

論文 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

禿 和英*1・須藤 敦史*2・佐藤 京*3

要旨：北海道では山岳トンネルなどのコンクリート構造物は、長い間冬期の厳しい気象現象に曝され、さらには路面に散布する凍結防止剤散布などの影響を受けていると考えられるため、様々な観測・計測、調査・試験によるその状態の把握は、寒冷地構造物の維持管理システム構築するうえで貴重な情報である。そこで本論文では、北海道の内陸部に NATM で建設された覆工コンクリート表面のひび割れや覆工スパン間継目の気温変動の観測に伴う変動とともに、矢板工法で施工され供用開始から数十年経過した覆工コンクリートに対する圧縮強度・中性化深度・塩分濃度等の調査・試験結果（経年の変化状況）について報告する。

キーワード：コンクリート特性、経年変化の観測・調査、寒冷地構造物、山岳トンネル

1. はじめに

北海道は本州の各地域とは異なり、都市間の交通や物流などの社会生活の基盤を道路に大きく依存しており、昭和 30 年代後半から経済成長ともなっており、道路における橋梁や山岳トンネルなどの社会インフラの建設が進められている。

しかし、現在では建設から数十年以上経過したコンクリート構造物が多くなってきており、また昨今の社会・経済状況より、寒冷地特有な環境特性を考慮したメンテナンスや維持管理システムの早期構築とその効率的な運用が求められる¹⁾²⁾など。

加えて、北海道のコンクリート構造物は、冬期の厳しい気象現象（寒気や海風など）に長い間曝され、さらには路面に散布する凍結防止剤の影響を受ける。このため、コンクリート材料における現状や変動特性の把握は、寒冷地構造物における効率的な維持管理システムを構築する上で重要な情報であるが、供用中のコンクリート構造物に対する観測や調査を実施した事例は少ない。

そこで北海道（寒冷地）の山岳トンネル（特に覆工コンクリートの性状）において、基本性状の把握と寒冷地に特化したメンテナンスや維持管理システムの構築のための基礎情報（データベース）の蓄積を目的として、山岳トンネルの覆工コンクリートに対して各種の観測・計測や調査・試験を実施している³⁾⁴⁾など。

本論文では、北海道の内陸部に NATM で建設された山岳トンネルの覆工コンクリート表面に生じたひび割れと覆工スパン継目における坑内の温度変動に伴う変動の観測結果とともに、矢板工法で施工され供用開始から数十年経過した覆工コンクリート材料における圧縮強度・中性化深度・塩分濃度など基本特性の調査・試験結果について報告する。

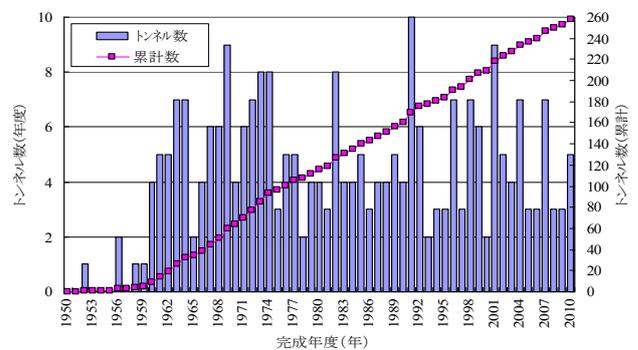


図-1 北海道における山岳トンネル数（国道）累計

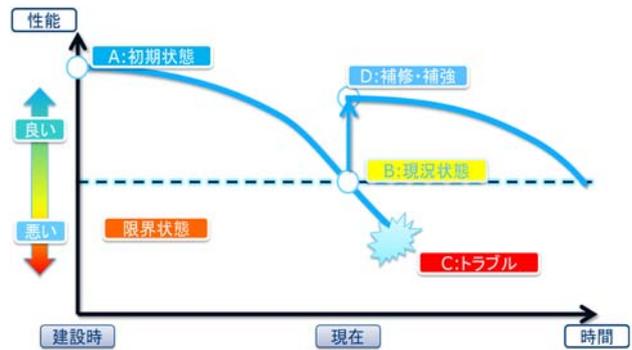


図-2 構造物における LCC の概念

2. 山岳トンネルの現状と維持管理について

2.1 山岳トンネルにおける覆工の現状と点検

北海道では図-1 に示すように建設から 30 年以上を経過した山岳トンネルの数が 50%程度となってきている。このため、寒冷地特有のコンクリート構造物（材料）における劣化要因を考慮しながら、限られた予算の中で多くの既設の山岳トンネルに対して、図-2 に示すようなライフサイクルコスト³⁾など(Life Cycle Cost : LCC)の考え方を基本として、費用の低減を図るメンテナンスや維持管

*1 (株)建設技術研究所(正会員)

*2 東北工業大学 工学部 都市マネジメント学科教授 *3 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造グループ

表-1 トンネル点検の頻度

区分	国土交通省	NEXCO	鉄道系
日常点検	1回/1日 [原則]	7日/1週～7日/2週	-
定期点検	2年または5年に1回程度	年に1回[原則]	2年を超えない期毎

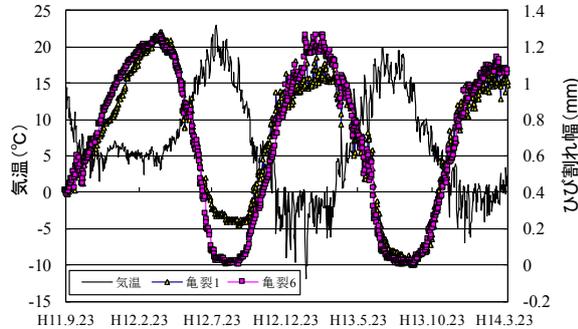


図-3 覆工コンクリート表面のひび割れ幅と気温変動

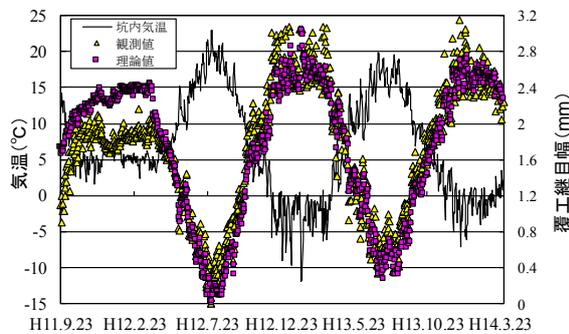


図-4 覆工スパンの継ぎ目幅と気温変動

理システムの構築が必要不可欠となっている⁴⁾など。

このライフサイクルコストの概念では対象とする構造物に対して障害発生の時期C点を予測し、その状態に至る前に補修・補強(B点→D点)等を施して構造物の性能を向上させ、効率的・経済的に社会インフラの長寿命化を図ってゆく考え方である。

このような状況下、平成25年度に国土交通省は道路構造物に対して、本格的なメンテナンスサイクルの構築に着手⁵⁾し、平成26年度には具体的な取組みとして道路構造物を国の定める監視および統一的な健全度判定・診断を実施している⁶⁾。

トンネルに対する点検頻度は、トンネルの劣化状況を評価した健全度に対して2～5年間隔で実施(表-1参照)されている。

2.2 山岳トンネルの基本構造と地域性

北海道における山岳トンネルは、1980年代前半までは矢板(在来)工法により建設されていたが、1980年代後半以降ではほとんどのトンネルがNATM(New Austrian Tunneling Method)で建設されている。

矢板工法は、掘削後の地山を鋼製支保工と矢板で保持し、その後に覆工コンクリートを打設して建設される。一方NATMは、掘削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保持し、その後に防水シートの設置と覆工コンクリートを打設して建設される。

北海道では矢板(在来)工法により建設された山岳トンネルは30年以上供用されており、山岳トンネル覆工におけるコンクリート材料の現状把握と将来の劣化予測が維持管理において課題となっている。

加えてNATMトンネルでは、坑口部付近において冬期気温や坑内に吹込む寒気の影響で、覆工コンクリート外周部の地山が凍結膨張して覆工コンクリートの側壁部分にひび割れ(凍結クラック)が発生する。そこで北海道では覆工コンクリートの凍結クラックを防止する目的で、吹付けコンクリートの後に施工する防水シートと覆工コンクリートとの間に断熱材を吹込む寒気の温度に応じて施工するのが一般的となっている(ただしNEXCO東日本管轄の山岳トンネルを除く)。

したがって、北海道のNATMトンネルでは、冬期における坑内部の気温や坑内に吹込む寒気の状態等は、覆工コンクリートへの障害(表面の凍害や凍結クラック)に加えて断熱材の設計(施工延長・厚さ)にも影響を及ぼす。

3. NATMの覆工コンクリートの気温変動による挙動観測

前章で記述したように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に対するひび割れや変形などの凍害を受ける危険性が高く、加えて北海道内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認められている⁷⁾。

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に対する凍害や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と打ち継目の挙動とともに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。

ここで、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)の関係を図-3に、覆工スパンの継ぎ目幅の変動と気温変動に対する延長方向の継ぎ目幅(コンクリート線(熱)膨張係数:7～13 μ /°C、覆工スパン長:10.5m、図中では平均値を理論値と表

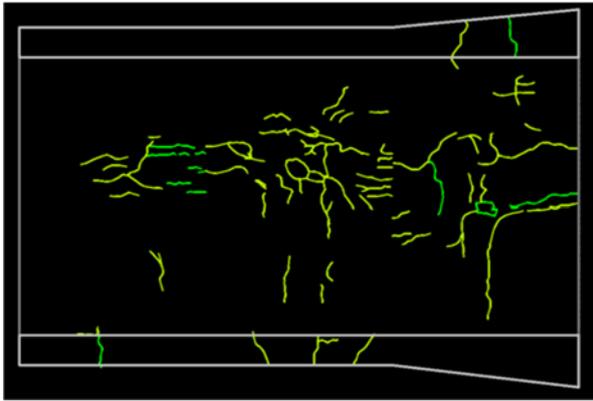


図-5(a) ひび割れの点検時期による事例①
(夏期点検, 2006. 7)

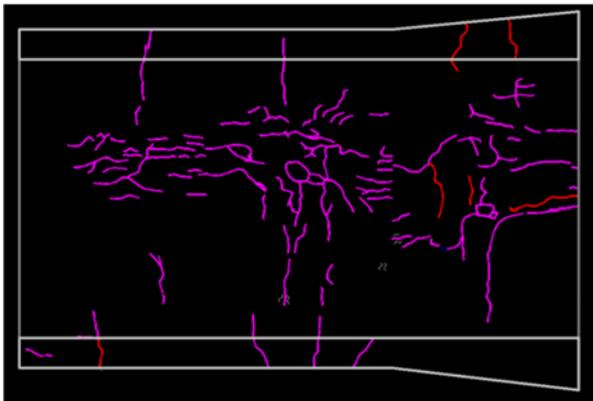


図-5(b) ひび割れの点検時期による事例②
(冬期点検, 2008. 1)

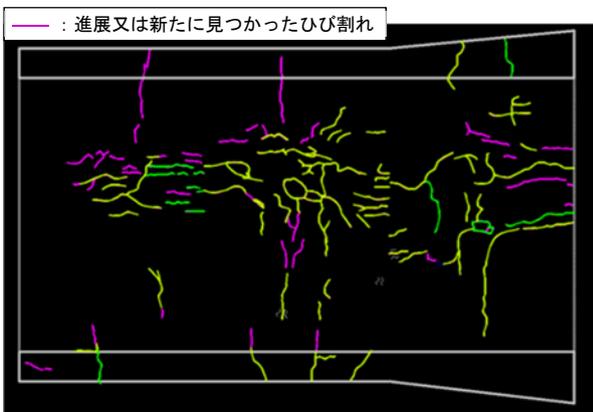


図-5(c) ひび割れの点検時期による変動例(重合せ)
(夏・冬期点検, 2008. 1)

示) の関係を図-4 に示す。

図-3, 図-4 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。このため, 劣化評価に当たっては, 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(増加)していないかの確認が必要である。

また, 図-4 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, ほぼコンクリートの線(熱)膨張係数の平均値で試算した幅の 0.0mm⇔3.0mm の伸縮を示している。このため, 延長方向では坑内温度に伴った変動を示し, 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-5(a), (b), (c)に示す。

図-5(a), (b)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。図-5(c)は図-5(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。本トンネルの供用後の経過時間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こと, 地山も硬硬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気温の影響によるものと考えられる。このため, 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℃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。

4. 矢板工法における覆工コンクリート性状の経年変化

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの圧縮強度・中性化深度・塩分濃度などの基本性状は, 経過(供用)年数にともなって変化すると考えられるが, これらを観測や調査・試験に基づいて定量的に評価した事例は少ない。

一方, 矢板工法のトンネルにおける覆工コンクリートは, 北海道特有の気温変動, 降雨・降雪, 季節風などの自然環境や路面への凍結防止剤散布

などの使用環境により、少しずつ経年劣化が進行し、蓄積されているものと考えられる。

そこで本論文では、気候・気象状況や既往の研究における凍害危険度の分布図など^{8)~11)}などを参考に、北海道を4つの地域（日本海南・北側、太平洋側、オホーツク海側、内陸側）に分割して、主に矢板工法で建設された山岳トンネルの覆工コンクリートを対象として圧縮強度・中性化深度および塩分濃度などの調査・試験を実施し、供用年数や坑口からの距離などで整理、検討・分析を実施した。

4.1 覆工コンクリートにおける圧縮強度の経年変化

日本海南・北側における山岳トンネルの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図-6に示す。

図-6より、日本海南・北側では坑口からの延長距離に伴いトンネルセンター部（天端）の圧縮強度は低下傾向を示している。一方、覆工側壁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が、センター部、側壁45°方向の相関係数(R=0.2~0.3)は小さい。これは、覆工コンクリートは無筋構造で標準的な圧縮強度は18N/mm²であるが、数多くの山岳トンネルにおいて覆工コンクリートの施工性向上のためにセメント量を多くしているため、圧縮強度が大きくなり、かつ圧縮強度がまちまちになっているのも一要因と考えられる。

既往の報告¹²⁾から、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ことが知られている。一方、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ことが特に矢板工法のトンネルにおいて頻繁に発生している。

そこで、調査データ数等の理由により、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）年数との関係を図-7に示す。

$$\text{強度比} = \frac{\text{坑内(調査最深部)の覆工コンクリート強度}}{\text{坑口部の覆工コンクリート強度}} \times 100 \quad (1)$$

図-7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（最深部の圧縮強度が坑口より小さくなる）となった。

これは、試料を採取したほとんどのトンネルで覆工コンクリートからの湧水が確認されており、覆工コンクリートのセメント水和物が湧水に溶解

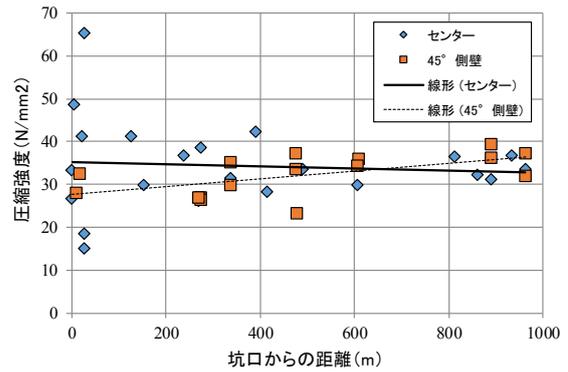


図-6 圧縮強度と坑口からの距離（日本海南・北側）

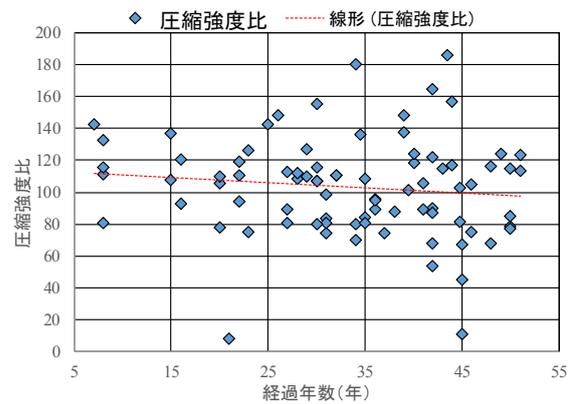


図-7 供用年数による強度推定比

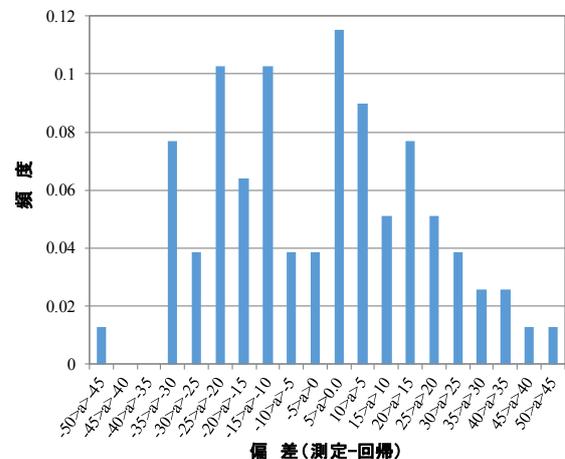


図-8 強度推定比の偏差分布（測定値-回帰値）

して、トンネル最深部の覆工コンクリートの強度が低下する現象が生じている可能性があると考えられる。しかし、ばらつきが大きく（相関係数：R=0.55~0.65）、複合的な誤差要因が作用していると考えられるが、その分布は図-8のようにほぼ正規分布を示しており、誤差要因の特定は今後の課題である。

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生じることが示唆されるが、地

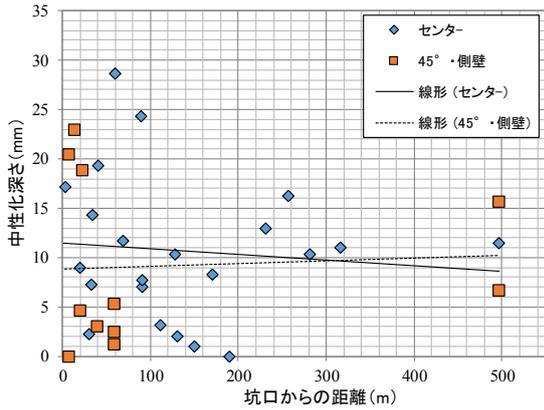


図-9(a) 中性化深度と坑口からの距離（内陸側）

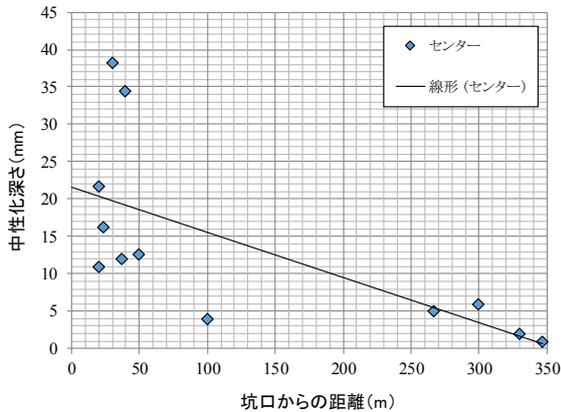


図-9(b) 中性化深度と坑口からの距離（日本海北側）

域性は明確にならなかった。今後も測定誤差等の要因検討とともにデータの蓄積が必要と考える。

4.2 覆工コンクリートにおける中性化深度の経年変化

次に、内陸側、日本海南・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度と坑口距離の関係を図-9(a), (b)に示す。山岳トンネルにおける覆工コンクリートのほとんどは無筋コンクリートであるが、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もある¹³⁾。図-9(a), (b)より、内陸側と日本海北側における坑口距離に対する中性化深度は、坑口からの距離に伴いセンター部は浅くなる傾向（相関係数 $R=0.6$ 程度）を示しているが、これらについても測定値のばらつき要因の検討とデータの蓄積、地域性に関する検討は必要と考える。

4.3 覆工コンクリートにおける塩分濃度の経年変化

山岳トンネルの覆工コンクリートに含まれる塩分濃度も中性化深度と同様に強度に悪影響を及ぼすため、覆工コンクリートの塩分濃度の調査を実施した。ここでは調査データが少ないため地域性は考慮せず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

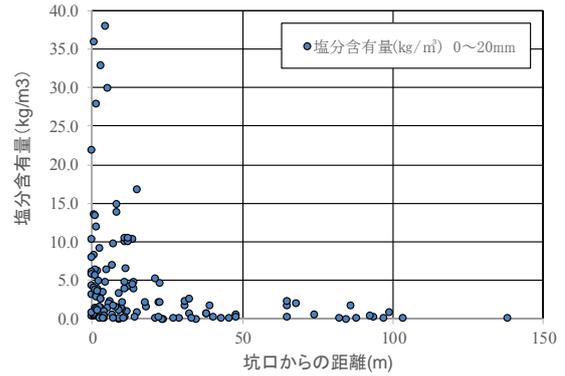


図-10 塩分濃度（表面0～20mm）と坑口からの距離

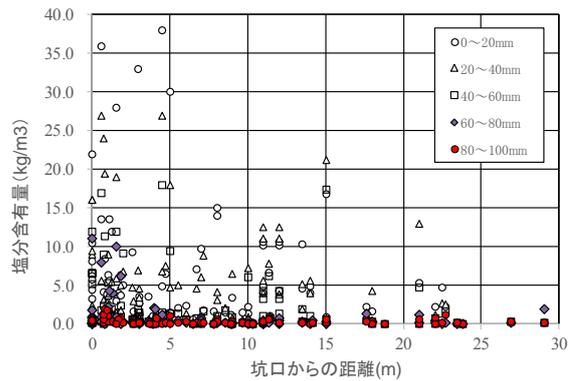


図-11 塩分濃度（深度別）と坑口からの距離

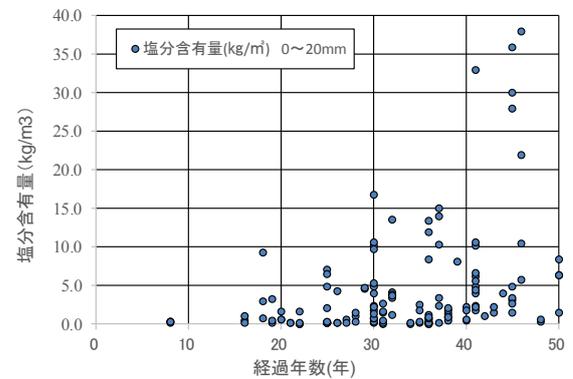


図-12 表面部（0～20mm）の塩分濃度と経過年数

からの距離の関係を図-10に整理した。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-10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しており、冬期に散布された路面の凍結防止剤の影響（塩分濃度）は坑口から距離約30m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-11に示す。図-11より、覆工コンクリート深度方向における塩分濃度では、深度：40～60mmで影響がなくなる観測結果を示している。

最後に、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-12に示す。図-12により、供用年数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おり、長期間凍結防止剤の浸食に曝されていた結果と考えられる。

5. 結論

本論文では、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の観測データの蓄積を目的として、トンネル覆工コンクリートに対して様々な調査・観測や計測を実施し、以下に示す結論が得られた。

- (1) NATM 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(0.0mm⇔0.8mm)および継目幅(0.0mm⇔3.0mm)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) 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す結果が得られたが、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。
- (3) 中性化深度は、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。
- (4) 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、供用年数にともな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。

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・中性化深度など基本性能に関する変化の把握・評価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予定である。

参考文献

- 1) 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.203-208,2011.12.
- 2) 須藤敦史,三上隆,岡田正之,河村巧,角谷俊次:寒冷地トンネルにおける二次覆工コンクリートの長寿命化に関する一考察,土木学会第21回建設マネジメント問題に関する研究発表会, pp.191-194, 2003.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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) 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) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Mason P. J. : The Effect of Aggressive Water on Dam Concrete, Construction & Building Materials, Vol.4, No.3, pp.115-118, May.1990.
- 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.