

論文

[1038] 若材令コンクリートの変形挙動に関する基礎的研究

正会員○井上 健 (名古屋大学大学院)

正会員 田辺忠顕 (名古屋大学工学部)

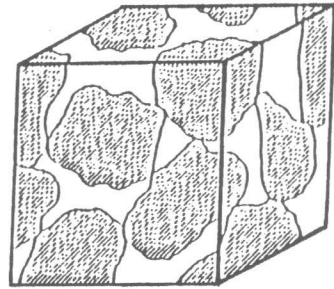
1. はじめに

コンクリート構造物の温度応力解析を行うには、コンクリートの諸物性を合理的に評価する必要がある。硬化後のコンクリートの諸物性に関する研究は、近年、大きな進歩を見せているが、一方、若材令コンクリートの諸物性に関する研究は、今までわずかな数の研究しか報告されておらず、極めて不十分な状態にある。そこで、本研究は、温度応力解析において特に重要となる若材令コンクリートを弾性体の骨材と弾粘塑性体としてセメントペースト部分にわけ、セメントペースト部分にDrucker-Pragerの降伏条件を導入して、Contri ら⁽¹⁾が提案した解法により、多層不均質構造物質モデルとして、有限要素法解析を試みるものである。

2. 若材令コンクリートのFEM応力解析

2・1 概説

若材令のコンクリートのFEM応力解析を行うにあたって、Contri⁽¹⁾, Lewis, Schrefler⁽²⁾らによって導かれた力の釣合方程式と間隙水の連続方程式を発展させて、温度変動が存在する場合の方程式をたてる。剛性マトリクスに塑性も考慮に入れて解析を行う。若材令コンクリートは、次のようなものとする。まず、骨材は完全等方弾性体であり、骨材間を占めるセメントペースト部分は、水で飽和された空隙を有する弾塑性透水性体として考える。なお、要素は直方体要素とする。



..... 骨材

図2.1 3次元アイソパラメトリックモデル

2.2 要素の釣合方程式の定式化

2.2.1 仮想仕事の原理による有限要素法の定式化

有効応力 $\{\sigma'\}$ と全応力 $\{\sigma\}$ 及び間隙水圧 p の関係は、応力を引張りを正とすると、

$$\{\sigma'\} = \{\sigma\} + \{m\}p \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

但し、 $\{m\}$ はクロネッカーの記号である。

線形あるいは非線形にかかわらず、全ての主要な変形に対して関係するのは有効応力 $\{\sigma'\}$ である。そして破壊の状態はこのような有効応力によってのみ十分に表すことができる。

その関係は D_T を応力-ひずみマトリクス、固体相の平均的な体積弾性率を k_s 、線膨張係数を α 、温度変化を dT とすると増分形式で次のようになる。

$$d\{\sigma'\} = D_T (d\{\varepsilon\} + \{m\}(1/3k_s)d p - \{m\} \alpha d T) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

仮想仕事の原理を用いて、釣合式を書くと

$$\int \delta \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} d\Omega - \int \delta \{u\}^T \{b\} d\Omega - \int \delta \{u\}^T \{t\} d\Gamma = 0 \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

ここで、 $\{b\}$ 、 $\{t\}$ 、 Ω 、 Γ はそれぞれ物体力、境界の表面力、領域および境界である。

2. 2. 2 力の釣合方程式の離散化

有限要素の離散化を、節点の変位、圧力と温度のパラメータ、 $\{u\}$ 、 $\{p\}$ および $\{T\}$ によって変位形式で表すと、変位とひずみは次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \{u\} &= [N] \{\bar{u}\} \\ \{\varepsilon\} &= [B] \{\bar{u}\} \\ \{p\} &= [N] \{\bar{p}\} \\ \{T\} &= [N] \{\bar{T}\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

ここで、 $[N]$: 形状関数マトリクス $[B]$: ひずみ変換マトリクス
 以上の変換を用いて、(2.3) 式を増分形に直すと次式になる。

$$K_T d\{\bar{u}\}/dt - L d\{\bar{p}\}/dt - A d\{\bar{T}\}/dt - d\{f\}/dt - R = 0 \quad \dots\dots(2.5)$$

ここで、 K_T は接線剛性マトリクス、 R は不平衡力である。

$$\begin{aligned} K_T &= \int B^T D_T B d\Omega \\ L &= \int B^T \{m\} N d\Omega - \int B^T D_T \{m\} (1/3k_s) N d\Omega \\ A &= \int B^T D_T \{m\} \alpha N d\Omega \\ f &= \int N^T \{b\} d\Omega + \int N^T \{t\} d\Gamma \end{aligned}$$

2. 3 要素における流れの連続方程式の定式化

2. 3. 1 Darcyの法則に従う流れの有限要素法の定式化

間隙水圧が若材令コンクリートの変形挙動に与える影響は少ないと考えられるが、個々で、水頭 h を次のように定義する。

$$\gamma h = \gamma z + p \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

ここで、 γ 、 z は、流体密度、鉛直座標（鉛直下向きが正）である。

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する。流れの速度 v は次のようになる。

$$v = -k \nabla h = -k \nabla [(\gamma z + p)/\gamma] \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

ここで、 k : 透水係数マトリクス（等方的な状態ではスカラーである。）

$$\nabla^T = [\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z]$$

流れの連続性は、次のように書くことができる。単位ボリュームに外部から流入する量と流速ベクトルの発散の差は、空間の単位体積当りの蓄積の速度に等しい。

$$(\text{流体の蓄積の速度}) = (\text{外部からの流入量}) - \nabla \cdot v \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

いま、種々の要因が左辺に関係する。

(1) 蓄積の速度に起因する全ひずみの変化

$$\partial\{\varepsilon_v\}/\partial t = \{m\}^T \partial\{\varepsilon\}/\partial t$$

(2) 圧力変化に起因する粒子体積の変化

$$(1-\xi)(1/k_s) \partial\{p\}/\partial t$$

ここで、 ξ は間隙比で、材令、即ち水和の速度に依存する係数である。

(3) 流体の体積変化

$$\xi (1/k_f) \partial\{p\}/\partial t$$

ここで、 k_f は流体の体積弾性率である。

(4) 液体の温度による体積変化

$$3\xi\beta \partial\{T\}/\partial t$$

ここで、 β は水の線膨張率である。

(5) 有効応力の変化によって生じる固体粒子の圧縮

有効応力の変化によって、平均的な静水圧的圧縮 $-1/3k_s\{m\}^T(\partial\{\sigma'\}/\partial t)/(1-\xi)$ が発生する。これは固体の全体積 $(1-\xi)$ に作用し、次のような体積の蓄積を生ずる。

$$-1/3k_s\{m\}^T \partial\{\sigma'\}/\partial t$$

これは、(2.12)式を用いて次のようになる。

$$-1/3k_s\{m\}^T D_T (\partial\{\varepsilon\}/\partial t + \{m\}(1/3k_s)d p - \{m\}\alpha d T) \dots\dots\dots(2.9)$$

2.3.2 流れの連続方程式の離散化

流れの連続方程式に対する有限要素の離散化は、あらかじめ与えられた流れの境界条件を組み入れた標準的な方法であるGalerkin法を用いて次のようになる。

$$H\{\bar{p}\} - S d\{\bar{p}\}/d t - L^T d\{\bar{u}\}/d t - W d\bar{T}/d t - f_p = 0 \dots\dots\dots(2.10)$$

ここで、

$$H = \int (\nabla N)^T k' \nabla N d \Omega$$

$$S = \int N^T s N d \Omega$$

$$s = [(1-\xi)/k_s + \xi (1/k_f) - 1/(3k_s)^2\{m\}^T D_T \{m\}]$$

$$L^T = \int N^T (\{m\}^T - 1/3k_s\{m\}^T D_T) B d \Omega$$

$$W = \int N^T (1/3k_s)\{m\}^T D_T \{m\} \alpha N d \Omega + \int 3\xi\{m\}\beta N d \Omega$$

$$f_p = \int N^T q d \Omega + \int (\nabla N)^T k' \nabla \gamma z d \Omega$$

$$k' = k/\gamma$$

q = 外部からの水の流入量

2・4 要素の釣合方程式と連続方程式の結合

要素の釣合方程式(2.5)と連続方程式(2.9)を結合してマトリクス表示すると

$$\begin{bmatrix} [O] & [O] \\ [O] & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L^T] & -[S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\{\bar{u}\}/dt \\ d\{\bar{p}\}/dt \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} df/dt + Ad\bar{T}/dt + R \\ f_0 + Wd\bar{T}/dt \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.11)$$

3. 実験

前に述べたモデルによって若材令コンクリートの構成則を表すためには、多くのパラメーターを実験的に定めなければならない。そのためには、膨大な実験を必要とする。時間的な制約から、ここでは、2個の若材令コンクリートについて、応力-ひずみ関係を求め逆にそれらのパラメーターの概略値を推定する事にした。

表3.1 供試体の配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水W	セメントC	細S	粗G
25	7	2	55.0	40.9	189	344	724	1049

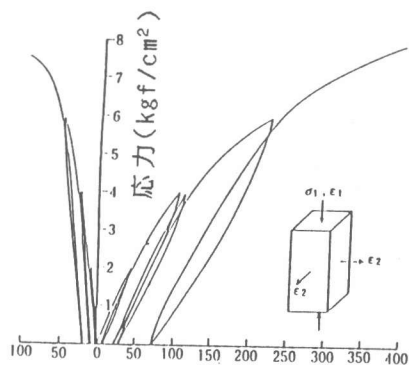
3.1 試験方法

若材令コンクリートの応力-ひずみ関係を知るためコンクリートの練り混ぜ後、材令10時間及び24時間で型枠から供試体を取り出し一軸圧縮繰り返し実験を行い、その応力-ひずみ関係を調べた。コンクリートの配合は表3.1に示すようであり、供試体寸法は、10cm×10cm×20cmの直方体である。試験方法としては、材令10時間（圧縮強度12.0kgf/cm）、材令24時間（圧縮強度51kgf/cm）のコンクリート供試体の相対する2側面の表面をヒーターで乾かし、ワイヤーストレインゲージを取り付け、短時間の内に実験が終わるようにした。長時間たつと水分が中からしみ出してきて、ワイヤーストレインゲージがはずれてしまうからである。強度の約1/4～1/3点、1/2～2/3点で、できるだけ短時間に繰り返し載荷除荷を行った。

3.2 結果

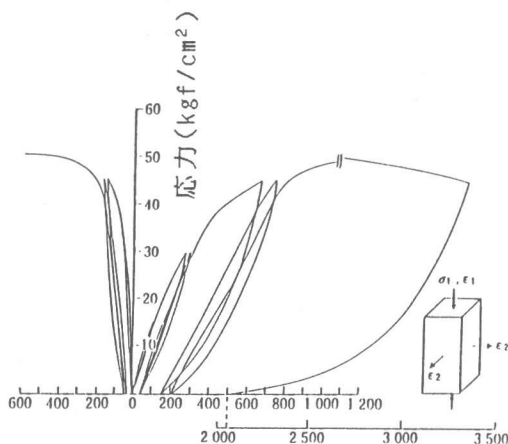
実験の結果は図3.1, 3.2に示す。即ち、若材令コンクリートの繰り返し載荷試験を行って除荷すると残留ひずみが残るが、これは、そのときまでに生じていた塑性ひずみとクリープひずみとの和と考えることができる。しかし、クリープひずみは載荷時間が零であれば生じないと、できるだけ短時間に載荷除荷を行い残留ひずみを測定し、塑性ひずみを得ることを考えた。

材令10時間
 圧縮強度51kgf/cm²



横ひずみ ϵ_2 縦ひずみ ϵ_1
 ($\times 10^{-6}$) ($\times 10^{-6}$)

材令24時間
 圧縮強度12kgf/cm²



横ひずみ ϵ_2 縦ひずみ ϵ_1
 ($\times 10^{-6}$) ($\times 10^{-6}$)

図3.1 材令10時間における応力ひずみ関係 図3.2 材令24時間における応力ひずみ関係

4. 数値解析結果とその考察

4.1 概説

実験により得られたデータの包絡線と数値モデルを近似的に一致させるパラメーターを求める事により、本モデル構築のため検討を行う。

4.2 結果と考察

このようにして、最終的に図4.1~4.4に示すBilinearな直線を得た。なお、解析に用いた諸物性値は、水の体積弾性率は 2.2×10^4 kgf/cmとして、材令10時間でヤング率 $E = 4.0 \times 10^4$ kgf/cm²、間隙比 $\zeta = 0.15$ 、透水係数 $k = 6.0 \times 10^{-7}$ cm/min、ポアソン比 $\nu = 0.17$ 、粘着力 $c = 2.0$ kgf/cm²、内部摩擦角 $\phi = 35.0^\circ$ 、材令24時間で、 $E = 1.1 \times 10^5$ kgf/cm²、 $\zeta = 0.10$ 、 $k = 6.0 \times 10^{-9}$ cm/min、 $\nu = 0.17$ 、 $c = 15.0$ kgf/cm²、 $\phi = 35.0^\circ$ である。これは、解析によって得られた応力・ひずみ関係および間隙水圧・ひずみ関係である。塑性後に間隙水圧が急激に上昇することは、塑性状態になって荷重増分にたいして応力増分が減少するためと考えられる。間隙水の流出量は載荷荷重が5kgfのときに、材令10時間の方が 3.17×10^{-5} cm³/min、材令24時間の方は 1.15×10^{-5} cm³/minであった。材令24時間の流出量の方が材令10時間のものよりも少ない結果となっているが、時間の経過とともに水和反応が進展し、それに伴い透水係数が減少することから、妥当な結果であると判断できる。

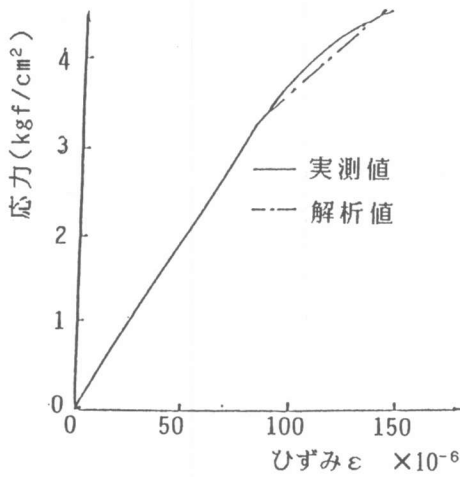


図4.1 材令10時間の数値解析結果

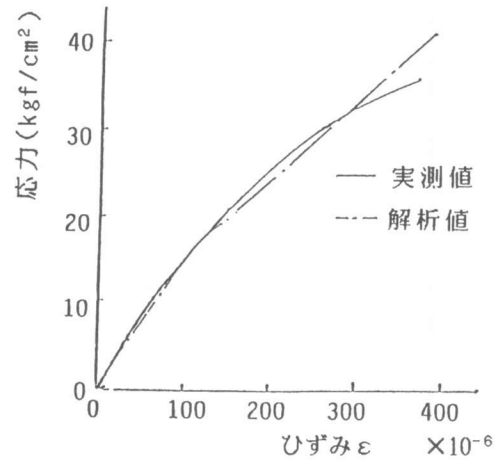


図4.2 材令24時間の数値解析結果

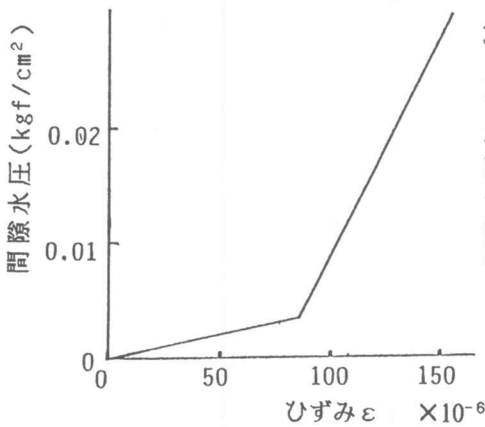


図4.3 材令10時間の数値解析結果

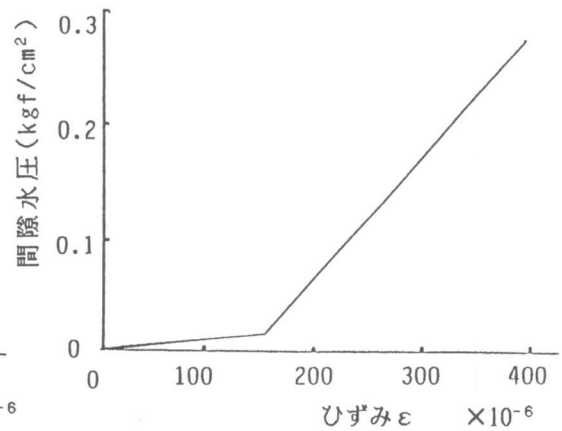


図4.4 材令24時間の数値解析結果

5. 結論

本研究では、水和反応が急激な速度で進行中の若材令コンクリートの応力-ひずみ関係を、弾塑性多孔質材料としてモデル化し、それらの各種パラメーターの検討を行った。実験も少くははっきりした結果は、得られていないが、水和速度とこれらのパラメーターとを関連づけることができれば、有望な数学モデルになり得ると思われた。

参考文献

- 1) Contri, L., Majorana, C.E., et Schrefler, B.A., : Proceeding of International conference on concrete of early ages, Vol.1, 1982, pp.193-198, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, PARIS 6-7-8 AVRIL, 1982
- 2) Lewis, R.W., Schrefler, B.A., : A fully coupled consolidation model of the subsidence of Venice, Water Resources research Vol.14, n°2, 1978, pp.223-230