

# 論文の内容の要旨

論文題名 地下鉄箱型トンネルの塩害対策システム構築に関する研究  
氏名 武藤 義彦

## 第1章 はじめに

東京メトロにおける地下鉄トンネルの定期検査等から、河川と交差・近接する区間は変状が多いことが分かっている。箱型トンネルでは補修が必要な場合が多く、特に感潮域河川下と交差・近接する区間は塩害による鉄筋腐食から被りコンクリートの浮きやはく落が多く発生している。さらに河川下における断面修復箇所でも補修材のはく落等、再劣化も発見されている。安全な地下鉄にするために中長期的な予防保全として、トンネルの劣化原因である塩害に対して地下鉄トンネルにおける体系だった調査を行い、対策方法を検討し、塩害対策方針を定めることが必要である。そこで、地下鉄箱型トンネルの塩害について、調査、計画、補修方法、工事に至る一連の「地下鉄トンネルの塩害対策システム」を構築することを研究の目的とした。

## 第2章 既往の研究

都市部のトンネルでは外力による変状事例は少なく、トンネル覆工の材料劣化による鉄筋腐食と被りコンクリートのはく落が問題となっている。その原因として酸、中性化、塩害等が考えられるが、中性化については調査結果から問題がないことが確認されている。地上構造物に対しては波しぶきや潮風による塩化物イオンの浸透により鋼材腐食が発生することなど、塩害の調査、研究が進んでいるが、トンネルに対しては飛来塩分の影響が少ないことから進んでいない。関門鉄道トンネルなど個別の塩害報告はあるが、総合的かつ体系的に検討された研究がほとんどないため、塩害に関する一連の研究を行った。

## 第3章 塩害検討区間の特定

地下鉄トンネルの塩害による影響範囲を調査するために箱型トンネルが感潮域河川下等と交差・近接する49箇所のうち、漏水の多い21箇所について漏水に含まれる塩化物イオン濃度を測定した。感潮域河川下および東京湾近郊において塩化物イオン濃度が高いことが判明し、49区間を感潮域河川下、埋立地下、非感潮域河川下、濠の下、低地帯で河川埋立地下の環境種別5つに分類した。

さらに、測定結果から漏水は河川等の境界より50m離れると塩化物イオン濃度は極めて低く、河川等の境界より50mを含んだ49区間を塩害検討範囲とした。

## 第4章 塩分浸透メカニズムの調査

トンネルの側壁における漏水箇所103箇所において、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を測定した。塩化物イオン濃度はトンネル内面側が高く、内部に入るほど低くなっていた。次にトンネル躯体の防水工の有無に着目し、潜函工法、イコス工法、開削工法で施工されたトンネルで側壁厚の長尺コアを採取し、深さによる塩化物イオン濃度からコンクリート内部への塩化物イオンの浸透経路を調査した。防水工のない潜函工法、イコス工法のトンネルは地山側からも塩化物イオンが浸透しているが、防水工のある開削工法のトンネルは地山側からの浸透はほとんどなかった。防水工のないトンネルは内面側からの塩化物イオンの浸透が多かった。

これらの結果から、地下鉄トンネル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トンネル内面側からコンクリート内部に浸透していると考えられる。地山側には地下水が存在するためコンクリート内への塩化物イオンの浸透が考えられるが、地下水内の酸素拡散は内面側に比べて速度が非常に遅いことから、地山側では内面側よりも鋼材の腐食は進行しにくいと考えられ、内面側の漏水箇所に対して塩害対策を実施することにした。

## 第5章 塩害補修範囲の特定

塩害対策の補修をより効果的に実施するため、現場において漏水および漏水跡付近における塩化物イオンの面的な塩害影響範囲の境界を特定する簡易な手法があれば有効である。漏水部分、漏水跡およびそこから約300mmの範囲に硝酸銀溶液を噴霧することで、短時間で補修範囲を判定できる硝酸銀溶液噴霧法を考案した。塩化物イオンが存在すれば化学反応で白色に変化することを利用している。硝酸銀溶

液の噴霧による発色の閾値を確認するための試験を実施し、発色の閾値は全塩化物イオン濃度  $0.6\text{kg}/\text{m}^3$  であることが分かった。これは、安全側に反応することから塩害補修範囲の特定に活用することとした。

## 第6章 塩害補修方法の検討

- (1) 塩害補修方法の基本方針 塩分の浸透および劣化状況に応じた補修方法を確実に実施するため、塩害補修方法の基本方針を定めた。塩化物イオンが浸透し劣化が発生している箇所では、断面修復工法、電気防食工法および表面含浸工法を、塩化物イオンが浸透しているが劣化が発生していない箇所では表面含浸工法を実施することとした。これは、浮き・ひび割れがなく強度が確保されたコンクリートであり、はつることによる構造物への影響が懸念され、塩分の浸透があるだけでははつりと断面修復の補修は実施しないこととした。また、表面含浸工法を実施することで、これ以上の塩化物イオンの浸透を抑制し、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と判断した。
- (2) 塩害補修方法の検討 地下鉄トンネル特有の短い作業時間（夜間の1時間30分程度）や建築限界、電気設備への影響という制約がある中で、地下鉄トンネルに適した塩害補修方法としての断面修復工法、電気防食工法および表面含浸工法を選定した。
- ① 電気防食工法は電気設備への影響を考慮し外部電源方式ではなく、トンネル内の制約条件から埋設型犠牲陽極材を用いることにし、腐食電流密度測定結果から鉄筋腐食の進行抑制に有効と判断した。
  - ② 遮塩性と水蒸気透過性のある表面含浸工法について、液状とクリーム状の効果確認の試験を行った。母体への浸透が深く、塩化物イオンの浸透も小さい液状の表面含浸材の効果がより期待できた。
  - ③ 犠牲陽極材、断面修復材、塩分吸着型防錆材の組合せについて9パターンの供試体を製作し、鉄筋防食の効果について曝露試験を行った。犠牲陽極材（亜鉛 35g、バックフィル材：臭化リチウム、硝酸リチウム）、超速硬型低電気抵抗性ポリマーセメントモルタルと液状表面含浸材の組み合わせが地下鉄トンネルの塩害対策補修に適している結果が得られた。
  - ④ 犠牲陽極材から発生する積算電流値を用いた理論的な亜鉛の質量減少量と1年後の解体試験から実測した亜鉛の質量減少量から、犠牲陽極材の効果持続時間は10年程度であることを確認した。

## 第7章 東京メトロの塩害対策方針

東京メトロの箱型トンネルが河川等と交差・近接する49箇所について、これまでの定量的な調査・分析から塩害対策工事の優先順位を付けるため塩害対策優先区間の選定表を作成した。防水工の有無と漏水の多さから潜函工法・イコス工法によるトンネルと開削工法によるトンネルに区分し、さらに漏水中の塩化物イオン濃度により  $5,000\text{mg}/\text{L}$  を境として高濃度と低濃度に区分した。選定表によって優先度Aの8区間（1,446m）と優先度B1のうち損傷・補修率の高い2区間を含む6区間（4,417m）を塩害対策区間として、塩害対策工事を実施することにした。優先度Aの6区間は塩害対策工事をすでに完成し、優先度Aの残り2区間とB1の6区間も施工中である。

優先度A（6区間）の施工実績から、塩害対策を実施した区間の20年間の補修費用を比較した。通常の補修を実施した場合の再劣化を4年と仮定すると約4割の費用が削減できる試算となり、今回検討した塩害対策工事を行うことによってトンネル保守費の低減が見込まれる結果となった。

## 第8章 塩害対策システムの構築

これまでの知見から、一般的な地下鉄事業者用の「地下鉄トンネルの塩害対策の総合フロー」として「地下鉄トンネルの塩害対策システム」を構築した。これは、詳細な調査を行わなくても簡易的に塩害対策補修が必要な区間を決定できる塩害対策区間を特定するフローと、塩害補修範囲と劣化状態に応じた補修方法を決定できる塩害補修方法を決定するフローを組み合わせたものである。

## 第9章 結論および今後の課題

東京メトロの箱型トンネルにおいて最も懸念されている劣化のひとつである塩害に対して、劣化過程を解明し具体的な補修範囲、補修方法および補修計画が確立した。また、一般的な地下鉄事業者が日常の補修において用いることができる「地下鉄トンネルの塩害対策システム」を構築した。

今後の課題としては、地下鉄トンネルにおいて塩害対策をより効果的に実施していくために、確実な漏水補修方法と材料の検討、犠牲陽極材の交換時期・取替方法・開発、表面含浸材の持続性、シールトトンネルにおける塩害対策方針の決定が挙げられる。（以上）