

論文 打設管理記録を活用したマルチスケール統合解析システムによる実構造物のひび割れ評価

米田 大樹*1・石田 哲也*2

要旨：コンクリート構造物のひび割れ発生を抑制するためには、各種ひび割れ抑制対策の効果について定量的に評価することが重要である。本稿では、コンクリート構造物の挙動を統一的手法で評価可能なマルチスケール統合解析システム（DuCOM-COM3）と、山口県で運用されているひび割れ抑制システムのデータベースを活用することで、温度と乾燥の影響を同時に考慮した実構造物のひび割れ解析を実施した。その結果、実構造物のひび割れ発生の傾向を比較的良好に追跡できることを確認し、各種ひび割れ抑制対策について、その効果を数値解析によって評価した。

キーワード：マスコンクリート、温度応力解析、乾燥収縮、ひび割れ、マルチスケール

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れ発生原因とその対策は、設計から施工、維持・管理まで各段階に跨るものである。従って、プロジェクトの各段階で様々な組織や人間が関与するため責任の所在が曖昧になりやすく、ひび割れ発生の原因特定に必要な情報伝達も困難となりやすい。コンクリート構造物のひび割れ挙動を定量的に予測し、適切な対策を講じるためには、初期の計画段階から長期の維持・補修までを含めた全体のマネジメントシステムの構築が重要である。

以上の背景より、山口県では「ひび割れ抑制システム」と呼ばれるマネジメントシステムを構築し、コンクリート構造物のひび割れ抑制に取り組んでいる^{1),2)}。これは、図-1に示す「打設管理記録」を施工時に作成し、データベースとして収集・整理したものをプロジェクト関係者で共有すると同時に、一般にも公開するものである。ひび割れ抑制システムは、設計由来のひび割れと施工由来のひび割れを区別するのに有効だけでなく、施工者の品質に対する意識向上にも寄与しており、施工由来のひび割れ発生件数が大幅に減少する成果も報告されている³⁾。山口県では、さらに各種ひび割れ抑制対策（材料の変更、補強鉄筋の配置の変更等）とその効果の検証を目的とした施工後の観察・調査を実施し、次の改善に反映させるPDCAサイクルを実施している。

近年、マスコンクリートの温度ひび割れに対しては、温度応力解析等によってひび割れ発生の予測や、各種対策の定量的な評価が実施されるようになってきている。解析は、様々な対策の効果を実験的に比較・検証することが容易なツールの一つであるが、乾燥収縮ひび割れの影響も含めて統合的に構造物の挙動を予測することは未だに困難であり、定性的・経験的に各種ひび割れ抑制対

策を実施することが多い。

一方、統一的手法によってコンクリート構造物の挙動を追跡することを目的に、微視的挙動から巨視的挙動までをモデル化したマルチスケール統合解析システム（DuCOM-COM3）の研究が進められている⁴⁾。DuCOM-COM3では、乾燥収縮ひび割れの影響も含めてコンクリート構造物の挙動追跡が可能になりつつある⁵⁾。本研究は、DuCOM-COM3を用いることにより、実際のコンクリート構造物のひび割れ発生とひび割れ抑制対策の効果を実験的に評価することを試みたものである。

2. マルチスケール統合解析システムの概要

ここでは、本研究で用いるDuCOM-COM3の乾燥収縮ひび割れに関連する部分について簡単に概要を述べる。本システムは、セメントの水和反応の進展、硬化体の空隙構造形成、内部の水分状態といったコンクリート内部の微視的挙動に関するモデル群を実装した熱力学連成解析システム（DuCOM）と、鉄筋コンクリート構造の巨

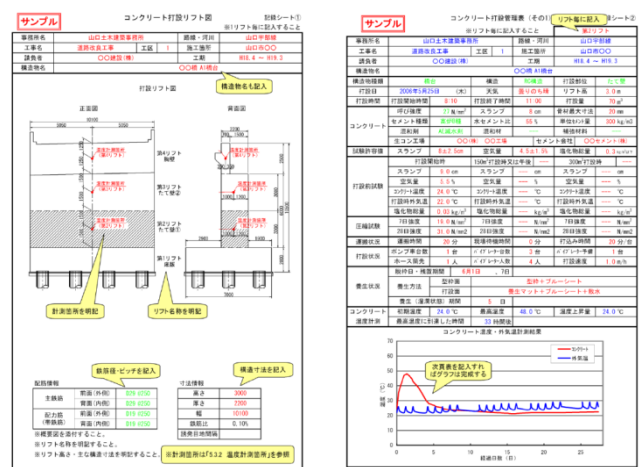


図-1 打設管理記録の例^{1),2)}

*1 前田建設工業株式会社 技術研究所 博士（工学）（正会員）

*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 博士（工学）（正会員）

視的応答・損傷を追跡可能な非線形動的 RC 構造解析システム (COM3) を統合したものである (図-2)。本システムは、収縮を引き起こす内在駆動力として高湿度域で支配的となる毛細管張力と低湿度域で卓越する分離圧の 2 つを組み合わせた収縮駆動力モデルを採用している (図-2 A)。収縮やクリープによる時間依存変形は、骨材とセメント硬化体の 2 相系材料を仮定し、セメント硬化体の剛性をバネ、ダッシュポット、スライダーによる仮想水和殻の増加で表現する時間依存構成則が採用されている (図-2 B)。時間依存構成則は、入力されるひずみに対して外力と収縮駆動力を区別せず応力を算出し、微視的挙動と巨視的挙動を繋ぐ準微細ひび割れモデル (図-2 C) を経由し、巨視的な平均挙動をモデル化の出発点とする分散ひび割れモデルによって構造応答を算出する (図-2 D)。DuCOM-COM3 は、若材齢から超長期に至る時間軸上での挙動を、強度や弾性係数、収縮ひずみといった材料特性やパラメータのフィッティングを解析対象ごとに行わなくても、使用材料の種類、コンクリートの配合、養生・環境条件、構造諸元等の基本的情報を与えるのみでコンクリート構造物の挙動を良好に表現できることが確認されている^{4),5)}。

3. 解析対象のモデル化

3.1 対象構造物

本稿は、実際の構造物のひび割れ挙動を解析で再現し、ひび割れ発生原因の推定と抑制対策の効果について定量的に評価を試みるものである。そこで、信頼できる良質なデータとして、ひび割れ抑制システムのデータベースから、実際にひび割れの発生した構造物 (金田ため池橋：山口県美弥市) を解析対象として選定した (図-3)⁶⁾。

3.2 施工条件および環境条件

(1) 工程

金田ため池橋の工期は平成 18 年 9 月 20 日から平成 19 年 3 月 24 日である。しかし、1 リフト打設時の情報がデータベースに記録されていないため、2 リフト打設の 28 日前に 1 リフトの打設日を仮定した。他のリフトの打設日および脱型までの養生日数は、データベースの記録に従った (図-5)。

(2) 外気温および湿度

データベースに記録されている気温の計測値は、日中 (8 時~17 時) のみであり、夜間の温度や 1~4 リフト目までの連続した外気温データ、湿度データが存在しない。そこで解析では、山口市の日平均の気温と湿度の履歴を

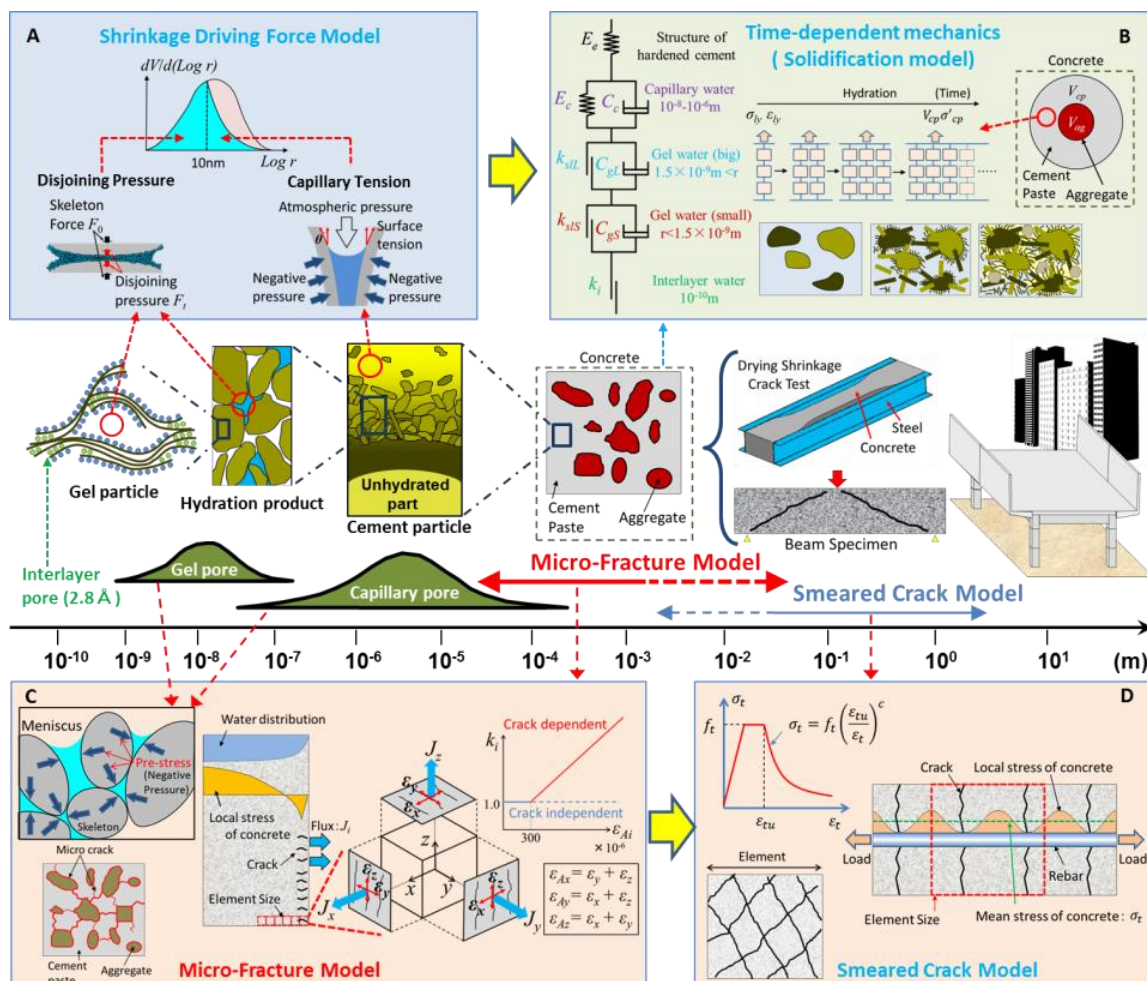


図-2 マルチスケール統合解析システム (DuCOM-COM3) の概要^{4),5)}

気象庁のデータから与えることとした (図-4)。

(3) 計測位置および観察

コンクリートの温度履歴は、図-3 に示す位置で計測されている。また、打設後のひび割れ発生について観察・記録が行われている。

(4) 配合

データベースの配合に関する記録は、セメント種類 (OPC)、W/C (54%)、空気量 (5%) のみである。従って、粗骨材量 (1000kg/m³)、細骨材量 (850kg/m³)、骨材実積率 (0.6)、セメントのブレン比表面積 (3380g/cm²) を仮定した。セメント化学成分は、既往の文献⁷⁾に従った。また、乾燥収縮に大きな影響を及ぼす骨材の絶乾時における最大収縮ひずみも不明なため、事前の感度解析より 250μ を仮定した。

3.3 解析モデル

(1) メッシュ分割

解析モデルは、地盤を含む実構造物の 1/2 モデルとし、地盤は弾性要素、コンクリート部は RC 要素と無筋コンクリート要素とした (図-6)。1 リフトは基礎部分であり、データベースに詳細が記載されていないため、全て RC 要素 (xyz 軸の全方向に対して鉄筋比 0.5%) を仮定した。2~4 リフトは、データベースの配筋情報に従った。なお、2~4 リフトの主筋および配力筋が存在する範囲は、コンクリート表面の 1 要素分 (20cm) と仮定した (図-7、表-1)。

(2) 境界条件

コンクリート部分は、ダミー要素を用いて 1~4 リフトまでの打設リフトを模擬した。打ち継ぎ面は、熱伝達境界と水分移動境界を設定し、上リフトの打設完了後に無効化することで表現している (図-8)。熱伝達係数は、

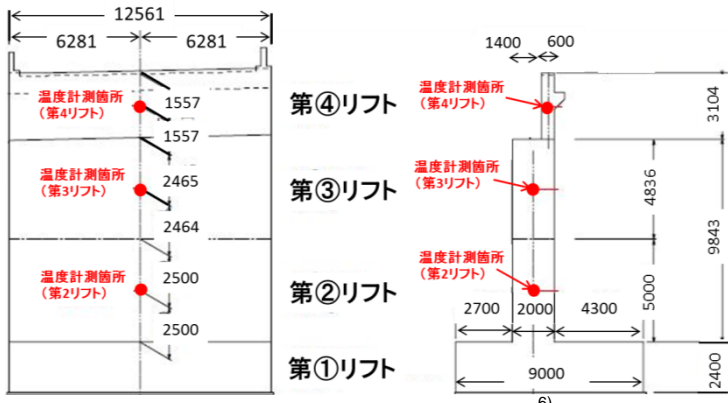


図-3 形状および温度計測位置

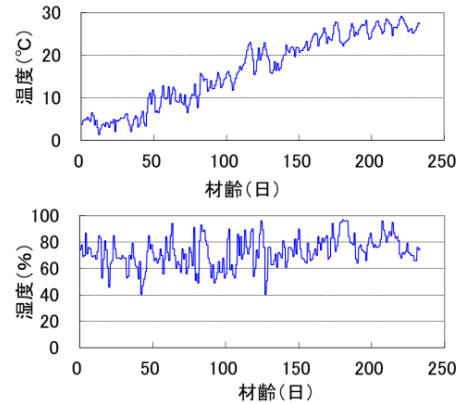


図-4 気温および湿度履歴

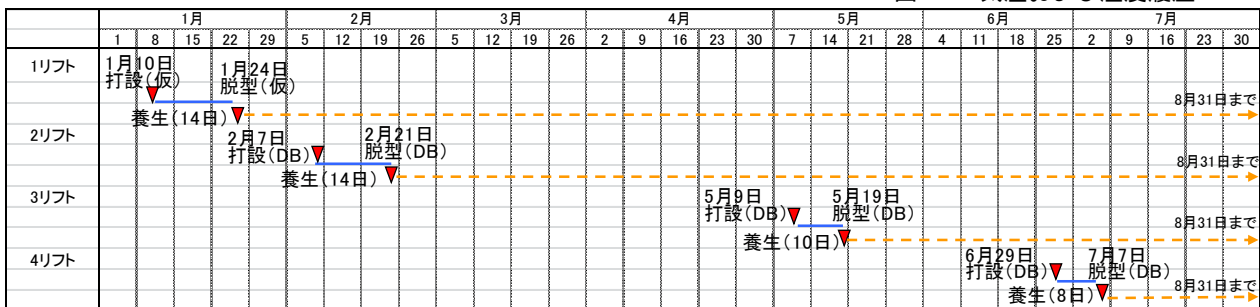


図-5 工程およびイベント

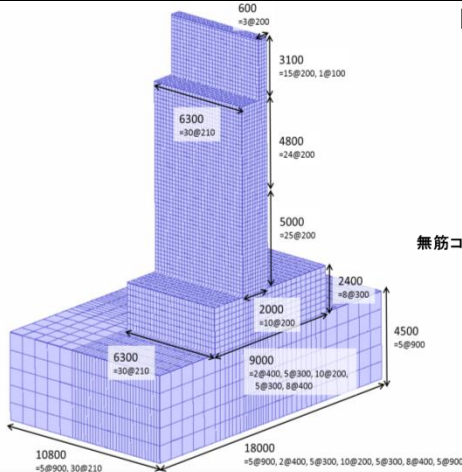


図-6 要素分割

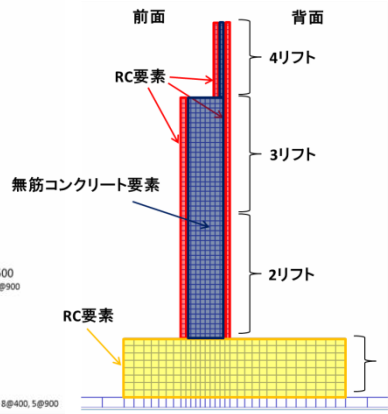


図-7 打設リフトと要素設定

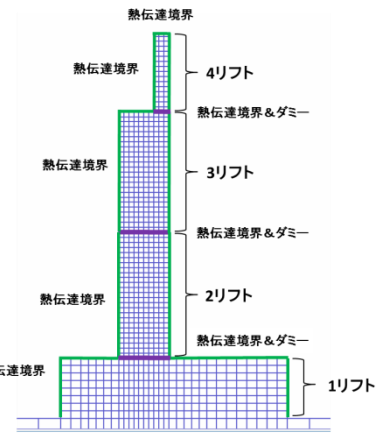


図-8 境界条件

表-1 RC要素設定値

前面側	(x軸)		主筋(z軸)		配力筋(y軸)	
	鉄筋比 %	配置	鉄筋比 %	配置	鉄筋比 %	配置
1リフト目	0.50	不明	0.50	不明	0.50	不明
2リフト目	0.00	D32@250	1.58	D16@125	0.79	D16@125
3リフト目	0.00	D32@250	1.58	D16@125	0.79	D16@125
4リフト目	-	-	-	-	-	-
背面側	(x軸)		主筋(z軸)		配力筋(y軸)	
	鉄筋比 %	配置	鉄筋比 %	配置	鉄筋比 %	配置
1リフト目	0.50	不明	0.50	不明	0.50	不明
2リフト目	0.00	D32@125	3.15	D19@125	1.14	D19@125
3リフト目	0.00	D32@125	3.15	D19@125	1.14	D19@125
4リフト目	0.00	D22@250 D22@250	1.54	D16@250 D16@250	0.77	D16@250

型枠の有無により変更し、水分移動境界も型枠の有無と養生条件で切り替えた(表-2)。地盤の底面は固定温度境界、側面は断熱温度境界、上面は熱伝達境界とした。

(3) 初期条件

表-3にコンクリートの初期温度(打設温度)設定値一覧を示す。なお、初期温度は、データベースの150m³打設時を基本としたが、1リフトと4リフトの150m³打設時のデータが存在しないため、1リフト目については1月の平均気温+8℃として12℃、4リフト目については、打設開始時の計測値28℃を用いた。地盤の温度も、データベースに無い情報のため、気象庁のデータから山口市の1966年~2010年までの平均気温(15.2℃)を与えることとした。

4. ひび割れ発生状況の再現

4.1 温度履歴

図-9~11に第2~4リフトの温度履歴の実測値と解析値の比較を示す。解析結果は、いずれのリフトにおいても比較的良好に温度履歴を再現できている。

4.2 ひび割れ発生状況

(1) 第二リフト

第2リフトは、2007年2月7日に打設され、7日間の散水養生が行われ、合計14日間の型枠残置期間を経て、2月21日に脱型されている。ひび割れは、打設から17日経過後の2月24日、さらに3月3日に発見され、最大ひび割れ幅0.2mmと記録されている。ひび割れ位置は、部材中央付近の2箇所であり、垂直に貫通している(図-12)。図-13に解析結果を示す。図中の赤色部分は、ひび割れ判定(軟化域に達したと判定)がなされた要素である。解析結果の表面近傍は、打設後1日以内にひび割れが発生しており、マイクロクラックなどに相当するひび割れと判断される(図-13左)。一方、断面中央までの貫通ひび割れが材齢20日程度で発生しており、第一リフトからの外部拘束によるものと推測される(図-13右)。

(2) 第三リフト

第3リフトは、2007年5月9日に打設されて9日間の散水養生後、10日目に脱型されている。脱型時の初期観

表-2 熱伝達率の設定値

	湿度移動なし(養生中)			湿度移動あり
	養生期間 日	型枠面 W/(m ² ・℃)	打設面 W/(m ² ・℃)	脱型後 W/(m ² ・℃)
地盤表面	-	-	12	-
1リフト目	14	4	5	14
2リフト目	14	4	5	14
3リフト目	10	6	5	14
4リフト目	8	6	5	14

表-3 コンクリートの打設温度

	データベース記録値		
	打設開始時	150m ³ 打設時	解析使用値
1リフト目	無し	無し	12℃
2リフト目	13℃	17℃	17℃
3リフト目	20℃	25℃	25℃
4リフト目	28℃	無し	28℃

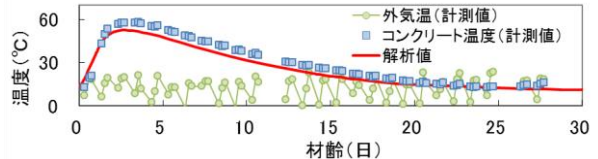


図-9 温度履歴(第二リフト)

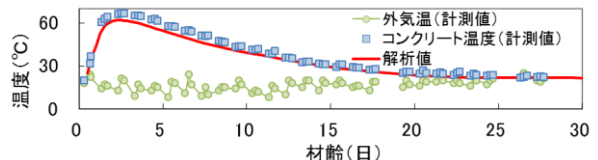


図-10 温度履歴(第三リフト)

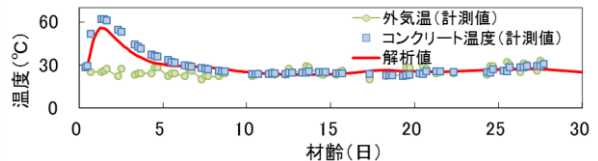


図-11 温度履歴(第四リフト)

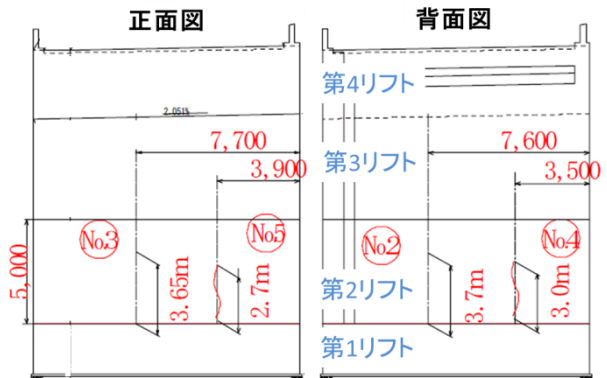


図-12 第二リフトのひび割れ状況⁶⁾

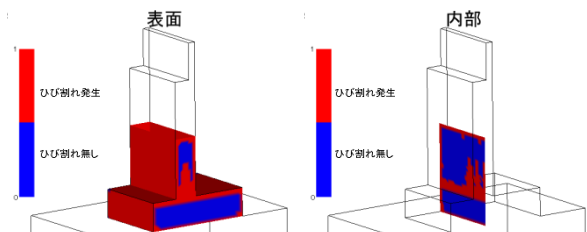


図-13 第二リフトの解析結果(再現)

察ではひび割れの発生は認められていない。ひび割れは、5月26日(打設から17日目)に確認されたと記録されているものの、ひび割れの位置や長さに関する記録は残っていない。従って、最大ひび割れ幅は0.2mmと記録さ

れているが、貫通する様な明確なひび割れではなく、表面近傍に現れた微細なひび割れのことを指していると推測される。

解析結果では、第2リフトと同様、第3リフトも表面近傍で打設後1日以内にひび割れが発生している(図-14左)。一方、断面中央の貫通ひび割れは発生しておらず、データベースの記録通りの挙動と思われる(図-14右)。

(3) 第四リフト

第4リフトは、2007年6月29日に打設された。打設面は7日間養生マットで湿潤養生され、8日目に脱型が完了している。ひび割れは、打設日から11日目に確認され、垂直に貫通している(図-15)。最大ひび割れ幅は、0.25mmと記録されている。

解析では、第2リフト、第3リフトと同様に第4リフトも表面近傍はひび割れが発生している(図-16左)。ただし、表面のひび割れ発生時期は乾燥を開始した材齢8日以降である。また、内部の貫通ひび割れ発生は、材齢20日ごろであり、第3リフトからの外部拘束が原因と考えられる(図-16右)。なお、解析結果における各リフト内部のひび割れは、部材の中央を表示したものである。

5. ひび割れ抑制対策の効果

5.1 養生期間延長の効果

一般に、養生期間の延長は、ひび割れ抑制に対して有効であることが定性的に言われている。そこで、極端な例として乾燥を許容しない解析を実施した。

解析の結果、ひび割れ発生時期は先の再現解析と大差なく、第2リフトと第3リフトは乾燥していないにもかかわらず表面近傍にひび割れが発生し、乾燥条件よりは小さいものの断面内部にも貫通ひび割れが発生している(図-17)。すなわち、第2リフトは、断面寸法の大きさによる温度応力によって表面と内部にひび割れが発生していると考えられる。本解析の第3リフトは、図-18右に示す様に、再現解析時には現れなかったひび割れが材齢20日ごろに中央付近に現れている。これは、乾燥が無いために第2リフトと第3リフトの打継面近傍のひび割れが抑制された結果、第2リフトからの拘束の影響が増加したためと推測される。一方、断面の薄い第4リフトでは表面のひび割れが大きく減少し、内部の貫通ひび割れも発生していない(図-19)。従って、第4リフトの貫通ひび割れは、乾燥収縮の影響と考えられる。

5.2 低熱ポルトランドセメントの効果

上記より、第2リフトと第3リフトは、温度応力の影響が大きいことが推測された。そこで、温度応力の発生を低減するため、再現解析のセメントを低熱ポルトランドセメントに変更して再現解析を実施した。低熱ポルトランドセメントを用いた場合の最大温度は、図-20～22に

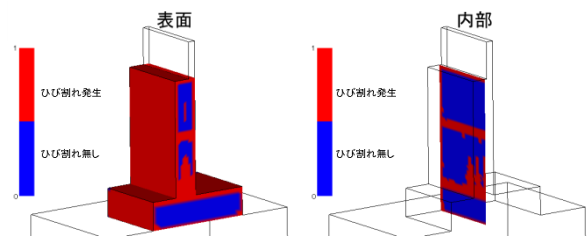


図-14 第三リフトの解析結果(再現)

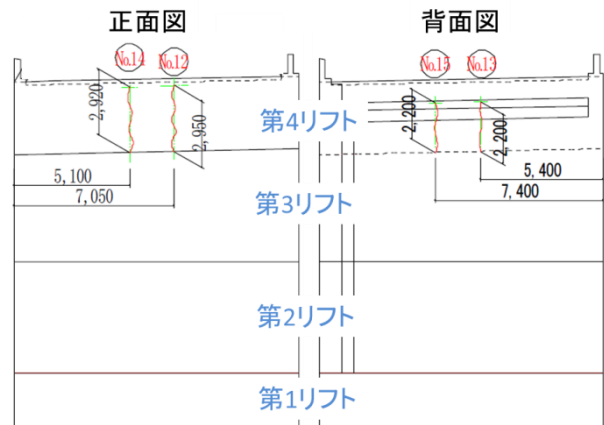


図-15 第四リフトのひび割れ状況⁶⁾

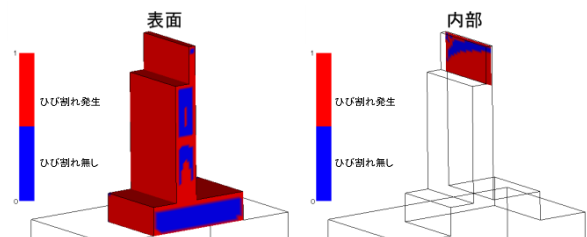


図-16 第四リフトの解析結果(再現)

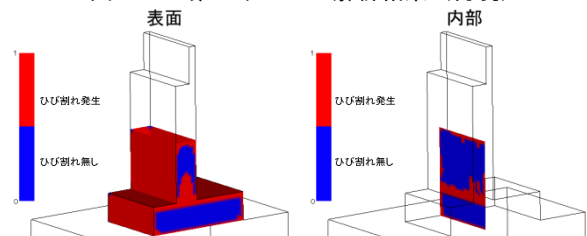


図-17 第二リフトの解析結果(養生)

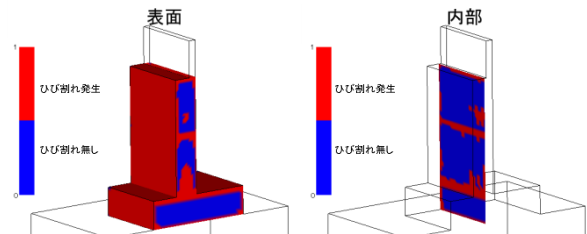


図-18 第三リフトの解析結果(養生)

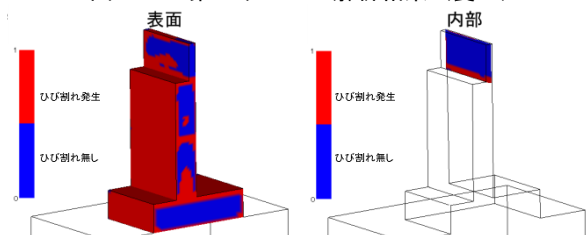


図-19 第四リフトの解析結果(養生)

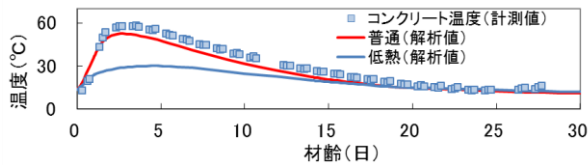


図-20 温度履歴 (第二リフト：低熱)

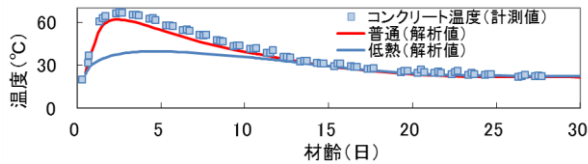


図-21 温度履歴 (第三リフト：低熱)

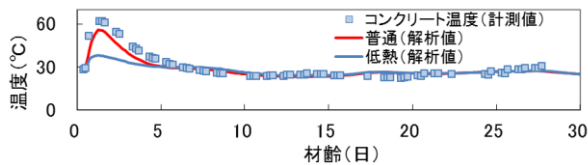


図-22 温度履歴 (第四リフト：低熱)

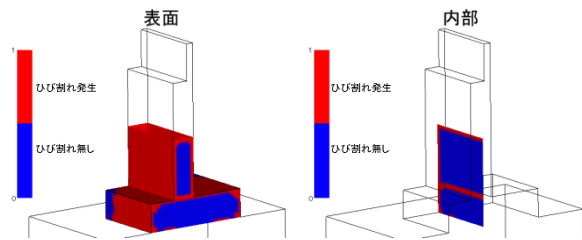


図-23 第二リフトの解析結果 (低熱)

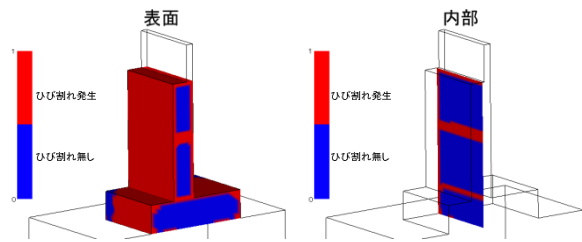


図-24 第三リフトの解析結果 (低熱)

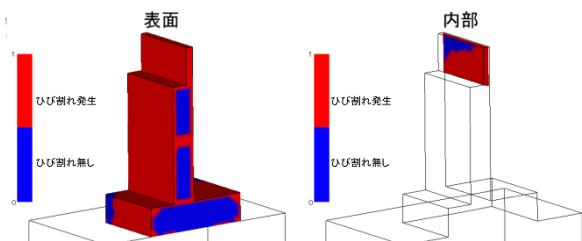


図-25 第四リフトの解析結果 (低熱)

示す様に、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して大幅に低下している。

解析による表面近傍のひび割れは、いずれのリフトも乾燥開始後に生じた。第2リフトと第3リフトの貫通ひび割れ発生は、抑制されていることがわかる(図-23右、図-24右)。一方、第4リフトは、部材断面が薄いため、温度ひび割れよりも乾燥収縮ひび割れの影響が大きく、内部の貫通ひび割れが減少しなかったものと考えられる(図-25右)。以上より、金田ため池橋は、第2リフトと

第3リフトは温度応力の低減、第4リフトについては、乾燥収縮の低減がひび割れ抑制に対して有効であると考えられる。

6. まとめ

山口県のひび割れ抑制システムのデータベースより、実構造物に関する打設管理記録を基にしたマルチスケール解析を実施し、本検討で対象とした実構造物のひび割れ発生状況をおおよそ再現することができたと考えられる。

実構造物の再現解析の後、養生条件、使用セメントの種類の影響について個別に評価を行った結果、第2リフトおよび第3リフトは温度ひび割れの影響が、第4リフトは乾燥収縮ひび割れの影響が大きいと推測された。ひび割れの発生原因が明確となったことにより、各種ひび割れに対する対応とその効果が DuCOM-COM3 を用いた解析によって評価可能になったと考えられる。

謝辞

本研究は、最先端・次世代研究開発支援プログラムおよび科学研究費基盤研究(A)「統合型情報プラットフォームとマルチスケール解析の高次元融合による構造物の性能評価」の助成を受けて実施いたしました。また、本研究は、谷内諒平氏(東京大学)の卒業研究の一部として実施したものです。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 二宮純：山口県における取組み(コンクリート構造物の品質確保システム)、コンクリート技術大会(郡山)、2013.10.
- 2) 山口県技術管理課：コンクリート構造物ひび割れ抑制対策資料、2007.10.
- 3) 細田暁、田村隆弘、二宮純：山口県のひび割れ抑制システムによる各プレーヤーの技術力向上、土木技術、pp.33-38、2012.10.
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 2009.
- 5) 米田 大樹, 石田 哲也, 前川 宏一, Esayas G., 三島 徹也：コンクリートの微視的損傷および細孔内水分状態に着目した準微細ひび割れモデル, 土木学会論文集, Vol.71, No.3, pp.248-256, 2015.9.
- 6) 山口県技術管理課：<http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a18000/hibiware/hibiwareyokusei.html>
- 7) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 日本コンクリート工学協会, 2008.11.