

北海道のトンネル覆工における凍結危険度の地域性について

(株)建設技術研究所 ○禿 和英

東北工業大学 須藤 敦史

(株)構研エンジニアリング 五十嵐 隆浩

1. はじめに

北海道では、建設から数十年以上を経過した山岳トンネルが多くなってきており、今後は予防保全を基本とした維持管理の構築とその運用が求められている¹⁾。このような状況下、合理的な維持管理には矢板工法で建設された山岳トンネルの長寿命化が直近の問題となっているが、トンネル覆工における様々な劣化現象に対する基礎的な調査・研究等が少なく、円滑な維持管理を実施していくための基本的な性状の把握・評価や将来予測が難しいのが現状である。そこで、北海道では矢板工法の山岳トンネルを中心に、トンネル覆工に対する圧縮強度・中性化・含有塩分濃度等の調査・試験を実施しており、その状況や性状等を気象区分(図-1 参照)に分けて整理・分析²⁾を行っており、地域によって中性化と塩害(塩化物イオン濃度)の複合劣化現象が現れている³⁾。本報告では、トンネル覆工の地域別における塩分供給と凍結の危険性に対する検証をアメダスの観測値により行っている。

2. トンネル覆工の複合劣化(中性化・含有塩分)

コンクリートの劣化を促進する塩化物イオンは、飛来塩分(冬期の季節風などから供給)や路面の凍結防止剤散布など外部から供給される場合とコンクリート製造時に材料から供給される場合がある³⁾。深さ x (cm)、経過時間 t (年)における塩化物イオン濃度 $C(x,t)$ は、表面における塩化物イオン濃度 C_0 、塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} 、予測の精度に関する安全係数 γ_{cl} (一般的に1.0)、初期含有塩化物イオン濃度 C_i および誤差関数 erf から式

(1)となる。

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \times \left[C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right] + C_i \quad (1)$$

ここで、トンネル覆工表面における塩化物イオン濃度 C_0 (飛来塩分と凍結防止剤等より供給)は、拡散係数 D_{ap} 、コンクリート中の塩化物イオン濃度 C_i を未知数として、観測値を基に摂動法により同定している。まず、日本海側北部と南部における覆工内部の観測塩化物イオン濃度と式(1)による同定値を図-2(a)に示す。調査したトンネル覆工における平均の中性化深さは約15mmであった。図-2(a)より、観測では平均深度30mmおよび50mmにおいて塩化物イオンの濃縮が見られ、加えて日本海北部と南部では塩化物イオンの供給量に差があるような結果が得られている⁴⁾。また、日本海側南部と太平洋側西部における塩化物イオン濃度の観測値と同定値(図-2(b)参照)では、塩分供給量は同程度だが、平均深度30mmおよび50mmにおいて塩化物イオンの濃縮現象では太平洋側西が高くなっている⁴⁾。しかし内陸部のトンネル覆工においては塩化物イオンの濃縮現象は際立っていない。

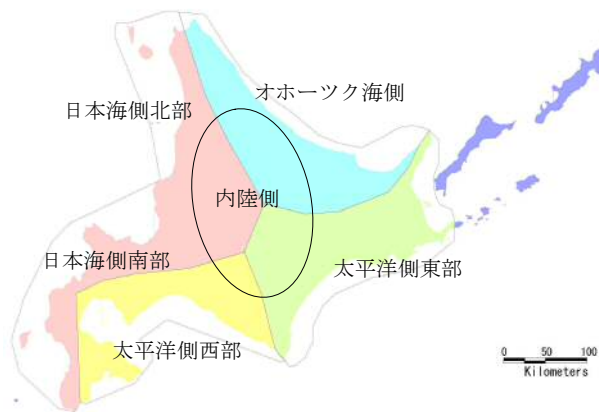


図-1 北海道の気象区分

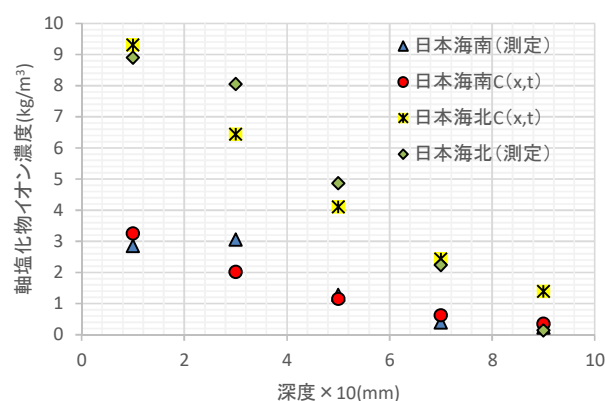


図-2(a) 覆工塩化物イオン濃度(日本海側北部・南部)

キーワード：覆工コンクリート, 塩分含有量, 中性化深度, 複合劣化

連絡先 〒810-0041 福岡県福岡市中央区大名 2-4-12 Tel:092-714-6147 E-mail: kamuro@ctie.co.jp

3. 塩分供給量の環境要因について

内陸部・日本海側の北部と南部における冬期の風向・風速と積雪量および凍結防止剤の散布量を比較したものを表-1 に示す。表-1 より、冬期の日本海側北部における平均風速は南部より強く、加えて積雪量も日本海側北部が多い結果となっているが、凍結防止剤の散布量は日本海側南部が多い。次に、日本海側南部は太平洋側西部に比べて冬期の平均風速は小さく、加えて積雪量では太平洋側西部が少なく、また凍結防止剤の散布量も日本海側南部が多いことより、北海道では外部からの塩分供給による塩化物イオンの濃縮と考えられる。

4. 各地域における凍結融解の危険度（地域係数）

コンクリートにおける凍結融解の危険性を、式(2)に示す地域の凍結融解に対する指標（地域係数）⁵⁾として、アメダス統計値より求めた結果を表-1 に示す。

$$T = - \left(1 - \left[\frac{t}{D_f} \right] \right) \quad (2)$$

T は地域係数、 t_{amin} は日最低気温の年間極値（℃）、 D_f は凍結持続日数（日）、 D_w は凍結融解総日数（日）、 -1.0°C で凍結、 0.0°C 以上で融解すると仮定しており、地域係数が大きいほど凍結融解の可能性が高い。

表-1 より、地域係数 T における凍結危険度は内陸部＞太平洋側西部＞日本海側北部＞日本海側南部となり、内陸部や太平洋側西側において凍結融解におけるトンネル覆工表面の損傷危険度が大きいことが分かる。

しかし、内陸部のトンネル覆工では塩化物イオンの濃縮現象（複合劣化）は他の地区に比べて際立っていないため、式(3)に示す該当地域の季間の最低気温を除いた修正地域係数 T_a の式(3)を提案する。

$$T_a = \left(1 - \left[\frac{D_f}{D_w} \right] \right) \quad (3)$$

ここで修正地域係数 T_a における凍結危険度は太平洋側西部＞日本海側南部＞日本海側北部＞内陸部との結果（表-2 参照）が得られた。以上より、修正地域係数が大きいほど凍結融解の危険性は大きく、さらに太平洋側西部におけるトンネル覆工の表面部では、季節風と凍結防止剤による塩化物イオンの供給量および冬期の 1 日当たりに凍結融解が生じるような気象（温度）条件による覆工表面部における損傷の危険度が大きいことが判明した。

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) 禰和英,須藤敦史: 寒冷地トンネルの覆工コンクリートにおける冬期挙動と経年劣化, 寒地開発研究会,第 34 回寒地技術論文・報告集,Vol34,CTC18- I -014,pp.69-74, 2018.12.

3) 禰和英,須藤敦史,佐藤京:寒冷地のトンネル覆工における複合劣化現象に対する一考察, 土木学会 第 25 回応用力学シンポジウム論文集,S01A-01, 2022.5.

4) 禰和英,近藤祐一郎,須藤敦史,五十嵐隆浩,河村巧: 北海道におけるトンネル覆工の含有塩分の地域性について, 寒地開発研究会,第 37 回寒地技術論文・報告集,Vol37,CTC21- I -018,pp.97-102, 2021.11.

5) 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.

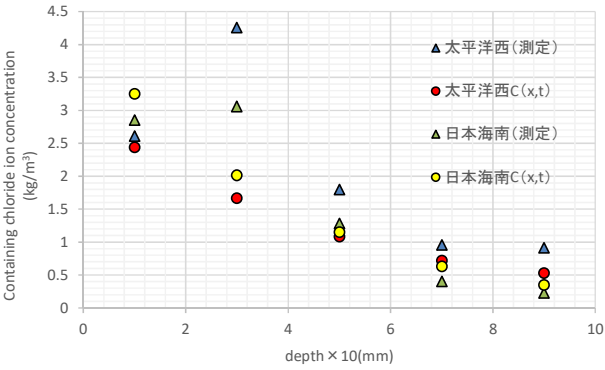


図-2(b) 覆工塩化物イオン濃度（日本海側南部・太平洋側西）

表-1 各地域の積雪量,風向・風速と凍結防止剤散布量

Weather classification	Snowfall (cm)	Wind speed (m/s)	Wind direction	Application rate of antifreeze (ton/km)
Inland	121.0	3.0	Northwest	118.63
Pacific West	43.3	5.9	West	422.95
Japan Sea North	149.3	6.7	Northwest	54.11
Japan Sea South	158.2	3.3	Northwest	408.11

表-2 各地域の地域係数の比較

Weather classification	Regional coefficients	Modify regional coefficients	Note
Inland	6.5	0.2	The high temperature the days of more than 0.0 and lowest temperature the number of days less than -1.0 from reference 5)
Pacific West	6.0	0.6	
Japan Sea North	4.8	0.3	
Japan Sea South	3.5	0.4	