

非線形3次元FEMを用いた温度応力解析による温度ひび割れ進展挙動の解明

鹿島建設(株) 正会員 ○小嶋進太郎 柳井修司 平 陽兵 取違 剛 芦澤良一

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の老朽化が顕在化するにつれて維持管理の重要性が増し、施工完了から時間が経過したコンクリート構造物の性能を評価できる数値解析技術が求められている。供用中に変化する構造物の性能を評価するためには、まずは供用開始時点の性能・状態を初期値として精度よく捉えることが重要となる。

そこで、著者らは材齢初期のコンクリート構造物のひび割れや応力度を精度よく把握することを目的に、若材齢の挙動を扱う温度応力解析に対し、非線形3次元FEMを適用することを検討している。これまでに、実規模のコンクリート部材が硬化する過程において得られた実測結果と比較し、コンクリートおよび鉄筋の応力度の経時変化を精度よく再現できることを確認している¹⁾。本稿では、同様の非線形3次元FEMを用いることで、「外部拘束による温度ひび割れが断面内部から表面に向かって進展する挙動」を解析的に明らかにした事例について報告する。

2. 実験・解析概要

解析対象とした実験²⁾は、1層2径間ボックスカルバートの底版および中壁を模擬した実大規模の試験体(図-1)を対象として、コンクリート打込み後の水和熱に伴う挙動を計測したものである。底版の寸法は厚さ1.2m、幅9.0m、延長9.0mであり、壁との接合部に高さ幅が0.8mのハンチを設けた。壁の寸法は厚さ1.5m、高さ6.0m、延長9.0mである。なお、鉄筋にはSD345を使用し、主筋および配力筋としてそれぞれD32およびD16を250mm間隔で配置した。試験体の構築は、表-1に示すように3月から5月にかけて、底版および壁を3リフトに分けて施工した。型枠には木製型枠を用い、材齢7日で脱型した。

解析は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾(以下、示方書)に示される温度応力解析手法をベースに、コンクリートの引張応力度が引張強度を超えた時点でひび割れの発生を考慮する非線形3次元FEM解析とした。解析モデルは対称性を考慮し、試験体を平面視した際の1/4の範囲のコンクリートと地盤をソリッド要素でモデル化し、鉄筋には埋込み鉄筋要素を用いて主筋、配力筋、せん断補強筋を1本ずつモデル化し、コンクリートとの付着は完全付着とした。コンクリートのひび割れモデルは分散ひび割れモデルとし、強度発現モデルには示方書式³⁾を用いた。コンクリートの引張軟化特性には、土木学会コンクリート標準示方書³⁾に示される「引張破壊エネルギーを考慮した2直線モデル」を、要素の等価長さによりひび割れ幅をひずみに変換した上で適用した。なお、本検討では材齢初期の挙動に着目したため、乾燥収縮の影響は考慮していない。解析の入力値を表-2に示す。

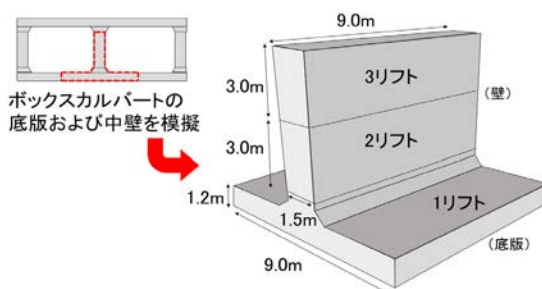


図-1 試験体形状

表-1 施工日とコンクリートの打込み温度

リフトNo.	施工日	高さ (m)	日平均気温 (°C)	打込み温度 (°C)
1	2019/3/22	2.2	17.8	23.9
2	2019/5/8	3.0	16.3	23.5
3	2019/5/30	3.0	21.4	26.7

表-2 解析入力値

項目	入力値
断熱温度上昇量 ³⁾ (°C) (簡易断熱試験結果をもとに算定)	$Q(t) = Q_{\infty} * (1 - e^{-r(t-t_0)^s})$ $Q_{\infty} = 48.0, r = 0.70,$ $s = 1.20, t_0 = 0.0$
比熱 (kJ/kg°C)	1.5
熱伝導率 (W/m°C)	2.0
密度 (kg/m ³)	2289
圧縮強度 ³⁾ (N/mm ²)	$S_p) * f'_c(t_n)$ $a = 7.00, b = 0.75, Sf = 0.42$
引張強度 ³⁾ (N/mm ²)	$f_t(t_e) = 0.13 * f'_c(t_e)^{0.85}$
有効ヤング係数 ³⁾ (N/mm ²)	$E_c(t_e) = 6300 * f'_c(t_e)^{0.45}$
自己収縮 ³⁾	$\epsilon_{as}(t_e) = \eta_c * \epsilon_{as, \infty} * r_{as}(t_e)$ 温度解析の最高温度結果を使用
乾燥収縮	考慮しない
引張破壊エネルギー (N/m)	89
熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	12
ヤング係数 (N/mm ²)	200,000
降伏強度 (N/mm ²)	345
コンクリート表面の熱伝達率 (W/m ² °C)	8→14 (7日後)
地盤上面の熱伝達率 (W/m ² °C)	8→14 (7日後)

キーワード：温度応力解析、温度ひび割れ、ひび割れ進展挙動、非線形3次元FEM解析

連絡先：〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

3. 温度ひび割れ進展挙動

図-2 はクラックスケールを用いて観測したひび割れ幅と位置 (2 リフト目) を示したものである。実験では壁をおおむね4等分する位置において鉛直方向に3本のひび割れが発生した。

図-3 に鉄筋ひずみの計測結果 (2 リフト目) を示す。ここで、鉄筋ひずみは断面中央ならびに表面から 80mm の位置に配置した鉄筋計により計測したものである。同図より材齢8日、9日に試験体の延長方向中央、および1/4の位置における鉄筋ひずみが引張側に大きく推移している。これは、試験体に貫通ひび割れが生じたことによるものと考えられる。また、これ以降の鉄筋ひずみの挙動に着目すると、断面中央のひずみが表面のひずみよりも大きい値を示していることがわかる。さらに、試験体の延長方向1/4の位置においては、断面中央の鉄筋ひずみが急激に引張側へ移行したのに対し、表面の鉄筋ひずみは2日程度をかけて漸増している。これらは、断面中央でひび割れが生じた後に表面に向かってひび割れが進展することを示しているものと考えられる。

図-4 はひび割れの進展挙動を確認するため、解析における断面中央と表面のひび割れ図を時系列で比較したものである。延長方向中央付近のひび割れに着目すると、材齢11日に断面中央でひび割れが発生したのに対して、表面では断面中央と同じ位置で2日遅れて材齢13日にひび割れが発生する挙動が示された。前述したように実験では、延長方向1/4の位置で生じたひび割れにおいて同様な挙動が計測されており、ひび割れ位置や発生時刻に若干の相違はあるものの、外部拘束により部材を貫通する温度ひび割れが断面中央から表面に進展する状況を解析で示すことができたと考えられる。

4. まとめ

本稿では、実規模の壁部材を対象として非線形3次元FEMによる温度応力解析を実施し、コンクリートの断面中央と表面のひび割れ発生状況から、鉄筋ひずみの実測値により示唆された「部材内部から表面に進展する温度ひび割れの挙動」を解析的に明らかにした。今後は、温度ひび割れの進展過程を考慮した効果的なひび割れ制御対策の検討や構造物完成時における初期応力の評価に対し、本解析手法の適用を検討する予定である。

参考文献

- 1) 小嶋ら：実規模施工実験との比較による温度ひび割れ解析の検証，第76回土木学会年次学術講演会，V-531,2021.
- 2) 高木ら：クーリングおよびヒーティングを用いた温度ひび割れ抑制技術に関する効果の定量評価，コンクリート工学年次論文集，vol.42,No.1,pp.1091-1096,2020.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2017.

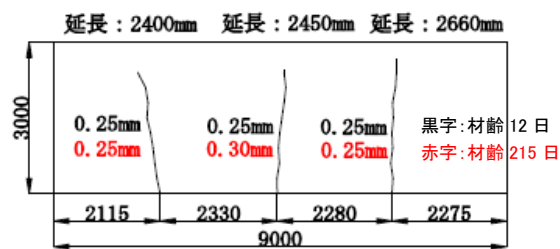


図-2 ひび割れ発生状況 (2 リフト目) ²⁾

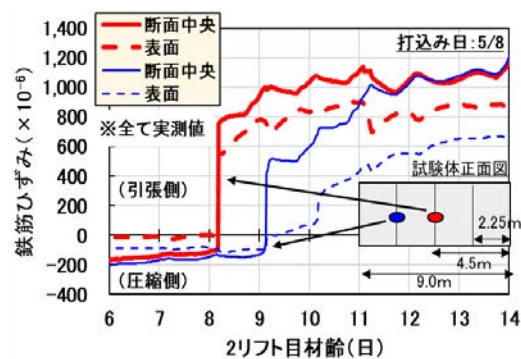


図-3 鉄筋ひずみの経時変化 (2 リフト目実測値)

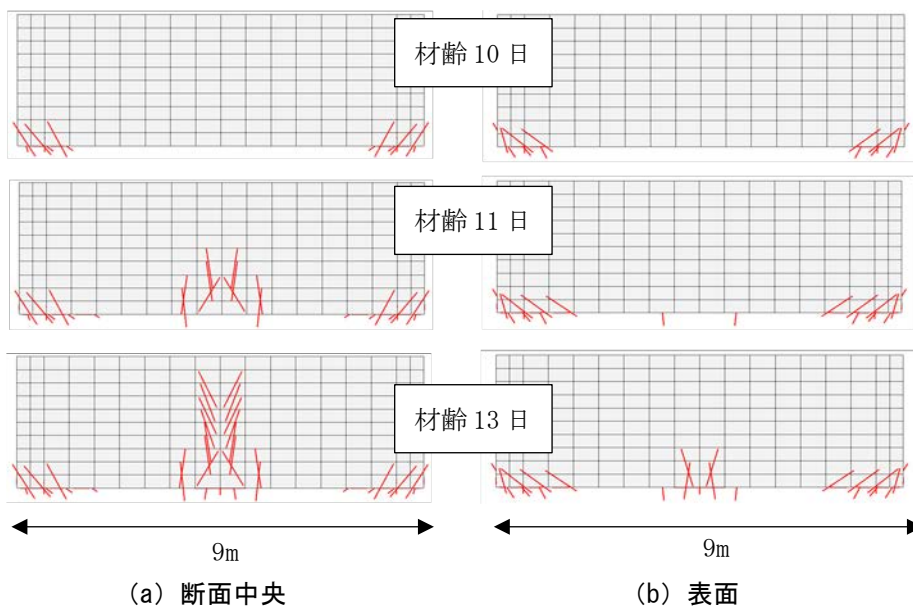


図-4 解析における断面中央と表面のひび割れ状況 (2 リフト目)