

|                 |     |       |
|-----------------|-----|-------|
| 北海道大学           | 学生員 | 青野 正志 |
| 北海道大学           | 正 員 | 三上 隆  |
| 開発土木研究所         | 正 員 | 佐藤 昌志 |
| 北海道開発コンサルタント(株) | 正 員 | 岡田 正之 |
| 釧路工業高等専門学校      | 正 員 | 芳村 仁  |

## 1. はじめに

寒冷地道路トンネルでは、地山の凍結による覆工の変形等、凍害を受ける危険性が大きい。そのため、新設トンネルにおいては、1次覆工と2次覆工の間に、また、既設トンネルにおいては覆工表面に断熱材が施工される場合が多いが、熱応力の検討は十分になされているとは言い難い。

そこで本論文では、断熱材無しおよび断熱材施工されたトンネル・地山系の非定常熱伝導解析から得られる温度分布をもとに、覆工に生じる温度応力の基本的特性を明らかにしようとするものである。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析方法

#### 2.1.1 非定常熱伝導解析

本論文では、1次元の有限要素法で離散化して得られる熱伝導方程式(1)にCrank-Nicolson法(2)を適用することにより、トンネル・地山系の温度を時刻歴に求める<sup>1)</sup>。

$$[C]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} + [K]\{T\} = \{f\} \quad (1)$$

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \frac{\{T\}_{t+dt} - \{T\}_t}{dt} \quad (2)$$

$$\{T\} = \frac{\{T\}_{t+dt} + \{T\}_t}{2}$$

ここで、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ熱容量マトリックス、熱伝導マトリックス、 $\{f\}$ 、 $\{T\}$ はそれぞれ熱流束ベクトル、温度ベクトルを示す。

#### 2.1.2 定常熱応力解析

熱応力は以下のように求められる<sup>1)</sup>。支配方程式(3)を解くことにより各節点の変位が得られ、続いて得られた変位を式(4)で表される応力-ひずみ関係式に代入することで応力が算出される。

$$[K]\{u\} = \{f_i\} \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} - \{\epsilon^t\} \quad (4)$$

ここで、 $[K]$ 、 $[D]$ はそれぞれ剛性、応力-ひずみマトリックス、 $\{u\}$ 、 $\{f_i\}$ 、 $\{\sigma\}$ 、 $\{\epsilon\}$ 、 $\{\epsilon^t\}$ はそれぞれ変位ベクトル、熱ひずみによる見かけの節点荷重ベクトル、応力ベクトル、ひずみベクトル、そして熱ひずみベクトルを示す。

2.2解析モデル

本解析に用いた解析モデルを図-1に示す。断熱材無しモデルと断熱材を覆工内部及び覆工表面に施工した場合のモデルを示している。トンネルは円形断面を仮定し、中心からトンネル表面までの内空距離、覆工厚はどの場合においてもそれぞれ4.5m、0.4mである。また、(b)、(c)モデルについては覆工内部及び表面に厚さ5cmの断熱材が施工されている。なお、解析は200要素に分割し、時間刻みは3時間を用いた。

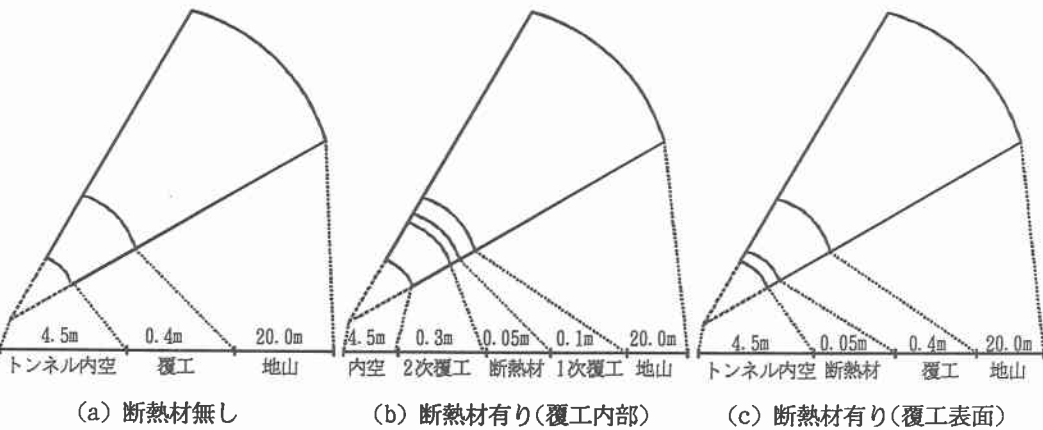


図-1 解析モデル

2.3材料定数及び解析ケース

解析に用いた材料定数を表-1に示す。覆工については弾性係数 $E=2.0\times10^6$ (tf/m<sup>2</sup>)、ポアソン比 $\nu=1/6$ 、断熱材については弾性係数 $E=1.3\times10^4$ 、ポアソン比 $\nu=0.45$ 、そして、地山については弾性係数 $E=7.8\times10^3$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ として計算を行った。また、線膨張係数はどの材料についても $1.0\times10^{-5}$ (°C<sup>-1</sup>)と仮定した。

ここでパラメータスタディとして断熱材の厚さを基本の5cmから10cm、15cmと変えた時の応力変化、およびトンネルの内空側に夏と冬の場合を想定し、次のような条件のもとで応力の検討を行った。

- ・夏モデル：1°Cのステップ状に変化する入力温度、熱伝達率 $\alpha=5.0$ (kcal/m<sup>2</sup>h°C)
- ・冬モデル：-1°Cのステップ状に変化する入力温度、熱伝達率 $\alpha=\infty$

表-1 解析に用いた材料定数

(1)熱伝導解析に用いた材料定数

|     | 熱伝導率k<br>(kcal/mh°C) | 熱容量pc<br>(kcal/m³°C) |
|-----|----------------------|----------------------|
| 覆工  | 1.0                  | 400.0                |
| 断熱材 | 1.0                  | 40.0                 |
| 地山  | 1.0                  | 500.0                |

(2)熱応力解析に用いた材料定数

|     | 弾性係数E<br>(tf/m²) | ポアソン比ν | 線膨張係数<br>(°C <sup>-1</sup> ) |
|-----|------------------|--------|------------------------------|
| 覆工  | $2.0\times10^6$  | 1/6    | $1.0\times10^{-5}$           |
| 断熱材 | $1.3\times10^4$  | 0.45   | $1.0\times10^{-5}$           |
| 地山  | $7.8\times10^3$  | 0.35   | $1.0\times10^{-5}$           |

3. 解析結果

3.1 熱伝導解析

解析モデル(図-1)の冬モデルにおける温度変化を図-2に示す。断熱材が施工することにより覆工と地山接触部の温度は入力温度に対して小さくなり、覆工表面に断熱材を施工する場合にその傾向は著しい。また、同図では省略しているが、トンネル内空側の熱伝達率 $\alpha$ を無限大と設定したためトンネルの表面はどの解析モデルにおいても入力温度と同じ-1℃である。

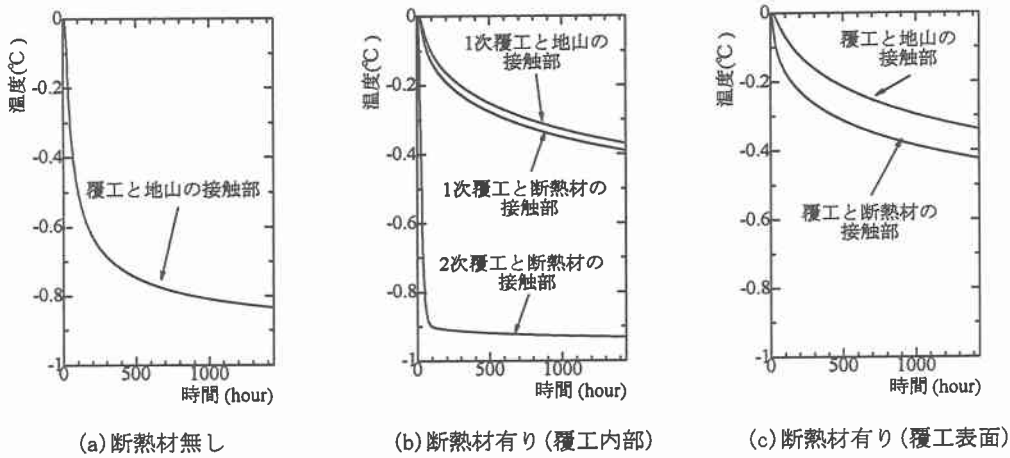


図-2 温度の経時変化 (冬モデル)

3.2 熱応力解析

覆工表面応力の断熱材施工位置による比較を図-3に示す。断熱材無しと内部に断熱材を施工した時には覆工表面の最大応力にそれほど差は見られないが、覆工表面に断熱材を施工した場合に最大応力がかかなり低減されてることが分かる。また、トンネル内空側の入力温度がさらに小さくなると覆工表面の応力がコンクリートの許容引張応力と同程度になることも考えられる。図-4は24時間経過時の覆工の応力分布図である。断熱材が施工されない時、覆工表面では引張応力を示し、地山との接触部で覆工の応力は圧縮となっている。断熱材が施工された場合においてもおおよその傾向は示されているが、断熱材が施工されたところでは不連続な点がみられる。

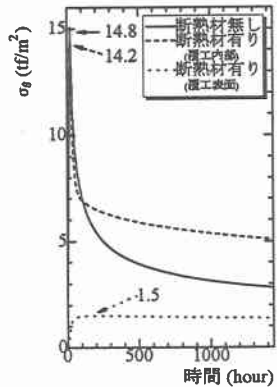


図-3 覆工表面応力の断熱材施工位置による比較

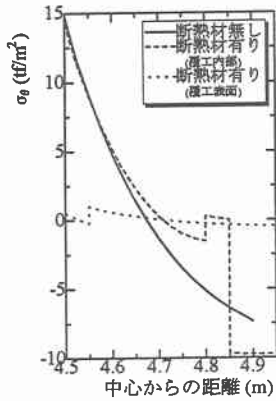
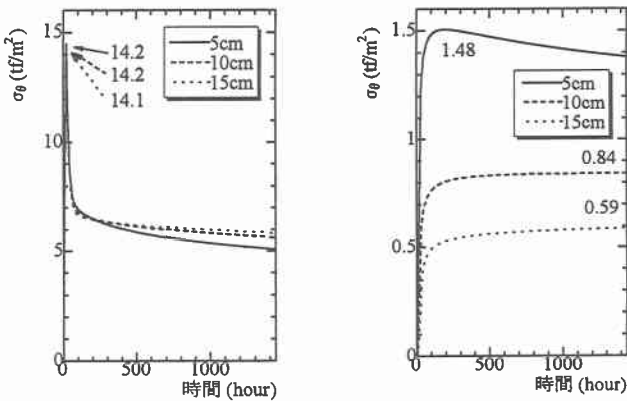


図-4 24時間経過時の覆工の応力分布

覆工表面応力の断熱材厚による比較を図-5に示す。覆工内部に断熱材を施工し、その厚さを変化させた場合には覆工表面の応力にそれほど影響が見られなかった。しかし、覆工表面に断熱材を施工した場合、厚さを2倍、3倍と変化させると最大応力はそれに伴い減少していることが分かる。

夏モデルの解析結果を図-6に示す。冬モデルの解析結果を示す図-3では覆工表面の応力は引張応力になっているのに対し、図-6では圧縮応力を示している。これは入力温度の正負の相違によるものであり、また、最大応力に違いが見られるのは熱伝達率 $\alpha$ の影響であると考えられる。



(1) 覆工内部に断熱材を施工      (2) 覆工表面に断熱材を施工

図-5 覆工表面応力の断熱材厚による比較

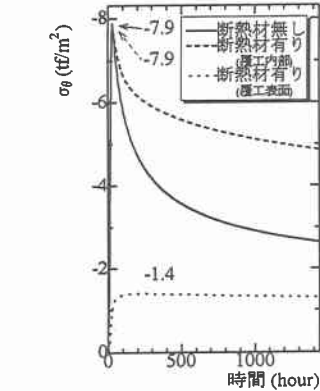


図-6 夏モデルにおける覆工表面応力

#### 4. まとめ

寒冷地道路トンネルの温度変化と温度応力特性を有限要素法を用い解析を行った。断熱材の施工位置、厚さの応力に与える影響、地山の弾性係数の応力に与える影響、夏と冬モデルによる応力の相違について検討を加えた。この解析の範囲で分かったことは以下のようにまとめられる。

- (1)断熱材を施工することにより、覆工と地山の接触部の温度は入力温度に対して小さくなり、覆工表面に断熱材を施工したとき著しい。
- (2)覆工の内部に断熱材を施工した時、覆工表面の最大引張応力は断熱材無しの場合とそれほど違いはないが、覆工表面に施工すると応力はかなり低減されると思われる。
- (3)断熱材厚の変化は、覆工内部に断熱材を施工する場合には応力にそれほど影響を与えないが、覆工表面に断熱材を施工すると厚くなるにしたがって、応力が減少する。
- (4)夏モデルは冬モデルと比較して入力温度の違いにより覆工表面で圧縮応力を示し、熱伝達率の影響により最大応力の絶対値が小さい値となっている。

#### 参考文献

1)矢川元基・宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析、サイエンス社、pp115-161、1991