

1. まえがき

寒冷地における多くのトンネルでは冬期につららや側氷が現われ、殊に鉄道トンネルでは列車の運転を確保するために人力によるつらら落としという多大の労苦が払われているのが実情である。これに対して北国のトンネル技術者は幾多のつらら防止策を施し、その改良と工夫を積み重ねてきている。筆者等もトンネル覆工表面を断熱材で被覆し、地熱をなるべく放出しないようにして覆工表面を氷点下にならないように保温する、いわゆる表面断熱処理によるつらら防止工法の試験を行い、その効果を確認し、また非定常熱伝導による温度解析を行って実用的な断熱材厚を提案している。¹⁾²⁾

しかしこのような断熱材を用いる保温法や、電熱線などの加温法を用いていない多くのトンネルにおいては、覆工中間あるいは覆工背面の地山の冬期の温度低下についてはあまり考慮されておらず、そのためにこれらの中で生ずる凍結・融解作用の結果トンネルの変状や劣化が促進せられることも多い。

特に比較的土被り高さの薄いトンネルあるいはトンネル坑口近くでは、トンネル天端上層部の土被り部分の地温はトンネル内空側と土被り上の地表面の両者から冷却されることになり、地山が“しばれる”ことにもなる。このような現象は極寒冷地におけるトンネル坑口付近のつららが初冬と晩冬にのみ発生し、厳寒期には成長しないことが観測されることから推測することができる。したがって土被りの及ぼすトンネル周辺地山の温度の影響はこれから判断すればかなり大きいものと考えられる。

そこでトンネル断面と土被り高さを考慮できる図-1のようなトンネル地山モデルを仮定し、2次元非定常熱伝導方程式の explicit 型差分式を導くことによって、トンネル周辺地山の年周期の温度挙動に及ぼす土被り効果

について基礎的考察を行った。しかし解析を容易にするためにかなり大胆な仮定にもとづいているので、その応用は定性的なものに限られるが、実際のトンネルで生じる現象の把握をいくらかでも容易にすることができ、かつ種々のつらら防止工法を設計施工する際の目安になるものと考えられる。

2. トンネル断面モデルの仮定

対象とするトンネルは鉄道トンネルの単線1号型(直流電化用)とし、これを近似する変形大角形断面で仮定する。トンネルは左右対称とし、このトンネルの土被り高さ H_0 は一定の水平な地高が続いているものとすれば、図-1に示されるようなトンネル軸に垂直な横断面(2次元平面)の鉛直半断面で考えることが可能である。

3. トンネル内・外気温の入力定数

外気温の変動を日平均気温で整理する限りにおいては、年周期の正弦曲線で代表でき、

$$\theta(t) = t_m + A_Y \sin 2\pi t/364 \quad \cdots \cdots (1)$$

である。ここに t_m は年平均気温($^{\circ}\text{C}$)、 A_Y は年周期の温度の片振幅、ここでは $A_Y = 13^{\circ}\text{C}$ 、 t は day である。トンネル内気温は外気温に等しいものと仮定し、この状態を $S=0$ と名

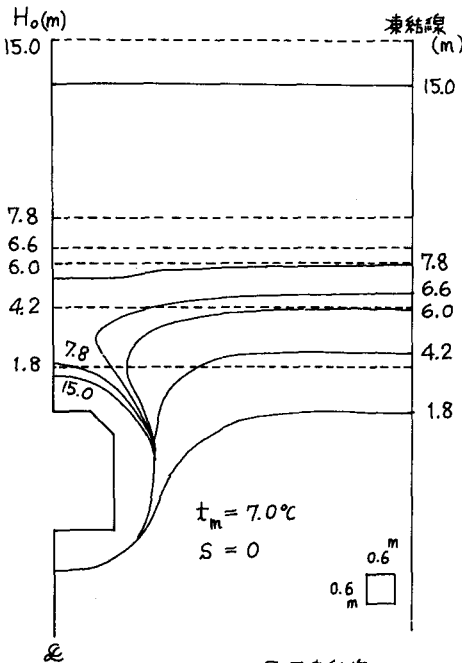


図-1 H_0 に対する最深凍結線

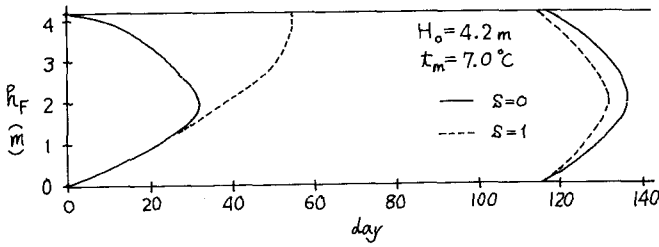


図-2 $H_0=4.2\text{ m}$ に対する h_F の経日変化

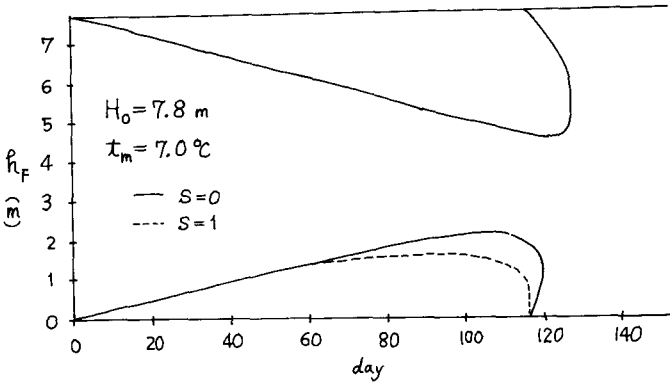


図-3 $H_0=7.8\text{ m}$ に対する h_F の経日変化

h_F の影響は極めて大きいことがわかる。たとえば $H_0=6.6\text{ m}$ の時 $t_m=7^\circ\text{C}$ 、 $S=0$ の状態では土被り上部の地山全高が凍結領域に入るのに対して、 $H_0=7.8\text{ m}$ では凍結領域は土被り上層部とトンネル内空側に分断される。

(2) 凍結深度の経日変化に及ぼす土被り効果と積雪の有無の影響

トンネル頂部の凍結深度 h_F の経日変化は $t_m=7^\circ\text{C}$ 、 $H_0=4.2\text{ m}$ については図-2 に示される。また $H_0=7.8\text{ m}$ については図-3 のようである。実線は $S=0$ 、破線は $S=1$ について描いたものであるが、トンネル上部の積雪の有無による h_F の影響は大きい。図-2 において $\theta(x)<0$ になると h_F は進行しはじめ、 $S=0$ の場合 32 day においてトンネル上・下部よりの h_F は接触して $h_F=H_0$ となる。そして地山全高の凍結状態が続き、 $\theta(x)>0$ となる 116 day から両面より h_F は後退をはじめ地山中にポケット状に凍結領域が残る。しかし図-3 ではもはや地山全高が凍結領域になることはなく、またトンネル内空側からの h_F は積雪の有無にあまり影響されない。

(3) トンネル上部の最大凍結深度到達日数と土被り高さの関係

$\theta(x)\leq 0^\circ\text{C}$ となってから h_F が最大値に達するまでの経過日数 $d_{F,\max}$ と H_0 の関係は図-4 に示される。狐頭形の極値以下の H_0 は $h_F=H_0$ であり、それ以上ではトンネル上・下部よりの h_F は交わることはない。そのような極値は $S=1$ の方が $S=0$ よりも H_0 は小さくなる。

付ける。しかし冬期に土被り上部に積雪が存在する場合は概ね地表面温度は 0°C に保持されるものと、この状態を $S=1$ と称し、地表面温度は、

$$\theta(x) = t_m + A_Y \sin 2\pi x / 364 \quad (\theta(x) > 0)$$

$$\theta(x) = 0 \quad (\theta(x) \leq 0)$$

----- (2)

とする。なお式(2)を用いる場合でもトンネル内気温は式(1)を適用する。

4. 地山の熱的定数

覆工コンクリートならびに地山の熱的定数はすべて一定とし、 $\lambda = 2\text{ Kcal/m}\cdot^\circ\text{C}$ 、 $C_S = 0.2 \times 2700\text{ Kcal/m}^3\cdot^\circ\text{C}$ とする。また地山の凍結・融解に伴う潜熱を無視する。

5. 解析結果

(1) トンネル地山の最深凍結線

トンネル地山の温度分布から最深凍結線をおいてみると図-1 のようになる。左欄が土被り高さ H_0 (破線) を、右欄が凍結線 (実線) を示す。これから H_0 の及ぼす凍結深度

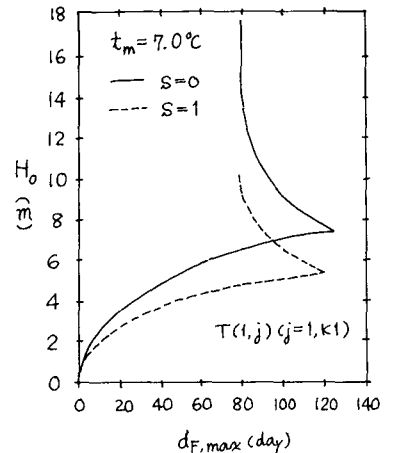


図-4 トンネル頂部の $d_{F,\max}$ と H_0 の関係

1) 土木学会 31 回, 32 回, 33 回 年次学術講演会 概要集

2) 岡田・他「表面断熱処理によるトンネルのつら防止工法の極寒地試験とその解析」鉄道技術研究報告 NO. 1078, 1978 年 3 月