

## 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応性

### ADAPTABILITY OF ICICLE PREVENTION WORK BY ADIABATIC TREATMENT IN THIN-EARTH-COVERING TUNNEL

岡 田 勝 也\*  
By Katsuya OKADA

について評価したものである。

#### 1. ま え が き

寒冷地における多くの鉄道トンネルに発生するつららは列車の走行安全に重大な影響を及ぼす。また側氷はそれに加えて線路巡回などの作業員の歩行を困難にしている。そのために従来人力によるつらら落し作業や側氷の削氷作業が厳寒の中未明に実施されてきた。さらに覆工背面の凍結と融解の繰返しはトンネルを変状させたり、その強度を劣化させ、改築や廃棄に追い込むことも多い。そこで、従来の人力によるつらら落し作業に期待するのではなく、積極的につらら防止工法が望まれてきた。

そのような背景のもとにトンネル覆工内面を発泡断熱材で被覆し、地熱を冬期になるべく放出しないことによって、トンネル覆工表面の温度を氷点下に達しないように保温する、図-1のような表面断熱処理によるつらら防止工法が開発された<sup>1)</sup>。著者らは当工法の実物大試験によってその断熱効果をトンネル地山の温度挙動としてとらえると同時に、断熱材、覆工と地山からなる三層系の一次元非定常熱伝導モデルによって年平均気温と日振幅から当工法に必須な断熱材の厚さを提案した<sup>1),2)</sup>。また断熱材端部の側方からの寒気の回り込みについても解析し、必要な余裕幅の提案も行った<sup>1),3)</sup>。

しかし、土被りの小さいトンネルに表面断熱処理工法を適用した場合、覆工表面温度はトンネル内空側だけではなく土被り上部の地表面温度にも影響され、その結果地熱を積極的に利用しようとする当工法のメリットは失われることになる。すなわち土被りが小さい場合には断熱材をより厚くすれば済むのかあるいは厚さには限界があるのかが問題となり、それに対する定量的な解析が必要となる。当報告はこれに着目し、表面断熱処理によるつらら防止工法の土被りの小さいトンネルへの適応性

#### 2. 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断面モデル

##### (1) 土被りの小さいトンネル断面モデル

表面断熱処理を施工した土被りの小さいトンネルは図-1で代表されるが、土被りのきわめて小さいトンネルの天端付近に着目し、トンネル地山モデルを一次元問題として近似する。すなわち図-2において、下面(座標1)をトンネル内空側、上面(座標N)を土被り上の地表面とし、その間に断熱材、覆工コンクリートと地山の3種類の異物質が存在するものとする。そのとき異物質境界座標をAとBとし、分割長さの境界座標を覆工内でC、地山内でDとして、断熱材付近では細かい要素で演算ができるようにした。なお  $d_h$ ,  $d_c$ ,  $d_r$  は断熱材、

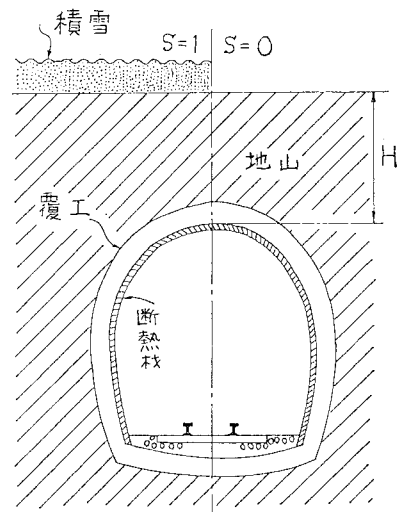


図-1 表面断熱処理によるつらら防止工を有するトンネル断面

\* 正会員 国鉄構造物設計事務所 主任技師(前・鉄道技術研究所防災研究室 主任研究員)

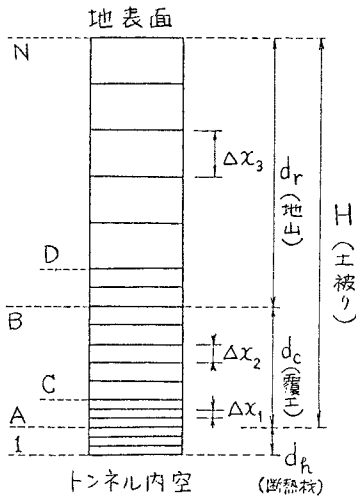


図-2 トンネル断面モデル

覆工コンクリート，地山のそれぞれの厚さである。

(2) トンネル温度モード

外気温の変動を年周期の正弦曲線で代表させると，トンネル内気温は

$$\theta_1(n) = t_m + A_Y \sin(2\pi n/365) \dots \dots \dots (1)$$

である。ここに  $t_m$  は年平均気温， $A_Y$  は年周期の気温の片振幅 (°C)， $n$  は日 (day) である。寒冷地においては一般に  $A_Y = 13^\circ\text{C}$  であり，積雪地帯ではトンネル土被り上の地表面は図-1の左断面のように根雪に覆われることになるが，そうした場合地表面に接する要素の温度は，

$$\theta_N(n) = 0 \text{ (ただし } \theta_1(n) \leq 0 \text{ のとき)} \dots \dots \dots (2)$$

と仮定する<sup>1)</sup>。しかし冬中根雪が存在しない地方では地表面の温度は，

$$\theta_N(n) = \theta_1(n) \dots \dots \dots (3)$$

とする。なお，トンネル内および地表部の流体 (空気) とそれに接する物体 (断熱材等) との熱伝達率は無視し，流体に接する要素の温度は外気温に等しくした<sup>1), 2)</sup>。

さらに解析には物質の凍結・融解に伴う潜熱を無視し，図-2の要素に対する一次元非定常熱伝導の explicit 型差分式を誘導し，式 (1)，(2) と (3) の温度入力に対して，断熱材，覆工コンクリートと地山の温度伝導度を  $a_h = 0.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ ， $a_c = 1.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ ， $a_r = 3.70 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  として計算を進めた<sup>1)</sup>。

温度解析のパラメーターは断熱材厚  $d_h(\text{mm})$ ，年平均気温  $t_m(^\circ\text{C})$ ，土被り高さ  $H(\text{m})$  と  $S$  (積雪のあるとき = 1，ないとき = 0) の4つとし，これらを組み合わせて与えられる条件をトンネル温度モードと称することにし， $TM_{d_h}(S, H, t_m)$  で表わす。

3. トンネル断面モデルにおける温度の年周期変動

(1) トンネル断面の年周期変化

トンネル断面モデルに式 (1)，(2) あるいは (3) を与えることによって，外気温の年周期変動に対するトンネル断面の断熱材，覆工コンクリートと地山の温度変化が計算される。たとえば土被り上部に積雪を有する  $TM_{30}$  (1, 7.94, 7.0) の約 400 日間の経日変化は図-3 ようになる。ここに  $\theta_1$  はトンネル内気温， $\theta_A$  は断熱材背面温度 (覆工表面温度)， $\theta_B$  は覆工背面温度， $\theta_{N-1}$  は土被り上地表面下 40 cm の位置における地温である。地表面あるいはトンネル内空から離れるに従って振幅は小さくなり，かつ位相も遅れていくが， $\theta_1 = -6^\circ\text{C}$  に達しても， $\theta_A = 0.6^\circ\text{C}$  となり， $d_h = 30 \text{ mm}$  の断熱材の効果が明瞭に現われ，覆工表面における凍結を防止することが可能となることを示している。 $S=1$  であるので，地表面温度  $\theta_N$  は式 (2) に従い，それによって地表面近くの地温  $\theta_{N-1}$  は  $\theta_1 = 0$  となったときから，温度低下が正弦曲線に乗らないこともわかる。このような温度曲線のひずみの傾向は，年平均気温  $t_m$  が低くなるほど，地表面に近くなるほど大きくなる。

トンネル断面の経日変化をトンネル横断面について描けば，土被り高さにおける温度振幅図が得られる。図-4 は  $TM_{30}$  (0, 7.94, 5.0) の隔月ごとの温度振幅の例であるが，厳寒期の2月の外気温  $\theta_1 = \theta_N = -8.0^\circ\text{C}$  に対し，断熱材背面では  $\theta_A = 0^\circ\text{C}$ ，土被り中間部では  $\theta_i = 5.5^\circ\text{C}$  になる凸型分布を示す。しかし4月では  $\theta_1 = \theta_N = -3.1^\circ\text{C}$  に対し，地中では2月よりも低くなり， $\theta_A = -1.5^\circ\text{C}$ ， $\theta_i = 0^\circ\text{C}$  となる平滑な温度分布形状を示す。 $\theta_1$  と  $\theta_N$  の温度振幅  $2A_Y = 26^\circ\text{C}$  は， $\theta_A$  では  $2A_{Y,A} = 13.2^\circ\text{C}$ ， $\theta_i$  では  $2A_{Y,i} = 9.5^\circ\text{C}$  に逓減する鼓状を示す。このような温度振幅の逓減傾向は土被り高さ  $H$  が低くなると鈍くなる。一方積雪の存在する  $TM_{30}$  (1, 7.94, 5.0) の場合には地表面 ( $x = 7.94 \text{ m}$ ) におい

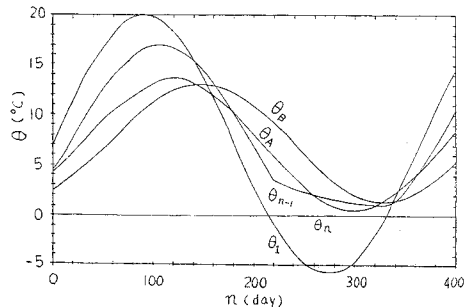


図-3  $TM_{30}$  (1, 7.94, 7.0) における温度の経日変化

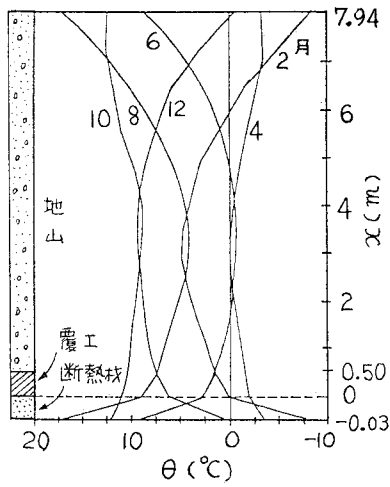


図4  $TM_{30}(0, 7.94, 5.0)$  のトンネル断面温度の月別変化

て  $\theta_N < 0^\circ\text{C}$  にならないので、地中の温度振幅は小さくなり、 $2A_{Y,A}=12.8^\circ\text{C}$ 、 $2A_{Y,i}=9.2^\circ\text{C}$  になる。そのような傾向は土被り  $H$  の小さいほど、年平均気温  $t_m$  の低いほど一般には強く現われる。

(2) 温度の経日変化の実測値の例

断熱材を考慮した三層系のトンネル断面モデル(図-2)において地山の厚さ  $d_r$  が十分大きい場合の断熱材背面温度等の計算値は実測値を満足することができることを前報で示した<sup>1)</sup>。ここでは土被りに積雪が存在する場合の地表面付近の地温の経日変化について考察する。図-5は羽幌線初山別トンネル<sup>3)</sup>における地表面下50cmの地温の実測値  $\theta_{r,m}$  と積雪深  $H_s$  に加えて、当トンネル断面モデルによる計算値  $\theta_{r,c}$  を示したものである。 $\theta_{r,m}$  は図の 255 day 付近より正弦曲線がくずれて平坦な下降曲線に転換していくのがわかるが、これはちょうど根雪の始めと一致している。そして  $\theta_{r,m}$  が再び上昇傾向になるのは根雪の終日におおむね一致することが容易に想像される。また根雪の始めと終日は外気温の  $0^\circ\text{C}$  の境界にもほぼ対応しており、式(2)の仮定が定性的に

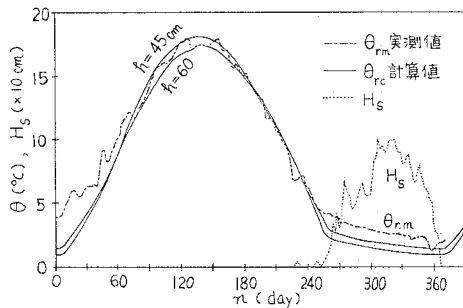


図-5 初山別トンネルにおける  $\theta_{r,m}$ 、 $\theta_{r,c}$  と  $H_s$

は確認された。 $\theta_{r,c}$  は  $t_m=7.0^\circ\text{C}$  に対する式(1)と式(2)を用い、温度伝導度として  $a_c=a_r=1.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  を入力して求めたものである。積雪下における地温は計算値  $\theta_{r,c}$  が実測値  $\theta_{r,m}$  よりも約  $1^\circ\text{C}$  低いだけで、かなり大胆な仮定にもかかわらず、計算値はよく実測値の傾向を表わすものと解釈できる。

4. 断熱材背面温度と凍結深度

(1) 断熱材背面温度に及ぼす積雪の影響

土被り上部の地表面に積雪がない ( $S=0$ ) 場合の断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,\min}$  と土被り高さ  $H$  の関係は図-6 のようになる。 $H$  が 3m を越えると  $\theta_{A,\min}$  は急激に大きくなり、 $H$  が 8m 以上ではほぼ収束する傾向を示すようである。したがっておおむね  $H > 10\text{m}$  では土被りの影響はほとんどなく、いわゆる半無限平面として考えてもよいであろう。また土被り  $H$  が低いと断熱材厚  $d_h$  の増加の割には断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,\min}$  は高くなり、換言すれば断熱材厚を増加しても土被りが小さい場合には覆工表面温度は高くなり

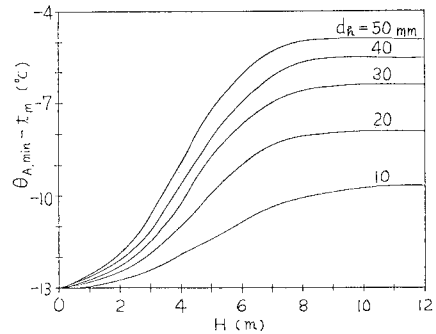


図-6  $S=0$  における  $(\theta_{A,\min}-t_m)$  と  $H$  の関係

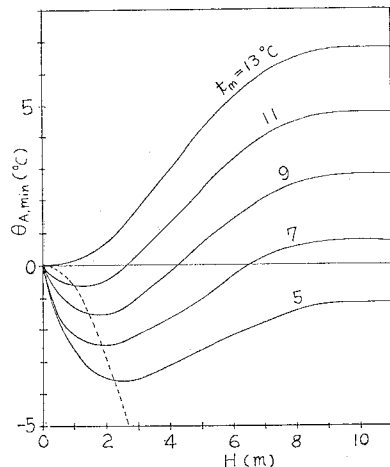


図-7  $S=1$  における  $\theta_{A,\min}$  と  $H$  の関係 ( $d_h=30 \text{ mm}$ )

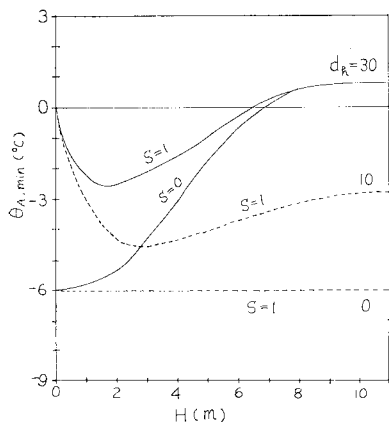


図-8  $TMa_h(S, H, 7.0)$  における  $\theta_{A,min}$  と  $H$  の関係

ことを示している。図-6 は  $S=0$  に対して、年平均気温  $t_m$  がわかれば地山の土被り  $H$  に従って  $\theta_{A,min} \geq 0$  とするための必要な最小の断熱材厚  $d_h$  を与えるものである。

積雪が存在する ( $S=1$ ) 場合の断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,min}$  と土被り  $H$  の関係は断熱材厚  $d_h=30$  mm を例にとれば図-7 のようになる。図は年平均気温  $t_m$  に従って違った形状を与え、 $t_m < 13.0^\circ\text{C}$  の範囲において  $\theta_{A,min}$  はある土被り高さ  $H$  で負の極小値を有する。図の曲線群が  $\theta_{A,min}=0$  を切る  $H$  が必要な最小の土被り高さを与えることになる。

寒冷地における年平均気温である  $t_m=7.0^\circ\text{C}$  を例に挙げ積雪の有無 ( $S=1$  と  $0$ ) に対する断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,min}$  の変化を描くと図-8 のようになる。両者は土被り  $H$  が大きくなると漸近する傾向を示し、 $\theta_{A,min}=0^\circ\text{C}$  に対応する  $H$  は、 $S=1$  の方が  $S=0$  よりも  $0.5$  m ほど低くなり、 $H=6\sim 7$  m に存在する。この  $H$  は  $t_m$  が高くなるほど小さくなる。

なお  $S=1$  について断熱材厚  $d_h$  をパラメーターにした断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,min}$  と土被り高さ  $H$  の関係は図-8 の破線のように描かれる。 $d_h=0$  mm の場合は 2.(2) の仮定により熱伝達率を無視したので  $\theta_{A,min}=\theta_{i,min}=(t_m-Ay)$  となり、 $H$  に無関係に一定となる。 $d_h$  が厚くなるに従って  $\theta_{A,min}$  は高くなるが、 $d_h=10$  mm では  $\theta_{A,min}$  を正にすることは不可能であり、 $\theta_{A,min}=-2.8^\circ\text{C}$  にしか収束しない。

いずれにせよ、断熱材背面温度に影響を及ぼす積雪の効果は土被りが小さくなると大きくなり、土被りに根雪が存在することがつらら防止工には有利であることがわかる。

(2) 断熱材背面温度の位相遅れ

断熱材背面温度  $\theta_A$  は図-3 に示されるようにトン

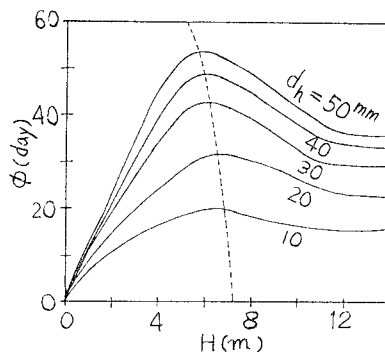


図-9  $S=0$  における  $\phi$  と  $H$  の関係

ネル内気温  $\theta_i$  に対してある位相差  $\phi$  をもって振動している。 $S=0$  のトンネル温度モードでは年平均気温  $t_m$  に無関係に土被り高さ  $H$  と断熱材厚  $d_h$  のみによって位相差  $\phi$  が定まる。いま、 $d_h$  をパラメーターに位相差  $\phi$  と土被り高さ  $H$  の関係を描くと図-9 のようになる。土被り  $H$  が低い間は土被り上の外気温変化に伴う地山からの温度の位相遅れがトンネル内空側の断熱材の温度挙動に大きく影響し、位相差  $\phi$  は極大値  $\phi_{max}$  を取る。しかし土被り  $H$  がさらに大きくなると土被り上からの位相遅れの干渉はしだいに小さくなり、トンネル内空側の気温変動に  $\phi$  は左右される割合が高くなり、一定値に収束する。この一定値は土被りが十分高い場合の位相遅れに相当するが、 $d_h$  が厚くなるに従って  $\phi$  は大きくなる。同様に  $\phi_{max}$  も  $d_h$  とともに増大するが、 $\phi_{max}$  に対応する土被り高さ  $H(\phi_{max})$  は逆に小さくなる。平均的な断熱材厚  $d_h=30$  mm を考えた場合、 $\phi_{max} \approx 45$  day であり、トンネル内気温  $\theta_i$  より約1か月半の位相遅れを生じる。このとき  $H(\phi_{max}) \approx 6$  m である。しかし土被り  $H > 10$  m においては位相差  $\phi \approx 30$  day に収束していくことがわかる。

一方、 $S=1$  の場合には式 (2) に示すようにトンネル内気温  $\theta_i \leq 0$  のとき土被り上の地表面では  $\theta_N=0$  となるために、断熱材背面温度  $\theta_A$  は完全な正弦曲線にならない。その経日変化は 3.(2) で示したようなひずんだ曲線となるが、それは年平均気温  $t_m$  に大きく影響される。すなわちそのようなひずみの傾向は  $t_m < 13^\circ\text{C}$  において  $t_m$  が低下するほど大きくなるはずである。

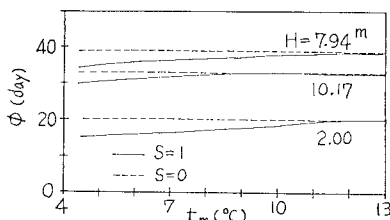


図-10  $d_h=30$  mm のときの  $\phi$  と  $t_m$  の関係

その結果位相差  $\phi$  も影響を受けて、 $t_m$  が低くなるに従って、小さくなり、 $d_h=30\text{ mm}$  の場合は 図-10 のようになる。これによれば  $S=1$  の  $\phi$  が  $S=0$  のそれよりも  $t_m$  の低下に対してほぼ直線的に小さくなっていくことを示しているが、図-9 の  $H(\phi_{\max})$  に近い  $H=7.94\text{ m}$  のときでも両者の差は 5 day ( $t_m=7.0^\circ\text{C}$ ) 以下である。

(3) 凍結深度

a) 凍結深度の経日変化

トンネル断面における凍結深度  $h_F$  (地表面から凍結面までの深さ。当解析では地山中の凍結・融解という相変化を考慮していないが、ここでは地表面から  $\theta_i=0^\circ\text{C}$  までの距離をよぶことにする) の経日変化の一例は 図-11 のようになる。地山と覆工厚に対する断熱材厚の図中の縮尺比は 50/1 であり、凍結深度  $h_F$  の進行は式 (1) で示すトンネル内気温  $\theta_i$  が  $0^\circ\text{C}$  に達した日を原点としている。

$S=0$  のときの  $h_F$  曲線はトンネル内空側と地表面側の両方から地山に向かって成長し、 $n=75\text{ day}$  付近で両者の凍結深度  $h_F$  は接触し、 $h_F=H+d_h$  となり地山全体が凍結領域となる。そしてトンネル内気温  $\theta_i$  が再び正に戻ると今度は地表面とトンネル内空側から凍結線は消滅していき、地山中にポケット状に凍結領域が残ることになる。図-11 は年平均気温  $t_m=9.0^\circ\text{C}$  ( $H=4.26\text{ m}$ ) の例であるが、 $t_m>10^\circ\text{C}$  では地山全体が凍結する

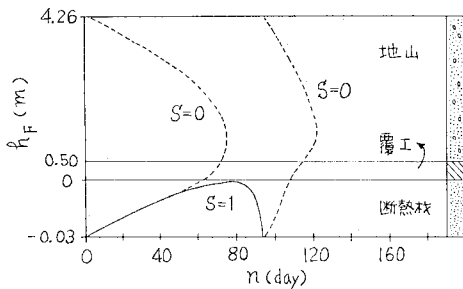


図-11  $TM_{00}(S, 4.26, 9.0)$  における  $h_F$  の経日変化

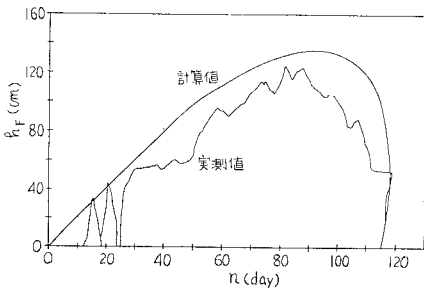


図-12  $h_F$  の経日変化の実測値と計算値の比較

ことはなく、トンネル内空側と地表面側にそれぞれ分離した  $h_F$  曲線が得られる。

$S=1$  の場合はトンネル内空側からのみ凍結深度  $h_F$  は地山に向かって進行し  $n=80\text{ day}$  で最大値となり、ほぼ断熱材背面の位置に達する。したがってこのトンネル温度モードのときがつら発生に限界になるわけで、換言すれば土被り  $H=4.26\text{ m}$ 、年平均気温  $t_m=9.0^\circ\text{C}$  の場合の必要な最小断熱材厚は  $d_h=30\text{ mm}$  であるといえる。

次に凍結深度  $h_F$  の経日変化の実測値 (羽幌線初山別トンネル) を示し、計算値と比較する。表面温度が初冬には正負を繰り返すために凍結深度  $h_F$  はノコギリ状に分断されるが、しだいに成長して最大値  $h_{F,\max}=124\text{ cm}$  に達する。その後  $h_F$  は急速に減退し、地山中にポケットの凍結領域を残して消滅していくことを示している。一方それに対する計算値は温度伝導度  $a_c=a_r=1.85 \times 10^{-3}\text{ m}^2/\text{h}$ 、年平均気温  $t_m=7.0^\circ\text{C}$  と土被り  $H=10\text{ m}$  を入力したトンネル温度モード  $TM_0(0, 10, 7.0)$  に対するものであるが、実測値よりも少し大きい値を与える。この原因は、図-2 のトンネル断面モデルが凍結・融解なる相変化を無視し、かつ流体と物体表面との熱伝達率を考慮していないことのほかに、実測値である  $h_F$  曲線が温度の三測点の直線近似によって算出した誤差にも影響されているものと考えられる。しかし凍結・融解の相変化を無視した一次元非定常熱伝導による当解析値は傾向的には積雪のないときの凍結深度の経日変化を十分対応づけるものであると解釈できよう。

b) 最大凍結深度

凍結深度の最大値  $h_{F,\max}$  をそれぞれの土被り高さ  $H$  について整理すると 図-13 のようになる。図はトンネル温度モード  $TM_{00}(S, H, 7.0)$  の例であり、実線は  $S=0$ 、破線は  $S=1$  に対応し、横軸はトンネル内空のレベルを、斜軸は土被り上の地表面のレベルを示してい

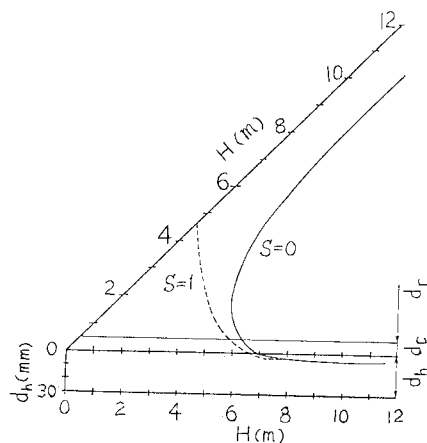


図-13  $TM_{00}(S, H, 7.0)$  における  $h_{F,\max}$

る。したがって  $h_{F,max}$  曲線と横軸，斜軸に囲まれる領域が凍結領域となる。

$S=0$  の場合土被り  $H$  が小さい間は土被り全高が凍結領域となり， $H_c=6.0\text{m}$  において凍結深度  $h_F$  はトンネル内空側と土被り上の地表面側に分断される。そしておおむね  $H > 10\text{m}$  になれば土被りの影響はほとんどなくなるが，このことは 4.(1) で述べた断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,min}$  の土被り効果とよく呼応する。

$S=1$  の場合には凍結温度  $h_F$  はトンネル内空側からしか進行しないので，凍結領域は  $S=0$  のそれよりも小さくなる。トンネル内空側からの凍結深度  $h_F$  が土被り上の地表面に到達し，土被り全高が凍結領域となる限界土被り高さは  $H_c=4.6\text{m}$  である。この  $H_c$  より高い所では  $h_{F,max}$  は急激に小さくなっていき，土被りが  $H > 7\text{m}$  になると  $S=0$  の曲線と一致する。すなわちこの土被りでは地表面の積雪の影響は無視される。

つらら防止工としての限界である断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,min}=0^\circ\text{C}$  に対応する土被り高さ  $H$  は， $h_{F,max}=d_h$  であることが条件であるが，図-13 のトンネル温度モード  $TM_{30}$  ( $S, H, 7.0$ ) では， $S=0$  のとき  $H \geq 6.9\text{m}$ ， $S=1$  のとき  $H \geq 6.5\text{m}$  である必要がある。このような土被りの限界は，断熱材厚  $d_h$  が薄くなるほど，年平均気温  $t_m$  が低くなるほど，高くなる。たとえば図-11 と図-13 の比較から， $d_h=30\text{mm}$  に対して  $t_m=7.0^\circ\text{C}$  から  $9.0^\circ\text{C}$  に上がると， $H=6.9\text{m}$  から  $4.3\text{m}$  に低下することがわかる。

## 5. 限界断熱材厚の提案

### (1) 積雪のない場合

つらら等を生じさせない限界としての断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,min}=0^\circ\text{C}$  に対する断熱材厚  $d_h$  を限界断熱材厚  $d_{h,l}$  とよぶことにする。積雪のない ( $S=0$ ) 場合の  $d_{h,l}$  は図-6 から任意の年平均気温  $t_m$  に対して求めることができ，図-14 の上図のように整理される。2.(2) の仮定により気温の年振幅を  $A_Y=13^\circ\text{C}$  としたので，年平均気温  $t_m=13.0^\circ\text{C}$  を原点に土被り高さ  $H$  が大きくなるに従い  $d_{h,l}$  は滑らかに低減する曲線を与える。この曲線群の上側では覆工表面温度  $\theta_A$  は正になり，つらら防止工としての目的が達成できる範囲となる。逆にその曲線の下側では  $\theta_A < 0$  となり本来の目的を全うすることができない。したがって土被り  $H$  と年平均気温  $t_m$  が低いトンネルでは断熱材厚  $d_h$  をかなり厚くしても断熱材背面温度  $\theta_A < 0$  となる場合が存在する。また  $H$  がある程度高い所では限界断熱材厚  $d_{h,l}$  に対する年平均気温  $t_m$  は  $d_{h,l}$  の増分の割には  $t_m$  は

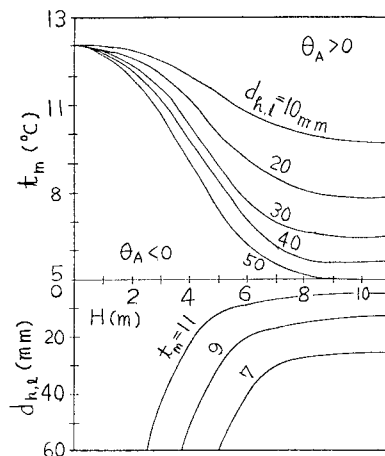


図-14  $S=0$  のときの  $d_{h,l}$

低くならないこともわかる。年平均気温  $t_m$  をパラメータに限界断熱材厚  $d_{h,l}$  と土被り高さ  $H$  の関係を示したのが図-14 の下図であるが， $t_m$  が一定のとき  $H$  が大きくなると  $d_{h,l}$  は収束する傾向を示す。その収束に対応する土被り高さは  $t_m$  が高くなるにつれて低くなる。いずれにせよ，トンネルの土被り上の地表面に積雪のない場合，土被りと年平均気温によって断熱材の限界厚は図-14 のように決定されることになった。

### (2) 積雪のある場合

積雪のある ( $S=1$ ) 場合には土被り上の地表面温度  $\theta_N$  が式 (2) に従い正弦波振動をしないために，個々の年平均気温  $t_m$  について限界断熱材厚  $d_{h,l}$  を定める必要がある。いま図-7 の曲線群が断熱材背面温度の最小値  $\theta_{A,min}=0$  を切る土被り高さ  $H$  について整理すれば， $d_{h,l}=30\text{mm}$  に対する  $t_m$  と  $H$  の関係が図-15 の上図のように得られる。図には図-14 の  $S=0$  の曲

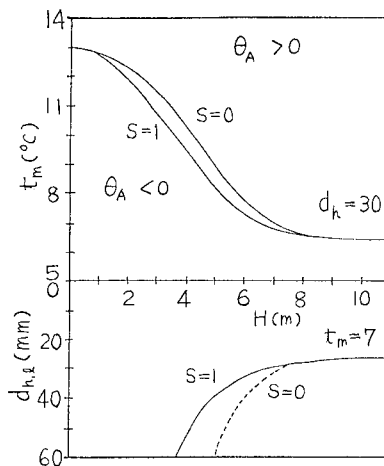


図-15  $S=1$  のときの  $d_{h,l}$

線も併記されているが、両曲線は  $t_m=13^\circ\text{C}$  ( $H=0$ ) と  $t_m=6.4^\circ\text{C}$  ( $H>8\text{m}$ ) で一致し、その中間で同じ  $t_m$  に対して最大約  $0.7\text{m}$  の  $H$  の差をみる。すなわち断熱材厚  $d_h=30\text{mm}$  の場合積雪の有無による土被りの影響高さはせいぜい  $0.7\text{m}$  程度であるといえる。

一方、年平均気温  $t_m=7.0^\circ\text{C}$  に対する 限界断熱材厚  $d_{h,l}$  と土被り高さ  $H$  の関係は図-15 の下図のようになり、必要な  $d_{h,l}$  は  $H$  が低くなると急激に厚くなっていく。しかし  $S=1$  の場合に許される土被り高さ  $H$  は、 $d_h$  が同じでも、 $S=0$  よりも約  $1\text{m}$  ( $H<6\text{m}$  のとき) 低くなる。

いずれにせよ、積雪のあるトンネルにおいて、図-15 の上図によって限界断熱材厚  $d_{h,l}=30\text{mm}$  に対する年平均気温  $t_m$  あるいは土被り高さ  $H$  の限界が、下図によって日本の寒冷地の平均的な年平均気温である  $t_m=7.0^\circ\text{C}$  のときの限界断熱材厚  $d_{h,l}$  が任意の土被り高さ  $H$  に対して求められることになった。

### 6. 一次元トンネル断面モデルの適応性

これまでトンネル上部の土被り部の温度挙動を一次元モデル(図-2)によって仮定したものである。このトンネル断面モデルは一つの近似解を与えることにはなるが、これがトンネルの二次元モデルによる解析値とどの程度の相関性を有するかということについて考察を加える。

トンネル断面の二次元モデルは、一定の水平な高さを有する左右対称な単線鉄道トンネルを考慮した図-16

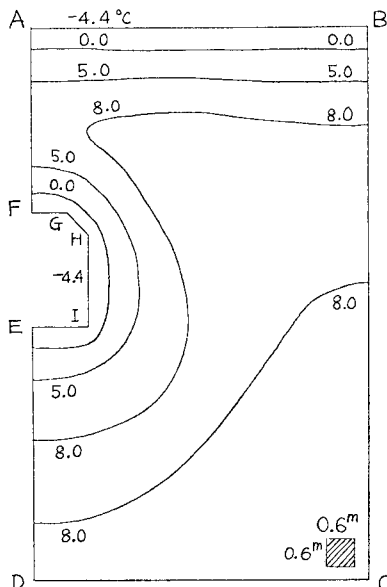


図-16 トンネル断面の二次元モデルと  $TM_0(0, 7.8, 7.0)$  の1月の等温線

のようなトンネル地山(ABCD)で表現する。このトンネル断面を矩形と三角形の有限要素に分割し、トンネル側壁と底盤からの地山の奥行きを十分長くとしたそれぞれの境界(BCとDC)とトンネル中心線(AF, ED)においては断熱境界条件が適用できる。そしてトンネル内空側(FGHIE)では式(1)を、地表面(AB)では式(2)あるいは式(3)を考慮した二次元非定常熱伝導差分式を誘導して解析を進めた。しかし計算の簡単化を考え、すべての要素は同一物質とし、地山の温度伝導度として  $a_r=3.70 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  を入力し、トンネル内空に接する要素と土被り上の地表面の要素の温度は、2.(2)と同様  $A_T=13^\circ\text{C}$  とした年周期変動を考慮し、式(1),(2)あるいは(3)を用いることにした。

いま、トンネル温度モード  $TM_0(0, 7.8, 7.0)$  に対する1月の等温線を一例として描けば図-16のようになる。土被り部近傍の温度がトンネル側方の地山の影響を受けていることは等温線のくびれの状態からも理解され、二次元モデルが一次元モデルよりも実状に近い解を与えることになる。

しかし図-2に対応するトンネル天端の直上部においては、土被り  $H$  が低くなるにつれて両者のモデルによる解析値の差はより縮まる。図-17はトンネル温度モード  $TM_0(0, 4.2, 7.0)$  の凍結深度  $h_F$  の経日変化を示した一例であるが、トンネル内空側からと地表面側からの凍結深度が接触して土被り全高が凍結領域となる日( $n=30\text{ day}$ )は数日ほど二次元モデルによる方が一次元モデルよりも遅いだけで、両者の凍結深度はほぼ一致した経日変化を示すようである。

こうした両モデルの差を限界土被り高さ  $H_c$  に着目して評価するために図-18を描いた。それによれば年平均気温  $t_m$  が低くなるにつれて  $H_c$  は大きくなるが、一次元モデルの方が二次元モデルよりも大きい。しかし  $t_m=5.0^\circ\text{C}$  の場合でさえ、両モデルの  $H_c$  の差は  $2\text{m}$  程度にすぎない。逆に  $H_c$  に対応する  $t_m$  の差でいえば大きくても  $1.5^\circ\text{C}$  程度であり、わずかに一次元モデルの方が激しい温度挙動を示すことになる。

以上は同一物質からなる要素で構成されたトンネル断面モデルに関するものであるが、これよりも温度伝導度の小さい断熱材や覆工コンクリートを含む図-2のモデルを考慮した場合には、一次元モデルと二次元モデルの差は、特にトンネル内空側近傍の温度挙動に関しては、

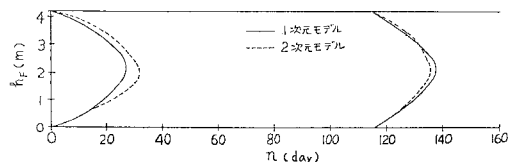


図-17  $TM_0(0, 4.2, 7.0)$  の  $h_F$  の経日変化

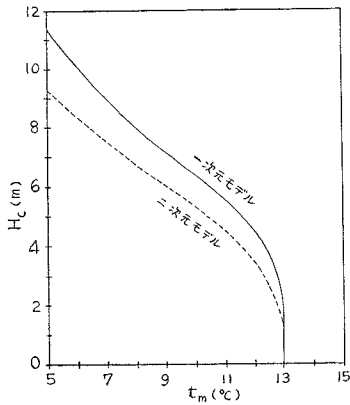


図-18  $H_c$  と  $t_m$  の関係

より縮まるものと考えられる。したがって、当報告の目的とする土被りの小さいトンネルにおける断熱処理によるつらら防止工法の設計には一次元モデルで設計しておけば安全側の値を与えるといえそうである。

## 7. 結 論

この報告は、土被りの小さいトンネルに表面断熱処理によるつらら防止工法を施工した場合の外気温の年周期変動に対するトンネル地山の温度挙動を非定常熱伝導差分式を用いて解析し、土被り、年平均気温と積雪の有無をパラメーターに必要な断熱材厚を提案したものであ

る。これによってトンネルの土被りの小さい場合の断熱処理工法の適応度をかなり定量的に把握することが可能となった。このことは先に報告した設計断熱材厚<sup>1),2)</sup>と断熱材の余裕幅<sup>1),3)</sup>とともに表面断熱処理工法に必須な設計条件を明確にしたことになり、より経済的合理的な設計施工ができるようになったものと考えられる。

本研究の発端を与えられたのは、当時の鉄道技術研究所防災研究室長、福地合一博士（現・鹿島建設技術研究所次長）であり、以来同氏はもとより、後藤巖（前）主任研究員（現・長岡技術科学大学教授）、森野亮宏防災研究室長、川口孝夫（前）研究員（現・札幌鉄道管理局工事課補佐）には、貴重な助言をたびたびいただいた。深甚なる謝意を表する次第です。

## 参 考 文 献

- 1) 岡田・福地：断熱処理によるトンネルのつらら防止工の研究，土木学会論文報告集，第 309 号，1981 年 5 月。
- 2) 岡田・川口・後藤：表面断熱処理によるトンネルのつらら防止工法の極寒冷地試験と解析，鉄道技術研究報告，No. 1078，1978 年 3 月。
- 3) 岡田・川口：寒冷地トンネルの温度挙動と表面断熱処理によるトンネルのつらら防止工法の延長幅効果に関する実験的考察，鉄道技術研究報告，No. 1168，1981 年 3 月。
- 4) 吉田：雪の科学，日本放送出版協会，pp. 48～50，p. 259，1975 年 9 月。
- 5) 岡田：土被りの小さいトンネルにおける表面断熱処理によるつらら防止工の温度挙動とその適応性，鉄道技術研究報告，No. 1181，1981 年 8 月。

(1982.2.22・受付)