

III-213 トンネルのつらう防止工法の現場試験

国鉄 鉄道技術研究所 正員 ○ 岡田 勝也
 〃 正員 後藤 巖
 〃 川口 孝夫

1. まえがき

寒冷地におけるトンネルに発生するつらうあるいは側氷は、時には覆工あるいは覆工背面の凍結と共にしばしば問題にされる。トンネルの漏水が覆工の外へ流れ出る時、外気温で冷やされて凍り、つらうが発生する。側壁の場合は側氷となる。気温が高い時には漏水はそのまま滴下するであろうが、少し低くなるとつらうの先端でつぎつぎに凍り、細くて長いつらうに生長するのであろう。さらに気温が低い時には水は先端まで流れないうちに凍り、太くて短いつらうになるものと思われる。更に気温が低ければ、覆工内、あるいは覆工背面で凍り、凍結融解の結果として覆工の破壊、劣化を促進させることになる。このようなつらうを発生する鉄道トンネルでは車両限界までも犯すことが多く、従来は人力によるつらう落し作業や削氷作業によって、列車の運転を確保している。しかし、保守作業の省力化と高速列車運転の時代を迎えた今、そのような人力作業に期待するのではなく積極的なつらう防止工法が強く望まれてきた。この実験はそれに対する一つの解を与えるものであり、表面断熱処理工法と呼ばれる。ここでは、その概要とつらう防止工としての効果について述べる。

2. 供試トンネルの環境と表面断熱処理工法の概要

供試トンネルは名羽線(北海道・羽幌一名寄間、現在建設中)の羽幌起点22 $\text{K}536\text{M}$ に位置する延長66 mの小トンネルが選ばれた。当トンネルは土被り18 m程度で、砂岩あるいは泥岩を主体とする地質で、覆工巻厚は45 cmである。当地方の年平均気温は7.1 $^{\circ}\text{C}$ 、1月の月平均気温は-5.5 $^{\circ}\text{C}$ (日最高気温の月平均値は-2.2 $^{\circ}\text{C}$ 、日最低気温の月平均値は-9.7 $^{\circ}\text{C}$)であり、積算寒度は510 $^{\circ}\text{C}$ を超えている。一方、真冬日は年間67日にも達することから、つらう落し作業の必要な日は80日以上になるものと想像される。

このトンネルで採用されたつらう防止工法は表面断熱処理工法と呼ばれるものであり、まず、覆工表面に防水材としての塩化ビニール樹脂波板がアンカーボルトによって18 mmの空間を残して取り付けられる。この空間はトンネル漏水が流下するためのものである。防水板の上にはウレタン系の発泡断熱材が35 mmの厚さで吹き付けられる。必要ならばさらに防氷コートの処理が行なわれることになる。

3. 試験結果と解析

(1) トンネル横断面の温度勾配の例は図-1に示されている。Aはつらう防止工区、Bは無施工区である。

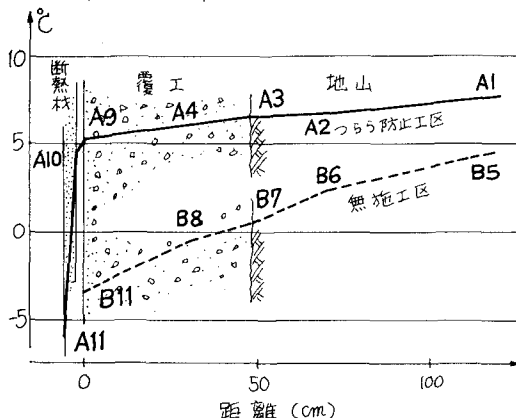


図-1 トンネル断面温度勾配(12/18~23)

つらう防止工区では断熱材(A11~A9)中で急激な温度勾配を示し、温度差は10 $^{\circ}\text{C}$ にも達する。そして覆工(A9~A3)から地山(A3~A1)にかけての温度勾配は小さくなっている。一方、つらう防止工を施工しない無施工区では覆工表面(B11)から地山(B7~B5)にかけて温度勾配はつらう防止工区のそれよりもかなり小さいことがわかる。この勾配から、地山からの流入熱量を計算すると、つらう防止工区は断熱材のためにかなり小さくなり、 $Q_A = 2.185 \text{ Kcal/m}^2\text{R}$ (12月)に、無施工区では $Q_M = 8.068 \text{ Kcal/m}^2\text{R}$ (12月)になった。

また、覆工表面の温度では較べてみると、つらう防止

工区では最低値の約3℃(A9)に対し、無施工区では-11℃(2月11日)(B12)にも達した。

これから、表面断熱処理工法は覆工表面温度を氷点以下に下げることではなく、つうら防止工法としての効果を十分発揮するこゝが出来るようである。

(2) トンネルの温度はそれぞれにある位相遅れを持ちながら変化しており、非定常熱伝導問題として解析される必要がある。ここでは1次元の非定常熱伝導問題を差分法によって求め、実測値との比較を行う。地中温度の測定記録は覆工コンクリート表面からせいぜい1.5m程度の深さまでしか与えられていないので、そこでの境界条件を考慮しながら1次元直角座標系として解析する。今、P時刻における温度を T_m^P とし、それよりも Δt 時間だけ経過した時のその位置の温度を T_m^{P+1} とする。 m は要素番号である。要素

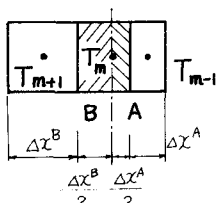


図-2 異物質を境界とする熱伝導モデル

m より Δx だけ離れた要素におけるP時刻の温度は T_{m-1} 、 T_{m+1} で表わされるものとし、 λ , C , ρ をそれぞれ物質の熱伝導率、比熱、単位体積重量とし、添字A、Bは物質名とする。今、図-2のように異物質を境界とし、物質毎に要素の分割長さが異なる場合の差分式を例にすれば、つぎのようになる。要素 $(m-1)$ と要素 $(m+1)$ から流入する単位時間あたりの熱量と要素 m における温度上昇とのエネルギーのつりあいから、

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

が得られる。ここに、 $k = (C\rho)_B / (C\rho)_A$, $\beta = \lambda_B / \lambda_A$, $\delta = \Delta x^B / \Delta x^A$ である。この差分式を他の条件についても求め、それらを組み合わせて、トンネルのモデルに適用し、つうら防止工区の1ヶ月間の経日変化を計算したのが図-3である。入力定数として、覆工コンクリートの熱伝導率を $\lambda_c = 1.0 \text{ Kcal/m} \cdot \text{R} \cdot ^\circ\text{C}$ 、断熱材と地山の熱伝導率は、定常熱伝導計算で概算した月平均値を用いることにし、それぞれ $\lambda_t = 0.0132 \text{ Kcal/m} \cdot \text{R} \cdot ^\circ\text{C}$ 、 $\lambda_r = 1.0006 \text{ Kcal/m} \cdot \text{R} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。断熱材表面(A11)の温度(ほぼトンネル内気温に等しい)を矩形波として入力した時の覆工表面(A9)と地山温度(A01)の計算値は実測値とよく一致しているのがわかる。したがって、トンネルの地中温度の傾向を把握するこゝができれば、それぞれのトンネルの気象条件にあった合理的なつうら防止工法の設計が可能となる見通しを得た。

(3) 無施工区における地中温度の記録から、トンネルの凍結深度を求めた。凍結深度は12月に入ってから急に成長し、12月末には覆工コンクリート(厚45cm)の背面に達し、3月初旬には93cmになった。一方、坑門における凍結深度は105cmに達した。したがって、コンクリート背面の地山は完全な凍結領域に入っており、それが覆工、坑門コンクリートに異常な荷重を与えているものと考えられる。このような寒冷地では巻厚を厚くすることによって覆工背面の凍結を防止することはかなり不経済な設計となろう。なお凍結深度(R cm)と種算寒度(F °C)との関係は、一般には $R = \beta \sqrt{F}$ で表わされるが、当トンネルでは $\beta \approx 4$ とすれば実測値とよく一致するこゝを確認した。

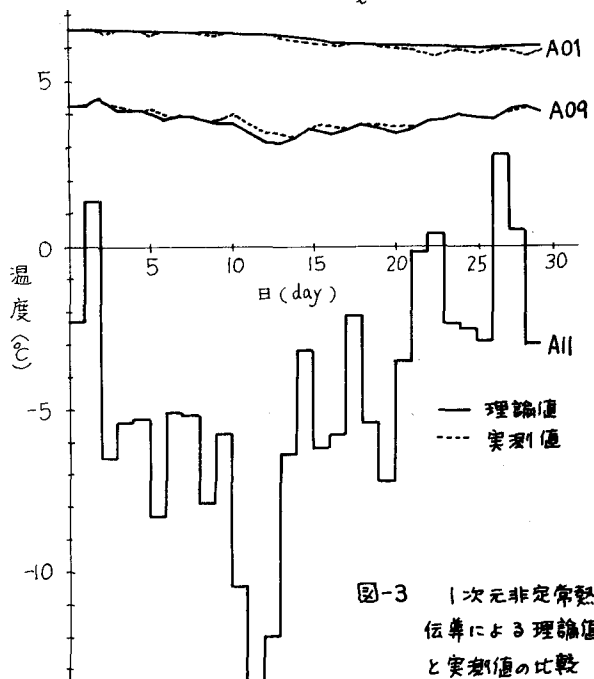


図-3 1次元非定常熱伝導による理論値と実測値の比較