

養生期間中のコンクリートの内部温度推定方法に関する研究

東北学院大学 学生会員 ○鈴木 拓人
東北学院大学 正会員 石川 雅美

1. はじめに

コンクリートの施工時において、脱枠時期を適切に判定することは、初期ひび割れを防止するうえで重要である。本研究では、型枠の内側に設置した温度センサを用いて、養生期間中のコンクリートの表面温度を測定することで、さらにその表面温度から内部の温度を推定する方法を提案する。内部温度の推定方法として1次元の熱伝導問題にコンクリートの発熱特性を加えた理論解を用いる。推定方法の妥当性を確認する目的で熱の流れが1次元となるような0.9mx0.8mx1.8m試験体を作成して、その表面温度および内部温度を測定し、推定値と比較した。その結果、推定値は実測値より若干低めの傾向があるが、両者は良好な対応を示すことが認められた。

2. 熱伝導方程式の理論解

1次元熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + Q(t) \quad (1)式$$

ここに、 u : コンクリートの温度

k : 温度伝導率, $Q(t)$: 発熱項(単位時間当たりの上昇温度)

温度 u を得るために $u = w_1(x) + w_2(x,t)$ (2)式

と置き、 u は初期温度分布を表す位置のみ関数で与えられる温度成分 $w_1(x)$ と、位置と時間の関数の $w_2(x,t)$ との和としてあらわされるものとする。ゆえに $w_1(x)$ は、図-1 に示すように、次式となる。

$$w_1(x) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L} x \quad (3)式$$

一方、 $w_2(x,t)$ は、初期条件として $x=0$ および $x=L$ で $w_2(t,0) = T_1$, $w_2(t,L) = T_2$ で与えられるものとする。すなわち、両端を固定温度境界として(1)式を解くと、

$$w_2(x,t) = -\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \{T_1 - (-1)^m T_2\} e^{-k\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 t} \sin \frac{m\pi}{L} x + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-k\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 t} \sin \frac{m\pi}{L} x \int_0^L f(\xi) \sin \frac{m\pi}{L} \xi d\xi + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-k\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 t} \sin \frac{m\pi}{L} x \int_0^L g(\xi) \sin \frac{m\pi}{L} \xi d\xi \quad (4)式$$

となる。ここで、 $f(\xi)$: 初期温度分布を示す関数とする。 $g(\xi)$: 発熱による温度上昇分を示す関数で、コンクリートの断熱温度上昇式 $T = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$ を代入する。 $f(\xi)$, $g(\xi)$ は数値積分によってその値を計算プログラム内で求める。なお、ここで提案する温度推定手法は、理論解によりコンクリートの内部の温度を厳密に計算するものではなく、(2)式で表される関数(理論解)を利用して内部温度を近似すると位置付ける。ここでは逐次計測される型枠両端の表面温度である T_1 と T_2 を各材齢 t で与えることにする。なお級数 m は 20 程度までで安定した解が得られる。

3. 検証実験

表面温度を基にした内部温度推定方法の妥当性を確認する目的で、図-2 に示す試験体を作成した。試験体に用いたコンクリートは W/C=57%, 単位セメント量 295kg/m³, 使用したセメントは普通セメントである。

キーワード 養生, 温度, 熱伝導方程式, 理論解

連絡先 〒985-8537 多賀城市中央 1-13-1 東北学院大学工学部 TEL 022-368-1189

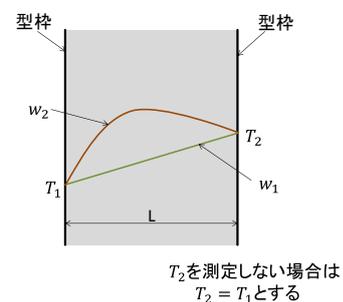


図-1 温度分布

図-2に示すようにコンクリート部分は0.9m×0.8m×1.8mであり、熱の流れが長手方向に1次元状態となるよう側面をすべて厚さ100mmの発泡スチロールで覆った。端面には樹脂製の型枠を使用し、型枠の内側(コンクリートに接する側)と外側にそれぞれ温度センサを取り付け、コンクリートの表面温度とともに、外気温も計測した。内部温度は図-2に示すように300mmおきに測定している。計測は1時間毎とした。コンクリートの打設温度は31.4℃であった。

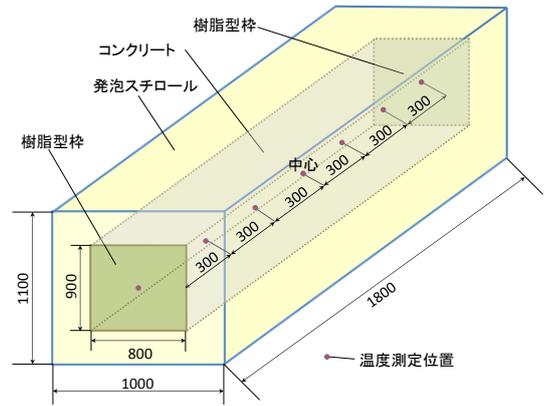


図-2 内部温度測定位置

4. 理論解による推定

理論解の計算に際して、終局温度上昇量および発熱速度パラメータは前述の単位セメント量および打設温度をもとに示方書の式より求め、それぞれ $Q_{\infty}=49.10^{\circ}\text{C}$ 、 $r=1.838$ とした。また、比熱を $1.15\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ とし、熱伝導率および密度をそれぞれ $2.4\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 、 2300kg/m^3 とした。図-3に試験体中心位置での温度の比較を示す。実測の温度は材齢1.5日最高温度 72.4°C に達したのに対して、推定値は材齢1.4日に最高温度 66.9°C であり、 5.5°C の差が生じている。図-4は、材齢1日における温度分布の比較であるが、中心付近で 5.2°C の差が生じている。この原因は、理論解の境界条件として、両側の表面温度を固定温度と仮定しているが、実際には樹脂型枠を介した熱伝達境界であり、この型枠を介しての熱の出入量が実際と異なっていることに起因していると考えられる。

そこで、型枠面の熱流を調整するため、1)熱伝達を介した熱流量 $q_{\text{ex}}=h_s(T_{\text{sf}}-T_{\text{air}})$ 、ここに h_s :樹脂型枠の熱伝達率、 T_{sf} :表面温度、 T_{air} :外気温、で求められるコンクリート表面温度と、2)表面から50mm内側の推定温度との間の熱流量 $q_{\text{in}}=\lambda'(T_{50}-T_{\text{sf}})/50$ 、(T_{50} :50mm内側の温度)が等しいと仮定して熱伝導率 λ' を算出し、これを用いた。なお樹脂型枠の熱伝達率は $8\text{W/m}^2\text{C}$ とした。この λ' を用いて推定した温度の比較を図-5に示す。実測と推定値の最高温度の差は 3.2°C 程度となり、改善が見られた。

5. まとめ

本研究では、養生期間中のコンクリート内部温度を、表面温度より推定する方法を提案した。試験体の測定結果と推定温度の比較において、推定値は実測の値より若干低めの値となった。推定精度を高めるためには、熱伝達境界における理論の改善を図る必要である。

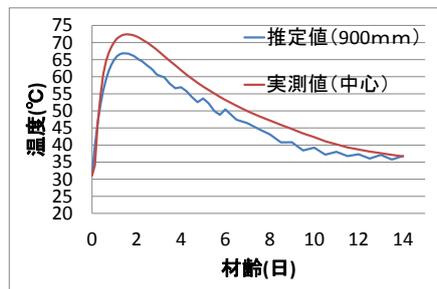


図-3 中心温度の比較

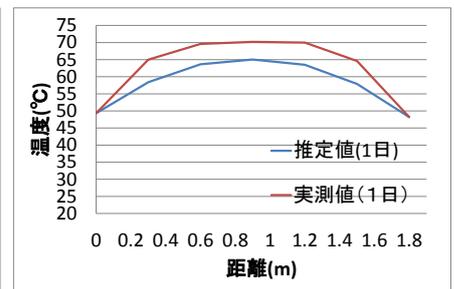


図-4 材齢1日の温度分布

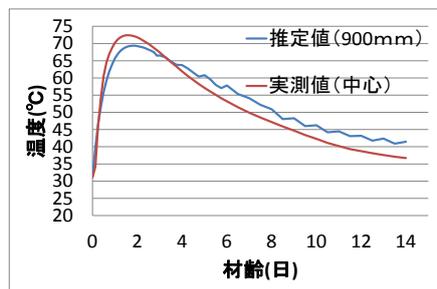


図-5 k' を用いた場合

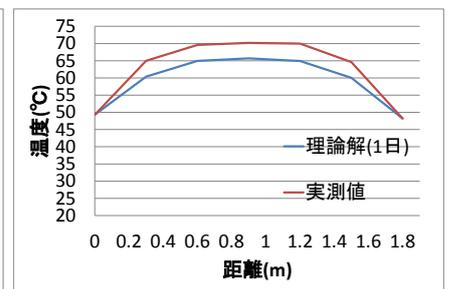


図-6 k' を用いた場合

謝辞: 本研究で示した温度計測試験データは、児玉株式会社西島茂行氏よりご提供いただいたものです。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 野邑雄吉: 応用数学、(株)内田老鶴圃、2003.4 甲藤好郎: 伝熱概論、養賢堂(株)