

温度応力解析によるマスコンクリートのひび割れ制御について

知念 直¹・嵩原 務仁²

^{1,2} 那覇港湾・空港整備事務所 第一工事課（〒901-2123 沖縄県浦添市西洲 1-1）

マッシブなコンクリートを打設するにあたっては、温度応力によるひび割れに留意する必要がある。ひび割れの発生は、鉄筋の腐食を進行させ耐久性の低下の一因となるため、ひび割れを制御することは品質確保の上で重要な課題のひとつである。

本工事においても、橋脚のフーチング部および梁部がマスコンクリートであり温度応力によるひび割れが懸念されたため、施工に先立ち温度応力解析による温度ひび割れ予測を行った。その結果、温度ひび割れが予測されたため、保温養生によるひび割れ制御対策を実施した。また、温度計測を行うことにより保温養生の管理を行った。

キーワード：マスコンクリート、温度ひび割れ、保温養生、内部拘束

1. はじめに

那覇港は、東アジアの中心という地理的優位性や豊かな自然環境、独自の芸能・文化を背景に年間50回以上の外国クルーズ船が寄港する国際クルーズ拠点港である。

〈外国クルーズ船寄港回数が日本一：H21 国交省調べ〉

しかしながら、係留施設の不足から専用的な利用が図れず、一般貨物取扱岸壁での対応を余儀なくされ、観光立県沖縄の海の玄関口としてイメージの低下に加え、安全性および荷役作業効率の低下が問題となっていた。

これらの問題を解決するため、那覇港（泊ふ頭地区）大型旅客船ターミナル整備事業を進めており、平成21年9月には暫定供用を開始したところである。本工事においては、アクセス道路と既存泊大橋との接続部における道路拡幅のための下部工(P9～P11)工事を行い、既設橋脚にフーチング、柱、梁を拡幅補強した。

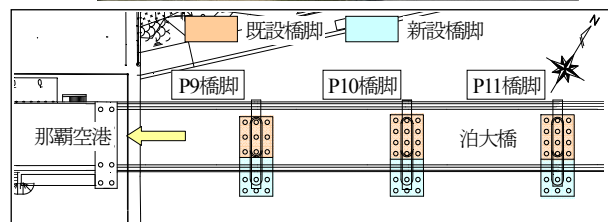


図-2 本工事位置図



図-1 旅客船ターミナル完成イメージパース図

今回施工した橋脚は、フーチング断面が2.3m、梁断面が1.7m～1.9mであり、マスコンクリートに該当し、温度応力によるひび割れが懸念された。そのため温度ひび割れ抑制対策として保温養生を行った。近年コンクリート構造物における長寿命化が重要視されてきていることから、その重要な対策の一つであり実際に行った「温度ひび割れ制御対策」および「温度計測に基づいた保温養生の管理」についての内容を報告するものである。

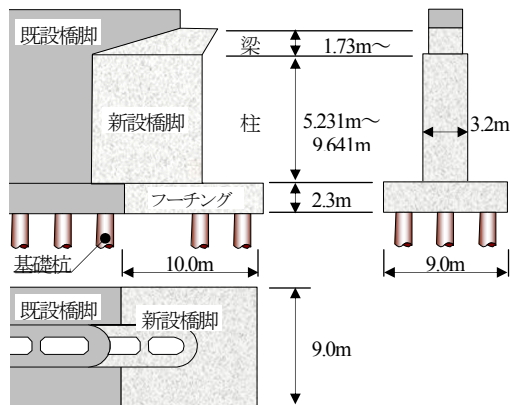


図-3 橋脚の構造寸法

2. 事前温度応力解析

温度応力解析は3次元温度応力解析プログラムを使用した。また、解析条件は「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008(社)日本コンクリート工学協会」(以後「マスコン指針」と称す。)に準拠した。解析フローを図-4に示す。

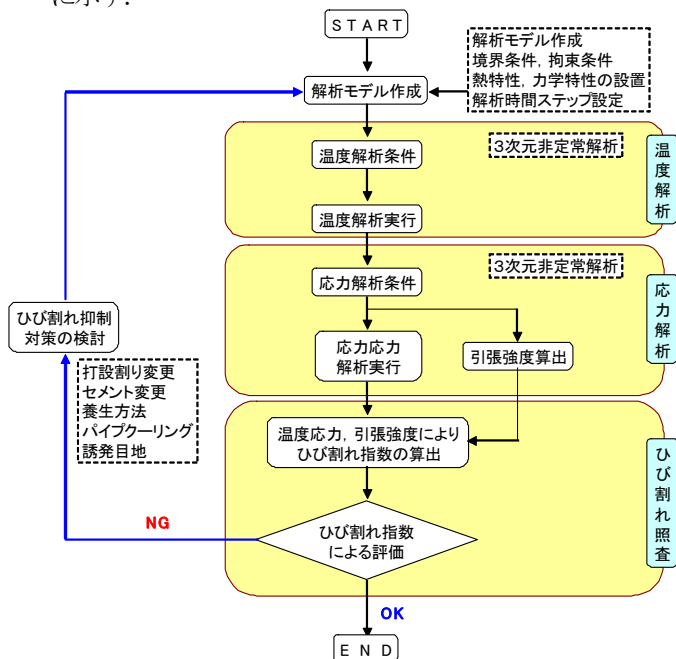


図-4 解析フロー

(1)解析条件

a) 解析モデル

解析モデルは、橋軸直角方向軸に対して対称であるため、1/2モデルとして解析を行った。

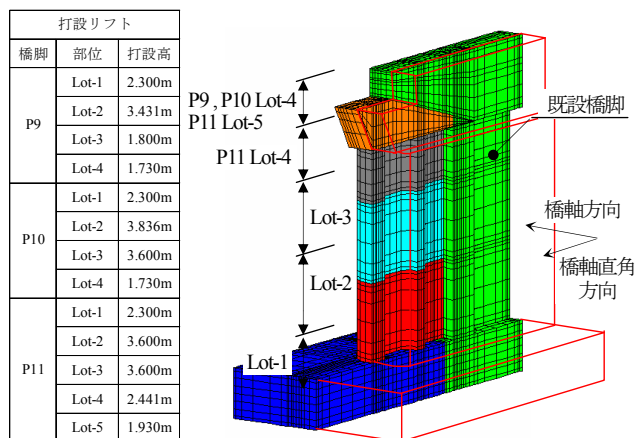


図-5 解析モデル

b) 外気温の設定

外気温は気象庁発表の月別平均気温(那覇市;2007～2009年)を用いて日平均気温を算定した。解析に用いた外気温を図-6に示す。

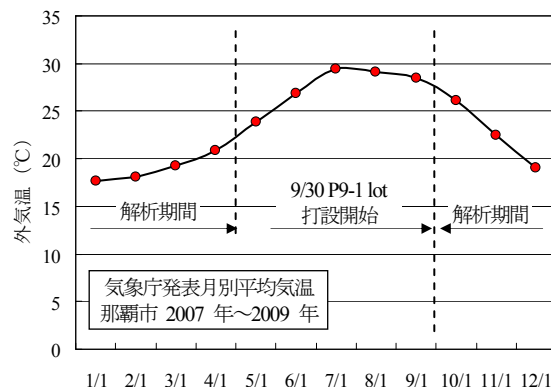


図-6 解析に用いた外気温

c) コンクリートの打設工程

コンクリートの打設日等を表-1に示す。コンクリート温度は、今回使用するプラントにおけるコンクリート温度の実績値を参考に、外気温に3.5℃を加えた温度とした。

橋脚	打設部位	打設予定日	外気温 [℃]	コンクリート 温度 [℃]
P9	フーチング Lot-1	2010/9/30	27.3	30.8
	柱 Lot-2	2011/10/20	25.5	29.0
	柱 Lot-3	2011/11/2	23.9	27.4
	梁 Lot-4	2011/11/12	22.7	26.2
P10	フーチング Lot-1	2010/12/20	18.8	22.3
	柱 Lot-2	2011/1/14	17.7	21.2
	柱 Lot-3	2011/1/27	17.9	21.4
	梁 Lot-4	2011/2/7	18.0	21.5
P11	フーチング Lot-1	2010/11/11	22.9	26.4
	柱 Lot-2	2011/12/1	20.6	24.1
	柱 Lot-3	2011/12/16	19.0	22.5
	柱 Lot-4	2011/12/27	18.5	22.0
	梁 Lot-5	2011/1/17	17.7	21.2

表-1 コンクリート打設予定日

d) コンクリートの熱特性および力学特性

今回打設に用いる普通コンクリートの熱特性および力学特性の値を表-2に示す。断熱温度上昇式は、式(1)を用いるものとし、式中の終局断熱温度上昇量 Q_{∞} および温度上昇速度に関する定数 γ は表-2 内着色部に示す値とした。また、コンクリートの熱伝導率、比熱、比重および線膨張係数等も「マスコン指針」に準拠して設定した。

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

ここに、 $Q(t)$; 材齢 t 日における断熱温度上昇量[℃]

Q_{∞} ; 終局断熱温度上昇量[℃]

γ ; 温度上昇速度に関する定数

t ; 材齢[日]

項 目	単位	条 件
セメント	—	普通ポルトランドセメント
単位セメント量	kg/m ³	353 (5/1～10/31) 349 (11/1～4/30) 混和材 20kg/m ³
設計基準強度	N/mm ²	30
水セメント比	%	48
断熱 温度 上昇 特性	橋脚	Lot-1 Lot-2 Lot-3 Lot-4 Lot-5
	P9	Q _∞ [°C] 56.1 56.3 55.8 55.9 —
		γ 2.10 1.94 1.87 1.74 —
	P10	Q _∞ [°C] 56.0 56.0 56.1 56.1 —
		γ 1.61 1.54 1.43 1.46 —
	P11	Q _∞ [°C] 55.9 56.0 56.0 56.0 56.0
		γ 1.77 1.64 1.56 1.61 1.59
熱伝導率	W/m°C	2.7
比熱	kJ/kg°C	1.15
密度	kg/m ³	2400
線膨張係数	μ/°C	10.0
圧縮強度	N/mm ²	$f_c'(t) = \frac{t-0.37}{3.63+0.868 \times (t-0.37)} \times 40.857$ t: 材齢
引張強度	N/mm ²	$f_t'(t) = 0.13 \times f_c'(t)^{0.85}$
有効ヤング係数	N/mm ²	$E_e'(t) = \varphi \times 6300 \times f_c'(t)^{0.45}$ φ=0.42 (最高温度に達するまで) φ=0.65 (最高温度に達する有効材齢+1 日以降)
ポアソン比	—	0.2

表-2 熱特性および力学特性

e) 温度境界および力学的拘束条件

解析モデルの温度境界条件を図-7 に示す。解析に用いた温度伝達境界の熱伝達率は、「マスコン指針」に示される熱伝達率の参考値に従い設定をした。なお、空気に接する面では図-6 に示した外気温とした。断熱温度境界とは熱の出入りがない境界である。

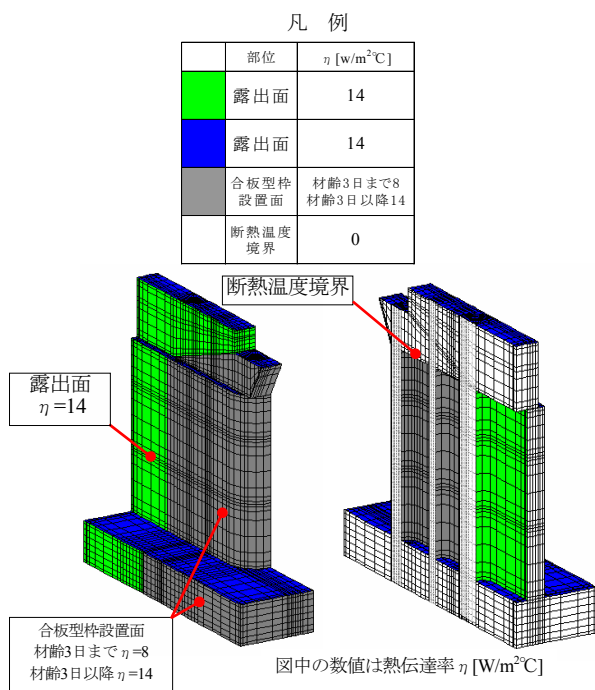


図-7 温度境界条件

力学的拘束条件を図-8 に示す。解析地盤上であるフーチング下端面で鉛直方向を拘束した。橋脚の 1/2 をモデ

ル化しているため解析上の切断面で変位を拘束した。

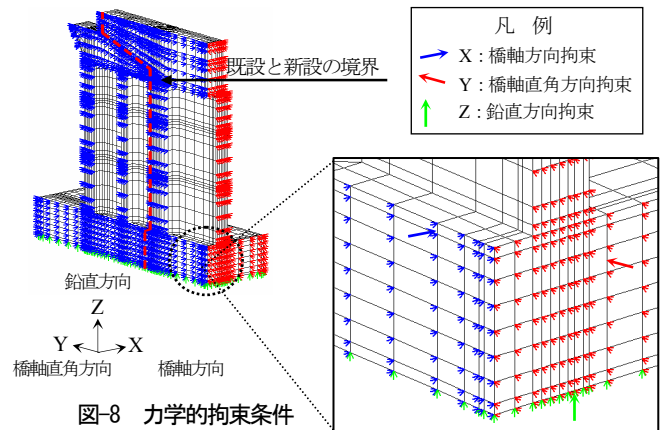


図-8 力学的拘束条件

(2) ひび割れ指数の目標値

目標とするひび割れ指数は、引張強度と最大主引張応力の比とし 1.0 を目標値とする。また、ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係を図-9 に示す。

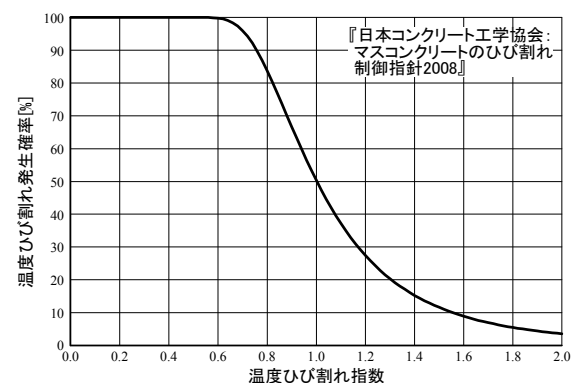


図-9 温度ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係

(3) 解析結果

解析結果を表-3 に示す。ひび割れ指数の最も低い P11 における最小ひび割れ指数の分布を図-9 に示す。フーチングに関してはひび割れ指数が 0.42 であり、100%の確率でひび割れが発生すると予測された。梁に関してはひび割れ指数が 0.85 と 1.0 を下回り、50%以上の確率でひび割れが発生すると予測された。ひび割れ指数の最小値はいずれも打設初期に示す数値であったことより、ひび割れ指数低下の原因は内部拘束によるものと推察できる。

打設ロット		コンクリート温度[°C]		ひび割れ指数の最小値		
		最高温度	側面温度	①	②	③
P9	Lot-1	85.2	40.5	0.43	0.66	0.68
	Lot-2	71.6	38.1	1.95		
	Lot-3	69.9	41.1	1.30	1.41	
	Lot-4	76.5	30.7	0.98	0.99	
P10	Lot-1	76.0	30.8	0.44	0.65	0.66
	Lot-2	61.1	29.2	1.97		
	Lot-3	61.3	35.4	0.91	1.69	
	Lot-4	71.8	24.9	0.94	0.97	
P11	Lot-1	80.0	35.2	0.42	0.66	0.66
	Lot-2	64.7	32.1	1.15		
	Lot-3	62.5	30.2	1.14		
	Lot-4	62.0	35.5	1.09	1.24	
	Lot-5	72.5	25.8	0.85	0.85	

表-3 事前解析結果

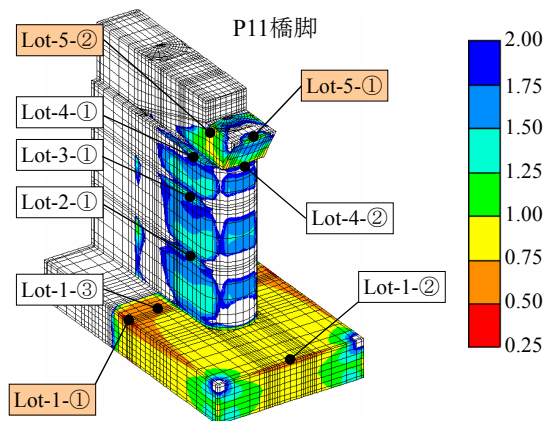


図-10 最小ひび割れ指数の分布(P11)

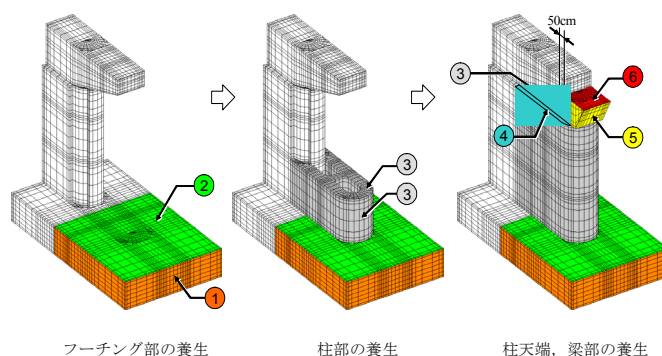


図-11 保温養生の方法

3. ひび割れ抑制対策の検討

(1)温度ひび割れ抑制対策の選定

温度ひび割れ制御方法と、本構造物への適用性を表-4 にまとめる。解析の結果より、予測される温度応力ひび割れは内部拘束によるものであると推察された。したがって、コンクリート内外の温度差を緩和することによりひび割れを制御することが可能である。以上より今回の対策は、ひび割れ抑制効果の程度・施工性・経済性・本工事での実現性を総合的に評価し、「保温養生によるひび割れ制御対策」を選定した。

対策の種類	対策の方法および目的	本構造物での適用性	評価
単位セメント量の低減	高性能AE減水剤などを用いて単位セメント量を低減し、水和熱を低減する。	経済性・施工性に優れるが、低減できるセメント量には限りがあるため、この対策のみで十分な効果を得ることは難しい。	×
打込み区画の変更	打込み区画の面積やリフト高さを小さくすることによって、コンクリート内部の温度を低減する。	各ロットの厚さを1m以下に分けて打設しなければ効果が得られないため、非現実的である。	×
パイプクーリングの実施	部材内部にφ25mm程度のパイプを配管し、打設後、配管内に水を流すことによって、部材内部の熱を排出する。	温度ひび割れを抑制する効果は大きいが、配管や送水設備が必要で、あり対策費が高く経済性に劣る。	△
保温養生の実施	部材内部が高温である期間中に、表面を保温し、部材内部と表面の温度差を緩和する。	内部拘束による部材内部の引張応力を緩和できる。養生期間を確保する必要があるため、工程の調整が必要となる。	◎

表-4 制御方法と適用性

(3)温度応力解析による効果の推定

保温養生を行った場合の解析結果を表-6 に示す。また、P11 における最小ひび割れ指数の分布を図-12 に示す。フーチングに関してはひび割れ指数が 1.03 であり、無対策時に 100%であったひび割れ発生確率が 46%に低下すると予測された。梁に関してはひび割れ指数が 1.28 と 1.00 を上回り、21%以下に低下すると予測された。

打設ロット		コンクリート温度[℃]		ひび割れ指数の最小値		
		最高温度	側面温度	①	②	③
P9	Lot-1	85.6	62.2	1.12	1.48	1.60
	Lot-2	71.6	38.1	1.95		
	Lot-3	69.9	48.9	1.30	1.52	
	Lot-4	78.7	59.9	1.89	1.77	
P10	Lot-1	76.6	52.5	1.07	1.45	1.38
	Lot-2	61.1	29.2	1.97		
	Lot-3	61.3	42.2	1.15	2.15	
	Lot-4	71.9	51.2	1.61	2.26	
P11	Lot-1	80.6	57.0	1.03	1.48	1.45
	Lot-2	64.7	32.1	1.15		
	Lot-3	62.5	30.2	1.14		
	Lot-4	62.0	44.4	1.09	1.66	
	Lot-5	73.3	56.4	1.28	1.43	

表-6 対策後の解析結果

(2)保温養生の実施方法

保温養生の実施方法を表-5、図-11 に示す。養生期間、断熱材に関しては、施工性および工程への影響と、ひび割れ制御効果が両立するよう、養生期間と断熱材をパラメータとし、温度応力解析によって決定をした。

部位	養生を行う面		養生期間（材齢）	養生材料	番号
フーチング*	側面		打設日　～　3　日	③ 25mm厚	①
			3　　～　14　日	③ ×2枚	
	天端面		打設日　～　14　日	③ ×1枚	②
脚柱部	側面		保温養生なし（通常の湿潤養生）		③
	天 端 面	P10-Lot2以外	保温養生なし（通常の湿潤養生）		③
		P10-Lot2	打設日　～　3　日	養生マット	④
張出部	側面		打設日　～　3　日	③ 40mm厚	⑤
	(既設端部から50cm)		3　　～　7　日	③ ×2枚	
	側面（上記以外）		保温養生なし（通常の湿潤養生）		③
	天端面		打設日　～　3　日	③ 40mm厚	⑥
			3　　～　7　日	③ ×2枚	

表-5 保温養生の実施方法 ③ スタイロフォーム, ② コンマット2号

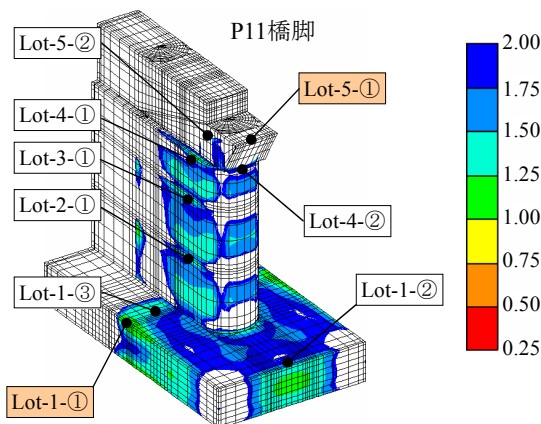


図-12 最小ひび割れ指数の分布(P11)

4. 保温養生の管理

(1) コンクリートの温度計測

解析結果に基づき、コンクリートの温度計測を行い、断熱効果の調整、保温養生材の終了時期の管理を行った。計測箇所は、コンクリート温度が最も高くなるフーチング中心部および梁の中心部と、内部拘束によるひび割れの発生が予測される表面部とした。(図-13 参照)

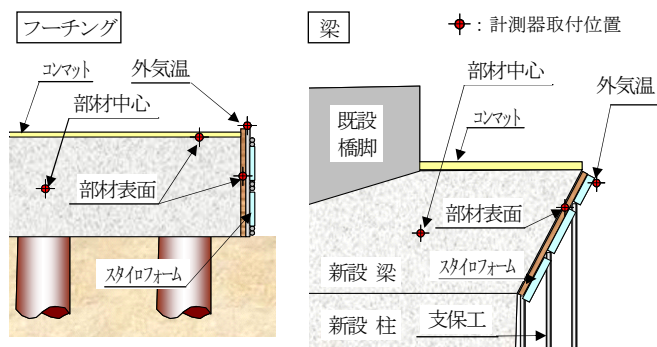


図-13 温度計測位置図

(2) 保温養生の管理方法

保温養生の管理は、温度計測値を用いて行った。温度の管理値（以後、「管理温度」と称する）は、温度応力解析結果を基に決定をした。

a) 管理温度の決定

管理温度は、温度上昇時の「部材内部と表面の温度差」および保温養生終了時の「内部温度と外気温の温度差」に着目して決定する。ここでは、図-14 に示す P 11 における解析結果を例に管理温度の決定方法を説明する。

温度上昇時では、部材内部と表面の温度差が大きくなり、表面におけるひび割れ指数が低下する。温度差がある値 T_1 を越えるとひび割れ指数が 1.0 を下回る。したがってこの温度差を T_1 以内に管理することにより、ひび割れを制御するものとする。以上より、内部温度から T_1 を引いた温度を管理温度①とした。

保温養生終了時では、コンクリートが外気にふれることにより表面温度が急激に低下する。この表面温度の低下 T_2 が大きいと、コンクリート内外の温度差が大きくなり、ひび割れ指数が低下する。したがって、保温終了時における温度低下を T_2 以内に管理することにより、ひび割れを制御するものとする。以上より、外気温に T_2 を足した温度を管理温度②とした。

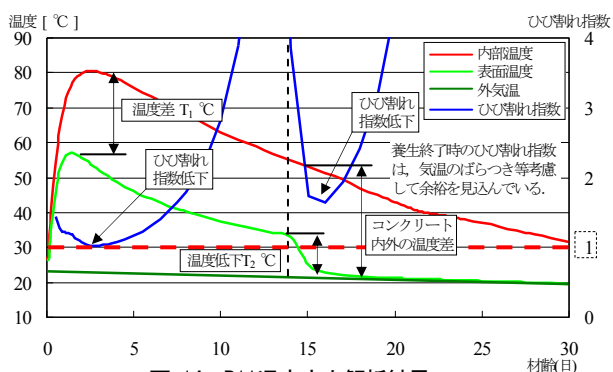


図-14 P11温度応力解析結果

b) 保温養生の管理

保温養生の管理は、表面温度が管理温度①を下回った場合は、養生材を追加し保温効果を高めるものとした。保温養生終了時期に関しては、表面温度が管理温度②を下回るまでとした。

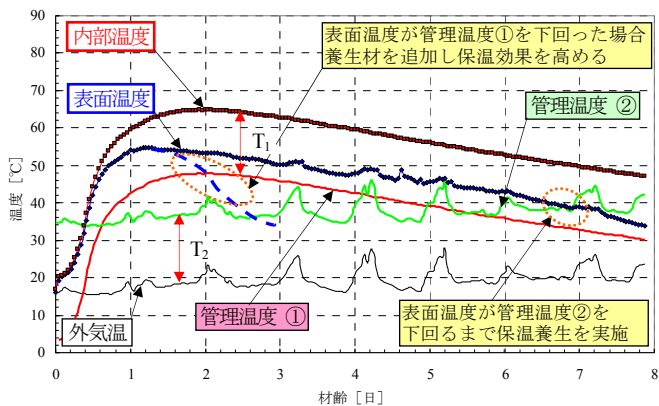


図-15 保温養生の管理図

(3) 保温養生状況

保温養生の状況を写真-1 に示す。側面に関しては、スチロフォームを型枠外部にはめ込むことにより保温効果を確保した。また、天端および脱枠後の側面に関しては、コンマツト2号を敷設することにより保温効果を確保した。

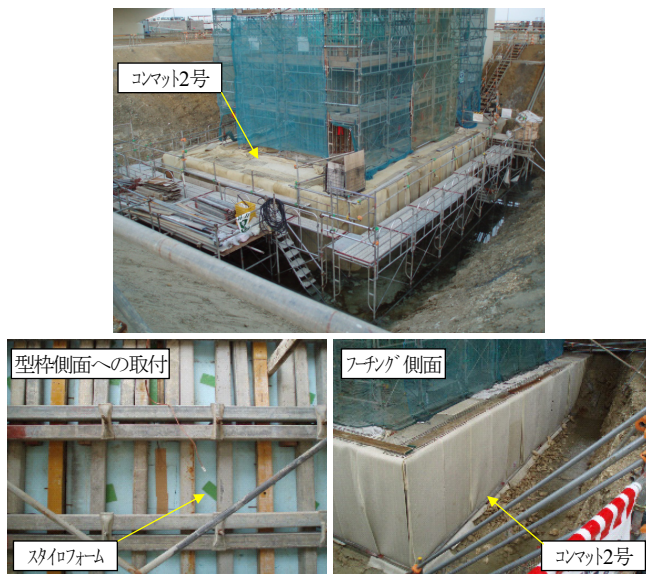


写真-1 保温養生の施工状況

(4) 完成時躯体のコンクリート

当初懸念されていた、打設初期に発生する内部拘束による温度ひび割れの発生は、いずれの橋脚においても認められなかった。本工事では、ひび割れの無い密実で高品質なコンクリート構造物を構築することができたものと考えられる。



写真-2 完成時の躯体 (P11)

5. まとめと有用性

マッシブな橋脚躯体に対する温度ひび割れ対策として、温度応力解析結果に基づく保温養生および温度計測管理を行った。今回得られた知見を以下に示す。

- (1) 橋脚躯体にひび割れが発生していないことから、内部拘束に対する温度ひび割れの制御対策として、保温養生は十分有効であることがわかった。
- (2) 温度応力解析におけるひび割れ指数を1.0以上確保することにより、内部拘束によるひび割れの発生を十分制御できることがわかった。
- (3) 保温養生に時に、躯体の温度計測管理を行うことで、確実なひび割れ制御が可能であることがわかった。

以上のことから、今回実施した解析から対策に至るまでの知見が、今後のマスコン対策において極めて有用性が高いことが分かった。また、ひび割れが起きた際の延命対策はもちろんのこと、設計や施工の段階での事前のひび割れ対策が重要且つ長寿命化の効果が高いことから、その観点からいっても今回の対策の有効性が分かる。

6. 今後の課題

今後の課題としては、「対策による効果の定量的な検証」が挙げられる。橋脚躯体にひび割れが発生していないことから、保温養生の効果は十分であったと推察される。しかし、ひび割れ指数の定量的な検証が行われておらず、養生期間および養生材が最も適切であったかの判断が難しい。今後は、ひずみや有効応力を計測するとともに、温度応力解析および保温養生効果の妥当性を定量的に検証し、解析精度を高めるとともに品質確保の向上に努めたい。

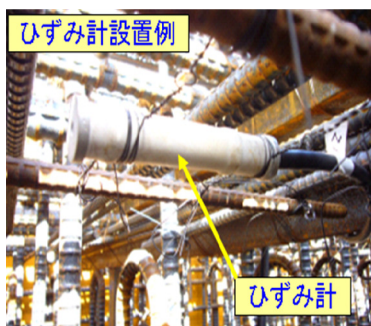


写真-3 ひずみ計設置例

7. おわりに

戦後から今までの約70年間に、復興からこんにちに至るまで、多くの社会資本整備・インフラ整備が行われてきた。そのなかでも、コンクリート構造物は約100億m³といわれており、国内でいたるところで建設され、日本の発展を支えてきた。

しかしながら現在、現存のコンクリート構造物に関しては、老朽化等による劣化のため、更新時期いわゆる補修の時期を迎えており、これらのコンクリート構造物をいかに長寿命化および維持管理していくかが課題となっている。

また、国際状況が変化するなか、沖縄ではアジアゲートウェイ構想の実現に向け、那覇港等の国際交流拠点整備が重点整備方針として挙げられているが、これらを実現していくにあたり、社会資本である道路橋脚等のコンクリート構造物の品質を確保することは非常に重要である。その中でもコンクリートのひび割れを制御することは、品質確保の上で最も重要な項目のひとつである。

今後も、品質が高く耐久性に優れた安定したコンクリート構造物を構築できるよう努力しく所存である。



写真-4 完成全景



写真-5 旅客船ターミナル全景

【参考文献】

マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
(社) 日本コンクリート工学協会