

論文 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

武藤 義彦*1・大即 信明*2・岸 利治*3

要旨: 東京地下鉄株式会社では、河川付近のトンネルにおいてコンクリート補修後の再劣化が見られる箇所が散見されたため調査を実施した。その結果、塩害による劣化と判明した。そこで、塩害状況を把握するためトンネル構築物への塩化物イオンの侵入経路、塩害の影響範囲を明らかにした。また、これらの補修計画のため影響範囲を特定する必要があったため、硝酸銀水溶液を噴霧して白色した箇所を塩害として判定する簡易的な判定手法を新たに開発した。この手法により、地下鉄トンネルにおいて塩害範囲を容易にかつ効率良く確認することが可能になった。

キーワード: 地下鉄トンネル, 塩害範囲, 侵入経路, 硝酸銀水溶液噴霧法

1. はじめに

東京地下鉄株式会社(以下、「東京メトロ」)は、現在9路線、約195kmの構造物を維持管理しており、そのうちの約85%がトンネルである。地下鉄トンネルのコンクリートは、特に感潮域河川下で漏水中の塩化物イオン濃度が高いため、塩害による劣化が生じている箇所が存在する。現状では変状が認められない箇所を含めて適切な維持管理を行っていくため、東京メトロでは、現地調査を行い、塩害の発生メカニズムをとりまとめ報告した¹⁾。地下鉄トンネルは、作業時間が終電から初電までの実質約2時間しか無いため、効率よく塩害箇所を特定する必要がある。そこで、現地調査で地下鉄トンネルの塩化物イオン侵入経路を特定した。また、塩害範囲を簡易的に判定できる新しい手法を開発した。本論文では、これらの詳細について述べる。

2. 東京メトロの塩害状況¹⁾

2.1 東京メトロの構造種別

東京メトロの構造物の種類別延長は、箱型トンネル60%、シールドトンネル25%、高架橋9%、橋梁3%である。最初の開業路線である銀座線は現場練りのコンクリートを使用しているが、以降、開削および潜函トンネルでは生コンクリート、シールドトンネルでは工場製品を使用して建設されている。変状の発生は、工場製品を使用したシールドトンネルに比べ、現場打設の生コンクリートで建設された開削および潜函トンネルで多く発生していることから、開削および潜函トンネルについて詳細な検討を行った。以下、開削および潜函トンネルを総称して箱型トンネルと呼ぶ。

2.2 河川等との交差

東京メトロの路線は都心部に位置しており、河川等(河川、埋立、堀、濠)との交差・近接している箇所は箱型トンネルで49区間存在する。塩害が発生する可能性から河川等の種別を表-1に示すカテゴリーで分類した。塩害の発生する可能性が高いのは、海水の干満の影響を受ける感潮河川域および埋立地である。

表-1 交差・近接する河川等の種別と想定される塩害可能性

種別	河川等の種別	区間数	想定塩害可能性
A	現在の感潮域河川の下	14	高
B	明治以降の埋立地の下	2	高
C	現在の非感潮域河川の下	5	中～低
D	現在の濠の下	6	中～低
E	低地帯で明治以降に埋め立てられた河川の下	22	中～低
		計 49	

2.3 塩害発生状況

東京メトロの路線では、感潮域河川下では塩害劣化により内部鉄筋が腐食し、コンクリート躯体に浮きや剥落が生じている箇所の存在が認められている。はつり調査結果の例を写真-1および写真-2に示す。漏水の発生箇所に塩害が生じている。漏水の発生部位は、乾燥収縮ひび割れや施工不良箇所に起因してコンクリート躯体そのものに生じているケースと、目地部等の施工に起因する

*1 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部部長 工修 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所教授 工博 (正会員)

箇所が生じているケースに大別できる。代表的な漏水パターンを表-2に示す。これらは、いずれも詳細調査の結果、塩害に起因する損傷であることが確認されたものである。



写真-1 はつり調査結果



写真-2 鉄筋の腐食状況

2.4 感潮域河川下のトンネルコンクリート中の塩化物イオン量

現在、東京メトロでは、漏水中の塩化物イオン濃度が高く塩害の影響を受けうる可能性がある区間を対象に、a) 以前に塩害対策を実施した区間、b) 日常補修により対応が実施されている区間、c) 剥離・剥落等の変状が顕在化している区間、d) 剥離・剥落等の変状が認められない区間、に分類して維持管理を行っている。

感潮域河川下の区間のコンクリートから 103 試料を採取して含有塩化物イオン量を測定した。図-1 に結果を示す。図中には実測により求めた鉄筋位置を点線に示

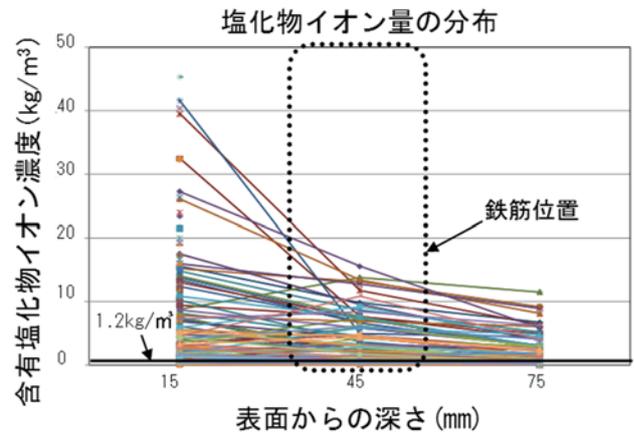


図-1 感潮河川下のコンクリート構造物中の塩化物イオン濃度の分布 (103 試料)

表-2 漏水の発生部位および状況

発生部位	側壁部	天井部
躯体コンクリート	 乾燥収縮等により生じたひび割れ部からの漏水痕	 ひび割れに沿って生じた漏水痕
施工目地部	 施工目地から生じた漏水	 支保工跡および施工目地部からの漏水痕

した。感潮域河川下では、コンクリート表面および鉄筋周囲における塩化物イオン濃度が高い箇所が多数存在することが確認された。また、それらの箇所では、表面での塩化物イオン濃度が高く、内部になるほど低下する傾向も認められた。したがって、漏水中の塩化物イオン濃度が高い感潮域河川下では、現在の変状発生程度に関わらず、コンクリート表面からコンクリート中への塩化物イオンの浸透による塩害が生じている可能性が高い。

3. 塩化物イオンの侵入経路

3.1 現場調査

箱型トンネルの施工方法である開削工法では、地盤中からトンネル躯体への水分浸透防止を目的に、1975年頃まではトンネルの外周部に溶融アスファルトによる防水工を実施していた。また、以降は合成高分子材料を用いたシート防水工を実施している。また、潜函トンネル、イコトンネルについては、施工方法の制約から防水工を実施していない。これらの防水工が塩化物イオンの浸透経路に影響があるか調査した。調査は、「潜函工法（部材厚：1100mm）」、「イコ工法（部材厚：800mm）」、「開削工法（部材厚：850mm）」の3工法の区間からコアを採取し、図-2に示すように1本毎に、塩化物含有量測定として、5試料（表面側、表面側1/4地点、中央部、背面側1/4、背面側）の分析を行った。なお、腐食発生塩化物イオン濃度は 3.0 kg/m^3 とした¹⁾。

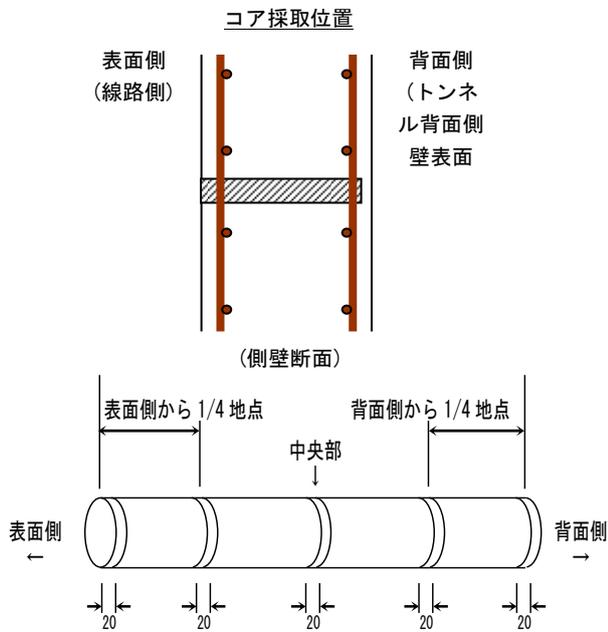


図-2 採取コアからの試料切り取り箇所

3.2 調査結果

潜函工法の結果を図-3に示す。潜函部の躯体中央および継手中央における塩化物イオン濃度は、内空側表層

部において高い値(躯体 4.20 kg/m^3 , 継手 20.83 kg/m^3)を示すが、壁内部に入ると急激に低下し(躯体 0.00 kg/m^3 , 継手 $0.24 \sim 0.33 \text{ kg/m}^3$)、地山側表層部付近でやや増加(躯体 0.79 kg/m^3 , 継手 0.48 kg/m^3)している。目地部近傍の塩化物イオン濃度の分布も同じ傾向を示すが、壁内部(躯体 $1.03 \sim 1.45 \text{ kg/m}^3$, 継手 $0.46 \sim 0.55 \text{ kg/m}^3$)および地山側表層部付近(躯体 1.94 kg/m^3 , 継手 0.68 kg/m^3)では躯体中央部および継手中央部における値よりもやや大きな値となっている。

これらの結果から、潜函の躯体部および継手部とも、塩化物イオンはトンネル内空側および地山側から浸透している可能性が高いと考えられ、目地部近傍においては目地部からの浸入も考慮すべきと考えられる。

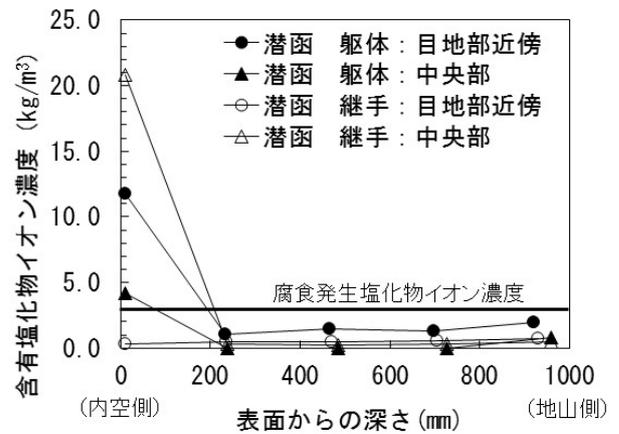


図-3 潜函トンネル躯体および継手断面内における塩化物イオン濃度の分布

イコ工法の結果を図-4に示す。イコ工法による側壁における塩化物イオン濃度は、目地部近傍において $0.07 \sim 3.19 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあり、中央部において $0.00 \sim 0.18 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあった。イコ側壁目地近傍では、潜函部目地近傍と同様に、トンネル背面側壁表面からの浸透に加えて、目地部からの浸透も生じている可能性が高いと考えられる。

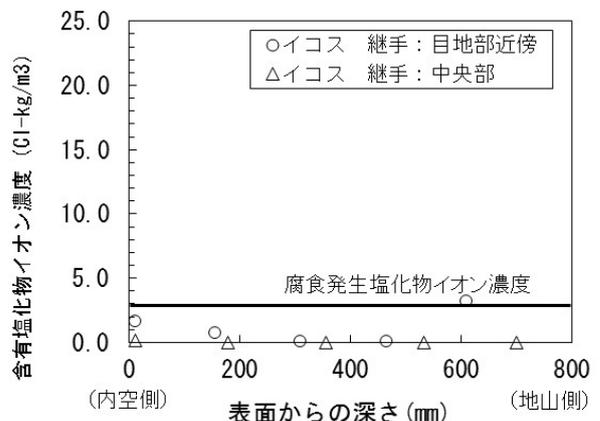


図-4 イコトンネル躯体断面内における塩化物イオン濃度の分布

開削トンネルの躯体断面内の含有塩化物イオン濃度は、図-5に示すように、 $0.00\sim 0.29\text{ kg/m}^3$ の範囲にあり、内空側の表層部のみに約 0.3 kg/m^3 の塩化物イオンが含まれていた。地山側からの浸透は、防水層が効果的に作用しているために抑制されていると考えられ、塩化物は内空側面のみから浸透していると考えられる。

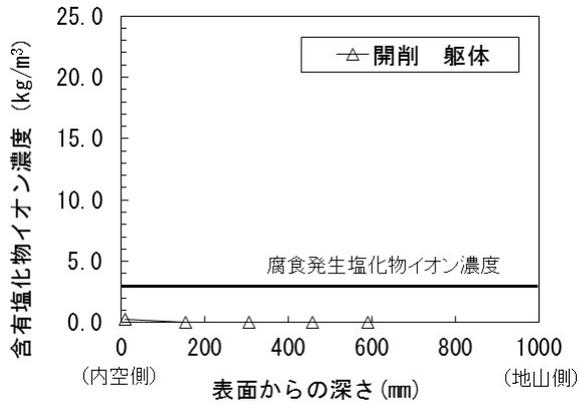


図-5 開削トンネル躯体断面内における塩化物イオン濃度の分布

4. 漏水に含まれる塩化物イオンの影響範囲

4.1 現場調査

漏水に含まれる塩化物イオンの影響範囲を調べるため、漏水箇所、漏水中心から300mm、同660mmおよび1000mm離れた箇所合計4箇所でのコア（それぞれ、コアA、B、C、D）を採取し、表面から深さ方向の塩化物イオン含有量を調査した。調査位置を写真-3および図-6に、結果を図-7に示す。

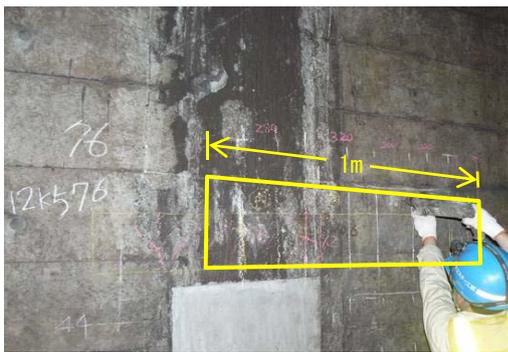


写真-3 コア採取箇所の外観

4.2 調査結果

漏水痕の顕著な箇所にて採取したコアAの含有塩化物イオン濃度は、表層部で 11 kg/m^3 を越えており、また表層から深さ 90mm の位置でも 2.0 kg/m^3 近い値である。漏水痕箇所から離れた位置から採取したコアBの表層部における含有塩化物イオン量は 3.6 kg/m^3 であり、コアAの同位置と比べて著しく少なくなっている。また、コアBの深部およびコアC、コアDにおける含有塩分量は、

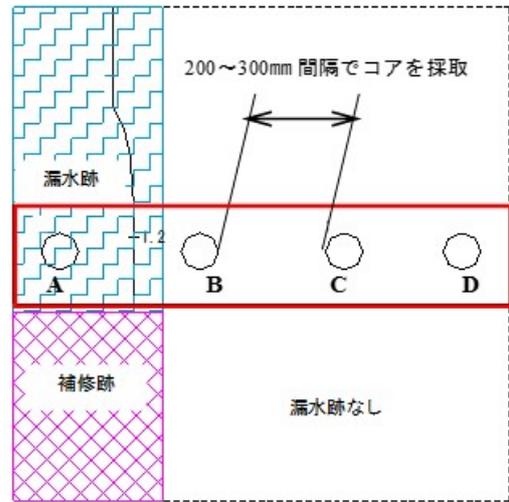


図-6 採取コアの位置と外観状況

最大で 0.5 kg/m^3 と非常に小さい値であった、このことから建設時からコンクリート中に含まれる塩化物イオン量（いわゆる内在塩化物イオン）はきわめて小さいものと判断された。以上の結果から、現状においては、漏水中に含まれる塩化物イオン量の影響範囲は、局所的な範囲に止まっており、基本的には漏水痕の認められている直下、およびそれから 200~300mm の範囲内であると結論づけた¹⁾。

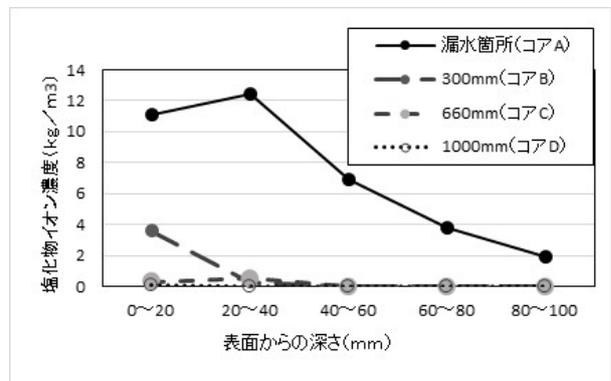


図-7 漏水中に含まれる塩化物イオンの影響範囲

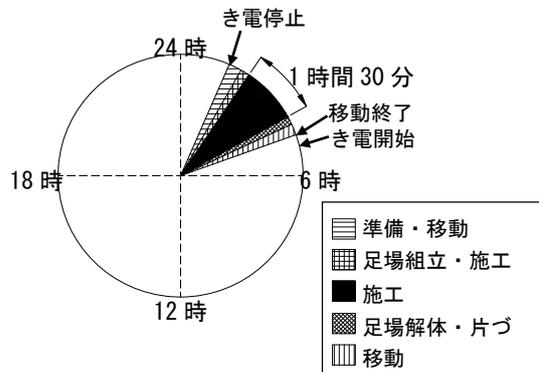


図-8 トンネル補修工事のタイムサイクル

5. 硝酸銀溶液噴霧法による塩化物イオンの影響範囲の把握

5.1 簡易的手法による塩化物イオンの影響範囲把握の必要性

鉄道トンネル内において補修工事の実施が可能な時間は、列車が運行を停止し、翌日の運転開始までの時間に限定される。地下鉄の場合、他の鉄道事業に比べ、終電が遅く、始発が早いことから作業時間が十分に確保出来ない。図-8 に東京メトロの例を示す。準備作業、足場組立、片付け等を除くと、1時間30分程度しか作業時間を確保出来ないのが現状である。塩化物イオンの影響範囲を特定するためには、先の調査のようにコアを採取し、室内試験により塩化物イオンの有無を判定していた。しかし、この手法では多くの時間を要してしまう。そこで、現場で簡易な手法で塩化物イオンの影響範囲を特定出来る手法が必要であった。

5.2 硝酸銀溶液噴霧法による塩化物イオンの影響範囲の把握

硝酸銀溶液噴霧法は、コンクリート表面に塩化物が付着している場合、硝酸銀溶液(0.1N)を噴霧すると、硝酸銀溶液中の銀イオン(Ag^+)と塩化物イオン(Cl^-)が反応して、白色の塩化銀($AgCl$)が生成される現象を利用したものである²⁾。この手法は、コアによる塩害深さの特定に用いられていたが、面的な調査には使われていなかった。

塩化物イオンが存在すれば、硝酸銀溶液の噴霧により写真-4 のように発色するが、その発色閾値に相当する塩化物イオン濃度値を明確に把握出来れば、維持管理に活用出来る。そこで、面的な影響範囲特定に使えるかどうか調べるため、コア採取・分析による確認試験を行なった。試験実施箇所の漏水状況を写真-5 に、硝酸銀溶液噴霧による発色状況を図-9 に示す。

なお、本調査はコンクリート表面に付着した漏水中の塩化物の有無を評価するものであり、コンクリート表層部の中性化の影響は考慮しないこととした。



写真-4 硝酸銀溶液噴霧による発色状況



写真-5 硝酸銀溶液噴霧法実施箇所の外観

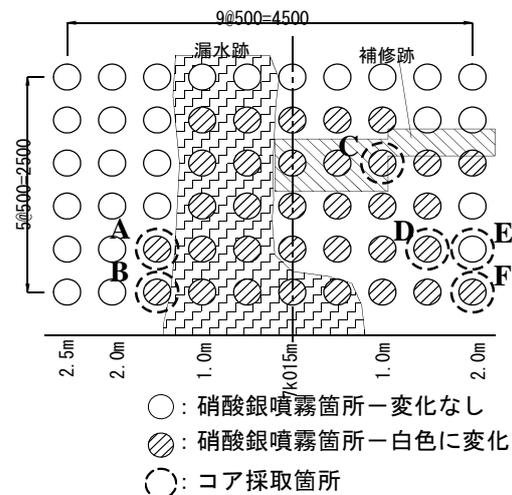


図-9 硝酸銀溶液噴霧夜発色状況とコア採取位

硝酸銀溶液噴霧箇所60箇所のうち33箇所で発色が認められた。東京メトロにおける漏水は、上部より下部に行くほど範囲が拡散する傾向を示す。これらは列車風による影響が起因したものである。そのため、硝酸銀噴霧により発色した範囲には、列車進行方向に発色範囲が広がっている。逆に上部や進行逆方向においては、漏水の影響が軽微であったため変化しなかったと考えられる。白色に変化した箇所と変化しない箇所の境界付近を中心に6箇所を選定してコアを採取し、含有塩化物イオン量をJIS A 1154により測定した。分析試料は、試験適応限界であるコア表面から10mmとした。である結果を表-3に示す。コアDEFの結果より、全塩化物イオン量 $0.6kg/m^3$ 近傍で発色の有無が混在していることから、発色の閾値を全塩化物イオン量 $0.6kg/m^3$ とした。

供試体の割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオンの有無を判断する試験において、白色に変色する境界付近における塩化物イオン濃度は、可溶性塩化物イオンで、セメント重量あたり0.15wt%程度であると報告されている²⁾。

表-3 硝酸銀噴霧による発色箇所から
採取したコアの塩化物イオン濃度

コア番号	硝酸銀溶液噴霧による発色状況	全塩化物イオン量 (kg/m ³)
A	白色	7.68
B	白色	3.12
C	白色	1.78
D	白色	0.59
E	発色せず	0.62
F	白色	0.57

分析用試料の採取箇所：コア表面から0~10mm

本調査箇所におけるセメント量は309kg/m³であり、東京メトロ内において一般的なセメント量である。である。参考文献²⁾に基づいて、白色に変色する境界付近のコンクリートに含まれる可溶性塩化物イオンを想定すると309 kg/m³×0.0015=0.46 kg/m³になる。

これに対して、本調査結果で得られた全塩化物イオン量は0.6kg/m³から、可溶性塩化物イオン量を参考文献³⁾に基づいて想定した。硬化コンクリート中に存在する塩化物は、通常、コンクリート中を自由に移動できる可溶性塩化物イオンとフリーデル氏塩などの固定化された塩化物に分けられる。固定化された塩化物の全塩化物量に対する比(固定化係数)は、固定化された塩化物量は全塩化物量のうちの50~60%程度、可溶性塩化物イオン量は40~50%と考えられている⁴⁾。この比率を用いて調査箇所における可溶性塩化物イオン量を求めると、0.6×(0.4~0.5)=0.24~0.30 kg/m³となる。この値は、先に述べた想定値0.46 kg/m³よりも小さい。(表-4)

表-4 硝酸銀溶液噴霧法による発色閾値の検討

	本試験	参考文献 ²⁾
セメント質量あたりの可溶性塩化物イオン濃度 (%)		0.15
コンクリート中の可溶性塩化物イオン量 (kg/m ³)	0.24~0.30	0.46*
コンクリート中の全塩化物イオン量 (kg/m ³)	0.60	

※単位セメント量 309kg/m³

このことから今回の壁表面に硝酸銀を噴霧して白色に変色した部分に浸透している塩化物イオン量は、報告された供試体の割裂面に硝酸銀を噴霧した際に変色する部分に浸透した塩化物イオン量、腐食発生塩化物イオン濃度よりも少なく、変色には壁表面に付着している塩化物イオンが起因したことが伺える。硝酸銀噴霧法は、塩化物イオンがトンネル躯体に影響を与える範囲を安全側に判定する、簡易な方法といえる。また、経年による汚れや補修施工時のモルタルやプライマーの垂れ等で漏水境界が不明瞭な箇所では、目視による漏水跡の識別が困難である。今回試行した硝酸銀噴霧法では、このような

箇所でも塩化物が付着していれば明確に白色に変化するため、塩化物の付着範囲を識別出来るので補修対象範囲を特定するのに有効である事がわかった。さらに、一般的に腐食限界塩化物イオン量1.2kg/m³を塩化物量に換算すると約1.9kg/m³となり、硝酸銀噴霧法によりコンクリート表面に塩化物イオンがある場合は、補修対象とすることで、すでに鉄筋位置において腐食発生塩化物イオン濃度に達している箇所に加え、今後鉄筋腐食が起りうる箇所についても補修を行うことでトンネルの健全度をさらに向上できると考える。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 地下鉄トンネル部における塩分供給経路は、トンネル内の漏水に含まれている塩化物イオンがコンクリート表面から内部に侵入していることを確認した。
- (2) 塩化物イオンを含んだ漏水の影響範囲は、基本的には漏水部分あるいは漏水痕およびそれから200~300mmの範囲であることを確認した。
- (3) 塩害範囲を容易に短時間に把握出来る簡易手法として、硝酸銀溶液噴霧法を新たに開発した。硝酸銀溶液噴霧による発色の閾値は全塩化物イオン濃度0.6kg/m³であり、既往の研究と比較しても安全側に反応することを確認した。

謝辞

本調査・検討は、東京地下鉄(株)の「地下鉄トンネル塩化物対策検討委員会」の指導の下に実施し、各委員の皆様から数多くの貴重なご意見を頂戴した。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本務,武藤義彦,小椋紀彦,葛目和宏,大即信明: 地下鉄トンネルにおける塩害発生条件の検討,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,Vol.11,pp.147-154,2011
- 2) Nobuaki Otsuki, Shigeyoshi Nagataki and Kenji Nakashita: Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials, ACI MATERIALS JOURNAL, No.89-M64, pp.587-592, November-December, 1992
- 3) 丸屋剛,松岡康訓: コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化,土木学会論文集 No.585/V-38 79-95 1998
- 4) (公社)日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'14, 3章, 3.9.3 塩化物イオン含有量, 2014