

12. 寒中マスコンクリート底版の温度ひび割れ制御の事例

A Case Study of Temperature Crack Control of Cold Weather-mass Concrete Bottom Slab

劉 翠平* 小川輝幸** 坂本繁一*** 牛島 栄****

—概要—

部材断面の大きいコンクリート構造物では、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが生じやすくなるため、ひび割れに関する照査を行い、有害な(過大な幅の)ひび割れが発生しないことを確認することが原則となり、ひび割れを制御することは品質確保の上で重要な課題の一つである。近年、温度応力解析によって事前検討を行い、適切な対策を取った上に適切な施工管理を実施し、ひび割れの抑制・防止に達成する技術が適用されている(図1)。本報告では、厳しい寒さを受ける東日本大震災で被災した釜谷水門の災害復旧工事(写真1)の底版本体における温度ひび割れ制御、その計測結果および施工結果について報告するものである。

—技術的な特長—

広がり大きい底版本体は設計上の制約および復興工事における現地の特殊な工期、工程管理および資機材の調達などを配慮し、あらかじめ温度応力解析を行い、配合の変更、実施可能なブロック割りと保温・養生との組み合わせを絞り出した。そして、寒中施工におけるマスコンクリートの施工時の工程管理について現場で工夫し(写真2)、ひび割れ幅が過大とならないように、ひび割れの抑制を図ることとした。結果として、温度による表面ひび割れが生じたものの、ほぼ事前検討で予想した箇所にひび割れが発生したことを確認できた。また、ひび割れの幅は時間の経過とともに閉じていく傾向であり、その最大幅は水密性を確保する上限値以下にあったことを確認した(図2)。よって、本報で実施したひび割れ抑制対策は効果が十分に得られた。本工事で得られた技術研究の成果を今後の類似工事に適用し、ひび割れが施工時に生じるリスクを低減することに寄与できる。

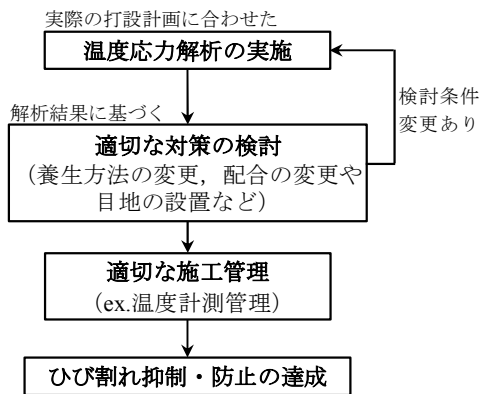


図1 温度応力解析を用いた事前検討の流れ

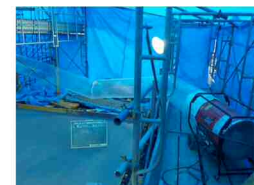


写真1 対象工事

写真2 養生の様子

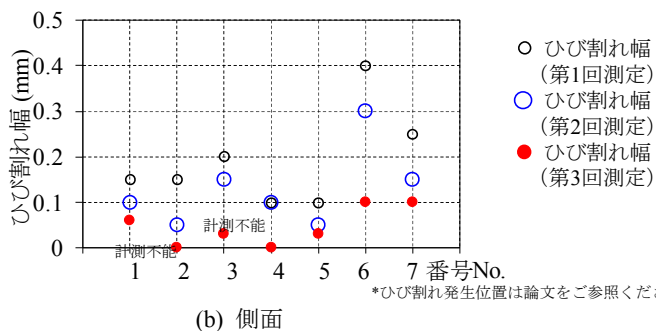
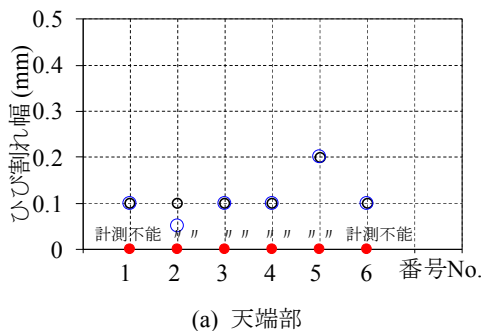


図2 ひび割れ幅の変化傾向

*技術研究所建築研究室 **東京土木本店工事第一部 ***技術研究所土木研究室 ****執行役員技術研究所長

寒中マスコンクリート底版の温度ひび割れ制御の事例

A Case Study of Temperature Crack Control of Cold Weather-mass Concrete Bottom Slab

○劉 翠平* 小川 輝幸** 坂本 繁一*** 牛島 栄****
Suihei RYU Teruyuki OGAWA Shigekazu SAKAMOTO Sakae USHIJIMA

ABSTRACT Large cross-sectional concrete member is prone to cracks due to temperature stress originated from hydration heat, so that it is avoided occurrence a crack with excess width to ensure the quality of concrete structures. Temperature stress analysis is applied for the establishment of a proper plan for construction site management so as to suppress and to prevent temperature crack on large cross-sectional concrete member. In this paper, optimization of water-cement ratio of concrete, partition of placing sections and insulated curing method were investigated to suppress temperature crack on the mass concrete bottom slab' surfaces. The results showed that the places of temperature crack were generally predictable, while the width of temperature crack decreased with the lapse of time. It was confirmed that the maximum width of the temperature cracks was small enough to secure the water-tightness and durability. The technique investigated in this paper was effective for suppression of temperature crack and provided useful information for the application to similar structures in the future.

Keywords : 実構造物, マスコンクリート, 温度履歴, ひび割れ制御, 寒中施工

Actual structure, Mass concrete, Temperature history, Controlling crack, Construction in cold weather

1. はじめに

部材断面の大きいコンクリート構造物では、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが生じやすくなるため、ひび割れに関する照査を行い、有害な（過大な幅の）ひび割れが発生しないことを確認することが原則となり、ひび割れを制御することは品質確保の上で重要な課題の一つである^{1), 2), 3), 4)}。

マスコンクリートの内部温度を下げる方法は、使用するセメント種類の変更や単位セメント量の低減など材料・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多くの方法が挙げられる¹⁾。近年、実際の施工状況に合わせていくつかの方法を採用することによって品質を確保した上でトータルコストを抑える事例が見られる。また、図1に示すように、温度応力解析によって事前検討を行い、適切な対策を取った上

に適切な施工管理を実施し、ひび割れの抑制・防止に達成する技術が適用されている。

本報告の対象は、図2に示すような東日本大震災で被災した釜谷水門の災害復旧工事として実施されており、底版本体は寒中施工のマスコンクリートとなり、温度ひび割れ発生メカニズムは内部拘束作用によるものが卓越するため、適切な対策をとれば有害なひび割れは発生しにくいと考えられる。しかし、設計上の制約から、使用するセメントの種類は一般的に高炉セメントに限られており、これを踏まえて事前解析を行った結果、ひび割れ制御対策案としては打設後に打込まれたコンクリートの内部温度の上昇を抑えるパイプクーリングの実施、または表面からの放熱を防ぐ保温性の型枠・保温材の使用に絞られた。このうち、パイプクーリングが設計上の問題（水密性）や被災直後の資材調達の困難さなどとの兼ねあいから実施し難く、ひび割れ制御対策は、型枠・

*技術研究所 建築研究室
***技術研究所 土木研究室

**東京土木本店 工事第一部
****執行役員 技術研究所長

保温材の対応のみとなった。そこで、型枠の使用については、指針・規準や現場の工程に合わせて、保温方法、型枠解体などの施工計画は、すべて温度応力に関する解析的な検討から決定した。このように、施工検討した際に事前検討から実施まで、寒中施工におけるマスコンクリートの施工時の工程管理について現場で工夫し、ひび割れ幅が過大とならないように、ひび割れの抑制を図ることとした。

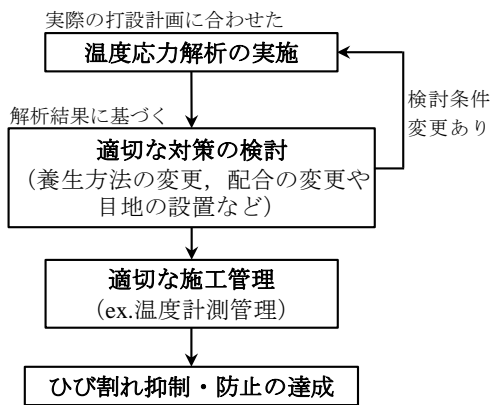


図1 温度応力解析を用いた事前検討の流れ

本報告では、実構造物の底版本体における温度ひび割れ制御、その計測結果および施工結果について報告するものである。まず、事前検討結果に

合わせて実際に行った打ち込み区画、養生方法および温度測定などを述べる。次に、計測した温度測定結果を分析する。さらに、表面ひび割れの発生状況、補修状況を報告する。最後に、本工事で採用したマスコンクリートのひび割れ抑制方法によってそのひび割れ抑制効果の有無を確認する。

2. 測定計画

2.1 工事概要

(1) 構造物の概要

検討対象となる国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所発注の水門の底版概略図を図2に示す。底版本体と翼壁とは設計上に伸縮目地によって区画されている。底版本体を層状に一括打設する施工計画を検討せず、7分割にブロック割りを行う施工計画を策定した。

底版本体の寸法が23.5m×28.8m、底版厚は3.0～3.2mであり、文献1), 2), 3), 4)によって厚さが80cm～100cm以上かつ広がりのあるスラブに相当するため、マスコンクリートとして施工管理を行う。

コンクリートの配合を表1に示す。セメントは

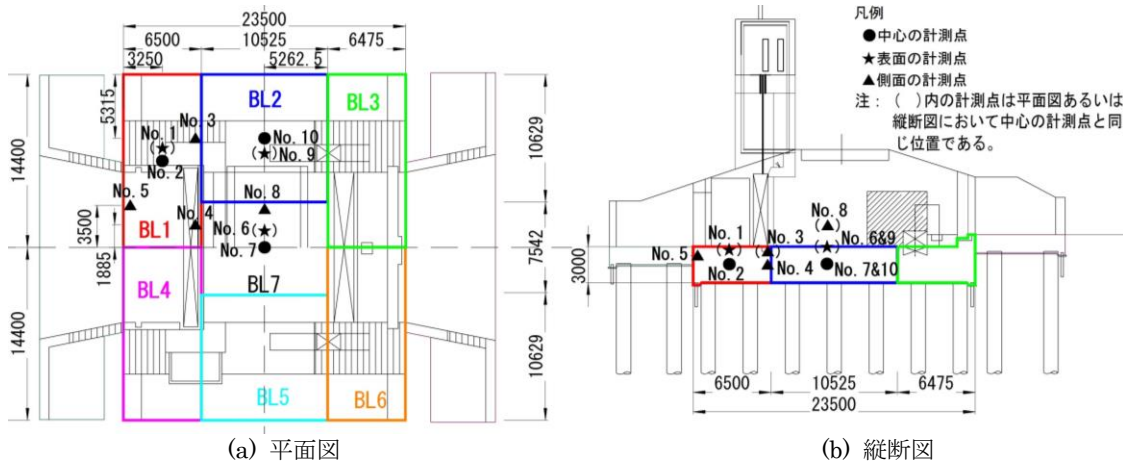


図2 底版の概略図・温度測定点の配置

表1 コンクリートの配合

セメントの種類	$f_{ck}^{*1)}$	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A ^{*2)}	混和剤 B ^{*3)}
高炉セメント B種	33	42.5	40.0	8.0	4.5	152	358	714	1115	3.94	0.5

*1) f_{ck} : 呼び強度, 基準材齢が28日

*2) A: マスターポリヒード15S (AE減水剤, 高性能タイプ, 標準形1種)

*3) B: スーパーラックノン (耐アルカリガラス繊維)

低発熱形の高炉セメント B 種を使用し、低減後の単位セメント量は 358kg/m³である。また、現場に到着した生コン車に耐アルカリガラス繊維を混入することによって表面ひび割れの抑制を図る。

(2) 気象条件

底版本体の打設計画時期は 2015 年 12 月下旬～2016 年 2 月中旬にわたり、工程的に外気温が低い冬季から春季にかけて施工される。気象庁に公表されている桃生観測点(現場から最も近い公的観測点)における 2012 年～2014 年の平均月外気温の平均値を表 2 に示す。図 3 に示す過去 3 年間の日平均外気温より、打設日には日平均気温は 4℃以下になるような気象条件であるため、寒中コンクリートとして工程管理を行う⁴⁾。

(3) 打設計画

最も近いレディーミクストコンクリート工場と 1 日の供給可能な最大コンクリート数量や打設現場に設置可能なポンプ台数を検討することなどによって打込み区画の大きさ、リフト高さお

よび継目の位置を決定し、体積変化に対する拘束ひいては温度応力の低減^{1),2)}を図る。

図 2 および表 3 に示すように底版本体を 7 分割して打設を行い、それぞれの打設量は 280m³～335m³となる。最大打設量は、ブロック BL5 と BL2 では 335m³となり、打設には朝 7 時から夜 23 時までとなる。

表 2 打設時期の予想平均外気温

月	12月	1月	2月	3月
平均外気温(℃)	1.9	-0.8	-0.8	3.9*

* 底版の養生期間

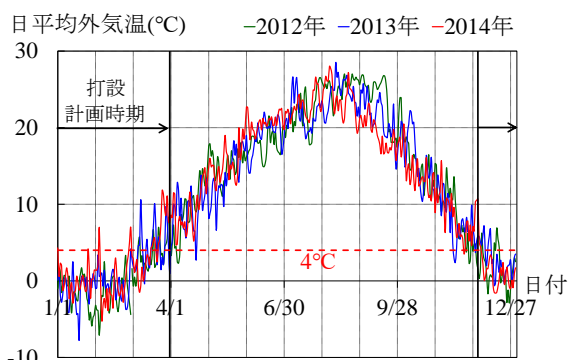


図 3 過去 3 年間の日平均外気温

表 3 底版本体の打設数量など

ブロック	打設日	打設数量 (m ³)	試料採取時のコンクリート温度(℃)	試料採取時の外気温(℃)	備考
BL1	2015.12.19	280	11℃(1回目) 12℃(2回目)	2℃(1回目) 6℃(2回目)	中央部中心：No.2； 中央部表面：No.1； 側面：No.3～No.5
BL6	2015.12.26	291	12℃(1回目) 13℃(2回目) 14℃(3回目)	0℃(1回目) 4℃(2回目) 4℃(3回目)	
BL4	2016.1.13	280	8℃(1回目) 13℃(2回目)	0℃(1回目) 5℃(2回目)	
BL3	2016.1.26	291	10℃(1回目) 14℃(2回目) 11℃(3回目)	0℃(1回目) 7℃(2回目) 3℃(3回目)	
BL5	2016.1.29	335	11℃(1回目) 11℃(2回目) 10℃(3回目)	3℃(1回目) 6℃(2回目) 2℃(3回目)	
BL7	2016.2.4	238	9℃(1回目) 13℃(2回目)	0℃(1回目) 8℃(2回目)	中央部中心：No.7； 中央部表面：No.6； 側面：No.8
BL2	2016.2.12	335	7℃(1回目) 13℃(2回目) 13℃(3回目)	0℃(1回目) 8℃(2回目) 7℃(3回目)	中央部中心： No.10； 中央部表面：No.9

型枠の転用および先打ちのブロックによって拘束された縁端の低減や施工性を配慮し、ブロック BL1, BL6, BL4, BL3 で対角線上に、そして BL5, BL7, BL2 の順序で打設を行う計画とする。各ブロック内部では断面内の温度差による内部拘束が主体となるため、底版本体に耐アルカリガラス繊維を混入することによって表面ひび割れの抑制を図る。

また、コンクリートの圧縮強度の試験回数に合わせ、試料採取時のコンクリートの温度および外気温を表 3 にまとめた。新しく打込んだコンクリートが初期凍害を受けないよう打設時のコンクリート温度を 5~20℃の範囲とし、気象条件が厳しくマスコンクリートであるため、表 3 に示すように打込み時コンクリートの最低温度は 10℃程度を確保する。

(4) 養生

表 1 に示す配合、(3)に示す打設計画および工事現場の気温条件に最も近い気温条件（観測地：宮城県 桃生の過去 3 年間の実測値の平均値）を用いて、温度応力解析によって養生条件および養生期間の事前検討を行い、ひび割れの抑制を図った。なお、底版本体は内部拘束応力が卓越し一般的に表層部分にひび割れが発生するため、養生には合板および湿潤・保温マットを採用し、乾燥や温度変化に伴うひび割れを抑制するとともに、強度発現を向上させる。

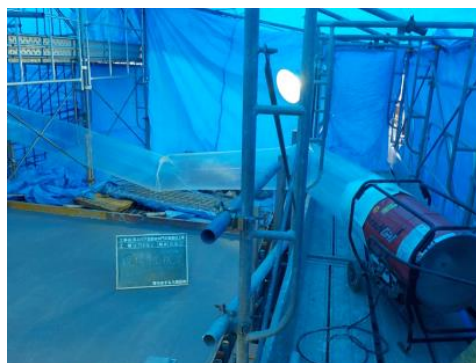
実施する養生条件一覧を表 4 にまとめる。各ブロックの側面に合板とエアバック 2 枚で 5 日まで養生し、型枠解体後にも 28 日までエアバック 3 枚で養生する。ブロックの上面は湿潤保温養生マットで、28 日まで湿潤状態で養生する。

表 4 養生条件一覧

養生面	期間		
	~5 日	5 日~28 日	28 日~
ブロック側面	合板 +AB 2 枚	AB 3 枚	露出
ブロック上面	湿潤保温養生マット (うるおんマット S タイプ)		露出

注：AB はエアバックである。

また、実施工程管理において初期凍害防止の観点のため、写真 1 に示すようにシートで養生領域を囲まれ、ファンヒーターによって表面温度を 5℃以上に保つように養生を行う。



(a) 内部の様子



(b) 養生全景
写真 1 養生の様子

2.2 測定点の設置

図 2 に示すように底版本体に計測点を計 10 点設け、コンクリートの温度履歴を計測した。底版のコンクリートは厚く広がり大きく内部と表面の温度差が大きいため、ブロック BL1、BL7 および BL2 のブロックの中心（以下、中心）とブロック表面からかぶり厚 86.5mm に一番近い鉄筋位置（以下、表面）にそれぞれ計測点を設置した。また、先行打設したブロックによる影響を確認するため、ブロック BL1、BL7 および BL2 の接合境界面の中心からかぶり厚の位置（以下、側面）に計測点を設けた。

写真 2~写真 3 に周囲温度およびコンクリートの温度測定の様子を示す。コンクリートの温度経時変化を素線径 0.65mm の熱電対を用いて 10 分ピッチで温度差が収束するまで計測した。

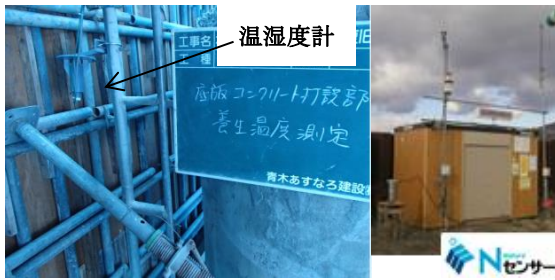
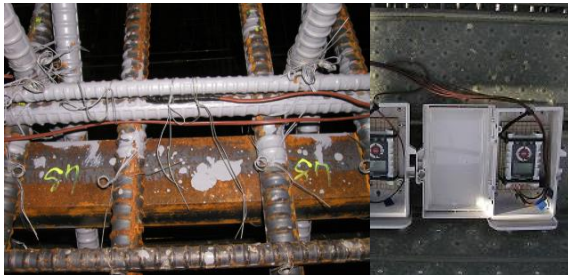


写真2 養生の環境温湿度測定



(a) 熱電対の設置 (b) データロガー
写真3 表面温度測定

3. 測定結果および考察

3.1 温度測定の結果

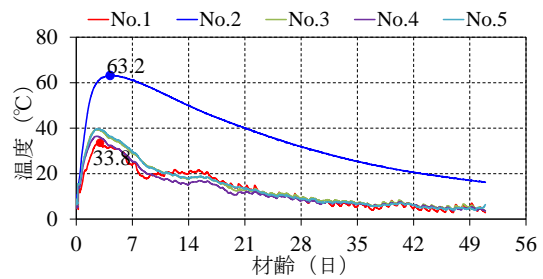
(1) コンクリートの中心および表面温度

打設完了から底版ブロック BL1, BL7 および BL2 の温度履歴曲線を図4に示す。ブロック中心および表面の最高温度、温度差の最大値を表5にまとめた。

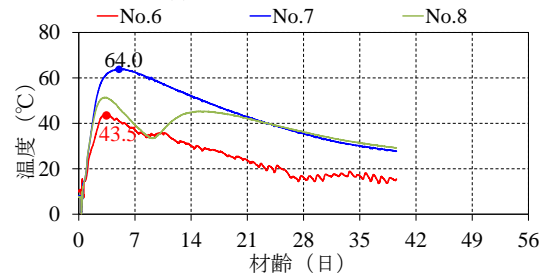
測定した底版ブロック BL1, BL7 および BL2 については、中心における最高温度はほぼ同程度であることを確認できた。これは、各ブロックの断面寸法は異なるものの、断面厚、コンクリートの配合および養生条件(冬季施工管理)は同じであるためと考えられる。また、図4に示すように、ブロック断面の中心に最大温度に達する際にはなく、温度が低下しているときに、中心と表面の温度差が最大となることを確認した。各ブロック表面の急激な温度低下を防止でき、内外の温度差および部材温度低下速度が大きくなりず保温養生による効果が見られ、打込み後30日ほど経過したところ中心と表面との温度差が収束することを確認した。

(2) 隣接ブロックへの影響

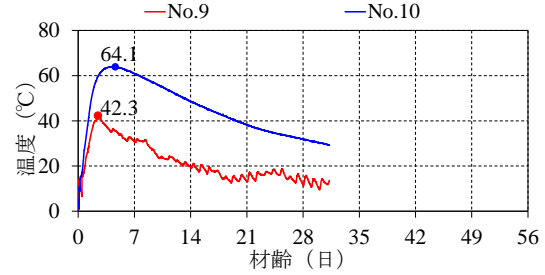
底版ブロック BL2 と BL7 との打込み間隔は約7日である。先打ちのブロックが境界領域に後打ちのコンクリートの水和熱を受け、ひび割れが



(a) 底版ブロック BL1



(b) 底版ブロック BL7



(c) 底版ブロック BL2

図4 コンクリート温度の経時変化図

表5 最高温度および温度差

ブロック	温度		温度差1 (°C)	温度差2 (°C)
	最高温度(°C)	中心		
BL1	63.2	33.8	29.4	40.9
BL7	64.0	43.5	20.5	26.4
BL2	64.1	42.3	21.8	32.2

注: 「温度差1」および「温度差2」はそれぞれ中心および表面の最高温度の差および同時刻における中心と表面との温度差の最大値である。

生しやすくなる場合がある。そのため、ここに、底版ブロック BL7 に設置した計測点 No.8 の温度経時変化図をブロック BL7 およびブロック BL2 の計測結果と重ねて図5に示し、隣接ブロックによる温度上昇の具合を確認した。

底版ブロック BL2 を打込んだ後、計測点 No.8 付近のコンクリートは温度が再び上昇し、No.6 より約 22°C 高くなった。実施工程においてブロック BL7 の温度が低下した後にブロック BL2 が打設したものの、ブロック BL7 と BL2 の境界付近にひび割れが発生せず、外部拘束による応力が少なくなった。

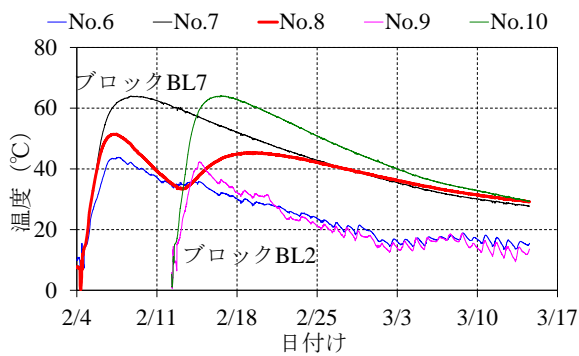


図5 コンクリート温度の経時変化図
(ブロック BL7 および BL2)

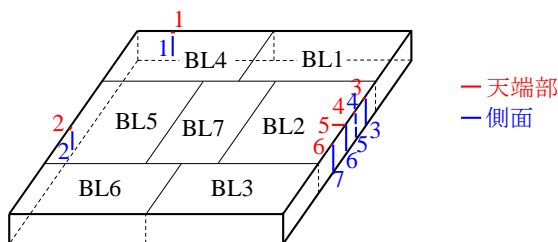


図6 ひび割れ発生位置の概略図

3.2 施工結果および考察

(1) ひび割れ発生状況

2016年2月10日～2月16日にわたり第1回の温度ひび割れ測定を行い、ひび割れの発生状況を把握し、最大ひび割れ幅などを測定した。その

後、第2回(2月19日)および第3回(3月7日)に測定し、ひび割れの評価と経過観察の結果によって補修要否の判定および補修方法の選定を行った⁵⁾。

コンクリートの温度が低下した時に図6に示すようにブロックBL2, BL4およびBL5の天端部に合計6本、側面に合計7本の表面ひび割れが見られた。内部拘束によって生じた温度ひび割れとなり、温度低下後にひび割れの幅は時間が経過しても大きくならず、閉じる傾向を示す場合が多いため、ここに、ひび割れの経過を観察し、幅や長さなどを測定した。

第1回から第3回の温度ひび割れ測定結果およびひび割れ幅の変化を表6に示し、その傾向が把握しやすいようにひび割れ幅の変化傾向を図7に示した。なお、最小読み取り値以下の場合については正確に測定不能のため、表に「-」、図に「計測不能」で表記する。コンクリートの温度低下後に、側面No.6のひび割れの最大幅は最も大きく0.4mmであったが、測定日の3月7日(材齢23日)に0.1mmまでに閉じたことを確認し

表6 ひび割れの測定結果

番号 (No.)	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	
ブロック	BL4	BL5	BL2				BL4	BL5	BL2					
発生位置	天端部						側面							
長さ(mm)	220	150	60	160	2100	230	2300	1600	3000	1200	900	3000	3000	
第1回測定	幅(mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.15	0.15	0.2	0.1	0.1	0.4	0.25
	経過日数(日)	28	12	4				28	12	4				
第2回測定	幅(mm)	0.1	0.05	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.1	0.05	0.3	0.15
	経過日数(日)	37	21	7				37	21	7				
第3回測定	幅(mm)	-	-	-	-	-	0.06	-	0.03	-	0.03	0.1	0.1	
	経過日数(日)	54	38	24				54	38	24				

注：水密性を確保する上限値の0.20mm以上ならば、太字で表示する。

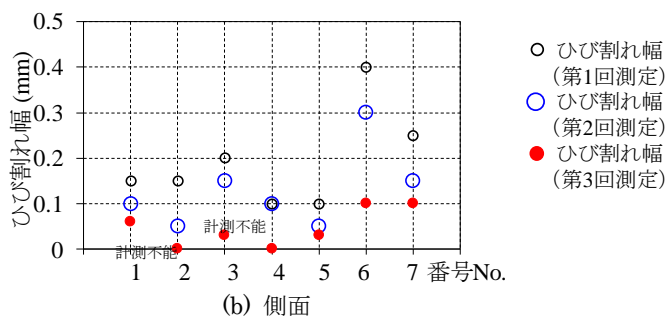
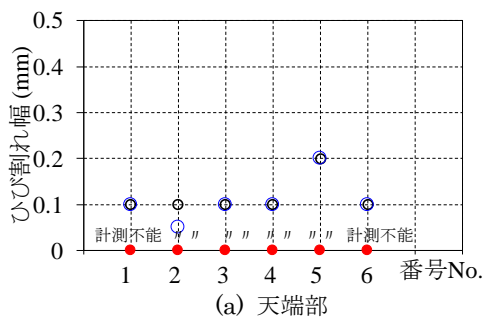


図7 ひび割れ幅の変化傾向

た。

(2) ひび割れの補修

第3回に行ったひび割れ診断の結果より、ひび割れ幅最大値は0.1mmであり、底版本体は内部拘束によって発生した表面ひび割れであるため、時間の経過とともに閉じる傾向であったことを確認できた。また、ひび割れ幅の限界値は次のように定められ³⁾、その上限値は0.2mmであった。

1) 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値：

異形鉄筋・普通丸鋼材、特に厳しい腐食性環境で算定し、0.30mm (0.0035*c*; *c*はかぶり) である。なお、かぶりは86.5mmである。

2) 一般の水密性を確保する場合：0.20mm

表6に示すように天端部に6本と側面に7本の表面ひび割れ幅の最大値は水密性を確保する上限値0.20mm以下であるため、補修する必要がないと判断できる。ただし、水密性・耐久性を考慮した結果として表面被覆工法を採用し⁵⁾、全箇所にあクリル系樹脂接着剤(低粘度型)で補修を行った。

(3) ひび割れ抑制の効果

本実構造物に対して、あらかじめ温度応力解析を行い、配合の変更、実施可能なブロック割りと保温・養生との組み合わせを絞り出した。そして、工程管理においてコンクリートの温度調節、運搬、打込み、養生などを計画とおりで実施した。前述したように、施工の結果としては温度による表面ひび割れ発生したが、第3回のひび割れ測定結果によってその幅が適切に抑えられたため、構造物の水密性・耐久性を損なう恐れはない^{1), 3), 4)}と判断できた。

以上のことを踏まえ、採用したひび割れ抑制の方法は適切であり、ひび割れ抑制に対して十分な効果があったことを確認した。

写真4に東日本大震災で被災した釜谷水門の工事前後の状況を構造物の設置環境が理解しやすいよう、位置関係を示す航空写真を示した。同時、竣工時の釜谷水門を把握できるように全景を

示した。



(a) 被災した既設水門と建設予定地の位置関係



(b) 竣工時の水門の全景

写真-4 釜谷水門の工事前後の状況

4. まとめ

本報告で検討した項目および得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 設計上の制約および復興工事における現地の特殊な工期、工程管理および資機材の調達によって、構造物のブロック割りと保温・養生との組み合わせで寒中施工のマスコンクリートの表面ひび割れ抑制を図った。
- (2) 中心および表面のコンクリート温度の経時変化を計測し、内外の温度差および隣接ブロックへの影響を確認しながら施工管理を実施した。
- (3) 施工結果として、表面ひび割れが生じたものの、その幅は水密性を確保する上限値以下に、時間の経過とともに閉じる傾向にあったことを確認した。よって、本工事で実施した温度ひび割れ抑制の効果が十分に得られたと考える。

【参考文献】

- 1) (公) 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 2008, 2012.6.15 (1版3刷)

- 2) (公) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'12, 2012.10
- 3) (社) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書「設計編」, 2008.3 (第1刷)
- 4) (社) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書「施工編」, 2014.9 (第2刷)
- 5) (公) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2009-, 2011.11.20 (1版6刷)