

# 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

OPTIMUM HEAT INSULATOR IN CONSIDERATION OF STATISTICAL ATMOSPHERIC  
CONDITIONS FOR AN ADIABATIC ICICLE PREVENTION IN AN EXISTING TUNNEL

岡田勝也\*・松本嘉司\*\*

By Katsuya OKADA and Yoshiji MATSUMOTO

This paper deals with the optimum method of a heat insulator for an adiabatic icicle prevention at tunnel-lining surface. The atmospheric conditions, which consist of yearly mean temperature, yearly amplitude and daily amplitude, are estimated as statistical values following an extreme distribution analysis. They are incorporated into a non-steady state heat convection/conduction analysis about a tunnel-ground model with adiabatic treatment. Thus the material and the thickness of a heat insulator for the icicle prevention can be designed reasonably and economically on the basis of the periodicity of atmospheric conditions and the thermal conditions of a tunnel-ground.

*Keywords: icicle prevention, adiabatic treatment, heat insulator, heat convection/conduction, statistical atmospheric condition*

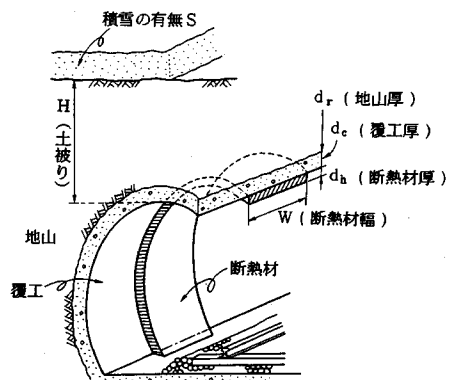
## 1. ま え が き

JR 旅客鉄道グループにおける鉄道トンネルの総数は約3800本に達するが、このうちの約30%に相当する1100本のトンネルには冬季につららや側氷が発生し、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。問題は列車の運行阻害にとどまらない。トンネルの覆工背面にまで凍結が進行すると、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てきた。この一環として、まず、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。既設トンネルでは列車間合の比較的長い夜間しか工事ができないので、覆工自体を全面的に改築するような施工は多くの場合不可能である。そこで、既設の覆工を改築せずに、その覆

工表面に断熱材を設置する図—1のようなつらら防止工法が開発されたものである。ここに用いる断熱材の設計上の問題点としては、断熱材の厚さ、断熱材の幅、土被りと積雪の有無の影響などがあるが、これらは多層系の一次元あるいは二次元非定常熱伝達/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<sup>1)~3)</sup>。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。これは、



図—1 表面断熱処理によるつらら防止工法の概念図

\* 正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 地盤・防災研究室 主任研究員 (〒185 国分寺市光町 2-8-36)

\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (〒185 文京区本郷 7-3-1)

一次覆工と二次覆工の間に防水シートと断熱材をサンドイッチするものであり、熱的挙動とともに力学的挙動についても解析が実施され、すでに実用化されている<sup>1),4)</sup>。

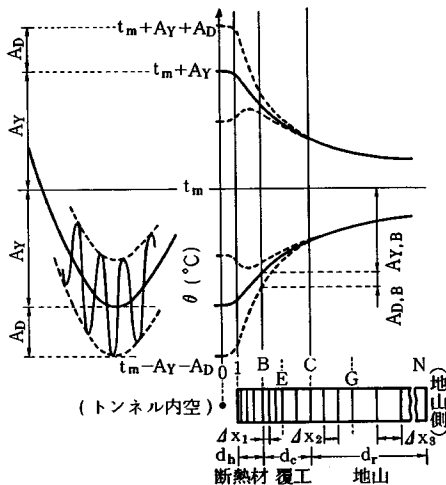
これらの断熱処理によるつらら防止工法に関する実験的、理論的解析において対象とした断熱材は、開発当初から多用されてきたウレタン系断熱材であった。しかし最近、断熱材の種類も豊富になり、かつ施工する地域が極寒冷地にとどまらなくなってきたので、従来の解析結果をそのまま設計に用いることが不都合となった。したがって実設計においては、設計上の種々のパラメーターに対応できるように、断熱材の材質とその厚さをトンネルの置かれている気象条件に基づいて最適化する必要が生じてきた。このうち、新設トンネル用の断熱二重巻覆工に対しては、断熱二重巻覆工の厚さ、断熱材の熱特性、二次覆工表面の熱伝達率などをパラメーターとした温度解析を実行し、断熱材を最適化する手法をすでに提案した<sup>4)</sup>。

ここでは、図—1に示すような既設トンネル用の表面断熱処理によるつらら防止工法に使用する断熱材に着目して、従来提案されている非定常熱伝達/熱伝導トンネル地山モデルによる温度解析<sup>1),4)</sup>をさらに深度化するとともに、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について述べる。

## 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

### (1) 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図—1に示すトンネルにおいて、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、鉄道トンネル程度の



図—2 つらら防止工法の温度挙動の概念とトンネル地山モデル

断面を有するトンネル地山の温度挙動は、図—2に示すような一次元モデルでも十分解析できることはすでに述べた<sup>1),3)</sup>。図—2の下図に示すモデルは、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。系は  $N$  個の要素からなり、座標  $0$  はトンネル内気温で覆工表面から十分離れた温度境界層の外側にある。異物質の境界座標は  $B$  と  $C$  であり、要素の分割長さ境界座標は  $E$  と  $G$  である。なお要素の分割長さは  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  と  $\Delta x_3$  であり、断熱材厚、覆工厚と地山厚はそれぞれ  $d_h$ 、 $d_c$  と  $d_r$  で表わされる。図—2のモデルにおいて、トンネル内空に接する断熱材の要素については熱伝達率  $\alpha$  を考慮した一次元非定常熱伝達 explicit 型差分式を誘導し、またこの要素を除く断熱材、覆工と地山のそれぞれの要素については異物質境界座標と分割長さ境界座標を考慮した一次元非定常熱伝導 explicit 型差分式を求めれば、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非定常熱伝達/熱伝導モデルが構築できる<sup>1)</sup>。

このモデルに用いる気温の入力条件としては、トンネル内気温  $\theta_0$  を与える必要がある。トンネル内気温の年周期変動は、

$$\theta_0 = t_m + A_Y \sin(2\pi/365)t \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに  $t_m$  は年平均気温、 $A_Y$  はその振幅、 $t$  は経日である。日周期変動は、

$$\theta_0 = A_D \sin(2\pi/24)t \dots\dots\dots (2)$$

である。ここに、 $A_D$  はトンネル内気温の日振幅、 $t$  は時間である。

また、地山の座標  $N$  における地山温度は、図—2に示す考慮すべき地山の厚さ  $d_r$  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。以上の諸条件を考慮して図—2に示すトンネル地山モデルに入力すれば非定常熱伝達/熱伝導解析が実行できる。

なお、覆工コンクリートの熱伝達率  $\lambda_c$  に対する断熱材の熱伝達率  $\lambda_h$  あるいは地山の熱伝達率  $\lambda_r$  の比、

$$\beta_h = \lambda_h / \lambda_c \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta_r = \lambda_r / \lambda_c \dots\dots\dots (4)$$

をそれぞれ、断熱材の無次元熱伝達率、地山の無次元熱伝達率とよぶことにする。

### (2) トンネル内気温の周期変動に対するトンネル地山の温度挙動の概念

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モデルにおいて、トンネル内気温  $\theta_0$  が式 (1) と式 (2) に従って周期変動するときの温度挙動の概念は図—2の上図のようになる。図—2の実線はトンネル内気温の年振幅  $A_Y$  による年振幅挙動の包絡線を、破線は日振幅  $A_D$  による日振幅挙動の包絡線を示す。トンネル内気温  $\theta_0$  の最小値は、

$$\theta_0 = t_m - A_Y - A_D \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。また、つらら防止工として着目すべき断熱材背面温度  $\theta_B$  の最小値は、

$$\theta_{B,\min} = t_m - A_{Y,B} - A_{D,B} \dots\dots\dots (6)$$

である。  $A_{Y,B}$  は、図—2 に示すように、トンネル内気温  $\theta_0$  の年周期変動による断熱材背面の温度振幅であり、  $A_{D,B}$  はトンネル内気温  $\theta_0$  の日周期変動によるものである。断熱材としては独立発泡型の高分子材料を選択し、さらに断熱材背面に防水シートを添付すること等を考えれば、つらら防止工としては  $\theta_{B,\min} > 0^\circ\text{C}$  を満足するように配慮すればよい<sup>4)</sup>。そのとき式 (6) は、

$$t_m / A_Y > k_{Y,B} + \eta k_{D,B} \dots\dots\dots (7)$$

でなければならない。ここに、

$$k_{Y,B} = A_{Y,B} / A_Y \dots\dots\dots (8)$$

$$k_{D,B} = A_{D,B} / A_D \dots\dots\dots (9)$$

$$\eta = A_D / A_Y \dots\dots\dots (10)$$

である。式 (7) において、  $t_m$ 、  $A_Y$  と  $\eta$  はトンネルの存在する気象条件により、  $k_{Y,B}$  と  $k_{D,B}$  は非定常熱伝達/熱伝導解析により得られるものであるから、式 (7) を満足するように断熱材の厚さ  $d_n$  を決定することが可能となる。

なお、既設トンネルの覆工背面の地山の凍上性を問題とする場合には、覆工背面温度の最小値が  $\theta_{c,\min} > 0$  である必要があり、式 (8) と (9) の添字  $B$  を  $C$  に変えた

$$t_m / A_Y > k_{Y,C} + \eta k_{D,C} \dots\dots\dots (11)$$

が断熱材の厚さの決定式となる。

### 3. 表面断熱処理によるつらら防止工法の温度挙動解析

#### (1) 計算値と実測値の比較

シミュレーションの対象としたトンネルは延長 66 m、覆工厚さが  $d_c = 50$  cm で、地山は新第三紀の砂岩・泥岩の互層からなる。このトンネルに、断熱材厚さが  $d_n = 3.5$  cm でその熱伝導率が  $\lambda_n = 0.0149 \times 1.16$  W/m<sup>2</sup>C である表面断熱処理によるつらら防止工法を施工し、約 1 年にわたり温度計測を続けた。

この 1 年間の実測データをフーリエ解析した覆工表面

温度  $\theta_B$ 、覆工背面温度  $\theta_c$  と地山温度  $\theta_R$  の温度振幅  $A_{Y,i}$  (ただし、  $i = B, C, R$ ) の値 (実測値) と上述の一次元非定常熱伝達/熱伝導トンネル地山モデルによって解析した温度振幅 (計算値) とを比較すると表—1 のようになる。表には年周期応答に対する各測点の位相差  $\Delta\phi$  (断熱材表面温度  $\theta_1$  を基準とする) の比較も示した。これらの温度振幅とその位相差の計算値は実測値を十分満足するものであるといえそうである。

#### (2) パラメーター解析のための入力定数

##### a) 既設トンネルの覆工厚さ

鋼アーチ支保工などを用いた従来のトンネル工法によって建設された鉄道トンネルの覆工厚さは、単線トンネルで  $d_c = 30 \sim 45$  cm、複線トンネルで  $d_c = 45 \sim 55$  cm、新幹線トンネルで  $d_c = 50 \sim 70$  cm 程度である。また NATM による鉄道トンネルの覆工厚さは平均して一次覆工で  $d_c = 10$  cm、二次覆工で  $d_c = 25$  cm である<sup>4)</sup> ので全覆工厚さとしては  $d_c = 35$  cm 程度である。在来線トンネルの約 85 % は単線であり、また今後建設されるトンネルのほとんどが NATM で施工されることを考慮して、解析に用いる覆工厚さの標準を  $d_c = 35$  cm と仮定する。

##### b) 断熱材、覆工と地山の熱特性

断熱材として高分子系の発泡断熱材を用いることにすれば、その熱伝導率は  $\lambda_n = (0.015 \sim 0.04) \times 1.16$  W/m<sup>2</sup>C に分布する。ここでは前報告<sup>4)</sup> にならない断熱材を 3 種類に分け、①  $\lambda_n = 0.015 \times 1.16$  W/m<sup>2</sup>C、 $(c\rho)_n = 60$  kJ/m<sup>3</sup>C、②  $\lambda_n = 0.025 \times 1.16$  W/m<sup>2</sup>C、 $(c\rho)_n = 80$  kJ/m<sup>3</sup>C、③  $\lambda_n = 0.040 \times 1.16$  W/m<sup>2</sup>C、 $(c\rho)_n = 92$  kJ/m<sup>3</sup>C を標準とした。なお、 $(c\rho)_n$  は断熱材の熱容量である。これらの熱特性を式 (3) の断熱材の無次元熱伝導率で表わせば、①~③に対してそれぞれ  $\beta_n = 0.015$ 、0.025 と 0.040 となる。

覆工と地山の熱特性についても前報告<sup>4)</sup> にならない次のように仮定した。すなわち、覆工については  $\lambda_c = 1 \times 1.16$  W/m<sup>2</sup>C、 $(c\rho)_c = 1930$  kJ/m<sup>3</sup>C、また地山については熱伝導率を 2 種類に分け、 $\lambda_r = 1$  と  $2 \times 1.16$  W/m<sup>2</sup>C としたが、熱容量は  $(c\rho)_r = 2100$  kJ/m<sup>3</sup>C と一定とした。したがって式 (4) の地山の無次元熱伝導率はそれぞれ  $\beta_r = 1$  と 2 になる。

#### (3) 断熱材表面の熱伝達率の無次元振幅 $k_y$ に及ぼす影響

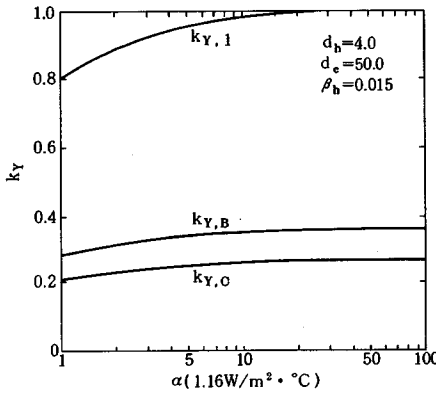
表面断熱処理によるつらら防止工法では、図—2 の下図のトンネル地山モデルの座標 0 と 1 の間、すなわちトンネル内流体 (空気) と断熱材表面の間で熱伝達が行われる。鉄道トンネルに対する種々の研究によれば、一般には熱伝達率は  $\alpha = 5 \sim 10$  W/m<sup>2</sup>C 程度以上である<sup>1)</sup>。

いま、断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_n = 0.015$  に対し、断

表—1 年周期変動に対する温度振幅  $A_{Y,i}$  と位相差  $\Delta\phi$  の計算値と実測値の比較

測点	実 測 値			計 算 値		
	振 幅	振幅比	位相差	振 幅	振幅比	位相差
	$A_{Y,i}(^\circ\text{C})$	(1)	$\Delta\phi(\text{d})$	$A_{Y,i}(^\circ\text{C})$	(1)	$\Delta\phi(\text{d})$
$\theta_1$	11.3	1.00	0	11.3	1.00	0
$\theta_B$	3.3	0.30	32.0	3.9	0.34	31.0
$\theta_C$	2.8	0.25	45.3	2.9	0.28	45.0
$\theta_R$	2.0	0.18	64.4	—	—	—

ただし、振幅比は  $\theta_1$  の振幅に対する  $\theta_B$ 、 $\theta_C$ 、 $\theta_R$  のそれぞれの比

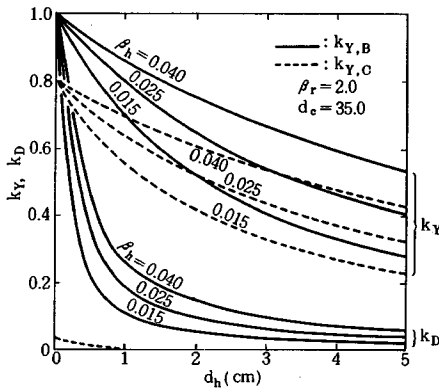


図—3 熱伝達率  $\alpha$  と無次元振幅  $k_{Y,B}$ ,  $k_{Y,C}$  の関係

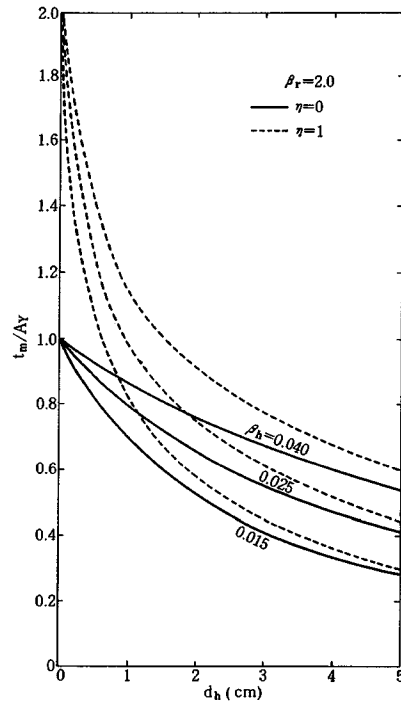
熱材表面、断熱材背面と覆工背面の無次元振幅  $k_{Y,1}$ ,  $k_{Y,B}$  と  $k_{Y,C}$  を求めると図—3 のようになり、覆工背面に深の無次元振幅に及ぼす熱伝達率の影響は小さい、こうした現象は断熱二重巻覆工でも同じ傾向であった<sup>4)</sup>。したがって以後の解析では、設計上の安全性も考慮して  $\alpha$  の変動を無視することにした。

(4) トンネル内気温の年周期変動による無次元振幅  $k_Y$  の挙動

前述の2.(1)で述べたトンネル地山の非定常熱伝達/熱伝導モデルに式(1)のトンネル内気温  $\theta_0$  を入力すれば、年周期のトンネル内気温によるトンネル地山温度の無次元振幅  $k_Y$  の挙動を求めることができる。図—4は地山の無次元熱伝導率  $\beta_r=2$  の場合の断熱材厚さ  $d_h$  と無次元振幅  $k_Y$  の関係を、断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h$  をパラメーターに示したものである。 $d_h=0$  cm の場合の断熱材背面の  $k_{Y,B}$  はトンネル内流体に接する覆工表面となるので、 $k_{Y,B}=1$  となる。しかし覆工背面の  $k_{Y,C}$  は覆工厚さ  $d_c=35$  cm の影響を受けて  $d_h=0$  cm の場合でも  $k_{Y,C}=0.8$  程度しかない。なお  $\beta_r=1$  についても図—4と同様の関係が得られるが、 $\beta_r$  の小さい方が  $k_Y$  は大きくなる。



図—4 断熱材厚さ  $d_h$  と無次元振幅  $k_Y$ ,  $k_D$  の関係



図—5  $\beta_h$  をパラメーターとした断熱材厚さ  $d_h$  と  $t_m/A_Y$  の関係 ( $\beta_r=2$ )

いずれにせよ無次元振幅  $k_Y$  は、断熱材厚さ  $d_h$  の増加とともに、また断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h$  の低下とともに、小さくなることは明らかである。

(5) トンネル内気温の日周期変動による無次元振幅  $k_D$  の挙動

日周期のトンネル内気温による温度挙動は式(2)を考慮することによって実行できる。地山の無次元熱伝導率  $\beta_r=2$  に対する無次元振幅  $k_D$  は図—4に示される。断熱材背面の無次元振幅  $k_{D,B}$  は、年振幅の場合と同様  $d_h=0$  cm で  $k_{D,B}=1$  となるが、断熱材厚さ  $d_h$  が大きくなると急激に低下する傾向を有する。この低下傾向は年周期変動よりもはるかに大きい。

一方、覆工背面の無次元振幅は  $d_h=0$  cm でも  $k_{D,C}=0.04$  程度と非常に小さく、 $d_h$  が厚くなればさらに小さくなるので、日振幅の影響は実用上は無視できる。

したがって、表面断熱処理によるつらら防止工法における日振幅変動としては、断熱材背面の温度挙動に着目すればよく、無次元振幅の  $k_{D,B}$  曲線が断熱材厚さの算定に使われる。

(6) 表面断熱処理によるつらら防止工法の断熱材厚さの提案

トンネル内気温の年周期変動と日周期変動に対するトンネル地山モデルの温度挙動解析から得られる無次元振幅  $k_{Y,B}$ ,  $k_{D,B}$  とトンネル内気温の年振幅・日振幅比  $\eta=$

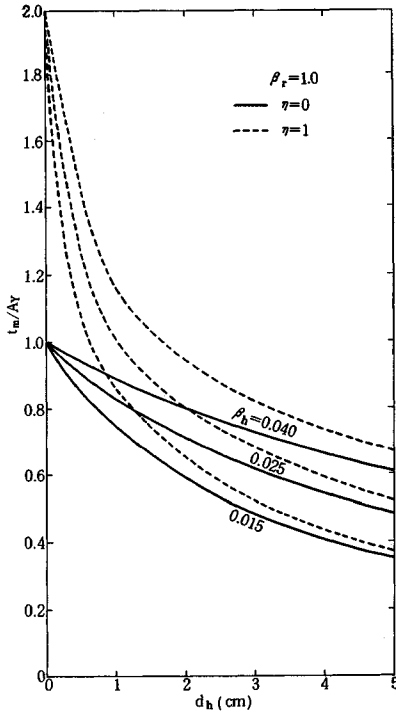


図-6  $\beta_h$  をパラメーターとした断熱材厚さ  $d_h$  と  $t_m/A_T$  の関係 ( $\beta_r=1$ )

$A_T/A_D$  を式 (7) に代入し、これを満足する  $t_m/A_T$  を定めれば、断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h$  と地山の無次元熱伝導率  $\beta_r$  に対してつらら防止工法として必要な断熱材厚さ  $d_h$  を確定することができる。図-5 と 6 は地山の無次元熱伝導率  $\beta_r=2$  と 1 に対応する断熱材厚さ  $d_h$  を、断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h$  をパラメーターとして描いたものである。これらの図は  $t_m/A_T$  と  $\beta_h$  が小さいほど、また  $\beta_h$  と  $\eta$  が大きいほど、必要な断熱材厚さ  $d_h$  が厚くなることを示している。

一方、覆工背面の地山の凍上防止のみに着目する場合には、式 (11) を満足する必要があるが、3. (5) で述べたようにトンネル内気温の日振幅変動が、覆工背面の無次元振幅  $k_{D,C}$  に及ぼす影響は小さいので、年振幅変動による無次元振幅  $k_{Y,C}$  のみを考慮すればよく、地山の無次元熱伝導率  $\beta_r=2$  の場合には図-4 の  $k_{Y,C}$  曲線によって断熱材厚さ  $d_h$  は定められる。

#### 4. トンネル内気温の条件

##### (1) 極値分布解析による気象条件の確率量の算定

表面断熱処理によるつらら防止工の設計の基礎データとなるトンネル内気温の気象条件、すなわち式 (1) と式 (2) に示す年平均気温  $t_m$ 、その年振幅  $A_T$  と日振幅  $A_D$  は確率変数として求めることが合理的である。なぜ

ならば、施工されたつらら防止工が変動する気象条件に対してどの程度の防災強度を有しているかを把握していることは、トンネルの保守管理上有益であるからである。確率分布モデルとしては正規分布の特性を利用するもの、非対称分布関数に直接あてはめるものなど種々のものがあるが、ここでは、古くから鉄道防災で用いられている、後者の 1 つである第一種極値分布 (Gumbel による方法<sup>8)</sup>) をトンネル内気温の気象条件に適用することにした。

これによれば  $n$  個の統計データ (変量) の平均値  $\mu_Y$ 、標準偏差  $\sigma_Y$  ならびに  $n$  のみによって与えられる関数の期待平均値  $y_n$ 、その期待標準偏差  $\sigma_n$  を求め、

$$u = \mu_Y \pm (y_n / \sigma_n) \sigma_Y \dots\dots\dots (12)$$

$$\alpha = \sigma_n / \sigma_Y \dots\dots\dots (13)$$

を与えれば、非超過確率  $p$  に対する極値の大きさ  $y_p$  は

$$y_p = u \pm 1/\alpha \cdot \ln\{-\ln(1-p)\} \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる<sup>7),8)</sup>。なお式 (12) と (14) において  $\pm$  は最小極値と最大極値を示す。ここに  $m$  は再現期間である。

つらら防止工の断熱材厚さの設計においては断熱材背面温度  $\theta_b$  が問題になるが、これが最小値をとるためには、式 (6) が示すように  $t_m$  を第一種極値分布による最小極値分布として、また  $A_T$  と  $A_D$  を最大極値分布として取り扱うのがより合理的である。なお  $A_T$  と  $A_D$  は非負の値であるから、本来は第二種極値分布に相当するが、最大極値分布を対象としていることを考慮すれば第一種極値分布で近似できる<sup>9)</sup>。図-7 は、3. (1) でシミュレーションの対象としたトンネルの年平均気温  $t_m$  と年振幅  $A_T$  の極値分布を描いたものであるが、第一種極値分布で十分シミュレートできることを示す一例である。

##### (2) 年平均気温、年振幅と日振幅の確率量の推定式 つらら防止工の断熱材厚さの設計には、上述の 3 つの

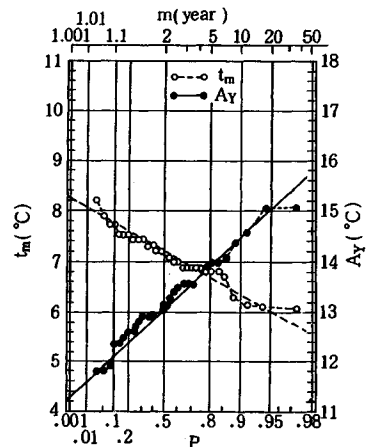
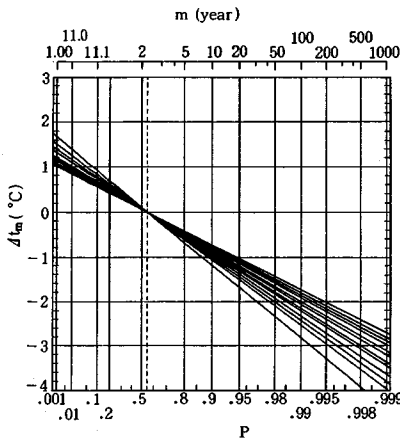


図-7 年平均気温  $t_m$  と年振幅  $A_T$  の極値分布の例



図—8 寒冷地における年平均気温  $t_m$  の増分  $\Delta t_m$  と再現期間  $m$  との関係

気象条件の確率量すなわち年平均気温  $t_m$ 、年振幅  $A_Y$  と日振幅  $A_D$  を求めねばならないが、つらら防止工を施工しようとする個々のトンネルについて気象データを収集することは現実には不可能なことが多い。したがって寒冷地の代表的な都市について3つの確率量を求め、その傾向について検討を加えておくことは断熱工の設計に役立つものと考えられる。

気象条件、 $t_m$ 、 $A_Y$  と  $A_D$  の極値分布を求めるために用いるデータ数は、気象官署の設置年により  $n=20\sim 91$  年とかなりの差がある。なおこの解析がつらら防止工を対象としているので、 $t_m$  は年度(4月～翌年3月)について整理した。また  $A_Y$  は当該年度の月平均気温の最大値と最小値の差から求めた。さらに  $A_D$  は寒冷期である2月の気温の日振幅の最大値を対象とすることにした。

まず最小極値分布の年平均気温  $t_m$  について式(12)～(14)により  $t_m$  の極値  $y_p$  を求め、 $\ln(-\ln(1-p))$  を横軸として描いたのが図—8である。なお、図は、極値  $y_p$  がデータの平均値  $\mu_Y$  に等しくなる再現期間  $m=2.339$  年(データ数  $n$  の  $m$  に対する寄与は非常に小さいので  $n=\infty$  を基準とした)を原点として、寒冷地の気象官署の設置されている22の都市に対する直線を重ね合わせたものである。こちらの直線群の勾配は式(13)の逆数  $1/\alpha$  であるが、その平均値と標準偏差はそれぞれ0.519と0.079であり、直線群の勾配はかなり収束している。そこでこの平均的な勾配を考えれば、再現期間  $m=2.339$  年を  $\Delta t_m=0^\circ\text{C}$  とする式は、

$$\Delta t_m = 0.303 + 0.519 \ln\{-\ln(1-1/m)\} \dots\dots\dots (15)$$

となる。したがってトンネルの平均的な年平均気温  $\bar{t}_m$  がわかっている場合、再現期間  $m$  に対する年平均気温  $t_m(m)$  は、式(15)から最小極値分布として

$$t_m(m) = \bar{t}_m + 0.3 + 0.52 \ln\{-\ln(1-1/m)\} \dots\dots\dots (16)$$

によって近似できる。

同様に、トンネル内気温の年振幅  $A_Y$  の最大極値分布を式(14)によって求め、再現期間  $m=2.339$  年を原点として重ね合わせ、得られた直線群の勾配  $1/\alpha$  の平均値と標準偏差を求めると、0.832と0.106となるが、この直線群も比較的良好に収束している。これにトンネルの平均的な年振幅  $\bar{A}_Y$  を考慮すれば、再現期間  $m$  に対する年振幅  $A_Y(m)$  は、最大極値分布として、

$$A_Y(m) = \bar{A}_Y - 0.5 - 0.83 \ln\{-\ln(1-1/m)\} \dots\dots\dots (17)$$

で推定できる。

さらに、トンネル内気温の日振幅  $A_D$  は一般に内陸部では大きく、沿岸部では小さいことはよく知られているが、最大極値分布として整理してみるとその直線群の勾配  $1/\alpha$  はかなり収束し、その平均値と標準偏差は0.892と0.278となる。しかし、この収束の程度は上述の  $t_m$  や  $A_Y$  よりはやや悪いが、トンネルの平均的な日振幅  $\bar{A}_D$  を導入すれば、再現期間  $m$  に対する日振幅  $A_D(m)$  は、最大極値分布として、

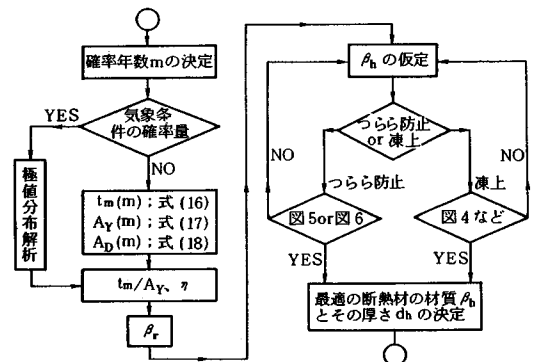
$$A_D(m) = \bar{A}_D - 0.5 - 0.90 \ln\{-\ln(1-1/m)\} \dots\dots\dots (18)$$

によって代表できそうである。

トンネルの凍害防止工の設計において、トンネルの気象条件を算定しようとするとき、平均値  $\bar{t}_m$ 、 $\bar{A}_Y$  と  $\bar{A}_D$  しかわからないことは多い。そうしたとき、再現期間に対する年平均気温の最小極値と年振幅の最大極値については式(16)と(17)によってかなり精度よく、日振幅の最大極値については若干のばらつきはあるが式(18)によって推定が可能となった。

### 5. 表面断熱処理によるつらら防止工法の断熱材厚さの最適化

表面断熱処理によるつらら防止工法の設計に必須な断熱材の材質とその厚さの最適化は、4. で述べた気象条件の極値分布解析と、3. で示したトンネル地山の非定



図—9 表面断熱処理によるつらら防止工法の断熱材の最適化のフローチャート

常熱伝達/熱伝導解析によるそれぞれの成果を結合することによって実行できる。その最適化のフローチャートは図-9のようにまとめられる。

すなわち最適化に際し、入力する気象条件は確率量として考えることが合理的であり、4. では第1種極値分布を適用し、再現期間  $m$  年に対する気象条件、すなわち年平均気温  $t_m$ 、年振幅  $A_Y$  と日振幅  $A_D$  の極値を推定できる手法を提案した。気象条件の確率量は、凍害防止工を計画しているトンネルの防災強度、トンネルを有する線区特性など総合的に判断する必要があるが、当該トンネルに対する気象条件の再現確率を決定すれば、当手法を適用することができ、式(16)~(18)により必要とする気象条件  $t_m$ 、 $A_Y$  と  $A_D$  が求められる。これにより入力定数である年平均気温・年振幅比  $t_m/A_Y$  と日振幅・年振幅比  $\eta (=A_Y/A_D)$  が確定する。

ついで3. で述べたトンネル内気温の年周期変動と日周期変動を考慮した多層系の非定常熱伝達/熱伝導モデルによる解析結果に、上で求めた気象条件の確率量を入力し、さらにトンネル地山の物性値である地山の無次元熱伝導率  $\beta_r$  と断熱材の無次元熱伝導率  $\beta_h$  のパラメータを考慮すれば、覆工表面温度を  $\theta_s > 0^\circ\text{C}$  とする条件(つらら防止工法)に対しては図-5と6により、あるいは覆工背面温度を  $\theta_b > 0^\circ\text{C}$  とする条件(地山の凍上防止工法)に対しては図-4などにより、凍害防止工の施工性と経済性に基づき、最適の断熱材の材質とその厚さが選択できることになる。

## 6. あとがき

既設トンネルの凍害防止工法の1つであ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が、この設計に必須な断熱材の材質とその厚さは、トンネル地山の非定常熱伝達/熱伝導解

析と気象条件の極値分布解析を結合することにより、合理的経済的に選択することが可能になった。しかし、ここでは既設トンネル用の凍害防止工における断熱材の厚さの問題だけを取り扱ったものであるが、断熱材の延長幅に対する余裕長の影響<sup>1),2)</sup>、土被りと積雪の効果<sup>1),3)</sup>、トンネル内気温の温度減衰の影響<sup>5)</sup>をこの手法と合わせて考慮すれば、より合理的な設計が可能となるものである。そうした意味でつらら防止工の設計施工にかかわる最も基本的な問題である断熱材の最適化に関する当報告が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。

## 参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 岡田勝也：トンネルの断熱つらら防止工における断熱材の材質と厚さの最適化，鉄研報告，No.1350，1987。
- 7) 亀田弘行・池淵周一・春名 攻：確率・統計解析(新体系土木工学2)，土木学会，pp.72~83，1981。
- 8) Gumbel: Statistics of Extremes, Columbia University Press, pp.201~305, 1958.
- 9) Gumbel: Statistical Theory of Drought, Proc. of ASCE, Vol.80-439, pp.1~19, 1954.

(1988.2.2・受付)