

赤外線を利用した温度解析の 境界条件設定方法に関する研究

A New Method to Decide the Boundary Condition in Calculating Temperature
Heat Hydration of Concrete by Infrared Image Analysis

山口 明伸*・魚本 健人*
Toshinobu YAMAGUCHI and Taketo UOMOTO

1. はじめに

コンクリートの温度分布は、一般に与えられた熱伝達境界を満足するように熱拡散方程式を解くことにより求めるが、境界条件の与え方いかんによっては、その解析精度は大きく左右される。しかしながら、熱伝達率等の境界部分の熱定数は、その測定が極めて難しいため、従来の境界条件は正確に与えられていない。

そこで本研究では、コンクリート養生中の型枠外面の熱赤外線画像を利用することにより境界部分の諸熱定数を測定し、境界条件の設定を従来よりも厳密に行うことを試みた。

2. 実験概要

実験に使用したコンクリートの配合は、単位セメント量を300, 350, 400, 450kg/m³とした4種類とした。試験体の大きさは30×40×70cmとし、また養生条件は、全てについてコンクリートの6面のうち5面に対しては型枠の内側に発泡スチロールを張り付けた断熱状態を模擬し、表1に示す通り残りの1面の位置と条件を、側面に鋼製または合板型枠を用いた場合、打設終了後の上部打設面に深さ7cmの水を張り堪水養生とした場合の3種類として行った。全ての場合とも養生中の型枠の外面、または水面の温度分布を熱赤外線映像装置を用いて打設終了直後から30分間隔で48時間にわたって経時的に撮影した。また、試験体内部の9カ所に熱電対を配置した。図1に養生条件が鋼製型枠の場合の試験体の概要を示す。

3. 境界条件

図2は、従来の境界条件を用いたコンクリート表面における温度解析とその実測値を示したものであり、両者の間

*東京大学生産技術研究所 第5部

表1 養生条件

養生法	厚さ(mm)	取り付け位置
鋼製型枠	2.0	側面
合板型枠	12	側面
湛水	70	上部

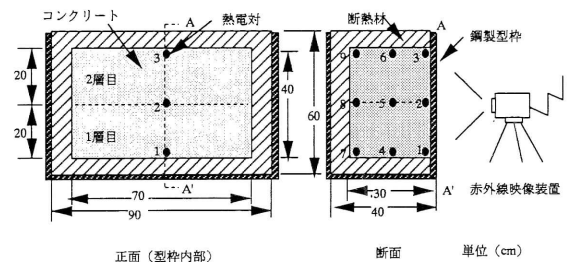


図1 試験体の概要

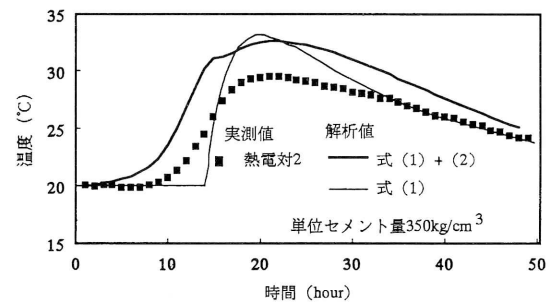


図2 温度解析結果 (従来の境界条件)

にはかなりの差が生じていることが分かる。これは、従来の境界条件の設定が正しくないため、その影響を受けやすいコンクリート表面付近における解析精度が低下するためである。

コンクリートと型枠および外気との温度分布の概念図を図3に示す。境界部分の熱移動は、図3に示したように

研究速報

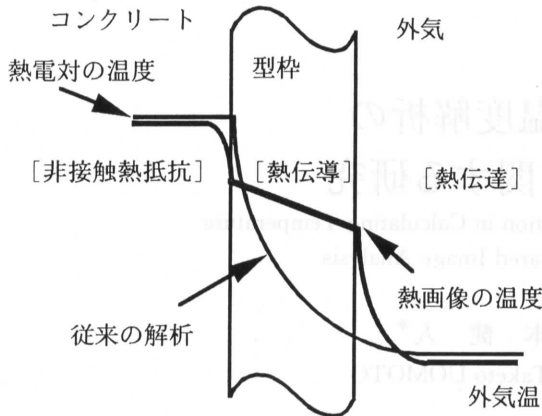


図3 熱移動の概念図

①コンクリートと型枠の間の非接触熱抵抗, ②型枠内の熱伝導, ③型枠と外気間の熱伝達, の3種類の形態が存在すると考えられる. 温度解析を精度良く行うためには, それぞれの熱移動に寄与する熱定数を正しく決定し, それらの熱定数を解析過程に正しく用いることが必要となる.

これらの熱定数を決定するためには, コンクリートから外気までの各熱移動形態における熱移動量とその時の境界断面における温度分布が必要となるが, そのためには型枠外面の温度を実際に確認しなければならない. また, 各移動形態ごとの熱移動量は, 型枠の材質, 形状, 熱特性, 表面状態, 等により決定するが, 同一の型枠内においても錆の有無, 変形等による局所的なばらつきが存在する. したがって, 熱移動量は型枠のある1点ではなく型枠全体に対して求めることが必要である.

本研究では, これらの要求を満たすために, 熱赤外線映像装置を利用することを考えた. つまり, 熱赤外線映像装置を用いてコンクリート養生中の型枠外面の2次元温度分布を熱画像により確認し, その温度分布から境界部分における各移動形態における熱定数を決定することを試みた. なお, 熱定数のうち型枠の熱伝導率については, 過去の文献⁴⁾を参考にした(表2参照).

表2 型枠とコンクリートの熱伝導率

	熱伝導率 (kcal/mms°C)
鋼製型枠	1.92×10^{-5}
合板型枠	2.03×10^{-8}
湛水	1.29×10^{-7}
コンクリート	6.70×10^{-7}

3.1 型枠の非接触熱抵抗

非接触熱抵抗は単独で測定するのが困難であるため, 本

研究では非接触熱抵抗および型枠内の熱伝導による熱移動の合計, つまりコンクリート表面から型枠外面までの熱移動を型枠の熱通過特性⁴⁾として扱った. 型枠の熱伝導率の値は既知であるから, 測定した型枠の熱通過特性と熱伝導率から, 非接触熱抵抗を求めることとした.

型枠の熱通過特性は, 型枠外面の温度上昇量のコンクリート表面の温度上昇量に対する割合であり, 下式のように表せる.

$$U = (T_{fo} - T_0) / (T_{cs} - T_0) \quad (1)$$

ここに, U : 型枠外面までの熱通過率

T_{fo} : 熱画像による型枠外面の温度 (°C)

T₀ : コンクリート打設前の型枠の温度 (°C)

T_{cs} : 型枠内部のコンクリートの温度 (°C)

図4に鋼製型枠の場合の熱画像による実測の熱通過率を示す. 図のように熱通過率は, コンクリート表面の温度によらずほぼ一定であることが分かった. また, 赤外線による実測値から求めた熱通過率と, 型枠の熱伝導率から計算した熱通過率の値は大きく異なっている. これは, 非接触熱抵抗が, 考慮されているか否かの違いである. 本研究では, 非接触熱抵抗がないと仮定して熱伝導率のみから計算される型枠外面の仮想温度を T_{fo'} とし, 非接触熱抵抗率を次式のように定義した.

$$R = 1 - (T_{fi} - T_0) / (T_{cs} - T_0) \quad (4)$$

また, 非接触熱抵抗率と熱通過率の関係は次式のように表せる.

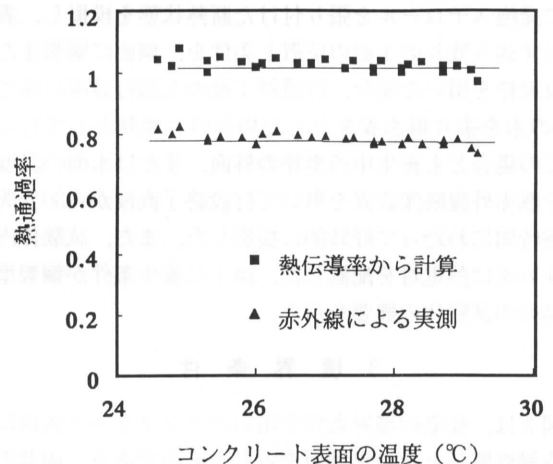


図4 鋼製型枠の熱通過率

表3 熱定数

	非接触熱抵抗率	熱通過率
鋼製型枠	0.21	0.78
合板型枠	0.45	0.52
湛水	0	0.60

$$U = R \cdot (T_{fo} - T_0) / (T_{fi} - T_0) \quad (5)$$

したがって、式(4)は式(5)を用いて次式のように表せる。

$$R = 1 - U \cdot (T_{cs} - T_0) / (T_{fo}' - T_0) \quad (6)$$

ここに、R : 非接触熱抵抗率
 T_{fi} : 型枠内面の温度(°C)
 T_{fo}' : 型枠外面の仮想温度(°C)

表3に各養生方法ごとの熱通過率と、型枠とコンクリート間の非接触熱抵抗率を示す。

3.2 熱伝達率

前述したように、型枠の熱伝達率は温度解析の結果に直接影響する極めて重要な熱定数であるにもかかわらず、従来の熱伝達率の推定方法には問題点が多い^{2),5)}。

そこで、本節では前節で求めた非接触熱抵抗率、熱電対を用いて従来より厳密に熱伝達率を求める⁶⁾。

図5に示すように、打設からt時間後の熱電対により計測したコンクリート表面の温度上昇量をΔT_{cs}(t)、そのときの断熱温度上昇量をΔT_a(t)とし、コンクリート中の温度分布は距離の2乗の関数として表せると仮定すれば、t時間後までにコンクリートから放出される熱量の積算∫Q(t)は、次式のように表せる。

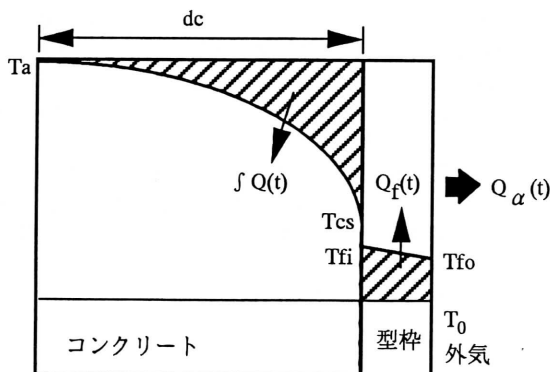


図5 放熱の概念図

$$\int Q(t) = C_c \rho_c d_c (\Delta T_a(t) - \Delta T_{cs}(t)) / 3 \quad (7)$$

ここに、∫Q(t) : 放出熱量の積算(kcal)
 ΔT_a(t) : 断熱温度上昇量(°C)
 ΔT_{cs}(t) : コンクリート表面の温度上昇量(°C)
 C_c : コンクリートの比熱(kcal/kg)
 ρ_c : コンクリートの密度(kg/mm³)
 d_c : コンクリートの奥行き(mm)

図6に式(7)による各養生条件における積算放熱量の経時変化を示す。図中の積算放熱量曲線の微分値がコンクリートから単位時間あたりに放出される熱量Q(t)となる。

さらに、型枠の温度上昇に使われる熱量をQ_f(t)とすると、熱伝達による外部への放熱量をQ_α(t)は次式のように表せる(図6参照)。

$$Q_{\alpha}(t) = Q(t) - Q_f(t) \quad (8)$$

ここに、Q_α(t) : 熱伝達による放熱量
 Q(t) : コンクリートから放出される熱量
 Q_f(t) : 型枠で消費される熱量

したがって、型枠の熱伝達率αは以下のように表せる。

$$\alpha(t) = Q_{\alpha}(t) / (T_{fo}(t) - T_{air}(t)) \quad (9)$$

ここに、α(t) : 熱伝達率(kcal/m²h°C)
 T_{air}(t) : 外気温(°C)

図7に養生条件ごとの熱伝達率と、標準示方書による熱伝達率を示す。養生条件に関わらず、本手法による熱伝達率と従来使用されている熱伝達率の値は、かなり異なること

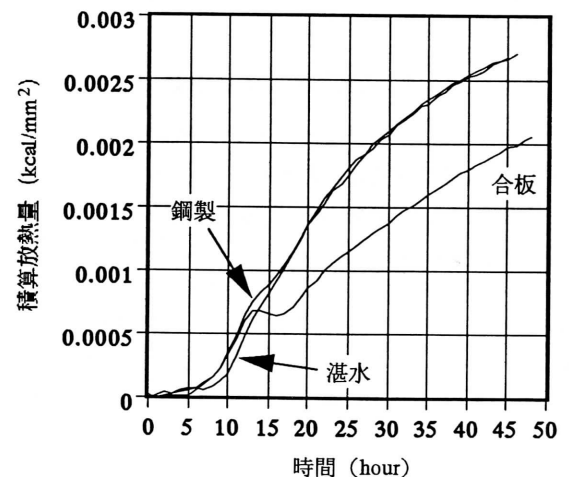


図6 コンクリートからの積算放熱量

研究速報

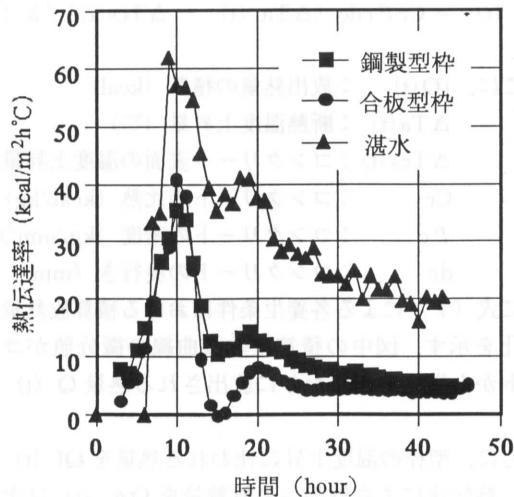


図7 熱伝達率

が分かる。図のように本手法による熱伝達率は養生中一定値ではなく時々刻々とその値が変化しており、しかもコンクリート発熱速度の経時変化に追随するように変化している。これは、熱伝達率の値が、内部のコンクリートの発熱速度の大きさに依存することを示している。また、外気温の影響で、実際に打設したコンクリートの水和発熱量が、断熱試験結果による発熱特性よりも少なくなり、その減少量がコンクリートからの放熱量として過剰に含まれていることも考えられる。この場合、熱伝達率の変動は打設したコンクリートの単位時間当たりの水和反応の減少量を示していることになる。いずれにしても本手法により決定される熱伝達率は、コンクリートの温度解析に用いる場合の見かけの熱伝達率として扱うことができると考えられる。なお、湛水養生の場合赤外線量と水面の温度が必ずしも一致していないことが考えられ、今後さらに測定方法等の検討が必要であると考えられる。

4. 温度解析による確認

前章までで決定した境界部分での各熱定数の精度を確認するために3次元FEM温度解析を行った。

養生条件として鋼製型枠を用い、単位セメント量が $350\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の試験体についての温度解析結果および熱電対による実測値を図8に示す。図のように本手法による境界条件を解析で用いることにより、温度解析の精度が改善されていることがわかる。同様に他の養生条件、配合の場合についても、温度解析の精度は極めて良好であった。

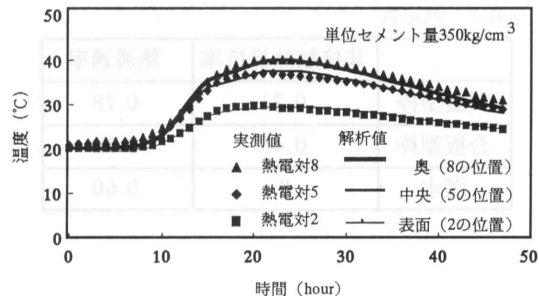


図8 温度解析結果

したがって、本研究による境界条件の設定方法は妥当なものであることが確認できた。

5. 結論

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 境界部分における熱の移動を、①コンクリートと型枠の間の非接触熱抵抗、②型枠内の熱伝導、③型枠と外気との熱伝達、の3つに分類することにより、非接触熱抵抗、熱伝達率を各養生条件ごとに決定することができた。なお湛水養生の場合、その測定方法等の今後の検討が必要である。
- (2) 熱伝達率は、従来解析に用いられている値とはかなり異なっており、経時的に変化することが分かった。
- (3) 型枠の非接触熱抵抗率を求めることにより、熱伝達量の算出に必要な型枠外面の温度を精度良く推定することができた。
- (4) 以上の境界条件を用いた3次元FEM温度解析の推定精度は極めて高く、本手法の妥当性を確認できた。

(1995年8月9日受理)

参考文献

- 1) コンクリート工学協会耐久性研究会抄訳：コンクリート構造物の耐久性，コンクリート工学，Vol. 23, No.1, pp. 39-53, 1994.1.
- 2) 日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度応力研究小委員会：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，pp. 1-34, 1982.9.
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書，平成3年版，(施工編)。
- 4) 渡部 正：サーモグラフィ法によるコンクリート施工のモニタリングシステムに関する研究，博士論文，1994.
- 5) 土木学会コンクリート委員会：マスコンクリート技術の現状と動向，土木学会，1994.
- 6) 橋 藤雄：伝熱論，コロナ社，1969.