

空冷および水冷による PC 橋はり部のマスコンクリート対策

笹倉 伸晃・舟橋 政司・東福 忠彦*¹・清水 大輔*¹

An Applying of Combined Cooling Methods using Air and Water to the Mass Concrete of Prestressed Concrete Bridge

Nobuaki SASAKURA, Masashi FUNAHASHI, Tadahiko TOUFUKU, Daisuke SHIMIZU

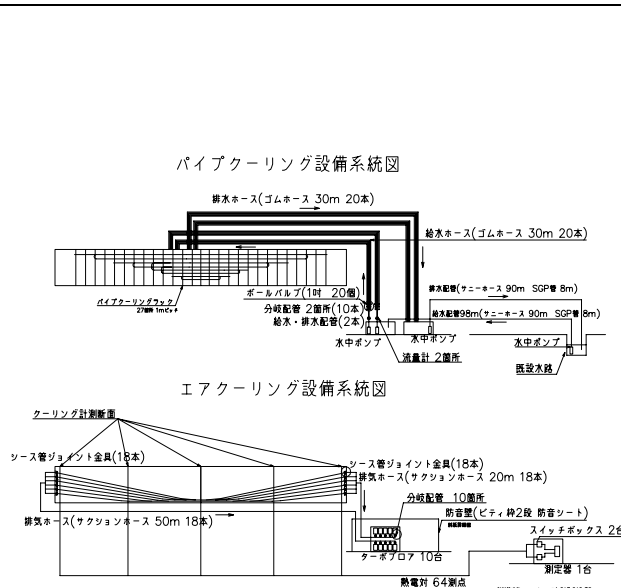


図-1 クーリング設備配置図

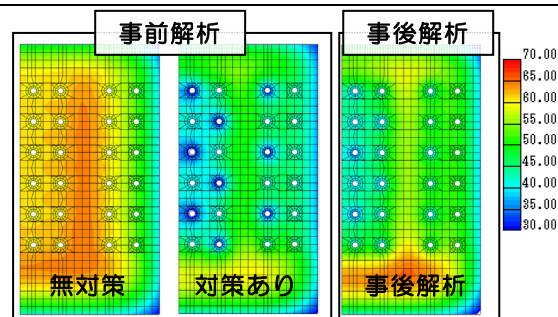


図-2 温度分布 (1-1 断面: 打設 1.5 日後)

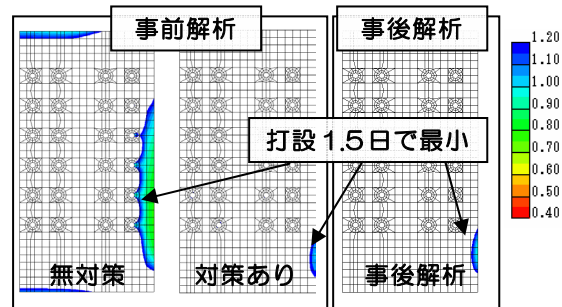


図-3 最小ひび割れ指数分布 (1-1 断面)

研究の目的

北陸新幹線(糸・黒)新黒部 StBL の 2 径間連続 PC 箱桁工事におけるマスコンクリート対策として、事前解析によりポストクーリングを検討し、クーリングパイプ等の配置および条件を決定して、空冷と水冷を併用したクーリング対策を本施工に適用した。加えて、温度ひび割れ制御効果を確認した。

技術の説明

対象構造物のポストクーリングは、シース管に冷却媒体として空気を通すエアパイプクーリングの効果を検討した。また、シース管を利用できない断面については、通水によるパイプクーリングの効果を検討し、クーリングパイプの配置および条件を決定した。(図-1 参照)

本施工では、事前解析結果に基づいた計測管理を行った結果、クーリング条件に関する実測値が得られたとともに、内部拘束型のひび割れの発生を防止することが出来た。また、事前解析と実測値を用いた事後解析を比較すると、最小ひび割れ指数分布は事前解析とほぼ同様であり(図-2,図-3 参照)、実施工でひび割れが認められなかったことと対応している。

主な結論

PC はりのマスコンクリート対策としてシースクーリングおよびパイプクーリングを併用する方法を採用し結果、クーリング条件に実測結果と事前解析条件に多少の差は認められたものの、構造物にひび割れは発生しなかった。今後、この実測値を事前解析に反映することにより、より精度の高いひび割れ制御予測が可能となるものと考えられる。

* 1 前田・東鉄・竹沢共同企業体 新黒部高架橋作業所

空冷および水冷によるPC橋はり部のマスコンクリート対策

笹倉 伸晃

舟橋 政司

東福 忠彦^{*1}清水 大輔^{*1}

要 旨

北陸新幹線（糸・黒）新黒部StBLの2径間連続PC箱桁工事におけるPC横はりのマスコンクリート対策として、2次元有限要素法を用いた非定常熱伝導解析および応力解析を行い、シース管を利用したエアパイプクーリング（空冷）の効果を検討した。また、シース管を利用できない断面については、通水によるパイプクーリング（水冷）の効果を検討し、クーリングパイプの配置および条件を決定して、2つを併用したクーリング対策を本施工に適用した。本施工では、事前解析結果に基づいた計測管理を行った結果、クーリング条件に関する実測値が得られたとともに、内部拘束型のひび割れの発生を防止することが出来た。

キーワード PC構造物／温度応力／パイプクーリング／エアパイプクーリング

目 次

- | | |
|--------------|------------|
| 1. はじめに | 4. 実施工への適用 |
| 2. 構造物の概要 | 5. 計測結果 |
| 3. 事前解析による検討 | 6. まとめ |

AN APPLYING OF COMBINED COOLING METHODS USING AIR AND WATER TO THE MASS CONCRETE OF PRESTRESSED CONCRETE BRIDGE

Nobuaki SASAKURA
Tadahiko TOUFUKU

Masashi FUNAHASHI
Daisuke SHIMIZU

Synopsis:

Prior analyses of applying of combined cooling methods, which are air cooling method with using sheath pipe and water cooling method with using pipe, to the mass concrete of prestressed concrete bridge were carried out. The arrangement of cooling pipes and cooling conditions were decided by the results of prior analyses and those were applied to the construction of prestressed concrete bridge. As a result, the crack of concrete was prevented.

* 1 前田・東鉄・竹沢共同企業体 新黒部高架橋作業所

1. はじめに

部材断面の大きいマスコンクリート構造物では、一般にセメントの水和熱に起因する温度ひび割れが生じやすいため、ひび割れに関する照査を行い、有害なひび割れを発生させないことが原則となっている¹⁾。北陸新幹線（糸・黒）新黒部 StBL の 2 径間連続 PC 箱桁工事（写真-1 参照）における橋脚はり部は、断面が 3.5×3.6m と大きく、延長が 30.0m のマッシブな PC はり構造である。したがって、ひび割れに関する照査を行い、ひび割れ抑制対策を検討するものとした。

対象構造物において温度応力が発生するメカニズムとしては、内部拘束作用によるものが卓越すると考えられた。内部拘束による温度ひび割れの制御対策としては、次の 2 つがある。①内部温度を下げて表面との温度差を小さくする。②表面からの放熱を抑えて内部との温度差を小さくする。また、①には、使用するセメントの種類の変更や単位セメント量の低減など、材料や配合によるものやコンクリートのプレクーリング、打込み後のコンクリート温度を下げるパイプクーリングなどのポストクーリングの方法がある。

対象構造物の設計段階でのセメントの仕様は早強ポルトランドセメントであり、事前解析は、当初計画の配合、施工条件で行った。その結果、打込み後のコンクリート温度上昇量を低下させるために、セメントの仕様を普通ポルトランドセメントに変更し、加えてポストクーリングを検討するものとした。

ポストクーリングでは、シース管に冷却媒体として空気を通すエアパイプクーリングの効果を検討した。また、シース管を利用できない断面については、通水によるパイプクーリングの効果を検討し、クーリングパイプの配

置および条件を決定して、2 つを併用したクーリング対策を本施工に適用して PC 構造物を構築した。

本報告は、パイプクーリングおよびシースクーリングによる温度ひび割れ制御の解析的検討と、実施工での温度計測および施工結果について報告するものである。



写真-1 対象構造物（断面方向）

2. 構造物の概要

対象構造物は、平成 16 年 10 月に打設された C2bp1 横はりである。対象構造物の横はり、PC 構造であり、横はりの寸法は、長さが 30.0m、断面が 3.5m×3.6m、断面内に $\phi 75\text{mm}$ の PC 鋼線シース管が 48 本設置される。図-1 にはりの側面図を示す。また、コンクリートの配合を表-1 に示す。使用するセメントは、普通ポルトランドセメントであり、単位セメント量は 388kg/m^3 である。また、型枠には化粧合板を使用した。

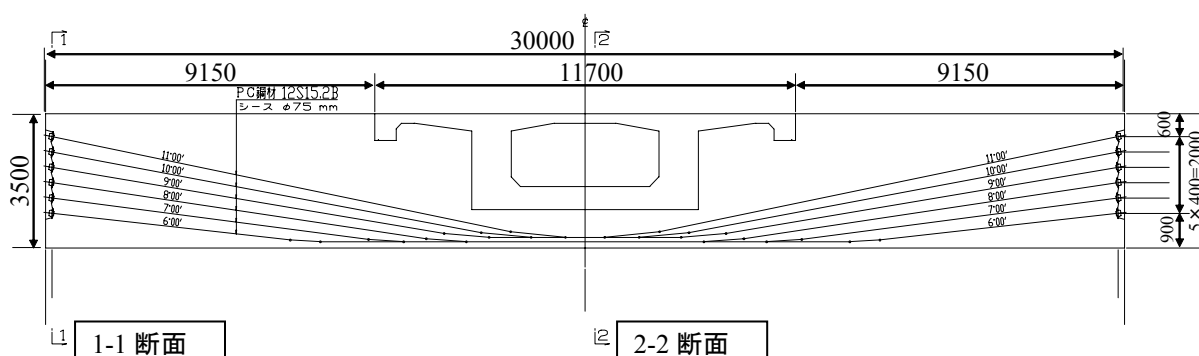


図-1 構造物の概要

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
普通	40	25	12	41.5	42.8	161	388	758	1037	1.552

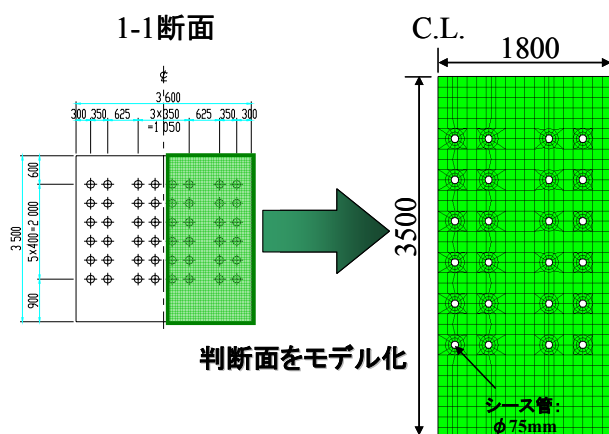


図-2 1-1 断面解析モデル

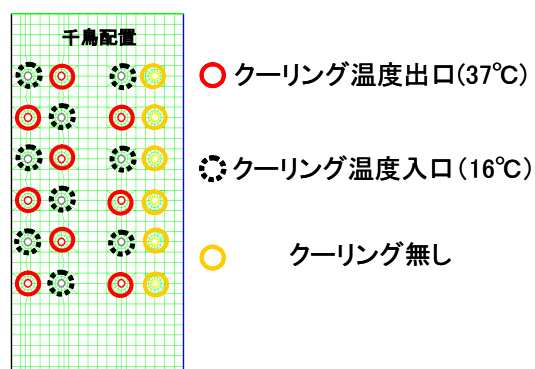


図-3 1-1 断面シースクーリング概要

3. 事前解析によるクーリング効果の検討

事前解析におけるひび割れ検討は、2次元有限要素法を用いた非定常熱伝導解析および応力解析を行い、ひび割れ指数を算出して評価を行った。

解析より得られたひび割れ指数を判定するにあたり、まず許容されるひび割れ指数を決定する必要がある。発生が予想される内部拘束型のひび割れは、表面部分にとどまるため、耐久性上問題となる許容ひび割れ幅を超えるレベルの大きさでなければ、構造的に有害とはならない。また、ひび割れの発生を防止するためには、過大な対策設備が必要になると考えられることから、ひび割れ指数 1.0 以上を目標値として設定した。

3.1 シースクーリング条件

シースクーリング条件の設定で対象とした断面は、1-1 断面である。解析モデルを図-2 に示す。

構造物は左右対称であるため、温度解析は半断面を対象とし、構造体中心線は全て断熱境界とした。また、シースクーリングは、一方からのみの送風とすると、入口と出口ではシースクーリングの効果に差が生じると考えられる。そこで、PC はりの両端から同じ本数だけ同じ風速を与え、内部の温度勾配を平均化する方法とした。クーリング配置を図-3 に示す。クーリング条件は、文献 2) を参考として、対流境界条件として与えた。また、シースクーリングの風速は 15m/s とし、送風温度は、千鳥配置での送風を考慮し、入口側では外気温とし、出口側では外気温+21℃ (文献 2) の実測値) とした。解析条件を表-2 に示す。

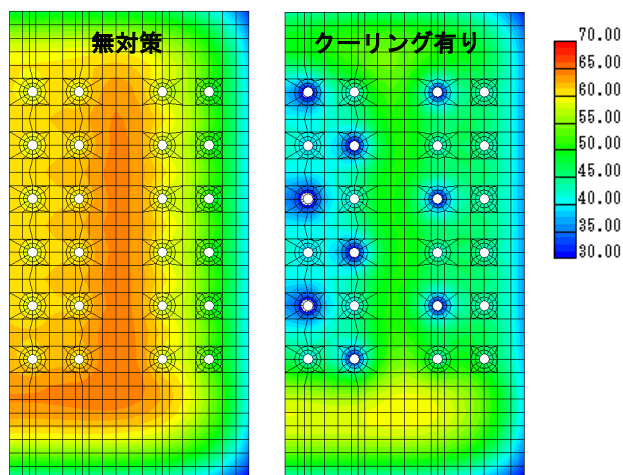
3.2 シースクーリングの効果

1-1 断面におけるシースクーリングの有無による PC はり断面内の温度および最小ひび割れ指数の分布を図-4 に示す。なお、無対策時におけるシース管の熱伝達係数は、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾の風速と熱伝達係数の関係より与えるものとした。

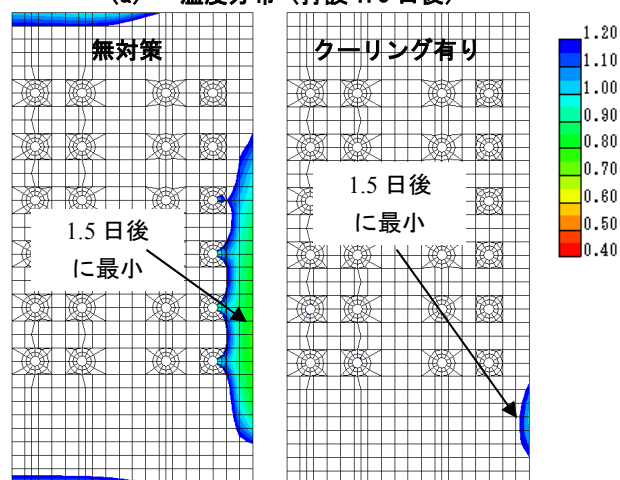
表-2 解析条件

項 目		解析条件値
熱伝達率 (W/m ² ℃)		2.7
密度 (kg/m ³)		2344
比熱 (kJ/kg℃)		1.15
打込み温度 (℃)		20.6 (外気温+5℃)
単位セメント量 (kg/m ³)		388
セメントの種類		普通ポルトランドセメント
断熱温度上昇特性		$Q_u=55.68$, $\gamma=1.438$
熱伝達係数 (W/℃・m ²)		合板 : 5 (7日間) 湛水+養生マット : 5 (7日間) 無養生 : 14
シースクーリング条件	管径	シース管 : φ75mm
	熱伝達係数	送風 : 48 (W/℃・m ²) 通常 : 4 (W/℃・m ²)
	送風温度	入口 : 15.6 (外気温) 出口 : 36.6 (外気温+21℃)
圧縮強度 (N/mm ²)		土木学会標準示方書に準拠
ヤング係数 (N/mm ²)		$4700 \times f_c (t)^{1/2}$
引張強度 (N/mm ²)		$0.44 \times f_c (t)^{1/2}$
ポアソン比		0.18
線膨張係数 (μ/℃)		10

1-1 断面におけるシースクーリング無しの場合のコンクリートの材齢は、1.5 日である。解析結果の温度分布を見ると、シースクーリングを実施した場合には、放熱が促進されて全体的に温度が低下しており、対策無しに比べて最高温度で 5.0℃程度の差が見られる。また、ひび割れ指数分布を比較すると、シースクーリング無しの場合は、側面の大部分で 1.0 を下回る値となっているが、シースクーリングを実施した場合には、1.0 を下回る部分は認められなかった。これらの事前解析により、1-1 断面においてシースクーリングの効果が十分にあることが確認できた。したがって、本施工においても、これらの条件を満たす設備を設けるものとした。



(a) 温度分布 (打設 1.5 日後)



(b) 最小ひび割れ指数分布

図-4 1-1 断面における解析結果の比較

3.3 パイプクーリングの条件

対象構造物のスパン中央部では、はりスパン中央下部にシース管が集中しているため、シースクーリングのみでは、下端表面部が過冷却され、ひび割れ制御対策としては、逆効果となることが考えられた³⁾。そこで、パイプクーリングの配置の選定にあたっては、2-2 断面を対象としてパイプクーリングとシースクーリングを併用した解析を実施し、その条件を実施工へ反映させるものとした。

2-2 断面解析モデルを図-5 に、パイプクーリングの通水条件を表-3 に示す。通水温度は、管内延長方向での水温上昇を考慮して 35℃とした。また、パイプ壁面とコンクリート面との熱伝達係数は、式[1]により求めた⁴⁾。

$$h=552u+50.0 \quad (\text{W/m}^2\text{℃}) \quad \text{式 [1]}$$

ここに h : 熱伝達係数, u : 流速 (m/s)

一方、2-2 断面におけるシースクーリング温度は、文献²⁾の実測結果を参考として、外気温+14℃とした。

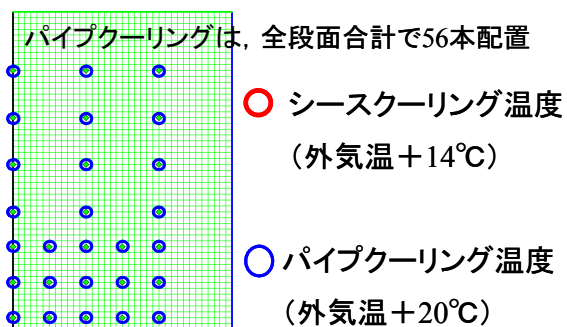
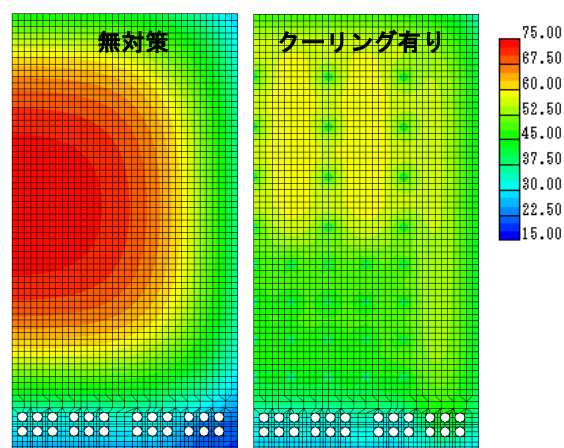


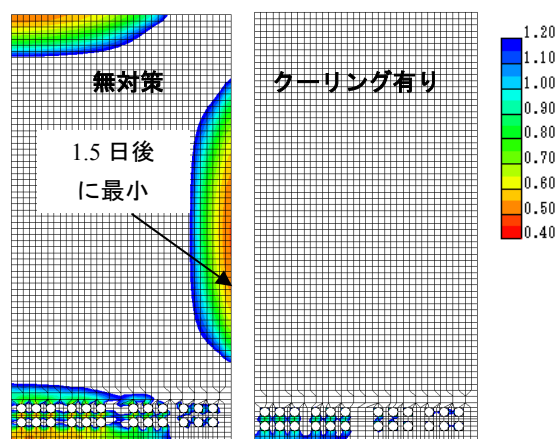
図-5 2-2 断面の解析モデル

表-3 パイプクーリング通水条件

項 目	解析条件値
通水管径	1 インチ管
通水流量 (l/min)	14
熱伝達係数 (W/℃・m ²)	304
通水期間	4 日間



(a) 温度分布 (打設後 1.5 日)



(b) ひび割れ指数分布

図-6 2-2 断面における解析結果

3.4 パイプクーリングの効果

2-2 断面におけるシースクーリングの有無による PC はり断面内の温度および最小ひび割れ指数の分布を図-6 に示す。

温度分布を比較するとパイプクーリング無しの場合、2-2 断面中心部と外側の温度勾配が大きくなり、中心の最高温度は 74.5℃であった。また、2-2 断面では、シース管が断面の下端に集中しているために、中心部との温度勾配が 1-1 断面より大きくなっている。一方、パイプクーリングを行った場合には、放熱が促進されて最高温度が 15℃程度低減されている。また、ひび割れ指数分布を比較すると、パイプクーリング無しの場合には、側面および下面、上面の大部分で 1.0 を下回る値となったが、パイプクーリングを実施した場合には、1.0 を下回る部分はシース管近傍の一部であり、側面及び上面には確認できなかった。

これらより、2-2 断面では、パイプクーリングの効果が十分にあることが確認できた。本施工では、シースクーリングを効果的に利用できない断面では、パイプクーリングによるひび割れ抑制対策を講じるものとした。

4. 実施工への適用

4.1 クーリング設備

シースクーリングはシース管端部にジョイント金具を設置し、サクションホースの延長にターボブロアを接続し、吸気による送風とした。

また、パイプクーリングの通水をはり端部から行くと、パイプクーリングの効果ははりスパン方向で対称性が損なわれる。一方、はり中央部より通水した場合には、パイプクーリングの効果が全体に一樣になることから、通水ルートは中央部からとした。なお、クーリングパイプの延長が長くなると通水中に水温が上昇し、クーリング効果が低減されることを考慮し、2-2 断面において検討したクーリングパイプ本数を、PC はりスパン方向に 20 系統となるように、クーリングパイプを設置した。

4.2 通水および送風管理方法

通水および送風の管理は、コンクリート内に設置した熱電対により温度を測定し、その結果に基づいて行うこととした。管理温度の設定は、事前解析より、計測対象断面のコンクリート最高温度とコンクリート表面と内部の温度差を管理するものとし、コンクリート最高温度を 60℃、最大温度差が 20℃を上回らないよう通水管理を行うものとした。

5. 計測結果

5.1 コンクリート温度の実測値

各断面におけるコンクリート温度測定点对応図を図-7 に示す。また、解析対象とした 1-1 断面における温度計測結果を図-8 に示す。コンクリート温度は、打設完了か

ら 24 時間程度でピーク温度に達し、最高温度は 60.5℃（測点 4）であった。また、最大温度差は 17.1℃（測点 6－測点 4）であり、コンクリートの最大温度差は、今回の管理温度を満足する結果となった。

2-2 断面における温度計測結果を図-9 に示す。2-2 断面のコンクリート温度は、打設完了から 24 時間程度でピーク温度に達し、2-2 断面計測点における最高温度は 61.2℃（測点 25）である。また、最大温度差は 39.3℃（測点 19－測点 30）であり、8 箇所の温度差が管理温度を上回った。最大温度差が大きく管理温度を上回った原因としては、測点 21, 28, 29, 30, 31, 32 がクーリングパイプ近傍に設置していたために、測定点が打設中にパイプに接し、実際のコンクリート温度よりも低い温度を計測した可能性が考えられる。このことは、通水を停止した際にこれらの測点の温度変化が他に比べて著しかったことから言える。

5.2 クーリング条件の実測値

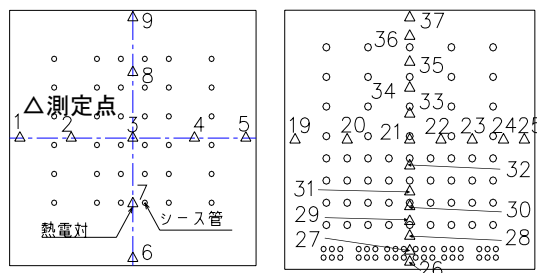


図-7 測定点对応図

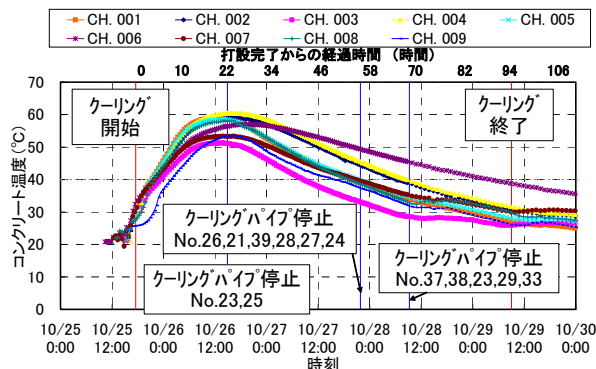


図-8 温度計測結果（1-1 断面）

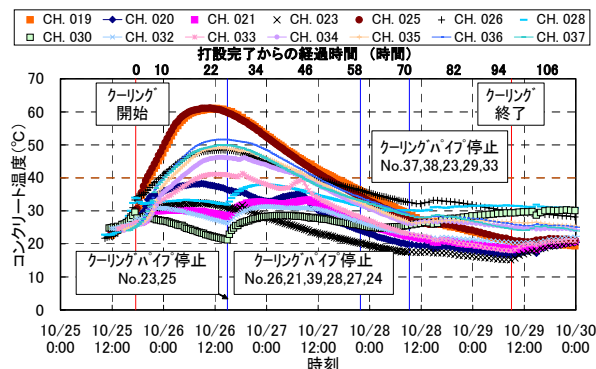


図-9 温度計測結果（2-2 断面）

通水期間中の通水温度の平均値は、入口で 11.3℃、出口で 14.8℃であった。通水期間における入口と出口の最大温度差は、打設 1 日後の 11.0℃であった。

シースクーリングの入口と出口の温度差の平均は 6.6℃であり、最大温度差は打設 1 日後の 9.3℃であった。事前解析と比較すると、シースクーリングの風速（平均 7.9m/s）が事前解析条件（15.0m/s）よりも小さかったにも関わらず、事前解析でのクーリングの入口と出口の温度差（21℃）よりも小さい結果となった。これは、PC はりの出口から少し離れた位置での送風温度計測となったためであり、今後計測を行う際には、入口と出口に温度測定機器を設け、計測管理を行うことで、より精度が高い実測値を得る必要がある。

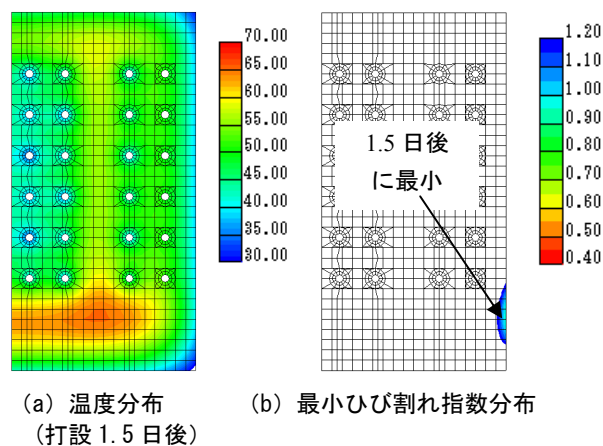


図-10 事後解析結果

5.3 事後解析結果との比較

実測結果のうち、打設温度およびシースクーリング条件（温度、熱伝達係数）を反映させて、事後解析を行った。1-1 断面における実測値と事後解析結果における最大温度の比較を表-4 に示す。また、図-10 に 1-1 断面における温度分布及び最小ひび割れ指数分布の解析結果を示す。

実測値と事後解析のコンクリート最高温度の差は、最大で 5.6℃（測点 8）であり、良く一致していると言える。また、事後解析では、事前解析（図-4 (a) クーリング有り参照）と比較して打設温度が高く、シースクーリングの風速が小さいため、コンクリートの最高温度は上昇した。しかしながら、最小ひび割れ指数分布は事前解析とほぼ同様であり、実施工でひび割れが認められなかったことと対応している。一方、2-2 断面においては、実測点とパイプクーリングの位置が近接していた影響が出ている可能性があり、実測値と事後解析結果を精査中である。

表-4 事後解析と実測値のコンクリート最大温度の比較
(1-1 断面)

測 点 (図-8 参照)	実測値 ① (℃)	事後解析 ② (℃)	温度差 ①-② (℃)
3	51.3	52.3	-1.0
4	60.5	60.5	0
5	58.5	54.6	3.9
6	57.0	53.2	3.8
7	53.4	53.3	0.1
8	58.1	52.5	5.6
9	53.6	55.7	-2.1

6. まとめ

PC はりのマスコンクリート対策としてシースクーリングおよびパイプクーリングを併用する方法を採用した。実施にあたっては、簡易的な 2 次元の事前解析を行って、クーリング条件を決定し、実施工に適用した。その結果、実施工でのクーリング条件と事前解析時のクーリング条件に多少の差は認められたものの、構造物には、ひび割れは発生せず、本クーリング対策の有効性が示された。今後、この実測値を事前解析に反映することにより、より精度の高い予測が可能となるものと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002.
- 2) 三厨晋也，小坂寛巳，山口正晃，吉田光男：PC 鋼線用シースを利用した空気によるパイプクーリング工法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.1157-1162，1995.
- 3) 井上敏弘：マッシブな PC はりのパイプクーリングによる温度ひび割れ制御，コンクリート工学，Vol.41，No.7，pp.35-40，2003.7.
- 4) 田辺忠顕，溝渕利明：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定並びに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第 343 号，pp.171-179，1984.