

# 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塩分環境評価

岡崎 泰幸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>松江工業高等専門学校 環境・建設工学科.

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、トンネル構造物やトンネル内附属物へのそれらの浸透・付着はスケーリングや腐食劣化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塩分環境に及ぼす影響を把握・評価する必要があると考えられるが、実際の道路トンネルを対象にその影響を調査した事例は少ないのが現状である。そこで、本研究では、複数の道路トンネル坑口部を対象に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。

キーワード：道路トンネル，坑口部，凍結防止剤，塩分環境，現地観測

## 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。中でも、特に道路トンネルの坑口部は劣化が生じやすい傾向にあることがわかっており、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<sup>1)</sup>。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や附属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<sup>2)</sup>。このような凍結防止剤は一般的にトンネル坑内までは散布されないが、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近年明らかとなっている<sup>3)</sup>。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、道路トンネル坑口部の覆工コンクリートや附属物（照明・換気設備など）に、スケーリングや塩害が発生することが問題となっている<sup>4)</sup>。したがって、道路トンネルの供用期間中の安心・安全を確保するためには、凍結防止剤の散布が道路トンネル坑口部の塩分環境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。しかしながら、実際の道路トンネルを対象に凍結防止剤の散布が道路トンネル坑口部の塩分環境に及ぼす影響を調査した事例は少ないのが現状である。

中国地区においても、凍結防止剤を多量に散布する寒冷地域があり、凍結防止剤が散布される環境下にある道路トンネルにおいて、附属設備であるジェットファンの

内部に腐食が生じ、運転ができない状況に陥った例などもある。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中国地区の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、中国地区における複数の道路トンネル坑口部を対象に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やステンレス鋼板を設置し、暴露期間後にそれぞれの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。

## 2. 現地観測と分析方法

本章では、本研究で実施した道路トンネル坑口部の塩分環境の現地観測と分析方法について詳細に示す。本研究では、道路トンネル坑口部の塩分環境を観測する方法として、薄板モルタル供試体の暴露試験とステンレス鋼板の暴露試験を採用した。前者は、覆工コンクリート表層に浸透する塩分量（以下、浸透塩分量とする。）を標的とし、後者は、附属物などの金属表面に付着する塩分量（以下、付着塩分量とする。）を標的とした暴露試験である。現地観測の詳細については以下を参照されたい。

### (1) 浸透塩分量の現地観測と分析方法

本研究では、道路トンネル坑口部における浸透塩分量

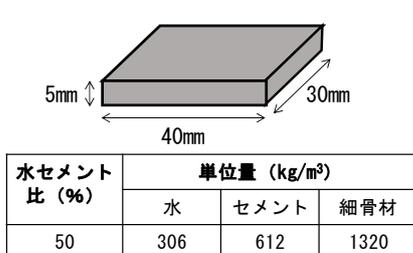
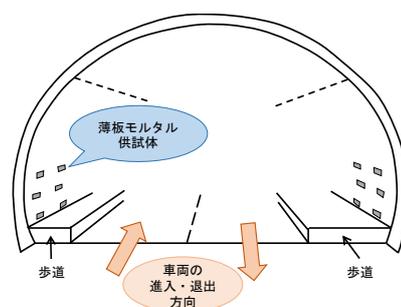


図-1 薄板モルタル供試体の寸法と配合



(a) トンネル断面方向図

表-1 薄板モルタル供試体を設置したトンネルの概要

| トンネル    | 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) |
|---------|--------|------------|--------|-----------------------------|---------------|
| A (山間部) | 130    | 10.7       | 2003   | 6.1 (暴露期間1)<br>13.1 (暴露期間2) | 1121          |

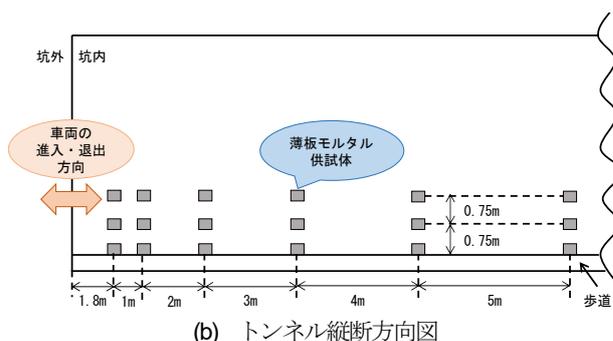
※凍結防止剤の影響を調査するため、海塩粒子が飛来しにくい山間部のトンネルを対象とした。  
 ※凍結防止剤散布量については、暴露期間中の凍結防止剤散布総量を散布区間の往復距離と暴露期間で除すことにより求めた。  
 ※暴露期間1は2019年12月12日から2020年3月13日までの期間、暴露期間2は2020年12月15日から2021年3月15日までの期間である。

の調査を行うために、図-1に示すような薄板モルタル供試体<sup>9)</sup>を作製した。ここで、薄板モルタル供試体の養生については、実験室内の密閉容器内に静置し、28日間の気中養生とした。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。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は表-1に示すとおりである。表に示すように、本研究では凍結防止剤の影響を調査するため、海塩粒子が飛来しにくい山間部のトンネルを対象とした。設置した薄板モルタル供試体の暴露期間については、凍結防止剤が散布される約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-1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求めた。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らるるため、表-1には平日12時間交通量<sup>9)</sup>も示している。

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 : 2020<sup>7)</sup>に基づいて、供試体中の全塩化物イオンの定量を行った。ここで、定量方法についてはサブ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/m<sup>3</sup>) に変換した。

## (2) 付着塩分量の現地観測と分析方法

本研究では、道路トンネル坑口部における付着塩分量の調査を行うために、図-3に示すようなステンレス鋼板



(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

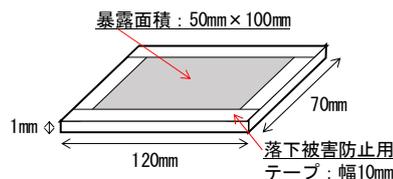


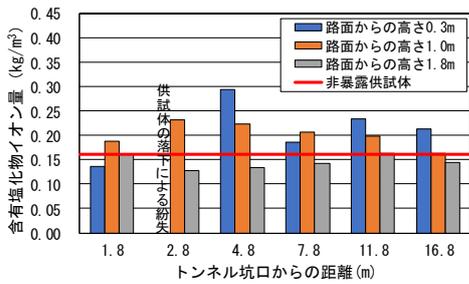
図-3 ステンレス鋼板の寸法

表-2 ステンレス鋼板を設置したトンネルの概要

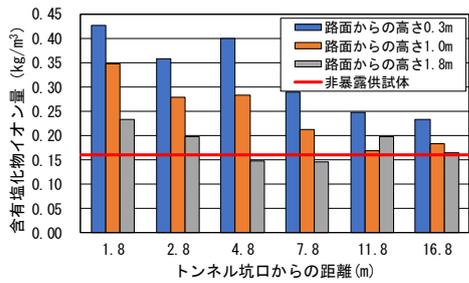
| トンネル    | 延長 (m) | トンネル直径 (m) | 竣工 (年) | 凍結防止剤散布量 (kg/km/day) | 平日12時間交通量 (台) |
|---------|--------|------------|--------|----------------------|---------------|
| A (山間部) | 130    | 10.7       | 2003   | 0 (夏期)               | 1121          |
|         |        |            |        | 13.1 (冬期)            |               |
| B (山間部) | 115    | 9.8        | 1993   | 0 (夏期)               | 840           |
|         |        |            |        | 75.9 (冬期)            |               |
| C (山間部) | 110    | 9.7        | 1985   | 0 (夏期)               | 840           |
|         |        |            |        | 75.9 (冬期)            |               |

※凍結防止剤の影響を調査するため、海塩粒子が飛来しにくい山間部のトンネルを対象とした。  
 ※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求めた。  
 ※夏期は2021年6月17日から2021年9月17日までの期間、冬期は2020年12月15日から2021年3月15日までの期間である。

(SUS304 JIS G4305 2B) を道路トンネル坑口部に複数枚設置した。ここで、ステンレス鋼板の寸法（暴露面積）・厚さ・材質については、JIS Z 2383:1998<sup>8)</sup>を参考に定めた。ステンレス鋼板の設置位置については、薄板モルタル供試体の分析結果とも比較が可能なように、各薄板モルタル供試体の設置位置（図-3参照）の10cm後方（トンネル坑口から離れる方向）の設置位置とした。ステンレス鋼板を設置した二車線道路トンネルの概要は表-2に示すとおりである。ここで、表-2のAトンネルは、

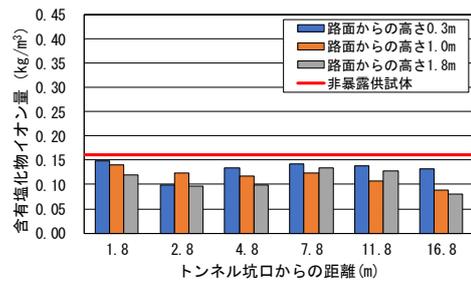


(a) 暴露期間1

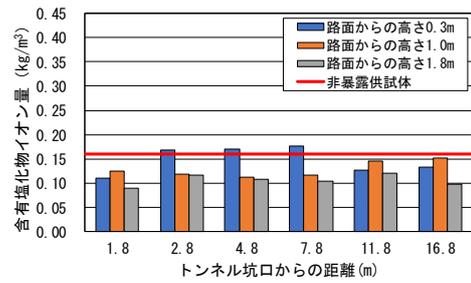


(b) 暴露期間2

図4 トンネル坑口部左側壁の含有塩化物イオン量



(a) 暴露期間1



(b) 暴露期間2

図5 トンネル坑口部右側壁の含有塩化物イオン量

表-1のAトンネルと同一のトンネルである。また、表に示すように、本研究では凍結防止剤の影響を調査するため、海塩粒子が飛来しにくい山間部のトンネルのみを対象とした。設置したステンレス鋼板の暴露期間については、凍結防止剤が散布される冬期（2020年12月15日～2021年3月15日）と凍結防止剤が散布されない夏期（2021年6月17日～2021年9月17日）の2種類とし、期間は約3ヶ月間とした。また、表-2に示す凍結防止剤散布量と平日12時間交通量については、表-1に示したものと同様のものである。

暴露期間終了後、設置したステンレス鋼板の表面をガーゼで拭き取ること（ガーゼ拭き取り法）により付着物（すなわち、付着塩分）の採取を行った。その後、採取した付着物をイオン交換水に溶解し、その溶液の塩化物イオン濃度をイオンクロマトグラフ法により定量した。ここで、定量方法はサプレッサ方式のイオンクロマトグラフ法とし、分析機器はイオンクロマトグラフICS-1600とした。定量後は塩化物イオン濃度（mg/l）を付着塩分（NaCl）量（mg/m<sup>2</sup>）に換算した。

### 3. 分析結果と考察

本章では、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で観測した含有塩化物イオン量（浸透塩分量）と付着塩分量の分析結果を示す。そして、それらの結果に対して考察などを行う。

#### (1) 含有塩化物イオン量の分析結果と考察

図4、図5に、道路トンネル坑口部側壁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、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（2供試体の平均値）も示している。

##### a) 坑口部左側壁における含有塩化物イオン量

図4から、左側壁の暴露期間1と暴露期間2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。また、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、路面からの高さが低く、トンネル坑口からの距離が近いケースほど、暴露供試体の分析結果が非暴露供試体の分析結果を超過しやすい傾向にあることがわかる。したがって、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は、凍結防止剤の影響を受けることがわかった。

##### b) 坑口部右側壁における含有塩化物イオン量

図5から、右側壁の暴露期間1と暴露期間2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5の各暴露供試体

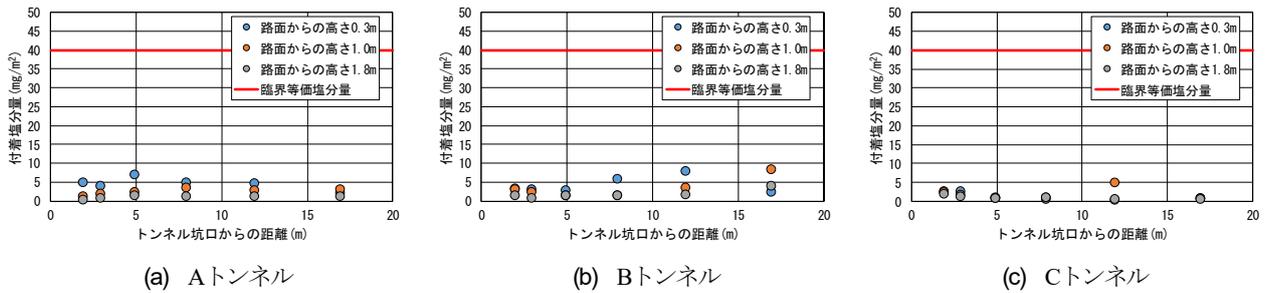


図-6 夏期におけるトンネル坑口部左側壁の付着塩分量

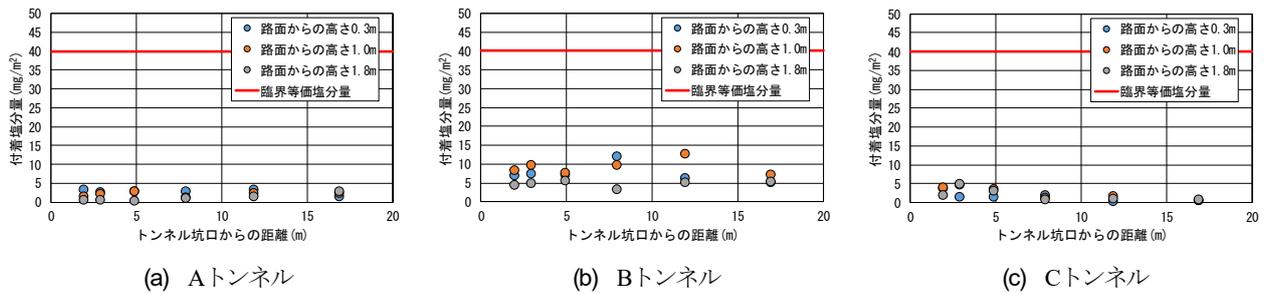


図-7 夏期におけるトンネル坑口部右側壁の付着塩分量

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、車両が坑外へ退出する側の坑口部の側壁は凍結防止剤由来の塩分が到達・浸透しにくいと考えられる。これは、凍結防止剤由来の塩分を坑内へ運び込むと考えられる車両が進入する側の車道から距離が離れており、塩分の付着頻度などが少ないためと考えられる。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多い環境下での検討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。以降に示すステンレス鋼板の付着塩分量の分析結果からも検討の必要性は明らかである。

## (2) 付着塩分量の分析結果と考察

図-6、図-7、図-8、図-9に、分析により得られた夏期および冬期におけるトンネル坑口部両側壁の付着塩分量を示す。ここでは、図を見やすくするために各トンネルでステンレス鋼板の設置高さ別に整理した。また、図中には比較対象の1つとしてSUS304ステンレス鋼の臨界等価塩分量(40mg/m<sup>2</sup>)<sup>9)</sup>を示した。ここで、臨界等価塩分量とは金属が発錆しない限界の付着塩分量である。

### a) 夏期における坑口部両側壁の付着塩分量

図-6、図-7から、全てのステンレス鋼板の付着塩分量の値自体が極めて低く、臨界等価塩分量を下回っていることがわかる。この結果から、凍結防止剤が散布されない夏期における山間部の道路トンネルでは、トンネル坑口部に存在する附属物に付着する塩分が極めて少なくなるといえる。そのため、海塩粒子が飛来しにくい山間部の道路トンネルは、凍結防止剤が散布されない環境であ

れば、トンネル内附属物に塩害による劣化を引き起こすリスクが低いと考えられることがわかった。

### a) 冬期における坑口部両側壁の付着塩分量

図-8、図-9から、多くのステンレス鋼板の付着塩分量がSUS304ステンレス鋼の臨界等価塩分量を上回っていることがわかる。これらと図-6、図-7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付着し、坑内の場所によってはトンネル内附属物の腐食劣化が促進させられる可能性があることがわかった。図-8、図-9の各図の付着塩分量の比較から、特にトンネル坑口部の路面からの高さ1.0m程度の位置でその可能性が高いといえる。一方で、一冬期の凍結防止剤の散布でトンネル坑口部側壁への付着塩分がある程度観測されたことから、凍結防止剤の散布の繰り返しによりトンネル坑口部上部などでも付着塩分が多量に観測される可能性も示唆された。

続いて、図-8、図-9の各トンネルでの付着塩分量の比較を行う。図-8、図-9の各図から、凍結防止剤の散布量が多い区間のトンネル(B、Cトンネル)ほど、付着塩分量が多い傾向にあることがわかる。また、トンネル坑口部右側壁の含有塩化物イオン量の傾向(図-5参照)から、車両が坑外へ退出する側の坑口部の側壁は凍結防止剤由来の塩分が到達しにくいと考えられたが、図-9の凍結防止剤散布量が多いケースでは、トンネル坑口部右側壁であったとしても、付着塩分量が多い箇所があることがわかる。したがって、凍結防止剤散布量が多くなると、凍結防止剤由来の塩分が到達する範囲が広くなり、トンネル坑口部に存在する附属物に塩害による劣化を引き起こすリスクが高くなると考えられる。しかしながら、凍結防止剤散布量の倍率ほどの違いは多くのケースで確認

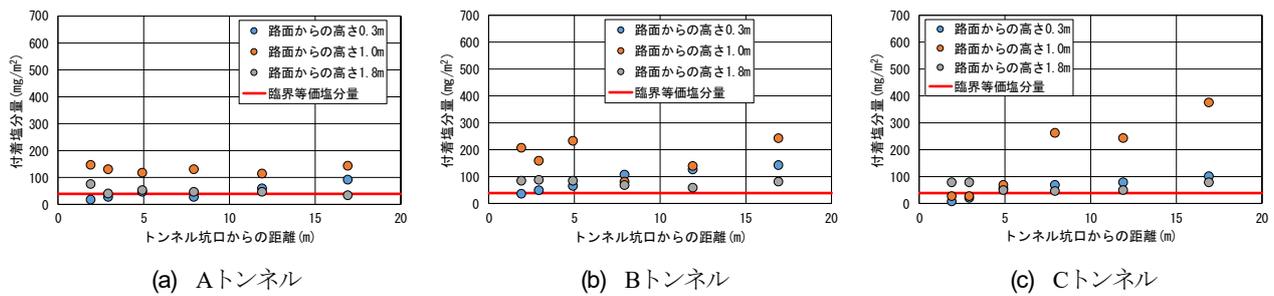


図-8 冬期におけるトンネル坑口部左側壁の付着塩分量

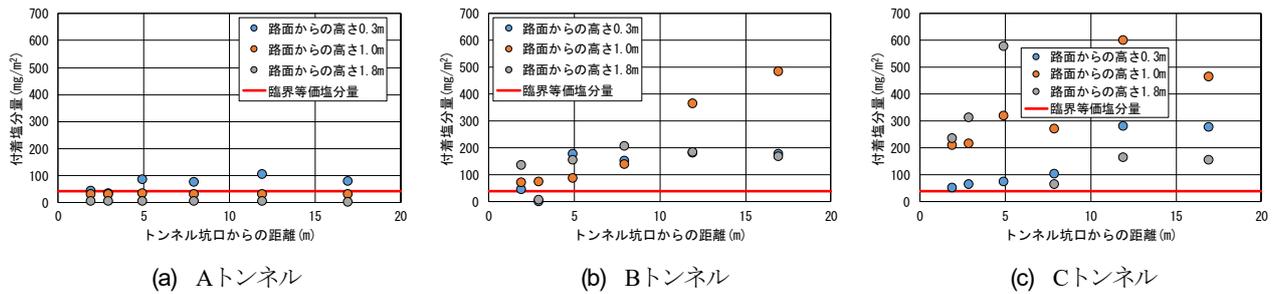


図-9 冬期におけるトンネル坑口部右側壁の付着塩分量

できなかった。これは、Aトンネルの方がB、Cトンネルと比較して交通量が多く、車両の走行によって凍結防止剤由来の塩分が飛散する回数が多いことが要因の1つと考えられる。また、トンネル坑口部左側壁の含有塩化物イオン量の傾向(図-4参照)を考えると、路面からの距離が離れるほど付着塩分量が小さくなると考えられたが、図-8、図-9から実際には路面からの高さ1.0mに設置したステンレス鋼板の付着塩分量が多くなる傾向にあることがわかる。さらに、坑口からの距離が離れるほど付着塩分量が小さくなるとも考えられたが、図-8、図-9から実際には坑口から距離が離れるほど付着塩分量が多くなるケースが多数あることがわかる。このようになった要因としては、薄板モルタル供試体とステンレス鋼板の材質の違いが考えられる。例えば、ステンレス鋼板に付着した塩分は車両に巻き上げられた路面滞水が直接かかることによって、それが少量であったとしても流れ落ちる可能性があるが、薄板モルタル供試体の場合はかけられる水の量によってはモルタル表面が湿潤状態となり、逆に塩分が浸透しやすくなると考えられるためである。また、逆に言えば、坑口からの距離が離れるほど車両に巻き上げられる路面滞水がかかる機会が減少することから、ステンレス鋼板には塩分が蓄積しやすくなり、薄板モルタル供試体は表面が湿潤状態になりにくいことから塩分が浸透しにくくなるものと考えられる。以上のような要因で、車両に巻き上げられる路面滞水がかかりやすい路面からの高さ0.3mに設置したステンレス鋼板の付着塩分量が小さくなり、車両に巻き上げられる路面滞水がかかりにくい坑口から距離が離れた位置のステンレス鋼板の付着塩分量が多くなる傾向にあったと考えられる。

以上に示した分析結果から、凍結防止剤の散布により

道路トンネル坑口部に塩分が付着し、坑内の場所によってはトンネル内附属物の腐食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が、その影響による腐食劣化の速度や対策を実施すべき箇所などを明確にするためには、更なる観測・分析が必要不可欠と考えられる。

#### 4. まとめと今後の課題

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の坑口部に複数の薄板モルタル供試体やステンレス鋼板を設置し、暴露期間後にそれぞれの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) 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は、凍結防止剤の影響を受けることがわかった。
- 2) 車両が坑外へ退出する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) 海塩粒子が飛来しにくい山間部の道路トンネルは、凍結防止剤が散布されない環境であれば、トンネル内附属物に塩害による劣化を引き起こす可能性が低いことがわかった。
- 4) 凍結防止剤の散布により道路トンネル坑口部に塩分が付着し、坑内の場所によってはトンネル内附属物の腐食劣化が促進させられる可能性があることがわかった。

5) 凍結防止剤散布量が多い区間のトンネルほど、付着塩分量が多い傾向にあることがわかった。また、凍結防止剤散布量が多くなると、凍結防止剤由来の塩分が到達する範囲が広がることがわかった。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・付着し、覆工内部の鉄筋やトンネル内附属物の腐食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、その影響による腐食の速度や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、トンネル坑口部上部などでも付着塩分が観測される可能性が考えられたことから、まずはトンネル坑口部上部に塩分が付着しうるかを数値解析などにより検討していきたいと考えている。

**謝辞：**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。

#### 参考文献

1) 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。
- 2) 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。
  - 3) 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。
  - 4) 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），2016。
  - 5) 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，I\_1345-I\_1350，2017。
  - 6) 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。
  - 7) 日本工業規格（JIS）：大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法，JIS Z 2383:1998，1998。
  - 8) 日本工業規格（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 1154:2012，2012。
  - 9) 元田慎一，篠原正，鈴木揚之助，辻川茂男：海洋性大気に暴露したステンレス鋼の発錆におよぼす付着海塩量と相対湿度の影響，材料と環境，Vol.50，pp.162-169，2001。