型枠の内外温度を用いたコンクリートの中心温度推定手法に関する基礎的研究

東京大学大学院工学系研究科　正会員　○北垣　亮馬　正会員　野口　貴文
児玉（株）　正会員　西島　茂行　正会員　山本　秀之

１．はじめに

コンクリートは，打ち込まれた直後から数日間，水和熱による温度上昇が生じるが，この際，中心から表面までの温度差や，硬化状態における物性の違いなどによってひび割れが生じることがある．このような問題の発生を防ぐために，打ち込まれるコンクリートの配合と部材寸法を組合せた温度解析を事前に実施したり，コンクリートの中心部に温度センサーを埋め込み，内外温度をモニタリングするなどの品質管理対策がとられることがある．ここで，中心温度の測定においては，センサーの設置に手間がかかることや，センサーのリード線が構造物に残ってしまうことに対する懸念があり，限られた場合にのみ行われているのが実情であるが，コンクリート工事現場にとって，手間なく中心温度を把握することは，品質管理上，依然として要望が高いものと考えられる。

そこで，本研究では，型枠に搭載された２基の温度センサーのみからコンクリートの内部温度推定を実現するための数式モデルを提案し，検証した結果について報告する．

２．モデルの概要

いま、図１に示すような構成で，コンクリートが発熱しているとすると発熱項を含めた熱伝導方程式は以下のようになる。

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

ここで，断熱温度上昇 $T = Q_\infty(1-\exp(-\alpha p^2 t))$ とし、$\mu_0 = \int Q(t)dt$ となる値 μ_0 を考え、$v = u - u_0$ とすると、この式は，

$$\frac{\partial v}{\partial t} = k\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

と変換でき、発熱項のない伝熱方程式が得られることから、一般解 v を求めると、

$$v(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \exp(-\alpha p^2 t)\cdot\cos(p_n x)$$

となる。よって、

$$u(x,t) = v(x,t) + c\rho Q_\infty\left(t + \frac{1}{\alpha p^2 n}\exp(-\alpha p^2 n t)\right)$$

となる。ここで，コンクリートが打ち込まれるまでは，型枠の温度とコンクリートの温度は，通常，完璧には一致していないため，打ち込まれた時点で両者の間に熱流が生じ，一定の期間を経て熱的に一体となった挙動を示すようになる．この時刻を $t=0$ とすると，それ以降になって熱流の向きや挙動が安定する．すなわち，$t=0$ の前の温度変化は，$t=0$ の後によく見られる，コンクリートの発熱履歴に応じた上に凸の上昇曲線とは異なるため，その間には明らかな変曲点を持つものと考えられる。例えば，樹脂製型枠のコンクリート側と外

キーワード　内部温度推定，スマートセンサ型枠，コンクリート，情報化施工
連絡先　〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 1 号館 112 号室

気側に温度計を設置し，打ち込まれる直前までは同一温度だったとして，ここに2℃高いコンクリートが打ち込まれた場合，型枠内外温度差（(コンクリートの表面温度）－（型枠の屋外表面の温度)）が図2のようになるため，変曲点を容易に判断することができる。上記で述べた熱伝導方程式の解は$t=0$からはじめて成立するものなので，$t=0$を代入してみると，

$$u(x,0)=\sum_{n=1}^{\infty}C_n\cos(p_n x)+c\rho Q_\infty\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha p_n^2}$$

となる。この一般解を n=1 に近似し，さらに$t=0$以降の型枠と接触している部分（x=L）のコンクリート表面温度を複数入力し，未知数を決定することで，その後のコンクリートの中心温度を推定することができる。この方式で推定する場合，数式的には事前にコンクリートの配合を知る必要がない点にも利点がある。

３．実験概要

図3に実証実験で利用したコンクリートの試験体寸法と温度測定箇所を示す。打ち込んだコンクリートとして，セメントが普通ポルトランドセメント，W/C=37%，スランプフロー50cm，空気量4.5%の高流動コンクリートを調達した。打込み時期と場所は8月中旬の屋外で，測定中ずっと晴天であった。また，型枠の内外表面部分の2対の温度測定においてはスマート型枠[1)]を用いた。

４．実験結果および考察

実験結果を図4に示す。本モデルで行った2対の表面温度計のみによる中心温度の推定と実測結果は比較的よく一致していたと考えられる。

５．まとめ

本報告で考案したコンクリートの中心温度推定手法によって，柱部材を想定したコンクリートの中心温度を推定したところ，比較的よく一致した。今後はさまざまな部材断面をもつコンクリートや配合の違いなどを検討する必要があると考えられる。

参考文献

1） NETIS：http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=QS-110040

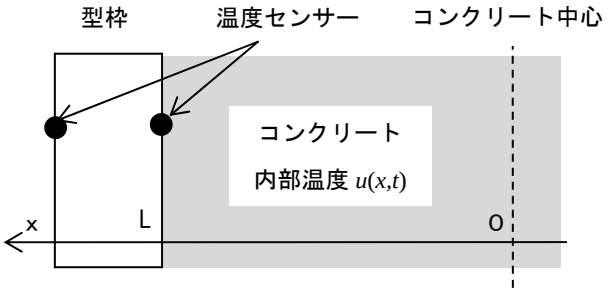

図 1 コンクリートと型枠の模式図

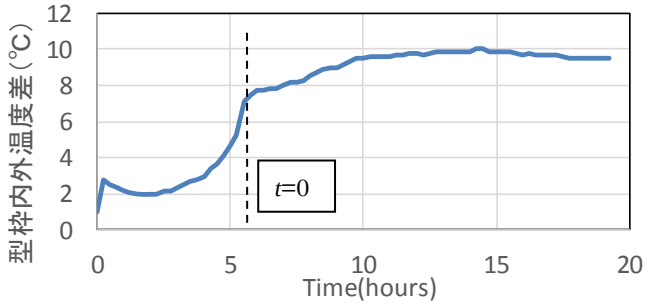

図 2 打ち込み直後からの型枠内外温度差の推移

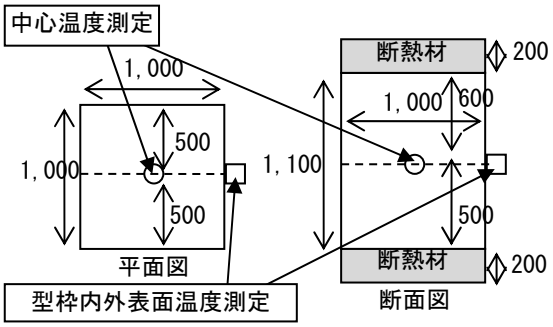

図 3 コンクリート供試体と温度測定箇所

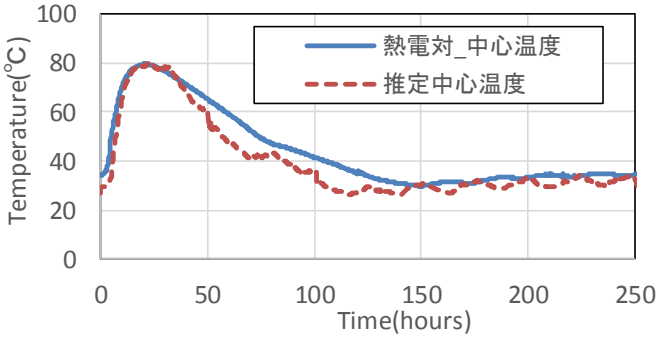

図 4 実験結果