

コンクリートの簡易断熱温度上昇試験の評価方法の検討

Research on the Evaluation Method of a Semi-Adiabatic Temperature Rise Test of the Concrete

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 ○学生員 沓澤 雄飛(Yuhi Kutsuzawa)
 長岡技術科学大学 建設工学課程 中市 翔也(Syoya Nakaichi)
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正員 澤村 秀治(Sawamura Syuji)

1. はじめに

コンクリートは水和反応により水和熱を生じ、その水和熱によりコンクリートは膨張・収縮し温度応力が生じる。特にマスコンクリートの様な巨大な構造物では、セメントの水和熱が蓄積され内部温度が相当に上昇し、場合によっては内部からの膨張力とコンクリート自体の拘束力により引張応力が発生し外面に温度ひび割れが生じてしまう。そのためマスコンクリートの施工にあたっては、温度応力および温度ひび割れに対する検討を十分に行う必要があり、またその制御が大きな問題となっている。

構造物の温度履歴・温度ひび割れの推定には、コンクリートの断熱温度上昇特性が解析条件として必要となる。正確な断熱温度上昇パラメータを得るためには断熱温度上昇試験を行う必要があるが、特別な試験設備が必要であり一般的ではない。一方、簡易断熱温度上昇試験は比較的容易に行うことができるが、温度計測結果に放熱の影響が含まれるため、断熱温度上昇パラメータの推定は難しい。

そこで本研究では、3次元 FEM 熱伝導解析と非線形最小二乗法を組合せ、簡易断熱温度上昇試験結果から断熱温度上昇パラメータを精度よく推定するプログラムの開発を行い、断熱温度上昇試験の結果と比較しプログラムの実用性の検討を行った。

2. プログラムの概要^{1), 2)}

このプログラムは3次元 FEM 熱伝導解析結果と簡易断熱温度上昇試験の実測データを比較しながら、非線形最小二乗法により、断熱温度上昇パラメータと供試体表面の見掛けの熱伝達率の推定を同時に行うものである。解析の流れを図-1に示す。プログラム中の FEM 熱伝導解析モデルでは、図-2に示すように供試体の 1/8 部分をアイソパラメトリック要素でモデル化し、表面部を熱伝達境界、およびその対称面を断熱境界とした。また、熱伝導解析に用いる断熱温度上昇モデルはコンクリート標準示方書(施工編)にある断熱温度上昇モデル $T(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\alpha t})$ を参考に改良された次の3種類について検討を行った。

$$\text{Type1: } T(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\alpha t^{\beta}})$$

$$\text{Type2: } T(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\alpha(t-t_0)})$$

$$\text{Type3: } T(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\alpha(t-t_0)^{\beta}})$$

簡易断熱温度上昇試験の実測温度と FEM 温度解析結果の関係を図-3に示す。まず任意の断熱温度上昇パラメータ $(Q_{\infty}, \alpha, \beta, t_0)$ および見掛けの熱伝達率 η を仮定し FEM 温度解析を行う。最小二乗法で実測値と解析値の差を計算

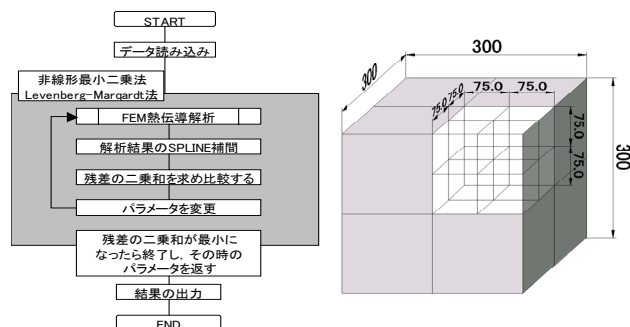


図-1 解析フロー

図-2 FEM 解析モデル

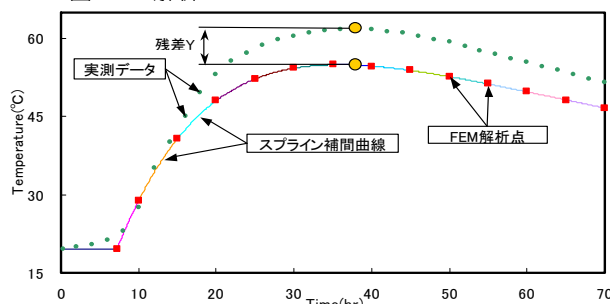


図-3 実測温度と FEM 解析値の関係

するためには、FEM 温度解析の時間ステップ数は実測値の時間ステップ数に合わせるのがよい。しかし計測データの数が多い場合 FEM 温度解析のステップ数を多くすると膨大な計算時間が必要になる。そこで本プログラムでは FEM 温度解析の時間刻みを大きくし、FEM 温度解析結果を SPLINE 曲線補間し計算時間の短縮を図ることとした。

プログラムの非線形最小二乗法のモジュールでは、実測値とこれと同じ時刻の SPLINE 曲線上の点との差を残差とみなし、全実測点の残差の二乗和が最小になるようなパラメータを Levenberg-Marquardt 法で逐次計算していく。Levenberg-Marquardt 法は非線形最小二乗法の中でも非線形性が強い問題に有効な方法であり、各パラメータの変動が計算結果に及ぼす影響を分析しながら、変動させる方向と大きさを逐次定め解を収束させてゆく方法である。

3. 解析事例と評価

3.1 収束過程と結果

ここで、ある配合に対して断熱温度上昇モデル Type2 を適用した場合の非線形最小二乗法による逐次計算によって、断熱温度上昇パラメータの値が収束していく過程を図-4に示す。断熱温度上昇モデル Type2 は S 形の温度の立ち上がりを表すパラメータ β を考慮しないもので、発熱モデルの初期発熱部をすべて発熱が開始されるまでのタイムラグ t_0 として扱うモデルである。

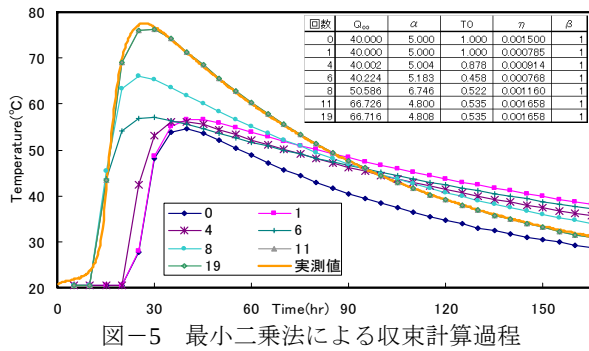


図-5 最小二乗法による収束計算過程

ここでは解析初期値として終局断熱温度上昇量 Q_{∞} を 40.0°C 、断熱温度上昇パラメータ α を 5.0、発熱開始までのタイムラグ t_0 を 1.0hr とした。このように任意に仮定した初期値を用いた FEM 温度解析結果は実測温度と大きな差を示すが、収束の過程で徐々に実測値に近づき、本例では収束計算 11 回目で実測値の曲線とほぼ一致した。このプログラムにより実測値の温度履歴をほぼ完全に表現できる断熱温度上昇パラメータと、供試体表面の見掛けの熱伝達率が同時に効率よく求められることがわかる。

3.2 断熱温度上昇モデルの適合性

この配合の実測データに対して 3 種類の断熱温度上昇モデルを適用し解析した結果を図-5 に示す。Type1 は発熱初期の S 型の立ち上がりを良く表現できるが、温度上昇の部分やピーク温度付近の適合性が良くなかった。逆に Type2 は温度上昇の部分やピーク温度付近は非常に良い適合性を示したが、発熱初期の立ち上がりの適合性が良くなかった。Type3 は Type1・Type2 の性質を合わせたもので最も適合性が良かった。しかし Type3 はパラメータの数が多いため、一般に収束計算の時間が長くなる傾向にある。そこで Type1・Type2 の結果を参考に Type3 の初期値を設定することで計算時間を短縮することができる。

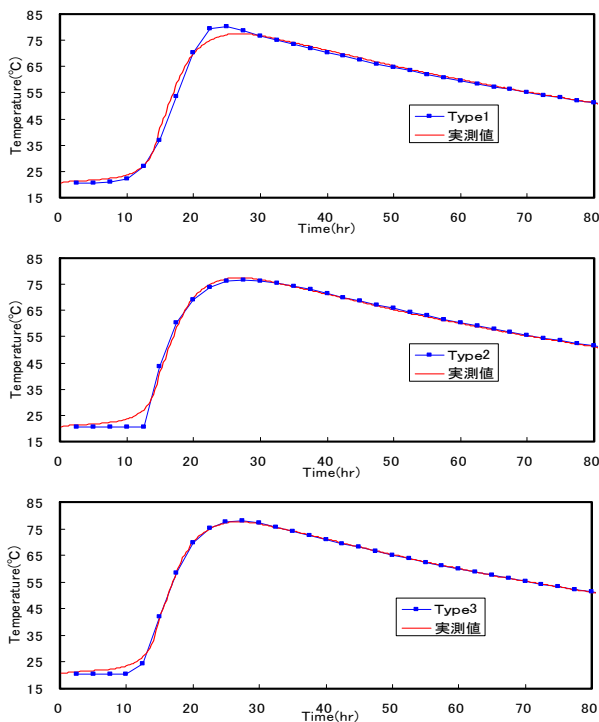


図-5 断熱温度上昇モデルの適合性

4. 実験の概要

使用材料およびコンクリートの配合を表-1 に示す。本研究では、セメントの種別を普通ポルトランドセメントとし、単位セメント量を $300\text{kg}/\text{m}^3$ に固定した。コンクリートの打込み温度は $18^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ の範囲にあった。実験の要因は、断熱材の厚さ、室内の風速、打込み温度と気温の差とし、それらの組合せにより、実験ケースを表-2 に示す 4 ケースとした。また、簡易断熱温度上昇試験と並行して断熱温度上昇試験を同時に行った。断熱材には厚さ 20mm, 50mm, 100mm の一般建築用発泡ポリスチレンパネルを用い、それぞれ一辺 300mm の立方供試体を作成した。計測は気温を $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の精度で制御できる恒温室内で行った。

表-1 使用材料およびコンクリートの配合

セメント	普通ポルトランドセメント	$\rho_c = 3.15\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	函館市豊原産天然砂	$\rho_s = 2.63\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	上磯町峯郎産砕石 2005	$\rho_g = 2.67\text{g}/\text{cm}^3$
混和剤	AE 減水剤標準形 (I 種) AE 助剤	$\rho_{ad1} = 1.08\text{g}/\text{cm}^3$ $\rho_{ad2} = 1.00\text{g}/\text{cm}^3$

配合設計条件			単位容積質量 (kg/m^3)					
W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	W	C	S	G	AE 減水剤	AE 助剤
0.533	0.45	5.0	160.0	300.0	822.3	1020.3	4.50	1.05

表-2 簡易断熱温度上昇試験の条件

データ名		養生環境	
断熱	簡易	風速	室温
ATR001	DAT901	2.0m/s	打込み温度 $\pm 0^{\circ}\text{C}$
ATR002	DAT902	0.7m/s	打込み温度 $\pm 0^{\circ}\text{C}$
ATR003	DAT903	2.0m/s	打込み温度 -10°C
ATR004	DAT904	2.0m/s	打込み温度 $+10^{\circ}\text{C}$

5. 簡易断熱温度上昇試験結果と評価

5.1 断熱材の厚さの影響

図-6 に DAT901 の計測結果を示す。これによると断熱材の厚さによって温度上昇履歴が大きく異なることがわかる。最も薄い $t=20\text{mm}$ の断熱材と最も厚い $t=100\text{mm}$ の断熱材とでは発熱初期の立ち上がりこそ概ね一致するものの、その後のピーク温度および温度低下速度が大きく異なることがわかる。これは断熱材の厚さの違いによる熱伝達率の差によるものである。

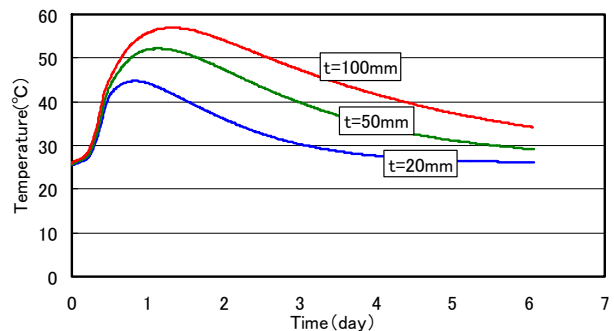


図-6 コンクリートの中心温度 (DAT901)

5.2 養生条件の影響

(1) 風速の影響

図-7 に断熱材の厚さが 100mm で風速が異なる場合の温度履歴の比較を示す。風速が大きくなると断熱材表面の熱伝達率が大きくなり、コンクリートの温度上昇は小さくなる。風速の影響は、断熱材の厚さが小さいほど顕著であるが、断熱材の厚さが 100mm のケースにおいても 1.3m/s の風速の差で、ピーク以降の温度に 2℃程度の差を生じた。

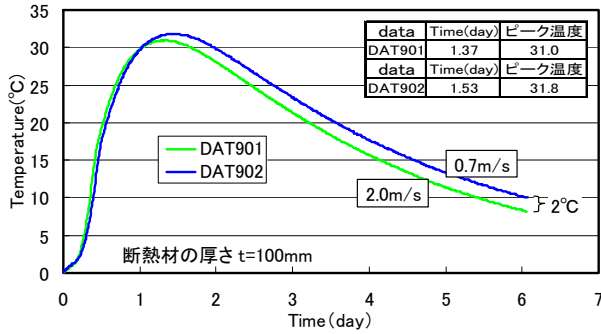


図-7 風速が異なる場合の温度履歴の比較

(2) 気温の影響

図-8 に DAT903 の計測結果を示す。このケースでは気温がコンクリートの打込み温度よりも低いため、発熱初期段階ではコンクリートの発熱量よりも放熱量が勝っている。そのため発熱初期段階では温度の立ち上がりが遅く、特に $t=20\text{mm}$ の場合では打設後のコンクリート温度がむしろ低下している。これは $t=20\text{mm}$ の場合は断熱効果が小さいため気温の影響を受け易い。

図-9 に断熱材の厚さが 100mm の場合で、気温を打込み温度 $+10^\circ\text{C}$ 、打ち込み温度 -10°C にした状態の温度履歴の比較を示す。コンクリートの打込み温度と気温が大きく異なる場合、コンクリートの温度履歴には、本来コンクリートが持つ発熱特性に気温の影響がノイズのように強く含まれるようになる。

気温を打込み温度に合わせたケースを基準にみると、ピーク温度の差は、気温が高い場合に比べ低い場合の方が大きく、ピーク温度が生じる時刻も遅くなる。これは、コンクリートが持っている発熱エネルギーが同じであっても、温度が低い場合には水和発熱速度が小さくなるためである。このことから簡易断熱温度上昇試験において、気温がコンクリートに与える影響は、打込み温度より気温が低い場合に顕著になる傾向がある。

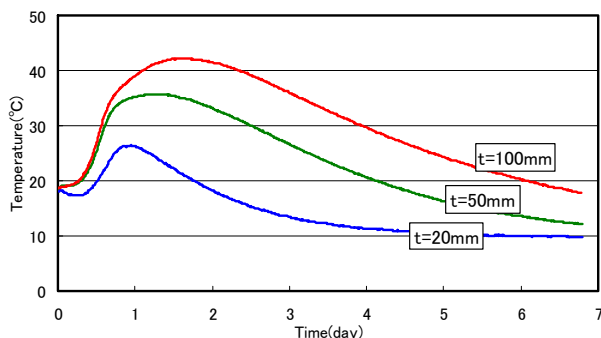


図-8 コンクリートの中心温度 (DAT903)

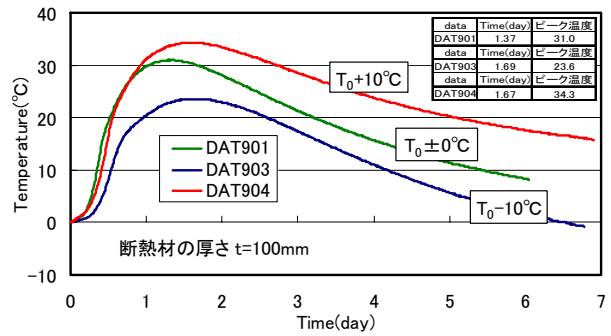


図-9 気温が異なる場合の温度履歴の比較

6. 解析による断熱温度上昇カーブの推定

6.1 断熱材の厚さの影響

解析には最も適合性が良かった Type3 の断熱温度上昇モデルを用いることとした。図-10 に DAT901 に対する解析結果を示す。断熱材の厚さ別の断熱温度上昇カーブの計算値は非線形最小二乗法によって得られた断熱温度上昇パラメータをそれぞれ Type3 の式に代入して求めたものである。図中には並行して実施した断熱温度上昇試験結果も併せて表示した。「ATR001.nls」は、断熱温度上昇試験結果を Type3 モデルで回帰したものである。

断熱材の厚さが 100mm の場合は、簡易断熱温度上昇試験結果より推定した断熱温度上昇カーブは、真の断熱温度上昇カーブに近くなったが、断熱材の厚さが薄くなるにしたがって、推定精度は悪化する。これは、温度が低いとコンクリートの水和発熱速度が小さくなるため、断熱状態との乖離が大きくなることに起因している。

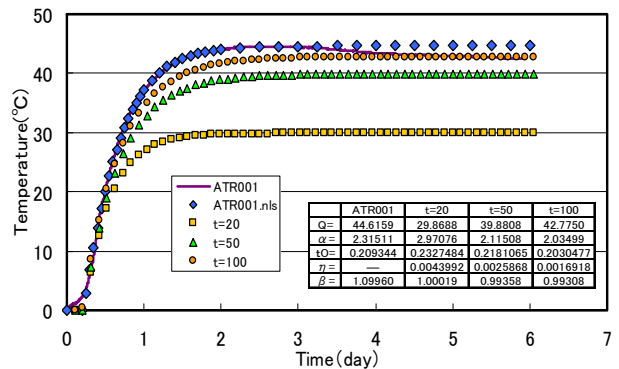


図-10 断熱温度上昇カーブの推定結果 (DAT901)

6.2 養生環境の違いによる影響

(1) 風速の違いによる影響

図-11 に風速を小さくした DAT902 に対する解析結果を示す。図-10 と比較すると $t=100\text{mm}$ と $t=50\text{mm}$ のケースでは、風速を小さくすることにより、断熱温度上昇カーブの推定精度が向上する。特に $t=100\text{mm}$ のケースでは、温度上昇の終局付近に幾分の差が認められるものの、ほぼ完全に真の断熱温度上昇カーブを推定することができた。

DAT901 と DAT902 の解析結果を比較するため図-12 に断熱温度上昇カーブの推定結果のうち、断熱材の厚さと終局断熱温度上昇量、および見掛けの熱伝達率の関係を示す。終局断熱温度上昇量は断熱材が厚くなるほど、また風速が小さいほど大きな値が得られている。

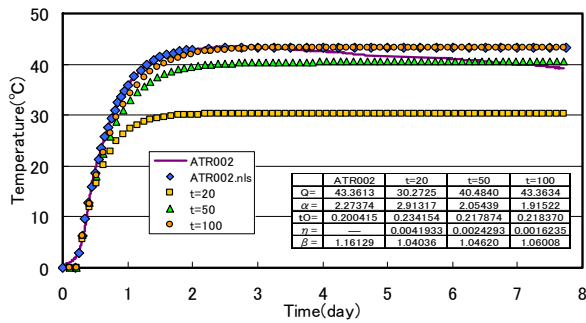


図-11 断熱温度上昇カーブの推定結果 (DAT902)

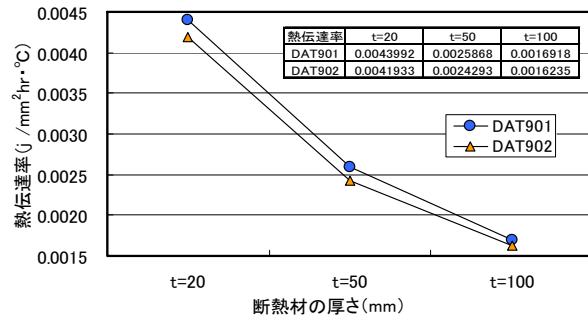
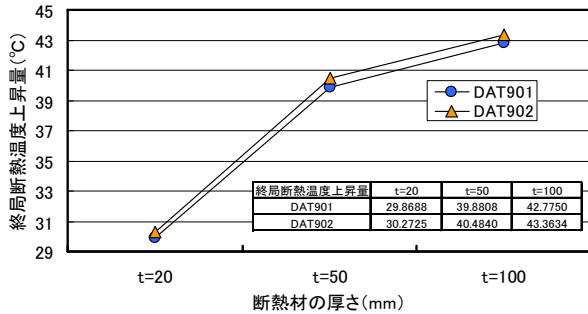


図-12 断熱材の厚さと風速による解析結果の比較

一方、見掛けの熱伝達率は断熱材が厚くなるほど小さく、また風速が小さい方が小さい値を得られており、実際との矛盾はない。風速の違いによる見掛けの熱伝達率の計算値の差は、断熱材が薄い方が大きくなっている。表面の熱伝達率と断熱材を含んだ見掛けの熱伝達率の関係は次式で表すことができる。

$$\eta = \frac{1}{1/\beta + d_F/\lambda_F}$$

η : 断熱材を含む見掛けの熱伝達率

β : 表面の熱伝達率

d_F : 断熱材の厚さ

λ_F : 断熱材の熱伝導率

これによると、断熱材の厚さが薄いほど表面の熱伝達率の変化が見掛けの熱伝達率に及ぼす影響が大きいこととなり、今回の解析結果と整合している。

(2) 気温の影響

打込み温度と気温が異なる場合の解析結果の比較を図-13に示す。終局断熱温度上昇量と見掛けの熱伝達率は、ともに断熱材の厚さが100mmのケースでは解析結果に差が生じておらず、気温の影響を受けていないことがわかる。しかし断熱材の厚さが薄くなると、解析結果は気温の影響を強く受けるようになる。特に断熱材の厚さが20mmのケースにおける見掛けの熱伝達率の計算値は、気温を低くし

た場合に大きな差が生じる。計算された断熱温度上昇パラメータや見掛けの熱伝達率は、温度の経時変化の計算値が簡易断熱温度上昇試験の実測値にフィットするように非線形最小二乗法で求めたものであるため、結果にはさまざまな要素が含まれている。断熱材の厚さが薄い場合や気温を低く設定した場合などコンクリートが受ける温度履歴が低い場合には、水和発熱速度が断熱状態と大きく異なるため、精度の良い断熱温度上昇カーブの推定は困難である。

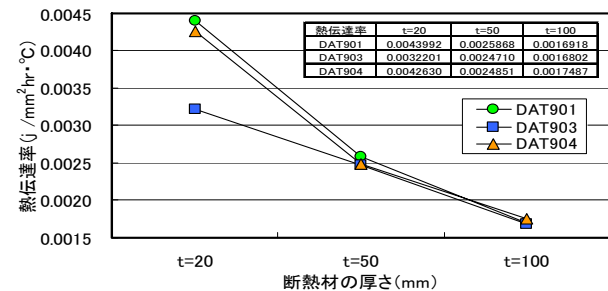
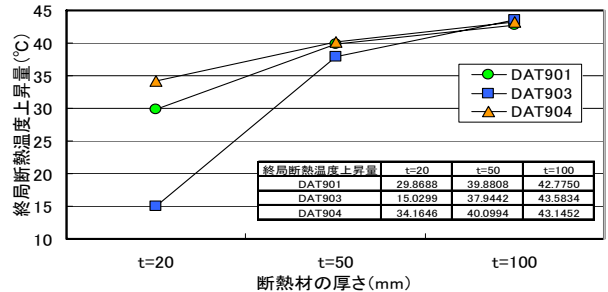


図-13 打込み温度と気温の差による解析結果の比較

7. まとめ

本プログラムによる断熱温度上昇カーブの推定結果と同時に進めた断熱温度上昇試験結果との比較により次のような知見を得た。

- ① 断熱材の厚さが厚く、風速を小さくしてコンクリート供試体表面の熱伝達率をできるだけ小さくすることにより、断熱温度上昇カーブの推定精度は向上する。
- ② 一辺が300mmの立方供試体で簡易断熱温度上昇試験を行う場合は、断熱材の厚さを100mm程度確保すれば、実用的に十分な精度を持つ断熱温度上昇カーブを推定することができる。
- ③ 打込み温度と気温との差が小さいほど、断熱温度上昇カーブの推定精度は良い。
- ④ 気温がコンクリートの打込み温度より低い場合は、推定精度が著しく低下する。

本研究では簡易断熱温度上昇試験結果から断熱温度上昇カーブを推定するプログラムの開発を行い、その実用性について検討した。その結果、開発したプログラムは断熱温度上昇パラメータと、供試体表面の見掛けの熱伝達率を同時にかつ精度よく推定することができ、簡易断熱温度上昇試験の評価方法として十分な実用性を有していることがわかった。

参考文献

- 1) 矢川元其，流れと熱伝導の有限要素方入門第6刷，培風館，1987
- 2) 大野豊・藤田和男，新版数値計測ハンドブック，オーム社，1990