

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

INSPECTION RESULTS FOR SUBWAY TUNNELS AND THEIR APPLICATION TO TUNNEL MAINTENANCE MANAGEMENT

三浦 文典^{1*}・赤木 寛一²・小西 真治³・五十嵐 翔太⁴

Takenori MIURA^{1*}, Hirokazu AKAGI², Shinji KONISHI³, Syota IKARASHI⁴

In Japan, the construction of social infrastructure has been increasing since the high economic growth in the 1960s. It is expected that further deterioration will occur in the future, so the maintenance and operation for these infrastructures is now a significant subject. Under these circumstances, "Maintenance Standards for Railway Structures" was established in January 2007. Railway companies in Japan perform maintenance on the basis of this standard and record these data. In this research, Infrastructure asset management has been applied to subway tunnel for the development of efficient maintenance method. Firstly, health index evaluation is made trial by two statistical approaches and deterioration prediction is performed. Secondly, Difference approaches make impact on health evaluation and deterioration prediction result. Finally, the environmental characteristics of each subway, such as constructed in the soft ground, make the impact of deterioration prediction results. This paper describes these results.

Key Words : asset management, underground railway tunnel, health index, deterioration prediction

1. はじめに

高度経済成長期以降, 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, これら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, 鉄道分野では2007年1月に「鉄道構造物等維持管理標準(構造物編)」が定められた. 鉄道事業者はこの標準に基づき定期的な検査を行い, 健全度判定し, その結果必要な場合補修などの措置をとり, 検査データの記録と保存を進めている. 以上のように, 近年, 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. そして, それらを活用することで, トンネルの状態を定量的に評価すると同時に, 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.

本研究では, 劣化予測による効率的な維持管理計画立案方法の開発を目的に, 地下鉄トンネルの検査データを2種類の異なる手法(最悪値法, 累積値法)で数値化し健全度評価を行うとともにマルコフ過程を用いた劣化予測を試みている. そして, この統計手法の違いが健全度評価やマルコフ過程を用いた劣化予測結果に及ぼす影響を検討した. 次に, 軟弱地盤上といった路線ごとの環境特性がマルコフ過程を用いた劣化予測結果に与える影響を検討した.

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変状ランクなどを記録した検査結果データを用いてトンネルの健全度評価と劣化予測を行った. 検査データについては, 通常全般検査と特別全般検査の2種類によるデータがあり, それぞれについて集計を行った. 図-1はトンネル横断面に対して実施される特別, 通常全般検査での検査概要を示す. 通常全般検査は2年に一回行われ, 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い, 構造物の変状を抽出している. 特別全般検査は20年に一回行われ, 専用の高所作業車を使用し, トンネル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, 健全度の判定精度を高めている.

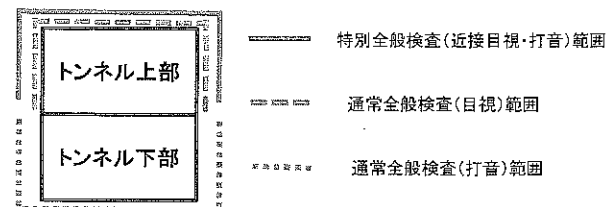


図-1 特別・通常全般検査概要

キーワード: アセットマネジメント, 地下鉄トンネル, 健全度評価, 劣化予測

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: takeneri@akane.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正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 Tokyo Metro Co.,Ltd, Tokyo, Japan

表-1 構造物の変状ランク判定区分¹⁾

判定区分	構造物の状態
A	AA 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
	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

本研究では、東京地下鉄株式会社が実施した通常全般検査データを活用しており、変状例には、はく離、剥落、漏水、漏水跡などが挙げられる。また、トンネル検査時に利用されている健全度判定区分¹⁾は、表-1に示すとおりである。

3. トンネル検査結果を利用した劣化予測手法について

(1) 検査結果の集計方法・整理手順について

本論文では、以上のようなトンネル検査結果について2種類の検査データ集計手法（最悪値法・累積値法）を利用して、トンネル検査の集計、整理を行った。以下、最悪値法と累積値法について記す。

最悪値法では、検査データを集計する過程でトンネル延長方向を5mスパンに区切り、そのスパン内の劣化変状の最悪値をそのスパンの変状代表値とする集計手法である。最悪値法は、従来より品質管理・信頼性工学において広く適用されており、システム全体が機能不具合となる最悪値を管理指標として取り入れることで、事故の許されないシステムや多くの判定条件を伴う回路などの評価をすることができる。しかしながら、地下鉄トンネルなどの大規模かつ複雑なシステムの実際の検査結果では、劣化個数や劣化原因など個々の状態によって大きなばらつきが存在している。そこで、このようなばらつきを考慮することができるデータ集計手法として累積値法を考案した。

累積値法では、トンネルの路線を5mに区切ったスパンに対して、そのスパン内に含まれる全変状個数に各変状の劣化度を乗じた値の和を該当スパンの劣化代表値として点数化する集計手法である。トンネルの全変状状態を点数化し、その累積値を算出することにより、実際の検査結果の各種の要因によるばらつきを包括的に考慮して、トンネルの劣化度合いを定量的に評価することが可能になる。

これら2つの手法による集計結果に基づく劣化予

測と健全度評価について検討することとした。

全路線における累積値法劣化推移行列を作成することを目的として、本研究では地下鉄トンネルの点検データの集計を行った。

(2) 劣化予測手法

土木構造物の劣化予測の方法は、大きく分けて2つに分類できる。1つは、力学的特性を把握し劣化予測を行う方法、もう1つは、検査による判定区分の低下を統計的に予測する方法である。前者は、特定の土木構造物や部材を対象にしているのに対し、後者は、土木構造物全体を対象に使用されることが多い。本研究は、トンネル構造物全体の劣化進行を予測し、修繕計画を検討することを目標としているため、統計的手法の中でも代表的なマルコフ確率過程を使用した。マルコフ確率過程は、橋梁や舗装などの劣化推移を対象に多く使用されているが、トンネルやトンネル部材にも適用がみられる手法である。

(3) マルコフ確率過程による劣化予測

トンネルの劣化推移をマルコフ過程として扱うことで、過去の劣化推移の結果から統計的な考え方で、将来の劣化予測が可能になる。マルコフ確率過程では、建設完成から t_n 年経過したトンネルの変状 X の存在確率を $\{P_X\}$ とすると、 t_{n+1} 年経過したトンネルの変状ランク X の存在確率 $\{P'_X\}$ は以下の式で与えられる²⁾。

$$\{P'_S P'_C P'_B P'_{A2} P'_{A1}\}$$

$$= \begin{bmatrix} P_S & P_C & P_B & P_{A2} & P_{A1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & K_{SB} & K_{SA2} & K_{SA1} \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & K_{CA2} & K_{CA1} \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA2} & K_{BA1} \\ 0 & 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $[K_{ij}]$ は劣化推移確率行列であり、 K_{CC} は変状ランクCが翌年にランクCを維持していること、 K_{CB} はランクCが翌年ランクBに悪化する事象の割合を表している、 $K_{A1A1}=1$ である。なお、ここでは次の条件を仮定して、劣化推移シミュレーションを行った。

- ① トンネルの劣化変状ランクが、維持補修することなく自然に改善することはない。
- ② 変状ランクの1年ごとの変化は、同じランクを維持するか、または1段階悪化する事象の2通りである。
- ③ 初年度(2010年度)における変状の存在確率は、Sランクが100%である。

表-2 変状分布割合の比較

変状ランク	S	C	B	A2	A1
経年75年	0.530	0.240	0.035	0.163	0.028
経年74年	0.532	0.240	0.401	0.161	0.027

表-3 劣化推移確率行列の例

経年74年 →		経年75年				
		S	C	B	A2	A1
経年74年	経年75年	53.0%	24.0%	3.5%	16.3%	2.8%
	S	53.18%	0.997	0.003	0.000	0.000
	C	24.01%	0.000	0.994	0.006	0.000
	B	4.01%	0.000	0.000	0.923	0.077
	A2	16.14%	0.000	0.000	0.000	0.994
	A1	2.67%	0.000	0.000	0.000	0.000

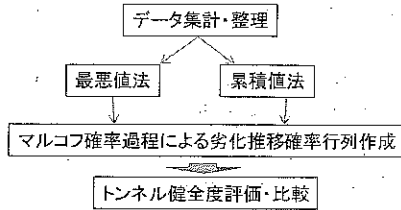


図-2 研究手順の流れ

上記の仮定を用いて算出した劣化推移確率行列の作成例を以下に示す。トンネルの経年に応じた変状分布割合と作成した劣化推移確率行列の例は、表-2、表-3の通りである。表-2は、経年74年と経年75年における地下鉄トンネルの変状分布割合を表した結果を示しており、表の分布の推移を比較することで行列を作成した。表-3は、建設後74年経ったトンネル構造物の1年後の状態を予測する行列であり、表-2の変状割合の推移に基づいた行列を示している。この行列を利用して建設後74年における変状ランクの分布から、建設後75年の変状ランクの分布を算出可能である。

以上のように、最悪値法と累積値法によるデータ集計結果に基づいて、マルコフ確率過程による劣化推移確率行列を作成し、両手法による劣化推移と健全度評価の違いを評価している。本研究における研究手順について、要約した流れ図を図-2に示す。

4. 最悪値法による劣化推移確率行列

(1) 最悪値法の概要

最悪値法は、前述のように検査データを集計する過程でトンネル延長方向を5mスパンに区切り、そのスパン内の劣化変状の最悪値をそのスパンの変状代表値とする集計法である。トンネルの1スパンの変状を最悪値という代表値とおくことで、トンネル全体の状態を最悪状態を考慮した品質管理の考え方に基いて定量的に評価できる手法である。

(2) トンネル検査結果の集計手順

地下鉄トンネルの検査データは、最悪値法に基づき以下の手順で集計した。なお、実際の検査結果のばらつきを平準化する目的で、空間的にはトンネル延長5mスパンを変状ランク評価単位とするとともに、時間的には経年10年間の変状ランク分布を単位としてデータ整理を行った。

- ①地下鉄各路線のトンネルを5mスパンに区切り、そのスパン内で変状の最悪値をそのスパンの変状ランクとした。スパン内に変状が見られないときの変状ランクは、Sである。
- ②建設年代別(10年ごと)に、各変状ランクの総数を全路線において集計する。
- ③年代別(10年ごと)に建設されたトンネルの総延長より、年代別の総スパン数を求める。
- ④10年単位で各変状ランクのスパン数の総数を算出した結果を利用して、10年間に建設された総延長スパン数で除すことで10年単位での各変状の存在確率を求める。
- ⑤集計した10年単位での存在確率に対して、線形補間を行い1年単位のデータを算出する。

これらの手順に基づいて、構造条件3通り(開削、シールド、構造区別なし)と、地盤条件3通り(地盤条件A、地盤条件B、地盤区別なし、表-4参照)の合計9通りについて同様の集計を行った。なお、表-1の判定区分AAについては、ただちに措置が講じられているので検査データには存在しない。

図-3に、(地盤条件A、構造区別なし)の条件で抽出した変状ランクの存在分布を10年単位の建設年次で表した例を示す。図-3より、建設年次が新しい構造物ほど変状がないスパンの割合が大きく、変状が小さい傾向があることが確認できる。なお、1940年代には、地下鉄トンネルは第二次世界大戦のため建設されていない。また、図-4に、線形補間により求めた経年一年毎の変状ランク分布を示す。図-4より、変状ランクSにおいては、トンネル建設年次が新しくなるほど、変状ランクSの割合が大きくなり、変状ランクA2、A1においては、トンネル建設年次が新しくなるほど、その割合が少なくなる傾向を確認することができる。

表-4 地盤条件(A・B)の概要

Aブロック	Bブロック
本ブロックは本郷台、豊島台、淀橋台等の台地地帯で地質構成は代表的に表土(沖積層)、関東ローム層・東京礫層・江戸川層、上総層(第3紀層)の順に構成されている。表土の沖積層は数メートルボーダーで薄い	本ブロックは、地表面より軟弱な有楽町層(沖積層)、の層厚が大きい(B1ブロック20-30m、B2ブロック30-40m、B3ブロック40m以上)地層構成は有楽町層、東京砂層、東京礫層、江戸川層(B1、B2ブロック)あるいは地域によって有楽町層、7号地層、東京砂層、江戸川層(C3ブロック)の順に構成されている。

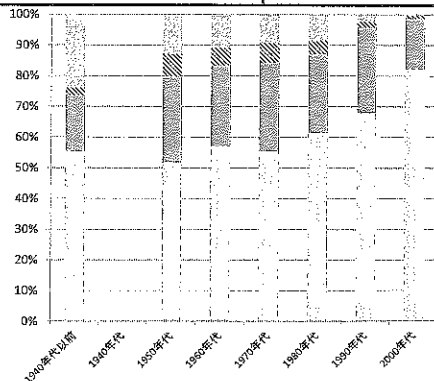


図-3 変状ランクの分布(地盤条件A・構造種別なし)

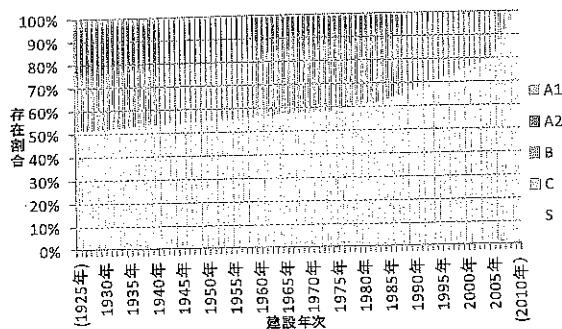


図-4 線形補間後の経年ごとの変状ランクの分布

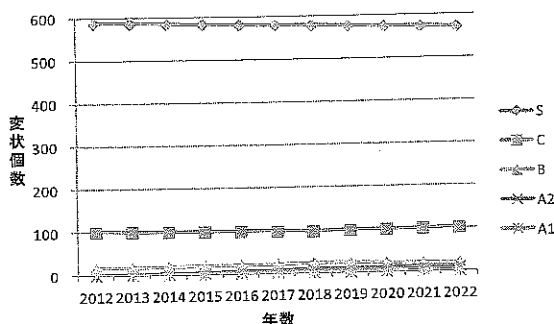


図-5 最悪値法における劣化変状推移

表-5 累積値法における各変状重みづけ点数

変状ランク	S	C	B	A2	A1
重みづけ係数	0	2	4	7	9

(3) 劣化推移確率行列作成と劣化推移状況

前節で算出した一年毎の変状ランクの存在割合を利用して、最悪値法による劣化推移確率行列を作成した。図-5は、建設年次1962年のトンネルに対して作成した劣化推移確率行列を適用し、2010年を原点とした時の将来10年に対して、劣化予測をした結果である。この図を利用して、劣化推移確率行列適用時の各変状ランクの劣化個数の推移を把握することができ、最悪値法による変状ランクの低下は10年後においても小さいことがわかる。

5. 累積値法による劣化推移確率行列

(1) 累積値法の概要

累積値法は、トンネルの路線を5mに区切ったスパンに対して、そのスパン内に含まれる全変状個数に各変状の劣化度を乗じた値の和を該当スパンの劣化代表値として点数化する集計手法である。トンネルの全変状状態を点数化し、その累積値を算出することにより、実際の検査結果の各種の要因によるばらつきを包括的に考慮して、トンネルの劣化度合いを定量的に評価することが可能になると考えられる。

(2) トンネル検査結果の集計手順

トンネルの検査データは、累積値法に基づき以下の手順で集計した。

- ① 地下鉄対象路線のトンネルを5mスパンに区切り、そのスパン内で変状総数、変状ランクを求める。
- ② 1スパンに含まれる各変状ランクに表-5に示す変状重みづけ点数を割り振り、変状個数を乗じた和を、該当スパンにおける変状累積値とする。
- ③ 対象路線沿いの各建設年次のトンネル全スパンに対して、変状累積値を算出する。
- ④ 各建設年次のトンネル全スパンについて、各変状累積値に対応するスパン数の存在確率を求める。

以上の手順に基づき、一例として建設年次1961年のトンネルにおける検査データより求めた変状累積値に対応するトンネルスパン存在確率分布を図-6に示す。図-6より、変状累積値が0~10点の変状存在割合が高いことがわかる。この結果より、1スパンに含まれる変状がBやCが2~3個、もしくは変状がA1、A2が1つ存在する割合が高いということがわかる。

(3) 確率分布の考え方

以上のような、累積値法により検査結果を集計した変状累積値の存在確率分布に対して、確率密度関数で近似することにより、トンネル変状について実施された点検結果自体に対するばらつきやデータの欠損を考慮することが可能となり、トンネル変状の確率分布を連続的に推定することができる。

しかし、図-6に示した集計結果は、変状累積値が不連続でばらつきが大きく、確率密度関数への近似が困難である。そこで、表-6に示すように変状累積値をグループ化することにより、確率密度関数で近似する際の誤差を最小化することとした。一例として、建設年次1961年のトンネルの変状累積値をグループ化した結果を図-7に示す。図-7より、図-6のような累積値のばらつきが解消され、連続な関数とみなすことができ、確率密度関数で近似できる。

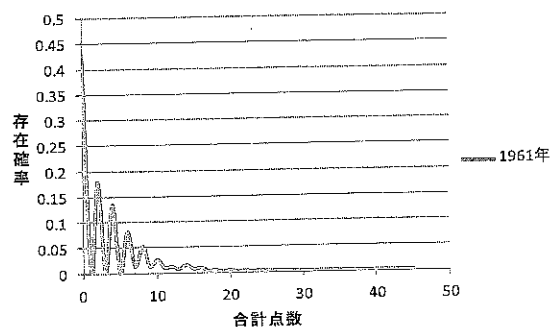


図-6 変状累積値の存在確率分布

表-6 グループ化の定義

グループ	0	1	2	3	4	5
累積値	0~3	4~7	8~11	12~15	16~19	20~23
グループ	6	7	8	9	10	
累積値	24~27	28~31	32~35	36~39	40~43	

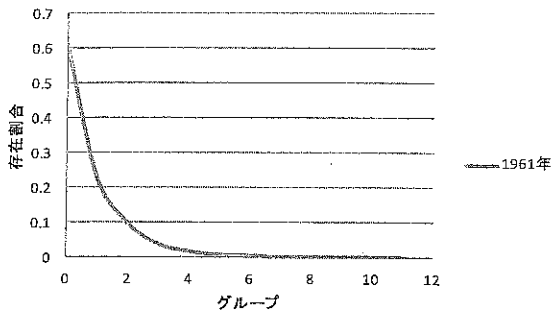


図-7 グループ化した存在割合分布

(4) ガンマ分布を用いた変状割合分布推定手法

確率論および統計学において、ガンマ分布は連続確率分布の一種で指数分布を一般化した分布とされている。その性質は形状パラメータ $\alpha (>0)$ 、尺度パラメータ $\beta (>0)$ の2つのパラメータで特徴づけられる。指数分布をある事象 x が起きるまでの待ち時間分布として考えることにより、確率密度関数 $P=f(x)$ は式(2)で与えられる。

$$P(X=x) = f(x) = \frac{x^{\alpha-1} \exp(-\frac{x}{\beta})}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (2)$$

ガンマ分布の応用範囲は広く、さまざまな研究分野で汎用的に用いられている。経済学においては、保険金の支払額のモデル化に、生物学においては、ウイルスの潜伏期間のモデル化やタンパク質の特定の残基位置における置換頻度のモデル化等に用いられる。また、工学においては電子部品の寿命のモデル化にガンマ分布を用いることがある。本研究においては、トンネルの劣化事象に対して特定の変状累積値 x のトンネルスパンが発生するまでの時間分布をガンマ分布で近似すると考えることができ、図-7に対してガンマ分布を適用することにより、検査結果に対するばらつきやデータ欠損を考慮した変状存在割合 P を推定することができる。

(5) ガンマ分布による近似

前章までで述べた図-7のようなトンネル検査結果の累積値法による集計結果を、ガンマ分布により近似する。ガンマ分布により近似する場合には、ガンマ分布の式(2)に含まれるパラメータ (α, β) を決定する必要がある。ここでは、集計結果における変状累積値を有するトンネルスパンの存在確率と、仮定するガンマ分布による変状存在確率を適合させるために、図-8に示すように特定の変状累積値区間におけるトンネルスパンの存在確率に相当する面積比が1に近くなるように、試行錯誤法によりガンマ分布のパラメータを決定した。図-8は面積比を算出する例を示しており、両曲線における特定の変状累積値点数区間の面積比 ($S1/S2$) ($S1$:実測値分布面積, $S2$:ガンマ分布面積) が1に最も近いパラメータを決定する手順を示している。図-9には、建設年次1961年のトンネルにおける集計結果をガンマ分布で近似した例を示している。

また、表-7は、検査結果に対して累積値データ集計を行った対象路線におけるトンネル建設年次ごとに決定したガンマ分布パラメータ (α, β) と対応する確率分布面積比を示している。表-7の建設年次1955年に対応するトンネル区間のパラメータに関しては、1955年に建設されたトンネルが存在しないことから1954年と1956年のパラメータ推定結果に基づいて決定している。

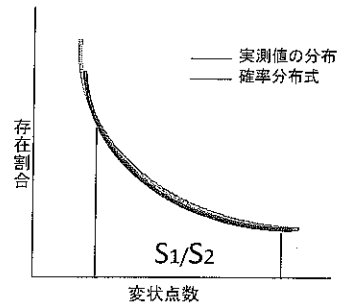


図-8 確率分布の近似例

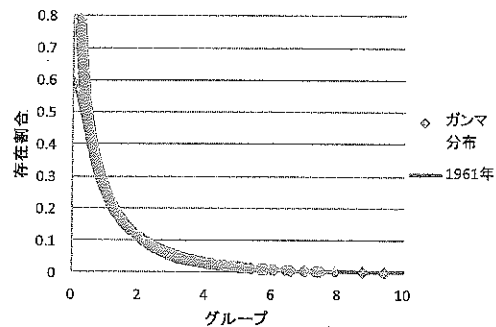


図-9 ガンマ分布による集計結果の近似例

表-7 建設年次ごとの決定パラメータと面積比

建設年次	1952年	1953年	1954年	1955年	1956年	1957年
α	0.26	0.15	0.45	0.4	0.28	0.28
β	7	35	6.8	6.8	8.5	8
面積比	88%	80%	92%		92%	91%
建設年次	1958年	1959年	1960年	1961年	1962年	
α	0.3	0.45	0.35	0.55	0.72	
β	7.1	4.5	2.5	2	1.5	
面積比	87%	94%	95%	95%	99%	

表-8 各変状に対するグループ範囲

変状	S	C	B	A2	A1
グループ	0,1	2,3	4,5,6	7,8	9,10

(6) ガンマ分布を考慮した変状判定区分

ここでは、ガンマ分布を用いて変状割合推定を行った結果に基づいて、改めて表-1に示した変状ランク判定区分(A1,A2,B,C,S)を決定した。具体的には、図-8に示すようなガンマ分布に対して、累積変状値に対応する集計グループの対象範囲の面積を算出することで、変状ランク判定区分ごとの存在確率を考慮して決定した。ここでは、表-8に示すような集計グループ範囲に対応する変状ランク判定区分を決定した。

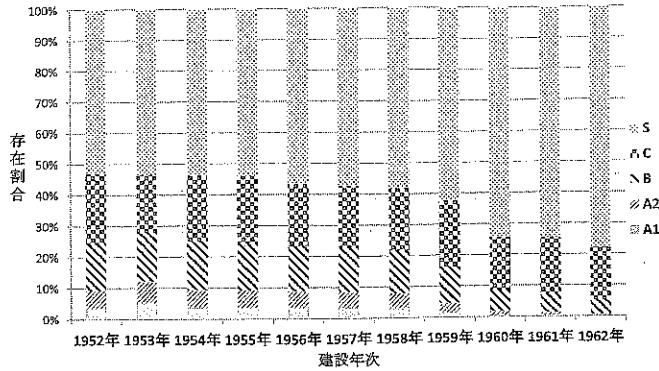


図-10 各建設年次の変状割合

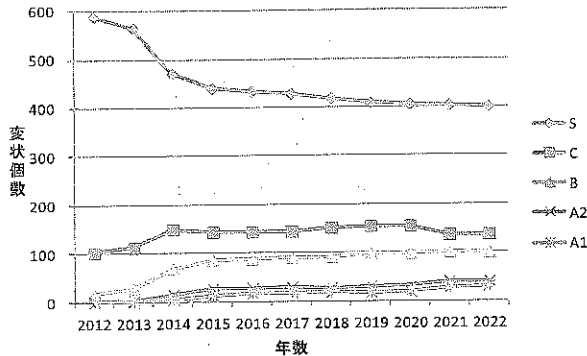


図-11 累積値法における将来10年の劣化推移

以上のようにして決定した変状ランク判定区分に基づき、対象トンネル建設年次ごとの各変状ランクの存在確率を算出した結果を図-10に示している。図-4と同様に、経年年数が大きいトンネルでは変状Sランクの割合が少なく、劣化が進行しているA2ランクやBランクの割合が多いことが確認できる。図-4では、検査データの欠損箇所を線形補間により推定せざるを得なかったが、集計結果をガンマ分布に近似することによって合理的な根拠をもって経年年数に対応したトンネル変状の劣化を推定することができた。

(7)劣化推移確率行列作成と劣化推移

図-10を利用して、累積値法による検査データ集積に基づいたマルコフ確率過程による劣化推移確率行列を作成した。劣化推移確率行列を作成する手順は最悪値法の場合と同じであり、図-10で示した各経年年数における変状割合に基づきマルコフ確率過程を適用した。一例として、1962年に建設されたトンネルに対して作成した劣化推移確率行列を利用して、2012年を原点とした場合の向こう10年間の劣化推移予測をした結果を図-11に示す。この場合には、トンネルは2014年以降は緩やかに劣化するのに対して、当初の2013年から2014年にかけて大きく劣化することがわかる。

6. トンネル健全度評価

(1)トンネル健全度評価の概要

以上のようにして、最悪値法と累積値法で集積した検査データを利用して求めた劣化推移確率行列により劣化予測計算を用い、地下鉄の個別路線の健全度評価を行った。対象トンネルの健全度の定量的評価を行うため、表-9に示す重みづけ係数を用いて対象としたトンネル路線の健全度を算出した。

本論文における健全度(health index) h とは、各変状ランク区分に分類されたトンネルスパン数に表-9に示した健全度重みづけ係数を乗じて、変状総スパン数 n で割った値のことで式(3)で表される。なお、重みづけ係数は、東京地下鉄株式会社のトンネル検査担当者へのアンケート調査結果により設定した値である。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^6 k_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^6 n_i} \quad (i = AA, A1, A2, B, C, S) \quad (3)$$

(2)最悪値法と累積値法における健全度評価比較

地下鉄トンネルを対象として、最悪値法と累積値法による集計データに基づく健全度評価を行った結果を、比較したものを図-12に示す。累積値法により得られた健全度は、最悪値法と比較して高い結果となることがわかる。

この健全度評価手法を利用して、同等の健全度を有するトンネル区間について、図-11と同じ最悪値法と累積値法による劣化推移確率行列を利用して劣化推移を予測した結果を図-13に示す。図-11と同様に累積値法と最悪値法では健全度の劣化推移に大きな差が生じていることがわかる。累積値法では健全な個所の劣化プロセスが該当トンネルスパンの健全度の低下に顕著に反映されるのに対して、最悪値法では健全な個所の劣化は該当スパンの健全度に影響しないためにこのような劣化プロセスの違いが生じるものと考えられる。トンネルスパンの健全度評価の上では、累積値法により検査結果を集計した方が劣化プロセスを適切に評価できるものと思われる。

表-9 変状ランクと重み付け係数

変状ランク(i)	S	C	B	A2	A1	AA
重みづけ係数(k _i)	10	8	6	3	1	0

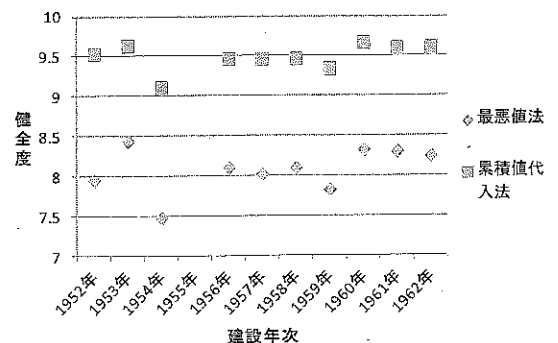


図-12 最悪値法と累積値法による健全度比較

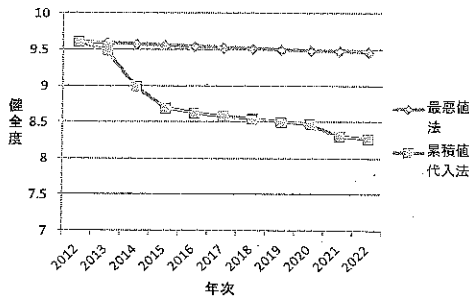


図-13 最悪値法と累積値法による劣化推移の比較

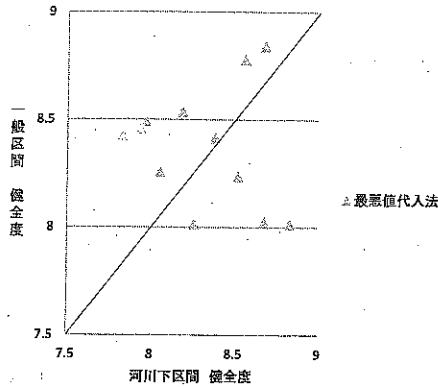


図-14 最悪値法による健全度評価の比較

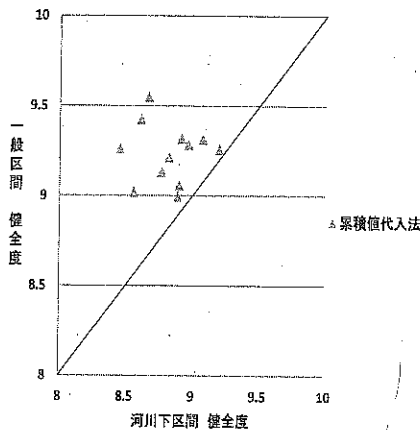


図-15 累積値法による健全度評価の比較

(3) 河川下トンネル区間の健全度評価

地下鉄トンネルの河川下区間では、塩害の影響により劣化進行が著しいことが報告されている。ここでは、累積値法と最悪値法によるトンネル健全度評価がトンネル劣化原因である塩害をどの程度考慮できているのかを検証している。具体的には、2つの方法により河川下トンネル区間の健全度を算出し、非河川区間(以下、一般区間)の健全度との比較を行うことで劣化原因の塩害の影響を調査した。一般に河川下のトンネル区間は一般区間と比べ、漏水などの変状が著しく多く、それにより一般区間の健全度と比較した場合には、河川下区間の健全度の低下が想定される。そこで以下に示す手順で、河川下トンネル区間と一般区間における健全度評価を行った。

①河川下区間(河川直下±50m)において、2つの方法により健全度評価を行う。⁴⁾

②河川下区間の地下鉄トンネルと同建設年次、同地盤条件、同トンネルスパン数のトンネル区間を選定し、これを一般区間とする。

③河川下区間と一般区間の健全度の比較を行う。

図-14は、最悪値法を用いて求めた河川下区間の健全度と一般区間の健全度を比較したものである。健全度を最悪値法で求めた場合、河川下区間の健全度と一般区間の健全度の間には上記で述べたような傾向が認められない。最悪値法では、河川下トンネル区間に存在している塩害による劣化個所を考慮することができず、他の要因による劣化個所を含めた最悪値という指標でのみで評価する結果となっている。一方、図-15は累積値法を用いて、図-14と同様の健全度評価を行った結果を示している。累積値法では、対象とした全区間において河川下区間の健全度が一般区間の健全度より小さくなる結果が得られた。対象トンネルスパン内にある変状をすべて考慮する累積値法を用いることで、河川下区間の塩害による変状を健全度に的確に反映させることができたためと考えられる。すなわち、塩害などの劣化要因を健全度低下として定量的に評価する際には、すべての劣化個数と劣化状態を適切に把握することができる累積値法が有効な手段であると考えられる。

7. 軟弱地盤上の地下鉄トンネルでの劣化予測検討

(1) 軟弱地盤上の地下鉄トンネルの概要

一般的に軟弱地盤上に建設されたトンネル構造物は、トンネル躯体の継ぎ目等から漏水が発生し変状が多く見受けられる。実際に軟弱地盤上の変状数は、図-16に示すように良質な地盤と比較し多い結果が得られた。また、対象とした軟弱地盤上の地下鉄トンネルでは、集中的に補修工事を行っており、図-16より路線ごとの地盤条件によって、変状数が異なり、検査データにバラツキが生じていることがわかる。ここでは、劣化推移行列作成に用いる検査データを地盤条件で場合分けし、路線ごとの特徴が劣化予測にどの程度影響を与えるのかを検討した。具体的には、全路線の点検データを用いて作成した劣化推移行列と、軟弱地盤上に建設されたある一路線の点検データを用いて劣化推移行列の作成を試みた。

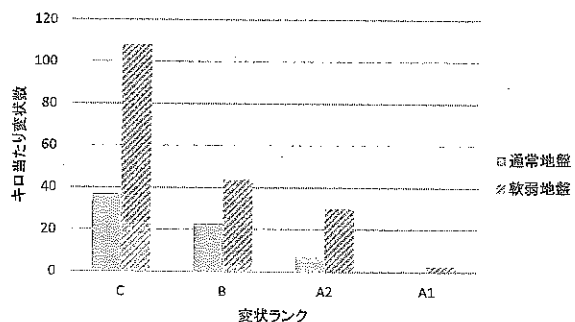


図-16 地盤条件と変状数
(対象とした地下鉄路線 10年間の通常全般検査の結果より)

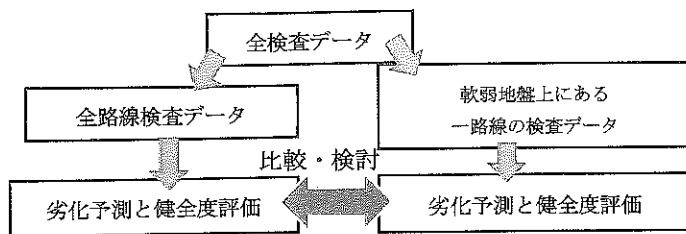


図-17 劣化予測検討フロー

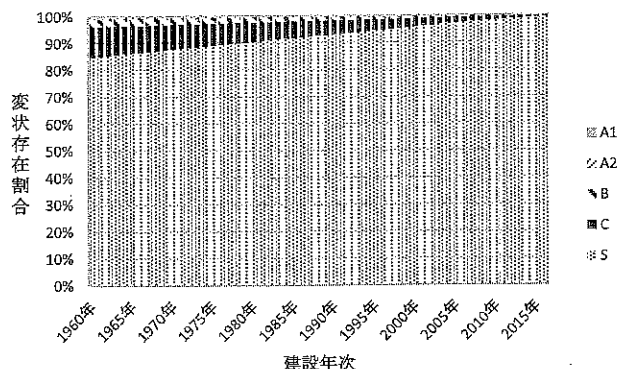


図-18 線形補間後の経年ごとの変状ランクの分布 (軟弱地盤上の一路線の累積値法による集計結果)

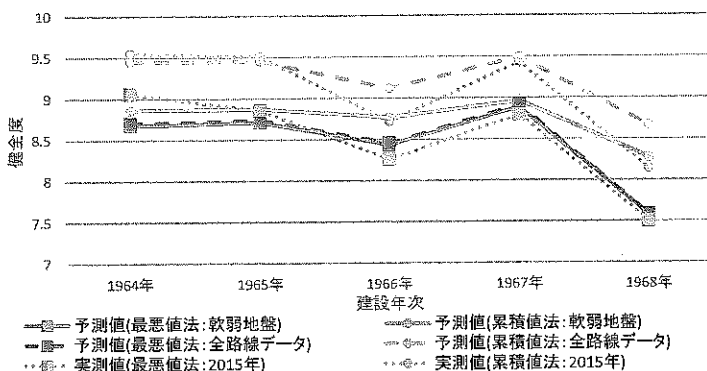


図-19 劣化予測結果の比較

(2) データ集計手順

図-17 に従い地下鉄全線の検査データと、軟弱地盤上の地下鉄一路線の検査データを用いて、最悪値法、累積値法にて、4通りの劣化推移行列を作成した。比較対象として、軟弱地盤上のある一路線の2013年の検査結果を基に、2年後の劣化予測結果と、2015年の健全度評価結果との比較を行っている。一例として、累積値法にて求めた経年毎の変状ランク分布を図-18に示す。そして、健全度評価と劣化予測の結果を図-19に示す。

(3) 劣化推移行列作成と劣化推移の比較

図-19より、累積値法にて求めた劣化予測値が実測値と良く一致した。これは累積値法によって求めた変状ランクが、各検査年において、Sランクで多数を占めていることに起因する。劣化推移行列作成の際、累積値代入法の算出では変状ランクS以外の変状の割合が少ないため、劣化進行が小さい劣化推移行列が作成できた。対象とした軟弱地盤上の路線では、集中的に補修を行っている。このため変状ランクSの割合が例年と大差なく、実測値、予測値共に近い変状ランクの割合を形成したと考察した。

8. まとめ

本研究では、地下鉄トンネルの検査結果を用いた健全度評価と劣化予測手法を検討するにあたり、最悪値法と累積値法の2種類のデータ集計方法による検討を行った。得られた成果は以下の通りである。

- ①地下鉄トンネルの検査データを集計する手法として品質管理・信頼性工学に基づく最悪値法と、トンネル検査の劣化個数や劣化要因を考慮することができる累積値法によるデータ集計を行い集計結果を比較・検討することができた。
- ②最悪値法に基づくデータ集計によって劣化推移確率行列を作成し、トンネルの将来における劣化推移を確認することができた。
- ③累積値法に基づくデータ集計により、トンネルの劣化度を定量的に評価し、確率分布(ガンマ分布)を用いた劣化推移確率行列を作成した。また、作成した劣化推移確率行列を用いてトンネルの将来における劣化推移を確認することができた。
- ④トンネル健全度評価手法を用いて最悪値法と累積値法における健全度評価の比較、作成した劣化推移確率行列に基づく健全度の劣化予測を行った。最悪値法と累積値法による健全度比較を行う場合、累積値法はトンネルの劣化プロセスを適切に評価できると考えられ、トンネルの劣化予測を考える過程で有効な手段を示すことができた。
- ⑤最悪値法と累積値法を用いて、河川下トンネル区間における健全度の比較を行った。河川下などの変状が多い区間では、累積値法を用いて健全度評価を行うことで、すべての劣化個数と劣化状態を適切に把握することができる。累積値法が河川下での健全度を的確に反映させることができると確認できた。
- ⑥路線ごとの特徴が劣化予測に及ぼす影響について検討した。軟弱地盤上に建設されたある一路線の点検データを用いて、累積値法にて作成した劣化予測値が実測値と良く一致した。軟弱地盤上の区間では、補修工事を集中的に行っているため、変状ランクSの割合が大きく占める。補修が集中的に実施される路線にて、累積値法がトンネルの劣化予測を考える過程で有効な手段であることを確認できた。

謝辞：本研究実施にあたり、東京地下鉄株式会社の小西真治氏、五十嵐翔太氏には、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。

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(トンネル), 丸善出版, 2007
- 2) 真壁ら 新版信頼性工学入門, P15-19, 日本規格協会, 2010
- 3) 中易 秀敏ら, 統計的品質工学の基礎, 2010 P8-30 朝倉書店 1994
- 4) 諸橋 由治ら「地下鉄箱型トンネルの塩害範囲に関する研究」トンネル工学研究発表会, Vol.70, P75-82, 2014