地下鉄トンネルの経年対策とこれからの維持管理 MEASURES AGAINST THE AGED DETERIORATION AND MAINTENANCE IN THE FUTURE, OF SUBWAY TUNNELS

新才 浩之¹·河畑 充弘²·山本 努³

Hiroyuki SHINSAI Mitsuhiro KAWABATA Tsutomu YAMAMOTO

In the late years when the deterioration of structure is concerned about, the importance of the maintenance increases. The current maintenance takes repair after a thing for an accrual basis, however performing predictions in the future and acquiring measures priority in future and, classifying the prevention maintenance into the field of vision, and it is necessary to make maintenance effectively. Tokyo Metro, which estimate future deterioration as the present conditions generally about the tunnel of each route that is important social overhead capital. We aim at realizing high maintenance of the precision for engineering in a long-term viewpoint and perform some actions, so we introduce these summaries.

At first prediction of detailed investigation / deterioration mechanism estimate / progress about the Ginza Line tunnel which is the subway of beginning in Japan, we devised the general evaluation and measures plan. Now as development to the whole line, we push forward development of the asset management by all routes that the section where deterioration / deterioration is not remarkable included. In addition, in the daily repair, we make a guide in an office and push forward an action to reduce a judgment error.

Key Words : carbonation, chloride attack ,steel reinforcement corrosion, inspection, preventive maintenance, daily repair

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、平成20年に開業した副都心線を含め全9路線,営業 キロ195.1kmの土木構造物を維持管理している.維持管理対象としている土木構造物のうち約85%がRCト ンネル区間(図-1.1)であり、供用開始から80年以上経過している区間もみられる(図-1.2). 今後,さら に土木構造物の経年が進むにつれて、維持管理の重要度は増すばかりである.

現在の維持管理は、大別して、定期的に行っている全般検査と、変状が著しい箇所等に対して行われる個 別検査に体系化されており、個別発生主義的な事後保全が基本であるが、今後は将来予測等を行い、詳細な 対策優先順位を付けると伴に、予防保全も視野に入れ、より効率的に維持管理していく必要がある.また、 アカウンタビリティが一層強く求められる中で、土木構造物の維持管理に関しても、一層の効率化及び透明 性が必要になると考えられる.

キーワード : 中性化,塩害,鉄筋腐食,予防保全,日常補修						
1	正会員	東京地下鉄株式会社	鉄道本部	工務部	土木課	
2	正会員	東京地下鉄株式会社	鉄道本部	工務部	土木課	課長
3	正会員	東京地下鉄株式会社	鉄道本部	工務部	土木課	課長補佐



2. これまでの維持管理

(1) 検査·補修

地下鉄トンネルの維持管理は,日常の巡回(徒歩及び列車による巡回),2年毎の全般検査(目視調査及び ハンマーによる打音調査)により,コンクリート表面のひび割れや漏水,浮き等の各変状の抽出と進展を確認し ている.検査に関しては,運転保安,列車の正常運行及び旅客,公衆等の安全の確保に着目しなければならない. また,補修に関しては,検査判定区分により日常的に補修を施している.

また,必要に応じてコンクリートの中性化深さや塩分濃度,鉄筋の腐食度状況などのデータを非破壊・微破壊 検査により測定する詳細調査も行っており,これらの各検査結果に応じて必要な補修・補強などの対策を実施 している.

(2)劣化·変状

地下鉄トンネルに生じる劣化・変状による不具合としては、ひび割れに起因したトンネル背面の地下水の漏 水によるコンクリート中の鉄筋腐食の加速(=耐久性の低下),レールや信号等の施設への悪影響(=使用性 の低下)などが挙げられる.

また,鉄筋の腐食膨張の進行による表面(かぶり) コンクリートの剥離もリスクとして存在し,大きなひび割 れや空洞の存在は鉄筋腐食を加速させる要因となる.そのため漏水が見られた場合は,旅客や施設物への影響 度を勘案し,できるだけ止水する工法で補修している.また,コンクリートに浮きが見られた場合は,除去して, 断面修復を行い,耐久性を回復させるとともに,ひび割れ補修等の工事も日常的に実施している.

3. 維持管理を取り巻く状況の変化

地下鉄トンネルの維持管理は,主に目視による検査を行い,既に顕在化した変状に対する経験に依存した定 性的な判断を行っているのが実情である.

また,補修工事等の計画は比較的短期(基本的には5カ年計画)であり,必ずしも長期的な劣化予測に基づいているわけではない.

地下鉄トンネルが長年このような方法で,維持管理されてきた背景として,鉄筋コンクリートトンネルその ものが有している以下のような特徴が考えられる.

- ・レールや橋梁など鋼構造物の疲労亀裂のような運転保安上,直ちに影響するような,急速な変状の進展が見られない.
- ・通常,劣化進行による変状は比較的ゆっくり進行し,危険個所は大規模なひび割れ・浮き・漏水・錆 汁など明らかな不具合として顕在化し,経験があれば,目視・打音により危険個所を発見できる.
- ・通常の環境にある鉄筋コンクリートトンネルが劣化によって,変形・崩壊した事例が見られない。

・コンクリート構造物はメンテナンスフリーであると言われていた.

しかし,減価償却資産としての耐用年数である 60 年を経過したトンネルも今後多くなる中で,高度成長期の 終焉と会社の民営化に伴い,より限られた予算・人員で信頼性があり,質の高い維持管理を実施することが要求 されつつある.

このような背景から,東京メトロでは重要な社会資本としての財産である各路線のトンネルについて,現状 と将来の健全性を総合的に評価し,長期的な視点で工学的に精度の高い維持管理を実現することを目指し,詳 細な調査・試験,劣化機構推定,進行予測,評価を実施することとし,我が国初の地下鉄である銀座線トンネル及 び河川下トンネルで発生している塩害に対する診断を行った.

4. 銀座線トンネルの診断と対策

地下鉄銀座線は,我が国初の地下鉄として大正末期に建設が開始され,上野~浅草駅間が昭和2年に開業しており(図-4.1),トンネルは80年を超えている.東京メトロでは今後も末永く安全な状態で供用していくため,トンネル構築の現状と将来の健全性を総合的に評価し,今後の維持管理の方針を明確にすることを目的に,詳細な調査・診断を行った.現在のトンネル内部は写真-4.1のとおりである.





図-4.1 当時の路線平面図(上野~浅草間)

写真-4.1 現在のトンネル内部

(1)構造耐力の確認

現状のトンネル構造物の耐荷性を確認するために,強度試験と構造解析・照査を行った.

コンクリートの圧縮強度は,平均21.2 N/mm²と設計時の基準強度10N/mm²を上回っており,当時期待された 強度は現在でも十分に有していることがわかった.また,鉄骨と鉄筋の引張強度も十分であった.

構造解析は,実績が豊富な2次元フレームモデルに加え,当該トンネルの複雑な形状を忠実に再現できるよう,3次元ソリッドモデル解析も行った.解析の結果,断面力は断面耐力を大きく下回っており,十分な耐力余裕があることが確認された.

これは、本トンネルが昭和初期の材料・配合・施工でコンクリート強度は現在より低いものであったが、それに応じた適切な部材断面・配筋が確保されており、当時の設計技術が現在と比べ遜色ないものであったと評価することができる.

(2) 中性化による劣化進行の確認

測定の結果,中性化は経年でそれなりに進んでいたが,概ねまだ鉄筋の位置までは達していなかった.ただし,測定箇所によってバラつきが見られ,一部では鉄筋より深い位置まで中性化が進んでいた.

一方,鉄筋の腐食状況は,非破壊検査機器(自然電位法)と,はつり出して直接目視する方法による調査を行ったが,建設から 80 年経過しているにもかかわらず,殆どの箇所で腐食なしか,ごく軽微な腐食に留まっていた.工事に伴い鉄筋を露出した箇所があったので,その状況を写真-4.2 に示すが,腐食は見られず結束線も健全な状態で残っていることがわかる.ただし,現在漏水している箇所ではやや腐食が進んでいた.

全体的に鉄筋の腐食度が小さい原因としては、コンクリート内部の含水率が極めて低く、かなり乾燥したコンクリートであることが今回の調査で判明したため、たとえ中性化が進行して鉄筋の保護膜が消失しても、ト

ンネル内では降雨もないため、漏水個所以外では水分が供給されず、腐食が進行しないものと考えられる.

従って、当該トンネルのような構造物での診断においては、一般的な指標である中性化深さのみで評価する ことは適切ではなく、コンクリートの含水状態や実際の鉄筋の腐食状況も十分に考慮すべきであると考える. また、建設時の防水層の施工や供用後の漏水対策工の良否が、耐久性上大きな影響を与える可能性が高いとも いえる.



写真-4.2 内部鉄筋の状態(腐食なし)



図-4.2 ひび割れ発生予測の概念図

(3)劣化進行の予測

中性化の進行は経過年数の平方根に比例する(√ t 則).これによる予測を行った結果,一部を除くほとんどの区間は 50 年後,つまり建設後 130 年経過しても鉄筋位置まで到達しない結果となった.

ただし,中性化の実測値はバラつきがあり,また,コンクリートの含水状態によっても鉄筋の腐食速度が大き く異なるため,対策要否の判断材料の一つとするために,既存研究事例を参考に,中性化進行後から腐食ひび割 れ発生までの期間の予測を試みた.

予測では、コンクリート含水率から腐食速度を算出するとともに、ひび割れ発生腐食量と現在の腐食量を設定することで、ひび割れ発生までの期間を算出した(図-4.2).

結果は、漏水がない場合は腐食速度が低いため、100 年以上先でもひび割れは発生しないと予測されたが、漏水がある場合は、約10年以内にひび割れが発生する可能性があると予測された.

(4)評価と対策方針

まず,耐荷性については,各種調査・測定結果,構造解析結果から十分に満足していると評価できた.

一方,耐久性については,各測定結果から,中性化以外の塩害やアルカリ骨材反応,化学的腐食による劣化の 可能性はないと判断され,中性化としての劣化過程は,現在,一部加速期(腐食ひび割れ発生)の初期段階にある が,大部分は潜伏期(中性化深さが腐食発生限界まで)~進展期(鋼材の腐食か開始から腐食ひび割れ発生まで) にあり,漏水がない箇所では鉄筋の腐食進行速度,つまり劣化進行速度が極めて遅いと判断された.

以上の結果から当該トンネルでは,現状においては耐荷性や剛性の回復・向上のための補強は不要であり, 全面的な劣化対策も必要ないが,所々の漏水発生付近でひび割れ・剥離等が見られるため,漏水補修や断面修 復等の補修工事を今後も確実に実施するものとした.

5. 河川下トンネルの塩害劣化対策

感潮河川である隅田川,日本橋川と交差する一部のトンネルでは,以前より塩分を含んだ漏水により鋼材の 腐食やコンクリートの剥離が進んでおり,日常の補修等を繰り返してきたが,再劣化やレール等の施設物への 影響があったため,抜本的な調査と対策を実施することとなった.

(1) 潜函トンネル

このうち潜函工法(造船台でRCトンネル函体を築造し,すこしずつ掘削しながら沈設し,幾つかの函体を接合する工法)のトンネルでは,函体間の接合部からの漏水による鉄筋腐食が問題となっていた.

詳細な調査・測定の結果,接合部付近を中心に,塩化物イオン濃度が鉄筋深さで示方書¹⁾に腐食発生限界濃

度の標準値とされている 1.2kg/m³ を大きく超えている箇所が多くみられ、これが鉄筋腐食の原因であること が確認された.このような箇所では、通常の断面修復を行っても高濃度の塩化物イオンが鉄筋の奥に残ってし まい(RC構造物では通常、耐荷性等を考慮して断面修復は鉄筋深さまでしか行わないため),再劣化の可能 性が高いため、接合部前後は断面修復に加えて鉄筋腐食促進因子である酸素・水分の供給を遮断するための表 面被覆も施工した.

(2) シールドトンネル

また一方,図-5.1 に示すシールド工法のトンネルでは,セグメント継手部からの漏水による,セグメント間 継手ボルトの腐食,セグメント鉄筋の腐食・露出,かぶりコンクリートの剥離が問題となっていた(写真-5.1). この区間の詳細調査を行った結果,セグメントコンクリート中の塩化物イオン量は,トンネル内面から

30mm 程度までで 1.2kg/m³ を大きく超えている箇所があり,これはトンネル側部で顕著であった.ただし,30mmより深くなると,途端に塩化物イオン量は極めて少なくなる傾向がみられた(図-5.2).

当該区間が初期のRCセグメントであったためか,工場製品にもかかわらず鉄筋かぶり厚さにバラつきが 多く,鉄筋腐食,剥離,鉄筋露出しているのは全てかぶりが極端に薄い個所であった.一方で,かぶりがある程 度確保されている箇所では,たとえ鉄筋位置での塩化物イオン量が 1.2kg/m³を超えていても,全く腐食してい ないことが判明した.これは,高強度なセグメントコンクリートは細孔組織が緻密であるため,塩化物イオン によって鉄筋の不動態皮膜が消失しても,水分・酸素の供給が少ないために腐食が進まないためと推測され る.

対策は,発錆したボルトの交換,剥離箇所の除去と鉄筋の防錆処理,変状が多い範囲の表面被覆の補修工を 施工した.また一部に,建設時のセグメント組み立て過程から生じていると推定される,トンネル断面変形が やや大きい範囲があったため,塩害進行抑止と補強を兼ねた二次巻きを施工した.



図-5.1 隅田川シールドトンネル

写真-5.1 発錆ボルトと露出鉄筋

図-5.2 塩化物イオン含有量

6. 全路線トンネルへの展開

銀座線トンネル,塩害劣化トンネルの調査・診断では,通常行われているコンクリート表面の目視調査だけ でなく,定量的な劣化指標データを採取することで,構造物の健全性と将来のリスクを工学的な根拠に基づい て判断することができた.

そこで,これらの検討成果をベースに,全路線のトンネルについても,中長期的な維持管理計画を検討する ことを目的に,引き続き調査・診断を実施することとした.

全路線のトンネルを概観すると,前述の塩害劣化トンネル等,既に対策を講じている区間を除き,現時点で はトンネル表面に著しい劣化が顕在化している区間はなく,日常の検査・補修を確実に実施することで当面は 安全性能が確保できると考えられる.

しかし、①経年したトンネルでは中性化がある程度進行していること、②トンネル内にはコンクリートの収 縮等によるひび割れが存在していること、③地下水位が高い区間ではひび割れや防水層の部分的な不良のた めに漏水が所々に生じていること、④河口から近い河川下のトンネルでは漏水中に海水と同程度の塩分が含 まれていること、などから、中長期的な観点でみると中性化や塩害による劣化進行も懸念される.

そこで,中性化・塩害の劣化機構について予防保全を取り入れた各路線全体の長期的補修計画を目指し,ア セットマネジメントシステムの開発検討を開始した.

また,塩害劣化については,中性化より進行速度が大きく,また,対策工法の選定を誤ると再劣化の可能性も 指摘されていることなどから,東京メトロの河川下トンネルを中心に,調査・診断・将来予測・対策工法の検 討にも着手した.

7. アセットマネジメントシステムの開発への挑戦

(1) 東京メトロが目指すアセットマネジメントシステム像

東京メトロでは経年による今後の劣化進行が懸念され,劣化の推移とその対策の実施,またその事業計画な どステークホルダー(利害関係者)に対するアカウンタビリティ(説明責任)を一層強く求められる時代に 突入すると考えられる.この時代に必要なマネジメント手法として,平成 17 年度にアセットマネジメントを取 り上げ,導入基本構想(図-7.1)などの基礎調査から開発検討に着手した.

地下鉄トンネルへのアセットマネジメント手法導入の難しい点は,システム上不可欠な劣化予測式が完全に は確立されていないこと,予測に必要な測定指標にバラつきが多くあること,劣化の推移と性能評価,対策要否 の関係が決定しづらいこと等が挙げられ,現在のところ出力する計画案がまだ客観性,論理性に欠けるところ である.

また,必要な客観性を高めるためには,システムが必要とするデータ量が膨大になり,システム構築までに長い年月を要してしまう.東京メトロでは,これらの状況に鑑み,システムの論理性を欠いたまま早期導入するのではなく,必要データ量を確保した上で,論理性を高め,システムを構築したいと考えている.

これにより,マネジメントシステムは理想的な状態で存在し,導入に関する抵抗が和らぎ,ステークホルダー へのアカウンタビリティが果たされると考える.

上記の見解からシステムの客観性・論理性の確立と必要データ量の確保を指標として捉えることが可能と 考えられる.

必要データとして,主に次の項目が挙げられる.①構造物の基礎データ②環境条件データ(河川下などの塩害 可能性区間)③検査データ④かぶり厚さデータ⑤中性化・塩害データ

(2) 必要データと出力イメージ

これまでの検討では,上記データが地下鉄トンネルの劣化進行に影響を与える因子であることが確認されて おり,このデータと既往研究などによる劣化予測式を組み合わせることにより,精度の高い予測と評価が可能 である.

地下トンネルは、RC構造物である.経年により劣化が進行し、構造耐力が低下し、構造物が変形を生じる事 象は、通常の維持管理を行っていれば、極めて想像しづらい.日常の安全安定の確保は、鉄筋腐食に伴うコンク リートの剥離・剥落を効率的に防ぐかが重要になる.したがって、構造物に悪影響を及ぼす劣化因子だけでな く、RC構造物の性能を大きく左右するかぶり厚さを電磁波レーダーで連続的に測定した.このようなデータ を活用して、管理単位での地下トンネルの健全性を評価する.

地下トンネル自体は連続している長い構造物であるため,補修実施の必要有無や実施時期などを同一とみな せる管理単位を設定する必要がある.管理単位の適切な区分については,まず劣化進行モデルを同一とみなせ る範囲とする視点で検討し,RCトンネルの建設年度,構造形式や施工区分,環境条件等を勘案した「コンクリー トの品質に特異な変化点が存在しないと想定される範囲」を管理単位と定義した.今後は,これにかぶりデータ や中性化速度係数の大小(≒コンクリートの品質)を加味した管理単位を最終的には設定したい.

出力方法として,管理単位ごとの評価指標を統合することで,劣化度予測マップ(図-7.2)を作成することが 可能となる.各データによる劣化予測結果により,任意年における劣化度予測マップは,補修等の事業計画の立 案に資するだけでなく,現場の検査時の重点着目点の把握にも貢献が期待される.

本取り組みは,今後必要となるモジュールの改良,必要データの収集,全路線への展開により本システムの精 度を向上し実働したい.



図-7.1 アセットマネジメントシステムの基本構想

8. 河川下トンネルの塩害に対する予防保全の検討

東京メトロのトンネルのうち,河川・埋立地等と交差・近接する区間は,図-7.1に示すとおり70箇所を超える.これらすべてに塩害リスクがあるわけではないが,測定の結果,河口から近い河川下トンネルの漏水近傍を中心にコンクリート中の塩化物イオン濃度が高い箇所が多く存在しており,鉄筋深さで,示方書¹⁾に腐食発生限界濃度の標準値とされている1.2kg/m³を超えている箇所も多い.一部では,内部の鉄筋の軽微な腐食も確認されているが,コンクリート表面には必ずしも劣化変状(剥離・剥落,鉄筋腐食による錆汁など)が多く顕在化しているわけではない.これらの区間は,直ちに被害が生じるような状況ではなさそうだが,中長期的には鉄筋腐食進行によるコンクリート剥落などの発生可能性を十分に秘めている.

そこで,全ての河川等と交差・近接する区間を対象 に,地下鉄トンネル特有の環境条件を明確にしなが ら,必要な現地試験や将来予測等を行い,対策必要範 囲とその時期を判断する検討に着手した.

具体的な課題としては、①地下鉄トンネル環境下 での塩害劣化進行速度(塩化物イオン濃度が腐食発 生原価濃度の標準値を大きく上回っていても腐食が さほどない理由),②塩害劣化進行に対する影響度の 高い指標の絞り込み、③対策範囲を決定する指標(例 えば漏水発生源からの塩化物イオンの濃度分布な ど)を簡易に測定できる手法の検討、④条件毎の進行 性・将来予測、などである.

全ての区間でムラなく多くの劣化指標を調査・測

定したうえで,個々の進行予測とリスク評価し,具体 対策範囲・時期を決定することが非効率であること はいうまでもない.そのため,条件毎に幾つかのパタ ーンを設定し,代表箇所での劣化指標の調査・測定に よる工学的根拠に基づく対策範囲の絞り込みと対策 時期の検討を進めている.また同時に,地下鉄トンネ ルという環境条件のなかで,劣化過程,施工条件に応 じた要求性能を満たし,ライフサイクルコストを考 慮した工法の検討も行っている.



図-8.1 河川等と交差する区間

9. 構造物維持管理体制の強化

東京メトロでは,構造物の検査を,国土交通省,鉄道総合技術研究所制定の「鉄道構造物等維持管理標準・同 解説」(以下「維持管理標準」という)に基づき2年毎の通常全般検査として実施している.維持管理標準に よる健全度の判定はA・B・C・Sの4段階であり,その基準は構造物の状態を定性的に表現する記述に留ま っている.また,東京メトロにおいても従来は検査員の経験重視の判定がなされていた.

しかし近年, ベテラン社員の退職, 検査の外注化が進むなか, 近年の調査・研究で得られた根拠にできるだけ 基づき, バラつきのない検査判定を実施することを目的に,「維持管理の手引き」を作成した.

ここでは地下鉄トンネルに特化するひび割れや漏水といった変状の状態を分類し,観察すべきポイントや 変状の状態と耐久性判定の根拠,具体的な判定フローといった項目を,できるだけ可視化して具体的な表現に なるよう留意して記述した.

現在,この「維持管理の手引き」(図-9.1)に基づく検査判定は2年目に入っており,実務のなかで改善すべき点がある場合は柔軟に対応するようにしている.



図-9.1「トンネル構造物の維持管理の手引き」

これまでに東京メトロでは土木構造物の現場での検査作業はほとんどを外注化しており,判定作業,現場再 確認のみ社員が行っていた.しかし,直営検査経験のあるベテラン社員の退職と,社員の検査判定スキルの向 上を目指し,数年前から若手社員が継続的に検査作業実施会社に出向し,検査作業に従事することで技術を担 保するようにしている.

さらに、それまでは構造物種別ごとに幾つかの部署に分散していた検査・判定・計画の業務を一元化する「検 査計画課」の設置、トンネル構造物の劣化診断スキル向上のための「コンクリート技士・診断士」取得の支援、 地下鉄トンネルでの劣化メカニズムや対策工法の考え方の基本をまとめたテキストの作成といった取り組み により、日常の維持管理体制の強化に努めているところである.

参考文献

1) (社)土木学会 コンクリート標準示方書[維持管理編] 2007

2) Tetsuya ISHIDA, Yukihiro ISHIKAWA, Mitsuhiro KAWABATA, Akira MARUYAMA and Satoshi TSUCHIYA : Maintenance Management System for RC Subway Tunnels Based on Numerical Predictive Models Coupled with On-site Measurement Information, Society for Social Management Systems 2009, Kochi, Japan.