

論文 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

林真弘*1・大下英吉*2 石川靖晃*3

要旨：繰り返し圧縮荷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、間隙水圧のヒステリシス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。その結果、繰り返し荷重を行うと全応力と間隙水圧の経路は全く定性的に異なることが確認された。

キーワード：繰り返し圧縮荷重、間隙水圧、低ひずみ域

1. 序論

近年大深度地下構造や海洋構造物など新たなコンクリート構造の利用が目まぐるしく行われている。これらの構造物の主たる外力は土圧や水圧であり、設計に際して十分な安全性と耐久性を確保されなくてはならない。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、単調増加荷重においては、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧は、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ることが分かっている。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、再除荷のような履歴荷重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、特に材齢一週間程度の若材齢コンクリートまで

を対象として繰り返し圧縮荷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、コンクリートの応力特性に及ぼす間隙水圧の影響を実験的に検討した。

2. 繰り返し圧縮荷重試験

2.1 供試体の配合

コンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比は最大連続空隙率が大きくなるように60%とした。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は粗粒率(F.M)が2.8のものをを用いた。練り混ぜ方法は、最初に細骨材とセメントをミキサーに入れて、約30秒練り混ぜ、その後、水を入れて10秒混ぜ、その後粗骨材を入れて3分間練り混ぜた。供試体寸法はφ10(cm)×20(cm)の円柱を用いた。

2.2 実験パラメータ

繰り返し圧縮荷重試験の実験パラメータは、材齢、水中養生期間、繰り返し荷重の3つである。供試体名は図-1に示すようにそれぞれの数字が荷重材齢、水中養生期間、繰り返し荷重荷

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法	スラブ	空気量	水セメント比	細骨材率	単位量 (kgf/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	S	G
15	10±2	2.5	60	51.4	209	348.3	868.0	827.9

*1 名城大学大学院土木工学専攻 学生会員
 *2 防衛大学校土木工学教室講師 工博 正会員
 *3 名城大学土木工学科講師 工修 正会員

重の一軸圧縮強度に対するパーセンテージを示している。材齢についてはコンクリートの強度即ち密度の違いから間隙水圧に及ぼす影響を調べる目的で設定したものであり、3日、7日の2種類とした。また、水中養生期間についてはコンクリートの含水率の違いによる影響を調べる目的で設定したものであり、2日、6日の2種類とした。また、繰り返し荷重については一軸圧縮強度の30、60、90%の3種類とした。

Ⅲ - 2 - 60

材 齢 水 中 養 生 期 間 繰 り 返 し 荷 重

図-1 供試体名の説明

2.3 繰り返し圧縮載荷試験方法

図-2～図-4に示すような特殊なセルを作製し、セルと供試体との界面にシリコンを塗布して界面をコーティングし間隙水圧測定実験を行った。以下に実験方法を示す。まず、載荷試験を行う供試体の上面を研磨機で水平になるように削り供試体はセルに設置するぎりぎりまで水中養生を行った。次に、セルとコンクリート供試体の側面と接触する部分に十分なシリコンを塗った。そして、セルに供試体を設置し、載荷盤を載せた状態で、ボルトで十分しめた。この時点で供試体がセルとの接触がうまく行かない場合は、その供試体は使用しなかった。その理由は仮に載荷盤の設置をボルトをしめる前に行えば、供試体の上面と載荷盤の間に空気が残り、これが実際よりも大きな間隙水圧を発生させる原因になるためである。

続いて、間隙水圧計を図-5、図-6に示すように設置した。まず、セルを上下逆さまにして、間隙水圧計を設置する場所に水を注入し、数分間放置した。この時、水面の低下がないことを確認した。水面の低下が生じない場合には、おそらく図-5に示すコンクリート供試体底面とセルとの界面に隙間が存在しておらず、排水口内の水は完全に供試体底面とセルの接合部によって遮断されていると考えられる。水面の低下が

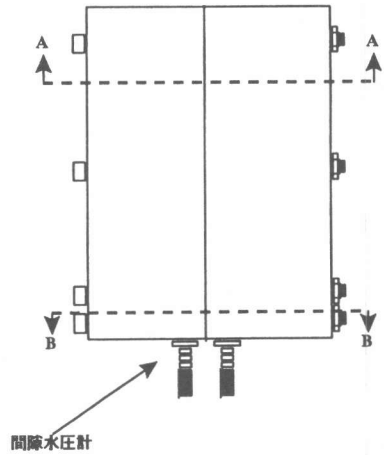


図-2 間隙水圧測定装置

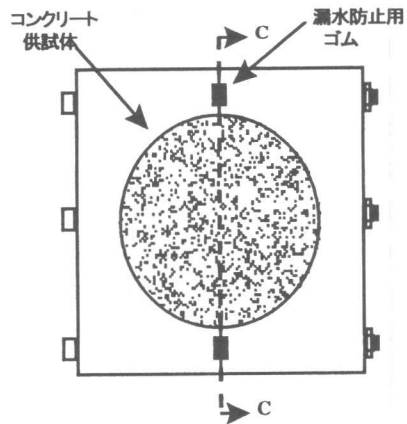


図-3 間隙水圧測定装置 A-A

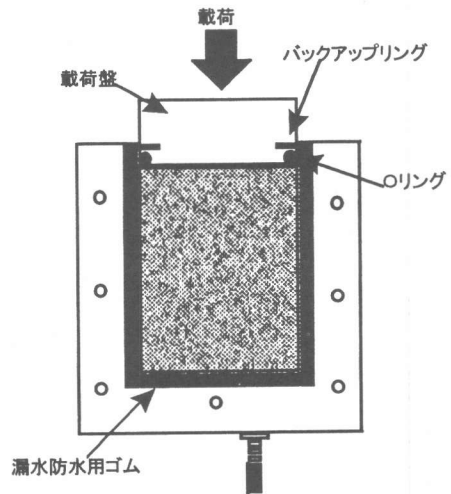


図-4 間隙水圧測定装置 C-C

認められないことを確認した後、間隙水圧計を一つずつネジ込み排水口に設置した。この際注意すべきことは、排水口内の水の体積減少に応じて水圧が $1\sim 3\text{N/mm}^2$ の範囲で発生するため水圧計は非常にゆっくりとねじ込む必要があることである。この時、他方の排水口における水面の変化は認められなかった。このことは、図-6に示すように2つの排水口内の水が供試体底面をとうして通じていないことと、及び供試体側面とシリコンあるいはセルとの隙間を水が移動できないことを示しているものと考えられる。

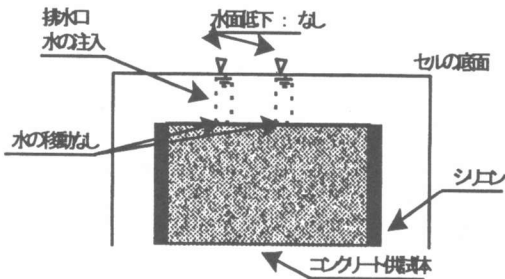


図-5 排水口への水の注入

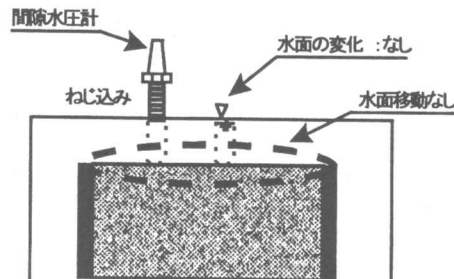


図-6 排水口への間隙装置の設置

このように、供試体とセルとの界面における水分移動を完全に防止する事により、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧を精度良く測定できることになる。もし、これらの隙間で水分移動が生じているならば、排水口の水面下が認められるであろうし、さらに水圧計をねじ込む時に他方の排水口で水面変化が認められるはずである。

そして、セルを図-7に示すように万能試験機に設置する。セルの上に鋼板、ロードセルの順に設置し、セルの側面に変位計を設置した。そ

して所定のひずみ速度 ($20\ \mu/\text{sec}$) を与え、繰り返し圧縮载荷を行った。ただし、本実験は、変位場は一軸とみなせられるが、応力場は側圧の影響を受ける一次元繰り返し圧縮試験であることを記しておく。また、変位の測定は、変位計を用いたが、変位計を用いた場合、供試体と载荷盤との間にあそびが存在し、正確な変形が測定されない。そのため、本研究では、まず小さな荷重を作用させあそびをなくした後、その点からの測定量を零として、実験値とした。

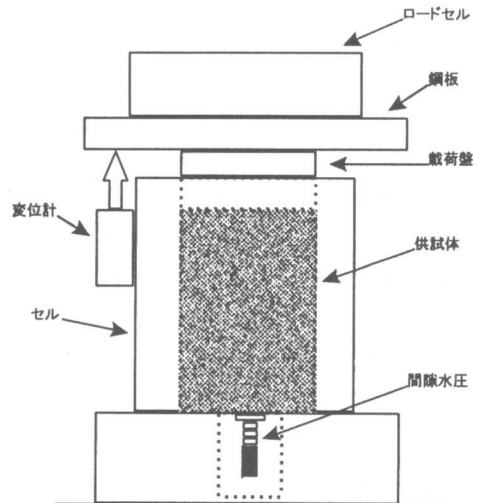


図-7 間隙水圧測定機の概略図

同時に、供試体の圧縮強度を測定した。その結果を表-2に示す。

表-2 圧縮強度試験結果

材齢(日)	圧縮強度 (N/mm^2)
3	14.8
7	21.6

さらに、载荷材齢の違いによるコンクリートの含水率の違いが分かるように含水率の測定を行った。本研究で用いた含水率とは供試体質量と乾燥後の供試体質量の差を乾燥後の供試体質量で除した値である。含水率の測定はそれぞれ3回ずつ行い平均をとった。その結果を表-3に示す。材齢3日と7日の含水率の違いは1%程であり、かつ、含水率1%の違いでも間隙水圧特

性は大きく影響を及ぼし得る為、ここでの測定結果をそのまま採用した。

表-3 含水率

載荷材齢(日)	含水率(%)
3	9.33
7	10.34

3. 繰り返し圧縮載荷試験結果

繰り返し圧縮載荷試験結果を図-8～図-15 に示す。

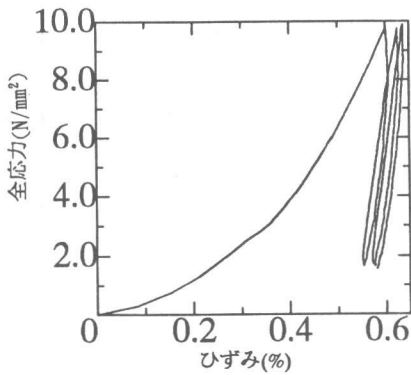


図-8 全応力～ひずみ関係 (Ⅲ-2-60)

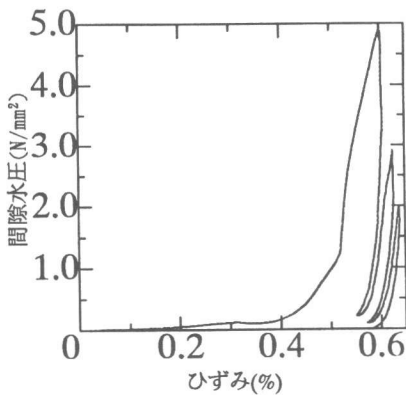


図-9 間隙水圧～ひずみ関係 (Ⅲ-2-60)

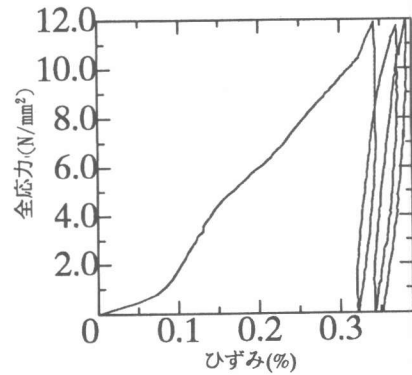


図-10 全応力～ひずみ関係 (Ⅲ-2-90)

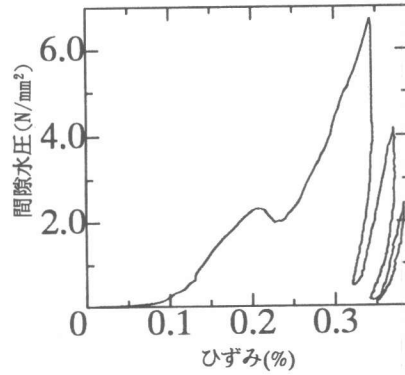


図-11 間隙水圧～ひずみ関係 (Ⅲ-2-90)

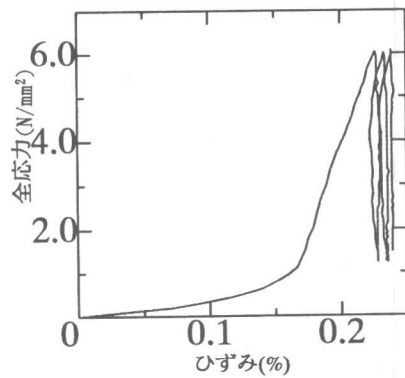


図-12 全応力～ひずみ関係 (Ⅶ-6-30)

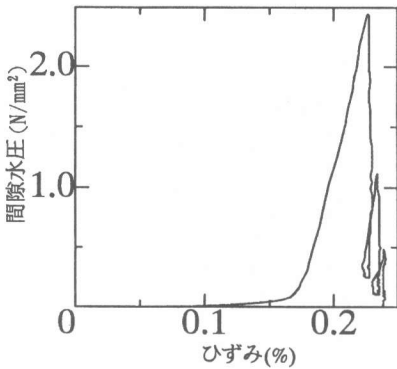


図-13 間隙水圧～ひずみ関係 (VII-6-30)

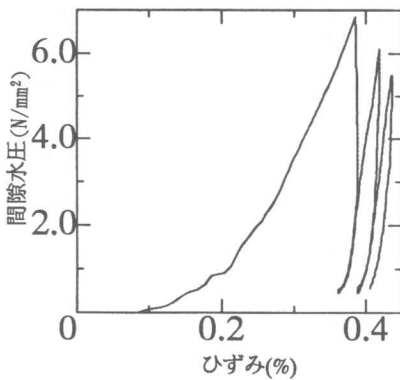


図-14 全応力～ひずみ関係 (VII-6-60)

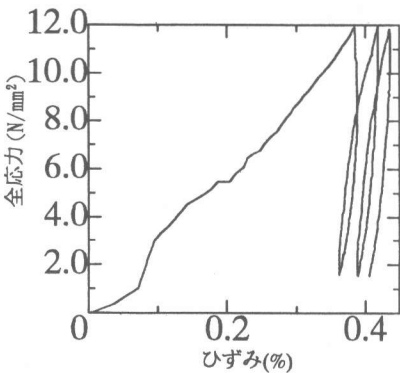


図-15 間隙水圧～ひずみ関係 (VII-6-60)

3.1 低ひずみ域での間隙水圧発生状況

すべての実験パラメータにおける実験結果よ

り、低ひずみ域においては全応力は緩やかに上昇するが、間隙水圧が発生する時点のひずみ域から、载荷応力（全応力）の一部を間隙水圧が負担することにより急激にその傾きは大きくなる。また、低ひずみ域では間隙水圧は全く発生せず、あるひずみ状態に達すると急激に生じる。これは田沢²⁾の自己収縮に関する実験研究や、大下ら³⁾が行った解析的研究から、養生期間中に起こる水和反応によって形成される内部空隙に発生する応力が負圧状態であり、载荷応力は、その一部が内部空隙の負圧と打ち消し合い、そのほか骨格に作用する。したがって、内部空隙に発生した初期応力がゼロになるひずみで供試体内部で水分の移動が生じることによるものと思われる。以上に述べたことを図に示すと図-16のようになる。

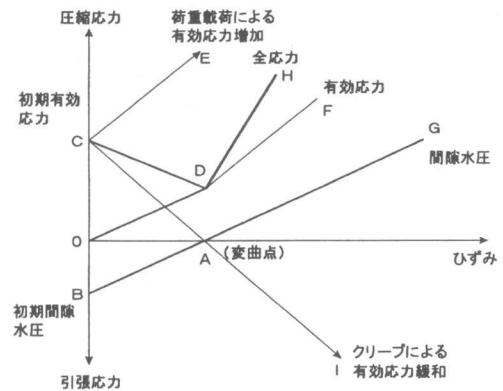


図-16 初期応力状態に関する挙動メカニズム

このような初期の内部空隙における応力状態は全応力～ひずみ関係における低ひずみ域の応力状態（全応力の緩やかな上昇）にも影響を及ぼすことが今回の繰り返し圧縮载荷試験においても確認された。

3.2 高ひずみ域での間隙水圧発生状況

すべての実験パラメータにおいて発生する間隙水圧は全応力の約 50%程度の値となっている。また、载荷、除荷、再载荷、再除荷を繰り返すと、間隙水圧は徐々に減少することが分かる。そして载荷材齢 7 日の方が载荷材齢 3 日より間隙水圧の減少する割合が小さい事が分か

る。さらにこの実験結果の重要な特徴として全応力～ひずみ関係と間隙水圧～ひずみ関係での載荷および除荷に対する経路が顕著に異なっている事が分かる。

3.3 載荷材齢と間隙水圧の関係

本研究ではコンクリートの含水率を材齢毎に求めているが、コンクリートの組織が全く同じで含水率のみが異なるコンクリートを作製することは非常に難しいものと思われる。しかし、本研究ではこの含水率をそれぞれの材齢の含水率として用いた。

Ⅲ-2-60とⅦ-6-60の間隙水圧～ひずみ関係を示した図-17より、間隙水圧が発生するひずみが材齢7日の方が小さいひずみで間隙水圧が発生している。つまり含水率が高い方が小さいひずみで間隙水圧が発生していることが分かる。その理由は含水率が高いと、つまり水中養生期間が長いと図-18に示したように供試体外部からの水の浸透が多く、これに伴い内部空隙に発生した負圧が徐々に減少するものと考えられる。したがって、水中養生期間が長いと間隙水圧の発生が早くなると考えられる。

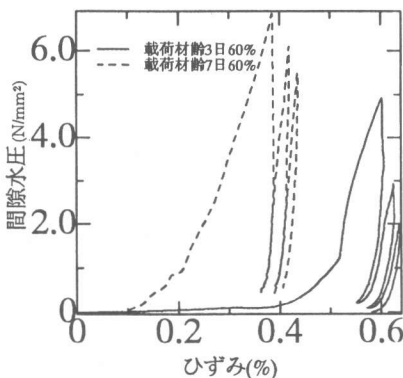


図-17 材齢の異なる間隙水圧～ひずみ関係

また、図-17より載荷材齢7日のほうが発生する間隙水圧が大きいことが分かる。この理由もまた、養生期間中に供試体外部からの水の浸透に伴い内部空隙に発生した負圧が徐々に減少することにより、供試体の内部空隙に発生して

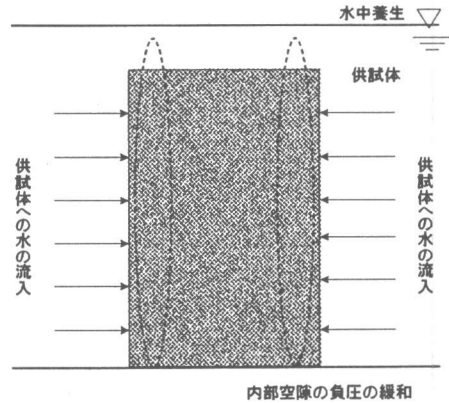


図-18 水中養生中における内部空隙の応力緩和

いた負圧が載荷材齢3日の時よりも小さくなるためである。故に、打ち消される載荷応力が小さくなり、発生する間隙水圧が大きくなると思われる。

4. 結論

本研究では繰り返し圧縮載荷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うことができた。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) すべての実験パラメータにおいて載荷・除荷を繰り返すと全応力～ひずみ関係と間隙水圧～ひずみ関係の応力経路はまったく異なる。
- (2) 載荷・除荷を繰り返すと全ての載荷材齢に対して間隙水圧は減少する。
- (3) すべての実験パラメータにおいて発生する間隙水圧は全応力の約半分の値になる。

参考文献

- 1) 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，名古屋大学学位論文，1995年
- 2) 田沢忠一・田沢学一・笠井芳夫：セメント・コンクリート中の水の挙動，セメント・コンクリート研究会水委員会，pp.53-55，1993
- 3) 大下英吉・谷口幸弘・田辺忠顕：初期応力を考慮した若材齢コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.639-644，1994