

地下鉄トンネルの検査データに基づく 健全度評価と修繕投資効果について

鈴木 彰吾¹・西村 高明²・小西 真治³・村上 哲哉⁴
赤木 寛一⁵

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)
E-mail: rainbow1123@fuji.waseda.jp

²正会員 メトロ開発株式会社 (〒160-0004 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)
E-mail: t.nishimura@metro-dev.co.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 (〒160-0004 東京都台東区東上野4-19-6)
E-mail: konishi@tokyometro.jp

⁴正会員 東京地下鉄株式会社 (〒160-0004 東京都台東区東上野4-19-6)
E-mail: te.murakami@tokyometro.jp

⁵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)
E-mail: akagi@waseda.jp

現在, 高度経済成長期以降に集中的に整備された社会資本ストックの多くが老朽化し, 維持管理の重要性が認識されている. また近年, 社会資本を効率的, 効果的に維持管理するために社会資本アセットマネジメントという手法を適用する事例が注目されている. 社会資本アセットマネジメントとは社会資本ストックを社会の「資産」(アセット)とみなし, 構造物の状態を客観的に把握・評価し, 中長期的な資産の状態を予測し, 予算制約の中で費用対効果の高い維持管理を行うことである.

本研究では, 地下鉄トンネルの劣化と修繕に着目し, 劣化検査データに基づく健全度評価により, トンネルの劣化状態・劣化原因を定量的に評価した. またトンネルの劣化推移特性を求め, その推移特性に基づいて個別路線に対する修繕シナリオの検討を行った.

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

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは高度経済成長期以降に集中的に整備され, 今日に至る約60年の間に相当量のストックが蓄積された. 現在, その集中的に整備された社会資本ストックの多くが老朽化し, 社会資本の維持管理が重要な課題となっている. そのような状況の中, 近年, 社会資本を効率的・効果的に維持管理するために社会資本アセットマネジメントという手法を適用する事例が注目されている. 従来, アセットマネジメントとは証券や不動産などの金融資産管理に対して適用されていたが, 本研究においては, 社会資本に対してアセットマネジメントを適用することで費用対効果の高い維持管理を行うことが目的である.

本研究では, 社会資本に対してアセットマネジメントの適用を試みるために, 地下鉄トンネルを対象としてトンネルの検査結果に基づく健全度評価, 劣化推移特性に基づく劣化予測, 費用便益分析に基づく修繕対策について検討をしている.

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. トンネル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. また, 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て, トンネル上床及び側壁上部についても入念な目視, 打音検査を行い, 健全度の判定精度を高めている.

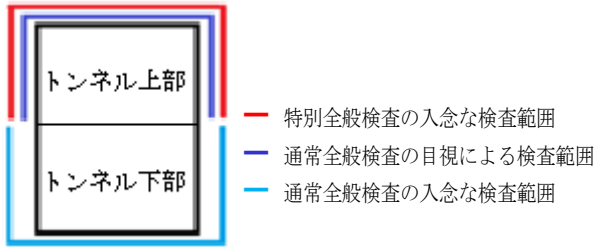


図-1 特別・通常全般検査概要

3. 経年による劣化予測と健全度評価

(1) 劣化予測の考え方

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、予算配分を評価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。

(2) トンネル検査データの集計手順

トンネルの検査データは、以下の手順で集計した。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。

- 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。
- ④ 10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-2参照)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。

表-1 構造物の健全度の判定区分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 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
	A2 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
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

表-2 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・東京砂層(硬質粘土層を介在)・東京礫層・江戸川層(以上洪積層)、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ホルダーで薄い。	・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。

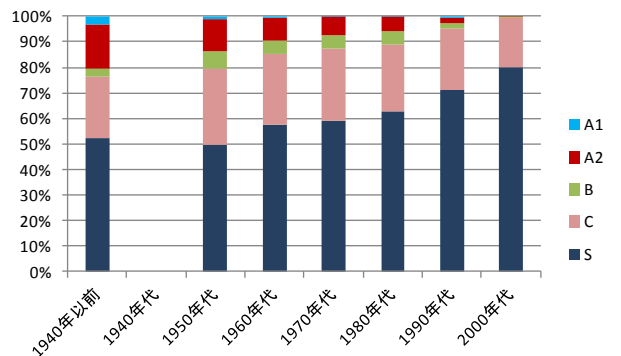


図-2 変状ランクの割合(地盤条件A・構造種別なし)

図-2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割合を10年単位の建設年次で表した例を示す。図-2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。

(3) 推移確率行列の作成

推移確率行列の作成については、上記の集計結果を用いてマルコフ確率過程を適用する。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⁾。

$$= \begin{Bmatrix} P'_S \\ P'_C \\ P'_B \\ P'_{A2} \\ P'_{A1} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & K_{SB} & K_{SA2} & K_{SA1} \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & K_{CA2} & K_{CA1} \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA2} & K_{BA1} \\ 0 & 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 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。

上記の仮定を用いて、作成した推移確率行列の例は、表-3の通りである。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割合から、建設後75年の変状ランクの割合を算出可能である。

(4) トンネル健全度評価について

上記で求めた推移確率行列を用いた劣化予測計算を用い、個別路線の劣化予測と健全度評価を行った。ここでは、東京地下鉄株式会社のある一路線を対象として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、重みづけ係数を用いて対象としたトンネル路線の各年における健全度を算出した。健全度(health index) h とは、78各変状スパン数に表-4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。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^6 k_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^6 n_i} \quad (i = AA, A1, A2, B, C, S) \quad \text{式(2)}$$

表-3 劣化推移確率行列の例

経年74年→		経年75年				
経年75年		S	C	B	A2	A1
経年74年	S	0.99701	0.00299	0	0	0
	C	0	0.994314	0.005686	0	0
	B	0	0	0.926585	0.073415	0
	A2	0	0	0	0.994061	0.005939
	A1	0	0	0	0	1

表-4 健全度重みづけ係数

変状ランク(i)	S	C	B	A2	A1	AA
点数(k)	10	8	6	3	1	0

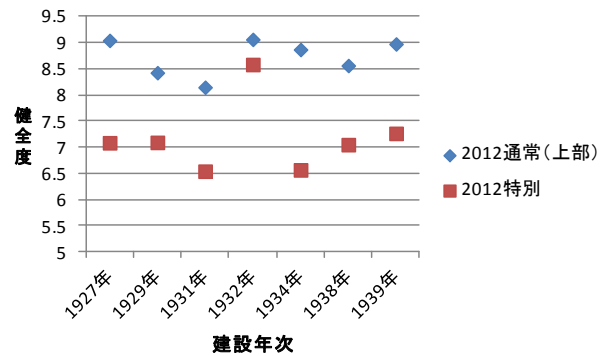


図-3 トンネル建設年次と健全度の関係

図-3は、2012年に行われた特別、通常全般検査の両検査結果に基づいて図-1に示すトンネル上部箇所に着目し、式(2)で求めた健全度を比較しものである。図-3より、通常全般検査よりも特別全般検査で得られた健全度がやや低い結果となり、これは、図-1に示したように特別全般検査が通常全般検査と比較して、トンネル上部について入念な検査を実施しているためと思われる。しかしながら、いずれの検査結果によっても、表-1の変状ランクBからC程度の健全度は保たれていることがわかる。なお、1932年に建設されたトンネル箇所については、集中的な補修が行われたので、他の区間よりも健全度の値が大きくなっている。

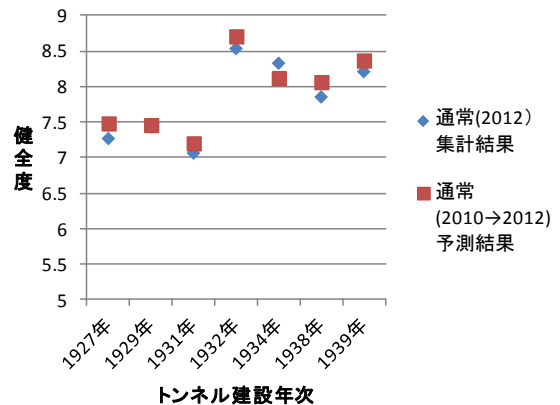


図-4 トンネル建設年次と健全度推移の関係

図-4 は 2012 年に行われた通常全般検査の集計結果と、2010 年に行われた通常全般検査結果を利用して、前節で求めた推移確率行列を用いて 2010 年から 2 年後の健全度を予測した結果を比較している。図-4 より、トンネル建設年次ごとに多少の違いがあり、予測結果の方がやや高い健全度を示している年次の方が多いが、両者は近い値をとっていることがわかる。したがって、トンネル検査結果を利用して作成した推移確率行列によるトンネルの劣化予測は、ある程度妥当であることが確認できる。

4. 劣化原因と健全度について

(1) 劣化原因の推定と中性化

別途行われた調査・分析によって、本研究で対象としている路線では塩害やアルカリ骨材反応、化学腐食による劣化の可能性は低いことが分かっており、建設後 80 年以上が経過していることから、中性化が一番大きな劣化要因である可能性が高い。

中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、炭酸化反応を起こすことによってコンクリートマトリクスの pH が低下する現象である。これにより表-5 に示すようにコンクリート内の鋼材が腐食し、ひび割れが生じ、かぶりの剥落等が発生する³⁾。中性化の進行はコンクリートの品質や環境条件の影響を受けるが、一般に式(3)に示すように時間(材齢)の平方根に比例するとされている。なお、表-5 における中性化残りとは、かぶりから中性化深さを差し引いた値である²⁾。

$$y = b\sqrt{t} \quad \text{式(3)}$$

y : 中性化深さ(mm), b : 中性化速度係数(mm/year), t : 材齢(year)

(2) 中性化進行と検査結果に基づく健全度の関係

図-5 に、対象トンネルにおける中性化測定結果として、かぶり・中性化進行と経年数との関係を示す。図-5 より、中性化検査位置における、かぶりの平均値は約 60mm であり、中性化深さの平均値はかぶりの 1/3 程度であるが、中性化の最大箇所では中性化が鉄筋近傍まで進んでいることが分かる。

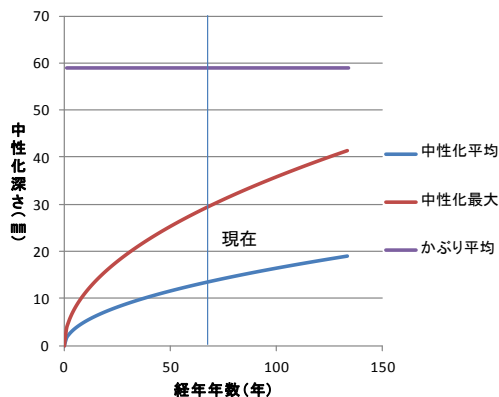


図-5 中性化進行・かぶりと経年数との関係

ここで、コンクリートの中性化進行による影響を定量的に評価するために、式(4)の中性化進行割合を算出した。

$$\text{中性化進行割合} = \frac{\text{中性化深さ(mm)}}{\text{かぶり(mm)}} \quad \text{式(4)}$$

図-6 は、対象トンネルにおけるコンクリートコア採取位置に応じた中性化進行割合の分布を示したものであり、横軸の採取位置は、対象トンネル起点からの離隔を示している。この図では、中性化進行割合が高いコア採取区間をグループ 1、中性化進行割合が中のコア採取区間をグループ 2、中性化進行割合が低いコア採取区間をグループ 3 として示している。また、各グループにおけるトンネル検査結果に基づく健全度と中性化進行割合の平均値の関係を求めた結果を図-7 に示す。図-7 から中性化進行割合が高くなるほど、検査結果に基づくトンネル区間健全度が低くなることが分かる。すなわち、トンネル検査結果は、トンネル躯体の中性化等の物理的劣化状態を適切に反映したものと考えることができる。

表-5 中性化進行と劣化度²⁾

劣化度	中性化残り	鋼材の腐食性	中性化による鉄筋腐食の可能性
特			
高	0mm未満	大	腐食が生じ得る
中	0mm以上 10mm未満	やや大	場合によっては中性化による腐食が生じる可能性がある
低	10mm以上 30mm未満	軽微	将来的には中性化による腐食が生じる可能性がある
無	30mm以上	なし	当面の間は、中性化による腐食が生じる恐れはない

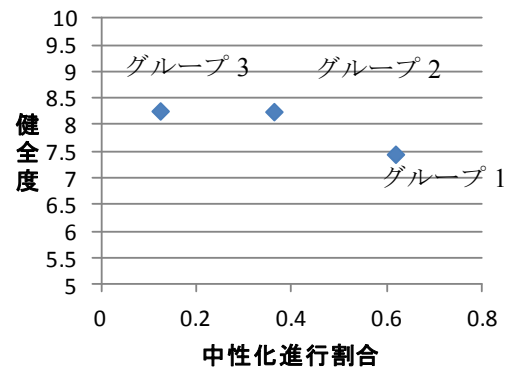
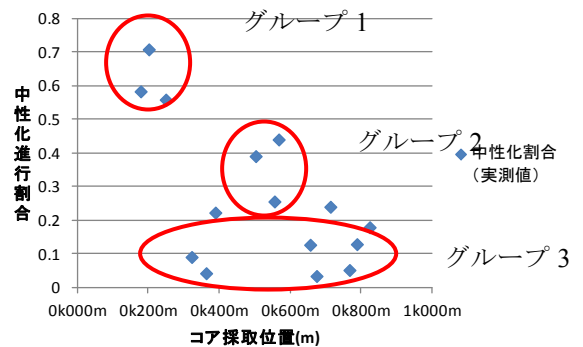


図-7 中性化進行割合と健全度

5. 修繕費用と修繕シナリオを考慮した補修シミュレーション

(1) 修繕単価の設定

3. 経年の劣化予測と健全度評価で求めた推移確率行列を用いた劣化予測計算を利用して、2010年を基準とした時の20年間の健全度の変化と、修繕シミュレーションを行った。

修繕単価は、現在、東京地下鉄株式会社で補修工事を実施しているA2ランクの修繕費用の実績値を基本とし各変状種別の単価を設定した。各変状ランクの修繕単価を設定する際、A2ランクの修繕累計費用を、その劣化個数総和で除した平均価格を設定単価とした。その他のランクについては、表-4の重みづけ係数に準じて、単価設定重みづけ係数、A1: 3.0, A2: 1.0, B: 0.5, C: 0.2 を乗じてランク別に単価を設定した。各変状ランクの設定単価は、表-6に示すとおりである。

表-6で設定した修繕単価は、変状1箇所を修繕するのに必要な費用を示している。しかしながら、変状の集計は5mスパンで行っており、1つのスパンに変状が複数存在する場合もある。そこで、各変状ランクの総数を変状が存在するとみなされたスパン数で割ることで、1スパンあたりに存在する変状個数を算出し、1スパン(5m)当たりの修繕単価を求めると表-7に示すとおりであった。

(2) 修繕を考慮した補修シミュレーション

次に、対象トンネルに対してトンネル建設年次別に劣化予測を行った。ここでは、次の条件に基づいて補修シミュレーションを行った。

- ①修繕は、毎年度につき1回行われるものとする。
- ②修繕費用は、表-7に示した値を利用する。
- ③修繕工の信頼期間は10年とし、11年目以降は構造物本体と同等に劣化推移する。
- ④劣化予測には、全線を対象に2010年通常全般検査によって作成した推移確率行列を使用する。
- ⑤トンネル建設後84年目以降を予測する必要がある場合においては、トンネル建設後83年目を予測する行列で代用する。

表-6 各変状ランク修繕単価

変状ランク	1箇所当たり単価(円)
A1	794 000
A2	264 000
B	132 000
C	52 000

表-7 1スパン当たりの修繕単価

変状ランク	1スパン(5m)当たりの単価(円)
A1	1 926 262
A2	640 470
B	320 235
C	126 153

着目年次(修繕前)

	S	C	B	A2	A1
1927年	811	59	8	1	0
1929年	585	110	13	2	0
1931年	157	114	13	2	0
1932年	623	77	6	1	0
1934年	376	163	10	1	0
1938年	1093	693	139	12	0
1939年	273	190	44	18	0
計	3918	1406	233	37	0

修繕

着目年次(修繕後)

	S	C	B	A2	A1
1927年	812	59	8	0	0
1929年	587	110	13	0	0
1931年	159	114	13	0	0
1932年	624	77	6	0	0
1934年	377	163	10	0	0
1938年	1105	693	139	0	0
1939年	291	190	44	0	0
計	3955	1406	233	0	0

劣化予測

1年後(修繕前)

	S	C	B	A2	A1
1927年	810	60	7	1	0
1929年	586	111	12	2	0
1931年	159	114	12	2	0
1932年	622	78	6	1	0
1934年	376	163	10	1	0
1938年	1103	691	131	12	0
1939年	290	190	42	4	0
計	3946	1407	220	23	0

修繕

1年後(修繕後)

	S	C	B	A2	A1
1927年	811	60	7	0	0
1929年	588	111	12	0	0
1931年	161	114	12	0	0
1932年	623	78	6	0	0
1934年	377	163	10	0	0
1938年	1115	691	131	0	0
1939年	294	190	42	0	0
計	3969	1407	220	0	0

図-8 修繕を考慮した劣化予測の流れの例

以上の条件に基づいた修繕を考慮した劣化予測の流れの例を、図-8に示す。図-8では、トンネルに存在するA1, A2を毎年修繕するシナリオを示している。また、このシミュレーションにおいては、修繕→劣化予測→修繕→劣化予測の流れを20年間にわたって繰り返している。

(3) 修繕シナリオ

上記の方法に基づいた修繕を考慮した補修シミュレーションを行い、2010年を原点とした時から20年後までの健全度推移と修繕費用の算出を行った。修繕シナリオは、a) 修繕範囲、 b) 修繕頻度、に着目し作成した。

a) 修繕範囲を考慮したシナリオ

ここでは、修繕を行う際の修繕範囲に着目してシナリオ作成を行った。現在、修繕が実施されているのは A1, A2 ランクの変状であるが、ここでは修繕範囲を広げてトンネル修繕の費用対効果がどのように変化するかを検討した。この修繕範囲シナリオ適用の条件として、トンネル修繕は毎年行っており、変状ランクが A1, A2 のトンネル箇所に関しては 10 割、変状ランクが B のトンネル箇所に関しては 3 割、変状ランクが C のトンネル箇所に関しては 2 割の修繕を実施するものと想定している。表- 8 に、修繕範囲を考慮した 3 種類のシナリオを示す。

b) 修繕頻度を考慮したシナリオ

ここでは、修繕を行う際の頻度に着目してシナリオ作成を行った。トンネルの変状ランク A1, A2 は構造物の性能を低下させる恐れがあるため、直ちに修繕が必要であると考えられる。それに対して変状ランク B は直ちに修繕する必要性は低いため、ここでは、変状ランク B の修繕頻度に着目した。修繕頻度を考慮したシナリオは、表-9 に示すとおりであり、変状ランクが A1, A2 はすべてを毎年修繕し、変状ランク B は、表-9 に示すような頻度で修繕することを想定した。なお、シナリオ 8 はシナリオ 1 と同じシナリオである。

(4) 修繕シナリオの評価

維持管理の最適な政策を決定する要因には、修繕工法の選択、実施時期、適用箇所などが挙げられるが、本研究では修繕の実施時期や適用箇所などの実施手順に着目して、その投資効果を評価した。

修繕シナリオの評価は、費用便益分析(B/C)により行った。費用便益分析における費用便益比は、以下の式(5)で求めることができると仮定した。ある年度の全事業費に対するトンネル修繕費用の比率で割引いた営業収入に t 年次の修繕で得られた健全度上昇比を乗じた値の合計を便益(B)、修繕費用の合計をコスト(C)とみなし、2010 年を原点としたときの 20 年間における便益とコストの比を算出した。なお、ここで営業収入に乘じた健全度上昇比は、修繕によるトンネル供用性能の増加に対応するものと考えている。

$$\begin{aligned}
 \text{便益(B)} &= \sum_{t=1}^{20} (\text{健全度上昇比}) \times (\text{営業収入}) \\
 &\quad \times \left(\frac{\text{トンネル年間修繕費用}}{\text{全事業営業費}} \right) \\
 \text{費用(C)} &= \sum_{t=1}^{20} t \text{年次の補修費用}
 \end{aligned}$$

式(5)

表-8 修繕範囲を考慮したシナリオ

シナリオ	内容
1	A1A2ランクのみ修繕
2	A1～Bランク修繕
3	A1～Cランク修繕

表-9 修繕頻度を考慮したシナリオ

シナリオ	内容
4	Bランク(毎年)修繕
5	Bランク(2年に1回)修繕
6	Bランク(3年に1回)修繕
7	Bランク(5年に1回)修繕
8	Bランク修繕なし

a) 修繕範囲を考慮したシナリオ

図-9 に、修繕範囲を考慮したシナリオにおける 20 年間の健全度推移を示す。図-9 より、全シナリオにおいて 20 年間、健全度 9.0 以上を維持しており、広い範囲にわたって修繕を行うシナリオ程、20 年にわたる健全度が高いことが分かる。表-10 に、修繕範囲を考慮したシナリオにおける 20 年間の累計修繕費用と B/C 値を示す。これより、修繕範囲を考慮したシナリオにおいて、シナリオ 2 の A1~B ランクを補修した場合が最も B/C 値が高く、また 20 年間の累計費用も低いことが分かる。変状ランク A1~C まで修繕するシナリオ 3 では、広い範囲で修繕を行っているため健全度上昇は、シナリオ 1, シナリオ 2 と比較して高い結果となっているが、広い範囲で修繕を行う程、修繕費用が必要となり B/C 値はシナリオ 2 と比較して、わずかに低い結果となった。したがって、シナリオ 2 が、トンネルの修繕費用を抑え、費用対効果の高いトンネルの修繕を行うことができると考えられる。

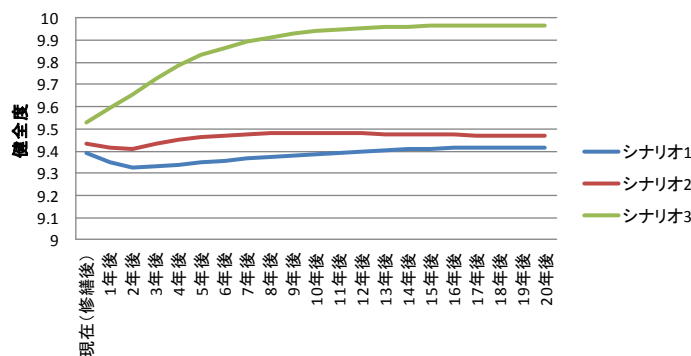


表-10 累計修繕費用と B/C 値 (シナリオ①～③)

番号	20年累積費用(百万円)	B/C値
シナリオ1	1145.75	1.310
シナリオ2	1051.60	1.334
シナリオ3	1185.97	1.333

b) 修繕頻度を考慮したシナリオ

図-10 に、修繕頻度を考慮したシナリオにおける 20 年間の健全度推移を示す。シナリオの違いによる差は小さいが、20 年にわたって健全度 9.0 以上を維持していることがわかる。表-11 に、修繕頻度を考慮したシナリオにおける 20 年間の累計修繕費用と B/C 値を示す。表より、トンネルの変状 B ランクの修繕の頻度を高めることで、結果的に 20 年間の累積費用を抑え、トンネル修繕の費用対効果を高めることができることがわかる。

以上のことから、トンネル変状ランク A1,A2 のみでなく、トンネル変状ランク B に関しても予防的に修繕を実施することが重要であると判断される。

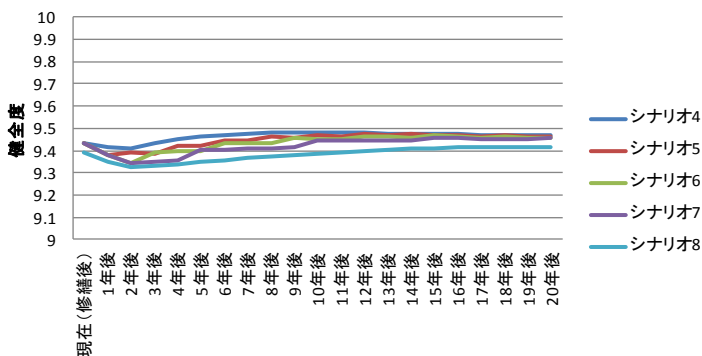


図-10 各修繕シナリオの健全度推移

表-11 累計修繕費用と B/C 値 (シナリオ④～⑧)

番号	20年累積費用(百万円)	B/C値
シナリオ4	1051.60	1.334
シナリオ5	1072.41	1.329
シナリオ6	1082.34	1.329
シナリオ7	1102.84	1.324
シナリオ8	1145.75	1.310

6. まとめ

本研究では地下鉄トンネルの劣化と修繕に着目し、構築の検査データに基づく健全度評価結果を利用した劣化推移特性に基づくシミュレーションにより、修繕シナリオの検討を実施した。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- ① 2種類の検査データに基づくトンネルの健全度評価を行うことによって、通常、特別全般検査の特徴と精度を確認した。
- ② トンネル検査結果に基づく健全度評価と、コンクリート中性化検査結果に基づく中性化進行状況の比較をもとに、トンネル検査結果に基づく健全度はコンクリート中性化等の物理的劣化状態による影響を適切に反映したものであることが確認することができた。
- ③ 作成した地下鉄トンネルの推移確率行列を用いて補修補修シミュレーションを行った結果、修繕シナリオに対応して健全度推移、修繕費用を把握することができた。また、修繕範囲を広げ、修繕頻度を高くするといったような予防保全的な修繕を実施することで、修繕の長期的な費用対効果を上げることが可能であることがわかった。

謝辞：本研究実施にあたり、東京地下鉄株式会社の武藤義彦様、河畑充弘様、山本努様、早稲田大学の前田啓太様には、多くのご支援とご指導を頂いたことをここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 鉄道総研：鉄道構造物等維持管理標準，同解説（トンネル），丸善，2007
- 2) 独立行政法人土木研究所日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，P50-58、2003
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書(維持管理編)，2012

(2014. 9. 15 受付)

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

Shogo SUZUKI, Takaaki NISHIMURA, Keita MAEDA, Shinji KONISHI, Tetsuya MURAKAMI and Hirokazu AKAGI

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. Asset management is a strategic management of physical assets during their life in the organization, which enables us to manage physical assets effec-

tively and efficiently. In this research, a social infrastructure is considered as an asset. Infrastructure asset management has been applied to subway tunnel. Our goal is to conduct a mid and long term efficient maintenance and operation plan for the subway tunnel and to decide the proper budget for rehabilitation.