

論文 水圧作用下におけるコンクリートのクリープ挙動に関する解析的研究

梨木義春^{*1}・井之上尚史^{*2}・大下英吉^{*3}

要旨: 著者らの実験的研究により、円柱供試体に一定側面水圧を載荷させた場合、水の圧入現象によってコンクリート内部空隙に発生する間隙水圧の影響により軸方向の変形が徐々に大きくなり破壊にまで至るという、クリープに似た現象が生じること明らかとなった。そこで、本研究はコンクリート内部空隙に発生する間隙水圧がコンクリートのクリープ特性に及ぼす影響について解析的評価を行い、コンクリート中の水分移動の重要性について考察を行う。

キーワード: 間隙水圧、水分移動、クリープ現象、排水非排水混合境界

1. はじめに

今まで、セメント・コンクリートのクリープ変形性状に関する研究成果は、鋼材などを介して力が作用するように、固体を荷重伝達媒体とした研究のみであるが、特に、コンクリート地中およびコンクリート水中構造物では直接水がコンクリート表面に作用することにより、水を荷重伝達媒体としたクリープ変形性状の解明が不可欠である。それは、水が静水圧として直接コンクリート表面に作用することにより、コンクリートの内部水(空)隙への水の圧入現象に起因して間隙水圧が発生し、コンクリート骨格を押し広げたり水分移動が生じたりという現象が発生するため、鋼材などを介して力が作用した場合のクリープ変形性状とは全く異なると予想されるためである。

静水圧により水がコンクリート内に圧入されることにより、骨格間を水が押し広げようとする現象とポテンシャルが低い方へと水が移動する現象が生じる。このような現象は、骨格もしくはコンクリート全体のクリープ変形性状にどのような影響を及ぼすのか、どのようなメカニズムでクリープ変形性状が生じるのであろうか、

そして鋼材を介して力が作用した場合のクリープ変形性状とどのような関係にあるのかが明らかにされなければならない。これらの現象が詳細に解明されなければ、セメント・コンクリートの合理的耐久性設計の体系化は不可能であろう。

著者らは、コンクリート側面に一定水圧が持続的に作用した場合のクリープ変形性状を詳細に評価することを目的として、コンクリート供試体に一定の側面水圧を作用させ水の供試体内部への圧入現象によってコンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧(図-1)の測定実験およびクリープ変形性状に関する実験を実施した¹⁾。

そこで、本研究では、その実験結果を基に谷口ら²⁾が開発した破壊エネルギーに基づく水分移動モデルを排出および非排出混合境界を有するモデルにも適用可能なように拡張することにより、コンクリートの変形挙動、特にクリープ変形性状に及ぼす水分移動の影響評価を実施した。本研究の特色は、言うまでもないが、間隙水圧や水分移動とクリープ変形性状との関連性を明らかにすることである。

*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

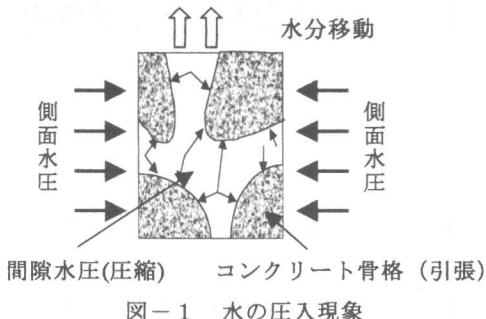


図-1 水の圧入現象

2. 解析モデル

本研究では、図-2に示すようにコンクリートを骨材とセメントペーストおよびそれらの空隙には水が満たされている多孔質材料として捉え、骨材およびセメントペーストは完全等方弾性体と仮定した。

二相多孔質材料としてのコンクリート中の水分移動に関する支配方程式は、間隙水の質量保存則と力の釣合式を連成させなければならない。そして、本研究の特徴は、間隙水の排出境界と非排出境界が混在した状態においても、統一的に水分移動特性を評価することのできるモデルの開発である。

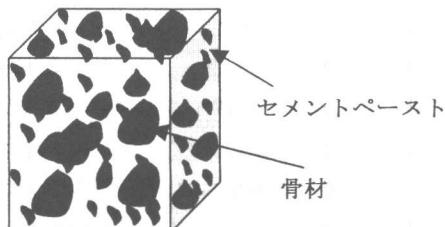


図-2 二相材料コンクリートモデル

2.1 連成式の定式化

本研究は、間隙水の質量保存則と力の釣合式を満足する水～コンクリート骨格連成解析であり、以下にそれぞれの定式化および連成の定式化を示す。

(1) 間隙水の質量保存則

水頭 h は、位置水頭 z と圧力水頭 p/γ の和により次式で表される。

$$h = z + p/\gamma \quad (1)$$

ここで、 γ は液体の単位体積重量であり、位置水頭 z は鉛直上向きを正とする。

単位体積のコントロールボリュームを考えると、保存則の条件は単位時間当たりに外部から流入する量 (Q_{in}) と外部に流出する量 (Q_{out}) との差が蓄積される流体量 ($\nabla^T v$) に等しい式(2)と表すことができる。なお、 v は液体の流速であり Darcy の法則にしたがうものと仮定する。

$$Q_{in} - Q_{out} = \nabla^T \{v\} \quad (2)$$

ここで、蓄積量は次に述べる要因から構成される。

(a) 蓄積の速度に起因する全ひずみの変化

$$\gamma S_w \{m\}^T \frac{d\{\varepsilon\}}{dt} \quad (3)$$

(b) 間隙水圧の変化に起因する粒子体積の変化

$$\gamma S_w (1-\xi) \{m\}^T [D_S^{ep}] \{m\} \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

(c) 液相の体積変化

$$\gamma S_w \frac{\xi}{k_f} \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

ここで、 k_f は水の体積弾性係数である。

(d) 液相の温度による体積変化

$$-3\gamma S_w \xi \mu_w \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

ここで、 μ_w は水の線膨張係数である。

(e) 水和による液相の質量減少

$$\gamma S_w \frac{\eta_w \gamma_p}{\rho_w} \frac{dC_H}{dt} \quad (7)$$

ここで、 η_w は水和による水の密度の変化を表す係数、 γ_p はセメントの完全結合水量、 ρ_w は水の密度、 C_H は単位体積当たりのセメントペースト中で水和しているセメントの質量をそれぞれ表している。

(f) 有効応力の変化によって生じる固体粒子の圧縮

$$-\gamma S_w \{m\}^T [D_S^{ep}] \frac{d\{\sigma'\}}{dt} \quad (8)$$

ここで、 S_w は空隙中に占める水の飽和度であり、本研究では $S_w = 1$ と仮定する。

これらの各要因を式(2)に代入する。そして質量保存則に対する有限要素の離散化は Galerkin 法を用いると次式のようになる。

$$\begin{aligned} -H\{p\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - W \frac{d\{T\}}{dt} \\ - \frac{d\{g_p\}}{dt} + \{fp\} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、マトリックス H 、 L^T 、 S 、および W は、それぞれ液体の移動に関するマトリックス、固体相の圧縮性の影響に関するマトリックス、液体の圧縮性に関するマトリックス、および温度変化による固体相と液体相の圧縮性に関するマトリックスである。また、ベクトル $\{g_p\}$ 、 $\{fp\}$ はそれぞれ水和によって損失する水の量および間隙水の流出量である。これらのマトリックスおよびベクトルはそれぞれ次式のように表される。

$$H = \gamma \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k \nabla \bar{N} d\Omega \quad (10)$$

$$S = \gamma \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k} \bar{N} d\Omega \quad (11)$$

$$W = \gamma \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1-\xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega \quad (12)$$

$$g_p = \gamma \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\eta_w \gamma_p}{\rho_w} C_H d\Omega \quad (13)$$

$$\begin{aligned} fp = \gamma \int_{\Omega} \bar{N}^T q d\Omega - \gamma \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k \nabla \gamma z d\Omega \\ + \gamma \int_{\Gamma} \bar{N}^T (\{v\}^T \cdot n) d\Gamma \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $k' = k / \gamma$ であり、 q は内部からの湧き出し量であり、式(14)の右辺第3項が排出境界項である。

(2) 力の釣合式

多孔質材料内の全応力 $\{\sigma\}$ 、有効応力 $\{\sigma'\}$ および間隙水圧 p の関係は、次式のよう

れる。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p \quad (15)$$

ここで、 $\{m\}$ はクロネッカーの記号である。なお、符号の定義は、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している。また、全応力とはコンクリート全体（固体相（骨材+セメントペースト）+液体相）に作用している応力、有効応力とは固体相のみに作用している応力であり、次式のような増分形で表される。

$$d\{\sigma'\} = D_T^{ep} \{d\{\varepsilon\} - d\{\varepsilon^{pr}\}\} \quad (16)$$

ここで、 $[D_T^{ep}]$ はコンクリート全体の応力-ひずみマトリックス、 $d\{\varepsilon\}$ は全ひずみ増分、 $d\{\varepsilon^{pr}\}$ は間隙水圧増分 dp によって生じる固体相のひずみ増分、固体相の平均的な応力-ひずみマトリックス $[D_S^{ep}]$ および間隙比 ξ を用いて以下のように表される。

$$[D_T^{ep}] = (1 - \xi) [D_S^{ep}] \quad (17)$$

$$d\{\varepsilon^{pr}\} = -[D_S^{ep}]^{-1} \{m\} dp \quad (18)$$

そして、仮想仕事の原理から求められる釣合方程式を有限要素により離散化すると次式に示すような微分方程式が得られる。

$$K_T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - \frac{d\{f\}}{dt} = 0 \quad (19)$$

ここで、 K_T 、 L 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の影響に関するマトリックスである。また、 $\{f\}$ は外力ベクトルである。これらのマトリックスはそれぞれ次式のよう

に表される。

$$K_T = \int_{\Omega} (1 - \xi) B^T D_S^{ep} B d\Omega \quad (20)$$

$$L = \int_{\Omega} \xi B^T \{m\} \bar{N} d\Omega \quad (21)$$

$$f = \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{t\} d\Gamma \quad (22)$$

なお、 N 、 \bar{N} はそれぞれ変位、間隙水圧に関する形状関数であり、 B はひずみ-変位マトリックスである。また、 $\{b\}$ 、 $\{t\}$ はそれぞれ

領域 Ω に作用する物体力、境界 Γ に作用する表面力である。

(3) 排出境界条件

クリープ現象を詳細に評価するためには、水の浸透問題を考えなければならない。また、本研究の対象とした実験では、図-3 に示すように円柱供試体の側面にのみ水圧を作用させていている。また、供試体上下面は大気と接しており、その面からは微少であるが水がしみ出していることが確認された。したがって、この大気と接している面(排出面)に排出境界条件が導入されなければならない。

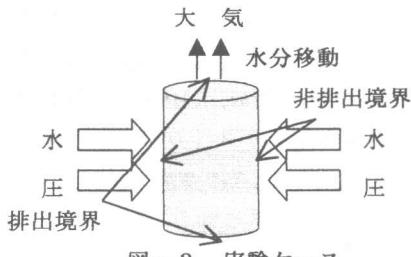


図-3 実験ケース

排出境界面における間隙水の排出速度 v は、Darcy の法則に従うものと仮定すると次式のように表すことができる。

$$v = -k'' \frac{\partial h}{\partial n} \quad (23)$$

ここで、 n は排出境界面における法線ベクトルであり、 k'' は排出係数である。なお、 k'' は同一材料中を間隙水が移動する場合には、透水係数と呼ばれているが、本研究のようにコンクリート中から大気に間隙水が移動する場合には排出係数と呼ぶことにする。勿論ではあるが、透水係数と排出係数は異なる。本来であれば、実験により排出係数を求める必要があるが、現時点においては、その実験的評価手法が確立していないため排出速度は排出境界における間隙水圧に依存するものとして、次式のような仮定を行う。

$$-\gamma k \frac{\partial h}{\partial n} = -W_m h \quad (24)$$

ここで、 W_m は水分移動率であり、単位時間当たりに単位長さを通る水の重量である。この水分移動率 W_m の値を決めることによりクリープ現象を詳細に評価することができるようになるわけである。

式(14)の右辺第3項に式(24)を代入することにより、式(14)の右辺第3項は次式のようになる。

$$\int_{\Gamma_m} \bar{N}^T \{v\}^T \cdot n d\Gamma_m = - \int_{\Gamma_m} \bar{N}^T \frac{W_m}{\gamma} \bar{N} d\Gamma_m \left\{ \{\bar{p}\} + \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \right\} \quad (25)$$

ここで、 Γ_m は流出境界の面積である。なお、上式の積分項を次式に示す $[M]$ マトリックスとする。

$$M = \int_{\Gamma_m} \bar{N}^T \frac{W_m}{\gamma} \bar{N} d\Gamma_m \quad (26)$$

(4) 連成方程式

質量保存である式(9)と釣合方程式である式(19)との連成方程式は、次式のようなマトリックスにより表すことができる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & -[H] + [M] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L]^T & -[S] + [M] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \frac{df}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - fp + \frac{dg_p}{dt} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

本研究では、式(27)に後退差分法を適用し次式のような増分形のマトリックスで表される連成方程式を用いることにした。

$$\begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L]^T & -[S] - \Delta t_n ([H] - [M]) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{u}_n \\ \Delta \bar{p}_n \end{bmatrix}$$

$$= \begin{Bmatrix} \Delta f_n \\ -fp_n \Delta t_n + W \Delta \bar{T}_n + \Delta g_p + \Delta t_n (H - M) \bar{p}_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

ここで、 $\Delta \bar{u}_n$ 、 $\Delta \bar{p}_n$ および \bar{p}_{n-1} はそれぞれ節点変位増分、節点間隙水圧増分および前ステップにおける節点間隙水圧である。

3. 一定側面水圧下のクリープメカニズムの評価

2章における解析理論を基に有限要素法により数値計算を行った。以下に、解析モデル、解析条件および解析パラメータを示す。

3.1 解析モデルおよび解析条件

解析の対象としたモデルは、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の形状寸法をした円柱供試体の8分の1部分を取り出し、これを8要素に分割したものである。解析条件は、図-3に示したものと同様に境界条件を設定し、荷重は供試体側面に与えた。

また、解析に用いた諸係数は、表-1、2に示す通りであり、材齢3日における実験を対象とした。

表-1 骨材とセメントペーストの諸係数

	骨材	セメントペースト
ヤング係数 (Mpa)	4.0×10^4	2.2×10^4
ポアソン比	0.2	0.2
体積比	0.7	0.3

表-2 水に関する諸係数

	水
体積弾性係数 (Mpa)	2.2×10^3
単位体積重量 (Mpa)	1.0×10^{-4}
間隙比	0.15
透水係数 (cm/sec)	6.66×10^{-8}

なお、セメントのヤング係数は、実験で得られたコンクリートのヤング係数から逆算した値である。なお、セメントの水和は無視をした。

3.2 解析パラメータ

実験¹⁾では、まず側圧を 0.1Mpa/sec の荷重速度で単調載荷させ破壊まで加圧を行い、破壊時の側圧 σ_{ru} を測定する。そして、破壊時の側圧 σ_{ru} の50%および70%の一定側圧($=0.5\sigma_{ru}$ 、 $0.7\sigma_{ru}$)を供試体側面に直接持続載荷(水の圧入有り)させた。なお、比較のために、

供試体表面に水の圧入を防ぐためゴムスリーブを施した実験(水の圧入無し)も実施した。

解析パラメータは、表-3に示すように、一定側圧($0.5\sigma_{ru}$ 、 $0.7\sigma_{ru}$)である。なお、水分移動率 W_m は実験を行った際にコンクリート表面からしみ出した量を測定し、その値を水分移動率 W_m として解析を行った。一方、ゴムスリーブを施したケースについては、水分移動率 W_m をゼロとして解析を行った。

表-3 解析パラメータ

($\sigma_{ru} = 4.0\text{Mpa}$)

	0.5 σ_{ru} (Mpa)	0.7 σ_{ru} (Mpa)
一定側圧	2.1	2.8

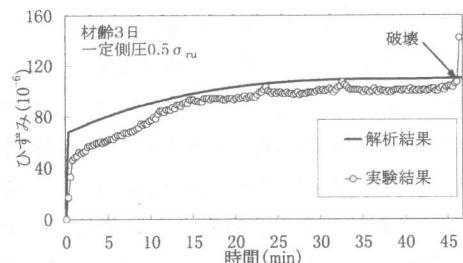


図-4 軸ひずみ～時間関係(排出、 $0.5\sigma_{ru}$)

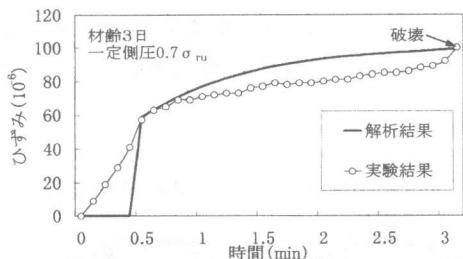


図-5 軸ひずみ～時間関係(排出、 $0.7\sigma_{ru}$)

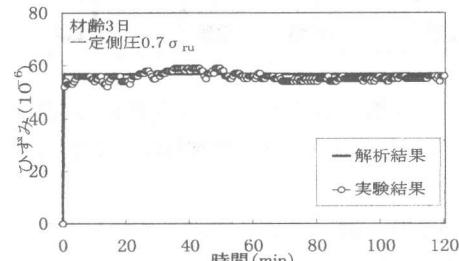


図-6 軸ひずみ～時間関係(非排出、 $0.7\sigma_{ru}$)

4. 解析結果および考察

図-4、5は、それぞれ一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ および $0.7\sigma_{ru}$ の時の実験結果と解析結果とを比較させた図であり、図-6は、比較のために、ゴムスリープを施すことにより水の圧入が無い場合における一定側圧 $0.7\sigma_{ru}$ 時の実験結果と解析結果とを比較させたときの図である。なお、図中の記号○は実験結果であり、実線は解析結果である。

解析結果は実験結果と比較的良好な一致を示している。図-4に示す一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ の場合、一定側圧を載荷してから約45分の時間で約 100μ のひずみを生じ破壊に至った。解析結果は、側圧載荷直後において多少のずれがあるものの、破壊付近では良く一致している。図-5に示す一定側圧 $0.7\sigma_{ru}$ の場合、約3分の時間で約 100μ のひずみを生じ破壊に至った。一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ と $0.7\sigma_{ru}$ との違いは、一定側圧 $0.7\sigma_{ru}$ の方が破壊に至るまでの単位時間当たりのクリープひずみが大きいということである。図-6に示す水分移動のない場合、一定側圧載荷から2時間経過してもクリープ現象が生じず破壊に至らなかった。本解析においてクリープひずみは、水分移動率 W_m に起因することが図-5と図-6から理解することができる。

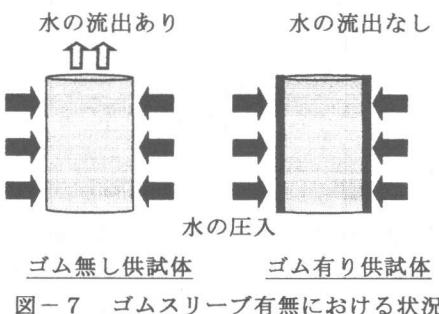


図-7 ゴムスリープ有無における状況

つまり、図-7に示すようにコンクリート表面に直接水圧が作用すると、コンクリート内部に水が圧入し水分移動により上下面から水が

流出する。これによりクリープひずみが生じるものと考えられる。また、シールした供試体の場合では、コンクリートを一相材料と仮定しても解析的に評価することは可能であるが、シールをしていない供試体のように水の圧入現象が生じ、水分移動があるものについては本解析のようにコンクリートを二相材料として捉えることが不可欠であると言える。

5. まとめ

本研究では、コンクリート表面に水圧が作用した場合の変形特性、特にクリープ現象の詳細な評価を目的とし、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧の影響評価を行った。本研究で得られた結論を要約すると次のようになる。

- (1) コンクリートに水圧が作用した時にクリープひずみが生じる大きな要因は、直接水圧が作用することによりコンクリート内部に水が浸透することによるものである。
- (2) 水分移動が生じるようなコンクリートの特性を詳細に評価するためには、コンクリートを二相材料として捉えなければならない。
- (3) 本研究のように液体を荷重伝達媒体としたクリープに関する研究は全く試されておらず、このような結果が得られたのは、著者らの研究が初めてである。今後はさらに精度良く水分移動のメカニズムの解明が必要と思われる。

参考文献

- 1) 井之上尚史・梨木義春・大下英吉：水圧作用下におけるコンクリートのクリープ挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、投稿中、1999.
- 2) 谷口幸弘：破壊エネルギーに基づく多孔質飽和透水性材料の力学的特性に関する研究、広島大学修士論文、1996.