

# 外部断熱材を施工した既設トンネルの地山内温度計測

## 結果についての一考察

### A STUDY ON THE RESULTS OF GROUND TEMPERATURE MEASUREMENT IN EXISTING TUNNEL WITH HEAT INSULATOR

岡田正之<sup>1)</sup>・三上 隆<sup>2)</sup>

Masayuki OKADA and Takashi MIKAMI

Icicle and ice sheet formation upon tunnel walls pose a problem for transportation and road maintenance. Heat insulating panels are being developed that can be attached to the walls of existing tunnels to prevent icicle formation. This paper demonstrates the efficiency of these heat insulators through temperature measurements done inward from the tunnel wall. Further, these results generally agree with temperature estimates generated from an equation presented in this paper.

**Key Words:** road tunnel, heat insulator, temperature measurement, design, cold region

#### 1. はじめに

寒冷地における山岳トンネルでは地山からの湧水がある場合、つららや側水の発達、地山凍結による覆工の変形などの凍害を受ける危険性が高い。道路トンネルにおいては、冬期間の交通安全確保および維持管理におけるコスト削減の観点から、凍害を解決することが望まれる。北海道内では凍害対策としてトンネル内空側に断熱材を施工する、いわゆる「外部断熱工法」が採用されることが多い。

しかしながら実際に外部断熱工法が施工されたトンネルでの、厳寒期における背面地山（トンネル半径）方向での温度分布や岩盤の熱特性値などの調査例が少なく、工法の効果を定量的に把握することが難しい。また設計法についても確立されていないのが現状である。

著者らは、外部断熱材の材料選定や厚さの決定などを比較的簡単に行うことを目的とした、実用的な温度算定式を準定常（周期的）熱伝導解析に基づき既に提示し、さらにトンネル・地山系の温度特性を支配する断熱材の熱伝導率、熱容量、厚さ等の種々のパラメーターの影響を明らかにした<sup>1)</sup>。

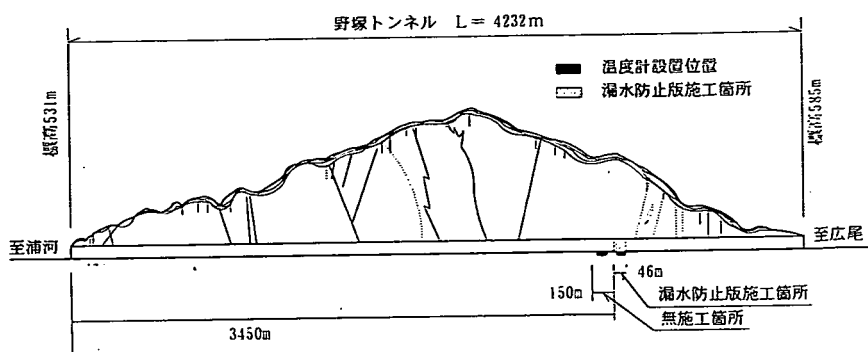
本報告では、外部断熱材の断熱効果を把握するため寒冷地の道路トンネルにおいて実施した現場計測の結果について検討するとともに、既往論文で提案した外部断熱材設計のための温度算定式について検証する。

#### 2. 調査の概要

北海道浦河町および広尾町に位置する一般国道 236 号野塚トンネルの、広尾側坑口から 760～850m 地点において現場計測を実施した（図-1）。同トンネルは延長 4,232m、標高 531～588m の供用中の 2 車線道路トンネルであり、矢板工法で施工されている。外部断熱材は厚さ約 35 mm、幅 1m、長さ 2m の工場製作による三層構造（表層部；着色亜鉛鉄板、芯材；断熱材（ポリイソシアヌレートフォーム）、背面部；排水

1) 正会員 北海道開発コンサルタント(株)交通施設部

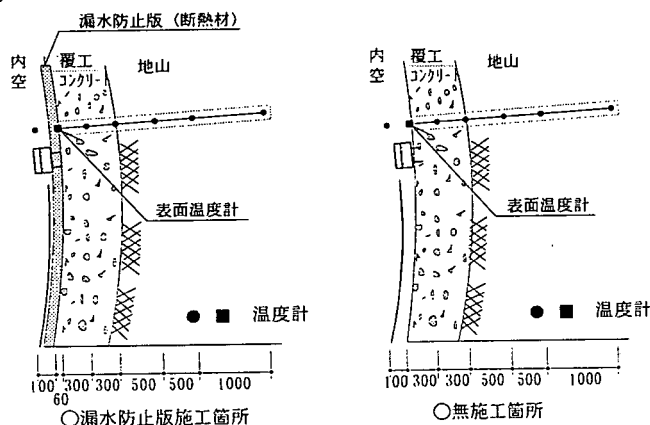
2) 正会員 工学博士 北海道大学大学院 工学研究科



図－１ 調査トンネル縦断面図および現場計測位置

シート)のボードを、覆工表面に取付け金具によりアンカー止めし、トンネル天端から順にトンネル全周にわたり組立てるものである。

計器設置図を図－２に示す。計測は外部断熱材が施工されている箇所と施工されていない箇所の２断面において実施した。温度センサーとして防水性の高い白金測温抵抗体を用いることとし、内空温度(覆工表面から5cm離れた地点)、覆工表面ならびにボーリング孔内の覆工中央、覆工背面、地山内深度0.5m、地山内深度1m、地山内深度2mに設置した。測定は原則として1時間間隔とし、各々の断面でICカードに自動記録しておき定期的にICカードを交換しデータを収集するシステムとした。測定期間は1997年8月から1998年7月までである。



図－２ 温度測定計器配置図

### ３．調査結果

#### (１) 温度計測

外部断熱材施工断面および無施工断面における、温度計測データの経時変化をそれぞれ図－３，４に示す。図より内空温度については明瞭に周期的年変化が見られ、両断面ともほぼ同様の値を示している。外部断熱材施工断面では、覆工表面で若干周期的変化の傾向があるものの、覆工内および地山内では全計測期間を通じてほとんど温度変化が見られず、断熱材の背面側は坑内温度の影響を受けていないことが分る。

断熱材無施工断面では、覆工表面は内空温度の変化にほぼ一致した周期的年変化があるのをはじめ、地山深度0.5m地点までは周期的変化が見られ坑内温度の影響が覆工および地山内まで及んでいることが分る。

以上の結果から、外部断熱材施工の有無で、覆工表面温度や覆工および地山内への影響に明らかな差異が見られ、外部断熱材の断熱効果が認められる。

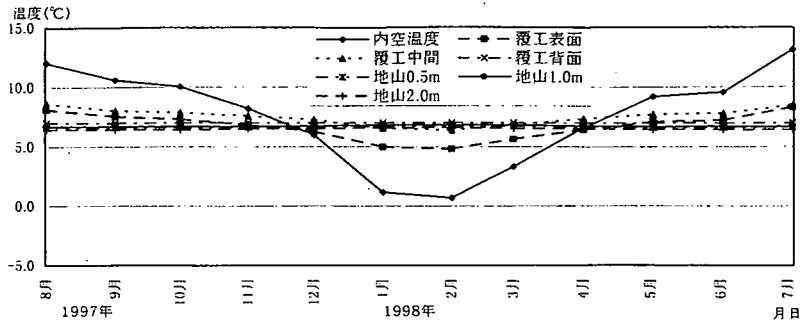


図-3 外部断熱材施工断面の月平均温度経時変化グラフ

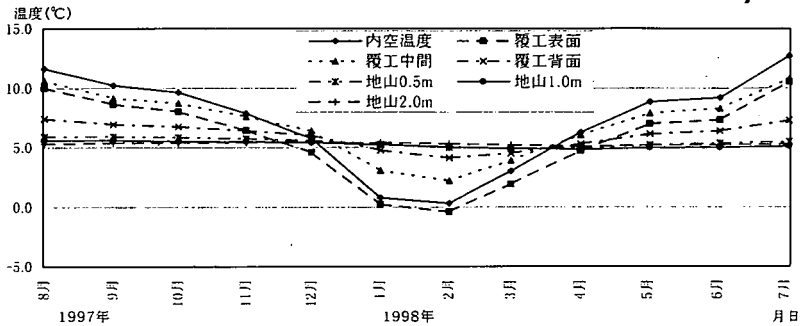


図-4 外部断熱材無施工断面の月平均温度経時変化グラフ

## (2) 地山試料試験

ボーリングコアを用いた地山試料の熱伝導率は  $1.8 \sim 2.0 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、熱容量は  $421 \sim 478 \text{ kcal/m}^3^\circ\text{C}$  であり、通常設計で用いられてきた値と同程度であり適切な値と言える。なお地山は花崗閃緑岩であり単位体積重量は平均  $25 \text{ kN/m}^3$ 、1 軸圧縮強度は平均  $53 \text{ Mpa}$  であった。

## 4. 考 察

### (1) 外部断熱材の有効性

外部断熱材施工断面および無施工断面での地山内の温度分布を、各々図-5、6 に示す。厳寒期の 1998 年 2 月においては、無施工断面では内空温度が  $0.3^\circ\text{C}$ 、覆工表面温度も  $-0.4^\circ\text{C}$  と氷点下を記録したのに対し、断熱材施工断面では内空温度が  $0.7^\circ\text{C}$  で、覆工表面温度が  $4.8^\circ\text{C}$  と、約  $4^\circ\text{C}$  の外部断熱材による断熱効果が認められる。また覆工背面温度についても、無施工断面では  $4.1^\circ\text{C}$  であるのに対して断熱材施工断面では  $7.0^\circ\text{C}$  と、約  $3^\circ\text{C}$  高い結果となり、覆工コンクリートと合わせた断熱効果は約  $6^\circ\text{C}$  である。

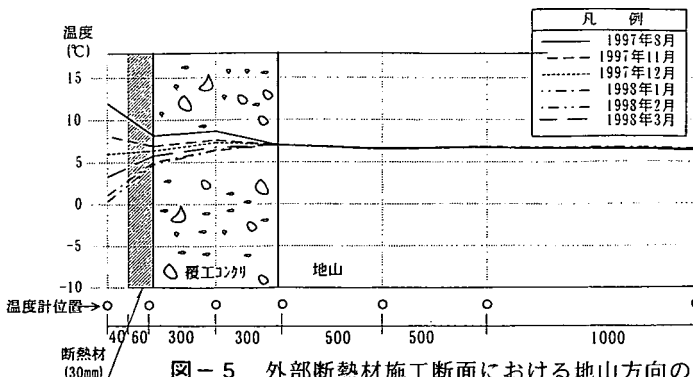
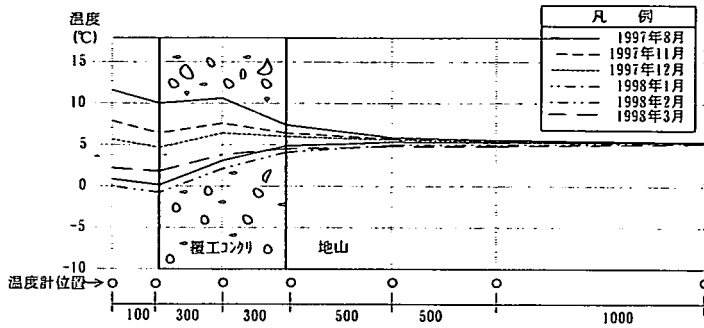


図-5 外部断熱材施工断面における地山方向の温度分布図



図－6 外部断熱材無施工断面における地山方向の温度分布図

## (2) 温度算定式による計算値との比較

現場計測から得られた温度測定結果と、著者らが既往論文で提案<sup>1)</sup>した以下の温度算定式による計算値とを比較する。断熱材背面温度  $U_1$  および覆工背面温度  $U_2$  は、

$$U_1 = U_m - A_Y \cdot \text{Max}(UU_1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$U_2 = U_m - A_Y \cdot \text{Max}(UU_2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\text{Max}(UU_1) = \sqrt{(E^2 + F^2) / (C^2 + D^2)}, \text{Max}(UU_2) = 1 / \sqrt{(C^2 + D^2)}$$

$$C = 1 + (L_1/k_1 + L_2/k_2) \sqrt{p k_3 (\rho c)_3 / 2}$$

$$D = (L_1/k_1 + L_2/k_2) \sqrt{p k_3 (\rho c)_3 / 2} + \{L_2/(2k_2) + L_1/k_1\} p L_2 (\rho c)_2$$

$$E = 1 + (L_2/k_2) \sqrt{p k_3 (\rho c)_3 / 2}, F = (L_2/k_2) \sqrt{p k_3 (\rho c)_3 / 2} + \{L_2/(2k_2)\} p L_2 (\rho c)_2$$

ここで、 $U_m$ ；年平均気温、 $A_Y$ ；年振幅、 $L_1$ ；断熱材厚さ、 $L_2$ ；覆工厚、 $k_1$ ；断熱材の熱伝導率、 $k_2$ ；覆工の熱伝導率、 $k_3$ ；地山の熱伝導率、 $(\rho c)_2$ ；覆工の熱容量、 $(\rho c)_3$ ；地山の熱容量、 $p$ ； $2\pi/(365 \times 24)$

当トンネルでは計測結果などから、 $U_m=7.5^\circ\text{C}$ 、 $A_Y=6.2^\circ\text{C}$ 、 $k_1=0.0189 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、 $k_2=1.3 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、 $k_3=1.9 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、 $(\rho c)_2=500 \text{ kcal/m}^3^\circ\text{C}$ 、 $(\rho c)_3=450 \text{ kcal/m}^3^\circ\text{C}$ 、 $L_1=0.037\text{m}$ 、 $L_2=0.45\text{m}$ である。式(1)、式(2)より、断熱材背面温度  $U_1$  の計算値は  $4.8^\circ\text{C}$  となり、計測結果 ( $4.8^\circ\text{C}$ ) と良い一致をみた。また覆工背面温度  $U_2$  の計算値は  $5.3^\circ\text{C}$  となり、計測結果 ( $7.0^\circ\text{C}$ ) より 25%ほど小さな値となった。

## 5. おわりに

既設トンネルの凍害を防止するために施工される外部断熱材の効果を把握するため、実際のトンネルにおいて温度計測を実施し、以下のことが明らかとなった。

- ①地山の熱伝導率は  $1.8 \sim 2.0 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、熱容量は  $421 \sim 478 \text{ kcal/m}^3^\circ\text{C}$  で、従来から用いられている値とほぼ同等であった。
- ②厳寒期の測定データによれば、内空温度が  $0.7^\circ\text{C}$ 、覆工表面温度が  $4.8^\circ\text{C}$  であり、約  $4^\circ\text{C}$  の外部断熱材による断熱効果が認められた。
- ③今回の計測値と温度算定式による計算値は、おおむね良い一致を示した。

最後に、本報告は北海道土木技術会トンネル研究委員会の研究成果の一部を取りまとめたものであり、委員各位、関係各機関に対し心より感謝致します。

## 参考文献

- 1) 三上隆・岡田正之・芳村仁：既設トンネルの外部断熱材の厚さの算定について、構造工学論文集、Vol.42A、pp.43～48、1996。