

既設トンネルの外部断熱材の厚さの算定について

A SIMPLIFIED EQUATION FOR ESTIMATING THICKNESS
OF HEAT INSULATOR IN EXISTING TUNNELS

三上 隆*, 岡田正之**, 芳村仁***

Takashi MIKAMI, Masayuki OKADA and Jin Yoshimura

*工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

**北海道開発コンサルタント(株) 交通施設部 (〒062 札幌市豊平区月寒東4条9丁目)

***工博 釧路工業高等専門学校長 (〒084 釧路市大楽毛西2丁目32番1号)

Icicles and side wall ices in road tunnels became a problem for transportation and road maintenance. Recently, a heat insulator for icicle prevention at the lining surface has been developed in the existing tunnels. This paper presents a simple practical equation for estimating the thickness of heat insulator. The equation is obtained by using a one-dimensional tunnel-ground model and a non-steady periodic thermal analysis. By using the equation presented, we can reasonably determine the optimum material of heat insulator and its optimum thickness. Several examples are given to demonstrate the equation and to investigate the effect of various parameters on the solution.

Key words: road tunnel, heat insulator, design, heat conduction

1. はじめに

気象条件の厳しい地点や標高の高い地点に建設される道路トンネルは、つららや側氷の発達、地山凍結による覆工の変形等、凍害を受ける危険性が大きい。例えば、北海道では供用中の道路トンネルのうち、何らかの変状が認められるトンネルはいずれも矢板工法で施工されたものであり、全トンネル数の約半数を占めている¹⁾。そのため、冬期間の交通確保および維持管理の労力の軽減を目的に、トンネル内空側に断熱材を設置する、いわゆる外部断熱工法が凍害防止の対策工法の一つとして採用されるようになってきた。

既設トンネルの断熱材の材料の選定や厚さの算定に対する代表的な取組みには、岡田らの²⁾鉄道トンネルに関するものがある。そこでは、トンネル・地山系を一次元モデルで表し、トンネル内空気温が周期的変動するものと仮定し、差分法による非定常熱伝導解析に基づき断熱材の設計を行っているが、トンネル・地山系の温度分布は、覆工の熱容量、熱伝導率、厚さ、および地山の熱容量、熱伝導率等の多くのパラメーターに影響を受けるため、相当量の計算を強いられる。

本研究では、既に著者らが発表した³⁾新設トンネルに用いられる内部断熱工法（一次覆工と二次覆工の間に断熱材が施工される）の断熱材の厚さの算定法と同様な主旨に立ち、地山の凍結防止およびつらら防止を目的に、外部断熱材の設計（材料の選定や厚さの決定）が比較的簡単に行える実用的な温度算定式を準定常（周期的）熱伝導解析に基づいて提示し、さらに、トンネル・地山系の

温度特性を支配する種々パラメーター（断熱材の熱伝導率、熱容量、厚さ等）の影響を明らかにする。

2. 基礎方程式

トンネル・地山系の温度挙動の解析を行うために、図-1に示すような断熱材、覆工、地山の三つの要素から成る一次元モデルを用いる。各要素には、断熱材から順次1, 2, 3と番号を付し、各要素の長さを L_n 、熱伝導率を k_n 、熱容量を $(\rho c)_n$ および温度を U_n で表す（ここで、 $n=1\sim 3$ である）。なお地山長さの影響は、半無限体として扱ってもトンネル・地山系の温度分布に大きな影響を与えないので、ここでは地山長さを無限大($L_3 \rightarrow \infty$)と仮定する³⁾。

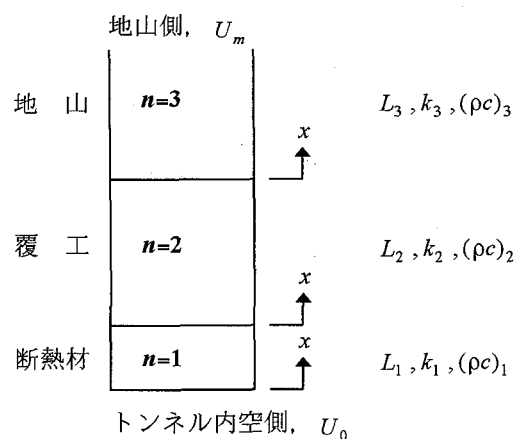


図-1 トンネル・地山モデル

さて各要素の位置座標を x 、時間を t で表せば、各要素の温度分布 $U(x,t)$ を記述する熱伝導微分方程式は以下となる。

$$\frac{\partial U_n}{\partial t} = a_n^2 \frac{\partial^2 U_n}{\partial x^2} \quad (n=1\sim 3) \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{ここで,} \quad a_n^2 = k_n / (\rho c)_n \quad \dots\dots (2)$$

であり温度伝播率を表す。

各要素の接触面では、温度と通過熱量に関して以下の連続条件が成立する。

$$U_n(L_n, t) = U_{n+1}(0, t) \quad (n=1, 2) \quad \dots\dots (3.a)$$

$$k_n \frac{\partial U_n}{\partial x} \Big|_{x=L_n} = k_{n+1} \frac{\partial U_{n+1}}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (n=1, 2) \quad \dots\dots (3.b)$$

トンネル内空の温度は一般的には不規則に変動するが、基本的には地球自転による日変化および公転による年変化の周期的変動としてとらえられ、このうち日変化のトンネル・地山系の温度特性に与える影響は小さくてほとんど無視できるので^{2, 3)}、本研究では年変化のみを考慮することにする。また、地中温度は、地中のある深さに達すると変化が認められない不易層が存在し、地温はその地域の年平均気温に等しい一定値になることが知られている。なお、土被りの浅いトンネルにおいては、外気温の影響が無視し得なくなる恐れもある。しかし、地質条件によっても異なるが、地中温度の年較差が 0.1°C 以下となる深さは、普通は10m位であるとの報告がある⁶⁾。

さらに、トンネル内空側とトンネル壁面間の熱のやりとりは、熱伝達を考慮する必要があるが、温度算定式を簡便な形で求めること、および熱伝達を無視すれば算定温度は断熱材の設計に対しては、安全側になることから考えないことにする³⁾。

従って、トンネル内空側と地山側で規定される温度に関する境界条件は、以下となる。

$$U_3(\infty, t) = U_m \quad \dots\dots (4.a)$$

$$U_1(0, t) = U_0 \quad \dots\dots (4.b)$$

ここで、 U_m = 年平均気温、 U_0 はトンネル内空側の温度変動を表し次式で与えられる。

$$U_0 = U_m + A_T \sin(pt) \quad \dots\dots (5)$$

ただし、 A_T = 年振幅であり、 $p = 2\pi / (365 \times 24)$ は年変化の角速度を表す。

3. 基礎方程式の解

連続条件式(3)と境界条件式(4)に対する熱伝導方程式(1)の解は、定常解 $U_{n1}(x, t) = U_m$ および周期的変動成分 $A_T \sin(pt)$ に対する準定常解 $U_{n2}(x, t)$ の和で与えられる。ここでは、記述の容易性から単位の年振幅($A_T = 1$)に対する解 $U_{n2}(x, t)$ を求めることにする。

式(1)の一般解は次式となる⁴⁾。

$$U_{n2}(x, t) = \left[A_n \exp \left\{ -(1+i)x \sqrt{(p/2)/a_n} \right\} + B_n \exp \left\{ (1+i)x \sqrt{(p/2)/a_n} \right\} \right] \exp(ipt) \quad (n=1\sim 3) \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 A_n と B_n は複素定数、 $i = \sqrt{-1}$ であり、地山を半無限と扱うので $B_3 = 0$ である。

5個の未定複素定数を文献3)に倣い求め、式(6)に代入すれば、トンネル・地山系の解は以下のように整理できる。ここで、

$$\delta_n = L_n / a_n, \quad \beta_n = a_n / k_n, \quad \beta_y = \beta_i / \beta_j$$

$$g_1 = \delta_1 + \delta_2, \quad g_2 = \delta_1 - \delta_2$$

なる諸量を導入すれば、

1) 断熱材部分について($n=1$):

$$U_{12}(x, t) = (Af_2 - Bf_1) / (A^2 + B^2) \quad \dots\dots (7)$$

ここで、

$$f_1 = R_1 \exp\{h_1(x)\} \cos\{pt + h_1(x)\} + R_2 \exp\{h_2(x)\} \cos\{pt + h_2(x)\} + R_3 \exp\{-h_2(x)\} \cos\{pt - h_2(x)\} + R_4 \exp\{-h_1(x)\} \cos\{pt - h_1(x)\} \quad \dots\dots (8.a)$$

$$f_2 = R_1 \exp\{h_1(x)\} \sin\{pt + h_1(x)\} + R_2 \exp\{h_2(x)\} \sin\{pt + h_2(x)\} + R_3 \exp\{-h_2(x)\} \sin\{pt - h_2(x)\} + R_4 \exp\{-h_1(x)\} \sin\{pt - h_1(x)\} \quad \dots\dots (8.b)$$

ただし、

$$R_1 = (1 + \beta_{12} + \beta_{23} + \beta_{13}) / 4$$

$$R_2 = (1 - \beta_{12} - \beta_{23} + \beta_{13}) / 4$$

$$R_3 = (1 - \beta_{12} + \beta_{23} - \beta_{13}) / 4$$

$$R_4 = (1 + \beta_{12} - \beta_{23} + \beta_{13}) / 4$$

$$h_1(x) = (g_1 - x/a_1) \sqrt{p/2}$$

$$h_2(x) = (g_2 - x/a_1) \sqrt{p/2}$$

なお、式(7)に現れる A および B は、後述の式(13)で与えられる。

2) 覆工部分について($n=2$):

$$U_{22}(x, t) = (Af_4 - Bf_3) / (A^2 + B^2) \quad \dots\dots (9)$$

ここで、

$$f_3 = R_5 \exp\{h_3(x)\} \cos\{pt + h_3(x)\} + R_6 \exp\{-h_3(x)\} \cos\{pt - h_3(x)\} \quad \dots\dots (10.a)$$

$$f_4 = R_5 \exp\{h_3(x)\} \sin\{pt + h_3(x)\} + R_6 \exp\{-h_3(x)\} \sin\{pt - h_3(x)\} \quad \dots\dots (10.b)$$

ただし、

$$R_5 = (1 + \beta_{23}) / 2, \quad R_6 = (1 - \beta_{23}) / 2$$

$$h_3(x) = (\delta_2 - x/a_2) \sqrt{p/2}$$

3) 地山部分について($n=3$):

$$U_{32}(x, t) = (Af_6 - Bf_5) / (A^2 + B^2) \quad \dots\dots (11)$$

ここで、

$$f_5 = \exp\{h_4(x)\} \cos\{pt + h_4(x)\} \quad \dots\dots (12.a)$$

$$f_6 = \exp\{h_4(x)\} \sin\{pt + h_4(x)\} \quad \dots\dots (12.b)$$

ただし、

$$h_4(x) = (-x/a_3)\sqrt{p/2}$$

なお、式(7)、(9)および式(11)に現れる A と B は次式で与えられる。

$$A = \{R_1 \exp(d_1) + R_4 \exp(-d_1)\} \cos(d_1) + \{R_2 \exp(d_2) + R_3 \exp(-d_2)\} \cos(d_2) \quad \dots\dots\dots (13.a)$$

$$B = \{R_1 \exp(d_1) - R_4 \exp(-d_1)\} \sin(d_1) + \{R_2 \exp(d_2) - R_3 \exp(-d_2)\} \sin(d_2) \quad \dots\dots\dots (13.b)$$

ただし、

$$d_1 = g_1 \sqrt{p/2}, \quad d_2 = g_2 \sqrt{p/2}$$

以上の関係式を用いれば、トンネル・地山系の任意の位置における温度挙動の検討が可能であり、また、角速度を $p = 2\pi/24$ とすれば、日変化の場合にも適用できる。また、断熱材を用いない状態のトンネル・地山系の温度挙動を知りたい場合には以下のように扱えばよい。すなわち、実際の覆工厚を L と記せば、上式において例えば $L_1 = L_2 = L/2$, $k_2 = k_1$, $(\rho c)_2 = (\rho c)_1$ と置けばよい。

4. 実用的な温度算定式

ここでは、地山の凍結防止およびつらら防止を目的にした温度算定式を導く。

断熱材を地山の凍結防止のために使用するならば、地山と覆工の境界における温度(以下、覆工背面温度と称する)が次式を満たすように、断熱材の材質、厚さを決めればよい。

$$U_2(L_2, t) = U_m - A_T \cdot \text{Max}(UU_2) \geq 0^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (14.a)$$

同様に、トンネル内空側に生じるつららを防止するには、覆工と断熱材の境界における温度(以下、断熱材背面温度と称する)が次式を満足するようにすればよい。

$$U_1(L_1, t) = U_m - A_T \cdot \text{Max}(UU_1) \geq 0^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (14.b)$$

従って断熱材の設計は、その厚さおよび材料を試行錯誤的に変化させて式(14)を満たすように行われる。

なお、式(14)に現れる $\text{Max}(UU_2)$ および $\text{Max}(UU_1)$ はそれぞれ、年振幅 $A_T = 1$ としたときの覆工背面温度の振幅および断熱材背面温度の振幅である。前者は式(7)または式(9) $[U_{12}(L_1, t) = U_{22}(0, t)]$ が成立、後者は式(9)または式(11) $[U_{22}(L_2, t) = U_{32}(0, t)]$ の温度応答の最大値であり、この値が小さければ小さいほど、冬期間においては地山側からトンネル内空側に向かって流れる熱を断熱することになるので、トンネル・地山系の断熱特性を表す指標となる。

さて、 $\text{Max}(UU_2)$ および $\text{Max}(UU_1)$ を得るには、式(7)、式(9)等を用いて $0 \leq t \leq 365 \times 24(\text{h})$ における温度履歴の最大値を見出す必要があり、このままでは実務者が設計を行うには不便である。

そこで前報³⁾と同様に、断熱材の設計が電卓を用いた計算ででき、またトンネル・地山系の温度特性を理解するのに有益となるように、 $\text{Max}(UU_2)$ 及び $\text{Max}(UU_1)$ を陽な形で求めることにする。

すなわち、式(9)および式(11)に現れる初等関数(三角

関数と指数関数)を2次のべき級数で表し、熱容量が他と比較して小さい断熱材の熱容量 $(\rho c)_1$ を零とすれば、 $\text{Max}(UU_2)$ および $\text{Max}(UU_1)$ は以下のように得られる。

$$\text{Max}(UU_2) = 1/\sqrt{(C^2 + D^2)} \quad \dots\dots\dots (15.a)$$

$$\text{Max}(UU_1) = \sqrt{(E^2 + F^2)/(C^2 + D^2)} \quad \dots\dots\dots (15.b)$$

ここで、

$$C = 1 + \lambda_1 \quad \dots\dots\dots (16.a)$$

$$D = \lambda_1 + \mu_1 \quad \dots\dots\dots (16.b)$$

$$E = 1 + \lambda_2 \quad \dots\dots\dots (17.a)$$

$$F = \lambda_2 + \mu_2 \quad \dots\dots\dots (17.b)$$

さらに、

$$\lambda_1 = (L_1/k_1 + L_2/k_2)\sqrt{pk_3(\rho c)_3/2} \quad \dots\dots\dots (18.a)$$

$$\mu_1 = \{L_2/(2k_2) + L_1/k_1\}pL_2(\rho c)_2 \quad \dots\dots\dots (18.b)$$

$$\lambda_2 = (L_2/k_2)\sqrt{pk_3(\rho c)_3/2} \quad \dots\dots\dots (19.a)$$

$$\mu_2 = \{L_2/(2k_2)\}pL_2(\rho c)_2 \quad \dots\dots\dots (19.b)$$

なお、断熱材施工がなされていない既設トンネルの覆工背面温度を評価したい場合にも式(14.a)を用いることができるが、ただし $\text{Max}(UU_2)$ は次式によらなければならない。

$$\text{Max}(UU_2) = 1/\sqrt{X} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし、

$$X = 1 + 2(L_2/k_2)\sqrt{pk_3(\rho c)_3/2} + (L_2/k_2)^2 pk_3(\rho c)_3 \quad \dots\dots\dots (21)$$

5. 数値解析

ここでは、3.で求めた解析解と4.で述べた近似算定式を用いて、算定式の精度や各パラメータの温度振幅に与える影響を検討する。なお、トンネル・地山系の標準諸元を以下のように設定し、特定のパラメータの影響をみるときは、そのパラメータのみを変化させ、他のそれには標準諸元を用いた。

断熱材 : $k_1 = 0.02 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} (= 0.02 \times 1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C})$

$(\rho c)_1 = 20 \text{ kcal/m}^3\text{C} (= 20 \times 4.19 \text{ kJ/m}^3\text{C})$

$L_1 = 0.05 \text{ m}$

覆工 : $k_2 = 1$, $(\rho c)_2 = 400$, $L_2 = 0.5$

地山 : $k_3 = 1$, $(\rho c)_3 = 500$

5.1 トンネル・地山系の温度履歴

図-2(a)は、トンネル内空側の年周期変動 $\sin(pt)$ (ただし、年振幅 $A_T = 1$)に対する、断熱材背面温度および覆工背面温度の経時変化を示したものである。これによれば、断熱材背面温度はトンネル内空側の年周期変動に類似な挙動を示すが、覆工背面温度は温度振幅が減少するとともに、位相の遅れが認められる。

図-2(b)は参考のため、日周期変化 $\sin(pt)$ (ただし、角速度 $p = 2\pi/24$)に対する経時変化を示したものである。これによれば、トンネル内空気温度の地山方向への影響が非常に小さくなり無視できる程度に減衰するのがわ

かる（値は年変化の一桁から二桁落ちである）。

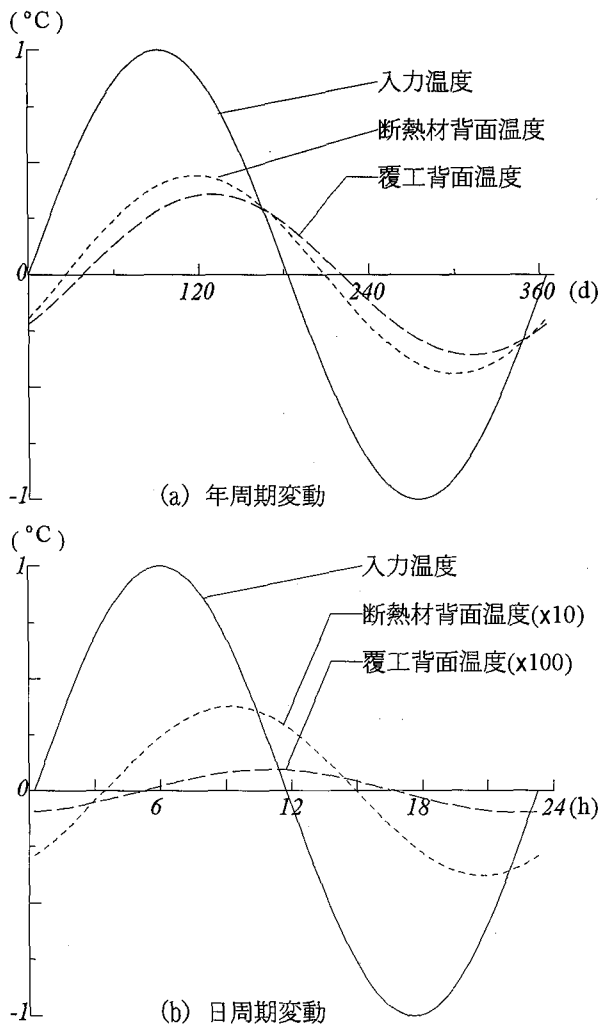


図-2 周期変動に対するトンネル・地山系の温度履歴

5. 2 温度算定式の精度

上で設定したパラメータ値を標準諸元にし、着目したパラメータのほぼ上限値、中間値および下限値に対する、算定式(15)による $\text{Max}(UU_2)$ と $\text{Max}(UU_1)$ 、および式(9)の $U_{22}(0,t)$ と式(11)による $U_{32}(0,t)$ の結果（厳密解と称する）の比較を表-1(a)から1(f)に示す。なお各表で、ブロック内の二つの数値の上段は厳密解、下段のそれは算定式による結果である。この中で表-1(a)は、断熱材の熱容量 $(\rho c)_1$ の影響を考慮した厳密解と、 $(\rho c)_1 = 0$ として導いた算定式の結果を比較したもので、断熱材の熱容量の影響を無視した算定式の妥当性を示している。各表は、いずれのパラメータの場合も算定式の結果は厳密解によく一致し（厳密解との相対誤差で1%未満）、算定式の精度は十分であると判断できる。

5. 3 各種パラメータの温度振幅 $\text{Max}(UU_1)$ と $\text{Max}(UU_2)$ に与える影響

ここでは、覆工の材料であるコンクリートの熱的定数 $(k_2, (\rho c)_2)$ がほぼ一定と判断できるので、これを除い

表-1 温度算定式の精度

(a) 断熱材の熱容量 $(\rho c)_1$

$(\rho c)_1$	断熱材背面温度 $\text{Max}(UU_1)$	覆工背面温度 $\text{Max}(UU_2)$
10	0.440	0.357
	0.439	0.355
20	0.440	0.357
	0.439	0.355
80	0.440	0.357
	0.439	0.355

(b) 断熱材の厚さ L_1

L_1	$\text{Max}(UU_1)$	$\text{Max}(UU_2)$
0.01	0.816	0.661
	0.814	0.658
0.05	0.440	0.357
	0.439	0.355
0.10	0.273	0.221
	0.273	0.220

(c) 断熱材の熱伝導率 k_1

k_1	$\text{Max}(UU_1)$	$\text{Max}(UU_2)$
0.01	0.273	0.221
	0.273	0.220
0.03	0.549	0.445
	0.548	0.443
0.05	0.679	0.550
	0.677	0.547

(d) 覆工厚さ L_2

L_2	$\text{Max}(UU_1)$	$\text{Max}(UU_2)$
0.4	0.439	0.370
	0.438	0.370
0.5	0.440	0.357
	0.439	0.355
0.6	0.442	0.343
	0.441	0.342

(e) 地山の熱容量 $(\rho c)_3$

$(\rho c)_3$	$\text{Max}(UU_1)$	$\text{Max}(UU_2)$
100	0.602	0.546
	0.599	0.543
500	0.440	0.357
	0.439	0.355
800	0.397	0.305
	0.397	0.304

(f) 地山の熱伝導率 k_3

k_3	$\text{Max}(UU_1)$	$\text{Max}(UU_2)$
0.5	0.509	0.437
	0.507	0.435
1.0	0.440	0.357
	0.439	0.355
4.0	0.325	0.218
	0.325	0.217

た他のパラメーターの温度振幅 $\text{Max}(UU_2)$, $\text{Max}(UU_1)$ に及ぼす影響を調べてみる。なお以下に示す図で、実線

は $\text{Max}(UU_1)$ を、点線は $\text{Max}(UU_2)$ を表す。

1) 断熱材の熱伝導率 k_1 の影響

断熱材の熱伝導率はトンネル・地山系を構成する他の要素のそれに比べて極めて小さいのが特徴である⁵⁾。

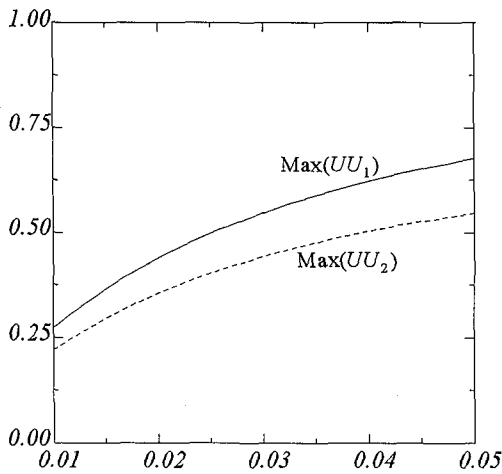
図-3(a)は $k_1 = 0.01 \sim 0.05 (\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C})$ の範囲で、温度振幅 $\text{Max}(UU_1)$ と $\text{Max}(UU_2)$ に与える影響をみたものである。これによれば、温度振幅は熱伝導率の増加とともに増加し、断熱効果が悪くなる。

2) 断熱材の厚さ L_1 の影響

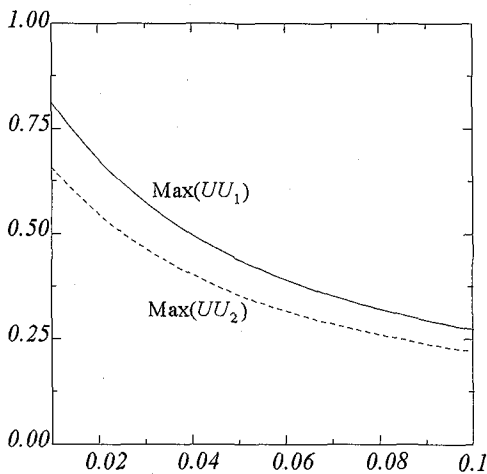
図-3(b)は、断熱材厚さを $L_1 = 0.01 \sim 0.1 (\text{m})$ の範囲で変化させたものである。温度振幅は L_1 の増加とともに反比例的に減少し断熱効果がよくなるが、その効率は厚さの増加による温度振幅の減少率が小さくなるので低下することもある。

3) 覆工の厚さ L_2 の影響

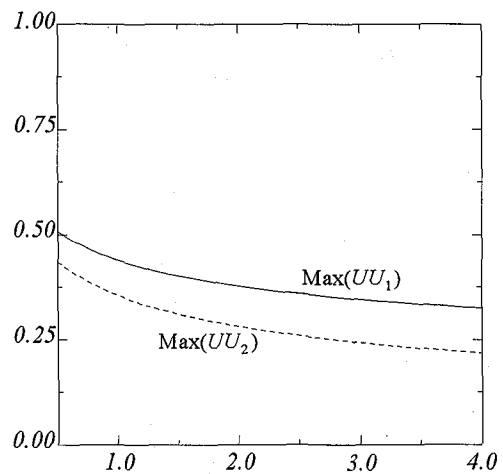
図-3(c)は、 $L_2 = 0.1 \sim 1.0 (\text{m})$ の範囲で温度振幅に与え



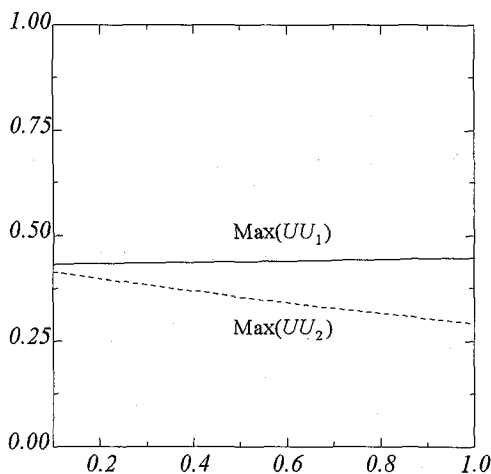
(a) 断熱材の熱伝導率 k_1



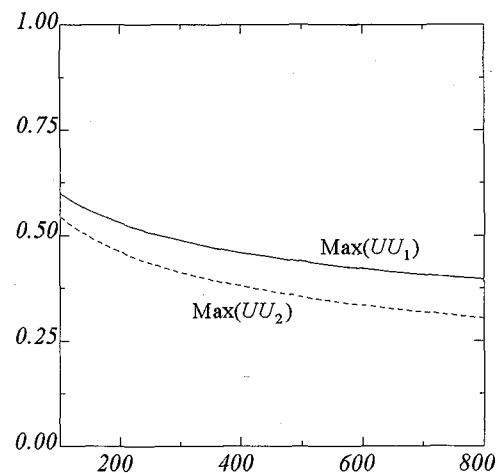
(b) 断熱材の厚さ L_1



(d) 地山の熱伝導率 k_3



(c) 覆工の厚さ L_2



(e) 地山の熱容量 $(\rho c)_3$

図-3 温度振幅に与える種々パラメータの影響 [$\text{Max}(UU_1)$: 断熱材背面温度振幅, $\text{Max}(UU_2)$: 覆工背面温度振幅]

る影響を調べたものである。これによれば、断熱材背面の温度振幅は L_2 によらず一定であるが、覆工背面の温度振幅は L_2 の増加とともに減少している。すなわち、覆工厚の増加はつらら発生防止よりも、地山の凍結防止に役立つことがわかる。

4) 地山の熱伝導率 k_3 の影響

地山の熱伝導率は岩石の種類等により異なりその値は広範囲に変化する。図-3(d)は $k_3 = 0.5 \sim 4.0$ (kcal/mh $^{\circ}$ C) の範囲で変化させ、温度振幅の影響を調べたものである。これによれば、温度振幅は k_3 が増加する程、減少し断熱効果がよくなることがわかり、一般に言われる熱伝導率の果たす役割(熱伝導率が小さければ、断熱効果が大きい)と異なる。これは、前報告³⁾で明らかにしたように、地山の熱伝導率が大きくなれば地温の不易層が深くなり、その結果、地山の単位面積当たりの熱容量が大きくなることを意味している。

5) 地山の熱容量 (ρc)₃ の影響

図-3(e)は、(ρc)₃ = 100~800 (kcal/m 3 $^{\circ}$ C) の範囲で変化させたものである。これによれば、温度振幅は熱容量の増加とともに減少していく。

以上の結果より、一次覆工と二次覆工の間に断熱材が施工される新設トンネルにおける内部断熱工法と同様に、温度振幅は、

- ①地山の熱伝導率 k_3 、熱容量(ρc)₃が大きい程、
 - ②断熱材の熱伝導率 k_1 が小さい程、厚さ L_1 が大きい程、
 - ③覆工の厚さ L_2 が大きい程
- 小さくなることがわかる。

5. 4 断熱材の試設計

計算例の最後に、つららの発生を防止するための断熱材の設計例を以下に示す。ただし、トンネル建設地点の年平均気温を $U_m = 6.0^{\circ}\text{C}$ 、年振幅を $A_T = 15.5^{\circ}\text{C}$ とし、断熱材を除く他の諸元は覆工厚 $L_2 = 0.6\text{ m}$ 、覆工と地山の熱伝導率は $k_2 = k_3 = 1.2\text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ 、覆工と地山の熱容量は(ρc)₂ = (ρc)₃ = 500 kcal/m 3 $^{\circ}\text{C}$ である。

断熱材の諸元として、熱伝導率 $k_1 = 0.02$ 、厚さ $L_1 = 0.05$ のものをを用いるものとする。式(18)より $\lambda_1 = 1.392$ 、 $\mu_1 = 0.592$ と得られ、式(16)より、 $C = 2.392$ 、 $D = 1.984$ となる($C^2 + D^2 = 9.658$)。さらに式(19)より $\lambda_2 = 0.232$ 、 $\mu_2 = 0.054$ 、式(17)より $E = 1.232$ 、 $F = 0.286$ と得られる($E^2 + F^2 = 1.600$)。従って、断熱材背面の温度振幅 $\text{Max}(UU_1)$ は、式(15.b)より $\text{Max}(UU_1) = \sqrt{(1.600/9.658)} = 0.407$ となる。つらら防止のための断熱材背面温度は式(14.a)より $U_1(L_1, t) = U_m - A_T \cdot \text{Max}(UU_1) = -0.3^{\circ}\text{C}$ と得られるが、負の温度のためつららが発生する危険がある。

そこで、断熱材の厚さのみを $L_1 = 0.06\text{ m}$ に変更し、上述の計算を繰返せば、 $\lambda_1 = 1.624$ 、 $\mu_1 = 0.699$ 、 $C = 2.624$ 、

$D = 0.592$ となる($C^2 + D^2 = 12.282$)。なお λ_2 と μ_2 には、パラメータ L_1 が関係しないので、温度振幅 $\text{Max}(UU_1)$ は、 $\text{Max}(UU_1) = \sqrt{(1.600/12.282)} = 0.361$ となる。断熱材背面温度は $U_1(L_1, t) = 0.4 \pm 0^{\circ}\text{C}$ となり、断熱材厚さを $L_1 = 0.06\text{ m}$ にすればつららの発生を防げることになる。なお、覆工背面温度は式(14.a)で算定でき、 $U_2(L_2, t) = 1.6 \pm 0^{\circ}\text{C}$ であり、地山凍結の危険もない。

6. 結論

本研究は、既設の寒冷地道路トンネルの地山凍結・つらら発生防止に用いられる外部断熱材施工において、その材質の選択および厚さの決定が比較的簡単に行える温度算定式を準定常(周期的)熱伝導解析に基づいて提示し、さらに熱伝導率、熱容量等の種々パラメータの外部断熱されたトンネル・地山系の断熱特性に与える影響の検討を行ったもので、次のように要約される。

- ①提示した温度算定式は、トンネル・地山系の断熱特性を支配するパラメータのみで表されているので、設計が簡単に行え、また断熱特性を理論的に理解するのに役立つ。
- ②温度算定式は、実用上は十分な精度を有している。
- ③トンネル・地山系の断熱効果は、新設トンネルの内部断熱工法と同様に、地山の熱伝導率および熱容量が大きい程、断熱材の熱伝導率が小さい程、断熱材の厚さおよび覆工の厚さが大きい程、良好となる。
- ④ここでは寒冷地道路トンネルを対象としたが、高熱地帯のトンネルに対しても適用可能である。

最後に本研究は、北海道土木技術会道路トンネル研究委員会の研究成果の一部を取りまとめたものであり、委員各位、関係各機関に謝意の意を表します。また、本論文をまとめる際に尽力を頂いた北海道大学工学部土木工学科修士課程在学の熊谷清貴君に感謝します。

参考文献

- 1) 坂本稔・川北稔・五十嵐敏彦：道路トンネルの変状実態—北海道の場合—、トンネルと地下、第20巻第5号、pp. 31~35, 1989.
 - 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, pp. 171~177, 1988.
 - 3) 三上隆・林憲造・権田静也：寒冷地道路トンネルの断熱材設計のための実用的な温度算定式の提案、土木学会論文集, No. 498/VI-24, pp. 87~93, 1994.
 - 4) 小平吉男：物理数学(第二巻), pp. 400~409, 岩波書店, 1940.
 - 5) 藤田仙之：断熱材の話(前編), (後編), 日本造船学会誌, 第707号(pp. 27~38), 第709号(pp. 9~16), 1988.
 - 4) 山田雅士：建築の断熱, p. 98, 井上書院, 1984.
- (1995年9月18日受付)