

# 寒冷地における矢板工法のトンネル覆工に対する維持管理のための考察

須藤 敦史<sup>1</sup>・兼清 泰明<sup>2</sup>・佐藤 京<sup>3</sup>・丸山 収<sup>4</sup>・檀 寛成<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 東北工業大学 工学部 都市マネジメント学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35番1号)  
E-mail: atsu-sutoh@tohtech.ac.jp

<sup>2</sup>関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)  
E-mail: hiro.t.k@kansai-u.ac.jp

<sup>3</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1-34)  
E-mail: taka4@ceri.go.jp

<sup>4</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)  
E-mail: omaruya@tcu.ac.jp

<sup>5</sup>関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)  
E-mail: dan@kansai-u.ac.jp

市民生活の多くを道路に依存している北海道では、矢板工法の山岳トンネルは厳しい自然環境を耐えながら長い耐用・供用年数を必要とするインフラストラクチャーである。そこで昨今の社会・経済情勢等を考慮しながら、点検結果に基づく予防保全（劣化予測）を前提とした長寿命化対策を図り、早急に維持管理システムを構築して、効率的な運営をしなければならない。そこで本研究は、北海道における主に矢板工法の山岳トンネルに対する信頼性の高い維持管理の構築と運用を目的として、トンネル覆工に対する各種の調査・試験、および定期点検値より現状の管理状態における劣化の進行度等を同定している。さらに、それら劣化特性に対して地域特性や環境要因の検証・考察も行っている。

**Key Words:** tunnel linings, deterioration, life cycle management, cold region tunnels

## 1. はじめに

高度経済成長期に建設された社会資本の老朽化などに伴ってインフラストラクチャーの長寿命化問題と、それらの効率的な維持管理システムの構築・運営は、早急に解決しなければならない課題として認識され、種々の取り組みがなされている<sup>1)</sup>など。

北海道においては市民生活の多くを道路に依存しているため、矢板工法の山岳トンネルは厳しい自然環境を耐えながら長い耐用・供用年数を必要とするインフラストラクチャーであり、点検結果に基づく予防保全（劣化予測）を前提とした長寿命化対策を図り、さらに早急に維持管理システムを構築して効率的な運営をしなければならないのが現状である。

一方、北海道では昭和 63 年度に制定された「道路トンネル設計施工要領」に伴って NATM が矢板工法に代わって山岳トンネルの標準工法に採用されているが、昨

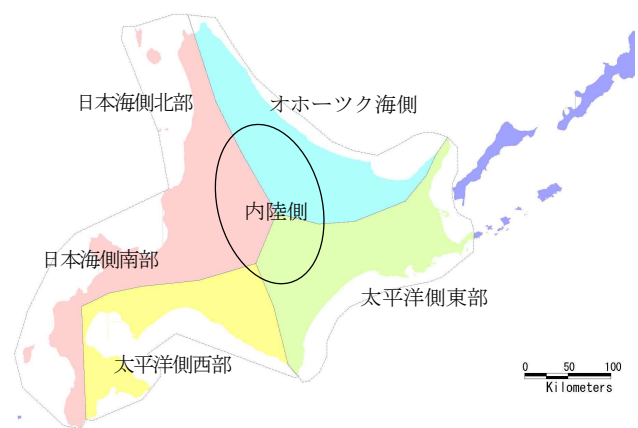


図-1 北海道の気象区分<sup>4)</sup>を修正

今の社会・経済状況等により、今後も矢板工法の山岳トンネルをなるべく長い期間に供用していかなければならない。しかし、北海道では矢板工法の山岳トンネルは、

建設から約 25～30 年以上経過しているため、長い間厳しい自然環境に晒されていることに加えて、路面への凍結防止剤の散布や沿岸部などは冬季の季節風による飛来塩分などによる塩害を受けていると考えられる。

さらに、トンネル覆工に対する定期点検の健全度評価の判定は、表-1 に示す5段階のレーティング（離散）値が基本であるため、その解釈や利用等が難しく、加えて点検時期により判定基準が数回改定されているため<sup>2)</sup>、経過年等を検討軸とした長期にわたる一貫した劣化評価が非常に難しいのが現状である。

このような状況下、近接目視を主とする定期的な点検結果に基づいたトンネル覆工における劣化の現状評価と将来予測の研究もなされているが<sup>3)</sup>など、矢板工法に対ししたトンネル覆工における様々な劣化現象の基礎的な調査・試験の数は非常に少なく、円滑な維持管理を実施していくための基本的な性状の把握・評価のための技術情報にはならず、加えてそれらを基本とした将来予測は難しいのが現状である。

そこで本研究では、北海道開発局が管理する矢板工法のトンネル覆工に対する現状に即した維持管理の効率化・最適化を図るために、定期点検における個々のトンネル覆工における健全度の判定区分値から長期の劣化現象の遷移を求めて、その気象区分ごとにおける経過年数に伴う変動特性を検討している。

次に、トンネル覆工に対する圧縮強度・中性化深さ・含有塩分（塩化物イオン）濃度等の調査・試験を実施し、さらにその状況等を図-1 に示す環境・気候区分別に検証・考察を実施している。

表-1 損傷ランク（劣化区分）

判定区分	定義
I	利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、措置を必要としない状態
II	II b 将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、監視を必要とする状態。
	II a 将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III	早晩、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に措置を講じる必要がある状態
IV	利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態

※I 判定区分IVにおける「緊急」とは、早期に措置を講じる必要がある状態から、交通閉鎖できない状態までを言う。

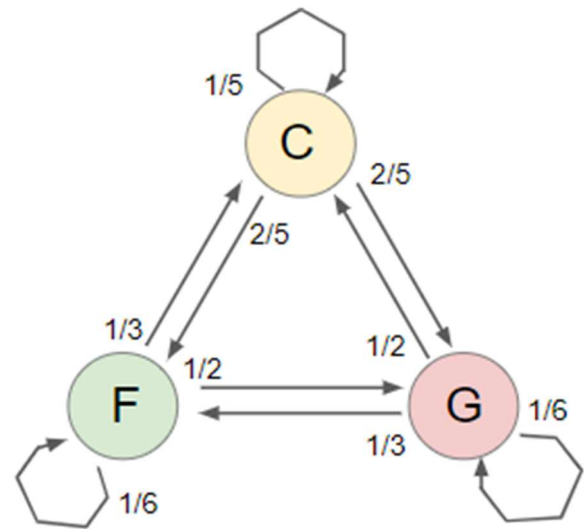


図-2 マルコフ連鎖モデル

## 2. 山岳トンネルに対する定期点検および点検値

### (1) 北海道における山岳トンネルの定期点検

北海道開発局では、管理する山岳トンネル数や交通量等を勘案して、劣化度の判定区分を表-1 に示すような変更しており、さらに、平成 26 年度には、具体的な取組みとして、坑内照明や避難装置などの管理設備を含めた道路構造物に対して、国が定める点検・監視および統一的な健全度の判定・診断が実施されている<sup>9)</sup>。

### (2) 北海道におけるトンネルの定期点検値

北海道開発局および（独）土木研究所地土木研究所では、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>7)</sup>を基本とし、さらに平成 5 年 11 月も日本道路協会における「道路トンネル維持管理便覧」<sup>8)</sup>を参考にして一部を修正して、平成 15 年度より矢板工法と NATM のトンネル覆工に対する定期点検を開始し、同時に山岳トンネルの長寿命化を支援す

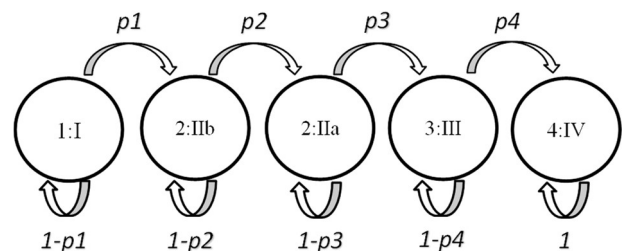


図-3 トンネル劣化区分のマルコフ連鎖

るための定期点検結果を主としたデータベースの構築も行っている<sup>9)</sup>。

ここで、トンネル覆工における近接目視による点検項目は、その表面の損傷・変状種類ごとに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遊離石灰の 6 種類を基本としており、さらにスパン毎におけるすべての損傷・変状等に対しては、目視点検から詳細な CAD 図を作成して定期点検値等のデータベース化を行っている。

ここで本研究では、北海道開発局が管理する矢板工法の山岳トンネル（約 137 か所）における定期点検値等のデータベースから、平成 18 年度～令和 2 年度において実施された 14 回の定期点検値を用いている。

### 3. 点検値に基づくトンネル覆工の劣化について

#### (1) 定期点検値に基づくトンネル覆工の劣化区分値

山岳トンネルに対する維持管理やアセットマネジメント等で使用される定期点検の結果は、トンネルの覆工表面における近接目視点検値より判定される劣化判定区分値とその検査年およびトンネルの供用開始年であり、マルコフ連鎖モデルを用いて、トンネル覆工における劣化区分値の遷移確率行列を同定するには、同一の点検間隔で少なくとも 2 回以上取得され、加えて劣化区分値のレベルが遷移したサンプルが出来る限り数多くあることが、必要条件となる。

#### (2) マルコフ連鎖モデル

マルコフ連鎖モデル<sup>10)</sup>は、図-2に示すように、ある時刻においてCの状態が、次の時刻においてもCの状態のままの確率は1/5、また状態Cから状態Gに変化する確率は2/5、さらに状態Cが状態Fに変化する確率は2/5となる。このように、ある状態からつぎの状態への遷移過程においてマルコフ連鎖モデルでは、ひとつ前の劣化評価の区分値の状態に依存すると考える。

また、図-3に示すように、山岳トンネルなどの構造物の劣化区分（ランク）値におけるマルコフ遷移過程は、離散時間の経過に伴い、常にある一定確率 $p_i$ で劣化の方向（1: I ⇒ 2: II b ⇒ 2: II a ⇒ 3: III ⇒ 4: IV）に遷移、または停留 $1-p_i$ する確率プロセスと考えられる。

一般的に山岳トンネルの覆工は、良好な状態の劣化評価値 I から終局的破損状態の評価値IVまでの時間的遷移は、離散的な時間 $t_1, t_2 (= t_1 + \Delta t)$ の現象としている。

ここで時刻 $t$ において評価区分値 $i$ のトンネル覆工が、時間 $t + \Delta t$ で評価区分 $j$ に移行する遷移確率 $p_{ij}$ は式(1)となる。

$$p_{ij} = \text{prob}[X_{t+\Delta t} = j | X_t = i] \quad (1)$$

この遷移確率が、現在の状態のみに依存するならば $p_{ij}$ は時間差 $\Delta t$ にのみに依存する。

#### (3) 時間依存型のマルコフ連鎖モデルによる劣化予測

本研究では、このマルコフ連鎖モデルを矢板工法による山岳トンネルにおける劣化過程に適用してトンネル覆工の供用年数に伴う劣化区分値より、その値の時間遷移や分布を予測するものである。

さらに、山岳トンネルにおける劣化過程の進展度合いは、その状態や経過時間により、遷移・変化するものと考えられるため、本研究においてマルコフ連鎖の遷移確率行列を時間の経過に依存する値と定義して、それらを実際に山岳トンネルの定期点検より得られる数多くの劣化区分値より、経過年数に依存する遷移確率行列の要素をそれぞれ同定する。

例えば、時刻 $t_k$ において劣化区分値 $i$ から、時刻 $t_{k+1}$ に劣化区分値 $j$ に遷移した確率 $(p_{ij})_{t_{k+1}}$ は、基本的には2回以上の定期点検から得られる劣化区分値より、式(2)のように求められる<sup>11)</sup>。

$$(p_{i,j})_{t_{k+1}} = \frac{X(t_k) = i \text{ から } X(t_{k+1}) = j \text{ への推移個数}}{X(t_k) = i \text{ のデータ数}} \quad (2)$$

ここで、 $X(t_k)$ は時刻 $t_k$ において定期点検より求められた劣化区分値 $i$ の個数、また $X(t_{k+1})$ は時刻 $t_{k+1}$ において定期点検により劣化区分値 $i$ から区分値 $j$ へ推移した個数となる。ここで、具体的に $ij$ は、山岳トンネルの覆工点検から得られる5つの劣化区分値I, II b, II a, III, IVをとる値である。

さらに、この劣化遷移を要素 $p_{ij}$ とした行列 $P_{k+1}$ は遷移確率行列と呼ばれ、以下に示す式(3)に従う。

$$p_{i,j} \geq 0, \quad \sum_j p_{i,j} = 1 \quad (3)$$

ここで、トンネル覆工に対する劣化区分値は健全な状態から 1: I, 2: II b, 3: II a, 4: III, 5: IVで示されるとすると、マルコフ連鎖モデルの遷移確率行列は式(4)のように表される。

$$P_{t_{k+1}} = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} & p_{1,4} & p_{1,5} \\ 0 & p_{2,2} & p_{2,3} & p_{2,4} & p_{2,5} \\ 0 & 0 & p_{3,3} & p_{3,4} & p_{3,5} \\ 0 & 0 & 0 & p_{4,4} & p_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{5,5} \end{pmatrix}_{t_{k+1}} \quad (4)$$

ここで、遷移確率の要素が既知の場合には、マルコフ連鎖モデルによる劣化の予測値は式(5)により求められるが、前述のように山岳トンネルの遷移確率行列は時間の経過に対して依存する値と考えられるため、経過年数に伴った実際の点検値から遷移確率を同定すれば、時刻 $t_k$ における劣化区分値の分布ベクトル $\pi_k$ と遷移確率行列 $P_k$ との行列の積から1ステップ先の劣化区分値の分布ベクトルが得られる。

$$\pi_{t_{k+1}} = \pi_{t_k} P_{t_k} \quad (5)$$

ここで、マルコフ連鎖モデルにおける遷移確率の要素 $(p_{ij})_{k+1}$ は、数多くの実際の点検データから、精度よく同定することが焦点となる。

また、現状における多くの構造物の点検データ等では

数が少なく、加えてその点検間隔が異なる場合も多いため、遷移確率行列を式(1)から直接同定することが難しいが、本研究では表-2 に示す矢板工法の山岳トンネル（約 137 か所）における平成 18 年度～令和 2 年度における 14 回の定期点検値を用いている。

#### 4. 覆工の判定区分値による遷移確率の同定

時間依存型のマルコフ連鎖モデルに対して、矢板トンネルの覆工定期点検より得られる劣化区分値を用いて、マルコフ遷移確率を同定して、現状のトンネル覆工における劣化状態の把握とその予測を試みる。

##### (1) 用いた定期点検データベース

北海道では昭和60年ごろより、山岳トンネルの建設工法はNATMに移行しているが、表-2に示すように現在においても、約140箇所以上の矢板工法により建設された山岳トンネルが供用されている。ここで表-2において、その他は矢板工法とNATMとのハイブリッド工法、もしくは開削工法やプレキャスト工法で建設された山岳トンネルである。

##### (2) トンネル覆工の劣化区分値による遷移確率

矢板工法で建設された山岳トンネルにおいて遷移確率行列の要素をそれぞれ同定するために、供用期間（①20～39年、②40～59年）ごとに観測された劣化区分値を用いて同定した結果を表-3.1および表-3.2に示す。

ただし、矢板工法では、前記したように建設年代と定期点検の開始年度のため、供用年数約20年以前の矢板工法におけるトンネル覆工の定期点検の記録はない。

表-3.1および表-3.2より、供用年数の経過に伴って同一の劣化区分値の停留確率は少なくなり、また劣化が進行する遷移確率が大きくなっており、矢板工法のトンネル覆工においても劣化は進行する傾向を示し、加えて経過時間に伴って劣化遷移の速度は変動している。

具体的には、劣化区分値 I において供用年数20～39年においては劣化区分値 I の状態が、2年後に評価区分値 II bに遷移する確率は0.324となり、劣化区分値 I のままでいる確率は0.591を示している。

次に、供用年数40～59年では劣化区分値 I の状態が、2年後に劣化区分 II bに遷移する確率は0.295を示し、劣化区分値 I のままでいる確率は0.518を示しているが、劣化区分 II aに遷移する確率は0.171と供用年数20～39年より多くなっている。

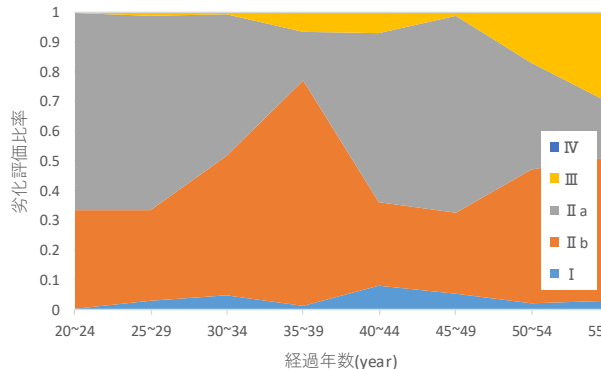


図-5.1 小樽地域における劣化区分値の遷移確率（矢板工法）

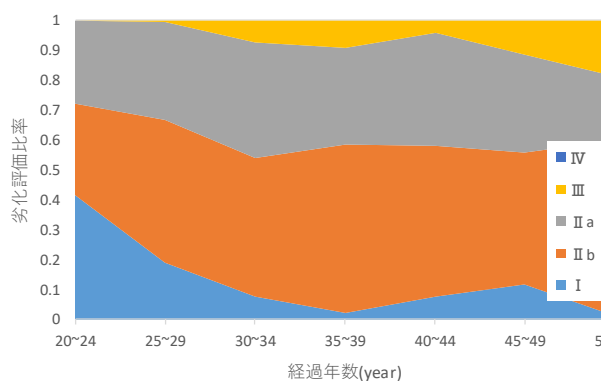


図-5.2 函館地域における劣化区分値の遷移確率（矢板工法）

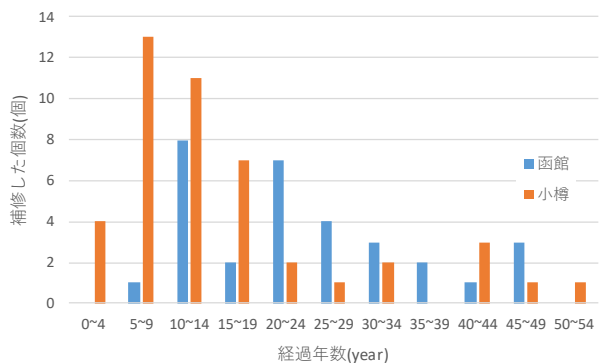


図-6 小樽・函館地域におけるトンネル覆工の補修・補強

加えて、表3.1, 3.2の左下側の部分に示される補修による劣化評価値が向上している同定の結果が見られるため、維持管理台帳を基にした補修効果の修正等が必要となる。

さらに、供用期間ごとの劣化区分値より同定された遷移確率の要素変動を基に、遷移確率の要素をまとめた結果を図-4に示す。ここで、供用年数30年以前における遷移確率は、定期点検値がないためNATMで得られた遷移確率の要素（供用年数5～25年）を参考にしてスムーズ

ングを行っている。

図-4より、矢板工法の山岳トンネルでは、供用年数25年以降において劣化区分値Ⅱbの割合が多くなり、また劣化区分値Ⅱaの比率は少なくなっている。さらに劣化区分値Ⅲ、Ⅳの比率は全体に対して少ない結果が得られている。

これは矢板工法の山岳トンネルにおいては、供用開始から約25年以降において多くの補修や補強工事を実施しているため<sup>2)</sup>、これらよりトンネル覆工の劣化区分値がⅡb程度以上の性能水準に保たれている。

今後、トンネル覆工に対する補修・補強等と劣化区分値の遷移との関係を詳細検討することで、効率的な補修・補強等の維持管理に対する有力な情報が得られると考えられる。

### (3) 地域別の劣化区分値における遷移確率の動向

北海道は、他の本州の地域に比較して冬期の自然環境は極めて厳しく、加えてその面積は大きいこと、各地域でトンネル覆工に対する劣化状況とともに補修・補強などのメンテナンスも異なった対応・対処が必要となる。

そこで本研究では、トンネル覆工の定期点検より得られる劣化区分値から、北海道の各地域におけるマルコフ遷移確率を比較して、地域ごとのトンネル覆工の劣化状況やその動向、さらに地域ごとの劣化性状・特性に合わせた効率的な維持管理を行うために必要な基礎情報の収集を試みた。

ここで、その気象状況や地域や都市の規模・道路の利用状況等、さらに位置するトンネル数等を勘案して、小樽・函館地区における矢板工法のトンネル覆工を対象とした。

ここでトンネル覆工の経過年数に依存する遷移確率行列の要素を同定するために、それぞれの供用期間で、おおむね5年間でまとめて、函館地区では①20～24年、②25～29年、③30～34年、④35～39年、⑤40～44年、⑥45～49年、⑦50年以上、また小樽地域では、⑧50～54年、⑨50年以上を追加)の劣化区分値を用いて各地域の矢板工法のトンネル覆工における遷移確率を同定した結果を図-5.1.5.2に示す。

図-5.1.5.2より、小樽地区の劣化遷移においては定期点検開始の経過年数20～24年では、劣化区分値Ⅱaの割合が多く、Ⅰの割合が少ない結果になっている。また函館地区の遷移確率においては劣化区分値Ⅰ、Ⅱb、Ⅱaの割合は同程度であり、小樽地区に比較して劣化の進行が遅い傾向を示している。さらに、小樽地区では35～39年および50～54年においてトンネル覆工の補修・補強がなされているため、Ⅱbの比率が多くなり、Ⅱaの比率が減少している。

また図-7に示すように小樽地区は函館地区より冬期

表-2 北海道開発局が管理する矢板工法の山岳トンネル数  
(令和2年現在)

地区名	矢板工法	その他
札幌	20	1
函館	34	0
小樽	24	5
旭川	7	4
室蘭	23	1
釧路	0	0
帯広	18	0
網走	2	0
留萌	8	1
稚内	1	0
合計	137	12

表-3.1 矢板工法におけるマルコフ遷移確率行列

(供用年数 20～39年)

	I	Ⅱb	Ⅱa	Ⅲ
I	0.591	0.324	0.085	0.000
Ⅱb	0.018	0.777	0.195	0.010
Ⅱa	0.008	0.040	0.929	0.024
Ⅲ	0.005	0.080	0.053	0.862

表-3.2 矢板工法におけるマルコフ遷移確率行列

(供用年数 40～59年)

	I	Ⅱb	Ⅱa	Ⅲ
I	0.518	0.295	0.171	0.016
Ⅱb	0.014	0.768	0.195	0.023
Ⅱa	0.009	0.034	0.876	0.081
Ⅲ	0.006	0.039	0.051	0.803

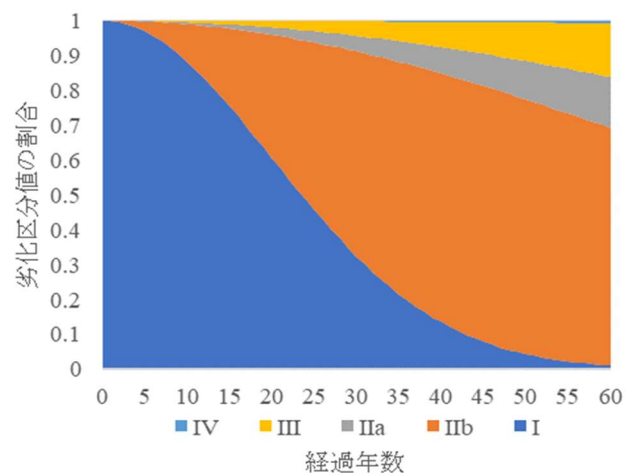


図-4 矢板工法における劣化区分値の遷移確率

の環境特性は厳しいため、矢板工法のような供用期間の長いトンネル覆工等に対する劣化進行の要因になっていると考えられる。

さらに北海道開発局におけるトンネル覆工の維持管理台帳より、各地区におけるトンネル覆工の補修・補強の時期と個所数を図-6に示す。

ここで図-6に示すように小樽地区ではトンネル覆工に対して供用後早い時期（5年目程度）から補修・補強を実施しており、函館地区では供用後10年程度から補修・補強を経年で実施しているのを見てとれる。

ここで、特に小樽地区では経過年数5～10年において補修・補強数が多くなっているが、経過年数20年以降では減少しており、函館地区における補修・補強の傾向と異なるが、それぞれの地区特有の環境等に起因することか、都市の形態や道路の使用状況等に起因するものなのかは、今後の詳細なデータの検討・考察等が必要と考える。

## 5. 矢板工法におけるトンネル覆工の劣化現象

北海道土木技術会（トンネル研究委員会）では、トンネル覆工における劣化状況の把握のために、北海道開発局が建設・管理する主に矢板工法で施工された供用開始から数十年経過したトンネル覆工に対して、中性化深さ・含有塩分（塩化物イオン）濃度などの材料劣化に対する調査・試験結果を実施している。

### (1) 坑口部トンネル覆工における中性化深さ

トンネル覆工に対する冬期の環境劣化は、本州より北海道では厳しく、加えて沿岸部に位置する山岳トンネルでは冬期の季節風による飛来塩分、さらに路面に対して凍結防止剤が散布されるため、坑口部のトンネル覆工（有筋である場合が多い）における飛来塩分量と中性化深さの実態を把握することも、山岳トンネルの劣化状態把握や予測には貴重な資料となる。

そこでトンネル覆工の中性化深さの調査・試験等を行っており、式(6)に示す中性化深度  $C(mm)$  と中性化速度係数  $A$  と経過時間（供用年数） $t$  との関係で整理している<sup>13)14)</sup>など。

$$C = A\sqrt{t} \quad (6)$$

### (2) 中性化深さと供用年数

トンネル覆工供用年数ごと（10年未満と30年以上）の中性化深さ(mm)の関係を図-8に示す。

図-8より、経過年数を経たトンネル覆工では中性化深度は大きくなる傾向を示しているが、ばらつきも大きいいため、さらに多くの調査・試験のデータの詳細な

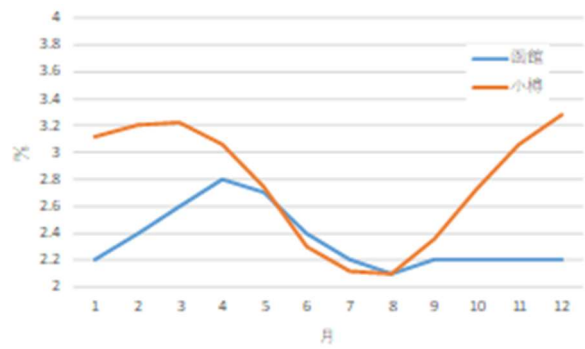


図-7 小樽地区と函館地区の風速（アメダス10年平均値）

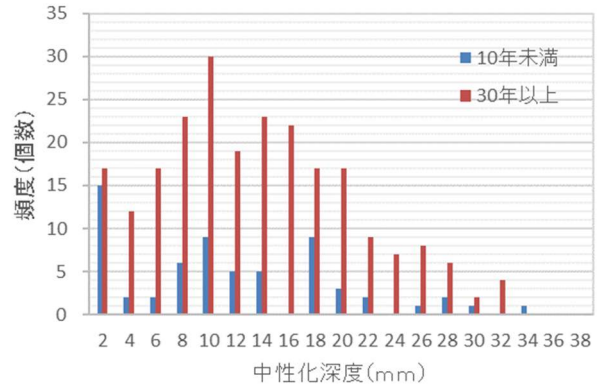


図-8 経過年数ごとの中性化深さ（矢板工法）

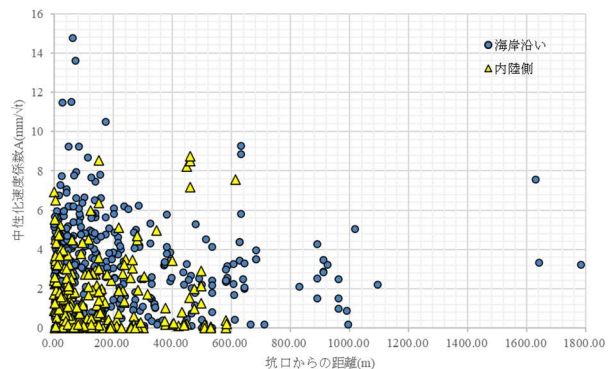


図-9.1 坑口からの距離と中性化速度係数（矢板工法）

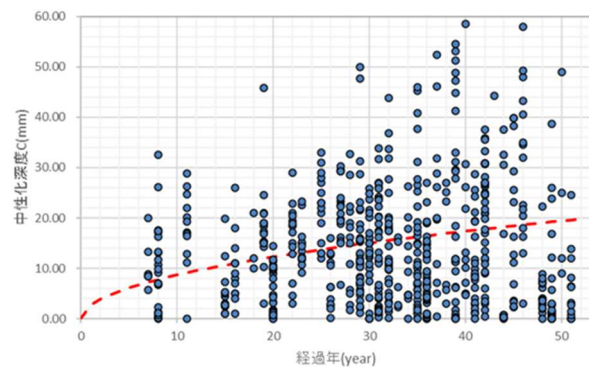


図-9.2 中性化深さとトンネルの経過年数（矢板工法）

検討・考察が必要である。

### (3) 中性化深度係数と坑口からの距離

海岸沿いと内陸側に位置する矢板工法のトンネル覆工における中性化深度係数とトンネル坑口部からの距離との関係を図-9.1, また中性化深度係数とトンネルの経過(供用)年数との関係を図-9.2に示す。

ここで図-9.2における点線は最尤法により推定した平均的な経過年数における中性化深度である。

また図-9.1より, トンネル坑口部からの距離に伴い中性化速度係数は, 沿岸部・内陸部ともに小さくなる傾向を示すが, 沿岸部のほうが坑口部からの距離は大きい値となる。これは沿岸部のトンネルの方が風の吹き込みが強いものと考えられる。

また図-9.2では, 経過年数に伴って中性化深度は大きくなる傾向を示すが, ばらつきも大きいため, これらにおいても詳細な検討・考察には多くの観測データが必要である。

## 6. トンネル覆工の含有塩分(塩化物イオン)濃度

次に, 一般的にコンクリートに含まれる塩化物イオン(塩分濃度)の拡散予測値  $C(x,t)$ は, 覆工コンクリート表面の塩化物イオン濃度  $C_0$ および拡散係数  $D_{ap}$ , 経過時間  $t$ , ばらつきの係数  $\gamma_d$ として, 山岳トンネルの覆工コンクリートに含まれる塩化物イオン濃度  $C_i$ とした式(7)となる<sup>15)19)</sup>など。

$$C(x,t) = \gamma_d \cdot \left[ C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right] + C_i \quad (7)$$

寒冷地の鉄筋コンクリートにおける塩分含有量では, 劣化を促進させる塩化物イオンが, 飛来塩分(主に冬期の季節風など)や凍結防止剤散布など外部環境から供給される場合とコンクリート製造時に材料から供給される場合がある。本研究では, 主に坑口部のトンネル覆工の中性化とともに覆工材料の耐久性の減少を引き起こす可能性があるため調査・試験を実施して, 劣化の傾向の検討を行っている。

### (1) 坑口部距離と含有塩分(塩化物イオン)濃度

矢板工法のトンネル覆工において表面から(0~20mm, 20~40mm, 40~60mm, 60~80mm, 80~100mm)に対する含有塩分(塩化物イオン)濃度の調査を実施している。

まず, 坑口部からの距離(m)とトンネル覆工における表面から深度別の含有塩分(塩化物イオン)濃度との関係を図-10.1に示す。

図-10.1より, 坑口部からの距離(m)にもなって含有

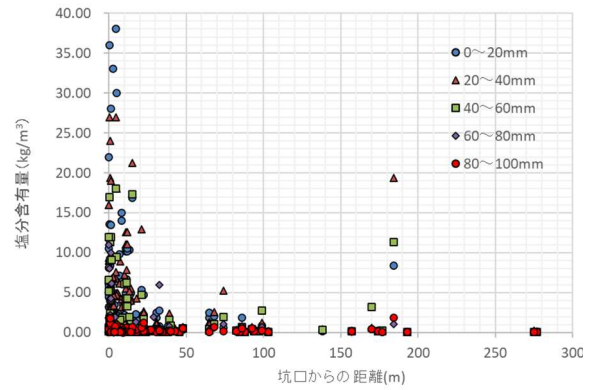


図-10.1 坑口距離と深度別の塩化物イオン濃度

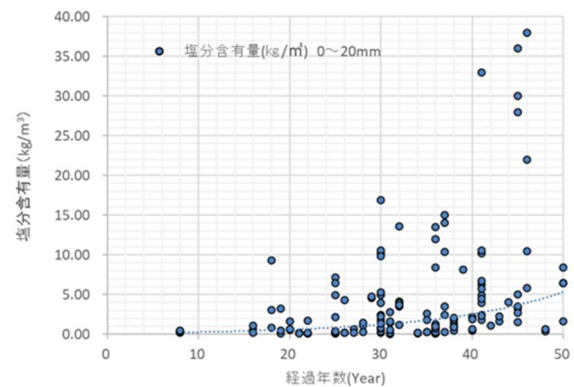


図-10.2 経過年数と含有塩分(塩化物イオン)濃度  
(深度:0~20mm)

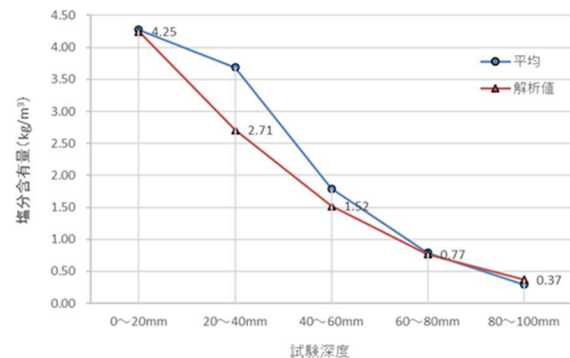


図-11 深度別の平均含有塩分(塩化物イオン)濃度

塩分(塩化物イオン)濃度は急速に小さくなる傾向を示している。

### (2) 経過年数と含有塩分(塩化物イオン)濃度

次に, トンネル覆工の表面部(0~20mm)における含有塩分(塩化物イオン)濃度と経過年数の関係を図-9.2に示す。

図-10.2より, 経過年に伴って覆工コンクリート表面部の含有塩分(塩化物イオン)濃度は大きくなる傾向が

みられ、経過年における塩化物イオンの浸透・濃縮現象の進行が伺える。ここで図-10.2における点線は最尤法により推定した平均的な経過年数における塩化物イオン含有量である。

### (3) 深度別含有塩分（塩化物イオン）濃度の平均値

さらに調査したトンネル覆工における平均含有塩分（塩化物イオン）濃度の式(7)における同定値と実測値を図-11に示す。ここで、調査トンネルにおける平均中性化深さは約15mmである。

図-11より、調査トンネルの平均値においても実測値では深度30mmおよび50mmにおいて含有塩分（塩化物イオン）の濃縮現象が見られ、今回調査した矢板工法のトンネル覆工において中性化深さと塩化物イオンの濃縮による複合劣化の現象が現れているものと考えられる。

## 7. 地域別のトンネル覆工における複合劣化現象

### (1) 地域別の含有塩分（塩化物イオン）濃度

日本海側北部と日本海側南部および日本海側南部と太平洋側西部におけるトンネル覆工の含有塩化物イオン濃度の観測値と理論式(7)による同定値を図-12, 13に示す。

図-12, 13より、日本海側北部ではトンネル覆工の表面部（平均深度10mm）における塩化物イオン濃度が高く、路面への凍結防止剤の散布や冬期の日本海からの季節風による飛来塩分などの影響を受けているが、日本海側北部と南部ではトンネル覆工の表面より平均深さ30mmにおける塩化物イオンの濃縮量は両地区とも同程度である。

また図-13に示すように太平洋側西部では、平均深さ30mmにおける塩化物イオンの濃縮度が大きく、中性化による塩化物イオンの濃縮（複合劣化）現象の進行が大きいのが伺える。

### (2) 環境要因による複合劣化現象について

日本海側の北部と南部における冬期のアメダス風向・風速と路面への凍結防止剤の散布量の比較したものを表-4に示す。

表-4より、冬期の日本海側北部における平均風速は南部より強く、加えて路面の凍結防止剤も多く散布されている。

### (3) 地域における凍結融解の危険度（地域係数）

次に、コンクリート表面部における凍結融解の可能性

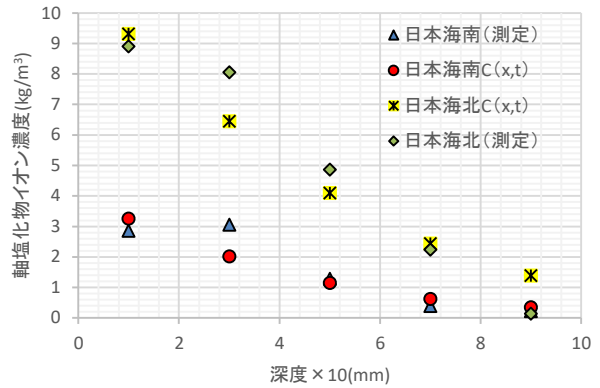


図-12 トンネル覆工の地域別塩化物イオン濃度  
(日本海側北部・日本海側南部)

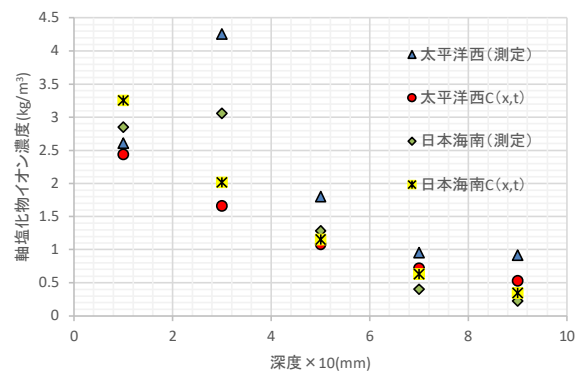


図-13 トンネル覆工の地域別塩化物イオン濃度  
(日本海側南部・太平洋側西部)

表-4 日本海北・南部の風向・風速と凍結防止剤散布量

気象区分	風速(m/s)	風向	凍結防止剤(ton/km)
日本海(北)	6.18	東南東	3.610
日本海(南)	4.4	北西	2.952

表-5 コンクリート表面における凍結融解の可能性  
(地域係数)

気象区分	地域係数	備考
日本海(北)	4.8	最高気温0.0度以上、 最低気温-1.0度以下の 日数：文献3)より
日本海(南)	3.5	
太平洋(西)	6.0	
内陸	7.6	

を式(8)に示す。

$$T = -t_{amin} \left( 1 - \left[ \frac{D_f}{D_w} \right] \right) \quad (8)$$

ここで  $T$  は地域係数,  $t_{a, min}$  は日最低気温の年間極値 (°C),  $D_f$  は凍結持続日数 (日),  $D_w$  は凍結融解総日数 (日) であり, また  $-1.0^\circ\text{C}$  で凍結,  $0.0^\circ\text{C}$  で融解すると仮定しており, 地域係数が大きいほど凍結融解の可能性が大きくなる。

またこの式では特定地域の凍結融解作用に対する指標 (地域係数) <sup>4)</sup> を定義しており, アメダス統計値より求めた各地域の係数を表-5 に示す。

ここで表-5 より, 太平洋側西部において地域係数が大きくなっており, 太平洋側西部ではコンクリート表面における凍結融解の可能性が大きく, マイクロクラックによる損傷危険度が大きいことが分かる。

このように, 矢板工法のトンネルにおける定期点検結果のデータベースを利用して, 北海道における各地域に対するトンネル覆工における劣化の遷移傾向が把握でき, さらに予測が可能となることより, トンネル覆工において適切な性能水準を維持し, さらに将来予測により予防保全を基本としたライフサイクルコスト (LCC) によるトンネル維持管理システム (TMS) の構築と運用が実現されるものと考えられる。

## 8. まとめ

本研究は, 北海道 (寒冷地) における矢板工法のトンネル覆工において効率的かつ現状に即した維持管理の構築を目標として, 定期点検における個々のトンネル覆工のから長期の劣化現象の遷移を求めて, その気象区分ごとにおける経過年数に伴う変動特性の検討を行い, さらにトンネル覆工に対する圧縮強度・中性化深さ・含有塩分 (塩化物イオン) 濃度等の調査・試験を実施し, 以下の結論が得られた。

- 1) 経過年数に伴って遷移する矢板工法におけるトンネル覆工の劣化過程を, 実際に得られているトンネル覆工の定期点検値より, その遷移確率を同定して時間依存を確認し, 同時に現状把握に対して有効性を示した。
- 2) 同定された遷移確率の要素の変動傾向を基に, トンネル覆工における遷移確率の将来予測することができ, このことはトンネル覆工に対する補修・補強等の維持管理に対する有力な情報と考えられる。
- 3) 矢板工法のトンネル覆工では, 中性化による塩化物イオン濃縮による複合劣化の現象が進行しており, それらは冬季の飛来塩分・路面散布の凍結防止剤と気温による凍結融解の地域特性など冬期における地域別の環境差が要因であるとの結論が得られた。

- 4) 矢板工法の山岳トンネルにおいて予防保全を前提とした維持管理の効率的な運用には, 冬期の地域環境を考慮し, 加えてトンネル覆工における中性化や含有塩化物イオンの濃縮などの材料情報も必要不可欠であり, 今後も多くの調査や試験値の蓄積と整理と詳細な分析・考察が必要となる。
- 5) 現状に即した矢板工法の山岳トンネルにおける効率的な維持管理の構築と運用を早急に図るためには, 既存の定期点検データの整理・検討は有効であり, トンネル覆工の性能水準を適切に評価した予防保全を基本としたライフサイクルコスト (LCC) の最適化によるトンネルの維持管理もしくはトンネルマネジメントシステム (TMS) の構築と運用が実現されるものと考えられる。

謝辞: 北海道土木技術会トンネル研究委員会 TMS 分科会に対して, トンネル覆工の定期点検値や補修・補強等の管理履歴の提供等に謝意を表します。

## 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.
- 2) 道路トンネル定期点検要領 (案)・同参考資料: 国土交通省道路局国道課, 平成 14 年 4 月.
- 3) 須藤敦史, 近野正彦, 丸山収, 佐藤京, 西弘明: 寒冷地トンネルの覆工における劣化過程の同定と長期予測, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.20, pp.61-68, 2010.
- 4) 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.
- 5) 菊池, 村上, 石谷: 北海道の豪雨傾向の地域・経年特性について, 第 52 回 (平成 20 年度) 北海道開発技術研究発表会, 2009.
- 6) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領 (案), 土木研究所資料, 第 2651 号, 1988.
- 7) 国土交通省道路局国道課: 道路トンネル定期点検要領 (案), 平成 14 年 4 月.
- 8) 日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, 1993, 11.
- 9) 須藤敦史, 佐藤京, 西弘明: 積雪寒冷地トンネルにおける TMS 構築に関する研究, 土木学会 第 21 回トンネル工学研究発表会論文集, pp.203-208, 2011.
- 10) 武山泰, 嶋田洋一, 福田正: マルコフ連鎖モデルに

- よるアスファルト舗装の破損評価システム, 土木学会論文集, 第 420 号, V-13, pp.135-141, 1990.
- 11) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マ  
ルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計, 土木  
学会論文集 D3, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.
  - 12) 禿和英, 須藤敦史: 寒冷地のトンネル覆工における  
生存率解析による劣化評価, 土木学会, 第 23 回応用  
力学シンポジウム論文集, S05A-04, 2020.
  - 13) 岸谷孝一, 西澤紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性シ  
リーズ(中性化), 技報堂出版, 1986.
  - 14) 須藤敦史, 佐藤京, 五十嵐隆浩: 北海道のトンネルにおける  
覆工コンクリートの劣化調査について, 寒地開発研究会第  
36 回寒地技術論文・報告集, Vol36, CTC20- I -011, pp.55-59, 2020.
  - 15) 酒井秀昭: 凍結防止剤散布地域の橋梁高欄の塩化物イ  
オン濃度の予測手法に関する研究, 土木学会論文集 E  
Vol/66 No.3, pp.268-275, 2010.7.
  - 16) 小林竜太, 井上雅弘, 小田島大, 田口史雄, 嶋田久  
俊: 塩分量調査に基づく道南渡島地方沿岸における  
塩害地域区分の評価, 平成 18 年度, 土木学会北海道  
支部論文報告集, 第 63 号, E-16
  - 17) 河村巧, 須藤敦史, 五十嵐隆浩: 北海道のトンネル覆工  
コンクリートにおける中性化と塩分濃度について,  
土木学会令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学  
術講演会, VI-394, 2020.
  - 18) 河村巧, 近藤祐一郎, 須藤敦史, 五十嵐隆浩, 佐藤京: 北  
海道のトンネル覆工における劣化(中性化と塩分濃度)  
について, 土木学会 令和 2 年度北海道支部年次技術  
研究発表会, F-01, 2021.
  - 19) 河村巧, 須藤敦史, 五十嵐隆浩: 北海道のトンネル覆工  
における複合劣化(中性化・塩分濃度)の地域性に  
ついて, 土木学会, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76  
回年次学術講演会, VI-817, 2021.
  - 20) 禿和英, 須藤敦史: 寒冷地トンネルの覆工コンクリー  
トにおける冬期挙動と経年劣化, 寒地開発研究会, 第  
34 回寒地技術論文・報告集, Vol34, CTC18- I -  
014, pp.69-74, 2018.12.

(2022.8.26 受付)

## A BASIC CONSIDERATION ON DETERIORATION OF COLD REGION TUNNEL LINING FOR MANAGEMENT SYSTEM

Atsushi SUTOH, Hiroaki KANEKIYO, Takashi SATO, Osamu MARUYAMA  
and Hironari DAN

In Hokkaido, more tunnels have passed since its construction, and in the future, construction and operation of maintenance based on preventive maintenance. Therefore, we are investigating the compressive strength, centralization, salinity concentration, etc. of lining concrete for tunnels mainly constructed by the conventional construction method managed by the Hokkaido Development Bureau. In this study, in order to accumulate basic information for the maintenance and management of tunnels, the regionality in the combined degradation of the depth of centralization and the salinity concentration is examined. In this paper, the tunnels of Hokkaido are regionally divisions, and the values of tunnels belonging to inland and coastal areas, as well as each region, are graphed and examined. The purpose is to compare and consider the combined degradation of coastal and inland areas. Also, it is a comparison and consideration of the progress of the compound deterioration by the region. Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of this identification and estimation method for Tunnel Management System.