

トンネル覆工コンクリートの水和熱によるひび割れ発生解析的評価

Crack Analysis of Lining Concrete caused by Heat of Hydration

北海道大学工学部土木工学科 非会員 板谷壮一郎 (Soichiro Itaya)
 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 浅井 大樹 (Daiki Asai)

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に、セメントの水和熱に伴う温度応力がある。解析の対象とした地中線シールドトンネル覆工コンクリートの場合、温度応力が鋼セグメント等による外部拘束あるいは内部拘束によって、コンクリートに温度応力が発生し、それがひび割れ発生の原因となる。この解析は、水和熱によるひび割れ発生の有無を解析的に評価した。

2. 解析対象

解析の対象とする地中線シールドトンネルの内径は2.5mであり、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(厚さ 6.4mm)で 32.5cm、主桁部で 17.5cmである(図-1)。最初に鋼セグメントを挿入したの内型枠のセントルを配置し、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。

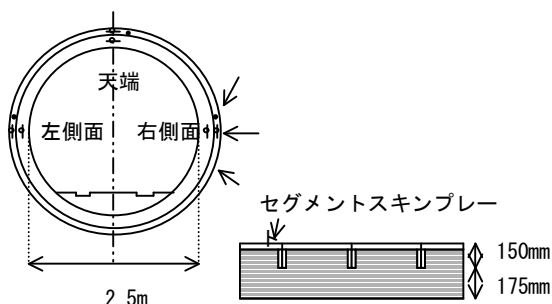


図-1 トンネルの断面図と断面拡大図

3. 解析方法および解析に用いた材料特性

軸対称構造物の熱伝導を支配する方程式は、次式で与えられる。

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

境界条件には、固定境界条件と熱伝達境界条の2種類があり、解析ではトンネル内表面から 130.14cm土要素を固定境界条件(境界温度 20℃)、トンネル内表面を熱伝達境界条件(熱伝達率 $h=5.81(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、境界面の流体温度 20℃)とした。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 : 比熱である。内部発熱率は次式の断熱温度上昇曲線を微分して与える。

$$T = K_1 \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot t^\beta}) \quad (2)$$

ここで、 K_1 および α 、 β は実験定数である。

温度変化に伴う膨張および収縮ひずみは、コンクリートの線膨張係数を α_c 、温度変化を ΔT とすると、次式で与えられる。

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha_c \cdot \{\Delta T\} \quad (3)$$

また、コンクリートのヤング係数および引張強度は、次のマチュリティー(M)の関数で表わし、温度履歴の影響を考慮した。

$$M = (T - 10)(^\circ\text{C}) \times t(\text{日}) \quad (4)$$

覆工コンクリートのセグメント1個分の断面を、三角形断面リング要素を用いてモデル化した。

覆工コンクリートの水和熱の違いによる温度応力を評価するために、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(CRA#20)を用いた配合④、の4種類を使用した。解析に用いたコンクリートの断熱上昇曲線および熱特性をそれぞれ図-2および表-1に示した。また、鋼セグメントおよび土の熱特性は、熱伝導率(W/m・K)、比熱(J/kg・K)、単位体積重量(kg/m³)の順に、鋼セグメントが(53.33, 460, 7860)、土が(1.45, 837, 1250)である。

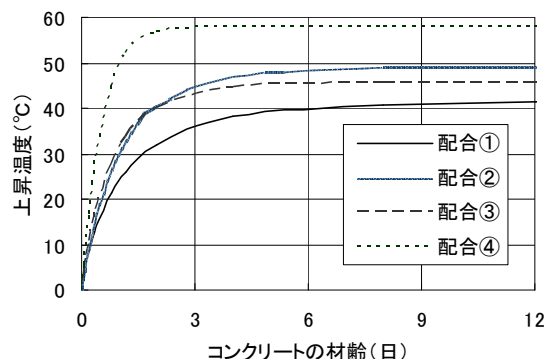


図-2 コンクリートの断熱温度上昇曲線

表-1 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	2.565	0.00329	1193	41.330	0.859	0.786
②	2.491	0.00327	1168	49.099	0.932	0.893
③	2.515	0.00326	1180	45.504	1.136	0.890
④	2.492	0.00300	1273	57.920	1.905	1.071

K (W/m・K)、 H^2 (m²/hr)、c (J/kg・K)

4. 解析結果と考察

各配合の温度履歴の解析結果を図-3 に、温度応力の解析結果とコンクリートの引張強度を図-4 に示す。

コンクリートの最高温度は配合④,③,②,①の順に高く、これは、図-2 で示した各配合コンクリートの断熱温度上昇曲線の違いによるものと考えられる。

図-4 のコンクリートに発生する温度応力と引張強度履歴の比較から、配合①,②,④には引張強度を上回る温度応力が発生し、ひび割れが発生しやすいという結果が得られた。しかし、配合③には引張強度を上回る温度応力が発生せず、ひび割れは発生しにくいことが示された。これは、配合③では約 200×10^{-6} の最大膨張ひずみが生じており、このケミカルプレストレスによって引張応力が小さくなったことと、水和熱が小さかったことによるものである。また、コンクリートの引張強度を最大主引張応力で除したひび割れ指数は、材齢8日において配合①,②,③,および④がそれぞれ 0.91, 0.77, 1.19, および 0.92 であり配合③の膨張コンクリートはひび割れ発生を抑えることができることがわかった。

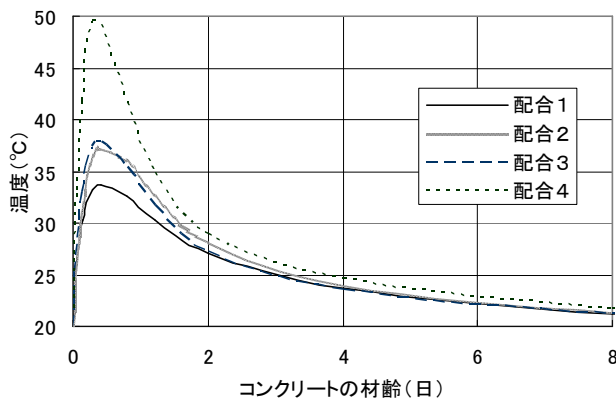


図-3 温度履歴の解析結果

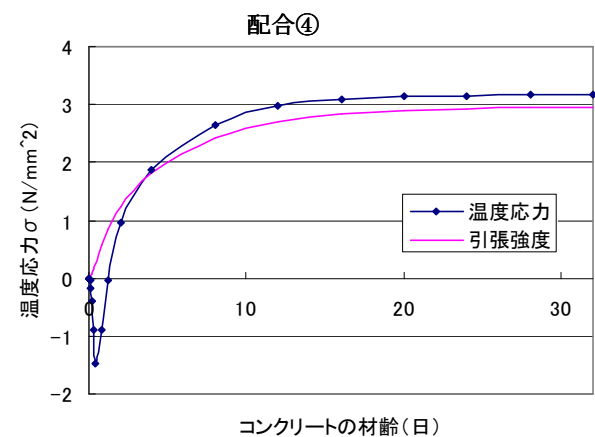
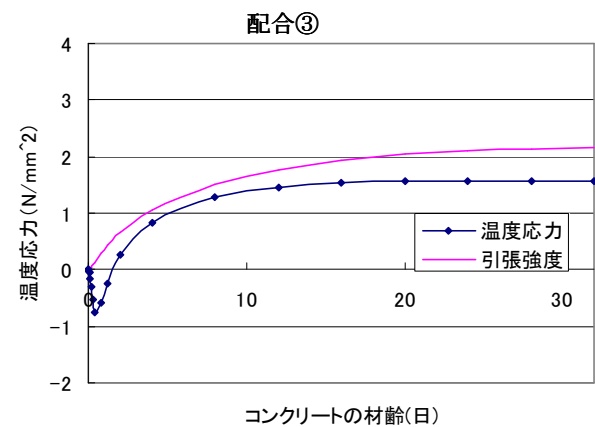
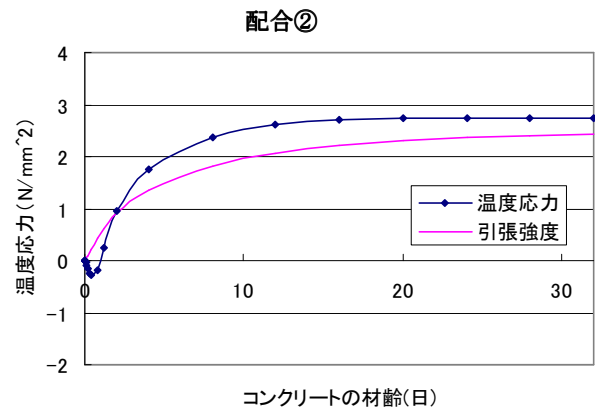
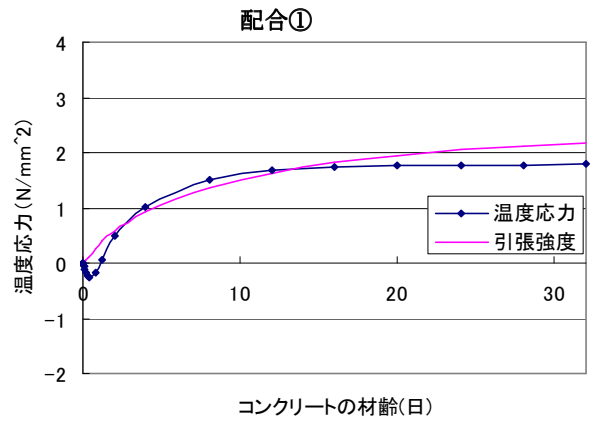


図-4 温度応力の解析結果とコンクリートの引張強度