

# 論文 実構造物の計測結果に基づく温度応力解析の精度向上方法

関 健吾<sup>\*1</sup>・横関 康祐<sup>\*2</sup>・坂田 昇<sup>\*3</sup>・芦澤 良一<sup>\*4</sup>

**要旨:** 温度ひび割れに対する照査方法として、2012年制定 コンクリート標準示方書【施工編：施工標準】では、施工前に照査条件を確認し、設計時の照査条件が実際の施工条件と異なる場合には再度照査を行うこととしている。温度ひび割れをより確実に抑制するには、施工中にも、照査に用いた解析条件が適切であったかを評価し、より精度の高い事前解析を行うことが望ましい。そこで、建設中の実構造物を対象として計測結果や試験結果を反映させた温度応力解析を実施し、その精度について評価した。その結果、実構造物の熱膨張係数や強度特性を解析条件に反映することで、事前解析精度は著しく向上することが明らかとなった。  
**キーワード:** 温度ひび割れ, 温度応力解析, 熱膨張係数

## 1. はじめに

品質の高い構造物を構築するには、温度ひび割れに代表される初期欠陥を抑制する必要がある。そのため、2012年制定 コンクリート標準示方書【設計編】<sup>1)</sup> (以下、設計編) では、構造物の設計時に、施工実績あるいは温度応力解析に基づく評価を行い、温度ひび割れに対する照査を行うことを定めている。また、2012年制定 コンクリート標準示方書【施工編：施工標準】<sup>2)</sup> (以下、施工編) では、設計時に実施した照査条件が実際の施工条件に合致しているかどうかを、施工前に確認することとしている。これは、設計時に行う照査は、コンクリート材料の物性や施工日程、外気温などを仮定して行うため、実際の施工条件と異なる場合があることから、あらかじめ施工前に行われるものである。

ここで、さらに確実に温度ひび割れを抑制するには、施工中においても、照査に用いた解析条件が適切であったかどうかを評価し、より精度の高い解析等を行うことが望ましい。効果的にひび割れ抑制を行うためには、より精度の高い解析を行って、①施工中に実構造物の内部温度や応力等を計測し、②計測結果と解析結果を比較することで解析条件の整合性を検証し、③検証した結果を次ブロックの評価に反映させることが有効と考えられる。

そこで本研究では、当該ブロックの施工前に得られる情報を用いて温度応力解析の精度を向上させ、確実にひび割れを抑制する手法の確立を目的とし、建設中の実構造物を対象としてその適用性について評価した。

## 2. 検討概要

本研究における検討フローを図-1に示す。ここでは、設計時、施工前および施工中の各段階において、三次元FEM解析による温度応力解析に基づく照査を行うもの

とした。図中において、設計時の照査 (以下、レベルⅢ) は、詳細施工計画の定まっていない設計時に、設計編やメーカ技術資料等に基づいて実施されるものである。施工前の照査 (以下、レベルⅡ) は、詳細施工計画やコンクリートの配合が決定した施工前に、施工編に基づいて実施されるものである。ここまでは、従来の照査と同様である。その後、1ブロック目のコンクリートの打込みを行う。本研究では、この際に、実構造物の温度や応力を計測する。そして、施工中の照査 (以下、レベルⅠ) において、取得した計測結果や使用するコンクリートの強度試験結果を解析条件に反映させる。これにより、照査条件は施工条件にさらに近づき、解析精度の向上が図られるものと考えられる。

本研究では、建設中の実構造物を対象として上記の各レベルの解析精度を評価した。構造物は、関東南部に位置する、長さ 100.4m、幅 61.5m、高さ 8.4m の箱型躯体である。検討対象は、厚さ 800mm の底版上に施工される側壁 (厚さ 600mm) の1リフト目 (リフト高さ 3.0m)

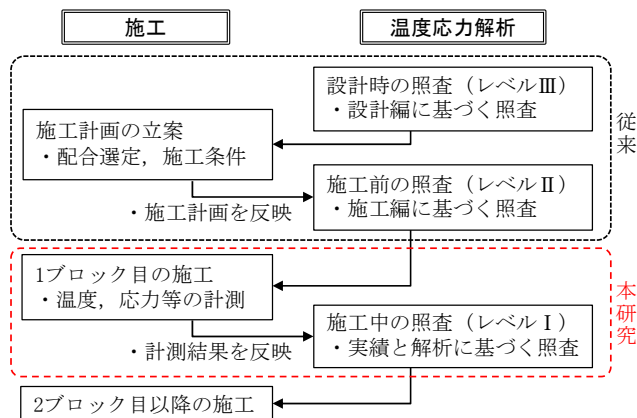


図-1 温度応力解析の精度向上に関する検討フロー

\*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士 (工学) (正会員)  
 \*2 鹿島建設 (株) 土木管理本部 土木技術部 要素技術開発グループ長 博士 (工学) (正会員)  
 \*3 鹿島建設 (株) 土木管理本部 土木技術部長 博士 (工学) (正会員)  
 \*4 鹿島建設 (株) 東京土木支店 外環市川中 JV 工事事務所 工事課長代理 修士 (工学) (正会員)

とした(図-2)。側壁は、5.0m 間隔でひび割れ誘発目地を導入し、1 回の打設で約 20m 施工する計画であった。そこで、1 回で打設する延長の 1/2 をモデル化した。なお、図中には、後述する計測機器の設置位置も併記した。温度応力解析ソフトは、ASTEAM-MACS ver 6.5.4 を用いた。

### 3. 各レベルの解析結果と実構造物の計測結果の比較

#### 3.1 各レベルにおける解析条件

##### (1) レベルⅢ (設計時の照査)

レベルⅢは、詳細施工計画の定まっていな設計時に、設計編に基づいて実施した解析である。

解析条件を表-1 のレベルⅢに示す。施工日程は未定であるが、年間を通じてコンクリート施工が行われるため、側壁の打込み日は安全側として夏期(8/15)と設定した。外気温は、気象庁の統計情報<sup>3)</sup>に基づき、当該現場付近である横浜市の月別平均気温を用いた。コンクリートの初期温度は設計編に従い外気温+5℃とした<sup>1)</sup>。

コンクリート配合は、実工事に用いる配合が未定のため、設計条件に基づいた机上検討により、表-2 のレベルⅢのように仮定した。なお、セメント種類は低発熱・収縮抑制型高炉セメント(以下、MKC)とした。熱膨張係数は、高炉セメントB種を用いることおよび砂岩粗骨材を用いることを想定し、12.0 $\mu\text{C}^{-1}$ とした。

圧縮強度、ヤング係数および引張強度の推定式は、セメントメーカー技術資料<sup>4)</sup>に基づき設定した。なお、クリープの影響は、設計編に示される有効弾性係数法<sup>1)</sup>に従って考慮した。また、自己収縮の影響は、セメントメーカー技術資料<sup>4)</sup>に従い考慮した。なお、MKCは添加されている石膏の影響により、材齢初期に若干の膨張挙動を示

すが、この影響は自己収縮式に加味されている<sup>4)</sup>。

熱物性および境界条件は、メーカー技術資料<sup>4)</sup>および設計編<sup>1)</sup>を参考に、表-3 に示す値を用いた。

##### (2) レベルⅡ (施工前の照査)

レベルⅡは、詳細施工計画や実工事に用いる配合が決定した施工前に、施工編に基づき実施した解析である。

解析条件を表-1 のレベルⅡに示す。施工日程の決定に伴い、側壁の打込み日を8/15から3/29に修正した。

コンクリート配合は、配合選定試験結果に基づき、表-2 のレベルⅡのように修正した。同様に、強度推定式は水セメント比を54.9%とした場合の値に修正した。ここで、配合選定試験の際に、粗骨材の50vol%に石灰石粗骨材を使用できることとなった。石灰石粗骨材を用いたコンクリートは、熱膨張係数が低減され、温度ひび割れの抑制に有利となることが一般に知られている。そこで、本研究では石灰石粗骨材を使用した場合の熱膨張係数として、メーカー技術資料<sup>4)</sup>に基づき、6.9 $\mu\text{C}^{-1}$ と設定した。

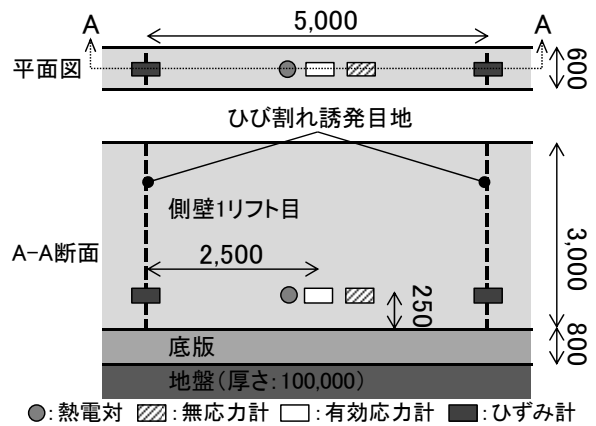


図-2 解析対象と計測機器の設置位置(単位:mm)

表-1 解析条件一覧

解析レベル	照査の時期	打込み日		外気温(°C)	初期温度(°C)	セメント種類	単位セメント量(kg/m³)	熱膨張係数( $\mu\text{C}^{-1}$ )	強度推定式	自己収縮			
		底版	側壁										
レベルⅢ	設計時	7/15	8/15	気象庁月別平均(横浜市)	外気温+5	MKC	317	12.0	・設計編 ・技術資料	技術資料			
レベルⅡ	施工前	2/3	3/29								図-3	297	6.9
レベルⅠ	施工中												

表-2 コンクリート配合

24-12-20BB(MKC)	W/C(%)	SL(cm)	Air(%)	単位量(kg/m³)						
				水	セメント	細骨材1	細骨材2	細骨材3	砂岩粗骨材	石灰石粗骨材
机上検討(レベルⅢ)	52.0	12.0	4.5	165	317	534	285	-	1008	-
配合選定(レベルⅡ,Ⅰ)	54.9			163	297	415	166	248	508	517

表-3 熱物性の入力値

解析レベル	終局断熱温度上昇量(°C)	温度上昇速度に関する係数	発熱開始材齢(日)	比熱(kJ/kg°C)	熱伝導率(W/m°C)	表面熱伝達率(W/m²°C)	
						上面	側面
レベルⅢ	38.0	0.72	0.14	1.15	2.70	材齢7日まで:8	材齢7日まで:8
材齢7日以降:14						材齢7日以降:14	
レベルⅡ						材齢12日まで:8	材齢12日まで:8
レベルⅠ	36.4	0.69	0.20	1.01	2.95	材齢12日以降:14	材齢12日以降:14
						材齢12日まで:8	材齢12日まで:8
						材齢12日以降:10	材齢12日以降:10

熱物性は、配合選定試験結果に基づき単位セメント量を  $297\text{kg/m}^3$  とした場合の値に修正した。

上記以外の解析条件はレベルⅢと同一とした。

### (3) レベルⅠ（施工中の照査）

レベルⅠは、側壁Ⅰブロック目が施工されたまでの間に、当該工事で取得した施工データに基づく解析である。

解析条件を表-1のレベルⅠに示す。コンクリートの初期温度は、側壁に先行して施工した底版等の品質管理試験時に取得した、外気温とコンクリート温度の関係に基づき設定した(図-3)。設計編では、コンクリートの初期温度は季節によらず外気温+5°Cと規定されている<sup>1)</sup>が、図-3によると、温度によって外気温とコンクリート温度の関係は異なり、両者の差は、外気温が高くなるほど小さく、外気温が低くなるほど大きくなる傾向にある。同様の傾向は既往の文献<sup>5)</sup>においても報告されている。すなわち、設計編で規定されているコンクリートの初期温度の設定条件は、外気温が高い場合には安全側の評価となり、外気温が低い場合には危険側の評価となる可能性がある。なお、本研究におけるコンクリートの場外運搬時間は20~30分程度であった。

強度推定式には、配合選定試験時に取得した強度試験結果(図-4)を用いた。これは、実際に打ち込むコンクリートの強度特性を把握するため、配合選定試験時に、通常強度確認用の圧縮強度試験とは別に、材齢3, 7, 28および91日において圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度を測定し、積算温度と圧縮強度の関係、圧縮強度とヤング係数の関係、圧縮強度と引張強度の関係を温度の影響を考慮できるようにそれぞれ定式化したものである。図中には、比較として、レベルⅢおよびレベルⅡの解析で用いたセメントメーカ技術資料に示される式を併記した。図より、試験練り結果の方が、ヤング係数は小さく、引張強度は高くなる傾向であった。

熱膨張係数は、側壁Ⅰブロック目の施工時に、無応力計を用いて前掲の図-2に示す位置で取得した、実構造物の測定結果を用いた。測定した熱膨張係数は、コンクリートが最高温度に達するまでは  $23.0\mu\text{C}^\circ\text{C}$ 、最高温度到

達以降は  $10.6\mu\text{C}^\circ\text{C}$  であり、メーカ技術資料に示される値 ( $6.9\mu\text{C}^\circ\text{C}$ ) とは異なるものであった。これは、石灰石粗骨材の産地や使用割合が異なること、その他の配合条件が異なること、熱膨張係数の測定方法が異なること等によると考えられる。ここで、文献<sup>6)</sup>によると、石灰石粗骨材を用いたコンクリートは、砂岩粗骨材を用いた場合と比較して、熱膨張係数が30%程度低減されることが示されている。また、高炉セメントB種と砂岩粗骨材を用いた場合の熱膨張係数は  $12.0\mu\text{C}^\circ\text{C}$  程度であることも示されている<sup>1)</sup>。本研究で用いたMKCは高炉セメントB種であること、および石灰石粗骨材の使用割合が50vol%であることを勘案し、石灰石粗骨材による熱膨張係数の低減効果を  $30\% \times 50\text{vol}\% = 15\%$  と仮定すると、 $12.0\mu\text{C}^\circ\text{C} \times (1-0.15) = 10.2\mu\text{C}^\circ\text{C}$  となり、実構造物の測定結果とほぼ一致する。したがって、限られた条件下ではあるが、セメント種類、骨材の岩種および使用割合を考慮することで、より正確な熱膨張係数を推定できる可能性がある。

また、測定した熱膨張係数は、コンクリートが最高温度に到達する前後で大きく変化している。そこで、コンクリートが最高温度に到達する前後で熱膨張係数を変更した場合について、レベルⅠの条件で試験解析を実施した。解析条件および解析結果を表-4に示す。表より、最高温度に到達する前後で熱膨張係数を変更した場合 ( $23.0\mu\text{C}^\circ\text{C} \rightarrow 10.6\mu\text{C}^\circ\text{C}$ ) と、熱膨張係数を一定とした場合 ( $10.6\mu\text{C}^\circ\text{C}$ ) とで、解析結果はほぼ同等であり、最小ひび割れ指数の差は5%程度であった。これは、コンクリート

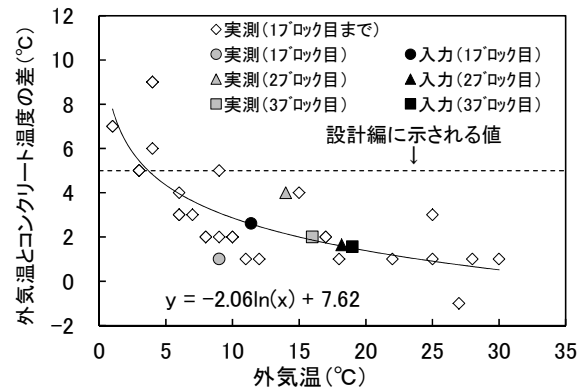


図-3 外気温とコンクリート温度の関係

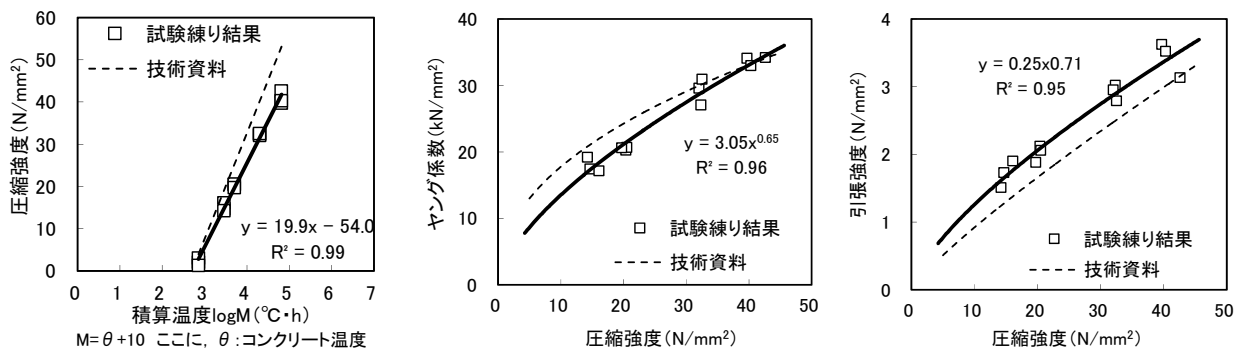


図-4 取得した強度試験結果(左:積算温度と圧縮強度,中:圧縮強度とヤング係数,右:圧縮強度と引張強度)

が最高温度に到達する材齢初期の時点では、温度変化量は大きいものの、ヤング係数が小さいため、導入される圧縮応力に及ぼす熱膨張係数の相違による影響は小さかったものと考えられる。したがって、レベルⅠの熱膨張係数は、 $10.6\mu\text{C}^{-1}$ で一定とした。

比熱および熱伝導率は、骨材種類により異なることが示されている<sup>7)</sup>。そこで、石灰石粗骨材と砂岩粗骨材の使用割合(50vol%:50vol%)を勘案し、表-3に示すとおり比熱および熱伝導率を修正した。コンクリートの表面熱伝達率は、風速により異なることが既往の文献<sup>8)</sup>に示されている。気象庁統計情報によると、当該現場付近の平均風速は2.1m/sであった。そこで、文献<sup>8)</sup>を参考に、脱型したコンクリートの表面熱伝達率は $10.0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とした。上記以外の解析条件はレベルⅡと同一とした。

### 3.2 各レベルの解析結果と実構造物の計測結果の比較

各レベルの解析結果と実構造物の計測を比較するため、側壁1ブロック目の施工時に、前掲の図-2に示す位置において、躯体内部温度、コンクリート応力を、それぞれ1時間ごとに計測した。実構造物の計測結果と各レベルの解析結果の比較を図-5~図-7にそれぞれ示す。

まず、コンクリート温度(図-5)について、レベルⅢは計測結果と乖離しており、最高温度の差は $23.1\text{C}$ であった。これは、施工日程および単位セメント量が大きく異なることによる。次に、レベルⅡは、レベルⅢと比較して精度は向上したものの、計測結果よりも全体的に高い結果であった。レベルⅡは、実際の施工日程および単位セメント量を考慮しているため乖離が抑制された一方で、コンクリート初期温度、比熱および熱伝導率等の設定において実構造物と差異が生じたためと考えられる。レベルⅠは、計測結果との差がさらに小さくなり、両者の最高温度の差は $0.4\text{C}$ であった。これは、レベルⅡはコンクリートの初期温度を外気温 $+5\text{C}$ で一定としたのに対し、レベルⅠは当該現場の実績(図-3)に基づきコンクリートの初期温度を設定したこと、骨材の岩種を考慮して比熱および熱伝導率を設定したことによると考えられる。したがって、温度解析の精度を向上するには、品質管理試験時に取得する外気温とコンクリート温度の関係を蓄積して解析条件に反映させること、および骨材の岩種を考慮して熱物性を設定するのがよいと考えられる。

次に、コンクリート応力(図-6)について、レベルⅢは計測結果と乖離している。これは、前述のとおり温度解析結果が乖離していることに加え、強度推定式や熱膨張係数の解析条件が、実際の施工条件と異なるためと考えられる。レベルⅡは、計測結果とほぼ一致しているように見受けられる。しかしながら、表-1に示すように、レベルⅡで設定した強度推定式および熱膨張係数は、試験練り結果および実構造物の測定結果と異なる。すな

表-4 熱膨張係数の入力条件と解析結果の比較

No	熱膨張係数( $\mu\text{C}^{-1}$ )		最小ひび割れ指数
	最高温度以前	最高温度以降	
1	23.0	10.6	3.19
2	10.6		3.02

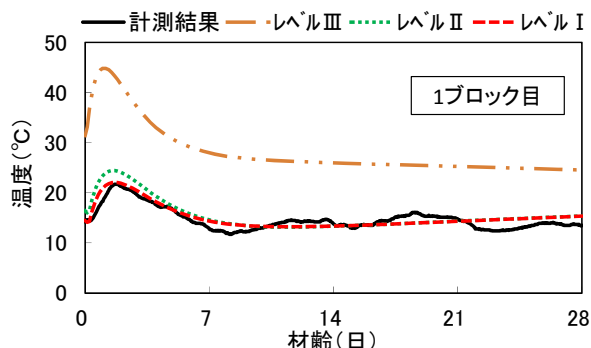


図-5 計測結果と解析結果の比較(コンクリート温度)

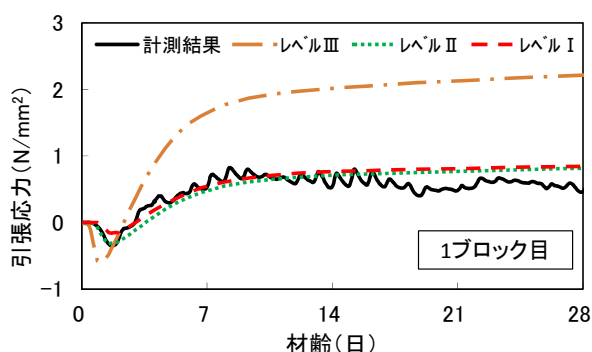


図-6 計測結果と解析結果の比較(コンクリート応力)

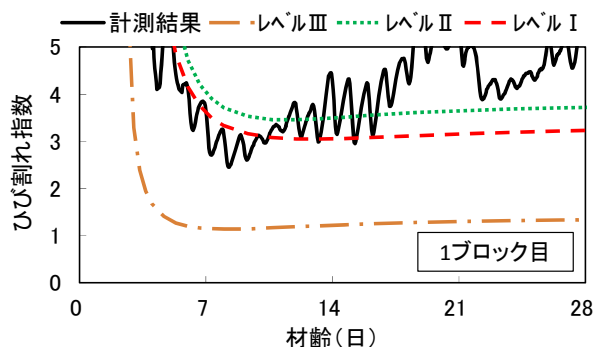


図-7 計測結果と解析結果の比較(ひび割れ指数)

わち、ヤング係数は実際よりも大きく、熱膨張係数は実際よりも小さく設定しているため、レベルⅡは結果として計測結果に近い値になったものと考えられる。その場合、施工時期が異なり、コンクリートの強度発現性が異なった際には、応力解析精度の低下が懸念される。レベルⅠも、レベルⅡと同様に、計測結果とほぼ一致する結果となった。これは、前述のとおりコンクリート温度を高い精度で予測できていることに加えて、実際に使用した配合のヤング係数および実構造物の熱膨張係数を解析条件に反映させているためと考えられる。したがって、レベルⅡとは異なり、施工時期が異なった場合にも、レ

レベル I の応力解析精度は低下しないものと考えられる。

最後に、ひび割れ指数を比較する。ここで、実構造物のひび割れ指数の算出方法を以下に記す。引張強度は、コンクリート温度の計測結果から積算温度を算出し、図-4 に示す積算温度と圧縮強度の関係および圧縮強度と引張強度の関係を用いて算出した。引張応力は、実構造物に設置した有効応力計の測定結果から算出した。その後、算出した引張強度を、測定した引張応力で除することで、実構造物のひび割れ指数を求めた(図-7)。図より、レベル III は実測値と乖離している。これは、前述の温度および応力の解析結果からも明らかである。次に、レベル II の最小ひび割れ指数は 3.46 であり、実構造物の最小ひび割れ指数 (2.45) と比較して 4 割程度危険側の評価となった。一方で、レベル I の最小ひび割れ指数は 3.05 であり、実構造物の最小ひび割れ指数により近い結果となった。レベル II はレベル I よりも圧縮強度の発現が早く(図-4)、若材齢のコンクリート温度はレベル I よりも高い(図-5)。そのため、レベル II とレベル I の引張強度は、図-7 で最小ひび割れ指数となった材齢 10.7 日および 12.0 日においてそれぞれ  $2.26\text{N/mm}^2$  および  $2.19\text{N/mm}^2$  と同程度であった。併せて、引張応力もレベル II の方が僅かながら小さく、ひび割れ指数はレベル II の方が大きい結果となった。ここで、レベル I と実構造物の最小ひび割れ指数の差は、外気温の影響によるものと考えられる。すなわち、外気温の時間変動を予測して設定することは困難なため、本研究では、過去の気象庁統計データに基づく月別平均気温を用いているためと考えられる。そこで、実施時に計測した外気温を用い、レベル I の条件で解析した結果(レベル I 事後解析)を図-9 に示す。図中には、図-7 に示した実構造物の計測結果およびレベル I の事前解析結果を併記した。同図より、外気温を施工時に計測した実際の値とすることで、解析結果と計測結果は材齢 10 日まではほぼ合致する結果となった。なお、材齢 10 日以降で計測結果と解析結果に差が生じている。ここで、ひび割れ誘発目地に設置したひずみ計の計測結果(図-10)を見ると、材齢 6~8 日頃にひずみが急増している。このことから、図-9 の材齢 10 日以

降におけるひび割れ指数の差は、誘発目地にひび割れが発生し、応力解放されたために生じたものと推察される。このことから、レベル I と実構造物の最小ひび割れ指数の差は外気温が主な要因であり、その他の解析条件は非常に精度の高いものであることが明らかとなった。

以上より、解析精度を向上するには、配合選定試験時にヤング係数および割裂引張強度も測定し、解析条件に反映させることが有効と考えられる。さらに、事後解析結果が計測結果と合致していることから、コンクリートの打ち込み後に、実際の外気温を入力条件とした検証解析を行うことで、温度ひび割れ対策の効果を定量的に評価することも可能と考えられる。

#### 4. 各レベルの解析精度の評価

前章にて、実構造物の計測結果および試験結果を反映することで、解析精度を向上できることが示唆された。そこで本章では、側壁の 2 ブロック目以降も対象として、本手法によるレベル I の解析精度を評価した。

まず、2 ブロック目を対象として実施したレベル III、

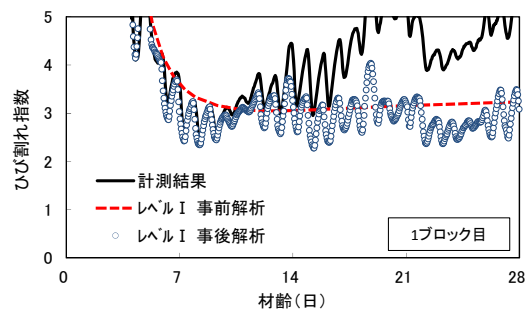


図-9 計測結果と事後解析結果の比較

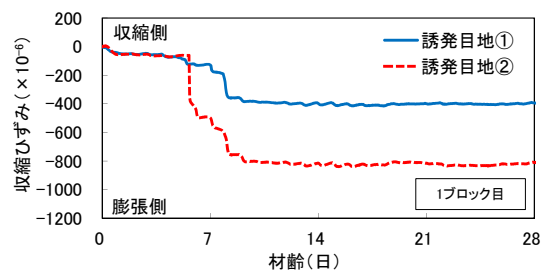


図-10 ひび割れ誘発目地におけるひずみ

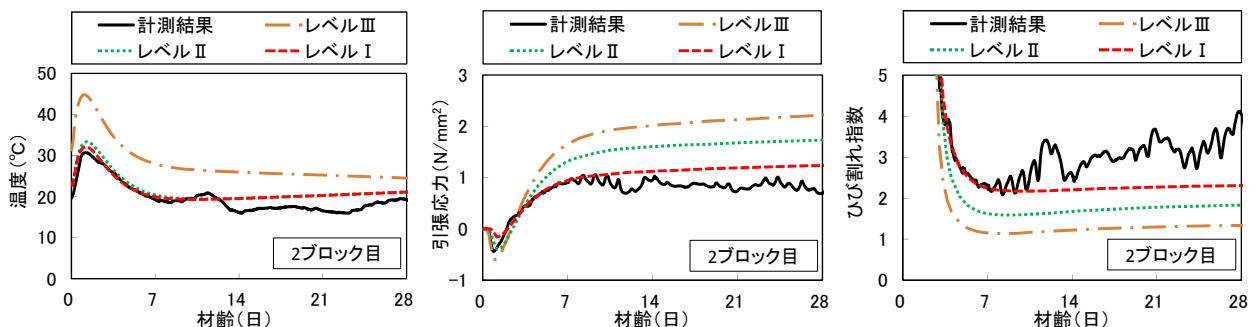


図-8 2 ブロック目の事前解析結果 (左: コンクリート温度, 中: コンクリート応力, 右: ひび割れ指数)

表- 5 事前解析結果と計測結果との差 (側壁 1 リフト目)

項目	最高温度(°C)				最小ひび割れ指数時の応力(N/mm <sup>2</sup> )				最小ひび割れ指数			
	1	2	3	絶対値平均	1	2	3	絶対値平均	1	2	3	絶対値平均
レベルⅢ	23.1	14.1	6.8	14.7	0.95	0.72	0.87	0.85	-1.31	-0.94	-1.43	1.23
レベルⅡ	2.7	2.7	-3.4	2.9	-0.17	0.35	0.59	0.37	1.01	-0.49	-0.98	0.83
レベルⅠ	0.4	1.4	-6.7	2.8	-0.08	-0.01	-0.03	0.04	0.60	0.09	-0.02	0.24

レベルⅡ, レベルⅠの解析結果および実構造物の計測結果を図- 8 に示す。図より, 2ブロック目についても, 1ブロック目と同様に, レベルⅢ→レベルⅡ→レベルⅠとなるにつれて, 解析結果は計測結果に近づく結果となった。特に, レベルⅠの解析結果は, 温度, 応力およびひび割れ指数のいずれについても, 計測結果とほぼ合致する結果となった。したがって, 施工時期の異なる他のブロックを対象とした場合でも, 本研究におけるレベルⅠは, 精度の高い解析を行えるものと考えられる。

次に, 当該構造物において計測を行った3ブロックを対象として, 各レベルにおける解析値と計測結果の差を比較した。比較する項目は, 最高温度, 最小ひび割れ指数時の引張応力, 最小ひび割れ指数とした。比較結果を表- 5 に示す。なお, 各ブロックの打込み日は表- 6 に示すとおりであり, 打ち込み時期は大きく異なる。表- 5 より, レベルⅢ→レベルⅡ→レベルⅠとなるにつれて, 最小ひび割れ指数の解析値と計測結果との差は小さくなっており, 解析精度が向上していることが分かる。また, 各レベルの解析結果の, 計測結果に対する比率を図- 11 に示す。図より, 最高温度は, レベルⅢ, レベルⅡおよびレベルⅠで, それぞれ計測結果に対して 43%, 9%および 8%の差であった。一方で, 最小ひび割れ指数時の応力は, 101%, 44%および 5%の差であった。同様に, 最小ひび割れ指数は, 45%, 30%および 9%の差であった。

以上のように, 強度試験結果および実構造物の熱膨張係数等を解析条件に反映させた施工中の照査(レベルⅠ)は, 施工編に準じた施工前の照査条件(レベルⅡ)と比較して, コンクリート応力で 40%程度, 最小ひび割れ指数で 20%程度, 解析精度を向上できることが分かった。

## 5. 結論

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリート標準示方書に示される照査に加えて, 実構造物での計測結果および強度試験結果を反映した温度応力解析を実施することで, 解析精度は向上する。特に, 応力解析の精度が向上する。
- 2) 応力解析の精度を向上するには, 実構造物で熱膨張係数を測定して解析条件に反映させること, 配合選定試験時にヤング係数と引張強度を測定して解析条件に反映させることが有効である。
- 3) 外気温とコンクリート初期温度の差は, 外気温が高いほど小さくなる。また, これを考慮することによ

表- 6 各ブロックの打込み日

項目	1ブロック目	2ブロック目	3ブロック目
底版	2/3	3/4	9/6
側壁 1 リフト目	3/29	5/11	10/13

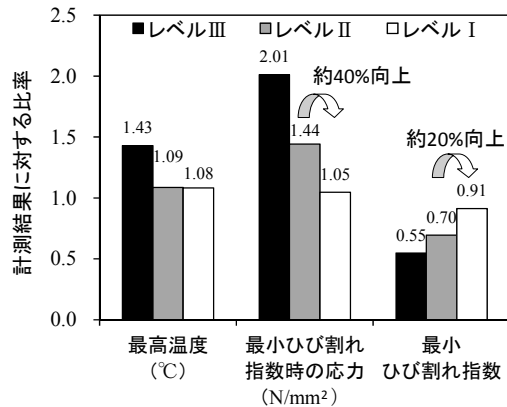


図- 11 解析精度の比較

り解析精度が向上する可能性がある。

- 4) 精度を向上させた解析条件を用い, 施工後に時間変動を考慮した外気温の計測結果を入力条件とした検証解析を行うことで, 温度ひび割れ抑制対策の結果, すなわち, 実構造物におけるひび割れ指数を定量的に評価できることを確認した。

## 参考文献

- 1) 土木学会: 2012年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, pp.91-98, pp.303-318, 2013.3.
- 2) 土木学会: 2012年制定 コンクリート標準示方書【施工編】, pp.171-176, 2013.3.
- 3) 気象庁 HP : (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)
- 4) 株式会社ディシィ: MKC TYPEⅢ 低発熱・収縮抑制型高炉セメント技術資料, pp.2-15, 2011.9.
- 5) 溝渕利明: 温度変化, コンクリート工学, Vol.43, No.5, p.40, 2005.5.
- 6) 社団法人 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, pp.46-56, 2008.11.
- 7) 川口徹ら, 榎田佳寛: コンクリートの熱伝導率, 熱拡散率, 比熱の測定方法とその応用, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム 論文集, p.13, 1982.8.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書(昭和 61 年制定) 改訂資料, コンクリート・ライブラリー第 61 号, p.57, 1986.10.