

論文 熱赤外線を利用したコンクリート養生中の内部温度推定法に関する基礎的研究

山口明伸*¹・魚本健人*²

要旨：コンクリートの温度解析の際最も重要となる熱定数はコンクリートの発熱特性であるが、主に用いられている指数関数による発熱式は若材令時の精度が低い。また、コンクリート表面付近では熱伝達率の値により解析結果が大きく左右するが、熱伝達率の測定や予測は難しく、経験的な値を用いているのが現状である。本論文では、若材令コンクリートの発熱特性としてシグモイド曲線を用いて温度解析の精度向上を図った。また、型枠外面の熱赤外線画像利用して型枠の熱通過率を測定することによって、型枠と外気の熱伝達率によらず温度解析を行う手法について実験的に検討した。

キーワード：熱赤外線画像、温度分布、熱通過率、境界条件

1. はじめに

コンクリート構造物の品質低下、または早期劣化の原因の多くは、施工中におけるコンクリートの配合のばらつき、打込み方法、あるいは養生方法に原因があることが報告されている¹⁾。したがって、これらの施工中に発生する欠陥を未然に防止・検出することがコンクリート構造物の品質を確保し、またそれを維持管理するために最も望ましくかつ確実な方法であると言える。

近年、高流動コンクリートの研究が盛んになされており、また実用化されつつあるが、このようなコンクリートを使用する場合その単位セメント量が極めて多いことから温度ひび割れの危険性があり、施工管理においてはその発生を未然に防ぐことが重要である。そのためには、養生中におけるコンクリートの温度応力を精度良く推定できなくてはならず、その前提としてコンクリート躯体内の温度分布を正確に求める必要がある。温度解析を行う場合、その結果に最も影響する因子はコンクリートの発熱特性と境界条件である²⁾。しかしながら、通常発熱特性として用いられている発熱式は若材令時の精度が低く、また境界条件についても熱伝達率の推定や測定が困難なため、特に若材令時における解析結果はその信頼性に欠ける。

そこで本論文では、若材令時における発熱式の精度の改善、また型枠外面の熱赤外線画像を利用した境界条件の設定等を行い、養生中のコンクリート躯体内の温度分布を精度良く推定することを試みた。

表-1 配合

セメント C	単位量(kg/m ³)			W/C (%)	S/a (%)
	水 W	細骨材 S	粗骨材 G		
300	170	893	938	59	49
350	170	813	1016	50	45
400	169	808	905	44	47
450	168	775	943	29	46

*各配合ともAE剤、減水剤を単位セメント量のそれぞれ0.5、1.0%添加。

2. 実験概要

実験に使用したコンクリートの配合は、表-1に示すように単位セメント量を300、350、400、450kg/m³とした4種類である。使用した各配合の発熱特性は断熱温度上昇試験により計測した。

* 1 東京大学大学院、工学系研究科土木工学専攻（正会員）

* 2 東京大学教授、生産技術研究所、工博（正会員）

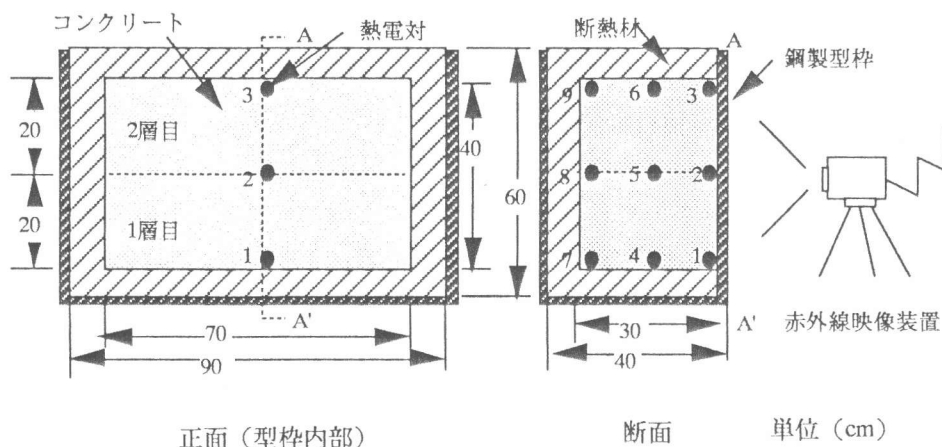


図-1 試験体の概要

試験体の製作には、鋼製型枠を使用し2層に分けて打設した。また表-1の範囲において、1層と2層の単位セメント量を変えた場合の試験体の製作も行った。赤外線撮影装置で計測を行う1面のみを残し、残りの5面には型枠の内側に発泡スチロールを貼り付け、断熱状態を模擬した。また、試験体内部の9カ所に熱電対を配置した。図-1に試験体の概要と熱電対の位置を示す。

赤外線撮影装置によるコンクリート打設後の型枠外面の温度分布の計測は、打設終了直後から30分間隔で48時間にわたって行った。実験に使用した赤外線撮影装置の仕様を表-2に示す。

表-2 赤外線撮影装置の仕様

測定温度範囲	-35 ~ 950
撮影距離	20 cm 以上
検知波長帯	3 ~ 5.4
赤外線探知器	Insb 10 素子アレイ
検知器の冷却方式	アルゴンガス or 窒素ガス
最小検知温度差 (°C)	0.1
設定感度 (°C)	0.01 以上
瞬時視野角 (mrad)	2.2
観測視野角 (度)	10 × 15
走査線数 (本)	100
表示画素数 (縦×横)	199 × 256

3. 内部温度の推定

3. 1 断熱温度上昇式

コンクリートの温度解析はその発熱特性を表すための近似曲線として、式(1)のような指数関数式を用いることが多い。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - \exp(-\gamma t)) \quad (1)$$

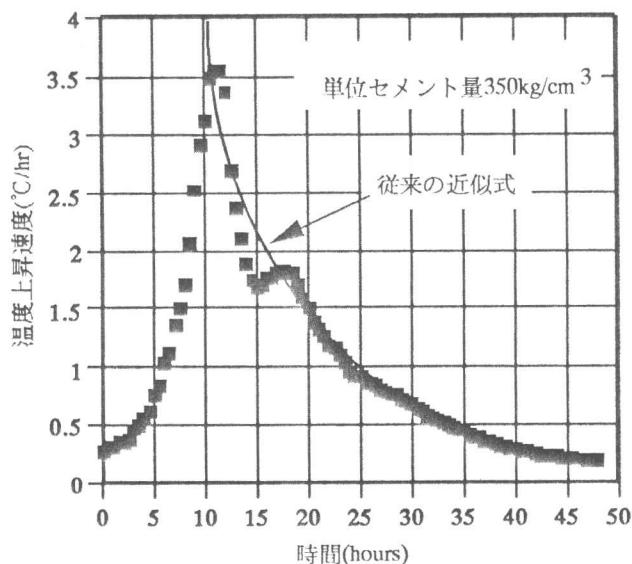


図-2 断熱温度上昇速度

図-2に単位セメント量 350kg/m^3 の場合の断熱温度上昇速度の実測値と式(1)による近似曲線を示す。図のように式(1)による発熱速度関数は、単調減少となるために、水和反応減速期となるセメントの水和初期打設後15時間程度以降については良く近似できているが、それ以前の水和反応加速期では実測値と大きく異なっている。コンクリートの温度上昇に伴う温度ひび割れの発生が最も懸念されるのは、コンクリート内部の温度変化あるいは表層部の温度差が大きい水和初期であるから、温度解析を行う際、水和反応加速期における発熱速度は特に精度良く与える必要がある。

そこで、水和加速期における近似式として従来の指数関数式の代わりに式(2)に示すシグモイド曲線式を用いることを試みた。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 + \exp(at + b)) \quad (2)$$

図-3、4に水和反応加速期と減速期における温度上昇速度の実測値と式(2)、

(1)による近似式を示す。図のように水和反応の加速期と減速期で近似式を区別することにより発熱特性を精度良く近似することができた。

3. 2境界条件

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-5に示す。図のようにコンクリートと型枠の間には固体間の非接触熱抵抗が存在し、型枠内では熱伝導、型枠外面と外気の間では熱伝達が生じている。ところが、図中に示したように従来の温度解析では、型枠と外気の熱伝達の

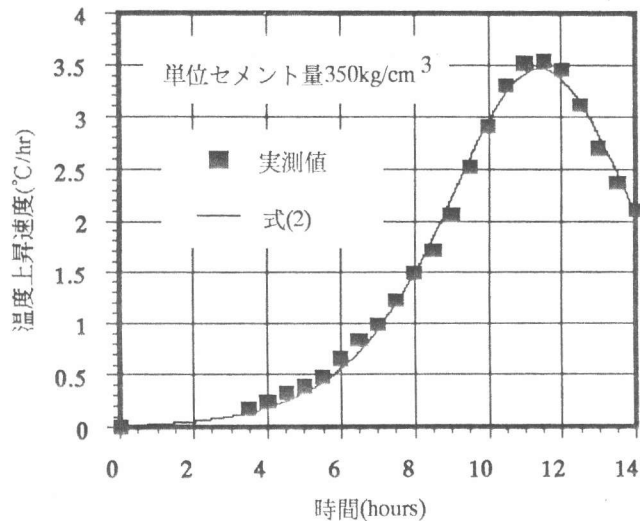


図-3 水和加速時の温度上昇速度

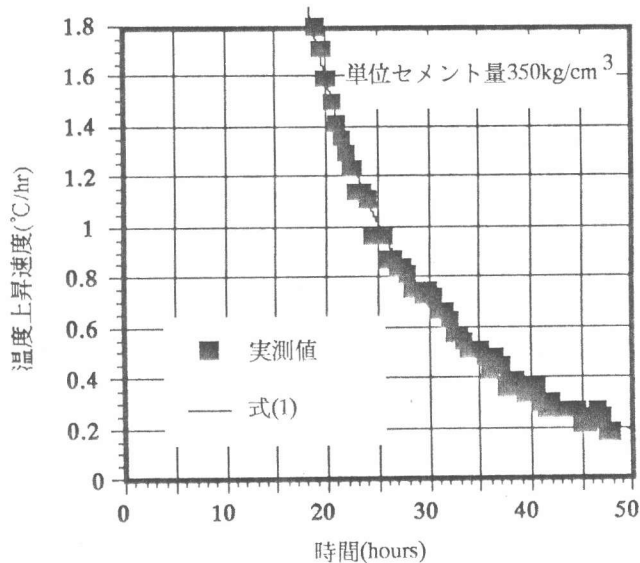


図-4 水和減速時の温度上昇速度

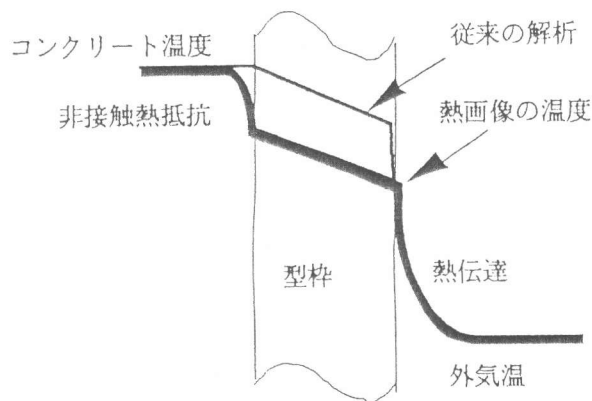


図-5 境界部の温度分布の概念図

みを考慮しており、しかもその熱伝達率も経験的なものである場合が多い²⁾。

そこで、熱赤外線画像によって計測した型枠外面の温度を利用して、これらの境界条件を正確に表現することを試みた。

(1) 型枠の熱通過率

非接触熱抵抗および型枠内の熱伝導によるコンクリートと型枠の間の熱の移動に関しては、型枠の熱通過特性として扱った³⁾。型枠の熱通過特性は下式に示す熱通過率として表した。

$$U = (T_f - T_{fi}) / (T_c - T_{fi}) \quad (3)$$

ここに、U：型枠外面までの熱通過率、T_f：熱画像による型枠外面の温度（℃）、T_{fi}：コンクリート打設前の型枠の温度（℃）、T_c：型枠内部のコンクリートの温度（℃）である。

図-6に熱電対による型枠背面のコンクリートの温度変化量と、熱画像による型枠外面の温度変化量の関係を示す。両者はほぼ比例関係にあることが分かり、このときの傾きが熱通過率となる。今回使用した鋼製型枠の熱通過率の平均は0.8であり、コンクリート温度の約80%が型枠外面に通過していることが分かる。

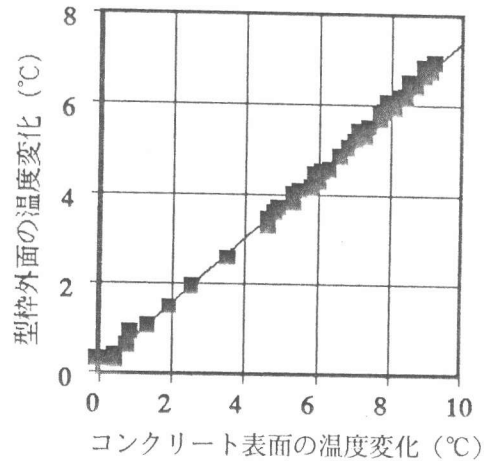


図-6 コンクリートと型枠の温度変化

熱通過率は型枠の材質、厚さ、表面の粗さ等に依存するものであり、同一の型枠を用いる場合一定値を用いてよいものと考えられる。

(2) 境界温度

熱伝達率は、気象条件や型枠の材質また養生方法によりその値が大きく異なるため、その決定が困難であるうえにコンクリートの温度変化や温度分布に及ぼす影響は大きい²⁾⁴⁾。ところが、型枠外面の熱画像の温度分布は、外気温とコンクリートの温度差、および型枠と外気の熱伝達率といった外部環境の影響が既に含まれている。そこで、コンクリート養生中の型枠外面の熱赤外線画像のデジタル値を境界温度として温度解析を行うこととした。

表-3 解析に使用した熱定数

	コンクリート	鋼製型枠
熱伝導率 (kcal/mm s °C)	6.7×10^{-7}	1.92×10^{-5}
比熱 (kcal/kg °C)	0.27	0.105
密度 (kg/mm ³)	2.3×10^{-6}	7.85×10^{-6}
熱伝達率 (kcal/mm ² s °C)	-----	1.00×10^{-9}

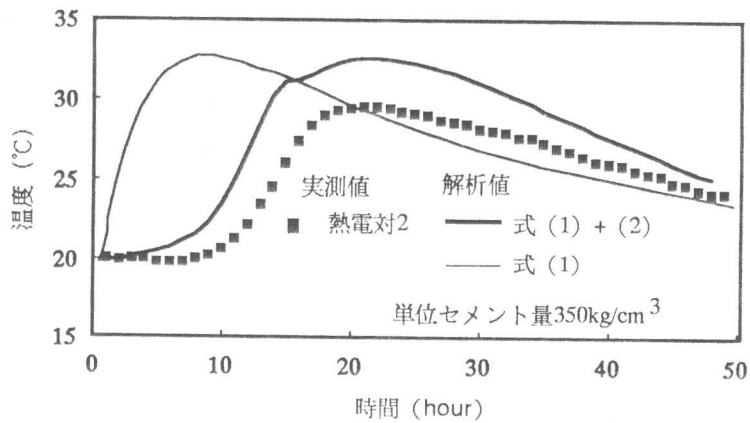


図-7 温度解析結果（従来の境界条件）

3. 3 内部温度の推定

前節までで決定した発熱式および境界条件を用いて3次元FEM温度解析を行った。解析に使用したその他の諸熱定数は、コンクリート標準示方書を参考にして表-3に示す値を用いた⁵⁾。

単位セメント量が350kg/m³の試験体について、水和発熱式と境界条件の設定を従来の方法で行った場合と本手法を用いた場合のそれぞれの温度解析結果および熱電対による実測値を図-7、図-8に示す。また、図-9、図-10に、単位セメント量が350kg/m³と400kg/m³の配合のコンクリートを2層打ちした場合の各層におけるコンクリート内部の温度解析の結果をそれぞれ示した。

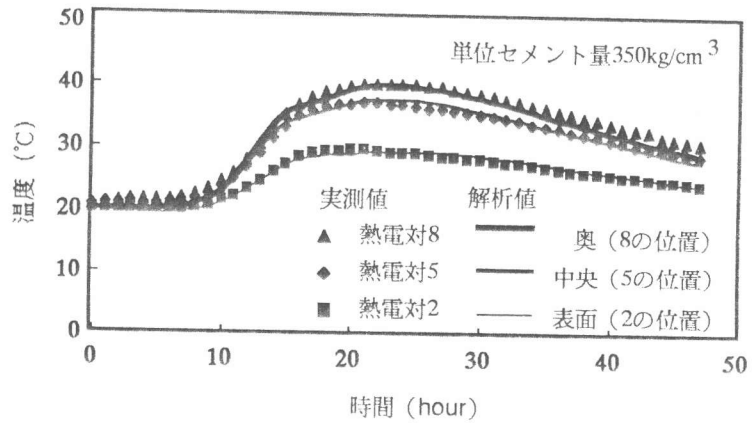


図-8 温度解析結果

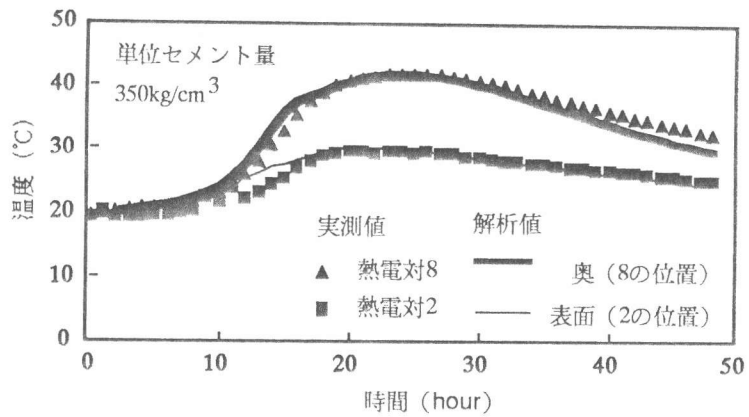


図-9 温度解析結果 (1層目)

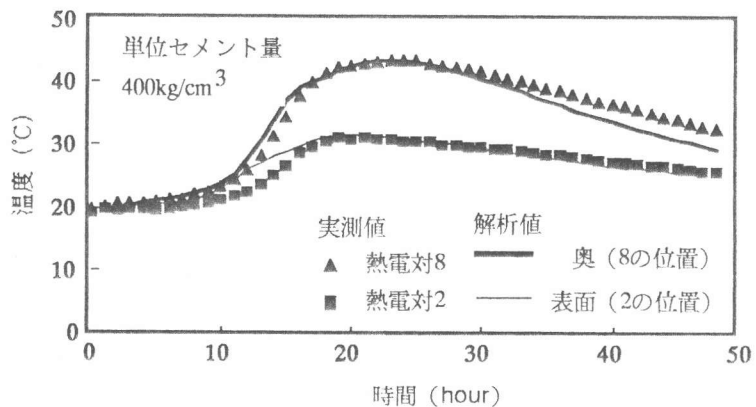


図-10 温度解析結果 (2層目)

4. 結果と考察

図-7に示すように発熱式として近似式(1)だけを用いた場合、若材令時の水和反応加速期において、解析結果と実測結果が大きく異なっている。しかし、発熱式を水和反応の加速期と減速期のそれぞれの期間で、シグモイド関数と従来の指数関数により与えた場合、

解析結果の精度がかなり改善され、実測値と傾向的に一致していることが分かる。これは、コンクリートの水和反応過程別の発熱式として解析に用いた(1)、(2)式による近似式が実際のコンクリートの発熱特性を良く表現できているためと考えられる。さらに、図-7に比べて型枠の熱画像を境界温度とした内部温度の推定結果(図-8)はコンクリートの表面、内部ともに実測値との適

合性がよく、明らかに温度解析の推定精度が向上していることがわかる。また、図-9に示した2層打ちの結果についても熱画像を境界条件とすることにより若材令時におけるコンクリート温度の実測値とほぼ一致した結果となった。

外気と型枠の熱伝達率は、コンクリート打設時、および養生時の気温、湿度、風、日照などの外的要因により影響を受け様々に変化してしまう可能性があり、またその測定が困難であるため、解析に用いるための適切な値を決定することは難しい。しかし、型枠とコンクリートの熱通過率は、充填不良による空隙がなく型枠とコンクリートが接している場合、外部の環境に関わらずほぼ一定と考えられる。したがって、あらかじめ使用する型枠の熱通過率を熱赤外線撮影装置を利用して算出し、養生中の型枠外面の熱赤外線画像のデジタル値を境界温度として直接入力することにより、養生過程におけるコンクリート内部の温度分布を推定しその養生状態を確認することができる。

5. 結論

本研究の結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 水和反応の加速時と減速時の各過程においてそれぞれシグモイド関数式と指数関数式を用いることにより、コンクリートの発熱特性を正確に表現することができ、それによって特に若材令時における温度解析を精度よく行うことができた。
- (2) 赤外線映像装置を用いて型枠外面の熱画像によって型枠の熱通過率を算出し、2次的に計測した熱画像のデジタル値を境界温度として用いることにより、養生中のコンクリート内部の3次元温度分布推定することができた。

【謝辞】

本研究を実施するにあたり、尻無浜公人君（芝浦工業大学）および松本雅夫氏（電気化学工業）の多大なる御協力を得ました。ここに深く感謝の意を記します。

〈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) 渡部 正：サーモグラフィー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
- 4) 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
- 5) 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）