

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

岡田 真聡¹・赤木 寛一²・小西 真治³・宮本 光基⁴

¹学生会員 早稲田大学 創造理工学研究科 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail:okd.0706@moegi.waseda.jp

²フェロー会員 早稲田大学 理工学術院 教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail:akagi@waseda.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

E-mail:s.konishi.r4r@tokyometro.jp

⁴非会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

E-mail:k.miyamoto.t8k@tokyometro.jp

鉄道構造物の維持管理において、鉄道事業者は定期的な検査を行い、構造物の劣化状況や変状種類等を整理している。これら点検データの結果より鉄道事業者は補修計画を立て、補修を実施している。一つの鉄道事業者内においても、路線によって建設された時代や沿線環境により点検データの結果の傾向に差異が生じることが想定される。

本研究では、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、トンネルの検査結果に基づく劣化予測を実施する。これに加えて、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、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ことを目的としている。

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、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

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A1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。

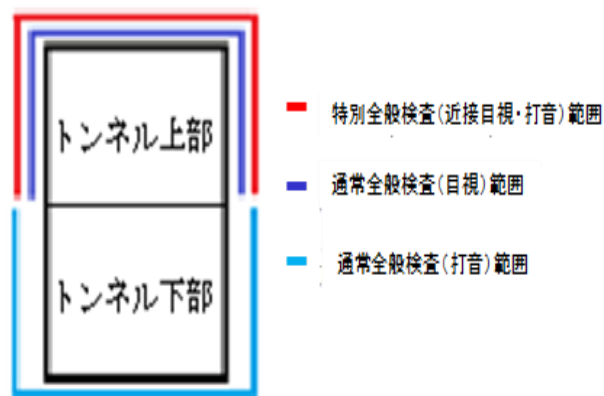


図-1 特別・通常全般検査範囲概要²⁾

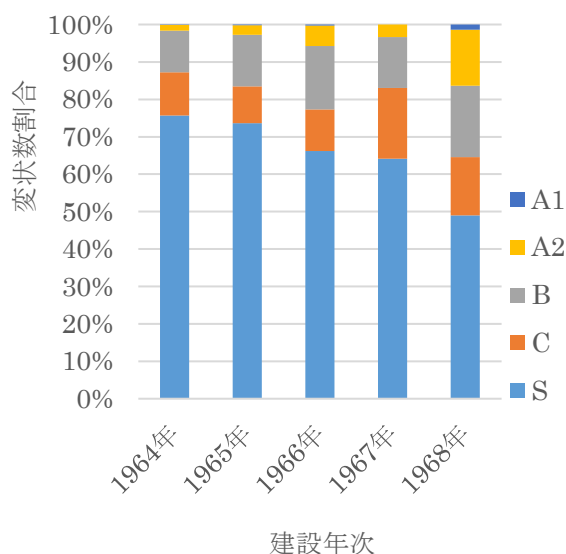


図-2 最悪値法集計結果一例（当該路線2015年度特別全般検査結果）

(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。

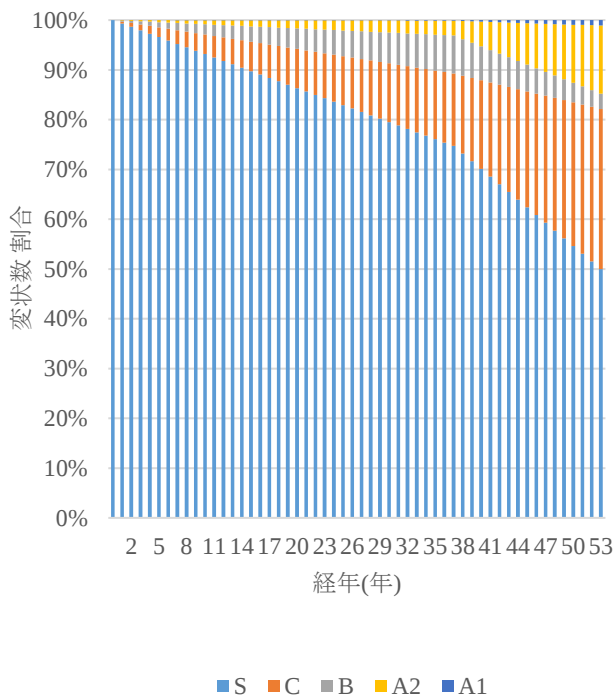


図-3 最悪値法集計結果連続データ（行列1用）

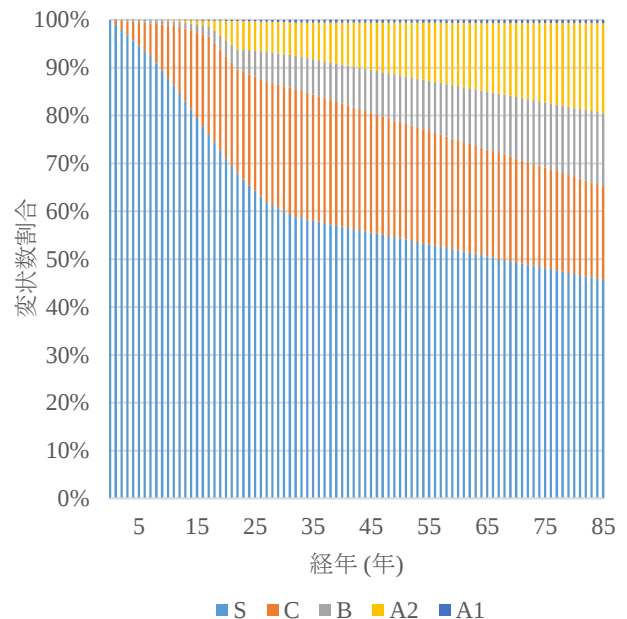


図-4 最悪値法集計結果連続データ（行列2用）

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 ²⁾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²⁾

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

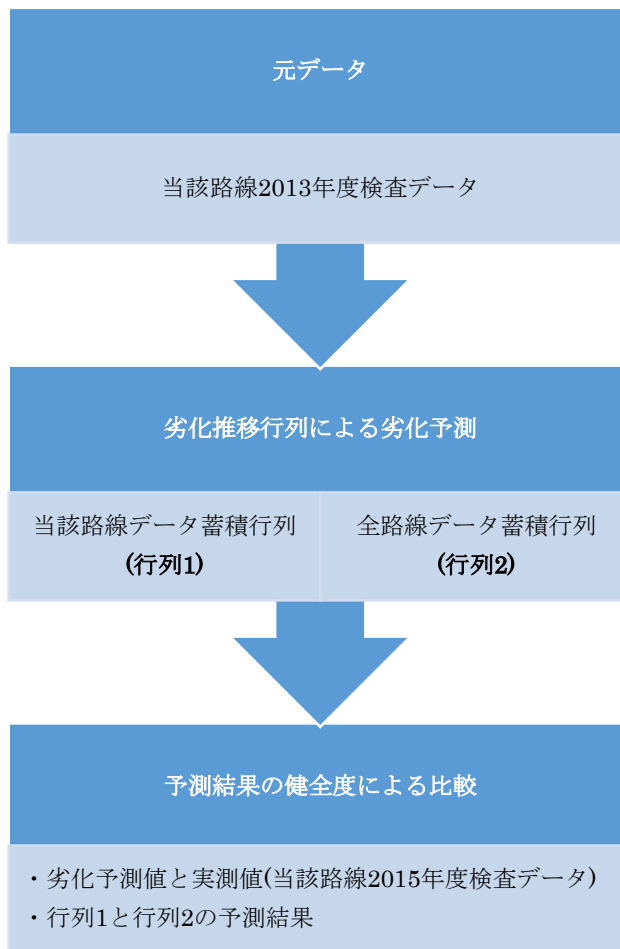


図-5 劣化予測検討フロー

(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

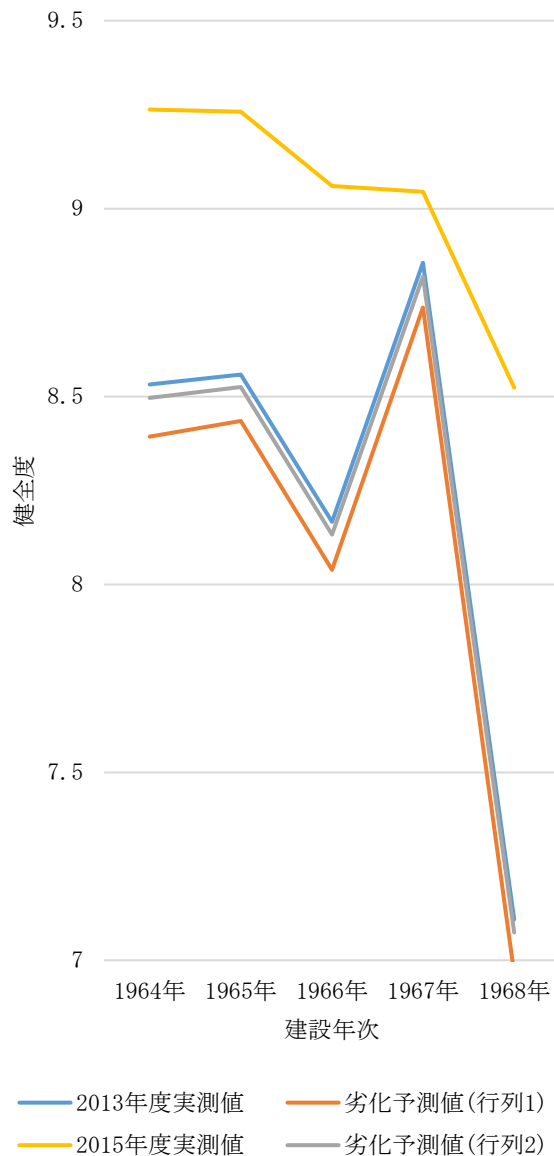


図-6 劣化予測結果

(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。

5. 大規模補修の考慮

(1) 対象とした大規模補修の概要

本研究で対象とした路線の一部において、完成後に大規模な補修補強工事が行われている区間がある。具体的な補修として、傷んだシールドを内側から二次覆工を施すことが行われた。これを考慮したデータ集計を行うことで、軟弱地盤を多く通行する当該路線に特化した劣化予測を行うことを試みる。

(2) 大規模補修の考慮方法

上記の大規模補修を劣化予測に反映させる具体的な手段として、二次覆工が施された年次を見かけの建設年次とみなし、集計していくことを行う。これにより、二次覆工を施したことによる劣化の進行の遅れを考慮できると考えられる。当該路線においては、二次覆工は1977年度より順次行われているが、より安全側に検討するために、二次覆工は全て1977年に行われたものとみなし集計を行った。

当該路線2013年度検査台帳最悪値法集計結果の、図-7に元来の集計結果を、図-8に二次覆工建設年次修正版集計結果を示す。当該路線において、主に二次覆工が施された区間は建設年次1967年の区間であるため、図-7と図-8のそれぞれ1967年の部分に特に差異が見受けられる。また、図-8において二次覆工施工後の区間として追加された建設年次1977年の部分は、他の建設年次と比較して軽微な変状ランク(SやC)の割合が多くなっている。

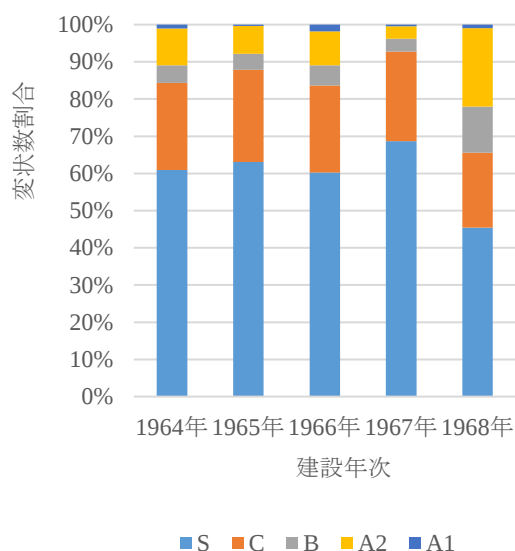


図-7 最悪値法集計結果一例（2013年度通常全般検査：二次覆工区間建設年次修正前）

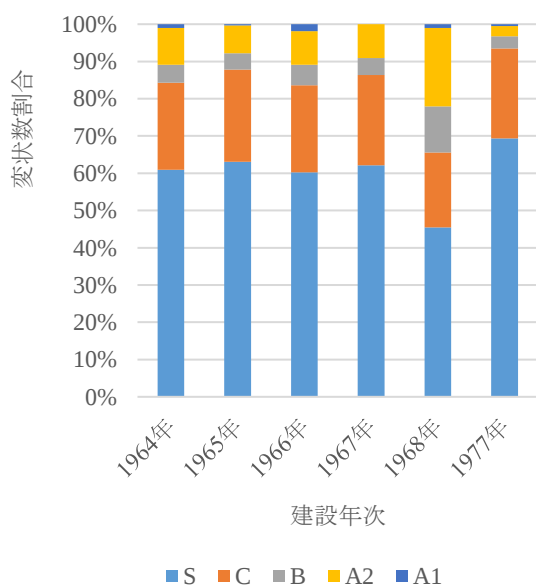


図-8 最悪値法集計結果（2013年度通常全般検査：二次覆工区間建設年次修正後）

(3) 大規模補修を考慮した劣化予測結果

上記のような二次覆工を考慮した集計結果を蓄積し、第3章と同様に劣化推移行列を作成する。この劣化推移行列をもとに劣化予測を行った結果を図-9に示す。大規模補修を考慮していない図-6の結果と、大規模補修を考慮した図-9の結果を比較すると、二次覆工区間の建設年次を修正して集計することにより、実測値と予測値が近くなっているといえる（建設年次1977年の部分）。このことから、二次覆工などの大規模補修を考慮して劣化予測を行う際に、このようにその大規模補修が行われた年次を見かけの建設年次として扱うことの有用性を示すことができた。

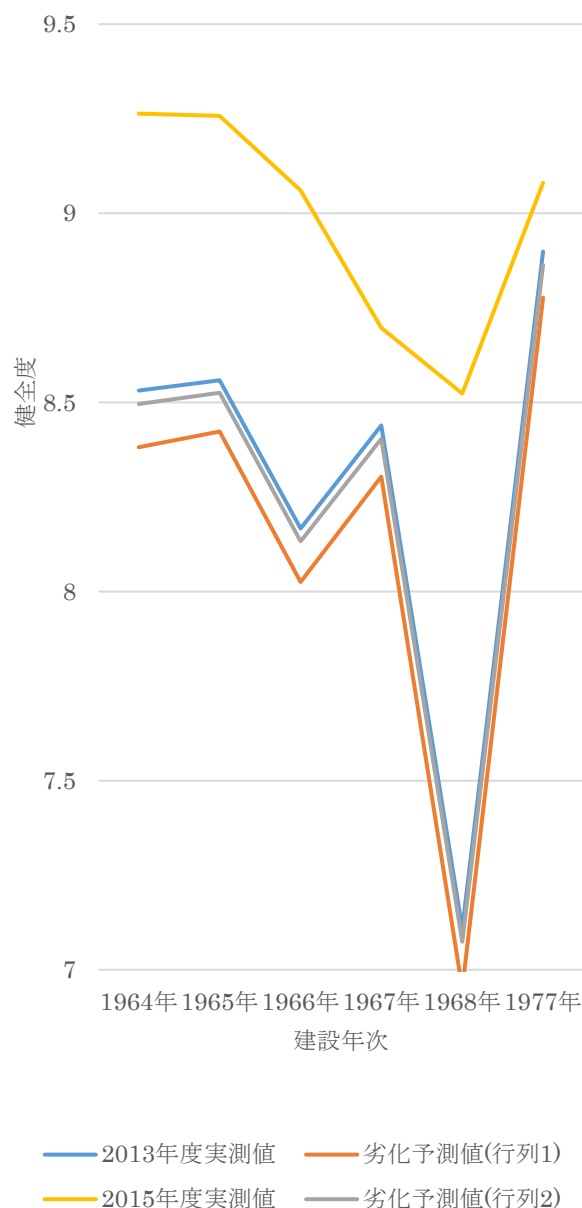


図-9 劣化予測結果（二次覆工区間建設年次修正版）

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。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。
- ・ 二次覆工等の大規模補修を考慮して劣化予測を行った場合、考慮しない場合と比較して劣化予測の精度が向上することを確認できた。大規模補修を行った

年次を見かけの建設年次として扱いデータ集計することには、一定の有効性がみられることを確認した。

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) 三浦文典，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.

(2017.8.11 受付)

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

Masato OKADA, Hirokazu AKAGI, Shinji KONISHI and Koki MIYAMOTO

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.