

長大トンネルにおける断熱二重巻覆工の断熱材厚さ逡減に関する設計法

岡田勝也*・高木憲治**・朝倉俊弘***・
藤林征男****

トンネルの断熱二重巻覆工工法は、一次覆工と二次覆工の間に防水層と断熱層を介在させるものであり、新設トンネル用のつらら・凍上防止工法として開発された。当論文は、長大トンネルにおける坑内気温の減衰特性に対応して、トンネル坑口から中心に行くにしたがって順次断熱材を逡減させるという、合理的な断熱材厚さ設計法を提案したものである。さらに断熱二重巻覆工を施工した実物の長大トンネルの坑内気温と地山温度の挙動の実態を述べ、提案した設計法の適用性について述べたものである。

Key Words : tunnel, adiabatic double lining, adiabatic icicle prevention, heat insulator depth, atmospheric temperature fluctuation

1. まえがき

寒冷地のトンネルの多くは、冬期に漏水が結氷して、つららや側氷を発生させる。これらは列車や自動車の走行安全性に重大な影響を及ぼすだけではなく、凍上性の地山では凍上圧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、断熱処理によるつらら防止工法が開発され¹⁾、多くのトンネルで施工されている。

この工法の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は、既設トンネル用の表面断熱処理工法²⁾と新設トンネル用の断熱二重巻覆工工法³⁾のそれぞれに対して提案されている。これに加えて、土被りと積雪の有無の影響⁴⁾、断熱材の幅⁵⁾の影響などについても解析が行われ、定量的な設計が可能となった。

一方、覆工背面地山の相変化を考慮した凍結深度の挙動も明らかにされ⁶⁾、さらに坑内気温の坑口からの減衰特性についての解析によって坑内気温の変動モデルに基づいたつらら発生領域の予測法が提案された^{7), 8)}。

これらによって一般的なトンネルとトンネル全長に一樣な厚さの断熱材を施工した断熱処理トンネルの坑内気温の振幅減衰が定量的に明らかになった。しかし、断熱工をトンネル全長に渡って施工した場合、断熱工の材料費、施工費の増加だけでなく、断熱材の厚さ相当分の地山の余掘りに伴う掘削費の増大をもたらす等、トンネル工事費と工期の増加をもたらすことになる。また、トンネル断面積のもとと狭小な既設トンネルにおいては、

覆工表面に設置する断熱材厚さが車両通行に関わる建築限界支障の原因となり、そのための改良工事費が余分に必要となることにもなる。したがって、長大トンネルにおいてトンネル内気温の振幅の減衰に応じて断熱材厚さを薄くできれば、トンネル建設費あるいはトンネル改良工事費を低減させることに寄与することになる。

しかし、長大トンネルにおいて、断熱材厚さを坑口から順次低減させた場合の坑内気温の振幅減衰の実態と、その予測法については、十分明らかになっていない。

当論文は、長大トンネルにおけるトンネル内気温の減衰特性に対応して断熱材厚さを順次段階的に逡減させるという、より合理的な断熱材の設計法を提案する。ついで断熱二重巻覆工を施工した実物の長大トンネルの坑内気温と地山温度の挙動の実態を述べると共に、提案した設計法の適用性について検討する。

2. 断熱二重巻トンネルの構造と温度挙動

既設トンネルのつらら防止工では、既設トンネルの覆工に防水層を介して断熱層材を夜間の列車間合いに施工する。これに対して、断熱二重巻トンネルは、NATMの工程における一次覆工（吹付コンクリート）の施工の後、その上に防水シートと断熱層を、さらに二次覆工を施工するものである。

この断熱二重巻トンネルにおけるトンネル断面方向の温度挙動は次のように与えられている⁹⁾。

いま、図-1に示すように、断熱材、一次覆工、二次覆工と地山からなるトンネル断面における温度挙動の変動（図の縦軸は温度（°C））を考えた時、トンネル内気温の年平均気温 t_m 、その年周期変動（年振幅 A_Y ）と日周期変動（日振幅 A_D ）に対して、断熱材背面温度の最小値、 $\theta_{B,min}$ は、

$$\theta_{B,min} = t_m - A_{Y,B} - A_{D,B} \dots \dots \dots (1)$$

のようになる。ここに、 $A_{Y,B}$ は年周期挙動に対する断

* 正会員 工博（財）鉄道総合技術研究所 施設研究部長
（〒185 国分寺市光町 2-8-38）

** 正会員 北海道旅客鉄道（株） 開発事業本部不動産レジャー事業部長

*** 正会員 工修（財）鉄道総合技術研究所 トンネル研究室主任研究員

**** 前・北海道旅客鉄道（株）（現・ピーエスアイ技術部長）

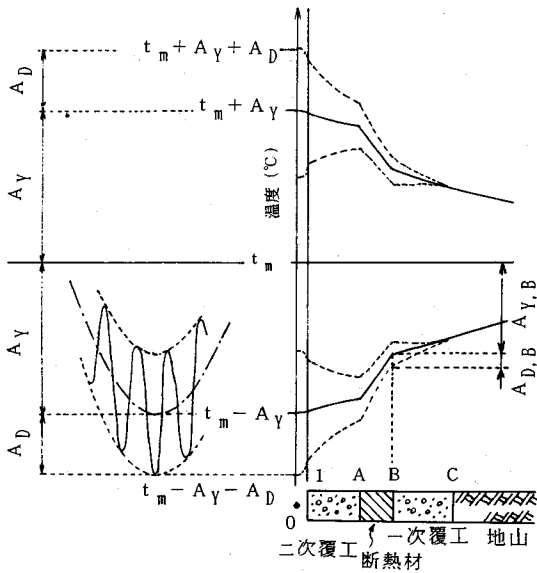


図-1 断熱二重巻覆工トンネルにおけるトンネル地山モデル

断熱材背面の温度振幅, $A_{D,B}$ は日周期挙動に対するそれである。つらら防止工としては, $\theta_{B,min} > 0^\circ\text{C}$ を満足することが必要であるから, 式(1)は次式のようになる。すなわち,

$$t_m/A_Y > k_{Y,B} + \eta k_{D,B}$$

ここに,

$$k_{Y,B} = A_{Y,B}/A_Y$$

$$k_{D,B} = A_{D,B}/A_D$$

$$\eta = A_D/A_Y \dots\dots\dots (2)$$

となる。

式(2)の第1式において, t_m , A_Y と η はトンネルの存在する気象条件により決定されるが, $k_{Y,B}$ 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(2)の第1式を満足するように断熱材の厚さ d_h を決定すればよいことになる。

土盛り H が十分厚く, かつ断熱材の幅 w が大きい場合の断熱材の厚さ d_h と無次元振幅 $k_{Y,B}$, $k_{D,B}$ の関係は, 無次元熱伝導率 β_h と β_r に対して, 岡田・松本によって既に与えられている^{2),3)}。ここに, 断熱材, 覆工コンクリートと地山の熱伝導率をそれぞれ, λ_h , λ_c と λ_r とすれば,

$$\beta_h = \lambda_h/\lambda_c$$

$$\beta_r = \lambda_r/\lambda_c \dots\dots\dots (3)$$

で表される。

3. トンネル延長方向における気温減衰に対応した断熱材厚さ遞減に関する設計法の提案

(1) 断熱材厚さが一樣な場合のトンネル延長方向の気温減衰

トンネル外気温が正弦波で変化する時のトンネル内気温の減衰については, トンネル坑口からのつらら発生領域とトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 の関係から, 岡田・松本⁷⁾によって既に式(4)のように与えられている。すなわち, トンネル外気温が正弦波振動を行う時のトンネル内気温の振幅減衰モデルに対して, トンネル坑口と坑口から z の距離のトンネル内気温の振幅をそれぞれ A_0 と A_z とした時,

$$A_z/A_0 = \exp(-\kappa Z \cdot \cos\xi) \dots\dots\dots (4)$$

ここに,

$$\kappa = 2\sqrt{2}\phi\eta\lambda/(\gamma r_0 c_p v)$$

$$\phi = \sqrt{\omega/2a}$$

$$\eta = 1/\sqrt{1+2(\phi/h)+2(\phi/h)^2}$$

$$h = \alpha/\lambda$$

$$\varepsilon = \tan^{-1}[(\phi/h)/(1+(\phi/h))] \dots\dots\dots (5)$$

$$\xi = \pi/4 - \varepsilon \dots\dots\dots (5)$$

である。 α , λ , a , r_0 , γ , c_p と v は, それぞれ, トンネルの覆工表面における熱伝達率, 覆工地山の熱伝導率, その温度伝導度, トンネルの換算半径, トンネル内空気 の比重量, トンネル内空気の定圧比熱とトンネル内風速である。なお, ω は, トンネル外気温が振幅 A_0 で,

$$\theta = t_m + A_0 \sin\omega t \dots\dots\dots (6)$$

で変動する場合の角速度である。温度伝導度 a は c_p を熱容量とすれば,

$$a = \lambda/c_p \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。

上式はトンネルが熱的に均一な地山で構成される時のトンネル内気温の温度減衰に関するものである。しかしトンネルの全延長が断熱材で覆われる場合には, 断熱材の影響により地山からの流入熱量が相違するので, 岡田・松本の簡易モデルによる推定法によれば, 式(5)の第2式の温度伝導度 a に, 式(8)に示す換算温度伝導度 a_E を入力する必要がある。すなわち,

$$a_E = \omega d_h^2/2(\ln k)^2 \dots\dots\dots (8)$$

なお, k は, 断熱材を通過する熱量をこの厚さと等価な地山方向の温度振幅を有する半無限平面の通過熱量に近似的に換算したもので, 断熱材厚さ間の振幅減衰比である。この時, 式(5)の第2式の ϕ は,

$$\phi_E = -\ln k/d_h \dots\dots\dots (9)$$

である。

これにしたがって求められた断熱材厚さ d_h と振幅比 A_z/A_0 の関係は実測値を満足することが確かめられている⁸⁾。

(2) 断熱材厚さを遞減させた場合のトンネル延長方向の振幅減衰

前述の3.(1)の手法は, トンネル外気温が式(6)

で与えられたとき、断熱材厚さ d_h が一様の場合のトンネル内気温の振幅減衰を表すものである。ここでは、トンネル延長方向のトンネル内気温の振幅減衰にしたがって断熱材厚さを通減させる手法について述べる。

断熱材厚さはトンネル延長方向に段階的に通減させることにし、トンネル坑口から距離 Z_j と Z_{j+1} の区間の断熱材厚さを d_{hj} 、換算温度伝導度を a_{Ej} 、その関数である式 (5) の第 1 式と第 6 式を κ_j 、 ξ_j とする。また距離 Z_j の位置のトンネル内気温の振幅を A_{Zj} とする。この時、断熱材厚さを d_{hj} とする断熱工の施工距離は、

$$\Delta Z_j = Z_{j+1} - Z_j \dots \dots \dots (10)$$

である。

a) トンネル坑口 Z_1 から距離 Z_2 までの区間 ΔZ_1

坑口 $Z_1 (=0)$ から Z_2 までの区間 ΔZ_1 に厚さ d_{h1} の断熱材を施工することを計画する。このとき、坑口の気温振幅は A_{Z1} となるが、これはトンネル外気温の振幅 A_0 に相当する。すなわち、

$$A_{Z1} = A_0 \dots \dots \dots (11)$$

である。

この振幅は区間 ΔZ_1 を代表する温度振幅となる。

b) 距離 Z_2 から Z_3 までの区間 ΔZ_2

距離 Z_2 から Z_3 までの区間 ΔZ_2 における坑口方の距離 Z_2 の位置の温度振幅は、式 (4) より、

$$A_{Z2}/A_{Z1} = \exp(-\kappa_1 \Delta Z_1 \cdot \cos \xi_1) \dots \dots \dots (12)$$

となる。式 (12) における κ はトンネル内換算風速 v の関数であるので、

$$\kappa = \Psi/v$$

$$\Psi = 2\sqrt{2} \phi \eta \lambda / (\gamma_0 c_p) \dots \dots \dots (13)$$

とおけば、

$$A_{Z2}/A_{Z1} = \exp(-\Psi_1 \Delta Z_1 / v \cdot \cos \xi_1) \dots \dots \dots (14)$$

が得られる。

式 (11) と式 (14) によって、トンネル外気温の振幅に対する距離 Z_2 の位置のトンネル内気温の振幅の比、 A_{Z2}/A_0 が、任意の換算風速 v について求められる。

c) 距離 Z_j と Z_{j+1} の区間 ΔZ_j

区間 ΔZ_3 、 $\Delta Z_4 \dots \Delta Z_{j-1}$ についても、b) と同様、順次計算を進めることができる。したがって、距離 Z_{j-1} の位置のトンネル内気温の温度振幅 $A_{Z_{j-1}}$ は、区間 ΔZ_{j-1} における計算結果より、既知となる。

区間 ΔZ_j における坑口からの距離 Z_j の位置の温度振幅 A_{Zj} は、区間 ΔZ_{j-1} の既知の $A_{Z_{j-1}}$ を用いて、

$$A_{Zj}/A_{Z_{j-1}} = \exp(-\Psi_{j-1} \Delta Z_{j-1} / v \cdot \cos \xi_{j-1}) \dots \dots \dots (15)$$

で与えられる。

式 (15) をトンネル外気温を用いて表すことにすれば、

$$A_{Zj} = \frac{A_{Zj}}{A_{Z_{j-1}}} \frac{A_{Z_{j-1}}}{A_{Z_{j-2}}} \frac{A_{Z_{j-2}}}{A_{Z_{j-3}}} \dots \frac{A_{Z2}}{A_{Z1}} A_{Z1}$$

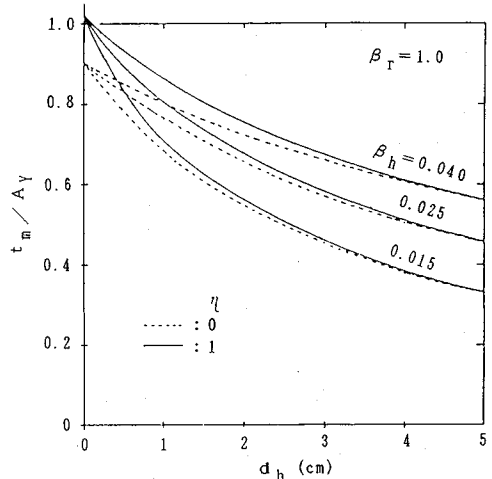


図-2 断熱材厚さ d_h と t_m/A_Y の関係

$$= A_{Z1} \cdot \prod_{i=1}^{j-1} \frac{A_{Z_{i+1}}}{A_{Z_i}} \dots \dots \dots (16)$$

となるが、式 (11)、(15)、(16) などから、

$$A_{Zj} = A_0 \cdot \prod_{i=1}^{j-1} \exp(-\Psi_i \Delta Z_i / v \cdot \cos \xi_i)$$

$$\text{ただし、} j \geq 2 \dots \dots \dots (17)$$

のように得られる。

式 (17) によって、区間 ΔZ_j にある距離 Z_j の位置のトンネル内気温の振幅 A_{Zj} が、任意の換算風速 v と断熱材特性 (たとえば断熱材厚さ d_{hj} 、換算温度伝導度 a_{Ej}) について、トンネル外気温の振幅 A_0 に対して、求められることになった。

(3) トンネル延長方向の断熱材の合理的な厚さ通減法

トンネル坑口から奥に行くにしたがって、トンネル内気温の温度振幅 A_{Zj} は次第に減衰していくことになるので、断熱材厚さ d_h も順次通減させていくのが合理的である。

a) 前述の 3.(1) と 3.(2) によって、トンネル延長方向に坑口から順次区間を設定し、区間の長さ ΔZ_j と断熱材厚さ d_{hj} を仮定する。トンネル内気温の温度振幅は坑口から奥に行くにしたがって次第に減衰していくので、 $d_{h1} > d_{h2} > \dots > d_{hj}$ である。

b) トンネル内気温の温度振幅 A_{Zj} を、それぞれの区間 ΔZ_j 毎に、それぞれの断熱材厚さ d_{hj} 毎に、順次計算を進め、区間 ΔZ_j におけるそれぞれのトンネル内気温の温度振幅 A_{Zj} を式 (17) により求める。

c) 一方、トンネル内気温の温度振幅が年振幅に対して A_Y 、振幅比が η 、その年平均気温が t_m であるとき、 t_m/A_Y と d_h の関係は、 η をパラメーターにして、2. の解析結果として図-2 のように与えられている³⁾。そこで式 (17) を用いて温度振幅 A_{Zj} を年振幅と日振幅につ

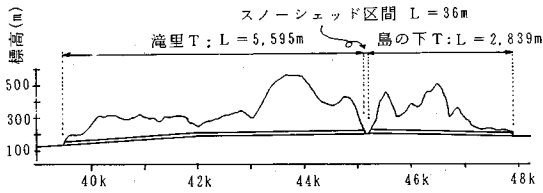


図-3 滝里・島の下トンネルの一般図

いて計算し、これらを図-2に適用して、断熱材厚さ d_h を求める。

d) 上述の c) の図-2 で得られた d_h が、b) で式 (17) の温度振幅 A_{Zj} の計算時に仮定した a) の断熱材厚さ d_{hj} に一致するまで、 d_{hj} を変化させて収束計算をする。

これら一連の計算によって、坑口から順次遞減する断熱材厚さ d_{hj} がそれぞれの区間 ΔZ_j ごとに段階的に決定できる。

4. 長大トンネルの温度挙動の実態と提案した設計法の適用性

(1) 試験トンネルの概要

a) トンネルの概要

当トンネルは根室本線滝川・富良野間にあり、北海道開発局による石狩川総合開発計画の一環として建設される滝里ダムの湛水によって水没する約 10.4 km の線路付け替え工事に基づき、新設されたものである。

トンネルは単線鉄道トンネルの 2 号型 (非電化断面) で、図-3 のように延長 5595 m の滝里トンネルと延長 2839 m の島の下トンネルからなる。両トンネルに挟まれる 35 m 間はスノーシェッドで覆われる。

トンネルの地質は滝里トンネルの起点方では崖錐堆積物、風化頁岩で偏圧地形となっており、島の下トンネルの終点方約 50 m は土被りも $2D$ (D : トンネル幅) 以下と小さく、崖錐堆積物、段丘堆積物、風化頁岩となっているが、それを除けば両トンネルのほとんどは白亜紀の下部蝦夷層群に属する砂岩と頁岩の互層よりなる。

b) トンネル外気温の統計的予測

トンネルの断熱工の設計には式 (2) に示す気象条件が必要となる。しかし、この地域における、特に当該トンネル付近の気象データで統計解析に耐え得るデータがなかったため、北海道内陸部の気候でこのトンネルに比較的近い旭川の気象データを代表として選択することにした。そして、旭川の 80 年間 (ただし日振幅は 21 年) 間の気温データについて第 1 種極値分布解析を実行した^{2), 16)}。

つらら防止工の気象条件の設定において、年平均気温 t_m には最小極値分布を適用し、また気温の年振幅 A_Y とその日振幅 A_D には最大極値分布を適用することを、岡田・松本²⁾は提案している。これによれば、再現期間を

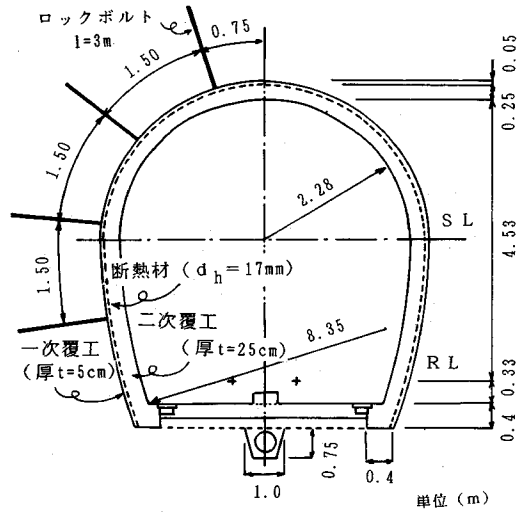


図-4 トンネル断面標準図 (地山等級: III_N) の例

$m=3$ 年とすれば、 $t_m=5.7^\circ\text{C}$ 、 $A_Y=15.7^\circ\text{C}$ 、 $A_D=9.2^\circ\text{C}$ となる。これはトンネル坑口の気象条件を与えることになる。

c) 断熱二重巻覆工の施工

前述のトンネル坑口の気象条件に基づき、断熱二重巻トンネルにおける断熱材の設計を行った。その結果、トンネル坑口から 550 m については厚さ 42 mm で、550 m から 1100 m 間については 17 mm の厚さのウレタン系発泡断熱材を施工することにした。坑口から 1100 m までの区間を除くトンネル中間部は防水シートのみ的一般区間とした。

3. (2) の記号にしたがえば、 $Z_1=0$ 、 $Z_2=550$ m、 $Z_3=1100$ m、 $\Delta Z_1=\Delta Z_2=550$ m、 $\Delta Z_3=2798$ m、1420 m (それぞれ、滝里トンネルと島の下トンネルの延長の 1/2) であり、断熱材厚さは $d_{h1}=42$ mm、 $d_{h2}=17$ mm、 $d_{h3}=0$ mm である。

トンネルは NATM 設計施工指針に基づき 6 つの支保パターンを設定して施工され、一次吹付けコンクリート (厚さ 10 cm) 後の内空変位が十分落ちついたあと、ウレタン系発泡断熱材が上述の厚さで吹き付けられ、二次覆工 (厚さ 25 cm) が施工された。トンネル標準図の一例 (地山等級 III_N) は図-4 のようである。

(2) トンネル断面温度と断熱材厚さの関係

a) トンネル断面温度の挙動

トンネル横断方向の温度分布の年周期挙動 (実測値) の一例を描くと図-5 のようになる。図は島の下トンネル出口方の坑口から 800 m の断面であり、区間 ΔZ_2 に属する。一次覆工と二次覆工の厚さはそれぞれ 5 cm と 25 cm、断熱材厚さは $d_{h2}=17$ mm である。実線は月平均温度、点線は最高・最低温度を示している。 $d_{h2}=17$ mm の断熱材の中で温度振幅は急縮し、地山の奥に行く

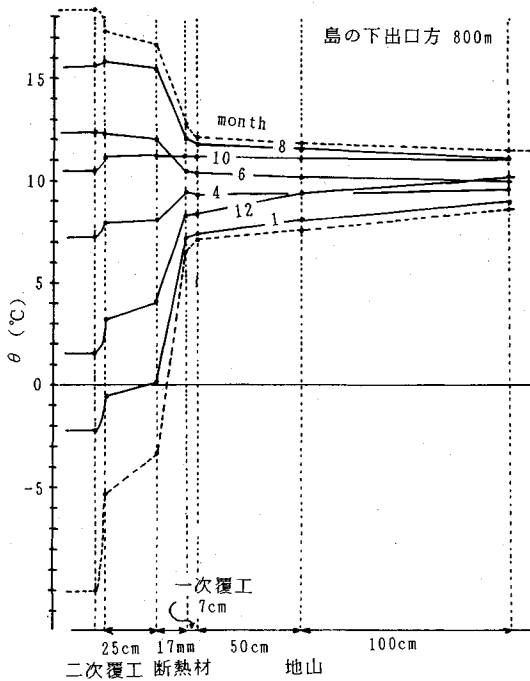


図-5 トンネル断面温度 (年周期)

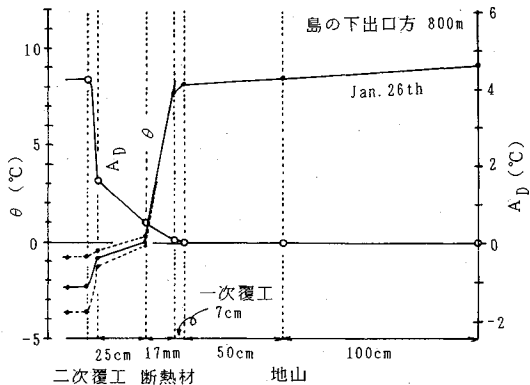


図-6 トンネル断面温度 (日周期)

にしたがってなだらかに減衰していくのがわかる。

一方、同じ断面の日振幅挙動 (実測値) の一例として、1月26日の日平均温度と日最高・最低温度を図-6に示すが、これによれば、約4.2°Cのトンネル内気温の温度振幅は、二次覆工背面で約0.5°Cに減衰し、さらに断熱材の中でさらに減衰して0.1°C以下になるのがわかる。

b) 断熱材背面温度の位相差と断熱材厚さの関係

年周期のトンネル断面温度の図-5が示すように、覆工表面から地山の奥に行くにしたがって温度伝搬に位相の差が現れる。

年周期挙動における二次覆工表面温度 $\theta_{Y,1}$ に対する断熱材背面温度 $\theta_{Y,B}$ の位相差 $\phi_{Y,B}$ を断熱材厚さ d_h につ

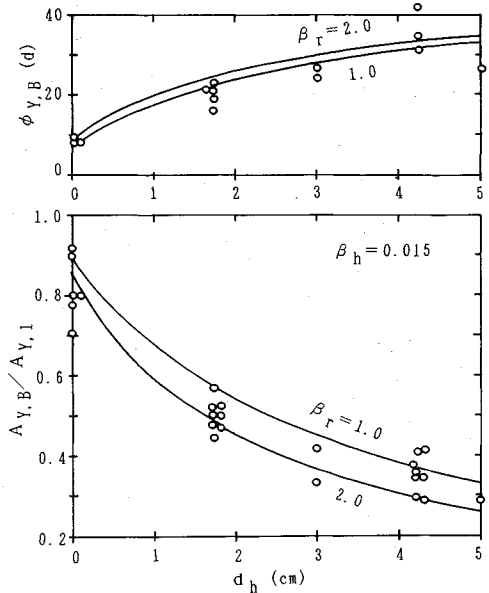


図-7 断熱材厚さ d_h と位相差 $\phi_{Y,B}$ 、 $A_{Y,B}/A_{Y,1}$ の関係

いて描くと図-7の上図のようになる。 $\phi_{Y,B}$ は一年間の実測温度をフーリエ級数に展開して求めたものである。 d_h の増加と共に $\phi_{Y,B}$ は大きくなるが、この関係は先に求めた理論曲線³⁾にほぼ一致していると言える。

c) 断熱材背面温度の振幅と断熱材厚さの関係

前述の位相差と同様、年周期挙動における $\theta_{Y,1}$ の振幅 $A_{Y,1}$ に対する断熱材背面温度 $\theta_{Y,B}$ の振幅 $A_{Y,B}$ を断熱材厚さ d_h について描くと図-7の下図のようになる。この関係は d_h の増加と共に、 $A_{Y,B}/A_{Y,1}$ は次第に低下する傾向を有するが、これも先に提案されている理論曲線³⁾をほぼ満足することがわかる。

d) トンネル内風速と覆工表面の熱伝達率

滝里トンネルに設置したトンネル内風速計によれば、夏期にはトンネル入口方から、また冬期には出口方から風が吹き込むことが多いが、これは季節風の影響である。その頻度分布は図-8 ($v < 0$: トンネル入口方, $v > 0$: トンネル出口方より吹き込む) のようであり、列車通過時には4 m/s程度の風速を記録するが、それを除けば平均 $v = 1.1$ m/s, せいぜい $v = 1.5$ m/s以下の自然風が吹き込むことがわかる。

覆工表面の熱伝達率は、二次覆工のコンクリートの熱伝導率 α を $1.16 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ($1.0 \text{ kcal/m}^2\text{h°C}$)として、定常熱伝導の仮定のもとにトンネル内気温と二次覆工表面温度の温度差から算出した。その頻度分布である図-9によれば、平均値は $\alpha = 6.1 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ($5.6 \text{ kcal/m}^2\text{h°C}$)、標準偏差は $\sigma = 2.6 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ($2.4 \text{ kcal/m}^2\text{h°C}$)である。 2σ までを考えれば $\alpha = 11 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ($10 \text{ kcal/m}^2\text{h°C}$)となる。

トンネル内風速 v と熱伝達率 α の関係には多くの式が提案⁹⁾⁻¹⁵⁾されており、図-10のようになる。当トン

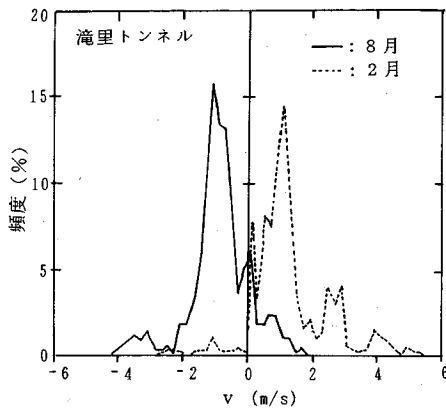


図-8 トンネル内風速 v の頻度分布

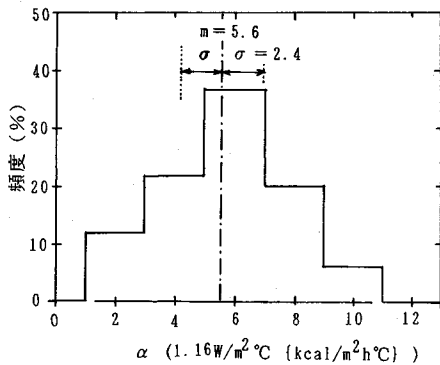


図-9 熱伝達率 α の頻度分布

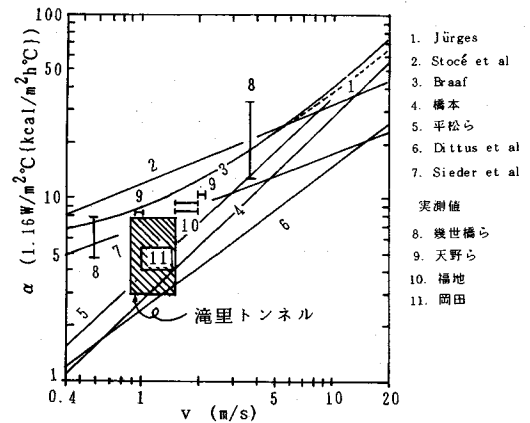


図-10 トンネル内風速と熱伝達率 α の関係

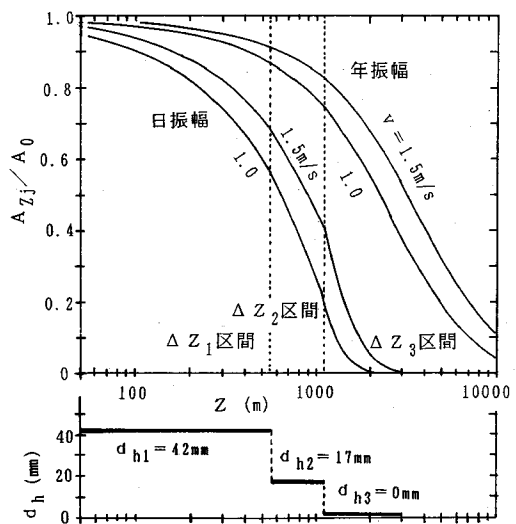


図-11 距離 Z と温度振幅の減衰比 A_{Z1}/A_0 の関係 (解析値)

ネルは岡田の過去に実測した初山別トンネルの値にはほぼ相当し、平松らの式に一致し、Stocé et al. の式は実測値の上限に位置すること¹⁴⁾がわかる。

(3) トンネル延長方向のトンネル内気温の挙動と提案した設計法の適用性

a) 提案した設計法によるトンネル内気温の予測

前述の4.(1)c)で述べたように、トンネルは坑口から3つの区間、 $\Delta Z_1 = \Delta Z_2 = 550$ m, $\Delta Z_3 = 2798$ m, 1420 mにわけ、それぞれの断熱材厚さは $d_{h1} = 42$ mm, $d_{h2} = 17$ mm, $d_{h3} = 0$ mmである。このとき $Z_1 = 0$, $Z_2 = 550$ m, $Z_3 = 1100$ mである。

式(8)を考慮しながら式(17)に基づき、温度振幅の減衰比 A_{Z1}/A_0 を年振幅と日振幅のそれぞれについて求め、坑口からの距離 Z について描くと図-11のようになる。なお式(5)の定数は、 $r_0 = 2.5$ m, $\gamma = 1.251$ kg/m³, $c_p = 1.0$ kJ/°C (0.24 kcal/kg °C)であり、覆工地山の温度伝導度は $a = 1.85 \times 10^{-3}$ m²/h、断熱材の換算温度伝導度は文献⁸⁾により $d_h = 0.02, 0.03$ と 0.05 mに対してそれぞれ、 $a_E = 5.17 \times 10^{-7}, 6.00 \times 10^{-7}, 8.15 \times 10^{-7}$ m²/h (年振幅)、また $a_E = 6.62 \times 10^{-6}, 1.14 \times 10^{-5}, 2.14 \times 10^{-5}$ m²/h (日振幅)である。覆工表面の熱伝達率は4.(2)d)より $\alpha = 11$ W/m²°C (10 kcal/m²h)とし、

トンネル内風速は $v = 1.0$ と 1.5 m/sの両者を考慮した。

図-11によれば、温度振幅の減衰は断熱材の厚い坑口付近の ΔZ_1 や ΔZ_2 の区間では小さいが、坑口から遠い断熱材無施工の ΔZ_3 区間では大きくなる。また振幅減衰は、年振幅よりも日振幅の方が大きく、かつトンネル内風速が大きいほど小さいことがわかる。

b) トンネル内気温の年振幅挙動の実測値と解析値の比較

トンネル内気温の振幅減衰の実測値を年振幅について描くと図-12のようになる。図は、夏期と冬期の月平均気温の差から年振幅を算出し、坑口から150 mの位置の温度振幅の減衰比0.97を基準に描いたものである。

一方、年周期温度挙動における坑口からの位相差 ϕ_i は解析的には、

$$\phi_i = \Psi_i Z \cdot \sin \xi_i / v \dots \dots \dots (18)$$

で与えられる⁷⁾。これを $\Delta Z_i (i=1 \sim 3)$ の各区間毎に求めると図-13のようになる。実測値には欠測の所があ

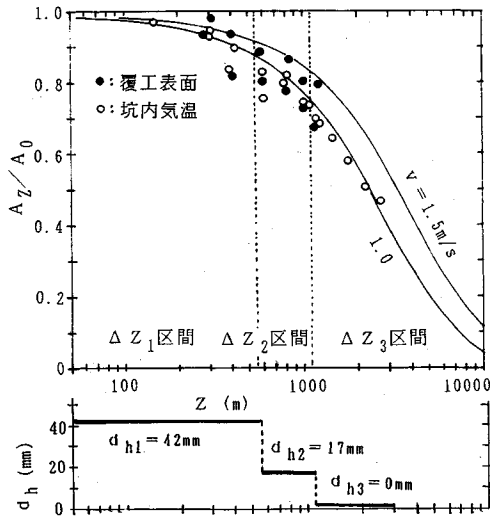


図-12 温度振幅の減衰比 A_z/A_0 の解析値と実測値の比較 (年周期)

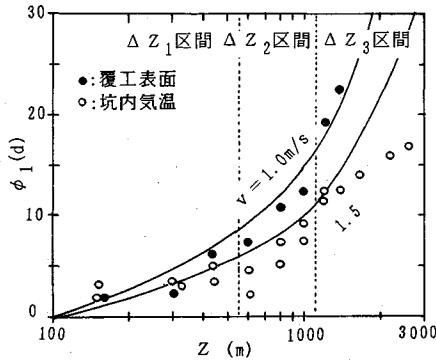


図-13 距離 Z とトンネル内気温の位相差 ϕ_1 の関係に関する解析値と実測値の比較

るので ϕ_1 には誤差の入ることは免れないが、式 (18) の $v=1.0\sim 1.5\text{ m/s}$ の範囲にあることがわかる。

これら図-12と図-13から、トンネル内の換算風速を $v=1.0\sim 1.5\text{ m/s}$ とした温度減衰の予測値は実測値をほぼ満足できると言えそうである。

c) トンネル内気温の日振幅挙動の実測値と解析値の比較

トンネル内気温の日振幅の推移を1991年1月の滝里トンネルについて描くと図-14のようになる。図は坑外と坑口より2200mまでの7地点について示したものであるが、トンネルの奥に行くにしたがって次第に日振幅の平均値 m とその標準偏差 σ は共に小さくなっていく様子がわかる。

これらの日振幅の減衰比 A_z/A_0 として、坑口から150mの位置のそれを0.87として、夏期の7と8月、冬期の2, 3, 4月の月平均値について描くと図-15のようになる。これら実測値はトンネル内の換算風速を v

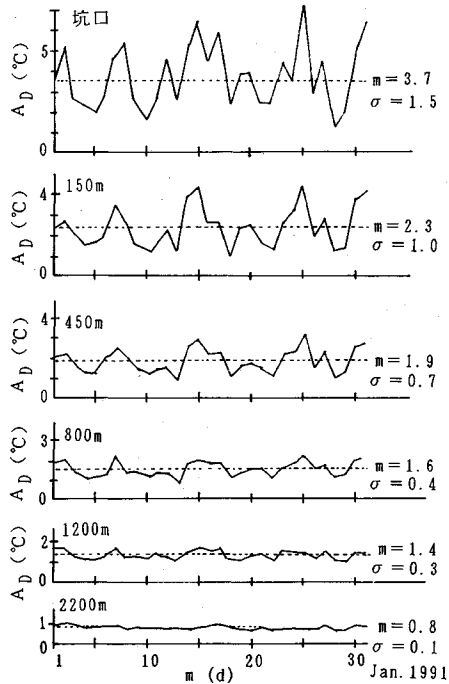


図-14 トンネル内気温の日振幅 A_D の経日変化 (Jan. 1991)

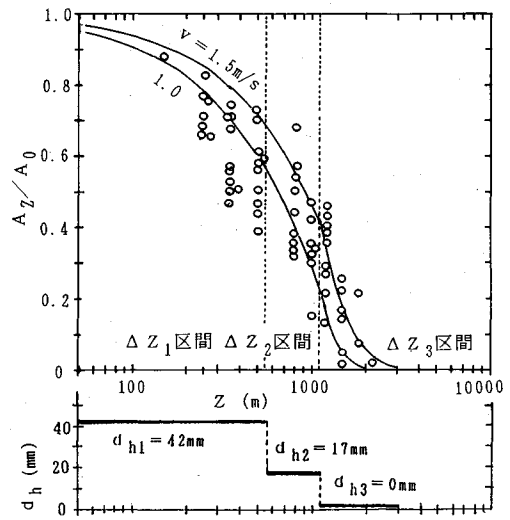


図-15 温度振幅の減衰比 A_z/A_0 の解析値と実測値の比較 (日周期)

$=1.5\text{ m/s}$ とした予測値によってほぼ表すことができると言えそうである。

d) トンネル内気温の振幅減衰の予測法の適用性

前述の b) に示したトンネル内気温の年振幅の減衰比と c) の日振幅の減衰比に関する式 (17) の予測法は、トンネル内換算風速を $v=1.0\sim 1.5\text{ m/s}$ とすることにより、実測値をほぼ満足する値を与えることがわかった。

しかし、断熱二重巻覆工の断熱材厚さに対しては日振

幅挙動よりも年振幅挙動がはるかに大きく影響するので、実務的な設計には、図-12の振幅減衰比が示すように、既往の研究^{7),8)}で提案した換算風速 $v=1.0$ m/s を考えておけばよい。

したがって、3.(3)に示したトンネル延長方向の断熱材厚さ遞減法を用いることにより、断熱材厚さをトンネル内気温の温度減衰に対応して解析的に順次薄く設計することが可能となった。

5. あとがき

トンネルの凍上・つらら防止工法の一つである断熱工法は寒冷地の多くの鉄道トンネルで施工されている^{1),4)}。それらの多くは既設トンネルの改良²⁾のために施工されてきたが、新設トンネルでは断熱二重巻覆工トンネル³⁾としてNATMに取り入れられ施工例を増やしつつある。

当論文は、長大トンネルにおいて、トンネル内気温の減衰特性に応じて断熱材厚さを段階的に順次低減させる合理的な設計手法を提案したものであり、既報の断熱工法を施工したトンネルの坑内気温の振幅減衰推定法⁸⁾に改良を加えたものである。この設計法を、断熱二重巻覆工を用いた実物の長大トンネルの温度測定結果に適用したところ、実測結果を十分満足するものであることが確認された。

したがって、ここで提案した設計法を用いれば、断熱工法の設計に必須な断熱材厚さを坑口から段階的に順次遞減させるとともに、断熱工の坑口からの必要施工距離が、解析的に設定できることになり、実用的で経済的な寒冷地トンネルの設計が可能となった。

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・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。

- 3) 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。
- 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：断熱処理によるつらら防止工法における断熱材の余裕長さの提案，土木学会論文集，No. 424/Ⅲ-14，1990。
- 6) 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-14，1990。
- 7) 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. 388/3-8，1987。
- 8) 岡田勝也・松本嘉司：断熱つらら防止工を施工したトンネルにおけるトンネル内気温の減衰と断熱材厚さに関する簡易推定法，土木学会論文集，No. 439/Ⅲ-17，1991。
- 9) 天野勲三：乾燥した岩盤坑道における気流の温度変化について，日本鉱業学会誌，Vol. 70，No. 787，1954。
- 10) 外尾善次郎：坑道を流れる通気の温度について，日本鉱業学会誌，Vol. 78，No. 892，1962。
- 11) 大塚全一：地下鉄道の温度環境に関する理論と分析，土木学会論文報告集，No. 241，1975。
- 12) 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，鉄道技術研究報告，No. 1076，1978。
- 13) 井上雅弘ほか：通気の温度変動を考慮した坑道周辺岩盤から放散される熱量に関する理論的研究，日本鉱業学会誌，Vol. 97，No. 1120，1981。
- 14) 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。
- 15) 天野勲三・水田義明：トンネル内気象の予測計算，土木学会論文集，No. 387/Ⅱ-8，1987。
- 16) 岡田勝也：トンネルの凍害・凍上防止工設計のための気象条件の評価，日本雪工学会誌，Vol. 10，No. 1，1994。

(1994. 2. 2 受付)

DESIGN METHOD ON DECREASING OF HEAT INSULATOR DEPTH OF ADIABATIC DOUBLE LINING IN LONG TUNNEL

Katsuya OKADA, Kenji TAKAGI, Toshihiro ASAKURA and Yukio FUJIBAYASHI

An adiabatic double lining in tunnel, in which a heat insulator was sandwiched between an outer lining and an inner one, was developed for a prevention work of icicles and frost heave of newly constructed tunnel. This paper proposes an approximate and reasonable estimation method of decreasing heat insulator depth, step by step, from portal to tunnel center according to an amplitude fluctuation of atmospheric temperature in tunnel. This also deals with temperature behaviours of a few adiabatic double linings in a long tunnel which was newly constructed, and the applicability of the proposed estimation method.