

VI-51 寒冷地トンネルにおける 断熱材厚さの実用算定法について

北海道開発コンサルタント 正員 林 憲 造
北海道大学 正員 芳 村 仁
北海道大学 正員 三 上 隆

1. はじめに

トンネルは水に接する機会が多く、寒冷地に建設される場合には、地山凍結による覆工の変状、凍結融解によるコンクリートの劣化など、いわゆる凍害を受ける危険性が高く、道内においては数多くの事例が報告されている。その対策として、覆工と地山(NATMでは覆工と吹付コンクリート)の間に断熱材が施工されるが、断熱材厚さの算定法を体系的に示した研究報告は少ないのが現状である。¹⁾

本論では、トンネル内空側の温度変化を周期的変動とみなし、準定常(周期的)熱伝導解析に基づいた断熱材厚さ算定法およびそれに必要な温度略算式を提案する。

2. トンネル・地山系の熱伝導解析

- 1) トンネル・地山モデル —— 図-1に示すように、トンネル・地山系を覆工、断熱材、吹付コンクリートおよび地山から成る4つの要素でモデル化する。各要素に覆工から順次1,2,3,4と番号付をし、各要素の長さを ℓ_n 、熱伝導率を k_n 、熱容量を $(\rho c)_n$ および温度を U_n で表わす。また U_0 はトンネル内空温度、 U_5 は地山の温度を表わし、その土地の年平均気温 U_m に等しいとする。

このモデルの妥当性は非定常熱伝導解析²⁾による結果と実測値の対比で確認されている。

- 2) トンネル・地山系の温度分布 —— 各要素の位置座標を図-1に示す X とすれば、各要素の温度分布 $U_n(X, t)$ を支配する微分方程式は次式になる。

$$\frac{\partial U_n}{\partial t} = a_n^2 \frac{\partial^2 U_n}{\partial X^2} \quad (1) \quad (n=1 \sim 4, a_n^2 = k_n / (\rho c)_n)$$

トンネル内空側および地山側の温度に関する境界条件は次のようになる。

トンネル内空温度変化を周期的変動としてとらえ、年変化および

日変化をそれぞれ角速度 $P = 2\pi / (365 \times 24)$ および $P = 2\pi / 24$

の正弦関数で表わすものとすれば、次式となる。

$$\text{Case 1 (年平均気温)} : U_0 = U_5 = U_m \quad (2.1)$$

$$\text{Case 2 (年 変 化)} : U_0 = A_Y \sin pt, U_5 = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{Case 3 (日 変 化)} : U_0 = A_D \sin pt, U_5 = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 A_Y 、 A_D は年較差、日較差の半分である。

次に、式(1)、(2)および各要素の接触面における温度、熱量に関する連続条件を考慮すれば、トンネル・地山系の任意点の温度は近似的に次式より求められる。

$$U_n(X) = U_m - A_Y \cdot \text{Max}(U_n^Y) - A_D \cdot \text{Max}(U_n^D) \quad (3)$$

ここで、 $\text{Max}(U_n^Y)$ および $\text{Max}(U_n^D)$ は年変化、日変化に対する

表-1 記号の定義および単位

k	熱伝導率	kcal/m·h·°C
ρ	比 熱	kcal/kg·°C
c	密 度	kg/m ³
(ρc)	熱 容 量	kcal/m ³ ·°C
l	長 さ	m
u	温 度	°C
α	熱伝達率	kcal/m ² ·h·°C
p	角 速 度	rad/h
t	時 間	h

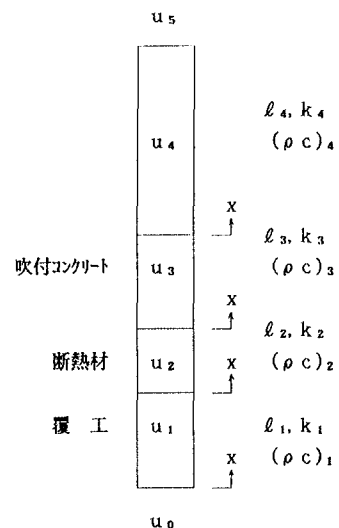


図-1 トンネル・地山モデル

時間応答の最大値を表わす。なお、これらの最大値を求めるための厳密解は文献3)を参照されたい。

- 3) 断熱材厚さの算定法 —— ここでは、地山の凍結を防止する場合を考えてみる。この場合、気温パラメータ (U_m , A_y , A_D) に対し、吹付コンクリート背面温度 $\text{Max}(U_4^y)$, $\text{Max}(U_4^D)$ を求め、式(3)の温度 $U_4(0)$ が正になる

断熱材厚さを試行錯誤的に求めればよい。なお、厳密解による $\text{Max}(U_4^y, U_4^D)$ の計算は、相当に複雑になるので、表-2の略算解が実用上便利である。(なお、略算解は厳密解を基礎に導いたものであり、その精度は実用上十分である。3))

表-2 略 算 解

年変化に対する略算解	日変化に対する略算解
$\text{Max}(U_4^y) = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}}$ $\epsilon = \tan^{-1}(B/A)$ $p = 2\pi / (365 \times 24)$ $A = 1 + \alpha, B = \alpha + \beta$ $\alpha = \left(\frac{1_1 + 1_3}{k_1} + \frac{1_2}{k_2} \right) \sqrt{(\rho c)_4 k_4 p / 2}$ $\beta = \left(\frac{(1_1 + 1_3)^2}{2k_1} + \frac{1_2 1_3}{k_2} \right) p (\rho c)_1$	$\text{Max}(U_4^D) = \frac{8(\rho c)_2 k_2}{\sqrt{(\rho c)_1 k_1} + \sqrt{(\rho c)_4 k_4}} \cdot \frac{\exp(-G_1)}{\sqrt{x}}$ $\epsilon = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin(G_1) + \tau^2 \sin(G_3) \exp(-\delta_2 \sqrt{2p})}{\cos(G_1) + \tau^2 \cos(G_3) \exp(-\delta_2 \sqrt{2p})} \right\}$ $p = 2\pi / 24$ $x = 1 + \tau^4 \exp(-\delta_2 \sqrt{2p}) - 2\tau^2 \exp(-\delta_2 \sqrt{p/2}) \cdot \cos(\delta_2 \sqrt{2p})$ $\delta_2 = 1_2 \sqrt{(\rho c)_2 / k_2}$ $G_1 = \left\{ (1_1 + 1_3) \sqrt{(\rho c)_1 / k_1} + 1_2 \sqrt{(\rho c)_2 / k_2} \right\} \sqrt{p/2}$ $G_3 = \left\{ (1_1 + 1_3) \sqrt{(\rho c)_1 / k_1} - 1_2 \sqrt{(\rho c)_2 / k_2} \right\} \sqrt{p/2}$ $\tau = \frac{\sqrt{(\rho c)_1 k_1} - \sqrt{(\rho c)_2 k_2}}{\sqrt{(\rho c)_1 k_1} + \sqrt{(\rho c)_2 k_2}}$

4) 試算例

トンネル建設地点の気温因子 $U_m = 6.0$, $A_y = 15.5$, $A_D = 8.7$, 入力定数 $l_1 = 0.3$, $l_2 = 0.05$, $l_3 = 0.2$, $(\rho c)_1 = 460$, $(\rho c)_2 = 20$, $(\rho c)_4 = 500$, $k_1 = k_4 = 1$, $k_2 = 0.02$

表-2より、年変化の $\text{Max}(U_4^y)$, 日変化の $\text{Max}(U_4^D)$ を求める。

年変化の場合; $\alpha = 1.270$, $\beta = 0.206$, $A = 2.270$, $B = 1.477$

$$\therefore \text{Max}(U_4^y) = 0.369$$

日変化の場合; $G_1 = 4.452$, $\delta_2 = 1.582$, $\delta_2 \sqrt{2P} = 1.144$, $\delta_2 \sqrt{P/2} = 0.572$

$$\exp(-\delta_2 \sqrt{2P}) = 0.318, \exp(-\delta_2 \sqrt{P/2}) = 0.564, \cos(\delta_2 \sqrt{2P}) = 0.414$$

$$\tau = 1, x = 1.149 \quad \therefore \text{Max}(U_4^D) = 0.001$$

吹付コンクリート背面温度は、 $U_4 = 6.0 - 15.5 \times 0.369 - 8.7 \times 0.001 = 0.27 > 0^\circ\text{C}$ となり、断面材には厚さ $l_2 = 0.05$, 熱伝導率 $k_2 = 0.02$ のものを使用すればよい。

3. おわりに

本報告では、気温因子を入力定数とする断熱材厚さの算定法およびそれに必要な温度略算式を示した。今後は、地山の凍結とトンネルの凍害を定量的にとらえ、設計に反映させていくつもりである。

<参考文献>

- 岡田勝也; トンネル断熱つららの防止における断熱材の材質とその厚さの最適化, 鉄道技術研究報告 No.1359, 1987
- 芳村仁・三上隆・小山田欣裕; 寒冷地道路トンネルの地山温度解析(非定常熱伝導解析), 土木学会北海道支部論文報告書, 第45号, 1989
- 三上隆・芳村仁・林憲造・奥山秀樹; 寒冷地道路トンネルの断熱材厚さの一算定法(準定常熱伝導解析), 土木学会北海道支部論文報告集, 第45号, 1989