

NATM トンネル覆工コンクリートの温度・乾燥収縮に関する解析的検討

(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 フェロー 高山博文, 正 会 員 増田康男
 (財) 鉄道総合技術研究所 正 会 員 仲山貴司
 (財) 地域地盤環境研究所 正 会 員 ○Yingyongrattanukul, N., フェロー 小山幸則

1. はじめに

NATM において, 覆工コンクリートのクラウンにトンネル縦断方向のひび割れが発生する場合がある。ひび割れ発生の原因としては, コンクリート硬化過程での水和熱による膨張, 収縮, コンクリート内部の水分拡散に伴って生じる乾燥収縮が考えられる。これらの変形が覆工コンクリートの内・外部拘束によって引張応力の発生原因となり, さらにそれが引張強度を超えるとひび割れが生じるといった現象が考えられる。そこで, 本研究では覆工コンクリートの温度・乾燥収縮がひび割れ発生現象に及ぼす影響について数値解析で検討することとした。

2. 解析方法

数値解析の手法として, FEMによる非定常熱伝導解析法, 非定常湿気拡散解析法を用いた。乾燥収縮ひずみについては, 土木学会より提案されている通常骨材コンクリートの乾燥収縮ひずみ式¹⁾で求める。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \varepsilon'_{sh} \quad (\text{式 } 1)$$

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S)/10]^2$$

ここで, $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: 収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$), ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$), RH : 相対湿度, W : 単位水量 (kg/m^3), V/S : 体積表面積比 (mm)。

また, コンクリート中の湿気移動則から, 次の湿気移動の非線形支配方程式²⁾が導かれる。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_p \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_p \nabla P) - \left(\frac{dq}{dt}\right) \quad (\text{式 } 2)$$

境界条件については, トンネル内空側表面を湿気の拡散境界と仮定し, 次式のように設定する。

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P - P_c) \quad (\text{式 } 3)$$

ここで, q : 湿気密度 (g/m^3), (dq/dt) : 水和による湿気密度変化 ($\text{g}/\text{h} \cdot \text{m}^3$), t : 時間 (h), (dq/dP) : 湿気容量 ($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{mmHg}$), α : 蒸発率 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$), λ_p : 透湿率 ($\text{g}/\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{mmHg}$), P_c : コンクリートの周囲蒸気圧 (mmHg), P : コンクリート内部の蒸気圧 (mmHg)。

透湿率 (λ_p), 湿気容量 (dq/dP) は西岡ら³⁾の研究結果を参考し, 蒸発率 (α) は森本ら⁴⁾の実測結果を参考にする。今回の解析は水和項 (dq/dt) を無視して計算した。また, 湿気移動による乾燥収縮ひずみ特性を次式により評価する⁵⁾。

$$\varepsilon_{sh} = -\frac{A_s}{k \cdot E_s} \cdot \frac{RT \cdot \ln(RH)}{v} \quad (\text{式 } 4)$$

ここで A_s : 収縮駆動力の作用程度に関する係数, ε_{sh} : 乾燥収縮ひずみ, E_s : コンクリートヤング係数 (Pa), k : 乾燥開始材齢に関する補正係数 (1.0), R : 気体定数 ($8.314 \text{ J}/\text{K} \cdot \text{mol}$), T : 絶対温度 (K), v : 水分子の比容積 ($1.802 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$), RH : 相対湿度。

3. 解析モデル, 条件と解析ケース

図-1 に解析モデル, 表-1 に解析に用いた入力値を示す。想定するトンネルは新幹線複線クラスのトンネルとし, 解析断面は二次元平面とした。防水シートは覆工コンクリートと吹付けコンクリートとの間の法線方向のばね要素で表現した。また, 接線方向の拘束は無い状態ものとした (Case2~4)。なお, 防水シートが無い場合は覆工コンクリートと吹付けコンクリートを剛結した (Case1)。その他の条件, 材料物性値, 養生条件, 坑内温度, 湿度等については冬期施工を想定して仮定した。

解析ケースを表-2 に示す。ここでは覆工コンクリート背面の拘束状況 (Case1, 2) および乾燥収縮の予測方法 (Case3, 4) に関する影響を解析検討した。なお, 全ケースで, 水和熱による温度膨張, 収縮を考慮した。

4. 解析結果と考察

覆工コンクリートクラウン内空側表面の周方向ひずみの変化を図-2 に, 表面応力変化を図-3 に示す。

表-2 解析ケース

Case	防水シート	温度収縮	乾燥収縮
1	無し	考慮する	考慮しない
2	有り		考慮しない
3			断面一様とし、土木学会式より設定する
4			湿気拡散解析により設定する

キーワード: トンネル, NATM, 覆工コンクリート, ひび割れ, 温度応力, 乾燥収縮

連絡先: 〒113-0034 東京都文京区湯島 1-8-4 山川ビル TEL 03-3812-4792, FAX 03-3812-4793

防水シートが無い場合 (Case1) は背面拘束により覆工コンクリートひずみがほとんど変化せず、温度収縮のみでひび割れが発生した。一方、防水シートがある場合 (Case2) は背面拘束がないため、温度収縮による表面応力が小さく、引張強度以下となる。この結果より、防水シートを採用することにより、温度収縮によるひび割れ発生を抑えることができ、それを解析で表現できることがわかった。

乾燥収縮を断面一様と仮定したケース (Case3) は覆工全体の収縮量が大きくなったものの、表面応力は小さく、引張強度より小さい値となった。一方、湿気拡散解析に基づいた乾燥収縮を用いたケース (Case4) は、材齢約7日で表面応力が引張強度を超えた。湿気拡散解析から得られた乾燥収縮量は、表面で最も大きく、表面からコンクリート内部に入るに従って減少するため、コンクリートの内部拘束による引張応力が発生したためであると考えられる。

以上の結果により、防水シートを採用した場合に覆工コンクリートに発生する表面ひび割れの主原因は乾燥収縮であると考えられる。

参考文献 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「構造型態照査編」, 2002. 2) 森本ら：温度変化を考慮したコンクリートの非線形湿気移動解析, コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム論文集, JCI-C52, pp.283-290, 2001. 3) 西岡ら：多孔質物質の透質率および湿気拡散について, セメント技術報告, XV, pp.274-278, 1961. 4) 森本ら：風の影響を考慮したコンクリート表面から水分蒸発に関する研究, H14 年度土木学会中部支部研究発表会概要集, pp.607-608, 2003. 5) 森本ら：コンクリート部材の乾燥収縮挙動の解析, 中部支部研究発表会講演概要集, 497-498, 2006.

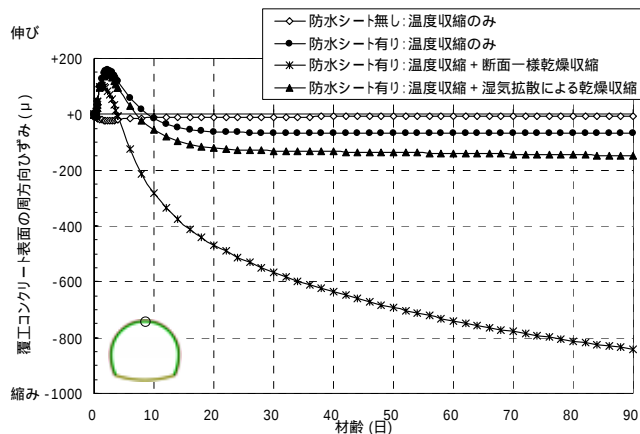


図-2 覆工コンクリートクラウン表面のひずみ履歴

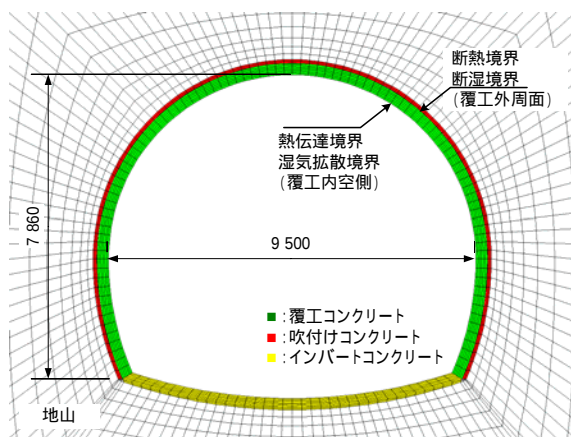


図-1 解析モデル (全体 20m × 20m)

表-1 材料特性, 養生, 環境条件

部 位	記号	単位	解析入力値
● 覆工コンクリート			
セメント種類	-	-	普通ポルトランドセメント
単位セメント量	C	kg/m ³	278
単位水量	W	kg/m ³	162
水セメント比	W/C	%	58
密度	ρ_c	kg/m ³	2250
28日強度	$f'_c(28)$	N/mm ²	27.3
圧縮強度	$f'_c(t)$	N/mm ²	$f'_c(t) = \{t/(4.50+0.95t)\} \cdot 1.1 \cdot f'_c(28)$
引張強度	$f_{tk}(t)$	N/mm ²	$f_{tk}(t) = 0.44 \sqrt{f'_c(28)}$
ヤング係数	$E_c(t)$	N/mm ²	$E_c(t) = 4.7 \cdot \sqrt{f'_c(t)}$
ポアソン比	ν	-	0.2
線膨張係数	α	/	10×10^{-6}
比熱	C_c	kJ/kg	1.15
熱伝導率	λ_c	W/m	2.7
打設温度	-	-	12
断熱温度上昇特性	$Q(t)$	-	$50.0(1-e^{-0.70t})$
厚さ	t_c	mm	300
透湿率	λ_p	g/m·hr·mmHg	0.002 ~ 0.006
湿気容量	$(dq/dp)_p$	g/m ³ ·mmHg	3000 ~ 11500
蒸発率	a	g/m ² ·hr·mmHg	0.3 ~ 1.0
収縮駆動力係数	A_s	-	0.2
● 養生条件			
養生方法	-	-	メタルフォーム
養生時間	-	hr	15
熱伝達率 (内空側)	η	W/m ²	3
● 環境条件			
坑内温度	T	-	17
坑内湿度	RH	%	40
● 吹付けコンクリート			
密度	ρ_c	kg/m ³	2150
ヤング係数	E_m	kN/mm ²	22
ポアソン比	ν	-	0.2
● 防水シート (Case2,3,4)			
厚さ	t	mm	5
ばね定数	k	MN/m ³	9
● 地山			
密度	ρ_c	kg/m ³	2000
変形係数	E_m	kN/mm ²	50
ポアソン比	ν	-	0.3

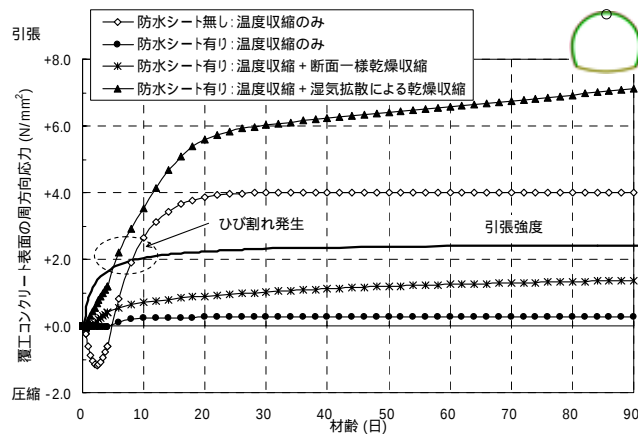


図-3 覆工コンクリートクラウン表面の応力履歴