

# 水和発熱過程および強度発現の温度依存性を考慮したマスコンクリートの温度応力解析

中村秀明<sup>1</sup>・浅上 修<sup>2</sup>・谷本俊夫<sup>3</sup>・浜田純夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

<sup>2</sup>正会員 工修 宇部興産(株)建設資材事業本部 (〒755 山口県宇部市大字小串字沖の山1-6)

<sup>3</sup>正会員 (株)エイトコンサルタント 技術本部 (〒700 岡山県津島京町3丁目1-21)

<sup>4</sup>正会員 Ph. D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

セメントの水和反応やコンクリートの強度発現は材齢とその系の温度に強く依存しており、構造物内部では温度履歴に応じて時間的、部位的に異なっている。本研究は、温度ひび割れ予測の精度向上を目的に水和発熱過程および強度発現の温度依存性を考慮した温度応力解析を行ったものである。解析例として壁状構造物、パイプクーリングが実施されているスラブ状構造物を取り上げ、従来の解析法との比較を行った。

**Key Words :** mass concrete, thermal stress, heat of hydration, maturity, adiabatic temperature rise, FEM., compensation plane method

## 1. まえがき

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。温度応力を求める際の解析方法としては、温度についてはFEMを用いた非定常熱伝導解析法が多く用いられ、また、応力解析についてはFEM, CP法(CL法)などの数値解析法が広く用いられている。しかしながらコンクリートの温度および温度応力の予測にFEMなどの高度な数値解析手法を用いても、これらの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正確な解析結果は得られない。

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。これらの熱特性値は使用するコンクリートの材齢や配合、コンクリートの湿潤状態、温度などによってばらつく不確定量である。著者らは文献<sup>1)</sup>で温度解析に及ぼすこれらの影響度合いを求め、その結果、発熱特性が温度解析に大きく影響を及ぼしていることを定量的に示した。従来から

行われてきたコンクリート構造物の温度解析では、断熱温度上昇試験の結果を基に全解析領域において、断熱状態と同一の水和反応が進行するとの仮定で行われてきた。しかしながら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や強度発現も系の温度に大きく影響される。すなわち、系の温度が高い程、水和は促進され、水和発熱速度は大きくなり、強度発現も早くなる。したがって、型枠をはずした時に外気からの冷却を受けるコンクリートの表面部分やパイプクーリング等を行う場合の温度や応力の推定などでは、従来の断熱温度上昇結果だけでは不十分であり、水和反応からその発熱過程や強度発現を明らかにし、温度履歴に応じた発熱量や強度を基に解析を行う必要がある。

水和反応による発熱過程を予測する研究として、内田ら<sup>2)</sup>は、化学反応速度論を用いて、一定温度下におけるセメントペーストの水和発熱速度から、各種セメントの温度履歴を考慮した水和発熱モデルを微分方程式で示した。また、鈴木ら<sup>3)</sup>は、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を用い、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構造

物に適用できる水和発熱モデルを提案した。さらに、原田ら<sup>4)</sup>は、鈴木らの研究結果を基に、熱伝導方程式と温度履歴に依存するセメントの水和発熱過程との連成を考慮した非線形温度解析手法を示した。これらの一連の研究で、水和発熱過程の温度依存性を考慮した温度解析が可能になったものと思われる。一方、応力解析においては、従来コンクリートの強度や変形能力を断面内で便宜上一定とみなし、解析されることが多かった。例えば土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>に示されている強度算定式は材齢のみの関数となっており、同一材齢であればコンクリート断面内の強度はどこでも同じとなる。しかしながら、コンクリート強度の発現過程は、温度と材齢に影響されることがよく知られており、構造物内部では温度履歴に応じて、時間的、部位的に異なることが予想される。コンクリートの圧縮強度、弾性係数などの力学特性を積算温度あるいは有効材齢などの関数として表そうとする試みは古くから行われており、数多くの実験式が提案されている。特にマスコンクリートを対象としたものとして、岡田ら<sup>6)</sup>は、マスコンクリート内部で予想される種々の温度履歴下での強度と弾性係数の発現状況を積算温度との関係で示している。また、森本ら<sup>7)</sup>は有効材齢を用いて温度応力解析を行っている。

本研究は、温度ひび割れ予測の精度向上を目的に、水和発熱過程および強度発現の温度依存性を考慮した解析を行い、温度解析のみならず、従来行われていなかった温度応力解析を本研究で提案したブロックCP法と有限要素法を用いて行った。解析例として、水和発熱過程と強度発現に温度履歴の影響を受けると考えられる壁状構造物、パイプケーシングが実施されているスラブ状構造物および地盤上の矩形状スラブを取り上げ、従来の解析結果との比較を行い、温度応力およびひび割れ指数等について検討を行った。

## 2. 解析理論

### (1) 温度解析

#### a) コンクリートの熱伝導の支配方程式

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(1)で表される。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。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + H \quad (1)$$

ただし、 $\rho, c, \kappa$ 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る。従来の温度解析において、 $H$ 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。

$$H = H(t) = \frac{dQ}{dt} = \rho c \frac{dT_{ad}}{dt} \quad (2)$$

ここに、 $Q$ ：積算発熱量

$T_{ad}$ ：材齢 $t$ 日における断熱温度上昇量

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

$K$ ：最終断熱温度上昇量（実験定数）

$\alpha$ ：発熱速度に関する係数（実験定数）

水和発熱速度 $H$ を式(2)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と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>3)</sup>の方法で表す。

$$\begin{aligned} H &= H(Q, T) \times C \\ &= H(Q, T_s) \exp \left[ -\frac{E(Q)}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \times C \quad (3) \end{aligned}$$

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(3)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(1)と式(3)を空間と時間で連成させて解くことにより求められる。

#### b) 有限要素法による非線形非定常熱伝導解析

式(1)をGalerkin法を用いて空間的に離散化すると次式を得る。

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} + \{H\} = 0 \quad (4)$$

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(3)で表される水和発熱速度ベクトルである。

式(4)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 $t + \frac{\Delta t}{2}$ における温度ベクトルを

$$\left\{ T \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} = \frac{1}{2} (\{ T(t + \Delta t) \} + \{ T(t) \}) \quad (5)$$

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

$$\left\{ \dot{T} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} = \frac{\{ T(t + \Delta t) \} - \{ T(t) \}}{\Delta t} \quad (6)$$

と表す。式(5)、(6)を式(4)に代入し整理すると

$$\left( \frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{ T(t + \Delta t) \} = \left( -\frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{ T(t) \} + \{ H \} \quad (7)$$

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。

### c) 水和発熱過程の定量化

鈴木らは文献3)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ポルトランドセメントの実験結果<sup>8)</sup>を用いた。図-1に定量化された活

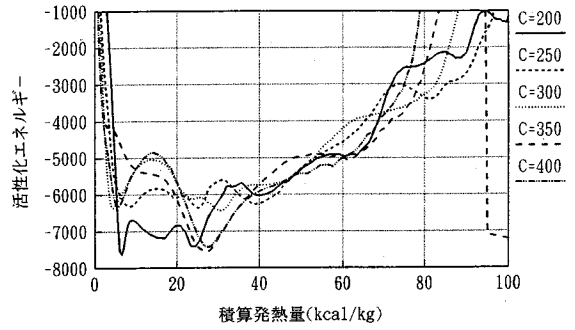


図-1 活性化エネルギー

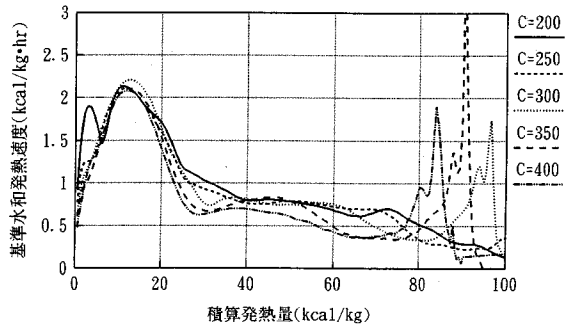


図-2 基準水和発熱速度

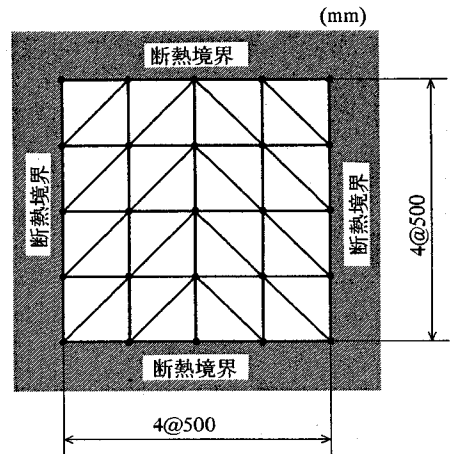


図-3 検証用有限要素モデル

表-1 解析条件

単位セメント量 $\text{kg/m}^3$	250 or 300
比熱 $\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ( $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ )	0.2632 (1102)
熱伝導率 $\text{kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ ( $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ )	1.8 (2.09)
密度 $\text{kg/m}^3$	2312
初期温度 $^\circ\text{C}$	10, 20, 30

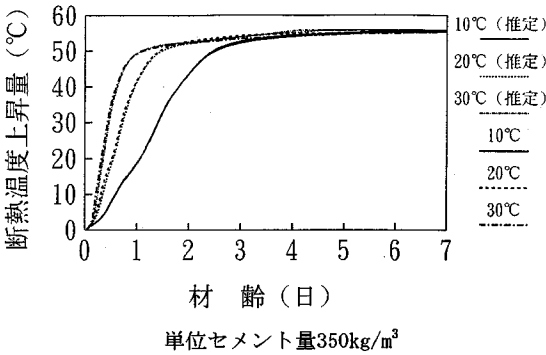
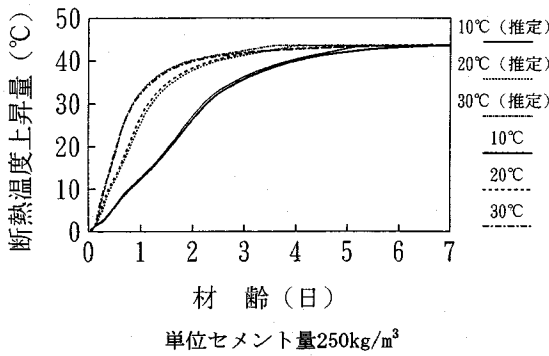


図-4 断熱温度上昇量推定結果

性化エネルギーを示し、図-2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。

#### d) 水和発熱モデルの検証

前節で定量化された活性化エネルギーと基準水和発熱速度を用いて水和発熱モデルの検証を行った。検証を行った有限要素モデルを図-3に、解析条件を表-1に示す。このモデルの境界は断熱状態となっており、すなわち、活性化エネルギーと基準水和発熱速度から計算される温度履歴は断熱温度上昇試験結果と一致するはずである。図-4に打込み温度10°C、20°C、30°Cの場合の断熱温度上昇試験結果と式(3)を用いて予測された温度履歴を単位セメント量250kg/m<sup>3</sup>、350kg/m<sup>3</sup>のものについて示す。図-4によると打込み温度、単位セメント量が変わっても断熱温度上昇試験結果と計算値は良く一致しており、水和発熱過程の定量化が十分な精度で行われていると判断できる。

#### (2) 応力解析

マスコンクリートの応力解析では一般にCP法(CL法)およびFEMが多く用いられている。従来から行われている応力解析では、コンクリートの強度や変形能力は材齢のみの関数として表され、断

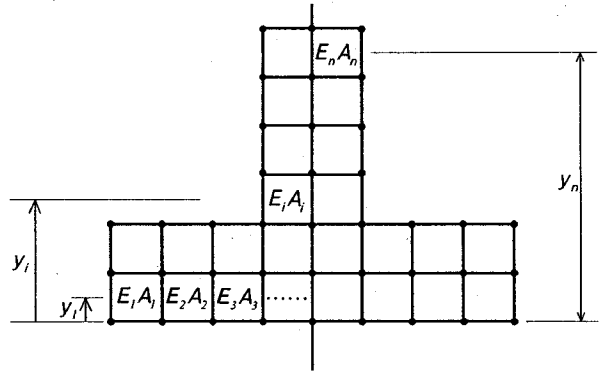


図-5 ブロックCP法説明図

面内で便宜上一定とみなし解析されることが多かった。しかしながら、コンクリート強度の発現過程は温度と材齢に影響されることがよく知られており、構造物内部では時間的、部位的に異なることが予想される。FEMでは時間的、部位的に材料定数を設定することは比較的簡単である。CP法<sup>9)</sup>はJCIマスコンクリート温度応力委員会により開発されたもので、温度応力を簡便に計算することができる。本研究では、場所(Block)ごとに異なるヤング係数を考慮できるCP法(以下ブロックCP法と呼ぶ)を用いた。

#### a) ブロックCP法(BCP法)

断面がy軸に対して対称な場合全体の重心の位置Y<sub>G</sub>は図-5を参考にして、

$$Y_G = \frac{\sum_{i=1}^n E_i A_i y_{G_i}}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} \quad (8)$$

である。ここで、E<sub>i</sub>はiブロックのコンクリートの材齢t<sub>1</sub>とt<sub>2</sub>間のヤング係数であり、A<sub>i</sub>はiブロックのコンクリートの断面積、y<sub>G<sub>i</sub></sub>はiブロックのコンクリート重心の基礎底面からの高さ、nはブロック数である。

自由な軸変形増分Δε̄、曲げ変形増分Δφはそれぞれ、

$$\Delta \bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} \alpha \Delta T(x, y) dA}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} \quad (9)$$

$$\Delta\phi = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} (\alpha\Delta T(x,y) - \Delta\bar{\epsilon})(y - Y_G) dA}{\sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} (y - Y_G)^2 dA} \quad (10)$$

となる。ここに、 $\alpha$ はコンクリートの熱膨張係数である。 $\Delta\bar{\epsilon}$ 、 $\Delta\phi$ が求まると、内部拘束ひずみ増分 $\Delta\epsilon(x,y)$ は、

$$\Delta\epsilon(x,y) = \alpha\Delta T(x,y) - \Delta\bar{\epsilon} - \Delta\phi(y - Y_G) \quad (11)$$

として求められる。したがって、 $i$ ブロックの内部拘束応力増分は、

$$\Delta\sigma_{i_i}(x,y) = E_i \{ \alpha\Delta T(x,y) - \Delta\bar{\epsilon} - \Delta\phi(y - Y_G) \} \quad (12)$$

となる。一方 $i$ ブロックの外部拘束応力増分は、

$$\Delta\sigma_{R_i}(x,y) = R_N \Delta\bar{\epsilon} E_i + R_M \Delta\phi E_i (y - Y_G) \quad (13)$$

となるので、 $i$ ブロックのコンクリートの温度応力増分 $\Delta\sigma_i(x,y)$ は、

$$\Delta\sigma_i(x,y) = \Delta\sigma_{i_i}(x,y) + \Delta\sigma_{R_i}(x,y) \quad (14)$$

となり、材齢 $t_2$ における温度応力 $\sigma_{2i}(x,y)$ は、

$$\sigma_{2i}(x,y) = \sigma_{i_i}(x,y) + \Delta\sigma_i(x,y) \quad (15)$$

となる。ここで、 $\sigma_{i_i}(x,y)$ は材齢 $t_1$ における $i$ ブロックのコンクリート内での温度応力である。

### (3)異なる温度履歴を受けるコンクリートの力学的特性

コンクリートの強度や弾性係数などの力学特性を積算温度あるいは有効材齢の関数として表そうとする試みは古くから行われている。例えば、マスコンクリートを対象としたものとして、岡田ら<sup>6)</sup>は、マスコンクリート内部で予想される種々の温度履歴下での強度と弾性係数の発現状況を積算温度との関係で示し、これらの関係は温度履歴に関係なく直線で近似できるとしている。

現在、土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>では、マスコンクリートの力学特性の推定に以下の式を提案している。これらの式は実際の設計に際して安全

側となるよう設定されている。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} f'_c(91) \quad (16)$$

$$f_t(t) = c\sqrt{f'_c(t)} \quad (17)$$

$$E_c(t) = \psi(t) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)} \quad (18)$$

ここに、

$f'_c(t)$  : 材齢 $t$ 日のコンクリートの圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$f_t(t)$  : 材齢 $t$ 日のコンクリートの引張強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$f'_c(91)$  : 材齢91日のコンクリートの圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$E_c(t)$  : 材齢 $t$ 日のコンクリートの有効ヤング係数(kgf/cm<sup>2</sup>)

$\psi(t)$  : ヤング係数の補正係数

$a, b, c$  : 定数

式(16)は標準養生下での強度発現を推定する式と考えられ、同一材齢であれば同じ強度となり、コンクリートの温度履歴の影響を考慮できない。そこで、式(16)、(17)、(18)の材齢 $t$ の代わりに有効材齢 $t_{eff}$ を用いる。有効材齢 $t_{eff}$ は積算温度 $M$ より次式で表される。

$$t_{eff} = \frac{M}{30} = \frac{\sum(T+10)a_i}{30} \quad (19)$$

ただし、 $t_{eff}$  : 有効材齢(日)

$M$  : 積算温度(°C・日)

$T$  : コンクリートの温度(°C)

$a_i$  : 温度 $T$ の下での日数

なお、積算温度、有効材齢の算出は-10°Cを温度の基準点とした。各部位ごとの温度履歴から有効材齢を求めることにより、温度履歴に応じた力学特性を推定できるものと思われる。

## 3. 数値解析例

### (1)コンクリート基礎上の壁状構造物

#### a)解析モデル・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厚の異なる2種類の壁状構造物の解析を行った。温度解析は、従来から行われている時間依存型の水和発熱速度(式(2)参照)を用いた線形非定常熱伝導有限要素解析(以下断熱発熱モデルと呼ぶ)と鈴木ら<sup>3)</sup>による温度と積算発熱量に依存する水和発熱速度(式(3)参照)を用いた非線形非定常熱伝導有限要素解析(以下水和発熱モデルと呼ぶ)の両者で行った。解析に用いた有限要素モデルをそれぞれ図-6, 7に示す。応力解析は断熱発熱モデルについては

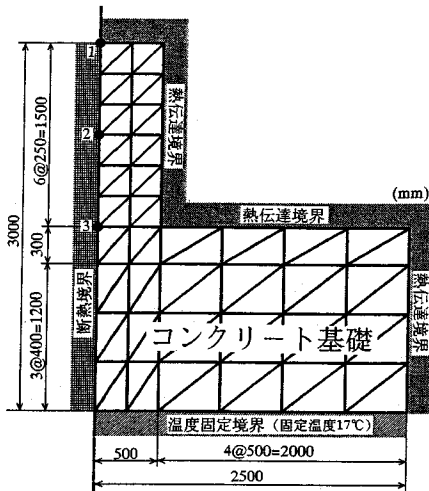


図-6 有限要素メッシュ (壁厚1.0m)

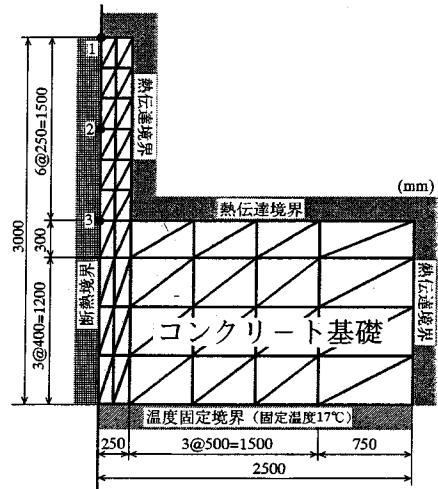


図-7 有限要素メッシュ (壁厚0.5m)

表-2 壁状構造物解析条件

単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	300	
比熱 kcal/kg°C (J/kg°C)	0.2632 (1102)	
熱伝導率 kcal/mh°C (W/m°C)	1.80 (2.10)	
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2312	
打込み温度(°C)	20	
新コンクリート熱伝導率 kcal/m <sup>2</sup> h°C (W/m <sup>2</sup> °C)	5.0 (5.8) t < 2日	10.0 (11.6) t ≥ 2日
基礎コンクリート熱伝導率 kcal/m <sup>2</sup> h°C (W/m <sup>2</sup> °C)	10.0 (11.6)	
断熱温度上昇式	$T_{ad} = K(1 - e^{-at})$	$K = 49.9$ $a = 1.023$
外気温(°C)	18.0	
熱膨張係数(1/°C)	$10 \times 10^{-6}$	
圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	$f'_c(t_{eff}) = \frac{t_{eff}}{4.5 + 0.95 t_{eff}} f'_c(91)$ ( $f'_c(91) = 322 \text{ kgf/cm}^2$ )	
引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	$f_t(t_{eff}) = 1.4 \sqrt{f'_c(t_{eff})}$	
有効ヤング係数 kgf/cm <sup>2</sup>	$E_c(t_{eff}) = \psi(t_{eff}) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t_{eff})}$ $t_{eff} < 3日: \psi(t_{eff}) = 0.73$ $3 < t_{eff} < 5日: \psi(t_{eff}) = 0.135 t_{eff} + 0.325$ $t_{eff} > 5日: \psi(t_{eff}) = 1.0$	
コンクリート基礎のヤング係数 kgf/cm <sup>2</sup> (MPa)	$2.1 \times 10^5$ (20593)	
外部拘束係数 $R_N$	0	
$R_M$ (ピーク前)	1.0	
$R_M$ (ピーク後)	1.0	

従来のCP法で行い、水和発熱モデルについては、有効材齢により断面内の温度履歴に応じた有効ヤング係数を用いたブロックCP法により行った。解析において基礎周辺は埋め戻しで軸拘束はないものとし、自重による曲げ拘束のみを考えた。また、壁体部コンクリートの型枠は材齢2日で取り外されてお

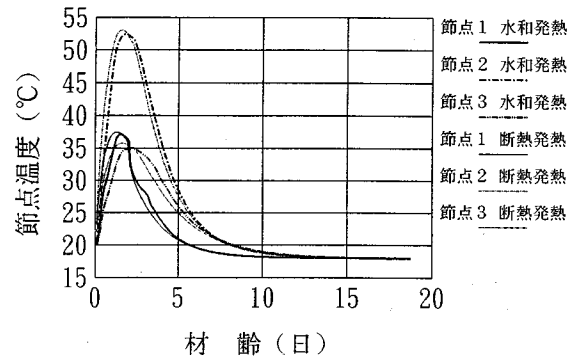


図-8 温度解析結果 (壁厚1.0m)

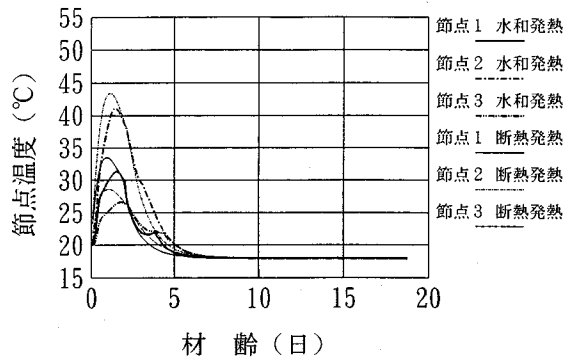


図-9 温度解析結果 (壁厚0.5m)

り、したがって壁体部の熱伝達係数を材齢2日までは $5.0 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ とし、2日以後は $10.0 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ とした。解析条件を表-2に示す。温度解析の結果を図-8, 9に、応力解析の結果を図-10, 11に示す。また、温度ひび割れ指数の時刻歴を図-12, 13に示す。また、図-14, 15には壁厚0.5mの場合の材齢と有効ヤング係数の関係、材齢と引張強度の関係を従来の材齢の

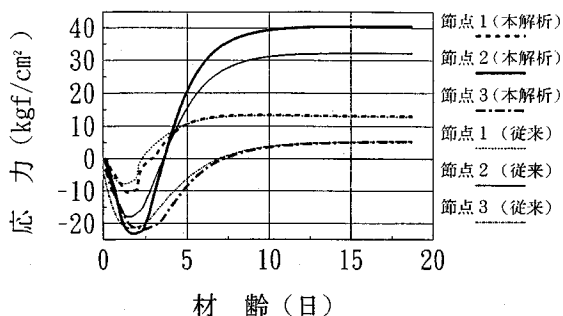


図-10 応力解析結果 (壁厚1.0m)

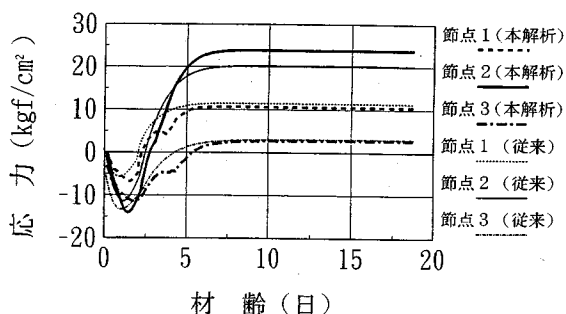


図-11 応力解析結果 (壁厚0.5m)

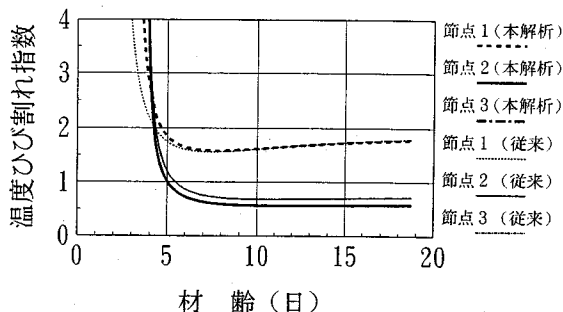


図-12 温度ひび割れ指数の時刻歴 (壁厚1.0m)

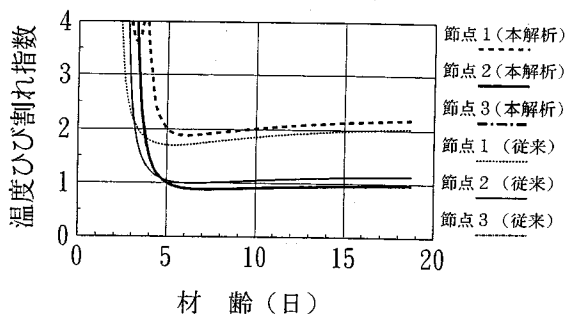


図-13 温度ひび割れ指数の時刻歴 (壁厚0.5m)

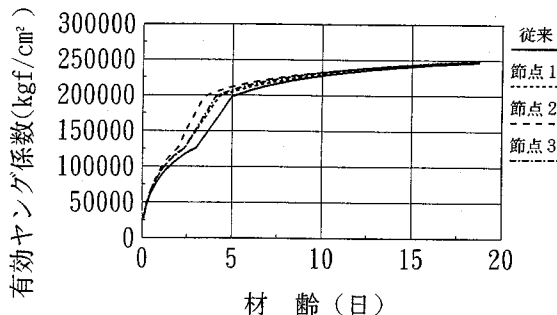


図-14 材齢と有効ヤング係数の関係 (壁厚0.5m)

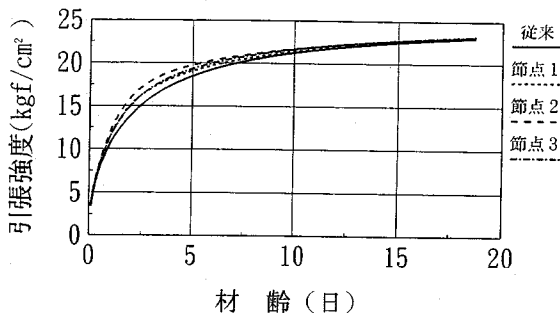


図-15 材齢と引張強度の関係 (壁厚0.5m)

みによるものと、有効材齢を用いたものについて示す。なお、解析結果は図-6, 7の3つの節点について示した。

### b) 解析結果

温度解析の結果、壁厚1.0mの解析例については従来型の断熱発熱モデルと水和発熱モデルの解析結果に顕著な差は生じていない。水和発熱モデルは断熱発熱モデルに比べ、どの場所においても温度が最高になる時刻が遅くなっているが、これは、水和発熱の温度依存性のためである。壁厚が0.5mの解析例では、両解析結果に差が生じており、すべての場

所において従来型の断熱発熱モデルの結果が大きくなっており、原田ら<sup>4)</sup>の研究結果と一致している。

応力解析については、どちらの解析例も水和発熱モデルとブロックCP法を組み合わせた解析結果が大きな応力を示しており、壁厚が1.0mの方が顕著な差が現れている。壁厚が1.0mの解析例では、温度解析結果にそれ程差がない。むしろ水和発熱モデルの方が温度上昇量が小さかったことから、応力解析において、水和発熱モデルとブロックCP法を組み合わせた解析が大きな応力を与えるのは、ブロックCP法において有効ヤング係数の算定に有効材齢を用いるためと考えられる。図-14は材齢と有効ヤ

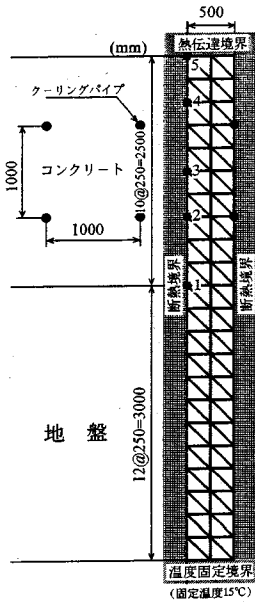


図-16 パイプクーリング有限要素モデル  
(パイプ間隔1.0m)

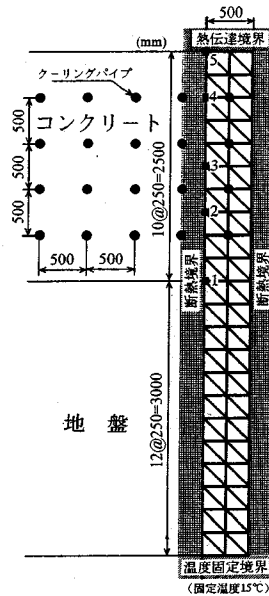


図-17 パイプクーリング有限要素モデル  
(パイプ間隔0.5m)

表-3 パイプクーリング解析条件

	コンクリート	地盤
単位セメント量 kg/m <sup>3</sup>	250	—
比熱 kcal/kg°C (J/kg°C)	0.2632 (1102)	0.36 (1507)
熱伝導率 kcal/mh°C (W/m°C)	2.06 (2.40)	1.26 (1.47)
密度 kg/m <sup>3</sup>	2312	1600
初期温度 °C	20	15
熱伝達率 kcal/m <sup>2</sup> h°C (W/m <sup>2</sup> °C)	12.0 (14.0)	
断熱温度上昇特性	T <sub>s,t</sub> = K(1 - e <sup>-αt</sup> )	
	K=43.5 α=0.92	
外気温 °C	18.0	
パイプの熱伝達率 kcal/m <sup>2</sup> h°C (W/m <sup>2</sup> °C)	233 (271)	
クーリング水温 °C	15.0	
パイプの径 m	0.025	
熱膨張係数 (1/°C)	10×10 <sup>-6</sup>	
圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	f <sub>c</sub> (t <sub>eff</sub> ) = $\frac{t_{eff}}{4.5+0.95t_{eff}}$ f <sub>c</sub> (91) (f <sub>c</sub> (91) = 225kgf/cm <sup>2</sup> )	
引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	f <sub>t</sub> (t <sub>eff</sub> ) = 1.4√f <sub>c</sub> (t <sub>eff</sub> )	
有効ヤング係数 kgf/cm <sup>2</sup>	E <sub>e</sub> (t <sub>eff</sub> ) = ψ(t <sub>eff</sub> ) × 1.5 × 10 <sup>4</sup> √f <sub>c</sub> (t <sub>eff</sub> ) t <sub>eff</sub> < 3日 : ψ(t <sub>eff</sub> ) = 0.73 3 < t <sub>eff</sub> < 5日 : ψ(t <sub>eff</sub> ) = 0.135t <sub>eff</sub> + 0.325 t <sub>eff</sub> > 5日 : ψ(t <sub>eff</sub> ) = 1.0	
地盤のヤング係数 kgf/cm <sup>2</sup> (MPa)	2.0 × 10 <sup>4</sup> (1961)	
外部拘束係数 R <sub>N</sub>	0.01	
R <sub>M</sub> (ピーク前)	0.7	
R <sub>M</sub> (ピーク後)	1.1	

ング係数の関係を示しているが、有効材齢を用いた方が従来の材齢を用いるよりも、有効ヤング係数の発現が早いことからその分だけ応力が大きくなるものと思われる。

温度ひび割れ指数については、どちらの解析例も水和発熱モデルとブロックCP法の組み合わせた解析結果の方が小さくなっている。有効材齢を用いると引張強度の発現も早くなるがそれ以上に応力が大きくなるためである。

## (2) パイプクーリングが実施されているスラブ状構造物

### a) 解析モデル・解析条件

次の数値解析例としてパイプクーリングが実施されているスラブ状構造物の解析を行う。温度解析は水和発熱モデルと断熱発熱モデルの両方で行った。解析はクーリングパイプが配置されたコンクリートスラブの一部分を想定し、パイプ間隔がそれぞれ1.0m、0.5mと異なる図-16、17に示すような2種類の断面について行った。パイプ部はクーリング水温を外部温度とする熱伝達境界として解析を行った。解析条件の詳細を表-3に示す。クーリングパイプとクーリング水との熱伝達係数は、管内流速をu=40cm/sとし、田辺ら<sup>10)</sup>の式から求めた。温度解析は材齢10日目までを行い、始めの10時間目までは、時間刻み0.1時間で、それ以後は0.5時間刻みで行った。また、応力解析は、断熱発熱モデルに対して従



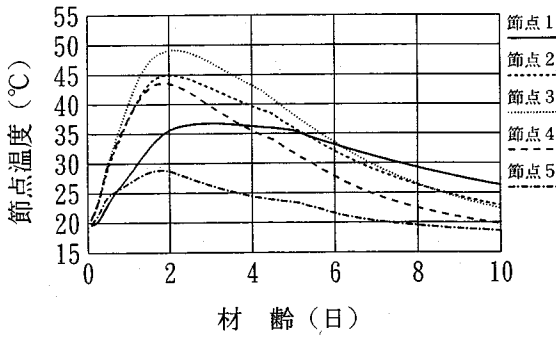


図-18 温度解析結果 (水和発熱モデル)  
パイプ間隔1.0m

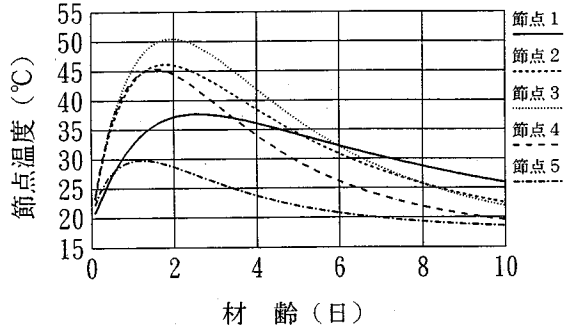


図-19 温度解析結果 (断熱発熱モデル)  
パイプ間隔1.0m

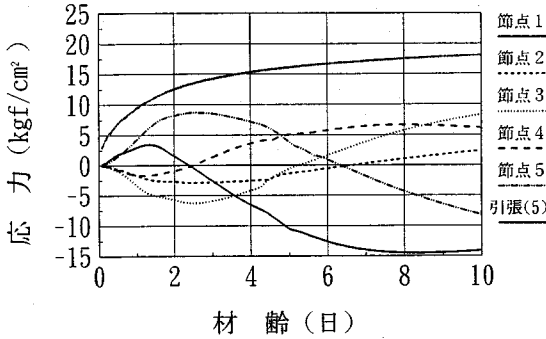


図-20 応力解析結果 (水和発熱モデル)  
パイプ間隔1.0m

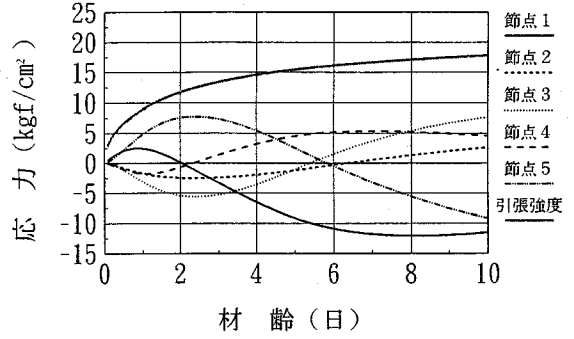


図-21 応力解析結果 (断熱発熱モデル)  
パイプ間隔1.0m

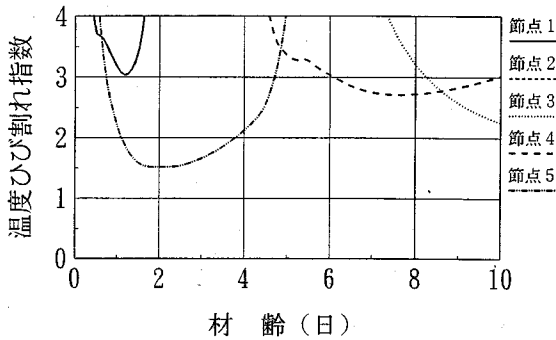


図-22 温度ひび割れ指数 (水和発熱モデル)  
パイプ間隔1.0m

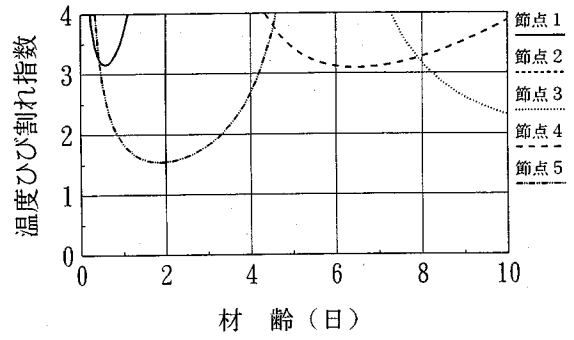


図-23 温度ひび割れ指数 (断熱発熱モデル)  
パイプ間隔1.0m

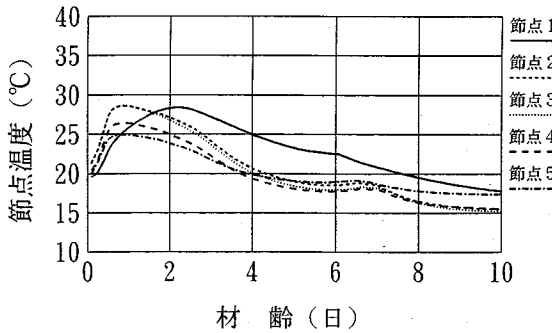


図-24 温度解析結果 (水和発熱モデル)  
パイプ間隔0.5m

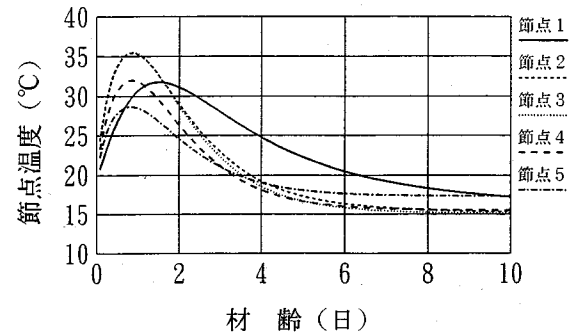


図-25 温度解析結果 (断熱発熱モデル)  
パイプ間隔0.5m

来のCP法で行い、水和発熱モデルについては有効材齢により断面内の温度履歴に応じた有効ヤング係数を用いたブロックCP法で行った。なお、解析結果はそれぞれ図-16, 17に示す5つの節点について示す。

**b) 解析結果**

パイプ間隔が1.0mの場合の温度解析結果を水和発熱モデルについては、図-18に、断熱発熱モデルについては、図-19に示す。節点3で最高温度を示すが、最高温度はどちらのモデルもそれ程差はなく、断熱発熱モデルの方が約2℃程高くなっている。温度上昇量はすべての位置において断熱発熱モデルの結果が大きくなっているが、それ程大きな差ではない。また、温度上昇の速度が水和発熱モデルの方がやや遅くなっており、水和発熱の温度依存性の影響がでている。

次にパイプ間隔が1.0mの場合の応力解析結果を水和発熱モデルについては、図-20に、断熱発熱モデルについては、図-21に示す。最大引張応力はどの位置においても、水和発熱モデルとブロックCP法を組み合わせた結果が断熱モデルとCP法を組み合わせた結果より大きくなっており、壁状構造物の応力解析結果の傾向と一致している。温度解析では最高温度は、むしろ水和発熱モデルの解析結果が小さかったことから、ブロックCP法を用いた応力解析において、有効ヤング係数の算定に有効材齢を用いたため、応力が大きくなったと考えられる。引張強度については有効材齢を使って算定した方が若干大きな強度を与えている。引張応力と引張強度から温度ひび割れ指数を算定した結果を水和発熱モデル、断熱発熱モデルについてそれぞれ図-22, 23に示す。温度ひび割れ指数の最小値は、水和発熱モデルとブロックCP法を組み合わせた結果が、断熱発熱モデルとCP法を組み合わせた結果より若干小さくなっているものの、顕著な差は見られない。最後にパイプ間隔が0.5mの場合の温度解析結果を水和発熱モデル、断熱発熱モデルについてそれぞれ図-24, 25に示す。パイプ間隔0.5mでは、各節点の温度上昇はかなり異なっており、断熱発熱モデルは水和発熱モデルより温度上昇量が大きくなっている。断面内の最高温度は節点2, 3で最高温度を示し、水和発熱モデルでは、28℃であるのに対し、断熱発熱モデルでは、36℃となっている。パイプ間隔が50cmの場合では、温度解析結果にかなりの差が生じるものの、断面内の温度はそれ程高くないため、生じる応力も小さく、温度ひび割れ指数の差はそれ程問題とはならないと考えられる。

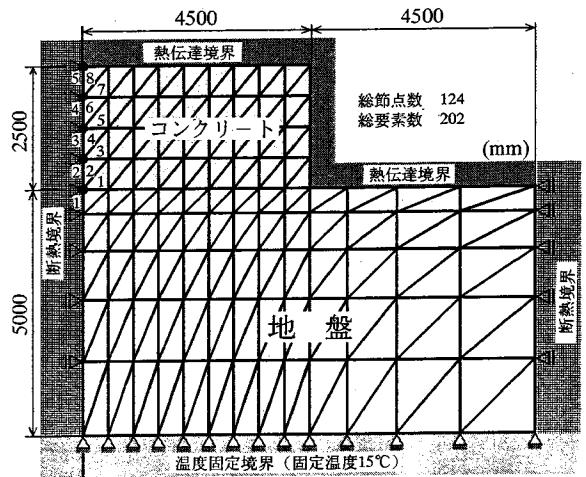


図-26 矩形形状スラブ有限要素モデル

表-4 矩形形状スラブ解析条件

	コンクリート	地盤
単位セメント量 kg/m³	250	—
比熱 kcal/kg°C (J/kg°C)	0.2632 (1102)	0.36 (1507)
熱伝導率 kcal/mh°C (W/m°C)	2.06 (2.40)	1.26 (1.47)
密度 (kg/m³)	2312	1600
初期温度 (°C)	20.0	15.0~20.0
熱伝達率 kcal/m²h°C (W/m²°C)	10.0 (11.6)	10.0 (11.6)
断熱温度上昇特性	$T_{ad} = K(1 - e^{-at})$	$K = 43.5$ $\alpha = 0.92$
外気温 (°C)	20.0	
熱膨張係数 (1/°C)	$10 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$
ポアソン比	0.167	0.2
圧縮強度 kgf/cm²	$f'_c(t_{eff}) = \frac{t_{eff}}{4.5 + 0.95t_{eff}} f'_c(91)$ ( $f'_c(91) = 322 \text{ kgf/cm}^2$ )	
引張強度 kgf/cm²	$f_t(t_{eff}) = 1.4\sqrt{f'_c(t_{eff})}$	
有効ヤング係数 kgf/cm²	$E_e(t_{eff}) = \psi(t_{eff}) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t_{eff})}$ $t_{eff} < 3 \text{日} : \psi(t_{eff}) = 0.73$ $3 < t_{eff} < 5 \text{日} : \psi(t_{eff}) = 0.135t_{eff} + 0.325$ $t_{eff} > 5 \text{日} : \psi(t_{eff}) = 1.0$	
地盤ヤング係数 kgf/cm² (MPa)	—	$2.0 \times 10^4$ (1961)

**(3) 地盤上の矩形形状スラブ**

**a) 解析モデル・解析条件**

FEMによる応力解析の解析例として、地盤上の矩形形状スラブの解析を行う。温度解析は水和発熱モデルと断熱発熱モデルの両方で行った。応力解析は水和発熱モデル、断熱発熱モデルのそれぞれに対し、コンクリートの力学的特性値を従来の材齢により算定したものと断面内の温度履歴に応じて有効材齢により算定したものの4通りの組み合わせで行った。温度解析および応力解析の有限要素モデルを図-26

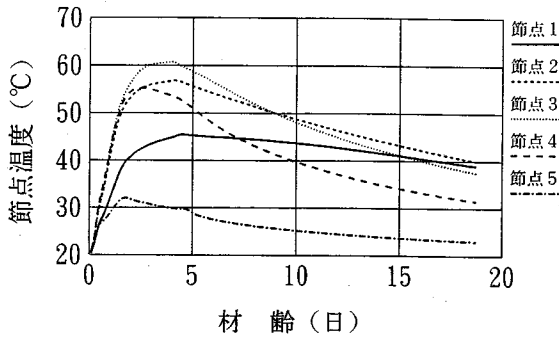


図-27 温度解析結果 (水和発熱モデル)

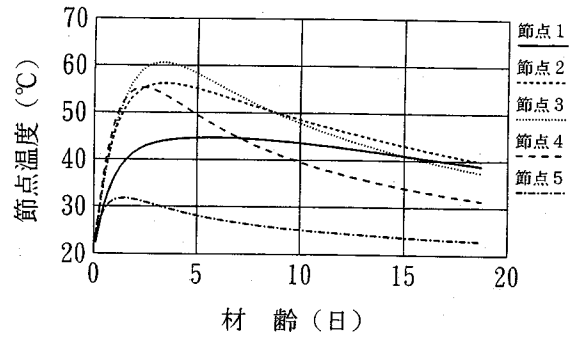


図-28 温度解析結果 (断熱発熱モデル)

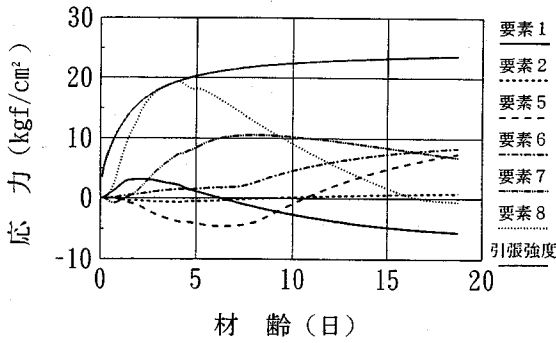


図-29 応力解析結果 (水和発熱モデル, 有効材齢)

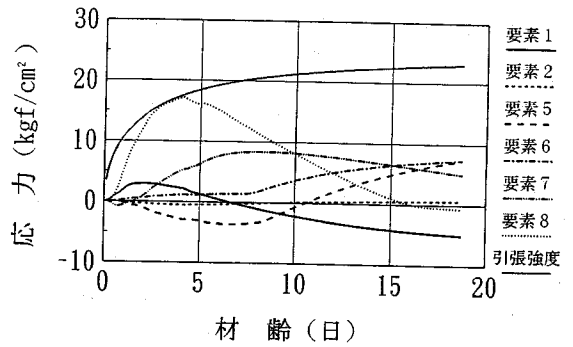


図-30 応力解析結果 (水和発熱モデル, 材齢)

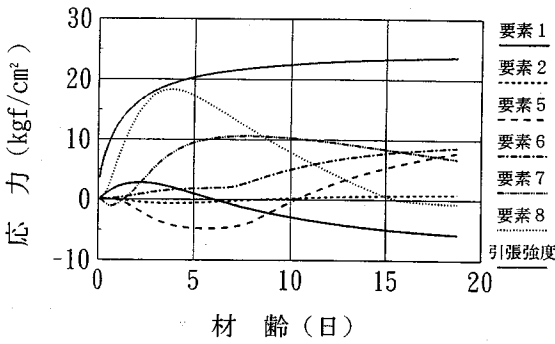


図-31 応力解析結果 (断熱発熱モデル, 有効材齢)

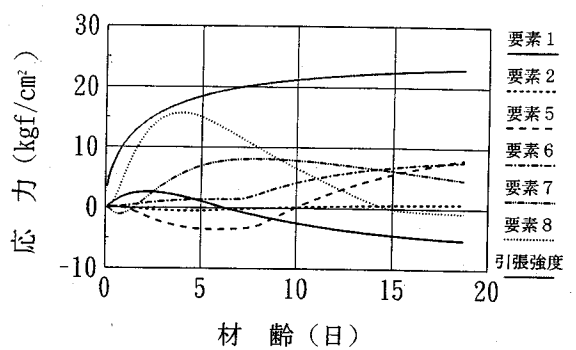


図-32 応力解析結果 (断熱発熱モデル, 材齢)

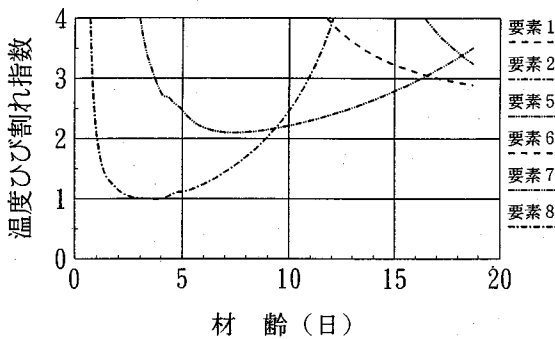


図-33 温度ひび割れ指数 (水和発熱モデル, 有効材齢)

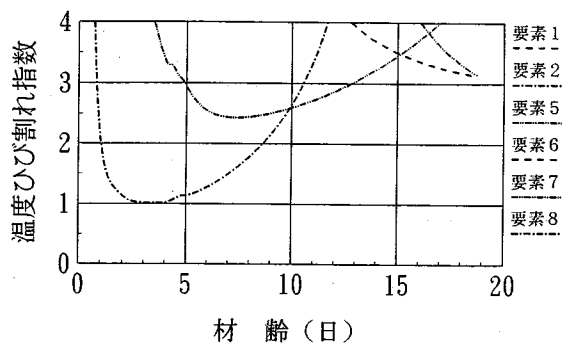


図-34 温度ひび割れ指数 (水和発熱モデル, 材齢)

に示す。また、解析条件を表-4に示す。温度解析の結果は図-26の5つの節点について示し、応力解析の結果は図-26の8つの要素について示す。

#### b) 解析結果

温度解析の結果を水和発熱モデルについては、図-27に、断熱発熱モデルについては図-28に示す。水和発熱モデルと断熱発熱モデルの解析結果に顕著な差はない。温度解析において、水和発熱過程の温度依存性が問題となるのは、外気からの冷却を受けるコンクリートの表面部分やパイプクーリング等が行われている場合（非断熱部分）であり、本解析例のように断熱状態に近い場合には、水和発熱過程の温度依存性はあまり問題とならない。

応力解析の結果をそれぞれの組み合わせに対し図-29~32に示す。水和発熱モデルと断熱発熱モデルの温度解析結果に顕著な差がないことから、応力解析においても両モデルの差はない。しかしながら力学的特性値の算定に有効材齢を用いたものと、従来の材齢を用いたものとは、応力にかなりの差が生じており、有効材齢を用いた方が応力が大きく出ている。これはCP法とブロックCP法の解析結果と同じ傾向を示している。引張応力と引張強度から温度ひび割れ指数を算定した結果を水和発熱モデルについて図-33, 34に示す。図-33はコンクリートの力学特性の算定に有効材齢を用いたものであり、図-34は従来の材齢を用いたものである。従来の材齢を用いたものより有効材齢を用いたものは温度ひび割れ指数が小さくなっている。応力解析において、力学的特性値（強度、弾性係数）の発現に温度依存性を考慮した解析では、一般に応力は大きくなり、温度ひび割れ指数は小さくなる。したがって、温度ひび割れ予測の精度向上のためには、温度依存性の影響は温度解析よりもむしろ応力解析に考慮する必要がある。

## 4. 結 論

本研究は、温度ひび割れ予測の精度向上を目的に、水和発熱過程および強度発現の温度依存性を考慮した解析を行ったものである。解析例として壁状構造物、パイプクーリングが実施されているスラブ状構造物および地盤上の矩形状スラブを取り上げ従来の解析法との比較を行った。以下に本研究で得られた結論を要約する。

(1) 水和発熱過程の温度依存性を考慮した非線形温度解析の結果は、従来から行われている断熱温度上昇式を用いる線形解析の結果に比べ、温度上昇量が小さく見積られる。また、最高温度に達する

までの時間も若干遅くなる。この傾向は壁厚が薄かったり、パイプクーリングされているような放熱、冷却を受ける構造物では特に著しい。

(2) 温度解析において、水和発熱過程の温度依存性が問題となるのは、外気からの冷却を受けたり、パイプクーリングされている領域であるが、この領域では温度上昇量は一般に小さく、温度応力はそれ程問題にはならない。従来の断熱温度上昇式を用いた方が最高温度が高くなることから、設計においては従来の断熱温度上昇式を用いた方が安全側の指標を与える。

(3) ブロックCP法と有効材齢を用いることにより、構造物内部の温度履歴に応じて、時間的、部位的に異なる力学特性を応力解析に盛り込むことが可能となり、より正確な応力解析が行える。

(4) コンクリートの力学的特性値の算定に有効材齢を用いて行った応力解析の結果は、従来の材齢を用いて行った応力解析の結果を上回っており、その結果温度ひび割れ指数が従来の方法で算定したものより小さくなることがある。

(5) 温度解析において、温度依存性が問題となる領域では温度上昇量が小さく、温度ひび割れはあまり問題とはならない。したがって温度ひび割れ評価では、温度依存性の影響は温度解析よりもむしろ応力解析に考慮する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、コンクリート標準示方書改訂小委員会のマスコンクリート部会（國府主査、小野幹事）の皆様から貴重な御意見を頂き、ここに深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 中村秀明, 浜田純夫：材料の不確定性を考慮したコンクリート構造物の熱伝導有限要素解析, 土木学会論文集, No. 496/V-24, pp. 71-80, 1994. 8.
- 2) 内田清彦, 榊原弘幸, 斉藤 豊：積算発熱量に基づくセメントの水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測, コンクリート工学, Vol. 24, No. 4, pp. 105-113, 1986. 4.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 土木学会コンクリート標準示方書・施工編, 1994年
- 6) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘：マスコンクリートの基本的特性に関する一考察, セメント技術年報, 34, pp. 230-233, 1980.
- 7) 森本博昭, 小柳 洽：コンクリート構造物の温度応力解析における2, 3の問題点, マスコンクリートの温度応力発生に関するコロキウム論文集, pp. 69-74, 1982.

- 8) 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。  
9) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，pp. 91-96, 1986年3月。

- 10) 田辺忠顕，山川秀次，渡辺 朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第343号，pp. 171-179, 1984.

(1994. 11. 22受付)

## THERMAL STRESS ANALYSIS OF THE MASS CONCRETE STRUCTURE BASED ON TEMPERATURE-DEPENDENT PROPERTIES OF CONCRETE

Hideaki NAKAMURA, Osamu ASAKAMI, Toshio TANIMOTO  
and Sumio HAMADA

The hydration of cement and strength development of concrete are dependent on the temperature. The present study proposes the analytical procedure for the thermal stresses induced in the mass concrete structures in order to obtain more accurate estimation of cracking, when the properties dependent on the temperature are included. The present analytical results are compared with the conventional analytical results for the wall structures and slabs having a water cooling system.