

# 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

守分敦郎<sup>1</sup>・長滝重義<sup>2</sup>・大即信明<sup>3</sup>・三浦成夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 東京工業大学大学院博士課程(東亜建設工業勤務) (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup> 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)

<sup>3</sup> 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)

<sup>4</sup> 東京ガス(株)袖ヶ浦工場 施設部(〒299-02 千葉県袖ヶ浦市中袖 1-1)

本研究は、塩害対策として行われてきたコンクリート表面処理工法のうち、表面塗装の補修効果について、塩化物イオンの拡散過程を整理することにより検討を行ったものである。検討方法としては、塗装されて8年経過したコンクリート構造物の、含有塩化物イオン濃度を測定し、塗装時に得られた濃度分布との違いから、塗膜を施すことによって内部の塩化物イオンがどの様に移動するか確認した。さらに、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の履歴を差分法により求め、目視調査によって得られた鉄筋腐食判定との関連を検討した。この結果、表面塗装は塩化物イオンを遮断するが、塗装後の塩化物イオンがフィックの拡散則に従って移動するため、コンクリート中の塩化物イオン量が多い場合、塗装による補修効果は得られないことが確認された。

**Key Words:** concrete surface coating, chloride diffusion, fick's law, difference equation, existing structure, marine environment, durability

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の塩害対策としての工法が多様化し、構造物の劣化状況に合せた工法の適用が重要となってきた。これまでに数多く施工されてきた補修工法としては、「表面処理工法」や「断面修復工法」があげられる。しかし、表面処理工法は、コンクリート中の塩化物イオン浸透量が多い場合には、比較的早い時期に再劣化の発生する可能性のあることが指摘されている<sup>1)2)3)</sup>。また、部分的な断面修復工法においては、マクロセル腐食の発生する可能性のあることが指摘されている<sup>4)5)</sup>。

このような欠点を補うために、「電気防食工法」<sup>6)</sup>や「電気化学的脱塩工法」<sup>7)</sup>等が実用化され、具体的な構造物へ適用されてきている。

しかし、多様な補修工法を使い分けるためには、それぞれの工法の特徴と、どのような場合に補修効果が得られるかを明確にすることが重要である。

本研究は、表面処理工法が補修効果を発揮するために必要な条件について、コンクリート中の塩化物イオン量により評価検討した。検討に当たっては、塗装を施して8年経過した既設コンクリート構造物の塩化物イオン量調査を行い、1次元の差分法により塩化物イオンの挙動を追跡し、塗装後の鉄筋腐食との関係について検討した。

## 2. 研究の流れ

既設コンクリート構造物は、供用状態や部材の位置などにより、コンクリート中に供給される塩化物イオン量は大きく異なる場合が多い。さらに、配置された鉄筋の位置やコンクリートの塩化物イオン拡散係数の値にも「ばらつき」があり、顕在化する劣化現象も多様である。このような種々の「ばらつき」を持つ構造物の劣化現象に対して、補修工法としての表面塗装の適用性について、以下のながれに従って検討を進めた。

- ① 構造物の劣化環境の評価：外部環境からコンクリート中へ供給される塩化物イオンは、塩化物イオン調査結果にフィックの拡散方程式を近似させ、表面塩化物イオン濃度( $C_0$ )を算出し評価した。さらに、鉄筋腐食に大きな影響を与える「かぶり」についても、はつり調査あるいは非破壊試験により測定した結果を整理した。
- ② 劣化過程と補修後8年経過した後の状態：補修時における劣化状態と表面塗装による補修後の劣化状況について、既設構造物の調査結果の例を示した。
- ③ 塩化物イオンの拡散過程：表面塗装を実施した後の、コンクリート中の塩化物イオンの移動について、1次元差分法あるいは、2次元FEM解析を用いて計算した。
- ④ 鉄筋位置における、塩化物イオン量の履歴の計算結果は、鉄筋腐食の有無と関連させて検討した。
- ⑤ 以上の検討から、表面処理工法における補修効果につ

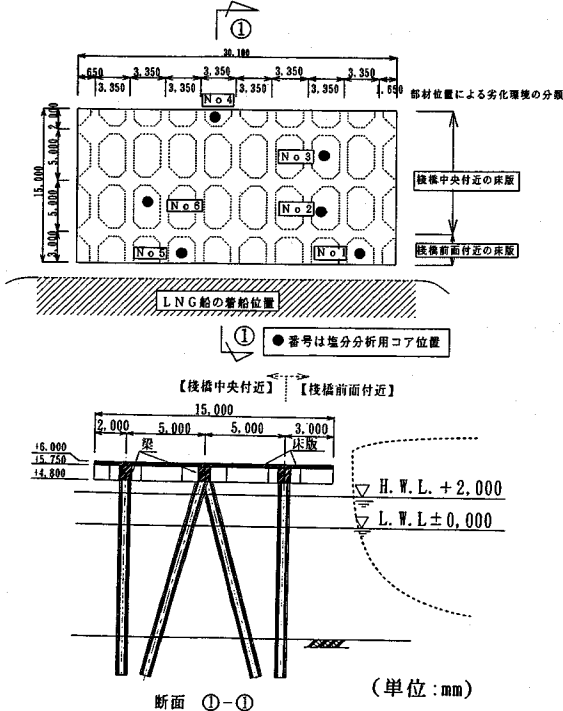
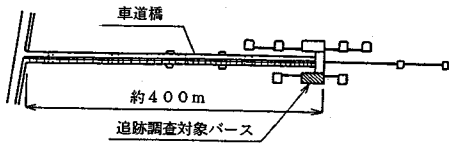


図-1 栈橋の概略図

いて検討を加えた。

### 3. 構造物の概要と劣化環境

#### (1) 構造物の概要

検討対象とした構造物は、東京湾に約400m突出した鋼管杭式栈橋であり、その概要を図-1に示す。塩害劣化が問題となった上部工の梁および床版は、それぞれL.W.L.+4.80mおよび+5.75mの位置にあった。また、建設地点における最大波高は約3.0mであり、海洋コンクリート構造物の防食指針(案)<sup>8)</sup>によれば、栈橋上部工の環境条件は、飛沫帯あるいは海上大気中と分類される。

栈橋に使用されたコンクリートは、設計基準強度が210kgf/cm<sup>2</sup>、水セメント比が50%の、表-1に示す配合のものが用いられた。

鉄筋は、設計図面によると図-2に示すように配筋されており、梁では主筋D19が15cmピッチで、スターラップはD16が30cmピッチでそれぞれ配筋されて

表-1 コンクリートの配合

G max (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					セメント	水	粗骨材	細骨材	AE減水剤
2.5	1.2	4	5.0	41.8	30.2	15.1	112.0	79.5	0.121

注) 設計基準強度  $f'_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$   
 セメント:普通ポルトランドセメント  
 細骨材:山砂, FM 2.62, 表乾比重 2.61  
 粗骨材:川砂利, FM 6.98, 表乾比重 2.66

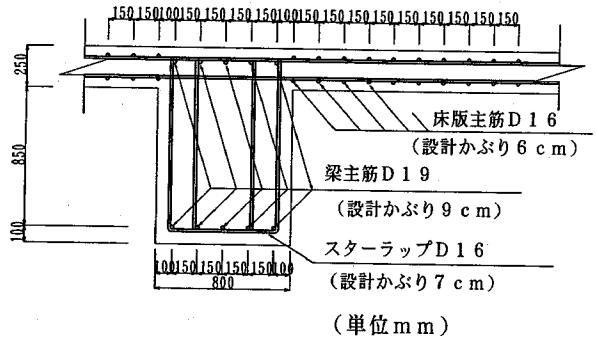


図-2 栈橋の配筋図

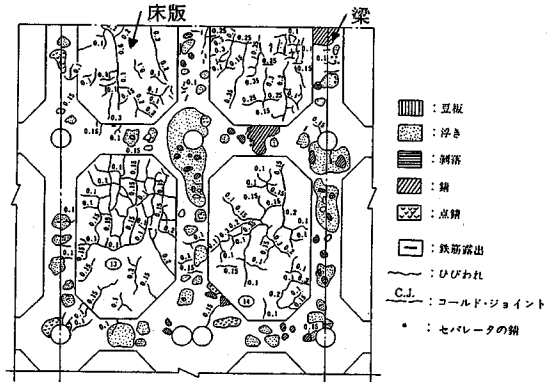


図-3 栈橋下面の劣化状況

おり、梁の主筋のかぶり厚は9cm、スターラップのかぶり厚は7cmであった。一方、床版にはD16の鉄筋が15cmピッチで6cmのかぶり厚で配置されていた。

構造物は昭和47年に建設され、建設後14年経過した頃に塩害による劣化が確認された。栈橋下面に見られた劣化の一例を図-3に示す。

#### (2) 鉄筋位置

構造物のかぶり厚は、劣化調査の結果から床版の主筋は図-4、梁のスターラップは図-5に見られる度数分布を示した。床版の主筋のかぶり厚は、平均6.3cm標準偏差が1.1cmであった。一方、スターラップの場合は、平均

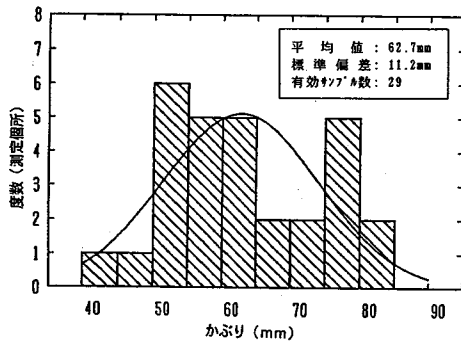


図-4 床版主筋のかぶりの度数分布

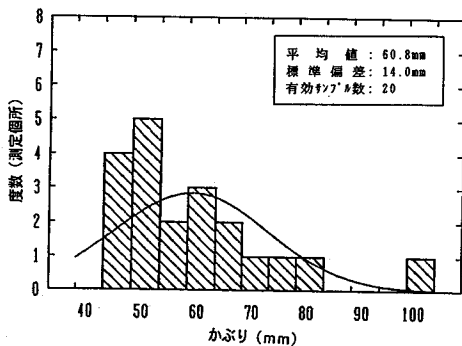


図-5 梁スターラップのかぶりの度数分布

が6.1 cm, 標準偏差は1.4 cmを示しており, 設計値に比較して小さい値であった. 劣化調査の結果, 梁下面の浮き・剥離はスターラップの腐食に起因していることが確認された.

### (3) 塩化物イオン量分布

建設約15年経過後(補修工事直前)において実施した, 床版底面における塩化物イオン量の調査結果を図-6に示す. この図から明らかなように, 栈橋前面側の床版の塩化物イオン量は, 栈橋中央側の床版に比較して大変高いことが確認された. これは, 着船時に船体に散布される海水の影響と考えられ, 栈橋の供用状況によっては局所的に劣化環境が異なるものと推測される. 従って, 栈橋の補修においては供用状況等も十分配慮して行わなければならないことがわかる.

### (4) 構造物の環境条件

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は, 「濃度拡散」「塩化物イオンの濃縮とフリーデル氏塩による固定化」<sup>9),10)</sup>あるいは「炭酸化による塩化物イオンの移動と濃縮」<sup>11)</sup>等の複雑な影響を受ける. また, 浸透過程では可溶性塩化物イオンだけでなく,  $C_3A$ 水和物等へ吸着した

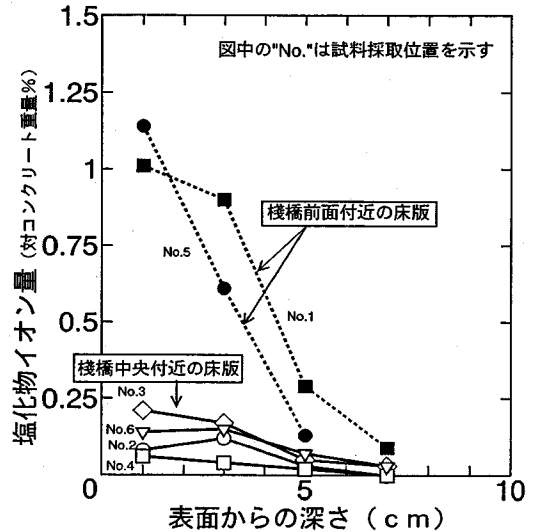


図-6 床版底面の塩化物イオン量

塩化物イオン<sup>12)</sup>も移動可能となることが考えられる. さらに, 試験方法(溶出時間, 溶出温度など)の違いによっても, 得られる可溶性塩化物イオン量が異なることを考慮に入れて, ここでは全塩化物イオンの測定結果を対象に議論を進めた.

また, 塩化物イオンの浸透現象については, フィックの拡散則を用いて評価した. 従って, 塩化物イオンの移動現象を正確に表現するための厳密性は若干犠牲となっている. これは, 既設コンクリート構造物が示す「表面から供給される塩化物イオン量のばらつき」や「コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数のばらつき」を, できるだけ明快に整理することを目的としたためである.

これまでも, マクロ的には式(1)で示される, フィックの拡散方程式が塩化物イオンの浸透過程を説明できると言われてきた<sup>13)</sup>.

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

ここに  $C(t,x)$ : 時間  $t$ , 距離  $x$  における塩分量(%)

$C_0$  : 表面塩化物イオン量(%)

$x$  : 表面からの距離(cm)

$t$  : 経過時間(sec)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

$D$  : 見かけの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

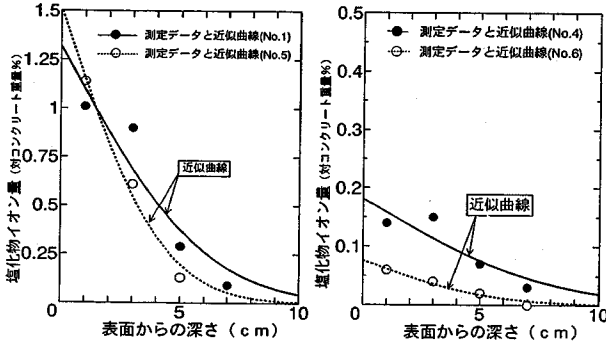


図-7 塩化物イオンの近似曲線

この式を用いると、「構造物の面している塩害環境」は「表面塩化物イオン量;  $C_0$ 」を用いて整理することが可能である。さらに、「コンクリートの保有する塩害に対する耐久性能」を、塩化物イオンの浸透速度の面から評価すると、「見掛けの拡散係数;  $D$ 」を用いて検討することも可能と思われる。

これらの値は、劣化調査における全塩化物イオン量の測定結果に、式(1)を最小二乗法で近似させることにより求めることができる。このとき、「表面塩化物イオン量」は建設後数年の間に増加し、やがて比較的安定した状態となることが推測されるが<sup>14)</sup>、安定するまでの期間は港湾構造物の場合は比較的短いものと想定されるため、ここでは「建設当初から見かけの表面塩化物量は一定」と仮定した。

本構造物において、J C I 規準に従って全塩化物イオン量を求め<sup>15)</sup>、これに式(1)を近似させた例を「棧橋前面側の床版」および「棧橋中央側の床版」について図-7に示す。測定値には、塩化物イオンの濃縮現象等の影響と思われる分布形状も見られるが、全体的な傾向は濃度拡散則に従っていることが理解される。

この近似を測定点毎に行った結果、表面塩化物イオン量 ( $C_0$ ) の頻度分布は、棧橋前面側の床版とそれ以外に分けると図-8および図-9のようになった。データ数が少ないために母集団の分布形状を正確に推定することは難しいが、「前面側の床版」における平均値は1.58%であり、「中央付近の床版」の平均値0.23%と比較すると、大変大きい値を示しており、両者は明らかに異なる塩害環境にあるものと考えられる。

従って、棧橋構造物の塩害環境は表面塩化物イオン量を用いる事によって、それぞれの位置における塩化物イ

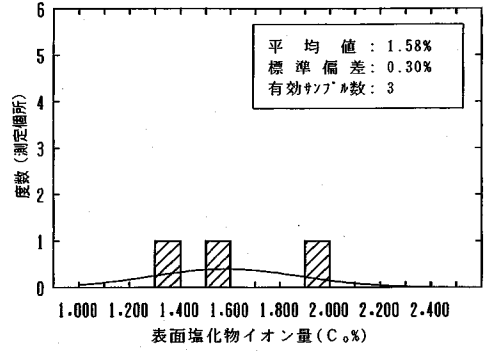


図-8 棧橋前面側の表面塩化物イオン量の度数分布

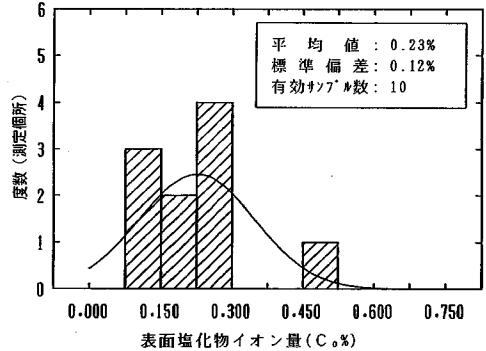


図-9 棧橋中央付近の表面塩化物イオン量の度数分布

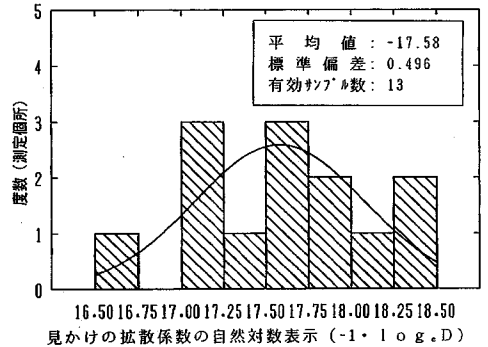


図-10 棧橋全体の塩化物イオンの拡散係数の度数分布

オンの供給量の違いを評価することができるものと思われる。ただし、表面塩化物イオン量はコンクリート中の塩化物イオン量分布から推定されるため、見掛けの拡散係数の影響を受ける。従って、コンクリートの材質(W/C等)が異なる場合には、各コンクリートの材質ごとに整理して評価する必要がある。

#### (5) 見掛けの拡散係数

塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、コンクリートのW/Cや使用された粉体の種類あるいは施工の良否に大き

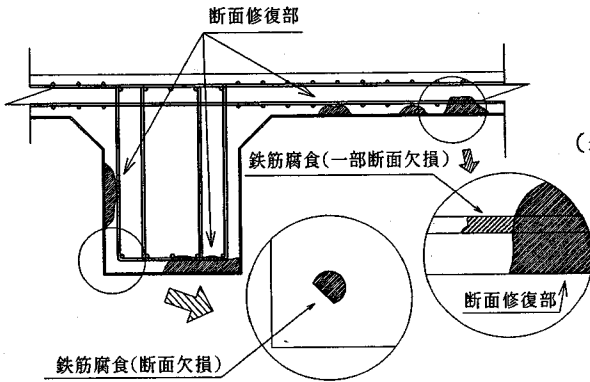


図-11 補修後の鉄筋の腐食状況

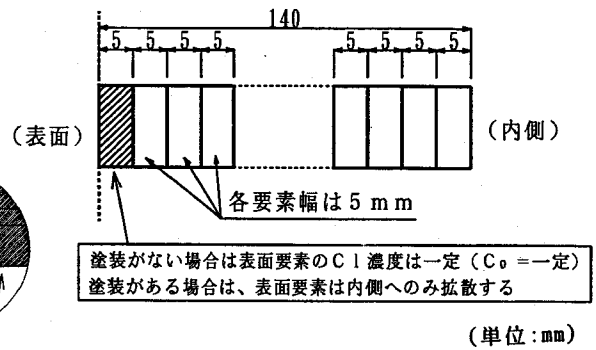


図-12 分割した要素のモデル図

な影響を受けるとされており、構造物の塩害に対する耐久性を推測するための重要な指標である。劣化調査の結果より得られた見掛けの拡散係数の分布の例を図-10に示す。同図は、横軸に拡散係数の(自然)対数を取って整理したものである。この度数分布から、この構造物の見掛けの拡散係数は対数正規分布に従ってばらつくものと推定される。さらに、測定された見掛けの拡散係数の平均値は、「 $2.33 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 」( $\exp(-17.58)$ )、また90%確率は「 $X + 1.28 \cdot \sigma$ 」( $\exp(-17.58 + 1.28 \times 0.496)$ )であることより、「 $4.39 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 」であった。

以上より、構造物の保有する耐久性能は、見掛けの拡散係数を整理することにより、構造物の品質のばらつきも含めて評価することが可能であることがわかった。しかし、見掛けの拡散係数がどのような分布形状に従うか、今後数多くの構造物について整理してみる必要がある。

#### 4. 補修方法とその後の劣化状況

ここで検討した構造物の補修は、浮き・剥離の見られる箇所についてはポリマーセメントコンクリートあるいは樹脂系の材料による断面修復工法を用い、その後栈橋上部工の下面全体に対してポリブタジエン樹脂系の塗膜を中塗り材として用いた表面塗装が施された。塗膜自体の耐久性については、8年経過後も十分な耐久性を保持していた<sup>16)</sup>。

一方、コンクリート中の鉄筋に見られた腐食状況を整理すると図-11に示す状況にあった。即ち

① 表面塗装時に、既にコンクリート中の塩化物イオンが多い部分(栈橋前面の床版)においては、8年経過後において、内部鉄筋に部分的断面欠損を伴う全面腐食が確認された(「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」<sup>8)</sup>による劣化度Ⅱ～Ⅲ)。

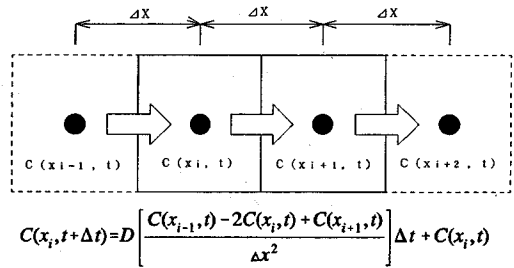


図-13 差分法による拡散方程式の概念

② 梁の隅角部に配置された鉄筋は、塗装により補修した後においても、断面の1/5程度の欠損を伴う腐食が認められた(同劣化度Ⅲ)<sup>17)</sup>。

③ ポリマーセメントあるいは樹脂系の修復材により断面修復された境界部の鉄筋は、既設コンクリート側で全周にわたって断面欠損を伴う腐食の進行が認められた(同劣化度Ⅲ)<sup>17)</sup>。

#### 5. 塗装後の塩化物イオン濃度分布の変化

##### (1) 塩化物イオンの変化

表面処理工法は、コンクリート中に塩化物イオンを残したまま表面を覆うこととなるため、たとえばコンクリート表面に塗装を行った後においても、濃度の高い表面付近の塩化物イオンは内部へ再度拡散する傾向にある<sup>17)</sup>。この結果、鉄筋位置の塩化物イオン量は塗装後も引き続き高くなることが考えられる。

ここでは、表面処理工法を行った後の塩化物イオンの変化を追跡してみた。検討方法としては、表面塗装施工時の調査より得られる塩化物イオン量の分布と、ほぼ同位置(1m以内)で塗装8年後に調査して得られた分布を比較し、その違いを検討した。

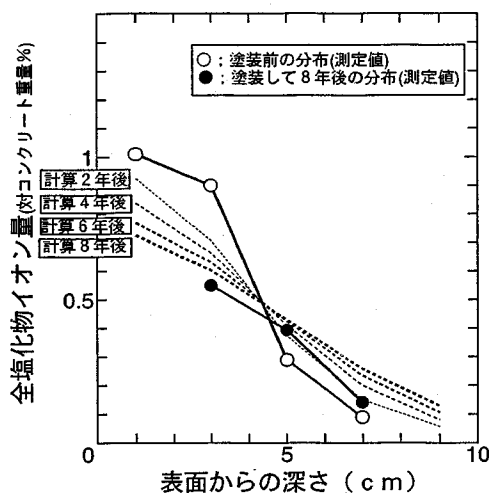


図-14 塩化物イオン量の変化(No.1)

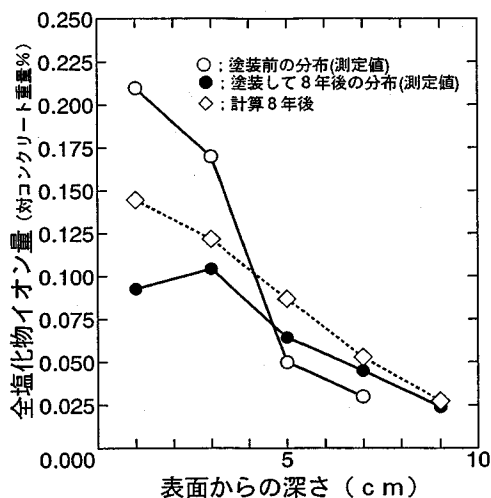


図-16 塩化物イオン量の変化(No.3)

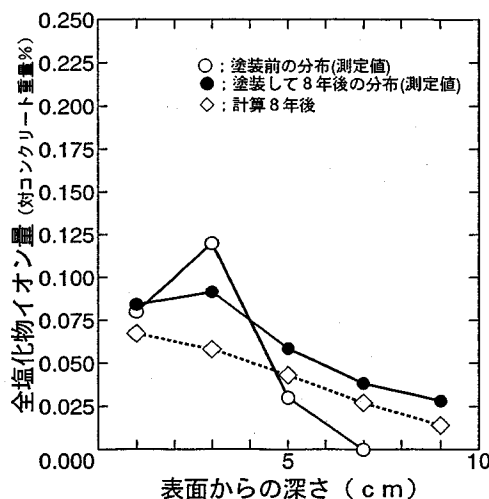


図-15 塩化物イオン量の変化(No.2)

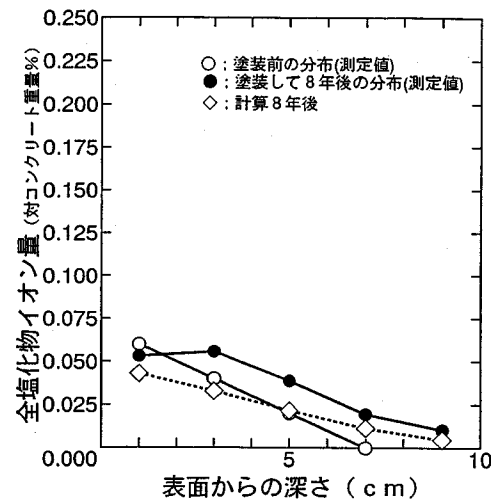


図-17 塩化物イオン量の変化(No.4)

さらに、その変化を定量的に評価することを目的として、図-12に示すように要素分割した一次元の差分法によって(図-13)、塩化物イオンの拡散現象を解析的に検討した。この解析は以下の仮定のもとで行った。

- ① 補修時点におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度を初期値とする(各要素には実測値を線形補完して代入した)。
- ② 塗装後は、表面からの塩化物イオンの供給は無いものとし、内部の全塩化物イオンは各要素間の濃度勾配に従って拡散する。
- ③ 塗装後の拡散係数は、水分の移動や中性化速度が遅くなること等の影響により、塗装前と異なることも考えられるが、ここでは塗装後の見掛けの拡散係数は、塗装前と

同様と仮定して計算を行い、実測値とどの程度一致するか比較検討した。

劣化環境の厳しい「栈橋前面側の床版」について、塗装前および塗装して8年経過後に行った塩化物イオン量の実測値と、先の仮定のもとで行った計算結果を比較して図-14に示す。

同図から、表面付近の高い塩化物イオン量が、塗装後8年間で、内部へ拡散していく様子が確認される。さらに、差分法により求めた数値解においても、塗装後の経過年数に従って、塩化物イオンが内部への浸透する過程を表現することができ、8年後の計算結果は実測値と良い一致を示していることが確認される。

同様に行った他の調査位置における結果を、図-15～図-19に示す。これらの図を見ると、コア採取位置の違

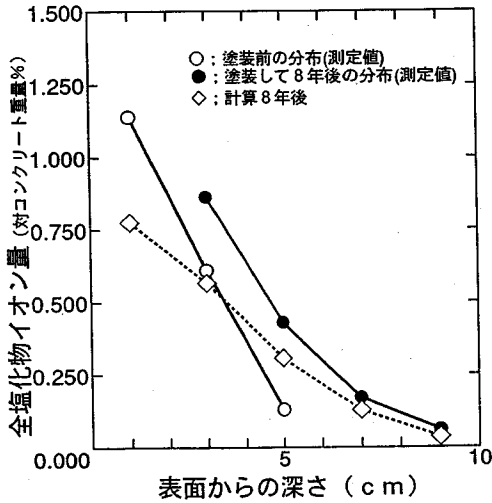


図-18 塩化物イオン量の変化(No.5)

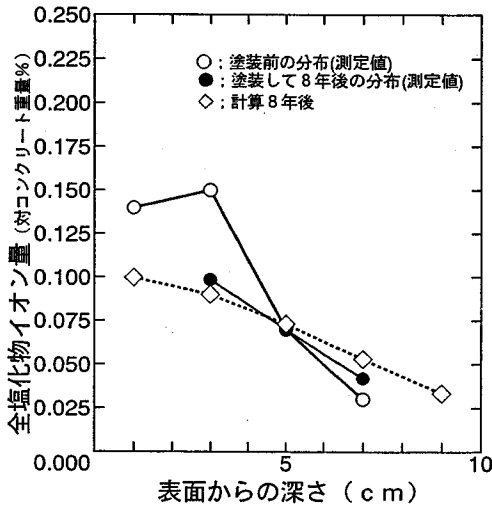


図-19 塩化物イオン量の変化(No.6)

いかなる原因と思われるデータのばらつきは見られるものの、計算値と実測値は比較的良く一致しており、塗装後の拡散係数は、塗装前と同じとしても大きな間違いはないようである。さらに、いずれの調査結果においても表面から5.0cm程度までの部分の塩化物イオン量が低下し、それより深い位置で増加傾向にあることが確認される。

## 6. 鉄筋腐食と塩化物イオンの履歴

栈橋前面側の床版は、4章に示したように、塗装時点でコンクリート中の塩化物イオン量が多い場合は、表面塗装を行っても内部鉄筋の腐食の進行が確認された。しかし、塩化物イオン量の少ない部分では、表面塗装後の

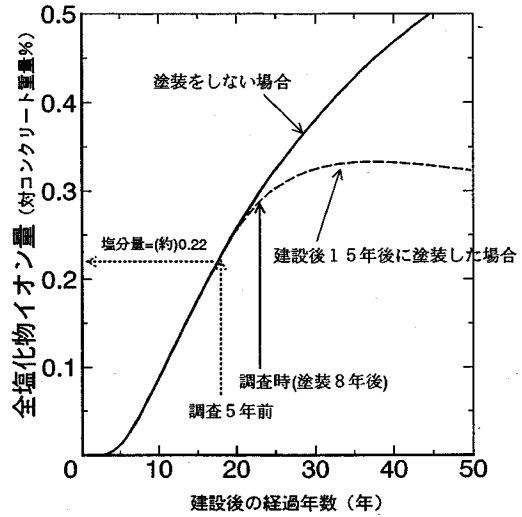


図-20 鉄筋位置の塩化物イオンの履歴の推定値(No.1)

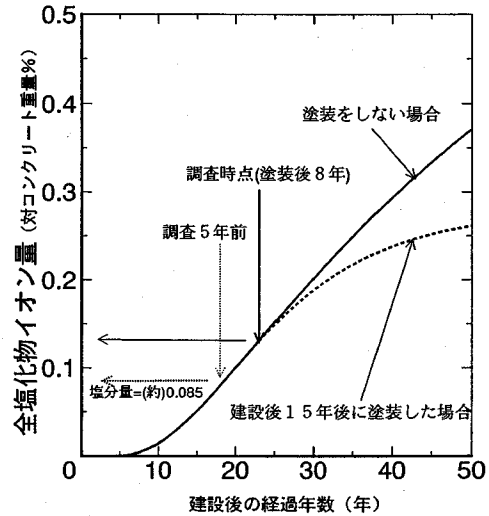


図-21 鉄筋位置の塩化物イオンの履歴の推定値(No.5)

鉄筋には腐食が確認されておらず、塩化物イオン量と補修効果には密接な関係のあることが推測される。また、梁の隅角部の鉄筋は、表面塗装後においても腐食が確認されており、この位置の塩化物イオン量が多いことも推定される。

従って、ここではコンクリート中の鉄筋が、これまでにどのような塩化物イオンの履歴を受けたか、5章で行った数値解析法を用いて計算し、鉄筋腐食の調査結果と比較して表面処理工法の効果を検討した。

### (1) 塩化物イオン履歴の計算方法

解析は、以下の条件のもとで行った。

- ① 劣化調査に得られたデータから、「 $C_0$ 」および「D」を算定する。

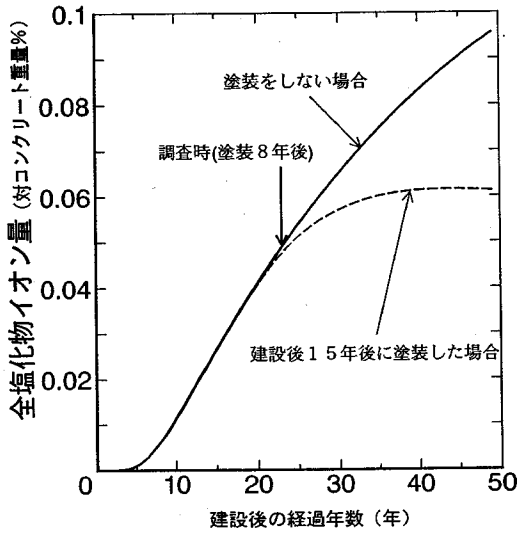


図-22 鉄筋位置の塩化物イオンの履歴の推定値(No.3)

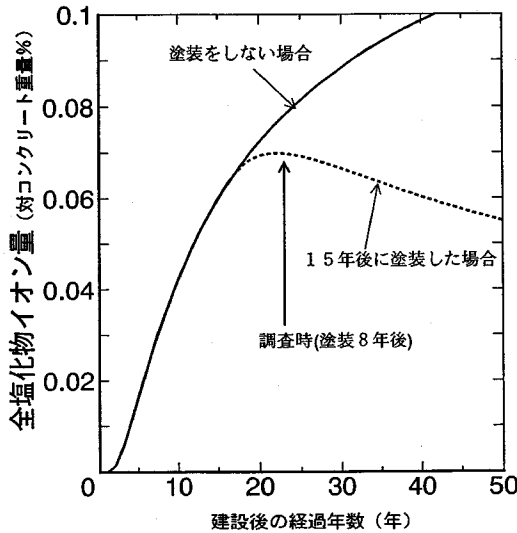


図-23 鉄筋位置の塩化物イオンの履歴の推定値(No.6)

- ② 塗装前の15年間は、「 $C_0$ 」が一定として、式(1)を用いてコンクリート中の塩化物イオン量を求めた。
- ③ 塗装後の8年間は、表面から塩化物イオンの供給がないものとし、コンクリート中の塩化物イオンは見掛けの拡散係数「 $D$ 」で再拡散するものと仮定した。計算には一次元差分法を用いた。

(2) 鉄筋腐食の見られた床版(栈橋前面側)

調査で得られた、みかけの拡散係数およびかぶりをを用いて計算した、鉄筋位置の塩化物イオン量を図-20および21に示す。塩化物イオン量は、塗装後においても増加しており、塗装して8年(建設されてから23年)経過しても、まだ増加傾向にあることがわかる。この位置では

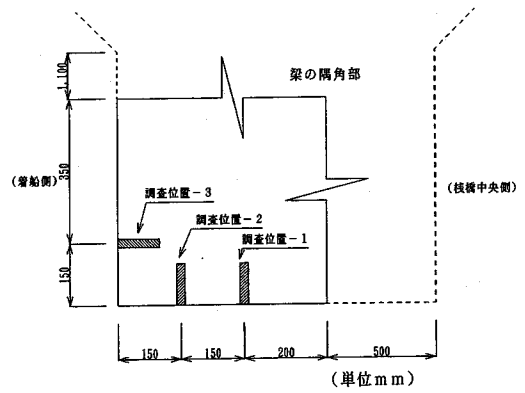


図-24 隅角部の調査位置

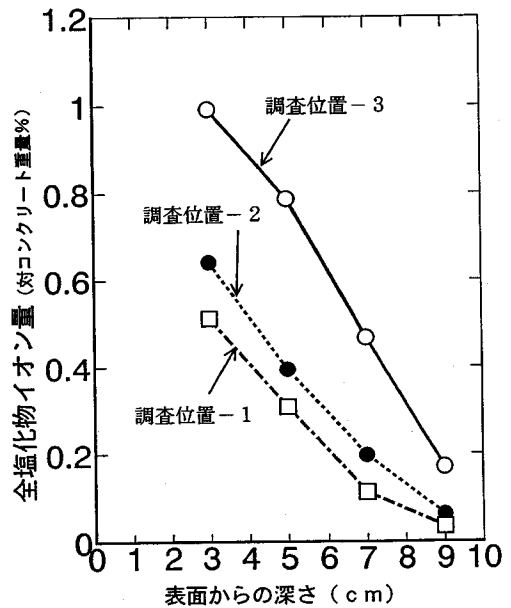


図-25 隅角部の塩化物イオン量分布

表面塗装後においても鉄筋腐食が確認されており、腐食は引続き進行するものと推測される。しかし、塗装を施さない場合に比較すると、飛来塩分が塗装によって遮断されるため、長期的にはコンクリート中に浸透する塩化物イオン量は低い値になるものと推測される。

(3) 鉄筋腐食の見られなかった床版(栈橋中央付近)

栈橋中央付近の調査データをもとにした解析例を、図-22および23に示す。解析結果によると、塗装後においても塩化物イオン量は増加傾向を示しているがその値は小さく、また補修後の調査において鉄筋腐食は確認されていないことより、表面塗装により十分な補修効果が期待できるようである。



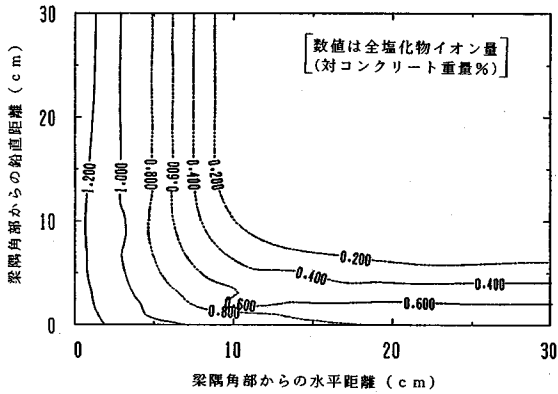


図-26 塩化物イオンの断面内の分布(実測データより推定)

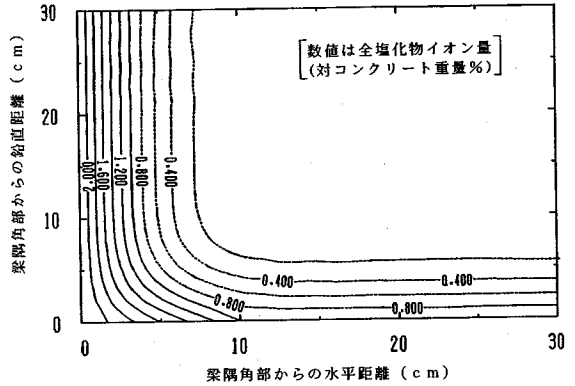


図-28 FEM解析結果(建設11年後の分布)

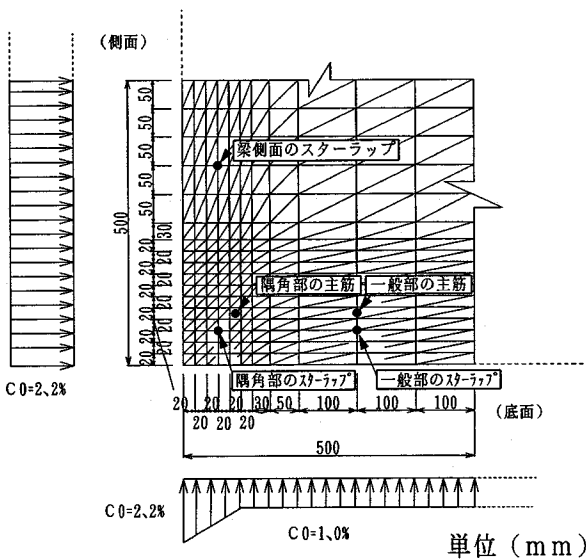


図-27 隅角部のFEM解析モデル

#### (4) 梁隅角部

本構造物においては、梁の隅角部の鉄筋腐食が顕在化し、塗装面にまでひびわれを発生させた。この理由を検討するために、同様な補修が行われた梁の隅角部を中心に、図-24に示すように塩化物イオンの調査を行った。測定結果を図-25に示す。また、これらのデータから隅角部の断面内の塩化物イオン分布を推測した結果を図-26示す。着船側の梁側面からの塩化物イオンの供給が多く、隅角部では底面と側面の両方からの浸透の影響が推測された。

このデータより、隅角部の塩化物イオン濃度の履歴を推定するために、2次元拡散方程式を用いて検討した。

2次元の拡散方程式は、X方向Y方向いずれも同じ拡散数を持つとすると、式(2)のように表現される。

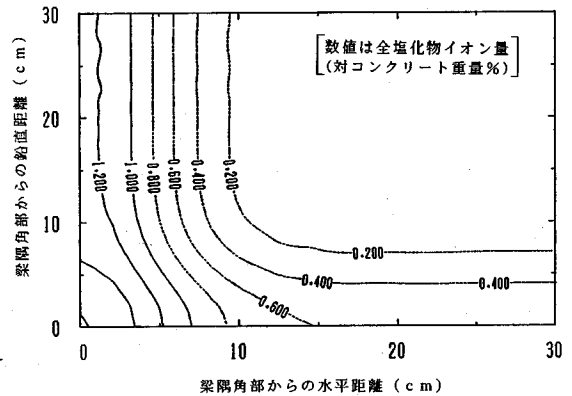


図-29 FEM解析結果(塗装8年後の分布)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

ここに、  
C：時間 t, 要素位置(x,y)における塩化物イオン量(%)  
D：見かけの拡散係数(cm<sup>2</sup>/sec)

この式は2次元の熱伝導問題と同様な形であり、これをFEMで解く場合には、例えばJCIの温度解析プログラム<sup>18)</sup>を用いて、物性値を以下のように見直して解析することも可能である。

$$D = \frac{\lambda}{C_c \cdot \rho} \quad (3)$$

ここに D：見かけの拡散係数(cm<sup>2</sup>/sec)

C<sub>c</sub>:比熱(kcal/kg·°C)

ρ:比重(kg/cm<sup>3</sup>)

λ:熱伝導率(kcal/cm·sec·°C)

解析は、梁隅角部を図-27に示す形状でモデル化した。

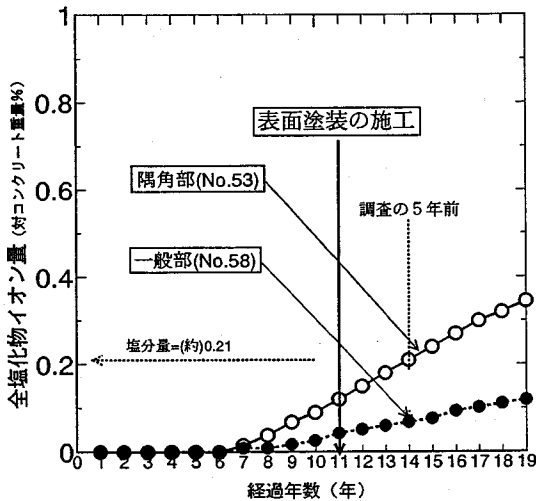


図-30 主筋位置での塩化物イオンの履歴(かぶり8cm)

解析に用いた条件は以下の通りである。

- ① この梁の場合、建設後11年目に表面塗装が施工され、調査まで8年経過していた。調査の結果から、 $C_0$ を逆算すると「梁側面で $C_0=2.2\%$ 」「梁底面で $C_0=1.0\%$ 」となったため、図-27に示すような $C_0$ の分布を仮定した。また、拡散係数は平均「 $2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 」であった。
- ② 塗装されるまでのコンクリート中の塩化物イオン量の計算は、表面節点の濃度をそれぞれの位置における $C_0$ の値に固定して11年間の浸透計算を行った。
- ③ 塗装後の計算では、表面節点における塩化物イオンの拡散は、コンクリート内部方向のみとして、8年間の濃度変化を計算した。従って、外部と表面節点との塩分の授受は無いものとした。

計算の結果、建設後11年目の塩化物イオン濃度分布を図-28に示す。さらに、塗装して8年経過した後の分布を図-29に示す。この計算結果は実測値(図-26)と比較的良く合っていることがわかる。

この計算法をもとに、隅角部にあるスターラップ(かぶりが底面、側面共に6cm)および主筋(底面側面ともかぶり8cm)の塩化物イオン量の履歴を、一般部(一面からのみ塩分浸透がある部分)と比較して図-30および図-31に示す。

この図より、調査時点(建設後19年)での隅角部に配置された鉄筋位置の塩化物イオン量は、「スターラップの位置で0.8%以上」と大変大きな値を示しており、腐食の進行が推測される。

また、梁の隅角部に見られた軸方向のひびわれは、隅角部に配置された主筋の腐食と想定されたが、解析結果

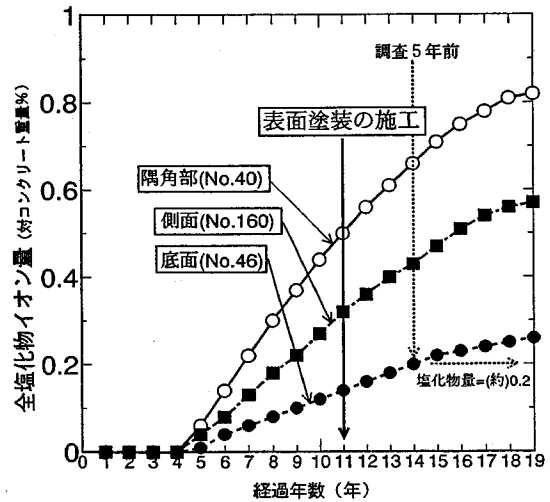


図-31 スターラップ位置での塩化物イオンの履歴(かぶり6cm)

においても0.35%程度(建設後19年)と、高い塩化物イオン量を示しており、隅角部の主筋においても表面塗装による補修効果は期待できなかったものと推定される。

隅角部以外の主筋では、建設後19年で約0.1%の値が得られたが、調査においてこの主筋には顕著な腐食は認められなかった。

#### (5) 塩化物イオンの発錆限界値について

塩化物イオンの発錆限界値を検討するために、鉄筋位置の塩化物イオン量と、目視による鉄筋腐食とを比較した。この場合、目視により鉄筋腐食が確認されても、腐食開始時期を正確に想定することは難しい。

しかし、既に塩化物イオンが多量に浸透している場合、表面塗装を行った後においても、鉄筋腐食の進行は速いことが指摘されている<sup>3)</sup>。従って、腐食開始時点の塩化物イオン量を安全側に評価するために、調査によって鉄筋腐食が確認された場合は、調査時より5年程度さかのぼった時点からの塩化物イオンの履歴を検討対象とした。一方、鉄筋腐食が確認されていない場合は、調査時点での塩化物イオン量は発錆限界以下にあるものと考えた。

鉄筋腐食が確認された2箇所では、鉄筋位置の塩化物イオン量は調査時を含めた5年間でおよそ「0.085~0.13%」(図-20)あるいは「0.22~0.28%」(図-21)の範囲にあった。一方、腐食の見られなかった箇所では(図-22, 23)、塩化物イオン量は「0.05~0.07%」程度であった。

調査は床版で合計14箇所行ったが、他の箇所ではいずれも鉄筋腐食が見られず、鉄筋位置での塩化物イオン

濃度も低かった。

梁については、腐食の確認された隅角部の鉄筋の5年間の塩化物イオン量の履歴は「0.2~0.34%」(図-30)程度であった。一方、腐食が認められなかったそれ以外の主筋では、調査時の塩化物イオン量は「約0.1%程度」(図-31)であった。

これらのデータの範囲から、表面処理工法の効果を左右する塩化物イオンの限界値は「コンクリート重量に対して0.1%程度」であることが推測される。

限界塩化物イオン量については、大即ら<sup>19)</sup>の研究において「コンクリート1m<sup>3</sup>中に約2.25kg(約0.1wt%)以下であれば、不動態は80%以上の確率で存在する」ことが指摘されており、ここでの調査結果と良く一致している。

## 7. 結論

以上の検討の結果、塩化物イオンの拡散現象から評価される表面処理工法の適用性について、以下の結論が得られた。

(1) 塩害を受けたコンクリート構造物を評価するためには、「供用状態の違いによる塩化物イオンの供給量」および「コンクリートの材質(W/C)や施工状況」を適切に評価する必要がある。コンクリート中の塩化物イオン量分布に拡散方程式を近似させて得られる、「表面塩化物イオン量:  $C_0$ 」と「見掛けの拡散係数:  $D$ 」は、この目的のための重要なデータとなる。

(2) コンクリート中に塩化物イオンを残したまま表面塗装を行った場合、濃度の高い表面付近の塩化物イオンは、拡散則に従って濃度の低い内部に拡散することが確認された。

(3) 塗装後の塩化物イオン量分布を推測することは、表面処理工法の補修効果を評価するために重要である。この計算には、補修前の劣化調査などで得られた「見掛けの拡散係数」を用いた差分法によって検討することが可能である。

(4) 鉄筋位置の塩化物イオン量は、表面塗装を行っても、拡散によってしばらくの間は増加する傾向にあることが推測された。従って、表面処理工法によって補修効果を得るためには、施工時期が大変重要であることが確認された。

(5) 構造物は、部材形状によってコンクリート中の塩化物イオン量が異なり、梁部材の隅角部においては塩化物イオン濃度が高くなることが確認された。

(6) 表面処理工法により補修(防食)効果を得るために

は、本構造物の調査結果の範囲では、塩化物イオン濃度がコンクリート重量に対して約0.1%より小さくしなければならぬものと推定された。

ここでは、特定の構造物について検討してきたが、同様の検討を他の多くの構造物で実施できれば、表面処理工法の適用性について、より正確な評価が可能になるものと思われる。

謝辞: 本研究を実施するに当たり、東京ガス(株)高岸泰弘氏、市川廣氏、工藤文弘氏、広谷亮氏、小笠原健氏に御協力頂いた。また、室内試験やデータ整理に際して、東亜建設工業(株)西川正夫氏、羽瀨貴士氏、秋葉泰男氏をはじめ多くの関係者に御助力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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協会, pp.1-6, 1992.12.
- 2) 片脇清士, 佐々木巖, 若菜和之: 表面被覆の施工時期とその効果に関する二, 三の考察, 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協会, pp.7-12, 1992.12.
- 3) 小林和雄, 宮川豊章, 久米生泰: 耐久性設計の手法に基づいた鉄筋コンクリート部材の表面処理効果の評価, 土木学会論文集 第390/V-8, pp.151-160, 1988.2.
- 4) 安田正樹, 工藤文弘, 広谷亮, 守分敦郎: コンクリート表面塗装の補修効果について, 土木学会第46回年次学術講演会概要集第5部, pp.388-389, 1991.9.
- 5) 中村和彦, 佐伯彦彦: 補修した構造物の塩害再劣化メカニズムに関する一実験, 第48回年次学術講演会概要集第5部, pp.272-273, 1993.9.
- 6) 武若耕司: コンクリート構造物における電気防食法の現状, コンクリート工学 Vol.30, No.8, pp.16-27, 1992.8.
- 7) 芦田公伸, 石橋孝一: 直流電流によるコンクリート中の塩分の移動, 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, pp.29-34, 1992.12.
- 8) 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)(JCI-R1), (社)日本コンクリート工学協会, 1983.2.
- 9) Nagataki, S., Otsuki, N. and Wee, T.: Condensation and binding of intruded chloride ion in hardened cement matrix materials, *Proc. of JSCE*, NO.414/V-12, pp.205-215, 1990.2.
- 10) Richartz, W.: Die Binding von Chlorid bei der

- Zementerhartung, *Zement-Kalk-Gips*, *Hef* 10, pp.447-456, 1969.
- 11) 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、硫黄塩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.
  - 12) 米澤敏男, V. Ashworth and R.P.M. Procter: セメント水和物によるモルタル細孔溶液中のCl<sup>-</sup>固定メカニズム, *コンクリート工学年次論文報告集*, 10-2, pp.475-480, 1988.
  - 13) 大即信明, 森好生, 関博: 海洋環境下におけるコンクリート中の塩素に関する一考察, *土木学会論文報告集*, 第332号, pp.107-118, 1983.4.
  - 14) 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.
  - 15) 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案), *コンクリート工学* Vol.22, No.12, 1984.12.
  - 16) 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, 第49回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.80-681, 1994.9.
  - 17) 工藤文弘, 広谷亮, 守分敦郎, 安田正樹: 補修された桧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.
  - 18) マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム, (社)日本コンクリート工学協会, pp.156-190, 1985.11.
  - 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.

(1994.6.6受付)

## EVALUATION OF THE EFFECT OF SURFACE COATINGS THROUGH THE DIFFUSION PROCESS OF CHLORIDE ION IN CONCRETE

Atsuro MORIWAKE, Shigeyoshi NAGATAKI, Nobuaki OTSUKI and  
Nario MIURA

In this study the effects of surface coatings of concrete for protection of chloride attack is studied through the chloride diffusion process in concrete.

The diffusion process of chloride is evaluated by the changes of chloride distributions in existing concrete structure which has been repaired with surface coatings 8 years before the examination.

The effects of surface coatings is examined through the simulated chloride concentration at the position of rebars in concrete and the corrosion rate of rebars.

As the results, the effects of surface coatings are estimated only when the chloride concentration at rebars is smaller than the critical value.