

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

岡田勝也*・松本嘉司**

断熱処理によるつらら防止工は、つららや側氷を発生する多くのトンネルで施工されている。周期的に変動するトンネル内気温の減衰モデルを、断熱材・覆工・地山からなる非定常熱伝達/熱伝導モデルと結合させる簡易手法を提案した。これを用いて、トンネル全長に渡って断熱つらら防止工を施工した場合のトンネル延長方向の気温減衰の評価と、それに対応した断熱材の厚さの決定法を述べた。これにより従来以上に合理的・経済的な設計が可能となった。

Keywords: tunnel, adiabatic icicle prevention, heat convection/conduction, atmospheric temperature fluctuation, heat insulator depth

1. ま え が き

鉄道トンネル約3800本のうちの約70%に相当するトンネルは漏水に悩まされている。これらは寒冷地にあつては結氷して、全トンネル数の約28%には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。さらに凍上性の地山でトンネルの覆工背面にまで凍結が進行すると、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もなる。

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⁾、多くの鉄道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と気象条件の極値分布解析を適用して、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覆工工法³⁾のそれぞれに対して提案した。また土被りと積雪の有無の影響⁴⁾、断熱材の幅⁵⁾などについても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を行い、実用的な設計条件を提案した。

一方、寒冷地トンネルにおける覆工背面地山の相変化を考慮した凍結深度の挙動を定量的に示す¹⁴⁾と共に、トンネル内気温の坑口からの減衰特性についてマクロな考察を行いトンネル内気温の変動モデルからつらら発生領域の予測法を提案した⁶⁾。

これら一連の研究によって、トンネル内気温の減衰特性を考慮した最適の断熱処理によるつらら防止工法が選定できることになった。しかし、これは、トンネルのつららの発生がトンネル全長にわたるものではなく、その発生箇所がトンネル延長方向に幾箇所にも分断されると

いう一般的な場合に適用できるのであつて、トンネル全長にわたって断熱処理工法を採用する場合には、前述のトンネル内気温の減衰に関する提案式をそのまま適用することはできない。なぜならば被覆された断熱材の影響により地山から冬期にトンネル内空に流入する熱量が相違するので補正が必要となるからである。

当論文は、断熱処理によるつらら防止工法をトンネル全長に施工した場合のトンネル内気温の減衰特性を簡易モデルによって推定する手法を提案し、それが鉄道トンネルにおけるトンネル内気温の実測値を十分満足することを確認した後、この手法を用いてつらら防止工の断熱材の厚さを坑口から順次低減させていく計算フローを提示したものであり、トンネルの断熱処理によるつらら防止工法の実用的な設計の便に供しようとするものである。

2. トンネル内気温の減衰に関する簡易モデル

(1) トンネル内気温の減衰⁶⁾

トンネル内気流の温度変化に関しては、地下鉄や山岳鉄道トンネル⁷⁾⁻⁹⁾に対してあるいは道路トンネル¹⁰⁾、鉱山の坑道¹¹⁾⁻¹³⁾に対して多くの研究がある。

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、トンネル軸方向の熱伝達・熱伝導の相互作用として、天野が坑道の気流変化に関する解を極座標系の問題¹¹⁾として、また岡田らは鉄道トンネル程度の大きさの断面に着目して直角座標系の一次元モデル⁶⁾として、それぞれ提案している。

このうち、鉄道トンネルのつらら発生領域に関して解析した岡田らは、トンネル坑口からのつらら発生領域 l とトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 の関係を図-1のトンネル内流体の温度減衰モデルに対して、式(1)のように提案している。すなわち、トンネル坑口から Z の距離にある図-1のような微小区間 dZ をトンネル内流体

* 正会員 工博 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部主幹 (〒185 東京都国分寺市光町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

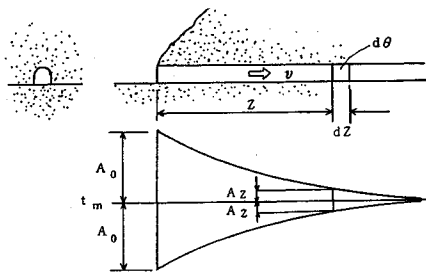


図-1 トンネル内流体(空気)の温度減衰モデル

が速度 v で流れる間に、それぞれ $d\theta$ だけ温度上昇する時の単位時間あたりの熱量 dQ_1 が、トンネル地山より熱伝達・熱伝導によって放散される熱量 dQ_2 に等しいものと仮定したエネルギーのつり合い式において、後述の式(10)のトンネル地山に対する一次元非定常熱伝達・熱伝導方程式を考慮すれば、坑口から Z の距離にあるトンネル内気温の振幅 A_Z はつぎのように与えられる⁹⁾。すなわち、

$$A_Z/A_0 = \exp(-\kappa Z \cdot \cos\xi) \dots\dots\dots (1)$$

である。ここに、 A_0 はトンネル坑口における気温の振幅であり、

$$\begin{aligned} h &= \alpha / \lambda \\ \phi &= \sqrt{\omega / 2a} \\ \eta &= 1 / \sqrt{1 + 2(\phi/h) + 2(\phi/h)^2} \\ \varepsilon &= \tan^{-1}[(\phi/h) / \{1 + (\phi/h)\}] \\ \kappa &= 2\sqrt{2}\phi\eta\lambda / \gamma r_0 c_p v \\ \xi &= \pi/4 - \varepsilon \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

である。なお、 α はトンネルの覆工表面における熱伝達率、 r_0 はトンネルの換算半径、 γ はトンネル内空気の比重、 c_p はトンネル内空気の定圧比熱である。なお、 ω は、トンネル外気温が振幅 A_0 で

$$\theta = t_m + A_0 \sin \omega t \dots\dots\dots (3)$$

で変動する場合の角速度であり、また a は温度伝導度で c_p を熱容量とすれば、

$$a = \lambda / c_p \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

なお、鉄道トンネルの覆工表面にける熱伝達率は、福地⁸⁾、雑賀¹⁵⁾、岡田⁹⁾らによる実測結果によれば、 $\alpha \approx 10 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{h}^\circ\text{C})$ を考えておけばよい⁹⁾。図-1 のモデルではこの熱伝達率を考慮し、約 80 例の鉄道トンネルを対象としたつらら発生距離の実測値から式(1)に示す気温の振幅比を求め、それらの実測値を包絡する曲線に相当する風速を推定した結果、 $v = 1.0 \text{ m/s}$ とすればよいことがわかった⁶⁾。この風速はトンネル内の実風速ではなく、式(1)で示すトンネル内気温の減衰を考慮する場合の換算風速と言うべきものである。

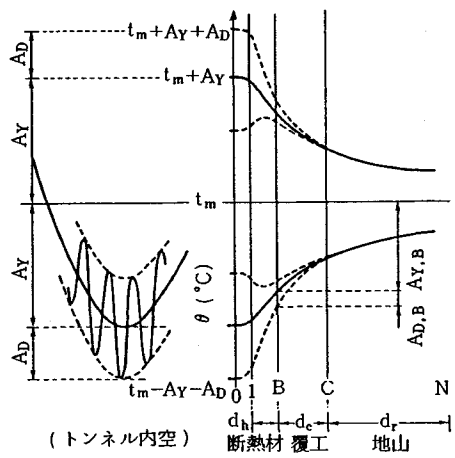


図-2 つらら防止工を有するトンネル地山モデル

(2) 断熱処理工法を採用したトンネルの温度解析モデルと覆工背面温度の無次元振幅^{2),3)}

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^{2),3),9)}。すなわち、このモデルは、図-2 に示すように、トンネル内気温と、断熱材、覆工、地山の三層の異物質から構成される²⁾。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 である。トンネル内空に接する要素については熱伝達率 α を考慮した一次元非定常熱伝達 explicit 型差分式を誘導し、この要素を除く断熱材、覆工と地山の要素については、一次元非定常熱伝導 explicit 型差分式を用いる。なお、このモデルに対する気温の入力条件としてはトンネル内気温の年周期変動と日周期変動の両者を考慮したものである。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 に収束することを仮定する。以上の諸条件を考慮して図-2 に示すトンネル横断方向の温度挙動解析モデルを構築したものである²⁾。

いま、断熱材厚、覆工厚と地山厚を図-2 に示すようにそれぞれ d_h 、 d_c と d_r で表わした時、トンネル内気温の年周期変動(年振幅 A_Y)と日周期変動(日振幅 A_D)に対して、つらら防止工として断熱材背面温度の最小値が $\theta_{B,\min} > 0^\circ\text{C}$ を満足する条件として、

$$t_m / A_Y > k_{Y,B} + \eta k_{D,B} \dots\dots\dots (5)$$

を与えている²⁾。ここに、 $A_{Y,B}$ は年周期挙動に対する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

とすれば、無次元振幅 $k_{Y,B}$, $k_{D,B}$ と η は、

$$k_{Y,B} = A_{Y,B} / A_Y \dots\dots\dots (6)$$

$$k_{D,B} = A_{D,B} / A_D \dots\dots\dots (7)$$

$$\eta = A_D / A_Y \dots\dots\dots (8)$$

である。 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 (5) 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。

なお、断熱材の厚さ d_h と無次元振幅 $k_{Y,B}$, $k_{D,B}$ の関係は、覆工コンクリートの熱伝導率 λ_c に対する断熱材の熱伝導率 λ_h あるいは地山の熱伝導率 λ_r の比、

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

$$\beta_r = \lambda_r / \lambda_c \dots\dots\dots (9)$$

で表される断熱材の無次元熱伝導率、地山の無次元熱伝導率をパラメーターに、既に求められている^{2),3)}。

(3) トンネル全長が断熱材で被覆された場合の温度減衰の簡易モデルによる推定法

前述の (1) 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若干の補正が必要である。ここでは断熱工を施工した場合のトンネル内気温の減衰に関する簡易モデルによる推定法について述べる。

つらら防止工が施工されていないトンネルにおいて覆工と地山の熱的定数が同じで、鉄道トンネル程度の断面積を有する場合には、一次元熱伝導解析が可能である⁹⁾。今、覆工表面の温度 θ_0 が式 (3) にしたがって変化する時、半無限平面 (覆工・地山) における温度 θ は、覆工表面からの距離 x に対して、

$$\theta = t_m + A_0 \exp(-x\sqrt{\omega/2a}) \cdot \sin(\omega t - x\sqrt{\omega/2a}) \dots\dots\dots (10)$$

となることは、周知のとおりである。深さ x における温度振幅を A_x とした時、覆工表面温度の温度振幅 A_0 との比は、

$$\Delta = A_x / A_0 \dots\dots\dots (11)$$

であるが、式 (10) から温度振幅比は、

$$\Delta = \exp(-x\sqrt{\omega/2a}) \dots\dots\dots (12)$$

で表される。

一方、(2) で述べたように、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いて、断熱材表面の温度振幅に対する断熱材厚さ d_h の位置の温度振幅の比は、式 (6) と式 (7) に示されるように、 k で与えられた²⁾。この時、断熱材厚さ d_h と等しい深さにおいて、これと等価な地山方向の温度減衰を有する半無限平面の

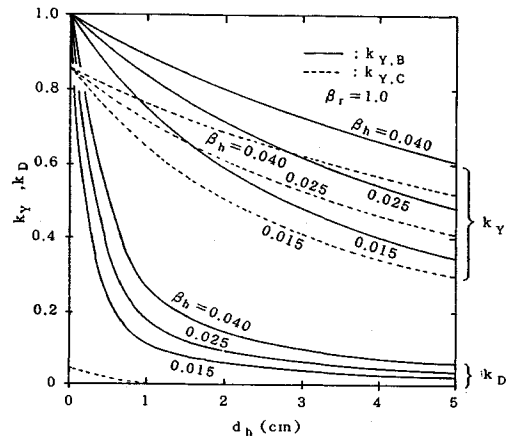


図-3 断熱材厚さ d_h と無次元振幅 k_Y , k_D の関係

温度伝導度 a_E を求めることにする。これは断熱材を通過する熱量を半無限平面のそれに近似的に換算したことになる。すなわち、

$$k = \Delta \dots\dots\dots (13)$$

の仮定から、式 (13) に式 (12) を代入して整理すれば換算温度伝導度 a_E として、

$$a_E = \omega d_h^2 / 2 (\ln k)^2 \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。

次に、この換算温度伝導度 a_E を (1) で述べたトンネル外気温の周期変動に対するトンネル内気温の減衰を示す式 (1) に代入すれば、温度減衰比が求められることになる。なお式 (1) を用いるにあたっては、まず式 (13) を式 (2) の第2式に代入し、 $k < 1$ の条件から得られる

$$\phi_E = -\ln k / d_h \dots\dots\dots (15)$$

を考慮する必要がある。

これによって断熱処理によるつらら防止工法をトンネル全長にわたって施工した時の換算されたトンネル内気温の減衰比 A_x/A_0 が、トンネル坑口からの距離・トンネル内風速比 z/v に対して求められることになる。

3. トンネル内気温の減衰解析のための入力定数と、推定値・実測値の比較

(1) 入力定数の仮定

a) 覆工と地山の熱的定数の仮定

表面断熱処理によるつらら防止工法を施工した鉄道トンネルにおいて多く用いられている断熱材の無次元熱伝導率として $\beta_h = 0.015$ を選択する。また地山の無次元熱伝導率 $\beta_r = 1.0$ とした時、式 (6) に示す断熱材背面温度の無次元振幅は、2. (2) における非定常熱伝達/熱伝導計算により、図-3 のように既に与えられている²⁾。

b) 換算温度伝導度

図-3 で、断熱材厚さ d_h に対応する断熱材背面の無

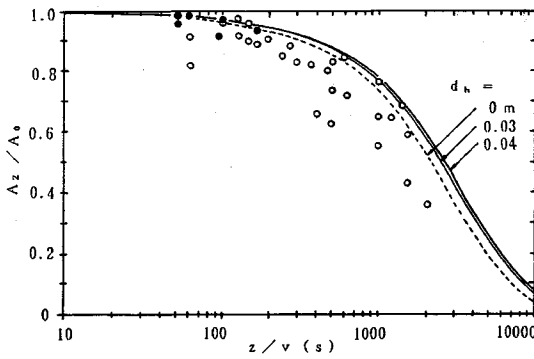


図4 年周期のトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 に対する推定値と実測値の比較

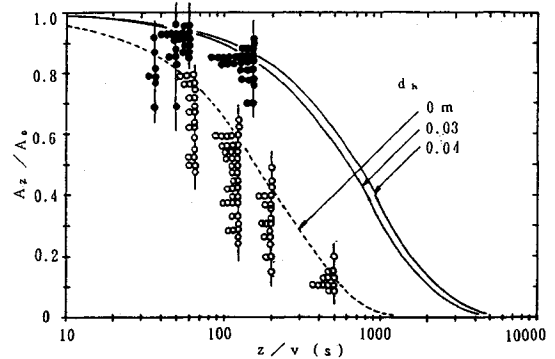


図5 日周期のトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 に対する推定値と実測値の比較

次元振幅 k_r , k_D を求めれば、式 (14) から断熱材厚さ d_h に対応した換算温度伝導度 a_E が求められる。たとえば、 $d_h=0.02, 0.03, 0.05$ m に対して年振幅の場合にはそれぞれ $a_E=5.17 \times 10^{-7}, 6.0 \times 10^{-7}, 8.15 \times 10^{-7}$ m^2/h となる。なお、 ω は 7.19×10^{-4} rad/h (364 day) である。また全部地山の場合、 $\lambda_r=1.0$ $\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$, $c_p=540$ $\text{kcal}/\text{m}^3^\circ\text{C}$ とした時、式 (4) より $a=1.85 \times 10^{-3}$ m^2/h である。

一方トンネル内気温の日周期変動の場合には換算温度伝導度は、 $d_h=0.02, 0.03, 0.05$ m に対して $a_E=6.62 \times 10^{-6}, 1.14 \times 10^{-5}, 2.14 \times 10^{-5}$ m^2/h となる。なお、 ω は 2.62×10^{-1} rad/h (1 day) である。

c) トンネル内流体 (空気) の入力定数

換算温度伝導度 a_E が得られたので、式 (14) を考慮しながら、式 (1) によって表面断熱処理によるつらら防止工法がトンネル全長に渡る時の換算されたトンネル内気温の温度減衰を計算することができるが、式 (2) におけるトンネル内流体の入力定数については、鉄道トンネルの断面の換算半径を $r_0=2.5$ m, トンネル内空気の比重量を $\gamma=1.251$ kg/m^3 , トンネル内空気の定圧比熱を $c_p=0.24$ $\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$ とし、トンネルの覆工表面における熱伝達率を $\alpha=10$ $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ とする。

またトンネル内風速の換算風速については $v=1.0$ m/s と仮定するが、これは2.(1)に示したように鉄道トンネルのつらら発生の実態調査データに基づく A_z/A_0 の包絡線がほぼこの換算風速に対応している⁹⁾からである。

(2) 推定値と実測値との比較

a) トンネル内気温の年周期応答

トンネル外気温が年周期変動する場合のトンネル内気温の減衰 A_z/A_0 (換算風速 $v=1.0$ m/s) は図4のようになる。図において断熱工が施工していない ($d_h=0$ m に相当) トンネルについては、推定値を破線で、実測値を○印で示した。また断熱工 ($d_h=0.03$ m) を施工したトンネルについてはそれぞれ実線と●印で示した。デー

タとしては岡田らが実測した初山別 (トンネル延長 $l=270$ m), 蘭法華 ($l=322$ m) と直別トンネル ($l=300$ m) に加えて、花巻 ($l=1908$ m), 黒石 ($l=2013$ m) 他の13トンネル ($l=308 \sim 9730$ m) を対象とした。前者のトンネルについては1年間にわたる日平均気温をフーリエ解析したものあるいは月平均気温から算出したものであり、後者の13トンネルについては坑口と中央 ($l/2$) における冬期間一週間毎の最高・最低気温から求めたものである。

これによれば、断熱工のない○印のトンネルのほとんどは図の破線の曲線より下の領域にあり、この曲線は包絡線と考えても良さそうである。年周期の場合断熱工トンネルの推定値はそれがないトンネルの応答値とほとんど変わらないことを示しており、断熱工トンネルに対しても、推定値である実線より下の領域に●印の実測値がある。したがって、換算風速 $v=1.0$ m/s の推定包絡線は実測値を十分満足するものと言えそうである。

b) トンネル内気温の日周期応答

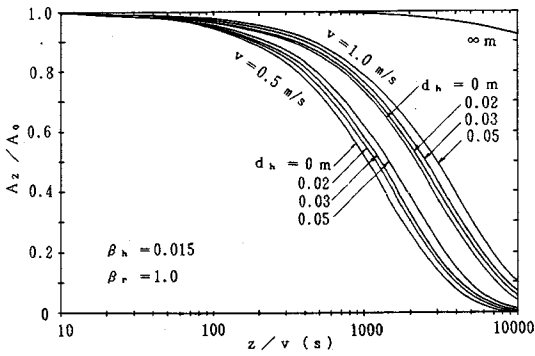
トンネル外気温の日周期変動に対する減衰比 A_z/A_0 は図5のようである。図には、断熱工が施工していないトンネルについては推定値を破線で、蘭法華、花巻と黒石トンネルの実測値を○印で示した。また断熱工 ($d_h=0.03$ m) を施工したトンネルについては推定値を実線で、初山別、直別トンネルの実測値を●印で示した、これらの実測値は連続したある期間の日最高・最低気温から算出したものである。

日周期の場合、減衰比 A_z/A_0 の推定値は断熱工の有無で大きく変わるが、実測値はその傾向をよく表わしており、いずれの推定曲線もほぼ実測値を満足する包絡線になっていると言えそうである。

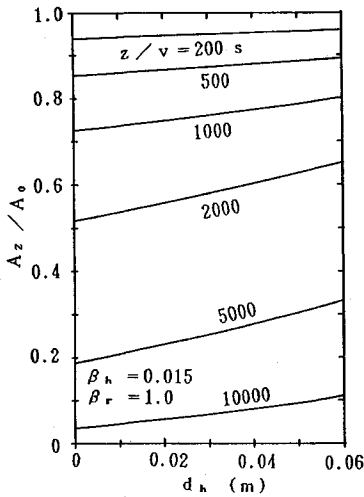
4. トンネル内気温の温度減衰解析

(1) 温度減衰に及ぼすトンネル延長方向の距離の影響

トンネル外気温の周期変動に対するトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 の推定値は、前述の3.(2)でも述べたよ



図—6 年周期のトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 ($\beta_r=1.0$, $\beta_h=0.015$)



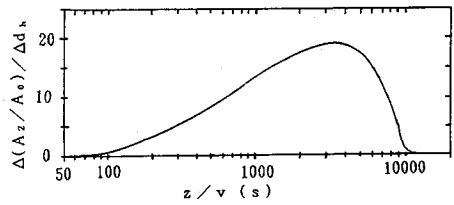
図—7 年周期の温度減衰比 A_z/A_0 と断熱材厚さ d_h の関係

うに、トンネル内風速の換算風速を $v=1.0$ m/s としておけば実測値の包絡線をほぼ表すことができることがわかった。しかしここでは換算風速の影響も併せて考察するために $v=1.0$ と 0.5 m/s について、断熱材の厚さ d_h をパラメータに描くと図—6 のようになる。これによれば v が大きくなれば A_z/A_0 の減衰の程度は小さくなる。

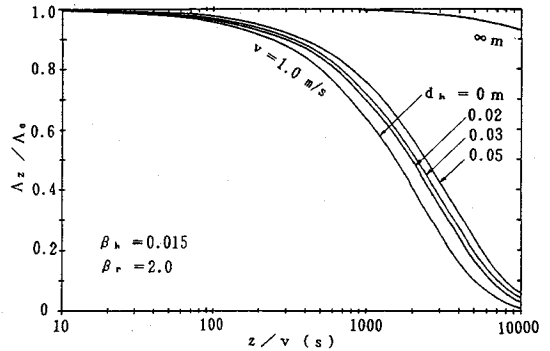
図—6 の $d_h=0$ は断熱工を施工していない一般のトンネルに相当するが、トンネル延長方向の距離と風速の比 z/v が大きくなると減衰比 A_z/A_0 は小さくなる傾向を示す。しかも、断熱材厚さ d_h が厚くなるにしたがって A_z/A_0 が大きくなる。また d_h が ∞ になると振幅減衰は非常に小さくなることがわかる。

(2) 温度減衰に及ぼす断熱材厚さの影響

前述の図—6 に基づき、断熱材厚さ d_h に対する A_z/A_0 の関係を描くと図—7 のようになる。坑口からの距離と風速の比 z/v が小さいうちは温度減衰は小さく (A_z/A_0 は大きく)、かつ断熱材厚さに対する温度減衰の効果も小さいが、 z/v が大きくなるにつれて A_z/A_0 が低下すると共に、 d_h が厚くなるにつれて d_h の影響が大



図—8 温度減衰比の増分 $\Delta(A_z/A_0)/\Delta d_h$ と距離・風速比 z/v の関係



図—9 年周期のトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 ($\beta_r=2.0$, $\beta_h=0.015$)

きくなることを示している。しかしこの効果は z/v がさらに大きくなり、 $z/v > 1000$ s 程度になるとあまり効いてこない。この様子は図—8 の $\Delta(A_z/A_0)/\Delta d_h$ が $z/v=3000$ s 付近で最大値をとることからも理解でき、トンネル内気温の温度減衰に及ぼす断熱工の影響は坑口付近あるいは十分奥に入った所ではそれほど大きくないので、そうした領域ではトンネル内気温の減衰を求める場合に断熱工の影響を考慮しなくてもよいと言えそうである。

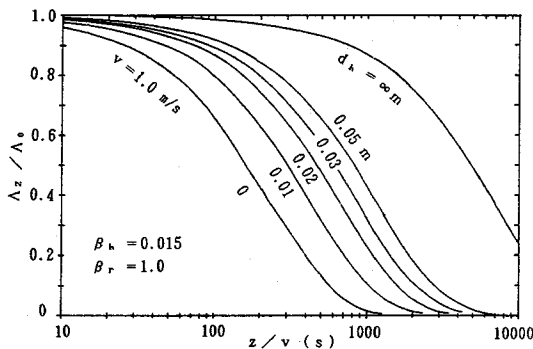
(3) 地山の熱伝導率の影響

前述の (1) と (2) は式 (9) に示す地山の無次元熱伝導率が $\beta_r=1$ に対するものであったが、ここでは $\beta_r=2$ の場合について計算し、 β_r の影響について考察する。

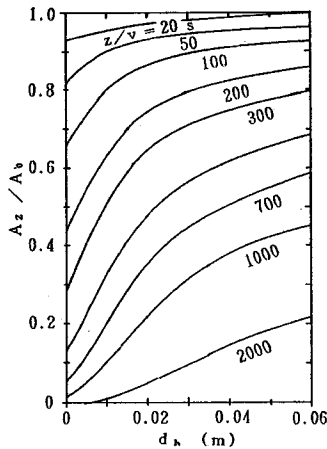
なお半無限平面における地山の熱伝導率は $\lambda_r=2.0$ kcal/mh°C で、その熱容量を $c_p=540$ kcal/m³°C としたので、温度伝導度は式 (4) より $a=3.70 \times 10^{-3}$ m²/h となる。

一方断熱工を有するトンネル地山モデルの非定常熱伝導計算から式 (14) により換算温度伝導度 a_E を求めれば、断熱材厚さ $d_h=0.02, 0.03, 0.05$ m に対して、それぞれ $a_E=5.16 \times 10^{-7}, 6.00 \times 10^{-7}, 8.15 \times 10^{-7}$ m²/h である。これらの値に対して、式 (1) からトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 を描くと図—9 のようになる。

図は $v=1.0$ m/s の場合の結果を示したものであるが、 β_r が大きい方が地山からの流入熱量が大きくなるために A_z/A_0 はいずれの z/v に対しても小さくなることが



図一10 日周期のトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 ($\beta_r=1.0$, $\beta_h=0.015$)



図一11 日周期の温度減衰比 A_z/A_0 と断熱厚さ d_h の関係

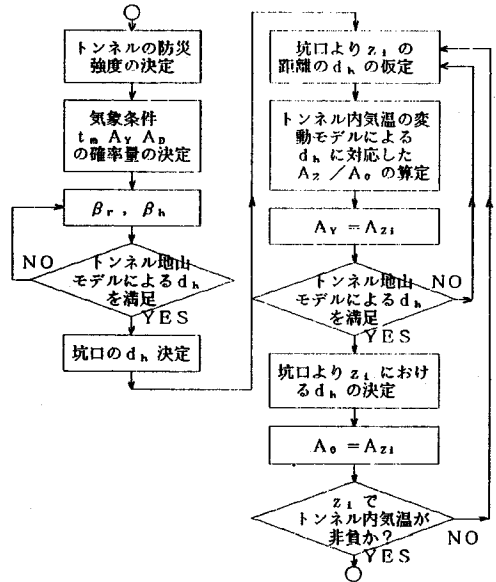
わかる。

(4) トンネル内気温の日振幅の影響

前述の3.(1)b)に基づき、トンネル内気温の日周期変動に対するトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 を描くと図一10のようになるが、年周期の図一6と比較すると z/v は1オーダー低下し、トンネル外気温の日周期の温度変動は年周期ほどはトンネルの奥の方に進入しないことがわかる。しかし日周期の場合には断熱材の厚さの影響は大きく、図一11のように z/v がおよそ200~1000sの領域で顕著である。これは断熱材厚さ d_h が小さい時には日振幅挙動に対する流入熱量が大きく影響するためであると考えられる。

5. トンネル全長に断熱工がある場合のトンネル内気温の減衰の推定と断熱材厚さの決定に関する簡易手法

トンネルの全長にわたって断熱つらら防止工を施工した時のトンネル内気温の減衰に関する簡易モデルを2.(3)で示したが、これを用いればトンネル内気温の減衰に応じてつらら防止工の断熱材厚さをトンネルの奥に



図一12 トンネル全長に断熱工が施工された場合のトンネル内気温の減衰の推定と断熱材厚さの決定に関するフロー

行くにしたがって順次遞減する設計が可能となる。そのフローを示せば図一12のようになる。

すなわち、まずトンネルの防災強度を決定し、それにしたがうトンネル外気温の気象条件 t_m, A_r, A_b を求め²⁾、さらに地山と断熱材の無次元熱伝導率 β_r, β_h を仮定すれば、2.(2)で述べた従来提案されている手法^{2),3),5)}によりトンネル地山モデルによる解析結果から合理的に断熱材厚さ d_h を算定できる。これは坑口における断熱材厚さを決定したことになる。

トンネルの奥に行けばトンネル内気温の振幅は低下するから、坑口より z_1 の距離における断熱材厚さ d_{h1} を坑口のそれよりも薄く仮定することができるが、坑口の断熱厚さ d_h の条件のもとで2.(3)で提案した簡易推定法により、トンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 を求める。たとえば、トンネル外気温の年振幅挙動については断熱材の無次元熱伝導率 $\beta_h=0.015$ の場合、地山の無次元熱伝導率 $\beta_r=1.0$ に対しては図一6より、 $\beta_r=2.0$ に対しては図一9より求めることができ、さらに日振幅挙動については図一10などにより、断熱材厚さ d_h に対応した温度振幅の減衰比 A_z/A_0 を決定できる。

こうして得られた距離 z_1 における振幅 A_{z1} を用いて、2.(2)のトンネル地山モデルから坑口より z_1 以奥に施工する断熱材厚さ d_{h1} を決定する。次いで、 z_1 の位置の温度振幅 A_{z1} を改めて A_0 とおいて順次 z_i よりさらに奥の次の区間 z_i に対する断熱材厚さ d_{hi} を低減させることになる。そして減衰したトンネル内気温が正になればつらら防止工は不必要になるので、そこで計算を打ち切ることになる。

6. 結 論

(1) 断熱材・覆工・地山の三層系の非定常熱伝達/熱伝導モデルと、トンネル外気温の周期変動によるトンネル内気温の減衰モデルとを、換算温度伝導度の概念を導入して結び付け、トンネルの全長にわたって断熱処理によるつらら防止工を施工した時のトンネル内気温の減衰を近似的に求める簡易モデルを提案した。このモデルを用いたトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 の推定値は実測値をほぼ満足する包絡線を与えるものであった。

(2) 気温の年周期変動に対する A_z/A_0 は、 $\beta_r=1.0$, $\beta_h=0.015$ の時の坑口からの距離・風速比 z/v に対して断熱材厚さ d_h をパラメーターに図-6のように、与えられる。 $\beta_r=2.0$ については図-9に示される。 β_r が小さいほど A_z/A_0 は大きくなる。かつ d_h と v が厚くなると A_z/A_0 が大きくなってトンネル外気温の温度振幅がトンネルの奥の方まで伝達されることになる。

(3) 気温の日振幅挙動に対する A_z/A_0 は $\beta_r=1.0$, $\beta_h=0.015$ について図-10に示される。これを年周期と比較すると、 z/v は1オーダー低下して、年周期ほどはトンネル内気温の日変化はトンネルの奥へは伝達されないが、断熱材の厚さの影響は大きくなる。

(4) A_z/A_0 に及ぼす d_h の影響は図-7のようになる。坑口付近と坑口より十分奥に入った領域では小さく、トンネル内気温の減衰を求める場合には断熱材の影響を考慮しなくてもよい。なお d_h の影響が大きくなるのは年周期の場合 z/v が約3000 s, 日周期の場合200~1000 s 付近である。

(5) トンネル全長に断熱工を施工せざるをえない気象条件のトンネルにおいては、図-12に示したフローにしたがって、断熱材厚さを考慮しながらトンネル内気温の減衰の推定を行えば、坑口からトンネルの奥に行くにしたがって断熱材厚さを順次合理的に低減することが可能である。

7. あとがき

断熱処理によるつらら防止工は寒冷地の多くの鉄道トンネルで施工されている^{1)-6), 9), 14)}が、それらはトンネル延長方向には局所的に施工されるのが一般的であった。そうした場合には、既報のトンネル内気温の減衰モデル⁶⁾とつらら防止工を有するトンネル地山の非定常熱伝達・熱伝導モデルの解析結果^{2), 3)}を用いて合理的に断熱工の設計をすることができる。

しかし近年トンネル保守の合理化に伴い、トンネル全長にわたって断熱つらら防止工を施工することが度々計

画されるようになった。当論文は、断熱工を通過する熱量に着目した換算温度伝導度を定義し、これを用いて上述の両モデルの解析結果を近似的に結合して、断熱工を施工したトンネル内気温の温度減衰の推定と断熱材厚さの決定に関する簡易な計算手法を提案したものである。

この解析結果は鉄道トンネルの実測値の傾向をほぼ満足するものであることが確認されたので、この手法を用いれば、トンネル坑口から奥に行くにしたがって、つらら防止工法の設計に必要な断熱材厚さを順次低減させることが可能となり、実用的で経済的なトンネル設計ができるようになるものと考えられる。

参 考 文 献

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 雑賀忠昭・森田敏男・斉藤孝基，ほか：地下鉄道の温熱環境の解析，空気調和・衛生工学，Vol. 47, No. 6, 1973. (1991.1.10 受付)

APPROXIMATE ESTIMATING METHOD FOR NARROWING AMPLITUDE OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE AND HEAT INSULATOR DEPTH IN TUNNEL WITH ADIABATIC ICICLE PREVENTION

Katsuya OKADA and Yoshiji MATSUMOTO

An adiabatic icicle prevention work has been provided in many tunnels in cold climate where icicles and side-ices grow. This paper deals with an approximate estimation of narrowing amplitudes of atmospheric temperature and depth of heat insulator in a tunnel with an adiabatic icicle prevention work. A fluctuation model of a cyclic atmospheric temperature change in a tunnel is in an approximation combined with a non-steady state heat convection/conduction model including heat insulator, tunnel lining and ground. Thus even if an adiabatic icicle prevention work is provided over all the length of tunnel, the atmospheric temperature fluctuation can be reasonably estimated and the heat insulator depth can be economically decreased.
