

電中央研究所 正員 阿部博俊

田辺志願

〇原口 晃

## 1 まえがき

近年、断面寸法の大きなコンクリート構造部材が頻繁に使用されるようになり、単位セメント量の大きなマスコンクリートを安全かつ迅速に施工する必要性が増大している。この場合に考慮すべき主たる要因は水和反応によるコンクリート内部の温度上昇及び、冷却にともなう引張応力の発生であることは周知のことである。したがって、この種のマスコンクリートについては、温度上昇の程度を予測し発生する引張応力の大きさを推定する必要がある。

本報告は原子力発電所の原子炉格納容器の基礎マツトコンクリートについて温度分布、ひずみ分布を予測し、これらの結果に基いて、有限要素法による非定常時の温度分布解析および熱応力解析を行って比較検討を行ったものである。

表-1 コンクリートの配合

| 骨材の最大粒径<br>(mm) | 水セメント比<br>(W/C) | 細骨材率<br>(S/G) | 単位量 (kg/m³) |          |            |            |                      |
|-----------------|-----------------|---------------|-------------|----------|------------|------------|----------------------|
|                 |                 |               | セメント<br>(C) | 水<br>(W) | 粗骨材<br>(S) | 細骨材<br>(G) | 水和剤<br>(Plasticizer) |
| 25              | 60              | 44.4          | 315         | 189      | 805        | 1048       | 1.3                  |

## 2 解析に必要な諸定数

解析に用いたコンクリートの熱定数は各々実験によって求めた。その結果は表-2、表-3に示した。また、熱応力を計算する場合、ヤング率も割合によって変化させて実際の状態にできるだけ近似させた。若幹令時の弾性係数は次の様にして求めた。すなわち、まず20℃密封養生条件下のコンクリートの強度とヤング率の関係を求め、積算温度を用いて温度と割合が変化する場合のコンクリートの強度を求めその強度をもとにして弾性係数を決定した。

表-2 コンクリートの熱定数

| 熱伝導率<br>K (Kcal/m·h·°C) | 熱拡散率<br>h² (m²/h) | 単位容積重量<br>ρ (kg/m³) | 比熱<br>D (Kcal/kg·°C) |
|-------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| 1.77                    | 0.00219           | 2356                | 0.343                |

表-3 断熱温度上昇試験結果

| 材料<br>(日) | セメント試験<br>による水加熱<br>(Kcal/kg) | 断熱温度上昇試験<br>水加熱<br>(Kcal/kg) | 温度<br>(°C) |
|-----------|-------------------------------|------------------------------|------------|
| 0.5       |                               |                              | 14.9       |
| 1.0       |                               | 64.6                         | 25.2       |
| 1.5       |                               |                              | 28.2       |
| 2.0       |                               | 76.7                         | 29.9       |
| 2.5       |                               |                              | 30.7       |
| 3.0       |                               | 81.3                         | 31.7       |
| 7.0       | 66.6                          | 87.7                         | 34.2       |
| 10.0      |                               |                              | 34.7       |
| 28.0      | 77.8                          | 89.8                         | 35.0       |

## 3 解析方法

非定常熱伝導の基礎方程式は、次の様に表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + Q - C \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad \text{----- (1)}$$

ただし、未知関数中は温度、 $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  は異方性熱伝導率、 $Q$  は発熱量である。ある指定の時刻における状態を解析する場合、 $\partial \phi / \partial t$  および  $Q(t)$  を解析のみの関数とみなす事でできるので最小化の汎関数は

$$\chi = \iiint \frac{1}{2} \left\{ \left[ k_x \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + k_y \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + k_z \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] - \left[ (Q - C \frac{\partial \phi}{\partial t}) \phi \right] \right\} dx dy dz \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 $\partial \phi / \partial t$  および  $Q(t)$  は不変量、即ちある時刻における場所のみの関数として取り扱う。

境界条件としては、

(1)  $\phi$  の値が境界上では一定 (2) 同定温度境界

(2) 境界上で

$$k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} l_z + q + \alpha (\phi - \phi_0) = 0 \quad \text{----- (3) --- 対流境界}$$

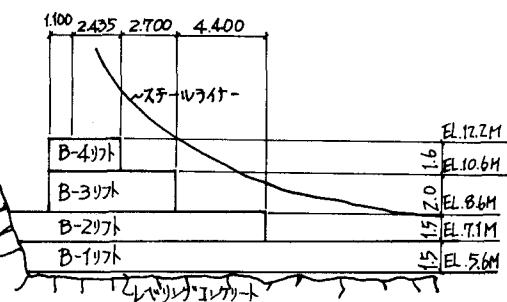
## 4 基礎マツトコンクリートにおける温度・ひずみの変動結果と解析結果

基礎マツトコングリートの温度測定には熱電対を、またひずみの測定にはカーソル型ひずみ計を使用した。  
 なお基礎マツトコングリート部分の工事概要を図-1に示した。

#### 4-1 温度分布

図-1 原子炉格納施設基礎マツトコングリート断面

リフト中心位置における実測値と解析値の1例を図-2に示した。実測結果と解析結果とは、ほぼ一致しているが初期の急上昇カーブがかなり異なっている。このことは同じブロッツ内の位置で打設時期が異なり、そのため部分的に硬化熱が発生する。この様なtime lagの影響を解析では考慮していない事が主たる原因と考えられる。また、温度上昇速度はかなり早く、コングリート打設後1日半～2日でピーク温度に達するのが示されており、中腐熱セメントであってもかなり発熱速度が早いことは、注意を要する点であろう。



#### 4-2 ひずみ分布

カーソル型ひずみ計によって測定した熱膨張ひずみも含めたひずみ変化の1例を図-3に示した。実測結果はいずれの場合も、最高ひずみがコングリート打設後1日半～2日の間に発生し、その後徐々に減少する速度は非常に遅いが、これはコングリート内部がなかなか冷えない事と一致する。

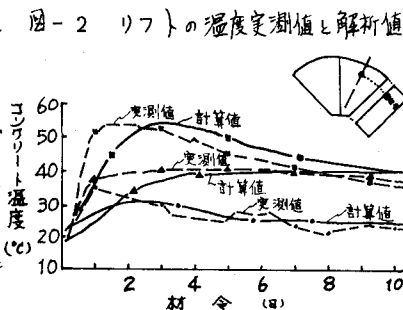


図-3 リフトのひずみ実測値と解析値

#### 4-3 応力分布

岩盤上にコングリートブロックを打設すれば硬化初期過程で、温度膨張が生じ、それは岩盤が拘束する結果、ブロッツ内に圧縮応力が生じる事、また上昇温度が最高に達した後冷却されるに従って、今度は逆に温度収縮が生じ、それは岩盤が拘束する結果コングリートブロック内には逆に引張応力が生じる事は周知の事である。

本解析結果によれば、まず1層のみのコングリートも打設した段階で、温度変化にともなうブロッツおよび岩盤に発生する応力は図-4に示したように変化し、打設後2日～4日間はブロッツ断面全体にバラバラ状の圧縮応力が発生し、最高で  $17.1 \text{ kg/cm}^2$  程度の圧縮応力が発生する事が示されている。冷却されるに従って、上面から引張応力が発生し、材令1ヶ月程度の時にはブロッツ全体に引張応力が生じる事になり、しかもブロッツ中心部に最も大きな引張応力が発生する事が示された。ただし、ここで述べる応力値は全て弾性解であってクリープを考慮した応力値は当日発表する。

図-4 1層リフト打設時の応力分布

図-5は2層のリフトを打設した時の上層リフト、低層リフトの応力分布を示したものである。

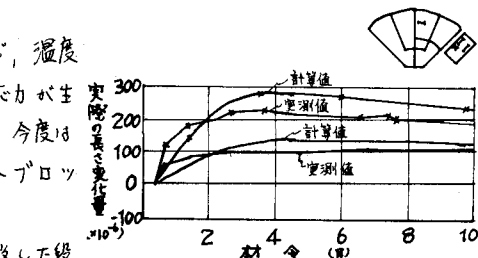
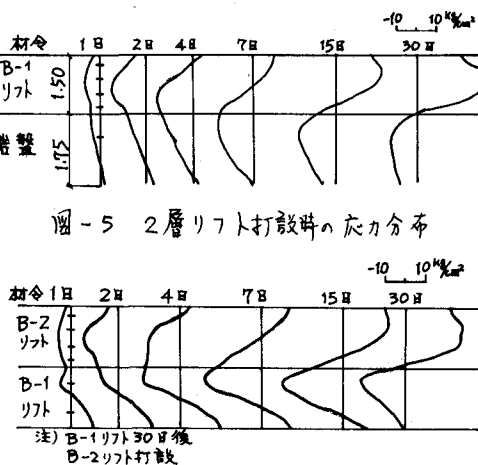


図-5 2層リフト打設時の応力分布



注) B-1リフト30日後  
B-2リフト打設