

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

大下英吉¹・田辺忠顕²

¹正会員 工博 防衛大学校講師 土木工学教室 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

²正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市中千種区不老町)

本研究は、Post-Peak領域におけるコンクリート内の透水メカニズムを解明することを目的として、側圧を一定とした条件のもとコンクリートに荷重が作用した場合に生じる間隙水圧に関する実験的および解析的検討を行うものである。本研究では、まずコンクリートの Pre-Peakおよび Post-Peak領域において発生する間隙水圧の測定が可能なセルの開発を行った。実験では載荷材齢、養生方法および作用側圧をパラメータとしたコンクリート応力、ひずみおよび間隙水圧等の測定を行い、間隙水圧特性に及ぼす各パラメータの影響についての検討を行うことにより、Pre-PeakおよびPost-Peak領域における間隙水圧特性の違いを議論した。さらに、実験結果に対する解析的評価を行うことにより、間隙水圧の発生メカニズムについての議論も行った。

Key Words : pore water pressure, water migration, total stress, effective stress, lateral pressure, permeability, volumetric strain, pre-peak region, post peak region

1. はじめに

地中コンクリート重要構造物における透水問題が、放射性廃棄物処理施設との関連で提起されてやや久しいが、未だ十分な解決は得られていない。この種の構造物に限らず、海洋コンクリート構造物、地中トンネルなどコンクリート中の水分移動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、さらに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ない。まして、コンクリートの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^{1),2),3),4)}の他には公表されていない。したがって、これらの現象をより正しく理解するためには、間隙水圧の及ぼす影響も含めてコンクリート中の水分移動に関する定性的かつ定量的評価が不可欠であると考えられる。

そこで筆者等は、横方向変位が拘束された条件のもとで荷重の載荷によって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セルの開発を行い、三軸非排水状態における間隙水圧の測定実験¹⁾を行った。さらに、コンクリートや岩盤などの多孔質材

料に対して適用可能な荷重載荷により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^{2),3),4)}を行い、間隙水圧に関する定性的および定量的評価を行った。実験的・解析的検討から、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、コンクリート応力の相当分を分担するものであることが明らかになった。また、間隙水圧を発生させる主要因は含水率であることが判明し、若材齢コンクリート、地中或いは海洋コンクリート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験的および解析的検討から実証されたわけである。さらに、コンクリート養生中に水和反応によって形成される空隙内部の応力状態が負圧であることも明らかとなり、この存在は自己収縮と密接な関連を有するものと考えられる。これらの実験および解析を通して、コンクリート内部に発生する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。しかしながら、上述の実験的研究は、コンクリートの体積ひずみは圧密現象により収縮ひずみのみを呈し、コンクリートの変形挙動はPre-Peak挙動を示すのみである。一般に、コンクリートは、均質材料から荷重履歴により不均質材料に急変する弾粘塑性材料であり、

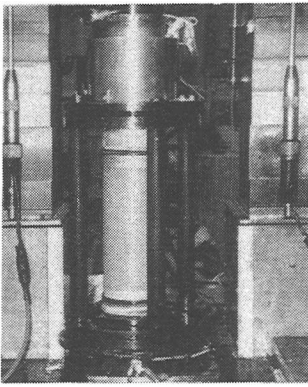


図-1 間隙水圧測定装置の概要

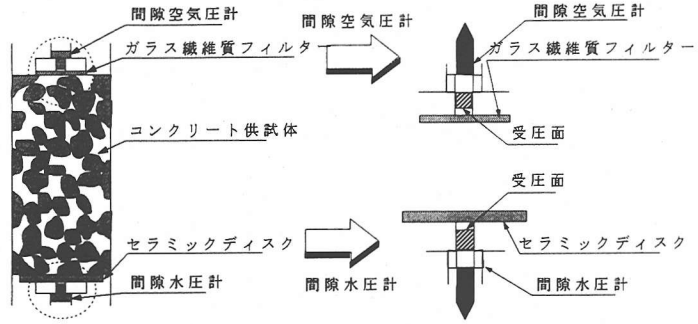


図-2 間隙水圧計と間隙空気圧計の設置図

Pre-Peak領域とPost-Peak領域でその応力あるいはひずみ特性は全く異なる。すなわち、Pre-Peak領域では、セメントペーストが弾性体から塑性体となり多くのマイクロクラックが発生する応力増加および体積収縮領域である。一方、Post-Peak領域では破壊面の形成、成長、そして破壊面のひび割れ幅が急激に増加する応力低下および体積膨張領域である。すなわち、上述の実験はコンクリートのPre-Peak領域における結果を示しており、コンクリート中の水分移動に関する詳細な評価を行うには、コンクリートのPost-Peak領域における詳細な検討も行わなければならない。

本研究では、コンクリートのPre-Peak領域からPost-Peak領域に至る間隙水圧特性の詳細な評価を行うため、既往の研究¹⁾とは異なる境界条件のもとで、コンクリート内部で荷重の増加に伴って間隙水圧がどのようなメカニズムで発生し、それはどのような要因で推定できるのか実験および解析的検討を行うことにした。まず、本報告では側圧一定の条件のもと荷重の荷荷によって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セルの開発を行った。実験は、三軸完全非排水状態で実施し、実験パラメータには荷荷材齢、養生方法および作用側圧を設定した。そして、各パラメータが間隙水圧に及ぼす影響を検討するとともに、構築した統一的な水分移動に関する解析理論^{2),3),4)}により間隙水圧の発生メカニズムの解明を行った。

2. 実験概要

(1) 側圧制御式間隙水圧測定装置の開発

本実験では、まず第一に側圧を制御することのできる新たな間隙水圧測定装置の開発を行う必要があった。このような装置は、土質材料などに対しては

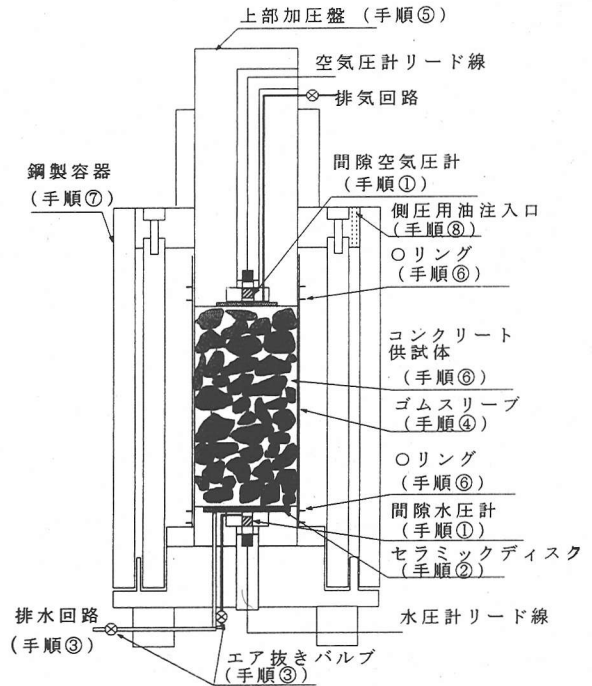


図-3 荷荷までの手順

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
		W	C	S	G
60	54	226	377	906	732

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。

そこで本研究では、地盤工学会が提案している標準的不飽和3軸試験装置をコンクリート材料に適用可能なように高剛性なものに改良して用いることにした。試験装置の概要は、図-1に示す通りである。この装置は鋼製の容器からできており、容器の寸法

表-2 間隙水圧測定用供試体の処理方法

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	側圧 (MPa)
III-0.5-W		0.5
III-1.0-W		1.0
III-2.0-W		2.0
VII-0.5-W		0.5
VII-1.0-W		1.0
VII-2.0-W		2.0
VII-0.5-A		0.5
VII-1.0-A		1.0
VII-2.0-A		2.0

はφ 250×600mmである。コンクリート供試体は、その寸法がφ 100×200mmの円柱供試体であり、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。間隙圧（間隙水圧、間隙空気圧）測定用の圧力計は、図-2に示すように供試体上部および下部に設置され、圧力計と供試体との間にそれぞれガラス繊維質フィルターおよびセラミックディスクが設置されている。ガラス繊維質フィルターは、空気のみを通す材質であるため、コンクリート供試体の間隙空気圧を測定することができる。また、セラミックディスクは、陶器製のものであり水と空気を通す材質であるため、間隙水圧および間隙空気圧を測定することができる。すなわち、コンクリート供試体下部で測定される圧力（間隙水圧+間隙空気圧）から供試体上部で測定される間隙空気圧を差し引くことにより、コンクリート内部の間隙水圧が測定されることになる。なお、鋼製容器の耐圧は10MPaであり、供試体上部および下部に配置されている圧力計の最大測定能力は、それぞれ2MPaおよび10MPaである。

(2) 間隙水圧測定手順

試験体設置から間隙水圧測定までの一連の手順は、以下に示す通りである。なお、図-3にもその手順が示してある。

- ①間隙水圧計および間隙空気圧計のセット。
- ②煮沸により飽和したセラミックディスクのセット。
- ③間隙水圧計およびセラミックディスク用エア抜きバルブを開きエア抜きを行うとともに、作動チェックを行う。
- ④試験体のゴムスリーブをはめ供試体をセットする。
- ⑤上部加圧盤のセット。
- ⑥上部および下部加圧盤にO-Ringをはめる。この時、供試体とゴムスリーブの間に空気もしくはみ水がある場合には完全に外部に追い出しておく。

- ⑦鋼製容器を被せる。
- ⑧側圧用油を注入し、セルを高剛性試験器にセットする。

(3) 供試体の養生方法

コンクリートの配合は表-1に示す通りであり、水セメント比は最大連続空隙径が大きくなるように、すなわち間隙水圧が発生し易いように極力大きな値とした。また、供試体は表-2に示すように、コンクリート打設後1日の時点で脱型され、その後は2日間および6日間の水中養生および気中養生を行った。水中養生は、20℃の水中にて行い、気中養生は雰囲気温度20℃、湿度50%の恒温室にて行った。したがって、水中養生供試体では外部からの水の供給により、供試体半径方向断面内で含水分布がほぼ均一となるが、気中養生供試体では中心部近傍で高含水率となる不均一な分布を示すものと考えられる。しかしながら、本研究で用いた供試体は、その径が高さに比べ非常に小さいため、荷重荷重により半径方向への水分の移動が支配的となり荷重の極初期の段階で含水分布は均一になるものと考えられる。したがって、本研究では供試体の含水分布は断面内で均一であるものと仮定した。

(4) 実験パラメータ

実験パラメータは、荷重材齢、作用側圧および養生方法であり、表-3にそれぞれを示す。なお、各パラメータの設定目的は、以下に示す通りである。

- ①荷重材齢：間隙水圧に及ぼすコンクリート強度の影響評価
- ②作用側圧：間隙水圧に及ぼす拘束効果の影響評価
- ③養生方法：間隙水圧に及ぼすコンクリートの含水率の影響評価

なお、表-3に示す試験体名の各記号、数値の意

表-3 実験パラメータ

試験体名	載荷材齢 (日)	側圧(MPa)	養生方法
Ⅲ-0.5-W	3	0.5	全期間 水中養生
Ⅲ-0.5-W		1.0	
Ⅲ-0.5-W		2.0	
Ⅶ-0.5-W	7	0.5	
Ⅶ-0.5-W		1.0	
Ⅶ-0.5-W		2.0	
Ⅶ-0.5-A	7	0.5	全期間 気中養生
Ⅶ-0.5-A		1.0	
Ⅶ-0.5-A		2.0	

味を試験体Ⅲ-0.5-Wを例に取り説明する。

- Ⅲ : 載荷材齢 3日
- 0.5 : 作用側圧 0.5MPa
- W : 養生方法 水中養生
- A は気中養生を示す。

また、載荷装置は100ton高剛性試験機であり、図-4に示す通りである。載荷実験は変位制御で行い、作用側圧が所定の圧力となった時点で荷重が100tonロードセルを介して軸方向に載荷され、コンクリート応力がほぼゼロ近傍になるまで載荷された。なお、変位速度は0.05mm/sec、ひずみ速度にして250μ/secであり、側圧は実験中において常に一定である。

3. 変形に伴う間隙水圧発生の一時的傾向

地中或いは海洋コンクリート構造物は、土圧や水圧の作用により一般のコンクリート構造物に比べ含水率が高いため、変形挙動に及ぼす間隙水圧の影響は無視できない。そこで本章では、このような高含水率を有するコンクリート中の間隙水圧特性の一般的傾向を示す。対象とした供試体は、本研究の範囲内において含水率が比較的高いⅢ-0.5-W試験体である。Ⅲ-0.5-W試験体は、載荷材齢3日、側圧0.5MPa、型枠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-5に示す。同図(a)は平均応力~全ひずみ関係、(b)は間隙水圧~全ひずみ関係をそれぞれ表しており、平均応力 $I_1/3$ は次式に示す通りである。

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

σ_i : 主応力 ($i = 1, 2, 3$)

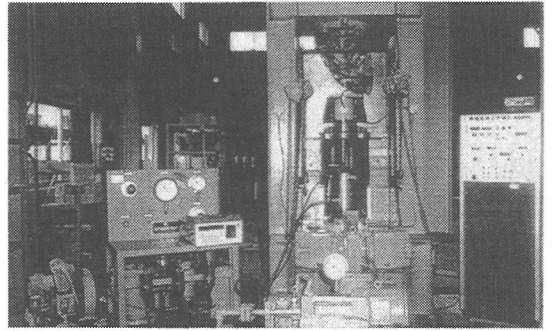
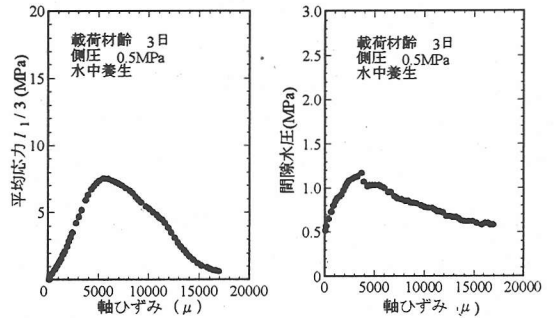


図-4 100ton高剛性試験機



(a) 平均応力~軸ひずみ (b) 間隙水圧~軸ひずみ

図-5 間隙水圧発生の一時的傾向(試験体Ⅲ-0.5-W)

間隙水圧の発生傾向は、図-5(b)に示されるように、載荷応力とともに徐々に大きく(圧縮)なり、その後最大となった後に負(引張)の勾配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(5000μ前後)は、同図(a)に示す平均応力の勾配が緩やかになるひずみ、すなわちコンクリートが塑性状態になるひずみ(約4000μ)から平均応力が最大となるひずみ(約5000μ)の範囲内にある。また、間隙水圧の最大値は約1.2MPaであり、平均応力の約15%となっている。さらに、側圧載荷時に発生する間隙水圧は、側圧とほぼ同じ値であり、コンクリートが水でほぼ飽和された状態になったことを示している。これは、既往の研究^{1),2)}でも述べたように、コンクリートの内部空隙は水和反応により応力状態が負圧となっており、外力の作用により変形が空隙部分で吸収されることによるものである。これらの実測値が、コンクリート内の間隙水圧の実際の値となっていることは、装置の構造から疑いようもないことであって、コンクリート内の間隙水圧がコンクリート応力に対して非常に大きな割合で発生することが実証されたわけである。

4. 変形に伴う間隙水圧特性の検討

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に関する実験的研究は、その実験範囲内でのみ適用が可能である。しかしながら、コンクリート中の水分移動特性を詳細に評価することのできる解析手法により、任意の境界条件にまで適用範囲を拡張させることができる。さらに、解析的研究を併用することにより、実験的研究のみでは評価できない水分移動に関する詳細なメカニズムの解明も可能となる。すなわち、コンクリート中の水分移動特性の詳細な評価を行うには、実験および解析の両面からの検討が必要となる。そこで本章では、まず筆者等が構築した多孔質飽和透水性材料の水分移動に関する詳細な解析理論^{2),3),4)}の概要を簡単に示す。そして、各種パラメータを変化させ荷重の載荷による間隙水圧を測定することにより間隙水圧特性に及ぼす各パラメータの影響についての実験的および解析的な検討を行うことにする。

(1) 多孔質飽和透水性材料の水分移動に関する解析理論^{2),3),4)}

一般に、コンクリートは部分的に飽和された多孔質材料であり、このような材料に外力が作用すると、コンクリート骨格部分には有効応力、間隙部分には間隙水圧や間隙空気圧が発生する。そして、荷重履歴により均質から不均質へと変遷する材料である。このような材料内の水分移動に関する詳細な解析理論は、力の釣合および間隙水の質量保存則を満足するとともに、均質部分および不均質部分を同時に取り扱うことのできるものでなくてはならない。そこで筆者らは、ひび割れ部分における動水勾配および変位の不連続性をマイクロレベルにおいて考慮し、ひび割れを含むコンクリート体のマクロな透水マトリックスおよび弾塑性マトリックスの構築を行い、次に示すような不均質材料としてのコンクリートの水・コンクリート骨格連成解析手法の提案を行った。すなわち、式(2)に境界条件、初期条件および既往の文献に示すひび割れ幅～透水マトリックス、弾塑性マトリックス関係を与えて、節点変位増分 Δu_n と節点間隙水圧増分 Δp_n を未知数とする連立方程式の解を求めれば、コンクリート中の水分移動特性が理論的に求まることになる。

$$\begin{Bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S - \Delta t_n H \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta p_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta f_n + A \Delta T_n \\ W \Delta T_n - f_{pn}^{ext} \Delta t_n - \Delta f_{pn}^{creep} + \Delta g_{pn} + \Delta t_n H p_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、マトリックス K_T, L, S, H, A, W は、それぞれ接線剛性マトリックス、変形および間隙水圧の変化による固体相・液体相の圧縮性の影響、間隙水の流出量および温度変化による固体相・液体相の圧縮性の影響に関するマトリックスである。また、ベクトル $\Delta f_n, \Delta T_n$ は、それぞれ外力、水和反応やクリープによる固体相の体積変化を表すベクトルおよび温度変化を表している。さらに、ベクトル $f_{pn}^{ext}, \Delta f_{pn}^{creep}, \Delta g_{pn}$ は、それぞれ液体相の流出量、液体相のクリープおよび水和反応による体積変化を表すベクトルである。なお、これらのマトリックスおよびベクトルは、それぞれ以下のように表すことができる。

$$K_T = (1 - \xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} B d\Omega \quad (3)$$

$$L = \xi \int_{\Omega} B^T \{m\} N d\Omega \quad (4)$$

$$H = \int_{\Omega} (\nabla N)^T \frac{K}{\rho_w} \nabla N d\Omega \quad (5)$$

$$S = \int_{\Omega} N^T \frac{\xi}{k_f} N d\Omega \quad (6)$$

$$W = \int_{\Omega} N^T \{3(1 - \xi)\alpha - 3\xi\mu\} N d\Omega \quad (7)$$

$$A = (1 - \xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} \alpha N d\Omega \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \{\bar{f}\} &= \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{t\} d\Gamma + \\ &(1 - \xi) \frac{1}{3} \frac{V_C}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{C}{\rho_c} C_H \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} N d\Omega + \end{aligned} \quad (9)$$

$$(1 - \xi) \frac{V_C}{V} \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{\varepsilon^{cr}\} d\Omega$$

$$\begin{aligned} f_p^{ext} &= \int_{\Omega} N^T q / \rho_w d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla N)^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w z d\Omega \\ &+ \int_{\Gamma} N^T \left(\{v\}^T \cdot n \right) d\Gamma \end{aligned} \quad (10)$$

$$f_p^{creep} = \int_{\Omega} \left\{ (1 - \xi) \frac{V_C}{V} - \xi \right\} \{m\}^T \{\varepsilon^{cr}\} d\Omega \quad (11)$$

$$g_p = \int_{\Omega} N^T \frac{V_C}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} C_H d\Omega \quad (12)$$

筆者等が構築した上述の解析理論は、コンクリートや岩盤などの多孔質材料に適用可能な一般性のあるモデルであり、その適用性評価は既往の研究^{2),3),4)}により確認されている。実際に、コンクリート中の水分移動を解析的に評価するためには、コンクリート供試体のモデル化およびコンクリートの力学的特性や透水係数或いは塑性域におけるセメントペース

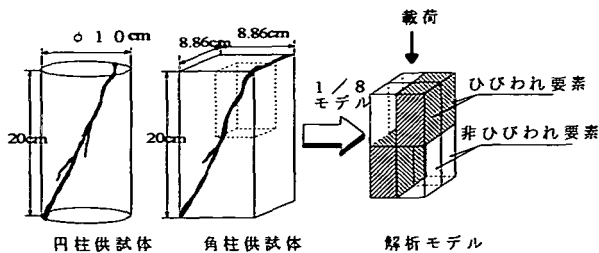


図-6 コンクリート供試体のモデル化

トの初期粘着力, 内部摩擦角などの材料定数を定めなければならない. 以下に, 解析に用いた材料定数を示す.

a) コンクリート供試体のモデル化

コンクリート供試体のモデル化は, 図-6に示す通りである. コンクリート供試体は, $\phi 10 \times 20$ cmの形状寸法をした円柱供試体であり, これを同図に示すように等価な面積を持つ角柱供試体に置き換え, その1/8部分を解析モデルとした. 実験ではピーク荷重以降破壊面となるひび割れが目視により観察されているため, 解析モデルにおいても同図に示すように破壊面となるひび割れを考慮したものとなっている.

b) コンクリートの力学的特性

コンクリートの一軸圧縮強度および弾性係数などの力学的特性には, 表-4に示すように各試験により得られた結果を用いることにした.

c) コンクリートの透水係数

コンクリートの初期透水係数は, J.Murata⁵⁾およびT.C.Powers⁶⁾の研究を参考に, 材齢3, 7日に対応する値を表-5のように決定した.

d) 塑性域におけるセメントペーストの材料特性

本研究における塑性モデルには, Drucker - Pragerタイプ⁷⁾を用いており, 初期粘着力および初期内部摩擦角などの材料定数を決定しなくてはならない. 初期粘着力は, 側圧がゼロの場合では一軸圧縮強度の約1/4²⁾であり, 3軸状態では側圧による拘束効果を考慮したものではなくてはならない. 本研究では, 井上等⁸⁾の3軸圧縮実験結果に対する弾塑性解析を実施し, 初期粘着力を同定した. 同定された初期粘着力は, 側圧が0.5, 1.0, 2.0MPaに対してそれぞれ各材齢の一軸圧縮強度の65, 70, 80%である. また, 初期内部摩擦角および最終内部摩擦角は, それぞれ0°および29°⁸⁾とした.

このような解析モデルおよび材料定数を用いて, 荷重の荷重によってコンクリート内部に発生する間隙水圧に関する解析を行うことにする. そして, 次節では実験結果および解析結果から間隙水圧に対する考察を行うことにする.

表-4 解析に用いる力学的特性

材齢 (日)	圧縮強度(MPa)	弾性係数(MPa)
3	15.3	5.0×10^3
7	21.0	7.5×10^3

表-5 解析に用いる透水係数

材齢 (日)	透水係数(cm/sec)
3	6.66×10^{-8}
7	3.33×10^{-10}

(2) 間隙水圧に及ぼす各実験パラメータの影響

本節では, 間隙水圧に及ぼす荷重材齢, 作用側圧および養生方法などの各実験パラメータの影響に関する検討を実験的および解析的に行うものとする.

側圧荷重時に発生する間隙水圧は, 図-5の高含水状態のコンクリートの一般的傾向に示すようにほぼ作用側圧と同じ値であり, どの作用側圧および材齢においても同一の傾向が得られた. このことは, すなわち, 側圧の作用によりコンクリートが水でほぼ飽和された状態になったことを示しているものと考えられる. そして, 側圧作用後の軸圧縮力により発生する間隙水圧は, 偏差応力の等方圧成分により生じるものであり, 次式により表すことができる.

$$P(\sigma_1 - \sigma_3)/3 = p - p_{\sigma_3} \quad (13)$$

$P(\sigma_1 - \sigma_3)/3$: 偏差応力の等方圧成分により

発生する間隙水圧(MPa)

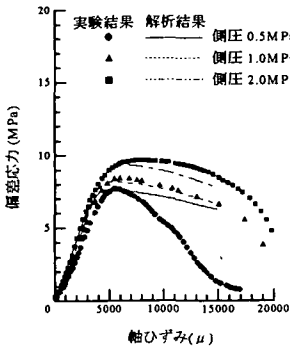
p : 三軸状態により発生する間隙水圧(MPa)

p_{σ_3} : 作用側圧 σ_3 により発生する間隙水圧(MPa)

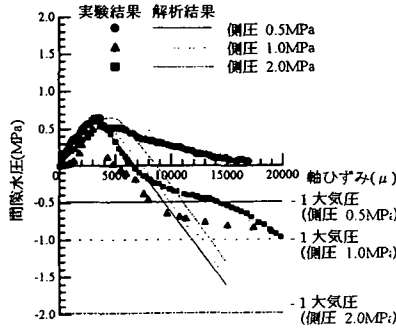
そこで, 以下に示す影響評価では, 偏差応力の等方圧成分およびそれにより発生する間隙水圧に対して検討を行うことにする. なお, 偏差応力の等方圧成分を“偏差応力”と記し, 解析結果は, 図-6に示す解析モデル上面の各要素の結果を平均化したものである.

a) 間隙水圧に及ぼす側圧の影響

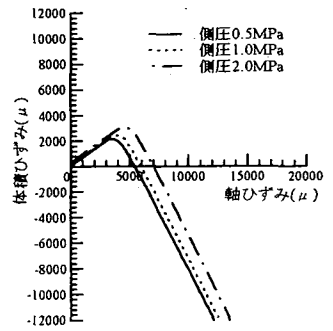
図-7, 8は, それぞれ荷重材齢が3および7日で, 養生方法が全期間水中養生であるIII-0.5, 1.0, 2.0-W試験体およびVII-0.5, 1.0, 2.0-W試験体に対する実験および解析結果を示したものである. 各図中の(a)は偏差応力~軸ひずみ関係, (b)は間隙水圧~軸ひずみ関係, (c)は体積ひずみ~軸ひずみ関係をそれぞれ表している. なお, 図中に示す記号●, ▲および■はそれぞれ側圧が0.5, 1.0, 2.0MPaにおける実



(a) 偏差応力～軸ひずみ

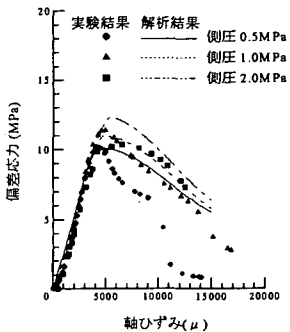


(b) 間隙水圧～軸ひずみ

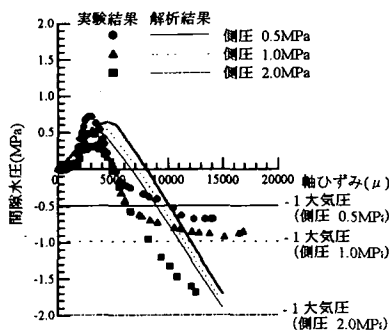


(c) 体積ひずみ～軸ひずみ

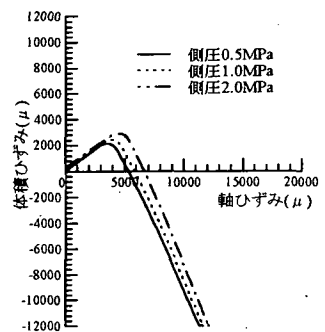
図-7 載荷材齢3日における側圧の比較



(a) 偏差応力～軸ひずみ



(b) 間隙水圧～軸ひずみ



(c) 体積ひずみ～軸ひずみ

図-8 載荷材齢7日における側圧の比較

験結果であり、実線、点線および一点鎖線は解析結果を表している。また、各図(b)には、各側圧におけるマイナス1大気圧(-0.1MPa)軸をそれぞれ実線、点線および一点鎖線で示してある。

まず、どの載荷材齢、作用側圧においても実験結果と解析結果は比較的良好な一致を示しており、Pre-Peak領域までは偏差応力の増大に伴って正の間隙水圧が増加し、その後Post-Peak領域に至ると負の勾配を持ち徐々に低下していき最終的に負圧となる。このような間隙水圧特性を偏差応力と対比して考えると、間隙水圧が最大となるひずみは、各図(a)に示すように偏差応力の降伏ひずみあるいは最大となるひずみにほぼ対応していることがわかる。すなわち、Pre-Peak領域ではコンクリートの体積が収縮することにより正の勾配を持った間隙水圧が発生することに対して、Post-Peak領域では体積が膨張することにより負の勾配を持った間隙水圧が発生することになる。各図(c)に示す体積ひずみの解析的考察からも、間隙水圧はコンクリートの体積変化が支配的要因となって発生することがわかる。

また、Pre-Peak領域における間隙水圧の実験結果と解析結果は比較的良好な一致を示しているが、間

隙水圧の最大値は解析結果では側圧の増加とともに大きくなっていることに対し、実験結果では載荷材齢3日の場合、側圧によらず約0.6MPaの一定値となり、載荷材齢7日の場合、側圧の増加とともに小さくなっている。このような実験結果と解析結果との差異に対する解析的評価を行うと、各図(c)に示すように体積収縮ひずみの最大値が側圧の増加ともなって大きくなっていることから判断すれば、恐らく側圧の増加とともに間隙水圧の最大値は大きくなるものと言えるであろう。すなわち、実験結果においてこのような傾向が表れていないことは、次のような現象が実験中に生じたものと考えられる。

本実験では間隙水の非排水状態を模擬するため、コンクリート供試体表面にゴムスリーブを被せている。このゴムスリーブは土質材料の間隙水圧測定実験で良く用いられており、伸縮性の良い材料である。従って、図-9に示すように体積収縮過程において、コンクリート供試体表面の間隙水圧が作用側圧よりも大きくなるとコンクリート表面から水が排出され、ゴムスリーブとの隙間に間隙水が溜まる恐れがある。もし、このような現象が生じているものとするれば、間隙水が完全非排水状態とならないため、解析結果

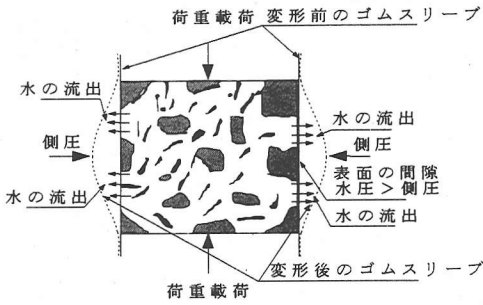


図-9 供試体表面とゴムスリーブ界面 (体積収縮過程)

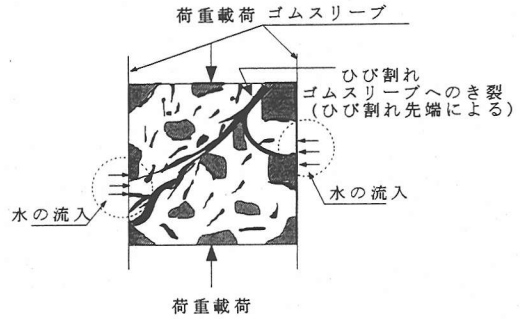


図-10 供試体表面とゴムスリーブ界面 (体積膨張過程)

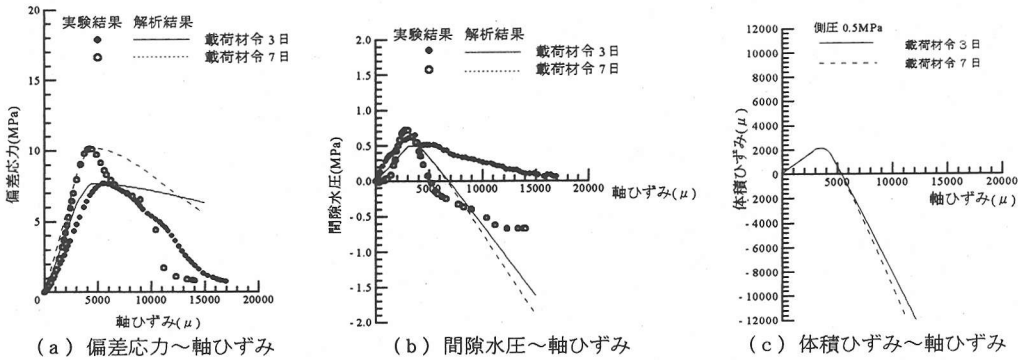


図-11 側圧0.5MPaにおける載荷材齢の比較

のような間隙水圧の最大値と側圧との関係が呈示されないものと考えられる。

また、Post-Peak領域においても、実験結果と解析結果では比較的良好な一致を示しているが、軸ひずみが約10,000 μ 以降においては、解析結果は負の間隙水圧勾配が一定であることに対して、実験結果では負の間隙水圧勾配が急激に小さくなっている。この一つの原因は、水の負圧の最大値はマイナス1大気圧(-0.1MPa)であることによるものである。すなわち、各図(b)に示すように実験結果は-1気圧にほぼ漸近しており、本解析理論の適用範囲がマイナス1大気圧となる約10,000 μ の範囲内であり、それ以降のひずみにおいては水の相転移現象を本解析理論に導入しなければならないのかもしれない。もう一つの原因は、各図(c)に示すように体積膨張ひずみの勾配が一定であることにより、実験中に図-10に示すような現象が生じたものと考えられる。すなわち、破壊面となるひび割れが成長していく体積膨張過程では、ひび割れ先端の鋭利な凹凸部によりゴムスリーブにき裂が生じ、き裂面から側圧用の油がコンクリート供試体に流入し間隙水圧が緩和されるものと考えられ、ゴムスリーブへのき裂発生は実験終了後の目視観察からも確認されている。し

かしながら、図-8(b)の側圧0.5MPaであるVII-0.5-W試験体では、実験結果は上述の現象とは異なりマイナス1大気圧を下回るといふ解析結果に似た現象を示している。コンクリート中の空隙は毛細管空隙であると考えると、メニスカスの影響すなわちLaplaceの式⁹⁾から、毛管径によっては負の間隙水圧となる。例えば、コンクリートの毛管径の平均的な値10~100nm¹⁰⁾を用いて毛管水圧を算出すると-13~-1.3MPaとなり、コンクリート中の間隙水圧がマイナス1大気圧を大きく下回る負圧になる可能性は大きい。今後、よりミクロ的な間隙水圧に関する実験を行い、10,000 μ 以降のひずみにおける詳細な挙動の解明を行わなければならないものと考えられる。

b) 間隙水圧に及ぼす材齢の影響

図-11~13は、それぞれ側圧が0.5, 1.0および2.0MPaであるIII-0.5-WとVII-0.5-W試験体、III-1.0-WとVII-1.0-W試験体およびIII-2.0-WとVII-2.0-W試験体に対する実験結果および解析結果を示したものである。各図中の(a)は偏差応力~軸ひずみ関係、(b)は間隙水圧~軸ひずみ関係、(c)は体積ひずみ~軸ひずみ関係をそれぞれ表している。なお、図中に示す記号●および▲はそれぞれ載荷材齢が3および7日における実験結果であり、実線、点線は解析結果

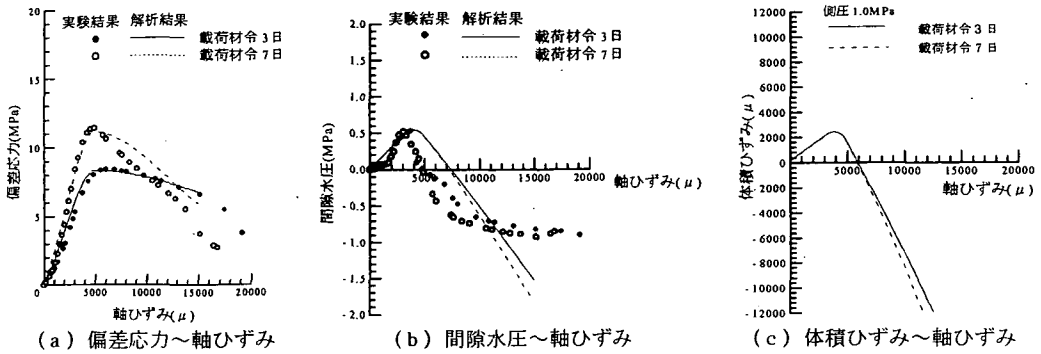


図-1 2 側圧 1.0MPa における載荷材齢の比較

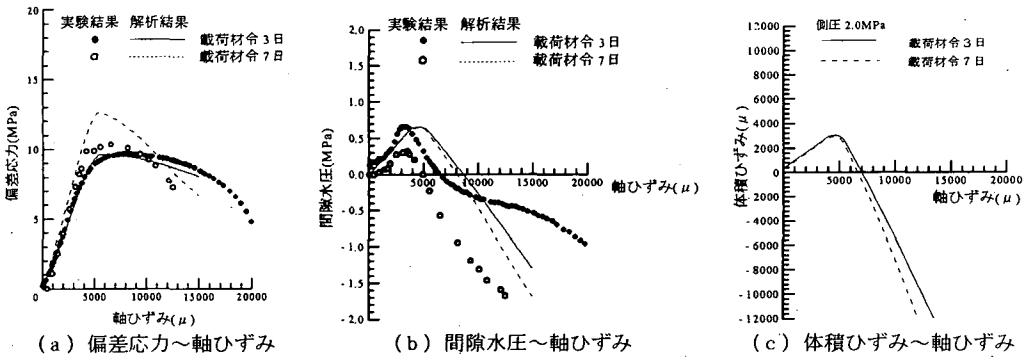


図-1 3 側圧 2.0MPa における載荷材齢の比較

を表している。

まず、各図(a)に示す偏差応力の最大値は、実験結果および解析結果とも当然のことながらどの側圧においても載荷材齢が7日の方が大きい。各図(b)に示す間隙水圧の最大値は、載荷材齢によらずほぼ一定となっている。これは、各図(c)に示すコンクリートの体積ひずみの解析的評価から、Pre-Peak領域における体積収縮ひずみが、載荷材齢によらずほぼ同じであることによるものである。すなわち、コンクリートが飽和に近い状態であれば、間隙水圧の最大値は材齢によらずほぼ一定であると考えられる。

また、載荷材齢による顕著な差異は、各図中(a)に示すように、Post-Peak領域における応力低下は、どの側圧においても載荷材齢3日に比べ7日の方が著しくなっており、脆性的な挙動を示すことである。このような挙動は、間隙水圧にも影響を及ぼしており、各図(b)に示すように間隙水圧が急激に低下していることがわかる。これは、各図(c)に示すコンクリートの体積ひずみの解析的評価から、Post-Peak領域におけるコンクリートの体積膨張ひずみが載荷材齢3日に比べ7日の方が大きくなっており、破壊面となるひび割れが急激に進行することによるものである。なお、実験完了後のコンクリート供試体の

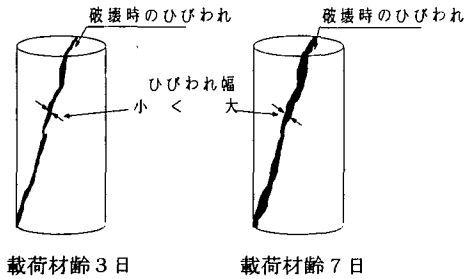
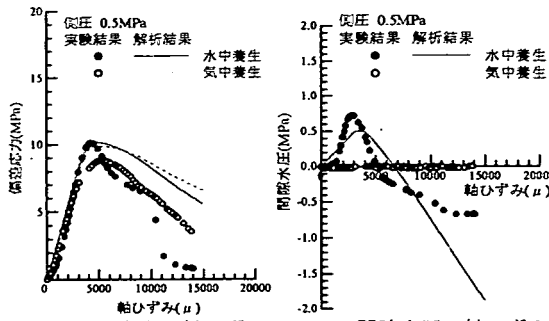


図-1 4 実験完了時の供試体状況

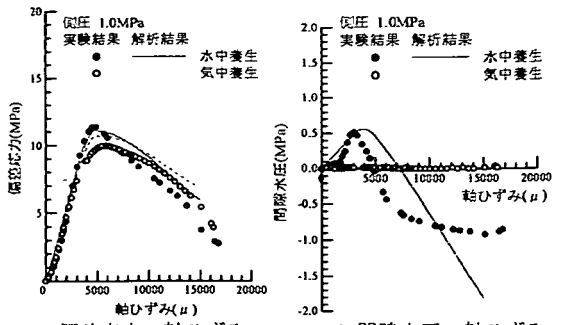
目視観察から、図-1 4 に示すように破壊面となるひび割れ幅が載荷材齢3日に比べ7日の方が非常に大きくなっており、上述の現象を裏付ける結果であると考えられる。

c) 間隙水圧に及ぼす養生方法の影響

図-1 5 ~ 1 7 は、載荷材齢が7日、養生方法が水中養生および気中養生である VII-0.5, 1.0, 2.0-W および VII-0.5, 1.0, 2.0-A 試験体に対する実験結果および解析結果を示したものである。各図中の(a)は偏差応力～軸ひずみ関係、(b)は間隙水圧～軸ひずみ関係をそれぞれ表している。なお、図中に示す記号●および○はそれぞれ水中養生および気中養生における実験結果であり、実線および点線は解析結果を表し



(a)偏差応力～軸ひずみ (b)間隙水圧～軸ひずみ
図-15 側圧 0.5MPaにおける養生方法の比較



(a)偏差応力～軸ひずみ (b)間隙水圧～軸ひずみ
図-16 側圧 1.0MPaにおける養生方法の比較

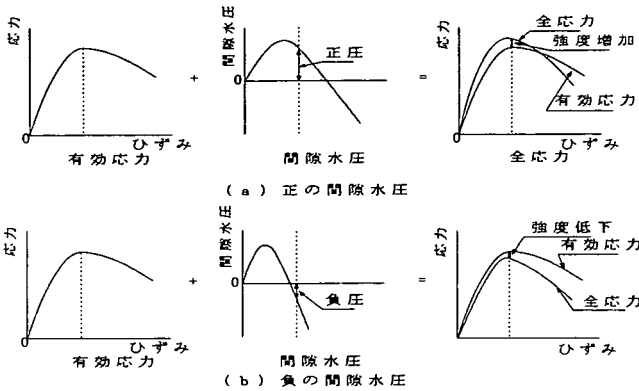
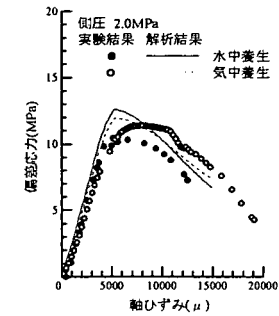


図-18 間隙水圧の符号によるコンクリートの応力特性

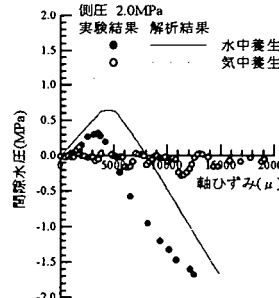
ている。

まず、各図(b)に示す間隙水圧～軸ひずみ関係から、気中養生を行った供試体では間隙水圧は全く発生しないことがわかる。これは、含水率が非常に小さいことによるものであり、筆者等が指摘¹⁾している含水率と間隙水圧の関係とも一致している。従って、気中養生供試体の全応力は、コンクリート骨格に生じる有効応力に等しいことになる。

次に、各図(a)から偏差応力の最大値は、側圧が0.5, 1.0MPaの場合、実験結果および解析結果とも気中養生供試体に比べ水中養生供試体の方が大きい。一方、側圧が0.2MPaの場合には、実験結果では気中養生供試体、解析結果では水中養生供試体の方が大きくなっている。このような現象は、恐らく偏差応力が最大となるひずみにおいて、各図(b)に示す間隙水圧が正圧か、或いは負圧かによって異なってくるものと考えられる。すなわち、本実験のような圧縮状態下では、偏差応力が最大となるひずみにおいて水中養生供試体の間隙水圧が正圧であれば、図-18に示すように骨格の有効応力(圧縮)が間隙水圧により緩和されることにより見かけの骨格強度すなわち全応力が大きくなる。一方、間隙水圧が負



(a)偏差応力～軸ひずみ



(b)間隙水圧～軸ひずみ

図-17 側圧 2.0MPaにおける養生方法の比較

圧であれば、同図(b)に示すように有効応力(圧縮)が間隙水圧により増加されることにより見かけの骨格強度(全応力)が小さくなる。含水によるコンクリートの強度低下¹¹⁾は、岡島による吸水による固体の表面エネルギー低下¹²⁾によるものであると言われているが、コンクリートは固体単体ではなく内部に多くの空隙或いは水隙を含んでいるため、詳細に強度低下を表すには固体の表面エネルギーに上述の現象を考慮する必要があると考えられる。

5. 間隙水圧の最大値に影響を及ぼす要因の検討

前章に示したように、間隙水圧発生に影響を及ぼ

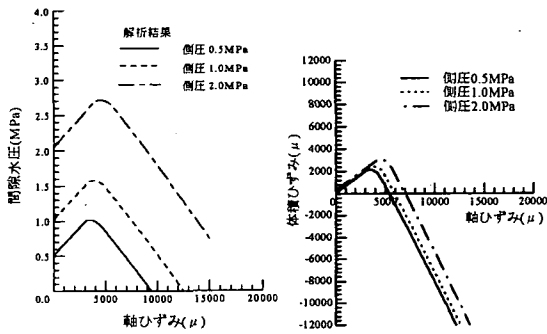


図-19 荷材材齢3日における側圧による解析結果

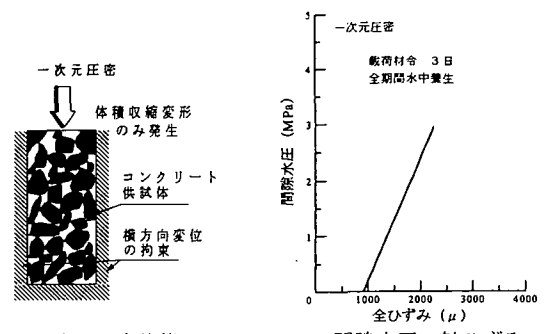


図-20 一次元圧密状態における間隙水圧特性

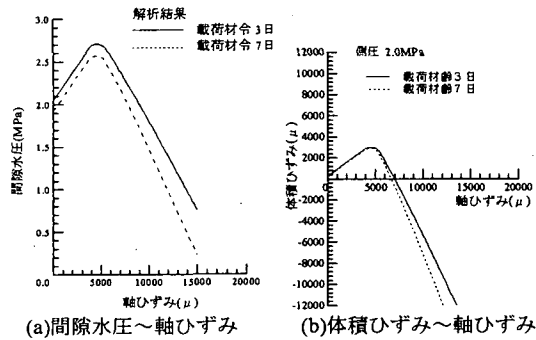


図-21 側圧2.0MPaにおける荷材材齢による解析結果

す要因或いは間隙水圧特性が、間隙水圧に対する実験的および解析的考察から明らかとなった。また、著者等が提案している水・コンクリート骨格連成解析手法の適用性も、実験結果との比較により評価された。そこで本章では、間隙水圧の最大値に影響を及ぼす要因について、側圧および荷材材齢をパラメータとした解析的評価を行うことにする。

(1) 側圧の影響

図-19は、側圧を解析パラメータとした荷材材齢3日における解析結果を表しており、同図(a)は間隙水圧～軸ひずみ関係、同図(b)は体積ひずみ～軸ひずみ関係を表している。なお、実線、点線および一点鎖線はそれぞれ側圧が0.5、1.0、2.0MPaの解析結果に対応しており、体積ひずみは側圧荷時点をゼロとして表している。

側圧作用時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側圧とともに大きくなる。また、前章でも述べたように、側圧が大きいほどコンクリートの体積収縮ひずみが大きくなることにより、側圧荷後からの間隙水圧の増加量は側圧の増加とともに大きくなる。すなわち、体積収縮ひずみが大きいほど間隙水圧は大きくなることを示しており、例えば図-20に示す一次元圧密¹⁾のよ

うな状態では、体積収縮ひずみのみ生じるため間隙水圧特性は同図(b)に示すように正の(圧縮)間隙水圧勾配を持ったまま大きくなるのみである。

(2) 荷材材齢の影響

図-21は、荷材材齢を解析パラメータとした側圧2.0MPaにおける解析結果を表しており、同図(a)は間隙水圧～軸ひずみ関係、同図(b)は体積ひずみ～軸ひずみ関係を表している。なお、実線および点線はそれぞれ荷材材齢3日および7日の解析結果に対応しており、体積ひずみは側圧荷時点をゼロとして表している。

側圧荷時に発生する間隙水圧は、初期材齢ほど骨格の剛性が小さいことにより、発生する間隙水圧は僅かながら大きい。しかし、側圧荷後からの間隙水圧の増加量は、荷材材齢によらずほぼ一定となっている。これは、前章でも述べたように、体積収縮ひずみの最大値が両荷材材齢でほぼ同じであることによるものである。

(3) 間隙水圧発生に影響を及ぼす主要因

4章および本章1、2節から、間隙水圧特性はコンクリートの体積ひずみに支配され、中でも正(圧縮)の間隙水圧の最大値に影響を及ぼす主要因は、体積収縮ひずみであるものと考えられる。

6. 結論

本研究では、コンクリートの水分移動特性を内部に発生する間隙水圧として捉え、荷重の荷重によって各種パラメータを変数として間隙水圧を測定することにより、コンクリートのPre-Peak領域およびPost-Peak領域における間隙水圧特性に及ぼす各パラメータの影響についての実験的および解析的な検討を行った。そして、各パラメータの影響に対する解

析的検討から、間隙水圧特性に影響を及ぼす主要因を決定するとともに、間隙水圧の最大値に影響を及ぼす主要因の決定も行った。なお、設定した実験パラメータは、側圧、載荷材齢および養生方法の3種類である。以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

(1) 側圧を一定とした三軸完全非排水状態を模擬した装置の開発により、Pre-Peak領域およびPost-Peak領域におけるコンクリート中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) Pre-Peak領域であるコンクリートの体積収縮過程では、間隙水圧勾配は正(圧縮)となり、Post-Peak領域である体積膨張過程では負(引張)の勾配となる。

(4) 水中養生供試体の圧縮応力特性は、気中養生供試体に比べ、内部に発生する間隙水圧が正圧であれば大きくなり、負圧であれば小さくなる。

(5) 間隙水圧特性に影響を及ぼす主要因は、体積ひずみである。

(6) 正(圧縮)の間隙水圧の最大値に影響を及ぼす主要因は、体積収縮ひずみである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.514/V-27, pp.29-41, 1995.
- 3) 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.
- 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) J.Murata: Studies on The Permeability of Concrete, *Trans. of JSCE*, No.77, Nov., pp.69-103, 1961.
- 6) T.C.Powers, L.E.Copeland, J.C.Hayes and H.M.Mann: Permeability of Portland Cement Paste, *ACI Journal*, No.51-14, Nov., pp.285-298, 1954.
- 7) Wu, Z. S. and Tanabe, T.: A Hardening-Softening Model of Concrete Subjected to Compressive Loading, *Journal of Structural Engineering*, Architectural Institute of Japan, Vol.36, pp.153-162, 1990.
- 8) 井上健: 若材令コンクリートの変形挙動に関する研究, 名古屋大学大学院修士論文, 1990.
- 9) 小野周: 表面張力(物理学One Point - 9), 共立出版株式会社, 1994.
- 10) 田代忠一, 田澤栄一, 笠井芳夫: セメント・コンクリート中の水の挙動, セメント・コンクリート研究委員会水委員会, 1993.
- 11) 井上正一, 西林林蔵, 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, Vol.5, pp.636-637, 1990.
- 12) 岡島達雄: コンクリートの力学的性質と水分, セメント・コンクリート, No.464, pp.18-26, 1985.

(1996. 3. 28 受付)

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON PORE WATER PRESSURE OCCURRING IN POST-PEAK REGION OF CONCRETE

Hideki OHSITA and Tada-aki TANABE

The experimental and analytical study on pore water pressure occurring in post-peak region of concrete due to the external load is performed to investigate the mechanism of water migration in concrete in detail. In the experiment, the apparatus which can measure pore water pressure in pre peak and post peak region of concrete under the control of lateral pressure, is developed. Measurements of the concrete strain, stress and pore water pressure is carried out, in which the experimental parameters are loading age, lateral pressure and curing method, and the effects of each parameters on pore water pressure are discussed. Further, the main factor which influenced on pore water pressure was decided.