

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

NONLINEAR COUPLING ANALYSIS OF HEAT CONDUCTION AND TEMPERATURE-DEPENDENT HYDRATION OF CEMENT

原田修輔*・前川宏一**・辻 幸和***・岡村 甫****

By Shusuke HARADA, Koichi MAEKAWA, Yukikazu TSUJI and Hajime OKAMURA

This study was made to present a method for nonlinear coupling analysis of heat conduction and temperature-dependent hydration of cement and to indicate the difference of analytical results between the conventional linear method by using an adiabatic temperature rise curve and the proposed nonlinear method by using the temperature dependent heat hydration model. For the cement hydration model, the heat generation rate depending on the temperature and past hydration process was adopted as a function of temperature and accumulated heat.

This nonlinear analysis results are considerably different from that of the conventional linear analysis in case of thin wall type structure. The proposed nonlinear analysis is able to express the actual behavior occurred in the concrete structure with high fidelity.

Keywords: nonlinear coupling analysis, heat conduction, FEM, heat generation, cement, hydration

1. 序 論

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委員会から提案された、マスコンクリートの温度応力に関する研究成果¹⁾によって、セメントの水和熱に起因する温度ひびわれの危険度を定量的に評価できるシステムが確立されている。このシステムを基礎に、セメントの品質や単位セメント量などの配合上の要因が温度応力あるいは温度ひびわれに及ぼす影響度について、各方面で検討されるようになってきた。温度ひびわれの危険度を定量化したことにより、初めて、温度ひびわれの発生に関する限界状態設計法が可能になったといえよう。このような定量的評価によるアプローチが、今後、コンクリート構造物の耐久性および信頼性の向上に大きな貢献を果たすことになる。

温度ひびわれ危険度の算定精度は、また、構造物の種類、形状寸法および使用するコンクリートの性質などに

よって、大きく異なる。したがって、温度ひびわれ危険度の算定精度を向上させることが、次の段階として必要である。

温度ひびわれ危険度の算定には、セメントの水和発熱過程とコンクリートの熱定数、時間と温度を考慮した若材令時のコンクリートの構成式と力学定数、ならびに、ひびわれの発生条件の3者を仮定しなければならない。温度応力の解析精度は、このような基本仮定の精度と適用範囲の広さに依存するのである。

従来、多くの研究者により貴重な研究成果が報告されているものの、現段階におけるこれらの基本仮定には、まだ未解明な点も残されており、十分な解析精度と広範な適用範囲のレベルに達しているとはいいがたい。このため、温度ひびわれ危険度の算定は、状況によって過大にまたは過小に評価され、解析精度のばらつきが大きくなっているのである。

セメントの水和発熱に起因する構造物中の温度分布の予測は、温度ひびわれ危険度に大きな影響を及ぼすことは論を待たない。現状の技術において、温度解析結果が実際と異なることを技術者は経験からすでに認知している。さらに、このような場合、解析に用いる材料モデルを試験から得られた実際の値より若干修正することにより、解析結果を実際と合致させることが可能なことも経

* 正会員 工修 住友セメント(株)技術開発センター
(〒274 船橋市豊富町 585)

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

*** 正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科
(〒376 桐生市天神町 1-5-1)

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

験的に体得しているのである。

現段階で行われているコンクリートの温度解析では、断熱温度上昇試験から得られた発熱曲線を時間の関数に置き換えて、それをあらゆる部位のコンクリートの発熱曲線として用いてきた。換言すれば、熱伝導解析の発熱項を場所の関数ではなく、時間のみ関数として与えてきたのである。

しかしながら、断熱温度上昇値は、あくまでも熱が移動しないという特殊な環境下において進行するセメントの水和反応過程によるものである。きわめて断面の大きい構造物の中心近くでは、断熱温度上昇試験と同じような環境にあると考えてよいが、構造物の表面近傍や強制的に冷却されるような部位のコンクリートは、断熱温度状態とは異なる水和反応ならびに水和発熱過程を呈するのである。より精度の高い熱伝導解析には、構造物中の各部位ごとに異なる水和反応過程とそれに伴う水和発熱速度を特定することが必要である。鈴木らは、すでに温度履歴の依存性を考慮した、コンクリート中における単位重量当たりのセメントの水和発熱過程を定量的に求める手法を提示した²⁾。

一方、セメントの水和反応自体がその部位のコンクリートの温度履歴に依存するため、水和発熱速度の予測には、熱伝導解析の結果が不可欠となる。すなわち、熱の移動と水和発熱の相互に依存する形態を、温度解析において追跡することが必要となるのである。

本研究は、温度ひびわれ危険度の算定精度の向上を目的として、セメントの水和発熱過程に及ぼす温度履歴を考慮した非線形温度解析方法を提案するものである。すなわち、熱伝導と水和発熱過程の連成挙動、いわゆるカップリング問題を、空間と時間軸に対して離散化した、温度に関する非線形問題としてとらえる。そして、比較的薄い壁状構造物の温度解析には、熱伝導と温度に依存するセメントの水和発熱過程の連成を考慮することが、温度ひびわれ危険度の算定精度の向上に必須の条件であることを提示するものである。

ここで、本研究で提案する非線形温度解析方法において、コンクリートの水和発熱モデルの設定に対する考え方は、従来の線形温度解析方法で行われている考え方と基本的に同様で、解析結果に要求される精度の程度によってその設定手順が異なる。すなわち、一般的な場合のコンクリートの水和発熱モデルは、これまでに既知となっている断熱温度上昇量を利用して、既報²⁾に示した導出方法を用いて設定すればよい。一方、より詳細な検討が必要となる場合には、精度の高い断熱温度上昇曲線を2~3水準に初期温度を設定した実験から事前により、水和発熱モデルを設定するのである。したがって、ここで提案する非線形温度解析は、従来の線形

温度解析で必要となる労力と同程度の労力で実行可能と思われる。

2. 熱伝導と水和発熱過程の連成方程式

熱伝導に関する支配方程式は、熱エネルギーの保存則および熱流束の構成式で記述される。コンクリートの場合、熱勾配に対して熱流束の等方線形性が仮定できるとして、以下に示すような支配方程式と境界条件が確立している。

熱エネルギーの保存則：

$$c\rho \cdot \frac{dT}{dt} = -\text{div } q + H \dots \dots \dots (1)$$

熱流束の構成式：

$$q = -k \cdot \text{grad } T \dots \dots \dots (2)$$

境界条件：

$$q \cdot n = m(T - T_{\text{ext}}) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 t は時間、 k 、 ρ 、 c 、 n 、 m は、それぞれ熱伝導率、単位容積重量、比熱、および温度解析対象の表面で定義される単位外向き法線ベクトルと熱伝達率であり、コンクリートの場合、一般に定数として与えられている。また、 q 、 T 、 T_{ext} 、 H は、それぞれ熱流束ベクトル、温度、外部環境温度、および単位時間・単位体積当たりのセメントの水和発熱速度であり、 q 、 T 、 H は位置と時間の関数である。

水和発熱速度 H は本来、時間だけでなく位置の関数でもあるが、断熱温度上昇試験に基づく従来の温度解析方法では、時間のみ関数として取り扱われている。すなわち、このことは、解析領域の全体に等しい水和発熱速度を仮定したことに相当する。この場合には、式(1)および式(2)は、温度 T に関して線形結合が可能な演算子で構成されることになり、離散化した方程式も線形代数方程式に変換される。

一方、内田らは一定温度条件下におけるセメントペーストの水和発熱速度から、断熱状態を含む任意の温度履歴に対して水和発熱速度を与えることのできる、温度履歴を考慮した水和発熱モデルを提案している³⁾。本研究では、構造物の各部位ごとに異なる水和発熱過程を追跡し得るセメントの水和発熱モデルとして、内田らによる水和発熱モデルを基本的に採用することにした。採用した水和発熱モデルを次式に示す。

$$\underline{H} = \underline{H}(Q, T) = \underline{H}_s(Q, T_s) \exp \left[-\frac{E(Q)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \dots \dots \dots (4)$$

$$Q = \int \underline{H} dt, \quad H = \underline{H} \cdot C \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 T_s は任意の基準温度、 Q はセメント単位重量当たりの積算発熱量、 R は気体定数(1.986 cal/deg·mol)

である。また、 C は単位セメント量、 H はセメント単位重量当たりの水和発熱速度である。

ここで、コンクリート中のセメントに対応する活性化エネルギー $E(Q)$ 、および一定温度下 T_s における水和発熱速度を示す基準水和発熱速度 $H_s(Q, T_s)$ を、それぞれ材料関数として与えなければならない。これらの材料関数は、セメント粒子の分散性や水との接触機会に強く影響を受ける。したがって、セメント粒子の練りませ効率の、水和反応への影響を考慮すると、セメントペーストによる試験から求めた $E(Q)$ と $H_s(Q, T_s)$ を、コンクリート中に存在しているセメントの特性値と仮定することはできない。そこで、鈴木らは、初期温度のみを変化させた、同一配合、同一製造方法によるコンクリートの断熱温度上昇試験より、活性化エネルギー $E(Q)$ と基準水和発熱速度 $H_s(Q, T_s)$ を求める手法を開発した²⁾。この方法によれば、コンクリートの配合の違いによる水和発熱特性の差も、温度解析に取り入れることができる。本研究では、鈴木らの方法で定量化された実際のコンクリートの水和発熱過程を代表する材料関数を用い、非線形温度解析を行うことにした。

式(4)で表現される水和発熱速度 H は、温度 T と積算発熱量 Q の関数である。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 も時間と空間で変化することになる。ここで、積算発熱量 Q は構造物の各部位で異なる水和反応の程度を代表するものであり、式(5)の時間積分は、各部位の温度および水和発熱履歴の違いを反映する経路依存を代表するパラメーターである。

熱伝導と水和発熱過程の連成問題の解法は、空間と時間軸の両者に関して、式(1)~式(4)を連立して解き、式(5)により、あらゆる部位において温度と水和発熱の履歴を追跡していくことに帰着する。このとき、式(4)は温度 T に関して非線形な演算子で構成されているため、支配方程式群は温度 T に関して線形にはならず、連立非線形方程式となるのである。

3. 離散化代数方程式と温度の非線形性

式(2)および式(4)を式(1)に代入すると、空間と時間領域で離散化すべき次式に示す非線形微分方程式が得られる。

$$c\rho \cdot \frac{dT}{dt} = k \cdot \nabla^2 T + H(Q, T) \dots\dots\dots (6)$$

離散化にあたり、支配方程式の非線形性に無関係に適用可能な重み付き残差法を用いると、位置に関して離散化された、次式に示す非線形連立方程式を得る⁴⁾。

$$[K]\{T\} - [C] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + \{H(Q, T)\} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $[K]$ および $[C]$ は熱伝導マトリックスおよび熱容量マトリックスであり、 m 個の節点で構成されている有限要素の形状関数 N_i ($i=1 \sim m$) を用いて、以下に示す要素熱伝導マトリックスおよび要素熱容量マトリックスを加算したものである。

$$\left. \begin{aligned} [K] &= \sum_{\text{element}} \int k [B]^T [B] dV \\ [C] &= \sum_{\text{element}} \int c [L]^T [L] dV \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$[B]^T = \begin{bmatrix} dN_1/dx & dN_1/dy & dN_1/dz \\ dN_2/dx & dN_2/dy & dN_2/dz \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ dN_m/dx & dN_m/dy & dN_m/dz \end{bmatrix} \quad [L]^T = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix}$$

また、 $\{H(Q, T)\}$ は水和発熱速度ベクトルであり、以下のように定義される。

$$\{H(Q, T)\} = \sum_{\text{element}} \int [L]^T H(Q, T) dV \dots\dots\dots (9)$$

さらに、クランク-ニコルソンの θ 法による時間差分を行うと、次式に示す時間 ($t_0 + \theta\Delta t$) における節点温度ベクトル $\{T\}$ に関する非線形代数方程式が導出される。

$$R(\{T\}) = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$R = \left[[K] - \frac{1}{\theta\Delta t} [C] \right] \{T\} + \frac{1}{\theta\Delta t} [C] \{T_{sol}\} + \{H(Q, T)\}$$

ただし、時間 t_0 における節点温度ベクトル $\{T_{sol}\}$ は既知量であり、差分の最初のステップでは初期温度に相当する。

水和発熱速度ベクトル $\{H(Q, T)\}$ は、未知量である温度 $\{T\}$ の非線形関数であるため、平衡ベクトル R をゼロとする非線形解 $\{T\}$ は、繰り返し数値計算によって求めなければならない。本研究では、繰り返し数値計算に Newton 法を採用した。式(10)を節点温度ベクトル $\{T\}$ の各成分で偏微分すると、式(9)をもとに式(11)を得る。

$$dR = [D] d\{T\} \dots\dots\dots (11)$$

$$[D] = \left[[K] - \frac{1}{\theta\Delta t} [C] + \sum_{\text{element}} \int \frac{dH}{dT} [L]^T [L] dV \right]$$

したがって、節点ベクトル $\{T^{(n)}\}$ を仮定し、収束条件 $|R| \ll 0$ を満足しない場合には、次の候補値を以下のように与え、収束条件を満足するまで繰り返し計算を行えばよい。

$$\{T^{(n+1)}\} = \{T^{(n)}\} + [D] dR \dots\dots\dots (12)$$

このようにして求められた時間 ($t_0 + \theta\Delta t$) における非線形解 $\{T\}$ より、時間 ($t_0 + \Delta t$) における節点温度ベクトル $\{T_i\}$ が、線形内挿の仮定から以下のとおり求められる。

$$\{T_i\} = \{T_{sol}\} + [\{T\} - \{T_{sol}\}] / \theta \dots\dots\dots (13)$$

なお、水和発熱と温度の時刻歴を有限要素内の数値積分点ですべて記憶しておく必要はない。温度と水和発熱の過去の経緯は、式(5)で表現される積算発熱量 Q により代表される。したがって、各要素の数値積分点において式(5)を時間差分ごとに数値積分し、順次、 Q を更新していけばよい。

$$Q_i = Q_{i0} + \Delta t \cdot H(Q_{i0}, T) \dots \dots \dots (14)$$

温度に関する繰り返し計算に要する回数は、時間差分間隔によっても異なるが、従来、温度解析で使用してきた時間間隔を用いると、およそ2~3回で収束させることができる。

水和反応の位置的な相違や構造物の形状等に伴って、コンクリート中の水が移動する。また一方では、コンクリートの水和発熱過程はコンクリート中の含水量によっても変化すると考えられる。厳密に言えば、水和発熱モデルに含水量をパラメーターとして含め、コンクリート中の水の移動に関する支配方程式とも連成させて解かなければならない。このような多相の相互連成問題を解くこと自体は、線形・非線形を問わず、数値解析上の技術としてすでに確立されている。ただし、若材令時のコンクリート中における水分移動や水和発熱モデルのコンクリート中における水分移動や水和発熱モデルの含水量の依存性は、現段階では未知の点が多い。したがって、本研究では、非線形温度解析における水和反応に伴う水の移動の影響は十分小さいとして無視した。しかし、超速硬セメントを用いた、比較的薄肉断面をもつようなコンクリート構造物の温度解析では、水の移動・熱エネルギーの移動・水和発熱過程の3者を連成して解く必要があるものと思われる。

4. コンクリート壁の非線形温度解析例

熱伝導解析における温度に依存するセメントの水和発熱過程を連成させる意義を検討するために、断面寸法の異なるコンクリート壁を採り上げる。壁状構造物はダムほどの大きな断面厚をもたず、壁表面からの放熱が相対的に大きい特徴をもっている。

この温度解析を行う場合、断熱状態に相当するセメントの水和発熱過程を壁体の全域に仮定することは、厳密には正しくない。また、断熱温度上昇過程をすべての部位で仮定する従来の解析によると、中規模マスコンクリートの温度解析の精度が、大断面構造物の解析精度に比較して劣ることは経験的に知られている⁵⁾。壁厚が1m以下のセメント量の多い壁状構造物は、今後ますます建造されていくものと考えられる。この種のマスコンクリート構造物に従来の解析方法を適用しても良い精度が得られないと思われるのである。

(1) 解析対象および解析モデル

セメントの水和発熱速度の温度依存性を考慮した非線形温度解析とともに、従来から実施されてきた温度依存性を考慮しない線形温度解析を行い、熱の移動に伴う水和発熱の経路依存性の効果を検討する。

温度依存性を考慮した式(4)の水和発熱モデルを用いて、単位セメント量が250 kg/m³と350 kg/m³の2種類のコンクリートについて温度解析を行った。コンクリートの配合を表-1に示す。両者の配合に対して、初期温度が238°K(10°C)、293°K(20°C)、303°K(30°C)と異なる断熱温度上昇試験をそれぞれ実施した。その結果を図-1に示す。なお、断熱温度上昇試験装置は、大型コンクリートブロック等においてその精度を十分に検証したものをを用いた⁶⁾。

表-1 解析に用いたコンクリートの配合

| 打込み 速度 (°K) | 粗骨材の 最大寸法 (mm) | スラブ の厚さ (cm) | 空気量 の範囲 (%) | 水セメ ント比 (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単 位 量 (kg/m ³) | | | | | |
|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|------|-----|------|------------|------------|
| | | | | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | A E 減水剤 | 空気量 調整剤 |
| 283 (10) | 40 | 8 ± 1 | 4 ± 1 | 60.8 | 42.4 | 152 | 250 | 810 | 1117 | 0.625 | — |
| | 40 | 8 ± 1 | 4 ± 1 | 43.4 | 39.0 | 152 | 350 | 713 | 1129 | 0.875 | 0.7 |
| 293 (20) | 40 | 8 ± 1 | 4 ± 1 | 61.2 | 42.3 | 153 | 250 | 807 | 1117 | 0.625 | 0.25 |
| | 40 | 8 ± 1 | 4 ± 1 | 43.7 | 38.9 | 153 | 350 | 710 | 1129 | 0.875 | 0.35 |
| 303 (30) | 40 | 8 ± 1 | 4 ± 1 | 60.0 | 42.5 | 150 | 250 | 815 | 1117 | 0.625 | 0.5 |
| | 40 | 8 ± 1 | 4 ± 1 | 42.9 | 39.2 | 150 | 350 | 718 | 1129 | 0.875 | 0.7 |

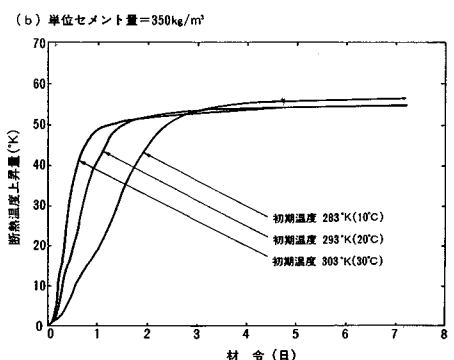
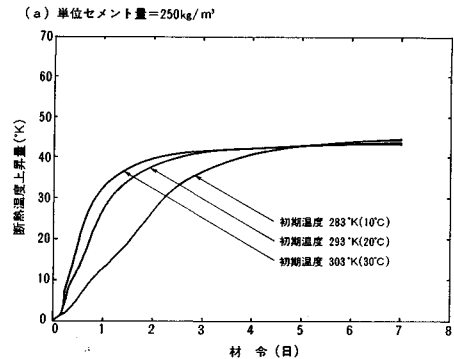


図-1 断熱温度上昇試験結果

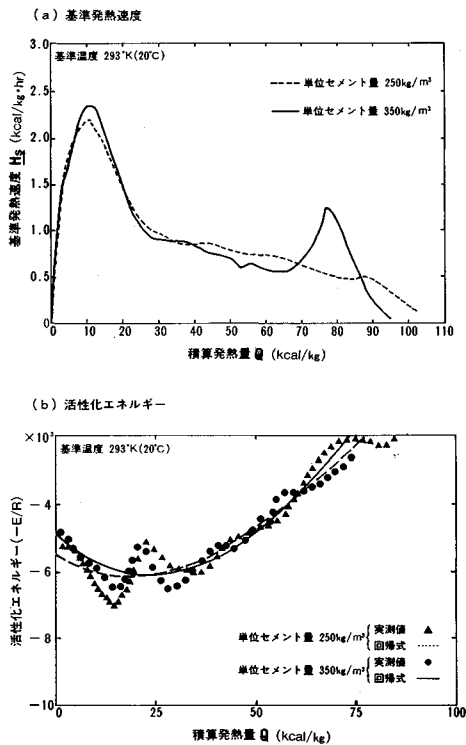


図-2 基準発熱速度と活性化エネルギー

断熱温度上昇試験結果から、式(4)に用いるコンクリート中のセメントの活性化エネルギー $E(Q)$ と基準水和発熱速度 $H_s(Q, T_s)$ に関して、鈴木らの方法によって算出したものを図-2に示す。本解析では、図-1に示した断熱温度上昇試験結果から定量化されたデータをスプライン補間して求め、式(4)における $H_s(Q, T_s)$ として計算に用いた。なお、 $E(Q)$ と $H_s(Q, T_s)$ の導出方法の詳細等については、既報に譲る²⁾。

図-3は式(4)を断熱条件で経路積分することにより求めた解析値と実測値とを対比したものである。両者は良好に一致している。

水和発熱過程における温度の非線形性の寄与分を考察するために、解析条件として、最も単純な一次元熱伝導状態を想定した。すなわち、十分な平面的広がりを持つ壁について、図-4に示すように、壁厚方向に関する熱移動に着目したものである。ここで、壁厚を0.1~2.0mと変化させ、壁両面から放熱する境界条件を設定した。

壁状構造物の温度解析では、一般に熱伝達率と外的環境条件が重要な要因となる。しかし、風速の影響、熱伝達率の温度依存性および放射の影響を定量化するためには、多くの不確定要因を含む。したがって、本解析の目的が温度に依存するセメントの水和発熱過程の熱伝導解

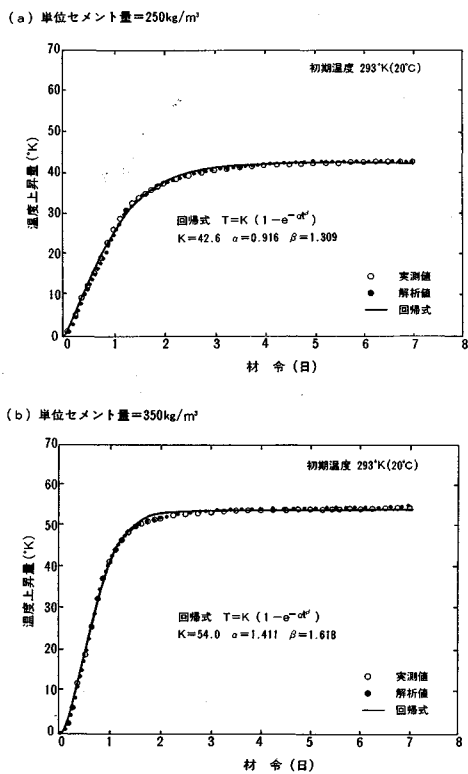


図-3 断熱温度上昇曲線の解析値と回帰式

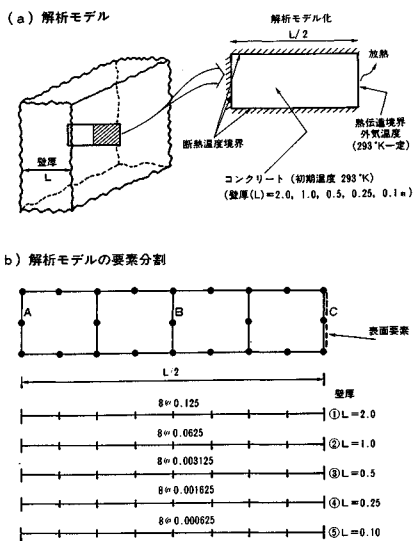


図-4 解析モデルと要素分割

析における連成効果の検討であることを考慮して、外気温度は293°K一定(コンクリートの打ち込み後の初期温度に同じ)とし、熱伝達率も一定とした単純な境界条件を設定した。

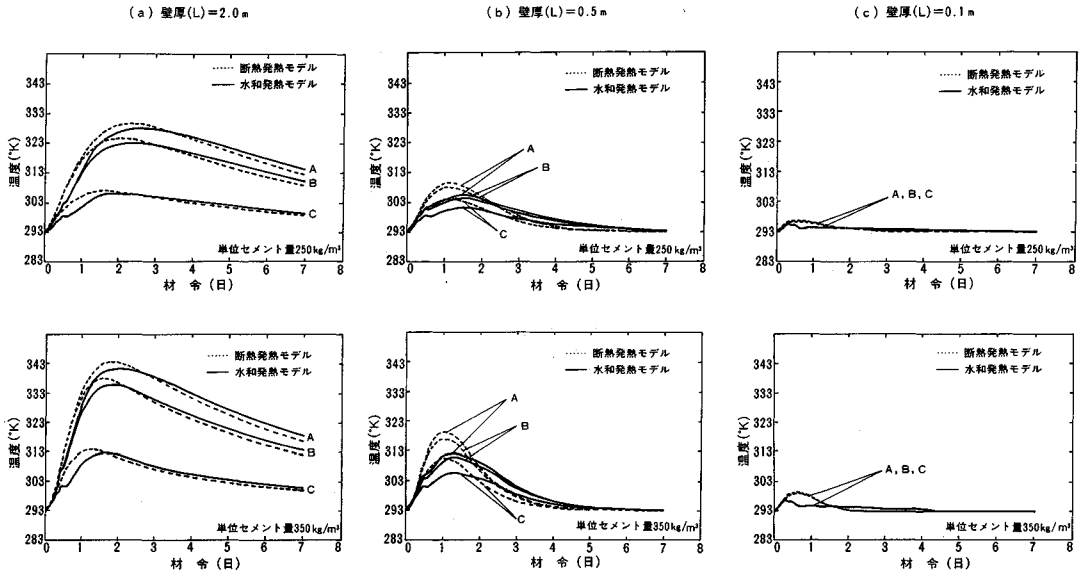


図-5 壁各位置における温度経時変化

表-2 解析ケースとコンクリートの熱定数

| No. | 単位セメント量 (kg/m³) | 壁厚 (m) | 熱伝導率 (kcal/(m·hr·°C)) | 比熱 (kcal/(kg·°C)) | 単位容積重量 (kg/m³) | 熱伝導率 (kcal/(m²·hr·°C)) | 計算時間間隔 (day) |
|-----|-----------------|--------|-----------------------|-------------------|----------------|------------------------|--------------|
| 1 | 250 | 2.00 | 2.55 | 0.2526 | 2327 | 10 | 0.005 |
| 2 | | 1.00 | | | | | 0.005 |
| 3 | | 0.50 | | | | | 0.005 |
| 4 | | 0.25 | | | | | 0.005 |
| 5 | | 0.10 | | | | | 0.0025 |
| 6 | | 2.00 | | | | | 0.005 |
| 7 | 350 | 1.00 | 2.55 | 0.2523 | 2342 | 10 | 0.005 |
| 8 | | 0.50 | | | | | 0.005 |
| 9 | | 0.25 | | | | | 0.005 |
| 10 | | 0.10 | | | | | 0.0025 |

表-2には、温度解析で使用した熱定数を示す。比熱は、コンクリートの配合に対応するものを使用した。なお、水和発熱過程の温度依存性を考慮した非線形温度解析と従来型の線形温度解析には、それぞれ同じ熱定数を使用した。また、計算時間間隔も同じ値とした。なお、従来の線形温度解析では断熱温度上昇曲線を式で表す必要がある。そこで、図-3中に示したとおり、筆者らが既報⁷⁾において断熱温度上昇量の実測値との適合性を確認し、提案している3係数による指数関数で表現することにした。この指数関数から得られる断熱温度上昇量と実験値との平均誤差は0.2°K以下で、かつ最大誤差は約1°K程度であった。このため、本研究で比較の対象となる、温度に関する線形解析と非線形解析とは、断熱状態において図-3に示したとおり良く一致した結果を与えるのである。

(2) 熱伝導と水和発熱モデルの連成解析の意義

図-5は、温度の経時変化の解析結果を示したものである。壁の中心(A点)、表面(C点)およびその中間

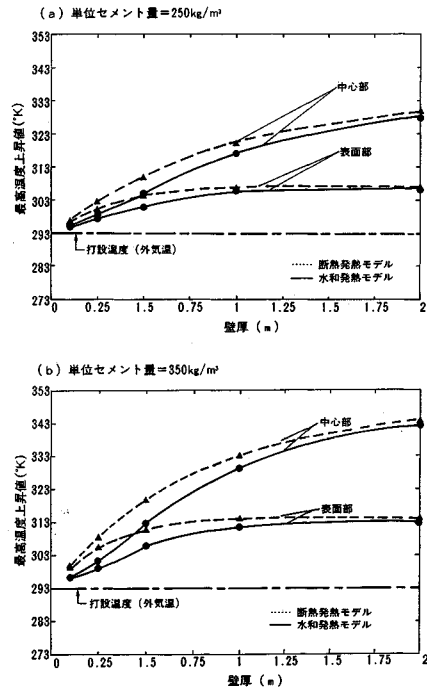
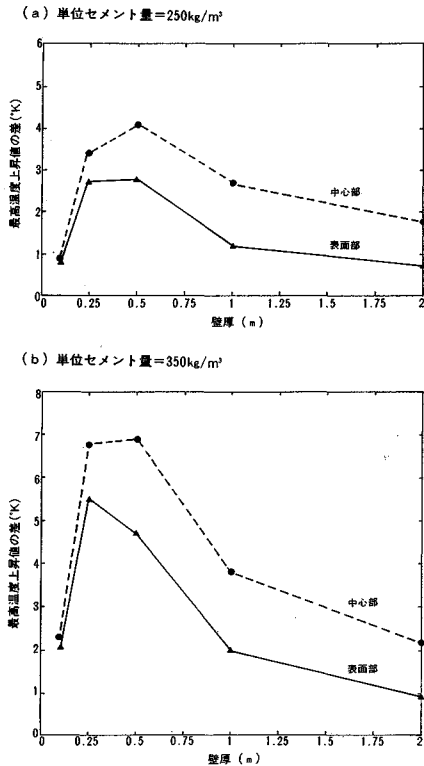


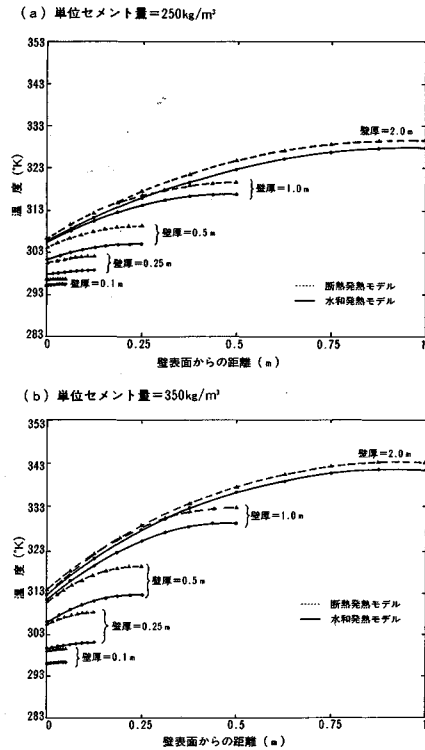
図-6 最高温度上昇値と壁厚との関係

点(B点)の各位置(図-4参照)における温度の経時変化を、壁厚と単位セメント量ごとに示している。

壁厚が2.0 mの場合、配合の相違や壁断面内の位置の違いにかかわらず、水和発熱過程の温度依存性を考慮した解析結果は、従来の断熱温度上昇から一意的に水和発熱速度を与えた解析結果と大きな差は認められない。



図一七 両解析方法による最高温度上昇値の差



図一八 温度分布 (最高温度上昇時)

しかしながら、壁厚を薄くしていくと、両解析結果は異なったものとなる。なお、最高温度上昇量は、すべての位置において、従来型の線形温度解析結果が、水和発熱過程の温度依存性を考慮したものを上回る結果となるのである。

図一六は、壁中心と壁表面位置における最高温度上昇値、ならびに図一七は、壁中心と壁表面の各位置における水和発熱過程の温度依存性を考慮した解析と従来型の解析との最高温度上昇量の差を、それぞれ壁厚に対して示したものである。多くのコンクリート構造物で採用されている、0.25~0.5 mの壁厚の範囲において、両解析結果には最も大きな差が現われることが認められる。ただし、壁厚が0.1 mになると、かえって両解析結果の差は小さくなっていく。

外気に接している壁表面部分では、冷却の影響を受けてコンクリートは断熱状態とは異なる水和発熱過程を呈する。しかし、壁厚の大きい場合は、大気への放熱がコンクリート躯体全体の発生する水和熱より相対的に小さいために、ほとんどの領域で断熱状態に近い温度履歴と水和発熱状態になっているものと思われる。一方、壁厚が小さくなると、外気による冷却効果を受ける領域が躯体全体に対して相対的に大きくなり、全断面で断熱状態に相当する発熱が確保されなくなり、解析結果に大きな

差となって現われてきたものと考えられる。なお、断面厚がさらに小さい場合は、水和熱が速やかに表面に移動してしまうため、解析結果における差が小さくなったものと解釈される。壁厚0の極限では、理論的には躯体温度は外気温度に等しくなり、両解析モデルのセメントの水和発熱過程による温度上昇値はともに0となる。

単位セメント量が 350 kg/m³ のコンクリートでは、図一七に示すとおり、最高温度上昇量は当然、セメント量の小さいコンクリートよりも増加する。さらに、壁厚の影響による両解析結果の差が一層増幅されていることが認められる。たとえば、壁厚が0.25 mの場合は、最高温度上昇の解析値が、従来の解析に比較して中心部において7°C程度低く、最高温度上昇量の約30%程度も異なる結果となった。水和発熱速度が速いコンクリートでは、水和発熱過程の温度依存性が、相対的に躯体の熱分布に著しい影響を及ぼしてくる可能性を示唆しているのである。

上記で議論した最高温度上昇値は、壁の外部拘束（たとえば、すでに打ち込まれたコンクリート等）により、温度降下時において導入される温度応力と直接関連する量である。

壁の温度分布の解析結果を、それぞれの解析手法と配合に対して示したものが図一八である。なお、個々の解

析法に対し、最も温度勾配が大きくなる時点の結果を示した。壁中心部と壁表面部とにおける平均温度勾配に関しては、解析方法の相違が大きな差として現われていない。壁厚方向の内部拘束については、従来の解析結果と本研究で提案する解析結果に大きく異なる点はないようである。

5. 非線形温度解析方法の検証

壁厚の異なる壁状構造物について、セメントの水和発熱過程の温度依存性を考慮した非線形温度解析と従来の温度依存性を考慮しない線形温度解析を行った。これらの結果より、現実を忠実に模擬していると思われるセメントの水和発熱過程と熱伝導を連成して解く方法が、少なくとも従来の手法と壁状構造物に対して大きく異なることが認められた。しかしながら、温度解析方法の有効性は、解析結果について比較することによってのみ議論することはできない。実際の構造物レベルに対してセメントの水和発熱過程の非線形性を考慮した温度解析方法を適用して、温度解析結果と実測値との適合性を確認することによって、初めてその有効性が検証されるのである。ここでは、温度解析における温度非線形性を考慮することの有効性を検証するために、実験室レベルにおける試験体の温度履歴の実測値とその数値解析結果とを比較する。

温度を測定した試験体は、図-9に示すような一辺が約0.6 mの立方体で、供試体表面での熱の放散の程度を変化させるために、全面を断熱材で覆った場合とそ

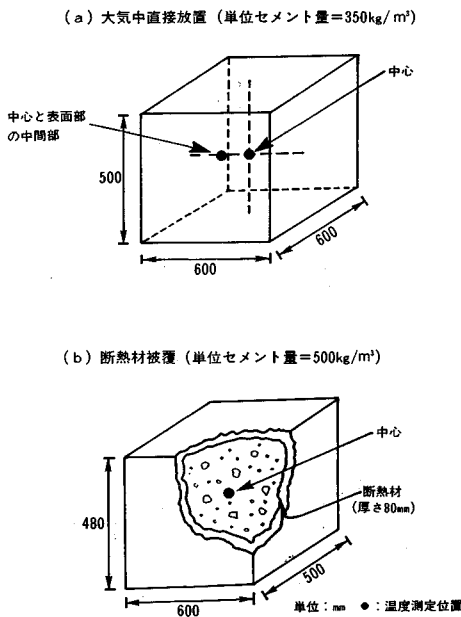
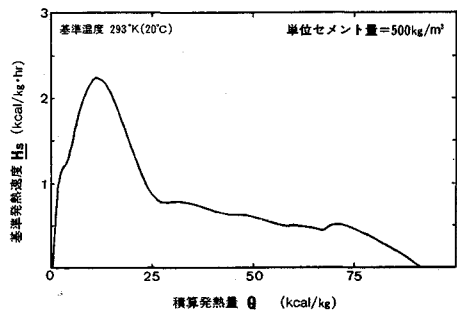


図-9 温度を測定した試験体の概要

でない場合の2種類とした。試験体に用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用し、単位セメント量を断熱材で覆った場合が500 kg/m³、そうでない場合が350 kg/m³とした。断熱材には、厚さが8 cmの発泡スチロールを使用した。試験体は、風の少ない屋内実験室内に放置し、内部の温度と室温の変化を測定した。

解析に用いた熱特性値のうち、熱伝達率は、コンクリートの打込み後2週間が経過した段階の、供試体の温度変動と外気温度の変動から解析的に求めた。すなわち、コンクリートの発熱速度が十分に小さくなった段階の供試体の温度変動は、外気温度変動に支配されるとして、材令2週以後における温度の実測値に解析値が一致するように間接的に熱伝達率を決定した。この結果、熱伝達率は、断熱材で被覆した場合が0.425 kcal/m²hr°C、そうでない場合が10 kcal/m²hr°Cとした。また、比熱は、コンクリートの配合から各使用材料の比熱と構成比率から単純に計算により求めた²⁾。熱伝導率は、温度解析で従来から一般的に適用されている値とし、2.0 kcal/mh°Cを用いた。コンクリートの発熱特性は、鈴木らの方法によって算出されたセメントの活性化エネルギー $E(Q)$ と基準水和発熱速度 $H_0(Q, T_0)$ を用いた²⁾。単位セメント量が500 kg/m³の場合について、解析で用いたコンクリートの発熱特性を図-10に示す。

(a) 基準発熱速度



(b) 活性化エネルギー

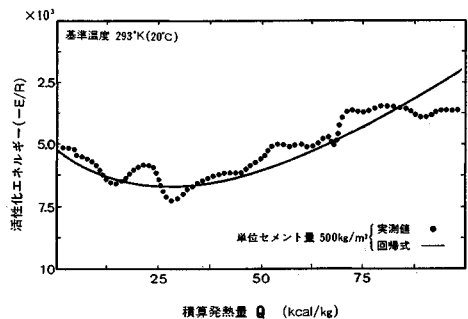
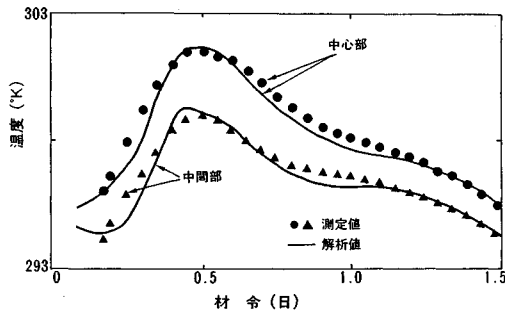
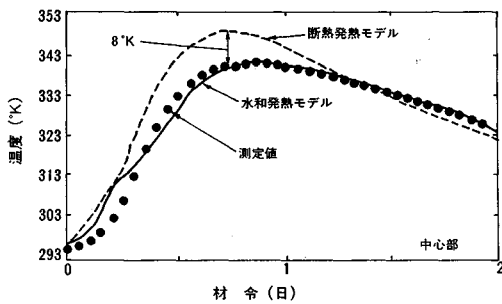


図-10 基準発熱速度と活性化エネルギー



図—11 大気中に直接放置した試験体の温度変化



図—12 断熱材被覆試験体の温度変化

図—11は、単位セメント量が 350 kg/m^3 で、試験体表面を大気中に放置した場合について、温度の実測値とセメントの水和発熱過程の温度依存性を考慮した非線形温度解析による解析値とを相互に比較したものである。図中では、試験体の中心部および中心部と表面との中間部の2ヶ所における温度変化を比較している。試験体のいずれの部位においても、実測値と解析値とは良く一致している。このように、試験体表面からの放熱が大きく、温度上昇が緩やかとなる場合について、セメントの水和反応が抑制され、水和発熱速度が緩やかになることを適切に温度解析において評価できていることが認められる。

図—12は、単位セメント量が 500 kg/m^3 で、表面を断熱材で被覆した試験体を大気中に放置した場合について、試験体中心部における温度の実測値と温度解析結果とを比較したものである。温度の解析値は、セメントの水和発熱過程の温度依存性を考慮した非線形温度解析と比較のために、従来の線形温度解析による結果についても示している。

この図より、温度の実測値と非線形温度解析による解析値とは、比較的良好に一致しているが、従来の断熱温度上昇量に基づく線形温度解析では材令初期より実測値を大きく上回り、最高温度上昇値では約 8°C 大きく算定していることが認められる。なお、本実験のコンクリートには高性能減水剤を使用した。解析に用いた鈴木ら

の材料関数 $E(Q)$ と $H_g(Q, T_g)$ は、通常の AE 減水剤を使用したコンクリート中のセメントに与えられたものである。したがって、コンクリートの打込み後 0.3 日程度における解析精度は若干劣っている。

この試験条件では、前述の試験体に比較して、試験体表面からの放熱が少ないため蓄熱効果が大きく、さらに単位セメント量が多いことから温度上昇速度も大きくなる。しかし、外気温と供試体表面部の温度差も大きくなり、試験体表面からの放熱により、断熱状態における水和発熱過程を全部位に仮定することはできない。このような場合においても、非線形温度解析は、試験体表面からの放熱によりセメントの水和反応が抑制され、水和発熱速度が緩やかになることを適切に評価していることが認められる。

以上の解析的、実験的検討から、対象とするコンクリート部材の各部位において、異なる水和発熱過程を熱伝導解析に取り入れること、すなわち、より現実に則したモデル化を行うことが、今後、コンクリートの温度解析の精度向上に不可欠な要因であるといえよう。

6. 結 論

本研究において、熱伝導方程式と温度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提示した。壁状構造物のように、放熱等の影響が相対的に大きい場合には、すべての部位で断熱温度状態における水和発熱過程を等しく仮定する従来の線形温度解析方法は、必ずしも十分でないと思われる。ある範囲の壁厚と単位セメント量の組合せによっては、構造物の各部位におけるセメントの水和発熱過程をそれぞれ厳密に追跡していく、より現実に則した非線形温度解析方法の必要性が示唆された。また、このことから強制的に冷却を受ける構造物や熱の移動が大きく現われる条件では、従来の線形温度解析方法では不十分となることも示唆していると思われる。以下に、本研究で得られた結論を要約する。

(1) 温度履歴に依存する水和発熱過程と熱伝導方程式との連成問題は、温度に関する非線形方程式となる。この場合、Newton 法による非線形繰り返し計算が有効である。

(2) 放熱を受ける一次元熱伝導状態下において、解析領域における壁厚が 1 m 以上の場合には、構造物の各部位ごとに異なる水和発熱過程を考慮した非線形温度解析と、すべての部位に等しい断熱温度状態の水和発熱を仮定した従来の線形温度解析とは、ほぼ等しい温度上昇値と温度分布を与える。

(3) 一般的に採用されている、壁厚が $25 \sim 50 \text{ cm}$ の範囲では、従来の線形温度解析と現実に近い非線

形温度解析では、最高温度上昇値の予測において、温度上昇値に対して30%程度の差が現われることが解析的に認められた。このことから、強制的に冷却を受ける構造物や熱の移動が大きく現われる条件でも、従来の線形温度解析方法では不十分となることが示唆された。

(4) 単位セメント量が多くなるほど、(3)で指摘した解析方法による差は拡大する。

(5) 壁の中心部と表面部に生じる温度勾配に関しては、両解析方法による差は、(3)に述べた最高温度上昇値の差に比較して相対的に小さい。

(6) 提案した非線形温度解析方法において、コンクリートの水和発熱モデルの設定に対する考え方は、従来の考え方と基本的に同様であり、非線形温度解析の実施に要する労力も、従来の線形温度解析で必要となる労力と同程度と思われる。

単位セメント量の多いコンクリートを用いた、比較的大型の壁状構造物やブロック状のコンクリート構造物を対象とする場合、温度解析の精度の向上には、温度に依存する水和発熱過程と熱伝導との連成を考慮することが必要である。

謝 辞：本研究は、文部省科学研究補助金・試験研究(No. 01850107)の一部を受けて行ったものである。また、本研究を遂行するにあたり、住友セメント(株)

横田紀男氏、鈴木康範氏、佐藤利幸氏の各氏には、多大なご支援とご助力を賜りました。ここに、深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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委員会報告，p.98，1985年11月。
- 2) 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，第414号/V-12，pp.155~164，1990年2月。
- 3) 内田清彦・榑原弘幸・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年4月。
- 4) たとえば，矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，1983年。
- 5) 鈴木康範・原田修輔・前川宏一・辻 幸和：温度解析における断熱温度上昇試験結果の適用性，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.25~28，1985年。
- 6) 鈴木康範・原田修輔・前川宏一・辻 幸和：コンクリートの断熱温度上昇試験装置に関する性能試験方法について，土木学会論文集，第402号/V-10，pp.81~86，1989年2月。
- 7) 鈴木康範・原田修輔・前川宏一・辻 幸和：新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の定量化，土木学会論文集，第396号/V-9，pp.109~117，1988年8月。
(1990.6.21・受付)