欠損が生じた表面被覆コンクリートへの 塩化物イオン浸透性状と再補修戦略

中村 慶一郎* 松本 理佐** 服部 篤史** 河野 広隆**

Chloride ion Penetration Properties and Repairing Strategy of Concrete with Partially Damaged Surface Coating

by

Keiichiro NAKAMURA*, Risa MATSUMOTO**, Atsushi HATTORI** and Hirotaka KAWANO**

Surface coating is one of the repair methods for chloride-induced corrosion in reinforced concrete. In maintenance procedures for the surface coating so far, qualitative evaluation base on experience is adopted and obtained knowledge are accumulated to judge necessity of re-repair for deteriorated surface coating. That is, quantitative evaluation is not yet fully established for influence of performance degradation and/or defect of surface treatment on life of a concrete structure. In this study, pinhole and delamination are focused as deterioration phenomena of surface coating. As a first step to the quantitative evaluation, 3-dimensional ingress of chloride ion into surface-coated mortar specimens with modeled deterioration phenomena were investigated. As a result, if areas of deterioration phenomena are large enough, chloride ion ingress can be predicted using FE analysis based on Fick's diffusion law, which enables establishing effective re-repair strategy.

Key words:

Surface coating, Pinhole, Delamination, Chloride ion ingress, Re-repair strategy

1 緒 言

塩害対策手法の 1 つに表面被覆工法がある。表面被覆工法とは、樹脂等の有機系被覆材をコンクリート表面に塗布・硬化することで外部からの劣化因子の侵入を物理的に遮蔽する工法である。現在、表面被覆工の劣化に対する維持管理は、経験的な情報を集約して定性的な評価を行いその積み重ねから再対策の要否を判定しており、被覆材の性能低下や表面被覆材の欠陥が構造物の寿命にどの程度影響するかを定量的に評価し得るレベルまでには至っていない。そこで、本研究ではピンホールや剥がれを模擬した表面被覆モルタルへの 3 次元的な塩化物イオン浸透性状を捉えることで、欠損が生じた表面被覆コンクリート構造物への塩化物イオン浸透を定量的に予測し、効果的な再補修戦略の構築を図ることを目的とした。

2 実験概要と解析概要

2・1 実験方法

供試体にはモルタルに表面被覆材を塗布したものをを用いた。欠損はピンホールや、剥がれのような表面被覆材を貫通するものを検討の対象とした。

モルタルの形状は 100×100×100mm とし、モルタルの配合は W/C=0.5, S/C=3.0 とした。試験面は、プライマー、

Table 1 Specification of surface coating.

Process	Coating thickness (μm)	Type of resin, Standard usage (kg/m ²)	Coating Interval (h)
Primer	-	Epoxy, 0.10	4~16
Intermediate coating	60	Epoxy, 0.26	13~22
Overcoat	30	Acrylic urethane, 0.12	-

Table 2 Factor of specimen.

Type of specimen	Properties of partial loss
Uncoated specimen	-
Pinhole specimen	2 circles with a diameter of 1 mm 2 circles with a diameter of 3.1 mm
10 mm square delamination specimen	1 square with a side of 10 mm
20 mm square delamination specimen	1 square with a side of 20 mm
30 mm square delamination specimen	1 square with a side of 30 mm

中塗りおよび上塗りを塗装した。試験面の表面被覆材の仕様を Table 1 に示す。

試験面以外の面は封止面とし、エポキシ樹脂系厚塗り塗膜で封止した。表面被覆材の養生期間は、上塗りの塗装後 6 日とし、塗装と養生は室温 20℃の実験室で行った。

Table 2 に供試体の要因を示す。ピンホールは直径 1mm または 3.1mm の円形とし、表面被覆材養生後、φ1mm, φ3.1mm の電着バーを用いて削孔し、Fig. 1 のように配置

† 原稿受理 平成 31 年 1 月 16 日 Received Jan. 16, 2019

©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 宇部興産(株) 〒755-8633 宇部市大字小串字沖の山
UBE Ind., Ltd., Ooazakogushiazaokinoyama, Ube, 755-8633.

** 京都大学 大学院 都市社会工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂
Department of Urban Management, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540.

Fig. 1 Measurement surface of various specimens (Unit : mm).

した。剥がれは、1 辺 10, 20, 30mm の正方形とし、マスキングテープを用いて試験面中央部が塗装されないようにすることで模擬した。

水温 20℃ の 3% 塩水溶液に 5 日間浸せし、気温 20℃ の空气中で 2 日間乾燥する、1 サイクル 7 日の塩水浸せき・乾燥繰返し環境下で、供試体を促進試験した。促進期間は 5 サイクル (35 日) および 13 サイクル (91 日) とし、促進試験終了後に硝酸銀噴霧法および EPMA によってモルタル内部の塩化物イオン分布を測定した。各供試体の測定面を Fig. 1 に示す。

2・2 解析方法

本研究では、有限要素解析プログラム ABAQUS CAE/6.14.1 を用いて、FEM 解析を行った。

各供試体に対して作成した解析モデルを Fig. 2 に示す。ピンホール、剥がれ供試体に対応するモデルは、3 次元で供試体の 1/4 対称モデルとし、要素タイプは六面体とした。表面被覆材の膜厚は、実験の供試体は 90 μ m だが、解析上では、簡単のため 100 μ m (0.1mm) とした。ピンホールモデルでは ϕ 1mm と ϕ 3.1mm のピンホール部の、剥がれモデルでは 10, 20, 30mm 四方の剥がれ部の表面被覆材を欠損させた。被覆なし供試体に対応するモデルは、深さ 100mm の 1 次元モデルとした。

支配方程式は Fick の拡散方程式とし、初期条件は内在塩化物イオン濃度を 0 kg/m³ とした。境界条件は塩化物イオンが流入する境界 (試験面) に表面塩化物イオン浸透速度 (ここでは、流入塩化物イオン量と呼ぶこととする) を与える Neumann 型とし、封止面と対称面は断塩境界とした。

一般に、コンクリートへの塩化物イオン浸透を予測する場合、境界条件として表面塩化物イオン濃度を与える Dirichlet 型が用いられるが、表面被覆材の欠損部のコンクリートの表面塩化物イオン濃度の予測や測定は困難である。一方、流入塩化物イオン量は、飛来塩分量から算出でき³⁾、実構造物に適用することが比較的容易であるため、本研究では、Neumann 型を用いることとした。

硝酸銀噴霧法を行う供試体では、定量的な塩化物イオ

Fig. 2 Model of analysis (Unit : mm).

Table 3 Analysis parameters in the case of comparison with experimental results by silver nitrate spray method^{1)~3)}.

Material conditions	Mortar	Parameters	Value
		Water-cement ratio	50%
	Surface coating material	Diffusion coefficient	1.47 cm ² /yr
		Diffusion coefficient	1.48 $\times 10^{-3}$ cm ² /yr
Boundary conditions (Neumann)	Surface of mortar	Flux of chloride ion content	1.09 $\times 10^1$ mg/cm ² /yr
	Surface of coating	Flux of chloride ion content	1.10 $\times 10^{-2}$ mg/cm ² /yr

Table 4 Analysis parameters in the case of comparison with experimental results by EPMA.

Material conditions	Mortar	Parameters	Value
		Water-cement ratio	50%
	Surface coating material	Diffusion coefficient	3.36 cm ² /yr
		Diffusion coefficient	1.48 $\times 10^{-3}$ cm ² /yr
Boundary conditions (Neumann)	Surface of mortar	Flux of chloride ion content	9.13 $\times 10^1$ mg/cm ² /yr
	Surface of coating	Flux of chloride ion content	4.02 $\times 10^{-2}$ mg/cm ² /yr

ン濃度分布の測定ができないため、本環境における材料条件と境界条件を求めることができない。そこで、既往の研究^{1)~3)}を参考に Table 3 に示すとおり設定した。EPMA 分析では、定量的な塩化物イオン濃度分布の測定が可能であるため、JSCE-G 572-2013 に準拠して、被覆なし供試体の測定結果から、モルタルの見掛けの拡散係数を求めた。流入塩化物イオン量は、そのモルタルの見掛けの拡散係数を用いた、被覆なしモデルにおける解析結果と被覆なし供試体の塩化物イオン濃度分布を比較することで、逆算的に同定した。以上から得られる材料条件と境界条件を Table 4 に示す。

解析における時間条件は、供試体の促進期間である 35 日および 91 日とした。

3 実験結果と解析結果の比較

3・1 硝酸銀噴霧による変色境界の塩化物イオン濃度の仮定

被覆なし供試体の断面 A (Fig. 1) における硝酸銀噴霧結果から、JIS A 1171 に準拠して、促進 35 日 (5 サイクル) および 91 日 (13 サイクル) での塩化物イオン浸透深さを求めた。また、その位置における、被覆なしモデルでの期間 35 日および 91 日の解析結果の塩化物イオン濃度を硝酸銀噴霧による変色境界の濃度と仮定し、ピ

Fig. 3 Cross section B around $\phi 1$ mm pinhole at 5 cycles.

Fig. 4 Cross section B around $\phi 3.1$ mm pinhole at 5 cycles.

Fig. 11 Cross section B around $\phi 1$ mm pinhole at 13 cycles.

Fig. 12 Cross section B around $\phi 3.1$ mm pinhole at 13 cycles.

Fig. 5 Cross section C of 10 mm square delamination specimen at 5 cycles.

Fig. 6 Cross section D of 10 mm square delamination specimen at 5 cycles.

Fig. 13 Cross section C of 10 mm square delamination specimen at 13 cycles.

Fig. 14 Cross section D of 10 mm square delamination specimen at 13 cycles.

Fig. 7 Cross section C of 20 mm square delamination specimen at 5 cycles.

Fig. 8 Cross section D of 20 mm square delamination specimen at 5 cycles.

Fig. 15 Cross section C of 20 mm square delamination specimen at 13 cycles.

Fig. 16 Cross section D of 20 mm square delamination specimen at 13 cycles.

Fig. 9 Cross section C of 30 mm square delamination specimen at 5 cycles.

Fig. 10 Cross section D of 30 mm square delamination specimen at 5 cycles.

Fig. 17 Cross section C of 30 mm square delamination specimen at 13 cycles.

Fig. 18 Cross section D of 30 mm square delamination specimen at 13 cycles.

Fig. 19 Chloride ion penetration depth at 35 days (Unit : mm).

Fig. 20 Chloride ion penetration depth at 91 days (Unit : mm).

Table 5 Actual measurement value of chloride ion penetration depth of uncoated specimen and chloride ion concentration of analytical results at it's depth.

	35 days	91 days
Actual measurement value of chloride ion penetration depth	8.76 mm	15.53 mm
Chloride ion concentration of analytical results	1.67×10^{-1} kg/m ³	1.59×10^{-1} kg/m ³

ンホール, 剥がれモデルでの解析結果に適用した。それらを Table 5 に示す。

3・2 硝酸銀噴霧の実験結果と解析結果の比較

5 および 13 サイクルでのピンホール, 剥がれ供試体の硝酸銀噴霧結果と解析結果の塩化物イオン量の分布を重ね合わせたものを Fig. 3~18 に示す。硝酸銀噴霧による変色境界を黒線で示し, ヒートマップの最外側の境界は, Table 5 における塩化物イオン量を示している。なお, 各寸法の単位は mm で示している。ここで, 剥がれ供試体の断面 D の深さを Table 6 に示す。

Table 6 Depth of cross section D of delamination specimen.

	10 mm square	20 mm square	30 mm square
5 cycles	3 mm	4 mm	5 mm
13 cycles	5 mm	7 mm	8 mm

Fig. 3~4, Fig. 11~12 に示すように, ピンホール周辺では, いずれも解析値より実験値の方が塩化物イオンの浸透域が広がった。この原因は, 濃度拡散よりも, 水分の移流が卓越したためであると推測される。移流とは, 空間内の物質の移動によって, 温度や物質濃度の変化が起こる現象のことである。ここでは, モルタル内部への水分の移動に伴って, 塩化物イオンも同時に移動したと考えられる。特に, 今回は塩水浸せき・乾燥繰返し環境下で供試体を促進試験しているため, モルタル表面は乾湿繰返しの影響を非常に受けやすい。一般に, モルタルやコンクリートが乾湿繰返し環境にある場合, 表面付近の水分の移動が頻繁に起こる。それによって, ピンホール周辺の水分の移動が卓越し, 解析値より実験値の方が塩化物イオンの浸透域が広がったと推測される。しかし, これは仮説であり, 移流を考慮した塩化物イオンの拡散方程式等を用いて妥当性を検討する必要がある。

Fig. 5~10, Fig. 13~18 に示すように, 10, 20, 30mm 四方の剥がれ供試体の断面 C, D (Fig. 1) における硝酸銀噴霧結果と解析結果は概ね一致した。これから, 本解析手法は, 剥がれを有する表面被覆モルタルへの 3 次元的な塩化物イオン浸透性状を概ね捉えているといえる。

続いて, 被覆なし供試体と剥がれ供試体の塩化物イオン浸透深さを比較する。Fig. 19, 20 にそれぞれ 35 日 (5 サイクル), 91 日 (13 サイクル) の被覆なしモデルと剥がれモデルの深さ方向の断面の解析結果を示す。なお, 硝酸銀噴霧結果の実験値も示しており, 赤字が実験値, 青字が解析値を表している。

期間 35 日の被覆なしの塩化物イオン浸透深さと剥がれ中心位置の浸透深さを比較すると, 剥がれ 10mm 四方では実験値・解析値ともに浸透深さが小さくなっているが, 剥がれ 20, 30mm 四方では実験値・解析値ともに被覆なしの浸透深さと概ね一致していることがわかる。同様に, 期間 91 日の被覆なしの塩化物イオン浸透深さと剥がれ中心位置の浸透深さを比較すると, 剥がれ 10, 20mm 四方では, 実験値・解析値ともに浸透深さが小さくなっているが, 剥がれ 30mm 四方では実験値・解析値

ともに被覆なしの浸透深さと概ね一致していることがわかる。

以上から, 剥がれ面積が小さくなるにつれ, また, 暴露期間が長期間になるにつれ, 剥がれ直下の浸透深さは, 被覆なしの浸透深さよりも小さくなると考えられる。このことから, コンクリートへの塩化物イオン浸透予測に一般的に用いられる, Fick の拡散方程式を, 比較的長期間暴露された, 欠損が生じた表面被覆コンクリートへの塩化物イオン浸透予測に適用する場合, 深さ方向への 1 次元的な拡散だけではなく, 3 次元的な拡散を考慮する必要があると考えられる。

3・3 EPMA の実験結果と解析結果の比較

ピンホール供試体の断面 B (Fig. 1) における EPMA 分析結果と解析結果を Fig. 21, 22 に, 10, 20mm 四方剥がれ供試体の断面 C (Fig. 1) における EPMA 分析結果と解析結果を Fig. 23, 24 に示す。なお, EPMA 分析を行った供試体は 13 サイクルのもののみで, 縦×横=1×1.1mm の範囲の 100 μ m メッシュ計 110 個の塩化物イオン濃度を平均し, 深さ方向に沿って算出したものを比較対象とした。また, 各グラフの横軸は, いずれも欠損中心位置における, モルタル表面からの深さ方向への距離を示している。また, それぞれのグラフには, EPMA 分析により得られた実験値に概ね一致するように解析値の縦軸方向に適当な倍数を乗じた補正值も示している。

ϕ 1mm ピンホール, ϕ 3.1mm ピンホールでは, 解析値より実験値が大きくなった。また, 補正值の倍数から, ϕ 1mm ピンホールでは, 実験値は解析値よりも 45.0 倍程度, ϕ 3.1mm ピンホールでは, 5.0 倍程度大きくなっていることがわかる。同様に 10mm 四方剥がれでも, 解析値より実験値が 1.7 倍程度大きくなった。20mm 四方剥がれでは, 実験値と解析値が概ね一致しており, 塩化物イオン浸透を予測できているといえる。これから, 欠損面積が小さくなるにつれ, 塩化物イオン濃度分布の解析値と実験値の乖離が大きくなり, その差は解析値より実験値の方が大きくなるといえる。

Fig. 21 Experimental value and analytical value in the depth direction of ϕ 1 mm pinhole specimen.

Fig. 22 Experimental value and analytical value in the depth direction of $\phi 3.1$ mm pinhole specimen.

Fig. 23 Experimental value and analytical value in the depth direction of 10 mm square delamination specimen.

Fig. 24 Experimental value and analytical value in the depth direction of 20 mm square delamination specimen.

4 欠損の進展を考慮しない再補修戦略例

4・1 解析条件・仮定条件

塩害環境下の表面被覆を施されたコンクリートの道路橋で隅角部にわたって欠損が生じた桁を想定し、再補修戦略を検討した。道路橋の設計供用期間は100年を想定し、鉄筋のかぶり厚は50mm、桁断面は高さ×幅＝

Fig. 25 Half symmetric model of assumed road bridge girder (Unit : mm).

750×500mmの長方形断面、再補修戦略の対象とする奥行きは2,000mmとし、解析上では、この桁の1/2対称モデルを用いた。

想定する道路橋は、新設時に予防保全的に表面被覆を施し、初期含有塩化物イオン濃度は 0 kg/m^3 とし、新設後5年時点での定期点検⁴⁾で、Fig. 25に示すように、 $\phi 1\text{ mm}$ のピンホールが隅角部にわたって6個、20、50、60mm四方の剥がれが隅角部にわたってそれぞれ1個の計4ケースの欠損を発見したと想定した。一般的に、表面被覆を行う際、塗装工法の都合上、隅角部では表面被覆材が薄くなりやすく、外部からの物理的な力などによって欠損が生じやすいため、欠損発生位置は隅角部を採用した。

欠損が生じていない部分の表面被覆材の見掛けの拡散係数は $0\text{ cm}^2/\text{yr}$ とし、欠損が生じている部分、すなわち、コンクリート表面のみから塩化物イオンが浸透すると仮定した。コンクリート表面の境界条件は、Neumann型境界条件とし、水セメント比、コンクリートの見掛けの拡散係数、流入塩化物イオン量の値は、既往の研究を参考にそれぞれ63%、 $2.00\text{ cm}^2/\text{yr}$ 、 $14.80\text{ mg/cm}^2/\text{yr}$ とした³⁾。また、欠損は経過年数に伴って進展しない、すなわち、発見時の形状・寸法を維持し続けると仮定した。さらに、欠損発生時点は未知とし、発見時点での欠損存在期間は、安全側となる最大の5年とし、新設時～5年で欠損部から塩化物イオンが浸透し続けたと仮定した。

以上の解析条件の下、かぶり50mm位置での塩化物イオン濃度が、 $W/C=63\%$ 時のコンクリートの鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度⁵⁾ $C_{lim}=1.51\text{ kg/m}^3$ に達しないように再補修戦略を検討した。

再補修工法は、「表面被覆塗替え工」、「断面修復工」を用いる場合を想定した。「断面修復工」は、桁側面50×400mmの範囲に深さ50mmの断面修復を適用した後、表面被覆を施すものとした。

4・2 解析結果

4ケースの欠損のそれぞれ再補修を行わない場合の新設時～100年のかぶり50mm位置の塩化物イオン濃度の経時変化をFig. 26に示す。 $\phi 1\text{ mm}$ ピンホール6個と20mm四方剥がれは100年時点でも C_{lim} に達していないため再補修の必要性はないといえる。50、60mm四方剥がれは、欠損発見時の5年時点では、 C_{lim} に達していないが、50mm四方剥がれは7.5年付近で、60mm四方剥がれは5.5年付近で C_{lim} に達するため、予防保全的に対策を行うべきであるといえる。

Fig. 26 Chloride ion concentration change at the 50mm depth in 0 to 100 years without repair.

Fig. 27 Chloride ion concentration change at the 50mm depth in 0 to 100 years by type of repairing method in the case of "50 mm square delamination".

Fig. 28 Chloride ion concentration change at the 50mm depth in 0 to 100 years by type of repairing method in the case of "60 mm square delamination".

50mm 四方剥がれに対し、5 年時点で「表面被覆塗替え工」を適用した場合のかぶり 50mm 位置の塩化物イオン濃度の経時変化を Fig. 27 に示す。かぶり 50mm 位置では、8 年まで塩化物イオン濃度が上昇するが、それ以降は減少していくという結果になった。新設時～100 年で C_{lim} に達する時点はないため、この再補修方法は適当

であるといえる。

60mm 四方剥がれに対し、5 年時点で「表面被覆塗替え工」を適用した場合、5 年時点で「断面修復工（深さ 50mm）」と「表面被覆工」を適用した場合のかぶり 50mm 位置の塩化物イオン濃度の経時変化を Fig. 28 に示す。5 年時点で「表面被覆塗替え工」を適用すると、6～12.5 年で C_{lim} を上回っており、この再補修方法では不十分であるといえる。5 年時点で「断面修復工（深さ 50mm）」と「表面被覆工」を適用すると、5 年で塩化物イオン濃度が 0 kg/m^3 になり、その後、断面修復範囲以深からの塩化物イオンの拡散により、濃度が多少上昇するが、新設時～100 年で C_{lim} に達する時点はないため、この再補修方法が適当であるといえる。

このように、様々な欠損に対して、コンクリートの塩化物イオン浸透予測を行うことで、再補修工法の選定を効率良く図ることができる。

5 結 言

本研究では、塩水浸せき・乾燥繰返し環境下で塩害促進した供試体に、硝酸銀噴霧法と EPMA 分析を行いモルタル内部の塩化物イオン分布を測定し、解析値と比較・検討した。また、表面被覆材欠損部からの塩化物イオン浸透により劣化するコンクリート構造物の再補修戦略を検討した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 欠損面積が小さくなるにつれ、塩化物イオン濃度分布の解析値と実験値の乖離が大きくなり、その差は解析値より実験値の方が大きくなった。
- (2) 欠損面積が小さくなるにつれ、また、暴露期間が長期間になるにつれ、剥がれ直下の浸透深さは、被覆なしの浸透深さよりも小さくなると考えられる。
- (3) 欠損の進展を考慮しない場合、 $\phi 1\text{mm}$ ピンホール 6 個や 20mm 四方剥がれ 1 個程度の欠損部からの塩化物イオン浸透は問題とならない。しかし、この知見は本研究の想定条件や仮定条件の下での結果であるため、実際に対象とする構造物ではその環境条件や構造物条件等の情報を用いて、慎重に検討する必要がある。
- (4) 環境条件や構造物条件が明らかならば、表面被覆材に欠損が生じたコンクリート構造物の塩化物イオン浸透予測が可能となり、効果的な再補修戦略の構築を図れる。

本研究を実施するにあたり、(株) ショーボンド建設の三村典正様、竹村学様、二木有一様には多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of Civil Engineers, "Recommendation for concrete repair and surface protection of concrete structures", Concrete Library119, pp.118 (2005).
- 2) N. Otsuki, M. Hisada, T. Otani and T. Maruyama, "Theoretical assessment of diffusion coefficient of chloride ion in mortar by electro-migration method", Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.592, V-39, pp.97-105 (1998).
- 3) Y. Yamada, T. Oshiro and Y. Masuda, "Analytical study on chloride penetration process and accumulation amount in concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.19, No.1, pp.949-954 (1997).
- 4) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, "About formulation of periodic inspection requirement, Regular inspection requirement for road bridge" (2014).
- 5) Japan Society of Civil Engineers, "Standard specifications for concrete structures-2012, Design", pp.149 (2013).