調査結果より、表面塗装を行った後においても既にコンクリート中に浸透した塩化物イオンは濃度勾配に従って拡散し、鉄筋位置における塩化物イオン量が発錆限界値より高くなると、表面塗装をされていても鉄筋腐食は進行することが確認された⁴⁾。即ち、表面処理工法の適用限界について知見を得ることができた。

本文においては、栈橋構造物より得られたデータを基に、「腐食環境の定量的評価法」「構造物の保有する耐久性能の評価法」について検討すると共に、塩化物イオンの拡散予測に基づく表面処理工法の適用性の検討手法に

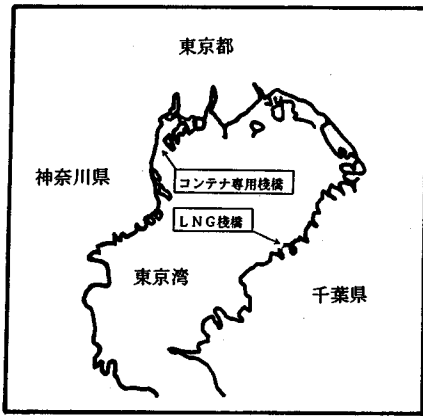


図-2 検討対象とした棧橋の位置

ついて提案した。ここでの検討は、図-1に示すフローに従って行った。

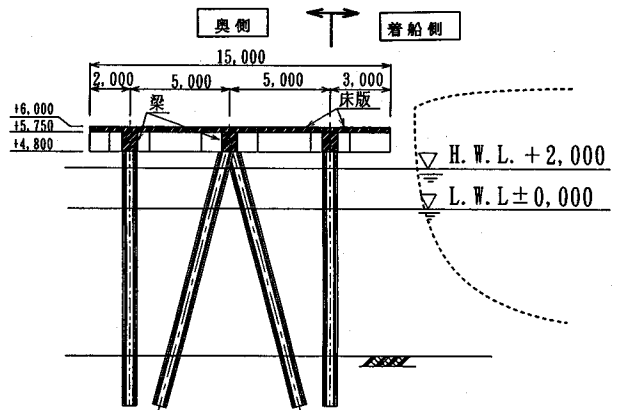
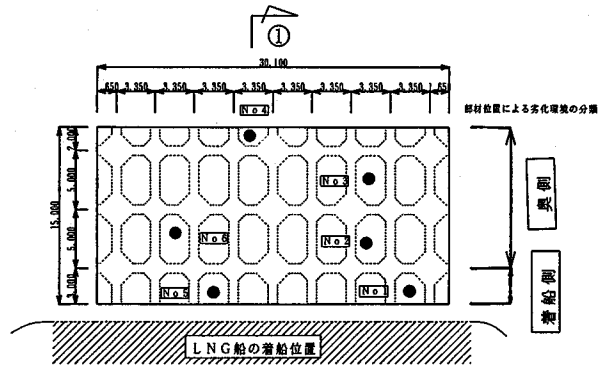
2. 構造物が暴露されている腐食環境の評価法

(1) 検討対象とした構造物

港湾構造物の腐食環境評価は、構造物の耐久性設計を行う場合や補修工法を決定する上において必要不可欠なものであり、これまでも多くの調査研究が実施されてきた⁵⁾⁶⁾。しかし、補修方法の検討を行う場合には、耐久性設計を行う場合と異なり、既に腐食環境に暴露された鉄筋コンクリート構造物が対象となるために、調査・評価方法を系統立てて行い、十分なデータを収集すれば比較的明快に評価することが可能と推測される。本研究においては、構造物が暴露されている環境条件の評価や構造物の耐久性評価法の検討のために、図-2に示す位置に建設された二つの棧橋をとりあげた。

検討対象とした棧橋の一つは、海岸線から約400m離れた位置に建設された、図-3に示す構造のLNG(液化天然ガス)棧橋である。この棧橋は、建設後約14年経過した時点で図-4に示す塩害劣化が確認された。

劣化の多くは、かぶりの小さい「梁のスターラップ」や底面と側面から塩化物イオンの浸透を受ける「梁の隅角部の主筋」の腐食によるものであった⁴⁾。また、床版には乾燥収縮によるものと思われる微細なひびわれが見られたが、塩害による顕著な浮き・剥離は確認されなかった。このような劣化現象に対する補修として、顕在化した劣化部は鉄筋の裏側までコンクリートをはづり取り、鉄筋の錆を除去した後ポリマーセメント系補修材で断面修復を行ない、さらに上部工の下面全体にポリブタジエン樹脂を中



断面 ①-①

図-3 LNG棧橋の構造概要

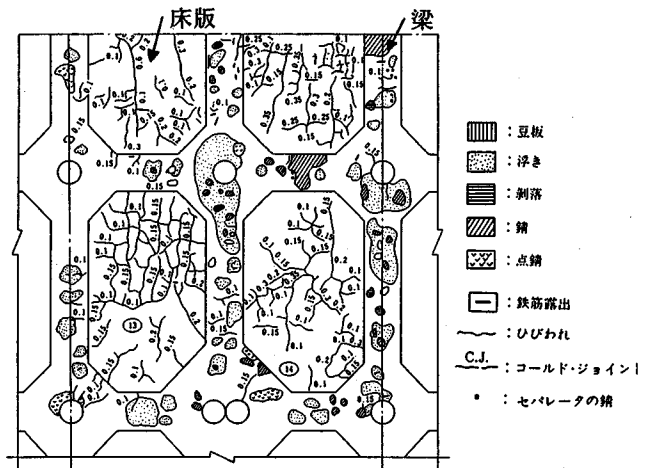


図-4 LNG棧橋の劣化の概要

塗り材とした表面塗装⁷⁾⁸⁾を施工した。上部工の梁底面のレベルは「L.W.L.+4.80m」、床版底面は「L.W.L.+5.75m」であり、海洋コンクリート構造物の防食指針(案)⁹⁾による分類に従うと、上部工は飛沫帯あるいは海上大気中

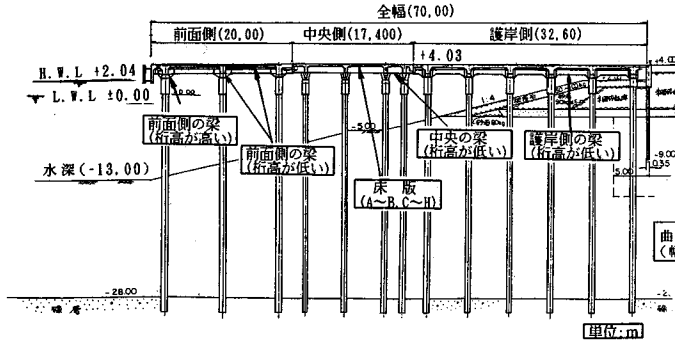


図-5 コンテナ専用栈橋の構造概要

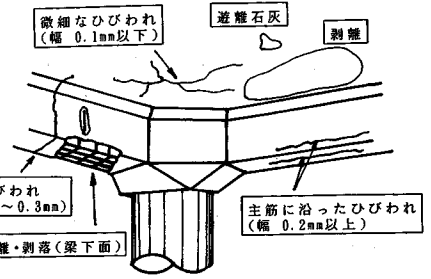


図-6 コンテナ専用栈橋の劣化の概要

に分類される。

この栈橋は、建設15年後に劣化調査とそれに基づく補修(断面修復、表面塗装)が実施され、その後約8年間に渡って補修効果に関する追跡調査が行なわれた³⁾⁹⁾。追跡調査の結果では、表面塗装を行った時点で既にコンクリート中の塩化物イオン量が多い場合、塗装後においても内部鉄筋の腐食が進行することが確認されている。

検討対象としたもう一つの栈橋は、図-5に示すように上部工のレベルが先のLNG栈橋より低く、8パース(A~H)よりなる総延長が2300mにおよぶ大規模なコンテナ専用栈橋である。この栈橋においては、塩害による劣化現象が建設12~13年後に確認された。表面に見られた劣化現象の代表例を図-6に示す¹⁰⁾。この栈橋の場合、構造物の規模が大きいために平面的な位置(前面側、中央側、護岸側等)や部材と海面の距離の違い(梁、床版)によって、顕在化した劣化現象は多様であった。

(2) フィックの拡散則を用いた腐食環境の評価

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、外部の腐食環境に大きく依存するものと推測される。従って、塩害に関与した環境条件の評価方法の一つとして、建設から劣化調査までの間にコンクリート中に浸透した塩化物イオン量の分布を指標とする方法が考えられる。

即ち、コンクリート中の塩化物イオンの浸透過程を濃度拡散と仮定し、劣化調査等より得られた構造物の塩化物イオン量に対して式(1)(フィックの拡散則(第2法則))を近似させると、「表面塩化物イオン量(C_0)」および「塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D)」を得ることができる。これらの数値のうち「表面塩化物イオン量(C_0)」はコンクリート構造物が暴露されている腐食環境

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

ここに、 x : コンクリート表面から鉄筋までの深さ(cm)

t : 建設からの期間(sec)

C : t 期間経過後、深さ x cm の塩化物イオン量(%)

C_0 : 表面塩化物イオン量(%)

D : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm^2/sec)

に大きく依存した値であることが推測される。

しかし、表面塩化物イオン量(C_0)は構造物が建設された直後から増加し、腐食環境やコンクリートの材質(W/C等)によって異なるものの、塩化物イオン供給量が多い場合や、コンクリートの塩化物イオン浸透性が高い場合には、比較的短い期間で一定値に収束するものと考えられる¹¹⁾¹²⁾。従って、 C_0 は変化する値であるが、栈橋構造物の厳しい腐食環境を考慮にいれて、式(1)における「 t 」は建設から調査までの期間とし、 C_0 は建設から調査時までの平均的な値(一定値)として評価を行った。

なお、本論文では塩化物イオンの移動現象を式(1)により評価しており、「塩化物イオンの固定化現象」¹³⁾¹⁴⁾「含水率の変化に伴う塩化物イオンの濃度変化」「中性化による濃縮現象」¹⁵⁾「コンクリートの材質の経年変化に伴う拡散係数の変化」さらには「移動可能な塩化物イオンと全塩化物イオンとの関係」¹⁶⁾等が考慮されておらず、イオン移動に関する理論的厳密性が犠牲となっている。これは構造物が面している多様な腐食環境を比較的明快に評価することを目的としたためである。

なお、以下に示す塩化物イオンは特に断らないかぎり、全て「全塩化物イオン」であることを示している。

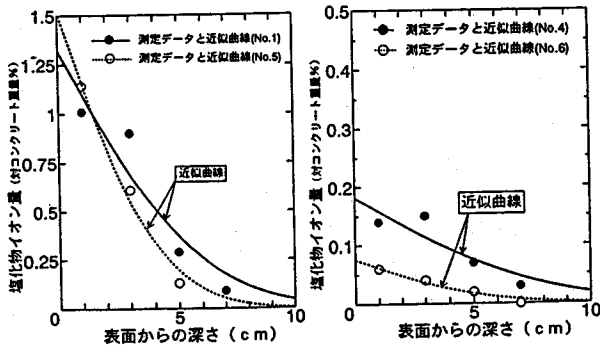


図-7 塩化物イオン調査結果と近似曲線

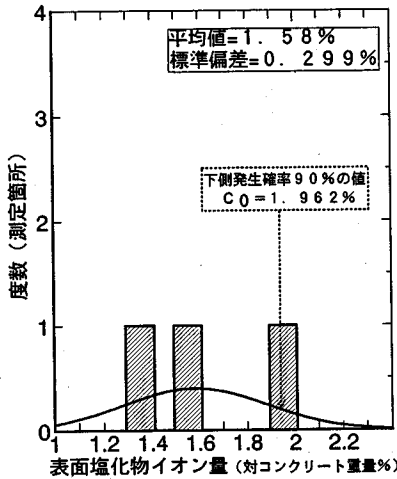


図-8 着船側床版の表面塩化物イオン量の頻度分布(LNG栈橋)

(3) C_0 を用いた腐食環境の評価例

コンクリート中に浸透した塩化物イオンの量は、腐食環境の違いに大きな影響を受ける。さらに、塩化物イオンの調査結果は、同様な腐食環境においても調査位置によって異なる場合も多い。従って、コンクリートの部材を「海面からの距離の違い(梁と床版)」「着船側や護岸側等の平面位置の違い」あるいは「供用状態の違い」等をもとに腐食環境ごとに分類し、調査結果と式(1)を近似させて得られた C_0 の値を、それぞれの腐食環境ごとに整理し、調査に伴うばらつきを評価する必要がある。

LNG栈橋における塩化物イオン量の調査結果と式(1)による近似の例を図-7に示す。LNG栈橋では、上部工面積が比較的小さいにもかかわらず塩化物イオン量の浸透状況は調査位置によって異なっており、 C_0 の値に大

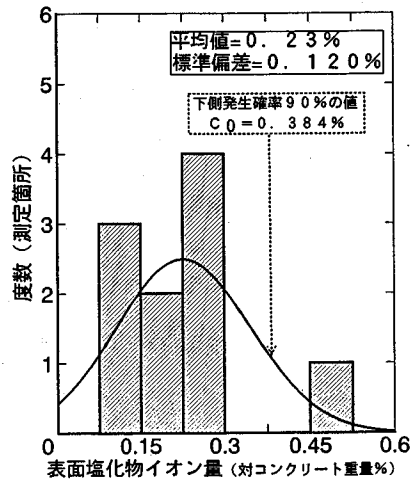


図-9 栈橋の奥側床版の表面塩化物イオン量の頻度分布(LNG栈橋)

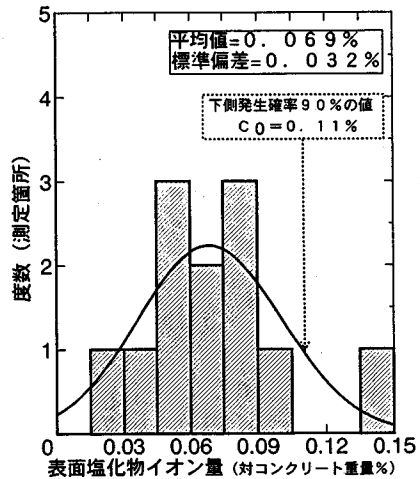


図-10 C~Hバース床版の表面塩化物イオン量の頻度分布(コンテナ専用栈橋)

きな違いが見られた。この原因としては、LNGの荷下し時に船体に海水が散布されることが影響しているものと推測された。従って、上部工の床版を、「海水が散布される着船側の床版」と「栈橋の奥側で着船の影響が少ない床版」に腐食環境を分類して C_0 のばらつきを整理してみると、図-8および図-9に示す度数分布を示した。

一方、コンテナ専用栈橋においては、外観目視調査結果を反映させて、8バースの栈橋の内「A~Bバースの梁、床版」「C~Hバースの床版」「前面側にある桁高の高い梁部材」「前面側にある桁高の低い梁部材」「栈橋中央部の桁高の低い梁部材」「護岸側にある桁高の低い梁部材」の6種類に分類して C_0 を評価した。

評価結果の例として、「C~Hバースの床版」および

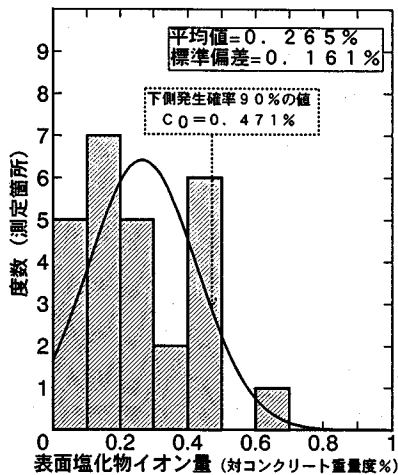


図-11 前面の梁の表面塩化物イオン量の頻度分布(コンテナ専用栈橋)

「前面側にある桁高の高い梁部材」の C_0 の度数分布を図-10および図-11に示す。

これらの図より、 C_0 の値は大きくばらつき、またデータ数が少ないために母集団の分布が明確でないものも見られが、ここでは比較的広範に採用されている正規分布を仮定して C_0 のばらつきを評価した。

LNG栈橋の2種類の腐食環境(図-8、図-9)における C_0 の平均値を比較すると、「1.58%」「0.23%」と大きく異なっており、明らかに異なる腐食環境にあることがわかる。同様に、コンテナ専用栈橋の例(図-10、図-11)では、それぞれの平均値は「0.07%」および「0.27%」となっており、この場合も異なる環境条件にあるものと推定される。

従って、このような方法により構造物の腐食環境を、ばらつきも含めて評価することが可能と思われる。

3. 構造物の塩害に対する耐久性の評価法

(1) 見掛けの拡散係数による耐久性評価

コンクリート中の塩化物イオン量分布に式(1)を近似させることにより、塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D)を求めることができる。この値は、塩化物イオンの浸透性状から評価される、コンクリートの塩害に対する耐久性を表す指標の一つと考えられる。見掛けの拡散係数も、 C_0 の場合と同様にばらつきを持つ値であり、LNG栈橋およびコンテナ専用栈橋における測定結果を図-12、図-13に示す。それぞれの栈橋において、使用されたコンクリート

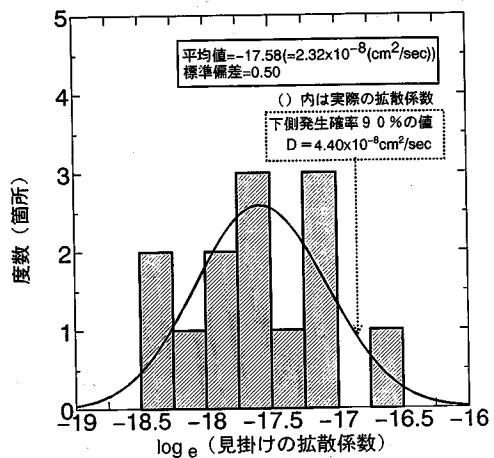


図-12 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の頻度分布(LNG栈橋)

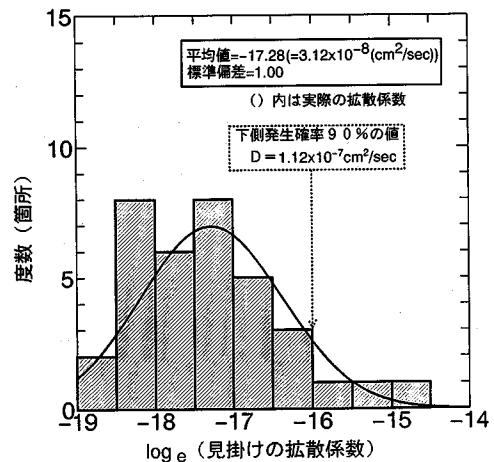


図-13 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の頻度分布(コンテナ専用栈橋)

の配合は栈橋全体で同一であるにも拘らず、見掛けの拡散係数は測定位置の違いにより大きくばらついている。従って、それぞれの図の横軸を「見掛けの拡散係数の自然対数」で表示し、構造物全体の見掛けの拡散係数のばらつきを対数正規分布と仮定した。

この様な分布が想定できれば、見掛けの拡散係数のばらつきをも考慮に入れた評価が可能と考えられる。

(2) 鉄筋のかぶり

鉄筋コンクリートの場合、かぶりも構造物の塩害に対する耐久性能を大きく支配する要因の一つと考えられる。既設構造物におけるかぶりのばらつきを、LNG栈橋の

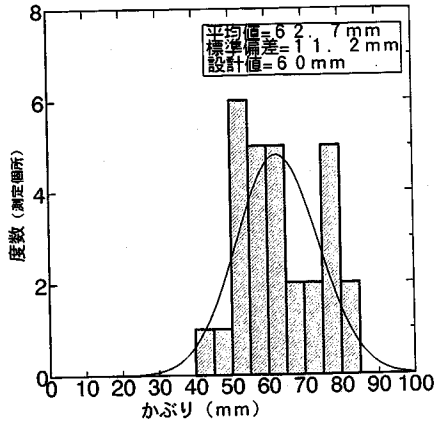


図-14 床版の下側主筋のかぶりの頻度分布 (LNG 栈橋)

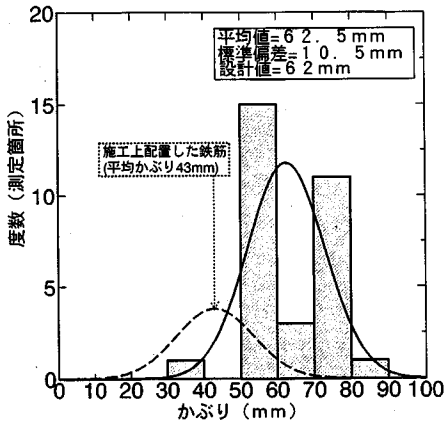


図-15 床版の下側主筋のかぶりの頻度分布(コンテナ専用栈橋)

床版の主筋の場合は図-14に、コンテナ専用栈橋の「床版の主筋」「梁のスターラップ」の場合について図-15および図-16に示す。データ数の少ないものについては、母集団の分布が明確に推測することは難しいが、ここにおいてもかぶりのばらつきを正規分布と仮定した。なお、分布の平均値は設計値と比較的近い値であった。

なお、図-15においては、床版の主筋の下側に施工のための鉄筋が配置されており、顕在化した塩害劣化がこの鉄筋に起因している例も多かったため、施工鉄筋のかぶりを主筋の分布および鉄筋径から推測した。

4. 表面塗装の補修効果の判定法に関する検討

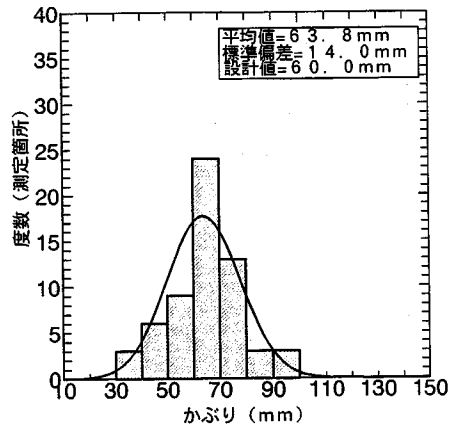


図-16 梁のスターラップのかぶりの頻度分布 (コンテナ専用栈橋)

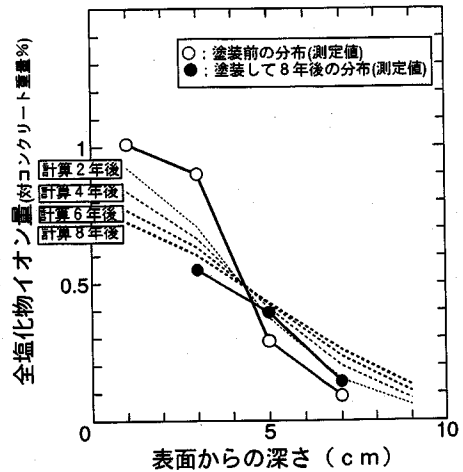
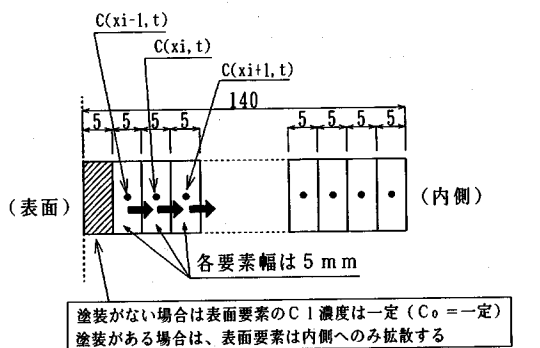


図-17 塗装後の塩化物イオン量分布の変化

(1) 表面塗装後の塩化物イオン量の変化

表面塗装においては、外部からの塩化物イオンの供給を遮断する効果は期待できるが、コンクリート内部に既に多量の塩化物イオンが浸透している場合、鉄筋腐食の進行を止めることは難しいことがこれまでも報告されてきた³⁾。

建設15年経過後に表面塗装が施工され、その後8年経過したLNG栈橋における、塩化物イオン量分布の例を図-17に示す。8年後の調査結果を表面塗装直前の塩化物イオン量と比較すると、塗装後における塩化物イオン量は、表面付近で減少し内部が増加する傾向にあることが確認された。これは、塗装後においても浸透した塩化物イオンが拡散し、鉄筋の位置によっては塩化物イオン量が増加して、表面塗装による補修効果が発揮されない場合があるものと推測される⁴⁾。



$$C(x_i, t + \Delta t) = D \times \frac{C(x_{i-1}, t) - 2C(x_i, t) + C(x_{i+1}, t)}{(\Delta x)^2} \times \Delta t + C(x_i, t)$$

図-18 表面塗装後の塩化物イオンの変化を計算する1次元差分法の概念

従って、塗装後におけるコンクリート中の塩化物イオンの浸透過程を予測することにより、表面塗装の補修効果に関する指標を得ることが可能と思われる。

塗装後の塩化物イオン量は、「Ⅰ:塗装前の塩化物イオン量の分布を初期値」とし「Ⅱ:見掛けの拡散係数を塗装前と同一」と考え、さらに「Ⅲ:塗装面から塩化物イオンの供給が無い」と仮定して、図-18に示す1次元の差分法により、塗装後2～8年目の塩化物イオン量の分布を求めた。計算結果を実測値と比較して図-17に示す。計算の結果、塗装後において濃度の高い部分から低い部分への濃度拡散が進行し、8年目における計算値は実測値と比較的良く一致している。この傾向は、他の測定データにおいても同様であることが確認された⁴⁾。これらの結果より、塗装後の塩化物イオン量の浸透過程は、先に示したⅠ～Ⅲの条件と1次元差分法によりある程度の精度で推測することが可能であると思われる。

(2) 補修効果の判定に用いる発錆限界値

表面塗装の補修効果の判定は、塗装を行った後に内部鉄筋の腐食が進行するか否かによって評価することが可能と考えられる。このために、表面塗装後の鉄筋位置における塩化物イオン量の発錆限界値を想定する必要がある。

塩化物イオンの発錆限界値は、研究者らによって1.2～2.5kg/m³の範囲にあることが指摘されている^{17),18)}。LNG 棧橋の塗装後8年経過した時点の調査では、全塩化物イオン量としてコンクリート重量に対して「0.1%(約2.3kg/m³)以下」の部分では、鉄筋腐食が確認されなかった。この値は、大即¹⁹⁾宮川²⁰⁾らが指摘した「発錆面積が顕著に

増加する塩化物イオン量」に近い値であるが、データのばらつきを考慮に入れて全塩化物イオン量として「2.0kg/m³」(0.085対コアイト重量%)採用し、棧橋の劣化を顕在化させるために必要な発錆限界値と仮定した。

なお、劣化がコンクリート表面に顕在化するまでの時間は、鉄筋の腐食速度も考慮に入れる必要がある。しかし、腐食環境の厳しい棧橋上部工を適用対象とした場合、塩化物イオンが発錆限界値に達した後、鉄筋腐食による劣化が顕在化までの期間は比較的短いものと推定されることより²¹⁾、劣化判定や補修効果の判定は、鉄筋位置の塩化物イオン量を発錆限界値と比較することにより行った。

5. コンクリート中の塩化物イオン量と構造物の劣化過程

前章までの腐食環境評価および構造物の耐久性評価によって、「表面塩化物イオン量(C₀)」「見掛けの拡散係数(D)」「かぶり(d)」のばらつきや数値の算出方法を検討した。さらに、表面塗装後の調査データをもとに、塗装後の塩化物イオン量の計算法や補修効果の判定法を検討してきた。ここでは、それぞれの評価より得られた数値をどのように組み合わせれば、計算によって得られる劣化判定が実際の構造物に見られた劣化現象と一致するか検証した。

検討に用いる、C_{0a}、D_a、d_aはばらつきを考慮に入れた安全側の値を採用する必要があるが、全て安全側の値を採用すると、過大な評価となる傾向が認められた。計算において最も影響の大きいものは「C_{0a}」であり、これを小さく評価してしまうと、他の数値を大きくしても危険側の評価となってしまう場合もあった。また、D_aおよびd_aの値は、発錆限界値に到達するまでの時間に影響を与えることが確認された。ここでは、これらの数値の組み合わせについて、以下の2ケースで検討を行った。

(ケース1) 計算に用いる表面塩化物イオン量は、棧橋構造物が厳しい塩害環境にさらされているため、安全側に評価する必要があり「C_{0a}=下側発生確率が90%となる値」を採用した(図-8～図-11)。また、計算に用いる「見掛けの拡散係数(D_a)」「鉄筋のかぶり深さ(d_a)」はいずれも平均値(発生確率50%となる値)を用いた。

(ケース2) (ケース1)の条件のうち、見掛けの拡散係数も安全側の値として「下側発生確率が90%となる値」を用いた(図-12～図-13)。ただし、d_aは平均値とした。

なお、塩化物イオン量の計算は、前章までの検討結果より、

以下の手順で行った。

① 構造物に表面塗装が施されていない状態の、コンクリート中の塩化物イオン量は、「計算に用いる表面塩化物イオン量(C_{od})」を一定とし、「計算に用いる見掛けの拡散係数(D_a)」「計算に用いる鉄筋のかぶり(d_a)」および「建設後からの経過年数(t)」を、式(1)に代入して計算を行った。

② 供用期間中に表面塗装が施される場合、塗装直前の塩化物イオン量分布を上記①により求め、塗装後はこの分布の値を初期値として「塗装面からの塩化物イオンの供給がない」と仮定して、1次元差分法により塗装後の経過年数に応じた塩化物イオン量を計算する。このとき、見掛けの拡散係数は塗装前と同じ値を用いる。

以下に、LNG棧橋およびコンテナ専用棧橋の計算結果を示し、構造物の劣化現象と比較検討した。

(1) LNG棧橋の検討結果

LNG棧橋においては、「着船側で環境の厳しい床版」と「棧橋の奥側で環境が穏やかな床版」の計算結果を、それぞれ図-19および図-20に示す。このとき、建設15年後の塩化物イオン量分布は上記①により求めて実線で、さらに塗装後8年経過した時点の塩化物イオン濃度分布は、上記②により計算して破線で示してある。いずれの部材においても、それぞれの腐食環境評価および耐久性評価の結果をもとに、(ケース1)の組み合わせで計算を行った。

a) 着船側の床版

環境条件の厳しい位置にあるこの床版は、建設15年経過時点のコンクリート中の鉄筋の状態は、「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」⁹⁾で示される劣化度「I~II」であり、軽微な鉄筋腐食が認められた。しかし、コンクリート表面には顕著な劣化現象は確認されなかった。

一方、このような部材に対して、内部に塩化物イオンを残したまま表面塗装を行って8年経過した時点の調査では、床版下面のコンクリートに浮き・剥離が確認された。

塩化物イオン量の計算結果を図-19に示す。計算の結果、かぶりの平均の位置において、既に建設15年後に発錆限界値(0.085%)を超えており(図中○)、塗装後の8年間に於いて、鉄筋位置における塩化物イオン量の計算値はさらに増加している(図中●)。従って、計算上では塗装を施しても劣化の進行は止められないことが確認され、塗装後8年経過した後に劣化が顕在化した事実と良く一致しているようである。

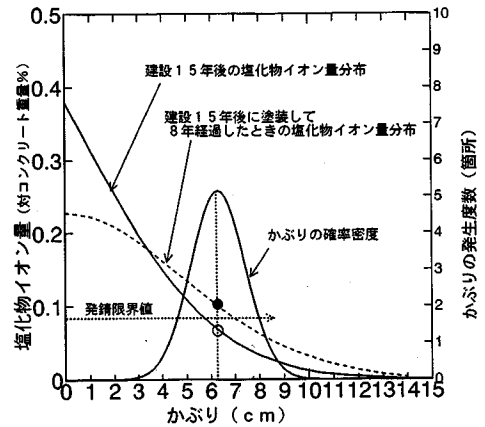


図-19 着船側床版の塩化物イオン量分布の計算結果(LNG棧橋)

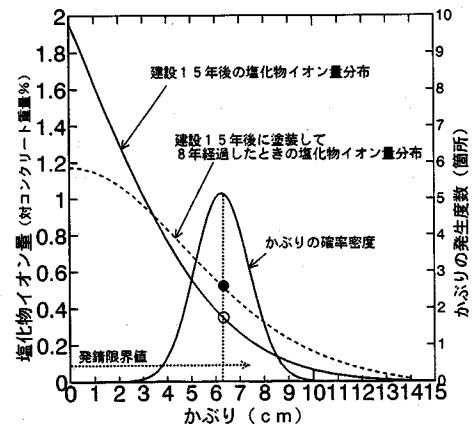


図-20 棧橋奥側床版の塩化物イオン量分布の計算結果(LNG棧橋)

b) 棧橋中央側の床版

棧橋中央付近の床版の調査結果においては、建設15年後においても、また塗装して8年経過した後においても鉄筋腐食は確認されなかった。計算の結果、図-20に示すようにかぶりの平均の位置において、建設15年後は発錆限界値を下回っているが(図中○)、塗装8年後においては発錆限界値を若干超えている(図中●)。計算値の方が若干安全側の評価となっているようである。

(2) コンテナ専用棧橋の検討結果

コンテナ専用棧橋においては、建設して約12年経過後に、航路側に面した梁や床版に浮き・剥離を伴う劣化が確認された。一方、棧橋中央付近の床版や梁には、建設され

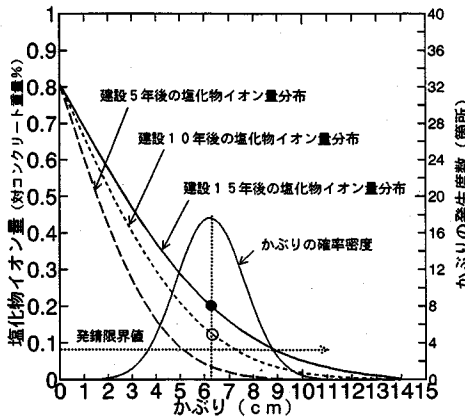


図-21 前面の梁の塩化物イオン量分布の計算結果 (コンテナ専用栈橋)

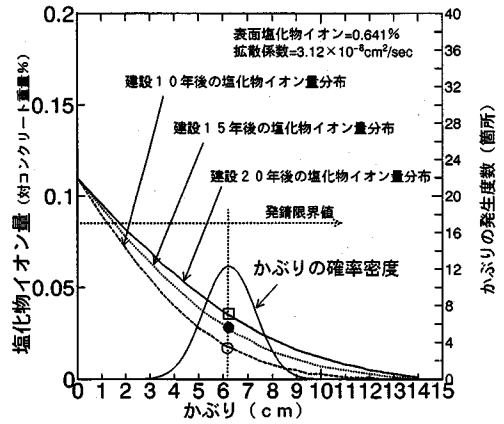


図-23 劣化の見られない床版の塩化物イオン量分布の計算結果(コンテナ専用栈橋)

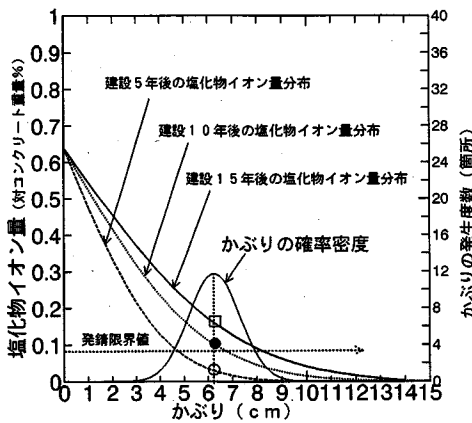


図-22 劣化の確認された床版の塩化物イオン量分布の計算結果(コンテナ専用栈橋)

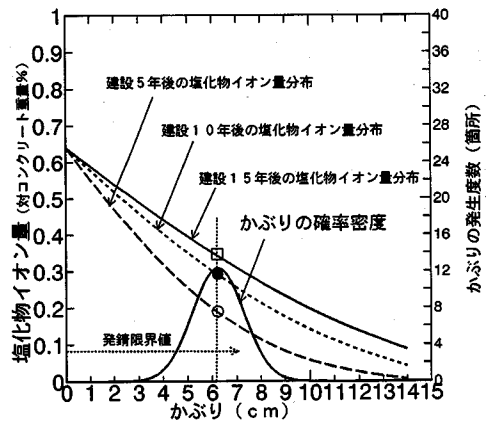


図-24 見掛けの拡散係数が下側発生確率90%の場合 (劣化の確認された床版:コンテナ専用栈橋)

て20年経過した現在においても劣化が認められていない。

ここでは、「a)劣化の確認された前面の梁」「b)劣化の確認された床版」および「c)劣化の確認されていない床版」について検討を行った。これらの検討は、それぞれの腐食環境評価および耐久性評価の結果をもとに、(ケース1)に従って数値を設定して計算を行ったものである。また、以下に示すd)においては、(ケース2)に従って数値を設定した検討も行った。

a) 劣化の確認された前面の梁

劣化が確認された栈橋の前面側の梁部材における、塩化物イオン量分布の計算結果を図-21に示す。かぶりの平均値(スターラップで約6.4cm)における塩化物イオン量は、既に建設10年後に発錆限界値を超えている(図中○)。この部材は建設して約12年後に内部鉄筋の腐食による劣

化が確認されており、計算結果は実構造物の劣化進行状況を比較的良く説明できているものと思われる。

b) 劣化の確認された床版

同様に、建設された約12年後に劣化が確認された床版の計算結果を図-22に示す。計算の結果でも、かぶりの平均値(約6.2cm)において、建設後約10年で発錆限界値を超えており(図中●)、先の梁の場合と同様な傾向を示していることがわかる。

c) 劣化の確認されていない床版

一方、劣化の確認されていない床版における計算結果を図-23に示す。この計算結果によると、建設20年後(現在)においても鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値を下回っており(図中□)、実際の構造物の状態と良く一致している。

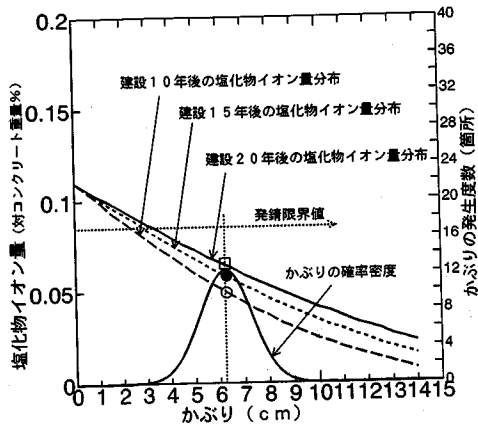


図-25 見掛けの拡散係数が下側発生確率90%の場合 (劣化の見られない床版:コンテナ専用栈橋)

d) ケース2に従って計算した場合

「劣化が確認された床版」の計算結果では(図-24), 見掛けの拡散係数を平均値とした計算結果(図-22)に比較して, 鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値に達する時期が, 10年程度早くなっていることがわかる. 一方, 「劣化が確認されていない床版」においては(図-25), 現状でも鉄筋位置の塩化物イオン量は発錆限界値を下回っており (図中□), 劣化の認められていない構造物の現状を表現出来ているものと思われる. 従って, この栈橋の場合は見掛けの拡散係数の値として「下側発生確率90%」を用いても, かならずしも過大な評価となっていないようである.

以上の検討の結果, C_{od} , D_d , d_d を検討対象としている構造物の特徴に合わせて設定できれば, ここに示した考え方に従って, 表面塗装の適用性を評価することが可能と思われる. しかし, 構造形式等が異なると, 劣化が顕在化するまでの期間が異なり, C_{od} , D_d , d_d の値やその組み合わせも異なるものと推測される. 従って, 今後様々な構造物に対する調査検討によって, より多くの知見を収集する必要がある.

6. 表面処理工法の適用性の検討方法

(1) 補修工法適用の流れ

補修工法の選定において, 表面塗装を含む表面処理工法を, 断面修復工法, 電気防食工法あるいは脱塩工法等との関係から図-26のように位置付けることが可能と考えられる²²⁾.

即ち, 表面処理工法は部材の劣化度が比較的低い段階に

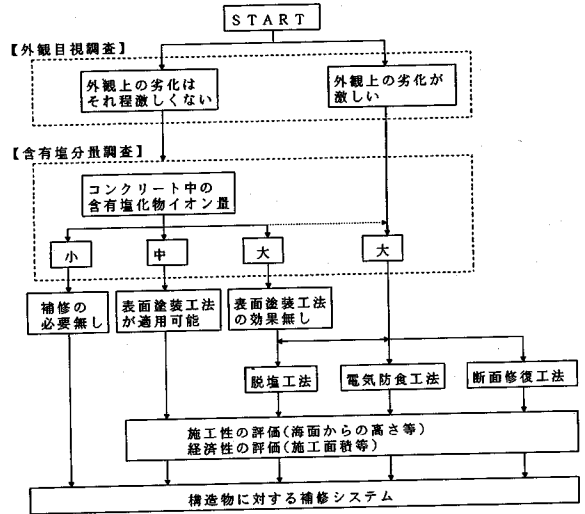


図-26補修工法の選定の流れ

表-1 外観目視による補修の目安²³⁾

項目 \ 劣化度	0	I	II	III	IV	V
補修の要否判定	補修の要なし	補修の要なし	補修の要なし (場合により補修)	要補修	要補修	要補修 (場合により補修)

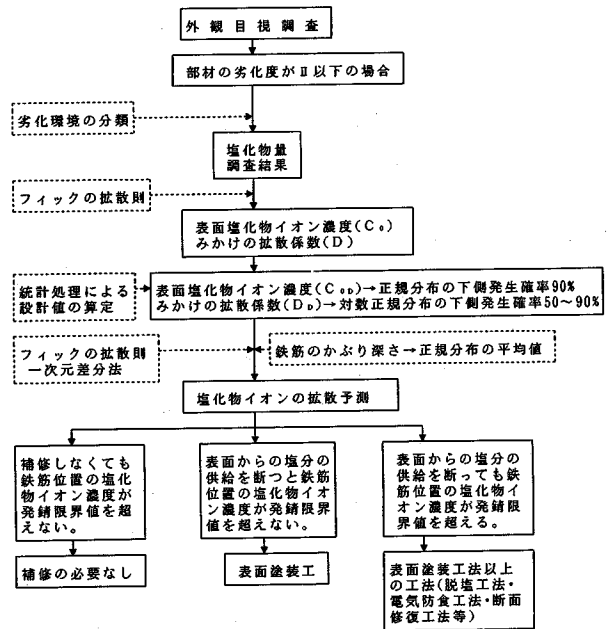


図-27 表面処理工法の適用性検討のながれ

用いられる工法であり、これまでに栈橋の劣化評価に用いられてきた(財)沿岸開発技術研究センターの劣化防止・補修マニュアル(案)²³⁾に従って劣化評価を行った場合、表面処理工法は表-1に示される「劣化度Ⅱ以下」の部材に対して適用が可能と考えられる。

従って、「劣化度Ⅱ以下」の部材に対して、「腐食環境の評価」「構造物の耐久性評価」を基に「 C_{od} 、 D_d 、 d_d 」を算出し、鉄筋位置の塩化物イオン量を計算して発錆限界値と比較する事により「補修の必要なし」「表面処理工法の適用可能」「表面処理工法の効果無し」を評価することが可能となる。

一方、「劣化度Ⅲ以上」の部材では既に鉄筋腐食が進行した状態にあり、鉄筋位置の塩化物イオン量も発錆限界値を超えているものと考えられる。従って、「電気防食工法」「断面修復工法」あるいは「脱塩工法」などを適用する必要がある。これらの工法の選定は、別途「施工性・経済性」を中心に評価して判定する必要がある。

(2) 表面処理工法の適用性検討の流れ

本文においては、表面処理工法の適用性の評価方法について検討しており、5章までの検討結果より、図-27に従って行うことが可能と考えられる。即ち、

- 劣化度Ⅱ以下の部材に対して塩化物イオン量の調査を行い、各コア毎に「表面塩化物イオン量(C_0)」および「塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D)」を求める。
- 部材の形状(梁、床版あるいは海面からの高さ)等から各部材を腐食環境ごとに分類し、それぞれの腐食環境ごとに C_0 のばらつきを正規分布と仮定して、「計算に用いる表面塩化物イオン量(C_{od} :ここでは下側発生確率90%の値)」を設定する。
- さらに、見掛けの拡散係数はコンクリートの配合が同じ場合には構造物全体から得られたデータをもとに、母集団のばらつきを対数正規分布と仮定して、「計算に用いる塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D_d :ここでは平均値～下側発生確率90%の範囲の値)」を設定する。
- これら C_{od} および D_d を用いて、塩化物イオンの拡散予測を行い、計算で考慮する「鉄筋のかぶり深さ(d_d :ここでは平均値)」の位置における、塩化物イオン量を算定して発錆限界値と比較することとなる。発錆限界値は、鉄筋の腐食速度との関係から、栈橋の環境条件ごとに異なるものと思われるが、本構造物と同様な環境条件であればおよそ「 2.00kg/m^3 (0.085対コンクリート重量%)程度が

表-2 表面塩化物イオン量と外観目視による平均的劣化度(コンテナ専用栈橋の場合)

調査位置(バース)		A	B	C	D	E	F	G	H
床	版	Ⅳ～Ⅴ 0.641	Ⅳ～Ⅴ 0.641	Ⅰ～Ⅱ 0.110	Ⅰ～Ⅱ 0.110	Ⅰ～Ⅱ 0.110	Ⅰ～Ⅱ 0.110	Ⅰ～Ⅱ 0.110	Ⅰ～Ⅱ 0.110
梁 (桁高が低い)	前面側	Ⅳ～Ⅴ 0.641	Ⅳ～Ⅴ 0.641	Ⅱ～Ⅲ 0.471	Ⅱ～Ⅲ 0.471	Ⅱ～Ⅲ 0.471	Ⅱ～Ⅲ 0.471	Ⅱ～Ⅲ 0.471	Ⅱ～Ⅲ 0.471
	中央	—	—	Ⅰ～Ⅱ 0.096	Ⅰ～Ⅱ 0.096	Ⅰ～Ⅱ 0.096	—	—	—
	護岸側	—	—	Ⅲ～Ⅳ 0.448	Ⅲ～Ⅳ 0.448	Ⅲ～Ⅳ 0.448	Ⅱ～Ⅲ 0.448	Ⅱ～Ⅲ 0.448	—
梁 (前面側で桁高が高い)	—	—	—	—	—	Ⅳ～Ⅴ 0.810	Ⅳ～Ⅴ 0.810	Ⅳ～Ⅴ 0.810	—

上段: 外観目視調査により得られた主要な劣化度(沿岸センターのマニュアル案に従った評価)
下段: 表面塩化物イオン量 C_0 (%)

一つの基準値と推測される。

e) このとき、5章の①に示した方法(表面処理工法が適用されていない場合)において、「 t :建設からの期間」を構造物に求められる供用年数として計算し、鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値を超えない場合は、計算上「補修の必要無し」と判断される。

f) また、5章の②によって計算した結果(共用の途中から表面処理工法を適用する場合)、鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値を超えない場合、「表面処理工法が有効」と評価される。

g) しかし、塗装後においても鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値を超える場合、塩化物イオンを含むコンクリートを取り除く「断面修復工法」や、電気化学的に防食する「電気防食工法」を検討する必要がある。

h) これらの検討結果より、経済性や施工性を考慮に入れて、栈橋全体の補修システムを構築する。

(3) コンテナ専用栈橋への適用事例

このような考え方に従って、コンテナ専用栈橋において表面塗装の適用性の検討を行った例を以下に示す。

a) 補修の要否判定

検討に当たっては、本構造物の重要性を考慮して、 C_{od} および D_d は「下側発生確率90%の値」を、 d_d は平均値を用いて行った。なお、この栈橋は検討時点までに建設されてから20年経過しており、今後少なくとも30年間の供用が計画されている。従って、供用期間(50年間)において、鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値を超えるか否かにより、表面処理工法の適用性を評価した。調査の結果より得られた C_{od} (下側発生確率90%の値)を表-2に示す²²⁾。この表は、A～Hの各バースにおいて、「床版」「一般部の梁」「前面側の梁」等の腐食環境に

分類し、それぞれの環境条件ごとに C_{od} を計算したものである。この表より、 C_{od} の大小と部材の劣化レベル(表-1によりI~Vで評価したもの)は比較的良く一致しており、 C_{od} は構造物の面している腐食環境を明快に表現していることがわかる。

劣化環境の穏やかな部分に位置する、中央の梁部材に対する表面処理工法の適用性の検討を行った結果を、図-28に示す。かぶりが小さいスターラップの位置においても、鉄筋位置の塩化物イオン量は発錆限界値を超えておらず、この部材は補修する必要がないものと評価される。

一方、現状において劣化の認められない、C~Hパースの床版の計算結果では、図-29に示すように、建設して30~40年後において、鉄筋位置(施工上配置された鉄筋位置)で塩化物イオン量が発錆限界値を上回るものと推測されるため、何等かの対策が必要であることがわかる。

b) 表面処理工法の適用性判定

補修が必要と考えられる床版(図-29)に対して、現時点(建設20年後)で表面塗装を施した場合、その後の塩化物イオン量の分布を図-30に示す。表面から9cm付近までの範囲で塩化物イオン量が低下し、鉄筋位置の塩化物イオンも発錆限界値を超えることは無いようである。従って、この床版の場合は表面処理工法が十分な効果を発揮するものと判断される。

一方、既に多量の塩化物イオンが含有され、塗装しても発錆限界値を超える部材も多く、この場合には表面処理工法を適用しても補修効果は期待できないものと評価された。

検討の結果、コンテナ専用栈橋においては、補修の必要がない部材としては、表-2に示す「C~Eパースの中栈橋の梁」であり、表面処理工法の採用が可能な部材としては、「C~Hパースの床版」であった。しかし、その他の部材には表面処理工法の適用が出来ないため、断面修復工法あるいは電気防食工法の適用が検討された²⁴⁾。

7. 構造物の耐用年数と塗装時期

前章に示した方法により、表面処理工法の適用性について検討を行うことが可能であるが、これを比較的簡単に行うためには、「計算に用いる表面塩化物イオン量(C_{od})」「計算に用いる見掛けの拡散係数(D_d)」から「鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値に達するまでの期間(t)」を事前に計算して図表化する必要がある。

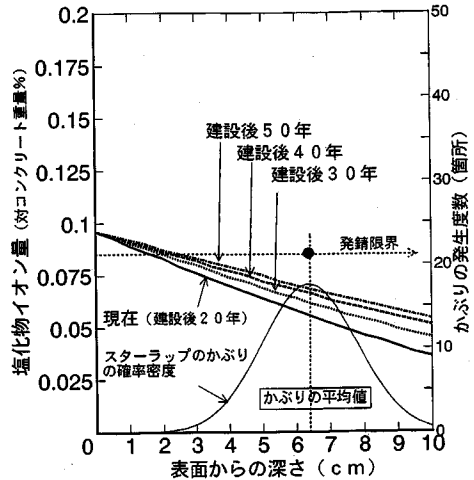


図-28 補修の必要のない梁の塩化物イオン量の予測計算結果(コンテナ専用栈橋)

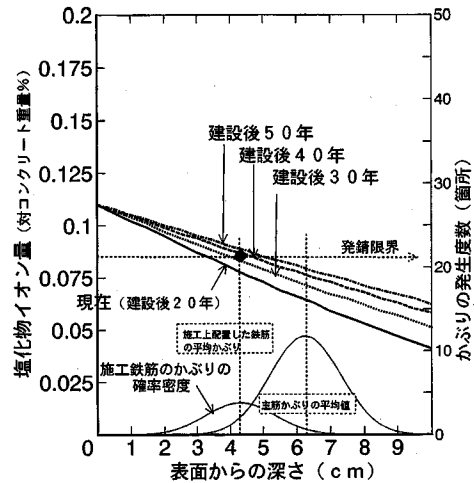


図-29 補修が必要な床版の塩化物イオン量の予測計算結果(コンテナ専用栈橋)

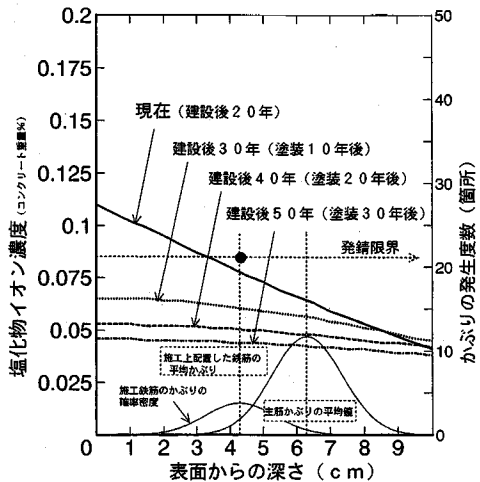


図-30 表面塗装を行った床版の塩化物イオン量の予測計算結果(コンテナ専用栈橋)

図-31は、5章①の方法により「鉄筋位置の全塩化物イオン量がコンクリート重量に対して0.085%になるまでの期間」を、かぶり10cmの場合について計算した結果である。

この(t)と供用年数を比較することにより「補修の必要性」を評価することが出来る。例えば、かぶり10cmの場合、調査の結果 $C_{od}=0.5\%$ 、 $D_d=3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ が得られたと仮定すると、鉄筋位置の塩化物イオン量が発錆限界値に到達する時期は、建設後およそ28~29年程度と想定される。この年数が構造物に求められる供用年数を下回っている場合は、供用中に補修を行う必要があるものと推測される。一方、劣化調査などを行って補修を検討しようとする時期が、この年数に近い場合、少なくとも表面処理工法の適用は既に難しいものと推測される。

そこで、構造物の供用年数を50年と仮定し、表面処理工法をいつ実施すれば良いか検討した結果を図-32に示す。これは、5章②に示す条件で計算したものである。従って、これらの図より C_{od} および D_d が得られれば、鉄筋位置の塩化物イオンが発錆限界値以下となる表面塗処理工法の適用時期tが得られる。先と同様に $C_{od}=0.5\%$ 、 $D_d=3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と仮定すると、かぶり10cmでは11~12年程度で表面処理工法を適用しなければならないことがわかる。さらに、この図より得られるtと構造物の経過年数を比較し、経過年数の方が計算値よりも長い場合その構造物は「既に表面処理工法の適用は不可」であることもわかる。

8. 結論

表面処理工法の適用性に関する評価方法を検討した結果、以下の結論を得ることができた。

- (1) 構造物が暴露されている腐食環境は、「表面塩化物イオン量(C_0)」によって評価することが可能であり、構造物の塩害に対する耐久性は「塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D)」と「かぶり(d)」によって、ばらつきを含めて評価することが可能であることが確認された。
- (2) 表面処理工法を行っても、既に浸透しているコンクリート中の塩化物イオンは引き続き拡散していくことが確認された。塗装後の塩化物イオン量の分布は、塗装前のみかけの拡散係数を用いて1次元差分法によって推定すれば、十分な精度で評価できることがわかった。
- (3) 表面処理工法の適用性は、構造物が暴露されている腐食環境の評価や構造物の耐久性評価をもとに、塩化物イ

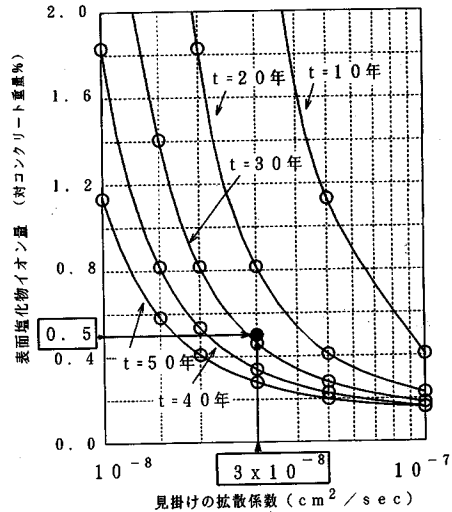


図-31 発錆限界到達までの年数の予測 (かぶり10cmの場合)

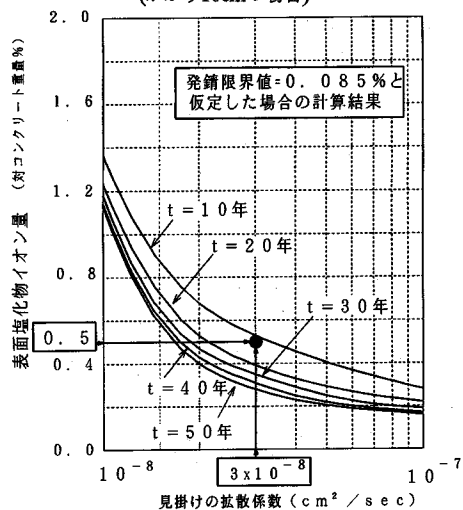


図-32 耐用年数を50年とした場合の表面処理施工時期の推定(かぶり10cmの場合)

オンの拡散現象を推測して評価することが可能と判断される。

(4) ここで行った検討の範囲では、 C_{od} を下側発生確率90%の値、 D_d および d_d を平均値(発生確率50%)として塩化物イオン量の予測を行うと、実構造物における劣化現象を比較的良く説明することができた。

(5) 表面処理工法の要否の判定や、補修の施工時期を想定できる図を提案した。

本文において、構造条件の異なる2種類の既設構造物から得られたデータを基に、表面処理工法の検討方法を提案

した。検討対象とした構造物の数が少ないために、この検討法がどの程度の汎用性を持つか、あるいは塩化物イオンの移動現象を単純化したこと、腐食速度の問題さらには環境条件の違いによる塩化物イオンの発錆限界値等についての検討は十分ではない。

また、表面処理工法に用いられる、補修材料自体の耐久性についての評価も行っていない。今後、これらの項目についても検討して行きたい。

謝辞：本論文は、LNG 棧橋の劣化・補修後調査においては、東京ガス(株)小笠原健氏、三浦成夫氏のご協力を得た。また、コンテナ専用埠頭の調査データは(財)東京港埠頭公社佐々木栄三氏、川田秀夫氏にご協力頂いた。さらに、コンテナ専用棧橋の劣化調査・補修に関する「マニュアル作成研究会」に参加された学識経験者、専門家からも多くの助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Takagishi, Y., Ichikawa, H., Tabuchi, H., Moriwake, A.: An experimental study on deterioration and repairing of a marine concrete structure, Concrete in Marine Environment, CANMET/ACI, pp.253-276, 1998.
- 2) 片脇清士, 守屋進, 西崎到, 佐々木巖: 塩害補修被覆工法とその効果-暴露実験をもとに-, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集, (社)日本コンクリート工学会, pp.1-6, 1992.12.
- 3) 工藤文弘, 広谷亮, 守分敦郎, 安田正樹: 補修された棧橋の耐久性について, 第13回コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, pp.899-904, 1991.
- 4) 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, 第514/V-27, pp.111-122, 1995.8.
- 5) 耐久性専門委員会報告: 耐久性を阻害する要因マップその三 (D-3), (社)セメント協会, 1988.6.
- 6) 大即信明, 長滝重義, 福手勲, 中下兼次: 港湾での鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No.472/V-20, 1993.6.
- 7) 守分敦郎, 三浦成夫, 長滝重義, 大即信明: 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, 第520/V-28, pp.99-110, 1995.8.
- 8) 守分敦郎, 三浦成夫, 西川正夫, 秋葉泰夫: コンクリート表面に塗られて8年経過した塗膜の耐久性について, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.680-681, 1994.9.
- 9) 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)-改訂版-, (社)日本コンクリート工学会, p3, 1983.2.
- 10) (財)東京港埠頭公社, (財)沿岸開発技術研究センター: 平成3年度大井埠頭棧橋劣化調査報告書, p.47, 1991.3.
- 11) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 海洋暴露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定, コンクリート工学年次論文報告集13-1, pp.595-600, 1991.
- 12) 星野富雄, 魚本健人, 守屋正裕: 海洋環境下におけるコンクリートへの塩化物イオンの浸透と暴露環境に関する検討, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, (社)日本コンクリート工学会, pp.1-6, 1994.10.
- 13) Nagataki, S., Otsuki, N. and Wee, T.: Condensation and binding of intruded chloride ion in hardened cement matorix material, Proc. of JSCE, No.414/V-12, pp.205-215, 1990.2.
- 14) Richartz, W.: Die Binding von Chlorid bei der Zementerhartung, Zement-Kalk-Gips, Helf 10, pp.447-456, 1969.
- 15) 小林一輔, 白木亮司, 河合研司: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫酸化物およびアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, 第1巻第2号, pp.69-82, 1990.7.
- 16) 丸屋剛, SOMNUK, T., 松岡康訓: コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究, 土木学会論文集 第442/V-16, pp.81-90, 1992.2.
- 17) Stratfull, R.F.: Corrosion autopsy of a structurally unsound brige decks, HRR433, 1973.
- 18) Stewart, C.E.: Consideration for repairing salt damaged brigege deck, ACI Journal Vol.72, No.12, pp.685-713, 1975.12.
- 19) 大即信明, 横井聰之, 下沢治: モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文集 第360/V-3, pp.111-118, 1985.8.
- 20) 宮川豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985.2.
- 21) 関博, 金子雄一: コンクリート部材の寿命予測-鉄筋の腐食を中心として-, コンクリート工学 Vol.29, No.8, pp.15-23, 1991.8.
- 22) 佐々木栄三, 関博, 川田秀夫: 大規模棧橋の維持管理システムと補修計画の策定, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, (社)日本コンクリート工学会, pp.177-184, 1994.10.
- 23) (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), 1987.
- 24) (財)東京港埠頭公社: 大井埠頭棧橋劣化調査・補修-マニュアル(案)-, 1994.3.

(1995.4.10受付)

A DESIGNING METHOD OF SURFACE COATINGS FOR CONCRETE JETTIES DETERIORATED BY CHLORIDE ATTACK

Atsuro MORIWAKE, Shigeyoshi NAGATAKI, Nobuaki OTSUKI,
Hiroshi SEKI and Tsutomu FUKUTE

In this paper, A designing method of surface coatings for jetties deteriorated by chloride attack is proposed. The designing method includes "Evaluation of marine environment by concentration of surface chloride (C_0)", "Evaluation of durability of structures by apparent diffusion coefficient(D)", and estimation method of chloride ions in concrete by Fick's law with one dimensional difference equation.

The method is understood to have good accuracy when the estimated deterioration period of structures and that of actual concrete structures are compared. The numbers of " C_0 " and " D " are evaluated under the probability study of data sampled from the actual concrete structures.