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

早稲田大学大学院　学生会員　○酒井　亮太　　早稲田大学　　フェロー会員　　赤木　寛一
東京地下鉄株式会社　正会員　　小西　真治　　早稲田大学　　学生会員　　伏木　良太

1. はじめに

我が国では，大量に蓄積されてきた社会資本ストックの老朽化が問題となっており，それらの効率的な維持管理が求められている．現在，共同研究中の事業者が有する全 9 路線における補修計画は，トンネルの現時点の状況を基に策定している．そこで本研究では，検査データを用いた様々な試みや将来の劣化予測を実施し，それに基づいた補修計画の検討を行う．

2. 検査データの集計

本研究では，対象とする路線 A～I (以下，全路線)において，変状種類・部位・健全度等，発見時からの状態が記録されている検査データを用いる．その中で，変状ランク（表-1）に着目し「最悪値法（図-1)」により集計する．

さらに，トンネルの構造種別（開削・シールド）と地盤条件（硬質・軟質）に着目し，4 通りに区分する．全路線において区分すると，計 27 区間に分けられる．

表-1　構造物の健全度判定区分 [1)]

判定区分	構 造 物 の 状 態
A	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
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

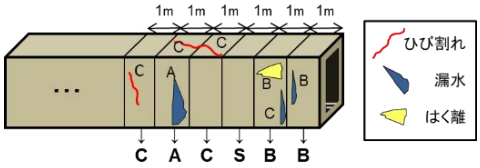


図-1　集計法概要（最悪値法）[2)]

3. 地下鉄トンネルの健全度

3.1. 健全度と重み付け係数

集計した結果を定量的に評価するため，「健全度 (Health Index:h)」を導入する．健全度とは，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 (a)，表−2)．なお，この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により決定した [2)]．

$$h = \frac{\sum k_i n_i}{\sum n_i} \qquad (i = \mathrm{A,B,C,S}) \qquad \text{(a)}$$

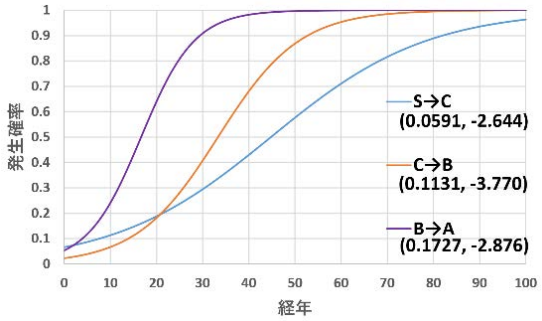
表−2 重み付け係数

	A	B	C	S
重み付け係数	1	2.3	5.3	10

3.2. 重み付け係数の評価

図−2 の重み付け係数を，ロジスティック回帰分析により評価する．ロジスティック回帰分析とは，ある現象の発生確率を，複数の因子の組み合わせとそれらの程度からモデル化する分析手法である．ロジスティック回帰分析は目的変数が 2 値の場合に用いられ，本検討においては，経年(x)を一つの因子として，S・C・B ランクの変状が，S→C・C→B・B→A と劣化するか否かを目的変数とする．そして，劣化する確率 $p(x)$ をロジスティック関数（式(b)）によってモデル化する．Z は変数 x_n と偏回帰係数 β_n を用いて合成したもので、本検討においては，経年(x)の係数 β_1 と切片 β_0 で表される．図-2 は，各変状ランク間で得られた分析結果であり，ロジスティック関数中の変数（係数 β_1，切片 β_0）をグラフ凡例中に示す．

$$p(x) = \frac{1}{1+\exp(-Z)} \qquad (Z = \beta_0 + \beta_1 x) \qquad \text{(b)}$$



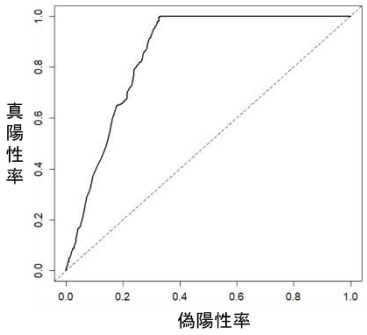
図−2　各変状ランク間における回帰曲線

3.3. モデルの適合性評価

分析により得られた回帰曲線の適合性を Receiver Operating Characteristics 解析（以下，ROC 解析）を用いて評価する [3)]．ROC 解析とは，モデルによって予測された結果が，実際に観察された結果に，どの程度正確に分類（劣化する or 劣化しない）できているかを評価する検定方法である．

ROC 解析では，真陽性率(陽性者を陽性と判定した率)を y 軸に，偽陽性率(陰性者を陽性と判定した率)を x 軸に取り，ROC 曲線を描く．また，ROC 解析の評価指標として，Area of Under the Curve(以下，AUC)を算出する．AUC とは ROC 曲線の下側の面積であり，一般的に AUC>0.70 であれば，対象モデルが適していると言える [3)]．

解析結果より，S→C，B→A の回帰モデルは AUC>0.70 であり，どちらも適合性を示すことができた．一方，C→B の回帰モデルでは AUC=0.68 となり，少しだけ下回る結果であった(図-3，表-3)．



図−3　S→C 間における ROC 曲線

表−3　各変状ランク間における回帰モデルの AUC

	S→C	C→B	B→A
AUC	0.85	0.68	0.76

3.4. 分析結果の整理

分析により得られた関数・グラフより，各変状ランク間において発生確率(劣化する確率)が 50%になるまでに要する年数と，重み付け係数を整理する(図-4)．

分析の結果，A-B, B-C 間の差異は，重み付け係数の差異と比べて，大幅に値のズレが生じていないことから，ある程度の妥当性を示している．C-S 間については，S=10 が実用的にするため任意に設定した値であることから比較的差が生じたと考えられる．

キーワード　地下鉄トンネル，維持管理，健全度，劣化予測，補修計画
連絡先　〒169-8555　東京都新宿区大久保 3-4-1　58 号館 205 号室　TEL：03-5286-3405　E-mail：ryota-waseda@toki.waseda.jp

	A	B	C	S
重み付け係数	1	2.3	5.3	10
各変状ランク間の重みの差異：		1.3	3.0	4.7
A-B間を基準に算出した分析により得られた重みの差異：		1.3	2.6 ($\times\frac{33.3}{16.6}$)	3.5 ($\times\frac{45.0}{16.6}$)
各変状ランク間の発生確率50%に要する年数：		(16.6年)	(33.3年)	(45.0年)

図-4　分析結果の整理

4.　劣化予測

4.1.　経年毎のデータ整理とマルコフ過程の適用

前述の最悪値法による集計結果を「経年」(＝(検査年次)-(建設年次)) 毎に整理する．以下の条件の下に，経年毎に各変状ランクの存在確率を集約し，該当データが存在しない部分には線形近似を施しながら経年による連続データを作成する．

- 変状ランクが自然と改善することはない．
- 経年 0 年においては全て S ランクである．

この連続データに対し，「マルコフ過程」を適用し「劣化推移行列」を作成する．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確率過程のことである．この理論より，上記の連続データ内の確率推移から 1 年毎に劣化の進行を表す劣化推移行列[K_U]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．

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を掛け合わせ，1 年後の各変状スパン数{P'_X}を予測する（式(c)）．以降を予測する際はこれを繰り返す．

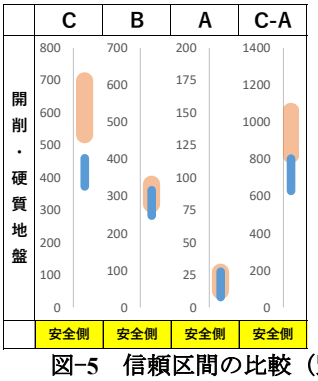
$$(P'_S \quad P'_C \quad P'_B \quad P'_A) = (P_S \quad P_C \quad P_B \quad P_A)\begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & 0 \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA} \\ 0 & 0 & 0 & K_{AA} \end{bmatrix} \quad (c)$$

4.2.　劣化予測手法の統計学的検証

本研究で用いる予測手法の妥当性を，95%信頼区間と交差検証の考え方を応用した方法で検証した．交差検証 [4] とは全データを学習用データと検証用データに分割し，学習用データで作成したルールを検証用のデータに適用し，一致率を見るというものである．図-5 は，各路線を構造種別・地盤条件別に分けた 27 区間分の劣化推移行列を検証した結果の一例である．95%信頼区間の平均値が予測値＞実測値の場合を「安全側」，予測値＜実測値の場合を「危険側」の判定としている．

図-5 のように検証によって安全側だと判断された場合でも，実際の予測結果がある程度実状に即している必要がある．そこで，定期的に行われる検査毎に各変状ランクの存在割合が大幅に変化しないことから，以下の 2 つの条件を満たさない場合は，劣化推移行列の代わりに図-2 の回帰曲線を用いる．

- A ランクの予測結果が，「安全側」かつ「検査の間隔と同一の年数における変化量が±5%以内」
- B,C ランクの予測結果が，「検査の間隔と同一の年数における変化量が±5%以内」



	C	B	A	C-A 合算	S
予測	533 ～ 700	279 ～ 333	13 ～ 27	825 ～ 1059	12315 ～ 12493
実測	373 ～ 460	248 ～ 317	8 ～ 28	629 ～ 804	12591 ～ 12668
平均値の相対誤差	32%	8%	11%	24%	-2%

図-5　信頼区間の比較（路線 D：開削構造・硬質地盤）

5.　補修シミュレーション（路線毎の年間補修量の決定）

補修計画を策定するにあたり，安全性の確保を目指すことは大前提であり，その上で補修の効率化も追求したい．そこで，全路線のうち「駅部」を除いた計 194 区間毎の集計結果および劣化予測結果をもとに，以下に示す 2 つの指標(X,Y)を用意し，路線全体の年間補修スパン数を区間別に配分する．

X：**3 年間劣化予測における健全度低下量**

→単位距離当たり各区間補修スパン数を，該当区間の健全度低下量の比に振り分ける．（補修の効率化の観点）

Y：**策定時点における A ランクスパン数**

→単位距離当たり各区間補修スパン数を，該当区間の A ランクスパン数の比に振り分ける．（安全性確保の観点）

本検討では，中期経営計画が更新される 3 年毎に補修量配分を更新することを想定する．また，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和が，路線全体の年間補修量の 900 スパンになるという条件の下で，X・Y の比を調整しながら劣化予測・補修シミュレーションを実施する．X・Y の比は（X:Y＝0:100，1:99，…，100:0）の 101 通りで行った．そして，(a)補修 Sim 後の健全度，(b)補修 Sim 後の A ランクスパン数の 2 つの観点から最適比を決定する．

図-6 より．(a)は X の割合が増えるにつれて減少し，(b)は(X:Y)＝(0:100) で最も少ないことが確認できる．以上より最適ウエイト比は（X ：Y）＝(0:100)である．

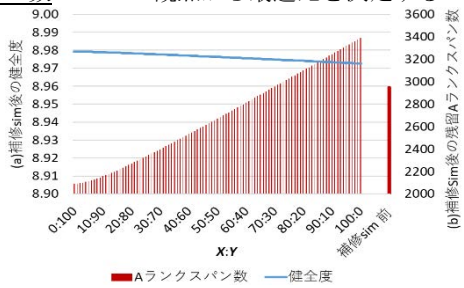


図-6　補修シミュレーションの結果

図-7 に，各路線の補修量を示す．A ランクが現状より少ない条件下では，健全度低下量も考慮した補修計画が策定できると想定できるが，検討の結果，現行の補修計画と同様 A ランクを優先的に補修することが，最も路線全体の安全性を確保できるという結果となった．

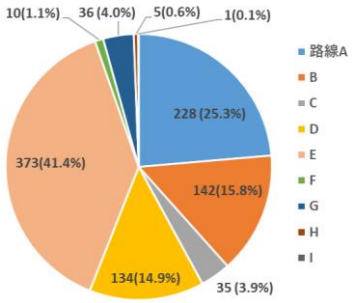


図-7　各路線の補修量配分(最適比)

6.　まとめ

本検討で得られた知見は以下の通りである．

- 検査データとロジスティック回帰分析による検討により，数理モデルにより設定した，健全度判定区分に対する重み付け係数が妥当であることを，別の観点から確認できた．
- 劣化予測・補修シミュレーションを通じて，現在行われている補修の有効性を示すことができた．

＜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・同解説（構造物編　トンネル），丸善出版，2007.
2) 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，第 25 回地下空間シンポジウム，2020.
3) 森實敏夫：わかりやすい医学統計学，メディカルトリビューン，2004.
4) 岩本佑太，亀井啓太，劒持尚樹，小川大貴，畠山恭輔，福中公輔：サポートベクトルマシンを用いた軌道検査・土木検査の相関性検証，第 73 回土木学会全国大会，2018.