

論文 補修を行った塩害環境下コンクリートの塩素イオン拡散

小川 彰一*1・吉岡 民夫*2・杉山 隆文*3

要旨：塩害により劣化したコンクリート構造物の補修では、断面修復あるいは表面塗装を施しても早期に劣化が生じることがある。補修を行った後のコンクリート中塩素の拡散による移動を非定常拡散場として二次元で解析した結果、既に浸透している塩素を取り除くことなく塗装を行った場合には、残留した塩素が時間の経過とともにコンクリート内部に移動して鉄筋を腐食させる可能性があることが分かった。

キーワード：塩害、補修、塩素拡散、有限要素法

1. はじめに

塩害により劣化したコンクリートを補修する場合、断面修復工法や塗装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の事例¹⁾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ついては、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外観上と、構造物中の塩素含有量を直接測定することによって判定される。しかしながら、塩素含有量については調査時における鋼材位置での塩素量が腐食発生濃度であるかどうかの判定はできるものの、補修後に塩素含有量がどの様に変化するかを定量的に予測し、補修工法を評価する手法がない。

そこで、本報告では塩素浸透の拡散モデルを用いて、断面修復やコンクリート表面塗装を行った場合にコンクリート中の含有塩素量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った。拡散モデルでは、コンクリートへの塩素浸透量を非定常拡散場として二次元での解析を行うこととし、過去に報告された実環境下のコンクリートへの塩素浸透量と比較して解析モデルを評価し、また厳しい塩害環境下にあるポストテンションT型橋の補修

を想定し、補修前後の塩素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. 解析手法

コンクリート中の塩素の移動には、塩素が濃度拡散により移動すると考える塩素拡散モデルを適用した。なお、本報告では塩化物イオン、全塩分などはすべて元素である塩素として表し、コンクリート中の塩素濃度はコンクリート1m³当りの塩素量(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素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)²⁾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素濃度、 \bar{u}_i は移流流束、 C_f は細孔液中の塩素濃度、 V_0 は吸着した塩素の単位時間あたりの離脱量、 p は飽和面積率、 δ は雨掛かりによる洗流率、 $C_0(s)$ は表面塩素濃度、 $Q(s)$ は飛

*1 オリエンタル建設(株) 技術研究所主任研究員 葉修 (正会員)

*2 オリエンタル建設(株) 技術研究所所長 工博 (正会員)

*3 群馬大学助教授 工学部建設工学科 Ph.D (正会員)

来塩素量を表す。

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、その詳細は報告している³⁾。但し解析では、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素の離脱量は無視できると仮定し、塩素イオン脱離量の値として $V_p=11.0\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ を、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。

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-1に示した。飛来塩素量は $20\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ 、新潟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

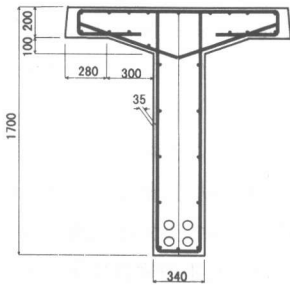


図-1 モデルPCT型桁のスパン中央断面図

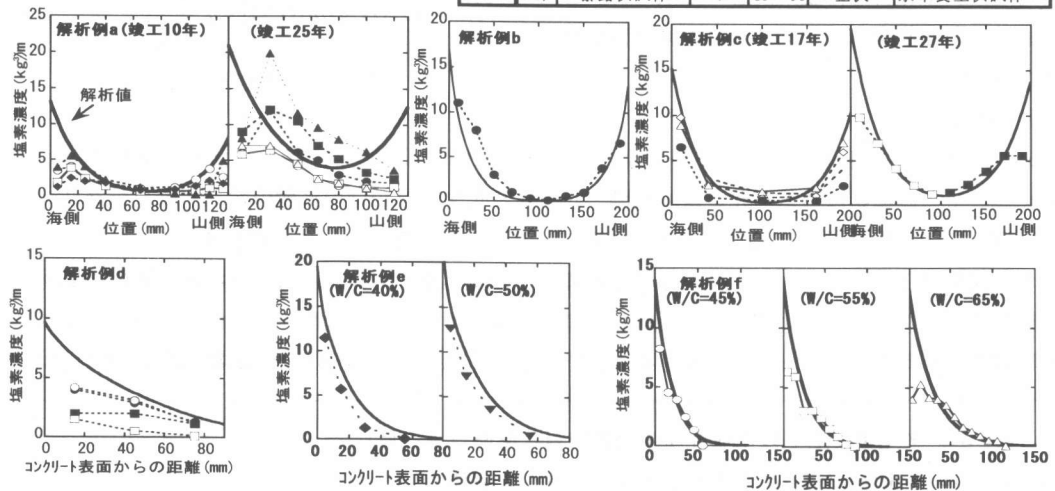


図-2 既報値と解析値との比較 (平滑線:解析値, 折れ線:既報の実測値)

ント量は $400\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比を 40%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⁴⁾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⁵⁾を参考に建設時のコンクリートの 1/2 とした。

コンクリート表面塗装を施した後の境界条件としては、塗装によって飛来する塩素とコンクリート表面との接触が妨げられ、20年経過後に塗装性能は 20%まで低下すると仮定し式(3)で表す塗装性能式を用いた。

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

ここで、 λ および N は塗装性能のパラメータでそれぞれ 1.0および0.00147とし、 $Q_F(s,t)$ はコンクリート表面に供給される塩素量を表す。

3. 結果と考察

3. 1 解析結果と実測結果の比較

既報^{6~11)}の実環境下に置かれたコンクリートの塩素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。解析ではそれぞれの報告から想定された表-1に示した解析条件を

表-1 実測結果との比較に用いた解析条件概略

解析例	文献	構造物	竣工後 経過年	解析条件 W/C(%) 温湿度条件	使用データ
a	6)	プレテンションT型橋	10, 25	40	金沢
b	7)	ポストテンションT型橋	12	43	酒田
c	8)	ポストテンションI型橋	17, 27	43	酒田
d	9)	ポストテンションT型橋	27	40	酒田
e	10)	暴露供試体	10	40, 50	浜松
f	11)	暴露供試体	7	45~65	金沢

(竣工11年で塗装)
第三フェーズNPCデータ
水中養生供試体

用いた。飛来塩素量は何れも海側では $20\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ 、山側では海側の $1/3$ の量としている。

解析値と実測値との比較結果を図-2 に示した。解析例 a~d は実構造物のコア供試体のデータを、解析例 e, f は水セメント比が異なる暴露供試体のデータであり、また解析例 d では、補修として竣工 11 年後に表面塗装を施している。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結果を概ね表しているものであった。

3. 2 コンクリート隅角部への塩素浸透

塩害環境下にある PCT 型桁橋の劣化では、ウェッジ下側あるいは下フランジのコンクリート隅角部の損傷が激しいことが多い。この原因の一つとして、コンクリート隅角部では、下面および側面の 2 面から塩素が浸透することが考えられる。そこで本拡散モデルを用いて隅角部の塩素濃度分布を二次元で解析した結果を図-3 に示した。解析では、飛来塩分量が一樣にコンクリート表面に付着するものと仮定している。

コンクリート隅角部では、角に配置されている鉄筋やシースにかかる部分で塩素の浸透量は多くなることが分かる。そこで、角に配置されている鉄筋位置(側面から 35mm、下面から 35mm 位置、以下、角鉄筋位置)と、一次元で解析した場合のコンクリート表面から 35mm 鉄筋位置での塩素濃度の経時変化を図-4 に示した。二次元解析での角鉄筋位置の塩素濃度は一次元解析で行った 35mm 位置のおおよそ 2 倍にも達した。

隅角部への塩素量が高い結果は守分らの報告¹²⁾と一致し、コンクリート隅角部に配筋された鉄筋の腐食は早く進行すると考えられる。

通常、実構造物の塩素含有量の調査ではコンクリート平面部のコア抜きやドリル穿孔で試料採取が行われている。従って、測定されたコンクリート塩素濃度よりコンクリート隅角部ではより高い塩素濃度に達している可能性が高く、実構造物調査の際にはこの点にも留意する必要があると考えられる。

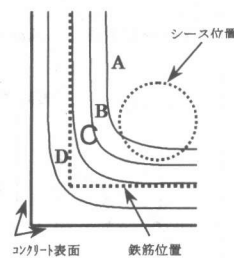


図-3 コンクリート角部の塩素濃度分布
A:1, B:2, C:4, D:10 kg/m^3

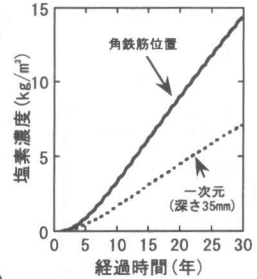


図-4 一次元と二次元解析の(角鉄筋位置)塩素濃度

3. 3 塗装後の塩素移動

塗装工による補修では、塗装によって塩素のコンクリートへの進入は妨げたとしても、既に浸透している塩素は濃度勾配を駆動力として、さらにコンクリート内部へと浸透していくと考えられる。

図-5 に一次元で解析した塗装時および塗装後の塩素濃度分布を示した。表面塗装時にはコンクリート表面付近の塩素濃度が高いが、塗装 10 年後には表面付近の塩素はコンクリート内部に移動し、コンクリート表面からの距離が 20mm より深い部分では塗装後に塩素濃度が高くなった。塗装工による補修では、塗装時には鉄筋位置での塩素濃度が低い場合でも、その後の塩素の移動でコンクリート内部の塩素濃度が上昇することを示している。図-6 にはウェッジ高さ方向中央部の鉄筋位置(コンクリート側面から深さ方向 35mm 位置、以下、ウェッジ鉄筋位置)および角鉄筋位置での塩素濃度の経時変化を示した。塗装時期は、それぞれの鉄筋位置での塩素濃度が約 $2\text{kg}/\text{m}^3$ となる竣工後 10 年および 7 年後に塗装することとしている。その結果、ウェッジ鉄筋位置では、塗装後の塩素の移動により鉄筋位置の塩素濃度は塗装後 10 年で約 1.5 倍に達し、さらに角鉄筋位置では 2 倍以上となった。

このことは、既に塩素がコンクリート中に浸透している場合には、補修工法として塗装を施してコンクリートへの塩素の供給が遮断されたとしても塩素がさらに内部に移動し、鉄筋位置

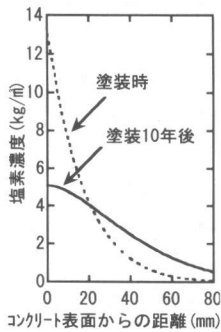


図-5 表面塗装によるコンクリート中塩素の移動

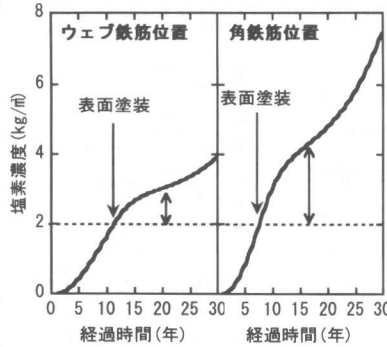


図-6 塗装後の塩素濃度変化

での塩素の上昇は、ウェッジ部分よりも二面から塩素が供給されていたコンクリート隅角部で大きく、塗装後に鋼材を腐食させる可能性が高まると考えられる。

3. 4 断面修復後の塩素移動

断面修復によってコンクリート中の塩素がどのように移動するかの知見は少ない。そこで塩素が浸透したコンクリートを断面修復ののち塗装を行う補修を施す際に、鉄筋の裏側までコンクリートをはつり出しによって除去して断面修復した場合と、鉄筋かぶりまではつり出した場合についてウェブ部で解析を行った。補修はコンクリート深さ 35mm 位置の塩素濃度が 4kg/m^3 となった時に行い、補修 2 年経過後の結果を図-7 に示した。

鉄筋の裏側まではつり出して補修を行った場合、鉄筋近傍の塩素濃度は 0.5kg/m^3 以下に低下した。これに対し、鉄筋位置まではつり出した場合には、鉄筋近傍の塩素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 2 年後においても鉄筋が配置されている位置で 1.5kg/m^3 以上の塩素が残存し、断面修復を行ってもなお鉄筋の腐食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素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¹³⁾、また断面修復では鉄筋裏側まで補修する方法が効果的との報告¹⁴⁾があり、解析結

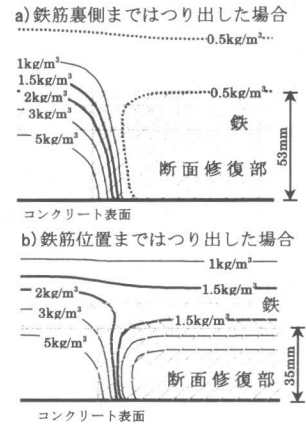


図-7 はつり出し深さの違いによる補修後コンクリートの塩素濃度分布

果はこれら知見と一致した。

3. 5 補修時期のシミュレーション

ポストテンションT型橋を想定し、補修として断面修復および塗装を施すこととして補修時期を変えて塩素浸透量のシミュレーションを行い、補修後の鉄筋腐食について考察した。断面修復は鉄筋の裏側まではつり出すものと仮定している。

実構造物における塩素濃度の測定は、通常ウェブ部分の採取試料を用いるためウェブ鉄筋位置の塩素濃度を指標とした。ケース1として、塩素が浸透し腐食が進展してひび割れやかぶりの剥離が開始する塩素濃度 (C_p) がセメント質量 $x\%$ とした報告¹⁵⁾を参考に、ウェブ鉄筋位置の塩素濃度が $Cx\%$ に相当する 4kg/m^3 の場合、または塩素浸透量が未だ少ない場合(ケース2)としてウェブ鉄筋位置の塩素濃度がケース1の1/2である 2kg/m^3 に達した時に補修を施すこととした。補修時期は竣工後それぞれ18年および11年に相当する。

塩素濃度の経時変化を解析した結果を図-8に示した。ケース1では、補修時のウェブ鉄筋位置の塩素濃度は 4kg/m^3 であるのに対して角鉄筋位置では既にその約2倍に相当する 8kg/m^3 となっている(図-8<ケース1>)。ここで断面修復および塗装を行った場合、それぞれの鉄筋位置の塩素濃度は急激に低下し、また桁内に配

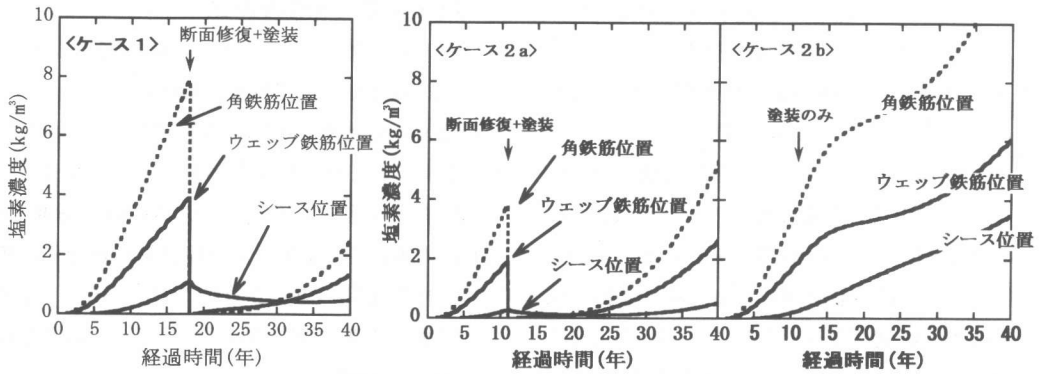


図-8 ポストテンションT型桁での塩素濃度経時変化

置されているシース位置（コンクリート隅角部から最も近いシース管の位置としてウェップ下面から高さ方向 65mm，側面から深さ方向 96mm 位置を仮定）においても，補修時の塩素濃度は約 1kg/m^3 でその後緩やかに低下した。

しかしながら，実際にはケース 1 では補修時に角鉄筋位置の塩素濃度が C_p を大きく超えていることから，ひび割れが生じ，ひび割れに沿ってさらに多くの塩素が供給されると想定され，コンクリート隅角部では解析値より高い塩素濃度となっていると考えられる。従ってシース位置でも塩素濃度は 1kg/m^3 を超えて腐食発生の閾値と考えられる $1.2\sim 2.5\text{kg/m}^3$ の塩素濃度¹⁰⁾に達する可能性があり，またコンクリート塩素濃度が解析値より高いと想定されることから，補修後に内部の塩素が断面修復した新しいコンクリート中に拡散する量が増加して各鉄筋位置での塩素濃度の上昇は早くなり，再劣化の危険性が高くなると考えられる。

塩素浸透量が未だ少ないケース 2 では，角鉄筋位置の塩素濃度は 4kg/m^3 に達している（図-8<ケース 2a>）。この塩素濃度は C_p に相当し，鉄筋腐食は既に開始しているが，深刻な構造物の劣化にまで至っていないものと想定される。この段階で桁全面について補修として断面修復と塗装を行えば，塗装性能の劣化に依存して再び塩素が供給され，塩素濃度が増加する補修からおおよそ 20 年経過後まで何れの鉄筋位置やシース位置でも鉄筋腐食を妨げることができ，

構造物は維持できるものと考えられる。

しかしながら，一方で実際の補修では断面修復を行わずに塗装のみを施す部位が残ることがある。そこでケース 2 において塗装のみを施した場合のウェップ鉄筋位置およびシース位置での塩素濃度変化を図-8<ケース 2b>に示した。

角鉄筋位置，ウェップ鉄筋位置の塩素濃度は塗装後も増加し続け，断面修復を行わず塗装のみ施した部位では再劣化が早急に進行するものと考えられ，さらにシース位置の塩素濃度は補修から約 15 年後に 2kg/m^3 を超え，腐食発錆の閾値に達する。

以上の結果から，構造物を長く維持するためには塩素の浸透量が少ない段階で断面修復によって既に浸透した塩素を取り除く必要があり，既に浸透している塩素を除去しない場合には補修後の塩素の移動によって早期に再劣化が生じるだけでなく，シース管の腐食にまで至る可能性があると考えられる。

4. まとめ

二次元の塩素浸透モデルを用い，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素の移動を解析した。用いた拡散モデルはおおよそ実環境下のコンクリートの塩素浸透量を表していた。そして，いくつかのケースを想定してコンクリート内の拡散による塩素の移動から補修時の塩素挙動を解析した結果，

1) コンクリート隅角部に配置された鉄筋位置

では、一面から塩素が浸透する一次元モデルと比較して、約2倍の塩素濃度となった。

- 2) 塗装工によって飛来塩素を遮断しても、塩素は濃度勾配によってコンクリート内部に浸透し続け、特にコンクリート隅角部の鉄筋位置では、塗装後の塩素濃度の上昇が大きい。
- 3) 断面修復では、鉄筋かぶりまではつり出しでは、なお鉄筋配置位置の塩素濃度が高く保持され、腐食が進行していく可能性がある。
- 4) ポストテンションT型桁の補修では、塩素の浸透量が少ない段階で断面修復によって既に浸透した塩素を取り除く必要があり、残留した塩素は塗装後もコンクリート内部に拡散して早期に再劣化が生じ、またシーす管まで腐食する可能性がある。

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) 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
- 3) 吉岡民夫，小川彰一：ポストテンションT型橋の塩素浸透解析とLCCに関する考察，オリエンタル建設技術研究所報，Vol.5，pp.55-64，2000
- 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) 金海鉦ら：塩害環境下で25年間供用されたPCT桁橋の損傷度調査，コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集，pp.55-60，1998.10
- 7) 建設省東北地方建設局酒田工事事務所：新五十川橋における電気防食について，温海地区塩害橋対策技術報告書，pp.57-89，1998.10
- 8) 松田芳範ら：塩害により損傷を受けたPC橋の補修効果に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1015-1020，1999
- 9) 石村勝則ら：塩害を受けたPC単純Tげた橋の断面修復，コンクリート工学，Vol.38，No.7，pp.34-39，2000.7
- 10) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室，プレストレスト・コンクリート建設業協会：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書(飛沫帯におけるコンクリート構造物の防食技術に関する研究第2分科会)，1995.12
- 11) 笹谷輝彦ら：海洋環境下に長期間暴露したコンクリートへの塩化物イオン浸透性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.957-962，1996
- 12) 守分敦郎ら：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応性，土木学会論文集，No.52/V-28，pp.111-122，Vol.18，1995.8
- 13) 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
- 14) 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
- 15) Bentur, A., Diamond, S. and Berke, N.S. : Steel Corrosion in Concrete, E & FN Spon, London, 1997
- 16) 岸谷孝一，西澤紀昭ほか編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(1)，技報堂出版，1986