

# 報告 プレキャスト埋設型枠を用いた寒冷地におけるマスコンクリート構造物の急速施工

白根 勇二<sup>\*1</sup>・河野 一徳<sup>\*2</sup>・大野 琢海<sup>\*3</sup>

**要旨：**寒中コンクリートとしてのみならず，マスコンクリートとしての取り扱いも必要となる寒冷地での大断面橋脚の施工に，プレキャスト埋設型枠工法を適用した。温度ひび割れ制御対策として，ジェットヒータで橋脚全体を保温養生するとともに，プレキャスト埋設型枠の表面を直接保温シートで覆うことにより内部拘束型の温度応力を緩和する方法を実施した。このような対策の実施により，プレキャスト埋設型枠工法は温度ひび割れ発生の抑制のみならず，従来の型枠工法では困難だった寒冷地における急速施工を可能とする工法であることが確認された。本報告では具体的な温度ひび割れの制御方法とその効果について述べる。

**キーワード：**プレキャスト埋設型枠，マスコンクリート，寒冷地，急速施工，橋脚

## 1. はじめに

寒冷地においてコンクリート構造物を施工する場合，初期凍害の発生を防止するために，コンクリート温度の管理やコンクリート表面の養生等，入念な対策が必要となる。また，構造物がマスコンクリートとなる場合には，コンクリート内部と表面の温度差が養生期間中に大きくなり，温度ひび割れの発生が懸念される。

したがって，このような施工に従来の型枠工法を適用する場合には，型枠の脱型までに十分な時間をとる必要があり，通常的环境条件での施工より工期を長く設定しなければならない。

一方，プレキャスト埋設型枠工法は型枠の脱型が不要であることや，型枠自体の保温効果により，寒冷地施工においても工期短縮が可能となる。また，型枠表面を必要な時期だけ直接保温することも容易に行えるため，コンクリートの内外温度差に起因する温度応力を緩和することも可能となる。

本報告では，寒冷地でのプレキャスト埋設型枠工法による大断面橋脚の施工において実施した養生方法を紹介するとともに，現場計測に基

づき，その効果の検証結果について述べる。

## 2. 施工概要

### 2.1 橋脚の構造

図-1に今回プレキャスト埋設型枠工法を適用した橋脚の構造図を示す。施工した橋脚は2基で，それぞれの脚柱部の高さは40mと36.5mであり，断面寸法は8.0×5.0mである<sup>1)</sup>。施工場所は青森県で，施工時期は3～5月であった。

橋脚の基本構造は，主方向(縦方向)鉄筋をすべて自立可能な鉄骨(突起付きH型鋼)に置き換えるとともに，型枠の脱型作業が不要となるプレキャスト埋設型枠を使用している。プレキャスト埋設型枠は，水セメント比30%の高強度モルタルに補強材としてステンレスファイバーを体積比で2.5%混入させたもので，厚さが5cmのものを使用した。

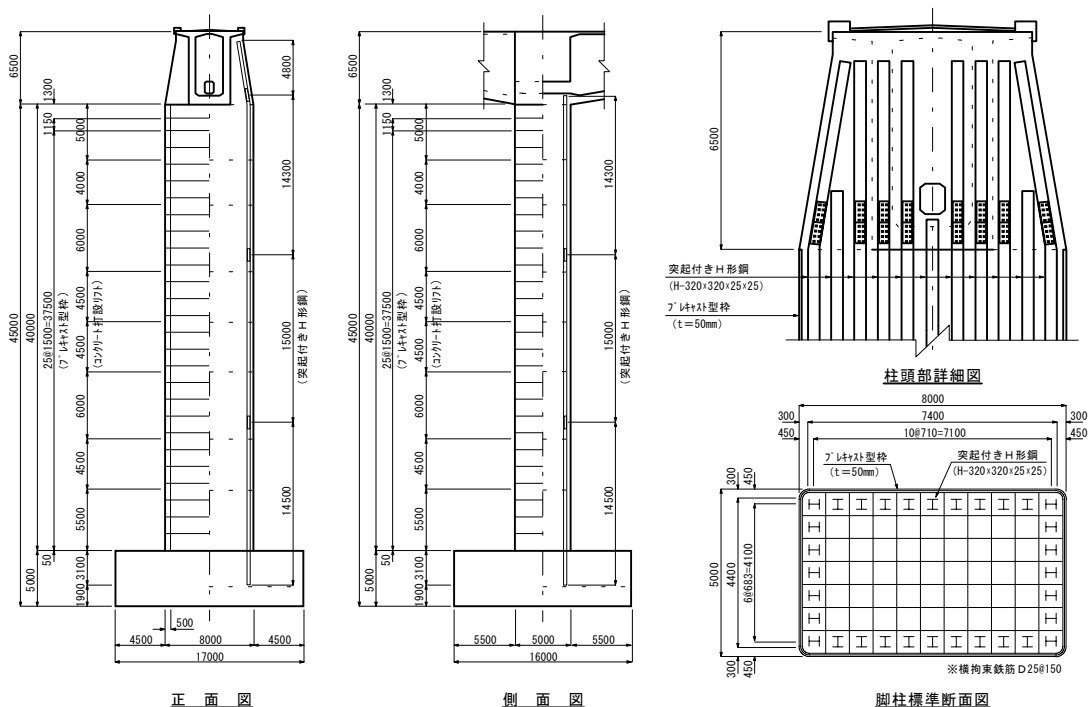
### 2.2 施工方法

橋脚の施工は，主鋼材のH型鋼を建て込んだ後，地上で団体状に組み立てたプレキャスト埋設型枠(高さ1.5m)を設置し，型枠内部にコンクリートを打設する手順で実施し，これを必要

\*1 前田建設工業(株) 技術研究所 (正会員)

\*2 前田建設工業(株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*3 前田建設工業(株) 東北支店



図－１ 検討対象橋脚の構造図（P2 橋脚）

回数繰り返す。鉄筋は地上でプレキャスト埋設型枠の内部に組み込んでおく。したがって、本工法においてはほとんどの作業を地上で行うことになるため、急速施工が可能となる。

### 3. 温度ひび割れ制御対策の検討

#### 3.1 温度ひび割れ制御対策の立案

従来工法では寒中コンクリートの施工において以下の点に留意する必要がある。

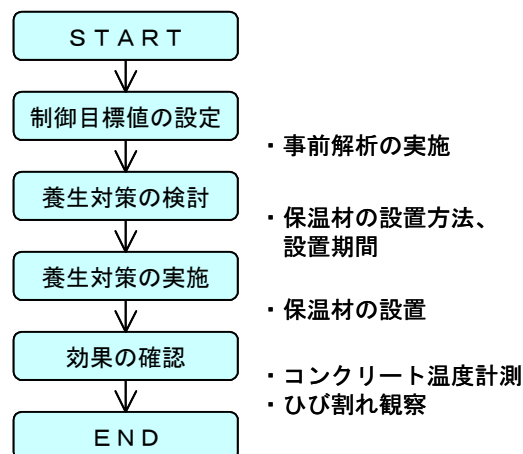
- ・ コンクリートの製造および運搬
- ・ コンクリートの打込み
- ・ コンクリートの養生
- ・ 型枠および支保工

プレキャスト埋設型枠工法においても同様の点に留意する必要があるが、型枠脱型作業の省略や型枠の保温効果という特徴から、従来工法よりも有利な施工が可能となる。すなわち、コンクリート表面を直接外気にさらさず、保温材をプレキャスト埋設型枠表面に必要な期間だけ直接設置することが可能であるため、従来工法のような型枠脱型時のコンクリート表面の急冷を防止することができる。

以上を考慮して、コンクリートの初期凍害の

防止、温度ひび割れ発生の制御を目的に、図－２に示すフローにしたがい、寒冷地における大断面橋脚の養生方法およびその効果について検討した。ここで、制御目標値としては温度ひび割れの発生原因となるコンクリート内部と表面部の温度差(内外温度差)を用いることにした。

具体的な温度ひび割れ制御方法は、コンクリート打込み後から内外温度差がピークに達するまではプレキャスト埋設型枠面に断熱材を配置し、次に内外温度差が低下し始めた段階からは、内外温度差が制御目標値以下に収まるように注



図－２ 温度ひび割れ制御方法検討フロー

意を払いながら徐々に断熱材を取り除いていくことを基本とした。また、内外温度差を小さくするためには雰囲気温度をできるだけ高くすることも効果的であることから、初期凍害の発生防止も兼ねて、外周足場を利用して脚柱部をシートで囲い、内部をジェットヒータで温め、雰囲気温度を5℃程度に保つ対策も実施した。

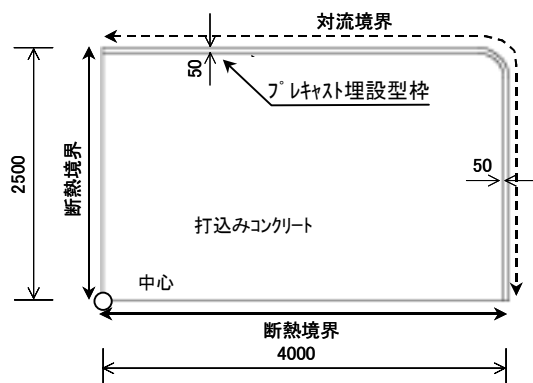
### 3.2 事前解析による検討

#### (1) 検討方法

前述したように、温度ひび割れの発生を抑制する上では、内外温度差の制御目標値を設定する必要がある。そこで、温度応力解析により内外温度差と温度ひび割れ指数の関係を見いだすこととした。

図－3に解析モデル図を示す。解析モデルは橋脚断面の対象性を考慮し、1/4モデルとした。

解析で用いた物性値は表－1に示すとおりで



図－3 温度応力解析モデル

表－1 解析に用いた物性値

項目		単位	物性値	
			プレキャスト埋設型枠	後打ちコンクリート
熱伝導率	$\lambda$	W/m・℃	2.70※	2.70※
密度	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	2400	2415
比熱	$c$	J/kg・℃	1.15※	1.15※
断熱温度上昇特性	$Q_{\infty}$	℃	考慮しない	45.13
	$\gamma$	—	—	1.064
打設温度	$T_c$	℃	—	5.0
圧縮強度	$f'_c$	N/mm <sup>2</sup>	70.0	34.2 (91日材令)
	$a$	—	—	4.5
	$b$	—	—	0.93
ヤング係数	$E_c$	N/mm <sup>2</sup>	35000	式(4)
引張強度	$f_t$	N/mm <sup>2</sup>	6.0	式(3)
ポアソン比	$\nu$	—	0.2※	0.2※
熱膨張係数	$\alpha$	10 <sup>-6</sup> /℃	10.0※	10.0※
熱伝達係数	$\eta$	W/m <sup>2</sup> ・℃	2～14	—

※コンクリート標準示方書参考

ある。解析パラメータであるプレキャスト埋設型枠の熱伝達係数は、2.5 W/m<sup>2</sup>・℃（ほぼ断熱養生）から 14.0 W/m<sup>2</sup>・℃（養生なし）の 7 段階とした。後打ちコンクリートの断熱温度上昇特性、圧縮強度、ヤング係数、引張強度は、現場データをもとにコンクリート標準示方書<sup>2),3)</sup>の式 (1) ～ (4) を用いて算出した。

解析対象期間は 2 ヶ月とし、外気温は 5℃一定の条件とした。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (1)$$

$$f'_c(t) = \frac{t}{a + b \cdot t} f'_c(91) \quad (2)$$

$$f_t(t) = 0.44 \sqrt{f'_c(t)} \quad (3)$$

$$E_c(t) = \Phi(t) \cdot 4700 \sqrt{f'_c(t)} \quad (4)$$

ここで、 $Q(t)$ ：材令  $t$  日の断熱温度上昇量 (℃)

$Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量 (℃)

$\gamma$ ：温度上昇に関する定数

$f'_c(t)$ ：材令  $t$  日の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_t(t)$ ：材令  $t$  日の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

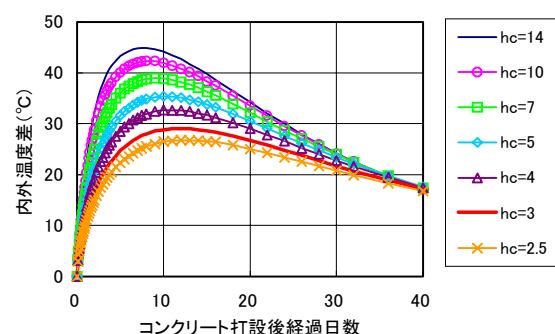
$E_c(t)$ ：材令  $t$  日のヤング強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$a, b$ ：定数 (表－1)

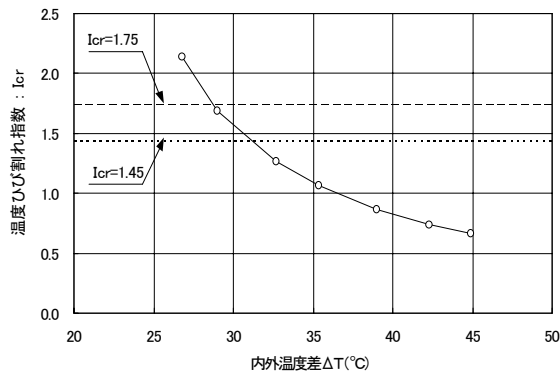
$\Phi(t)$ ：補正係数 (0.73～1.00)

#### (2) 検討結果

図－4に事前解析によるコンクリートの内外温度差履歴を示す。ここで  $hc$  は熱伝達係数を示す。コンクリートの内外温度差は、プレキャスト埋設型枠の表面を露出した場合 ( $hc = 14$ ) には 44.9℃と大きな値となったのに対し、表面を



図－4 熱伝達係数による内外温度差履歴



図－５ 内外温度差とひび割れ指数の関係

ほぼ断熱に近い状態で養生した場合 ( $h_c = 2.5$ ) には  $26.8^{\circ}\text{C}$  と小さくなった。

図－５にコンクリートの内外温度差と温度ひび割れ指数（最小値）の関係を示す。図中の内外温度差は、温度ひび割れ指数が最小のときの値である。内外温度差の制御目標値は、コンクリート標準示方書を参考に設定し、温度ひび割れ指数 1.45 以上（ひび割れの発生をできるだけ制御したい場合）に相当する  $31^{\circ}\text{C}$  以下とした。

### 3.3 温度ひび割れ制御方法の決定

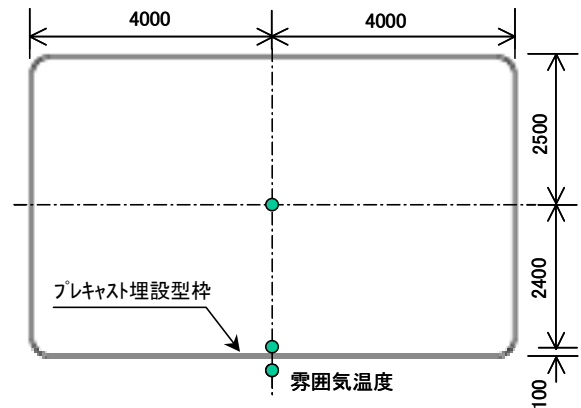
事前検討の結果をふまえ、温度ひび割れの制御方法は以下のように決定した。

- ・ 外周足場を利用して構造物全体をシートで囲い、保温養生する。
- ・ コンクリートの初期養生期間中、シート内の雰囲気温度が  $5^{\circ}\text{C}$  を下回る場合、ジェットヒータを用いて  $5^{\circ}\text{C}$  以上に保つ。
- ・ 必要に応じ、プレキャスト埋設型枠の表面を保温マット（気泡を内包したポリエチレンシート）で覆い、コンクリート内外温度差をできるだけ小さくする。
- ・ 内外温度差が制御目標値以下に降下した段階で保温マットを除去する。

## 4. 現場温度計測

### 4.1 現場温度計測方法

橋脚断面内の内外温度差が予備解析で設定した制御目標値以内にコントロールされているかどうかを確認することと、保温マットとジェットヒータを用いた温度ひび割れ制御対策の効果



図－６ 熱電対設置位置

表－２ 各リフトの施工条件

橋脚	リフト	保温マット 設置枚数	コンクリート配合		
			呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント種類
P1	1リフト	2	24	281	普通 ホルランド セメント
	2リフト	2			
	3リフト	2			
	4リフト	2			
	5リフト	2			
	6リフト	2			
P2	7リフト	0	30	308	
	1リフト	2	24	281	
	2リフト	2			
	3リフト	0			
		1			
		2			
	4リフト	3			
		0			
		0			
	6リフト	2			
	7リフト	2			
	8リフト	0			

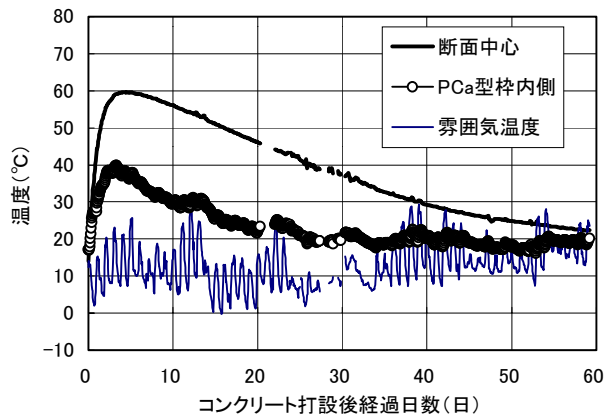
を検証することを目的に、図－６のように断面内に熱電対を設置して、コンクリート温度を計測した。計測位置は、断面中心部、プレキャスト埋設型枠内側（コンクリート表面から 100mm）、雰囲気温度の 3 点とし、P1 および P2 橋脚のコンクリート打設リフトごとに計測を行った。

各リフトの保温マットの設置枚数は表－２の通りである。P2 橋脚 3 リフト目は、保温マット設置枚数による保温効果を検証するため、各面の設置枚数にパラメータを与えた。

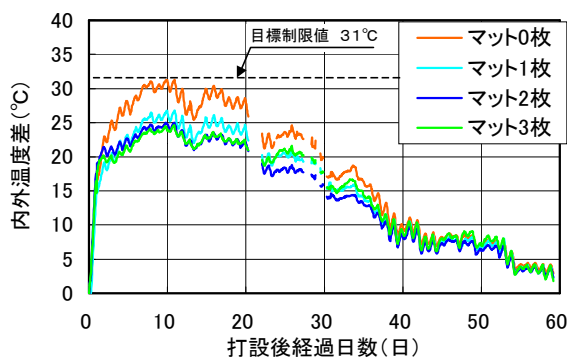
### 4.2 現場温度計測結果

図－７に現場温度計測結果の一例（P2 橋脚 3 リフト目：保温マット 2 枚）を示す。断面中心部のコンクリート温度は、コンクリート打込み後 4 日間ほぼ断熱状態で推移し、最高  $59.6^{\circ}\text{C}$  まで上昇した。また、内外温度差はコンクリート打込み後 10 日程で、約  $25^{\circ}\text{C}$  となった。

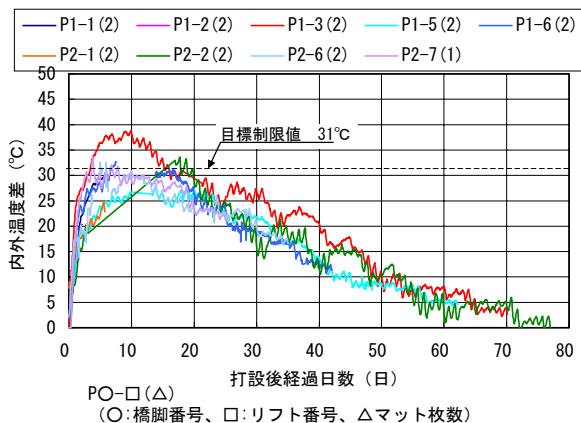
図－８に P2 橋脚の 3 リフト目における保温マ



図－７ 現場計測結果  
(P2 橋脚 3 リフト目)



図－８ 内外温度差履歴  
(P2 橋脚 3 リフト目)



図－９ 内外温度差履歴

ット設置枚数ごとの、断面中心部とプレキャスト埋設型枠内側との内外温度差を示す。この図より、保温マットを設置すると設置しない場合と比べ、内外温度差を抑制することができることがわかる。

図－９に各リフトの内外温度差の履歴を示す。ただし、コンクリート配合が異なるP1 橋脚 7 リフト目およびP2 リフト 8 リフト目、図－８に既示した P2 橋脚 3 リフト目は除外した。内外温

度差は、日変動等の影響もあり目標制限値の 31°C を越えるリフトもあったが、P1 橋脚 3 リフト目を除き、管理目標値+3°C 以内に抑えることができ、コンクリートの内外温度差を概ねコントロールすることができた。

## 5. 温度ひび割れ制御対策の効果の検証

### 5.1 検証方法

保温マットとジェットヒータを使用した温度ひび割れ制御方法の効果を検証するため、各リフトの現場温度計測結果をもとに逆解析を実施し、保温マットの熱伝達係数の同定を行った。

解析ケースは、埋戻し作業により計測を中断したP1 橋脚 2 リフト目以下と P2 橋脚 2 リフト目以下を除いた全リフトとした。ただし、P1 橋脚 4 リフト目は計測トラブルによりデータが得られなかったため除外した。解析条件は事前解析とほぼ同条件としたが、後打ちコンクリートの断熱温度上昇特性とコンクリート温度は表－２のコンクリート配合条件と計測結果に基づき、コンクリート標準示方書に準拠して算出した。また、プレキャスト埋設型枠の熱物性値は表－３に示す物性試験のデータを用いた。

表－３ プレキャスト埋設型枠熱物性値

項目	単位	物性値	
		PCa型枠	
熱伝導率	$\lambda$	$\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$	1.68
密度	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	2310
比熱	$c$	$\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$	1.09
熱膨張係数	$a$	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	8.0

### 5.2 効果の検証結果

逆解析から同定した各リフトの熱伝達係数と保温マット貼付け枚数の関係を図－10 に示す。設置枚数 0 枚のデータには保温マット撤去後の熱伝達係数も含まれる。この結果、設置枚数が 0 枚のときは熱伝達係数にばらつきが認められるが、概ね  $10 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  程度であった。また、設置枚数が 1～3 枚のとき、熱伝達係数はそれぞれ  $3.6\sim 5.5 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  となり、設置枚数が多いほど保温マットの効果が確認できる。実施工では、内外温度差の制御目標値に応じて、保温マット



表－4 在来工法とプレキャスト埋設型枠工法の施工速度

工 法	工 種	実 働 日 数 (日)																																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
本 工 法	足場設置	■	■																																								
	H形鋼建込み (32本)			■	■	■																																					
	プレキャスト図体設置						■		■		■																																
	コンクリート打設段取							■		■		■																															
	コンクリート打設 (6m, 4. 5m)							■		■		■																															
従 来 工 法	養生シート設置							■		■		■																															
	足場設置	■	■																																								
	主筋建込み (鉄筋圧接, 360本)			■	■	■																																					
	横拘束鉄筋組立							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	型枠組立																	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	コンクリート打設段取																			■								■										■					
	コンクリート打設 (4m/1リフト)																				■								■									■					
	養生シート設置																					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

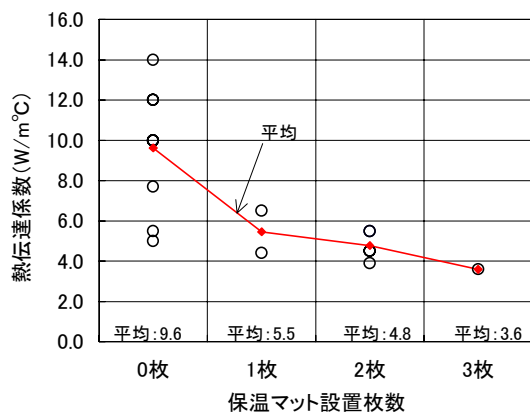
○施工速度の比較

PCa工法 15m÷11日=1. 36m/日

従来工法 12m÷39日=0. 31m/日

∴PCa工法／従来工法=4. 4倍

※本プレキャスト工法の場合は脚柱部15m部分の施工、従来工法の場合は脚柱部12m部分の施工をそれぞれ1施工サイクルと考えた工程



図－10 保温マット設置枚数と熱伝達係数

の設置枚数を決定することになる。

### 5.3 保温養生の効果および施工性

橋脚完成時に実施したひび割れ観察において、ひび割れの発生が認められたが、いずれも0.1mm以下であり耐久性上問題となる許容ひび割れ幅(0.4mm)<sup>3)</sup>以下であった。温度ひび割れの制御対策によって、ひび割れの発生頻度や発生した場合のひび割れの大きさを抑制できたものと思われる。また、プレキャスト埋設型枠工法は、構造物に悪影響を与えずに、型枠設置時から足場解体時まで連続して養生ができたこともひび割れ制御の一因と考えられる。

在来工法とプレキャスト埋設型枠工法の施工速度の比較を表－4に示す。プレキャスト埋設型枠工法は在来工法に比べ、4倍以上のスピードで施工が可能であることがわかる。これは、寒冷地であるにもかかわらず、プレキャスト埋設型枠工法の場合は通常的环境条件と同じサイクルで施工を行えることに起因している。

## 6. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 実施工を通して、保温マットとジェットヒータを用いた保温養生がコンクリートの温度ひび割れの発生およびひび割れの程度を抑制することが確認された。
- (2) 内外温度差の制御目標値に応じて保温マットの設置枚数を決定することにより、コンクリート表面の保温効果をコントロールすることが可能であることがわかった。
- (3) 逆解析の結果、保温マットを1～3枚設置したときのコンクリート表面の熱伝達係数は3.6～5.5W/m²・℃となり、設置しない場合と比べ、保温マットは十分な保温性を有していることがわかった。
- (4) プレキャスト埋設型枠工法は、マスコンクリートや寒中コンクリートに対する対策が容易に施工でき、実施工においても急速施工が可能であることが確認された。

## 参考文献

- 1) 河野一徳, 高橋日出男, 村永正一: 鉄骨コンクリート複合構造橋脚工法による世増ダム新水吉橋橋脚の急速施工, コンクリート工学, Vol. 39, No. 11, pp. 24-29, 2001. 11
- 2) 土木学会: 【平成11年版】コンクリート標準示方書(施工編), pp. 24-36, 2000. 1
- 3) 土木学会: 【平成8年制定】コンクリート標準示方書(設計編), pp. 25-26, 1996. 3