

報告 塩害を受けた道路橋床版の補修に関する一検討

木元 大輔*1・神谷 清志*2・立松 英信*3

要旨: 道路橋床版の塩害補修用として、塩分吸着剤の添加量を変えた超速硬型の塩害対策用補修材による補修効果を検証した。塩分吸着剤は塩化物イオンを吸着・固定し、亜硝酸イオンを放出する材料であり、コンクリート中の塩化物イオンの吸着・固定と亜硝酸イオンの放出により内部鉄筋の保護効果がある。これを用いた補修材により道路橋床版を断面補修した場合の鉄筋近傍の $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比分布の経年変化をシミュレーションにより求め照査した結果、鉄筋位置の塩化物イオン量が 10kg/m^3 以下の場合、断面修復材に対する塩分吸着剤の添加量を 1%以上とすることで、内部鉄筋の防錆効果は補修後 20 年以上持続することが判った。

キーワード: 塩分吸着剤, 塩化物イオン, 亜硝酸イオン, $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比, 防錆モルタル, 断面修復材

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物は建設後 40 余年を経過し、経年劣化の進行により、その維持補修が緊急の課題となっている。寒冷地における供用中の道路橋床版コンクリートでは、冬期に散布される凍結防止剤由来の塩化物イオンによる鉄筋腐食に伴う劣化が課題となっている。塩害劣化対策には亜硝酸リチウムが利用されているが、鉄筋の残存錆中に含有される塩化物イオンにより劣化が再度進行するとの報告もある¹⁾。そこで、この種の道路橋床版の補修用として、塩分吸着剤を用いた塩害対策用補修材の補修効果を検証することとした。塩分吸着剤は、塩化物イオンの吸着・固定と亜硝酸イオン放出の機能があり、残存錆に残留する塩化物イオンを吸着・固定する効果がある。なお、補修材は早期交通開放にも対応できる超速硬型とした。

本報では、断面修復材に対する塩分吸着剤の添加量を変化させた場合の補修後の内部鉄筋の防錆効果の持続性 ($\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比分布の経年変化) をシミュレーションにより解析し、照査した結果について報告する。

2. 塩分吸着剤とは

塩分吸着剤の概念図を図-1に示す。塩分吸着剤は、層状物質である水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$)中のカルシウムイオン (Ca^{2+}) の一部をアルミニウムイオン (Al^{3+}) に置き換えた構造のカルシウム・アルミニウム複合水酸化物で、この化合物が常に正に帯電するため、電気的中性を保つよう化合物の層間に亜硝酸イオン (NO_2^-) を保持させたものである。塩分吸着剤と塩化物イオン (Cl^-) が接すると、塩化物イオンが吸着・固定され、亜硝酸イオンを放出する。放出された亜硝酸イオンが鉄筋に不動態皮膜を形成するため、腐食を抑制することができる²⁾。すなわち、有害な塩化物イオンを吸着・固定して無害化

し、同時に防錆効果のある亜硝酸イオンを放出して鉄筋腐食を抑制する二重の効果をもたらす。この効果により、コンクリート中に残存する塩化物、特に、鉄筋錆中の残存する塩化物イオンに起因する再劣化防止に有効である。

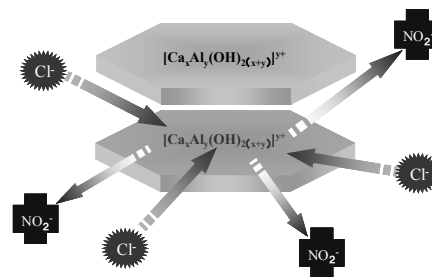


図-1 塩分吸着剤の概念図

3. シミュレーションによる防錆効果の解析

シミュレーションにより、補修後の躯体コンクリート中の塩化物イオン量および亜硝酸イオン量の分布の経年変化を解析し、内部鉄筋の防錆効果の持続性を照査した。防錆効果を示す指標としては、コンクリート中の亜硝酸イオンと塩化物イオンの分布状態、すなわち NO_2^- と Cl^- のモル比 (以下、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比) が用いられることが多く、Y.P.Virmani らは 0.8³⁾、Rosenberg らは 0.62⁴⁾、小林らは 0.6 程度以上⁵⁾としている。ここでは、防錆効果が維持できる $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比を 0.8 以上と設定した。

3.1 解析に用いた補修材と補修仕様

補修材は、早強型防錆ペースト、超速硬型の防錆モルタルおよび断面修復材とした。防錆モルタルおよび断面修復材の物性を表-1 および表-2 に示す。防錆ペーストは鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針 (案)・同解説 ((一社) 日本建築学会) の鉄筋コンクリート補修用防せい材の品質基準 (案) に、防錆モルタルおよび断面修復材は上面増厚工法設計施工マニ

*1 三菱マテリアル(株) セメント研究所 製品グループ 副主任研究員 (正会員)

*2 三菱マテリアル(株) セメント研究所 製品グループ グループリーダー(正会員)

*3 (株)ジェイアール総研エンジニアリング 相談役 (正会員)

ユアル（(公財) 高速道路調査会）に規定する物性を有しているものである。なお、補修材に対する水の混合比は、防錆ペーストが30%、防錆モルタルおよび断面修復材が12%とした。また、補修材に対する塩分吸着剤添加量は、防錆ペーストは10%、防錆モルタルは5%、断面修復材は0～5%の範囲で設定した。これらの補修材を用いた補修仕様の概要および補修モデルを表-3 および図-2(a)に示す。補修モデルは、はつり深さを上側鉄筋の半面の位置(52mm)に設定した。比較として、塩分吸着剤の代わりに断面修復材に亜硝酸リチウムを添加した場合についても検討した(図-2(b))。

表-1 防錆モルタルの物性

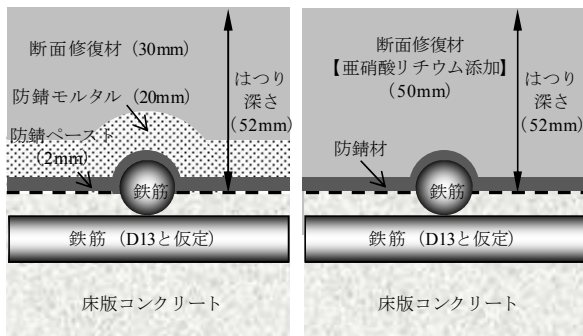
試験項目	環境温度			目標値
	5℃	20℃	35℃	
練上がり温度(℃)	10.7	23.3	37.2	—
静置フロー(mm)	176	183	184	180±30
始発時間(分)	42	57	48	40以上
材齢3時間圧縮強度(N/mm ²)	42.8	42.7	31.5	30.0以上

表-2 断面修復材の物性

試験項目	環境温度			目標値
	5℃	20℃	35℃	
練上がり温度(℃)	10.4	23.5	37.4	—
静置フロー(mm)	205	184	186	180±30
始発時間(分)	42	55	48	40以上
材齢3時間圧縮強度(N/mm ²)	33.4	49.6	38.7	30.0以上

表-3 補修仕様の概要

種類	補修材の施工厚さ	塩分吸着剤添加量
防錆ペースト	2mm	10%
防錆モルタル	20mm	5%
断面修復材	30mm	0～5%



(a) 塩分吸着剤添加 (b) 亜硝酸リチウム添加
図-2 補修モデル

3.2 解析条件

シミュレーションの解析条件を表-4に示す。シミュレーションは建設後20年における鉄筋かぶり深さの位置の塩化物イオン量が5, 10, 15 kg/m³の場合について行った。補修前のコンクリート表面の塩化物イオン量は、式(1)⁶⁾より求めたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数から式(2)⁶⁾を用いて算出し、それぞれ、14.3kg/m³, 28.7kg/m³, 43.1kg/m³とした。なお、断面修復材の見掛けの拡散係数は、測定値の0.30cm²/年を用いて計算した。

補修後から鉄筋腐食によりひび割れが発生する期間は、塩化物イオン量15kg/m³の場合で約1.5年と推定¹⁾されるため、防錆効果を発揮する補修後の経過年数の期間は1年以内と仮定した。また、補修後の供用期間は20年以上とし、断面修復後の表面からの塩分の供給は受けないものとした。

$$\log_{10} D = 3.0 \left(\frac{W}{C} \right) - 1.8 \quad (1)$$

$\frac{W}{C}$: 水セメント比

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

C : 床版コンクリート中の塩化物イオン量 (kg/m³)

C_0 : 床版コンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m³)

x : 橋床版コンクリート表面からの距離 (cm)

D : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/年)

t : 経年数 (年) (ここでは $t = 20$ 年)

表-4 シミュレーションの解析条件

入力条件		入力値	
補修前	経過年数	20年	
	コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数	0.70cm ² /年	
	コンクリート表面の塩化物イオン量	塩化物イオン量 5 kg/m ³	14.3 kg/m ³
		塩化物イオン量 10 kg/m ³	28.7 kg/m ³
塩化物イオン量 15 kg/m ³		43.1 kg/m ³	
補修後	解析深さ	30cm	
	補修後供用期間	20年	
	浸透深さのきざみ幅(Δx)	0.5cm	
	時間のきざみ幅(Δt)	0.025年	
	解析の安定を示す定数* (r = Δt/Δx ²)	0.10	
	補修後の表面塩化物イオン量	0.00 kg/m ³	

*r ≤ 1/2 で収束, r > 1/2 で発散

3.3 補修前のコンクリートの塩化物イオン量の分布

補修前の塩化物イオン量の分布を図-3に示す。建設後20年で鉄筋かぶり深さの位置の塩化物イオン量が5, 10, 15 kg/m³になるよう、式(2)より補修前の塩化物イオン量の分布を算出した。

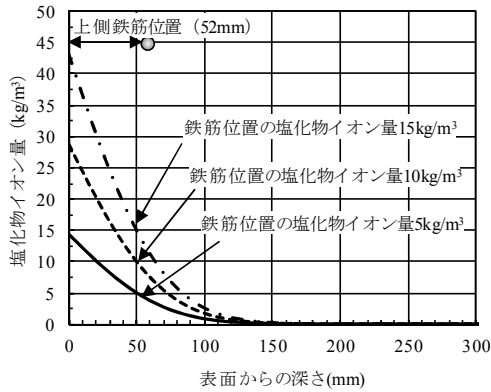


図-3 補修前の塩化物イオン量の分布

表-5 各材料の塩化物イオン吸着量および亜硝酸イオン放出量

種類	塩分吸着剤添加量(%)*	塩化物イオン吸着量(mg/g)	亜硝酸イオン放出量(mg/g)
防錆ペースト	10	4.0	15.0
防錆モルタル	5	3.0	10.0
断面修復材	0	0.0	0.0
	1	0.7	2.0
	3	1.9	6.0
	5	3.0	10.0

* 補修材に対する添加量

表-6 補修材の塩化物イオン吸着能力と亜硝酸イオン放出能力

種類	補修材	塩分吸着剤添加量(%)	施工厚さ(mm)	使用量(kg/m ²)	塩化物イオン吸着能力(g/m ²)	亜硝酸イオン放出能力(g/m ²)	亜硝酸リチウム添加量(kg/m ³)
塩分吸着剤添加量 0%	防錆ペースト	10	2	2.8	11.2	42.0	—
	防錆モルタル	5	20	40.0	120.0	400.0	—
	断面修復材	0	30	60.0	0.0	0.0	—
	計				131.2	442.0	—
塩分吸着剤添加量 1%	防錆ペースト	10	2	2.8	11.2	42.0	—
	防錆モルタル	5	20	40.0	120.0	400.0	—
	断面修復材	1	30	60.0	42.0	120.0	—
	計				173.2	562.0	—
塩分吸着剤添加量 3%	防錆ペースト	10	2	2.8	11.2	42.0	—
	防錆モルタル	5	20	40.0	120.0	400.0	—
	断面修復材	3	30	60.0	114.0	360.0	—
	計				245.2	802.0	—
塩分吸着剤添加量 5%	防錆ペースト	10	2	2.8	11.2	42.0	—
	防錆モルタル	5	20	40.0	120.0	400.0	—
	断面修復材	5	30	60.0	180.0	600.0	—
	計				311.2	1042.0	—
亜硝酸リチウム添加	防錆材	0	2	2.8	0.0	0.0	—
	断面修復材	0	50	100.0	0.0	0.0	55
	計				0.0	0.0	55

3.4 補修直後の塩化物イオン量, 亜硝酸イオン放出能力および塩化物イオン吸着能力

補修直後の塩化物イオン量は、補修前の塩化物イオン量の分布から、はつり深さまでを削除した分布とした。補修材中の亜硝酸イオンは、補修部分に均等に存在するものと仮定した。塩分吸着剤を用いた補修工法では、表-5 に示す各補修材の亜硝酸イオン放出量から、表-6 に示す亜硝酸イオン放出能力を算出し、この亜硝酸イオン放出能力を補修厚さで割り戻して算出した。なお、亜硝酸リチウムの添加量は 55kg/m³ とした。塩化物イオン量が 10kg/m³ の場合を一例として、補修直後の塩化物イオン、亜硝酸イオン放出能力および塩化物イオン吸着能力を図-4 に示す。

3.5 補修後の塩化物イオンおよび亜硝酸イオンの拡散

朝倉らの研究⁷⁾では、コンクリート部材の塩分浸透解析において、フィックの拡散方程式の理論解が適用できない初期値、境界条件に対して、差分法による数値解析を適用し、塩分浸透を解析的に予測できるとしている。本報告では、これを応用して塩化物イオンおよび亜硝酸イオンの拡散状況を差分法により解析した。ただし、塩分吸着剤による塩化物イオンの吸着・固定の作用はフィックの拡散方程式では説明できないので、以下の塩化物

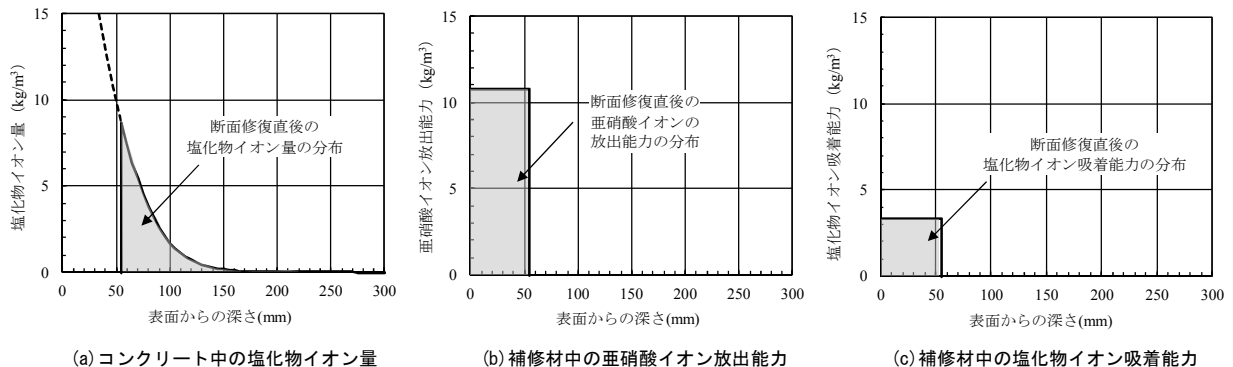
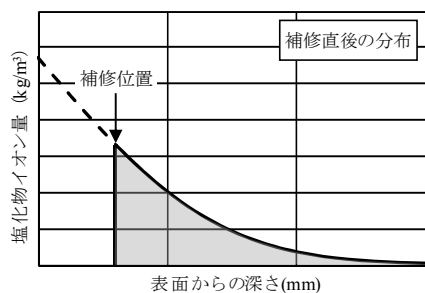


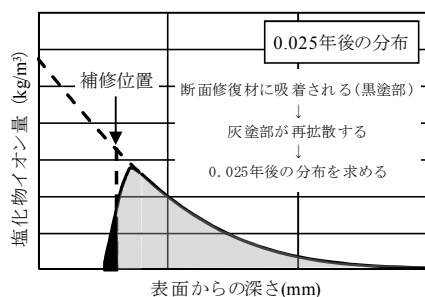
図-4 補修直後の塩化物イオン、亜硝酸イオン放出能力および塩化物イオン吸着能力 (塩分吸着剤添加量 1%)

イオン吸着・固定をモデル化した手順を解析に加えた。本報告では、これを応用し補修後の塩化物イオンおよび亜硝酸イオンの拡散状況を計算した。

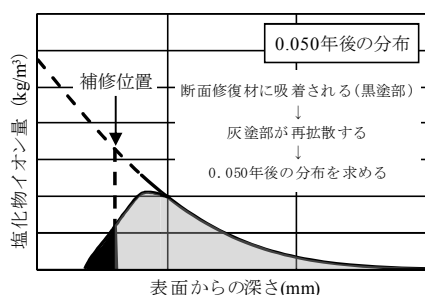
塩化物イオン拡散状況の模式図を図-5に示す。図-5(a)を初期条件として計算すると、0.025年後の分布は図-5(b)のようになる。ここで黒塗部の塩化物イオンは吸着されて0になり、その後、補修位置より深い位置の灰塗部の塩化物イオンが再拡散する。これを0.025~0.050年の間も同様に計算すると、図-5(c)のように0.050年後の分布が求まる。以下、同様の計算を塩化物吸着量の総和が表-6の塩化物イオン吸着能力に達するまで繰り返す(塩分吸着剤1%では 173.2g/m^2 となる)。なお、亜硝酸イオンについては単純な拡散のみによるものとした。井上らの研究⁸⁾では、同一水セメント比における亜硝酸イオンと塩化物イオンの拡散係数はともに近い値になるとの報告がある。よって、亜硝酸イオンの拡散係数は、塩化物イオンの拡散係数と同じとし、断面修復材は $0.30\text{cm}^2/\text{年}$ 、コンクリートは $0.70\text{cm}^2/\text{年}$ を用いて計算した。



(a) 補修直後の分布



(b) 0.025 年後の分布



(c) 0.050 年後の分布

図-5 塩化物イオン拡散状況の模式図

3.6 解析結果

防錆効果は、断面修復後の上側鉄筋背面部の位置における、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比により評価した。断面修復材に対する塩分吸着剤の添加量と $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比が 0.8 以上となる年数の関係を図-6に示す。

(1) 塩分吸着剤添加量 0%の場合

$\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化を図-7に示す。 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は、鉄筋位置の塩化物イオン量が 5kg/m^3 では約 0.8 年で 0.8 以上となり、その後は継続して 20 年まで増加する。塩化物イオン量が 10kg/m^3 では約 1.8 年で 0.8 以上となり、20 年までは 6.0 近傍で推移している。塩化物イオン量が 15kg/m^3 では約 2.7 年で 0.8 以上となり、約 5 年以降は 1.5 近傍で推移している。なお、本シミュレーションは、断面修復後の表面からの塩分の供給は受けないものとしている。塩化物イオン量が 10 および 15kg/m^3 では、補修後に $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 0.8 以上を得られる経過年数は 1 年以上となるため、防錆環境が形成される前に腐食が進行する可能性がある。したがって、塩分吸着剤を添加しない場合では、塩化物イオン量が 5kg/m^3 以下で補修後 20 年以上、内部鉄筋の防錆効果が維持できる。

(2) 塩分吸着剤添加量 1%の場合

$\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化を図-8に示す。 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は、鉄筋位置の塩化物イオン量が 5kg/m^3 では約 0.6 年で、塩化物イオン量が 10kg/m^3 では約 1 年で 0.8 以上となり、その後は継続して 20 年以上は増加する。一方、塩化物イオン量が 15kg/m^3 では、約 2 年で 0.8 以上となるため、防錆環境が形成される前に腐食が進行する可能性がある。したがって、塩分吸着剤を 1% 添加した場合は、塩化物イオン量が 10kg/m^3 以下で補修後 20 年以上、内部鉄筋の防錆効果が維持できる。

(3) 塩分吸着剤添加量 3%の場合

$\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化を図-9に示す。 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は、鉄筋位置の塩化物イオン量が 5kg/m^3 では約 0.5 年で、塩化物イオン量が 10kg/m^3 では約 0.9 年で 0.8 以上となり、その後は継続して 20 年以上は増加する。一方、塩化物イオン量が 15kg/m^3 では約 1.5 年で 0.8 以上となるため、防錆環境が形成される前に腐食が進行する可能性がある。したがって、塩分吸着剤を 3% 添加した場合は、塩化物イオン量が 10kg/m^3 以下で補修後 20 年以上、内部鉄筋の防錆効果が維持できる。

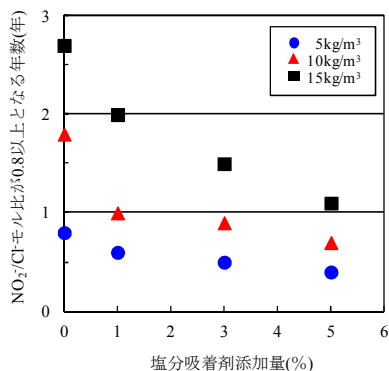


図-6 断面修復材に対する塩分吸着剤添加量と $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比が 0.8 以上となる年数の関係

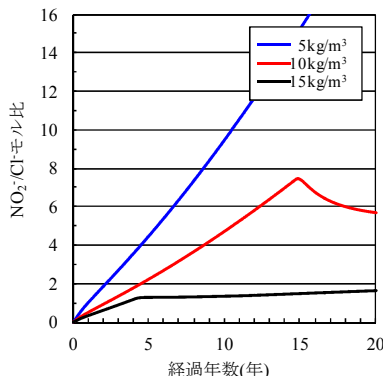


図-7 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化 (塩分吸着剤添加量 0%)

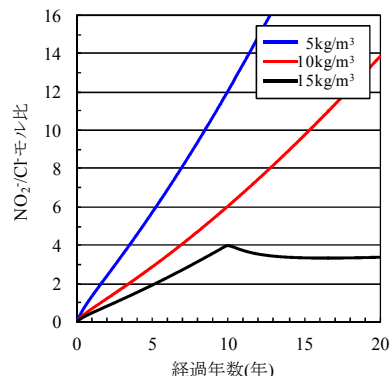


図-8 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化 (塩分吸着剤添加量 1%)

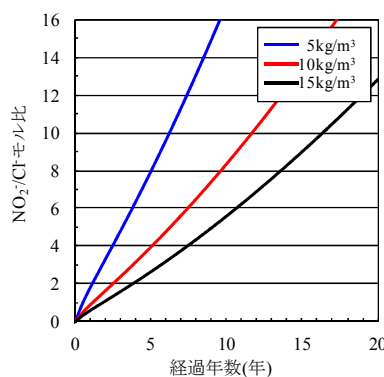


図-9 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化 (塩分吸着剤添加量 3%)

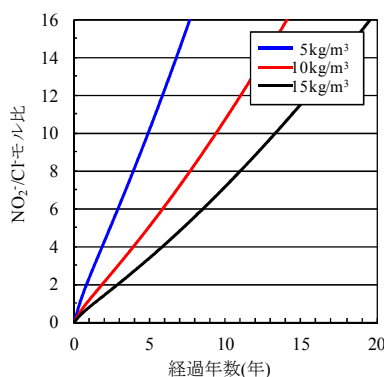


図-10 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化 (塩分吸着剤添加量 5%)

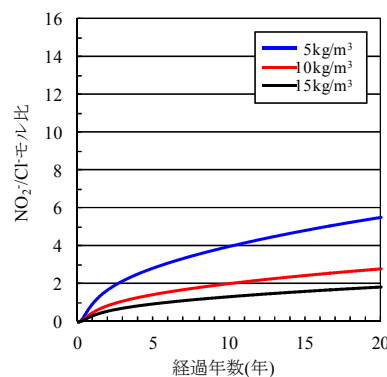


図-11 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化 (亜硝酸リチウム添加)

(4) 塩分吸着剤添加量 5% の場合

$\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化を図-10 に示す。 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は、鉄筋位置の塩化物イオン量が 5kg/m^3 では約 0.4 年で、塩化物イオン量が 10kg/m^3 では約 0.7 年で 0.8 以上となり、その後は継続して 20 年以上は増加する。一方、塩化物イオン量が 15kg/m^3 では約 1.1 年で 0.8 以上となるため、防錆環境が形成される前に腐食が進行する可能性がある。したがって、塩分吸着剤を 5% 添加した場合には、塩化物イオン量が 10kg/m^3 以下で補修後 20 年以上、内部鉄筋の防錆効果が維持できる。

(5) 亜硝酸リチウム添加の場合

$\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比の経年変化を図-11 に示す。 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は、鉄筋位置の塩化物イオン量が 5kg/m^3 では約 0.8 年で 0.8 以上となり、その後は継続して 20 年以上は増加する。塩化物イオン量が 10kg/m^3 では約 1.9 年で、 15kg/m^3 では約 3.7 年で $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比が 0.8 以上となる。したがって、塩化物イオン量が 10 および 15kg/m^3 では、防錆環境が形成される前に腐食が進行する可能性がある。よって、亜硝酸リチウムを添加した場合には、塩化物イオン量が 5kg/m^3 以下で補修後 20 年以上、内部鉄筋の防錆効果が維持できる。

4. まとめ

塩分吸着剤を用いた超速硬型の塩害対策用補修材を用い、設定した補修仕様の内部鉄筋の防錆効果の持続性について $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比分布の経年変化をシミュレーションにより解析し照査した。鉄筋位置の塩化物イオン量が 10kg/m^3 以下の場合、断面修復材に対する塩分吸着剤の添加量を 1% 以上とすることで、補修後 20 年以上内部鉄筋の防錆効果が維持できることが判った。一方、亜硝酸リチウムを添加した場合には、補修後 20 年以上内部鉄筋の防錆効果を維持できる塩化物イオン量は 5kg/m^3 以下であった。このことより、塩分吸着剤を用いた場合は、より塩化物イオン量が高い場合でも防錆効果が長期間維持できることが判った。

今後は、促進試験や暴露試験により、本解析の妥当性を検証する予定である。さらに、塩害を受けた道路橋床版での試験施工を行い、実環境下における防錆性能を評価する予定である。

参考文献

- 1) 飯島 亨ほか：塩害を受けた PC けたを用いた長期暴露供試体による断面修復工法の補修効果の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 12 巻，pp.281-288，2012
- 2) 立松英信ほか：塩化物イオン吸着剤を活用した防錆型補修材及び補修工法，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集，pp.1-6，1996
- 3) Y. P. Virmani, K. C. Cleear and T. J. Pasco, Jr. : Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, V. 5, Calcium Nitrite Admixture or Epoxy-Coated Reinforced Bars as Corrosion Protection Systems, Report No FHWA-RD-83-012, Federal Highway Administration D. C, 1983
- 4) J. M. Gaidis and A. M. Rosenberg : The Inhibition of Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete by Calcium Nitrite, American Society for Testing and Materials, 1980
- 5) 小林明夫, 八重樫明彦, 黒田 武, 笹野哲郎：コンクリート中の鉄筋発錆に対する塗布型抑制剤の効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.1, pp.405-410, 1987
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)，p155, 2012
- 7) 朝倉啓仁, 田口史雄：差分法による数値解析を用いたコンクリート部材の塩分浸透解析，土木学会北海道支部論文報告集，第 61 号，V-15, 2005
- 8) 井上和久, 松里広昭, 綾田隆史：塗布型防錆剤を用いた鉄筋コンクリートの防食工法に関する研究その 2 コンクリート中への防錆剤の浸透に関する検討，日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集，pp.19-22 , 1995