

1. はじめに

北海道の山岳トンネル覆工表面における漏水・湧水は、凍結による覆工劣化の進展や通行車両への障害となるばかりではなく、凍上による背面地山への影響が大きい(写真-1)。

そこでトンネルの覆工表面に断熱漏水防止(板)工(写真-2)を施して漏水・湧水の凍結および地山凍上の防止対策を図っている¹⁾。一方、山岳トンネルの覆工表面における劣化状況の把握は重要であるが、断熱漏水防止板は覆工表面の(目視)点検の妨げになり、トンネル覆工に対する劣化状況の把握・評価が行えないのが現状である。

そこで本研究では、北海道において断熱漏水防止板で被覆されているトンネル覆工表面の劣化評価値を前後の評価値から確率論手法を用いて合理的に補間する方法の考察を行っている。



写真-1 トンネルにおける冬期の漏水氷結



写真-2 トンネル断熱漏水防止版

2. 北海道のトンネルにおける覆工の劣化特性

北海道のトンネルにおける劣化評価値の全体的な傾向を調べるために、劣化評価値のトレンド成分(多項式関数)を求めた結果を図-1に示す。ここで、北海道の中西部(海岸側)に位置するTトンネル(L=1,242m)の覆工点検(2006年)における劣化評価値を用いている。

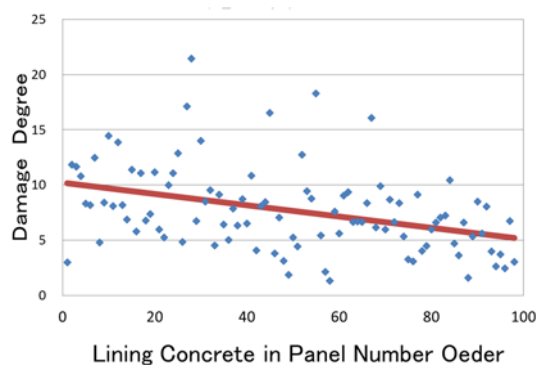


図-1 Tトンネルの覆工劣化の傾向(2006年)

3. 覆工(劣化評価値)における空間場算定

Kriging²⁾は、空間場の統計特性と得られた観測値より未観測点の値を補間する手法であるが、空間の統計特性は既知点 i, j における2点間距離の式(1)(Semi-Variogram $\gamma(d_{ij})$)で示され、観測値より近似的にSemi-Variogramを求めて未観測点の値を補間するものである。ここで未観測点(x_r)の補間値 $z^*(x_r)$ は、式(2)に示す既観測点の劣化評価値 $z(x_i)$ の線形和で定義されている。

$$2\gamma(d_{ij}) = \text{var}[z(x_i) - z(x_j)]$$

$$= E[z^2(x_i)] - 2E[z(x_i)z(x_j)] + E[z^2(x_j)] \quad (1) \quad , \quad z^*(x_r) = \lambda_0(x_r) + \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)z(x_i) \quad (2)$$

$\gamma(d_{ij})$: Semi-Variogram , $\lambda_i(x_r)$: 未観測点の係数(重み), N : 観測点数

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r)\gamma(d_{ik}) + \mu(x_r) = \gamma(d_{kr}), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

キーワード：寒冷地トンネル, 覆工点検, 確率補間, バリオグラム

4. 空間分布（相関特性）の観測値から算出

トンネル覆工における劣化評価値から任意の2点を選択し、その評価値 $z(x_i)$, ($i=1,2,\dots,N$) と2観測点間の距離から、距離に対する相関関係（Experimental Variogram）を求める。ここで $N(a)$ は2観測点 (x_i, x_j) 距離が $(a+1) \times d \sim a \times d$ ($a=1,2,\dots$) 間の組数としており、離散距離 d は覆工スパン数としている（式(4),(5)）。

次に、求めた評価値の距離に対する相関特性から、モデル化した相関関係（Theoretical Variogram）を求める。ここでは各種提案されている実用的なモデル³⁾から式(6)に示す指数関数型を用いている。

$$d_a = \frac{1}{N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} d_{ij} \quad (4)$$

$$\gamma(d_a) = \frac{1}{2N(a)} \sum_{i=1}^{N(a)} [z(x_i) - z(x_j)]^2 \quad (5)$$

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{L_v^2}\right) \right] \quad (6)$$

σ_z : 対象場の分散, L_v : 相関距離, d : 二点間距離

北海道における各トンネル覆工の劣化評価値より求めた Experimental Variogram を図-2(a),(b)、加えて式(6)における $(\sigma_z \cdot L_v)$ を表-1 に示す。

提案方法で補間するには、まず補間点と既知点との位置関係（隣り合う）とその距離（スパン数）を求め、表-1 の σ_z, L_v および式(6)から Semi-Variogram $\gamma(d_{ij})$ を求める。次に、得られた $\gamma(d)$ を式(3)に代入して各既知点における重み係数 $\lambda_k(x_r)$ ($k=1,2,\dots,N$) を求め、この重み係数 $\lambda_k(x_r)$ と既知点の劣化評価値 $z(x_i)$ を式(2)に代入することにより、漏水防止板で覆われた覆工表面の劣化評価値 $z^*(x_r)$ が補間される。

6. 結 論

本研究では、北海道において断熱漏水防止板で被覆されている覆工表面の劣化評価値を前後の評価値から補間する方法の基本的考察を試み、個々のトンネルにおける劣化評価値の空間分布特性（Semi-Variogram）を事前に求めておけば、漏水防止板で覆われた覆工表面の劣化評価値の補間が可能となる結果が得られた。

参考文献

- 1) 須藤敦史, 佐藤京: 寒冷地トンネルにおける断熱漏水防止工で覆われた覆工劣化の推定, 寒地開発研究会 第32回寒地技術論文・報告集, Vol.32, pp.235-238, 2016.11.
- 2) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydrosience, Advance in Water Resources, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.
- 3) 須藤敦史, 三上 隆, 岡田正之, 角谷俊次: トンネル断熱材の合理的設計を目的とした Semi-Variogram による坑口気温の補間土木学会 応用力学論文集, Vol.5, pp.37-44, 2002.

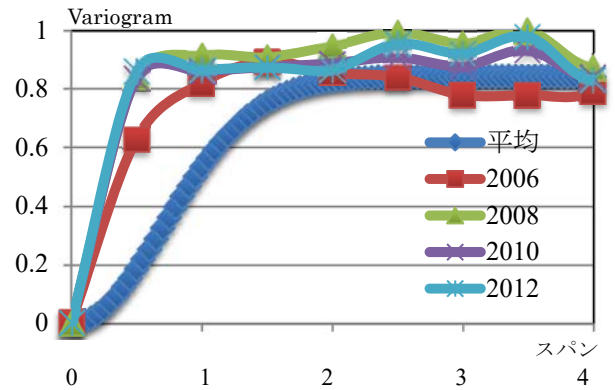


図-2(a) Experimental Variogram (T トンネル)

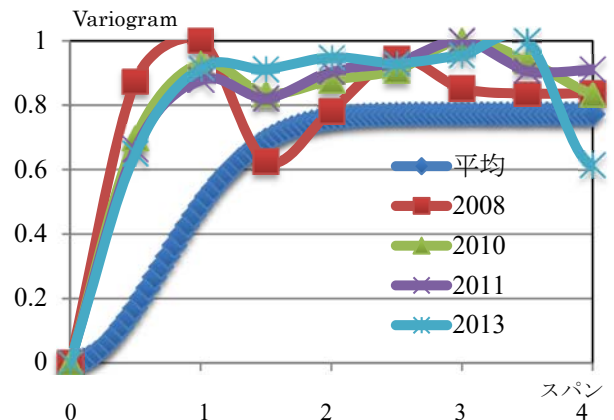


図-2(b) Experimental Variogram (G トンネル)

表-1 相関パラメータ

σ_z	L_v
0.8	2