

## 論文 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

櫻井拓也<sup>\*1</sup>・檜新太郎<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特性を詳細に評価するため、円柱供試体に一定および単調増加型の側圧を作用させ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実施した。一定側圧を載荷させた場合、間隙水圧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に似た現象を生じた。また、単調増加型の側圧が作用した場合には、間隙水圧がコンクリートの引張強度近傍となった時点において劈開破壊を生じ、間隙水圧はコンクリートの破壊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、有効応力、全応力、水分移動、クリープ現象

## 1. はじめに

近年、実施工に向けて計画段階にあるコンクリート製水中トンネルには、常時荷重として側面水圧が作用する。この水圧は、水中トンネルが水深数百メートルに施工されるとすると  $10^1\text{MPa}$  のオーダーであり、コンクリートの耐久性に非常に大きな影響を及ぼすことが予想される。一般に、コンクリートは部分的に水で飽和された多孔質透水性材料であり、水が直接作用することによりコンクリート内部への水の浸透現象が生じ、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。大下ら[1][2]は、荷重載荷によりコンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧に対する実験的・解析的評価を行い、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。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言うまでもなく、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なければならない。

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、円柱供試体への側圧載荷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を行い、コンクリートの変形特性或いは破壊現象に及ぼす間隙水圧の影響評価を行った。さらに、大下ら[3]が開発した、水・コンクリート連成解析手法により解析的にも影響評価を実施した。

## 2. 実験概要

## 2. 1 実験方法

側圧載荷用セルは、図-1に示すように鋼製の円筒容器からなっており、その中央部に  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  のコンクリート供試体が配置される。この際、セルと供試体の隙間から外部への水の漏水を防止するために、セルの上下端に O-Ring、バックアップリングおよびポリプロピレンテープが配置されている。実験は、コンクリート供試体の材齢が3日の時点でセルと供試体との隙間に外部から水を圧入することにより行われ、手動ポンプの能力から圧入速度は圧力に換算して約  $0.04\text{MPa/sec}$  の一定値である。なお、コンクリートの配合は表-1に示す通りである。コンクリ

<sup>\*1</sup>名古屋市 土木局 (正会員)

<sup>\*2</sup>徳島県 池田事務所 (正会員)

<sup>\*3</sup>防衛大学校講師 土木工学科, 工博 (正会員)

ートの内部空隙に発生する間隙水圧を本実験のような短時間で測定するためには、コンクリート内部における透水が早期に生じる、すなわちコンクリート内部の最大連続空隙径が極力大きくする必要があり、このような現象を再現するためには材料分離が生じない程度の高水セメント比を有する若材齢コンクリートが最も有効である。本来ならば、実コンクリート構造物と全く同一の条件における実験の実施が必要であるが、長期に渡る水の浸透を経て部分的に飽和した実コンクリート構造物の間隙水圧特性は上述の実験供試体である程度評価可能であるものと考えられる。

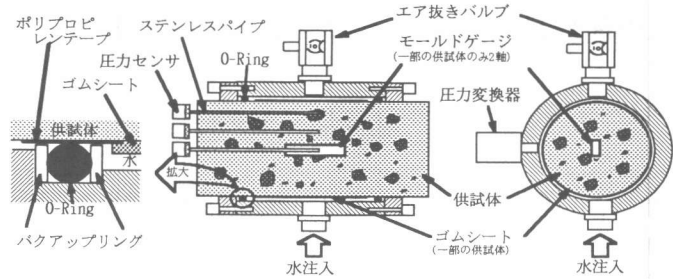


図-1 実験装置概要

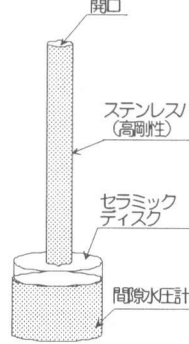


図-2 水圧測定図

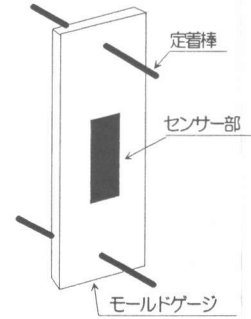


図-3 モールドゲージ

表-1 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積重量(kg/m <sup>3</sup> )				圧縮強度 (MPa)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	
10±2	2.5±1	60	54	226	377	906	732	10.8

## 2. 2 測定項目

本実験における測定項目は、作用側圧、コンクリートひずみ、間隙水圧である。作用側圧は、図-1に示す圧力変換器により測定し、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取り付けることにより実施され、測定位置は供試体中心から2.5cm毎の3箇所である。なお、間隙水圧計の細部は図-2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と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-3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、軸方向および軸直交方向（周方向）のひずみが測定された。

## 2. 3 側圧荷重方法

側圧の荷重は、一定側圧作用時の変形特性および単調増加型の側圧作用時の変形特性を調べる目的およびコンクリート供試体を極力飽和に近い状態にする目的で、図-4に示す荷重履歴により供試体が破壊するまで行われた。まず、側圧がコンクリート供試体の引張強度の約1/3(0.3MPa)に

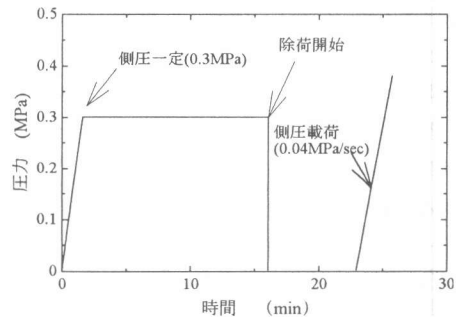


図-4 側圧荷重履歴

なるまで徐々に荷重し、側圧が 0.3MPa となった時点から約 15 分間一定側圧が保持され、その後側圧の除荷を行う。そして、コンクリート内部に配置された 3 箇所の間隙水圧がほぼゼロとなった時点から、0.04MPa/sec の一定応力速度で側圧を荷重し、コンクリートが破壊に至るまで実施された。なお、一定側圧の保持時間は、図-1 に示す供試体の上下表面に内部からの浸透により水滴が発生するまでの経過時間であり、コンクリート供試体が十分な飽和度を呈するように設定した。

### 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

0.3MPa の側圧を約 15 分間保持した後に側圧を除荷した場合の間隙水圧特性を、図-5 に示す。図中の記号○は側圧を表し、記号●は間隙水圧履歴である。なお、図中の間隙水圧は中心部の値を示しており、表面部の間隙水圧は側圧とほぼ同じ履歴であるため図中には記載していない。

間隙水圧は、側圧荷重後約 16 分までは側圧に追従して殆ど同じ値を示しているが、側圧を除荷した後は急激に低下し、その後は約 0.1MPa の一定値を示す残留応力となる。このように、間隙水圧が側圧を除荷したにも拘わらず残留応力となることは、コンクリートの組織の緻密さによるものであると考えられ、組織が緻密になるほどまた部材寸法が大きくなるほど、残留応力としての間隙水圧の値は大きくなるものと考えられる。

#### 3. 2 コンクリートの変形特性

図-6, 7 は、それぞれ 0.3MPa の側圧を約 15 分間保持した後に側圧を除荷した場合における周方向ひずみおよび軸方向ひずみを表している。

まず、側圧荷重過程では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数  $\mu$  程度の引張ひずみが生じる。その後、周方向においては側圧荷重過程にも拘わらず、ひずみの回復現象（圧縮ひずみの低下）が側圧荷重後約 2 分経過した後に生じている。そして、一定側

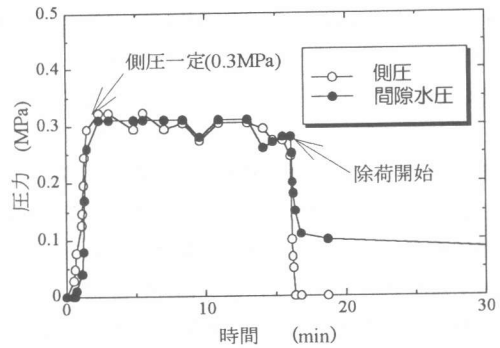


図-5 間隙水圧特性

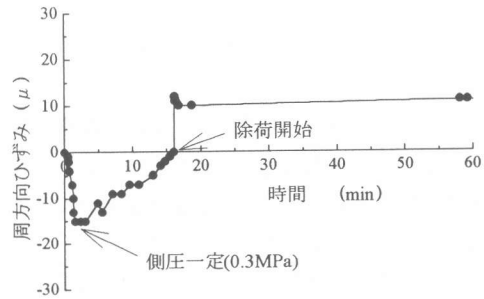


図-6 周方向の変形特性

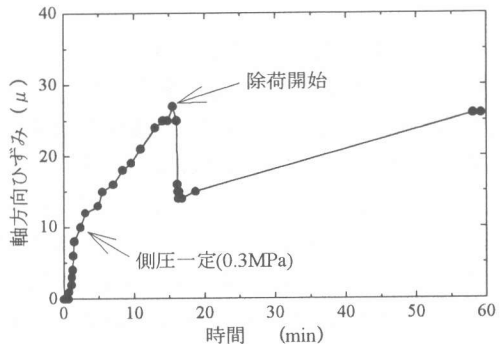


図-7 軸方向の変形特性

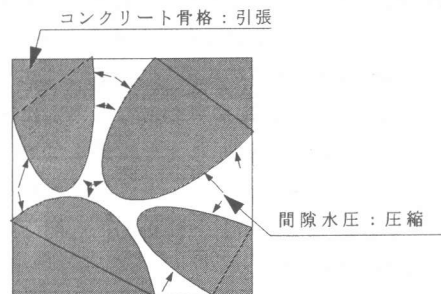


図-8 水の圧入現象

圧過程では周方向には上述と同じひずみの回復現象を生じ、軸方向には更に引張ひずみが生じる。このような一定側圧下における変形挙動は、図-8に示すように、コンクリート内部に水が圧入することにより正（圧縮）の間隙水圧が発生し、コンクリート骨格が間隙水圧により押し広げられる現象によるものである。すなわち、周方向では間隙水圧が徐々に大きくなり上述の現象により圧縮ひずみが低下し、側圧の除荷直前においては側圧と間隙水圧とが釣り合い状態になることにより完全にひずみが回復している。また、軸方向には外力が作用していないことから、次式に示す関係から外力すなわち全応力をゼロとすることにより間隙水圧（圧縮）とコンクリート骨格に作用する有効応力（引張）とが釣り合い状態となり、変形は生じないことになる。しかしながら、外力がゼロの時の最安定な応力状態は、間隙水圧、有効応力ともゼロであり、このような応力状態となるためにはクリープに似た現象が生じているものと考えられる[2]。

$$\sigma = \sigma' - p \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ 、 $\sigma'$ 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、応力に関しては引張を正、圧力に関しては圧縮を正にしている。

側圧除荷過程においては、除荷直前までに発生していた間隙水圧が低下することにより、周方向では力の釣り合いを満足するようにコンクリート骨格に引張応力が発生し、急激な引張ひずみが生じるものと考えられる。また、軸方向では間隙水圧が低下することすなわち有効応力（引張）が低下することにより、急激な引張ひずみの減少が生じるものと考えられる。

#### 4. 単調増加型側圧を受けるコンクリートの変形挙動

田澤・大下ら[4]は、単調増加型側圧を受ける円柱供試体の強度特性および破壊現象に対する実験的評価を行った。その結果、実験装置は等二軸圧縮応力場であるにも拘わらずコンクリートの破壊時の側圧は一軸圧縮強度に比べ非常に小さく、その値はコンクリートの引張強度にほぼ対応している。さらに、コンクリートの破壊性状は、軸方向に直交する単一面で切断されたような劈開破壊を生じ、あたかも軸方向に一軸引張試験を行ったかのような破壊性状であった。この現象は、図-8に示す水の圧入により骨格に引張応力が作用し、軸方向の拘束が殆ど無いことから生じるものである。上述の実験的評価から、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧がコンクリートの強度特性や破壊現象に大きく関与をしているものと想定されるが、測定された間隙水圧が表面部近傍のみであり図-1に示す中心部近傍の2箇所においては、供試体が飽和に近い状態ではなかったこと等により殆ど測定されていないため、その断定が困難であった。そこで本章では、間隙水圧が上述の現象を引き起こす主要因であることを確認する目的で、供試体内部の各断面で間隙水圧の測定が可能となるように図-4に示した荷重履歴を与えた実験を実施した。さらに、水・コンクリート骨格連成解析手法を実験結果に適用し、解析的にも間隙水圧の影響評価を実施した。

##### 4. 1 間隙水圧発生状況

図-9は、図-1に示す供試体内部の3断面に配置された間隙水圧の測定結果であり、記号○、△、□は、それぞれ中心部、中心部

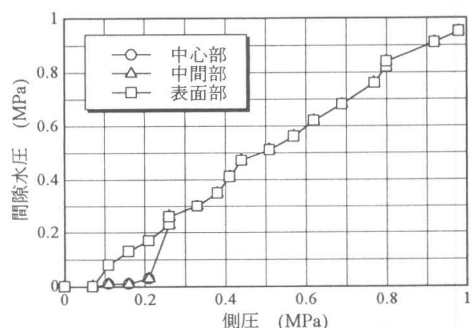


図-9 間隙水圧分布

から 2.5cm および表面部の間隙水圧～側圧関係を表している。また、図-10 は軸方向ひずみ～間隙水圧関係を表しており、実線および破線はそれぞれ中心部および表面部の結果である。

図-9 から、コンクリート内部に発生する間隙水圧は各測定断面においてほぼ同じであり、その値は作用側圧とほぼ同じであることから、コンクリート供試体がほぼ飽和に近い状態であることを示しているものと考えられる。また、図-10 に示す供試体中心部と表面部における軸ひずみに殆ど差異が無いことから、コンクリート供試体の変形特性に及ぼす間隙水圧の影響は、どの断面でも同じであることが言えるであろう。

#### 4.2 コンクリートの変形特性

図-11 は、供試体中心部における間隙水圧～ひずみ関係を表しており、記号●および○は、それぞれ軸方向および周方向を表している。コンクリート供試体は、間隙水圧の増加に伴い直線的に軸方向に引張ひずみが生じ、

約 0.98MPa (軸ひずみが約 126  $\mu$ ) となった時点で破壊に至った後、供試体が劈開破壊を生じたことにより間隙水圧は徐々に低下している。なお、上述の現象は一軸引張試験とほぼ同じ傾向を示していることが確認される。また、周方向には圧縮ひずみが生じるが、その値は数  $\mu$  程度であり軸方向ひずみに対して殆ど無視できる。すなわち、本研究のようにコンクリートがほぼ飽和に近い状態では、载荷された側面水圧は間隙水圧によりその殆どが受け持たれるため周方向ひずみが殆どゼロとなり、骨格を伝達媒体としたポアソン効果による軸方向変形は無視し得るものと考えられる。一般に、コンクリートのような多孔質材料では、骨格に作用する有効応力によりその変形特性を定義する。本実験のような境界条件では、軸方向については(1)式中の全応力  $\sigma$  をゼロとした次式の関係が成り立つものと考えられる。

$$\sigma' = p \quad (2)$$

すなわち、軸方向には発生する有効応力  $\sigma'$  は、内部空隙に発生する間隙水圧に等しく、コンクリートの破壊は有効応力が引張強度よりも大きくなることにより発生するものと考えられる。そこで、コンクリートの変形特性や破壊現象に及ぼす間隙水圧の影響を詳細に評価するために、実験結果に対する解析的評価を実施した。

#### 4.3 実験結果に対する解析的評価[5]

水・コンクリート連成解析モデルでは、骨材を完全弾性体、セメントペーストを弾塑性体とし、降伏関数には Drucker-Prager タイプを適用している。本解析では、Drucker-Prager の破壊曲面を

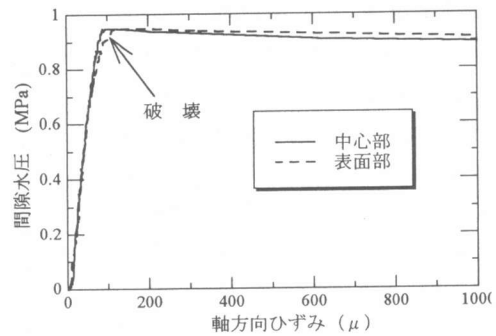


図-10 軸方向ひずみ分布

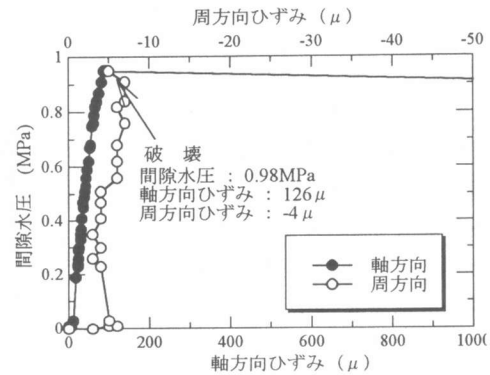


図-11 ひずみ成分と間隙水圧

引張子午線 ( $\theta=0^\circ$ ) で Mohr-Coulomb の曲面と一致させることにより、破壊が引張応力条件化で生じるという定義を行った。すなわち、解析結果が実験結果を比較的良好に評価していれば、間隙水圧により生じた引張応力状態にある有効応力により破壊が生じたものと考えることができる。

図-12は、コンクリート供試体中心部における間隙水圧～軸方向ひずみ関係を示しており、図中の実線は解析

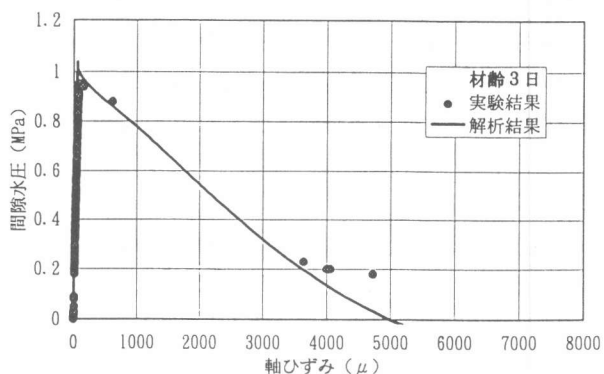
結果を、記号●は実験結果をそれぞれ表している。同図(a)は、側圧材齢が3日、同図(b)は本文には記載されていないが側圧材齢が1日における結果である。解析結果は実験結果と比較的良好な一致を示しており、間隙水圧の最大値は材齢1および3日でそれぞれ0.53, 1.0MPaであり、それぞれ圧縮強度の約1/10であり、ほぼ引張強度に等しい値となっている。すなわち、コンクリートの破壊は間隙水圧に起因する有効応力が引張強度よりも大きくなることにより生じたものと考えられる。

## 5. まとめ

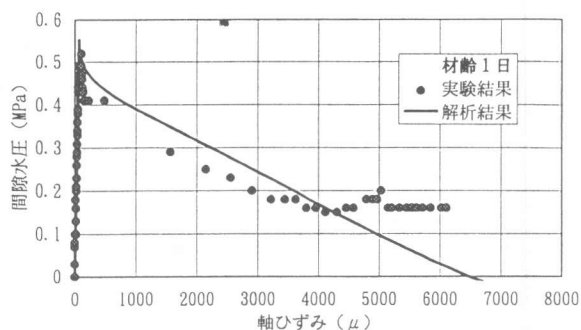
本研究では、コンクリート表面に水圧が作用した場合の変形特性の詳細な評価を目的とし、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧の測定実験を行いコンクリートの変形特性或いは破壊現象に及ぼす間隙水圧の影響評価を行った。一定側圧を載荷させた場合、間隙水圧の影響により軸方向の変形が徐々に大きくなるというクリープに似た現象を生じた。また、単調増加型の側圧が作用した場合には、間隙水圧がコンクリートの引張強度近傍となった時点において劈開破壊を生じ、間隙水圧はコンクリートの破壊に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

## 【参考文献】

- 1) 大下英吉・田邊忠顕：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.
- 2) 大下英吉・田邊忠顕：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.
- 3) 大下英吉・田邊忠顕：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.63-77，1995.
- 4) 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集，Vol.18, No.1, pp.567-572, 1996.
- 5) 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.



(a) 側圧載荷材齢：3日



(b) 側圧載荷材齢：1日

図-13 数値シミュレーション結果