

東北工業大学審査学位論文（博士）

寒冷地の山岳トンネルにおける覆工コンク
リートの劣化評価に関する研究

2020 年 3 月

東北工業大学大学院
工学研究科
土木工学専攻
禿 和英

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本研究の位置づけ	4
1.3	本論文の構成	8
1.4	本研究の成果の要旨	11
	参考文献	13
第 2 章	山岳トンネルの維持管理における現状と課題	14
2.1	はじめに	14
2.2	山岳トンネルの基本構造	15
2.3	山岳トンネルの点検手法	17
2.4	山岳トンネルの健全性	22
2.5	措置方針	34
2.6	山岳トンネルの維持管理における課題	35
2.7	まとめ	37
	参考文献	39
第 3 章	寒冷地における山岳トンネルの劣化過程	40
3.1	はじめに	40
3.2	寒冷地における覆工コンクリート性状の劣化	41
3.3	寒冷地における山岳トンネル覆工コンクリートの挙動	50
3.4	統計データを用いた寒冷地における山岳トンネルの健全性評価	55
3.5	まとめ	65
	参考文献	67
第 4 章	山岳トンネルにおける確率論に基づいた劣化モデルの提案	69
4.1	はじめに	69
4.2	点検データのデータベース化と数量化	71
4.3	確率論を基礎とした覆工コンクリートの劣化遷移	75
4.4	点検値の指数化（同化）	77
4.5	生存時間解析を用いた劣化モデルの提案	84
4.6	まとめ	91
	参考文献	92

第 5 章 道路構造物の維持管理戦略	94
5.1 はじめに	94
5.2 メンテナンスサイクルの運用	98
5.3 道路構造物の維持管理戦略	101
5.4 まとめ	107
参考文献	108
 第 6 章 結 論	 109
 謝 辞	 112

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

我が国は、戦後の荒廃した国土を復興し先進欧米諸国に追いつくことを目標としてめざましい経済発展を遂げてきた。我が国の社会資本は、高度経済成長期とともに短期間の間に整備されストックされてきた。しかし、近年これらの多くが建設後50年以上を経過し老朽化が大きな問題となっている。平成24年12月に発生した山梨県中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故は記憶に新しく、社会資本を取り巻く衝撃的な事故であった。

社会資本は、これまでメンテナンスフリーで安全と考えられていたが、いくつかの事故などで道路構造物の欠陥が顕在化し、社会資本を適切に維持管理する必要性が強く叫ばれるようになった。このような中で、高度経済成長期に大量に建設された社会資本の多くが、その寿命を迎える時期の到来を迎え、これまでのような新たな社会資本整備の時代から、維持管理・更新の時代への変化の必要性を示唆しているものである。

これまで我が国の道路施設は、高度経済成長期から整備され続け、代表的な施設である道路は平成30年4月1日現在、表-1.1.1に示すとおり1,222,319kmである¹⁾。これらの道路は、仕事や生活等に利用され経済活動等に大きな役割を果たしており、維持管理の重要性が求められる施設といえる。

表-1.1.1 現況の道路延長

道路種別	高速自動車国道	一般国道	都道府県道	市町村道	合計
延長 (km)	9,430	65,950	142,797	1,061,476	1,229,653
割合 (%)	0.7	5.2	11.2	83.0	100

これらの道路には、橋梁、トンネル等の道路構造物があり、橋梁が約72万橋あり、このうち、地方公共団体が管理する橋梁は約66万

橋と9割以上を占めている²⁾。図-1.1.1に年度ごとの橋梁建設数の推移を示す。建設後50年を経過した橋梁の割合は、現在は約27%であるのに対し、10年後には約52%に急増する。図-1.1.1には反映されていない建設年度が不明の道路橋が全国で約23万橋あり、これらの大半が市区町村管理の橋長15m未満の橋梁である。

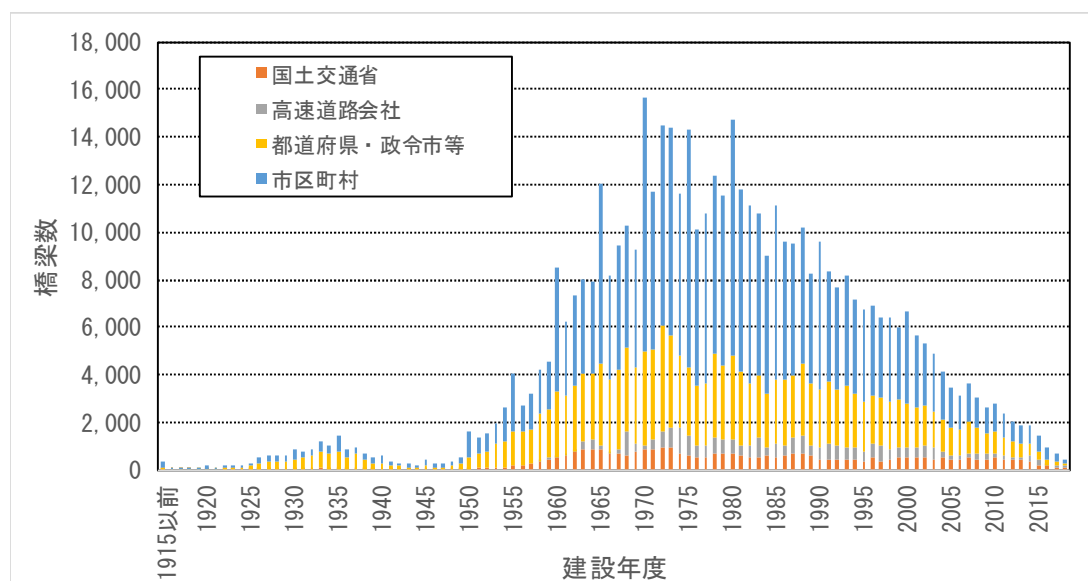


図-1.1.1 年度ごとの橋梁建設数の推移

トンネルについては、約1.1万箇所あり、このうち、地方公共団体が管理するトンネルは約8千箇所と約7割を占めている²⁾。図-1.1.2に年度ごとのトンネル建設数の推移を示す。建設後50年を経過したトンネルの割合は、現在は約21%であるのに対し、10年後には約35%に増加する。図-1.1.2には反映されていない建設年度が不明のトンネルが全国で約400箇所ある。

全国的にみて、高度経済成長期に整備されてきたインフラストラクチャーは老朽化が進行していることが推察される。特に地域・都市間交通の多くを道路に依存している広域分散型の北海道における道路構造物では、厳しい自然環境の中で長い期間の耐用年数が求められている。図-1.1.3は、北海道における年度ごとのトンネル建設

数の推移を示したものであり、約 50%が建設後 30～70 年経過している。このような状況の中で、道路構造物の適切な維持管理を実施していくことが求められ、昨今の社会情勢などから、予防保全を前提とした長寿命化を早急に図らなければならない。

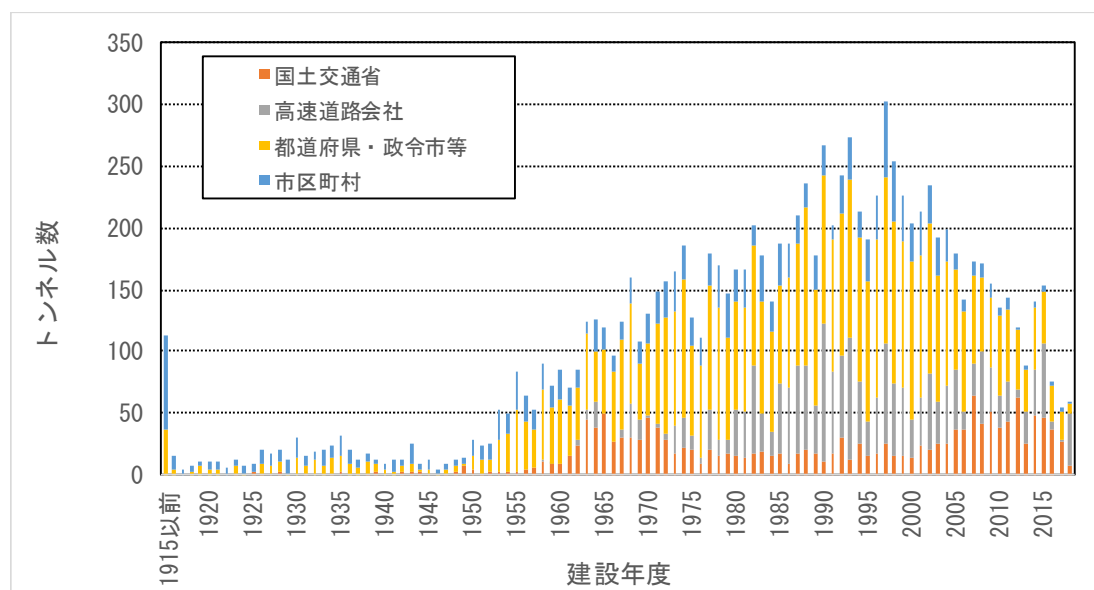


図-1.1.2 年度ごとのトンネル建設数の推移

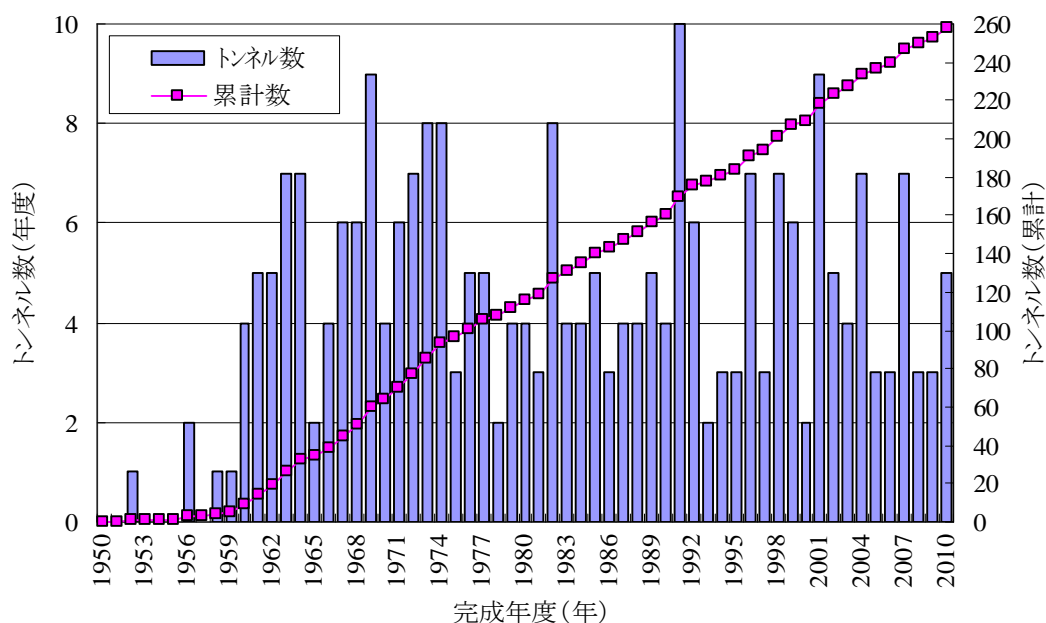


図-1.1.3 北海道における年度ごとのトンネル建設数の推移³⁾

1.2 本研究の位置づけ

少子化、財政健全化等の我が国を取り巻く状況を鑑みると、社会資本ストックに対して、賢く投資・賢く使うことが重要であり、予防保全への転換を早急に図らなければならない。しかし、インフラストラクチャーの維持管理や更新に関する知識・理論や技術などインフラメンテナンส์工学は完全に構築・確立されていないのが現状である³⁾など。このため、今後の維持管理においては、点検やモニタリングに基づく健全性の評価や劣化予測手法など様々な項目の研究・開発が必要となる⁴⁾など。このような状況下、平成25年度には国土交通省が橋梁や山岳トンネルなどの道路構造物に対して、本格的なメンテナンスサイクルに着手⁵⁾し、平成26年度には、国の定める監視および統一的な健全性判定・診断を実施するように具体的な取組みを示している⁶⁾。

一般に山岳トンネルに対する健全性判定は、表-1.2.1に示すようにその劣化状況に対して5段階の判定区分で評価される。このため、山岳トンネルの維持管理は連続的な劣化評価・予測を前提とした予防保全（ライフサイクルマネジメント：LCM）の概念⁷⁾が適用しにくい。山岳トンネルのライフサイクルコスト（LCC）は、計画・設計、建設、維持・管理、解体撤去に至る構造物の一生を通してのコストと定義される。LCMについては、LCCの他に予算の平準化や予算前倒し、環境負荷低減等のマネジメントが含まれる。山岳トンネルのLCMは、LCC算定やコスト平準化等があるが、適切にマネジメントするためには劣化予測を行う必要がある。図-1.2.1は、トンネルが建設されてからの維持管理におけるLCCの概念を示したものである。建設後、トンネルが供用され時間の経過とともに劣化が進行する。要求性能を満足しなくなった時点で対策工（補修や補強）が実施され、機能が回復する。対策後も時間の経過とともに同様なことが繰り返されることとなり、LCCを最小化するためには、劣化進行を適切に評価・予測することが重要である。

ここで、寒冷地における山岳トンネルなどの道路構造物では、寒さによる環境劣化が本州より厳しく、加えてその劣化形態が複雑で、かつばらつきが大きいなどの理由により、供用中の劣化状態の把握やそれらの自然災害リスクを考慮した将来予測は非常に難しいのが現状である⁸⁾。

表-1.2.1 トンネル覆工の健全性判定区分⁸⁾

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	早晚、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に対策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、緊急的に対策を講じる必要がある状態

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、交通開放できない状態までを言う

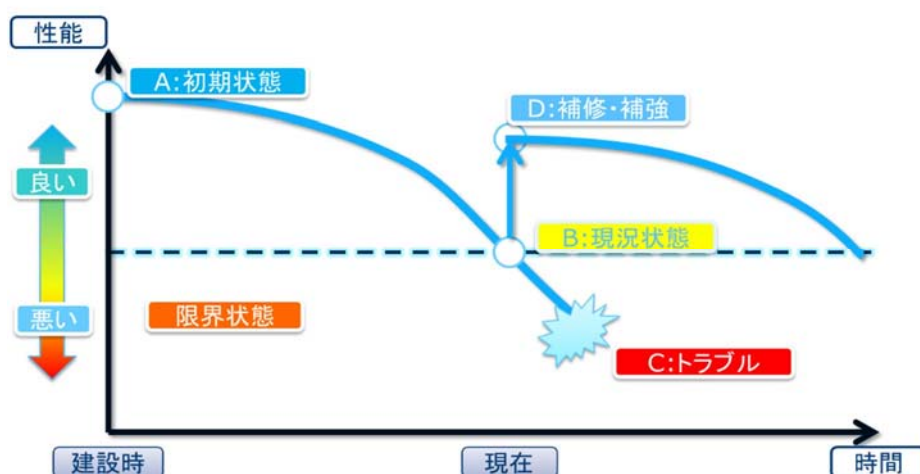


図-1.2.1 構造物における LCC の概念

本研究は、このような現状を踏まえ、寒冷地（北海道）の山岳トンネル覆工コンクリートを対象として、定期点検から得られた結果を

CAD 図や連続的な劣化評価値のデータベースを整備（データ同化）するとともに、これまでに観測・計測された寒冷地における山岳トンネル覆工コンクリートの基本性状（圧縮強度・中性化深度・塩分濃度など）について整理・考察した。

また、土木構造物の劣化過程を連続的に評価するためのモデルについて検討した。土木構造物の劣化現象は、一方向（劣化方向）に遷移していくのが一般的であり、橋梁やボックスカルバートの劣化遷移は対数正規分布に近い分布を示す。確率的な連続劣化モデル（Black Scholes Model）は、確率微分方程式であり、複合 Poisson 過程を導入すると、劣化現象は幾何ブラウン運動モデル（劣化方向のみに遷移）となり、その分布は対数正規分布となる。そこで、本研究では、山岳トンネルにおける覆工コンクリートの劣化現象のモデル化と新たに提案したモデルを用いて既往の点検データに基づく解析に適用し有用性を検証した。

土木構造物の劣化過程に対しては、上記の確率統計的な考え方に基づく連続値による幾何ブラウン運動モデルを構築し、実際の点検値に基づき確率制御理論による保守方策の最適化などについて理論的な検討を行った。さらに、寒冷地（北海道）の山岳トンネルを対象として判定区分値から劣化の把握と予測の簡便化を図るため、連続的な劣化の状態を表す指標の提案とその検証を行った。

山岳トンネルにおける劣化を評価するデータとしては、定期点検データと補修・補強などのトンネル保守履歴（管理台帳など）の2つの管理データがある。これらデータの有効活用を目的として、トンネル寿命を定義するとともに寒冷地（北海道）のトンネル覆工コンクリートにおける劣化の状態や補修・補強履歴の状況を生存率で検討した。この定義した劣化現象において、定期点検データと保守履歴の情報の双方からトンネル覆工における劣化過程の同定を検討しそれらを比較することで本手法における各管理データ（定期点検・保守履歴）の活用法の提案を行い、寒冷地（北海道）における山岳ト

ンネルの効率的な維持管理（予防保全）のための劣化予測の有効性を検証した。

1.3 本論文の構成

本論文は次の6章から構成されている。

第1章 序論

第2章 山岳トンネルの維持管理における現状と課題

第3章 寒冷地における山岳トンネルの劣化過程

第4章 山岳トンネルにおける確率論に基づいた劣化モデルの提案

第5章 道路構造物の維持管理戦略

第6章 結論

本研究の構成は、図-1.3.1のように示され、各章の研究内容を整理すると次のようになる。

第1章では、本研究の背景とその目的、本研究の位置づけおよび本論文の構成、研究内容について述べる。

第2章では、本研究対象の山岳トンネルの基本構造、点検手法、点検結果を受けたトンネルの健全性評価の方法について述べる。点検手法、点検結果を受けた健全性評価については、現在、国土交通省で用いられている手法・評価について示し、山岳トンネル定期点検結果を用いた維持管理の現状と課題について述べる。

第3章では、寒冷地（北海道）における山岳トンネル覆工コンクリートの試験、観測結果から得られた基本性状やひび割れ幅などについて分析・考察するとともに定期点検結果を適切に評価するための留意事項等について整理した。また、道路メンテナンス年報データを用いて、劣化進行に影響を及ぼす指標について検討した。

第4章では、寒冷地（北海道）の山岳トンネルにおいて実施され

た山岳トンネル覆工コンクリートの定期点検データと補修・補強などが主な記録であるトンネル保守履歴（管理台帳など）の2つの管理データに基づき、寒冷地（北海道）の山岳トンネル覆工における総合的な劣化特性の把握やそれらの予測に対する劣化モデルを提案し、既往データに基づき提案モデルの検証を実施した。

第5章では、各自治体での維持管理計画の立案状況を調査し課題を整理する。また、今後、道路構造物の維持管理計画を進めるに当たって、本研究結果を反映し、適切な維持管理を行うための戦略について検討した。

第6章では、本論文の結論をまとめて示し、今後の課題について述べる。

なお、本研究では、以下に示すトンネル点検データを用いた。

- ・平成25年度 トンネル点検報告書, 北海道開発局建設部維持管理課
- ・平成26年度 トンネル点検報告書, 北海道開発局建設部維持管理課
- ・平成27年度 トンネル点検報告書, 北海道開発局建設部維持管理課
- ・平成28年度 トンネル点検報告書, 北海道開発局建設部維持管理課
- ・平成29年度 トンネル点検報告書, 北海道開発局建設部維持管理課
- ・平成30年度 トンネル点検報告書, 北海道開発局建設部維持管理課

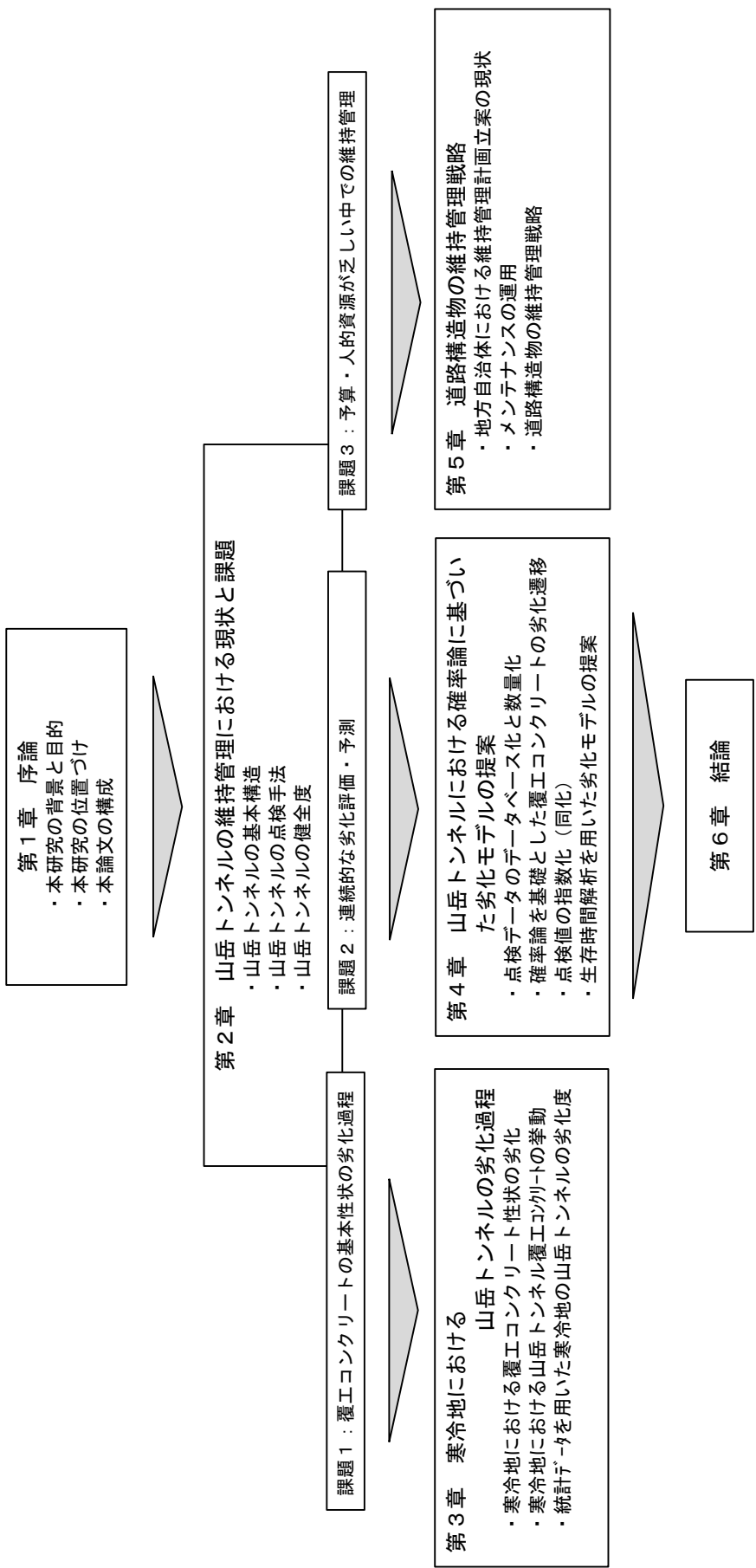


図 -1.3.1 本論文の構成

1.4 本研究の成果の要旨

本研究で得られた成果は各章毎にまとめており、それぞれを総括すると以下の通りである。

第1章では、本研究の背景とその目的および本研究の構成、研究内容について示した。

第2章では、研究の対象とした山岳トンネルの基本構造、点検手法、点検結果を受けたトンネルの健全性評価の方法について述べた。トンネル点検方法については、現在わが国の道路トンネルで実施されている一般的な手法について述べた。また、ひび割れ、浮き・はく落等のそれぞれの変状に対する判定区分を整理するとともに異常個所に対する措置に対して要求される内容を取りまとめた。変状ごとの判定区分および措置の方法等について、留意する事項を整理した。点検データについては、確実に蓄積されているが、これらのデータの活用方法等に課題があることを述べた。

第3章では、北海道の山岳トンネルにおける寒冷地の特性を考慮したメンテナンスや維持管理システムの構築のために蓄積した調査・観測・計測したデータを整理・評価した。寒冷地（北海道）における山岳トンネルの予防保全を前提とした維持管理には、覆工コンクリートにおける坑内温度に関わる挙動や経年的な圧縮強度・中性化深度などの基本性状に関する変化の把握・評価は特に重要である。トンネル覆工のひび割れを定量的かつ正確な点検を実施するには、点検季節の統一もしくは点検時の坑内気温によるひび割れ幅のキャリブレーション(例えば坑内気温 15℃に統一したひび割れ幅を記録)が必要であることを示した。また、トンネルが構築された位置の地質と覆工コンクリートの劣化進行の関係を整理し、地質によって劣化進行が異なることを示した。

第4章では、予防保全への適用を視野に入れ劣化過程を不規則な時間変動を確率過程でモデル化することが可能な Kachanov モデルを用いて連続的に推定した。また、新しく影響係数という考え方を導入し、覆工の劣化に着目した平均的な値である簡易 THI (Tunnel Health Index) を提案した。覆工コンクリートの劣化予測は、簡易 THI における平均値と分散値の時間的な遷移過程を推定することで、長期的な劣化状況の予測は可能である。また、トンネル寿命を定義し、定義した寿命に基づき、寒冷地（北海道）における山岳トンネルの保守履歴データを基づく生存時間解析を適用した結果、求められた生存率曲線は山岳トンネル覆工コンクリートにおける劣化状況、補修・補強を表現できることが分かった。

第5章では、各自治体での維持管理計画の立案状況を調査し課題を整理した。また、今後、道路構造物の維持管理計画を進めるに当たって、本研究結果を反映し、適切な維持管理を行うための戦略を示した。

第6章では、本研究を総括するとともに今後の課題について述べた。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2019 道路の現況, 2019.
- 2) 国土交通省：平成 30 年度道路メンテナンス年報（一巡目）, 2019.
- 3) 社会インフラ維持管理・更新の課題についての対処戦略（案）,（公社）土木学会，社会インフラ維持管理・更新検討タスクフォース，平成 25 年 3 月.
- 4) 特集，インフラの状態評価と将来予測の最前線，土木学会誌，Vol. 98, No. 11, pp. 8-45, 2013.
- 5) 国土交通省（社会資本整備審議会道路分科会）：道路の老朽化対策の本格的実施に関する提言，平成 26 年 4 月 14 日
- 6) 高速道路跨道橋の点検状況について（その 2）, 国土交通省道路課，平成 27 年 5 月 27 日.
- 7) 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ー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.
- 8) 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.

第2章 山岳トンネルの維持管理における現状と課題

2.1 はじめに

トンネル点検は、トンネル構造物を管理する事業者（国土交通省、地方自治体、NEXCO、JR など）ごとに行われている。しかし、同じトンネルであっても事業者間に統一された基準はなく、各事業者において個別の基準が採用されている。これは、事業者ごとのトンネルの用途や置かれる環境などにより特性が異なっているためと考えられる。

本研究では、道路トンネルを対象としていることから、道路トンネル（国土交通省）の維持管理方法について整理を行う。

道路トンネルを管理するための基準、マニュアル類は、道路トンネル維持管理便覧（本体工編）¹⁾、道路トンネル維持管理便覧（付属施設編）²⁾、道路トンネル定期点検要領³⁾、⁴⁾などが挙げられる。

トンネルの維持管理では、メンテナンスサイクル（点検、診断、措置、記録）を確実に実施することが重要であり、維持管理の基本は、安全で安心してトンネルを供用させるための機能を確保することである。このため、トンネル構造物としての安全性、耐久性に影響する変状については、上記の基準類に定められた頻度や方法で点検を実施するとともに、必要に応じて詳細調査を実施し、その結果を定量的、定性的に診断し、適切な措置を講じ、記録、保存することが必要である。また、道路利用者被害の防止の観点から、トンネル本体のみならず、トンネル内に設置されている附属物の取り付け状況等についても点検・措置が必要である。

2.2 山岳トンネルの基本構造

山岳トンネル工法は、矢板工法と NATM (New Austrian Tunneling Method) 工法とに大別できる。矢板（在来）工法は、使用する支保工の材料によって分けられ 1950 年ごろまでは木製支保工、1970 年代前半までは鋼製支保工が用いられてきた。その後、施工方法は、NATM 工法に変遷し、現在では主流の工法である。

北海道における山岳トンネルは、1980 年代前半まで矢板工法（写真-2.2.1 参照）により建設されており、80 年代後半以降は NATM 工法でほとんどの山岳トンネルが建設されている（写真-2.2.2 参照）。NATM 工法導入初期に構築された山岳トンネルは、およそ 30 年程度経過していることになる。



写真-2.2.1 矢板（在来）工法の山岳トンネル施工例（覆工コンクリート打設前）



写真-2.2.2 NATM工法の山岳トンネル施工例（覆工コンクリート打設前）

NATM 工法は、写真-2.2.2 に示すように、掘削直後の地山を鋼製支保工と吹付けコンクリートおよびロックボルトで支保し、防水シート設置後に覆工コンクリートを打設して建設される。北海道では、トンネル坑口部において坑内に吹き込む寒気による覆工コンクリートのひび割れ（凍結クラック）を防止する目的で、一般に吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間に断熱材を施工する（NEXCO 東日本の山岳トンネルを除く）。これは、冬期の地山凍結の影響による覆工コンクリートへの凍害の影響を防止するために断熱材が施工されている。このため、北海道では山岳トンネルにおける冬期の坑内気温は、断熱材の設計にも影響を及ぼす問題である。一方、矢板工法は写真-2.2.1 に示すように、掘削直後の地山を鋼製支保工と矢板で支保し、その後に覆工コンクリートを打設して建設される。矢板工法は、NATM 工法と異なり防水シートを設置していない構造であることから、地山からの湧水は目地部やひび割れから坑内に流れ込んでくる。矢板工法により建設された山岳トンネルは、供用期間が長期になっており、トンネルによっては、湧水によって覆工コンクリートの劣化が進行し維持管理において問題となっているトンネルが確認されている。

2.3 山岳トンネルの点検手法

(1) 点検手法

トンネル定期点検は、トンネル本体工・附属物を対象として「道路トンネル定期点検要領³⁾、⁴⁾」に準じて実施されている。既設トンネルの点検は、一般には、車線規制して車両を供用させながら片側車線ごとに行うことが多い（図-2.3.1 参照）。

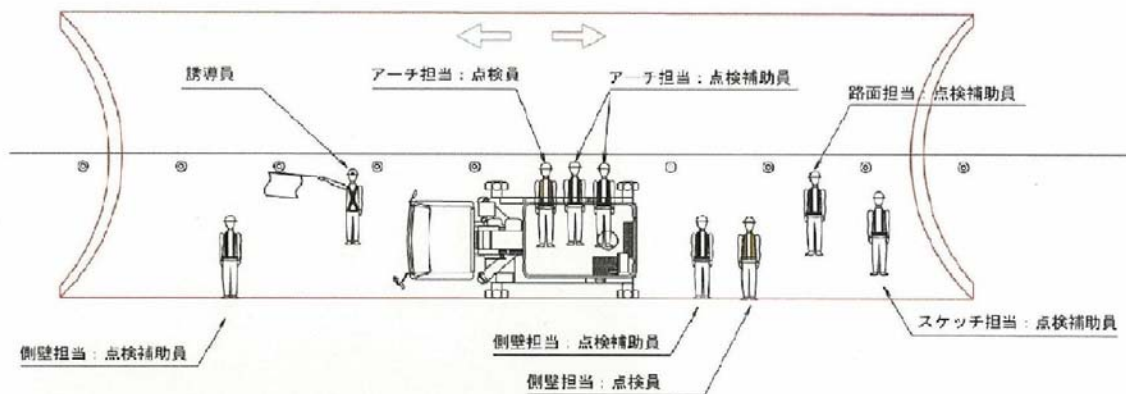


図-2.3.1 トンネル点検概略図

トンネル点検は、高所作業車を用いて近接目視（写真-2.3.1 参照）と必要に応じて触診や打音検査等の非破壊検査等を用いて覆工コンクリートの変状状況を把握する。

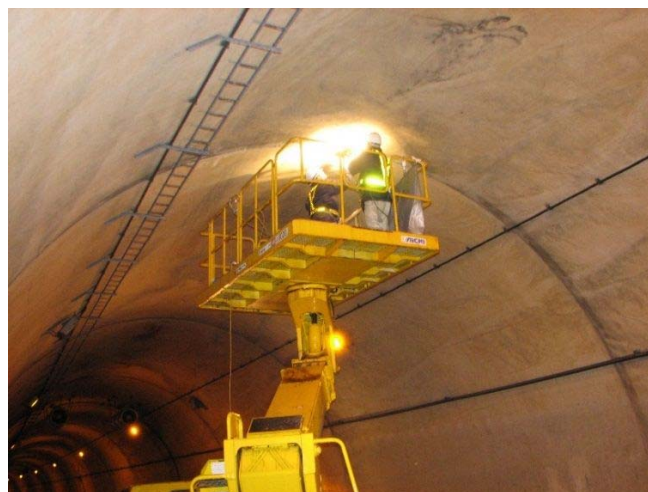


写真-2.3.1 点検作業実施状況

(2) 近接目視点検

近接目視点検にあたっては、コンベックスやクラックゲージを用いて変状規模等の測定を行う。また、漏水箇所ではストップウォッチやメスシリンダー等で1分間当たりの漏水量を測定する。

側壁・路面部の近接目視点検は、目視可能な範囲で路上から実施するが、アーチ部の近接目視点検は、図-2.3.2に示すようにトンネル点検車を用い実施する。

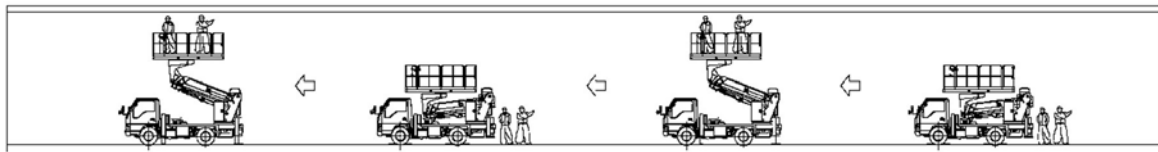


図-2.3.2 トンネル点検車による点検イメージ

(3) 打音検査（写真-2.3.2 参照）

打音検査にあたっては、頭部重量 100～300g 程度の点検用ハンマーを用いて、初回点検では、変状がなくても全面において行う。また、二回目以降の定期点検においては、前回の定期点検で確認されている変状箇所、新たに変状が確認された箇所、対策工が施されている箇所およびその周辺、水平打継ぎ目・横断目地部およびその周辺に対して打診することを基本とし、コンクリートのうき、はく落の有無とその範囲を確認し、緊急性を要するうき、はく落等が確認された場合には叩き落しを実施する。



写真-2.3.2 打音検査および叩き落とし状況実施例

(4) 点検における主な着目点と留意事項

定期点検で着目すべき変状・異常現象の例を表-2.3.1に示す。

表-2.3.1 定期点検で着目すべき変状・異常の例³⁾

定期点検対象	着目すべき変状、異常現象の例
覆工 ^{注1)}	圧ざ、ひび割れ、段差 うき・はく離、はく落 打継ぎ目の目地切れ、段差 変形、移動、沈下 鉄筋の露出 漏水、土砂流出、遊離石灰、つらら、側氷 豆板やコールト ^{ジョイント} 部のうき・はく離、はく落 補修材のうき・はく離、はく落、腐食 補強材のうき・はく離、変形、たわみ、腐食
覆工 ^{注1)} (吹付けコンクリート)	圧ざ、ひび割れ、段差 うき・はく離、はく落 変形、移動、沈下 漏水、土砂流出、遊離石灰、つらら、側氷 豆板部のうき・はく離、はく落 補修材のうき・はく離、はく落、腐食 補強材のうき・はく離、変形、たわみ、腐食
坑門	ひび割れ、段差 うき・はく離、はく落 変形、移動、沈下 鉄筋の露出 豆板やコールト ^{ジョイント} 部のうき・はく離、はく落 補修材のうき・はく離、はく落、腐食 補強材のうき・はく離、変形、たわみ、腐食

注1) はく落防止対策工、漏水対策工等の補修・補強材を含む

また、道路トンネルには施工法等により、類似した変状が発生する箇所がある。この特徴を踏まえた主な着目点と留意事項の例を表-2.3.2に示す。

表-2.3.2 (1) 点検時の着目点に対する留意事項³⁾

主な着目点		着目点に対する留意事項
覆工の目地 及び 打継ぎ目		<ul style="list-style-type: none"> ・覆工の目地及び打継ぎ目は、コンクリート面が分離された部分であり、周辺にひび割れが発生した場合、目地及び打継ぎ目とつながりコンクリートがブロック化しやすい。 ・覆工の型枠解体時の衝撃等により、目地及び打継ぎ目付近にひび割れが発生することがある。 ・覆工の横断目地付近に温度伸縮等により応力が集中し、ひび割れ、うき・はく離が発生することがある。 ・施工の不具合等で段差等が生じた箇所をモルタルで補修することがあり、モルタルや事後の補修モルタルがはく落することがある。 ・覆工が逆巻き工法で施工されたトンネル※は、水平打継ぎ目にモルタルを施工することがあり、モルタルや事後の補修モルタルがはく落することがある。
		※矢板工法は横断目地だけではなく、水平打継ぎ目に留意する。
覆工の天端付近		・覆工を横断的に一つのブロックとしてとらえると、天端付近はブロックの中間点にあたり、乾燥収縮及び温度伸縮によるひび割れが生じやすい。
覆工スパンの 中間付近		・覆工スパンの中間付近は乾燥収縮及び温度伸縮によるひび割れが発生しやすい。
顕著な 変状の 周辺	ひび割れ箇所	・ひび割れの周辺に複数の別のひび割れがあり、ブロック化してうき・はく離が認められる場合がある。
	覆工等の変色箇所	・覆工表面が変色している場合は、観察するとひび割れがあり、そこから遊離石灰や錆汁等が出ている場合が多い。その周辺を打音検査するとうき・はく離が認められる場合がある。

表-2.3.2 (2) 点検時の着目点に対する留意事項³⁾

主な着目点		着目点に対する留意事項
顕著な変状の周辺	漏水箇所	・覆工表面等に漏水箇所や漏水の跡がある場合は、ひび割れや施工不良（豆板等）があり、そこから水が流れ出している場合が多い。その付近のコンクリートにうき・はく離が生じている場合がある。
	覆工の段差箇所	・覆工表面に段差がある場合は、異常な力が働いた場合や施工の不具合等、何らかの原因があり、構造的な弱点となっている場合がある。
	補修箇所	・覆工の補修は、覆工コンクリートと別の材料であるモルタル、鋼材、繊維シート、その他を塗布または貼り付けて補修した場合が多く、容易に判別できる。これらの補修箇所は補修材自体、または、接着剤が劣化して不安定な状態になっていたり、変状が進行して周囲にうき・はく離が生じている場合がある。
	コールドジョイント付近に発生した変状箇所	・コールドジョイントは施工の不具合でできた継ぎ目である。コールドジョイントの付近にひび割れが発生しやすいので、コンクリートがブロック化することがある。特にコールドジョイントが覆工の軸線と斜交する場合は、薄くなった覆工コンクリート表面にひび割れが発生し、はく落しやすい。また、せん断に対する抵抗力が低下する原因となる。
附属物		<p>・トンネル内附属物本体やその取付部材について固定するボルトの緩みや部材の腐食等が発生した場合、附属物本体の落下につながるおそれがある。</p> <p>・アンカーボルト付近に生じた覆工コンクリートのひび割れが脱落の原因となるおれがある。</p>

2.4 山岳トンネルの健全性

変状等の健全性の診断は、道路トンネルの状態の把握と次回定期点検までの間の措置の必要性について、“状態の把握”及び“対策区分の判定”に基づき、表-2.4.1に示す健全性の判定区分を用いて行う³⁾。ここで、各変状に対しては、表-2.4.2の対策区分による判定が5段階で行われる。表-2.4.1においては、表-2.4.2のⅡbとⅡaを併せてⅡとして取り扱うが、対策区分の判定は必要となる措置を想定して行っているため、実際の措置は対策区分の判定結果も考慮して検討することとなる。また、健全性の診断は、「変状等の健全性の診断」を実施後に構造物単位で実施する「道路トンネル毎の健全性の診断」の2段階で行う。

表-2.4.1 健全性の判定区分³⁾

区分		定義
I	健全	道路トンネルの機能に支障が生じていない状態。
II	予防保全段階	道路トンネルの機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III	早期措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
IV	緊急措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

トンネル本体工の対策区分は、トンネルの変状・異常が利用者に及ぼす影響を詳細に把握し、適切な措置を計画するために行うものであり、点検・調査実施後に変状等に対して判定を行う。変状状況の把握に基づき、変状・異常を判定の単位とし、健全性を診断する。

表-2.4.2 対策区分^{3)、4)}

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		早晚、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に対策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。

変状の種類や変状区分を判定する上での指標は、表-2.4.3 に示す項目である。それぞれの項目を評価し、交通状況、現地状況や地山状況等を総合的に評価し健全性を判定する。

表-2.4.3 変状種類及び変状区分との関係^{3)、4)}

変 状 種 類	変 状 区 分		
	外 力	材質劣化	漏 水
① 圧ざ、ひび割れ	○	○	
② うき、はく離	○	○	
③ 変形、移動、沈下	○		
④ 鋼材腐食		○	
⑤ 有効巻厚の不足または減少		○	
⑥ 漏水等による変状			○

(1) 圧ざ、ひび割れに対する判定

圧ざ、ひび割れに対する判定は、表-2.4.4 に示す判定区分を参考にして行う。

ひび割れ発生の原因は、外力のほか材質劣化があるが、外力による場合には圧ざ(断面内で圧縮による軸力と曲げモーメントの影響が顕著に現れ、トンネルの内側が圧縮によりつぶされるような状態で損傷等を生じる状態)が生じたり、ひび割れが進行した場合、構造物の機能低下につながる。このため、外力がひび割れの要因として考えられる場合には、一般にⅡb以上の判定となる。

表-2.4.4 圧ざ、ひび割れに対する判定区分^{3)、4)}

区 分		定 義
Ⅰ		ひび割れが生じてない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱ b	ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱ a	ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、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		ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要がある状態

なお、矢板工法において、ひび割れの進行の有無が確認できない場合には、ひび割れ規模(幅や長さ)等に着目した対策区分の目安例として、表-2.4.5 が示されている。

表-2.4.5 点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の判定の目安例^{3）、4）}

対 象 箇 所	部 位 区 分	ひび割れ						判 定 区 分
		幅			長 さ			
		5mm 以 上	3～5 mm	3mm 未 満	10m 以 上	5～10 m	5m 未 満	
覆 工	断 面 内			○	○	○	○	I ～ II a※
			○				○	II a
			○			○		III
			○		○			III
		○					○	II b～III
		○				○		III
		○			○			IV

※補足）3mm 未満のひび割れの場合の判定例を下記に示す。

I、II b：ひび割れが軽微で、外力が作用している可能性が低く、ひび割れに進行が確認できないもの

II a：地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合。なお、地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用が明らかに認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うのが望ましい。

調査の結果、ひび割れの進行が確認された場合についての判定の目安例を表-2.4.6 に示す。

表-2.4.6 調査の結果、ひび割れの進行が確認された場合の判定の目安例^{3）、4）}

対 象 箇 所	部 位 区 分	ひび割れ				判 定 区 分
		幅		長 さ		
		3mm 以上	3mm 未 満	5m 以上	5m 未 満	
覆 工	断 面 内		○	○	○	Ⅱ a～Ⅲ
		○			○	Ⅲ
		○		○		Ⅳ

なお、表-2.4.6 は判定の目安例として示されたものであり、機械的に適用するのではなく、現場の状況に応じて判定を行うことに留意する。

(2) うき、はく離に対する判定

うき、はく離に対する判定は、表-2.4.7に示す判定区分を参考に行う。

うき・はく離部の落下の危険性は、ひび割れ等の状況や打音異常の有無で判断する。また、判定に際しては、外力によるひび割れ等によって発生したうき・はく離については変状区分の外力として、同じく材質劣化によるひび割れ等によって発生したうき・はく離については変状区分の材質劣化として判定する。

表-2.4.7 うき、はく離に対する判定区分^{3)、4)}

区 分		定 義
I		ひび割れ等によるうき、はく離の兆候がないもの、またはたたき落としにより除去できたため、落下する可能性がなく、措置を必要としない状態
II	II b	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき、はく離の兆候があり、将来的に落下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	II a	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき、はく離の兆候があり、将来的に落下する可能性があるため、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		ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき、はく離等がみられ、落下する可能性があるため、早期に対策を講じる必要がある状態
IV		ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき、はく離等が顕著にみられ、早期に落下する可能性があるため、緊急に対策を講じる必要がある状態

対策区分がII b～IVに対する対策区分の目安例を表-2.4.8に示す。なお、うき・はく離の判定は、打音検査時にたたき落としを行った後に実施する。

表-2.4.8 うき、はく離等に対する判定の目安例

対象 箇所	部位 区分	ひび割れ等の状況	打音異常	
			有	無
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても閉合の恐れがない	Ⅱ b	
		ひび割れ等は閉合してはいないものの、ひび割れの進行により閉合が懸念される	Ⅲ	Ⅱ b
		ひび割れ等が閉合しブロック化している	Ⅳ	Ⅱ b～ Ⅲ
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化している	Ⅲ～Ⅳ	Ⅱ b～ Ⅲ
		覆工コンクリートや骨材が細片化している、あるいは豆板等があり材質劣化している	Ⅲ～Ⅳ	Ⅱ b～ Ⅲ

補足 1) ブロック化とは、ひび割れ等が単独またはひび割れと目地、コールドジョイント等で閉合し、覆工が分離した状態をいう

補足 2) 打音異常が認められない場合、判定区分Ⅱ b によることを基本とするが、下記の場合は判定区分Ⅱ a またはⅢとする等を検討することが望ましい。

- ・ブロック化の面積が大きい場合
- ・ひび割れの発生状況から落下の危険性が考えられる場合
- ・ブロック化が進行している場合
- ・劣化要因が明確な場合や寒冷地等の厳しい環境条件下にある場合

補足 3) 補修材等のうき・はく離については、本体工に生じるうきに比べてその厚さが薄いことが多いため、発生位置等を考慮し、判定することが望ましい。

(3) 変形、移動、沈下に対する判定

変形、移動、沈下に対する判定は、表-2.4.9に示す判定区分を参考にして行う。

トンネルの変形、移動、沈下については変形速度が目安となる。変形速度の対策区分がⅡb～Ⅳに対する対策区分の目安例として、表-2.4.10に示す。ただし、変形速度のみでは構造体の残存耐力を一義的に判断できないため、変形速度が比較的ゆるやかな場合、画一的な評価をとることが難しく、変状の発生状況や、発生規模、周辺の地形・地質条件等を勘案し、総合的に判断する必要があることに留意する。

表-2.4.9 変形、移動、沈下に対する判定区分^{3)、4)}

区 分		定 義
Ⅰ		変形、移動、沈下等が生じていない、またはあっても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱ b	変形、移動、沈下等しており、その進行が停止しているが、監視を必要とする状態
	Ⅱ a	変形、移動、沈下等しており、その進行が緩慢であるため、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		変形、移動、沈下等しており、その進行がみられ、構造物の機能低下が予想されるため、早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		変形、移動、沈下等しており、その進行が著しく、構造物の機能が著しく低下しているため、緊急に対策を講じる必要がある状態

表-2.4.10 変形速度に対する判定の目安例³⁾、⁴⁾

対象箇所	部位区分	変形速度				判定区分
		10mm/年以上 (著しい)	3～10mm/年 (進行がみられる)	1～3mm/年 (進行がみられる～緩慢)	1mm/年未満 (緩慢)	
覆工	断面内				○	Ⅱ b～Ⅱ a
				○	○	Ⅱ a
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

※補足) 変形速度 1～3mm の場合の判定例を下記に示す。

Ⅱ a : 将来的に構造物の機能低下につながる可能性が低い場合

- ・変形量自体が小さい場合
- ・変形の外的要因が明確でない、または進行も収束しつつある場合

Ⅲ : 将来的に構造物の機能低下につながる可能性が高い場合

- ・変形量自体が大きい場合
- ・地山からの荷重作用が想定される場合（変形方向が斜面方向と一致する等）

(4) 鋼材腐食に対する判定

覆工の補修対策等で用いられている鋼材において、鋼材腐食に対し、表-2.4.11に示す判定区分を参考にして行う。

坑門コンクリートのように、構造部材として鋼材が計算に基づき使用されている場合、また、坑口部で構造鉄筋が使用されている場合は、その影響を考慮して判定する必要がある。

表-2.4.11 鋼材腐食に対する判定区分^{3)、4)}

区 分		定 義
I		鋼材腐食が生じていない、またはあっても軽微なため、措置を必要としない状態
II	II b	表面的あるいは小面積の腐食があるため、監視を必要とする状態
	II a	孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため、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		腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が損なわれているため、早期に対策を講じる必要がある状態
IV		腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が著しく損なわれているため、緊急に対策を講じる必要がある状態

(5) 漏水等による変状に対する判定

漏水等による変状の判定に関しては、表-2.4.12 に示す判定区分を参考にして行うものとする。

漏水等による変状について、対策区分がⅡb～Ⅳに対する対策区分の目安例として表-2.4.13 に示す。

漏水範囲の拡大や漏水量の増加は、覆工コンクリート背面の地山の緩みや降水量の増加と関連がある。特に前者の場合は地山の緩みの増加によって透水のしやすさが促進したり、地山が浸食されたりするケースがあるので、突発性の崩壊の防止をはかる観点から検討及び判定することが必要である。

表-2.4.12 漏水等の変状に対する判定区分^{3)、4)}

区 分		定 義
Ⅰ		漏水がみられないもの、または漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	コンクリートのひび割れ等から漏水が浸出しており、利用者の安全性にはほとんど影響がないが、監視を必要とする状態
	Ⅱa	コンクリートのひび割れ等から漏水の滴水があり、将来的に利用者の安全性を損なう可能性のあるもの、または、排水不良により、舗装面に滞水を生じるおそれのあるため、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		コンクリートのひび割れ等から漏水の流下があり、または、排水不良により舗装面に滞水があり、利用者の安全性を損なう可能性のあるため、早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		コンクリートのひび割れ等から、漏水の噴出があり、または、漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり、寒冷地において漏水等により、つららや側氷等が生じ、利用者の安全性を損なうため、緊急に対策を講じる必要がある状態

表-2.4.13 漏水等による変状に対する判定の目安例³⁾、⁴⁾

箇所	主な現象	漏水の度合				利用者への影響		判定区分
		噴出	流下	滴水	浸出 (にじみ)	有	無	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱ b
				○		○		Ⅱ a
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱ b
						○		Ⅲ～Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱ b
				○		○		Ⅱ a
			○			○		Ⅱ a
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱ b
						○		Ⅲ～Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱ b
						○		Ⅲ～Ⅳ
	滞水						○	Ⅱ b
						○		Ⅲ～Ⅳ
	凍結						○	Ⅱ b
						○		Ⅲ～Ⅳ

補足) 土砂流入等による排水機能の低下が著しい場合、路面・路肩の滞水による車両の走行障害が生じている場合、路床路盤の支持力低下が顕著な場合、舗装の劣化、氷盤の発生、つらら、側氷等による道路利用者への影響が大きい場合は判定区分を1ランク上げて判定することが望ましい。また、判定にあたっては、降雨の履歴や規模、及び部位区分の影響を考慮し判定することが望ましい。

2.5 措置方針

(1) 措置概要

措置は、表-2.5.1に示すように適用する対策の効果と持続性、即応性、点検後に行われる調査の容易性等から、対応（応急対策および本対策）、監視に区分して取り扱われている。

本対策とは、中～長期的にトンネルの機能を回復・維持することを目的として適用する対策である。また、応急対策とは、定期点検等で利用者被害が生じる可能性が高い変状が確認された場合、調査や本対策を実施するまでの期間に限定し、短期的にトンネルの機能を維持することを目的として適用する対策である。

表-2.5.1 判定区分措置内容の目安^{3）、4）}

区 分		措 置 内 容
Ⅰ：健全		—
Ⅱ	Ⅱb：予防保全段階	監視（日常巡視による状況把握）
	Ⅱa：予防保全段階	監視（重点的な監視）もしくは計画的な対策
Ⅲ：早期措置段階		本対策もしくは重点的な監視
Ⅳ：緊急措置段階		応急対策＋本対策

(2) 監視内容

監視は、応急対策工を実施した箇所、もしくは健全性の診断の結果、当面は応急対策や本対策の適用を見送ると判断された箇所に対し、変状の挙動を追跡的に把握するために行う。

覆工スパン毎の健全性の診断で「Ⅱ」および「Ⅲ」判定の覆工スパンは、調査結果や変状等の健全性の診断結果を踏まえ、適切な手法にて監視を行うものとする。変状等の健全性の診断結果がⅡaおよびⅢの箇所における重点的な監視とは、前回定期点検または監視から2年後を目安に近接目視点検を行うことを基本とする。

Ⅱbの箇所における監視とは、日常巡視等で状況を把握することに努めることを基本とする。

2.6 山岳トンネルの維持管理における課題

国や地方自治体、NEXCO、JR 各社など山岳トンネルの各管理者では、トンネル点検結果の他に、表-2.6.1（北海道開発局の事例）に示すようなトンネルの構造体の諸元や付属構造物（路面舗装、照明・避難設備など）に対する補修・補強などの保守履歴を、トンネル覆工コンクリートの定期点検の開始以前から保存・管理しているのが一般的である。

表-2.6.1 トンネル構造体や付属構造物に対する補修・補強などの管理記録表（例）

トンネル名	延長 (m)	幅員 (m)	建築 限界高 (m)	トン ネル 等級	竣工 年月	壁面 区分	路面 種別	照明(灯)		歩 道 (管査路)	非常用 施設	補 修 履 歴
								種類	数量			
Aトンネル(上り)	747	(10.75) 7.0	4.7	B	H3.3	覆工	Co	ナトリウム	193	0.75+2.0	有り	H2 ラジオ再放送施設 H8 無線通信補助設備 H9 通信補助、ラジオ再放送 H17 内面補強 H20 白色機能性砕石マスキング舗装
Aトンネル(下り)	671	(10.75) 7.0	4.7	B	H10.3	覆工	Co	ナトリウム	200	0.75+2.0	有り	H1 漏水防止 H9 通信補助 H20 白色機能性砕石マスキング舗装
Bトンネル	464	(8.5) 6.5	4.5	C	S44.3	覆工	Co	ナトリウム	218	0.75×2.0	有り	H5 照明取替(120灯増) H7 ラジオ再放送施設 S53 舗装打替 H20 非常用施設更新 H27 面導水、繊維シート接着、耐火防護補修 H28 白色SMA舗装
Cトンネル	75	(7.0) 6.5	4.5	D	S39.9	覆工	Co	ナトリウム	47			H25 断面補修 H26 剥落防止 H28 断面修復、剥落対策(繊維シート)、ひび割れ補修、 面導水補修、裏込注入

しかし、山岳トンネル覆工コンクリートにおける補修・補強等の保守履歴は、定期点検の実施以前のトンネル構造物の劣化状況を知り得る貴重な情報であるにも関わらず、有効に活用されていないため、多様かつ大量の管理データを活用した維持管理の高度化がなされていないのが現状である⁵⁾など。

加えて、北海道のような寒冷地では山岳トンネル覆工の環境劣化は、本州の他地域より厳しく、さらにその劣化形態が複雑（周辺地山の凍害等の影響）でかつばらつきが大きいなどの理由により、山岳トンネルに対する劣化状態の把握やそれらの予測には、多様な点検・管理・保守データの情報による検討が重要となる⁶⁾。

山岳トンネルの維持管理における課題には、点検技術者や点検員の経験や能力の個人差による人為的判断差による健全性の評価や変状展開図の精度などの点検方法や点検結果の評価にかかわるものが

ある。一方、点検結果や試験・調査結果、さらに補修・補強等の保守履歴の大量のデータが蓄積されているものの、それらのデータを有効に活用されていない。これを踏まえ、今後、これらの蓄積されたビッグデータを用いた効率的・効果的な予防保全を可能とする劣化予測手法を早期に確立する必要がある。

2.7 まとめ

本章では、トンネル点検方法や点検結果に対するそれぞれの変状や措置に対して要求される内容を取りまとめた。点検時、変状種類の判定時および措置の方法等について、留意する事項を以下に整理しまとめとする。

- (1) ひび割れは、トンネル構造に影響を及ぼすことが考えられ点検時においてその把握は非常に重要である。
- (2) ひび割れ幅 3mm 以上を正確に測定することが、点検において重要である。
- (3) ひび割れの進行性の把握は特に重要である。基本的には点検時において幅や長さの確認を行い、圧ざやせん断ひび割れを伴う重視すべきひび割れを対象として、モニタリング等を実施するのが望ましい。
- (4) うき、はく離の把握には、打音検査が最も重要であり、確実に打音検査を実施する。
- (5) うき、はく離が発見された際には、可能な限り確実にたたき落としを行い、落とせない場合は応急対策の提案を行う（ネット工等）。
- (6) 定期点検では、「変形、移動、沈下」、「巻厚不足・背面空洞」等を把握することは困難であることから、道路利用者への影響が考えられる場合には早期に詳細調査を実施し、対策を検討する必要がある。
- (7) 変形、移動、沈下においては、周辺に発生しているひび割れなどとの関連性も考慮し、管理者に報告を行った後に、調査・測量の実施について検討すべきである。
- (8) 漏水の状況を把握するのは点検で十分であるが、季節変動（渇水期、非渇水期）等も考えられるため、滴水以上の漏水に対しては、流量を測定するのが望ましい。
- (9) 漏水がコンクリートへ悪影響を及ぼす可能性がある際には、水質調査などによる検証が必要である。

- (10) 外力が伴う変状（ひび割れ、うき、はく離、変形、移動、沈下、巻厚不足・背面空洞、巻厚不足の減少、漏水）はそれぞれが関連することが多く、地域、地形、地質などの条件が複合的に作用している可能性も考えられる。このため、追加調査等を行い総合的な知見に基づき判断する必要がある。
- (11) 応急措置については、緊急時には点検時にハンマーによるたたき落とし、ボルトの締め直し等を行い、管理者に報告を行う。また、点検時に対応できない損傷等については、管理者に報告するとともに、応急対策の必要性について早期に検討することが重要である。
- (12) II 判定とされた事象については、2 年以内の近接目視が原則であることを踏まえ、計画的に点検を実施する必要がある。
- (13) 点検結果、措置結果は、確実に記録し今後の維持管理に役立たせるように保管する。

【参考文献】

- 1) 道路トンネル維持管理便覧（本体工編），（社）日本道路協会，H27.06.
- 2) 道路トンネル維持管理便覧（付属施設編），（社）日本道路協会，H28.11.
- 3) 道路トンネル定期点検要領，国土交通省 道路局，H31.02.
- 4) 道路トンネル定期点検要領，国土交通省 道路局 国道・技術課，H31.03.
- 5) 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.
- 6) 禿和英，須藤敦史，佐藤京：寒冷地（北海道）トンネルにおける維持管理を目的とした覆工コンクリート性状の観測・調査結果に基づく一考察（公社）日本コンクリート工学会「コンクリート工学年次論文集」，Vol.41，No.2，pp.1381-1386，2019.7.

第3章 寒冷地における山岳トンネルの劣化過程

3.1 はじめに

これまでの道路構造物点検は、ルーチン作業として実施され、劣化が顕著に現れている箇所において対症療法的に修繕するのが一般的であった。点検要領の作成、データベースの構築、技術開発の推進など個別に行われてきたものの、全体を俯瞰した枠組み、総合的なマネジメントシステムの構築については検討が遅れていた。

このような中で、社会資本ストックの事故や障害が話題になったことや社会資本を次世代に継承するために、平成26年4月に社会資本整備審議会道路分科会から「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言¹⁾」が示され道路構造物のメンテナンスに関する重要性が再認識されている。

一般に山岳トンネルに対する健全性は、第2章で述べたように劣化状況に対して5段階の判定区分で評価される。このため、現時点における判定区分では、連続的な劣化評価・予測を前提とした予防保全の概念²⁾などが適用しにくい。また、寒冷地（北海道）の山岳トンネルにおいては、供用中における冬期の厳しい自然環境により、覆工コンクリートや周辺地山の劣化進行は、他の本州の地域に比べてさらに進行しており、加えてそのばらつきも大きくなると考えられる。このようなことから、本章では、寒冷地（北海道）における山岳トンネル覆工コンクリートの試験、観測結果から得られた基本性状やひび割れ幅などについて分析・考察するとともに定期点検結果を適切に評価するための留意事項について検討した。また、道路メンテナンス年報データを用いて、劣化進行に影響を及ぼす指標について検討した。

3.2 寒冷地における覆工コンクリート性状の劣化³⁾

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの基本性状（圧縮強度・中性化深さ・塩分濃度など）は、経過（供用）年数にともなって減少もしくは増加すると考えられる。しかし、これらの基本性状を調査・観測値に基づいて定量的に評価した事例は少ないことから、覆工コンクリート性状の劣化において留意する事項が明確となっていない。そこで、所有する寒冷地（北海道）における山岳トンネルの覆工コンクリートに対して調査・観測したデータを用いて検討した。

寒冷地（北海道）における山岳トンネルの覆工コンクリートの基本性状の経年変化は、寒冷地特有の気温変動、降雨・降雪、季節風などの自然環境のほかに路面への凍結防止剤散布などの使用環境により、少しずつ変化が蓄積されていると考えられる。本研究では、図-3.2.1 に示す北海道の気候区及び既往の研究における凍害危険度の分布図など^{4)~7)}を参考にして北海道を5つの地域（日本海北側(①)、日本海南側(②)、太平洋側（太平洋西側(③)、太平洋東側(④)）、オホーツク海側(⑤)、内陸(⑥)）に分割し基本性状について整理・分析・検討を行った。ここで、太平洋西側(③)、太平洋東側(④)においては、太平洋西側、太平洋東側と区分するとデータ数が少ないため、③、④をまとめて太平洋側とした。

これらの5つの地域において、劣化性状の特性等を把握するために、調査・試験から得られた覆工コンクリートの基本性状を供用年数や坑口からの距離などで整理・分析・検討を実施した。

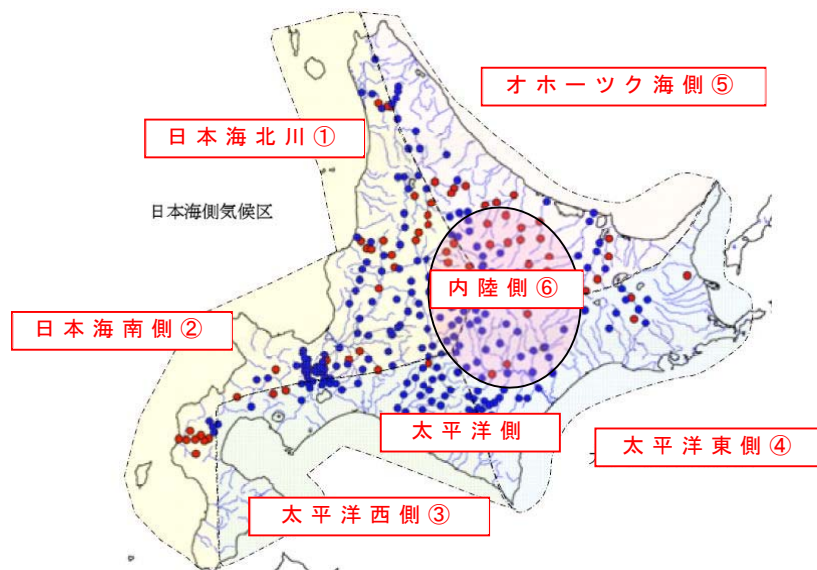


図-3.2.1 北海道の気候区⁸⁾ (赤文字の気候区番号は加筆したもの)

(1) 覆工コンクリートにおける圧縮強度の経年変化

ここでは、覆工コンクリートの圧縮強度と経年変化について整理・考察する。なお、考察については使用しているデータ数が少ないことから傾向的なものを述べている。

図-3.2.2(a)、(b)、(c)は、日本海南・北側および太平洋側の山岳トンネルにおける覆工コンクリートに対する圧縮強度と坑口からの距離の関係を示したものである。用いた圧縮強度試験データは、主に矢板（在来）工法で建設された山岳トンネルを調査したものである。

図-3.2.2(a)、(b)、(c)より、日本海南側では坑口からの距離にともないトンネルセンター（天端）部の圧縮強度は低下しているが、側壁 45° 方向では坑口からの距離にともない強度は増加する傾向を示している。また、太平洋側の天端部や内陸側では側壁 45° 方向では、坑口からの距離に伴い強度は増加する傾向を示しているが、これらの相関係数 ($R=0.2\sim0.3$) は小さい。圧縮強度の経年劣化については、大きな低下傾向は示していないものの、データ数が少なく明確な傾向は出ていない。今後、調査数を増やしてデータを蓄積することが必要であると考えられる。

一方、覆工コンクリートは、設計基準強度 18N/mm^2 の無筋構造で設計されるが、数多くの山岳トンネルではセメント量を多くして覆工の施工性を向上させることが一般的であることから、圧縮強度が大きくなっている一要因と考えられる。

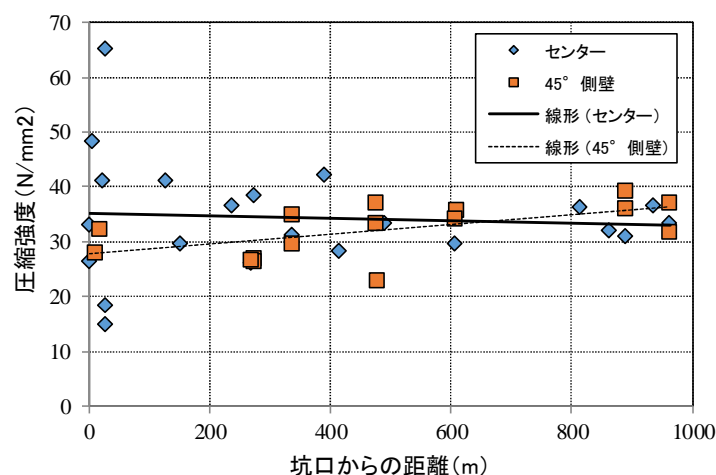


図-3.2.2(a) 覆工コンクリート圧縮強度と坑口からの距離（日本海南側）

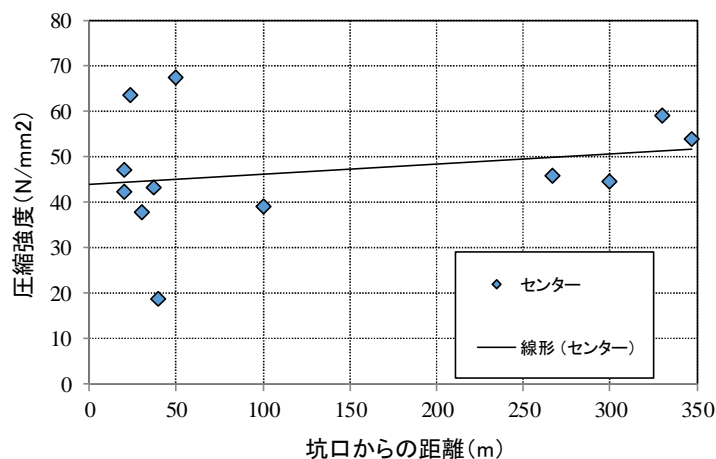


図-3.2.2(b) 覆工コンクリート圧縮強度と坑口からの距離（日本海北側）

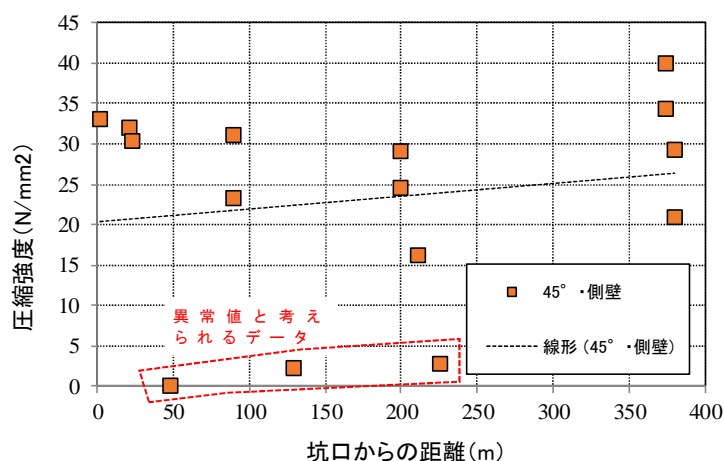


図-3.2.2(c) 覆工コンクリート圧縮強度と坑口からの距離(太平洋側)

山岳トンネル覆工コンクリートの標準的な圧縮強度は 18N/mm^2 である。図-3.2.2(a)、(c)では、一部、標準的な圧縮強度より小さい試験結果が得られている。これは、コンクリートが流水に接している場合に、コンクリート中のセメント水和物が周囲の水（特に軟水の場合は顕著）に溶解して組織が疎となり、強度が低下する現象が生じている可能性が示唆される⁹⁾。これは、防水シートが設置されていない矢板工法で構築された山岳トンネルの覆工コンクリートでは、ひび割れ・浮き剥離やジャンカ・豆板等の損傷部において、覆工コンクリートが坑内の湧水に長期に接する状況が確認されていることから推察される。

そこで、調査した全トンネルにおいて、式(1)に示した坑口部と坑内（調査最深部）における覆工コンクリート強度の比率と経過（トンネル供用）年数との関係を整理し図-3.2.3に示す。

$$\text{強度比} = \frac{\text{坑内(調査最深部)の覆工コンクリート強度}}{\text{坑口部の覆工コンクリート強度}} \quad (1)$$

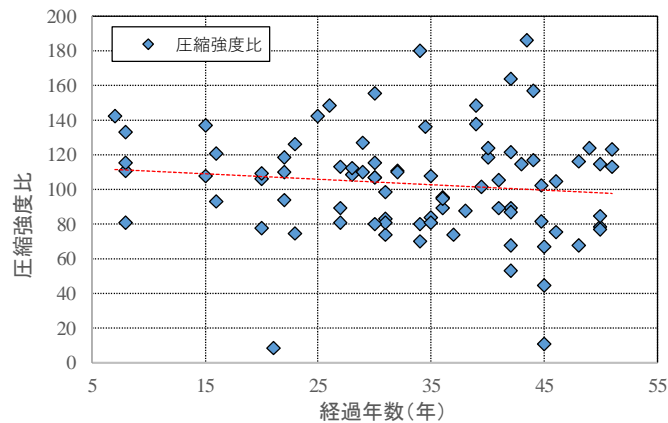


図-3.2.3 覆工コンクリートの経過年数による強度比

図-3.2.3より、経過（供用）年数に伴い坑口部と坑内調査最深部における覆工コンクリート強度比が小さくなる傾向が見られるが、誤差が大きい。圧縮強度比が100%より大きいデータは、変状が生じやすい坑口部において湧水や雨水の引き込みの影響によりコンクリート水和物が溶解し、坑口部の強度低下が生じた可能性がある。一方、圧縮強度比が100%より小さいものについては、施工的なものなのか、時間経過による劣化現象なのかを検証する必要がある。

覆工コンクリートの経過年数と強度比との関係は、誤差等のばらつきが大きく、かつ相関係数（ $R=0.6$ 程度）は小さいが、その分布は図-3.2.4のようにほぼ正規分布を示している。ここで、正規分布以外の非線形分布では、偏差を含んでいるか異なった分布特性であると考えられる。このため、回帰式に対する全サンプルのバラツキを評価し正規分布になることで、試験誤差のみを含むランダムなばらつきであることが確認できる。

よって、山岳トンネルの覆工コンクリートは長期間湧水に曝されるとセメント水和物が湧水に溶解して強度低下を招く可能性があることが示唆される。この傾向については、今後、試験数を増やし、データを蓄積し検証することが必要である。

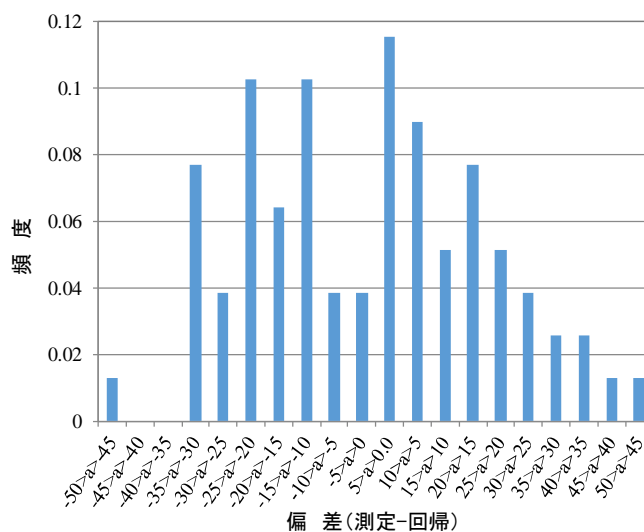


図-3.2.4 供用年数による強度推定比の偏差分布（測定値-回帰値）

（2）覆工コンクリートにおける中性化深さのトンネル内分布

次に、太平洋側、内陸、日本海北側の山岳トンネルにおける覆工コンクリートに対する中性化深さと坑口距離の関係を図-3.2.5(a)、(b)、(c)に示す。

山岳トンネルの覆工コンクリートは、坑口部分を除き、ほとんどが無筋コンクリートである。ただ、コンクリートの中性化は、鉄筋等の鋼材の腐食だけではなくコンクリートの強度変化を引き起こす可能性があることが知られている⁹⁾。

図-3.2.5(a)、(b)、(c)より、太平洋側では坑口距離に対する中性化深さは、坑口からの距離に伴いセンター部は浅くなり、側壁45°方向および側壁部は深くなる傾向がみられ、内陸側と日本海北側では坑口距離に対する中性化深さは、坑口からの距離に伴いセンター部は浅くなる傾向を示している。

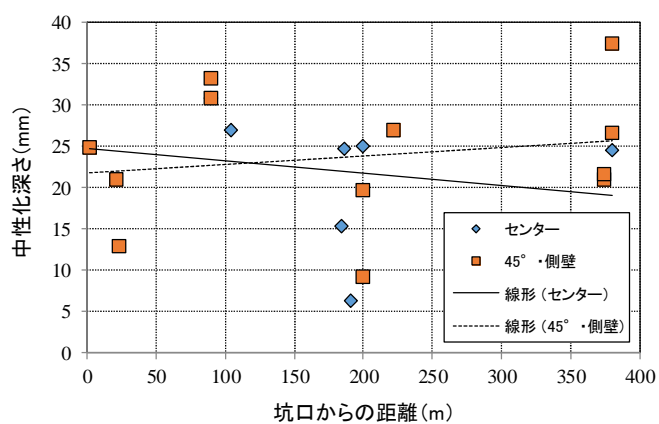


図-3.2.5(a) 覆エコンクリートの中性化深さと坑口からの距離（太平洋側）

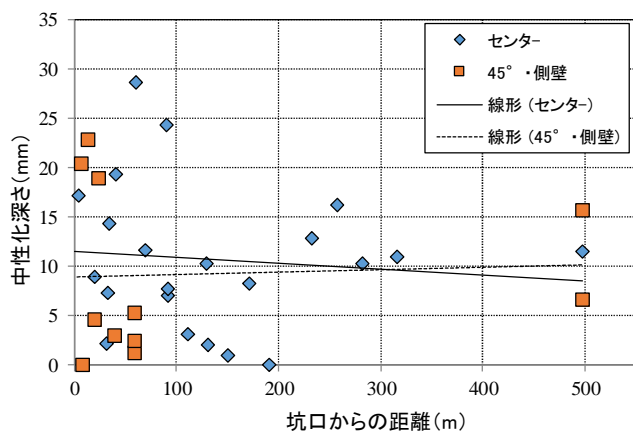


図-3.2.5(b) 覆エコンクリートの中性化深さと坑口からの距離（内陸側）

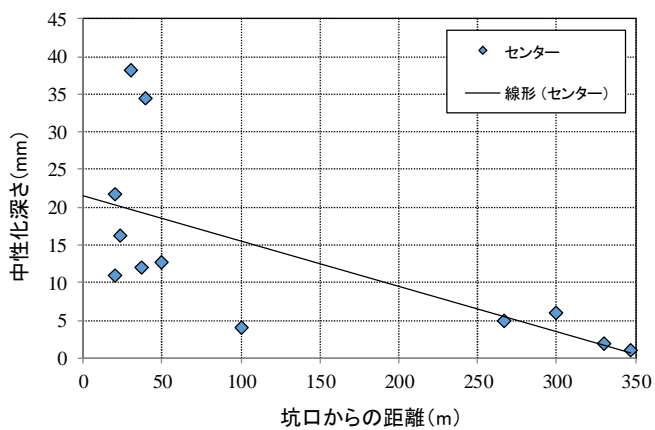


図-3.2.5(c) 覆エコンクリートの中性化深さと坑口からの距離（日本海北側）

(3) 覆工コンクリートにおける塩分濃度の経年変化

覆工コンクリートに含まれる塩分濃度は、前述した中性化深さの現象と同様な影響を及ぼすため、覆工コンクリートの塩分濃度の調査を実施した。調査全域における覆工コンクリート表面部（深度：0～20mm）における塩分濃度と坑口からの距離を図-3.2.6に示す。ここでも主に矢板（在来）工法で建設された山岳トンネルを主な対象として調査を実施している。

図-3.2.6より、坑口からの距離に伴い覆工コンクリート表面部における塩分濃度は低下傾向を示しており、冬期に散布された凍結防止剤の影響（塩分濃度）は、坑口から距離約30m程度でなくなる結果を示している。

次に、覆工コンクリート深度方向（深度：0～20mm、20～40mm、40～60mm、60～80mm、80～100mm）における塩分濃度と坑口からの距離を図-3.2.7に示す。覆工コンクリート深度方向における塩分濃度は、深度40～60mmで影響がなくなっていることが分かる。また、坑口からの距離と覆工コンクリートの塩分濃度は、深度：40～60mmで冬期に散布された凍結防止剤の影響（塩分濃度）は坑口から距離約20mでなくなる計測結果を示している。

覆工コンクリート表面部（0～20mm）における塩分濃度とトンネルの供用年数の関係を図-3.2.8に示す。供用年数の経過に伴い覆工コンクリート表面部（0～20mm）における塩分濃度は、増加する傾向を示している。これは長期間凍結防止剤の浸食に晒されていた結果と考えられる。

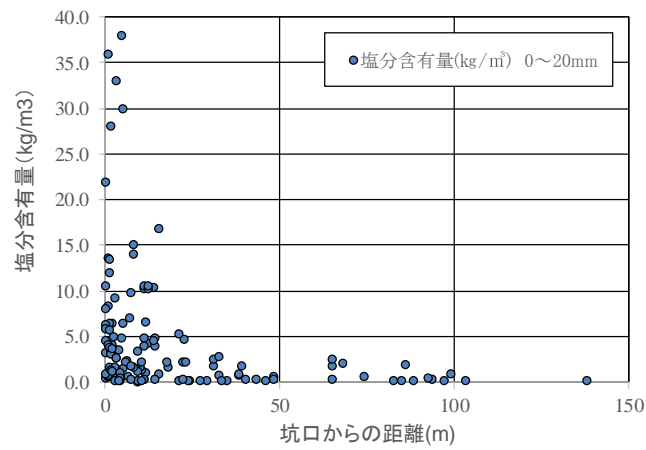


図-3.2.6 覆エコンクリート塩分濃度（表面 0～20mm）と坑口からの距離

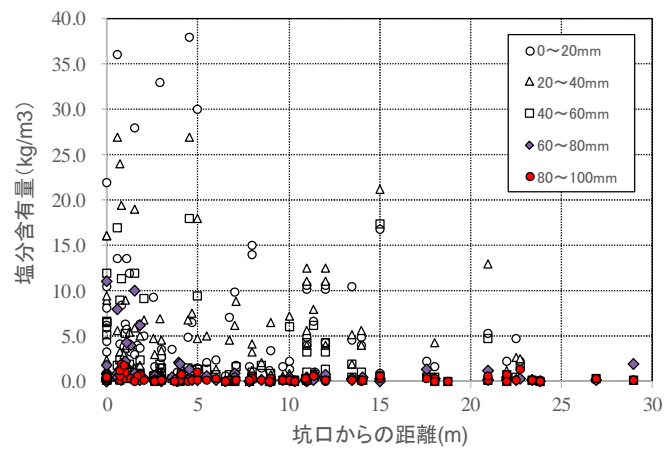


図-3.2.7 覆エコンクリート塩分濃度（深度別）と坑口からの距離

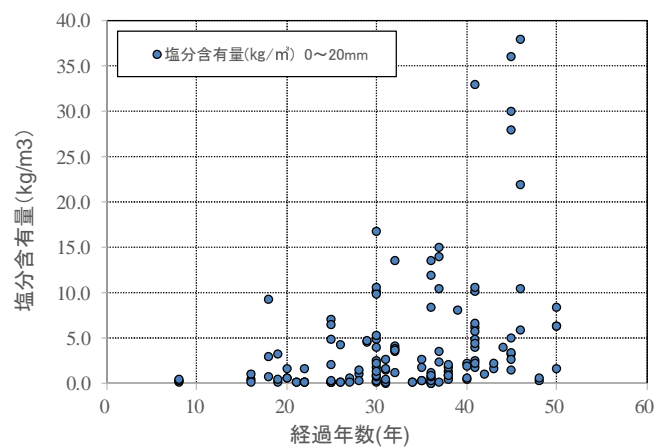


図-3.2.8 表面部（0～20mm）の塩分濃度と経過年数

3.3 寒冷地における山岳トンネル覆工コンクリートの挙動¹⁰⁾

寒冷地（北海道）の山岳トンネルでは、冬期の寒気流入（坑内の気温低下）に伴い地山凍上が原因の覆工コンクリートのひび割れや変状など（写真-3.3.1 参照）を受ける危険性が高い。

寒冷地（北海道）の山岳トンネルの点検結果では、矢板工法で施工された道路トンネルの約半数は何らかの凍害による変状が確認されている¹¹⁾。



写真-3.3.1 凍害の例（凍結クラック、つらら）

そこで、寒冷地（北海道）における山岳トンネルの覆工コンクリートの凍害に伴うひび割れなどの損傷や劣化に対する評価などを定量的に把握する目的で、NATM工法で施工されたトンネルの覆工コンクリート天端部の表面に生じたひび割れ、覆工スパンの打ち継目の挙動と坑内における気温変動の観測（1999年9月23日～2003年3月31日）を実施した。

図-3.3.1は、トンネル坑口より100m地点における観測期間の坑内気温と覆工コンクリート表面に生じたひび割れ幅（亀裂1：天端部、亀裂6：側壁部）の変動状況を示したものである。図-3.3.2は、覆工スパンの継目幅の変動と気温変動に対する延長方向の継目幅（コンクリート線（熱）膨張係数： $7\sim 13\mu/\text{℃}$ 、覆工スパン長：10.5m、図中では平均値を理論値と表示）の関係を示したのである。図-3.3.1、

図-3.3.2 より、坑口から 100m 地点における覆工コンクリートのひび割れ幅および覆工スパンの継目幅の変動は気温変動に伴い収縮（冬期）・膨張（夏期）を繰り返していることが分かる。加えて、覆工表面のひび割れ幅は夏期：0.00mm から冬期：0.80mm に変動しており、劣化を評価するひび割れ幅 0.3mm もしくは 0.5mm より大きな変動幅を示している。これは、調査時期によってひび割れの判定区分が変わることが考えられ、劣化評価に当っては、長期観測を実施して覆工コンクリートに生じたひび割れ幅が進行性（増加）のものなのかを確認する必要がある。また、図-3.3.2 に示すように気温変動による覆工スパンの継目幅の変動は、コンクリートの線（熱）膨張係数の平均値で試算した幅の 0.0mm \leftrightarrow 3.0mm の伸縮を示している。このため、トンネル縦断方向の継目幅は、坑内温度に伴った変動を示すことが分かる。今回の観測結果から、3.0mm 程度開きがある打継目では、寒気が直接断熱材に接するため覆工コンクリートによる断熱効果は望めず（設計要領では断熱材の設計厚は覆工による断熱効果も考慮）、断熱材設計に用いる温度や算出方法の再評価も必要となると考えられる。

次に、覆工コンクリート表面における定期点検（2006.7:夏期点検および 2009.1:冬期点検、点検間隔 30 か月）の点検記録（ひび割れ展開図）を図-3.3.3(a)、(b)に示す。図-3.3.3(a)、(b)との比較により、覆工コンクリート表面のひび割れは冬期点検においてひび割れ密度が増加していることが分かる。

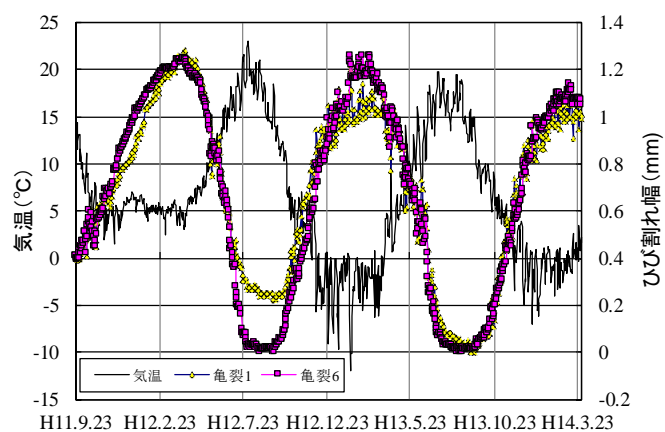


図-3.3.1 覆エコンクリート表面のひび割れ幅と気温変動

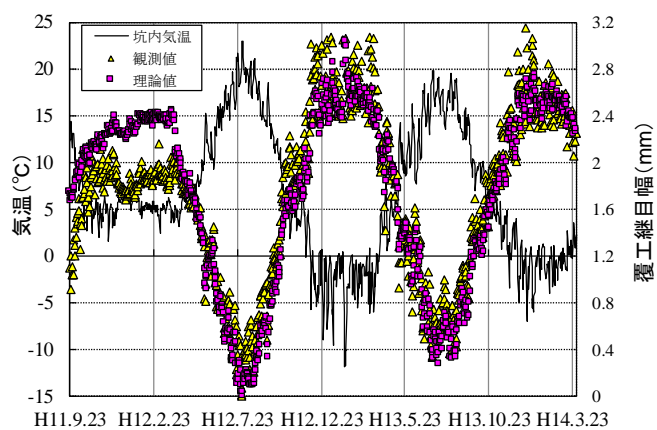


図-3.3.2 覆エスパンの継ぎ目幅と気温変動

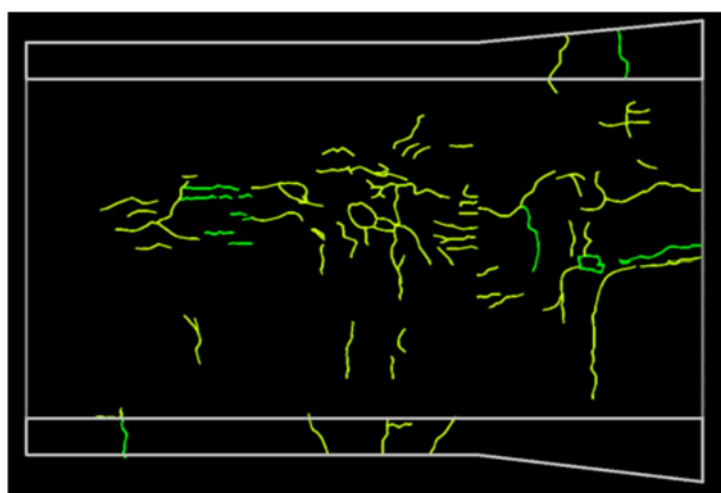


図-3.3.3(a) ひび割れの点検時期による事例①（夏期点検, 2006.7）

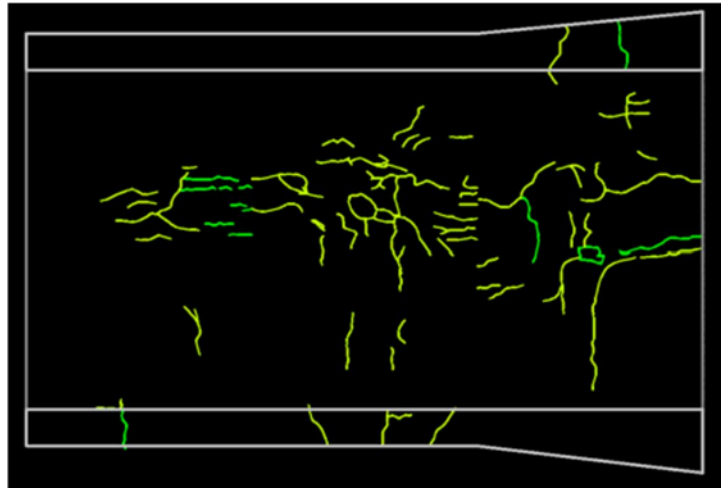


図-3.3.3(b) ひび割れの点検時期による事例②（冬期点検, 2008.1）

図-3.3.4は図-3.3.3(a)、(b)を重ねたものであり、冬期点検において進展又は新たなひび割れが確認されていることが分かる。本トンネルが供用されてかなりの時間が経過していることから覆工コンクリートの乾燥収縮は終了していると考えられる。また、地山も硬堅で外力作用はないと考えられることから、新たに確認されたひび割れは坑内気温の影響によるものと考えられる。北海道のような寒冷地では、点検時期で覆工コンクリート表面におけるひび割れ幅は変動することが確認されたことを踏まえると、トンネル覆工のひび割れを定量的かつ正確な点検を実施するには、点検季節の統一もしくは点検時の坑内気温によるひび割れ幅のキャリブレーション（例えば坑内気温 15℃（図-3.3.1 のひび割れ最大幅と最小幅との中間値の坑内気温）におけるに統一したひび割れ幅を記録）が必要である。

寒冷地トンネルの覆工コンクリートひび割れの定量的な評価には、今後も坑内温度と覆工コンクリートの挙動などの基礎データを蓄積していかなければならないと考える。

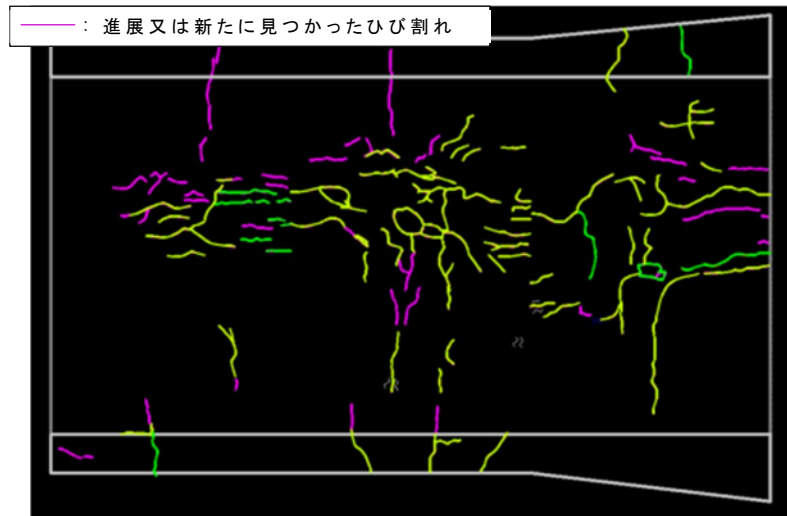


図-3.3.4 ひび割れの点検時期による変動例（重合せ）
（夏・冬期点検, 2008.1）

3.4 統計データを用いた寒冷地における山岳トンネルの健全性評価

(1) 道路メンテナンス年報^{1 3)}データを用いたトンネル健全性の分析

道路メンテナンス年報は、国民・道路利用者に道路インフラの現状及び老朽化対策についての理解を深めることを目的に、点検の実施状況や結果等を国土交通省においてとりまとめて公表されている。

ここでは、平成26年～平成29年の4年間の点検・結果が整理された道路メンテナンス年報を元にトンネルの劣化度について整理・分析した。

トンネル点検が実施されたトンネル本数は、表-3.4.1に示すとおりである。トンネルデータの詳細は、高速道路会社が1,558本、国土交通省が1,355本、地方公共団体が5,019本、全体で7,932本のトンネル点検が実施されている。

整理方法は、判定区分の他に覆工コンクリートの劣化と関係があると考えられる①施工年（経過年数）、②トンネル延長、③トンネル位置（地方別）とした。

表-3.4.1 トンネル年報に示されているデータ数

機関	H26	H27	H28	H29	合計
高速道路会社	337	505	385	331	1,558
国土交通省	323	405	306	321	1,355
地方公共団体	782	889	1,295	2,053	5,019
合計	1,442	1,799	1,986	2,705	7,932

表-3.4.2は、各機関におけるトンネル建設後の経過年数と判定区分（Ⅰ～Ⅳ）におけるトンネル本数を整理したものである。図-3.4.1は、点検年度におけるトンネル健全性（Ⅰ～Ⅳ）とトンネル本数の関係を示したものである。4年間の点検から、本数は少ないが、判定区分Ⅳのトンネルが37本（全体の0.5%程度）確認されており、緊急的な対処が必要または供用できないトンネルが出てきていることが分かる。地方公共団体に着目すると、31本のトンネルがⅣ判定とな

っており、地方公共団体においては、国土交通省や高速道路会社と比べ適切な維持管理が実施されていない可能性があることがうかがえる。

表-3.4.2 各機関における経過年数と健全性との関係

経過年数		0～10年	11～20年	21～30年	31～40年	41～50年	51年以上	合計
高速道路 会社	I	8	5	11	2	17		43
	II	147	244	300	157	43	10	901
	III	24	68	247	210	62	3	614
	IV							
国土交通 省	I	40	7	1		1	1	50
	II	232	163	109	78	112	144	838
	III	37	58	46	70	116	131	458
	IV				1	1	1	3
地方公共 団体	I	40	26	20	14	5	15	120
	II	221	534	563	389	324	493	2,524
	III	69	293	490	442	394	519	2,207
	IV		1	3	2	3	22	31

また、図-3.4.2は、トンネルの経過年数と判定区分を機関ごとに示したものである。図-3.4.1から、H26からH29に年度が進むにつれて判定区分Ⅱ、Ⅲのトンネル本数の増加が見られ、今後、補修・補強が必要なトンネルが増加することが予測される。また、図-3.4.2からも、施工後30年以上経過するトンネルが増加し、適切な維持管理を行うために早急に長寿命化計画を立案する必要があると考えられる。

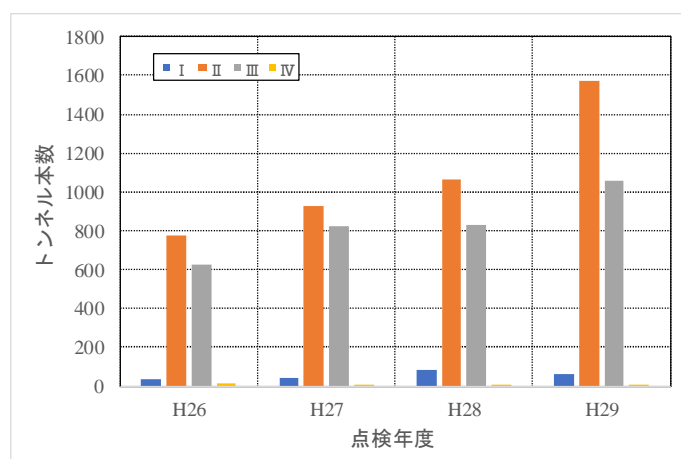


図-3.4.1 各年度で見る健全性とトンネル本数の関係（全国）

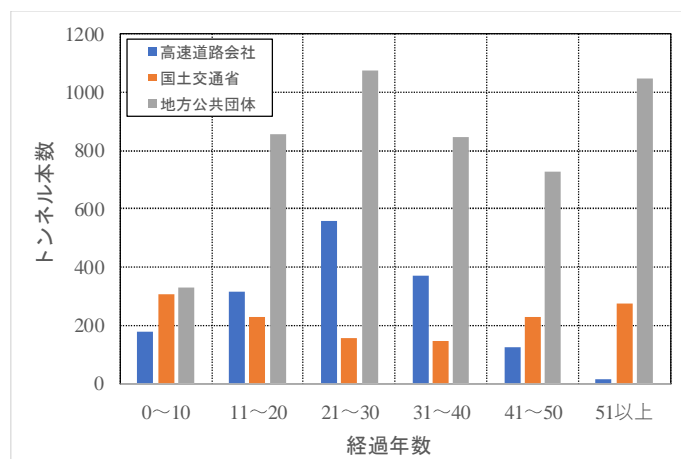


図-3.4.2 機関ごとの経過年数とトンネル本数の関係

（2）メンテナンス年報からの劣化要因分析

劣化要因としては、施工後の経過年数、トンネルが建設された地点の地山状況など種々のものが考えられるが、ここでは、メンテナンス年報に記載があるトンネル延長、経過年数、トンネルが位置する地方について整理した。

図-3.4.3 に経過年数と健全性、図-3.4.4 にトンネル延長と健全性との関係を示す。図-3.4.3 は、今回収集したトンネルの判定区分を横軸、経過年数を縦軸として整理した。また、図中には、それぞれの判定区分（I、II、III、IV）における対象としたトンネルの平均経過

年数の推移を破線で示している。これより、経過年数が経つにつれⅠからⅣへ劣化区分が悪くなる傾向を示すが、バラツキが大きい。また、図-3.4.4は、判定区分とトンネル延長で整理したものである。図-3.4.3と同様にトンネル延長が長くなれば劣化区分が悪くなる傾向を示すが、こちらもバラツキが大きい。ここで、トンネル健全性（判定区分）は、覆工スパンごとの判定区分から、最も判定区分が悪い判定をそのトンネルの健全性として判定しているため、トンネル延長、経過年数と健全性との関係は、バラツキが大きくなる要因であると考えられる。

図-3.4.5に地方別と健全性との関係を示す。全トンネルにおける判定区分ごとの比率は、Ⅰ判定が3%、Ⅱ判定が55%、Ⅲ判定が41%、Ⅳ判定が0.4%である。北海道地方のそれは、Ⅰ判定が2%、Ⅱ判定が57%、Ⅲ判定が40%、Ⅳ判定が0.3%であり、全国平均とほぼ同様な傾向を示す。

地方別では、中国地方、中部地方においてⅢ判定が他地方に比べ多い傾向を示すものの、Ⅱ判定とⅢ判定とを合計した比率は、全ての地方において、95%～97%程度であり、地方別の大差はなく特徴的な傾向はうかがえない。

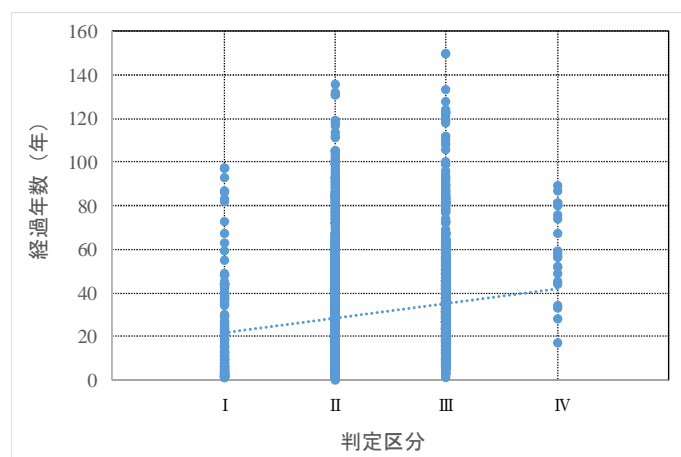


図-3.4.3 経過年数とトンネル健全性との関係

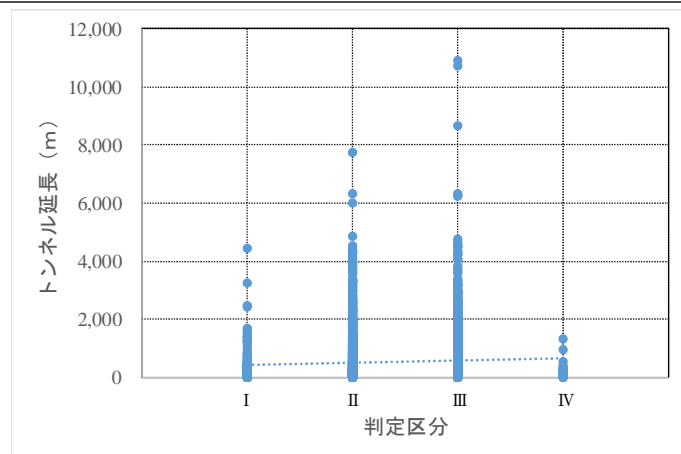


図-3.4.4 トンネル延長とトンネル健全性との関係

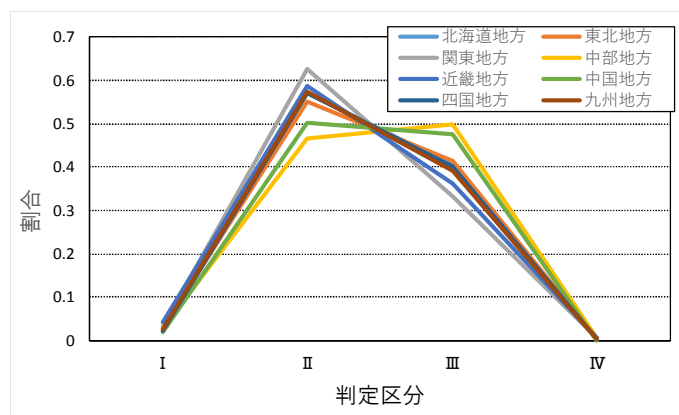


図-3.4.5 地方別とトンネル健全性との関係

(3) 北海道における覆工コンクリート劣化の地質的要因分析¹⁴⁾

全国のトンネルにおける劣化状況を整理したが、トンネル延長、経過年数、地域性では、データのばらつきが大きく、劣化進行の予測は困難であることが分かった。

そこで、トンネルが地中に構築される構造物であることを踏まえ、トンネルに直接接する地山（地質）は、施工時、供用後に種々の影響を与えているものと考えられる。このため、トンネル覆工の劣化は、坑内環境の他に、トンネルが構築された位置での地質状況も関係すると考えられる。これより、トンネル位置が明確に把握できている北海道のトンネルを例にとり、トンネルが構築された位置での地質を新たな指標としてトンネル覆工コンクリートの劣化状況を分析する。

使用したデータの詳細は、表-3.4.3 に示す通りで、トンネルデータ数は 391 本である。

表-3.4.3 トンネル年報に示されているデータ数（北海道）

機関	H26	H27	H28	H29	合計
高速道路会社	0	0	37	7	44
国土交通省	30	63	71	75	239
地方公共団体	13	23	28	44	108
合計	43	86	136	126	391

トンネル地点の地山状況については、図-3.4.6 に示す地質図表示システム地質図 N a v i¹⁵⁾ により推定した。

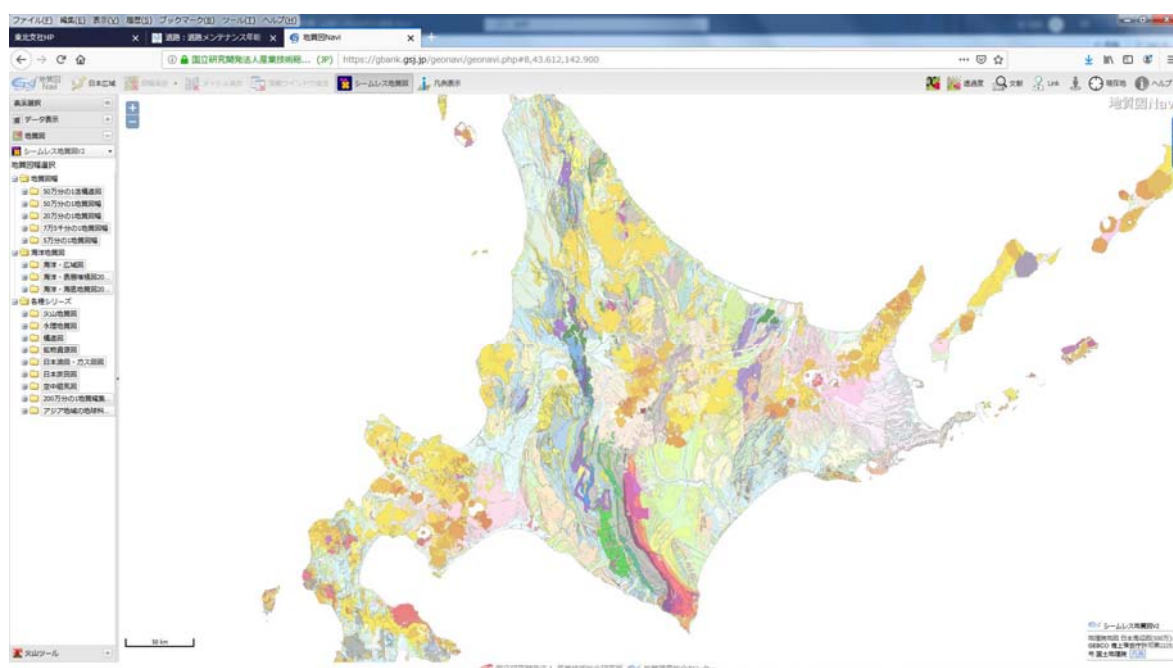


図-3.4.6 地質図表示システム地質図 N a v i のトップ画面

トンネル地点の地質の把握は、図-3.4.6 からトンネル地点を抽出し、抽出した地点をクリックすることでその地点の地質が表示される。地質については、あまり細かく分類すると傾向が分からなくな

ることが考えられたことから、本研究では、表-3.4.4 に示す 4 種類の岩石で地質を区分した。

表-3.4.4 地質の種類¹⁶⁾

地 質	特 徴
火成岩	マグマが冷え固まって出来た岩石
堆積岩	様々な物質や粒子が寄せ集まって出来た岩石
変成岩	一度変成された火成岩や堆積岩がマグマによる熱、あるいは地層やプレートの圧力を受けて、その成分に変化が見られるような岩石
付加体	大陸プレートや海洋プレートの接する場所でできる、くさび形の断面をもつ地質体

今回対象（メンテナンス年報に掲載された391本）としたトンネルの地質は、地質図表示システム地質図 N a v i を用いて判読し、その結果を表-3.4.5に示す。北海道は、火成岩、堆積岩の分布範囲が広く、今回のデータからも火成岩、堆積岩に構築されるトンネルの割合が大きくなっている。

表-3.4.5 年報に示されている地質のデータ数

地質の種類	H26	H27	H28	H29	合計
火成岩	17	42	62	58	179
堆積岩	13	31	65	40	149
変成岩	1	12	16	4	33
付加体	2	11	11	6	30

391本のトンネルにおける判定区分と地質との関係を図-3.4.7(a)、(b)に示す。図-3.4.7(a)はトンネル数を、図-3.4.7(b)には割合を示す。図-3.4.8には、経過年数と地質との関係を示す。図-3.4.9には火成岩における判定区分と経過年数、図-3.4.10には堆積岩に

おける判定区分と経過年数を示す。

図-3.4.7～図-3.4.10 から、堆積岩は経過年数が10年経っていてもⅡ又はⅢ判定となっている。一方、火成岩については、時間の経過とともにⅡ判定、Ⅲ判定が多くなり、時間とともに劣化度が進行していることが推察される。

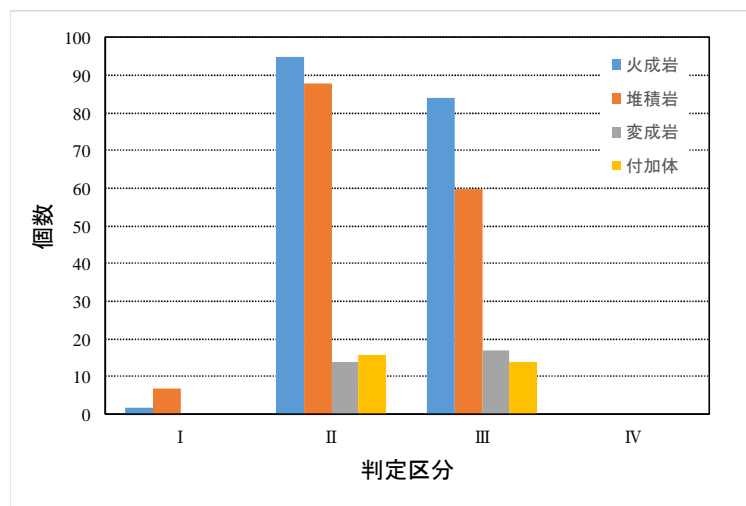


図-3.4.7(a) 地質と健全性の関係（個数）

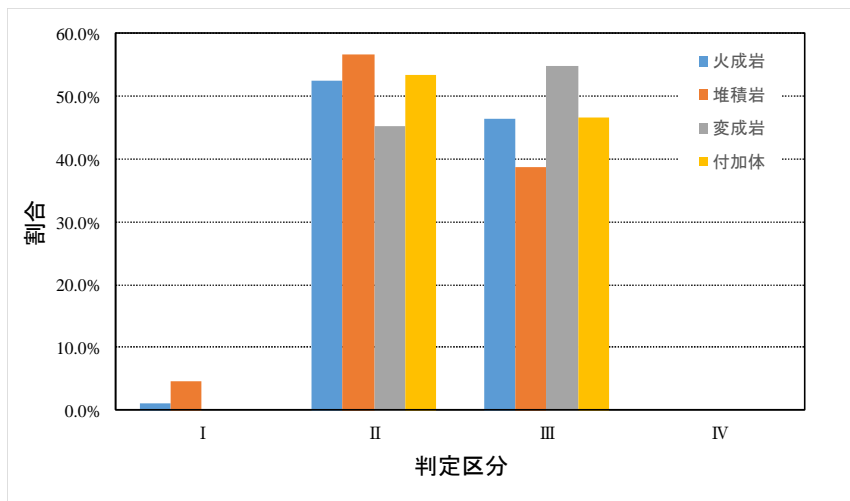


図-3.4.7(b) 地質と健全性の関係（割合）

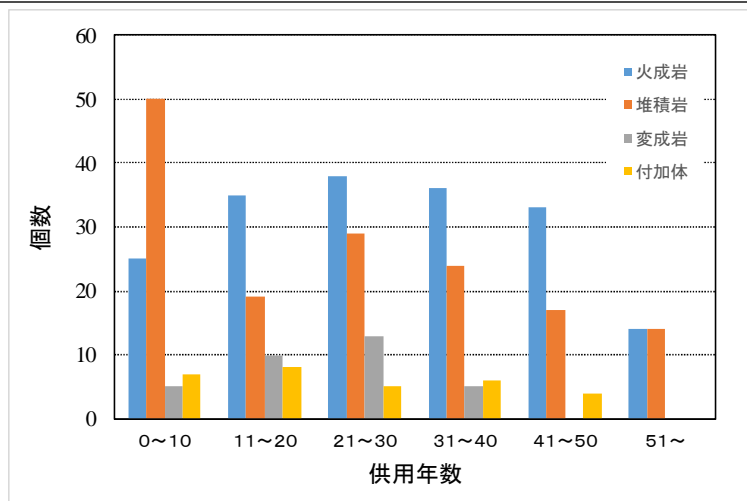


図-3.4.8 地質毎の経過年数と健全性の関係

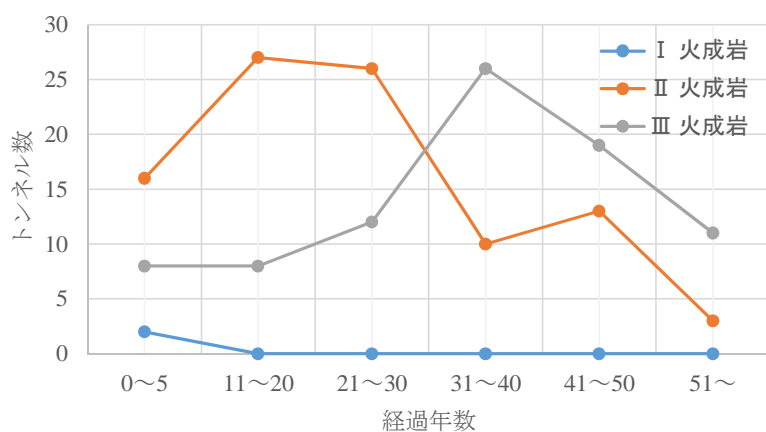


図-3.4.9 火成岩の健全性ごとの経過年数と個数の関係

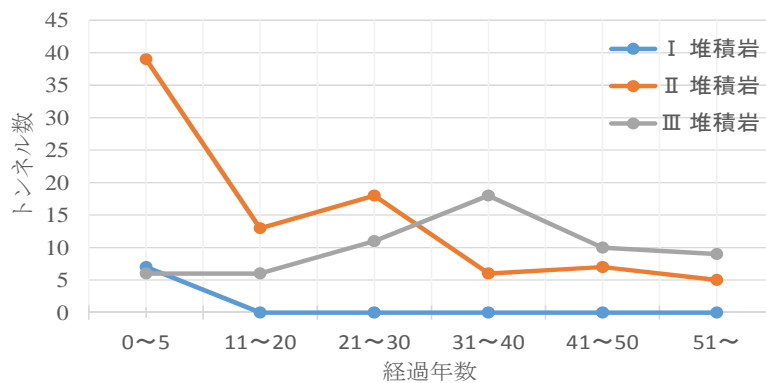


図-3.4.10 堆積岩の健全性ごとの経過年数と個数の関係

図-3.4.11 は、健全性Ⅱにおけるトンネルを経過年数別に整理したものである。縦軸は、地質毎の健全性Ⅱのトンネル本数（経過年数）を地質毎の健全性Ⅱのトンネル全本数で除した比率を示している。堆積岩では建設後の経過年数が10年までにⅡ判定が40%程度

を示しており、堆積岩中に構築されたトンネルはトンネル覆工の劣化は他の地山より進行が早い傾向にあることが伺える。また、他の地質においても20年までの経過年数において60%程度が健全性Ⅱとなることが分かる。図-3.4.12は健全性Ⅲについて整理したものであるが、変成岩、付加体は20年までで約40%が健全性Ⅲとなっている。堆積岩中に構築されたトンネルは、他の岩石に比べて劣化の進行が早いことが考えられることが示唆される。これは、山岳トンネルの主部材は覆工コンクリートではなく周辺地山であり、劣化・損傷の原因が構造物の老朽化以外に地山（地質）の影響をうけるためと推定される。これより、覆工コンクリートの劣化進行の予測には、トンネルが位置する地質情報は重要な指標となりうることが考えられる。

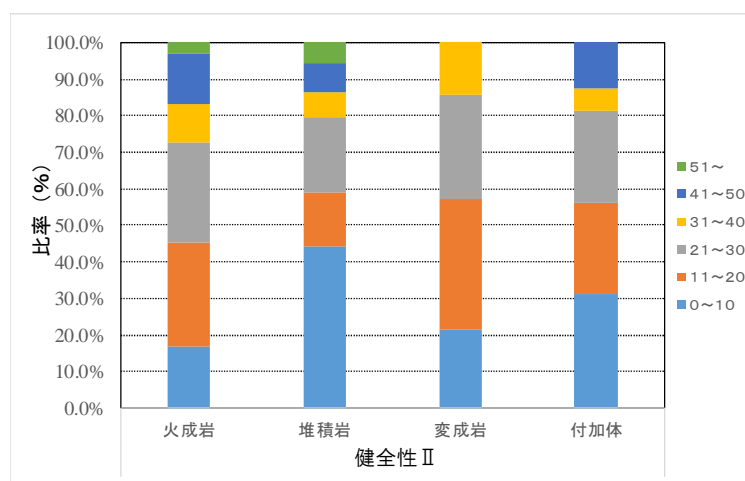


図-3.4.11 健全性Ⅱと地質との関係

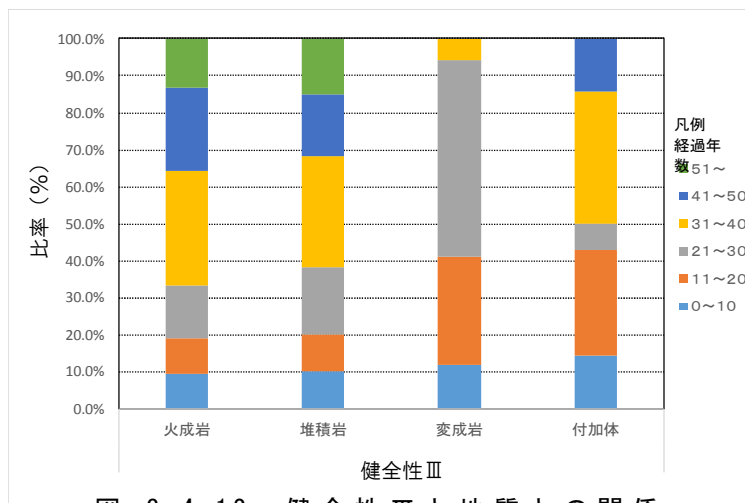


図-3.4.12 健全性Ⅲと地質との関係

3.5 まとめ

本章では、寒冷地（北海道）における山岳トンネル覆工コンクリートの試験、観測結果から得られた基本性状やひび割れ幅などについて分析・考察するとともに定期点検結果を適切に評価するための留意事項等について検討した。また、道路メンテナンス年報データを用いて、劣化進行に影響を及ぼす指標について検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) NATM 工法のトンネルでは坑内の温度変動に伴う覆工コンクリート表面のひび割れ（ $0.0\text{mm} \Leftrightarrow 0.8\text{mm}$ ）および覆工スパンの継目幅（ $0.0\text{mm} \Leftrightarrow 3.0\text{mm}$ ）の変動は大きく、点検時期やひび割れ評価および断熱材の設計温度の再評価が必要となる。
- (2) (1)が確認されたことから、トンネル点検において、トンネル覆工のひび割れを定量的かつ正確に判定区分を評価するためには、点検季節の統一もしくは点検時の坑内気温によるひび割れ幅のキャリブレーション（例えば坑内気温 15°C に統一したひび割れ幅を記録）が必要である。
- (3) 圧縮強度は、覆工コンクリート中のセメント水和物が長期にわたり周囲の湧水に溶解して、強度が低下する現象が生じている可能性を示唆する結果が得られたが、まだ測定値のばらつきが大きく相関係数も小さいため、今後も測定誤差等の要因を検討するとともにデータの蓄積が必要と考える。
- (4) 中性化深さは、経過年数に対して坑口からの距離に伴いセンター部は浅くなる傾向が得られたが、相関係数が小さいため、さらなる測定データの蓄積が必要と考える。
- (5) 覆工コンクリート表面部における塩分濃度は坑口からの距離に伴って低下しており、冬期に散布された凍結防止剤の影響であると考えられる。また、供用年数に伴い表面部の塩分濃度は増加する傾向を示しており、長期間にわたり凍結防止剤の浸食に曝されていた結果と考えられる。

(6)トンネルが構築された位置の地質と覆工コンクリートの劣化進行の関係を整理した。その結果、堆積岩に構築されたトンネルは他の地質に構築されたトンネルよりも劣化の進行が早いことが示唆された。

北海道における山岳トンネルの点検結果の評価、予防保全を前提とした維持管理には、覆工コンクリートにおける坑内温度に関わる挙動や経年的な圧縮強度・中性化深さなど基本性状に関する変化の把握は重要な情報である。このため、今後も多くの山岳トンネルの覆工コンクリートに対する調査・試験や点検データの蓄積を継続する必要がある。

【参考文献】

- 1) 国土交通省（社会資本整備審議会道路分科会）：道路の老朽化対策の本格的実施に関する提言，平成26年4月14日．
- 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, 2004.9.
- 3) 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，（一社）北海道開発技術センター，寒地開発研究会第34回寒地技術論文・報告集，Vol.34, pp.69-74, 2018.12.
- 4) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報，XXIX, pp.248-253, 1975.
- 5) 須藤敦史，三上隆，岡田正之，角谷俊次：寒冷地トンネルの断熱材設計における坑口・坑内気温の推定法の精度検証，土木学会応用力学論文集，Vol.7, pp.139-144, 2004.
- 6) 須藤敦史，糸井謙介，佐藤京，西弘明：寒冷地トンネル覆工における劣化過程の地域特性，寒地開発研究会 第27回寒地技術論文・報告集，Vol.27, pp.-319-316, 2011.
- 7) 須藤敦史，豊田邦男，三上隆，外塚信：高速道路トンネルにおける坑内・坑外の気温推定の実測値による検証，2005.
- 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) Mason P. J. : The Effect of Aggressive Water on Dam Concrete, Construction & Building Materials, Vol.4, No.3, pp.115-118, May.1990.
- 10) 禿和英，須藤敦史，佐藤京：寒冷地（北海道）トンネルにおける維持管理を目的とした覆工コンクリート性状の観測・調査結果に基づく一考察，（公社）日本コンクリート工学会「コンクリート工学年次論文集」，Vol.41, No.2, pp.1381-1386, 2019.7.

- 1 1) 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.
- 1 2) 坂本稔, 川北稔, 五十嵐敏彦: 道路トンネルの変状実態-北海道の場合-, トンネルと地下, 第20巻5号, pp. 31~35, 1989.
- 1 3) 道路メンテナンス年報 平成26年度~平成29年度: 国土交通省 道路局
- 1 4) 禿和英, 須藤敦史, 松浦寛斗, 織笠豊晃: 寒冷地におけるトンネル覆工劣化に関する一考察, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成30年度), VI-46, 2019.3.
- 1 5) 地質図表示システム地質図 Navi: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- 1 6) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

第4章 山岳トンネルにおける確率論に基づいた劣化モデルの提案

4.1 はじめに

山岳トンネルなどの道路構造物における劣化状況およびその遷移は、個々の山岳トンネルにおける地質状況・構造特性や施工時の状態などの影響を受け異なるものと考えられる。加えて、北海道のような寒冷地では供用中における冬期の厳しい自然環境により、トンネル覆工表面や周辺地山の劣化進行は、他の本州の地域に比べてさらに進行しており、そのばらつきも大きくなる¹⁾など。

このように、山岳トンネルは種々の影響をうけて劣化が進行するものと推定されるが、定式化された劣化予測手法は確立されていないのが現状である。

一方、山岳トンネルでは、覆工コンクリート表面における各種損傷の観察（目視）および打音による異状の有無などの点検が維持管理に必要な情報を取得する最も基本的なデータとなっており、一般に5年（または2年）に一度の近接目視を基本とした定期点検が実施されている²⁾など。その点検結果は、判定区分としてレーティング値で示されているが、実態として観察・点検および評価・診断等に対する信頼性の向上、学術・技術的な劣化進行を予測する手法など多く課題が解決されていない³⁾など。

このような状況の中、点検体制の整備や点検実施に対する各種の取組みが推進され、各道路管理者では次の段階として蓄積された点検（データ）結果を活用した効果的・効率的な維持管理計画の立案および実行が推進されているが、これまで得られた点検結果や保守履歴（管理データ）などの情報を十分に有効活用しているとは言えないのが現状である。大量の定期点検データおよび管理データ（データベースあるいはビックデータ）は、実現象としての劣化進行を表す重要なものであり、それらを活用することで、山岳トンネルの劣化把握と正確な将来予測が可能なモデルを構築することが可能となると考えられる。

そこで本章では、寒冷地（北海道）の山岳トンネルにおいて実施された定期点検のデータと補修・補強などが主な記録であるトンネル保守履歴（管理台帳など）の2つの管理データに基づき、以下に示す寒冷地（北海道）の山岳トンネルの覆工における総合的な劣化特性の把握やそれらの予測に対する劣化モデルを提案した。

(a) 山岳トンネルにおける劣化過程の確率統計的な予測

(b) 寒冷地のトンネル覆工における劣化状況に基づくトンネル寿命の定義と定期点検データと保守履歴情報の双方からトンネル覆工における劣化過程の同定

4.2 点検データのデータベース化と数量化

(1) 使用したトンネル点検データ

本研究に使用したトンネル点検データは、覆工コンクリートの変状6種類（①ひびわれ、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）を基本として整理・蓄積を行った。点検記録は、トンネル覆工の各スパンを1単位としていることから、覆工スパン数だけの劣化指標が求められることになる²⁾など。

寒冷地（北海道）の国道トンネルにおける定期点検結果の例を表-4.2.1に示す。表-4.2.1の事例では、トンネル覆工コンクリート表面の状態に対して、(a)地山側もしくは内空側（坑内気温や通行車両）からの外力、(b)材料劣化に対する判定、(c)漏水に対する判定を実施している。劣化判定においては、図-4.2.1に示す変状展開図をCAD化するなどの点検データの整理・蓄積を行い、これらを基本データとしてトンネル覆工コンクリートにおいて損傷・変状などの劣化評価値の数値化を行っている⁴⁾。ここでは、寒冷地（北海道）における山岳トンネル225箇所の覆工コンクリートの点検データを用いている。なお、1箇所のトンネルにおいて複数実施した点検データを含んでいる。

表-4.2.1 北海道の国道トンネルにおける定期点検（結果）の例

トンネル本体の判定														
全判定区分箇所数 ①+②+③					① 外力					② 材質劣化				
IV 判定	III 判定	IIa 判定	IIb 判定	I 判定	IV 判定	III 判定	IIa 判定	IIb 判定	I 判定	IV 判定	III 判定	IIa 判定	IIb 判定	I 判定
0	0	7	66	94	-	-	-	62	42	-	-	7	4	52
0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	0	0	0	30	-	-	-	-	12	-	-	-	-	18
0	0	13	11	4	-	-	-	2	2	-	-	13	8	2
0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	5	139	140	9	-	-	10	61	5	-	2	122	62	3
0	3	92	123	12	-	-	1	99	4	-	-	73	9	8
0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	0	9	28	75	-	-	-	20	75	-	-	9	7	-
0	0	0	28	15	-	-	-	27	2	-	-	-	1	12
0	2	21	32	3	-	-	-	27	2	-	-	21	5	1
0	0	13	16	3	-	-	-	11	2	-	-	13	4	1
0	0	1	6	-	-	-	-	-	-	-	-	1	6	-
0	0	1	172	54	-	-	-	171	11	-	-	1	1	43
0	3	67	79	4	-	-	-	46	2	-	-	65	32	1
0	1	296	236	82	-	-	-	194	4	-	1	271	39	78
0	0	0	0	164	-	-	-	-	130	-	-	-	-	33

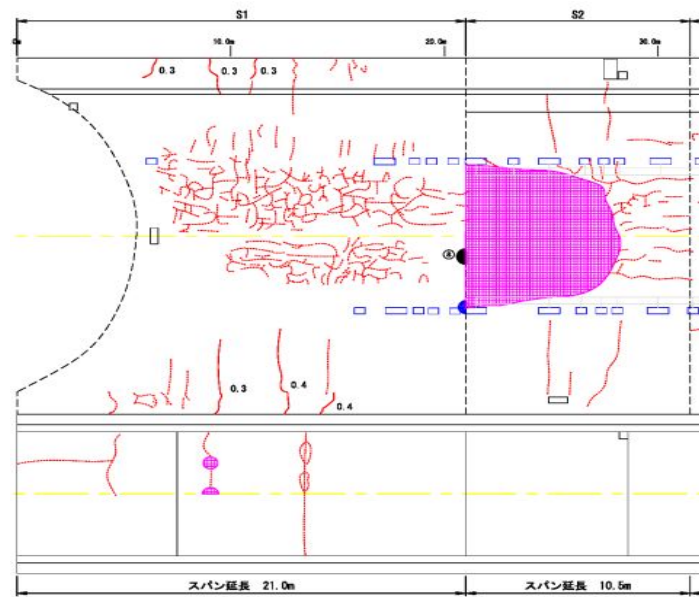


図-4.2.1 トンネル点検データのCAD化の例

(2) 点検データの数量化³⁾など

劣化予測モデルを構築するためには、トンネル覆工コンクリートにおいて劣化評価値を連続量として取り扱う必要がある。そこで、点検データを数量化し劣化進行を連続的に評価することを試みた。点検データには種々のものがあるが、本研究では、トンネル覆工コンクリートにおいて代表的な「覆工コンクリートのひび割れ」で評価することとした。

点検結果から得られたひび割れ幅は、それほど大きなものが確認されていなかったことから、過去の文献やトンネル点検技術者へのアンケートにより、レイティングを対象としている点検要領の基準（3mm）より厳しい管理基準 0.3mm を採用した。0.3mm は RC 構造物において、補修・補強が必要となる基準値である。

トンネル覆工におけるひび割れの数量化は、ひび割れ幅 0.3mm 以上と 0.3mm 未満、それぞれのひび割れの延長、ひび割れ交点の数（0.3mm 以上が関連するものと 0.3mm 未満同士の場合とを区別）とし、ひび割れパターンを表-4.2.1 のように場合わけして重み付けを行って定量化を実施した。

なお、0.3mm未満同士の交点については、第三者被害の危険度はそれほど高くないと考えられるため、0.3mm以上が関連する交点では表-4.2.2に示すウェイト値を設定した。なお、ウェイト値は、トンネル点検技術者、管理技術者などのアンケート調査結果から求めたものである。

表-4.2.1 ひび割れパターンの分類

種別	ひび割れの条件	ひび割れパターン
A	0.3mm以上	短いひび割れ散布
B		長いひび割れ（クロス有）
C		大きな三角、四角形
D		特定部分が密（クロス有）
E	全てのひび割れ	その他（平凡）
F	0.3mm未満	短いひび割れ散布
G		長いひび割れ（クロス有）
H		大きな三角、四角形
I		特定部分が密（クロス有）

表-4.2.2 ひび割れの重み

交点の種類	ウェイト
0.3mm未満同士	0.003
0.3mm以上関連	0.1

劣化評価値＝区間比×補正係数+交点数×交点ウェイト

区間比：観察面積／覆工スパン面積

補正係数：ウェイトⅠ×ウェイトⅡ×打音ウェイト

ウェイトⅠ：変状種別の係数（重み）、ひび割れ長さ×ひび割れパターンウェイト

ウェイトⅡ：発生原因、位置、状態による係数

打音ウェイト：打音検査によるウェイト

ここでウェイトⅡと打音ウェイトについては簡素化のため、それぞれ材料劣化 1.5、清音・反発 1.0 に固定している。上記の重み係数を用いることにより、トンネルにおける健全性評価値は、健全な状態から劣化進行に伴って連続的に評価できることとなる。

4.3 確率論を基礎とした覆工コンクリートの劣化遷移

一般にインフラストラクチャーの劣化過程（その遷移や将来の予測）は、①構造物群の平均的な劣化特性を対象とする確率・統計的手法、②個別の構造物における具体的な損傷や劣化現象を対象とする物理的方法に大別される。①は膨大な点検・観測値から劣化現象や過程を確率・統計的なモデル化を行う手法であり、②は物理的な劣化メカニズムを解明してモデル化する確定論的な手法である。さらに、観測・点検値やモデル化の誤差などの不確定性を考慮するかでさらに詳細に分類さる。

確率・統計論を用いた劣化モデルは、1)マルコフ過程（マルコフ連鎖モデル）、2)ポアソン過程、3)幾何ブラウン運動モデルが挙げられる。マルコフ連鎖モデルにおける劣化過程は、観察・点検により、良好ランクⅠから破損状態のランクⅣまでのレイティング（離散値による判定区分）値が、どのように推移していくのか（遷移確率）⁶⁾を予測するものであり、離散的な評価となる。一般にライフサイクルマネジメント（LCM）では、構造物の保有性能と補修・補強の関係を連続的に表現する必要があるため、本研究では離散的なマルコフ連鎖モデルではなく、連続的な幾何ブラウン運動モデルを用いる。劣化進行を表現するモデルは、損傷や経年劣化などで保有性能がある要求性能レベル以下（閾値の通過）となる時期を予測し、それらを補修・補強により回復させて長寿命化を図って行く予防保全⁶⁾などによる維持管理が国土交通省の基本方針であるため、本研究ではレイティング値で得られる覆工コンクリートの判定区分より、連続的に遷移する簡易的な劣化指数へ変換するモデルで検討を行う。

現状の定期点検からの山岳トンネル劣化進行の概念は、2～5年間隔で定期的の実施される点検結果における判定区分が健全性と評価され、図-4.3.1に示す劣化区分の推移となる。

ここで、インフラストラクチャーの不規則で連続的な劣化は図-4.3.2に示すように、その様々な環境や要因などによりそれぞれの

トンネルにおいて確率的な劣化過程（サンプルパス 例えば \triangle ：トンネル A、 \blacksquare ：トンネル B）を示すものと考えられ、これら遷移過程は幾何ブラウン運動過程で表現できる。本研究では、寒冷地（北海道）の道路トンネルにおける定期点検値（矢板工法：167 か所、NATM：101 か所）をもとに、幾何ブラウン運動モデルを用いて連続的に劣化過程を予測を試みる。

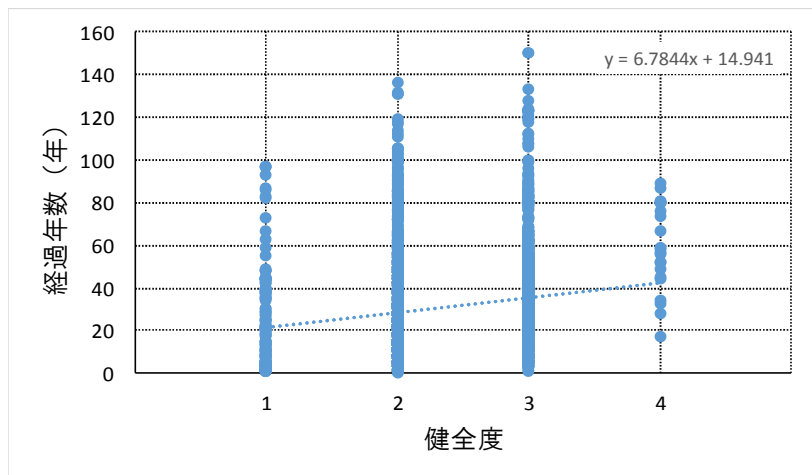


図-4.3.1 トンネルの定期点検における劣化区分（例）

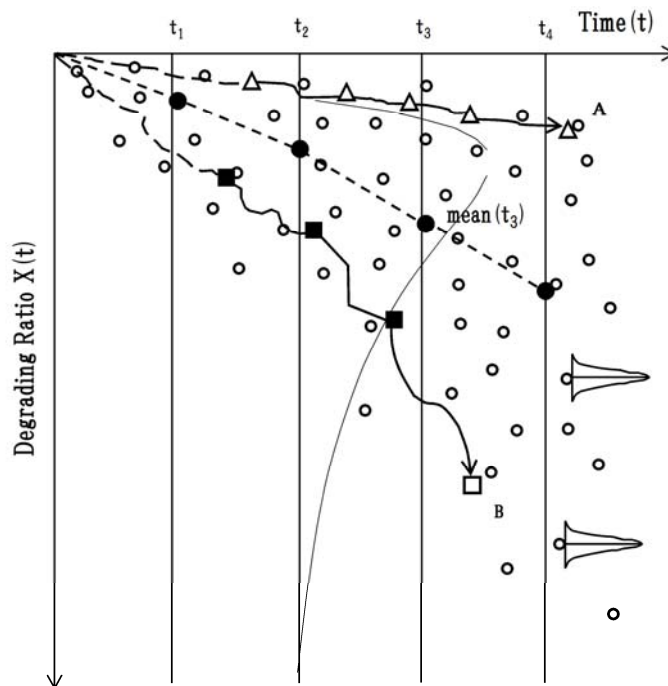


図-4.3.2 山岳トンネルの点検値と劣化サンプルパスの概念

4.4 点検値の指数化（同化）

確率・統計的な幾何ブラウン運動モデルは、あくまで数理モデルであるため、山岳トンネルなどの土木構造物の劣化（物理）現象は記述していない。そこで材料の経験的劣化モデルである Kachanov モデルの導入を行う。

(1) Kachanov 劣化モデル

覆工コンクリートの劣化は、時間に依存して損傷が進行する。本研究は、劣化過程を連続的に表現するために、前節までの点検データの数量化、劣化遷移の考え方をもとに検討する。

山岳トンネル覆工コンクリートの点検値（判定区分）は、 $X(t)$ を時刻 t における山岳トンネルの劣化度とし、その不規則な時間変動を確率過程でモデル化する。劣化度は、厳密な物理量ではないが、ここでは式(2)に示す材料力学の分野において経験論的な劣化モデルである Kachanov モデルを用いて劣化現象における平均的な時間推移（変動）を記述する⁷⁾。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 X(t)^{-\gamma} \quad (2)$$

β_0 : 劣化に関する平均進展抵抗値

γ : 劣化に関する形状パラメータ

ここで土木構造物は橋梁・トンネル・コンクリート構造物など種々の構造物があり、それらの劣化度の遷移を表すには指数化した値（0.0～1.0）が都合がよい。そこで式(2)が構造物の劣化度が 0.0～1.0 に理論上厳密に収まるようにゼロ近傍が安定するための係数 ε を用いた式(3)、(4)の補正関数 $g(x)$ を導入する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 g(X(t)), \quad g(x) \equiv x^{-\gamma} F_c(x) \quad (3)$$

$$F_c(x) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq x \leq 1) \\ (x/\varepsilon)^{\gamma+1} & (0 < x < \varepsilon) \end{cases} \quad (4)$$

これにより、構造物の破壊に至るまでの時間変化は式(2)と同じに

なる。また、時間的に不規則な劣化推移として複合 Poisson 過程を駆動雑音に導入すると地震などの突発的な自然災害による大きな損傷を考慮した確率微分方程式として次式のようなになる⁸⁾。

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t) \quad (5)$$

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (6)$$

$N(t)$: Poisson 過程 (強度パラメーター λ)

Y_k : 同一の分布に従う独立な確率変数の集まり

複合 Poission 過程 $C(t)$ を不規則な劣化度成長の駆動雑音として用いるモデル式 (5) は、サンプルパスが増減を繰り返して成長することはないため、劣化過程 (挙動) モデルに適している。

Kachanov (物理) モデルを導入すると、劣化度は 0.0~1.0 間の値となる。そこで、本研究では、劣化度について、健全度指数 (簡易 THI) の概念として導入する。

(2) 山岳トンネルにおける点検値の指数化 (簡易 THI)

日常点検は、通常の巡回点検の時に車上からの目視が一般的であり、定期点検は近視目視点検で、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遊離石灰などの有無や打音点検が実施され、各覆工スパンごとにⅠ、Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ、Ⅳの5段階の損傷ランク (判定区分) の判断がなされる。

点検結果から得られた判定区分による簡易のトンネル劣化指数は、Caltrans⁹⁾ などや AASHTO の「PONTIS」¹⁰⁾ で採用されている健全度指数 (Bridge Health Index : BHI) の基本式 (7) 用いて以下のように定義される^{11)、12)}。

$$BHI = \frac{\text{現在の資産価値}}{\text{初期資産価値}} \quad (7)$$

初期資産価値 : 当初の構造物の価格 (一般的に当初建設費)

現在資産価値：：現在の構造物の価格

式(7)に示す健全度指数 (Bridge Health Index : BHI) では、資産価値が導入されているが、本研究ではトンネル覆工の劣化に着目した平均的な値を求めることを目的としている。このため、トンネルの健全性は、覆工スパン毎の健全性の影響係数の総和を覆工総数で除した式(8)と定義して簡易 THI (Tunnel Health Index) を指数として提案している¹³⁾。

$$\text{簡易THI} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V (\text{覆工}_i \text{健全性の } wf_i^j) \quad (8)$$

V : 一つのトンネルにおける覆工総数

wf_i^j : 影響係数

ここで、損傷評価値に対する影響係数(wf_i^j)は、専門技術者へのアンケート調査結果¹⁾をもとに AHP 解析により、

$$\text{I} : wf_i^I = 0.00, \quad \text{II} : wf_i^{II} = 0.25, \quad \text{III} : wf_i^{III} = 0.50, \quad \text{IV} : wf_i^{IV} = 0.75, \\ \text{OK}(V) : wf_i^V = 1.0$$

と定めた。また、簡易 THI は 0.0～1.0 の連続値をとり、健全状態 1.0 から劣化の進行に従って 0.0 に向かっていく値となる。

これより、連続的な劣化過程の評価は、材料力学における経験的なカチャノフ劣化モデルを用いることで可能となる。ここで、収集・整理したトンネル点検データより、簡易 THI を求めたものを図-4.4.1、図-4.4.2 に示す。図-4.4.1、図 4.4.2 より、NATM 工法、矢板工法ともに経過時間とともに劣化度は進行していることが分かる。

図-4.4.3 は、図-4.4.1、図-4.4.2 を重ね合わせたものをプロットし、2015 年と 2016 年に実施したトンネルの定期点検より求めたトンネルにおける簡易 THI の経時変化と式(8)におけるトレンド値を示したものである。矢板工法、NATM 工法のトレンド値は、点検データの指数関数での回帰式で表現され以下の通りとなる。

$$\text{簡易THI(矢板)} = -0.985e^{-0.0076x}, \quad \text{簡易THI(NATM)} = -0.995e^{-0.0118x}$$

ここで、指数関数の定数が劣化に関する平均的な進展(トレンド)

を示す値となっており、式(2)の Kachanov 劣化モデルにおける β_0 に相当するものである。

矢板工法と NATM 工法を別々に示したのは、矢板工法データには、補修、補強工を実施されているトンネルが含まれており、NATM 工法には補修、補強工が実施されていないトンネルがあるためである。

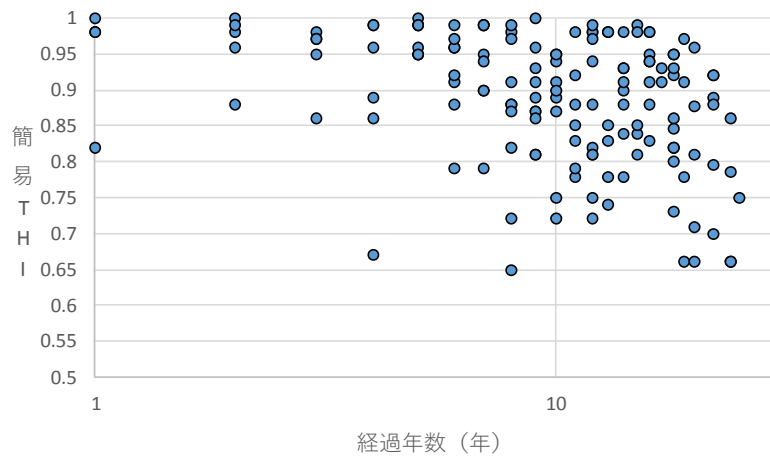


図-4.4.1 提案式より求めた簡易 THI (NATM 工法)

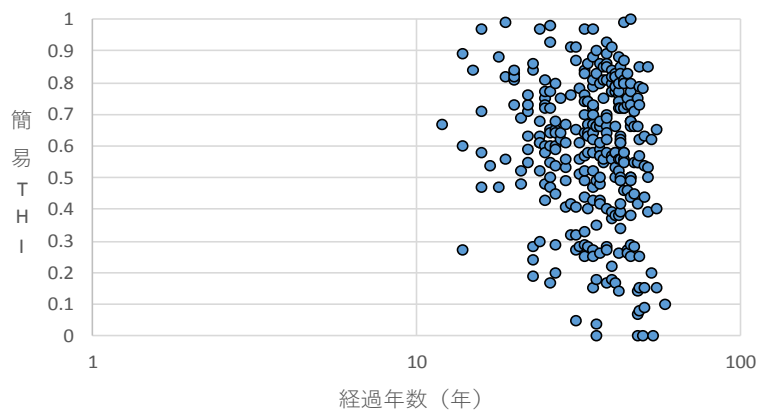
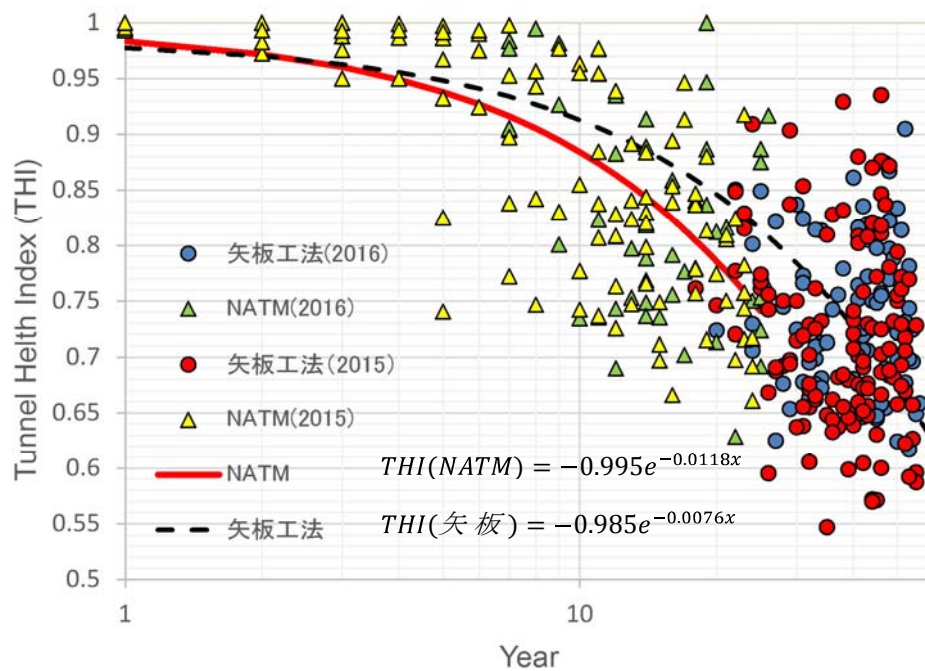


図-4.4.2 提案式より求めた簡易 THI (矢板工法)

図-4.4.3 簡易 THI を用いた Kachanov モデルの同定¹³⁾

次に、トンネル覆工コンクリートにおける従来の評価基準値と簡易 THI に変換したものを図-4.4.4 に、変換式を式(9)に示す。

$$y = 32.245e^{-4.166x} \quad (9)$$

同図より、従来のトンネル覆工の判定区分（評価点）が簡易 THI に変換され、簡易 THI を用いて判定区分を連続的に評価できることが検証された。したがって、健全度指数の考え方をを用いることにより、橋梁やトンネルなど異なる構造物の劣化評価が可能になることが分かり¹⁴⁾、本研究でも一部確認している¹⁵⁾。

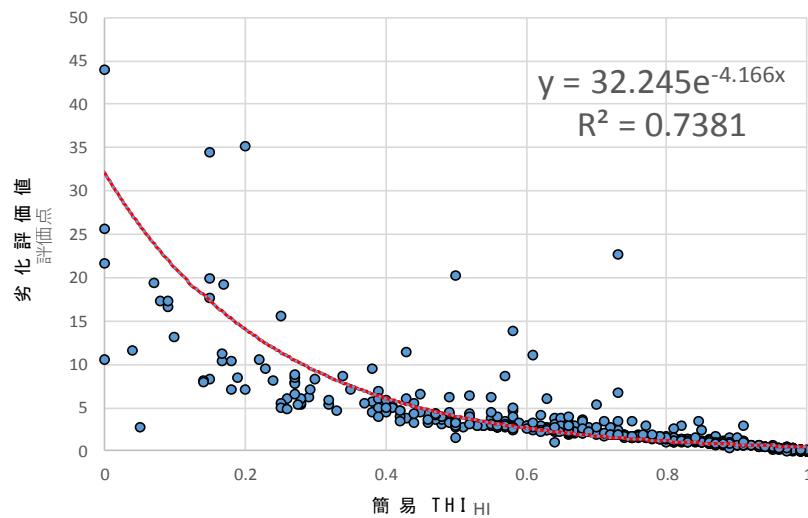


図-4.4.4 トンネル覆工の劣化評価値

(3) トンネル覆工の簡易 THI の分布傾向

図-4.4.5、図-4.4.6は、寒冷地（北海道）の国道トンネルにおける定期点検値より求めた簡易THIの度数分布（NATM、矢板工法）を示したものである。図-4.4.5、図-4.4.6より、寒冷地（北海道）における国道トンネルにおける簡易THIは対数正規分布を示しており、供用年数が長くなるにともない裾野は劣化が進行した方向に広がり、かつ度数も増加するロングテール化が見られる¹⁶⁾。ただし、データ数が少なく、簡易THIの分布状況として精度はあまりよくないが、橋梁やボックスカルバートの解析結果より、対数正規分布を示す結果が得られていることより、トンネルにおいても対数正規分布を示すものと推察される。また、ロングテール化を示すということは、構造物の劣化分布の裾野部分は将来不具合が発生する確率が高いことを示しており非常に重要な情報となる。

次に供用期間ごとの簡易THIの分布遷移（①0～10年、②11～15年、③16～25年）を図-4.4.7に示す。図-4.4.7より、寒冷地（北海道）における国道トンネルの簡易THIは供用年数とともに平均と分散が進行していると言え、平均値と分散値は一様に広がる傾向を示している。

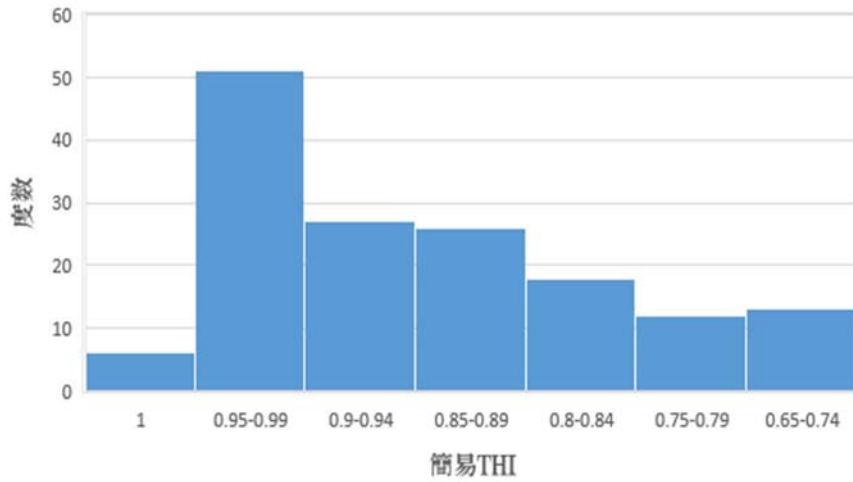


図-4.4.5 簡易 THI の分布 (NATM)

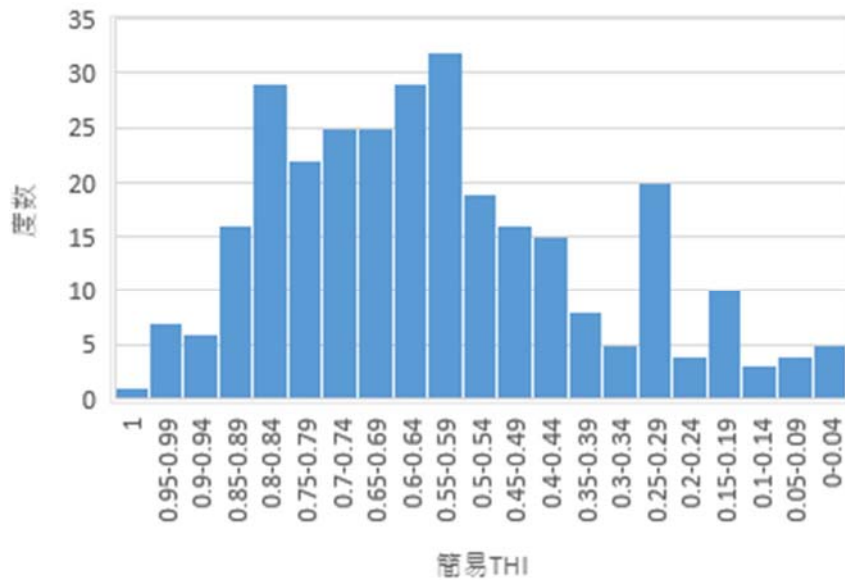


図-4.4.6 簡易 THIの分布 (矢板工法)

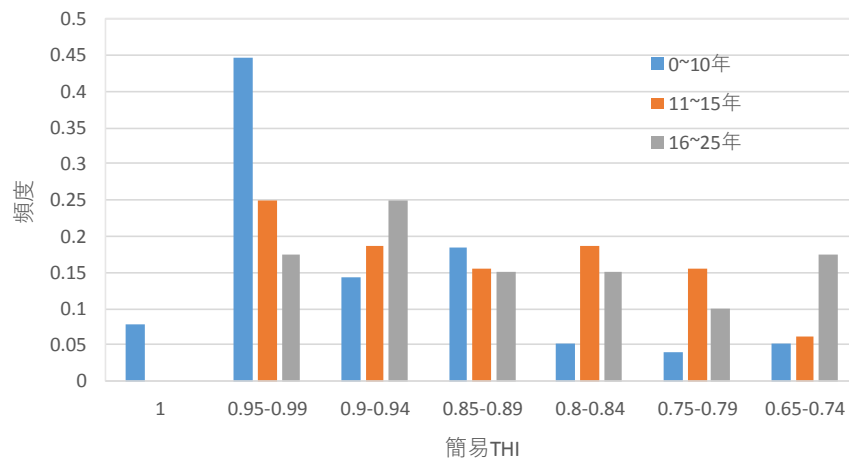


図-4.4.7 簡易 THIの分布遷移 (NATM)

4.5 生存時間解析を用いた劣化モデルの提案

(1) 生存率（解析）の定義

道路構造物の予防保全では、劣化過程を連続的に推定するとともに要求性能を満足しない時期において、補修・補強の適切な時期を推定する必要がある。

本研究では、トンネルの寿命を推定するために補修・補強を考慮できる生存時間解析を用いることとした。生存時間解析^{17)、18)}を用いて山岳トンネルの寿命を推定する場合、何が死亡や病気に相当するイベントなのかを明確にし、かつ定義しなければならない。

ここで、山岳トンネルの構造物としての寿命は、老朽化や交通量増加などに伴って①山岳トンネルがその機能を満足しなくなった場合に新たに再建すること、②覆工コンクリートなどに対して補修・補強を実施する場合とが考えられる。

ライフサイクルコスト(Life Cycle Cost : LCC)では、トータルコストが最小となる更新時点を寿命としているが、維持管理者およびトンネル点検技術者などにおけるヒアリングを参考にして、本研究では山岳トンネルにおける寿命の定義を以下とする。

定義 1: 更新（寿命）とは山岳トンネルの再建設もしくはごく近くに新設することであり、山岳トンネルの支保・構造部材や車両の許容通行量が要求性能を満足しなくなったときと考える。

定義 2: 山岳トンネルでは周辺地山・坑口斜面崩壊等もしくは経年劣化等によって覆工に物理的な損傷が生じた場合には疾病、その後の修復（補修・補強）は手術や治療と考える。また補修方法の規模によって更新・修復かに分かれるが本研究でこれらは対象とはしない。

定義 1 に示したような山岳トンネルの更新（寿命）事例は最近では非常に少ないため、定義 2 の寒冷地（北海道）の国道トンネルにおける覆工などの補修・補強などの修繕・補修の履歴を人間に置き

換えると疾病の手術や治療など健康状態に関する履歴として生存時間解析を適用して、山岳トンネルの覆工コンクリートにおける劣化遷移過程の同定を検討する。

(2) 生存時間解析

生存時間解析とは、イベントが発生するまでの時間解析¹⁹⁾などである。そのうちの Kaplan-Meier 法²⁰⁾は、医学・薬学分野において生存関数を推定するためによく用いられる。生存時間解析は、医学の分野でイベントを患者の死亡と定義し、投薬群と非投薬群の生存関数を比較し、試験薬の有効性を検証することなどが例として挙げられる。

生存時間解析では、患者idについて開始時刻 **time1** から終了時刻 **time2** まで観測が行われ、終了時刻においてイベントが生存(0)または死亡(1)とする。観測期間 **time3** を式(10)で求めると、患者のデータは id、イベントは **time3** で示せる。

$$\text{time3} = \text{time2} - \text{time1} \quad (10)$$

全患者数 j とし、全患者の観測期間 **time3** のデータ **time3₁**、...、**time3_m** が集められ、並べ替えると式(11)で示される。

$$0 < \text{time3}_1 < \dots < \text{time3}_m \quad (11)$$

このとき **time3_m** は最大値である。**time3_m** を除いた半開区間 $[0, \text{time3}_m]$ は、式(12)の半開区間 p_i に分割できる。

$$p_i = (\text{time3}_{i-1}, \text{time3}_i) \quad i = 1, \dots, m \quad (12)$$

ノンパラメトリックな生存時間解析手法としては Kaplan-Meier 法が良く用いられる。この手法は丹後¹⁸⁾によれば、**time3_i** を t_i とおき、時間 t_j の生存関数 \hat{S} の最尤推定値として式(13)を与える。

$$\hat{S}(t_j) = \prod_{i|t_i < t_j} \left(\frac{n_i - d_i}{n_i} \right) \quad (13)$$

式(13)の右辺 $(n_i - d_i)/n_i$ は、期間 p_i の生存確率である。 n_i はサブ期間の患者数、 d_i は期間 p_i におけるイベント数（死亡者数）である。

(3) 生存率解析による山岳トンネルの劣化評価値^{2 1)}

図-4.5.1は、寒冷地（北海道）における国道の山岳トンネル覆工コンクリート（矢板工法：176本）における補修履歴（表-4.5.1参照）データを基に生存時間解析のKaplan-Meier法を適用し、山岳トンネル覆工における生存曲線を求めたものである。図-4.5.1より、供用（経過）年数に伴い生存率曲線は低下しており、供用30年頃に境に曲線の勾配がなだらかに遷移している。供用開始から約50年で生存率が0となっており、全山岳トンネルが補修されていると推定される。

次に、補修履歴から求めた補修年の供用開始の度数分布を図-4.5.2に示す。図-4.5.2より、補修や補強を実施しているトンネルは、供用開始から26~30年において多く、またその分布の傾向は正規分布を示している。なお、供用60年以降の山岳トンネルにおける補修・補強記録が使用した保守履歴がなかったため、データが存在しない。

表-4.5.1 トンネル構造体や付属構造物に対する補修・補強などの管理記録表（例）

トンネル名	延長 (m)	幅員 (m)	建築 限界高 (m)	トン ネル 等級	竣工 年月	壁面 区分	路面 種別	照明(灯)		歩 道 (管走路)	非常用 施設	補 修 履 歴
								種類	数量			
Aトンネル(上り)	747	(10.75) 7.0	4.7	B	H3.3	覆工	Co	ナトリウム	193	0.75+2.0	有り	H2 ラジオ再放送施設 H8 無線通信補助設備 H9 通信補助、ラジオ再放送 H17 内面補強 H20 白色機能性砕石マスチック舗装
Aトンネル(下り)	671	(10.75) 7.0	4.7	B	H10.3	覆工	Co	ナトリウム	200	0.75+2.0	有り	H1 漏水防止 H9 通信補助 H20 白色機能性砕石マスチック舗装
Bトンネル	464	(8.5) 6.5	4.5	C	S44.3	覆工	Co	ナトリウム	218	0.75×2.0	有り	H5 照明取替(120灯増) H7 ラジオ再放送施設 S53 舗装打替 H20 非常用施設更新 H27 面導水、繊維シート接着、耐火防護補修 H28 白色SMA舗装
Cトンネル	75	(7.0) 6.5	4.5	D	S39.9	覆工	Co	ナトリウム	47			H25 断面補修 H26 剥落防止 H28 断面修復、剥落対策(繊維シート)、ひび割れ補修、 面導水補修、裏込注入

次に、寒冷地（北海道）における山岳トンネル（43本）の定期点検データの劣化区分値より求めた、トンネルの劣化評価値の推定値と供用（経過）年数の関係を図-4.5.3に示す。図-4.5.3より、供用年数とともに劣化が(遷移)進行していることが分かる。これより、山

岳トンネルにおける保守履歴を用いた山岳トンネル覆工の劣化遷移は生存時間解析より求められることが分かる。

ここで、生存時間解析により得られる劣化評価値（生存率）は、Kachanovの劣化モデルと同様な0.0～1.0となる。したがって、保守履歴より求めた生存率解析は定期点検より求めた簡易THIと同様に山岳トンネル覆工における劣化評価値を表す指標となり、加えてその劣化過程はBlack-Scholesモデル^{2,2)}で表現できると考えられる。

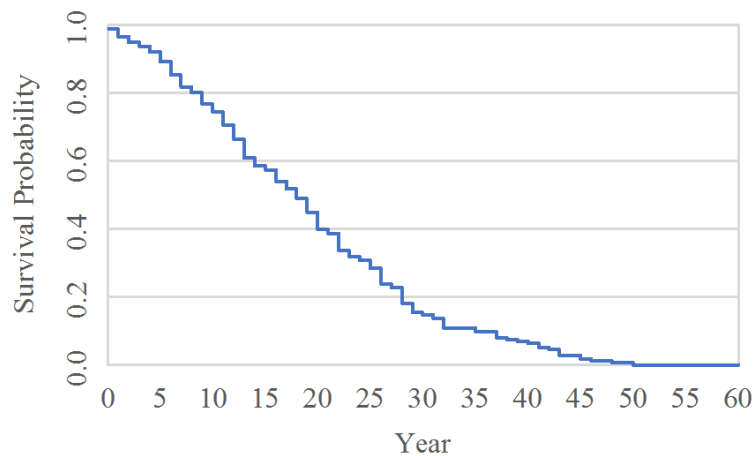


図-4.5.1 生存曲線－全トンネル

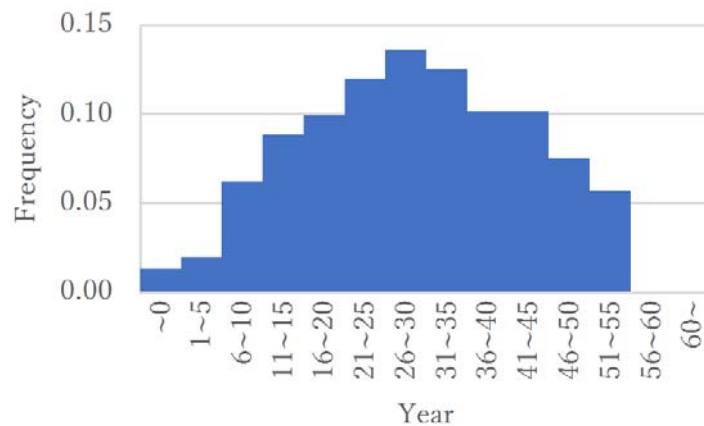


図-4.5.2 補修の分布－全トンネル

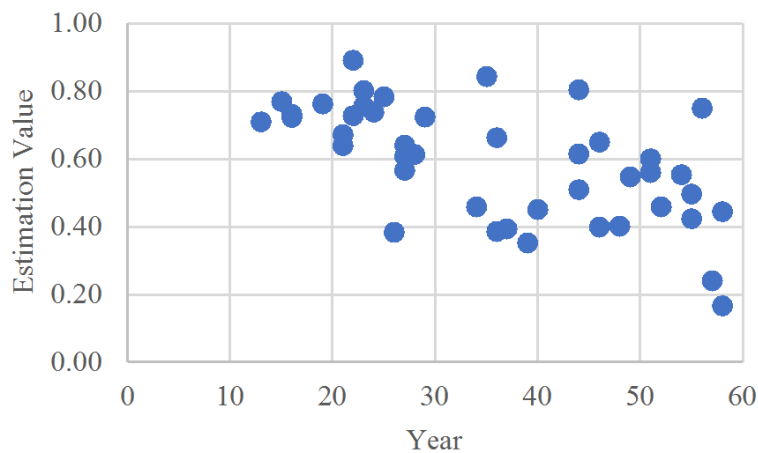


図-4.5.3 劣化評価の平均値の分布

(4) 構造形式・地域特性

図-4.5.4、図-4.5.5 は、寒冷地（北海道）の山岳トンネルの維持管理データに生存時間解析を適用し、構造形式別（NATM 工法、矢板工法）で推定した生存曲線を示したものである。NATM 工法（49 本）は普及して 30 年程度であるため、それ以降のデータはなく、供用期間 20 年で全トンネルが補修されている。矢板工法（123 本）は図-4.5.1 と同様の傾向を示している。また、寒冷地（北海道）を 5 つの地域に分け、そのうちの日本海南（63 本）と日本海北（22 本）の生存曲線を図-4.5.6、図-4.5.7 に示す。日本海南は図-4.5.5 と同様の傾向を示している。一方、日本海北では供用期間 13 年と 33 年に補修の数が多く、供用期間が 43 年で全トンネルが補修されていることが分かる。日本海北は、日本海南に比べ補修時期が早く地域性が現れている。これより、地域性を考慮することで精度の高い維持管理計画を立案することが可能であることを示唆している。

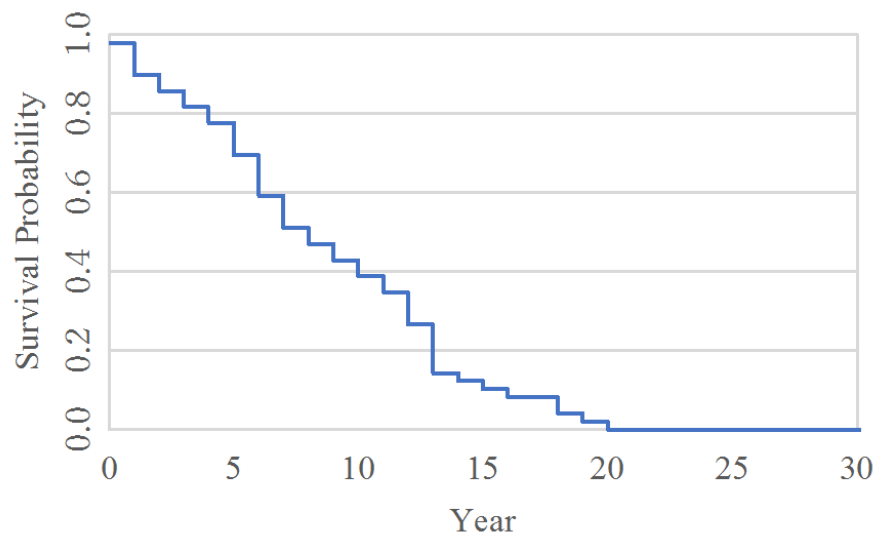


図 - 4.5.4 生存曲線 - NATM 工法

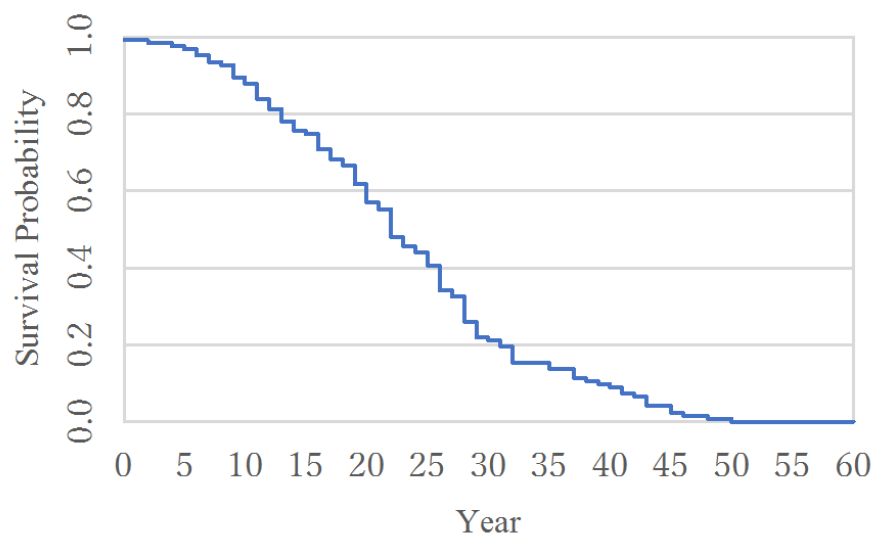


図-4.5.5 生存曲線 - 矢板工法

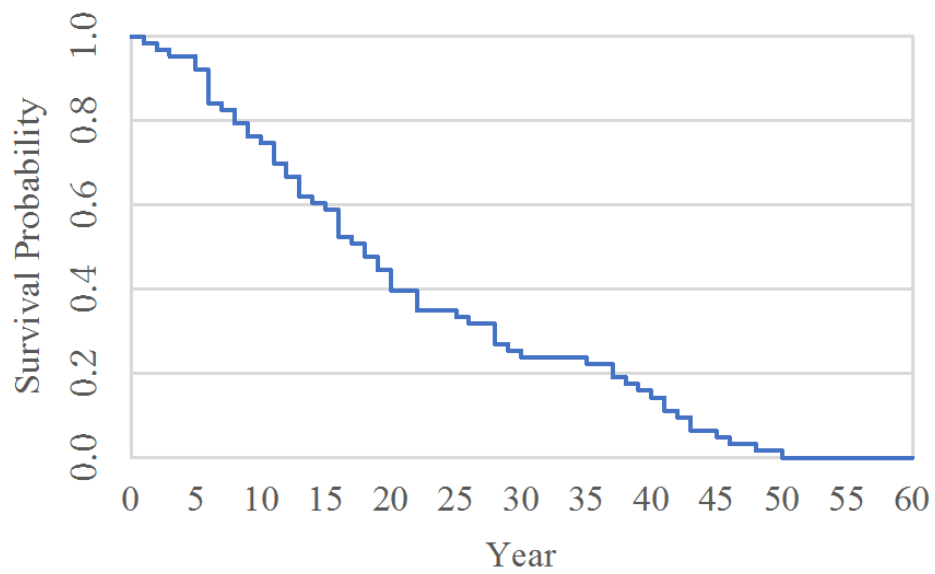


図-4.5.6 生存曲線－日本海南

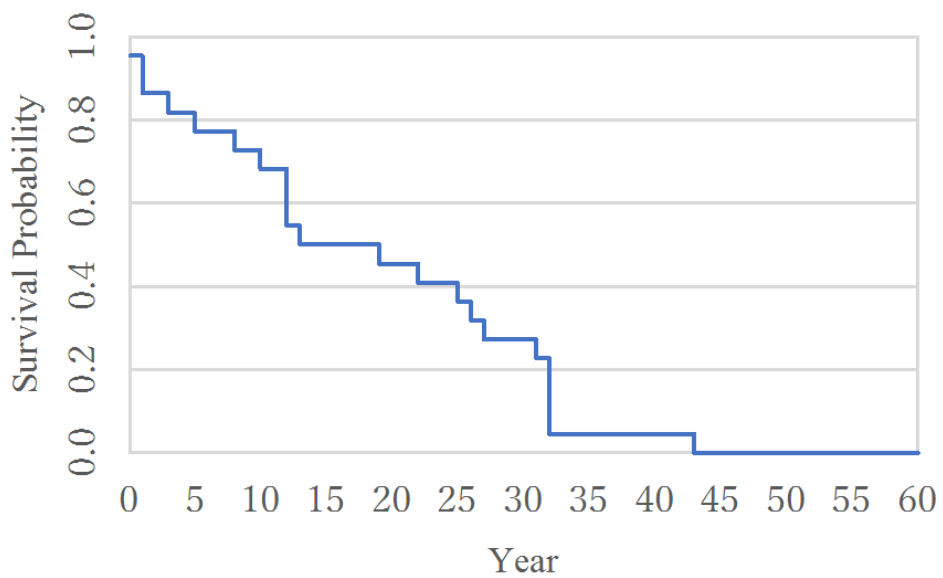


図-4.5.7 生存曲線－日本海北

4.6 まとめ

本章では、山岳トンネル覆工コンクリートの定期点検データと補修・補強などが主な記録であるトンネル保守履歴（管理台帳など）の2つの管理データに基づき、寒冷地（北海道）に対するトンネル覆工における総合的な劣化特性の把握やそれらの予測に対する検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 山岳トンネルにおける定期点検データおよびトンネル保守履歴（山岳トンネル管理台帳など）の2つのデータベースをもとに、寒冷地（北海道）の山岳トンネルの劣化特性を評価するために簡易な健全度指数（簡易 THI）を提案した。本研究で提案した簡易 THI の検証を行った結果、確率・統計的な損傷度成長モデルと定期点検データにより、簡易 THI における平均値と分散値の時間的な遷移過程を推定することで、それらの長期的な劣化状況の予測は可能である。
- (2) 山岳トンネルの構造物としての寿命は、新設トンネル、既設トンネルともに、ライフサイクルコスト(LCC)が最小化となる時点での更新時期が基本となるが、明確に定義されてものはない。このため、本研究において山岳トンネルの寿命を定義した。
- (3) 定義した寿命に基づき、寒冷地（北海道）における山岳トンネルの保守履歴に生存時間解析を適用した結果、求められた生存率曲線は基本的に山岳トンネル覆工コンクリートにおける劣化状況、補修・補強を表現できることが分かった。

今後、寒冷地（北海道）の山岳トンネルにおいて、覆工コンクリートの劣化の時間的遷移やその分布傾向の詳細な把握は予防保全を前提としたトンネルマネジメントシステム(TMS)には不可欠な情報となる。本研究で提案した手法を用いることにより、山岳トンネルの寿命や適切な補修・補強時期の設定が可能となる。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 国土交通省道路局国道課: 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) 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.
- 4) 須藤敦史, 佐藤京, 西弘明, 野村貢: 確率過程を用いた寒冷地トンネル覆工における性能(劣化)水準の同定, 土木学会, 第 19 回トンネル工学研究発表会, 2009.11.
- 5) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No.801/I-73, pp.69-82, 2005.10.
- 6) 日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, 1993.11.
- 7) Kachanov, R. : Rupture time under creep conditions, Int. J. of Fracture, 97, xi-xviii.
- 8) Hiroaki Kanekiyo, Osamu Maruyama, Atsushi Sutoh, Takashi Sato : A mixed Poisson model for random damage growth of tunnel concrete linings, 62nd Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics, pp.149-157, 2013.
- 9) Shepard, R. W. and Johnson, M. B. : California Bridge Health Index -IBMC-005, Technical Report, Caltrans, 1999.
- 10) AASHTO : PONTIS User's Manual, Release 3.2, 1997.
- 11) 渡邊一悟, 石川博之, 佐藤京, 加藤静雄, 佐藤誠, 大島俊之: 北海道 BMS の開発と本格運用に向けた課題, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 61 号, 2005.
- 12) 大島俊之, 三上修一, 丹波郁恵, 佐々木聡, 池田憲二: 橋梁各

部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析，土木学会論文集 No.703/I-59, pp.53-65, 2002.4.

- 1 3) 禿和英,須藤敦史,兼清泰明,佐藤京,丸山収,檀寛成：山岳トンネルにおける判定区分を用いた不規則な遷移を考慮した劣化指標，（公社）土木学会第36回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集,pp.41-44, 2018.12.
- 1 4) 須藤敦史,佐藤京,兼清泰明：点検データに基づいた寒冷地におけるコンクリート橋梁の劣化過程，日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.2, pp.1285-1289, 2017.
- 1 5) 禿和英,須藤敦史,前田智尋,小山 純平,森快斗：寒冷地におけるトンネル覆工の劣化遷移に関する一考察，土木学会東北支部技術研究発表会（令和元年度），VI-28, 2020.3.
- 1 6) 須藤敦史,佐藤京,兼清泰明,丸山収,西弘明：寒冷地の道路構造物（橋梁・山岳トンネル）における劣化特性とその分布について，土木学会構造工学論文集 F1, Vol.62A, pp.156-165, 2016.3.
- 1 7) D. G. Kleinbaum: Survival Analysis, A Self-Learning Text, Springer:New York, 1996.
- 1 8) 渡邊一悟,石川博之,佐藤京,加藤静雄,佐藤誠,大島俊之：北海道 BMS の開発と本格運用に向けた課題，土木学会北海道支部論文報告集，第61号，2005.
- 1 9) 山崎崇央,石田哲也：生存時間解析を用いた東北地方における橋梁コンクリート部材の劣化定量分析，土木学会論文集 F4, Vol.71, No.4, pp11-22, 2015.
- 2 0) 丹後敏郎：統計モデル入門，朝倉書店，246p, 2000.
- 2 1) 禿和英,須藤敦史,佐藤京：北海道のトンネルにおける維持管理データによる劣化モデルの考察，（一社）北海道開発技術センター，寒地開発研究会第35回寒地技術論文・報告集, Vol35, pp.69-74, 2019.11.

第5章 道路構造物の維持管理戦略

5.1 はじめに

わが国の社会資本は、高度経済成長期を中心に、社会的ニーズに応じて着実に整備が進められてきた。その結果、国民の生活・経済活動を支えるとともに、地域の安全を確保する基盤として大きな役割を果たしている。しかし、近年、これまで整備されてきた社会資本について、建設後相当の期間を経過するケースが増えつつある。例えば、道路トンネルにおいては、建設後50年を経過したトンネルの割合は、約20%程度に達しており、10年後には約35%に達する。橋梁においては、もっと深刻で、2030年には約50%程度が建設後50年以上経過したものとなる。

社会資本の耐久性は、社会環境、自然環境等により異なるものであり、橋梁においては良好な状態を維持する期間として橋の設計供用期間は100年を標準とすることを道路橋示方書¹⁾で規定している。社会資本の構造物ごとに劣化の程度に差はあるが、時間とともに徐々に機能低下していくことが予想され、老朽化に伴う機能低下等により、障害事例が見られる。例えば、道路橋や道路トンネルで通行規制が行われている状況である。

適切に社会資本の維持管理・更新を行うためには、施設を構成する部材や材料の特性に応じて、早期に損傷を発見し事故や大規模な修繕や更新に至る前に対策を行う「予防保全的管理」を推進する戦略的維持管理が重要である。

これは、定期的な点検の実施によって社会インフラの健全度を診断し、その結果を踏まえて長寿命化計画を策定し、計画に基づく予防的な補修・補強を行うものである。大規模な修繕や更新に至る前の損傷が軽微な段階で対策を講じることにより、構造物の延命化、トータルコストの縮減を図ることが可能となる。

表-5.1.1は、各自治体における維持管理計画の立案状況を示したものである（各自治体のHPに掲載のあるものを調査・整理）。表-

5.1.1 からも分かるように、47 都道府県において構造物種別による差はあるが維持管理計画は立案済のようである。市町村についても同様な調査を実施した。調査対象は、47 都道府県において市町村数（35 市町村）及び財政規模（600 億円）が全国の平均的である宮城県の市町村を対象とした。宮城県における市町村において維持管理計画の立案状況の調査結果を表-5.1.2 に示す。市町村に対象の構造物があるかどうかは調査できていないが、全体的にみて、維持管理計画が立案されていない構造物がある。財政的に厳しく、人的資源も乏しい市町村においては、維持管理戦略をどのように立案していくかが課題となる。

このように、今後、財政的、人的資源に厳しい環境になる自治体においては、限られた予算の中で維持管理・更新を優先的に行う必要がある施設の見極めのための人的資源の確保や技術力向上、一層のコスト縮減のための新技術の導入や技術開発、予防保全的管理の導入など様々な課題がある。

道路構造物の戦略的な維持管理のためには、ライフサイクルコストを視野に入れた予算の平準化、技術者の確保・研修制度の充実、新技術導入や技術開発、事業を理解してもらうための説明責任、持続的な維持管理等を行う必要がある。この中でも、本研究対象とした蓄積データを基にした統一された指標による健全性の評価や点検データや更新データを用いた健全性の将来予測は、予防保全的管理においては特に重要である。

表-5.1.1 各自治体の維持管理計画立案状況

都道府県	維持管理計画の有無	道路構造物種別						
		橋梁	トンネル	舗装	シェッド	大型カルバート	横断歩道橋	標識等
北海道	有	○	○	○	○	○	○	○
青森	有	○	○		○	○		
岩手	有	○	○	○				
宮城	有	○					○	
秋田	有	○			○		○	○
山形	有	○	○	○	○		○	
福島	有	○			○			
茨城	有	○	○	○			○	
栃木(※)	有	○	○	○	○		○	
群馬(※)	有	○	○	○	○	○	○	○
埼玉	有	○						
千葉	有	○	○			○	○	
東京	有	○	○					
神奈川	有	○	○				○	○
新潟	有	○	○	○	○			
富山	有	○						
石川	有	○			○			
福井	有	○						
山梨	有	○	○	○				
長野(※)	有	○	○	○	○			
岐阜	有	○	○	○				
静岡	有	○	○	○				
愛知(※)	有	○	○	○	○	○	○	○
滋賀	有	○						
京都	有	○						
大阪	有	○	○	○		○	○	○
兵庫	無	○						
奈良	有	○						
和歌山	有	○	○		○	○	○	○
鳥取	有	○	○		○	○	○	○
島根	有	○	○		○	○		○
岡山(※)	有	○	○	○	○	○	○	○
広島	有	○	○	○				
山口	有	○	○		○	○	○	○
徳島	有	○	○					○
香川	有	○						
愛媛	有	○						
高知	有	○	○		○			○
福岡	有	○		○				
佐賀	有	○	○					
長崎(※)	有	○	○	○	○	○		○
熊本	有	○	○	○				
大分(※)	有	○	○		○	○	○	○
宮崎	有	○	○		○	○	○	○
鹿児島	有	○	○					
沖縄	有	○						

表-5.1.2 宮城県各市町村における維持管理計画立案状況

市町村名	維持管理の有無	道路構造物種別						
		橋梁	トンネル	舗装	シェッド	大型カルバート	横断歩道橋	附属物等
仙台市	有	○	○	○	○	○		○
石巻市	有	○						
塩竈市	有	○						
気仙沼市	有	○						
白石市	有	○						
名取市	有	○						
角田市	有	○						
多賀城市	有	○						
岩沼市	有	○						
登米市	有	○						
栗原市	有	○	○					
東松島市	有	○						
大崎市	有	○	○				○	
富谷市	有	○						
蔵王町	有	○		○				
七ヶ宿町	有	○						
大河原町	有	○	○	○				
村田町	有	○		○				
柴田町	有	○						
川崎町	有	○						
丸森町	有	○						
亘理町	有	○						
山元町	有	○						
松島町	有	○	○					
七ヶ浜町	有	○						
利府町	有	○						
大和町	有	○						
大郷町	有	○						
大衡村	有	○					○	
色麻町	有	○						
加美町	有	○						
涌谷町	有	○						
美里町	有	○						
女川町	有	○						
南三陸町	有	○						

5.2 メンテナンスサイクルの運用

(1) コストの視点（ライフサイクルコスト、トータルコスト）

多数のインフラの維持管理を限られた予算の中で合理的に行うためには、コストの視点も重要である。特に、トンネル、橋梁などの道路構造物の社会インフラは耐用期間が格段に長い。そのため、所用耐用期間内において、一定の性能をインフラのライフサイクルにわたって発揮させることを前提とした上で、単なる初期の建設費用だけでなく、その後の維持管理や撤去に関する費用を含めたライフサイクルにわたる総コスト（ライフサイクルコスト、LCC）をできるだけ低減する必要がある。

構造物の設計や維持管理における一つの考え方は、LCCを最小化するものである。従来、初期建設費用の最小化を基本とした構造物の設計・施工が行われてきたが、結果的に維持管理への配慮が不十分となり、早期に変状が顕在化して補修・補強を要する場合があるなど、LCCとしては最小化されていない事例が見受けられる。

従来のインフラの維持管理は、変状が顕在化してきてからの「事後保全」が多かった。塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物を例に挙げれば、鉄筋腐食が始まると、その進行を抑制することはできても、鉄筋腐食のない元の状態に戻すことはできないほか、場合によっては既に対象構造物を解体撤去せざるを得ない場合も考えられる。一方で、コンクリート内部の塩化物イオン濃度の変化を定期的に把握し、発錆限界塩化物イオン濃度を超過する前に表面被覆等の対策を行えば、鉄筋腐食を生じさせずに合理的な維持管理を行うことができる。このようなインフラに変状が顕在化する前から適切な対策を図る「予防保全」を行うことは、LCCの低減を図ることが可能になる。

(2) 情報蓄積の重要性

インフラのメンテナンスに限らず、様々な局面で意思決定を行うには情報活用が必要不可欠である。社会インフラにおいては、造っ

たインフラは、必ず維持管理が必要であり、今後高齢となる社会インフラが増えることから、メンテナンスが必要なインフラはますます増えることが予想される。

インフラのメンテナンスを戦略的に行うためには、情報の利活用が重要であるが、現時点では、メンテナンスに必要な情報の蓄積が十分に行われておらず、存在したとしても各機関でばらばらに存在したり、様式が統一されていなかったりと、活用するに当たって効率的でないことがある。必要な時に必要な情報が得られないため、メンテナンスの現場では、適切な判断を迅速に行うことが難しい状況である。

(3) 情報の利活用

これまでの情報や定期的に得られる情報をメンテナンスに活用するには、対象となる情報を明確にする必要がある。情報活用の目的を明確化し、その目的に合致した情報を蓄積することが重要である。この蓄積された情報を維持管理に活用し適切な予防保全を行うことが必要と考える。メンテナンスでは、対象となるインフラによって収集すべきデータも異なるが、目的が明確になっていれば、おのずと収集すべきデータも明らかになる。

表-5.2.2に一般的なメンテナンスで必要となる情報の種類とその概要を示す。紙ベースでの資料もあるが、維持管理への情報活用を考えると電子データに変換するのが望ましく、インフラごとに必要な情報を蓄積できるシステムが必要となる。また、やみ雲にたくさんのデータを収集するのは費用がかかるばかりか、整理等が煩雑になり、データの信頼性を落とすことになるので、どのようなデータが必要で、どのように活用するかをよく吟味することが重要である。また、組織内でデータ入力の手順やチェック体制等の運用ルールが定まっていない場合には、品質の低いデータが混入する可能性があるため、品質の低いデータを発生させない工夫、取り除く工夫が必要である。

表-5.2.2 メンテナンスで必要となる情報の種類

項目	概要
環境条件、使用条件	立地している環境条件、交通量等
設計記録(設計図書)	設計図面等
使用材料	工事において使用した材料、品質管理記録等
工事(施工)記録	施工方法、気象条件等、出来形検査結果等
竣工検査記録	竣工検査記録(初期欠陥の記録を含む)等
点検・調査記録	点検調書等
補修・補強記録	点検・診断記録、補修・補強記録工事内訳等

(4) 情報の統合化

メンテナンスに関わる意思決定を迅速かつ確実に行うためには、メンテナンスに必要な情報を統合し、一元化することが望まれる。情報を一元化することで情報活用が円滑に行われ、状況の把握ができ、現在の傾向や問題の詳細までが認識でき、原因と今後の予測、対策の立案が可能となる。しかしながら情報の一元化は進んでないのが現状である。そのため、今後はデータの活用を国全体で考える視点を持ち、単に自組織に閉じた取組みとするのではなく、自組織を越えたデータマネジメントが望まれる。他機関のデータベースとの互換を円滑に行うため、データの標準化が望まれる。

5.3 道路構造物の維持管理戦略

(1) 維持管理計画の現状

逼迫した財政状況のもとで、各施設の要求性能を満足しつつ維持管理・更新等に係るトータルコストの縮減・平準化を図るためには、点検・診断等の結果を踏まえて、個別施設毎に戦略的な維持管理方針に基づく維持管理計画を策定し、これに基づき計画的に維持管理・更新を進めていくことが重要である。

これまで道路橋、トンネル、河川構造物、下水道施設等をはじめとする多くのインフラにおいて長寿命化修繕計画等の策定が進められており、一定の進捗が見られる一方、修繕計画を策定することなくコンクリート片の落下など不具合発生後に対処療法的に修繕等を実施している施設も多数存在しており、施設や管理者によって取組みの進捗や計画内容にバラツキがみられる。

その要因は、施設毎の維持管理方針が不明確であること、計画策定の前提となる点検・診断の実施や情報の蓄積が十分ではないこと、優先順位の考え方等の計画策定のノウハウが不足していること等、様々であり管理者の取組み状況に応じたきめ細かな対応をいかに図っていくかが課題である。

(2) 維持管理計画のあり方

維持管理計画を「策定」する意義は、維持管理事業の具体的な実施方法を明らかにするとともに、納税者である住民や利用者へ、維持修繕事業等の内容を説明し、アカウンタビリティ(説明責任)を向上させること、維持管理を計画的かつ持続的に実施していくことである。

1) 住民や利用者への明確な説明

維持管理に必要な予算とその効果を明確にすることにより、住民や利用者に対して、財政の透明性を高めるとともに、メンテナンスの必要性を説明する。

2) 管理者内部への説明

維持管理に必要な予算、期間、事業の内容を明確にし、新設事業等も含めた事業全体の中で戦略的な維持管理に必要な予算や人員の確保に対する合意形成を図る。

3) 維持管理の持続的な実施

維持管理計画の実施状況を持続的に把握・評価して、維持管理のPDCA サイクル(計画→実施→評価→見直し)のスパイラルアップを図る。

(3) 優先順位・予算平準化

1) 優先順位・予算平準化の現状

限られた予算の中で施設の健全性・安全性を確保しつつ、戦略的なメンテナンスを実施していくためには、点検・診断結果に基づき今後必要となる修繕・更新等の対策費用を適切に把握したうえで、優先順位の高い施設より戦略的に対策を実施していくことが重要である。

2) 優先順位・予算平準化のあり方

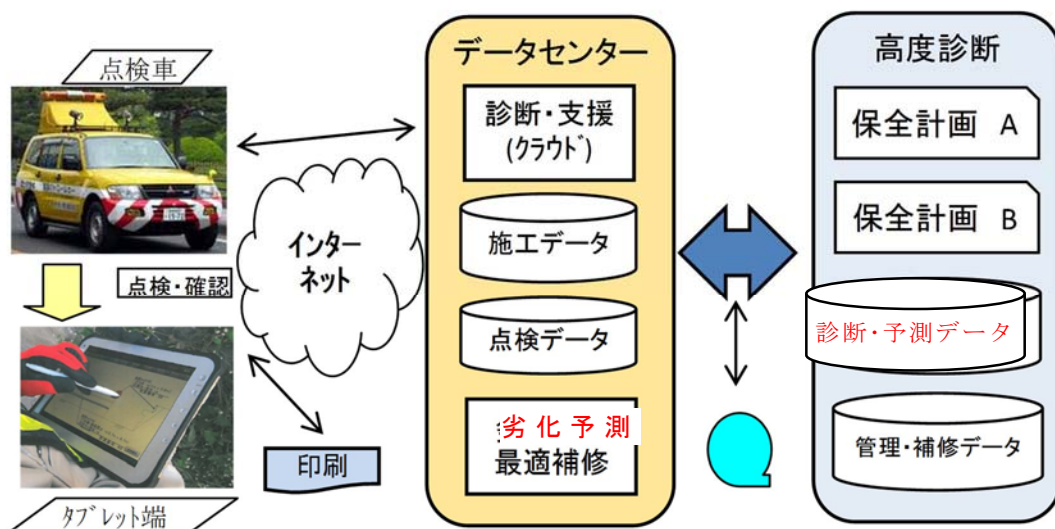
今後、メンテナンスサイクルをスパイラルアップしてより適切な維持管理を実施していくためには、同種施設間の部分的な最適化から1歩踏み出し、異なる施設間においても優先度評価を行い、施設種別に関わらず本当に優先度が高い施設より修繕・更新等の対策を実施していく必要がある。

しかしながら、社会インフラを構成する各施設の役割・機能は様々であり、異なる施設間で対策の優先度を判定するのは簡単ではない。異なる施設間の優先度を評価するための手法の一つとして、維持管理におけるリスクに着目し、維持管理を怠ったとき(補修・更新を先送りにしたとき)に施設の機能低下による事故や不具合が発生する確率(発生確率)と不具合が起こった場合の人命や社会的被害の大きさ(社会的影響度)を2軸で評価し、リスクの高い施設より優先的に対策を実施していく方法などが考えられる。

(4) 維持管理システム

道路構造物は、周辺・自然環境からの長年の影響等により徐々に劣化し、損傷し、やがて崩壊する。道路構造物は、利用者が不特定多数であり、構造物の損傷、崩壊は、道路利用者を巻き添えにする可能性が高い。このような事態を回避するためには、日々の点検・確認、定期的な点検・調査は特に重要となる。

点検・調査等で収集されるデータは膨大となるが、インフラを維持管理していく上では重要なデータとなる。図-5.3.1は、維持管理システムの概念図を示す。本研究では、図-5.3.1の点検や管理データを用いた劣化予測により、診断・予測データの精度向上が期待されることを示した。



※赤字は本研究結果より精度向上となる項目

図-5.3.1 維持管理システムの概念図

これからは、B I M / C I Mの活用により、設計・施工時点から3次元データの取得が可能となる。さらに、走行型トンネル点検車を用いたトンネル点検の技術も進歩しており、その点検データをAIを活用してひび割れ幅やひび割れ長さを評価することも可能となる。

(5) 維持管理戦略

道路構造物の保全方法には、機能低下が明白になった時点に対応する事後保全と計画的に機能低下を防止する予防保全とがある。予防保全は、点検により把握した兆候から機能低下を予測して事前に劣化進行を予測して維持管理を行う。道路構造物の維持管理は、図-5.3.2に示すように設計、施工、点検、健全度評価、劣化予測、維持管理計画のサイクルが基本モデルである。

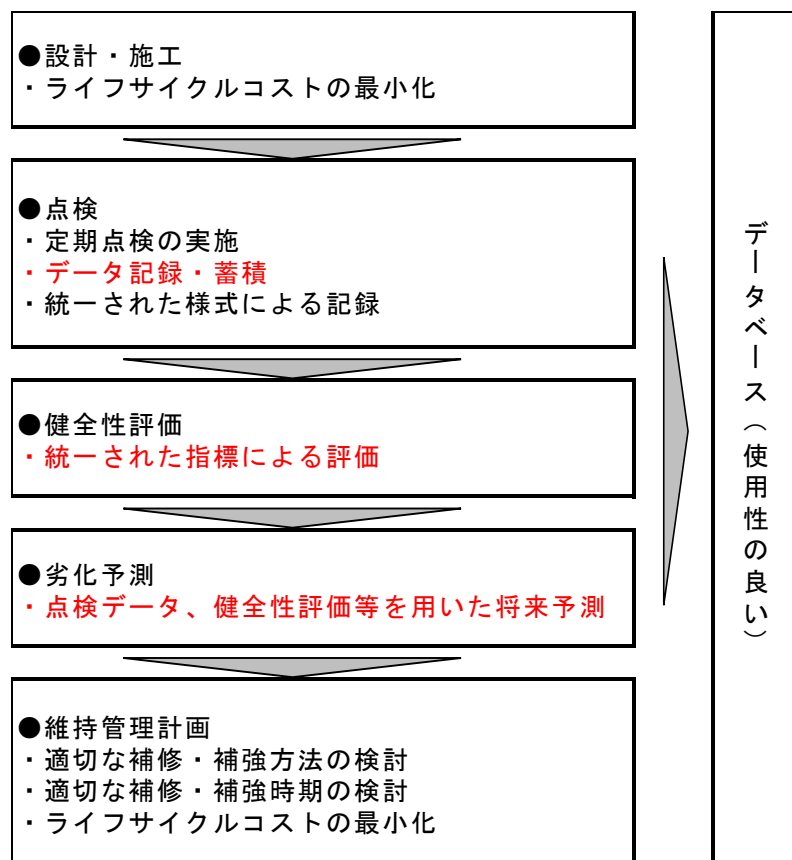


図-5.3.2 維持管理サイクルの基本モデル

図-5.3.2に示した基本モデルを回すことは、道路構造物の計画的な維持管理においては重要なことであり、本研究では①データの記録・蓄積、②統一された指標による評価、③点検データ、健全性評価等を用いた将来予測による精度向上を図る手法であることを3章、4章で示した。

①については、点検記録とトンネル台帳からトンネルの劣化評価・

予測を実施し寒冷地のトンネルにおける維持管理に利用可能なデータのデータベース化を実施した。②については、寒冷地（北海道）の覆工表面では点検時期によるひび割れ幅の変動が確認されたので、点検時期の統一もしくは点検時のひび割れ幅のキャリブレーションが望ましいことを示した。③については、劣化状態の将来予測が示せたことにより、トンネル覆工の維持管理において、いまだなされていない予防保全の考え方を適用することが可能になることを示した。ここで、維持管理計画を立案する上で、利用者の安全性、道路構造物の安全性の閾値の設定が特に重要である。閾値については、それぞれの要求性能を満足することが必要となる。これらの閾値が設定されて時間経過に伴う劣化予測を行い適切な時期に適切な補修・補強を施すことが予防保全となる。このためには、精度の高い劣化予測モデルを適用し、建設後の維持管理に配慮した設計が重要となる。すなわち、精度の高い劣化予測を向上させることで予算の平準化や維持管理コストの低減が可能となる。このような観点から、定期的に行われる点検から得られたデータに対して、次回点検時に現時点での予測結果があっていたのかどうかを検証し、あっていなければその要因を分析・評価することが重要である。その結果を劣化モデルにフィードバックし改良を加え、より精度の良い劣化モデルに改善していくことが必要である（図-5.3.3 参照）。

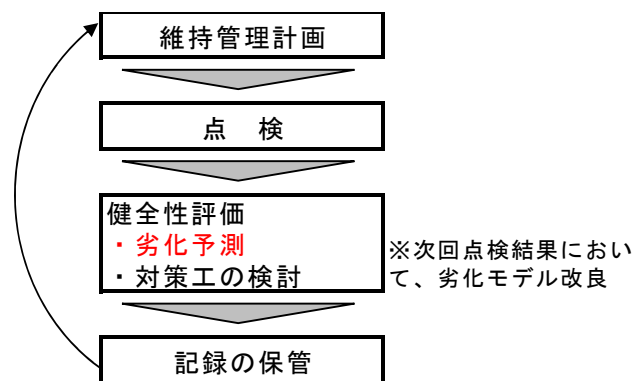


図-5.3.3 劣化モデル改善

本研究では、寒冷地トンネルの覆工コンクリートの点検データを用いて確率・統計論を基本とした劣化予測を提案した。構造物には、橋梁、ボックスなどの種々のものがあり、北海道の橋梁、ボックスに

において、それぞれの点検結果と経過年数に対する確率・統計論を基本とした劣化モデルの有用性が確認されており²⁾、本研究でも具体的に確認している³⁾。これより、道路構造物の維持管理計画を立案する上で本研究において提案した劣化モデルにより、種々の構造物に対して同じ指標で現状把握、劣化予測の評価が可能となる。また、**図-5.3.3**に示したように点検データの蓄積により、提案した劣化モデルを改善することで精度の高い劣化モデルの構築が可能となる。

5.4 まとめ

適切に社会資本の維持管理・更新を行うためには、早期に損傷を発見し事故や大規模な修繕や更新に至る前に対策を行う「予防保全的管理」を推進する戦略的維持管理が重要である。本章では、維持管理を行う上での留意点、方針等について検討した。

- (1) 47 都道府県のホームページから、維持管理計画の立案状況について調査した。構造物種別による差はあるが維持管理計画は立案済である。一方、宮城県における市町村において維持管理計画の立案状況を調査した結果、維持管理計画が立案されていない構造物があり、財政的に厳しく、人的資源も乏しい市町村においては、今後の維持管理戦略をどのように立てていくかが課題である。
- (2) メンテナンスサイクルを効率的、効果的に運用していくためには、①コスト、②情報蓄積、③情報の利活用、情報の統合化の視点が特に重要であることを示した。
- (3) 道路構造物の維持管理計画の現状は、構造物種別により取組みや計画内容にバラツキがある。バラツキの要因として前提となる点検・診断結果の情報の蓄積が十分でないこと、優先順位の考え方やノウハウが不足していること等、今後きめ細かな対応を図っていくことが課題である。
- (4) これらの課題を踏まえ、維持管理計画のあり方として、①住民や利用者への明確な説明、②管理者内部への説明、③維持管理の持続的な実施が重要であることを述べた。さらに、優先順位・予算の平準化、現状の維持管理システムの運用状況から、戦略的な維持管理計画を立案する上で特に重要な劣化予測の改善手法について述べた。
- (5) 戦略的維持管理における維持管理サイクルの基本モデルと3章、4章の本研究成果との関連性について述べた。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成 29 年 11 月国土交通省道路局国道課，平成 14 年 4 月．
- 2) 須藤敦史，佐藤京，兼清泰明，丸山収，西弘明：寒冷地の道路構造物（橋梁・山岳トンネル）における劣化特性とその分布について，土木学会 構造工学論文集，Vol.62A，pp156-165，2016.5.
- 3) 禿和英，須藤敦史，前田智尋，小山 純平，森快斗：寒冷地におけるトンネル覆工の劣化遷移に関する一考察，土木学会東北支部技術研究発表会（令和元年度），VI－28，2020.3.

第6章 結論

山岳トンネルに対する健全度判定は、劣化状況に対して5段階の判定区分（レイティング値）であるため、連続的な劣化評価・予測を前提とした予防保全（ライフサイクルマネジメント：LCM）の概念が適用しにくい。

さらに、寒冷地（北海道）における山岳トンネルなどの道路構造物では、寒さによる環境劣化が本州やその他の地域に比べより厳しく、加えてその劣化形態が複雑で、かつばらつきが大きいなどの理由により、供用中の劣化状態の把握や将来予測は非常に難しいのが現状である。

本研究は、上記の現状を踏まえ、寒冷地（北海道）のトンネル覆工を対象として、定期点検より得られる結果をCAD図などを用いて連続的な劣化評価値のデータベースを整備し、同時に、複合 poisson 過程を導入した確率論による連続劣化モデルを提案した。提案した簡易 THI は、寒冷地（北海道）の山岳トンネルの判定区分値から劣化の把握と予測の簡便化を図り、連続的な劣化予測が可能であることを検証した。

また、寒冷地（北海道）の山岳トンネルにおいて現在実施されているトンネル覆工の定期点検データと補修・補強などが主な記録であるトンネル保守履歴（管理台帳など）の2つの管理データに基づき、寒冷地（北海道）のトンネル覆工における劣化評価に用いるそれぞれのデータが、どの劣化現象なのかを定義するとともに定期点検データと保守履歴の情報の双方からトンネル覆工における劣化過程の同定を実施した。さらに、新たに提案した本手法における各管理データ（定期点検・保守履歴）の活用法を示し、トンネル覆工の予防保全へ適用性を示した。

本研究で得られた特に重要な成果は次の4点である。

- ① 環境劣化が厳しい寒冷地（北海道）に位置する山岳トンネルにおいては、劣化形態が複雑であることから、予防保全を前提とした維持管理には、坑内温度に連動した覆工コンクリートの挙動や経年的な圧縮強度・中性化深度など基本性状に関する変化の把握・評価を行うことが重要であることを整理した。特に、定期点検結果において、ひび割れ幅や長さへの点検時期における温度補正が必要であることを示し、点検時期（季節）の統一もしくは点検時の坑内気温によるひび割れ幅のキャリブレーション（例えば坑内気温 15℃ に統一したひび割れ幅の記録など）を行うことの必要性について示した。
- ② 橋梁の劣化評価で用いられている BHI (Bridge Health Index) を参考に、トンネル点検結果から得られた劣化指標（レイティング値）を連続的に評価するためのトンネル健全度指数（簡易 Tunnel Health Index : THI）を提案した。トンネル健全度指数は、対数正規分布に近い分布を示し、かつ供用期間に応じて劣化度は平均値・分散値は一様に進行する傾向が見られ、トンネル覆工の健全度を連続的に評価できることを示した。
- ③ 保守履歴のデータベースをもとに、提案した簡易 THI における平均値と分散値の時間的な遷移過程を推定することで、補修・補強履歴も考慮した長期的な劣化状況の予測が可能であることを示した。
- ④ 医学・薬学分野で用いられている生存（率）解析を用いて、寒冷地（北海道）における山岳トンネル覆工コンクリート寿命を推定した。寒冷地（北海道）における山岳トンネル覆工の保守履歴（寿命）から求めた生存率は、保守履歴を表現でき劣化過程をトレースできることを示した。

山岳トンネル覆工コンクリートにおける予防保全を前提とした維持管理計画を立案するにあたり、提案したモデルが適用できるこ

とを明らかにした。

結論の最後に今後の課題について述べる。本研究では、これまでに蓄積されたトンネル点検データ、補修・補強履歴データ等をもとに、不規則な時間変動を確率過程でモデル化した簡易 THI の考え方を提案し、山岳トンネルの劣化状況を連続的に評価することができ、提案したモデルが予防保全の考えた方に基づく維持管理計画に適用できることを示した。

しかし、本研究では、劣化評価において寒冷地の厳しい気象影響が重要であることを示したが、覆工材料の劣化以外に、周辺地山の地質状況、施工方法、建設時の社会状況などの影響も受けることが考えられる。このようなことから、さらなる観察・点検データおよびトンネル管理台帳などの保守履歴、施工記録などのデータを蓄積することで劣化予測の精度を向上させた予防保全モデルの構築が可能となると考えられる。

謝 辞

本論文は、東北工業大学須藤敦史教授のご指導のもと、筆者が平成 30 年 4 月から東北工業大学大学院工学研究科土木工学専攻博士後期過程在学中に行った研究の成果を取りまとめたものです。社会人として勤務の傍ら、本論文をとりまとめられたのも、数多くの方のご支援とご指導の賜物であると心より感謝しております。

筆者は、平成 3 年（株）建設技術研究所に入社以来、建設コンサルタントの使命である“安全で潤いのある豊かな社会づくり”にかかわる業務に携わってきました。入社後、杭基礎の設計法に関する業務、トンネル設計業務等、地盤にかかわる業務が主でありました。ここ数年は、特に注目されているトンネルの維持管理に関する業務に携わりました。このような実務を遂行するにあたり、多数の方のご意見やご指導を頂戴しました。この場を借りて深く感謝の意を表します。

東北工業大学須藤敦史教授には、研究期間中に終始変らぬ厳しくかつ熱心なご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。また、副査をお引き受けいただきました、東北工業大学小出英夫教授、同権永哲准教授には、論文審査の過程で貴重なご指導とご助言を頂戴いたしました。本論文が一層充実したものになりましたことに深く感謝申し上げます。

筆者にこのような研究の機会を与えていただいた（株）建設技術研究所の多くの方に、この場を借りて深く感謝の意を表します。特に、東京本社 野村貢博士には、本研究を始めるに際して、ご助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。

須藤研究室の織笠豊晃氏、松浦寛斗氏、前田智尋氏、小山純平氏、森快斗氏には、図表や資料作成等ご協力いただきました。厚くお礼申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたり、常にやさしく、たまには厳しく後押しをしてくれた真由美、文、桃華に感謝し結びとします。