

開削トンネルのマスコン対策検討

THE STUDY ON THERMAL CRACKING CONTROL OF MASSIVE CONCRETE STRUCTURES FOR CUT AND COVER TUNNELS

石田高啓¹⁾・田嶋仁志²⁾・前田邦彦³⁾・石田哲也⁴⁾
Takahiro ISHIDA, Hitoshi TAZIMA, Kunihiko MAEDA, Tetsuya ISHIDA

The purpose of this study is to examine the effect of low-heat portland cement and joint for inducing crack which control thermal cracking in thick concrete wall of cut and cover tunnels, through the measurement for massive concrete structures and the numerical analysis by the finite element method. As a result of the examination, it is found out that not only use of low-heat portland cement and joint for inducing crack are effective to control thermal cracking of massive concrete structures, but it is necessary to establish the character of concrete dynamics, specially the compensative coefficient of Young's modulus which is used for the analysis so as to evaluate that effect suitably. Then, the compensative coefficient of Young's modulus corresponding to a kind of the cement is estimated through the measurement and the numerical analysis.

Key Word : cut and cover tunnel, massive concrete structures, low-heat portland cement, joint for inducing crack

1. はじめに

近年、首都高速道路公団では、高速道路本線としてトンネル構造を採用することが多くなっており、既設交差物等の関係から、大深度化する傾向にある。このことから、開削トンネルにおいては、壁厚が2～3 mと厚く、いわゆるマスコン構造となっており、セメントの水和熱に起因する温度応力によってひび割れを発生させる可能性がある。

開削トンネルのマスコン対策としては、低発熱セメントの使用、ひび割れ誘発目地の積極的な適用、ひび割れ制御鉄筋等が考えられる。特に低発熱セメントについては、近年、高ビーライト系の低発熱ポルトランドセメントの使用実績¹⁾が増加しているが、これら対策工の選定に当たっては、対策工の有効性を適切に評価することが重要である。

本研究では、マスコン対策として低発熱ポルトランドセメントおよびひび割れ誘発目地を試験的に使用した川崎縦貫線大師工区と同セメント使用した大宮工区において、現場計測やひび割れ観測とFEMによる温度応力解析により、その有効性について検証した。

2. 試験工事の概要

(1) 川崎縦貫線 (KJ125工区) 半地下トンネル側壁部 (大師工区)

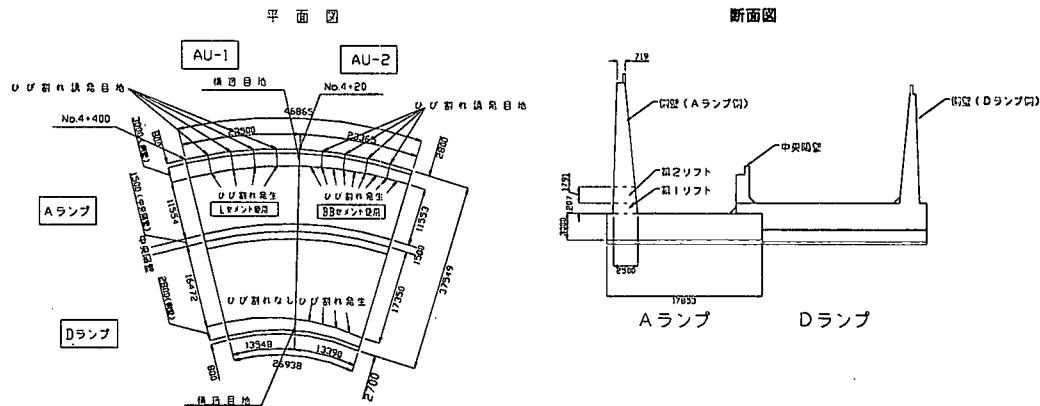
川崎縦貫線は川崎市内国道409号沿いに国道15号から東京湾アクアラインおよび首都高速湾岸線に接続する浮島ジャンクションまでの延長7.9 kmの自動車専用道路である。途中首都高速神奈川横羽線に大師ジャンクションにて接続する。当工区は、この大師ジャンクション内における半地下構造のU型擁壁で、側壁の

1) 正会員 首都高速道路公団 工務部 2) 正会員 博士(工学) 首都高速道路公団 工務部

3) 正会員 オリエンタルコンサルタンツ 総合技術部

4) 正会員 博士(工学) 東京大学大学院工学研究科

壁厚は、約2.1～2.8mである。概要図を図－1に示す。計測項目は、温度、有効応力、無応力ひずみ、有効ひずみである。高炉セメント（BB）に対し、低発熱ポルトランドセメント（Lセメント）の有効性を検証するため、打設ブロックによってコンクリートを打ち分けた。また、事前解析では、Lセメントの対策だけでは、ひび割れを制御できないという結果を得ていたので、追加対策としてひび割れ誘発目地をAライン側の側壁のみ設置し、これもDラインと比較検証することとした。この誘発目地は約4.5m間隔で設置した。コンクリートのリフト高は約2.2mである。



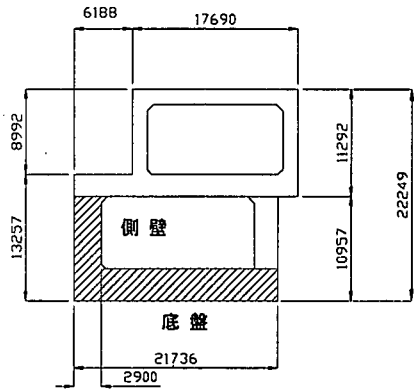
図－1 試験工区（大師工区）概要図

表－1 適用したマスコ対策の種別（大師工区）

	Aライン	Dライン
AU1	Lセメント 誘発目地有	Lセメント 誘発目地無
AU2	BBセメント 誘発目地有	BBセメント 誘発目地無

(2) 大宮線（0E24工区）2層トンネルの下段側壁部（大宮工区）

大宮線は、東京外環自動車道と首都高速5号池袋線が交差する美女木ジャンクションから北進し（南北線）、与野ジャンクションから埼玉新都心を経由し第2産業道路まで東進する（東西線）延長13.8kmの自動車専用道路である。南北線についてはすでに供用されている。当工区は、東西線のうち上下2層のボックスカルバート区間で、最大壁厚は2.9mのマスコン構造であり、温度ひび割れ対策として低発熱ポルトランドセメントを使用した。計測は、温度計測のみ実施している。施工目地間隔は約20m間隔で設置した。リフト高は約3.5mであり、ひび割れ誘発目地は設置していない。



図－2 試験工区（大宮工区）

(3) コンクリート配合

配合や設計材令については、各路線で考え方がことになっており、大宮線では、壁厚が厚くマスコンクリートとしての配慮をしていることから、水セメント比の上限値を緩和している。また、設計材令を56日にし、単位セメント量を低減している。

表－2 試験練りにおける配合および強度一覧

	設計 材令	配 合		強度(N/mm ²)	
		W/C	C(kg/m ³)	σ_{28}	σ_{56}
BB242B	28	55	288	36.2	43.5
L242B	28	52	289	34.7	45.3
L272B	56	59	263	28.0	36.8

*BB242B,L242Bは大師工区で、L272Bは大宮工区で使用。

3. 温度解析

大師工区で使用したコンクリートを用いて断熱温度上昇量試験を実施し、この試験結果を温度解析に用いた。温度解析は、2次元FEMを用い、熱伝達率をパラメータとして感度分析を行った。解析条件を表-3に示す。また、得られた結果が同種構造物において適用可能か検証するため、大宮工区で解析を行い、現場計測と比較検証することで適用性を確認した。

表-3 温度解析条件

熱伝導率 (W/m ² ℃)	密度 (kg/m ³)	比熱 (KJ/kg℃)	地盤温度 (℃)
2.70	2400	1.26	15.6

(1) 断熱温度上昇量試験

断熱温度上昇量試験は表-4に示す試験方法により行った。断熱温度上昇量Qは式(1)を用いた。パラメータQ_∞や温度上昇速度α、βを表-5に示す。この結果から、LとBBでは、終局断熱温度上昇量Q_∞で約8℃の差が確認された。なお、温度解析では試験値を入力することとした。

表-4 断熱温度上昇量試験方法

試験装置の仕様	空気循環式、円柱供試体
部材寸法	部材径=400mm
型枠容量	50 リットル
装置材質	鉄

表-5 断熱温度上昇特性値

種別	養生温度	Q _∞		
			α	β
L	10℃	41.152	0.371	0.774
	20℃	42.1	0.473	0.764
	30℃	41.256	0.617	0.632
BB	20℃	48.572	0.664	1.0

式(1): $Q = Q_{\infty} (1 - e^{-\alpha t})$

(2) 温度解析

解析では、側壁背面の埋め戻しによる影響を考慮するため、周辺地盤や底版までモデル化した。

a) 熱伝達率

コンクリートの表面温度は、型枠の熱伝達率の影響を受けやすく、コンクリート中心に対しても、若干の影響がみられる。このため、型枠の熱伝達率をパラメータとして感度分析を行った。この結果を図-3に示す。土木学会で参考値として定められている型枠の熱伝達率η=8 (W/(m²・℃))をη=4 (W/(m²・℃))まで下げることで、コンクリート表面の温度を計測値にほぼ近い値となることがわかった。

また、初期材齢時において、側壁天端の中央部の温度は(図-4)、解析結果に比べ、5℃程度低いことが確認されたため、初期材齢時の温度を合わせることを目的として感度分析を実施した。その結果、養生時の熱伝達率をη=13 (W/(m²・℃)) (土木学会参考値)から8 (W/(m²・℃))まで下げることで、計測値とほぼ近い値を得ることができた。

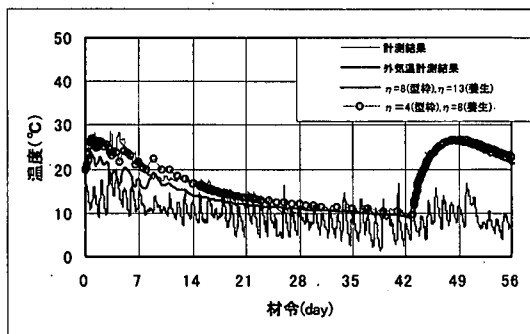


図-3 感度分析結果(型枠面)

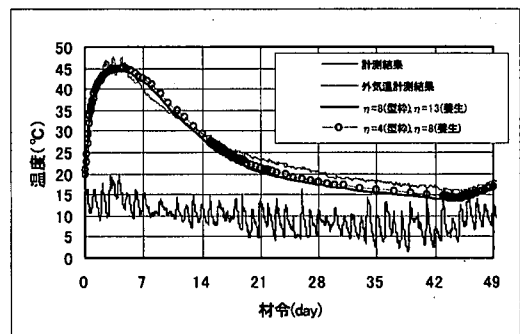


図-4 感度分析結果(天端養生面)

b) 側壁中心温度

感度分析で得られた熱伝達率を用いて解析を行い、最高温度に達したと考えられる側壁中心温度を、計測値と比較した。図-5がLセメント、図-6がBBセメントの結果である。側壁が厚いためコンクリート表面ほどηに対する感度は鋭くないが、いずれも、解析値は計測値によく一致する。また、Lセメントを使用

すると最高温度が約10℃低下しており、マスコン対策としての効果が確認できる。

c)大宮線への適用

大師工区で得られた熱伝達率を用いて、大宮線（0E23工区）での温度解析を実施した。図-7に解析結果を示す。解析値が最高温度で2～3℃高い値が得られたが、風速等の施工環境がほぼ同じであれば、同種構造物への適用は可能であると考えられる。

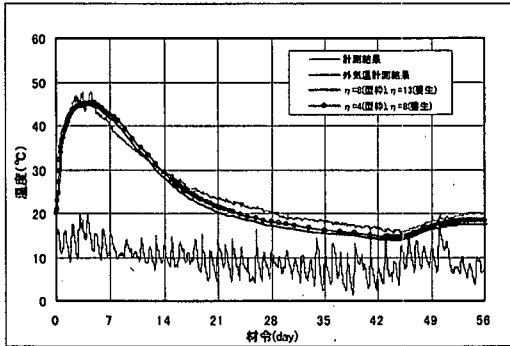


図-5 温度解析結果（Lセメント）

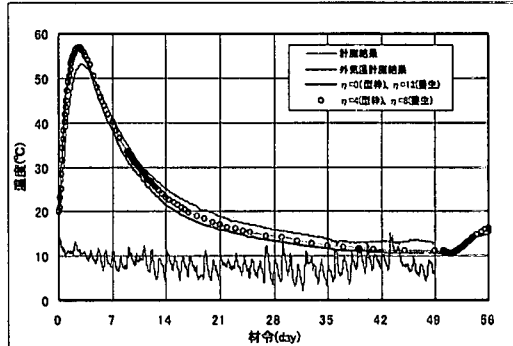


図-6 温度解析結果（BBセメント）

4. 温度応力解析

応力解析は、2次元FEMを用い、有効ヤング係数の補正係数 ϕ をパラメータとして行った。また、入力条件のうち、温度履歴は前章でfittingした解析結果を用い、コンクリートの引張強度や弾性係数は室内試験結果を用いた。試験・解析は、応力やひずみの現場計測を行った大師工区を主に対象にし、大宮線については、コンクリート応力の実測を行っていないため、参考値として、ひび割れ指数を算出し、現場のひび割れ状況との整合性を検証した。

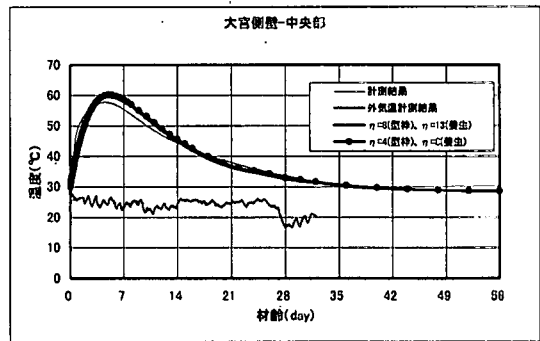
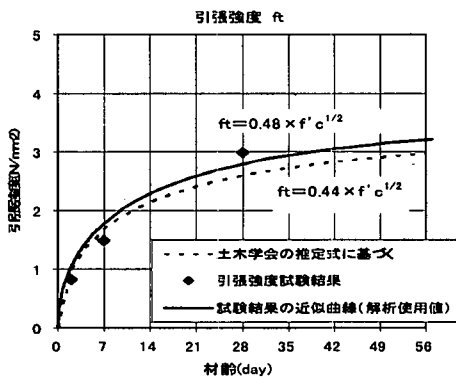


図-7 温度解析結果（Lセメント）

(1) 室内試験

室内試験として、強度試験および若材齢のクリープ試験を行った。圧縮試験では供試体のひずみを計測し弾性係数を求めた。

図-8にLセメント



の引張試験結果を、 図-8 引張強度（大師工区、Lセメント） 図-9 弾性係数（大師工区、Lセメント）

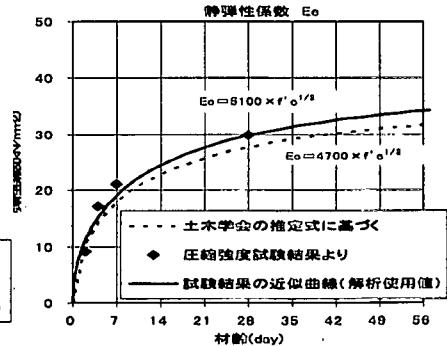


図-9にLセメントの弾性係数試験結果を示す。土木学会式より若干高めの結果であるが、実設計では、土木学会式を使用しても問題ない範囲と考えられる。クリープ試験は、 $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体を用い、材齢3日から2.04Mpaで載荷した。図-10に弾性ひずみおよび乾燥・自己収縮ひずみを差し引いた試験結果（クリープひずみ）を示す。材齢10日までに、Lセメントでは約300 μ 、BBセメントでは約200 μ のクリープひずみが計測された。このことから、LセメントはBBセメントに比べクリープによる応力緩和効果が大きい

いと考えられる。

(2) 温度応力解析

事前解析で最大引張応力が発生すると予測された位置に設置したコンクリート有効応力計の計測結果を用いて、 ϕ を推定した。Lセメントの解析結果を図-11、BBセメントの解析結果を図-12に示す。また、この時の ϕ を表-6に示す。 ϕ は応力に依存する（圧縮増加時、圧縮減少時、引張増加時）²⁾と言われており、これを考慮して ϕ を推定した。この結果から、Lセメントについて

では、引張増加域での補正係数 ϕ は土木学会の標準値の5割程度（ $\phi=1.0 \rightarrow 0.5$ ）と推定される。一方、BBセメントの有効応力は、クラック等が原因で正確に計測することができなかったため、有効応力を推定して ϕ を定めた。LとBBの感度分析結果を比較すると、土木学会式は、BBセメントでは、やや安全側に ϕ を設定していると言えるが、Lセメントでは、 ϕ を別途適切に設定する必要があると言える。なお、解析プログラムの制約から、 ϕ は $2T_{peak}$ 以前と以降の2段階の値を入力している。

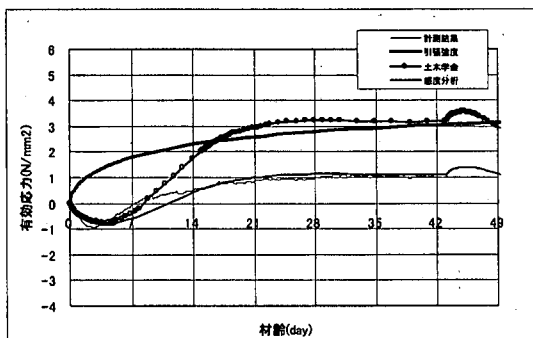


図-11 応力解析結果（Lセメント）

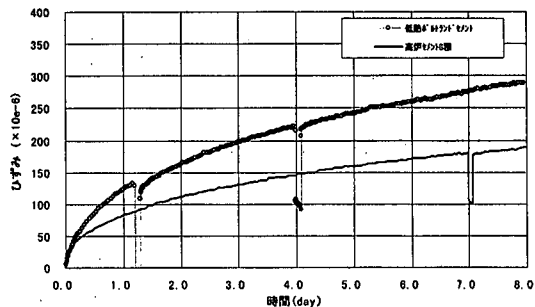


図-10 圧縮クリープひずみの比較

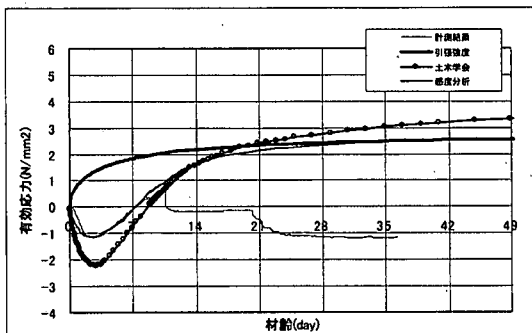


図-12 応力解析結果（BBセメント）

(3) 現場計測から推定される ϕ

Lセメントについて、現場計測から得られたコンクリート有効応力計と拘束ひずみ（実ひずみ－自由ひずみ）を用いて式（Ⅱ）により ϕ を求めた。算出された ϕ を表-7に示す。Lセメントに関しては、この ϕ は感度分析で得られた ϕ とほぼ一致した。

$$\phi = \Delta\sigma / E / \Delta\varepsilon \cdots (Ⅱ)$$

$\Delta\sigma$: 温度応力の増分の実測値 E : 静ヤング係数の実測値

$\Delta\varepsilon$: 拘束ひずみ増分の実測値

T_{peak} : 最高温度に達した材令（日） L:3.4日、BB:3.0日

表-6 感度分析で用いた ϕ

	有効ヤング係数の低減係数 ϕ		
	$t \leq T_{peak}$	$T_{peak} \leq t \leq 2T_{peak}$	$t \geq 2T_{peak}$
Lセメント	0.8	0.8	0.5
BBセメント	0.5	0.5	1.0
土木学会（L, BB）	材齢3日まで 0.73		
	材齢3日～5日 直線補間		
	材齢5日以降 1.0		

5. ひび割れ観測

コンクリート打設後、大師工区では2～3ヶ月後、大宮工区では6ヵ月後に目視によるひび割れ観測を行った。

大師工区では、ひび割れ誘発目地にはL・BBセメントのブロック共に、クラックが発生した。

表-7 現場計測より推定される ϕ

有効ヤング係数の低減係数 ϕ		
$t \leq T_{peak}$	$T_{peak} \leq t \leq 2T_{peak}$	$t \geq 2T_{peak}$
0.7	1.0	0.4
1.0	1.0	0.8

上段：Lセメント 下段：BBセメント

低発熱ポルトランドセメントを使用したブロック(AU1)では、その他の部分にはクラックは発生していない。一方、高炉セメントを使用したブロック(AU2)では、Aライン側では誘発目地間の中央に1本、Dライン側では4本のクラック(最大0.2mm、約4mm²程度)が発生した。ひび割れ発生図を図13-1、図13-2に示す。

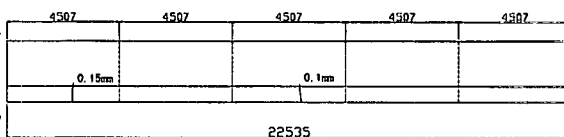


図13-1 ひび割れ発生図(AU2-Aライン)

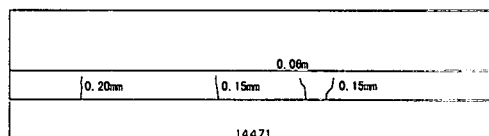


図13-2 ひび割れ発生図(AU2-Dライン)

大宮工区では、5ブロック中1ブロックに、1本(0.25mm)のみクラックが発生した。観察されたひび割れ状況から、低発熱ポルトランドセメントの効果が確認できる。この結果から、施工条件によっては、トンネル躯体の打設ブロックを20m程度でも、良好なコンクリート躯体を構築することが可能であることがわかった。

6. 考察

(1) 温度解析

断熱温度上昇量試験結果から、低発熱セメントの発熱抑制効果が確認できた。また、熱伝達率 η については、土木学会の参考値より、低い値となっている。これは、気中にさらされる構造物に比べ、トンネル等の地下構造物は、風速の影響を受けにくいいため熱伝達率は低くなったと考えられるが、 η の値については実測データを蓄積し信頼性を高める必要がある。

(2) 温度応力解析

低発熱ポルトランドセメントは、発熱を抑えるのみならず、クリープによる応力緩和の影響が大きく、ひび割れの発生を抑制することがわかった。また、ひび割れ指数の算出結果を表-8に示す。仮にBBセメントを大宮線で用いた場合には、指数が1前後となり、有害なクラックが発生する可能性が高かったと考えられる。

表-8 ひび割れ指数

セメント	ϕ	大師工区	大宮工区
L	土木学会	0.7	1.1
	感度分析	2.1	3.2
BB	土木学会	0.7	0.9
	感度分析	1.2	1.0

(3) 施工目地間隔

適切な養生等を行えば、目地間隔を20m程度で施工することは可能であり、特に施工条件が厳しい場合を除き、誘発目地の有効性は特に認められない。今回、Lセメントの有効性を適切に評価することができたことで、今後は、誘発目地との併用は少なくなると考えられる。

7. おわりに

ひび割れ指数では、ひび割れ幅や間隔の定量的な評価ができなため、今後はひび割れ幅に着目した解析を行っていききたい。また、コスト削減の観点からは、低発熱ポルトランドセメントは長期で高強度が得られることを利用して、躯体のスリム化を図っていきたいと考えている。

【謝辞】末筆ながら、今回の検討に当たり貴重なご助言をいただいた東京大学大学院工学系研究科、前川宏一教授に深甚なる謝意を表する次第です。また、断熱温度上昇量試験の実施に当たっては、太平洋セメント株式会社技術営業部佐野氏、技術部山崎氏に多大なるご協力を賜りました。合わせてここに謝意を表します。

参考文献

- 例えば、藤田、宇山、櫛下町、諸角、新開、近松：大規模高度浄水施設における総量20万 m^3 の低発熱型高流動コンクリートの適用，土木学会論文集，No. 592/V-39, pp. 147-154, 1998. 5
- 江渡正満：マスコンクリートの温度応力低減技術の開発に関する研究：平成11年8月