

東急建設(株)

中部復建(株)

中央復建コンサルタンツ(株)

名古屋大学工学部

・ 笹木敏信

古田光司

片瀬貴文

市川康明

1. はじめに

NATMで施工されたトンネルの2次覆工ライニングに、ひび割れが生じた事例が数多く報告されている。このひび割れの発生時期、発生パターンにはかなりの相違が見られるが、在来工法との施工法の違いから発生の主要因として、セメントの水和熱によりライニングおよび地山に生じる温度応力が考えられる。本研究では、セメントの水和熱によるライニングおよび地山の温度変化、温度分布を熱伝導解析により求め、さらに経時的な温度変化に対するライニングの応力状態の変化を有限要素解析により求めた。

2. 解析方法

今、円形トンネル掘削後、切羽の影響のないところで一時にトンネル全周に渡ってライニングコンクリートが打設された状態を考えると、1次元軸対称場における熱伝導方程式による温度解析および熱応力解析を行なえばよい。ここではライニング内の温度および応力の経時的な変化について検討し、さらにそれらがライニングの厚さによつてどのように変化するかについて調べた。

表面 $\partial\Omega$ を有する物体 Ω の熱収支を表現するエネルギー保存則は1次元極座標では、

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \dot{q} = 0 \quad (2-1)$$

C : 体積比熱, k : 熱伝導率

t : 時間, T : 温度

$\dot{q}$: 単位体積、単位時間あたりの発熱量

となる。本研究では $\dot{q}$ 、 C 、 k が時間および位置に依存して変化するので、(2-1)式が陽に解けないため有限要素離散化を行なって解くこととする。すなわち温度場 T に近似

$$T = \sum_{n=1}^N N^n \dot{\theta}^n \quad (2-2)$$

$$N^n = \frac{r_n - r}{r_n - r_m}, \quad N^m = \frac{r - r_m}{r_n - r_m} \quad (2-3)$$

を導入する(r_m, r_n は m, n 点の r -座標)と、(2-1)式は、

$$M \dot{\theta} + H \theta = \Phi \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで} \quad M_{ij} &= \int_C N^i N^j r dr \\ H_{ij} &= \int_C k \frac{\partial N^i}{\partial r} \frac{\partial N^j}{\partial r} r dr \\ \Phi_i &= \int_C \dot{q} N^i r dr \end{aligned}$$

と書ける。次に θ -法で時間方向を離散化すると、時刻 n の節点温度 θ^n は、

$$\left(\frac{M}{\Delta t} + H \right) \theta^n = \left[\frac{M}{\Delta t} - (1-\theta) H \right] \theta^{n-1} + (1-\theta) \Phi^{n-1} + \theta \Phi^n \quad (0 \leq \theta \leq 1) \quad (2-5)$$

を各時間ステップ毎に解くことにより求められる。

一方、仮想仕事の原理を用いると、熱応力が存在する場合、応力場の有限要素近似式は、

Table-1 Material Properties

	K (kcal/m-h-°C)	C (kcal/l-°C)	ρ (t/m ³)	α (1/°C)	E (t/m ²)	ν
CONCRETE	0.1	2.0×10^{-4}	2.3	1.0×10^{-5}	—	—
ROCK	0.1	—	—	1.0×10^{-5}	3.0×10^6	0.15

K: Thermal diffusivity
C: Specific heat
 ρ : Density
 α : Thermal expansion coefficient
E: Elastic modulus
 ν : Poisson's ratio

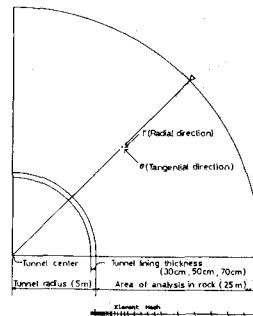


Fig. 2-2 One-dimensional Axisymmetric model

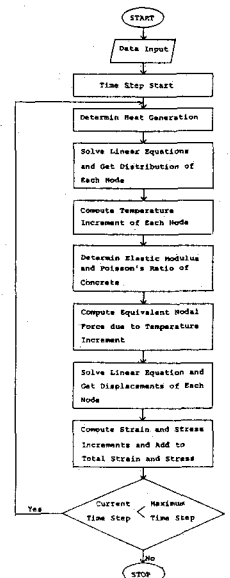


Fig. 2-1 Flow Chart

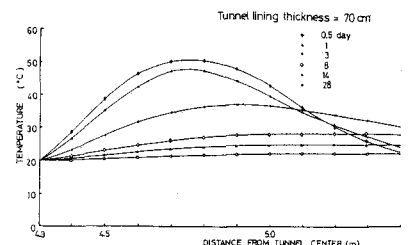


Fig. 2-3 Temperature Distribution

$$KU - F_0 = 0$$

(2-6)

$$\begin{aligned} \text{ただし } K &= \int_0^R B D B r dr \\ F_0 &= \int_0^R B D E_0 r dr, \quad E_0 = (1+\nu) \left\{ \begin{array}{l} \alpha \Delta \theta \\ \alpha \Delta \theta \end{array} \right\} \\ B &= \frac{1}{r_0 - r_m} \left[\frac{1}{1+\nu} \frac{r_0}{r} - \frac{1}{1-\nu} \frac{r_m}{r} \right] \end{aligned}$$

と与えられる。ここで E_0 は軸対称平面ひずみ場における温度初期ひずみ (ν : ポアソン比), F_0 は初期ひずみ等価節点力ベクトルである。

3. コンクリートの材料特性

コンクリートの水和熱は細谷らにより次式で求まる (t の単位は日)。

$$Q = \begin{cases} 39.0 + 16.07 \log t & (t \leq 15) \\ 75.46 + 43.52 \log(\log t) & (t > 15) \end{cases} \quad (2-7)$$

また弾性係数 E_c は野中らにより次式で求まる。

$$E_c = \begin{cases} 2.156 \times 10^{-8} \times (480 \times t)^{5.055} & (t \leq 0.625) \\ 10^6 \times \{ 1 - 10^{-5.741 \times 10^6 \times (480 \times t)^{1.516}} \} & (0.625 < t \leq 3.0) \\ 10^6 \times \{ 1 - 10^{-1.168 \times 10^{-3} \times (480 \times t)^{0.783}} \} & (3.0 < t) \end{cases} \quad (2-8)$$

またポアソン比 ν_c の経時変化は次式で定めるとする。

$$\nu_c = \begin{cases} 0.3t^2 - 0.6t + 0.45 & (t \leq 1) \\ 0.45 & (t > 1) \end{cases} \quad (2-9)$$

なお解析に用いた岩盤、コンクリートの他の力学特性を Table-1 に示す。ここで、単位セメント量は 300%, 水セメント比は 47% と仮定した。

4. 解析結果とその考察

解析モデルは Fig. 2-2 に示すとおり直径 5.0m、ライニング厚は 3 ケースについて行なったが、ここでは代表例として 70cm 厚における温度分布、ひずみ状態、応力状態を示す。これによるとライニング周方向 (θ -方向) には、半径方向 (r -方向) に比べ大きな引張応力が発生し、そのピーク値発生地点は時間の経過とともにライニングと地山の境界へ近づく。これにより、 θ -方向に強い拘束がはたらいていることがわかる。またこれは、温度ひび割れは θ -方向応力によってライニング内部から発生することを示している。ここで解析結果から温度ひび割れ発生機構をまとめると次のようになる。

(1) 材令の非常に若いとき、ライニング内ではコンクリートの弾性係数が小さいため応力はほとんど生じないが、コンクリートの膨張によりひずみが発生する。(2) 時間の経過とともにコンクリートの弾性係数は大きくなる。この段階では温度は下降する状態にあり、コンクリートは収縮を始める。これによりライニング内部に引張応力が発生する。(3) 地山の温度降下による収縮によってもライニングに引張応力が生じる。これらの作用によりライニング内部に、 θ -方向の大きな引張応力が発生する。この引張応力は打設後 30 日前後まで増大する。

本研究にあたり、終始適切な助言をいただいた名古屋大学工学部川本脩万教授に深く感謝の意を表します。また、多大の協力をいただいた名古屋大学工学部学生 (現鴻池組) 武村直幸君に感謝いたします。

参考文献: 1) 細谷繁好、松原篤、"水和初期におけるセメントの水和熱とコンクリートの断熱温度上昇について"、セメント技術年報、社団法人セメント協会、1970。 2) 野中統、奥村忠彦、"コンクリートの初期性状に関する研究"、清水建設研究所報 29、1978。

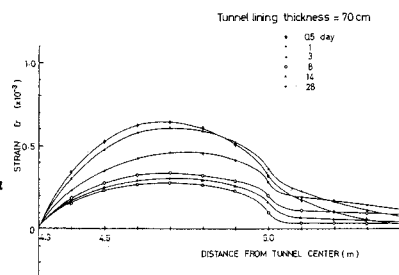


Fig. 2-4 Strain Distribution (E_r)

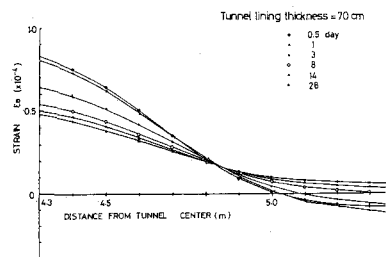


Fig. 2-5 Strain Distribution (E_θ)

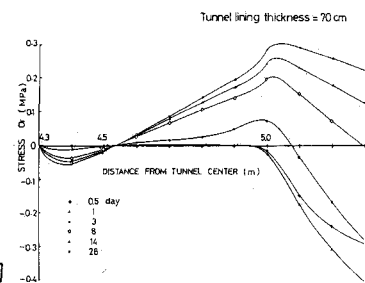


Fig. 2-6 Stress Distribution (σ_r)

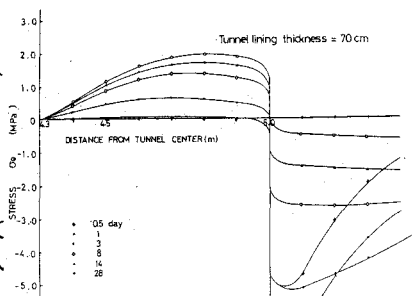


Fig. 2-7 Stress Distribution (σ_θ)