温度応力を受ける若材令コンクリートの挙動解析

○名古屋大学工学部　学生会員　石川靖晃
名古屋大学工学部　正　会員　田辺忠顕

1．はじめに

打設直後のコンクリート構造物には温度応力が発生することが知られている。この温度応力は、構造物に対し著しい影響を及ぼすため、正確な温度応力解析が必要となってくる。そのためにはコンクリートの諸物性を合理的に評価しなければならない。そこで本研究では、若材令コンクリートを弾性体の骨材と弾塑性体のセメントペーストに分け、その間隙部分には水が満たされていると仮定し、有限要素解析を行った井上[1]の報告を基に温度変化を考慮したモデルの有限要素解析を行った。

2．解析理論

2－1　変形に関する理論

構造物に対し仮想仕事の原理を用いて、力の釣合式をマトリックス表示すると

$$K_T\frac{d\{\bar{u}\}}{dt}-L\frac{d\{\bar{p}\}}{dt}-A\frac{d\{\bar{T}\}}{dt}-\frac{d\{f\}}{dt}=0 \tag{1}$$

ただし、$\{\bar{u}\}$は、節点変位、$\{\bar{p}\}$は、節点間隙水圧、$\{\bar{T}\}$は、節点温度、K_Tは、接線剛性マトリクス、Lは、間隙水圧力マトリクス、Aは、温度外力マトリクス、$\{f\}$は、表面力、物体力ベクトルである。

さらに、コンクリート中の間隙水の流れがDarcy の法則に従うと仮定し、流れを支配する連続方程式をGalerkin法を用いて離散化し、マトリックス表示すると

$$H\{\bar{p}\}-S\frac{d\{\bar{p}\}}{dt}-L^T\frac{d\{\bar{u}\}}{dt}-W\frac{d\{\bar{T}\}}{dt}-\{f_p\}=0 \tag{2}$$

ただし、Hは、流れマトリックス、Sは、液体と固体の圧縮性を示すマトリックス、Wは、温度による流出量のマトリクス、$\{f_p\}$は、外力の変化である。

（１）（２）を結合してマトリクス表示すると

$$\begin{bmatrix}[0] & [0]\\ [0] & [H]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\bar{u}\}\\ \{\bar{p}\}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[K_T] & -[L]\\ -[L^T] & -[S]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\frac{d\{\bar{u}\}}{dt}\\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\frac{d\{\bar{f}\}}{dt}+A\frac{d\{\bar{T}\}}{dt}\\ \{f_p\}+W\frac{d\{\bar{T}\}}{dt}\end{Bmatrix} \tag{3}$$

この方程式は、K_Tが対称であるので、この一般的な方程式の対称性は保証される。そして初期条件が既知であれば解を得ることができる。具体的には、次の差分行列方程式より求めることができる。

$$\begin{bmatrix}[K_T] & -[L]\\ -[L^T] & \frac{\Delta t}{2}\cdot[H]-[S]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\bar{u}\}\\ \{\bar{p}\}\end{Bmatrix}_{(t+\Delta t)}-\begin{bmatrix}[K_T] & -[L]\\ -[L^T] & \frac{\Delta t}{2}\cdot[H]-[S]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\bar{u}\}\\ \{\bar{p}\}\end{Bmatrix}_{(t)}$$

$$=\Delta t\begin{Bmatrix}\frac{d\{\bar{f}\}}{dt}+A\frac{d\{\bar{T}\}}{dt}\\ \{f_p\}+W\frac{d\{\bar{T}\}}{dt}\end{Bmatrix} \tag{4}$$

2－2　熱伝導に関する理論

等方性連続体における非定常熱伝導方程式は

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2T}{\partial z^2}\right)+\dot{Q} \tag{5}$$

ただし、ρ は、物体の密度、c は、物体の比熱、λ は、熱伝導率、$\dot{Q}$ は、発熱率である。
この方程式を数値解析することによって任意の場所、時間の温度を求めることができる。

2－3　降伏条件について

セメントペーストは弾塑性体であるから、適当な降伏条件を与え塑性と弾性の判定をしなければならない
本研究ではDrucker-Pragerの破壊基準を用いることにした。式で示すと

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \tag{6}$$

ただし、 $\alpha = \dfrac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}$　$, k = \dfrac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}$　(7)

ここで、α は内部摩擦角、k は粘着力であり、I_1 、J_2 は以下に定義する不変量である。

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \tag{8}$$

$$J_2 = \{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2\} + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \tag{9}$$

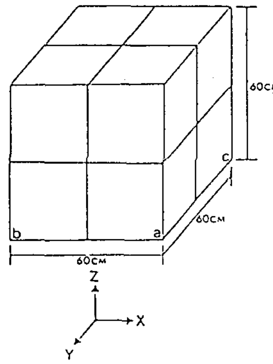
$F \geqq 0$ を満たすとき塑性ひずみが生じる。

3．解析方法

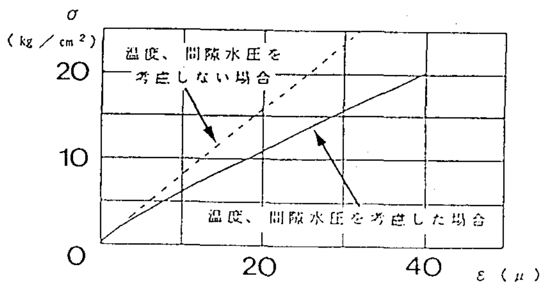
有限要素解析の対象とした要素モデルを図－1に示した。これを3次元アイソパラメトリック要素モデルとし、各時間毎に温度履歴を求め、それを用いて各ステップで変形解析を行った。

境界条件として、温度解析では上端と下端の両面をz方向に固定し、固定した部分の温度は常に一定であるとした。応力解析では上端と下端の各節点をz方向に固定し、さらに剛体変形が生じないようにa点をx、y方向、b,c点をそれぞれx方向、y方向に固定した。また、本研究では温度変化によって発生した力のみを外力として与えた。

解析結果を図－2に示した。この図は、ある積分点においての応力－ひずみ関係を表したものであるが、勾配が徐々に変化して、有効応力が増大していることを示している。現在の段階では、ヤング率を一定にして解析しているが、得られた曲線は間隙水圧の影響を表しており、更に詳細な検討を加えたいと考えている。



図－1　要素モデル



図－2　σ－ε曲線

参考文献

1）井上　健：岩材令コンクリートの構成則に関する基礎的研究，１９８８年度名古屋大学卒業論文

2）矢川元基，宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，１９８５