

# 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变化に対するその解析

ACTUAL STATE OF FROST PENETRATION DEPTH IN RAILWAY TUNNEL AND ITS ANALYSIS AGAINST PERIODIC CHANGE OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE

岡田 勝也\*・松本 嘉司\*\*

By Katsuya OKADA and Yoshiji MATSUMOTO

In many tunnels, icicles and side-wall ices usually grow, and frost heaves at back of lining occur. This paper deals with some actual states of frost penetration depth in railway tunnels and its simulation analysis. First, daily fluctuations and maximum values of frost penetration depth are described about a few actual tunnels. Next, they are simulated by a tunnel ground model which is a one-dimensional nonsteady state heat convection/conduction difference equation considering the latent heat. The analytical results agree with the measured ones. Then using the tunnel ground model, behaviors of daily fluctuations, etc. of frost penetration depth are analysed against a yearly periodic change of atmospheric temperature in tunnel.

*Keywords : frost penetration depth, railway tunnels, simulation analysis, nonsteady state heat convection/conduction, yearly periodic change*

## 1. まえがき

鉄道トンネルにおける冬期の保守作業は厳寒の未明に人力によって行われるつらら落としという過酷な作業によって代表されてきたが、近年トンネルの覆工表面を断熱材で被覆する表面断熱処理によるつらら防止工法<sup>1,2)</sup>が開発され、労働環境は著しく改善された。

しかし、このようなつらら防止工を施工していない寒冷地の多くのトンネルでは、つららや側氷の発生に加えて、凍結深度が覆工背面に及び、地山の凍上によって覆工の押し出しや水平クラックなどの変状を発生させる。

当論文は鉄道トンネルの凍結深度に着目し、凍結深度の経日変化の実態を述べ、凍結融解なる相変化を考慮した熱伝達・熱伝導トンネル地山モデルによってシミュレーションを行い、その結果が実測値を十分満足することを確認したうえで、トンネル内気温の周期的変動に対する凍結深度の進退について考察したものである。

## 2. トンネルの凍結深度に関する調査と解析に関する過去の研究経過

### (1) トンネルの凍結深度の調査に関する研究経過

鉄道トンネルの凍結・凍上に関する調査は1939年に開設された札幌鉄道局の凍上対策委員会に始まり、1944年に小野と真井<sup>3)</sup>が深名線多度志トンネル、根室本線古瀬トンネル、瀬棚線若松トンネル、さらに花輪線龍ヶ森トンネル、腰森トンネル、山田線小屋の沢トンネル、第二飛島トンネルの覆工の凍害と変状を報告したが、トンネル内気温の測定のみで地山温度の計測はしていない。

トンネル覆工と地山温度の測定については1960年谷が浦幌トンネルにおいて行ったが、鉄道トンネルにおいては1970年興浜線雄武トンネルにおいて覆工背面裏70cmまでの地山温度が測定された。さらに斎藤<sup>4)</sup>が函館本線神居トンネル、嵐山トンネルなどの測定を実施し、1971年には吉田<sup>5)</sup>が東北本線中山トンネルで、また西沢ら<sup>6)</sup>は第二小繫トンネルで、五能線大間越トンネルで、1972年に古川は函館本線狩太トンネルの温度測定を行った。その後も東北新幹線の建設時には箕輪トンネルなどでも測定が実施された。これらの多くは断片的な地山温度の測定に限られてはいるが、寒冷期には覆工背面の地山まで凍結深度が及ぶことを示している。しかし、

\* 正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部 主幹 (〒185 国分寺市光町2-8-38)

\*\* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 野田市山崎2641)

トンネル内気温も含め長期間にわたる経時変化として整理されたものは少ない。

一方、断熱処理によるつらら防止工法の開発試験の一環として、岡田らは1975年に名羽線上羽幌トンネル<sup>1)</sup>、1977年に羽幌線初山別トンネル<sup>2)</sup>、1983年に室蘭本線蘭法華トンネル<sup>3)</sup>、1986年に根室本線直別トンネル<sup>4)</sup>において断熱工区間とともに無施工の一般区間にについてもトンネル内気温と地山温度に関して詳細な測定を実施しトンネル地山の温度挙動の実態を明らかにした。

## (2) トンネルの凍結深度算定に関する過去の研究経過

凍結・融解を伴う相変化を考慮した熱伝導の解析は Franz Neumann や Joseph Stefan の研究に始まる<sup>10)</sup>。その後、Berggren と Aldrich<sup>11)</sup>は緩やかな温度の低下に対して Neumann の解に補正係数を導入して実用的な地盤の最大凍結深度の算定手法を提案した。伊福部<sup>12)</sup>は道路の路盤の凍結についてこれらの理論を展開して凍上と置換率を提案した。しかしこれらによても凍結深度の経日変化や経時変化を追跡することはできない。

このような変動する表面温度に対する地盤の間隙水の相変化を考慮した熱伝導解析は有限要素法や階差法によらねばならない。後者については Eyres, Price と Slack らの報告にみられる conventional 法, Murry と Landis による移動温度点法と固定点法, Goodman らの heat balance integral 法, 片山・服部の方法<sup>13)</sup>, 柳沢・由川の法<sup>14)</sup>などがあり、また変分不等式による菊地・市川の法<sup>15)</sup>など多くの解析方法<sup>15), 16)</sup>が提案されており、道路、用水路、低温貯蔵庫あるいは凍結工法による施工など多方面に適用されている。しかしトンネル地山を対象とした凍結深度の解析については行われていない。

一方トンネル地山の横断面の熱伝導を解析する場合二次元座標系として、あるいは極座標系として一般には取り扱わねばならないが、岡田は鉄道トンネル程度の断面積を有する場合には一次元座標系でも十分であること<sup>18)</sup>を示し、相変化を伴わないトンネル地山あるいは断熱つらら防止工法を施工したトンネルにおいて非定常熱伝達/熱伝導解析を実施している<sup>18)~21)</sup>。またそれらに加えて寒冷地の鉄道トンネルにおけるトンネル内気温の減衰についても言及している<sup>22)</sup>。

## 3. トンネルの凍結深度の実態

### (1) トンネル地山における最大凍結深度

寒冷地の鉄道トンネルにおける覆工と地山に対する上述の温度測定結果は容易に凍結深度が覆工背面に到達することを示しているが、凍結深度の最大値  $h_{F,\max}$  と積算寒度  $F$  の関係を周知のステファン式

$$h_{F,\max} = \beta \sqrt{F} \quad \dots \dots \dots (1)$$

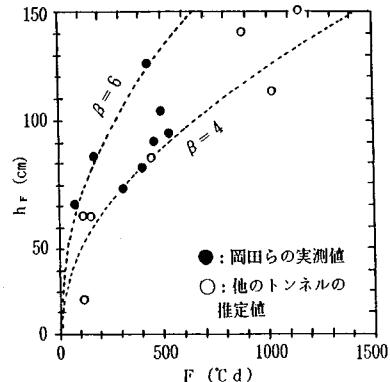


図-1 積算寒度  $F$  と凍結深度  $h_F$  の関係

に基づき求めると図-1 のようになる。図は岡田らの実測したトンネルに加えて、上述の鉄道トンネルのデータを整理して描いたものであるが、式(1)の定数はおおむね  $4 < \beta < 6 \text{ cm}/(\text{°Cd})^{0.5}$  の範囲にある。

### (2) トンネルの凍結深度の経日変化の実測例

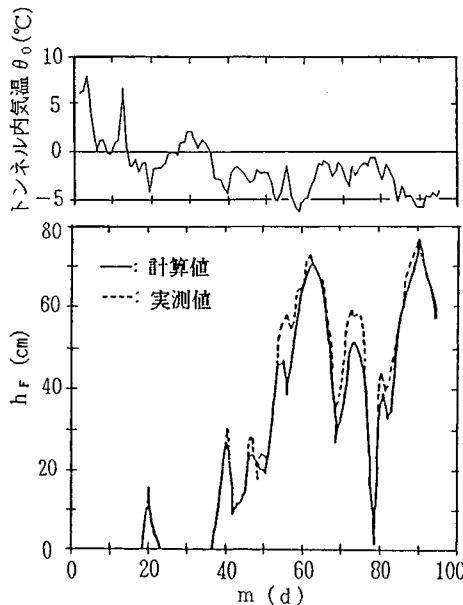
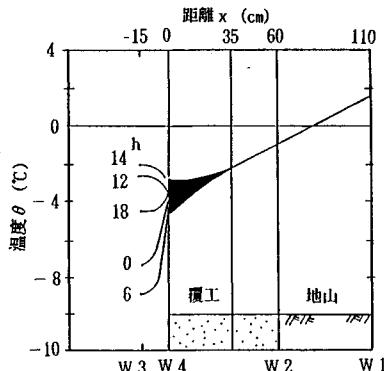
#### a) 蘭法華トンネル

当トンネル<sup>3)</sup>は延長 322 m の複線鉄道トンネルであり、断熱二重巻覆工が NATM によって新設されたが、一部区間についてはつらら防止工の施工されなかったところがある。

坑口から 70 m の位置におけるつらら防止工無施工区間における二次覆工表面、一次覆工背面と地山（覆工以深 50 cm の位置）の温度（図-3 の W4, W2 と W1 に相当）、ならびにトンネル内気温（図-3 の W3）を熱電対を用いて測定した。そして得られた各測点の日平均温度を直線補間して凍結深度  $h_F$  を求めた。凍結深度  $h_F$  の経日変化は図-2 の下図の点線で示すとおりである。なお、図-2 の下図の計算値は後述の 4.(2)a) による解析結果である。当区間の地質は洪積世旧期のランポーゲ軽石層であり、一次覆工厚さは 25 cm、二次覆工厚さは 35 cm である。

$m$  を経日とすれば図-2 の下図に示すように、凍結深度  $h_F$  は  $m=19 \text{ d}$  で成長を始めるが、いったん途切れた後再び成長を始め  $m=62 \text{ d}$  で極大値  $h_F=73 \text{ cm}$  を記録する。その後一時低下するが、 $m=90 \text{ d}$  で最大値  $h_{F,\max}=76 \text{ cm}$  に達する。そのとき、設計覆工厚は 60 cm があるので凍結深度は一次覆工裏のランポーゲ軽石層に 16 cm まで進入しており、その積算寒度は  $F=160.3 \text{ °Cd}$  であった。なおその前年は暖冬で積算寒度は  $F=75.6 \text{ °Cd}$  しか達しなかったので、凍結深度は  $h_{F,\max}=60 \text{ cm}$  までしか進行しなかった。

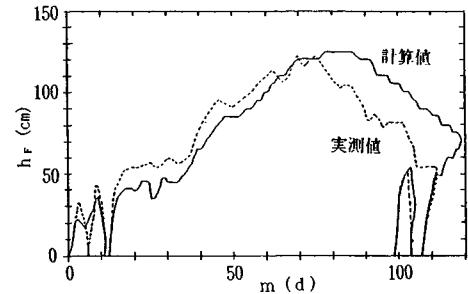
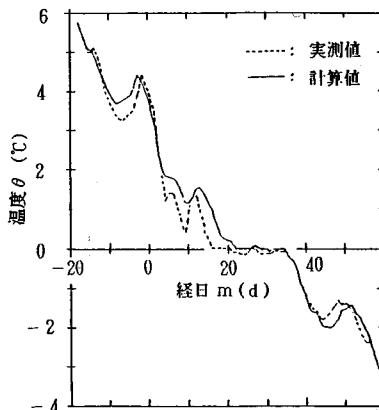
一方、トンネル内気温は坑口近くでは日周期でも変動している。たとえば図-2 に対応する期間において厳寒期の  $m=90 \text{ d}$  におけるトンネル断面の温度変化の実測

図-2 凍結深度  $h_f$  の経日変化の実測値と計算値の比較図-3 厳寒期のトンネル断面温度  $\theta$  の経時変化

値を描くと図-3 のようになるが、約 7°C のトンネル内気温の日振幅変動は二次覆工表面では 1.9° となり、覆工内ではせいぜい一次覆工と二次覆工の境界までしか及ばないことがわかる。いま、半無限平面を仮定したとき、周期的熱伝導に対する温度振幅の及ぶ深さ  $y$  は

$$y = -\sqrt{2 \lambda / (c_p \omega)} \cdot \log_e \delta \quad (2)$$

で与えられる<sup>2)</sup>。ここに、 $\lambda$ は熱伝導率、 $c_p$ は熱容量、 $\omega$ は角速度、 $\delta$ は温度の減衰比である。後述の 4.(2)a) を参照して、 $\lambda=1.2 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$ 、 $c_p=480 \text{ kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{°C}$ 、 $\omega=2\pi/24 \text{ rad/h}$ （日周期）とすれば、式(2)より温度の日振幅が覆工表面温度の  $\delta=1/10$  に低減する距離は  $y=33 \text{ cm}$  となる。この値は実測値の傾向をおおむね説明するものといえそうである。したがってトンネル内気温の日振幅の影響はトンネルの凍結深度を考慮する場

図-4 凍結深度  $h_f$  の経日変化の実測値と計算値の比較図-5 覆工背面温度  $\theta$  の経日変化の実測値と計算値の比較

合には無視できると考えられる。

#### b) 初山別トンネル

当トンネル<sup>2)</sup>は延長 270 m の単線鉄道トンネルであり、冬期のつららと側氷、凍土による覆工の押し出し現象などにより変状の激しいトンネルであった。そのためトンネルを活かしたまま、表面断熱処理によるつらら防止工法が変状の激しい区間に施工された。この無処理工区間に対しても温度測定が実施されたが、坑口から 35 m の地点における凍結深度  $h_f$  の経日変化は図-4 のようである。地質は新世代新第三紀の増幅層で泥岩、砂岩、礫岩の互層を貫いており、覆工厚さは 54 cm である。

トンネル内気温の積算寒度  $F$  が上昇するにつれて、その凍結深度  $h_f$  が大きくなるが、初期には覆工表面温度が正負を繰り返すために凍結深度は鋸状に分断される。一方、後期においては覆工表面温度が正になっても覆工背面の地山の凍結が続いたために、覆工中にポケット状の凍結領域が存在する。凍結深度の最大値は  $h_{f,\max}=124 \text{ cm}$  であり、覆工以深約 70 cm の地山まで達する。積算寒度は  $F=414.8^\circ\text{C day}$  であった。

図-4において、覆工背面に相当する深さ 54 cm において  $m=20 \text{ d}$  付近から 10 日間、 $m=105 \text{ d}$  付近から 7 日間凍結深度は停滞する。前者に対する覆工背面温度の

経日変化を示せば図-5のようになり、傾向的には下降を続けてきた覆工背面温度はこの期間 $0^{\circ}\text{C}$ 付近に停滞した後、再び下降するのがわかる。したがって、覆工背面の地山において、 $m=20\text{ d}$ 付近から10日間は水から氷、 $m=105\text{ d}$ 付近から1週間はその逆の現象、いわゆる相変化が起こっているものと推定される。

#### 4. トンネルの凍結深度のシミュレーション

### (1) トンネル地山の凍結深度の計算モデル

鉄道トンネル地山の横断面の熱伝達・熱伝導解析においては一次元座標系でも十分な解が得られることが確認されている<sup>18)</sup>ので、ここでもトンネル地山モデルとして図-6のようなモデルを考慮する。

このモデルの一次元熱伝達・熱伝導解析には explicit 型差分式<sup>2)</sup>を用いることにすると、相変化を伴う場合には、conventional 法<sup>17)</sup>を適用することにする。

図-6のモデルの要素数は  $N$  個であり、要素の大きさは要素 1 を除いて  $\Delta x$  である。要素 1 はトンネル内空に接する要素で、この要素の大きさは  $\Delta x/2$  である。要素 1 は覆工表面に相当し、トンネル内流体（空気）の温度は熱伝達によってこの要素に伝達されることになる。図では要素 1～要素  $(n-1)$  が凍結、要素  $(n+1)$ ～要素  $(N-1)$  が未凍結状態であり、要素  $n$  において  $\Delta t$  時間に潜熱  $\Delta H$  を費やして凍結が進行中であることを示しているが、conventional 法は要素  $n$  において適用される。要素  $n$  の凍結の終了はその要素中の潜熱  $L_o$  のもとで、

になることによって判断しようとするものであり、その間は要素  $n$  の温度は、

に保たれる。ここに  $T_f$  は凍結温度である。なお融解の場合には潜熱の放出によって判断される<sup>17)</sup>。

要素  $N$  は覆工表面から十分深い地山の中にある、地中熱流量が無視できるとき要素  $N$  の温度  $\theta_N^*$  はトンネル内気温の年平均値  $t_m$  にほぼ等しい。したがって、

で与えられる。

図-6のモデルにおいて、トンネル内気温  $\theta_0^P$  は冬期には正負を繰り返しながら、マクロ的には年周期変動を

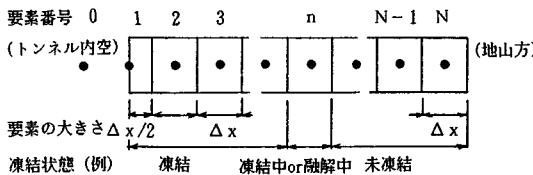


図-6 トンネル地山の一次元熱伝達・熱伝導モデル

して最低値に達し、その後も日変化をしながら傾向的には上昇していくものであるので、凍結深度は進行と退行を繰り返す。したがって、トンネル地山の凍結深度の消長はトンネル内気温に左右されることになる。トンネル内気温  $\theta^o$  は刻々の変動を入力しなければならない。しかし、トンネル内気温が年周期の正弦波振動をする場合には、

を入力することになる。ここに  $A_Y$  は年振幅、 $m$  は経日である。

要素  $i$  ( $\neq n$ ) が未凍結あるいは凍結の場合には相変化を考慮しない熱伝達・熱伝導 explicit 型差分式<sup>2)</sup>を用い、凍結あるいは融解の相変化が進行中の要素  $n$  においては conventional 法による差分式を適用する。そして式(3)によって凍結あるいは融解が完了したと判断された場合には、次の要素へ前進あるいは後退させる。

これによって、トンネル内気温の変動  $\theta_i^o$  に対する任意の要素  $i$  の応答を求めることができ、トンネル地山の凍結深度を計算することが可能となる。

## (2) 実物トンネルへの適用

#### a) 蘭法華トンネルの例

当トンネルの凍結深度の実態については3.(2)a)で述べたとおりである。図-2によれば凍結深度の最大値は $h_{F,\max} = 76\text{ cm}$ に達したが、覆工の設計巻厚は一次覆工が $25\text{ cm}$ 、二次覆工が $35\text{ cm}$ の合計 $60\text{ cm}$ であるので、地山中への進入は $16\text{ cm}$ しかない。実際には余掘りが若干あるので、地山への凍結深度の進入はさらに小さくなると考えられる。したがって凍結領域のはほとんどはコンクリート中にると仮定し、地山の潜熱の影響を無視して凍結深度の計算を行う。

熱伝導率については、年周期の周期的熱伝導を考慮した実測結果<sup>8)</sup>に基づき覆工コンクリートの熱伝導率を  $\lambda = 1.2 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}^\circ\text{C})$ 、覆工背面の地山がランポーゲ軽石層であることを考慮し地山の熱伝導率を  $\lambda = 1.0 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}^\circ\text{C})$  と仮定した。また熱伝達率としては、鉄道トンネルにおける平均的な値を用いることにし、 $\alpha = 10 \text{ kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^\circ\text{C})$ とした<sup>19), 20)</sup>。

要素の大きさは  $\Delta x = 5 \text{ cm}$  とし、要素  $N$  は覆工背面から  $10 \text{ m}$  以上になるように設定し、その温度を式(5)に基づき年平均気温とし、時刻  $p$  にかかわらず  $T_p^N = 7.6^\circ\text{C}$  一定とした。また、トンネル内気温  $T_0^p$  としては、3.(2)a) で述べたように日周期の変動は凍結深度を考慮する場合には無視してもよいので、日平均気温(図-2の上図参照)を入力することにした。

その結果、凍結深度の経日変化の計算値は図-2の実線のようになるが、凍結深度の大きな変動に対しても、両者は比較的良く一致しているといえそうである。

### b) 初山別トンネルの例

当トンネルの凍結深度の実態については3.(2)に示したが、凍結深度の最大値は $h_{F,\max} = 124\text{ cm}$ に達した。覆工厚さは54 cmであるので、覆工背面の地山70 cmまで凍結深度が達したことになる。

熱伝導率については、つらら防止工を施工したときの温度の実測値に基づいた定常熱伝導計算から、覆工コンクリートと地山の熱伝導率はほぼ同じで、 $\lambda_u = 1.0\text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}^\circ\text{C})$ であった<sup>17)</sup>ので、凍結時には $\lambda_r = 1.2\text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}^\circ\text{C})$ を仮定した。また凍土による変状の激しいところにはつらら等の発生もみられたが、図-4の測定区間の地山は乾燥状態にあった。そこで現場で採取した岩石試験の結果に基づき、容積含水率を5.8%と仮定し、式(3)に示す潜熱を $L_\rho = 4600\text{ kcal/m}^3$ を基準として解析することにした。

要素の大きさは $\Delta x = 5\text{ cm}$ 、考慮すべき要素数を $N = 200$ としたので、要素 $N$ は覆工表面から10 m以深に設定したことになる。その位置の温度は式(5)に基づき、 $T_n^0 = 7.0^\circ\text{C}$ 一定とした。トンネル内気温 $T_0^0$ としては日平均気温を入力することにし、熱伝達率は $\alpha = 10\text{ kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^\circ\text{C})$ とした。

凍結深度の経日変化に対する計算結果は図-4の実線のようになり、凍結深度の曲線が凍結深度の成長初期と消滅期においてジグザグ状に大きく変動する現象も含めて比較的良好く実測値の傾向を表わしているものといえよう。この潜熱の影響を考慮しないときの凍結深度の応答は図-7のようになるが、 $m > 100\text{ d}$ にみられる凍結領域が地山にポケット状に残る実測値のパターンを $L_\rho = 0\text{ kcal/m}^3$ の場合はシミュレートできないことがわかる。

また図-5の覆工背面温度が $m = 20 \sim 30\text{ d}$ 付近で停滞する現象についても、潜熱を考慮した場合には実測値

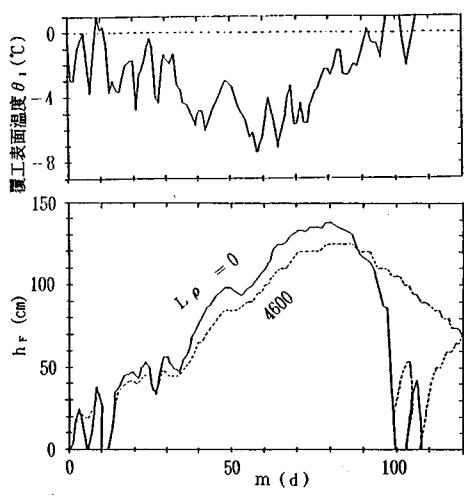


図-7 覆工表面温度 $\theta_t$ 、凍結深度 $h_F$ の経日変化

と計算値はよく一致するが、潜熱を考慮しない場合には覆工背面温度は正負に変動し実態に合わなかった。したがってこの期間は覆工背面の地山において凍土への相変化が起こっているものと考えられる。このような潜熱による覆工背面温度の影響は覆工背面が凍土から融解していく過程でも生じている。図-8は覆工背面温度が負から正に転じる期間を中心に描いたものであるが、 $m = 105 \sim 112\text{ d}$ の間覆工背面温度が $0^\circ\text{C}$ に保持される状態を含めて、計算値と実測値はよく一致しているといえようである。

### 5. トンネル内気温の周期変動に対する凍結深度の解析

#### (1) トンネル地山モデルの仮定

前述の4.では相変化を伴う一次元非定常熱伝達/熱伝導モデルを用いて実物トンネルの凍結深度のシミュレーションを行ったが、その結果計算値は実測値を比較的良く満足することが確かめられた。そこでトンネル内気温が年周期の正弦波変化をしたときのトンネル地山の凍結深度について考察することにする。

覆工コンクリートと地山の熱的定数については、4.(2)b)に用いた値を用いることにする。これらの値は鉄道トンネルの凍害防止工を設計するときの代表的な定数の1つである<sup>19), 20)</sup>。潜熱については、4.(2)b)で示した初山別トンネルの比較的乾燥した地山条件に対する $L_\rho = 4600\text{ kcal/m}^3$ を基準に、容積含水率を $0 \sim 23.2\%$ まで変化させ、 $L_\rho = 0 \sim 18400\text{ kcal/m}^3$ について考慮することにした。考慮すべき要素数は $N = 200$ とし、要素の大きさを $\Delta x = 5\text{ cm}$ としたので、覆工表面から10 mの深さの地山までを考慮したことになる。年平均気温を $t_m = 7 \sim 13^\circ\text{C}$ 、その年振幅を $A_y = 9 \sim 13^\circ\text{C}$ に変えて、式(6)に従ってトンネル内気温を変動させることにした。なお、覆工表面の熱伝達率 $\alpha$ については設計の安全性を考慮して $\alpha = \infty$ として計算を進める。

これらの条件に従い4.(1)の手法によってトンネルの凍結深度を計算する。

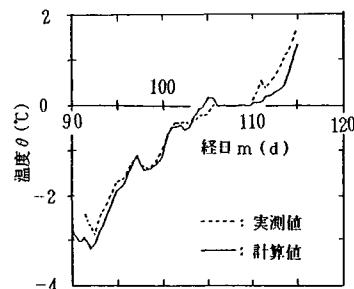


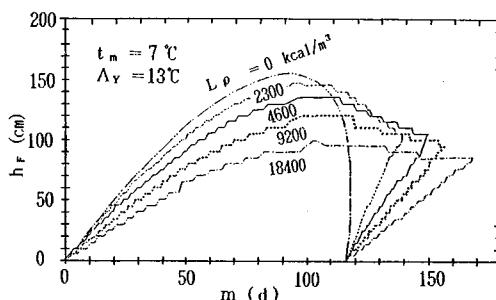
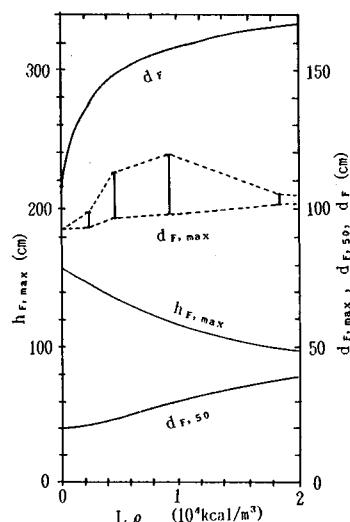
図-8 覆工背面温度 $\theta_t$ の経日変化の実測値と計算値の比較

## (2) 潜熱をパラメーターとした応答

トンネル内気温が式(6)に従って変動するとき、潜熱  $L_p$  をパラメーターとした凍結深度  $h_F$  の経日変化は図-9のようである。これは年平均気温を  $t_m=7.0^\circ\text{C}$ 、気温の年振幅を  $A_y=13.0^\circ\text{C}$  としたものである。

$t_m$  と  $A_y$  が同じであるのでトンネル内気温が負になつてから再び正になるまでの期間は同じであり、118 d である。図で潜熱  $L_p$  が有限のとき凍結深度  $h_F$  が階段状に進展するのは図-6の要素の大きさ  $\Delta x=5\text{ cm}$  の中で、相変化が進行していることによるものである。

潜熱が大きくなるに従って最大凍結深度  $h_{F,\max}$  はしだいに小さくなり、逆に  $h_{F,\max}$  に達する日  $d_{F,\max}$  は大きくなり、かつトンネル地山のどこかが凍結している日数  $d_F$  は長くなる。その様子は図-10のようになる。 $L_p=0$  のとき、 $h_{F,\max}=146\text{ cm}$ 、 $d_{F,\max}=92\text{ d}$  となるが、これはトンネル内気温が最小値となる  $m=58\text{ d}$  よりも 34 d 遅れることになる。 $L_p=20000\text{ kcal/m}^3$  になると

図-9 凍結深度  $h_F$  の経日変化 (パラメーター :  $L_p$ )図-10 潜熱  $L_p$  と最大凍結深度  $h_{F,\max}$ 、凍結日数  $d_{F,\max}$ ,  $d_{F,50}$ ,  $d_F$  の関係

$d_{F,\max}$  はさらに遅れ 102 d となる。

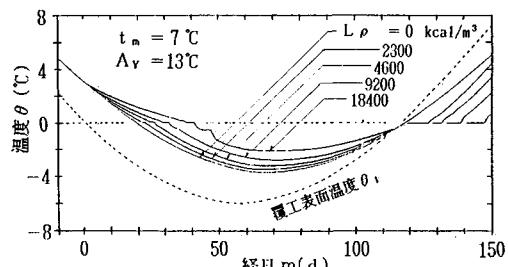
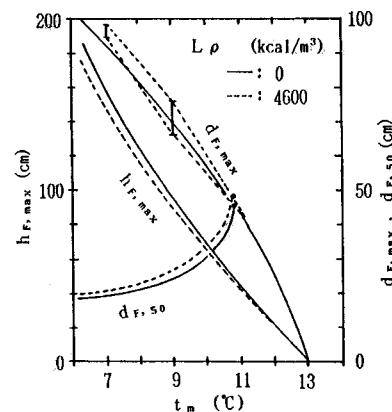
覆工厚さを 50 cm (覆工表面から  $10 \Delta x$ ) と仮定し、その位置における温度の経日変化を描くと図-11のようになるが、トンネル内気温が負になった日から温度低下に位相差が生じ、潜熱の増加とともに最低温度は高くなり、かつ位相が遅れていくのがわかる。覆工背面が氷点になる日  $d_{F,50}$  も図-10のように増大する。しかも融解時にはトンネル内気温  $\theta_t$  が正になっても  $10 \Delta x$  の位置の温度は  $0^\circ\text{C}$  を保持し、凍結領域がポケット状に残ることを示している。

このように、トンネルの凍結深度の経日変化に及ぼす潜熱の影響は、最大凍結深度を小さくさせるとともに、それに達する日を遅らせ、気温上昇時のトンネル地山の融解も遅らせるものである。

## (3) 年平均気温をパラメーターとした応答

トンネル内気温の年振幅を  $A_y=13.0^\circ\text{C}$  としたときの年平均気温  $t_m$  に対する応答について考察する。

$t_m$  の増加とともに最大凍結深度  $h_{F,\max}$  は低下し、また潜熱が凍結深度の経日変化に及ぼす影響は小さくなる。この関係を描くと図-12のようになり、 $t_m$  が高くなると  $h_{F,\max}$  は潜熱に敏感に反応しなくなり、 $d_{F,\max}$  も潜熱の影響を受けなくなる傾向を示し、またトンネル内

図-11 覆工背面温度  $\theta$  の経日変化図-12 年平均気温  $t_m$  と最大凍結深度  $h_{F,\max}$ 、凍結日数  $d_{F,\max}$ ,  $d_{F,50}$ ,  $d_F$  の関係

気温が正に転じた後地山中に凍結領域をポケット状に残す日数も小さくなる。

なお、図には覆工背面が氷点に達するまでの日を $d_{F,50}$ として示しているが、 $t_m$ が低くなると収束する傾向を示し、また $t_m$ が大きくなると $d_{F,50}$ は急激に大きくなる。そして $t_m=10.7^{\circ}\text{C}$ で曲線が途切れてしまうが、これはそれ以上の年平均気温では凍結深度は覆工背面に到達できないことを表わすものである。

#### (4) 年振幅をパラメーターとした応答

トンネル内気温の年平均気温を $t_m=7.0^{\circ}\text{C}$ としたときの年振幅 $A_Y$ に対する応答について述べる。

$A_Y$ と $h_{F,\max}$ ,  $d_{F,\max}$ ,  $d_{F,50}$ の関係を描くと図-13のようになる。これによれば $A_Y$ の低下とともに、最大凍結深度 $h_{F,\max}$ は低下し、また潜熱が凍結深度の経日変化に及ぼす影響は小さくなる。なお覆工表面温度の最小値が $0^{\circ}\text{C}$ となる $A_Y=7.0$ で $h_{F,\max}=0$ となる。 $A_Y$ が大きくなると $d_{F,50}$ は収束する傾向を示すが、これは年振幅は大きくなつても覆工背面に凍結深度が達する日が年振幅にかかわらず一定になることを示すものである。また $A_Y$ が $10^{\circ}\text{C}$ 以下になると $d_{F,50}$ は急激に大きくなり、 $A_Y$

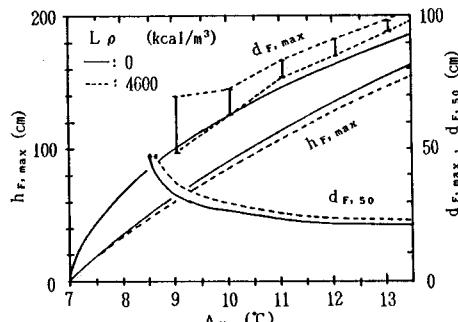


図-13 年振幅 $A_Y$ と最大凍結深度 $h_{F,\max}$ , 凍結日数 $d_{F,\max}$ ,  $d_{F,50}$ ,  $d_F$ の関係

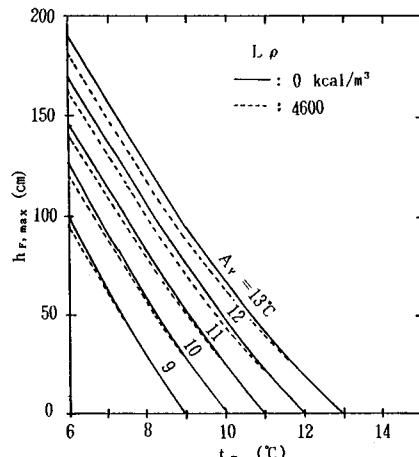


図-14 年平均気温 $t_m$ と最大凍結深度 $h_{F,\max}$ の関係

= $8.5^{\circ}\text{C}$ でこの曲線は途切れてしまうが、これは $A_Y < 8.5^{\circ}\text{C}$ の年振幅では凍結深度は覆工背面に到達しないことを表わすものである。 $h_{F,\max}$ は $A_Y$ にはほぼ比例して大きくなり、 $h_{F,\max}$ が与える潜熱の影響は $d_{F,\max}$ ほど大きくはない。

#### (5) 最大凍結深度と年平均気温、年振幅、積算寒度の関係

上述の(2)~(4)の解析結果をまとめ、年平均気温 $t_m$ と最大凍結深度 $h_{F,\max}$ の関係を年振幅 $A_Y$ をパラメーターに描くと図-14のようになる。図は $t_m$ と潜熱 $L_\rho$ が低下するほど、 $A_Y$ が大きくなるほど、 $h_{F,\max}$ は大きくなることを示している。

$h_{F,\max}$ の応答はトンネル地山の熱的定数により変動するものであることはもちろんあるが、潜熱が無視できるとき、 $h_{F,\max}$ と $t_m$ の関係を2次式で近似すると、5.(1)のトンネル条件のもとでは、

$$h_{F,\max} = 1.21 t_m^2 - 50.12 t_m + 22.5 A_Y + 154.57 \dots (7)$$

のようになる。

また積算寒度 $F$ と最大凍結深度 $h_{F,\max}$ の関係は図-15のようになる。これによれば、 $F$ が同じでも $h_{F,\max}$ は潜熱 $L_\rho$ の影響を大きく受ける。また $F$ が同じであつても年平均気温 $t_m$ が低い方が $h_{F,\max}$ は大きくなる。図には破線でステファン模型における式(1)の定数 $\beta$ を示したが、 $4 < \beta < 7$ の間に含まれており、図-1で示した鉄道トンネルで実測された $\beta$ と良い対応を示す。

## 6. まとめ

(1) 寒冷地の鉄道トンネルの凍結深度の経日変化は、conventional法による相変化を考慮した一次元非定常熱伝達/熱伝導トンネル地山モデルによってシミュレートできる。そのとき、覆工背面以深の凍結深度に対してはトンネル内気温の日平均気温を入力すれば十分で

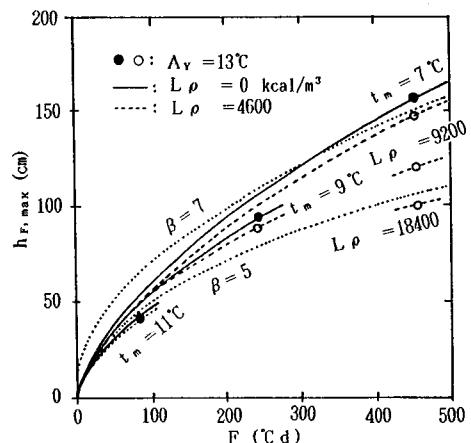


図-15 積算寒度 $F$ と最大凍結深度 $h_{F,\max}$ の関係

ある。

(2) トンネル地山の潜熱の存在は、トンネルの凍結深度の最大値を減少させる。またそれに達する日とトンネル内気温が最小値に達する日との差は大きくなり、地山の凍結期間を増加させる。

(3) トンネル内の年平均気温が  $t_m = 7 \sim 13^{\circ}\text{C}$ 、その年振幅が  $A_y = 9 \sim 13^{\circ}\text{C}$  の範囲で式(6)に従って正弦波変動する気象条件において、トンネル覆工と地山の熱的定数がほぼ同じで、覆工表面の熱伝達率が  $\alpha = \infty$  であり、かつトンネル地山の潜熱が無視できるとき、トンネル内気温の年平均気温と年振幅を変数とした2次式によって凍結深度を表わすことができ、この凍結深度は式(7)によって与えられる。

(4) 上述の(3)の条件において、積算寒度が同じであっても年平均気温の低い方が、また積算寒度の大きい方が、凍結深度の最大値は大きくなり、図-15のようになる。

## 7. あとがき

当論文は、鉄道トンネルの凍結深度に着目し、凍結深度の経年変化と最大値の実態を示し、凍結融解なる相変化を考慮した非定常熱伝導・熱伝導トンネル地山モデルによって計算値が実測値を十分満足することを確認した後、トンネル内気温の周期的変動に対して年平均気温と年振幅をパラメーターに解析したものである。この成果を先に報告したトンネル内気温の減衰解析<sup>22)</sup>と組み合わせれば、トンネル延長方向にわたる凍結深度の消長を合理的に推定することが可能となる。またこれは断熱処理によるつらら防止工法<sup>1), 2), 18)~21)</sup>を設計するうえで有益な資料を提供できるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 岡田勝也・川口孝夫・後藤巖：表面断熱処理によるつらら防止工法の極寒冷地試験と解析、鉄研報告、No. 1078, 1978.
- 2) 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.
- 3) 小野諒兄・真井耕象：隨道の凍害（第1回調査、昭和18年12月），業務資料凍上、pp. 146~239、旭川鉄道管理局、1951.
- 4) 斎藤教蔵：寒冷地における変状トンネルの調査、鉄道土木、Vol. 13, No. 12, pp. 6~9, 1971.
- 5) 吉田竹治：トンネルの変状と活線改築、鉄道土木、Vol. 13, No. 7, pp. 23~28, 1971.
- 6) 西沢生一・多田信幸・坂崎和夫：トンネル内つらら防止対策、鉄研速報、No. A-83-67, 1983.
- 7) 岡田勝也・川口孝夫：寒冷地トンネルの温度挙動と表面断熱処理によるつらら防止工法の延長幅効果に関する実験的考察、鉄研報告、No. 1181, 1981.
- 8) 岡田勝也・姥沢勝三：断熱二重巻覆工トンネルの温度挙動とその解析、鉄研報告、No. 1278, 1984.
- 9) 岡田勝也・青木保親：断熱二重巻トンネルの温度挙動一根室本線直別トンネル、鉄研速報、No. A-86-154, 1986.
- 10) Jumiks, A. R. : Thermal soil mechanics, Rutgers University Press, 1966.
- 11) Aldrich, H. P. : Frost penetration below highway and airfield pavement, Bul. 135, H. R. B., 1956.
- 12) 伊福部宗夫：北海道における道路の凍上、凍結深さおよび置換率に関する研究、土木試験所報告、No. 26, 1962.
- 13) 秋田好雄・矢田俊夫・柳沢一郎：低温液体貯蔵用タンクに関する基礎的研究、土木学会論文報告集、No. 157, 1965.
- 14) 柳沢一郎・由川博康：処罰法と差分法の併用による低温地下タンクの凍結領域の数値解析、土木学会論文報告集、No. 272, pp. 93~102, 1978.
- 15) 菊地昇・市川康明：変分不等式による Stefan 問題、土木学会論文報告集、No. 289, pp. 17~29, 1979.
- 16) 小森友明・関平和：2次元的土壤凍結進行過程の近似解法、土木学会論文報告集、No. 314, pp. 9~11, 1981.
- 17) 片山功蔵・服部賢：凍結を伴う熱伝導の研究、日本機械学会論文集(第2部)、Vol. 40, No. 333, pp. 1404~1409, 1974.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 岡田勝也・松本嘉司：断熱処理によるつらら防止工における断熱材幅の余裕長の提案、土木学会論文集、No. 424/III-14, 1990.
- 22) 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.

(1990.2.9・受付)