

博士論文審査報告書

論文題目

地下鉄トンネルの検査データに基づく

安全性評価と維持管理に関する研究

Subway Tunnel Safety Evaluation and its Maintenance
based on the Inspection Data

申請者

西村	高明
Takaaki	NISHIMURA

2017年2月

我が国の社会資本は 1950 年代後半から高度経済成長とともに急速に整備が進められ、その後 30～60 年間で相当量の社会資本ストックが蓄積されてきた。近年になり、以前に建設された多くのインフラ施設の老朽化が解決されるべき検討課題とされ始め、インフラ施設の維持・更新が注目されてきた。鉄道トンネルにおいても、建設後 50 年以上経過したものは全体の約 55% を占め、さらに 20 年後には全体の約 85% にも及ぶなど、老朽化が顕著になっている。とりわけ、東京地下鉄株式会社(以下、東京メトロと呼ぶ)の地下鉄銀座線では、一日約 108 万人(2015 年度実績)もの乗降客数があり、都心でも重要な路線の一つである。しかし、建設後 89 年を経ており、維持管理に関しては各種検査を入念に行って構造物を管理し、安全・安定運行が図られている。

鉄道の安全性については、国土交通省の定める維持管理標準で『①トンネル構造の安定性として、トンネルが崩壊しないこと。②建築限界と覆工との離隔として、建築限界を支障しないこと。③路盤部の安定性として、列車の安全な運行に支障するような路盤の隆起・沈下・移動が生じないこと。④はく落に対する安全性として、列車の安全な運行に支障するようなコンクリート片、補修材等のはく落が生じないこと。⑤漏水・凍結に対する安全性として、列車の安全な運行に支障するような漏水、凍結が生じないこと。』と規定されている。

本論文では、上記の維持管理標準の中で特に④の安全性に着目し、東京メトロ地下鉄銀座線を対象に各種検査データを分析し、それに基づく三次元非線形 FEM 解析を用いて構造耐力の評価を実施し、銀座線の安全性の評価と維持管理に関する検討が行われている。審査にあたっては、2016 年 12 月 1 日に審査員予定者 3 名による予備審査会を実施し、専攻内縦覧に付してよい旨の判定を得た。2016 年 12 月 1 日から 1 週間の建設工学専攻における縦覧の後、12 月 8 日の専攻会議で博士論文受理申請が承認され、12 月 22 日の創造理工学研究科運営委員会で論文が受理された。2017 年 1 月 26 日に公聴会を開催するとともに、4 科目の学識確認を実施した。研究倫理については受理前に申請者が研究倫理科目を受講するとともに、論文の剽窃・盗用チェックが実施され問題のないことが確認された。

本論文は、序論から結論までの 5 章で構成されているが、以下に各章の概要と審査結果を述べる。

第 1 章は序論であり、我が国における社会資本ストックの蓄積から、近年多くのインフラ施設の老朽化が解決されるべき検討課題とされ始め、インフラ施設の維持・更新の必要性が注目されてきたことを概説し、本研究の目的である地下鉄トンネルを対象とした維持管理の必要性および本論文の構成と各章の概要について述べている。

第 2 章では、東京メトロ地下鉄銀座線の重要性と維持管理について説明し、銀座線の建設の変遷や当時の設計法を紹介するとともに、銀座線特有のトン

ネル構造形式の特徴について概説している。さらに、地下鉄の安全・安定輸送を確保するために、銀座線で行った各種検査において確認された老朽化の著しい個所での補修・補強対策について言及している。また、国土交通省の『維持管理標準』の考え方と、東京メトロの『維持管理基準』が比較、紹介されている。

第3章では、東京メトロ銀座線の通常全般検査および特別全般検査体制について要約するとともに、老朽化を調査するために30年近く実施されてきた個別検査の結果を整理し、その健全度を評価している。

また、地下鉄トンネルの維持管理のマネジメントの観点から、費用便益分析に基づく修繕対策を検討するために、統計的に劣化を予測して、修繕費用を考慮した最適な補修のシミュレーションを実行している。本章で得られた成果は、下記のとおり集約されている。

(1)小さな浮きやはく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が、浮きやはく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、経過観察で対応可能である。補修を行った区間では、施工後十数年経過していても変状はほとんど出ていなかった。このことから、現在の補修工法の有効性を確認した。

(2)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、劣化環境など様々な要因により劣化の進行具合が変わってくることを確認した。個別検査においては、中性化の進行はあまり認められなかった。これは当該区間で、あまり漏水が生じていないこと、また地上部のような乾湿繰り返しを受けるような悪条件下でないことが要因であり、今後も急速に中性化が進行する可能性は低い。

(3)地下鉄トンネルの費用対効果の高い修繕を行うには、修繕範囲を広げ、さらに修繕頻度を高くする、すなわち予防保全的な修繕を実施することが望ましい。

銀座線トンネルの施工後89年が経過していることを考えると、今後も定期的なモニタリングが必要不可欠である。特に通常全般検査において、ひび割れの多大な発生や漏水補修箇所での再漏水など、変状発生の有無や発生場所にも留意して監視を続けるとともに、必要な修繕を施していくことが重要であることを指摘している。

第4章では、第3章で述べた東京メトロ銀座線トンネルの安全性に密接に関係するトンネル構造物の構造耐力評価に焦点をあて、解析的な検討を行っている。特に、躯体調査および材料試験結果、構造検討条件を考慮した三次元非線形FEM解析を用いて、銀座線トンネルに用いられた鉄鋼框構造の構造耐力を算定している。本解析により銀座線トンネルの耐力評価に関連して得られた知見は、下記のようにまとめられている。

(1)三次元FEM解析は、鉄鋼框構造特有の縦断方向に対して不連続な状況を忠実に再現できるため、それらに起因する三次元効果や同効果を考慮した挙

動，応力状態から得られた評価により耐力確認が可能である。一般に，連続体の解析ではコンクリートのほか鋼材，鉄筋を一体の剛性として扱うので，構造ひび割れの発生傾向や各部材の応力度を直接的に把握することはできない。本研究で採用したモデル化手法に則って，躯体内部にある鉄骨，鉄筋までモデル化して各々に剛性を与え，コンクリートの引張軟化構成則を適用することにより，コンクリートの曲げ引張ひび割れの発生を考慮した非線形解析が可能になる。

(2)本解析で算定された最大ひび割れ幅は，コンクリート標準示方書で規定された許容ひび割れ幅を十分下回っており，実際のトンネルのひび割れも，許容ひび割れ幅とほぼ同等以下であったため，現在のトンネルは構造安定性を満足しており，鋼材腐食等の耐久性も問題ない。

以上の解析結果から，東京メトロ銀座線のトンネル構造部材に発生している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，安全性が十分確保できていると判断している。この要因として，当該トンネルが，昭和初期の材料・配合・施工で構築されていて，コンクリート強度は現在より低かったにも関わらず，それに応じた適切な部材断面・配筋が確保されており，当時の設計技術は現在と比べ遜色ないものであったことを確認している。

第5章では，結論として各章で述べた結果および知見をとりまとめ，今後ますます増加すると思われる築後50年を超える地下鉄トンネル構造物の維持管理に関する今後の課題と対策を整理している。

以上を要するに，本論文は建設後89年を経過した東京メトロ銀座線を対象として，鉄道構造物の維持管理標準に定められた通常全般検査，特別全般検査を含む各種の検査データに基づいて，地下鉄トンネルの安全性評価と維持管理手法について研究したものである。具体的には，綿密な三次元非線形有限要素法解析によりその安全性を確認するとともに，統計的に劣化を予測して，修繕費用を考慮した最適な補修のシミュレーションを実行して費用便益分析に基づく最適な修繕対策を検討し，予防保全的な維持管理の重要性を実証している。この成果は，地下鉄トンネル構造物の維持管理に向けて具体的な対策手法を提示するものであり，地盤工学，トンネル工学上の貢献大なるものと判断される。よって，本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2017年2月

審査員 主査 早稲田大学教授 工学博士(早稲田大学) 赤木寛一

副査 早稲田大学教授 工学博士(早稲田大学) 小泉 淳

早稲田大学教授 博士(工学)早稲田大学 小峯秀雄