

博士論文概要

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

2016年12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問題視され始め、インフラ施設の維持・更新がクローズアップされてきた。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くる。とりわけ、東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロ）地下鉄銀座線は、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・安定運行を図っている。

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の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研究を行った。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問題視され始め、インフラ施設の維持・更新の必要性がクローズアップ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た。

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述べた。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・補強対策についても言及した。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』を比較して紹介した。

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た。

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行った。本章で得られた成果は、下記のとおり集約することができる。

(1)小さな浮きやはく離を発見するためには、近接目視及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。

(2)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。

(3)漏水が多い区間では、浮きやはく離が多くなる傾向が見られることから、水への対応（止水など）の重要性を確認した。

(4)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。

(5)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。

(6)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。

(7)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。

(8)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確認した。

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た。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の算定を行った。以下に、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を記す。

(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。

(2)本研究のような構造耐力の照査を目的とした検討を行う場合は、構築の詳細な形状寸法その他、対象区間内にみられる各種の変状も忠実に再現でき立体要素を主体とした三次元構造解析モデルを用いることが妥当である。

(3)一般に、連続体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。

(4)鉄筋とコンクリートの付着切れは、長期的な安全性を確保する上では回避すべき事象であり、断面修復等の手法を用いて、速やかに鉄筋とコンクリートの付着を確保する必要がある。

(5)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算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、東京メトロ銀座線トンネル構造の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できる。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のであったと判断できる。

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下記のような今後の課題と対策を整理した。

課題としては、①適切な維持管理が行われない場合、トンネル構造物の機能が低下し、鉄道の安全・安定運行が損なわれる。②今後、老朽化する構造物が増加し点検すべき対象が広範囲に亘ることで、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、機能の低下を招く恐れがある。③目視や打音による点検は、技術者によりバラついた結果が生じることがある。④老朽化する構造物が増えることで、コスト増となり、維持管理を行う上での新規投資が困難な状況になることなどが指摘される。

対策としては、①既存の情報の収集・蓄積を行い、“技術の伝承”を視野に入れた取り組みを行う。②技術者の減少に対応した技術の簡素化やコスト縮減のために、人口知能(AI)を導入した“新技術開発”を構築する。③構造物の変状を見逃ごさないよう、迅速にかつ確実に把握するシステムを導入することなどが挙げられる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 西村高明 印

(2016年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	<u>西村高明</u> , 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.1,38-49,2009.2
○論文	<u>Takaaki Nishimura</u> , Shinji Konishi, Tetsuya Murakami, Shogo Suzuki, Keita Maeda, Hirokazu Akagi: A trial infrastructure asset management for subway tunnels, Proceedings of 6 TH JAPAN-CHINA GEOTECHNICAL SYMPOSIUM, Advanced Geotechnology in Japan and China, 30 August-1 September 2015, Sapporo Japanese
○論文	<u>Takaaki Nishimura</u> , Shinji Konishi, Tetsuya Murakami, Hirokazu Akagi, Keita Maeda and Shogo Suzuki: A trial intefrasuructure asset management for subway tunnels, Proceedings of Fourth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 16-19 November 2014, Tokyo Japan
○報告	<u>西村高明</u> , 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
○報告	<u>西村高明</u> , 鈴木彰吾, 小西真治, 村上哲哉, 赤木寛一: 地下鉄トンネルの検査データに基づく健全度評価と修繕投資効果について, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.24, III-7, 2014.12
報告	宮瀬史裕, <u>西村高明</u> , 小林朗, 塩屋俊幸: 高軸力を受ける RC 柱の炭素繊維シートによる耐震補強実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 231-236, 1997.6
報告	小山幸則, <u>西村高明</u> : 梁ばねモデルによるシールドトンネル覆工の設計法, 鉄道総研研究論文, 鉄道総合技術研究所, Vol.11, No.7, 1997.7
2. 講演	
講演	郷原惇史, 赤木寛一, 小西真治, <u>西村高明</u> , 村上哲哉, 鈴木彰吾: 地下鉄トンネルの点検データを用いた劣化予測手法について, 第 12 回地盤工学関東支部発表会, pp450-451, 2015.10.
講演	三浦丈典, 赤木寛一, 小西真治, <u>西村高明</u> , 村上哲哉, 鈴木彰吾: 地下鉄トンネルの検査データに基づく河川下区間での健全度評価について, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015.9
講演	三浦丈典, 赤木寛一, 小西真治, <u>西村高明</u> , 村上哲哉, 鈴木彰吾: 地下鉄トンネルの点検データを用いた漏水進行割合と鉄筋の腐食確率の推定, 第 11 回地盤工学会関東支部発表会, 2014.10
講演	鈴木彰吾, 前田啓太, 赤木寛一, 小西真治, 村上哲哉, <u>西村高明</u> : 地下鉄トンネルの検査結果に基づく健全度評価について, 第 69 回土木学会年次学術講演会概要 VI, VI-170, pp.339-340, 2014.9

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
3. その他	
○講演	<u>西村高明</u> ：東京地下鉄13号線建設における工事概要，第1回日本-シンガポールトンネルセミナー，2012.3（Singapore）
○講演	<u>西村高明</u> ， <u>浜辺真篤</u> ， <u>竹縄慎二</u> ， <u>佐々木洋二</u> ：海外情報 第14回(2009年)JRMA 海外鉄道調査団報告(その4) スペイン(2)，R&M、Vol18,No.7、S/N.718、2010.7
○講演	<u>西村高明</u> ， <u>浜辺真篤</u> ほか：海外情報 第14回(2009年)JRMA 海外鉄道調査団報告(その3) スペイン(1)，R&M、Vol18,No.6、S/N.717、2010.6
○講演	<u>西村高明</u> ：東京メトロにおける建設技術の変遷，建設技術研究委員会，土木学会，2009.11
○講演	<u>西村高明</u> ：東京メトロの改良建設工事計画，建設技術力の活用方策，第10344回日本計画研究所特別研究セミナー，日本計画研究所，2009.7
○講演	<u>西村高明</u> ：シールドトンネルの設計，シールド講習会，地盤工学会，2008.12
○講演	<u>西村高明</u> ：副都心線建設工事における環境対策－発注者が取得したISOの運用－，第8回環境フォーラム，玉川大学工学部マネジメントサイエンス学科，2008.11
○講演	<u>西村高明</u> ：地下鉄副都心線建設プロジェクトを振り返って－新技術の活用とコスト削減方策－，プロジェクトマネジメントシンポジウム2008，日本プロジェクトマネジメント協会，2008.9
○講演	<u>西村高明</u> ：副都心線建設工事における環境対策－発注者が取得したISOの運用－，一般財団法人建材試験センター，2008.4
○講演	<u>西村高明</u> ：東京地下鉄におけるシールド工事のコスト削減の取り組み，日本－ソウル地下鉄技術交流会，ソウル地下鉄運営公社，2006.4（Seoul）
○講演	<u>西村高明</u> ：東京地下鉄13号線建設概要，日中シールド技術交流会，早稲田大学，2005.8
○講演	<u>西村高明</u> ：東京地下鉄13号線建設における情報化・自動化技術の取り組み，第22回建設用ロボットに関する技術講習会，土木学会，pp.61-72，2005.3
講演	廣元勝志，矢萩秀一，藤木育雄， <u>西村高明</u> ，今井京平：3連円形駅シールドにおける縦桁の設計，第54回土木学会年次学術講演会概要Ⅲ，VI-54，pp.268-269，1999.9
講演	宇佐美芳彦，小山幸則， <u>西村高明</u> ，松本吉雄：上り勾配中のシールドトンネル施工における鉛直地盤変位の解析，第51回土木学会年次学術講演会概要Ⅲ，VI-170，pp.340-341，1996.9
講演	入江健二， <u>西村高明</u> ，渡辺浩史：地下連続壁の本体利用に関する計測結果と設計手法について，トンネル工学研究発表会論文・報告集，pp.287-292，1991.12

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
報文	<u>西村高明</u> ：東京メトロ有楽町線小竹向原～千川駅間配線変更計画について，日本鉄道情報，No.750，pp.1-6，2010.4
報文	<u>西村高明</u> ，島村祐司：副都心線各駅のデザイン，基礎工，Vol.36 pp.1-6，No.6，pp.34-38，2008.6
報文	<u>西村高明</u> ：企業価値向上のためのリスク管理，経営アカデミートップマネジメントコースグループ研究報告書，社会経済生産性本部，pp.1-62，2005.12
報文	<u>西村高明</u> ，今井龍雄，吉永旭：低空頭下での銀座線高架橋下請け工事，建設機械，Vol.41，No.8，pp.54-59，2005.8
報文	<u>西村高明</u> ，今井龍雄，鷺見博由：渋谷駅前の銀座線高架橋基礎の受け替え－13号線・東横線相直 渋谷駅建設工事－，トンネルと地下，Vol.36，No.2，S/N.414，pp.29-36，2005.2
報文	<u>西村高明</u> ，大月喜雄，宮島秀夫：地下鉄13号線各駅の土留め工法，トンネルと地下，Vol.34，No.9，S/N.397，pp.21-29，2003.9
報文	藤木育雄， <u>西村高明</u> ，高橋聡：多様化するシールド工法，建設機械，Vol.38，No.12，pp.9-12，2002.12
報文	<u>西村高明</u> ，武藤義彦：格子状に施工したセメント杭による液状化対策，基礎工，Vol.30，No.11，pp.77-80，2002.11
報文	朝倉俊弘，小島芳之，齋藤貴，新井泰，岡野法之，小西真治，野城一栄，高橋徹，大石敬司，六車崇司， <u>西村高明</u> ，佐藤豊：NATM トンネルの安全(和訳)，Safety of NATM tunnels，鉄道総研研究業務資料，2000.9
報文	<u>西村高明</u> ：シールドトンネル工事におけるコスト縮減対策－営団地下鉄南北線・半蔵門線建設工事－，土木施工，Vol.41，No.6，pp.25-28，2000.5
報文	<u>西村高明</u> ：わかりやすい土木講座－シールドトンネル技術の変遷－，日本鉄道施設協会誌，Vol.36，No.9，pp.63-66，1998.9
報文	新井泰，岡野法之， <u>西村高明</u> ：シールドトンネル設計法の新たな方向，RRR，鉄道総研，Vol.55，No.4，pp.24-27，1998.4.
報文	Yukinori Koyama， <u>Takaaki Nishimura</u> ：The Design of Lining Segment of Shield Tunnel Using a Beam-Spring Model，Quarterly Report of RTRI，Vol.39，No.1，pp.23-27，1998.2
報文	<u>西村高明</u> ：シールドトンネル覆工の新設計標準，施設研究ニュース，No.84，pp.1-2，1997.8
報文	<u>西村高明</u> ：既存の開削トンネル RC 柱の耐震補強および耐震補強工法，施設研究ニュース，No.79，p.2，1997.3