

# 論文 コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧に関する実験的研究

谷口幸弘\*1 ・大下英吉\*2 ・田辺忠顕\*3

**要旨：**コンクリート中の水分移動を空隙に発生する間隙水圧としてとらえ、側圧を一定とした三軸状態における間隙水圧測定実験を行い、コンクリートの強度特性に及ぼす間隙水圧の影響に関する実験的検討を実施した。その結果、間隙水圧は載荷応力に対して非常に大きな割合を占めており、また体積ひずみの変化が主要因となって間隙水圧が発生し、コンクリートの体積収縮ひずみ過程において間隙水圧勾配は正となり、体積膨張過程においては負となることが明らかとなった。

**キーワード：**水分移動、間隙水圧、三軸状態、体積ひずみ

## 1. はじめに

コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧は、研究が殆どなされていない分野であるが、近年徐々にその重要性が認識されつつある。間隙水圧の位置による変動は間隙水の変化をコンクリート内に引き起こし、内部物質の流出のみならず鉄筋の腐食にからんで、コンクリート構造物の耐久性や繰り返し荷重を受ける疲労強度にも影響を及ぼす可能性があると考えられる。実際のコンクリート構造物は、間隙水の境界条件あるいは変位に関する境界条件が単一ではなく種々の異なった境界条件が複雑に絡み合っているため、コンクリート中の水分移動特性は非常に複雑な形態を示すであろう。例えば、ケーソンやダムなどの大型コンクリート構造物では、ブロック打設により既設ブロックの排水状態や変位の境界条件が絶えず変化するものと考えられる。

そこで、著者らは、横方向変形を拘束した三軸状態下における間隙水圧測定実験を行って、実際に発生するコンクリート中の間隙水圧を測定した。その結果、間隙水圧は載荷応力に対して非常に大きな割合を占めていることが明らかになった。〔1〕

本研究では、先の実験とは異なる境界条件、すなわち側圧を一定とした三軸状態における間隙水圧測定実験を行い、間隙水圧に及ぼす側圧および材令の違いによる影響を検討することにした。

## 2. 実験概要

### 2. 1 実験方法

本研究では、側圧を一定とした三軸状態における間隙水圧測定実験を行うために、土質工学会が提案している標準的不飽和三軸試験装置をコンクリートに適用可能なように高剛性なものに改良して用いた。試験装置の概要を、写真-1に示す。この試験装置は鋼製であり、容器の寸法は $\phi 250 \times 600 \text{mm}$ である。また、コンクリート供試体は $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体であり、供試体底部には、図-1に示すようにセラミックディスクが設置されている。セラミックディスクは陶器製のもので、水および空気を透す材質であり、それを透して間隙水圧が測定される。なお、用

\*1 広島大学大学院 工学部土木工学科、(正会員)

\*2 広島大学助手 工学部土木工学科、工修(正会員)

\*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

いたセメントは普通ポルトランドセメントであり、コンクリートの配合は表-1に示す通りであり、水セメント比は最大連続空隙径が大きくなるよう決定した。なお、供試体はコンクリート打設後1日で脱型され、その後水中養生を行い材令3日および7日で載荷試験を行った。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
60	54	10±2	2.5±1	226	377	906	732

## 2.2 載荷方法

載荷装置は、100t高剛性試験機であり、載荷は側圧が所定の圧力となった時点で100tロードセルを介して軸方向に、載荷速度0.05mm/sec、ひずみ速度にして250μ/secで圧縮載荷し、載荷応力がゼロに近くなるまで行った。

## 2.3 実験パラメーター

実験パラメーターは、表-2に示すように、作用側圧および載荷材令の2種類とした。

### (1) 作用側圧

作用側圧の違いが間隙水圧や強度特性に及ぼす影響について調べる目的で設定した。

### (2) 載荷材令

コンクリートの強度の違いが間隙水圧に及ぼす影響を調べる目的で設定した。

## 3. 間隙水圧発生状況

本章では、載荷材令3日、側圧0.5 MPaの試験体(Ⅲ-0.5)に着目し、間隙水圧特性の評価を行う。図-2にこの試験体に対する結果を示す。なお、図中の(a)は平均応力 $I_1/3$ ～軸ひずみ関係、(b)は間隙水圧～軸ひずみ関係をそれぞれ表している。なお、 $I_1$ は応力テンソルの第一不変量である。

間隙水圧の発生傾向は、図の(b)に示されるように載荷応力とともに間隙水圧は徐々に大きくなり、最大値に達した後に負の勾配(引張)を持って徐々に小さくなる。間隙水圧が最大となるひずみは、図の(a)に示す平均応力の勾配が緩やかになるひずみ、すなわちコンクリートが塑性状態になるひずみに対応しているものと思われる。また、間隙水圧の最大値は、約1.2 MPaであり、平均応力の約15%となっている。

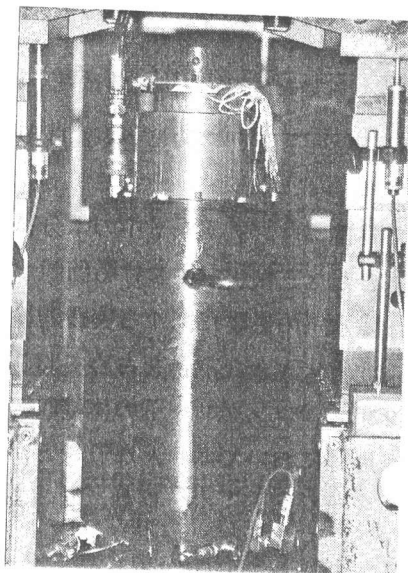


写真-1 測定装置

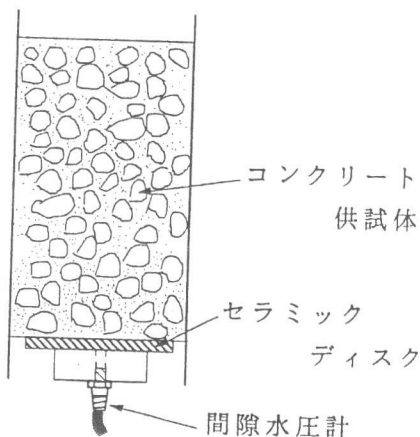
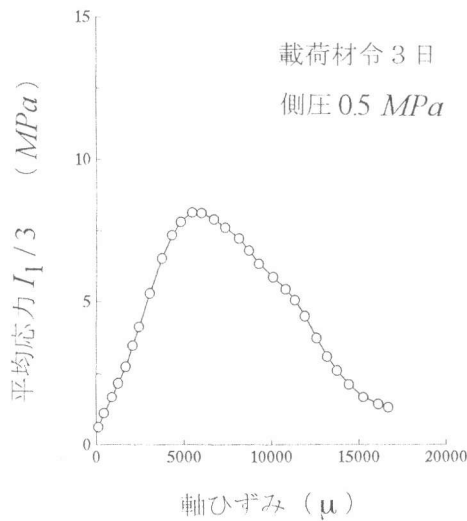


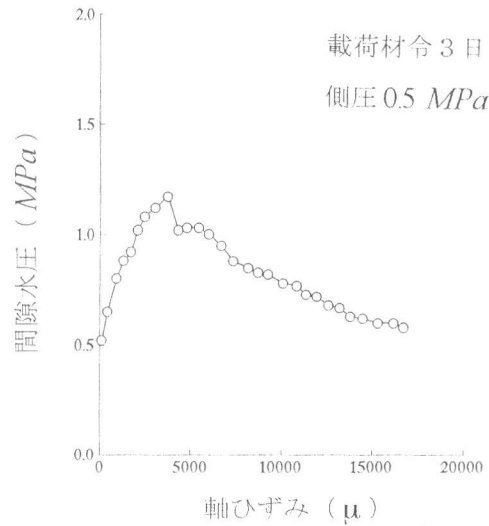
図-1 間隙水圧計の設置

表-2 実験パラメーター

試験体名	載荷材令 (日)	側圧 (MPa)
Ⅲ-0.5	3	0.5
Ⅲ-1.0		1.0
Ⅲ-2.0		2.0
Ⅶ-0.5	7	0.5
Ⅶ-1.0		1.0
Ⅶ-2.0		2.0



(a) 平均応力  $I_1/3$  ~ 軸ひずみ



(b) 間隙水圧 ~ 軸ひずみ

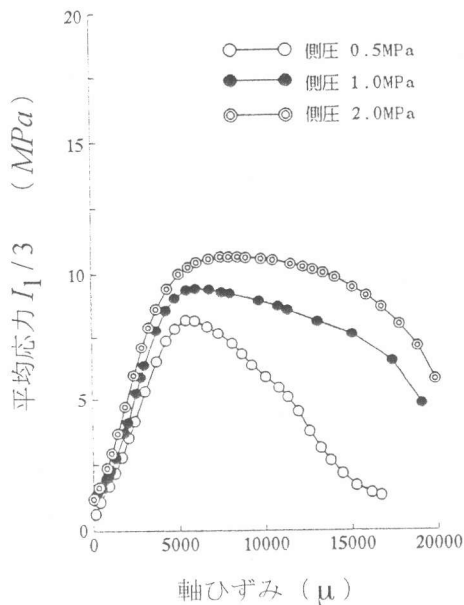
図-2 間隙水圧発生の一般的傾向 (III-0.5)

#### 4. 間隙水圧に及ぼす各パラメーターの影響

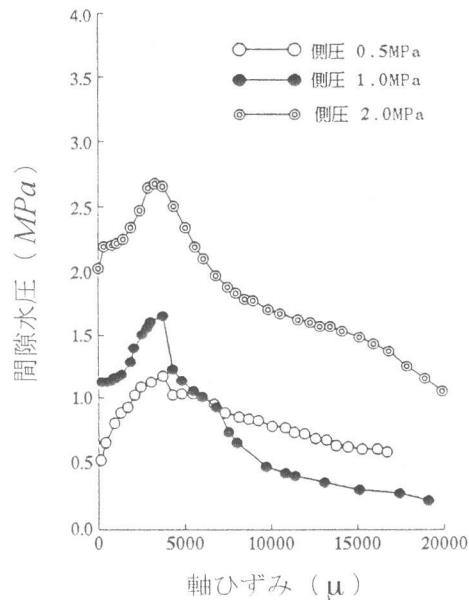
本章では、作用側圧および載荷材令の各パラメーターについて、間隙水圧の発生状態を比較検討する。

##### 4.1 作用側圧の影響

図-3は、載荷材令が3日であるIII-0.5、1.0、2.0試験体に対する実験結果である。なお、各図中(a)は平均応力~軸ひずみ関係、(b)は間隙水圧~軸ひずみ関係をそれぞれ表しており、記号○、●および◎はそれぞれ側圧が0.5、1.0、2.0 MPaの実験結果である。



(a) 平均応力  $I_1/3$  ~ 軸ひずみ



(b) 間隙水圧 ~ 軸ひずみ

図-3 間隙水圧に及ぼす側圧の影響 (載荷材令 3 日)

軸ひずみがゼロにおける間隙水圧は、図-4に示すように等方圧  $\sigma_3$  すなわち側圧が作用した時に発生するものであり、図の(b)から各試験体とも作用する側圧とほぼ等しくなっている。こ

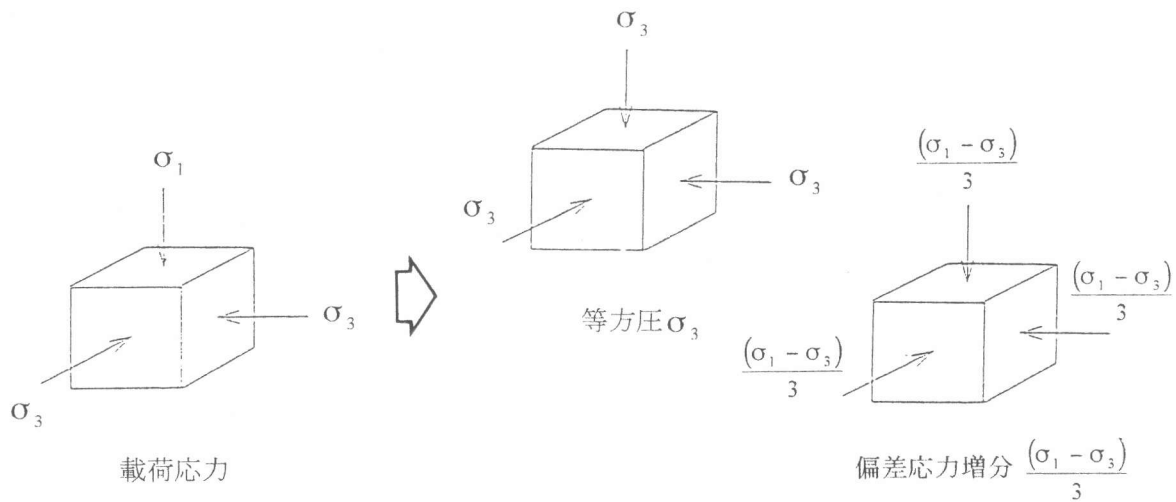


図-4 三軸状態における間隙水圧発生 of 支配的要因

これは、側圧の作用により内部空隙の体積が減少し内部空隙に発生していた応力と側圧による応力とが打ち消し合い、コンクリートがほぼ飽和に近い状態になったことによるものと考えられる。

側圧が作用した後に発生する間隙水圧は、コンクリートが飽和状態であると仮定すると、図-4に示すように载荷応力の増加による偏差応力増分によって発生するものである。

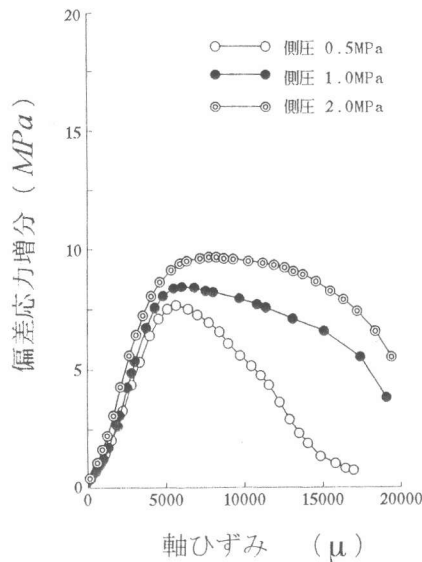
すなわち、その間隙水圧は次式で表すことができる。

$$P_{((\sigma_1 - \sigma_3)/3)} = P - P_{\sigma_3} \quad (1)$$

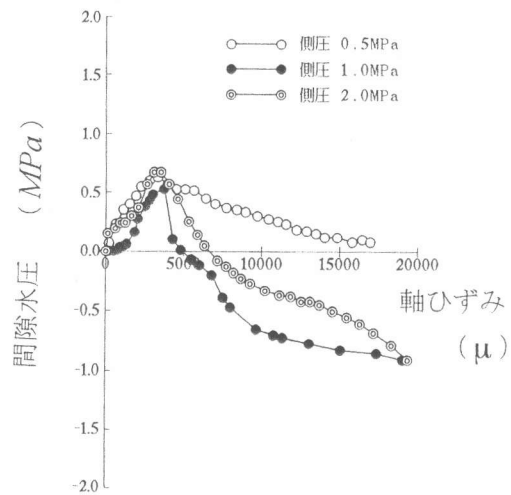
ここで、 $P_{((\sigma_1 - \sigma_3)/3)}$  は偏差応力増分（平均応力  $I_1/3$  から等方圧  $\sigma_3$  を差し引いた値）により発生する間隙水圧、 $P$  は三軸状態により発生する間隙水圧、 $P_{\sigma_3}$  は等方圧  $\sigma_3$  により発生する間隙水圧をそれぞれ表している。

図-5に偏差応力増分および(1)式で示す間隙水圧と軸ひずみの関係を示す。同図は、载荷材令が3日であるⅢ-0.5、1.0、2.0試験体に対する実験結果である。なお、各図中(a)は平均応力増分～軸ひずみ関係、(b)は間隙水圧～軸ひずみ関係、(c)は体積ひずみ～軸ひずみ関係をそれぞれ表しており、記号○、●および◎はそれぞれ側圧が0.5、1.0、2.0 MPaの実験結果である。また、同図(c)は解析的評価[2]による体積ひずみの変化を表している。

どの側圧においても、pre-peak領域までは偏差応力増分の増大にともなって正の間隙水圧が増加し、post-peak領域に至ると負の勾配を持ち徐々に低下していき最終的に負圧となる。このような間隙水圧特性を偏差応力増分と対比して考えると、間隙水圧が最大となるひずみは、図(a)に示すように、偏差応力増分の降伏ひずみあるいは最大となるひずみにほぼ対応している。すなわち、pre-peak領域ではコンクリートの体積が収縮することにより正の勾配を持った間隙水圧が発生することに対して、post-peak領域では体積が膨張することにより負の勾配を持った間隙水圧が発生することになる。したがって、図(c)に示すように、解析的考察から間隙水圧はコンクリートの体積変化が支配的要因となって発生するものと考えられる。また、pre-peak領域とpost-peak領域におけるこのようなコンクリートの体積変化は、各領域でコンクリートに発生するひびわれ形態が異なることによる。すなわち、pre-peak領域はセメントペーストが弾性体から塑性体となり多くのマイクロクラックが発生し、破壊面が形成される体積収縮領域である。一方、post-pe



(a) 偏差応力増分～軸ひずみ



(b) 間隙水圧～軸ひずみ

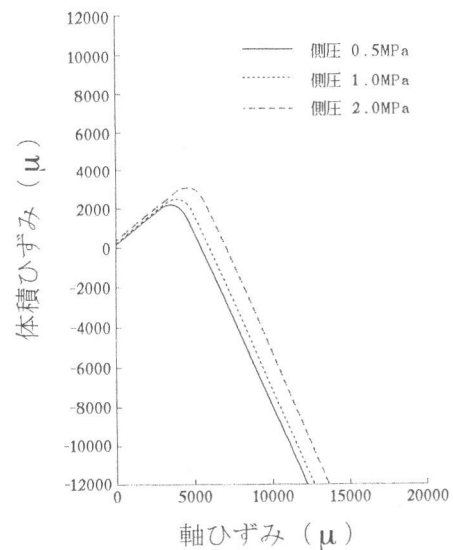
ak領域は破壊面の成長、そして、破壊面のひびわれ幅が急激に増大する体積膨張領域である。

#### 4.2 荷材令の影響

図-6は、側圧が0.5 MPaであるⅢ-0.5とⅦ-0.5試験体に対する結果である。なお、各図(a)は偏差応力増分～軸ひずみ関係、(b)は平均応力増分により発生する間隙水圧～軸ひずみ関係、(c)は体積ひずみ～軸ひずみ関係をそれぞれ表している。なお図(a)、(b)の記号○、●はそれぞれ荷材令が3および7日の実験結果であり、図(c)の実線、点線は解析結果である。

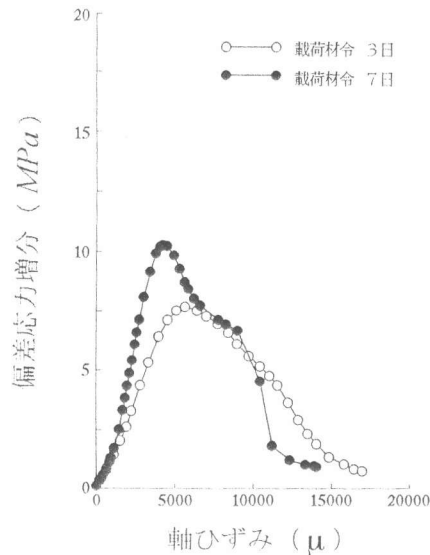
偏差応力増分の最大値は、当然のことながら荷材令が7日の方が大きい、間隙水圧の最大値は荷材令によらずほぼ一定となっている。図(c)に示すコンクリートの体積ひずみの解析的評価から、pre-peak領域における体積収縮ひずみが、荷材令によらずほぼ同じことによるものと考えられる。すなわち、コンクリートが飽和状態であれば、間隙水圧の最大値は材令によらず一定であると言えると考えられる。

荷材令の違いによる顕著な差異は、図(a)に示すように、荷材令7日の供試体は荷材令3日に比べpost-peak領域における応力低下が著しく、脆性的な挙動を示していることである。このことは、間隙水圧にも影響を及ぼしており、各図(b)において間隙水圧が急激な低下を示している。これは、図(c)に示すように、post-peak領域におけるコンクリートの体積膨張が、荷材令7日の供試体は荷材令3日に比べ大きくなっており、破壊面となるひびわれが急激に進行することによるものと思われる。なお、実験後の供試体の目視観察から、荷材令7日の供試体の破壊面となるひび割れ幅が荷材令3日のものに比べ非常に大きくなっていたことから、上述のことが推測できる。

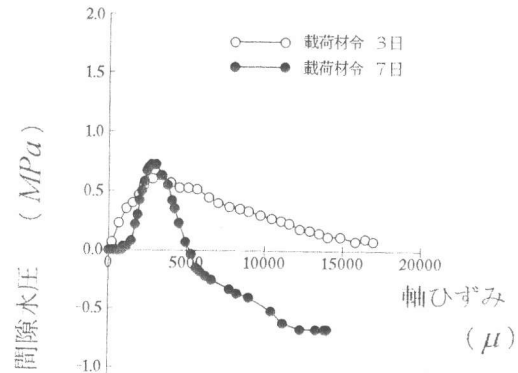


(c) 体積ひずみ～軸ひずみ

図-5 側圧による比較 (荷材令3日)



(a) 偏差応力増分～軸ひずみ



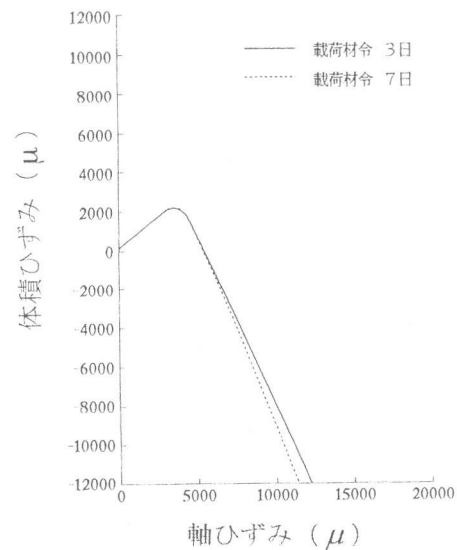
(b) 間隙水圧～軸ひずみ

### 5 まとめ

本研究では、コンクリートの水分移動を内部に発生する間隙水圧として捉え、荷重の荷重によって各種パラメーターを変数として間隙水圧を測定することにより間隙水圧特性に及ぼす各パラメーターの影響について実験的検討を行った。以下にその結果をまとめる。

- (1) 体積ひずみの変化が主要因となって、間隙水圧が発生する。
- (2) 体積収縮ひずみ過程において間隙水圧勾配は正となり、体積膨張過程においては負となる。

水中コンクリート構造物（例えば、大型の浮体構造、各種の石油プラットフォーム他）のせん断破壊、曲げ破壊にはこの間隙水圧が大きく影響していると思われ、その設計の合理化に今後とも研究を続けたい。



(c) 体積ひずみ～軸ひずみ

図-6 荷荷材令による比較  
(側圧 0.5 MPa)

### [参考文献]

- 1) 谷口幸弘・大下英吉・田辺忠顕：若材令コンクリートの強度に及ぼす間隙水圧に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 16, No. 1, pp645-650, 1994
- 2) 大下英吉：微細ひびわれを含むコンクリート体の透水メカニズムに関する研究、名古屋大学工学部博士論文（提出予定）、1995