

論文 三軸応力状態下におけるコンクリートのクリープと間隙水圧挙動の相関性に関する研究

齊藤俊一*1・清水喜博*2・大下英吉*3

要旨：コンクリート中の水分移動メカニズムを定量的に評価する一つの方法として、三軸応力状態下においてコンクリート中に発生する間隙水圧及びクリープひずみを測定し、コンクリートのクリープ性状と間隙水圧挙動の相関性について検討した。その結果、外力によってコンクリート内部に間隙水圧が発生し、それが駆動力となり圧力の低い方に水分が移動し、その方向にクリープひずみが増加する現象が三軸状態においても認められた。よって、間隙水圧挙動及び水分移動がクリープ性状に及ぼす影響が非常に大きい事が確認された。

キーワード：クリープ、間隙水圧、水分移動、三軸応力状態下

1. はじめに

建設構造物材料としてコンクリートは必要不可欠な物であり、近年ますます高強度、高機能化を遂げ多様化されている。なかでも大深度地下構造物や海洋構造物のようなコンクリート構造物は、非常に大きな土圧や水圧が常時作用しており、過酷な環境下にあるといえる。

コンクリート構造物に求められる条件としては、置かれる環境において定められた期間、その機能を維持する耐久性をもつことが重要である。この耐久性に関する研究は数多く行われているが、実際コンクリートを材料的に見ると、様々な固体相とともに形状と大きさの異なる空隙相より構成されている多孔質複合材料であり多くの難しい問題がある。その代表的なものの一つがクリープ現象である。クリープ現象に関する研究は、昔から数多く行われ、粘性流動説、浸出説およびマイクロクラック説などがあるが、クリープ挙動を統一的に表現可能なモデルはない。一般に、セメント・コンクリートのクリープひずみの大きさは、含水状態により非常に相

違し湿潤状態の方が乾燥したものよりもクリープひずみは大きくなる。さらに、飽和状態のセメント・コンクリートが乾燥しながら持続荷重を受ける場合には、クリープひずみはさらに大きくなり、その値は弾性ひずみの数倍にも達するといわれている。

現在までの研究によれば、コンクリート供試体に持続荷重が載荷した時に生じる初期の急激なクリープひずみの発生は、コンクリート部材内に発生する間隙水圧が、時間の経過と共に定常状態になることに起因していることが明らかになり、その後は、緩やかにクリープひずみが発生することがわかっている。しかしながら、コンクリートの水分移動および間隙水圧とクリープ挙動を直接関連付けた実験手法による確認は全く行われていない。すなわち、室内実験においてクリープ性状に及ぼす間隙水圧および水分移動特性との関連性を評価し、実験・解析の両面から総合的評価が必要である。

そこで本研究では、コンクリート中の水分移動メカニズムを定量的に評価する一つの方法と

*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)

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
20	10±2	2.5±1	60	55	226	377	906	732

して、三軸応力状態下において若材齢時のコンクリート供試体に発生する間隙水圧およびクリープひずみの測定実験を実施し、その結果をもとにコンクリートのクリープ性状と間隙水圧挙動との関連性について実験的評価を行った。

なお、本論文で言う間隙水圧とは、間隙水に発生する圧力と空気に発生する圧力の総和を示している。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

本実験で使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント(比重 3.16)、細骨材が富士川産細骨材(比重 2.61)、粗骨材が富士川産粗骨材(比重 2.66、最大寸法 20mm)を使用した。なお、間隙水圧が極力発生しやすいように、水セメント比は 60%とした。コンクリートの配合表を表-1 に示す。

2.2 供試体の処理方法及び実験パラメータ

本研究における供試体の処理方法は、コンクリート打設後 1 日で脱型し、その後 2 日間水中養生(水温 20℃)を行い材齢 3 日で載荷実験を行った。また、実験パラメータは、作用側圧、応力強度比であり、試験体名、作用側圧、応力強度比を表-2 に示す。なお、作用側圧は 0.5MPa、1.0MPa、応力強度比(載荷応力/圧縮強度)は 30%、60%とした。強度特性は、表-3 に示す通りであり、各パラメータの設定は以下に示す通りである。

- ① 作用側圧・・・拘束効果の影響を調べるために設定されたものである。
- ② 応力強度比・・・弾性域、塑性域の違いによる影響を調べるために設定されたものである。

表-2 各試験体に対する実験パラメータ

試験体名	作用側圧 (MPa)	応力強度比 (%)
III-0.5-30	0.5	30
III-0.5-60		60
III-1.0-30	1.0	30
III-1.0-60		60

表-3 強度特性

圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比
15.1	5.0×10^3	0.18

2.3 間隙水圧測定装置

本研究では、三軸応力状態下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、コンクリートにも適用可能なように高剛性な物にして使用した。試験装置の概要を図-1 に示す。

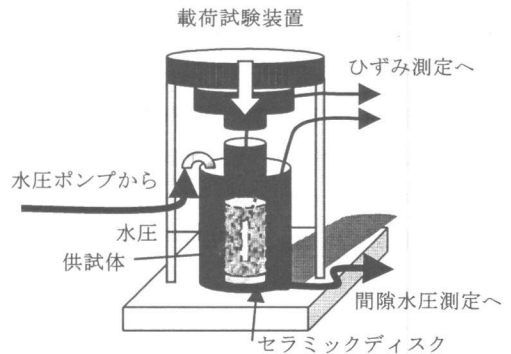


図-1 試験装置概要

この試験装置は鋼製であり、容器の寸法はφ250×200mmである。また、コンクリート供試体はφ100×200mmの円柱供試体を用い表面をゴムスリーブで覆うことによりコンクリート内部の間隙水は非排水状態となっている。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。間隙水圧計はセラミックディスク下部に設置してありその近傍でエア抜きできる構造となっている。なお、鋼製容器の耐圧は 10MPa であり、間隙水圧の最大測定能力は 10MPa である。

2.4 三軸応力載荷試験方法

実験に使用した装置は、図-1 に示したように間隙水圧測定装置およびアムスラー型載荷試験機である。はじめに供試体を間隙水圧測定装置にセットし鋼製容器内に水を満たした後、水圧ポンプにより所定の側圧を与えた。その後、応力強度比でそれぞれ 30%、60%の軸圧縮応力を載荷速度 0.1 MPa/sec で与えた。所定の応力に達した後、一定荷重が約 3 時間持続的に載荷された。なお、測定項目はひずみおよび間隙水圧である。

3. コンクリートのクリープ性状と間隙水圧挙動の相関性

3.1 実験結果

対象とした試験体はⅢ-0.5-60 の供試体である。試験体名Ⅲ-0.5-60 は材齢 3 日、作用側圧 0.5MPa、応力強度比 60% (約 9MPa)、脱型から 2 日間水中養生されたものである。三軸応力状態下(載荷応力、作用側圧共に一定)における単位クリープおよび間隙水圧挙動の時間的変化を図-2 に、間隙水圧～単位クリープ関係を図-3 に示す。図-2 に示す記号○は間隙水圧であり、実線、点線は、それぞれ縦(軸)方向の単位クリープひずみおよび横(周)方向の単位クリープひずみである。なお、縦方向の単位クリープひずみは収縮を正、横方向の単位クリープひずみは膨張を正としている。また、図-3 に示す記号▲, ○は縦、横方向の挙動である。

間隙水圧挙動に関しては、初期に発生した間隙水圧は、時間の経過と共に急激に減少し、最終的に側圧とほぼ同じ値の一定値になる。

次に、クリープ性状に関しては、縦、横方向

の単位クリープひずみとも一定荷重載荷の初期においてクリープが急激に増加しており、その後は緩やかに上昇する傾向となっている。

間隙水圧とクリープ挙動との関連性を明確に表したものが図-3 であり、一定荷重載荷の初期における急激な間隙水圧の減少と共に単位クリープひずみの増加が起こっていることが再確認される。

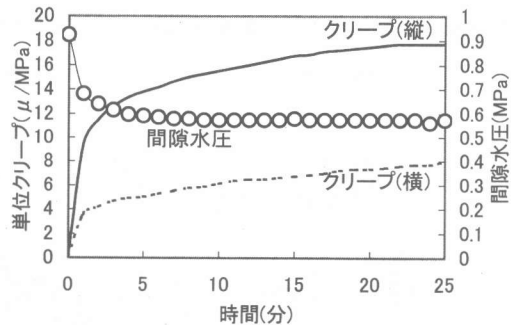


図-2 単位クリープ～時間、間隙水圧～時間、(Ⅲ-0.5-60)

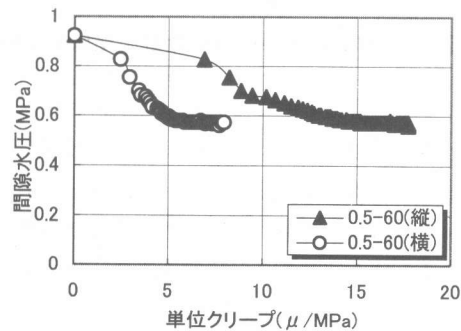


図-3 間隙水圧～単位クリープ 関係(Ⅲ-0.5-60)

3.2 クリープメカニズムの評価

前節において、間隙水圧挙動とクリープ挙動との間には、密接な関連性がある事がわかった。クリープメカニズムを間隙水圧挙動に関連付けて解明するためには、井之上・梨木らの実験的研究¹⁾が手がかりとなる。井之上・梨木らは、コンクリート供試体に一定側面水圧を作用させた二軸応力状態下におけるコンクリートのクリープ性状および間隙水圧挙動に関する研究

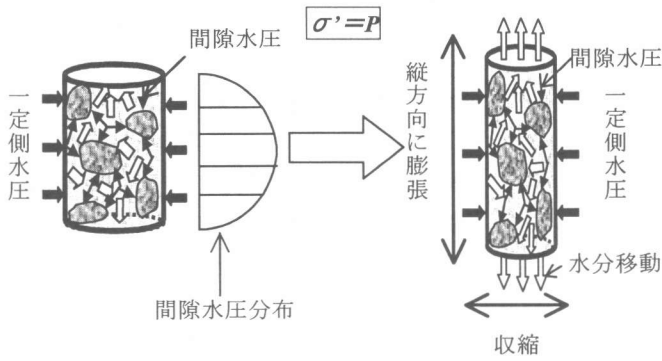


図-4 二軸応力状態での水分移動、間隙水圧挙動、及びクリープ性状

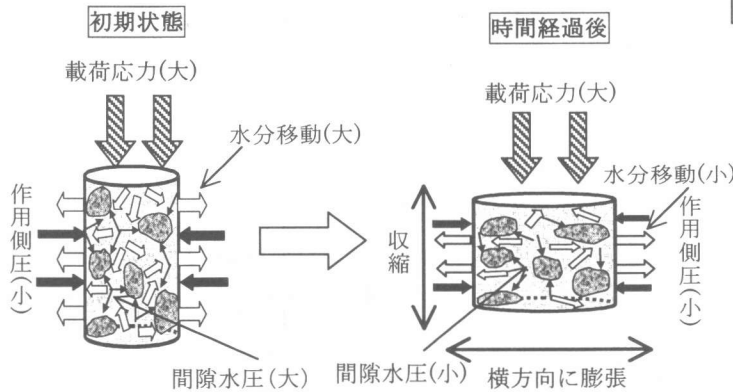
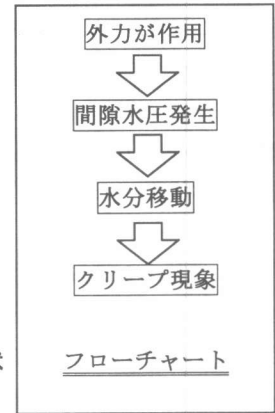


図-5 三軸応力状態での水分移動、間隙水圧挙動、及びクリープ性状

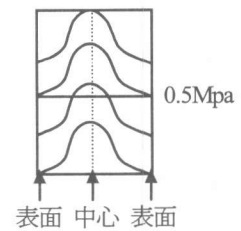


図-6 内部の圧力分布

を行っている。この中で、クリープメカニズムは図-4に示すように、コンクリート内部に圧入された水はある圧力(間隙水圧)を持ち、供試体軸方向には、骨格に生じる有効応力と間隙水圧が見かけ上は釣り合い状態となり、軸方向への変形は生じないことになる。しかしながら、供試体上下端面と内部において間隙水圧勾配が生じることにより、水が上下端面に向かって移動する。この定常或いは非定常な水の移動により、その方向にクリープひずみが発生することになる。

この現象を踏まえて、本研究の三軸応力状態下における水分移動およびクリープ現象を模擬したのが、図-5である。この図に従えば、側圧、荷重応力の順で外力が作用されることにより、コンクリート供試体内部には間隙水圧が発生する。間隙水圧が発生するという事は、供試体内部に水が存在していることであり、本

実験のように、横方向より縦方向に大きい応力が偏差的に作用している場合、その内部では図-6に示すような間隙水圧分布となる。この間隙水圧勾配によって、横方向に定常的に水分が移動することになり、この移動現象は間隙水圧が時々刻々と減少している実験結果からも明らかであり、さらに、実験終了後の目視観察から供試体側面が濡れていることによっても、再確認される。このような横方向への水分の移動は、井之上・梨木らの実験的事実に従えば、横方向にクリープひずみ(膨張)が生じ、その後クリープポアソン比の影響によって縦方向のクリープひずみ(収縮)が発生するわけである。そしてこのような現象は、間隙水圧勾配が消散するまで続き、その後はセメント・コンクリート骨格の粘性の影響により徐々にクリープひずみが発生するわけである。実験結果および一般的特性の評価より、コンクリートのクリープ性状に

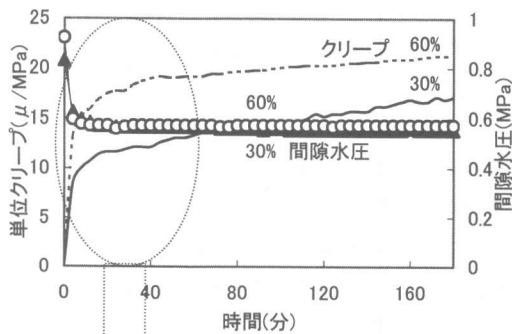


図-7 側圧0.5MPa時における, 単位
クリープ~時間, 間隙水圧~時間

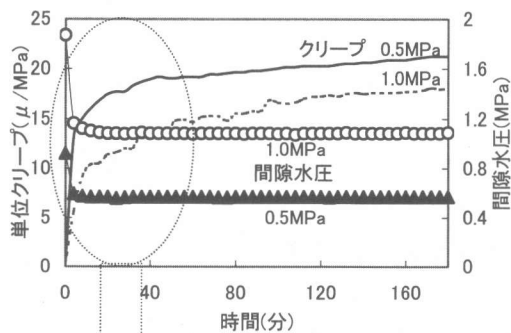


図-10 応力強度比60%時における, 単位
クリープ~時間, 間隙水圧~時間

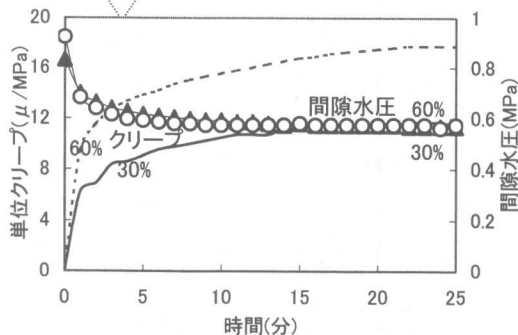


図-8 側圧0.5MPa時における, 単位
クリープ~時間, 間隙水圧~時間
拡大図

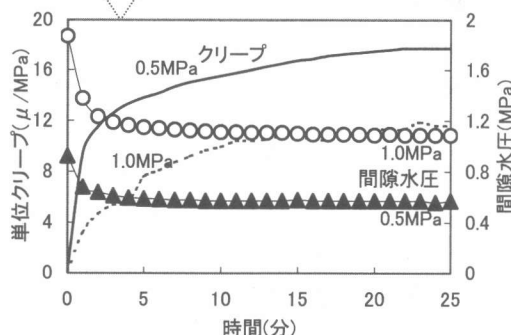


図-11 応力強度比60%時における, 単位
クリープ~時間, 間隙水圧~時間
拡大図

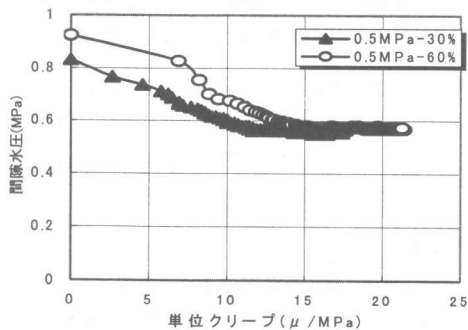


図-9 側圧0.5MPa時における間隙水
圧~単位クリープ

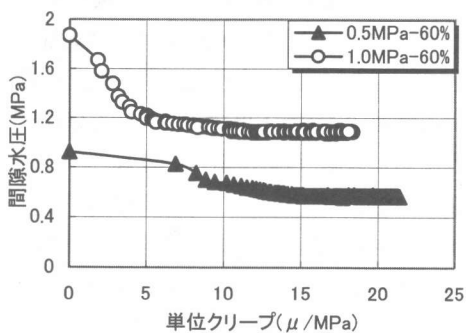


図-12 応力強度比60%時における間
隙水圧~単位クリープ

※応力強度比の違いによる比較

※作用側圧の違いによる比較

は間隙水圧の発生および水分移動が密接に関連し、また、非常に大きな影響を及ぼしていることが実験により確認できたわけである。

4. 各パラメータがクリープおよび間隙水圧に及ぼす影響

4.1 応力強度比の違いによる影響

作用側圧 0.5MPa 時におけるの応力強度比の違いによる比較を図-7~9 に示す。図-7, 8 に示す記号▲, ○は、応力強度比 30%, 60% における間隙水圧であり、実線、点線は、応力強度比 30%, 60% における単位クリープである。図-9 に示す記号▲, ○は、応力強度比 30%, 60% における挙動を示す。

間隙水圧挙動に関しては、応力強度比が大きいほど、初期に発生する間隙水圧が大きく、また、一定値となる減少量も多い。クリープ性状に関しては、発生した間隙水圧の影響および応力強度比の違いにより、初期における単位クリープの増加が顕著に現れており、その後のクリープ速度は徐々に緩やかになる。

4.2 作用側圧の違いによる影響

応力強度比 60% 時におけるの作用側圧の違いによる比較を図-10~12 に示す。図-10, 11 に示す記号▲, ○は、作用側圧 0.5MPa, 1.0MPa における間隙水圧であり、実線、点線は、作用側圧 0.5MPa, 1.0MPa における単位クリープである。図-12 に示す記号▲, ○は作用側圧 0.5MPa, 1.0MPa における挙動を示す。

間隙水圧挙動に関しては、初期発生値から減少し一定値となるまでの時間が、作用側圧が小さいほど短くなっている。クリープ性状に関しては、作用側圧 1.0MPa 時の初期における単位クリープ増加量が少なくなっている。また、間隙水圧~単位クリープ関係においても傾きが異なっている。この原因として、作用側圧による拘束効果の影響が大きく現れていると考えられる。

4.1, 4.2 の評価より、応力強度比、作用側圧の各パラメータが相互に関連しあいながら、

コンクリートのクリープ性状および間隙水圧挙動に影響を及ぼしている。

5. まとめ

本研究では、三軸応力状態下において若材齢時のコンクリート供試体に一定な載荷応力および側圧を与え約 3 時間、ひずみ及び間隙水圧を測定した。そして、クリープと間隙水圧挙動の相関性の評価、およびクリープと間隙水圧挙動に及ぼす各パラメータの影響を検討した。以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

(1) 三軸応力状態下における若材齢時のコンクリートのクリープ挙動は、外力により供試体内部に間隙水圧が発生し圧力の低い横方向への水分移動が生じ、横ひずみが増加すると共にクリープポアソン比の影響により縦ひずみが増加することが明らかになった。すなわち、若材齢時においては、クリープ性状に及ぼす間隙水圧及び水分移動の影響が非常に大きいことが確認された。

(2) 三軸応力状態下におけるコンクリートのクリープ挙動は、弾性域の範囲においては作用側圧の違いによる影響は殆んど受けない。しかしながら、塑性域の範囲においては側圧の拘束効果により、塑性体積膨脹が妨げられその結果としてクリープひずみに大きな差が生じるということが確認された。

(3) 初期に発生する間隙水圧は、応力強度比が大きいほど高い値となることが確認された。

参考文献

- 1) 井之上尚史・梨木義春・大下英吉：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・解析的研究，コンクリート年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.793-804，1999
- 2) 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
- 3) 大下英吉：微細ひび割れを含むコンクリートの透水性メカニズムに関する研究，名古屋大学博士論文，1995