

大規模開削トンネル躯体の 温度応力解析結果の評価に関する一考察

A Study About Appraisal of Temperature Stress Analysis Result
of Large Scale Cut Tunnel

平井祐貴¹・岩波基²・大沢拓洋³

Yuuki Hirai, Motoi Iwanami and Takuhiro Osawa

¹学生会員 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888)

E-mail:ac20834k@st.nagaoka-ct.ac.jp

²正会員 博(工) 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888)

³正会員 長岡工業高等専門学校 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888)

Yumeshima tunnel which links the Yumeshima to Sakishima in the bottom of the sea is a submerged tunnel the combination of a road and the railroad of about 2.1km long. Of them, the construction (No.6) of Yumeshima tunnel of approach area is earth retaining and excavating work for building a part of about 650m land approach of Sakishima side.

Because the building frame concrete of this construction was massive with deck slab, floor board and wall, crack of the temperature stress crazing by the hydration reaction was forecasted. Recalculating after execution about box culvert structure of complicated and large scale such as this construction, and there is not the example that compared with crazing findings.

This report compares the real crazing situation with temperature crazing analysis in a large-scale structure under the ground such as this construction. We considered the cause of the difference that understood by the result.

Key Words : temperature stress, crack, cut tunnel

1. はじめに

咲洲と夢洲を海底で結ぶ夢洲トンネルは、全長約2.1kmの道路・鉄道併用の沈埋トンネルであり、そのうち夢洲トンネル咲洲側アプローチ部築造工事(その6)は、咲洲側の陸上アプローチ約650mの一部を構築するための土留め、掘削工事である。

本工事の躯体コンクリートは、底版・床版、壁ともマッシュであるため、水和反応による温度応力ひび割れの発生が懸念された。そこで、工事前に解析を行い、ひび割れ発生の確率とひび割れ幅を推定した上で、対策案を検討した。ひび割れ対策は、以下の2点を実施した。

- (a) 全ての部材に低熱ポルトランドセメントと最大骨材寸法 20mm の配合のコンクリートの採用。
- (b) 鉄道部側壁に膨張剤を添加。

その結果、温度応力に起因していると思われるひび割れは発生しなかった。しかし、施工後に実際の条件で解析を行った結果、ひび割れが90%以上発生する結果となった。

過去に旧首都高速道路川崎縦貫線大師工区と大宮工区¹⁾や旧阪神高速道路公団²⁾の比較的単純な構造のボックスカルバートや温度応力解析とひび割れ発生状況の比較検討がなされ、みなとみらい21線北仲駅³⁾などについては温度ひび割れ対策について報告が行われてきた。しかし、今回の工事のような大規模かつ複雑な構造のボックスカルバートについて施工完了後に再計算を行い、ひび割れ調査結果と比較を行った事例はない。

そこで本報告は、当該工事のような大規模地下構造物において温度ひび割れ解析と実際のひび割れ発生状況を比較し、そこで明らかになった差異が生じ

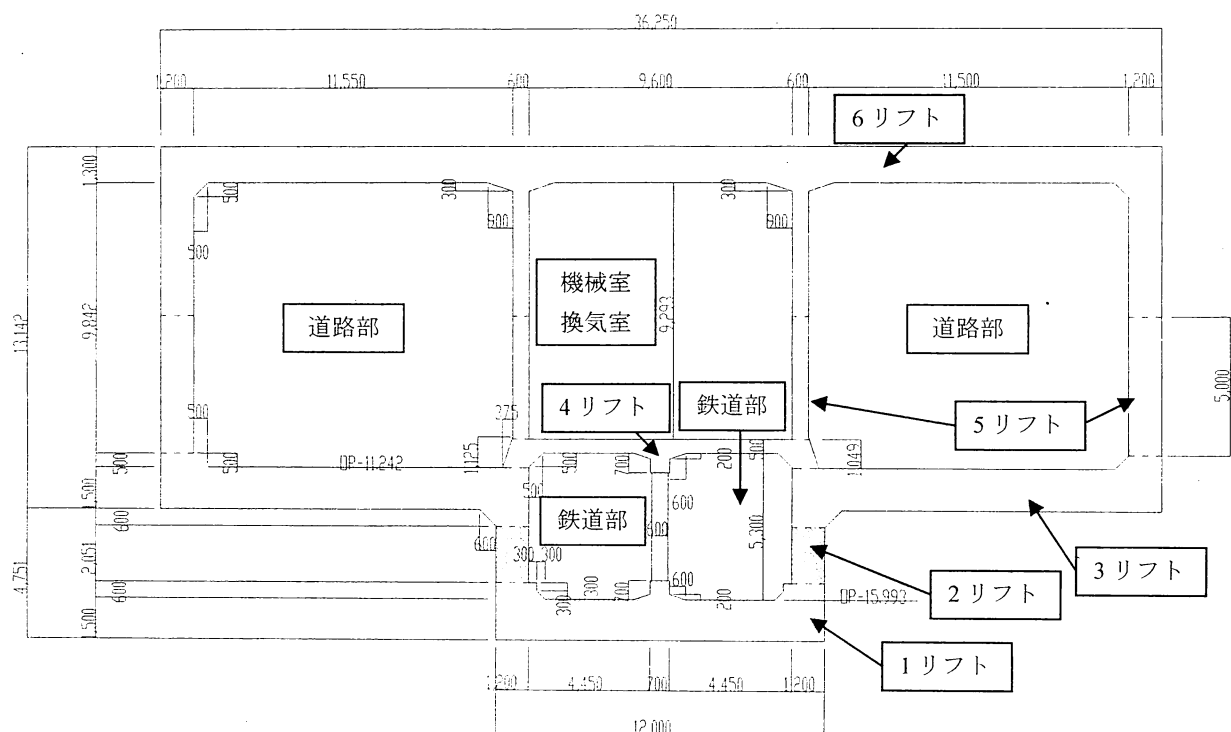


図-1 標準断面図

表-1 コンクリート配合条件

セメントの種類	低熱ポルトランドセメント
設計基準強度	24N/mm ²
水セメント比	55%
セメント単位量	318kg/m ³

表-2 打設日および打設温度

打設リフト	打設箇所	打設時期	打設温度
1	鉄道部底版	5月21日	24.9
2	鉄道部側壁	6月16日	28.2
3	道路部底版	8月30日	32.3
4	鉄道部頂版・柱	9月16日	29.3
5	道路部側壁・中壁	11月29日	15.5
6	道路部側壁・頂版・中壁	2月28日	11.7

表-3 外気温度

日	気温 (°C)
1月	5.8
2月	5.9
3月	9.0
4月	14.8
5月	19.4
6月	23.2
7月	27.2
8月	28.4
9月	24.4
10月	18.7
11月	13.2
12月	8.3

る要因について考察を加えたものである。

2. 解析条件

(1) 構造寸法

図-1は夢洲トンネル咲洲側アプローチ部築造工事（その6）の標準断面図である。色ごとに打設リフトが区別されている。本トンネルは、上部のうち内空11,550mm×10,342mmの部分が道路部であり、道路部に挟まれた内空9,600mm×9,293mmの部分が機械室および換気室となっている。また、下部の4,500mm

×5,300mmの部分は鉄道部となっており、全体の外寸法は36,250mm×17,893mmで、工区は64.0mであり、そのうち28.0mが図-1の断面形状をしていて、その他の断面形状とは施工目地でつながっている。

(2) 材料条件

事前の検討により、温度応力ひび割れの発生が懸念されたため、コンクリートには全て部位に低熱ポルトランドセメントが使用され、特に事前解析でひび割れ制御が困難であると判断された鉄道部側壁には膨張材が採用された。コンクリートの配合条件を表-1に示す。

(3) 施工条件

図-1の断面部分の構築は2004年5月21日から2005年2月28日にかけて行われ、図中に示したリフト割りで施工された。また、型枠には合板を使用し材齢3日で脱型した。実際の打設日および打設温度を表-2に示す。

(4) 解析条件

外気温度は大阪の実績より表-3に示したとおり設定し解析を実施した。

その他のコンクリートの熱物性および力学的物性は、コンクリート標準示方書⁴⁾に準じて表-4のように設定した。

(5) 解析モデルおよび解析条件

解析に用いた3次元モデルを図-2に示す。奥行きは対称性を考慮して14.0mに設定した。なお、対称性から1/4モデルで解析を実施した。温度境界条件は、鉄道部底版の上面と道路部底版の上面、鉄道部頂版の上面そして道路部頂版の上面は外気温度との熱伝達境界として評価した。また、鉄道部側壁の側面と鉄道部柱の側面、鉄道部頂版の下面、道路部側壁、中壁の側面そして道路部頂版の下面は、打設後3日目まで合板の熱伝達条件を考慮し、その後は外気と接するものとして熱伝達境界を設けて解析を実施した。表-5はそれぞれの熱伝達率を示している。

また、通常の低熱ポルトランドセメントの線膨張係数は $10\mu/^{\circ}\text{C}$ とし、膨張剤の効果は線膨張係数は $7\mu/^{\circ}\text{C}$ と設定することにより表現した。これは、他工区と共通の評価方法として採用された経緯がある。

表-4 コンクリートの熱物性値および力学的物性値

セメント種類		低熱ポルトランドセメント	
熱伝導率	W/m℃	2.7	
比熱	KJ/kg℃	1.15	
密度	kg/m ³	2350	
断熱温度上昇量	(℃)	Q=K(1-exp(-α×t ^β))	
	打設温度	採用値	
K：終局断熱温度上昇量	10	43.60	
	20	42.35	
	30	41.09	
α：上昇速度に関する定数	10	0.317	
	20	0.446	
	30	0.608	
β：上昇速度に関する定数	10	0.712	
	20	0.683	
	30	0.667	
f _c '(t):材齢t日のコンクリートの圧縮強度(N/mm ²)	$f_c'(t) = \frac{t}{a+bt} f_c'(91)$		
	a	4.5	6.2
	b	0.95	0.93
	f(91)	26.6	27.6
f _t (t):材齢t日のコンクリートの引張強度(N/mm ²)	$f_t(t)=0.44 \times \sqrt{f_c(t)}$		
Ee(t):材齢t日における有効ヤング係数(N/mm ²)	φ(t):温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の補正係数		
	材齢3日まで φ=0.73		
	材齢5日以降 φ=1.0		
	材齢3日～5日は直線補間		

表-5 熱伝達境界条件

養生方法	$\eta(\text{W/m}^2\text{°C})$
空気	14
合板	8

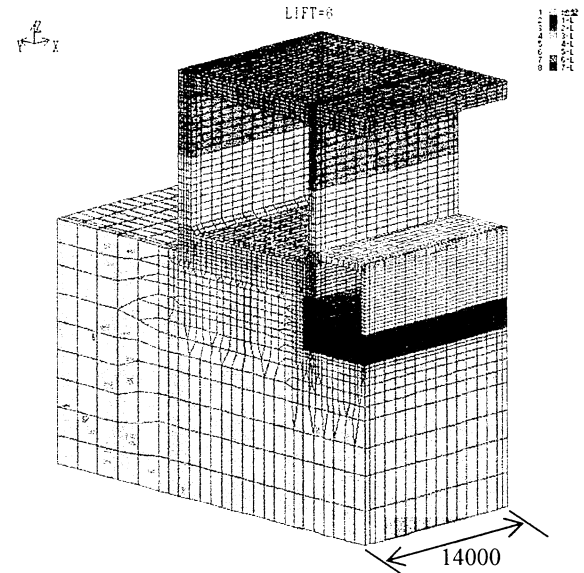


図-2 解析モデル
表-6 各リフトの最高温度

リフト	グラフNo.	打設箇所	最高温度
1	1	鉄道部底版	49.1
2	2	鉄道部側壁	44.8
3	3	道路部底版	57.1
4	4	鉄道部頂版	44.6
5	5	道路部側壁	30.0
6	7	道路部頂版壁部	30.2

表-7 各リフトの最小ひび割れ指数

リフト	グラフNo.	打設箇所	最小ひび割れ指数
1	1	鉄道部底版	1.65
2	2	鉄道部側壁	2.36
3	3	道路部底版	1.03
4	4	鉄道部頂版	0.74
5	5	道路部側壁	0.85
6	7	道路部頂版壁部	3.20

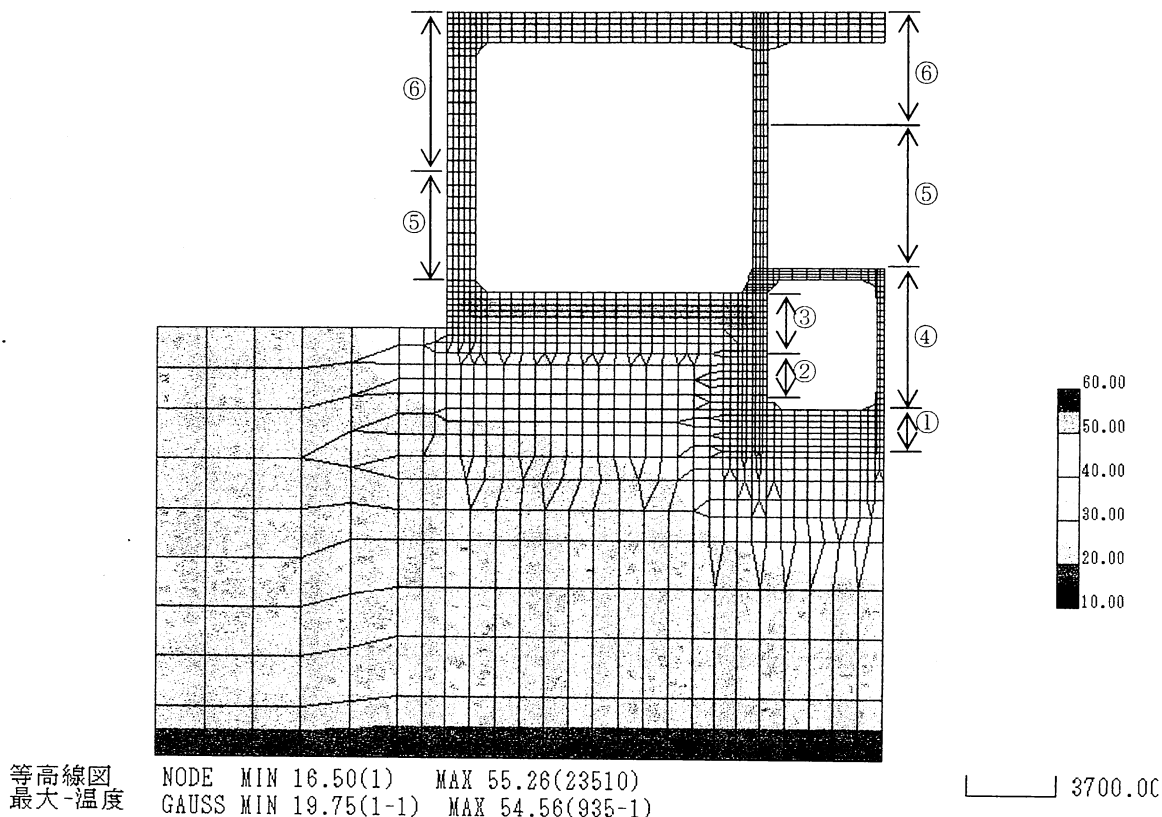


図-3 最高温度分布図

3. 結果

(1) 温度解析結果

解析結果のうち図-3にトンネル長手方向の中央部である14.0mの断面における最高温度分布図を示す。

この分布図は、ステップ解析を行って各要素における最高温度の結果を表示したものである。したがって、要素によって時刻が異なっている。

図-4は各リフトの最高温度となった要素に着目して、温度の経時変化を示したグラフである。また、表-6はリフトごとに最高温度を示した。3リフトの道路部底版で57.1℃となり、もっとも高い値となっていることがわかる。

(2) 温度応力解析結果

解析結果のうち図-5にトンネル長手方向の中央部分である14.0mの断面における最小ひび割れ指数分布図を示す。

この分布図は、最高温度と同様にステップ解析を行って各要素における最小ひび割れ指数の結果を表示したものである。したがって、要素によって時刻が異なっている。

図-6は各リフトで最小のひび割れ指数ひび割れ指数となった要素に着目して、ひび割れ指数の経時変

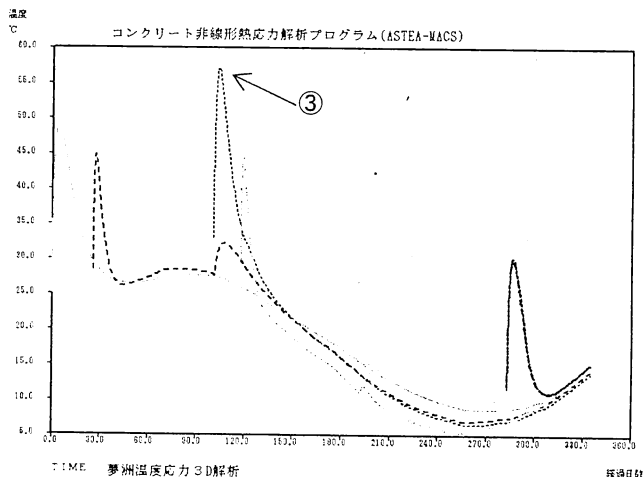


図-4 各リフトの温度の経時変化

化を示したグラフである。また、表-7にリフトごとの最小ひび割れ指数を示す。

図-5, 6および表-7より、鉄道部頂板で最小ひび割れ指数が0.74、道路部側壁で0.85となっておりほぼ95%以上ひび割れが発生する解析結果となっている。鉄道部頂板は厚みが約80cmとそれほど壁が厚くないにもかかわらず最小ひび割れ指数が小さい結果となった。

また、道路部底版では最小ひび割れ指数が1.03となり、ひび割れが発生する可能性があるという解析結果となった。

ひび割れが発生すると考えられていた、鉄道部側

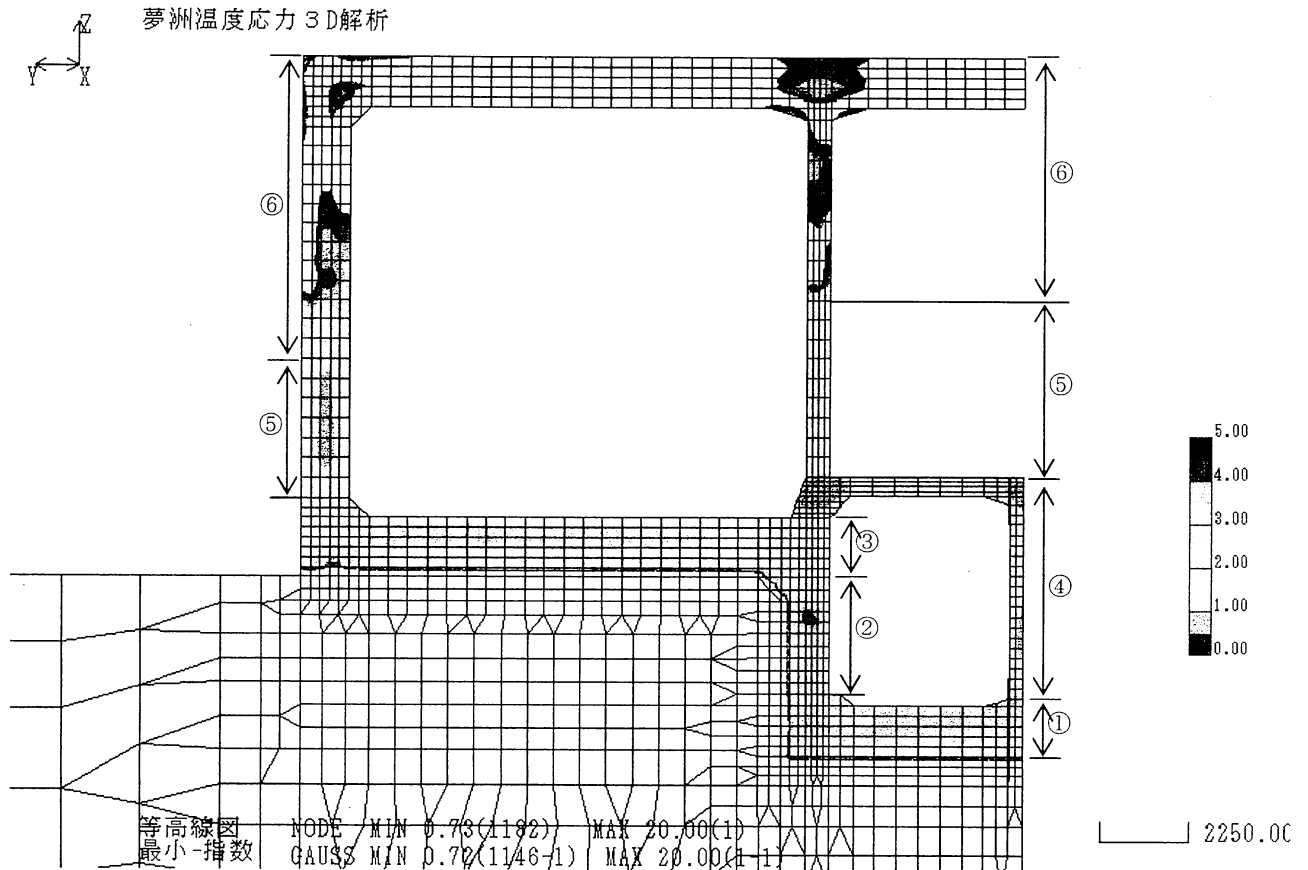


図-5 最小ひび割れ指数分布

壁は、最小ひび割れ指数が2.36となり、ひび割れが発生しない結果となった。これは膨張剤の効果によるものと思われる。

図-6より、鉄道部底版では打設の約30日後に低下しているが、道路部頂版打設直後の材齢430日程度で急激にひび割れ指数が低下し、最小値となっている。同様に鉄道部側壁でも打設直後に低下しているが、道路部底版打設直後の材齢110日程度で最小ひび割れ指数となっている。道路部側壁、道路部中壁では打設した際に再度ひび割れ指数が低下し、材齢330日程度で最小ひび割れ指数となっていることが分かる。

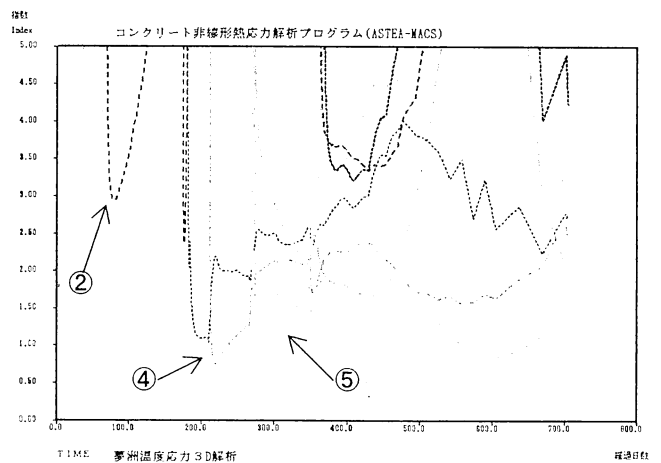


図-6 各リフトのひび割れ指数の経時変化

(3) 目視調査の結果

目視調査の結果、道路部底版では中間杭の周辺に構造ひび割れが生じたが、温度応力を原因とするひび割れはすべての部位で発見されなかった。

4. 考察

温度応力解析結果の評価では、ひび割れ指数が小さい期間が短くその後のひび割れ指数が大きき場合でも最小値で評価することが多い。これが、現実との差として現れる可能性がある。

また、鉄道部底版や鉄道部側壁の解析から、打設直後のひび割れ指数よりも後続のリフトを打設した時点でのひび割れ指数が小さいという結果となっている。しかし、後続のリフトが温度上昇の影響で下の部材に引張応力が生じるとは考えにくい。

また、道路部側壁、中壁の解析結果に見られたような、打設後約1年も経過した地点でひび割れ指数が急激に低下することは通常考えにくい。

したがって、今回のような複雑な構造の開削トンネルでは通常用いられている弾性解析によって実挙動を再現することには限界があると考えられる。

通常、ひび割れが生じた場合に、鉄筋によるひび

割れを分散する効果があると考えられるが、今回の場合は、ひび割れが生じていないためその効果については言及できないと考えている。

以上の知見から、ひび割れの発生の有無はあらゆる作用の影響を受けるためひび割れ解析の評価には十分な検討が必要である。また、通常、本工事のような大規模な地下構造物でも事前の温度ひび割れ解析を行い、対策を講じるが、その結果を検証する計測を行っていない場合が多いが、構造物の耐久性が課題となっている現在、ますます情報の蓄積が重要になっていくと考える。

参考文献

- 1) 石田高啓, 田嶋仁志, 前田邦彦: 開削トンネルのマスコン対策検討, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.12, pp.571-576, 2002
- 2) 小松郁夫, 佐藤奈津代: 開削トンネルの躯体コンクリート打設に関する検討と実績, 阪神高速道路公団技術研究発表会論文集, Vol.32, pp.138-143, 1999
- 3) 奥原祐治: 開削トンネルのひび割れ対策, 土木技術, Vol.56, pp.91-97, 2001
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編] 2002 年制定