

セメントの水和熱によるトンネル覆工コンクリートの温度解析

Temperature Analysis of a Lining Concrete caused by Hydration Heat of Cement

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 浅井 大樹 (Daiki Asai)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼 博志 (Hiroshi Ohnuma)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 川田 雅紀 (Masaki Kawata)

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れの原因のひとつとして、セメントの水和熱に起因するコンクリートの温度収縮が考えられる。この温度収縮によるひび割れを温度ひび割れと言う。コンクリートは打設後数時間の間に、反応熱の放出を伴う、水とセメントの活発な水和反応が始まる。マスコンクリート構造物の中心部では発生した熱は外部に容易に逸散出来ないため、内部には熱エネルギーが保存される。その後、構造物が冷却されると、外部の構造物の拘束、あるいは表面と内部の温度勾配による温度応力が発生する。この温度応力がコンクリートの引張強度を上回ると、温度ひび割れが生じる。この種のひび割れは、構造物の機能・耐久性能を低下させる原因となる。

コンクリート構造物の一例として地中線シールドトンネル覆工コンクリートを取り上げた。覆工コンクリートは鋼セグメントによる外部拘束が大きく、また背面が土であるので内表面からの熱伝達によって温度差（内部拘束）によって温度応力が生じる。本論文では、温度応力を解析する前段として、実験で得られたコンクリートの熱特性と断熱温度上昇曲線を用いて非定常熱伝導解析を行った。そうして、覆工コンクリートの温度上昇の特徴、温度上昇に及ぼすコンクリート（断熱温度上昇曲線）の影響、温度上昇に及ぼす内表面の熱伝達係数の影響を評価した。

2. 対象としたシールドトンネル

解析対象としたシールドトンネル覆工コンクリートの形状寸法を図-1に示す。シールドトンネルは地中送電線を配置するためのものであり、その内直径は2.5m、コンクリートの覆工厚さは鋼セグメントのスキンプレート部（厚さ6.4mm）で32.5cm、主桁部で17.5cmである。

シールドトンネルは、最初に鋼セグメントを挿入したのち、内型枠（セントル）を配置し、鋼セグメントとセントルの間にコンクリートを打設した。1スパン10.8cmとして打ち継ぎ目を設け、3スパン連続して同一のコンクリートを打設している。また、コンクリートの打設後、トンネルの両端を閉塞して通風を防止し、坑内の相対湿度を90%以上に保持した。

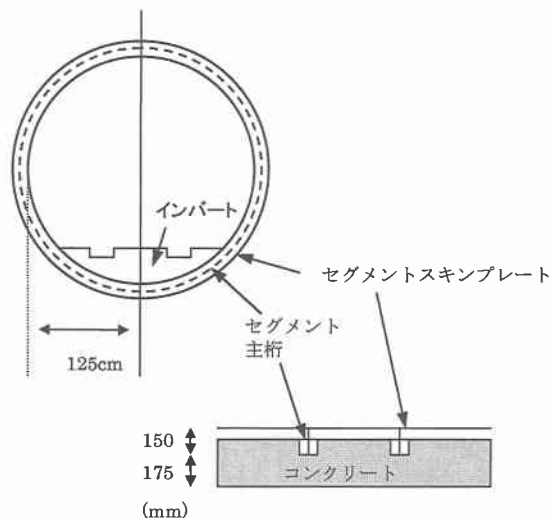


図-1 シールドトンネルの形状寸法

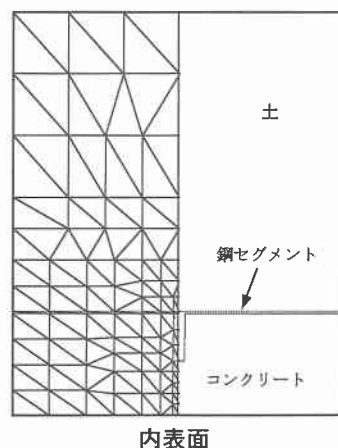


図-2 解析モデル

3. 温度解析方法

3.1 非定常熱伝導解析

軸対称構造物の非定常熱伝導を支配する方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^*K_r^*\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(r^*K_z^*\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$
$$+r^*Q-r^*\rho^*c^*\frac{\partial T}{\partial t}=0\tag{1}$$

境界条件としては次の 2 種類がある。

- (a)固定境界条件： $T=T_a$
- (b)熱伝達境界条件：

$$r^*K_n^*\left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)+r^*h^*(T-T_0)=0\tag{2}$$

ここで、 r,z ：座標、 T ：温度、 K_r,K_z ： r,z 方向の熱伝導率、 t ：時間、 Q ：内部発熱率、 ρ ：密度、 c ：比熱、 T_a ：境界で指定される温度、 h ：熱伝達率、 T_0 ：熱伝達境界面の流体温度である。

内部発熱がある場合には、発熱率は次式の断熱温度上昇曲線を微分して与える。

$$T=K_1^*\left(1-e^{-\alpha^*t^\beta}\right)\tag{3}$$

ここで、 K_1,α および β は実験定数である。

3.2 解析モデル

図－2 に示すように、三角形断面リング要素を用いてセグメント 1 個分をモデル化した。また、トンネル長手方向と最も外側の土は断熱温度条件、トンネル内表面は熱伝達境界条件とした。分割した節点数および要素数はそれぞれ 100 および 159 である。

3.3 使用コンクリートの配合

解析では、以下の 4 種のコンクリート配合に対する断熱温度上昇曲線を用いた。すなわち、フライアッシュを混和して水和熱と単位水量の低減を図った配合①、設計基準強度が 21N/mm² の配合②、水和熱抑制型膨張材(CSA100R)を用いた収縮補償コンクリートの配合③、ケミカルプレストレスを導入するために膨張材(CSA#20)を用いた配合④の 4 種類のコンクリートである。これらのコンクリートの配合を表－1 に示す。すべての配合において、粗骨材の最大寸法、スランプの範囲および空気量の範囲はそれぞれ 20mm、17±2.5cm および 5.5±1% である。

3.4 コンクリートの断熱温度上昇曲線

4 種のコンクリートに対して、実験で得られた断熱温度上昇曲線を図－3 に示す。この図から、以下のことが明らかにされた。

- (1)単位結合材量をもっとも大きな配合④のコンクリートは上昇温度が最も高い。
- (2)単位結合材量が同一である配合①、②、③の中でフライアッシュを混合した配合①のコンクリートは上昇温度が最も低い。
- (3)水和熱抑制型膨張材を混和した配合③のコンクリートは配合②のものと比較して最終の温度上昇は低いが、断熱温度上昇曲線の立ち上がりの勾配が急であり、上昇速度が大きい傾向にある。

表－1 コンクリートの配合

配 合		水セ メン 比 W/C (%)	細骨 材率 S/a (%)	水 W	単位体積質量(kg/m ³)					
					セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材料		
								フライ アッシュ	膨張材	混和材
①	σ_{ck} =21N/mm ² フライアッシュ代替 20%	57.8	46.0	173	239	793	942	59.8		ポゾリス 5L #303:2A
②	σ_{ck} =21N/mm ²	62.9	46.5	188	299	795	925			ポゾリス 5L #303:2A
③	σ_{ck} =21N/mm ² CSA100R,30kg/m ³	61.8	46.5	185	269	796	927		30	ポゾリス 5L #303:2A
④	σ_{ck} =35N/mm ² CSA#20,55kg/m ³	44.0	44.0	187	370	707	910		55	ポゾリス 5L #303:1.5A

3.5 解析に用いた材料の熱特性

温度解析に使用したコンクリートの熱特性を表-2に、解析に用いたセグメントと土の熱特性を表-3に示す。これらのうち、コンクリートの熱特性は表-1のコンクリートに対する実験において求めた値であり、土の熱特性は代表的な関東ローム層のものである。

表-2 コンクリートの熱特性

配合	熱伝導率 K	熱拡散率 h^2	比熱 c	断熱温度上昇曲線		
				K_1	α	β
①	2.206	0.00329	0.285	41.330	0.859	0.786
②	2.142	0.00327	0.279	49.099	0.932	0.893
③	2.163	0.00326	0.282	45.504	1.136	0.890
④	2.143	0.00300	0.304	57.920	1.905	1.071

単位：K (kcal/m・hr・℃)、 $h^2(m^2/hr)$ 、c (kcal/kg・℃)、 $\alpha_c(10^{-6}/℃)$

表-3 セグメントと土の熱特性

	セグメント	土
熱伝導率	45kcal/m・hr・℃	1.25kcal/m・hr・℃
比熱	0.11kcal/kg・℃	0.2kcal/kg・℃
単位体積重量	7860kg/m ³	1250kg/m ³

4. 解析結果と考察

4.1 覆工コンクリートの温度上昇の特徴

図-4に最高温度が求められた時間における4種の覆工コンクリートの温度分布を示す。解析では、配合①、②、③のコンクリートは打設から24時間後に最高温度に達し、配合④のコンクリートは18時間後に最高温度に達した。これは、配合④のコンクリートは発熱速度が大きいことによるものと考えられる。この図から以下のことが明らかにされた。熱伝達率は5.0 (kcal/m²・hr・℃)、初期温度は20℃とした。

(1)全ての配合のコンクリートにおいて、水和熱はトンネル内表面の熱伝達と鋼セグメントおよび土の熱容量による拡散により、内表面と鋼セグメントとのちょうど中間で最高温度が求められた。

(2)全ての配合のコンクリートにおいて、鋼セグメントの温度は内表面にかなり近い温度になっている。

(3)内表面からの距離が100cm付近を超える土の要素では、コンクリートの配合に関わらず、一定の温度に収束している。

(4)配合④の最高温度が最も高く、配合①の最高温度が最も低くなっている。これは、断熱温度上昇曲線の特性によるものと考えられる。

これらの温度分布から、今後、セメントの水和熱による温度応力を算定する際には、鋼セグメントによる外部拘束に加えて、内外の温度差による内部拘束の影響を考える

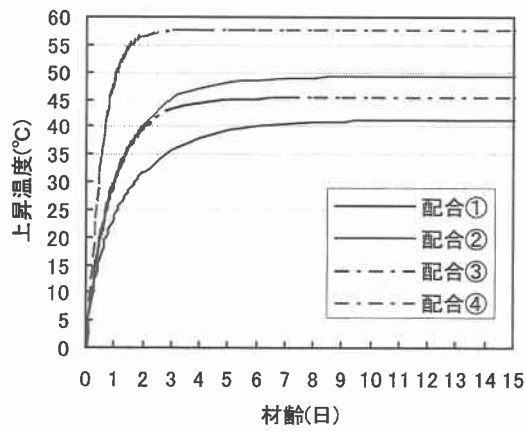


図-3 各種コンクリートの断熱温度上昇曲線

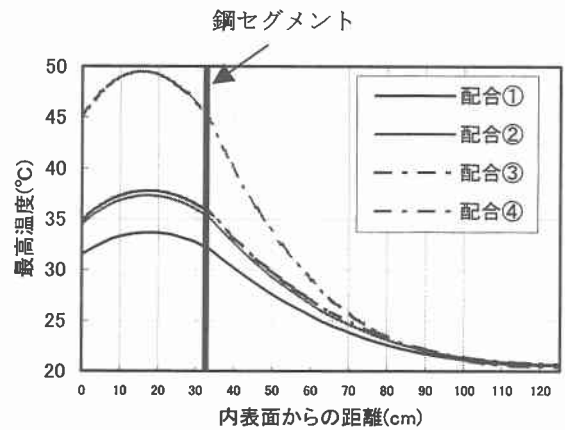


図-4 最高温度時の覆工コンクリートの温度分布

必要があることが考察された。

4.2 温度上昇に及ぼすコンクリート（断熱温度上昇曲線）の影響

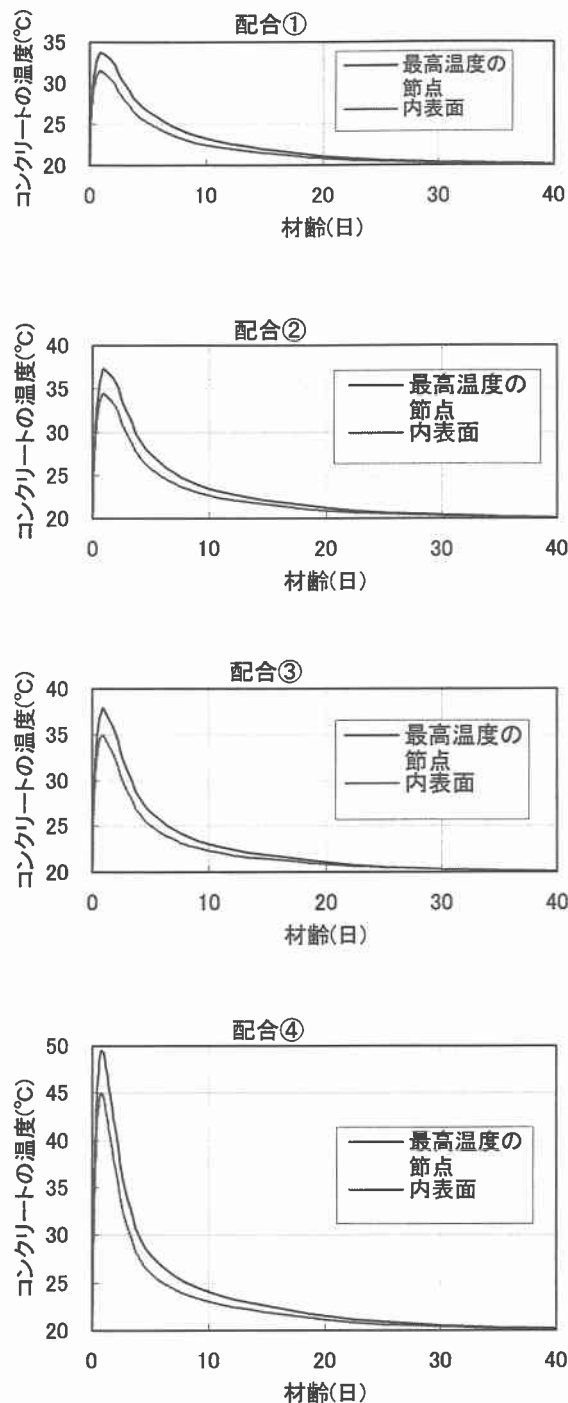
図-5に、4種のコンクリートの最高温度を記録した節点と、内表面における温度履歴を示す。この解析では、熱伝達率は5.0 (kcal/m²・hr・℃)、初期温度は20℃とした。

(1)全ての配合において、コンクリートの温度は材齢40日を過ぎるあたりから初期温度の20℃に収束している。

(2) 配合④の最高温度が最も高く、配合①の最高温度が最も低くなっている。また、配合②と③のグラフはほとんど同じ値をとっているが、配合③の方が温度上昇は早く、また温度降下も早い。これらは、断熱温度上昇曲線の特徴が影響していると考えられる。

4.3 温度上昇に及ぼす内表面の熱伝達率の影響

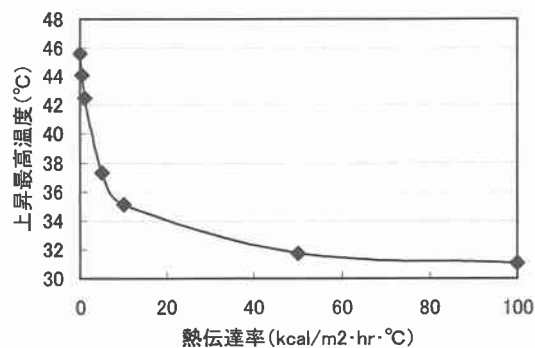
セメントの水和熱の熱拡散には内表面の熱伝達率が大きな影響を及ぼすことが予測される。そのため、熱伝達率が温度分布に与える影響を解析によって検討した。



図－５ 各種コンクリートの温度履歴

配合②のコンクリートについて、熱伝達率を $0.1 \sim 100$ ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$) まで変化させた時のそれぞれの最高温度を図－６に示す。文献⁴⁾によると、熱伝達率の値としては、静止している空気と接しているときが $1.72 \sim 30.09$ ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)、流れている空気と接しているときが $8.60 \sim 515.88$ ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$) であることが知られている。

(1)熱伝達率が大きくなると、最高温度は低くなっている。これは、熱伝達率が上がると、空気中に発散する熱の量が多くなることによるものである。



図－６ 温度上昇に及ぼす熱伝達率の影響

(2)熱伝達率が大きくなると、最高温度を示す位置は内表面から離れ、鋼セグメントに漸近している。これは、熱伝達率が上がると、内表面から発散する熱の量が多くなり、内表面が冷やされることで、内部のコンクリートの温度が相対的に高くなると考えられる。

(3)熱伝達率が 0.1 、 0.5 、 1 のとき最高温度に達するまでの材齢は 2 日、熱伝達率が 5 、 10 のときは 1 日、熱伝達率が 50 、 100 のときは 18 時間であった。これは、熱伝達率が大きくなると、空気中に発散する熱の量が多くなることが原因と考えられる。

5. まとめ

実際の地中深用シールドトンネルで施工されたコンクリートの熱特性を実験によって求め、これらを用いて非定常熱伝導解析を行った。

解析結果から、セメントの水和熱によるコンクリートの温度の変化は、断熱温度上昇曲線や熱伝達係数の影響を大きく受けることを明らかにした。

参考文献

- 1)コンクリートの収縮とコンクリート構造物のひび割れ、J C I 北海道支部、コンクリート収縮研究委員会報告書、2001.4
- 2)栗山武雄、大沼博志、河角誠、中野毅弘、青柳征夫：地中線シールドトンネル二次覆工コンクリートの熱特性、引張クリープおよび乾燥収縮、電中研報告 No.382046、1983.2
- 3)川田雅紀、大沼博志、名和豊春、出雲健司：覆工コンクリートの温度および乾燥収縮応力のクリープ解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.333-338、2002.6
- 4)中島英治：高温温度の材料科学、内田老鶴圃、1997.4