

○名古屋大学 学生員 石川靖晃
名古屋大学 正会員 田辺忠顕

1. はじめに

打設後1週間ないし1カ月間に発生するひび割れは、水和熱による温度が主な原因となっている場合が多い。そこで、打設直後のコンクリートの応力解析が必要となってくるが、打設直後すなわち若材令コンクリートは硬化後のコンクリートとは材料の性質が異なるためコンクリートの諸物性を適格に評価しながら解析を行わなければならない。当研究室の井上らは若材令コンクリートを他孔質弾塑性材料としてのモデル化を行ったが、そこでは、水和熱による温度変化が実際には取り扱われていなかった。そこで本研究では井上らが行った研究を踏襲しつつ温度変化を考慮にいたした挙動の解析を行った。

2. 解析理論

コンクリート全体の弾塑性マトリクスは

$$D_T = \left[\frac{V_1}{V} [D_1]^{-1} + \frac{V_2}{V} [D_2]^{-1} \right]^{-1} \quad (1)$$

と表される。但し V_1 、 V_2 は骨材、セメントペーストの体積、 V は全体の体積、 $[D_1]$ は骨材の弾性マトリクス、 $[D_2]$ はセメントペーストの弾塑性マトリクスである。井上らはコンクリート全体を弾塑性マトリクスと考えたのに対し本研究では、セメントペーストのみを弾塑性マトリクスと考えた。

仮想仕事の原理を用いて要素の釣合方程式を書く

$$K_T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{f\}}{dt} = 0 \quad (2)$$

但し $\{\bar{u}\}$ $\{\bar{p}\}$ $\{\bar{T}\}$ は節点変位、節点間隙水圧、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 は温度節点力マトリクス、 $\{f\}$ は外力ベクトルである。

流れを支配する連続方程式は

$$H\{\bar{p}\} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \{f_p\} = 0 \quad (3)$$

と表される。但し H は流れマトリクス、 S は液体と固体の圧縮性を示すマトリクス、 W は温度変化による流出を示すマトリクス、 $\{f_p\}$ は外部からの流入を示すベクトルである。(2)(3)式において $\{\bar{T}\}$ に関する項は本研究で初めて取り扱っており、以下の数値解析では、温度解析を別に行い各温度増分をこれらの式中に外力項として加えた。

(2)(3)を結合してマトリクス表示すると

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L^T] & -[S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ \{f_p\} + W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

具体的には次の差分方程式に境界条件を与え、解を得ることが出来る。

$$\begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L^T] & \frac{\Delta t}{2} \cdot [H] - [S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix}_{(t+\Delta t)} - \begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L^T] & -\frac{\Delta t}{2} \cdot [H] - [S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix}_{(t)} = \Delta t \begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ \{f_p\} + W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

3. 解析方法

解析の対象とした任意のコンクリートを図3-1に示す。これを3次元アイソパラメトリック要素で分割し、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、下端の両面の温度を常に一定とし、応力解析では上端、下端の各節点のz方向変位を0とした。また、要素の表面において間隙水圧を0とし、さらに温度によって発生した力のみを外力として与えた。

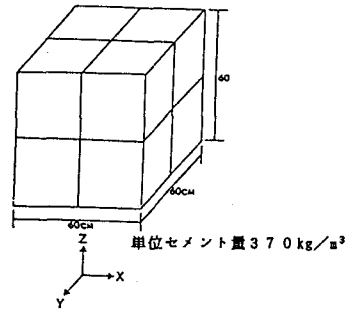


図3-1 コンクリート要素モデル

4. 解析結果及び考察

温度分布は単位セメント量 370 kg/m^3 として解析を行い中心部の温度分布として図4-1に示すものを、次の応力解析に用いた。場所毎の有効応力-有効ひずみ関係、間隙水圧-有効ひずみ関係を図4-2、4-3に示す。有効応力と間隙水圧の割合は要素の外側に行くほど小さくなっている。言い換えれば要素の内部に行くほど間隙水圧の影響を受ける。間隙水圧は時間と共に減少し、その圧力変化はコンクリート中の応力変化を起さしめ、ひずみ変化を生じさせる。従来、若材令コンクリートのクリープが複雑で実験的にも定説はないと言われてきているが、この間隙水圧の変化がその原因である可能性もある。

ある場所においての有効応力-時間関係を図4-4に示す。4日後ぐらいで要素内部の温度は外気温と同じくらいまで下がるので、引張応力が生じているが、この引張応力はかなり大きな値となった。もちろんこれがひび割れの原因となる応力であるが、これらの値自身が先に述べた間隙水圧などの影響を受けている。

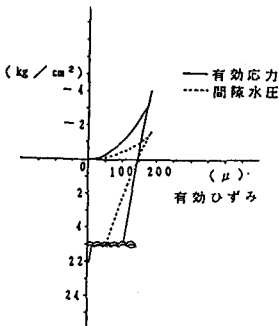


図4-2 両面固定
内部の有効応力-有効ひずみ、
間隙水圧-有効ひずみ関係

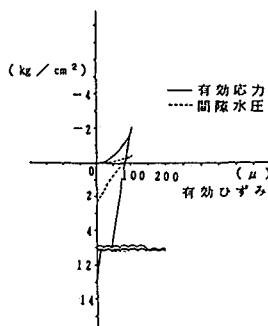


図4-3 両面固定
外部の有効応力-有効ひずみ、
間隙水圧-有効ひずみ関係

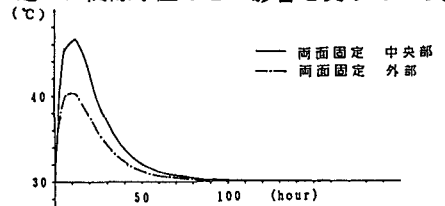


図4-1 温度-時間関係

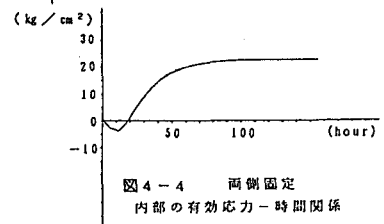


図4-4 両側固定
内部の有効応力-時間関係

5. 結論及び今後の課題

本研究では、水和熱が特に大きく発生する若材令コンクリートを弾塑性多孔質材料モデルとおき、弾性係数などの諸物性を時間依存の値とすることを検討した。そして、各節点の温度履歴を求め解析を行った結果、内部に生じる有効応力は場所によって間隙水圧の影響をかなり受け、それは極めて複雑であることが判明した。今後の課題としては、要素数を増やして解の精度を高め、物性の理想化を出来るだけなくし、より厳密に解析を行うことである。さらにコンクリート要素と岩盤要素とを結合させて2層材料として解析を行えば実用性も増すと思う。

参考文献

- 1) 井上 健: 若材令コンクリートの変形挙動に関する研究、1989年度名古屋大学修士論文
- 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
- 3) G.Gudehus, (川本眺万、桜井春輔、足立紀尚共訳): 地盤力学の有限要素解析1, 森北出版1981