

博士論文

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

武 藤 義 彦

【目 次】

第1章 序 論

1. 1	研究の背景と目的	1
1.1.1	研究の背景	1
1.1.2	地下鉄トンネル覆工コンクリートの現状	3
1.1.3	研究の目的	6
1. 2	研究のフロー	7
1. 3	本論文の構成と内容	8

【第1章 参考文献】

第2章 既往の研究

2. 1	概 要	11
2. 2	トンネル覆工の劣化についての研究	14
2.2.1	酸	14
2.2.2	中性化	14
2.2.3	その他	15
2. 3	トンネル覆工の塩害についての研究	16

【第2章 参考文献】

第3章 塩害検討区間の特定

3. 1	河川等と交差・近接する区間	30
3. 2	トンネル漏水の塩化物イオン濃度	30
3. 3	浸透流解析によるシミュレーション	37
3. 4	まとめ	44

【第3章 参考文献】

第4章 地下鉄トンネルの塩分浸透メカニズムの調査

4. 1	コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布	46
4. 2	塩化物イオンの浸透経路	47
4.2.1	箱型トンネルの建設工法	47
4.2.2	塩化物イオンの浸透経路	51
4. 3	まとめ	56

【第4章 参考文献】

第5章 塩害影響範囲の簡易判定方法の考案

5. 1	漏水に含まれる塩化物イオンの影響範囲	57
5. 2	硝酸銀溶液噴霧法の考案	58
5.2.1	従来の判定方法	58
5.2.2	簡易判定方法の考案	59
5.2.3	発色閾値の確認	60

5. 3	まとめ	62
【第5章 参考文献】		
第6章 地下鉄トンネルに適した塩害補修方法の検討		
6. 1	地下鉄トンネルの制約条件	64
6. 2	塩害補修工法の検討	64
6.2.1	塩害対策工法の基本方針	64
6.2.2	電気防食工法の選定と効果の確認	65
6.2.3	表面含浸工法の効果の確認	71
6.2.4	犠牲陽極材と断面修復工法の組合せの検討	73
6.2.5	犠牲陽極材の効果持続時間	79
6. 3	まとめ	81
【第6章 参考文献】		
第7章 東京メトロの塩害対策方針		
7. 1	塩害対策における優先工区間	83
7. 2	劣化予測による確認	90
7. 3	まとめ	96
【第7章 参考文献】		
第8章 塩害対策システムの構築		
8. 1	検討概要	97
8. 2	地下鉄トンネルの塩害対策に関する総合フロー	97
8. 3	まとめ	99
【第8章 参考文献】		
第9章 結論および今後の課題		
9. 1	本研究の結論	100
9. 2	今後の課題	103
謝 辞		105

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 研究の背景

東京地下鉄(株) (以下、東京メトロという) は首都圏に9路線、営業延長195.1kmを有している。旅客運輸人員は1日724万人(2016年度)であり、首都東京における交通の大動脈である。図1-1-1に示すように路線営業延長の85%、166.7kmがトンネルである¹⁾。鉄道構造物全体の65%は経年40年を超えており、今後、様々な変状の発生が懸念され、予防保全を含めた適切な維持管理を進めていく必要がある。

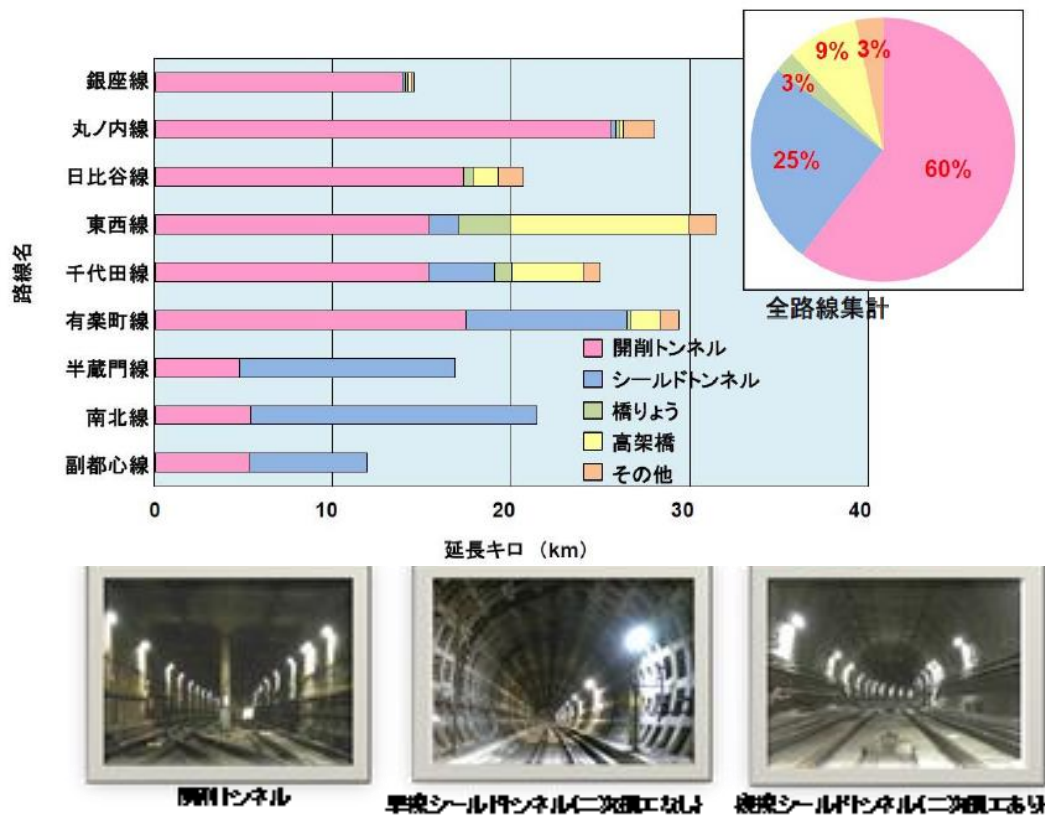


図 1-1-1 東京メトロの構造物の種類・延長と割合

地下鉄トンネルの維持管理として定期的に検査²⁾等を行っており、検査結果等からも漏水が多い区間はその他の変状も多い傾向³⁾がある。そして、河川に交差・近接している区間に漏水を伴う変状が多いことがわかっている。実際、トンネル躯体の一部がはく落する事象が時折発生している。無筋コンクリートが覆工主体の山岳部のトンネルと異なり、都市部の地下鉄トンネルはほとんどが鉄筋コンクリート構造物である。はく離・はく落は主に躯体中の鉄筋等の鋼材が中性化や塩害等により腐食膨張し、被り部分のコンクリートが押し出されることにより発生している。

中性化については、近年行った経年 80 年以上の箱型トンネルにおける調査から、漏水のない箇所は中性化が鉄筋位置まで到達しても 100 年以上先でもひび割れは発生しないこと、漏水のある箇所は中性化の到達から 10 年程度でひび割れが発生する可能性があることがわかっている。したがって、中性化はある程度進行しているものの、漏水が発生していない部分はコンクリート中の含水率が低いことから早急に対策が必要な状態ではないことを確認している^{4) 5) 6)}。

一方、塩害については飛来塩分の影響がないトンネル内では発生しないと考えられていたが、近年、トンネルにおける塩害の被害が報告されるようになっており、東京メトロでも同様な事例が報告されている⁷⁾。この報告などから、コンクリート中の鉄筋腐食が始まるとされる腐食発生限界塩化物イオン量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ が含まれているトンネル構造物が河川下を中心に存在しており、打音検査で濁音が確認される箇所も多くあることがわかった。塩害による変状として、写真 1-1-1 および写真 1-1-2 に示すように、鉄筋が剥き出しの状態の箇所もある。これらの箇所は塩害による鉄筋の腐食により被りコンクリートのはく離・はく落が実際に発生しており、標準的な工法による部分的な断面補修で対応してきた。現在、直ちに大規模な範囲で損傷が生じる状態ではないが、今後の塩化物イオンや水分の供給状況、鉄筋の被り厚等の条件によっては劣化が進み、トンネル本体に影響することも考えられることから塩害に対する抜本的な対策が必要になると考えられる。



写真 1-1-1 塩害状況

(日比谷線・日本橋川潜函工法部)



写真 1-1-2 塩害状況

(東西線・隅田川潜函工法部)

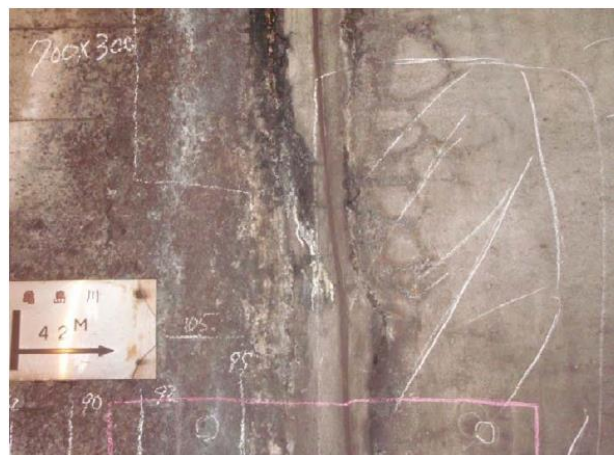


写真 1-1-3 再劣化した補修箇所

(亀甲状のひび割れ、濁音を観測)

(東西線・亀島川潜函工法部)

また、最近行った調査結果では、写真 1-1-3 に示すように補修を実施した箇所でも補修材のはく離・はく落等の再劣化が発生している事例⁷⁾があり、現在実施している構築補修の方法ではトンネルの塩害に対して適切かどうか懸念された。さらに、現時点では塩害による変状が認められないが塩分の浸透が考えられる区間に対しても、中長期的な予防保全として今後の塩害に対する維持管理をどのように実施していけばいいのかを検討する必要もあり、体系だった調査を行い、対策方法を詳細に検討し、地下鉄トンネルの塩害対策方針を定めることが求められていた。

1.1.2 地下鉄トンネル覆工コンクリートの現状

(1) トンネルの構造およびコンクリートの種別

東京メトロ営業線構造物の 85%はトンネルであり、その内訳は箱型トンネル 60%とシールドトンネル 25%である。1927 年～1939 年に順次開業した東洋初の地下鉄である銀座線はほとんどが箱型トンネルである。表 1-1-1 に示すように銀座線は現場練りのコンクリートが使用されているが、戦後建設され 1962 年に全線開業した丸ノ内線以降、開削工法および潜函工法等によって建設されたトンネルにはレディーミクストコンクリートが、東西線から採用されたシールドトンネルにはセグメントが使用されている。工場製品のセグメントを組み立てたシールドトンネルに比べ、現場打設のレディーミクストコンクリートを用いた開削工法、潜函工法およびイコス工法によるトンネル（以下、箱型トンネルという）で補修が必要な変状が多く発生していることがわかっている。

なお、イコス工法とはベントナイト溶液を利用して地中を掘削し、その中に鉄筋籠を建込み、コンクリートを打設してベントナイト溶液と置換して、地下に地中壁を築造する連続地中壁工事の初期の工法である。

表 1-1-1 各路線の建設年代・主な建設工法とコンクリートの基準強度

	建設年代										主な建設工法とコンクリートの基準強度		
	1930	40	50	60	70	80	90	00	10				
銀座線											SRC・RC 開削	10 N/mm ²	現場練り
丸ノ内線											RC 開削	21、25 N/mm ²	開削・潜函は生コン 一部で高炉も シールドセグメントは工場製品
日比谷線											RC 開削、RC 潜函	21、25 N/mm ²	
東西線											RC 開削、RC 潜函 RC シールド	21、24 N/mm ² 55 N/mm ²	
千代田線											RC 開削 RC シールド	21、24 N/mm ² 55 N/mm ²	
有楽町線											RC 開削 RC シールド	21、24 N/mm ² 55 N/mm ²	
半蔵門線											RC 開削 RC シールド	21、24 N/mm ² 48 N/mm ²	
南北線											RC 開削 RC シールド	24 N/mm ² 48 N/mm ²	
副都心線											RC 開削 RC シールド	24 N/mm ² 48 N/mm ²	

箱型トンネルに使用するコンクリート配合については、丸ノ内線建設当時の箱型トンネルに使用するレディーミクストコンクリートの設計基準強度は 21N/mm^2 （水セメント比53～55%）が主に用いられていたが、1998年以降、 24N/mm^2 （水セメント比50%）に変更されている。また、水セメント比は53→55→50%、単位セメント量は320→309→304kg、骨材の最大寸法は砂利使用の25mmから碎石使用の20mmに変更されている。表1-1-2に箱型トンネルのコンクリート配合の変遷を示す。

表 1-1-2 箱型トンネルのコンクリート配合

年 代	設計基準強度 (N/mm^2)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スラン プ (cm)	水セ メント 比 (%)	空気 量 (%)	コンクリート1 m^3 に用いる量(kg)					使用区分
						セ メント	水	細 骨 材	粗 骨 材	混和 剤	
～昭和57年（1982年）9月	21	25	16 ± 2.5	53	4± 1	320	170	746	109 2	0.096	壁中ホーム、鋼管柱中埋、換気口および縦型ポンプ室（上床版含む）
昭和57年（1982年）9月～平成10年（1998年）10月	21	25	18	55	4	309	170	809	101 0	0.773	壁中ホーム、鋼管柱中埋、換気口および縦型ポンプ室（上床版含む）
平成10年（1998年）10月～	24	20	15 ± 2.5	55	4.5 ± 1.5	304	167	794	102 4	0.76	壁、上・中床版、換気口、新線用コンクリート道床

(2) コア採取によるコンクリート強度の確認

営業線の箱型トンネルについて、コンクリートの状況を確認するために構造物から337箇所のコアを採取し、コンクリートの圧縮強度試験を行った。その結果を表1-1-3に示す。各路線ともばらつきが認められるものの、平均値はすべての路線において設計基準強度を大きく上回っており、コンクリートの強度は問題がないことが確認された。

表 1-1-3 トンネル躯体の圧縮強度試験結果

路線	試料数	トンネル躯体の圧縮強度 (N/mm^2)			設計基準強度 (N/mm^2)
		平均	最大	最小	
銀座線	110	21. 2	45. 2	8. 3	10
丸ノ内線	120	35. 5	63. 2	14. 3	21
日比谷線	55	42. 8	65. 8	20. 5	21
東西線	78	44. 9	61. 2	25. 8	21
千代田線	4	28. 4	41. 4	20. 1	21
有楽町線	4	35. 5	50. 2	25. 2	21
半蔵門線	4	46. 3	46. 3	27. 9	24
南北線	4	48. 3	48. 3	28. 1	24

(3) トンネルの塩害発生状況

東京メトロで定期的に実施しているトンネルの検査結果を分析したところ、感潮域河川下と交差・近接している区間は塩害による劣化で鉄筋が腐食し、コンクリート躯体に浮きやはく落が発生している区間が多いことがわかった^{7) 8)}。

その中でも漏水発生箇所付近に塩害の劣化箇所が集中していることが確認できた。はつり調査結果の一例を写真 1-1-4 に示す。断面欠損の明らかな著しい腐食である腐食度 D (表 1-1-4) と判定される箇所である。漏水はコンクリート躯体の施工不良部分やひび割れから発生しているケースと、施工目地部や支保工跡等から発生しているケースに分類できる。表 1-1-5 に示している代表的な漏水箇所はいずれも塩害が発生していることが確認された。

このように感潮域河川等から塩分が浸透し塩害が発生している可能性が高いことから、本研究において具体的な地下鉄トンネルの塩分浸透メカニズムを把握するため、塩分の供給元、浸透ルート、影響範囲等の定量的な調査を行った。



(東西線・亀島川付近)



(東西線・隅田川付近)

写真 1-1-4 鉄筋の腐食状況

表 1-1-4 腐食度の定義⁹⁾

腐食度	腐食状態	参考写真
なし	腐食を認めず (I ※)	
A	点錆程度の表面的な腐食 (I)	
B	全体に表面的な腐食 (II)	
C	浅い孔食など断面欠損の軽微腐食 (III)	
D	断面欠損の明らかな著しい腐食 (IV)	

※ ()内は土木学会コンクリート標準示方書での腐食度評価を示す。
出典: ひび割れ調査、補修・補強指針2013 P35 日本コンクリート工学会

表 1-1-5 漏水の発生部位および状況（感潮域河川下付近）

発生部位	側壁部	天井部
躯体 コンク リート	 <p>ひび割れ部からの漏水跡</p>	 <p>ひび割れ部からの漏水跡</p>
施工目 地部	 <p>施工目地から生じた漏水</p>	 <p>支保工跡および施工目地部からの漏水跡</p>

1.1.3 研究の目的

鉄道事業者として列車の安全・安定運行を確保するために、土木構造物の安全性（耐火性、安定性、耐疲労性を含む）を維持することは絶対であり、使用性（走行性）・第三者影響度（コンクリート等の落下、騒音・振動）への対応もさらに向上していく必要がある。そのためにも定期的に計画、検査、判定、対策（補修・補強）のPDCAサイクルを確実に回し、その記録と保管を行い、次へのPDCAサイクルに活用することが重要である。さらに安全な地下鉄にするために一歩進んだ維持管理としてコンクリートはく落等の事故をなくすこと、経年劣化に対する事前の対応を行うなど、中長期的な予防保全を鉄道事業者は実施していかなければならない。

本研究の目的は、地下鉄トンネルにおいて補修方法の定まっていない塩害に対して、体系だった調査を行い、対策範囲、対策方法を検討し、塩害対策方針を定め、塩害対策工事の計画を策定することによって、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「地下鉄トンネル塩害対策システム」を構築することである。そのため、東京メトロの箱型トンネルを対象に、塩害発生の

メカニズムおよび塩害の影響範囲についての調査・分析，簡易な判定方法の考案，試験施工等による対策補修方法の検討を実施し，地下鉄トンネルの塩害とその対策について体系的に詳細な研究を行った。

1.2 本研究のフロー

本研究の進め方について，図 1-2-1 に示す。

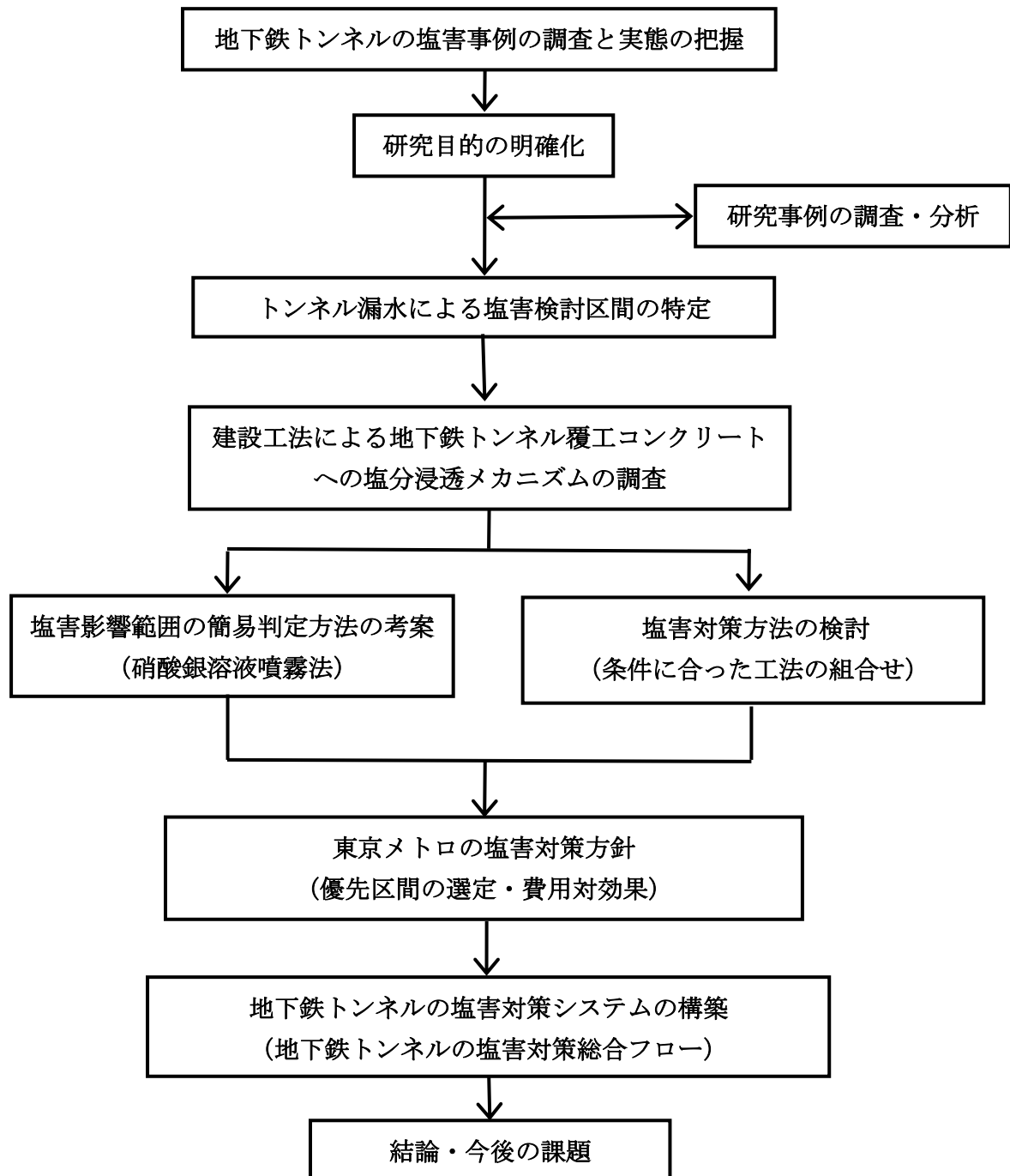


図 1-2-1 研究の流れ

1.3 論文の構成と内容

以下に、本論文の構成を示す。

第1章では、地下鉄トンネルとして東京メトロの箱型トンネルにおいて、定期検査、個別検査および補修工事等の記録から、地下鉄トンネルの塩害の実態と地下鉄トンネルの塩害についての問題点を述べる。次に、地下鉄トンネルの塩害発生メカニズムと対策方法の体系的な研究の必要性と本研究の目的、本論文の構成について述べる。

第2章では、既往の研究について一般的なトンネル構造物の劣化についての研究事例、塩害以外のトンネル覆工劣化の研究事例およびトンネル覆工の塩害の研究事例について述べ、トンネル覆工の塩害調査と対策の重要性と、まだ研究されていない事項を示す。

第3章では、地下鉄トンネルの塩分の供給源と考えられる感潮域河川等と地下鉄トンネルにおいて塩害発生の可能性がある範囲を東京メトロのデータを基に調査した結果を示す。トンネル漏水に含まれる塩化物イオン濃度から塩害検討区間を特定できることを述べる。

第4章では、東京メトロのデータを基に地下鉄トンネルの塩分浸透メカニズムを調査した結果を述べる。トンネル漏水が内面からコンクリート内に浸透することで塩害が発生すること、建設工法による漏水の有無や浸透の影響を調査した結果を述べ、塩害対策はトンネル内面側の漏水箇所を優先することを述べる。

第5章では、実際の対策補修を想定して面的な塩害影響範囲の簡易判定方法の考案について述べる。具体的には、塩化物イオンが付着していれば硝酸銀溶液の噴霧により白色に変化することを利用する。発色の閾値に対する妥当性を検証し、塩害対策を行うにあたり安全側であることについて述べる。

第6章では、地下鉄トンネルに適した塩害対策の補修方法について述べる。地下鉄トンネルでの作業場所や作業時間等、保守に対する制約条件から、実施可能な複数の補修工法を選定した。特に数種類組み合わせた場合の効果確認を試験によって検証し、これらの結果から地下鉄トンネルの塩害対策工事に適した工法を採用したことについての内容を述べる。

第7章では、東京メトロにおける塩害対策の優先度の考え方について述べる。対象トンネルの構造種別、漏水の塩化物イオン濃度を基に、簡易的に塩害対策優先区間の選定表を作成する。中長期的な塩害対策補修計画を策定し、その計画に基づいて工事を実施していることとその効果等を述べる。

第8章では、地下鉄トンネルの塩害対策システムについて述べる。本研究で得られた知見から、一般の地下鉄事業者でも使用できるトンネル塩害対策の手順として、塩害対策区間および塩害補修範囲の特定ができる「地下鉄トンネルの塩害対策システム」の総合フローを構築したので、その内容を述べる。

第9章では、本研究の結論と今後の課題を述べる。

本論文の構成について，図 1-3-1 に示す．

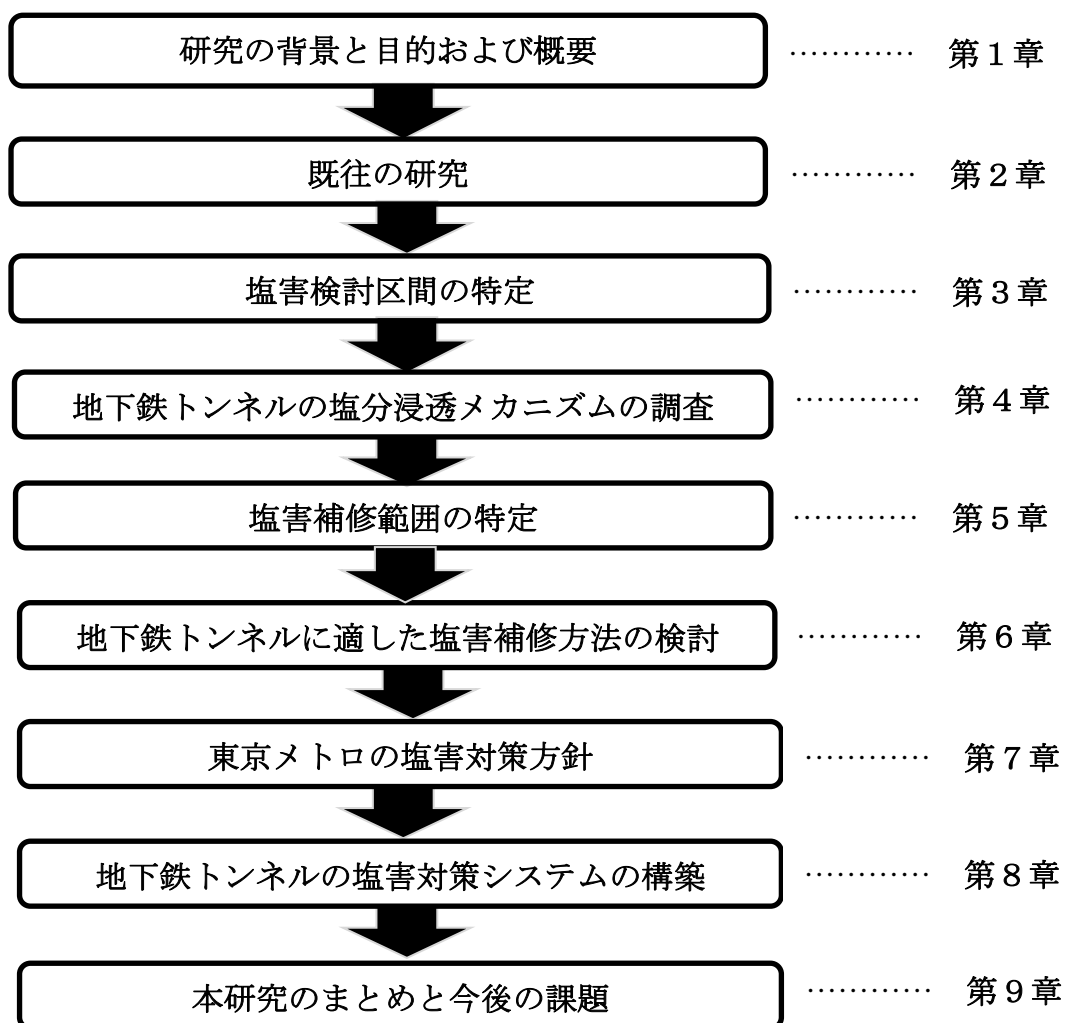


図 1-3-1 本論文の構成

【第1章 参考文献】

- 1) 東京地下鉄株式会社：東京メトロハンドブック 2017, pp.130, 2017.7.
- 2) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等 維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル, pp.11-19, 2007.1.
- 3) 上田洋：水の動きからみたコンクリート構造物のメンテナンス，鉄道総合技術研究所，RRR, pp.22-25, 2011.4.
- 4) 石田哲也，河畑充弘，丸山明，土屋智史：構造物実測データと劣化予想手法を組み合わせた地下鉄トンネルの維持管理マネジメントシステム，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2 pp.1507-1512, 2011.7.
- 5) 川上幸一，武藤義彦，大泉政彦，保栖重夫，諸橋由治：地下鉄箱型トンネルにおける中性化進行予測，土木学会第69回年次学術講演会，V-165, pp.329-330, 2014.9.
- 6) 小柴康平，川上幸一，大泉政彦，村上哲哉，諸橋由治，鈴木拓：古い地下鉄開削トンネルの健全度調査結果，第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，土木学会・機械学会・電気学会共催，S2-14-1, 2014.12.
- 7) 瀬筒新弥，山本努：河川を横断する地下鉄潜函トンネルの塩害対策，土木学会トンネル工学報告集，Vol.20, pp.395-402, 2008.11.
- 8) 山本努，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, 2011.10.
- 9) （社）日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，日本コンクリート工学協会，2013.5.

第2章 既往の研究

2.1 概 要

トンネルの変状は、トンネルの維持管理上の重要な問題である。一般的にトンネルの変状と呼ばれているものとしては、ひび割れ、目地切れ、はく離・はく落、変形・はらみ出し、漏水・有害水、材料劣化、鉄道における軌道狂い、汚損、土砂流入、つらら・側氷などが挙げられる^{1) 2)}。

表 2-1-1³⁾ に鉄道トンネルの要求性能と性能項目の例を示す。維持管理では、これらトンネルの変状に対して、トンネルの要求性能が保たれるように対策を行うことが必要である。この対策としては、変状の原因に応じて、劣化・はく落対策工、漏水・凍結対策工、外力対策工などが行われる。

トンネルの変状の原因は、外力や環境による「外因」と呼ばれるものと、外因による変状を促進させる「内因」と呼ばれるものに分類できる。トンネル変状の一般的な「外因」と「内因」を図 2-1-1³⁾、図 2-1-2³⁾ に示す。

山岳部のトンネルでは、土圧や地滑りなどの外因による変状事例が多く報告されており¹⁾、これらに対する研究が鉄道総研等で数多く行われてきた^{4) 5)}。一方、都市部のトンネルでは、外力による変状事例は少なく、近接施工、地盤沈下によるものがわずかに報告されている程度である^{6) 7) 8)}。都市部のトンネルで問題になっているのは、主に中性化、塩害などの環境による材料劣化に起因する変状である(図 2-1-3)⁹⁾。

1990 年代、山陽新幹線の高架橋や団地ビルの早期劣化が問題になり、塩害、アルカリ骨材反応や中性化(炭素化)の調査・研究が精力的に行われた^{10) 11) 12)}。しかし、トンネル覆工についても調査は行われたと考えられるが公表されているものは少ない。

表 2-1-1 鉄道トンネルの要求性能と性能項目³⁾

要求性能	性能項目	具体的な内容
安全性	① トンネル構造の安定性	トンネルが崩壊しないこと
	② 建築限界と覆工との離隔	建築限界を支障しないこと
	③ 路盤部の安定性	列車の安全な運行に支障するような路盤の隆起・沈下・移動が生じないこと
	④ はく落に対する安全性	列車の安全な運行に支障するようなコンクリート片、補修材等のはく落が生じないこと
	⑤ 漏水・凍結に対する安全性	列車の安全な運行に支障するような漏水、凍結が生じないこと
使用性	⑥ 漏水・凍結に対する使用性	漏水・凍結が坑内設備の機能に影響を及ぼさないこと
	⑦ 表面の汚れ	検査に著しく支障するような汚れがないこと
	⑧ 周辺環境に与える影響	周辺環境に有害な影響を与えないこと
復旧性	⑨ 災害時等の復旧性	復旧対策が必要となるような災害時の偶発的な作用を受けた場合でもトンネルが崩壊せず性能回復が容易に行えること

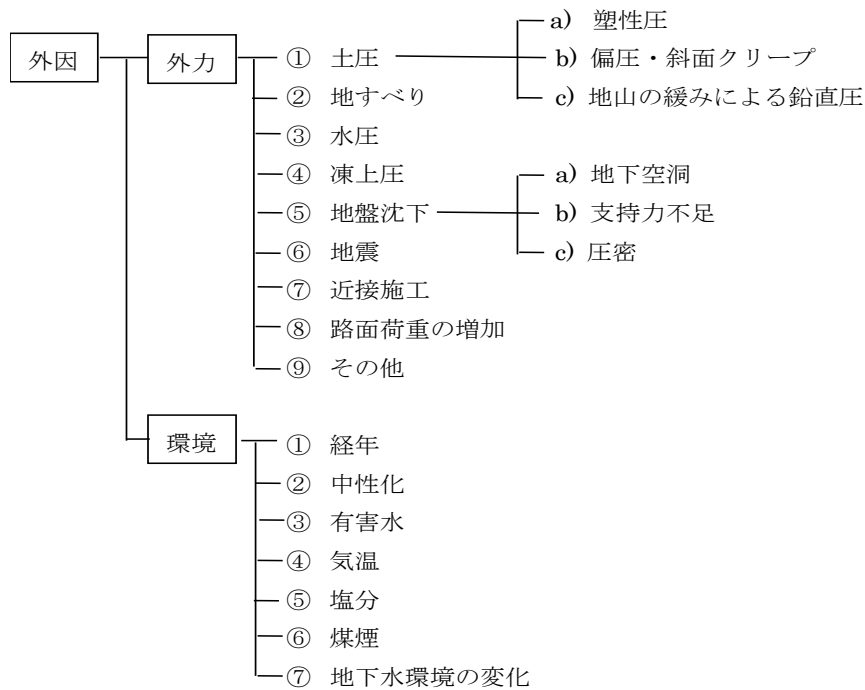


図 2-1-1 トンネル変状の外因³⁾

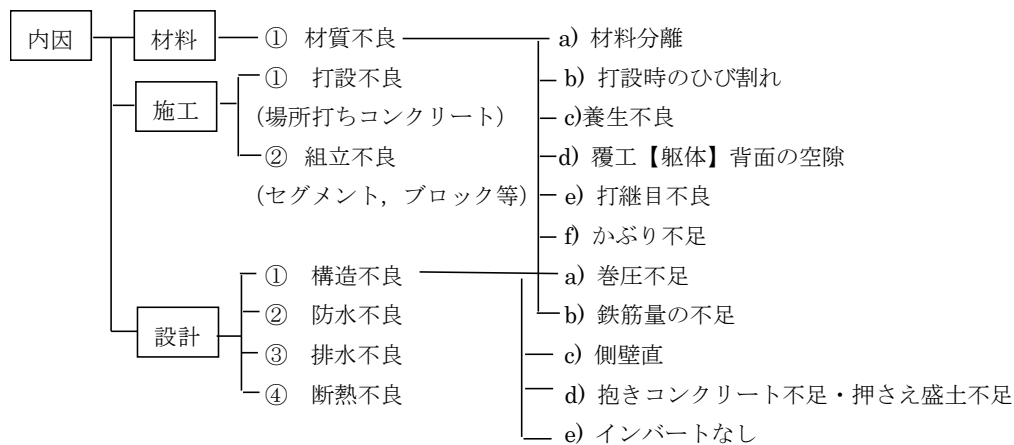


図 2-1-2 トンネル変状の内因³⁾

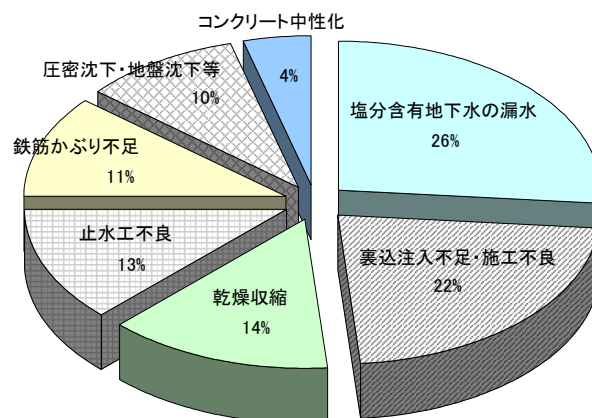


図 2-1-3 都市部鉄道シールドトンネル変状の原因⁹⁾

1999 年山陽新幹線福岡トンネルや北九州トンネルで覆工コンクリート(無筋)のはく落事故が発生した。原因究明に調査が行われ、コールドジョイントや施工直後のひび割れが長期間の漏水と温度変化の繰り返しおよび列車振動の影響で進展したことに起因していることが判明した(図 2-1-4, 写真 2-1-1)^{13) 14)}。そして、鉄道関係者において維持管理方法が議論され、現在行われている検査体系が国土交通省により基準化された³⁾。これに伴い、2000 年以降、トンネル覆工コンクリートの調査や研究事例が発表されるようになってきた。



写真 2-1-1 福岡トンネルのはく落跡¹⁴⁾

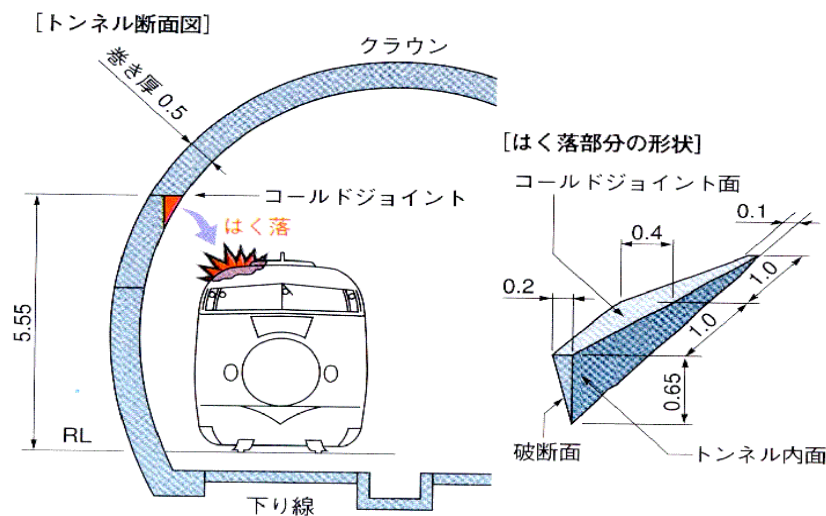


図 2-1-4 福岡トンネルのはく落事故¹⁴⁾

都市トンネルのひとつである地下鉄トンネルは、鉄筋コンクリート構造物の箱型トンネルとシールドトンネルがほとんどである。車両の安全・安定運行上の課題になっているのが、発生頻度が多い塩害や中性化による内部鉄筋の腐食を原因とする被りコンクリートのはく落事故である。これらの事故に対してははく落箇所の補修を行うとともに、定期的な検査において浮き・はく離箇所を発見して適切な処置を行うことで対応しているのが現状である。

2.2 トンネル覆工の劣化についての研究

塩害以外のトンネル覆工の劣化に関する既往の研究について述べる。

2.2.1 酸

上田ら^{15) 16)}は、経年の長い鉄道山岳トンネルの覆工コンクリートを数多く調査し、劣化の多くは覆工材料の侵食によるものであることを示した。その原因は蒸気機関車の煤煙や酸性地下水等の酸による劣化、地下水に含まれる硫酸塩の作用による劣化、補修材の中に含まれる成分に起因したソーマサイト硫酸塩による劣化、火山灰や珪藻土などのセメント代用品使用に起因した劣化であることを明らかにした。

2.2.2 中性化

中性化については、高架橋や橋脚等の地上構造物の事例および研究発表は多数あるが、トンネル覆工についてのものは少ない。

東京メトロでは、1987年から各路線におけるトンネル覆工コンクリートの中性化のデータを収集している^{17) 18) 19) 20) 21) 22) 23)}。これらを整理した結果、中性化速度係数の平均が大きい路線は、一番古い開業後約90年経過した銀座線（建設年代1925年～1938年）で、有楽町線（建設年代1951年～1962年）、千代田線（建設年代1966年～1978年）、丸ノ内線（建設年代1951年～1962年）、南北線（建設年代1986年～2000年）、日比谷線（建設年代1959年～1964年）、半蔵門線（建設年代1973年～1991年）、東西線（建設年代1962年～1969年）の順になっていた。中性化深さの標準偏差値は、銀座線、千代田線、丸ノ内線、日比谷線、東西線、半蔵門線、南北線、有楽町線の順になっている。常識的には古いものほど中性化が進んでいるようであるが、その進行は必ずしも年代順にはなっていなかった。

表 2-2-1 東京メトロ銀座線の中性化による劣化予測結果²³⁾

変状パターン		腐食 グレード	現腐食量 (mg/cm ²)	ひび割れ発生 までの腐食量 (mg/cm ²)	ひび割れ発生 までの予測年数 (year)
漏水	外観上 の変状				
あり 含水率3%以上 損失腐食率 2.42 mg/cm ² /year	あり	IV	96	50 - 96 = -46	既に発生レベル
	なし	III	32	50 - 32 = 18	18 / 2.42 ≒ 7.4年
なし 含水率3%以下 損失腐食率 0.242 mg/cm ² /year	あり	II	16	50 - 16 = 34	34 / 0.242 ≒ 140.5年
	なし	I	0	50 - 0 = 50	50 / 0.242 ≒ 206.6年

中性化深さの実測値は場所によるばらつきが大きく、銀座線においても漏水がない場合は 100 年以上先でもひび割れは発生しないが、漏水のある場合は 10 年以内にひび割れが発生する箇所もあると指摘されている（表 2-2-1）。また、予測値を基に総合的に考えて中性化深さが鉄筋位置まで達すると予測されるのは、銀座線、丸ノ内線、日比谷線の 1960 年代以前に建設されたトンネルである。コンクリートの供給方法（発注者からの支給品）や品質管理の違いなどが原因であるのか、高度成長時代に建設されたコンクリートの劣化が激しいとされている地上構造物とは少し違った結果になっている。ただし、千代田線、有楽町線、半蔵門線、南北線はデータ数が少ないので、データ数を増やしてさらに検討する必要があると記述されている。

松田ら²⁴⁾は、日本全国の外部環境に晒される 36 箇所の既設構造物の中性化深さについて行った調査結果を報告しているが、この中に鉄道トンネル 2 箇所が含まれている。測定位置は側壁コンクリートで、無筋覆工であるので中性化が直接耐久性に影響するものではないとしながらも、経年 74 年のトンネル覆工コンクリートの中性化深さは 40mm、逆に経年 92 年のトンネル覆工コンクリートについては 5mm 程度で、コンクリートの品質によるばらつきが大きいと報告している。

石田ら²⁵⁾は、地下鉄における開削および潜函トンネルの鉄筋コンクリートを対象として、構造物の実測データと劣化予測手法を組み合わせることで中性化による鋼材腐食の進展を予測した。実構造物の鋼材腐食状況を調査して予測手法の妥当性を検証しており、それらの結果に基づき、補修順位と対策実施時期を決定する維持管理マネジメントシステムを提案している。

牛田ら^{26) 27)}は、日本全国の開削トンネルで実施された約 150 箇所の現場調査データを統計分析し、中性化速度係数値は 0.21~8.16mm/√年の範囲に分布しており、中央値が 2.71 mm/√年としている。そして、地上構造物と比較して進行速度がやや遅く、中性化深さは広く分布するとしている。また、全国の開削トンネルにおける中性化に起因する経年とひび割れ発生割合の関係について、漏水がある箇所では経年 20 年で 0~6%程度、経年 100 年で 16~21%程度であること、漏水がない箇所では経年 100 年で 0~4%程度と少ないことがわかったと報告している。

2.2.3 その他

麻田ら^{28) 29)}は、北陸地方（石川県、富山県、福井県）における道路用コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関連した複合劣化を調査している。この中で石川県の道路トンネル 120 箇所の調査を行い、①アルカリ骨材反応が発生したトンネルの割合は 29%であること、②劣化範囲は降雨や日射、温度変化などの影響から坑門と坑口付近であること、③アルカリ骨材反応で劣化したトンネルの補修対策として行った表面被覆工は再劣化する場合がほとんどで、全面打ち換え工法の方が長期的な維持管理として有利であったと報告している。

2.3 トンネル覆工の塩害についての研究

塩害については、地上部におけるコンクリート構造物に関して、1970年代半ばに東北地方日本海沿岸部のコンクリート橋で鋼材位置に相当量の塩分浸透が生じていることが把握され、波しぶきや潮風に含まれる塩化物イオンの浸透に起因する鋼材腐食の発生が確認された。これを契機に広範囲で調査が行われ、1984年に建設省の道路橋課長通達「道路橋の塩害対策指針（案）」が、日本道路協会から「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」³⁰⁾が出版された。それ以降、建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発（1985～87年）」³²⁾を初めとして多くの塩害に関する研究が実施された結果、維持管理に有益なデータや知見が蓄積されている^{32) 33)}。地上部の鉄道コンクリート構造物に関しても、立地環境が原因の塩害発生状況や対策実施などが報告されている^{34) 35)}。しかし、飛来塩分の影響が少ないトンネル覆工のコンクリートに関しては、日本では調査、研究事例が少ないのが現状である。

(1) 海外における調査・研究事例

海外では、いくつかの事例が紹介されている。香港の地下鉄海底トンネル（RC中子型セグメント）では、海水が混合している地下水がボルト継手付近より漏水し、漏水箇所における塩分の過度な付着によりコンクリートのはく離や鉄筋の腐食が進行した事例（写真 2-3-1）が報告されている³⁶⁾。このトンネルでは、トンネル内の温度が 26℃と高温であり、湿度が最高 90%程度で営業時間帯と終電後の時間帯で生じる乾燥状態と湿潤状態の繰り返しにより塩害が進行したとされている。対策としては、トンネル完成後 9 年で漏水の止水、塩害の可能性のある部分の除去、高密度・低透過性の吹付けコンクリートで補修工事を 5 年半かけて行ったと報告されている。



写真 2-3-1 香港地下鉄トンネルの塩害³⁶⁾

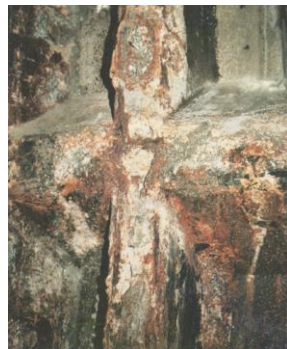


写真 2-3-2 エジプト道路トンネルの塩害³⁷⁾



写真 2-3-3 大規模改修工事状況³⁷⁾

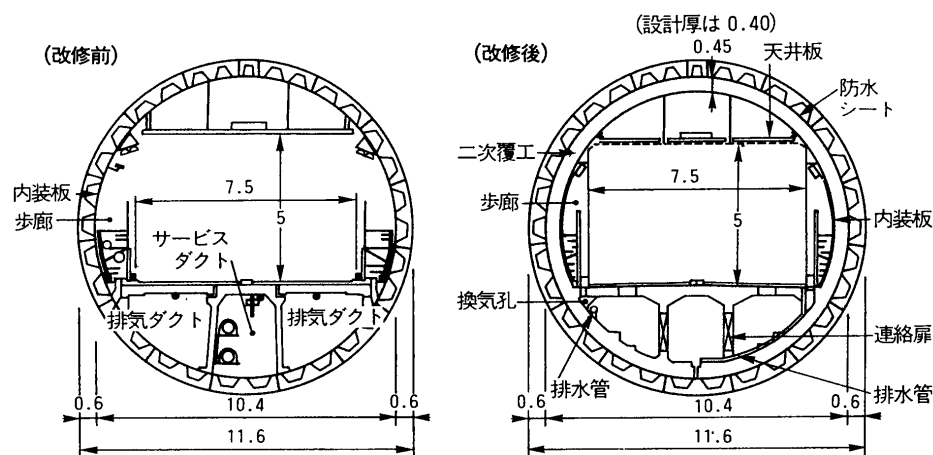


図 2-3-1 エジプト道路トンネル大規模改修³⁷⁾

エジプトのアハムド-ハムディトンネルは、スエズ運河下を通過する延長 1,640m、掘削外径 11.6m の道路シールドトンネルである。セグメント背面の裏込注入が不十分だったことと、セグメント継目の過大な目開き部から海水を含む多量の地下水がトンネル坑内に流入したことから、トンネル完成の 2 年後には深刻な塩害の被害が発生していることが確認された³⁷⁾。調査では、海水の数倍の塩分を含んだ漏水が急速に鉄筋を腐食させ、その膨張によりコンクリートセグメントを劣化させ、損傷の範囲はセグメントの 65%にも及び、トンネルの強度は設計値の 50%にまで低下していたことが判明した(写真 2-3-2)。そこで、完成 10 年後に塩害部分の除去と主要部材として二次覆工を設置する大規模改修工事(図 2-3-1, 写真 2-3-3)が行われたことが報告されている。なお、セグメントからの漏水対策として二次覆工の外側を導水タイプの防水シートで覆っている。

Carola Edvardsen は、耐用年数 100 年で設計したスウェーデンのグリーンベルトリンクトンネル(海底道路シールドトンネル)において 224 個の腐食センサーをセグメント内部に取り付け(図 2-3-2, 写真 2-3-4)、塩害による鉄筋の腐食についてモニタリング調査の結果を報告している³⁸⁾。

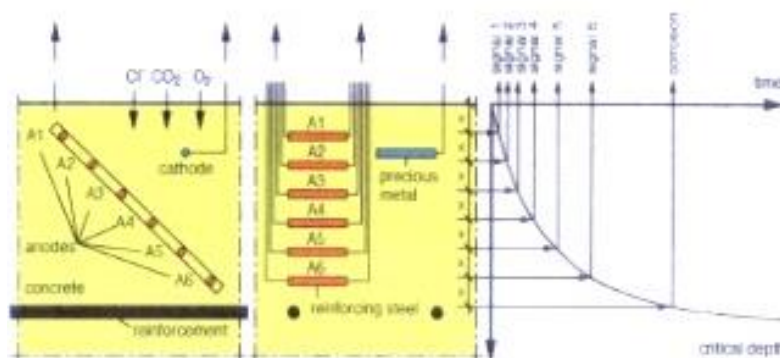


図 2-3-2 セグメント鉄筋腐食センサー³⁸⁾



写真 2-3-4 セグメント鉄筋腐食センサー³⁸⁾

(2) 日本における調査・研究事例

日本では、海底トンネル等の塩害についていくつかの報告がある。

関門鉄道トンネルでは、経年 50 年時に 7 箇所からコアを採取して行った覆工の品質に関する調査結果が江村ら³⁹⁾により報告されている。中性化や塩分の著しい浸透は認められず、表層 1cm では塩分濃度が高い部分もあるが、深さ方向で低くなり、現在も健全な状態にあると報告されている。

山陽新幹線の新関門トンネルについては、漏水によるスラブ軌道の塩害について亦野ら⁴⁰⁾や山根⁴¹⁾らにより報告されている。このトンネルは全長 18km714m で、そのうち 880m が海底部であり、軌道構造はトンネル全区間に亘りスラブ軌道となっている。海底部においては、塩分を含んだ漏水により開業後 2 年目くらいから、スラブ上面や側面に甲羅状の亀裂や表面はく離が発生し、内部の鉄筋が腐食し始めた。塩害を受けたスラブのコンクリートを分析した結果、「コンクリート中の塩化物イオン濃度は、土木学会コンクリート標準示方書に示されている塩化物イオンの許容値 (0.3kg/m^3) に対して十数倍となっていた」と報告されている。しかし、トンネル覆工の塩害劣化状況については述べられていない。

関門国道トンネルは 1958 年 (昭和 33 年) に完成した 2 車線の海底トンネルである。トンネル断面を図 2-3-3 に示す。開通後の交通量の増加、車両の大型化および海水の影響等により、鉄筋コンクリート床版や側壁にひび割れが発生し、鉄筋の腐食およびそれに伴う被りコンクリートのはく離などの変状が認められたため、約

21 年経過した時点で海底部の 413m³ の打ち替え工事が行われたことが報告されている^{42) 43) 44)}。しかし、関門国道トンネルの覆工コンクリートについては、1978 年（昭和 53 年）の調査の結果では、水溶性塩素濃度は最高で 0.6%であったが、コンクリートの圧縮強度は約 500kg/cm²、超音波伝播速度は 4500m/s～5000m/s と大きく、しかも無筋コンクリートであるため、今後も塩分浸透によるコンクリートの劣化の可能性は少ないと判断されていた。

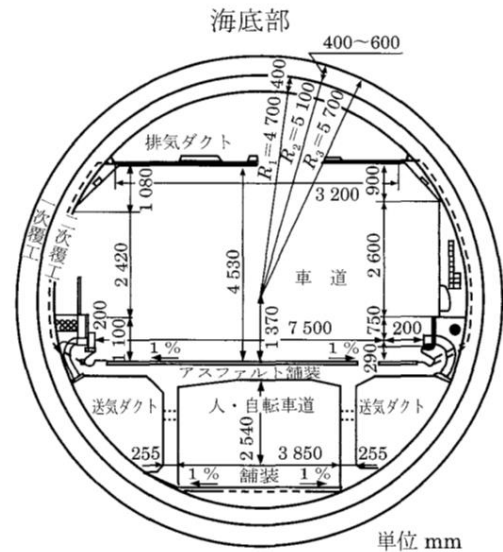


図 2-3-3 関門国道トンネル⁴²⁾

宍戸ら⁴⁵⁾は、環状八号線羽田空港トンネルの塩害対策について報告している。図 2-3-4 に示すこのトンネルは、羽田空港の滑走路下に建設されたために周辺の軟弱地盤と同様な沈下傾向を示すことが要求された。しかし、トンネル軸方向での沈下量が一樣でないため、トンネルは予想を超える不等沈下を起し、ひび割れ、漏水などの変状が生じた。竣工後 15 年間にわたる動態観測の結果、不等沈下に対して躯体は十分な耐力を有していることが明らかになった。鉄筋の腐食に関する調査では、中性化進行速度は小さく、鉄筋の腐食に至るまでに 150 年かかることが明らかになった。しかし、漏水が生じていることから塩害はかなり進行していると予想された。そこで、腐食が進んでいると考えられる 1 ブロック（20m の施工スパン）と、腐食がそれほど進んでいないと考えられる 1 ブロックを選定し、各ブロックにおける自然電位、分極抵抗、電気抵抗の調査を行った。その調査結果から、鉄筋腐食が進んでいると考えられる箇所（図 2-3-5 の赤で示す部分）と現場のひび割れ状況、漏水状況との間に高い相関関係があることが明らかになった。

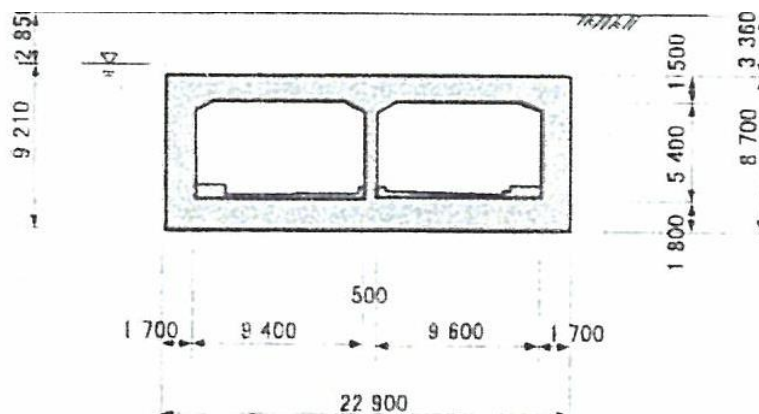


図 2-3-4 環状八号線羽田空港トンネルの断面⁴⁵⁾

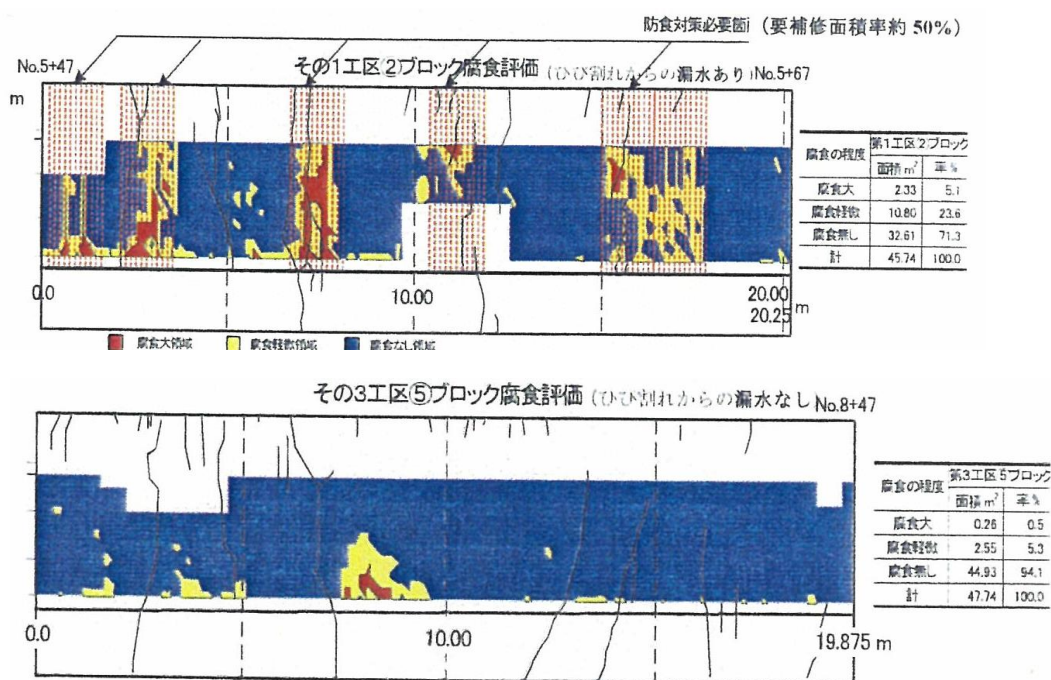


図 2-3-5 漏水箇所と鉄筋の腐食程度の関係⁴⁵⁾

吉本ら⁴⁶⁾は、供用年数が約15年～40年の東京電力地中送電用シールドトンネル(延長14,275m)から2,855箇所を選び、鉄筋の腐食程度、ひび割れ、漏水などの劣化現象を調査した結果を論文発表している。漏水は全体の68.5%(1,956箇所/2,855箇所)で発生しており、ほとんどの漏水は継手部からであった。何らかの鉄筋腐食があるものは全体の20.6%(587箇所/2,855箇所)で、そのうち補修が必要な鉄筋腐食の発生箇所は全体の0.7%(20箇所)であった。これらの箇所について詳細な劣化調査が行われ、調査対象として選定された5本のシールドトンネルのうち、3本(A, B, C)のトンネルは海岸からの距離が1km以上離れており、漏水から塩化物イオンが検出されなかった(内陸性環境)。2本(D, E)のトンネルは海岸からの距離が1km以内で、漏水にかなりの濃度の塩化物イオンが検出された(海洋性環境)。D, Eのトンネルの漏水およびコンクリート表面析出物の塩化物イオン濃度の値(表2-3-1, 表2-3-2)から、地下水は海水の影響を受けていると考えられた。セグメントでは配力鉄筋や組立鉄筋が主鉄筋の外側に配置されているので、被りとは配力鉄筋や組立鉄筋の純被りを示している。このため、ここで取り扱う鉄筋の腐食とは配力鉄筋や組立鉄筋の腐食であり、主鉄筋はほぼ被害なしであった。

鉄筋腐食グレードと被りとの関係を調べたところ(図2-3-6, 図2-3-7)、内陸性環境では曲げひび割れがない場合で被りが5mm以下で腐食が顕著であった。また、曲げひび割れがある場合でも被りが20mm以上あれば腐食は心配ないと考えられる。海洋性環境の下では、曲げひび割れのない場合で被りが12mm以下、曲げひび割れのある場合で被りが15mm以下で腐食が顕著であった。漏水の有無と鉄筋腐食の明

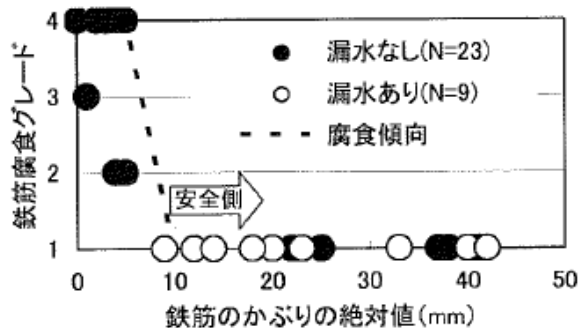
確な差異については認められなかった。これらの結果から、内陸性環境と海洋性環境で鉄筋の腐食傾向に明確な差異が生じており、鉄筋の腐食に塩化物イオンが明確に影響を与えているとしている。

表 2-3-1 漏水塩化物イオン濃度分析結果 ⁴⁶⁾

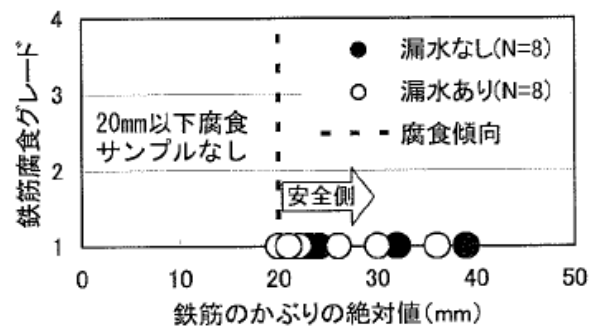
調査対象	Cl ⁻ 濃度	備考
D トンネル	6.20 kg/m ³	一般的な濃度 海水：20.0 kg/m ³ 淡水：0.03 kg/m ³
	5.35 kg/m ³	
	3.05 kg/m ³	
E トンネル	2.15 kg/m ³	
	2.12 kg/m ³	

表 2-3-2 表面塩化物イオン濃度分析結果 ⁴⁶⁾

調査対象	Cl ⁻ 濃度	備考
D トンネル	2.25 kg/m ³	継手からの漏水が 乾燥した箇所のコ ンクリート表面析 出物を採取
	2.44 kg/m ³	
	44.7 kg/m ³	
E トンネル	75.4 kg/m ³	
	5.75 kg/m ³	

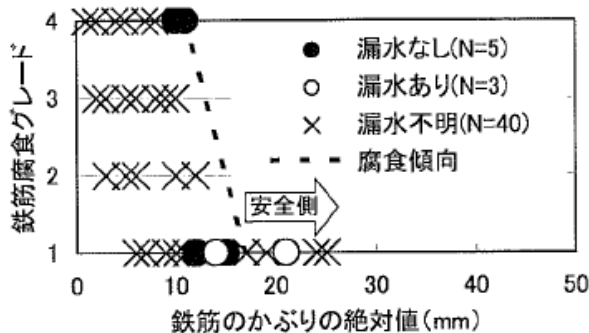


(a) 曲げひび割れなし

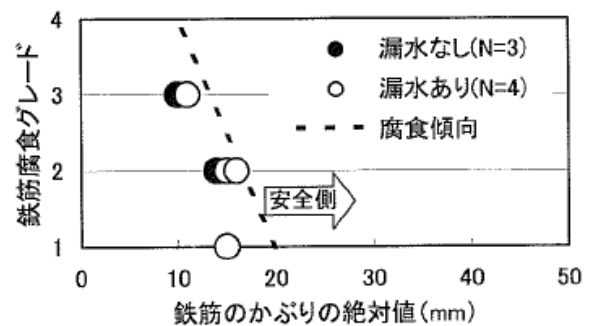


(b) 曲げひび割れあり

図 2-3-6 内陸性環境における鉄筋腐食グレードとかぶりの関係 ⁴⁶⁾



(a) 曲げひび割れなし



(b) 曲げひび割れあり

図 2-3-7 海洋性環境における鉄筋腐食グレードとかぶりの関係 ⁴⁶⁾

JR 東日本のシールドトンネルでも塩害対策工事が報告 ⁴⁷⁾ されている。このトンネルは 1966 年～1972 年に建設された鉄道単線シールドトンネルで、外径 7,060mm の RC および合成セグメントが使用されている。建設当時、地下水位はトンネル下部に位置していたため、二次覆工を行わず供用が開始された。地下水汲み上げ規制の強化に伴い、地下水位がトンネル天端まで回復し、1970 年代後半からトンネル

内への漏水，レール腐食，セグメントの継手金物等の腐食など図 2-3-8 に示すようなトンネルの変状が認められるようになった。

調査の結果，セグメントコンクリートの中性化の進行は小さく，圧縮強度は設計値を満足していることが明らかになった。漏水の水質は塩化物イオン濃度が高く，海水の影響を受けており，セグメントボルトおよびセグメント表面鋼材に最大 10% 程度の腐食が認められたが，トンネルは外力に対して所要の耐荷力を有していることが確認された。漏水に起因する鋼材腐食等によるトンネルの劣化進行，漏水に伴うトンネル背面の土砂の流出により，トンネル周辺地盤の緩みおよび地上構造物への影響を与える可能性が考えられたので，路線の重要度を考慮して，恒久的対策として二次覆工による対策が実施された。

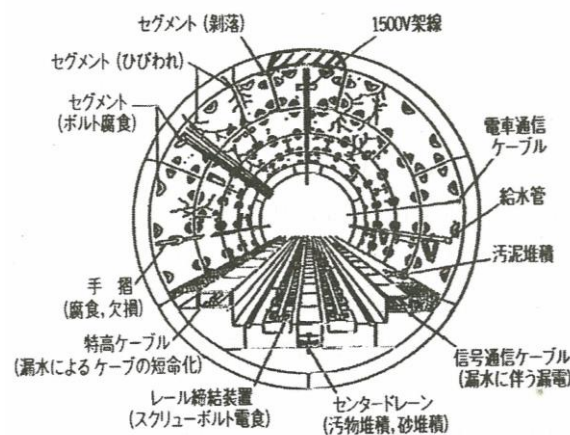


図 2-3-8 シールドトンネル変状図 47)

田辺ら⁴⁸⁾は，JR 東日本の臨海部シールドトンネルにおける塩害被害について報告している。このトンネルの断面形状を図 2-3-9 に示す。セグメント区間（二次覆工なし）が約 4km，二次覆工区間が約 3km で，途中に立坑が 7 つあり，いずれも海に面した河口部から 100m 以内に位置している。調査時には供用後 30 年以上経過しており，目視調査の結果，セグメント継目部分からの漏水，セグメント継目ボルトや付帯設備（手すりやエキスパンドメタル）の腐食，排水溝の目詰まりなどが確認された。

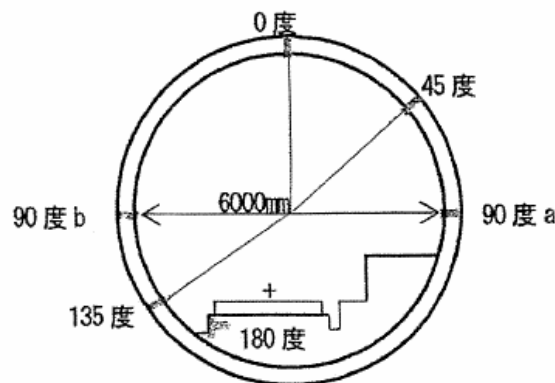


図 2-3-9 臨海部トンネル断面と測量位置

コンクリート表面における塩化物イオン濃度を測定した結果、90 度の位置（スプリング）で $0.07 \sim 3.16 \text{ kg/m}^3$ 、135 度の位置で $2.30 \sim 5.60 \text{ kg/m}^3$ 、180 度の位置（インバート）で $8.39 \sim 10.47 \text{ kg/m}^3$ が得られ、トンネル下部に行くほど表面の塩化物イオン濃度は高くなっていることが確認できた。トンネル覆工に対して、コンクリートコアを採取し、コンクリート内部の深さ方向の塩化物イオン濃度を測定した。深さ方向の塩化物イオン濃度を、セグメント、二次覆工、路盤の構造別に図 2-3-10 から図 2-3-12 に示す。鉄筋位置における塩化物イオン濃度も、スプリングからインバートに向かうにつれて高くなり、発錆限界濃度を越える傾向が示された。図 2-3-11 の⑨、⑫においては、覆工背面側の濃度が高い。これはセグメントと二次覆工の境界に漏水の水みちができて、二次覆工の背面から劣化因子が浸透していることによると考えられた。図 2-3-13 に路盤（①、⑧、⑬）における鉄筋近傍での将来の塩化物イオン濃度の予測を示す。現状および将来において、濃度が発錆限界濃度を超えており、酸素および水分が十分に供給されれば、鉄筋腐食が生じることを示している。

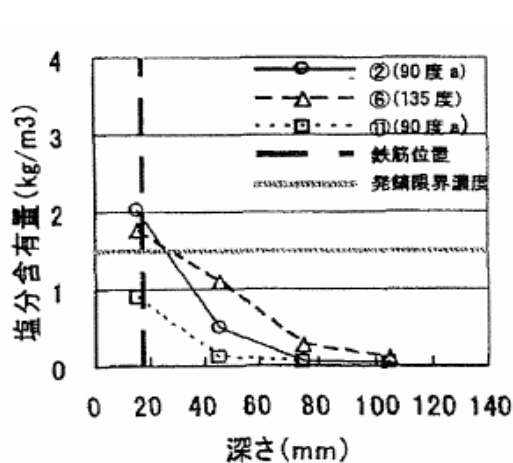


図 2-3-10 セグメント塩化物イオン濃度⁵⁰⁾

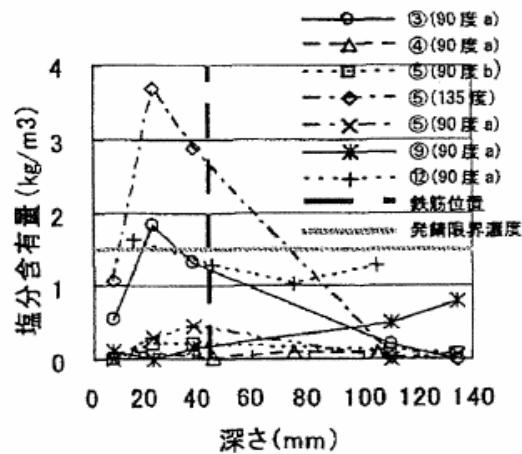


図 2-3-11 二次覆工塩化物イオン濃度⁴⁸⁾

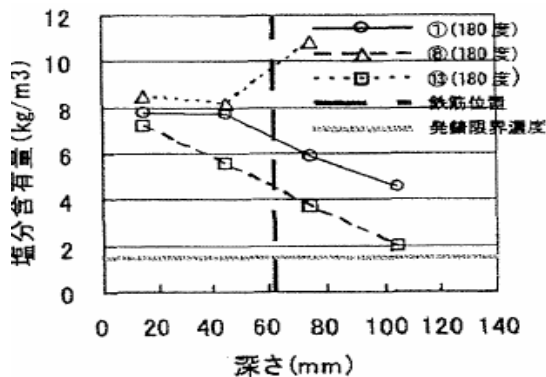


図 2-3-12 路盤部塩化物イオン濃度⁵⁰⁾

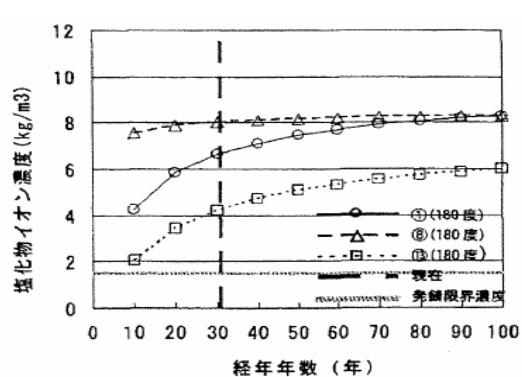


図 2-3-13 路盤部塩化物イオン濃度予測⁴⁸⁾

トンネル内外での飛来塩分量の測定を行い、付着した飛来塩分がすべてコンクリート中に浸透したと仮定した時の飛来塩分の蓄積量と、コンクリート中の全塩化物量との比較をスプリング部について行った。その結果は表 2-3-3 に示すとおりで、セグメントにおいてはコンクリート中に含まれる全塩分量の 3.9%に過ぎず、また二次覆工においても 4.3%に過ぎないことから、飛来塩分はトンネルの塩害にほとんど寄与していないことがわかる。トンネル内の漏水の化学分析結果を表 2-3-4 に示す。Na⁺量および Cl⁻量がともに海水の 1/3 程度となっており、漏水に海水が混じっていることが予想できる。すなわち、トンネル内において漏水箇所や、それが滞留している排水溝等が塩化物イオンの供給源となり、この水が何らかの影響（風圧）で飛散して付着したり、コンクリート自体の吸い上げ等が繰り返されて塩害が発生したとしている。

表 2-3-3 コンクリート中の全塩化物量に対する飛来塩分量の割合（90 度分）⁴⁸⁾

	a 飛来塩分蓄積量 (kg/m ²)	b コンクリート中の全塩化物量 (kg/m ²)	a/b (%)
セグメント	0.011	0.282	3.9
二次覆工	0.009	0.208	4.3

表 2-3-4 トンネル内漏水の化学分析結果⁴⁸⁾

	pH	Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻
トンネル内	7.56	3,120	396	6,036	152	0.03
海水	8.10	10,500	401	19,000	2,652	0.14
河川水	-	7.3	12.7	6.1	15.9	2.61

単位：mg/l

東ら⁴⁹⁾は、横浜市地下鉄における臨海部の駅部立坑躯体壁（厚さ 1,000mm）で背面の連壁部も含めて 1,400mm の長さのコアを採取して調査を行い、塩害で損傷を受けた供用中の地下鉄構造物の耐久性向上対策についての報告を行っている。また、小出ら⁵⁰⁾は、臨海部の横浜・関内間でのシールドセグメント（ダクトイル、合成セグメント）の塩害補修補強工事について報告している。

牛田^{26) 27)}らは、日本全国の開削トンネルで実施された約 150 箇所における現場調査データの統計分析結果から、全国の開削トンネルにおける塩害は、感潮域河川付近において、その進行速度は干満帯と S2 地域における飛来塩分の間である特徴を得ている。塩害に起因するトンネルの経年とひび割れ発生割合の関係について

は、経年 20 年で 3～18%程度、経年 100 年で 100%程度であることがわかったと報告している。

東京メトロでは、第 1 章で述べたような調査を 1987 年（昭和 62 年）から行なっている^{51) 52) 53)}。また、塩害を受けた感潮域河川下のシールドトンネル二次巻き補強工事（写真 2-3-5）について報告している^{54) 55)}。



写真 2-3-5 塩害を受けた感潮河川下のシールドトンネルの二次巻き補強工事^{54) 55)}

これら報告されている事例の多くはシールドトンネルについてであり、またほとんどは覆工における塩害事例の調査結果を報告したものである。原因調査から、塩害の発生メカニズム、影響範囲の特定、対策方法の検討に至る、総合的かつ体系的に検討された研究が少ないのが現状である。

そこで、今回、塩害による劣化が多く見られる東京メトロの箱型トンネルを例に、地下鉄トンネルの塩害について体系的な研究を行った。

【第2章 参考文献】

- 1) 鉄道総研：トンネル補修・補強マニュアル、鉄道総合技術研究所，p5，1990. 10.
- 2) 日本鉄道施設協会：鉄道土木構造物の維持管理，日本鉄道施設協会，p238，1998. 9.
- 3) 国土交通省，鉄道総研：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所，2007. 1.
- 4) 鉄道総研：変状トンネル対策工設計マニュアル、鉄道総合技術研究所，1998. 2.
- 5) 鉄道総研：トンネル補修・補強マニュアル、鉄道総合技術研究所，2007. 1
- 6) 地盤工学会：近接施工，地盤工学・実務シリーズ 28，丸善，2011. 1.
- 7) 鉄道総研：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル，鉄道総合技術研究所，2007. 1.
- 8) 有泉毅，五十嵐寛昌，金子俊輔，永谷英基，山崎剛，日下部治：周辺地盤の圧密沈下に伴う既設シールドトンネル作用荷重の変化メカニズム，土木学会論文集，No. 750/Ⅲ-65，pp. 115-134，2003.
- 9) 鉄道総研：都市トンネルの変状対策（変状の傾向／対策事例），鉄道総研教育講座 トンネル維持管理の基本テキスト，鉄道総合技術研究所，pp. 6-1-10～6-1-13，2002. 10.
- 10) 小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 1，森北出版，1991. 7.
- 11) 小林一輔：コンクリートが危ない，岩波新書（新赤版）616，岩波書店，1999. 5.
- 12) 魚本健人：コンクリート診断学入門-建造物の劣化対策-，朝倉書店，2004. 9.
- 13) トンネル安全問題検討会：トンネル安全問題検討会報告書事故の原因推定と今後の保守管理のあり方，運輸省鉄道局，2000. 2.
- 14) 小島芳之，野城一栄，朝倉俊弘，小山幸則：鉄道トンネルの覆工剥落事故と原因推定，トンネルと地下，土木工学社，Vol. 31，No. 9，pp. 63-70，2000. 9.
- 15) 上田洋：トンネル覆工コンクリートの化学的侵食に関する研究，東京大学工学部博士論文，2009. 9.
- 16) 上田洋，松田芳範，西尾壮平，佐々木孝彦：トンネル覆工コンクリートの劣化について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 759-764，2004.
- 17) 東京地下鉄株式会社：銀座線トンネル維持管理検討委員会報告書，東京地下鉄株式会社，2005. 3.
- 18) 山本努，松川俊介：建設から 75 年経過した開削 SRC トンネルの調査・診断，土木学会トンネル工学報告集，Vol.15，pp.395-402，2005.12.
- 19) 山本努：建設から 80 年を経過する銀座線トンネルの調査・診断，日本鉄道施設協，Vol. 44，No6，pp227-229，2006. 3.
- 20) 武藤義彦：地下鉄銀座線における旧駅・旧ホームを含む維持管理，日本鉄道施設協会誌，Vol. 45，No. 4，pp62-66，2007. 4.

- 21) 川上幸一, 武藤義彦, 大泉政彦, 保栖重夫, 諸橋由治: 地下鉄箱型トンネルにおける中性化進行予測, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, V-165, pp. 329-330, 2014. 9.
- 22) 小柴康平, 川上幸一, 大泉政彦, 村上哲哉, 諸橋由治, 鈴木拓: 古い地下開削トンネルの健全度調査結果, 第 21 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, 土木学会・機械学会・電気学会共催, S2-14-1, 2014. 12.
- 23) 西村高明: 地下鉄トンネルの検査データに基づく安全性評価と維持管理に関する研究, 早稲田大学大学院創造理工学研究科博士論文, p61, 2017. 2.
- 24) 松田芳範, 上田洋, 石田哲也, 岸利治: 実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 629-634, 2010. 7.
- 25) 石田哲也, 河畑充弘, 丸山明, 土屋智史: 構造物実測データと劣化予測手法を組み合わせた地下鉄トンネルの維持管理マネジメントシステム, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 2, pp. 1507-1512, 2011. 7.
- 26) 牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, 嶋本敬介, 焼田真司: 鉄道開削トンネルの材料劣化に関する事例調査, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, pp. 565-566, 2013. 9.
- 27) 牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, 嶋本敬介, 焼田真司, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 開削トンネルにおける調査データの分析と将来予測手法の検討, 土木学会論文集 F1, Vol. 71, No. 1, pp. 41-53, 2015. 6.
- 28) 麻田正弘, 鳥居和之: 石川県におけるトンネルの ASR 劣化状況と対策に関する実態調査, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 2, pp. 1465-1470, 2013. 7.
- 29) 麻田正弘: 各種環境条件に曝されたコンクリート構造物の複合劣化の実態調査とその対策に関する研究, 金沢大学大学院自然科学研究科学学位論文, 2015. 9.
- 30) (社) 日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 1984. 2.
- 31) 佐藤信彦, 佐藤直良, 三浦真紀: 総プロ「コンクリートとの耐久性向上技術の開発(1985-1987)」の概要—土木構造物—, 土木技術資料 / 国土交通省国土技術政策総合研究所, 土木研究所 監修, Vol. 30, No. 12, pp. 637-641, 1988. 12.
- 32) 大即信明他: 塩害 (I), コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 技報堂, 1985. 5.
- 33) 中谷昌一, 玉越隆史, 内田賢一, 廣松新, 池田明寛: コンクリート橋の塩害対策資料集-実態調査に基づくコンクリート橋の塩害対策の検討-, 国土技術政策総合研究所資料, 第 55 号, 2002. 11.
- 34) 宮本征夫: 鉄道橋における被害の実態, コンクリート工学, Vol. 25, No. 11, pp. 57-62, 1987. 11.

- 35) 小林明夫：鉄道橋における塩害対策，コンクリート工学，Vol. 25，No. 11，pp. 80-84，1987. 11.
- 36) Hadyn Davies, Mikael Brunnsatthey, K. W. Ho: Robots used for Hong Kong Mass Transit Railway report, Tunnels & Tunnelling, 1995. 3.
- 37) 浜田清一：スエズの塩害トンネル，土木学会誌，Vol. 79， pp22-29, 1994. 10.
- 38) Carola Edvardsen: Design for Durability in Denmark, Proceedings of International Workshop Measuring and Predicting the Behaviour of Tunnels Delft, the Netherlands, 2002. 10.
- 39) 江村康博，宮武洋之：経年50年の海底トンネルの健全度調査，トンネル工学研究発表会 論文・報告集，Vol. 2， pp. 137-142，1992. 11.
- 40) 亦野和弘，山下靖二，安藤勝敏：新関門トンネル内軌道スラブの塩害対策，土木学会第50回年次学術講演会概要集，IV-315，pp. 630-631，1995. 9.
- 41) 山根寛史，松本亮介，金岡裕之：海底トンネルにおける軌道スラブの塩害対策効果について，第19回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，土木学会・機械学会・電気学会共催，No. 12-79，2505，pp. 209-212，2012. 6.
- 42) 松下博通，手塚誠，豊田昭夫：海水の浸食による鉄筋の腐食（関門トンネル車道床版の調査），コンクリート工学論文集，Vol. 2， pp. 17-20，1980.
- 43) 楠原和典：海底トンネルの床板打換え工事 関門国道トンネル，トンネルと地下，Vol. 11，No. 6， pp. 17-26，1980. 6.
- 44) 西沢邦夫，小川隆一：トンネルの保守・維持管理シリーズ(9) 関門トンネルにおける維持と補修，トンネルと地下，Vol. 16，No. 2， pp. 67-71，1985. 2.
- 45) 穴戸薫，関口幹夫，馬場敦：環状八号線羽田空港トンネルの塩害対策，土木学会第60回年次学術講演会概要集，V-042，pp. 83-82，2005. 9.
- 46) 吉本正浩，信岡卓，笠井靖浩，大塚正博：地中送電用シールドトンネルの耐久性設計に関する提案，土木学会論文集，No. 763，VI-63，pp. 119-132，2004. 6.
- 47) 土木学会トンネル工学委員会維持管理部会：トンネルの維持管理 シールドトンネルの事例，土木学会トンネルライブラリーNo. 14， pp. 145-148，2005. 7.
- 48) 田辺将樹，佐藤優，上原元樹，鈴木延彰，吉田聖浩：臨海部経年シールドトンネルの塩害および腐食メカニズムの解明とその対策，土木学会トンネル工学報告集，Vol. 15， pp. 355-362，2005. 11.
- 49) 東邦和，宮村貫雄，青木進：横浜市地下鉄におけるコンクリート側壁の塩害の調査と耐久性診断システムによる評価，建設の施工企画， pp. 68-72，2007. 11.
- 50) 小出昌克，津村匡洋，西山宏一：地下鉄構造物の長寿命化対策-平沼長シールドトンネル（下り線）・関内駅他構築補修工事-，土木施工，Vol. 57，No. 7，2017. 7.

- 51) 大塚努, 瀬筒新弥, 田底成智: 漏水中の塩化物イオンの影響を受けたセグメントの健全度調査, 土木学会トンネル工学報告集, Vol. 16, pp. 419-426, 2006. 11.
- 52) 瀬筒新弥, 山本努: 河川を横断する地下鉄潜函トンネルの塩害対策, 土木学会トンネル工学報告集, Vol. 20, pp. 395-402, 2008. 11.
- 53) 山本努, 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. 10.
- 54) 大塚努, 丹治宏, 瀬筒新弥: 千代田線隅田川シールドトンネル二次巻き工事の計画, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, VI-178, pp. 355-356, 2005. 9.
- 55) 大塚努, 堀健三, 山中耕太郎: 千代田線隅田川シールドトンネル二次巻き工事の施工, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集, VI-006, pp. 11-12, 2006. 9.

第3章 塩害検討区間の特定

3.1 河川等と交差・近接する区間

東京メトロの路線において、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への漏水が原因と考え、塩害による劣化と考えられる変状が多く発生している河川下および東京湾近郊を調査範囲とした。東京メトロのトンネルが河川等(河川、埋立地、濠)と交差・近接している区間は図 3-1-1 に示すように 75 区間あり、箱型トンネルが 49 箇所、シールドトンネルが 26 箇所である。その中でも建設年次が古く、定期検査の結果等から変状(はく離・はく落)、補修面積が大きい箱型トンネル 49 箇所に対して塩害対策を検討することとした。



図 3-1-1 河川等との交差・近接区間（シールド区間も含む）

3.2 トンネル漏水の塩化物イオン濃度

トンネル躯体からの漏水に含まれる塩化物イオン濃度を把握するため、河川等と交差・近接する 49 箇所の中から漏水の多い 21 箇所（表 3-2-1）を対象に漏水に含まれる塩化物イオン濃度を測定した¹⁾。なお、現地での調査可能時間を勘案し、採取する漏水量を必要最小限に留める必要があり、測定には極めて少量の漏水でも分析可能な塩化物イオン濃度分析機器を用いて行った。

調査を実施したトンネル 21 区間における漏水中の塩化物イオン濃度の結果を図 3-2-1 に示す。各区間で漏水の塩化物イオン濃度が最も高い箇所と最も漏水が発生している箇所（代表地点の値）を示している。漏水中の塩化物イオン濃度は地上部

の環境が大きく影響すると考え、感潮域河川下（Ⅰ）、埋立地下（Ⅱ）、非感潮域河川下（Ⅲ）、濠の下（Ⅳ）、低地帯で河川埋立地下（Ⅴ）の5つの環境種別（表 3-2-2）に分類することとした。

表 3-2-1 箱型トンネ区間の漏水中の塩化物イオン濃度調査箇所

No.	路線	駅間			線	キロ程	河川名
1	銀座線	三越前駅	～	神田駅	B	9k637m	竜開川
2		神田駅	～	末広町駅	B	10k470m	神田川
3		稲荷町駅	～	田原町駅	B	13k411m	新堀
4	丸ノ内線	銀座駅	～	霞が関駅	B	10k108m	堀
5		赤坂見附駅	～	四ツ谷駅	B	13k067m	弁慶濠
6	日比谷線	上野駅	～	仲御徒町駅	A	3k991m	小さい川
7		築地駅	～	東銀座駅	B	9k255m	築地川
8		広尾駅	～	恵比寿駅	B	17k264m	渋谷川
9	東西線	茅場町駅	～	門前仲町駅	A	13k903m	濱辺運河
10		門前仲町駅	～	木場駅	A	14k239m	埋立地
11		落合駅	～	高田馬場駅	A	3k086m	神田川
12		竹橋駅	～	大手町駅	A	10k669m	大手濠
13		茅場町駅	～	門前仲町駅	B	12k597m	亀島川
14	千代田線	大手町駅	～	二重橋前駅	A	13k477m	和田倉、馬場先濠
15	有楽町線	銀座一丁目駅	～	新富町駅	A	20k060m	三十三間堀
16		新富町駅	～	月島駅	B	20k718m	築地川
17		月島駅	～	豊洲駅	A	23k133m	埋立地
18		護国寺駅	～	江戸川橋駅	B	12k828m	神田橋
19	半蔵門線	水天宮前駅	～	清澄白河駅	A	11k067m	隅田川支流
20		九段下駅	～	神保町駅	B	7k013m	日本橋川
21	南北線	市ヶ谷駅	～	飯田橋駅	B	9k919m	外濠

* 東京メトロは上・下線をA・B線と呼んでいる。

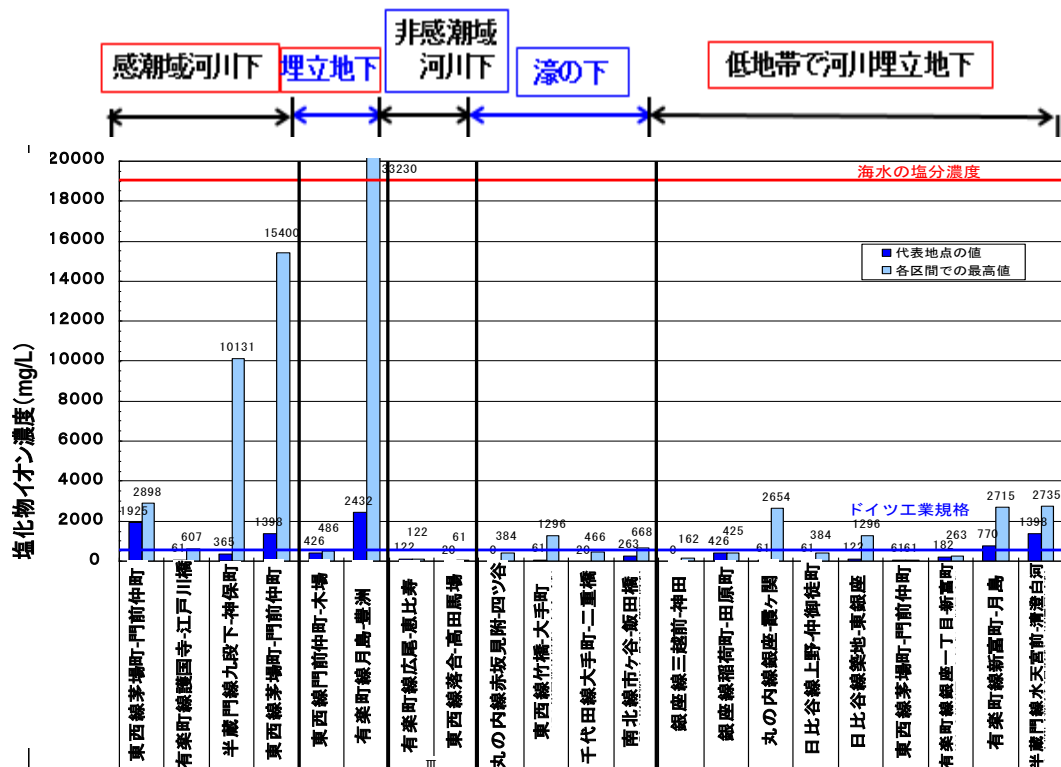


図 3-2-1 漏水中の塩化物イオンの濃度調査結果

表 3-2-2 交差・近接する河川等の環境種別

種別	河川等の環境種別	区間数
I	感潮域河川下	14
II	埋立地下	2
III	非感潮域河川下	5
IV	濠の下	6
V	低地帯で河川埋立地下	22
	計	49

トンネル躯体に対する塩化物イオンの影響範囲を調べるために、調査した河川等の直下以外に当該地点周辺で漏水が採取できた地点での塩化物イオン濃度をプロットした測定結果を、環境種別ごとに図 3-2-3～図 3-2-7 に示す。

これらのデータは、図 3-2-2 に示すように河川等の直下とそれ以外（範囲外）から採取したものである。

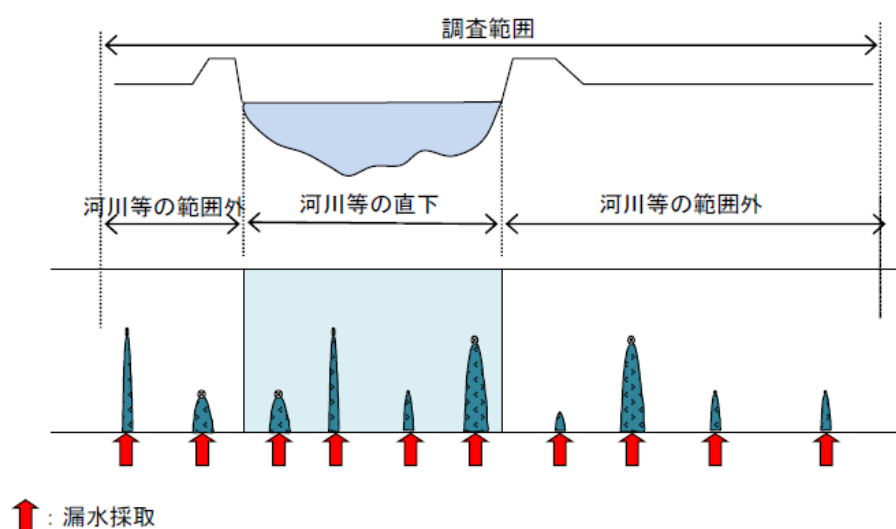


図 3-2-2 漏水採取位置のイメージ図

図 3-2-3 および図 3-2-4 に示すように、環境種別 I（感潮域河川下）および II（埋立地下）に発生している漏水の塩化物イオン濃度は高い値である。特に環境種別 I では河川下の直下で高く、その箇所は東京湾近郊の地点に集中している。図 3-2-5、図 3-2-6 および図 3-2-7 に示すように、環境種別 III（非感潮域河川下）、IV（濠の下）、V（低地帯で河川埋立地下）に発生している漏水は低い値であるものの、環

境種別Ⅴのうち東京湾近郊に位置する箇所では塩化物イオン濃度が比較的高い箇所が認められた。

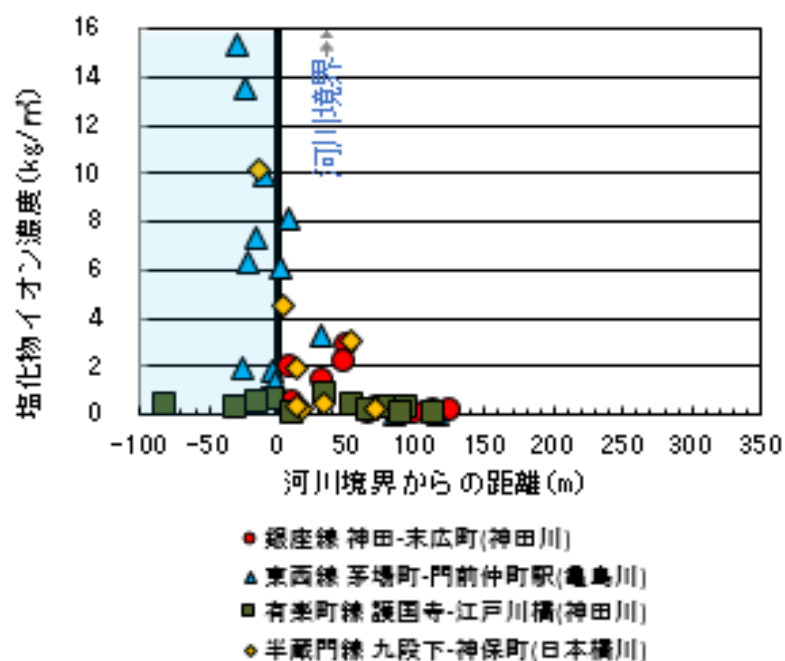


図 3-2-3 漏水中の塩化物イオン濃度
(Ⅰ：感潮域河川下)

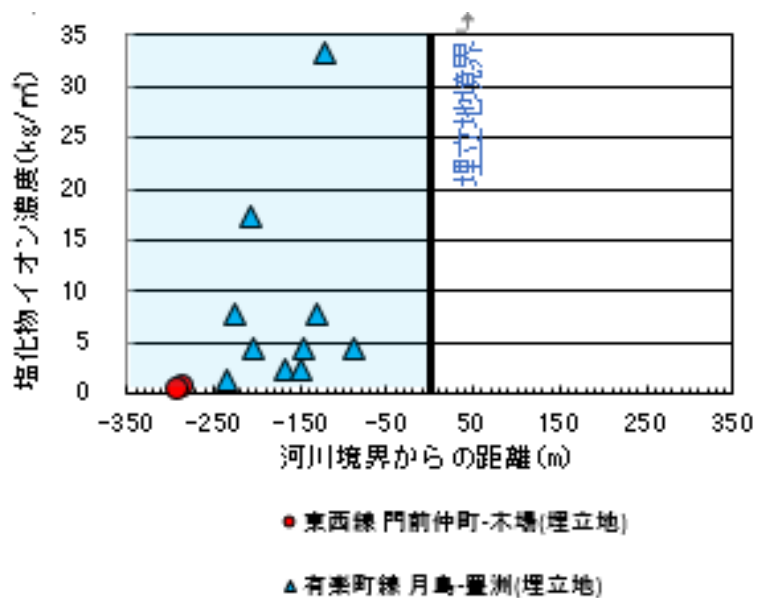


図 3-2-4 漏水中の塩化物イオン濃度
(Ⅱ：埋立地下)

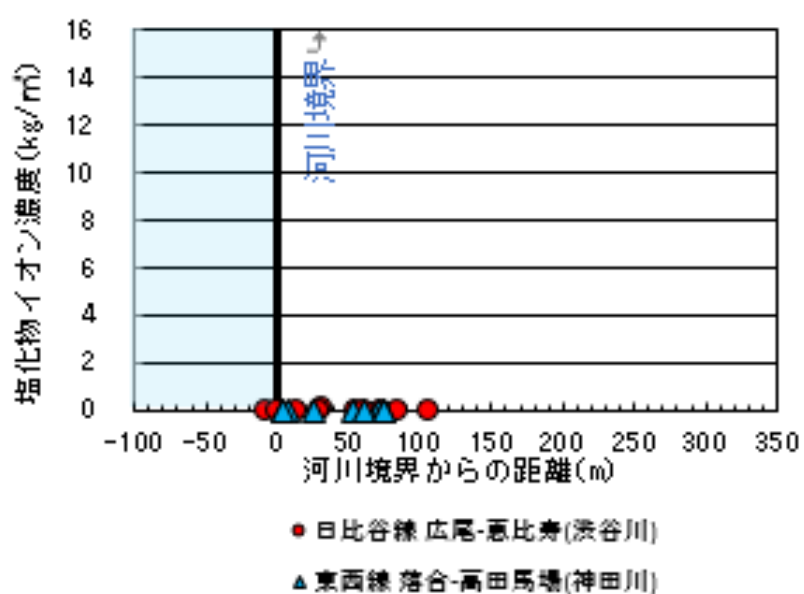


図 3-2-5 漏水中の塩化物イオン濃度
(Ⅲ：非感潮域河川下)

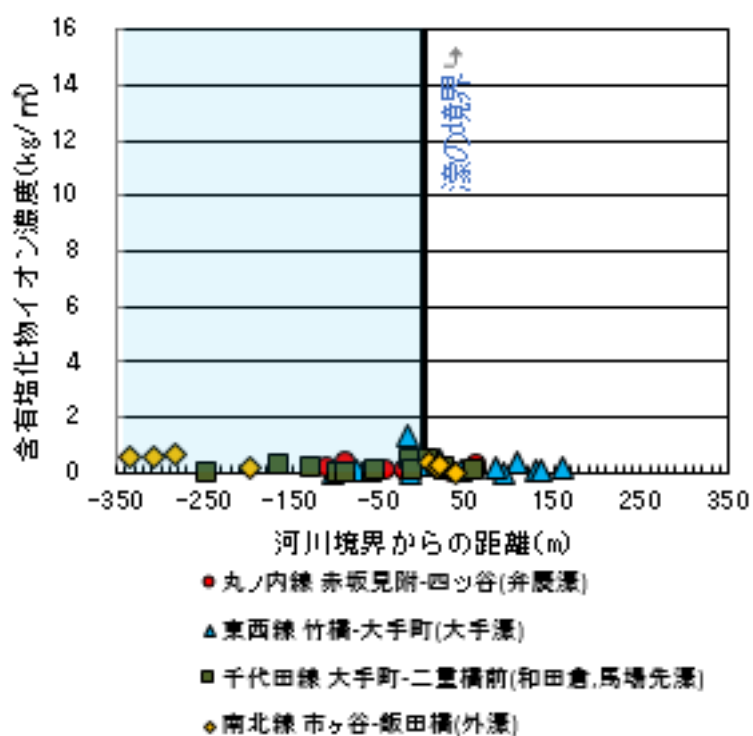


図 3-2-6 漏水中の塩化物イオン濃度
(Ⅳ：濠の下)

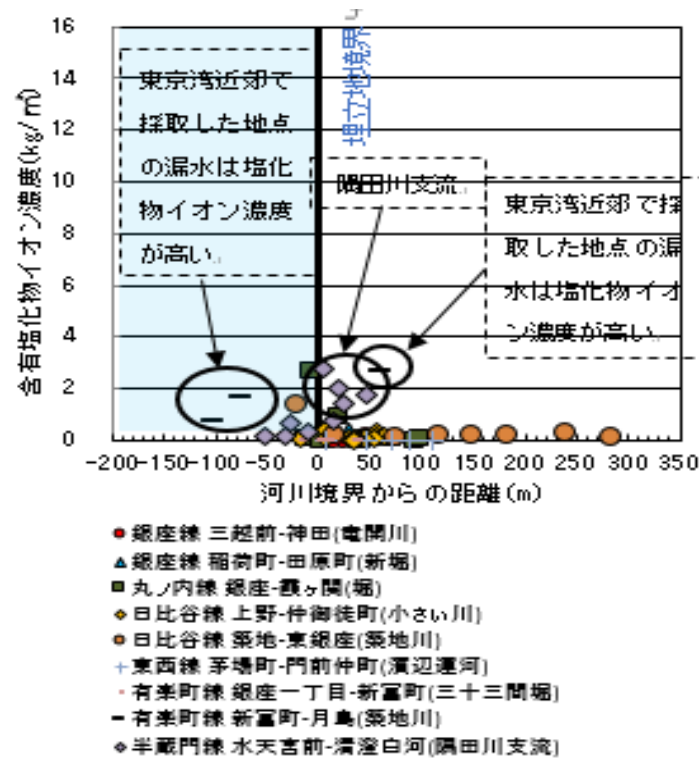


図 3-2-7 漏水中の塩化物イオン濃度 (V : 低地帯で河川埋立地下)

これらの結果から環境種別ごとに河川等からの塩化物イオンの影響する範囲をみると、塩化物イオン濃度の高い環境種別ⅠおよびⅡにおいて河川等の直下で塩化物イオンは高い傾向を示しており、河川等の直下から 50m 以上離れれば塩化物イオン濃度は極めて低くなる傾向を示していることがわかる (図 3-2-8)。

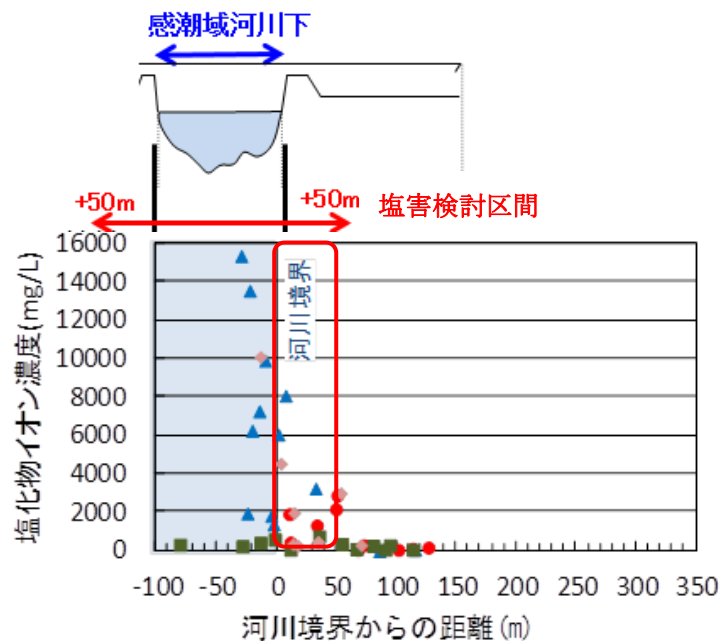


図 3-2-8 塩害検討区間の設定範囲 (Ⅰ : 感潮域河川下)

したがって、河川等の境界から 50mを含んだ範囲を塩害に関して検討が必要な塩害検討区間とする。

また、河川水そのものの塩化物イオン濃度を調査したところ、図 3-2-9 に示すように東京湾近郊で最も高く、上流側へ遡るにつれて低くなっており、河口から 8km 程度上流で影響がなくなることがわかった。なお、東京湾等一般的な海水の塩化物イオン濃度は約 19,000mg/L である。

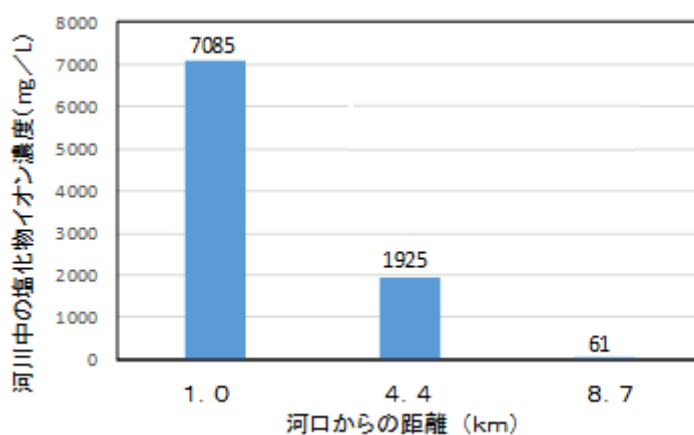


図 3-2-9 河口からの距離と河川中の塩化物イオン濃度

3.3 浸透流解析によるシミュレーション

(1) 検討の概要

トンネル中における漏水の塩化物イオン濃度の測定結果から、河川等の境界から50m以上離れば漏水中に塩化物イオン濃度が極めて低くなる傾向であることがわかったが、一般的な地形やトンネルの土被り等の異なる条件でも同じような傾向であるかを確認するために浸透流解析（地下密度流解析）によるシミュレーションを行った^{1) 2)}。

地下密度流解析とは、地下水中の塩水挙動を、①地下水流動および淡水と塩水の密度差によって生じる移流と、②淡水への塩分の拡散で表現するものである。既往の研究^{3) 4) 5)}では、海岸地域の地下水（淡水）への海水侵入（塩水くさび現象と呼ばれる：図3-3-1 a)）を対象とするものが多くみられ、密度勾配を考慮したダルシー則と移流拡散方程式を連成させた有限要素解析手法が構築されている⁶⁾。

ただし、本研究の対象である感潮域河川からの塩水浸透とトンネル位置での塩化物イオン濃度の分布（図3-3-1 b)）を、現場の調査結果とともにシミュレーションした研究事例はみられない。

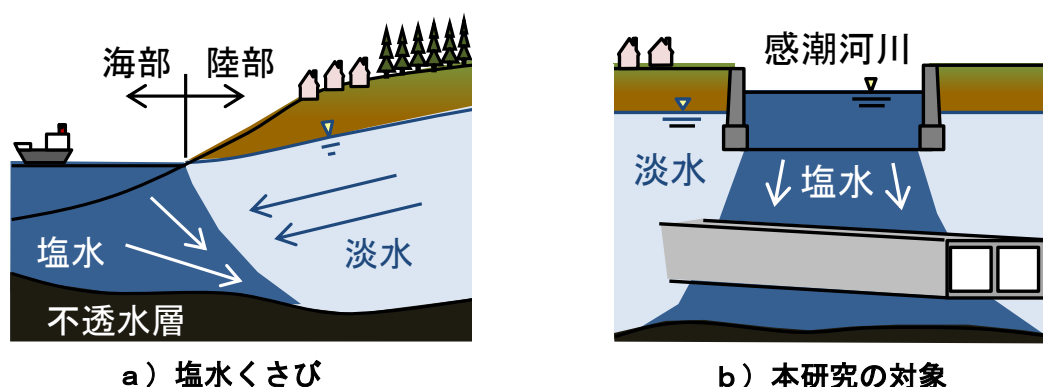


図 3-3-1 地下水（淡水）への塩水侵入のイメージ図

(2) 解析方法

解析対象は塩化物イオン濃度が高い環境種別 I（感潮域河川下）とした。図3-3-2に示すように、解析モデルは上面中央に塩化物イオンの供給元である感潮域河川幅40mを、深度20m⁷⁾に第一不透水層の地盤幅450mを設定した。感潮域河川位置には濃度1.0の固定境界条件を与え、解析後に海水の塩化物イオン濃度19,000mg/Lを乗じて、各位置の塩化物イオン濃度の分布を求めた。

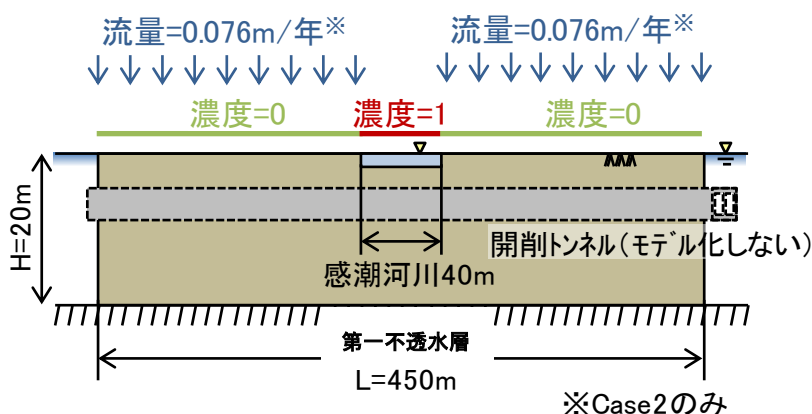


図 3-3-2 解析モデルのイメージ

また、感潮域河川外の地表面からは降雨などにより塩化物イオン濃度が薄まることが想定されるため、表3-3-1に示すように雨水の浸透条件が異なる2ケースを設定した。東京都千代田区大手町の観測資料（1981年～2010年の30年間での平均値）を取りまとめた資料によれば、東京の年降水量は1528.8mm⁸⁾であり、CASE2の地表面から地盤への雨水の浸透量については雨水の浸透量が最小になるように流出係数を0.95として、 $1.5288\text{m/年} \times (1-0.95) = 0.076\text{m/年}$ とした。

なお、解析コードには岡山大学西垣教授らが公開しているオイリアン-ラグランジアン法（EL法）2次元浸透流解析プログラム、Dtransu-2D・EL^{9) 10)}を用いた。

表 3-3-1 解析ケース

Case1	感潮域河川外の地表面の塩分濃度を0とし、地表面から地盤への雨水の浸透は考慮しない。
Case2	感潮域河川外の地表面の塩分濃度を0とし、東京の年降水量、路面（舗装）の流出係数に基づき、地表面から地盤への雨水の浸透を考慮する。

解析に用いる地盤物性値を表3-3-2に示す。浸透流解析で東京近郊の砂質土相当の地盤を想定して、関東全域を調査した文献⁷⁾より物性値を定めた。また、移流拡散解析の縦および横分散長とは、拡散係数と地下水流との比例定数である。室内実験では数cm程度となることが知られているが、一方で観測精度や地盤の不均一性の問題から、観測規模に応じて大きく設定する必要があることも知られている¹¹⁾。そこで、縦分散長にはBeimsの観測規模100m（調査結果で得られたトンネル片側の塩害影響範囲の2倍）の値¹²⁾を用い、横分散長は既往文献¹³⁾の範囲の中で安全側とし水平方向の濃度分布が最大となる横分散長/縦分散長=1/3とした。

表 3-3-2 解析に用いる地盤物性値

浸透流	透水係数 $k(\text{m/sec})$	1.0×10^{-5}	文献 10)を引用
	比貯留係数 $S_s(\text{m}^{-1})$	1.0×10^{-3}	文献 11)を引用
	有効間隙率 θ	0.25	
移流拡散	塩水の比重	1.025	Beims の観測規模 100m の値 ¹²⁾
	縦分散長 $\alpha_L(\text{m})$	3.0	
	横分散長 $\alpha_R(\text{m})$	1.0	$\alpha_R/\alpha_L=1/3$ ¹²⁾

(3) 解析結果

雨水の浸透がないCASE1について、解析モデル全域における塩化物イオン濃度分布の経時変化を図3-3-3に、解析モデル中心付近（水平方向に約80mの区間）における地下水の流向分布の経時変化を図3-3-4に示す。初期はElder問題¹²⁾と同様に河川域河川両端で下降流、中央で上昇流が生じて、感潮域河川両端直下の塩化物イオン濃度が上昇する分布を示すが、時間の経過とともに、感潮域河川中央に下降流が発生する地下水の流向分布に遷移し、深度方向にくびれた塩化物イオン濃度分布になる結果となった。なお、雨水の浸透があるCASE2も同様な傾向を示した。

また、浅い深度では塩化物イオン濃度の移流拡散の水平距離はほぼ一定であるが、第一不透水層との境界では広がり続けることがわかる。そのため、トンネルと第一不透水層の位置関係によっては、塩化物を含む漏水が発生する範囲は異なり、トンネルが第一不透水層に近い場合には経年とともにその範囲が広がるものと考えられる。

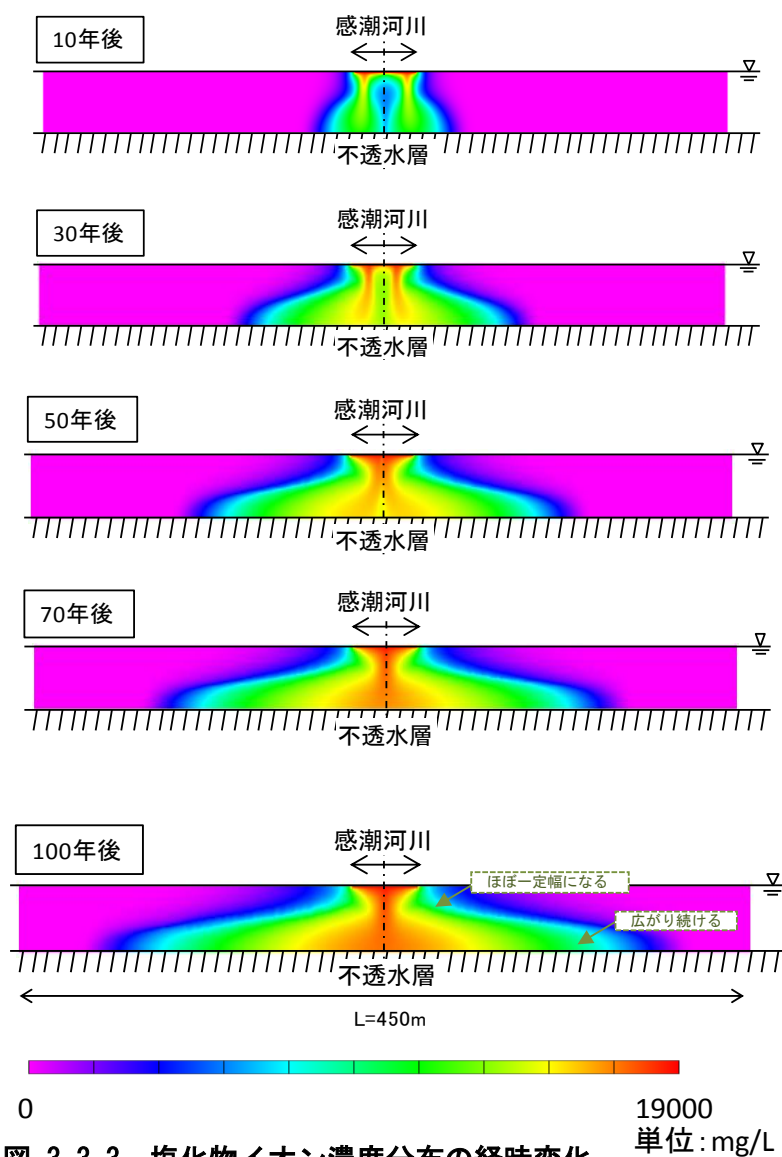


図 3-3-3 塩化物イオン濃度分布の経時変化

(CASE1: 地表面からの雨水の浸透を考慮しない場合)

* 水平方向のスケールは 1/2 倍

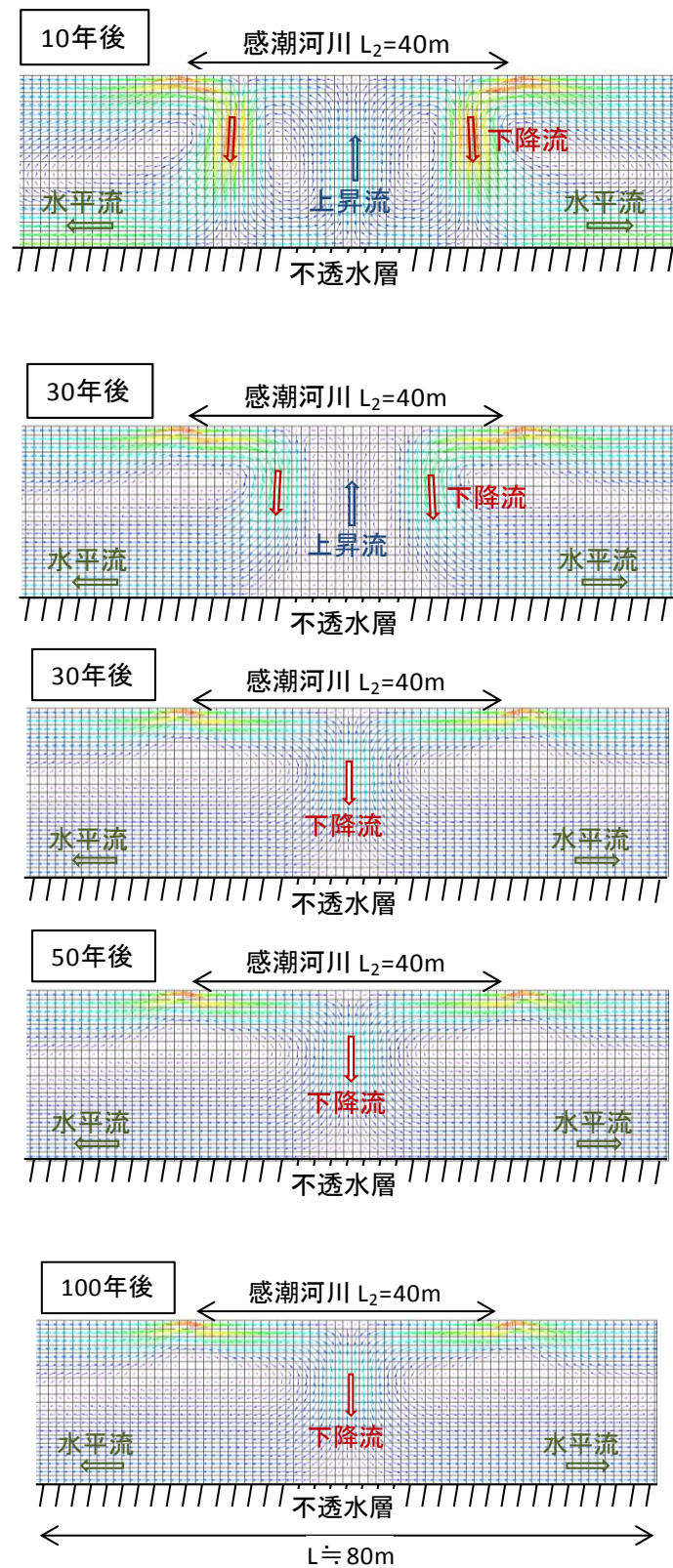


図 3-3-4 地下水の流向分布の経時変化
(CASE1：地表面からの雨水の浸透を考慮しない場合)

環境種別Ⅰ（感潮域河川下）にある4路線の土被りは、銀座線が約1m，東西線，有楽町線，半蔵門線が約3mであり，深度3mにおける河川境界からの距離と濃度分布の経時変化の関係を図3-3-5（CASE1），図3-3-6（CASE2）に示した．深度3mでは概ね100年で河川境界の外側は移流拡散が落ち着く傾向にあることがわかる．深度1mでも同様の傾向を示しており，今回対象とする区間では100年後の解析結果を用いて調査結果と比較する．

また，CASE1よりもCASE2の方が河川外の塩化物イオン濃度が低いことがわかる．このことから，地表面から地盤への雨水の浸透量を考慮する方が塩化物イオン濃度は低く算出されるため，この浸透水量が最小となるように設定した今回の解析条件は，塩害影響範囲を検討する上で安全側となっていることがわかる．

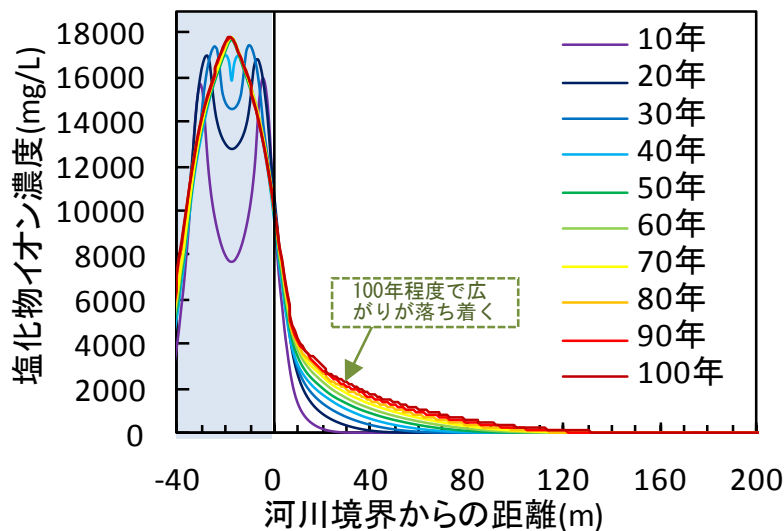


図 3-3-5 深度 3m の塩化物イオン濃度分布の経時変化
(CASE1：地表面からの雨水の浸透を考慮しない場合)

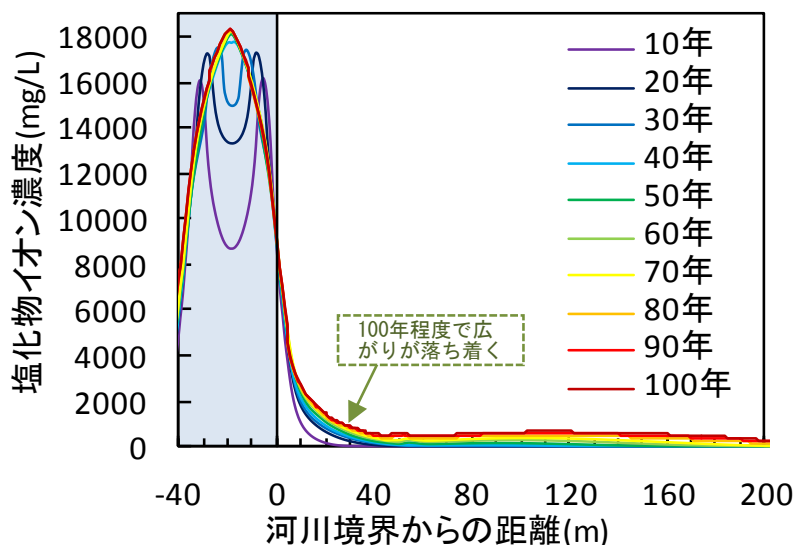


図 3-3-6 深度 3m の塩化物イオン濃度分布の経時変化
(CASE2：地表面からの雨水の浸透を考慮する場合)

(4) 解析結果と調査結果の比較

感潮域河川下において、深度1mと3mで塩化物イオン濃度分布が落ち着く100年後の解析結果と調査結果を図3-3-7 (CASE1) および図3-3-8 (CASE2) で比較した。この結果、簡易な2次元の解析モデルを用いたものの、東西線 (深度3m)、銀座線 (深度1m) はCASE1の解析値、半蔵門線 (深度3m) はCASE2の解析値が、測定した塩化物イオン濃度の分布と概ね同傾向を示していることがわかる。解析的にも河川境界から遠ざかるにつれて、測定結果と同様に塩化物イオン濃度が低下することを確認することができ、塩化物イオン濃度の測定結果から設定した塩害検討区間は妥当性があるものと考えられる。

さらに、解析結果からは地表面からの雨水の浸透の影響が大きいことがわかる。都心部では地下に雨水管等が整備され、実際の地盤への浸透量を正確に把握するのは困難であるが、地表面からの雨水の浸透量を小さく設定することが安全側の条件設定となることがわかった。

雨水の浸透量を考慮しないCASE1について、深度と塩化物イオン濃度の分布の関係を図3-3-9に示した。この図からも深度が深くなるにつれ、影響範囲は広くなることがわかる。安全側に条件設定しているため、解析値は実際より広い範囲であることが想定されるが、実際の状況を把握する目安となるものと考えられる。

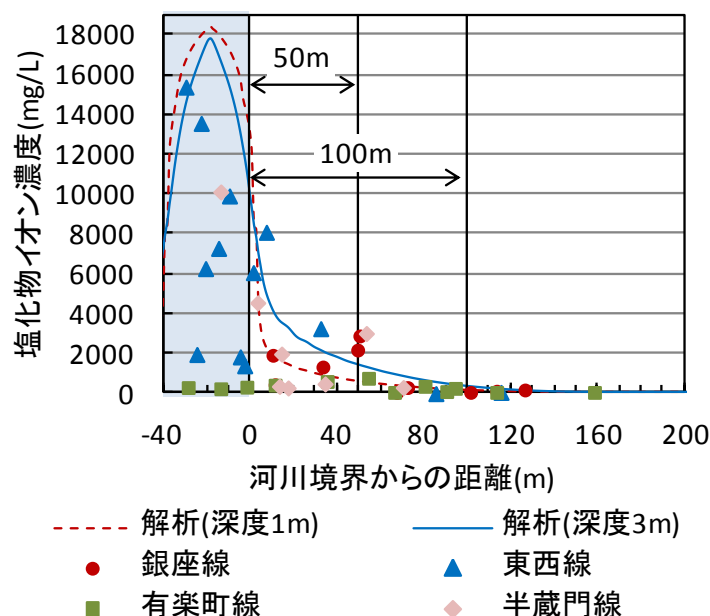


図 3-3-7 計測結果と解析結果の比較
(CASE1 : 地表面からの雨水の浸透を考慮しない場合)

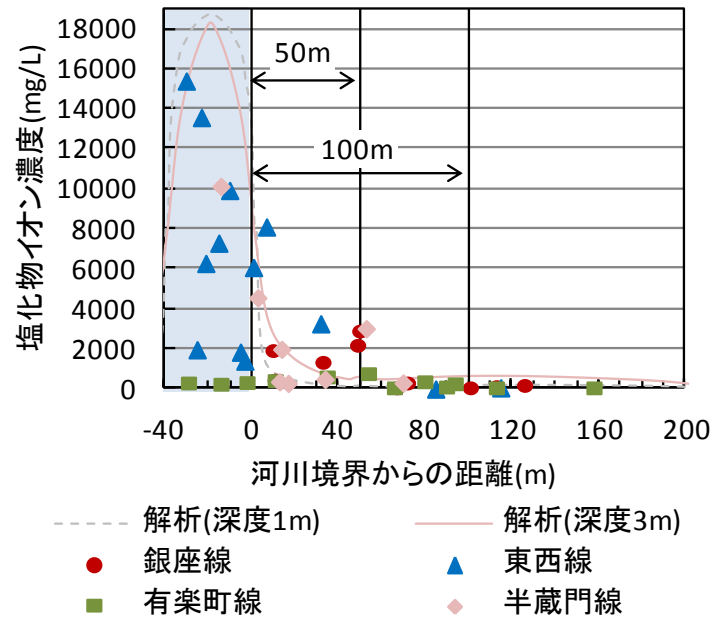


図 3-3-8 計測結果と解析結果の比較
(CASE2：地表面からの雨水の浸透を考慮する場合)

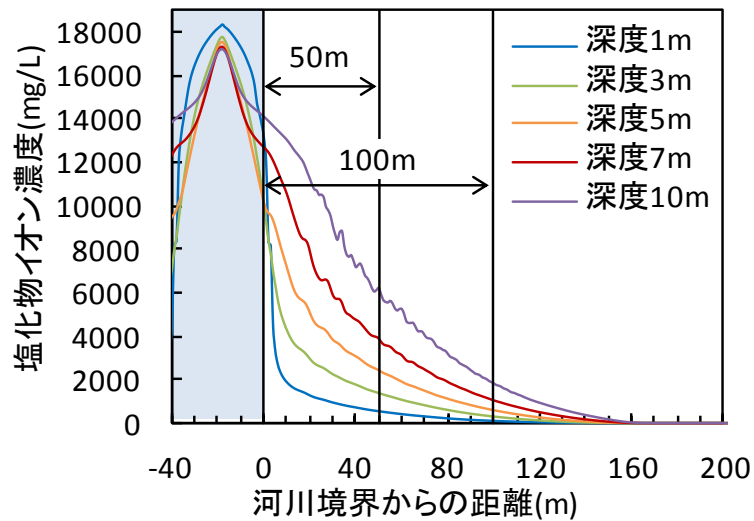


図 3-3-9 深度と塩化物イオン濃度との関係
(CASE1：地表面からの雨水の浸透を考慮しない場合)

3.4 まとめ

地下鉄トンネルにおける塩害を検討する範囲を設定するためとして、河川等と交差・近接する区間について漏水中の塩化物イオン濃度の調査を行った。塩化物イオン濃度の測定結果を基に、地上部の状況から感潮域河川下等を5つの環境種別に分類した。感潮域河川下および東京湾近郊におけるトンネルの漏水は塩化物イオン濃度が高いこと、これらの漏水は河川等の境界より50mを超えると塩化物イオン濃度の影響は極めて低い傾向であることがわかった。河川等（河川、埋立地、濠）の交差・近接する区間で河川境界より50mの範囲を含んだ区間を塩害に対して検討していく範囲として、塩害検討区間の特定を行った。

【第3章 参考文献】

- 1) 武藤義彦, 小西真治, 諸橋由治, 仲山貴司, 牛田貴士, 葛目和宏, 大即信明 : 地下鉄箱型トンネルの塩害範囲に関する研究, 土木学会トンネル工学論文集 F1, Vol. 70, pp. I_75- I_82, 2015. 4.
- 2) 武藤義彦, 牛田貴士, 仲山貴司, 小西真治: 塩化物の地中移流拡散を考慮した地下鉄トンネルの塩害範囲の検討, 土木学会地下空間シンポジウム論文集, Vol. 20, C3-2, pp. 233-238, 2015. 1.
- 3) 内山雄介: 砂浜海岸帯水層における潮位変動に伴う循環流の形成機構, 土木学会論文集, No. 670/II-54, pp. 37-47, 2001.
- 4) 高山裕介, 齋藤雅彦: 臨海部の塩水侵入現象における地盤の不均一性の影響, 土木学会第64回年次学術講演会, pp. 303-304, 2009. 9.
- 5) 靱井和朗, 神野健二, 上田年比古, 伊藤敏朗, 細川土佐男, 平野文昭: 不飽和領域を考慮した海岸自由地下水の塩水の侵入・分散の数値解析, 日本地下水学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 103-112, 1986.
- 6) 河野伊一郎, 西垣誠, 田中慎一: 飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象の有限要素法, 土木学会論文報告集, Vol.311, pp.133-141, 1983.
- 7) 落合敏郎: 関東平野における地下水の年代測定とその水文地質学的研究, 日本地下水学会会誌, Vol.14, pp.11-23, 1968.
- 8) 東京管区気象台ホームページ: : jma-net.go.jp
- 9) Hishiya, T., Nishigaki, M., Hashimoto, N. and Yageta, M. : Proceedings of ModelCARE96, Calibration and Reliability in Groundwater Modeling, Colorado School Mines Golden, Colorado, USA, pp.89-98, 1996.
- 10) Nishigaki, M. , Hishiya, T. and Hashimoto, N. : Density Dependent Groundwater Flow with Mass Transport in Saturated-unsaturated Porous Media, Proceedings of the First Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney, N.S.W. , Australia, pp.1375-1380, 2001.
- 11) 小橋秀俊, 三木博史, 平山光信, 菱谷智幸, 山本博之, 大北康治: 地盤汚染の影響予測に用いる分散長の決定方法について, 土木学会論文集 No.764/III-67, pp.53-67, 2004.6.
- 12) Elder, J. W. : Transient convection in a porous medium, J. Fluid. Mech., Vol.27, No.3, pp.609-623, 1967.
- 13) 山本努, 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. 10.

第4章 地下鉄トンネルの塩分浸透メカニズムの調査

4.1 コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布

感潮域河川下にある箱型トンネルにおける塩害を調査するため、トンネル躯体コンクリートの側壁において、漏水のある103箇所からドリル法を用いて表面から深さ15mm、45mm、75mmの資料を採取し、含有する塩化物イオン濃度を測定した（図4-1-1(1)）。トンネル内側の表面（以下、トンネル内面という）からの深さと103箇所の濃度を平均した塩化物イオン濃度の関係を図4-1-1(2)に示している。なお、実測により求めた鉄筋位置を点線で、腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 を実線で表している。

この結果から、トンネル内面近傍では内面で塩化物イオン濃度が高く、内部に入るほど低下していることがわかり、コンクリート内面側から塩化物イオンが浸透していると想定できる。

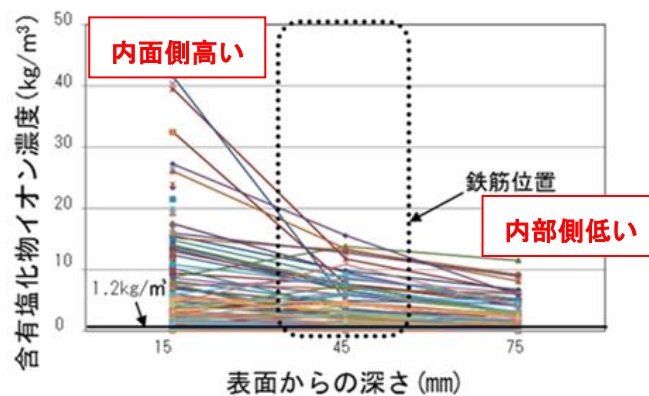


図 4-1-1(1) コンクリートの塩化物イオン濃度の分布（感潮域河川下）

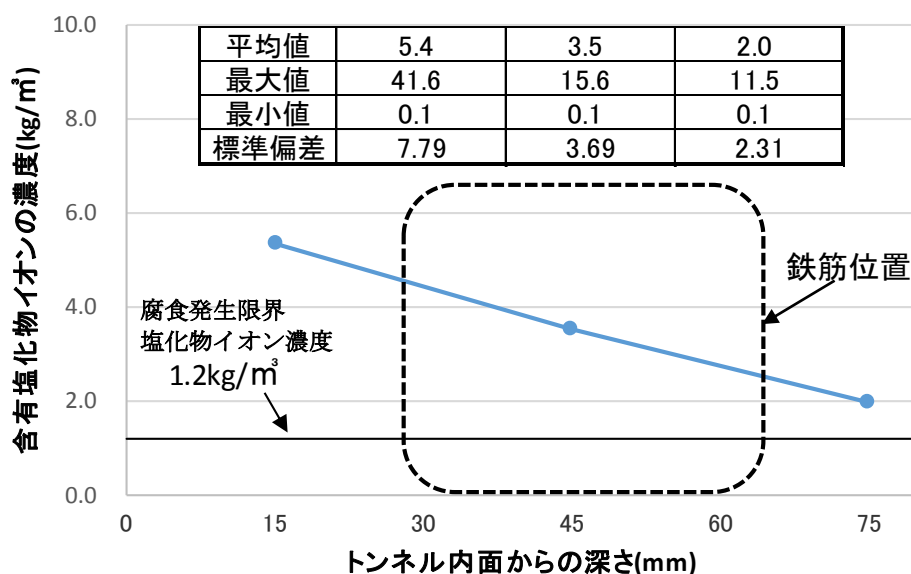


図 4-1-1(2) コンクリートの塩化物イオン濃度の平均値（感潮域河川下）

4.2 塩化物イオンの浸透経路

箱型トンネルでは建設工法による防水工の有無が漏水の発生に影響すると考えられるため、東京メトロで採用された開削工法、イコス工法、潜函工法について塩化物イオンの浸透経路を調査した。

4.2.1 箱型トンネルの建設工法

(1) 開削工法

開削工法は地表面から土留めと支保工を施工しながら掘り下げて、所定の位置にトンネルを築造した後、埋め戻して地表面を復旧する工法である（図 4-2-1、写真 4-2-1）。地下鉄を道路下に建設する場合の標準的な工法である。断面の大きいシールドトンネルの技術が確立されていない千代田線まではほとんどがこの工法であり、比較的浅い部分の建設には有効である。開削工法のトンネルでは、漏水防止を目的に 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、1975 年以降は合成高分子材料を用いたシートによる防水工を実施している。アスファルト防水の標準的な構成を図 4-2-2 に示す。アスファルト防水は溶解されたアスファルトと防水布類を交互に接着しながら数層を積み重ね、トンネルの外側を被覆し、防水層を構成して防水効果を持たせるものである。

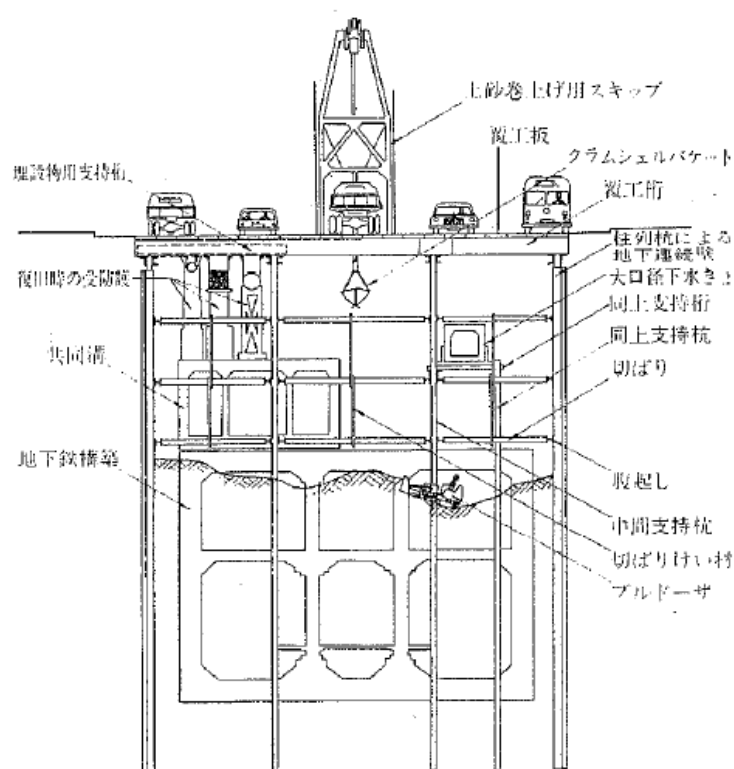


図 4-2-1 開削工法における標準断面図



写真 4-2-1 開削工法の掘削状況

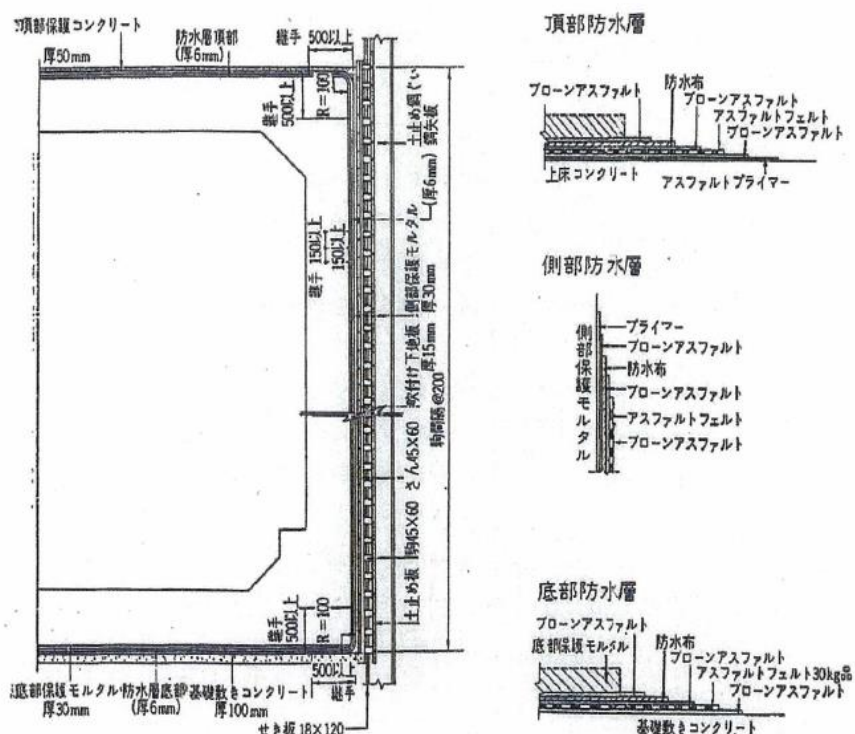


図 4-4-2 開削工法のアスファルト防水の構成

(2) イコス工法

イコス工法とは、イタリアのイコス社（Impresa Construzioni Opere Specializzate Process）が開発した杭や地下壁を造る方法で、土砂内に浸透すると土砂を安定させる性質を持つベントナイト溶液の特徴を利用して掘削し、鉄筋籠を挿入後、コンクリートを打設して構造物を築造する工法である。イコス工法の掘削状況を写真 4-2-2 に、鉄筋籠の建込み状況を写真 4-2-3 に、イコス工法による側壁の施工順序（横断面）を図 4-2-3 に示す。

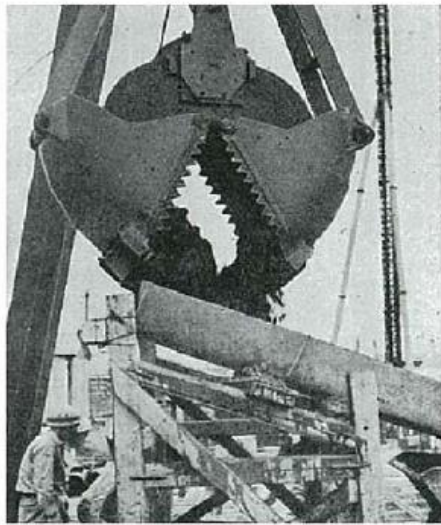


写真 4-2-2 イコス工法の掘削状況
(クラムシェル・バケット使用)



写真 4-2-3 イコス工法の鉄筋籠の
建込み状況

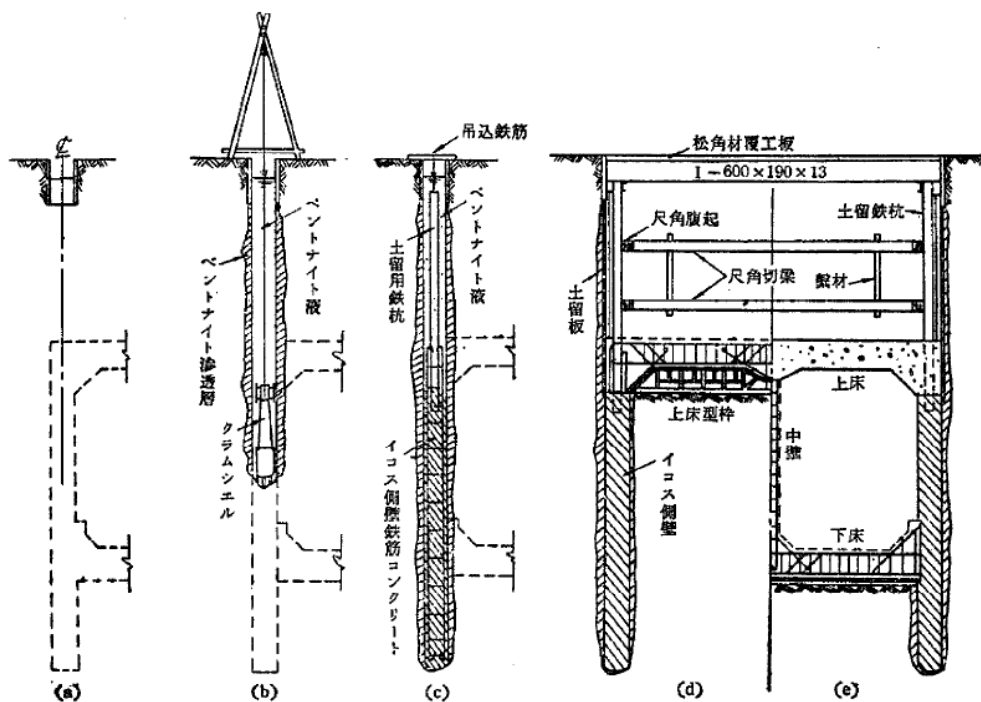


図 4-2-3 イコス工法による側壁の施工順序 (横断面)

(3) 潜函工法

潜函工法とは、鉄筋コンクリート製の函（トンネルの躯体）を地上で築造し、躯体下部に気密な作業室を設け、この作業室内で底部の土砂を掘削・排土することにより、躯体を所定の深さまで沈下させてトンネルを築造する工法である。作業室内に圧縮空気を送り込む装置を設けているため、作業室内の気圧を地下水圧に見合った高い状態にすることにより、作業室内への水や泥の流入を防止し、地上と同じ乾いた状態での掘削が可能になる。作業室内で所定の掘削が終了すると、潜函は自重により逐次沈下する。潜函を所定の深さまで沈下させた後、作業室内には中埋めコンクリートを充填する。潜函工法の躯体構造と沈設の状況を図4-2-4に、潜函掘削標準断面図を図4-2-5と図4-2-6に、河川中央部の潜函工事状況を写真4-2-4に示す。

これらのトンネルを建設した当時は、河川を仮締切して開削トンネルを設置するのが技術的に難しく、またシールド工法も一般的でなかったために河川部の横断では潜函工法がしばしば用いられた。

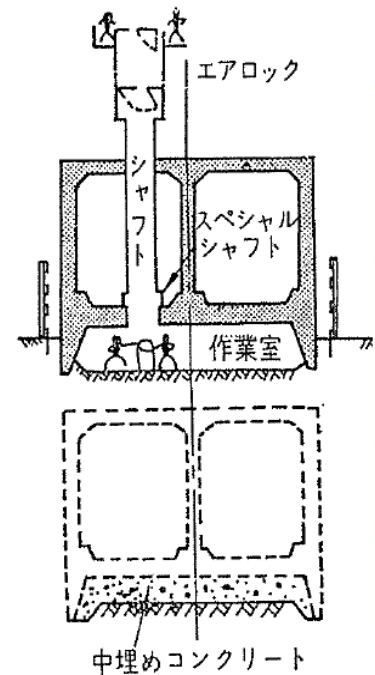


図 4-2-4 潜函工法の躯体構造と沈設の状況

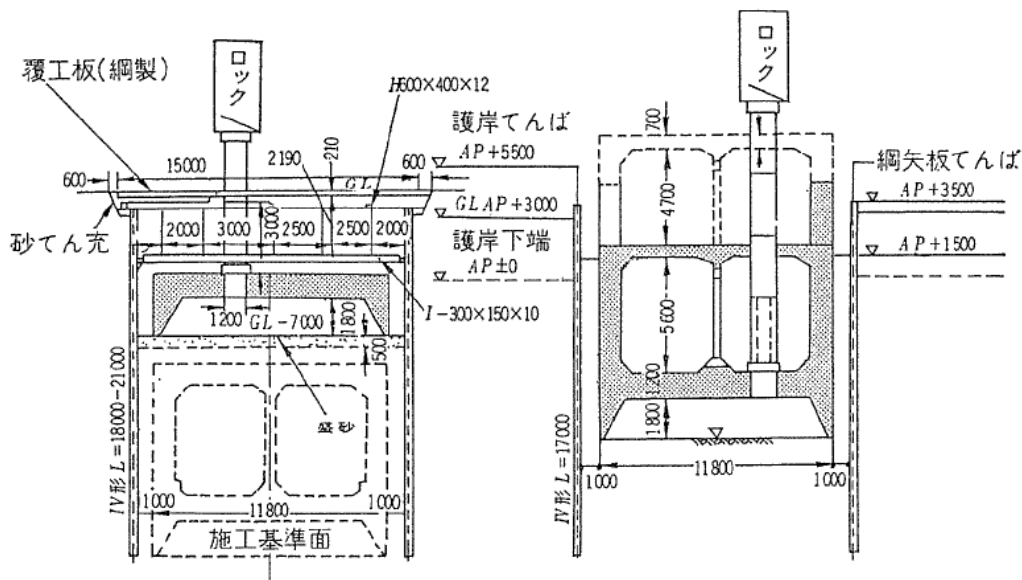


図 4-2-5 路下式潜函掘削標準断面図 図 4-2-6 路上式潜函掘削標準断面図



写真 4-2-4 河川中央部潜函工事状況

以上から、開削工法のトンネルはトンネル構築の外周すべてに防水層を施工しているが、潜函工法およびイコス工法のトンネルについては施工法の制約から側壁等、防水工を実施できない箇所がある。ただし、これからの施工法を用いて建設したのは昭和 50 年以前のものであり、現在は漏水に対する対策も施されて施工精度が上がっており、施工法が漏水の多さに直接関係しているとは限らない。

4.2.2 塩化物イオンの浸透経路

トンネル躯体におけるコンクリート内部への塩化物イオン浸透経路の影響を調査するため、潜函工法、イコス工法、開削工法の 3 工法によって建設されたトンネル区間の側壁から、図 4-2-7 および図 4-2-8 に示すように地山側の背面近くまで達する長尺コアを 7 本採取した。コア 1 本ごとにトンネル内面側、トンネル内面側 1/4 地点、中央部、地山側 1/4 地点、地山側の 5 試料を切り出して塩化物イオン濃度を測定した。

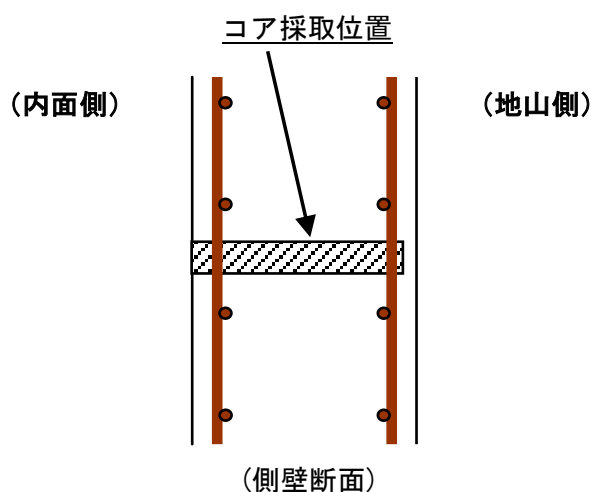


図 4-2-7 トンネル側壁のコア採取位置

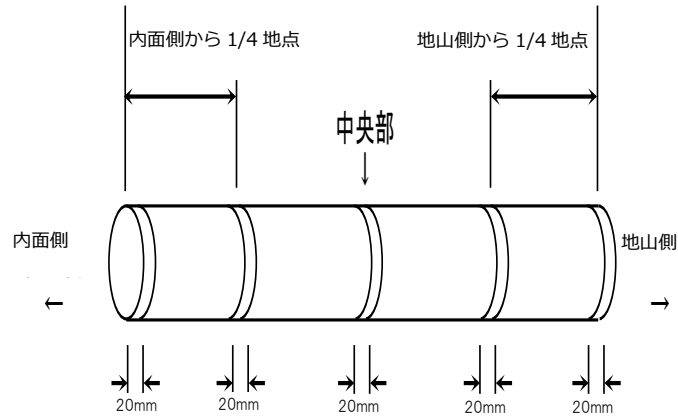
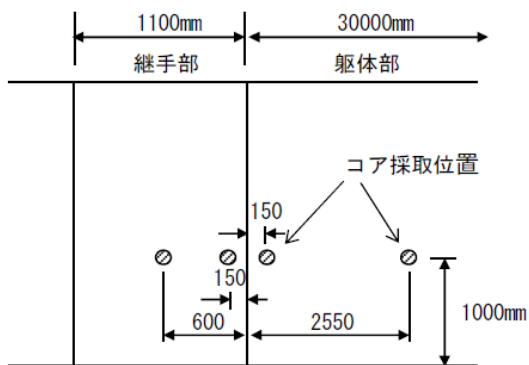


図 4-2-8 採取コアの塩化物イオン測定位置

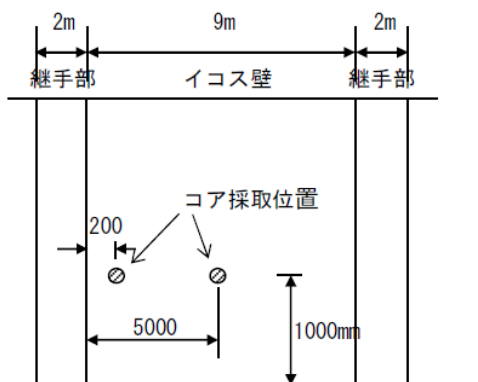
潜函工法，イコス工法，開削工法によって建設されたトンネル区間の側壁部のコア採取位置とその位置の写真を，図 4-2-9，図 4-2-10，図 4-2-11 に示す。



(側壁側面)



図 4-2-9 コア採取位置（潜函工法・東西線隅田川横断部）



(側壁側面)

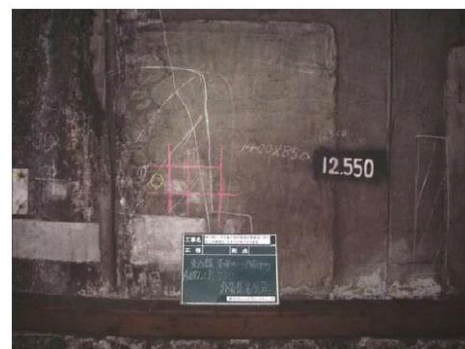


図 4-2-10 コア採取位置（イコス工法・東西線亀島川横断部）

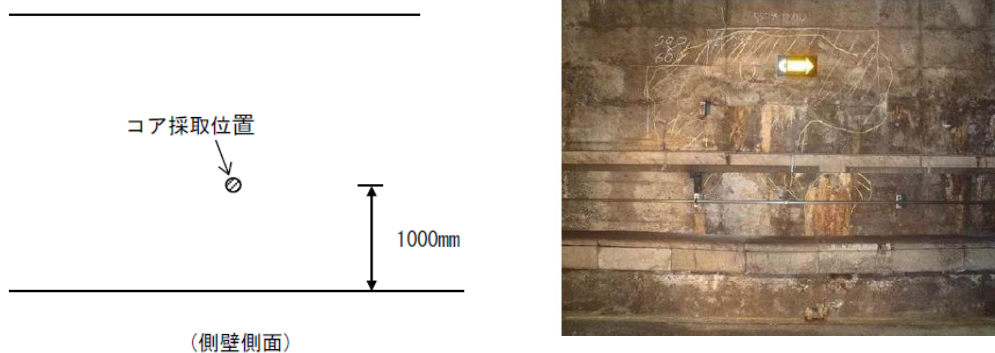


図 4-2-11 コア採取位置（開削工法・日比谷線神田川横断部）

表 4-2-1 に、潜函工法，イコス工法，開削工法で建設されたトンネル側壁の内面側，トンネル内面側 1/4 地点，中央部，地山側 1/4 地点，地山側における塩化物イオン濃度の測定結果を示す。

表 4-2-1 長尺コア採取の塩化物イオン濃度測定結果

工法	部位	塩化物イオン濃度 (Kg/m ³)				
		内面側	内面側 1/4	中央部	地山側 1/4	地山側
潜函	躯体の目地部近傍	11.77	1.03	1.45	1.32	1.94
	躯体の中央部	4.20	0	0	0	0.79
	継手の目地部近傍	0.29	0.48	0.46	0.55	0.68
	継手の中央部	20.83	0.33	0.24	0.31	0.48
イコス	継手の目地部近傍	1.63	0.73	0.07	0.07	3.19
	継手の中央部	0.18	0	0	0	0.02
開削	躯体	0.29	0	0	0	0

(1) 潜函工法のトンネル

潜函工法のトンネルにおける塩化物イオン濃度の分布を図4-2-12に示す。躯体の中央部（▲）はトンネル内面で4.20 kg/m³と高く内部は0.00 kg/m³を，地山側で0.79 kg/m³を示している。継手の中央部（△）は，トンネル内面で非常に高い値20.83 kg/m³を，内部に入るにつれて急激に低下して0.24～0.48 kg/m³である。躯体の目地部近傍（●）はトンネル内面で11.77 kg/m³を，内部も1.03～1.94 kg/m³と高い値である。継手の目地部近傍（○）はすべての深さで0.29～0.68 kg/m³を示している。

継手の目地部近傍（○）以外はトンネル内面の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度値1.2 kg/m³を超えており，塩分を含んだ漏水がトンネル内面側から浸透し，乾湿の繰り返りで凝縮して高い値になったと考えられる。すべてのコアで内部に比べて地山側の塩化物イオン濃度はわずかであるが高い値を示してい

ることから、地山側からも浸透していると考えられる。また、躯体の目地部近傍(●)は内部も腐食発生限界塩化物イオン濃度値 1.2 kg/m^3 をほぼ超えており、トンネル内面からの浸透に加え目地部からの浸透の可能性も考えられる。潜函工法はトンネルの躯体を沈下させ、その後にトンネル間の接続部を地盤改良等の補助工法を用いて開削工法で施工する。潜函工法を用いる区間は一般的に地盤が悪いため、当時の技術では接続部の十分な施工ができず、目地部のひび割れからの漏水が多く、その影響で塩化物イオン濃度が高くなったと考えられる。

これらの結果から、潜函工法のトンネルは躯体および継手とも、塩化物イオンのほとんどはトンネル内面側から浸透していることがわかる。また、目地部からの漏水が多い場合はその近傍の内部も塩化物イオン濃度が高いと考えられる。建設当時は、河川横断部など技術的に難しく、接続部の防水層が十分でなく止水工ができず、漏水の多い区間が発生したと考えられる。

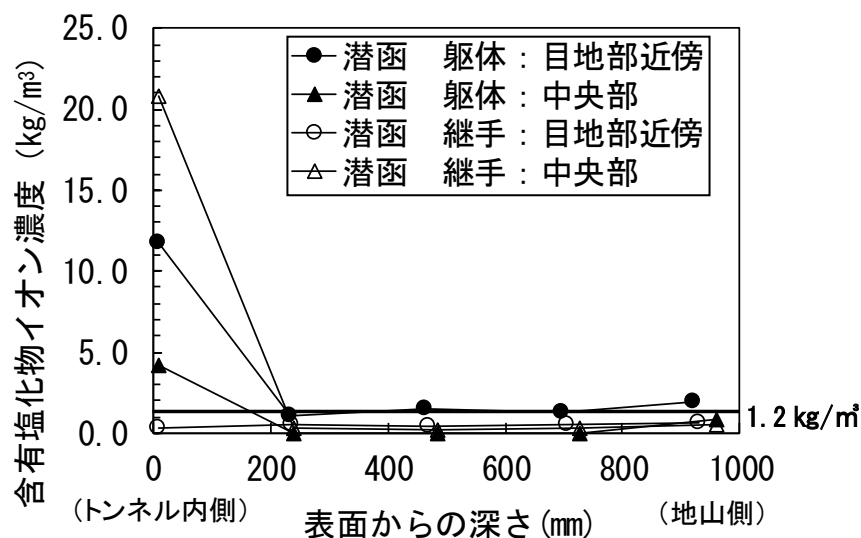


図 4-2-12 潜函工法のトンネルにおける塩化物イオン濃度の分布

(2) イコス工法のトンネル

イコス工法のトンネルにおける塩化物イオン濃度の分布を図 4-2-13 に示す。継手の目地部近傍 (○) は、トンネル内面で 1.63 kg/m^3 、地山側で 3.19 kg/m^3 、それ以外の深さは $0.07 \sim 0.73 \text{ kg/m}^3$ である。継手の中央部 (△) は内面で 0.18 kg/m^3 、それ以外は 0.00 kg/m^3 を示している。目地部近傍では、トンネル内面側、地山側から塩化物イオンが浸透しているとともに、目地部からの浸透もしている可能性が高いことがわかる。イコス工法もコンクリート壁背面の地山との間に防水層の施工ができず、また建設当時は開発当初の工法で泥水管理の技術が十分でなく、地山や継目境界部の品質が悪かったため、漏水が多く塩化物イオン濃度が高くなったと考えられる。

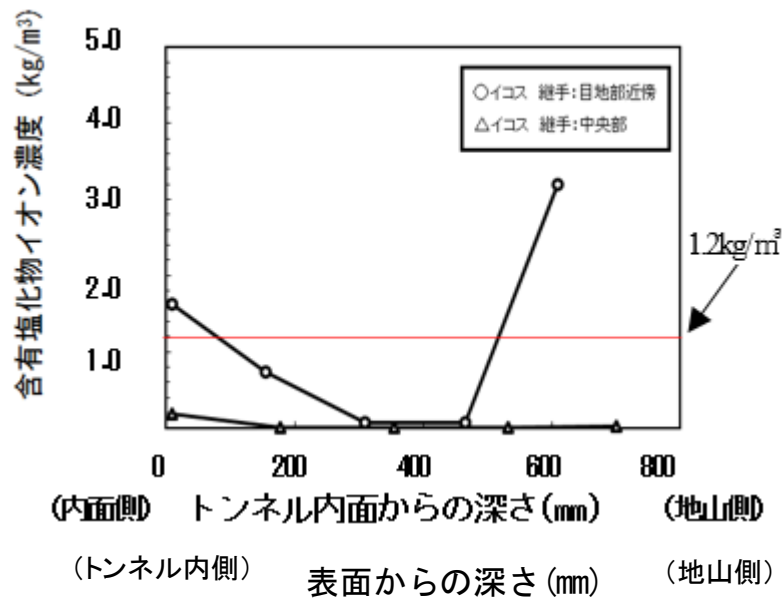


図 4-2-13 イコス工法のトンネルにおける 塩化物イオン濃度の分布

(3) 開削工法のトンネル

開削工法のトンネルにおける塩化物イオン濃度分布を図4-2-14に示す。躯体(△)はトンネル内面側のみ0.29kg/m³を示し、内部はすべて0.00 kg/m³である。開削工法は地山側に防水層を設けており、地山側からの浸透は防水層の効果で抑制され、塩化物イオンはトンネル内面側のみから浸透していることがわかる。

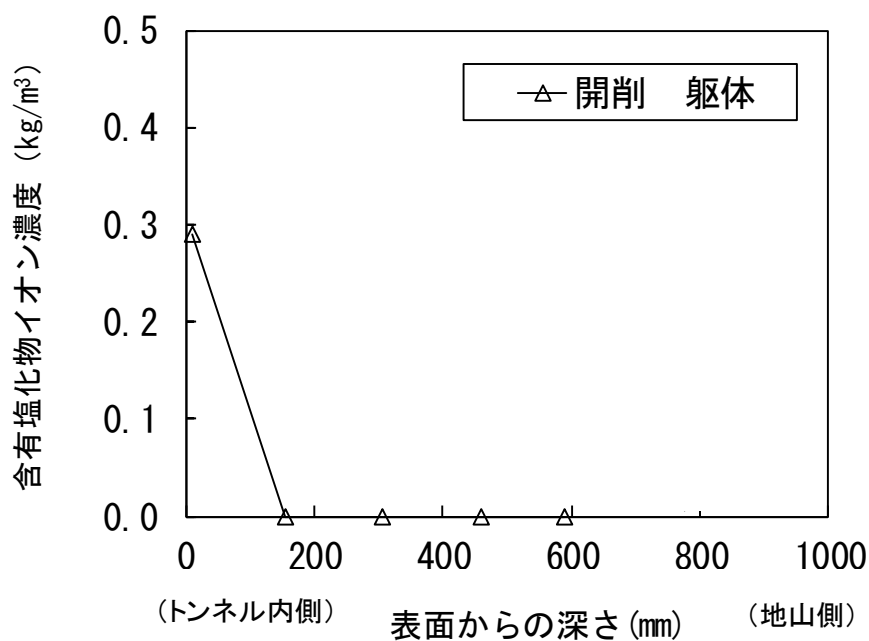


図 4-2-14 開削工法のトンネルにおける塩化物イオン濃度の分布

4.3 まとめ

感潮域河川下にあるトンネル躯体の側壁部におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の分布を測定するとともに，建設工法の違いによる防水工の有無に着目して工法ごとに長尺コア採取によってコンクリート内部の塩化物イオン濃度を測定した。

その結果から，以下のことがわかった。

- ・ 地下鉄トンネルの内面側と地山側では，内面側の方が塩化物イオン濃度は高い傾向にある。
- ・ 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（図 4-3-1）。
- ・ 建設方向による違いでも傾向は同じであるが，施工上から防水層がなく漏水の多い潜函方向やイコス工法では内面側の塩化物イオン濃度は非常に高い傾向である。

したがって，トンネルにおける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。

今回，塩害対策を内面側だけ行う理由として，地山側には地下水が存在してコンクリート内への浸透が考えられるが，鉄筋が腐食するには酸素の存在が不可欠であり，地下水内の酸素拡散は内面側に比べて非常に遅いこと¹⁾がわかっている。このことから，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るので，トンネル内面の漏水箇所における対策を優先することとした。

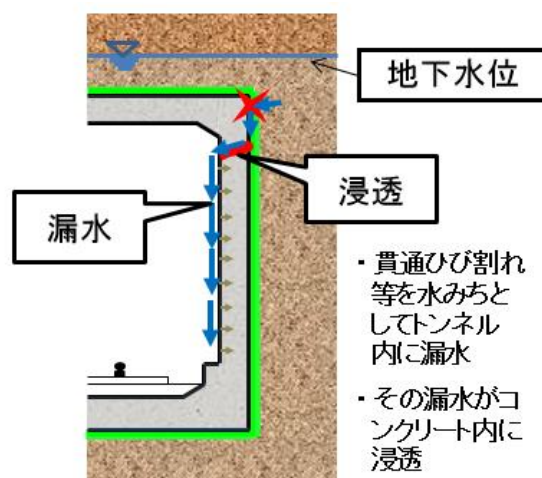


図 4-3-1 コンクリート内面からの浸透イメージ

【第4章 参考文献】

- 1) 小林豊治：コンクリート中の鋼材と腐食機構，コンクリート工学，Vol. 19，No. 3，1981. 3.

第5章 塩害影響範囲の簡易判定方法の考案

5.1 漏水に含まれる塩化物イオンの影響範囲

トンネルにおける塩害は、塩化物イオンを含んだ漏水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ことはこれまでの調査から判明した。対策を実施するにあたり、漏水および漏水跡の箇所だけを補修すればいいのか判断するために、塩化物イオンの面的な影響範囲を調査する必要があった。

漏水に含まれる塩化物イオンのコンクリート壁への面的な影響範囲を調べるため、漏水中の塩化物イオンが高い区間のトンネル側壁部において、①漏水跡の箇所、漏水跡の箇所から②300mm、③660mm、④1000mm 離れた計4箇所でもコアを採取し、トンネル内面側から深さ方向の塩化物イオン濃度を5箇所（塩分試料スライス幅20mm）調査した。調査位置を写真5-1-1 および図5-1-1 に示す。



写真 5-1-1 コア採取箇所の外観（東西線 亀島川）

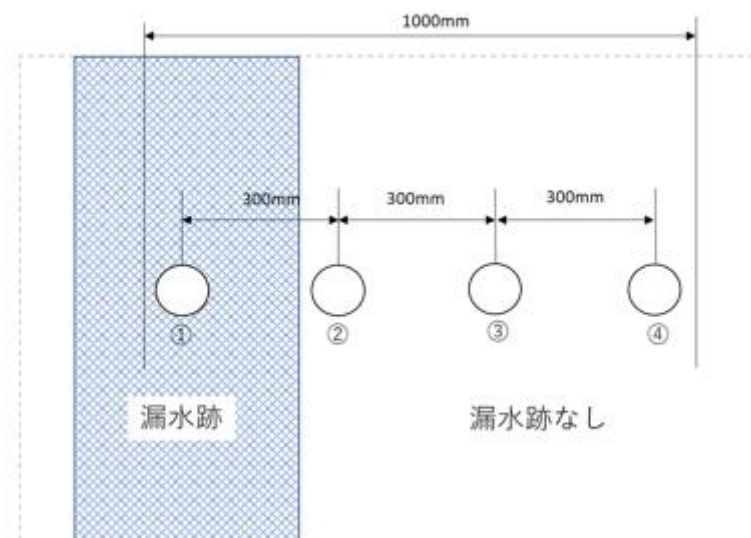


図 5-1-1 コア採取の位置

調査結果から、図 5-1-2 に示すように漏水跡の箇所で採取したコア①の塩化物イオン濃度は表層部で 11.0kg/m^3 であり、表層から深さ 90mm の位置でも 1.9kg/m^3 であった。漏水跡の箇所から 300mm 離れた位置から採取したコア②における塩化物イオン濃度は表層部 3.6kg/m^3 であり、コア①の同位置と比較して著しく低くなっていた。また、コア②の内部およびコア③、④における塩化物イオン濃度は最大でも 0.5kg/m^3 と非常に低い値であった。

したがって、漏水中に含まれる塩化物イオンの面的な影響は局所的な範囲であり、基本的には漏水跡（漏水）の箇所の直下および漏水跡（漏水）から約 300mm の範囲内であると考えられる¹⁾。また、漏水跡以外の内部は塩化物イオン濃度が非常に低い値であることから、建設時にコンクリート中に混入した塩化物イオン量（内在塩化物イオン量）は極めて少ないものと判断される。

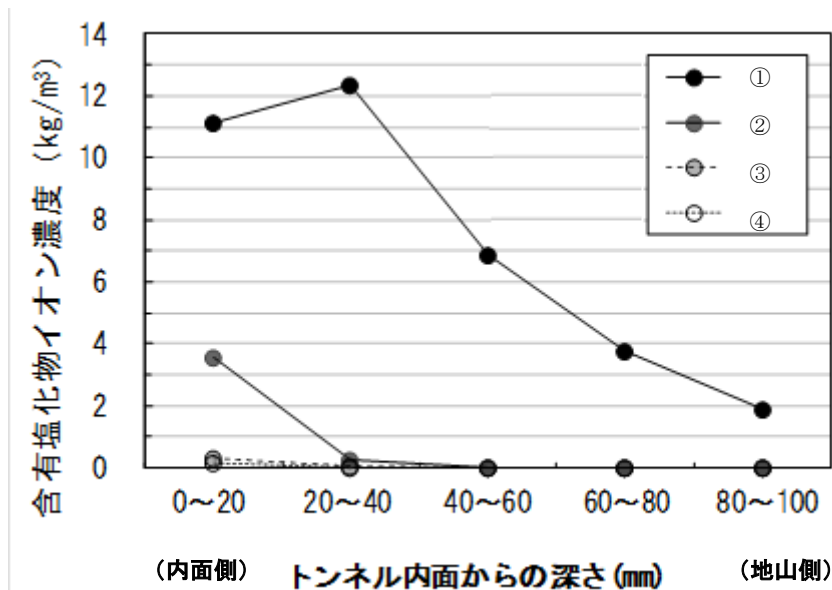


図 5-1-2 塩化物イオンの面的な影響範囲

5.2 硝酸銀溶液噴霧法の考案

5.2.1 従来の判定方法

塩害対策工事等において、補修をより効果的に実施するためには塩害の影響範囲を簡易に決定することが必要である。塩化物イオンの面的な影響範囲を調査した結果から、漏水、漏水跡および目安として約 300mm 離れた範囲について塩害対策を行うこともできるが、健全な部分も補修を行ってしまう可能性がある。

塩害の影響範囲を直接判定する方法として、従来はコアを採取して試験室に持ち帰り塩化物イオン濃度を測定しているが²⁾、この方法では迅速性に欠け、日常的な補修工事で用いることはできない。コンクリート表面における塩化物イオン濃度の高い範囲を現場で簡易に判定できる方法が考案できれば、塩害の影響範囲をその場

で特定できることになり，塩害対策工事を実施するにあたり非常に有効な手段となる。

5.2.2 簡易判定方法の考案

トンネル内の現場において短時間で塩害補修の対象範囲を判断できる簡易な判定方法として，硝酸銀溶液の噴霧による方法を考案した。写真 5-2-1 のように，塩化物イオンが付着しているコンクリート表面に硝酸銀溶液（0.1N）をそのまま噴霧すると，硝酸銀溶液中の銀イオン（ Ag^+ ）とコンクリート表面の塩化物イオン（ 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³⁾。

この方法は，コア試験体を用いた割裂試験体への噴霧で塩化物イオンの側壁等への浸透深さを調べることに用いられているが，面的な影響範囲の調査には用いられていなかった。コンクリート表面に塩化物イオンが存在すれば，写真 5-2-2 のように硝酸銀溶液の噴霧により白色に変化する。発色する閾値に相当する塩化物イオン濃度を正確に把握すれば，面的な補修範囲の特定に活用することができると考えた。



写真 5-2-1 硝酸銀溶液の噴霧状況



写真 5-2-2 硝酸銀溶液噴霧による発色状況

また、経年によるトンネル内面の汚れや補修時のモルタルやプライマーの垂れ等で漏水跡の境界が不明瞭な箇所では、目視による境界の識別が困難である。今回、考案した硝酸銀溶液噴霧の方法（硝酸銀溶液噴霧法）を用いることにより、このような箇所でもコンクリート表面に塩化物イオンが付着していれば白色に変化し、塩化物イオンの影響範囲を確実に識別することができ、塩害補修の施工現場において面的な塩害対策の影響範囲を直接特定することができる。

5.2.3 発色閾値の確認

硝酸銀溶液を噴霧すると白色に変化するコンクリート表面の塩化物イオン濃度、すなわち硝酸銀溶液による塩化物イオン濃度の発色閾値を確認するため、トンネル内において溶液の噴霧とコア採取等による試験を行った。試験方法は、漏水跡、補修跡およびその近傍を 500 mmピッチで計 60 箇所に印を付け、各々の印に硝酸銀溶液の噴霧を行った。試験実施箇所の状況を写真 5-2-3 に、硝酸銀溶液の噴霧による発色状況とコア採取位置を図 5-2-1 に示す。

その結果、噴霧した 60 箇所のうち 33 箇所で白色の変化が認められた。次に白色に変化した箇所と変化しない箇所の境界付近で 6 箇所を選定してコアを採取し、コア表面（0～10 mm）の塩化物イオン濃度を測定した。表 5-2-1 に示すコア④、⑤、⑥の塩化物イオン濃度の結果より、塩化物イオン濃度が 0.6kg/m^3 付近で発色の有無が混在していることがわかる。したがって、発色閾値を塩化物イオン濃度 0.60kg/m^3 と推定した。



写真 5-2-3 試験実施箇所の漏水状況
(半蔵門線 日本橋川下)

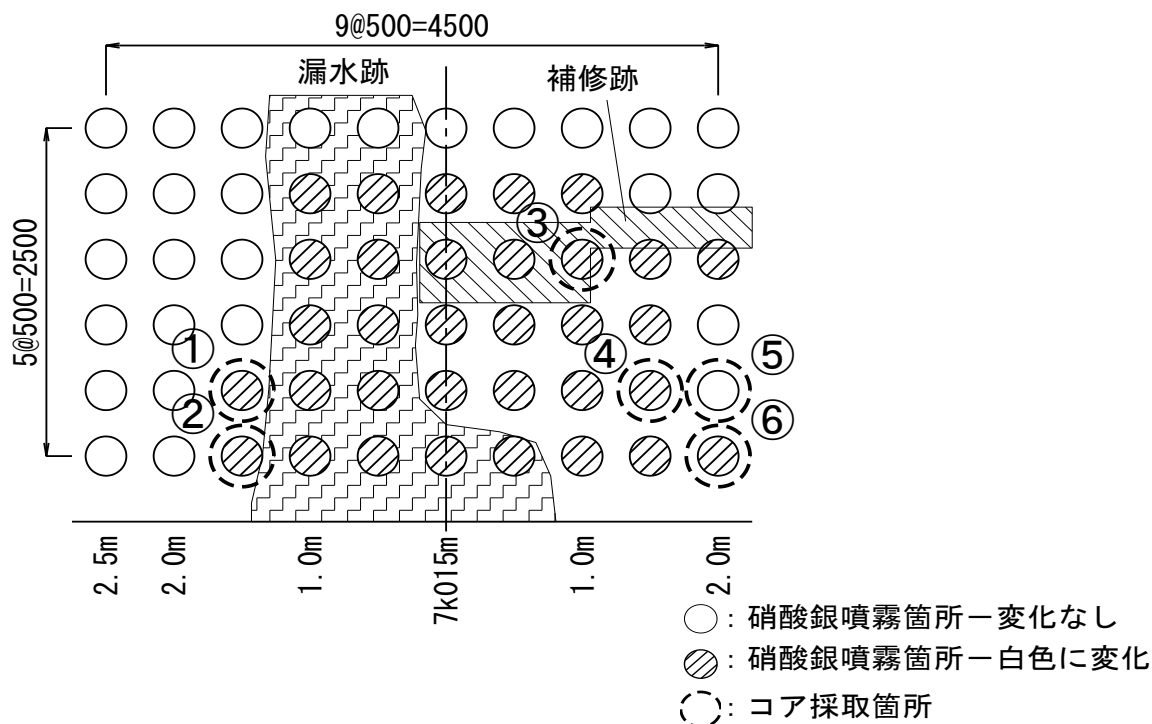


図 5-2-1 硝酸銀溶液噴霧の発色状況とコア採取位置

表 5-2-1 コア表面における塩化物イオン濃度

コア番号	硝酸銀溶液噴霧による 発色状況	塩化物イオン量 (kg/m ³)
①	白色	7.68
②	白色	3.12
③	白色	1.78
④	白色	0.59
⑤	発色せず	0.62
⑥	白色	0.57

※分析用試料の採取箇所：コア表面から 0～10mm

硬化コンクリート中に存在する塩化物イオンは、コンクリート中を自由に移動でき塩害を引き起こす可溶性塩化物イオンと、フリーデル氏塩などの形で固定化された塩化物イオンに分類される。コンクリート中に塩化物が多く含まれている場合に、可溶性塩化物イオン量の割合は全塩化物量のうちの 40～50%程度であると報告されている⁴⁾。また、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、白色に変化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あり、発色の閾値に関してセメント質量当り可溶性塩化物イオン濃度は 0.15%程度と報告されている³⁾。

今回の試験で得られた発色閾値と供試体割裂面への噴霧で示された閾値の比較を表 5-2-2 に示す。今回の試験で得られた発色閾値 0.60kg/m^3 に含まれる可溶性塩化物イオン $0.24\sim 0.30\text{kg/m}^3$ は、供試体割裂面への噴霧から導き出された可溶性塩化物イオン 0.46kg/m^3 よりも低い。また、発色閾値 0.60kg/m^3 が鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 よりも低いことから、硝酸銀溶液噴霧法による特定方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できると考えられる。このことから、塩害対策工事等の補修範囲の決定に利用することが可能と判断した。

表 5-2-2 硝酸銀溶液噴霧法による発色閾値の検討

	コンクリート表面での本試験	供試体割裂面への噴霧 ²⁾
コンクリート中の全塩化物イオン量	0.60kg/m^3	
セメント質量当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	$0.24\sim 0.30\text{Kg/m}^3$ (0.60kg/m^3 のうち、 可溶性塩化物イオン $40\sim 50\%$)	0.46kg/m^3 (単位セメント量 309kg/m^3 の 0.15%)

5.3 まとめ

塩害対策の補修をより効果的に実施するためには、漏水および漏水跡付近における塩化物イオンの面的な影響範囲の境界を簡易に特定できる方法があれば有効であることから、現場において短時間で判定できる硝酸銀溶液噴霧法を考案した。

硝酸銀溶液噴霧法は、硝酸銀溶液をコンクリート面にそのまま噴霧することにより、コンクリート表面の塩化物イオンと溶液中の銀イオンが反応して白色に変化することを利用したものである。発色の閾値を確認するため、漏水跡、補修跡およびその近傍において試験を実施し、発色の閾値は全塩化物イオン濃度 0.60kg/m^3 であり、補修範囲を判定するにあたり安全側に反応することを確認した。

【第5章 参考文献】

- 1) 山本努, 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, 2011.10.
- 2) コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案), JCI-SC8, pp.57-58, 1987.4.
- 3) Nobuaki Otsuki, Shigeyoshi Nagataki and Kenji Nakashita: Evaluation of AgNO_3 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.
- 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, 2014.5.

第6章 地下鉄トンネルに適した塩害補修方法の検討

6.1 地下鉄トンネルの制約条件

地下鉄トンネルは数分おきに列車が通過し、作業員等が退避する場所も限られているため、列車運行中に補修等の作業を行うことは非常に難しい。したがって、地下鉄トンネル内の補修工事は列車運行を停止してから運転開始までの夜間に限られ、図 6-1-1 に示すように準備作業、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することができない。また、補修の施工完了後 30 分程度で列車がその場所を通過するため、その時点で固化や接着の強度が足りないなど、列車運行の時間中に落下の恐れがある材料や工法は使用を控えなければならない。

さらに、トンネル内には列車を安全に通過させるために物を設置できない空間として車両の幅や高さより大きく設定された建築限界(図 6-1-2)が設けられており、トンネル側壁や上床等から大きな突出物が付けられず、また信号機器等多くの電気設備が設置されており、それらに影響を及ぼす可能性のあるものも設置できないなどの制約がある。塩害対策等の補修にあたってはこれらの条件をすべて満足する材料や工法等の選定が必要である。

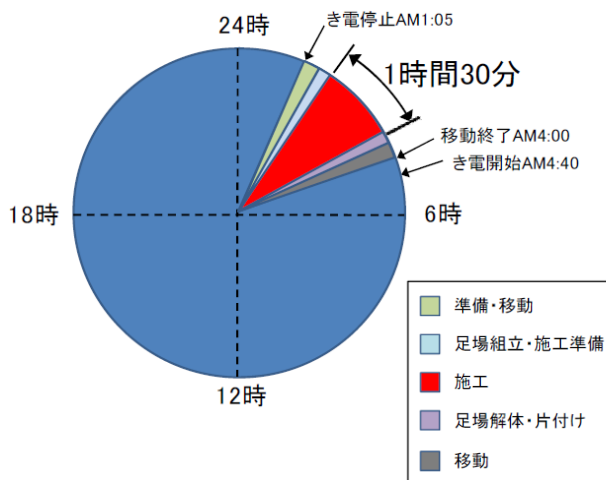


図 6-1-1 地下鉄トンネル補修工のタイムサイクル

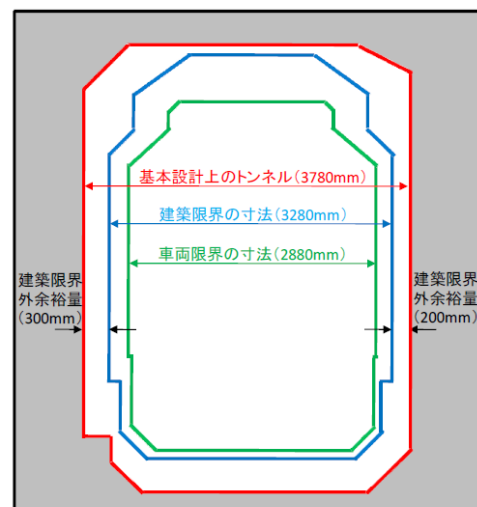


図 6-1-2 建築限界外余裕量 (千代田線開削トンネル)

6.2 塩害補修方法の検討

6.2.1 塩害対策方法の基本方針

塩害対策は、①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、②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、③塩化物イオンが浸透していないが、今後浸透する可能性がある箇所について、各々対策方法を選定する必要がある。

塩害対策の工法として施工上の制約等から、表面被覆工法、表面含浸工法、断面修復工法、電気防食工法の4工法を選定し、箱型トンネル固有の環境条件や劣化部特有の条件から派生する事項を基に各工法の検討を行った。その結果、①の状態に対しては、浸透した塩化物イオンにより劣化した部分を除去し断面を修復する工法（断面修復工法）と塩化物イオンによる腐食を抑制する工法（電気防食工法）を用いることを基本とした。②、③および①の断面修復工法と電気防食工法の補修後の状態に対しては、塩化物イオンの浸透を防止する工法（表面含浸工法）を用いることを基本とした。これらの工法について、メトロ環境下の箱型トンネルに適した工法や材料を選定するために室内および現場試験を実施した。

6.2.2 電気防食工法の選定と効果の確認

(1) 電気防食工法の選定

断面修復工法は、劣化や損傷によって剥がれた、または除去したコンクリート構造物の表面を当初の断面寸法に復旧してコンクリート構造物の耐久性能を回復させる工法である。東京メトロでは、図6-2-1に示すように修復材としてポリマーセメントモルタル（以下、PCMという）を用いた断面修復工を標準的な補修として長期間採用しており、良好な施工実績を有している。

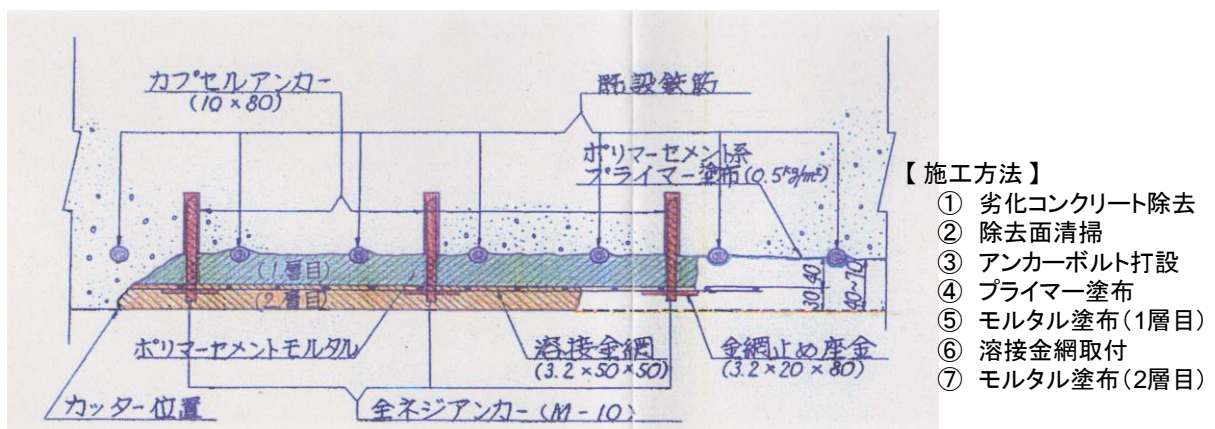


図 6-2-1 断面修復工法の標準断面図（補修厚 40mm～70mm 未満）

しかし、塩害対策として、断面修復工法のための補修ではコンクリート構造物の要求性能を満足できないと判断される場合は、表面含浸工法や電気防食工法など、他の工法との組合せが必要である。劣化部分を撤去した後に鉄筋防錆材を塗布して腐食を抑制し断面修復する方法、塩分吸着型防錆材を塗布して断面修復する方法、電気防食工法を行い断面修復する方法等が考えられる。

東京メトロでは、以前から塩害に対して亜硝酸イオンを主成分とする鉄筋防錆材を用いる補修を実施していたが、最近の塩害対策区間の定期検査において一部の箇所再劣化が確認された。そのため、塩害に効果が高いと言われている塩分吸着型防錆材や電気防食工法を用いた補修方法の有効性について調査および試験を行っ

た。なお、塩分吸着型防錆材は硬化に時間がかかることからトンネル内で使用することが難しいが、犠牲陽極材との効果を比較するために試験で使用することにした。

電気防食工法は、過酷な塩害環境に曝される港湾構造物等において外部電源方式の実施事例が多く、その効果を上げている^{1) 2)}。しかし、外部電源方式は電気防食の影響範囲が不確実なこと、迷走電流を生じさせる恐れがあることなどから、多数設置されている信号等の電気設備と十分な離隔を取ることが地下鉄トンネル内では必要である。しかし、これが難しく、電気設備への影響が懸念されることから、外部電源方式の使用を見合わせることにした。したがって、鉄と卑な金属の電位差で電流を発生させ、腐食電流を打ち消す犠牲陽極材を用いる方法について試験を行った。

犠牲陽極材を用いる方法は大きく分けて、犠牲陽極材を構造物内部に埋設する方式（写真 6-2-1）と構造物表面に貼り付ける方式（写真 6-2-2）がある。空間が限られているトンネルでは構造物表面に貼り付ける場合、トンネル内が狭あいでの建築限界の制限および落下の危険性等の問題があることから、埋設型の犠牲陽極材を用いることにした。合わせて使用する断面修復材である PCM については、地下鉄トンネル特有の施工時間の制限から硬化時間の速い材料が望ましく、電気防食工法の効果を最大限に発揮させるためには電気抵抗率の低い材料を選定する必要があることがわかっている。



写真 6-2-1 犠牲陽極材を埋設する方式



写真 6-2-2 犠牲陽極材を貼り付ける方式

今回実施する塩害に伴う劣化箇所への補修方法としては、図 6-2-2 に示すように①劣化箇所のはつり、②鉄筋ケレン、③犠牲陽極材の設置、④断面修復材の塗布、⑤表面含浸材の塗布を行うこととした。

(2) 電気防食工法の効果の確認

犠牲陽極材方式による電気防食工法の適用性を検討するため、写真 6-2-3 に示すように営業線トンネルにおいて試験施工を実施した。犠牲陽極材を用いた実証試験の施工箇所の大きさは、500×500mm 程度とし、電位が移動しやすい湿り気のある漏水箇所と、逆に漏水のない箇所で行った。断面修復箇所および周囲の電位を測定するために適切な位置に照合電極を埋め込んだ。防食効果の確認として防食電流量の計測と復極量の計測を、鉄筋の腐食状態の確認として分極抵抗の計測を行った。計測は初期値（犠牲陽極材設置直後）、3 ヶ月後、5 ヶ月後、8 ヶ月後、9 ヶ月後の計 5 回実施した。

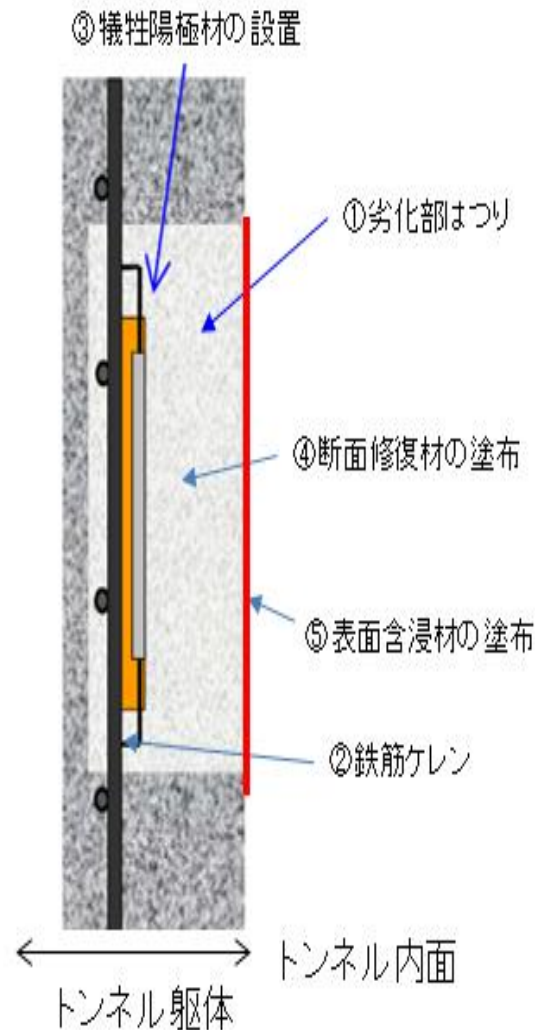


図 6-2-2 塩害補修方法

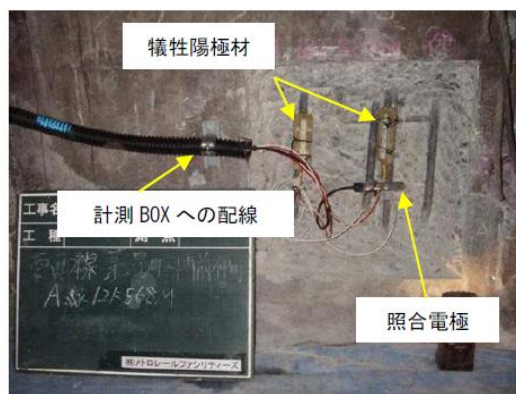


写真 6-2-3 犠牲陽極材の効果確認の試験状況（東西線 亀島川下）

① 防食電流密度

防食電流量の計測方法は図 6-2-3 に示すように、計測 BOX 内の配線が無抵抗電流計に接続して計測した。犠牲陽極材の防食電流量の計測結果を図 6-2-4 に示す。B 線 555m の測定箇所では 3 ヶ月後と 5 ヶ月後の 2 回において高い値を示しているが、それ以外ではすべての箇所でそれほど変化せずに 1~12mA/m²程度の値を示している。電気化学的防食工法設計指針（案）には、「犠牲陽極方式の必要防食電流は環境や鋼材の腐食程度によって変わり、通常 1~30 mA/m²程度である」³⁾と述べられているので、犠牲陽極材による防食は効果的に作用していると考えられる。

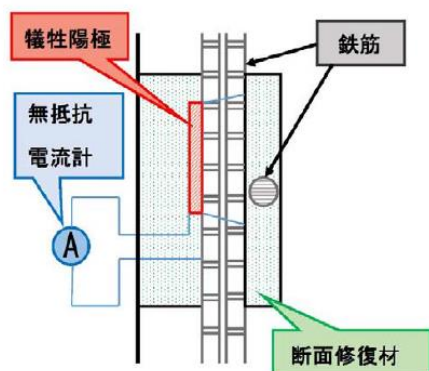


図 6-2-3 防食電流の測定方法

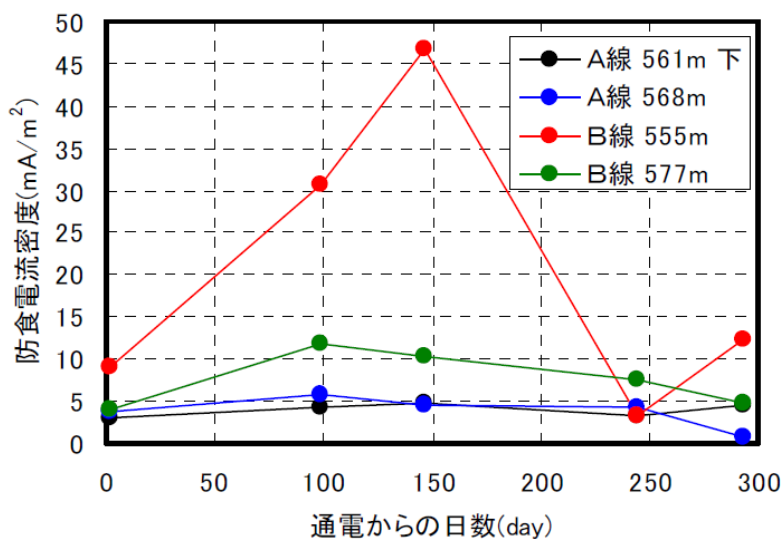


図 6-2-4 防食電流密度の測定結果

② 復極量

復極量の計測試験は、犠牲陽極と鉄筋の間の回路に流れる防食電流を一時的に停止し、停止直後の鉄筋のインスタンソフ電位（ E_{io} ）と一定時間が経過した後の電位（ E_{of} ）の差を測定する試験である。鉄筋の電位は図 6-2-5 に示すように、断面修復時にコンクリート内部に設置した埋め込み型照合電極を用いた方法で測定する。鉄筋の復極量の測定結果を図 6-2-6 に示す。9 ヶ月間における復極量の測定値は、測定時期により変動が見られ、外部電源方式の復極量の目安の基準値とされる 100mV 以上を示す箇所もあるが、現時点では一致の傾向は認められない。なお、橋脚に犠牲陽極材を埋設して 10 年間モニタリングを行った報告によると、復極量は犠牲陽極設置直後は低かったが、9 年後には 100mV に近づくかまたは超えたこと、およびその間における劣化がなかったことが報告されており、100mV の復極基準値を初期に適用することは実用的ではなく、これに代わる基準の設置の必要性を述べている。今後も長期的に復極量をモニタリングする必要がある。

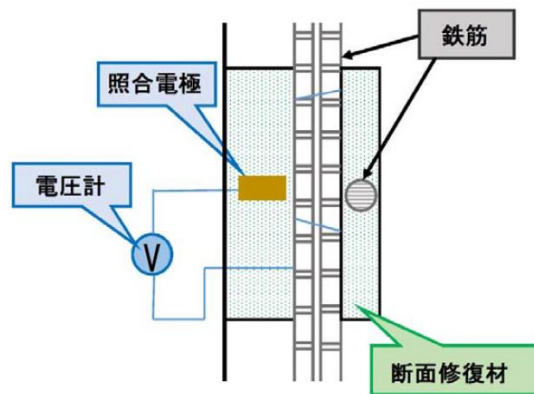


図 6-2-5 照合電極を用いた鉄筋の電位の測定方法

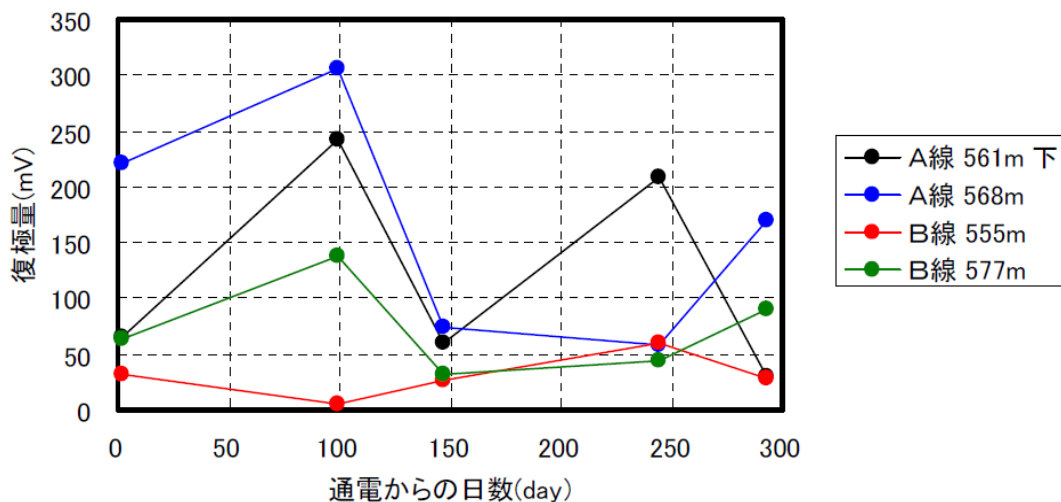


図 6-2-6 極量の測定結果

③ 分極抵抗

犠牲陽極材の回路を切断した状態で分極抵抗の測定を行い、分極抵抗から求めた腐食電流密度の測定結果を図 6-2-7 に示す。この結果を表 6-2-1 に示す CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）の腐食速度の判定基準（案）⁴⁾に基づいて判断すれば、温度や漏水量の変化に伴って一部高い値を示している値もあるが、全体として鉄筋腐食速度は遅く、犠牲陽極材方式が鉄筋腐食の進行抑制に有効であると考えられる⁵⁾。

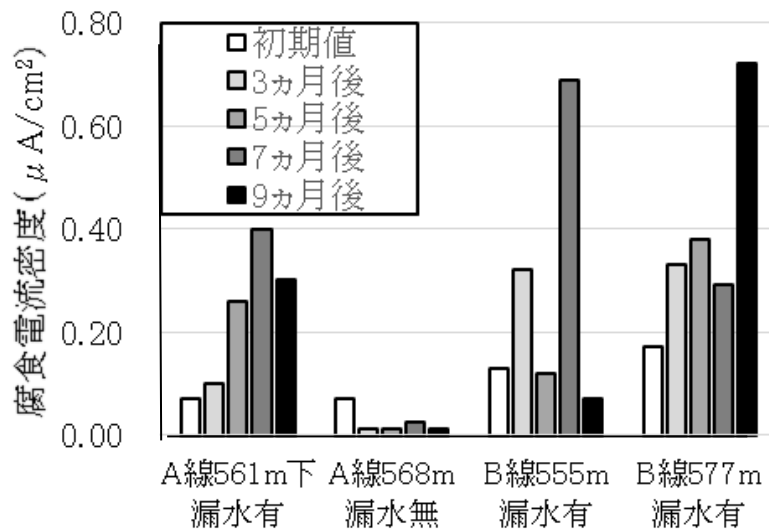


図 6-2-7 試験施工による電気防食工法の効果確認

表 6-2-1 CEBによる腐食速度の判定基準

Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度の判定
<0.2	不動態状態（腐食なし）
0.2-0.5	低～中程度の腐食速度
0.5-1	中～高程度の腐食速度
≥ 1	激しい、高い腐食速度

これら防食電流量、復極量および腐食電流密度の測定から、東京メトロの環境下において埋設型犠牲陽極材の防食効果は期待できるものであり、塩害補修工法として十分に使用できると判断した。

6.2.3 表面含浸工法の効果の確認

塩化物イオンの浸透を抑制する工法には、コンクリート表面に表面被覆材を塗布する方法と表面含浸材を塗布する方法がある。東京メトロで過去に実施した感潮域河川下の潜函工法で建設されたトンネルの継手部劣化補修工事において、有機系の表面被覆材（ポリウレタン樹脂塗料）を施工した箇所、施工3年後に被覆材の膨れや剥れが発生した再劣化の事例がある。これは表面被覆材の施工により水分が躯体内部に閉じ込められたことが原因と考えられることから、同様の損傷を避けるために表面被覆材は採用せず、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た。

表面含浸工法の効果を確認するにあたり、他機関における使用実績に関するヒアリング調査等を行った。その結果、シラン系表面含浸材（撥水材）の主成分濃度は従来20～40%程度が主流であったが、撥水効果を高めるために主成分濃度が80%を超えるものが開発されていること、主成分としてはアルキルアルコキシシラン系、シランシロキサン系の含浸材が優れていることがわかった^{6) 7) 8)}。このことから試験用材料として、液状の表面含浸材（主成分アルキルトリアルコキシシラン、濃度95%以上）とクリーム状の表面含浸材（主成分アルキルトリアルコキシシランと反応性ポリシロキサン、濃度80%）を選定した。

効果確認の試験は、土木学会基準「表面含浸材の試験方法（案）」（JSCE-K 571）に準拠して図6-2-8に示すように実施した。箱型トンネルに使用する普通コンクリート（水セメント比53%）および2種類の断面修復材（現行PCM、低抵抗PCM）を用いて角柱100mm×100mm×100mmの試験体を各々製作した。一面に表面含浸材を塗布し、残りの面には塩化物イオンが浸透しないようにエポキシ等でシールして塩分溶液中に2ヶ月間浸漬した。浸漬期間終了後に試験体を切断し、表面含浸材の浸透深さおよび塗布試験体への塩化物イオンの浸透状況を確認した。なお、PCMの電気抵抗率試験を行ったところ、材齢28日で現行PCMは26.3kΩ・cm、低抵抗PCMは9.6kΩ・cmであった。

試験結果を図6-2-9および図6-2-10に、施工性等の評価を表6-2-2に示す。試験体の材料に関わらず、表面含浸材の浸透深さは液状の方がクリーム状に比較してより深くまで浸透している。表面含浸材を塗布した場合の塩化物イオンの浸透深さは、液状の方がクリーム状よりも小さな値であり、普通コンクリートおよび現行PCMといった既存の構造物に適用した場合にも塩化物イオンの浸透抑制効果が期待できる結果となった。

したがって、液状の表面含浸材は母材への浸透が深く、表層よりやや内部で撥水と遮塩に対する効果があり、トンネル内でコンクリート表層部を清掃しても効果の持続性が高いと考えられる。また遮塩効果が薄れてきた場合は、液状の表面含浸材は上塗りも可能であり、中長期的に効果が期待できると判断した。

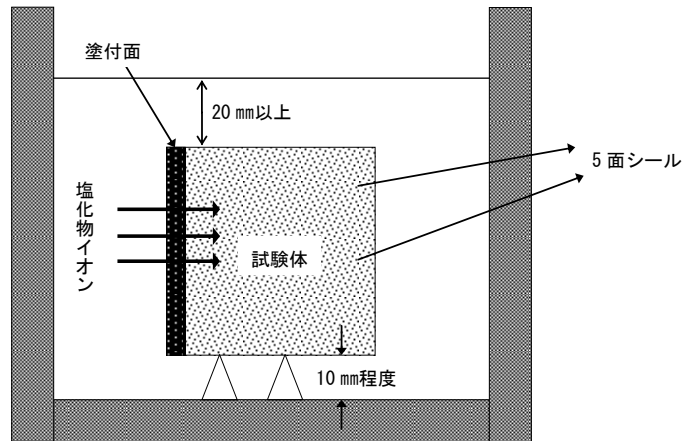


図 6-2-8 表面含浸材の試験方法

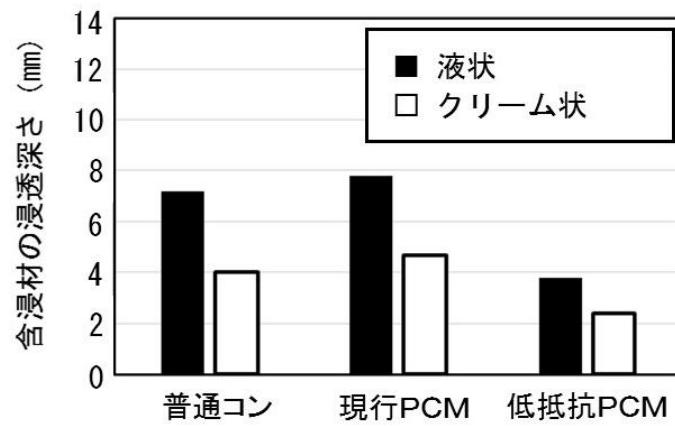


図 6-2-9 表面含浸材の浸透深さ

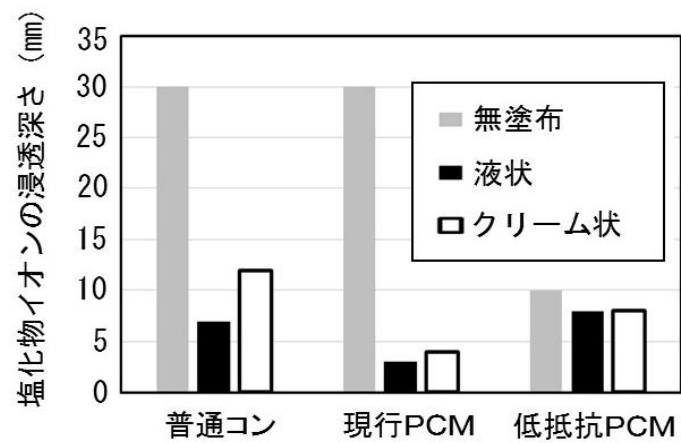


図 6-2-10 塩化物イオンの浸透深さ

表 6-2-2 表面含浸材の評価

種類	遮塩性	施工性	塗重ね	効果の持続性	総合
液状	○	△	○	○	○
クリーム状	△	○	×	△	△

凡例 ○：良 △：可 ×：不可

6.2.4 犠牲陽極材と断面修復工法の組合せの検討

塩害補修工事の実施にあたり犠牲陽極材の効果を高めるため、断面修復材との組合せを検討する必要がある。表 6-2-3 に示す 3 種類の犠牲陽極材（亜鉛含有量およびバックフィル材組成の異なる A、B、C）と 2 種類の断面修復材、さらに塩害に対して有効と考えられる塩分吸着型防錆材を含めて、表 6-2-4 に示す組合せの補修条件で防食効果を確認する室内試験を実施した。

なお、塩分吸着型防錆材については硬化時間が短いものが現状では開発されておらず、施工後 30 分程度で電車が通過する地下鉄トンネルでは適用が難しいと考えられるが、今回電気防食工法と効果の違いを評価するために調査を行った。

表 6-2-3 補修方法の検討に用いた材料

	種類・組成
犠牲陽極材	A：亜鉛量 160g バックフィル材（水酸化リチウム）
	B：亜鉛量 85g バックフィル材（水酸化リチウム）
	C：亜鉛量 38g バックフィル材 （臭化リチウム、硝酸リチウム）
断面修復材	現行 P C M （アクリル樹脂エマルジョン含有軽量型）
	超速硬型低電気抵抗性 P C M （粉末樹脂、短繊維プレミックス型）
塩分吸着型防錆剤	亜硝酸型ハイドロカルマイト含有ペースト

表 6-2-4 室内試験における補修条件

補修条件 No.	犠牲陽極材	断面修復材	塩分吸着型防錆材
1	—	現行 PCM	—
2	—	現行 PCM	有
3	B	現行 PCM	—
4	A	低抵抗 PCM	—
5	B	低抵抗 PCM	—
6	C	低抵抗 PCM	—
7	A	低抵抗 PCM	有
8	C	低抵抗 PCM	有

PCM : ポリマーセメントモルタル

試験で使用した供試体の概要図を図 6-2-11, 供試体の実施手順を表 6-2-5 に示す。供試体はトンネル構造物の配筋状況を考慮し、鉄筋表面積比は 1.15, 鉄筋は $\phi 16$ と $\phi 19$ の磨き丸鋼を用いた。供試体は高さ 25mm まで塩化物イオン濃度 10kg/m^3 を混入したコンクリート（水セメント比 53%）を打設した（写真 6-2-4, 写真 6-2-5）。約 1 ヶ月間気中環境で養生し、母材コンクリート中における鉄筋の発錆状況を再現してマクロセル腐食を模擬させ、そこに組合せを変えた補修条件を適用した。より厳しい状態とするため、既存コンクリート部および断面修復部ともすでに発生している錆の除去は行わずに補修を実施した。補修材の硬化後、供試体以外からの腐食要因の影響を除くために供試体の側面の鉄筋はエポキシ樹脂の処理を実施し、エポキシ樹脂硬化後に供試体を養生環境下で曝露状況とした。

曝露状況の試験は、図 6-2-12 および写真 6-2-6 に示すように空調設備のない屋内で塩水を噴霧した。塩水の濃度は 30gNaCl/L に、温水はヒーターで 35°C に暖め、サーモスタットで管理して塩水噴霧 4 時間と自然乾燥 8 時間を繰り返した。81 日間の促進曝露の後、空調設備のない屋内での気中環境とし、補修から約 1 年後に試験体を解体して鉄筋の腐食量（発錆面積率、質量減少率）を測定した。

表 6-2-5 供試体の実施手順

1	試験体作成、1 ヶ月間の気中養生
2	補修実施 (防錆、断面修復、犠牲陽極材埋設等)
3	犠牲陽極材と鉄筋の接続 (通電、測定開始)
4	鉄筋腐食の初期値測定 (対策なし試験体解体) 1 ヶ月後
5	塩水噴霧繰り返し環境で養生 (81 日間)
6	室内気中養生に変更 (温湿度調整無し)
7	通電 12 ヶ月で解体、鉄筋腐食測定

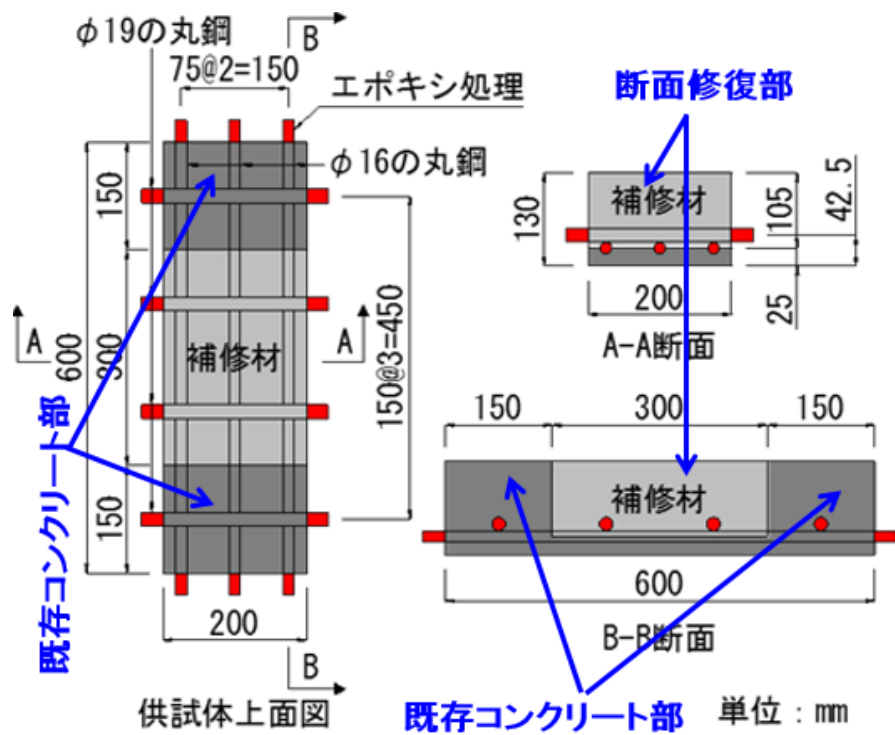


図 6-2-11 供試体の概要図



写真 6-2-4 供試体（母体打設後）



写真 6-2-5 供試体（犠牲陽極材設置状況）

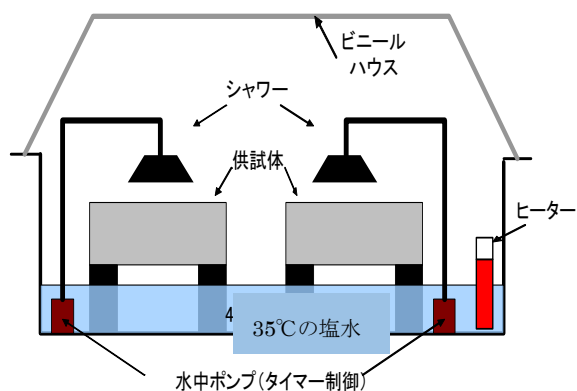


図 6-2-12 曝露試験の概要図



写真 6-2-6 曝露試験の状況

補修条件の違いによる供試体の既存コンクリート部および断面修復部における鉄筋腐食（質量減少率，発錆面積率）を表 6-2-6 に示す．既存コンクリート部の鉄筋の発錆評価の数値はわずかの差であり，すべての補修条件で補修実施前に比較して鉄筋腐食が進行していた．犠牲陽極材 C を使用した供試体 No. 6, 8 は鉄筋腐食（質量減少率）が少なく，マクロセル腐食を抑制することができた．

一方，断面修復部では，現行 PCM を用いた供試体 No.1～3 の中で塩分吸着型防錆材を使用した No.2 は鉄筋腐食が抑えられていたが，No.1, 3 については犠牲陽極材の使用の有無に関わらず，鉄筋腐食が進行していた．超速硬型低電気抵抗性 PCM を使用した供試体 No.4～8 の中で犠牲陽極材 B を用いた No.5 については抑制効果がなく，それ以外は断面修復部の鉄筋腐食が抑制されていた．

表 6-2-6 補修工法の選定に関する室内試験結果

補修条件 No.	発錆の評価（％）			
	既存コンクリート		断面修復部	
	発錆 面積率	質量 減少率	発錆 面積率	質量 減少率
補修前	59	0.32	49	0.19
1	88	1.13	60	0.85
2	87	1.46	5	0
3	88	1.17	71	0.58
4	97	1.82	8	0.13
5	99	1.66	27	0.36
6	97	0.87	6	0
7	73	1.13	9	0
8	86	1.04	5	0.20

* 発錆面積率：既存コンクリート部，断面修復部のすべての鉄筋

* 質量減少率：既存コンクリート部，断面修復部のφ19の鉄筋

鉄筋の発錆評価をわかりやすくするため、補修条件によって鉄筋腐食の結果を比較したものを図 6-2-13 から図 6-2-16 に示す。図 6-2-13 に示すように、塩分吸着型防錆材または犠牲陽極材 B を用いて現行 PCM で断面修復した場合は、補修部において塩分吸着型防錆材は高い防錆効果があるが、既存コンクリート部では効果の違いはなかった。図 6-2-14 に示すように、犠牲陽極材 B を使用して現行 PCM または電気抵抗率が低い低抵抗 PCM で断面修復材した場合は、補修部において低抵抗 PCM を用いる方が犠牲陽極材の防錆効果があることが確認させた。図 6-2-15 に示すように、低抵抗 PCM で断面修復して犠牲陽極材および塩分吸着型防錆材を用いた場合は、補修部および既存コンクリート部とも塩分吸着型防錆材と犠牲陽極材の両方を用いた方の防錆効果が高いことがわかった。鉄筋腐食の進行抑制効果が高い組合せは No. 7, 8 (犠牲陽極材 + 超速硬型低電気抵抗性 PCM + 塩分吸着型防錆材) と考えられる。しかし、塩分吸着型防錆材は硬化時間が長いいため、地下鉄トンネルの作業時間が限られている制約条件から施工性に問題があり使用が難しい。図 6-2-16 に示すように、低抵抗 PCM を使用して断面修復した場合、犠牲陽極材の違いによる効果は、補修部および既存コンクリート部とも犠牲陽極材 C の防錆効果が高いことがわかった。

これらの結果から、鉄筋腐食の抑制効果が高い組合せは補修条件 No.6 (犠牲陽極材 C + 超速硬型低電気抵抗性 PCM) と考えられる²⁶⁾。

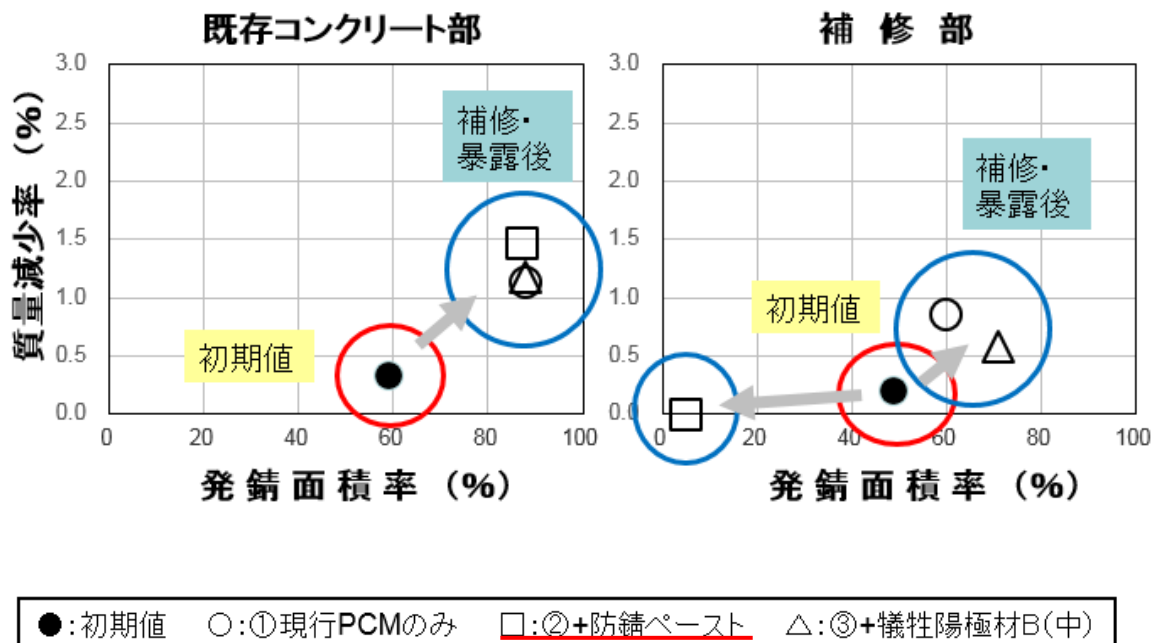


図 6-2-13 現行 PCM で断面修復した場合の鉄筋腐食量

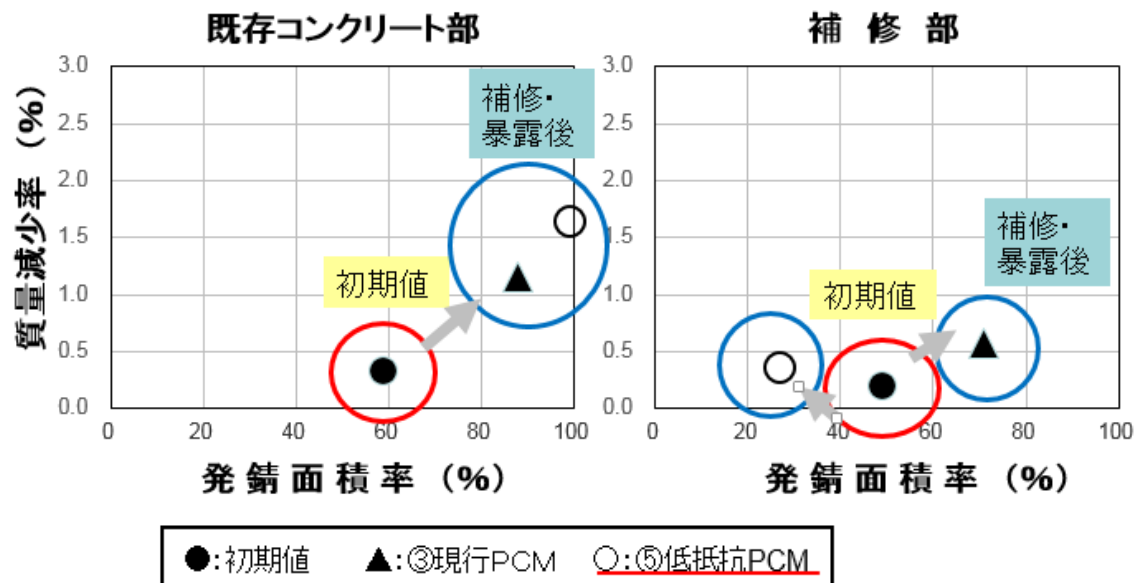


図 6-2-14 現行 PCM と低抵抗 PCM で断面修復した場合の鉄筋腐食量
(犠牲陽極材 B 使用)

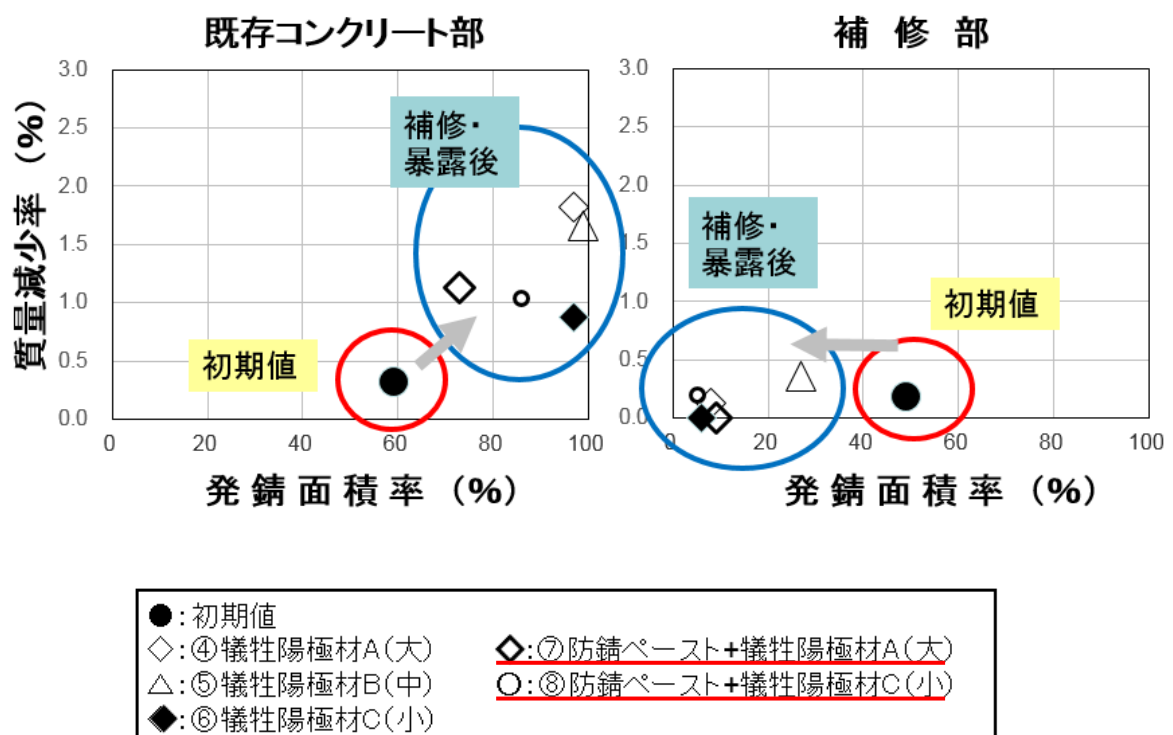


図 6-2-15 低抵抗 PCM で断面修復した場合の鉄筋腐食量

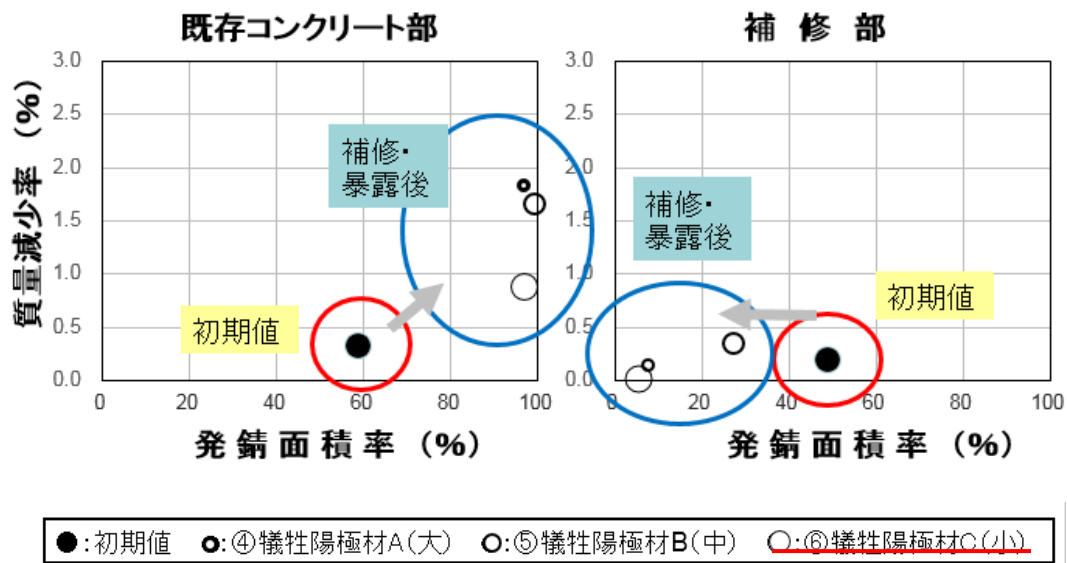


図 6-2-16 犠牲陽極材の違いによる鉄筋腐食量（低抵抗 PCM 使用）

6.2.5 犠牲陽極材の効果持続時間

犠牲陽極材の亜鉛が減少することにより鉄筋腐食の進行が抑制されることから、犠牲陽極材の効果持続期間の調査を行う必要がある。図 6-2-17 に示すように供試体の鉄筋と犠牲陽極材をリード線で接続してコンクリートの外部で通電電流量の測定を行った。曝露期間 1 年で犠牲陽極材から発生した積算電流値を用い、式(1)のファラデーの法則に基づき算出した理論的な亜鉛の質量減少量を計算するとともに、1 年後に解体して実測した犠牲陽極材中の亜鉛の質量減少量を比較した。

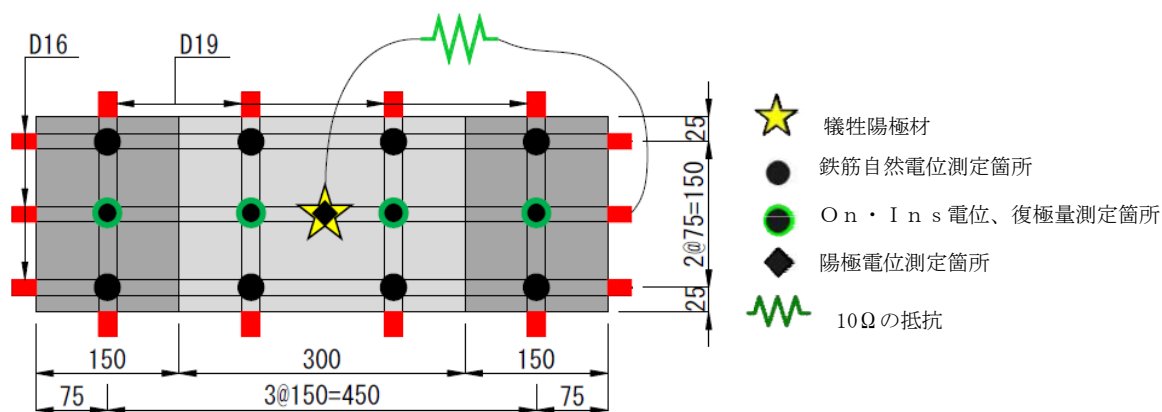


図 6-2-17 鉄筋と陽極の各種電位測定箇所

$$W = \frac{I t e}{26.8} \quad \dots \dots \text{式 (1)}$$

ここで、 W =亜鉛の質量（g）， I =電流（A），
 t =時間（h）， e =亜鉛の科学当量（32.69）

表 6-2-7 に示すように、解体試験の実測質量減少率は 1 年間に約 9～30%，ファラデーの法則から求められる理論的な減少率は約 4～9% となり、実測値は理論値の概ね 2～3 倍となった。減少率から犠牲陽極材の亜鉛が 100% 減量する期間、すなわち犠牲陽極材の効果持続時間は図 6-2-18 からわかるように解体による実測結果では 3～11 年、積算電流量による算出結果では 12～23 年である。

理論値を計算している発生電流量は 2 週間に 1 回測定した値をその期間中の発生電流量に換算しているために解体試験による質量減少率とは乖離したと考えられる。試験データは設置から 1 年間であり、ヒアリング結果から犠牲陽極材は通電初期において発生電流量が大きくなることが試験結果で示されており、効果持続時間は 20 年程度という試験結果もある。解体試験からの効果持続時間の平均は約 7 年であるが、トンネル環境下では気温の変動が少ないことから効果持続時間は 10 年程度であると推測される。試験結果の効果持続時間によって犠牲陽極材の種類を選定することは難しく、さらに検証を続ける必要がある。

したがって、表 6-2-8 に示すように抑制効果、施工性、持続性から、No. 6（犠牲陽極材 C（小）＋低抵抗 PCM）の組合せが最も優れていると判断した。

表 6-2-7 犠牲陽極材の効果持続評価

補修条件 No.	解体試験			ファラデーの法則			
	質量減少量(g)	質量減少率(%)	効果持続時間(年)	積算電流量(Ah)	質量減少量(g)	質量減少率(%)	効果持続時間(年)
3	14.71	15.48	6.5	3.4	4.18	4.4	22.7
4	20.35	11.83	8.5	8.19	10.08	5.86	17.1
5	16.09	16.94	5.9	4.08	5.02	5.28	18.9
6	7.87	20.66	4.8	2.63	3.24	8.5	11.8
7	15.03	8.74	11.4	6.67	8.2	4.77	21
8	11.52	30.24	3.3	2.67	3.28	8.62	11.6

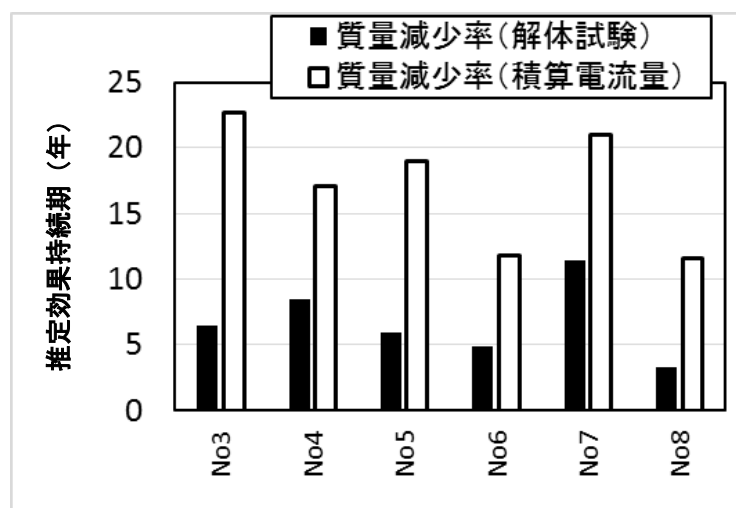


図 6-2-18 犠牲陽極材の効果持続期間推定結果

表 6-2-8 補修条件の評価

補修条件 No.	抑制効果	施工性	持続性	総合評価
1	×	○	×	×
2	○	×	△	×
3	×	○	△	×
4	△	○	△	△
5	×	○	△	×
6	○	○	△	○
7	○	×	△	×
8	○	×	△	×

* 施工性：地下鉄トンネルの制約条件を満たしていること

凡例 ○：良 △：可 ×：不可

6.3 まとめ

地下鉄トンネルにおける塩害対策としてトンネル内面に塩化物イオンが浸透しているが、浮き・はく離がなく塩害が進行していない箇所は塩化物イオンの浸透を抑制する対策（表面含浸工法）を実施する必要がある。その工法として液状の表面含浸材を塗布することとした。また、塩化物イオンが浸透し、浮き・はく離が発生して塩害が進行している箇所には断面修復工法、電気防食工法および表面含浸工法を実施する必要がある。

地下鉄トンネルの施工環境を考慮した試験結果から、塩害劣化箇所を除去し犠牲陽極材（Cタイプ）を埋め込み、超速硬型低電気抵抗性PCMで断面修復する工法を行った後に表面含浸工法を行うことが最も適していることが判明した。これらの補修方法を地下鉄トンネルにおける塩害対策工法として、工事を実施している。

【第6章 参考文献】

- 1) 奥平幸男, 関 博, 川田秀夫, 藤松康裕: 大規模港湾施設の補修技術の現状, コンクリート工学, Vol. 39, No. 6, pp. 22-27, 2001. 6.
- 2) 牛島栄, 大即信明, 宮川豊章: コンクリート構造物の電気化学的防食工法, 材料, Vol. 52, No. 1, pp. 47-56, 2003.
- 3) 土木学会: 電気化学的防食工法設計施工指針(案), 土木学会, コンクリートライブラリー107, pp. 9, 2001. 11.
- 4) 土木学会: コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)委員会報告書, 2009. 10.
- 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報告集, Vol. 14, pp. 287-294, 2014. 10.
- 6) 林大介, 坂田昇, 三村俊行, 神沢弘: シラン・シロキサン系撥水材の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 301-306, 2000. 7.
- 7) 田中博一, 滝本和志, 栗田守朗: 表面改質材を用いたコンクリートの耐久性向上に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 667-672, 2008. 7.
- 8) 林大介, 芦澤良一, 植田政明, 前山篤史: シラン・シロキサン系表面含浸工法による新設構造物の耐久性向上, コンクリート工学, Vol. 49, No. 5, pp. 83-86, 2011. 5.

第7章 東京メトロの塩害対策方針

7.1 塩害対策における優先区間

(1) 塩害対策優先区間の選定表の作成

東京メトロでは、過去においてもはく離・はく落等の変状が顕在化しているトンネル区間を対象として補修工事等の維持管理を行ってきたが、これらは塩害についての調査・分析に基づいて判断を行ったものではなかった。予防保全の観点からも塩害対策工事を早急に実施する必要がある、塩害に対する中長期的な維持管理計画を策定することとした。

箱型トンネルの河川等と交差・近接する49区間の塩害検討区間に関して、すべての区間でコンクリート中の塩化物イオン濃度の測定等、詳細な調査が実施されていない中、塩害検討区間から優先的に対策工事を実施する優先区間を選定することとした。

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は、

- ① 防水工が行われておらず、漏水が多く発生している潜函工法などの特殊工法で建設されたトンネル区間
 - ② 漏水中の塩化物イオン濃度が高い区間
- が挙げられる。

この2点に着目して、表7-1-1に示すような塩害対策優先区間の選定表を作成した。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。

表 7-1-1 塩害対策優先区間の選定表

		箱型トンネルの施工法	
		潜函工法・イコス工法等 特殊工法	開削工法
塩化物イオン濃度	高濃度	8区間 1,446m 優先度A	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

感潮域河川の塩化物イオン濃度は東京湾から2 km程度の範囲（東京湾沿岸）では5,430 mg/L～13,775 mg/Lであるが、3 km以上離れた内陸部では急激に低下して1,800 mg/L～3,000 mg/Lであることが調査からわかった。定期検査の結果からも塩害による劣化箇所は東京湾沿岸に集中しており、トンネル内の漏水箇所におけるはつり調査（図 7-1-1）から鉄筋の腐食が多い区間は概ね 5,000 mg/L 以上であることから、選定表における高濃度と低濃度の境界を 5,000 mg/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、優先区間を選定するための目安として東京湾からの距離または公表されている河川等の塩化物イオン濃度を用いることとした。今回の選定表の作成で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の49区間を区分した。



腐食度

- 0：腐食を認めず A：点錆程度の表面的な腐食
B：全体に表面的な腐食 C：浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食
D：断面欠損の明らかな著しい腐食

図 7-1-1 漏水箇所のはつり・鉄筋調査

(2) 対策区間の優先順位

塩害対策優先区間の選定表に基づき、潜函工法等の特殊工法で塩化物イオンが高濃度である優先度Aの8区間1,446mについては、2014年から塩害対策工事を実施した(表7-1-2)。開削工法で塩化物イオンが高濃度である優先度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ることとした。

表 7-1-2 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/m³)	採取コアのCl-量d=7cm(kg/m³)	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	楓川	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・イ・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(凍)	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

優先度B1の15区間における2005年までの定期検査の結果から、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が塩害の影響の高い区間と考え、塩害対策工事を実施することとした(表7-1-3)。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。

表 7-1-3 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	竜開川	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
丸ノ内線	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	小さい川	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			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			駅	小川	140	V	開削	8950				0
半蔵門線	押上	駅			駅	北十間川	140	I	開削	9725				0

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漏水および漏水跡の回りにおける塩分の有無を調査することにした。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、変状がある範囲は劣化部分の撤去、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を施工することで補修面積を決定した。なお、優先度B1の優先的に塩害対策工事を行う6区間については、詳細調査において塩害対策の補修範囲が少ない場合は塩害対策工事の実施を見直すことも必要である。

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しないが、2年に1回実施している定期検査の時に塩害検討区間にある漏水および漏水跡の箇所について同様の方法を用いて判定し、塩害対策を実施することで対応することにした。

(3) 塩害対策工事の効果

塩害対策工事はすでに開始されており、優先度Aの6区間1,110mは2014年3月から2017年10月までの43ヵ月間で完了している。表7-1-4に示すように6区間1,110mの施工実績である犠牲陽極材・断面修復の側壁304㎡、犠牲陽極材・断面修復の上床114㎡、表面含浸材塗布2,581㎡を基に、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。

試算には6区間の工事実績から、図7-1-2に示すように犠牲陽極材・断面修復の側壁施工単価は61万円/㎡、上床施工単価は106万円/㎡、表面含浸材の施工単価は側壁・上床とも3万円/㎡を使用した。通常の構築補修における断面修復は、側壁施工単価24万円/㎡、上床施工単価31万円/㎡を使用した。なお、漏水に伴う止水工の費用は塩害対策補修も通常の断面修復も同様と考え、試算には含まれていない。

側壁と上床に施工した犠牲陽極材・断面修復と表面含浸材の塗布の面積から、塩害対策の総費用は約3億8000万円である。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。この試算から塩害対策工事を実施することにより優先度Aの6区間は20年間で約3割の費用を削減できることとなる。

再劣化の期間については、定期検査で確認された塩害区間の断面補修箇所が約3～5年で再劣化した事例を参考とした。試算の精度を上げるためにも、塩害区間における通常の断面修復の再劣化時期、さらに塩害対策の補修効果を持続させるために必要な犠牲陽極材の交換時期、表面含浸材の再塗布時期等、今後年数を掛けてモニタリングを行っていく必要がある。

表 7-1-4 塩害対策工事の施工実績

番号	路線	駅間			河川名	延長	種別	側壁補修(㎡)	上床補修(㎡)	表面含浸(㎡)
1	日比谷線	人形町駅	～	茅場町駅	日本橋川	170	I	15	3	207
2	東西線	茅場町駅	～	門前仲町駅	亀島川	160	I	154	82	923
3		茅場町駅	～	門前仲町駅	隅田川	320	I			
4		茅場町駅	～	門前仲町駅	大島川	62	I	34	4	221
						78	I	37	2	301
5	千代田線	新御茶ノ水駅	～	大手町駅	日本橋川	180	I	62	20	772
6	半蔵門線	九段下駅	～	神保町駅	日本橋川	140	I	2	3	157
					計	1110		304	114	2581

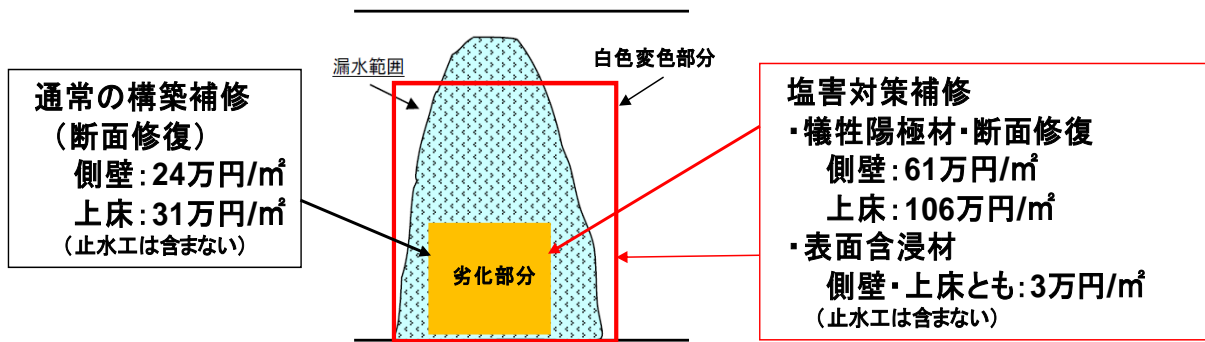


図 7-1-2 塩害対策を実施した場合の施工単価比較

(4) 塩害対策工事による保守費への影響

東京メトロの全路線におけるトンネル保守費は、トンネルの経年劣化等の影響もありここ7年間で+1.4%/年の増加傾向にある（表 7-1-5）。この保守費に加え、平成 26 年度から本格的に塩害対策工事を開始している（表 7-1-6）。優先度 A と B1 の優先区間を実施する塩害対策工事が完了する平成 31 年度以降は、再劣化箇所がなくなると想定されるため、試算結果を考慮すると構築コンクリート（集中）補修の費用は年 1000 万円減少すると考えられる。しかし、あくまでも試算であり、トンネル保守費における構築コンクリート（集中）補修についてはトンネル保守費抑制のためにも今後さらに詳細な検証が必要である。

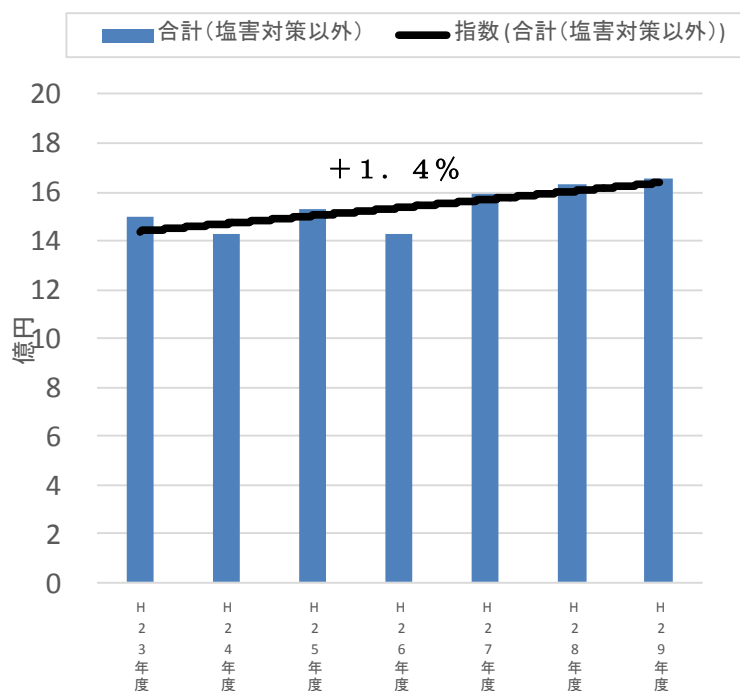


表 7-1-5 トンネル保守費の推移（塩害対策を除く）

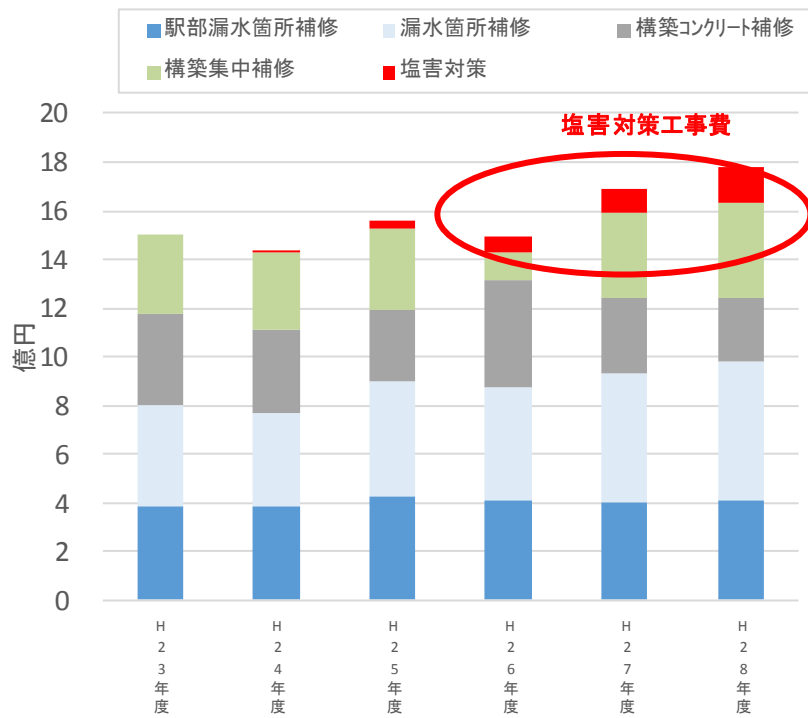


表 7-1-6 東京メトロのトンネル保守費（平成 23～28 年度の実績）

7.2 劣化予測による確認

東京メトロの箱型トンネルが河川等と交差・近接する 49 区間（総延長 15,888m）について、調査・検討の結果を基に作成した塩害対策優先区間の選定表により優先順位を付けて優先度 A の 8 区間と優先度 B1 の 6 区間の塩害対策工事を実施することが塩害の劣化状況に整合しているのかを確認することとした。将来の劣化状況は、定量的な調査のデータを基に鋼材の発錆条件の明確化やひび割れ（浮き）発生限界腐食量を推定することができる劣化予測^{1) 2)}を用いることとし、劣化予測の方法として、以下に示す 3 手法の検討を行った。

なお、劣化予測の手法および計算については、東京大学石田研究室で実施されたものであり、東京地下鉄（株）「地下鉄トンネル塩化物対策検討委員会 報告書」から引用して紹介する。

(1) DuCOM による手法

東京大学前川教授および石田教授の研究室で研究が進められている熱力学連成解析システム DuCOM (Durability Model of Concrete) による予測技術を適用するための検討を進めた。構造物内部の塩化物イオン濃度分布から漏水履歴を推定し、その結果から鋼材腐食解析を行い、塩害による劣化現象の顕在化時期を予測する手法である。漏水中の塩化物イオン濃度、漏水の開始時期、漏水の頻度・サイクル等をパラメータとして解析を行った結果、ひび割れ発生時期の解析結果と実構造物における劣化変状の程度が良く整合しているとの結果が得られている¹⁾。

(2) 簡易予測手法

DuCOM による劣化予測手法は精緻な結果が得られるものの、コンクリートの品質（空隙率、含水率等）や現場環境（漏水に含まれる塩化物イオン量等）に関する多くのパラメータが必要となり、解析に要する時間も多くなる。

このため、対象となる全てのトンネル構造物に適用することは実務上難しいと考えられたことから、以下の手順による簡易予測手法を適用して劣化予測を行った。

- ① 土木学会コンクリート標準示方書に示された水セメント比から拡散係数を算出する。
- ② 表面塩化物イオン濃度を一定として解いた Fick の拡散方程式の解に代入する。
- ③ 実測塩分濃度分布に回帰させて、表面塩化物イオン濃度 C_0 と期間 t を逆算する。
- ④ 得られた t を漏水開始からの経過年数とする。
- ⑤ 漏水開始以前は拡散係数 $D_c=0$ とし、漏水開始以降、水セメント比から得られた拡散係数と、回帰分析により求めた C_0 を使って塩分量の変化を予測する。
- ⑥ 鉄筋腐食速度は塩分濃度を考慮した既存研究の式 (Raja の提案式)、ひび割れ限界腐食量は横関の提案式を用いる。

この簡易予測手法を用いて、丸ノ内線・日比谷線の2路線のトンネルを対象に試算を行った。その結果、漏水発生時期は DuCOM による結果に比較的一致し、進展期末の予測到達時期も図 7-2-1 に示すように DuCOM による予測結果との差が5年以内となることが確認できた。この方法は、表面塩化物イオン濃度を一定と仮定しているために、被りが小さい区間ほど、初期の塩化物イオン濃度の増加量が大きくなり、結果として進展期末を迎えるのも早くなる。したがって、予測式としては、安全側の閾値設定となっていると考えられる。一方、調査時点までの供用年数が短い場合は、将来の塩化物イオン量を低く見積り過ぎる恐れがある。

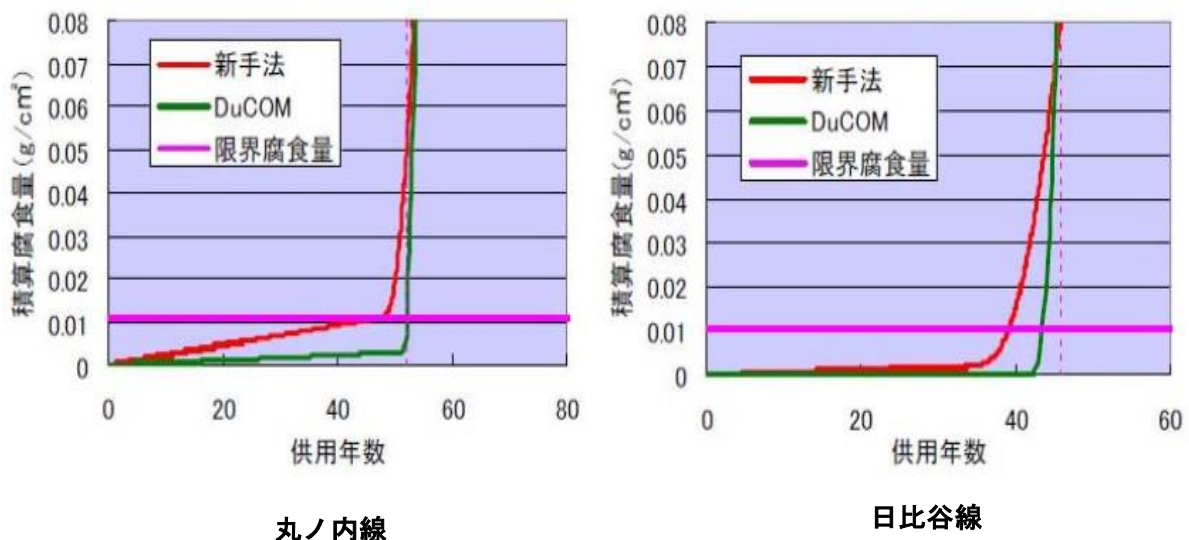


図 7-2-1 DuCOM と簡易予測式（新手法）との劣化予測の比較

(3) 濃度係数を考慮した解析手法

簡易予測手法では、Fick の拡散方程式を表面塩化物イオン濃度が一定であるとして解いており、環境条件が一定であると仮定している。しかし、実際のトンネルでは環境は多少なりとも変化している。このため、塩化物イオンの浸透による濃度勾配の変化を解析に反映させるために Fick の拡散方程式を表面塩化物イオン濃度が漏水供給の蓄積により時間の平方根に比例して増加すると仮定して解いた式で表現する手法を検討した²⁾。

結果の一例を図 7-2-2 に示す。この図には簡易予測手法による劣化予測結果も併記している。濃度係数を考慮した解析手法による劣化予測結果の方が、進展期末までの予測期間が長く評価された。これは鉄筋位置での塩化物イオン濃度の経時変化が、簡易予測手法では漏水開始後から急激に塩化物イオンが浸透しているのに対し、濃度係数を考慮した解析手法では漏水開始後、徐々に塩化物イオンが浸透していることによるものと考えられる。より安全側を考えれば、従来の簡易予測式を適用すれば良いが、実環境下に近い環境条件を考慮した予測手法としては、濃度係数を考慮した解析手法の方が適切と考えられる。

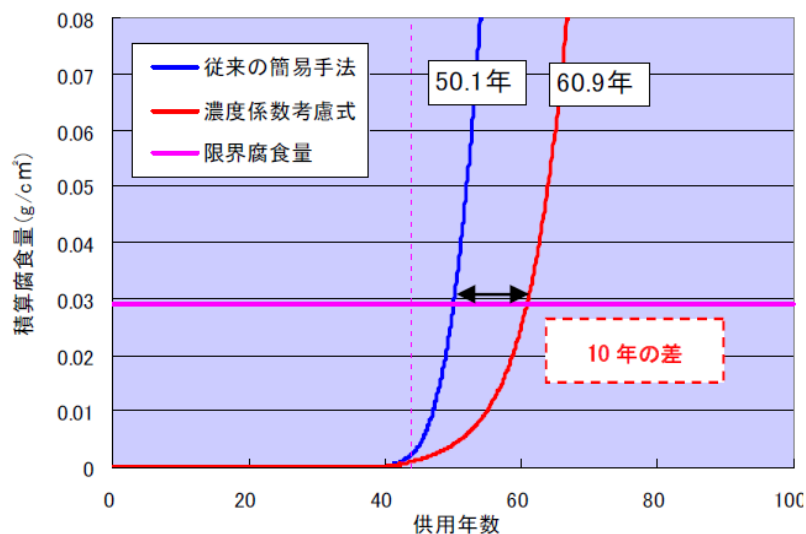


図 7-2-2 簡易手法と濃度係数考慮式による劣化予測の比較
(東西線 茅場町～門前仲町 亀島川)

(4) 劣化予測結果と実構造物における鉄筋腐食度の整合性

簡易予測手法および濃度係数を考慮した解析手法による劣化予測結果と、実構造物における鉄筋の腐食度の関係を表 7-2-1 に示す。なお、鉄筋の腐食度ははつり調査を行って目視により判定したものである。

劣化予測による進展期末までの年数と、はつりによる鉄筋腐食段階判定結果がほぼ整合していることが確認できた。しかし、東西線茅場町～門前仲町間の箇所では乖離が認められる。同箇所の劣化予測結果では、進展期末に到達するまで2年が残されているという評価であったにもかかわらず、はつり調査の結果では鉄筋の腐食グレードはD評価であり、進展期末に相当する顕著な腐食段階である。原因として、この箇所では表 7-2-1 に示したように浮きの存在が確認されていることから、浮きが鉄筋腐食の促進に影響した可能性が考えられる。劣化予測手法はコンクリート表面からの塩化物イオンの浸透による鉄筋腐食の発生を評価するものであり、浮き等による塩化物イオンの浸透促進は考慮されない。本手法の運用にあたってはひび割れや浮き等の外観変状がないことを確認したうえで評価することが必要である。

表 7-2-1 簡易手法と濃度係数を考慮した手法における劣化予測の結果

		東・茅場-門前		東・茅場-門前		日・人形-茅場	
影響河川		亀島川		隅田川		日本橋川	
現地調査結果	はつり鉄筋腐食度	B		D		C	
	浮き	なし		あり		なし	
	かぶり	50mm		65mm		65mm	
簡易予測手法	調査測定年次	建設後 44 年		建設後 44 年		建設後 48 年	
	予測手法	簡易手法	濃度係数	簡易手法	濃度係数	簡易手法	濃度係数
	推定漏水開始時期	建設後 39 年	建設後 36 年	建設後 25 年	建設後 10 年	建設後 35 年	建設後 26 年
	推定漏水開始からの年数	5 年	8 年	19 年	34 年	6 年	26 年
	予測進展期末までの期間	建設後 50 年	建設後 61 年	建設後 46 年	建設後 46 年	建設後 56 年	建設後 64 年
	現状(進展期末まで)	あと 6 年	あと 17 年	あと 2 年	あと 2 年	あと 8 年	あと 16 年

		丸・淡路-大手		千・新御-大手		有・江戸-飯田	
影響河川		日本橋川		日本橋川		神田川	
現地調査結果	はつり鉄筋腐食度	C(A)		A		A	
	浮き	あり(なし)※		なし		なし	
	かぶり	25mm		175mm		50mm	
簡易予測手法	調査測定年次	建設後 54 年		建設後 41 年		建設後 37 年	
	予測手法	簡易手法	濃度係数	簡易手法	濃度係数	簡易手法	濃度係数
	推定漏水開始時期	建設後 36 年	建設後 24 年	建設後 31 年	建設後 24 年	建設後 19 年	建設後 6 年
	推定漏水開始からの年数	18 年	30 年	10 年	17 年	18 年	31 年
	予測進展期末までの期間	建設後 73 年	建設後 76 年	建設後 100 年	建設後 104 年	(100 年以上)	(100 年以上)
	現状(進展期末まで)	あと 19 年	あと 22 年	あと 59 年	あと 63 年	(あと 100 年以上)	(あと 100 年以上)

※丸ノ内線の結果はひび割れが発生し、1 本の鉄筋が局所的に腐食していた。隣り合う鉄筋はすべて健全度 A であった。

		日・秋葉-小伝	
影響河川		神田川	
現地調査結果	はつり鉄筋腐食度	0	
	浮き	なし	
	かぶり	85mm	
簡易予測手法	調査測定年次	建設後 48 年	
	予測手法	簡易手法	濃度係数
	推定漏水開始時期	建設後 42 年	建設後 38 年
	推定漏水開始からの年数	8 年	12 年
	予測進展期末までの期間	(100 年以上)	(100 年以上)
	現状(進展期末まで)	(あと 100 年以上)	(あと 100 年以上)

(5) 箱型トンネルの劣化予測

箱型トンネルの河川等と交差・近接する 49 区間について、建設時の施工法および漏水中の塩化物イオン濃度を確認するとともに、すべての区間について劣化予測の解析を実施するには時間や費用が必要であることから、代表的な 11 区間において劣化予測のグラフを作成した。代表的な 11 区間以外の区間については、コア採取等によりコンクリート中の塩化物イオン濃度分布が既知の場合にはほぼ等しい箇所のグラフを用い（2 区間）、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布がない場合には漏水中の塩化物イオン濃度がほぼ等しい箇所のグラフを用いた（11 区間）。

漏水に関する情報がない場合には、交差・近接する河川等の塩化物イオンがほぼ等しい箇所のグラフを用い（9 区間）、河川・濠が埋め立てられている箇所においてコンクリート中の塩化物イオン濃度分布がない場合は劣化予想なし（15 区間）として取り扱った。ただし、河川・濠が埋め立てられていても近くに詳細調査が行われている箇所がある場合にはその値を用いた（1 区間）。

（6）選定表による優先度と劣化予測との違い

塩害対策優先区間の選定表と劣化予測による進展期末までの年数を比較した。なお、劣化過程の定義は表 7-2-2 に示す。表 7-2-3 に示すように、優先度 A のうち 6 区間については、劣化予測の結果からも進展期末までマイナスの数字であり劣化が進行していることから、すでに塩害劣化が顕在化した加速期と評価させている。残り 2 区間については劣化予測を実施していないが、環境種別および損傷・補修率から同様に早期の対応が必要であると考えられる。

優先度 B1 のうち損傷・補修率等から塩害対策工事を実施する 6 区間であるが、3 区間については劣化予測から 10 年以内に進展期末に達すると評価されており、優先度 A に引続き塩害対策工事を行うことが必要である。しかし、残り 3 区間については進展期末まで 51 年の期間を有する評価から、優先順位は低いと考えられる。また、優先して工事を実施する区間としては除かれていたが、進展期末まで 3 年という区間（日比谷線築地駅～東銀座駅間）が 1 区間あった。

このことから、トンネルにおける損傷・補修率の値および東京湾近郊の坑口付近を用いて塩害対策工事の優先順位を付けることには課題はあるが、塩害検討区間の中から詳細なデータが少ない中で早急に塩害補修を行う塩害対策区間を選定する方法として、活用できると考えている。今回、塩害対策工事を実施することになっているが、劣化予測から優先度が低い区間については工事前に実施する詳細調査による塩害補修範囲の特定結果に基づき優先度を下げ、工事を行わないこととしている。また、今回塩害対策工事に選定されなかったが、劣化予測から優先度の高い区間については定期検査等から劣化状態を確認し、必要であればトンネル漏水の塩化物イオン濃度調査や塩害補修範囲の特定を行い、優先順位を上げて塩害対策工事を行うこととする。

表 7-2-2 劣化過程の定義³⁾

劣化過程	定義	期間を決定する主要因
潜伏期	鋼材の腐食が開始するまでの期間	塩化物イオンの拡散, 初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から 腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により 腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の 鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間	

表 7-2-3 選定表による優先度と劣化予測結果の比較表（49 区間）

路線名	駅間	河川名称	影響範囲	環境種別	建設工法	選定表優先度	劣化予測結果	劣化予測使用区間	備考
銀座線	新橋 駅 ～ 銀座 駅	堀	140	V	開削	C		なし	
銀座線	銀座 駅 ～ 京橋 駅	京橋川	140	V	開削	C		なし	
銀座線	日本橋 駅 ～ 三越前 駅	日本橋川	160	I	開削	B1	28	丸1	
銀座線	三越前 駅 ～ 神田 駅	竜開川	140	V	開削	B1	51	有5	
銀座線	神田 駅 ～ 末広町 駅	神田川	150	I	開削	B	53	有2	
銀座線	上野広小路 駅 ～ 上野 駅	忍川	140	V	開削	B		なし	
銀座線	稲荷町 駅 ～ 田原町 駅	新堀	140	V	開削	B1★	51	有5	優先度は低い
銀座線	田原町 駅 ～ 浅草 駅	隅田川	670	I	開削	B1	28	丸1	
丸ノ内線	淡路町 駅 ～ 大手町 駅	日本橋川	150	I	開削	B1	28	●丸1	
丸ノ内線	大手町 駅 ～ 東京 駅	道三堀	140	V	開削	C		なし	
丸ノ内線	東京 駅 ～ 銀座 駅	堀	260	V	開削	C		なし	
丸ノ内線	銀座 駅 ～ 霞ヶ関 駅	堀	180	V	開削	C		なし	
丸ノ内線	赤坂見附 駅 ～ 四ツ谷 駅	弁慶濠	420	IV	開削	C	164	●丸5	
丸ノ内線	西新宿 駅 ～ 中野坂上 駅	神田川	130	III	開削	C	109	東1	
丸ノ内線	中野坂上 駅 ～ 中野新橋 駅	神田川	130	III	開削	C	109	東1	
丸ノ内線	中野富士見町 駅 ～ 方南町 駅	神田川	140	III	開削	C	109	東1	
日比谷線	上野 駅 ～ 仲御徒町 駅	小さい川	140	V	開削	B1★	3	●日1	問題なし
日比谷線	秋葉原 駅 ～ 小伝馬町 駅	神田川	150	I	開・ト	B2	28	●日2	問題なし
日比谷線	秋葉原 駅 ～ 小伝馬町 駅	神田堀	140	V	開削	C		なし	
日比谷線	人形町 駅 ～ 茅場町 駅	日本橋川	170	I	潜函	A	-13	◎東7	問題なし
日比谷線	八丁堀 駅 ～ 築地 駅	築地川	196	V	潜函	A		なし	
日比谷線	八丁堀 駅 ～ 築地 駅	築地川	244	V	開削	B1	51	有5	
日比谷線	築地 駅 ～ 東銀座 駅	築地川	140	V	開削	B1	3	日1	優先度は高い
日比谷線	東銀座 駅	三十三間堀	140	V	開削	C		なし	
日比谷線	広尾 駅 ～ 恵比寿 駅	渋谷川	130	III	開削	C	452	●日9	
東西線	落合 駅 ～ 高田馬場 駅	神田川	130	III	開削	C	109	●東1	
東西線	九段下 駅 ～ 竹橋 駅	清水濠	440	IV	潜函	B2		なし	
東西線	竹橋 駅 ～ 大手町 駅	大手濠	680	IV	潜函	B2		なし	
東西線	大手町 駅 ～ 日本橋 駅	道三堀	760	V	開削	C		なし	
東西線	日本橋 駅 ～ 茅場町 駅	楓川	140	V	開・ト	A		なし	
東西線	茅場町 駅 ～ 門前仲町 駅	亀島川	160	I	開・イ・ト	A	-6	◎千1	問題なし
東西線	茅場町 駅 ～ 門前仲町 駅	隅田川	320	I	潜函	A	-13	●東7	問題なし
東西線	茅場町 駅 ～ 門前仲町 駅	大島川	140	I	潜函	A	-13	東7	問題なし
東西線	茅場町 駅 ～ 門前仲町 駅	濱辺運河	140	V	開削	B1★	51	有5	優先度は低い
東西線	門前仲町 駅 ～ 坑口 駅	埋立地	2127	II	開削	B1★	0	有6	問題なし
千代田線	新御茶ノ水 駅 ～ 大手町 駅	日本橋川	180	I	開・ト(凍)	A	-6	●千1	問題なし
千代田線	大手町 駅 ～ 二重橋前 駅	和田倉濠・馬場先濠	660	IV	開削	C	164	丸5	
有楽町線	護国寺 駅 ～ 江戸川橋 駅	神田川	160	I	潜函	B2	28	日3	
有楽町線	江戸川橋 駅 ～ 飯田橋 駅	神田川	1100	I	開削	C	53	●有2	
有楽町線	飯田橋 駅 ～ 市ヶ谷 駅	外濠	1140	IV	開削	C	164	丸5	
有楽町線	銀座一丁目 駅 ～ 新富町 駅	三十三間堀	140	V	開削	B		なし	
有楽町線	新富町 駅	築地川	540	V	開削	B1★	51	●有5	優先度は低い
有楽町線	新富町 駅 ～ 坑口 駅	埋立地	1330	II	開削	B1★	0	●有6	問題なし
半蔵門線	渋谷 駅 ～	渋谷川	140	V	開削	B		なし	
半蔵門線	九段下 駅 ～ 神保町 駅	日本橋川	140	I	開・ト	A	0	東7	問題なし
半蔵門線	水天宮前 駅 ～ 清澄白河 駅	隅田川支流	230	V	開削	B1	51	有5	
半蔵門線	住吉 駅	小川	140	V	開削	B1	51	有5	
半蔵門線	押上 駅	北十間川	140	I	開削	B1	28	丸1	
南北線	四ツ谷 駅 ～ 飯田橋 駅	外濠	362	IV	開削	C	164	◎丸5	

- ・建設工法：開削工法，潜函工法，イコス工法，トレンチ工法，凍結工法
- ・劣化予想結果：進展期末までの年数
- ★：優先度 B1 の優先区間（6 区間）
- ：劣化予想実施箇所（11 区間）

塩害対策優先区間の選定表に基づき実施する塩害対策工事の補修は、塩害劣化の発生している箇所に対応ばかりでなく、今後進展期末に達するであろう区間についても予防保全の観点から施工の順位を付けて対応することを意味している。したがって、今回の確認において評価していない劣化予測なしの区間ばかりでなく、塩害対策工事を実施しない優先度B1で除かれた区間、優先度B2、Cの区間についても、今後実施する定期検査の結果等に応じて、適宜、計画を見直し、必要であれば劣化予測を行い進展期末の到達年数までに塩害対策を行うこととしなければならない。

今回実施する塩害対策工事のうち優先度Aの区間が完了した時点で、定期検査の結果および費用面等を基に塩害補修計画の見直しを行い、その時に実情に合ったものにしていくことが肝要である。

7.3 まとめ

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目安となる選定表を作成した。防水工の有無と漏水の多さから潜函工法・イコス工法等の特殊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高濃度と低濃度に区分した。この選定表により、優先度Aの区間は塩害対策工事をすでに実施し、優先度B1のうち優先順位の高い区間も施工中であり、塩害対策工事によるトンネル保守費への費用対効果を試算し、予算上の削減効果への可能性を示すことができた。

また、劣化予測による進展期末までの年数と比較することにより、今回の塩害対策優先区間の選定方法は劣化予測結果との整合性を確認でき、工事の優先区間を決定する目安としては活用できることがわかった。

【第7章 参考文献】

- 1) 高橋佑弥, 石田哲也, 香川紗絵: 塩害環境におかれた地下構造物の漏水履歴の推定と鋼材腐食解析, 土木学会第63回年次学術講演会, 5-223, pp. 445-446, 2008. 9.
- 2) (社)日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, 委員会報告書・論文集, 2004.
- 3) 土木学会 コンクリート委員会: コンクリート標準示方書 維持管理編, 土木学会, 2013年制定, 2013. 10.

第8章 塩害対策システムの構築

8.1 検討概要

東京メトロの箱型トンネルにおいて、感潮域河川下等で発生している塩害対策に関する調査・研究を進めてきた。東京メトロは塩害対策優先区間の選定表に基づき優先順位を付けた塩害対策区間について塩害対策工事を行うこととし、実施する区間の中で個別の変状に合わせた補修範囲と補修工法を決定している。東京メトロ以外の地下鉄事業者においても通常の定期検査等において、塩害対策として変状箇所の補修範囲および補修方法を決定する必要があることが想定される。

そのために地下鉄トンネルにおいて、塩害の発生状況に応じた補修範囲と補修方法を常に確認できる仕組みを構築しておくことが重要である。これまでの研究による知見を基に東京メトロにおける塩害対策区間と補修範囲・方法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が日常の補修においても塩害補修範囲とその状態に応じた補修方法を決定できる簡易的な「地下鉄トンネルの塩害対策システム」の総合フローを構築した。

8.2 地下鉄トンネルの塩害対策に関する総合フロー

地下鉄箱型トンネルにおいて塩害対策を実施するためのシステムとして、塩害対策区間の特定および塩害補修範囲の特定という2段階からなる総合フローを作成した。

(1) 塩害対策範囲の特定（図8-2-1）

塩害対策区間の特定では箱型トンネルにおいて河川等と交差・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、5,000 mg/L以上の高濃度であれば塩害が発生する確率が高いことから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り、東京湾沿岸においては河口から上流8km地点までとすることも一つの方法である。しかし、第3章の図3-2-9に示すように河口から上流8km地点では塩化物イオン濃度がゼロに近い値であり、高濃度とする5,000 mg/Lより極めて低いことから、さらに塩害対策区間を絞り込む場合には漏水中の塩化物イオン濃度調査等を行い、塩害対策範囲を決定することが望ましい。

(2) 塩害補修範囲の特定（図8-1-2）

塩害対策区間においてトンネル内の変状ごとに塩害補修範囲を特定する必要がある。塩害対策区間内において、漏水または漏水跡がある場合は第5章で考案した

酸銀溶液噴霧法によって白色に変化するかを判定する。白色に変化すれば塩分が存在し、塩害による劣化に進行する可能性が高い。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、劣化部分の撤去と漏水の発生状況に応じた止水工を実施し、塩害の補修方法として犠牲陽極材の設置と断面修復工、表面含浸工を実施する。濁音がなくコンクリートの浮き・ひび割れ等の劣化が認められない場合は漏水発生状況に応じた止水工を実施し、これ以上の塩化物イオンの浸透を抑制するために表面含浸工を実施することにより、適切な塩害対策の補修が行われたこととなる。

また、図 8-2-2 に示すように、塩害対策の施工完了時には塩害対策の施工状況について詳細な記録を残して定期検査に加えるとともに、その後の定期検査時には塩害対策を行った補修箇所の状態を目視点検し、劣化等が進行していないかを確認する。特に塩害対策の補修時に止水工を行っても、経年により再び漏水が発生する場合がある。再漏水によってコンクリート中にさらに塩分が浸透し、塩害対策の効果が失われることが予測されるので塩害対策を実施した後の検査による確認は非常に重要である。

東京メトロのように予防保全の観点から塩害対策区間を設定して塩害対策工事を行い、塩害対策区間で発生している漏水および漏水跡ごとに硝酸銀溶液噴霧法によって、塩害補修範囲と補修方法を決定することもできる。しかし、特別に塩害対策工事を実施していなくても、定期的に実施している 2 年に 1 回の通常全般検査、20 年に 1 回の特別全般検査¹⁾において、塩害対策区間と考えられる箇所で漏水および漏水跡が確認された場合は、硝酸銀溶液噴霧法による塩害補修範囲の判定を行い、塩害補修範囲の特定の総合フローを用いて塩害対策を実施することも可能である。

① 塩害対策区間の特定

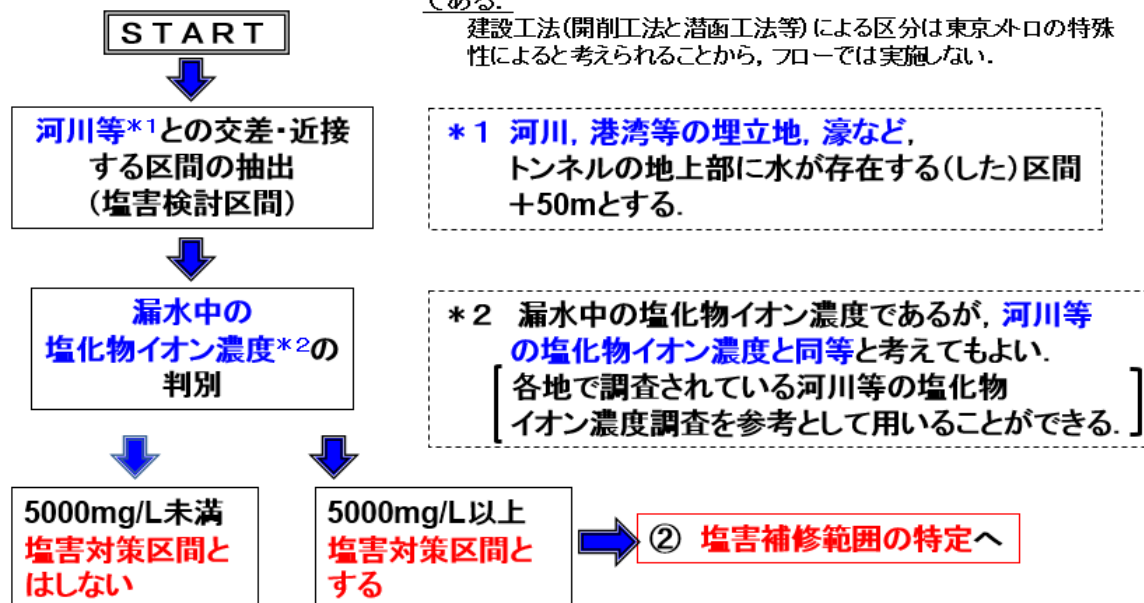


図 8-2-1 地下鉄トンネルの塩害対策システムの総合フロー（塩害対策区間の特定）

② 塩害補修範囲の特定

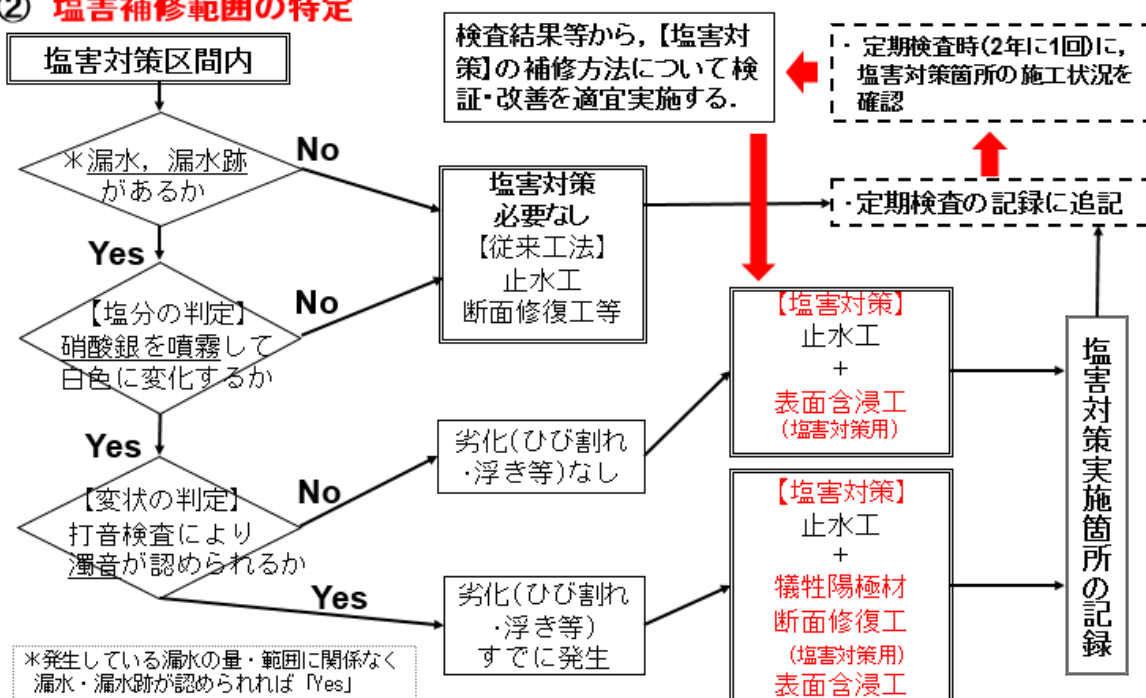


図 8-2-2 地下鉄トンネルの塩害対策システムの総合フロー（塩害補修範囲の特定）

8.3 まとめ

一般の鉄道事業者において地下鉄トンネルの塩害対策を実施するにあたり，塩害による影響が考えられる塩害検討区間の把握，トンネル漏水の塩化物イオン濃度による塩害対策区間の特定，漏水および漏水跡箇所での硝酸銀溶液の噴霧による塩分の有無の確認，そして打音検査によるコンクリートの劣化状況の確認を手順に従って進めることを示した「塩害対策システムの総合フロー」を用いることで，詳細な調査・検討を実施せずに塩害対策の効率的な補修が可能となった。

【第8章 参考文献】

- 1) 国土交通省，鉄道総研：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所，P11，2007.1.

第9章 結論および今後の課題

9.1 本研究の結論

地下鉄の箱型トンネルにおいて塩害は最も懸念されている劣化現象のひとつである。地下鉄トンネルの塩害による劣化過程を解明し、具体的な補修方法および補修計画が確立できたこと、および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」を構築したことは意義のある成果である。

なお、鉄道トンネルにおける列車の安全・安定運行の確保ということから考えれば、これらの塩害対策だけではなく、これまで長年に渡り実施してきた通常の検査および補修、そしてトンネル内の清掃、排水や通気性の改善等の維持管理をこれからも着実に実施していくことが重要である。

次に、本研究において得られた結果および知見をまとめる。

第1章では、東京メトロにおける地下鉄トンネルの現状および劣化状況から、限られた区間で塩害の被害が発生していること、その塩害の補修箇所において再劣化が発生しており、予防保全として塩害に対する抜本的な対策が求められていることを述べた。

また、東京メトロ営業線のトンネルの構造について、建設工法、使用コンクリートの配合等を示すとともに、コンクリート強度上は問題がないことを確認した。定期的実施されている検査結果から、感潮域河川下と交差・近接する箱型トンネルの区間は塩害による鉄筋腐食が多いことが判明し、その一例と代表的な漏水の発生部位とその塩害の劣化状況を示した。

第2章では、トンネルの変状として、山岳トンネルと都市トンネルの事例から一般的な原因と対策を示し、トンネル覆工の劣化についての研究内容を酸、中性化、その他に分類して紹介した。

塩害について地上構造物に対しては調査、研究が進んでいるが、トンネルに対しては調査、研究事例が少なく、海外の事例として香港の地下鉄海底トンネル等3事例を、日本の事例として関門鉄道トンネル等10事例を紹介した。このように地下鉄トンネルについては個別の報告はあるが、総合的かつ体系的に塩害の検討がなされた研究がほとんどなされていない現状について述べた。

第3章では、地下鉄トンネルにおいて塩害による影響範囲を調査するため、建設年次が古く、変状の多い箱型トンネルが感潮域河川下等と交差・近接する49箇所

を抽出した。そのうち、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の測定を行い、感潮域河川下および東京湾近郊に敷設されているトンネルの漏水は塩化物イオン濃度が高いことが判明し、49 区間を 5 つの環境種別に分類した。また、塩化物イオン濃度の測定結果および浸透流解析によるシミュレーションから漏水は河川境界より 50m を超えると塩化物イオン濃度の影響は極めて低い傾向であることを確認した。これら 49 区間について、河川境界より 50m を含んで塩害検討範囲とした。

第 4 章では、塩分浸透のメカニズムの調査として、コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布を測定するとともに、建設工法による防水工の有無からトンネル躯体の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。

その結果、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ことが判明した。また、地下水に含まれている塩化物イオンは、トンネル地山側からコンクリート内部にはほとんど浸透していないこと、浸透しても内面側よりも腐食の進行が遅いことから、トンネル内面側の漏水箇所に対して塩害対策を実施することを示した。

第 5 章では、塩害影響範囲の判定方法として、塩化物イオンを含んだ漏水によるトンネル内面側の面的な影響範囲は、基本的には漏水部分、漏水跡およびそこから約 300mm の範囲であることを確認した。さらに、塩害対策の補修を効果的に実施するため、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手法として、短時間で判定できる硝酸銀溶液噴霧法を考案した。

硝酸銀溶液の噴霧による発色の閾値を確認するため、漏水跡、補修跡およびその近傍において塩化物イオン濃度と発色の関係を確認する試験を実施した。発色の閾値は全塩化物イオン濃度 0.6kg/m^3 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示し、この方法を用いて塩害補修範囲を決定することを述べた。

第 6 章では、地下鉄トンネルに適した塩害補修方法の検討として、地下鉄トンネル特有である夜間作業時間（施工時間 1 時間 30 分程度）や建築限界、電気設備への影響という施工上の制約がある中で、塩害補修方法の基本方針を定めた。

そして、断面修復工法、電気防食工法および表面含浸工法の効果を確認するとともに、これらの組合せについても検討を行った。

次に記述した内容を要約する。

- ① 電気防食工法では電気設備への影響を考慮して流電陽極方式とし、トンネル内の建築限界による制約条件から埋設型の犠牲陽極材を用いることとした。分極抵抗から求めた腐食電流密度の測定結果等から、この方法は鉄筋腐食の進行抑制に有効であることを確認した。

- ② 塩化物イオンの浸透を抑制する工法として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。含浸材のコンクリート母体への浸透が深く、塩化物イオンの浸透が浅い液状の表面含浸工法の方がより効果が期待できることを確認した。
- ③ 3種類の犠牲陽極材と2種類の断面修復材、さらに塩分吸着型防錆材の組合せについて8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状況の試験を実施した。その結果、地下鉄トンネルにおける塩害対策の補修には犠牲陽極材、超速硬型低電気抵抗性ポリマーセメントモルタルおよび液状表面含浸材の組み合わせが適していることを確認した。
- ④ 犠牲陽極材を用いた鉄筋腐食の進行に関する効果持続期間を調査するため、犠牲陽極材から発生した積算電流値を用いた理論的な亜鉛の質量減少量と解体試験から実測した亜鉛の質量減少量等から、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章では、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選定表を作成した。防水工の有無と漏水の多さから開削工法によるトンネルと潜函工法・イコス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高濃度と低濃度に区分した。

塩害対策優先区間の選定表により、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区間およびB1の6区間は施工中である。優先度Aの6区間における施工実績から、塩害対策補修による施工単価の比較や塩害対策工事によるトンネル保守費への費用対効果を試算したことを述べた。

第8章では、一般的な鉄道事業者が地下鉄トンネルの塩害対策に用いることができる維持管理システムとして、簡易的に塩害対策工事を実施する塩害対策区間を特定するフロー、塩害補修範囲と劣化状態に応じた補修方法を特定するフローを合わせた地下鉄トンネルにおける「塩害対策システムの総合フロー」を作成し、提案した。

以上のことを結論としてまとめる。

予防保全の観点から、鉄筋腐食の原因である塩害に対して対策工事を実施していくために以下のことを行った。

○塩害検討区間の特定

- ・感潮域河川および東京湾近郊のトンネル漏水は塩化物イオン濃度が高い。
- ・箱型トンネルの河川等と交差・近接する区間（河川境界より50mを含む）を塩害検討区間とする。

○トンネル内面側の対策実施

- ・地下鉄トンネルは、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、鉄筋の腐食を起こす。
- ・トンネル内面側の漏水（漏水跡）部について塩害対策を実施する。

○塩害補修範囲および補修方法の特定

- ・塩害補修範囲の面的な境界を短時間で判定できる簡易手法として硝酸銀溶液噴霧法を考案し、漏水部分、漏水跡およびそれから約 300mm 内の範囲に噴霧することで塩害補修範囲を特定する。
- ・地下鉄トンネル特有の制約がある中で、塩害補修方法として犠牲陽極材、超速硬型低電気抵抗性ポリマーセメントモルタルおよび液状の表面含浸材が最適な組み合わせである。

○塩害対策工事の実施

- ・塩害対策優先区間の選定表を作成し、優先順位を付けて施工を実施する塩害対策区間を決定した。
- ・塩害対策工事として、優先度 A の 8 区間（1,446m）と B 1 の優先順位の高い 6 区間（4,417m）を実施する。

○「地下鉄トンネルの塩害対策システム」の構築

- ・地下鉄事業者が地下鉄トンネルの塩害対策として、日常補修で利用できる塩害対策システムの総合フローを構築し、提案した。

9.2 今後の課題

塩害対策工事が完成した後でも、定期的な検査（通常全般検査、特別全般検査）を活用し、塩害劣化が発生すると考えられる塩害対策区間については補修箇所の再劣化の有無、未補修箇所の塩害等劣化状況を監視できる体制を整えなければならない。それらを踏まえて、今回の研究からさらに実施していかなければならない課題については、以下のものが挙げられる。

(1) 漏水補修における方法・材料の検討

漏水補修としての止水工は、従来から実施している施工方法である程度の効果を得られているが、一部の補修箇所では漏水が止まらず再補修を行っている事例もある。より効果的で施工性に優れた漏水補修の方法および材料について検討を進めていくことが必要である。

(2) 犠牲陽極材の交換時期・取替方法・開発

今回の試験の結果から、塩害対策の補修方法で適用する犠牲陽極材については効果発現期間が 10 年程度である結果が得られている。しかし、交換時期の目安となる基準は定まっておらず、他機関の報告等を見ても犠牲陽極材を交換した事例は見当たらない。引き続き定期的に犠牲陽極材の設置個所における効果確認

のためのモニタリングを行い、その結果から交換時期の再評価する必要がある。

また、埋設型の犠牲陽極材は効果が減少すれば、再度コンクリートをはつり犠牲陽極材を取り出して交換することになるが、交換に伴うはつり作業は作業手間ばかりでなく既設コンクリート部材への影響も大きくリスクを伴う。したがって、取替えの簡便化が期待できる取替型犠牲陽極工法（表面部埋込型）の開発についても検討していく必要がある。

さらに、犠牲陽極材の防食効果は亜鉛量ばかりでなく、亜鉛を刺激し活性化させるバックフィル材の成分によるとの見解もある。地下鉄トンネルの塩害補修に適した犠牲陽極材について、今後も製品の開発状況に注視して効果を確認していくことが必要である。

(3) 表面含浸材の持続性

塩害対策の補修で適用する表面含浸材の効果については、試験の結果から撥水性および塩化物イオンの浸透阻止性に優れていることが確認されている。しかし、その効果の持続性に関しては、実績も含めて明確になっていない。外部からの劣化促進因子の侵入を阻止することは維持管理の観点から極めて重要な課題である。経年による塩化物イオン濃度の浸透深さ等のモニタリング調査を行い、効果の持続性を的確に把握し、定期的に塗り直していくようにするなどの対応を行っていく必要がある。

(4) シールドトンネルにおける塩害対策方針の決定

シールドトンネルにおいては、箱型トンネルに比較して建設後の経過年数が浅いこと、プレキャスト製品のためにコンクリートが緻密であることなどから、定期的な検査結果からも一部区間を除いて塩害の損傷が軽微である。したがって、今回の検討ではシールドトンネルを含む東京メトロの全路線における具体的な塩害対策計画は策定していない。

今後、営業線全線について調査な調査を行い、シールドトンネルの劣化状況や将来の劣化予測等を基に具体的な塩害対策計画を策定し、劣化の進行が予測される箇所には塩害補修工事を実施していく必要がある。

(以上)

謝 辞

私は昭和 60 年（1985 年）以来、鉄道の保守業務に携わり、線路やトンネルの維持管理を行ってきました。東京地下鉄(株)において、地下鉄トンネルの塩害対策が重要な課題となったことから平成 21 年（2009 年）度に設置された「地下鉄トンネル塩害対策検討会」に関わり、その結論から実際の塩害補修計画および工事を進められていることについて、本研究は改めてその内容を検証および分析してまとめたものであります。

本研究を進めるにあたり、「地下鉄トンネル塩害対策検討会」の時からご指導いただきました東京大学教授 岸利治博士には、ご懇篤なるご指導と暖かい励ましを頂戴いたし、完成するまでの長い期間、適切なご助言を賜わりここまでに至りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、東京大学大学院教授 石田哲也博士、東京工業大学特任教授 大即信明博士には研究の細部に至るまで、貴重かつ有意義なご指導を賜わり、論文を上梓することができました。東京大学大学院教授 前川宏一博士、野口貴文博士、東京大学准教授 長井宏平博士には論文の審査にあたり、有意義なご意見、およびご指導を賜りました。先生方には深く御礼申し上げます。

さらに、東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 小西真治様には、データ作成から文章構成、そして工程管理まで、終始全般にわたり大変なご指導、ご協力をいただいたからこそ、何とか論文を書き上げることができました。心から感謝申し上げます。

また、本論文のとりまとめに当たっては、東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 河畑充弘様、村上哲哉様、大槻あや様、新田裕樹様、(株)メトロレールファシリティーズ 安達光成様、大泉政彦様、(株)CORE 技術研究所 小椋様紀彦様を始め、各社の塩害対策に関係する皆様には多大なるご支援とご協力をいただきましたことをここに記し、改めて謝意を表します。

そして、(株)メトロレールファシリティーズ前社長 矢萩秀一様には、貴重なご意見をいただくとともに、多大なるご協力とご理解を賜わり、最後まで暖かく見守って下さいましたことに心より御礼申し上げます。

以上の方々を始め、データ提供など本研究のフィールドを与えてくれた(株)東京地下鉄と多くのご指導、ご助言、ご協力をいただきました関係各位に深甚なる謝意を申し上げます。

本研究で得られた成果が、地下鉄トンネルの塩害対策を含めた保守技術の進展に微力でも役立てられれば、これに勝る喜びはありません。

最後に、本論文の上梓まで何も言わず時間を与えてくれた家族に対し、感謝の言葉を贈ります。本当にありがとうございました。

2018 年 9 月 武藤 義彦