

在来工法により建設された寒冷地道路トンネルの覆工内温度

北海道大学工学研究科 学生会員 松尾 優子
 北海道大学工学研究科 学生会員 河村 巧
 北海道大学工学研究科 正会員 三上 隆

1. はじめに

80年代に建設された断熱材等で補修等がなされていない、在来工法の寒冷地道路トンネルは、冬期の厳しい寒さにより、つららや側氷の発達、地山凍結による覆工の変形等、凍害を受ける危険性が大きい。

これら凍害の影響の程度等を調べるには、トンネルの温度応力挙動を明らかにする必要があるが、本研究では、その前段階として基礎的情報を与える覆工内温度分布(温度差)解析を行い、トンネル半径、風速等の覆工内温度に与える影響を明らかにすることを目的としている。

2. 解析方法

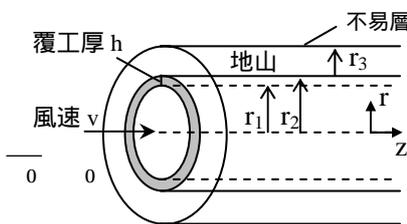


図1 解析モデル

解析モデルは、図1に示すトンネル覆工と地山からなる二層円筒モデルとする。トンネル内径を r_1 、外径を r_2 、覆工の外側から不易層までの距離を r_3 、覆工厚 h 、風速を v で表し、延長方向座標を z 、半径方向を r (トンネル中心から) で表す。なお、トンネル内へはトンネル坑口から風が一定の風速で吹き込み、またトンネル坑口及びトンネル覆工・地山内の温度は周期的(年周期)に変化するものとする。解析は2段階からなり、ステップ1では熱伝導・熱伝達を用いて、トンネル延長方向(z 方向)のトンネル

内空側温度を求める。ステップ2では熱伝導理論を用いて、ステップ1で求めたトンネル内空温度に対するトンネル覆工・地山内(半径方向)の温度を求める。以下に、各ステップ(ステップ2は覆工内温度)について、その定常解(年平均気温 $\bar{\theta}_0$)と準定常解(年温度振幅 Θ_0)を示す。

トンネル延長方向の温度式

定常解: $\frac{\bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}_0} = \frac{u_0}{\theta_0} - \left(\frac{u_0}{\theta_0} - 1\right) \cdot \exp\left(\frac{\text{cof}(f(r_1) - 1) \cdot z}{v}\right)$ - (1)

準定常解: $\frac{\Theta(z)}{\Theta_0} = \exp\left(\frac{\text{cof}(g(r_1) \cdot \cos \eta_1 - 1) \cdot z}{v}\right)$ - (2)

トンネル半径方向の温度式

定常解: $\frac{ur}{\theta_0} = \frac{u_0}{\theta_0} - \left(\frac{u_0}{\theta_0} - 1\right) \cdot f(r) \cdot \exp\left(\frac{\text{cof}(f(r_1) - 1) \cdot z}{v}\right)$ - (3)

準定常解: $\frac{uc}{\Theta_0} = g(r) \cdot \exp\left(\frac{\text{cof}(g(r_1) \cdot \cos \eta_1 - 1) \cdot z}{v}\right)$ - (4)

ここで、 $\frac{u_0}{\theta_0} = 1.3 \text{ cof} = 2 / (C_p \cdot \rho \cdot r_1)$ であり、 $f(r) = \left\{ \frac{r}{r_1}, \frac{r}{r_2}, \frac{r}{r_3}, \frac{c}{c_s}, \dots \right\}$ $g(r)$ 、 η_1 は kelvin 関数と境界条件によって得られる未定係数によって決まる。なお、 C_p は空気 の定圧比熱、 ρ は空気 の比重である。

3. 解析結果

解析諸元を表1に表す。解析には基本的に基準値を用い、各パラメータは表の範囲中で変化させ、トンネル内空側温度、覆工・地山内(半径方向)の温度変化による影響を調べた。

表1 温度解析諸元

諸元項目	単位	基準値	範囲
風速 v	m	0.1	0.1~5.0
トンネル入口からの距離 z	m	0.0	0.0~1000
トンネル内径 r_1	m	3.5	2.5~4.5
不易層までの距離 r_3	m	10.0	
覆工厚 h	m	0.6	0.3~1.3
覆工厚の熱伝導率 c	W/m	2.7	
地山の熱伝導率 s	W/m	3.45	1.7~5.2
空気 の熱伝達率	W/m ²		10.0~15.0,
不易層の温度 u_0 /年平均気温 $\bar{\theta}_0$		1.3	

キーワード 寒冷地、道路トンネル、温度解析、覆工内温度

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目北海道大学工学研究科 TEL 011-706-6176

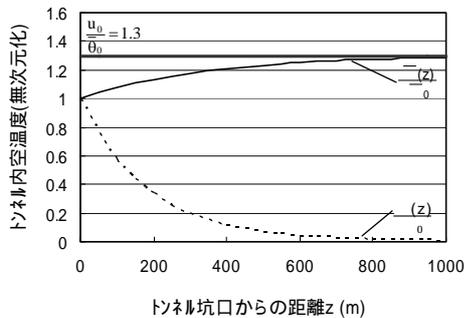


図2 年平均気温と年間温度振幅

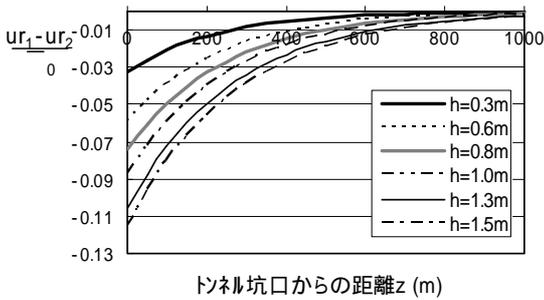


図3 覆工厚hの変化による覆工内の T (定常解)

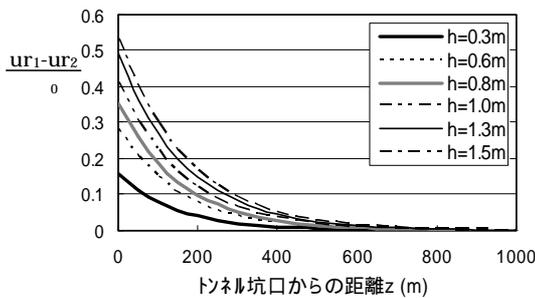


図4 覆工厚hの変化による覆工内の T (準定常解)

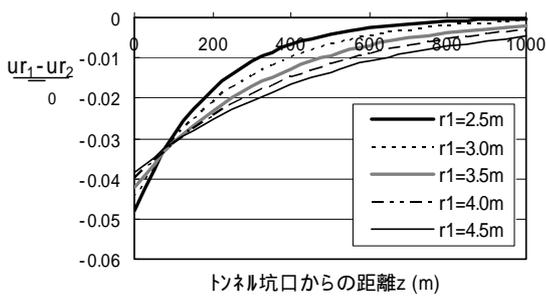


図5 トンネル内径 r1 の変化による覆工内の T

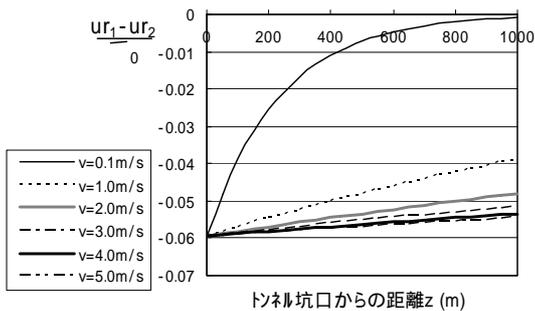


図6 風速 v の変化による覆工両側の T (定常解)

1) トンネル延長方向の内空側温度

図2に延長方向におけるトンネル内空側温度の年平均気温 $\bar{u}(z)$ (定常)と年間温度振幅 $\bar{u}(z)$ (準定常)を示す。なお、定常解は年平均気温 \bar{u}_0 で、準定常解は年間温度振幅 θ_0 でそれぞれ除し、無次元化を行っている。

図2より、トンネル坑口からz方向に進むに従い、定常解は不易層の温度 ($\frac{u_0}{\theta_0} = 1.3$) に近づき、準定常解は減少していく特徴を持つことが確認できる。

2) 覆工厚hの変化によるz方向の覆工内の温度差 T

覆工厚hの変化によるトンネル内径側の温度 ur_1 と外径側の温度 ur_2 の差 Tを図3(定常)、図4(準定常)にそれぞれ示す。図3、図4において、トンネル坑口付近では覆工厚hが厚いほどTは大きくなっており、双方を比較するといずれのケースにおいても、定常解に比べ準定常解のTが大きいことが確認できる。

3) トンネル内径 r1 の変化による覆工内の温度差 T

図5に定常解におけるトンネル内径 r_1 の変化によるTを示す。但し、ここでは覆工厚hは一定(表1基準値)として計算を行っている。図5よりトンネル坑口付近では、 r_1 が小さな値の方がTは大きくなっているが、トンネル坑口から100mの地点では交差し、それ以降については r_1 が大きな値の方がTが大きくなっていることが確認できる。また準定常解についても同様な傾向を示し、その差は準定常解の方が大きいことが確認された。

4) 風速 v の変化による覆工内の温度差 T

風速vの変化によるTを図6(定常)、図7(準定常)にそれぞれ示す。これらの図より風速が小さいほどTが大きくなっており、準定常解のほうがその影響が大きいことが確認できる。

4. まとめ

本研究はトンネル覆工内の温度変化に及ぼす影響について数値計算をおこなった。北海道の年平均気温を7.5、年温度振幅を14.5とすると、 $h=0.6m$ のとき覆工内の温度差Tは、最もTが大きくなる坑口付近において、定常解は-0.4、準定常解では4.1となる。本研究で得られたこれらの結果を用いて、今後は熱応力解析を試みていきたい。

謝辞：本論文作成にあたり多大なご協力を頂いた修士2年福本皓一氏に感謝いたします。

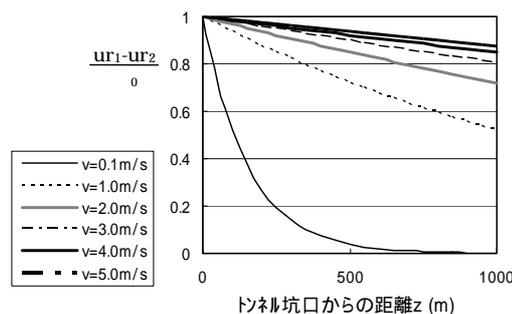


図7 風速 v の変化による覆工両側の T (準定常解)