

報告 高性能軽量コンクリートを用いたPC橋の設計と施工

山崎 通人*1・柴田 泰行*2・中村 元*3・竹本 伸一*4

要旨：高性能軽量コンクリート（以下，H L コンクリートと称す）はP C 橋に使用される一般的なコンクリート（以下，普通コンクリートと称す）に比べ水セメント比が小さくセメント量が多いため，マッシブな部材のコンクリート温度が高温になると想定された。そこで，柱頭部実物大供試体の三次元熱応力解析においてH L コンクリート，普通コンクリートの比較を行った。さらにその結果を基に，H L コンクリートを使用しパイプクーリングを設置した実物大供試体を製作し，温度・ひび割れ状況の確認を行った。その後，実施工でのパイプクーリングの設置場所を決定するため，パイプクーリングを考慮した三次元熱応力解析を行った。

キーワード：高性能人工軽量骨材，高性能軽量コンクリート，三次元熱応力解析，実物大供試体

1. はじめに

本橋は，近年開発された高性能人工軽量骨材を用いたH L コンクリートを高速道路のP C 橋に使用して設計・施工された。

日本での軽量コンクリートの実用化は，天然軽量骨材を使用して始まり，1960 年代に品質が安定した人工軽量骨材の市販によって本格的に始まった。1967 年から 1970 年へかけて土木分野での軽量コンクリートの施工実績は年間約 50 件程度であったが，それ以降その使用実績は減少していった。その理由として，コンクリートのポンプ施工が急速に広がり，人工軽量骨材の吸水特性による閉塞トラブルが頻発しそれへの対応が遅れたことや，疲労耐久性など軽量コンクリートの経年変化への研究が不十分であったことが原因であった。

本橋で使用した高性能人工軽量骨材は，従来の人工軽量骨材に比べ吸水率が約 1/3，強度が約 2 倍になり，ポンプ圧送性や耐久性が大幅に改善され¹⁾ P C 橋へ使用されることになった。H L コンクリートの使用に当たっては，各種の試験・実験^{2) 3) 4) 5)} に基づき設計およびコンクリート配合の決定を行った。

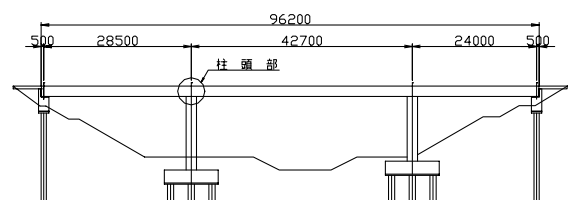


図-1 橋梁一般図

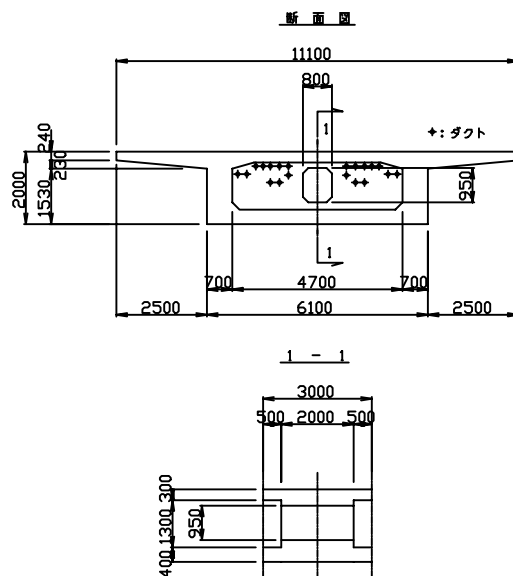


図-2 構造寸法図

2. 実物大供試体の三次元熱応力解析

2.1 柱頭部実物大供試体

本橋の橋梁一般図と柱頭部実物大供試体の構造寸法を図-1，-2 に示す。

*1 ドーピー建設工業(株) 設計部設計課課長 (正会員)

*2 日本道路公団北海道支社 長万部工事事務所工事長

*3 日本道路公団北海道支社 構造技術課課長代理

*4 ドーピー建設工業(株) 設計部部長 (正会員)

2.2 三次元熱応力解析の解析モデル

柱頭部実物大供試体を三次元熱応力解析するための解析モデルは、柱頭部の対称性を考慮し全体の1/4モデルとした。それを図-3に示す。

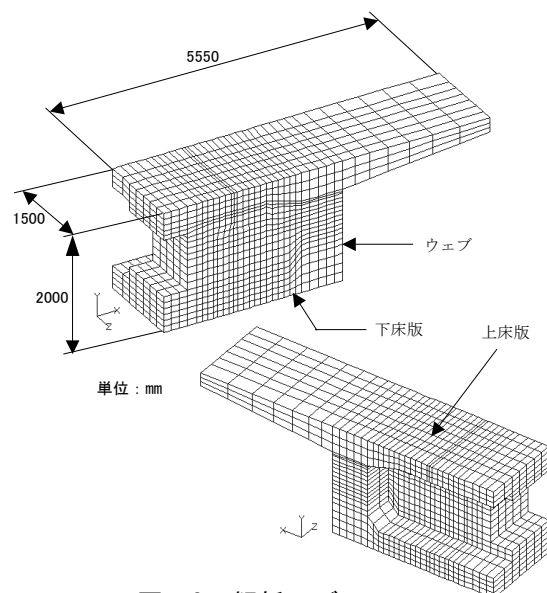


図-3 解析モデル

2.3 解析方法

解析方法は、汎用非線形構造解析システム FINAS を使用し、打設段階をシミュレートするため、熱伝達境界における熱伝達係数を材齢に応じて変化させた非定常熱伝導解析を行った後、応力解析の時点を決し初期基準温度を考慮して温度データを作成した。その手順を図-4に示す。熱応力解析における弾性係数は材齢に応じた有効弾性係数を使用した。

また、検討方法は、検討する材齢時に発生する

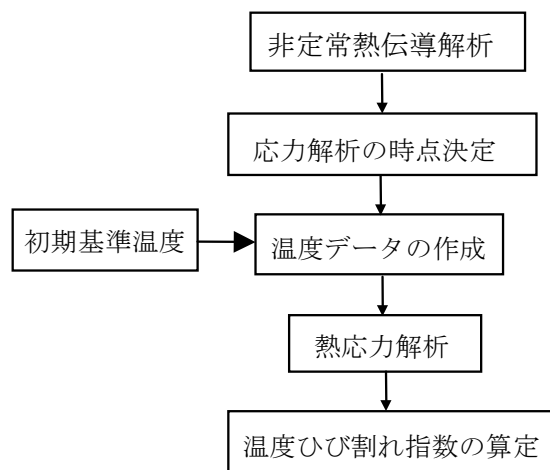


図-4 解析手順

発熱を考慮した非定常熱伝導解析および熱応力解析を実施し発熱による熱応力を求め、コンクリート標準示方書（施工編）⁶⁾における温度ひび割れ指数を算出した。

2.4 解析条件

発熱量は、断熱温度上昇と発熱の関係式より決定した。断熱温度上昇式決定の条件を表-1、図-5に示す。断熱温度上昇式と発熱量の式を式(1)・(2)に示す。

表-1 断熱温度上昇決定条件

	CASE-1	CASE-2
セメント種	普通ポルトランド	早強ポルトランド
水セメント比	38%	35%
打設温度 (°C)	20°C	20°C
Q_{∞}	75.4	86.0
r	1.51	1.77

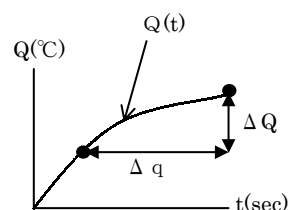


図-5 断熱温度上昇グラフ

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

$$Q = \rho \times C \times \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 $Q(t)$: 断熱温度上昇 (°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量

r : 温度上昇に関する定数

t : 材齢 (日)

Q : 発熱量 ($\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{sec}$)

ρ : 単位体積重量 (kg/m^3)

C : 比熱 ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)

ΔT : 温度増分 (°C)

Δt : 時間増分 (sec)

2.5 解析結果

普通コンクリート (CASE-1) の最高温度は打設時のコンクリート温度+約 70°C で 88.7°C, HL コンクリート (CASE-2) で打設時のコンクリート温度+約 80°C で 99.8°C となった。この解析結果から床版

横締め使用するプレグラウト鋼材（グラウト不要のポストテンション用樹脂積算温度硬化型PC鋼材）タイプを選定した。また，算出された温度履歴は柱頭部実物大試験の温度計測間隔の参考とした。解析結果を図-6に示す。

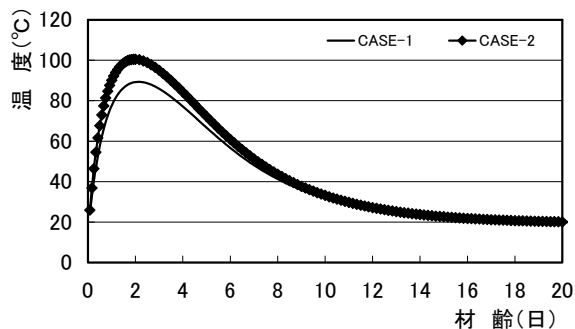


図-6 三次元熱応力解析温度履歴

温度ひび割れ指数はCASE-1，CASE-2ともにコンクリート打設1日後から「1」を下回る（温度ひび割れ発生確率50%以上）範囲が上床版・ウェブ・下床版に現れ，打設4日目まで発生していた。

3. 柱頭部実物大供試体試験

3.1 試験概要

本試験では，柱頭部マスコンクリート部材の初期ひび割れ等が発生しているか，いないかを目視確認，温度履歴の確認と解析値との比較，温度硬化型プレグラウト鋼材の使用性の確認を行った。さらに，コンクリート打設時には，ポンプ圧送性の確認を行い施工性についても検討した。また，事前の温度解析の結果，コンクリートの最高温度が100°C近くになることが予想されたので，高温となる位置にパイプクーリングを実施し高温部分の分散化を図った。

3.2 HLコンクリートの配合および使用材料

HLコンクリートの物性の目標値を表-4，使用材料および配合をそれぞれ表-5，-6に示す。

表-4 物性の目標値

項目	目標値
スランブフロー	55±5 cm
空気量	5.5±1.5 %
単位容積質量	1.85±0.05 t/m ³
設計基準強度	50 N/mm ²

表-5 使用材料

種類	物性および成分
早強セメント(C)	密度：3.14
粗骨材(ALS1.2)(G)	絶乾密度：1.21g/cm ³ ， 24h吸水率：2.2%，最大寸法：15mm
細骨材(S1)瀬棚産陸砂	表乾密度：2.59g/cm ³ ，FM：2.40
(S2)上磯産砕砂	表乾密度：2.65g/cm ³ ，FM：3.38
高性能AE減水剤(SP)	ポリカルボン酸エーテル系複合体
AE剤(AE)	アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤

3.3 供試体温度の計測

パイプクーリングの配置と温度計測位置を図-7に示す。温度の計測位置は，プレグラウト鋼材3本×3箇所，上床版×2箇所，高温予想位置×1箇所と外気温1箇所の計13箇所とした。

温度計測には熱電対を使用し，材齢28日まで計測を行った。計測間隔は，打設直後から3日までには1時間間隔，3日から8日までには2時間間隔，8日から28日までには12時間間隔とした。

3.4 パイプクーリング

(1) パイプクーリングの配管

配管は管理上，横桁のみの1系統とした。管延長は約24.3mと比較的短く，流入口と流出口の温度差が小さくなり，一様にコンクリートを冷却することができるかと判断した。クーリングパイプの配管に際しては，パイプの接合部から漏水が生じないように注意すると共に，コンクリート打設作業時にパイプに損傷を与えないように注意した。

(2) 冷却温水

冷却水の温度は低いほど効果的ではあるが，水温とコンクリート温度に著しい差を生じることになる。この場合，コンクリートはクーリング周辺

表-6 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m³)					SP (C×%)	AE (C×%)
			W	C	G	S1	S2		
35	50.8	5.5±1.5	165	472	375	580	254	1.35～1.45	0.0005

※ 軽量骨材は絶乾重量表記（軽量骨材の24h吸水量を予め単位水量に加算）

（現場配合では軽量骨材の24h吸水量(375kg/m³×2.2%=8.25kg/m³を予め単位水量に加算）

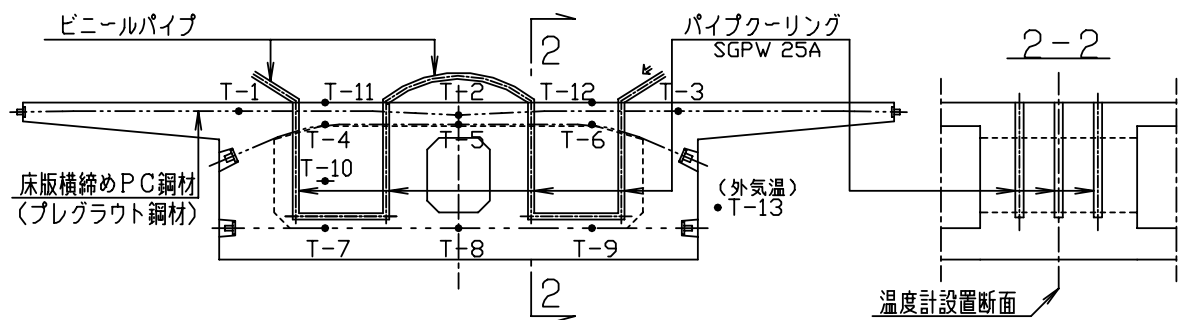


図-7 パイプクーリングと温度計測位置

と内部で急激な温度差を生じ、ひび割れ発生の原因となる。解析上コンクリート温度がかなり高温となることから、冷却水として常温水を使用しても十分冷却効果が期待できると考えられるので、冷却水として水道水を用いた。

(3) 冷却水の通水速度

パイプクーリングによって十分な冷却効果をあげるためには、基本的には冷却水の流れが乱流であることが必要である。これは冷却水の流れが層流であると、パイプ内壁での流速が壁面抵抗により極めて小さくなり、冷却水による熱の輸送量が少なくなるためである。このため、冷却水の流速が十分大きい乱流状態で冷却水を通水し、パイプ内壁の水が常に入れ替わるようにする必要がある。

今回は、過去の事例を参考に最大で 15L/min で通水可能なパイプクーリング設備を設置し、基本通水量を 10L/min とした。

3.5 試験結果

三次元熱応力解析では、コンクリート打設初期（打設 1 日後）にひび割れ指数が「1」を切る部分がかかなり見られたが、型枠脱型後の供試体状況を目視により確認したが、初期ひび割れは認められなかった。HL コンクリートの最高温度は 104.2℃ となり、打設時のコンクリート温度（平均 25℃）+ 約 80℃ と三次元熱応力解析値とほぼ等しくなった。温度履歴を図-8 に示す。

プレグラウト鋼材の使用性については、コンクリート打設、1 週間後・1 ヶ月後・2 ヶ月後に試験緊張を行い、伸びと圧力計の読みは計算通りの値を示した。

ポンプ圧送性の確認は、ポンプ圧送速度を 10～

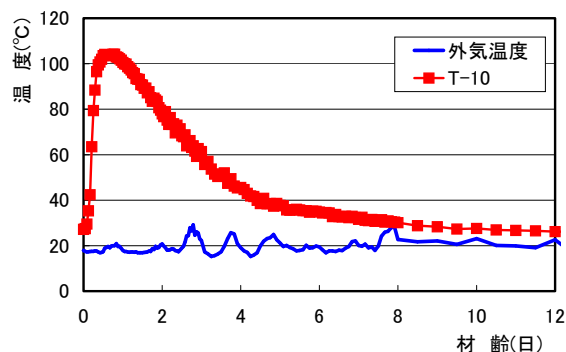


図-8 実物大供試体温度履歴 (1)

40m³/h に変化させて行った。圧送速度を早くした場合（30m³/h 以上）ポンプに強い負荷がかかる状況が見られた。

パイプクーリングについては、上床版面から 28cm における T-4 の最高温度と同高さにあるパイプ表面から 15cm の最高温度が、ほぼ同じであることから、局所的な温度低減には効果があるものの、パイプ周辺から 10cm 以上離れるとさほど効果は見られなかった（図-9 参照）。

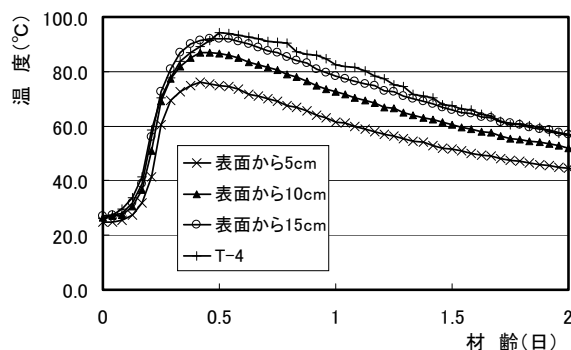


図-9 実物大供試体温度履歴 (2)

4. パイプクーリングの三次元熱応力解析

4.1 解析方法と解析条件

実物大供試体試験後、パイプクーリングを考慮した三次元熱応力解析を行った。解析方法と解析条件は事前に行った三次元熱応力解析を基本的に

表-7 断熱温度上昇決定条件

セメント種	早強ポルトランド
水セメント比	35%
打設温度 (°C)	20°C
Q_{∞}	86.0
r	6.0

表-8 施工工程と境界条件

工 程 部 位			打込み	脱型
作業日数	(日)		--	6
外 気 温	(°C)		実測値	実測値
地 盤	100	下面 接続	Acp	Aca
	101	側面 伝達	Acp	Aca
	102	上面 伝達	Acm	Aca

Aca: 直接外気との熱伝達 $14 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Acp: 側面合板を考慮した熱伝達 $8 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Acm: 養生マットを考慮した熱伝達 $5 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

使用した。しかし、断熱温度上昇を求める条件、施工工程と環境条件は実物大供試体試験結果を使用した。変更した条件を表-7, -8に示す。

4.2 パイプクーリングの解析

熱伝導解析で用いるパイプ～流体間の熱伝達係数(α_1)は、実物大供試体試験結果を使用し式(3)より算定した。

$$\alpha_1 = \alpha_2 \times \frac{A_2 \cdot (T_2 - T_3)}{A_1 \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3)$$

ここで、 A_1 : 管の表面積

A_2 : 管表面より5cmの表面積

α_1 : パイプ～流体間の熱伝達係数

α_2 : コンクリート5cm当りの等価熱伝達係数 $\alpha_2 = \lambda / 0.05 = 21.98 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

λ : 熱伝導係数=1.099

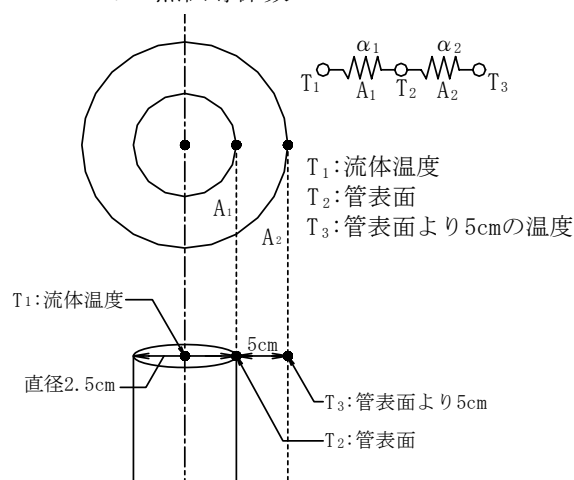


図-10 パイプクーリングモデル

算定方法は、図-10に示すように流体温度、パイプ表面温度およびパイプ表面から5cm位置での計測温度を用いて各時点の熱伝達係数を求め、外気温の変動が少ない6～60時間の平均値をパイプ～流体間の熱伝達係数とした。また、コンクリートの発熱・外気との熱伝達は、本算定モデルに与える影響が少ないと判断して考慮しなかった。

4.3 解析結果

HLコンクリートの実物大供試体試験と同じ位置での解析温度は、打設時のコンクリート温度+約80°Cで100.2°C、最高温度の発生時期もコンクリート打設1日後とほぼ試験結果と同じ温度履歴を得ることができた。また、パイプ表面から10cm位置での温度履歴は、解析と計測値が良く一致しており算定した熱伝達係数の妥当性が検証された。解析結果を図-11に示す。

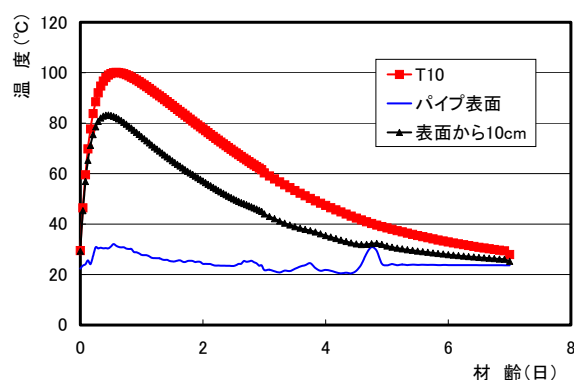


図-11 三次元熱応力解析温度履歴

温度ひび割れ指数はコンクリート打設0.5日後から「1」を下回る範囲が上床版・ウェブ・下床版の桁表面上に見られ、打設1.5日目まで発生していた。

5. 柱頭部施工

三次元熱応力解析と柱頭部実物大供試体試験の結果から、コンクリート温度はコンクリートの打設時温度に比例して高くなることが分かった。このため柱頭部の実施工では、打設時温度を下げるため以下の方法を実施した。

(1) 夜間打設

コンクリートの打設時温度は、外気温に影響されて変化する。そこで、現着時温度を低く保つた

め外気温が低く、温度変化の少ない夜間（打設時10月の気温約7℃から10℃）にコンクリートの打設を行った。また、事前に氷で冷却水を作りその冷却水とセメント、骨材を練り混ぜ、練り上がり温度を低下させた。

(2) パイプクーリングの増設

パイプクーリングの配置は、実物大供試体試験や三次元熱応力解析の結果から、パイプ周辺より効果が広範囲に及ばない結果が得られたため設置長を24.3mから6.2m増設し30.5mとした。増設したパイプは、断面中心部に橋軸方向へ向かって配置した。それを図-12に示す。

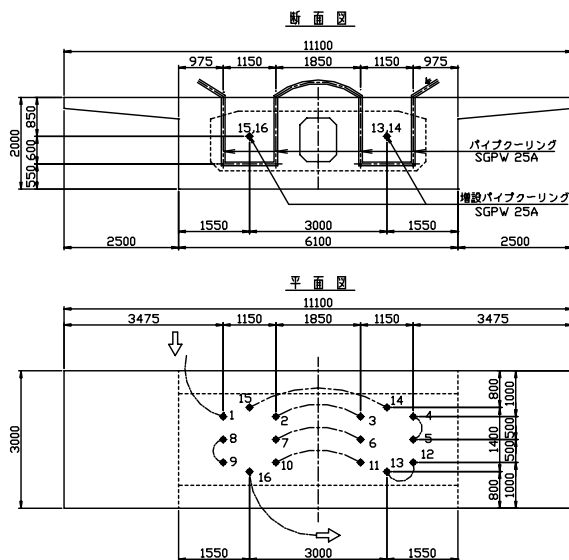


図-12 パイプクーリングの増設
(13・14・15・16)

以上の施工方法により、コンクリートの打設温度は18～20℃となり、柱頭部のコンクリート最高温度は86.0℃に押さえることが出来た。柱頭部施工のコンクリート温度を図-13に示す。

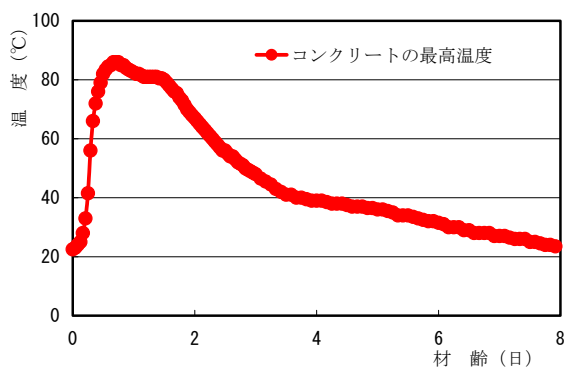


図-13 実施工柱頭部温度履歴

6. まとめ

- (1) HLコンクリートを用いたマスコンクリート部材の最高温度はコンクリートの打設時温度に影響され、その温度上昇は打設時温度+80℃であった。
- (2) 実物大供試体には初期ひび割れ等は発生しなかった。
- (3) HLコンクリートのパイプクーリングは局所的な温度低下に効果はあるが、パイプ周辺から10cm以上離れるとそれほど効果はなかった。
- (4) 三次元熱応力解析結果より得られた温度上昇量は、実物試験供試体および実施工時の温度上昇量にほぼ等しい結果となった。

参考文献

- 1) 石川雄康ほか：高性能軽量骨材の吸水特性がコンクリートのポンプ圧送に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21，No. 2，pp. 349-354，1999
- 2) 岡本享久ほか：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol. 37，No. 4，pp. 12-18，1999. 4
- 3) 濱田譲ほか：高性能軽量コンクリートを用いたPCはり部材のせん断耐力，第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 739-744，1999. 10
- 4) 田村聖ほか：高性能軽量コンクリートを用いたPC定着部の耐荷特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 3，pp. 871-876，2000
- 5) 佐藤裕也ほか：凍結融解作用を受ける軽量コンクリートの表層部の劣化評価，平成12年度土木学会北海道支部，第57号，pp. 886-889，2001. 2
- 6) コンクリート標準示方書(平成8年制定)施工編，土木学会，1996