

琴ノ浦水門本体工事における マスコンクリートの施工について

山野井 研人

近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 海岸課 (〒640-8404 和歌山市湊薬種畑の坪1334)

和歌山県海南市沿岸部は、津波浸水想定区域の中に行政・防災中枢機能や高付加価値製品製造企業群が集積していることから、巨大地震による津波の襲来により、甚大な被害を受けることが危惧されている。災害から人命、財産を守るため、現在、護岸及び津波防波堤の補強、嵩上げと水門の設置を組み合わせた施設を整備し、津波浸水被害の軽減を図る津波対策事業を実施している。その一環として整備を進めている琴ノ浦水門は、海南地区の津波対策における防護ラインの一翼を担う重要な施設である。本稿は、当該水門の躯体構築に使用したマスコンクリートに係る施工について報告するものである。

キーワード 津波対策水門、マスコンクリート、パイプクーリング、保温型枠

1. はじめに

紀伊半島に位置する和歌山県では、今後 30 年以内に 70%程度の確率で発生するとされている南海トラフ巨大地震・津波により、広範囲にわたり甚大な被害を受けることが危惧されている。和歌山下津港海岸（海南地区）背後地は、行政・防災中枢機能や主要交通施設に加え、世界的シェアを誇る高付加価値製品の製造企業群が集積しており、海南市における東海・東南海・南海 3 連動地震の津波による被害額は約 5,000 億円に上ると試算されている¹⁾（図-1、図-2 参照）。

このため、近畿地方整備局和歌山港湾事務所では、2009 年度より津波対策事業を進めている。2012 年 8 月に内閣府が南海トラフ巨大地震による地震・津波想定の上方修正値を公表したことに伴い、当初の事業計画を見直して、護岸および津波防波堤の補強・嵩上げと水門の設置を組み合わせた施設整備を実施しているところである。

このうち本稿では、津波防護ラインの一部である琴ノ浦水門の本体築造工事におけるマスコンクリート対策について紹介するものである。

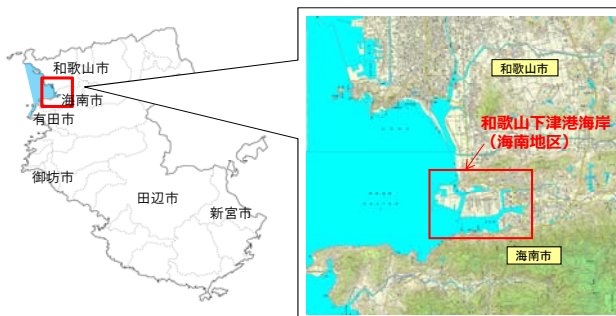


図-1 和歌山下津港海岸(海南地区)位置図

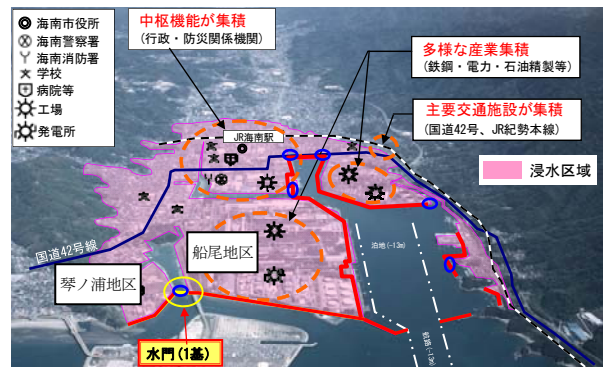


図-2 和歌山下津港海岸(海南地区)全体図

2. 琴ノ浦水門の概要

(1) 形状・寸法

琴ノ浦水門は、柱高 30m、径間長 30m、扉体高 9.5m の日本最大級クラスの水門である。また、本体コンクリートは、底版、堰柱、門柱、および操作台で構成されている。底版は厚み 4m の広がりのあるスラブ、堰柱・門柱は最大幅 5m の壁または柱状であり、いずれも大断面のコンクリート部材である（図-3 参照）。

(2) 打込みブロック割

当該地区におけるレディーミクストコンクリートの供給条件等から、底版は鉛直打継目を設けて平面的に 1 ブロック 10m × 約 13m とする 9 分割、堰柱は打込み高 3.0～3.5m として両岸で 6 分割、門柱は打込み高 3.5～4.1m として両岸で 10 分割、両岸の操作台を加えて、全 27 ブロックに分割してコンクリートの打込みを行った。

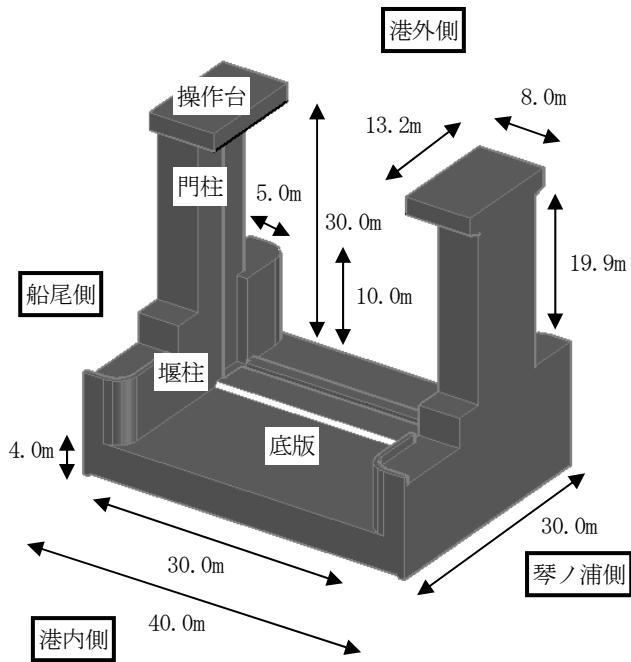


図-3 水門本體工鳥瞰図

(3) 使用材料

本体コンクリートには、安全性、使用性、耐久性、および後述する設計時のマスコンクリート対策検討から、表-1に示す材料を使用した。

なお、下表に示す膨張コンクリートは、JIS A 5308に規定されるレディーミクストコンクリートに準じる規格外品であるため、打込みに先立ち試験練りを行い、ワーカビリティ、発現強度、および拘束膨張率等について計画配合の妥当性を確認した。

表-1 使用材料

対象構造物	躯体コンクリート
セメントの種類	低熱ポルトランドセメント
呼び強度	33N/mm ² (56日強度)
スランブ	12cm
粗骨材の最大寸法	20mm
細骨材の種類	砂
粗骨材の種類	砕石
混和材の種類	膨張材
単位セメント量	327kg/m ³
単位膨張材量	20kg/m ³
単位水量	170kg/m ³
水結合材比	49%

(4) 施工時期

本体コンクリート打込み時期は、2015年10月から2016年2月である。本稿では、その際のマスコンクリート対策について述べる。

3. マスコンクリートについて

(1) マスコンクリートの定義

マスコンクリートとは、一度に打込むコンクリート容積の大きさ等により、水和熱による温度応力が問題となるコンクリート構造物を指す。マスコンクリートとして取り扱うべき構造物の部材寸法の目安は、下端が拘束された壁の場合は厚さ 50cm 以上、広がりのあるスラブの場合は厚さ 80cm 以上とされている²⁾。

(2) 温度応力によるひび割れパターン

図-4に温度応力によるひび割れパターンを示す³⁾。水和熱による温度応力は、内部拘束と外部拘束に大別される。前者は、大断面のコンクリートの場合に、水和発熱に伴う温度上昇が断面内で一様とならないことにより生じるものであり、温度上昇過程では高温の内部の膨張変形を低温の表面部が拘束し、表面部に引張応力が生じる(図-4左参照)。一方、後者は、既設コンクリートの上に壁状構造物を立ち上げる場合等に、新設コンクリート温度が最高点に達した後から常温に降下する過程で既設コンクリートに拘束され、打継部より少し上の領域で引張応力が生じる(図-4右参照)。一般に、内部拘束が主原因であるひび割れは表面ひび割れ、外部拘束が主原因であるひび割れは貫通ひび割れであることが多い。

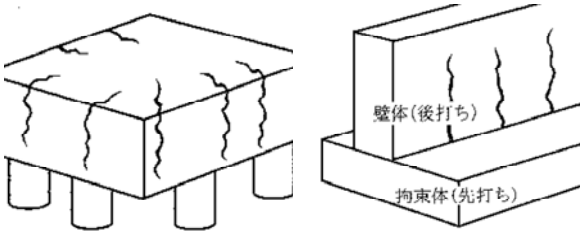


図-4 温度応力ひび割れパターン

(3) 温度応力によるひび割れに対する照査方法

温度応力によるひび割れ発生に対する照査は、以下に示すひび割れ指数の最小値を用いて行うことができる。3次元有限要素法を用いた温度応力解析により、ひび割れ指数を算定する場合、図-5に示す安全係数とひび割れ発生確率との関係が得られている⁴⁾。

また、一般的な配筋の構造物における、対策レベルに応じたひび割れ発生確率と安全係数の参考値を表-2に示す。

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr}$$
$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma(t)$$

ここに、

- $I_{cr}(t)$: 材齢 t 日におけるひび割れ指数
 $f_{tk}(t)$: " コンクリートの引張強度
 $\sigma(t)$: " コンクリート最大主引張応力度
 γ_{cr} : ひび割れ発生確率に関する安全係数

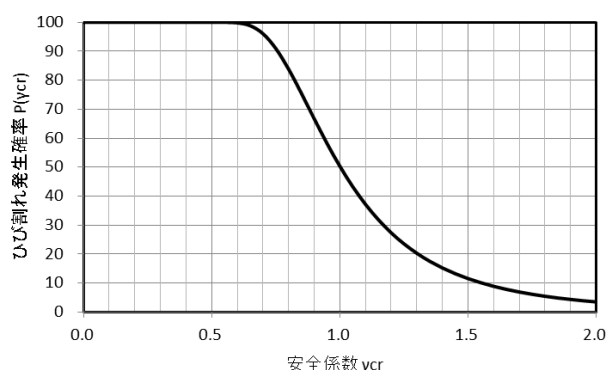


図-5 安全係数とひび割れ発生確率

表-2 標準的なひび割れ発生確率と安全係数の参考値

対策レベル	ひび割れ発生確率	安全係数 γ_{cr}
ひび割れを防止したい場合	5%	1.85 以上
ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合	15%	1.40 以上
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	50%	1.00 以上

4. 対策工の検討

対策工の検討は2段階で実施した。まず、設計時において無対策時および複数の対策ケースについて検討を行い、各種対策工の効果の特性を把握した。次に、施工着手前に実施工条件に即した解析条件で再検討を行い、対策工仕様を決定した。

(1) 設計時の検討

当該水門は、使用性の観点からコンクリートによって水密性を確保する必要はなく、また、安全性の観点から温度ひび割れにより部材の耐力が大きく低下することはないと考えられたため、温度ひび割れの発生は許容するものとした。一方、耐久性の観点からコンクリート内部に鋼材腐食の因子が供給されることを抑制するため、ひび割れ幅を制御する方針とした。温度ひび割れ抑制の対策レベルは、表-2を参考としてひび割れ発生確率に関する安全係数 1.0 以上と設定した。

コンクリート標準示方書およびマスコンクリートのひび割れ制御指針に準じて3次元温度応力解析を行った結果、無対策の場合の内部最高温度は80~90℃となり、水和熱による温度応力により最小ひび割れ指数は大部分で1.0を下回った。図-6、図-7に解析結果の一例を示す。

無対策ケースの検討結果より、温度ひび割れ対策の必要性を確認し、以下の対策を単独あるいは併用で実施した場合の効果を検討した。内部温度上昇を抑制

する対策は、内部拘束と外部拘束の両方に有効であり、引張応力抑制は、既設コンクリートによる外部拘束応力を低減させるものである。検討の結果、それぞれの対策単独では、要求性能（安全係数 1.0 以上）を満足させることができず、3つの対策を併用することとした。

▼体積変化を抑制する方法（温度上昇抑制）

- ・低熱ポルトランドセメントの使用
- ・パイプクーリングの実施

▼引張応力を抑制する方法

- ・膨張材の使用

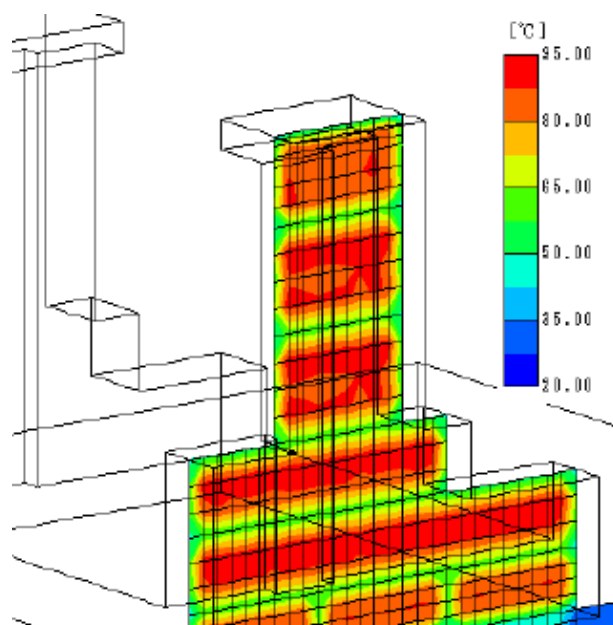


図-6 無対策解析結果の一例（内部温度）

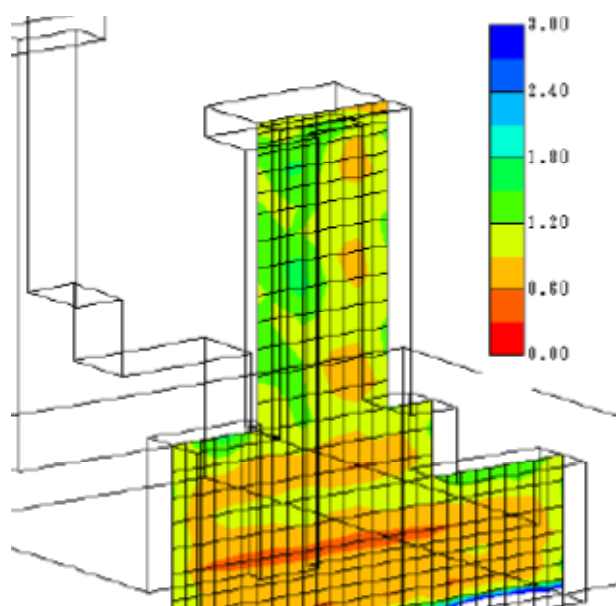


図-7 無対策解析結果の一例（内部ひび割れ指数）

(2) 施工着手前の検討

実施工時期は 10 月から 2 月であったため、工事の施工時期に合わせて施工着手前に解析条件等を再設定し、最適の温度ひび割れ対策の決定を目的として検討した。

表-3 に施工着手前の検討ケースを示す。対策ごとの効果の違いを明確に示すため、表中項目以外の、配合条件（表-1 参照）、外気温（和歌山県過去 10 年間の日平均気温を採用）、熱物性、力学特性、拘束条件（いずれもコンクリート標準示方書に準じて設定）は各ケースで同じとした。図-8～図-10 にそれぞれのケースの表面部最小ひび割れ指数分布図、図-11 に各ケースの内部最小ひび割れ指数分布、図-12～図-13 に各ケースの表面ひび割れ指数発生比率を示す。

全ケース共通の傾向として当該構造物では、図-11 より断面全域でのひび割れ指数低下は見られないことから、既設ロットの拘束による外部拘束型の貫通ひび割れが発生する可能性は低く、これは膨張材の効果が発現しているものと考えた。一方、打込み後の内外温度差に起因する内部拘束型の表面ひび割れの影響は大きく、構造物の長期的耐久性を確保するためには、表面部に発生する内部拘束型ひび割れを抑制する対策が重要と考えた。

case1 では、打込み時期等の施工条件が設計時検討から変更されたため、表面部のひび割れ指数が 1.0 を下回る箇所が全体の 50.5%となった。温度応力ひび割れ抑制対策として十分ではなく、改善対策が必要であると判断した。パイプクーリングの通水条件、配管配置、および門柱のリフト割を変更した case2 では、底版のひび割れ指数は改善するものの、冬季施工となる柱部で改善度合いが小さく、全体としてひび割れ指数が 1.0 を下回る箇所が 28.1%となった。冬季施工の

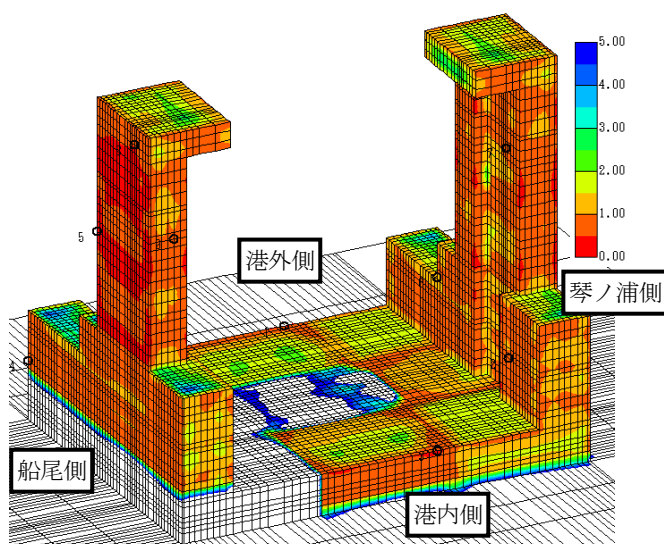


図-8 case1表面最小ひび割れ指数分布

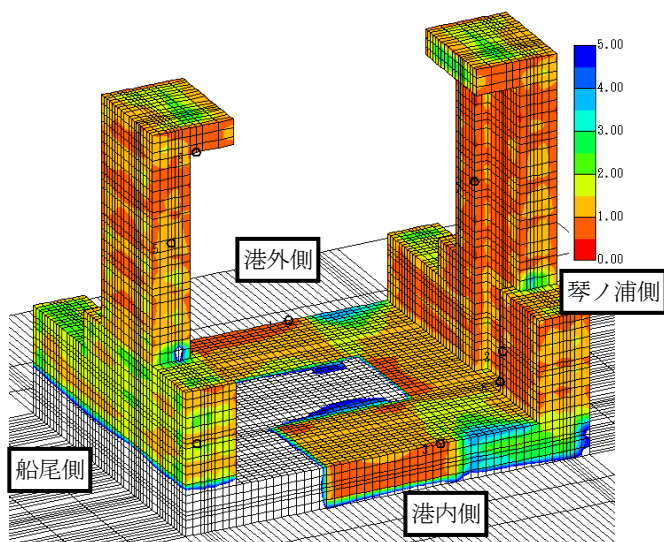


図-9 case2表面最小ひび割れ指数分布

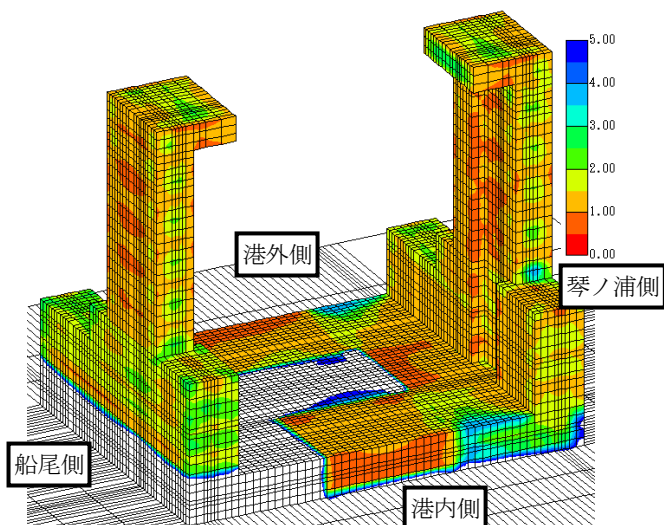


図-10 case3表面最小ひび割れ指数分布

表-3 施工着手前検討ケース

ケース		内容
case1	設計仕様	- 通水温度：10℃ - 通水速度：20cm/sec(φ34) - 通水期間：14日 - 配管配置：110～350cmピッチ - 門柱打込：3分割
case2	対策案①	- 通水温度：20℃ - 通水速度：30cm/sec(φ34) - 通水期間：5日 - 配管配置：75～150cmピッチ - 門柱打込：5分割
case3	対策案②	- 通水条件はcase2と同じ - 配管配置：75～150cmピッチ ※底版、琴ノ浦側堰柱のみ - 保温型枠：堰柱、門柱 - 門柱打込：5分割

特徴である表面部からの放熱による内外温度差が原因であると考えられた。case3 では、冬季施工となる柱部で保温型枠により表面からの放熱を抑制することで、ひび割れ指数が大幅に改善し、全体としてひび割れ指数が 1.0 を下回る箇所が 11.6% となった。

要求性能として表面部全箇所ではひび割れ指数 1.0 以上を目安としたものの、対策による経済性も考慮し、検討ケースの中で最もひび割れ指数改善効果が高い case3 を対策仕様に決定した。

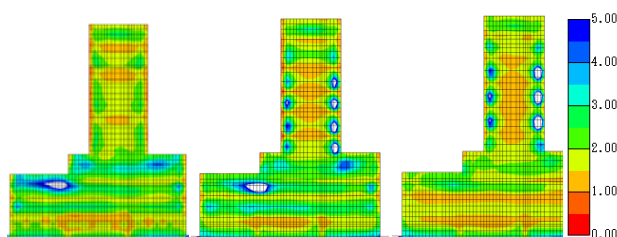


図-11 内部最小ひび割れ指数分布
(堰柱中央部、左からcase1,case2,case3)

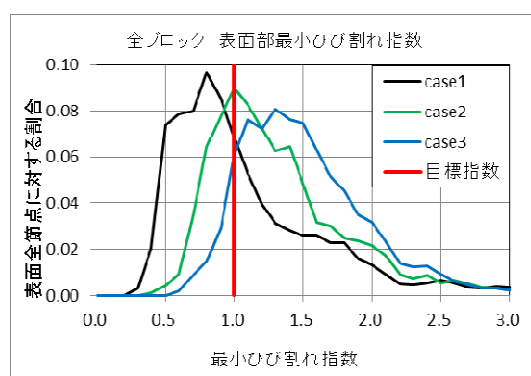


図-12 最小ひび割れ指数発生比率

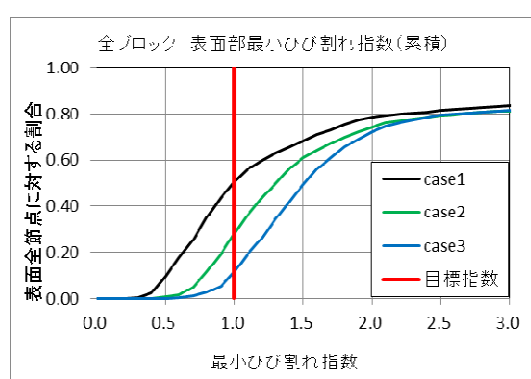


図-13 最小ひび割れ指数発生比率 (累積)

5. 対策工の実施

(1) パイプクーリング

10～11 月の比較的外気温が高い時期に施工した底

版および琴ノ浦側堰柱では、鉄筋・型枠組立時にコンクリート断面内に配管を行い(図-14 参照)、打込み完了直後から 5 日間、20℃の水を継続的に通水した(図-16 参照)。通水には、送り出し側の通水温度が常に 20℃程度に保たれるよう、水タンクに貯めた上水、冷却装置、およびコンクリート内配管を循環するシステム(図-15 参照)を構築した。



図-14 クーリングパイプ配管状況



図-15 循環水冷却装置

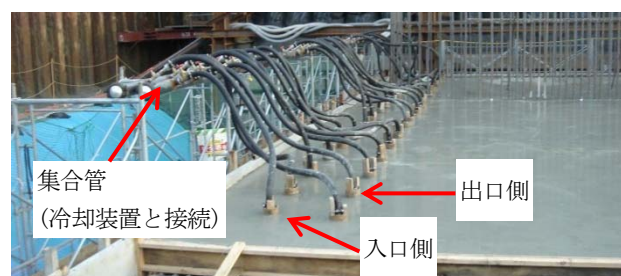


図-16 クーリングパイプ通水状況

(2) 保温型枠

施工時期が 12～3 月の寒冷期にあたる堰柱(パイプクーリングを実施した琴ノ浦側含む)、門柱の型枠には、通常用いられる鋼製型枠(メタルフォーム)の裏側に、熱伝導率が小さい発泡ポリエチレン製の断熱材を取り付け、保温効果を高めた型枠(本稿では保温型枠と称す)を使用した(図-17 参照)。



図-17 保温型枠設置状況

(3) コンクリート温度計測

コンクリート温度計測の目的は、施工初期段階でコンクリートの温度特性を把握し、型枠取り外し後の表面点検結果を踏まえて、解析結果の妥当性確認、および必要に応じて次工程の対策仕様にフィードバックさせることであった。

各ブロックの温度計測位置は、コンクリート断面の内部、側面部、上面部、および角部とし、パイプクーリング実施ブロックについては、クーリングパイプからの離隔の影響を確認するため、内部計測点をパイプ近傍と少し離れた個所の2点とした。温度計測には、コンクリート打込み前に熱電対を設置し、データロガーにより打込み直後から30分ごとのコンクリート温度データを全ブロックで取得した(図-18参照)。

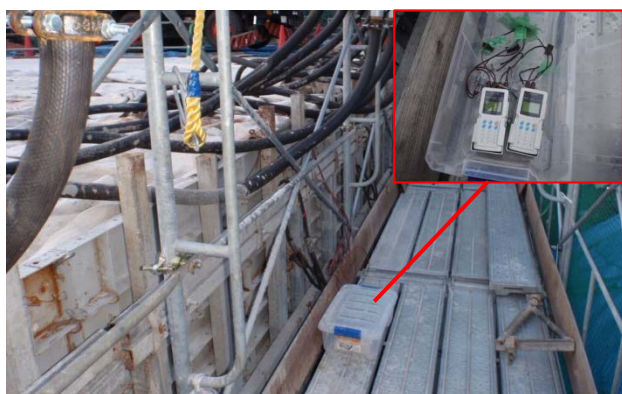


図-18 温度計測状況

図-19 に温度計測結果の一例を示す。温度計測データは、解析結果より得られた温度時系列データと比較し、両者の差、および生じた差の原因(打込み時温度、養生中外気温等)を推定した。全ブロックの計測結果から、実測温度と解析予測値は概ね同様の傾向を示しており、解析の妥当性を確認した。また、実測値と解析値の差を、型枠取り外し後の表面点検結果を踏まえて整理することで、次工程のコンクリート養生中にひび割れ発生の可能性を推定する判断材料となった。

施工中随時行った表面点検結果から、著しい腐食性環境に立地する構造物の耐久性に影響を及ぼす目安とされる0.2mm幅のひび割れは発生しなかった。これにより、新たな追加対策は不要であると判断できた。

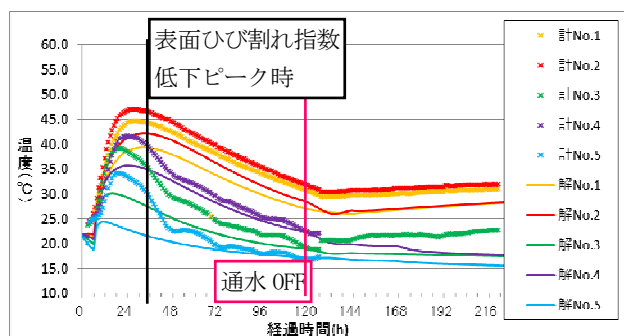
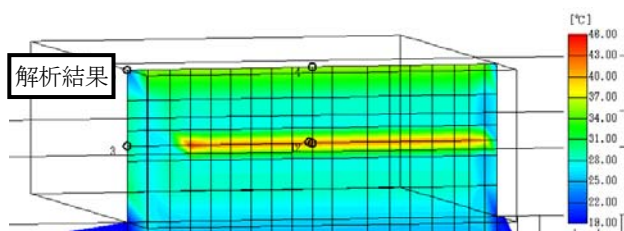


図-19 温度計測結果の一例

6. おわりに

本稿では、和歌山下津港海岸(海南地区)で施工した大型水門本体築造工事における、マスコンクリート対策について、対策工の検討および実施した対策内容を紹介した。対策検討は、設計時および施工着手前の2段階で実施し、低発熱コンクリート、パイプクーリング、膨張材、および保温型枠の使用を組み合わせ、施工時期に応じた対策を実施した。施工後の表面点検から、発生したひび割れは幅0.2mm未満のものが、ごく部分的に発生したのみであり、実施した対策の妥当性を確認した。

琴ノ浦水門は、海南地区津波防災事業の最初の水門工事であり、後続の水門工事におけるマスコンクリート対策の参考となれば幸いである。

- 1) 近畿地方整備局事業評価監視委員会：和歌山下津港海岸直轄海岸保全施設整備事業，近畿地方整備局 HP，2015.3
- 2) 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，2008.11
- 3) 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，2013.4
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2012.12