

国鉄 鉄道技術研究所 岡田 勝也

1. まえがき

寒冷地におけるトンネル漏水は冬期にはつららや側氷に発達し、さらに極寒冷地になるとトンネル覆工背面の凍結を生じさせることになる。前者は列車運転に重大な影響を及ぼすために、一番列車の前に従来人力によってつらら落し作業や削氷作業を行ってきた。また後者はトンネルを変状させたりその強度を劣化させることになり、改築や廃棄に追い込まれたトンネルも多い。

このような背景をもとに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、積極的なつらら防止工法の採用が強く望まれている。当工法は、トンネル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下に達しないように保温するものであり、名羽線上羽幌トンネルおよび羽幌線初山別トンネルにおける現地試験の結果、断熱効果を十分発揮できる工法であることがわかった。ここでは、この表面断熱処理によるトンネルのつらら防止工法に必要な設計断熱枚厚について述べる。

2. 非定常熱伝導によるつらら防止工の理論モデル

トンネル内気温の刻々の変動に対して地中温度はある位相遅れを持ちながら変化しており、非定常熱伝導として取り扱う必要がある。ここではつらら防止工を持つトンネルの温度変動を一次元非定常熱伝導(直角座標系)問題の差分式によって求める。その

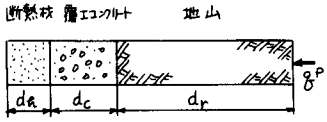


図-1 トンネル断面モデル

モデルは図-1 に示されるが、つらら防止工としての断熱材、覆工コンクリート、地山の3種類の異物質が存在し、考えるべき要素の大きさが温度変化の大きい所では小さく、変化の小さい所では大きい要素で計算できるように理論式を組み立てた。種々の要素のうち、異物質を境界とし、物質毎に分割長さが必要なる場合の差分式の例を上げれば、要素mの温度を T_m^P 、それより Δt 時間たった時の温度を T_m^{P+1} 、その要素の大きさを Δx 、異物質名をA, Bとした場合、

$$T_m^{P+1} = T_m^P + \frac{2\beta}{S(1+kS)} \theta_A (T_{m+1}^P - T_m^P) + \frac{2}{(1+kS)} \theta_A (T_{m-1}^P - T_m^P) \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。ここに、 $S = \Delta x^B / \Delta x^A$ 、 $\theta = \lambda \Delta t / cS \Delta x^2$ 、 $\beta = (cS)_B / (cS)_A$ 、 $\beta = \lambda_B / \lambda_A$ である。なお入熱伝導率、 (cS) は比熱×単位体積重量である。

3. 温度のフーリエ解析と位相遅れ

トンネル断面の温度をマクロ的にみれば一年周期の波で振動している。そこで、測定されたトンネル断面温度の日平均温度を原始データとして、 $T=364$ 日についてフーリエ解析を行った。つらら防止工の断熱材表面温度のフーリエ振幅 R_Σ は図-2 に示されるようになり、年周期の波が卓越していることがわかる。またそれに対する

位相遅れ φ (day) は、断熱材表面と覆工表面では $\varphi \approx 31$ 、覆工表面と背面との間では $\varphi = 14$ であった。一方、2. による非定常熱伝導による計算値は、前者では $\varphi = 31$ 、後者で $\varphi = 12$ となりよく一致した。

なお、以下の解析では図-2 の結果にしたがい年周期の温度振幅のみに着目し、 t_m を年平均気温 A_Y を年周期の温度の片振幅、 t をdayとすればトンネル内気温は、 $\theta(t) = t_m + A_Y \sin \frac{2\pi}{364} t \dots\dots (2)$

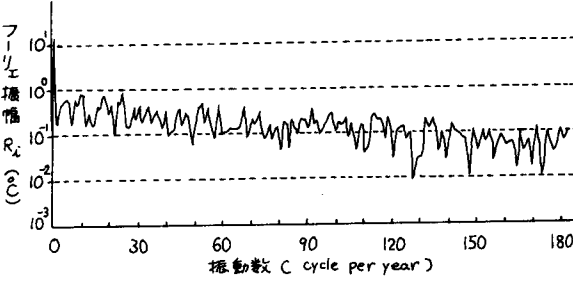


図-2 つらら防止工断熱材表面温度のフーリエ振幅

で表わすことにする。 A_T は寒冷地において、平野部では $A_T=12\sim13^\circ\text{C}$ であり、北海道の盆地部では $A_T=15^\circ\text{C}$ であるが、以下の解析では $A_T=13^\circ\text{C}$ とした。

4. つらう防止工の設計断熱材厚の理論解析

(1) 年平均気温 t_m と断熱材背面温度 θ_A の関係

トンネル内気温は式(2)にじたがうから、トンネル断面温度は t_m を中心にして変動することになる。いま標準的な覆工厚を $d_c=50\text{cm}$ とした場合、断熱材背面温度の最小値 $\theta_{A,\min}$ は、断熱材の厚さ d_R をパラメーターにすれば図-3に示されるようになる。図の直線群が $\theta_{A,\min}=0$ を切る時の t_m は覆工表面温度を氷点下に連じさせないための t_m の限界を示すものである。また覆工背面温度が $\theta_{B,\min}=0$ となる時の限界の t_m については図-3で一点鎖線で示されるようになる。 $\theta_{B,\min}\leq 0$ なる領域は地山が(氷 $\leftrightarrow$ 水)相変化を起こす性質を具備するものであれば、正しくはなく潜熱の影響を考慮して修正する必要がある。

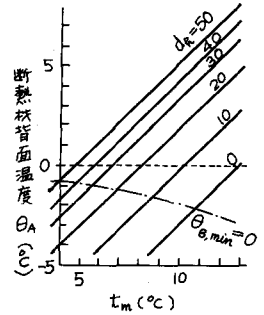


図-3 年平均気温(t_m)と断熱材背面温度(θ_A)の関係

(2) 断熱材厚 d_R と温度振幅 A の関係

トンネル内気温の温度振幅 $2A_T=26^\circ\text{C}$ に対し、 d_R が厚くなれば、断熱材背面の温度振幅は急激に小さくなっていく。 $d_R=20\text{mm}$ の場合、断熱材背面の温度振幅は $2A_A\approx 16^\circ\text{C}$ 、 $d_R=40\text{mm}$ の時には、 $2A_A\approx 12^\circ\text{C}$ まで低下する。

(3) 覆エコンクリート厚の変化に対する断熱材背面の温度と位相角の関係

図-3は $d_c=50\text{cm}$ に対するものであるが、 $d_c=28\text{cm}$ と 72cm について計算を行ったのが図-4である。ただし

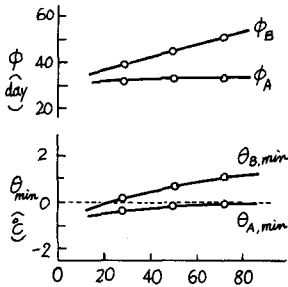


図-4 覆エコンクリート厚(d_c)に対する断熱材背面温度($\theta_{A,\min}$)と位相角(ϕ)の関係

$d_R=40\text{mm}$ とした。 d_c に対する $\theta_{A,\min}$ 等は図-4の下図に与えられるが、 $\theta_{A,\min}$ に対しては d_c の変化の影響をあまり受けないことがわかる。同様にトンネル内気温に対する位相角 ϕ はほとんど変化しないことも図-4の上図から判断される。しかし、 $\theta_{B,\min}$ 、 ϕ_B については d_c が変化することから、それぞれかなり変わることもわかる。

(4) トンネル内気温の日周期の影響

トンネル内でも日周期の振幅はかなりあり、上羽根トンネルの実測値によれば、夏期には大きく 14°C 前後、冬期には小さく 5°C 前後である。この日振幅

A_D の影響を断熱材背面温度について求めると、 $d_R\geq 10\text{mm}$ になると急激に小さくなり、 $A_D=13^\circ\text{C}$ の時、 $d_R=10, 20, 30, 40, 50\text{mm}$ に対し $\Delta\theta_A=1.5, 0.75, 0.5, 0.3, 0.2^\circ\text{C}$ 程度になる。一方、覆工背面の日周期による温度振幅は 10^{-2} のオーダーであり、実用上無視される。

(5) 設計断熱材厚の提案

つらう防止工として必要な断熱材厚 $d_{R(\text{limit})}$ は、図-3にもとづいて得ることができる。さらに、トンネル内気温の日周期の影響を考慮すれば、 $d_{R(\text{limit})}$ は t_m に対し、 A_D をパラメーターに図-5に示されるようになる。これは $d_R=50\text{cm}$ 程度の標準的なトンネルに表面断熱処理によるつらう防止工を施工する場合の設計断熱材厚を与えるものである。

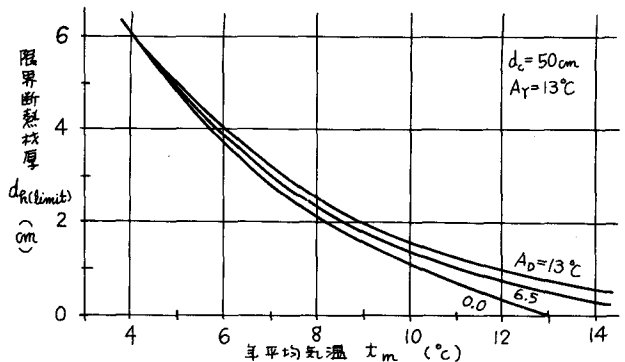


図-5 断熱材背面温度(θ_A)=0に対する限界断熱材厚($d_{R(\text{limit})}$)

(注) 当工法の現場試験に対する温度実測等につ

いては第31・32回年次学術講演会で発表。