道路等の凍上対策

Damage due to Frost Heave and its Mitigation in Roads and Other Structures

岡田 勝也*
Katsuya Okada7. トンネルの凍結・凍上防止のための
断熱工法の設計

7.1 まえがき

寒冷地のトンネルでは、つららや側氷がトンネル覆工表面に発生し、トンネルを通行する列車や自動車の安全運行を阻害する。凍結が覆工背面の地山にまで及ぶ場合には、地山の凍上によって覆工の力学的な安全性や劣化が促進される。

ここでは、まず、トンネルに関わる凍害と凍上の実態について説明し、ついで、これらの凍害防止工法の一つである断熱工法の設計について述べる。

7.2 トンネルの凍結・凍上による被害の実態

7.2.1 トンネルの凍結・凍上による被害

寒冷地におけるトンネル漏水は、冬季につららや側氷に発達する。また覆工背面の地山を凍結させる。つらは一晩で建築限界を侵すほどに成長するものも多く、列車や自動車の通行を阻害する。写真1は、廃棄トンネルにおいてアーチからのつらが路盤まで達した例である。また側氷は路面全体を覆うほどに発達することもあり、これもまた安全な交通を阻害する。写真2は建設中のトンネルにおけるその一例である。

また覆工背面の地山の凍上も、この講座で既に述べた道路のそれと同じ現象である。覆工背面にまわってきたトンネル湧水が単に凍結するよりも極めて大きい体積膨張を生じる。これはトンネルの覆工に異常な外力となっかかり、覆工にクラックを生じさせ、覆工の押し出しへと発展する。

このような冬期におけるトンネルの凍上による被害の模式図は、当講座の第1回目の図2-3-1に示すようになる¹⁾。

(1) トンネル側壁の凍上による押し出しの例

新得山トンネルは延長1682mの単線特1号型トンネルで、昭和41年に建設されたコンクリート造（インバート）であり、その断面図は図1のようである。トンネル出口方から150m間で側壁とアーチ部が最大100mmの食い違いを生じ、側壁には水平方向に最大10mmの開口クラックが伸びた。地質は変成岩（ホルンヘルス）であるが、変状の著しい坑口付近は第四紀更新世の扇状地堆積物の礫混じり砂またはシルトからなっている。この

写真1 廃棄トンネルに発生したつらら

* 国土館大学工学部 教授・工博

写真2 工事中のトンネルに発生した側氷

図1 新得山トンネルの断面図と凍上防止対策として施工した断熱材施工断面 (文献2) による)

地方の積算寒度は $F=650^{\circ}\text{Cday}$ 程度であるから、凍結深度 h_F は厚さ 50cm の覆工背面に到達する。

このような典型的な覆工背面地山の凍上による覆工の押し出し現象を左右覆工の相対変位として時系列的に描いたものが図2である²⁾。この凍上期間は約4カ月であるが、冬期に変形が進み、内空側へ30~40mm縮む。夏期にはほとんど相対変位は元に戻るといふ季節的な変動形態を示し、月平均気温が低下すると相対変位量が大きくなる。

(2) トンネル側壁の凍上によるクラックとつららの発生

初山別トンネルは昭和29年に竣工した延長270m

写真3 新得山トンネルに発生したアーチと側壁のくい違い

図2 相対変位量の経年変化 (文献2) による)

のトンネルで、地質は段丘堆積層で、砂、礫および粘土からなり、粒度分析の結果凍上性を有するものと判定された³⁾。

トンネル背面地山の凍上によってトンネル側壁が冬にトンネル内空側に押し出され、夏には元の位置に戻るといふ変状が毎年繰り返す、時には残留変位が累積して側壁間の距離が減少する。このため、写真4に示すように、側壁中央部には水平クラックが発生し、これが夏には閉じ冬には開く。またアーチクラウン部には圧ざと考えられるクラックも見られた。

写真4 初山別トンネルにおける側壁の水平クラック

写真5 初山別トンネルの坑口近くで発生したつらら

図3 積算寒度 F と凍結深さ Z_F の関係
(文献5)による)

また段丘礫層をトンネルが貫通しているため、地下水の供給も多く、つららの成長は非常に早かった。写真5は坑口近くにおいて一晩で成長したつららである。

7.2.2 トンネルの凍結深さ

(1) トンネル地山における最大凍結さ

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さが覆工背面に到達することを示しているが、凍結深さの最大値 $Z_{F, \max}$ と積算寒度 F の関係を周知のステファン式、

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

に基づき求めると図3のようになる⁴⁾。図は岡田ら

の実測したトンネルに加えて、他の鉄道トンネルのデータを加えて描いたものである。式(1)の定数は概ね $4 < \beta < 6 \text{ cm}/(\text{°C days})^{0.5}$ 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

① 蘭法華トンネル

当トンネルは延長322m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が施工されなかった。

坑口から70mのつらら防止工無施工区間では、凍結深さ Z_F の経日変化は図4のようである。当区間の地質は洪積世旧期のランボーゲ軽石層であり、一次覆工厚さは35cm、二次覆工厚さは25cmである。

図4で $n=19\text{d}$ から凍結深さが成長を始めるが、一旦途切れた後再び成長を始め、 $n=62\text{d}$ で極大値 $Z_F=73\text{cm}$ を記録する。その後一時低下するが、 $n=90\text{d}$ で最大値 $Z_{F, \max}=76\text{cm}$ に達する。その時、凍結深さは一次覆工裏のランボーゲ軽石層に26cmまで進入し、その時の積算寒度は $F=160.3\text{°C days}$ であった。なおその前年は暖冬で積算寒度は $F=75.6\text{°C days}$ に過ぎなかったので、凍結深さは $Z_{F, \max}=60\text{cm}$ 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4の中の厳寒期の $n=90\text{d}$ におけるトンネル断面の温度変化の実測値は図5のようになる。約7°Cのトンネル内気温の日振幅変動は覆工表面で1.9°Cに収束し一次覆工と二次覆工の境界までしか及ばない。半無限平面を仮定

図4 凍結深さ Z_F の経日変化の実測値と計算値の比較 (文献5) による)

すると、周期的熱伝導に対する温度振幅の及ぶ深さ y は

$$y = -\log_e \delta \sqrt{2} \lambda / (C \omega) \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる⁴⁾。ここに、 λ は熱伝導率、 C は熱容量、 ω は角速度、 δ は温度の減衰比である。また、 $\lambda = 1.39 \text{ W/mK}$ ($1.2 \text{ kcal/(mh}^\circ\text{C)}$), $C = 2016 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ ($480 \text{ kcal/m}^3\text{C}$), $\omega = 2\pi/24 \text{ rad/h}$ (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説明するものと言える。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合には無視できる。

② 初山別トンネル

当トンネルは延長 270m の単線鉄道トンネルであり、冬期のつららと側氷、凍上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。トンネルを活かしたままで、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。また無処理区間の温度測定の結果から、坑口から 35m の地点における凍結深さ Z_F の経日変化が図6のように得られた。地質は新世代新第三紀の増幌層

図5 厳寒期のトンネル断面温度の経時変化 (文献5) による)

図6 凍結深さ Z_F の経日変化の実測値と計算値の比較 (文献5) による)

で泥岩、砂岩、礫岩の互層を貫いており、覆工厚さは 54cm 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、その凍結深さ Z_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くために、覆工中にポケット状の凍結領域が存在する。凍結深さの最大値は $Z_{F, \max} = 124 \text{ cm}$ であり、覆工で深約 70cm の地山まで達する。積算寒度は $F = 414.8^\circ\text{C} \cdot \text{days}$ であった。

図6において、覆工背面に相当する深さ 54cm において $n = 30 \text{ d}$ から 10日間、 $n = 110 \text{ d}$ から 7日間凍

結深さは停滞する。前者に対する覆工背面温度の経日変化を示せば図7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℃付近に停滞した後、再び下降する。

しかし凍結深さが停滞を続けている間も覆工表面温度 θ_1 は下降を続けている。したがって覆工背面の地山において、前者では水から氷、後者ではその逆の現象、いわゆる相変化が起こっているものと推定される。

(3) 相変化を考慮した凍結深さ

鉄道トンネルのトンネル地山の凍結深さを若干の仮定をもとに、一例として7.2.1(2)で述べた初山別トンネルについて計算する⁵⁾。このトンネルの凍結深さの最大値は図6のように $Z_{F, \max} = 124\text{cm}$ に達した。覆工厚さは54cmであるので、覆工背面の地山70cmまで凍結深さが達した。

熱伝導率については、つらら防止工を施工した時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を $\lambda_u = 1.16\text{W/mK}$ ($1.0\text{kcal/(mh}^\circ\text{C)}$)とし、凍結時には $\lambda_i = 1.39\text{W/mK}$ ($1.2\text{kcal/(mh}^\circ\text{C)}$)と仮定した。また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、凍結潜熱を $L_w = 19320\text{kJ/m}^3$ (4600kcal/m^3)を基準として解析した⁵⁾。なお、トンネル内気温と

しては日平均気温を入力することにし、熱伝達率は $\alpha = 11.6\text{W/m}^2\text{K}$ ($10\text{kcal/(m}^2\text{h}^\circ\text{C)}$)とした。

凍結深さの経日変化に対する計算結果は図6の実線のようになり、凍結深度が $m = 20\text{d}$ と 100d 付近で鋸状に分断される現象も含めて比較的良く実測値の傾向を表している。潜熱の影響を考慮しない $L_w = 0\text{kJ/m}^3$ (0kcal/m^3)の場合に計算される凍結深度では、 $m > 100\text{d}$ にみられる凍結領域が地山にポケット状に残る実測のパターンをシミュレートできない。

また図7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実態に合わない。したがってこの期間は覆工背面の地山において土中水の氷への相変化が起こっているものと考えられる。なお、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ることはもちろんである⁵⁾。

7.2.3 トンネルの凍結・つらら発生領域の実態とトンネル延長方向の気温の振幅減衰の推定法

トンネル覆工背面の地山の凍結はトンネル内気温によって左右される。トンネルにおけるつららの発生や凍上の被害は、トンネル延長 L が短い場合にはトンネル全長にわたって起こるが、 L が長くなるとトンネル坑口付近にのみ起こる^{4, 6)}。

これはトンネル延長方向の気温の振幅減衰に関係する。トンネル内気温の振幅 A_z は、図8のように、トンネル内の奥へ行く(Z が増加する)にしたがって、坑外気温の振幅 A_0 に対して、しだいに減衰していく。その結果その最低気温がしだいに高くなっていく。これは、冬季の季節風が速度 v でトンネルを通過していく間に、地山から熱伝導によって伝わる熱量、通行車両が発生する熱量やトンネル湧水の持つ熱量によって温められるためである。ある仮定条件のもとではあるがトンネル内気温の温度減衰の傾向を推定する手法が提案されている^{6, 7)}。鉄道トンネル坑口の外気温が年周期と日周期の正弦波振動を行う時、坑外の空気が季節風によって片方の坑口から一定の速度でトンネル内に吹き込む場合の温

図7 覆工背面温度 T の経日変化の実測値と計算値の比較(文献5)による)

図8 トンネルの内流体（空気）の温度減衰モデル
(文献6)による

図9 年周期のトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0
(文献8)による

図10 日周期のトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0
(文献8)による

度挙動を、覆工・地山との非定常熱伝達・熱伝導問題と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とトンネル内気温の減衰比 A_z/A_0 の関係から、トンネル内流体の温度減衰曲線を提案した^{6, 8)}。

すなわち、トンネル外気温が年周期と日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 $v=1.0\text{m/s}$) は図9と図10のようになる。図において断熱工が施工していない ($d_h=0\text{m}$ 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 ($d_h=0.03\text{m}$) 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。

これらの図によれば、年周期の方が日周期よりも温度振幅の減衰は小さく、日周期の場合減衰比 A_z/A_0 は断熱工の有無で大きく変わる。

なおこれらの図はトンネル覆工につらら防止工としての断熱材がない一般のトンネルに対するものであるが、断熱工法がトンネル全長に渡って施工されるような場合には、断熱材の存在によってトンネル内気温の振幅の減衰は小さくなる。この場合は図9と図10に若干の修正が必要となる⁸⁾。

これによってトンネル内気温が氷点下になる位置とトンネル坑口との距離が概略計算でき、トンネルの凍害の推定やその対策工の策定が定量的にできる。

7.3 凍上対策工法の選定と事例

7.3.1 トンネルの凍害防止工法の選定

トンネルの凍害防止工法の選定にはトンネル内気温、漏水温度、漏水量などの条件とともに、地山の凍上性を勘案する必要がある。寒冷地でも比較的暖かい地方では、たとえ冬期に外気温が氷点下に達しても凍結に達しない位置に漏水防止工法を施工すれば、つらら防止工法を施工する必要はない。

たとえば、地山の凍上によって写真2～4のような変状がトンネルに現れた時、凍上防止対策として、凍結深さの及ばない覆工背面と地山の間に砂層を介在させるとか、透水性のブロックを施工するというような置き換え工法がとられている。

しかし、このような漏水防止工ではつららや凍上を防止できない場合には、積極的な凍害防止対策が計画されることになる。これには、加熱による方法と保温による方法がある。

前者の一つには電熱線によるものがあるが、局所的な防止工に限られる。後者には、ヒートパイプを覆工背面下に打設して地熱を利用しようとするものである⁹⁾。また、覆工表面あるいは中間に断熱材を

図11 表面断熱処理工法（模式図）（文献4）による

設置し、地山の熱を冬期になるべくトンネル内空へ放出しないことによって、断熱材の背面を氷点以上に保持しようとする断熱工法がある。

この断熱工法^{4, 10)}は既設トンネルの凍害防止工法として発展し、覆工表面に止水板（あるいはシート）を設置してトンネル漏水を防止した上に断熱材を吹きつけあるいは添付するものであり、図11のような構造を有する。これは、新設トンネルへも応用され、NATMにおける一次覆工と二次覆工の間に止水層と断熱層を設ける、いわゆる断熱二重巻覆工も実用化されている。

このように、寒冷地トンネルの凍害防止対策の設計にはつらら発生条件あるいは凍上条件を知ることが大切である。特に、7.2.3で述べたトンネル延長方向の温度減衰を含めたトンネル内気温の実態と覆工背面地山の地質を十分に把握する必要がある。これによって合理的経済的な凍害防止工が施工できる。

7.3.2 既設トンネル用の表面断熱処理工法

既設トンネルの凍害防止工法の一つである図11のような断熱工法⁴⁾について述べる。この工法は、供用中のトンネルにおいては通行車両の関係から長い閉鎖間合いのとれる夜間に工事ができるように、既設の覆工を改築しないで覆工の表面に断熱材を設置する工法であり、表面断熱処理によるつらら防止工法と呼ばれる。

図12 表面断熱処理工法によるつらら防止工法の温度挙動の概念（文献11）による

この工法の設計上の留意点としては、①断熱材の厚さ、②断熱材の幅、③土被りと積雪の影響、である。

断熱材の厚さ d_h はこの設計の最も基本となるパラメーターである。断熱材のないトンネルにおける横断面の温度分布の包絡線を描くと図12の点線のようにになるが、断熱処理した温度振幅は実線のように断熱材のなかで急激に減衰して、覆工表面ですら年間を通じて正の温度を保持する。したがって覆工表面に流出した漏水は凍結することなく、断熱材と覆工表面との間の薄い排水層を流下する。断熱材の厚さ d_h は図12の覆工表面の温度を氷点以上に保つように決定すればよい。

すなわち、土被り H が十分厚く、かつ断熱材の幅 w が大きい場合、断熱材厚、覆工厚と地山厚を図12に示すようにそれぞれ d_h 、 d_c と d_s で表した時、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は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、

$$t_m/A_Y > k_{Y, B} + \eta k_{D, B} \dots\dots\dots (3)$$

を与えている¹¹⁾。ここに、 $A_{Y, B}$ を年周期挙動の断熱

材背面の温度振幅、 $A_{D,B}$ を日周期挙動のそれとすれば、無次元振幅 $k_{Y,B}$ 、 $k_{D,B}$ と η は、

$$k_{Y,B} = A_{Y,B}/A_Y \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$k_{D,B} = A_{D,B}/A_D \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\eta = A_D/A_Y \quad \dots\dots\dots (6)$$

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(3)を満足するように断熱材の厚さ d_h を決定すればよい。

なお断熱材の無次元熱伝導率 β_h 、地山の無次元熱伝導率 β_r は、

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

$$\beta_r = \lambda_r/\lambda_c \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表される。

一例として $\beta_r=2.0$ に対して η と β_h をパラメータに t_m/A_Y と d_h の関係を描くと図13のようになる。これから、断熱材の厚さ d_h は、気象条件の確率量を考慮したその土地の年平均気温 t_m 、トンネル内気温の年振幅 A_Y とその日振幅 A_D によって算定することができる。

図13 表面断熱処理工法の断熱材厚さ d_h の算定図 ($\beta_r=2$) (文献11) による)

しかし、十分な断熱材厚さ d_h が確保される場合であっても、断熱材の端部付近では断熱工を施工していない所からの寒気の回り込みの影響を受けるので、図12のような一次元的な温度分布では表すことは出来ない。この影響は図11のように既設トンネルの改良において断熱材敷設幅 w が狭い場合にはより厳しくなり、断熱材の端部付近では断熱材で被覆されているにもかかわらず、 0°C 以下になる区間があつて、それは余裕長 L_n と呼ばれる。 w の幅の断熱工を施工したにもかかわらず、つらら防止工として有効な範囲は $w-2L_n$ しかない。この余裕長 L_n は上で述べた非定常熱伝達・熱伝導モデルを二次元問題に拡張して求めることができ、断熱材敷設幅 w と年平均気温 t_m のパラメーターを用いて提案される^{4,12)}。

一例として示す図14は、年平均気温 $A_Y=13^\circ\text{C}$ の時の w と L_n の関係 t_m をパラメーターに示したものである。

上述の解析によって必要な断熱材厚さ d_h と断熱材敷設幅 w が確保された場合であっても土被り H が低い時には、トンネル地山はトンネル内空側のみならず土被り上の地表面からも冷却される。さらに土被り上に根雪が存在するか否かによってもその影

図14 年振幅 $A_Y=13^\circ\text{C}$ のときの断熱材幅 w と余裕長 L_n の関係 (文献4) による)

図15 年平均気温 $T_m=7.0^{\circ}\text{C}$ 、断熱材厚さ 30mm のときの土被り H と最大凍結深さ $Z_{F,max}$ の関係 (パラメーター：積雪の有無 S) (文献4) による)

響は変化する。たとえば、図15は、断熱材厚さ $d_h=30\text{mm}$ におけるトンネル頂部の土被り H に対する凍結領域を、積雪の有無 S ($S=1$ の時有り、 $=0$ の時無し) について、示したものであるが、この例によれば、 $S=1$ の場合はほぼ $H<4.5\text{m}$ では断熱材があるにも関わらず土被り全体が凍結領域になるが、 $S=0$ ではほぼ $H>6\text{m}$ になると凍結領域はトンネル内空側と土被り上部の地表面側に分離されることを示している。このような土被りの薄い所に施工される断熱工法の適用性は、図11に示す土被り H 、積雪の有無 S 、年平均気温 t_m と断熱材厚さ d_h をパラメーターとする非定常熱伝導解析によって、定量的に明らかになっている¹³⁾。

このようにして既設トンネルにおける表面断熱処理によるつらら防止工法の設計が行われる。

7.3.3 新設トンネル用の断熱二重巻覆工法

既設トンネル用の表面断熱処理工法を新設トンネルに応用したのが断熱二重巻覆工である⁴⁾。一次覆工 (吹きつけコンクリート) と二次覆工の間に断熱材を挟むサンドイッチ構造は断熱材の弾性係数が覆工コンクリートよりもはるかに小さいために、力学的な安定性も問題になるが、NATM において一次

図16 断熱二重巻覆工法の断熱材厚さ d_h の算定図 (文献14) による)

覆工の変形が落ち着いた後に二次覆工を施工するなどの注意を払えばその安定性は十分確保できる。一方温度挙動の立場からは、断熱材が覆工表面ではなく、覆工中間に存在するために、表面断熱処理工法よりは断熱材厚さ d_h を薄くできるなどの利点がある。すなわち、二次覆工が存在するので、その間で日振幅 A_b による温度振幅は急減して一次覆工表面にはほとんど伝達されないためと、二次覆工の厚さに相当する年振幅 A_y の減衰があるためである。

この場合の断熱材の最適厚さも多層系の非定常熱伝達/熱伝導解析により求められるが、その基本的な考え方は式(3)と同様である。その計算例として、 $\beta_r=2.0$ に対して η と β_h をパラメーターとした t_m/A_y と d_h の関係を図16に示した¹⁴⁾。

この図から、気象条件の統計量に基づいて、最適の断熱材が選択でき、その厚さ d_h が合理的に決定できることになる。

7.4 トンネル断熱工法の設計

冬期にトンネルにつららの発生が著しいある実物トンネルについて、有効時間帯に列車を走らせながら、深夜の列車間合にトンネル覆工表面を防水シートと断熱材で被覆する、図11に示す既設トンネル用の表面断熱つらら防止工の設計例を示す。

設計の最も基本となる断熱材の厚さについては、

次の3つのステップを踏めば、合理的に断熱材の設計ができる。すなわち、

- ① トンネル周辺の気象条件の設定、
- ② トンネル延長方向におけるつらら発生距離の推定、
- ③ 断熱材の種類と厚さの算定、

である。

7.4.1 トンネルの条件

このトンネルの延長は1500m、複線電化断面(内空断面積51.3m²)、列車回数110回/日である。土被りは50m～200m程度、新第三紀の流紋岩質凝灰岩で凍上性の地質ではないが、トンネルの方向は北北東で冬期の季節風が吹き込み易く、つららは局所的ではあるがトンネル坑口から中央まで断続的に発生する。

7.4.2 極値解析に基づくトンネル外気温の推定

① 平均的なトンネル外気温の算定

断熱工法の設計には、式(3)に示すように、最小3つの気象データが必要であり、それらはトンネル外の年平均気温 t_m 、気温の年振幅 A_Y と日振幅 A_D である。

トンネル近傍の保線区で観測した数年に亙る気温データを整理した結果、過去数年間の2月と8月における最高気温と最低気温の平均値は、それぞれ23.8℃と-2.1℃であった。

最高気温と最低気温の和と差から平均的な年平均気温 t_m と年振幅 A_Y の概略値を求めることができ、

$t_m=10.8℃$ 、 $A_Y=13.0℃$ が得られる。この t_m と A_Y は図8のトンネル外気温の変動に相当する。

気温の日振幅変動は、この保線区の観測した同じ気温データの厳寒期である2月の日最高気温と日最低気温から、過去数年間の平均として $A_D=6.1℃$ が得られる。

② 再現確率を考慮したトンネル外気温の推定

上述の①で求めた t_m 、 A_Y と A_D は平均的な値であり、確率的にはもっと厳しい値をとる必要がある。この場合、起こり得る再現期間 (m 年) に応じて表1の Δ の値¹⁾を加えることによって概略の値を求めることができる。この表は寒冷値の鉄道沿線の代表的な気象観測地点のデータを用いて、最大あるいは最小極値分布解析に基づいて計算したものである。より詳細な検討には極値分布解析をしなければならない¹⁾。

再現期間 m は線区の特性を考慮して決定されるが、ここではこのトンネルが複線電化トンネルで、比較的列車本数が多いことも考慮して、 $m=10$ 年とする。この時、表1の Δ と①で求めた結果を加算すれば、年平均気温、年振幅と日振幅は、それぞれ、 $t_m=9.9℃$ 、 $A_Y=14.4℃$ と $A_D=7.6℃$ のように修正できる。

7.4.3 トンネル延長方向のつらら発生領域の推定

上述の7.4.2①で述べた t_m 、 A_Y 、 A_D は図8に示すトンネル外気温を代表する。延長の短いトンネルではトンネル内気温はこの外気温とほとんど同じにな

表1 再現期間 m に対する補正值 Δ (文献11) による)

m (year)	ΔT_m (℃)	ΔA_Y (℃)	$\Delta A_{D,max}$ (℃)	$A_{D,max}$ (℃)
2	0.112	-0.181	-0.194	7.0
3	-0.166	0.266	0.287	7.5
5	-0.475	0.763	0.822	8.0
10	-0.865	1.387	1.495	8.7
20	-1.239	1.986	2.141	9.3
30	-1.453	2.331	2.513	9.7
40	-1.605	2.574	2.775	10.0
50	-1.722	2.761	2.977	10.2
60	-1.818	2.915	3.142	10.4
70	-1.898	3.043	3.281	10.5
100	-2.084	3.342	3.603	10.8
150	-2.296	3.681	3.968	11.2

るが、延長が長い場合には、7.2.3に示したように、この外気温の空気はトンネルの中を流れる間に図8のように次第に減衰していく。

つらら発生距離 l は、熱伝導率、熱伝達率、トンネル断面積、トンネル内風速など多くのパラメータによって決定されるが、このトンネルに対しては図9によってただちに求めることができる。

図9の縦軸の振幅比 A_z/A_0 のうち、 A_0 は図8に示す坑口の気温振幅で、7.4.2②で求めた A_Y あるいは A_D に相当する。また A_z は坑口から距離 z の位置の温度振幅で、つらら発生距離 l を求める場合には年平均気温 t_m に一致する。したがって図8の縦軸は A_z/A_0 ($=t_m/A_Y$) $=0.69$ となるので、 $l=1300\text{m}$ が得られる。

この距離はつららが発生する坑口からの長さになる。このトンネルの延長が $L=1500\text{m}$ であるから、 $l>L/2$ となるので、このトンネル全長に亘ってつららが発生する可能性が高い。

7.4.4 トンネル内気温の振幅の推定

図9の横軸のつらら発生距離 l をトンネル坑口からの距離 z と読みかえ、坑口から $z=300\text{m}$ の位置におけるトンネル内気温の年振幅と日振幅を求める。

すなわち、 $z(=l)=300\text{m}$ に対する A_z/A_0 は、年振幅、日振幅それぞれについて、 $A_{Y,z=300}/A_Y=0.91$ 、 $A_{D,z=300}/A_D=0.41$ となる。坑口から $z=300\text{m}$ の位置のトンネル内気温が年振幅ではトンネル外気温の91%に、日振幅では41%に低下する。この A_Y と A_D は7.4.2②に示すトンネル外気温であるから、坑口より $z=300\text{m}$ の位置のトンネル内気温の振幅は、 $A_{Y,z=300}=0.91\times 14.4=13.1^\circ\text{C}$ 、 $A_{D,z=300}=0.41\times 7.5=3.1^\circ\text{C}$ のように決定できる。

7.4.5 断熱材厚さの決定

既設トンネルを対象とした表面断熱工法では式(3)を満足すれば、覆工表面に滲み出した漏水は凍ることがないので、つららの発生を防止できる。式(3)によれば、気象条件である (t_m/A_Y) 、 η と断熱材と地山の熱的性質に基づく β_h と β_r によって、断熱材の厚さ d_h を求めることができる。

今、地山の無次元熱伝導率を $\beta_r=2.0$ 、断熱材の無次元熱伝導率(ポリエチレン系の断熱材)を $\beta_h=$

0.025 に仮定し、断熱材の厚さ d_h を、トンネルの坑口から 300m までの区間と、 300m からトンネルの中央までの区間に分けて求める。

① トンネルの坑口から 300m 地点までの区間

この区間のトンネル内の気象条件として、7.4.2に示すトンネル外気温を用い、 t_m/A_Y ($=9.9/14.4$) $=0.69$ 、 η ($=A_D/A_Y=7.6/14.4$) $=0.52$ となるので、図13から直ちに断熱材厚さとして、 $d_h=2.0\text{cm}$ が得られる。

② 300m 地点からトンネルの中央までの区間

この区間では、トンネル坑口から 300m 地点の気温、すなわち7.4.4で求めた $A_{Y,z=300}$ と $A_{D,z=300}$ を用いる。 t_m は7.4.2②で求めた値と同じである。したがって、 $t_m/A_{Y,z=300}$ ($=9.9/13.1$) $=0.76$ 、 η ($=A_{D,z=300}/A_{Y,z=300}=3.1/13.1$) $=0.24$ となるので、図13から断熱材厚さとして $d_h=1.4\text{cm}$ が得られる。

この結果、このトンネルに施工するつらら防止工法の断熱材の厚さは、図17のように、寒さの厳しいトンネル坑口付近では $d_h=2.0\text{cm}$ 、それほど寒さが厳しくないトンネルの中央付近では $d_h=1.4\text{cm}$ のように薄くて良い。

図17 トンネル内気温の振幅減衰に対応した断熱材厚さ d_h の遞減例

参考文献

- 1) 岡田勝也, 東海林更二郎: 道路などの凍上被害, 日本雪工学会誌, Vol.16, No.2, P.62-70, 2000
- 2) 岡田勝也, 吉川 浩, 土居勝美: トンネル地山の凍上防止のための断熱工法の設計施工, 第24回土質工学研究発表会論文集, 1989.6
- 3) 北川修三, 川上義輝: 寒冷地でのトンネル変状と地山の凍上性, 鉄道技術研究報告, No.1349, 1987
- 4) 岡田勝也: 鉄道トンネルに於ける断熱処理によるつらら防止工法に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.1324, 1986
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 岡田勝也, 松本嘉司: 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, 土木学会論文集, No.439/Ⅲ-17, 1991.12
- 9) 後藤 巖, 藤井俊茂, 黒川義範: ヒートパイプによる凍上のつらら防止工, 鉄道技術研究所速報, No.80-1012, 1977.8
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 土質工学会編: 土の凍結—その制御と応用—, 土質基礎工学ライブラリー23, p.127/154