

検査結果のバラツキを考慮した トンネル健全度指標の開発と妥当性の検証

榎谷 祐輝¹・石川 幸宏²・坂 祐樹³・赤木 寛一⁴

¹正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 改良建設部（〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6）
E-mail: y.enokidani@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部（〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6）
E-mail: yuk.ishikawa@tokyometro.jp

³非会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部（〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6）
E-mail: y.ban.x7y@tokyometro.jp

⁴フェロー会員 早稲田大学 理工学術院（〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1）
E-mail: akagi@waseda.jp

地下鉄事業者は、2 年毎に各路線での地下鉄トンネル検査を実施し、検査結果を基にトンネル内の変状に対して個々に補修を行っている。補修は変状の健全度を検査者が判定・ランク付けしており、優先順位をつけて状態が悪い箇所から期限を決めて順次施工を行っている。しかし変状の集中及び進行がある場合は一時的な補修だけではなく、予防保全を考慮した大規模な対策を検討する必要がある。

これを踏まえ、東京地下鉄株式会社では、検査時期や路線の違いによる検査結果のバラツキを無くし、全線における変状の健全度を比較する事で、補修や予防保全の対策の優先順位を全路線で検討しやすくすることを目的に維持管理指標 θ を開発し実務に用いてきた。本論文では、この指標の詳細と検査年度や路線が違う場合の本指標の妥当性を検証した結果を述べる。

Key Words: subway tunnel, maintenance, health index, inspection item response model, Validation

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、「東京メトロ」という。）は現在9路線、営業キロ195.0km、うち地下部166.8kmを所有しており、一日に約498万人(2020年度)のお客様にご利用いただいている。最も古い路線は表-1に示す通り、開業後94年以上が経過しており、全線の半分以上が50年以上経過している。お客様が安全・安心に利用されるためには、日常のメンテナンスが必要不可欠である。

地下鉄トンネルは鉄道構造物維持管理標準¹⁾（以下、「維持管理標準」という。）に則り2年毎の目視点検による通常全般検査、20年毎の足場を用いた近接目視や打音による特別全般検査を実施し、変状に対して表-2に示す判定基準に準拠して健全度判定を行っている。しかし、全ての変状を補修することは難しく、維持管理する視点で変状の進行が著しい、あるいは列車運行に支障する恐れがある箇所は、健全度に応じて措置の必要性を判断し、適切な時期を定めて計画を策定し措置（補修ま

表-1 東京メトロの各路線

路線名	本線延長	支線延長	開業年
銀座線	14.5km	14.1km	1927 年
丸ノ内線	28.0km	25.8km	1954 年
日比谷線	20.7km	17.3km	1961 年
東西線	31.4km	17.1km	1964 年
千代田線	25.0km	19.1km	1969 年
有楽町線	29.3km	26.4km	1974 年
半蔵門線	16.8km	16.8km	1978 年
南北線	21.4km	21.4km	1991 年
副都心線	8.8km	8.8km	2008 年
計	195.9km	166.8km	-

青枠：94 年以上経過路線／赤枠：50 年以上経過路線

表-2 鉄道構造物の健全度判定¹⁾

健全度	運転保安、旅客及び公衆などの安全に対する影響	変状の程度	措置等
A	AA 脅かす	重大	緊急に措置
	A1 早晚脅かす 異常時外力の作用に脅かす	進行中の変状等があり、性能低下も進行している	早急に措置
	A2 将来脅かす	性能低下のおそれのある変状等がある	必要な時期に措置
B	進行すれば健全度Aになる	進行すれば健全度Aになる	必要に応じて監視等の措置
C	現状では影響なし	軽微	次回検査時に必要に応じて重点的に調査
S	影響なし	なし	なし

たは監視等)を行っている。これらは、パッチワーク的な補修であるが、これとは別に、検査結果を基に変状集中区間、あるいは今後注意しなければいけない区間を特定することを目的に、検査時期や路線の違いによる検査結果のバラツキを無くし構造物の区間における健全度を定量的に示す維持管理指標 θ を開発し²⁾維持管理の検討に用いている。しかし、本指標を用いた評価結果の妥当性は十分に検証されていない、今回、一対比較実験を実施しその妥当性を検証した。

2. 維持管理指標

(1) 維持管理指標とは

維持管理指標は、ある路線の位置を示す起点からの延長（以下、キロ程という）を一定区間ごとに区切り、その区間が潜在的に有している各変状の観測される確率を規定する指標で構造物の健全度を表す指標である。漏水・ひび割れ・浮き・鉄筋露出等の各変状の項目には、それぞれに対して「変状の観測されやすさ」という抽象的な概念がある。ひび割れや漏水などは、検査員が実際に観測できる変状そのものである一方で、「各変状の観測されやすさ」と「誤差」は実際には観測できない抽象概念である。実際に観測できる変状は、「その変状の観測されやすさ」と「誤差」が合成されたものと考えられるが、各変状の観測のされやすさの違いは、構造物の健全度への反映されやすさが異なると考えられる。維持管理指標 θ は、健全度を各変状の観測のされやすさで示す指標で、全般検査の結果から推定する方法を開発した。

(2) 維持管理指標算定方法の概要

維持管理指標推定の手順を図-1に示す。最初に検査データを数量化する。次に、維持管理指標と変状の発生確率の関係を表すモデルを仮定し、そのモデルが持つ3つのパラメータをベイズ推定によって求める。このパラメータの一つが維持管理指標 θ である。ベイズ推定は、当該データの得られやすさを示す尤度に対して、仮説に基づくパラメータ自体の傾向（事前分布）を反映することができ、最終的に求めたいパラメータ（事後分布）を推定する方法である。この事後分布はベイズの定理により以下のように表現できる。

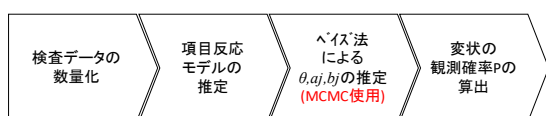


図-1 維持管理指標推定の手順

事後分布 $\propto$ 尤度 $\times$ 事前分布

また、推定された維持管理指標などのパラメータを用いることで、変状の観測確率を算出することが可能である。この維持管理指標の推定はトンネルの全般検査の結果を用いて行う。

(3) 維持管理指標算定方法

a) 検査結果データの処理方法

ここでは、表-3に示す地下鉄トンネル（A路線）の通常全般検査のデータを基に維持管理指標の推定を行った例を示す。

既存の検査データは、健全度判定の結果が質的データとして入力されており、統計分析が可能になる形に変換する。トンネル内面の検査用の位置区分を図-2に示す。分析に用いた変状項目は、漏水・ひび割れ・浮き・鉄筋露出・初期変状・その他の6項目であり、それぞれに対して左下・左・左上（左側壁）、上左・上・上右（上床）、右上・右・右下（右側壁）の土木構造物の断面当たりの部位によって記録されている。これらの変状の項目、位置情報と共にAA～S判定の文字列情報として健全度の判定が保存されている。

この健全度判定結果を2値変換で数量化する（表-4）。A判定およびB判定の変状は措置の必要性があるために重み得点を1とし、C判定の変状は、その程度が軽微であり、2年以内にB判定となる事例は少ないことから、措置は不要と判断して重み得点は0とした。また、東京メトロではS判定の変状は補修が完了したものを示しており、補修により本質的なリスクが無くなったわけではなく、再度変状が生じる可能性があると考え、重み得点を1とした。なお、これらは検査実務者へのヒアリングを基に決定した。

表-3 検討トンネルの諸元

項目	内容
延長	約15km
対象	路線A（トンネル）
検査年度	平成24年度
検査種類	通常全般検査
変状項目	ひび割れ・漏水・浮き・鉄筋露出・初期変状・その他 6項目

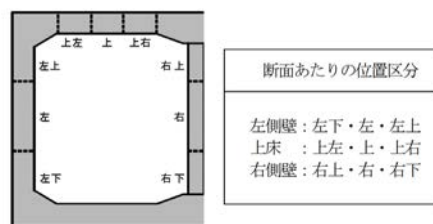


図-2 維持管理指標推定の手順

表-4 健全度判定結果の二値化

重み 得点	健全度判定					
	AA	A1	A2	B	C	S
2値	1	1	1	1	0	1

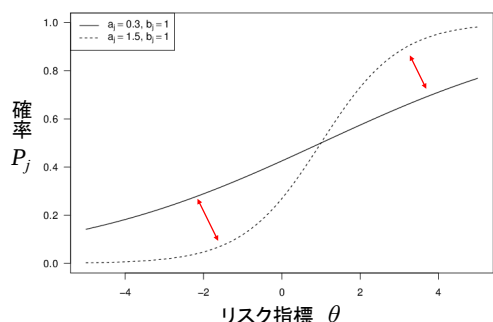
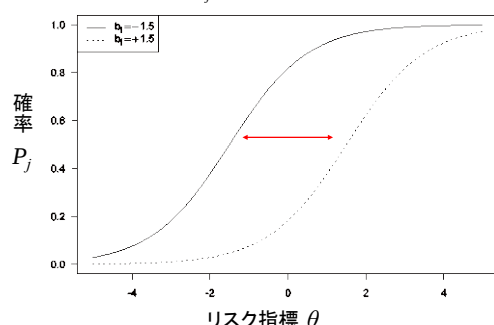
a) 識別力 a_i の違いを表現した関数b) 困難度 b_i の違いを表現した関数

図-3 検査項目反応モデル（ロジスティクスモデル）

次に、各路線のキロ程を5m間隔でメッシュ状に区切り、変状の断面当たりの場所に関して左・上・右に集約し、重み得点の合計値を算出した（表-5）。さらに、合計点数が1点以上の場合を1、0点の場合を0とした2値データ変換の再カテゴリ化得点を算出した（表-6）。

表-5 トンネル延長メッシュでの得点

キロ程	ひび左	ひび上	ひび右	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0k10m	0	0	0	...
0k15m	2	0	0	...
0k20m	0	0	0	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表-6 トンネル延長メッシュでの得点の二値化

キロ程	ひび左	ひび上	ひび右	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0k10m	0	0	0	...
0k15m	1	0	0	...
0k20m	0	0	0	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

b) 検査データの観測メカニズムの仮設

全ての検査データは、変状の観測・未観測の2値で構成されているため、ベルヌーイ分布で表現できると考えられる。変状が観測される確率は、式(1)の通りその区間が持つリスクにより表現されるものと考えられる。

$$f(x|P) = P^x(1-P)^{1-x} \quad \text{for } x \in \{0,1\} \quad (1)$$

ここで、 P ：変状の観測確率を示す。

ベルヌーイ分布における変状の観測確率は、維持管理指標と相関関係にあると考えられる。 $P(\theta)$ は事前に仮定された変状観測確率の分布モデルであり、確率を示すため、 $0 \leq P(\theta) \leq 1$ である。また、維持管理指標が高いほど変状の観測確率が大きくなると考えられることから、 $P(\theta)$ が示す構造は式(2)および図-3ようなロジスティックモデルが妥当だと判断した。

$$P(\theta) = \frac{1}{1 + \exp(-\theta)} \quad (2)$$

ここに、 P ：維持管理指標を示す。

c) 項目反応モデル

さらに実情に沿った構造とするため、維持管理指標を θ_i 、 θ_i における変状の発生確率を $P_{ij}(\theta_i)$ と表現し、 $P_{ij}(\theta_i)$ を以下の式に設定した。

$$P_{ij}(\theta_i) = \frac{1}{1 + \exp[-a_j(\theta_i - b_j)]} \quad (3)$$

ここで、 i ：観測数、 j ：変数の数、 $P_{ij}(\theta_i)$ ： θ_{ip} における変状の発生確率、 θ_i ：ある区間における維持管理指標、 a_j ：識別力、 b_j ：困難度である。

このモデルのことを、検査項目反応モデル（Inspection Item Response Model; IIRM）と呼ぶことにする（図-3）。

d) 維持管理指標 θ_i

維持管理指標 θ_i は目的変数であり、説明変数でもある。 θ_i が低いほどその区間は相対的に安全であり、逆に高い値を示せばその区間は相対的に危険側であると判断できる。また、 θ_i は構造物の劣化に影響を受ける指標である。構造物としての劣化が進んでいない健全側の区間数が多く、劣化が進み変状の箇所が多くなる不健全側の区間数は減少すると考えられるため、 θ_i はガンマ分布に従っていると仮定した。

e) 識別力（検査者に由来する検査状況） a_j

a_j は識別力と呼ばれるパラメータで、維持管理指標 θ_i の大小が変状の観測に反映されやすいかどうかを表す。この a_j はモデルの右上がりの上昇具合を表し、変状観測の閾値の明確さを表している（図-3a）。これにより、検査員の技能の違い、すなわち検査年度の違いや路線の

違いの影響を排除することが可能になる。識別力 q_j はその性質上、負の値になることは考えにくく、さらに連続量であることからパラメータの分布として対数正規分布と仮定した。

f) 困難度（潜在的な路線の危険性） b_j

b_j は困難度と呼ばれるパラメータで、変状の現れやすさを表す。モデルを左右に移動させるもので、変状の観測されやすさを表している（図-3b）。図より b_j の値が大きい場合は、維持管理指標 θ がかなり高くないと変状の観測確率 $P_j(\theta)$ は高くないので、 θ はと同様にガンマ分布を仮定した。

g) 各パラメータの推定方法

整理済みのデータセットから、式(3)におけるパラメータ（ θ_i , q_j , b_j ）を推定しなければならないが、モデルが複雑なため、マルコフ連鎖モンテカルロ法（Markov chain Monte Carlo methods ; MCMC）を利用して、ベイズ法によるパラメータの推定を行った。

推定の際、ガンマ分布や対数正規分布を事前分布に設定したが、これにより、検査項目特有の性質を q_j や b_j の影響として除外した上でのリスクを算出できることになる。

h) 検討結果の例

ここでは、維持管理指標 θ の値を、対象路線のキロ低ごとにプロットした図を示す（図-4）。実務では、例えば θ の値が 4.5 以上の箇所を詳しくチェックするような使い方をしている。図中、8.0km～8.7km は非常に小さい値となっているが、この箇所は以前、止水工事や断面修復工事を徹底的に行った個所で、その成果が反映されている。

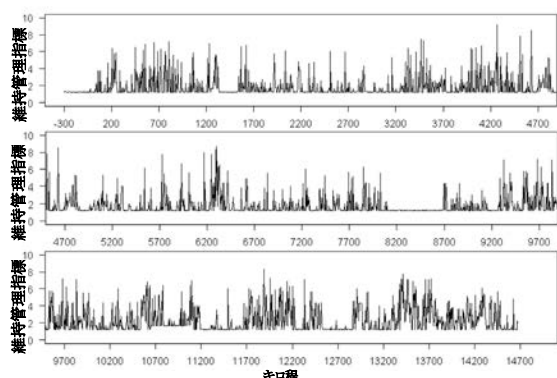


図-4 維持管理指標推定結果例

3. 維持管理指標 θ の妥当性の検証

(1) 妥当性の検証の概要

維持管理指標 θ の実務での運用にあたり、 θ の値が検

査年度の違いや路線の違いによる検査結果のバラツキを無くし、トンネルの潜在的な健全性が低い状態をどの程度の確に示しているかを検証する必要がある。そこで、実際の検査に携わっている検査員の当該構造物に対する健全性が低い状態の認識度を尺度とし、維持管理指標 θ との対応関係について明らかにすることにした。検証については、変状調書の見方に習熟した検査員に対して、検査年度の違う検査結果データおよび路線の違う検査結果データを用いて、一対比較実験を行った³⁾。具体的には、トンネルからある特定の区間 2 箇所（ i と j ）を取り出し、比較した。このとき i が j より健全性が低いと認識される確率を P_{ij} とし、各区間の健全性が低い程度を α_i , α_j で表すと以下のようにモデル化できる。

$$P_{ij} = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_j} \quad (i \neq j) \quad (4)$$

ここで $\lambda = \log(\alpha)$ とし、(4)式を(5)式のように変形する。

$$\text{logit}(P_{ij}) = \lambda_i - \lambda_j \quad (5)$$

このように一般化線形モデルの形になるので、 λ をパラメータとして最尤推定し、検査者の構造物に対する健全性の低い状態の認識を表す指標として算出した⁴⁾。

(2) 年度が違う検査についての妥当性の検証

a) 検証手順

一対比較実験に協力した熟練検査員は 37 名である。実験用試料は、2012 年度特別全般検査および 2014 年度通常全般検査の結果の変状調書（図-5）を用いて作成した。具体的な手順は以下の通りである。

- Step 1 互いに比較するキロ程区間 9 箇所を抽出し、それぞれ記号をつける。抽出にあたり、 θ の値が 1 以上 7 未満の範囲で取り上げ、駅ホームのような特殊な箇所や、補修跡がある箇所は除外した。
- Step 2 被験者を a, b 二つのグループに分け、抽出したキロ程区間のうち 5 箇所を割り当てる。
- Step 3 被験者個人で、割り当てた 5 箇所の区間における変状調書を一対比較し、土木構造物としての健全性の判断を行う。

このときグループ間で共通の試料を用意することで、全 9 箇所の順位付けを最終的に 1 次元で行うことができる。

b) 検証結果

維持管理指標 θ と一対比較によるリスク評価の差を図-6 に示す。一対比較として表記されている数値が高いほど現場の検査者が健全でないと判断している。維持管

理指標 θ の順序と現場検査者 37 名の判断は、おおむね一致していた。これにより、維持管理指標 θ の値に妥当性があることが示されたと考えられる。

ただし、調書記号「A」のように θ の値が 1.578 と最も低いにもかかわらず、現場検査者は高リスクと判断し、順序が変動する結果を示す箇所も存在した。この「A」は変状が上部に存在する調書で、現場検査者ははく落による列車運行への支障の可能性が高いといった短期的な観点から健全でないとは判断したが、維持管理指標 θ は長期的な観点で構造物の健全性を検討するもので、差が生じていると考えられる。

(3) 路線が違う検査についての妥当性の検証

a) 検証手順

検証手順を図-7 に示す。建設年度や工法等が異なる路線間で比較を行うため、維持管理指標 θ の分布などを考慮して 5 路線を一对比較を行う対象とした。5 路線の維持管理標準 θ の値の基本統計量を表-7 に示す。

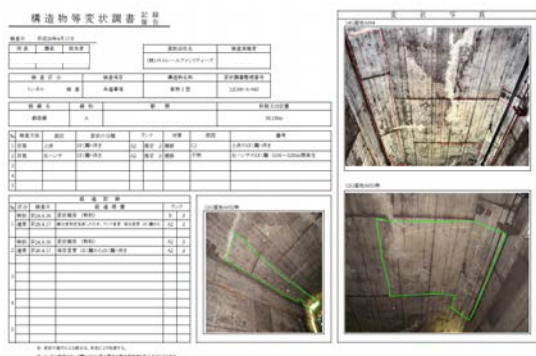


図-5 変状調査

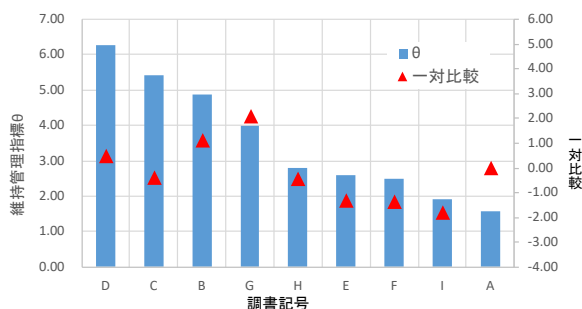


図-6 維持管理指標 θ と一对比較によるリスク評価結果



図-7 路線が違う検査についての妥当性の検証手順

表-7 対象路線の維持管理標準 θ の値の基本統計量

	箇所数	最小値	中央値	平均値	最大値
A 路線	2994	0.808	1.510	2.229	5.023
B 路線	5310	1.698	1.751	2.062	4.902
C 路線	3469	1.736	1.794	2.064	5.048
D 路線	3557	1.411	1.928	2.204	5.002
E 路線	3814	1.463	2.413	2.646	5.573

路線の違う維持管理指標 θ の妥当性の検証では、データを相互に比較する必要があるため、比較的維持管理指標 θ の分布が似ている路線の検査結果を用いることにした。維持管理指標 θ が高い値から低い θ 値まで連続して分布しており、また θ の分布の形状が似ている区間が長い路線として、対象の 5 路線の中から、3 路線 (A, D, E 路線) を選定し、一对比較実験を行った。図-8 に各路線の維持管理標準 θ の分布を示す。相互の比較検討を容易にするため、この維持管理指標 θ の分布から、 θ 値の範囲を 5 つにクラス分けした (表-8)。この際、高リスクグループと低リスクグループの違いが際立つよう、出来るだけ θ の値に差が出るようにした。このクラス分けに応じて、一对比較実験に使用する試料を作製した。

表-8 維持管理指標 θ のクラス区分

維持管理指標 θ のクラス	維持管理指標 θ の範囲
低リスク①	1.0~1.5
低リスク②	1.5~2.0
中リスク③	2.5~3.0
高リスク④	4.0~4.5
高リスク⑤	4.5~

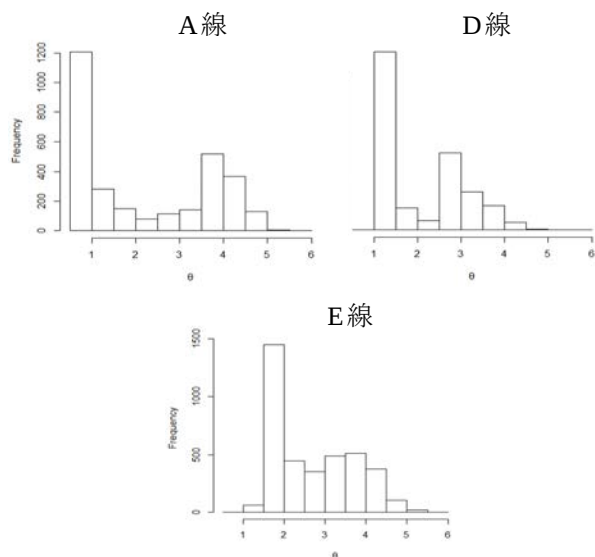


図-8 一对比較実験候補路線の維持管理指標 θ の分布

路線間比較で、均等な条件で一対比較実験を行うた
法を用いた。今回は、3 路線、5 つの θ クラス での比較
になり、一対の実験試料を選定する組み合わせは、膨
大な数となるが、実験計画法を適用することで要因、
水準の影響を最低限の組み合わせで検討することがで
き、今回の例は 27 通りとなった。今回は、27 名のトン
ネル熟練検査員を被験者にして一対比較実験を行った。
なお、実験の正確性を期すため 1 回あたり 2 セットの一
対比較を行った。一対比較実験では、東京メトロが保
有している各クラスの写真および変状に関する情報を
用いて実験用の資料を作成し、用いた。

前節の「(2) 年度が違う検査についての妥当性の検証」
の経験から、「営業線への影響の有無」が検査員の判
断に与える影響が大きいことが想定されている。今回
は一対比較実験を 2 回実施したが、1 回目は特に指示を
せず被験者が自由に判断し、実験終了後、学習効果を
避けるため、一定期間をあけ、2 回目を実施した。2 回
目は、営業線への影響は一切考慮せず、構造体として
のリスクのみに着目し健全度を判定するよう被験者に
指示し、営業線への影響を考慮することが、どの程度
検査員の判定に影響を与えているか判断した。

一対比較実験では、まず、27 名の被験者に試料のセ
ットを配布し、被験者は web 上で回答した。具体的
には、試料内の指定された一対を参照しながら web 回
答画面に従い、高リスクと判定する番号を選択した。実
施は、1 回目を 7 月、2 回目を 10 月に行った。図-9 に回
答用の web フォーム (Google フォームを使用) を示す。

図-9 一対比較実験での回答用の web フォーム

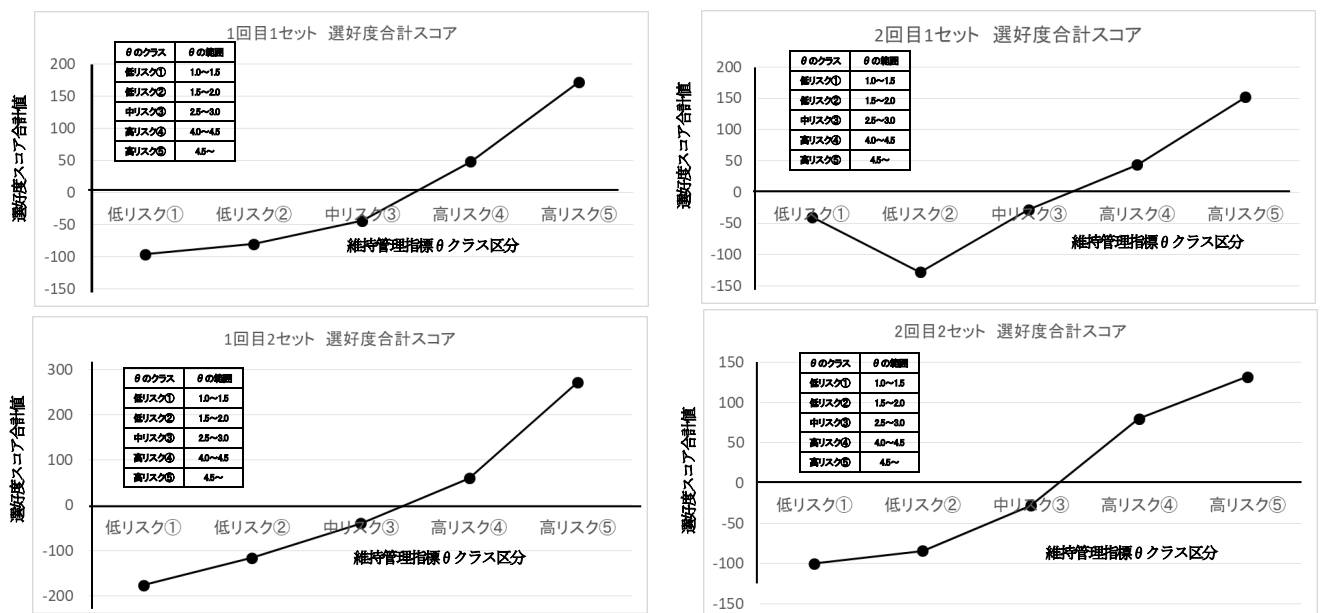


図-10 一対比較実験による選考度スコア合計値と維持管理指標 θ クラス区分の関係

b) 検証結果

各被験者にヒアリングを行い、一対比較の結果について被験者がどのようにリスク順位を判定したか分析した。次に、高リスクで選択されたものを「1」、選択されなかったもの「-1」としてスコアを割り当て、スコアの総和を計算し、選好度を算出した。図-10に、被験者の判断による選好度スコア合計値と維持管理指標 θ のクラス区分との関係を示す。維持管理指標 θ の大きさ（リスクの大きさ）と選好度スコア合計値の大きさは、概ね整合していることが分かる。ここで、一か所、2回目の1セット目で低リスク①と②が逆転しているが、低リスク内での逆転であり、実務上からは、複数路線を比較したデータでも、維持管理指標 θ の値が、熟練検査員が健全度を評価する感覚に整合しており、本指標に妥当性があると評価できる。

4. まとめ

検査時期や路線の違いによる検査結果のバラツキを無くし構造物の区間における健全度を定量的に示す維持管理指標 θ を開発し維持管理の長期的な検討に用いている。しかし、本指標を用いた評価結果の妥当性は十分に検証されていないため、検査時期や路線の違う検査結果に対して熟練検査員による一対比較実験を実施し、維持管理指標 θ の値と比較して、指標の妥当性を検証した。

検査時期や路線の違う検査結果を用いた一対比較実験結果と維持管理指標 θ の順序等の熟練検査員の判断は、おおむね一致していた。これにより、維持管理指標 θ の値に妥当性があることが示されたと考えられる。

これにより、時期の違う検査結果を用いた維持管理指標 θ による、進行性の確認や、路線の違う検査結果を用いた維持管理指標 θ による路線の持つ健全性の比較が可能になった。すなわち、全路線での健全度評価が可能になり、変状が集中または進行している区間をバラツキなく抽出できるようになったと考えられる。

今後は、熟練検査員による一対比較実験以外の方法で指標の妥当性を検証するとともに、維持管理指標 θ をトンネル予防保全対策の判断材料として活用していくことで、各路線毎ではなく、全路線を対象に将来の補修計画の優先順位を定め、トンネルの維持管理に努めていきたい。

謝辞:本研究を進めるにあたり、元産業能率大学の福中公輔博士、産業能率大学の富澤日出夫氏、東京メトロの川上幸一博士、田口真澄氏、田中大介氏、野口正則氏にお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省、鉄道総研：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所，2007.
- 2) 川上幸一，小西真治，三浦考智，篠崎真澄，福中公輔：地下鉄トンネルの全般検査データによる維持管理指標の研究，トンネル工学論文・報告集，第25巻，報告部門，VI-1，2015.
- 3) 田口真澄，川上幸一，村上哲哉，榎谷祐輝，三浦考智，福中公輔：地下鉄トンネル検査結果を用いた維持管理指標の妥当性の検証，第71回土木学会年次学術講演会概要集VI，VI-682，pp1363-1364，2016
- 4) Turner, H. & Firth, D : (2012) Bradley-Terry Models in R, The Bradley Terry 2 Package, *Journal of Statistical Soft-ware*, 48, pp.1~21, 2012.

DEVELOPMENT AND VERIFYING VALIDITY OF HEALTH INDEX WITH ELIMINATING VARIATIONS OF TUNNEL INSPECTION RESULTS

Yuuki ENOKIDANI, Yukihiro ISHIKAWA, Yuuki BAN
Tadayuki NUNOMURA, Shinji KONISHI and Hirokazu AKAGI

Subway companies carry out inspections for tunnels of each line every two years and individually repair deformations inside the tunnels on the basis of inspection results. For repairs, the inspector judges and ranks the soundness of the deformation. Then, engineer personnel prioritizes them, sets the deadline from the part with the worst condition, and repair work is carried out in sequence. However, if there are concentration and progress of deformations, it is necessary to consider not only temporary repair but also large-scale measures considering preventive maintenance. Based on this, Tokyo Metro Co., Ltd. has been developing the health index θ and using it in practice for the purpose of making it easier to prioritize repair and preventive maintenance measures on all lines by eliminating variations of inspection results between different inspection years and subway lines

and comparing the soundness of deformation on all lines. This paper describes the development and verifying validity of the health index with eliminating variations of tunnel inspection result due to difference of inspection years and subway lines.