

非線形 3 次元 FEM による温度応力解析手法の検証と温度ひび割れ挙動の考察

Verification of Thermal Stress Analysis Using a Non-linear 3D FEM and Consideration on Thermal Crack Behavior

小 嶋 進太郎 平 陽 兵 柳 井 修 司
取 違 剛 向 俊 成

要 約

供用中に変化していく構造物の性能を評価するためには、供用開始時点の性能・状態が初期値となることから、これを精度よく評価することが重要になる。本報では、供用前のコンクリート構造物のひび割れや応力状態を非線形 3 次元 FEM により精度よく把握することを目的に、実規模の壁部材においてコンクリートが硬化する過程で得られた測定結果と同部材を対象とした解析結果との比較を行い、温度ひび割れに伴う初期応力・損傷状況の再現性について検証した。その結果、コンクリートのひび割れ幅、応力度、及び鉄筋の応力度に関して、その経時変化並びに残留するひび割れ幅・応力度を精度よく再現できることがわかった。さらに、コンクリート硬化中における断面内部と表面におけるひび割れパターンの変化から、温度ひび割れが断面内部から表面に向かって進展する状況を解析的に示すことができた。

目 次

- I. はじめに
- II. 解析手法について
- III. 実験と解析の概要
- IV. 実験結果と解析結果の比較
- V. おわりに

I. 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、維持管理が益々重要となっている。既設構造物の維持管理対策を検討するためには、任意時刻までに構造物に生じた応力・損傷状況を適切に評価し、その時刻に構造物が保有する構造性能を評価することが求められる。

任意時刻における構造物の応力・損傷状況を数値解析的に精度よく予測するためには、まずは、コンクリート打込み後から硬化する過程で生じる水和熱や自己収縮、その後の乾燥収縮によって発生する応力やひび割れの発生状況、さらには、ひび割れの発生によって変化する応力を適切に再現する必要がある。

しかし、一般にコンクリート部材の温度ひび割れの照査で行われる温度応力解析は、ひび割れによる剛性の変化を考慮しない弾性条件で行われる。この場合、コンクリートに発生する引張応力度は引張強度を超えても増加し続けるため、ひ

び割れ箇所の剛性が喪失してコンクリートの引張応力度が解放されるような挙動や、ひび割れ位置における鉄筋が引張応力度を負担する挙動を再現できない。

そのため、非線形 3 次元 FEM により材齢初期の挙動を再現する研究が進められており、実験との比較によりその再現性が検証されている。例えば、大野ら¹⁾は RC 床版供試体の若材齢における収縮・膨張挙動を再現できることを示し、伊藤ら²⁾は若材齢梁部材を対象とした載荷実験の再現解析により、載荷履歴の影響を考慮できることを示している。しかしながら、実際に温度ひび割れが発生した部材を対象とした再現性の検証は行われていない。

そこで、本報では供用前のコンクリート構造物のひび割れや応力状態を数値解析で精度よく把握することを目的に、温度ひび割れが発生した実規模の壁部材においてコンクリートが硬化する過程で得られた測定結果と、同部材を対象とした非線形 3 次元 FEM による温度応力解析結果との比較を行い、温度ひび割れに伴う挙動の再現性について検証した。解析には非線形 3 次元 FEM プログラム DIANA (Ver10.4)³⁾を用いた。

II. 解析手法について

非線形 3 次元 FEM によるコンクリートのひび割れモデルには主に、離散ひび割れモデルと分散ひび割れモデルの 2 つ

キーワード : 初期応力, 初期ひび割れ, 温度応力, 温度ひび割れ, 温度応力解析, 残留応力

Keywords : initial stress, initial crack, thermal stress, thermal crack, thermal stress analysis, residual stress

がある。離散ひび割れモデルは、ボンドリソング要素という非線形パネ要素を用いる方法であり、予めひび割れ発生位置を予測して設定する必要がある。しかしながら、温度応力と外力が複合して作用する場合にひび割れ位置を予測することは難しい。そこで、本検討では、引張強度を超える引張応力が発生した位置においてひび割れを発生させる分散ひび割れモデルを用いることとした。

Fig.1に本モデルを用いた非線形3次元FEMによる温度応力解析結果の例としてひび割れ図と鉄筋応力のコンター図を示す。このモデルの適用によりひび割れを直接的に表現することができ、さらにひび割れ位置において鉄筋が応力を負担する状況を再現できることがわかる。また、後述するように、このひび割れ図を時系列で比較することで温度ひび割れの進展経路を示すことも可能である。

このモデルでは、ひび割れの影響は要素内に分散していると仮定し、ひび割れ幅を要素の平均的なひずみとして式(1)の右辺に示すクラック相当ひずみ⁴⁾で表現する。本検討においては、各要素の積分点におけるクラック相当ひずみを足し合わせた値に、ひび割れ帯域幅(=要素の等価長さ)を掛け合わせることでひび割れ幅を算出した。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{crack} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_t + \varepsilon_{sh} \quad (1)$$

ここで、 ε : コンクリートの全ひずみ、 ε_e : 弾性ひずみ、 ε_{crack} : クラック相当ひずみ、 ε_{creep} : クリープひずみ、 ε_t : 温度ひずみ、 ε_{sh} : 収縮ひずみである。

III. 実験と解析の概要

1. 実験概要

解析対象とした実験⁵⁾は、ボックスカルバートの底版及び中壁を模擬した実規模試験体(Fig.2)を対象として、コンクリート打込み後の温度応力による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、高さ0.8mのハンチを設けた。また、壁の寸法は厚さ1.5m、高さ6.0m、延長9.0mとした。

Table 1にコンクリートの配合を示す。使用したコンクリートは高炉セメントB種を用いた水セメント比52.2%のものとした。鉄筋は全てSD345を使用し、主筋及び配力筋にはそれぞれD32及びD16を250mm間隔で配置した(鉄筋比 $p=0.11\%$)。

試験体の構築は、Table 2に示すように3月から5月にかけて底版及び壁を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。

試験体に設置した計測器の配置図をFig.3に示す。実験では、熱電対でコンクリート温度、有効応力計でコンクリート応力、鉄筋ひずみ計で鉄筋のひずみを計測した。熱電対は、

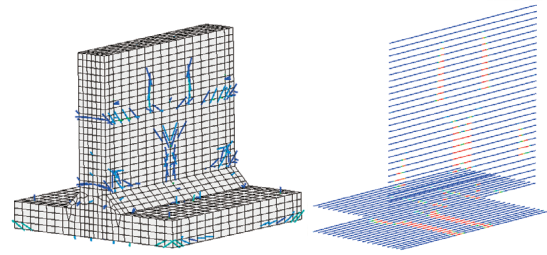


Fig.1 ひび割れ図と鉄筋応力のコンター図の一例 (Crack Diagram and Rebar Stress Contour)

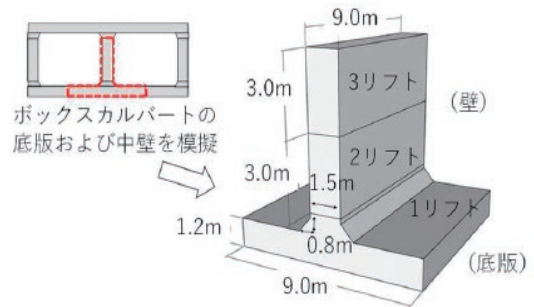


Fig.2 解析対象とした実規模試験体の概要⁵⁾ (Overview of Full-scale Test Specimens Analyzed)

Table 1 コンクリートの配合⁵⁾ (Mix Proportion of Concrete)

水セメント比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
52.2	12	4.5	168	322	839	960	3.22

セメント：高炉セメントB種、細骨材：砕砂+山砂、粗骨材：硬質砂岩砕石

Table 2 施工日とコンクリートの打込み温度 (Construction Date and Concrete Placement Temperature)

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	1.2	17.8	23.9
2	2019/5/8	3.0	16.3	23.5
3	2019/5/30	3.0	21.4	26.7

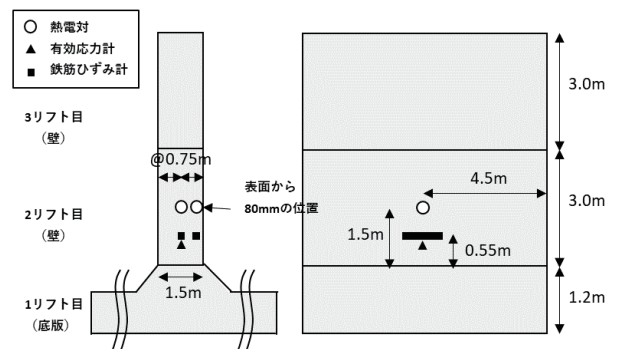


Fig.3 計測器の配置図 (Layout of Measuring Instruments)

断面中心とかぶり（表面から 80mm の位置）に設置した。有効応力計及び鉄筋ひずみ計は、リフト下端から高さ 0.55m となる断面中心に設置した。また、脱型から 1 回/日の頻度で、目視によりひび割れの有無を観察し、ひび割れが発生した場合にはひび割れの位置、幅及び長さを記録した。さらに、3 リフト目のコンクリートを打込む際には、2 リフト目のひび割れ位置に亀裂変位計を設置し、打込み後の硬化過程におけるひび割れ幅の変化を連続的に計測した。

2. 解析対象のモデル化

Fig.4 に解析モデルを示す。解析では試験体の対称性を考慮し、試験体を平面的に見た際の 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た。コンクリートの解析メッシュ分割については着目する壁の放熱面付近での要素の長さを 25cm とし、放熱面から 75cm の深さを 3 分割した。熱伝達境界条件については、マスコンクリートのひび割れ制御指針⁶⁾に準拠し、コンクリートの表面熱伝達率を材齢 7 日まで 8W/m²℃、材齢 14 日以降は 14W/m²℃で設定し、地盤の表面熱伝達率を 14W/m²℃で一定として設定した。拘束条件は 1/4 断面の法線方向と、地盤の側面及び底面の法線方向を拘束する設定とした。また、地盤及び各リフトの境界面は一体として挙動するようにモデル化した。

Table 3 に解析の入力条件を示す。コンクリートの熱特性について、断熱温度上昇式⁶⁾に用いた定数は、試験体と同じコンクリートを用いた簡易断熱試験⁸⁾の結果を用いて同定解析を実施して設定した。外気温とコンクリートの打込み温度には実測値を用いた。比熱及び熱伝導率は、上記の温度条件による温度解析結果が実測温度に合うように、比熱 1.5kJ/kg℃、熱伝導率 2.0W/m℃で設定した。Fig.5 は 2 リフト目の断面内部と表面におけるコンクリート温度履歴について実測値と解析値を比較したものである。最大温度に 3~4℃の違いがあるものの、全体の傾向は一致しているため、この条件でひび割れ・応力度について比較することとした。

コンクリートの強度発現モデル、自己収縮ひずみの予測式には、マスコンクリートのひび割れ制御指針⁶⁾のモデルを用いた。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。コンクリートのひび割れ後の挙動をあらゆる引張軟化特性には、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾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て用いた。引張破壊エネルギーは土木学会コンクリート標準示方書に基づき 89N/m と設定した。

鉄筋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 本ずつモデル化した。鉄筋の構成則は、鉄筋単体の応力度-ひずみ関係を用いて、降伏後は硬化なしのバイリニアモデルとし、コンクリートと鉄筋の付着は完全付着とした。

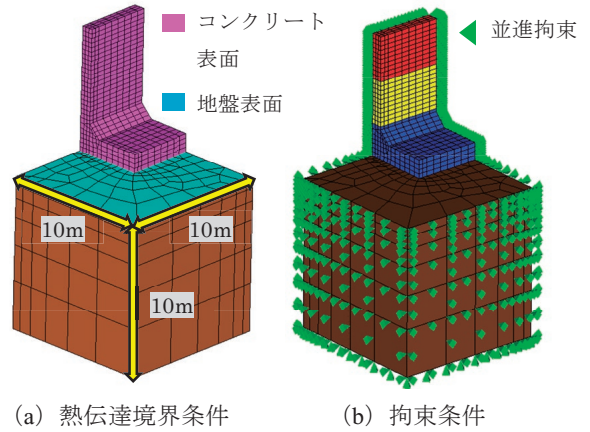


Fig.4 解析モデル (Analysis Model)

Table 3 解析入力条件 (Analysis Input Conditions)

項目	入力値
断熱温度上昇量 ^{6),8)} (°C)	$Q(t) = Q_{\infty} * (1 - e^{-r(t-t_0)^s})$ $Q_{\infty} = 48.0, r = 0.70, s = 1.20, t_0 = 0.0$
比熱 (kJ/kg℃)	1.5
熱伝導率 (W/m℃)	2.0
密度 (kg/m ³)	2289
コンクリート	
圧縮強度 ⁶⁾ (N/mm ²)	$f'_c(t_e) = (t_e - S_f) / (a + b(t_e - S_f)) * f'_c(t_n)$ $a = 7.00, b = 0.75, S_f = 0.42$
引張強度 ⁶⁾ (N/mm ²)	$f_t(t_e) = 0.13 * f'_c(t_e)^{0.85}$
有効ヤング係数 ⁶⁾ (N/mm ²)	$E_c(t_e) = 6300 * f'_c(t_e)^{0.45}$
自己収縮 ⁶⁾	$\epsilon_{as}(t_e) = \eta_c * \epsilon_{as,\infty} * r_{as}(t_e)$ 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 /℃)	12
鉄筋	
ヤング係数 (N/mm ²)	200000
降伏強度 (N/mm ²)	345
境界	
コンクリート表面の熱伝達率 (W/m ² ℃)	8→14 (7日後)
地盤上面の熱伝達率 (W/m ² ℃)	8→14 (7日後)

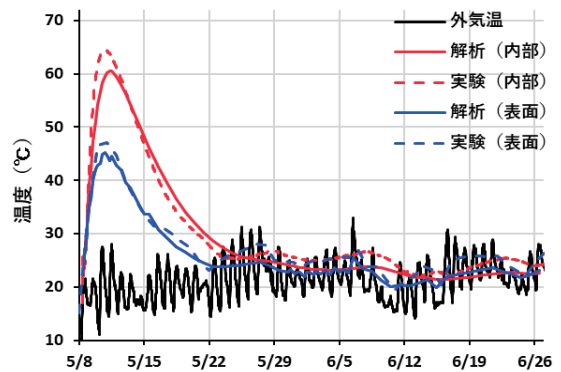


Fig.5 コンクリート温度履歴 (2 リフト目) (Concrete Temperature History)

IV. 実験結果と解析結果の比較

1. ひび割れ

Fig.6 にひび割れ発生材齢（実験：材齢 8 日，解析：材齢 12 日）の 4 日後のひび割れ状況を示す。解析のひび割れ図では 500 μ 以上のクラック相当ひずみが発生した要素において、主ひずみと直交するようにひび割れパターンを表示した。実験では壁を 4 等分する位置に鉛直方向に 3 本のひび割れが確認された。一方，解析では鉛直方向にひび割れが入る挙動は捉えたが，鉛直方向のひび割れは中央のみに発生し，壁を 4 等分する位置のひび割れが再現できなかった。また，壁端部において斜め方向のひび割れが発生した。これらのひび割れは 2 リフト目の収縮が 1 リフト目に拘束されて生じるものである。この拘束の度合いに関して，解析ではリフト間の境界面（打継ぎ面）は完全一体としてモデル化しており，境界面における付着特性，せん断特性を設定していない。一方，実際は 2 リフト目の硬化が進むにつれてリフト間の境界面が一体化していき，付着およびせん断応力度がその強度を超えた場合に境界面での付着切れが発生する。このように境界面における拘束度合いを実状に即してモデル化できていないことがひび割れ発生状況を再現できなかった要因だと考えられる。今後は，リフト間の境界面における付着，せん断特性を適切にモデル化することでひび割れ発生状況を再現することを検討したい。

Fig.7 は，壁中央のひび割れ幅分布について，目視によるひび割れ観測値と解析値を比較したものである。材齢 12 日で比較したところ，解析のひび割れ幅は実験の 1/3 程度の値であった。実験と解析でひび割れ発生日時が異なることから，ひび割れ発生の 4 日後（実験：材齢 12 日，解析：材齢 16 日）の結果を比べると，高さ 1m 付近で最大値を示し，上部ではひび割れ幅が小さい傾向が一致した。また，最大ひび割れ幅については，実験が 0.25mm に対して解析が 0.28mm であり，同等の結果が得られた。

Fig.8 は，ひび割れ幅の経時変化について，実測値と解析値を比較したものである。実測値は 2 リフト目のひび割れ位置に設置した亀裂変位計（Fig.6 参照）の計測値である。亀裂変位計は 3 リフト目打設の 1 日前に設置し，初期値にはクラックスケールで記録したひび割れ幅を用いた。3 リフト目が打設直後に膨張・収縮するに伴い 2 リフト目のひび割れ幅が増減する状況を解析で再現できていることがわかる。

2. 応力度

Fig.9 は 2 リフト目の中央断面におけるコンクリート応力度について，有効応力計の計測値と解析値を比較したものである。グラフ中で材齢 8~12 日頃に引張応力度が急激に低下しているのはひび割れの発生により，着目点の応力度が解放されたことによるものである。解析結果は，ひび割れが発生した要素の内，計測位置に近い節点の結果を選択したものである。材齢初期の圧縮応力度の値とひび割れ発生材齢に違いがみられたものの，応力度が圧縮から引張に転じる際の挙動や，ひび割れ発生時に引張応力度が解放される挙動は実測値

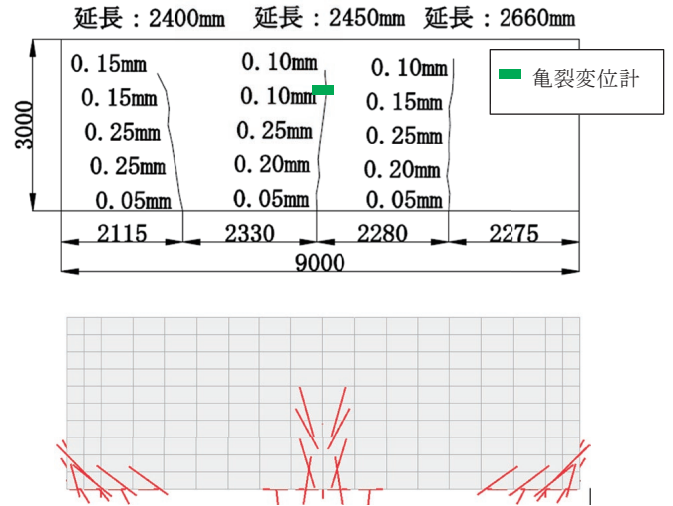


Fig.6 ひび割れ図(上：実験，下：解析)
(Crack Pattern)

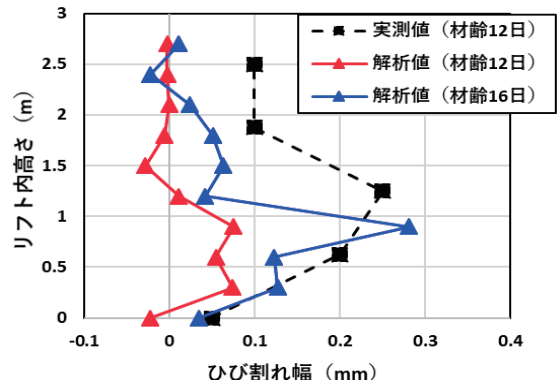


Fig.7 ひび割れ幅分布(2リフト目)
(Crack Width Distribution)

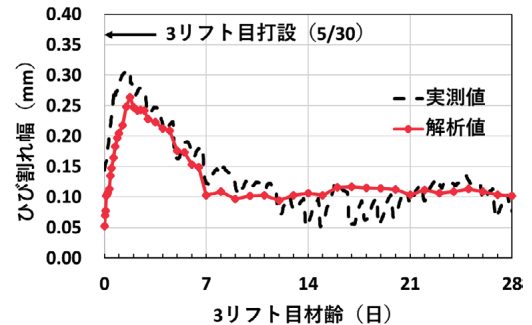


Fig.8 ひび割れ幅履歴 (2リフト目)
(Crack Width History)

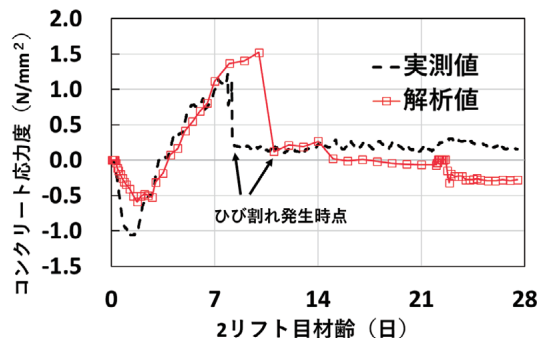


Fig.9 コンクリート応力度履歴(2リフト目)
(Concrete Stress History)

とよく対応した。実験において解析よりも若材齢かつ小さい応力度でひび割れが発生した要因の一つとして、解析ではコンクリートを均質なものとして扱うのに対し、実際のコンクリートは不均質であり、周囲よりも強度が低い部分が存在することが考えられる。また、高温履歴をうけた高炉セメントB種コンクリートのひび割れ抵抗性が低下する⁹⁾といわれており、本実験もその影響があったものと考えられる。

Fig.10は2リフト目の中央断面における鉄筋応力度について、鉄筋ひずみ計の計測値に鉄筋の弾性係数 200kN/mm^2 を乗じた値と解析値を比較したものである。解析結果は、鉄筋要素の内、ひび割れ近傍で最大応力度を示す節点の結果を選択したものである。実測値と同様に材齢 12 日頃にひび割れの発生により鉄筋応力度が増加した後、3リフト目を打ち込んだ際の3リフト目の膨張収縮に伴って応力度が増減する挙動を再現し、その後の残留応力度も実測値とよく対応していることがわかる。なお、材齢初期の挙動について、実験では圧縮応力度が生じたのに対し、解析では引張応力度が発生した。これは、実験では型枠によりコンクリートの膨張が拘束される一方、解析では型枠を考慮していないためだと考えられる。

以上のように、実規模試験体についての温度応力の解析値と実測値は、時間的変化や分布についてほぼ良好な対応を示した。一方、全ての温度ひび割れの発生状況とその時期については再現することができなかった。本検討では地盤及びリフト間の界面の付着のモデル化について詳細に取り扱っていないため、今後はこの点に着目して検討を進める。

3. ひび割れ進展挙動

2リフト目における鉄筋ひずみの計測結果を Fig.11 に示す。同図より材齢 8 日、9日に試験体の延長方向中央及び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

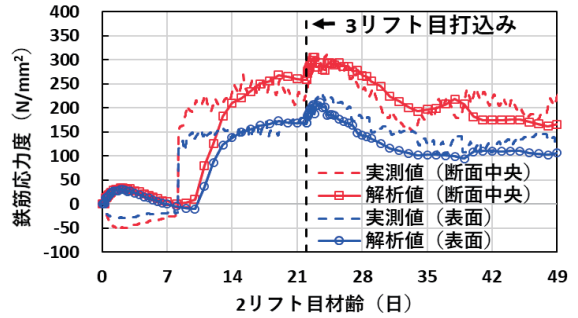


Fig.10 鉄筋応力度履歴(2リフト目)
(Rebar Stress History)

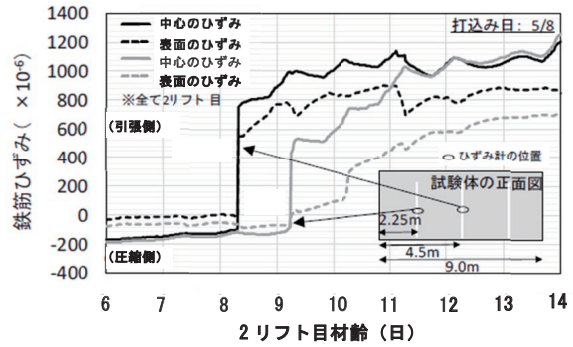


Fig.11 鉄筋ひずみ履歴(2リフト目)
(Rebar Strain History)

れは、試験体に貫通ひび割れが生じたことによるものだと考えられる。また、これ以降の鉄筋ひずみの挙動に着目すると、断面中心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、断面中心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、断面中心でひび割れが生じた後に表面まで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。

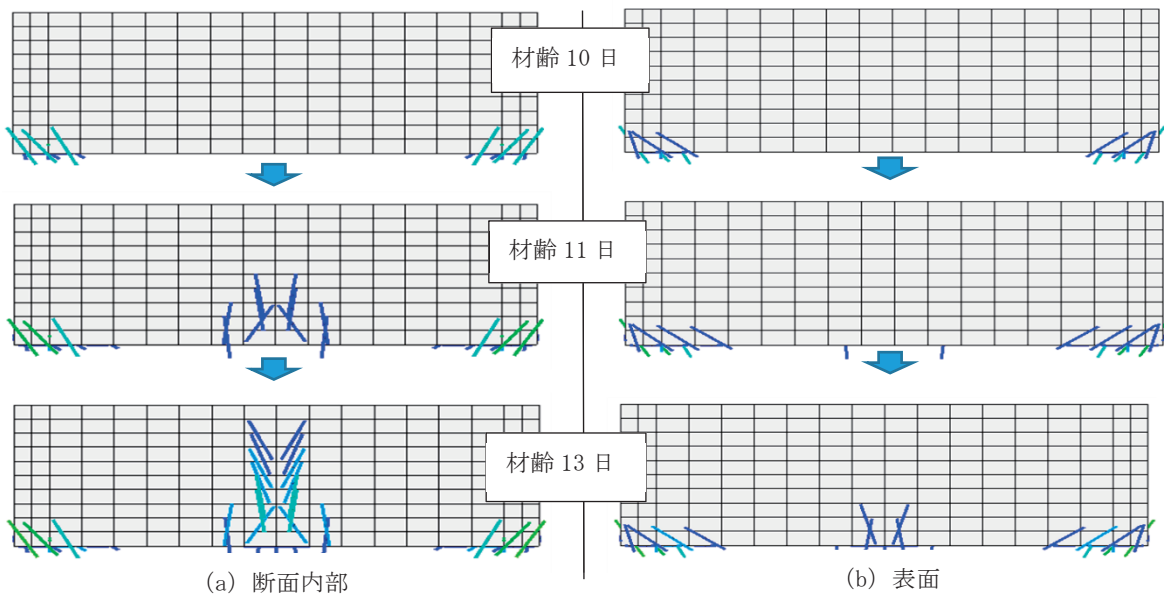


Fig.12 断面内部と表面のひび割れパターン
(Internal and Surface Crack Pattern)

Fig.12はこのひび割れの進展挙動について解析的に確認するため、断面内部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日に断面内部でひび割れが発生したのに対して、表面では断面内部と同じ位置で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、ひび割れ位置の相違はあるものの、温度ひび割れが断面内部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。

VI. おわりに

本報では、分散ひび割れモデルを用いた非線形3次元FEMによる温度応力解析手法の妥当性及びに解析精度を検証するため、実規模試験体における実測値と解析値を比較した。本検討により示された結果を以下にまとめる。

- ① 本解析手法により、コンクリートのひび割れ幅・応力度の経時変化並びに残留ひび割れ幅・残留応力度を精度よく再現できることが示された。一方、ひび割れ発生状況・時期は再現できなかった。
- ② コンクリートの断面内部と表面におけるひび割れパターンの変化から、既報において示唆された温度ひび割れの進展挙動を解析的に確認した。

今後は、主に解析モデルの境界条件等の精緻化を進めることで、ひび割れ発生状況の再現性を高めるとともに、温度ひび割れの進展過程を考慮した効果的なひび割れ防止対策の検討や、構造物完成時における各種初期応力の評価に対して、

本解析手法の適用を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 大野直也ほか；異なる配合・養生を与えた小型供試体および実物大RC床版の若材齢挙動に関するマルチスケール統合解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，2016，pp.471-476.
- 2) 伊藤睦ほか；初期応力を考慮したRC構造物の耐荷力解析手法の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，2012，pp.19-24.
- 3) DIANA-10.4 User's Manual，DIANA FEA BV.
- 4) 中村秀明ほか；コンクリートの収縮ひび割れ対策②解析プログラムによるひび割れ幅の検討，コンクリート工学，vol.50，No.3，2012，pp.290-296.
- 5) 高木英知ほか；温度ひび割れを抑制する躯体コンクリートの温度制御技術－「クール&ヒート工法」の定量評価－，鹿島技術研究所年報，第67号，2019，pp.73-80.
- 6) 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，2016，pp.41-97.
- 7) 土木学会；コンクリート標準示方書【設計編】，2017，pp.41-42.
- 8) 室野井敏之ほか；簡易断熱容器の形状が断熱温度上昇特性の推定に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010.7，pp.1283-1287.
- 9) 細田暁ほか；高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学的特性に対する微視的溫度応力の影響，土木学会論文集E，Vol.63，No.4，2007，pp.549-561.

Verification of Thermal Stress Analysis Using a Non-linear 3D FEM and Consideration on Temperature Crack Behavior

Shintaro Kojima, Yohei Taira, Shuji Yanai, Takeshi Torichigai and Toshinari Mukai

To evaluate the performance of a structure as it changes during service, it is important to accurately evaluate the performance and state of the structure at the start of service, which become the initial values. Therefore, to evaluate the initial stress at the time of completing a structure, we focused on the thermal stress and thermal cracks that occur during construction and that remain after service, and we developed a thermal stress analysis using a non-linear three-dimensional FEM. In this report, to verify the validity and accuracy of the method, measurement results obtained during concrete hardening in a full-scale member were compared with analysis results. It was found that the change over time as well as the residual values of the crack width, concrete stress, and reinforcing-bar stress can be accurately evaluated using the method. Furthermore, on the basis of the change in the crack pattern inside and on the surface of a cross section of the member during concrete hardening, it is shown analytically that thermal cracks propagated from the inside toward the surface of the cross section.