

地下鉄トンネル健全度判定区分の 重み付けの検討

原 大介¹・赤木 寛一²・小西 真治³・野口 弘毅⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 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 58 号館 205 号室) E-mail: hrdsk0302@toki.waseda.jp

²フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 205 号室)

³正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-19-6)

⁴非会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-19-6)

これまで、地下鉄トンネル維持管理の効率化を目的に、鉄道事業者より提供される検査データを用いた将来の劣化予測、およびそれに基づく様々な補修計画の検討を行ってきた。使用する検査データには、鉄道構造物等維持管理標準に基づき検査員が判定した健全度判定区分が記入されており、各区分の重み付け係数を設けることでトンネルの健全度を点数化してきた。この重み付けは、検査員へのアンケート調査により設定したものであるが、その妥当性については疑問の残るところもあった。

そこで本論文においては、従来の重み付け係数を見直し、より実際の検査員の感覚に近い値に再設定するための方法を検討した。

Key Words: subway tunnel, asset management, deterioration prediction, bradley-terry model

1. はじめに

高度経済成長期以降に急速に整備され、これまでに相当量蓄積されてきた社会資本ストックの老朽化が進む中で、近年の我が国においては、維持管理の効率化が重要な課題となっている。このような中、鉄道分野においては、2007年1月に「鉄道構造物等維持管理標準」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に検査を行い、劣化状況や変状種類等を整理している。そして、これらの検査データに基づいて、鉄道構造物に対して補修計画が策定され、補修が実施されている。

これまで、地下鉄トンネルにおける維持管理の効率化に寄与することを目的に、鉄道事業者より提供される検査データを用いた将来の劣化予測、およびそれに基づく様々な補修計画の検討を実施してきた¹⁾²⁾。この中で、検査で判定された変状ランクに対して重み付け係数を付与し、現在および将来のトンネル健全度を定量的に評価してきた。しかし、この重み付け係数は検査員へのアンケート調査により設定したものであり、その妥当性については疑問の残るところもあった。そこで本研究においては、各変状ランクの変状写真を用いたアンケート調査

を新たに実施し、Bradley-Terry モデルを用いてアンケート結果から重み付け係数の再設定を試みた。本論文においては、第2章に重み付け係数を用いた劣化予測手法を、第3章以降に重み付け係数の再設定に関する方法論とその結果を整理する。

2. 検査データを用いた劣化予測¹⁾

(1) 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所有する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ている。検査台帳には、変状地点・変状種類・変状ランク等が記されている。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」²⁾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とはしていない。

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種類の検査があり、それぞれにおいて検査台帳が記録される。

表-1 トンネル変状ランク判定区分²⁾

健全度	構造物の状態
	運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす、またはそのおそれのある変状等があるもの
A	AA 運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり、緊急に措置を必要とするもの
	A1 進行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、または、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低下させるおそれのあるもの
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

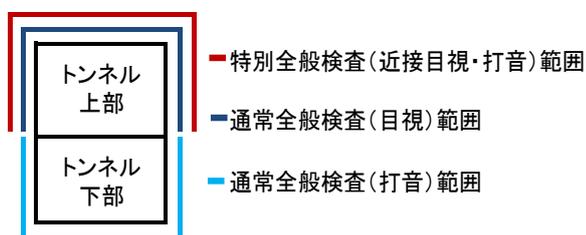


図-1 特別・通常全般検査範囲概要

図-1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、トンネル上床およ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、専用の高所作業車を使用して、トンネルの上床およ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。

(2) 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」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。

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き、図-2のように集計する。具体的には、トンネルを縦断方向に1m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。

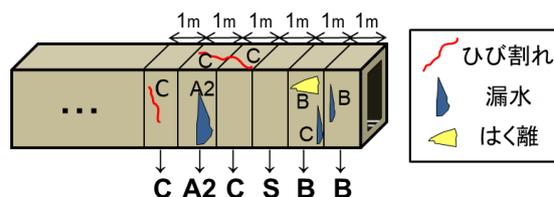


図-2 最悪値法概要

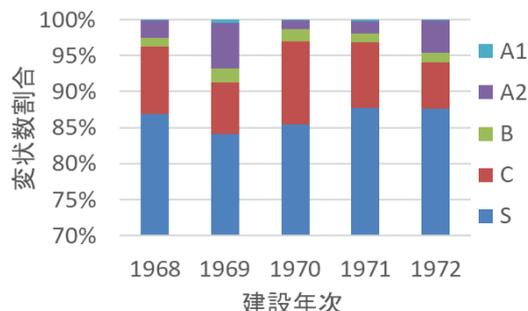


図-3 最悪値法による集計結果

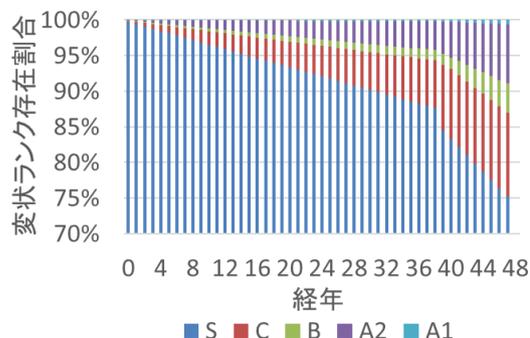


図-4 経年毎の各変状ランク存在割合

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、ある一路線（以下、C線）の2013年度通常全般検査台帳の最悪値法による集計結果を図-3に示す。

(3) 経年毎の整理とマルコフ過程の適用

最悪値法の集計結果について、経年（＝（検査年次）－（建設年次））毎に各ランクの存在確率を集約し、連続データを作成する。図-4は、C線の2011・2013年度の通常全般検査の集計結果より作成した連続データの一例である。また作成の際には、以下2つの前提条件を設定し、該当データが存在しない経年については線形補間・外挿を施す。

- 変状ランクが補修なしに自然と改善しない。
- 経年0年においては、すべてSランクである。

さらに、図-4の連続データに対し、「マルコフ過程」の理論を適用し、「劣化推移行列」を作成する。ここでマルコフ過程とは、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過程であり、この理論を作成した連続データに適用し、確率推移から1年

毎に劣化の進行を表す劣化推移行列を作成する。この際、各変状ランクは1年毎に同ランクを維持するか1段階悪化するかの2通りであると仮定する。表-2に作成例(経年40年→経年41年の場合)を示す。

(4) 劣化推移行列の作成と予測

上記のマルコフ過程と劣化推移行列を用い、ある経年の各変状スパン数 $\{P_X\}$ に、該当する経年間の劣化推移行列 $[K_U]$ を掛け合わせることで、1年後の各変状スパン数 $\{P'_X\}$ を予測する(式(1))。以降を予測する際はこれを繰り返す。

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

(5) トンネル健全度の点数化

現在および将来のトンネル健全度を点数化するため、「健全度(Health Index: h)」を導入する。健全度(h)とは、以下の式(2)に示されるように、各変状ランクに分類されたトンネルのスパン数(n)に表-3に示す各重み付け係数(k)を乗じて、総スパン数で除した値である。

$$h = \frac{\sum k_i n_i}{\sum n_i} \quad (i = A1, A2, B, C, S) \quad (2)$$

表-2 劣化推移行列作成例(黄色部分)

		経年41年 変状ランク存在割合				
		S	C	B	A2	A1
		0.8331	0.0976	0.0166	0.0498	0.0029
経年40年 変状ランク 存在割合	S	0.8457	0.9851	0.0149	0	0
	C	0.0912	0	0.9326	0.0674	0
	B	0.0155	0	0	0.6708	0.3292
	A2	0.0450	0	0	0	0.9925
	A1	0.0026	0	0	0	0

表-3 重み付け係数(k)

変状ランク	A1	A2	B	C	S
重み付け係数	1	3	6	8	10

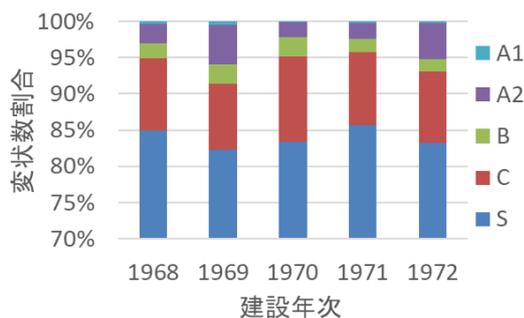


図-5 10年後の変状数割合

(6) 劣化予測

作成した劣化推移行列を用いて10年間劣化予測を実施した結果を図-5、図-6に示す。

本研究における劣化予測手法は以上のとおりである。

「健全度」の指標を設けることで、現在および将来のトンネルの健全度を点数化し、視覚的に今後の劣化傾向を表現している。また、この劣化予測に基づき、より効率的な補修計画を検討している³⁾。

3. Bradley-Terry モデルとアンケート調査

(1) 解析手法

今回、重み付け係数の再設定に当たっては、Bradley-Terry モデル(以下、BTM)を用いた。BTMとは、スポーツ統計学の分野で用いられる手法で、リーグ戦の勝敗表から計算されたオッズをプレイヤーの強さの比で記述できると仮定したモデルをいう⁴⁾。

重み付け係数の算出においては、各変状ランクの写真グループをプレイヤーとして、写真グループ間の一対比較により危険性についての勝敗表を作成し、BTMにより強さの比を算出した。

(2) アンケート調査概要

今回のアンケート調査は、東京地下鉄株式会社の所有する地下鉄トンネルにおいて複数年検査経験のある12人の被験者を対象に、各変状ランクの写真グループ間での一対比較を2回ずつ実施したものである。

設定した写真グループ一覧を表-4に示す。各写真グループはある通常全般検査結果における、後述の(3)の条件を満たす5枚の写真で構成し、変状ランク毎に2種類ずつ作成した。なお、各写真グループ名はランダムに決定した。

Sランクの写真グループを作成しなかった点について、本研究においては、変状がない区間を補修済み変状と同様のSランクとして集計している。そのため今回の調査では、Sランクの写真グループは必ず選択されないという前提条件を設け、アンケート調査には含めないこととした。

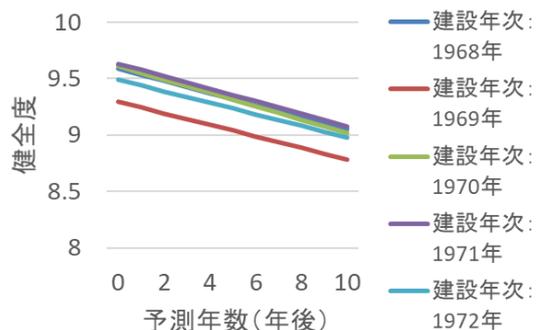


図-6 10年間劣化予測結果

表4 アンケート調査に用いた写真グループ一覧

	検査台帳記載の変状ランク			
	A1	A2	B	C
前半	グループえ	グループき	グループお	グループく
後半	グループい	グループか	グループう	グループあ



図7 アンケート調査に用いた写真の一例

図-7はアンケート調査に使用した写真の一例である。各写真内では対象変状を赤枠で囲い、右上には変状部位と変状名を記した。

(3) 使用変状の選定

今回のような調査は本来であれば実際のトンネル内で行うべきであるが、それが現実的ではないため写真を用いて実施した。そのため、使用する写真については、以下の選定条件を設け、これを満たす変状の写真よりランダムに各写真グループ5枚ずつ選定することとした。

- 打音検査を要する変状については、写真のみでの判定は困難であると考えられるため、「浮き・はく離・はく落」の変状は対象としない。
- 単独の初期欠陥の変状はほとんどがCランクであり、一対比較の際に被験者にCランクであることが見抜かれることが想定されるので、対象としない。
- 上床の変状の写真は、見えない部分における運行への影響が把握できず、検査員ごとに判定がばらつくことが予想されるので、対象としない。
- 付近に複合的な変状を伴うものは、台帳記載の変状ランクが純粋な当該変状の判定結果とは言えないため、単独で存在する変状のみを対象とする。

(4) アンケート調査票の作成

アンケート調査では、図-8のようなweb画面にて回答を頂いた。4段階の変状ランク(A1, A2, B, C)の写真グループ間での一対比較を2回ずつ実施するため、設問は合計12問である。

健全度判定区分重み付けのための調査2019

以下で提示されている2種類の写真グループを比較し、普段の検査と同じ視点で、赤枠で囲んだ変状の健全度判定区分がより悪いと感じる方をそれぞれお選びください。左の写真グループがより悪いと感じる場合は1を、右の写真グループがより悪いと感じる場合は2を選んでください。

*必須

【回答例】グループ〇の方がグループ△より判定区分が悪いと感じる場合

グループ〇とグループ△

1 2

グループ〇 グループ△

グループえとグループき*

1 2

グループえ グループき

図-8 回答フォームのweb画面

表-5 アンケート調査結果(勝敗表)

ランク	「悪い方」として選択した人数		ランク
A1	17	7	A2
A1	17	7	B
A1	19	5	C
A2	18	6	B
A2	20	4	C
B	18	6	C
A1	24	0	S
A2	24	0	S
B	24	0	S
C	24	0	S

(注) グレー部分は前提条件

回答に当たっては、それぞれの写真グループを比較し、写真から分かる情報の中で、普段の検査と同じ視点で、健全度判定区分がより悪いと感じる方をそれぞれ選択する形式とした。

4. アンケート調査結果と新重み付け係数の算出

(1) アンケート調査結果

アンケート調査の集計結果(勝敗表)を表-5に示す。今回の調査は、12人の被験者が各変状ランクの一対比較を2回ずつ実施する形式としたため、延べ24人のアンケート結果となっている。また、Sランクについては前述のとおり、必ず選択されないものとして活用した。

表-6 解析結果（新重み付け係数）

変状ランク	A1	A2	B	C	S
新重み付け係数	0	0.4	1.1	1.9	25
（従来のもの）	1	3	6	8	10

(2) 新重み付け係数の算出

表-5 の勝敗表に対し、BTM を適用することで、新重み付け係数を算出した。ここでは、統計解析ソフト R で公開されているパッケージ「BradleyTerry2」を活用し、各プレイヤーの強さの比として各変状ランクの新重み付け係数を決定した。表-6 中にその結果を従来のものと合わせて示す。

(3) 従来の重み付けとの乖離と考察

A1, A2, B, C ランクのそれぞれの数値の違いに比べて、S ランクの重み付け係数の他ランクとの差が非常に大きくなった。変状の有無を定量的に、明確に示すうえで非常に効果的であると考えられる。

この原因としては、他ランク間の比較では逆転的な選択をされることがあったのに対し、S ランクについては必ず選ばれないという前提条件を設けていたことが大きく影響していると考えられる。

一方で被験者への事後ヒアリングでは、この間隔について、以前のものよりも適切であるとの意見を頂き、S ランクについての前提条件は適切であったと考えている。

(4) 課題

a) 事後ヒアリング調査

表-5 から分かるように、被験者による一対比較結果は必ずしも実際の検査の判定どおりではなく、逆転的な判定も散見された。なかでも A1 ランクと C ランクの一対比較結果が逆転していた被験者に対して、そのように判定した理由について事後ヒアリング調査を実施した。その結果は以下のとおりであった。

- A1 ランクの写真グループは鉄筋露出のみで構成されている。トンネルの構造は鉄鋼框構造であり、鉄筋が広く露出しているも、構造的に大きな問題はないと判断した。
- 反対に C ランクの写真グループには漏水の変状が含まれており、これに重きを置いて危険と判定した。

b) 課題

今回の調査では、希少な A1 ランクの判定を比較的多く含む通常全般検査の結果を使用した。A1 ランクの変状は鉄筋露出が主であり、この対象路線には一部鉄鋼框という特殊な構造が採用されていた。

また、A1 ランクの写真グループは鉄筋露出の変状のみで構成されていたのに対し、C ランクの写真グループは漏水、ひび割れの変状も含んでいた。

以上の、各写真グループを構成する写真のばらつき、今回対象とした路線の一部の構造の特殊性が逆転的な判定の一因となってしまった可能性があるといえる。

5. 結論

本研究では、これまでに実施してきた地下鉄トンネルの劣化予測における重要な要素であった各変状ランクの重み付け係数を見直し、より実際の検査員の感覚に近い値に再設定するための方法を検討した。

手法としては、各変状ランクで構成された写真グループ間の一対比較のアンケート調査を複数年の検査経験がある検査員に依頼し、アンケート調査の集計結果の解析には、スポーツ統計学の分野で用いられる Bradley-Terry モデルを用いた。

その結果、従来のものとは大きく異なり、より実際の検査員の感覚に近い新たな重み付け係数を得ることができた。今回の手法は、作成した写真グループの質に起因すると思われる若干の課題を残すが、「重み付け係数」に従来の客観性・妥当性を持たせることができたと考えている。今後は、今回得られた新たな重み付け係数を用いて、これまで実施してきた種々の分析を見直していきたい。

謝辞：アンケート調査・事後ヒアリング調査にご協力いただいた東京地下鉄株式会社および関連会社の検査員の方々、および本研究実施にあたり多くのご支援とご指導を頂いた東京地下鉄株式会社の今泉直也氏に、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 原大介, 赤木寛一, 小西真治, 宮本光基, 岡田真聡：地下鉄トンネル検査データに基づく維持管理計画の策定について, 第 73 回土木学会全国大会, 2018.
- 2) 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）, p.80, 丸善出版, 2007.
- 3) 酒井亮太, 赤木寛一, 小西真治, 根本早季, 今泉直也, 原大介：地下鉄トンネル検査データに基づく維持管理計画の具体化の試み, 第 74 回土木学会全国大会, 2019.
- 4) 竹内啓, 藤野和健：スポーツの数理科学, pp.27-54, 共立出版社, 1988.

TRIAL SCORING OF DETERIORATION JUDGEMENT CLASSIFICATION FOR SUBWAY TUNNEL

Daisuke HARA, Hirokazu AKAGI, Shinji KONISHI and Hiroki NOGUCHI

The social infrastructure that rapidly developed during the period of high economic growth in Japan is now aging, and improvements in maintenance and management efficiency have become an important issue. Related to the maintenance and management of railway structures, the “Maintenance Standards for Railway Structures and Commentary” was enacted in January 2007. Based on this, railway operators conduct regular inspections and document the deterioration status, deformation types, etc. Based on this inspection data, repair plans are formulated for the railway structure and then, the repairs are carried out.

In previous research, for the purpose of contributing to the efficiency of subway tunnel maintenance management, prediction of future deterioration of the tunnel and development of repair plans based on the inspection data were conducted. In the inspection data, the deterioration judgment classification based on the “Maintenance Standards for Railway Structures and Commentary” is recorded, and the integrity of the subway tunnel structure is evaluated by obtaining the scored level value from the deterioration classification. Though the values used in this scoring are determined by interviews with the inspection staff members who are engaged in the maintenance of the subway tunnels of Tokyo Metro Company, they cannot be said to be valid. In this paper, the controversial classification level was reviewed, and a methodology for resetting it to a value closer to the actual inspector’s sense was examined.