

軟弱地盤における地下鉄トンネル 検査データに基づく維持管理手法の検討

EXAMINATION OF MAINTENANCE METHOD BASED ON SUBWAY TUNNEL INSPECTION DATA ON SOFT GROUND

岡田 真聡¹・赤木 寛一²・小西 真治³・宮本 光基⁴

Masato OKADA¹, Hirokazu AKAGI², Shinji KONISHI³, Koki MIYAMOTO⁴

In maintaining railway structures, railway companies conduct periodic inspections and organize the deterioration of structures, types of change and others. Based on the results of these inspection data, railway companies set up a repair plan and carry out repair. Even within a single railway company, it is assumed that there will be differences in the tendency of inspection data depending on age or environment. In this research, we try to examine the influence of environmental characteristics of each line on deterioration prediction result using inspection data. As the first step, pay attention to one subway line that passes soft ground, and predict degradation based on inspection result. In addition to this, we aim to find a unique trend of the line by comparing with deterioration prediction results of other lines, and prepare reference material for preparation of subway tunnel maintenance plan in soft ground.

Key Words : subway tunnel, soft ground, health index, Markov process, deterioration prediction, asset management

1. はじめに

近年の我が国においては，高度経済成長期に集中的に整備されたインフラストックの多くが老朽化しており，これらのストックに対する効率的な維持管理が求められている．このような中，鉄道分野においては，2007年1月に「鉄道構造物維持管理標準」が制定され，2007年2月に「施設及び車両の定期検査に関する告示」の一部改正が行われた．鉄道事業者は，これらに基づき定期的な検査を実施することで健全度を判定し，その結果に応じて補修等の措置をとり，以上の記録と保存を進めている．近年，上記の蓄積された検査データを活用し，鉄道構造物に対して長期的な維持管理を行っていくことが求められている．例として，地下鉄トンネルにおいては，検査データを活用することでトンネルの状態を定量的に評価するとともに，将来のトンネル劣化推移を予測する手法を検討している．

本研究は，トンネルの検査データより劣化推移を予測し，効率的な維持管理計画策定のための参考となる資料を作成することを目的としている．さらに，路線ごとの環境特性が点検データを用いた劣化予測結果に与える影響の検討を試みる．その第一歩として，軟弱地盤を多く通行するある地下鉄一路線に着目し，検査データによる劣化予測を行う．これを他路線の劣化予測結果と比較することで当該路線独自の傾向を見出し，補修計画の費用便益分析を行うことで，軟弱地盤における地下鉄トンネル維持管理計画策定のための参考となる資料を作成する．

2. 地下鉄トンネルの検査概要

本研究では，東京地下鉄株式会社の地下鉄トンネルの検査台帳を用いて，トンネルの健全度評価と劣化予測を行った．この検査台帳には，変状地点・変状種類・変状

キーワード：地下鉄トンネル，軟弱地盤，健全度，マルコフ過程，劣化予測，アセットマネジメント

¹学生会員 早稲田大学創造理工学研究科建設工学専攻 Graduate school of Civil Engineering, Waseda University (E-mail: okd.0706@moege.waseda.jp)

²フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 Professor, Faculty of Civil Engineering, Waseda University

³正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 Tokyo Metro Co.,Ltd, Tokyo, Japan

⁴非会員 東京地下鉄株式会社 工務部 Tokyo Metro Co.,Ltd, Tokyo, Japan

ランクなどが記されている。変状ランクには、「鉄道構造物等維持管理標準・同解説 トンネル編」¹⁾の判定区分が用いられている。この判定区分の詳細を表-1に示す。なお、もっとも重度な変状ランクAAに関しては、発覚後ただちに措置が講じられるため検査台帳に掲載されず、そのため本研究では集計の対象にしていない。

地下鉄トンネルの検査には、通常全般検査・特別全般検査の2種類の検査がある。それぞれにおいて検査台帳が存在しており、本研究では両者のデータを利用する。

図-1²⁾は、トンネル横断面における検査の概要を示したものである。通常全般検査は2年に一度実施され、トンネル側壁下部については入念な近接目視、打音検査、トンネル上床及び側壁上部については目視を主体とした検査を行う。また、特別全般検査は20年に一度実施され、専用的高所作業車を使用して、トンネルの上床及び側壁上部についても入念な近接目視、打音検査を行い、変状の抽出精度を高めている。

3. 検査データを利用した劣化予測

(1) 検査台帳の集計方法について

本研究では、上記のようなトンネル検査台帳について、「最悪値法」³⁾という考え方でデータ集計を行う。「最悪値法」とは、回路設計やシステム設計などに用いられる「最悪値設計法」という考え方をベースにしたものである。これは、複雑な回路を設計する際や事故の許されないシステムを構築する際に、最も厳しい条件下で評価するものである。

表-1 トンネル変状ランク判定区分¹⁾

判定区分	構造物の状態
A	運転保安、列車の正常運行及び旅客、公衆等の安全の確保を脅かし、またはそのおそれのある変状等があるもの
	AA 運転保安、列車の正常運行の確保及び旅客、公衆等の安全の確保を脅かす変状等があり、急な措置を必要とするもの
	A1 侵出している変状等があり、構造物の性能が低下しつつあるもの 大雨、出水、地震等により、構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2 変状等があり、将来それが構造物の性能を失うおそれのあるもの
B	将来、健全度Aになるおそれのある変状等があるもの
C	軽微な変状等があるもの
S	健全なもの

この考え方をもとに、本研究の「最悪値法」では、膨大な量のトンネル変状データを、より重度な変状ランクに重きを置いて集計する。具体的には、トンネルを縦断方向に5mのスパンで区切り、1スパン内に含まれる最も重度な変状の変状ランクをそのスパンの代表値として集計していく。ある1スパン内に変状がない場合は、そのスパンはSランクのスパンとして集計する。

この「最悪値法」によるデータ集計結果を蓄積し、トンネルの劣化予測を行うことで、トンネルの劣化が早く進行してしまう、より深刻な状況を想定した劣化予測が可能になると考えられる。集計結果の一例として、図-2に当該路線2015年度特別全般検査台帳最悪値法集計結果を示す。各スパンを各々の建設年次ごと分類し、その中で各変状ランクのスパン数の存在割合を示す。

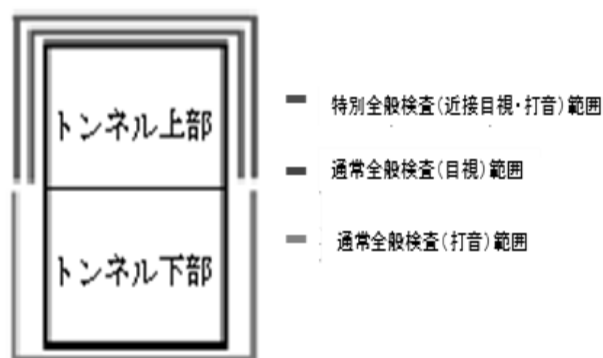


図-1 特別・通常全般検査範囲概要²⁾

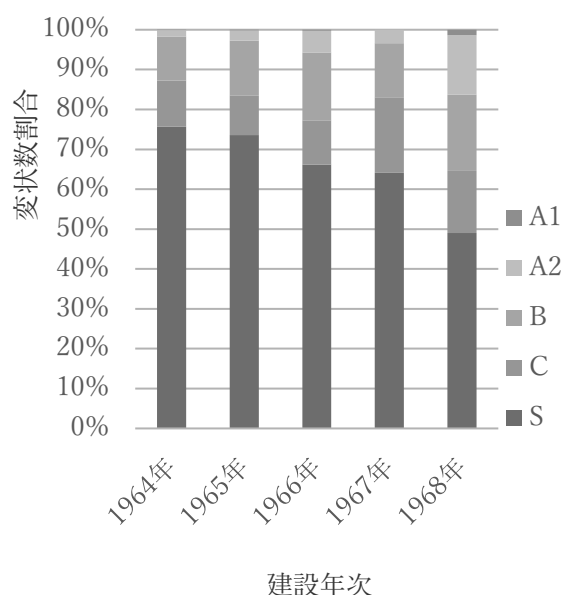


図-2 最悪値法集計結果一例（当該路線2015年度特別全般検査結果）

(2) 劣化予測手法

本研究では、今後のトンネルの劣化予測、すなわち変状ランクの悪化の予測を検査データの集計により行い、この結果をもとに修繕計画を立てるための参考となる資料作りを目的としている。そのため、トンネル全体の劣化進行を検査データから統計学的に求めることが必要である。本研究では、統計学的手法の中で代表的なマルコフ確率過程を使用する。マルコフ過程は、橋梁や道路舗装などの劣化推移を対象に多く用いられており、トンネルなどにも適用が見られる手法である。

(3) マルコフ過程の適用

マルコフ過程³⁾とは、未来の挙動が現在の値だけで決定され、過去の挙動とは無関係であるという性質をもつ確率過程である。この考え方を、劣化推移行列の作成という形式で本研究に適用すると以下ようになる。

トンネル完成から n 年経過した際の、トンネルの変状ランク X の存在確率を $\{P_x\}$ とすると、 $(n+1)$ 年経過したトンネルの変状ランク X の存在確率 $\{P_x'\}$ は、劣化推移行列 $\{K_{ij}\}$ を用いて式(1)で与えられる。ここに、 K_{SS} は S ランクの変状が翌年に S ランクを維持する確率を示しており、 K_{SC} は S ランクの変状が翌年に C ランクに悪化する確率を示したものである。

この劣化推移行列 $\{K_{ij}\}$ を作成するにあたって、以下の前提条件を用いることとする。

- ・ 変状ランクが補修をすることなく自然と改善することはない。
- ・ 変状ランクの1年ごとの変化は、同ランクを維持するか一段階悪化するかの2通りの事象である。
- ・ 経年0年においては、すべて S ランクである。

この前提条件をもとに、検査台帳データを蓄積したものから劣化推移行列を作成していく。

$$\begin{pmatrix} P_S' \\ P_C' \\ P_B' \\ P_{A2}' \\ P_{A1}' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_S \\ P_C \\ P_B \\ P_{A2} \\ P_{A1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(4) 劣化推移行列の作成

本研究では、2通りの劣化推移行列を作成する。一つは、当該路線のデータのみを集計して作成した行列（以下：行列1）である。もう一つは、全路線のデータを集計して作成した行列（以下：行列2）であり、全路線を含めた平均的な劣化推移と当該路線の劣化推移の比較を試みる。

まず、検査データより最悪値法で集計した変状数の割合を経年ごとにまとめ、線形補間・補外をしながら連続データとする。図-3に当該路線データのみを集計したものを、図-4に全路線のデータを集計したものをそれぞれ示す。この集計において、「経年」は「検査年次」と「建設年次」の差とした。

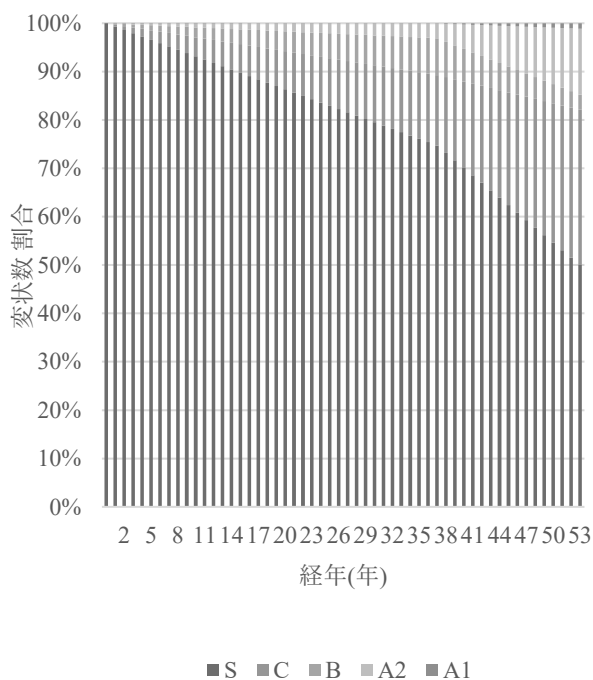


図-3 最悪値法集計結果連続データ（行列1用）

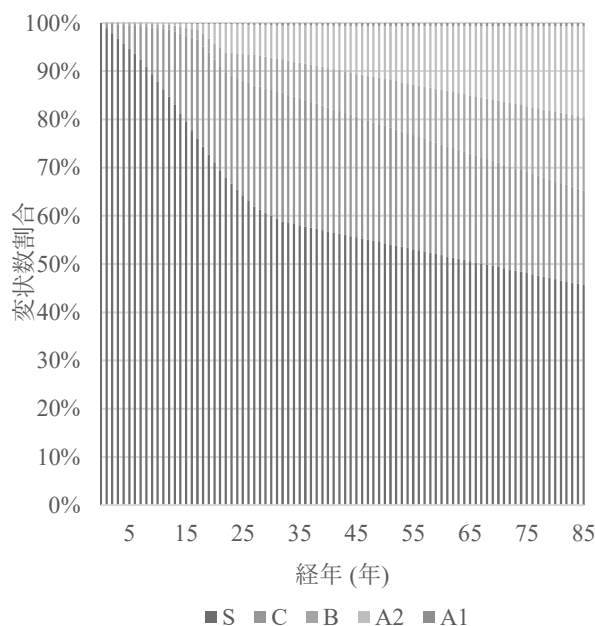


図-4 最悪値法集計結果連続データ（行列2用）

表-2 各経年の変状数割合抜粋(行列1用)

経年	変状ランク				
	S	C	B	A2	A1
48 年	67.27%	21.49%	6.18%	4.73%	0.34%
49 年	66.56%	21.97%	6.27%	4.85%	0.35%

表-3 劣化推移行列例(行列1)

	経年 49 年	S	C	B	A2	A1
経年 48 年		66.56%	21.97%	6.27%	4.85%	0.35%
S	67.27%	0.9896	0.0104	0	0	0
C	21.49%	0	0.9899	0.0101	0	0
B	6.18	0	0	0.9789	0.0211	0
A2	4.73	0	0	0	0.9980	0.0020
A1	0.34	0	0	0	0	1

次に、図-3、図-4それぞれの連続データの1年ごとの推移に着目し、各変状ランクの変状数割合の変化を行列で表現する。これを各経年すべてにおいて行う。表-2、表-3に行列の作成例として、行列1の作成例の1つを示す。

このような行列を各経年間で作成し、式(1)を用いて劣化予測を行う。本検討では、2005年度から2014年度までのデータを蓄積することで劣化推移行列を行列1・2の2種類作成し、これを用いて2015年度の劣化状態を予測し、2015年度の検査データとの比較を行うこととする。

4. 劣化予測結果と考察

(1) 予測結果の比較方法

劣化予測結果と実測値を比較するにあたって、健全度(Health Index: h)²⁾という指標を導入する。これにより、劣化状態を定量的に把握することが可能となる。この健全度の値によって劣化予測結果と実測値を比較する。以下に、健全度 h の計算式を示す。これに加えて、表-4に健全度の計算時に用いる各変状ランクの重みづけ係数 k ³⁾の値も示す。ここに、 n は該当変状ランクのスパン数である。

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

($i = S, C, B, A2, A1$)

表-4 各変状ランクの重みづけ係数³⁾

変状ランク	S	C	B	A2	A1
重みづけ係数: K	10	8	6	3	1

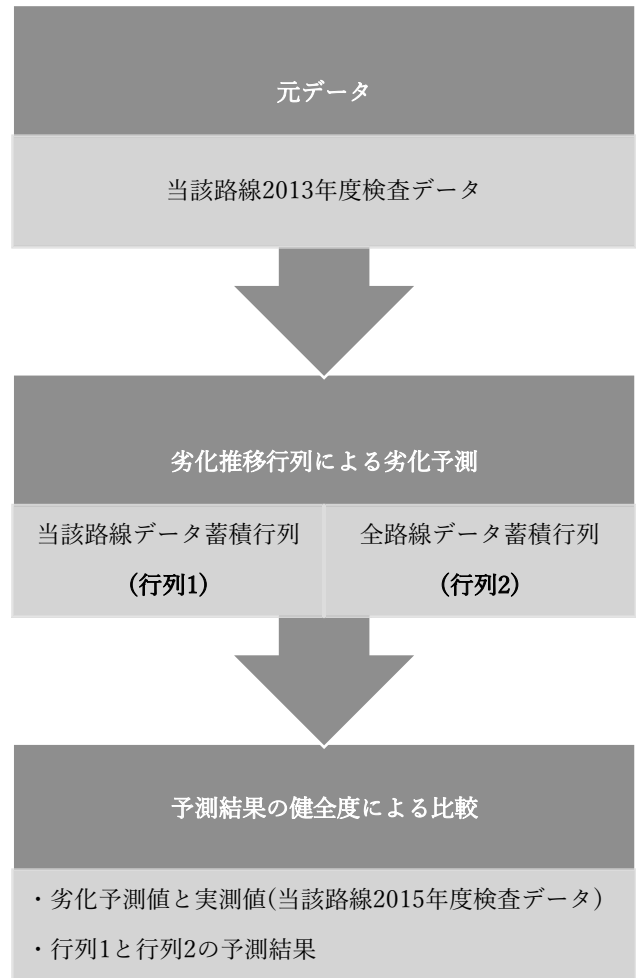


図-5 劣化予測検討フロー

(2) 劣化予測結果と実測値

第3章で作成した2種類の劣化推移行列を用いて、当該路線2013年度検査データから劣化予測を行う。そして、2種類の予測結果と2015年度検査データを健全度の値により比較を行う。2015年度の検査データについては、通常全般検査によるもの、特別全般検査によるもの、これら2つのデータがあるが、本研究では当該路線2015年度通常全般検査のデータを予測結果との比較に用いることとする。この理由として、元データの2013年度や、劣化予測行列作成の際に用いたデータは全て通常全般検査によるものであり、データの性質が異なるためである。図-5に、劣化予測の流れをフローチャートで示す。

表-5 変状ランク見直し対象変状数（A線のみ）

建設年次	A1 ↓ A2	A1 ↓ B	A1 ↓ C	A2 ↓ B	A2 ↓ C	B ↓ C
1964 年	-	-	1	12	36	37
1965 年	-	-	-	4	34	18
1966 年	4	3	4	26	94	23
1967 年	3	2	1	4	11	6
1968 年	1	-	1	7	52	24

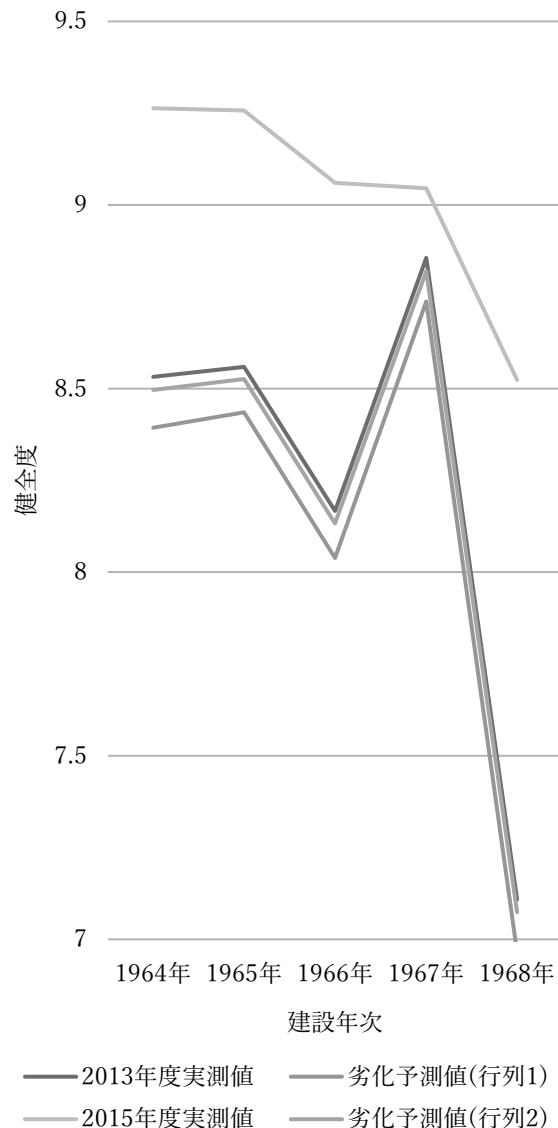


図-6 劣化予測結果

(3) 比較結果の考察

図-6より、まず元データ（2013年度検査結果）とそれぞれの予測値の値が近いということが分かる。今回は2年間という短期間の予測であるため、両者の差が見受けられなかったと考えられる。

次に、2種類の予測結果同士の比較について、当該路線のみのデータを蓄積した行列1による予測結果の方が、全路線のデータを蓄積した行列2による予測結果よりも健全度が下回っている。これは、軟弱地盤を多く通行する当該路線が、全路線の平均と比較して劣化速度が速いということを示している。今後、長期間の劣化予測を行っていく上で、このように区別して予測していくことの有用性を引き続き検討していきたい。

最後に、予測値と2015年度実測値の比較について、大きなズレが見受けられる。このズレに関しては、2014年度に行われた変状ランク判定の見直しの影響や、検査データを蓄積することによる毎年の補修の積み重ねを含む劣化推移行列になっていることなどに起因すると考えられる。表-5に、変状ランクの見直しの対象となった変状数を示す。これは、各建設年次の区間において、変状ランクがより健全なランクに見直された変状の個数を示している（補修に起因するものを除く）。この見直しにより、実測値が予測値よりも大きく健全であるという結果になったと考えられる。今後は、このような変状ランクの見直しや補修履歴等を考慮した劣化予測手法の検討を試みる。

なお、劣化予測値と実測値のグラフは、形状としては似たような傾向であるため、これまで行ってきた劣化予測手法には大きな欠陥はないと考えられる。

5. 補修計画の費用便益分析

(1) 本研究における費用便益分析の概要

第3章で作成したマルコフ過程による2通りの劣化予測行列(行列1・2)を活用し、補修計画の費用便益分析を行う。第4章においては2年間のみの劣化予測を行い、精度の検証を行ったが、本章ではさらに長期間の劣化予測を行う。これに加え、補修計画を実務に基づいた「補修シナリオ」という形式で各種設定し、各シナリオの優劣を費用便益分析(B/C)によって判定する。

本研究において、費用(Cost: C)は「補修費用」である。便益(Benefit: B)に関して、前田ら⁴⁾は、健全度上昇量・営業収入・補修費用・全事業営業費により評価式を設定し、金額にて導出していた。本研究においては、より簡便な方法で検討を行うために、便益は「補修による健全度上昇量」とした。すなわち、B/Cは、「単位補修費用(C)あたり健全度上昇量(B)」となる。したがって、各シナリ

オの優劣を比較する際には上記B/C値の相対評価となる。
 なお、本分析の検討年数は特別全般検査頻度に合わせた20年間とする。また、貨幣換算の割引率に関しては、国土交通省道路局「費用便益分析マニュアル」⁹⁾によると割引率は0.04であるが、本検討においては、どのシナリオにも均等に割引率がかかることから、この考慮は省略して比較を行う。図-7に本研究における費用便益分析の流れを示す。

(2) 費用便益分析条件

a) 補修シナリオの設定

実務で行われている地下鉄トンネルの補修傾向を踏まえ、表-6に示す10通りの補修シナリオを作成した。この際に着目した点は、補修範囲(補修を行う変状ランク)・補修頻度(補修時期の間隔)の2点である。

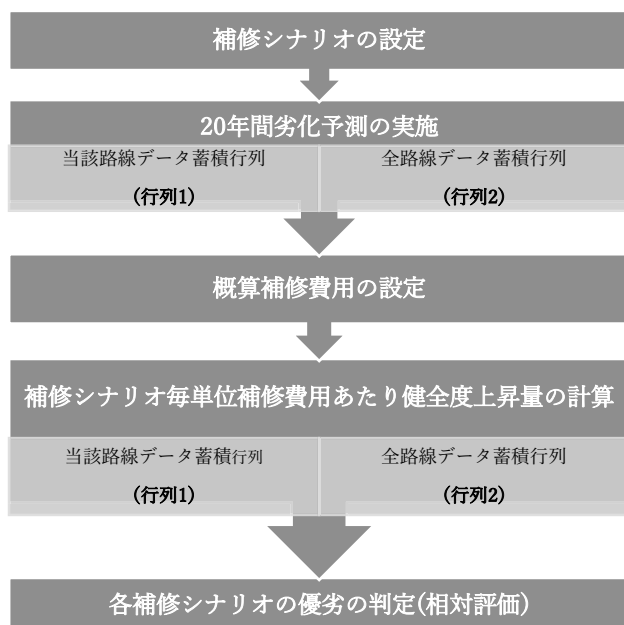


図-7 費用便益分析フロー

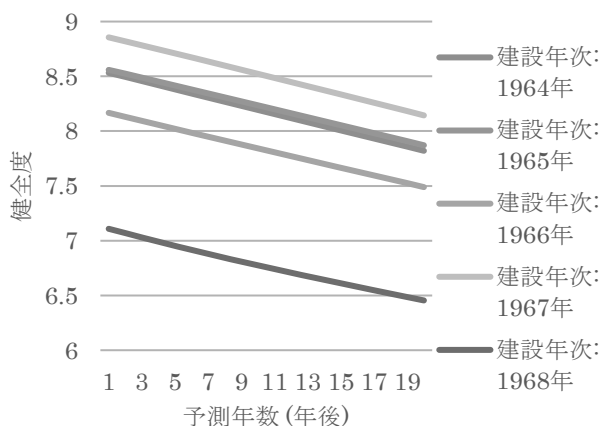


図-8 20年間健全度推移(行列1)

なお、費用便益分析の都合上、一度に該当箇所すべてを補修するシナリオになっているが、実際には作業量の定常化がなされている。

b) 20年間劣化予測

第4章で行った2年間の劣化予測で用いた劣化推移行列を用い、費用便益分析のために20年間の劣化予測を行う。行列1で予測した20年間の健全度推移を図-8に、行列2で予測した20年間の健全度推移を図-9に、それぞれ建設年次ごとに示す。なお、これらの健全度推移は補修が行われていない場合のものである。

図-8と図-9を比較すると、図-6で行った2年間劣化予測の際よりも、それぞれの行列1・2による健全度低下予測値に明確な差が現れた。これより、当該路線は他路線と比較して劣化の進行が早いということが、改めて示された。

表-6 補修シナリオ一覧

	各変状ランクの補修頻度			
	A1	A2	B	C
シナリオ 1	毎年	経過観察	経過観察	経過観察
シナリオ 2	毎年	毎年	経過観察	
シナリオ 3	毎年	毎年	毎年	
シナリオ 4	毎年	毎年	2年に1回	
シナリオ 5	毎年	毎年	3年に1回	
シナリオ 6	毎年	2年に1回	経過観察	
シナリオ 7	毎年	2年に1回	2年に1回	
シナリオ 8	毎年	2年に1回	3年に1回	
シナリオ 9	毎年	3年に1回	経過観察	
シナリオ 10	毎年	3年に1回	3年に1回	

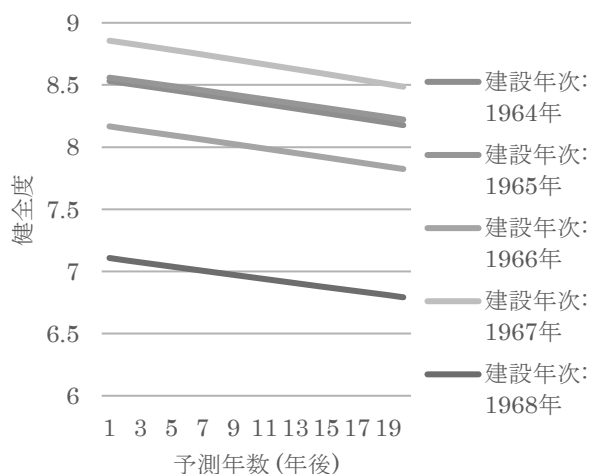


図-9 20年間健全度推移(行列2)

表-7 各変状ランクの重みづけ係数と補修費用指数

変状ランク	S	C	B	A2	A1
重みづけ係数: K	10	8	6	3	1
補修費用指数	-	0.375	0.5	1	3

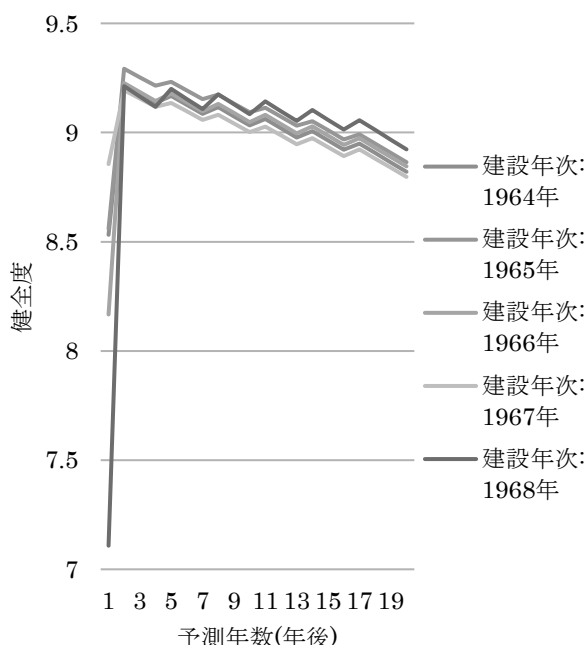


図-10 20年間健全度推移一例(シナリオ9: 行列1)

c) 概算補修費用の設定

地下鉄トンネル補修計画の費用便益分析を行うに当たって、補修費用を設定する必要がある。本研究においては、個別変状ごとではなくスパンごとにトンネルを変状ランクで評価していることから、1スパンの概算補修費用を設定し、費用便益分析を行う。その際に、具体的な金額ではなく、A2ランク1スパンの補修費用を1とした「補修費用指数」というものを新たに定義した。他の変状ランクの指数は、表-4に示した重みづけ係数 k を基準に、表-7に示す通りに設定した。この補修費用指数を用い、費用便益分析の費用(C: Cost)の部分を計算する。したがって、補修による健全度上昇量を補修費用指数合計で除した値が、本研究のB/C値となる。

(3) 費用便益分析結果

前節で設定した費用便益分析条件をもとに、各補修シナリオで費用便益分析を行い、B/C値の相対比較を行う。まず、図-10に補修シナリオに基づく補修計画による20年間健全度推移の一例を示す。次に、図-11に各シナリオのB/C値を示す。

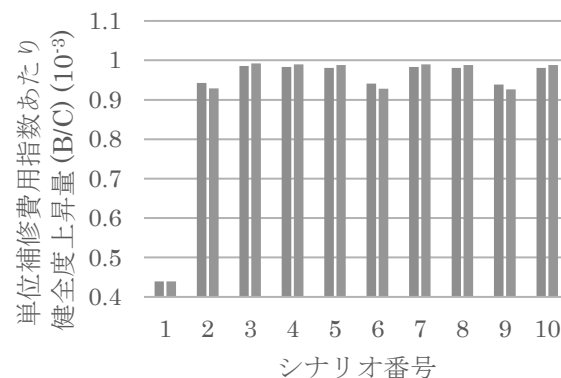


図-11 各シナリオのB/C値

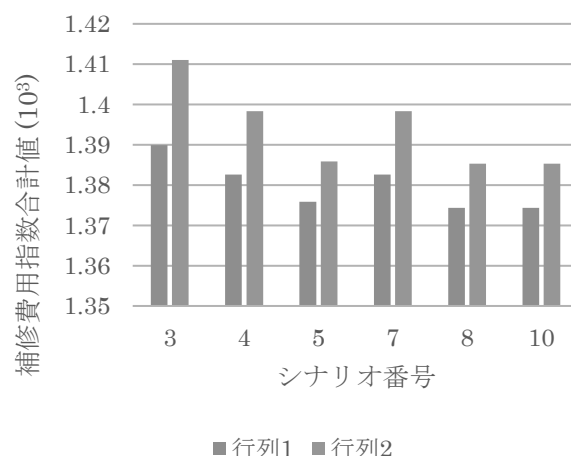


図-12 B/C値上位シナリオの補修費用指数比較

図-11において、各シナリオのB/C値を相対比較したときに、行列1・2どちらにおいても他のシナリオよりも高いB/C値をとった、シナリオ3・4・5・7・8・10に着目する。これら6シナリオのB/C値はほぼ同じであり、B/C値がほぼ同じならば補修費用が低いほうがより望ましいため、これらの優劣をみるために補修費用指数の合計値を比較する。これを図-12に示す。一方で、シナリオ1のB/C値が他と比較して半分以下になっている。これは変状ランクA1スパンのみ補修するシナリオであり、これにより変状ランクA2,Bスパンが蓄積され、補修による健全度上昇分が一部打ち消されてしまったと考えられる。

図-12より、シナリオ5・8・10の補修費用指数合計値が他と比較して相対的に低いということが分かる。これら3シナリオの共通点としては、変状ランクBスパンを3年に1度補修する点であり、変状ランクA2スパンに関しては、毎年ないし3年に1度補修するものである。

実務において、A1変状は即時補修、A2変状は次の全般検査まで(2年以内)に補修、B・C変状は経過観察ということが行われている。上記では補修シナリオの優劣を細かく比較したが、本検討により、トンネルの検査データを用いたマルコフ過程による劣化予測結果に基づく補修計画の費用便益分析の観点からも、実務で行われている補修計画には概ね妥当性があると言える。これに加えて、実務では経過観察されているB変状においても、適度に補修していくことで全体としての効率の向上が見込めると言える。また、シナリオ10に関して、Bランクの補修もすることでA2ランクの補修間隔を長くすることが出来るという考察も可能である。今後さらにこのような点について検討していきたい。

6. まとめ

本研究では、軟弱地盤における地下鉄トンネル検査結果に基づく劣化予測を、最悪値法によるデータ集計とマルコフ過程による劣化推移行列作成により実施した。さらに、補修シナリオの費用便益分析を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- ・ 最悪値法によるデータ集計、健全度評価を用いることで、トンネルの検査データからトンネルの劣化状態を定量的に把握することができた。
- ・ 軟弱地盤上の地下鉄路線に対して、当該路線のみのデータを蓄積した行列、他路線のデータも含めて蓄

積した行列、これら2種類の行列を作り分けることで、様々な予測結果を検討することができた。これらを適切に使い分けることで、今後さらに精度の高い劣化予測を行うことができると考えられる。

- ・ 補修頻度・範囲に着目した各種補修シナリオの費用便益分析を行うことで、より効率の良い補修計画策定のための様々な検討を行うことができた。今後は、年間補修費用予算などの制約条件も取り入れた検討も行い、補修計画策定に役立てることを目標にしている。

謝辞：本研究実施にあたり、東京地下鉄株式会社の今泉氏に、多くのご支援とご指導を頂いたことをここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・道開設（構造物編 トンネル），pp.80，丸善出版，2007.
- 2) 三浦丈典，赤木寛一，小西真治，五十嵐翔太：地下鉄トンネルの検査データに基づいた健全度評価とマルコフ過程を用いた劣化予測手法に関する検討，第22回地下空間シンポジウム，2017.
- 3) 福島正俊，武田雅好：確率論教程シリーズ4 マルコフ過程，pp.5，培風館，2008.
- 4) 前田啓太，赤木寛一，山本努：地下鉄トンネルの点検データを用いた劣化予測と修繕予算配分に対する検討，土木学会第68回年次学術講演会，2013.
- 5) 国土交通省道路局：費用便益分析マニュアル，pp.2，2008.