

# 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実験的研究

井之上尚史\*<sup>1</sup>・梨木義春\*<sup>2</sup>・大下英吉\*<sup>3</sup>

**要旨：**コンクリート表面に水圧が作用した場合の変形挙動を詳細に評価するため、円柱供試体に一定の側面水圧を作用させ、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および変形挙動に関する測定実験を実施した。一定側圧を載荷させた場合、内部空隙に発生する間隙水圧による水分移動の影響により軸方向の変形が徐々に大きくなるというクリープ現象が生じた。一定側圧の値はコンクリートの一軸引張強度に比べ非常に小さな値にもかかわらずほとんどの供試体においてクリープ破壊を生じた。間隙水圧による水分移動はコンクリートの変形や強度特性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

**キーワード：**間隙水圧, 水分移動, クリープ現象

## 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。これらの典型的な例が、橋脚、水中トンネルそして放射性廃棄物処理場などである。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、長期にわたる耐久性が確保されなければならない。

水中施工の橋脚や水中トンネルを例にとって考えると、常時荷重として側面水圧が作用する。その水圧は、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。

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、水の浸透現象が生じる。それによってコンクリートの内部空隙に間隙水圧が発生することになる。この間隙水圧はコンクリート応力に対して非常に大きな割合で発生し、コンクリートの変形或いは強度特性に非常に大きな影響を及ぼすことを指摘している<sup>1)</sup>。すなわち、上述のような構造物に対しては、コンク

リート中の水分移動が主要な設計要因であることはいうまでもなく、その変形特性の詳細な評価においては間隙水圧の影響を考慮した水分移動メカニズムの解明が行われなければならない。

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変形挙動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の測定実験および変形挙動に関する実験を実施した。

## 2. 実験概要

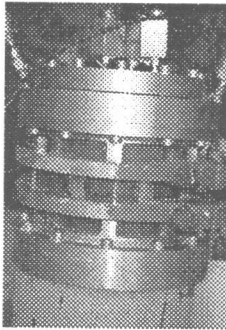
### 2. 1 側面水圧載荷セル

側面水圧載荷セルの外観は図-1 に示す通りであり、その詳細を図-2 に示す。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のコンクリート円柱供試体を配置する。この際、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。

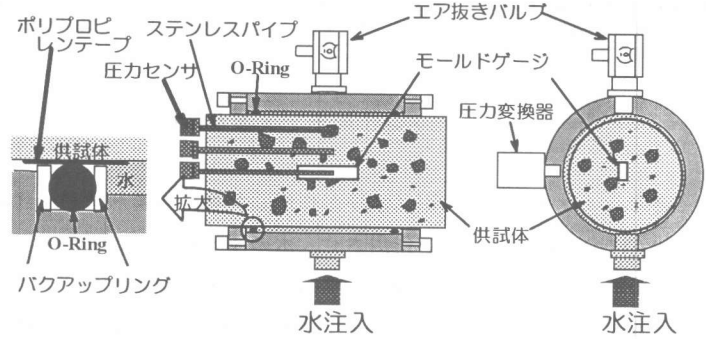
\*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

\*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)



図一 実験装置外観



図二 実験装置概要

表一 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 (kgf/m <sup>3</sup> )			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
20	10±2	2.5±1	60	54	226	377	906	732

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全て60%で行い、材齢は3日と7日のものを使用した。また、コンクリートの配合は表一に示す通りであり、強度特性は表二に示す通りである。

表二 強度特性値

	圧縮強度(MPa)	引張強度(MPa)	ヤング係数(KN/mm <sup>2</sup> )
材齢3日	17.2	1.7	22.37
材齢7日	25	2.6	25.45

## 2.2 側圧載荷方法

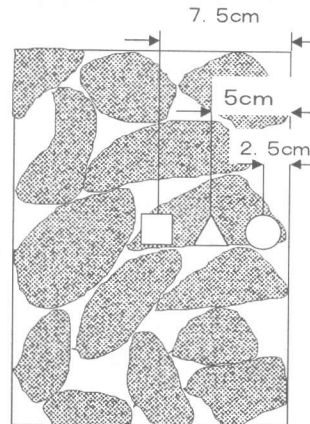
まず、側圧を0.1MPa/secの荷重速度で単調増加させ破壊まで加圧を行い、破壊時の側圧の値 $\sigma_{ru}$ を事前に求める。そして実験により得られた破壊時の側圧 $\sigma_{ru}$ に対し50% (0.5 $\sigma_{ru}$ ) および70% (0.7 $\sigma_{ru}$ ) の値を一定側圧として持続的にコンクリート供試体の側面のみ載荷させる。

## 2.3 実験パラメータ

本実験で使用したパラメータは表三に示すように、一定側圧載荷値および載荷測定材齢である。なお、比較のために供試体にゴムスリーブを巻き供試体内への水の圧入を防止した実験も実施した。

表三 実験パラメータ

一定側圧値	材齢3日	材齢7日
0.5 $\sigma_{ru}$ (MPa)	2.1	2.8
0.7 $\sigma_{ru}$ (MPa)	2.9	3.9



図三 間隙水圧測定位置

## 2. 4 測定項目

本実験における測定項目は、荷重側圧、軸方向および周方向のコンクリートひずみ、間隙水圧である。荷重側圧は図-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測定は、予め供試体内部に埋め込んだ $\phi 1\text{ mm}$ 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取り付けることにより実施され、測定位置は図-3に示す供試体の表面から2.5 cm, 5 cm, 7.5 cmの3箇所とする。

なお、間隙水圧計の細部は、図-4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、コンクリートひずみは図-5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により測定され、軸方向および周方向のひずみを測定する。

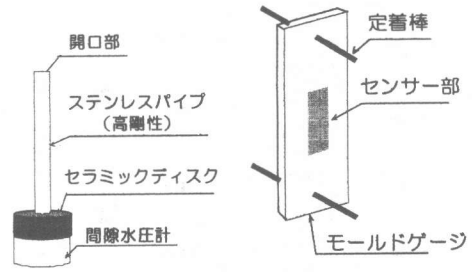


図-4 間隙水圧計 図-5 モールドゲージ

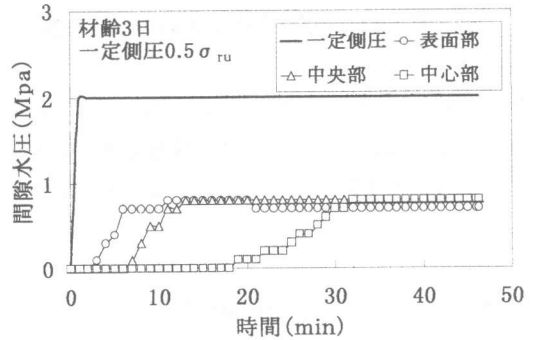


図-6 間隙水圧発生状況 (材齢3日)

## 3. 一定側圧を受けるコンクリートの変形挙動

### 3. 1 間隙水圧発生状況

間隙水圧発生状況を一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ を例に取り、図-6および7に示す。図-6, 7はそれぞれ材齢3日および7日の時点で一定側圧を持続荷重した結果である。各図中に示す記号○, △, □は図-3に示すようにそれぞれ表面から2.5 cm (表面部), 5 cm (中間部), 7.5 cm (中心部)の間隙水圧の発生状況であり、荷重した一定側圧値を実線で示している。

まず、図-6に示す荷重材齢3日の場合、一定側圧荷重後、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荷重側圧の約40%の一定値となった。

次に、図-7に示す荷重材齢7日の場合、表面部では、間隙水圧計の不具合により間隙水圧

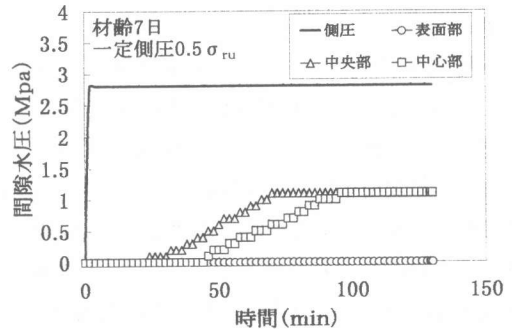
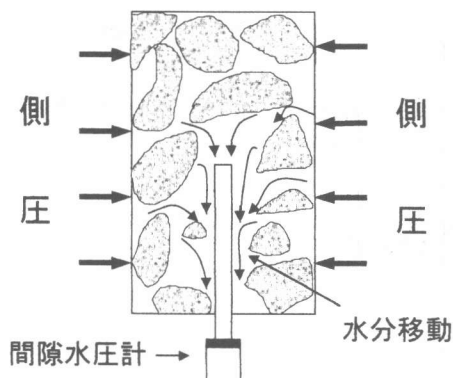


図-7 間隙水圧発生状況 (材齢7日)

は測定されなかったが、約24分で中間部、約45分で中心部において間隙水圧が発生し、その後約95分後には2箇所における間隙水圧は荷重側圧の約40%の一定値となった。ここで、荷重側圧と一定値となる間隙水圧との値に差異が生じる原因は、コンクリート供試体の緻密さおよび図-4に示したステンレスパイプ先端の



図—8 コンクリート供試体内の水分移動

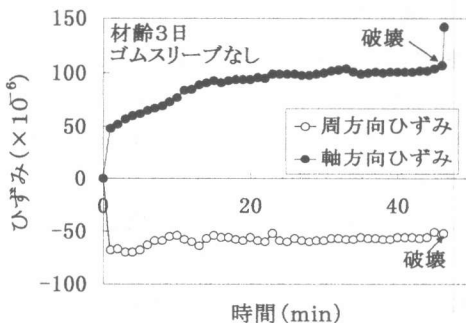
開口部に水が流入せず、圧力の低いステンレスパイプとコンクリート供試体界面を図—8に示すように水が移動することの2つが考えられる。

### 3. 2 コンクリートの変形特性

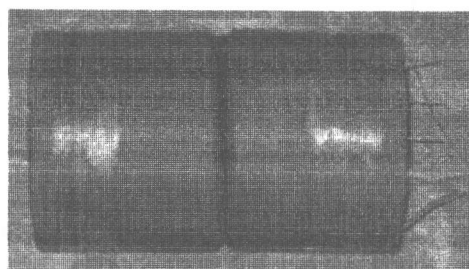
図—9は材齢3日の時点で $0.5\sigma_{ru}$ の一定側圧を載荷した場合における軸方向および周方向のひずみを表わしている。図中に示す記号●および○はそれぞれ軸方向および周方向ひずみを表している。

側圧の載荷は、 $0.1\text{MPa}/\text{sec}$ で $0.5\sigma_{ru}$ まで単調増加させ側圧が $0.5\sigma_{ru}$ に達すると、後は $0.5\sigma_{ru}$ の一定値にする。

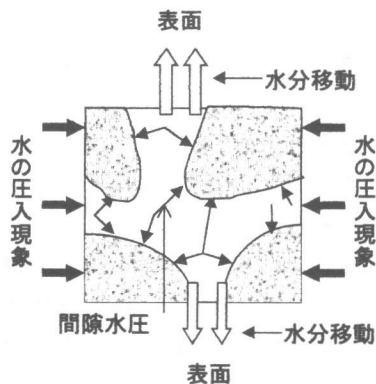
まず、単調増加型の側圧載荷により、周方向には圧縮ひずみが生じ、軸方向にはポアソン効果により引張ひずみが生じる。その後、一定側圧過程においては、軸方向にはさらに引張りひずみが増加し、周方向には圧縮ひずみの回復現象が生じた。そして、約45分後に図—10に示すように供試体の中央部で軸方向に直交する単一面でへき開破壊を生じた。このような一定側圧下における変形挙動と破壊現象は、図—11に示すように、コンクリート内部に水が圧入されることにより正（圧縮）の間隙水圧が発生し、それが駆動力となり、より圧力が低い供試体両表面に向かって水分移動が定常或いは



図—9 軸方向および周方向のひずみ  
(材齢3日,  $0.5\sigma_{ru}$ )

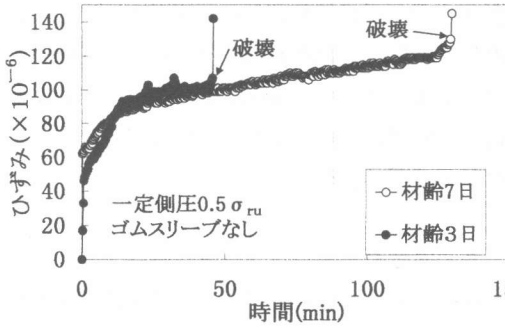


図—10 供試体の破壊状況



図—11 コンクリート内部の水分移動

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—1 2 材齢の違いによる変形挙動

#### 4. 変形挙動に及ぼす実験パラメータの影響評価

##### 4. 1 変形挙動に及ぼす材齢の影響

材齢3日と7日において一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ を載荷したときの軸方向ひずみ変化を図-1 2に示す。図中の記号●および○は、それぞれ材齢3日および7日の軸方向ひずみを示す。

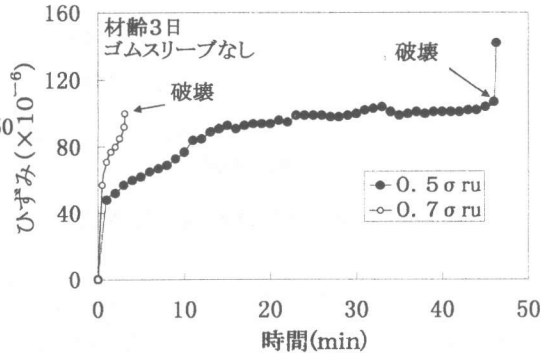
材齢3日および7日とも変形速度はほとんど同じである。しかしながら、一定側圧載荷後、材齢3日の供試体においては、約4 5分でクリープによるへき開破壊を生じ、破壊時の軸方向ひずみは約 $110\mu$ であった。一方、材齢7日の供試体においては、材齢3日の供試体に比べ、7 5分長い約1 2 0分でクリープによるへき開破壊を生じ、破壊時の軸方向ひずみは約 $140\mu$ であった。変形挙動に及ぼす材齢の影響評価を行うと、破壊に至るまでの時間と軸方向ひずみに大きな違いが見られる。また、表-2における引張強度をヤング係数で除した破壊時のひずみを表-4示すと、このひずみの値も材齢の違いにより大きな差が生じている。すなわち、実験におけるひずみに差が生じた要因はコンクリートの材齢にあると考えられる。

##### 4. 2 変形挙動におよぼす一定側圧値の影響評価

図-1 3は材齢3日の時点で一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ および $0.7\sigma_{ru}$ を載荷した時の軸方向ひずみ変化を示したものである。図中の記号●お

表—4 破壊時ひずみ

	材齢3日	材齢7日
破壊時ひずみ( $\mu$ )	76	102



図—1 3 一定側圧値の違いによる変形挙動

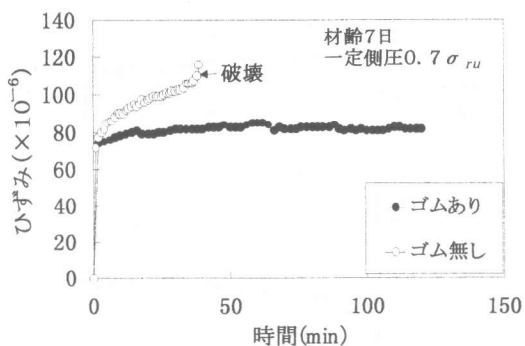
び○はそれぞれ一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ および $0.7\sigma_{ru}$ 載荷した時の軸方向ひずみを示す。

一定側圧 $0.5\sigma_{ru}$ と $0.7\sigma_{ru}$ を載荷させた場合の変形速度は $0.7\sigma_{ru}$ のほうが速く一定側圧 $0.7\sigma_{ru}$ を載荷した場合、載荷後約3分でへき開破壊を生じたことに対し、 $0.5\sigma_{ru}$ を載荷した場合は約4 5分後にへき開破壊を生じた。なお破壊時の軸方向ひずみは、両一定側圧とも約 $100\mu$ である。両結果での大きな差異は、破壊に至るまでの持続時間であり、この要因は一定側圧の違いにより内部空隙に発生する間隙水圧が異なり、それにより図-1 1に示す供試体両表面への水分移動量が異なるものと考えられる。

##### 4. 3 ゴムスリーブを巻いた供試体における変形挙動との比較

本節では、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ため、前節までのゴムスリーブなしの供試体に加えゴムスリーブを供試体側面に設置した実験を実施した。

図-1 4は、材齢7日の時点で一定側圧 $0.7\sigma_{ru}$ を載荷した時の軸方向ひずみ変化を



図—1 4 ゴムスリーブの有無による変形挙動

示したものである。図中の記号○および●は、それぞれゴムスリーブを巻いてない供試体の軸方向ひずみ変化およびゴムスリーブを巻いた供試体の軸方向ひずみ変化を表している。

ゴムスリーブを巻いてない供試体では3. 2節で述べたように、コンクリート供試体内における水分移動の影響によりクリープ現象が生じ、軸方向ひずみが増加する。そして、一定側圧載荷後約45分でへき開破壊を生じたことに対して、ゴムスリーブを巻いた供試体では一定側圧載荷後2時間経過した後においても軸方向ひずみの変化はほとんど生じず、約80 $\mu$ の一定値のままである。また、ゴムスリーブを巻いた供試体においてはコンクリート供試体内における間隙水圧の発生はなかった。

このような両者のクリープ変形挙動に関する相違から断定可能なことは、ゴムスリーブ有りと無しとの違いは、単にコンクリート供試体内への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推測すると、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ことが、再確認されることである。

従来、コンクリートのクリープ挙動に関する研究は、鋼材を介して外力を加えた研究のみに

留まっているが、本研究のようにコンクリート内部に発生する間隙水圧或いはそれが駆動力となって発生する水分移動によりクリープ現象を捉えた研究は始めてであり、今後、より詳細な検討が必要である。

## 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測定実験を行いコンクリートの変形特性及び破壊現象に及ぼす間隙水圧の影響評価を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 一定側圧を持続載荷させた場合、間隙水圧による水分移動の影響により軸方向ひずみが徐々に大きくなるというクリープ現象が生じた。最終的には供試体の中央部で軸方向に直交する単一面でへき開破壊を生じた。
- (2) ゴムスリーブを巻いた供試体は一定側圧を持続載荷後2時間経過した後も軸方向ひずみの変化はほとんど生じなかった。
- (3) 間隙水圧による間隙水の定常或いは非定常な水分移動は、コンクリートの変形や強度特性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 櫻井拓也・桧新太郎・大下英吉：側圧作用下におけるコンクリートの変形挙動に関する研究，コンクリート工学，Vol.19, No.1, pp. 553—558, 1997
- 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.
- 3) 松林博文：コンクリートの変形および破壊に対する二相概念の適用性，広島大学修士論文，1996.