

論文 環境条件の違いによる側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

小田耕平*¹・川名 健*²・大下英吉*³

要旨：本研究では、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状を詳細に評価することを目的として、種々の環境条件下にさらされたコンクリート供試体に一定の側面水圧を作用させた際のクリープ変形状に関する実験および解析を実施した。結果、一定側面水圧が作用しているコンクリート供試体の環境条件の変化は、そのクリープ性状に大きな影響を及ぼすことが分かった。

キーワード：クリープ現象, 間隙水圧, 水分移動, 雰囲気圧

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物の利用が注目されている。これらの典型的な例が、橋脚や水中トンネルであり、これらのコンクリート構造物においては常時荷重として水圧がコンクリート表面に直接作用する。その値は、水深数百メートルに施工されると MPa のオーダーとなり、水中環境下におけるコンクリート材料の変形特性の詳細な解明が必要となる。

一般にコンクリートは多孔質透水性材料であり、水が直接作用すると内部に発生する間隙水圧勾配によって細孔内において水の浸透現象が生じるわけである。この浸透現象は、時としてコンクリートの破壊を引き起こす実験的事実が確認されている。井之上ら¹⁾は、等2軸圧縮場を模擬した装置によりコンクリート供試体側面にのみ水圧を直接作用させた場合の実験的研究を実施し、引張強度とほぼ同等の水圧でへき開破壊が生じる現象を確認している。また、引張強度の約1/2という非常に小さな水圧を持続的に作用させた場合、供試体軸方向にクリープ変形を生じ、最終的にへき開破壊を生じるこ

とも実験により確認している。さらに、供試体側面にゴムスリーブを巻き水の圧入を排除した際、ゴムスリーブ無しの場合と比べて軸方向ひずみの変化はほとんど生じないことも確認されている。

これらの現象のメカニズムは、側面から圧入された水が、表乾状態である供試体上下表面に向かって移動するという現象によるものであることが解析的手法との併用により明らかにされた。この種の現象は、海洋構造物に限らず、昨今の大きな問題であるトンネルコンクリートの剥離現象の一要因としても考え得るものである。

そこで本研究では、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状を詳細に評価することを目的として、種々の環境条件下にさらされたコンクリート供試体に一定の側面水圧を作用させた際、水の供試体内部への圧入現象によりコンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧の測定実験およびクリープ変形状に関する実験および解析を実施した。

2. 実験概要

2.1 側面水圧載荷セル

*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)

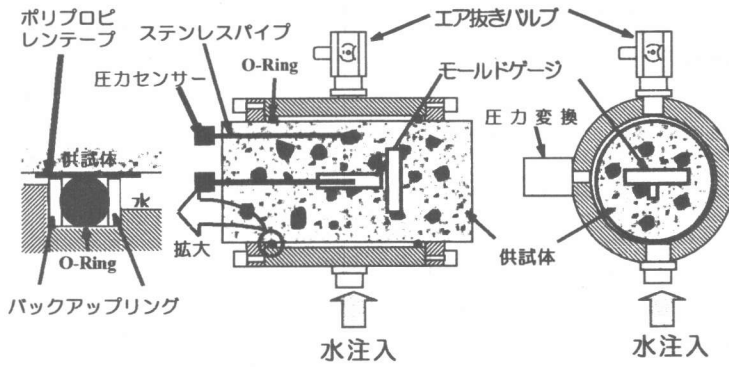


図-1 実験装置概要

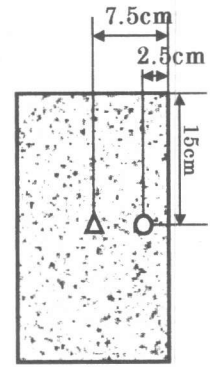


図-2 間隙水圧測定位置

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
25	10±2	2.5±1	60	54	226	377	906	732

側面水圧載荷セルの概要は、図-1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を配置する。その際、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、セルと供試体の隙間から外部への水の漏水を防止する。コンクリートの配合は表-1に示す。強度特性は表-2に示す。

2.2 側圧載荷方法

まず、側圧を0.1MPa/secの荷重速度で単調増加させ破壊まで加圧を行い、破壊時の側圧の値 σ_{ru} を事前に求める。そして実験により得られた破壊時の側圧 σ_{ru} に対して50%(0.5 σ_{ru})の値を一定側圧として持続的にコンクリート供試体の側面にのみ載荷させる。

2.3 測定項目

本実験における測定項目は、載荷側圧、軸方向及び周方向のコンクリートのひずみ、間隙水圧である。載荷側圧は図-1に示す側圧測定器により測定し、コンクリート内部の間隙水圧の

表-2 強度特性

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)
材齢3日	16.9	1.67	22.21×10 ³

測定は、予め供試体内部に埋め込んだφ1mmのステンレスパイプ内に水を満たし、先端に間隙水圧計をとりつけることにより実施され、側定位置は図-2に示すように供試体の表面から2.5cm、7.5cm(中心部)の2箇所にする。

また、コンクリートひずみは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を図-1に示す様に予め供試体中心部に埋め込み、軸方向および周方向のひずみを測定する。

2.4 環境条件の設定

本実験で設定した供試体の上下表面の環境条件は、以下の3ケースである。

・表乾供試体

上下表面に何も手を加えず、表乾状態に保つ。

・気乾供試体

実験開始直後から上下表面に約15cmの距離から480Wのドライヤーを2個ずつ使い、温

風を当て続けることで表面を気乾状態に保つ。

・湿潤供試体

外寸(W×D×H)：100×60×40cm の容器を用意し、その中にセルごと横たえ、セルが浸る高さまで水を入れ実験を開始し、上下表面を湿潤状態に保つ。

3. 環境条件の違いによる一定側面水圧を受けるコンクリートのクリープ挙動

3.1 間隙水圧の発生状況

間隙水圧発生状況を図-3, 4, 5に示す。

図-3, 4, 5はそれぞれ表乾供試体, 気乾供試体, 湿潤供試体の発生状況を比べたもので、図中に示す記号○, △は図-2に示すように、それぞれ表面から2.5cm(表面部), 7.5cm(中心部)の間隙水圧の発生状況であり、載荷した一定側圧値を実線で示してある。

どの供試体においても、間隙水圧の発生状況は、先ず表面部から発生し、続いて中心部が発生するという傾向を示している。これはコンクリート表面から側面水圧により圧入された水が表面部分の間隙水圧を上昇させ、より間隙水圧の低い中心部へと水分移動が起こっているということを示している。

さらに、コンクリート上下表面より微量の水が浸出しているという目視による確認から判断すると、コンクリート内部に圧入された水が内部の間隙水圧を上昇させ、より圧力の低い上下表面へと内部の間隙水を浸透させていることがわかる。

3.2 コンクリートのクリープ性状

図-6はコンクリート供試体の変形特性である。図中の●は軸方向ひずみを、○は周方向ひずみを示す。

まず、単調増加型の側圧载荷により、周方向には圧縮ひずみが生じ、軸方向にはポアソン効果により引張りひずみが生じる。その後、一定側圧過程においては、軸方向にはさらに引張りひずみが増加し、周方向には圧縮ひずみの回復現

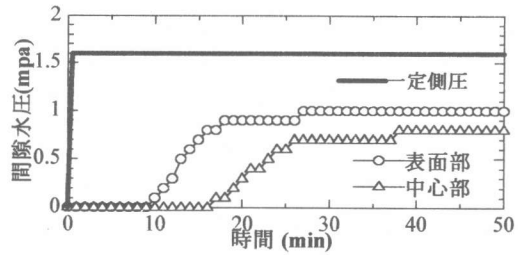


図-3 間隙水圧発生状況(表乾供試体)

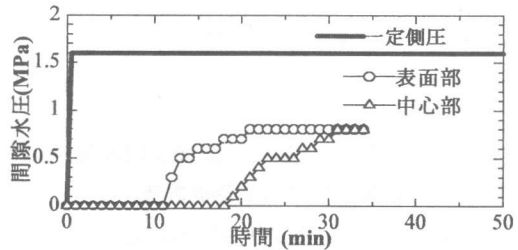


図-4 間隙水圧発生状況(気乾供試体)

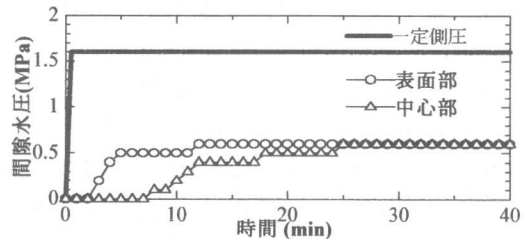


図-5 間隙水圧発生状況(湿潤供試体)

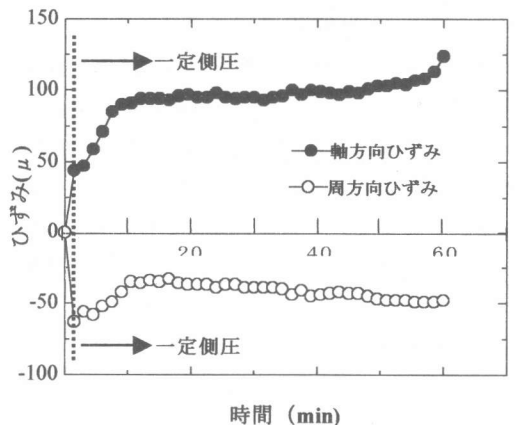


図-6 表乾供試体の軸方向および周方向のひずみ

象が生じた。そして、約55分後に供試体の中央部で軸方向に直交する単一面で水分移動に伴うクリープ現象によりへき開破壊を生じた。このような一定側面水圧下における変形挙動と破

壊現象は、図-7に示すようにコンクリート内部に水が圧入されることにより正（圧縮）の間隙水圧が発生し、それが駆動力となり、より圧力が低い供試体上下両表面に向かって水分移動が定常或いは非定常に生じることにより軸方向の変形すなわちクリープ現象が生じるものと考えられる。一方、周方向ひずみはコンクリート骨格の内部に発生する間隙水圧により押し広げられる現象によりひずみの回復現象が起こったと考えられる。

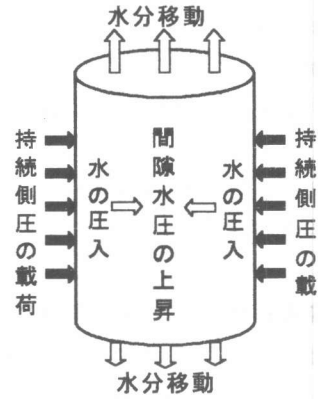


図-7 コンクリート内部の水分移動

3.3 クリープ挙動に及ぼす環境条件の影響に関する実験的評価

2.4に示した環境条件下におけるコンクリートの軸方向クリープひずみを図-8に示す。図中の記号○, □, △は、それぞれ表乾, 気乾, 湿潤供試体の場合のクリープひずみを示す。

気乾, 湿潤供試体ともに、表乾供試体に比べて変形速度にかなりの差があった。また、一定側圧載荷後、気乾供試体では、表乾供試体に比べ20分短い約35分でクリープによるへき開破壊を生じ、破壊時の軸方向クリープひずみは約83 μ であった。一方、湿潤供試体では、本実験の範囲内では破壊には至らなかった。

変形挙動に及ぼす環境条件の影響評価を行うと、破壊に至るまでの速度、時間、軸方向クリープひずみに大きな違いが見られる。これは4.2でも述べた通り、上下表面の環境条件の違いによりコンクリート内部に圧入された水がより圧力の低い供試体表面に向かって移動する際の速度の違いによるものと思われる。

すなわち、気乾供試体の場合は、表面部を気乾状態にすることにより、内部と上下表面部における間隙水圧勾配が大きくなるため、表乾供試体に比べて水分移動がより速い速度で起こるわけである。したがって、クリープひずみ速度が早くなるものと考えられる。また、湿潤供試体については、内部と上下表面部における間隙水圧勾配が表乾供試体に比べて小さくなるため、水分の移動速度が遅くなるものと考えられる。

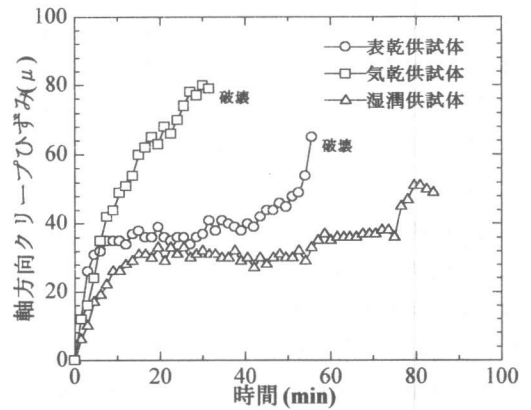


図-8 軸方向クリープひずみ

以上のように、一定側面水圧がコンクリート供試体に作用する際、そのクリープ性状に上下表面すなわち水分が移動する方向の環境条件が密接に関わっていることが実験的に明らかとなった。

4. 種々の環境条件下でも適用可能な解析モデルの構築と数値シミュレーション

4.1 雰囲気状態を評価可能な解析モデル

本章では、既に梨木ら²⁾が開発した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を評価することのできるクリープモデルを、著者らの研究の主題でもある種々の環境条件下でも適用可能なモデルに拡張した。まず梨木らの開発したクリープモデルを(1)式に示す。

また、ここで f_{pm}^{ex} は間隙水の流出量を表すベクトルであり(2)のように示される。

表-3 解析条件

透水係数 (cm/sec)	ヤング係数 (kN/mm ²)	水の体積弾性係数 (kN/mm ²)	浸出係数 (cm/sec)	持続側圧 (N/mm ²)
6.60×10 ⁻⁸	20	22	1.0×10 ⁻⁹ ~5.0×10 ⁻⁹	1.6

$$\begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S - \Delta t_n(H - M) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{u}_n \\ \Delta \bar{p}_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{Bmatrix} \Delta \bar{f}_n \\ W \Delta \bar{T}_n - f_{pn}^{ext} \Delta t_n + \Delta g_p + \Delta t_n(H - M) \bar{P}_{n-1} \end{Bmatrix}$$

$$f_{pn}^{ext} = \int_{\Omega} \bar{N}_T \frac{q}{\rho_w} d\Omega - \int_{\Omega} (\bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w Z d\Omega + \int_{\Gamma_m} \bar{N}_T \{v\}^T n d\Gamma_m \quad (2)$$

(2)式中の右辺第3項で、梨木らは液体相の浸出境界面からの浸出速度についてダルシーの式を用いる際、全水頭のみを考慮しているが、本研究では環境条件の変化に対応させるため、上下表面の雰囲気における全水頭を考慮した次式を用いる。

$$\{v\}^T n = -k \nabla h n = -m(h - h_{\infty}) \quad (3)$$

ここで k は透水係数、 h は間隙水の全水頭、 h_{∞} は雰囲気における全水頭、 n は浸出境界における法線ベクトルとする。 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と呼ぶことにする。勿論ではあるが、空隙がナノメートルほどのコンクリート内部を移動する間隙水と、そのコンクリート内部から直径のない大気中へ移動する浸出水とはオーダーが異なるため透水係数と浸出係数は区別することとする。

さらに、間隙水圧を p 、雰囲気気圧を p_{∞} によって表すと(3)式は次式のようにになる。

$$\{v\}^T n = -m \left(\frac{p - p_{\infty}}{\rho_w} \right) \quad (4)$$

(4)式を(2)式中の右辺第3項である浸出境界における間隙水の浸出量を求める項に代入し

整理すると、(2)式は最終的に次式で表すことができる。

$$f_{pn}^{ext} = \int_{\Omega} \bar{N}_T \frac{q}{\rho_w} d\Omega - \int_{\Omega} (\bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w Z d\Omega - \int_{\Gamma_m} \bar{N}_T \frac{m}{\rho_w} \bar{N} d\Gamma_m \{p_{\infty}\} \quad (5)$$

最終的に、(5)式を(1)式に代入することにより雰囲気気圧を評価することのできる、すなわち種々の環境条件下でも適用可能なクリープモデルの構築がなされたわけである。なお、本解析における供試体上下表面の乾燥或いは湿潤の度合いを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。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。なお、解析条件は表-3に示す。

4.2 クリープ性状に及ぼす雰囲気気圧の影響に関する解析的評価

図-9は、前節で構築された理論に対して表-3に示す解析条件を代入することにより、雰囲気気圧をパラメータとした数値シミュレーションを実施した際のクリープひずみの解析結果を示したものである。なお、雰囲気気圧は-20~10atmと変化させた。

一定側圧载荷直後に生じる急激なクリープひずみの増加とその後の緩やかな増加の程度は雰囲気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くほど大きくなる傾向にある。逆に、雰囲気気圧が正の値として大きくなる

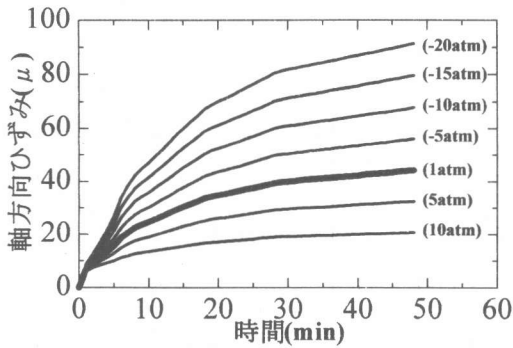


図-9 軸方向クリープひずみの解析結果

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供試体上下表面における間隙水圧勾配が、上下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増えるためであり、構築した解析モデルはこのような現象を詳細に表している。

5. 環境条件の違いによるクリープ変形性状の実験結果と解析結果の比較

図-10は、図-8の表乾、気乾、湿潤供試体の軸方向クリープひずみと、図-9の解析結果を比較させた図である。図中の記号○, □, △はそれぞれ表乾、気乾、湿潤供試体の実験結果、記号●, ■, ▲は雰囲気気圧をそれぞれ 1atm, -15atm, 5atm で与えたものの解析結果であ

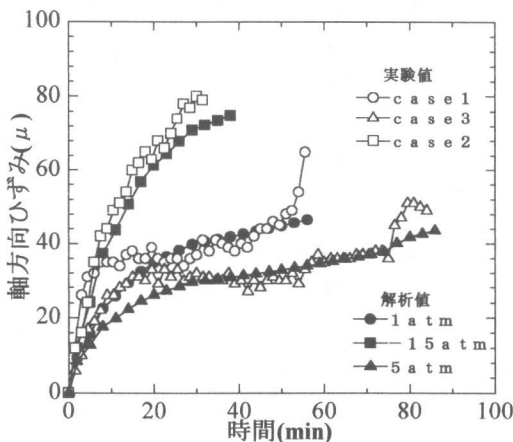


図-10 軸方向クリープひずみ

る。図-10から実験結果の気乾供試体は、解析結果-15atm, すなわち本解析で気乾状態と定義しているものと非常に精度良く一致している。また、実験結果湿潤供試体の湿潤状態のものは、解析結果 5atm, すなわち本解析で湿潤状態と定義しているものと非常に精度良く一致している。

これらの精度良い一致は、著者らの構築した種々の環境条件下でも適用可能な解析モデルの適合性を示唆しているものと言える。

なお、今後の問題としては、乾湿の程度の違いを数値により如何に表すかである。

6. まとめ

本研究では、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、種々の環境条件下にさらされたコンクリート供試体に一定の側面水圧を作用させた際、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧およびクリープ変形性状に関する実験および解析モデルの構築を行った。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- (1)一定側面水圧がコンクリートに作用する際、そのクリープ性状に上下表面の環境条件が密接に関わっている。
- (2)雰囲気気圧を評価可能な、すなわち種々の環境条件下でも適用可能なクリープモデルが構築された。
- (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。

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，コンクリート年次論文報告集，Vol. 21, No. 2, pp. 793~798, 1999
- 2) 梨木義春・井之上尚史・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解析的研究，コンクリート年次論文報告集，Vol. 21, No. 2, pp. 799~804, 1999