

報告 センサによる温度測定値に基づく加熱養生システムの開発

山本 秀之*1・西島 茂行*2・野口 貴文*3・友寄 篤*4

要旨：著者らは既に若材齢コンクリートの品質向上を目指し、有効材齢による強度推定を目的としたコンクリート初期養生強度推定システムを開発した^{1) 2)}。本システムはセンサユニットに実装された温度センサによりコンクリート表面の温度履歴から強度をリアルタイムに推定するものである。今回は、寒中コンクリート対策として、ヒータによる加熱制御を自動で行なうアクティブ型システムを試作し評価を行なった結果、環境温度が0℃の場合においてもコンクリート温度を5℃に保つことが出来ると共に、従来のジェットヒータを用いた場合よりもコストメリットが得られる可能性を見出すことが出来た。

キーワード：コンクリート型枠, センサ, 有効材齢, 強度推定, 寒中コンクリート, 加熱養生

1. はじめに

建設現場に於ける ICT の導入は著しく、この時代の趨勢はコンクリート分野においても例外ではないと言える。近年では、新たなセンサ機器を駆使したコンクリートの初期養生管理システムも実現場に投入されつつあり、従来はコンクリート打設毎に内部にセンサを毎回設置し、配線を巡らせるやり方が普及してきたが、昨今では大幅に機能改良されて、型枠に設置されたセンサを繰り返し使用することが可能になり、更にセンサとデータ解析の情報収集機器が無線で連動する高度化された管理システム（図-1）などが登場し、コンクリートの情報化施工というプログラムの中で、品質管理の高度化と併せて現場に於ける省力化、省人化を成す為の一つのアイテムとなっている。

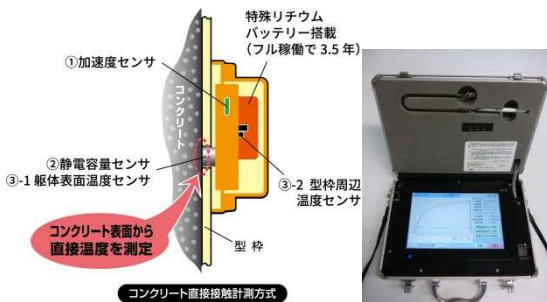


図-1 センサ構成（例）・情報収集演算タブレット（例）

水和反応の温度履歴をセンシングしながら、強度発現の推移を現場に居ながらにして時系列で確認できるシステムは、例として、トンネル工事におけるセントル

による二次覆工コンクリートや、一般構造物のタイムリーな脱型判断に数多く利用されるようになったが、主要パラメータの一つであるコンクリートの材齢に関しては、日数をカウントする材齢だけでなく、有効材齢³⁾（式中の t_e ）という、より精度の期待できる材齢の考え方が現場においても理解と普及が進んできている。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / t_0} \right] \quad (1)$$

t_e ：有効材齢(日)

Δt_i ：温度 T が継続する期間(日)

$T(t_i)$ ： Δt_i の期間のコンクリート温度(℃)

T_0 ：1(℃)

一般構造物の養生は自然環境に左右される要素が大きく、春夏秋冬の気温の変動は言うに及ばず、同一構造物においても壁面の方角やロケーションによって日射や風雨の影響で異なる温度履歴を示す場合がある。従って、より正確な脱型強度判定が求められる現場寒中コンクリートにおいては、精度の高い強度推定が可能な有効材齢による強度推定方式の普及促進が望まれるところである。

尚、図-1 で例示した管理システムでは、コンクリート表面温度計測用の温度センサを搭載したセンサユニット（以降、スマートセンサ）から得られた温度データに基づき、有効材齢による温度履歴から強度推定を行っている。

*1 児玉(株)エンジニアリング事業部 商品開発部長 (正会員)

*2 児玉(株)エンジニアリング事業部 事業部長 (正会員)

*3 東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 教授 (正会員)

*4 東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 学術支援専門職員 (正会員)



写真-1 橋梁工事現場使用（例）

写真-1に示すような山間部の例であれば、冬季の自然環境はまさに零下の外気温が想定され、日数による材齢カウントと平均気温による積算温度方式に対して、合理的に算出された有効材齢を演算式に用いることでより正確な強度推定が可能となる。

2. 温度履歴に基づく強度発現推定システム

2.1 管理システムの機能

図-1に例示した管理システムでは複数のセンサ情報をタブレットに組み込まれた演算式で処理すると同時に、図-2で示すように色々な画面で可視化することが可能である。型枠の組立～コンクリート打設～充填確認～水和反応による温度履歴計測～強度確認～脱型といった一連の施工工程をデータとして記録することは勿論のこと、情報をタイムリーに画面上に可視化することで得られた情報を基に、適切な養生環境をコントロールするのに適していると言える。

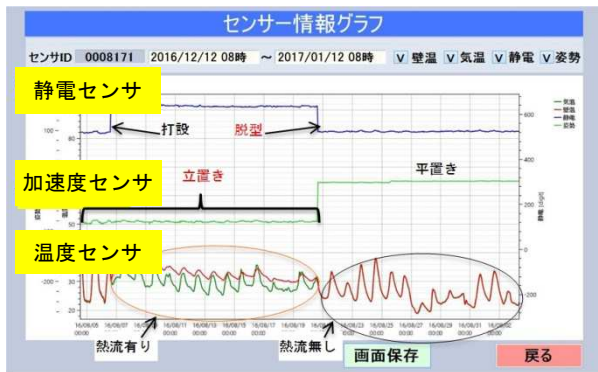


図-2 施工工程記録の可視化例

更に、躯体表面に複数のセンサ付き型枠を搭載し管理測点を多数設けることで、型枠単位で変動し得る温度状況を可視化し適切な処置を講じるための、図-3のようなカラーマッピングの表示も可能となる。



図-3 温度データ分布のカラーマッピング例

これらの膨大な情報処理が瞬時に可能になった建設業界の実現場においては、躯体の最も外側である表面温度を計測すると同時に、躯体内部に温度センサを埋め込むことでリアルタイムに内外温度差の温度勾配が把握可能でマスコンの温度ひび割れ対策にも適しているといえる。

また、連続的に取得される躯体表面の温度計測結果と(1)式の有効材齢式を用いて強度推定演算を行なうことにより、図-4に示すような強度発現の推移が現場に居ながらにして時系列的に把握することも可能になった。



図-4 強度発現グラフ

2.2 冬季施工品質向上の必要性

以上のことから、今後の建設現場における品質管理は、まさに ICT や IoT を駆使しながら、品質の向上をコントロールして行く方向性が示唆されるが、様々な環境が想定されるなかで、特に寒中コンクリートを取り巻く現場の環境は高度な施工品質の管理には程遠く、改善の余地は多いと考えられる。

寒中コンクリートの養生環境は断熱シートなどでコンクリート打設躯体を覆いつくし、暖房器具やジェットヒータなどを配置して暖機運転を実施し、水和反応に効果的な環境を作り出してきた。

しかしながら、暖気を満遍なく行き渡らせ、躯体表面

への効果的な熱量の供給が出来たか否かは知る術もないのが現状である。一番脆弱である躯体表面の各部位の温度管理により実際の温度状況を把握し、それに基づいた対策を施せば、寒中コンクリートの水和反応を厳しい現場の環境下で最適化することも可能になる。

今般、温度センサに依るタイムリーで緻密な表面温度測定が可能になった現在、高度化された冬季の寒中コンクリート対策として、風雨などの天候変化や気温の日変動による温度の変化傾向を捉えて、コンクリート表面温度と躯体中心温度とを自律的に制御しながら、最適な熱量を加熱供給する自動加熱養生システムの開発が望まれる。

3. 自動加熱養生システム

前項で述べた冬季施工品質の向上、即ち寒中コンクリート対策を目的として、自動加熱養生システムを開発し、試作機による実験・評価を行なった。

3.1 実験目的

寒中コンクリートの温度環境を環境試験槽内に作り、パネルヒータによる加熱機能を持たせた試作型枠を用いて試験槽内で打設した場合のコンクリートの内部温度分布を計測することにより加熱養生効果の有無、即ち各環境温度にてコンクリート内部温度を 5℃以上を保てるか否かの検証を行なう。

併せて、将来の実用化を念頭に電力消費量の計測を行ない、採算性の検討を行なう。

3.2 実験方法

(1) 試験体

実験に用いた試験体の構造、並びに熱電対の配置を図-5、6 に示す。コンクリート内部の温度測定に使用する熱電対は、四隅と中央の計 5 箇所×上中下の 3 点で合計 15 点を配置し、試験体の底面にはヒータを裏面に取り付けた樹脂型枠を設置した。また、コンクリートの配合は 24-18-20N とした。写真-2 に試験体と恒温槽の外観写真を示す。

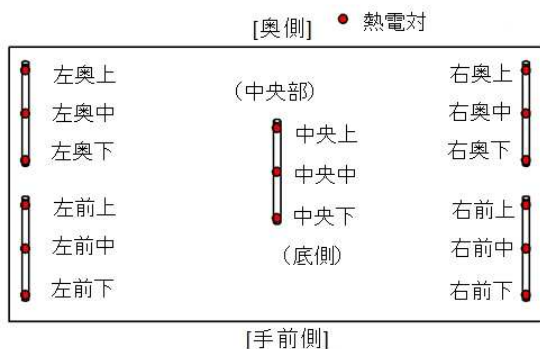


図-5 熱電対の配置と名称

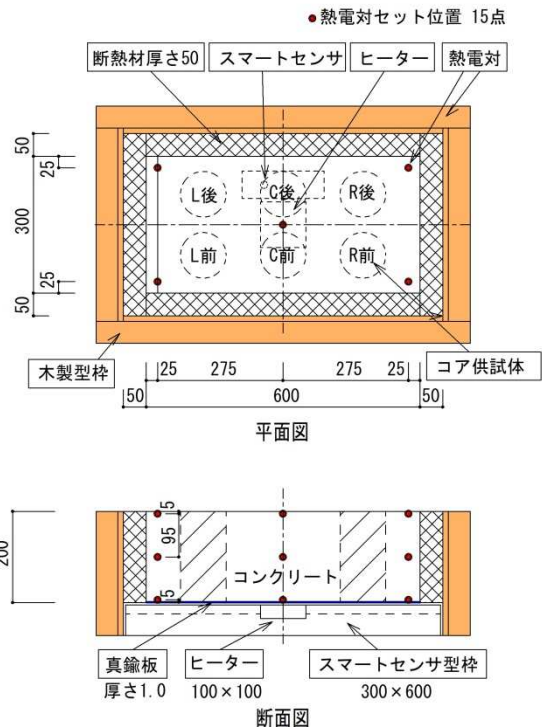


図-6 試験体構造と熱電対配置

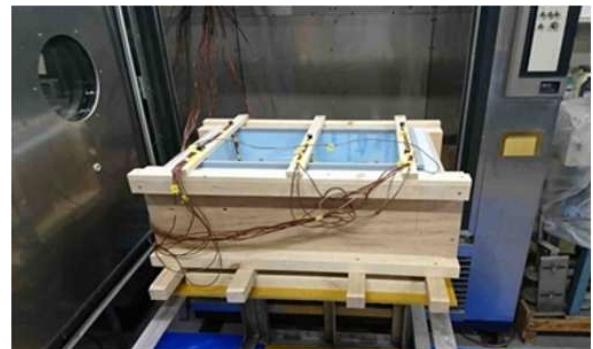


写真-2 試験体と恒温槽

(2) ヒータ付き型枠

試験に用いた樹脂型枠は、ガラス繊維入りポリプロピレン製で外寸 600×300×72mm であり、コンクリート面には真鍮製の伝熱板(長さ 595×幅 295×厚さ 1mm)を張り付けると共に、背面中央部にパネルヒータ(20W, 100×100mm)を取り付けた。また、パネルヒータの背面には出来るだけ熱的損失が生じない様に発泡ポリプロピレンフォーム製の断熱材(熱伝導率: 0.035kcal/mh℃)を充填した。尚、型枠には図-1 に例示したスマートセンサを設置して強度推定を行なえるようにした。写真-3 に表裏面の外観写真を示す。

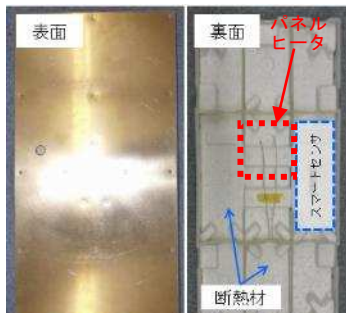


写真-3 型枠外観写真

(3) 温度設定

環境試験槽の設定温度は 0℃と-5℃の 2 通りとし、それぞれヒータの調整温度は 30℃と 40℃とした。

(4) 配線回路

ヒータの制御、及び電流計測回路を図-7 に示す。電源は DC24V のため、消費電力は電源電圧×電流値(=電圧ロガー電圧/0.22Ω)として算出した。

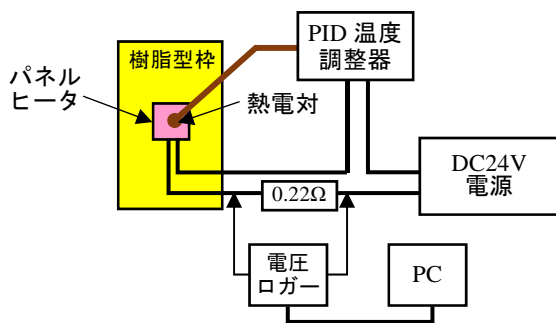


図-7 ヒータ制御・電流計測回路

3.3 実験結果

①環境温度 0℃と②環境温度-5℃の場合の 2 通りについて、材齢 7 日までの期間中のコンクリート内部温度の計測と材齢 7 日でのコア抜きによる圧縮強度の測定、並びにスマートセンサによる強度推定を行なった。併せて消費電力算定の為に材齢 2 日までの間にヒータで消費する電力量を計測した。これらの詳細結果について以下に述べる。

(1) コンクリート内部温度計測結果

1) 環境温度 0℃ (ヒータ温度 30℃) の場合

図-5、6 に示す通り、試験体の中央部と周縁 4 隅の計 5 箇所に、熱電対を上中下 3 箇所配置し、コンクリート内部の温度を計測した。材齢 1 日、及び材齢 7 日の時の温度計測結果をそれぞれ図-8、図-9 に示す。

この時の最高温度は 9.3℃であり、ヒータの真上でヒータからの距離が最も近い中央下で記録された。

最低温度はコンクリート上面に近い右前上の 3.7℃で目標温度 5℃を達成出来なかった。この地点は環境試

験槽内の還流ファンに最も近い箇所なので一番低くなったと思われるが、実環境での条件ばらつきを考えると一定のマージン確保の必要がある。

この時、各点の同一時刻における最高温度と最低温度の温度差を求めてみると、最大で 14.4℃であった。つまり、マスコンクリートにおける内部拘束ひび割れ抑制に必要な規定である内外温度差の限界値 25℃⁴⁾に対し、10℃程度の余裕が見られたことになるので、この実験ではヒータ設定温度を 30℃とした次の環境温度-5℃での試験についてはヒータ設定温度を 40℃とすることにした。

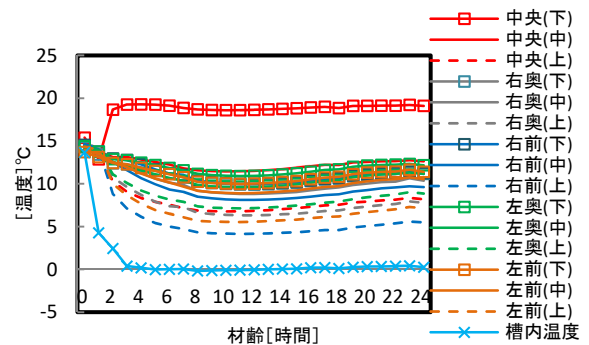


図-8 環境温度 0℃の時の温度履歴 (材齢 1 日)

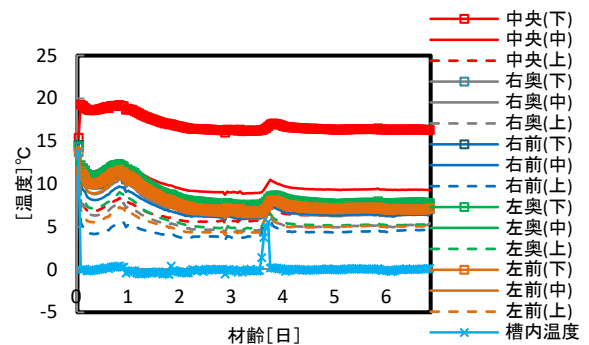


図-9 環境温度 0℃の時の温度履歴 (材齢 7 日)

2) 環境温度-5℃ (ヒータ温度 40℃) の場合

環境温度-5℃(ヒータ温度 40℃)の場合の材齢 1 日、7 日の温度計測結果をそれぞれ図-10、図-11 に示す。

この時の最高温度は 0℃の場合と同じくヒータに一番近い中央下の 22.9℃であった。

また、最低温度はコンクリート上面に近い右前上の 1.3℃であり、目標温度に対して 4℃近く低い結果が得られた。また、同一時刻における各地点の最高温度と最低温度の温度差は最大 20.2℃であり、内外温度差としては限度内であった。

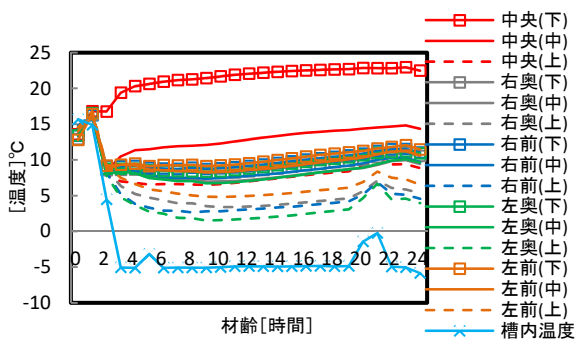


図-10 環境温度-5°Cの時の温度履歴(材齢1日)

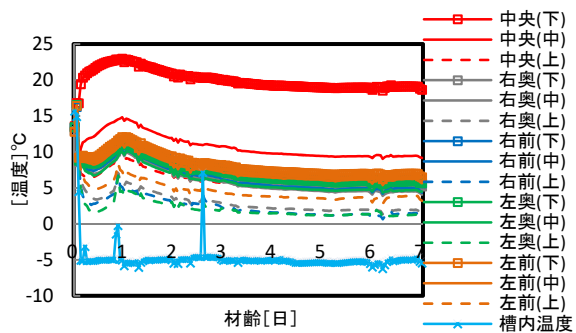


図-11 環境温度-5°Cの時の温度履歴(材齢7日)

(2) 圧縮強度試験結果

材齢7日において、加熱養生試験体（コア抜き）、標準養生試験体、現場養生試験体について圧縮強度試験を行なった。

1) 加熱養生試験体（コア抜き）の圧縮強度

加熱養生試験体を写真-4の6箇所にてコア抜きを行なった。圧縮試験を実施した結果を表-1に示す。



写真-4 加熱養生試験体のコア抜き箇所

表-1 加熱養生試験体の圧縮強度 (N/mm²)

環境温度	L前	L後	C前	C後	R前	R後	平均
0°C	12.7	13.9	12.5	13.4	13.1	13.8	13.23
-5°C	10.7	10.9	11.7	12.8	10.9	10.7	11.28

2) 標準養生試験体、現場養生試験体の圧縮強度

標準養生試験体と現場養生試験体の圧縮強度試験結果を表-2に示す。尚、-5°Cにおける現場養生試験体は凍結により圧縮強度試験に供することが出来なかつたので省いている。

前項の加熱養生試験体の圧縮強度値は、0°Cの場合に限って言えば標準養生と現場養生の場合の圧縮強度値の間であり、加熱養生の一定の効果が認められる。

表-2 標準養生、現場養生試験体の圧縮強度 (N/mm²)

環境温度	養生温度	養生条件	圧縮強度
0°C	20°C	標準養生	23.1
	0°C	現場養生	6.69
-5°C	20°C	標準養生	22.5

(3) スマートセンサによる強度推定

スマートセンサによる材齢7日の強度推定結果を表-3、並びに図-12、図-13に示す。

尚、強度推定値は、スマートセンサ内の表面温度計測用温度センサによる温度履歴と式(1)の有効材齢を用いて算出した。

表-3 スマートセンサによる強度推定値 (N/mm²)

環境温度	強度推定値 (材齢7日)
0°C	15.5
-5°C	15.4

この数値は加熱養生試験体の強度に近いが、スマートセンサの方が数値的に上回っている理由として、コア抜き試験体の方は上が低温、下が高温という温度分布を生じているのに対して、スマートセンサの方は温度センサの位置がヒータに近い底面であったことから、温度の高いポイントでの強度推定値となった為と推測される。

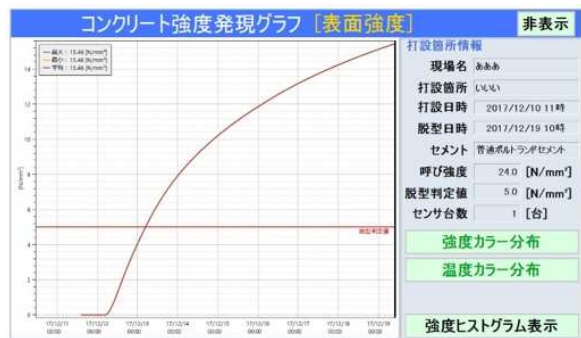


図-12 環境温度0°C時の強度推定グラフ

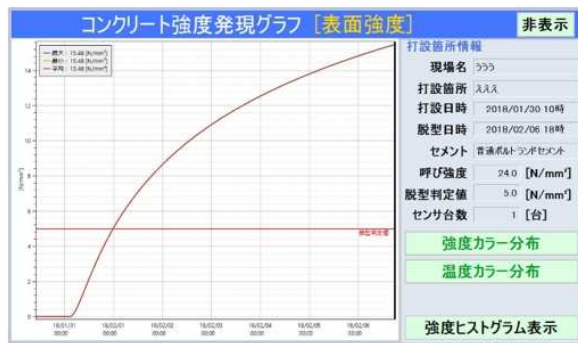


図-13 环境温度-5°C時の強度推定グラフ

(4) ヒータ消費電力量計測結果

ヒータ材齢 2 日までの累積消費電力計測結果を図-14 に示す。ここで、寒中コンクリート対策が必要なのは材齢 2 日程度までと考えて 48H までの消費電力について評価を行なう。

実測結果として 48H 経過時点で 0.8kWh を消費しているため、1 日当たり 0.4kWh だが、今回試験に使用した型枠の面積は 300×600mm であるから、コンパネ型枠の定尺品 (600×1800mm) と比較すれば 1/6 枚分に相当する為、定尺品で 1 日当たり 2.4kWh のエネルギーが必要となる。

実際に現場で寒中コンクリート対策として使われるジェットヒータと比較してみる。仮に養生面積を型枠 20 枚分とし、この面積を 2 日間加熱養生した場合を想定する。ジェットヒータの場合、平均的な機種で熱出力は 17kW 程度なので、2 日間=48H 連続運転した場合は、 $17\text{kW} \times 48\text{h} = 816\text{kWh}$ を消費する。これに対し、本加熱養生方式の場合は、 $20\text{枚} \times 2.4\text{kWh/日} \times 2\text{日} = 96\text{kWh}$ であり、1/8 程度のエネルギー消費で済むことが分かる。

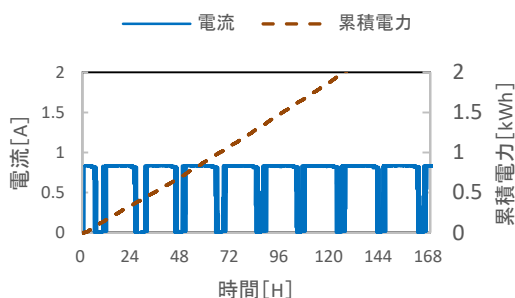


図-14 消費電力量計測結果

4. まとめ

本報告では、寒中コンクリート対策としてヒータでの加熱制御により自動加熱養生システムの実現を図るべく加熱養生用型枠を試作し、実験と評価を行なった。

今回の実験によって得られた知見について以下の通り整理してみる。

(1) 0°C 環境下では、材齢 7 日の期間においてコンクリート内部の測温地点 15 箇所の内、最低温度は 3.4°C で、下限値の 5°C を達成することは出来なかった。

しかしながら全測温地点中において同一時刻での最大温度差は 14.4°C にとどまることから、ヒータ設定温度を上げてみた場合に最低温度がどの程度変化するか検討を行なう必要がある。

(2) -5°C 環境下では、コンクリート内部の最低温度は 1.3°C であり、同じくこの時の最大温度差が 20.2°C であったことから、本環境温度下では 5°C の維持は困難と思われるが、断熱材料の変更により断熱性強化を施すなど、他の断熱手法を組合せることによって改善改良の余地はあるものと思われる。

(3) エネルギーの消費量については、一般的なジェットヒータを使った場合と比較すると、型枠 20 枚相当の面積 (約 20 m²) を加熱養生する場合で約 1/8 程度となることが試算結果で得られたが、実際にはそれ以外にヒータや配線部材などの材料費、或いは組立配線費用などの工賃等々を含めて総合的に勘案する必要がある。

参考文献

- 野口貴文, 北垣亮馬, 西島茂行, 山本秀之: スマートセンサ型枠システムを利用したコンクリートの養生・品質管理システムの開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-048, 2012 年 9 月
- 北垣亮馬, 野口貴文, 西島茂行, 山本秀之: スマートセンサ型枠システムの無線ネットワーク化による現場管理・温度分布・推定強度分布の可視化, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-049, 2012 年 9 月
- 日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・解説, 2008
- Alain Jeanpierre and Laurent Boutillon: CRITERIA for the maximal admissible thermal differential within a mass concrete element, CONCRACK 5, 2017