

報告 大規模水門における温度ひび割れ対策とその実施について

為石 昌宏*1・金本 和憲*2・牛島 浩一郎*3

要旨：舞川水門は洪水調整機能を有する遊水地への洪水の流入防止と洪水後の貯留水排除を目的に、岩手県一関市に建設される全長 109m,最大幅 60m,堰柱高さ 23m, コンクリートの総使用量が 25000m³の大規模な水門であり,施工時において温度応力による有害なひび割れの発生が懸念された。そこで3次元温度応力解析を行い,本構造物に対して有効なひび割れ対策方法の検討を行った結果,パイプクーリングを主な対策とし,その他の複数の対策を組み合わせることで,ひび割れの原因となる温度応力を低減することができると分かった。実際に検討結果を基に対策を実施し施工を行った結果,有害なひび割れの発生を防止することができた。

キーワード：温度ひび割れ,パイプクーリング,温度応力解析,膨張材,ひび割れ誘発目地

1. はじめに

北上川の中流部・岩手県南部に位置する一関・平泉地区は,その地理的特性から古来より水害に悩まされており,1947(S22)年のカスリン台風および1948(S23)年のアイオン台風の洪水による大災害に見舞われた。この水害を契機に一関遊水地が計画され,1972(S47)年に事業着手された。遊水地は市街地を洪水から守る周囲堤と中小洪水時には,遊水地内に洪水が入ることを防ぎ水田等を守る小堤からなり,第1・第2・第3の3つの遊水地で構成されている。

舞川水門は第3遊水地に構築するものであり,水門完成予想図を図-1に示す。

舞川水門は全長 109m,最大幅 60m,堰柱高さ 23m,コンクリートの総使用量が 25000m³の大規模水門であり,特に本体部の壁厚は 4.5m と大きく,また,暑中を含む期間に施工を行うことから,有害な温度ひび割れの発生が懸念された。そこで3次元温度応力解析を実施することで,本構造物に対して有効なひび割れ対策の検討を行った。本稿は,その対策を選定する過程から実際に対策を実施した結果までを取り纏めたものである。

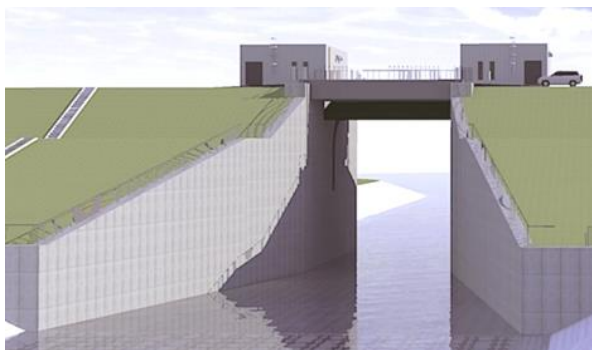


図-1 水門完成予想図

2. 解析ケース及び条件

2.1 本体部の概要

図-2に,舞川水門一般図を示す。本構造物は,本体部と翼壁部5ブロック(川表A,B,川裏A,B,C)の合計6ブロックに分類される。本体部は,厚さ 4.0m の底版上に厚さ 4.0m~4.5m の壁状の堰柱と胸壁を構築するため,底版コンクリートおよび前リフトに拘束されることから外部拘束に伴う貫通ひび割れの発生が懸念された。また,部材幅が大きいため部材の内外の温度差による内部拘束によるひび割れが発生する恐れもあった。そして,打込み期間は,1月中旬から10月まで要する予定のため,特に夏期に施工するリフトにおいては注意が必要であった。

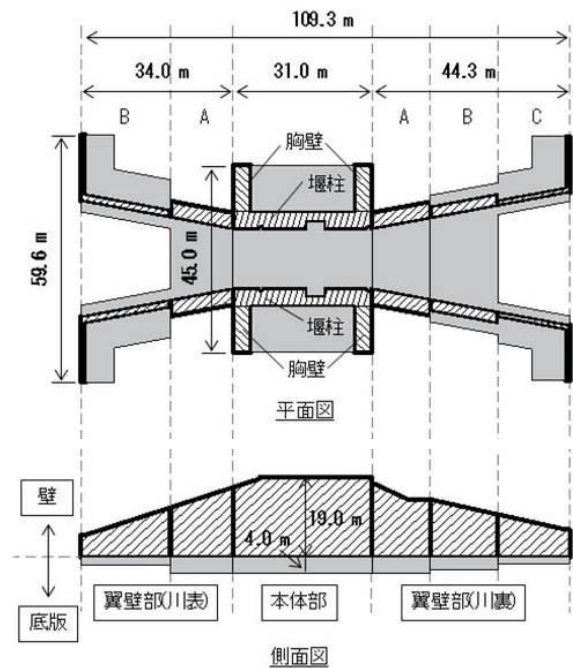


図-2 舞川水門一般図(平面図,側面図)

*1 (株) 鴻池組 土木技術部 (正会員)

*2 (株) 鴻池組 土木技術部

*3 (株) 鴻池組 東北支店 土木部

2.2 ひび割れ照査方法

(1) 照査方法

ひび割れの照査は、2012年制定 コンクリート標準示方書【設計編】(以下、コンクリート標準示方書と称す)に記載の方法により、式(1)を満足するか否かで照査を行った。

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr} \quad (1)$$

ここに、 $I_{cr}(t)$: ひび割れ指数

γ_{cr} : ひび割れ発生確率に関する安全係数

本検討では、温度ひび割れの制御水準を、「ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合」とし、目標とするひび割れ指数を1.0以上とした。

(2) 解析手法

コンクリートの温度は非定常熱伝導解析を、応力はコンクリートの温度およびヤング係数の変化を考慮した応力解析を、いずれも三次元有限要素法を用いて実施した。なお、解析プログラムは、「ASTEA-MACS ver.9.2.6」を使用した。

2.3 解析モデル

本体の解析モデルを図-3に示す。構造物の対称性から本体及び翼壁それぞれ軸対称1/2モデルとした。また、モデル化する地盤およびメッシュ分割については、コンクリート標準示方書に準拠し、モデル化する地盤の深さは10m以上、幅は構造物の2倍以上とした。

2.4 解析ケース

本解析ケースの一覧を表-1に示す。本構造物のように部材断面が大きい場合、水和熱による温度上昇が大きくなるため、その温度を抑制する対策が最も効果的であると考えられる。そこで、水和熱を抑制する対策としては、低熱ポルトランドセメントのように水和熱が小さい結合材を使用すること、もしくは、打込み後のコンクリ

ートを冷やすことで温度の上昇量を低減することのできるパイプクーリングが有効と考えられた。

両対策を比較すると、本工事の場合、コンクリート打込み量が非常に大きく、セメントの変更に伴う費用が大きくなる懸念された。一方、パイプクーリングの場合、その費用がコンクリート量に左右されにくく、確実に大断面での温度上昇を抑制でき、かつ実績も多い対策工法であることから、本工法を基本の対策とした。

基本対策である①パイプクーリングのみでは、目標のひび割れ指数を満足できない場合、その他の対策として②～⑤の対策を併用することで検討を行った。

表-1 対策ケース一覧

解析ケース	A 無対策	B	C	D	E	F
①パイプクーリング	-	○	○	○	○	○
②打設高さの抑制 (1.5m→1.0m)	-	-	○	○	○	○
③膨張材使用	-	-	-	○	○	○
④ひび割れ誘発目地の設置	-	-	-	-	○	○
⑤クーリングパイプの配置見直し	-	-	-	-	-	○

2.5 解析条件

(1) コンクリートの配合

配合を表-2に示す。設計基準強度は24N/mm²、セメントは高炉B種とした。膨張材を使用する解析ケースでは、単位セメント量を膨張材の使用量で置換した。

表-2 配合表

	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材
標準	53.8	161	299	0	810	1053
対策	53.8	161	279	20	810	1053

B=セメント+膨張材

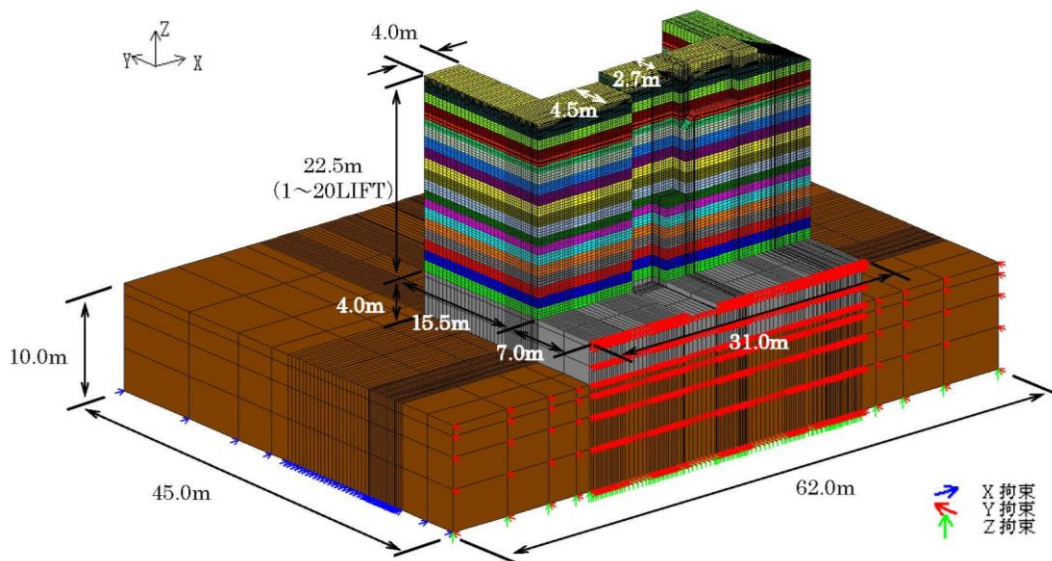


図-3 本体・解析モデル

(2) コンクリート打込み工程

コンクリートの打込み工程は、底版コンクリートを既設コンクリート（設計基準強度；24N/mm²）とし、コンクリートの打込み期間は、実際の打込み工程予定に合わせ、1リフトの打込み日を1月中旬、最終リフトを10月中旬とする約10ヶ月間とした。なお、解析期間は、最終リフト打込み後、60日までとした。

(3) 気温および打込み温度

外気温は、図-4に示すように本現場の位置する岩手県一関市（気象庁観測地点）での過去3ヶ年の月別平均気温を直線補間して用いた。また、コンクリートの打込み温度は、打込み日の外気温+5℃とした。

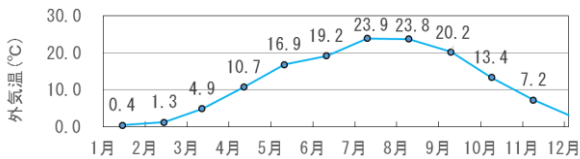


図-4 外気温

(4) 物性値

コンクリートおよび地盤の熱特性および力学特性については、コンクリート示方書および「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」¹⁾に準拠した。膨張材を使用した対策配合の膨張ひずみは、同指針¹⁾の算定式（解4.2.10）を適用した。

(5) 熱伝達境界

コンクリートの境界部における熱伝達率は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」¹⁾を参考に表-3に示す値を用いた。また、地盤の側面は断熱境界とし、下面は岩手県一関市の過去3年間の年平均気温である12.0℃を固定温度境界とした。

表-3 熱伝達率

対象箇所	境界種別	熱伝達率 (W/m ² °C)	
地盤、既設底板表面	露出面	一定値	14
		打設～材齢7日	8
側面	合板	材齢7日以降	14
		打設～材齢7日	8
上面	湛水	材齢7日以降	14

(6) パイプクーリング

クーリングパイプには直径 25.4mm のものを使用することを想定し、隣り合うパイプの間隔を 500mm（パイプとコンクリート表面間は 1000mm）とし、1系統のパイプ延長は概ね 150m 以下となるようにした。通水温度は 15.0℃、また通水量は 15L/min とした。通水期間は打込み直後から実施するものとし、材齢 5 日までとした。なお、解析では、移流拡散機能により、冷却水と水和熱の授受による冷却水温の上昇をステップ毎に算出することで、パイプ経路による冷却効果の減少を考慮した。

(7) 誘発目地

ひび割れ誘発目地は、ボンドリンク要素を用いた離散ひび割れモデルとし、ボンドリンク要素に作用する引張

応力が設定した引張強度を超えたとき、ボンドリンク要素が切り離される挙動を、ひび割れ発生とした。

設置する誘発目地の断面欠損率はコンクリート標準示方書に準拠し、50%以上とすることから、引張強度の低減係数を 0.5 として設定した。

3. 解析結果と対策の検討

3.1 無対策時におけるひび割れ予測

図-5に無対策の場合（ケース A）における最高温度の分布図を、図-6に最小ひび割れ指数の分布図を示す。各リフトの断面中心の最高温度は、3月～4月で 43.5℃～55.4℃、さらに夏期となる6月～8月では 62.6℃～68.5℃となる。また断面中心部の各リフトの最小ひび割れ指数は 0.35～0.68 といずれも 1.00 を大きく下回る結果であり、一般に温度ひび割れに対して有利な時期である冬期においても 0.5 未満となる箇所が生じた。また、断面幅 4.5m の一般部より、水門ゲート設備が設置される断面幅 2.7m の断面減少部の方が、各リフトとも 1、2 割ほど値が小さくなる傾向にあった。これは、断面減少部が本体堰柱壁の中央部に位置し、かつ部材幅が小さくなっていることで、底版コンクリートおよび既設リフト（前リフト）に拘束されることで発生する縦断方向の引張応力が大きくなったためと考えられる。

また中心部のみならず表面部における全断面においてひび割れ指数 1.0 以下の箇所が見られることから、外部拘束による貫通ひび割れおよび内部拘束によるひび割れが多数生じる可能性が高いと予想された。

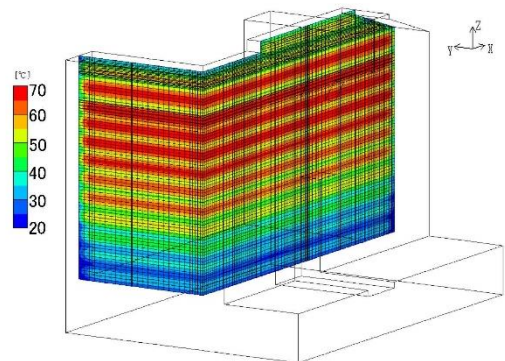


図-5 最高温度の分布（ケース A・無対策）

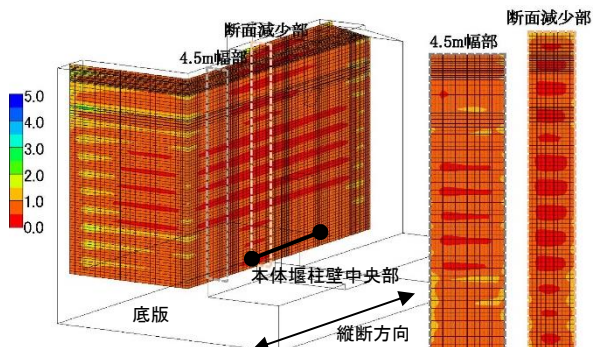


図-6 最小ひび割れ指数の分布（ケース A・無対策）

3.2 パイプクーリングと打込み高さの抑制（ケース B およびケース C）

図-7にパイプクーリングを実施した場合（ケース B）における最高温度の分布図を、図-8 に最小ひび割れ指数の分布図を示す。各リフトの断面中心の最高温度は、3月～4月で33.1℃～36.7℃、さらに夏期となる6月～8月では42.4℃～47.2℃となり、ケース A と比較し概ね20℃低下した。そして、断面中心部の各リフトの最小ひび割れ指数は0.1程度向上したものの0.44～0.77といずれも1.00を大きく下回る結果であった。

そこでケース Cでは1リフトあたりの打込み高を1.5mから1.0mに縮小することで部材内部温度の更なる低減を図った。図-9に示すクーリングパイプ配置概略図のように、打込み高さを1.5mとするとクーリングパイプを2段配置する必要があったが、打込み高さを1.0mとすることで1リフト当たり1段のパイプ配置となり、コンクリートの単位容積当りのパイプの必要延長を低減することができる。本構造部ではクーリングパイプ総延長を約170000mから140000mに減少することができた。

打込み高さを減少することで、ケース Bと比較し、部材内部温度は最大9℃、平均で2.6℃低減することができた。それに伴いひび割れ指数も改善したが、各リフトのひび割れ指数は、0.56～0.77と評価基準を満足しなかった。

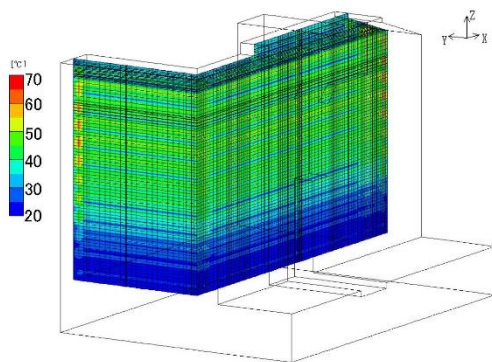


図-7 最高温度の分布（ケース B）

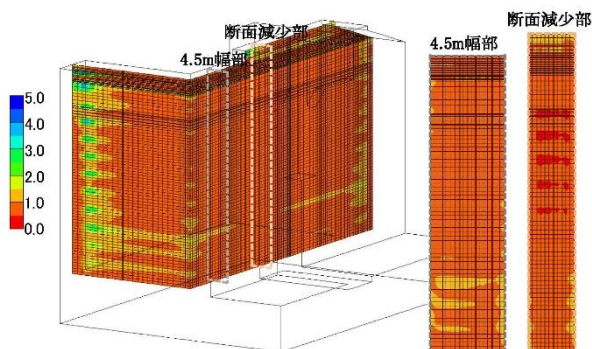


図-8 最小ひび割れ指数の分布（ケース B）

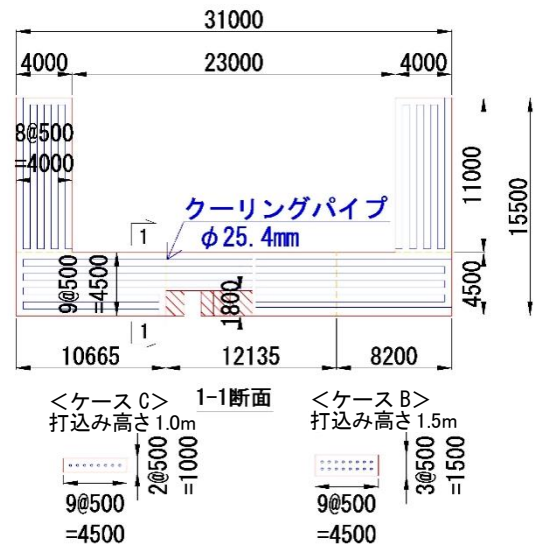


図-9 クーリングパイプ配置概略図

3.3 膨張材の使用（ケース D）

本工事では、環境負荷低減目的のため、標準配合のセメントが高炉 B 種となっているが、高炉 B 種を用いたコンクリートでは、セメントの水和熱によるコンクリート温度が高いほど、若材齢における自己収縮速度が大きく、また長期材齢における自己収縮ひずみも大きくなることが知られている。本解析結果において、各リフトの最小ひび割れ指数の材齢は、5日前後と若材齢のものが多く、自己収縮量が大きくなる材齢と一致する。このことから、コンクリートの自己収縮により生じる引張応力が温度応力を更に助長しているため、その低減が重要であると考えられた。そこで、表-2に示すように混和材として膨張材を添加した配合を対策に追加した。

図-10に膨張材を使用した配合における（ケース D）の最小ひび割れ指数の分布図を示す。その結果、発生引張応力は0.8N/mm²～1.2N/mm²低減され、最小ひび割れ指数は、0.2から0.4良化し0.73～1.23となった。

しかし、5月までに打込みを実施する9リフトの一般断面部（幅4.5m）では、目標ひび割れ指数を満足することができたが、それ以降で、打込みを行うリフト、さらに断面減少部では、ほぼ全リフトにおいて目標ひび割れ指数を満足することができなかった。

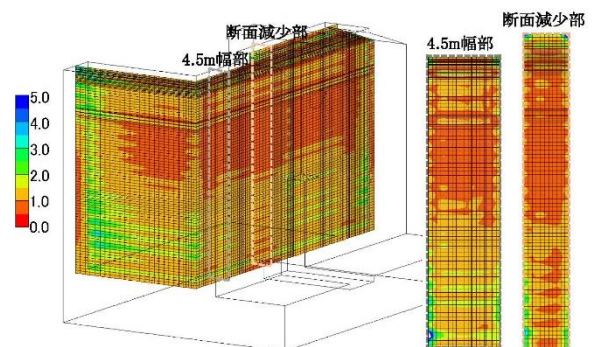


図-10 最小ひび割れ指数の分布（ケース D）

3.4 ひび割れ誘発目地の検討 (ケース E)

前述の対策では、目標ひび割れ指数を満足することができないリフトや部位があることから、追加の対策としてひび割れ誘発目地の設置について検討を行った。ひび割れ誘発目地の設置位置は図-11 に示す温度応力の方向を元に検討を行った。具体的には堰柱において縦断方向に引張力が生じた場合、a 部に示す箇所は断面が減少しているためより大きな応力が生じる。そこで断面減少部を挟む形でひび割れ誘発目地を設置し、発生引張応力の低減を図った。また、b 部に示す箇所は堰柱と胸壁の境目となる隅角部であり、堰柱で生じる縦断方向の応力と胸壁で生じる幅員方向の応力が合力となり、大きな発生応力となる箇所であったためその境目にひび割れ誘発目地を設置し、合力として部材に作用する応力を分散させた。部材内部温度はケース E と同じだが、最小ひび割れ指数は大幅に改善するに至り、a 部で 1.01~1.71、b 部で 1.05~1.42 となり、断面内部ではいずれの箇所においても 1.00 を上回る結果となった。

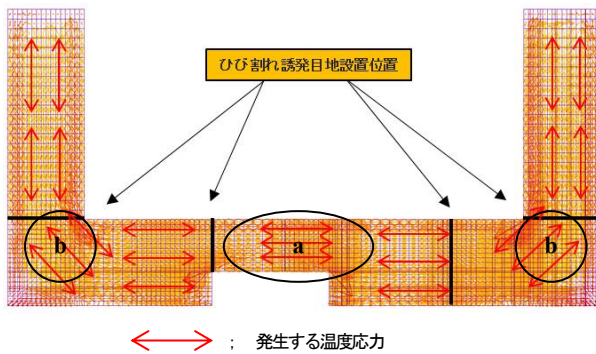


図-11 温度応力の方向

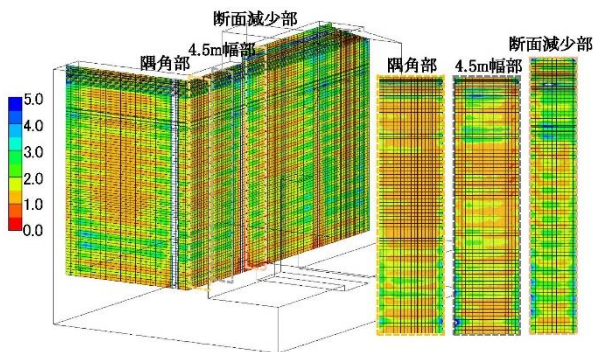


図-12 最小ひび割れ指数の分布 (ケース E)

3.5 パイプ配置の見直し (ケース F)

ケース E にて、断面内部ではいずれの箇所においても 1.00 を上回る結果となったが表面付近において 1.00 を下回る箇所が確認された。そこで、クーリングパイプ配置を見直し、パイプとコンクリート表面の距離を 1000mm

から 500mm としたケース F の解析を行った。その結果、部材表面温度は 4.1℃低減され 36.2℃に、最小ひび割れ指数は 0.52 良化し 1.35 となった。ケース F にて、断面内部・表面部全ての箇所において最小ひび割れ指数 1.00 を上回った。

4. ひび割れ抑制対策の実施

4.1 クーリング設備と計測計画

(1) クーリング設備

図-13 に水門本体のパイプ配置 (平面図) を示す。クーリングパイプの配置系統は、片側 4 箇所を設置するひび割れ誘発目地の位置を考慮し、川表および川裏側の左右胸壁に各 1 系統、堰柱部は片側 3 系統とし合計 10 系統とした。

実際に配置したクーリングパイプは、打込み日の変更や気温の変動などにより打込み温度が解析時より高くなる場合もあることなどを想定し、解析時より直径の大きなφ34mmの一般構造用炭素鋼鋼管 (STK400-E-G) を使用した。クーリング水は、地下水を使用し、解析時に設定した通水温度である 15℃以下となるように、冷却能力 75kW の空冷チラーユニットを冬期は 1 台、夏期は 3 台使用することとした。また、各リフトの打込み前には系統毎に通水試験を実施し、通水量およびパイプ継手部からの漏水の有無の確認を行った。

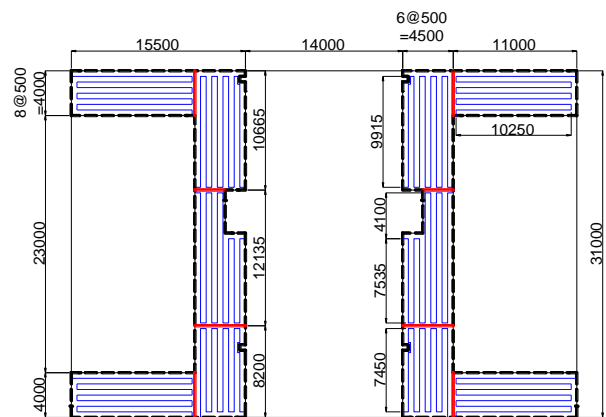


図-13 パイプ配置平面図

(2) 計測計画

クーリング管理のため、各リフトの打込み毎に、コンクリート内部 4 箇所 (断面上部、断面中央、断面下側およびクーリングパイプ近傍)、コンクリート表面部、クーリングパイプの入り口および出口、外気温の計測を行うこととした。また、現地での計測した各温度は、クラウドへ送信し、リアルタイムで、離れた事務所のパソコンやスマートフォンでも確認できるようにした。

4.2 クーリング管理と温度計測結果

パイプクーリングの管理は、原則、打込み時から通水を開始し、コンクリートの内部温度がピークに達した後、冷やし過ぎにより、温度勾配が急激とにならないようにそのピーク温度から 5°C~10°C低下した後、通水を停止した。その後は、再上昇した温度がピーク時の温度を超えないように管理を行った。

温度計測結果として、**図-14**に5月に打込みを行った本体第5リフトの温度履歴を、**図-15**に7月に打込みを行った本体第12リフトの温度履歴を示す。

第5リフトでは、コンクリートの打込み温度が解析時より5°C高く18°Cであり、かつ日平均気温が解析時より5°C程度高かったにも関わらず、ピーク時までの温度履歴は解析のものとはほぼ一致していた。このことは、解析時よりクーリングパイプ径が大きいこと、また、通水量を解析時より4割程度多い220/minで実施できたことにより、冷却能力が大きかったことによると考えられる。

また暑中時の打込みとなった第12リフトでは、解析時のひび割れ指数が1.06であり、特にコンクリートのピーク温度が解析値を超えないように管理する必要があったリフトであったが、前述のように実際のクーリングパイプ径が大きかったことや本リフトにおいてもクーリング水の通水量を多くすることができたことから、解析値より低い温度で管理することができた。なお、それ以外の夏場に打込みを行ったリフトにおいても同様に解析値近もしくはそれより低い温度で管理することができた。

コンクリート打込み時の状況を**写真-1**に示す。本体工事では1mのリフト高さの中央にクーリングパイプを配置することで、打込み中、パイプ位置を確認しながら締め作業を行うことができ、パイプレーターをパイプに接触することで発生する漏水を起こすことなく、また、仮に漏水が発生した場合、直ちに目視確認することができるなどの利点があった。

最終リフトまで打ちあがった本構造物の全景を**写真-2**に示す。ひび割れ検査の結果、0.2mm以上の有害なひび割れの発生なく、本ひび割れ対策の実施により、有害なひび割れの発生を適確に抑制できたと考えられる。

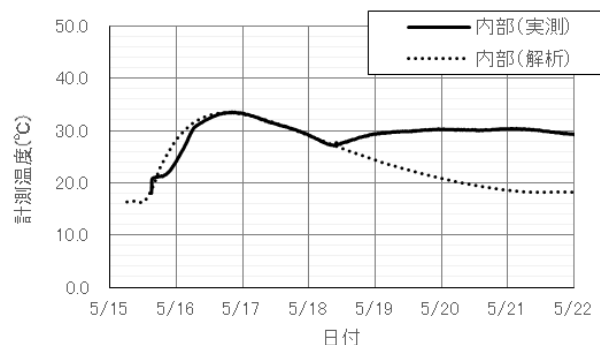


図-14 第5リフト温度履歴

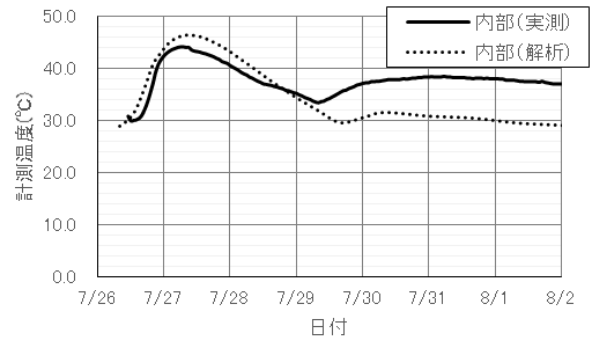


図-15 第12リフト温度履歴



写真-1 打込み状況



写真-2 水門全景

5. 結論

本検討では、堰柱部において壁厚4.5m、最大高さ19.0m、最大拘束延長31.0mを有する大規模な水門における温度ひび割れ制御方法として、a 水和熱の抑制(パイプクーリングの実施、打込みリフト高の低減)、b 収縮低減による発生引張応力の低減(膨張材の使用)、c 発生引張応力の分散(適切な位置に対するひび割れ誘発目地の設置)の a~c を組み合わせることが有効であり、有害なひび割れの発生を抑制できることを確認した。本検討が、同種・同規模の構造物に対して、ひび割れ対策検討を行う際に一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016