

# 開削トンネルにおける温度ひび割れ対策

工務部 設計課 鈴木 威  
工務部 設計課 秦 健作  
京都建設部伏見工事事務所 生田 正洋

## 要 旨

本論文は、開削トンネルにおける壁状マスコンクリート部材の温度ひび割れを制御する対策のうち、主に低熱ポルトランドセメントの使用に着目し、その効果を、実構造物を対象とした計測および有限要素法によるひび割れ幅の数値解析を通じて検討したものである。検討の結果、マスコンクリートの温度ひび割れを効果的に制御するには、低熱ポルトランドセメントの使用が有効であることが明らかになった。

キーワード：開削トンネル、マスコンクリート、離散ひび割れモデル、低熱ポルトランドセメント

## はじめに

近年、阪神高速道路の新規路線の建設においても、環境や土地有効利用の面から地下トンネル構造の採用が増加している。地下トンネル構造として開削トンネル工法が採用される場合、特に側壁マスコンクリートの温度ひび割れ対策に配慮する必要があり、一般に低発熱形セメントの使用やひび割れ制御鉄筋若しくはひび割れ誘発目地の配置などの対策が採用されている。

本論文では、開削トンネルの壁状マスコンクリート構造物として側壁を対象とし、温度応力挙動の計測および解析的検討を行い、セメントの種類および配筋鉄筋量を変えることでそのひび割れ対策としての効果（ひび割れ幅や本数）を、離散ひび割れモデルを用いた有限要素法により検討し、合わせてコストを含めた評価を行ったものである。

## 1. 実構造物における温度応力の計測と解析

### 1-1 計測の目的

神戸山手線の新湊川第3工区の開削トンネルを対象に実構造物における温度応力挙動を計測した。計測目的は以下のとおりである。

- 1) 温度ひび割れ制御対策として、低熱ポルトランドセメント（以下「Lセメント」）を使用した場合、若しくは、ひび割れ制御鉄筋として配筋鉄筋を増量した場合の各対策の効果を、計測を通じて定量的に把握する。
- 2) Lセメントは高温履歴を受けた場合に強度発現が大きいという強度特性<sup>3)</sup>が、温度ひび割れ制御に対してどの程度影響するかを、温度応力計測を通じて確認する。
- 3) 断熱温度上昇特性、クリープ特性値、熱膨張率などの温度応力の数値解析に必要な定数を計測により求める。特に重要な要因であるクリープについて、応力経路依存型の補正係数 $\phi$ を求め、既往の値<sup>4),5)</sup>と比較考察する。

4) 離散ひび割れモデルによる有限要素法解析を行い、実測値と比較することで応力経路依存型の補正係数 $\phi$ や解析手法の妥当性を検討する。

### 1-2 構造物と計測の概要

#### (1) 構造物の形状寸法と計測部位

図-1に試験施工を行った開削トンネルの断面を示す。本工区は全長約80mであるが、それを4ブロックに分割し、表-1に示す対策を実施した。計測は開削トンネル躯体部中壁（壁厚1.0m）と側壁（壁厚1.5m）において行った。

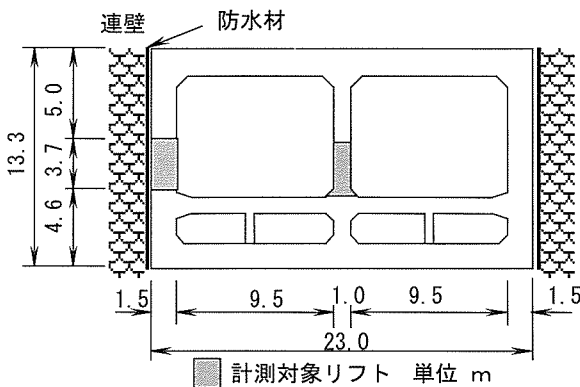


図-1 試験施工実施のトンネル断面図

表-1 対策工の種類

対象部位	対策の内容	
	セメント	配力鉄筋
2ブロック中壁	BB	D13@250
3ブロック中壁	L	同上
4ブロック中壁	BB	D19@125
4ブロック側壁	L	D22@125

#### (2) 計器の種類と設置位置

計器は、温度計、有効応力計、ひずみ計、無応力計とし、ブロックの中央断面に設置した。またひび割れ発生後は、ひび割れ幅が最大を示したひび割れに対して、亀裂変位計を設置した。

### 1-3 計測結果

#### (1) ひび割れ発生状況

図-2、3に高炉セメントB種（以下「BBセメント」）を使用した第2および第4ブロック中壁のひび割れ発生状況を示す。第2ブロック中壁で

は最大0.8mm幅のひび割れが発生し、鉄筋を増量した第4ブロック中壁では最大0.3mm程度のひび割れが発生した。また、図-4にLセメントを使用した第3ブロック中壁のひび割れ発生状況を示す。このブロックを含めLセメントを使用した他のブロック（側壁、中壁とも）では有害なひび割れはみられなかった。

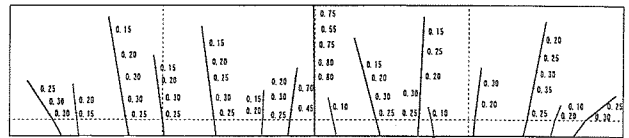


図-2 ひび割れ発生図（第2ブロック中壁）

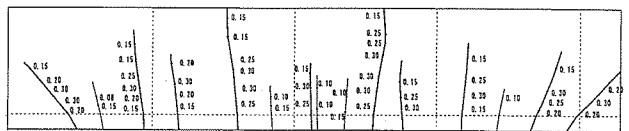


図-3 ひび割れ発生図（第4ブロック中壁）

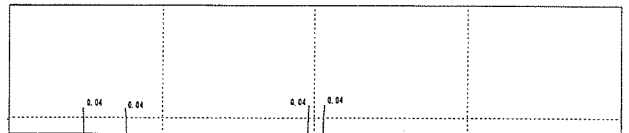


図-4 ひび割れ発生図（第3ブロック中壁）

#### (2) 温度計測結果

図-5に、部材内部（高さ1/3点）の温度計測結果（材齢と温度の関係）を示す。打設時期により打込み温度が異なるため直接の比較はできないが、Lセメントを用いることで、コンクリート内部の温度が低減されていることがわかる。

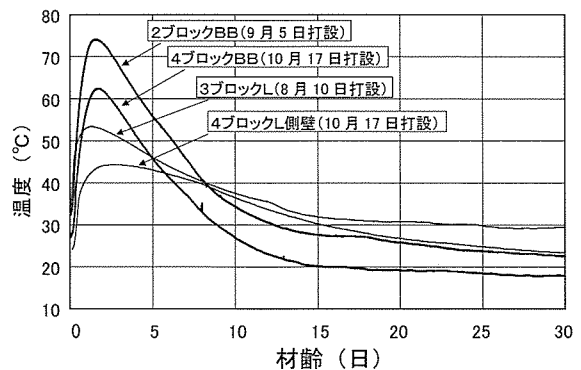


図-5 温度計測結果

### (3) 温度応力計測結果

図-6に、部材内部(高さ1/3点)の温度応力計測結果(材齢と温度応力の関係)を示す。第2, 4ブロック中壁では材齢5日程度で温度応力の急変が生じている。これは当該ブロックでは材齢7日における型枠脱型時には、すでにひび割れが確認されていることから、この応力の急変はひび割れ発生による応力変動と考えられる。一方Lセメントを用いた第3ブロック中壁や第4ブロック側壁では大きな応力変動は生じていない。これは有害なひび割れの発生がみられなかったことと合致する。

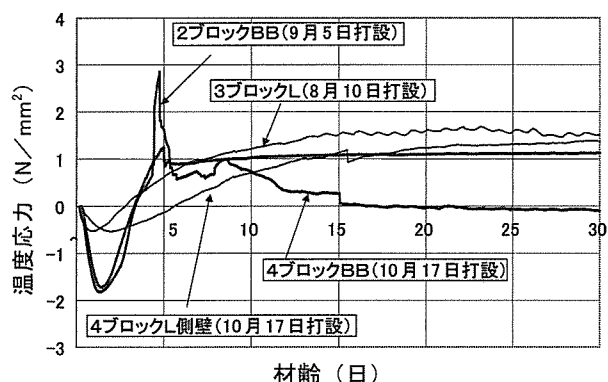


図-6 温度応力計測結果

### (4) 熱膨張率の計測結果

熱膨張率は、無応力計における自由ひずみと温度の計測結果より求めた。表-2に計測結果の一覧を示す。熱膨張率はセメントの種類によらず平均約 $7 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ であった。

表-2 熱膨張率の計測結果

部位	セメント	部位	温度上昇時	温度下降時	平均
2ブロック中壁	BB	壁中央	5.6	7.3	6.5
		壁高1/3	5.9	7.2	
4ブロック中壁	BB	壁中央	6.7	8.2	7.6
		壁高1/3	6.9	8.5	
3ブロック中壁	L	壁中央	4.5	8.0	7.0
		壁高1/3	5.0	8.0	
4ブロック側壁	L	壁中央	5.6	8.6	6.8
		壁高1/3	5.8	7.3	

単位  $\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$

### (5) クリープによる補正係数 $\phi$ の計測結果

応力経路依存型のクリープによる補正係数 $\phi$ の実

測値は以下の手順で求めた。

手順1: 実測の拘束ひずみ(ひずみ計測値-無応力計での自由ひずみ計測値)に対する温度応力計測値をプロットし、回帰曲線を求める。

手順2: 圧縮応力増加, 圧縮応力減少, 引張応力増加の各区間について、手順1の回帰曲線を微分( $d\sigma/d\varepsilon$ )する。

手順3: それを静ヤング係数 $E(t)$ で除してクリープ補正係数 $\phi$ とする。なお、静ヤング係数は、高温履歴における強度増進を考慮している。

表-3にクリープによる補正係数 $\phi$ の計測結果の一覧を示す。

表-3 クリープによる補正係数計測結果

壁名称	セメント	部位	圧縮応力増加期	圧縮応力減少	引張応力増加
2ブロック中壁	BB	壁中央	0.54	1.24	-
		壁高1/3	0.42	1.21	0.67
4ブロック中壁	BB	壁中央	0.50	0.83	0.60
		壁高1/3	0.70	0.81	0.74
3ブロック中壁	L	壁中央	0.75	0.89	0.50
		壁高1/3	0.48	0.99	0.42
4ブロック側壁	L	壁中央	0.76	1.14	0.63
		壁高1/3	0.90	1.03	0.72
平均			0.63	1.02	0.61

### 1-4 計測結果に基づいた考察

#### (1) Lセメントの強度特性とひび割れ制御効果

図-7, 8にLセメントおよびBBセメントを用いた場合の温度応力と引張強度の一例(第3, 4ブロック中壁)をそれぞれ示す。引張強度は高温履歴養生時の強度促進性を考慮したもの(図中「高温履歴考慮」と注記)と、 $20^\circ\text{C}$ 標準水中養生時の積算温度から求めたもの(「高温履歴考慮なし」と注記)の2種類を示しているが、コンクリート標準示方書(RC示方書)<sup>2)</sup>に準じいずれも0.8を乗じている。Lセメントの場合、全期間を通して、温度応力は高温履歴を考慮して推定された引張強度以下となっており、実際にも有害なひび割れがみられないことから、Lセメントの高温履歴養生による強度促進性がひび割れ抑制に寄与していたと考えられる。

(2) 応力経路依存型クリープによる補正係数  $\phi$

表-4に応力経路依存型のクリープによる補正係数  $\phi$  の試験結果の平均値と既往の研究結果<sup>4), 5)</sup>との比較を示す。クリープは、材料、環境条件に影響を受けること、材齢に伴う変動が大きいクリープ補正係数  $\phi$  を単純に平均して求めていることから、数値の絶対値を直接比較することはできないが、圧縮減少時にはクリープの作用がほとんどないこと、引張増加時は再度クリープが作用するなどの定性的な傾向は合致していると考えられる。

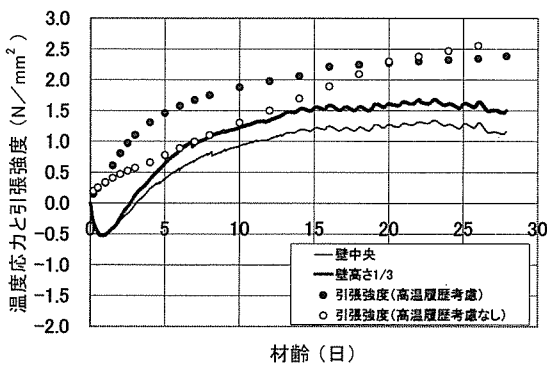


図-7 温度応力と引張強度 (Lセメント)

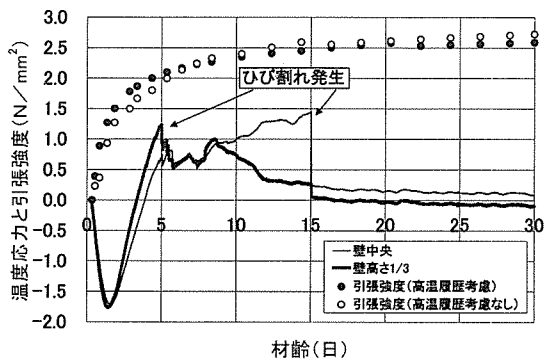


図-8 温度応力と引張強度 (BBセメント)

研究	応力経路		
	圧縮増加	圧縮減少	引張増加
入矢 <sup>4)</sup>	0.75	1.00	0.50
江渡 <sup>5)</sup>	0.50	1.00	0.70
本実験	0.63	1.02	0.61

表-4 クリープによる補正係数  $\phi$

## 2. 離散ひび割れモデルを用いた有限要素法による検討

### 2-1 目的

温度ひび割れ制御対策を立案する場合、その効果を温度応力やひび割れの本数あるいは幅に関して定量的にかつ精度良く評価することが重要である。本解析においては計測を通じて得られた各種物性値および応力経路依存型のクリープ補正係数  $\phi$  を用い、中壁を対象として離散ひび割れモデルによる2次元有限要素法解析を行い、実測値と比較することでその妥当性を検討した。

### 2-2 解析モデル

図-9に温度解析モデル、図-10に応力解析モデルを示す。

離散ひび割れモデルを使用する場合、応力解析においては要素分割時にひび割れ発生位置を設定することになる。第2, 4ブロック中壁は材齢1ヶ月で10本程度ひび割れが発生しているため、解析上のひび割れ予定位置は10箇所とした。

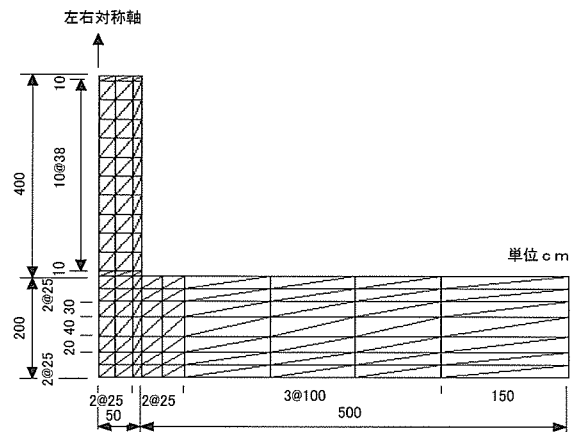


図-9 温度解析モデル

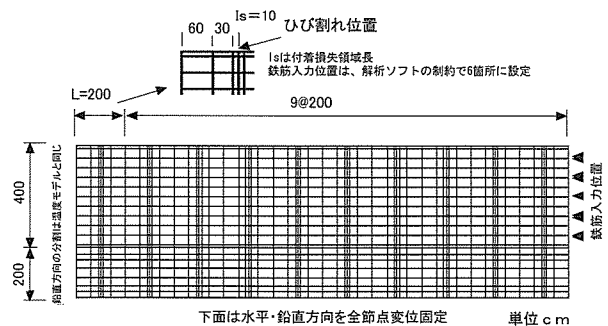


図-10 応力解析モデル

### 2-3 解析に用いた定数

表-5に解析に用いた定数を示す。クリープの評価は応力経路依存型<sup>5)</sup>とした。その他は計測値を使用することを基本としたが、熱膨張率については使用するプログラムの制約から一定値 ( $7 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ) を使用した。

表-5 解析定数一覧

セメント種類	BB	L
セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	332	300
熱物性値	熱物性値熱伝導率2.67W/m <sup>2</sup> °C、密度2300kg/m <sup>3</sup> 、比熱1.15KJ/kg°C	
断熱温度上昇式 (°C)	下記の打込み温度 21.6°Cの試験値に対し打込み温度補正(セメントメーカー実績値)を行った 56(1-exp(-0.92t))      43.5(1-exp(-0.53t0.78))	
圧縮強度 f <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	実測値 <sup>3)</sup>	実測値 <sup>3)</sup>
静ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値: Et = β × f <sub>c</sub> <sup>0.5</sup> βは文献3)による	
クリープ補正係数 φ	応力経路依存型 <sup>5)</sup> t: 解析材齢(日) φ = 0.5 (0 < t ≤ t <sub>p</sub> )      t <sub>p</sub> : 温度ヒーク材齢(日) φ = 1.0 (t <sub>p</sub> < t ≤ 2 × t <sub>p</sub> ) φ = 0.7 (2 × t <sub>p</sub> < t) 材齢依存型 <sup>1)</sup> φ = 0.73 (0 ≤ 材齢 ≤ 3日) = 1.0 (5日 ≤ 材齢) 3日 ~ 5日は補間	
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値: f <sub>t</sub> = 0.8 × α × f <sub>c</sub> <sup>0.5</sup> αは文献3)による	
ポアソン比	0.2	
線膨張係数 (1/°C)	実測値: 7 × 10 <sup>-6</sup>	
外気温	実測値	
熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> °C)	実測値から設定 合板面と上面: 4.0W/m <sup>2</sup> °C 6日目に脱型 その他面は無養生: 14.0W/m <sup>2</sup> °C	
付着損失領域長(cm)	ひび割れ幅の実測から設定 10	

### 2-4 温度解析結果

結果の一例として図-11, 12に第3ブロック中壁の温度解析結果と実測値を示す。解析結果は実測値をほぼ再現している。なお、他のブロックについても再現性は良好であった。

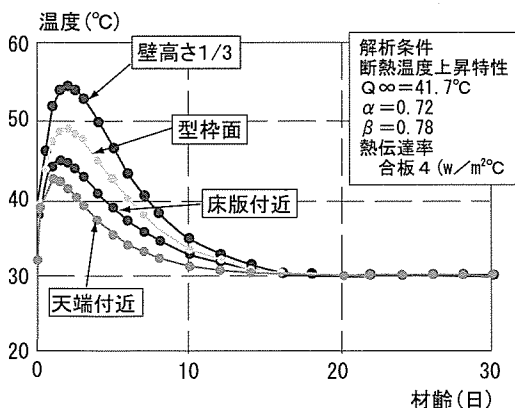


図-11 温度解析結果 (第3ブロック中壁)

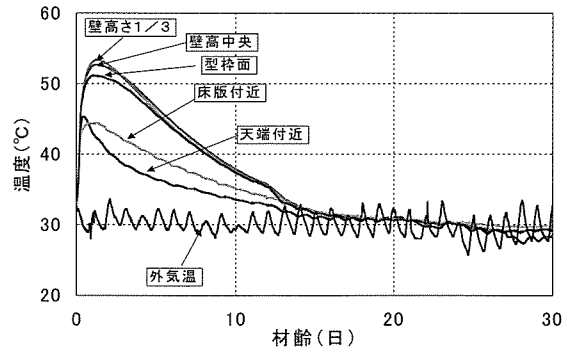


図-12 温度実測値 (第3ブロック中壁)

### 2-5 温度応力解析結果

一例として図-13, 14に第3ブロック中壁 (Lセメント) および第4ブロック中壁 (BBセメント) の温度応力解析結果を示す。

解析の結果、応力経路依存型のクリープ補正係数φを用いた解析結果はRC示方書におけるクリープ補正係数φを用いた場合に比べて、実測値を比較的よく再現しており、応力経路依存型のクリープ補正係数φを用いることは温度応力の解析において有効であると考えられる。

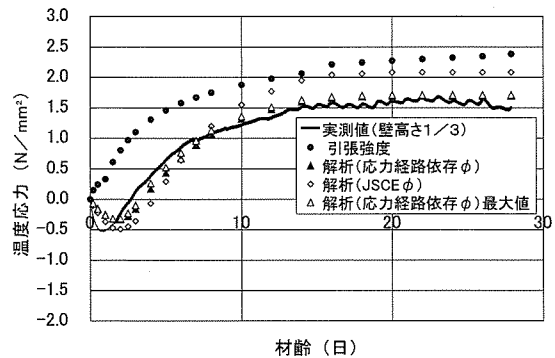


図-13 応力解析結果 (3ブロック中壁)

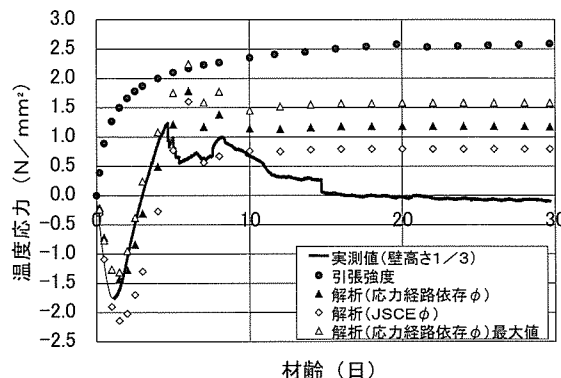


図-14 応力解析結果 (4ブロック中壁)

## 2-6 ひび割れ幅解析結果

ひび割れが発生した第2ブロック中壁(BBセメント+D13@250)および第4ブロック中壁(BBセメント+D19@125)について、図-15, 16にひび割れ幅の解析値と実測値を比較する。第4ブロック中壁については実測と解析はほぼ合致しているが、第2ブロック中壁については、実測0.83mmに対して解析0.61mmとなっている。これは、解析では鉄筋は降伏のない線形解析としているが、第2ブロック中壁で発生しているひび割れ部分の鉄筋は降伏領域に達しているためと考えられる。

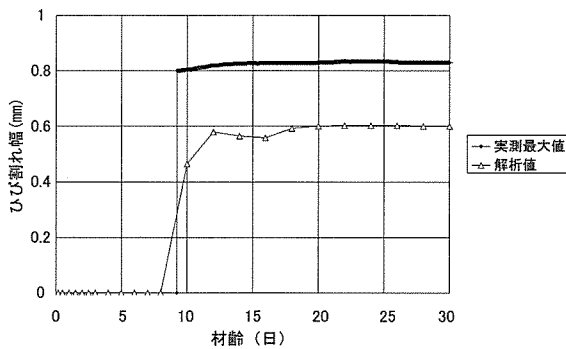


図-15 ひび割れ幅の比較 (第2ブロック中壁)

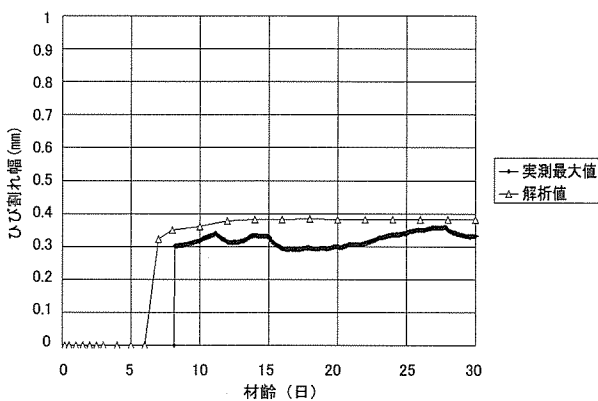


図-16 ひび割れ幅の比較 (第4ブロック中壁)

## 2-7 ひび割れ本数

表-6にひび割れ幅ごとの本数の比較を示す。実測では第2, 第4ブロック中壁とも材齢30日でひび割れは11本発生している。これに対し解析では第2ブロック中壁が4本, 第4ブロック中壁が8本である。解析上でひび割れ本数に差がでるのは、鉄筋量が少ない場合(第2ブロック中壁)には特定のひび割れに変形が集中し、また鉄筋量が

多い場合(第4ブロック中壁)では、ひび割れ分散効果があるためと考えられる。ひび割れ本数の予測については、鉄筋量が少ない場合(第2ブロック中壁では鉄筋比0.1%程度)はやや困難であるが鉄筋量が多い場合(第4ブロック中壁では0.4%程度)は、ある程度予測可能と考えられる。

表-6 ひび割れ幅とひび割れ本数

部材	種類	ひび割れ幅(mm)と本数(材齢1ヶ月)									合計
		0.0 ~0.1	0.1 ~0.2	0.2 ~0.3	0.3 ~0.4	0.4 ~0.5	0.5 ~0.6	0.6 ~0.7	0.7 ~0.8	0.8 ~0.9	
2BL	実測		6	4					1		11
	解析					2	2				4
4BL	実測	3	6	3							12
	解析		6	2							8

## 3. 開削トンネルの温度ひび割れ制御対策に関する検討

### 3-1 目的

前章において妥当性が認められた離散ひび割れモデルによる有限要素法を用い、開削トンネルの側壁を対象として、ひび割れ対策としてセメントの種類および配力鉄筋量を変化させ、その効果を補修も考慮したコストを含めて定量的に評価した。

### 3-2 パラメータ解析の概要

表-7に解析パラメータを示す。構造物はいずれも開削トンネルを想定し、中規模なタイプ(側壁厚1.0m, 拘束体は厚さ1.0mの底版)と、大規模なタイプ(壁厚1.5m, 拘束体は厚さ2.0mの既設コンクリート)の2種類とした。壁長さや壁高さは一般的な値としてそれぞれ20mおよび4mとした。また、打設時期は夏(打込み温度32°Cで打設し秋季に向かって気温が下降する場合)、春(打込み温度19°Cで打設し夏季に向かって気温が上昇する場合)、冬(打込み温度10°Cで打設し気温の上昇が少ない場合)とした。セメントの種類は、通常使用されるBBセメントのほかに、Lセメントと、両者の中間的なものとして高炉スラグ微粉末混入量55%程度の2成分系セメント(MK)を考えた。また、配力鉄筋比は、現状で使用されている0.1%程度から最大0.4%程度までとした。断熱温度上昇特性、力学的物性値などは基本的には表-5に示

したものを用いた。なおクリープによる補正係数は、計測により妥当性が確認された応力経路依存型<sup>5)</sup>とした。

表一七 解析パラメータ

要因	水準
部位	・中規模（1m厚底版上の1m厚側壁） ・大規模（2m厚の既設コンクリート上の1.5m厚側壁）
打設時期 (打込み温度)	・夏（32℃） ・春（19℃） ・冬（10℃）
セメント	・高炉セメントB種（BB） ・2成分系セメント（MK） ・低熱ポルトランド（LC）
配力鉄筋比	0.1~0.46%

3-3 解析結果と考察

(1) 解析結果

表一八に解析結果の一覧（ひび割れ幅毎のひび割れ本数や鉄筋降伏の有無など）を示す。ひび割れが発生しないケース（応力が引張強度を上回らないケース）については、引張強度を意図的に低減することで強制的にひび割れを発生させた。

表一八 解析結果一覧

壁厚 (m)	打設 時期	セメ ント	鉄筋 比 (%)	指数1 以上の ケース	ひび割れ幅 (mm) と発生本数									合計 本数	鉄筋 降伏
					0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4	0.4 ~ 0.5	0.5 ~ 0.6	0.6 ~ 0.7	0.7 ~ 0.8	0.8 ~ 0.9			
1.5	夏	BB	0.15		2							2	6	×	
			0.41		2	2	2						6	×	
		MK	0.15		2	2							6	×	
			0.41		2	4							6	○	
		L	0.15		2	2				2			4	×	
			0.41		2	2							4	○	
	春	BB	0.15		2	2						2	4	×	
			0.41		2	2							4	○	
		MK	0.15		2	2		2					4	×	
			0.41		2	2							4	○	
		L	0.15	○	2	2							4	○	
			0.31	○	2	2							4	○	
冬	BB	0.15		2	2			2				6	×		
		0.31		2	2	2						6	×		
	MK	0.15		2	2		2					2	×		
		0.41		2								2	○		
	L	0.15	○	2	2							2	○		
		0.31	○	2	2							2	○		
1.0	夏	BB	0.10		2	2					2	6	×		
			0.46		4	2							6	×	
	L	0.10	○	2	2		2					4	×		
		0.46	○	2	2							4	○		
	春	BB	0.10	○	2	2						2	○		
			0.20	○	2	2							2	○	
冬	BB	0.10		4					2			6	×		
		0.46		2	4							6	○		
		L	0.10	○	2	2					2	○			

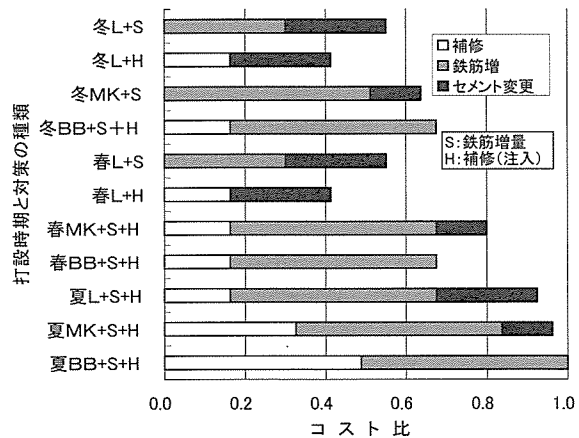
鉄筋降伏：×は「あり」○は「なし」

(2) 各要因のひび割れ制御効果

表一八より低発熱形セメントを使用することによりひび割れ幅や本数の低減が認められる。一方、温度ひび割れが発生した場合、その幅は鉄筋量の増加とともに低減する。ひび割れ発生に伴い鉄筋には引張応力が作用するが、鉄筋量が少ない場合は鉄筋が降伏する場合もあり、表一八には鉄筋の仕様をSD345とした場合の降伏の有無を示している。多くの場合、鉄筋に降伏が生じない鉄筋比は0.4%程度であるが、Lセメントを使用し、春、冬に打設した場合は少ない鉄筋量でも降伏しない場合がある。これは主に温度応力の低減によるものと考えられ、ひび割れ制御に必要な鉄筋量が少なくなることによるコスト低減が期待される。

(3) 温度ひび割れ制御対策のコスト評価

図一七は壁厚1.5mの場合のひび割れ制御対策コストを比較した結果を示す。この比較は、「夏季BB+鉄筋比0.41%を基準」とし、鉄筋が降伏しないケース（表一八の○印）について最大ひび割れ幅の制御目標を0.3mm以下とした場合について行った。最大ひび割れ幅が0.3mm以上となるひび割れは補修すると考えた。補修（エポキシ樹脂注入工法）単価、セメント単価などはそれぞれ作業環境や地域性で左右されるため普遍的ではないが、ひび割れ制御対策の低コスト化の点からもLセメントを使用する有効性が認められる。



図一七 コスト比較

#### 4. まとめ

開削トンネルにおけるマスコンクリート構造物の温度ひび割れ制御対策について実構造物における計測および数値解析を通じて検討した。

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- 構造物における計測の結果、Lセメントを用いた場合の温度応力は、20°C標準水中養生に対する積算温度から求めた引張強度程度になったが、高温履歴養生時の強度促進性を考慮した引張強度に対しては大きく下回った。実構造物ではひび割れの発生がみられなかったことから、温度ひび割れ発生有無の検討に際しては、Lセメントの高温履歴養生による強度促進性を考慮することが重要であると考えられる。
- 構造物における計測の結果、応力経路依存型のクリープ補正係数 $\phi$ は、既往の研究<sup>4),5)</sup>とほぼ同様な値を示した。
- 離散ひび割れモデルを用いた有限要素法による解析の結果、江渡の提案する応力経路依存型のクリープ補正係数 $\phi$ を用いることで、実構造物における温度応力を実用上十分な精度で推定できることが確認できた。また、ひび割れ幅や本数の推定精度は鉄筋量が多い場合に向上した。
- 開削トンネルの側壁を想定し、ひび割れ対策と

してセメントの種類および配力鉄筋を考え、その効果（ひび割れ幅や本数）を、離散ひび割れモデルを用いた有限要素法により解析的に評価した。その結果、コストの低減を含め低熱ポルトランドセメントの有効性が認められた。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会；マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書,1992.
- 2) 土木学会；平成8年度版コンクリート標準示方書－耐久性照査型・[施工編], 1996.
- 3) 徳永法夫ほか；開削トンネルマスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する実験及び解析的検討（コンクリート工学投稿中）.
- 4) 入矢桂史郎；若材齢コンクリートのクリープに関する研究（学位論文），1999.
- 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（学位論文），1999.
- 6) 川口 徹；コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について,マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集,1982.
- 7) 鈴木 威ほか；壁状マスコンクリート構造物 56土木学会年次学術講演会,2001.

## CONTROL OF THERMAL CRACKING IN THICK CONCRETE WALLS OF CUT AND COVER TUNNELS

Takeo SUZUKI, Kensaku HATA and Masahiro IKUTA

To examine the effect of low-heat Portland cement on the control of thermal cracking in thick concrete walls of cut and cover tunnels, measurement of heat and cracks in massive concrete walls was conducted. Also, a numerical analysis of crack width using the finite element method was conducted.

As a result of measurement, it was confirmed that the heat generated by low-heat Portland cement was low, but that the compressive strength of concrete made with it was high from early on and increased smoothly later when cured at high temperature. It is concluded that use of low-heat Portland cement is effective to control thermal cracking of massive concrete structures.