

トンネルの断熱処理によるつらら防止工法における断熱材幅の余裕長の提案

A PROPOSITION OF MARGIN LENGTH FOR HEAT INSULATOR WIDTH
IN AN ADIABATIC ICICLE PREVENTION OF AN EXISTING TUNNEL

岡田 勝也*・松本 嘉司**

By Katsuya OKADA and Yoshiji MATSUMOTO

In many tunnels, icicles and side ices grow in cold climate. Against such a background we usually adapt an icicle prevention by adiabatic treatment for railway tunnel. We previously proposed optimum materials and optimum depth of heat insulator in consideration of statistical atmospheric conditions for the prevention. This paper deals with a thermal behavior of a near end of the heat insulator affected by the cold in non-treated area, and a marginal length which has to be set aside in length of the heat insulator. A two dimensional nonsteady state heat conduction tunnel model is proposed. After the analyzed values are found to well agree with the measured ones of an existing tunnel, we propose the marginal length for insulator width according to atmospheric conditions.

Keywords : tunnel, icicle prevention, heat conduction, heat insulator, marginal length

1. まえがき

鉄道トンネルの総数は約3800本に達するが、このうちの約55%に相当するトンネルは漏水に悩まされている。トンネル漏水はレール等の軌道材料の腐食、劣化を促進させ、路盤の軟弱化による軌道狂いの発生、漏水とともに浸出する土砂によって生じる覆工背面の空洞化などトンネル保守上問題になることは多い。このような漏水トンネルの約40%のトンネルは寒冷期に結氷して、つららや側氷となり、列車の走行安全性に重大な影響を及ぼす。このため、従来は夜明け前の人力によるつらら落とし作業や側氷の削氷作業という過酷な労働に支えられて列車の運行が確保されてきたのが実情であった。さらに凍上性の地山の場合には、トンネルの覆工背面にまで凍結が進行して地山の凍上によってトンネルが変状し、トンネル構造上の安全性にも悪影響を及ぼすことにもなる。

このような背景のなかで、人力による保守作業には頼らない積極的なつらら防止工法の開発が望まれ、既設ト

ンネルのつらら防止工法として表面断熱処理工法が開発された^[1,2]。この工法については非定常熱伝達・熱伝導トンネル地山モデルによる温度解析を行うとともに、入力するトンネルの気象条件に極値分布解析を適用して設計の基本となる断熱材の種類とその厚さを最適化する手法を提案した^[3]。また断熱材の幅、土被りと積雪の有無の影響などについても多層系の一次元あるいは二次元の非定常熱伝達・熱伝導トンネル地山モデルによって解析が行われ、設計条件が提案された^[1,2,4]。これに基づいて寒冷地の多くの鉄道トンネルの改良が実施されてきた。

この既設トンネル用の表面断熱処理工法を新設トンネルに応用したのが断熱二重巻覆工工法であるが、既設トンネルと同様の熱的挙動に関する温度解析とともに、力学的挙動についても解析^[5]が実施され、二重巻覆工の厚さ、断熱材の熱特性、二次覆工表面の熱伝達率などをパラメーターとした温度解析に基づき、断熱材の種類と厚さの最適化手法が提案されている^[5]。

上述のようなトンネルの断熱処理によるつらら防止工法において、十分な断熱材厚さが確保された場合であっても、断熱材の延長幅 w が図-1のように狭い場合、あるいははたとえ広くてもその端部付近では、断熱材を施工していない無施工部の寒気の影響を受けて、断熱材に

* 正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部主幹 (〒185 国分寺市光町2-8-36)

** 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 野田市山崎 2641)

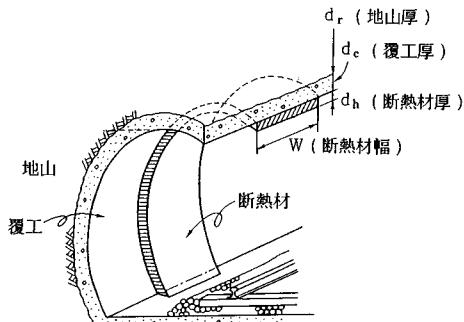


図-1 断熱材幅 w を有する表面断熱処理によるつらら
防止工法の概念図

被覆されていても氷点下になる可能性は十分予想される。したがって、つらら防止工の断熱材の施工にはある程度の余裕長 L_n が必要となる。特に、トンネルのつららの発生はトンネル全長にわたるのではなく、その発生箇所はトンネル延長方向で幾箇所にも分断するのが一般的であるから、トンネル保守費の軽減から図-1のようにある延長幅 w を有するつらら防止工が施工されることが多く、断熱材幅の狭い場合の余裕長 L_n の問題は実用的な設計を行ううえで重要となる。

ここでは、有限幅の断熱材を考慮したトンネルモデルを二次元非定常熱伝導問題として解析し、実物トンネルにおける実測値とその計算値が十分一致することを確認したうえで、断熱材の余裕長の提案を行うものである。

2. 既設トンネルにおける断熱つらら防止工法のトンネル地山モデル

表面断熱処理によるつらら防止工法を採用したトンネルにおいて、土被り H が十分厚く、かつ断熱材の幅 w が大きい場合には、トンネル地山の温度挙動は、トンネル内気温、断熱材、覆工と地山によって表わされる三層の異物質から構成される一次元非定常熱伝達・熱伝導モデルでも十分解析できることはすでに述べた^{1), 2), 4)}。

しかし、断熱材の幅 w が狭い場合には、上述のような一次元モデルを適用することはできず、 w の影響を考慮できる二次元モデルが必要となる。ここでは、トンネルを水平に切った図-2のような二次元平面を考え、 x 軸方向をトンネル延長に、 y 軸方向をトンネル内空から地山に向かう奥行きにとるものとして、トンネル内気温、断熱材、覆工と地山から構成されるものとした。 x 軸方向に沿っては断熱材延長幅 w の中央で温度挙動は左右対象になることから、トンネルモデルは半分で済むことになり、 x 座標 1 はその対象軸となる。また、 x 座標 K は断熱材延長幅 w の終端を示し、 KK は考慮すべき無施工部の境界を与える。 y 座標 $L1$ は断熱材と覆工コンクリートの境界座標、 $L2$ は覆工コンクリートと地

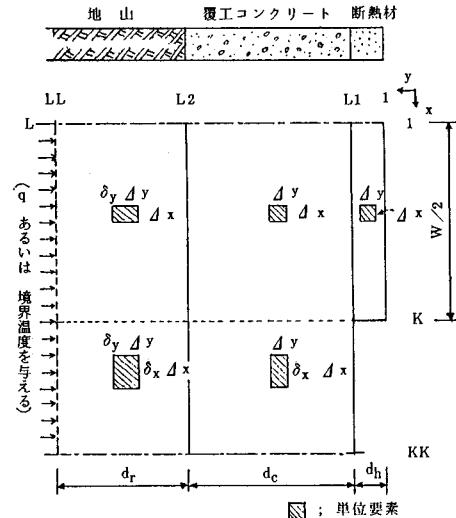


図-2 断熱材幅 w を考慮した二次元トンネル地山モデル

山の境界座標, LL は考慮すべき地山の奥行きを示す座標となる。要素の基本となる二次元要素の大きさは、図-2に示すように、つらら防止部の覆工コンクリート中のものが基本となり、 $\Delta x \times \Delta y$ で表わされる。その他の要素については、温度変化の大きい所では小さく、変化の小さい所では大きな要素で計算できるようにトンネルモデルを構成することにし、基本要素に対する倍率を δ_x, δ_y とする。したがって、断熱材の厚さ d_h 、覆工コンクリートの厚さ d_c と考慮すべき地山の厚さ d_r は、

で与えられ、断熱材の延長幅 w は、

となる。座標 $(1, y)$ は延長幅 w の中心であるので、この座標（ただし $1 \leq y \leq LL$ ）上にある y 軸に平行な直線上の各点での x 方向の温度勾配は、この直線を軸として対称となり、断熱条件が適用される。また無施工部において計算に考慮される幅 v は、

とおかれ、座標 (KK, y) の $L1 \leq y \leq LL$ の y 軸に平行な直線上でも断熱条件が適用される。

なお、座標 (x, LL) で $1 \leq x \leq KK$ なる x 軸に平行な直線上では $y > LL$ なる地山領域からの流入熱量 q もしくはその位置における境界温度 t_r が与えられるものとする。

さて、要素の大きさが不等で、かつ異物質 A , B , C と D が接する図-3(a) のような矩形要素を考える。時刻 P における要素 (m, n) の温度を $T_{m,n}^P$ とし、それより Δt 時間だけ経過したときのその位置の温度を $T_{m,n}^{P+1}$

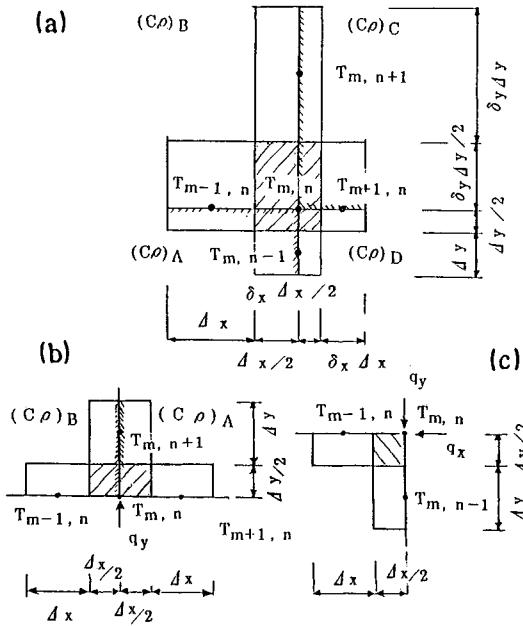


図-3 二次元矩形要素の分割長さと異物質境界条件

とする。要素 (m, n) より $\Delta x, \Delta x \Delta x$ だけ離れた要素における P 時刻の温度を $T_{m-1,n}^P, T_{m+1,n}^P$ 、また $\Delta y, \Delta y \Delta y$ だけ離れた要素における P 時刻の温度を $T_{m,n-1}^P, T_{m,n+1}^P$ とする。 λ, c と ρ は要素の熱伝導率、比熱と密度を示すが、それらの添字 A, B, C と D は異質な物質名を表示するものとする。

このとき二次元熱伝導 explicit 型差分式は、要素 $(m-1, n), (m+1, n), (m, n-1)$ と $(m, n+1)$ から要素 $(m, n) \times \Delta t$ 時間に流入する熱量と、要素 (m, n) の温度変化のつり合いから、

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{P+1} = & T_{m,n}^P + 2/|\delta x \delta y| (1 + k_b \delta y + k_c \delta x \delta y + k_d \delta x)| \\ & \times |\Theta_{x,A} \delta x \delta y (\beta_B \delta y + 1) (T_{m-1,n}^P - T_{m,n}^P) \\ & + \Theta_{x,A} \delta y (\beta_C \delta y + \beta_D) (T_{m+1,n}^P - T_{m,n}^P)| \\ & + \Theta_{y,A} \delta x (\beta_C \delta x + \beta_D) (T_{m,n+1}^P - T_{m,n}^P) \\ & + \Theta_{y,A} \delta x \delta y (\beta_D \delta x + 1) (T_{m,n+1}^P - T_{m,n}^P)| \dots (6) \end{aligned}$$

が導かれる。ここに、

$$\Theta_x = \lambda \Delta t / (c \rho \Delta x^2) \dots (7)$$

$$\Theta_y = \lambda \Delta t / (c \rho \Delta y^2) \dots (8)$$

$$k_i = (c \rho)_i / (c \rho)_A \dots (9)$$

$$\beta_i = \lambda_i / \lambda_A \dots (10)$$

である。さらに、異物質境界で 180° 辺で断熱（流入熱量 q_y^P ）を考慮する場合には、図-3(b)を参照すれば、

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{P+1} = & T_{m,n}^P + 2/(1 + k \delta y) \times \{\Theta_{y,A} (1 + \beta \delta x) (T_{m,n+1}^P - T_{m,n}^P) \\ & + \Theta_{x,A} (T_{m+1,n}^P - T_{m,n}^P) + \Theta_{x,A} \beta / \delta x (T_{m-1,n}^P - T_{m,n}^P) \\ & + \Theta_{y,A} (1 + \delta x) \Delta y / \lambda_A \cdot q_y^P\} \dots (11) \end{aligned}$$

であり、また図-3(c)のように 90° 辺の断熱（流入熱量 q_y^P, q_x^P ）を考慮する場合には次式で表わされる。

表-1 断熱材幅を考慮した二次元トンネル地山モデルにおける適用式

座標(X, Y)	式	備考
(N, 1) N=1, K (N, L1) N=K, KK (K, N) N=1, L1	(13)	
(N, L1) N=2, K-1	(6)	B=C, A=D
(N, L2) N=2, K-1 N=K+1, KK-1	(6)	B=C, A=D
(K, N) N=L1+1, L2-1 N=L2+1, LL-1	(6)	A=B=C=D
(1, N) N=2, L1-1 N=L1+1, L2-1 N=L2+1, LL-1 (K, N) N=L1+1, L2-1 N=L2+1, LL-1	(11)	$q_y = 0, A=B$
(1, L1)	(12)	$q_y = 0$
(1, L2), (KK, L2)	(12)	$q_y = 0$
(K, L2)	(6)	B=C, A=D
(1, LL), (KK, LL)	(14) or (12)	$q_y = q_x = 0$
(K, LL)	(14) or (11)	$q_y = 0, A=B$
(N, LL) N=2, K-1 N=K+1, KK	(6)	A=B=C=D
その他の(X, Y)	(6)	

$$T_{m,n}^{P+1} = T_{m,n}^P + 2 \Theta_x (T_{m-1,n}^P - T_{m,n}^P) + 2 \Theta_y (T_{m,n-1}^P - T_{m,n}^P) + 2(\Theta_x \Delta x / \lambda \cdot q_x^P + \Theta_y \Delta y / \lambda \cdot q_y^P) \dots (12)$$

となる。

上述の二次元非定常熱伝導に対する explicit 型差分式を表面断熱処理によるつらら防止工法を有する二次元トンネルモデルに適用することにすれば、座標 (x, y) について表-1 のようになる。

3. 表面断熱処理によるつらら防止工法の温度挙動に関する計算値と実測値の比較

(1) 試験トンネルの概要

試験に供したトンネルは、延長 270 m の単線鉄道トンネルで、日本海に突出した標高 60 m 程度の台地を貫通している。地質は新第三紀の増幅層で暗褐色の泥岩、砂岩、雑色礫岩を含むものであり、その上層部は透水性の良い砂、礫からなる不整合の第四紀更新世後期の地質で覆われている。建設以来 30 年を経過したトンネルの各所には夏には漏水が、冬季にはつららや側水が発生する。またトンネル側壁にはトンネル軸方向のクラックがあり、夏には閉じ、冬には開くという典型的な地山の凍上による周期的な変状がみられるトンネルであった。

このようなトンネルに表面断熱処理によるつらら防止工法を施工することにし、当地方の 10 年確率の極値分析に基づいた年平均気温 $t_m = 6.4^\circ\text{C}$ 、その年振幅 $A_Y = 14.5^\circ\text{C}$ 、日振幅 $A_B = 8.2^\circ\text{C}$ から、 $t_m/A_Y = 0.44$ 、 $\eta(A_B/A_Y) = 0.57$ を考慮し、既報³⁾の非定常熱伝達・熱伝導計算により、ポリウレタン系の断熱材を用いることにし、

その厚さを $d_h = 35 \text{ mm}$ と決定した。なお、断熱材の延長幅 w としては、 $w = 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 27.0 \text{ m}$ とした。

(2) 温度挙動の実測値と計算値との比較

断熱処理をしたトンネルの横断面における温度分布を求め、これに基づいて温度の年振幅 A_y を断熱材の延長幅 $w = 4 \text{ m}$ を例に挙げ、断熱材幅の中心、断熱材の中心より 1 m の断面（断熱材の端部より 1 m ）、無施工部について描くと図-4 のようになる。これから断熱材の端部ではたとえ断熱材で被覆されても温度振幅 A_y はその中心より大きくなり、断熱効果が小さくなることがわかる。図-4 には 2. で述べた二次元トンネルモデルによるシミュレーションの結果も示した。

この延長幅 $w = 4 \text{ m}$ の断面に対して、厳寒期の 2 月に着目して等温線を描くと図-5 のようになる。 0°C の等温線に着目すると断熱材延長幅の中心ではそれが断熱材の中にあったが、断熱材の端部に近づくと断熱材で覆われていても覆工コンクリートの中へ入って行き、ついには地山に到達する様子がわかる。

また延長幅 $w = 4 \text{ m}$ の断面の中心とそれから 1 m の位置における断熱材背面の年周期の温度振幅 A_y とトンネ

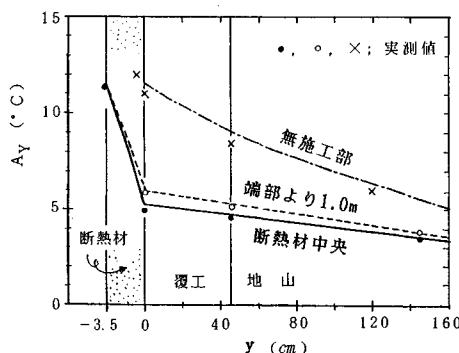


図-4 $w=4 \text{ m}$ における年振幅 A_y の計算値と実測値の比較

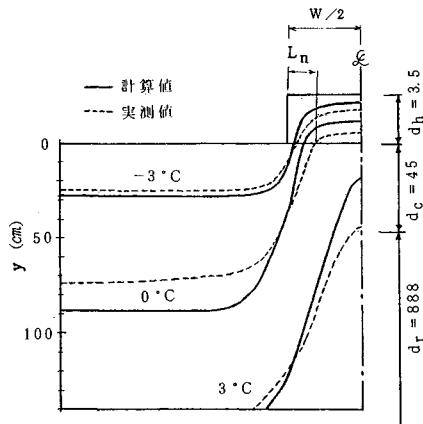


図-5 $w=4 \text{ m}$ における等温線の計算値と実測値の比較

表-2 年振幅 A_y と位相差 $\Delta\phi$ の計算値（フーリエ解析値）と実測値の比較

w (m)	着目位置	計算値		実測値	
		A_y (°C)	$\Delta\phi$ (d)	A_y (°C)	$\Delta\phi$ (d)
2	断熱材中央	7.65	22	7.20	24
	端部より0.5m	8.14	18	8.2	--
4	断熱材中央	5.26	39	4.97	34
	端部より1.0m	5.92	31	5.88	26

ル内気温との位相差 $\Delta\phi_y$ について、計算値と実測値を比較すると表-2 のようになる。実測値は、1 年間の実測データをフーリエ解析したものであり、計算値はトンネル内気温の年周期応答に対するものである。

さて、図-5 で 0°C の等温線が断熱材と覆工の境界を切る点から断熱材端部までの長さは断熱材で被覆されていても氷点下になる部分で、これを余裕長 L_n と称する。図-5 の延長幅 $w = 4 \text{ m}$ に対しては $L_n = 0.7 \text{ m}$ であるから、つらら防止工として有効な保温幅は $(w - 2L_n) = 2.6 \text{ m}$ となる。この余裕長 L_n を実測した他の延長幅の断面についても求め、計算値と比較したのが図-6 であるが、これから、 w が小さくなると L_n は急激に大きくなる必要があることがわかる。

以上の図-4, 5, 6 と表-2 には、温度挙動の実測値のみでなく、2. に示した二次元非定常熱伝導トンネルモデルによる計算結果も合わせて記しているが、両者は比較的良く一致しているといえそうである。

4. 断熱材の余裕長に関する解析

(1) 年周期の気温変動に対する入力定数

a) トンネル内気温の入力条件

トンネル内空に接する要素、すなわち、トンネル内流体（空気）と断熱材表面の間では一般には熱伝達率 α を考慮しなければならない^{6)~10)}が、鉄道トンネルに対する種々の研究によれば、一般には熱伝達率は $\alpha = 5 \sim 10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 程度以上である²⁾。そのため断熱材背面と覆工背面の温度振幅に及ぼす熱伝達率の影響は小さい³⁾の

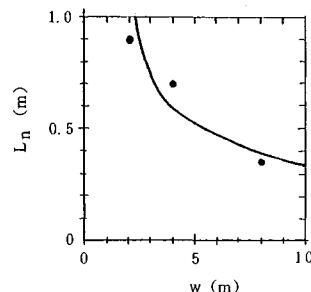


図-6 断熱材幅 w に対する余裕長 L_n の計算値と実測値の比較

で、ここでは、設計上の安全性を考慮して α の影響を無視することにした。

この仮定のもとでは、表面断熱処理によるつらら防止工法を有するトンネル地山の二次元非定常熱伝導モデルに対する気温の入力条件としては、トンネル内空に接する要素の温度はトンネル内気温 θ_0 によって与えられる。トンネル内気温の年周期変動に対しては

で与えられるが、 t_m は年平均気温、 A_Y はその振幅、 $t_{\text{日}}$ は経日である。

b) 考慮すべき地山の境界温度条件

考慮すべき地山の境界座標 (x, LL) における地山温度は、図-2 の地山の厚さ d_r を十分大きくとれば、一般にはその土地の年平均気温 t_m に収束する²⁾。ここでは、 d_r として覆工表面から 10 m 程度の深さをとることにし、

とおく。

また式(5)に示す無施工部の考慮すべき覆工と地山の幅 v は3.の実験結果を考慮して $v=5.0\text{m}$ を確保できるよう設定する。

c) 断熱材、覆工と地山の熱的定数

断熱材としては高分子系の発泡断熱材を用いることにし、その厚さは寒冷地で多用されている $d_h=35\text{ mm}$ を標準とする。このような断熱材の熱伝導率は $\lambda_h=(0.008 \sim 0.04) \times 1.16\text{ W/m}^\circ\text{C}$ に分布するが、ここでは寒冷地の鉄道トンネルにおいてよく使用されてきたウレタン系断熱材を対象として、その熱伝導率を $\lambda_h=0.01 \times 1.16\text{ W/m}^\circ\text{C}$ とする。また熱容量は $(c\rho)_h=60\text{ kJ/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$ を標準とした。

また覆工コンクリートの熱的定数はほぼ一定であり、平均的な熱伝導率として、 $\lambda_c = 1 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 、熱容量として $(c\rho)_h = 1930 \text{ kJ/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$ を仮定した。さらに覆工以深の地山の熱的定数については、その熱伝導率は $\lambda_r = 0.9 \sim 3.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ である²⁾が、熱伝導率が小さい方が設計上安全側であること^{3), 5)}を考慮して、ここでは $\lambda_r = 1 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ とした。

(2) 年周期のトンネル内気温による断熱材背面の温度挙動

表面断熱処理によるつらら防止工法を施工したトンネル地山の二次元熱伝導モデルに式(13)のトンネル内気温の条件と式(14)の地山境界の温度条件を入力すれば、年周期のトンネル内気温に対する温度挙動を求めることができる。

断熱材の幅 $w=2, 4$ と 6 m について、断熱材背面に相当する座標 $(i, L1)$ の温度の年振幅を示すと図-7のようになる。図の曲線のうち実線は $w=6\text{ m}$ 、点線は $w=4\text{ m}$ 、破線は $w=2\text{ m}$ である。

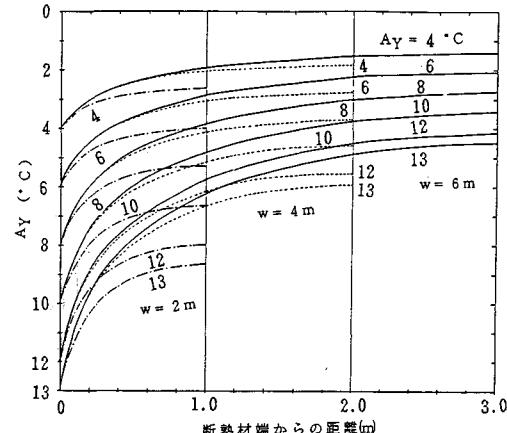


図-7 トンネル内気温の年周期変動に対する断熱材背面の
温度振幅

$= 4\text{ m}$, 一点鎖線は $w = 2\text{ m}$ を示す。図の左端は座標 $(K, L1)$ に相当し, この点ではトンネル内気温の年振幅 A_y に一致する。これから断熱材幅の中心 $(l, L1)$ に向かうに従って断熱材背面の年振幅は減衰する。特に w の中心付近での振幅の減衰程度は、 w が小さいほど悪く、トンネル内気温の年振幅 A_y が低いほど早いようである。

いずれにせよ、図の縦軸の値を($A_y - t_m$)としたとき、それに対応する横軸の値は、任意の年平均気温 t_m と年振幅 A_y における断熱材背面温度が 0°C の位置を示すものであり、換言すれば、断熱材の端からその位置までは、断熱材で被覆されているにもかかわらず負の温度となり、その距離が全裕長 L_0 を表すことになる。

(3) 残熱材の金裕長に及ぼす年平均气温の影響

日本の寒冷地の平均的な年振幅 $A_r = 13^{\circ}\text{C}$ を仮定したとき、年平均気温 t_m をパラメーターに余裕長 L_n と断熱材幅 w の関係を描くと図-8のようになる。 $t_m = 13^{\circ}\text{C}$ のときには気温の年振幅拳動に対する最低気温は 0°C になるので、余裕長は $L_n = 0\text{ m}$ となるが、 $t_m < 13^{\circ}\text{C}$ になると L_n は急激に大きくなり、しかも、 w が小さい所では L_n の上昇量は大きくなることがわかる。しかし L_n は $w/2$ を越えることがないので、図の破線より左側になることはない。また w が大きくなると L_n はしだいに収束する傾向を示し、しかも年平均気温 t_m が高くなると w の小さい所で早く収束することを示している。

一方、トンネル坑口付近の気温の年振幅は $A_y = 13^\circ\text{C}$ であってもトンネルの奥の方では地山との熱交換の影響で A_y は次第に小さくなる¹¹⁾。いま $A_y = 10^\circ\text{C}$ を例に挙げ、 L_n と w の関係を示すと図-9のようになる。この場合には $t_0 = 10^\circ\text{C}$ のとき z_n にかかわらず $L = 0$ にな

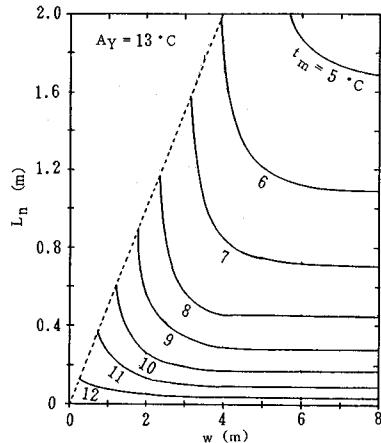


図-8 年振幅 $A_Y=13^{\circ}\text{C}$ のときの断熱材幅 w と余裕長 L_n の関係

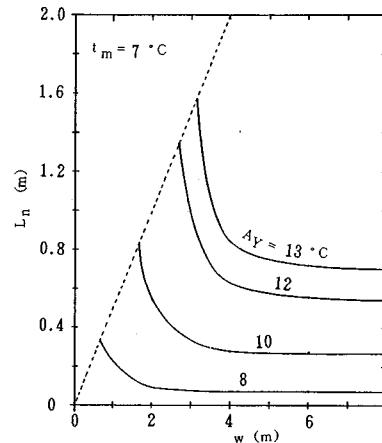


図-10 年平均気温 $t_m=7^{\circ}\text{C}$ における断熱材幅 w と余裕長 L_n の関係

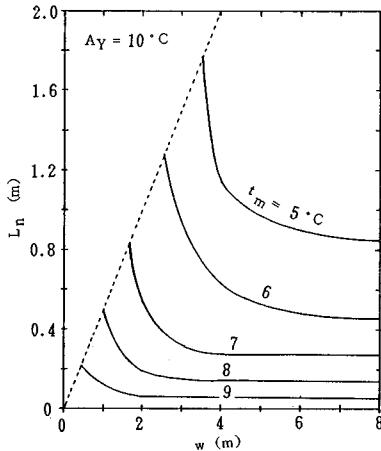


図-9 年振幅 $A_Y=10^{\circ}\text{C}$ のときの断熱材幅 w と余裕長 L_n の関係

るが、 t_m が低くなても $A_Y=13^{\circ}\text{C}$ の場合ほどは L_n は大きくならないことがわかる。

いずれにせよ、 t_m が高くなるほど、短い w で L_n は一定値に収束する傾向を示すといえる。

(4) 断熱材の余裕長に及ぼす年振幅の影響

年平均気温 t_m を一定として、年振幅 A_Y をパラメータにして w と L_n の関係の一例を示すと図-10 のようになる。土被りの薄いトンネルで地殻熱流量の影響を受けない場合には、トンネル内の年平均気温は一定である²¹⁾が、その年振幅はトンネルの奥に行くに従ってしだいに減衰していく¹¹⁾。図の曲線群はそうしたトンネルにおける L_n の変化を示すものである。すなわち、トンネル坑口で気温の年振幅が $A_Y=13^{\circ}\text{C}$ であったものが、トンネルの奥では A_Y が小さくなり、それにつれて必要な余裕長 L_n は小さくなっていく様子を表わしている。し

かも A_Y が小さくなると w の小さい範囲まで L_n は一定となる傾向が強くなる一方、 A_Y が大きくなる場合には w の小さい範囲で大きく変動する。

このように、 L_n に及ぼす A_Y の影響は w の小さい所で大きくなることがわかる。

(5) 最小断熱材幅に及ぼす温度挙動

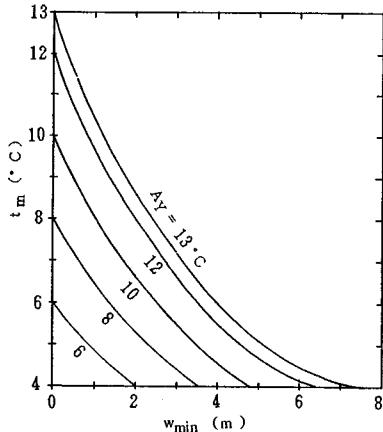
前述の図-8~10において、破線と曲線群の交点は余裕長が断熱材幅の中心に達した場合、すなわち $L_n=w/2$ を示すものである。これは、つらら防止工として断熱材の中心のみを保温するのに必要な断熱材の最小幅を与えるものである。この最小断熱材幅 w_{\min} と年平均気温 t_m の関係を年振幅 A_Y をパラメーターに描くと図-11 のようになる。これによれば、 t_m と w_{\min} はおよそ $6 < t_m \leq 13^{\circ}\text{C}$ の範囲ではほぼ逆比例の関係があり、 t_m が低くなるほど、 w_{\min} を広くせねばならない。また A_Y が高くなれば必要な w_{\min} は広くなることがわかる。

5. 断熱材の余裕長の提案

表面断熱処理によるつらら防止工法を施工したトンネルにおける断熱材の余裕長 L_n は、二次元非定常熱伝導トンネルモデルによるトンネル内気温の年周期変動に対する4.(2)~(5)の解析結果により、4.(1)の仮定のもとで、年平均気温 t_m とその年振幅 A_Y をパラメータに与えられることになった。

日本の寒冷地の平均的な気温の年振幅である $A_Y=13^{\circ}\text{C}$ に対する余裕長 L_n は図-8から t_m をパラメータに求めることができる。たとえば、断熱材幅が $w=6\text{ m}$ のとき年平均気温が $t_m=5, 6, 7, 8^{\circ}\text{C}$ …と暖かくなるにつれて、必要な余裕長は $L_n=1.86, 1.12, 0.71, 0.44\text{ m}$ …と狭くてよいことになる。

またそうした地域における年平均気温を $t_m=7^{\circ}\text{C}$ と

図-11 断熱材の最小幅 w_{min} と年平均気温 t_m の関係

した場合には図-10から L_n を定めることができる。トンネル坑口から奥へ行くに従ってトンネル内気温の振幅はしだいに減衰していく¹¹⁾が、図-10は A_y をパラメーターに描いているので、 A_y の低下に伴って L_n を小さく選択することが可能である。たとえば、図-10の年平均気温が $t_m=7^{\circ}\text{C}$ のときトンネル内気温の年振幅がトンネル坑口から奥へ向かって $A_y=13, 12, 10, 8^{\circ}\text{C} \cdots$ と低下していく場合を考えると、断熱材幅 $w=6\text{ m}$ に対する必要な余裕長は $L_n=0.72, 0.55, 0.27, 0.08\text{ m} \cdots$ と小さくてよいことになる。

一方、トンネル内のつららが線状に限られるときの最小の断熱材の被覆幅は図-11によって w_{min} として与えられることになる。

したがって、図-9～11によってトンネル内気温の気象条件とつらら発生幅の両者を考慮した断熱材の余裕長を合理的に選択することが可能となった。

6. あとがき

既設トンネルにおける表面断熱処理によるつらら防止工法は寒冷地の多くの鉄道トンネルで施工されている²⁾が、当報文は、つららの発生がトンネル延長方向に局所的にみられる場合に、寒気の横からの回り込みを考慮して、断熱材の必要な幅を合理的に算定できる手法を提案したものである。

著者らは先に断熱処理によるつらら防止工法の設計においてまず必要となる断熱材の厚さを、既設トンネル用の表面断熱処理工法³⁾に対して、また新設トンネル用の断熱二重巻覆工法⁵⁾に対して提案した。またトンネルの土被りと積雪の断熱材厚さに及ぼす影響についても定量的に示した⁴⁾。さらに、この工法の外力条件となるトンネル外気温を極値分析によって確定する手法を提案するとともに、それがトンネル延長方向に減衰していくト

ンネル内気温の挙動を求める手法も提案した¹¹⁾。

これら、トンネル外気温の条件、トンネル内気温の減衰、断熱材の厚さ、断熱材の幅に対する余裕長、土被りと積雪の影響などが明確になったことにより、断熱処理によるつらら防止工法はより合理的、より実用的に設計できるようになった。この断熱処理によるつらら防止工法が厳寒期の夜明け前につらら落としをしなければならないという従来の過酷な労働環境を一挙に解決することになったが、こうしたトンネルの保守の改善も含めて、トンネルの合理的な設計施工法における簡略化と標準化に少しでも役立てば幸いである。

付 錄

[I] 式(6)の誘導

要素($m-1, n$)と要素($m+1, n$)から単位時間に要素(m, n)へ流入する熱量は、図-3(a)において、

$$Q_{m-1,n} = (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p)(\lambda_B \delta_y \Delta y + \lambda_A \Delta y) / (2 \Delta x) \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$Q_{m+1,n} = (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p)(\lambda_C \delta_y \Delta y + \lambda_B \Delta y) / (2 \delta_x \Delta x) \quad \dots \dots \dots (16)$$

であり、また同様に、要素($m, n+1$)と要素($m, n-1$)から要素(m, n)へ単位時間に流入する熱量は、

$$Q_{m,n+1} = (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p)(\lambda_C \delta_x \Delta x + \lambda_B \Delta x) / (2 \delta_x \Delta y) \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$Q_{m,n-1} = (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p)(\lambda_B \delta_x \Delta x + \lambda_A \Delta x) / (2 \Delta y) \quad \dots \dots \dots (17)$$

となる。一方、これらの熱量が Δt 時間に要素(m, n)に流入したことにより、要素の温度が $T_{m,n}^p$ から $T_{m,n}^{p+1}$ まで上昇したものとすれば、エネルギーのつり合いから、

$$(Q_{m-1,n} + Q_{m+1,n} + Q_{m,n+1} + Q_{m,n-1}) \Delta t = \Delta x \Delta y / 4 \cdot [(c\rho)_A + \delta_y(c\rho)_B + \delta_x \delta_y(c\rho)_C + \delta_x(c\rho)_B] (T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p) \quad \dots \dots \dots (18)$$

が得られる。式(18)に式(15)～(17)を代入して整理し、さらに式(7)～(10)を考慮すれば、式(6)が導かれる。

なお、図-3(a)で異物質 A, B, C と D が同じであると仮定すれば式(6)で $k_B=k_C=k_D=1$, $\beta_B=\beta_C=\beta_D=1$ であるが、さらに要素の大きさも同じとすれば $\delta_x=\delta_y=1$ であるので、式(6)は、

$$T_{m,n}^{p+1} = T_{m,n}^p + \Theta_x(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p) + \Theta_y(T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p) \quad \dots \dots \dots (19)$$

なる周知の一般式が得られる。

[II] 式(11)の誘導

図-3(a)において、要素($m-1$)と要素($m+1$)から要素(m, n)に単位時間に流入する熱量は、

$$Q_{m-1,n} = (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) \lambda_B \Delta y / (2 \delta_x \Delta x) \quad \dots \dots \dots (20)$$

$$Q_{m+1,n} = (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \lambda_A \Delta y / (2 \Delta x) \quad \dots \dots \dots (21)$$

である。また要素($m, n+1$)から要素(m, n)へ流入する熱量は式(16)で添字CをAに変えたもので与えられる。この式と式(20), 式(21)を考慮すれば、エネルギーのつり合いは、

$$\begin{aligned} & |Q_{m-1,n} + Q_{m+1,n} + Q_{m,n+1} + q_y^p(\Delta x + \delta_x \Delta x)/2| \Delta t \\ & = \Delta x \Delta y / 4 \cdot ((c\rho)_A + \delta_x(c\rho)_B)(T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p) \dots \dots \dots (22) \end{aligned}$$

となる。ここに q_y^p は要素(m, n)に y 方向から流入する熱量であるが、断熱条件の場合には $q_y^p=0$ である。式(22)に式(7)~(10)を代入して整理すれば式(11)が得られる。

[III] 式(12)の誘導

x と y の両方向から流入熱量 q_x, q_y を考慮した図-3

(c) の場合には、要素($m-1, n$)から要素(m, n)へ流入する熱量は式(20)の添字Bを削除したもので与えられ、また要素($m, n-1$)からのそれは、

$$Q_{m,n-1} = (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \lambda \Delta x / (2 \Delta y) \dots \dots \dots (23)$$

である。したがってエネルギーのつり合いは、

$$\begin{aligned} & (Q_{m-1,n} + Q_{m,n-1} + q_x^p \Delta y / 2 + q_y^p \Delta x) \Delta x \\ & = \Delta x \Delta y (c\rho) / 4 \cdot (T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p) \dots \dots \dots (24) \end{aligned}$$

となる。式(7)と(8), 式(23)などを考慮して整理すると式(12)が得られる。図-3(c)の90°辺が断熱条件ならば式(12)で $q_x^p = q_y^p = 0$ である。

参考文献

- 1) 岡田勝也・福地合一：断熱処理によるつらら防止工の研

- 究, 土木学会論文報告集, No. 309, 1981.
- 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, 鉄研報告, No. 1324, 1986.
- 3) 岡田勝也・松本嘉司：既設トンネルにおける気象条件の確率量を考慮した断熱つらら防止工の断熱材の最適化, 土木学会論文集, No. 400/III-10, 1988.
- 4) 岡田勝也：断熱処理によるつらら防止工の土被りの小さいトンネルへの適用性, 土木学会論文報告集, No. 332, 1983.
- 5) 岡田勝也・松本嘉司：断熱二重巻覆工によるトンネルのつらら防止工法の断熱材の最適化に関する研究, 土木学会論文集, No. 388/III-8, 1987.
- 6) 福地合一：長大鉄道トンネルの換気に関する理論とその応用例について, 鉄研報告, No. 1076, 1978.
- 7) 雑賀忠昭・森田敏男・斎藤孝基ほか：地下鉄道の温熱環境の解析, 空気調和・衛生工学, Vol. 47-6, 1977.
- 8) 幾世橋広ほか：坑道壁面から通気への熱伝達率の実測と予測(1), 日本鉱業学会誌, Vol. 93, No. 1078, 1977.
- 9) 天野勲三ほか：年間気流湿度および温度の予測計算, 日本鉱業学会誌, Vol. 96, No. 1103, 1980.
- 10) 大塚全一：地下鉄道の温度環境に関する現況と分析, 土木学会論文報告集, No. 241, 1975.
- 11) 岡田勝也・松本嘉司：寒冷地トンネルにおけるつらら発生領域に関する統計的・理論的解析, 土木学会論文集, No. 388/III-8, 1987.

(1989.11.15・受付)