

## 塩害環境下コンクリート構造物の補修後の塩化物イオン拡散について

オリエンタル建設㈱ 正会員 博士(工学) 手塚 正道  
 オリエンタル建設㈱ 正会員 ○小野里 みどり

## 1. はじめに

塩害により劣化したコンクリート構造物を補修する場合、断面修復工法や表面被覆工法を施しても補修後数年で錆汁やひび割れが発生するなど、早期に再劣化が生じる事例<sup>1)</sup>が報告されている。

塩害劣化した構造物の補修工法の選定にあたっては、主に、コンクリートの浮き、ひび割れ、剥離や錆汁の発生などの損傷と、構造物中の塩化物イオン含有量を考慮して決められる。しかしながら、塩化物イオン含有量については調査時における鋼材位置での塩化物イオン量が腐食発生限界濃度であるかどうかの判定はできるものの、補修後に塩化物イオン含有量がどの様に変化するかを定量的に予測し、選定した補修工法の再劣化に対して評価する手法がない。

そこで、本報告では小川らの塩化物イオン侵入の拡散モデル<sup>2)</sup>を用いて、断面修復やコンクリート表面被覆を行った場合にコンクリート中の含有塩化物イオンがどの様に拡散するかを幾つかのケースを想定してシミュレーションを行い、補修後の塩化物イオンの移動と補修後の劣化再発の危険性について検討を行った。

2. 解析方法<sup>2)</sup>

## 2.1 基礎方程式

コンクリート中の塩化物イオンの移動には、塩化物イオンが濃度拡散により移動すると考える拡散モデルを適用した。なお、本報告ではコンクリート中の塩化物イオン濃度はコンクリート 1m<sup>3</sup>当りの塩化物イオン量(C1量)としている。

基礎方程式として式(1)に示す移流拡散方程式と、境界条件として飛来塩分量とコンクリート表面細孔比表面積によって決まる流束を与えたとした式(2)<sup>3)</sup>を用い、有限要素法で解いた。

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \text{div}[D_a \text{grad}(C_t)] - \bar{u}_i \frac{\partial C_f}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$q(t, s) = \frac{3.51 \cdot p \cdot V_0 \cdot Q(s)}{V_0 + 3.51 \cdot Q(s)} - \delta \cdot p \cdot C_0(s) \quad (2)$$

ここで、 $D_a$ は基準とした拡散係数に対して変化する見かけの拡散係数、 $C_t$ はコンクリート中の塩化物イオン濃度、 $\bar{u}_i$ は移流流速、 $C_f$ は細孔液中の塩化物イオン濃度、 $V_0$ は吸着した塩化物イオンの単位時間あたりの離脱量、 $p$ は飽和面積率、 $\delta$ は雨掛かりによる洗流率、 $C_0(s)$ は表面塩化物イオン濃度、 $Q(s)$ は飛来塩分量を表す。

拡散モデルでは、基準としたコンクリートの拡散係数に対して、水和の進行に伴う拡散係数の低下、温度および湿度で変化する拡散係数を考慮して時間の関数として変化させている。

コンクリート表面被覆を施した後の境界条件としては、表面被覆によって飛来する塩分とコンクリート表面との接触が妨げられ、30年経過後に表面被覆性能は10%まで低下すると仮定し、式(3)で表す表面被覆性能式を用いた。

$$Q_F(s, t) = Q(s) \cdot \left[ \exp(\lambda \cdot t^N) - 1 \right] \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$ および $N$ は表面被覆性能のパラメータで、 $Q_F(s,t)$ はコンクリート表面に供給される塩分量を表す。

## 2.2 解析結果と実測値の比較

実環境下に置かれたコンクリートの塩化物イオン濃度を測定した結果と、拡散モデルでの解析値との比較を行った。解析では表-1に示した解析条件を用いた。

表-1 実測値との比較に用いた解析条件概略

解析例	構造物	竣工後経過年数	解析条件			参考値		
			W/C(%)	温湿度条件	拡散係数の仮定値(m <sup>2</sup> /sec)	飛来塩化物イオン量の仮定値(mg/cm <sup>2</sup> /年)	W/Cから求めた拡散係数(m <sup>2</sup> /sec)	既報資料の飛来塩化物イオン量(mg/cm <sup>2</sup> /年)
a	ポストテンションT桁橋	21	35	那覇	$4.9 \times 10^{-12}$	11	$1.1 \times 10^{-12}$	138
b	ポストテンションT桁橋	21	42	那覇	$3.5 \times 10^{-12}$	1.4	$2.4 \times 10^{-12}$	138
c	橋脚	68	53	酒田	$9.0 \times 10^{-12}$	0.2	$5.3 \times 10^{-12}$	0.5
d	橋脚	21	64	那覇	$1.6 \times 10^{-11}$	0.3	$1.0 \times 10^{-11}$	138

解析値と実測値との比較結果を図-1に示す。解析例a~dの実測値は実構造物のコア供試体のデータである。

解析では、拡散係数と飛来塩化物イオン量を仮定する必要があるが、拡散係数については、経過年数とコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布の傾きから、また飛来塩化物イオン量については、表面近傍の塩化物イオン濃度より概ね推定できる。

図-1によれば、何れの実環境下のコンクリートでも、本拡散モデルを用いた解析値は実測値を概ね精度良く評価している。

また、参考のために、一般に用いられるW/Cより求められる拡散係数と地域から求められる飛来塩化物イオン量を参考値として表-1に示す。拡散係数については、解析に用いた仮定値の方が大きな値となっている。飛来塩化物イオン量については解析に用いた仮定値と参考値に大きな差が生じている。これは、参考値が地域における危険側の値を想定しているためであると考えられる。

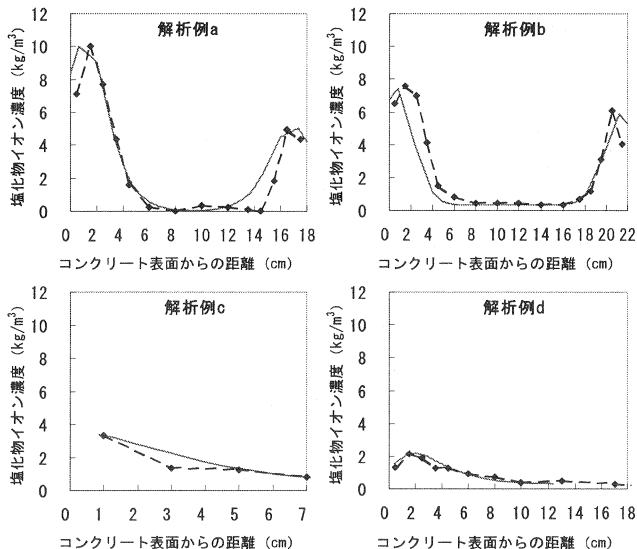


図-1 実測値と解析値との比較 (実線:解析値,点線:実測値)

## 3. シミュレーション結果

### 3.1 モデルと解析条件

シミュレーションでは、塩害環境下のコンクリート構造物としてポストテンションT型橋を想定し、その断面構造を図-2に示した。飛来塩分量は46mg/cm<sup>2</sup>/年、静岡での環境温湿度と仮定した。また建設時コンクリートの単位セメント量は427kg/m<sup>3</sup>、水セメント比を38%と仮定し、基準とした拡散係数は水セメント比と拡散係数との関係式<sup>4)</sup>から求め、また断面修復に用いるコンクリートの基準とした拡散係数は既報の文献

<sup>5)</sup>を参考に建設時のコンクリートの1/2とした。また、解析では、コンクリートの過度な乾燥および湿潤はなく、想定したポストテンションT型桁への雨掛かりはないと考えられることから、移流項および雨が掛かりによるコンクリート表面からの塩化物イオンの離脱量は無視できると仮定し、また環境温湿度は気象庁が提供する月別観測平年値を用いた。

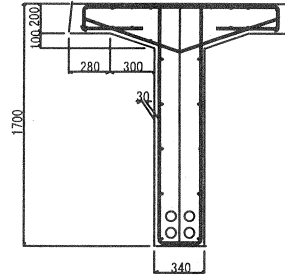


図-2 モデルPCT型桁の断面図 (純かぶり30mm)

### 3.2 断面修復後の塩化物イオンの移動

断面修復によってコンクリート中の塩化物イオンがどのように移動するか解析を行った。塩化物イオンが侵入したウェブ部を対象に、竣工後10年と30年について、コンクリートの断面修復(表面被覆工法併用)を実施した場合の解析を行った。断面修復範囲は最外縁鉄筋(D16)背面までとし、鉄筋表面位置での塩化物イオン量の経時変化を図-3に示した。

竣工後10年(塩化物イオン量約2kg/m<sup>3</sup>)で断面修復を行った場合、腐食発生限界塩化物イオン量と考えられる1.2kg/m<sup>3</sup>に達するまで修復後約30年を要する。これに対し、竣工後30年(塩化物イオン量約8kg/m<sup>3</sup>)で断面修復を行うと、修復後約15年で1.2kg/m<sup>3</sup>に達する。これは、修復後に鉄筋より内部の塩化物イオンが断面修復した新しいコンクリ

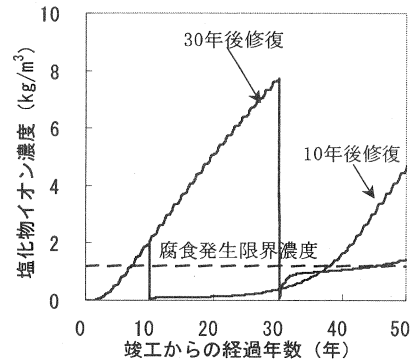


図-3 塩化物イオンの経時変化

ート中に拡散する量が増加して鉄筋位置での塩化物イオン濃度の上昇が早くなったものと考えられる。以上の結果から、構造物を長く維持するためには、塩化物イオンの侵入量が少ない段階で断面修復によって既に侵入した塩化物イオンを取り除き再劣化の危険性を小さくすることが重要と考えられる。

### 3.3 断面修復範囲のシミュレーション

補修として断面修復および表面被覆を施すこととして断面修復範囲を変えて塩化物イオン量の分布のシミュレーションを行い、補修後の再劣化について考察する。補修時期は竣工後20年とした。

ケース1として、断面修復範囲をかぶり厚と同じ30mmとした場合、ケース2として断面修復範囲を最外縁鉄筋背面までとした場合、ケース3として断面修復範囲を最外縁鉄筋背面+1cmとした場合についてそれぞれ解析を行った。

塩化物イオン濃度の分布状況を解析した結果を図-4に示す。断面修復および表面被覆を行った場合、それぞれの鉄筋位置の塩化物イオン濃度は急激に低下している。ケース2,3においては補修を行った場合、鉄筋表面近傍の塩化物イオン濃度は1ヶ月後で0kg/m<sup>3</sup>、10年後で約0.5kg/m<sup>3</sup>、20年後でも1.0kg/m<sup>3</sup>以下となった。これに対し、ケース1の場合には、鉄筋近傍の塩化物イオンは断面修復した新しいコンクリート中に拡散することによって移動するが、補修後1ヶ月で鉄筋表面位置において1.8kg/m<sup>3</sup>以上の塩化物イオンが残存し、断面修復を行ってもなお劣化は進行していくと考えられる。

断面修復を行う場合には高濃度の塩化物イオンを含有したコンクリートを除去するために鉄筋より深い範囲のコンクリートも除去することが求められており<sup>6)</sup>、また断面修復では鉄筋背面まで補修する方法が効果的との報告<sup>7)</sup>があり、解析結果はこれら知見と一致した。

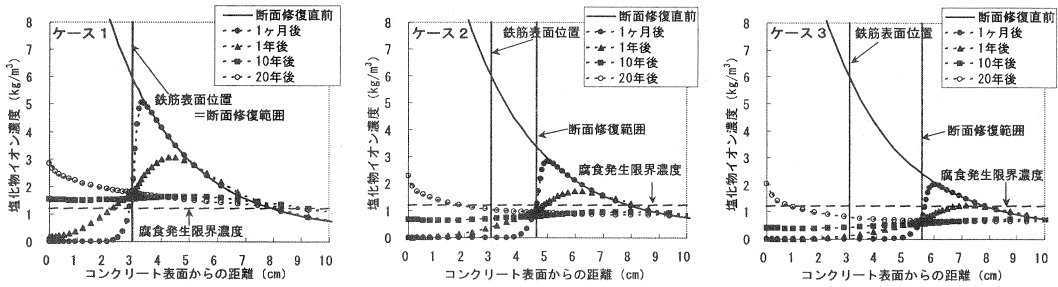


図-4 補修範囲別塩化物イオン濃度の変化

本報告では、対象をPC橋としたため、W/C が小さい範囲についてシミュレーションを行ったが、W/C が大きく拡散係数の大きい場合には、侵入した塩化物イオン濃度の分布が緩やかになり、断面修復による再拡散の影響は大きくなることが想定されるので、断面修復範囲についてさらに慎重に検討する必要がある。

4. まとめ

概ね精度良く実環境下のコンクリートの塩化物イオン侵入量を評価している塩化物イオン侵入モデルを用い、塩害環境下に置かれたコンクリートにおける補修前後の塩化物イオンの移動を解析した。本報告における結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 断面修復後、内部に残留した塩化物イオンは、断面修復しても断面修復部に再拡散して再劣化が生じる可能性があり、断面修復の範囲は、再拡散を評価して決定する必要がある。塩化物イオンの侵入量が少ない段階で断面修復によって既に侵入した塩化物イオンを取り除くことで再劣化の危険性は小さくなる。
- 2) 本報告で検討したPC橋の場合には、断面修復範囲を鉄筋の背面+1cmとすることで、補修後20年経っても再劣化の危険性は小さい。
- 3) W/C が大きく拡散係数の大きい場合には、断面修復範囲についてさらに慎重に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の劣化および補修事例集，1996.10
- 2) Ogawa, O., Yoshioka, T. and Idemitsu, T. : Life cycle cost of post-tensioned T-section girder bridges, Second International Conference on Engineering Materials, vol.1, pp.245-256, 2001
- 3) 山田義智, 大城武, 榎田佳寛：塩害環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する解析的研究, 日本建築学会構造経論文集, No. 501, pp.13-18, 1997.11
- 4) Sugiyama, T., Tsuji, Y., Bremner, T. W. and Hashimoto, C. : Determination of Chloride Diffusion Coefficient of High-Performance Concrete by Electrical Potential Technique, Performance of Concrete in Marine Environment, Spec. Publ. American Concrete Institute SP-163, pp.339-354, 1996
- 5) 大濱嘉彦, 出村克宣, 三宅雅之：ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートにおける塩化物イオン拡散性状, セメント技術年報, Vol. 40, pp.87-90, 1986.3
- 6) 柴桃孝一郎ら：コンクリート構造物のリフレッシュ技術, ハイウェイ技術, No. 17, pp.33-43, 2000.10
- 7) 宇仁川康行ら：塩害により劣化した鉄筋コンクリートの補修方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp.1165-1170, 1997