

清水建設(株)計算センター 正員 大内智範

清水建設(株)原子力部 手塚 徳

清水建設(株)土木技術部 正員 小野 定

1 はじめに

マスコンクリートの温度上昇に関する研究は、1930年代のBoulder Damの研究、Carlson, McHenry, R. E. Glover, A. D. Rossらの一連の研究に端を発して、今日まで多くの研究がなされてきた。初期の研究は、温度上昇の解析方法に主眼が置かれており、それらの方法は現在でも広く使用されている。

また、電子計算機の著しい発達にともない、マスコンクリート温度の解析においても、有限要素法(FEM)や有限差分法(FDM)の解析方法が一般的になりつつある。特に、FEMは施工段階における形状の変化、硬化熱過程、外気温の変化等をモデル化してシミュレートし解析する方法の一つとして有効である。しかしながら、本方法を実際問題に適用する場合には、データの作成等に多くの苦労が払われている。

本報は、数値解析例によりマスコンクリートの温度解析にFEMを適用した場合の問題点について検討したものである。

2 FEMによる数値解析上の問題点とその一解決について

マスコンクリートの水和熱による温度上昇の問題は、よく知られているように、非定常熱伝導問題として解析できる。特別な場合を除いて二次元問題として解析することができ、また、熱伝導式は次式によって与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y}) + Q(t) = Cc \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

部材表面部では、

$$\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} l + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} m + \alpha (\theta - \theta_a) + q = 0$$

ここに、Cc: コンクリートの比熱 (Kcal/Kg°C)

ρc : 単位体積重量 (Kg/m³)

λ_x, λ_y : x, y 方向の熱伝導率 (Kcal/mhr°C)

Q: 発熱量

θ : 温度 (°C)

θ_a : 外気温 (°C)

α : 熱伝達係数 (Kcal/m²hr°C)

q: 表面の熱流束 (Kcal/m²hr°C)

表-1 数値計算計算因子および水準

計算項目	計算式	計算結果
1. 材料定数		
2. 材料定数		
3. 材料定数		
4. 材料定数		
5. 材料定数		
6. 材料定数		
7. 材料定数		
8. 材料定数		
9. 材料定数		
10. 材料定数		

(注) 1. 内の数字は、計算結果

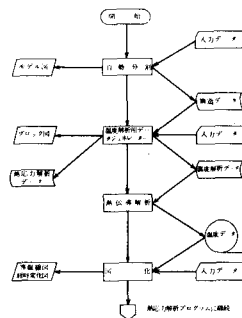


図-1 マスコンクリート温度解析システム流れ図

これらの式を満足する汎関数を最小にすれば解が得られるわけであるが、数値計算では ∂t ごとに発熱量等を与えて、各ステップで温度 $\{\theta\}$ を未知数とした連立方程式を求めて解かなければならない。

このような手順を施工段階に従って繰返すわけであるが、このため一般に多くの労力と費用がかかりすぎている。この点がマスコンクリート温度の数値計算にFEMを適用する場合、一つの障害となっている。

具体的にいうと、FEM解析に於けるデータ作成作業上の主要な問題点は次のようである。要素分割、節点座標等のデータ作成作業を人力でやると多大の労力が必要である。特に、解析対象部材が大きい場合にはこの問題が大きい。マスコンクリートの施工段階を追った解析では、施工段階ごとに解析モデルが変化し、それに伴う境界条件の変更が必要となる。また、施工段階ごとの発熱過程も時間とともに変わる。これらをすべての施工段階ごとにデータとして作成すると作業量は膨大なものになってしまう。

この問題を解決するために、要素の自動分割、温度解析用データの作成を自動化することにより、大巾に数値計算の準備作業を省力化することができた。図-1 にマスコンクリート温度解析システムの流れ図を示す。

3 数値計算例および考察

図-2 に示すような構造物の基礎スラブを対象にして具体的に数値計算を行った。境界条件は図-3 に示すように、モデル両端は断熱境界、下面は温度固定境界、また、各ブロックの外気に接する面は熱伝達境界とした。表-1 に主な計算因子および水準を一覧にして示す。コンクリートの断熱温度上昇特性は、コンクリートの断熱温度上昇試験結果を分割した時間内で2次曲線で近似して入力している。

図-3 に要素分割図、また、図-4 にブロック割図を示す。計算は1ブロック打込み開始後138日間行ったが、要素分割および温度解析用データの作成を自動化したことにより、約3万ステップの入力データをわずかに500ステップ程度で処理している。従来はこのように膨大なデータを入力で作成するには多大な労力を必要とし、また、その間には多くのミスを伴うものである。

図-5 に打込み後20日目の温度分布図、図-6 に同じく20日目の熱流図、さらに、図-7 に1ブロック中央部のコンクリート温度の経時変化を示した。本数値計算例におけるコンピュータの所要時間は約15分(IBM S370/158 使用)である。

このように、マスコンクリートの温度解析、特に大規模なマスコンクリート構造物の温度解析にFEMを適用する場合、要素分割、解析データの作成等を省力化する措置を講じなければ実用性に欠けると考えられる。

本解析システムをまとめるに当たり、プログラム作成に当たった当社計算センターの真瀬伸治氏及び非定常熱伝導解析プログラムの利用指導に当たった当社土木開発部の植田、川崎両氏に本文をかりて感謝の意を表します。

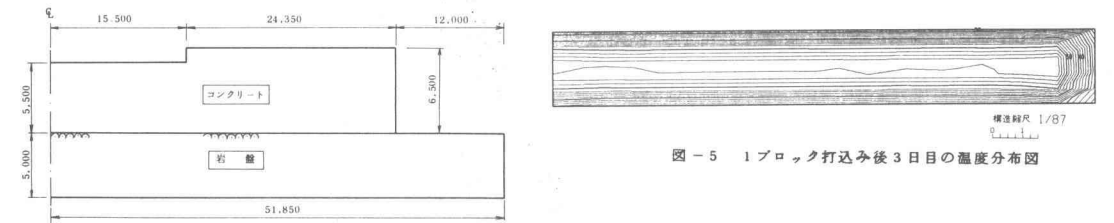


図-2 温度解析の対象としたマスコンクリート構造物

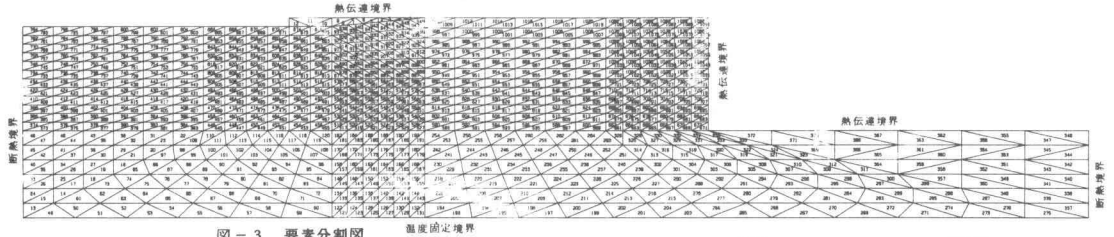


図-3 要素分割図

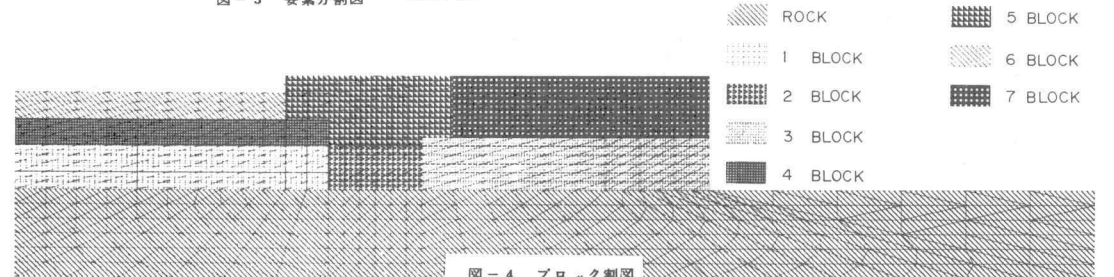


図-4 ブロック割図

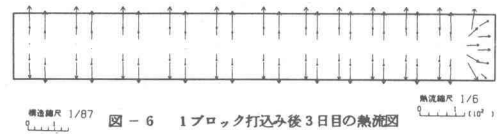


図-6 1ブロック打込み後3日目の熱流図

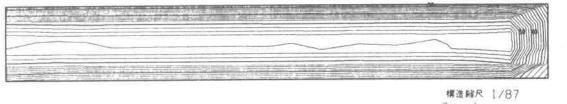


図-5 1ブロック打込み後3日目の温度分布図

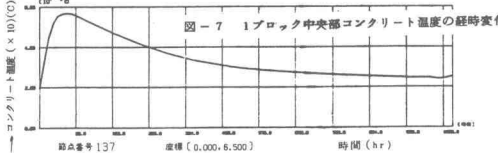


図-7 1ブロック中央部コンクリート温度の経時変化