

# 河川下の地下鉄潜函トンネルの塩害対策工事

## CHLORIDE ATTACK COUNTERMEASURE CONSTRUCTION OF SUBWAY CAISSON TUNNEL UNDER THE RIVER

亀井 啓太<sup>1\*</sup>・阿部 敏秀<sup>2</sup>・野口 正則<sup>3</sup>・辻口 貴大<sup>4</sup>

Keita KAMEI<sup>1\*</sup>, Toshihide ABE<sup>2</sup>, Masanori NOGUCHI<sup>3</sup>,  
Takahiro TUJIGUCHI<sup>4</sup>

In the subway tunnel, there is a place which is particularly caused deterioration due to chloride attack under tidal rivers. As a result of a detailed investigation, the caisson tunnel near the tidal river of the Tokyo subway Co., chloride attack due to water leakage that contains the seawater and the equivalent of salt in the joints between the box-body has occurred. Was also carried out the measures of Engineering in the past with respect to this chloride attack point, it was confirmed that the subsequent redegradation is happening. In recent years, this chloride attack for the occurrence conditions, research and analysis of the occurrence range, performs a comprehensive examination such as examination of the development and drastic repair method of a simple survey methods required range of repair, to ensure against chloride attack was to repair can be like. In this paper, we report on the chloride attack countermeasure work a combination of sacrificial anode material engineering and a crosssectional repair factory using a sacrificial anode material that details and the current implementation of the results of these studies.

**Key Words :** chloride attack, tidal rivers, subway tunnel, sacrificial anode material

### 1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、「東京メトロ」という。）は9路線、営業運転キロ195.1kmの土木構造物を維持管理しており、そのうち約85%の166kmがトンネルである。トンネルは、特に感潮域河川下において漏水中の塩化物イオン濃度が高いため、塩害による劣化を生じている箇所が存在する。そのような塩化物イオンを含む漏水による部材の材料劣化が見られたため、対策工事を施工した<sup>1)</sup>。

現状では変状が認められない箇所も含めて適切な維持管理を行っていくため、東京メトロでは、中長期的な予防保全対策を検討することとし、現地調査及び各種測定結果に基づいて東京メトロにおける塩害発生条件をとりまとめ報告した。さらに調査を進めるにつれ、塩化物イオンを含んだ漏水と塩害の関係や感潮河川の影響等が解明できた。その結果から、感潮河川の直下および河川端

から約50mの範囲が地下鉄トンネルにおける塩害の要注意範囲であると判断した。

また劣化を生じた箇所は、逐次補修対策を実施しているが、漏水に起因する塩化物イオン量が多いことから、一部の断面修復箇所では著しいマクロセル腐食が認められる。抜本的な効果が期待できる工法として、電気防食工法と断面修復工法を組合せた工法に着目し検討を行った。

本稿では、東京メトロで行った調査・検討結果の詳細、及び現在営業線トンネル内で実施している、犠牲陽極材を用いた電気防食工と断面修復工を組合せた塩害対策工事について報告する。

### 2. これまでの塩害に対する調査・検討

東京メトロのトンネルでは、河川等との交差、近接し

キーワード：塩害、感潮河川、地下鉄トンネル、犠牲陽極材

<sup>1</sup>正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部土木課 Structure Section, Infrastructure Maintenance Department, Tokyo Metro Co. Ltd.  
(E-mail:k.kamei.t6c@tokyometro.jp)

<sup>2</sup>非会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部土木課 Structure Section, Infrastructure Maintenance Department, Tokyo Metro Co. Ltd.

<sup>3</sup>非会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部土木課 Structure Section, Infrastructure Maintenance Department, Tokyo Metro Co. Ltd.

<sup>4</sup>非会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部土木課 Structure Section, Infrastructure Maintenance Department, Tokyo Metro Co. Ltd.

ている箇所は75区間あり、そのうち箱型トンネルは49区間存在する。

平成20年度から平成25年度にかけて感潮河川下での詳細な調査を行い、その結果箱型トンネルの塩害に関して、以下のような事柄が明らかになった。

また対策工を行うにあたり、営業線トンネル内において地下鉄の場合他の鉄道事業者に比べ、作業時間が短いため、現場で簡易な手法で塩害範囲を特定できる手法を開発した。

#### (1) 塩害発生条件<sup>2)</sup>

- ① 地下鉄の箱型トンネル区間の塩害の場合、沿岸構造物のように飛来塩分が部材全体に作用する場合とは異なり、塩化物イオンを含む漏水近傍で局所的に進行するケースが多い。
- ② ただし、過去からの漏水が著しい場合は、その影響範囲が広がっている。

#### (2) 塩害範囲<sup>3)</sup>

- ① 開削トンネルの塩害に対する要注意範囲は、感潮河川の直下および、河川端から50m程度の範囲と考えられる。
- ② コンクリート中の塩分量は、漏水位置で高いものの、その周囲にはほとんど認められず、開削トンネルの塩害は局所的な劣化現象であると考えられる。

#### (3) 塩害対策工<sup>4)</sup>

- ① 地下鉄トンネルにおいて犠牲陽極材の試験施工を実施し、防食効果が得られる。
- ② 地下鉄トンネルの環境条件、施工条件を考慮した場合、表面含浸材は塩化物イオンのさらなる浸透を抑制する効果を有する。
- ③ 犠牲陽極材の防食効果の持続性は、室内試験の結果からは、概ね10年程度と推測される。

#### (4) 塩害影響範囲の特定手法<sup>5)</sup>

- ① 塩害範囲を容易に短時間で把握できる簡易手法として、硝酸銀溶液噴霧法を新たに開発した。
- ② 塩化物イオンを含んだ漏水の影響範囲は、基本的には漏水部分あるいは漏水痕から200～300mmの範囲であることを確認した。

### 3. 東京メトロにおける塩害対策の方針

これまでの塩害に対する調査・検討を踏まえ、塩害対策における方針を整理した。

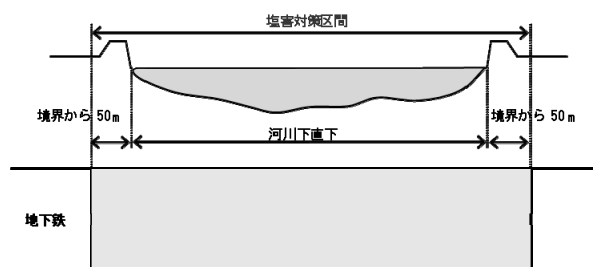


図3-1 塩害対策区間

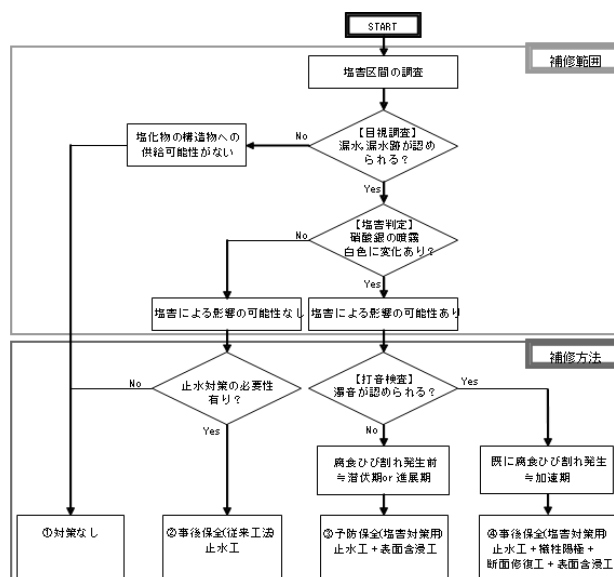


図3-2 現地判断・施工の基本フロー

#### (1) 塩害対策区間

塩害劣化が懸念される感潮河川下と交差近接する境界直下から50m前後を基本とする（図3-1）。さらに、境界直下から50mを越えて塩害による劣化が懸念される場合は、それらも塩害対策区間とする。

#### (2) 現地判断・施工の基本フロー

図3-2に示すフローにより現地判断を行い、対策方法を選定する。なお、実施工においてフロー図の通りに行かない場合は、コンクリート診断の専門知識を有する者が状況に応じて判断する。

#### (3) 補修範囲の考え方

基本的な補修範囲は、コンクリート表面部に塩化物イオンが付着しているか否かの境界までを範囲とする。補修範囲の決定に当たっては硝酸銀噴霧法を用いることとし、その状況を図3-3と写真3-1に示す。補修範囲の決定後は、断面修復工の範囲及び、表面含浸工の塗布範囲の特定を行う。断面修復工の範囲は、漏水および漏水の痕跡が疑われる箇所で、打音検査などによって濁音が認められる範囲（浮きや補修部の再劣化など）や、鉄筋腐食によって剥落が生じている範囲を対象とする。

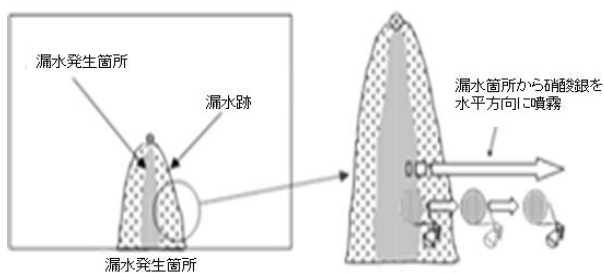


図3-3 硝酸銀噴霧法

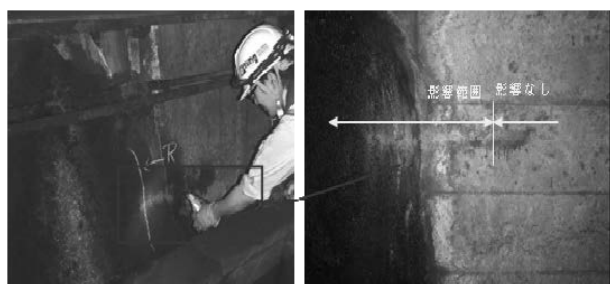


写真3-1 硝酸銀噴霧法

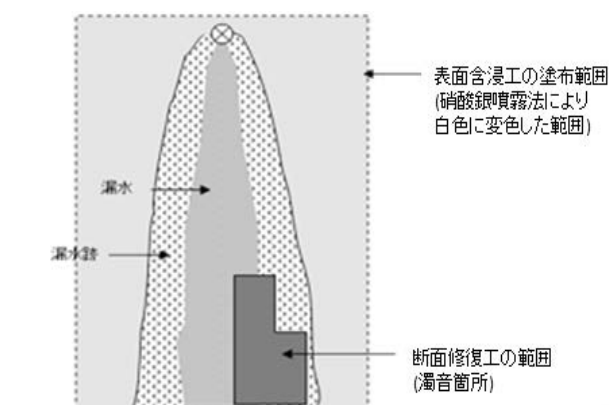


図3-4 各補修範囲の概略図

また表面含浸工の塗布範囲としては、硝酸銀噴霧法により、コンクリート表層部に塩化物が付着していると判定される範囲に、断面修復工を実施した箇所を併せた範囲までを対象とする。各補修範囲の概略図を図3-4に示す。

さらに塩害によって生じた変状は、施工時の継ぎ目や乾燥収縮ひび割れ等で生じた箇所からの漏水(漏水跡)近傍に発生するが、その変状が単体で生じている場合と、複数近接して認められる場合がある。そのため、これら近接して複数変状が生じている場合は、補修範囲をまとめて補修する(注：補修範囲であり、はつり範囲ではない)。図3-5に概略図を示す。

また、漏水跡が多く連続して連なったように認められる箇所や、止水対策後に別の場所から再漏水が頻繁に生じたり、季節により漏水が増加する可能性がある区間については、その区間全体に対して、予防保全的に表面含浸工を実施することも考えるものとする。

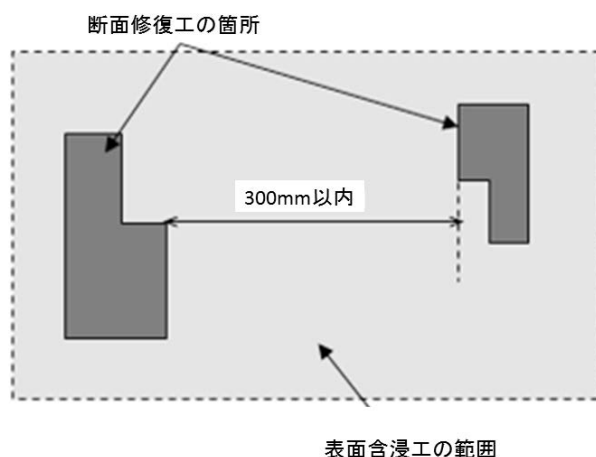
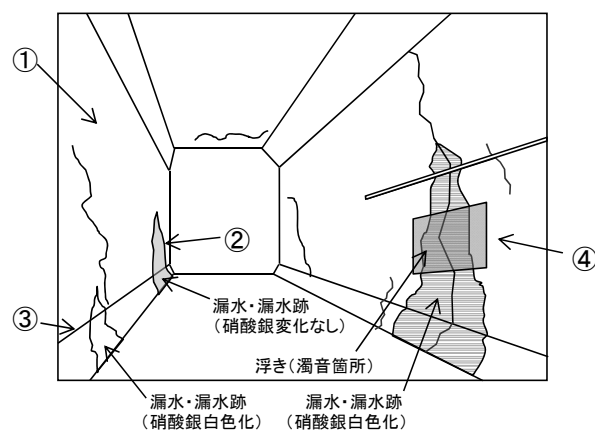


図3-5 複数変状が生じている補修対策範囲

表3-1 塩害対策における基本工法

No	変状状態	補修工法
①	漏水・漏水跡なし	対策なし
②	漏水・漏水跡あり (硝酸銀変化なし)	止水
③	漏水・漏水跡あり + 硝酸銀白色に変化	止水 + 【塩害工法】表面含浸
④	漏水・漏水跡あり + 硝酸銀白色に変化 + 濁音	止水 + 【塩害工法】犠牲陽極 + 断面修復 + 表面含浸



#### (4) 補修方法

補修方法は、①止水工、②表面含浸工、③断面修復工、④電気防食工(流電陽極方式：犠牲陽極)から選定することとし、劣化状態に応じてこれらの工法の併用を検討する(基本フローによる)。塩害対策における基本工法について、表3-1に示す。

断面修復工におけるはつり範囲は、外観変状(浮きや補修部の再劣化など)が生じている箇所で行うこととし、ブレーカーおよびチッパーを使用して、劣化部のかぶりコンクリートを除去する。ただし、はつり跡から目視で確認できる最外縁の鉄筋に、鉄筋の腐食が生じて

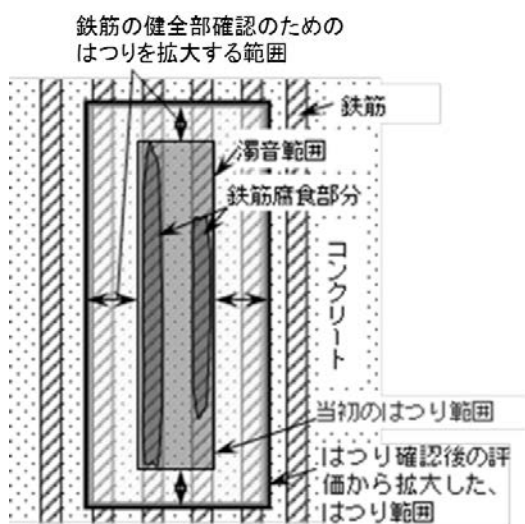


図3-6 はつり範囲

いない事が前提とする。もし鉄筋が腐食している場合には、はつり範囲を拡大し健全な鉄筋が現れるまでを範囲とする。

さらにはつり深さは、腐食した鉄筋を認めた場合、鉄筋露出後さらに、鉄筋から20mm程度深くはつる事を基本とする(図3-6)。この20mmは、鉄筋背面のケレン作業(鉄筋腐食部の除去)や、犠牲陽極材の設置が実施できる最小限度であるとしている。

またはつり後出した鉄筋の状態について、表3-2に示す「社団法人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」の鉄筋の腐食度判定に準拠して評価し、鉄筋の処置を決める。腐食度0～Cでは断面減少はほとんどないとして判断してよいが、これ以上の腐食ランクである腐食度D(写真3-2)では、鉄筋の断面欠損が著しいため、新しい鉄筋で取り替えるか、表3-3の重ね継ぎ手の要領で補うこととする。

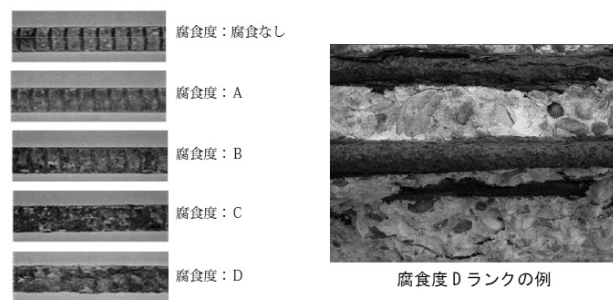
最後に犠牲陽極材設置後は、デジタルメルチメーター(直流電圧計)やテスター等を用いて導通の確認を行う。導通の目安としては、直流の電圧で1mV以下(もしくは直流抵抗で3Ω以下)であることを確認する。1mVを越えている場合は、鉄筋軟鋼線と鉄筋間との導通が低い(電気が流れにくい)状態であり、犠牲陽極材設置位置の軟鋼線接続部分の鉄筋について、再度ケレンを実施し、設置し直すこととする(図3-7)。

表3-2 目視による鉄筋の腐食度判定

腐食度	腐食状態
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

※社団法人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」



「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針」より

写真3-2 鉄筋の腐食度評価に関する参考写真

表3-3 鉄筋の重ね継手長

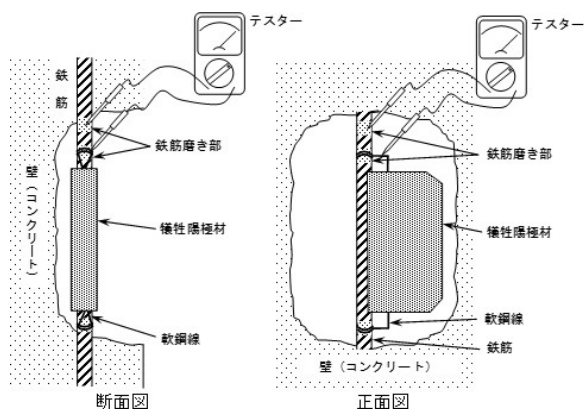
SD345 $\sigma_{sa}=2000\text{kgf/cm}^2$					単位: mm
$\phi$	$\sigma_{ck}$	210 $\tau_{oa}=14\text{kgf/cm}^2$	240 $\tau_{oa}=16\text{kgf/cm}^2$	270 $\tau_{oa}=17\text{kgf/cm}^2$	300 $\tau_{oa}=18\text{kgf/cm}^2$
D13		465	407	383	362
D16		572	500	471	445
D19		679	594	559	528
D22		786	688	648	612

引張鉄筋の重ね継手長

$$L = \frac{\sigma_{Sa}}{4 \cdot \tau_{oa}} \cdot \phi$$

ただし 20φ以上とする。  
ここに  $\sigma_{Sa}$ : 鉄筋の許容引張応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\tau_{oa}$ : コンクリートの許容付着応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\phi$ : 鉄筋径

出典(財)日本橋梁建設協会デザインデータブック



- ①軟鋼線と鉄筋(ケレン部分)間に、それぞれテスター棒を当てる。
- ②テスターのレンジ切替スイッチを直流電圧に併せる。
- ③直流電圧が 1mV 以下であることを確認する。
- ④直流電圧が 1mV を越えている場合は、一旦犠牲陽極材を取り外して、犠牲陽極材設置位置の軟鋼線接続部分の鉄筋について、再度ケレン(紙ヤスリ等でも可)を実施し、再測定を行う。

図3-7 導通確認要領図

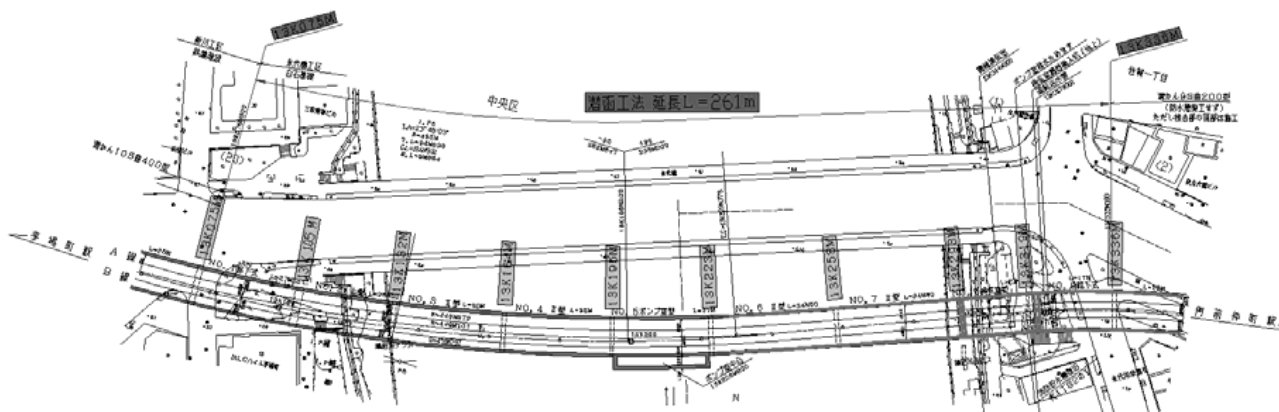


図4-1 施工位置平面図

表4-1 トンネルの諸元

区 間	東西線 茅場町駅～門前仲町駅間
構造形式	潜函トンネル
基 数	9基(隅田川下部7基、陸上部2基)
着 工	昭和38年6月
竣 工	昭和41年4月
曲線半径	茅場町方R=450m 門前仲町方R=250m の緩いS字型

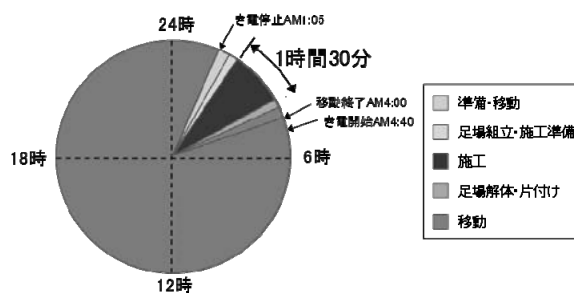


図4-2 工事のタイムサイクルの例

#### 4. 工事概要

##### (1) 工事箇所

工事箇所は、東京メトロ東西線茅場町駅～門前仲町駅間における、隅田川を横断する約320mの区間(河川端から約50mを含む)である。トンネルの諸元を表4-1に、工事箇所平面図を図4-1に示す。

##### (2) 作業時間

トンネル内であるため、営業線トンネル内での施工は夜間き電停止後にしか行えず、作業時間帯も通常1:00～4:00までと制限された。さらに保守用車の通過待機や、列車の留置変更等によりき電停止時間の繰り下げ、き電開始時間の繰り上げ等が発生することもあった。一方で、足場の組立しや鉄道施設物の防護、片づけ等を加味すると、実際の作業時間は正味1時間30分程度しかなく、作業時間の確保が非常に厳しい条件にあった(図4-2)。

##### (3) 施工状況

###### a) 現場調査

周期的に実施するトンネル通常全般検査や、巡回等により漏水や漏水跡、モルタルの剥離、浮き等の有無について構築に変状が見られないか日々点検を実施している。

これらの点検により判明した構築の変状が見られる箇所について構築表層部に塩化物が付着しているか否かを



写真4-1 硝酸銀噴霧状況



写真 4-2 打音・目視調査状況

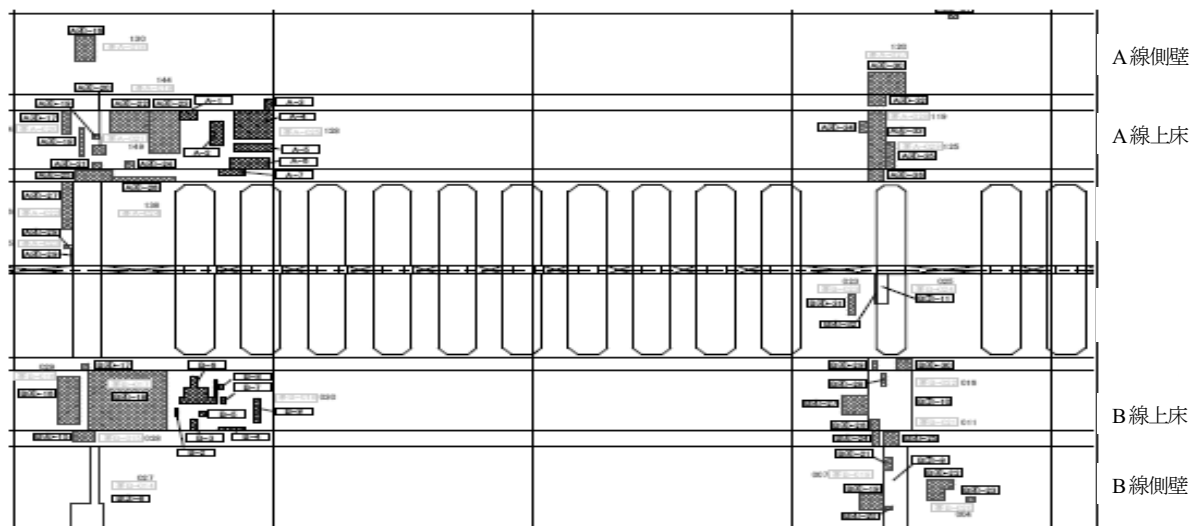
確認する目的で硝酸銀を噴霧し、白色に変色が見られた箇所について再度目視調査及び打音調査を実施し、ひび割れや浮き、濁音等がないかを確認した(写真4-1、4-2)。

塩害発生可能性がある箇所については、断面補修範囲を実測及びマーキングして記録し、補修展開図を作成した(図4-3)。また、硝酸銀の変色が見られず、塩害による劣化が見られない箇所についても、予防保全を目的として、表面含浸材の塗布範囲を補修展開図に示した。

###### b) 既設構築撤去

前述のように、断面補修範囲を実測及びマーキングした後、補修展開図に示した範囲を、はつりによる構築断面補修及び表面含浸材を塗布することにより補修をする。

構築のはつり前には、営業線内の剛体架線や、通信・電気ケーブル等の防護及び軌道面の防護として、シートや、ラインシールド、コンパネ等により防護した(写真4-3)。



名称	記号	記事
補修工法③		表面含浸工塗布範囲
補修工法④		断面修復工+表面含浸工塗布範囲
漏水		
補修No.		A・B線 工法No.

図4-3 補修展開図



写真4-3 鉄道施設物防護状況



写真4-4 側壁はつり状況

断面補修箇所は駅間トンネルのため、資材仮置場より、当夜作業ごとに施工箇所まで資材を運搬する必要がある。はつり作業にブレイカーを使用すると、コンプレッサーや発電機等、器具類のトンネル内での運搬が困難なため、はつり作業は電動ピックを使用した。劣化コンクリートは、鉄筋を露出するまではつり、作業スペース確保のため鉄筋裏20mm程度まで施工した。鉄筋裏のはつりは、既設鉄筋を切断しないよう注意した（写真4-4）。

#### c) 犠牲陽極材の取付け

塩化物の構築への浸入により、コンクリートの中性化が始まると、鉄筋表面の不動態被膜が破壊され、鉄筋の腐食が始まる。鉄筋が腐食することにより、鉄筋が膨張し、コンクリートにクラックが生じる。発生したクラックからさらなる塩化物が浸入することで、鋼材の腐食が急速に進む原因となる。

鉄筋の腐食箇所では、鋼材がイオン化する反応が進行し、鉄筋の健全な箇所では、酸素が還元される反応が進行する。このことにより、腐食部と健全部で電位差が生じることで腐食電力が流れ、腐食が進行する。

腐食電流の流れを抑制するために、鉄筋に対する防食工法として、電気防食工法を採用した。電気防食工法には、外部電源方式と流電陽極方式とがあるが、外部電源方式については、直流電源装置をトンネル内に設置することによる維持管理や建築限界への支障リスクが生じ、トンネル内の電気施設物やレールの電食の原因となる迷走電流が危惧されることから採用をしなかった。

流電陽極方式においても、犠牲陽極材の効果、持続性や交換周期が不明確であるが、暫定的な工法として採用することとした。また、犠牲陽極材の取付けについては、はつりにより露出させた既設鉄筋に軟鋼線をを用いて取付ける（図4-4）（写真4-5、4-6）。

電流が鉄筋に供給されやすいよう、犠牲陽極材と軟鋼線との導通をよくするために、軟鋼線接続部の鉄筋を十分にケレンし、犠牲陽極材の取付間隔は、以下に示す図4-5より、構築1m<sup>2</sup>あたりの鉄筋表面積を算出し、配置間隔Sを算出した上で取付けを行った。

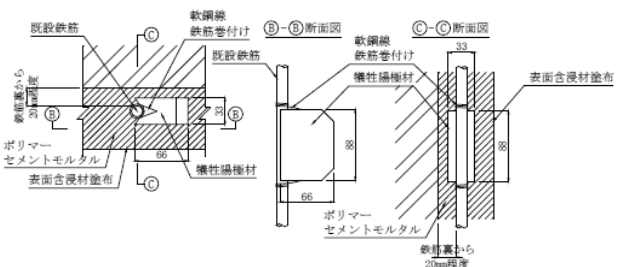


図 4-4 犠牲陽極材取付図

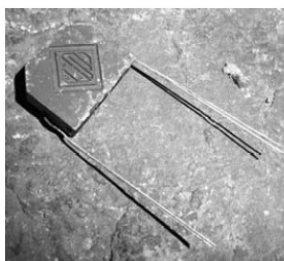


写真 4-5 犠牲陽極材



写真 4-6 犠牲陽極材取付状況

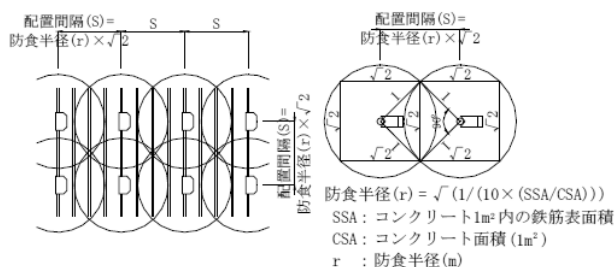


図4-5 犠牲陽極材 影響範囲図

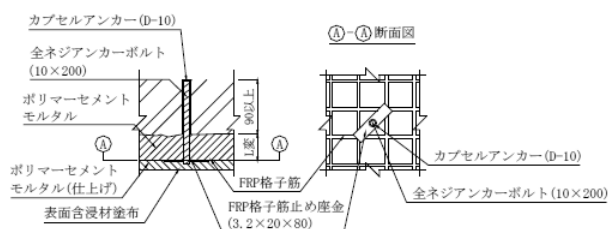


図 4-6 FRP格子筋 取付け詳細図

#### d) 構築断面補修

はつりにより撤去した箇所について、耐久性能の回復を目的とし、構築断面の補修を施工する。断面修復材の選定に関しては、電気防食工法との組合せや、既設構築への付着力及び施工性、営業列車への影響等を考慮して、ポリマーセメントモルタルを採用した。

モルタルの塗布の前には、既設構築との付着力改善のためのプライマーを塗布した。

また、モルタルの落下、剥離防止を目的としたFRP格子筋をアンカーボルト及び座金を用いて既設構築に固定した(図4-6)(写真4-7)。また、FRP格子筋については、防食電流が対象範囲外へ流出することを阻止するため、導体である炭素繊維製の使用を不可とした。

構築断面補修の深さが80mm以下の場合には、FRP格子筋及びモルタルを1層仕上げとし、80mmを超える場合は2層仕上げとして施工した(図4-7)。

#### e) 表面含浸工

表面含浸材は、塩化物の浸入防止及び予防保全を目的として塗布する。塗布範囲は、断面補修箇所及び硝酸銀を噴霧し、変色が見られなかった箇所についても、予防保全のために表面含浸材を塗布することとした。



写真4-7 FRP格子筋取付け状況

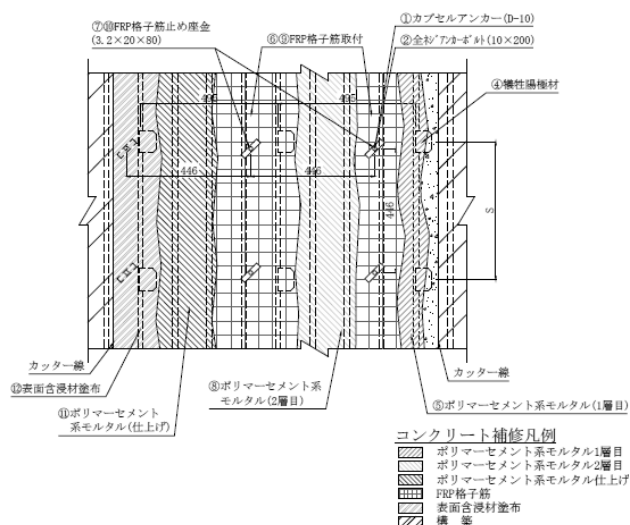


図4-7 構築断面補修工 施工標準図 (補修深さ80mm以上)

表面含浸材については、撥水機能を有し、コンクリートに撥水層が固着しやすい材質であり、経年により劣化をしても、表面含浸材を再度浸透させることにより効果を発揮できるシラン系材料をローラー又は刷毛等を用いて表面に塗布した(写真4-8)。



写真4-8 表面含浸材塗布状況写真

## 5. 犠牲陽極材の交換時期の検討

今回の塩害対策工事で使用した犠牲陽極材は、約10年程度の防食効果を有することが分かっている。しかし、現時点では交換時期の目安が定まっておらず、判断には難しさを伴うと考えられる。

そのため補修箇所から代表箇所を選定し、モニタリングを実施した。モニタリング項目として、自然電位、復極量、防食電流量等にした。モニタリング項目の一覧について、表5-1に示す。なお、モニタリング調査を実施するにあたっては、配流端子及び照合電極の埋め込みと計測ボックスを設置した(写真5-1)。

表5-1 モニタリング項目の一覧

調査方法	実施の頻度
外観調査	2年程度に1度
自然電位測定	
復極量測定	
防食電流量測定	
はつり調査	

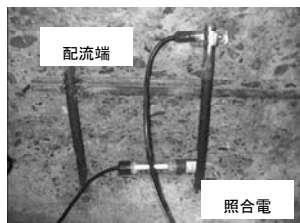


写真5-1 配流端子、照合電極、計測ボックスの設置

## 6. まとめ

現在施工を進めていく中で、施工性の面から現場より以下のような意見が挙げられた。

- ・断面修復工で使用するポリマーセメントモルタルは硬化時間が速く、一度に練る材料の量が制限される
- ・上床部の施工では、使用するポリマーセメントモルタルの密度が高い(重い)ため、既設コンクリートとの付着状況が悪かった

- ・塩害部をはつる際、通常の劣化コンクリートはつりと比べコンクリートが密な状態にあり、尚且つ鉄筋裏の狭隘部分を約20mm はつるため施工に時間がかかる

これらの意見に対応するため、よりよい施工方法、使用材料について、さらに改良研究を進めていく所存である。

また今後塩害に対し、トンネルを長期的に維持管理していくには、上記の改良研究と並行し、犠牲陽極材の交換時期の目安を決めていく必要がある。そのためには、モニタリング調査データと目視(亜鉛の減少や析出物等)の結果等を踏まえ、経時的な傾向を把握することが重要であり、データ蓄積と分析を適切に進め、包括的に判断できる指標を解明していきたい。

**謝辞：**本工事にあたっては、多くの関係者の方々に多大なるご指導、ご協力を賜りました。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 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, トンネル工学報告集, Vol.20, pp.395-402, pp.395-402, 2010.
- 2) 山本努, 武藤義彦, 小椋紀彦, 葛目宏, 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.
- 3) 武藤義彦, 小西真治, 諸橋由治, 仲山貴司, 牛田貴士, 葛目宏, 大即信明：地下鉄箱型トンネルの塩害範囲に関する研究, 第24回トンネル工学研究発表会, 2014
- 4) 武藤義彦, 大泉政彦, 諸橋由治, 葛目宏, 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, 日本材料学会 コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム, 2014
- 5) 武藤義彦, 大即信明, 岸利治：硝酸銀噴霧法を用いた地下鉄トンネルの塩害影響範囲の特定手法の, 日本材料学会 コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム, 2014