

マスコンクリートのひび割れ検討の実証

吉生 英二¹・佐藤 彰紀²

¹大林・前田建設工事共同企業体 阪神高速南島工事事務所 (〒590-0906大阪府堺市堺区三宝町4-247)

²阪神高速道路株式会社 建設事業本部 堺建設部設計課
(〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20 住友生命堺東ビル5階)。

マスコンクリート構造物の施工に際しては、事前の温度応力解析等によるひび割れ抑制の検討を行い、品質向上が図られている。本工事では事前の温度応力解析によってひび割れの発生がないと予測された底版において実施工にて許容値を超える幅のひび割れが発生した。そこで、以降の施工ブロックにおける有害なひび割れの発生を抑制するため、コンクリート温度の実測値をもとに温度応力の再現解析を行った。さらに、解析結果より養生方法を再検討し、次施工に反映した。本稿はその結果を報告するものである。

キーワード マスコンクリート、温度ひび割れ、温度応力解析、Qマット

1. はじめに

大阪府道高速大和川線（事業費2,773億円）は、阪神高速4号湾岸線より同14号松原線に連絡する全長9.9kmの自動車専用道路であり、大阪都心部の慢性的な渋滞や沿道環境の悪化を大幅に改善する大阪都市再生環状道路（延長約60km）の一部を形成する路線である。

本工事は大和川線のうち、本線部、（仮称）鉄砲ランプ部、換気所を含む延長755mの開削トンネルを施工するものである（図-1、2）。

工事概要を表-1に示す。

表-1 工事概要

項目	内 容
工事名称	三宝第4工区（その1）開削トンネル及び換気所新築工事
発注者	阪神高速道路株式会社
施工場所	大阪府堺市堺区南島町1丁～同区松屋町2丁付近
工期	平成21年9月29日～平成26年6月28日
工事内容	開削トンネル延長755m
主要工種	開削トンネル工、道路土工、換気所新築工、地中構造物撤去工
数量	開削土工：202,125m ³ 、函体工：81,996m ³ 土留壁工：43,257m ² 、工事用栈橋工：5452m ²



図-1 施工位置図

三宝第4工区(その1)開削トンネル及び換気所新築工事
延長約：755m 函体幅21.1m～39.8m

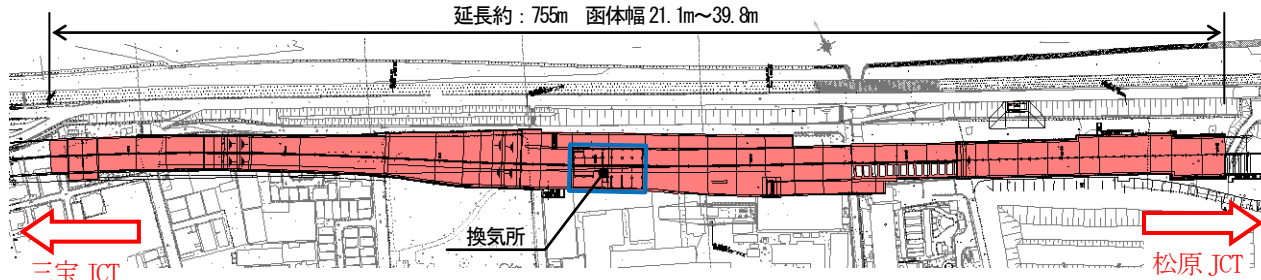


図-2 現場平面図

2. 本検討の背景と技術的課題

(1) 技術的課題の概要

本工事の開削トンネルは、函体工 81,996m³のうち底版厚が 1000mm～2500mm、側壁厚が 800mm～2400mm、頂版厚が 1000mm～2400mm と、トンネル構造すべてがマスコンクリート構造物であるため、発注時よりひび割れ制御鉄筋等の配慮がなされていた。また入札時には、「版状構造物の断熱湿潤養生」、「温度応力解析の実施」、「養生時温度管理」、「被膜養生剤による初期乾燥防止」等のコンクリートに関する技術提案を行っていた。

事前の温度応力解析を行った上で、本工事における初めての底版コンクリート打設（16-1BL 底版厚 t=1000mm）を 2011 年 11 月 1 日に、2 回目（17-1BL 底版厚 t=1100mm）を同年 11 月 16 日に打設したところ、「初期材齢における内部拘束型温度ひび割れ」と考えられるひび割れが発生した。そのため次の打設となった 18-1BL、15-2BL、17-2BL の底版では湿潤・保温養生マット（Q マット（写真－1））敷設のタイミングを早める対応を取ることにした。この対応により初期材齢におけるひび割れおよび養生期間中のひび割れについては制御することができたが、Q マット撤去後数日の間に最大 0.4mm のひび割れが発生した。

このため、これらのひび割れは当初判定した「初期材齢における内部拘束型温度ひび割れ」だけでは不十分と考えられたことから、当初の温度応力解析の内容に立ち戻り、原因の推定・対策の検討を行った。

では栈橋杭を起点に発生している。ひび割れの形状はほぼ直線状であり、大部分のひび割れ幅は 0.2mm 以下であるが、一部 0.25mm となっている。このひび割れの発生原因について検討したところ、

- ・打設したフレッシュコンクリートの品質に問題はなく、材料に起因するひび割れではない。
- ・コンクリートの打設方法に問題はなく、打重ね不良など打設方法の不具合によるひび割れではない。
- ・Q マット撤去時において、コンクリート表面は湿潤状態を保っていたことから乾燥収縮ひび割れの可能性は低い。
- ・コンクリートの最高温度および温度降下速度に関し、実測データと事前解析結果とで大きな差異はないことから、外部拘束による貫通ひび割れの可能性は低い。

以上が明らかとなった。しかしながら、コンクリートの内部温度と表面温度の差は、打設後 18 時間程度まで広がり続け、事前解析結果の温度差が 6℃であったのに対して、実測データは 15℃であった。また、コンクリートの引張強度が小さい初期材齢時に発生したひび割れであることから、コンクリートの内部と表面の温度差による内部拘束型の表面ひび割れである可能性が高いと考えられた。

これらの検討を受け、表面ひび割れ防止のため、Q マットの敷設時期をコンクリート打設完了から 14～16 時間経過後から 8 時間経過後に短縮することとした。

(2) ひび割れの発生状況

第 1 次打設 (16-1BL、17-1BL)

11 月に打設した 16-1BL のひび割れの状況を図-3 に示す。ひび割れは両端の棲部で縦断方向に、中央部



写真－1 Qマット構成写真

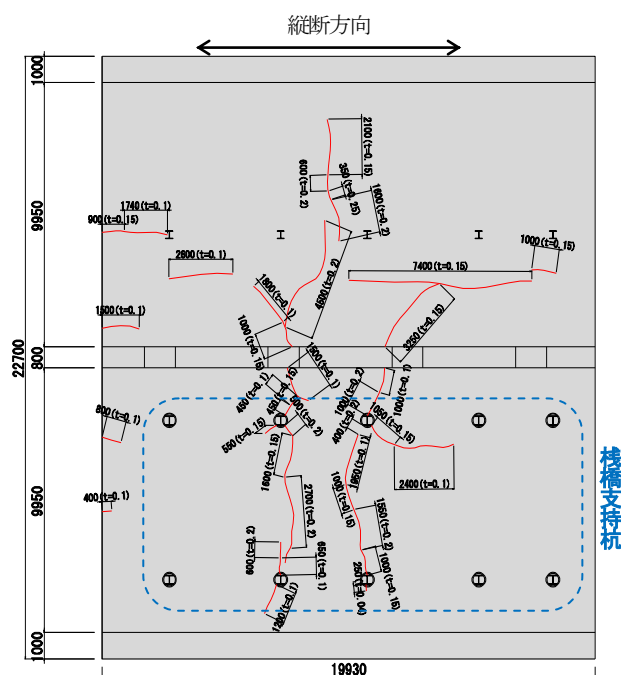


図-3 16-1BL 底版ひび割れ発生状況

(3) ひび割れの発生状況

第2次打設（18-1BL、15-2BL、17-2BL）

その後12月に打設した18-1BL、15-2BL、17-2BLでは、前述の対策により初期材齢におけるひび割れおよび養生期間中のひび割れを制御することができた。しかしながらQマット撤去後数日以内に最大0.4mmのひび割れが発生した。17-2BLのひび割れ発生状況を図-4に示す。

Qマット撤去後のひび割れ発生要因としては、ひび割れの発生時期がQマット撤去後数日以内であったこと、衝撃弾性波試験による調査の結果貫通ひび割れではなく表面ひび割れであると判断されたことから、コンクリート表面の急冷による内部拘束型温度ひび割れおよび乾燥収縮ひび割れが考えられた。この2つのひび割れ発生要因のうち主要因としては、最大0.4mmのひび割れがQマット撤去から短期間に発生していることから、コンクリート表面の急冷によるひび割れと考えられた。

第1次、第2次打設とも事前温度応力解析ではひび割れが発生する可能性は低いとされたが、実施工において内部拘束型温度ひび割れと推定される表面ひび割れが発生した。そこで温度応力解析に用いた各種パラメータやモデルを変更することで、より実施工に近い温度応力解析を実施し、その上でひび割れ抑制対策を再考することとした。

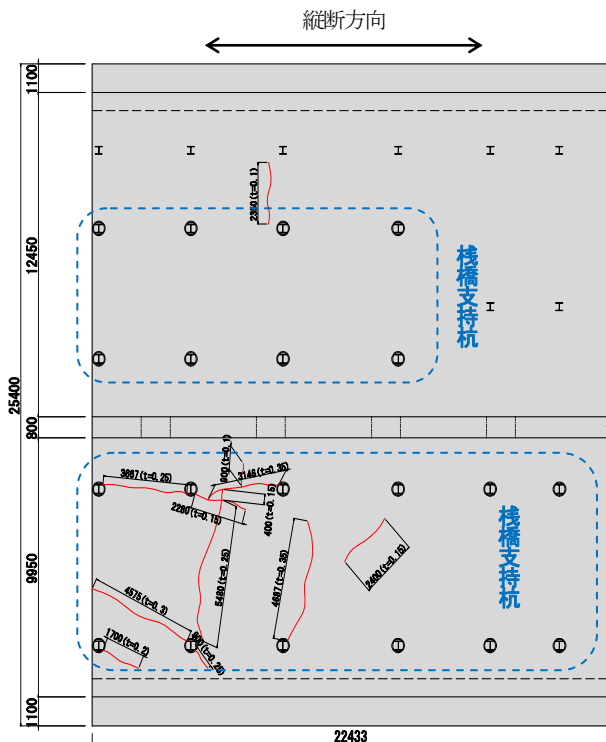


図-4 17-2BL 底版ひび割れ発生状況

3. 課題解決のための解析的検討と結果

(1) 解析モデルおよび解析条件

より正確に温度および応力履歴を再現するため、実施工時のコンクリート温度計測記録がある17-2BLについて、図-5に示すように底版コンクリートを貫く棧橋杭および中間杭も含めたモデルを構築した。

解析上のコンクリート打設日時は、実施工におけるコンクリート打設終了日時を用い、コンクリート打設温度は受入れ時試験におけるコンクリート温度の平均値、外気温についても実測データを使用した。また、コンクリートの配合・物性値、地盤の熱特性・力学特性は事前温度応力解析と同じ値を使用し、中間杭等のH形鋼の熱特性・力学特性はJCIのひび割れ制御指針に準拠した。

コンクリートの断熱温度上昇量、養生時の熱伝達率、圧縮強度特性は、以後に示す通り実現象（温度履歴および強度履歴）に合致するよう設定した。

(2) 温度履歴の再現

まず初めに17-2BLにおける実測コンクリート温度の再現を試みた。ここで、コンクリート温度を実測した箇所は底版中央(延長方向、幅員方向とも)のコンクリート中心部とかぶり部であるが、ひび割れの発生箇所がコンクリート表面部であるため、かぶり部のコンクリート温度を優先的に再現した。

変更するパラメータは以下の通りである。

①コンクリート断熱温度上昇量

$$Q(t) = Q_{\infty} \cdot (1 - \exp^{-\alpha t})$$

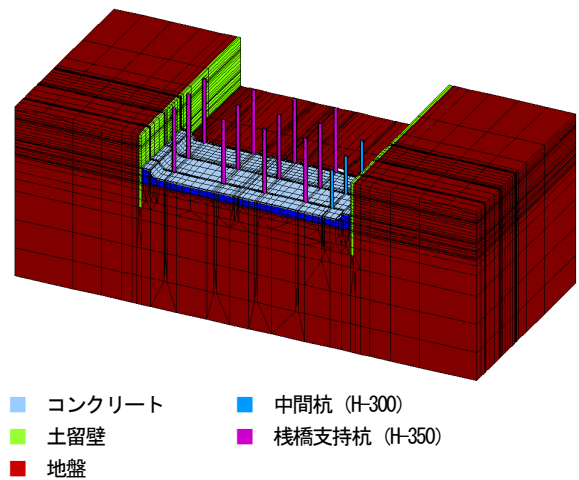


図-5 17-2BL 温度応力解析モデル

ここで,

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

α : 温度上昇速度に関する係数

であり、 Q_{∞} を変更することでコンクリートの最高温度を、 α を変更することでコンクリートの温度上昇速度を再現する。

②熱伝達率

施工で用いた湿潤・保温養生マット(Qマット)および空気の熱伝達率を変更することでコンクリート温度の降下速度を再現する。

以上のパラメータの組み合わせにより、表-2に示す6通りについて温度応力解析を実施した。解析結果および実測値の温度履歴を図-6に示す。図-6より表-2中のCASE1-6が、かぶり部において実測コンクリート温度と0.5°C以内の誤差で再現できていることがわかる。なお中心部においてもQマット撤去までは0.5°C以内の誤差で再現することができ、Qマット撤去後においても2°C程度の誤差で再現することができた。従って以降の解析ではCASE1-6パラメータを採用することとした。

表-2 解析ケースとパラメータ

CASE	解析条件			
	断熱温度 上昇特性		熱伝達率 (W/m ² °C)	
	Q_{∞}	α	Qマット	空気
1-1	59.95	0.575	4.0	14.0
1-2	65.06	0.837	3.5	14.0
1-3	56.64	0.837	2.5	14.0
1-4	57.00	0.750	2.5	8.0
1-5	57.00	0.750	2.5	6.0
1-6	57.00	0.750	2.5	Qマット撤去後 2日 : 6.0 その後 : 8.0
RC示方書	59.95	0.575	5.0 (養生マット)	4.0

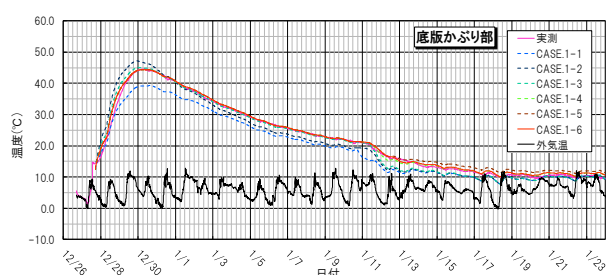


図-6 底版かぶり部コンクリート温度履歴の比較

(3) コンクリート強度履歴の再現

次に、コンクリートの圧縮強度については実施工におけるコンクリート圧縮試験結果と合わせるため、以下に示すコンクリート標準示方書の圧縮強度式におけるパラメータを変更した。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} \times f'_{ck} \times d(28)$$

ここで,

$f'_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの
圧縮強度 (N/mm²)

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

a : セメント種類別の定数 (BBの場合: $a=6.2$)

b : セメント種類別の定数 (BBの場合: $b=0.93$)

$d(28)$: 材齢28日に対する材齢91日の強度の増加率

(BBの場合: $d(28)=1.15$)

であり、 f'_{ck} および a を変更することで実施工時のコンクリート強度履歴を再現させた。再現結果を図-7に示す。

(4) ひび割れ発生再現

前項までの検討結果を用いて実施工におけるひび割れ発生履歴の再現を試みた。解析ケースとして乾燥収縮を考慮しないケース (CASE2-1) と考慮するケース (CASE2-2) を実施した。解析による最小ひび割れ指数の履歴を図-8～図-10に示す。

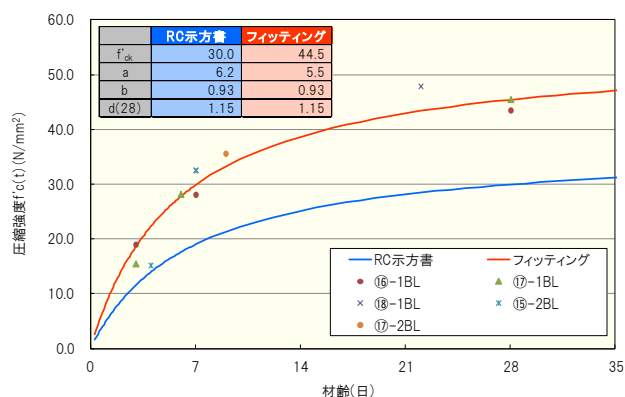


図-7 コンクリート圧縮強度再現結果

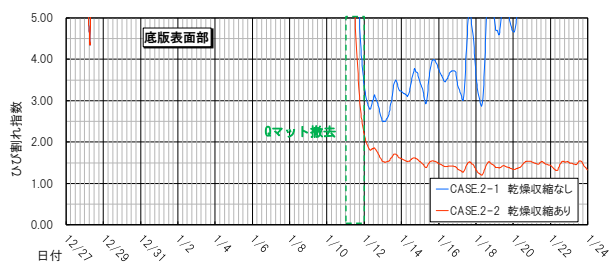


図-8 最小ひび割れ指数の履歴(底版表面部)

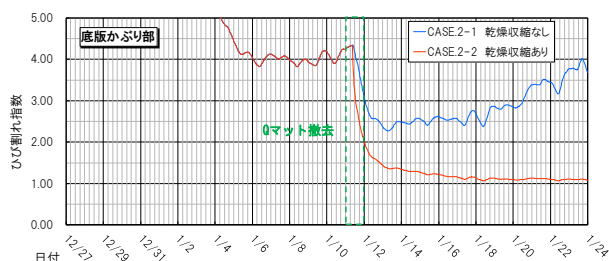


図-9 最小ひび割れ指数の履歴(底版かぶり部)

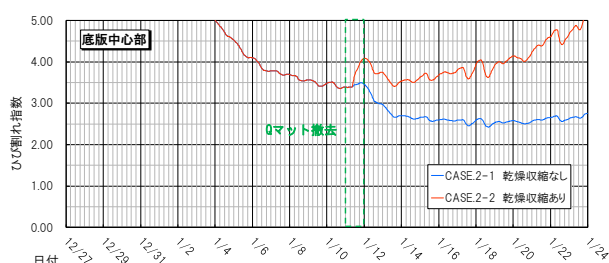


図-10 最小ひび割れ指数の履歴(底版中心部)

図から明らかなように、表面部およびかぶり部ではQマット撤去後のコンクリート表面の急冷に伴い内部拘束による温度応力が発生し、ひび割れ指数が急落していることが分かる。しかしながらCASE2-1においては最小ひび割れ指数2.00以上を保っており、一般的にはひび割れが発生する可能性は低いと判断できる。

一方で乾燥収縮を考慮したCASE2-2では、Qマット撤去後に温度応力にくわえ乾燥収縮が作用し、底版表面部において最小ひび割れ指数1.20、かぶり部において最小ひび割れ指数1.06と比較的小さい値となった。コンクリート標準示方書によるひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係から、ひび割れ発生確率は底版表面部において60%、かぶり部において78%であり、表面付近ではひび割れ発生の可能性が高いと判断できる。また、部材中心部の最小ひび割れ指数は3.36 (CASE2-1においても2.42) と十分に大きく、これより貫通ひび割れが発生する可能性は極めて低いと判断できる。

実施工において発生したひび割れは、いずれも表面ひび割れであること、Qマット撤去後まもなく発生していることから、CASE2-2はこれらを再現できていると判断されるため、これを以後の検討に用いることとした。

表-3 予測解析ケース・解析結果(最小ひび割れ指数)

CASE	解析条件				ひび割れ指数 (Qマット撤去後)	
	養生日数	乾燥収縮		表面部	かぶり部	
低減率		開始材令				
2-2	保温マット+湿潤シート	14日	—	14日	1.20	1.06
3-1	保温マット+湿潤シート	11日	—	14日	1.24	1.08
	湿潤シートのみ	3日				
3-2	保温マット+湿潤シート	14日	20%	14日	1.36	1.19
3-3	保温マット+湿潤シート	11日	20%	14日	1.40	1.22
	湿潤シートのみ	3日				
3-4	保温マット+湿潤シート	11日	20%	17日	1.63	1.38
	湿潤シートのみ	3日				
3-5	保温マット+湿潤シート	11日	20%	20日	2.26	1.65
	湿潤シートのみ	3日				
3-6	保温マット+湿潤シート	7日	20%	17日	1.72	1.42
	湿潤シートのみ	7日				
3-7	保温マット+湿潤シート	7日	20%	13日	1.46	1.23
	湿潤シートのみ	3日				

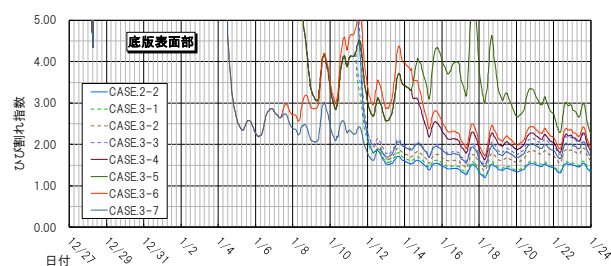


図-11 最小ひび割れ指数の履歴(表面部)

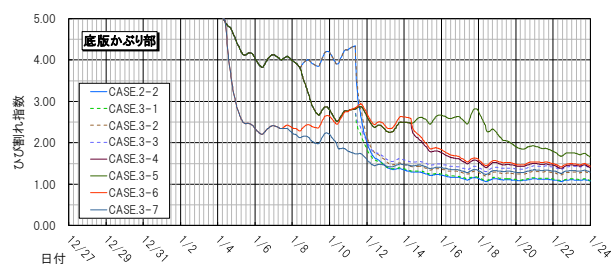


図-12 最小ひび割れ指数の履歴(かぶり部)

(5) ひび割れ抑制策の検討

以上の検討モデルを用いた予測解析を行い、今後のひび割れ抑制策を再考案した。

解析はQマットの保温マット、湿潤シートの設置期間、塗膜養生剤の散布による乾燥収縮の低減効果ならびに乾燥収縮の開始材令をパラメータとした8つのケースで行った。表-3に解析ケースと解析結果 (Qマット撤去後の最小ひび割れ指数) を示す。また、図-11、12にひび割れ指数の履歴を示す。

これらの解析結果より、ひび割れ指数について以下のことがわかった。

- ・湿潤養生シートと保温養生マットからなるQマットを段階的に撤去 (表面の急冷抑制) することにより0.02~0.04向上する。(CASE2-2⇒CASE3-1)
- ・乾燥収縮ひずみを20%低減 (乾燥収縮低減) させることにより0.13~0.16向上する。(CASE2-2⇒CASE3-2)

・急冷抑制と乾燥収縮低減を併用することにより 0.16
 ～0.20向上する。(CASE2-2⇒CASE3-3)

・乾燥収縮開始材令を3日遅延させることにより 0.16
 ～0.23 (CASE3-3⇒CASE3-4)、6日遅延により 0.43～
0.86 (CASE3-3⇒CASE3-5) 向上する。

・乾燥収縮開始材令を 3 日遅らせた条件の下
 (CASE3-4, 3-6, 3-7) では Q マットの段階的撤去の組合せとして「保温マット養生+湿潤シート養生」7 日 + 「湿潤シート養生」7 日 (CASE3-6) が最も効果的である。

このように、Qマットの段階的撤去（表面の急冷抑制）、塗膜養生剤の散布による乾燥収縮の低減および乾燥収縮開始材令の遅延がひび割れ抑制に効果的である。

(6) 以降の施工方針とその結果

以上の検討を踏まえ、残りの底版施工ブロック (16-2BL、17-3BL) の養生方法はCASE3-6の、「①塗膜養生材散布→②保温マット+湿潤シート養生7日、その後湿潤シートのみで養生7日→③湿潤シート撤去後、散水養生3日間（乾燥収縮開始材令3日遅延）」とした。解析では散水養生は6日間が最も効果的であったが、現場工程を鑑みて3日間とした。これはCASE3-6でも最小ひび割れ指数は1.42であり、ひび割れ発生確率は低い（発生確率25%程度）と判断したためである。この養生方法により施工した結果、以降のブロックでは目視確認できるひび割れは発生しなかった。

4. まとめ及び今後の展開

- ① 事前解析では予想しなかったひび割れに対し、実測データによる再現解析を行った。
- ② 再現解析から同定された条件を用いた予測解析により、今後の施工方針を検討した。
- ③ その結果、「塗膜養生材散布の後、保温マット+湿潤シート7日、その後湿潤シートのみ7日、湿潤シート撤去後散水養生3日間」の組み合わせで行うものとした。
- ④ 以上の検討結果を踏まえた以降の底版施工ブロックにおいては目視できるひび割れは発生しなかった。
- ⑤ マスコンクリートに対する温度応力解析では、一般的に乾燥収縮の影響は考慮しない。しかし本検討では解析パラメータを見直し、乾燥収縮を導入することで実現象をよく再現でき、以降のひび割れ抑制につながった。

今回は想定された幅以上のひび割れが発生したが、コンクリート内部温度を計測していたことで再現解析が可能となり、対策を講じることができた。本件のように連続したコンクリート施工がある現場においては、このような計測をしておくことで施工の初期段階で生じた不具合に対しても迅速な対応ができ、以降の施工における構造物の品質向上につなげることが可能となる。本報文が一事例として参考となれば幸いである。