

河川を横断する地下鉄潜函トンネルの塩害対策

瀬筒 新弥¹・山本 努²

¹東京地下鉄株式会社 工務部 工務事務所 (〒110-0015 東京都台東区東上野4-3-6)

E-mail:s.sedutu@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒110-0014 東京都台東区東上野3-19-6)

地下鉄東西線茅場町駅～門前仲町駅間に位置する潜函トンネルは、隅田川の河口から近い位置を横断しており、函体間の継手部における漏水が多く、コンクリートのはく離、はく落が問題になっていた。そこで、トンネルの安全性および耐久性の把握を目的とした調査を実施した。

調査の結果、海水と同等の塩分を含んだ漏水による塩害劣化が支配的であることが判明した。継手部においては塩化物イオン濃度が高く鉄筋腐食も進行していたが、函体部では一部を除き塩化物イオン濃度は低く鉄筋腐食はほとんど進行していなかった。

対策は、トンネル全体ですでに発生している変状個所の断面修復に加え、継手部およびその付近の函体部においては表面被覆工を施工した。

Key Words : caisson tunnel, chloride induced deterioration, inspection, remedial measure

1. はじめに

東京地下鉄東西線茅場町駅～門前仲町駅間において、隅田川を横断する約260mの区間は、図-1および写真-1に示すとおり、9基のRC函体を沈設して接合する潜函工法で昭和38年に建設されたトンネルである。

函体の築造は河川を締切った築島上で行うが、函体と函体との接合部（以下、「継手部」という）は沈設後に接合するため、継手部と函体部の境界において漏水を繰り返す個所が多く、鉄筋腐食とかぶりコンクリートのはく離、はく落が以前から問題になっていた。そこで、当該トンネルの安全性および耐久性の把握を目的とした調査およびその結果に伴う対策工事を実施した。

本報告は、当該トンネルの調査から対策工事の過程において得られた知見等について述べるものである。

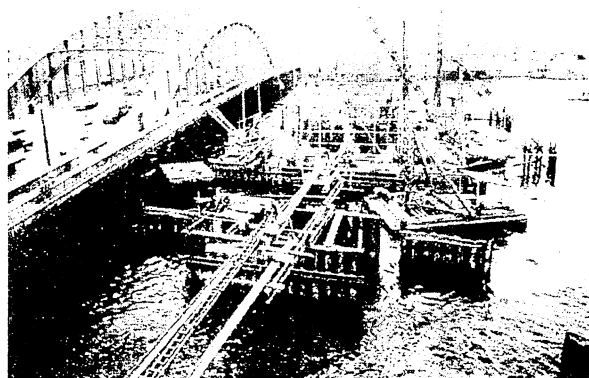


写真-1 建設状況

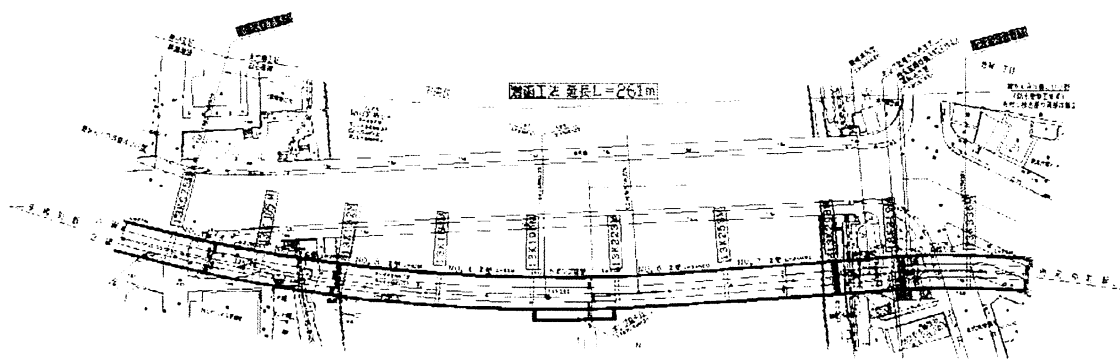


図-1 線路平面図

2. トンネルの概要

(1) トンネルの諸元

トンネルの諸元を表-1に示す。

表-1 トンネルの諸元

区 間	東西線茅場町駅、門前仲町駅間 261m
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であり、ゆるいS字型
地 質	沖積層（軟質シルト層がT.P-32mまで続いている）

また、トンネルが横断する位置の隅田川は河口から3.6kmであり、永代橋上流60mで日本橋川が流入し、下流500mの地点で月島によって2分されており、トンネル位置は、川幅183m、最高水深8m、平時1m、大潮時には2mの干満差（当該トンネル建設時）を示す感潮区域である。

(2) トンネルの建設方法

トンネルは、大別すると、①締切り、②潜函据付け準備、③函体の築造および沈設、④継手部施工の手順で建設した。

まず、函体据付け所定位置から2m離れた位置に幅6mの鋼矢板を2列打設し、その中に粘土質土砂をてん充し締切りを行った。

次に、締切り範囲内の排水および川底の泥土を撤去し、砂質土を函体の据付け位置まで盛土して築島を造成した。また、隅田川の中央部は盛土の地耐力を早期に発現できるよう、ウェルポイントを施工した。（図-2）

函体の築造は、底部の作業室部分、構築部分、頂部保護コンクリートの順で打設し、その後、沈設を開始した。函体の上床版が締切り天端まで沈設した際に一時沈設を中止し、あらかじめ函体の上部に作られた溝の中に鋼矢板を建込み、その内部に載荷土砂をてん充しながら、さらに沈設を進めた。

同様に次の函体を沈設し、2基続いて沈設した後、函体の上部に建込んだ鋼矢板を繋いで継手部を囲い、継手部上床版まで掘削し、上床版コンクリートを打設した。その後、下床版、側壁の順でコンクリートを打設し、函体を継ぎ、仮壁を撤去して2基続きのトンネルを完成させた。このような方法を繰り返し行い、トンネルを建設した。

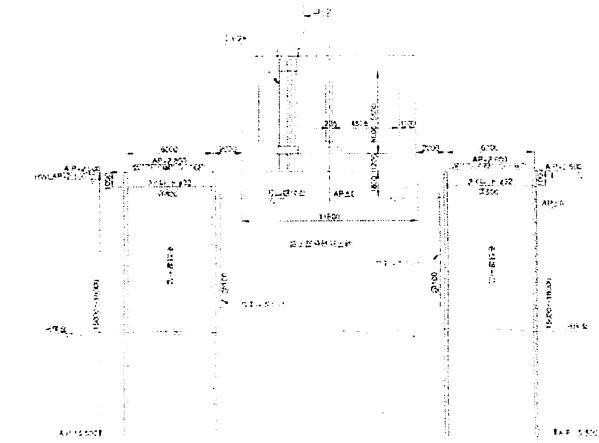


図-2 掘削標準断面図

3. 一次調査（全体劣化調査）

(1) 発生していた変状

当該トンネルに発生した主な変状は、写真-2に示すとおり、継手部におけるはく離、はく落、鉄筋露出であり、ほとんどの継手部において漏水跡も見られた。前述のとおり、函体のうち継手部は悪条件の中で施工されたコンクリートから成るものであり、また、当該トンネル位置は、感潮区域であることから、継手部周辺の支配的な劣化機構は、施工困難に伴う初期欠陥に起因した塩害と推定した。



写真-2 継手部において発生した変状

(2) 調査項目

前述した変状に対する当該トンネルの安全性および耐久性を把握するため、一次調査（全体劣化調査）として、次に示す①～⑧の調査を実施した。

次節より各々の調査方法および結果について詳述する。

- ①目視、打音調査
- ②コンクリート圧縮強度試験
- ③中性化深さ試験
- ④塩化物イオン濃度分析試験
- ⑤鉄筋腐食度調査
- ⑥配筋およびかぶり厚調査
- ⑦水質調査
- ⑧水準測量

(3) 目視、打音調査

トンネル全長261mを対象に、軌道面上からの目視調査を実施し、必要により打音調査を実施した。

調査の結果、継手部には、漏水跡があり、ひびわれ、エフロレッセンス、鉄筋露出等の様々な変状が見られた。とくに中壁および側壁では、鉄筋露出が顕著であることを確認した。

また、函体部には、全体的に変状は少なかったものの、上床に縦断方向のひびわれや建設時のシャフト孔跡（写真-3）からの放射状のひびわれ、側壁では鉛直方向のひびわれや打継ぎ目部にエフロレッセンス等を確認した。



写真-3 シャフト孔跡

(4) コンクリート圧縮強度試験

変状の発生個所、状態および範囲等を勘案した上で函体部および継手部からφ75×150mmのコンクリートコアを3本採取し、「コンクリートの圧縮強度試験」（JIS A 1108）を実施した。また、全体的な傾向を把握するため、シュミットハンマーによる反発硬度法も20箇所程度実施した。双方で得られた試験値は、すべてが設計基準強度21N/mm²を上回る結果であった。

なお、ここで採取したコンクリートコアは、中性化深さ試験および塩化物イオン濃度分析試験にも使用した。

(5) 中性化深さ試験

コンクリート圧縮強度試験を実施したコンクリートコアに加え、φ50×150mmのコンクリートコア5本を追加採取した後、割裂し、割裂面に濃度1%のフェノールフタレイン溶液を噴霧して、中性化深さを確認した。また、全体的な傾向を把握するため、ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法（NIDS 3419）も20箇所程度実施した。

試験の結果、中性化深さの最大値は28mm（コンクリートコア試験値）であり、当該トンネルの設計かぶりは60～70mmであるため、鉄筋位置まで中性化は進行していないことが判明した。

(6) 塩化物イオン濃度分析試験

コンクリート圧縮強度試験および中性化深さ試験を実施したコンクリートコアを用いて、硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（JCI-SC4）を実施するとともに、全体的な傾向を把握するため、ドリルによる削孔粉を採取し、硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析法（JCI-SC5）も20箇所程度実施した。

なお、採取した試料は、構築表面～10mm、10～20mm、20～30mm、30～50mm、50～70mm、70mm～100mmと1箇所（試料）あたり6分割し試験を実施した。継手部における塩化物イオン濃度分析試験結果の一例を図-3に示す。

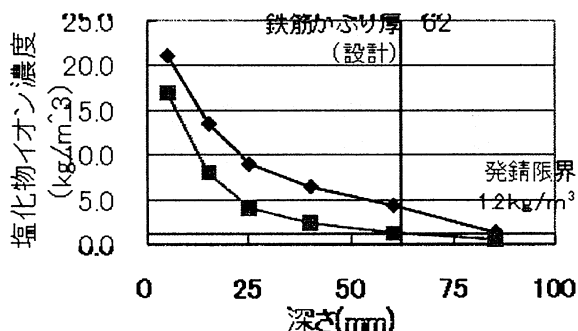


図-3 継手部における塩化物イオン濃度

図-3において、ひし形に示す値が硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（JCI-SC4）の結果であり、四角形に示す値が硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析法（JCI-SC5）の結果である。双方の結果とも、構築表面～30mmの塩化物イオン濃度が非常に高く、鉄筋位置において¹⁾土木学会「コンクリート標準示方書〔施工編〕」に規定されている腐食限界塩化物イオン濃度（12kg/m³）を超過していることが判明した。

その他の試料についても、継手部から採取した試料は、概ね図-3と同様に鉄筋位置において腐食限界塩化物イオン濃度を超過していた。一方、函体部から採取した試料は、一部の漏水跡や他の変状箇所から採取した試料を除いて、腐食限界塩化物イオン濃度を下回る結果であった。

(7) 鉄筋腐食度調査

鉄筋腐食度調査は、土木学会「JSCE-E601 コンクリート構造物における自然電位測定方法」、²土木研究所、日本構造物診断技術協会「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」により、コンクリート中の鉄筋の腐食のしやすさを判定する自然電位法と併せて、かぶりコンクリートの一部をはつり取り、目視により鉄筋腐食状況を調査することとした。表-2に自然電位法の評価基準を示す。また、目視による鉄筋腐食度の評価については、³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われ調査、補修・補強指針」によるものとし、表-3に判定基準を示す。

表-2 自然電位法の評価基準

劣化度	自然電位 E (mV:CES)	鋼材の腐食のしやすさ
特	—	—
高	$-350 \geq E$	大
中	$-250 \geq E > -350$	やや大
低	$-150 \geq E > -250$	軽微
なし	$E > -150$	なし

表-3 鉄筋腐食度の判定基準

腐食度	判定基準
I	黒皮の状態。または錆が生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが、小面積のはん点状である。
III	断面欠損は目視観察で認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
IV	断面欠損が生じている。

調査の結果、継手部は、自然電位法により鋼材の腐食のしやすさ“大”であり、鉄筋腐食度も“腐食度Ⅲ”であった。一方、函体部は自然電位法の結果、鋼材の腐食のしやすさ“なし”であり、鉄筋腐食度についても“腐食度Ⅰ～Ⅱ”程度であり、自然電位法と目視による調査結果に相関が見られた。

(8) 配筋およびかぶり厚調査

配筋およびかぶり厚さ調査は、電磁誘導法により実施した。なお、当該トンネルの設計かぶりは60～70mm、主鉄筋間隔は125mm、配力筋の間隔は300mmである。

調査の結果、各部位の鉄筋間隔および側壁、中壁のかぶりは概ね設計どおりであったが、上床のかぶりが平均54.7mmと若干不足している傾向が見られた。

(9) 水質調査

水質調査は、トンネルで発生している漏水を採取して、成分分析を行った。その結果、漏水中には、海水とほぼ同等の16 100mg/lの塩化物イオンが含まれていることが判明した。

(10) 水準測量

東京メトロでは、トンネル全区間に20mごとの測点を設け、4年に1度の定期的な水準測量を実施している。今回の水準測量は、定期測量の水準点を利用した。この結果も併せて考察すると、トンネル全体が同傾向の変動を示しており、特異な隆起や沈下等、局所的な変動の兆候は見られなかった。

また、水準測量に併せて、継手部と函体部との境界の目開き測定も実施したが、目開きは見られなかった。

(11) 調査結果のまとめ、考察

調査結果をまとめると、次のとおりとなる。

a) 目視、打音調査

継手部においては、漏水跡が見られた上、鉄筋露出等、様々な変状が発生している。

函体部は、継手部に比べて変状が少ない。

b) コンクリート圧縮強度試験

継手部および函体部のコンクリートは、設計基準強度以上の強度を有している。

c) 中性化深さ試験

継手部および函体部とも、中性化深さは鉄筋位置まで進行していない。

d) 塩化物イオン濃度分析試験

継手部は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食限界濃度を超過している。

函体部は、漏水跡や変状のある箇所を除いて、塩化物イオン濃度は低い。

e) 配筋およびかぶり厚調査

各部位の鉄筋間隔および側壁、中壁のかぶりは概ね設計どおりである。

上床のかぶりが若干不足している。

f) 鉄筋腐食度調査

継手部の鉄筋は腐食しやすい環境にあり、函体部の鉄筋は腐食しにくい環境にある。

目視による調査でも、同様の状況である。

g) 水質調査

トンネルで発生している漏水には、海水とほぼ同等の塩分が含まれている。

h) 水準測量

トンネル全体が同傾向の変動を示しており、特異な隆起や沈下等、局所的な変動の兆候はない。

以上より、主に継手部と函体部との境界から海水と同等の塩分を含んだ漏水がトンネル内面に飛散し、それらがコンクリート内に浸透することにより、塩害が発生したものと考えられる。

したがって、当該トンネルの支配的な劣化機構は塩害であり、変状発生および鉄筋腐食が顕著な継手部については対策を要すると判断した。

しかしながら、当該トンネル全体としては少ないが、函体部でも漏水跡および変状がある個所については、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食限界濃度を超過しており、函体部にも塩害が発生している個所が存在する。すなわち、継手部付近の函体部等、漏水の影響を受けている範囲は、将来、塩害による劣化進行の可能性が高いと考えられる。

よって、函体部における塩害対策要否の検討、塩害対策範囲の選定および対策工法の選定を目的とした二次調査を実施することとした。

4. 二次調査（函体部塩害詳細調査）

(1) 調査項目

次に示す3つのパターンに分けた範囲、個所において、塩化物イオン濃度分析試験および鉄筋腐食度調査を実施することとした。なお、調査方法については、塩化物イオン濃度分析試験は、硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析法（JCI-SC5）、鉄筋腐食度調査は、自然電位法および目視により鉄筋の腐食状況を調査することとした。

- ①継手部付近（1m離れ）函体部の全断面
- ②漏水および変状が発生している函体部
- ③変状のみが発生している函体部

塩化物イオン濃度分析試験は、①については、上床から1箇所、中壁は上下2箇所、側壁は上、中、下と3箇所で行うこととし、②および③は、各々において発生している変状を囲むように4箇所で行うこととした。採取した試料は、鉄筋位置を中心として前後20mm、その構築表面側、背面側から各々20mmと1箇所（試料）あたり3分割し試験を実施した。

自然電位法は、①については、継手部から離れ1mの全断面に対して実施することとし、②および③は、変状を中心として、1箇所あたり2m²を目安として実施した。図-4に①、②および③の調査範囲を図化したものを示す。丸で示す個所が塩化物イオン濃度分析試験の試料採取箇所であり、ハッチングしている範囲が自然電位法の範囲である。

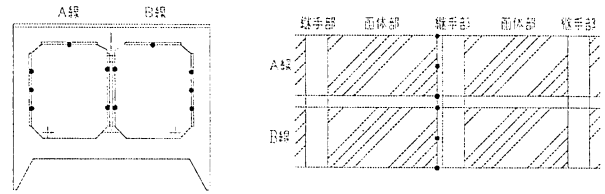


図-4-1 ①の調査範囲標準断面、平面

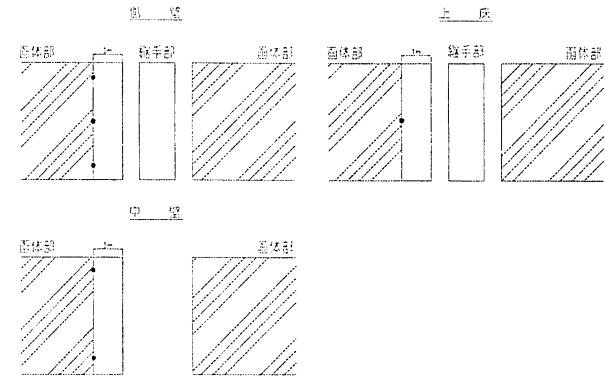


図-4-2 ①の各部位ごとの調査範囲標準平面

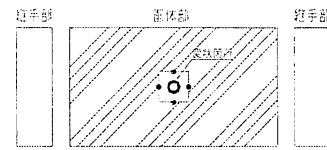


図-4-3 ②および③の調査範囲標準平面

(2) 調査結果

図-5に①の調査結果の一例を示す。トンネル断面図の周りにあるコンター図が自然電位法の結果を示すものであり、黄色（鋼材の腐食のしやすさ：なし）、緑色（同：軽微）青色（同：やや大）、赤色（同：大）の順で鋼材が腐食しやすいと評価される。また、その上にあるグラフが塩化物イオン濃度分析試験結果を示すものであり、赤線は腐食限界塩化物イオン濃度を示す。

塩化物イオン濃度は、上床は低く、中壁、側壁については、下段になるほうが高くなる傾向が見られた。中壁、側壁の下段においては、鉄筋位置において腐食限界塩化物イオン濃度を超過していた。そのため、継手部から3m離れた個所で再度、試料を採取し試験を実施したところ、鉄筋位置における塩化物イオン濃度は腐食限界濃度を超過していたが、当該個所に変状を見られなかった。

自然電位法は、上床、中壁、側壁、各々の一部に鋼材の腐食のしやすさ“大”と評価された個所があり、中壁、側壁については、下段になるにつれ、鋼材が腐食しやすい傾向が見られた。鋼材の腐食のしやすさ“大”の範囲を目視により確認したところ、腐食度はⅡ～Ⅲ程度であった。また、一例に示した個所ではないが、変状（漏水跡）と自然電位法結果（電位分布）に一部相関が見られた個所もあった。（図-6）

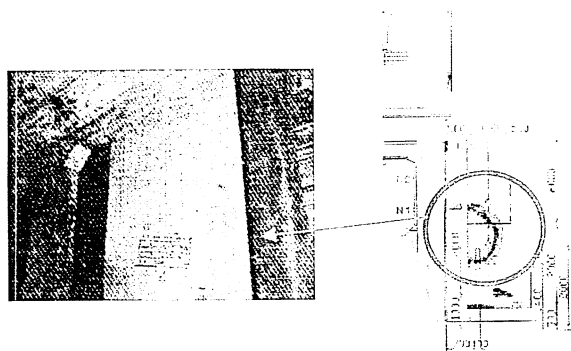


図-6 外観変状と自然電位法結果の相関

また、②および③の結果については、②の個所は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が高く、③の個所は、塩化物イオン濃度が低い結果であり、漏水の有無と塩化物イオン濃度に相関が見られた。

変状個所における自然電位法の適用は、コンクリート表面に凹凸があるため困難であったが、②の個所は、前述のとおり、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が高かったものの、鋼材の腐食のしやすさは“なし～軽微”であり、目視による鉄筋腐食度も“Ⅰ”（健全）の個所も存在した。

(3) 調査結果のまとめ、考察

調査結果をまとめると、次のとおりとなる。

a) 継手部付近の函体部（①の範囲）

鉄筋位置における塩化物イオン濃度が高かったものの、そこまで鋼材が腐食しやすい環境にあるわけではなく、鉄筋も断面欠損を伴う等しい腐食はしていなかった。

b) 漏水および変状が見られる函体部（②の個所）

鉄筋位置における塩化物イオン濃度は高かったものの、鋼材腐食は腐食しにくい環境にあり、鉄筋がまったく腐食していない個所も存在した。

c) 変状のみが見られる函体部（③の個所）

塩化物イオン濃度は低かった。

函体部は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が高くとも、鉄筋は腐食していない個所が存在する。

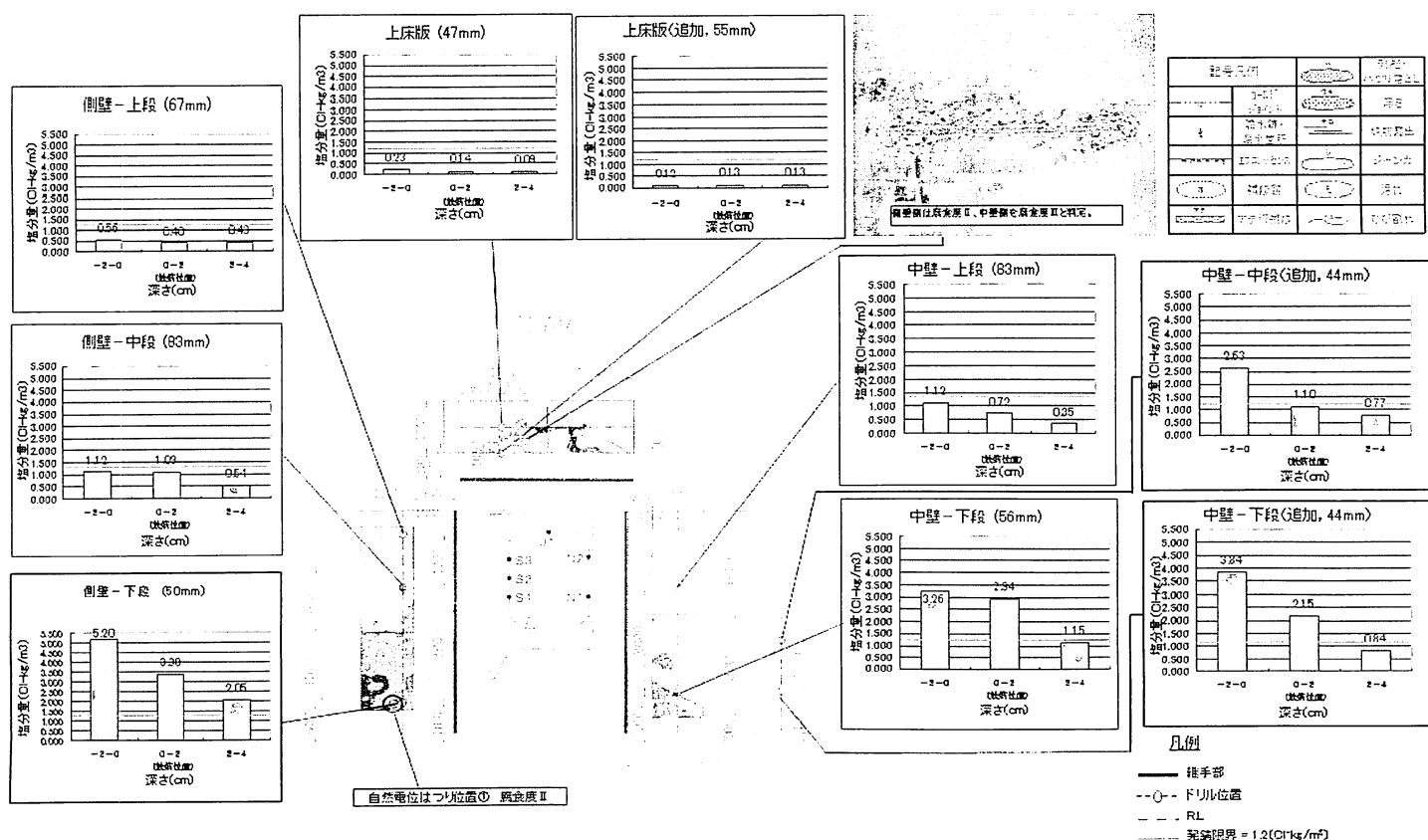


図-5 継手部付近（函体部）の調査結果総括

函体部は、地上で製作した後に沈設されており、継手部と比較すると施工条件がよいことから、全体的に変状が少ない。また、概ね設計かぶりを確保できていることから、変状が発生していない個所は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食限界濃度を超過していても、鉄筋腐食に不可欠である水および酸素の供給をかぶりコンクリートが遮断、抑制していることにより、鉄筋に腐食が見られていない、すなわち、塩害は発生していないものと推察できる。

5. 対策の実施

(1) 対策範囲の選定

詳細調査において継手部は塩害対策を行うと判断したが、函体部については、変状が発生している個所を除いては、塩害が発生していないことから、対策を実施せず、継続監視を行うという判断も十分考えられる。しかしながら、これまでと同様、今後も継手部から頻繁に漏水が発生する可能性は十分有り得るため、予防保全的な観点から、継手部付近の函体部にも塩害対策を実施することとした。なお、塩化物イオン濃度分析試験結果も踏まえて、継手部から離れ3mの範囲を塩害対策範囲とした。

(2) 対策工法の選定

継手部の対策は、はく離、はく落、鉄筋露出が見られた個所に対して、塩化物イオンの物理的除去を目的に、はつりを行い、鉄筋を防錆した上でポリマーセメントモルタルによる断面修復を行うこととし、併せて、塩化物イオン、鉄筋腐食に不可欠な水および酸素の供給を遮断するため、表面被覆を行うこととした。

なお、表面被覆材については、耐久性、コスト等を勘案し、図-7に示すとおり、エポキシ系樹脂塗料プライマー、パテ、柔軟型ポリウレタン樹脂系塗料中塗り、上塗りをしていることとした。

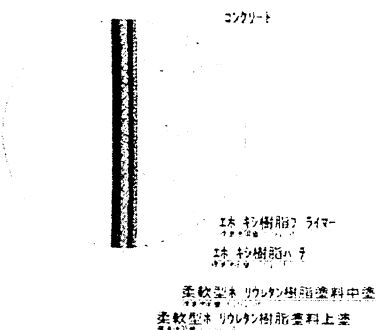


図-7 表面被覆構造標準図

また、漏水個所については、これまでの経験から再漏水する可能性がきわめて高いことが考えられることから、図-8に示すとおり、コンクリート表面に矩形の溝を切り、導水を行うこととした。

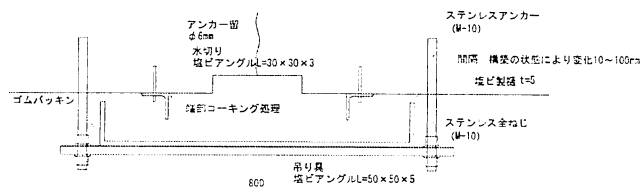


図-8 継手部導水標準断面図（上床）

函体部の対策については、継手部付近には基本的に継手部と同様の対策を実施することとし、その他の函体部については、漏水の止水、はく離、はく落、鉄筋露出部に対する断面修復、ひびわれに対しては注入を実施することとし、注入の対象とするひびわれは、表面被覆部分においては0.6mm以上、その他の部分においては1.0mm以上とした。

なお、断面修復に伴うはつりに関しては、マクロセル腐食の発生を懸念して、はつり深さを鉄筋裏までとするとともに、目視による鉄筋腐食度が“Ⅰ”になるまで、はつり範囲を広げて施工することとした。

また、函体部において、変状が発生している個所については、鉄筋腐食の進行が懸念されるため、漏水の有無に関わらず、塩害対策と併せて補修を行うこととした。

上記のとおり、対策工法を選定したものの、これまで東京メトロにおいて、このような塩害対策の事例はほとんどないことから、塩害対策の効果および鉄筋腐食に不可欠である水および酸素の供給に対するかぶりコンクリートの抑制効果を確認するため、表面被覆を実施する函体部と表面被覆を実施しない函体部に各々、鉄筋腐食のモニタリング機器を取り付けることとした。

対策の完了状況を写真-4に示す。

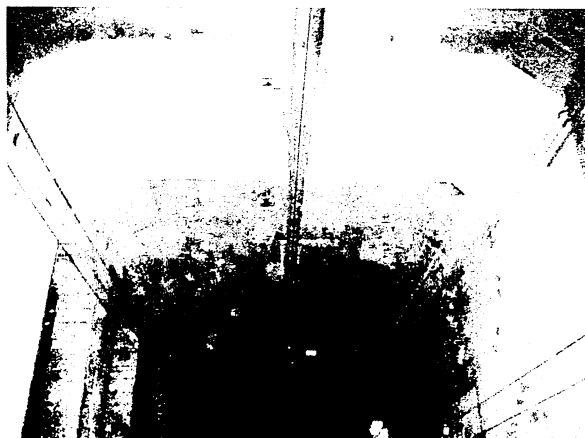


写真-4 対策完了状況

6. おわりに

土木学会¹⁾「コンクリート標準示方書[施工編]」では、腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 と規定しているが、当該トンネルの函体部においては、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 を超えていても、コンクリート中の鉄筋がしにくい環境にあり、鉄筋が腐食していないことを確認した。

建設後40年に渡って、塩害環境下にあるにも関わらず、鉄筋が腐食していないことは、前述のとおり、函体部は、地上で製作した後に沈設されており、比較的施工条件が良く、概ね設計かぶりを確保できていることから、塩化物イオン濃度が高くとも、鉄筋腐食に不可欠である水および酸素の供給をかぶりコンクリートが抑制しているため、塩害が発生しなかったものと推察した。

今後の課題として、鉄筋腐食に不可欠である水および酸素の供給に対して、函体部のかぶりコンクリートの抑制効果の妥当性、また、今回実施した塩害対策の効果について、鉄筋腐食のモニタリング機器を用いた経過観察の実施等により、検証、解明していきたい。このことについて、機会があれば報告したい。

謝辞：本報告における塩害対策工法の選定にあたっては、金沢工業大学の木村定男教授をはじめ関係各位にご指導をいただいたことに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，P24，2002.
- 2) (独) 土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，P105，技報堂出版，2003.
- 3) (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，P18，2003.

THE INSPECTION AND REMEDIAL MEASURE AGAINST CHLORIDE INDUCED DETERIORATION OF THE CAISSON SUBWAY TUNNEL WHICH CROSSES THE RIVER

Shinya SEZUTSU and Tsutomu YAMAMOTO

The tunnel which crosses the Sumida-river of the Tozai subway line was constructed by pneumatic caisson method. A lot of water leakage occurred at the joint between caisson elements, and concern has risen about occurrence of peeling of concrete caused by corrosion of reinforcing bar. Accordingly, a detailed inspection was undertaken to improve safety performance and performance over time.

The result of the inspection, deterioration of the tunnel was mainly due to chloride induced deterioration caused by leakage of water that was equal salinity matched seawater. Therefore leak repair, recovery patching and surface coating were implemented at the necessary range.