

コンクリート内部に発生する間隙水圧の予測と その影響評価に関する解析的研究

大下英吉¹・田辺忠顯²

¹正会員 工博 広島大学助手 工学部土木工学科 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

本研究は、コンクリートや岩盤などの多孔質材料に適用可能な水分移動に関する解析理論の構築を行った。そして、コンクリート内部に発生する間隙水圧に関する解析的評価を行ない、実測結果との比較により本モデルの適用性を示した。さらに、本モデルを用いてコンクリートの強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関するメカニズムの解明を行ない、水分移動の定量的評価の重要性を示した。

Key Words : pore water pressure, hydration, total stress, effective stress, porous material, water migration

1. はじめに

近年、大深度地下構造物や海洋構造物など新たなコンクリート構造の利用が注目されている。これらの構造物の主たる外力は土圧や水圧であり、設計に際して十分な安全性と耐久性を確保するためには、コンクリート中の水分移動現象をより一層詳細に明らかにする必要がある。一方、原子力発電所から生成される放射性廃棄物の処理施設の合理的設計においては、コンクリート中の水分移動が重要な設計要因であることは言うまでもない。即ちこれらの構造物は、建造後の保守および補修が非常に困難であり長期に渡る耐久性も確保しなければならないため、水分移動問題が特に重要となってくる。このように、コンクリート中の水分移動が関与する現象は数多く、さらに水分移動問題の重要性は高いのであるが、その水分移動に関して定性的あるいは定量的評価を行った研究は殆どなく、さらにコンクリートを組織する微細な空隙内部に発生する間隙水圧の実験的あるいは解析的評価を行った実例は無いものと思われる。したがって、これらの現象をより正しく理解するためには、間隙水圧の及ぼす影響も含めてコンクリート中の水分移動に関する定性的かつ定量的評価が、不可欠であると考えられる。

そこで筆者らは、荷重の載荷によってコンクリート内部に発生する間隙水圧を測定するセルを開発し、三軸非排水状態における間隙水圧の測定実験¹⁾を行った。実験的検討から、コンクリートを組織する微細な空隙内部に発生する間隙水圧は、載荷応力に対して非常に大きな割合を占めていることが明らか

になった。さらに、コンクリート養生中に水和反応によって形成される空隙内部の応力状態の負圧の存在を示す変曲点が存在することも明らかになった。この変曲点は、それよりも低ひずみ域では、間隙水圧が殆ど発生しないか、あるいは非常に緩やかな勾配を持ち変曲点における間隙水圧は非常に小さく、またそれよりも高ひずみ域では、載荷応力とともに間隙水圧がほぼ直線的に増加するというような境界点である。しかし、従来の応力～ひずみ関係ではひずみの増加とともに応力は直線的に増加するといったように後者の段階のみで応力～ひずみを関係付けていたが、前者の段階は硬化収縮などの問題に密接な関連を有している。これらの実験を通して、コンクリート内部に発生する間隙水圧に関する研究が、極めて重要であることが判明した。

本研究では、まずコンクリートや岩盤などの多孔質材料に適用可能な水分移動に関する解析理論の構築を行った。そして、コンクリート内部に生じる間隙水圧の解析的評価を行い、間隙水圧の測定実験の結果との比較により本モデルの適用性を示すと同時に、コンクリート中の水分移動に対する基礎的考察を行った。さらに、本モデルを用いてコンクリートの強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関するメカニズムの解明のための解析的評価を行った。間隙水圧測定実験は、横方向変位が拘束された三軸完全非排水状態で行い、間隙水圧測定材齢、水中養生期間（含水率）、処女載荷応力導入材齢および処女載荷応力比（導入応力／コンクリート強度）をパラメータにして間隙水圧測定を実施した。なお、処女載荷応力は、予め供試体にクラックを導入し、間隙水圧

に及ぼすクラックの影響を検討するために設定した。また、間隙水圧の解析的評価は全実験ケースに対して行い、さらにコンクリートの強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関するメカニズムの解明は、完全飽和状態と不飽和状態を想定したコンクリート試験体に対する解析を行い、その解析結果からメカニズムを解明することにした。

2. 2相多孔質材料としてのコンクリートのモデル化

筆者らは、CSHゲル粒子や骨材粒子を弾性体として考え、それらの混合材料では各粒子間の相対的位置変化により、材齢とともに間隙が減少するような粘塑性硬化材料として、若材齢コンクリートに対しても適用可能な一般性のあるモデル化の構築を行った。2相多孔質材料としてのコンクリートのモデル化を行う際には、図-1に示すように、間隙水の質量保存則と力の釣合を満足しなければならない。そこで、以下に間隙水の質量保存則、力に釣合およびそれらを連成した水・コンクリート骨格連成解析理論を示す。なお、以下に示す間隙水圧とは、水と空気の混合体に発生する圧力を示すものとする。

(1) 水和による体積収縮を考慮した間隙水の質量保存則

間隙水の移動速度 $\{v\}$ は、単位体積当たりのGibbsの自由エネルギーGの勾配に依存するものと仮定すると²⁾、次式のように表すことができる。

$$\{v\} = -k \nabla G \quad (1)$$

ここで、 k は透水係数である。Gibbsの自由エネルギーGは、間隙水の相の状態が液体であるとすれば、

$$G = (\gamma_w z + p) / \gamma_w \quad (2)$$

と表される。ここで、 γ_w および z は、それぞれ水の単位体積重量、鉛直上向きの座標を示している。

間隙水の質量保存則では、単位時間当たりにコントロールボリューム内に蓄積される流体量は流入量と流出量との差に等しいものとしている。なお、蓄積量は次に示す各要因により構成される。

a) 全ひずみの変化

$$\rho_w S_w \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = \rho_w S_w \{m\}^r \frac{\partial \{\epsilon\}}{\partial t} \quad (3)$$

b) 圧力変化に起因する粒子体積の変化

$$\rho_w S_w (1 - \xi) \{m\}^r [D_s^{op}]^{-1} \{m\} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4)$$

c) 間隙水の飽和度の変化

$$\xi \rho_w \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (5)$$

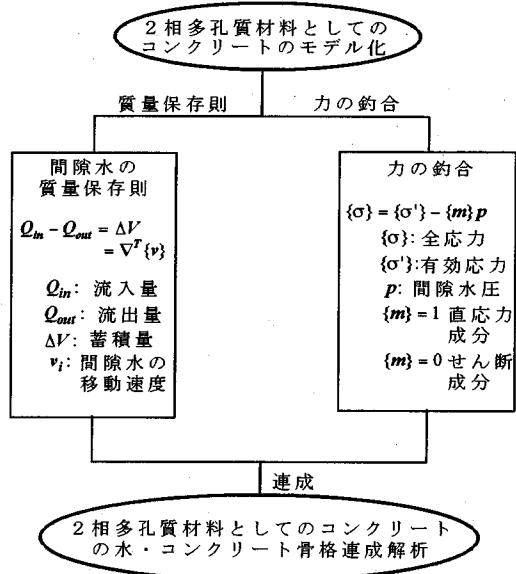


図-1 解析理論構築までの流れ

d) 液・気体相の圧力による体積変化

$$\xi \rho_w S_w K_f \frac{1}{K_f} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6)$$

e) 液・気体相の温度による体積変化

$$-3 \xi \mu \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

f) 液・気体相のクリープによる体積変化

$$-\rho_w S_w \xi \{m\}^r \frac{\partial \{\epsilon''\}}{\partial t} \quad (8)$$

ここで、 $\{\epsilon''\}$ はクリープひずみである。

g) 有効応力変化による固体粒子の変化

$$-\rho_w S_w \{m\}^r [D_s^{op}]^{-1} \frac{\partial \{\sigma'\}}{\partial t} \quad (9)$$

ここで、 ρ_w, S_w, K_f, μ および ξ はそれぞれ液・気体の密度、液・気体の飽和度、液・気体の体積弾性係数、液・気体の線膨張係数および間隙率である。また、 $[D_s^{op}]$ は固体相の弾塑性マトリックス、 $\{m\} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ である。さらに、 $u(\Rightarrow \epsilon), p$ はそれぞれ変位および間隙水圧である。

h) 水和反応による体積収縮

$$\rho_w S_w \frac{\eta \gamma_p dC_h}{\rho_w dt} \quad (10)$$

ここで、 η は水和反応によりゲル空隙となる割合、 γ_p はセメントの完全水結合比であり0.25~0.38の値を取り、 ρ_w は水の密度、 C_h は単位体積当たりのセメント中で水和しているセメントの重量である。なお、式(10)は単位セメント当たりのセメントの体積収縮による間隙水の変化量であり、これをコンクリートの単位体積当たりに書き直すと、次式のよう

になる。

$$\rho_w S_w \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{dC_H}{dt} \frac{V_c}{V} \quad (11)$$

ここで、 V, V_c は、それぞれコンクリートの全体積およびセメントペーストの体積である。

本研究では、 C_H に河角らの研究³⁾を参考にすることとした。河角らによれば、水和速度が単位セメント量および単位水量に依存すると仮定することにより、 C_H を次のような式で表わしている。

$$\frac{dC_H}{dt} = k_0(1-n_0)t^{-n_0}(W - \gamma_p C_H)(C - C_H) \quad (12)$$

ここで、 C, W は、単位セメント量および単位水量である。また、 t は材齢(日)であり、 k_0, n_0 は材料定数である。式(12)を初期条件 $t=0$ において $C_H=0$ の元に解くと次式のようになる。

$W/C = \gamma_p$ の時

$$C_H = \frac{1 - \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]}{1 - \gamma_p \frac{C}{W} \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]} \times C \quad (13)$$

$W/C = \gamma_p$ の時

$$C_H = \frac{\gamma_p k_0 t^{1-n_0}}{1 + \gamma_p k_0 t^{1-n_0}}$$

また、 γ_p, η には、W.Czerninにより報告されたように、ポルトランドセメントは完全な水和に至るまでに、その重量の1/4の水と化学的に結合し、またゲル水で乾燥蒸発した後のセメントゲルは、その容積の約1/4にも達する微細に分布された空隙“ゲル空隙”を含んでいるとした⁴⁾。

コントロールボリューム内の全蓄積量が、a)～h)の項の総和に等しいものとすれば、質量保存則は次式のようになる。

$$\begin{aligned} & \rho_w S_w [\xi \{m\}]^T \frac{\partial \{\epsilon\}}{\partial t} + \frac{\xi}{K_f} \frac{\partial p}{\partial t} + 3\{(1-\xi)\alpha - \xi\mu\} \frac{\partial T}{\partial t} + \\ & \frac{V_c \eta \gamma_p}{V} \frac{\partial C_H}{\partial t} + \{(1-\xi) \frac{V_c}{V} - \xi\} \{m\}^T \frac{\partial \{\epsilon''\}}{\partial t} + \\ & \xi \frac{\partial S_w}{\partial t} - \rho_w \nabla^T \frac{k}{\rho_w} \nabla (\rho_w z + p) - q = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、式(14)中の左辺第4項は、液体の飽和度は時間によらず一定($=1$)であると仮定すると、ゼロとなり、最終的に質量保存則は次式のようになる。

$$\xi \{m\}^T \frac{\partial \{\epsilon\}}{\partial t} + \frac{\xi}{K_f} \frac{\partial p}{\partial t} + 3\{(1-\xi) - \xi\mu\} \frac{\partial T}{\partial t} +$$

$$\frac{V_c \eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{\partial C_H}{\partial t} + \{(1-\xi) \frac{V_c}{V} - \xi\} \frac{\partial \{\epsilon''\}}{\partial t} -$$

$$-\nabla^T k / \rho_w \nabla (\rho_w z + p) - q / \rho_w = 0 \quad (15)$$

ここで、 q は内部からの湧き出し量である。式(15)に重み付き残差法を適用することにより、間隙水の質量保存則は次のようなマトリックスで表わすことができる。

$$\begin{aligned} & -H\{\bar{p}\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \\ & - W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{g_p\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{creep}\}}{dt} + \{f_p^{ext}\} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $\{\bar{u}\}, \{\bar{p}\}$ は節点変位ベクトルおよび節点間隙水圧である。さらに、マトリックス H, L^T, S, W およびベクトル $g_p, f_p^{creep}, f_p^{ext}$ は次のように定義される。

$$\begin{aligned} H &= \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \bar{N} d\Omega, S = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k_f} \bar{N} d\Omega \\ L^T &= \xi \int_{\Omega} \bar{N}^T \{m\}^T B d\Omega \\ W &= \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1-\xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega \\ f_p^{creep} &= \int_{\Omega} \{(1-\xi) \frac{V_c}{V} - \xi\} \{m\}^T \{\epsilon''\} d\Omega \\ f_p^{ext} &= \int_{\Omega} \bar{N}^T q / \rho_w d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w z d\Omega \\ & + \int_{\Gamma} \bar{N}^T \{(\nu)^T \cdot n\} d\Gamma \\ g_p &= \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{V_c}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} C_H d\Omega \end{aligned}$$

(2) 力の釣合い式

間隙水圧 p が存在するならば、全応力 $\{\sigma\}$ と有効応力 $\{\sigma'\}$ との関係は、符号の定義を応力に関しては引張を正、間隙水圧に関しては圧縮を正とすると次式のようになれる。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p \quad (17)$$

ここで、 $\{m\}$ は直応力成分に関しては $m=1$ 、せん断成分に関しては $m=0$ である。式(17)中の有効応力は、コンクリートの固体相に作用する応力であり、次式のような増分形で表すことができる。

$$d\{\sigma'\} = [D_s^{\sigma'}] (d\{\epsilon'\} - d\{\epsilon''\} - d\{\epsilon^h\} - d\{\epsilon'''\}) \quad (18)$$

ここで、

$$d\{\epsilon'\} = \frac{V_A}{V} d\{\epsilon'_A\} + \frac{V_c}{V} d\{\epsilon'_c\} \quad (19)$$

$$d\{\epsilon''\} = \frac{V_A}{V} d\{\epsilon''_A\} + \frac{V_c}{V} d\{\epsilon''_c\} \quad (20)$$

$$d\{\epsilon^h\} = \frac{1}{3} \frac{V_c}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{dC_h}{dt} \{m\} \quad (21)$$

$d\{\epsilon^o\}$: 式(22)参照

であり、それぞれ全ひずみ、間隙水圧ひずみ、体積収縮ひずみおよびクリープひずみである。なお、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。また、クリープひずみに関しては、次のような現象から導入することにした。先の間隙水圧測定実験¹⁾（本論文でも後に記載）から、変曲点となるひずみが材齢3日で荷重載荷した供試体（約1000μ）に比べ7日で荷重載荷した供試体（約500μ）の方が小さくなってしまい、これは恐らく体積収縮により発生する内部応力がクリープにより緩和されたことによるものと思われる。このことはすなわち、解析においてクリープひずみの導入を示唆しているものと考えられ、本研究では次式に示すような一般に良く用いられるクリープひずみ関数を導入した。

$$\epsilon^o(t, t') = a \times [1 - \exp\{b(t - t')\}] \quad (22)$$

ここで、 t, t' はそれぞれ材齢（日）および載荷材齢（日）であり、定数 a, b はそれぞれ $1.7 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-4}$, $-88.4 \sim -33.6$ である。

そして、仮想仕事の原理を用いた力の釣合い式を有限要素により離散化すると、次式のようになる。

$$K_r \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} = 0 \quad (23)$$

ここで、マトリックス K_r, L および A はそれぞれ接線剛性マトリックス、間隙水圧による固体相の圧縮性への影響を表すマトリックスおよび温度の影響を表すマトリックスである。また、 $\{\bar{f}\}$ は体積収縮およびクリープを考慮した外力ベクトルである。これらのマトリックスは、次式のように定義される。

$$\begin{aligned} K_r &= (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{pp} B d\Omega \\ L &= \xi \int_{\Omega} B^T \{m\} \bar{N} d\Omega \\ A &= (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{pp} \{m\} \alpha \bar{N} d\Omega \\ \{\bar{f}\} &= \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{t\} d\Gamma + \\ &\quad (1-\xi) \frac{1}{3} \frac{V_c}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} C_h \int_{\Omega} B^T D_s^{pp} \{m\} \bar{N} d\Omega + \\ &\quad (1-\xi) \frac{V_c}{V} \int_{\Omega} B^T D_s^{pp} \{\epsilon^o\} d\Omega \end{aligned}$$

ここで、 α は固体相の線膨張係数であり、 $\{b\}$ およ

び $\{t\}$ はそれぞれ物体力および表面力である。

(3) 2相多孔質材料の支配方程式

間隙水の質量保存則と力の釣合い式とを満足する連成方程式は、次のようなマトリックス形式で表わされる。

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{cc} K_r & -L \\ -L^T & -S \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{array} \right\} \\ &= \left\{ \begin{array}{c} \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{creep}\}}{dt} - \{f_p^{ex}\} + \frac{d\{g_p\}}{dt} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

結局のところ、式(24)すなわち節点変位 $\{\bar{u}\}$ と節点間隙水圧 $\{\bar{p}\}$ を未知数とする連立方程式の解を求めれば、コンクリート中の水分移動特性が理論的に求まる事になる。実際の数値計算は、式(24)を後退差分で表わした式(25)を用いて、境界条件および初期条件を与えることによって解くことができる。

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} K_r & -L \\ -L^T & -S - \Delta t_n H \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \Delta \bar{u}_n \\ \Delta \bar{p}_n \end{array} \right\} \\ &= \left\{ \begin{array}{c} \Delta \bar{f}_n + A \Delta \bar{T}_n \\ W \Delta \bar{T}_n - f_{pn}^{ex} \Delta t_n - \Delta f_{pn}^{creep} + \Delta g_{pn} + \Delta t_n H \bar{p}_{n-1} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u}_n &= \bar{u}_n - \bar{u}_{n-1}, \Delta \bar{p}_n = \bar{p}_n - \bar{p}_{n-1}, \Delta \bar{T}_n = \bar{T}_n - \bar{T}_{n-1} \\ \Delta \bar{f}_n &= \bar{f}_n - \bar{f}_{n-1}, \Delta g_{pn} = g_p(t_n) - g_p(t_{n-1}) \\ \Delta f_{pn}^{creep} &= f_p^{creep}(t_n) - f_p^{creep}(t_{n-1}), t_n = t_{n-1} + \Delta t \end{aligned}$$

3. 解析に用いる材料定数

本解析理論すなわち式(25)は、コンクリートや岩盤などの多孔質材料に適用可能な一般性のあるモデルとして構築した。しかし、その妥当性は、多くの実験結果との対比から検証されなくてはならない。本研究では、間隙水圧実測結果¹⁾に対する解析的検討を行うため、本解析理論を若材齢コンクリートに適用した。実際に式(25)を解くためには、圧縮強度、弾性係数、透水係数、および塑性域におけるコンクリートの初期粘着力や内部摩擦角などの材料定数を定めなければならない。しかし、若材齢コンクリートについては、水和反応が急激に進行することにより、時間とともにその性質が顕著に変化することを考慮しなければならない。すなわち、若材齢コンクリートに対する解析的検討においては、水分移動問題にコンクリートの養生中に水和反応によって形成される空隙内部の応力状態を考慮した特殊な解析方法でなくてはならない。この理由は、若材齢コ

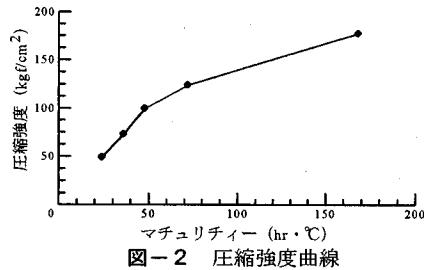


図-2 圧縮強度曲線

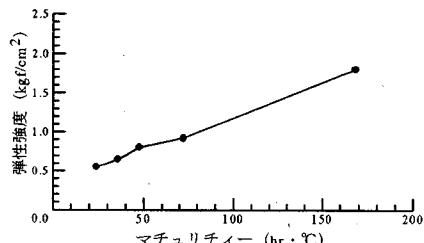


図-3 弾性係数曲線

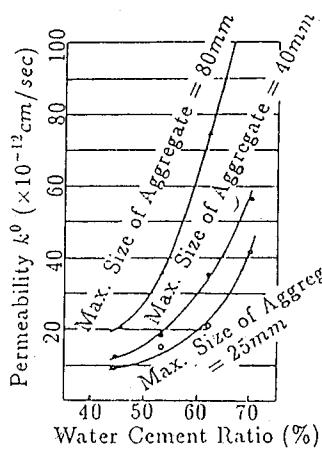


図-4 透水係数試験結果
(村田らの実験)

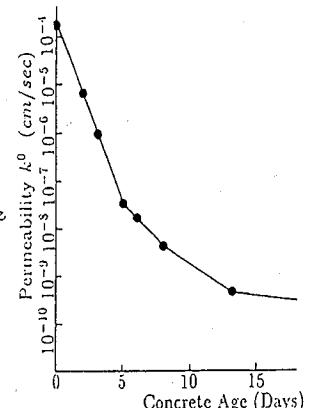


図-5 透水試験結果
(T.C.Powersの実験)

ンクリートに対する実験的検討¹⁾から、コンクリート養生中に水和反応によって形成される空隙内部の応力状態が負圧である（変曲点の存在）ことが明らかになったことによるものである。変曲点は、それよりも低ひずみ域では、載荷応力と空隙内部に発生している負圧とが打ち消しあうため間隙水圧が殆ど発生しないか、あるいは非常に緩やかな勾配を持ち変曲点における間隙水圧は非常に小さく、またそれよりも高ひずみ域では、載荷応力とともに間隙水圧がほぼ直線的に増加するというような境界点である。

(1) コンクリートの力学的特性

本解析を行う際、圧縮強度や弾性係数などの各材料定数を、解析ステップに対応する材齢毎に知る必要がある。一般に、圧縮強度および弾性係数は、マチュリティの関数としても一般性は失われないと言われている。そこで本研究では、筆者らが先に報告した実験結果を解析するために使用した、これらの関係を図-2および3に示す。両図に示すコンクリートの配合は、W/C=60%，C=377 kgf/m³，W=226 kgf/m³であり、実験で使用したコンクリートと同じである。なお、圧縮強度および弾性係数とも実測結果がない材齢では、2点間の実験結果を線型補間することにより決定した。

(2) コンクリートの透水係数

村田ら⁵⁾は、硬化コンクリートに対する透水試験を行い、図-4に示すように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。またT.C.Powers⁶⁾は、W/C 70%の硬化コンクリートに対する透水試験を行ない、図-5に示すように材齢と透水係数との関係を報告している。本研究では、各

材齢における透水係数は、両図から推定して用いることとした。なお、図-5はW/C 70%のコンクリートに対する結果であるが、本研究では配合によらず、透水係数の減少率と材齢関係は一定であるものとする。

(3) 液・気体相の体積弾性係数

一般に、コンクリートは不飽和材料であるが、水中養生を行ったコンクリート供試体に外力が作用した場合には、飽和に近い状態になることが確認されている¹⁾。これは、養生中に生じる内部空隙の負圧の存在により、外部から供試体内部に水が浸透し負圧が緩和するとともに、外力の作用により内部空隙の体積が減少することによるものである。そこで本研究では、このような水中養生供試体ではコンクリートは水で飽和されているものとして、液・気体相の体積弾性係数は22000 kgf/m³とした。なお、コンクリートが飽和に近い状態であれば、液体と気体の体積弾性係数の違いから、水圧に対して空気圧は無視できる程度の大きさであるものと考えられる。一方、気中養生を行った供試体では、外部からの水の浸透が無く、外力の作用によても依然不飽和状態である¹⁾。このようなコンクリートに対しては、体積弾性係数を低減することにより、本解析理論による評価が可能である。しかし、体積弾性係数の低減率は、液体と気体の混合率によって大きく変動することが予想され、一義的には決定できない。したがって、本研究では、このような気中養生供試体に対しても飽和状態を仮定して本解析理論の適用を行うが、実験結果と飽和を仮定した解析結果との比較により、本解析理論の適用範囲が明らかになるとともに、不飽和状態におけるコンクリート中の水分移動の予測が可能になるものと考えられる。

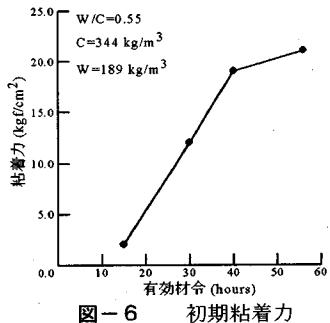


図-6 初期粘着力

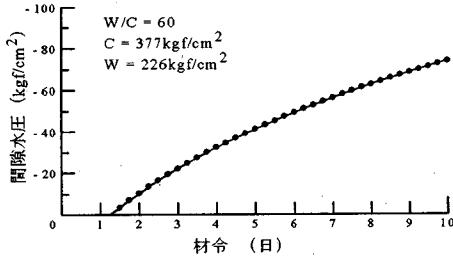


図-8 初期間隙水圧

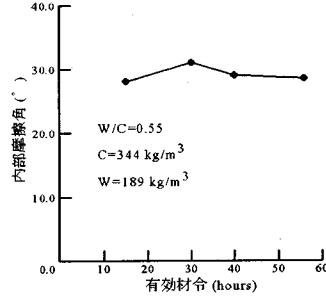


図-7 初期内部摩擦角

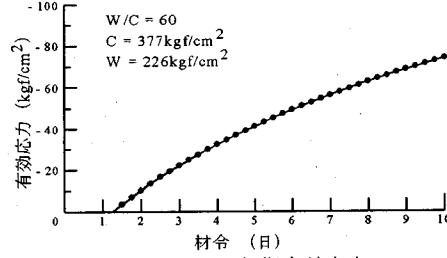


図-9 初期有効応力

(4) 塑性域におけるコンクリートの初期粘着力と初期内部摩擦角

本研究における塑性モデルには、Drucker - Prager タイプ⁷⁾を用いている。したがって、初期粘着力および初期内部摩擦角などの材料定数を決定しなくてはならない。名古屋大学⁸⁾ではW/Cが55%，試験体寸法がφ5cm×10cmのセメントペースト試験体の三軸圧縮試験を材齢0.5, 1, 1.5, 2日において実施し、有効材齢と初期粘着力および初期内部摩擦角との関係を求めており、それぞれの関係を、図-6, 7に示す。図-6の初期粘着力～有効材齢関係では、各材齢における初期粘着力はコンクリートの圧縮強度の約1/4となっている。また、図-7の初期内部摩擦角～有効材齢関係では、初期内部摩擦角は27°～31°の範囲内にあり、有効材齢に対してほとんど変化していない。この結果のみで、一般的な配合における初期粘着力と初期内部摩擦角を同定することはできないが、水セメント比が間隙水圧測定実験で用いたコンクリートとほぼ同程度であるため、本解析では初期粘着力には圧縮強度の1/4、初期内部摩擦角には29°を設定した。

4. 養生中に生じるコンクリート内部の応力状態

セメントと水との水和反応によってできる生成物は、主にセメントゲルからなっている。しかし、両物質がセメントゲルになる時、ゲルを構成するゲル水の体積の約1/4が初期の体積から減少すると言われている。これは、一般に“水和による収縮”と呼ばれているものである。

先の間隙水圧測定実験結果では、載荷直後全応力

は緩やかに発生することに対し、間隙水圧は変曲点に達するまでは殆ど発生せず、その後は載荷応力とともに急激に発生するという傾向を示している。この変曲点は、コンクリートの養生中の水和反応による収縮によりコンクリートの内部空隙に負の応力が存在していることを示している。内部空隙の応力状態に影響を与える要因は水和反応による体積収縮以外にもあると思われるが、本研究では水和反応による体積収縮が空隙の応力状態に影響を及ぼす主要因であると考え、その項のみを対象にして内部空隙の応力状態を評価することとした。なお、本章では、3章で述べた材料定数を用いて養生中に水和反応によって生じる内部空隙の応力状態を解析的に評価するとともに、養生中に生じるコンクリート内部の応力状態が特に影響を及ぼすと考えられる温度応力について、その影響を従来の温度応力解析方法による結果と比較することにする。

(1) 間隙水圧と全応力

コンクリートの水和反応による体積収縮によって生じる空隙内部の応力状態を解析的に評価するには、3章で述べた材料定数の他に境界条件、水の体積弾性係数ならびに水和進行率を表すパラメータを設定しなければならない。本研究では、境界条件として変位に関しては一軸状態を仮定し、間隙水に関しては非排水条件を仮定した。また、2章で示した水和進行率を表す材料定数 k_0, n_0 は、セメントの水和進行率が材齢6日の時点で約50%となるように設定し、それぞれ $6.219 \times 10^{-4}, 8.928 \times 10^{-2}$ とした。

解析結果を図-8および9に示す。図-8は、間隙水圧～材齢関係、図-9は、有効応力（コンクリート骨格に作用する応力）～材齢関係をそれぞれ表している。

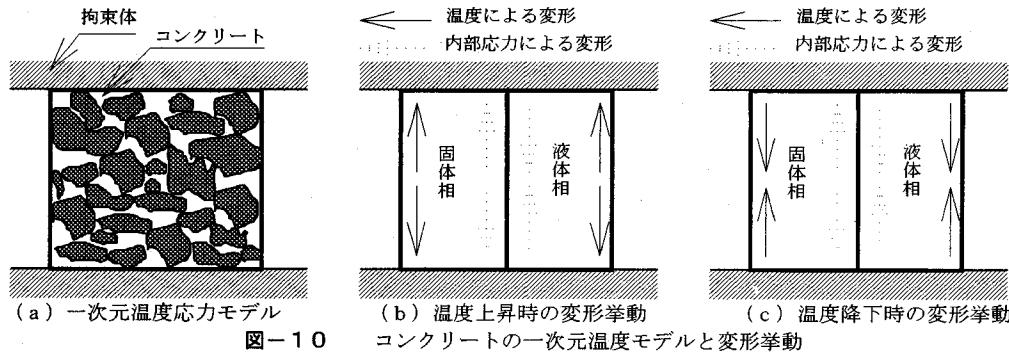


図-10

表-1 温度応力算定のための材料条件

固体相の弾性係数 (kgf/cm ²)	15×10^5
液体相の体積弾性係数 (kgf/cm ²)	22×10^4
体積収縮による有効応力 (kgf/cm ²)	-100
体積収縮による空隙の応力 (kgf/cm ²)	-100
固・液体相の線膨張係数 (°C)	1.0×10^{-5}
温度変化量 (°C)	±10.0

図-8に示す材齢～間隙水圧関係では、内部空隙に発生する間隙水圧は負圧となり、その値は材齢すなわち水和反応の進行により放物線的に上昇している。なお、内部空隙に発生する間隙水圧は、材齢が3日および7日において、それぞれ約22.0、57.0 kgf/cm²の負圧となっている。さらに、材齢～有効応力関係では、試験体に外力が作用していないことから全応力はゼロ、すなわち有効応力は圧縮となり、材齢による変化は間隙水圧と同じである。液体相および固体相に作用する上記のような応力状態は、次のような理由によるものと考えられる。セメントは、水和反応により絶対体積が減少するが、強度発現し始めると、骨格が体積減少に抵抗することにより内部に微細な空隙が形成される。この際、供試体に外力が作用していないものと仮定すると、骨格には体積減少に抵抗する圧縮力が発生し、空隙（水隙）にはそれに釣り合う引張力が発生することになる。実現象では、形成される空隙内には水、気体あるいは蒸気などが存在し、飽和状態を仮定した本解析条件とは異なるが、水と気体あるいは蒸気の体積弾性係数の違いから、水和反応により発生する負圧の殆どが水で生じるものと考えられる。このような、水和による収縮で発生する内部応力は、特に若材齢時のような水和反応率が大きい材齢では、負圧の発生する程度が大きいものと考えられ、特に自己収縮⁹⁾などの問題に非常に大きな影響を及ぼすものと思われる。しかし、空隙内部の応力状態すなわち図-8および9はあくまで解析結果であるが、確立された実験方法が無いため、現時点においては解析精度の検討の実施が困難である。したがって、今後実験方法の確立とともに、解析結果の精度の検討を行う必要があるものと言える。なお、本研究では、解析により得られた結果をそのまま用いて、次章で

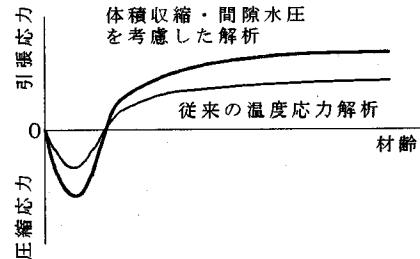


図-11 温度応力履歴図

は若材齢コンクリートに生じる解析的評価を行うこととする。

(2) 温度応力に及ぼす影響評価

コンクリートの養生中に生じる内部の応力状態が最も大きな影響を及ぼす代表例として、温度応力問題が挙げられる。従来の温度応力解析では、図-8、9のような内部空隙の負圧や骨格の圧縮応力という養生中に生じる初期応力状態を考慮していない解析であった。ここでは、このような初期応力状態を考慮することにより、従来の温度応力解析結果との相違を考察する。さらに、先の間隙水圧測定実験で測定された間隙水圧が温度応力に及ぼす影響についても考えてみることにする。そこで、図-10に示すような最も簡単な軸方向変位を拘束した一次元温度応力問題を考えてみる。コンクリートを構成する固体相と液体相は、温度上昇時には同図(b)、温度降下時には同図(c)に示すようなモデルであるものと仮定する。なお、同図(b)および(c)に示す破線の矢印は、初期の応力が作用している状態で変形をしようとする方向であり、また実線の矢印は、温度が作用した場合に変形しようとする方向を表しており、両矢印とも各相内に均一に作用しているものとする。このようなモデルに対して、表-1に示すような条件を仮定して、まずクリープ現象が無い場合を想定して影響評価を検討する。

温度上昇時には、固体相には初期の応力と温度によって変形しようとする方向が同じであるため、初期の圧縮応力(-10.0 kgf/cm²)に加えて温度による膨張を拘束する圧縮応力(-15.0 kgf/cm²)が作用し、-25.0 kgf/cm²の圧縮応力が発生する。また、液体相

表-2 間隙水圧測定実験における試験体名

試験体名	供試体作成から間隙水圧測定実験までの供試体の処理方法							処女載荷応力比 ^a
III1-0-0	打込み	脱型	気中養生	載荷				0 %
III1-0-60	材令(日) 0	1	2	3	間隙水圧測定			60 %
III1-0-90	処女載荷応力導入							90 %
III1-2-0	打込み	脱型	水中養生	載荷				0 %
III1-2-60	材令(日) 0	1	2	3	間隙水圧測定			60 %
III1-2-90	処女載荷応力導入							90 %
VII3-2-0	打込み	脱型	水中養生	処女載荷応力導入	気中養生	載荷		0 %
VII3-2-60	材令(日) 0	1	2	3	4	5	6	間隙水圧測定
VII3-2-90	処女載荷応力導入							90 %
VII3-4-0	打込み	脱型	水中養生	処女載荷応力導入	水中養生	気中養生	載荷	
VII3-4-60	材令(日) 0	1	2	3	4	5	6	間隙水圧測定
VII3-4-90	処女載荷応力導入							90 %
VII3-6-0	打込み	脱型	水中養生	処女載荷応力導入	水中養生	載荷		0 %
VII3-6-60	材令(日) 0	1	2	3	4	5	6	間隙水圧測定
VII3-6-90	処女載荷応力導入							90 %
VII5-4-0	打込み	脱型	水中養生	処女載荷応力導入	気中養生	載荷		0 %
VII5-4-60	材令(日) 0	1	2	3	4	5	6	間隙水圧測定
VII5-4-90	処女載荷応力導入							90 %
VII5-5-0	打込み	脱型	水中養生	処女載荷応力導入	水中養生	気中養生	載荷	
VII5-5-60	材令(日) 0	1	2	3	4	5	6	間隙水圧測定
VII5-5-90	処女載荷応力導入							90 %
VII5-6-0	打込み	脱型	水中養生	処女載荷応力導入	水中養生	載荷		0 %
VII5-6-60	材令(日) 0	1	2	3	4	5	6	間隙水圧測定
VII5-6-90	処女載荷応力導入							90 %

には変形方向が逆であるため、初期に生じている負圧(-10.0 kgf/cm²)と温度による膨張を拘束する圧縮応力(2.2 kgf/cm²)とが緩和しあい、-7.8 kgf/cm²の負圧が発生する。コンクリートの全応力は有効応力と間隙水圧との差として定義していることにより-17.2 kgf/cm²となり、従来の解析(-15.0 kgf/cm²)に比べ圧縮応力が-2.2 kgf/cm²大きくなる。次に温度降下時には、固体相には初期の応力と温度によって変形しようとする方向が逆であるため、初期の圧縮応力(-10.0 kgf/cm²)と温度収縮を拘束する引張応力(15.0 kgf/cm²)とが緩和しあい、5.0 kgf/cm²の引張応力が発生する。また、液体相には変形方向が同じであるため、初期に生じている負圧(-10.0 kgf/cm²)に加えて温度収縮を拘束する引張応力(-2.2 kgf/cm²)が作用し、-12.2 kgf/cm²の負圧が発生する。コンクリートに生じる全応力は、有効応力と間隙水圧の差から17.2 kgf/cm²となり、従来の解析(15.0 kgf/cm²)に比べ引張応力が2.2 kgf/cm²大きくなる。したがって、体積収縮によって生じる内部の応力状態を考慮することにより、従来の解析結果よりも圧縮および引張応力ともに大きくなり、図-11に示すような温度応力履歴になるものと思われる。以上に示した現象は、水和反応による体積収縮によって生じる内部の応力状態が温度応力に及ぼす影響をクリープがない場合について論じた。次に、クリープを考慮した場合について温度応力に及ぼす影響を考えてみる。仮に、水和反応による体積収縮によって生じるコンクリート内部の応力が、クリープにより緩和されゼロになる特別な場合を想定する。温度上昇時には、

コンクリート(液体相)の膨張を拘束することにより正圧の間隙水圧が発生し、また温度降下時にはコンクリート(液体相)の収縮を拘束することにより負圧の間隙水圧が発生する。したがって、コンクリートに発生する全応力は、従来の温度応力解析結果に比べ間隙水圧分だけ大きな応力となり、先のクリープを考慮しない場合、すなわち図-11と同じ傾向になるものと考えられる。従来から、温度応力によるクラックが解析結果よりも早く発生することが多々見受けられるが、これは水和反応による体積収縮によって生じるコンクリート内部の応力状態あるいは温度荷重の作用によって生じる間隙水圧が、一つの大きな要因であるものと考えられる。なお、上記の結果は、軸方向を拘束した非常に簡単なモデルに対するものであるため、実構造物のような複雑な拘束条件下にあるものに対しては、水和反応による体積収縮によって生じるコンクリート内部の応力状態あるいは温度荷重の作用によって生じる間隙水圧を考慮した検討が必要になってくるであろう。

5. 若材齢コンクリートに生じる間隙水圧

先の間隙水圧測定実験では、実験パラメータとして、載荷材齢、処女載荷応力導入材齢、処女載荷応力比(導入応力/コンクリート強度)ならびに水中養生期間を設定し、間隙水圧の測定を行った結果、処女載荷応力比および水中養生期間(含水率)が間隙水圧やコンクリートの応力特性に影響を及ぼす主

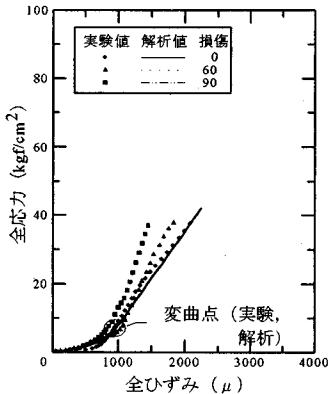


図-12 全応力に関する比較
(III 1-2-0,60,90試験体)

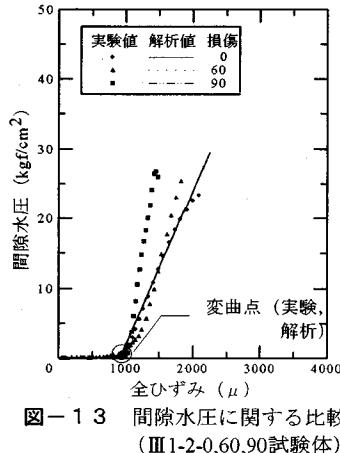


図-13 間隙水圧に関する比較
(III 1-2-0,60,90試験体)

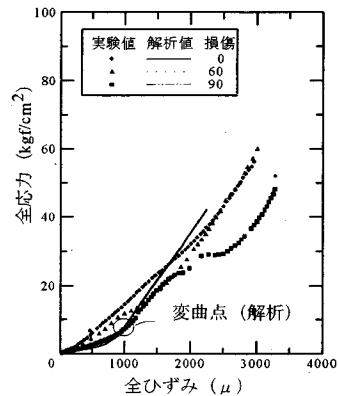


図-14 全応力に関する比較
(III 1-0-0,60,90試験体)

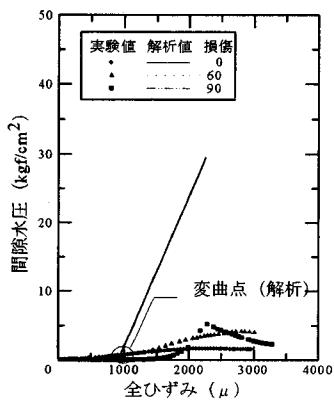


図-15 間隙水圧に関する比較 (III 1-0-0,60,90試験体)

要因であることが判明した。また、間隙水圧は載荷応力に対して非常に大きな割合で発生し、さらにコンクリート養生中に水和反応によって形成される空隙内部の応力状態の負圧の存在を示す変曲点が存在することも明らかになった。そこで本章では、4章で示した養生中に生じるコンクリート内部に発生する初期応力状態を考慮して、荷重載荷により若材齢コンクリートに生じる間隙水圧を解析的に評価するとともに、コンクリート中の水分移動メカニズムについて言及する。

表-2は、先の間隙水圧測定実験で用いた供試体作成から間隙水圧測定実験までの供試体の処理方法を示すものである。供試体の処理方法は、材齢1日において処女載荷応力を導入し材齢3日で間隙水圧測定を行ったもの、材齢3日において処女載荷応力を導入し材齢7日で間隙水圧測定を行ったもの、および材齢5日において処女載荷応力を導入し材齢7日で間隙水圧測定を行ったものの3種類に大別される。このうち本研究で解析対象とした供試体は、表-2に示す全供試体であるが、解析的傾向は上記に示す各種類毎にほぼ同じであることから、本研究ではIII 1-0-0,60,90, III 1-2-0,60,90, VII 3-2-0,60,90, VII 3-6-0,60,90およびVII 5-4-0,60,90, VII 5-6-0,60,90供試体

に対する解析結果を示すことにした。以下では、III 1-0-0,60,90, III 1-2-0,60,90をIII 1シリーズ供試体、VII 3-2-0,60,90, VII 3-6-0,60,90をVII 3シリーズ供試体およびVII 5-4-0,60,90, VII 5-6-0,60,90をVII 5シリーズ供試体と呼ぶこととする。

各シリーズのうち損傷が導入された試験体に対する本解析の適用方法は、まず事前解析として、処女載荷応力導入材齢時に一軸圧縮状態で弾塑性解析を行い、強度の60, 90%における損傷パラメータ¹⁾を求める。次に、その損傷パラメータを初期値として、間隙水圧測定材齢における本解析を実施する。なお、境界条件は、変位に関しては横方向変位を拘束し、間隙水に関しては非排水状態とした。以下では、実験結果および本解析理論を各供試体に適用した解析結果を各シリーズ毎に示し、両結果の比較検討を行うこととする。

(1) III 1シリーズ試験体の比較

図-12～15は、実験結果と解析結果の比較を表している。図-12, 13は、それぞれ処女載荷応力導入後の養生方法が水中養生を行った試験体(III 1-2-0,60,90)に関する全応力～全ひずみ関係および間隙水圧～全ひずみ関係を表している。また、図-14, 15は、気中養生を行った試験体(III 1-0-0,60,90)に関する結果である。各図中に示す実線、点線、一点鎖線はそれぞれ解析結果を、記号●, ▲, ■はそれぞれ実験結果を表わしている。また、図中には、変曲点を記号○で示している。

図-12, 13に示されるIII 1-2-0,60,90試験体では、損傷を与えていない試験体において実験結果と解析結果で良好な一致が見られる。両図から、実験結果では養生中に生じる内部空隙の負圧と載荷応力とが打ち消し合うひずみすなわち変曲点において飽和状態となり、解析結果においてもこのような傾向を良く捉えているものと思われる。これは、図-16に示すような現象によるものと考えられる。すなわち、荷重載荷直前においては内部空隙にはO-Cの負圧が、また骨格にはO-Dの圧縮応力が生じている。そして、僅かな荷重載荷O-Dにより内部

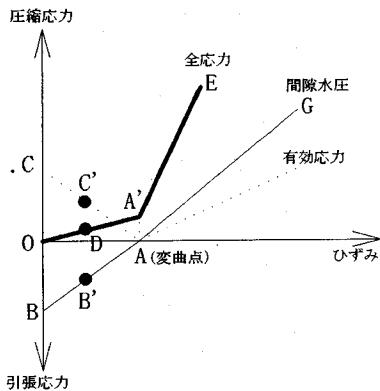


図-16 水分移動に関するメカニズム

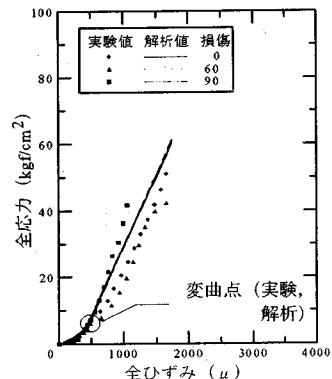


図-17 全応力に関する比較 (VII 3-6 試験体)

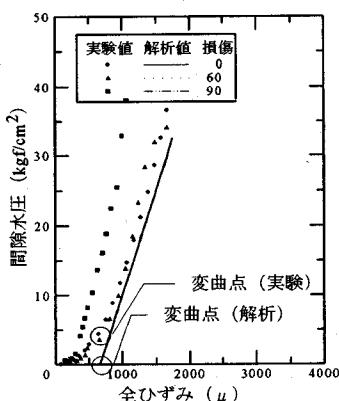


図-18 間隙水圧に関する比較
(VII 3-6 試験体)

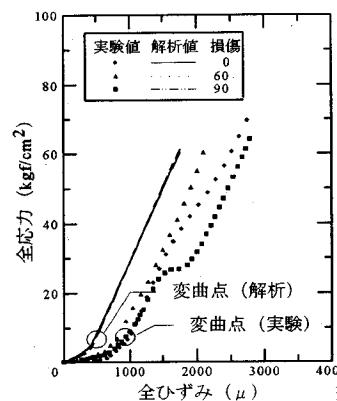


図-19 全応力に関する比較
(VII 3-2 試験体)

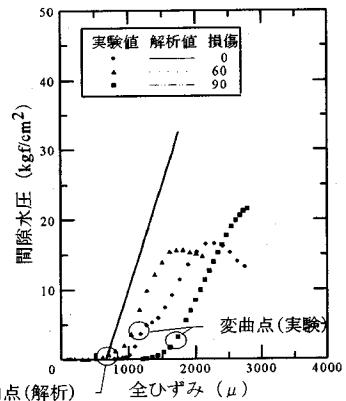


図-20 間隙水圧に関する比較
(VII 3-2 試験体)

空隙に生じていた負圧 $B - B'$ と骨格に生じていた圧縮応力 $C - C'$ とが打ち消し合い、最終的には載荷荷重 A' において $O - B$ と $O - C$ の殆どが打ち消し合うことになる。この時点が変曲点であり、それ以後の荷重載荷により水分移動が生じ、全応力は $A' - E$ に、間隙水圧は $A - G$ のように発生するものと思われる。したがって、水分移動問題を考える場合には、養生中に水和反応によって生じる空隙内部の応力状態を考慮しなければならないことが解析的にも示された。また、損傷を与えた試験体の場合では解析結果に比べ実験結果の方が全応力、間隙水圧とも勾配が大きく、両結果で差異が生じている。これは、損傷を与えることにより、コンクリート中の微細な粒子が水に混入し水の比重や体積弾性係数が、本研究で設定した値よりも大きくなっていることによるものと思われる。

一方、図-14, 15に示されるIII-0-0,60,90試験体に対する実験および解析結果は、全応力、間隙水圧とも全く異なるものとなっている。図-15から間隙水圧は、実験結果ではどの処女載荷応力比でも緩やかに上昇し、その後、ピークとなった後に急激にあるいは徐々に低下することに対し、解析結果では、養生による空隙内部の負圧がゼロとなるひずみにおいて間隙水圧が急激に発生している。実験

結果と解析結果との比較から、実験ではコンクリート中に水分を余り含んでおらず、荷重載荷によりコンクリート中で水分移動が殆ど発生せずマイクロあるいはマクロクラック内に水分が溜まった状態であるものと予想される。したがって、載荷応力のほとんどが固体相（コンクリート骨格）のみによって負担され、図-12に示す全応力～全ひずみ関係における勾配は解析結果に比べ小さいものとなっている。

(2) VII 3 シリーズ試験体の比較

図-17～20は、実験結果と解析結果の比較を表している。図-17, 18は、それぞれ処女載荷が導入された材齢3日からの養生方法が全期間水中養生の試験体(VII 3-6-0,60,90)に関する全応力～全ひずみ関係および間隙水圧～全ひずみ関係を表している。また、図-19, 20は、それぞれ全期間気中養生の試験体(VII 3-2-0,60,90)に関する結果を表している。各図中に示す実線、点線、一点鎖線はそれぞれ解析結果を、記号●、▲、■はそれぞれ実験結果を表わしている。また、図中には変曲点を記号○で表している。

図-17～20に示されるVII 3 シリーズ試験体では、特に図-17, 18に示されるVII 3-6-0,60,90試験体のように水中養生期間が長いほど、損傷を与え

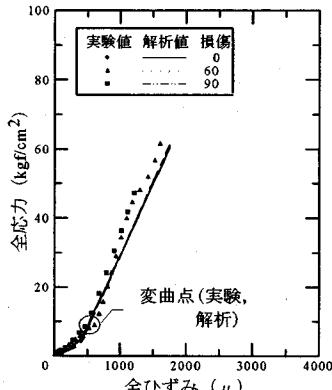


図-2 1 全応力に関する比較
(VII-5-4試験体)

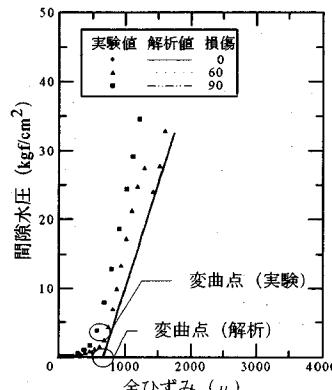


図-2 2 間隙水圧に関する比較
(VII-5-4試験体)

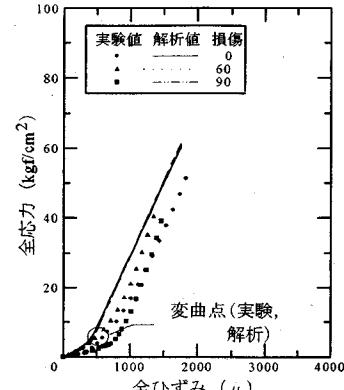


図-2 3 全応力に関する比較
(VII-5-6試験体)

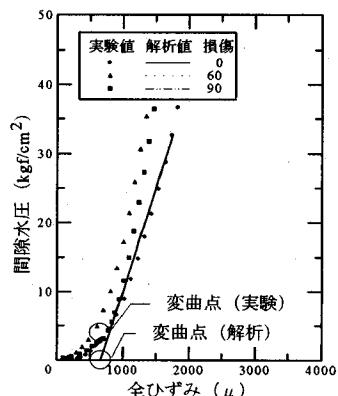


図-2 4 間隙水圧に関する比較 (VII-5-6 試験体)

ない試験体の場合には両者で比較的良好な一致が見らる。さらに、変曲点となるひずみは、III-1シリーズ試験体に比べて小さくなることがわかる。これは、水和反応中に間隙水圧と有効応力とがクリープ現象により緩和されること、さらに材齢が7日における供試体の剛性が材齢が3日に比べ大きくなることによるものである。また、損傷を与えた試験体の場合には、全応力～ひずみ関係および間隙水圧～ひずみ関係の勾配は解析結果の方が小さく、III-1シリーズ試験体で述べた同様な原因により全体的に両結果で差異が認められる。

一方、図-19、20に示される水中養生期間が短いVII-3-2-0,60,90試験体においては、解析により変曲点となるひずみが精度良く評価できれば、全応力、間隙水圧～全ひずみ関係で示される実験結果と解析結果は、比較的良好な一致を示すものと考えられる。すなわち、比較的水和反応が支配的な時期に水中養生を行っているため、荷重載荷によりコンクリートが飽和に近い状態となっていることが予想される。しかし、前述したように、変曲点となるひずみは、解析結果に比べ実験結果の方が大きくなってしまおり、水中養生を行うことにより初期応力は、水中養生供試体よりも大きくなることを示しているものと考え

られる。このことは、図-18と図-20に示すように、VII-3-2-0,60,90試験体に比べVII-3-6-0,60,90試験体の変曲点となるひずみが小さくなっていることからも一層明確となってくる。これは、長期間水中養生を行うことにより、供試体内部へ水が浸透し内部空隙に生じていた負圧が緩和されることによるものであり、このような現象を本研究ではクリープとして捉えている。したがって、図-19、20に示すVII-3-2試験体では、上述のような水の浸透による応力緩和すなわちクリープが殆ど生じないことにより、変曲点となるひずみに関して実験結果と解析結果で差異が生じているものである。

(3) VII-5シリーズ試験体の比較

図-21～24は、実験結果と解析結果の比較を表している。図-21、22は、それぞれ処女載荷が導入された材齢5日からの養生方法が全期間気中養生の試験体(VII-5-4-0,60,90)に関する全応力～全ひずみ関係および間隙水圧～全ひずみ関係を表している。また、図-23、24は、それぞれ全期間水中養生の試験体(VII-5-6-0,60,90)に関する結果を表している。各図中に示す実線、点線、一点鎖線はそれぞれ解析結果を、記号●、▲、■はそれぞれ実験結果を表わしている。また、図中には変曲点を記号○で表している。なお、VII-5-4-0試験体に対する実験結果は、間隙水圧計測中に計器の不良が生じたため本論文には記載していない。

図-21～24に示されるVII-5-4-0,60,90試験体およびVII-5-6-0,60,90試験体では、全応力～全ひずみおよび間隙水圧～全ひずみ関係とも、解析では損傷を与えた試験体を除き、変曲点あるいはそれ以降も実験結果を比較的良好に評価している。すなわち、両試験体とも、水和反応の支配的な時期に水中養生を行っていることにより、荷重載荷によって飽和状態となっていることが予想される。また、VII-3シリーズ試験体の場合にもそうであったが、III-1シリーズ試験体に比べ小さなひずみから水分移動が生じていることがわかる。

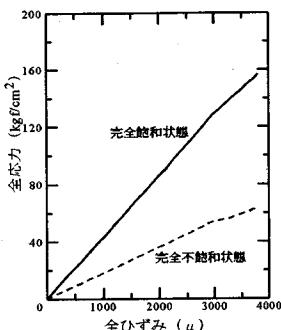


図-25 全応力～全ひずみ

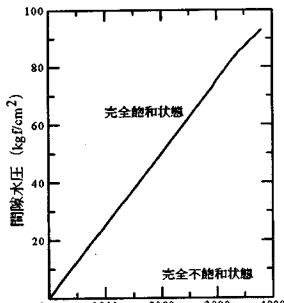


図-26 間隙水圧～全ひずみ

以上に示した、各試験体の実験結果と解析結果の比較検討により、本解析理論は水和反応が支配的な材齢に水中養生を行ったコンクリート供試体に対して、その適用性が確認された。また、コンクリート中の水分移動は、養生中に生じる内部空隙の負圧がゼロ（変曲点）となった時点で生じ、さらに水分移動問題を考える場合には、この内部空隙の負圧の状態（初期応力状態）を考慮しなければならないことが明らかになった。

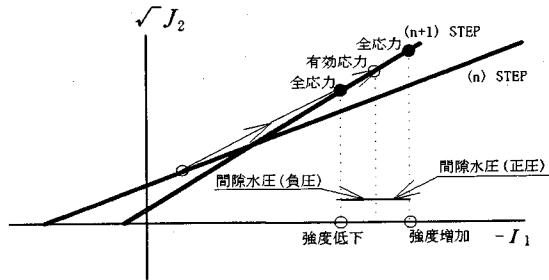
6. 強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関する解析的評価

5章に示した実験結果と解析結果との比較検討から、本解析理論は、本研究の範囲内においては特に水中養生期間が長くさらに損傷を与えない場合において実験結果を比較的良好評価していることが明らかになった。

そこで本章では、完全飽和状態と不飽和状態を想定したコンクリート試験体に対する解析を材齢3日において前章と同じ境界条件のもとで行い、コンクリートの強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関するメカニズムの解明を解析的に評価することとした。なお、不飽和コンクリートに対する解析は、液・気体相の体積弾性係数をほぼゼロとすることにより実施した。

解析結果を図-25, 26に示す。図-25, 26は、それぞれ完全飽和状態と不飽和状態の試験体に関する全応力～全ひずみ関係および間隙水圧～全ひずみ関係を表している。各図中に示す実線および点線は、それぞれ完全飽和状態および不飽和状態を表している。

図-25および26に示すように、完全飽和状態におけるコンクリートの有効応力は、空隙に水分を全く含まない状態、すなわち不飽和状態におけるコンクリートの全応力に等しいものである。すなわち、完全飽和状態におけるコンクリートの全応力は、弹性および塑性域においても不飽和状態におけるコンクリートの全応力よりも間隙水圧分だけ増加している。なお、不飽和状態におけるコンクリートの有効

図-27 $I_1 - \sqrt{J_2}$ 平面における有効応力および全応力経路 (Drucker-Prager Material)

応力は、内部に水を全く含まないため間隙水圧は発生せず、全応力に等しいものとなる。したがって、コンクリートの応力特性を有効応力で評価するすれば、図-25に示すように本解析条件においては、実測されるコンクリート強度すなわち全応力は、不飽和状態の試験体よりも完全飽和状態の試験体の方が、発生する間隙水圧が正圧であるため間隙水圧分だけ増加するということができる。なお、図-27は、(n)ステップから(n+1)ステップへの応力経路と応力状態を $I_1 - \sqrt{J_2}$ 平面で描いたものである。また、本解析条件とは異なる、すなわち塑性体積膨張やせん断変形が生じるような境界条件のもとでは、コンクリートが塑性域に入ると発生する間隙水圧が負圧となり、上記とは逆に実測されるコンクリート強度は、不飽和状態の試験体よりも完全飽和状態のものの方が間隙水圧分だけ小さくなるものと想定される。なお、このような境界条件に対する実験的評価は、今後の課題である。

7. 結論

本研究では、コンクリートや岩盤などの多孔質材料に適用可能な水分移動に関する解析理論の構築を行ない、コンクリート内部に発生する間隙水圧に関する解析的評価を実施した。さらに、本モデルを用いてコンクリートの強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関するメカニズムの解明を行ない、水分移動の定量的評価の重要性を示した。以下に、結果をまとめめる。

- (1) コンクリート中の水分移動を解析的に評価するには、コンクリートの養生中に生じる内部空隙の応力状態を把握する必要がある。
- (2) 水和による収縮の項を考慮することにより、コンクリートの養生中に水和反応によって生じる内部空隙の応力状態を算定することが可能となった。
- (3) コンクリートの養生中に水和反応によって生じる内部の応力状態は、温度応力問題などに特に大きな影響を及ぼす。
- (4) 本解析理論は、特に全期間水中養生の場合、水分移動特性を的確に評価することができる。

(5) 本解析(実験)条件のもとにおいては、コンクリートの一軸圧縮強度は、不飽和状態の試験体よりも完全飽和状態のものの方が大きくなることが解析的に示された。

参考文献

- 1) 大下英吉, 田辺忠顯: コンクリートに発生する間隙水圧の実測とその影響に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.514/V-27, pp.75-84, 1995.
- 2) Bazant, Z. P. and Najjar, L.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972.
- 3) 河角誠, 笠原清, 栗山武雄: 高温度下におけるコンクリートのクリープ(第3報)セメントの水和に及ぼす温度の影響, 電力中央研究所報告, No.381025, 1981.
- 4) W.Czernin 著, 德根吉郎 訳: 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, 技報堂出版.
- 5) J.Murata: Studies on The Permeability of Concrete, *Trans. of JSCE*, No.77, Nov., pp.69-103, 1961.
- 6) T.C.Powers, L.E.Copeland, J.C.Hayes, and H.M.Mann: Permeability of Portland Cement Paste, *ACI Journal*, No.51-14, Nov., pp.285-298, 1954.
- 7) 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.36, pp.153-162, 1990.
- 8) 井上健: 若材齢コンクリートの変形挙動に関する研究, 名古屋大学大学院修士論文, 1990.
- 9) 宮沢伸吾: 自己収縮および乾燥収縮によるコンクリートの自己応力に関する研究, 広島大学工学部博士論文, 1992.

(1994. 11. 25 受付)

ANALYTICAL STUDY ON PREDICTING PORE WATER PRESSURE OCCURRING IN CONCRETE AND ITS EFFECTS

Hideki OHSHITA and Tada-aki TANABE

The analytical model for water migration which is apply to the porous materials such as concrete and rock, is constructed. The analysis for pore water pressure occurring in concrete is carried out, and then the applicability of proposed model is shown according to compare with the experimental results. Further, the mechanism for the effects of pore water pressure on the property of strength for concrete using the proposed model is probed analytically, and then it is shown that water migration in concrete is thought to be very important.