

トンネル覆工における要求性能と点検項目との相関の AHP による解析

Correlation between performances to damage of tunnel lining using AHP

○北海道大学大学院工学研究科 正会員 河村 巧 (Takumi Kawamura)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆 (Takashi Mikami)
 (独)土木研究所寒地土木研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi Sato)
 (独)土木研究所寒地土木研究所 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急増していたが、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、補修・補強や改築などの対策が必要となるトンネルが増加する傾向にある。

しかし、供用中のトンネルは様々な制約条件があるため補修・補強、改修作業は難しく、かつ効率的・経済的な予算管理が求められるようになる。

一方、トンネル管理者が覆工における現状の健全度を正確に把握して、その劣化予測と補修・補強等の必要性や対策工法の選定を的確に判断するためには、トンネルおよび覆工の要求性能や機能を定量的に定義しておく必要があるが、多くの機能が複合しているため難しい¹⁾など。

そこで本論文では、寒冷地におけるトンネル覆工の定量的な健全度評価の確立とその精度向上を目的として、トンネルがその用途において保有すべき要求性能と点検項目との関係をトンネル点検技術者と土木技術者へのアンケート調査結果からAnalytic Hierarchy Process : AHPを用いて考察したものである。

2. トンネル覆工の要求性能と点検項目

(1) トンネル覆工の要求性能

山岳トンネルの維持管理に際して、まずその構造物や各部材に要求される性能あるいは機能を明確にしておく必要がある。しかし、単一の機能を要求される道具や機械などの性能や機能は簡単に示すことができるが、複合的な機能を要求されているトンネル覆工における要求性

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、土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]では、山岳(道路)トンネルの覆工における要求性能を図-1のように分類している。

また文献^{2),3)}などを参考にしてトンネル覆工の要求性能や機能をまとめると以下となる。

- 1) 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）など
- 2) 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性能
- 3) 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性
- 4) 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、視界の確保や心理的圧迫感の軽減
- 5) 耐久性能：供用期間中に要求性能を満足する性能

トンネル覆工の診断を行う際には覆工が保有すべきこれらの性能について評価・判定することになる。

(2) トンネル覆工の点検項目

トンネル覆工の要求性能との関連性を考える劣化現象は、トンネル点検項目²⁾などを参考にして①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の6種類の項目を対象として点検データから抽出している。

3. 階層化分析法(AHP)⁴⁾

(1) トンネル点検技術者および土木技術者へのアンケート調査

まず、山岳トンネルがその用途において保有すべき覆工の要求性能はあるのか？また、あるならばどの性能が優先されるべきか？を定量的に把握するために、一般的、都市部、山間部の生活用など各用途のトンネルに対して、a.安全性能、b.使用性能、c.第三者影響度に関する性能、d.美観・景観、e.耐久性能のうちどれを覆工が保有すべき性能と考えるか？次に、覆工の要求性能の健全度評価に影響が大きいのは①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の6つの点検項目のうちどの項目か？を定量的に把握するため、トンネル点検技術者35名および一

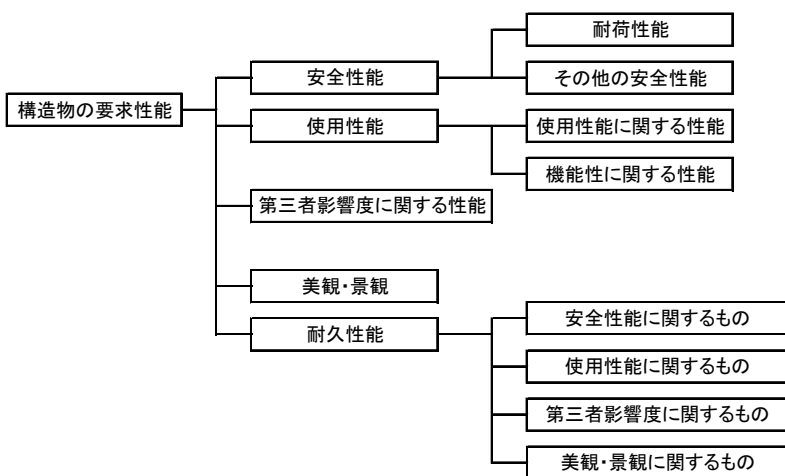


図-1 トンネル覆工の要求性能

般土木技術者50名の計85名を被験者として以下に示す一対比較の要領でアンケート調査を実施した。

AHPの一対比較法は、たとえば後者の場合、トンネル覆工の各要求性能（a.安全性能、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、①

表-1 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

(2)階層化分析法(Analytic Hierarchy Process : AHP) ⁵⁾⁻⁷⁾

階層化分析法(Analytic Hierarchy Process : 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。

- ① 評価基準が多く共通尺度がない場合でも判断が可能
- ② 不明瞭な要因を持つ定量分析が不可能な問題も可能
- ③ 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ークダウンし、単純な言語の一対一比較を基本として、これら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⁸⁾。

一対比較手法の具体的な手順を以下に示す。

第1段階：複雑な状況下にある問題を階層構造に分解する。ただし階層の最上層は1個の要素からなり総合的な課題(目的)となる。それ以下のレベルは、いくつかの要素を一つ上のレベルとの関係から選択する。なお、各レベルの最大許容要素数は(7±2)、レベル数は適用する問題の構造により決定され、最下層に代替案を選択する。

第2段階：次に各レベルにおける要素間のペア比較を一つ上のレベルにある関係要素を評価基準として行い、各レベルの要素間の重み付けを行う。したがって、比較要素数 n とすると被験者は $n(n-1)/2$ 個のペア比較をすることになる。

第3段階：各レベルの要素間の重みより、階層全体の重み付けを行う。これにより総合的に対する各代替案のプライオリティが決定される。

ここで本研究におけるトンネルの用途と覆工の劣化現象(点検項目)の関係を示すと図-2のようになる。

4. 山岳トンネルが必要とする要求性能と劣化現象との関連性

(1) 山岳トンネルが必要とする要求性能

まず、アンケート調査結果より求めたトンネル点検

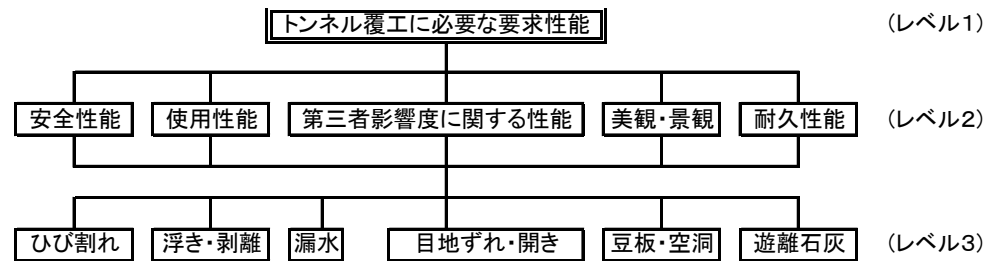


図-2 トンネル覆工に必要な要求性能と点検項目の階層化

する性能、d.美観・景観、e.耐久性能)に対して、①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の点検項目(劣化現象)の2項目において、表-1に示すどちらをどれだけ重要視するか記入してもらった。

技術者および土木技術者が考える一般的なトンネル、都市部(交通量の多い)トンネル、地方(住民の生活用)トンネルなど個々の用途の山岳トンネルが保有すべき要求性能(a.安全性能、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)を以下に示す。

1) 一般的なトンネル

アンケート調査結果より、トンネル点検技術者および土木技術者の考える一般的なトンネルが保有すべき要求性能の重要度(重み)は表-2の(a)のようになり、

1.安全性能>2.第三者影響度に関する性能>3.使用性能>4.耐久性能>5.美観・景観と考えている。

2) 都市部の(交通量の多い)トンネル

アンケート調査結果より、トンネル点検技術者および土木技術者の考える都市部のトンネルが保有すべき要求性能の重要度(重み)は表-2の(b)のようになり、

1.安全性能>2.使用性能>3.第三者影響度に関する性能>4.耐久性能>5.美観・景観と考えている。

3) 山間部の(住民の生活用)トンネル

アンケート調査結果より、トンネル点検技術者および土木技術者の考える山間部における住民の生活に欠かせないトンネルが保有すべき要求性能は表-2の(c)のよう

表-2 トンネルが保有すべき要求性能

(a) 一般的なトンネルが保有すべき要求性能							
	①	②	③	④	⑤	幾何平均	重み
①安全性能	1	4	1	6	3	2.3522	0.3658
②使用性能	1/4	1	1/3	5	1	0.8394	0.1306
③第三者影響度	1	3	1	5	3	2.1411	0.3330
④美観・景観	1/6	1/5	1/5	1	1/3	0.2941	0.0457
⑤耐久性能	1/3	1	1/3	3	1	0.8026	0.1248
(b) 都市部のトンネルが保有すべき要求性能							
	①	②	③	④	⑤	幾何平均	重み
①安全性能	1	3	1	5	3	2.1411	0.3570
②使用性能	1/3	1	4	2	5	1.6787	0.2799
③第三者影響度	1	1/4	1	3	3	1.1761	0.1961
④美観・景観	1/5	1/2	1/3	1	1/4	0.3835	0.0649
⑤耐久性能	1/3	1/5	1/3	4	1	0.6178	0.1030
(c) 山間部のトンネルが保有すべき要求性能							
	①	②	③	④	⑤	幾何平均	重み
①安全性能	1	3	2	6	3	2.5508	0.4070
②使用性能	1/3	1	1	5	1	1.1080	0.1768
③第三者影響度	1/2	1	1	5	2	1.3887	0.2201
④美観・景観	1/6	1/5	1/5	1	1/5	0.2647	0.0422
⑤耐久性能	1/3	1	1/3	5	1	0.9642	0.1538

になり、1.安全性能>2.第三者影響度に関する性能>3.使用性能>4.耐久性能>5.美観・景観と考えている。

トンネルにおける用途別の要求性能の重要度(重み)を整理した一覧表は表-3、ブロックダイヤグラムは図-3のようになった。

図-3より、各用途のトンネルにおいて最も必要とされるのは安全性能であった。また一般的・山間部のトンネルでは、第三者影響度に関する性能が、都市部のトンネルでは使用性能が二番目に必要とされる性能となった。

表-3 トンネルが保有すべき要求性能

	一般的	都市部	山間部
①安全性能	1	1	1
②使用性能	3	2	3
③第三者影響度	2	3	2
④美観・景観	5	5	5
⑤耐久性能	4	4	4

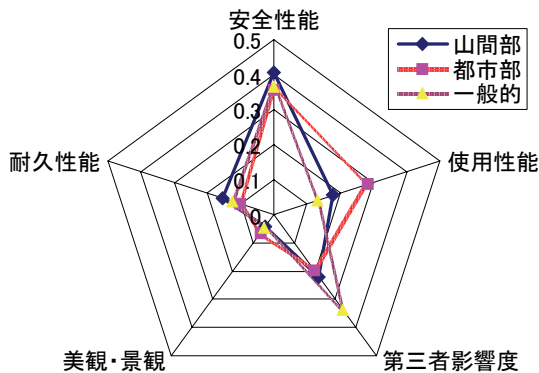


図-3 トンネルが保有すべき要求性能

(2) 要求性能と劣化現象(点検項目)の相関関係

次に山岳トンネルにおける覆工の要求性能と劣化現象との関連性(健全度評価への影響度)を同様に、トンネル点検技術者および土木技術者に対する一対比較の要領でアンケート調査により求めた結果を表-4(a)～(e)に示す。

また、各要求性能に影響する劣化現象について重みの順位で整理したものを表-5に示す。

1) 安全性能

安全性能に対する各劣化現象の相関(影響度)は、①ひび割れ>②浮き・剥離>④目地ずれ・開き>⑤豆板・空洞>③漏水>⑥遊離石灰の順である。

2) 使用性能

使用性能に対する各劣化現象の相関(影響度)は、③漏水>②浮き・剥離>①ひび割れ>④目地ずれ・開き>⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の順である。

3) 第三者影響度に関する性能

第三者影響度に関する性能に対する

表-4 各要求性能と点検項目の相関

(a) 安全性能に影響する劣化現象								
	①	②	③	④	⑤	⑥	幾何平均	重み
①ひび割れ	1	3	5	3	5	5	3.2250	0.4318
②浮き・剥離	1/3	1	1	3	1	3	1.2007	0.1608
③漏水	1/5	1	1	1/3	1	1	0.6367	0.0852
④目地ずれ・開き	1/3	1/3	3	1	3	3	1.2005	0.1507
⑤豆板・空洞	1/5	1	1	1/3	1	3	0.7646	0.1024
⑥遊離石灰	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1	0.4413	0.0591
(b) 使用性能に影響する劣化現象								
	①	②	③	④	⑤	⑥	幾何平均	重み
①ひび割れ	1	1/3	1	1	3	3	1.2007	0.1746
②浮き・剥離	3	1	1/3	1	3	3	1.4420	0.2097
③漏水	1	3	1	3	3	3	2.0801	0.3025
④目地ずれ・開き	1	1	1/3	1	1	3	0.9998	0.1454
⑤豆板・空洞	1/3	1/3	1/3	1	1	1	0.5771	0.0839
⑥遊離石灰	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	0.5771	0.0839
(c) 第三者影響度に関する性能に影響する劣化現象								
	①	②	③	④	⑤	⑥	幾何平均	重み
①ひび割れ	1	1/5	1	1	3	3	1.1029	0.1566
②浮き・剥離	5	1	3	1	3	3	2.2649	0.3216
③漏水	1	1/3	1	3	3	3	1.4420	0.2048
④目地ずれ・開き	1	1	1/3	1	1	3	0.9998	0.1420
⑤豆板・空洞	1/3	1/3	1/3	1	1	3	0.8323	0.1182
⑥遊離石灰	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	0.4000	0.0568
(d) 美観・景観に影響する劣化現象								
	①	②	③	④	⑤	⑥	幾何平均	重み
①ひび割れ	1	1	1/3	1	1/3	1/3	0.5771	0.0928
②浮き・剥離	1	1	1/3	1	1/3	1/3	0.5771	0.0928
③漏水	3	3	1	3	1	1	1.7321	0.2784
④目地ずれ・開き	1	1	1/3	1	1	1/3	0.6931	0.1114
⑤豆板・空洞	3	3	1	1	1	1/3	1.2007	0.1928
⑥遊離石灰	3	3	1	3	3	1	1.4420	0.2318
(e) 耐久性能に影響する劣化現象								
	①	②	③	④	⑤	⑥	幾何平均	重み
①ひび割れ	1	1	3	1	1	3	1.4422	0.2241
②浮き・剥離	1	1	1	1	1	3	1.2009	0.1863
③漏水	1/3	1	1	1	1	3	0.9998	0.1551
④目地ずれ・開き	1	1	1	1	1	3	1.2009	0.1863
⑤豆板・空洞	1	1	1	1	1	3	1.2009	0.1863
⑥遊離石灰	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	0.4000	0.0621

各劣化現象の相関(影響度)は、②浮き・剥離>③漏水>①ひび割れ>④目地ずれ・開き>⑤豆板・空洞>⑥遊離石灰の順である。

表-5 各要求性能に影響する劣化現象(点検項目)

要求性能 点検項目	安全性能	使用性能	第三者影響度 に関する性能	美観・ 景観	耐久性能
①ひび割れ	1	3	3	5	1
②浮き・剥離	2	2	1		2
③漏水	5	1	2	1	3
④目地ズレ・開き	3	4	4	4	2
⑤豆板・空洞	4		5	3	
⑥遊離石灰	6	5	6	2	4

4) 美観・景観

美観・景観に対する各劣化現象の相関(重要度)は、③漏水>⑥遊離石灰>⑤豆板・空洞>④目地ずれ・開き>①ひび割れ、②浮き・剥離の順である。

5) 耐久性

耐久性に対する各劣化現象の相関(影響度)は、①ひび割れ>②浮き・剥離>④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞>③漏水>⑥遊離石灰の順である。

各要求性能における劣化現象(点検項目)の影響度(重み)のブロックダイアグラムは図-4のようになった。

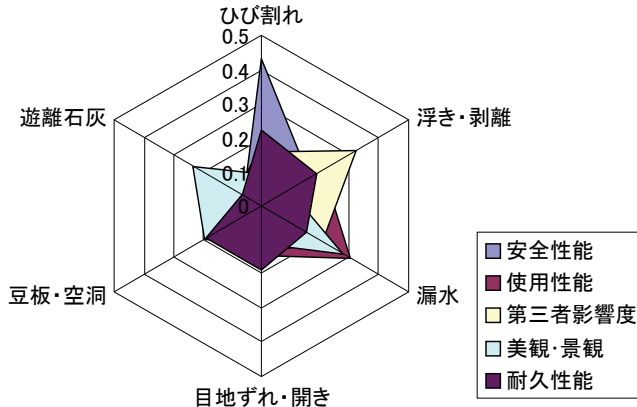


図-4 各要求性能に影響する劣化現象

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、ひび割れ、浮き・剥離、目地ずれ・開きなどの項目、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相関がある(重要視)と考えている事が判明した。

また劣化現象の中で遊離石灰に関しては、どの要求性能に対しても相関(影響度)が低い結果となった。

表-6 各用途のトンネルに影響する劣化現象

	一般的	都市部	山間部
ひび割れ	0.265112	0.262837	0.279462
浮き・剥離	0.220791	0.204378	0.205874
漏水	0.17095	0.189291	0.168838
目地ズレ・開き	0.149743	0.148762	0.15165
豆板・空洞	0.119837	0.114921	0.119315
遊離石灰	0.069834	0.077161	0.070722

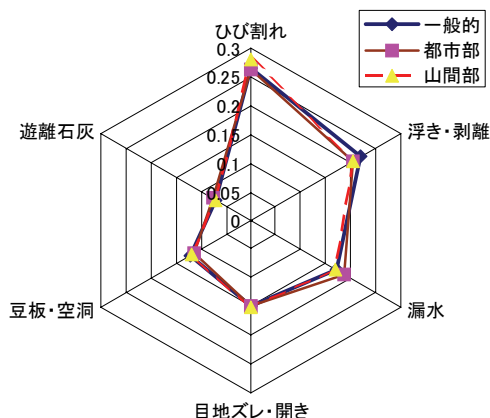


図-5 各用途のトンネルに影響する劣化現象

最後にトンネルの用途との劣化現象(点検項目)の相関関係を示すと表-6、図-5のようになり、都市部のトンネルでは漏水・遊離石灰(使用性能)、一般部および山間部のトンネルではひび割れ、浮き・剥離(安全・耐久性)を重要視していることが判明した。

5. まとめ

寒冷地におけるトンネル覆工の定量的な健全度評価の確立と精度向上を目的として、山岳トンネルがその用途において保有すべき覆工の要求性能および劣化現象(点検項目)と要求性能との関連性(健全度評価への影響度)をトンネル点検技術者および土木技術者へアンケート調査実施し、知識や感性など定性的なデータの定量化が可能なAnalytic Hierarchy Process: AHPを用いて考察した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 個々の用途のトンネルが保有すべき性能は、安全性であった。また一般的・山間部のトンネルでは、第三者に影響度に関する性能が、都市部のトンネルでは使用性能が二番目に必要とされる性能となった。
- (2) トンネル覆工の安全性・使用性・耐久性に対しては、ひび割れや浮き・剥離、目地ずれ・開きなどが、第三者への影響度や景観・美観においては、浮き・剥離、漏水などをトンネル点検の際に重要視している。
- (3) トンネル点検技術者が感覚として有する知識や覆工の要求性能と点検項目との関連性の抽出にはAnalytic Hierarchy Process: AHPにおける一対比較法は有用な手法である。

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) 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。
- 3) 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。
- 4) Saaty, T. L.:The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill、1980。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 刀根薫:ゲーム感覚意思決定法-AHP 入門-、日科技連、1986。
- 8) 松島学、須藤敦史:土木構造物の一般市民の感性と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。