

断熱材設計におけるトンネル坑内気温の推定法の検証

Periodic Change of Temperature overall the length at Tunnel for Heat Insulater Design

(株)地崎工業 技術部 正会員 須藤敦史(Atsushi SUTOH)

北海道大学大学院工学研究科 正会員 三上 隆(Takashi MIKAMI)

(株)ドーコン 交通部 正会員 岡田正之(Masayuki OKADA)

(株)ドーコン 構造部 正会員 重清浩司(Koji SHIGEKIYO)

(株)ドーコン 構造部 正会員 鷹田雅宏(Masahiro TAKADA)

(株)地崎工業 北海道本店土木部 正会員 河村 巧(Takumi KAWAMURA)

1. はじめに

北海道における新設の道路トンネルでは地山凍結防止の目的で坑口部の一定区間に一次・二次覆工の間に断熱材を施工しているが、その施工厚さ・延長はトンネル坑口部の気温および坑内延長方向の気温変動に大きく左右される¹⁾。

しかし、トンネル坑口部の冬期気温は観測されない場合がほとんどであり、加えて延長方向における気温変動は坑内の風向・風速、通過車両の排気熱や坑内換気など様々な現象の影響を受けるため、その推定は非常に難しい問題となっている。

そこで、北海道土木技術会(トンネル研究委員会:TMS(旧凍結防止)分科会)では合理的な断熱材設計を研究テーマとしてトンネル坑口(気温の未観測地点)の気温推定およびトンネル坑内延長方向の気温推定をアメダス観測記録の確率・統計的な検討²⁾と図-1に示す7箇所(トンネル)における坑口・坑内の気

温観測から、冬期のトンネル坑内環境に即した延長方向における気温の推定³⁾を行った。

本論文では別の新設された道路トンネルで観測された坑内気温と提案手法により推定した気温の比較を行うことで、提案手法の妥当性および断熱材の設計における適用性の検討を行ったものである。

2. トンネル坑口気温の推定

(1) 気温の年周期変動

一般に気温の年周期は式(1)に示す年平均気温 U_m と年振幅 A_Y を有する正弦関数で表される⁴⁾。

$$U = U_m - A_Y \sin\{2\pi(t - t_0)/365\} \quad (1)$$

U_m : 年平均気温, A_Y : 年振幅,

t : 経過日数(t_0 : 調整日数)

ここで、 U_m と A_Y を簡便に求める手法を以下に記述する。

(2) トンネル坑口の気温推定

坑口部の気温推定には Semi-Variogram⁵⁾を採用し、年平均気温 U_m と年振幅 A_Y それぞれの推定値 $z^*(x_r)$ は式(2)の示す重み係数 $\lambda_i(x_r)$ を用いた線形式とする。

$$z^*(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) z(x_i) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) = 1 \quad (3)$$

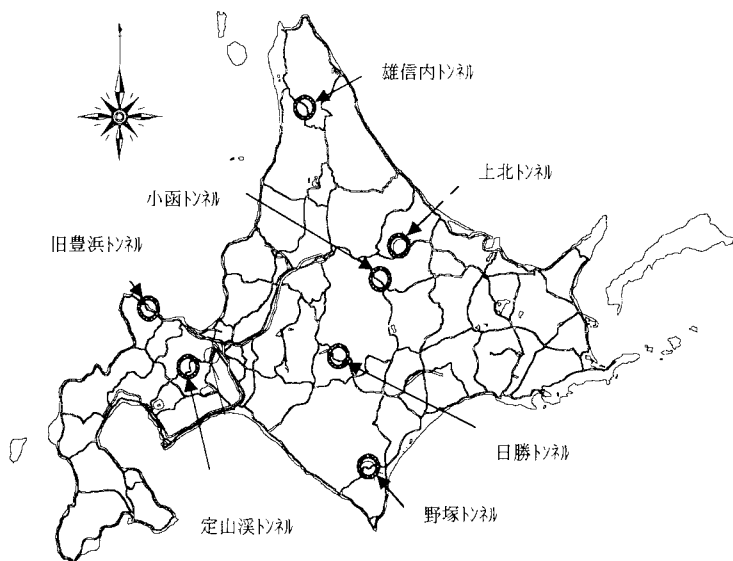


図-1 坑口部・坑内延長方向温度の観測トンネル位置図

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \gamma(d_{ik}) + \mu(x_r) = \gamma(d_{kr}), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\mu(x_r) = E[\{z(x_r) - m_z\}^2]: \text{場の分散}$$

ここでバリオグラム $\gamma(d_{ij})$ は式(5)に示す実用的な気温と距離の相関モデルで表され、表-1に示す相関パラメータ(σ_z 、 L_v)は226箇所のアメダスの観測気温から求められる。

$$\gamma(d) = \sigma_z^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{L_v^2}\right) \right] \quad (5)$$

σ_z : 分散, L_v : 相関距離, d : 二点間距離

表-1 アメダス観測点位置の相関

地域	σ_z	L_v
道内平均	0.78	2999

3. アメダス観測値によるトンネル坑口の気温推定

一般国道229号茂岩トンネルにおける坑口部の気温推定は、図-2に示す坑口部周辺の神恵内・岩内アメダス観測値(表-2)から気温変動は以下のように得られる。

- 1) 各アメダスと坑口の標高差50m以内であるため、トレンド成分の除去は行わない。
- 2) 既知2点および坑口との距離を求める。(坑口~神恵内4km, 坑口~岩内16km, 神恵内~岩内20km)
- 3) 既知2点と補間点の距離関係および式(5)のTheoretical Variogramから、各既知点におけるバリオグラム係数 $\gamma(d_{11}) \sim \gamma(d_{22})$ および $\gamma(d_{1r}) \sim \gamma(d_{2r})$ の値を求めると以下の連立方程式となる。

$$0.05904\lambda_2(x_r) + \mu(x_r) = 0.00246 \quad (6a)$$

$$0.05904\lambda_1(x_r) + \mu(x_r) = 0.03836 \quad (6b)$$

$$\lambda_1(x_r) + \lambda_2(x_r) = 1 \quad (3)$$

- 4) 連立方程式において各重み係数 $\lambda_1(x_r)$ 、 $\lambda_2(x_r)$ と $\mu(x_r)$ が未知量となり、マトリックス表示すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.05904 & 1 \\ 0.05904 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1(x_r) \\ \lambda_2(x_r) \\ \mu(x_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00246 \\ 0.03836 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

- 5) γ_A の逆行列を求めることで、各重み係数 $\lambda_1(x_r)$ 、 $\lambda_2(x_r)$ と $\mu(x_r)$ が求められる。

表-2 各アメダスの年平均気温, 年振幅

アメダス名	標高	年平均気温	年振幅
神恵内	50m	8.7	12.5
茂岩	33m	8.2	12.7

- 6) 得られた重み係数と神恵内・岩内アメダスの年平均と年振幅を式(2)に代入すると茂岩トンネル坑口における気温推定値が以下のように求められる。

年平均気温

$$z_1^*(x_r) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_1(x_i) = 0.80424 \times 8.7 + 0.19576 \times 8.2 = 8.602 \quad (8.a)$$

年平均振幅

$$z_2^*(x_r) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i(x_r) z_2(x_i) = 0.80424 \times 12.5 + 0.19576 \times 12.7 = 12.54 \quad (8.b)$$

よって、茂岩トンネル坑口の冬期気温は $8.60-12.54=-3.94^\circ\text{C}$ (約 -4.0°C)になる。

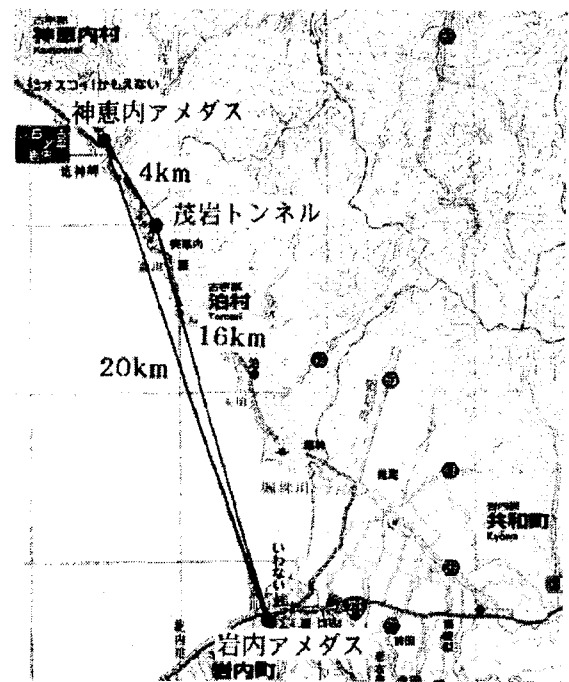


図-2 茂岩トンネルと各アメダスの位置図

4. トンネル坑内延長方向の気温推定

トンネル坑口から延長距離に伴って上昇する年平均気温 U_z と減衰する年振幅 A_z に対して、道内7箇所のトンネルにおいて坑内風の状態を考慮して観測された延長距離に対する平均気温・年振幅を坑口を基準として示すと図-3のようになる。

ここで、上北トンネルを代表とするグループI(坑内風が弱い)では、トンネル延長距離やトンネル軸の方向および坑口の地形、両坑口の標高差などの諸状況により、冬期の季節風が吹き込まないためトンネル坑内ではあまり風が吹いておらず(0.5m/s程度以下)加えて、その方向もあまり定まっていないものと考えられる。

一方、野塚トンネルを代表とするグループII (坑内風が比較的強い)では、トンネルの延長距離が短い、もしくはトンネル軸が東西向き、また坑口の地形、標高差などの理由により、トンネル坑内に冬期の季節風が吹き込むため、トンネル内では一定方向の風が1.0~1.5m/s程度の風速で吹き抜けているものと考えられる。

5. トンネル坑内の気温推定と実測値

との比較

次に、一般国道229号茂岩トンネルでは坑内 (坑口から317m地点) において気温変動の観測を行っている。

そこで、上記アメダス観測値より推定した坑口部の気温を図-3に示す回帰式により坑内延長方向の気温変動に変換し、実際の観測値と比較を行うことで、提案手法の妥当性および断熱材の設計における適用性の検討を行う。

ここで図-3より、茂岩トンネルと環境条件の類似している豊浜トンネルに近いグループII (坑内風が比較的強い)の回帰式

年平均気温 U_m と年振幅 A_y それぞれの推定値における上昇温度の回帰曲線を求めると

表-3 茂岩トンネル坑内気温 (317m)

トンネル	U_m	A_y
茂岩トンネル (317m)	9916	11.126

式(2)となる。

年平均： U_m

$$y = 0.4338 \ln(x) - 1.1842 \quad (9a)$$

年振幅： A_y

$$y = -0.449 \ln(x) + 1.1721 \quad (9b)$$

これに茂岩トンネルの温度観測点の距離 (坑口からの延長距離) 317.0mを代入すると温度上昇1314°C振幅の減衰-1414°Cが求められる。

ここで求められた茂岩トンネル坑口から延長距離317mの地点の気温変動の推定値 (年平均気温 U_z 、年振幅 A_z) は表-3に示すようになる

次に得られた茂岩トンネル坑口から延長距離317mの地点の気温変動の推定と実際に観測された気温変動を示すと図-4となる。

図-4より、トンネル坑内延長方向の年平均気温 U_z および年振幅 A_z の減衰は、図-3に示すトンネル坑内風の強さを考慮す

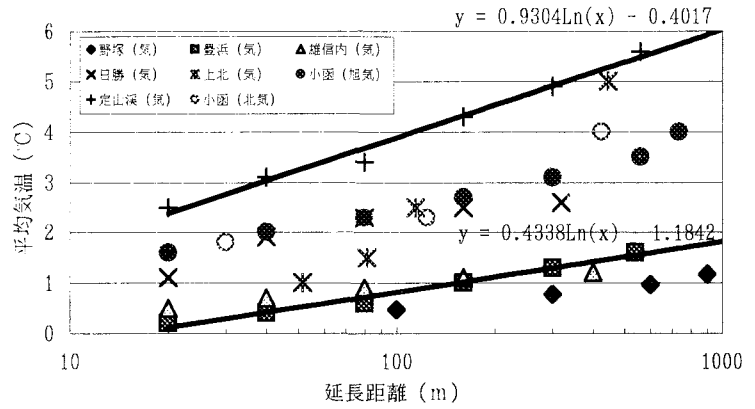


図-3(a) トンネル坑内の年平均 U_m の上昇(北海道)

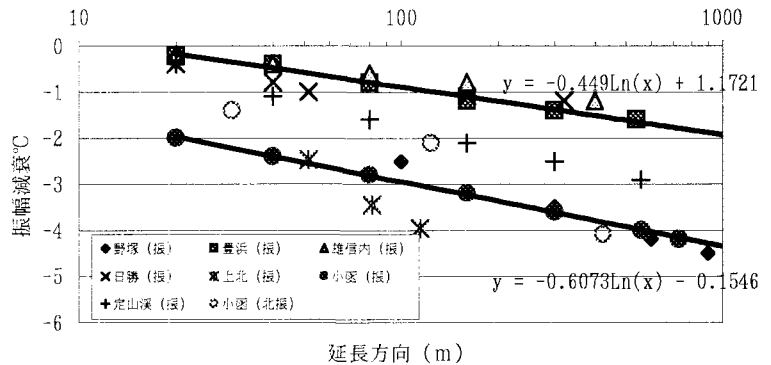
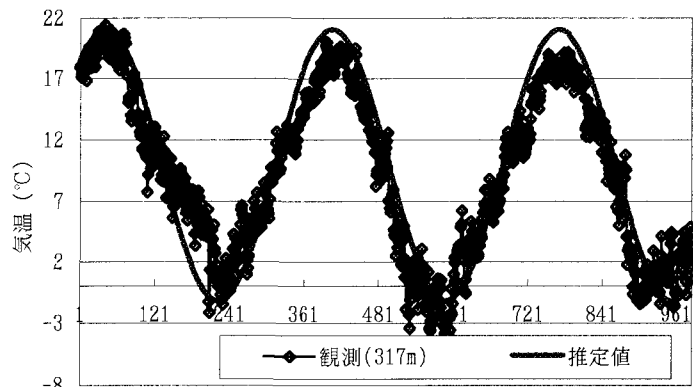


図-3(b) トンネル坑内の年振幅 A_y の減衰(北海道)

る回帰式で求められる。

5. 結論



(1998年7月1日~2002年3月11日)

図-4 茂岩トンネル坑内 (317m) の推定気温

本研究は寒冷地トンネルの断熱材設計におけるトンネル坑口部の気温と坑内延長方向気温の合理的設定において、以下に示す結論が得られた。

(1) トンネル坑口部の気温 (年平均気温 U_z 、年振幅 A_z) は周

辺のアメダス観測気温と確率・統計的手法（バリオグラム）より得られる。

- (2) トンネル延長方向の年平均気温 $U_{\bar{z}}$ の上昇および年振幅 $A_{\bar{z}}$ は、トンネル坑内の風速を考慮することで実用的かつ正確に求められ断熱材の設計における合理化・簡便化が図れる。

参考文献

- 1) 三上隆, 林憲造, 権田静也: 寒冷地道路トンネルの断熱材設計のための実用的な温度算定式の提案, 土木学会論文集, No.498/VI-24, pp.872-93, 1994.
- 2) 須藤敦史, 三上隆, 岡原貴司, 岡田正之: 寒冷地トンネルの温度変動について, トンネル工学研究論文・報告集第10巻, 報告28, pp.251-256, 2000.
- 3) 須藤敦史, 三上隆, 岡原貴司, 岡田雅之, 葦澤憲吉: 寒冷地道路トンネルの断熱材設計における気温変動の推定, 土木学会論文集, No.616/VI-42, pp.103~110, 1999.
- 4) 須藤敦史, 三上隆, 岡田正之, 飯塚哲善: トンネル内(延長方向)の気温変動について, 寒地技術論文・報告集, Vol.17, pp.66-73, 2001.
- 5) 岡田勝也, 松本嘉司: 鉄道トンネルにおける凍結深度の実態とトンネル内気温の周期的変化に対するその解析, 土木学会論文集, No.424/III-14, pp.179-186, 1990.
- 6) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydrosocience: *Advance in Water Resources*, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.