

地下鉄の地下コンクリート構造物を対象とした 塩害対策の取組

EFFORTS ON MEASURES AGAINST CHLORIDE INDUCED DETERIORATION FOR SUBWAY CONCRETE STRUCTURES

堀 元治¹・梯上 紘史²

Motoharu HORI¹, Koji HASHIUE²

We, Osaka Metro, have operated since 1933 and administered about the 130-kilometer-lines. About half of them were built before Osaka Expo in 1970. Since it's difficult for subway tunnels to rebuild, the period of the maintenance becomes very long. Therefore, we must take measures against the deterioration to be suited to the situation. Among these measures, we have been dealing with peeling from the tunnels. On the one hand, we haven't aggressively addressed chloride induced deterioration because we didn't clarify the details of it. On the other, the damage of chloride induced deterioration gets to bad faster than other factors, so we have to deal with it urgently. In this paper, first, we'll clarify the mechanism of chloride induced deterioration occurring in our concrete structures. Second, we'll decide the suitable maintenance policy to be suited to it in terms of the effectiveness, workability and cost. Last, we'll consider the measures against chloride induced deterioration and verify these effects.

Key Words : subway, maintenance, subway concrete structures, preventive maintenance, chloride induced deterioration, sacrificial anode material

1. はじめに

大阪市高速電気軌道株式会社（以下，Osaka Metro という。）の地下鉄は，約 130km（ニュートラムを除く）にも及ぶネットワークを形成し，うち約 5 割が 1970 年開催の大阪万博以前に建設されたものである．構造物の種類で見ると，約 9 割にあたる約 120km が地下構造物（開削トンネル約 80km，シールドトンネル約 40km）であり，その大半がコンクリート構造で築造されている．

地下鉄トンネルは，取替えが非常に困難な構造物であり，維持管理を行う期間が非常に長く，その間に構造物の劣化が進むのが一般的である．Osaka Metro では，これまで劣化に対する維持管理として，はく落に対する維持管理の検討・対策を進めてきたが，塩害については，対応が進んでいない状況であった．

本論文では，地下コンクリート構造物を対象に，まず次章に Osaka Metro における鉄筋コンクリート構造物の維持管理とその課題について述べ，3 章において Osaka

Metro で塩害の発生メカニズムについて明らかにする．4 章では塩害に対する有効な対策の検討と検証を行い，5 章において維持管理方針を設定したうえで，6 章において発生状況に応じた詳細な対策方法の設計と効果の検証について紹介し，最後に，7 章で Osaka Metro における地下コンクリート構造物の塩害に対する維持管理について総括する．

2. Osaka Metro における鉄筋コンクリート構造物の維持管理と課題

地下鉄構造物は，将来に亘り，地下鉄の安全・安定輸送を確保するため，要求性能であるトンネル構造の安定性（トンネルが崩壊しないこと）及び，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はく落が生じないこと）を満たすように，適切に維持管理することが必要である．

キーワード：地下鉄，維持管理，地下コンクリート構造物，予防保全，塩害，犠牲陽極材

¹非会員 大阪市高速電気軌道株式会社 鉄道事業本部 工務部 Osaka Metro Co. (E-mail: hori-m371@kotsu.city.osaka.lg.jp)

²非会員 大阪市高速電気軌道株式会社 鉄道事業本部 工務部 Osaka Metro Co.

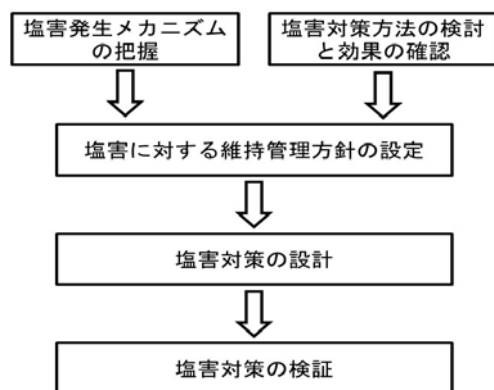


図-1 塩害対策の検討フロー

Osaka Metroでは、時代を取り巻く環境と技術に応じて策定した維持管理計画を基本に、劣化状況や速度に応じて、従来の事後保全から予防保全への転換を図っており、これまでの取組と課題についてまとめている。

(1) はく落に対する維持管理

Osaka Metroが実施した過去の調査では、要求性能のうち、トンネル構造の安定性には問題ないものの、構造物の状態によっては、はく落に対するリスクは抱えていることが分かった。一方で、リスク回避のためのはく落対策は、トンネル構造の安定性を主眼に置いた対策ではないことから、対応後も構造物の維持管理が必要であり、特にトンネル構造の安定性に関わる維持管理ができる環境確保が重要であった。

そのため、Osaka Metroでは、「要求性能を脅かすコンクリート片のはく落を抑制する」「はく落対策後も内空を確保するための耐力を有する構造物を直接目視して維持管理を行う」という維持管理ビジョンのもと、時代の技術に応じたはく落に対する対策を順次進めてきた¹⁾。

初期の対策としては、有効な透明で可視性のあるシート接着方法がなく、可視性のないシートを採用すると対策後に目視を主体とした維持管理が出来ないことから、可視性を確保でき、撤去が容易な剥落防止ネットの設置をはく落対策として実施してきた。

中期の対策としては、課題であった透明なシートの開発により広範囲での対策が可能となったことから、シールド二次覆工への二方向繊維シート接着による予防保全対策を実施してきた。

現在の対策としては、二方向繊維シート接着による対策では想定されるはく落規模が小さい函型構造物に対しては効率性を欠くという、課題を解決する1層で施工可能な技術開発により施工性の高い対策が可能となったことから、中性化抑制効果を有し、想定されるコンクリート片が剥離しても落下しない強度を持つ、函型構造物への可視性のある特殊有機短繊維混合アクリル樹脂の表面被覆による予防保全対策を実施している。

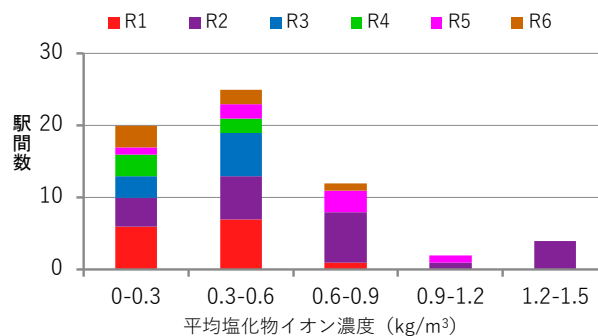


図-2 各駅間平均塩化物イオン濃度別 度数分布
(R1~R6 塩分調査実施 63 駅間)
[漏水等の影響を受けない部位での調査結果]

(2) 塩害に対する維持管理の課題

(1)の維持管理では、塩害に対する有効な検討が進められておらず、他の要因に比べて劣化の進行が速い塩害対策が課題であった。また、塩害と思われる顕在化した劣化が確認された箇所が限定的ではあるが見られるようになり、対応を検討していく必要があった。

この検討にあたっては、図-1に示す検討フローを設定し、Osaka Metroにおける塩害発生メカニズムを明らかにするとともに、有効な塩害対策を検討し効果を確認した。さらに、有効性・施工性・コストの側面から、発生メカニズムに適した維持管理方針を設定し、発生箇所に応じた詳細な対策方法を策定して効果の検証を行った。

3. 地下コンクリート構造物における塩害発生メカニズムの把握

Osaka Metroの地下コンクリート構造物において、塩害が発生するメカニズムについて、塩分供給源を明らかにし、その供給源からの影響について調査を行っている。

(1) 塩分供給源

Osaka Metroでは、過去に地下コンクリート構造物のコンクリートコアを用いた塩化物イオン濃度の調査を行っており、漏水等の影響を受けない部位での調査結果を図-2に示す。

調査の結果では、漏水箇所以外で塩分濃度が高い箇所が少ないことから、地下コンクリート構造物における塩分侵入経路のほとんどが漏水であると考えられ、内在塩分による塩害発生可能性がある箇所は少なく、外来塩分による影響が卓越する傾向にあることが分かった。

また、構造物に塩害の影響を与える可能性のある塩分濃度の漏水が発生する範囲は、感潮河川域以外ではほとんどなく、感潮河川域（安治川～堂島川、木津川～土佐

- 【凡例】
- 漏水 塩分濃度測定結果 (500mg/l以上)
 - 漏水 塩分濃度測定結果 (500mg/l以下)
 - コンクリート 塩分濃度測定結果 (2.4kg/m³以上)
 - コンクリート 塩分濃度測定結果 (1.2~2.4kg/m³)
 - コンクリート 塩分濃度測定結果 (1.2kg/m³以下)

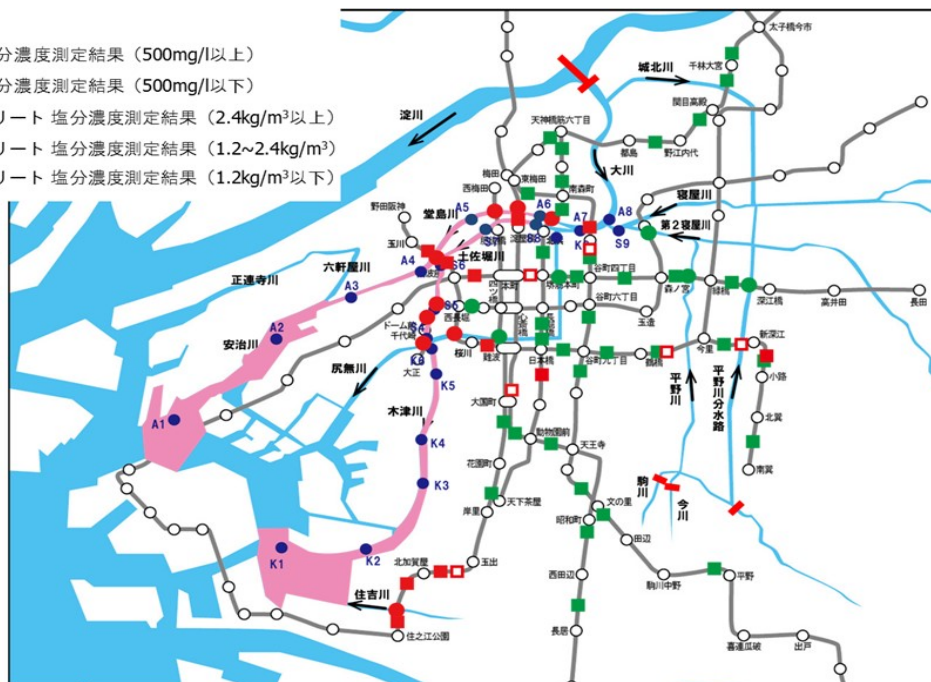


図-3 塩分を含む漏水発生範囲の推定

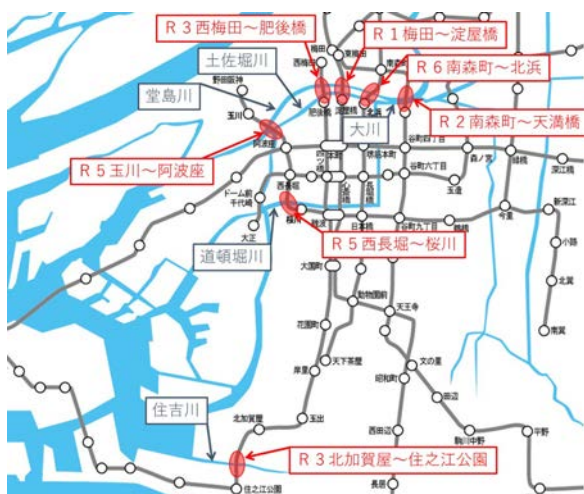


図-4 感潮河川横過部の塩害影響範囲図

堀川)の横過部に限定されることが分かった(図-3, 図-4)。

以上から, Osaka Metroの地下コンクリート構造物においては, 塩害の塩分供給源は感潮河川横過部前後で発生した, 塩分を含んだ漏水であると言える。

(2) 塩分を含んだ漏水の影響

ここでは, 塩分を含んだ漏水の影響を確認するため, 感潮河川域の漏水部において漏水から離れる方向に等間隔でコアを採取し, 深さ方向の塩分濃度について調査した。また, 硝酸銀溶液の噴霧による反応境界により影響範囲を確認した。結果の一例を図-5に示す。

塩化物イオン濃度は, コンクリート表面に近いほど高いことから, 漏水に含まれる塩分は構造物の内側表面から浸透しており, 塩分を含んだ漏水からの影響範囲は限定的であった。ただし, その範囲は一定範囲ではなくば

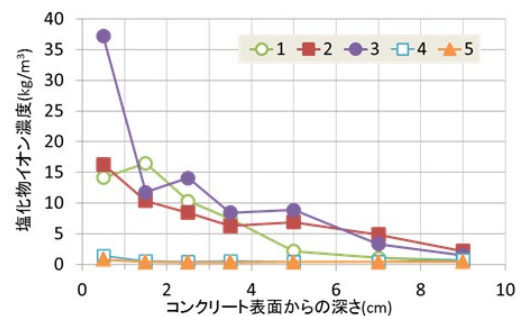
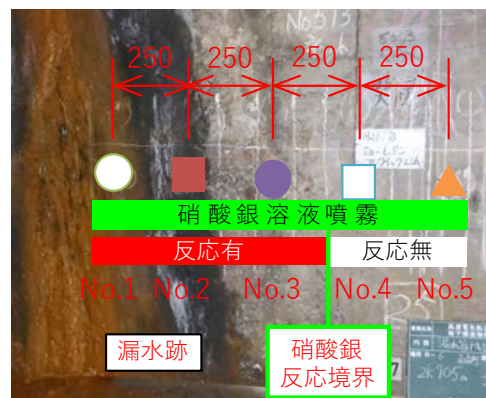


図-5 塩分を含んだ漏水の影響範囲

らつきがあり, その都度硝酸銀溶液を噴霧することにより特定する必要がある。

(3) 塩分発生メカニズム

以上から, Osaka Metroにおける地下コンクリート構造物の塩害は, 次のようなメカニズムであると言える。

○感潮河川からの外来塩分による影響が卓越し漏水により塩分が構造物内側表面から浸透している

○塩分を含んだ漏水の影響範囲は限定的であるが場所ごとに範囲が異なるので硝酸銀溶液を噴霧する必要がある

表-1 外付け犠牲陽極材の試験施工

方法	通常の犠牲陽極材の使用法	犠牲陽極材をコンクリート表面に設置(今回試験施工)
概念図		
メリット	・犠牲陽極材の使用実績が多数あり、効果が明確	・コンクリートのはつりが少なくでき(最小限)、塩害顕在化前の対策に向いている
デメリット	・健全なコンクリートをはつりとする必要がある	・使用実績がなく、効果の確認が必要

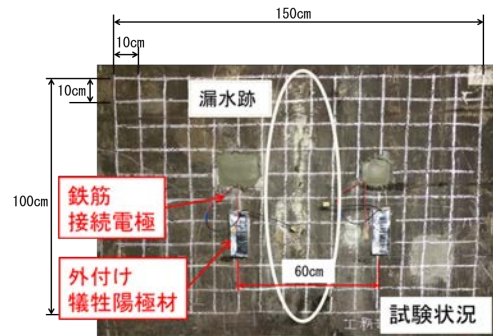


図-6 外付け犠牲陽極材設置状況

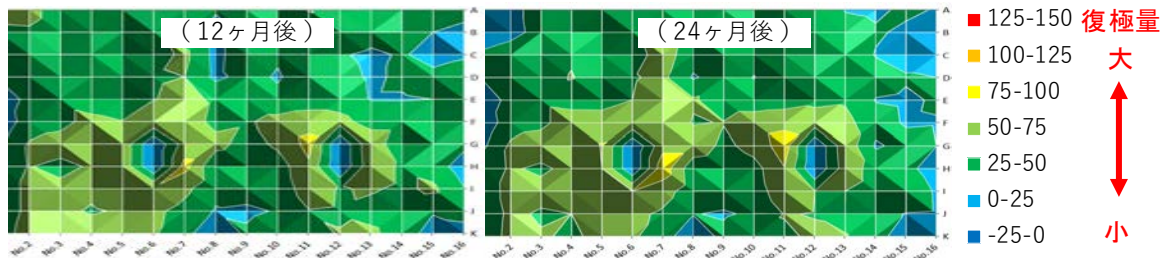


図-7 復極量調査結果(施工後24ヶ月後まで)

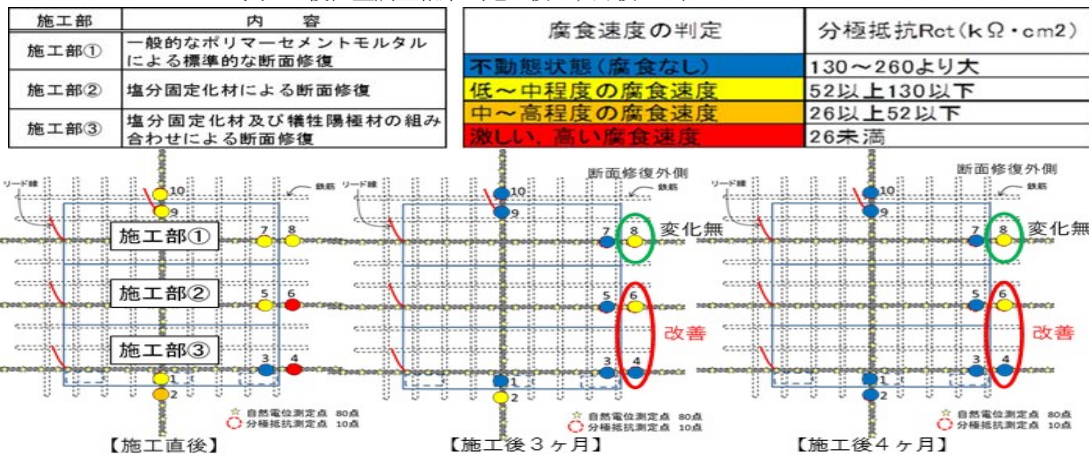


図-8 塩分固定化材入り断面修復材の試験施工と効果確認

4. 塩害対策方法の検討と効果の確認

塩害対策方法については、塩害発生のメカニズム、塩害による構造物の状態を勘案すると「塩分が供給され続ける箇所」「塩害が既に顕在化した箇所」が存在することからこの二つの対策を念頭に入れて、犠牲陽極材、塩分固定化材入り断面修復材を対象に検討を進めた。

(1) 外付け犠牲陽極材

コンクリート内の鋼材は、塩化物イオン等により不動態被膜が破壊されると腐食部と健全部との間に電位差が生じ、腐食電流が流れ鋼材腐食が進行する。この腐食反応に対しては、防食電流を流すことで腐食部と健全部との電位差を解消する方法である電気防食工法があり、地下のトンネルであることを考慮すると、外部電源を必要としない犠牲陽極材を用いた対策が、塩分が供給され続ける箇所に有効であると考え、検討を行った。

また、犠牲陽極材を直接鉄筋に接続する従来の方法では、新設、取替の都度健全なコンクリートをはつり出す

必要があり、構造物の健全性・維持管理面に課題があった。そこで今回、取替時のはつり量を少なくできる外付け犠牲陽極材を開発し、試験施工を実施して効果の確認を行った(表-1、図-6)。

効果確認は、復極量(犠牲陽極材Off時とOn時の自然電位の差)を用い、腐食がほぼ停止する50mV以上を目安として行った。復極量は、設置後概ね6ヶ月後に目安となる50mVを安定して観測し、その後24ヶ月経過後も継続して測定範囲内でプラスの復極量が観測された。その範囲は犠牲陽極材を中心に約半径30cmの範囲となっており、外付け犠牲陽極材の効果が確認された(図-7)。

(2) 塩分固定化材入り断面修復材

Osaka Metroでは、コンクリートの変状が顕在化した断面欠損箇所は原形復旧を基本としているが、塩害が既に顕在化した変状に対して通常の断面修復を行った場合、マクロセル腐食が懸念される。今回、その対応として、塩害が顕在化した箇所の対策として塩分固定化材入り断面修復材の検討を行った(図-8)。

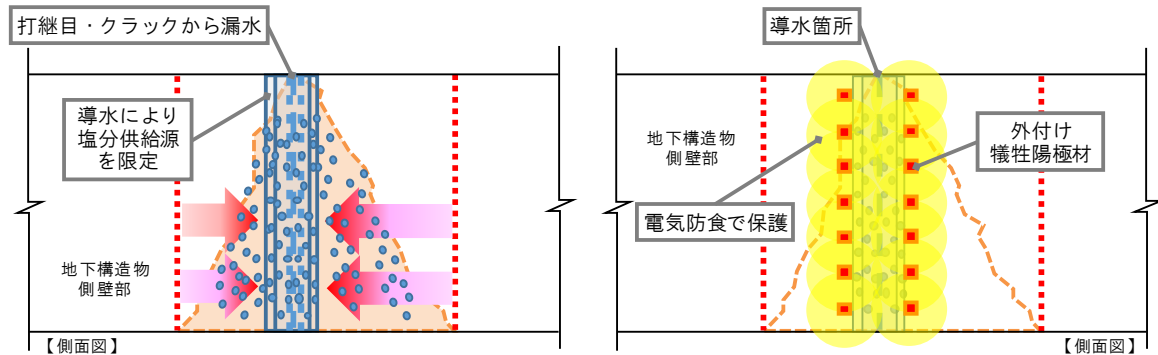


図-9 対策1（塩分が供給される箇所）

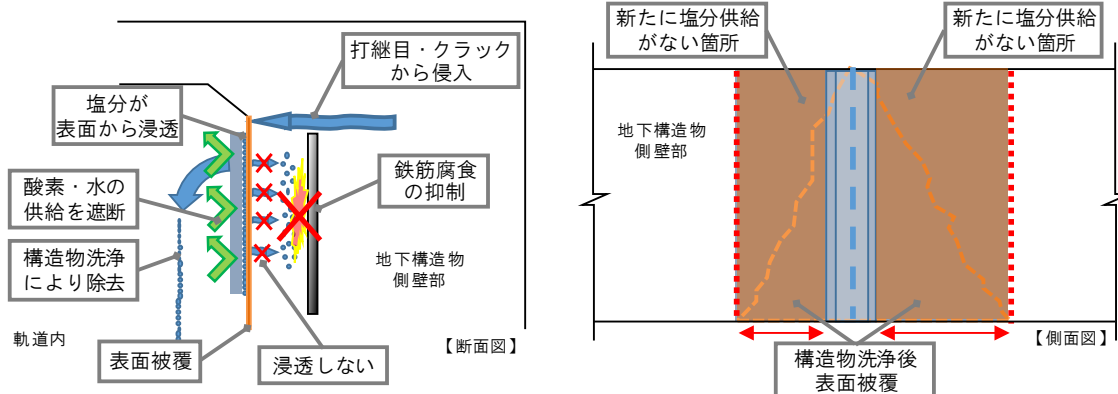


図-10 対策2（塩分供給が断たれた箇所）

検討は、3ケース行っており、塩分固定化材入り断面修復材のみの施工部②においても断面修復部と境界面との両方で分極抵抗の値が高くなり、腐食環境が改善されていることが示された。これは、断面修復外側の自由塩化物イオンが断面修復側に取込まれたと考えられ、境界面でのマクロセル腐食が抑制される環境となり、塩分固定化材入り断面修復材の効果が確認できた。

5. 塩害に対する維持管理方針の設定

地下コンクリート構造物における塩害は、塩分を含んだ漏水が列車風等により飛散され、付着した構造物内側表面から浸透していくメカニズムで発生する。今回の検討では、塩害対策、対策後の維持管理を可能な限り低減することを目指し、塩害対策方法の適応性を勘案して、次の方針を設定した。

【維持管理方針】

- 塩分の供給源を最小限にすることにより、塩害範囲を最小限にする
- 塩害対策は「塩分供給される箇所」「塩分供給が断たれた箇所」「塩害により変状が顕在化した箇所」に応じて行う

6. 塩害対策の設計

塩害対策は、塩害による構造物の状態について考えられるケースを想定し、次の(1)～(3)の内容を整理して組み合わせることで、発生状況に応じて設計することとした。

(1) 塩分供給される箇所の設計

地下コンクリート構造物では、発生する漏水を完全に止水することは一般的に難しい。ここでは、塩分を含んだ漏水の飛散を防ぐことを方針として、これまでの維持管理でも実績のある「導水樋」を用いて導水し、塩分供給源を最小限にする方法を採用することとした。

導水箇所は、漏水により塩分が供給されるため、継続的な腐食対策として導水箇所を包含するよう外付け犠牲陽極材を設置することにより防食対策を図ることとした（図-9）。外付け犠牲陽極材の設置間隔は、鉄筋の防食効果が期待できる30cmとし、その配置が可能なように導水樋の幅を30cmとした。

対策1：導水 + 外付け犠牲陽極材

(2) 塩分供給が断たれた箇所の設計

漏水が拡散されていた箇所は、導水樋の設置により、塩分の低減はないものの新たな塩分供給がなくなる。従って、当該箇所は塩害のリスクが大幅に低減されることとなるため、大気を遮断することにより腐食の顕在化を抑えることが可能で、また万が一のはく落にも対応できる実績のある表面被覆を採用することとした（図-10）。

表-2 対策箇所の状況に応じた対策

対策箇所の状況 漏水 / 変状	詳細状況 漏水 / 変状	対策 1	対策 2	対策 3
漏水あり / 変状あり	新たに塩分が供給され続ける / 塩害による変状が顕在化している	○	○	○
漏水なし(漏水跡) / 変状あり	過去に塩分供給があったが今はない / 塩害による変状が顕在化している	-	○	○
漏水あり / 変状なし	新たに塩分が供給され続ける / 塩害による変状が顕在化していない	○	○	-
漏水なし(漏水跡) / 変状なし	過去に塩分供給があったが今はない / 塩害による変状が顕在化していない	-	○	-

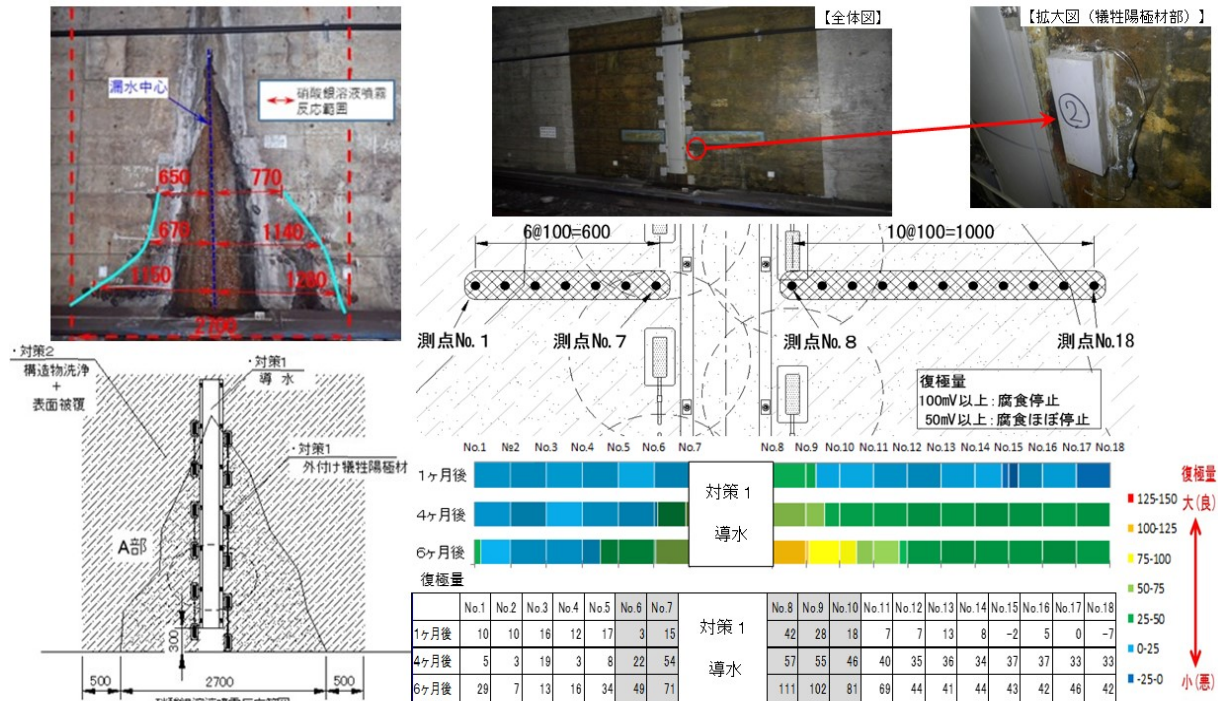


図-11 営業線内試験施工 (対策1+2)

被覆は、硝酸銀溶液噴霧反応範囲の両側500mm余裕を加えた範囲とし、被覆する際には塩分を可能な限り除去するため硝酸銀溶液を噴霧し反応があった範囲を包含する範囲を洗浄して施工することとした。

対策2： 構造物洗浄 + 表面被覆

(3) 既に塩害により変状が顕在化している箇所の設計

漏水の拡散箇所でコンクリートの劣化が顕在化した箇所は、塩化物イオンが既に鉄筋位置まで達していることを示していることから、効果の確認できた塩分固定化材入りの断面修復材を用いて修復する方法を採用することとした。

対策3： 塩分固定化材入りの断面修復材

(4) 組み合わせによる塩害発生状況に応じた対策

塩害は、現場により発生状況が異なるため、前述の対策1から対策3までを組合わせて対策を設計することとし、そのケースを表-2に示す。

検証は、対策1と対策2を組合わせたものを設計して営業線内で試験施工を行っている(図-11)。

結果として、塩分を含む漏水を絞り込んだ導水樋の周囲に設けた犠牲陽極材から半径30cmの範囲内の計測点

(No.6～10)において、腐食がほぼ停止する値である50mV以上の復極量が概ね得られ、営業線内の試験施工においても、外付け犠牲陽極材による対策が有効であることが確認された。また、表面被覆についても目視により問題が生じていないことを確認している。

7. おわりに

今回、課題であった塩害について、地下コンクリート構造物での塩害発生メカニズムを明らかにするとともに、有効性・施工性・コストの側面から、維持管理方針を設定し、詳細な対策方法を検討して効果の検証を行うことで、今後の維持管理を明確にすることが出来た。一方で、今回の対策は、トンネルの側壁を対象として進めてきたところもあり、天井での施工など課題もあるので技術の進歩などを勘案しながら検討を進める必要もあると考えている。

参考文献

- 堀元治, 梯上紘史: 地下鉄の地下コンクリート構造物を対象として時代の技術を取り入れた維持管理と最新の取組, 第23回地下空間シンポジウム, C2-3, pp193-198, 2018