

論文 凍結防止剤の散布が道路トンネル坑口部の覆工表層の塩分量に及ぼす影響に関する基礎的研究

岡崎 泰幸*1・武邊 勝道*2・周藤 将司*3・林 久資*4

要旨：道路トンネルの坑口まで散布された凍結防止剤は、車両の走行によりトンネル坑内まで運ばれることが知られている。凍結防止剤の多くは主成分が塩化物であり、トンネル構造物へのそれらの浸透は腐食劣化やスケーリングを促進させる要因の1つである。そのため、凍結防止剤の散布が道路トンネル坑口部の覆工表層の塩分状況に及ぼす影響を把握・評価する必要があると考えられる。そこで、本研究では、道路トンネル坑口部の覆工表層を対象とした塩分の現地観測および分析を行った。その結果、凍結防止剤の散布により道路トンネル坑口部の覆工に塩分が浸透し、覆工の劣化が促進させられる可能性があることが明らかとなった。

キーワード：道路トンネル、凍結防止剤、坑口部、覆工表層、浸透塩分量

1. はじめに

現在の我が国における道路トンネルの多くは、高度経済成長期に集中的に建設されたものであり、今後急速に老朽化することが懸念されている。その中でも、特に道路トンネル坑口部の覆工コンクリート（以下、覆工とする。）は劣化が生じやすい傾向にあることがわかっており（例えば、図-1 参照）¹⁾、この要因の一つとして、凍結防止剤の散布による影響が指摘されている²⁾。凍結防止剤は主成分が塩化物であり、路面の凍結を防止できる反面、鉄筋コンクリート構造物に塩害による劣化を引き起こしたり、コンクリート構造物の表層の凍害を促進させたりすることが知られている^{3),4)}。

このような凍結防止剤は、車両の走行によって沿道まで飛散することがわかっており⁵⁾、近年では、トンネル坑口まで散布された凍結防止剤が車両の走行により坑内まで運ばれ、特に坑口部付近において塩分が飛散していることが明らかとなっている⁶⁾。そのため、特に凍結防止剤を多量に散布する寒冷地域では、スケーリングなどの劣化が問題となることが多く⁷⁾、道路トンネル坑口部の覆工においてもそのような劣化が発生することが問題となっている¹⁾。したがって、道路トンネルの長寿命化を図るためにも、凍結防止剤の散布が道路トンネル坑口部の覆工表層の塩分状況に及ぼす影響を把握・評価し、適切に対策を講じる必要があると考えられる。

凍結防止剤の散布がコンクリート構造物に及ぼす影響を把握・評価した研究としては、例えば、青山ら^{8),9)}の研究や高木ら¹⁰⁾の研究がある。前者は、RC 中空床版橋と RC ボックスカルバートのトンネルを対象に、凍結防止剤による各構造物への塩分浸透状況や塩分浸透性を

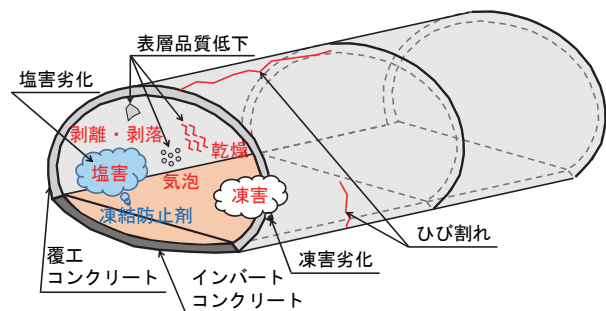


図-1 道路トンネル坑口部における覆工の劣化イメージ図（文献¹⁾より引用し一部改変）

分析しており、後者は、凍結防止剤が散布される環境下にある道路橋の排水管直下にコンクリート薄板供試体を設置し、凍結防止剤の散布状況と表面塩化物イオン量との関係を調査している。このように、凍結防止剤の散布がコンクリート構造物に及ぼす影響の把握・評価が試みられているものの、そのほとんどは橋梁を対象としたものであり、道路トンネルを対象とした研究は極めて少なく、凍結防止剤の散布が道路トンネル坑口部の覆工表層の塩分状況に及ぼす影響については十分に把握・評価されていないのが現状である。

そこで、本研究では、凍結防止剤が散布される環境下にある道路トンネルに対して、適切な維持管理（対策）を実施していくための有用な情報を得ることを目的とし、道路トンネル坑口部の覆工表層を対象とした塩分の現地観測および分析を行い、その結果から凍結防止剤の影響を評価した。具体的には、凍結防止剤が散布される環境下にある道路トンネルの坑口部に複数の薄板モルタル供試体を設置し、暴露期間後に塩分量の分析を行った。そ

*1 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科教授 博士(理学)

*3 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科准教授 博士(農学) (正会員)

*4 西日本工業大学 工学部総合システム工学科准教授 博士(工学)

して、道路トンネル坑口部の各位置における塩分量の比較などを行った。

2. 浸透塩分量の現地観測と分析方法

2.1 浸透塩分量の現地観測

本研究では、凍結防止剤が散布される環境下にある道路トンネル坑口部の覆工表層に浸透する塩分量（以下、浸透塩分量とする。）を観測するため、薄板モルタル供試体の暴露試験を採用した。薄板モルタル供試体の作製に使用したセメントは普通ポルトランドセメント（密度： 3.16g/cm^3 ）、細骨材は島根県安来市産加工砂（表乾密度： 2.55g/cm^3 、吸水率：1.75%、粗粒率：2.72）、水はイオン交換水である。供試体の配合は表-1 に示すとおりである。なお、細骨材は表乾状態のものをを用いた。供試体寸法は、縦30mm、横40mm、厚さ5mmとした。供試体の配合と寸法については文献^{11),12)}を参考にして決定した。また、薄板モルタル供試体の養生については、材齢1日での脱型後に実験室内の密閉容器内に静置し、材齢28日まで気中養生とした。

続いて、薄板モルタル供試体を設置した二車線道路トンネルの概要を表-2 に示す。ここで本研究では、凍結防止剤の影響を調査するため、海塩粒子の飛来が少ない山間部（中国地方）のトンネルを対象とした。対象としたトンネルにおける坑口部の覆工は、坑口近辺に軽微なひび割れ（0.2~0.4mm 程度）が見られるものの、漏水の発生は無い状態であった。そして、作製した薄板モルタル供試体を道路トンネル坑口部の両側壁に図-2 に示すように設置した。この際、各供試体は加工せず、そのままの状態でも面テープ（寸法：縦20mm、横30mm、厚さ1.2mm、接着位置：供試体中心位置）を用いて設置した。一般に、道路トンネルの覆工側壁部（アーチ以下の覆工部、図-2 参照）は負の勾配を有するため、表面気泡が生じやすいことが知られている¹³⁾。エントラップトエアによる表面気泡が多く存在する覆工側壁部では、劣化因子の浸入が容易となり、スケーリングなどの劣化現象が生じやすくなると考えられる。以上の理由から、本研究では供試体の最大設置高さをおおよそ側壁の高さとした。一方で、供試体の設置奥行きはトンネル坑口部を対象とした観測を行うため、坑口から17m 程度の距離までとした。

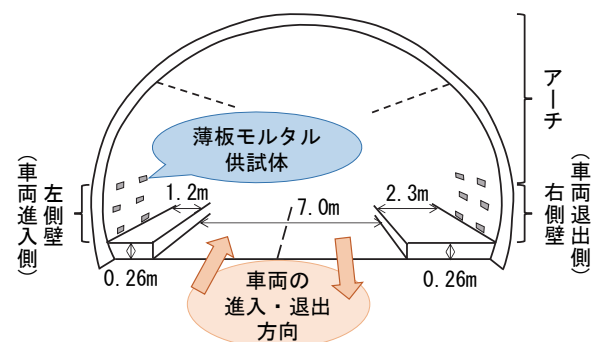
設置した薄板モルタル供試体の暴露期間は、凍結防止剤が散布される冬季の約3 か月間（暴露期間1：2019 年12 月12 日~2020 年3 月13 日、暴露期間2：2020 年12 月15 日~2021 年3 月15 日）とした。また、表-2 に示す凍結防止剤散布量については、暴露期間中の凍結防止剤散布の日報データに基づいて算出した凍結防止剤散布総量を散布区間の往復距離と暴露期間で除すことにより

表-1 薄板モルタル供試体の配合

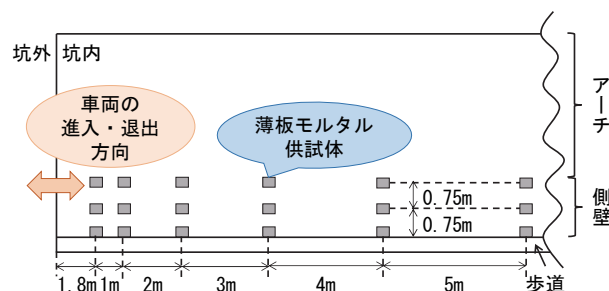
W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
	水	セメント	細骨材
50	306	612	1320

表-2 薄板モルタル供試体を設置した二車線道路トンネルの概要

延長 (m)	トンネル 直径 (m)	竣工 (年)	凍結防止剤 散布量 (kg/km/day)	平日12時 間交通量 (台)
130	10.7	2003	6.1 (暴露期間1)	小型車 980
			13.8 (暴露期間2)	大型車 141 合計 1121



(a) トンネル断面方向図



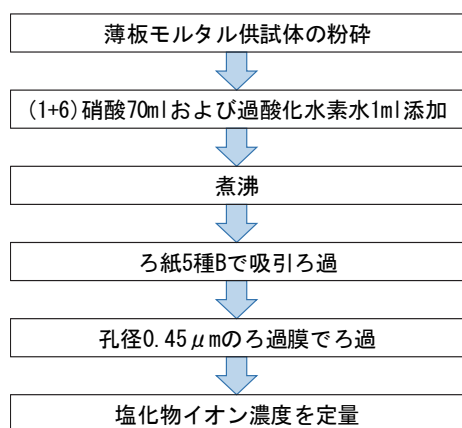
(b) トンネル縦断方向図

図-2 トンネル坑口部における薄板モルタル供試体の設置位置

求めている。この凍結防止剤散布量に加えて、車両の通行量も道路トンネル坑口部の塩分環境に影響を与えると考えられるため、表-2 には平日12 時間交通量¹⁴⁾も示している。

2.2 浸透塩分量の分析方法

暴露期間終了後、薄板モルタル供試体を回収して全量粉碎し、JIS A 1154: 2020¹⁵⁾に基づいて、供試体中の全塩化物イオンの定量を行った。薄板モルタル供試体の分析



図－3 薄板モルタル供試体の分析フロー

フローは図－3 に示すとおりである。ここで、定量方法についてはサプレッサ方式のイオンクロマトグラフ法とし、分析機器についてはイオンクロマトグラフ ICS-1600 とした。加えて、比較のため、非暴露（実験室内の密閉容器内に暴露期間と同様期間静置した）供試体 2 つも同様に処理し全塩化物イオンの定量を行った。定量後は、塩化物イオン濃度（mg/l）を浸透塩分量である含有塩化物イオン量（kg/m³）に変換した。

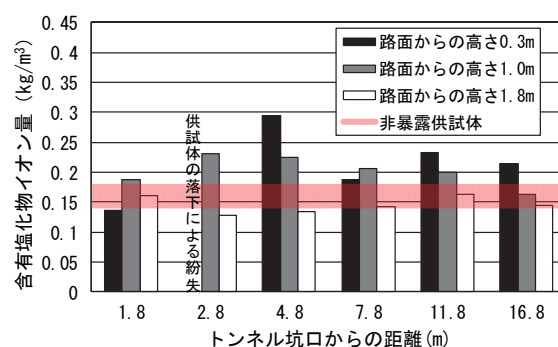
3. 含有塩化物イオン量の分析結果と考察

3.1 坑口部左側壁における含有塩化物イオン量

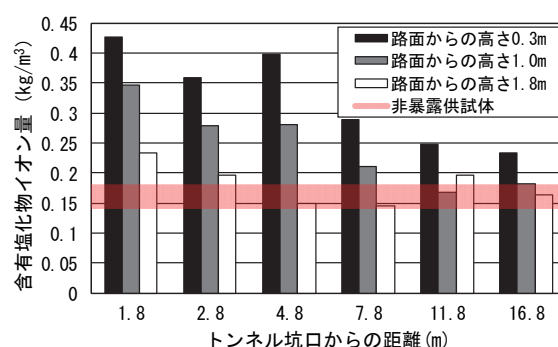
図－4 に、道路トンネル坑口部の左側壁（車両進入側）の各位置における薄板モルタル供試体の含有塩化物イオン量を示す。ここで、図中には、2 つの非暴露（実験室内の密閉容器内に暴露期間と同様期間静置した）供試体の分析結果の範囲も示している。

図－4 から、左側壁の暴露期間 1（図－4(a)）と暴露期間 2（図－4(b)）における同位置の分析結果を比較すると、凍結防止剤散布量が多い暴露期間 2 の含有塩化物イオン量の方が全体的に多く、特にその傾向は路面からの高さが低く、トンネル坑口からの距離が近いほど顕著であることがわかる。例えば、トンネル坑口からの距離 1.8m、路面からの高さ 0.3m のケースでは、暴露期間 1 と 2 で約 3 倍の差が生じていることが確認できる。したがって、凍結防止剤散布量が増加すると、路面からの高さが低く、トンネル坑口からの距離が近いトンネル覆工ほど覆工表層の塩分量が増加すると考えられる。

続いて、図－4 の各暴露供試体と非暴露供試体の分析結果を比較すると、路面からの高さ 0.3m のケースではトンネル坑口からの距離が 16.8m の位置でも、暴露供試体の分析結果のほとんどが非暴露供試体の分析結果を超過していることがわかる。一方で、路面からの高さ 1.0m では坑口からの距離が 7.8～11.8m 以内の位置で、路面からの高さ 1.8m では坑口からの距離が 0～2.8m 以内の位置



(a) 暴露期間 1（2019 年 12 月 12 日～2020 年 3 月 13 日、凍結防止剤散布量 6.1kg/km/day）



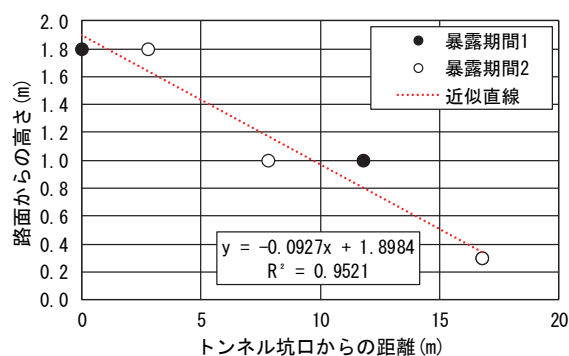
(b) 暴露期間 2（2020 年 12 月 15 日～2021 年 3 月 15 日、凍結防止剤散布量 13.8kg/km/day）

図－4 トンネル坑口部左側壁の含有塩化物イオン量

表－3 分析結果から推定した凍結防止剤の影響を受けるトンネル覆工の位置

暴露期間	分析結果から推定した凍結防止剤の影響を受ける位置 (暴露試験体の分析結果＞非暴露試験体の分析結果の位置)	
	路面からの高さ (m)	トンネル坑口からの距離 (m)
1	0.3	16.8
	1.0	11.8
	1.8	0
2	0.3	16.8
	1.0	7.8
	1.8	2.8

で、暴露供試体の分析結果が非暴露供試体の分析結果より概ね大きい値になっていることがわかる。暴露供試体の分析結果が非暴露供試体の分析結果より大きくなる位置は、凍結防止剤の影響を受けるトンネル覆工の位置と考えられることから、分析結果に基づいておおよその位置を表－3 に示すように推定した。また、表－3 の各値をプロットして直線近似を行い、凍結防止剤の影響を受けるトンネル覆工の範囲の推定も試みた（図－5 内の赤点線以下の範囲）。これらの結果から、路面からの高さが低く、トンネル坑口からの距離が近い範囲のトンネル覆工が凍結防止剤の影響を最も受けやすく、影響を受ける度



図－5 分析結果から推定した凍結防止剤の影響を受けるトンネル覆工の範囲

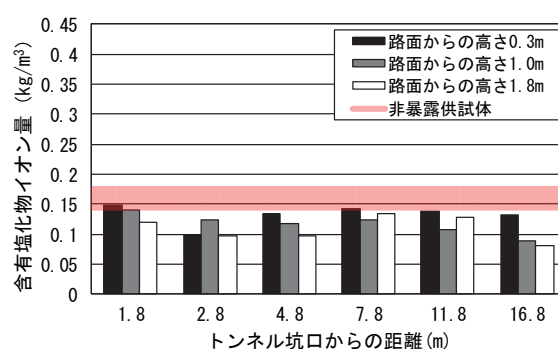
合いは図－5 の原点から遠ざかるにつれて徐々に減少する傾向にあることがわかった。

しかしながら、いずれの暴露供試体の分析結果も鋼材腐食発生限界濃度 1.9kg/m^3 (W/C=50%の際のボルトランドセメントの場合)¹⁰⁾を覆工表面位置で超過しない結果となった。一方で、凍結防止剤の影響を受けている覆工の範囲が明確に存在することから、覆工表層では凍結防止剤由来の塩分が蓄積されることで、覆工表層のスケーリング抵抗性の低下が生じると予測される。また、塩分浸透も進行することが予測されるため、将来的には覆工内部の鉄筋腐食のリスクも高まることが示唆される。ただし、塩分の蓄積や浸透については、深さ方向での分析や長期的な測定によって、更なる検討を行う必要がある。

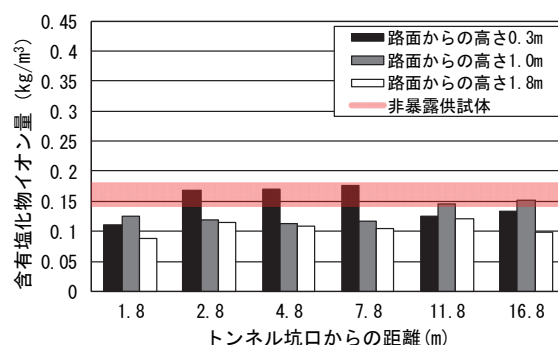
3.2 坑口部右側壁における含有塩化物イオン量

図－6 に、道路トンネル坑口部の右側壁（車両退出側）の各位置における薄板モルタル供試体の含有塩化物イオン量を示す。ここで、図中には図－4 と同様に、2つの非暴露（実験室内の密閉容器内に暴露期間と同様期間静置した）供試体の分析結果の範囲も示している。

図－6 から、右側壁の暴露期間 1（図－6(a)）と暴露期間 2（図－6(b)）における同位置の分析結果を比較しても、凍結防止剤散布量が多い暴露期間 2 の含有塩化物イオン量の増加傾向はほとんど確認できないことがわかる。また、図－6 の各暴露供試体と非暴露供試体の分析結果を比較しても、暴露供試体の分析結果のほとんどは非暴露供試体の分析結果を超過していないことがわかる。これらのことから、凍結防止剤散布量が増加したとしても、道路トンネル坑口部の右側壁（車両退出側）は凍結防止剤由来の塩分が到達・浸透しにくいと考えられる。これは、右側壁が凍結防止剤を運び込む車両進入側の車道から離れており、塩分の付着量が少なくなるためと考えられる。本分析により以上のような結果が得られたが、凍結防止剤散布量が 13.8kg/km/day より多い環境下のトンネルでの観測は実施していないため、更なる検討が必要であると考えられる。また、本研究で対象としたトンネ



(a) 暴露期間 1 (2019 年 12 月 12 日～2020 年 3 月 13 日、凍結防止剤散布量 6.1kg/km/day)



(b) 暴露期間 2 (2020 年 12 月 15 日～2021 年 3 月 15 日、凍結防止剤散布量 13.8kg/km/day)

図－6 トンネル坑口部右側壁の含有塩化物イオン量

ルの車両退出側の歩道幅員が広く、右側壁が車道自体から 2.3m 離れていることも結果に影響を及ぼしている可能性があるため、車両進入・退出側の歩道幅員が同等なトンネルでの更なる観測も必要と考えられる。

3.3 左右側壁における含有塩化物イオン量の比較

続いて、坑口部左側壁と右側壁の凍結防止剤の影響度合いの差異を把握するために、道路トンネル坑口部の左右側壁の同等な位置における薄板モルタル供試体の含有塩化物イオン量の比較を行った（図－7 参照）。図－7 から、坑口部右側壁の各分析結果に比べ坑口部左側壁の各分析結果の方が大きいことが確認できる。また、各プロットの数値を詳細に確認したところ、坑口部左側壁の分析結果は、暴露期間 1 で坑口部右側壁の分析結果の約 0.9～2.2 倍、暴露期間 2 で約 1.2～3.9 倍であることがわかった。したがって、凍結防止剤散布量が 13.8kg/km/day 以下の、車両退出側の歩道幅員が広い二車線道路トンネルでは、道路トンネル坑口部の右側壁（車両退出側）に比べ、左側壁（車両進入側）の方が凍結防止剤の影響を受けやすくなると考えられる。

4. まとめ

本研究では、道路トンネル坑口部の覆工表層を対象と

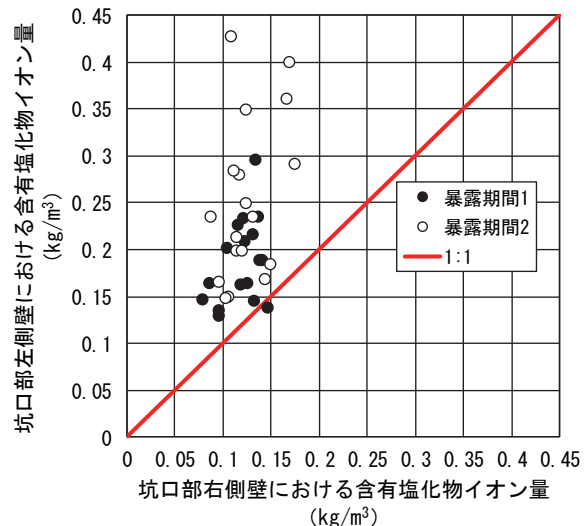
した塩分の現地観測および分析を行い、その結果から凍結防止剤の影響範囲などを評価した。具体的には、凍結防止剤散布量が 13.8kg/km/day 以下の環境下にある、車両退出側の歩道幅員が広い二車線道路トンネルの坑口部に複数の薄板モルタル供試体を設置し、暴露期間後に塩分量の分析を行った。そして、道路トンネル坑口部の各位置における塩分量の比較などを行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) トンネル坑口部左側壁（車両進入側）に設置した薄板モルタル供試体の分析結果から、路面からの高さが低く、トンネル坑口からの距離が近いトンネル覆工は、凍結防止剤の影響を受けることがわかった。そのため、対象としたトンネルにおける凍結防止剤の影響を受ける範囲の覆工表層では、凍結防止剤由来の塩分が蓄積されることで、覆工表層のスケーリング抵抗性の低下が生じると予測された。また、塩分浸透も進行することが予測されるため、将来的には覆工内部の鉄筋腐食のリスクも高まることが示唆された。
- 2) トンネル坑口部右側壁（車両退出側）に設置した薄板モルタル供試体の分析結果から、車両退出側の坑口部の側壁は凍結防止剤由来の塩分が到達・浸透しにくいことがわかった。
- 3) トンネル坑口部左側壁と右側壁の同等な位置における薄板モルタル供試体の分析結果を比較したところ、坑口部左側壁の分析結果は、坑口部右側壁の分析結果の約 0.9～3.9 倍であることがわかった。そのため、トンネル坑口部の右側壁（車両退出側）に比べ、左側壁（車両進入側）の方が凍結防止剤の影響を受けやすいと考えられた。

本研究の結果から、凍結防止剤の散布により道路トンネル坑口部に塩分が浸透し、覆工内部の鉄筋の腐食や覆工表層の凍害などが促進させられる可能性があることが明らかとなったが、対策を実施すべき箇所などを明確にするには分析結果が少ないと考えられた。そのため、今後も観測を継続して行い分析結果を増やしていく予定である。また、各道路トンネルにおける凍結防止剤の影響範囲を明確にするためにも、凍結防止剤の飛散範囲などを数値解析により検討したいと考えている。

謝辞

本論文の作成にあたり、凍結防止剤が散布される環境下にある道路トンネルと凍結防止剤散布の日報データをご提供いただいた島根県雲南県土整備事務所仁多土木事業所 維持管理課の皆様にご心から感謝申し上げます。また、本研究は、一般社団法人中国建設弘済会の研究助成を受けたものである。ここに記して謝意を表します。



図ー7 坑口部左右側壁における含有塩化物イオン量の比較

参考文献

- 1) 国土交通省 東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編）2021年改訂版，2021.6
- 2) 白岩誠史：トンネル坑口部覆工コンクリートの耐久性向上を目指した施工技術の開発，埼玉大学学位論文，2018.3
- 3) 小笹浩司：NEXCO 西日本の橋梁の長期保全に向けた取り組み，材料と環境，Vol.64，No.10，pp.429-437，2015.10
- 4) 庄谷征美，月永洋一：東北地方のコンクリート構造物の凍害について，コンクリート工学，Vol.42，No.12，pp.3-8，2004.12
- 5) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典：凍結防止剤散布と沿道環境，国土技術政策総合研究所資料，No.412，2007.7
- 6) 青山尚史，岡崎泰幸，武邊勝道，持田新太郎，林久資：凍結防止剤散布環境下にある道路トンネル坑口部の覆工表層を対象とした塩分量の調査，令和3年度土木学会中国支部研究発表会，V-8，pp.350-352，2021.6
- 7) 田中館悠登，羽原俊祐，山本英和，馬場孝輔：岩手県における最低気温および凍結防止剤散布量から求めるスケーリング危険度マップの提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，2019.7
- 8) 青山實伸，松田哲夫，野村昌弘：凍結防止剤によるコンクリート構造物中への塩分浸透状況，土木学会第58回年次学術講演会，V-030，pp.59-60，2003.9
- 9) 青山實伸，松田哲夫：凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.807-812，2004.6

- 10) 高木典彦, 遠藤裕丈, 渡辺淳: 凍結防止剤散布路線での塩害に対するコンクリートの耐久性照査に関する研究—照査に必要なコンクリート部材の表面塩化物イオン量の設定方法の検討—, 第 62 回 (平成 30 年度) 北海道開発技術研究発表会発表概要集, No. 管 18, 2018.2
- 11) 中村文則, 大原涼平, 井野裕輝, 下村匠: 地形・波浪条件による飛来塩分の発生・輸送過程への影響評価とその数値実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_1345-I_1350, 2017.10
- 12) 中村文則, 大原涼平, 井野裕輝, 下村匠: 新潟県佐渡島における構造物の表面塩分量の現地観測とその環境作用が及ぼす影響, コンクリート年次論文集, Vol.40, No.1, pp.669-674, 2018.6
- 13) 平野正幸, 前田智之, 本間宏記, 原田沙里, 棚瀬富弘, 吉武勇: トンネル覆工コンクリート側壁部に生じる表面気泡低減のための基礎実験, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.2, pp.95-105, 2015.10
- 14) 島根県: 平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査全国道路・街路交通情勢調査 交通量調査編, 2017.6
- 15) 日本産業規格 (JIS): 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法, JIS A 1154:2020, 2020.3
- 16) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善, pp.156-162, 2018.3