

## 北海道新幹線におけるトンネル凍害対策（断熱材施工延長の検討）について

鉄道・運輸機構\*) 正会員 南 邦明 鳥井宏之  
 パシフィックコンサルタンツ\*\*) 正会員 〇前田 洸樹 畠山幸佑 松長 剛  
 北海道大学大学院\*\*\*) フェロー 三上 隆

## 1. はじめに

北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）のトンネルでは、積算寒度が高く、トンネル覆工への凍害が懸念された。このため、凍害対策を検討する必要があった。別報<sup>1)</sup>では、トンネル覆工への凍害対策として断熱工について検討し、断熱材厚さを試算した。本報告では、断熱材のトンネル延長方向の必要施工延長の算定法について述べる。ここでは、既往研究であるトンネル内空延長方向温度算定式や多層系地盤における凍結深さの算定式等を用いることにより、断熱材の施工延長を試算した。試算に先立ち、年平均気温のトンネル延長方向分布および坑内風速設定値が断熱材の施工延長に与える影響について検討した。

## 2. トンネル延長方向における年平均気温および風速の設定

本報告では、別報<sup>1)</sup>と同様、A トンネルを対象に断熱材延長の算定法を検討した。表1に計算モデルとするA トンネルの気象条件を示す。

表1 A トンネルの気象条件

| 年平均気温 | 年温度振幅  | 積算寒度     |
|-------|--------|----------|
| 8.1℃  | 15.63℃ | 586℃・day |

## 2-1 トンネル延長方向における年平均気温の仮定

トンネル外気温や坑内温度については、文献<sup>2)</sup>等でも用いられており、一般に示される式(1)と仮定する。

$$\theta = T_m(z) + A_y(z) \sin\{(2\pi/364)t\} \quad (1)$$

ここで、 $\theta$ :トンネル坑内気温(℃)、 $z$ :坑口からの距離(m)、 $t$ :日、 $A_y(z)$ : $z$ 位置の年周期気温の片振幅(℃)、 $T_m(z)$ : $z$ 位置の年平均気温である。 $T_m(z)$ は、坑口からトンネル延長方向の距離に応じて上昇傾向が考えられるが、上昇幅や上昇幅のトンネル毎に異なる要因については明確にされていない。そこで本報告では、 $z=500\text{m}$ の位置で坑外の年平均気温  $T_m(0)(=8.1^\circ\text{C})$ よりも  $\Delta T^\circ\text{C}$ 上昇すると仮定する式(2)を用いて、 $\Delta T=0\sim 5^\circ\text{C}$ とした場合に断熱材施工延長に与える影響を分析した。式(2)で仮定した年平均気温分布状況を図1に示す。

$$T_m(z) = \Delta T / \ln(500) \cdot \ln(z) + T_m(0) \quad (2)$$

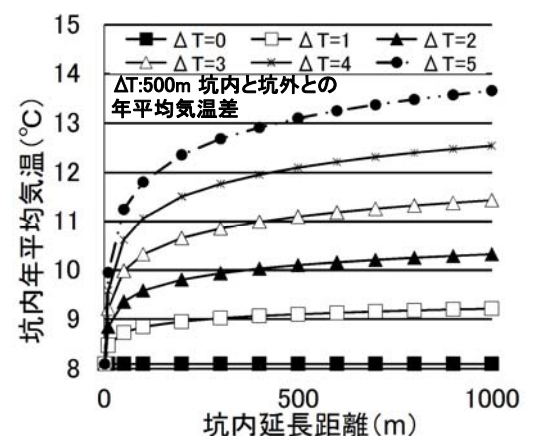


図1 仮定する年平均気温の分布図

## 2-2 トンネル坑内風速値の仮定

トンネル両坑口の流体のエネルギー保存を考えれば、坑内風速は一定と仮定できるため、本報告では、風速はトンネル坑内で一定と仮定し、 $v=0.1\sim 2.0\text{m/s}$ とした場合に断熱材施工延長に与える影響を分析した。

## 3. 断熱材の施工延長の試算方法

## 3-1 断熱材厚さの算定

断熱材厚さの算定方法には、別報<sup>1)</sup>で示した多層系地盤の凍結深さを算出する Aldrich による修正 Berggren<sup>3)</sup>の式(3)を用いる。詳細については、別報<sup>1)</sup>を参照されたい。

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{172800 \cdot F}{(L/K)_{\text{eff}}}} = C \cdot \sqrt{F} \quad (3)$$

$$(L/K)_{\text{eff}} = 2/Z^2 \{L_1 d_1 (d_1/2K_1) + L_2 d_2 (d_1/K_1 + d_2/2K_2) + \dots + L_n d_n (d_1/K_1 + d_2/K_2 + \dots + d_n/2K_n)\} \quad (4)$$

ここで、 $Z$ :凍結深さ(cm)、 $\lambda$ :無次元補正係数、 $K$ :熱伝導率( $\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ )、 $L$ :潜熱( $\text{cal/cm}^3$ )、 $F$ :積算寒度( $^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ )、 $d_1$ :覆工コンクリート厚(cm)、 $d_2$ :断熱材厚さ(cm)、 $d_3$ :吹付けコンクリート(cm)、 $d_4$ :地山(cm)を表し、図2に法線方向(半径方向)の断面図を示す。試算は、式(3)を  $Z$  について収束計算し、 $d_4 \leq 0$  となるときの  $d_2$  を必要断熱材厚さとする。

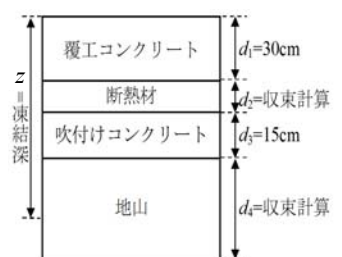


図2 法線方向の考え方

キーワード：トンネル 凍害 断熱材

連絡先：\*) 〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西 1-1 TEL 011-231-3491 FAX 011-231-3500  
 \*\*) 〒163-6018 東京都新宿区西新宿 6-8-1 TEL 03-5989-8321 FAX 03-5989-8329  
 \*\*\*) 〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目 TEL 011-716-2111 FAX 011-706-2432

### 3-2 断熱材施工延長の試算方法

トンネル延長方向の $z$ 位置における坑内気温およびトンネル坑内での積算寒度は、式(2)および文献<sup>4)</sup>における算出方法より求める。算出した $z$ 位置における積算寒度を式(3)に代入し、凍結深さを地山に到達させない断熱材厚さを収束計算により求め、 $d_2$ が0(ゼロ)となる位置を求める。坑口から本位置までを断熱材の施工延長とする。

## 4. 断熱材施工延長の検討結果

### 4-1 トンネル坑内気温設定の影響について

図4にトンネル坑内気温設定の違いによる必要断熱材厚さと断熱材延長の関係を示す。なお、風速は $v=1.0\text{m/s}$ で一定とした。Aトンネルの場合、断熱材の施工延長は最短120m、最長1880mとなった。 $\Delta T$ によって必要施工延長に最大1760mの差が生じ、 $\Delta T$ が施工延長に与える影響が大きい結果となったため、設計時には適切に $\Delta T$ を設定する必要がある。設計断熱材厚さは初期条件( $z=0\text{m}$ )で決定されるため、 $\Delta T$ によらず $d_2=3.3\text{cm}$ <sup>1)</sup>となる。図に示すように、例えば、 $\Delta T=4^\circ\text{C}$ において、 $z=240\text{m}$ で必要断熱材厚さは0mmとなり、この時のトンネル延長方向距離と積算寒度の関係を表2に示す。これより、地山・気温条件やトンネル諸元がAトンネルと同様の場合には、積算寒度 $180^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ 程度で $0^\circ\text{C}$ 凍結線が断熱材なし( $d_2=0\text{mm}$ )で地山に侵入しない結果となることが確認できる。

### 4-2 トンネル坑内風速設定値の影響について

図5にトンネル坑内風速( $v$ )の違いによる必要断熱材厚さと断熱材延長の関係を示す。なお、気温上昇幅は文献<sup>5)</sup>を参考に $\Delta T=4^\circ\text{C}$ とした。Aトンネルの場合、断熱材延長は最短60m、最長320mとなり、最大260mの差が生じ、 $v$ が断熱材施工延長に及ぼす影響は大きい結果となった。したがって、設計時に適切な風速値を設定する必要がある。また、 $v=1.0\text{m/s}$ 以上の場合より $v=1.0\text{m/s}$ を下回る場合の方が、必要施工延長に与える影響が大きいことが判った。北海道新幹線(新函館北斗・札幌間)のトンネルについて、両坑口の大気圧差からトンネル坑内風速を算出すると、多くのトンネルで風速 $v=1.0\text{m/s}$ を下回ることから、風速値を適切に予測・設定することが必要である。

## 5. まとめ

本報告では、既往の研究や別報<sup>1)</sup>をもとに新設トンネルにおける断熱材の施工延長の試算した。また、トンネル施工場所等各により差異が生じると考えられる $\Delta T$ および $v$ が断熱材の施工延長に与える影響を分析した結果、これらの影響は大きく、設計時に $\Delta T$ および $v$ を適切に設定することが重要であることが判った。

現在、Aトンネルにおける初期条件や $\Delta T$ および $v$ の設定を適切に行うため、北海道新幹線において施工済みのBトンネルにて、昨夏より覆工表面温度と外気温、風向風速の計測を実施中である。今後は、この計測結果を活用し、Aトンネルにおける断熱材の施工延長を決定することを考えている。

### 【参考文献】

- 1) 鳥井宏之, 米澤豊司, 南 邦明, 三上 隆:北海道新幹線におけるトンネル凍害対策(断熱工厚さの検討)について, 第70回土木学会年次学術講演会概要集, 2015.9
- 2) 岡田勝也:鉄道トンネルにおける断熱処理によるつらら防止工法に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.1324, 1986.9
- 3) Aldrich, H.P.: Frost penetration below highway and airfield pavements, Highway Research Board Bulletin 135, pp.124~149, 1956.
- 4) 岡田勝也:トンネルつらら発生領域に関する統計的・理論的解析と一提案, 鉄道技術研究報告, No.1324, 1997.3
- 5) 須藤敦史, 三上 隆, 角谷俊次, 五十嵐隆浩, 河村 巧:トンネル断熱材設計における坑口・坑内気温の推定について, 2007トンネル技術研究発表会論文集, 2007.2

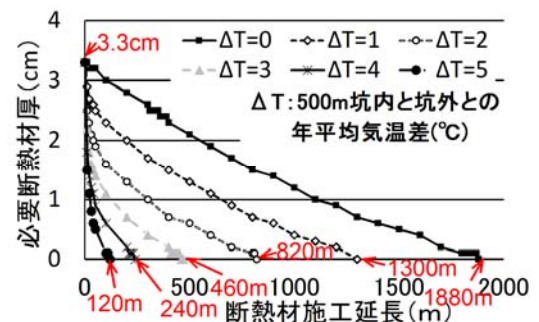


図4 トンネル坑内気温設定の違いと必要断熱材厚さと断熱材施工延長

表2  $\Delta T=4$ における坑口距離と積算寒度の関係

|                                          |     |     |     |     |
|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 断熱材不要点                                   | —   | —   | —   | ○   |
| 延長方向距離(m)                                | 0   | 100 | 200 | 240 |
| 積算寒度( $^\circ\text{C}\cdot\text{days}$ ) | 586 | 252 | 194 | 176 |

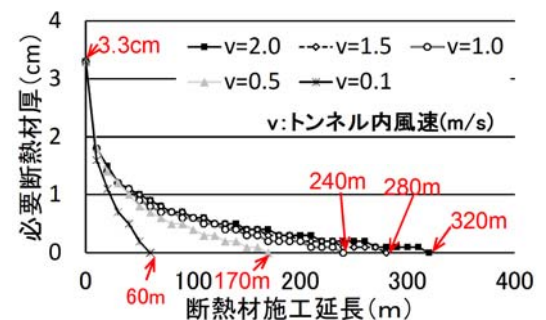


図5 トンネル内風速設定の違いにおける必要断熱材厚さと断熱材延長