

地下鉄トンネル検査データを用いた健全度予測とそれに基づく維持管理計画

Prediction of Subway Tunnel Health Conditions using Inspection Data and Maintenance Management Planning

赤木 寛一 (あかき ひろかず)

早稲田大学理工学術院 教授

e-mail: akagi@waseda.jp

小西 真治 (こにし しんじ)

元東京地下鉄(株) 土木担当部長 (早稲田大学 招聘研究員)

e-mail: shinjikonishi@gmail.com

キーワード：地下鉄トンネル，検査データ，維持管理計画，健全度予測

1. はじめに

社会資本アセットマネジメントは、公共機関などが施設などの固定資産の入手、維持管理を行うために投資を行う際に、ライフサイクルコストのみの最小化を目指すのではなく、供用上の便益性などの社会的要請を考慮するマネジメントとされている。

筆者の一人が土質力学、地盤工学に加えてこの種の問題に取り組むこととなったきっかけは、ある社会資本関連事業者の地下施設の劣化とマネジメントに関する相談を受けたことに始まる。これからの土木は環境・防災とマネジメントだと見定めて、2006年前期に大学の派遣で半年間アングロサクソン系の社会資本マネジメント研究が盛んなニュージーランド、カンタベリー大学で集中して勉強する機会を得ることができた。

ここでは、社会資本アセットマネジメントの具体的な応用例として、地盤工学と直接的に関係するところは少ないが、地下鉄トンネルの点検結果に基づく劣化予測と健全性評価による維持管理計画立案の具体例をご紹介します。ここで、「土と基礎」、否、地盤工学会誌の本特集号の総説の役割を果たすこととしたい。

近年、古いインフラ構造物の増加や将来の労働力の減少から構造物の維持管理の合理化が求められている。そのため、維持管理のDX化や機械化が進められている。また、この過程で得られるデータの有効活用も進められている。構造物の検査データを用いた将来の状態予測とそれに基づく維持管理計画策定もその取組みの一つである。ここでは、筆者らが研究してきた地下

鉄トンネルを対象とした取組みについて述べる。

2. 鉄道構造物の維持管理

2.1 維持管理の変遷と維持管理標準

鉄道では、135歳の東海道本線清水谷戸トンネルをはじめ、古い構造物が多数存在しているが、適切な維持管理で立派に活躍している。鉄道の昔の維持管理方法は、何か問題が発生してから対処する事後保全であった。しかし、戦争中の構造物の荒廃などから事故が多発するようになり旧国鉄では1965年頃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、自然災害等による事故が急激に減少した¹⁾。

さらに、1973年に取替え標準が制定され、現在の維持管理の体系となった。すなわち、事前に定期的に検査を行い、健全度を判定し、弱点箇所や変状箇所を抽出し、その箇所の詳細な検査を行い、必要な場合は措置（監視、補修・補強等）を行うものである。

しかし、1999年に新幹線トンネル等での覆工コンクリート片はく落事故が発生、社会問題化し、鉄道構造物の維持管理について議論が重ねられた。その結果、2009年に「鉄道構造物維持管理標準（以下、維持管理標準と呼ぶ）」²⁾が国土交通省から通達され、すべての鉄道事業者が同じ体系で維持管理を行う事になった。道路では、2012年に中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落事故が発生し、2013年に5年毎の定期点検が道路法で義務化され、「道路トンネル定期点検要領」³⁾や「道路トンネル維持管理便覧」⁴⁾等の改訂によりこの

表一 鉄道トンネルにおける検査区分²⁾

検査区分	内 容
初回検査	初期状態の把握を目的に新設時の供用開始前に実施する検査。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共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年毎に実施。目視と打音主体。
特別全般検査	トンネルでは新幹線10年、在来線20年毎に実施。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、方法等の精査を行う。
随時検査	地震や大雨等で変状が発生した場合など必要な場合に実施。

体系で点検等が実施されている。

2.2 地下鉄トンネルの維持管理

維持管理標準では、維持管理の性能規定化、検査の区分、検査の周期、検査員、調査項目と方法、健全度判定、措置、記録の考え方と方法が記載されている(表一、表二)。

地下鉄トンネルにおいても2年毎の徒歩による目視を主体とした通常全般検査と20年毎の近接目視と打音検査による、より詳細な特別全般検査が行われている。

9路線を保有している東京地下鉄株式会社(以下、東京メトロと呼ぶ。)の場合、1路線につき約3カ月かけて通常全般検査を行い、その結果から健全度に応じて順次補修計画を立て、定められた期間内に補修を行っている。この際、膨大な検査データが作成されデジタルデータとして保存されている。しかし、補修工事の計画が終わるとほとんど使われることがなく、このデータの有効利用が懸案となっていた。現在は、検査データを用いた将来の状態予測とそれに基づく補修計画検討⁵⁾⁶⁾、統計分析理論を用いた指標による維持管理⁷⁾、BI ツール(Business Intelligence Tools)を用いた管理システム⁸⁾等で利用が進んでいる。

3. 構造物の検査データを用いた将来状態予測とそれに基づく維持管理計画

3.1 検討の変遷

鉄道構造物について、2000年ごろから維持管理方法と事故による損失の関係を評価するリスクマネジメン

表二 鉄道トンネルにおける健全度判定区分²⁾

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	措置等
A	AA 脅かす	重大	緊急に措置
	A1 早晚脅かす。異常外力の作用時危険	進行中の変状等。性能低下も進行	早急に措置
	A2 将来脅かす	性能低下の恐れがある変状等	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	必要に応じて監視等の措置
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

ト手法(リスクを考慮したライフサイクルコスト評価)が検討された⁹⁾¹⁰⁾。しかし、構造物の劣化状態が評価できるデータや具体的な事故の例が少なく、リスクを評価する損害発生確率の算定や損害額算定の困難さから、実務で使われているとは言えない状態である。一方、近年これとよく似たアセットマネジメント手法を用いて、膨大にストックされている構造物の検査データから将来の状態を予測し、維持管理計画を評価する方法の研究が進められている⁵⁾⁶⁾。

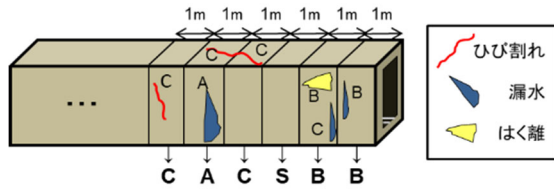
3.2 地下鉄トンネルでの検討概要

ここでは、検査データを用いた劣化予測に基づく補修計画策定について紹介する。具体的には、鉄道構造物の全般検査結果のデータを用いてマルコフ過程を用いた劣化推移行列を作成し、どの健全度の状態まで補修するかといった健全度ランクに対する補修の違いによる将来の構造物の状態の違いを予測・比較し、効率的な補修方法について検討した。

この検討においては、鉄道の実務に即した制約条件を設けている。すなわち、安全性を最優先にすることと、維持管理の具体的な体制や予算を急に変更することが困難なため年間の補修数量を一定にすることを条件としている。

3.3 維持管理計画の検討手順

本検討では、既存の地下鉄路線の検査データを用いた。検査データは、変状種類・部位・健全度等、変状発見以降の状態が記録されているものを用い、健全度に着目し「最悪値法」⁵⁾により集計した。最悪値法とは、トンネルを図一に示すように路線方向1mのブロックに分割し、その中にある変状で最も悪い健全度をそのブロックの健全度とする方法である。さらに、トン



図一1 集計法概要 (最悪値法)⁵⁾

ネルの構造種別 (開削・シールド) と地盤条件 (硬質・軟弱) に着目し, 検査データを4通りに区分した。

次に, 最悪値法による集計結果を構造物の建設後経過年数毎に整理した。その後, 経過年数毎に各健全度の存在確率を集約し, 連続データを作成した。

この連続データに対して, 「マルコフ過程 (未来の挙動が現在の状態のみに依存し, 過去の履歴とは無関係に展開する確率過程)」を応用し表一3 に示すような「劣化推移行列」を作成した。連続データ内の確率推移については, 1年毎に同ランクを維持するか1段階悪化するかの2通りと仮定した。

ある経過年数の各変状の存在確率ベクトル $\{P_x\}$ に, 該当する経過年数の劣化推移行列を掛け合わせ, 1年後の各変状の存在確率 $\{P_{x+1}\}$ を予測した (式(1))。

$$\{P'_S P'_C P'_B P'_A\} = \{P_S P_C P_B P_A\} \begin{bmatrix} k_{SS} & k_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & k_{CC} & k_{CB} & 0 \\ 0 & 0 & k_{BB} & k_{BA} \\ 0 & 0 & 0 & k_{AA} \end{bmatrix} \quad (1)$$

また, 集計した結果を定量的に評価するため, 「健全度 (Health Index :h)」を導入した。ここでの Health Index とは, 各変状ランクのスパン数 (n_i) に各変状ランクの重み付け係数 (k_i) を乗じ, 総スパン数で除した値である (式(2))。なお, 健全度判定区分毎の重み付け係数を表4 に示すように設定した。この変状ランクの重み付け係数は, 検査者へのアンケート調査および数理モデルの適用¹¹⁾により決定した。

$$h = \frac{\sum k_i n_i}{\sum n_i} \quad (2)$$

対象路線の駅間 (32 区間) 毎にデータ集計・劣化推移行列の作成を行い, 駅間・構造種別・地盤条件別に劣化予測を行った。この結果をもとに, 以下に示す2つの指標 (X, Y) の組み合わせを変化させて, 年間補修スパン数を区間別に配分した。ここでは, 簡単なた

表一3 劣化推移行列の作成例⁵⁾

		経年(X+1)年 各ランク存在確率				
		S	C	B	A	
経年(X)年 各ランク 存在確率	S	0.800	0.944	0.056	0	0
	C	0.100	0	0.860	0.140	0
	B	0.075	0	0	0.973	0.027
	A	0.025	0	0	0	1

表一4 健全度判定区分毎の重み付け係数⁵⁾

健全度判定区分	A	B	C	S
重み付け係数	1	2.3	5.3	10

め年間補修量全量を 100 スパンとした。

なお, X は各区間年間補修スパン数を劣化予測における当該区間の健全度変化の平均勾配の比により決定したものであり, Y は各区間年間補修スパン数を劣化予測における当該区間の A ランクスパン数の比により決定したものである。

本検討では, X による各区間年間補修スパン数と Y による各区間年間補修スパン数の合計が 100 スパンになるという条件で, ウェイト比 ($X:Y$) を調整しながら劣化・補修シミュレーションを実施した。すなわち, 補修効率 (年平均健全度上昇の量) と安全性の確保 (残留 A ランクスパン数の量) の組み合わせにより最適なウェイト比を評価することとした。

3.4 維持管理計画の検討結果例

本検討では東京メトロで採用されている中長期計画に合わせて3年毎に補修量配分を更新することを想定し, 2期6年分の補修シミュレーションを行った。初めの3年間のシミュレーションをケースI, 次の3年間をケースIIと表し, 101通りのウェイト比 ($X:Y=0:100, 1:99, \dots, 100:0$) について, その補修効率と安全性の確保を評価した。ケースI (初めの3年間) の評価結果を図一2 に示す。 X の割合が増えるに従って補修効率は単調に減少することと, $X:Y=22:78$ で A ランクスパン数が極小となり安全性が最も確保されることがわかる。

この状態から引き続き次の3年間をシミュレーションしたケースIIの結果を図一3 に示す。 $X:Y=55:45$ の

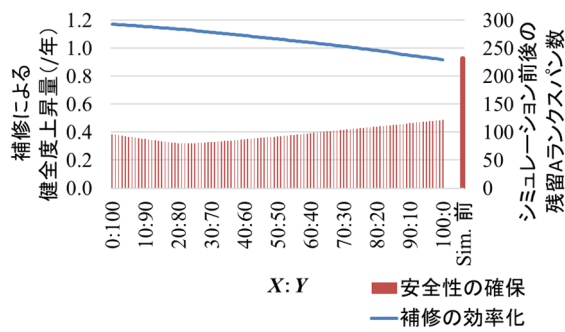


図-2 ケース I の評価結果

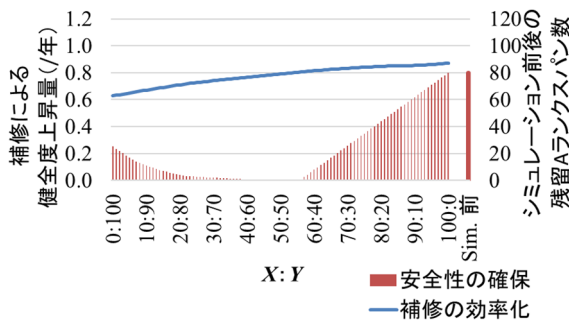


図-3 ケース II の評価結果

場合に A ランクスパン数が 0 になっており、安全管理上最も効果的であることがわかる。ケース I では $Y=78$ と A ランクを補修する割合が大きい場合が効果的という結果になっているが、補修が進んだ 3 年後からスタートするケース II では $Y=45$ と A ランクの補修割合が少ない場合が最適であるという結果になっている。このことから、最も健全度の低い A ランクのスパン数が少なくなってくると、劣化進行との関係から、次の B ランクや C ランクのスパンの補修比率を上げた方が効果的になると考えられる。

3.5 今後の展開

図-4、図-5 に、ある路線の通常全般検査結果から抽出した A ランクの変状数の最近の経年変化および C ランク以上の変状数の最近の経年変化を示す。図-4 から、2007 年の維持管理標準到達以降、計画的な補修が進められ、補修が必要な変状 (A ランク) 数が減少してきていることがわかる。しかし、図-5 に示されるように、供用年数の増加による老朽化に伴い、近い将来に補修が必要となる変状 (B、C ランク) 数増加のリスクも高まっている。すなわち、3.4 で述べた検討結果

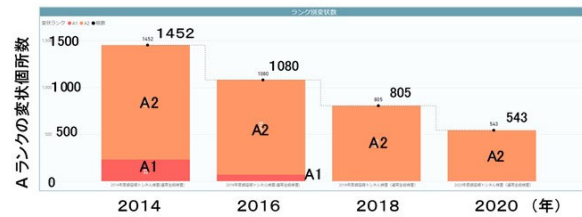


図-4 ある路線の A ランク変状数の最近の経年変化結果⁸⁾



図-5 ある路線の C ランク以上変状数最近の経年変化結果⁸⁾

も踏まえ、東京メトロにおいてもようやく予防保全を検討できる状態になってきていると考えられる。

このことから、従来採用されてきた A ランクの変状箇所のみ補修する維持管理方法が必ずしも適切なものとは言えず、構造物の劣化スピードも勘案した予防保全的な取り組みも必要になっていることが本検討によって示されている。

4. まとめ

この総説では、膨大にストックされている地下鉄トンネル構造物の検査データから将来の状態予測を行い、維持管理計画を評価した事例を紹介した。維持管理計画の策定には、蓄積データを用いた様々な分析が必要となってきている。

現在、使用している将来の劣化状態予測手法は、まだ、条件設定次第で結果が大きく変化する場合もあり、現段階では、意思決定にダイレクトに用いるというより、他の検討と合わせて用いていくのが良いと考えられる。しかし、この手法は、様々なケースを手軽に比較出来るため、使い方を工夫すれば実務に適用することが可能と考えている。

このような「統計分析の手法」や「将来予測」と聞いただけで拒否反応を示す方もおられるが、近年多用されるようになってきた AI も実は統計分析の一つの応用である。利用方法を良く考えて工夫すれば、非常

に有効なツールになると考えている。

参考文献

- 1) 小西真治：鉄道構造物のメンテナンス技術に関する研究開発の現状と展望, 土木学会論文集 F 研究展望, Vol.64, pp.369-380, 2008.
- 2) 国土交通省, 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル, 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所, 2007.
- 3) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領, 2014.
- 4) 日本道路協会：道路トンネル定期点検要領, 2015.
- 5) 酒井亮太・赤木寛一・小西真治・原 大介：検査データに基づく地下鉄トンネル維持管理計画の策定について, 第75回土木学会年次学術講演会概要集VI, VI-386, 2020.
- 6) 酒井亮太・赤木寛一・小西真治・伏木良太：地下鉄トンネル検査データに基づく劣化予測と維持管理に関する研究, 第48回土木学会関東支部技術研究発表会, 2021.
- 7) 榎谷祐輝・石川幸宏・坂 祐樹・赤木寛一：検査結果のバラツキを考慮したトンネル健全度指標の開発と妥当性の検証, 地下空間シンポジウム論文・報告集 第27巻報告集, 第27巻, 土木学会【一般投稿論文, A1-4】, pp.27-34, 2022.
- 8) 石川幸宏・富樫真美・小西真治・赤木寛一：BI ツールを用いた地下鉄トンネルの管理システムの構築, 地下空間シンポジウム論文・報告集 第27巻報告集, 第27巻, 土木学会【一般投稿論文, A2-2】, pp.39-44, 2022.
- 9) 亀村勝美・堀 倫裕・村田清満・小西真治：リスクを考慮した土木構造物のライフサイクルコスト評価, 土と基礎, 論文, Vol.51, No.10, pp.30-32, 2003.
- 10) 小西真治・亀村勝美：トンネル維持管理へのリスクマネジメントの適用法, トンネルと地下, 研究, Vol.35, No.12, pp.49-56, 2004.
- 11) 原 大介・赤木寛一・小西真治・野口弘毅：地下鉄トンネル健全度判定区分の重み付けの検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集 第25巻報告集, 第25巻, 土木学会【一般投稿論文, A1-2】, pp.54-59, 2020.

(原稿受理 2022.1.25)