

マッシブな水門コンクリートの温度応力対策と 効果の評価

—鉛直パイプクーリングと低熱高炉セメントの適用—

Measures to Control Thermal Stress in Massive Water-gate Concrete and Evaluation of Their Effects

- Application of Vertical Pipe Cooling and Low-heat Blast-furnace Cement -

東 邦和* 塚本耕治* 森田修二** 井 君人***

要 旨

マッシブな水門コンクリートでは、ひび割れ対策を行うことによる品質向上が要求されている。施工した水門の堰柱コンクリートは、幅2.0m、高さ8.15m、長さ23.5mの壁体が、厚さ2.0mの床版の上に打設されるという、ひび割れの抑制が難しい構造物である。主なひび割れ対策として、材料面では低熱高炉セメントB種と膨張材を用い、施工面では鉛直パイプクーリングを用いた。現地における計測と解析結果を比較することにより、個々の対策のひび割れ低減効果を検討した。当該構造物においては、鉛直パイプクーリングが有効であり、軽微なかぶり部のひび割れの発生にとどめることができた。

キーワード：水門コンクリート、鉛直パイプクーリング、低熱高炉セメント B 種、温度応力解析

1. まえがき

水門構造物における壁体はマッシブな構造であり、ひび割れ低減対策が要求されている。適用した工事の名称を表-1に示す。堰柱コンクリートは幅 2.0m、高さ 8.15m、長さ 23.5m の壁体が、厚さ 2.0m の床版の上に打設されるという、ひび割れの抑制が難しい構造物である。

対策として、材料面では低熱高炉セメント B 種と膨張材を用い、施工面では鉛直パイプクーリングを用いた。また、コンクリートの内外の温度差を小さくし、表面ひび割れを防止するために、型枠断熱材を用い、ひび割れ幅の拡大防止にガラス繊維ネットを使用した。現地における計測結果と温度応力解析により、これらの対策の効果を比較検討した内容を述べる。

水門の堰柱・門柱の施工時の外観を写真-1に示す。低減対策は、ひび割れ指数で「ひび割れの発生をできる限り制限したい場合 1.40 以上」を目標に実施した。鉛直パイプクーリング状況を写真-2に示す。

2. ひび割れ低減対策の概要

2.1 ひび割れ低減対策

温度ひび割れの低減のために、標準仕様で低熱高炉セメント B 種を使用し、さらに収縮補償のために、セ

表-1 工事名称

工事名称	甫木水門改築工事
発注者	九州地方整備局大隅河川国道事務所



写真-1 水門の堰柱・門柱の施工時の外観



写真-2 鉛直パイプクーリング状況

*技術研究所、**西日本支社土木技術部、***西日本支社九州支店

表-2 配合と使用材料

B/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G1	混和材 Ad1	混和剤 Ad2
54.0	45.7	164	294	403	403	1088	10	3.496

呼び強度 24 保証材齢 56日 スランブ 12cm 骨材最大寸法 20mm 空気量 4.5%
 セメント：低熱高炉セメント B種、密度 2.98 g/cm³ 水：地下水
 細骨材：S1 陸砂 産地：肝属郡東串良町 粗粒率 2.32 表乾密度 2.56 g/cm³
 S2 陸砂 産地：曾於郡大崎町 粗粒率 2.52 表乾密度 2.54 g/cm³
 粗骨材：碎石 2005 産地：肝属郡肝付町 実積率 59.0% 表乾密度 2.68 g/cm³
 混和材：膨張材 低添加型 密度 3.16 g/cm³
 混和剤：高性能 AE 減水剤 標準形 (I種)

メントの内割り 10 kg/m³の膨張材を添加した。

コンクリートの配合と使用材料を表-2に示す。ひび割れ低減対策一覧を表-3に示す。

事前の温度応力解析の結果により、ひび割れ低減効果が不足することから、鉛直パイプクーリングを併用した。また、内部拘束による表面ひび割れを防止するために型枠断熱材を用い、ひび割れ幅の拡大防止のため、鉄筋かぶり部分にガラス繊維ネットを配置した。

2.2 低熱高炉セメントと膨張材の添加

使用した低熱高炉セメント B種は、低発熱・収縮抑制型であり、初期に 100×10⁻⁶程度の膨張ひずみを示す。事前に使用材料を用いて、膨張材内割り添加量を 0、10、20kg/m³の3水準で拘束膨張・収縮試験¹⁾を実施した。膨張材添加量と最大膨張ひずみの関係を図-2に示す。収縮補償用の範囲に入るものとして、最大膨張率 190×10⁻⁶の内割り 10 kg/m³の膨張材を選択した。

2.3 鉛直パイプクーリングの施工方法

鉛直パイプクーリングは、パイプ配置を鉛直としたものである。パイプの設置はリフトの高さに影響を受けないため、高さ方向に打ち重ねていく構造物に適している。鉛直パイプクーリングの配管は、各リフトごとに躯体幅 2m の中心に長手方向に 1 列に、パイプ間隔を 1m として設置した。クーリングパイプ設置状況を写真-3に示す。

クーリングに使用したシース管径はφ60mmであり、管内に内径 18mm のビニルホースを底まで差し込み送水した。シース管上部でオーバーフローした冷却水は、打設部上面の養生水となり、排水処理される。右岸側と左岸側の壁体の同時打設で、クーリングパイプの本数は 46 本となり、多量のクーリング水を必要とするため、河川水を使用した。躯体の右岸および左岸の打設リフト①～②の施工において河川水の温度は 12～22℃で、クーリング水量は 1 本当たり約 12～20L/min である。クーリング水量が比較的多いのは、送水ポン

表-3 ひび割れ低減対策一覧

	ひび割れ対策	目的
1	低熱高炉セメント B種	温度上昇量の低減
2	膨張材	膨張ひずみによる収縮補償
3	鉛直パイプクーリング	クーリングによる温度上昇量の低減
4	型枠断熱材	コンクリート内部と表面部の温度差の低減
5	ガラス繊維ネット	ひび割れ幅の拡大防止

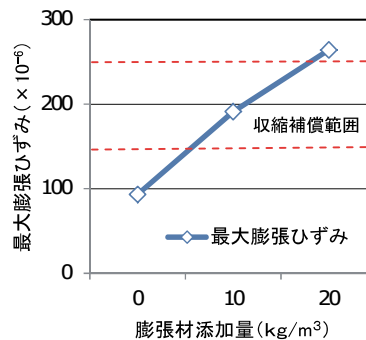


図-2 膨張材添加量と最大膨張ひずみ

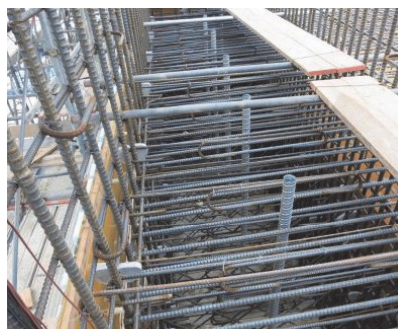


写真-3 クーリングパイプ設置状況

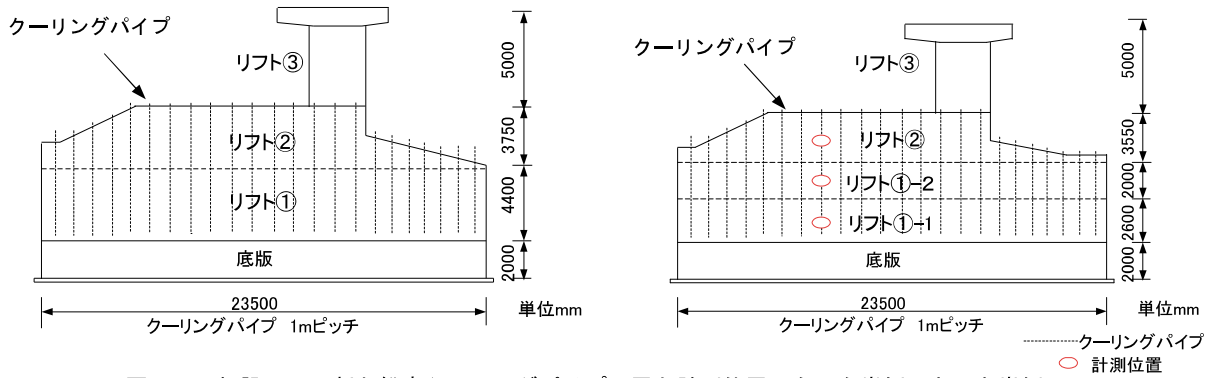


図-3 打設リフト割と鉛直クーリングパイプ配置と計測位置 左：左岸側、右：右岸側

ブ 1 台当たり 23 か所の分岐配管で送水を行うことから、送水量の小さい時に生じる各水量のばらつきをなくすためである。

3. 計測方法と計測結果

3.1 計測器の配置

コンクリート打設のリフト割と鉛直クーリングパイプ配置と計測位置を図-3に示す。計測は右岸側の壁体で行った。計測項目を表-4に示す。

右岸リフト①-1 (リフト高さ 2600mm) の計測器の配置を図-4に示す。平面図は、床版から 1600mm 高さ位置である。熱電対はクーリングパイプ 2 本の中間位置と、型枠表面から 100mm および 500mm の位置に設置した。また、コンクリートひずみ計は、クーリングパイプ間隔の中心に、長手方向と短手方向に水平に設置した。

立面図は、リフトの幅中心位置である。クーリングパイプは、床版上 400mm 上の位置から設置している。熱電対をクーリングパイプ側面と、100mm 離れた位置を組にして、床版から高さ 800mm (下段)、1600mm (中段) および 2400mm 位置 (上段) に設置した。

また、クーリング水の取入れ位置と、クーリングパイプの排出位置で水温を計測した。

3.2 計測結果

a. リフト①-1

リフト①-1 のクーリングパイプ 2 本の中間位置、パイプ表面から 100mm 位置、パイプ表面位置の温度および外気温の測定値を図-5に示す。リフト①-1 の打設温度は 25.5℃、ピーク温度 53.5℃である。外気温は、11 月初めの打設日の 20℃から次のリフト①-2 打設の 20 日間で 10℃に低下している。

クーリングは、打設翌日から 5 日間実施した。クーリング水温は 17~22℃であり、クーリング水量は、1 本当たり 12L/min である。

クーリング開始と同時に、クーリングパイプ表面に

表-4 計測項目

設置位置	計測項目	計測点数	計測機器
右岸リフト①-1	温度湿度	1	温湿度計
	ひずみ	2	コンクリートひずみ計
	温度	9	熱電対
クーリング水	温度	1	取水位置
	温度	1	パイプ上部吐出位置
断熱温度上昇の測定	温度	1	外気
	温度	1	試験体中心

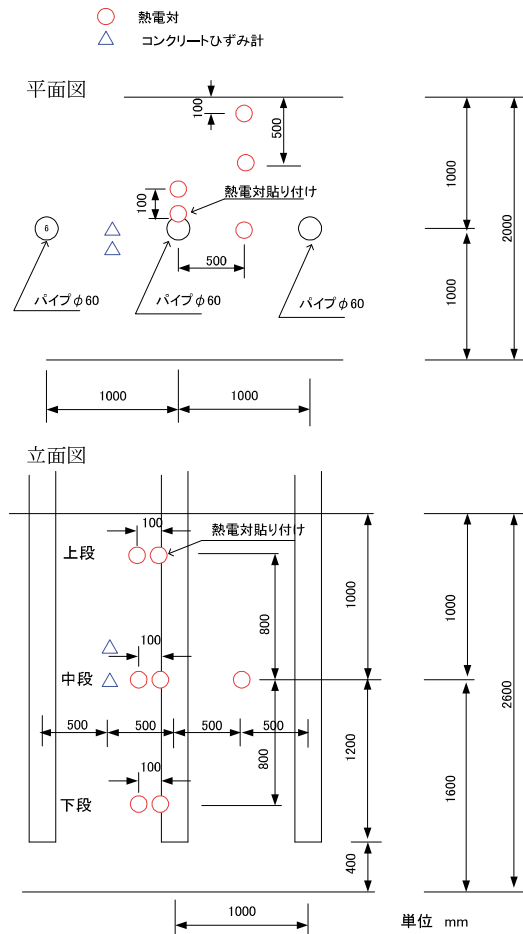


図-4 計測器の配置 (右岸リフト①-1)

貼り付けた熱電対の値は 25℃に大きく下がり、パイプ表面から 100mm 離れた位置の熱電対の値も、クーリングと共に下がっている。クーリングパイプ 2 本の中間位置では、パイプから 500mm 離れているが、クーリングの効果により、クーリング終了まで直線的に下がっている。クーリング終了後は、パイプ表面とパイプ表面から 100mm の位置の温度は、クーリングパイプの中間位置の温度と同じになった。

型枠表面から 100mm の位置の熱電対の値を中間位置および外気温と共に図-6 に示す。型枠表面から 100mm の位置のピーク温度は中心部より 6℃低いが、この温度差は、型枠断熱の効果により小さくなったものである。型枠表面から 100mm の位置でも、パイプクーリングの停止と共に温度低下勾配は小さくなっているが、中心部に比べると影響は小さい。型枠脱型は、脱型時の急冷を避けるために中心部の温度と外気温の差が 15℃以内になってから行っている。

クーリングパイプおよび近傍の温度を図-7 に示す。クーリングパイプに貼り付けた熱電対の温度は、送水と同時に低下している。パイプ表面から 100mm の位置では、クーリング期間 1 日でそれぞれクーリング開始時の温度から 8~10℃の温度低下が見られ、その後はなだらかな温度低下となっている。

コンクリートひずみの測定値を図-8 に示す。コンクリートひずみ計は、壁体長手方向と短手方向に水平に設置した。短手方向は拘束が小さく 445×10^{-6} 、長手方向は 228×10^{-6} の膨張ひずみが得られた。この値は温度ひずみを含んでいる。打設からの温度上昇が 28℃であり、低熱高炉 B 種コンクリートの線膨張係数が $12 \times 10^{-6}/\text{℃}$ であることから、膨張ひずみの 145×10^{-6} と合わせて 481×10^{-6} のひずみが生じるので、短手方向はほぼ自由膨張、長手方向は拘束により低減されている。

b. リフト①-2

リフト①-2 のクーリングパイプ 2 本の中間位置、パイプ表面から 100mm の位置の温度および外気温の測定値を図-9 に示す。リフト①-2 の打設温度は 21.0℃、ピーク温度 45.0℃である。外気温は、11 月下旬の打設日の 13℃から次のリフト②打設の 19 日間で 10℃に低下しているが、大きな変化はない。

クーリングは、打設翌日から 5 日間実施した。クーリング水温は 12~18℃であり、水量は 1 本当たり 20L/min である。

c. リフト②

リフト②のクーリングパイプ 2 本の中間位置、パイプ表面から 100mm の位置の温度および外気温の測定値を図-10 に示す。リフト②の打設温度は 19.0℃、ピーク温度 44.0℃である。外気温は、12 月中旬の打設日の 8℃から、その後の経過に大きな変化はない。

クーリングは、打設翌日から 5 日間実施した。クー

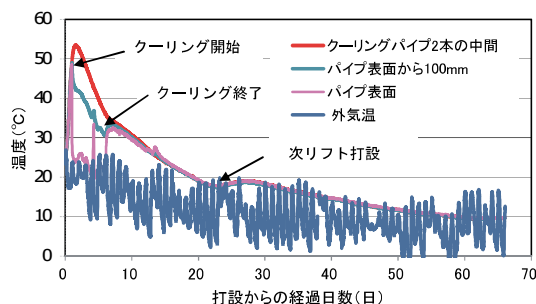


図-5 壁体内部温度と外気温 (リフト①-1)

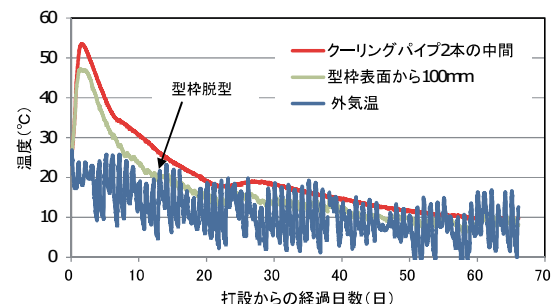


図-6 壁体中心と型枠表面から 100 mm の温度 (リフト①-1)

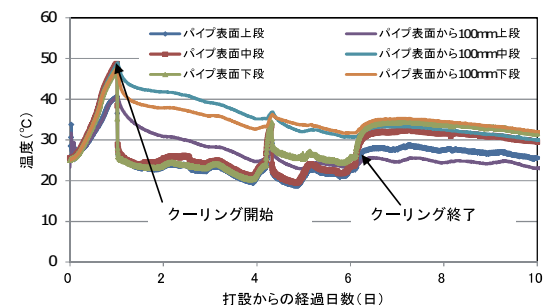


図-7 クーリングパイプおよび近傍の温度 (リフト①-1)

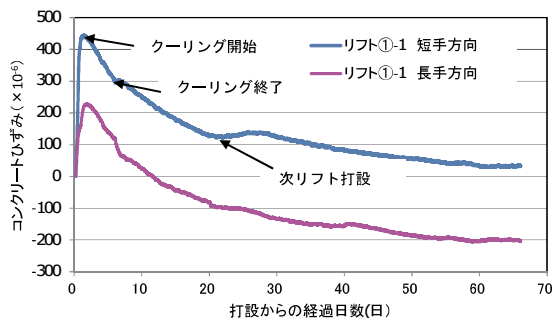


図-8 コンクリート実ひずみ (リフト①-1)

リング水温は 14~17℃であり、水量は 1 本当たり 10L/min である。急激な温度低下を防止するために水量を絞っていることから、パイプ表面から 100mm 位置の温度低下は緩やかである。

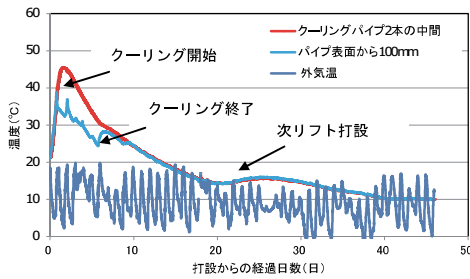


図-9 壁体内部温度と外気温の測定値
(リフト①-2)

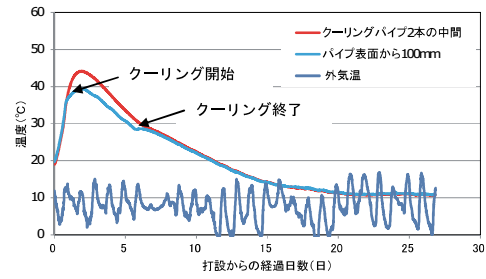


図-10 壁体内部温度と外気温の測定値 (リフト②)

4. 温度応力解析による検討

4.1 壁体解析モデルによる温度応力の検討

床版コンクリートと壁体リフト①-1 の部分を取り出した解析モデルを図-11 に示す。温度応力解析は汎用構造解析コード“FEAST” (JIP テクノサイエンス) を用いた。

解析条件を表-5 に示す。解析ケース 1~4 における外気温は一定値にしている。ケース 5 は、測定値 (図-6) を用いた。断熱温度上昇は、現場での断熱箱試験体から逆解析により求めた。解析用強度は、現場測定強度から設定した。呼び強度保証材齢は 56 日である。

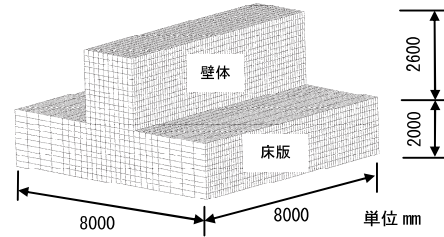


図-11 壁体コンクリート解析モデル
(床版とリフト①-1 の計測箇所部分)

4.2 クーリングの熱伝達率

パイプ径φ60mm で、流量 12L/min の場合に、流速は 7.1cm/sec になる。流速が 20 cm/sec 以下の場合に、現状の熱伝達率の提案式では、適用範囲外になっている³⁾。ここでは、パイプ近傍の測定結果から、試算で熱伝達率を算出し、86 W/m²C と設定した。

4.3 解析結果の比較

壁体と床版の温度解析結果コンターを図-12 に示す。クーリングパイプの周辺は温度が低下しており、この部分のひび割れ指数は、温度の高い部分より大きい。解析結果の比較を図-13 に示す。左縦軸に、ピーク温度を、右縦軸にひび割れ指数を示す。解析結果は、センター断面の中央高さ位置のものを示した。

低熱高炉セメント B 種に膨張材を添加したものは、高炉セメント B 種に比べて温度ピークを 67.8°C から 56.4°C に大きく下げ、ひび割れ指数を 0.74 から 1.04 に上げることができる。しかし、ひび割れ指数は目標値「ひび割れの発生をできる限り制限したい場合 1.40 以上」に対して、まだ不十分である。パイプクーリングを併用することで、温度ピークを 51.2°C に下げ、ひび割れ指数を 1.82 に上げることができる。このひび割れ指数は、「ひび割れを防止したい場合 1.85 以上」に近い値である。

4.4 実施工と外気温、熱伝達率を合せた解析結果

リフト①-1 の実際の外気温と熱伝達率を合わせて

表-5 解析条件

解析ケース	解析項目	解析パラメータ	備考	
1	高炉セメント B 種	断熱温度上昇	$Q_0: 51.521, r: 0.986, t_{0.0} 0.220$ ²⁾	外気温 20°C 一定
		強度発現	係数 a 8.363、係数 b 0.849、 $f_c 40.3, S_f 0.42$	
		熱伝達率	側壁脱型前 8W/m ² C、脱型後 14W/m ² C	
2	低熱高炉セメント B 種	断熱温度上昇	$Q_0: 38.50, r: 0.950, t_{0.0} 0.262$	同上
		強度発現	係数 a 19.98、係数 b 0.641、 $f_c 39.7, S_f 0.5$	
		熱伝達率	ケース 1 に同じ	
		膨張ひずみ	75×10^{-6}	
3	低熱高炉セメント B 種・膨張材	断熱温度上昇・強度発現・熱伝達率	ケース 2 に同じ	同上
		膨張ひずみ	145×10^{-6} (ケース 2 と合わせたひずみ量)	
4	低熱高炉セメント B 種・膨張材	断熱温度上昇・強度発現・熱伝達率	ケース 2 に同じ	同上
		膨張ひずみ	ケース 3 に同じ	
		パイプクーリング	パイプクーリングのあるモデル	
5	ケース 4 の外気温・熱伝達率小	外気温変化	7 日まで 20°C、7 日~15 日 20°C~15°C、15 日~28 日 15°C~10°C	外気温変化
		脱型前熱伝達率小	側壁脱型前 6W/m ² C、脱型後 14W/m ² C	

解析したケース 5 の温度の解析結果を図-14 に、ひび割れ指数の解析結果を図-15 に示す。外気温は 20°C から 20 日間で 10°C に低下させている。

打設温度は 25°C、ピーク温度 51.5°C である。打設 20 日後のセンター中央部温度は 19°C で、実際の状況を表せている。最小ひび割れ指数は、センター上部で

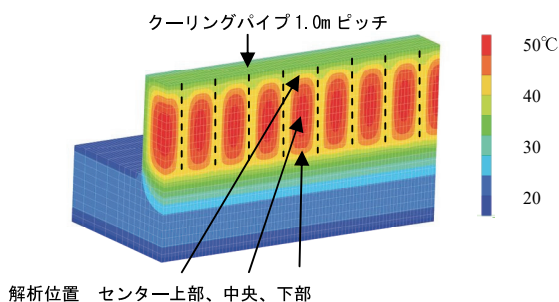


図-12 温度解析結果カウンター（壁体と床版）

は 2.19（打設後 12 日）、中央部と下部でそれぞれ 1.75、1.38（打設後 28 日）となった。パイプクーリングを行ったことにより、計画通りのひび割れ指数に近いが、実施工では打設日の外気温が予測より高いことによるコンクリートの打設温度の上昇と、その後の外気温低下による壁体の収縮があり、ひび割れの抑制に不利な条件となった。

5. ひび割れ低減効果のまとめ

ひび割れは、左岸側リフト①および右岸側リフト①-1の壁体に、打設リフト高さに近い2~4mの間隔で、軽微な 0.1~0.3mm 幅程度のものが観察された。これらは打設から約 2 週間経過して発生し、上部リフトの打設以前に発生したものである。ひび割れは超音波測定の結果、鉄筋かぶり程度の深さと確認された。また、外部拘束の小さくなるリフト①-2 とリフト②では、ひび割れの発生本数は下部のリフトに比べて少ないものとなった。

ひび割れ低減対策から、次の結果が得られた。

- i. 低熱高炉セメント B 種と膨張材の使用および鉛直パイプクーリングの適用により、コンクリートのピーク温度を抑えることができ、ひび割れ指数の増大が得られた
- ii. かぶり部分に軽微なひび割れは生じたが、温度応力による有害なひび割れは発生せず、ひび割れ低減効果が得られた
- iii. 壁体コンクリートの計測と温度応力解析の比較によって、効果の大きさを定量的に検討し、それぞれの対策の有効性を確認できた

6. あとがき

本構造物は、スラブ上にマッシュで延長の長い壁体を打設するという、ひび割れ抑制の難しい構造物であったが、低熱高炉セメント B 種と膨張材および鉛直パイプクーリングを組み合わせ、ひび割れを抑制する効果が得られた。また、壁体コンクリートの計測

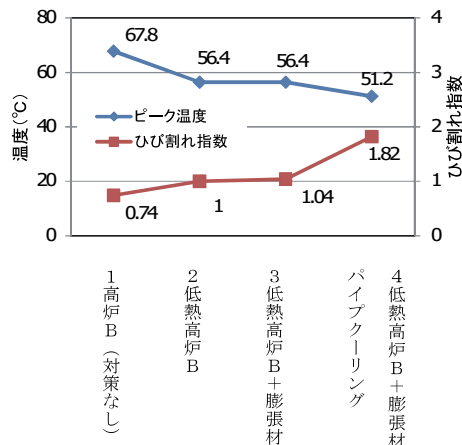


図-13 ケース 1~4 解析結果の比較（ピーク温度とひび割れ指数）

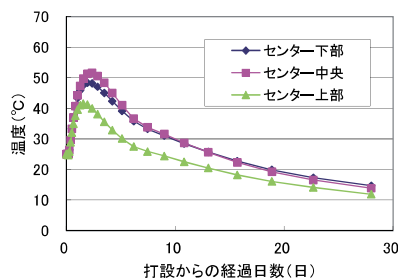


図-14 温度の解析結果（ケース 5）

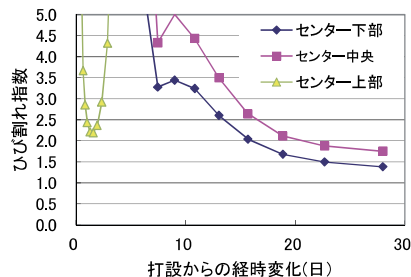


図-15 ひび割れ指数の解析結果（ケース 5）

と解析の比較によって対策の効果の評価し、有効性を確認できた。

本検討を進めるに当たり、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所のご指導を賜ったことに深く感謝する。

【参考文献】

- 1) JIS A 6202 コンクリート用膨張材 付属書 2「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験法」B 法
- 2) 「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」、日本コンクリート工学会
- 3) 溝淵利明、二塚保之、村尾義則「パイプクーリングによるひび割れ抑制対策効果に関する研究」、土木学会論文集 No.665/VI-49、pp.147-163、2000.12