

# 時間依存挙動に対する若材齢コンクリートのモデル化

石川靖晃<sup>1</sup>・大下英吉<sup>2</sup>・阿部博俊<sup>3</sup>・田辺忠顕<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 名城大学助手 理工学部土木工学科 (〒468 名古屋市天白区塩釜ロー一丁目501番地)

<sup>2</sup>正会員 工修 広島大学助手 工学部第四類(〒730 広島市鏡山一丁目4号1番地)

<sup>3</sup>正会員 元電力中央研究所

<sup>4</sup>正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科(〒464 名古屋市千種区不老町)

若材齢コンクリートの時間依存挙動を検討するため、材料物性値の変化を考慮にいれた数理モデルを提案した。ここでは、主に間隙水が若材齢コンクリートのクリープおよびレラクセーションに及ぼす役割について論じている。そして、実験値と解析値とを比較し、間隙水の影響について検討した。

**Key Words :** early age concrete, pore pressure, creep, relaxation

## 1. まえがき

コンクリートの特性は練り混ぜ後の数日間で急激に変化する。水とセメント粒子の接触間においては水和反応が始まり、CSHゲルが形成され、その結果直径約数十Åの空隙が生じる。空隙寸法の初期分布は、配合における骨材粒子寸法の分布、さらにはセメント粒子寸法の分布から決定される。セメント粒子の最小寸法は約1μm程度であるから、初期の空隙の最小寸法はこれとほぼ同値となり得る。その状態からCSHゲルが空隙に浸透し、さらに微細な空隙を形成する。CSHゲル粒子は、空隙で分離された未水和状態のセメント粒子や10<sup>2</sup>μm~10<sup>5</sup>μmの寸法をもつ骨材の近傍では、約10<sup>4</sup>Å~10<sup>4</sup>Åの寸法をもつとされている<sup>1)</sup>。また大部分の空隙は特に初期において水で飽和していると考えられる。このような水はゲル空隙水、毛管水と呼ばれ、蒸発性水である。以下の議論ではそれを単に間隙水と呼ぶ。

当然のことではあるが、何らかの理由で間隙水圧が発生したとすれば、この飽和多孔質系の存在は初期応力勾配に影響を及ぼす。

さらに物性値の点からもコンクリートの初期状態は後の挙動に影響を及ぼすと考えられる。このような視点は特にマスコンクリート構造物に対して重要である。なぜなら水和の進行にともない、水和熱が発生し、温度応力問題を引き起こすためである。材齢の極初期においては、水和の進行と共に剛性が急激に進展するため、大体的場合においてコンクリートは圧縮応力を受ける。しかし、数日間経た後、応力履歴は反対の傾向を示し、引張応力が発生するようになる。この時期においては、クリープ変形が卓越し、部分的にこれらの応力を相殺

すると思われるが、未だにこれらの影響は明らかにされていない。クリープ問題の変形解析を行う場合、硬化後のコンクリートに対しては、クリープ関数を外挿することが適当であると思われる。しかし、間隙水の移動の影響が存在するならば、それは寸法依存の影響となる。一般的にコンクリートのクリープは部材が小さくなるほど大きくなると言われているが、理論的にはクリープは材料特性であり寸法には依存しない一方、間隙水の移動は拡散過程に従う。さらにはクリープの影響は圧縮、引張共にほぼ同じとされている一方、間隙水の移動の影響は圧縮と引張の応力状態では逆である。

明確な理由は依然検討中ではあるが、材齢初期におけるコンクリートの時間依存挙動は、やはりコンクリート内部の移動水の影響を受けると考えられる。

コンクリート内部の間隙水の移動に関する従来の研究としてはLynam<sup>2)</sup>によってコンクリートのクリープにSeepage理論が初めて適用され、その後、Powers<sup>3)</sup>、Bazant<sup>4)</sup>等多くの研究者によってコンクリートの透水性が実験的理論的に検討されている。また、Neville<sup>5)</sup>は実験的に持続荷重によるコンクリートのクリープは間隙水の移動が大きく影響を及ぼすことを報告している。

しかしながら、多くの研究は実験的であり、間隙水の影響による時間依存挙動のメカニズムの理論的解明は未だ不十分の域を越えていない。そこで以上の現象を統一的に評価できる理論モデルの構築が必要と思われる。

これらの背景から若材齢コンクリートを骨材および間隙水を含んだセメントペーストからなる2相多孔質材

料としてモデル化し、若材齢コンクリートにおける空隙水移動の影響について検討を行った。

## 2. 2相飽和多孔質材料としての若材齢コンクリートの数理モデルの構築

CSHゲル粒子や骨材粒子は弾性体と考えられるが、それらの混合材料においては各粒子の相対的な位置の変化により、せん断変形が起こり得る。また、若材齢コンクリートの特徴として弾性域が極めて小さいことが挙げられる。ゆえに、若材齢コンクリートを完全もしくは部分的に飽和した空隙が材齢と共に減少する粘塑性硬化材料として捉えることが妥当だと思われる。空隙が部分的に空隙水で飽和している場合は、理論的に非常に困難となるため、本研究では、簡単のため空隙は完全に空隙水で飽和していると仮定する。そこで、このような仮定の下で、以下に述べるような定式化を行った。

### (1) 若材齢コンクリートの構成則

ここではコンクリートを骨材とセメントペーストからなる2相材料としてモデル化する。2相多孔質材料としての若材齢コンクリートのモデルの概念図をFig.1に示す。

また、骨材は弾性体と仮定し、セメントペーストは粘塑性体と仮定した。コンクリート全体のひずみは骨材とセメントペーストそれぞれのひずみの体積による重み付き平均で表されると仮定することにより、コンクリートの剛性マトリックスを定式化する。骨材の体積を $V_A$ 、セメントペーストの体積を $V_C$ 、全体のひずみを $d\{\epsilon^T\}$ とすると、全体のひずみは次式で表される。

$$d\{\epsilon^T\} = \frac{V_A}{V} d\{\epsilon_A^T\} + \frac{V_C}{V} d\{\epsilon_C^T\}, \quad V = V_A + V_C \quad (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} d\{\epsilon_A^T\} &= d\{\epsilon_A^e\} + d\{\epsilon_A^{pr}\} + d\{\epsilon_A^t\} \\ d\{\epsilon_C^T\} &= d\{\epsilon_C^e\} + d\{\epsilon_C^{pr}\} + d\{\epsilon_C^t\} \\ &\quad + d\{\epsilon_C^{vp}\} + d\{\epsilon_C^h\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここでは、ひずみ成分の上付き添字 $e, pr, t, vp$ および $h$ はそれぞれ弾性、空隙圧、温度、粘塑性および水和による収縮を示し、ひずみ成分の下付き添字 $A$ および $C$ はそれぞれ骨材およびセメントペーストを示している。

有効応力と全ひずみとの間には次のような関係がある。

$$d\{\sigma'\} = (1-\xi)[D_A^e]d\{\epsilon_A^e\} = (1-\xi)[D_C^e]d\{\epsilon_C^e\} \quad (3)$$

ここで $[D_A^e]$ および $[D_C^e]$ はそれぞれ骨材およびセメントペーストの弾性剛性マトリックスを示している。ま

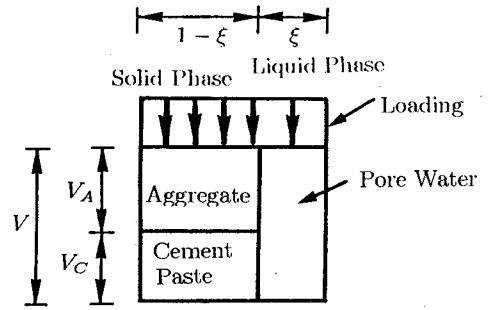


Fig.1 The Two Phase Porous Material Model

た、 $\xi$ は空隙率であり、材齢や水和の程度により変化する。式(1),(2)を式(3)に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} d\{\sigma'\} &= (1-\xi)[D_S] \left( d\{\epsilon^T\} - d\{\epsilon^{pr}\} - d\{\epsilon^t\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{V_C}{V} d\{\epsilon^{vp}\} - \frac{V_C}{V} d\{\epsilon^h\} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで

$$d\{\epsilon^T\} = \frac{V_A}{V} d\{\epsilon_A^T\} + \frac{V_C}{V} d\{\epsilon_C^T\} \quad (5)$$

$$d\{\epsilon^t\} = \frac{V_A}{V} d\{\epsilon_A^t\} + \frac{V_C}{V} d\{\epsilon_C^t\} \quad (6)$$

$$d\{\epsilon^{pr}\} = \frac{V_A}{V} d\{\epsilon_A^{pr}\} + \frac{V_C}{V} d\{\epsilon_C^{pr}\} \quad (7)$$

$$[D_S] = \left[ \frac{V_A}{V} [D_A^e]^{-1} + \frac{V_C}{V} [D_C^e]^{-1} \right]^{-1} \quad (8)$$

ここで粘塑性ひずみ成分を次式で定義する。

$$d\{\epsilon^{vp}\} = \Delta t \gamma F(\sigma') \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\} \quad (9)$$

ここで $F$ は粘塑性ポテンシャル曲面を表し、材齢と蓄積された損傷により拡大もしくは縮小する。また、 $\gamma$ は粘性係数である。

### (2) 粘塑性ポテンシャルとしての修正Drucker-Prager 曲面

本研究では、粘塑性ポテンシャルとして次式で表されるようなDrucker-Prager typeの破壊曲面を用いた。

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (10)$$

ここで $I_1$ と $\sqrt{J_2}$ はそれぞれ応力テンソルの第1不変量と偏差応力テンソルの第2不変量を表し、 $\alpha, k$ は材料定数で、材齢および水和の程度により変化する。

Mohr-Coulombの六角錐にDrucker-Pragerの円錐を合わせる際、圧縮子午線( $\gamma_c = 60^\circ$ )を一致させる。このとき

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi^*}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi^*)}, \quad k = \frac{6c^* \cos \phi^*}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi^*)} \quad (11)$$

ここで $c^*, \phi^*$ はセメントペーストにおける変動粘着力および変動内部摩擦角である。 $c^*$ および $\phi^*$ は、損傷

パラメーター $\omega$ を介し、塑性ひずみ履歴と関連づけることで定義される。一般に、 $\phi^*$ は $\omega$ の増加関数、一方 $c^*$ は $\omega$ の減少関数であるから、

$$c^* = c \exp[-(a\omega)^2] \quad (12)$$

$$\phi^* = \begin{cases} \phi \sqrt{2\omega - \omega^2}, & \omega \leq 1 \\ \phi, & \omega > 1 \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 $c$ 、 $\phi$ はセメントペーストの粘着力および内部摩擦角で材齢や水和の程度により変化し、 $a$ は材料定数である。

以上に述べたように破壊曲面は応力空間において損傷パラメーターと共に変化すると仮定した。その際、有効応力 $\sigma_e$ 、有効塑性ひずみ $d\varepsilon_p$ （ここで有効応力、有効塑性ひずみとは応力状態が等価な一軸応力状態に換算されたものを指し、他に述べられているものとは違う意味を持つ）を用いると塑性仕事増分 $dW^p$ は次式で表される。

$$dW^p = \{\sigma'\}^T d\{\varepsilon^p\} = \sigma_e d\varepsilon_p \quad (14)$$

損傷パラメーターはマイクロクラックの進展による蓄積された損傷の程度として定義され、次式で表される<sup>6)</sup>。

$$\omega = \frac{\beta}{\sigma_e \varepsilon_0} \int dW^p \quad (15)$$

ここで $\beta$ は材料定数であり、

$$\varepsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c} \quad (16)$$

ここで、 $E_c$ 、 $f'_c$ はそれぞれセメントペーストの弾性係数、一軸圧縮強度を示している。そして式(14)を式(15)に代入すると次式となる。

$$\omega = \beta \int \frac{1}{\varepsilon_0} d\varepsilon_p \quad (17)$$

### (3) セメントペーストの水和過程に基づく間隙率の算定

(1)の若材齢コンクリートの構成則において、間隙率を用いて構成則を定式化しているが、そこで間隙率は材齢や水和の程度によって変化すると述べた。ここでは河角ら<sup>7)</sup>の研究を参考にし、間隙率を算定した。水和速度が未水和水内のセメント量に依存すると仮定すると、水和過程は次式で表される。

$$\frac{dC_H}{dt} = k_0(1-n_0)t^{-n_0}(W - \gamma_p C_H)(C - C_H) \quad (18)$$

ここで $C$ 、 $C_H$ および $W$ はそれぞれ $1m^3$ 当たりの初期セメント量、水和セメント量および初期水量である。 $\gamma_p C_H$ は $1m^3$ 当たりの水和水量を表す。また $\gamma_p$ は完全結合水セメント比であり、0.25~0.38の値をとる。材齢 $t$ の単位は日であり、 $k_0$ 、 $n_0$ は水和パラメーターであり、20°C下での水中養生においては、それぞれ7.419×

$10^{-1}$ 、 $8.928 \times 10^{-6}$ である。式(18)を初期条件 $t=0$ で $C_H=0$ の下に解くと

$$C_H = \frac{1 - \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]}{1 - \gamma_p C/W \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]} \times C, \quad \text{for } \frac{W}{C} \neq \gamma_p \quad (19)$$

$$C_H = \frac{\gamma_p k_0 t^{1-n_0}}{1 + \gamma_p k_0 t^{1-n_0}} \times C, \quad \text{for } \frac{W}{C} = \gamma_p \quad (20)$$

間隙率 $\xi$ は初期の単位体積水量 $V_{W0}$ から水和による間隙水の減少を考慮することにより次式で表される。

$$\xi = V_{W0}(1 - \gamma_p C_H/W) \quad (21)$$

### (4) 仮想仕事の原理による力の釣合式

間隙水圧 $p$ が存在するならば全応力 $\{\sigma\}$ と有効応力 $\{\sigma'\}$ の関係は次式で表される。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p \quad (22)$$

$$\{m\} = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\} \quad (23)$$

ここで応力は引張を正とするが、間隙水圧 $p$ は圧縮を正とする。仮想仕事の原理を用いた力の釣合式は次式となる。

$$\int_{\Omega} \delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} d\Omega - \int_{\Omega} \delta\{u\}^T \{b\} d\Omega - \int_{\gamma} \delta\{u\}^T \{t\} d\gamma = 0 \quad (24)$$

ここで $\{b\}$ 、 $\{t\}$ はそれぞれ物体力、表面力であり、 $\Omega$ 、 $\gamma$ はそれぞれ領域、力学的境界である。そして、場についての補関数を用いると式(24)はマトリックス形で次式のように表される。

$$K_T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} = 0 \quad (25)$$

ここで、マトリックス $K_T$ 、 $L$ および $A$ はそれぞれ接線剛性マトリックス、間隙水圧、固相液相の圧縮性の影響に対するマトリックスおよび温度の影響に対するマトリックスである。さらに $\{\bar{f}\}$ は外力ベクトルである。これらは次のように表される。

$$K_T = \int_{\Omega} (1 - \xi) B^T D_S B d\Omega \quad (26)$$

$$L = \int_{\Omega} \xi B^T \{m\} \bar{N} d\Omega \quad (27)$$

$$A = \int_{\Omega} (1 - \xi) B^T D_S \{m\} \alpha \bar{N} d\Omega \quad (28)$$

$$\{\bar{f}\} = \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\gamma} N^T \{t\} d\gamma = 0 \quad (29)$$

ここで $N$ 、 $\bar{N}$ および $B$ はそれぞれ変位に関する形状関数マトリックス、間隙水圧、温度に関する形状関数マトリックスおよびひずみ-変位マトリックスである。土質力学の分野で主に用いられるような、間隙水圧に対して固相粒子が非圧縮であると仮定する場合は、 $1 - \xi$ と $\xi$ をそれぞれ1とすればよい。

### (5) 間隙水の質量保存則

間隙水の移動速度は単位質量当たりのGibbsの自由エネルギー $G$ の勾配に依存すると仮定すると<sup>4)</sup>

$$\{v\} = -k\nabla G \quad (30)$$

ここで $k$ は透水係数である。 $G$ は間隙水の相の状態によって

$$\begin{aligned} \text{液体相 } G &= (\gamma_w z + p)/\gamma_w + G_{sat} \\ \text{気体相 } G &= (R/M)T \cdot \ln H + G_{sat} \end{aligned} \quad (31)$$

と表される。ここで、 $\gamma_w$ ,  $z$ はそれぞれ水の単位体積重量、鉛直上向きの座標を表し、 $R$ ,  $H$ ,  $M$ はそれぞれ気体定数、 $H = p/p_{sat}$ , ( $p_{sat}$ =飽和蒸気圧) および水の分子量である。さらに $G_{sat}$ は標準自由エネルギーであり、絶対温度だけの関数である。本研究では間隙は液体相にて完全飽和していると仮定し、さらに絶対温度は場所、時間によらず一定とする。したがって

$$\{v\} = -k\nabla \frac{\gamma_w z + p}{\gamma_w} \quad (32)$$

となる。

質量保存則ではコントロールボリューム内の流体の蓄積量は流入量と流出量の差に等しいとしている。蓄積量は次の要因によって構成される。

- 1) 全ひずみの変化

$$\frac{d\epsilon_v}{dt} = \{m\}^T \frac{d\{\epsilon\}}{dt}$$

- 2) 間隙水圧変化に起因する粒子体積の変化

$$(1 - \xi)\{m\}^T D_S^{-1} \{m\} \frac{dp}{dt}$$

- 3) 液相の体積変化

$$\frac{\xi}{k_f} \frac{dp}{dt}$$

- 4) 液相の温度による体積変化

$$-3\xi\mu \frac{dT}{dt}$$

- 5) 有効応力の変化によって生じる固体粒子の圧縮

$$-\{m\}^T D_S^{-1} \frac{d\{\sigma'\}}{dt}$$

ここで $k_f$ ,  $\mu$ は水の体積弾性率、水の線膨張係数である。

コントロールボリューム内の全蓄積量が1)~5)の項の総和に等しいとすると、最終的に、質量保存則は次式で表される。

$$\begin{aligned} \xi\{m\}^T \frac{d\{\epsilon\}}{dt} + \frac{\xi}{k_f} \frac{dp}{dt} + 3\xi\mu \frac{dT}{dt} \\ - \nabla^T k/\gamma_w \nabla (\gamma_w z + p) - q = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

ここで $q$ は内部からの湧き出し量である。重み付き残差法を適用することにより式(33)は

$$\begin{aligned} -H\{\bar{p}\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \\ - W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} + \{f_p\} = 0 \end{aligned} \quad (34)$$

ここで

$$H = \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k/\gamma_w \nabla \bar{N} d\Omega, \quad S = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k_f} \bar{N} d\Omega$$

$$W = \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1 - \xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega$$

$$\begin{aligned} \{f_p\} = \int_{\Omega} \bar{N}^T q d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k/\gamma_w \nabla \gamma_w z d\Omega \\ + \int_{\Gamma} \bar{N}^T (\{v\}^T \cdot n) d\gamma \end{aligned}$$

である。非圧縮性を仮定するときは、上記の式において $k_f = \infty$ ,  $\xi = 1$ とおけばよい。

### (6) 2相多孔質材料の支配方程式

最終的に式(25)と式(34)から、力の釣合式と間隙水の質量保存則との連成方程式が次式のようなマトリクス形で表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} + A \frac{d\{T\}}{dt} \\ W \frac{d\{T\}}{dt} - f_p \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (35)$$

この式の全てのマトリクスは対称性を保証されているため、境界条件および初期条件が既知であれば解を得ることができる。式(35)を後退差分で表すと次式のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S - H\Delta t_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{u}_n \\ \Delta \bar{p}_n \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} \Delta f_n + A\Delta \bar{T}_n \\ -f_p \Delta t_n + W\Delta \bar{T}_n + H\bar{p}_{n-1} \Delta t_n \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (36)$$

但し

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u}_n &= \bar{u}_n - \bar{u}_{n-1} \quad \Delta \bar{p}_n = \bar{p}_n - \bar{p}_{n-1} \\ \Delta \bar{T}_n &= \bar{T}_n - \bar{T}_{n-1} \quad \Delta \bar{f}_n = \bar{f}_n - \bar{f}_{n-1} \\ t_{n-1} + \Delta t_n &= t_n \end{aligned} \quad (37)$$

である。

基本的に、ここでの定式化は一般化Maxwellモデルの1要素のみの表現に類似している。個々の粘性は、塑性成分に平行なダッシュポットの粘性と定義されている。

要素を増やすことや、硬化破壊曲面を適合させることにより、既に得られているような一般的なクリープ問題に拡張できると思われる。

### 3. 材料定数の決定

- (1) 若材齢コンクリートの粘着力と初期内部摩擦角  
修正Drucker-Prager材料では、粘着力、初期内部摩擦角、損傷パラメーター内の2つの材料定数など幾つかのパラメーターを決定する必要がある。若材齢コンクリートでは、一軸圧縮試験から粘着力と初期内部摩擦

角の関係を知ることはできない。その関係を調べるために、寸法 $\phi = 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ のセメントペースト供試体を作製し、材齢12,24,36および48時間において三軸圧縮試験を行った。水セメント比は55%であり、供試体は25°Cの室温で気中養生された。三軸圧縮試験によって得られた有効材齢(Maturity)と若材齢セメントペーストの粘着力の関係をFig.2に示す。有効材齢の増加と共に粘着力は増加するが、12時間以前では、ほとんど粘着力が発生しないことが分かる。室温25°Cで打設を行ったため、もし打設温度がさらに高かったならば、初期強度はさらに大きな値で得られたと思われる。有効材齢は環境温度の関数と、その温度下で経過した時間との積で定義され、次式で表される。

$$t_e = \int_0^t \exp \left[ \frac{U_h}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{K} \right) \right] dt \quad (38)$$

ここで、 $K$ は供試体の絶対温度(K)、 $U_h$ は水和の活性化エネルギー(J/mol)、 $R$ はガス定数(J/mol.K)である。また、初期内部摩擦角と有効材齢との関係をFig.3に示す。有効材齢に対し、内部摩擦角はほとんど変化せず、ほぼ25°から35°の範囲の値となっている。しかし、これらの結果のみで一般的な配合での適用性を確かめることはできない。同じことが粘着力の場合にもいえる。次章での解析では、初期内部摩擦角は有効材齢によって余り変化しないため、実験で得られた値の平均値である27°を保つものとした。また、粘着力は一般の硬化コンクリートでは一軸圧縮強度の1/3程度とされているが、粘塑性体としての若材齢コンクリートのクリープ流れは、かなり小さな応力レベルから起こるものと考えられる。よって非常に大まかではあるが、粘塑性ポテンシャルにおける粘着力は硬化コンクリートの粘着力の1/3すなわち一軸圧縮強度の1/9と仮定した。

## (2) 間隙率と透水係数

初期間隙率は、全体の体積に対する水の体積比と仮定することにより配合から得ることができる。材齢の進行と共に水和が進行し、間隙率は低下する。その時の間隙率は、初期水体積の減少を考慮に入れることにより計算される。

透水係数に関しては、Darcy, Poiseuilleの法則が適用できるかもしれない。しかし、このことは実験的確認がないため、誤っていることもあり得る。本研究では、過去の実験結果に基づいて大体の透水係数の値を評価する。村田<sup>8)</sup>は、材齢28日での硬化コンクリートに対して透水試験を行い、最大骨材粒径の違いによる透水係数とW/Cとの関係を報告している。その結果をFig.4に示す。村田は、材齢28日の透水係数は材齢14日のものに比べ0.6倍に減少することも報告しているが、材齢14日以前の若材齢コンクリートに対しての詳細な

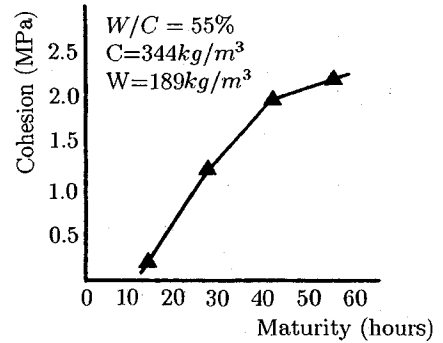


Fig.2 Cohesion with Maturity

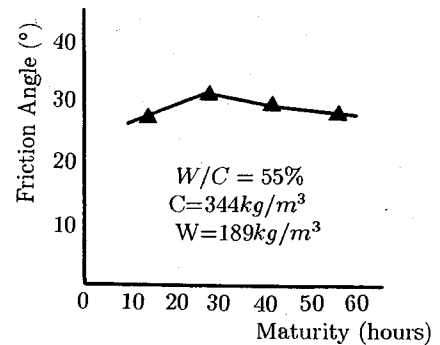


Fig.3 Friction Angle with Maturity

報告は行っていない。本研究では、T.C.Powersが行った研究<sup>3)</sup>を考慮することにより外挿を行った。硬化コンクリートでは透水係数は初期に比べ $10^{-6}$ 倍に減少するとPowersは報告している。その実験結果をFig.5に示す。ここでは水セメント比は70%である。透水係数は、初期に比べ材齢5日後で $10^{-4}$ 倍、さらに材齢14日では5日後に比べ $10^{-2}$ 倍の値となっている。

Fig.5はセメントペーストを用いての結果であるが、材齢によるコンクリートの透水係数の減少割合は未だ実験的に解明されていない。そのため本研究ではとりあえず、これらの透水係数の減少割合はコンクリート全ての配合に適用できるものと仮定した。

勿論、以上に述べた内部摩擦角、粘着力、透水係数などの物性値については今後も検討していかなければならない。

## 4. 若材齢コンクリートの解析

2章で構築された若材齢コンクリートモデルを用いて、既往の実験に対して解析を行った。このモデルの重要な特徴のひとつは、有効応力に加え間隙水圧も陽に計算できることである。

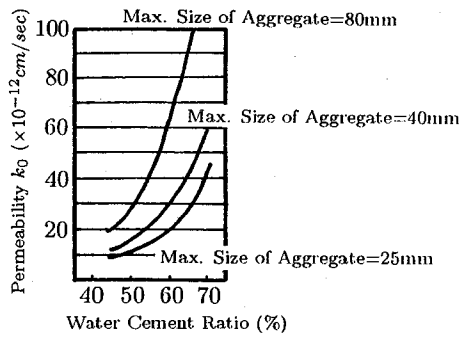


Fig. 4 Experimental Permeability (Murata)

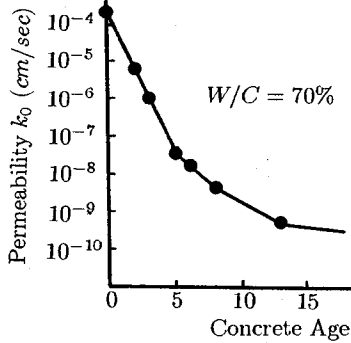


Fig. 5 Experimental Permeability of Cement Paste (Powders)

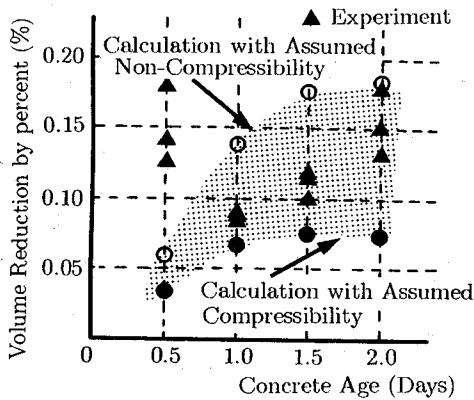
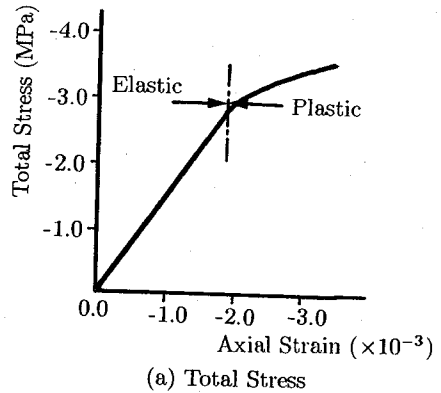


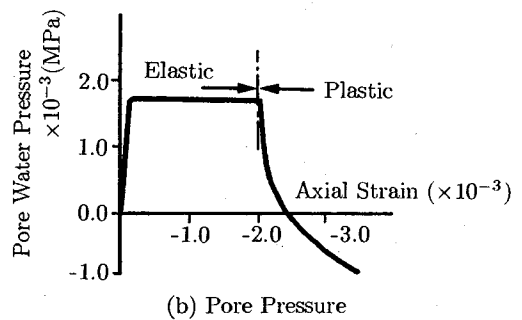
Fig. 6 Drain out of Pore Water

### (1) 間隙水流出現験の解析

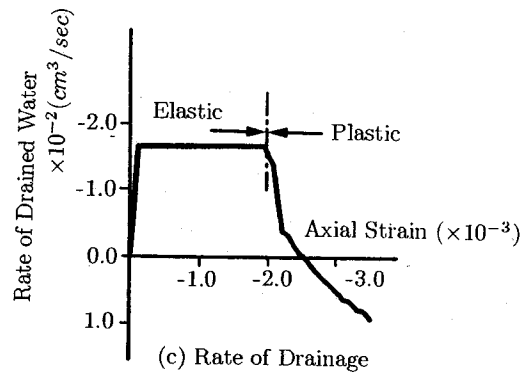
著者が行った若材齢モルタルの流出量実験<sup>9)</sup>に対して解析を行った。まず $\phi = 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ のモルタル供試体を作製した。W/C = 63%であり、単位セメント量は $368\text{kg}/\text{m}^3$ および単位細骨材量は $1175\text{kg}/\text{m}^3$ である。供試体は試験直前まで $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温水槽で水中養生した。材齢1.5, 1, 1.5および2日毎に供試体を水中から取り出し、乾いた布で拭き取り、0.01gの精度で測定可能な電子秤で質量を測定した。次に、万能試験機を用いて一軸状態で一定変位速度( $1.0 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ )で単調載荷した。荷重がピークに達したら、載荷を止めて再度



(a) Total Stress



(b) Pore Pressure



(c) Rate of Drainage

Fig. 7 Axial-Strain-Pore Pressure-Drained out Water

乾いた布で供試体を拭いた。そして、再度電子秤で質量を測定した。その結果をFig. 6に示す。Fig. 6は各材齢と、流出量の供試体に対する体積比との関係を表しており、どの材齢でも約0.1~0.2%の流出量が存在することを示している。

各々のケースでの実験結果は比較的ばらつきが小さく抜き取りによる誤差は小さいと思われる。また、載荷中は勿論蒸発により質量が減少していくが、試験期間における蒸発による質量減少を測定したところ、載荷による質量減少に比べ非常に小さい値であったため、ここで得られた実験値は載荷による流出量であると考

えてもよいと思われる。

これらの実験結果に対応する解析を行う際、弾性係数や粘着力および内部摩擦角などの、様々な材料定数を材齢毎に知る必要がある。非常に大まかではあるが、弾性係数は材齢24時間後の同配合の供試体の弾性係数の実験値を線形補間することにより推定した。その結果、材齢0.5, 1, 1.5および2日における弾性係数はそれぞれ250, 500, 750および1000MPaと推定した。また初期粘着力はMohr円から $c = f_c/2$ とした。さらに終局内部摩擦角は材齢に依らず $27^\circ$ とした。間隙率および透水係数は式(21)および3.2節で述べられたことから推定した。

境界条件として、供試体表面において間隙水圧は大気圧と等しいとした。

Fig.6およびFig.7に流出量、流出速度、間隙水圧および全応力の解析結果を示す。Fig.7では実験値と重ねて示されている。流出速度は荷重を作用させるとすぐに発生し、その後一定値を保つ。しかし、降伏域に達すると、セメントペーストの塑性体積膨張のため速度はそれまでとは逆の方向に移行する。すなわち吸い込みを起こす。解析では、外部からの流入は考慮しないため、供試体からの全流出量は、降伏に達し吸い込みが発生する以前までの流出速度と時間ステップとの積から計算した。

材齢0.5日を除いて、実験結果は2つの解析曲線の間に存在している。2つの曲線とはすなわちセメントペーストおよび間隙水の体積圧縮性を考慮したものと、土質力学の分野で用いられているような、完全に非圧縮であると仮定したものである。

実験値と解析値は、物性値をかなり粗雑に評価したにも拘わらず、同じオーダーの値となっている。また、材齢が経つにつれ実験値のばらつきがめだつが、解析値は滑らかな上昇曲線となっている。

## (2) クリープ試験の解析

電力中央研究所で行われた若材齢コンクリートのクリープ試験<sup>10)</sup>に対して解析を行った。この試験で用いられた配合は $W/C = 49\%$ ,  $s/a = 40\%$ であり、単位セメント量、単位水量、単位細骨材量および単位粗骨材量はそれぞれ $339\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $166\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $730\text{kg}/\text{m}^3$ および $1063\text{kg}/\text{m}^3$ である。供試体は $\phi = 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ であり、それは打設後5時間後に脱型され、銅缶に入れられ直ちに蓋を半田で取り付けられている。そして供試体は材齢0.69, 1および3日後に、それぞれ1.0, 2.0および2.5MPaの応力レベルに達するまで載荷されている。それぞれの、一軸圧縮強度に対する荷重の比はそれぞれ45%, 38%, 22%である。クリープ試験結果をFig.8に示す。これらの結果の最も支配的な特徴は、載荷直後、ク

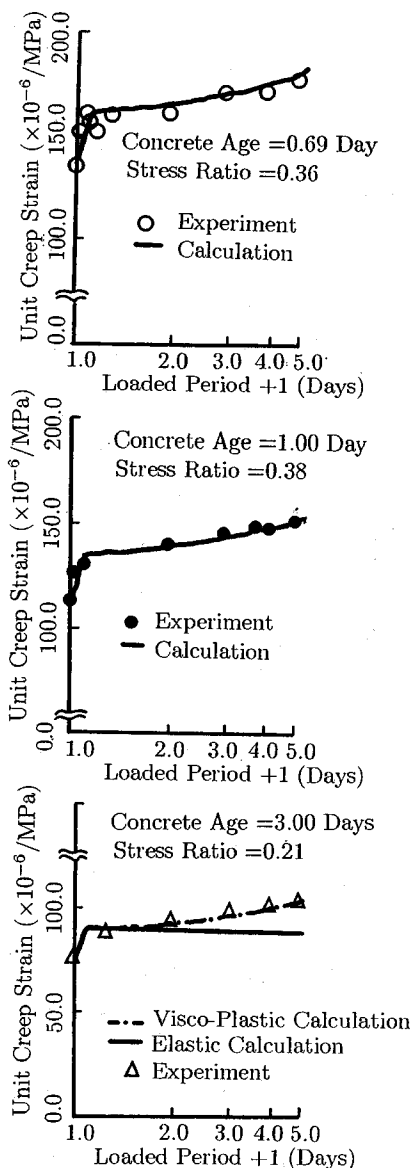


Fig.8 Compressive Creep Strain in Early Age Concrete

リープひずみが急激に発生し、次に一定値を保った後、さらに徐々に増加することである。

これらの実験値を解析する際、弾性係数は、初期のひずみに適合するように決定した。初期粘着力および終局内部摩擦角は3.1節、透水係数は3.2節で述べたように与えた。また、養生が経つにつれ粘塑性の影響は小さくなると予想されるため、粘性係数は養生時間の経過により、 $5.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-5} / \text{MPa} \cdot \text{Day}$ の範囲で減少させた。

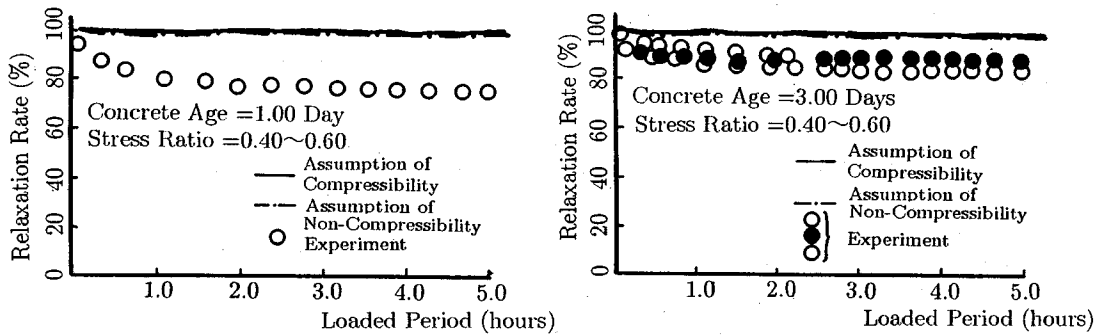


Fig.9 Tensile Relaxation of Early Age Concrete

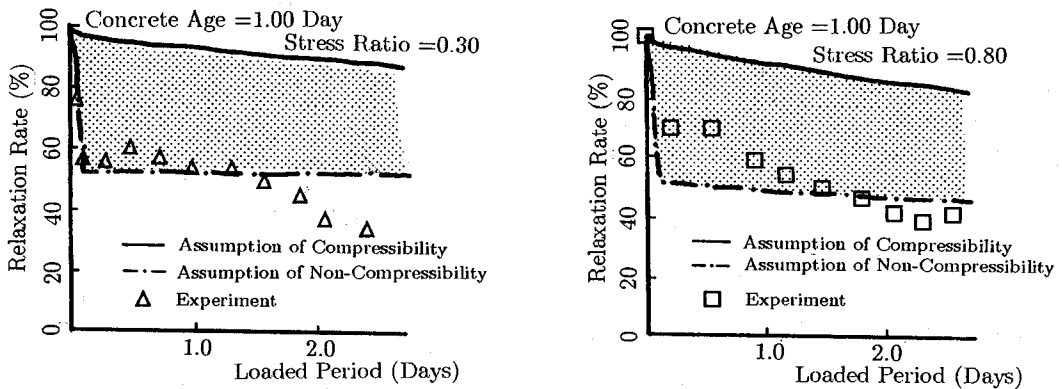


Fig.10 Compressive Relaxation of Early Age Concrete (Age=1.0 Day)

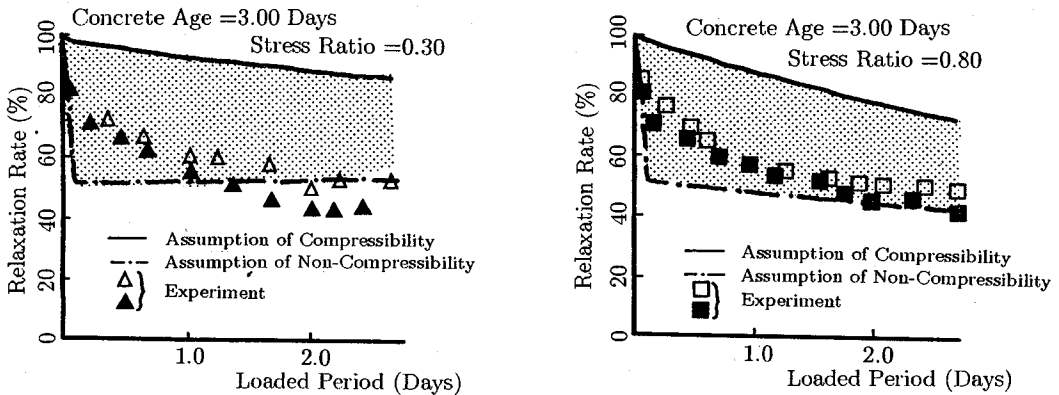


Fig.11 Compressive Relaxation of Early Age Concrete (Age=3.0 Days)

実験値と同じ荷重を作用させた後、変形解析がなされた。解析結果を Fig.8 の試験結果と重ねて示す。これらの結果は、セメントペーストおよび間隙水の体積圧縮性を考慮しない場合のものである。どの解析ケースにおいても、載荷後数時間で、クリープひずみが急激に発生し、その後は徐々に増加している。言い換える

ならば、載荷後発生した間隙水圧は、間隙水の流出によって急激に有効応力に変換され、急激にクリープひずみが発生する。そして間隙水の流出が生じなくなると、クリープひずみは発生しなくなる。その後は、むしろコンクリートの粘塑性変形のため、クリープひずみは徐々に増加する。本手法における粘塑性変形解析



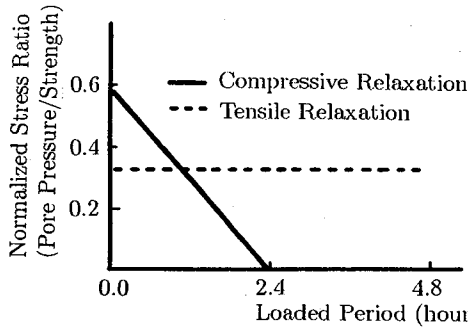


Fig.12 Variation of Pore Pressure in the Relaxation

は粘性係数および粘塑性ポテンシャル曲面に強く依存することであり、明らかなことではあるが、粘性係数および粘塑性ポテンシャル曲面に関してはさらに研究を進める必要がある。

また、セメントペーストおよび間隙水の圧縮性を考慮した場合についても解析を行ったが、その場合は、クリープひずみは特に発生しなかった。このことは、もしクリープひずみの急激な増加が間隙水の流出によるものであれば、クリープ解析において、圧縮性の仮定は他の仮定よりもより小さいことを示唆している。

### (3) レラクセーション試験の解析

岐阜大学で行われた若材齢コンクリートのレラクセーション試験<sup>11)</sup>に対して解析を行った。試験は圧縮および引張レラクセーション両方行われている。引張レラクセーション試験に対しては10cm×10cm×86cmの供試体、圧縮レラクセーション試験にたいしては10cm×10cm×40cmの供試体がいわれている。

配合は $W/C = 50\%$ ,  $s/a = 44\%$ であり、単位セメント量、単位水量、単位細骨材量および単位粗骨材量はそれぞれ346kg/m<sup>3</sup>, 173kg/m<sup>3</sup>, 790kg/m<sup>3</sup>, 996kg/m<sup>3</sup>である。供試体は20°C,  $R.H. = 90\%$ の恒温室で蒸気養生され、材齢1,3,7,28日後にそれぞれ引張レラクセーションおよび圧縮レラクセーション試験が行われている。引張レラクセーションにおいては、荷重レベルは一軸圧縮強度の30%, 30%~50%, 60%以上、圧縮レラクセーションにおいては、荷重レベルは一軸圧縮強度の30%, 50%, 80%である。

供試体を恒温室から取り出した後、供試体内部の水が蒸発しないように、供試体はパラフィンでコーティングされている。また試験の間は、室温は20°Cに保たれている。試験結果をFig.9~Fig.11に示す。引張レラクセーション試験における応力緩和は圧縮の場合に較べかなり小さいことがわかる。これらの実験結果に対し、解析を行った。圧縮レラクセーションの場合は、供試体の表面の間隙水圧は大気圧に等しいとした。言い換

れば、表面からの流出を許すということである。実験では供試体表面にパラフィンがコーティングされていることから、ここでの解析における仮定は、実験におけるコーティングは供試体内部からの間隙水の流出を抑えるにはあまり十分でないということを示唆している。しかし、コーティングは供試体外部からの水の流入を防ぐことから、引張レラクセーションでは、供試体表面への水の流入はないと仮定した。透水係数は3.2節で述べたように与えた。粘性係数は前述のクリープ試験の解析で用いたものと同じとした。解析結果をFig.9~Fig.11の試験結果と重ねて示す。圧縮レラクセーションでは、応力緩和が初期荷重と比べ著しく、さらにそれは載荷後、数時間で生じている。このことは圧縮レラクセーションでは、間隙水の役割が非常に大きいことを示唆している。実験結果は2つの解析曲線の間にある。ひとつはセメントペーストと間隙水の体積圧縮性を考慮したもの、もう一つはこれらの体積圧縮性を考慮しないものである。ゆえに、実際のレラクセーションのメカニズムはこれらの曲線の間にあると思われる。

引張レラクセーションの場合はどの荷重レベルでもわずかな応力緩和であった。明らかではあるが、引張荷重の場合は解析的には間隙水の移動の影響がないためである。実験結果でも、解析値よりわずかに応力緩和が大きい、同様の傾向を示している。

レラクセーションの解析では前節のクリープ解析に比べ満足する結果が得られなかった。言い換えれば、若材齢コンクリートのクリープとレラクセーションにおいては異なった変形メカニズムがまだ存在するということである。

Fig.12は荷重応力に対して正規化された間隙水圧の材齢に対する変化を表している。解析における引張レラクセーションと圧縮レラクセーションの違いは明らかに間隙水の移動があるかないかによるものである。

### (4) 三軸圧縮試験の解析

本研究で構築された若材齢コンクリートモデルは降伏関数を可塑性ポテンシャルに置き換えることにより短期間荷重での弾塑性応力ひずみ関係を捉えることも可能である。例えば、著者らが行った三軸圧縮試験に対して、このモデルを用いて解析を行った<sup>9)</sup>。4.1節の流出量実験で用いた供試体と同じ配合、寸法で供試体を作製し、材齢22,24および26時間で試験を行った。側圧は試験中常に、0.5MPaとした。Fig.13~Fig.15に $\sqrt{I_2}$ と軸ひずみの実験結果、その解析結果、さらにひずみ変化に付随して生じた間隙水圧の解析結果を示す。一般的にコンクリートの三軸圧縮試験において側圧が一軸圧縮強度の1/3以下で与えられたならば、コンクリートは脆性的に破壊し、ひずみ軟化挙動を示さない。

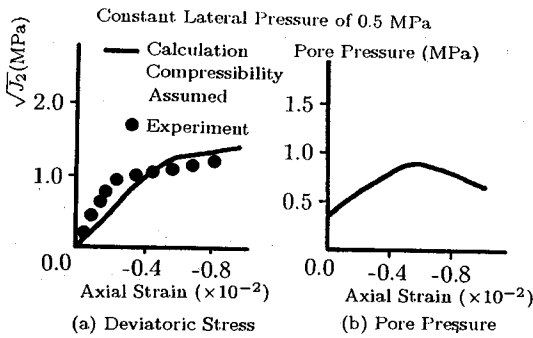


Fig.13 Three Axial Test of Early Age Concrete (Age=22 hrs.)

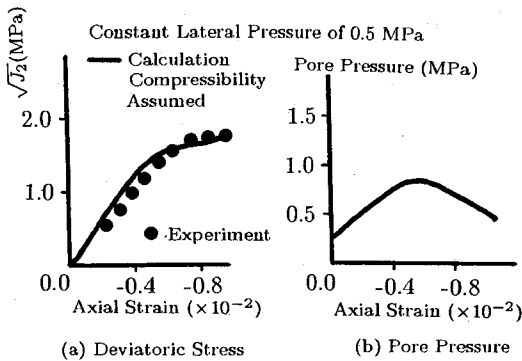


Fig.14 Three Axial Test of Early Age Concrete (Age=24 hrs.)

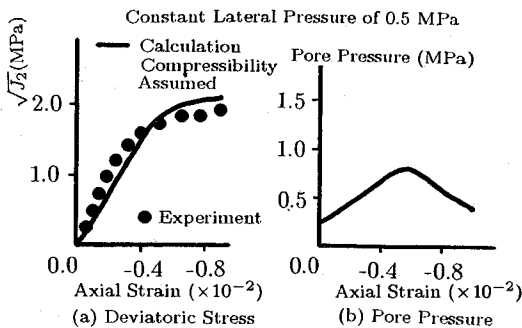


Fig.15 Three Axial Test of Early Age Concrete (Age=26 hrs.)

一軸圧縮試験で得られた同供試体の材齢22~26時間での一軸圧縮強度は1.8~3.0MPaであり、どの材齢でも側圧は一軸圧縮強度の1/3未満であった。しかし、どの実験結果においても脆性的な挙動を示したものはなく、延性的挙動を示している。Fig.13~Fig.15において解

析的考察を加えると、弾性域までは軸ひずみの増加につれ間隙水圧は増加していくが降伏に達すると塑性体積膨張のため間隙水圧は減少に向かう。そして有効応力の平均応力成分は間隙水圧の減少を補うために増加に転じる。間隙水圧の減少の程度によってはひずみ軟化を起こさなくなる場合もある。ゆえに、実際の破壊が有効応力によって起きるならば、コンクリートは極めて水密性がよいため、間隙水圧の影響が支配的となる。このことはある程度水で飽和しているコンクリートの早期破壊に対する情報をも与えている。

## 5. 結論

本研究では若材齢コンクリートの時間依存挙動を間隙水の役割の点から論じた。そしてセメントペーストと間隙水の体積圧縮性を考慮したものとししないもの両方を仮定した数理モデルを紹介した。さらに、電力中央研究所で行われたクリープ試験および岐阜大学で行われたレラクセーション試験に対して、このモデルを用いて解析し、挙動を間隙水の移動の見地から検討した。

各項目で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 流出量実験の結果、若材齢コンクリートにおける間隙水の流出が確認された。
- (2) クリープ試験およびレラクセーション試験の結果、粘着力、透水係数、粘性係数などの物性値については依然検討の余地はあるものの、提案されたモデルの妥当性がある程度示された。
- (3) 間隙水あるいは間隙水圧は若材齢コンクリートの挙動に強く影響を及ぼすことが分かった。

## 参考文献

- 1) 岩崎訓明:コンクリートの特性, 共立出版, pp.55~58, 1975年9月。
- 2) Lynam, C. G.: *Growth and Movement in Portland Cement Paste Concrete*, London, Oxford Univ. Press, pp.139, 1934.
- 3) Powers, T. C., Copeland, L. E., Hayes, J. C. and Mann, H. M.: Permeability of Portland Cement Paste, *ACI Journal*, No.51-14, pp.285-298, Nov., 1954.
- 4) Bazant, Z. P. and Najjar, L.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No. 25, pp. 3-20, 1972.
- 5) Neville, A. M.: Current Problems Regarding Concrete under sustained Loading, *Intern. Ass. for Bridge and Structural Engineering*, 26, pp.337-343, 1966.
- 6) Wu, Z. S. and Tanabe, T.: A Hardening-softening Model of Concrete Subjected to Compressive Loading, *Journal of Structural Engineering*, Architectural Institute of Japan, Vol.36B, pp.153-162,1990.
- 7) 河角誠, 笠原清, 栗山武雄:高温下におけるコンクリートのクリープ, 電力中央研究所, No.380037, pp. 15~16, 1981年2月。

- 8) 村田二郎:コンクリートの水密性の研究, 土木学会論文集, 第77号, pp.69-103, 1961年11月.
- 9) 石川靖晃, 大下英吉, 田辺忠顕:若材齢壁状コンクリート構造物の飽和透水性材料としての温度応力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 1137-1142, 1993.
- 10) 原口晃, 河角誠, 田辺忠顕, 岡沢孝雄:黒田ダム嵩上げ工事におけるコンクリート打設計画の検討(その1) —コンクリートの力学的, 熱的性質の実験検討—, 電力中央研究所報告, No.375561, pp. 2-36, 1976年7月.
- 11) 森本博昭, 平田正成, 小柳治:若材齢コンクリートのレラクセーション特性とその評価法に関する研究, 土木学会論文集, 第396号, V-6, pp.59-68, 1988年8月.

(1994. 6. 8 受付)

## TIME DEPENDENT BEHAVIOUR OF CONCRETE IN EARLY AGES AND ITS MODELLING

Yasuaki ISHIKAWA, Hideki OHSITA, Hirotoishi ABE and Tada-aki TANABE

A mathematical model of early age concrete is presented to investigate the time dependent behaviour taking into account the rapid change of the properties. The study concentrates on the role of pore water in creep and relaxation of early age concrete. Several experimental results are analyzed with the model and pore water effect on early age concrete is discussed.