

研究

東京メトロ銀座線トンネル構造物の維持管理に関する研究

メトロ開発(株)常務取締役 西村 高明
早稲田大学理工学術院教授 赤木 寛一

1 はじめに

近年、インフラ施設の老朽化が問題視され始め、維持・更新がクローズアップされてきた。

鉄道に関するメンテナンス体系を見ると、以前は、何か問題が発生してから対処する「事後保全」であったが、1965(昭和40)年ごろを境に、「事後保全」から「予防・事後を組み合わせた効率的な保全」に変わり、1974(昭和49)年国鉄により『土木建造物取替の考え方』が制定された。

これは、現在のメンテナンスのもとになるものであるが、定期的に検査を行って健全度を判定し、そこから弱点箇所や変状箇所を抽出して詳細な検査を行い、必要な場合には補修・補強などの措置を施すという体系である。この基準の制定に伴い、それ以降、自然災害などによる事故が急激に減少していったが、近年になり、コンクリートの中性化や剝落の問題などが顕在化したことで、維持管

理に関する統一的手法がないことが再認識され、「小まめに調査して、悪いところに手をを入れて使っていく」ことの大切さが見直され始めた。

しかしながら、ここ数年、現場の技術継承の困難さや深刻な労働力不足などの問題が浮上してきており、今ある構造物を、いかに少ないリソースで効率的にメンテナンスを行い、構造物の安全の確保と長寿命化を図っていくことが必要であり、併せて、確実に効率的なメンテナンス手法の研究開発が望まれている。

それらを踏まえ、本研究では、アジア最古の地下鉄である東京地下鉄(株)(以下「東京メトロ」)銀座線を題材として、各種検査の結果から健全度を評価し、維持管理マネジメントとして、劣化予測から費用対効果を見据えた修繕対策を検討した。さらに、銀座線特有の構造形式である「鉄構^{てっこうかまち}框構造」(H形鋼材による枠をいう、写真-1、図-1)を



写真-1 鉄構框構造(上野駅)

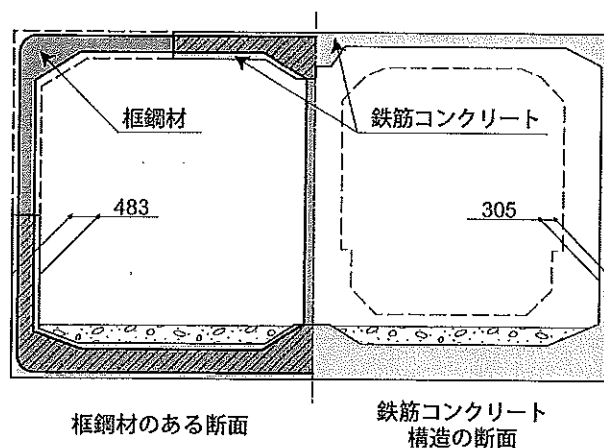


図-1 鉄構框構造断面図

有する躯体に焦点をあて、新規に提案する非線形FEM解析により構造耐力を分析するとともに、銀座線の現有耐力の評価を行った結果を紹介する。

2 鉄道構造物の維持管理

構造施設などの検査方法や検査周期など、鉄道における維持管理に関する技術基準としては、国

表-1 鉄道トンネルにおける検査区分

検査区分	内容
初回検査	初期状態の把握を目的に新設時などの供用開始前に行う検査。 至近距離からの目視と打音。
全般検査	健全度の全体把握とともに個別検査や措置の要否を判定するための定期的な検査。
通常全般検査	2年ごとに実施。 目視と打音主体。
特別全般検査	20年ごとに実施。 至近距離からの目視と打音。
個別検査	全般検査、随時検査で「健全度A」の場合に実施する検査で、変状程度および性能の把握、変状原因の推定、措置の要否や時期、方法などの精査を行う。
随時検査	地震や大雨などで変状が発生した場合など必要な場合に実施。

表-2 鉄道トンネルにおける健全度判定区分¹⁾

(1) 剝落以外の安全性に対する判定

健全度	運転保安、旅客および公衆などの安全に対する影響	変状の程度	措置など
A	AA 脅かす	重大	緊急に措置
	A1 早晚脅かす 異常時外力の作用時に脅かす	進行中の変状など性能低下も進行	早急に措置
	A2 将来脅かす	性能低下のおそれがある変状など	必要な時期に措置
B	進行すれば「健全度A」になる	進行すれば「健全度A」になる	必要に応じて監視などの措置
C	現状では影響なし	軽微	次回検査時に必要に応じて重点的調査
S	影響なし	なし	なし

(2) 剝落に対する判定

健全度	変状の程度
α	近い将来、安全性を脅かす剝落が生じるおそれがあるもの。
β	当面、安全性を脅かす剝落が生じるおそれがないが、将来「健全度 α 」になるおそれがあるもの。
γ	変状が認められるものの、安全性を脅かす剝落が生じるおそれがないもの。

土交通省から2007(平成19)年1月に『鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル』が施行され、すべての鉄道事業者が同じ体系でメンテナンスを行うこととなった。

東京メトロにおいても、国の基準を遵守しており、初回検査、全般検査(通常全般検査、特別全般検査)、個別検査および随時検査を行い(表-1)、全般検査で健全度の全体把握とともに個別検査や措置の要否を判定している(表-2)。

3 銀座線の健全度評価と維持管理マネジメントの試み

3-1 通常全般検査の概要

東京メトロの通常全般検査は、徒歩による目視と、必要に応じて手の届く範囲の打音検査を行っているが、銀座線では、2006～2018(平成18～30)年度まで、2年ごとに通常全般検査を行っている。

その結果は、漏水、ひび割れや剝離などの変状数に多少のばらつきがあったものの、相対的には変状数が増加してきており、中でも浮きや剝離の変状が多く見受けられたところである。

3-2 特別全般検査の概要

特別全般検査では、高所作業車を用いて、主に天井部と側壁上部の近接目視と必要に応じた打音検査、チョーキング、写真撮影および記録を行っている。

特別全般検査でわかる変状の多くは、軽微な浮きや剝離(図-2)であるが、これらは急に進行するものではないため、変状を把握しておけば、経過観察で問題はなさそうである。

また銀座線の建設は、大雑把にみると浅草駅から渋谷駅に向かって施工されているため、比較的浅草方向の構造物の方が、建設年次は古い。しかし、変状結果を見ると、単純に「建設年

度が古い区間で変状が多い」という結果には至っていない。

これは、トンネルの構造や施工法、地盤環境など、さまざまな要因が影響しているためと考えられる。

3-3 全般検査結果のまとめ

通常全般検査および特別全般検査の結果を分析して得られた知見を次に示す。

- ① 小さな浮きや剝離を発見するためには、近接目視および打音点検が重要であることを再確認した。ただし、浮きや剝離は急に進行するものではないため、一度変状を把握しておけば、経過観察を行うことで問題はないと考えられる。
- ② 漏水が多い区間では、浮きや剝離が多くな

る傾向が見られることから、漏水への対応(止水など)の重要性を再確認した。

- ③ 建設年度の古い構造物から劣化が進むのではなく、構造、施工法、劣化環境などさまざまな要因により劣化の進行具合が変わってくることを再確認した。

3-4 個別検査

3-4-1 個別検査の概要

銀座線構造物の劣化進行の予測や健全度の判定基準の精度向上のためには、定期的なモニタリングを継続し、全体的な劣化の傾向を把握していくことが必要であった。そのため、第一次トンネル健全度調査を1987、1988(昭和62、63)年に、第二次トンネル健全度調査を1992～1995(平成4～7)年にかけて実施した。

外観調査や室内試験を行ったが、誌面の都合上、外観調査と内部含水率測定の結果を紹介する。

3-4-2 外観調査

(1) 目視・打音調査結果

目視・打音調査は、図-3に示すA線およびB線(地下鉄における上り線および下り線)の上床と側壁の各内面について実施し、ひび割れ、漏水、ジャンカ、浮きに着目した。

とくに、ひび割れは0.1～0.3

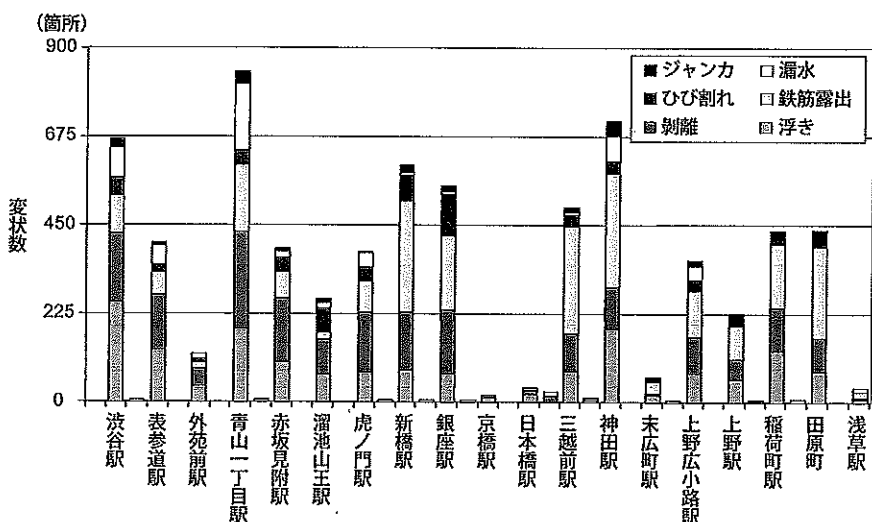


図-2 駅間ごとの特別全般検査結果(2012年度)

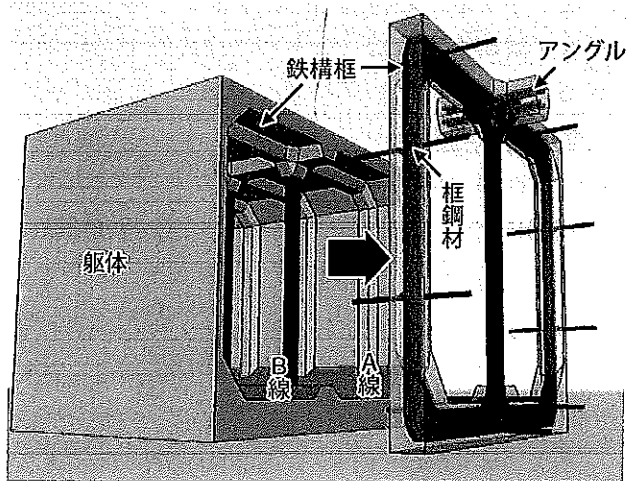


図-3 鉄構架構造を有する躯体の概要と鉄構架の詳細

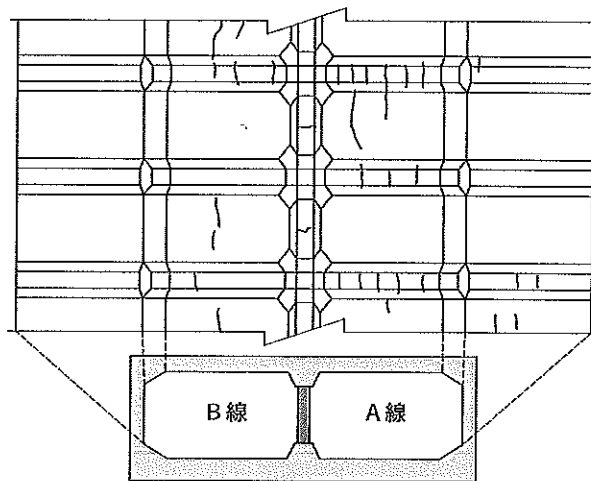


図-4 構造ひび割れ展開図(0.3mm以上)²⁾

mm程度のものが多数見られた(図-4)が、縦断または横断方向などの規則的な方向性を持っているものではなかった。また、一部区間でジャンカや漏水が生じている箇所があったが、粗骨材同士は結合しており、叩いても剥離しない状態であった。このことから、建設初期からの乾燥収縮によるひび割れが著しく進行する可能性は低いと考えられる。

(2) 内部含水率測定結果

コンクリート中の鉄筋の腐食速度が、コンクリートの含水状態によって変化することは知られているが、その内部含水率の測定については、精度よく測定する方法が少ないのが現状である。ここでは、ブラシセンサーを用いた電気抵抗式水分計(コンクリートに接触する部分の電気抵抗により水分量を測定する計器)を使用して、表面から10mmごとに110mmの深さまで、電気抵抗を測定して含水率を求めた²⁾。

鉄道総合技術研究所の報告書³⁾では、内部含水率が3.1%以下では、鉄筋の腐食速度は極端に遅くなることが示されているが、図-5に示す内部含水率の測定結果をみると、内部含水率が2%以下と、3.1%を下回っていることから、コンクリート表面にひび割れもなく漏水もない箇所では、腐食速度はきわめて遅いと考えられる。

また地下鉄構造物は、地表面下の環境が変動せず、おおむね一定であることを考慮すると、将来的にも鉄筋の腐食進行は進みがたいと想定することができる。

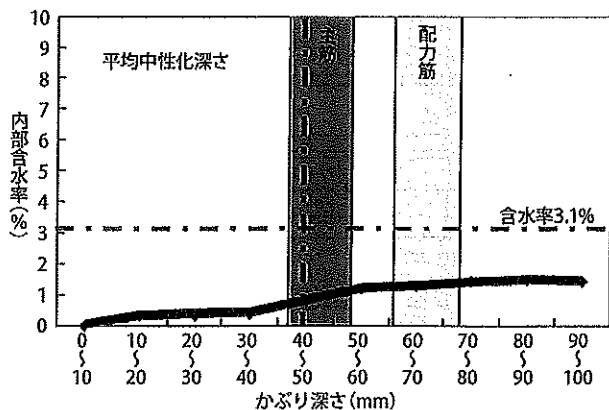


図-5 上野広小路駅～上野駅間含水率の深さ方向分布(2013年調査結果)

3-4-3 個別検査結果のまとめ

第一次および第二次健全度調査を行った個別検査結果から、銀座線のトンネル構造物に関して、次のような知見を得ることができた。

- ① 当該区間では、あまり漏水が生じていないことや地上部のように乾湿くり返しを受けるような環境条件下でないことから、中性化の進行は認められていない。
- ② 今後、急速に中性化が進行する可能性は低く、通常実施している日常補修で十分対応できる状態にあると思われる。
- ③ 施工後90年経過していることを考慮すると、検査においては、ひび割れの多大な発生や漏水補修箇所の再漏水など、変状の発生の有無や発生場所にも留意して、定期的なモニタリングは必要不可欠であると考えられる。

銀座線の全般検査結果にもとづく維持管理マネジメントの試み

4-1 維持管理マネジメントの適用と検討結果

ここでは、トンネル構造物に対して、種々のシナリオの中で最適な維持管理がどのようなものか、費用対効果を比較して検証することとした。

トンネル構造物の修繕計画を対象として、地下鉄費用の最小化と、修繕にもとづく地下鉄資産の効用の最大化に着目した。そこで、地下鉄トンネルを対象として、

- ① 劣化推移特性にもとづく劣化予測
- ② トンネルの検査結果にもとづく健全度評価
- ③ 費用便益分析にもとづく修繕対策

について検討した結果を述べる。

4-2 劣化推移特性にもとづく劣化予測

4-2-1 劣化予測の考え方

土木構造物の劣化予測は、検査による判定区分の低下を統計的に予測する手法により、トンネル構造物全体の劣化進行を予測することとした。統計的手法には、マルコフ確率過程を使用した。

4-2-2 トンネル検査データの集計手順

トンネルの検査データは、次の手順で集計した。

- ① 地下鉄各路線のトンネルを5mスパンに区

切り、そのスパン内で変状の最悪値をそのスパンの変状ランクとする。

- ② 建設年代別(10年ごと)に、各変状ランクの総数を全線において集計する。
- ③ 年代別(10年ごと)に建設されたトンネルの総延長より、年代別の総スパン数を求める。
- ④ 10年単位で各変状ランクのスパン数の総数を算出した結果を利用して、10年間に建設された総延長スパン数で除すことで、10年単位での各変状の存在確率を求める。
- ⑤ 集計した10年単位での存在確率に対して線形補間を行い1年単位のデータを算出する。

4-3 トンネルの検査結果にもとづく健全度評価

上記で得たデータをもとに、マルコフ確率過程で求めた劣化推移確率行列を用いた劣化予測計算により、銀座線トンネルの劣化予測と健全度評価を行った。健全度評価は定量的に行う必要があることから、重み付け係数(東京メトロへのアンケート調査により設定)を用いて、銀座線の各年における健全度を算出することとした。数値化する健全度の算出手法は、各スパンにおける変状ランクに重み付け係数を乗じ、総スパン数で平均化した値とした。

そこで全般検査のデータを利用して、推移確率行列を用い2年後の健全度を予測した結果を比較したところ、両者はほぼ同じ値になったことから推移確率行列による劣化予測は、ある程度の妥当性があることが確認された。

4-4 費用便益分析にもとづく修繕対策

4-4-1 修繕シミュレーション

そこで、この劣化予測計算を利用して、2010(平成22)年のデータをもとに20年間の健全度の変化と、修繕シミュレーションを行った。その条件は、以下のとおりである。

- ① 修繕は、年度ごとに1回行う。
- ② 修繕費用は、東京メトロのA2ランクの修繕費用の実績値を基本として、各変状ランクの修繕単価を設定する。
- ③ 修繕の信頼期間は10年とし、11年目以降

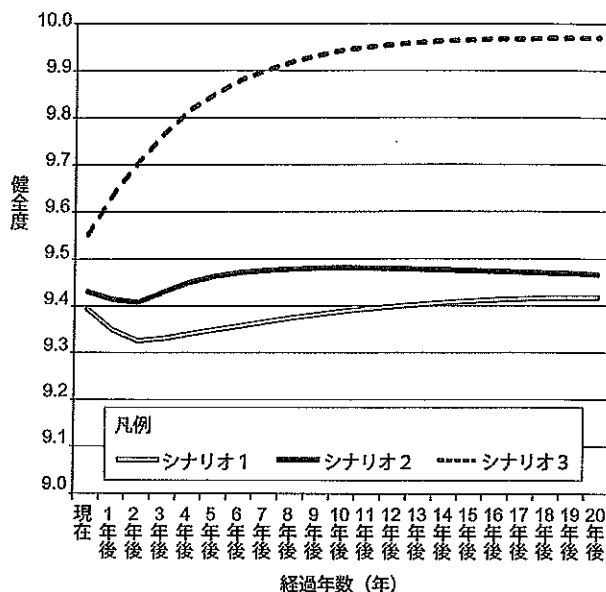


図-6 各修繕シナリオにおける健全度の推移^①(シナリオ1～3)

表-3 累計修繕費用とB/C値^①(シナリオ1～3)

シナリオ番号 (修繕範囲)	20年累積費用 (百万円)	B/C値
シナリオ1 (A1, A2ランクのみ毎年1回修繕)	1,145.75	1.310
シナリオ2 (A1～Bランクを毎年1回修繕)	1,051.60	1.334
シナリオ3 (A1～Cランクを毎年1回修繕)	1,185.97	1.333

は構造物本体と同等に劣化推移する。

- ④ 劣化予測には、全線を対象に2010(平成22)年通常全般検査により作成した推移確率行列を使用する。

4-4-2 修繕シナリオによる費用便益分析結果と対策

健全度推移と修繕費用を算出するにあたり、①修繕範囲(表-3に示す3パターン)と②修繕頻度(表-4に示す5パターン)に着目した修繕シナリオを作成した。

図-6に、修繕範囲を考慮したシナリオにおける20年間の健全度推移の結果を示す。この図より、全シナリオにおいて20年間、健全度9.0以上を維持しているが、その中で広い範囲にわたって修繕を行うシナリオ3ほど、20年にわたる健全度が高いことがわかる。しかし、20年間の累計修繕費用とB/C値(表-3)を見ると、シナリオ2のA1～B

ランクを補修した場合がもっともB/C値が高い。つまり、健全に近いCランクまで修繕する必要はなく、シナリオ2で、トンネル費用を抑え、費用対効果の高いトンネル修繕を伝えることがわかった。

次に、図-7に修繕頻度を考慮したシナリオ4～8における20年間の健全度推移を示す。シナリオの違いによる差は小さいが、修繕頻度が高いほど高い健全度を保ち、20年にわたって健全度9.0以上を維持していることが見受けられるが、20年間の累計修繕費用とB/C値(表-4)を見ると、シナリオ4(変状Bランク毎年修繕)のB/C値が高い。つまり、修繕の頻度を多くすることで、結果的に20年間の累積費用を抑え、トンネル修繕の費用対効果を高められることがわかった。

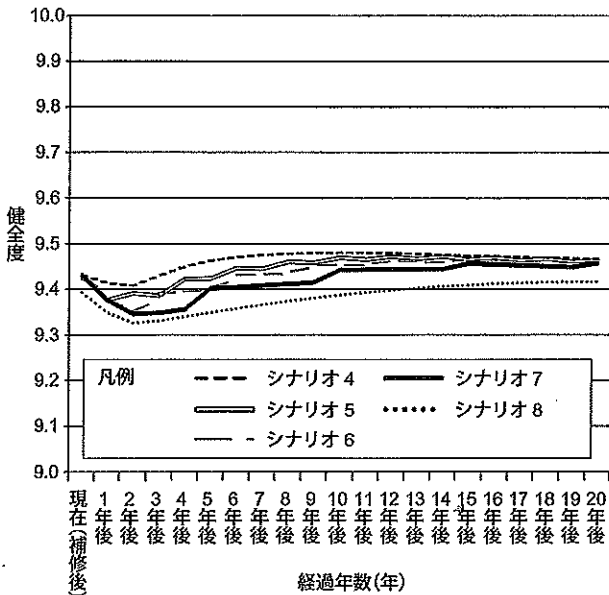


図-7 各修繕シナリオにおける健全度の推移¹⁾(シナリオ4～8)

表-4 累計修繕費用とB/C値¹⁾(シナリオ4～8)

シナリオ番号(修繕頻度)	20年累積費用(百万円)	B/C値
シナリオ4 (Bランクを毎年1回修繕)	1,051.61	1.335
シナリオ5 (Bランクを2年に1回修繕)	1,072.41	1.329
シナリオ6 (Bランクを3年に1回修繕)	1,082.34	1.329
シナリオ7 (Bランクを5年に1回修繕)	1,102.84	1.324
シナリオ8(=シナリオ1) (Bランク修繕なしA1, A2のみ)	1,145.75	1.310

5 銀座線の構造耐力の評価

5-1 鉄構框構造の耐力評価の概要

鉄構框構造の現有耐力の照査を行った。

構造解析は、2次元フレームモデルに加え、3次元ソリッドモデルを用いて、構造物の安全性を解析・照査した。

なお、まだ一般化されていない手法であるが、同モデルに対して、コンクリート、框鋼材、鉄筋相当の要素を付加し、それぞれに剛性を与え、コンクリートの曲げ引張りひび割れの発生を表現した3次元非線形FEM解析も行った。

5-2 検討条件

検討箇所の選定にあたっては、鉄構框を有する構造物の安全性の評価を目的とし、

表-5 欠損状態のモデル化手法

欠損状態	モデル化手法
健全	—
欠損1	上部框部材のかぶりコンクリートの曲げ剛性を0に設定する。
欠損2	上記に加え、上床版と縦桁のかぶりコンクリートも同様に曲げ剛性を0に設定する。

表-6 常時荷重設定根拠

常時荷重	安全係数 γ_i				設定根拠
	上床		側壁		
	土圧	変動荷重	土圧	変動荷重	
LD-1	1.1	1.0	1.2	1.0	上床・側壁の最大荷重状態
LD-2	1.1	1.0	0.9	1.0	上床中央に最大モーメントを生じる荷重状態
LD-3	0.9	0.0	1.2	0.0	側壁中央に最大モーメントを生じる荷重状態
LD-4	1.0	1.0	1.0	1.0	単位体積重量にもとづく荷重状態

表-7 解析ケース

常時荷重	荷重履歴	欠損状態		
		健全	欠損1	欠損2
LD-1	手法①	—	—	Case 3
LD-2	手法①	—	—	Case 4
LD-3	手法①	—	—	Case 5
LD-4	手法②	Case 1	Case 2	Case 6

- ① 標準的な構造を有している箇所
- ② 躯体の静的荷重状態が厳しいと判断される土かぶりが深い箇所
- ③ 剝落対策を目的としたかぶりコンクリートのはつり落としによる断面欠損が生じている箇所

という3点に着目した。欠損状態のモデル化手法を表-5に示す。

5-3 構造解析モデルおよび荷重履歴

構造解析モデルは、コンクリートを立体要素、框鋼材はシェル要素、鉄筋・アングルはトラス要素で表現し、構造物の形状寸法を忠実に再現した。

荷重履歴は、①常時荷重を鉛直・水平とも10分割して、多段階載荷する手法と、②実施工に則り発生順序ごとに躯体に多段階載荷させる手法とした。また、常時荷重は表-6に示すように鉛直・水平に安全係数を変化させて、構造物に影響の大きい4種類の解析ケースを設定し、躯体にクリティカルな応力状態を仮定できるようにした。

以上のような条件から、解析ケースは、表-7に示す6ケースを設定した。

5-4 解析結果

Case 1 (健全な状態)におけるコンクリートの引張ひずみ分布の結果を図-8に示す。現場と解析結果を比較す

ると、ひび割れ位置が整合していることから、このプログラムの妥当性を確認した。

各解析ケースの結果を図-9, 10に示す。

断面力は断面耐力を大きく下回っており、またコンクリートのひずみは非常に小さく、構造ひび割れ発生位置の鉄筋応力も非常に小さいことから、ひび割れ幅も小さいと判断され、銀座線のトンネル構造物の安全性は十分確保されていると考えられる。

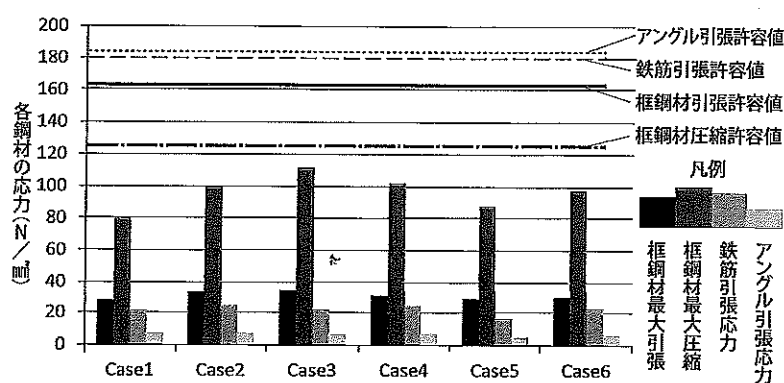


図-9 鋼材の応力評価⁵⁾

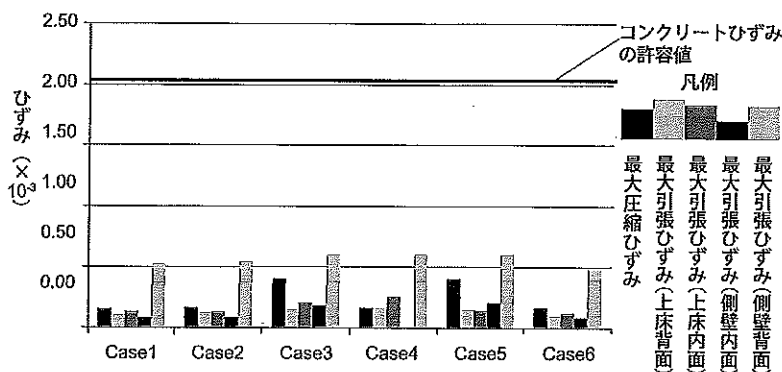
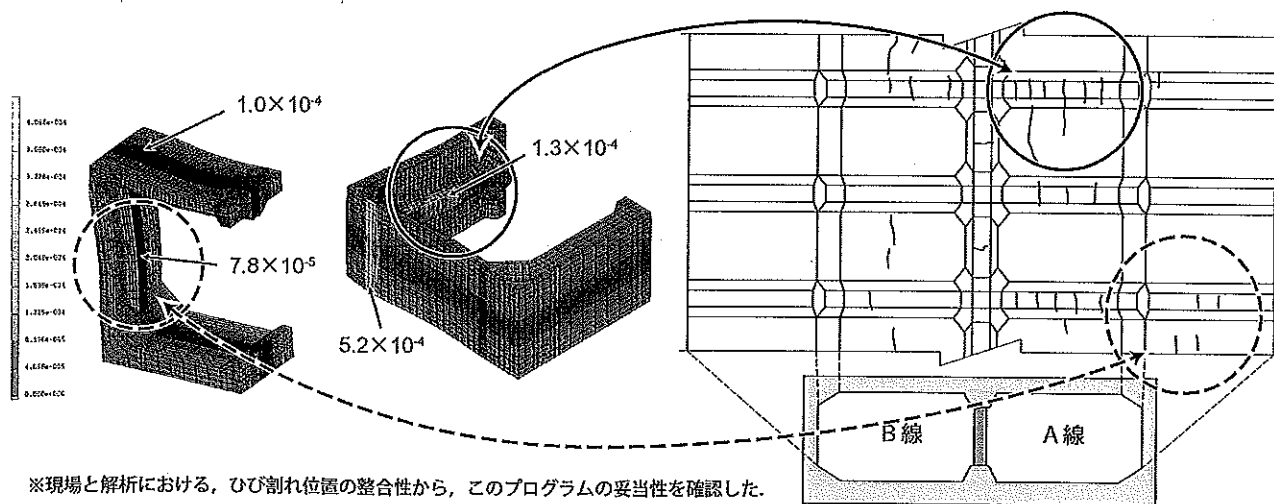


図-10 コンクリートひずみの評価⁵⁾



※現場と解析における、ひび割れ位置の整合性から、このプログラムの妥当性を確認した。

図-8 コンクリートの引張ひずみ分布(健全: Case 1)

6 維持管理の課題と今後の対策

以上をもとに、これから急増する建設後50年以上経過した地下鉄トンネル構造物の維持管理に関する主な課題および対策について提案する。

6-1 課題

- ・今後、老朽化する構造物が増え、点検すべき対象が広範囲にわたることにより、技術者の人員確保が難しくなり、さらに少子高齢化を背景として技術者数も減少することで、点検頻度が減少し、機能の低下を招くおそれがある。
- ・トンネル構造物の不具合箇所の対策の必要性の判断は、目視や打音による点検が重要であるが、その点検結果は技術者の判断によるため、結果としてバラついた評価になる可能性がある。
- ・老朽化する構造物が増えることでコスト増となり、維持管理上での新規投資が困難な状態になる。

6-2 対策

- ・現場の変状は一律ではないため、個々の変状

の発生状態を十分調査し、情報の収集・蓄積を行い、さらに「技術の伝承」を視野に入れた取り組みを行って、知識と経験を備えた技術者を育てる。

- ・技術者の減少に対応した技術の簡素化やコスト削減のために、人工知能(AI)を導入した「新技術開発」を構築する。
- ・費用対効果を十分検証したうえで、補修・補強対策の優先順位を決定する手法を構築する。
- ・構造物の変状を見逃さず、安定した評価を行えるよう、迅速かつ確実に把握できるシステムを導入する。

以上、この研究成果をもとに、築50年以上経過した地下鉄トンネル構造物における「日常の維持管理」と「長期的な維持管理」に関して、本研究で行った維持管理シナリオの「修繕シミュレーション」を活用したフローチャートを図-11に提案する。

7 おわりに

1950年代後半から高度経済成長期が始まり、新規建設に対して、多くの予算を計上し、一定量の

技術者が投入され、インフラ施設の急速な整備がなされてきた。しかし、ここ数十年のうちに、老朽化が問題視され、相俟って、施設の維持管理・更新に対する関心も高まり、補修・補強対策が喫緊の課題となってきた。

メンテナンスは、構造物を新設する分野とは異なり、「構造物を点検し、修理し、使用する」ことをくり返すシステムである。それゆえ、東京メトロにおいても、鉄道構造物に対するメンテナンスの必要性が今まで以上に重視され、従来の検査体制を強化してきた。

本研究では、築造後90年を経過した東京メトロ銀座線における特殊なトンネル構造物である「框構造」について、3次元非線形FEMを用いて解析し、応力照査などの検討を行って、現構造

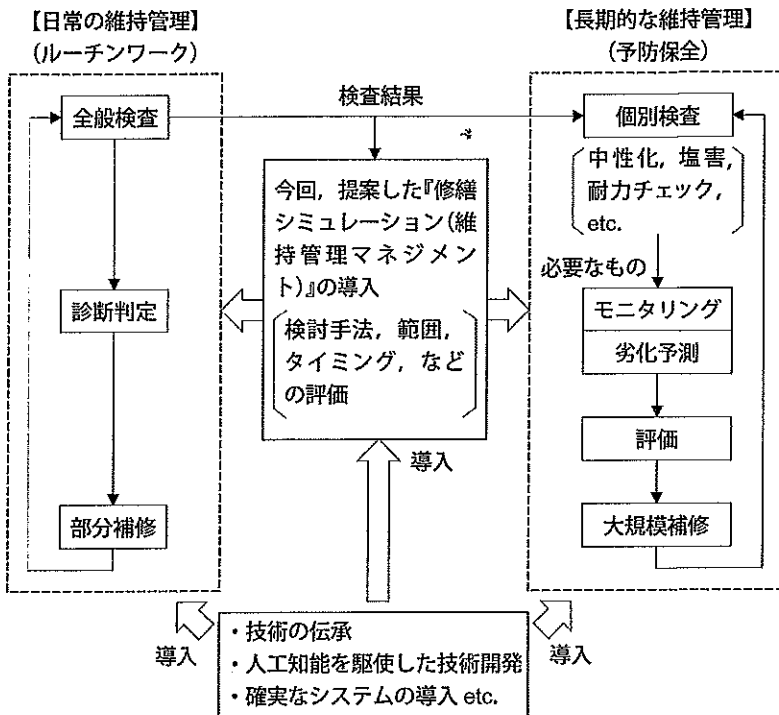


図-11 築50年以上経過した地下鉄トンネル構造物の維持管理フロー(提案)

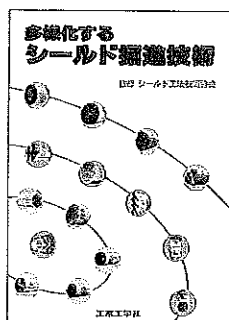
物の信頼性を評価し、さらに今後の維持管理の対策について提案した。

最後に、本研究を進めるにあたり、東京地下鉄(株)鉄道本部改良建設部および工務部の関係各位にご指導、ご助言をいただいたことに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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.11-18, 2007.1.
- 2) 東京地下鉄：銀座線トンネル維持管理検討委員会報告書, p.9, 2005.3.

- 3) 飯島亨・佐々木孝彦・横田優・松島学：塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究, 鉄道総合技術研究所, 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, 日本材料学会, Vol.4, pp.11-16, 2004.10.
- 4) 西村高明・鈴木彰吾・小西真治・村上哲哉・赤木寛一：検査データに基づく地下鉄トンネル劣化予測に関する検討, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.25, III-3, 2015.11.
- 5) 西村高明・山本務・松川俊介・大石敬司・杜世開・新井泰：現場調査結果に基づく三次元非線形FEMを用いた鉄構框構造の安全性評価に関する研究, 土木学会論文集F, Vol.65, No.1, pp.38-49, 2009.2.



多様化する シールド掘進技術

監修 シールド工法技術協会
B5判 141頁 本体価格2,500円

本書は、「トンネルと地下」に約1年間にわたり連載した『多様化するシールド掘進技術』をベースとして、掲載しなかった工法、技術などを整理、体系化するとともに、各種工法の境界、システム・考え方の違い、適用での留意点が、よりわかりやすいように手を加え再度同名の図書としてシールド工法技術協会が監修を行ったものである。

(掲載工法)

- ①ラチス式同時施工シールド工法, ②F-NAVIシールド工法, ③ハニカムセグメントを用いた同時施工法, ④ロングジャッキ式同時施工シールド工法, ⑤ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法, ⑥充填式シールド急曲線工法, ⑦地下茎シールド工法, ⑧T-BOSS工法, ⑨球体シールド工法, ⑩上向きシールド工法, ⑪MMST工法, ⑫拡大シールド工法, ⑬偏心多軸(DPLEX)シールド工法, ⑭ワギング・カット・シールド工法, ⑮自由断面シールド工法, ⑯OHM工法, ⑰H&Vシールド工法, ⑱単円～三連型駅シールド工法, ⑲MFシールド工法, ⑳DOT工法, ㉑MSD工法, ㉒親子シールド工法, ㉓拡径シールド工法, ㉔DSR工法, ㉕泥土加圧シールド工法, ㉖ケミカル・プラグ・シールド工法, ㉗気泡シールド工法, ㉘コンパクトシールド工法, ㉙既設シールド撤去工法

株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072