

寒冷地トンネルにおける維持管理のためのトンネル点検記録のデータベース

佐藤 京¹・須藤 敦史²・西 弘明¹

¹正会員 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

E-mail:taka4@ceri.go.jp

²正会員 東京都市大学, 工学部都市工学科 (〒158-8557東京都世田谷区玉堤1-28-1)

北海道では30年の間に350もの国道トンネルが建設されており, 近年これらのトンネルはメンテナンスの時期になりつつあり, ライフ・サイクル・コストに基づいたトンネル構造物の維持管理手法の構築が望まれている. しかし, これらトンネル構造物の保守や維持管理を効率的に実施するためには, 点検記録などのデータベースの実用化が必要である. 一方, コンピュータ技術の発展に伴い, 多くの分野で取り入れられているデータプロセッシング技術は, 寒冷地のトンネル構造物における点検情報のシステム化に有用な技術である.

そこで本論文は, 寒冷地におけるトンネル点検記録をデータベース化して, 一元管理することによりトンネル点検記録の蓄積や覆工における健全度の評価を効率化を目的としたシステムの構築を紹介する.

Key Words : Tunnel Management system, Database, Inspection data, Cold Resin Tunnel

1. はじめに

北海道は積雪寒冷地と云う地域特性に加えて広域分散型の社会構造であるため, 各地域の間を結ぶ交通・物流手段として道路への依存度が非常に高くなっており, 昭和30年代後半から道路網の拡充にともなって山岳トンネルの整備が進められてきている.

一方, 北部や山間部などの厳しい気象環境の地域では, 冬期のトンネル坑内に氷柱・つらら・路面凍結などが発生するため, トンネル覆工などに寒冷地の環境が影響したと考えられる劣化現象が生じており, 建設から30年以上を経過したトンネルでは老朽化もしくは環境による劣化が進行してきている.

加えて, 公共事業における財政制約上, 既存のインフラ・ストックを維持管理しながら最大限有効に活用して, より効率的・経済的な更新投資が求められ始めている¹⁾.

したがって, 効率的かつ経済的なメンテナンス・維持管理(トンネルの改築や補強・補修など)が求められることは, 現在の社会情勢や経済的状況より必然的であり, 計画的な維持管理を行うライフ・サイクル・マネージメント(Life Cycle Management : LCM)の計画とその実施が急務である²⁾.

そこで, 本論文では, 寒冷地における道路トンネルのロングライフ化を図るトンネル・マネージメント・システム(Tunnel Management system : TMS)のための基本データ(必要とする要求性能)と点検データの蓄積(データベース化)において現在までに得られている知見の一部を紹介する.

2. トンネル点検データのデータベース化

北海道におけるトンネルの長寿命化に対する基本方策

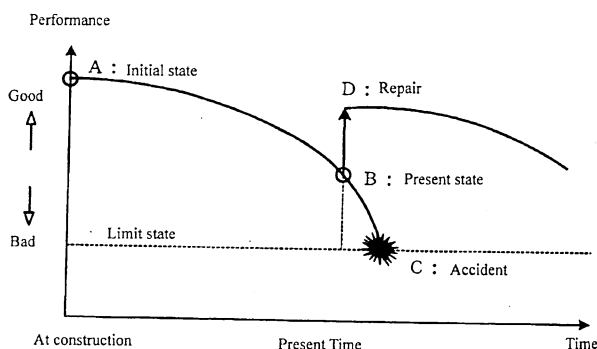


図-1 トンネルの性能劣化と補修・補強の概念図

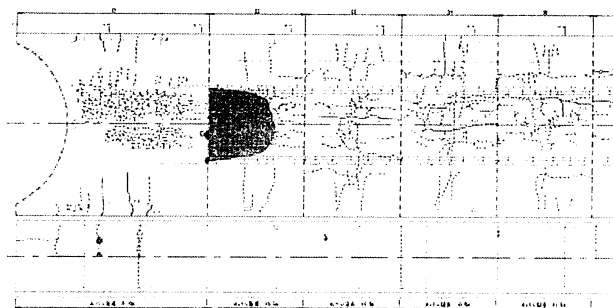


図-2 トンネル点検データのCAD化の例

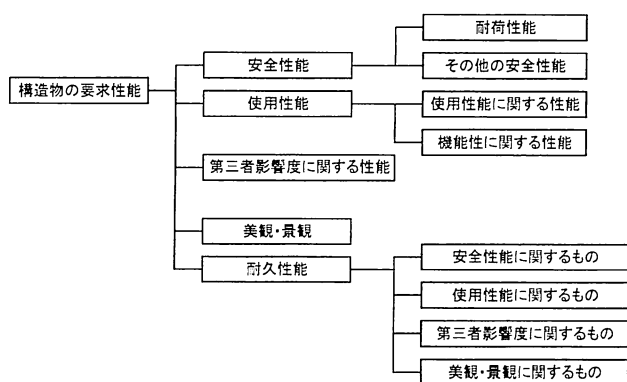


図-3 トンネル覆工の要求性能

は、既設トンネルの計画的な維持管理と延命対策を行う予防保全（図-1のB点→D点）、新設トンネルの耐久性の向上などを行ういわゆるストック・マネジメントの考え方に立脚している。

このような背景より、北海道開発局では平成12年10月に国土交通省により示された「道路トンネル定期点検要領（案）」³⁾を基本（一部「道路トンネル維持管理便覧」⁴⁾（日本道路協会平成5年11月）を参考）とし、平成15年度よりトンネル点検を実施している。また、北海道開発局では平成11、12年度に「トンネル台帳システム」を開発し、北海道内における国道トンネルの基本諸元、補修履歴、点検データなどの基本のデータベースを作成している。

(1) 点検データの定量化

(a) 点検データ（項目）と整理・蓄積方法

トンネルの点検データ（項目）は覆工変状の種類ごとに以下に示す6種類を基本として覆工の各スパンを1単位としている。

- ①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ズレ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰

これら6種類の変状種類について、変状展開図などをCAD化（図-2）するとともに点検表として整理・蓄積を行い、これらを基本データとしてトンネル覆工における

変状などの劣化評価値の数値化を求めている。

(b) トンネルの要求性能

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、その劣化評価と予測をして補修・改修の必要性や対策工法の選定を的確に判断するためには、トンネル覆工の要求性能や機能を定量的に定義しておくことが必要となるが、トンネル覆工は多くの機能が複合しているため非常に難しいのが現状である。

そこで、寒冷地の道路トンネルに求められる要求性能を明確にして、その性能・機能別とトンネルの点検項目との相関関係を明確にしている。

山岳トンネルの維持管理に際しては、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。

「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-3のように分類している。

加えて、トンネル覆工の劣化度を評価するための点検6項目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遊離石灰とトンネル覆工の要求性能との定量的な関係は明らかになっておらず、主な評価は点検技術者の主観的判断に委ねているのが現状である。

そこで、トンネル点検技術者に対するアンケート調査より、トンネル覆工における点検データ（項目）と劣化現象との相関関係をAnalytic Hierarchy Process：AHP⁹⁾を用いて実施している⁹⁾。

道路トンネルの覆工において、一般に対象となる要求性能を列挙すると以下となる。

- ① 安全性能：耐荷性能（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）
 - ② 使用性能：①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
 - 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がない
 - ④ 美観・景観：壁面の必要輝度の確保、ひび割れ・錆汁等による汚れの防止、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、要求性能を満足する性能
- ここで、トンネル点検技術者へのアンケート調査より得られたひび割れや浮き・剥離、漏水などの劣化現象が、これらの要求性能に与える影響についてまとめたものを表-1に示す。

表-1より、浮き・隔離、豆板・空洞、漏水などがトン

表-1 トンネル要求性能と劣化現象との相関表

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	耐久性性能	総合評価
①ひび割れ	○:2	6	5	3	○:2	○
②浮き・剥離	◎:1	◎:1	◎:1	◎:1	◎:1	◎
③漏水	◎:1	○:2	○:2	◎:1	○:2	◎
④目地ズレ・開き	◎:1	4	4	◎:1	3	◎
⑤豆板・空洞	◎:1	3	3	◎:1	◎:1	◎
⑥遊離石灰	3	5	6	○:2	4	△

◎:影響大 ○:影響

ネルの各要求性能と相関関係を示している。

以上より、トンネルの覆工に必要とされる要求性能に対する各点検項目のプライオリティ（重要度=重み）が決定され、これによりトンネル点検データからトンネル覆工の健全度（評価値）が求められる。

ここでアンケート調査より求めた各トンネルの用途における要求性能と劣化現象（点検項目）の重要度（重み）を示すと図-4、図-5となる。

これより、一般利用者はトンネル全般で覆工の要求性能における点検項目の重要度ランクは、②浮き・剥離>③漏水>⑤豆板・空洞と考えているが、土木技術者（トンネル点検技術者を含む）における要求性能における点検項目の重要度ランクは、①ひび割れ>②浮き・剥離>③漏水>④目地ズレ・開き>⑤豆板・空洞>⑥遊離石灰と判断している結果であった。

ここで土木技術者がひび割れに対して重み設定が大きくなる結果は、ひび割れを把握し事前に被害を予防する技術的判断が加味されていると推察される。

(c) 地域（寒冷地）の特殊性の反映

積雪寒冷地という北海道の特殊性を考慮に入れ、つららの発生状況や劣化の季節変動など冬期において必要な調査を行い、劣化評価値に反映させている。

寒冷地のトンネル覆工が受ける環境に起因する影響として、主に凍害（温度の上昇・下降による繰り返し応力を含む）と塩害による劣化が挙げられ、ひび割れの進展による覆工の耐久性の低下や覆工コンクリートの中酸化や坑口部の鉄筋腐食などが懸念される。

積雪寒冷地では、コンクリートの耐久性において環境による複合劣化の影響を適切に評価することが求められるが、実際のトンネル覆工を対象とした調査データの整理がなされていないため、その定量的な評価手法は確立されていないのが現状である。

そこでトンネル覆工の劣化と環境因子の関係を定量的に調査することを目的に、トンネル補修・補強履歴表に掲載されている道内234箇所（トンネル）を対象とした。

ここで北海道内のトンネル全体と各開発建設部が管理

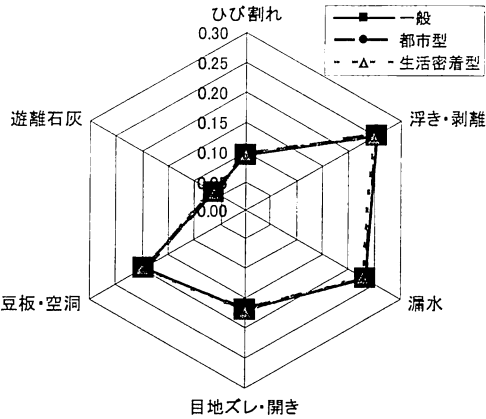


図-4 各点検項目の重み（一般利用者）

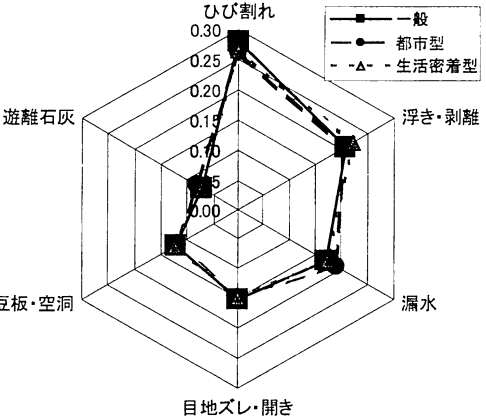


図-5 各点検項目の重み（土木技術者）

するトンネル覆工における補修・補強の実施平均年数を比較したものを表-2に示す。

表-2より、旭川・網走では構造・非構造の補修・補強で全体平均年数より早い。また室蘭・札幌・留萌では構造の補修・補強のみで全体平均の時期より早いことより、図-6に示す地域係数⁹⁾（寒気などの環境因子）とトンネル覆工における劣化度・耐久性との相関があると考えられる。

(d) 経時変化の把握

トンネル覆工における健全度評価は、変化を追跡して、

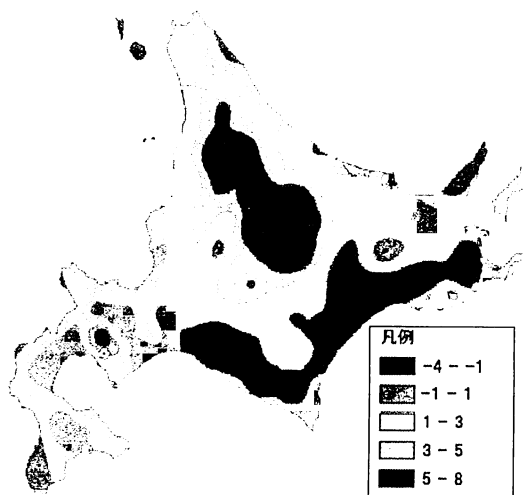


図-6 凍結融解を基にした地域係数⁹⁾

表-2 トンネルの性能劣化と補修・補強の概念図

	平均年数（構造）	平均年数（非構造）
全 体	30～40	20～30
函 館	30～40	20～30
小 樽	30～40（+）	30～40（-）
旭 川	20～30	20～30（-）
室 蘭	20～30	20～30
札 幌	20～30	20～30
帯 広	30～40（+）	20～30（-）
留 萌	10～20	20～30
網 走	10～20	10～20

亀裂や漏水などの変状の進行性などに基づいて、トンネル覆工の健全度を評価する手法の確立を目標としている。

一般にトンネル覆工の劣化推移は図-7 に示すように経過年数 t_i と劣化度 $Q(t_i)$ との関係として表され、この健全度低下モデルは健全度低下傾向の不確実性を考慮して、経過年数 t_i における劣化度の分布は $P(t_i)$ となり、幾何学的ブラウン運動（伊藤型確率微分方程式）モデルを適用すると劣化過程は次式で表される^{9)など}。

$$dX(t) = \beta X(t)dt + \sigma X(t)dW_1(t) \quad (1)$$

ここで β は平均劣化率（トレンドもしくはドリフト）、 σ は拡散（ボラティリティ）の程度を表すパラメータである。

本データ管理システムでは、得られている複数のトンネル覆工点検データ等に基づいて、この幾何学的ブラウン運動方程式のパラメータを統計的手法により同定することにより、健全度評価の変化を追跡している^{10)など}。

(2) トンネル覆工の補修方法の選定と評価の把握

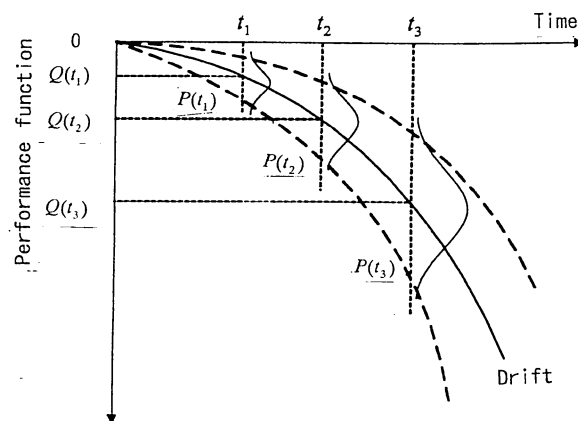


図-7 トンネル覆工の（性能）劣化モデル

トンネル覆工に対する適切な補修時期および最適な補修工法の選定（交通確保や通行止めなどの間接的影響も考慮）のため、加えて補修・補強後のトンネル覆工における機能・性能との関係を明確にするために、アンケート調査による評価を試みている。

(a) 補修・補強の基準

変状などトンネルの劣化現象に対する補修・補強対策として、覆工のコンクリート片などによる利用者被害を未然に防ぐための円滑な対応が求められるようになり「道路トンネル維持管理便覧：平成5年 日本道路協会」の定期点検の内容を補完する目的で「道路トンネル定期点検要領（案）：平成14年4月 国土交通省道路局国道課」では近視目視を主体とした定期点検の方法・内容が規定されている。

さらに本要領の内容を受けて、独立行政法人土木研究所から「対策マニュアル（案）」が作成されている。

トンネル覆工における劣化対策の種類としては、変状等が生じたトンネルの各部分を正常な機能を発揮するような補修を目的に行う工法、変状などが進行し続けた場合やトンネル構造物に悪影響を及ぼす規模や範囲が著しく大きな場合などに用いられる大規模な対策に大別でき、これらの資料から抽出した道路トンネルにおいて一般に実施される対策工法を表-3に示す。

(b) アンケート調査による補修・補強の選定

道路トンネルの覆工コンクリートに対する適切な補修時期および最適な補修工法の選定（交通確保や通行止めなどの間接的影響も考慮）を目的とし、加えて補修後のトンネル覆工における機能・性能との関係を明確にするために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項目に対する補修・補強工法の選定やその後の評価についてトンネル点検技術者および一般の土木技術者へのアンケートより求めた結果を表-4に示す。

表-4に示すように①ひび割れ：保護後方、②浮き・剥

表-4 トンネル覆工の劣化と選択される主な対策工法

劣化現象	補修・補強		損傷（多）		損傷（少）	
①ひび割れ	1:保護工法	2:注入工法	1:充填工法	2:注入工法		
②浮き・剥離	1:吹付け工法	2:繊維シート	1:浮き剥離処理	2:繊維シート		
③漏水	1:面導水	2:線導水	1:線導水	2:面導水		
④目地ズレ・開き	1:目地補修	2:充填工法	1:劣化部処理	2:目地補修		
⑤豆板・空洞	1:注入工法	2:劣化部処理	1:充填工法	2:その他		
⑥遊離石灰	1:除去	2:無処理	1:無処理	2:除去		

表-3 トンネルの劣化現象に対する主な対策工法

劣化現象	要求性能	安全性能	第三者影響度に関する性能
①ひび割れ		- 裏込め注入工 - 吹付けコンクリート - ロックボルト - 内巻きコンクリート - 断熱工 - インバート工 - 部分改築工 - 地山注入工	- ハツリ落とし工 - ひび割れ注入工 - 当て板工
②浮き・剥離		- 裏込め注入工 - 吹付けコンクリート - 内巻きコンクリート	- ハツリ落とし工 - 断面修復工 - ひび割れ注入工 - 当て板工
③漏水		- 導水樋工 - 溝切り工 - 止水注入工 - 防水バネル工 - 水抜きボーリング - 水抜き工 - 排水工	
④目地ズレ・開き		断熱工	
⑤変形・沈下		- ロックボルト - 断熱工 - グラウンドアンカー - インバート工 - 部分改築工 - 地山注入工	
⑥路面の隆起・沈下		- ロックボルト - 断熱工 - グラウンドアンカー - インバート工 - 部分改築工	

離：吹付け工法，③漏水：面導水，④目地ずれ・開き：目地補修，⑤豆板・空洞：注入工法，⑥遊離石灰：除去などの対策工法が選定されており，また補修後の覆工コンクリートにおける劣化評価値の定量的なランクアップ量も得られている。

3. ま と め

北海道における道路トンネルの効率的かつ経済的なメンテナンス・維持管理（トンネルの改築や補強・補修など）を実施するために検討しているトンネル・マネジメント・システム(Tunnel Management system：TMS)のための基本データ（必要とする要求性能）と点検データの蓄積（データベース化）において現在までに得られている知見の一部を紹介した。

今後もトンネルの維持管理点検データのデータベース化を図り，それらを基に寒冷地トンネルの維持管理（ロングライフ化）を目的としたトンネル覆工の劣化評価とその長期予測および最適な維持管理計画の研究を進めたいと考えている。

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IV-397,pp.791-792, 2004.

3) 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.

4) 日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧, 1993, 11.

5) 木下栄蔵:マネジメントサイエンス入門, 近代科学社, 1996.

6) 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, VI-040, pp.79-80, 2006.

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 I -43, pp.287-294, 2006.

8) 浜幸雄,松村光太郎,田畑雅幸,富坂崇,鎌田栄治:気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測,日本建築学会構造

系論文集,第 523 号,pp.9-16,1999.

- 9) 須藤敦史,丸山収,佐藤京,西弘明:寒冷地トンネルにおける劣化予測のための確率モデルについて,第 24 回寒地シンポジウム 2008, I -005,2008.

- 10) 須藤敦史,三上隆,佐藤京,西弘明,河村巧:寒冷地トンネルの覆工点検データによる覆工の劣化過程の同定,第 62 回年次学術講演会講演概要集,2007.

A TUNNEL INSPECTION DATABASE OF THE COLD RESION TUNNEL FOR MAINTENANCE

Takashi SATO, Atsushi SUTOH and Hiroaki NISHI

In Hokkaido, 350 tunnels have been constructed over the past 30 years. Since the time of maintenance for these tunnels is approaching, many tunnel linings will require repair in the near future.

This project therefore aims to establish a management system for tunnel structures based on life cycle cost. In this paper, an asset management methodology is presented to investigate the optimal repair policies of the public facilities under uncertainty of economic lives. And, it also introduces the tunnel inspection database in Hokkaido for analysis of the questionnaire results. The model system presented in the paper is applied to the asset management of the roadways tunnel.