

# 積雪寒冷地トンネルにおける マネジメントシステム構築に関する研究

佐藤 京<sup>1</sup>・須藤 敦史<sup>2</sup>・西 弘明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 (独)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

<sup>2</sup>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)

土木構造物において建設, 維持, 補修, 更新などの費用便益を総合的に評価するアセットマネジメントが着目されてきており, 導入に際して欠かせない技術項目として, 1)構造物の要求性能・水準の評価と現在の機能の把握, 2)構造物における状態の将来予測技術である. 加えて3)構造物のモニタリングを行いながら, 費用対効果を考慮して適切な時期に補修・更新することが必要となる.

一方, 北海道では30年の間に350本もの国道トンネルが建設されている. 今後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, 多くのトンネルに対してアセットマネジメントなどの維持管理や超寿命化技術の導入が必要となる. そこで本研究プロジェクトは, ライフサイクルコスト (LCC) に基づいたトンネルにおける維持管理手法 (TMS) の構築を目標とするものであり, ①寒冷地におけるトンネル点検記録のデータベース化, ②トンネル覆工の要求性能の把握や健全度の評価, ③トンネル覆工における補修・補強工の効果検討などを紹介する.

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

## 1. はじめに

現在, 既存の社会基盤施設の維持管理や超寿命化が課題となっており, それらすべてを最適な健全状態に維持していく費用は経済的・社会的にあまり期待できない. そして何よりも維持管理を進める上での技術的問題を数多く抱えているのが現状である.

したがって既存のインフラ・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<sup>1)</sup>.

このような状況下, アセットマネジメントシステムが注目されており, 社会基盤の計画・建設・維持・補修・更新において, その計画から実行までライフサイクルコスト (Life Cycle Cost : LCC) より合理化を図るマネジメント手法が導入されは始めている.

一方, 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, 図-1に示すように昭和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. 加えて北部や山間部などの厳しい気象環境の地域では, 冬期の間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特有の環境によ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劣化が進行してきている.

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・マネジメント (Life Cycle Management : LCM) の計画とその実施が急務である<sup>2)など</sup>.

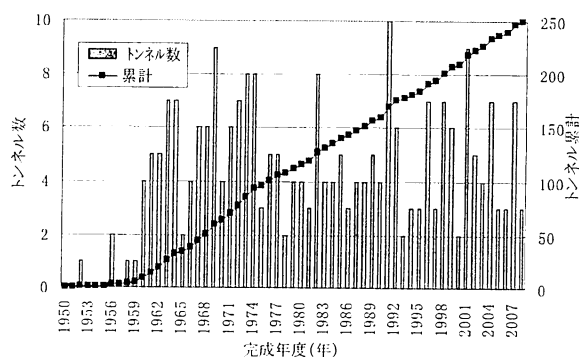


図-1 北海道における道路トンネル数と累計

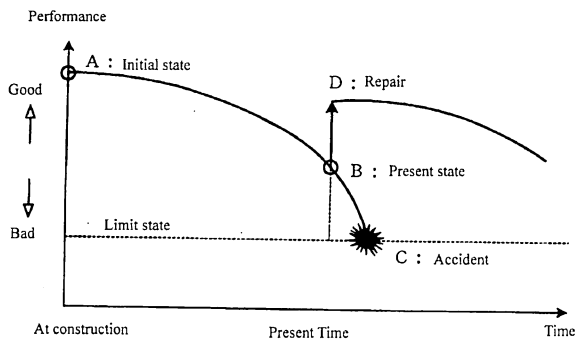


図-2 トンネルの性能劣化と補修・補強の概念図

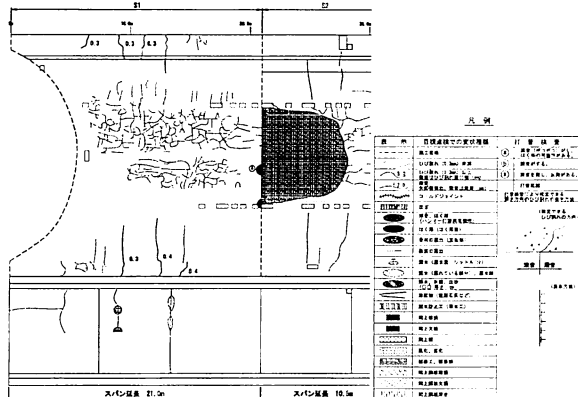


図-4 トンネル点検データのCAD化の事例

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)の基本構成の一部を紹介する。

## 2. TMSの基本構成

構築するTMS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の考え方を基本姿勢として、トンネルの耐久性の向上などを行ういわゆるストック・マネージメントの考え方で構成されている。

具体的には図-2に示すように、構造物の障害発生時期C点を予測し、その状態に至る前に適切な時期や工法で補修・補強を施して(B点→D点)構造物の延命対策を図る維持管理手法である。

一方、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)」<sup>3)</sup>を基本(一部「道路トンネル維持管理便覧」<sup>4)</sup>(日本道路協会:平成5年11月)を参考)として、平成15年度より矢板とNATMトンネルの双方において覆工の点検を実施している。

また、北海道開発局では平成11、12年度から平成15年度まで「トンネル台帳システム(トンネル2003)」を整備しており、道内における国道トンネルの基本諸元、施

工記録、補修履歴、その後の覆工の点検データなどを基本データベースとして構成している。

以上のような背景より、本研究プロジェクトで構築するTMSは図-3に示す基本フローで構成されている。

フロー図に示すように TMS の主要構成は、1) 覆工における点検記録のデータベース化として①点検データのCAD化と②数値化システムで構成され、2)トンネル覆工の管理基準として覆工が必要とされる要求性能を定量的に把握・評価する部分である。

次に3)トンネルにおける覆工の健全度評価として、①全道および地域別の覆工、②個々の覆工、③特定の覆工それぞれの劣化度の現状把握および将来予測を蓄積された点検データに基づいて実施される。

さらに 4)トンネルの維持管理、補修・補強として、得られた覆工の健全度とその予測値より、補修・補強およびライフサイクルコストを検討するシステムで構成されている。

## 3. 点検データのデータベース化・数値化

### (1) 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)は覆工の変状種類ごとに以下に示す6種類を基本として整理・蓄積を行っており、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、変状展開図などを図-4の事例に示すようにCAD化するとともに点検データの整理・蓄積を行い、これらを基本データとして覆工における変状など劣化評価値の数値化を求めている。

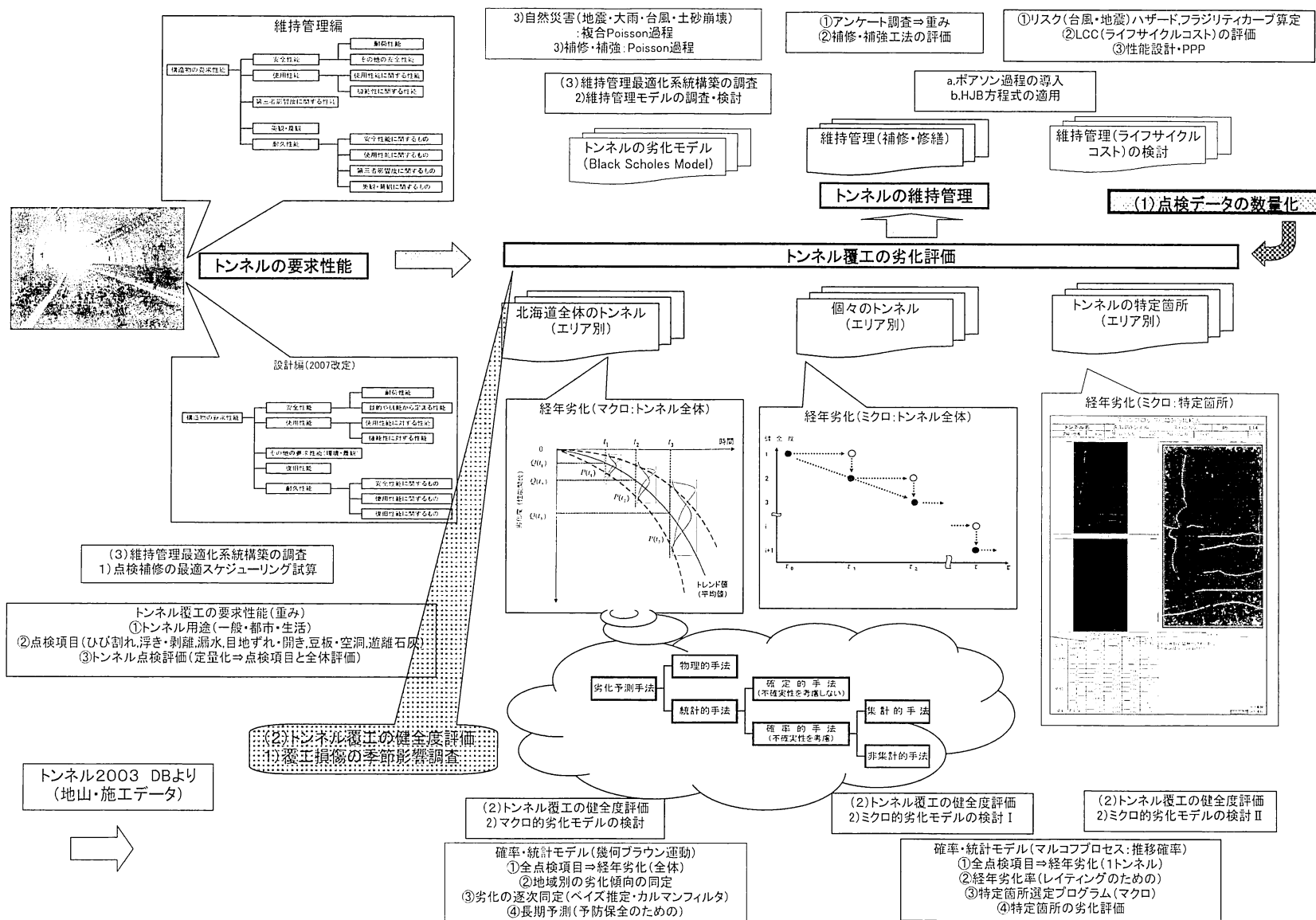
### (2) 点検データの数値化

トンネルにおける覆工の点検データは、様々な要因による複合した劣化現象と考えられるため、その定量的評価は非常に難しく、点検技術者の主観的判断に委ねているのが現状である<sup>3)</sup>。

そこで、本研究プロジェクトでは点検項目は、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遊離石灰など劣化状態を点検技術者のアンケート調査を基に数値化を試みている。

## 4. トンネル覆工が必要とする要求性能

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



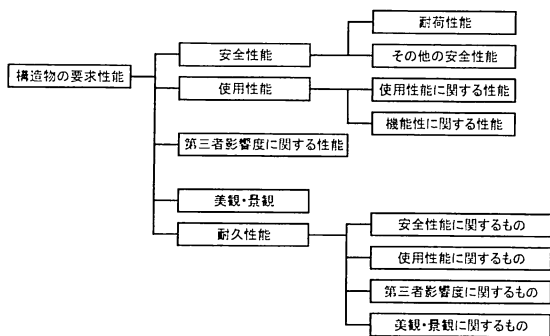


図-5 トンネルにおける覆工の要求性能

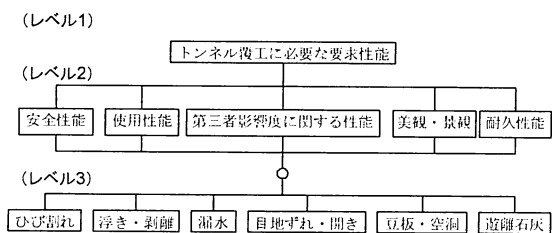


図-6 トンネルにおける覆工の要求性能と点検項目の階層化

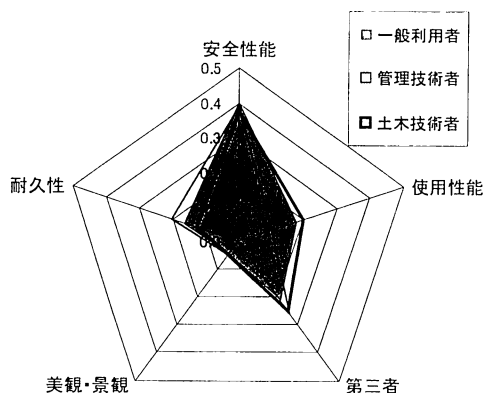


図-7 一般トンネルの保有すべき要求性能

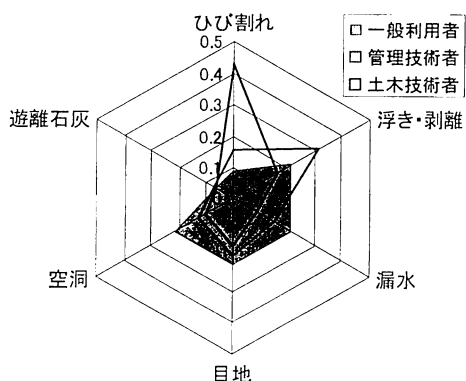


図-8 安全性能と劣化現象（点検項目）との相関

や対策工法の選定を的確に判断するためには、トンネル

における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、トンネルの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・機能別と覆工の点検項目との相関関係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-5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における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、アンケート調査よりトンネルの覆工が必要とする要求性能とそれらと点検項目（劣化現象）との相関関係（図-6参照）をAnalytic Hierarchy Process : AHP<sup>®</sup>を用いて実施している<sup>7)</sup>。

道路トンネルの覆工における要求性能を以下に示す。

- ① 安全性能：耐荷性（施工後の外力を含む）、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：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、一般的な山岳トンネルにおいて覆工が保有すべき要求性能の重要（優先）度は図-7 となり、利用者は安全性能（0.421）がトンネルの覆工に必要と考えている。また、要求性能と点検項目（劣化現象）と相関関係は図-8に示すようになる。

これにより各点検項目のプライオリティ（重要度=重み）が決定され、トンネルにおける覆工の健全度（評価値）が定量的に求められる。

## 5. トンネル覆工が必要とする要求性能

トンネルの覆工における健全度評価は、変化を追跡して、亀裂や漏水などの変状の進行性などに基づいて、覆工の健全度を評価する。

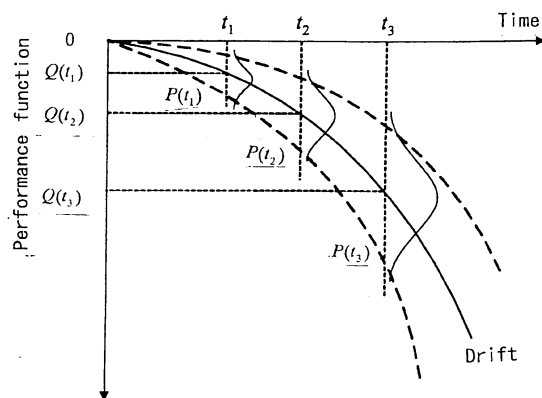


図-9 覆工の（性能）劣化モデル

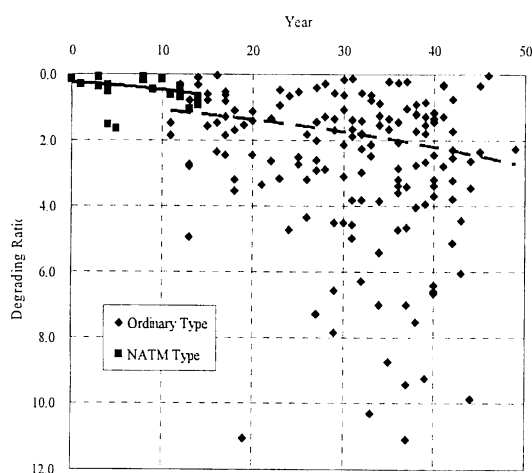


図-10 覆工における劣化度（矢板・NATM）

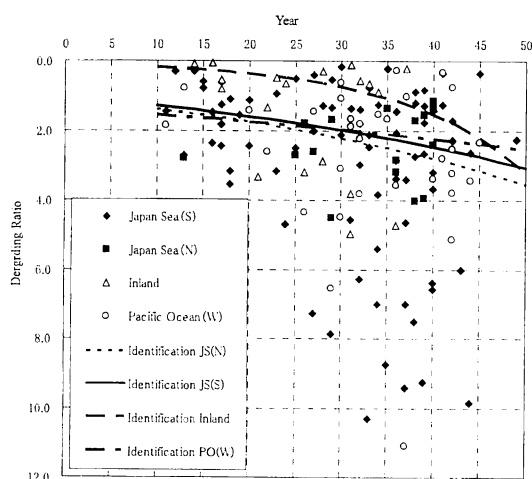


図-17 覆工における劣化度（地域別）

一般にトンネルにおける覆工の劣化推移は図-9 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<sup>9)</sup>など。

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

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

TMS では、得られている複数のトンネルの覆工点検データ等に基づいて、この幾何ブラウン運動方程式のパラメータを最尤法などの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<sup>9)</sup>。

#### (1) トンネル覆工の経年劣化

北海道内において矢板工法と NATM で施工されたトンネル（180 箇所）で得られた覆工の点検データから①ひび割れと②剥離、はく離に着目して幾何ブラウン運動（伊藤型確率微分）方程式による経年劣化過程を求める。

ここで実際にトンネルの覆工におけるひび割れと剥離、はく離の点検データから得られた、矢板工法および NATM における経年劣化過程を図-10 に示す。

図-10 より、複数の点検項目においても劣化評価値は建設年代に伴い低下の傾向を示している。

以上より、トンネル点検値①ひび割れ、②浮き・はく離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板、空洞、⑥遊離石灰を数値化して、トンネルの覆工における劣化評価を幾何ブラウン運動（伊藤型確率微分）方程式を用いて表すことが基本的に可能である。

ここで、同一のトンネルの覆工における経年にわたる観測データが存在しないため、現在得られている複数の点検データから劣化過程の時間推移を求めている。

#### (2) 劣化過程の地域性

北海道における土木構造物では、冬期の間厳しい気候に曝されるため、トンネルの覆工は様々な環境劣化を受けている。しかし、北海道は面積が大きく、加えて気象環境も異なるため地域によって様々な劣化作用を受けていると考えられる。

そこで、北海道の気象特性により区分けした地域<sup>10)</sup>においてトンネルの建設年代（経年）にともなう覆工における劣化度（ひび割れ、剥離・剥落）の評価値を求めた結果を図-11 に示す。

### 6. トンネルにおける覆工の補修方法選定と評価

道路トンネルの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)を目的とし、加えて補修後のトンネルの覆工における機能・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:保護工法、②浮き・剥離: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<sup>1)</sup>。

## 7. 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)の一部を紹介した。今後も寒冷地トンネルの維持管理(ロングライフ化)の研究を進めたいと考えている。

### 参考文献

1) 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.

表-1 トンネルにおける覆工の劣化と選択される主な対策工法

| 補修・補強<br>劣化現象 | 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    |

2) 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) 日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧, 1993, 11.

4) 日本道路公団:設計要領第三集トンネル(1)トンネル本体工保全編(変状対策), 2006.

5) Saaty, T.L.,:The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.

6) 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.

7) 飛田武幸:ブラウン運動, 岩波書店, 1975.

8) 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.

9) 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.

10) 佐藤京, 須藤敦史, 西弘明: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, 土木学会, 第20回トンネル工学研究発表会, 2010.

## A SUTDY OF TUNNEL MANAGEMENT SYSTEM FOR THE COLD RESION TUNNEL

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.