

コンクリートのクリープ性状に及ぼす水分移動の影響および骨格の粘弾性挙動の影響に関する研究

大下英吉

正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

本研究では、コンクリートのクリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動の定性的・定量的な影響評価を行うことを目的として、供試体内部における間隙水の拡散現象および外部への浸出現象を統一的に評価可能なクリープモデルの構築およびそれに間隙水およびセメントペーストの粘弾性挙動を導入したクリープモデルの構築を行った。そして、クリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動の影響に関する実験的および解析的評価を行い、その影響を明確にした。さらに、クリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動の影響および間隙水とコンクリート骨格の粘弾性挙動の影響および両者の相関性に関する評価も行い、コンクリートのクリープ機構の解明を実施した。

Key Words : creep mechanism, diffusion phenomenon, seepage phenomenon, pore water pressure, visco-elastic behavior, water migration, young age concrete

1. はじめに

コンクリート材料のクリープ変形は、その組成成分に水や空隙を多く含むことにより、各物質間の粘弾性、粘塑性、塑性変形能の違いの影響も考慮しなければならない。水(空)隙の占める割合は、重量比でコンクリートの約20%と大きく、空隙径がnmというミクロンオーダーであるため、毛細管張力理論によれば水(空)隙には非常に大きな負圧としての間隙水圧が起り得る。この代表的な現象が自己収縮であり、自己収縮は水(空)隙の応力状態の負圧により生じるクリープ現象の一種であり、時としてその変形が拘束されると破壊を生じる恐れがある。このようにコンクリートのクリープ変形性状は、コンクリート骨格のみの変形に起因するのではなく、それを組織する水(空)隙内部の応力状態によっても左右される。したがって、コンクリート構造物の合理的耐久設計の確立を行うためには、水(空)隙に発生する間隙水圧によるクリープ変形性状の解明が必要である。

一般に、コンクリートのクリープひずみの大きさは、含水状態によって非常に相違し、湿潤状態のものは乾燥したものよりもクリープひずみが大きくなる。さらに、飽水状態のコンクリートが乾燥しながら持続応力を受ける場合には、クリープひずみはさらに大きくなり、その値は弾性ひずみの数倍にも達するものと言われている²⁾。このようなコンクリートのクリープ機構に関する古くからの代表的な理論としては、粘弾性理論および浸出理論が挙げられる。粘弾性理論は、骨材を弾性体、セメントペーストを粘弾性体と仮定し、セメントペーストの粘性によりクリープ現象を表現するものであり、この理論の代表的なモデルにはバネとダッシュポットを並列に配列したフォクトモデル或いはケルビンモデルがある。本理論は、コンクリートのクリープが強度の40%程度以下の応力水準において応力に比例する実験事実とは符合はするが、クリープに対する乾燥の影響を説明できない、粘性流動では体積変化が起こらないがコンクリートのクリープは体積ひずみを伴うなどの矛盾があり、本理論のみでコンクリートのクリー

機構を詳細には説明できないわけである²⁾。一方、浸出理論は、コンクリートのゲル粒子間のゲル水（自由水、吸着水、層間水）の外部への逸散によりクリープ現象を説明したものである。このゲル水の外部への逸散の程度は、毛細管を水が流れる時の摩擦抵抗により変わり、環境条件が全く同一であれば、全摩擦抵抗はコンクリート内部と外部との温度勾配によって左右され、勾配が大きいほど水は毛細管内を流れ易くなるため全摩擦抵抗が大きくなることによりクリープは大きいとされている³⁾。しかしながら、実験で観察された様々なクリープ現象の中には、本理論では説明できない現象も数多い。例えば、空气中で乾燥されたコンクリートを水中において持続荷重を載荷して測定されたクリープひずみは、最初から水中で養生された水中で持続荷重を載荷した場合の約2倍になること³⁾、水中で引張クリープ試験を行えば同一環境の圧縮クリープよりも単位応力当たりのクリープひずみは大きくなるはずであるが実際には殆ど差異が無いこと³⁾、毛細管を間隙水が移動する際の骨格との摩擦抵抗である全摩擦抵抗はコンクリートの材齢とともに大きくなるためクリープひずみも材齢とともに大きくなるはずであるが実際には逆の現象となることなどであり、本理論のみでは説明できない実現象が多く存在するわけである³⁾。これにも増して重要な問題は、本理論に関するモデルの開発が全く成されていないことである。このように、コンクリートのクリープ現象は、それぞれの理論では説明できない多くの現象を呈するわけであるが、いずれの理論においても共通して言及できることは、コンクリート中の蒸発性の水がクリープ機構に大きく関与しているということである。さらに、コンクリートのクリープ機構は、単に一つの理論のみで統一的には評価できないことである。

このようなことから、筆者等は外力の作用によりコンクリートを組織する内部空隙に発生する間隙水圧がMPaオーダーであるという実験事実⁴⁾⁵⁾に基づき、コンクリートのクリープ機構を内部に発生する間隙水圧に関連付けた理論の構築⁶⁾を行った。その中で、材齢0.69日におけるコンクリート供試体に持続荷重が載荷した場合に生じる初期の急激なクリープひずみの発生は、コンクリート部材内部に発生する間隙水圧が時間の経過とともに定常状態になることに起

因していることが明らかとなったわけである。しかしながら、間隙水圧が定常状態となった後は、クリープひずみは全く生じないという結果となり、その後も緩やかにクリープひずみが発生するという実験事実とは相違を示した。この点に関して石川等⁷⁾は間隙水圧の影響に加えてコンクリート骨格に粘弾性モデルを導入することにより、一応の適用性評価が認められた。しかしながら、両者に共通して言及できる問題点は、コンクリート供試体外部への間隙水の浸出現象を全く考慮していない点である。すなわち、間隙水の移動はコンクリート供試体内部のみに限定され、結果として、間隙水圧が供試体内部において定常状態となると、それ以降ではクリープ現象に間隙水の移動の影響が全く関与しないわけである。実際の現象は、浸出理論の説明においても記したが、コンクリートの透水係数にも左右されるわけであるが、特に若材齢コンクリートにおいては、間隙水がコンクリート供試体内部において定常或いは非定常に拡散することによる骨格の摩擦抵抗および外部へ定常或いは非定常に連続的に浸出することによる骨格の摩擦抵抗が生じるわけであり、上述した両者の研究は、単に前者のみを考慮したものに過ぎない。すなわち、間隙水の影響を詳細に評価するためには、内部における拡散現象および外部への浸出現象という両現象を統一的に考慮しなければならないわけである。したがって、現時点では浸出理論の詳細なモデルの構築は勿論のこと、クリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動の定性的かつ定量的評価は詳細には実施されていないと言っても過言ではない。それが故に、クリープ性状に及ぼすコンクリート中の水分移動の影響度合いおよび分離圧としての間隙水圧による骨格の粘弾性挙動の影響度合い或いは両者の相関性が不明瞭であり、さらに、クリープ機構の統一的な理論の構築も未だ十分ではない。

本研究では、コンクリートのクリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動の定性的・定量的な影響評価を行うことおよびクリープ性状に及ぼすコンクリート中の水分移動の影響度合いおよび分離圧としての間隙水圧による骨格の粘弾性挙動の影響度合い或いは両者の相関性を明確にすることを目的として、コンクリート供試体内部における間隙水の拡散現象および外部への間隙水の浸出現象を統一的に評価可能な

クリープモデルの構築およびそれにセメントペーストと間隙水の粘弾性挙動の影響を同時に考慮したクリープモデルの構築を行った。まず、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散現象および浸出現象の影響のみを評価するために、コンクリート供試体の透水係数、弾性係数および供試体表面の乾湿の程度をパラメータとしたパラメータスタディを行い、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象の影響を議論した。次に、間隙水の拡散・浸出現象が顕著に生じるクリープ実験装置の開発を行い、実験的手法によっても間隙水の拡散・浸出現象の影響評価の議論を行った。さらに、実験的および解析的評価により、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象の影響と間隙水およびセメントペーストの粘弾性挙動の影響に関する境界領域の評価を行った。

2. 間隙水の拡散・浸出現象を統一的に評価可能なクリープモデルの構築^{8),9)}

コンクリートのクリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動を詳細に評価するためには、間隙水がコンクリート供試体内部のみで定常或いは非定常に拡散することによる骨格と間隙水の摩擦抵抗および間隙水が供試体外部へ定常或いは非定常に連続的に浸出することによる骨格と間隙水の摩擦抵抗を統一的に評価しなければならないわけである。そして、間隙水の拡散および浸出現象をコンクリート供試体の変形挙動に関連付けること、すなわち間隙水の水分移動と力の釣合いを連成させることにより、持続荷重を受けるコンクリートのクリープ性状に及ぼす間隙水の詳細な水分移動の影響に関する解析的評価が可能となるわけである。

(1) 多孔質飽和透水性材料の水分移動に関する解析理論^{4),6),7)}

一般に、コンクリートは部分的に飽和された多孔質材料であり、このような材料に外力が作用すると、コンクリート骨格部分には有効応力、間隙部分には間隙水圧や間隙空気圧が発生する。そして、荷重履歴によりコンクリートは非ひび割れ体からひび割れ体へと変遷する材料である。このような材料内の水

分移動と骨格の変形挙動に関する詳細な支配方程式は、力の釣合および間隙水の質量保存則を満足しなければならない。そこで筆者らは、次式に示すように両者を同時に満足することのできる水・コンクリート骨格連成解析手法の提案を行った。すなわち、式(1)に境界条件、初期条件および力学的特性を与えて、節点変位増分 $\Delta \bar{u}_n$ と節点間隙水圧増分 $\Delta \bar{p}_n$ 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および変形特性が理論的に求まることになる。

$$\begin{Bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S - \Delta t_n H \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{u}_n \\ \Delta \bar{p}_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \bar{f}_n + A \Delta \bar{T}_n \\ W \Delta \bar{T}_n - f_{pn}^{ext} \Delta t_n - \Delta f_{pn}^{ve} + \Delta g_{pn} + \Delta t_n H \bar{p}_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、式(1)の左辺は多孔質体の内力および固・液相の体積変化量を表しており、マトリックス K_T, L, S, H, A, W は、それぞれ接線剛性マトリクス、変形および間隙水圧の変化による固体相・液体相の圧縮性の影響、間隙水の流出量および温度変化による固体相・液体相の圧縮性に関するマトリクスである。また、式(1)の右辺は多孔質体への外力および間隙水の蓄積量を表しており、ベクトル $\Delta \bar{f}_n, \Delta \bar{T}_n$ は、それぞれ外力、水和反応やセメントペーストの粘弾性挙動による固体相の体積変化を表すベクトルおよび温度変化を表している。さらに、ベクトル $f_{pn}^{ext}, \Delta f_{pn}^{ve}, \Delta g_{pn}$ は、それぞれ液体相の浸出境界からの浸出量、液体相の粘弾性挙動および水和反応による体積変化を表すベクトルである。なお、これらのマトリクスおよびベクトルは、それぞれ以下のように表すことができる。

$$K_T = (1 - \xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} B d\Omega \quad (2)$$

$$L = \xi \int_{\Omega} B^T \{m\} \bar{N} d\Omega \quad (3)$$

$$H = \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{K}{\rho_w} \nabla \bar{N} d\Omega \quad (4)$$

$$S = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k_f} \bar{N} d\Omega \quad (5)$$

$$W = \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1-\xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega \quad (6)$$

$$A = (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} \alpha \bar{N} d\Omega \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{f}_n &= \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{t\} d\Gamma + \\ (1-\xi) &\frac{1}{3} \frac{V_C}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{C}{\rho_C} C_H \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} \bar{N} d\Omega + \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} (1-\xi) &\frac{V_C}{V} \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{\varepsilon^{ve}\} d\Omega \\ f_{pn}^{ext} &= \int_{\Omega} \bar{N}^T q / \rho_w d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w z d\Omega \\ &+ \int_{\Gamma_m} \bar{N}^T \left\{ \{v\}^T n \right\} d\Gamma_m \end{aligned} \quad (9)$$

$$f_{pn}^{ve} = \int_{\Omega} \left\{ (1-\xi) \frac{V_C}{V} - \xi \right\} \{m\}^T \{\varepsilon^{ve}\} d\Omega \quad (10)$$

$$g_{pn} = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{V_C}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} C_H d\Omega \quad (11)$$

筆者等が構築した上述の解析理論は、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であり、その適用性評価は既往の研究^{8),9)}により確認されている。

従来の研究では、式(9)中の右辺第3項である液体相の浸出境界からの浸出量を表すベクトルは無視していたが、この項を考慮することにより、浸出境界において液体相である間隙水が供試体外部へ定常或いは非定常に連続的に浸出する現象を評価できるわけである。したがって、式(1)は、間隙水の供試体内部での拡散現象および外部への浸出現象が統一的に評価可能となるわけであり、このことはすなわち実現象のより詳細な評価に繋がるわけである。

(2) 浸出境界における間隙水の浸出現象

浸出境界における間隙水の浸出量は、式(9)により次式のように表すことができる。

$$f_{out} = \int_{\Gamma_n} \bar{N}^T \left\{ \{v\}^T n \right\} d\Gamma_m \quad (12)$$

ここで、 f_{out} は間隙水の浸出量であり、 n は浸出境界面における法線ベクトル、 Γ_m は浸出境界表面積および $\{v\}$ は浸出境界面における間隙水の浸出速

度であり、Darcyの法則に従うものと仮定¹⁰⁾すると次式のように表すことができる。

$$\{v\} = -[k] \nabla h \quad (13)$$

ここで、 k は透水係数(cm/sec)であり、 h は全水頭(cm)である。

そして、浸出境界における境界条件は、次式のように表すことができる。

$$\{v\}^T n = -k \nabla h n = -m(h - h_{\infty}) \quad (14)$$

ここで、 m 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へ間隙水が移動する場合には浸出係数(cm/sec)と呼ぶことにする。勿論ではあるが、透水係数と浸出係数は異なる。また、 h_{∞} は雰囲気における全水頭である。

最終的に、式(14)は、間隙水圧 p 、雰囲気圧 p_{∞} により表すと次式のようになる。

$$\{v\}^T n = -m \left(\frac{p - p_{\infty}}{\rho_w} \right) \quad \text{境界 } \Gamma_m \quad (15)$$

結局のところ、式(15)を式(1)に代入して整理することにより、間隙水の拡散・浸出現象を統一的に評価可能なクリープモデルの構築がなされるわけである。

(3) 間隙水の拡散・浸出現象を統一的に評価可能な水分移動モデル

間隙水の拡散・浸出現象を統一的に評価したクリープモデルは、次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S - \Delta t_n (H - M) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{u}_n \\ \Delta \bar{p}_n \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} \Delta \bar{f}_n + A \Delta \bar{T}_n \\ W \Delta \bar{T}_n - f_{pn}^{ext} \Delta t_n - \Delta f_{pn}^{ve} + \Delta g_{pn} + \Delta t_n (H - M) \bar{p}_{n-1} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、マトリックス M およびベクトル f_{pn}^{ext} は、それぞれ浸出境界における間隙水の浸出に関するマ

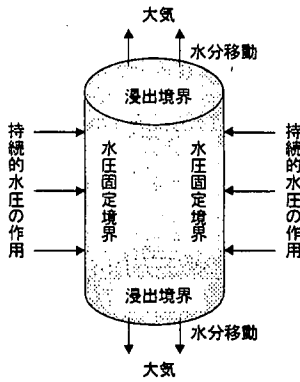


図-1 コンクリート供試体

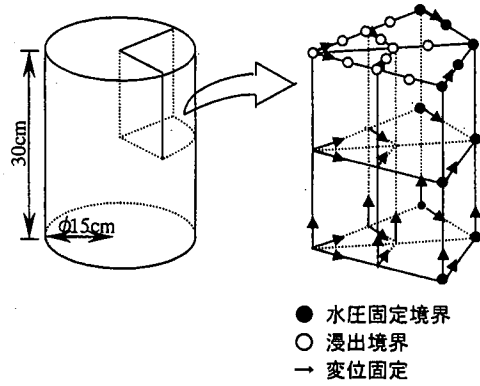


図-2 コンクリート供試体のモデル化

トリックスおよびベクトルであり、それぞれ次式のように表すことができる。

$$M = \int_{\Gamma_m} \bar{N}^T \frac{m}{\rho_w} \bar{N} d\Gamma_m \quad (17)$$

$$f_{pm}^{ext} = \int_{\Omega} \bar{N}^T q / \rho_w d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w z d\Omega - \int_{\Gamma_m} \bar{N}^T \frac{m}{\rho_w} \bar{N} d\Gamma_m \{ \bar{p}_{\infty} \} \quad (18)$$

このように、間隙水がコンクリート供試体内部のみで拡散することおよび供試体外部へ浸出することによるクリープ性状への影響評価を統一的に評価可能なモデルが構築されたわけである。ここで注目すべき点は、式(18)中にコンクリート表面の乾燥の程度或いは湿潤の程度を表す雰囲気気圧 p_{∞} が考慮されていることであり、このことによりクリープ性状に及ぼす供試体表面の乾燥或いは湿潤の影響が評価できる点である。なお、コンクリート表面の乾燥の程度或いは湿潤の程度を表す雰囲気気圧の決定は、表面における間隙水圧勾配が相対湿度勾配に比例するというBazant等の研究¹⁰⁾に基づくことにする。そこで次章では、構築された本解析理論を用いてクリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象のみの影響評価を各種パラメータを設定することにより解析的に行うことにする。

3. クリープ性状に及ぼす各種パラメータの影響に関する解析的評価

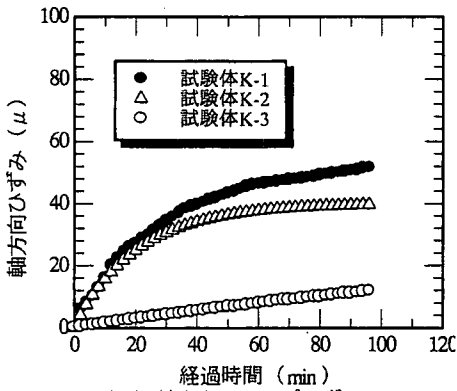
コンクリートのクリープ機構には、間隙水の浸出現象およびセメントペーストの粘弾性現象の影響が大きく関与していることは、1章において記した通りである。しかしながら、各要因が、それぞれ単独で関与するのか或いは複雑に絡み合って関与するのかは全く未解明のままであり、さらに、各要因の影響度合いも明らかにされていない。そこで本章では、間隙水の拡散および浸出現象のみがコンクリートのクリープ機構にどのように関与するのかに関する定性的かつ定量的評価のためのパラメータスタディを前章に示した解析理論により行うことにする。したがって、式(8)および式(10)中の間隙水およびセメントペーストの粘弾性挙動は、全く考慮されていないことになる。

(1) コンクリート供試体モデル

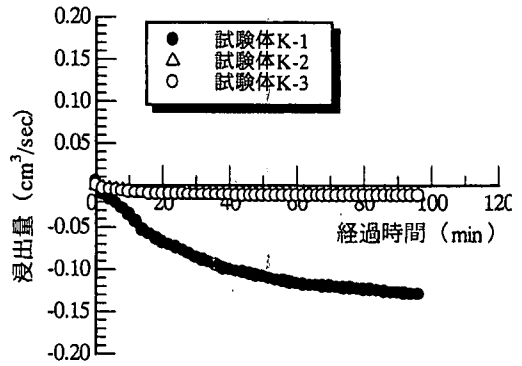
解析の対象としたコンクリート供試体は、図-1に示す通りであり、間隙水の供試体内部での拡散現象および浸出境界からの浸出現象の影響を明確にするために供試体側面のみを持続的な水圧を直接作用させたものである。したがって、間隙水は、供試体上下端方向に拡散され、そして、上下端が浸出境界となり外部への浸出が生じるため、クリープ変形は間隙水の拡散・浸出方向である軸方向に生じるもの

表-1 解析パラメータ

ケース	透水係数 (cm/sec)	ヤング係数 (kN/mm ²)	雰囲気気圧 (atm)	水の体積弾性係数 (kN/mm ²)	浸出係数 (cm/sec)	持続側圧 (N/mm ²)
K-1	6.60×10^{-8}	20	1.0	2.2	1.0×10^{-9} -5.0×10^{-9}	2.0
K-2	3.30×10^{-10}					
K-3	2.00×10^{-11}					
E-1	6.60×10^{-8}	10				
E-2		20				
E-3		30				
A-1	6.60×10^{-8}	20	1.0			
A-2			10.0			
A-3			-10.0			
A-4			-20.0			



(a) 軸方向クリープひずみ



(b) 間隙水の浸出量

図-3 クリープ性状に及ぼす透水係数の影響

と推測される。

コンクリート供試体のモデル化は、図-2に示すように、 $\phi 15 \times 30$ cmの形状寸法をした円柱供試体の1/8部分を取り出し、これを8要素に分割したものである。境界条件は、変位に関しては一軸状態を仮定し、間隙水に関してはモデル側面が水圧固定境界であり、上面が浸出境界である。

(2) 解析パラメータ

解析パラメータは、表-1に示すように、透水係数、コンクリートのヤング係数およびコンクリート表面の乾燥の程度或いは湿潤の程度を表す雰囲気気圧である。透水係数を解析パラメータに設定した理由は、クリープ性状に及ぼす間隙水の供試体内部での拡散の影響度合いおよび供試体外部への浸出の影響度合いを定性的に評価するためであり、解析対象時間が約2時間と非常に短時間であるため、その間の透水係数は一定値とした。コンクリートのヤング係

数に関しては、剛性の変化が間隙水の拡散・浸出現象に及ぼす影響評価およびその変化がクリープ性状に及ぼす影響を定性的に評価するためである。そして、雰囲気気圧に関しては、供試体表面の乾燥の度合い或いは湿潤の度合いが間隙水の拡散・浸出現象に及ぼす影響評価およびその変化がクリープ性状に及ぼす影響を定性的に評価するためである。この雰囲気気圧において、供試体表面の乾燥或いは湿潤の度合いが雰囲気気圧の変化と仮定した根拠は、乾燥によりコンクリートを組織する毛細管には毛細管張力が発生するためであり、その毛細管張力を負の雰囲気気圧と仮定して乾燥の度合いを定量的に表したわけである。一方、湿潤に関しては、水中環境下において持続応力が载荷されることを想定し、静水圧を正の雰囲気気圧と仮定して湿潤の度合いを定量的に表したわけである。なお、表-1に示すように、各解析ケースとも、水の体積弾性係数、浸出境界における浸出係数および持続側圧は、全て同一とした。

(3) クリープ性状に及ぼす各種パラメータの

影響評価

a) 透水係数

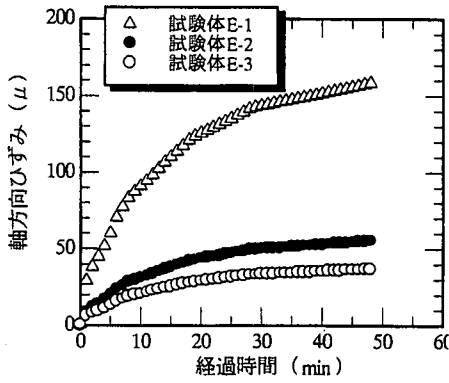
図-3は、解析ケースK-1、K-2、K-3に対する解析結果を示したものである。同図(a)は軸方向のクリープひずみ～時間関係、同図(b)は浸出境界である上端からの間隙水の浸出量～時間関係を表しており、図中に示す記号●、△および○は、それぞれ解析ケースK-1、K-2およびK-3に対応する解析結果である。

まず、透水係数が比較的大きい解析ケースK-1およびK-2では、急激なクリープひずみの増加が生じた後、徐々に緩やかな増加を示している。そして、透水係数が最も大きい解析ケースK-1では、本解析の範囲内においては常に緩やかなクリープひずみの増加を示すことに対して、解析ケースK-2では、約60分以降においてはクリープひずみは約40 μ の一定値となっている。一方、透水係数が最も小さい解析ケースK-3では、ほぼ一定の傾きのまま緩やかなクリープひずみの増加を示している。これらの傾向を浸出境界からの間隙水の浸出量に関連付けて考察を行ってみる。透水係数が最も大きい解析ケースK-1では、間隙水の浸出量は時間とともに徐々に多くなることに対して、解析ケースK-2およびK-3では、間隙水の浸出量は解析ケースK-1に比べて殆ど無視できるほど少ない。このような解析ケースK-2およびK-3において浸出量が殆どゼロであるということから判断すると、透水係数が比較的小さい場合には、持続側圧の荷重後は、時間とともに間隙水は供試体内部で拡散することのみに起因した供試体内部に発生する間隙水圧の定常状態すなわち持続側圧の荷重直後から発生する間隙水の拡散現象により一定の間隙水圧分布となった時点の分布状態までの変化により、軸方向のクリープひずみが生じるわけである。したがって、組織の緻密性という観点から、持続側圧荷重直後の間隙水圧分布は小さく間隙水の拡散も生じにくいことにより、定常状態となる間隙水圧分布までの変化量も小さく、定常状態に移行するまでに要する時間も長い。定常状態となった以降においては、供試体外部への間隙水の浸出が殆ど生じないことによりクリープひずみは殆ど生じないわけである。このような現象は、特に透水係数が小さい解析ケースK-3において顕著であり、間隙水が拡散

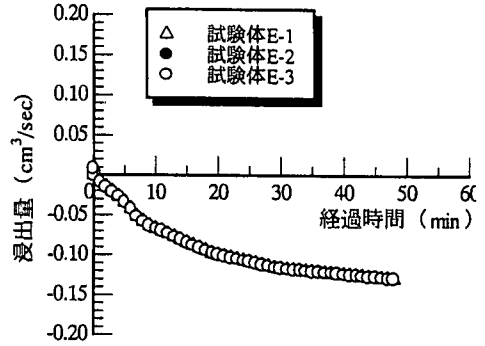
しにくい定常状態に至るまでに長時間を要することおよび定常状態となる間隙水圧分布までの変化量が小さくなることによるわけである。一方、透水係数が最も大きい解析ケースK-1の場合、組織が非常に多孔質であるため供試体内部において間隙水が拡散し易いことに起因して上述の間隙水圧の定常状態の値が持続側圧値とほぼ同じ値すなわち定常状態に至るまでの間隙水圧の変化量が大きいことおよび間隙水の外部への進出現象が連続的に発生（水が“入っては出て、入っては出る”）するため、クリープひずみは一定値とはならず徐々に大きくなるわけである。また、クリープひずみの増加量が時間の経過とともに徐々に小さくなる現象は、間隙水の浸出量の変化が小さくなることによるものである。また、解析ケースK-1とK-2を比較することにより、持続側圧荷重直後の急激なクリープひずみの増加は、間隙水の供試体内部における拡散の影響であり、その後の緩やかなクリープひずみの増加は、間隙水の供試体外部への浸出の影響と判断できる。

次に、透水係数の違いによるクリープひずみの最大値は、透水係数が大きいほど大きくなっている。これは、上述したように、間隙水の拡散および浸出現象に起因するコンクリート骨格の摩擦抵抗が、長時間に渡って連続的に生じることによるものである。さらに、解析ケースK-1とK-2の透水係数は200倍の差異であり、解析ケースK-2とK-3の透水係数は16.5倍の差異でありながら、クリープひずみの差は、解析ケースK-1とK-2では殆ど無く、解析ケースK-2とK-3では非常に大きい結果となっている。これは、透水係数と荷重直後の間隙水圧分布或いは間隙水圧の最大値、透水係数と定常状態となる間隙水圧分布までの変化量或いは定常状態に至るまでに要する時間との相関性は単に線形関係ではなく、ある透水係数を境として、それらの相関性は急激に変化することによるものと考えられる。この代表的事例は、著者等によるひび割れ面からの漏水量に関する研究であり⁹⁾、ひび割れ幅すなわちひび割れ面での透水係数によっては漏水を生じない場合もあり、また、漏水を生じる場合でも透水係数とは線形関係に無いことが明らかとなっている。

従来の研究では、浸出境界における間隙水の浸出現象を無視したものであった。したがって、解析ケ



(a) 軸方向クリープひずみ



(b) 間隙水の浸出量

図-4 クリープ性状に及ぼすヤング係数の影響

ースK-1よりもより若材齢に対応する透水係数を有するコンクリート供試体においても、間隙水の影響は、解析ケースK-2と同じく持続応力の載荷直後に於いて生じる急激なクリープひずみの増加のみに限定され、その後の緩やかなクリープひずみの増加には間隙水の供試体外部への浸出現象が全く関与しなかったわけである。しかしながら、本解析理論のように浸出現象を考慮することにより、間隙水の供試体外部への連続的な浸出現象によって、クリープ性状に及ぼす間隙水の影響が長時間に渡って関与することが明らかとなったわけである。

b) コンクリートのヤング係数

図-4は、解析ケースE-1, E-2, E-3に対する解析結果を示したものである。同図(a)は軸方向のクリープひずみ～時間関係、同図(b)は浸出境界である上端からの間隙水の浸出量～時間関係を表しており、図中に示す記号△、●および○は、それぞれ解析ケースE-1, E-2およびE-3に対応する解析結果である。

まず、どのヤング係数においても、持続側圧載荷直後は急激なクリープひずみの増加を示した後に緩やかなクリープひずみの増加を示している。しかしながら、ヤング係数が最も小さい解析ケースE-1では、初期の急激な増加およびその後の緩やかな増加の程度は、他の2つの解析ケースに比べて非常に大きなものとなっている。この現象は、同図(b)に示す間隙水の浸出量がヤング係数によらずに全く同一であることから判断すると、間隙水の浸出による影響ではないことがわかる。間隙水の浸出量はヤング係数によらず全く同一ではあるが、連続的に生じる間

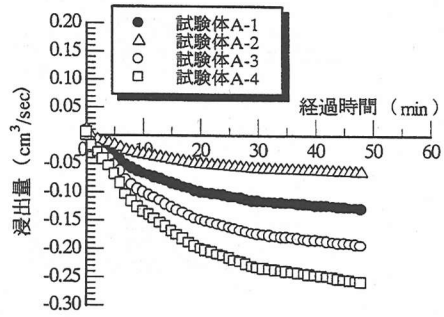
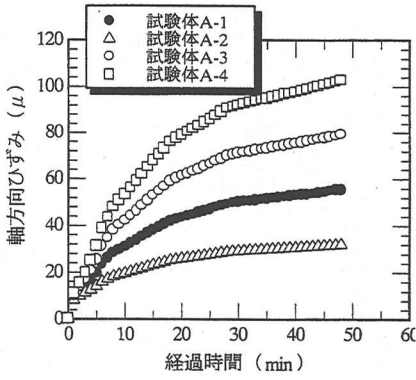
隙水の浸出現象に起因するコンクリート骨格の摩擦抵抗によるものと考えれば、この現象の理解は容易である。すなわち、ヤング係数によらず摩擦抵抗は同一であるとすれば、コンクリート供試体の剛性が小さいほど変形は大きくなるわけであり、クリープひずみも大きくなるわけである。

次に、上述したように、間隙水の浸出量はヤング係数によらず同一であった。すなわち、間隙水の浸出量は、浸出係数 m に依存することは勿論であるが、コンクリート内部の透水係数に特に依存するわけである。

c) 雰囲気圧

図-5は、解析ケースA-1, A-2, A-3, A-4に対する解析結果を示したものである。同図(a)は軸方向のクリープひずみ～時間関係、同図(b)は浸出境界である上端からの間隙水の浸出量～時間関係を表しており、図中に示す記号●、△、○および□は、それぞれ解析ケースA-1, A-2, A-3およびA-4に対応する解析結果である。

まず、持続側圧載荷直後に生じる急激なクリープひずみの増加およびその後の緩やかな増加の程度は、雰囲気圧が負の値として大きくなるほどすなわち乾燥の程度が大きいほど、大きくなる傾向にある。逆に、雰囲気圧が正の値として大きくなるほどすなわち湿潤の程度が大きいほど、その増加の程度は小さくなる傾向にある。この定性的傾向は、飽水状態のコンクリートが乾燥しながら持続応力を受ける場合には、クリープひずみは湿潤状態のものに比べて更に大きくなるという実現象¹¹⁾と一致している。この



(a) 軸方向クリープひずみ

(b) 間隙水の浸出量

図-5 クリープ性状に及ぼす雰囲気圧の影響

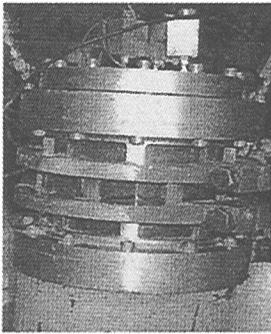


図-6 持続側圧載荷用セル

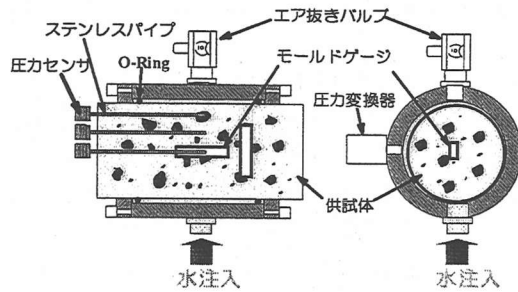


図-7 セルの詳細図

ような定性的傾向を示す理由は、コンクリート供試体内部と表面における間隙水圧勾配が、表面の乾燥の度合いとともに大きくなることにより、浸出境界からの間隙水の浸出量が大きくなるためであり、同図(b)はまさにそのような間隙水の浸出現象を示している。

次に、前項までの議論において、間隙水の浸出量の主要因は透水係数であったわけであるが、コンクリート供試体表面における乾湿状態にも大きく左右されることがわかるわけである。

このように、間隙水の浸出現象を詳細に導入した本解析理論によれば、供試体内部における間隙水の拡散現象および外部への連続的な浸出現象によってクリープ性状に及ぼす間隙水の影響は非常に大きく、また、長時間に渡ってその影響が関与することが明らかとなったわけである。この傾向は、特に、透水係数が小さく、コンクリートのヤング係数が小さく、そして、乾燥の影響が大きいほど顕著であり、この

ような状態は若材齢コンクリートが乾燥を受ける場合に対応しているわけである。そこで本章では、本解析モデルを忠実に模擬した装置を用いて、コンクリート供試体側面にのみ一定水圧を持続的に載荷した状態で生じる軸方向へのクリープ実験を行い、クリープ性状を実験的に評価するとともに、本解析理論の適用性を評価した。さらに、実験のおよび解析的評価から、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象の影響評価を行い、間隙水の挙動と間隙水およびセメントペーストの粘弾性挙動との境界領域に関する議論も行うことにする。

4. 持続側圧作用下におけるコンクリートのクリープ実験

(1) 実験装置^{12),13),14)}

持続側圧載荷用セルの外観は図-6に示す通りで

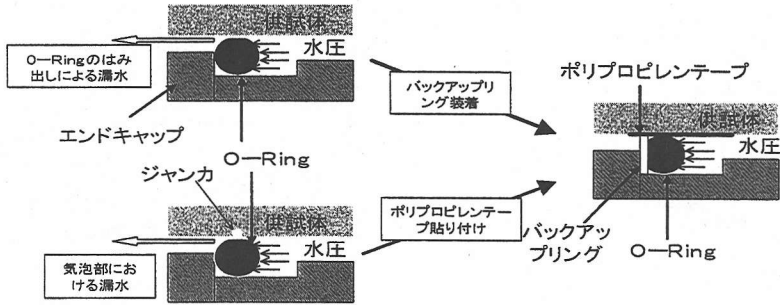


図-8 間隙水の漏水防止処理方法

表-2 コンクリートの配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積重量(kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
10±2	2.5±1	60	54	226	337	906	732

表-3 強度特性値

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
材齢3日	17.2	1.7	22.4
材齢7日	25.0	2.6	25.5

表-4 実験パラメータ

試験体名	材齢(日)	持続側圧	ゴムスリーブ
III-50	3	0.5 × σ_{ru}	無し
III-70	3	0.7 × σ_{ru}	無し
VII-50	7	0.5 × σ_{ru}	無し
VII-70	7	0.7 × σ_{ru}	無し
VII-70-G	7	0.7 × σ_{ru}	有り

{ 材齢3日 : $\sigma_{ru} = 4.2MPa$
材齢7日 : $\sigma_{ru} = 5.8MPa$ }

あり、その詳細は図-7に示す通りである。セルは鋼製の円筒容器からなっており、その中央部にφ15×30cmのコンクリート供試体が配置されている。供試体側面への直接的な水圧の作用方法は、セルと供試体との隙間に満たされた水にジャッキを介して直接加圧される。したがって、セルと供試体の隙間から外部への水の漏水処理が重要となってくる。その処理方法は、図-8に示すように、セルの上下端にO-Ring、バックアップリングを配置し、供試体にポリプロピレンテープを巻くことにより行われた。この際、供試体とポリプロピレンテープとの間にグリスを十分塗布することにより、その間の摩擦抵抗は殆ど無視し得るものと考えられる。なお、実験で使用したコンクリート供試体の水セメント比は60%であり、材齢は3日と7日のものを使用した。コンクリートの配合および強度特性は、表-2および表-3に示す通りである。

(2) 持続側圧載荷方法

まず、破壊時の側面水圧を計測する予備実験として、0.1MPa/secの加圧速度でセルと供試体との隙間に満たされた水に直接加圧させる実験を行い、破壊

時の側面側圧 σ_{ru} を求めた。そして、持続側圧の載荷方法は、0.1MPa/secの加圧速度で所定の側面水圧になるまで加圧され、その後は持続的にその側面水圧がジャッキにより自動的に保たれた。

(3) 実験パラメータ

本実験で使用したパラメータは、表-4に示すように、持続側圧値および持続側圧載荷材齢である。なお、比較のために、供試体にゴムスリーブを施すことにより供試体内への水の圧入現象を防止した実験も実施した。

(4) 測定項目

本実験における測定項目は、軸方向および周方向のコンクリートひずみ、供試体内部に発生する間隙水圧である。コンクリート内部の間隙水圧の測定は、予め供試体内部に埋め込んだφ1mmのステンレス

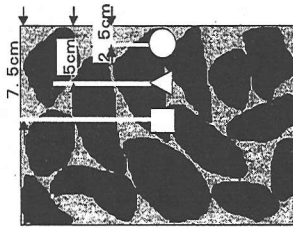


図-9 間隙水圧測定位置

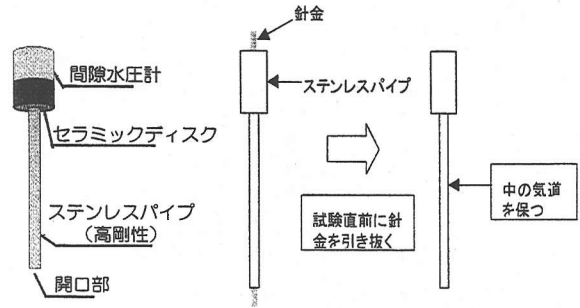


図-10 間隙水圧計の細部

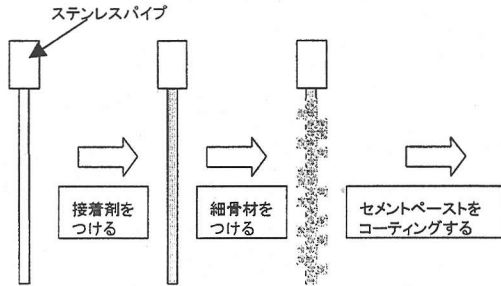


図-11 ステンレスパイプのコーティング

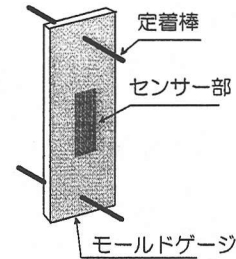


図-12 ひずみゲージ

パイプ内に水を満たし、先端に間隙水圧計を取り付けることにより実施され、測定位置は図-9に示す供試体の表面から2.5cm、5cmおよび7.5cmの3箇所とする。なお、間隙水圧計の細部は、図-10に示すように、間隙水圧のみを測定するため、供試体内部におけるパイプの先端は開口状態であり、パイプと間隙水圧計の間には、水と空気のみを通すセラミックディスクが設置されている。また、ステンレスパイプとコンクリート供試体との密着性を確保するため、図-11に示すように、ステンレスパイプ表面には接着剤が塗布され、その上に細骨材を万遍なくまぶした後にセメントペーストをコーティングした。そして、図-10に示すステンレスパイプ先端の開口部からのセメントペーストの進入を防ぐために、ステンレスパイプ内に予め針金を挿入した状態でコンクリートが打設され、実験直前にその針金を引き抜くことによりステンレスパイプ内の水の流入気道を確保した。コンクリートひずみは図-12に示すように、供試体との定着を十分に確保するために上下端に定着棒を取り付けたモールドゲージ（精度：1 μ ）により測定され、軸方向および周方向のひずみが測定された。この場合、供試体の局所

的な軸方向変形を測定することになるため、併せて、供試体上下端に変位計をセットすることにより供試体全体の軸方向変形も測定した。なお、データの計測は10秒間隔で実施し、計測データを間引くことにより次節に示す図の明瞭化を行った。

(5) 持続側圧を受けるコンクリートの変形挙動

a) 間隙水圧発生状況

間隙水圧発生状況について試験体Ⅲ-50を例に取り、図-13に示す。同図は、側面水圧载荷から持続側圧载荷による供試体内部に発生する間隙水圧と経過時間の関係を表しており、図中に示す記号○、△、□は図-9に示すようにそれぞれ表面から2.5cm（表面部）、5cm（中間部）、7.5cm（中心部）位置での間隙水圧の発生状況である。また、同図には、载荷された側面水圧と持続側圧が実線で示されている。

まず、側面水圧が载荷された後、約3分で表面部、約6分で中間部、約18分で中心部において間隙水圧が徐々に発生し、その後約32分において3箇所における間隙水圧は持続側圧値の約50%の一定値となった。また、供試体上下端面の目視による観察

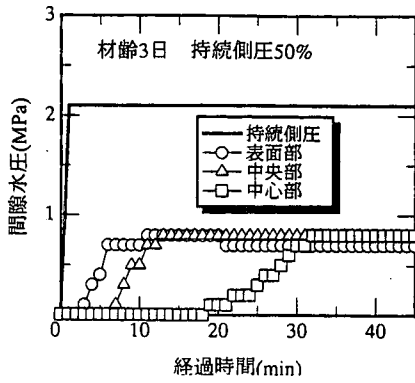


図-13 間隙水圧特性

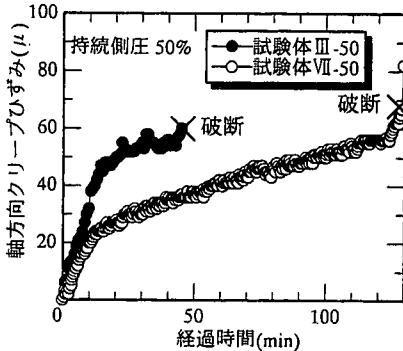


図-14 クリープひずみ性状 (試験体Ⅲ-50, Ⅶ-50)

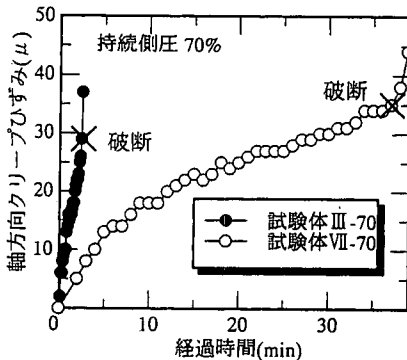


図-15 クリープひずみ性状 (試験体Ⅲ-70, Ⅶ-70)

では、側面水圧が荷重された後約 20 分を経過した時点から表面に水滴が確認され湿った状態であった。このような間隙水圧の発生傾向は、水圧作用面から間隙水が徐々に中心部に向かって拡散し、その後、より圧力が低い供試体上下端方向に向かって拡散・浸出するという間隙水の供試体内部における拡散および外部への浸出現象に対応している。すなわち、前章の解析的検討で述べたような間隙水の供試体内部での拡散現象および外部への浸出現象が、実験的に確認されたわけである。

b) 変形挙動に及ぼす材齢の影響評価

図-14, 15は、それぞれ試験体Ⅲ-50, Ⅶ-50 および試験体Ⅲ-70, Ⅶ-70における持続側圧荷重後における軸方向のクリープひずみを表したものであり、図中に示す記号●および○は、それぞれ材齢3日および7日の実験結果である。

まず、持続側圧が破壊時の側圧の50%である図-14では、どの材齢においても持続側圧荷重後初期に生じるクリープひずみは、ほぼ一定の割合で急激に増加した後、緩やかな増加を示している。しかしながら、クリープによる試験体の破断(劈開破壊)現象が約60μの時点において生じるということから判断すると、材齢3日の試験体における持続側圧荷重後初期に生じるクリープひずみは、材齢7日の試験体に比べて非常に大きい。これは、前章に示したように、透水係数が大きいすなわち組織が非常に多孔質であるため、発生する間隙水圧分布が大きいことにより間隙水の試験体内部での拡散と外部への進出現象が連続的に生じる、言い換えれば、水が“入っては出て、入っては出る”という現象が連続的に発生することによりクリープひずみが大きくなるわけである。したがって、透水係数が小さいすなわち組織が緻密である材齢7日の試験体では、発生する間隙水圧分布が小さいことにより間隙水の試験体内部での拡散現象も生じにくいわけである。このような影響に加えて、透水係数が大きい場合には、試験体内部における圧力の伝達速度が速いため、持続側圧荷重初期の段階から供試体外部への間隙水の浸出現象が生じることも主な要因である。このことは、材齢3日の供試体では表面に水滴が確認され湿った状態であったが、材齢7日の供試体では水滴の確認はできずに乾いた状態であったという供試体上下端面の目視による観察からも断定可能と考えられる。一方、持続側圧荷重後約20分経過した時点からのクリープひずみの増加の割合は、どの材齢においてもほぼ同一である。材齢3日の試験体では、間隙水の供試体外部への浸出現象が連続的に生じることによるものであるが、材齢7日の試験体では、前章に示したように、間隙水の浸出現象が全く発生しないという解析的評価から考えると、間隙水の影響ではないことが予想される。なお、これに関しては、次節で詳細に議論することにする。

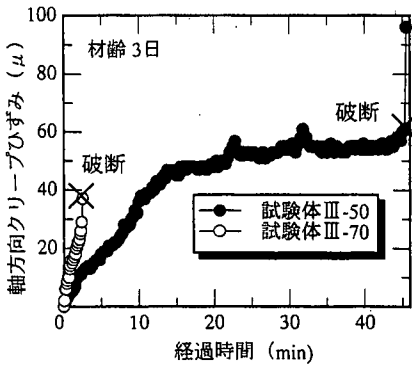


図-16 クリープひずみ性状 (試験体Ⅲ-50, Ⅲ-70)

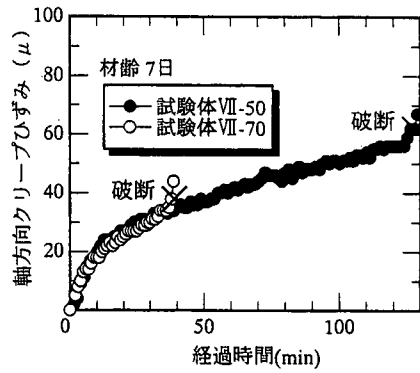


図-17 クリープひずみ性状 (試験体Ⅶ-50, Ⅶ-70)

次に、持続側圧が破壊時の側圧の70%である図-15では、材齢によらずクリープひずみはほぼ直線的に増加している。この現象を図-14に示す経過時間40分以内に対応付けて考えてみると、単に持続側圧値のみの違いであるため、メカニズ的には持続側圧が破壊時の側圧の50%の試験体におけるクリープ性状と同一であると考えられる。すなわち、持続側圧値が大きくなることにより、コンクリート骨格の摩擦抵抗が大きくなり、図-14に示した持続側圧載荷後初期に生じる急激なクリープひずみの増加現象のみを呈しているものと考えられる。したがって、間隙水圧の消散に至るまでの間隙水圧の変化量が大きいことのみによるものと考えられる。

c) 変形挙動に及ぼす持続側圧値の影響評価

図-16, 17は、それぞれ試験体Ⅲ-50, Ⅲ-70および試験体Ⅶ-50, Ⅶ-70における持続側圧載荷後における軸方向のクリープひずみを表したものであり、図中に示す記号●および○はそれぞれ持続側圧値が破壊時の側圧の50%および70%における実験結果である。

まず、図-16に示す材齢3日の試験体では、持続側圧値の違いにより全く異なった挙動を示している。試験体Ⅲ-70では、ほぼ直線的にクリープひずみが増加することに対して、試験体Ⅲ-50では、持続側圧載荷後初期に生じる急激なクリープひずみの増加を示した後に緩やかな増加を示している。これは、透水係数が両試験体で全く同一であるということ考えると、試験体Ⅲ-70では、持続側圧値が大きいため、間隙水の供試体内部での拡散および外部

への浸出現象の程度が大きいことによりセメントペースト骨格の摩擦抵抗が大きくなることに対して、試験体Ⅲ-50では持続側圧値が小さいため、その程度が小さいことによりセメントペースト骨格の摩擦抵抗が小さくなることによるものと考えられる。したがって、単位時間当たりのクリープひずみ量は、持続側圧値に依存しているわけである。

次に、図-17に示す材齢7日の試験体では、材齢3日の試験体の傾向とは異なり、持続側圧値によらずほぼ同一の傾向を示している。これは前項で示したように、透水係数が小さい場合、組織の緻密性という観点から、持続側圧値によらず持続側圧載荷直後の間隙水圧分布は小さく間隙水の拡散も生じにくいことにより、定常状態となる間隙水圧分布までの変化量も小さく定常状態に移行するまでに要する時間も長いことによるものと考えられる。なお、供試体上下表面の目視による観察から、外部への間隙水の浸出現象が生じないことが確認された。

d) 変形挙動に及ぼす水の圧入の影響評価

変形挙動に及ぼす外部から供試体内部への水の圧入の有無による影響評価を行うことにする。前項までの試験体は、供試体側面に直接水を作用させて水の外部からの圧入現象を許容したものであったが、比較のためにゴムスリーブを供試体側面に施すことによって水の圧入現象を許容しない実験も実施した。図-18は、試験体Ⅶ-70 (以下、ゴム無し) および試験体Ⅶ-70-G (以下、ゴム有り) における持続側圧載荷後における軸方向のクリープひずみを表したものであり、図中に示す記号●および○は、それぞれ試験体Ⅶ-70-G (ゴム有り) およびⅦ-70 (ゴム

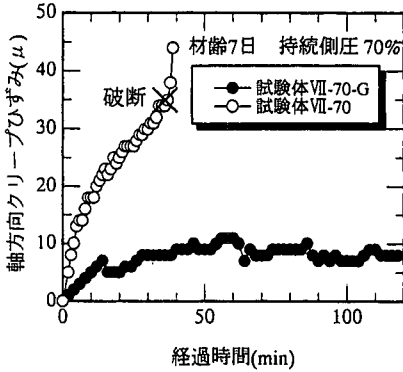


図-18 ゴムスリーブの有無によるクリープ性状

無し)における実験結果である。

ゴム無し供試体では、前項までの議論から、供試体内部における間隙水の拡散現象の影響により軸方向にクリープひずみが発生したわけである。一方、ゴム有り供試体では、持続側圧載荷後において僅かなクリープひずみの増加が認められるが、その後は約 10μ の一定値のままである。このようなゴム有り供試体における持続側圧載荷初期のクリープひずみの増加がゴム無し供試体に比べて小さいことおよびその後は一定値となる現象は、内部において発生する間隙水圧が小さいため拡散現象そのものが余り生じないことによるものである。したがって、供試体内部において発生する間隙水圧の実測値は、殆どゼロであったわけである。

このような実験結果から推測されることは、ゴムスリーブ有りとなしとの違いは、単に水の圧入現象の有無だけであり、その違いによって上述のような変形挙動を示すということから判断すると、コンクリート内部に発生する間隙水圧が駆動力となり、より圧力が低い供試体両表面に向かって間隙水が定常或いは非定常に拡散或いは浸出することにより軸方向のクリープ現象が生じることが、再確認されるわけである。

(6) 持続的な側面水圧を受けるコンクリートの クリープ機構の解明

コンクリート供試体側面にのみ直接水圧を持続的に作用させた場合、軸方向にクリープ変形が生じることが実験により明確になったわけであり、このようなクリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象

という水分移動の影響は、実験中における供試体の目視による観察およびゴムスリーブを供試体側面に施した実験結果との対比により、非常に大きいものと推測されたわけである。そこで本節では、このようなクリープ性状に及ぼす間隙水の供試体内部での拡散現象および外部への浸出現象の影響評価を解析的に行うとともに、コンクリートのクリープ機構の解明を実験的および解析的に行うことにする。なお、解析手法は、前章にて構築されたクリープモデルであるが、間隙水の水分移動の影響を明確にするために間隙水およびセメントペーストの粘弾性挙動の影響は無視することとした。

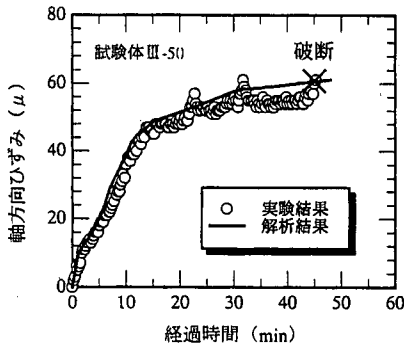
解析を行うに当たり、解析モデル、境界条件およびコンクリートと間隙水の力学的特性が必要である。解析モデルおよび境界条件は、前章に記した図-2と同じであり、コンクリートの力学的特性は実験により得られた値をそのまま適用した。また、間隙水の体積弾性係数は、 2.2kN/mm^2 、透水係数は、試験体Ⅲ-50, 70 に関しては $6.60 \times 10^{-8} \text{cm/sec}^{(15),(16)}$ 、試験体Ⅶ-50, 70 に関しては $3.30 \times 10^{-10} \text{cm/sec}^{(15),(16)}$ であり、浸出境界からの間隙水の浸出係数は $1.0 \times 10^{-9} \sim 5.0 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ とした。そして、雰囲気圧は、 1atm とした。

a) 試験体Ⅲ-50, Ⅲ-70

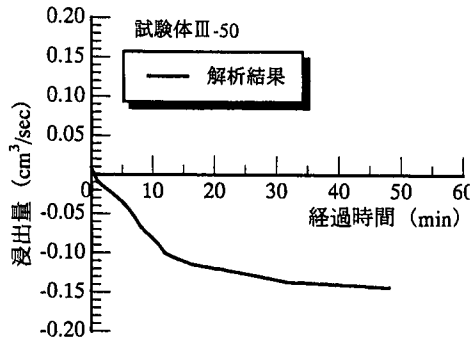
図-19, 20は、それぞれ試験体Ⅲ-50 およびⅢ-70 に対する実験結果と解析結果との比較を表しており、各図中に示す記号○は実験結果、実線は解析結果を示している。また、各図(a)は軸方向のクリープひずみ～時間関係、各図(b)は解析により得られた浸出境界面からの間隙水の浸出量～時間関係を表している。

まず、解析結果は実験結果を非常に精度良く表しており、試験体Ⅲ-50 では、急激なクリープひずみの増加を示した後に緩やかな増加を示すことに対して、試験体Ⅲ-70 では、急激なクリープひずみの増加のみを示しており、このような傾向も解析結果は精度良く評価している。

次に、各図(b)に示す浸出量の解析結果に関連付けてクリープひずみの発生傾向を考察してみる。試験体Ⅲ-50 では、持続側圧載荷直後から約 10 分までの急激なクリープひずみの増加は、ほぼ間隙水の浸出量の急激な増加に対応している。また、その後の緩

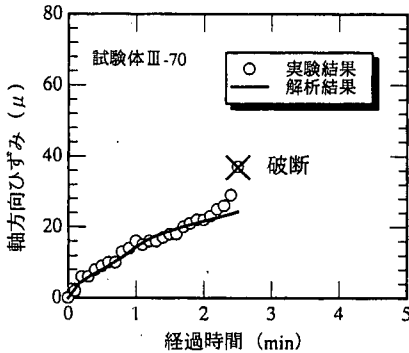


(a) クリープ性状

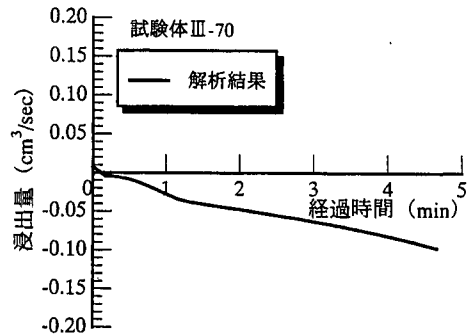


(b) 間隙水の浸出量

図-19 クリープ性状と間隙水の浸出量に関する解析結果(試験体Ⅲ-50)



(a) クリープ性状



(b) 間隙水の浸出量

図-20 クリープ性状と間隙水の浸出量に関する解析結果(試験体Ⅲ-70)

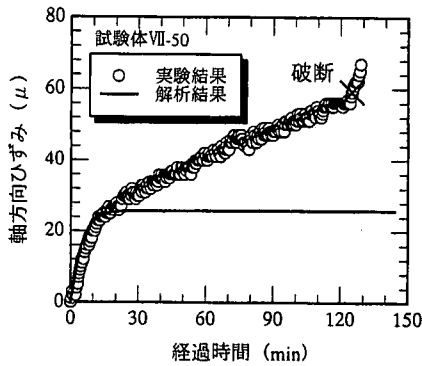
やかなクリープひずみの増加も、緩やかな間隙水の浸出量の増加に対応している。このことから判断すると、持続側圧載荷直後の急激な間隙水の拡散および浸出過程においては、コンクリート骨格の摩擦抵抗が大きくなることによりクリープひずみは急激な増加を示すことに対して、その後の緩やかな間隙水の浸出過程においては、その摩擦抵抗が小さくなることによりクリープひずみは緩やかな増加を示すわけである。では、何故、間隙水の浸出現象は、持続側圧載荷直後に大きく、その後は緩やかなのであろうか。このような現象は、持続側圧載荷直後では、間隙水圧分布が定常状態へと移行することによる間隙水の供試体内部での活発な拡散と外部への浸出が生じることに對して、その後は、間隙水圧の定常状態を保持した状態で間隙水の拡散と浸出が生じるために発生するものと考えられる。一方、試験体Ⅲ-70では、間隙水の浸出量が直線的であることから判断すると、前者の現象のみが生じていることが推測される。

このように、透水係数が比較的大きく、コンクリートの骨格の強度が比較的小さい若材齢コンクリートでは、そのクリープ機構は、ほぼ間隙水の供試体内部での拡散現象と外部への浸出現象により生じることが実験的および解析的検討から明確になったわけである。

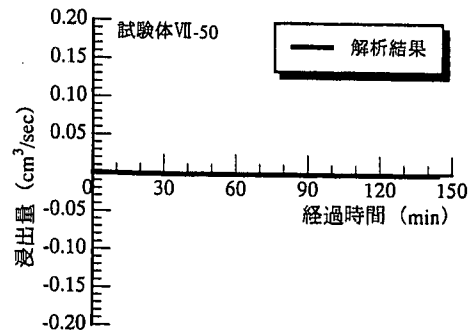
b) 試験体Ⅶ-50, Ⅶ-70

図-21, 22は、それぞれ試験体Ⅶ-50 およびⅦ-70 に対する実験結果と解析結果との比較を表しており、各図中に示す記号○は実験結果、実線は解析結果を示している。また、各図(a)は軸方向のクリープひずみ～時間関係、各図(b)は解析により得られた浸出境界面からの間隙水の浸出量～時間関係を表している。

まず、試験体Ⅶ-50およびⅦ-70とも、実験結果は持続側圧載荷直後に急激なクリープひずみの増加を示した後に緩やかな増加を示すことに対して、解析結果は、急激な増加を示した後はある一定値となっている。持続側圧載荷直後に急激なクリープひずみ

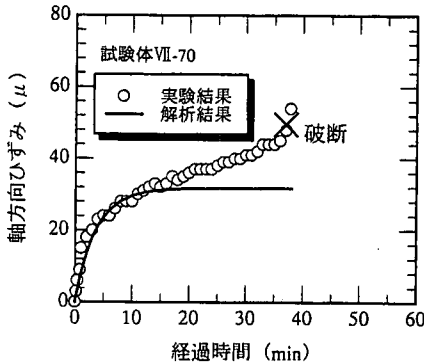


(a) クリープ性状

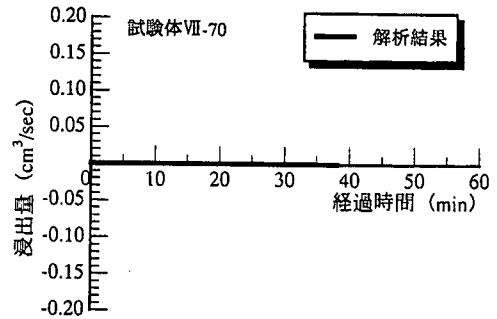


(b) 間隙水の浸出量

図-21 クリープ性状と間隙水の浸出量に関する解析結果(試験体VII-50)



(a) クリープ性状



(b) 間隙水の浸出量

図-22 クリープ性状と間隙水の浸出量に関する解析結果(試験体VII-70)

の増加という実験的傾向に関しては、解析結果は精度良く評価していることに対して、その後の緩やかな増加を示すという実験的傾向に関しては、解析結果は全く異なった傾向を示している。このような解析的傾向は、各図(b)に示す間隙水の浸出量がゼロということから判断すると、持続側圧荷重直後においては、間隙水の供試体内部での拡散に起因して供試体内部の間隙水圧が徐々に大きくなることによりクリープひずみの急激な増加が生じるわけである。そして、内部の間隙水圧がある定常状態に達すると、コンクリート組織の緻密性により間隙水の拡散が消失し、結果として間隙水の供試体外部への浸出が全く生じないことにより、その後のクリープひずみの増加が全く生じないわけである。このように、透水係数が比較的小さく、コンクリートの骨格の強度が比較的大きいコンクリートに関しては、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象の影響は、持続側圧荷重直後のみに生じるものと考えられる。

では、その後のクリープひずみの緩やかな増加現

象は、何によって生じるのであろうか。今、コンクリート供試体の軸方向の力の釣合いを考えると、次式で表すことができる。

$$\sigma = \sigma' - p \quad (19)$$

ここで、 σ 、 σ' および p は、それぞれ全応力、有効応力および間隙水圧であり、符号の定義は、応力に関しては引張を正とし、間隙水圧に関しては圧縮を正とする。

軸方向には、外力が作用していないため、次式に示すようにコンクリート骨格に生じる応力である有効応力 σ' と間隙水圧 p は等しくなり、応力状態は骨格に関しては引張応力状態であり、間隙水圧に関しては圧縮応力状態である。

$$\sigma' = p \quad (20)$$

σ' : 引張応力状態

p : 圧縮応力状態

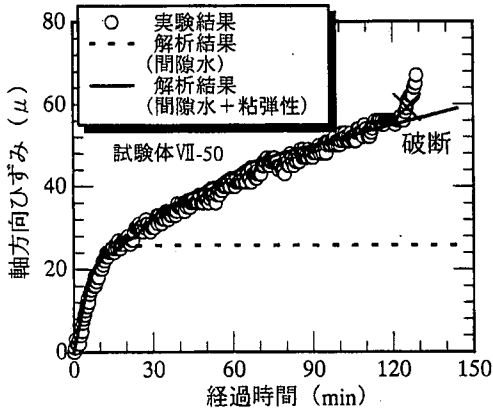


図-2 3 クリープ機構の解明 (試験体VII-50)

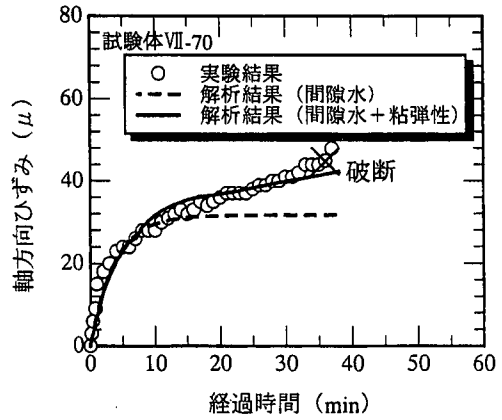


図-2 4 クリープ機構の解明 (試験体VII-70)

すなわち、コンクリート骨格と間隙水圧は、上述の応力状態を保ったまま平衡状態にあるわけである。したがって、間隙水に発生する応力である間隙水圧を分離圧として捉えることができる。この背景には、試験体Ⅲ-50、Ⅲ-70では、組織が非常に多孔質であるため間隙水は間隙水圧勾配により軸方向へと拡散し易いことに対して、試験体Ⅶ-50、Ⅶ-70では、組織が緻密であるため、たとえ軸方向に間隙水圧勾配が生じたとしても間隙水は拡散し難く間隙水圧は分離圧として骨格に作用するものと考えられる。

今、この分離圧としての間隙水圧によりコンクリート骨格を押し広げようとするクリープ現象が生じるものと仮定してみる。この現象を前章に示した本解析理論に導入することは、すなわち、式(8)および式(10)中の間隙水およびセメントペーストの粘弾性項を考慮することになるわけである。なお、粘弾性挙動は、クリープ性状への間隙水の影響が全く無くなった時点から考慮することとする。

図-2 3、2 4は、それぞれ試験体Ⅶ-50およびⅦ-70に対する実験結果、間隙水の影響のみを考慮した解析結果および上記に粘弾性挙動の影響をも考慮した解析結果の比較を表しており、各図中に示す記号○は実験結果、破線および実線は、それぞれ間隙水の影響のみを考慮した解析結果および間隙水と粘弾性の影響を考慮した解析結果を表している。したがって、破線で示された解析結果は、図-2 1、2 2に示す解析結果と同一である。

まず、両試験体において、粘弾性挙動の影響を考

慮した解析結果は、実験結果を非常に精度良く評価していることがわかる。実験結果および粘弾挙動の影響を考慮した解析結果とも、持続側圧載荷直後には、間隙水の供試体内部での拡散の影響によりクリープひずみの急激な増加が生じ、この傾向は、間隙水の拡散が消失するまで続く。その後は、平衡応力状態にある正(圧縮)の間隙水圧が分離圧となり、コンクリート骨格を徐々に押し広げようとする粘弾性挙動の影響により、クリープひずみの緩やかな増加が生じることになる。すなわち、解析結果における実線と破線との差が間隙水圧が分離圧としてコンクリートに作用することによる粘弾性成分を示しているわけである。

このように、透水係数が比較的小さく、コンクリート骨格の強度が比較的大きいコンクリートでは、そのクリープ機構は、持続側圧載荷直後においては間隙水の供試体内部での拡散により生じ、その後は供試体内部において発生する間隙水圧が分離圧としてコンクリート骨格に作用することによる粘弾性挙動により生じることが、実験的および解析的検討から明確になったわけである。

5. 結論

本研究では、コンクリートのクリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動挙動と粘弾性挙動の定性的・定量的な影響評価を行うことを目的として、コンクリ

ート供試体内部における間隙水の拡散現象および外部への間隙水の浸出現象を統一的に評価可能なクリープモデルの構築およびそれにセメントペーストと間隙水の粘弾性挙動の影響を同時に考慮したクリープモデルの構築を行った。まず、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散現象および浸出現象の影響のみを評価するために、コンクリート供試体の透水係数、弾性係数および供試体表面の乾湿の程度をパラメータとしたパラメータスタディを行い、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象の影響を議論した。次に、間隙水の拡散・浸出現象が顕著に生じるクリープ実験装置の開発を行い、実験的手法によっても間隙水の拡散・浸出現象の影響評価の議論を行った。さらに、実験的および解析的評価により、クリープ性状に及ぼす間隙水の拡散・浸出現象の影響と間隙水およびセメントペーストの粘弾性挙動の影響に関する評価を行った。以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

(1) コンクリート供試体内部における間隙水の拡散現象と外部への連続的な浸出現象という一連の水分移動挙動を統一的に評価可能なクリープモデルおよびそれにセメントペーストの粘弾性挙動の影響を考慮したクリープモデルが構築された。

(2) 構築されたモデルは、クリープ性状に及ぼす表面の乾湿の度合いによる影響を評価可能である。

(3) クリープ性状に及ぼす間隙水の水分移動挙動の影響は非常に大きい。

(4) 間隙水の水分移動挙動に起因したクリープ性状に及ぼす影響の主要因は、透水係数および供試体表面における乾湿の度合いである。

(5) 比較的透水係数が大きい若材齢時のコンクリートのクリープ機構は、間隙水の水分移動挙動により支配される。

(6) 比較的透水係数が小さいコンクリートのクリープ機構は、持続荷重載荷初期の段階では間隙水の水分移動挙動により支配され、その後は間隙水圧が分離圧となってコンクリート骨格を押し広げようとする粘弾性挙動により支配される。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、長大株式会社の井之上尚史君（当時：中央大学学生）および埼玉県の梨木義春君（当時：中央大学学生）には実験の実

施ならびにデータの整理にご尽力を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大下英吉, 濱中隆, 渡邊智紀: クリープ変形として捉えた自己収縮モデルの構築とその適用性評価, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.53-66, 2000.
- 2) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版
- 3) 村田二郎, 岡田清: 最新コンクリート技術選書(フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ), 山海堂, 1980.
- 4) 大下英吉, 田辺忠顕: 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.
- 5) 大下英吉, 田辺忠顕: コンクリートのポストピーク領域における間隙水圧に関する実験的・解析的研究, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.109-120, 1997.
- 6) Oshita, H., Ishikawa, Y. and Tanabe, T.: Creep Mechanism of Early Age Concrete Modeling with Two Phase Porous Material, *Proc. of the Fifth International RILEM Symposium*, pp.465-470, 1993.
- 7) 石川靖晃, 菊川浩治, 田辺忠顕: 遷移材齢時におけるコンクリートの時間依存挙動のモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.681-686, 1996.
- 8) 大下英吉, 田辺忠顕: 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, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.29-41, 1995.
- 9) 大下英吉, 田辺忠顕: 不均質材料の透水性に関するモデル化とその適用性評価, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.63-77, 1996.
- 10) Bazant, Z. P. and Najjar, L. J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No.25, pp.3-19, 1972.
- 11) 小田耕平, 川名健, 大下英吉: 環境条件の違いによる側面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研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.637-642, 2000.
- 12) 松林博文, 田澤栄一, 大下英吉, 梅津啓史: 側面水圧による円柱供試体の切断現象, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.567-572, 1996.

- 13) 櫻井拓也, 檜新太郎, 大下英吉: 側圧作用下におけるコンクリートの変形特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.553-558, 1997.
- 14) 大下英吉, 谷口幸弘: 部分的に水で飽和された多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーに関する研究, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.257-270, 1999.
- 15) Murata, J. : Studies on The Permeability of Concrete, *Trans. of JSCE*, No.77, Nov., pp.69-103, 1961.
- 16) Powers, T. C., Copeland, L. E., Hayes, J. C. and Mann, H. M. : Permeability of Portland Cement Paste, *ACI Journal*, No.51-14, Nov., pp.285-298, 1954.

(1999. 10. 19 受付)

STUDY ON EFFECT OF PORE WATER BEHAVIOR AND VISCO-ELASTIC BEHAVIOR ON CREEP MECHANICS OF CONCRETE

Hideki OSHITA

The analytical model for creep mechanism of concrete as a porous permeable material was established. In the analytical mode, the diffusion phenomenon and seepage phenomenon for pore water were introduced in detail and then the model was expanded so as to be able to be taken the visco-elastic behavior of pore water and cement paste into account. The effect of water migration on the creep phenomenon was estimated due to the analytical and experimental study. Moreover, the degree of water migration behavior effect and visco-elastic behavior effect of cement paste on the creep phenomenon was estimated due to the analytical and experimental study and then the creep mechanism was probed.