

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

大下英吉¹・田辺忠顕²

¹正会員 工修 広島大学助手 工学部土木工学科 (〒724 広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋千種区不老町)

本研究は、コンクリートの応力特性に及ぼす間隙水圧の影響に関するメカニズムの解明を実験的に行うことを目的として、間隙水圧特性に及ぼす各種要因の影響に関する実験的検討を試みたものである。実験では、コンクリートの材令、含水率、損傷の程度をパラメータとしたコンクリート応力、間隙水圧等の測定を行い、各パラメータが及ぼす影響について論じ、間隙水圧に及ぼす主要因の決定を行った。

Key Words : pore water pressure, porous material, water content, effective stress, water migration total stress

1. はじめに

コンクリート中の水分移動が、大きな影響を及ぼしていると考えられる事象の代表例は硬化コンクリートのクリープ特性¹⁾であるが、若材令のコンクリートの物性^{2), 3), 4)}に関しては、その影響の度合がより大きいものと考えられるようになって来た。また、含水率の大きな供試体では曲げあるいはせん断強度が大きく低下するという報告がなされており、鳥取大学で行われたせん断強度試験⁵⁾では、内部に水分を余り含まないものに比べ、内部に水分を含むとせん断強度が大きく低下するということが報告されている。Mихайлов⁶⁾らは、含水率を変数としたコンクリートの一軸圧縮強度試験を行った結果、含水率が増加するにつれ強度は指数的に減少するという報告をしている。この明確な原因は、おそらくコンクリート内部における水分移動の影響であるものと考えている。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いのであるが、その水分移動に関して定量的評価を行った研究は殆どなく、コンクリート内部を組織する微細な空隙内部に発生する間隙水圧を測定した事例は無いものと思われる。上記の実験に鑑みれば、間隙水圧の実測や水分移動の定量的評価がコンクリートの物性の解明に不可欠であるものと考えられる。更に、現在問題となっている原子力発電所から生成される放射性廃棄物の処理方法に関しては、コンクリート中の水分拡散問題が、新たな視点から見直されつつある。現在、放射性廃棄物の処理方法としては、放射性の低い廃棄物に関してはセメント、アスファルトあるいはプラス

チック等により固化した後に、ドラム缶詰め状態で保存することが一般的であるが、詳細な水分移動モデルの構築がなされなければ、その安全性の確保は不確実となるであろう。この状況は、放射性廃棄物の処理のみに留まるものではなく、大深度地下空間に建造されたコンクリート構造物やコンクリートを主体とした海洋構造物など、土圧や水圧などが、主たる外力となり、それらの構造物の設計に際して、十分な安全性を確保するとすれば必ず解決しなければならない問題と言える。

本研究では、コンクリート内部で荷重の増加にともなう間隙水圧がどの程度発生し、それはどのような理論で推定できるのか検討を行うことにした。まず、本報告では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するとともに、間隙水圧に影響を及ぼす主要因の決定を行うこととした。実験は、間隙水圧が比較的簡単に測定される三軸完全非排水状態にて実施した。また、間隙水圧を発生させる主要因を決定するために、実験パラメータに、間隙水圧測定材令、水中養生期間、処女載荷応力導入材令および処女載荷応力比（導入応力/コンクリート強度）を設定し、各パラメーターが間隙水圧に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

(1) 間隙水圧測定用セルの考案

本実験を行うためには、まず第一に新たな間隙水圧測定装置を開発する必要があった。勿論土質材料

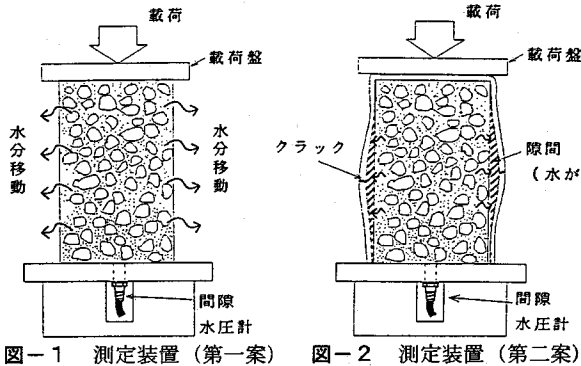


図-1 測定装置 (第一案) 図-2 測定装置 (第二案)

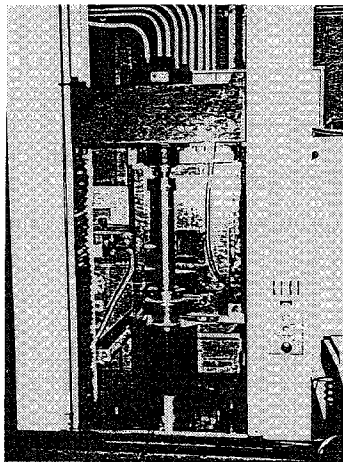


写真-1 载荷装置

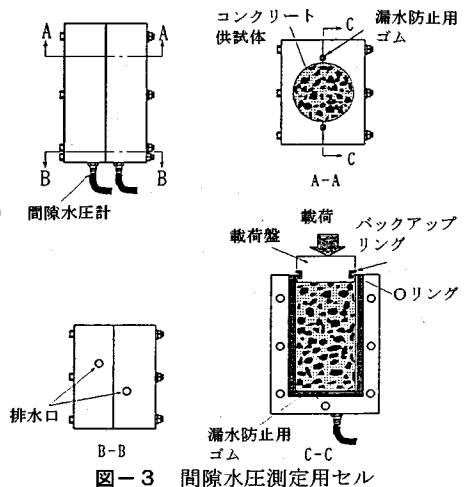


図-3 間隙水圧測定用セル

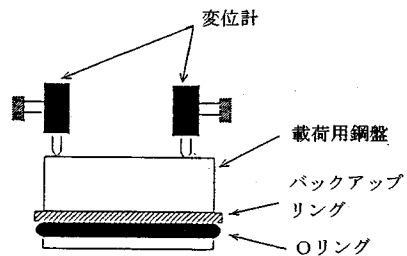


図-4 载荷用鋼盤の形状と漏水防止材料の配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s_2/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	10±2	2.5±1	60	54	226	377	906	732

などに対しては、定評のある測定装置が存在しているが、コンクリートに対しては皆無の状態であったのである。

まず、図-1に示すようなφ10×20cmのコンクリート供試体底面に間隙水圧計を取り付けただけで他の実験的配慮は何も行わず、一軸排水状態にてコンクリート供試体上面を図に示すように载荷することにより間隙水圧測定実験を行った。その結果、载荷荷重の増加にともなって供試体側面から外部への水の流出が卓越し、間隙水圧計は殆ど何も値を感知しなかった。すなわち、コンクリート内部の水がある圧力を持つと、圧力が低くさらに経路が最も短い場所すなわち供試体側面へと水が移動するだけであることが判明した。

そこで次に、図-2に示すように供試体側面から外部へ水が排出されないようにするため、コンクリート供試体外表面を水中ボンドにてコーティングした実験を行った。しかし、この場合にも水中ボンドコーティング材料が脆性的な挙動を示し、同図に示すように両者の境界に水が浸み出し、水中ボンドに入ったクラックから水が外部へと排出され、先の実験と同様な結果となった。水中ボンドコーティング材料は、一般に湿った物との接着性が良いと言われているが、固化した後は脆性的挙動を示し、間

隙水圧測定が可能とはならなかったのである。

そこで、最終的に図-3に示す特殊なセルを作成し、セルと供試体との界面にシリコンを添付して界面をコーティングし間隙水圧測定実験を行った。その結果、間隙水圧計は圧力を感知するようになった。このセルは、二つの厚肉の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。したがって、供試体は横方向の変位が拘束され(三軸状態)、また完全に非排水な状態をつくれるようになっていく。まず、横方向の変位が拘束されているかどうかのチェックを行うため、水中養生を行った供試体の周方向にひずみゲージを対角に4枚張付け、実際の間隙水圧測定実験を行う材令と同じ材令である3および7日において供試体をセル内にセットし上面から载荷を行った結果、各ひずみゲージともその値は約10μであり、横方向の変位が殆ど生じないことが確認された。また、実際実験を行った結果、非排水状態が実験の間保たれていることも確認された。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(供試体断面積の1%)に取り付けた間隙水圧計によって測定した。

表-2 供試体の養生と処女載荷

試験体名	供試体作成から間隙水圧測定実験までの供試体の処理方法	処女載荷 応力比
III1-0-0	打込み 0 → 脱型 1 → 気中養生 2 → 載荷 3	0 %
III1-0-60	打込み 0 → 脱型 1 → 処女載荷 応力導入 2 → 間隙水圧 測定 3	60 %
III1-0-90	打込み 0 → 脱型 1 → 処女載荷 応力導入 2 → 間隙水圧 測定 3	90 %
III1-2-0	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 載荷 3	0 %
III1-2-60	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 載荷 3	60 %
III1-2-90	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 載荷 3	90 %
VII3-2-0	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 気中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	0 %
VII3-2-60	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 気中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	60 %
VII3-2-90	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 気中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	90 %
VII3-4-0	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 水中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	0 %
VII3-4-60	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 水中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	60 %
VII3-4-90	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 水中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	90 %
VII3-6-0	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 水中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	0 %
VII3-6-60	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 水中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	60 %
VII3-6-90	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 処女載荷 応力導入 3 → 水中養生 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	90 %
VII5-4-0	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	0 %
VII5-4-60	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	60 %
VII5-4-90	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	90 %
VII5-5-0	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	0 %
VII5-5-60	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	60 %
VII5-5-90	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	90 %
VII5-6-0	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	0 %
VII5-6-60	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	60 %
VII5-6-90	打込み 0 → 脱型 1 → 水中養生 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 載荷	90 %

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 10～30 kgf/cm² 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供試体底面を通して通じておらず供試体底面に二つの間隙水圧計をつなぐ水が溜まっていないこと、および供試体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。また、供試体の軸方向変位は、供試体表面が湿った状態であるため、図-4 に示す載荷用鋼盤に取り付けた変位計により測定した。

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水セメント比を60%とした。さらに、単位水量、細骨材率は所定のスランプが出るように設定した。なお、コンクリートの一軸圧縮強度は材令3日において108.1 kgf/cm²、材令7日において179.0 kgf/cm²である。

この間隙水圧測定装置により計測される圧力は、コンクリートが一般に不飽和材料であるため間隙水

圧と間隙空気圧である。厳密的には、これらを区別して測定することが望ましいものと考えられるが、本論文においては、その体積弾性係数の違いから、測定圧（間隙水圧+間隙空気圧）に対する間隙空気圧の割合は小さいものと考え、測定圧は全て間隙水圧とみなすことにした。

(2) 載荷方法

載荷装置は、25 t 万能試験機であり、写真-1 に示すようにセルが設置されている。載荷は、供試体上部に設置した載荷用鋼盤を介して軸方向に圧縮載荷し、間隙水圧が計器許容能力の約50～80%になるまで行った。したがって、実験結果に示す全応力の最大値は破壊点を示すものではなく、応力経路内のある一つの状態である。なお、載荷用鋼盤下部には、図-4 に示すようにセルと載荷用鋼盤からの漏水を防止するために、Oリングとバックアップリングを配置してある。なお、載荷は、載荷速度0.02mm/secにて行われた。

(3) 供試体の養生方法および処女載荷材令

間隙水圧測定用供試体は、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、養生方法、

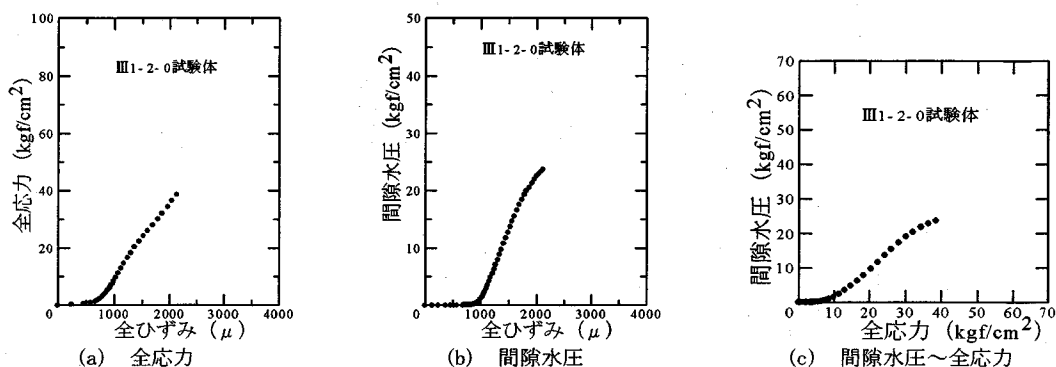


図-5 間隙水圧発生の一般的傾向 (Ⅲ1-2-0試験体)

期間、処女載荷の有無などのパラメータを変化させたものである。例えば、試験体Ⅲ1-0-90では材令1日の時点で一軸圧縮強度の90%に対する応力(処女載荷応力)を導入し、処女載荷応力導入後直ちに除荷し気中養生を行ったものである。なお、各試験体に対するこれらの養生方法と処女載荷材令の詳細は、同表に示されている。また、コンクリート供試体の養生については、水中養生期間中は20℃の水中で養生を行い、気中養生期間中は雰囲気温度20℃、湿度50%の恒温室にて養生を行った。

(4) 実験パラメータ

実験パラメータは、表-2あるいは試験体番号に記載されているように載荷材令、処女載荷応力導入材令、水中養生期間および処女載荷応力比(導入応力/材令における一軸圧縮強度)の4種類である。ここで、同表に示されている試験体名の各記号あるいは数値の意味を、試験体Ⅲ1-0-90を例に取り説明すると、以下のようになる。

- Ⅲ: 載荷材令 (日)
- 1: 処女載荷応力導入材令 (日)
- 0: 水中養生期間 (日)
- 90: 処女載荷応力比 (%)

3. 変形に伴う間隙水圧発生の一般的傾向

図-5は、Ⅲ1-2-0試験体に対する実験結果を表しており、同図(a)は全応力～全ひずみ関係、同図(b)は間隙水圧～全ひずみ関係および同図(c)は間隙水圧～全応力関係をそれぞれ表している。

まず、本実験の範囲内で生じる間隙水圧の最大値は、同図(b)に示されるように約25 kgf/cm²となっており、この値は、同図(a)に示される全応力すなわち載荷応力の最大値40 kgf/cm²の約63%をも占めていることがわかる。このように、発生する間隙水圧は全応力に対して非常に大きな割合で発生しており、さらに同図(c)に示される間隙水圧～全応力関係から間隙水圧は全応力の増加に対してほぼ直線的

に増加していることがわかる。

次に、同図(a)の全応力～全ひずみ関係に示されるように、その勾配には一つの変曲点が存在する。その変曲点よりも低ひずみ域では、同図(b)の間隙水圧～ひずみ関係に示されるように間隙水圧がほとんど発生しないか、あるいは非常に緩やかな勾配を持ち変曲点における間隙水圧の値も非常に小さい。それ以後のひずみ域では、同図(b)に示されるように間隙水圧がほぼ直線的に増加している。さて、変曲点の物理的意味であるが、後にも詳述するように養生期間中に水和反応によって形成される内部空隙の応力状態の負圧の大きさを示しているものと思われる。すなわち、全応力～全ひずみ関係は、荷重載荷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載荷応力の一部とが打ち消しあう段階

$$D = D' - K_{init} \quad (1)$$

D : コンクリート全体の弾性係数

D' : コンクリート骨格の弾性係数

K_{init} : 負圧を示す内部空隙の弾性係数

と供試体内部で水分の移動が完全に生じる段階

$$D = D' + K_{L+A} \quad (2)$$

D : コンクリート全体の弾性係数

D' : コンクリート骨格の弾性係数

K_{L+A} : 液相および気相の体積弾性係数

に別れるものと思われる。従来は、式(1)の段階を無視して式(2)の段階のみで応力～ひずみ関係を論じていたが、式(1)は自己収縮あるいは自己応力などを解明する場合には、最も大きな注目点になるものと思われる。

以上のように、発生する間隙水圧は全応力に対して非常に大きなものであり、さらに間隙水圧を測定することにより、養生中に生じる空隙の負圧状態をある程度定量的に評価することが可能であるものと思われる。

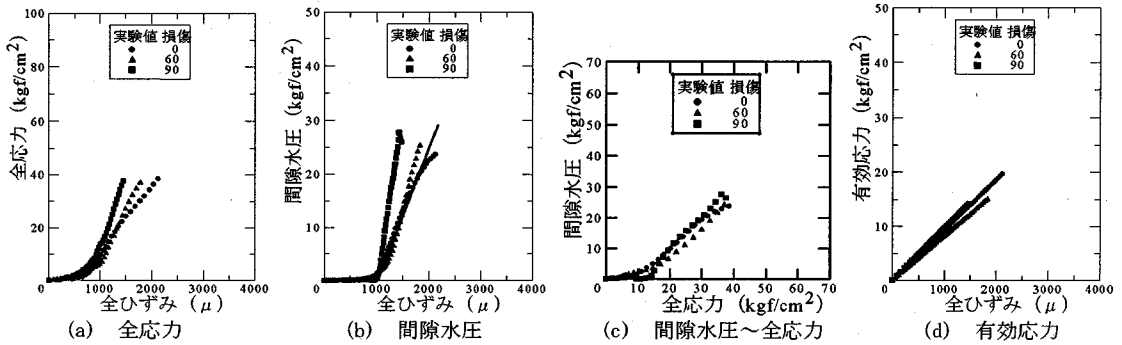


図-6 処女載荷応力比による比較 (Ⅲ1-2試験体)

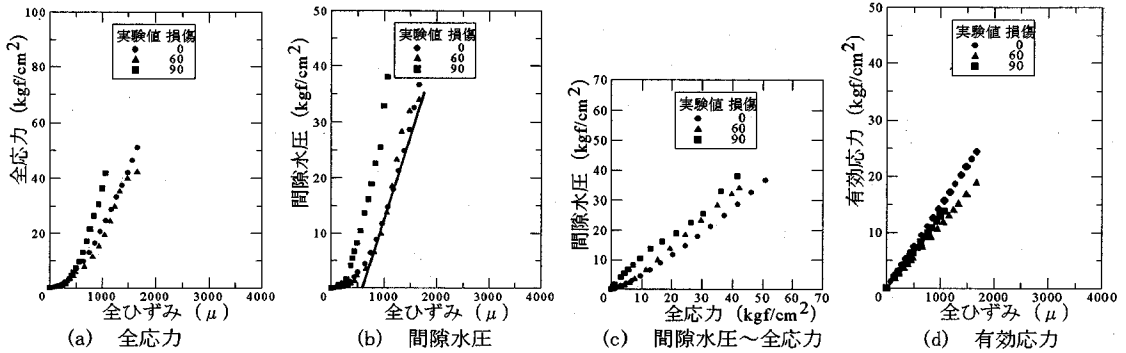


図-7 処女載荷応力比による比較 (Ⅶ3-6試験体)

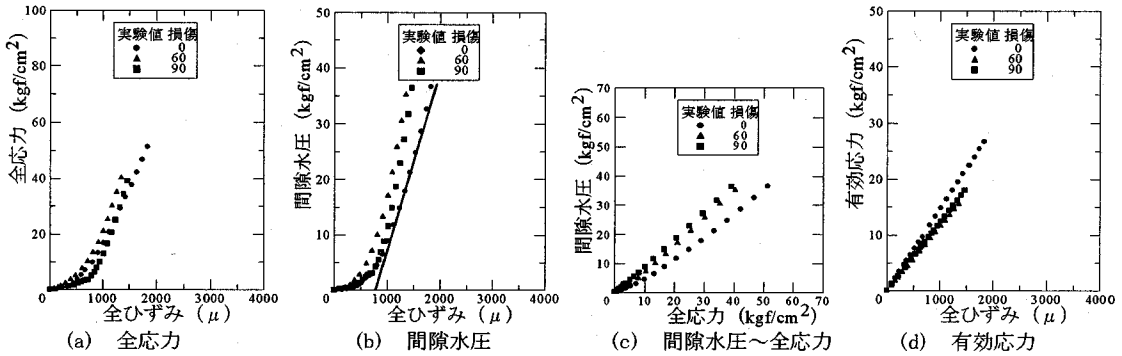


図-8 処女載荷応力比による比較 (Ⅶ5-6試験体)

次章では、これら間隙水圧の発生に関与すると思われる処女載荷応力比、水中養生期間、処女載荷応力導入材令および載荷材令などの各パラメータが間隙水圧発生に及ぼす影響を検討し、さらに各パラメータの中から主要因の決定を行うことにする。

4. 水圧を発生させる主要因の決定

本節では、①処女載荷応力比、②水中養生期間、③処女載荷応力導入材令および④載荷材令などの各パラメータ毎に各シリーズの間隙水圧特性を比較検討し、間隙水圧に及ぼす主要因の影響の程度について検討する。

(1) 処女載荷応力比の影響

図-6~8は、表-2に示す全期間水中養生であるⅢ1-2、Ⅶ3-6およびⅦ5-6に対する結果である。なお、各図の(a)は全応力~全ひずみ関係、(b)は間隙水圧~全ひずみ関係、(c)は間隙水圧~全応力関係、および(d)は有効応力~全ひずみ関係をそれぞれ示しており、各図(b)の間隙水圧~全ひずみ関係図には、下式に示す骨格の非圧縮性を仮定した完全飽和水圧曲線を描いている。

$$p = K_V \times e_V \quad (3)$$

ここで、 p : 間隙水圧 (kgf/cm²)

K_V : 水の体積弾性係数 (kgf/cm²)

e_V : 体積ひずみ (全ひずみ)

表-3 間隙水圧発生率

試験体番号	間隙水圧比	試験体番号	間隙水圧比	試験体番号	間隙水圧比						
III1	1	1.00	VII3	1	1.00	VII5	1	-			
	-0-	2		2.64	-2-		2	1.34	2	1.00*	
		3		3.31			3	1.02	3	1.29*	
		1		1.00			1	-	1	1.00	
	-2-	2		1.03	-4-		2	1.00*	-5-	2	1.40
		3		1.35			3	1.44*		3	1.47
				1	1.00		1	1.00			
				-6-	2	1.19	-6-	2	1.26		
					3	1.35		3	1.37		

なお、以下の説明で出てくる損傷の程度とは、処女載荷応力比の程度を称したものである。

まず、ほぼ全シリーズの試験体において、各図(a)および(b)の全応力～全ひずみおよび間隙水圧～全ひずみ関係に示すされるように、一つの変曲点が存在する。この変曲点の位置は、内部に発生した負圧の大きさによるものと考えられることは4節で述べた通りである。図-5から図-8をみると、変曲点となるひずみレベルは、全体的に損傷の程度が大きいほど小さくなっている。これは、損傷を与えることによって供試体外部から水が浸透し易くなり、内部空隙に発生していた負圧が徐々に抜けることによるものと考えられる。また、変曲点後の剛性は、損傷の程度が大きいほど大きくなっていることがわかる。このように、全応力～全ひずみ関係の剛性は上記のように損傷が大きいほど剛性は大きいことを示しているが、コンクリート骨格は、各図(d)の有効応力～全ひずみ関係に示されるように処女載荷を受けていることにより、損傷の程度が大きいほど骨格の剛性は小さくなっている。これらの関係については、6節で詳細な検討を行う。

次に、損傷の程度の違いによる間隙水圧特性は、各図(c)の間隙水圧～全応力関係に示されるように、損傷の程度が大きいほど全応力に対して発生する間隙水圧は大きい。これは、供試体に損傷を与えることで、セメントゲルを構成しているコロイド粒子間の結合力が弱まり、コンクリート骨格が受け持つ応力(有効応力)が小さくなることによるものである。間隙水圧～全応力関係は、次式に示すような一次関数で表すことができ、全応力の増加にともない間隙水圧は直線的に増加することを示している。

$$p = a \times \sigma \quad (4)$$

p : 間隙水圧(kgf/cm²)
 σ : 全応力(kgf/cm²)
 a : 材料パラメータ

そして、材料パラメータ a は、損傷が大きいほど大きくなることが各図(c)から示される。

式(5)に示すように、供試体に全応力として40 kgf/cm²が載荷された場合に生じる間隙水圧を、損傷を与えない場合におけるもので無次元化した値を表-3に示し、上記の関係を再確認する。

$$P_{\sigma=40} / P_{\sigma=40}^0 = 40 \quad (5)$$

$P_{\sigma=40}$: 全応力40 kgf/cm²作用時の間隙水圧

$P_{\sigma=40}^0$: 損傷を与えない試験体の全応力40 kgf/cm²作用時の間隙水圧

この表から、損傷を与えた場合、III1-0試験体を除く全試験体で式(5)で示される間隙水圧比は、1.0～1.5の範囲内にあり、90%の損傷を与えた場合の間隙水圧は60%のものに比べ大きくなっていることがわかる。

(2) 水中養生期間の影響

ここでは、コンクリートの含水率を表わすパラメータに水中養生期間を設定し、含水率が及ぼす影響について検討する。

図-9、10は、それぞれ載荷材令が3日であるIII1-0-0、III1-2-0試験体および載荷材令が7日であるVII3-2-0、VII3-6-0試験体に対する結果である。各図の(a)、(b)および(c)は、それぞれ全応力～全ひずみ関係、間隙水圧～全ひずみ関係および間隙水圧～全応力関係を表わしている。なお、各図(a)の全応力～全ひずみ関係には、各図(b)をもとに間隙水圧がほぼ直線的に発生するひずみを原点として、そこからの全応力～全ひずみ関係の剛性を実線にて表している。

載荷材令が3日の試験体に対しては、図-9(b)の間隙水圧～全ひずみ関係に示すように、水中養生を行わないIII1-0-0試験体では全期間水中養生であるIII1-2-0試験体に比べ、発生する間隙水圧は非常に小さく、またその勾配も小さい。同様なことが、図-10に示す載荷材令が7日であるVII3-2-0試験体に対しても言え、間隙水圧は一端ピークに達した後に急激に低下するという現象を示している。これは、表-4に示すように含水率が小さいことや気中

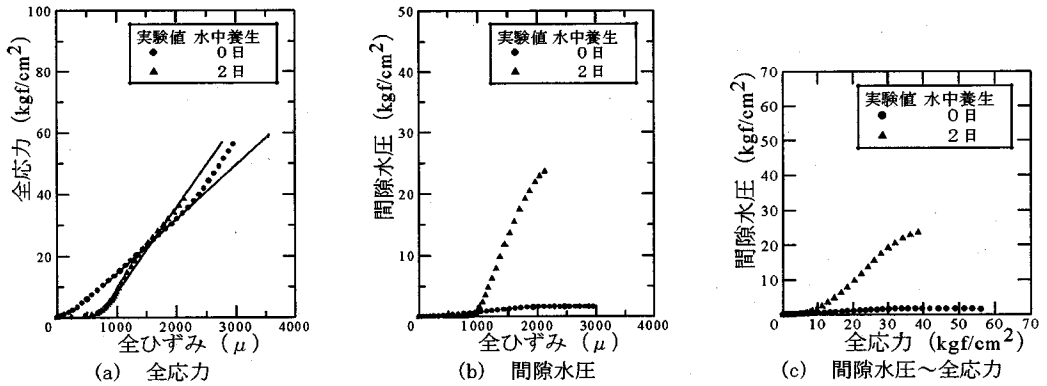


図-9 水中養生期間による比較 (III1-0-0, III1-2-0試験体)

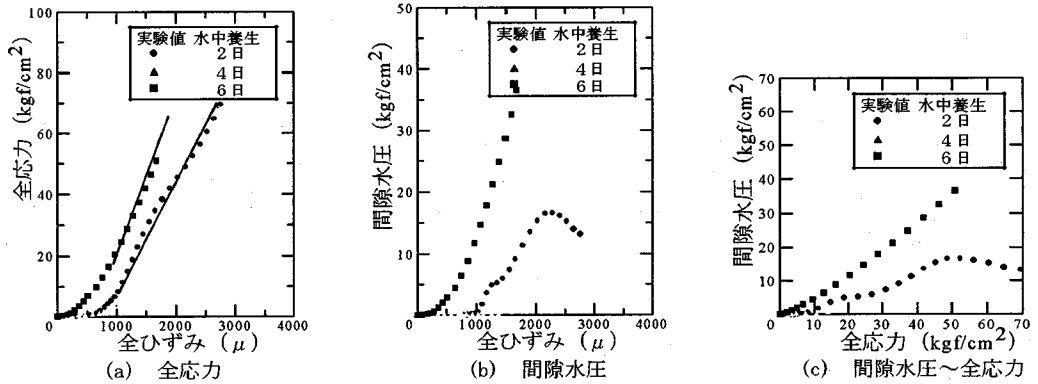


図-10 水中養生期間による比較 (VII3-2-0, VII3-6-0試験体)

表-4 各試験体の含水率

試験体番号	含水率(%)	試験体番号	含水率(%)	試験体番号	含水率(%)			
III1	1 9.409	-2-	1 9.257	-4-	1 -			
	2 9.817		2 9.903		2 10.002			
	3 9.838		3 9.666		3 10.074			
	-2-	1 9.787	VII3	1 -	VII5	1 10.137		
		2 10.264		-4-		2 10.165	-5-	2 10.128
		3 10.372		3 10.169		3 10.472		
		-6-	1 10.078	-6-	1 10.078			
			2 10.306		2 10.256			
			3 10.421		3 10.456			

養生を行うことにより負圧を生じている空隙率が大きいと飽和状態になるまで載荷する段階で多くのマイクロクラックが発生し、空隙中の水がクラック部分に移動することなどによるものと思われる。

また、各図(c)の空隙水圧～全応力関係に示すように、水中養生期間が長い試験体ほど全応力に対して発生する空隙水圧は大きく、また式(4)で表される傾きも大きい。このような傾向は、同図には示されていないがどの損傷の場合にも同様に認められた。これは、表-4に示すように含水率が水中養生期間が長いほど大きくなることによるものと考えられる。さらに、各図(a)の全応力～全ひずみ関係に示されるように、実線で示される剛性は、水中養生期間の

長い試験体ほど剛性が大きくなっていることがわかる。すなわち、次式の関係が成り立っている。

$$D_H + K_H > D_L + K_L \quad (6)$$

high water content low water content

D_H : 骨格の弾性係数 (含水率が大)

D_L : 骨格の弾性係数 (含水率が小)

K_H : 液相と気相の混合体の体積弾性係数 (含水率が大)

K_L : 液相と気相の混合体の体積弾性係数 (含水率が小)

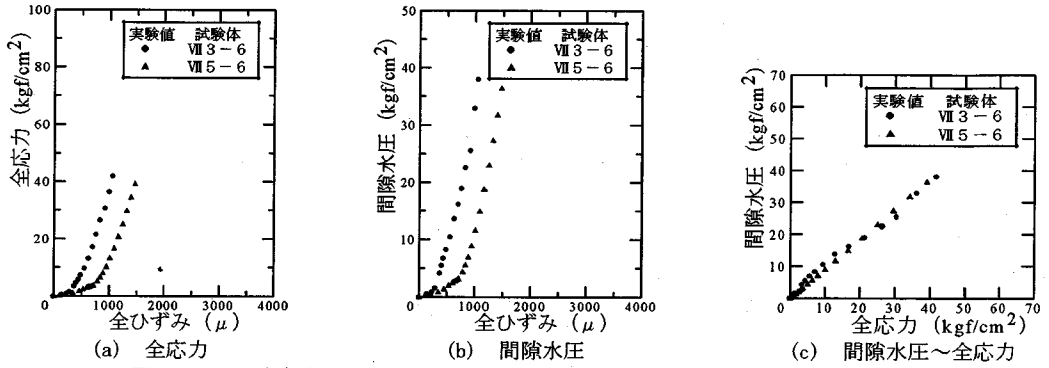


図-1.1 処女載荷応力導入材令による比較 (VII 3-6-90, VII 5-6-90試験体)

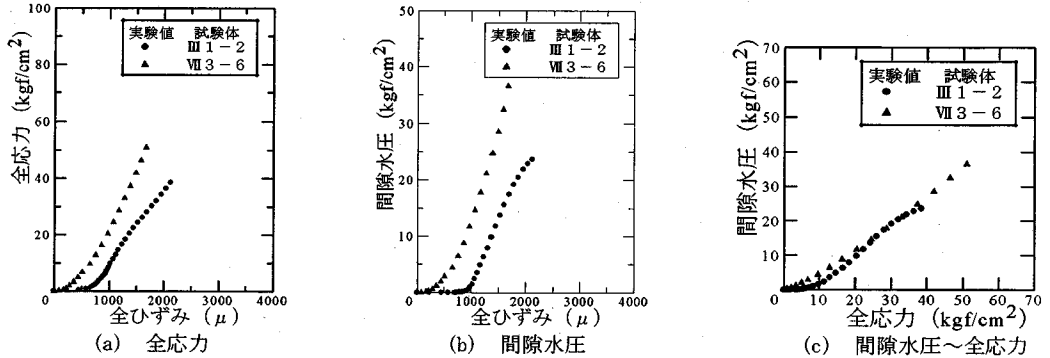


図-1.2 載荷材令による比較 (III 1-2-0, VII 3-6-0試験体)

また、図-9, 10の(a)および(b)の全応力～全ひずみおよび間隙水圧～全ひずみ関係に示されるように、水中養生期間が長いほど変曲点となるひずみ (VII 3-2-0では約1000 μ, VII 3-6-0では約300 μ) が小さくなっていることがわかる。これは、水中養生期間を長くすることによって供試体外部からの水の浸透が多く、これにともない内部空隙に発生していた負圧が徐々に抜けることによるものと考えられる。

以上のことから、水中養生期間すなわち含水率の違いによって、間隙水圧は全く異なることがわかる。さらに、水中養生期間により変曲点となるひずみも異なる。

(3) 処女載荷応力導入材令の影響

図-1.1は、載荷材令が7日、全期間水中養生であるVII 3-6とVII 5-6試験体のうち損傷の程度が90%であるVII 3-6-90およびVII 5-6-90試験体に対する実験結果を比較したものである。同図の(a)および(b)は、それぞれ全応力～全ひずみおよび間隙水圧～全ひずみ関係を示している。

同図(a)の全応力～全ひずみ関係に示されるように、処女載荷応力導入材令によらずVII 3-6-90およびVII 5-6-90試験体とも、剛性はほぼ同じである。しかし、同図からわかるように変曲点となるひずみレベルは、VII 3-6-90試験体の方が小さい (VII 3-6-90では約300 μ, VII 5-6-90では約800 μ)。表-4に示す含水率は両試験体でほぼ同じであるが、早期に処女載

荷を行ったVII 3-6-90試験体では、処女載荷導入後の水中養生期間が長いため、供試体外部からの水の浸透によって供試体全体に生じている空隙の負圧が徐々に低下することに対して、VII 5-6-90試験体では処女載荷導入後の水中養生期間が2日と短いため供試体表面のみの空隙の負圧が低下し、供試体内部における空隙の負圧は殆ど低下しないことを示していると考えられる。しかし、含水率が両試験体でほぼ同程度であることから、その勾配には両試験体で差異は認められない。さらに、同図(c)の間隙水圧～全応力関係から、その勾配は両試験体でほぼ同じであることがわかる。

以上のことから、本研究の2種類の処女載荷応力導入材令では、図-1.1(c)に示す間隙水圧～全応力関係における勾配は、処女載荷応力導入材令によって余り影響されないことが明らかとなった。同図には記載していないが他の損傷の程度においてもほぼ同じとなっている。しかし、変曲点となるひずみは、処女載荷応力導入材令が遅いほど大きくなる。

(4) 載荷材令の影響

図-1.2は、載荷材令が3, 7日であるIII 1-2-0およびVII 3-6-0試験体に対する結果である。同図の(a), (b), (c)は、それぞれ全応力～全ひずみ関係、間隙水圧～全ひずみ関係および間隙水圧～全応力関係を表わしている。

同図(a)の全応力～全ひずみ関係に示されるよう

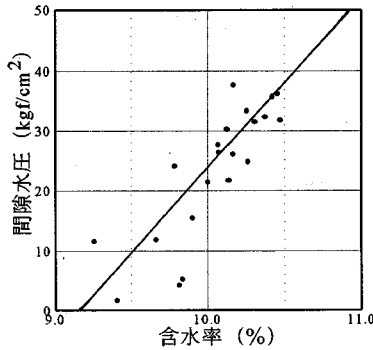


図-1.3 含水率～間隙水圧関係

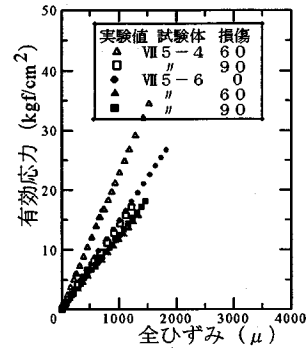


図-1.4 コンクリートの有効応力

に、剛性は載荷材令が7日であるVII3-6-0試験体の方がコンクリート骨格の剛性が大きいことにより大きくなっている。同図(b)の間隙水圧～全ひずみ関係に示されるように、その勾配は両試験体で殆ど差異が無いので、骨格の剛性のみの違いが同図(a)の勾配に表れたものであろう。

変曲点となるひずみは、同図(b)からIII1-2-0試験体では約1000 μ (全応力が約10 kgf/cm²) となった時点、一方VII3-6-0試験体では約500 μ (全応力が約2 kgf/cm²) となった時点であり、載荷材令が遅いほど変曲点となるひずみは小さくなっている。すなわち、載荷材令が遅い場合にはほぼ全応力が発生する時点で、逆に載荷材令が早い場合には全応力がある程度発生した時点で生じるという傾向がある。この原因は、主にIII1-2-0試験体では、水和反応が比較的活発であるため、供試体内部への水の浸透により供試体表面の空隙の負圧は徐々に低下するが、供試体中心部においては空隙の負圧は低下しないものと思われる。これに対し、VII3-6-0試験体では水中養生期間が長いので供試体全体に生じている空隙の負圧が徐々に低下することによるものと思われる。

また、同図(c)の間隙水圧～全応力関係に示すように、両載荷材令により全応力に対して発生する間隙水圧には差異はなく、載荷材令による間隙水圧への影響は殆ど無いものと思われる。

以上のことから、載荷材令が及ぼす全応力に対して発生する間隙水圧への影響は殆ど無いが、変曲点となるひずみは、載荷材令が早いほど大きくなる。

(5) 各パラメータに関する間隙水圧特性のまとめと主要因の決定

上記に記した(1)～(4)のパラメータに関する間隙水圧特性を本研究の範囲内でまとめると以下のようになる。

- ・全応力に対して発生する間隙水圧は、非常に大きなものとなる。
- ・変曲点の存在は、養生期間中に水和反応によって形成される内部空隙の応力状態の負圧の存在を示しているものと思われる。
- ・処女載荷応力比の違いにより、コロイド粒子間の結合力が異なりコンクリート骨格が受け持つ応力

- ・異なるため、間隙水圧はそれに応じ変化する。
- ・水中養生期間すなわち含水率の違いによって、間隙水圧は全く異なる。
- ・本研究の範囲内における2種類の処女載荷応力導入材令では、結合力に関して言えば、あまり差異はないものと思われる。

5. 間隙水圧に及ぼす主要因に関する検討

本節では、4節により選定された、間隙水圧に影響を及ぼす主要因である含水率に関して、実験により測定された間隙水圧を整理し、それに対する検討を加えることとする。

図-1.3は、本研究で実施した間隙水圧測定の結果を含水率を変数として表わしたものである。同図は、含水率と載荷応力が40 kgf/cm²の時点で生じる間隙水圧との関係を表したものである。なお、図中の実線は全試験結果に対する回帰曲線である。

同図から、全体的傾向として、含水率の増加とともに間隙水圧が上昇しており、含水率と発生する間隙水圧との相関係数は約70%となっており、含水率は間隙水圧に及ぼす主要因であることがわかる。

6. コンクリートの有効応力

本節では、載荷材令が7日の試験体のうち水中養生期間が4、6日間のVII5-4およびVII5-6試験体を例に取り、実験により測定された全応力、間隙水圧からコンクリートの有効応力を求め、有効応力特性に関する検討を行うこととする。

有効応力は全応力と間隙水圧との和で定義している。したがって、有効応力は間隙水圧が発生しないひずみ域では、全応力がそのまま有効応力になり、間隙水圧が発生するひずみ域では、次式に示すように全応力と有効応力との和になる。

$$\sigma' = \sigma + p \quad (9)$$

σ' : 有効応力 (kgf/cm²)

σ : 全応力 (kgf/cm²)

p : 間隙水圧 (kgf/cm²)

なお、符号の定義は、応力に関しては引張を正に、間隙水圧に関しては圧縮を正とする。

式(9)によりVII5-4およびVII5-6試験体に対する有効応力を算出すると、図-14のようになる。

同図から、有効応力は当然ではあるが損傷の程度が小さくなるほど大きい。また水中養生期間が短いほど大きくなっている。このことは、損傷が小さく、さらに含水率が小さくなるほど有効応力が大きくなることを表している。すなわち、若材令コンクリート骨格の剛性は、その時点のみで比較するならば、気中養生の存在する場合とか、損傷の無い場合の方が大きいことを示している。気中養生の方が骨格の剛性が大きいことは、硬化過程の途中から乾燥させたコンクリートの強度が湿潤養生を続けたコンクリート強度よりも大きいこと⁸⁾とも一致している。

7. 結論

本研究では、コンクリート中の水分移動を内部に発生する間隙水圧に起因する特性として捉え、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、間隙水圧特性に影響を及ぼす主要因を検討した。そして、コンクリートの応力特性に及ぼす間隙水圧の影響を解明することを試みた。実験は、横方向変位が拘束され三軸完全非排水状態を模擬したセルの中に試験体を配置し、試験体上面を漏水防止としてリングを取り付けた載荷用鋼盤を介して一軸方向に圧縮載荷した。間隙水圧の測定位置は、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り、セル底面に設けた排水口に取り付けた間隙水圧計にて行った。なお、設定した実験パラメータは、載荷材令、処女載荷応力導入材令、処女載荷応力比および水中養生期間の4種類である。以下に、実験から得られた結果をまとめる。

(1) 横変位を拘束した三軸完全非排水状態を模擬したモールドを開発することにより、コンクリートの間隙水圧測定が可能となった。

(2) 全応力に対して発生する間隙水圧は、非常に大きなものとなる。

(3) 変曲点の存在は、養生期間中に水和反応によって形成される内部空隙の応力状態の負圧の存在を示しており、本研究によりその負圧の程度を知ることが可能と思われる。このような養生中の応力状態は、硬化収縮などの研究に大いに役立つものと思われる。

(4) 間隙水圧の勾配は、内部空隙の飽和度や損傷の程度などによって非常に影響される。

(5) 本研究の範囲内では、有効応力の剛性は含水率が小さいほど大きくなる。

(6) 全体を通じて、間隙水圧に関する研究が極めて重要であることが判明した。

参考文献

- 1) Bazant, Z. P., ed.: *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Proc., RILEM International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, Wiley, N.Y., U.S.A., 1982.
- 2) 森本博昭, 岩本隆裕, 栗原哲彦, 小柳治: 若材令コンクリートの圧縮および引張クリープ特性, 中部セメントコンクリート工学論文集, 第8号, pp.17-20, 1993.
- 3) Tanabe, T. and Ishikawa, Y.: Time-Dependent Behavior of Concrete at Early Ages and its Modeling, Proc. of the Fifth International RILEM Symposium, pp.435-452, 1993.
- 4) Ohshita, H., Ishikawa, Y. and Tanabe, T.: Creep Mechanism of Early Age Concrete Modeling with Two Phase Porous Material, Proc. of the Fifth International RILEM Symposium, pp.465-470, 1993.
- 5) 井上正一, 西林新蔵, 熊野知司: 水中環境下におけるRCはりの疲労寿命評価とその設計への適用に関する研究, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, 第5部門, pp.636-637, 1990.
- 6) Михайлов, А. В.: Прочность Бетона в зависимости его влажностной, Бетони Железобетон., p.19, 1974.
- 7) 宮次伸吾: 自己収縮および乾燥収縮によるコンクリートの自己応力に関する研究, 広島大学工学部博士論文, 1992.
- 8) 岩崎訓明: コンクリートの特性 (コンクリート・セミナー①), 共立出版株式会社, 1982.

(1994. 6. 9 受付)

THE EXPERIMENTAL STUDY ON MEASURING PORE WATER PRESSURE OCCURRING IN CONCRETE AND ITS EFFECTS

Hideki OHSHITA and Tada-aki TANABE

The mechanism for the effects of pore water pressure on the property of stress in early age concrete is probed experimentally. Further experimental study for the effects of variable factors on pore water pressure is performed. In the experiment, the measurements of stress and pore water pressure in concrete is carried out, in which the experimental parameters are loading age, water content, degree of damage and age of introduced prestress, and the effects of each factors on pore water pressure are discussed.