

報告 地下鉄トンネルにおける塩害対策の優先順位と補修方法の決定

武藤義彦*¹・新田裕樹*²・小椋紀彦*³

要旨：地下鉄トンネルにおいて塩害による変状が発生し、今後発生する可能性がある区間でも予防保全の観点から塩害対策を実施することが必要であった。塩害対策区間の簡易的な決定方法として、トンネル漏水の塩化物イオン濃度と建設工法を用いた塩害対策優先区間の選定表を作成した。また、営業線という特殊な環境下において施工可能である塩害補修の基本方針と補修方法を決定した。塩害対策システムを構築したことにより、コンクリート中の塩化物イオン濃度など詳細な調査を行わなくても地下鉄トンネルの塩害対策を効率的に実施することが可能となった。

キーワード：地下鉄トンネル、予防保全、塩害対策区間、塩害補修範囲、塩害対策システム

1. はじめに

東京地下鉄(株) (以下、東京メトロという) は東京圏に 9 路線、195.1km の営業線を運行し、首都東京の重要な交通機関として社会生活を支えている。土木構造物の維持管理については検査と補修を確実に実施し、営業線の 85% であるトンネルでは定期検査に加えて定期的な打音点検や可視画像によるはく離箇所の早期発見、赤外線による内面状態の監視を実施している。

近年、営業線におけるコンクリートのはく落が発生しており、はく落等による劣化部分を補修した箇所の再劣化が検査から報告され原因が塩害によるものであることが判明した。予防保全の観点からも塩害対策を集中的に実施することが必要であると考え、営業線のトンネルの中から優先順位を付けた塩害対策区間を決定し、補修範囲と補修方法を定めて塩害対策工事を実施した。本報告ではこれらの詳細について述べる。

2. 塩害検討区間の特定¹⁾

塩害が発生する原因である塩分の侵入経路として、海水および感潮域河川からトンネル内への漏水が考えられた。営業線において河川や東京湾近郊の埋立地等と交差・近接する 75 箇所(図-1)を選定し、その中でも建設年次が古く、はく離・はく落の変状と補修面積が大きい箱型トンネル 49 区間について塩害対策を検討することとした。箱型トンネル 49 区間のうち、漏水の多い 21 区間を選定し漏水中の塩化物イオン濃度を測定した。

その結果、地上部の環境種別により 5 つに分類することができた(図-3)。鉄筋腐食に大きく影響を与える塩化物イオン濃度としてドイツ工業規格では 500 mg/L 以上としており、その値を目安とした。その中でも「感潮域河川下」「明治以降の埋立地下」および「低地帯で明治

以降の埋立地下」のうち東京湾近郊の区間が比較的高い塩化物イオン濃度を示した。また「感潮域河川下」におけるトンネルの漏水中の塩化物イオン濃度は概ね河川等と交差・近接する境界から前後 50m まで離れば低いことがわかった。塩化物イオン濃度の影響範囲を河川等の境界から前後 50m とし、この区間を塩害の検討が必要な塩害検討区間とした(図-2)。



図-1 東京メトロ路線での河川等と交差・近接する区間

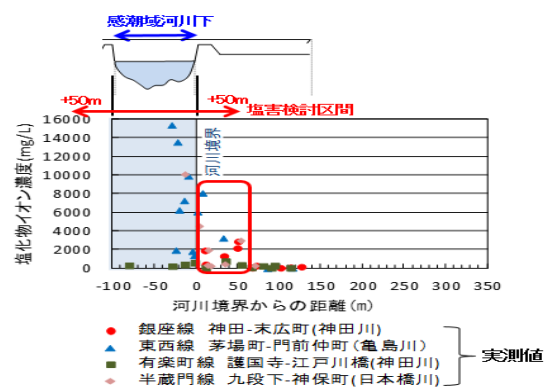
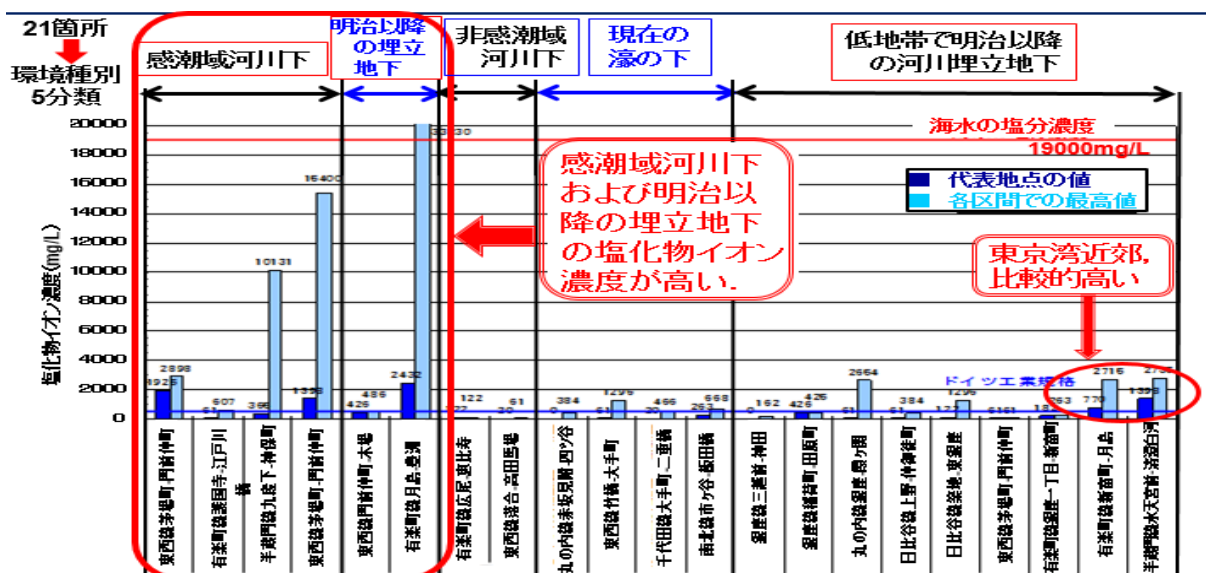


図-2 塩化物イオン濃度の影響範囲

*1 (株)メトロレールファシリティーズ 工修 (正会員)

*2 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 工修

*3 (株)CORE 技術研究所 技術部 工修 (正会員)



※各区間で最も漏水が発生している箇所を代表地点の値とする

図-3 トンネル漏水の塩化物イオン濃度測定結果

3. コンクリートへの塩分浸透メカニズムの調査¹⁾

トンネル内におけるコンクリート中の塩化物イオンの侵入経路を考察するため、トンネル側壁の漏水箇所ですべての箇所においてトンネル内面からの深さと塩化物イオン濃度を測定した。その結果、トンネル内面側の塩化物イオン濃度が高く、内部に入るほど低くなる傾向であった(図-4)。トンネル躯体の地山側にある地下水が躯体を貫通したひび割れ等を水みちとしてトンネル内面に漏水として入り、内面側からトンネル躯体のコンクリート中に塩化物イオンが浸透していることがわかった。

さらに漏水に関係するトンネル躯体外側の防水工の有無に着目し、建設工法の異なる箇所において側壁の壁厚に近い長尺のコア採取を実施した。潜函工法やイコス工法等、特殊な工法では施工上の制約からすべての外周で防水工ができず、その区間は河川部の横断箇所や軟弱な地盤で地下水位が高いなど施工が非常に困難であり、トンネル漏水も多い区間である。潜函工法やイコス工法ではトンネル内面側の塩化物イオン濃度は高く、地山側からも塩化物イオンの浸透は認められた。長尺のコア採取は7箇所であるが、地山側の塩化物イオン濃度が浸透

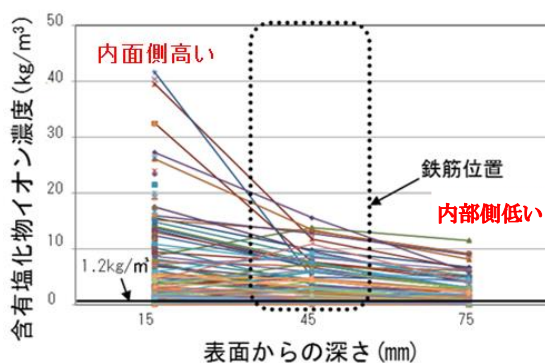


図-4 塩化物イオン濃度の分布

している箇所においては鉄筋には錆は認められなかった。

鉄筋が腐食するには酸素の存在が不可欠である。地山側の外には地下水が存在してコンクリート内に浸透する場合もあるが、地下水内の酸素拡散は内面側に比べて速度は非常に遅く内面側よりも鋼材の腐食は進行しにくく²⁾、塩害対策はトンネル内面の漏水箇所に対して補修を実施することが重要であると考えた。

4. 塩害対策の補修方法

4.1 塩害補修方法の基本方針

塩害対策は、塩分の浸透および劣化状況に応じて補修を行うこととした。塩化物イオンが浸透してすでに変状が発生している箇所では、断面修復工法、電気防食工法、表面含浸工法を実施することとし、具体的には劣化箇所のはつり落とし、鉄筋のケレン、犠牲

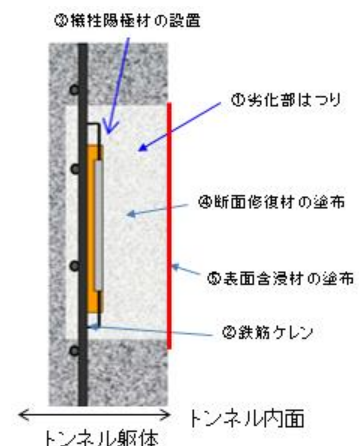


図-5 塩害対策の補修

陽極材の設置、断面修復材の塗布、表面含浸材の塗布を実施する(図-5)。塩化物イオンが浸透しているが変状が発生していない箇所では、表面含浸工法のみを実施する。

表面含浸工法を行うことでこれ以上の塩化物イオンの浸透を抑制できるとともに、表面含浸材の撥水機能によりコンクリート中の水分が減少することでさらに塩害による劣化に対して抑制効果がある^{3) 4)}。浮きやひび割

写真-1 硝酸銀溶液の噴霧状況



れ等の変状がなく強度が確保されたコンクリートであることから、躯体をはつることによる構造物への影響が懸念され、塩化物イオンの浸透だけでははつらないこととした。

4. 2 塩害補修範囲の決定方法¹⁾

塩化物イオンを含んだ漏水および漏水跡に対して塩害対策を行うため、漏水の面的な影響範囲を決定することが必要である。現場で簡単に塩害補修範囲を判断できる方法としてコンクリート表面に硝酸銀溶液を噴霧する方法（硝酸銀溶液噴霧法）を考案した（写真-1）。塩化物イオンが存在すれば化学反応で白色に変色する。白色に変色する塩化物イオン濃度の閾値は $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ であることから、安全側で判定する簡易な方法として塩害対策の補修時に利用することとした。

4. 3 塩害補修工法の選定⁵⁾

(1) 電気防食工法

塩害による腐食反応を抑制する電気防食工法としては外部電源方式と流電陽極方式が用いられており、外部電源方式は湾岸構造物等で効果を上げている。トンネル内の信号設備等電気設備への影響が懸念されることのない流電陽極方式である犠牲陽極材を採用することとした。さらに狭あいな空間であるトンネル内での建築限界や落下の危険性等の問題から、犠牲陽極材はコンクリート内部に埋設するものとした。

(2) 表面含浸工法

塩分の浸透を抑制する工法として表面被覆工法と表面含浸工法がある。感潮域河川下の潜函部トンネルにおいて表面被覆材（ポロウレタン樹脂塗料）の塗布を行ったが、施工3年後に被覆材の膨れやはがれの再劣化が発生し、コンクリート内の水分が内部に閉じ込められたことが原因と判明した。遮塩性と水蒸気透過性のある表面含浸工法を採用することとし、他社のヒヤリングや施工実績からシラン系の液状とクリーム状の表面含浸材を選定し効果確認の試験を実施した（図-6）。その結果、液状の表面含浸材が塩化物イオンの浸透を抑制する効果が高いとともに、液状の表面含浸材は浸透が深いためコンクリート表層部を清掃しても効果が持続し、上塗りもで

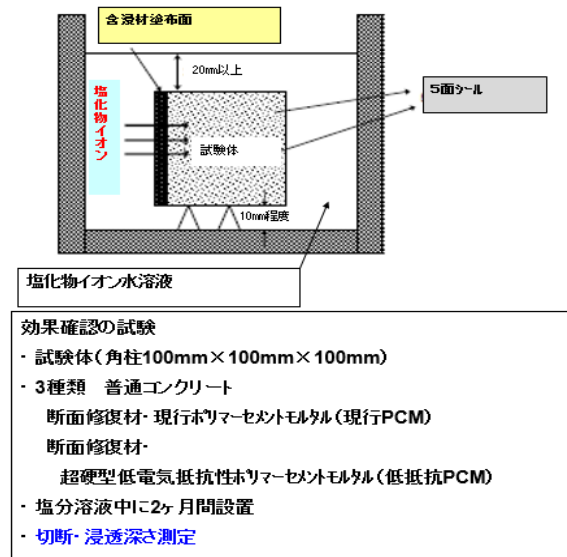


図-6 表面含浸材の効果確認の試験手順

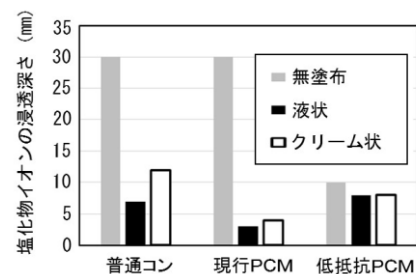


図-7 含浸材塗布時の塩化物イオン浸透深さ

き長期的に効果が期待できることから、液状の表面含浸材を採用した（図-7）。

(3) 断面修復材と犠牲陽極材との組合せ

犠牲陽極材の効果を確認するため、亜鉛量の異なる3種類の犠牲陽極材と電気抵抗率の異なる2種類の断面修復材の補修方法で抑制効果について供試体による試験を実施した。塩害対策において抑制効果が高い塩分吸着型防錆材との組合せも合わせて実施した（表-1）。

供試体は高さ25mmまで塩化物イオン濃度 $10\text{kg}/\text{m}^3$ を混入してコンクリートを打設した。約1ヵ月間気中環境で養生、鉄筋の発錆状況を再現し、そこに組合せを変えた補修条件を適用した。約1年間の促進曝露の後、供試体を解体して鉄筋の腐食度を測定した。

その結果、犠牲陽極材の効果を高めるためには断面修復材は低電気抵抗率ポリマーセメントモルタル、犠牲陽極材は亜鉛量の小さいものが効果は高かった。犠牲陽極材の効果持続時間は解体試験と積算電流量から求めた理論的な計算値から10年程度であることが判明した。犠牲陽極材については使用されているバックフィル材（臭化リチウム、硫酸リチウム）が亜鉛の効果を高めると考えられるが、今後も検証が必要である。塩分吸着型防錆材を使用したものは高い抑制効果があったが、硬化するのに時間がかかることから、施工時間が短く施工終了後

表一 補修方法の検討に用いた材料

	種類	組成等
犠牲陽極材	犠大	亜鉛160g バックフィル材(水酸化リチウム)
	犠中	亜鉛85g バックフィル材(水酸化リチウム)
	犠小	亜鉛38g バックフィル材(臭化リチウム, 硝酸リチウム)
鉄筋防錆材	鉄筋防錆ペースト	亜硝酸型ハイロカルマイト含有 添加率20%以上
	鉄筋防錆モルタル	亜硝酸型ハイロカルマイト含有 添加率15%以上
断面修復材	現行PCM	アクリル樹脂エマルジョン含有軽量PCM
	低抵抗PCM	粉末樹脂、短繊維プレミックスPCM 低電気抵抗率, 超速硬化性
	塩分吸着PCM	亜硝酸型ハイロカルマイト含有PCM 添加率1%以上

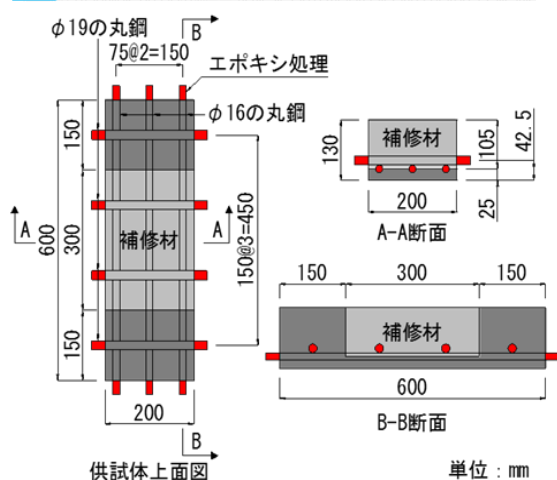


図-8 供試体の概要

30分で電車が通過するなどのトンネル内における作業制約から落下の危険性と作業効率の悪さから使用することはできなかった。

以上から、断面修復材は低電気抵抗率ポリマーセメントモルタルを、犠牲陽極材は亜鉛量の小さい製品を使用し、表面含浸材は液状のものを使用することとした。

5. 東京メトロの塩害対策方針

5.1 塩害対策優先区間の選定表の作成

東京メトロでは予防保全の観点から塩害対策工事を早急に実施することとした。塩害検討区間すべてにおい

表二 塩害対策優先区間の選定表

		箱型トンネルの施工法	
塩化物イオン濃度	高濃度	潜函工法・イコス工法 8区間 1,446m 優先度A	開削工法 15区間 6,431m 優先度B1
	低濃度	4区間 1,430m 優先度B2	22区間 6,581m 優先度C

てコンクリート中の塩化物イオン濃度など詳細な調査が実施されていない中で、塩害検討区間から優先的に実施する区間を選定することを考えた。これまでの調査結果から、塩害が発生する可能性が高い区間として、

- ・防水工がなく、漏水が多く発生する可能性が高い潜函工法など特殊な工法で建設されたトンネル区間
- ・漏水中の塩化物イオン濃度が高い区間

に着目し、塩害対策優先区間の選定表を作成した（表二）。塩害検討区間である箱型トンネル49区間において、防水工が行われている開削工法と一部行われていない潜函工法・イコス工法等の特殊な工法に区分するとともに、漏水中の塩化物イオン濃度5,000mg/Lを境界として高濃度と低濃度に区分を行った。

感潮域河川の塩化物イオン濃度は東京湾から2km程度の範囲（東京湾沿岸）では5,430mg/L～13,775mg/Lであり、3km以上離れた内陸部では急激に低下し1,800mg/L～3,000mg/Lであることが調査からわかった。トンネル内の漏水箇所におけるはつり調査から鉄筋の腐食が多い区間は概ね5,000mg/Lであることから、選定表における高濃度と低濃度の境界を5,000mg/Lとすることとした。なお、漏水中の塩化物イオン濃度を測定していない区間については東京湾からの距離が同程度のトンネル漏水の塩化物イオン濃度または公表されている河川等の塩化物イオン濃度を目安として用いることとし、今回はすべての区間で値が推測できる河川等の塩化物イオン濃度を用いて塩害検討区間49区間を区分した。

5.2 対策区間の優先順位

塩害対策の優先度Aの8区間1,446mは2014年から塩害対策工事を実施した（表三）。優先度B1の15区間6,431mは対象延長が多いため、さらに優先度を付けた。優先度B1の15区間における2005年までの定期検査の

表三 対策優先度Aの塩害対策工事区間

路線名	駅間	河川名称	影響範囲	環境種別	工種	河川中のCl-濃度 (mg/L)	漏水中のCl-濃度 (mg/L)	採取コアのCl-量 d=3cm (kg/m ²)	採取コアのCl-量 d=7cm (kg/m ²)	損傷・補修面積率 (%)
日比谷線	人形町駅～茅場町駅	日本橋川	170	I	潜函	5430		16.04	7.79	12.6
日比谷線	八丁堀駅～築地駅	築地川	196	V	潜函	11295				11.4
東西線	日本橋駅～茅場町駅	横川	140	V	開・ト	6758				19.9
東西線	茅場町駅～門前仲町駅	亀島川	160	I	開・ト	6758	15400	11.81	3.61	28.7
東西線	茅場町駅～門前仲町駅	隅田川	320	I	潜函	9325		16.15	9.12	11.4
東西線	茅場町駅～門前仲町駅	大島川	140	I	潜函	9325				7.2
千代田線	新御茶ノ水駅～大手町駅	日本橋川	180	I	開・ト(東)	5430		18.92	7.99	20.2
半蔵門線	九段下駅～神保町駅	日本橋川	140	I	開・ト	5430	365			5.1

結果から、単位面積あたりの損傷・補修面積率が10%以上の2区間280mと、東京湾沿岸に位置する東西線と有楽町線の坑口4区間4,137mを実施することとした(表-4)。これら優先度Aの8区間とB1の6区間、合計14区間について塩害対策工事を実施する塩害対策区間とした。

優先度B1の残り9区間、B2の4区間およびCの22区間は個別には塩害対策工事は実施せず、2年に1回実施している定期検査の結果から漏水および漏水跡の箇所について塩害対策を実施することとした。

塩害対策工事の補修を実施する前には事前調査として、硝酸銀溶液噴霧法を用いて対象区間で漏水および漏水跡の回りにおける塩分の有無を調べる。塩害対策の基本方針に基づき、塩分がある場合には打音検査で浮き・ひび割れ等の変状があるかを判定し、変状がある範囲は犠牲陽極材の設置と断面修復工、表面含浸工を行い、変状がない範囲は表面含浸工のみを施工することで補修面積を決定した。

5.3 塩害対策工事の効果

2017年時点で塩害対策工事を完了した6区間1,110mの補修実績から、通常の断面修復を施工した場合との費用対効果について20年間の試算を行った。側壁と上床の犠牲陽極材・断面修復と表面含浸材塗布の面積から、塩害対策の費用は約3億2000万円である。通常の断面修復を行った場合には塩害による再劣化を4年と仮定すると約5億4000万円となる。塩害対策工事を実施することにより20年間で約4割の費用を削減できることになる。

再劣化の時期を4年としているが、塩害区間における通常の断面修復の再劣化時期、さらに犠牲陽極材の交換時期、表面含浸材の再塗布時期等、今後モニタリングを

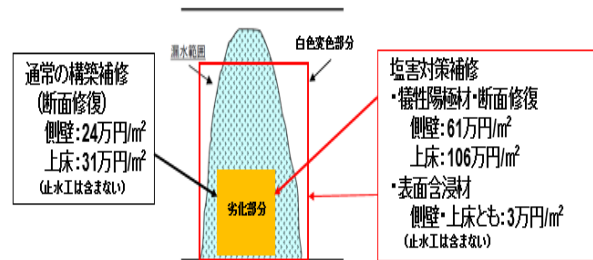


図-9 塩害対策の費用対効果

行っていく必要がある(図-9)。

6. 塩害対策システムの構築

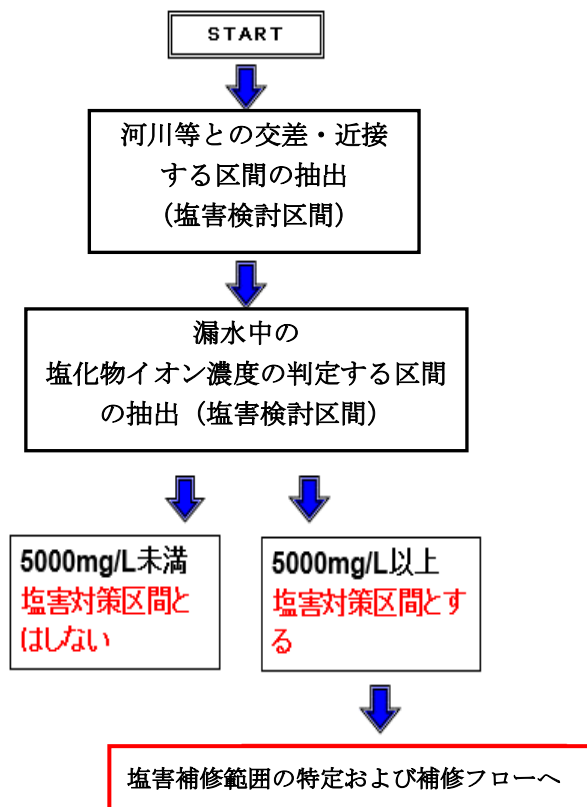
東京メトロにおける塩害対策優先区間の選定方法と同様な考え方をを用いることで、一般の地下鉄事業者においても塩害対策区間と塩害補修範囲を特定できる簡易的な地下鉄箱型トンネルの塩害に対する塩害対策システムの総合フローを構築した。

塩害対策区間の特定では河川等と交差・近接する区間を抽出し、その前後50mを加えた区間を塩害検討区間とする。その区間における漏水中の塩化物イオン濃度を測定し5,000mg/L以上であれば塩害対策区間とする。なお、漏水中の塩化物イオン濃度を測定できない場合は調査されている河川等の塩化物イオン濃度結果を目安として用いることも可能である(図-10)。

塩害対策区間において塩害補修範囲を特定する必要がある。塩害対策区間内にある漏水または漏水跡の部分が硝酸銀溶液噴霧法によって白色に変色するかを判定する。白色に変色すれば塩分が存在、劣化に進展する可能性がある。白色部分について打音検査を行い、濁音が認められれば浮き・ひび割れ等の劣化が発生していることから、犠牲陽極材、断面修復工、表面含浸工を実施する。

表-4 対策優先度B1の塩害対策工事区間

路線名	駅間	河川名称	影響範囲	環境種別	工種	河川中のCl-濃度(mg/L)	漏水中のCl-濃度(mg/L)	採取コアのCl-量d=3cm(kg/m3)	採取コアのCl-量d=7cm(kg/m3)	損傷・補修面積率(%)
銀座線	日本橋駅 ~ 三越前駅	日本橋川	160	I	開削	5430				0.1
銀座線	三越前駅 ~ 神田駅	亀開川	140	V	開削	5430	0			3.2
銀座線	稲荷町駅 ~ 田原町駅	新堀	140	V	開削	8025	426			11.4
銀座線	田原町駅 ~ 浅草駅	隅田川	670	I	開削	8025				3.8
丸の内線	淡路町駅 ~ 大手町駅	日本橋川	150	I	開削	5430	61	3.12	1.45	9.4
日比谷線	上野駅 ~ 仲御徒町駅	小笠原川	140	V	開削	8025	61	1.25	4.00	14.7
日比谷線	八丁堀駅 ~ 築地駅	築地川	244	V	開削	11295				4.4
日比谷線	築地駅 ~ 東銀座駅	築地川	140	V	開削	11295	122			2
東西線	茅場町駅 ~ 門前仲町駅	濱辺運河	140	V	開削	9125	61			5.4
東西線	門前仲町駅 ~ 坑口駅	埋立地	2127	II	開削	9125	426			7.7
有楽町線	新富町駅 ~ 新富町駅	築地川	540	V	開削	7785	770	1.72	0.68	8.1
有楽町線	新富町駅 ~ 坑口駅	埋立地	1330	II	開削	7785	33230	11.29	3.81	13
半蔵門線	水天宮前駅 ~ 清澄白河駅	隅田川支流	230	V	開削	7010	1398			2.1
半蔵門線	住吉駅 ~ 住吉駅	小川	140	V	開削	8950				0
半蔵門線	押上駅 ~ 押上駅	北十間川	140	I	開削	9725				0



図－10 塩害対策区間の特定フロー

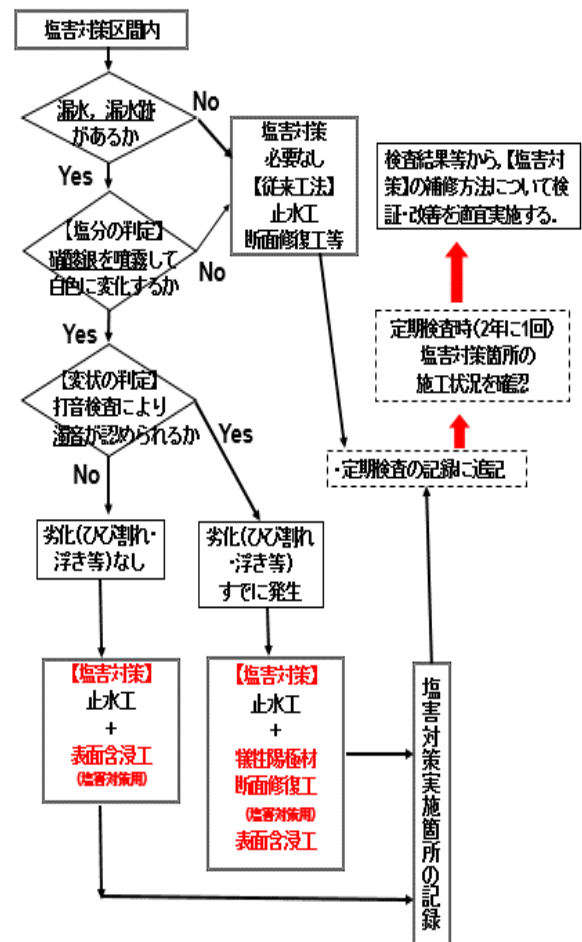
濁音ではなくコンクリートの劣化が認められない場合は表面含浸工を実施する。なお、塩害対策の補修を実施する前には漏水の止水工を実施しなければならない（図－11）。

7. まとめ

現在、東京メトロでは営業線トンネルにおいて塩害対策工を実施しており、塩害対策の優先度が高い A 区間はほぼ完了し、引き続き B1 区間を進めている。この塩害対策工を実施する中で補修方法について課題もあり、改善を図りながら実施している。さらに使用材料の進歩から補修方法の確立を図ることが必要である。

また、犠牲陽極材の効果持続時間や表面含浸材の効果低下に伴う再塗布時期の確認などモニタリングを行っているが、経過時間が少ないために結論を出すまでには至っていない。引き続きモニタリングを行い、これらの実施時期を決定しなければならない。塩害対策の補修前に行う漏水の止水工についても持続性など優れた効果が期待できる工法や材料の開発が必要である。

最後に、東京メトロは列車の安全・安定運行の確保のために安全最優先とする保守を行い、土木構造物の補修についてもできる限り予防保全を進めていきたいと考えている。



図－11 塩害補修範囲の特定および補修フロー

参考文献

- 1) 武藤義彦・大即信明・岸利治：硝酸銀噴霧法を用いた地下鉄トンネルの塩害影響範囲の特定手法の開発，JCI コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No. 1，pp915-920，2016
- 2) 小林豊治：コンクリート中の鋼材の腐食機構，コンクリート工学，Vol. 19，No. 3，pp25-28，March 1981
- 3) 外岡広紀，久保善司，若尾純也，村下剛：含浸処理による水分制御が腐食抑制効果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 2，pp529-534，2007
- 4) 横田直倫，久保善司，村下剛，渡辺二夫：親不知海岸に暴露した含浸コンクリートの腐食抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 2，pp625-630，2008
- 5) 武藤義彦，大泉政彦，諸橋由治，葛目和宏，大即信明：地下鉄トンネルを対象とした塩害対策工の検討，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文集，Vol. 14，pp287-294，2014