

## 矢板工法により建設された寒冷地トンネルの覆工内温度応力の理論的検討

An analysis of temperature stress of tunnel constructed by sheet pile method in cold regions

松尾 優子\*, 三上 隆\*\*

Yuko Matsuo, Takashi Mikami

\*北海道大学大学院, 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

\*\*工博, 北海道大学大学院教授, 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

In cold regions, existing tunnels constructed by sheet pile method suffer from frozen damages. In order to estimate these damages, analysis of temperature stress is necessary. This paper presents a method for analyzing temperature stress using cylindrical shell theory taking consideration into temperature distribution in tunnel's lining. The temperature distribution in lining is obtained using theoretical model of heat convection/conduction. The effects of geometrical parameters such as length, radius, and thickness of lining are investigated. Several examples are also compared with other numerical methods based on the cylindrical shell theory.

Key Words: temperature in lining, temperature stress, cylindrical shell theory

キーワード: 覆工内温度, 温度応力, 円筒殻理論

## 1. はじめに

北海道における道路トンネルは, 冬期の厳しい寒さにより, 氷柱や側氷の発達, 地山凍結による覆工の変形及び, ひび割れ等, 凍害を受ける危険性が大きい<sup>1)</sup>. そのため, 凍害防止対策の一つとして, 本研究で取り上げる矢板工法により施工されたトンネルの場合は, トンネル覆工表面に断熱材がトンネル坑口からトンネル奥の一定区間において施工される, いわゆる外部断熱処理がなされる.

しかしながら, 断熱材の厚さ<sup>2~4)</sup>及び施工範囲を算定するためのトンネル坑内の延長方向の温度分布<sup>5)</sup>に関する報告はみられるものの, 延長方向の分布特性を踏まえたトンネル覆工内の温度応力に関する報告は少ないようである.

なお, この種の問題に適用可能な温度応力(熱応力)算定式<sup>6)</sup>としては, 円筒殻の厚さ方向の温度の挙動を線形と仮定し, 殻の内側と外側の温度差に着目した殻の端面から十分に離れた位置における応力算定法及び, それに端面の境界条件を考慮した算定式があるが, トンネル延長方向の温度勾配を考慮した報告はみられない.

そこで本研究は, トンネル覆工表面のひび割れ発生の要因となる引張応力が発生しやすい冬季間のトンネル坑内気温分布より, トンネル覆工内の温度応力を把握することを目的に行ったものである. そのため本解析は,

冬季間におけるトンネル坑内延長方向の最低気温分布は「負の温度を示す. トンネル坑口より遠ざかるにつれて温度は上昇する」という観測温度分布特性をほぼ表すことのできる解析的なトンネル坑内延長方向温度算定式<sup>5)</sup>を下に, トンネル覆工内の延長方向の温度分布を求め, それに基づいたトンネル覆工の温度応力の検討を理論的に行ったものである.

具体的には, トンネルは円形断面とし, トンネル覆工はトンネル延長方向にはシェルとしての役割が期待できることから, 薄肉円筒殻理論により温度応力問題を記述して解析を行い, 数値例ではトンネル覆工の温度応力への各パラメータ(トンネル内風速, 地山の熱伝導率, トンネル径, トンネル延長等)の影響を調べるとともに, 上述の既往の算定法<sup>6)</sup>の適用可能性の検討も行った.

## 2. 北海道内の矢板工法で建設されたトンネルの諸元

ここでは後述する数値計算に使用する目的として, 既設の矢板工法で建設されたトンネル状況について, 北海道の道路トンネル<sup>7)</sup>より, トンネル延長, 半径, 覆工厚を調べた.

図—1 にトンネル延長について集計した結果を示す. 同図より, 北海道内の矢板工法で建設されたトンネルの多くは延長が 500m 以下であることが確認できる.

図—2 に換算半径による集計結果を示す. ここで換算

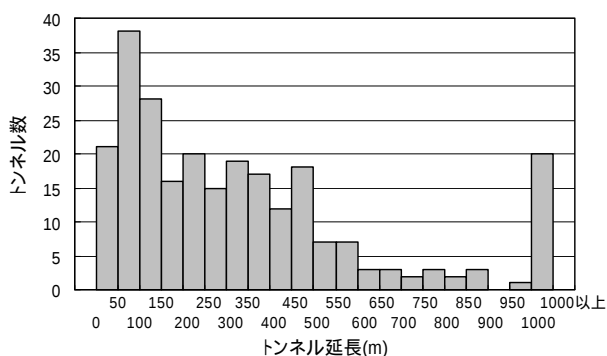


図 - 1 北海道内の矢板工法によるトンネル延長

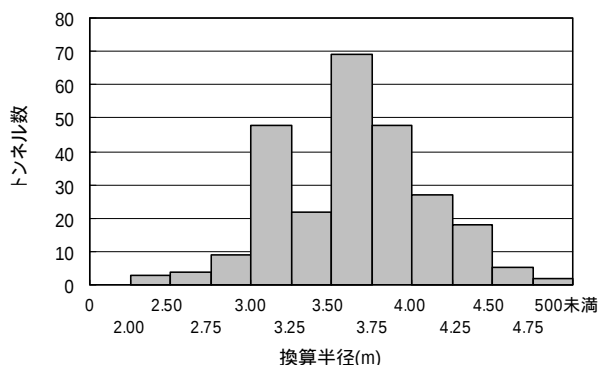


図 - 2 北海道内の矢板工法によるトンネルの換算半径

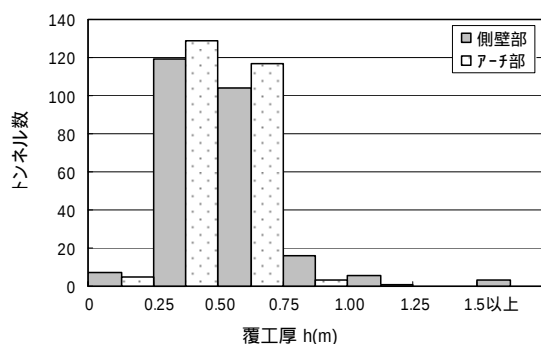


図 - 3 北海道内の矢板工法によるトンネルの覆工厚

半径とは、トンネル内空断面積より求めたトンネル坑内の半径であり、図—2 より 3.0m から 4.0m の範囲に分布しているのがわかる。また、図—3 に側壁部及びアーチ部の覆工厚についてそれぞれ 0.25m 単位で示す。同図に示すように、覆工厚については、0.25m から 0.75m の範囲で集中している。

本研究では、これらのデータを参照しパラメータの値を定め計算を行った。

### 3. トンネル覆工内の温度応力の解析

トンネル延長方向に沿った覆工内の温度応力を求めるには、最初にトンネル内空の延長方向の温度分布<sup>5)</sup>を求め、次にこれを入力温度としたトンネル覆工内の温度解析<sup>8)</sup>を行い、最後に温度応力の解析を行うことになる。

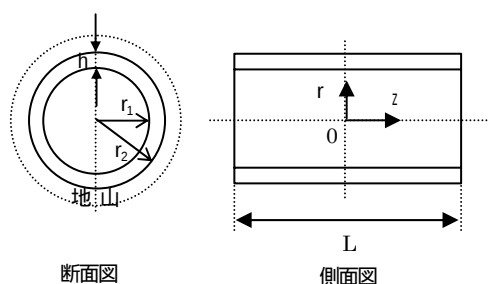


図 - 4 解析モデル

なお、延長方向の温度分布及びトンネル覆工内の温度分布の解析は文献 5,8)を参照してもらうことにし、ここでの記述は簡単にしたい。

図 - 4 に、トンネルの温度解析<sup>5,8)</sup>に用いた解析モデルを示す。トンネル延長は  $L$ 、トンネル内径は  $r_1$ 、トンネル外径は  $r_2$ 、及びトンネル覆工厚さは  $h=r_2-r_1$  を表す。解析は、トンネルの断面を円形、トンネル両坑口から風が一定の風速( $v_w$ )で吹き込み、及び気温は年周期の周期的変動を示すとの仮定の下、トンネル覆工と地山の二層系からなるモデルに対して、熱伝達理論・熱伝導理論<sup>9)</sup>を用いて行った。トンネル覆工内の温度分布<sup>8)</sup>は、トンネル坑口位置における年平均気温  $\theta_0$  及び年温度振幅  $\Theta_0$  を境界条件とする定常解と準定常解の和として求め、次にその和を入力値として、トンネル覆工内の温度解析を行っている。また、本解析では実際のトンネル覆工の延長 10m ごとに設けられている目地の影響を無視して解析を行っているが、その算定応力は安全側の結果を与えるものと考えられる。

一方、トンネル覆工内の温度応力解析は、矢板工法で施工されたトンネルの場合、覆工背面には一般には空隙があることから、図 - 4 からトンネル覆工のみを取り出して解析を行った。その挙動は薄肉円筒殻理論<sup>6)</sup>で記述し、トンネル坑口における境界条件は、トンネル延長(軸)方向には自由とした。

なおトンネル延長方向の座標  $z(=0 \sim L/2)$  は、温度分布解析及び温度応力解析に対して、トンネル延長方向の中心を原点とした。

#### 3.1 トンネル坑内延長方向及びトンネル覆工内の温度分布

トンネル覆工内の温度応力を求めるにあたり、冬季間ではトンネル覆工内に生じる温度応力が引張応力となるため、冬季間の温度応力に着目し解析を行った。解析に用いた冬季間におけるトンネル内空の最低気温の延長方向分布は、次式で表される。

$$\theta_z = \theta_0 - \Theta_0 \cdot \exp\left(\frac{\cos(g(r_1)) \cdot \cos n(r_1) - 1}{v_w} \cdot \left(\frac{L}{2} - z\right)\right) \quad (1)$$

ここで、上式の第 1 項目は定常解であり、第 2 項目は準定常解のピーク値であり、また最高気温分布は式(1)

の右辺において、マイナス符号をプラス符号に変えればよい。なお、気温分布は $z=0$ に関して対称分布をなすものである。

式(1)を入力温度として、トンネル覆工内(半径方向)の温度分布を求めれば次式となる

$$\theta_r = \theta_0 - \Theta_0 \cdot g(r) \cdot \exp\left(\frac{\text{cof}(g(r_1)) \cdot \cos \eta(r_1) - 1}{v_w} \cdot \left(\frac{L}{2} - z\right)\right) \quad (2)$$

ここで、 $\text{cof}=(2 \cdot a_r)/(C_p \cdot \gamma \cdot r_1)$ 、 $a_r$ は空気の熱伝達率、 $C_p$ は空気の定圧比熱、 $\gamma$ は空気の比重である。式(2)に現れる $g(r)$ は図—4に示したトンネル覆工と地山の二層系モデルに対する準定常解より求めたトンネル覆工内の温度振幅を表し、式(1)と式(2)の $g(r_1)$ は覆工表面の温度振幅である。さらに、式(1)と式(2)の $\eta(r_1)$ は、同様にして二層系モデルより得られた準定常解の地山方向の位相遅れを表している。また、上式は不易層の温度と年平均気温を同じ値として求めている。

なお、後の数値例で明らかにするが、トンネル覆工内において、厚さ方向の温度 $\tau$ の変動を線形であると仮定する。いま、式(2)において、右辺の第2項目を $\Theta_0 F(r, z)$ と記せば、トンネル覆工内の温度分布は次式のように半径方向の直線分布で表される。

$$\tau = \tau_0(z) + \frac{x}{h} \Delta \tau(z) \quad (3)$$

ここで $x$ ( $=-h/2 \sim h/2$ )は覆工中央を原点にとり、正の方向は $r$ のそれと同じとする(図-4)。さらに、

$$\tau_0(z) = \Theta_0 (F(r_2, z) + F(r_1, z))/2 \quad (4.a)$$

$$\Delta \tau(z) = \Theta_0 (F(r_2, z) - F(r_1, z)) \quad (4.b)$$

であり、 $\tau_0(z)$ は年平均気温からの温度変化を表し、 $\Delta \tau(z)$ は覆工の外側と内側表面の温度差を表す。

### 3.2 トンネル覆工内の温度応力の算定

式(4)で与えられた温度変化を受けるトンネル覆工の挙動は、円筒殻理論を用いて表せば次式となる。

$$\frac{d^4 w}{dz^4} + 4\beta^4 w = b_1 \cdot \tau_0(z) - \frac{d^2}{dz^2} \{b_2 \cdot \Delta \tau(z)\} \quad (5)$$

ここで、 $w$ はトンネル覆工の半径方向変位、 $\beta^4 = E \cdot h/(4 \cdot D \cdot r'^2)$ 、 $D = E \cdot h^3/\{12(1-\nu^2)\}$ 、 $b_1 = \alpha \cdot E \cdot h/(D \cdot r')$ 、 $b_2 = \alpha \cdot (1+\nu)/h$ であり、また $E$ はトンネル覆工コンクリートの弾性係数、 $\nu$ はポアソン比、 $\alpha$ は線膨張係数、 $r'$ は覆工中央における半径で $r' = (r_1 + r_2)/2$ である。

式(5)から得られる余解は、 $z$ につき偶関数で与えられることに留意すれば、半径方向変位 $w$ は、次式となる。

$$w = C_1 \cosh \beta z \cdot \cos \beta z + C_2 \sinh \beta z \cdot \sin \beta z + f(z) \quad (6)$$

ここで、 $C_1$ と $C_2$ は境界条件から決定される未定係数であり、 $f(z)$ は式(6)の特解を表し、次式で与えられる。

$$f(z) = (b_1 \cdot s_1 - b_2 \cdot s_2 \cdot s_0^2) \cdot \exp\left\{s_0 \cdot \left(\frac{L}{2} - z\right)\right\} / (s_0^4 + 4\beta^4) \quad (7)$$

$$s_0 = \frac{\text{cof} \cdot \{g(r_1) \cdot \cos \eta_1 - 1\}}{v} \quad (8.a)$$

$$s_1 = \Theta_0 \cdot \frac{\{g(r_1) + g(r_2)\}}{2} \quad (8.b)$$

$$s_2 = \Theta_0 \cdot \{g(r_2) - g(r_1)\} \cdot s_0^2 \quad (8.c)$$

未定係数 $C_1$ と $C_2$ は、トンネル坑口位置 $z=L/2$ における自由の条件より定められ、その条件は以下となる。

$$M_z = Q_z = 0 \quad (9)$$

ここで、曲げモーメント $M_z$ 及びせん断力 $Q_z$ は次式である。

$$M_z = D \cdot \left\{ \frac{d^2 w}{dz^2} + b_2 \cdot \Delta \tau(z) \right\} \quad (10.a)$$

$$Q_z = D \cdot \left\{ \frac{d^3 w}{dz^3} + \frac{d}{dz} \cdot (b_2 \cdot \Delta \tau(z)) \right\} \quad (10.b)$$

トンネル覆工の円周方向応力 $\sigma_\theta$ は、係数 $C_1$ と $C_2$ が求まれば、式(3)及び式(6)を用いて、次式より得られる。

$$\sigma_\theta = E \cdot \left\{ \frac{w}{r'} - \alpha \cdot \tau_0(z) - \frac{x}{(1-\nu^2)} \left\{ v \cdot \frac{d^2 w}{dz^2} + \alpha \cdot (1+\nu) \cdot \frac{\Delta \tau(z)}{h} \right\} \right\} \quad (11)$$

なお、前述した既往の温度応力(熱応力)算定式<sup>6)</sup>は以下となる。円筒殻の厚さ方向の温度の挙動を本研究と同様に線形と仮定し、式(3)における $\tau_0(z)$ を零とする場合の式である。

トンネル坑口より十分に離れた位置のトンネル覆工の円周方向応力 $\sigma_\theta$ は、次式である。

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta \tau(z)}{2 \cdot (1-\nu)} \quad (12.a)$$

また、トンネル坑口ではシェルの曲げの影響があることから、近似的に坑口での境界条件(トンネル延長方向の応力 $\sigma_z$ が零)の条件を満足するように求めた最大の温度応力は次式となる。

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta \tau(z)}{2 \cdot (1-\nu)} \cdot \left\{ 1 - \nu + \frac{\sqrt{1-\nu^2}}{\sqrt{3}} \right\} \quad (12.b)$$

### 4. 数値計算例

ここでは、温度応力に及ぼす覆工の温度分布特性(式(3)の $\tau_0(z)$ と $\tau(z)$ )、及び地山の熱伝導率、トンネル内

風速，トンネルの各種パラメータ(延長，覆工の厚さ，半径等)の影響を明らかにする．なお，冬季間の最低気温分布を下に温度応力を算出したため，円周方向応力 $\sigma_\theta$ は，すべて覆工内側表面の値に着目して整理し，正の値のときは引張応力である．

計算に用いた各種のパラメータを表-1に示す．計算では，特定のパラメータの影響を調べる時には，表-1に記した範囲内で変化させ，その他のパラメータにはこの表で与えた基準パラメータを用いた．

また，覆工の熱伝導率は $1.5(\text{W/m})$ ，覆工の熱容量 $1,700(\text{kJ/m}^3)$ ，地山の熱容量 $2,000(\text{kJ/m}^3)$ ，空気熱伝導率 $\infty(\text{W/m}^2)$ ，空気の定圧比熱 $1,000(\text{J/kg}\cdot\text{K})$ ，空気の比重 $1.3(\text{kg/m}^3)$ を用いた．

#### 4.1 覆工内の温度分布

図-5に式(2)より計算した覆工内の温度分布を示す．

表-1 解析パラメータ

| 諸元項目                | 単位  | 基準値 | 範囲         |
|---------------------|-----|-----|------------|
| 風速 $v_w$            | m/s | 0.5 | 0.1 ~ 5.0  |
| トンネル延長 $L$          | m   | 500 | 300 ~ 1000 |
| トンネル内径 $r_1$        | m   | 3.5 | 3.0 ~ 5.0  |
| 覆工厚 $h$             | m   | 0.6 | 0.4 ~ 1.0  |
| 地山の熱伝導率 $\lambda_s$ | W/m | 1.5 | 1.0 ~ 5.0  |

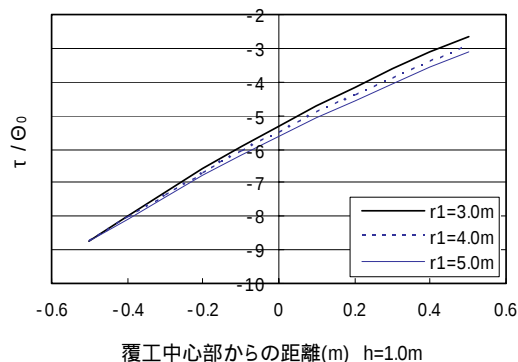


図-5 覆工内の温度分布

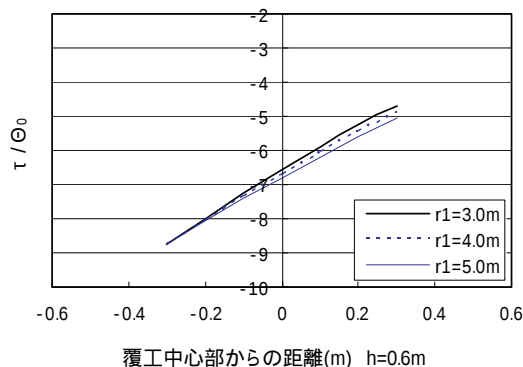


図-6 覆工内の温度分布

覆工厚は $h=1.0\text{m}$ の条件で，トンネル内径 $r_1$ を変化させて計算を行った．図-5より，覆工内の温度分布は直線近似できることが確認できる．同様にして，基準パラメータとなる $h=0.6\text{m}$ の覆工内の温度分布を図-6に示す．図-6より $h=0.6\text{m}$ においても，覆工内の温度分布は直線とみなすことができることがわかる．

#### 4.2 トンネル延長Lが与える影響

図-7にトンネル延長 $L$ の変化における $\Delta\tau$ を示す．同図より，トンネル中心部は $L$ が短いほど $\Delta\tau$ が大きい値となるが，トンネル坑口部では同じピーク値 $0.26$ を示していることがわかる．次に，同様にして図-8に $\tau_0$ を示す． $\tau_0$ は $z$ の増加とともに減少している．なお， $L$ における変化は $z$ のどの位置においても， $\Delta\tau$ ， $\tau_0$ の両者とも $L=500\text{m}$ に対して， $L=300\text{m}$ では $1.07$ 倍， $L=1,000\text{m}$ のときは $0.85$ 倍となっている．

図-9に $L$ の変化における覆工内面の温度応力 $\sigma_\theta$ を示す．同図よりわかるように，トンネル中心部では， $L$ が短いほど $\sigma_\theta$ は大きくなるが，坑口近傍ではいずれの $L$ の場合でも $\sigma_\theta$ は $0.15$ となるピーク値を示した．ただし，ここでは， $\sigma_\theta$ の値は $\theta_0$ で除して無次元で示しているため，実際の $\sigma_\theta$ は建設地点における $\theta_0$ に大きく影響される．また， $L=300\text{m}$ ， $L=500\text{m}$ では，トンネル坑口付近の応力は急激に減少しているが， $L=1,000\text{m}$ では一様に収束している．(付録参照)

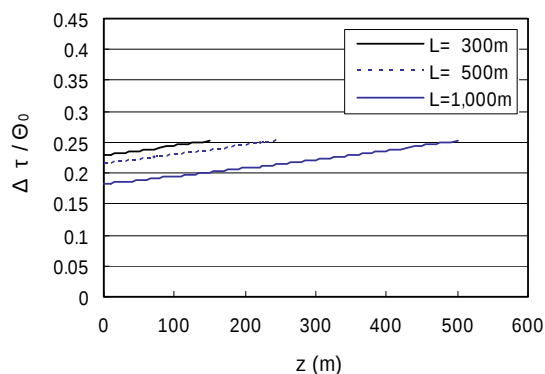


図-7 トンネル延長Lの変化による $\Delta\tau$

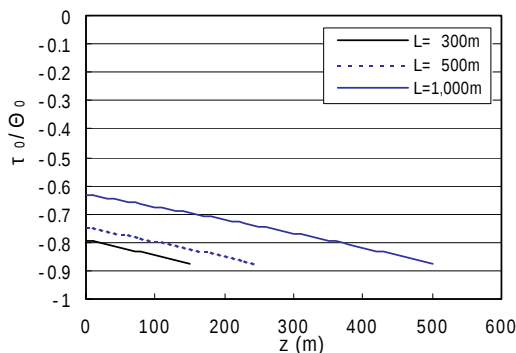
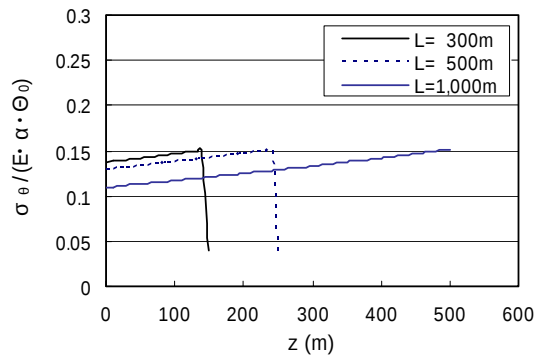
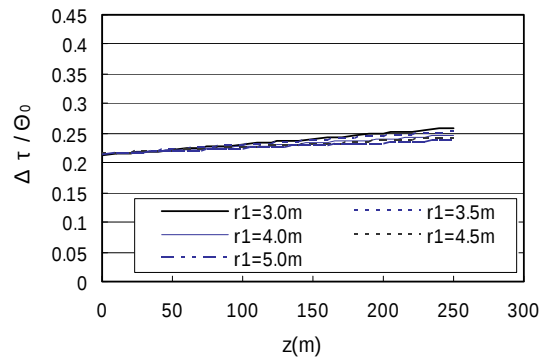


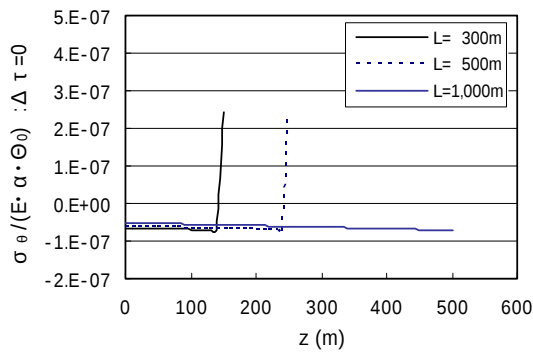
図-8 トンネル延長Lの変化による $\tau_0$



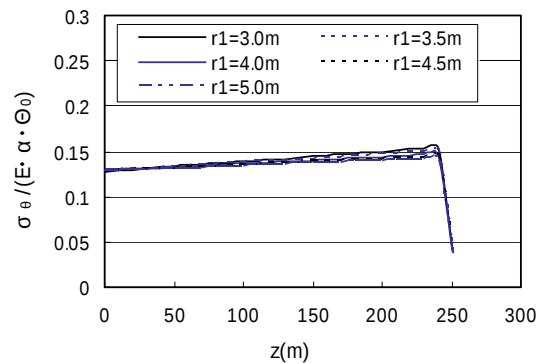
図—9 トンネル延長  $L$  の変化による温度応力  $\sigma_{\theta}$



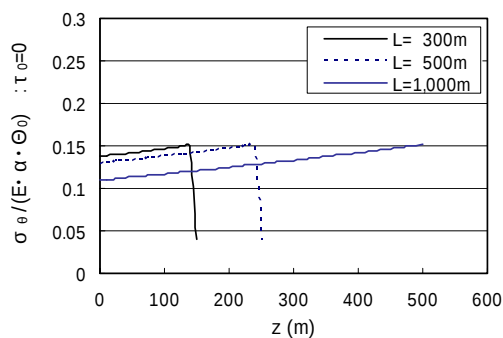
図—12 トンネル内径  $r_1$  の変化による  $\Delta \tau$



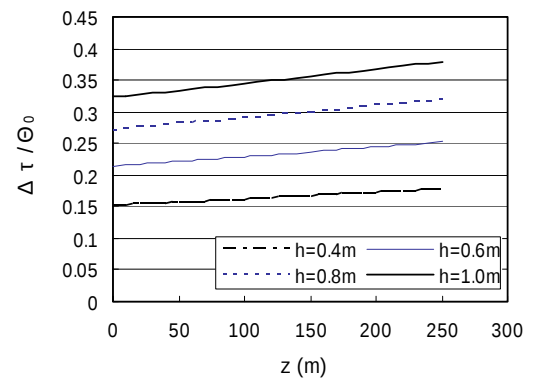
図—10  $\tau_0$  による温度応力  $\sigma_{\theta}$  ( $\Delta \tau=0$ )



図—13 トンネル内径  $r_1$  の変化による温度応力  $\sigma_{\theta}$



図—11  $\Delta \tau$  による温度応力  $\sigma_{\theta}$  ( $\tau_0=0$ )



図—14 覆工厚  $h$  の変化による  $\Delta \tau$

さらに、図—10 に  $\Delta \tau=0$ 、図—11 に  $\tau_0=0$  としたときの温度応力  $\sigma_{\theta}$  を示す。これらの図より、 $\tau_0$  による応力の影響は非常に小さく、 $\Delta \tau$  による応力が支配的であることがわかる。すなわち、式(3)で右辺の第 1 項を無視して  $\Delta \tau$  のみを考慮し  $\sigma_{\theta}$  の算定を行うことができるということがいえる。これ以降、温度分布については、 $\Delta \tau$  の結果のみを示す。ただし、本論文の  $\sigma_{\theta}$  の計算では  $\tau_0$  も考慮している。

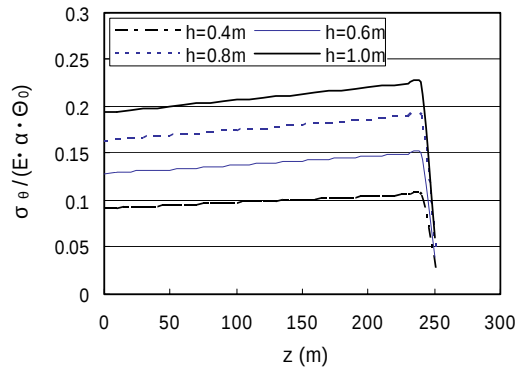
#### 4.3 トンネル内径 $r_1$ が与える影響

図—12 にトンネル内径  $r_1$  の変化における  $\Delta \tau$  を示す。同図よりトンネル坑口近傍では  $r_1$  が小さいほど、 $\Delta \tau$  の値が若干大きくなる傾向が見られるが、それほど大きな差がないことが確認できる。また  $\sigma_{\theta}$  (図—13) につい

ても、 $\Delta \tau$  と同様に  $r_1$  の変化による相違はあまり見られず、坑口近傍では  $\sigma_{\theta}$  はピーク値をとる。

#### 4.4 覆工厚 $h$ が与える影響

図—14 に覆工厚  $h$  の変化における  $\Delta \tau$  を示す。同図より  $z$  がどの地点であっても、 $h$  が厚くなるほど  $\Delta \tau$  は大きい値を示しており、 $\Delta \tau$  は  $z$  に対して直線的に増加している。次に、 $\sigma_{\theta}$  (図—15) では、トンネル中心部から坑口近傍までは、 $\Delta \tau$  と同様な傾向を示すが、坑口付近ではいずれのケースも、ピーク値に達したのち急激に減少している。また、 $h$  が厚いほど  $z$  に対する  $\sigma_{\theta}$  の増加率はやや大きくなっている。 $\Delta \tau$ 、 $\sigma_{\theta}$  とともにトンネル中心部では、 $h=0.6\text{m}$  のときの値を基準とすれば、



図—15 覆工厚  $h$  の変化による温度応力  $\sigma_\theta$

$h=0.4\text{m}$  では 0.7 倍,  $h=0.8\text{m}$  では 1.3 倍,  $h=1.0\text{m}$  では 1.5 倍となっている。

#### 4.5 風速 $v_w$ が与える影響

図—16 に風速  $v_w$  の変化における  $\Delta\tau$  を示す。図—16 よりトンネル中心部では  $v_w$  が大きいほど  $\Delta\tau$  は大きく, 坑口近傍ではその差が小さくなるのがわかる。また,  $\sigma_\theta$  (図—17) も  $\Delta\tau$  と同様な傾向を示しているが, 坑口近傍の  $\sigma_\theta$  は風速  $v_w$  の大きさに関わらず, いずれのケースも 0.15 付近まで達したのち, 0.04 まで, 急激に減少している。

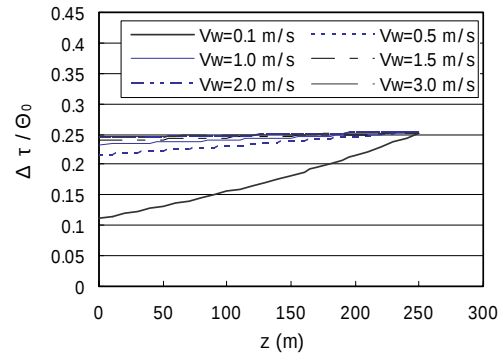
#### 4.6 地山の熱伝導率 $\lambda_s$ が与える影響

図—18 に地山の熱伝導率  $\lambda_s$  の変化における  $\Delta\tau$  を示す。同図よりいずれの  $z$  の位置においても,  $\lambda_s$  が大きいほど,  $\Delta\tau$  は大きな値を示し, また  $z$  に対する増加率も高くなっていることがわかる。次に, 図—19 に地山の熱伝導率  $\lambda_s$  の変化における  $\sigma_\theta$  を示す。トンネル坑口近傍までは  $\sigma_\theta$  は  $\Delta\tau$  と同様に  $z$  とともに増加するが, 坑口近傍ではどの  $\lambda_s$  の場合でも, ピーク値に達したのち, 急激に減少している。以上より, 坑口近傍までは,  $\lambda_s$  の変化による  $\Delta\tau$ ,  $\sigma_\theta$  は  $z$  に対して直線的に増加しており, トンネル中心部では,  $\lambda_s=1.5\text{Wm/}$  のときの値を 1.0 と基準においたとき,  $\lambda_s=1.0\text{Wm/}$  では 0.8 倍,  $\lambda_s=3.0\text{Wm/}$  では 1.3 倍,  $\lambda_s=5.0\text{Wm/}$  では 1.5 倍となった。

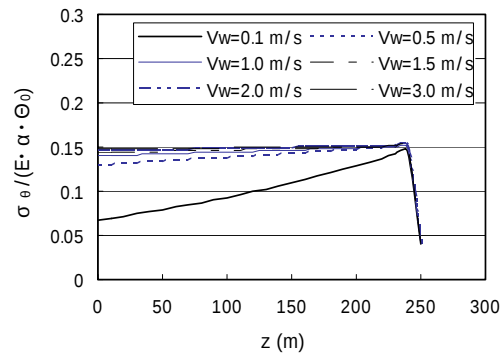
#### 4.7 本解析結果と他の算定法との比較

ここでは本解析結果と前述の式(12.a), 式(12.b)との比較を行う。なお, 式(12.a), 式(12.b)は  $\Delta\tau(z)$  のみを考慮した  $\sigma_\theta$  となっているため, 本算定法との比較にあたり, 本算定法では  $\tau_d(z)=0$  として解析を行った。

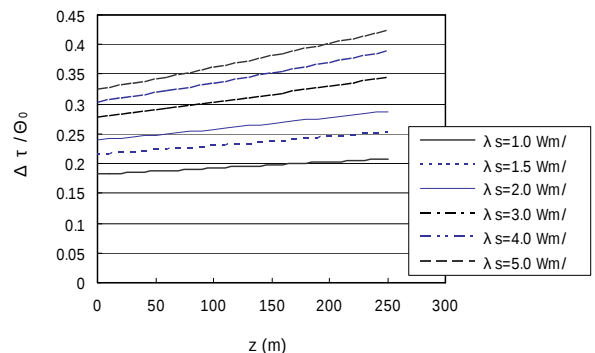
表—2 にトンネル延長  $L$  の変化における各理論の  $\sigma_\theta$  を示す。表—2 より, トンネル中心部( $z=0$ )では式(12.a)と本算定法による結果はほぼ同じ値を示している。しかし, トンネル坑口近傍では, 式(12.b)のほうが, 本算定法の 1.4 倍程度大きな値を示した。同様に,  $h$  (表—3)と  $r_1$  (表—4)についても, 比較を行ったが, いずれの場合におい



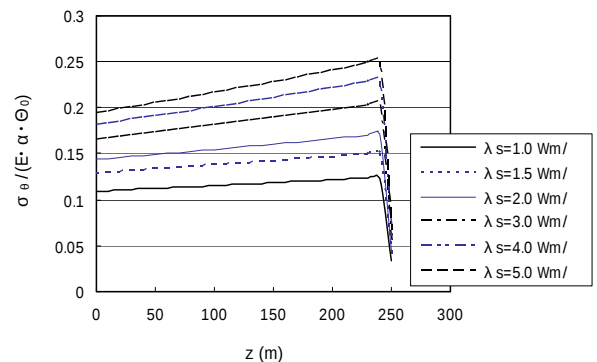
図—16 風速  $v_w$  の変化による  $\Delta\tau$



図—17 風速  $v_w$  の変化による温度応力  $\sigma_\theta$



図—18 地山の熱伝導率  $\lambda_s$  の変化による  $\Delta\tau$



図—19 地山の熱伝導率  $\lambda_s$  の変化による温度応力  $\sigma_\theta$

表—2 L の変化における温度応力  $\sigma_{\theta}/(\alpha \cdot E \cdot \Theta_0)$  の式(12.a), 式(12.b)と本算定法の比較

| トンネル延長   | z=0     |       | トンネル坑口付近 |       |
|----------|---------|-------|----------|-------|
|          | 式(12.a) | 本算定法  | 式(12.b)  | 本算定法  |
| L=300m   | 0.137   | 0.137 | 0.212    | 0.150 |
| L=500m   | 0.129   | 0.129 | 0.212    | 0.150 |
| L=1,000m | 0.109   | 0.110 | 0.212    | 0.151 |

表—3 h の変化における温度応力  $\sigma_{\theta}/(\alpha \cdot E \cdot \Theta_0)$  の式(12.a), 式(12.b)と本算定法の比較

| 覆工厚    | z=0     |       | トンネル坑口付近 |       |
|--------|---------|-------|----------|-------|
|        | 式(12.a) | 本算定法  | 式(12.b)  | 本算定法  |
| h=0.4m | 0.090   | 0.090 | 0.149    | 0.106 |
| h=0.6m | 0.129   | 0.129 | 0.212    | 0.150 |
| h=0.8m | 0.163   | 0.163 | 0.269    | 0.190 |
| h=1.0m | 0.194   | 0.194 | 0.319    | 0.226 |

表—4  $r_1$  の変化における温度応力  $\sigma_{\theta}/(\alpha \cdot E \cdot \Theta_0)$  の式(12.a), 式(12.b)と本算定法の比較

| トンネル半径            | z=0     |       | トンネル坑口付近 |       |
|-------------------|---------|-------|----------|-------|
|                   | 式(12.a) | 本算定法  | 式(12.b)  | 本算定法  |
| $r_1=3.0\text{m}$ | 0.128   | 0.128 | 0.219    | 0.155 |
| $r_1=3.5\text{m}$ | 0.129   | 0.129 | 0.212    | 0.150 |
| $r_1=4.0\text{m}$ | 0.129   | 0.129 | 0.207    | 0.147 |
| $r_1=4.5\text{m}$ | 0.129   | 0.129 | 0.203    | 0.144 |
| $r_1=5.0\text{m}$ | 0.128   | 0.128 | 0.200    | 0.142 |

でも式(12.b)のほうが, 本算定法より, 1.4 倍程度大きく評価している結果となった。

これまで示した温度応力の計算結果より, 温度応力  $\sigma_{\theta}$  は坑口近傍でピーク値をとり, トンネル中心部に近づくに従い, 減少傾向にあることがわかる。トンネル中心部においては, 式(12.a)は適用可能であるが, 坑口近傍においては式(12.b)は, 1.4 倍程度大きくなり過大評価されやすい。この傾向の要因としては, 式(12.b)はトンネル延長方向の温度分布特性が考慮されていないためである。

## 5 まとめ

本研究では, トンネル坑内の最低気温分布を下に, トンネル覆工内の温度分布, 及び温度応力へ影響を及ぼす各パラメータについて解析を行った。ここで得られた主な結果は以下である。

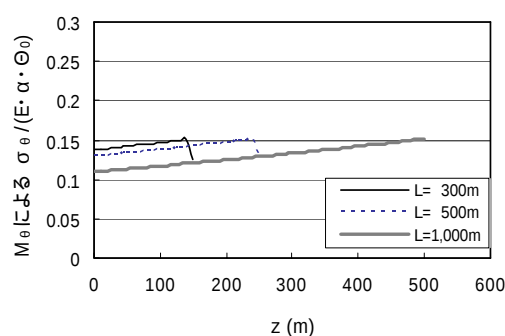
- 1)  $\tau_d(z)$  はトンネル中心から坑口にむかって直線的に増加し,  $\Delta \tau(z)$  は減少する。
- 2) 覆工内の温度応力解析には  $\Delta \tau(z)$  が支配的であり, 式(5)においては,  $\tau_d(z)$  の項は無視することができる。

3) 温度応力  $\sigma_{\theta}/(\alpha \cdot E \cdot \Theta_0)$  のピーク値はトンネル坑口もしくは坑口近傍でとる。またそのピーク値は内径, 覆工厚, 地山の熱伝導率, 風速が大きいほど大きくなる傾向を示した。

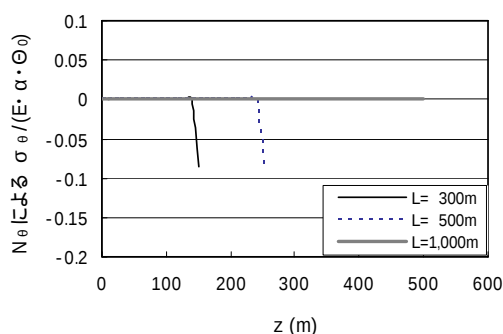
4) トンネル中央部分の温度応力  $\sigma_{\theta}/(\alpha \cdot E \cdot \Theta_0)$  の評価においては, 式(12.a)は有効である。ただし, 坑口近傍での式(12.b)は本算定法よりも約 1.4 倍程度大きく評価していることがわかった。

以上より, 対象となるトンネルの諸条件より覆工内に発生する温度応力を算定することができる。これらの結果を, トンネルの健全度の評価において, 参考にされたい。

## 付録



付図—1 L の変化における  $M_{\theta}$  による温度応力  $\sigma_{\theta}$  ( $M_{\theta}$ : 円周方向の曲げモーメント)



付図—2 L の変化における  $N_{\theta}$  による温度応力  $\sigma_{\theta}$  ( $N_{\theta}$ : 円周方向の軸力)

## 参考文献

- 1) 坂本稔, 川北稔, 五十嵐敏彦: 道路トンネルの変状の実態(北海道の場合), トンネルと地下, 第 20 巻, 第 5 号, pp.31-35, 1989.
- 2) 三上隆, 岡田正之, 芳村仁: 既設トンネルの外部断熱材の厚さの算定について, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.43-48, 1994.
- 3) 岡田勝也, 福地合一: 断熱処理によるトンネルつらら防止工の研究, 土木学会論文集, No.309, pp.129-139, 1981.

- 4) 岡田勝也，松本嘉司：トンネルの断熱処理によるつら  
ら防止工における断熱材幅の余裕長の提案，土木学会  
論文集，No.424/ -8，pp.145-152，1990.
- 5) 河村巧，三上隆，福本皓一：断熱材設計のための寒  
冷地トンネルにおける坑内延長方向の温度解析，構造  
工学論文集，Vol.54A，pp.32-38，2008.
- 6) S.Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger: Theory of  
Plates and Shells, McGraw-Hill Book Company, 1959.
- 7) 北海道土木技術協会トンネル研究委員会：北海道の道  
路トンネル，日本北海道土木技術会 トンネル研究委  
員会，1988.
- 8) 松尾優子，河村巧，三上隆：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，第64回年次学術  
講演会講演概要集, pp.653～654，2009.
- 9) 川下研介：熱伝導論，オーム社，1966.

(2009年9月24日受付)