

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

鹿島建設(株) 正会員 ○小嶋進太郎 平 陽兵 取違 剛 柳井修司

1. はじめに

RC 構造物の設計では、構造物の性能に影響するような初期ひび割れが施工段階で発生しないことを前提として安全性や使用性の照査が行われる。しかしながら、初期ひび割れが構造性能に及ぼす影響は明らかになっていない。そこで、筆者らは初期ひび割れのうち構造物を貫通する温度ひび割れに着目し、温度ひび割れが鉄筋応力度に及ぼす影響について温度ひび割れ解析と構造解析の連成解析による検討を進めている¹⁾。本論文では、実規模の施工実験²⁾を対象として、温度ひび割れ解析による解析値と計測値との比較を行い、実現象に対する再現性を検証した。

2. 実験概要

解析対象とした実験は、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、3リフトに分割してコンクリートの打込みを行い、温度応力による挙動を計測したものである。本報で比較する計測項目は、コンクリートの温度と応力度、および鉄筋のひずみであり、それぞれ熱電対、有効応力計および鉄筋計により計測した。図-2に各計測器の位置を示す。コンクリート温度は、壁軸方向の中央断面における断面中央と表面部の計測結果を使用し、コンクリート応力度と鉄筋ひずみは、壁軸方向の中央断面における断面中央部の計測結果を使用した。なお、鉄筋にはSD345を使用し、主筋および配筋にはそれぞれD32およびD16を250mm間隔で配置した。

3. 解析概要

土木学会コンクリート標準示方書³⁾(以下、示方書)で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3次元FEM解析を実施した。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、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を用いた。解析の入力値を表-1に示す。断熱温度上昇式に用いた定数は、試験体と同じコンクリートを用いた簡易断熱試験⁴⁾により定め、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・熱伝導率は、上記の条件下で解析結果が実測温度に合うように設定した(図-3)。

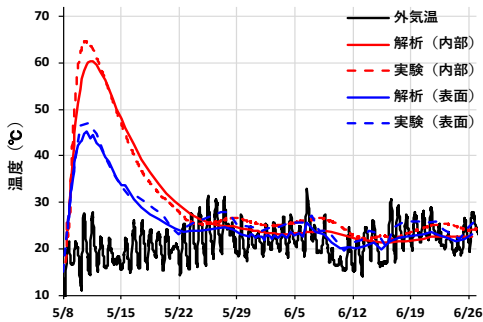


図-3 コンクリート温度履歴(2リフト目)

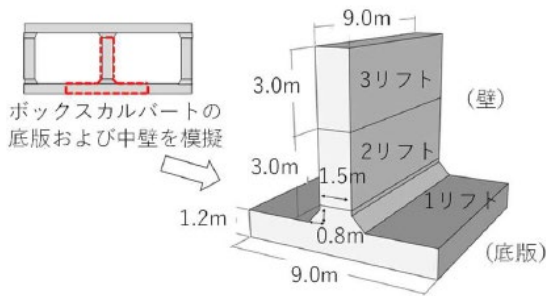


図-1 試験体形状

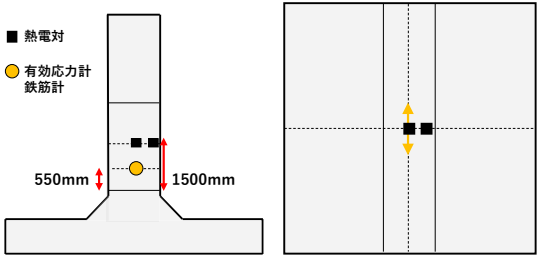


図-2 本報で比較した計測器の位置

表-1 解析入力値

項目	入力値
比熱 (kJ/kg°C)	1.5
熱伝導率 (W/m°C)	2.0
密度 (kg/m³)	2289
断熱温度上昇量 ⁴⁾ (°C)	$Q(t)=Q_{\infty}*(1-e^{-(t-t_0)^{-s}})$ $Q_{\infty}=48.0, r=0.70,$ $s=1.20, t_0=0.0$
圧縮強度 ³⁾ (N/mm²)	$f'_c(t')=(t'-S_T)/(a+b(t'-S_T))*f'_c(i)$ $a=7.00, b=0.75, Sf=0.42$
引張強度 ³⁾ (N/mm²)	$f_t(t')=0.13 \times f'_c(t')^{0.85}$
有効ヤング係数 ³⁾ (N/mm²)	$E_c(t')=6300 \times f'_c(t')^{0.45}$
ポアソン比	0.2
熱膨張係数 (×10⁻⁶/°C)	12
ヤング係数 (N/mm²)	200000
降伏強度 (N/mm²)	345
側面の熱伝達率 (W/m²°C)	8→14 (7日後)
上面の熱伝達率 (W/m²°C)	8→14 (7日後)

キーワード：初期ひび割れ，温度ひび割れ，構造性能，連成解析，温度ひび割れ解析

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 080-8873-3927

4. 解析と実験の比較

図-4 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．実験では壁をおおむね 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，解析では中央のみに鉛直方向のひび割れが 1 本発生する結果（中央 2 列の要素にひび割れが発生しているが，対称面の要素のため 1 本とみなした）となり，実験と一致しなかった．解析入力値が試験体に用いたコンクリートの材料特性と厳密には異なるほか，モデル化範囲，メッシュ分割サイズが適切ではない可能性が考えられる．

図-5 にコンクリート応力度の履歴を示す．グラフ中で 5/16 頃には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．図に示す解析結果は，ひび割れが発生した要素のうち，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，圧縮応力度から引張応力度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規模部材に生じた挙動とよく対応した．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扱ったのに対し，実際のコンクリートは不均質であり，弱部が存在することが考えられる．

図-6 に鉄筋応力度の履歴を示す．図に示す解析結果は，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．実験結果と同様に 5/16 頃にひび割れの発生により鉄筋応力度が増加した後，5/30 に 3 リフト目を打込んだ際の 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規模部材の挙動とよく対応する結果が得られた．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であると考えられる．

5. まとめ

本論文では，実規模の施工実験を対象として温度ひび割れ解析を実施し，計測値との比較により実現現象に対する再現性を検証した．その結果，ひび割れ発生時期，本数を再現できなかったものの，温度ひび割れにより鉄筋に残留する応力度を再現できることが示された．今後は，ひび割れの発生時期，本数および幅を再現できるような適切なモデル化方法を検討する．また，温度ひび割れ解析の結果を引き継いだ構造解析を行うことにより，より実構造に近い状態での耐荷性能の評価を試みる．

参考文献

- 1) 小嶋ら：温度応力解析と構造解析の連成による初期ひび割れの影響検討，第 75 回土木学会年次学術講演会，V-629,2020,9
- 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
- 4) 室野井ら：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

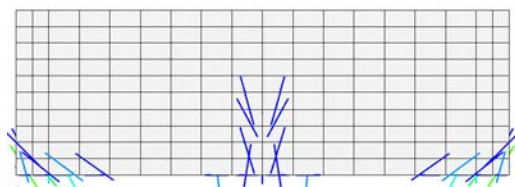
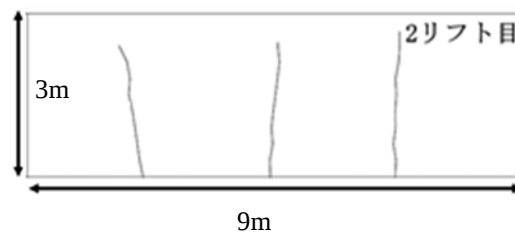


図-4 ひび割れ図（上：実験 下：解析）

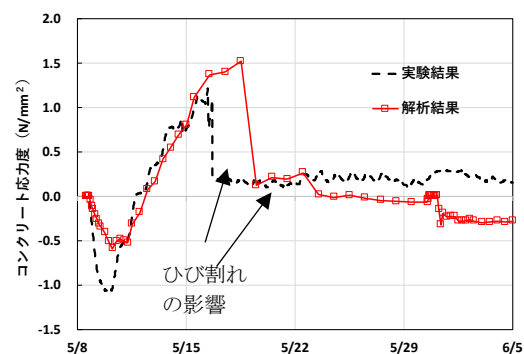


図-5 コンクリート応力度履歴(2 リフト目)

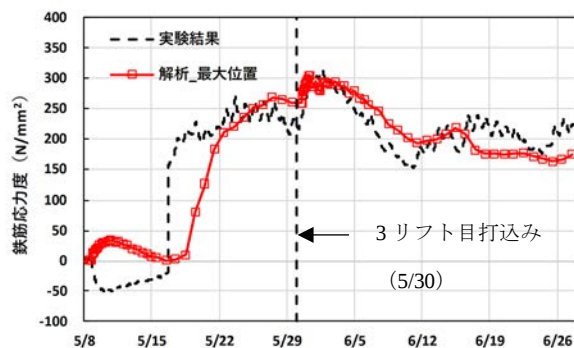


図-6 鉄筋応力度履歴（2 リフト目）