

## 論文 荷重履歴下における間隙水圧特性に関する研究

一ノ瀬晴幸\*<sup>1</sup>・伊東 隆\*<sup>2</sup>・大下英吉\*<sup>3</sup>

**要旨**：繰り返し荷重下におけるコンクリート中に発生する間隙水圧に関するより詳細な評価を行うことを目的として、繰り返し荷重を受ける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。さらに、変形挙動に及ぼす間隙水圧の影響評価も実施した。

**キーワード**：繰り返し圧縮荷重、間隙水圧、非排水状態

## 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多くなった。これらの構造物の主たる外力は水圧や土圧であり、設計に際し重要なことは、これらの大きな力に耐えることのできる十分な安全性と耐久性の確保が要求されることであるが、極めて劣化し易い環境状況下にあるといえる。しかし、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、補修なくしての長期にわたる耐久性が確保されなければならないのである。その第一歩はコンクリート中の水分移動メカニズムの解明であり、水分移動の精度良い推定法の確立が重要になる。

現在までの研究<sup>1)</sup>によれば、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧特性は、コンクリートが飽和に近い状態であればコンクリートの体積変化によりほぼ決定され、その値はMPaオーダーで発生することが明らかとなっている。しかし、このような現象は単調増加荷重に対して確認されたものであり、よ

り詳細な挙動の解明を行うためには、荷重、除荷、再荷重、再除荷のような荷重履歴下における間隙水圧或いは有効応力特性の評価を行う必要がある。そこで本研究では、繰り返し荷重下におけるコンクリート中の間隙水圧に関する詳細な評価を行うことを目的として、繰り返し荷重を受ける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。さらに変形挙動に及ぼす間隙水圧の影響評価も実施した。

## 2. 繰り返し圧縮荷重試験

## 2.1 供試体の作製

本実験で用いたコンクリート供試体の形状はφ100×200mmの円柱供試体である。また、コンクリートの配合は表-1に示す通りである。なお、用いたセメントは普通ポルトランドセメントであり、水セメント比は、コンクリートを組織している連続した微細空隙の径の最大値(最大連続空隙径)が大きくなるよう60%とした。

\*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)

## 2.2 供試体の養生方法

供試体の処理方法は、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齢3日で載荷実験を行った。養生は20℃の水中にて行った。

## 2.3 実験パラメータ

繰り返し圧縮載荷試験の実験パラメータは、最大載荷応力比、作用側圧である。最大載荷応力比については一軸圧縮強度の30%、60%の2種類とした。なお、各パラメータの設定目的は、以下の通りである。

### (1) 最大載荷応力比

最大載荷応力が間隙水圧或いは変形に及ぼす影響を調べる目的で設定された。

### (2) 作用側圧

作用側圧の違いが間隙水圧や変形特性に及ぼす影響を調べる目的で設定された。

供試体名は図-1に示すようにそれぞれの数字が載荷材齢(日)、作用側圧(MPa)、繰り返し荷重(kN)の一軸圧縮強度に対するパーセンテージを示し、Wは養生方法が、水中養生であることを示している。



図-1 供試体名称

## 2.4 測定項目

本実験における測定項目は、軸方向ひずみ、間隙水圧、全応力の3種類である。

## 2.5 間隙水圧測定装置

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、図-3に示す。この試験装置は鋼製であり、容器の寸法はφ250×600mmである。また、コンクリート供試体はφ100×200mmの円柱供試体であり、供試体底部には、セラミックディスクが設置されている。この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、これを透して間隙水圧が測定される。また、鋼製の容器の耐圧は10MPaであり、間隙水圧計の最大測定能力は10MPaである。

## 2.6 繰り返し圧縮載荷試験方法

繰り返し圧縮載荷は、まず、所定の側圧を載荷した後、図-2に示すように、一軸圧縮強度の30%および60%まで荷重が載荷され、その後、載荷応力が殆どゼロとなるまで除荷された。そして、再度、所定の最大載荷応力比まで荷重が再載荷された後に、除荷を行った。なお、側圧を載荷した際に、図-3に示す載荷ピストンが上部に持ち上がることを防ぐため、事前に0.1~0.4N/mm<sup>2</sup>の軸圧縮応力を載荷させた。実験に使用したコンクリートの圧縮強度は、表-2に示す通りである。

## 3. 変形に伴う間隙水圧発生の一般的特性

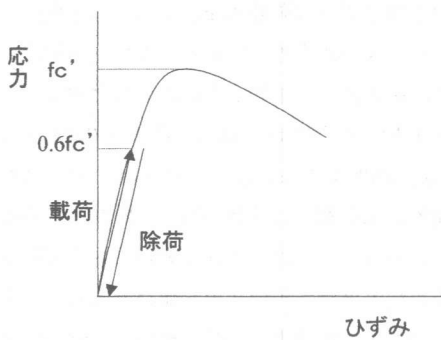
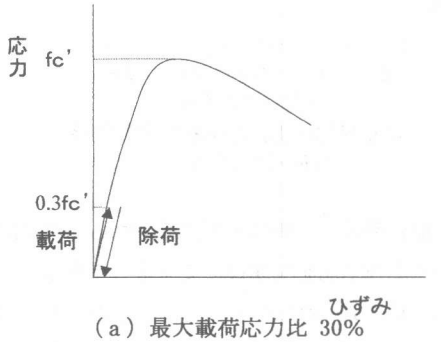
対象とした供試体は、III-1.0-60-W供試体である。III-1.0-60-W供試体は、載荷材齢3日、側圧1.0MPa、最大載荷応力比60%、脱型後からの養生方法が水中養生されたものであり実験結果を図-4に示す。同図(a)は、間隙水圧~軸ひずみ関係、(b)は平均応力~軸ひずみ関係をそれぞれ表しており、平均応力 $I_1$ は(1)式に示す通りである。

$$I_1/3 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (1)$$

$\sigma_i$ : 主応力 ( $i=1,2,3$ )

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 (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



$f_c'$  : 一軸圧縮強度  
 $0.3 f_c'$  : 一軸圧縮強度の 30%  
 $0.6 f_c'$  : 一軸圧縮強度の 60%

図-2 繰り返し荷重履歴

表-2 圧縮強度

材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)
3	14.4

間隙水圧の最大値は約 0.55MPa であり、平均応力の約 30%となっており、コンクリート応力に比べ非常に大きな割合で発生している。

間隙水圧の発生傾向は、載荷と除荷で異なる

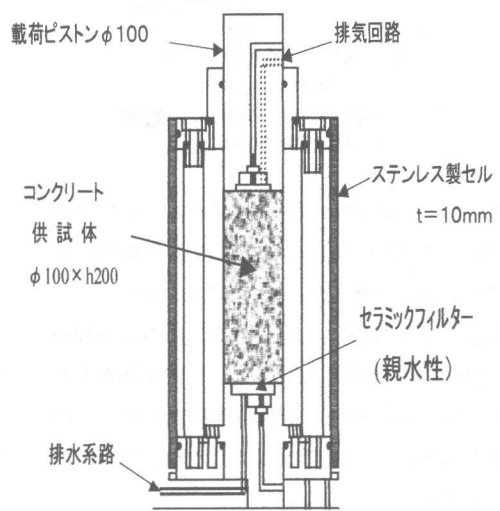


図-3 試験装置概要

る応力経路を示している。さらに、再載荷、再除荷においても載荷と除荷時と同じ傾向がみられる。また、間隙水圧は、載荷応力とともに正の増分（圧縮）を持って徐々に大きくなり、その後、荷重の載荷状態であるにも拘わらず、最大となった後に負の増分（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（約 0.5%）は、同図 (b) に示す圧縮強度の約 1/3 すなわち、コンクリートが弾性から塑性域に遷移する過程に対応している。したがって、約 0.5%以降のひずみ域において、荷重の載荷状態であるにも拘わらず間隙水圧が低下する現象は、コンクリートの塑性体積膨張による影響と考えられる。

一方、荷重の除荷開始時には、間隙水圧は急激な低下を示した後、緩やかな低下を示す。

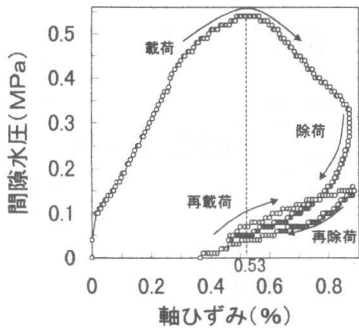


図-4(a) 間隙水圧～軸ひずみ関係  
(Ⅲ-1.0-60-W)

さらに、再載荷時の間隙水圧のピーク値（約 0.9%）は約 0.15MPa であり、再載荷時のピーク値（=最大値）約 0.55MPa に比べ、非常に小さな値になっている。このような荷重履歴による間隙水圧のピーク値が低下する原因は、載荷或いは再載荷過程において、間隙水圧がピーク値になるまでの軸ひずみが減少していることによる。

#### 4. 変形に伴う間隙水圧特性の検討

本章では、間隙水圧挙動に及ぼす側圧および最大載荷応力比の影響を検討する。

##### 4.1 間隙水圧に及ぼす側圧の影響

図-5, 6 は、それぞれ載荷応力比 30%および 60%における側圧の影響を表したものであり、同図 (a) は間隙水圧～軸ひずみ関係、同図 (b) は平均応力～軸ひずみ関係をそれぞれ表している。図-5 に示す記号△および○はそれぞれⅢ-0.5-30-WおよびⅢ-0.5-60-W供試体、図-6 に示す記号△および○はそれぞれⅢ-1.0-30-WおよびⅢ-1.0-60-W供試体を表している。載荷応力比が 30%の場合、載荷を始めると平均応力の増加とともに間隙水圧も増加するが、側圧 0.5MPa のとき 0.75%、側圧 1.0MPa のとき 0.55% の軸ひずみにそれぞれ達した後は荷重の載荷

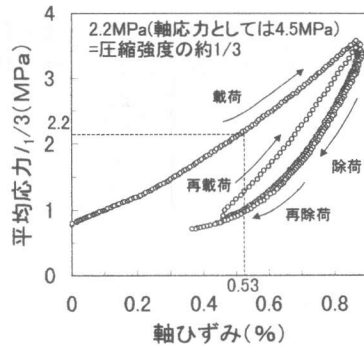
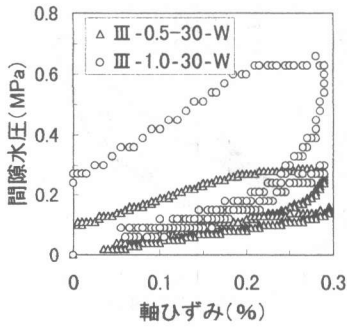


図-4(b) 平均応力 $1/\sqrt{3}$ ～軸ひずみ関係  
(Ⅲ-1.0-60-W)

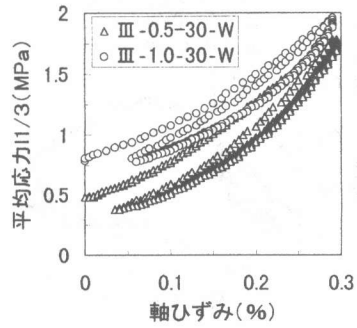
状態に関係なく間隙水圧は低下する。平均応力と間隙水圧を関連付けて考察してみると、載荷応力比 30%のとき、平均応力が最大となる軸ひずみは間隙水圧が最大となる軸ひずみとほぼ一致するといえる。このとき間隙水圧の最大値は、平均応力の最大値に対して側圧 0.5MPa では約 15%、側圧 1.0MPa では約 35%である。次に平均応力に対しての間隙水圧を載荷応力比 60%で検討してみると、平均応力が最大となる軸ひずみと間隙水圧が最大となる軸ひずみの値は異なっている。このとき、間隙水圧の最大値は、その時点での軸ひずみにおいて発生する平均応力に対して側圧 0.5MPa では約 15%、側圧 1.0MPa では約 25%である。

##### 4.2 間隙水圧に及ぼす載荷応力比の影響

図-7, 8 は、それぞれ側圧 0.5 および 1.0 MPa における載荷応力比の影響を表したものであり、同図 (a) は間隙水圧～軸ひずみ関係、(b) は平均応力～軸ひずみ関係をそれぞれ表している。図-7 に示す記号△および○はそれぞれⅢ-0.5-30-W およびⅢ-0.5-60-W供試体、図-8 に示す記号△および○はそれぞれⅢ-1.0-30-W およびⅢ-1.0-60-W供試体を表している。側圧が 0.5 MPa, 1.0MPa とも間隙水圧の経路は、荷

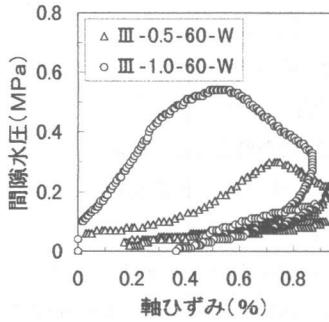


(a) 間隙水圧性状

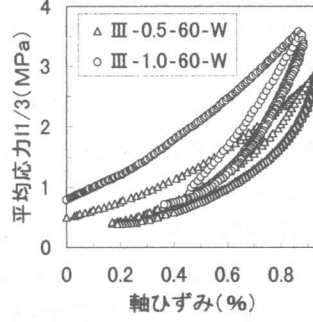


(b) 平均応力性状

図-5 側圧による比較 (載荷応力比 30%)

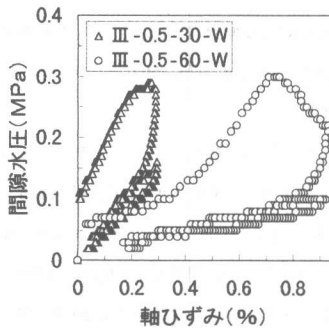


(a) 間隙水圧性状

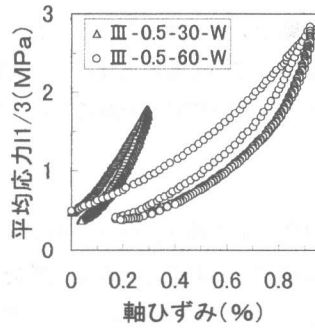


(b) 平均応力性状

図-6 側圧による比較 (載荷応力比 60%)

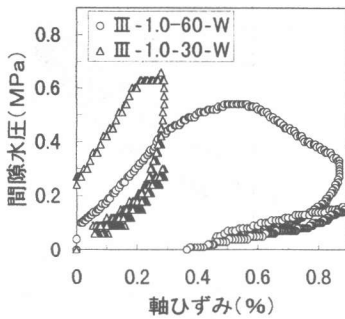


(a) 間隙水圧性状

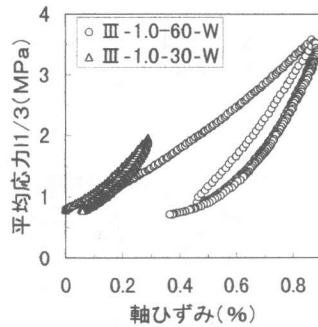


(b) 平均応力性状

図-7 載荷応力比の影響 (側圧 0.5 MPa)



(a) 間隙水圧性状



(b) 平均応力性状

図-8 載荷応力比の影響 (側圧 1.0MPa)

荷重の載荷と除荷で異なった傾向を示している。荷重の載荷時には、緩やかな間隙水圧の上昇Ⅲ-1.0-60-W供試体を表している。側圧が 0.5MPa, 1.0MPaとも間隙水圧の経路は、荷重の載荷と除荷で異なった傾向を示している。荷重の載荷時には、緩やかな間隙水圧の上昇或いは低下を示していることに対し、除荷時には急激な低下が生じている。載荷応力比による間隙水圧への影響を比較すると、両側圧とも載荷応力比が 30%の場合、荷重の載荷により間隙水圧は単調増加を示すが、載荷応力比が 60%の場合、単調増加した後に緩やかな減少を示す。この現象は塑性体積膨張の影響であると考えられる。また、載荷応力比が違っていても両側圧において間隙水圧のピーク値がほぼ同じであるといえる。

#### 4. 結論

本研究では繰り返し荷重履歴下でのコンクリート内部に発生する間隙水圧測定実験を実施し、間隙水圧の測定を行った。そして間隙水圧がコンクリートの応力特性に及ぼす影響について検討を行った。本研究の範囲内では以下のような結論を得た。

(1) 載荷, 除荷を繰り返すと全応力~ひず

み関係と間隙水圧~ひずみ関係応力経路は全く異なる。

(2) 荷重を除荷することにより、間隙水圧は急激に低下する。

(3) 載荷時および再載荷時のピーク値は、非回復性ひずみの影響により、徐々に低下する。

(4) 側圧を大きくすることにより、載荷応力比が同一であっても間隙水圧の最大値は大きくなる。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 大下英吉：微細ひびわれを含むコンクリートの透水メカニズムに関する研究，名古屋大学博士論文，1995
- 3) 林幸弘・大下英吉・石川康晃：荷重履歴を受けるコンクリート中の間隙水圧に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集第 20 巻，第 1 号，pp. 709-714，1998
- 4) 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，pp. 30-66，1996