

AHP によるトンネル覆工の要求性能と点検項目の着目点について

Correlation between performances to damage of tunnel lining using AHP

○(株)地崎工業北海道本店 正会員 河村 巧 (Takumi Kawamura)
(株)地崎工業 生産技術部 正会員 須藤敦史 (Atsushi Sutoh)
北海道大学大学院 FIE-会員 三上 隆 (Takashi Mikami)
(独)土木研究所寒地研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi Sato)
(独)土木研究所寒地研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. はじめに

北海道では昭和30年代後半から山岳トンネルの整備が進んでいるが、建設から30年以上を経過したトンネルでは老朽化が進行してきており、今後改築や補強・補修など何らかのメンテナンスの時期を向かえるトンネルの増加が予想される。しかし、供用下においてトンネルの補修・改修作業は様々な制約条件を受け難いため、効果的かつ経済的なメンテナンス、言い換えれば維持管理、更新費用の使い方が管理者に求められるようになる。

そこで予防保全の考え方により、トンネルの計画的な維持管理と延命対策を行う、ライフサイクルマネジメント (Life Cycle Management : LCM) や社会資本をアセット (資産) と見なして管理するアセットマネジメントに対する様々な技術的な検討が行われてきている^{1),2),3)}。

道路トンネルでは「道路トンネル維持管理便覧」など^{4),5)}に従って、表.1に示すような健全度評価を行っており、補修・改修対策の緊急度と変状を3AからBまでの4つの判定区分に分け、同時に判定基準として「外力による変状」・「材質劣化による変状」・「漏水等による変状」3つのカテゴリーを設けている。

しかしながら、管理者がトンネルの覆工コンクリートにおける現状の健全度を正確に把握して、劣化予測と補修・改修の必要性や対策工法の選定を的確に行うには、覆工コ

ンクリートに要求されている性能や機能を明確にしておく必要があるが、多くの機能が複合している覆工コンクリートの要求性能を示すことは難しく、また現状での保有性能や機能を定量的に明示する手法はまだ確立されていない。

そこで本論文は山岳トンネルの覆工コンクリートにおける各要求性能とトンネルの点検項目との相関 (健全度評価への影響) をトンネル点検技術者および土木技術者へのアンケートより求めたものである。

2. 覆工コンクリートの要求性能と点検項目

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの健全度や劣化予測および補修・改修の必要性や対策工法の選定を的確に行うためには、トンネルの覆工コンクリートに要求されている性能の明確な定義と健全度の定量的な評価が必要である。

しかし、複合的な機能を要求されているトンネル覆工コンクリートの要求性能を明確に定義することは非常に難しいのが現状であるが、文献^{5),6)}などを参考にして各要求性能や機能をまとめると以下となる。

- (a)安全性能:耐荷性(施工後の付加外力を含む)、耐震性能、その他の安全性(構造物の転倒や滑動)
- (b)使用性能:道路として必要な内空断面の保持、高い防水

性の保持、供用時の機能性を満足、路面凍結により走行安全性が損なわれない。

(c)第三者影響度に関する性能:コンクリート片・目地材等の落下防止、つらら、結氷、側氷の落下による危険がない。

(d)美観・景観:壁面の必要輝度の確保、ひび割れ錆汁等による汚れの防止、視界の確保や心理的圧迫感の軽減

表.1 トンネルの判定区分⁵⁾

判定区分	判定要素				対策の緊急度
	通行者、車両の安全走行に及ぼす影響	構造物としての安全性に及ぼす影響	維持管理作業量に及ぼす影響	変状の程度	
3A	危険	重大	著しい	重大	直ちに対策
2A	早晚脅かす異常時に危険となる	早晚重大となる	大きい	進行中、機能低下も進行する	早急に対策
A	将来危険となる	将来重大となる	中程度	進行中、機能低下のおそれがある	重点的に監視をし、計画的に対策
B	現状では影響がない	同左	ほとんどない	軽微	監視をする

(e)耐久性能:供用期間中に要求性能を満足する性能

次に,覆工コンクリートの劣化現象はトンネルの点検項目⁴⁾などを参考にして変状ごとに ひび割れ, 浮き・剥離, 漏水, 目地ずれ・開き, 豆板・空洞, 遊離石灰の6種類とした^{7),8)}.

3. アンケートによる点検項目の覆工コンクリート要求性能への影響度

(1) トンネル点検者と土木技術者へのアンケート

トンネル点検における ひび割れ, 浮き・剥離, 漏水, 目地ずれ・開き, 豆板・空洞, 遊離石灰などの6つの覆工コンクリートにおける劣化現象(点検項目)が,各要求性能の健全度評価へ与える影響度を定量的に把握するため,トンネル点検技術者 25 名および一般土木技術者 40 名の計 65 名に対して以下に示すアンケートを実施した.

アンケートは覆工コンクリートの各要求性能(a.安全性性能,b.使用性能,c.第三者影響度に関する性能,d.美観・景観,e.耐久性能)に対して ひび割れ, 浮き・剥離, 漏水, 目地ずれ・開き, 豆板・空洞, 遊離石灰などの6つの劣化現象(点検項目)の中の2つの項目で表.2に示すようにどちらをどれだけ重要視するかの一対比較アンケートを実施した.

(2) 階層化分析法(AHP)による評価

a) 階層化分析法(Analytic Hierarchy Process:AHP)⁹⁾

次に, アンケート調査結果を階層化分析法(Analytic Hierarchy Process:AHP)で分析してトンネル覆工コンクリートの各要求性能に対する6つの劣化現象(点検項目)における重要度のランク付けを行う¹⁰⁾.

ここで階層化分析法(AHP)は,アメリカのピッツバーグ大学教授 T.L.Saaty により 1971 年に考案されたものであり,複数の代替案から意思決定者によって最良な代替案を選択するための手法で以下の特徴を有している.

評価基準が多く共通尺度がない場合でも判断が可能

不明瞭な要因を持つ定量分析が不可能な問題も可能

データ種類に影響されず,かつ修正が容易

ここで AHP は複雑な意思決定プロセスを階層構造にブレイクダウンして単純な言語の一対一比較を行い,この判断を統合して全体としての優先順位や配分率を決定することが可能である.加えて,この手法は厳密な数学モデルに基づいているにもかかわらずシンプルで誰にもわかりやすい手法であり現実の身近な問題への応用が可能である.

一対比較手法の代表的な特徴は,ペアの比較で答える際に,同じくらい・ややかなり・非常に・極めてといった不明瞭な表現を用いることでアンケートの回答者への負担

が軽くなる.また実行者には複雑でかつ構造の不明確な問題等を階層化することにより整理ができ,限られた条件で部分的な比較・考案を重ねていけばすむようになっており,その後全体的な評価ができることである.

逆に留意点としては,同一レベルに取り入れる項目は互いに独立性の高いものを選ぶことと対象となる項目数は多くても9個以下にすることが重要である.その理由としては独立性の低い項目を10個以上羅列すると意思決定者を迷わして正確な回答が得られない場合が多いとされている.

b) 重要度の評価法

一対比較は2つの評価項目について重要度の相対的な値をアンケートにより,一対ずつ比較して決定する方法である.

ここで項目 i が項目 j よりどの程度の重要を表.2に示した定性的に比較した値を $a_{ij}^{(h)}$ ($i, j = 1, \dots, p$) とし,一対比較行列 A と称し,要素は $a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji}$ となる.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1i} & \cdots & a_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & 1 & \cdots & a_{ip} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pi} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで,各評価項目の重要度と一対比較における相対評価とが完全に一致するわけではない.

c) アンケートの精度評価^{11)~13)}など

このようなアンケート調査には,常に得られた回答の精度が高いか低いかの評価の問題が生じる.このような精度問題を AHP(一対比較手法)では整合度(Consistency Index)によって評価している.

この整合度とはアンケートにおいて2つの項目の価値判断で得られた結果が全体として首尾一貫した整合性をもっているかどうかを評価するものである.

ここで行列 A が完全な整合性をもつ場合はこの値は0であり,大きくなるほど不整合性は高いと判断され,整合度(C.I.)は式(2)のように求められる.

$$C.I. = \frac{l_{\max} - n}{n-1} \quad (2)$$

$l_{\max}$: 一対比較行列の最大固有値,

n : 評価項目数

表.2 一対比較値

一対比較	重要度
1	同程度に重要
3	やや重要
5	かなり重要
7	非常に重要
9	極めて重要
2,4,6,8	補間的な数値

一般にアンケートで一对比較手法が用いられた場合において、得られた回答の整合度が0.1～0.15以上の場合は整合性が悪いと判断される。

次に、行列 A （各評価項目）の幾何平均 g_i から重み w_i を求める方法は、は式(4)のように求められる。

$$g_i = \sqrt{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdots a_{ip}} \quad (3)$$

$$w_i = g_i / \sum_{i=1}^p g_i \quad (4)$$

本調査では、各要求性能に対する劣化現象（点検項目）の重みは $C.I. = 0.02 \sim 0.22$ 程度となり、定量化が困難な事象の重みは $C.I. = 0.02 \sim 0.13$ であったため、調査の整合性は取れている。

4. アンケートによる技術者の要求性能に対する点検項目の重要度

トンネル点検技術者および一般の土木技術者に対するアンケートによるトンネル覆工コンクリートの各要求性能に対する各点検項目（劣化現象間）の重要度ランク（重み）付けを表.3～表.7に示す。

- 1) 安全性能: 各点検項目における重要度ランク（重み）は、ひび割れ・浮き・剥離、目地ずれ・開き>豆板・空洞>漏水>遊離石灰の順となった。
- 2) 使用性能: 各劣化現象の重要度ランク（重み）は、漏水>浮き・剥離、ひび割れ>目地ずれ・開き>豆板・空洞、遊離石灰の順となった。
- 3) 第三者影響度に関する性能: 各点検項目における重要度（重み）は、浮き・剥離、漏水>ひび割れ>目地ずれ・開き>豆板・空洞>遊離石灰の順となった。
- 4) 美観・景観: 各点検項目における重要度ランク（重み）は、漏水>遊離石灰>豆板・空洞>目地ずれ・開き>浮き・剥離、ひび割れの順となった。
- 5) 耐久性能: 各点検項目における重要度ランク（重み）は、ひび割れ、浮き・剥離、目地ずれ・開き、豆板・空洞>漏水>遊離石灰の順となった。

以上より、トンネル点検技術者および土木技術者は安全性・使用性・耐久性などの要求性能に対しては、ひび割れや浮き・剥離、目地ずれ・開きなどの劣化現象を重要視しており、第三者への影響度や景観・美観においては、浮き・剥離、漏水などの劣化現象を重要視している事が判明した。

また、点検項目の中で覆工コンクリートの遊離石灰に関しては、どの要求性能に対しても重要度が低い結果となった。

表.3 安全性能と劣化現象の重要度

							幾何平均	重み
ひび割れ	1	3	5	3	5	5	3.2250	0.4318
浮き・剥離	1/3	1	1	3	1	3	1.2007	0.1608
漏水	1/5	1	1	1/3	1	1	0.6367	0.0852
目地ずれ・開き	1/3	1/3	3	1	3	3	1.2005	0.1507
豆板・空洞	1/5	1	1	1/3	1	3	0.7646	0.1024
遊離石灰	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1	0.4413	0.0591

表.4 使用性能と劣化現象の重要度

							幾何平均	重み
ひび割れ	1	1/3	1	1	3	3	1.2007	0.1746
浮き・剥離	3	1	1/3	1	3	3	1.4420	0.2097
漏水	1	3	1	3	3	3	2.0801	0.3025
目地ずれ・開き	1	1	1/3	1	1	3	0.9998	0.1454
豆板・空洞	1/3	1/3	1/3	1	1	1	0.5771	0.0839
遊離石灰	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	0.5771	0.0839

表.5 第三者影響度に関する性能と劣化現象の重要度

							幾何平均	重み
ひび割れ	1	1/5	1	1	3	3	1.1029	0.1566
浮き・剥離	5	1	3	1	3	3	2.2649	0.3216
漏水	1	1/3	1	3	3	3	1.4420	0.2048
目地ずれ・開き	1	1	1/3	1	1	3	0.9998	0.1420
豆板・空洞	1/3	1/3	1/3	1	1	3	0.8323	0.1182
遊離石灰	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	0.4000	0.0568

表.6 美観・景観と劣化現象の影響度

							幾何平均	重み
ひび割れ	1	1	1/3	1	1/3	1/3	0.5771	0.0928
浮き・剥離	1	1	1/3	1	1/3	1/3	0.5771	0.0928
漏水	3	3	1	3	1	1	1.7321	0.2784
目地ずれ・開き	1	1	1/3	1	1	1/3	0.6931	0.1114
豆板・空洞	3	3	1	1	1	1/3	1.2007	0.1928
遊離石灰	3	3	1	3	3	1	1.4420	0.2318

表.7 耐久性能と劣化現象の影響度

							幾何平均	重み
ひび割れ	1	1	3	1	1	3	1.4422	0.2241
浮き・剥離	1	1	1	1	1	3	1.2009	0.1863
漏水	1/3	1	1	1	1	3	0.9998	0.1551
目地ずれ・開き	1	1	1	1	1	3	1.2009	0.1863
豆板・空洞	1	1	1	1	1	3	1.2009	0.1863
遊離石灰	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	0.4000	0.0621

5. ま と め

寒冷地のトンネルにおける覆工コンクリートの健全度

評価手法の確立を目的として、覆工コンクリートの要求性能と点検項目への影響度を点検技術者のアンケート調査を実施しAHPで分析した結果を以下に示す。

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの要求性能の安全性・使用性・耐久性に対しては、ひび割れや浮き・剥離、目地ずれ・開きなど、第三者への影響度や景観・美観においては、浮き・剥離、漏水などのを点検の中で重要視している。

今後も寒冷地トンネルにおける覆工コンクリートの健全度評価手法の確立のため、様々な調査・試験を実施して検討していく予定である。

【参考文献】

- 1) 須藤敦史,三上隆,岡田正之,河村巧,角谷俊次:寒冷地トンネルにおける二次覆工コンクリートの長寿命化に関する一考察,土木学会第21回建設マネジメント問題に関する研究発表会,pp.191-194,2003.
- 2) 岡田正之,三上隆,川村浩,須藤敦史,角谷俊次:寒冷地トンネルにおけるライフサイクルマネジメントの基礎考察,土木学会第59回年次学術講演会 -397,pp.791-792,2004.
- 3) 中村一樹,竹内明男,山田正:トンネルマネジメントシステムの構築,土木学会,建設マネジメント研究論文集 Vol.11,2004.12.
- 4) 日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧,1993,11.
- 5) 道路トンネル定期点検要領(案),国土交通省道路局国道課,平成14年4月.
- 6) 土木学会:トンネルの維持管理トンネル・ライブラリー 第14号,丸善,pp.27-31,2005.
- 7) 須藤敦史,三上隆,佐藤京,河村巧,西弘明:寒冷地トンネルにおける覆工の要求性能と劣化現象のAHPによる相関について,土木学会トンネル工学研究発表会論文集,Vol.16,報告 -43,pp.287-294,2006.
- 8) 田中亮介,須藤敦史,三上隆,佐藤京,河村巧:寒冷地トンネルにおける覆工コンクリートの要求性能と劣化現象のAHPによる考察,土木学会第61回年次学術講演会, -040,pp.79-80,2006.
- 9) Saaty,T.L. : The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.
- 10) 松島学,須藤敦史:土木構造物の一般市民の感性和要求性能と再現期間,日本学術会議第5回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム,OS5,F2-03, pp.821-824,2003.
- 11) 貝原俊也:オペレーションズ・リサーチ-システムマネジメントの科学-,pp.60-66,オーム社,2004.
- 12) 高萩栄一郎,中島信之:Excelで学ぶAHP入門(問題解決のための階層分析法),オーム社,2005.
- 13) 刀根薫:ゲーム感覚意思決定法-AHP入門-,日科技連,1986.