

プレピーク領域において繰り返し荷重を受ける コンクリートの間隙水圧に関する 実験的・解析的研究

大下英吉¹・石川靖晃²

¹正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 工修 名城大学講師 理工学部土木工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

本研究では、荷重履歴による間隙水圧特性の詳細な評価を行うことを目的として、繰り返し荷重下における間隙水圧特性に関する実験的および解析的評価を行った。まず、前報で報告した横方向変位拘束型である一次元圧密状態を模擬した間隙水圧測定用セルを用い、載荷材齢をパラメータとした実験を実施し、繰り返し荷重下の間隙水圧特性を論じるとともに実験パラメータが間隙水圧特性に及ぼす影響を検討した。そして、筆者等が構築した水・コンクリート骨格連成解析手法を時間依存型挙動に対しても適用可能なように拡張し、繰り返し荷重下のコンクリート応力に及ぼす間隙水圧の影響評価を解析的にも実施した。

Key Words : water behavior, pore water pressure, total stress, effective stress, porous material, water migration, cyclic load

1. はじめに

コンクリート中の水分移動に関する研究は、硬化コンクリートのクリープ¹⁾の解明を例に取るまでもなく、過去多くの実績が積み重ねられている。この種の問題に限らず、海洋コンクリート構造物や水中コンクリート構造物などコンクリート中の水分移動現象が重要な設計要因となる問題は数多い。

このように、コンクリート中の水分移動が関与する現象は数多く、水分移動問題の重要性は高いのであるが、コンクリート躯体内の水分移動に関して精度の高い定量的検討を行った研究は、殆ど無い。まして、コンクリートを組織する微細な空隙内部に発生する間隙水圧の実測およびその分布から透水性を論じた研究は、筆者等^{2),3),4),5),6)}の他には皆無の状態である。このようなコンクリートの微細な空隙内部に生じる間隙水圧は、従来では構造材料として強度に主眼を置いた研究が殆どであったこと、コンクリート骨格の強度が大きいことから間隙水圧に関して殆ど注意が払われなかったことなどにより、殆ど関心が寄せられない状態であった。しかしながら、

自己収縮発生のメカニズム⁷⁾や引張および圧縮応力状態下にあるクリープメカニズム⁸⁾の解明などを例にとると、内部空隙(水隙)に発生する負の応力状態を持った間隙水圧或いは間隙水圧に起因した水分移動現象というように、それらは全て間隙水圧が大きく関与した現象であることが明らかとなり、近年、その重要性を認識する気運が高まりつつある。このように、コンクリートの微細な空隙内部に発生する間隙水圧は、諸処の現象に大きく関与しており、定性的かつ定量的な詳細評価が不可欠であると考えられる。

筆者等は、荷重の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を測定することのできるセルの開発を行い、Pre-PeakおよびPost-Peak領域における間隙水圧の測定実験を行った。さらに、コンクリートや岩盤のような多孔質材料に対して適用可能な均質材料から不均質材料に至るまでの統一的な水分移動に関する解析理論の構築を行い、解析的手法によっても間隙水圧に関する定性的および定量的評価を行った。その中で、コンクリートを組織する微細な空隙内部に発生する間隙水圧は、コンクリート

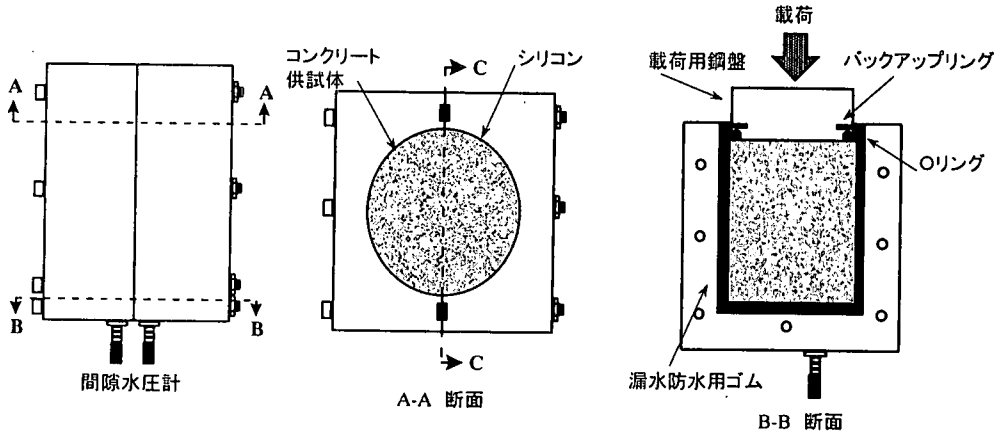


図-1 一次元圧密状態を模擬した間隙水圧測定用セル²⁾

応力の相当分を分担し、その値はコンクリートの体積変化にほぼ依存することが判明したわけであり、若材齢コンクリート、地中或いは水中コンクリート構造物では、その影響が無視できないことが明らかとなった。すなわち、そのようなコンクリートでは、間隙水圧の影響が非常に重要であることが実証されたわけである。一般に、地中或いは水中コンクリート構造物には、土圧や水圧という常時荷重の他に、地震動或いは波力のように長・短周期の外力の繰り返し中・長期的に作用するような時間依存型の荷重履歴が作用することになる。したがって、間隙水圧に関するより詳細な検討を行うためには、上述の単調増加型荷重に対する間隙水圧挙動に関する研究の他に、繰り返し荷重下での挙動を明確にしておかなければならないわけである。

本研究では、荷重履歴による間隙水圧特性の詳細な評価を行うことを目的として、荷重の載荷時と除荷時において間隙水圧はどのような相違を示し、それはどのようなメカニズムで生じるのかを実験的および解析的に評価した。まず、前報で報告した横方向変位拘束型である一次元圧密状態を模擬した間隙水圧測定用セルを用い、載荷材齢をパラメータとした実験を実施し、荷重載荷時と除荷時の間隙水圧特性を論じるとともに実験パラメータが間隙水圧特性に及ぼす影響を検討した。そして、筆者等が構築した水・コンクリート骨格連成解析手法を時間依存型挙動に対しても適用可能なように拡張し、繰り返し荷重下のコンクリート応力に及ぼす間隙水圧の影響

評価を解析的にも実施した。

2. 実験概要

(1) 間隙水圧測定用セル²⁾

本研究で用いたセルは、図-1に示すように、二つの厚肉鋼魂の間に漏水防止用ゴムを噛ませ高張力ボルトで定着することにより構成されており、セルの寸法は140×172×240mmである。コンクリート試験体はφ100×200mmの円柱供試体であり、試験体とセルとの界面にシリコンを添付することにより、その界面で水分移動が生じないようにしている。したがって、試験体は横方向の変位が拘束された一次元圧密状態にあり、また完全に非排水な状態をつくれるようになっているわけである。間隙水圧の測定は、セルが完全非排水状態を模擬していることから、コンクリート内部に発生する間隙水圧は場所によらず一定であるものとし、セル底面に設けた二つの排水口（試験体断面積の1%）に取り付けた間隙水圧計によって測定した。なお、水圧計のセル底面への取り付けは、二つの排水口に水を満たした状態で、一つずつネジ込む方法で行った。この際に、排水口内の水の体積減少に応じて水圧が1.0～3.0 N/mm²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み、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、二つの排水口内の水が試験体底面を通して通じておらず試験体底面に二つの間隙水圧計をつなぐ水が溜まっていな

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (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
15	10±2	2.5	60	51.4	209	348.3	868.0	827.9

表-2 試験体作成から実験までの試験体の処理方法

試験体名	試験体作成から間隙水圧測定実験までの試験体の処理方法	載荷応力比 (%)
Ⅲ-2-60	打込 脱型 水中養生 載荷 材齢(日) 0 1 2 3	60
Ⅲ-2-90	同上	90
Ⅶ-6-30	打込 脱型 水中養生 載荷 材齢(日) 0 1 2 3 4 5 6 7	30
Ⅶ-6-60	同上	60

表-3 試験体の一軸圧縮強度

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)
3	14.8
7	21.6

いこと、および試験体とシリコンあるいはセルとの隙間が水が移動できないことを示している。

コンクリートの配合は、表-1に示す通りであり、水セメント比は実構造物のものにできるだけ近く、また最大連続空隙径が大きくなるように設定した。

(2) 荷重の載荷方法

荷重はコンクリート試験体上部に設置した載荷用鋼盤を介して軸方向に繰り返し載荷された。荷重の載荷は、まず、載荷用鋼盤と試験体との遊びをなくすために事前に一軸圧縮強度の10%の荷重を載荷した後に、所定の載荷応力比まで行われた。その後、載荷応力がゼロ近傍になるまで除荷するという一連の荷重の載荷と除荷が3回繰り返して行われた。したがって、載荷応力の最大値はコンクリート試験体の強度を示すものではなく、繰り返し載荷時の応力経路内におけるある一つの状態を示すものである。なお、荷重の載荷および除荷は、載荷速度0.004 mm/secにて行われた。

(3) 試験体の養生方法

間隙水圧測定用試験体は、表-2に示すように、コンクリート打設後1日の時点で脱型し、2日間および6日間の水中養生が行われた。そして、間隙水

圧測定材齢は、3日および7日である。

(4) 実験パラメータ

実験パラメータは、表-2に示すように、載荷材齢および載荷応力比である。ここで、載荷応力比とは、載荷応力の最大値を表-3に示す各載荷材齢の一軸圧縮強度で無次元化した量である。なお、表-2に示す試験体の名称は、試験体Ⅲ-2-60を例に取り説明すると、以下のようになる。

Ⅲ：載荷材齢

2：水中養生期間

60：載荷応力比

なお、本論文では、載荷応力比が60%の結果のみに対して間隙水圧挙動の影響評価をすることにする。

3. 変形に伴う間隙水圧発生の一般的傾向

本研究における変形に伴う間隙水圧特性の一般的傾向を図-2に示す。同図は、試験体Ⅲ-2-60に対する結果であり、同図(a)は全応力と軸ひずみ関係、同図(b)は間隙水圧と軸ひずみ関係および同図(c)は有効応力と軸ひずみ関係を表わしている。なお、同図(c)の縦軸である有効応力 σ' は、全応力 σ と間隙水圧 p により、次式から算出されたものである。

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

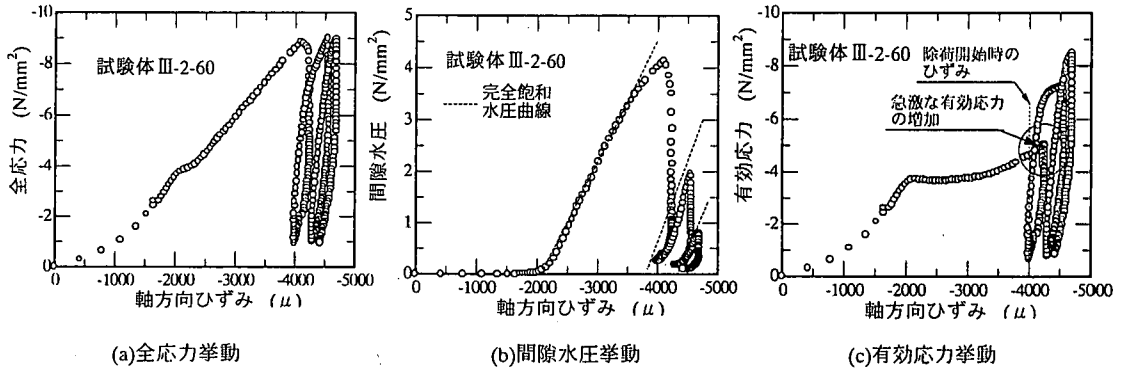


図-2 変形に伴う間隙水圧発生の一般的傾向

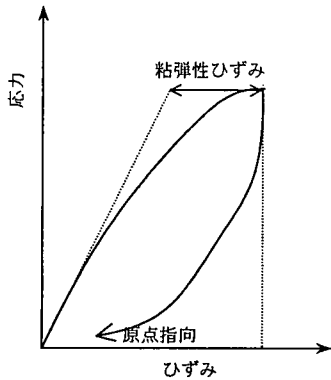


図-3 低応力レベルでの繰返し応力履歴特性

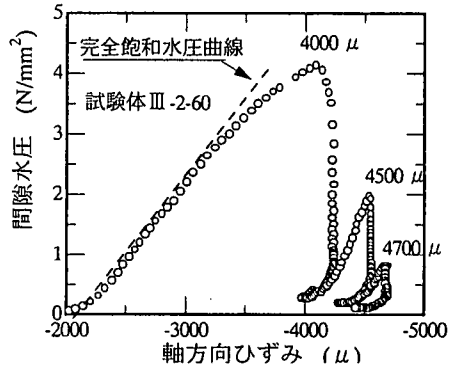


図-4 間隙水圧の極大値低下現象

まず、図-2(b)に示すように、荷重の載荷時および除荷時において間隙水圧経路は全く異なっており、載荷時は緩やかに上昇することに対して、除荷時には急激な間隙水圧の減少が生じている。この現象は、後続する載荷時の間隙水圧勾配が点線で示す完全飽和水圧曲線とほぼ等しいということから考えると、不飽和による影響ではないであろう。では、どのような影響によるものかは、同図(c)に示す有効応力履歴から一つの原因が推測されるであろう。除荷時の有効応力は、白丸の領域で示すように、荷重を除荷したにも拘わらず急激な増加を示した後に低下を生じている。ここで、除荷開始時の急激な有効応力の増加が、急激な間隙水圧の消散につながる一つの重要なポイントであると考えられる。すなわち、除荷開始時では、内部空隙に生じていた間隙水圧が何らかの原因により、コンクリート骨格に生じる有効応力へと移行することおよび荷重の除荷は間隙水圧のみに影響することなどの影響により、有効応力の急激な増加現象が生じるものと考えられる。このような現象は、あたかも水を媒体としてコンクリート骨

格に応力が伝達されることを示しており、詳細な検討は次章で行うことにする。そして、同図(a)に示す全応力に関しても、除荷時の挙動は間隙水圧の挙動と同様に急激な減少を示しており、ひずみの回復現象は殆ど生じていない。一般に、除荷時の応力経路は、図-3に示すように、載荷時の応力経路とは異なる原点指向を示すわけである。このような現象は、あたかも塑性或いは粘塑性挙動のように見えるが、実験が弾性応力レベルでの繰返し実験であることを考えると、この現象はそれらのひずみ成分の影響ではなく、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧の影響であると考えられる。なお、この詳細については、5章の解析的検討にて論じることとする。

次に、間隙水圧の最大値は約4 N/mm²であり、コンクリート応力である全応力の約1/2もの無視し得ない程の大きな応力を分担している。そして、間隙水圧の極大値は、繰返しとともに徐々に低下の傾向を示している。このような繰返しによる間隙水圧の極大値の低下現象は、図-4に示すことから推考される。同図は、水和反応により発生した内部空隙

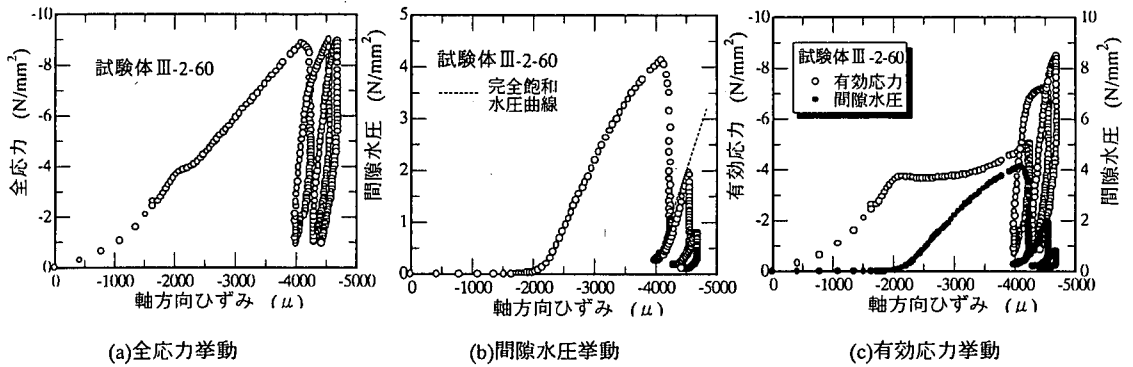


図-5 載荷材齢が間隙水圧特性に及ぼす影響 (試験体Ⅲ-2-60)

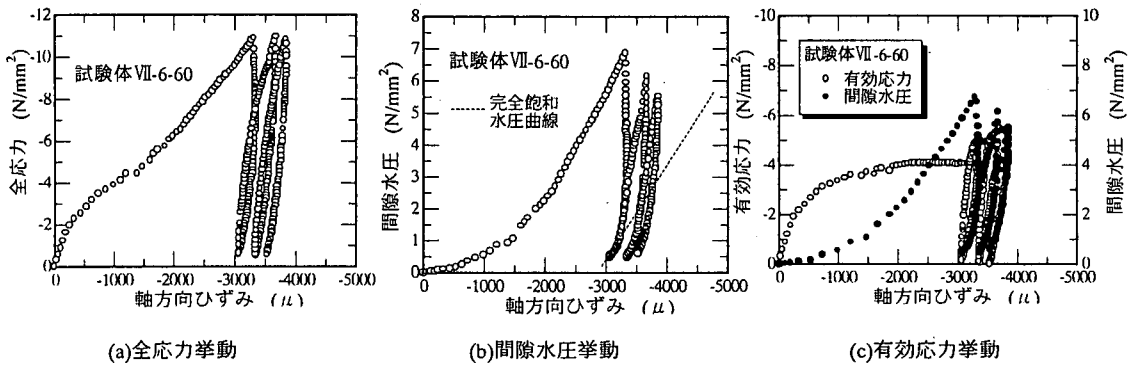


図-6 載荷材齢が間隙水圧特性に及ぼす影響 (試験体Ⅶ-6-60)

(水隙)の負の応力状態を持つ間隙水圧²⁾が消散し、完全飽和水圧曲線の勾配とほぼ等しくなった時点におけるひずみ(約2000 μ)以降を拡大して示した間隙水圧と軸ひずみの関係である。ここで、横軸である軸ひずみは、横方向変位が拘束されたセルの構造上、体積ひずみに相当するものである。同図に示すように、間隙水圧が極大値となるひずみは、それぞれ約4000 μ 、4500 μ および4700 μ であり、荷重の除荷により間隙水圧がほぼゼロとなるひずみからそれぞれの極大値を示すひずみまでの変化量に換算すると、それぞれ約2000 μ 、800 μ および400 μ である。間隙水圧特性は、体積ひずみに依存するという実験的・解析的実証に従うと、最大値を示す間隙水圧に対して、後続する間隙水圧の極大値は、それぞれ約1/2および1/5となるわけであり、この低下の割合は実測値にほぼ対応していることが分かる。したがって、荷重の繰り返しとともに間隙水圧の極大値が低下する現象は、載荷応力が荷重の繰り返しによりほぼゼロから所定の載荷応力比に到達するまでの軸ひずみ(体積ひずみ)の変化量に対応するわけである。

このような繰り返し荷重による軸ひずみの変化量の低下は、荷重の繰り返しによる内部空隙の消滅によるものと考えられる。

4. 載荷材齢が間隙水圧特性に及ぼす影響評価

本研究では、実験パラメータとして載荷材齢を設定した。ここでは、その実験パラメータが間隙水圧挙動に及ぼす影響を評価することにする。

載荷応力比60%の実験結果を図-5、6に示す。各図は、それぞれ載荷材齢3日(試験体Ⅲ-2-60)および7日(試験体Ⅶ-6-60)の結果であり、各図の(a)は全応力と軸ひずみ関係、(b)は間隙水圧と軸ひずみ関係および(c)は有効応力および間隙水圧と軸ひずみ関係を表わしている。

まず、両載荷材齢とも、間隙水圧の最大値は全応力の最大値の50%以上であり、コンクリート応力に対して非常に大きな割合で発生している。そして、荷重の除荷時において間隙水圧は急激な減少を生じ、荷重の載荷時とは全く異なった挙動を示しているこ

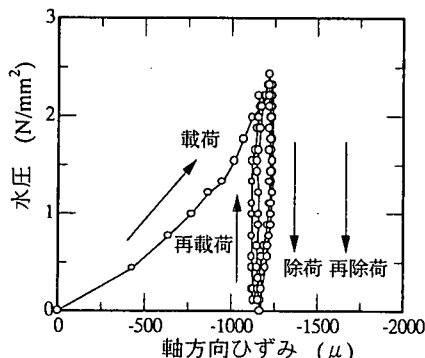


図-7 繰り返し荷重を受ける水の挙動

とが分かる。このような荷重の除荷時における間隙水圧の急激な低下現象は、前章で述べた原因に加え、図-7に示すことも重要な原因であろう。同図は、本実験で使用した水と全く同一の水に対して繰り返し荷重を載荷した際の水圧と軸ひずみの関係を示している。試験は、2章で示した試験装置に水を溜め、図-1に示すリングから水が漏れない範囲内において荷重の載荷および除荷が繰り返し行われた。まず、荷重の載荷（一次載荷）とともに約 2000 N/mm^2 の値を持つ体積弾性係数で水圧が上昇し、荷重を除荷（一次除荷）するとほぼ無限大に近い値を持つ体積弾性係数で水圧が急激に低下した後に、それよりも僅かながら緩やかな勾配で低下する。そして、荷重が再度載荷（2次載荷）されると、再度無限大に近い値を持つ体積弾性係数で水圧が上昇した後に、それよりも僅かながら緩やかな勾配で上昇する。その後の荷重の繰り返しにおいては、1次除荷と2次載荷時の水圧履歴とほぼ同じ応力経路を示すというような挙動を呈する。一般に、水の体積弾性係数は約 2200 N/mm^2 と言われており、水は弾性挙動を示すものとして荷重の載荷および除荷という状態によらず、その一定値を仮定してきたわけである。しかしながら、本実験のように、水は繰り返し荷重下において全く異なった応力経路を示すことが明らかとなったわけである。すなわち、荷重の除荷時における間隙水圧の急激な低下現象は、荷重の除荷開始時の影響は間隙水圧のみに影響するという前章の現象に加え、このような水の挙動によるものと推測される。

次に、間隙水圧の極大値は、荷重の繰り返しとと

表-4 試験体の含水率

試験体名	含水率(%)
Ⅲ-2-60	9.33
Ⅶ-6-60	10.34

もに徐々に低下しており、この現象は前章で指摘した通りである。しかしながら、そのような極大値の低下の割合は、載荷材齢が7日のものよりも3日の方が大きくなっていることが分かる。言い換えるならば、再載荷時において、両載荷材齢とも間隙水圧が極大値となる軸ひずみの変化量は約 500μ であるが、その間の間隙水圧の上昇量は、載荷材齢3日で約 1.7 N/mm^2 であることに対して載荷材齢7日で約 5.5 N/mm^2 というように両載荷材齢において差異が認められる。また、載荷材齢が3日の間隙水圧の勾配は、ほぼ完全飽和水圧曲線に一致しているが、載荷材齢が7日の場合には、それよりも大きな勾配を示している。前章で示したように、間隙水圧は体積ひずみに依存するとすると、両載荷材齢ともほぼ同じ間隙水圧の上昇量を示すことになるわけである。このような現象に対しては、今後より詳細な検討が必要であるが、恐らく、表-4に示すように両載荷材齢の試験体で含水率が異なることによるものと考えられる。すなわち、載荷材齢7日の試験体は、載荷材齢3日の試験体に比べて含水率が約1%大きくなっており、この影響によるものと考えられる。また、同図(b)に示す間隙水圧が発生する軸方向ひずみが異なる理由も含水率の影響と考えられる。なお、含水率の測定方法は、骨材の含水率試験(JIS A 1125)に準じて行われた。

最後に、図-5、6(c)に示すコンクリート骨格に発生する有効応力であるが、荷重の載荷時において間隙水圧がほぼ直線的に発生するひずみ域（載荷材齢3日： $2000 \mu \sim 4000 \mu$ 、載荷材齢7日： $1500 \mu \sim 3300 \mu$ ）では、載荷材齢3日では緩やかな有効応力の増加が見られるが、載荷材齢7日では殆ど変化はない。このことはすなわち、外力の殆どを水が間隙水圧として分担することに対して、コンクリート骨格は殆ど分担しないということである。このような現象は、荷重の繰り返し載荷において、どの載荷時においても見受けられる。そして、荷重の除荷開始時の段階では、前章および上述に示したように、急

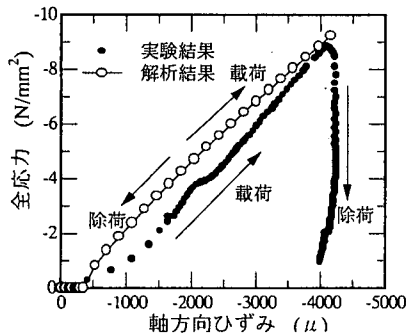


図-8 従来の水・コンクリート連成解析手法の特性 (全応力特性)

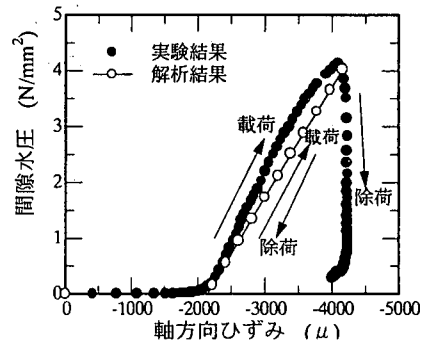


図-9 従来の水・コンクリート連成解析手法の特性 (間隙水圧特性)

激な低下を示すことに対して、有効応力は荷重を除荷したにもかかわらず、一定値或いは緩やかな上昇を示している。

このように、部分的に水で飽和された多孔質材料としてのコンクリートの挙動は、水の存在或いは間隙水圧挙動の影響により、水を含まないコンクリートとは全く異なった挙動を示すことが明らかとなった。そして、間隙水圧は荷重の載荷と除荷とで全く異なった挙動を示し、さらに水単体としての挙動も繰り返し荷重下において全く異なった応力経路を示すことが明らかとなったわけである。そこで次章では、このようなコンクリートの挙動を解析的に評価することにする。

5. 時間依存型の水・コンクリート骨格連成解析手法による間隙水圧特性評価

筆者等が構築した水・コンクリート骨格連成解析手法^{3),4)}は、単調載荷による時間依存性の無い短期挙動を評価するものであるため、地震動或いは波力のように短周期の外力の繰り返しが中・長期的に作用するような時間依存挙動に関しては適用が困難である。したがって、水・コンクリート骨格連成解析手法の適用範囲を広げるためにも、粘弾性或いは粘塑性モデルのような時間依存型モデルの導入が不可欠であり、このことはすなわち間隙水圧特性や応力特性に及ぼす間隙水圧の影響をより詳細に評価することにつながるわけである。

(1) 従来の水・コンクリート骨格連成解析手法による時間依存挙動の評価

本節では、間隙水圧測定実験結果に従来の水・コンクリート骨格連成解析手法を適用し、その問題点を明確にする。

図-8, 9は、実験に対する解析結果を示している。各図は、それぞれ全応力と軸ひずみ関係および間隙水圧と軸ひずみ関係を示しており、記号●は実験結果、○は解析結果を表している。両図から、実験結果はヒステリシスを示すことに対し、解析結果は載荷、除荷とも全く同じ応力経路を示している。一般に、低応力レベルの繰り返し荷重を受けるコンクリートの応力特性は、粘弾性の影響により載荷と除荷で異なる応力経路を示し、ヒステリシスを描くことが知られている。このことから、従来の水・コンクリート骨格連成解析手法により変形或いは間隙水圧特性のより詳細な評価を行うためには、粘弾性成分などの時間依存挙動を評価することのできるモデルへの拡張が必要である。

(2) 拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法

筆者らが構築した水・コンクリート骨格連成解析手法は、間隙水の質量保存則と力の釣合い式を連成させたものであり、均質材料から不均質材料に遷移する過程をも評価可能なものである。しかしながら、本解析手法は時間依存性を考慮していないため、その適用範囲が短期的挙動のみに限定されており、その適用範囲を長期的挙動評価にまで拡張させるため

には、時間依存性のひずみ成分の導入が必要であることが前節において確認された。

a) 粘弾性成分を考慮した間隙水の質量保存則

Bazant Z. P.¹⁾は、流動体から固体へ遷移する時点のコンクリートの変形挙動を表すために、弾性、塑性ひずみ成分の他に粘弾性および粘塑性ひずみ成分を表したモデルの構築を行っている。このうち、本研究では次式に示すDirichlet級数近似により増分型で表した粘弾性モデルを導入することにした。

$$\begin{aligned} d\{\epsilon^{ve}\} &= \frac{\Delta\sigma}{E''} + \Delta\epsilon'' \quad (2) \\ \frac{1}{E''} &= \sum_{\mu=1}^N \frac{1-\lambda_{\mu}}{C_{\mu(r+1/2)}} \\ \Delta\epsilon'' &= \sum_{\mu=1}^N \left\{ 1 - \exp(-\Delta y_{\mu}) \right\} \gamma_{\mu(r)} \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は応力増分であり、 E'' 、 $\Delta\epsilon''$ は級数展開にて算出される項である。

そして、既往の研究に粘弾性の影響による間隙水の変形を考慮すると、間隙水の質量保存則は次式のマトリックスで表すことができる。

$$\begin{aligned} -H\{\bar{p}\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \\ -W \frac{d\{\bar{v}\}}{dt} - d\{g_p\} - \frac{d\{f_p^{vs}\}}{dt} + \{f_p^{ext}\} = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 $d\{\bar{u}\}$ 、 $d\{\bar{p}\}$ は、それぞれ節点変位ベクトル、節点間隙水圧である。また、各マトリックスおよびベクトルは、以下に示す通りである。

$$\begin{aligned} H &= \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \bar{N} d\Omega, S = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k_f} \bar{N} d\Omega \\ L^T &= \xi \int_{\Omega} \bar{N}^T \{m\}^T B d\Omega \\ W &= \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1-\xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega \\ f_p^{ext} &= \int_{\Omega} \bar{N}^T q / \rho_w d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w z d\Omega \\ &+ \int_{\Gamma} \bar{N}^T \left\{ \{v\}^T \cdot n \right\} \mu \Gamma \end{aligned}$$

$$g_p = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{V_c}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} C_H d\Omega$$

ここで、粘弾性に関する項は $d\{f_p^{vs}\}$ であり、次式で表すことができる。

$$f_p^{vs} = \int_{\Omega} \left\{ (1-\xi) \frac{V_c}{V} - \xi \right\} \{m\}^T \{\epsilon^{ve}\} \mu d\Omega \quad (4)$$

b) 粘弾性成分を考慮した力の釣り合い式

既往の研究²⁾に粘弾性の影響による骨格の変形を考慮すると、有効応力増分は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} d\{\sigma'\} &= [D_s^{ep} \{d\{\epsilon'\} - d\{\epsilon^{pr}\} - \\ & d\{\epsilon^p\} - \frac{V_c}{V} d\{\epsilon^{ve}\}] \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、ひずみ成分の上付き添え字 t, pr, p, ve は、それぞれ全ひずみ、間隙水圧による骨格のひずみ、塑性ひずみおよび粘弾性ひずみを表している。また、 V, V_c は、それぞれコンクリート体の全体積およびセメントペーストの体積である。

いま、間隙水圧 p が存在する場合の全応力 $\{\sigma\}$ と有効応力 $\{\sigma'\}$ の関係は、次式により表すことができる。

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= \{\sigma'\} - \{m\}p \\ \{m\} &= [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、符号の定義は、応力に関しては引張を正、水圧に関しては圧縮を正としている。

そして、仮想仕事を用いた力の釣り合い式は次式のマトリックスで表すことができる。

$$K_T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - A \frac{d\{\bar{v}\}}{dt} - \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} = 0 \quad (7)$$

なお、各マトリックスおよびベクトルは、以下に示す通りである。

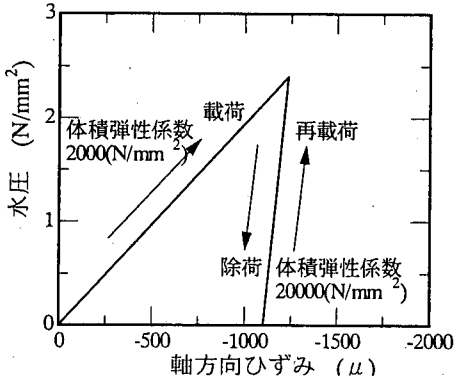


図-10 水の挙動に関するモデル化

$$K_T = (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} B d\Omega$$

$$L = \xi \int_{\Omega} B^T \{m\} \bar{N} d\Omega$$

$$A = (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} \alpha \bar{N} d\Omega$$

ここで、粘弾性に関する項は $d\{\bar{f}\}/dt$ であり、次式で表すことができる。

$$\{\bar{f}\} = \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{t\} d\Gamma + (1-\xi) \frac{V_C}{V} \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{\bar{\epsilon}^{ve}\} d\Omega \quad (8)$$

c) 粘弾性成分を考慮した多孔質材料の変形挙動に関する支配方程式

力の釣合いと間隙水の質量保存則とを同時に満足する拡張された水・コンクリート骨格連成解析方程式は、次式のマトリックス形式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{V}\}}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{V}\}}{dt} - \frac{d\{\bar{f}_p^{ve}\}}{dt} - \{f_p^{ext}\} + \frac{d\{g_p\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

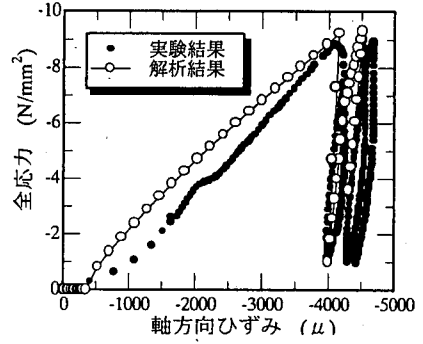


図-11 全応力に対する解析的評価

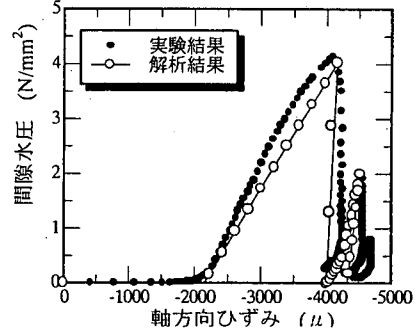


図-12 間隙水圧に対する解析的評価

すなわち、節点変位ベクトルと節点間隙水圧を未知数として、境界条件を代入することにより、時間依存挙動を示すコンクリートの変形および水分移動特性が自動的に求まることになる。なお、注意すべきことは、式(2)に示す粘弾性ひずみ増分は非線型性を有していることである。

水・コンクリート骨格連成解析手法の時間依存型挙動への拡張に際して粘弾性モデルの導入と並んで重要なことは、本実験により初めて明らかとなった繰り返し荷重を受ける水の挙動を詳細にモデル化して導入しなければならないことである。水の挙動は、図-7に示したように、荷重の載荷により水圧は緩やかに上昇し、荷重を除荷すると急激な水圧の低下を生じ、その後の繰り返し荷重による水圧経路は荷重を除荷した経路とほぼ同じであった。そこで本研究では、そのような水の挙動に関して、荒い近似ではあるが図-10に示すようなモデル化を行い、それを解析に導入することにした。モデル化した水の挙動は、次式に示すように、荷重の載荷時には2000 N/mm²の体積弾性係数で水圧が上昇し、除荷時には20000 N/mm²の体積弾性係数で水圧が低下する。そ

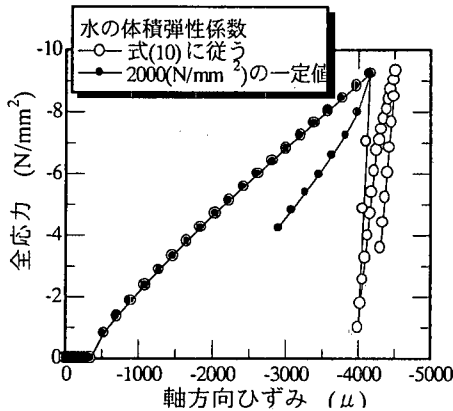


図-1 3 水の挙動が全応力に及ぼす影響

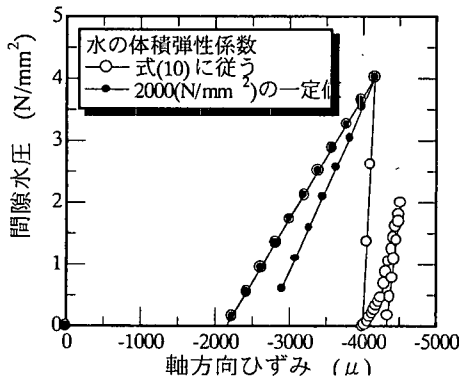


図-1 4 水の挙動が間隙水圧に及ぼす影響

して、その後の繰り返し荷重に対しては、除荷時と同じ水圧経路をたどるものとした。

$$\begin{aligned} \text{荷重: } K_f &= 2000 \text{ N/mm}^2 \\ \text{除荷: } K_f &= 20000 \text{ N/mm}^2 \\ \text{その後の荷重・除荷: } K_f &= 20000 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

(3) 拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法の適用性評価

繰り返し荷重を受けるコンクリートの間隙水圧測定実験に本モデルを適用し、その適用性評価を行うことにする。なお、適用性評価は試験体Ⅲ-2-60に対して実施する。

a) 全応力に対する適用性評価

全応力に対する実験結果と解析結果との比較を図-1 1に示す。図中の記号●は実験結果、○は解析結果を示している。なお、解析では水和反応により

生じる内部空（水）隙の負圧と骨格の圧縮力を初期応力として導入している。

まず、同図から、粘弾性モデルを導入した本解析手法と実験結果は比較的良好な一致を示しており、時間依存挙動を導入した本解析手法の適用性が評価される。

b) 間隙水圧に対する適用性評価

間隙水圧に対する実験結果と解析結果との比較を図-1 2に示す。図中の記号●は実験結果、記号○は解析結果を示している。

まず、同図から、全応力と同様に粘弾性モデルを導入した本解析手法と実験結果とは比較的良好な一致を示しており、時間依存挙動を導入した本解析手法の適用性が評価される。このように、拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法は、弾性応力（低応力）レベルでの時間依存挙動を詳細に評価可能であることが判明したわけである。そこで次に、繰返し荷重を受けるコンクリートの間隙水圧挙動について簡単な考察を行うことにする。

(4) 間隙水圧挙動に関する解析的評価

水の体積弾性係数が、全応力および間隙水圧の挙動にどのような影響を及ぼすかについて解析的に検討してみることにする。図-1 3, 1 4は、それぞれ水の体積弾性係数が全応力および間隙水圧挙動に及ぼす影響を示しており、各図中に示す記号○は、間隙水圧測定実験結果を非常に精度良く評価したものであり、すなわち前章において実験的に実施された繰り返し荷重を受ける水の水圧と軸ひずみの関係をモデル化した式(10)を用いた結果であり、記号●は一般的に使用されている水の体積弾性係数2000 N/mm²を全繰り返し経路で適用した結果である。

図-1 3に示す全応力についてであるが、荷重の荷重および除荷ともに水の体積弾性係数を2000 N/mm²とした場合には、除荷時のひずみの回復とともに緩やかな全応力の低下を示しており、図-3に示した一般的傾向である原点指向を示している。一方、本実験結果と非常に精度の良い一致を示したモデル化した体積弾性係数を適用した場合には、荷重の除荷とともに急激な全応力の低下を示し、ひずみの回復現象は殆ど生じていない。このような傾向は、

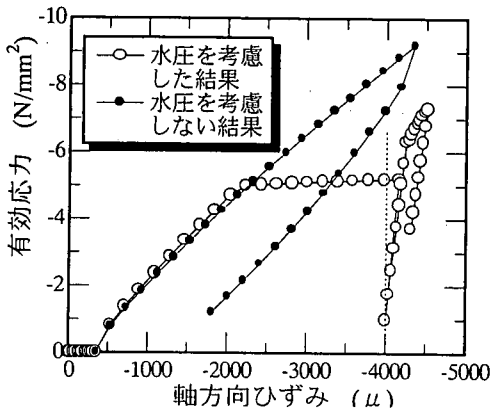


図-15 有効応力に及ぼす間隙水圧の影響

図-14に示す間隙水圧についても見受けられる。この両者の現象の違いは、単に荷重の除荷時における水の体積弾性係数の値のみにより生じているわけである。したがって、本実験のような荷重の除荷時に生じる全応力の急激な低下は、水の体積弾性係数の影響であり、言い換えるならば、除荷時以降の荷重の繰り返しにおいて水の体積弾性係数が載荷時よりも大きくなることにより、コンクリート全体の剛性が増加するというような繰り返し荷重を受ける水の挙動の影響であると言えることができるわけである。このことはすなわち、部分的に水で飽和されたコンクリートの挙動を詳細に評価するためには、水の挙動も詳細に評価しなければならないということである。

そして、水の挙動をより明確に表わしたものが、図-15である。同図は、有効応力と軸ひずみの関係を表わしており、間隙水圧の影響を明確にするために間隙水圧を考慮しない結果も併せて示している。図中の記号●は水圧を考慮しない結果、○は水圧を考慮した結果を示している。この図から、水圧を考慮した結果は、間隙水圧が発生する2000 μ 以後のひずみ域では、有効応力の増加は殆ど無く外力の相当分を間隙水圧が負担しており、水圧を考慮していない結果と全く異なった傾向を示している。また、荷重除荷後の挙動も両結果で全く異なっており、間隙水圧はコンクリート応力に多大な影響を及ぼしていることが再確認されるであろう。

5. 結論

本研究では、荷重履歴による間隙水圧特性の詳細な評価を行うことを目的として、荷重の載荷時と除荷時において間隙水圧はどのような相違を示し、それはどのようなメカニズムで生じるのかを実験および解析的に評価した。まず、前報で報告した横方向変位拘束型である一次元圧密状態を模擬した間隙水圧測定用セルを用い、載荷材齢をパラメータとした実験を実施し、荷重載荷時と除荷時の間隙水圧特性を論じるとともに実験パラメータが間隙水圧特性に及ぼす影響を検討した。そして、筆者等が構築した水・コンクリート骨格連成解析手法を時間依存型挙動に対しても適用可能なように拡張し、繰り返し荷重下のコンクリート応力に及ぼす間隙水圧の影響評価を解析的にも実施した。以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

- (1) 荷重の載荷と除荷時では、間隙水圧経路は全く異なり、荷重の除荷時には間隙水圧の急激な低下が生じ、これには水の挙動が大きく関与している。
- (2) 荷重の載荷と除荷時では、全応力経路は全く異なり、荷重の除荷時には全応力の急激な低下が生じ、これには水の挙動が大きく関与している。
- (3) 水の挙動は、水の繰り返し荷重下において荷重の載荷と除荷では全く異なり、除荷時の体積弾性係数は載荷時の約10倍である。
- (4) 拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法は、時間依存挙動を比較的精度良く評価可能なものである。
- (5) 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、コンクリート応力に対して非常に大きな影響を及ぼす。

参考文献

- 1) Bazant, Z. P. and Wittmann, F. H., ed.: Creep and Shrinkage in Concrete Structures, John Wiley & Sons, 1982.
- 2) 大下英吉, 田辺忠顕: 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.
- 3) 大下英吉, 田辺忠顕: 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.
- 4) 大下英吉, 田辺忠顕: 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.
- 5) 石川靖晃, 大下英吉, 阿部博俊, 田辺忠顕: 時間依存挙動に対する若材齢コンクリートのモデル化, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.123-133, 1995.
- 6) 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.
- 7) 加藤克規, 笠井哲郎, 大下英吉: 水和反応によるクリープ特性としての自己収縮に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vo.20, No.2, pp.787-792, 1998.
- 8) 石川靖晃, 菊川浩治, 田辺忠顕: 遷移材齢時におけるコンクリートの時間依存挙動のモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vo.18, No.1, pp.681-686, 1996.

(1998. 9. 2 受付)

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON PORE WATER PRESSURE OCCURRING IN CONCRETE SUBJECTED TO CYCLIC LOAD IN PRE-PEAK REGION

Hideki OSHITA and Yasuaki ISHIKAWA

The experimental and analytical study on the detailed estimation of the pore water pressure occurring in concrete subjected to the cyclic load as a porous permeable material, which is partially saturated with water, was performed. In the experimental estimation, at first, the measurement of pore water pressure was performed due to the pore water pressure cell which is assumed to be one dimensional consolidation and then the characteristic of pore water pressure under cyclic load was examined. In the analytical estimation, the coupled model with water and concrete solid which is expanded such as able to apply to the time dependent behavior was developed and then the effect of pore water pressure on concrete stress under cyclic load was examined analytically.