

寒冷地トンネルにおける坑内延長方向の実用的な温度解析

北海道大学大学院工学研究科	学生会員	畠山 幸佑
北海道大学大学院工学研究科	学生会員	川村 巧
北海道大学大学院工学研究科	正会員	三上 隆

1. 研究目的

寒冷地トンネルでは、覆工背面の地山の凍上によって、覆工の変形、ひび割れなどの悪影響が見られる。その対策として断熱材を施工する 경우가多いが、設計には坑内温度を与える必要がある。そこで著者らは、文献1)で温度算定式を提案したが、解析モデルに円形断面を採用したため、解には Kelvin 関数が現れ、実用面では課題が残った。本研究では、平面モデルを採用した簡略な理論式を提案する。さらに、実測値と比較することによって式の妥当性について検討し、各パラメータによる影響を示す。

2. 坑内温度理論式の導出

2.1. 解析モデル

図-1はトンネル半径方向のモデルを示したものである。半径方向については、覆工と地山からなる二層の平面モデルを採用する。ただし、 L :厚さ、 λ :熱伝導率、 a :熱拡散率、 ρc :熱容量とし、添字 c 、 s はそれぞれ覆工、地山を表すものとする。

図-2はトンネル延長方向のモデルを示したものである。延長方向については、トンネル坑内に一定の風速 v が流入していると仮定し、風量算定のために断面形状は半径 r の円形であるとする。また、 z は坑口を原点としたときの延長方向の距離を表す。

2.2. 微分方程式

図-3はトンネル延長方向の微少要素を示したものである。延長方向の微分方程式は、この要素内での熱収支を考えることにより、次式で表すことができる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{2\alpha}{C_p r \gamma} (\theta_0 - \theta) - v \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 γ :空気の比重 (1.3 kg/m^3)、 C_p :空気の定圧比熱 (1000 J/kgK)、 θ :坑内の温度、 θ_0 :覆工表面での温度、 α :空気の熱伝達率。

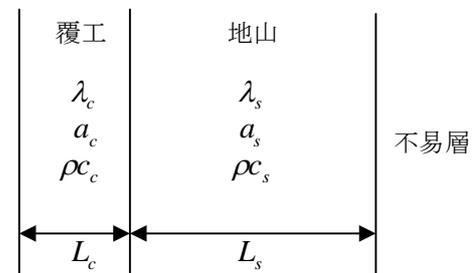


図-1 トンネル半径方向のモデル

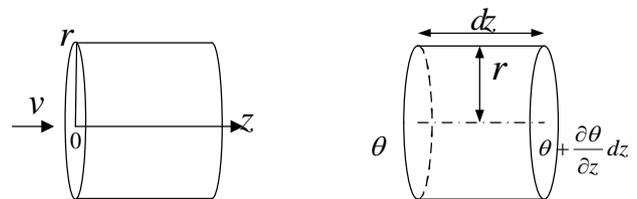


図-2 延長方向モデル

図-3 微少要素

2.3. 坑内温度理論式

坑内温度の理論式を定常項と周期的に変化する項との和であると仮定し次式で表す。

$$\theta = \bar{\theta}(z) + \Theta(z)e^{i\omega t} \quad (2)$$

式(1)、式(2)より、年平均気温 $\bar{\theta}(z)$ の理論式として式(3)が、温度振幅 $\Theta(z)$ の理論式として式(4)が得られる。

$$\bar{\theta}(z) = u_0 - (u_0 - \bar{\theta}_0) F(z) \quad (3)$$

$$\Theta(z) = \Theta_0 G(z) \quad (4)$$

$$G(z) = \exp\{cof(g \cos \eta - 1)z/v\}$$

$$cof = 2\alpha/C_p r \gamma$$

ここに、 u_0 :不易層での温度、 $\bar{\theta}_0$:トンネル坑口での年平均気温、 Θ_0 :トンネル坑口での温度振幅。

キーワード 寒冷地, トンネル, 温度解析, 理論式

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北十三条西八丁目 北海道大学大学院工学研究科 TEL 011-706-6176

3. 理論値と実測値の比較

理論式の妥当性を検討するため、実測値と式(3)、式(4)による理論値との比較を行う。なお、理論値を求める際、不易層における温度については、いまだ不明な点が多いため、坑口における年平均気温よりも2ほど高いと仮定して解析を行うものとする。

図4は雄信内トンネルでの結果を示したものである。グラフが示す通り、温度振幅については実測値と理論値が一致し、トンネル坑口から進むにつれて減少する傾向が、年平均気温についても実測値にほぼ一致し、次第に増加する傾向が確認できる。

この結果からわかるように、平面モデルを採用しても坑内温度の傾向を捉えることができる。

なお、解析に用いた雄信内トンネルの諸元、パラメータを以下に示す。

内空断面積=44.2 m², $r=3.75$ m, $\alpha=10.0$ W/m²K, $\bar{\theta}_0=6.0$, $\Theta_0=13.4$, $u_0=8.0$, $v=0.9$ m/s, $L_c=0.6$ m, $L_s=10.0$ m, $\lambda_c=1.5$ W/mK, $\lambda_s=6.1$ W/mK, $a_c=9.0 \times 10^{-7}$ m²/s, $a_s=1.45 \times 10^{-5}$ m²/s, $\rho c_c=1.67 \times 10^6$ J/m³K, $\rho c_s=4.2 \times 10^5$ J/m³K, .

4. パラメータによる影響

年平均気温、温度振幅に影響を及ぼすパラメータには風速 v , 地山の熱伝導率 λ_s , 地山の熱容量 ρc_s , 覆工厚 L_c , 不易層までの距離 L_s , トンネル半径 r が挙げられる。

ここでは、風速について取り上げ、式(3)、式(4)に現れる $F(z)$, $G(z)$ に与える影響を調べる。解析は、 $r=3.5$ m, $\alpha=10.0$ W/m²K, $L_c=1.0$ m, $L_s=10.0$ m, $\lambda_c=1.5$ W/mK, $\lambda_s=1.4$ W/mK, $a_c=9.0 \times 10^{-7}$ m²/s, $a_s=7.0 \times 10^{-7}$ m²/s, $\rho c_c=1.67 \times 10^6$ J/m³K, $\rho c_s=2.0 \times 10^6$ J/m³K の一定値を用い、風速のみを $v=0.1 \sim 3.0$ m/s の範囲で変化させて検討した。

結果を図5に示す。(a)(b)はそれぞれ $F(z)$, $G(z)$ の変化の様子を表している。いずれも、延長方向の距離が坑口から進むに従って次第に収束することがわかる。また、風速が小さくなるほど収束は速くなる。さらに、(a), (b)を比較すると、温度振幅のほうがより大きな影響を風速から受けていることも確認でき、文献1)と同様の傾向が見られる。

その他のパラメータについても検討を行った結果、風速、地山の熱伝導率、地山の熱容量による影響は

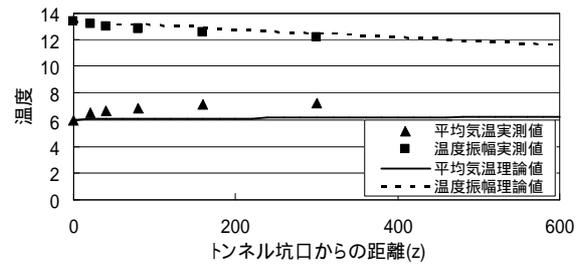
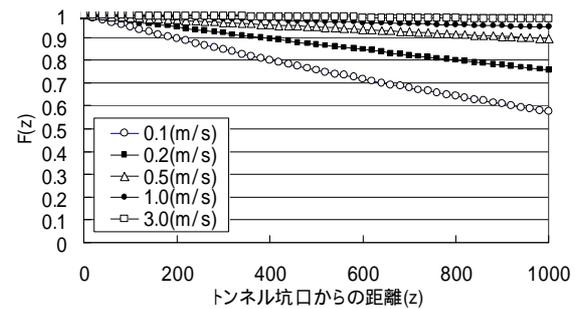
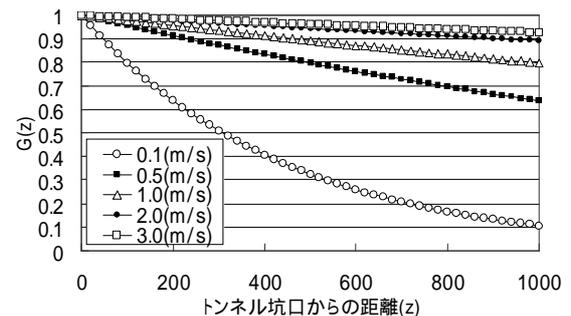


図4 雄信内トンネルでの理論値と実測値の比較



(a) $F(z)$



(b) $G(z)$

図5 風速が与える影響

比較的大きく、覆工厚や、不易層までの距離、トンネル半径による影響は小さいことが確認できた。

5. まとめ

以上の検討の結果を以下にまとめる。

- (1)本研究で、理論値と実測値の間にほぼ近い値を得られたことで、トンネル半径方向に平面モデルを採用することによる簡略な理論式の導出が可能であることが確認できた。
- (2)本研究による理論式を用いることで、断熱材施工範囲の算定式をより簡略化された式で導出することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1)福本皓一, 川村巧, 三上隆: 寒冷地におけるトンネル延長方向の温度解析, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, 第6部, pp295~296, 2007.9