

PC桁柱頭部における温度ひびわれ対策

大阪第一建設部 貝塚工事事務所 藤田哲夫
同 部 同 所 仲義史

要 約

多径間連続PC箱桁橋をディビダーク工法等のカンチレバー工法にて施工する場合、カンチレバー張出の前に、橋脚直上の橋体である柱頭部の施工を行う。柱頭部は、断面形状が複雑であること、鉄筋、PC鋼材が複雑に交錯することから、締固め等に配慮して、上下2回に分割してコンクリート打設を行なっている。第2層目のコンクリート打設時に、マスコンクリートとしての硬化熱や第1層目既設コンクリートの拘束による温度ひびわれの発生が懸念される。

本稿は、湾岸線（南伸部2期）二色の浜工区のPC桁柱頭部の施工にあたり実施した温度ひびわれ対策について報告するものである。まず、ひびわれ対策検討のため温度解析、温度応力解析を行い、対策方法の検討を行った。次に、現場条件、施工性、経済性、制御効果等を勘案し、実行可能なひびわれ対策としてコンクリート配合の変更、打設時のパイプクーリング等を実施した。その結果、温度計測結果などから温度ひびわれの制御効果が確認された。

キーワード：施工、対策、PC桁、温度ひびわれ、マスコンクリート、パイプクーリング、ディビダーク工法、FEM

まえがき

一般に、温度ひびわれは、マスコンクリートにおいて、セメントの水和熱に起因するコンクリート温度の上昇およびその後の冷却に伴う温度応力により発生するものである。温度応力は、コンクリートの熱変形の拘束により生じるもので、コンクリート外部からの拘束によるものと温度差による内部の拘束によるものがある。

多径間連続PC箱桁橋をディビダーク工法にてカンチレバー架設する場合、張出し施工の前に、橋脚直上の橋体である柱頭部をまず施工する。柱頭部は、二色の浜工区の場合、上下2回に分割してコンクリートを打設するが、第2層目（第2リフト）のコンクリート打設時に、第1層目（第1

リフト）既設コンクリートの拘束（外部拘束）による温度ひびわれや横桁とウェブの部材厚の差から発生する温度差（内部拘束）による温度ひびわれの発生が懸念される。

そこで、PC桁柱頭部の温度ひびわれ対策の検討が必要となった。温度ひびわれ制御については、当公団において下部構造物を対象に「マスコンクリートのひびわれ制御に関する設計・施工マニュアル」¹⁾が作成されているが、上部工については「別途の検討によること」とされている。

本稿では、二色の浜工区のPC桁柱頭部の施工にあたり検討、実施した温度ひびわれ対策についてパイプクーリングを中心に報告するものである。

1 温度ひびわれ対策の概要

大阪府貝塚市に位置する大阪府道高速湾岸線（南伸部2期）の二色の浜工区（約1.4km）においては、景観への配慮により全6橋の多径間連続PC箱桁橋を採用している。この一部の施工方法として、ワーゲンをを用いた場所打ち張出工法（ディバダーク工法）を用いている。

このうち、変断面形式の3径間連続PC箱桁橋2橋について、柱頭部の桁高が5.0m以上とかなり大型の構造物となることから、温度ひびわれ対策の検討対象とした。本稿では、図-1に示すP262～P265の3径間連続PC箱桁橋についてのひびわれ対策を詳述する。

PC桁の柱頭部は、箱桁内に横桁を有し、断面形状が複雑であること、支承等の補強鉄筋、仮固定工および本体工の鉄筋、PC鋼材が複雑に交錯することから、締固め等に配慮して、上下2回に分割してコンクリート打設を行なっている。

前述のように、第2リフトのコンクリート打設時に、横桁厚（2.5m）等部材が厚く、第1リフト既設コンクリートが拘束体となるため温度ひびわれ発生が懸念される。発生箇所は、図-1に示すように第2リフトのウェブ部分に打継目から斜め方向のひびわれ発生が予想される。

柱頭部の形状は、図-2に示すとおりであり、

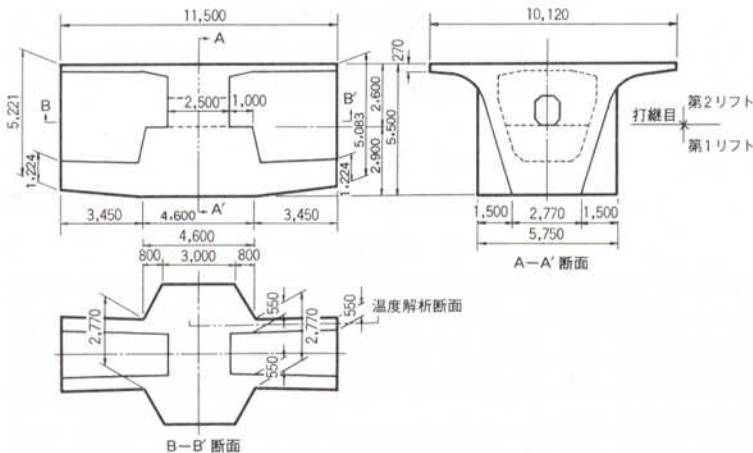


図-2 柱頭部 構造図

延長11.5m、幅員10.12m、桁高最大5.5m、中央部に横桁（厚さ2.5m）を有する複雑かつ大型のブロックである（写真-1）。

柱頭部の施工概要は、表-1のとおり夏期の打設であり、1回の打設量は100m³前後である。

温度ひびわれ対策の検討は、柱頭部施工前に図-

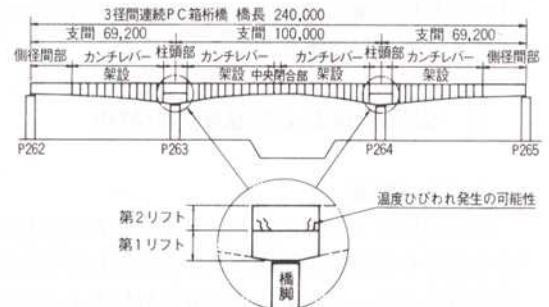


図-1 温度ひびわれ対策検討対象

表-1 柱頭部施工概要

橋脚	打設回	打設日	コンクリート種別	打設数量 (m ³)
P263	上り線	第1リフト	PH402B	112.5
		第2リフト	PN402B	102.0
	下り線	第1リフト	PH402B	117.0
		第2リフト	PN402B	96.5
P264	上り線	第1リフト	PH402B	110.0
		第2リフト	PN402B	103.5
	下り線	第1リフト	PH402B	110.0
		第2リフト	PN402B	103.5



写真-1 柱頭部施工状況

3に示す「公団マニュアル」¹⁾の検討フローに従って行った。まず、温度解析および温度応力解析により温度ひびわれ指数による評価を行った。本施工におけるひびわれ指数の基準値は、柱頭部が橋梁本体構造物であり、応力の集中する支点上であることから最もきびしい1.5以上と設定した。次に、制御対策の検討を行い、ひびわれ指数を満足するよう対策を実施することとした。

2 温度解析および温度応力解析

2-1 概要

前述の検討フローに従い、温度ひびわれ指数によるひびわれ発生の評価およびひびわれ対策の検討を行うため、FEMによる温度解析および温度応力解析を行った。

電算プログラムは日本コンクリート工学協会から公表されている「マスコンクリートの温度応力用パソコンプログラム集」を使用した。

温度解析は、2次元の三角形定ひずみ要素を用

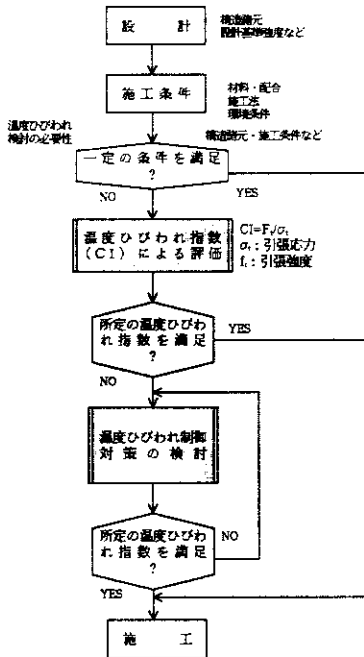


図-3 温度ひびわれ対策検討フロー

いて非常温度解析を行った。温度応力解析は、温度解析により求めた温度分布より2次元の平面ひずみ問題として主応力を求めた。

解析条件のコンクリートの材料定数等は「コンクリート標準示方書(施工編)」²⁾および「マスコンクリートのひびわれ制御指針」³⁾に基づいた。

2-2 解析ケース

解析の検討ケースとしては、表-2のとおり4ケースを設定した。

ケース1は、マスコンクリートを2層打設した場合で、第1、第2リフトの2部材で横桁とウェブの部材厚を考慮せず、モデルのキャリブレーションとして検討した。ケース2から4では、横桁(厚さ250cm)とウェブ(厚さ55cm)の部材厚の差を打設コンクリートの終局断熱温度上昇量の差により考慮して、第1リフトおよび第2リフトの横桁とウェブという3部材として、3次元の部材形状を反映させた。

終局断熱温度上昇量は、基本的には「コンクリート標準示方書」²⁾によっているが、ケース2と3の第2リフトのウェブについては、二色の浜工区(その2)PC桁工事の計測値を用いた。

ケース3により現設計でのひびわれ発生の評価をし、ケース2とケース3の比較によりセメント種別変更の対策の評価を行った。

ケース4は、P263上り線施工後に行ったものであり、実際の計測値を使用することにより、本施工で実施したひびわれ対策(パイプクーリング等)の効果を確認したものである。

2-3 解析モデル

解析断面は、ウェブにおけるひびわれ発生を検

表-2 解析検討ケース

	部材数	セメント種別	終局断熱温度上昇量	検討目的
ケース1	2部材	普通	文献2)による値(51.42℃)	マスコンクリートとしての2層打設の影響の検討
ケース2	3部材	普通	ウェブのみ計測値①(32.40℃)	ケース3との比較により、セメント種別変更の対策の評価
ケース3	3部材	早強	〃	現設計でのひびわれ発生の評価
ケース4	3部材	普通	ウェブのみ計測値②(46.08℃)	パイプクーリング等の全対策の効果の確認

注) 計測値①: 二色の浜工区(その2)PC桁工区での計測値、計測値②: 本施工P263上り線での計測値

討であることから、図-4のようにウェブ中心を橋軸方向に切った断面を設定し、要素数252、節点数150のFEM解析モデルを使用した。

2-4 解析結果

2-4-1 温度解析結果

ケース2（普通コンクリート）で温度解析結果をみると、材令2日の温度分布は図-5のようになり、断熱温度上昇量の差からウェブと横桁の内部温度差が部分的に15℃程度発生している。また、最高温度は横桁内部で約80℃となっている。

2-4-2 温度応力解析結果・ひびわれ指数

温度応力解析の結果としてひびわれ指数による評価を行うと、各要素のひびわれ指数は、図-6のように、ケース2、3ともに横桁付近のウェブ打継部において1.5以下となる。時系列からみると、図-7のケース2に示すように、材令2日までの間で1.5以下となることから、材令2日までの第2リフトの横桁付近ウェブ打継部において温度ひびわれ発生の可能性があることが確認された。

2-4-3 セメント種別変更の対策の評価

セメント種別変更のひびわれ対策をとった場合の評価として、ケース2（普通）とケース3（早強）をひびわれ指数で比較した。図-6に示すように、ケース2でひびわれ指数の改善がみられる。しかし、まだ多くの要素でひびわれ指数は1.5以下となっており、さらに何らかのひびわれ対策が必要と考えられる。

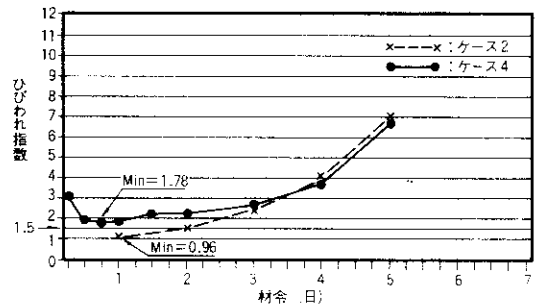


図-7 ひびわれ指数と材令の関係

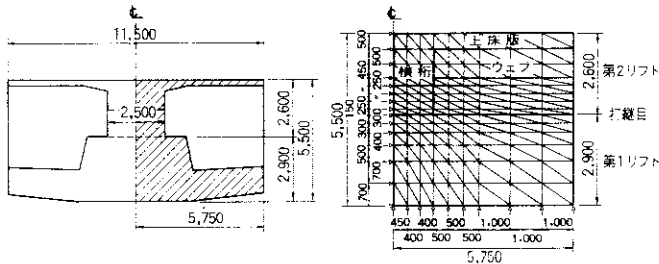


図-4 解析モデル

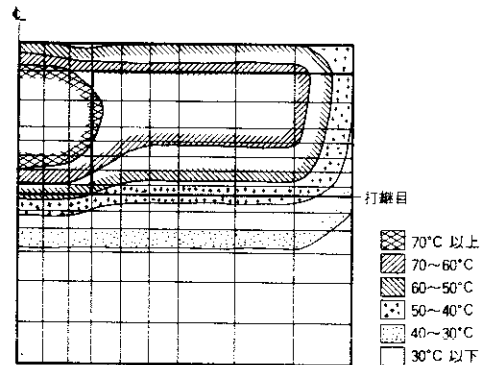


図-5 温度分布図（ケース2、材令2日）

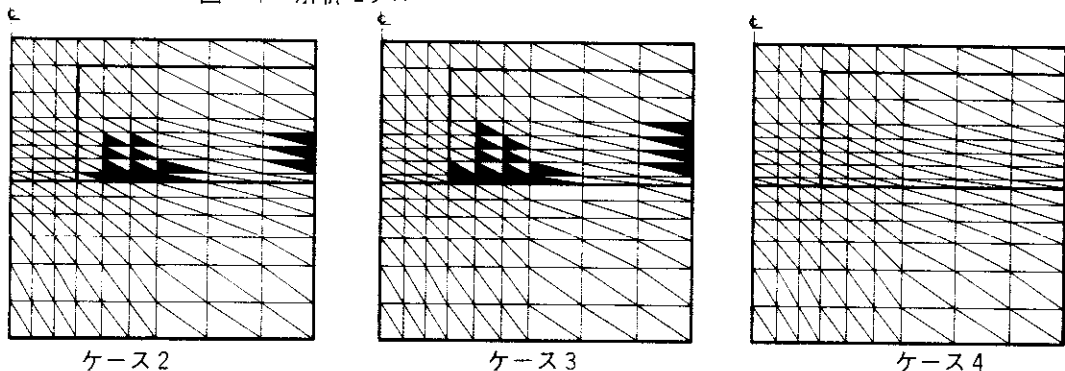


図-6 ひびわれ指数（ひびわれ指数1.5以下の要素を着色）

3 温度ひびわれ対策方法の検討

温度解析および温度応力解析の結果、施工上における温度ひびわれ制御対策の必要性が認められた。具体的な対策方法の選定は、まず一般的なひびわれ対策を列記し、その中から本施工に適用可能な対策方法を現場条件、構造物の条件、施工時期などの観点から選別していくこととした。その概要を表-3に示す。

以上の検討の結果、本施工の温度ひびわれ対策として、下記の4方法を採用することとした。

- (1) セメント種別の変更（早強から普通へ）
- (2) 早朝打設
- (3) 脱型時期の延長
- (4) パイプクーリング

4 温度ひびわれ対策の実施

4-1 セメント種別の変更

柱頭部第2リフトに打設するコンクリートについて、セメント種別を早強セメントから普通セメントに変更する対策である。これはセメント水和熱の発生を低減させ、断熱温度上昇量を抑え、温度応力を緩和することにより、ひびわれ発生を抑制する方法である。

一般に、早強セメントを使用した場合、断熱温度上昇量は当然高くなるが、一方、コンクリート自体の強度発現も早いと見做すことができ、一概には温度ひびわれ対策上不利とは言えない。そこで、温度解析により比較した結果、普通セメントへ変更した場合にひびわれ指数の改善がみられた。

表-3 温度ひびわれ対策方法検討表

温度ひびわれ対策方法			対策方法の採否	
対策方針	対策方法	具体的な方法	採否	採否理由
①コンクリートの配合	水和熱の低減 混和剤の使用 単位セメント量の調整	普通セメントの使用	採用	対応可能 PC桁での使用実績がない 生コンプラントの対応が困難
		膨張材の使用	×	
			×	
②コンクリートの冷却	ブレクーリング 打設温度の低下 ポストクーリング	骨材等の冷却	×	生コンプラントの対応が困難 地元条件の範囲内で可能 効果的であり、対応可能
		早朝打設	採用	
		パイプクーリング	採用	
③コンクリートの加温	ヒーティング	旧コンクリートの加温	×	施工時期(夏期)から効果が少ない
④コンクリートの打設	材令差の短縮 多層打設	第1,第2リフト打設間隔の短縮	×	工程上から不可能 施工上、美観上から好ましくない 〃
		新コンクリートの二層打ち	×	
		横桁等の後打ち	×	
⑤脱型	標準脱型	材令7日での脱型	採用	工程的な問題はあるが、対応可能
⑥早期プレストレス			×	解析データ不足のため対応困難
⑦補強筋の配置		ひびわれ制御鉄筋	×	多量の鉄筋となり、施工困難

表-4 コンクリート配合表

項目 種別	セメント 種類	呼び強度 (kg/cm ²)	最大粗骨 材寸法	スランプ (cm)	空 気 量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細 骨 材 (kg/m ³)	粗 骨 材 (kg/m ³)	混 和 剤 (kg/m ³)
早強コンクリート (PH402B)	H	400	20	8	4	35.0	32.4	177	506	516	1092	1.265
普通コンクリート (PN402B)	N	400	20	8	4	38.4	36.5	173	451	604	1063	1.128

これより表-4のとおりコンクリート配合を変更し、第2リフトに普通コンクリートを打設した。なお、普通セメントへの種別変更によりアルカリ総量が基準値を越えたため、単位セメント量の変更も行った。

4-2 早朝打設

コンクリート温度を抑制するために、比較的外気温の低い時間帯にコンクリート打設する方法である。本施工では、地元条件から早朝作業は不可能なため、可能な範囲で早い時間（午前8時30分頃）からコンクリート打設を開始し、できるだけ午前中に打設完了するよう配慮した。

4-3 脱型時期の延長

コンクリート内部の温度が外気の影響により急に低下するのを防ぐため、型枠の脱型時期を延長することにより温度ひびわれを抑制する方法である。通常であればプレストレス導入時（打設後3、4日）に脱型するものを最低7日は型枠を設置したままとした。

4-4 パイプクーリング

パイプクーリングは、コンクリート打設前に構造物内部に敷設したクーリングパイプに、コンクリート打設開始後冷却水を循環させ、セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇、その後の温度変化を抑制して、コンクリートに発生する温度応力を低下させるために行う温度制御の方法である。現在までの実施例は、そのほとんどがコンクリートダムにおいてであるが、最近の土木構造物の大規模化に伴い、マスコンクリートにおける温度制御法として採用される傾向にある。

本施工については、橋梁本体構造物であり、柱頭部という応力の集中する部位であること、富配合のコンクリートを使用するPC構造物であることなどから、温度制御対策として効果的と考えられるパイプクーリングを実施することとした。

5 パイプクーリングの実施

5-1 パイプクーリングの計画

5-1-1 クーリングパイプの配置

クーリングパイプの配置は、図-8に示すように、ウェブに左右1系統ずつで2系統、横桁に1系統の全3系統である。一般に、クーリングパイプ1系統の有効長は、300m程度とされているが、本施工での管延長はウェブで約70m、横桁で約40mと比較的短いため、流入口と流出口の温度差が小さくなり、一様な冷却が可能である。

クーリングパイプ配置間隔は、冷却速度を大きくするために、基本ピッチを50cmとし、シース配管、鉄筋等を考慮して決定した。

クーリングパイプの径は、冷却効果および管内摩擦抵抗の大きさによって決定されるが、その影響は比較的小さいことから径25mmの薄肉電線鋼管を使用した。なお、パイプクーリング後はグラウト注入により閉塞している。

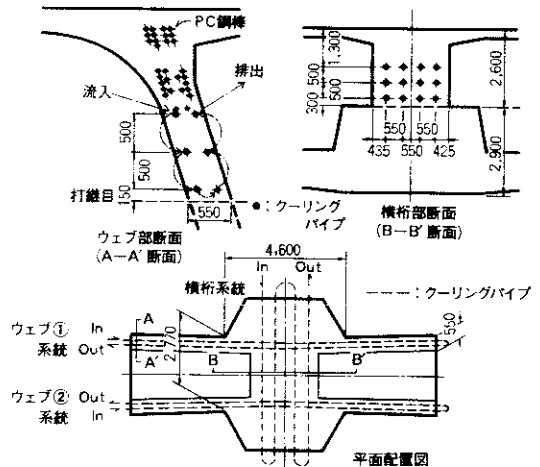


図-8 クーリングパイプ配置図

5-1-2 冷却水の水温

冷却水の温度は低いほど効果的であるが、水温とコンクリート温度に著しい温度差がある場合、パイプ周辺でのひびわれ発生の原因となる。

本施工では、夏期施工のためコンクリート打設時の温度が25℃を越える可能性があり、コンクリートの最高温度が80℃に達すると予想される。この

ため、冷却水として常温水（25℃程度）を用いても十分冷却効果はあるものと考えられることから、工業用水道水を直接使用することとした。

5-1-3 冷却水の通水量

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きわめて小さくなり、冷却水による熱の輸送量が少なくなる。パイプクーリングにより十分な冷却効果をあげるためには、パイプ内壁の水が常に入れ代わるように冷却水の流速が十分大きい乱流状態で通水する必要がある。

乱流条件をレイノルズ数から算定すると、流量が4.7ℓ/分以上となり、従来のコンクリートダムでの実績が13～16ℓ/分であることから、本施工では、最大15ℓ/分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/分とした。

5-2 パイプクーリングの管理

5-2-1 管理の概要

パイプクーリングの実施にあたっては、コンクリート内部の温度変化を把握し、冷却効果を確認するとともに冷却作業の調整を行うため、コンクリート温度の計測、管理の必要がある。

本施工においては、コンクリート内部に熱電対を埋設し、打設直後からコンクリート温度を測定した。通水時間の決定および通水量の調整等のクーリングの管理は、温度計測結果をもとに図-9に示す管理フローに従って行った。また、ウェブと横桁では、部材厚、境界条件等の違いにより、コンクリート最高温度や最高温度に達する材令が異なることから、ウェブ、横桁についてそれぞれ別々に管理を行った。

5-2-2 温度計測

温度計測は、K型熱電対およびデジタル温度測定器によって、コンクリート打設開始時から材令7日まで行った。パイプ周辺のコンクリート温度および全体の温度分布の計測のための測定点として、熱電対をウェブ20点、横桁22点を設置した。これに、外気温、流入口、流出口の冷却水温を含めて全47点で温度計測を行った。

5-2-3 クーリングの管理

クーリングの管理は、コンクリートが最高温度

に達した後もクーリングを継続したり、過度のクーリングによりパイプ周辺での急激な温度差が生じたりした場合、ひびわれ発生の原因となることから重要な作業である。本施工での管理は、図-9に示すフローに基づき冷却水温、通水量、コンクリート温度上昇率をパラメータとして行った。

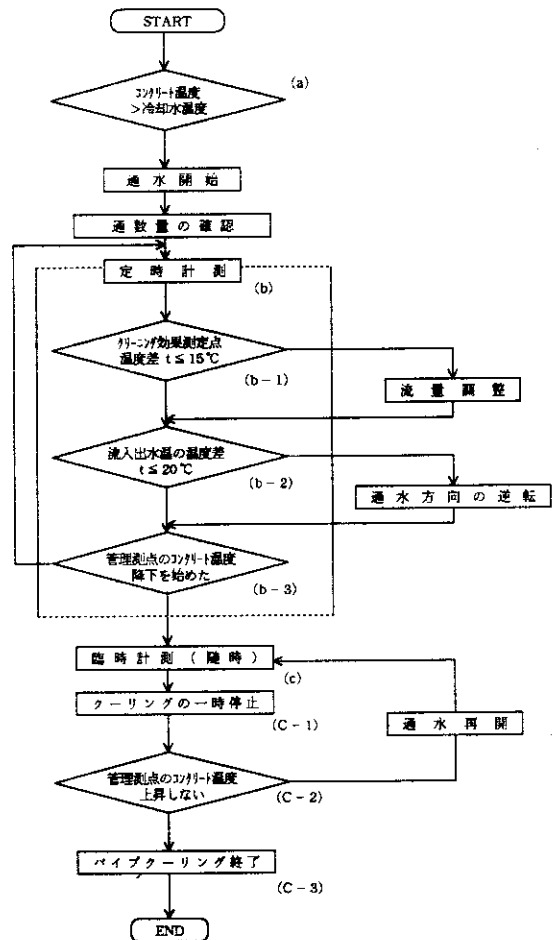


図-9 パイプクーリング管理フロー

以下、フローに従って管理方法を述べる。

(a) 冷却水の通水開始

コンクリート打設時に冷却水温がコンクリート温度より低いことを確認して通水を開始する。

(b) 定時計測

2時間ごとにコンクリート温度、冷却水温、通水量等を計測し、下記の項目を検討する。

(b-1) クーリング効果の確認

パイプ周辺での急激な温度差が生じないように、パイプ周辺測点とパイプ間中間測点とのコンクリート温度差が15℃を越えた場合、通水量を小さくし、パイプ周辺と内部の温度勾配を小さくする。逆に、温度差が小さい場合は、通水量を大きくする。

(b-2) 冷却水温差による通水方向の管理

冷却水の流入口と流出口での温度差が大きくなった場合、一様にコンクリートを冷却できなくなる。そこで両者の温度差が20℃を越えた場合、各定時計測時に冷却水の通水方向を逆転させる。

(b-3) コンクリート最高温度の管理

コンクリートが最高温度になった時点でクーリングを停止しないと、パイプ周辺に引張応力の発生が予想される。そこで管理測点のコンクリートが最高温度に達し、降下し始めているのが確認されたら臨時計測を行う。

(c) 臨時計測

(c-1) 通水停止

コンクリート温度が降下し始めたら、通水を一時中止するか通水量を極端に小さくする。

(c-2) コンクリート温度上昇の確認

通水一時中止によりコンクリート温度が上昇するならば、通水を再開する。

(c-3) クーリング停止

通水停止、再開を繰り返し、通水を中止した状態でコンクリート温度が降下するならばクーリングを停止する。

5-3 パイプクーリングの管理結果

5-3-1 管理結果の概要

パイプクーリングは、柱頭部4カ所すべてで行っているが、P263上り線の管理結果を例に述べる。P263上り線打設概要は下記のとおりである。

- ・コンクリート打設日 (柱頭部第2リフト)
平成 3年 7月31日 8:30~12:00
- ・コンクリート打設温度 32℃
- ・クーリング期間

ウェブ 7月31日 15:00~8月1日 12:00

横桁 7月31日 15:00~8月1日 12:00

定時計測は、コンクリート打設当日の12:00 から2時間ごとに行った。また、自動温度計測は1時間ごとに行った。

5-3-2 ウェブの管理結果

温度計測結果を図-10に示す。計測開始12時間後、下側管理測点の温度が下降し始め、13時間後通水量制限を行い、17時間後最下段、中段の通水を停止、22時間後上側管理測点の温度も降下し始めたため、24時間後通水を停止した。

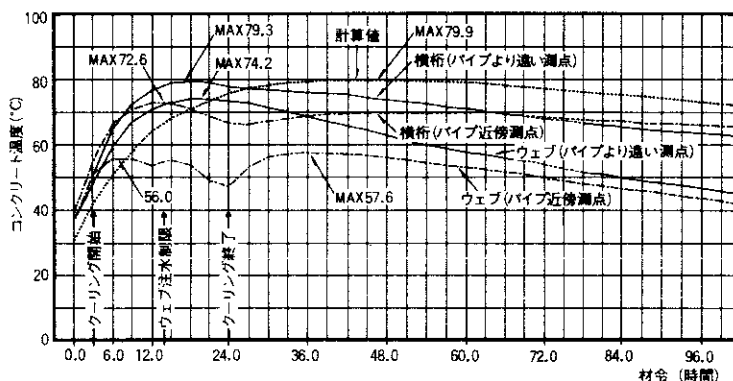


図-10 温度計測結果 (P263上り線)

コンクリート最高温度は、打設後20時間で74.2℃とほぼ計算値と合致している。

5-3-3 横桁の管理結果

計測開始14時間後、下側管理測点の温度が下降し始め、17時間後最下段の通水を停止、20時間後上側管理測点の温度も降下し始めたため、24時間後通水を停止した。

コンクリート最高温度は、打設後18～19時間で79.3℃とほぼ計算値と合致している。

6 温度ひびわれ対策の結果

6-1 温度計測からみた結果

温度計測の結果より、直接ひびわれ制御に対する明確な効果は把握できないが、図-10よりクーリングパイプ付近の測点のほうが遠い測点（クーリングの影響の少ない点）と比較して温度上昇量が小さいことなどから、コンクリート内部の温度上昇の制御効果は確認された。このことから温度ひびわれ抑制にも効果があったと推定される。

6-2 ひびわれ発生状況からみた結果

本施工での温度ひびわれ対策の効果を確認するため、ひびわれ調査を実施した。その結果、P263では箱桁内面に0.08～0.15mm程度の小規模なひびわれが数カ所確認されたが、プレストレスの導入に伴い消滅した。また、P264ではひびわれの発生が確認されなかった。

6-3 ひびわれ指数からみた結果

温度解析で述べたように、パイプクーリング等を含めた本施工でのひびわれ対策を評価するため、ケース4として実測データによりシミュレーションした。この解析結果によれば、図-6、図-7のケース4に示すように、ウェブ打継部でもひびわれ指数1.5以下の要素はなく、時系列でも最小値は1.78であり1.5以下とはならない。

これからみても、パイプクーリングを中心とした温度ひびわれ対策により、効果的な温度ひびわれ制御ができたものと考えられる。

なお、ひびわれ対策としてではないが、結果的に

単位セメント量の低減を行っており、これもひびわれ抑制に有効であったと考えられる。

あとがき

本稿では、P C桁柱頭部における温度ひびわれ対策の施工例としてパイプクーリングを中心とした対策を紹介したが、今後、同様の施工を行うに際しては、その建造物の規模、形状、施工条件、環境条件等考慮のうえ最適なひびわれ対策を選定していくべきと考えられる。

最後に、本論文をまとめるにあたりご協力いただいたドービー建設工業株式会社 樋上登志夫氏をはじめ二色の浜工区（その3）P C桁工事 ドービー・極東建設工事共同企業体関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：マスコンクリートのひびわれ制御に関する設計・施工マニュアル 平成2年6月
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）昭和61年版
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針 昭和61年3月