

## マスコンクリートの硬化熱による熱伝導および熱応力解析システム

清水建設株式会社技術部 正員 小野 定

清水建設株式会社計算センター 真頼 伸治

清水建設株式会社原子力部 手塚 徳

### 1. はじめに

マッシブなコンクリート構造物いわゆるマスコンクリートでは、コンクリート打込み後、コンクリートの硬化熱による温度上昇、降下に伴って体積変化が生じる。この体積変化が、内的あるいは外的に拘束された場合、部材内に引張および圧縮応力が発生する。この内、圧縮応力は一般に問題とならないが、引張応力がコンクリートの引張強度を超えた場合に発生すると考えられる温度ひびわれは、構造物の耐力、機能等に大きな影響を及ぼすため、マスコンクリートの設計・施工上重要な問題である。

従来、この問題は、熱伝導問題と熱応力問題の二つに大別して解析されており、種々の解析方法が提案されている。例えば、熱伝導問題では、コンクリート打込み後の温度上昇の解析法として、Boulder Damの研究、Carlson, McHenry, R.E. Glover, A.D. Rossの方法がある。これらの方法に共通することは、境界条件を単純化して、非定常熱伝導式を厳密解あるいは差分により解いていることである。境界条件等を簡略化せざるを得なかった主たる理由の一つとして、当時の計算能力不足が考えられる。

近年電子計算機の著しい発達にともない、マスコンクリート施工時の硬化熱による熱伝導および熱応力解析においても、有限要素法(FEM)や有限差分法(FDM)等の解析法が一般的になりつつある。特に、FEMは構造物の施工段階における形状変化、硬化熱過程、外気温の変化、ブロック相互の影響等をモデル化し解析する方法の一つとして有効である。

しかしながら、FEMをマスコンクリート施工時の問題に適用する場合、一般にはデータの作成等に多くの労力を要するため、実際には余り使用されていないのが実状である。

本報は、FEMによるマスコンクリート施工時の硬化熱による熱伝導および熱応力の解析システムならびにFEMを適用した場合の問題点について述べたものである。

### 2. FEMによる数値解析上の問題点とその一解決

#### (1) 解析法

マスコンクリートの硬化熱による温度上昇・降下、およびそれに伴う熱応力は非定常問題として解析できる。非定常熱伝導式は次式によって与えられる。

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

ここに、 $\lambda_x, \lambda_y$ :  $x, y$ 方向の熱伝導率( $\text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ )、 $\theta$ : 温度( $^\circ\text{C}$ )、 $Q(t)$ : 発熱量、 $c$ : コンクリートの比熱( $\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )、 $\rho$ : コンクリートの単位体積重量( $\text{kg/m}^3$ )

上式を満す汎関数 $\chi$ は、境界処理を含めて表示すれば次式によって表わすことができる。

$$\chi = \iint \left[ \frac{1}{2} \{ \lambda_x (\frac{\partial \theta}{\partial x})^2 + \lambda_y (\frac{\partial \theta}{\partial y})^2 \} - \{ (Q - c \rho \frac{\partial \theta}{\partial t}) \theta \} \right] dx dy - \int_0^t \int_S \delta \theta ds + \int_0^t \int_0^1 \frac{1}{2} \alpha (\theta - \theta_a)^2 ds$$

ここに、 $\delta$ : 表面の熱流束( $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ )、 $\alpha$ : 表面の熱伝達係数( $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ )、 $\theta_a$ : 外気温( $^\circ\text{C}$ )

この汎関数 $\chi$ を最小にすれば前述した熱伝導式の解が求まる。

熱応力は、まず熱伝導解析の結果求められた時刻ごとの温度分布から、熱応力解析に必要な等価節点力を求める。要素を $\Delta T$ の温度変化に対して拘束する力を $\{O_i\}$ とし、変位 $\{d\}$ による各要素の応力を $\{O_i\}$ とすれば、熱

応力は、 $\{0\} = \{0_0\} + \{0_1\}$ によって与えられる。

数値計算では、20ごとに硬化熱、外気温、弾性係数等を与えて、各ステップ毎に各要素の温度、応力を求める。

④数値計算上の問題点とその一解決

前述した手順を施工段階に従って繰り返すわけであるが、このために一般に多くの労力と費用を必要とする。この点から、マスコンクリート施工時の熱伝導、熱応力の数値計算にFEMを適用する場合、一つの障害となっている。

具体的には、FEM解析に於けるデータ作成作業に大きな問題がある。要素分割、節点座標等のデータ作成作業を人力で行えば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。さらに、マスコンクリートの施工段階をトレースする解析では、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化する。これらをすべて施工段階ごとのデータとして作成すれば、その作業量は膨大なものになるのが一般的である。

これらの問題点を解決した、解析システムの流れ図を図-1に示す。このシステムの特徴は、要素の自動分割および解析用データ作成の自動化を導入して、従来問題とされていた数値計算の準備作業を大巾に省力化していることである。

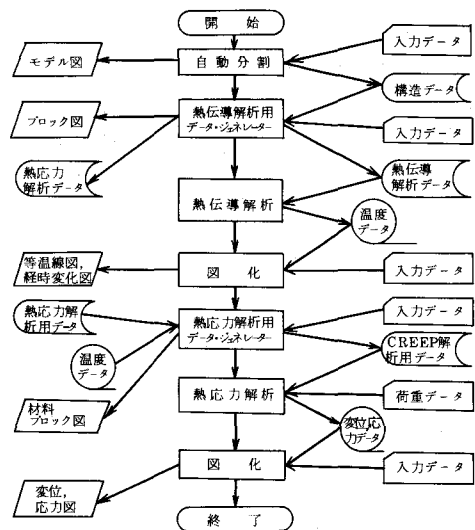


図-1 マスコンクリート熱伝導および熱応力解析システム流れ図

3.数値計算例

岩盤上に建設する構造物の基礎スラブを例にして、数値計算例を示し、先に述べた点について検討した。

①解析モデル

解析した構造物の形状寸法を図-2に示す。スラブ厚は5.5～6.5mである。図-3は要素分割図を示したものである。節点数が594、また要素数が1092である。境界条件は、図-3に示すように、モデル両端は断熱境界、各ブロックの外気に接する面は熱伝達境界とし、さらに、GL-5.0mを不易層とみなして温度固定境界とした。

図-4はブロック割図を示したものである。全体を7つのブロックに分割してコンクリートを打込むとしている。最終ブロックを打込むまでに要する日数は122日である。ブロック割図のアウトプットは、各ブロックが一目で区別できるように模様分けしてある。

②計算因子および水準

主な計算因子および水準を一覧にして表-1に示す。コンクリートの発熱(断熱温度上昇)は、分割した解析

表-1 解析で考慮した主要因子およびその水準

| №  | 因 子                               | 水 準                                                                                                              |
|----|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 打込み温度 (℃)                         | (1) 19.6, (2) 21.8, (3) 24.0, (4) 24.0, (5) 18.9, (6) 15.3, (7) 13.8                                             |
| 2  | 地盤初期温度 (℃)                        | 13.5                                                                                                             |
| 3  | コンクリートの熱伝導率(kcal/mh℃)             | 1.4                                                                                                              |
| 4  | コンクリートの比熱(kcal/Kg℃)               | 0.21                                                                                                             |
| 5  | 地盤の熱伝導率(kcal/mh℃)                 | 2.23                                                                                                             |
| 6  | 地盤の比熱(kcal/Kg℃)                   | 0.457                                                                                                            |
| 7  | コンクリートの断熱温度上昇                     | $Q(t) = 41.2(1 - e^{-0.880t})$                                                                                   |
| 8  | 熱伝達係数(kcal/m <sup>2</sup> h℃)     | 13.0                                                                                                             |
| 11 | コンクリートの単位体積重量(Kg/m <sup>3</sup> ) | 2267                                                                                                             |
| 12 | 地盤の単位体積重量(Kg/m <sup>3</sup> )     | 1680                                                                                                             |
| 13 | コンクリートのポアリン比                      | 0.167                                                                                                            |
| 14 | コンクリートの弾性係数(Kg/cm <sup>2</sup> )  | $E_3 = 2.06 \times 10^5$ , $E_7 = 2.64 \times 10^5$<br>$E_{20} = 2.90 \times 10^5$ , $E_{28} = 3.06 \times 10^5$ |
| 15 | コンクリートのクリープ                       | $C_1 = \frac{1}{0.0537 + 0.0036t} \times 10^{-6}$                                                                |
| 16 | 岩の弾性係数(Kg/cm <sup>2</sup> )       | 1.0 <sup>5</sup>                                                                                                 |

時間内で2次曲線により近似して入力している。  
外気温は可然に建設地の平均気温を入力している。

### ③結果および考察

数値計算は1ブロック打ち込み開始後138日間行ったが、要素分割および熱伝導・熱応力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500ステップ程度で処理している。従来はこのような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、作成作業には多くのミスを伴っている。

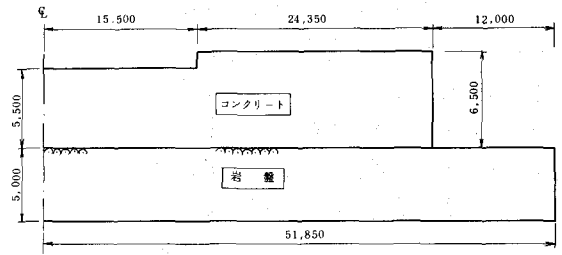


図-2 解析の対象としたマスコンクリートの構造物

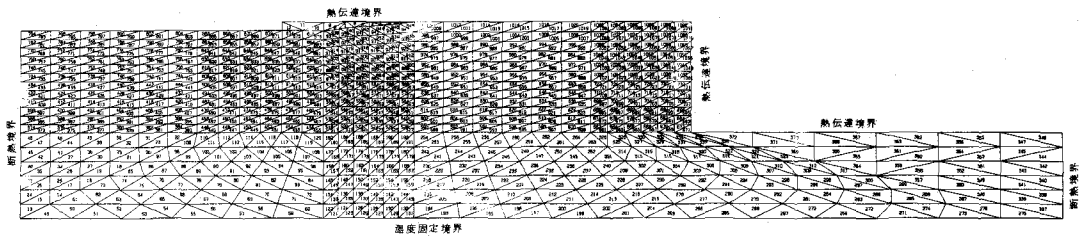


図-3 要素分割図

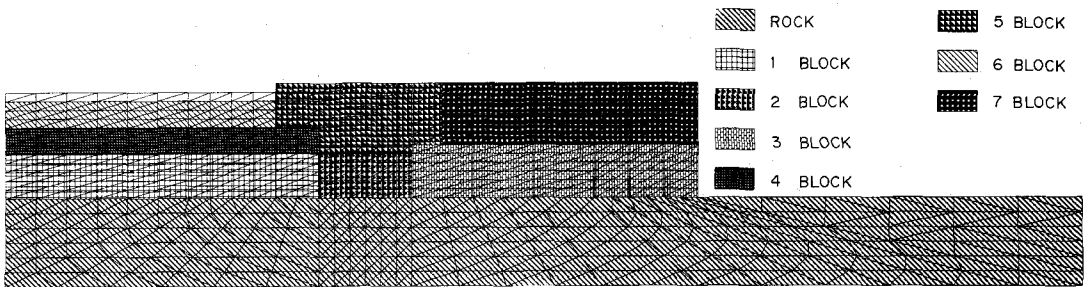


図-4 ブロック割図

このようなことから、要素分割、解析データ作成等の自動化により、マスコンクリートにおいても最適配合あるいは最適ブロック割等をコンピュータによる数値実験で選定することが現実的なものになると考えられる。

図-5に1ブロック打ち込み後3日目の温度分布、図-6に同じく3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す。計算結果はテープにファイルしておき、所要の材料の結果をプリントアウト

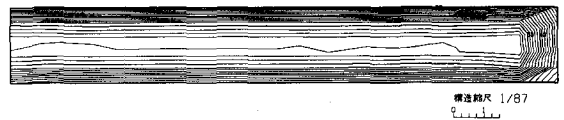


図-5 1ブロック打ち込み後3日目の温度分布図

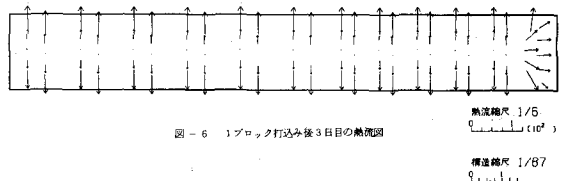


図-6 1ブロック打ち込み後3日目の熱流図

トすることができる。

図-8は図-7に示した1ブロック中央部と表面部のコンクリート温度の結果をFDMによる結果と比較したものである。中央部については、材令14日後両者間に2℃程度の差が認められるが、両者はほぼ一致した結果が得られている。表面部についても同様である。

図-9に1ブロック打込み後3日目の変位、図-10に同じく3日目の主応力、さらに、図-11に6ブロック打込み後10日目の主応力を示す。本システムにおける熱応力解析は、各解析時刻毎にクリープによる応力緩和を考慮した有効弾性係数を入力して行っている。このような手法でクリープを考慮した主たる理由は、クリープ解と弾性解(有効弾性係数で解析)との差が大きいこと、さらに、クリープ解析を行った場合、解析時間が飛躍的に大きくなり、マスコンクリートの問題のように何ケースかシミュレーションを必要とする場合の手法としては妥当でないといったことである。

本数値計算例におけるコンピュータの所要時間は約30分(IBM S370/158使用)である。

まとめとして、マスコンクリートの熱伝導および熱応力解析、特に大規模なマスコンクリートの解析に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システム上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、システム作成の指導に当たった当社計算センターの大内智範及び非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樋田、川崎両氏に本文をかりて感謝の意を表します。

(参考文献) 阿部博俊, 外2名: マスコンクリートの温度応力分布についての考察, 土木学会第30回年次学術講演会, 1975年

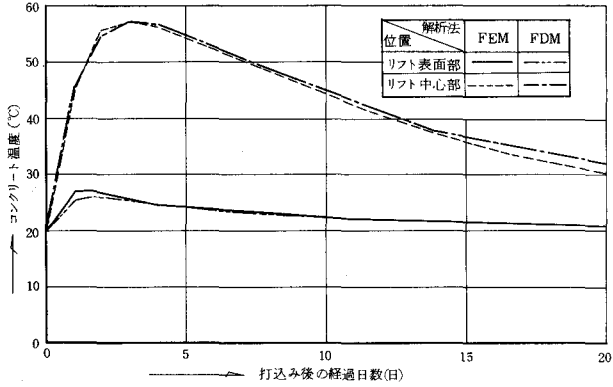
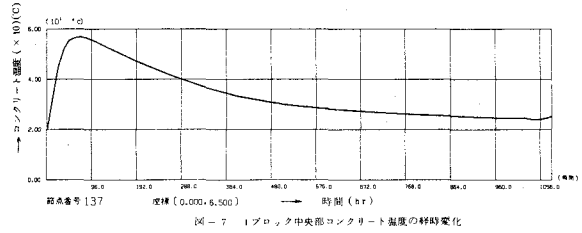


図-8 解析例のFEM解とFDM解の比較



図-9 1ブロック打込み3日目の変位

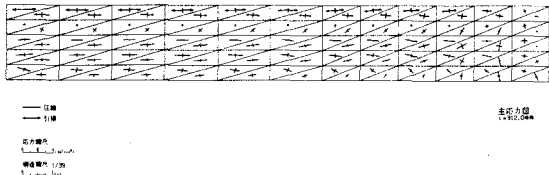


図-10 1ブロック打込み後3日目の主応力

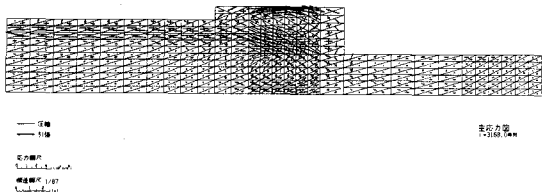


図-11 6ブロック打込み後10日目の主応力