

断熱処理によるトンネルのつらら防止工の研究

A STUDY ON ICICLE PREVENTION WORK OF TUNNEL
BY ADIABATIC TREATMENT

岡田 勝也*・福地 合一**

By Katsuya OKADA and Goichi FUKUCHI

1. ま え が き

寒冷地の多くの鉄道トンネルに発生するつららは通常一晩で成長し、車両限界を侵すことが多く、列車運転に重大な影響を及ぼしている。また側壁にできる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、列車待避などに危険を与えるとともに、レールを埋める氷は車両の脱線事故にもつながるものである。このようにほとんどの降雪地で悩まされているつららと側氷は、一番列車の前に従来人力によってつらら落し作業や側氷の削氷作業、除氷作業を行いながら、列車運転を確保してきているのが実情である。

冬期におけるつらら等は融水期にはトンネル漏水となつて、レールの腐食、信号回路の短絡化、路盤の軟弱化による軌道の不整などの被害を与える原因となることも多い。

したがって、トンネルにおける漏水やつらら、側氷を防止することは鉄道トンネルにとっては重要な課題であり、過酷な労働条件の改善と保守作業の近代化、さらには高速度高密度列車運転の時代を迎えトンネルの保守間合や改良間合が少なくなる実状を踏まえれば、従来的人力によるつらら落し作業などに期待するのではなく、省力化された積極的なつらら防止工法の開発が強く望まれてきた³⁾。

しかし、トンネル漏水やつらら防止対策は鉄道トンネルの歴史とともに、幾多の改良と工夫がなされてきており、たとえば、側壁に作られる縦下水やVカット工法、覆工内面へのモルタル等の吹き付けあるいはウレタンセメント塗布、側壁背面の集水ブロック工や透水性砂利層の設置あるいはビニールシートの張付け等、多くの施工

例がみられる。けれどもこれらの工法の多くは、目詰りや施工の困難さのために再び改築を余儀なくされた例もあり、また、つらら等を防止できたとしても覆工内あるいは背面地山の水分の凍結のためにトンネルが変状したり、覆工の劣化が促進して、改築や廃棄に追い込まれたトンネルも多い。

このような背景のもとで、つららを防止することはもちろん、覆工以深で生じる凍結・融解現象をも阻止しようとする工法が模索されてきた。それはトンネルの覆工を加熱あるいは保温することによって解決されるが、ここで述べるのは、保温法の1つで覆工内面を発泡断熱材で被覆し、地熱を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以上に保温するいわゆる断熱処理によるトンネルのつらら防止工に関するものである^{1)~4)}。

本報告は、寒冷地トンネルにおいて断熱処理によるつらら防止工の実物大試験を行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、当工法に必須な断熱材厚を断熱材、覆工コンクリートと地山の3層系からなるトンネルモデルの非定常熱伝導解析により年平均気温と気温の日振幅から決定できる方法を示したものである。

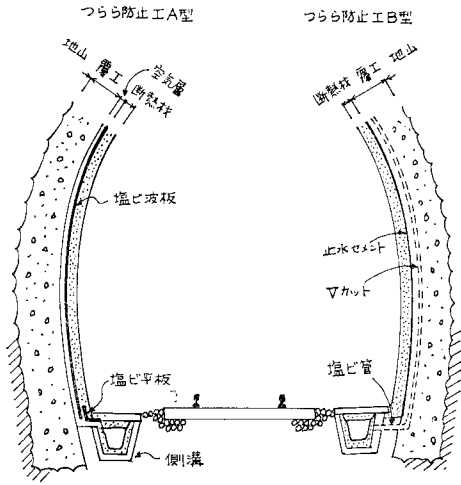
2. つらら防止工の概要

断熱処理によるつらら防止工は1.で述べたように、トンネルの覆工内面を発泡断熱材で被覆して冬期に地熱をなるべく放出しないことによって、トンネル覆工表面温度を氷点以上に保温しようとするものである。

トンネルの漏水は止水するのではなく導水することを原則としたが、導水の方法によって次の2工法(A型とB型と称する)を案出した。A型はトンネル覆工のいたるところから漏水する場合に適用するもので、まず覆工コンクリートの表面に防水材としての塩化ビニール樹脂波板をアンカーボルトによってある空隙を残して取り付

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

** 正会員 工博 鹿島建設(株) 技術研究所 次長 (前・国鉄道技術研究所防災研究室 室長)



図一 つらら防止工の断面図

ける。この空間はトンネル漏水が自由に流下するためのものである。次に防水板にウレタン系発泡断熱材を吹き付ける。必要ならば防火コートをさらに吹き付けることになる。結局、つらら防止工A型は、図一のような構造となり、その全厚はたとえば 18mm (空気層)+2mm (防水板)+35mm (d_h : 断熱材厚)=55mm となる。したがってトンネルの内空断面は既設トンネルよりこの分だけ減少することになる。なお、防水板により遮断された漏水は塩化ビニール樹脂波板と覆工との間隙を縫ってサイドドレーンに流れるようになるが、ドレーン内の漏水の凍結を考慮してドレーンとそのふたにも 図一のように断熱処理を施した。

一方、つらら防止工B型は覆工コンクリートの上に直接防水材料を塗布するものであり、A型のような空気層が介在しない。防水材料の上には発泡断熱材を吹き付け、必要ならば防火コートも施工することはA型と同様である。したがってつらら防止工B型としての全厚は、図一に示されるように、たとえば 1.3mm (防水セメント)+35mm (断熱材厚)=36.3mm となる。なお、トンネル漏水は、漏水箇所に沿って覆工コンクリートを 5cm Vカットして設置した $\phi 20$ mm の半円の塩化ビニールパイプの流路を下る。半円パイプの上には瞬間止水セメントを覆工表面まで充填する。B型ではこのようなVカット等による漏水処理が必要となるために、あらかじめ漏水箇所が判明している場合しか適用できないが、新設トンネルにおいてはトンネル掘削断面積 (正規のトンネル内空断面を保持するための余掘り)、および既設トンネルにおいては建築限界の縮少量は、つらら防止工A型よりはわずかであるが少なくなる。

なお断熱材の選択にあたり、施工性のよい吹き付けに適するもの、耐水性および断熱性の優れた独立気泡型、

また耐火性のある難燃型自己消火型となるように配慮した。

断熱処理によるつらら防止工の効果確認試験は北海道の名羽線 (建設中) 上羽幌トンネル (延長 66m) と羽幌線初山別トンネル (延長 270m) において実施した。なお、地質は両トンネルとも新第三紀のもので、前者は砂岩、後者は雑色礫岩を主体としており、いずれもトンネル延長方向には同種の地質であることがボーリング調査で確認された。前者の上羽幌トンネルでは断熱材厚を $d_h=35$ mm としたつらら防止工A型とB型の両工法について延長 $w=30$ m ずつ試験で、その効果を確認した後、後者の初山別トンネルでは工法をA型に絞って、つらら防止工の延長幅が狭いときの寒気の横からの回り込みについて検討を行うために、その幅を $w=1, 2, 4$ と 8m とし前者と同じ d_h で試験を実施した。本文中では、両トンネルの延長幅 $w=30, 1, 2, 4$ と 8m に関する工区を S30, S01, S02, S04 と S08 とそれぞれ名付ける。

トンネル断面の温度測定は熱電対 (銅コンスタンタン、シリコンラバー被覆) によって行い、測定位置はレールレベルより 1.2m の高さとした。そして各工区ごとにつらら防止工部と無施工部 (つらら防止工端部よりトンネル軸方向に 5m 離れた位置に測点を設けた) について温度測定を行ったが、それらは 1時間ごとに紙テープに記録させ、約 1年間の連続データを得ることができた。

3. 温度の卓越周期と振幅

(1) 温度のフーリエ解析

トンネル外気温 θ_0 の卓越する一番大きな周期は年周期であることは周知のとおりであるが、より短周期の成分を見出すためにフーリエ解析を行う。一般に周期 T の変動を $2n$ 個に分割したデータについて、 t_m を年平均気温、 R_i をフーリエ振幅 (温度)、 φ_i を位相差とすれば、時刻 t における温度 $\theta(t)$ は、

$$\theta(t) = t_m + \sum_{i=1}^n R_i \cos 2\pi i(t - \varphi_i)/T \dots\dots\dots (1)$$

のようになる。

6時間ごとの温度データを入力することにすれば $T=366 \times 4$ (6時間) であるから $2n=732$ である。計算の結果フーリエ振幅 R_i は図二のように第 1項目すなわち年周期の温度波が一番卓越し $R_1=13.2^\circ\text{C}$ になる。第 2項目以降の R_i は急激に減少して 10^{-1} のオーダーになるが、第 366項目 (1日周期) を中心として再びピークを示す。このとき $R_{366}=2.0^\circ\text{C}$ である。そしてこのピ

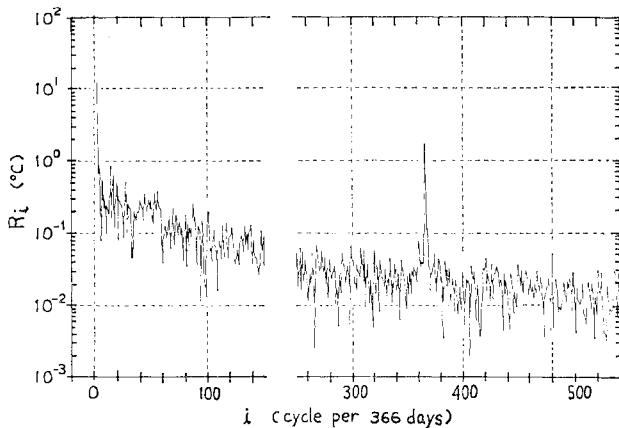


図-2 θ_0 のフーリエ振幅

ークが過ぎると R_i は 10^{-2} のオーダーまで漸減していくのがわかる。したがってトンネル外気温は年周期と日周期の2つの卓越した周期によって代表することができそうである。

トンネル坑口から約 50 m に入ったトンネル内の気温 θ_T の R_i は、 θ_0 のそれよりも約 1.4°C 小さくなっている。他の R_i ($i \neq 1$) も全般的に平行移動した形でごくわずかに θ_0 のそれより小さいが、周波数特性としてはほとんど変わらない。

また S08 工区におけるつらら防止工部の延長幅 w の中心に対する断熱材表面温度 θ_H と覆工表面温度 θ_W の R_i はそれぞれ 11.3°C と 5.0°C であり、断熱材の表裏で約 6.5°C の温度振幅の減少が現われる。そして i が大きくなるに従って、すなわち高周波数になるに従って両者の R_i の開きは拡大し、 $10^1 \sim 10^2$ 倍のオーダーの差がみられる。

一方 S08 工区のつらら防止工部と無施工部の覆工背面温度 θ_R における R_i を比較すると、後者は低周波数領域(約 6 日周期まで)においては前者よりもかなり大きく、温度波がなかなか減衰していかない。しかし高周波数領域においては $R_i = 10^{-2} \sim 10^{-3}^\circ\text{C}$ であって両者の差はあまりない。

なお式 (1) における年平均気温はいずれの測点においてもほぼ等しく、 $t_m = 7.1^\circ\text{C}$ である。

(2) 温度の年振幅と日振幅

前節によればトンネル内気温 θ_T は年周期と日周期の2つの卓越する温度波によって代表できることが示された。そこで、この2つの温度波のみが存在するものと仮定し、日平均気温の月別変化から得られる年振幅 A_Y と、日最高気温と日最低気温の差として求められる日振幅 A_D の月別平均値について概説する。

A_Y についてはフーリエ解析値とほとんど差はなく、

トンネル内気温 θ_T では $A_Y = 11.5 \sim 13.2^\circ\text{C}$ である。一方 θ_T に対する A_D の月別変化は、図-3 に示すように、傾向的には夏高冬低を呈する。いずれにせよ平均値としては $A_D = 1.8^\circ\text{C}$ 程度である。なおトンネル外気温 θ_0 の日振幅の年平均値は $\bar{A}_D = 3.3^\circ\text{C}$ であり、そのうち 2 月における \bar{A}_D の標準偏差は $\sigma(\bar{A}_D) = 1.7^\circ\text{C}$ とかなり大きい。この \bar{A}_D は前節のフーリエ振幅の $R_{366} = 2.0^\circ\text{C}$ よりは大きい³⁾が、この原因は卓越周期の仮定の相違によるものであり、フーリエ解析に存在する R_{366} 前後の比較的大きなフーリエ振幅 R_i を包含することにより、この節における \bar{A}_D と等価になるものと考えられる。

4. 熱伝導率と熱伝達率の推定

(1) 熱伝導率

a) 定常熱伝導による推定

まず定常熱伝導を仮定する。この方法は気候の変動しやすい季節の変わり目である年平均温度付近では、計算値に異常が発生しやすく、かつまた年間を通じてかなりの変動もみられるので、1つの簡便な目安として使われる³⁾。

断熱材 (h)、覆工コンクリート (c) と地山 (r) の3層系において、それぞれを通過する単位日(日平均温度)当たりの熱量が等しいものとして、1次元定常熱伝導によって求められた熱伝導率比 λ_r/λ_c は S08 工区について図-4 のようになる。 λ_r/λ_c はトンネル内気温 θ_T に依存することなく分布しており、月平均値は $\lambda_r/\lambda_c = 1.09$ で、その標準偏差は 0.15 である。

また λ_h/λ_c についても図-4 と同様な傾向を有し、その平均値は $\lambda_h/\lambda_c = 0.88 \times 10^{-2}$ 、標準偏差は 0.80×10^{-3} である。

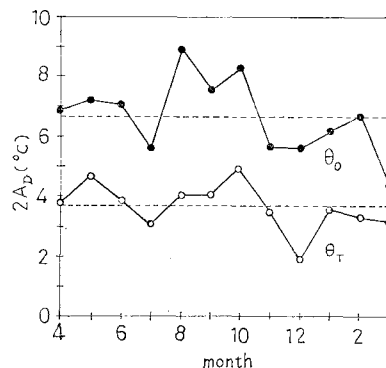


図-3 $2A_D$ の月別変化

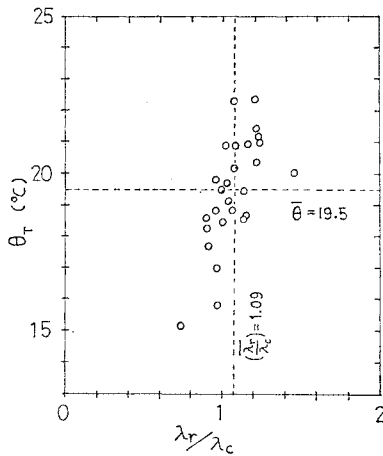


図4 S08 工区における θ_r と λ_r/λ_c の関係 (8月)

b) 非常常熱伝導による推定

トンネル地山の温度は本来非常常熱伝導問題として処理すべきものである。トンネルの非常常熱伝導を考えると、土被りの薄いトンネル直上部や側壁とインパートの隅角部を除けば、おおむね1次元非常常熱伝導として扱ってもよいことが確かめられている^{6),7)}。そこで年周期のみの温度波を対象とした半無限平面の周期的熱伝導としてトンネル地山の熱伝導率を概算する。

半無限平面の表面温度が、 ω を角速度としたとき、

$$\theta(0, t) = t_m + A_Y \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (2)$$

のように周期的に変化する場合、 x を覆工表面からの深さとした1次元非常常熱伝導方程式、

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

による解は、

$$\theta(x, t) = t_m + A_Y \sin(\omega t - x\sqrt{\omega/2a}) \exp(-x\sqrt{\omega/2a}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられることは周知のとおりである。 a は温度伝導度で、 λ を半無限体の熱伝導率、 c と ρ をそれぞれ比熱と単位体積重量とすれば、

$$a = \lambda/c\rho \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。

x における年周期の温度振幅を A として、その振幅比を

$$\Delta = A/A_Y \quad \dots\dots\dots (6)$$

とすれば、式(4)より、

$$x = -\sqrt{2a/\omega} \cdot \log_e \Delta \quad \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。式(7)を式(5)に代入し a を消去すれば λ は容易に求められる。

さて、a) で述べたように $\lambda_r/\lambda_c = 1$ であるから覆工コンクリートと地山はこの場合半無限平面と仮定することができ、式(7)より得られる λ は表-1の右欄のよう

表-1 無施工部における λ の推定

無施工部	x (m)	Δ (l)	a (m^2/h)	λ ($kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$)
S08 工区	1.58	0.457	1.46×10^{-3}	0.79
S04 工区	1.20	0.548	1.43×10^{-3}	0.77
S02 工区	1.54	0.525	1.93×10^{-3}	1.04
S02 工区*	1.24	0.578	1.83×10^{-3}	0.98

* h_F に基づく計算値

になる。さらに 5.(1), b) で示す凍結深度 h_F からも同様に計算することができ、式(6)で $A=t_m$ 、式(7)で $x=h_F$ とおくことにより表-1の最下欄の値が得られる。いずれにせよ、 $\lambda=0.8 \sim 1.0 kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$ と推定され、 $\lambda_c=1 kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$ (7.(3), a)) とした定常熱伝導によるものとほぼ一致する。

(2) 熱伝達率

a) 覆工壁面付近の温度分布

単線鉄道程度の断面を有するトンネルにおいては、トンネルの表面粗度と入口の形状による渦の影響を勘案し助走距離の間の断面内速度分布の遷移を考慮しないことにすれば、入口付近を除いたトンネル内では乱流であると仮定できよう⁶⁾。そうした場合、同時に面直角方向の気流温度分布も生じ、これが一定温度になるまでの壁面からの厚さを温度境界層とよんでいる。

初山別トンネルの北方坑口より約70mに位置するS08工区のレールレベルより1.2mの高さにおける覆工壁面付近の温度分布調査によれば、図-5のように覆工表面近くで温度の直線的な立ち上がりが見られた後、しだいに一定値に漸近する。この温度境界層は覆工表面から1.5~3.0cmの範囲にあって、少なくとも5cm離れば、トンネル内気流としての一般流の温度に等しくなることがわかる。

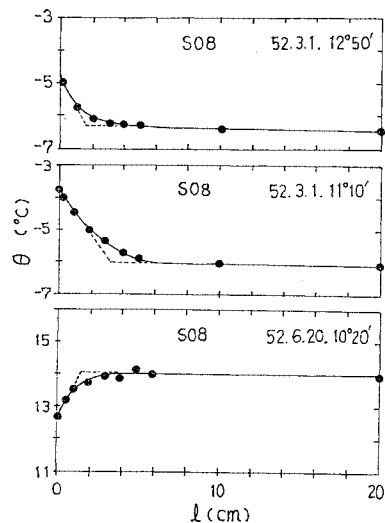


図-5 S08 工区における温度境界層 (無施工部)

トンネル内気温 θ_T (一般流の温度) と覆工表面温度 θ_W とは後述の熱伝達率と結びつけられるが、ここでは S08 工区を例にあげ、両者の日平均温度の差 $\Delta\theta (= \theta_W - \theta_T)$ について考察する。厳寒期の 2 月に着目すれば θ_W が低くなればそれに対する $\Delta\theta$ は大きくなる傾向を示し、それら実測値の $\Delta\theta$ と θ_W の関係は傾向的には 1 次式で表わすことができそうである。そのとき日平均温度を入力した最小二乗法によれば、

$$\Delta\theta = -0.435 \theta_W - 0.779 \dots\dots\dots (8)$$

で代表できる。式 (8) は S04 工区においても、また上羽幌トンネルの S30 工区でもおおむね満足することが確認されている。さて厳寒期の 2 月から月令が進むと θ_W はしだいに高くなるが、それぞれを月別に整理する限りにおいては、式 (8) と同様 $\partial\Delta\theta/\partial\theta_W$ は負となる関係を有する。

$\Delta\theta$ の月平均値を月別変化として示すと 図-6 の実線のようになり、2 月に $|\Delta\theta|$ は最高となる変形した正弦曲線を示し、 $\Delta\theta \leq 1.6^\circ\text{C}$ となる。一方、S04 工区のつらら防止工部の断熱材表面温度の日平均温度 θ_H と θ_T との差 $\Delta\theta'$ も 図-6 に破線で与えられるが無施工部と同様の傾向を示す。しかし $\Delta\theta'$ はかなり小さく、厳寒期には $\Delta\theta' \leq 0.6^\circ\text{C}$ となる。

b) 熱伝達率の推定

1 次元定常熱伝導を仮定したときの覆工コンクリート表面とトンネル内気流との熱伝達率 α と λ_c の比は、各工区の無施工部の年平均値として $\alpha/\lambda_c = 4.0 \sim 4.3 \text{ m}^{-1}$ である。一般には α/λ_c は夏と冬に大きく、たとえば 2 月の月平均値は $\alpha/\lambda_c = 4.7 \text{ m}^{-1}$ でありその標準偏差は 1.9 m^{-1} である。また α は a) で述べた $\Delta\theta$ と関係があり、 $|\Delta\theta|$ が大きいと α/λ_c は大きくなるようである。

つらら防止工部の断熱材表面とトンネル内気流との α も同様の仮定により計算を行うと、年平均値としては $\alpha/\lambda_c = 3.8 \text{ m}^{-1}$ となり、またこの α と $|\Delta\theta|$ の関係もともに前者の無施工部とほぼ同じ傾向を示している。

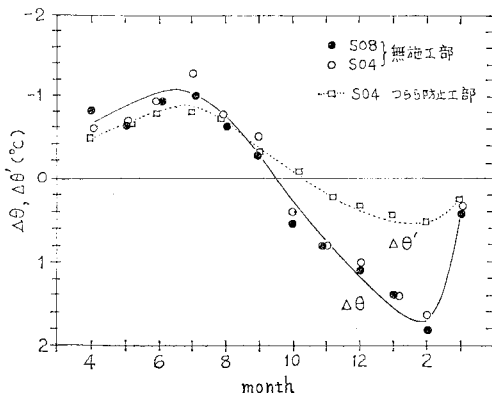


図-6 $\Delta\theta, \Delta\theta'$ の月別変化

5. トンネル横断方向の温度分布と断熱効果

(1) つらら防止工部

トンネル横断方向の温度分布 (月平均値) は 図-7 のように描かれる。図は S30 工区におけるつらら防止工 B 型の例であるが、断熱材厚 $d_h = 35 \text{ mm}$ の影響を受けて、温度振幅は覆工表面において急縮し、それ以後では緩やかな勾配を示している。この温度勾配は明らかに温度伝播の非定常性を表わしており、トンネル内空から地山深奥にかけての温度の位相遅れが存在する。

覆工表面温度 θ_W は厳寒期においても 3°C 程度を保持しており、 $t_m = 7.1^\circ\text{C}$ のこの地方ではつらら防止工として十分効果を發揮しているといえよう。

なお、S30 工区のつらら防止工 A 型では防水板と覆工表面との間の空気層のために覆工表面の温度振幅は 図-7 のつらら防止工 B 型のそれよりも少し小さくなる。したがって断熱効果としてはつらら防止工 A 型の方がわずかに有利であるといえそうである。しかし覆工以深の温度分布は両工法ともあまり相違はなく同様の形状を示しながら逓減している。

(2) 無施工部

a) トンネル横断方向の温度分布

無施工部における温度分布は (1) よりははるかに緩やかな温度勾配を有し、覆工表面から地山にかけて徐々に温度振幅が逓減しており、トンネル横断方向の各測点に

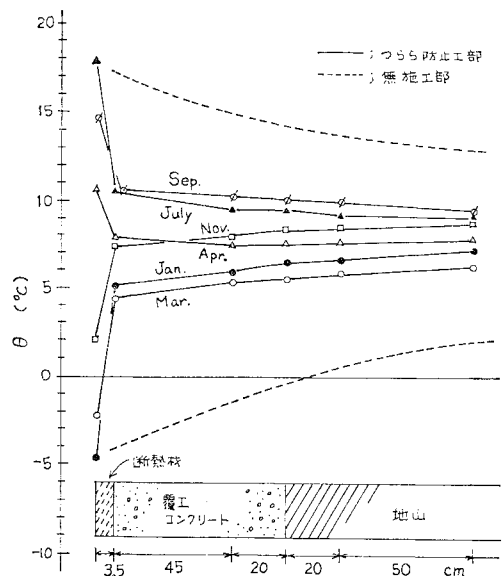
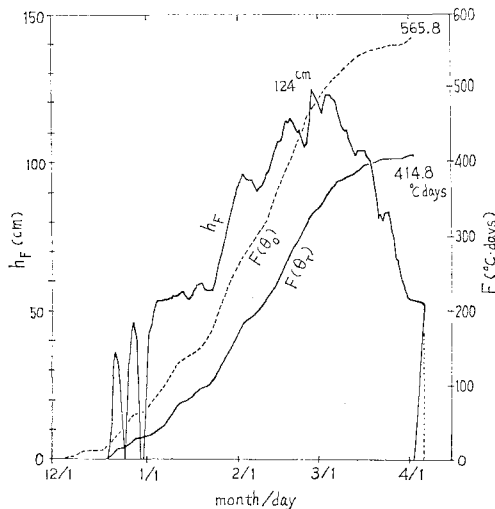


図-7 つらら防止工部におけるトンネル横断方向の温度分布 (S30 工区、つらら防止工 B 型)

おける月平均温度の最大値あるいは最小値の包絡線は図一7の破線のようになる。これからトンネル内気温 θ_T で $2A_Y=23.9^\circ\text{C}$ の年振幅は覆工背面より 70 cm 深奥の地山でも $2A=13^\circ\text{C}$ しか低下しないことがわかる。この包絡線が 0°C 線を切る位置が凍結深度 h_F となるが、それは覆工背面よりさらに深い地山まで達している。

b) 凍結深度

トンネル内気温 θ_T の低下につれて、覆工背面温度 θ_R は位相を遅らせながら低下していくが、 θ_R が正から負に転ずるときには約 2 週間 0°C を保持し続けることが測定された。この現象は覆工背面における地山中の水分の凍結による相変化に潜熱が費やされたことを意味しているものと考えられる。また融凍期も類似の現象が起こる。このようにして凍結は約 4 か月間トンネル地山内で続くことになるが、トンネル横断方向の各測点の日平均温度から得られる凍結深度 h_F の経日変化は図一8のように示される。図は S02 工区の無施工部の例であるが、積算寒度 $F(\theta)$ が上昇するにつれて h_F も大きくなる。しかし $h_F=54\text{ cm}$ 付近では覆工背面における地中水の凍結のために1月初旬と3月下旬以降に h_F が一定となる期間が存在する。4月に入ってトンネル内気温 θ_T が正となっても覆工背面の凍結が続いているために覆工中にポケット状に凍結領域が存在することになる。したがってこの例では、トンネル断面のどこかが凍結領域となっている期間は $d_F=110\text{ day}$ であり、覆工表面が 0°C になった日から 71 日目に凍結深度は最大となり、 $h_{F,\text{max}}=124\text{ cm}$ に達する。これは覆工背面以深 70 cm にも及ぶものである。初山別トンネルの積算寒度は $F(\theta_T)=414.8^\circ\text{C}\cdot\text{day}$ であるから、周知の一般式¹⁾から得られる熱的定数は $\beta=6.09\text{ cm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{day})^{0.5}$ であ



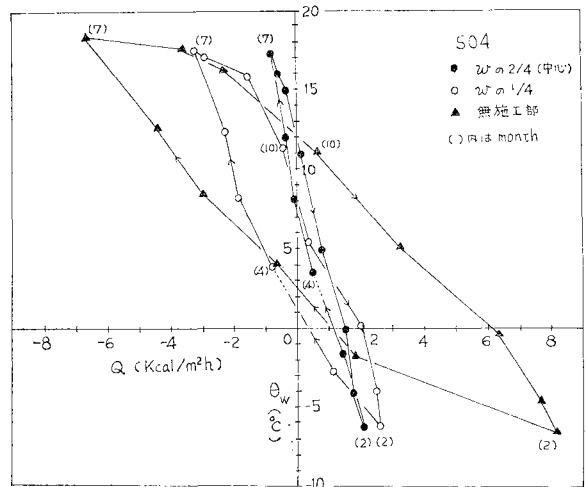
図一8 S02 工区における h_F と $F(\theta)$ の経日変化(無施工部)

る。また上羽幌トンネル (S30 工区) では $F(\theta_T)=513.4^\circ\text{C}\cdot\text{day}$ であるので $h_F=93\text{ cm}$ から $\beta=4.10\text{ cm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{day})^{0.5}$ となった。

6. トンネル軸方向のつらら防止工の温度分布

(1) つらら防止工の流入熱量と 2 次元温度分布

覆工背面における地山からの流入熱量 Q が、つらら防止工のトンネル軸方向の位置によって、年周期としてどのような挙動を示すかは図一9によって説明される。 Q は日平均温度をもとに $\lambda_c=1\text{ kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ を入力して求めた定常熱伝導の月平均値であるが、無施工部の覆工表面温度 θ_W を縦軸にとると長円を描くのがわかる。無施工部から断熱材延長幅 w の中央にかけて、長円の長軸の傾きは大きくなるのみならず、長円の幅は狭くなっていくことがわかる。このことは w の中央から離れるに従って Q の出入が大きくなると同時に、 θ_W と Q の位相差が大きくなることを示すものである。このように w の位置によっては Q はかなり変化するものであり、厳寒期の2月における S04 工区の Q は図一10のようになる。 Q は温度勾配に比例するが、図一10には断熱材、覆工コンクリートと地山系の等温線が実測値に基づいて描かれている。等温線の密度は断熱材の中で非常に濃くなっているが、反対にその奥の地山では非常に疎であり、断熱効果が明瞭である。 0°C の等温線は無施工部においては、覆工背面以深の地山の中にあるのに対し、 w の中心では断熱材厚 d_h の中にある。ここで 0°C の等温線が覆工表面を切る点と断熱材端部との距離を余裕幅 L_n とよぶ。図一10では $L_n=0.8\text{ m}$ となるが、この区間はつらら防止工の横(無施工部)からの寒気の



図一9 θ_W と Q の関係 (S04 工区)

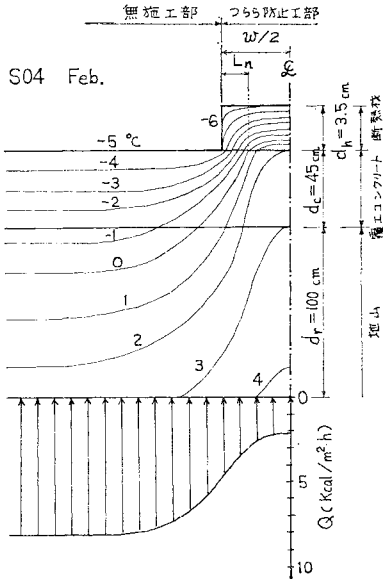


図-10 S04 工区における等温線と流入熱量（2月）

回り込みによって、断熱材で被覆されているにもかかわらず、覆工表面が 0°C 以下に冷却されるところである。つまりつらら防止工として有効な保温幅は $(w - 2L_n)$ で与えられることになる。したがって図-10 では $w = 4.0$ m に対して有効幅は約 2.4 m に縮小される。

(2) つらら防止工の覆工表面温度と余裕幅

余裕幅 L_n の最大値は断熱材厚 d_h と覆工表面温度 θ_w の最小値などに依存するものであるが、実測された θ_w の月平均温度の最小値を $d_h = 35$ mm の断熱材の延長幅 w (S01, S02, S04 と S08 工区) について描くと図-11 のようになる。図は $w/2$ を中心に左右対称になっており、 $w/2$ に近づくに従って、また w が大きくなるにつれて θ_w は高くなることを示している。これらの曲線群が $\theta_w = 0^\circ\text{C}$ を切る L の長さによって L_n が定ま

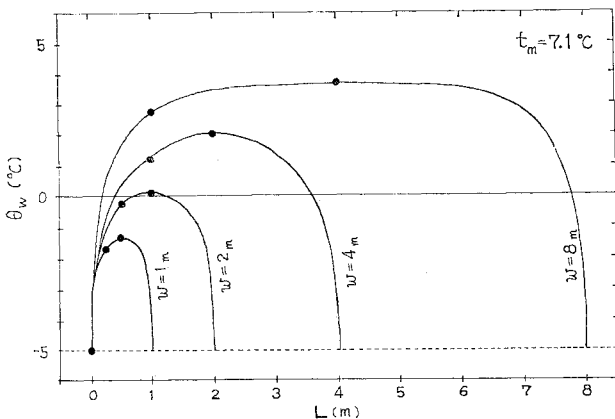


図-11 w をパラメーターとした θ_w の分布（2月）

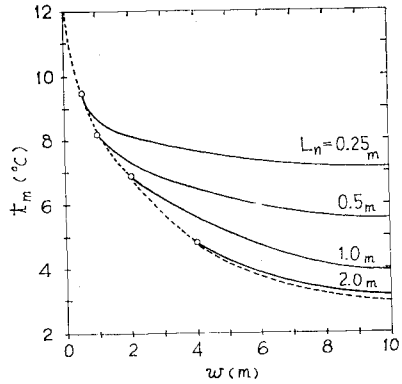


図-12 L_n をパラメーターとした t_m と w の関係 ($d_h = 35$ mm)

る。試験トンネルでは $t_m = 7.1^\circ\text{C}$ であるが、任意の t_m に対応する L_n は、図の曲線群を $\Delta t_m = t_m - 7.1^\circ\text{C}$ だけ縦軸に沿って平行移動 ($\Delta t_m > 0$ のとき上方に、 $\Delta t_m < 0$ のとき下方に) すれば得られる。その結果、 L_n をパラメーターとした t_m と w の関係は図-12 のようになる。物理的には $L_n \leq w/2$ であるから、 $L_n = w/2$ において曲線は切断されることになるが、これらを結んだ破線は、 w の中心においてのみ $\theta_w = 0^\circ\text{C}$ となる限界の t_m を与える。すなわちトンネル漏水が 1 か所だけに限られるときの必要な断熱材延長幅の最小値 w_{\min} を t_m について示すものである。一般に L_n が小さくなれば必要な t_m は高くなり、逆に t_m が低くなれば w の増加に伴って L_n は急激に大きくなっていく様子がわかる。またわが国における寒冷地の平均的な年平均気温である $t_m = 7.0^\circ\text{C}$ についてみれば、 $d_h = 35$ mm の断熱材を有するとき、 $w > 8$ m となれば、おおむね L_n は収束してこの場合 $L_n = 0.25$ m にとれば十分であるといえよう。

7. 設計断熱材厚の提案

(1) つらら防止工の非定常熱伝導モデル

トンネル地山の熱伝導は、トンネル断面を円孔や多角形として解析されることも多いが、鉄道トンネルほどの大きさの断面を有する場合には一般には 1次元（直角座標系）で解析しても大差のないことが確かめられている^{6),7)}ので、ここではつらら防止工をもつトンネルの温度挙動を 1次元非定常熱伝導問題の explicit 型差分式によって求めることにする。断熱材、覆工コンクリートと地山の 3種類が存在すること、分割要素の大きさが温度変化の大ききところほど小さくできるように

理論式を組み立てる。いま、要素の大きさが不等で、かつ異物質AとBが接する図-13(1)のような条件を考える。時刻 P における要素 m の温度を T_m^P とし、それより Δt 時間だけ経過したときのその要素の温度を T_m^{P+1} とする。そして要素 m より Δx だけ離れた要素 $m-1$ と要素 $m+1$ から単位時間に流入する熱量はそれぞれ、

$$Q_{m-1} = \lambda_A(T_{m-1}^P - T_m^P) / \Delta x_A \dots\dots\dots(10)$$

$$Q_{m+1} = \lambda_B(T_{m+1}^P - T_m^P) / \Delta x_B \dots\dots\dots(11)$$

となる。 λ は熱伝導率で添字 A, B は物質名である。式(10)、(11)の熱量が Δt 時間に要素 m に流入したときのエネルギーのつり合いは、

$$(Q_{m-1} + Q_{m+1})\Delta t = \{(\rho c)_A \Delta x_A + (\rho c)_B \Delta x_B\} \cdot (T_m^{P+1} - T_m^P) / 2 \dots\dots(12)$$

である。式(10)と式(11)を式(12)に代入し、

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \Delta x_B / \Delta x_A \\ k &= (\rho c)_B / (\rho c)_A \\ \beta &= \lambda_B / \lambda_A \\ \theta_A &= \lambda_A \Delta t / (\rho c)_A / (\Delta x_A)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

を考慮すれば、

$$T_m^{P+1} = T_m^P + 2\beta\theta_A(T_{m+1}^P - T_m^P) / \delta / (1+k\delta) + 2\theta_A(T_{m-1}^P - T_m^P) / (1+k\delta) \dots\dots\dots(14)$$

が得られる。式(14)は異物質が要素 m の中で境界を接し、その分割長さが異なる場合の非定常熱伝導差分式を与えるが、同一物質かつ要素の大きさが等しい場合には $\delta = k = \beta = 1$ であり周知の一般式と同じになる。

断熱境界あるいはエネルギーの流入条件を考えた場合には図-13(2)の要素に対して、単位時間当りの流入熱量 q^P を用いて、

$$(Q_{m+1} + q^P)\Delta t = \Delta x \rho c (T_m^{P+1} - T_m^P) / 2 \dots(15)$$

なるつり合い式が得られる。式(15)に式(11)、式(13)の第4式と、

$$h = \Delta x / \lambda \dots\dots\dots(16)$$

を代入して整理すれば、

$$T_m^{P+1} = T_m^P + 2\theta(T_{m+1}^P - T_m^P) + 2\theta h \cdot q^P \dots\dots\dots(17)$$

が得られる。断熱境界の場合には式(17)で $q^P = 0$ であることはもちろんである。

またニュートン冷却の場合には、図-13(3)に示すように流体温を T_0 、熱伝達率を α としたとき、

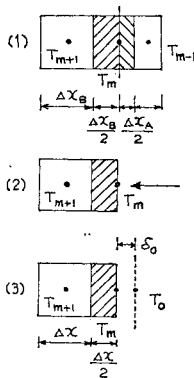


図-13 1次元熱伝導モデルの要素

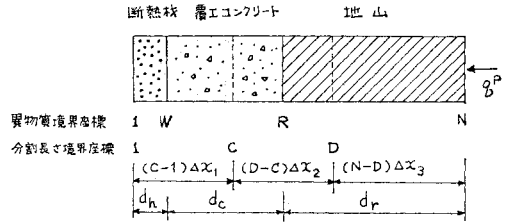


図-14 つらら防止工を有するトンネル地山の1次元モデル

$$q^P = \alpha(T_0^P - T_m^P) \dots\dots\dots(18)$$

であるから、式(18)を式(17)に代入することにより T_m^{P+1} を求めることができる。

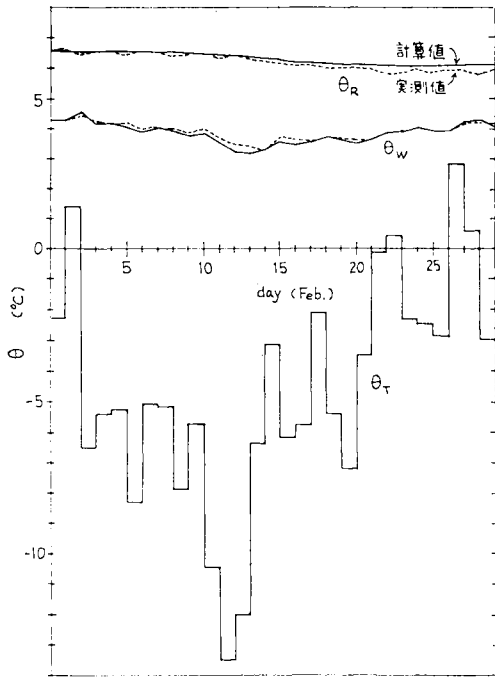
さてつらら防止工を持つトンネル地山の1次元モデルを図-14のような断熱材、覆工コンクリートと地山の3層系によって与える。系は N 個の要素からなり、異物質の境界座標は W と R であり、要素の分割長さは座標 C と D を境界に $\Delta x_1, \Delta x_2$ と Δx_3 の3種類が用いられる。

つらら防止工B型では断熱材と覆工コンクリートが密着しているが、A型では2.で述べたように漏水の流路としての空気層が存在する。そこでは固体と空気との間で熱伝達が行われることになるが、3.(1)で示したように断熱材の熱伝導率 λ_h がきわめて小さいために熱貫流率に占める熱伝達率 α の影響は非常に小さくなり、それを無視した断熱材と覆工コンクリートの異物質の接触条件が適用される。また断熱材表面とトンネル内気流についても同様であり、式(18)を用いることなくトンネル内気温 θ_T を断熱材表面温度 θ_H (座標1)に等しく仮定する。実際には4.(2)a)で述べたように、厳寒期でも $\Delta\theta' = 0.6^\circ\text{C}$ 程度の余裕をもつことになり、つらら防止工の設計には安全側の値を与える。また計算上考慮すべき地山の厚さ d_r を十分大きくとった場合の座標 N の温度 θ_N はほぼ年平均気温 t_m に収束するので $q^P = 0$ とした式(17)を用いることにする。

(2) 実測値と計算値の比較

上述のトンネルモデルをS30工区に適用し、2月の日平均気温 θ_T を入力して計算した覆工表面温度 θ_W と覆工背面温度 θ_R の経日変化は図-15のようになる。ここでは $\lambda_c = 1 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ と仮定し、 λ_h と λ_r は4.(1)a)の方法で求めた値を用いたほかは後述の(3)と同じ定数を入力した。 θ_T は図-15のように24時間ごとに変化する日平均気温の階段波を適用しているが、計算値は実測値に十分対応できることを示している。

また年周期の温度波についてS30工区を対象として解析したときの断熱材表面温度 θ_H と覆工表面温度 θ_W の位相差、 θ_W と覆工背面温度 θ_R のそれは、それぞれ



図—15 S30 工区(つらら防止工A型)に対する計算値と実測値の比較

31 day と 12 day であるが、式 (1) による実測値のフーリエ解析の位相差 φ_1 は約 31 day と約 14 day であり、温度の位相特性についても計算値は実測値をほぼ満足する。

したがって (1) で示した explicit 型差分式による非定常熱伝導トンネルモデルは、実際のトンネルの温度挙動を十分説明できるものであると考えられる。

(3) つらら防止工の温度解析

a) 入力定数の仮定

つらら防止工をもつ 図—14 のようなトンネルモデルに対する入力定数のうち、コンクリートの熱伝導率は材

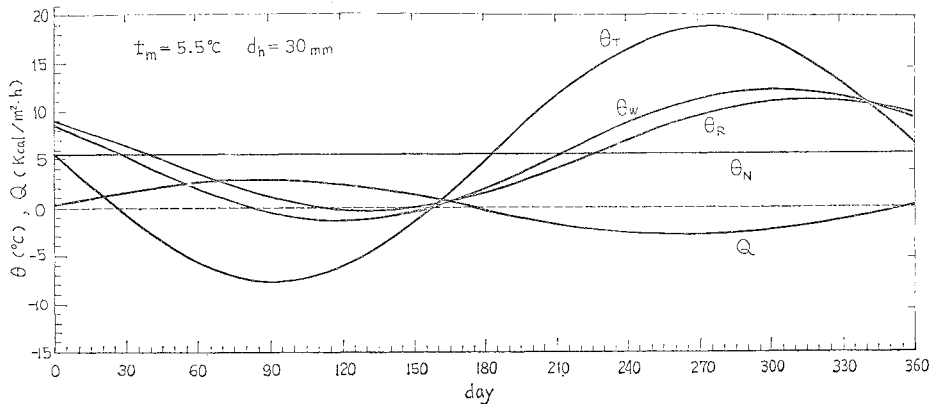
料の配合によって変化しおおよそ $0.7 \sim 1.2 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ であるので、ここでは $\lambda_c = 1.0 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ と仮定する。断熱材の熱伝導率 λ_h は独立気泡型である場合施工時の発泡倍率と雰囲気温度(施工時あるいは供用時の周辺温度)によってかなり変動するので、実測値である 4. (1) a) よりは大きく、安全側の $\lambda_h = 0.015 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ とする。また地山の熱伝導率 λ_r は、4. (1) で述べた供試トンネルの実測値では $\lambda_r/\lambda_c = 1$ であるが、一般には岩種により $1 \sim 2.5 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ 程度にばらつくようである。ここでは安全側を考え、かなり緻密な岩石から構成されるものとし、 $\lambda_r = 2.0 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ と仮定する。さらに断熱材、覆工コンクリートと地山の比熱×単位体積重量は、それぞれ $(c\rho)_h = 0.5 \times 100$, $(c\rho)_c = 0.2 \times 2700$, $(c\rho)_r = 0.2 \times 2700 \text{ kcal/m}^3\cdot\text{°C}$ とする。このとき覆工コンクリートに対する断熱材と地山の比である式 (13) の k と β はそれぞれ $k_H = 0.092$, $k_R = 1.0$, $\beta_H = 0.015$, $\beta_R = 2.0$ である。なお計算上考慮すべき地山の厚さ d_r は、上の入力定数を用いた式 (7) により $d = 0.05/13$ 程度の収束を考慮した $d_r = 9.5 \text{ m}$ を目安とした。

またトンネル内気温 $\theta_T (= \theta_1(t))$ は 3. (1) で述べたように概略年周期の正弦曲線で表わすことができ、 t を日 (day) としたとき、

$$\theta_1(t) = t_m + A_Y \sin(2\pi t/366) \dots\dots\dots (19)$$

とする。年振幅は 3. の実測値を参考として $A_Y = 13.0\text{°C}$ と仮定する。

b) 年平均気温と覆工表面温度、覆工背面温度の関係
トンネル内気温 θ_T は式 (19) に従うから、トンネル断面の温度分布も t_m を中心に変動することになる。その経日変化の一例は 図—16 に示される。これは $t_m = 5.5\text{°C}$, $d_h = 30 \text{ mm}$ に対する覆工表面温度 θ_w , 覆工背面温度 θ_R と覆工背面より約 15 cm 離れた地山における流入熱量 Q の応答を描いたものである。この場合 θ_T が 0°C 以下になるのは 27 day ~ 156 day までの 129 日



図—16 θ と Q の経日変化 ($d_h = 30 \text{ mm}$)

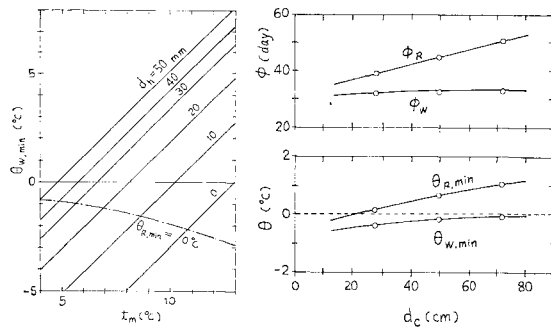
間であるのに対して、 θ_W は 87 day から氷点下になり始め 70 日後の 157 day までそれが続くことがわかる。そして θ_T と θ_W の位相差は約 50 day である。また θ_R が氷点下になるのはわずか 34 日間にすぎず、再び 0°C 以上になるときは θ_T のそれとあまり変わらないようである。

図—16 において θ_W の最低値は 121 day に起こり、 $\theta_{W,\min} = -1.23^\circ\text{C}$ になるが、任意の t_m に対しては、 $\Delta t_m = t_m - 5.5(^\circ\text{C})$ だけ正弦曲線を縦軸に沿って平行移動 ($\Delta t_m > 0$ のとき上方に、 $\Delta t_m < 0$ のときは下方に) すれば、それぞれの t_m に対応する $\theta_{W,\min}$ を求めることができる。これを種々の断熱材厚 d_h についてまとめると図—17 のようになる。 t_m が一定のとき d_h が厚くなれば $\theta_{W,\min}$ は収束する傾向を有するが、図—17 の直線群が $\theta_{W,\min} = 0^\circ\text{C}$ を切るときの t_m が、 d_h の厚さを持つつら防止工の限界の年平均気温となる。したがって t_m が低下すれば必要な d_h は加速度的に厚くする必要のあることがわかる。

一方、覆工背面温度の最小値を $\theta_{R,\min}$ としたとき、 $\theta_{R,\min} = 0^\circ\text{C}$ に対応する t_m と d_h の関係は図—17 に一点鎖線で示されるようになる。もし地山が相変化 (水 \leftrightarrow 氷) を起こす性質を具備するものであれば、一点鎖線より下の領域に対しては厳密には潜熱の影響を考慮する必要がある。しかし $\theta_{W,\min} = 0^\circ\text{C}$ に対する限界の t_m は $\theta_{R,\min} = 0^\circ\text{C}$ に対応するそれよりも常に高いので、つら防止工として考慮する場合はこの解析で十分である。

c) 覆工コンクリート厚の影響

これまでは覆工コンクリート厚の標準値を $d_c = 50\text{cm}$ として解析したものである。しかし現実の鉄道トンネルの d_c は地質条件により 30~80 cm とかなり変化する。そこで $d_h = 40\text{mm}$ を例にあげ、 d_c の変動に伴う $\theta_{W,\min}$ と $\theta_{R,\min}$ の応答を示すと図—18 のようになる。a) で示したように $\lambda_c = \lambda_r/2$ であるので、 $\theta_{R,\min}$ と $\theta_{W,\min}$ は d_c の低下とともに低くなる傾向を有するが、 $d_c = 20\sim 80\text{cm}$ の変化に対して $\theta_{W,\min}$ の差は 0.4°C



図—17 t_m と $\theta_{W,\min}$ の関係

図—18 d_c の変化に伴う θ と ϕ の関係

程度でほとんど問題にならない。また θ_T と θ_W の位相差も $\phi_w = 33\text{ day}$ でおおむね一定であることがわかる。

一方、 $\theta_{R,\min}$ とその位相差 ϕ_R は、 d_c 自体の変化に伴ってトンネル内壁からの距離が定まるので、 d_c にほぼ比例して大きくなる。いずれにせよ、つら防止工の断熱材厚を考えるうえでは $\theta_{W,\min}$ が $\theta_{R,\min}$ よりもより問題となるのであるが、 d_c の変化に対してはあまり影響がないといえそうである。

d) トンネル内気温の日周期の影響

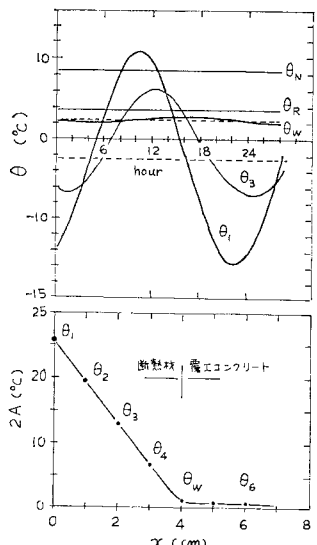
上述の解析は年周期の温度波に対するものであるが、3. で示したようにもう 1 つの卓越周期である日周期の θ_W に及ぼす影響を考慮する必要がある。入力する温度関数は式 (19) の代わりに、 t を時 (hour) とした、

$$\theta_i(t) = A_D \sin(2\pi t/24) \dots\dots\dots (20)$$

を用いる。

いま $A_D = A_Y = 13.0^\circ\text{C}$ の仮定のもとに $d_h = 40\text{mm}$ のときの断熱材付近の温度振幅を描いてみると 図—19 の下図のようになるが、断熱材表面の $2A_D = 26.0^\circ\text{C}$ は断熱材の中で急激に減少して覆工表面では $2A = 0.75^\circ\text{C}$ 程度になってしまう。これを経時変化として描いたのが 図—19 の上図である。図は年周期 ($t_m = 8.5^\circ\text{C}$) について求めた $\theta_{W,\min}$ のときの各断面温度に、日周期の波を重ね合わせたものであるが、温度振幅の減衰の状態とともに日周期の温度の位相差の関係が読み取れる。 θ_T と θ_W の間の位相差は約 3 時間であるが、この傾向は実測値とほぼ一致していることが確かめられている。

θ_W の温度振幅は d_h が薄くなると大きくなることは十分予想されるが、 $d_h > 10\text{mm}$ になれば急激に温度振幅は小さくなり A_D の 1/10 程度になる。解析の結果に



図—19 日周期に対する温度振幅と温度の経時変化

よれば $A_D=13^\circ\text{C}$ の日周期による覆工表面の温度振幅 $\Delta\theta_W$ は、 $d_h=10, 20, 30, 40$ と 50mm に対してそれぞれ $\Delta\theta_W=1.5, 0.75, 0.5, 0.3$ と 0.2°C 程度になる。一方、覆工背面における日周期の温度振幅は $d_h > 10\text{mm}$ では 10^{-2} のオーダーとなり、実用上は無視しても十分である。

なお式 (20) における $\theta_1(t)$ の日振幅 A_D としては、余裕をとって 3.(2) の θ_T から推定することにすれば、 $A_D = \bar{A}_D + 2\sigma(\bar{A}_D) = 6.7^\circ\text{C}$ を考えておけば十分である。

e) 設計断熱材厚

断熱処理によるつらら防止工法に必須な断熱材厚 d_h は覆工表面温度が $\theta_W > 0^\circ\text{C}$ であることが条件である。それは図-17 の d_h の直線群が $\theta_W=0^\circ\text{C}$ を切る t_m によって定められるが、その最小の断熱材厚を限界断熱材厚 $d_{h,l}$ とよぶことにする。図-17 から得られる $d_{h,l}$ と t_m の関係は図-20 の $A_D=0^\circ\text{C}$ の曲線のようになる。この曲線は $A_Y=13.0^\circ\text{C}$ の年周期によって解析されているが、日周期である A_D の影響は考慮されていない。しかし d) で述べたように、 A_D の大きさによっては若干の補正が必要となる。それは $\theta_W=0^\circ\text{C}$ により定められた $d_{h,l}$ に対応した t_m に、d) の $\Delta\theta_W$ の余裕をとればよいことになり、その結果 $A_D=13.0^\circ\text{C}$ と 6.5°C の修正曲線が図-20 に追加される。 $t_m > A_Y + A_D$ の場合には断熱材を必要としないが、 $A_Y + A_D \geq t_m > A_Y$ の場合には日振幅の中において $\theta_{W,\min} < 0^\circ\text{C}$ となるときが存在するので若干の $d_{h,l}$ が必要となることも図に示される。

図-20 の $d_{h,l}$ はトンネルを1次元モデルで仮定したこと、断熱材表面とトンネル内気流との温度差を無視したこと、またつらら防止工A型については覆工表面と防水板との間の空気層内の熱移動を考慮していないことなどを含めるとかなり安全側に見積られているといえそうである。したがって土被りの十分あるトンネルで、断熱

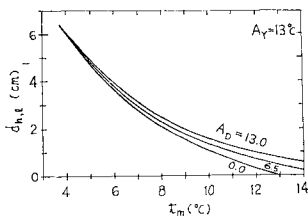


図-20 $d_{h,l}$ と t_m の関係

材の延長幅 w が十分大きいところでは、 $d_{h,l}$ をそのまま設計断熱材厚と考えてもよいであろう。しかし w の狭い場合や、断熱材端部付近では 6.(2) の余裕幅 L_n の影響を考慮せねばならないのはもちろんである。

8. 結 論

トンネルの凍結深度が 1m にも達するような寒冷地においても、断熱処理工法を適用することにより、確実につららを防止することのできる事が、トンネル地山の温度挙動から結論された。さらにトンネル内気温の卓越周期と振幅、トンネル断面温度などの温度挙動に関する解析結果をふまえて、つらら防止工を含むトンネルモデルの1次元非定常熱伝導差分式を提示し、その解析値が実測値を十分満足することを確認した後、そのモデルを用いて年平均気温と気温の日振幅によって当工法に必須な断熱材厚を提案した。

断熱処理によるつらら防止工法は鉄道トンネルにおける冬期の保守作業を一気に解決するものとして保守側から歓迎され、当解析結果にもとづいて多くのトンネル改良が実施されている。またトンネル建設側からは寒冷地におけるトンネルに当工法が応用され、メンテナンスフリーを目指した新しいトンネルの標準設計のための施工実績が作られつつある。

参 考 文 献

- 1) 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。
- 2) 岡田・川口・多田：トンネルの凍害防止に関する現地試験，土木学会第31回年次学術講演会概要集，1976年10月。
- 3) 岡田・後藤・川口：トンネルのつらら防止工法の現場試験，土木学会第32回年次学術講演会概要集，1977年10月。
- 4) 岡田：表面断熱処理によるトンネルのつらら防止工法の設計断熱材厚，土木学会第33回年次学術講演会概要集，1978年9月。
- 5) 福地：新幹線雪害対策に関する雪氷工学，日本鉄道施設協会，JREA, Vol. 20, No. 1, 1977年。
- 6) 福地：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年3月。
- 7) 岡田：単線鉄道トンネル周辺の地山の温度挙動に及ぼす土被り効果，鉄道技術研究所速報，No. 78~120, 1978年8月。
- 8) Aldrich, H.P.: Frost Penetration below Highway and Airfield Pavements, Highway Res. Board. Bull., 135, 1956.

(1979.12.27・受付)