

# マスコンクリートの温度解析における 断熱温度上昇近似式の適合性に関する研究

中村 秀明\*・萩野 千晶\*\*・浜田 純夫\*

## Study on the Suitability of the Approximate Equations for the Adiabatic Temperature Rise

Hideaki NAKAMURA, Chiaki HAGINO and Sumio HAMADA

### Abstract

Some approximate equations are proposed for an adiabatic temperature rise of concrete structure. However, approximate equations that represent an adiabatic temperature rise of Low-heat cement is not proposed.

In this study, suitability of these estimate equations were investigated from experimental results of adiabatic temperature rise of various kind of concrete and FEM analysis results.

### 1. はじめに

コンクリート構造物の大型化などにより、セメントの水和熱による温度ひび割れの発生が問題となっている。温度ひび割れが予想されるコンクリート構造物については、機能性および耐久性の確保から事前に温度ひび割れに対する検討が行われる。マスコンクリートの温度解析方法としては、有限要素法を用いた非定常熱伝導解析法が広く用いられている。しかし、温度解析に有限要素法などの高度な数値解析手法を用いても、これらの解析結果は入力される材料特性値によって大きく影響されるものであり、材料特性値が正確に求まっていなければ精度の高い解析結果を得ることはできない。

コンクリートの温度解析に必要な熱特性値としては、コンクリートの発熱特性、熱伝導率、熱伝達率、比熱などがある。これらの熱特性値のうち、温度解析の結果に最も重要な影響を及ぼすものは、セメントの水和

熱に起因するコンクリートの発熱特性値（発熱量とその発熱速度）であり、コンクリートの断熱温度上昇特性は打込み後のコンクリート内部の温度状態を解析するための基本的な定数である。わが国におけるコンクリートの断熱温度上昇特性に関する研究は約40年前から行われており、その後データの蓄積がなされた結果、コンクリートの断熱温度上昇は、主にセメントの種類、単位セメント量、打込み温度の3要因が支配的であるとされている。現在、土木学会のコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>等においては、コンクリートの断熱温度上昇を原則として試験により定めることとしているが、参考として、試験によらない場合の断熱温度上昇の標準値を簡便な近似式による断熱温度上昇曲線の形で与えている。その他にも多くの研究技術者によりいくつかの断熱温度上昇近似式が提案・検討され、セメントの種類、単位セメント量および打込み温度の影響を定量化した上で各種セメントについて任意のセメント量および打込み温度の断熱温度上昇が近似できる式も提案されている。また、近年マスコンクリート用に低発熱セメントが開発され使用されているが、これらの断熱温度上昇量は従来の近似式ではうまく表すことができない。そこで低発熱セメントの断熱温度上昇量を簡便に表す

\*社会建設工学科

\*\*広島大学大学院

近似式が望まれている。

一方、マスコンクリートの温度解析では、従来はコンクリートの発熱量を材令のみの関数で表し、全断面で断熱温度上昇と同じ水和反応が進行するとの仮定で行われてきた。しかし、実際にはコンクリートが受ける温度履歴は構造物の部位によって異なり、例えばコンクリート表面などの非断熱部分やパイプクーリングを行う場合には、水和発熱過程が断熱状態のそれと大きく異なる部位が存在する。このような場合には、現実より高めの温度を見積もることになる。精度の高い温度解析を行うためには、各部位ごとに異なる水和発熱過程をもとに、温度履歴に応じた発熱量を基に解析を行う必要がある。

本研究は、マスコンクリートの温度予測の精度向上を目的として、既往の研究より得られているコンクリートの断熱温度上昇試験結果をもとに、これまで提案されているいくつかの断熱温度上昇の近似式について、まず実測値との適合性について検討を行う。さらにこれらの近似式を基にした従来の時間依存型の水和発熱速度を用いた線形有限要素解析結果と、温度と時間に依存する水和発熱速度を用いた非線形有限要素解析結果との比較を行い、断熱温度上昇近似式の適合性・適合範囲等についての検討を行う。

## 2. 断熱温度上昇近似式

### 2.1 断熱温度上昇近似式

コンクリートの断熱温度上昇を、材令の関数として表す近似式には種々の提案がなされている。本研究では、次に示す7式を採り上げ検討を行う。式(1)~(3)は普通セメントの近似に用い、式(4)~(7)は低発熱セメントの近似に用いる。

$$T_{ad}(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

$$T_{ad}(t) = K(1 - e^{-\alpha t^S}) \quad (2)$$

$$T_{ad}(t) = K\{(1 - (1 + \alpha t)e^{-\alpha t})\} \quad (3)$$

$$T_{ad}(t) = K(1 - e^{-\alpha(t-t_0)^S}) \quad (4)$$

$$T_{ad}(t) = K\{(1 - (1 + \alpha t)e^{-\beta t})\} \quad (5)$$

$$T_{ad}(t) = K_1(1 - e^{-\alpha_1 t^{S_1}}) + K_2(1 - e^{-\alpha_2(t-t_0)^{S_2}}) \quad (6)$$

$$T_{ad}(t) = K_1(1 - e^{-\alpha_1 t^{S_1}}) + K_2(1 - e^{-\alpha_2 t^{S_2}}) \quad (7)$$

ここに、 $T_{ad}(t)$ : 材令  $t$  日におけるコンクリートの断熱温度上昇量 (°C)

$K, \alpha, S, K_1, \alpha_1, S_1, K_2, \alpha_2, S_2, \beta, t_0$ : 実験定数

式(1)は、土木学会のコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>などで採用されている式である。式(2)は佐藤ら<sup>2)</sup>の提案し

た実験式であり、鈴木ら<sup>3)</sup>の研究において推奨されている。式(3)は、平賀ら<sup>4)</sup>により提案されている式である。

### 2.2 拡張カルマンフィルタによる断熱温度上昇近似式の係数の推定

前節では、7つの断熱温度上昇近似式を示したが、ここでは、拡張カルマンフィルタを用いて断熱温度上昇試験結果より各式の係数を同定する方法について述べる。なお、式(6)、(7)の係数同定は拡張カルマンフィルタによらず Try&Error によった。

カルマンフィルタ<sup>5)</sup>は、次に示す観測方程式とシステム状態方程式より構成される。

$$y_t = H_t x_t + v_t \quad (8)$$

$$x_{t+1} = F_t x_t + G_t w_t \quad (9)$$

ここに、 $x_t$ : 時刻  $t$  における  $n$  次元状態ベクトル

$y_t$ : 時刻  $t$  における  $p$  次元観測ベクトル

$w_t$ :  $m$  次元システム雑音ベクトル

$v_t$ :  $p$  次元観測雑音ベクトル

$F_t$ :  $n \times n$  状態遷移マトリクス

$G_t$ :  $n \times m$  システム雑音マトリクス

$H_t$ :  $p \times n$  観測マトリクス

式(9)は状態ベクトルの時間的遷移、式(8)は状態ベクトルと観測ベクトルの関係を示している。ここで、 $F, G, H$  の要素は時間  $t$  のみの確定関数とする。また、雑音ベクトル  $w, v$  は平均値 0 のガウス白色雑音で、その共分散マトリクスを次のように仮定する。

$$E[w_t, w_s^T] = Q_t \delta_{ts} \quad (10)$$

$$E[v_t, v_s^T] = R_t \delta_{ts} \quad (11)$$

ここで、

$Q_t$ : システムノイズ共分散マトリクス

$R_t$ : 観測ノイズ共分散マトリクス

$\delta_{ts}$ : クロネッカのデルタ

カルマンフィルタは式(8)と式(9)に示した線形観測方程式と線形システム状態方程式を基本としている。これに対し拡張カルマンフィルタは次に示す非線形観測方程式と非線形システム状態方程式を基本としている。

$$y_t = h_t(x_t) + v_t \quad (12)$$

$$x_{t+1} = f_t(x_t) + G_t w_t \quad (13)$$

この基本式に対するアルゴリズムでは、式(12)と式(13)を線形化するために、 $h_t, f_t$ を状態量の推定値  $x^*_{t|t+1}$  と  $x^*_{t|t}$ のまわりにテイラー展開し、2次以降を無視すると最終的に、

$$y_t = H_t x_t + v_t + h_t(x^*_{t|t}) - H_t x^*_{t|t} \quad (14)$$

$$x_{t+1} = F_t x_t + G_t w_t + f_t(x^*_{t|t}) - F_t x^*_{t|t} \quad (15)$$

となる。式(14)、(15)を用いてシステムの最適推定値が求められる。

### 2.3 断熱温度上昇式を用いた係数推定の定式化

拡張カルマンフィルタに断熱温度上昇式を組み込み、断熱温度上昇試験結果から各係数を推定するための定式化を示す。断熱温度上昇の近似式としては、2.1に示す式(1)～(7)が提案されている。観測値  $y$  は断熱温度上昇量  $T_{ad}$  に観測雑音ベクトル  $v$  を加えたものとなるので、観測方程式は次のように定義できる。

$$y = T_{ad} + v = h(x) + v \quad (16)$$

式(16)は式(12)の観測方程式に対応している。また、式(1)～(5)を任意の係数である  $x(x=K, \alpha, S, \dots)$  で偏微分したものは、式(14)の微係数  $H_t$  に対応している。時刻ごとの観測データが読み込まれたならば、時刻ごとの係数である状態量  $x$  は変化しないので、状態遷移マトリクス  $F_t$  を単位マトリクスとして、また、このようなシステムではノイズの混入はないものと考え、式(13)あるいは式(15)によるシステム状態方程式は次のようになる。

$$x_{t+1|t} = I x_{t|t} \quad (17)$$

### 3. 断熱温度上昇近似式の適合性

鈴木ら<sup>3)</sup>の行った断熱温度上昇試験結果および宇部興産で行われた低発熱セメントの断熱温度上昇試験結果より、係数の同定を行った結果の一例を Table 1 に示す。これらの係数を各近似式に代入し、それから得られる断熱温度上昇量と実測値を比較し、近似式の実測値に対する適合性を検討した。まず、普通ポルトランドセメント(単位セメント量  $300\text{kg/m}^3$ 、打込み温度  $20^\circ\text{C}$ ) における近似式の適合性を Fig. 1 に示す。式(1)による近似は、打込み直後から材令1日までの間は実測値より大きく、それ以後4日頃まで逆に実測値より小さくなり、最後に再び実測値より大きくなる。特に、

Table 1 Coefficients of the approximate equations

Ordinary Portland Cement (C=300kg/m <sup>3</sup> , 20°C)	
(1)	K=51.01, $\alpha=1.023$
(2)	K=49.96, $\alpha=1.043, S=1.429$
(3)	K=49.99, $\alpha=2.241$
Low-heat Portland Cement (C=260 kg/m <sup>3</sup> , 20°C)	
(1)	K=22.93, $\alpha=0.291$
(2)	K=23.74, $\alpha=0.324, S=0.863$
(3)	K=21.80, $\alpha=0.719$
(4)	K=24.78, $\alpha=0.410, S=0.695, t_0=0.344$
(5)	K=22.88, $\alpha=0.386, \beta=0.467$
(6)	K <sub>1</sub> =12.6, $\alpha_1=0.5, S_1=2.5$ K <sub>2</sub> =15.5, $\alpha_2=0.15, S_2=0.8, t_0=2$
(7)	K <sub>1</sub> =9, $\alpha_1=0.776, S_1=2.98$ K <sub>2</sub> =15, $\alpha_2=0.089, S_2=1.327$

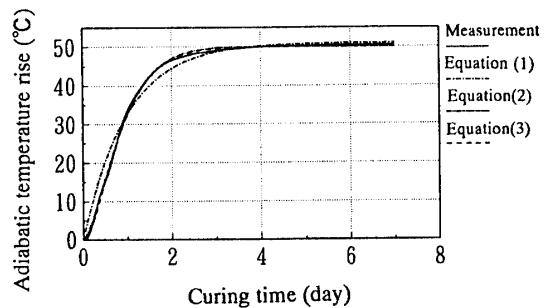


Fig. 1 Suitability of the approximate equations (Ordinary portland cement, C=300kg/m<sup>3</sup>, 20°C)

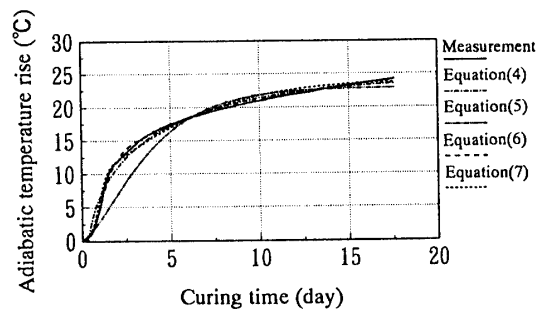


Fig. 2 Suitability of the approximate equations (Low heat cements, C=260kg/m<sup>3</sup>, 20°C)

材令1日までの初期の段階での実測値との適合性が悪く、最大で5.6°C実測値よりも大きくなる。これに対し、式(2)および式(3)による近似は最終的にわずかに実測値を下回るが、打込み直後から材令7日までの全般にわたって良く一致しており、実測値との誤差は最大1.3°C程度である。次に低発熱セメント(単位セメント量  $260\text{kg/m}^3$ 、打込み温度  $20^\circ\text{C}$ ) における近似式の適合性を

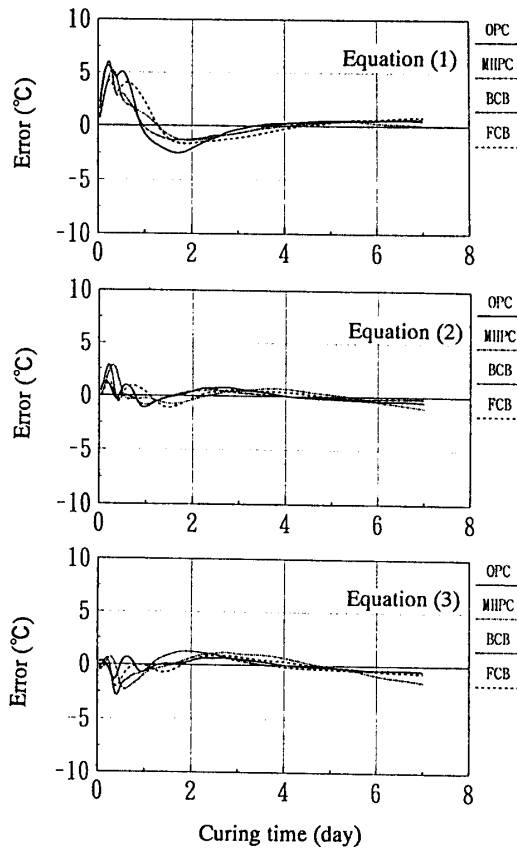


Fig.3 Error between the approximate value and measurements  
( $C=300\text{kg/m}^3$ ,  $20^\circ\text{C}$ )

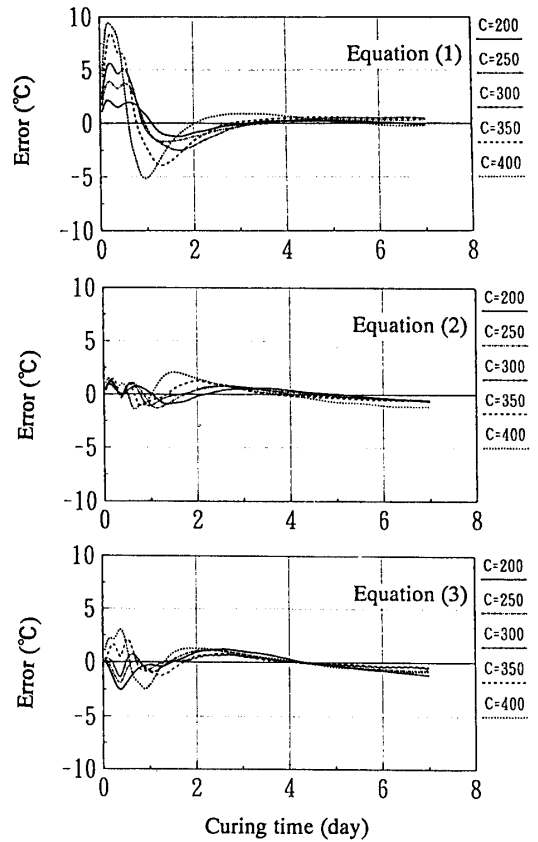


Fig.4 Error between the approximate value and measurements  
(Ordinary portland cements,  $20^\circ\text{C}$ )

Fig.2に示す、式(4)、(5)は拡張カルマンフィルタにより係数の同定を行い、式(6)、(7)はTry&Errorにより係数の同定を行った。式(5)以外は良好な近似となり、特に式(6)は実測値によく適合した。しかし式(6)、(7)の係数を同定する手法の確立には至らなかった。次にセメントの種類や単位セメント量および打込み温度を変えて同様に検討を行った。実測値と近似式との誤差を明示するために、横軸に経過時間(日)、縦軸に実測値との誤差(近似式による値から実測値を引いた値)

( $^\circ\text{C}$ )をとって表した。単位セメント量 $300\text{kg/m}^3$ 、打込み温度 $20^\circ\text{C}$ とし、セメントの種類を変化させた場合をFig.3に示す。式(1)はセメントの種類に関わらず適合性が悪い。式(2)および式(3)による近似は良好である。普通ポルトランドセメントとフライアッシュセメントB種では両者の差は顕著ではないが、中庸熱ポルトランドセメントと高炉セメントB種については式(2)で近似した方がわずかに精度が良いようである。

普通ポルトランドセメントを用い、打込み温度 $20^\circ\text{C}$ として、単位セメント量を変化させた場合の結果をFig.4に示す。式(1)による近似は式(2)および式(3)に比べ、全般的に誤差が著しく、材令1日までの初期の段階では近似式は実測値よりも高めの温度を与える。単位セメント量が大きくなるとに従い誤差が大きくなる傾向が顕著に表れ、単位セメント量 $400\text{kg/m}^3$ の場合で最大 $+9.4^\circ\text{C}$ の誤差が生じる。式(2)は、単位セメント量が大きくなると若干誤差が大きくなるが、単位セメント量 $400\text{kg/m}^3$ の場合で最大 $+2^\circ\text{C}$ 程度であり、良好な近似といえる。式(3)による近似は、打込み直後では、単位セメント量 $300\text{kg/m}^3$ を基準に、単位セメント量が大きいほど実測値より大きくなる傾向にあった。そして材令1日までの誤差が最大 $\pm 3^\circ\text{C}$ 程度みられる。また、式(3)に比べ式(2)は、特に材令1日までに於いて単位セメント量による影響が少ない。他のセメントでもほぼ同様の傾向となった。

普通ポルトランドセメントを用い、単位セメント量 300 kg/m<sup>3</sup>として、打込み温度を変化させた場合の結果を Fig.5に示す。式(1)は打込み直後では打込み温度が高いほど誤差が大きくなるが、全般的な近似の適合性は打込み温度が低いほど悪くなっている。一方、式(2)は打込み温度が高いほど誤差が大きくなるが最大で+3.3°C程度であり、式(3)は打込み温度による影響はさほど明確でなく誤差は最大±2.0°C程度である。他のセメントにおいてもほぼ同様の傾向となった。

FEMなどによりマスコンクリート構造物の温度解析を行う場合には、単位時間あたりの温度上昇量すなわち温度上昇速度も、解析結果に重要な影響を及ぼすことから、実測値と各近似式による断熱温度上昇速度を比較した。普通ポルトランドセメント（単位セメント量300kg/m<sup>3</sup>、打込み温度20°C）における温度上昇速度を Fig.6に示す。実測値の温度上昇の速度は、約7時間および約19時間後に2つのピークを示した後徐々に減少する。式(1)により断熱温度上昇量を近似し、その断熱温度上昇速度を求めると、図に示すように、打込み直後より単調に減少する曲線となるため、実測値の温度上昇速度とは大幅に異なる。したがって、実測値にピークが存在する打込み後1日までの間、式(1)による断熱温度上昇量の近似の適合性は、著しく劣っている。式(2)および式(3)による断熱温度上昇速度は、実測値の2つのピークを近似するには至っていないが、両式は式(1)に比べ実測値の温度上昇速度の経時変化の傾向を良くとらえている。このことから式(2)および式(3)は実用上十分な適合性を備えているといえる。セメントの種類や単位セメント量および打込み温度を変えると、実測値の温度上昇速度におけるピークの大きさやそれが生じる時期も異なってくるが、各近似式の適合性はいずれのケースでもほぼ同様である。

#### 4. マスコンクリートの温度解析

##### 4.1 コンクリートの熱伝導支配方程式

一般にコンクリートの非定常熱伝導問題の支配方程式は式(18)で表される<sup>9)</sup>。この方程式を空間と時間に対して解くことにより、コンクリート各部の温度が求められる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + H \quad (18)$$

ただし、 $\rho, c, k$ はそれぞれコンクリートの密度、比熱、熱伝導率である。また、 $H$ は水和発熱速度であり、コンクリートの単位時間、単位体積あたりの発熱量であ

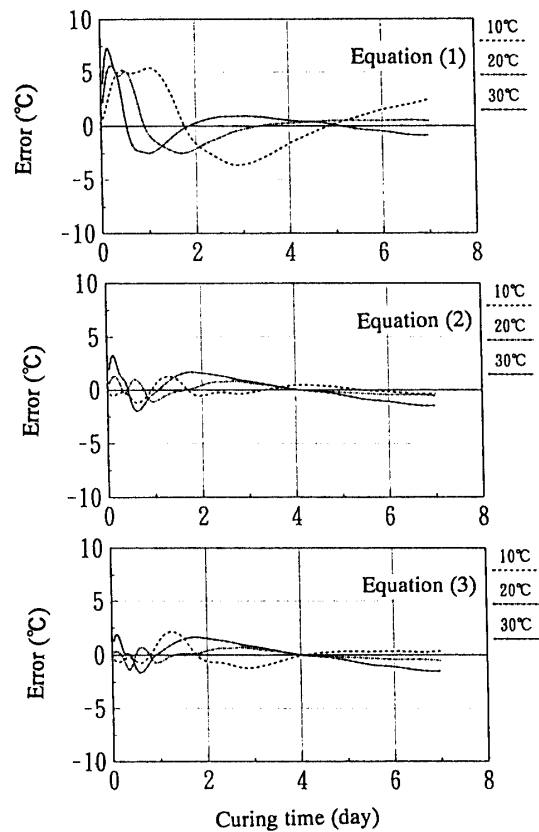


Fig.5 Error between the approximate value and measurements  
(Ordinary portland cement, C=300kg/m<sup>3</sup>)

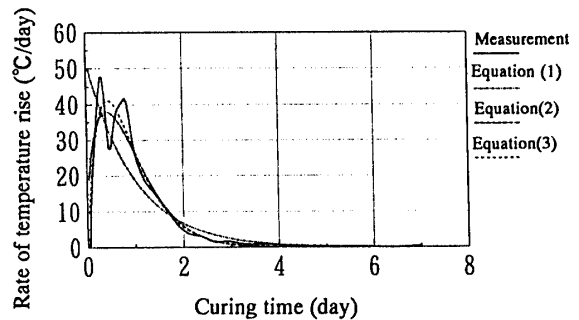


Fig.6 Suitability of the approximate equations against the rate of temperature rise

る。従来の温度解析において、水和発熱速度  $H$  は時間に依存した形で、断熱温度上昇量より次のように与えられていた。

$$H = H(t) = \frac{dQ}{dt} = \rho c \frac{dT_{ad}}{dt} \quad (19)$$

ここに、 $Q$ ：積算発熱量

$T_{ad}$ ：材令  $t$  日における断熱温度上昇量

水和発熱速度  $H$  を式(19)のように仮定した場合には、全解析領域において、断熱温度上昇量と同じ水和反応が進行していることになる。しかし、実際には、水和反応の速度は系の温度によって異なっており、単位時間あたりの水和熱である水和発熱速度も系の温度に大きく影響される。そこで水和発熱速度  $H$  を温度と積算発熱量に依存する鈴木ら<sup>7),8)</sup>の方法で表す。

$$H = H(Q, T) \times C \\ = H(Q, T_s) \exp \left[ -\frac{E(Q)}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \times C \quad (20)$$

ここに、 $H(Q, T)$ ：水和発熱速度

$H(Q, T_s)$ ：基準水和発熱速度

$C$ ：単位セメント量

$-\frac{E(Q)}{R}$ ：セメントの温度活性

$T_s$ ：任意の基準温度

式(20)で表される水和発熱速度  $H$  は温度  $T$  と積算発熱量  $Q$  の関数となる。また、温度  $T$  は時間と空間の関数であるため、水和発熱速度  $H$  および積算発熱量  $Q$  も時間と空間の関数となる。

水和発熱過程にあるコンクリートの熱伝導問題は、式(18)と式(20)を空間と時間で連成させて解くことにより求められる。

#### 4. 2 有限要素法による非線形非定常熱伝導解析

式(18)を *Galerkin* 法を用いて空間的に離散化すると次式を得る。

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} + \{H\} = 0 \quad (21)$$

ここに、 $[K]$ 、 $\{T\}$ 、 $[C]$  は、それぞれコンクリートの節点に関する熱伝導マトリクス、温度ベクトルおよび熱容量マトリクスである。添字( $\cdot$ )は時間に関する微分を示している。また、 $\{H\}$  は式(19)または(20)で表される水和発熱速度ベクトルである。

式(21)は空間的には離散化されているものの時間に関しては未処理のままである。そこで *Crank-Nicolson* の差分式を使って時間的な離散化を行う。

*Crank-Nicolson* の差分においては、時刻  $t + \Delta t/2$  における温度ベクトルを

$$\left\{ T \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} = \frac{1}{2} (\{T(t + \Delta t)\} + \{T(t)\}) \quad (22)$$

と表し、また、時刻  $t + \Delta t/2$  における温度ベクトルの時間微分を、

$$\left\{ \dot{T} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} = \frac{\{T(t + \Delta t)\} - \{T(t)\}}{\Delta t} \quad (23)$$

と表す。式(22)、(23)を式(21)に代入し整理すると

$$\left( \frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{T(t + \Delta t)\} \\ = \left( -\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{T(t)\} + \{H\} \quad (24)$$

となる。ここで、 $\{H\}$  は温度依存性があり、未知量である温度 $\{T\}$ の非線形関数であるため、各時間ステップにおいて $\{H\}$ を修正して節点温度 $\{T(t + \Delta t)\}$ が収束するまで繰り返し計算を行う必要がある。本研究では、非線形方程式の解法に *Newton-Raphson* 法を用いた。

#### 4. 3 水和発熱過程の定量化

鈴木らは文献7)で同一配合で打込み温度の異なるコンクリートの断熱温度上昇試験の結果から、コンクリート中のセメントが有する活性化エネルギーと限界水和発熱速度を定量化し、任意の温度履歴を受けるコンクリートに適用できる水和発熱速度モデルを提案している。本研究においても鈴木らの方法で水和発熱過程の定量化を行う。なお、水和発熱過程を定量化するために本研究で用いた断熱温度上昇試験結果は鈴木らの行った普通コンクリートの実験結果3)を用いた。Fig.7に定量化された活性化エネルギーを示し、Fig.8に基準水和発熱速度(20°C基準)を単位セメント量ごとに示す。

#### 5. 数値解析例および解析結果

##### 5. 1 解析モデルおよび解析条件

解析例として、コンクリート基礎上に打設された壁状構造物の温度解析を行った。解析は時間依存型の水和発熱速度(式(19)参照)を用いて線形非定常熱伝導有限要素解析と、温度と積算発熱量に依存する水和発熱速度(式(20))を用いた非線形非定常熱伝導解析法の両者により行った。解析に用いた有限要素モデルをFig.9に示す。また解析条件をTable 2に示す。

##### 5. 2 数値解析結果

壁状構造物の温度解析の一例として、普通ポルトランドセメント(単位セメント量300kg/m<sup>3</sup>、打込み温度

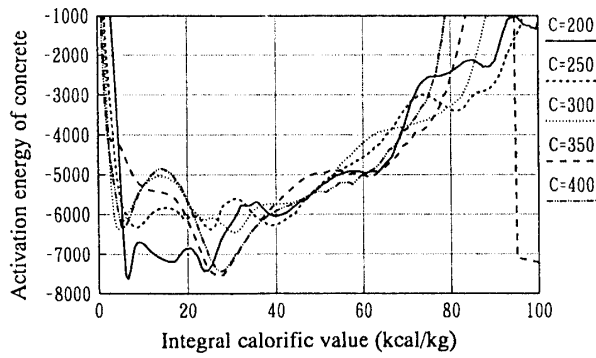


Fig. 7 Activation energy of concrete

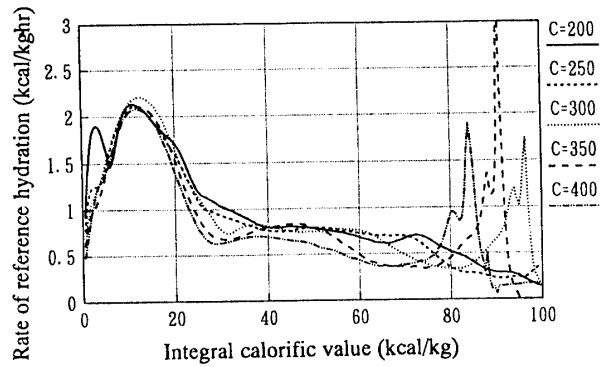


Fig. 8 Rate of reference hydration

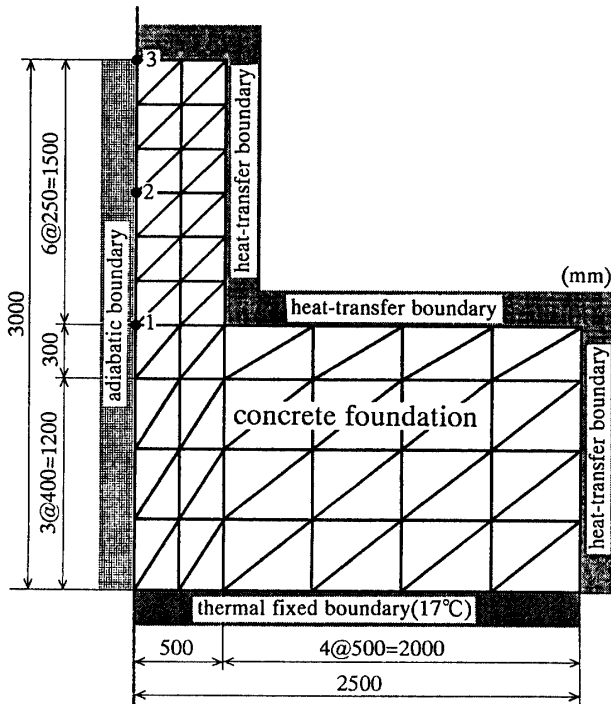


Fig. 9 Analytical Model

Table 2 Analytical condition

specific heat (kcal/kg°C)	0.2632
thermal conductivity (kcal/mh°C)	1.8
density (kg/m <sup>3</sup> )	2312
heat-transfer coefficient(kcal/m <sup>2</sup> h°C)	5.0
heat-transfer coefficient (foundation)	10.0
ambient temperature (°C)	18.0

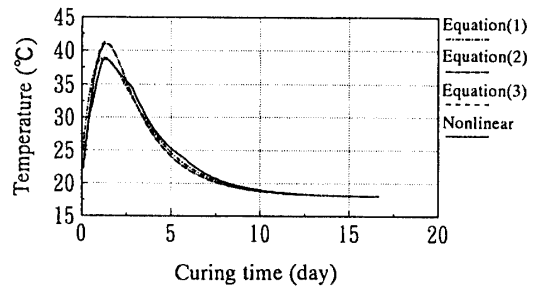


Fig. 10 Analytical results  
(Ordinary portland cement, C=300kg/m<sup>3</sup>, 20°C)

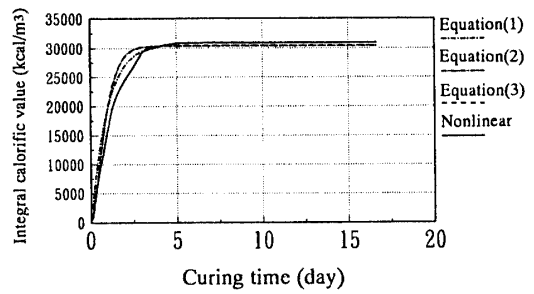


Fig. 11 Integral calorific value  
(Ordinary portland cement, C=300kg/m<sup>3</sup>, 20°C)

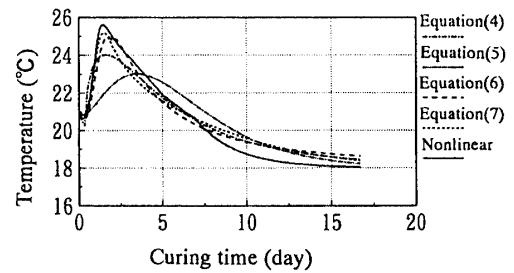


Fig. 12 Analytical results  
(Low heat cements, C=260kg/m<sup>3</sup>, 20°C)

20°C)の節点3についての解析結果をFig.10に示す。まず、ピーク時の温度に限ると、非線形解析の結果が最も低くなった。線形解析の結果は式(1)が非線形解析の結果に最も近く、式(2)、(3)は非線形解析値と+2.2~+2.5°Cの差が生じ、ピーク時の温度はかなり高く見積もられている。式(1)は打込み直後の温度を高く見積もるが、全般的にみれば非線形解析値との適合性は3式の内では比較的良い。発生した全熱量である積算発熱量をFig.に示す。積算発熱量を比較すると、温度ピークに達する時間においては、非線形解析値が最も低く、次いで式(1)、(2)、(3)となっている。このことが温度解析の結果に影響していると思われる。低発熱セメント(単位セメント量260kg/m<sup>3</sup>,打込み温度20°C)の温度解析結果をFig.12に示す。低発熱セメントでは、ピーク時の温度は非線形解析の結果が最も高い。線形解析の結果は式(6)および(7)が非線形解析の結果に近く、式(4)および(5)では低く見積もられている。材令7日以降は非線形解析の結果が最も低くなった。以上のことから、ここで採り上げた近似式のうちでは、特に式(6)および(7)が低発熱セメントの断熱温度上昇を近似する式として優れていると考えられる。しかし、式(6)および(7)の係数はTry&Errorによって同定されたものであり、これらの近似式を実際に適用するためには、係数を同定する手法の確立が不可欠である。

## 5. 結 論

本研究は、これまでに提案されているコンクリートの断熱温度上昇近似式について、実測値との適合性および解析における適合性について検討したものである。以下に本研究で得られた結論を要約する。

①ポルトランドセメントや混合セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇を近似する式としては、式(2)が適当である。

②低発熱セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇を近似する式としては、式(6)、(7)が適当である。  
③線形温度解析におけるピーク時の非線形温度解析値との差は、式(1)が最も小さく、式(2)および式(3)はピーク時の温度を高く評価する。

## 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書・施工編, 1994年
- 2) 佐藤純夫, 川田忠芳: ポルトランドセメントの水和熱およびモルタル強度などを計算する新しい公式の提案, セメント・コンクリート, No.166, pp.42-46, 1960.12.
- 3) 鈴木康範: コンクリート中のセメントの水和発熱過程と定量化に関する研究, 東京大学学位論文, pp.57-92, pp.118-170.
- 4) 平賀友晃, 倉林 清: コンクリートの断熱温度上昇に関する既往の研究成果について, 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.1-6, 1982.8.
- 5) 片山 徹: 応用カルマンフィルター, 朝倉書店, 1983.
- 6) 矢川元基: 流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館, 1983.
- 7) 鈴木康範, 辻 幸和, 前川宏一, 岡村 甫: コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化, 土木学会論文集, No.414/V-12, pp.155-164, 1990.2.
- 8) 原田修輔, 前川宏一, 辻 幸和, 岡村 甫: 温度依存性を有するセメントの水和発熱過程と熱伝導との連成を考慮した非線形温度解析, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.167-176, 1991.2.

(平成7年4月14日受理)