水門堰柱コンクリートの生産性向上と高耐久化へ向けた取組 Efforts to improve the productivity and duarability of floodgate weir pillar concrete

大城 佑介*
Yusuke Oshiro
真田 昌慶**
Masanori Sanada

Takashi Kudou

要 約

本工事は、東日本大震災復興計画に基づき関口川河口部の津波対策として、防潮水門を新規に築造するものである。堰柱コンクリート施工における生産性向上、高耐久化へ向けた取組としてパイプクーリングの高度化、Osmo の塗布、型枠長期存置による湿潤養生の長期化を実施した。コンクリート表面の緻密性の評価法として SWAT、トレントを実施してグレーディングを確認した。パイプクーリングの高度化により、工期短縮や作業量軽減による生産性向上、コンクリートの最高温度と温度ひび割れを抑制できた。Osmo 塗布、型枠長期存置により SWAT、トレントでグレーディングの目安が"良"以上の判定となった。

目 次

§ 1. はじめに

§2. 工事の特徴

§3. 課題と工夫

§4. 成果

§ 5. まとめ

§ 1. はじめに

本工事は、東日本大震災復興計画に基づき関口川河口部の津波対策として、防潮水門を新規に築造するものである。本稿では、堰柱コンクリートの温度ひび割れ対策として実施した、パイプクーリングの高度化による生産性向上の取り組み及びコンクリートの緻密性を向上するための取り組みについて報告する。

1一1 工事概要

工 事 名:二級河川関口川筋関口川水門土木工事施工場所:岩手県下閉伊郡山田町山田柳沢地内

発 注 者:岩手県沿岸広域振興局土木部宮古土木センター

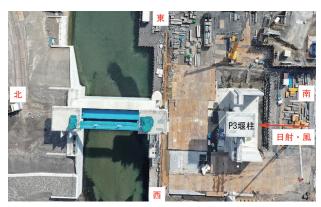
工 期:2015年10月21日~2022年3月20日

工事内容:水門本体工(鉄筋コンクリート,作業土工他),

地盤改良工 (機械攪拌工他),基礎工 (既製杭 工他),カーテンウォール工 (プレキャスト部 材組立他),管理橋(プレキャストセグメント 主桁組立架設他),仮設工



写真-1 水門本体を下流から望んだ上空写真



写真一2 水門本体上空写真

^{*} 北日本(支)関口(出)

^{**} 土木設計部設計一課

1-2 構造概要

水門本体工の構造の概要は以下の通りである.

堰柱・床版構造型式 : 堰柱 逆 T 型 コンクリート配合 : 27-8-25 N

C=344 kg/m³ (膨張材入り)

コンクリートのアルカリ量: $2.2 \text{ kg/m}^3 \text{ SO}_3 \equiv 6.4 \text{ kg/m}^3$

§ 2. 工事の特徴

2-1 特徴と課題

本工事の堰柱は、複雑な形状のマスコンクリート(約L22.5 m×H21.8 m×B3 m)であり、温度ひび割れの発生が懸念された。また、マスコンクリートでは DEF (Delayed Ettringite Formation) ひび割れ $^{1)}$ (以下 DEF ひび割れ)が問題となるため、コンクリートの最高温度を 80^{\circ} 以下に抑える必要があった $^{1)}$.

本水門は河口部に位置し、海風による乾燥と温度変化等の影響を受けるため、初期ひび割れ及び乾燥収縮ひび割れの発生が懸念される中、復興事業の早期完成を実現するために対策工の生産性に配慮する事が必要不可欠であった.

§3. 課題に対する工夫と実施内容

堰柱コンクリート施工上の技術的課題と工夫を報告する.

3-1 温度ひび割れの抑制及び生産性向上に対する実 施内容

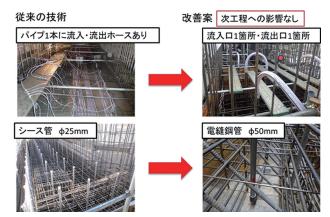
本堰柱は、複雑な形状のマスコンクリートのため、温 度ひび割れの抑制が課題となった.

当現場では膨張材の使用,ひび割れ補強鉄筋の配置,ハイパーネット(ひび割れ低減材)の配置,パイプクーリングを実施した.従来技術のパイプクーリングでは,写真一3(左)に示す通り,使用しているクーリング用のパイプ本数が非常に多く,コンクリート打設時・打設後にはパイプが支障となって作業効率が低下する.通水期間中を例に挙げるとレイタンス処理においては作業効率の低下,コンクリート打設後の次工程となる鉄筋組立施工開始日の遅延が考えられた.また,通水の開始・切替・停止といった運転操作時に起こりうる人的過誤によってコンクリートの品質低下といったリスクも考えられた.パイプクーリングの高度化に向けて実施した現場での取組について報告する.

(1) パイプ配置の改善

従来の技術ではパイプ1本毎に対して流入・流出ホースがあり、コンクリート打設時から通水を開始することは困難である。また、温度応力解析によって通水期間の目安として3.8日間必要であったが、通水期間中は鉄筋組立の作業が出来ず、次工程への影響が大きいと考えた。

改善案として写真一3(右)に示すように、コンクリ



写真一3 パイプ配置改善図



写真-4 フリーステップポンプ設置状況



写真一5 バルブ自動制御盤



写真一6 バルブ設置状況

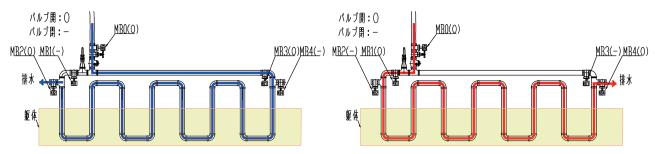


図-4 通水方向の自動切替えシステムの概要図

ートダムで用いられる水平パイプクーリングを応用し、流入口 1 箇所、流出口 1 箇所とすることによって、次工程の作業に支障となるホースを大幅に削減した. なお、クーリングパイプの設置及びクーリングパイプの充填の作業性の向上を目的として、パイプの種類をシース管 ϕ 25 mm から電縫鋼管 ϕ 50 mm に変更し、パイプ同士を曲管部材で接続してパイプを延長した.

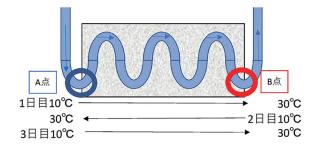
(2) 自動給水ポンプの採用

クーリング水を $30 \ell/\min$ を 2 系統,全揚程 H = 15 m の条件で供給する必要があったため,**写真一4** に示したフリーステップポンプ(FP-510)を採用した.フリーステップポンプは揚水量 $90 \ell/\min$,揚程高さ 80 m の性能を有し,超高層建築やシールドトンネル工事での仮設給水システムなどでの実績がある.

当現場では、パイプクーリング流入箇所のバルブを閉じた場合、圧力検知により自動停止する点や、給水元から使用箇所が遠く離れていたため利便性に長けていた.

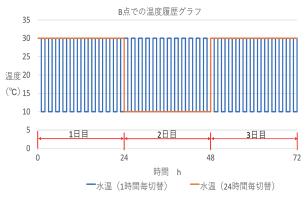
(3) 電動弁付バルブ,バルブ開閉用自動制御盤の設置

上記のように、クーリング水はパイプ延長が長いと流 入口と流出口の温度差が大きくなる. 24 時間毎の切替に よる過去の実績として P1 堰柱では、流入温度、流出温 度の差はパイプ延長 302 m で 24℃生じた. コンクリート を均一に冷却するために, 定期的に通水方向を切替える 必要があり、通水方向の切替えを行う作業量は少ないも のの休日を完全閉所にできなくなる. 働き方改革として 人による切替え作業が不要となるように通水方向の自動 切替え設備を設置した。図-4に通水方向の自動切替え システムの概要図を示す. 青矢印の方向へ通水時はメイ ンバルブ MB0, バルブ MB2, バルブ MB3 が開き, バル ブ MB1、バルブ MB4 が閉まる、赤矢印の方向へ通水時 は、メインバルブ MB0、バルブ MB1、バルブ MB4 が開 き, バルブ MB2, MB3 が閉まる. **写真-5** にバルブ自 動制御盤, 写真-6 にバルブ設置状況を示す. MB0~ MB4 には電動弁が付いており、自動制御盤からの信号で バルブの開閉を制御した.また、解析と同様の条件で通 水を停止させるためにコンクリートの最高温度検知から 12 時間後にパイプクーリングの運転を停止する必要が あったが、電動弁を設置することで、通水停止時の現場 での作業も自動化した. パイプクーリングの自動運転を 導入することによりクーリングの自動開始,自動停止,通



積算温度:50℃・日 積算温度:70℃・日

図-5 24 時間切替時の概要図



図一6 B点での温度履歴グラフ

水方向の自動切替えを無人化できた.

(4) 通水方向切替え時間について

当現場ではコンクリートダムで用いられる水平パイプクーリングを応用したことによって、通水延長が従来の鉛直パイプクーリングに比較して長くなった。そのため、通水方向の切替時間による温度の上昇差が生じる懸念があった。1 時間毎と 24 時間毎に通水方向を切替えた際の温度上昇の差について、図一5、図一6 を基に説明する。図一5 より流入温度が 10° C、流出温度が 30° C で 3 日間通水を行ったとする。通水方向の切替え時間が 24 時間の場合、A点とB点では積算温度に 20° ・日の差が生じる。

図-5のB点に着目し、温度の経時変化の概念を示したグラフが図-6である。B点における①1時間毎に通水方向を切替えた場合と②24時間毎に切替えた場合の積算温度の大小を比較する.72時間通水した際にB点での積算温度は①1440℃・h(1時間毎切替)、②1680℃・h(24時間毎切替)となる。

積算温度の観点から1時間毎に通水方向を切替えた方が24時間毎に切替えた場合よりコンクリートが均一に冷却される。当現場では1時間毎に切替えを行いコンクリートの均一な冷却を一部実施した。

(5) パイプクーリング自動運転制御システム

図―7 に自動運転システム概要図を示す. 現場にある制御用ノート PC にロガーのデータが送信され PC 画面上でパイプクーリングの状況を確認できる. また, PC 画面はクラウド上で閲覧でき, クーリングの最中に異常が生じるとメールにて登録宛先へ通知が来るため遠隔でクーリングの状況が確認できる.

(a) システムの制御項目と設定値

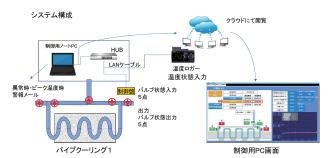
表一1にパイプクーリングシステムで制御可能な項目と設定値を示す。①パイプクーリングの自動運転開始の判定は、コンクリート打設箇所に設置した熱電対で計測した温度により行う。打設開始後の1層目において、コンクリート温度と外気温の計測値に2℃の温度差が生じた時点でクーリングを開始する制御とした。②ピーク温度(最高温度)判定後のクーリング自動運転停止までの時間は12時間とした。③通水の自動切替え時間は1時間とした。④通水方向が切替る際にメインバルブを一時停止する必要があるが、メインバルブ停止時間は5sとした。⑤ピーク温度付近での計測値の微小なバラツキによる誤判定を防ぐため、計測温度の降下量が、指定した時間内で指定した値以上となった点をピーク温度とした.指定時間は1時間、指定温度は0.1℃とした.

(b) 異常時の対応

表-2にパイプクーリング異常検知項目と設定値を示す。①通水方向の切替えは、1時間流入・流出の温度差が3℃以下の場合を異常値とした。②通常、通水方向切替え時やクーリング停止時にメインバルブ MB0 が閉じると、圧力が0.7 Mpa 程度を示す。圧力値が1分間で0.4 Mpa 以下の場合を異常値とした。③自動運転終了後にコンクリートの温度が1℃再上昇した場合を異常値とした。④写真-3のバルブ制御盤を自動運転から手動運転に切替えた場合、自動運転は一時停止する。手動運転の切替え時を異常とした。⑤パイプクーリング開始から異常判定検知を開始するまでの時間は、1時間とした。数値の設定は任意で可能で、過去の実績や温度応力解析を基に数値を決定した。①~⑤の異常を検知した際は、メインバルブ MB0 が閉じて、パイプクーリングの運転が一時停止する。

(6) 超低粘性 PC グラウトの採用

パイプクーリング終了後のパイプの充填には、ハイジェクター(太平洋ハイジェクター(Premix-AD) NETIS 登録番号: KT-110037-V 以下ハイジェクター)を使用した、ハイジェクターは超低粘性かつ材料分離抵抗性に優れた材料であり、狭い間隙やロングスパンの充填に有効である。当初は無収縮モルタルを充填する予定であったが、高い流動性による充填時間の短縮を目的にハイジェ



図一7 自動運転制御システム概要図

表一1 パイプクーリングシステム 制御可能項目と設定値

	設定値		
パイプクーリング設定項目	時間	温度	
①クーリング自動運転開始判別 温度差(外気温とコンクリート 温度の差)		2°C	
②ピーク温度判定後のバルブ自動運転停止時間	12h	_	
③通水方向自動切替間隔時間	1h	_	
④通水方向切替時メインバルブ 停止時間	5s	_	
⑤ピーク温度(最高温度)からの指定温度低下でのピーク検知	1h	0.1℃	

表一2 パイプクーリングシステム 異常検知項目と設定値

	設定値		
異常検知項目	時間	温度· 圧力	
①通水方向切替異常判定条件(切替時水温と現在水温の温度差)	1h	3℃	
②給水設備本管ルート異常判定差 分圧力差 (Mpa 以上)	1min	0.4 Mpa	
③クーリング停止後、コンクリー ト温度上昇		1℃	
④制御盤手動による一時停止			
⑤クーリング開始から異常判定検 知を開始するまでの待機時間	1h		

クターを採用した.

3-2 耐凍害性・耐遮塩性の確保のための実施内容

本工事の堰柱は山田湾,関口川河口付近に位置する事から海風による乾燥と温度変化等の影響を受けるため,初期ひび割れ,乾燥収縮ひび割れの発生が懸念された.また,水門通水部は海水で乾湿が繰り返えされ,塩害の発生が懸念された.以上から,コンクリートの耐凍害性,耐遮塩性の確保が課題となった.

コンクリート表層の品質やひび割れ抵抗性は養生の影響を受けやすいため、長期湿潤養生を実現するためにコ

ンクリート水平打継面は湛水状態にし、コンクリート用湿潤・保温養生マット(Q マット NETIS 登録番号: KT-980368-VE)にて養生した。コンクリート鉛直面や下面に対しては、経済性や工程面で優位な型枠存置にて長期養生を実施した。さらに水門通水部には高浸透性無機質コンクリート改質剤(Osmo)を使用した。

(1) 高浸透性無機質コンクリート改質剤の使用

当現場では、コンクリート緻密性を確保するため、湿潤養生を長期継続するとともに、高浸透性無機質コンクリート改質剤 (Osmo NETIS 登録番号: HK-070015-V以下 Osmo) を水門通水部に使用した。Osmo はコンクリート表層部の空隙、微細クラックから内部に浸透し、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応して、セメント水和物に組成の近い C-S-H ゲルを生成しコンクリート表層部を緻密化する。以上の原理によりマイクロクラックの抑制と閉塞効果が期待できるコンクリート表面含浸材である。

(2) 型枠の長期存置による湿潤養生の長期化

当現場では、堰柱、門柱、操作台の順に躯体の構築を行う中で、操作台張出部のコンクリート打設後から支保工取り外しに要する必要強度が発現するまでの期間に堰柱と門柱の型枠を取り外す計画として、堰柱、門柱の湿潤養生を長期化した。養生期間は最大で72日、最小で21日となった。

§ 4. 成果

4-1 温度ひび割れ対策

(1) 温度ひび割れ

コンクリートに生じたひび割れは, 許容ひび割れ幅 0.2 mm に対して最大で 0.15 mm であった.

温度応力解析に基づく解析結果とパイプクーリングによる実施工の対比表を表一3に示す。すべてのリフトにおいてコンクリートの最高温度を80℃以下に抑制することができた。また、P3 堰柱に関して、温度応力解析と実施工を比較して実施工の最高温度の値のほうが高い理由として、寒中コンクリート対策による打ち込み温度の違いが考えられる。温度応力解析ではコンクリートの打ち込み温度の設定を外気温+5℃で設定しているが、寒中コンクリート時の打ち込み温度(5~20℃)を反映していない。当現場で使用している生コン工場は寒中コンクリート施工時練り混ぜ水の温度をボイラーにより高くすることによりコンクリートの温度低下を防いでいる。そのため、実際に現場で打ち込むコンクリートは解析より高くなったものと推測される。

4-2 生産性の向上

(1) 工程の短縮

従来のパイプクーリングでは、打設後のパイプクーリング通水期間は次工程の作業ができないが、パイプクー

表一3 温度応力解析と実施工対比表

場所	LF	外気温 (°C)		打込み温度 (°C)		内部最高温度 (°C)		通水期間 (日)	最大ひび 割れ幅 (mm)
		解析	実施	解析	実施	解析	実施	実施	実施
	3	21.4	23.5	26.4	28.0	74.5	71.7	3.0	0.15
P1	4	22.0	17.5	27.0	26.0	71.0	68.3	3.0	無
堰柱	5	21.0	19.5	26.0	28.0	69.4	69.7	2.0	無
	6	20.2	28.0	25.2	31.0	68.5	73.7	2.0	無
	3	22.0	20.0	27.0	28.0	74.5	71.1	3.0	0.05
P2	4	20.7	22.0	25.7	28.0	71.0	72.4	3.0	無
堰柱	5	19.8	22.0	24.8	29.0	69.4	70.4	2.0	無
	6	19.0	20.5	24.0	26.0	68.5	70.2	2.0	無
P3 堰柱	3	5.5	2.5	10.5	11.0	51.4	55.6	2.9	無
	4	1.7	1.5	6.7	10.0	50.3	57.0	3.0	0.06
	5	1.2	3.5	6.2	14.0	48.5	56.2	2.7	無
	6	1.2	-2.0	6.2	11.0	47.6	53.9	1.9	無
	7	1.3	1.5	6.3	12.0	47.5	58.6	3.0	無

表一4 表面吸水速度によるグレーディングの目安

表面吸水速度 🕬	良	一般	劣
(m1/m ² /s)	0.0~0.25	0. 25~0. 50	0.50~

表一5 表層透気係数によるグレーディングの目安

透気係数kT	優	良	一般	劣	極劣
$(\times 10^{-16} \text{m}^2)$	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1	1~10	10~100

表一6 SWAT, トレント値測定条件

測定条件	
・コンクリートの試験材齢	60日以上
・コンクリート表面の水分率	5.5%以下
・コンクリートの養生方法	型枠存置
・改質剤の有無	無

表一7 改質剤塗布前後の SWAT, トレント値

打設場所	改質材の有無	試験日	SWAT (表面吸水速度)	判定	トレント (表層透気係数)	判定
P3 3 LF	無	2021年2月6日	0.049	良	0.016	良
P3 3LF	有	2021年5月26日	0.033	良	0.0083	優

リングの高度化により次工程への影響をなくすことで、 P3 堰柱に関して、約10日工期を短縮した.

また、型枠の長期存置により、5LF分の型枠取り外しの作業に要した施工日数として約6日工期を短縮した.

(2) 働き方改革

パイプクーリングの自動運転制御システムによりクーリング通水中の切替作業及びクーリング停止時に現場でのスイッチの切替作業を無人化することにより, P3 堰柱においては、現場の完全閉所を達成できた.

4-3 耐凍害性・耐遮塩性の向上

(1) 表面吸水試験 (SWAT), 表層透気試験 (トレント) による緻密性の評価

型枠の長期存置,改質剤の塗布効果を把握するため,表 面吸水試験(以下 SWAT)と表層透気試験(以下トレン ト)を使用し判定を行った.SWAT,トレント法は完全 非破壊でコンクリートの表層品質の評価を行うことがで きる. SWAT は強制的に圧力をかけて吸水するのではな く毛管力による吸水を行い、10分間時点での表面給水速 度 p600 (ml/m²/s) を測定する. トレントはコンクリー ト内を真空状態になるように脱気し、内圧が戻るまでの 時間を計測している.表一4に示すとおり、SWATのグ レーディングの目安は表面吸水速度 $p600 \text{ (ml/m}^2/s)$ の 値により"良""一般""劣"で判定される。また、表一 5に示すとおり、トレントのグレーディングの目安は透 気係数 kT (10⁻¹⁶ m²) の値により "優" "良" "一般" "劣" "極劣"で判定される. 測定条件としては、表一6に示す 通り試験材齢が60日以上、コンクリート表面の水分率 5.5%以下、養生方法は型枠の存置、改質剤の塗布は無し の条件とした.

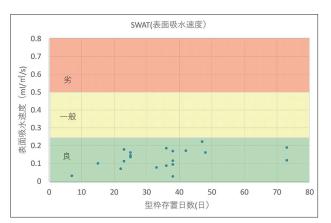
Osmo 塗布前と塗布後の対比表を表-7に示す. 塗布前と塗布後の SWAT, トレントのグレーディングの値は共に向上した. 特にトレントに関しては, グレーディングの目安が"良"から"優"に向上した.

図-8 に型枠存置日数と SWAT の値を示す。図-9 に型枠存置日数とトレントの値を示す。SWAT では、すべてのリフトでグレーディングの目安が"良"判定、トレントでは、すべてのリフトでグレーディングの目安が"良"判定となった。

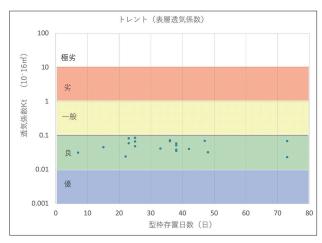
図-10 に型枠存置日数とコンクリートの表面水分率 の値を示す.型枠の存置日数が長くなると水分率は上昇 する傾向を示した.

§ 5. まとめ

- (1) 温度ひび割れ対策の結果, コンクリートの最大ひび 割れ幅を 0.15 mm に抑える事ができた.
- (2) コンクリートの最高温度を DEF ひび割れの対象と なる 80℃未満に抑えることができた.
- (3) パイプクーリングの高度化により次工程への影響をなくし、作業量軽減を実現できた。また、働き方改革として休日出勤の削減が可能となり生産性が向上した。
- (4) コンクリート表面の Osmo 塗布,型枠の長期存置に よる湿潤養生の長期化はコンクリート表面の緻密性 向上の可能性があると推察する.



図一8 型枠存置日数と SWAT 値



図一9型枠存置日数とトレント値

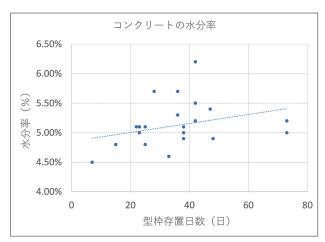


図-10型枠存置日数と水分率

参考文献

1) 公益社団法人 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, 平成 28 年 11 月