

## 不飽和地盤における空気と水の二相浸透流の評価

## Two Phase Flow of Air and Water in Unsaturated Ground

丸岡雄一郎	Yuichiro MARUOKA	(株)荒谷建設コンサルタント
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院)
中田幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院)
兵動正幸	Masayuki HYODO	(山口大学大学院)
有井隆秀	Takahide ARII	(山口大学大学院)

不飽和鉛直浸透実験および解析を行い、不飽和試料内に存在する間隙空気が水の浸透にどのような影響を及ぼすか検討した。また、不飽和浸透流解析には、間隙空気の影響を考慮する気液二相浸透流解析を適用し、間隙空気の移動の評価の必要性について調べた。その結果、間隙空気が閉塞されるような条件では、空気圧が上昇するため、気液二相浸透流解析により計算する必要があることがわかった。また、間隙空気の排気が速やかに起こらないような条件下で、水の浸透が急激に生じる場合には、間隙空気圧の上昇に伴う有効応力の低下による地盤の破壊が生じる可能性があることが示唆された。

キーワード：不飽和，浸透，空気圧，マトリックポテンシャル，気液二相流，FEM，(IGC：D04，E07，E14)

## 1. はじめに

近年増加している集中豪雨による土砂災害や、洪水時の河川水位上昇による堤体の決壊現象などは、地盤内に水が浸透することによる土のせん断強度の低下に起因していると考えられている。そのため、土の飽和度の変化や、浸透水圧の作用などによる破壊機構を解明するには土中水の浸透挙動を的確に把握する必要がある。その一手段として、有限要素法を用いた浸透流解析が広く用いられている。しかし、これらは水の移動のみを考慮しており、地盤間隙内の空気の移動は考慮されていない。浸透過程において、間隙空気が水と容易に交換される場合は、間隙内の空気圧変化は小さく、空気を無視できると考えられるが、豪雨などで大気と接する境界付近の飽和度が急激に増加する場合など、空気の自由な移動が妨げられる場合には、間隙空気の圧縮により空気圧は上昇すると考えられる<sup>1)</sup>。その結果、地盤内に空気が封入された状態となり、間隙空気の影響により有効応力の低下を誘発するという現象も考えられる<sup>2)</sup>。このような現象に対する理解のためには、間隙空気の運動を考慮した、高い精度の浸透流解析が必要と考えられる。これまでも、鉛直浸透過程を対象にした田中<sup>3)</sup>、佐藤<sup>4)</sup>、二相流解析を用いた高木・森下<sup>5)</sup>が研究を行い、間隙空気の影響を考慮する必要性を指摘している。

本研究では、不飽和鉛直浸透実験を行い、間隙空気が閉塞される場合と開放される場合で浸透挙動にどのような影響を与えるかを検討した。また、同様の条件で一相流、二相流の不飽和浸透流解析を実施し、実験結果と比較することで再現し得る問題を整理すると共に、間隙空気の運動

の考慮の必要性について検討する。

## 2. 不飽和浸透特性

## 2.1 水分特性曲線

本研究で用いた試料は、豊浦砂（土粒子密度 $\rho_s=2.643$  ( $g/cm^3$ ), 最大間隙比 $e_{max}=0.973$ , 最小間隙比 $e_{min}=0.635$ )であり、相対密度を $Dr=80\%$ に調整して実験に用いた。

図-1に、乾燥試料に水を加える浸潤過程で求めた水分特性曲線を示す。図中の○プロット (AEV: 50kPa) は $Dr=80\%$ で各飽和度に調整した豊浦砂に写真-1のテンシオ

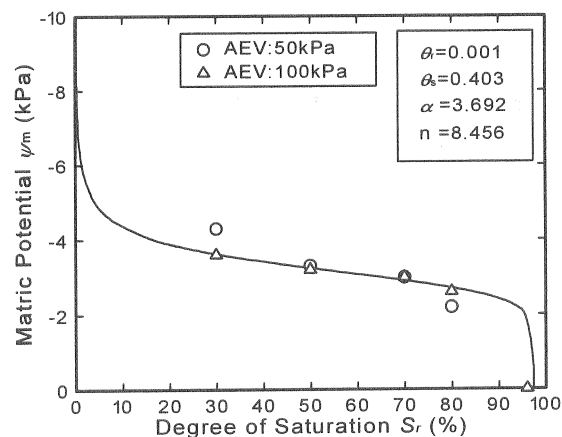


図-1 水分特性曲線

メーターを挿入し測定した値であり、 $\Delta$ プロット (AEV : 100kPa) は、三軸セルを用いてセラミックディスクを埋め込んだペDESTALの上部に、密度、飽和度を調整した試料をセットして測定した値である。また、図中には、水分特性曲線を表す関数モデルとして、式(1)に示す Van Genuchten<sup>6,7)</sup>の式を用いた結果も併せて示した。図中には Van Genuchten の式より、水分特性曲線を得るためのパラメータも示している。

これらのパラメータは、実験による実測値を元に、Van Genuchten の式でフィッティングし、決定している。

$$S_e = \left\{ 1 + (-\alpha \times \psi_m)^n \right\}^{-m} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$  は形状パラメータであり、 $n$ 、 $m$  は無次元、 $\alpha$  は圧力水頭の逆数の次元を持つ。 $\psi_m$  はマトリックポテンシャルである。また、 $S_e$  は有効飽和度であり、次式で表される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_s$  は、飽和体積含水率と呼ばれ、飽和状態 ( $\psi_m=0$ ) における体積含水率である。 $\theta_r$  は残留体積含水率と呼ばれ、 $\psi_m \rightarrow -\infty$  の時の体積含水率である。なお、 $\theta$  は、任意の飽和度の体積含水率である。

本研究では、後述する不飽和透水係数モデルが簡単な関数形を持つようにするために(1)式における  $n$  と  $m$  の関係には次式<sup>6)~8)</sup>を用いた。

$$m = 1 - 1/n \quad (3)$$

ここで、(1)式と(2)式から、次式のように水分特性曲線である  $\psi_m$  と  $\theta$  の関係式を得ることができる。

$$\theta = \left\{ 1 + (-\alpha \times \psi_m)^n \right\}^{-m} \times (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (4)$$

また、この式を  $\psi_m$  で微分することで、水分特性曲線の傾きである比水分容量関数  $C$  を得ることができる。

$$C \left( = \frac{d\theta}{d\psi_m} \right) = (\theta_s - \theta_r) \times mn\alpha \times (-\alpha \times \psi_m)^{n-1} \left\{ 1 + (-\alpha \times \psi_m)^n \right\}^{-m-1} \quad (5)$$

## 2.2 不飽和透水・透気係数

不飽和透水係数の推定について示す。本研究で用いた不飽和透水係数モデルは Mualem モデル<sup>9)</sup>を用いた。

$$k_{wr} = \frac{k}{k_{ws}} = S_e^\xi \left\{ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad (6)$$

ここで、 $k_{wr}$  は比透水係数と呼ばれ、不飽和透水係数と飽和透水係数  $k_{ws}$  の比を表す。また、比透気係数については次式を用いた<sup>7,9)</sup>。

$$k_{ar} = (1 - S_e)^\gamma \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^{2m} \quad (7)$$

ここで、式(6)、(7)の  $\xi$ 、 $\gamma$  は間隙の連続性に関わるパラメータであるが、一般に  $\xi=1/2$ 、 $\gamma=1/3$  が用いられる。本研究においても、 $\xi=1/2$ 、 $\gamma=1/3$  を用いた。図-2 に飽和度と比透水係数、比透気係数の関係を示す。

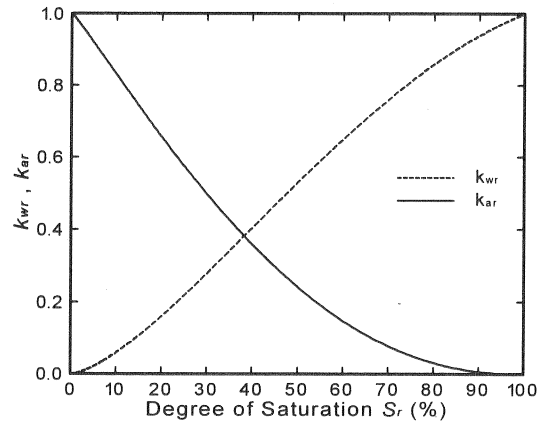


図-2 飽和度と比透水係数、比透気係数の関係

## 3. 一次元不飽和鉛直浸透流 FEM 解析

### 3.1 一相流浸透解析

#### (1) 支配方程式

土の中を水が移動する際に、その移動を支配する基礎方程式は、微小立方体内における水の収支を考えた一次元の連続の式に、ダルシー則を適用することで次式のような<sup>10)</sup>。

$$(C + \beta S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} + 1 \right) \right\} = 0 \quad (8)$$

ここで、 $\psi$  は圧力水頭を表し、不飽和状態では、マトリッ

ポテンシャルを意味する。\$C(\psi\_m)\$は水分特性曲線の傾きである比水分容量、\$x\$は位置座標を表すスカラー量であり、\$S\_s\$は比貯留係数である。不飽和領域において圧力水頭変化による間隙率の変化が生じないものと仮定し、\$\beta\$は不飽和領域では0、飽和領域では1となる。

(2) 有限要素法による定式化

本研究では、有限要素法により定式化する方法として、重みつき残差法の1つである Galerkin 法を用い、近似式を求めた。行列表示したものが式(9)である。

$$[M]\dot{\psi} + [K]\psi = [Q_1] - [Q_2] = [Q] \quad (9)$$

ここで、\$M\$は全体貯留行列であり、\$K\$は全体透水性行列であり、\$Q\$は全体流量ベクトルである。

(3) 時間項の取り扱い<sup>10)</sup>

式(9)の\$\dot{\psi}\$は、\$\dot{\psi} = d\psi\_m/dt\$であるため、式(9)はある特定の時間状態に対して式(8)を有限要素法により定式化したものである。したがって、時間項を取り扱うために本研究では中央差分法を用い、時間毎にガウスの消去法を用いて逐次計算を行い、全時間にわたる解を得た。

中央差分による式(9)の漸化式は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} & \left( [K]^{j+1/2} + \frac{2}{\Delta t^j} [M]^{j+1/2} \right) \psi_m^{j+1} \\ & = - \left( [K]^{j+1/2} - \frac{2}{\Delta t^j} [M]^{j+1/2} \right) \psi_m^j + 2[Q]^{j+1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、\$j\$はある時間段階を表し、\$t = t^j\$、\$\Delta t^j = t^{j+1} - t^j\$である。また、\$m\$はある位置の座標を示す。\$M\$や\$K\$の各マトリックス中の比水分容量 \$C(\psi\_m)\$や透水性係数 \$k(\psi\_m)\$は、式(5)と式(6)よりある特定の時間における\$\psi\_m\$の値から求めることができるため、式(11)より\$\psi\_m^{j-1/2}\$の値を仮定し、\$C(\psi\_m)\$と\$k(\psi\_m)\$を算出する。

$$\psi_m^{j+1/2} = \psi_m^j + \frac{\Delta t^j}{2\Delta t^{j-1}} (\psi_m^j - \psi_m^{j-1}) \quad (11)$$

算出された\$C(\psi\_m)\$と\$k(\psi\_m)\$を用い、再び(10)により、\$\psi\_m^{j+1}\$を算出する。

3.2 二相流浸透解析

(1) 支配方程式<sup>11)</sup>

地盤内の不飽和領域における間隙内には、水と空気が混在している。間隙率が一定の場合に間隙内の水分変化が生

じれば、同時に空気層の体積変化も生じる。つまり、間隙率が一定の場合、空気と水の飽和度 \$S\_a\$ と \$S\_w\$ には、

$$S_a + S_w = 1 \quad (12)$$

の関係が成り立つ。任意の流体の流れの連続の式も、水と同様に質量保存則より導かれ、ダルシー則を適用することで支配方程式を得ることができる。任意の流体のダルシー則は次式で表すことができる。

$$v_F = -k_{Fr} \frac{K}{\eta_F} \left( \frac{\partial u_F}{\partial x} + \frac{\partial x}{\partial x} \right) \quad (13)$$

ここで、\$v\_F\$は任意の流体の流速であり、\$k\_{Fr}\$は比透水性係数または比透気係数、\$K\$は地盤の固有透過係数、\$\eta\_F\$は流体\$F\$の粘性係数、\$u\_F\$は流体\$F\$の圧力水頭を表す。本研究では、\$K=1.0 \times 10^{-4}(\text{m/s})\$、水の粘性係数\$\eta\_w=1.14 \times 10^{-3}(\text{Pa}\cdot\text{s})\$、空気の粘性係数\$\eta\_a=1.78 \times 10^{-5}(\text{Pa}\cdot\text{s})\$とした。ここで、水の密度変化と間隙率の時間変化、及び空気に作用する重力を無視すると、水の方程式と空気の方程式は次式のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w n S_w) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\rho_w k_{wr} \frac{K}{\eta_w} \left( \frac{\partial u_w}{\partial x} + 1 \right) \right\} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a n S_a) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\rho_a k_{ar} \frac{K}{\eta_a} \left( \frac{\partial u_a}{\partial x} \right) \right\} = 0 \quad (15)$$

ここで、\$\rho\_w\$、\$\rho\_a\$は、水および空気の密度を表し、\$n\$は間隙率である。式(14)の水の方程式において、\$\psi\_m = u\_w - u\_a\$を考慮すると、水の運動の基礎方程式は次式で表すことができる。

$$C \left( \frac{\partial u_w}{\partial t} - \frac{\partial u_a}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_{wr} \frac{K}{\eta_w} \left( \frac{\partial u_w}{\partial x} + 1 \right) \right\} \quad (16)$$

また、空気の方程式において、構成体積率\$\beta\_a = V\_a/V\_{as}\$を導入し(\$V\_{as}\$:標準状態における空気の体積)、とおくと、空気の運動の基礎方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \left\{ n(1 - S_w)B + \frac{C}{\beta_a} \right\} \frac{\partial u_a}{\partial t} - \frac{C}{\beta_a} \frac{\partial u_w}{\partial t} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_{ar} K}{\beta_a \eta_a} \frac{\partial u_a}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 $B = \frac{\partial}{\partial u_a} \left( \frac{1}{\beta_a} \right)$ である。

## (2) 有限要素法による定式化

一相流問題と同じように、二相流問題について近似式を求めると、水と空気について以下ようになる。

$$K_w U_w + C_w \dot{U}_w - C_a \dot{U}_a = -Q_1 - Q_2 = -Q_w \quad (18)$$

$$K_a U_a + C_a \dot{U}_a - C_w \dot{U}_w = -Q_a \quad (19)$$

これらを連立すると以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} K_w & 0 \\ 0 & K_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_w \\ U_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_w & -C_a \\ -C_w & C_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_w \\ \dot{U}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Q_w \\ -Q_a \end{bmatrix} \quad (20)$$

ここで、 $K_w$ 、 $K_a$ 、 $C_w$ 、 $C_w'$ 、 $C_a$ 、 $C_a'$ 、 $Q_w$ 、 $Q_a$ は、以下の通りである。なお、 $K$ は水と空気の透水行列を、 $C$ は水と空気の貯留行列を、 $Q$ は水と空気の流量ベクトルを、 $U$ は水と空気の圧力を示している。

$$K_w = \sum_{m=1}^N \int_{x_1}^{x_2} k_w \frac{dN_m(x)}{dx} \frac{dN_n(x)}{dx} dx$$

$$K_a = \sum_{m=1}^N \int_{x_1}^{x_2} \frac{k_a}{\beta_a} \frac{dN_m(x)}{dx} \frac{d\bar{N}_n(x)}{dx} dx$$

$$C_w = \sum_{m=1}^N \int_{x_1}^{x_2} C N_m(x) N_n(x) dx$$

$$C_w' = \sum_{m=1}^N \int_{x_1}^{x_2} \frac{C}{\beta_a} N_m(x) \bar{N}_n(x) dx$$

$$C_a = \sum_{m=1}^N \int_{x_1}^{x_2} C \bar{N}_m(x) N_n(x) dx$$

$$C_a' = \sum_{m=1}^N \int_{x_1}^{x_2} \left\{ n(1 - S_w) B + \frac{C}{\beta_a} \right\} \bar{N}_m(x) \bar{N}_n(x) dx$$

$$Q_w = Q_1 + Q_2 = \frac{\hat{q}}{\rho_w} N_n(x_{qw}) + \int_{x_1}^{x_2} k_w \frac{dN_n(x)}{dx} dx$$

$$Q_a = \frac{\hat{q}_a}{\rho_w} \bar{N}_n(x_{qa})$$

ここで、 $k_w$ は透水係数であり、 $k_a$ は透気係数であり、 $N_m(x)$ 、

$\bar{N}_m(x)$ 、 $\bar{N}_n(x)$ は形状関数である。また、 $C$ は比水分容量であり、 $\hat{q}$ は水の流量で、 $\hat{q}_a$ は空気の流量を表す。

## 3.3 解析に用いたパラメータ

不飽和の一相流、二相流解析に用いたパラメータを表-1に示す。これによって求まる水分特性曲線関数を用いて実験に対応する。

表-1 解析に用いた主なパラメータ

解析パラメータ名	入力値	
水分特性曲線の形状パラメータ	$\alpha$	3.692
	$n$	8.456
飽和体積含水率	$\theta_s$ (%)	0.403
残留体積含水率	$\theta_r$ (%)	0.001
間隙の連続性に関わるパラメータ	$\xi$	1/2
	$\gamma$	1/3
地盤の固有透過係数	$K$ (m/s)	$1.0 \times 10^{-4}$
水の粘性係数	$\eta_w$ (Ps·s)	$1.14 \times 10^{-3}$
空気の粘性係数	$\eta_a$ (Ps·s)	$1.78 \times 10^{-5}$

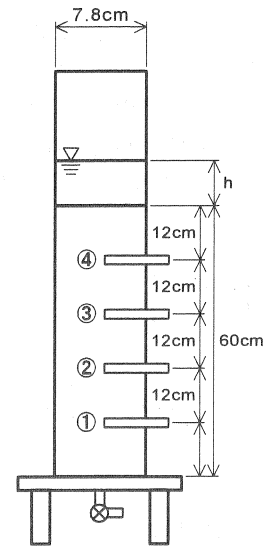


図-3 不飽和鉛直浸透実験装置

## 4. 一次元不飽和鉛直浸透実験概要

不飽和地盤中の流体の浸透挙動を把握するために、不飽和鉛直浸透実験を行った。用いた実験装置の概略図を図-3に示す。実験装置の本体は、内径 7.8cm、高さ 82cm のアクリルパイプであり、下部より鉛直方向に 12cm 間隔でテンシオメーターを設置している。また、間隙空気が閉塞された状態や開放された状態を再現するために装置下部に排気排水用コックを設けている。本研究では、実験上排気排水用コックの開閉により、間隙空気の状態をコントロールしていることから、間隙空気が開放された状態を排水実験、閉塞された状態を非排水実験と表現する。不飽和鉛直

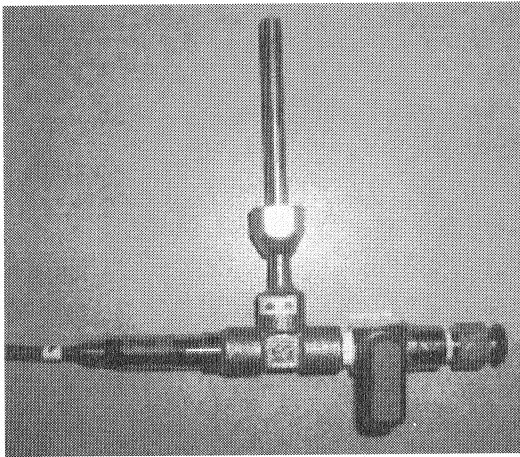


写真-1 テンシオメーター

表-2 不飽和鉛直浸透実験条件

初期飽和度 (%)	水位 $h$ (cm)			
	0.5	2	4	10
30				
50				

浸透実験中のマトリックポテンシャルを測定するために用いたテンシオメーター(写真-1参照)は、直径5.9mm、長さ8.6cmであり、不飽和鉛直浸透実験装置に設置すると、ほぼ中心のマトリックポテンシャルを測定できることになる。なお、用いたテンシオメーターの空気侵入値はAEV=50kPaであり、透水性も良くタイムラグも少ないとされている<sup>12)</sup>。

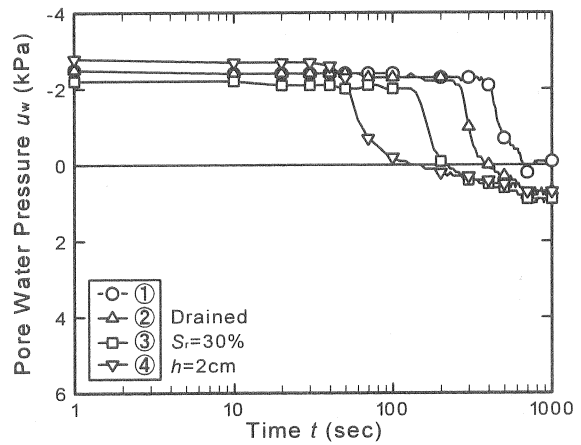
実験条件を表-2に示す。本研究では、排水条件と非排水条件において、それぞれ初期飽和度30%、50%で表-2に示す表面貯留水位を保ったまま水を流入させ、テンシオメーターで間隙水圧の経時変化を測定した。なお、密度条件としては、相対密度で $D_r=80\%$ (乾燥密度 $1.55\text{g/cm}^3$ )となるよう全ての実験において統一した。

ここで、供試体作成について、12cm ずつ試料を突固めているが、その際、 $D_r=80\%$ になるように各層の打撃回数を変化させて供試体を作成している。

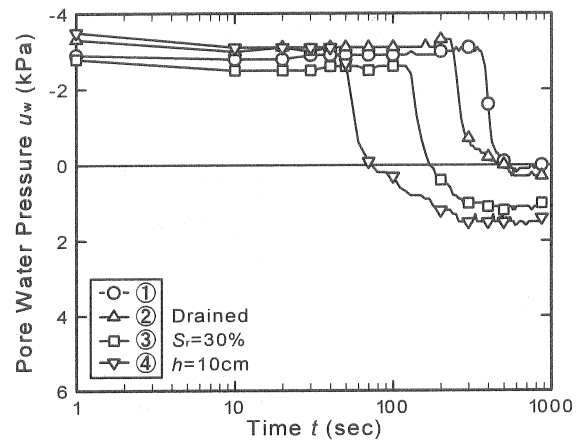
## 5. 解析結果と実験結果および考察

### 5.1 排水条件(間隙空気を開放した場合)

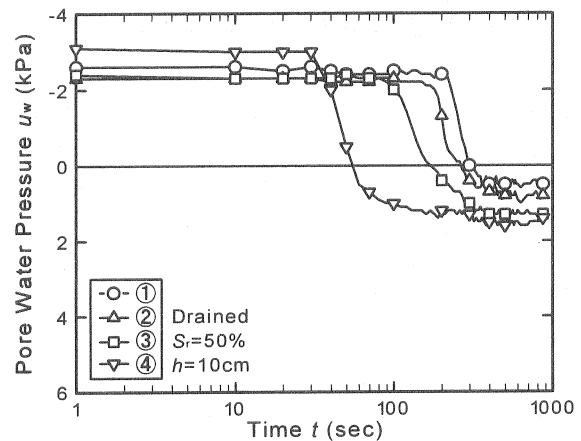
この実験は、実験装置の下部にある排気・排水用コックを開けた排水条件で行っている。これは、土砂層の最下端より間隙空気が抜けることによって、間隙空気が浸透水と比較的容易に置換される場合である。図-4(a)~(c)に不飽和鉛直浸透実験より得られた間隙水圧の経時変化を示す。ここで、(a)は飽和度 $S_r=30\%$ で水位 $h=2\text{cm}$ 、(b)は飽和度 $S_r=30\%$ で水位 $h=10\text{cm}$ 、(c)は飽和度 $S_r=50\%$ で水位 $h=10\text{cm}$ の条件の結果である。図-4(a)より、若干ばらつきが認めら



(a)  $S_r=30\%$ ,  $h=2\text{cm}$



(b)  $S_r=30\%$ ,  $h=10\text{cm}$



(c)  $S_r=50\%$ ,  $h=10\text{cm}$

図-4 間隙水圧の経時変化(排水条件)

れるものの、流入開始後、間隙水圧がほぼ一定値を示すが、浸透が進み、浸潤面が下へと移動するにつれて上部に位置する④から順番に間隙水圧が上昇し、最終的には、全体が飽和し、静水圧分布を示すことがわかる。なお、図-4(a)~(c)の比較より、水位 $h$ が大きいほど、飽和度 $S_r$ が高いほど、間隙水圧の上昇が早い時期に起こり、浸潤面の進行が早いことがわかる。不飽和鉛直浸透実験は、先に示した土槽全体が飽和するまで流入し続ける条件と、同条件下で

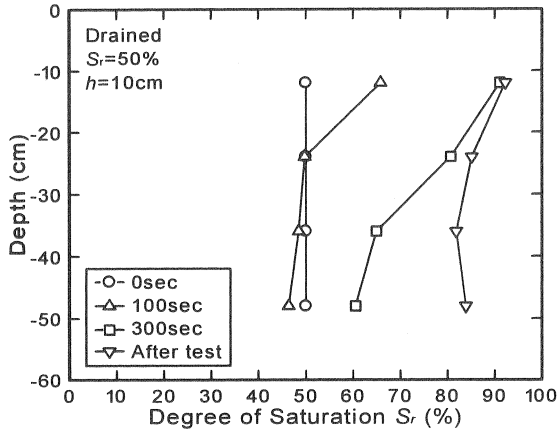


図-5 飽和度と深度の関係(排水条件)  
( $S_r=50\%$ ,  $h=10\text{cm}$ )

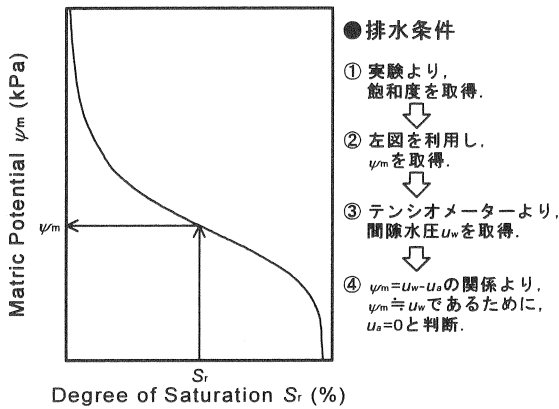


図-6 間隙空気圧算出の流れ(排水条件)

流入開始後 100sec, 300sec で流入を停止する条件を実施した。流入開始後 100sec, 300sec で流入を停止する条件では、所定の時間に達した時点でテンシオメーターの配置箇所より、速やかに試料採取を行い、含水比を測定し、飽和度を算出している。図-5 に飽和度と深度の関係の一例として、飽和度  $S_r=50\%$  で水位  $h=10\text{cm}$  の条件での結果を示す。この図からも 100sec, 300sec, 実験終了後と進行するにつれて上部から、飽和度が上昇していき、最終的にほぼ全層で飽和に達していることがわかる。各々の実験で得られた、飽和度と間隙水圧を用いて、図-6 に示す流れで間隙空気圧の算出を試みた。初期飽和度 30%、水位 2cm で 100 秒経過後に①の箇所を例にとって検討する。この時、含水比は 4.9% で間隙水圧は -3.0kPa であった。含水比から飽和度を求め、水分特性曲線より求められる  $\psi_m (= -3.2\text{kPa})$  であった。これより、算出される間隙空気圧  $u_a$  はほぼ 0 である。排水条件での実験は、いずれの箇所、時間においても、間隙空気圧  $u_a$  はほぼ 0 を示し、後述する非排水条件の間隙空気圧  $u_a$  と比較して値が小さいため、この条件では、間隙空気圧を考慮する必要はないと判断し、図-7 に示す境界条件の下、一相流の不飽和浸透流 FEM 解析を行った。図-8 に解析結果の一例として、飽和度  $S_r=30\%$  で水位

$h=10\text{cm}$  の条件での間隙水圧  $u_w$  の経時変化の結果を示す。この結果は、図-4(b)の実験結果と対応するが、実験と同様に試料上面から浸潤していく様子が表現できており、間隙空気が開放される排水条件においては、間隙空気を無視しても問題ないことがわかる。

5.2 非排水条件(間隙空気が閉塞される場合)

非排水条件での不飽和鉛直浸透実験は、実験装置下部の排気・排水コックを閉じた状態で実施した。そのため、試料内の間隙空気は流入してくる水と入れ替わることでしか排気できず、間隙空気は閉塞される。非排水条件の実験においても図-9 に示すような流れで間隙空気圧を算出した。排水条件との違いは、図-13 で後述するように、 $\psi_m \neq u_w$  とはならず、間隙空気圧  $u_a$  が発生することである。マトリックポテンシャルの取得に必要な飽和度は、排水条件の場合と同様の方法で取得している。ただし、非排水条件においては、観察の時間を 100sec, 400sec とした。

図-10 に、非排水条件における間隙水圧  $u_w$  の経時変化を示す。図(a)~(c)より、すべての実験条件において、流入開始後、数秒から 10 秒程度で全てのテンシオメーターにおいて、同時に間隙水圧が上昇しており、排水条件のように上部のテンシオメーターから順番に上昇する結果とは大きく異なる。飽和度が高い程、水頭が高い程、早い時間で間隙水圧が上昇していることもわかる。さらに、数百秒経過し、テンシオメーターの値がほぼ一定になるまでに要する時間も短くなることがわかる。また、ほぼ一定になったと判断した箇所は、水圧の時間経過による上昇の勾配が緩やかな勾配へと変化したとみなせる箇所とした。ここで、100sec, 400sec において得られた飽和度と深度の関係を図-11 に示す。図より、排水条件の場合(図-5 参照)と比較して、100sec, 400sec においては、飽和度があまり上昇していないことがわかる。取得した飽和度から図-9 に示す流れで求めた  $\psi_m$  の経時変化を図-12 に、間隙空気圧  $u_a$  の経時変化を図-13 に示す。マトリックポテンシャル  $\psi_m$  は、実験終了後のプロットを除き、数 100 秒間ほぼ横ばいになることがわかる。また、図-13 より、間隙空気圧が増加していることがわかり、非排水条件では水の浸透に伴う間隙空気圧の増加が確認できた。これらのことより、非排水条件における間隙水圧の増加は、排水条件における飽和度の増加による  $\psi_m$  の増加ではなく、水が浸透することに伴う空気圧の増加によるものと考えられる。非排水条件下では空気の排気は上部の境界面でしか起こりえない。そのため、間隙に浸入してくる水と交換されながら空気は排気しようとする。しかし、初期に浸潤面の飽和度が上昇すると、図-2 の透気係数と飽和度の関係に示されるように、透気係数が急激に低下する。このため、間隙の空気はより排気されにくくなり、閉塞され、図-13 のように空気圧が上昇するものと考えられる。また、浸潤面付近では飽和度が低い状態であると考えられるために、浸潤面の進行が緩やかになり、水の流入量が減少していくものと考えられる。

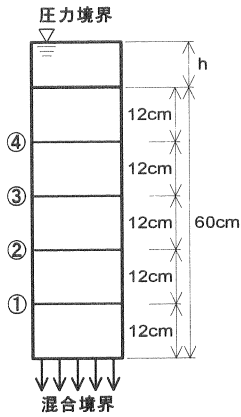
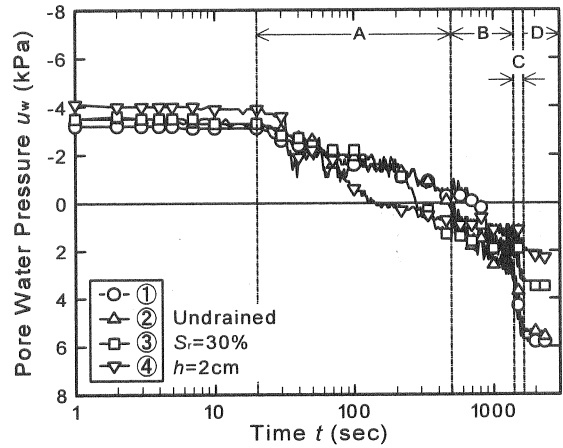


図-7 一相流不飽和浸透流解析条件(排水)



(a)  $S_r=30\%$ ,  $h=2\text{cm}$

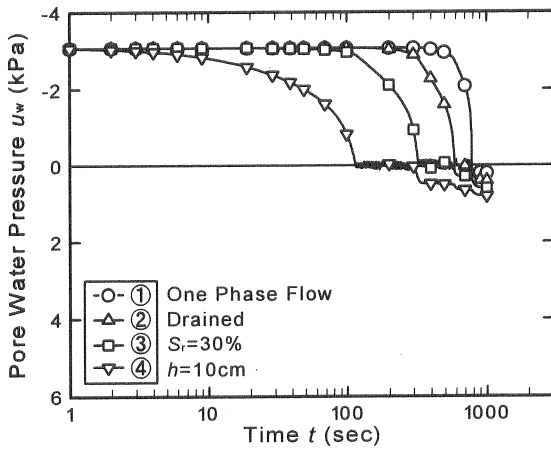
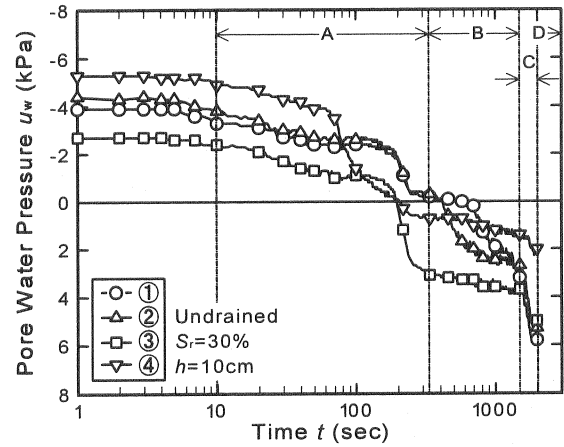


図-8 一相流解析結果(排水境界)



(b)  $S_r=30\%$ ,  $h=10\text{cm}$

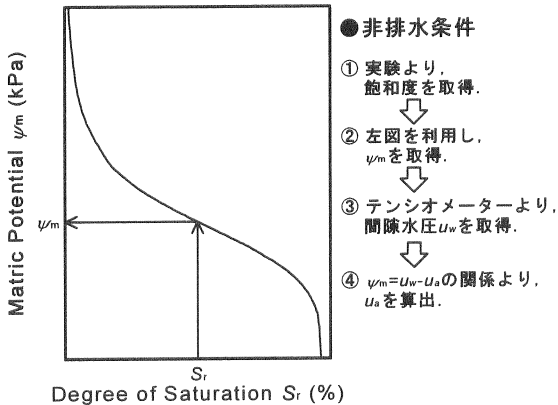
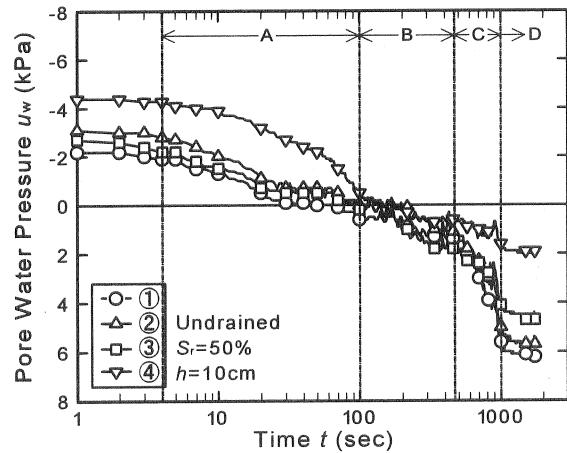


図-9 間隙空気圧算出の流れ(非排水条件)



(c)  $S_r=50\%$ ,  $h=10\text{cm}$

図-10 間隙水圧の経時変化(非排水条件)

次に、図-10(a)に示した A~D の区間ごとの間隙水圧挙動の変化に対応した状態の変化について考察する。水の浸透によって間隙の空気の排気がスムーズに行われなくなると、間隙空気は体積収縮を起こすと同時に、含水量に変化がなければ、空気圧が上昇する。また、それに伴って間隙水圧も上昇する。図では、A の区間に対応する。次にある程度空気圧が上昇すると、浸潤面と空気との境界面上は平衡状態となり、水の流入がほぼ停止し、水圧もほぼ一定となる B の区間となる。ここで、深い位置にあるテンシオ

メーターの結果において、水圧が一定になるまでに少し、時間がかかっている。これは、空気圧の伝播の時間遅れなどの影響のためと考えられる。その後、ほとんどの実験で、土粒子の骨格が変化し、空気が排出され、それに伴って水が流入する C の区間へと推移し、空気と水の交換が終了すると再び平衡状態となる D の区間へと推移する。

排水条件の場合と同様に、非排水条件の場合においても FEM 解析による実験のシミュレーションを行う。ここで

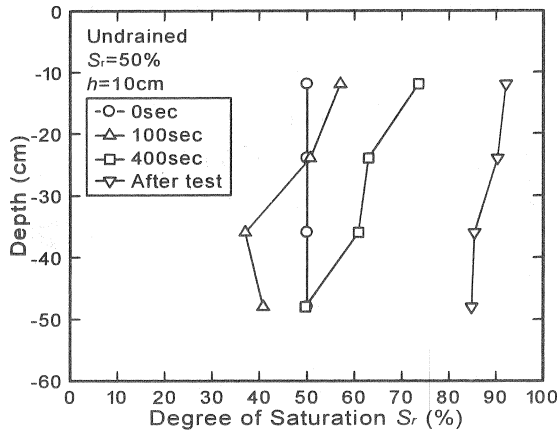


図-11 飽和度と深度の関係(非排水条件)  
( $S_r=50\%$ ,  $h=10\text{cm}$ )

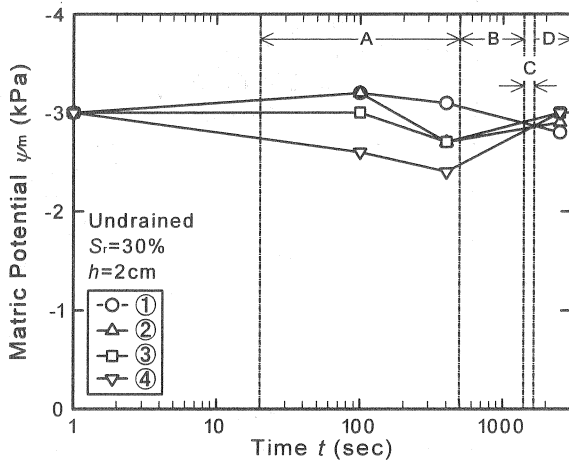


図-12 マトリックポテンシャル  $\psi_m$  の経時変化  
(非排水条件) ( $S_r=30\%$ ,  $h=2\text{cm}$ )

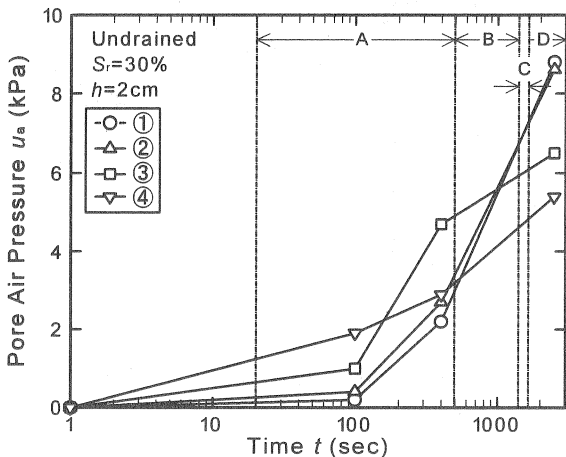


図-13 間隙空気圧の経時変化(非排水条件)  
( $S_r=30\%$ ,  $h=2\text{cm}$ )

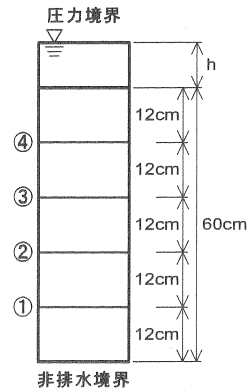


図-14 一相流不飽和浸透流解析条件(非排水)

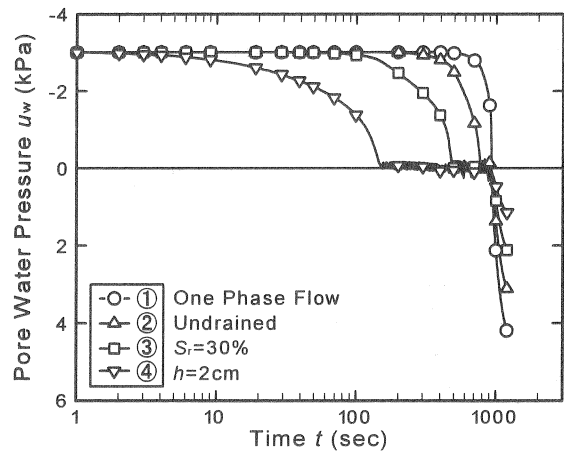


図-15 一相流解析結果(非排水境界)

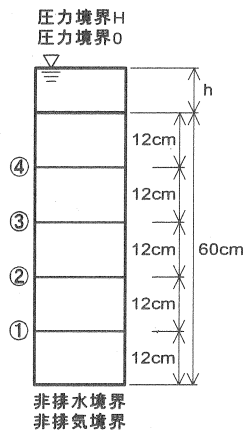


図-16 二相流不飽和浸透流解析条件(非排水)

は、排水条件の時に適用した一相流の不飽和浸透流 FEM 解析と二相流の不飽和浸透流 FEM 解析により検討する。一相流の不飽和浸透流 FEM 解析は図-14 に示す境界条件のように下部を非排水境界とすることで行った。図-15 に

非排水境界における解析結果を示す。試料上部より、浸透が進み、全体が飽和すると静水圧状態へ移行していく様子を表している。非排水条件での不飽和鉛直浸透実験においては、間隙水圧がほぼいっせいに上昇し始めるのに対して、解析結果では、上部より順に間隙水圧が上昇しており、排水条件に近いことがわかる。一相流問題においては、空気運動を考慮していないため、間隙に水が浸入し、飽和度



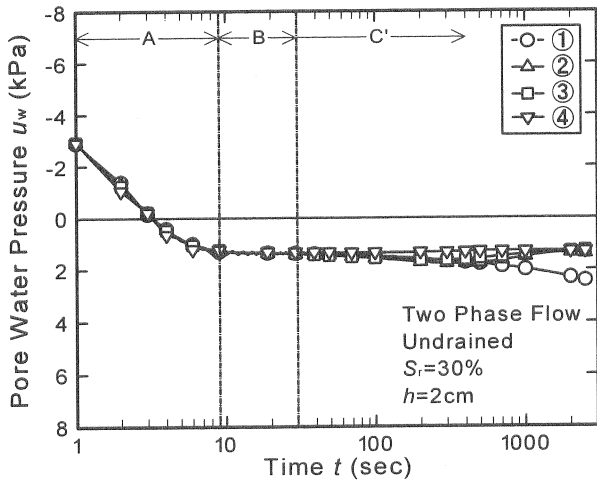


図-17 間隙水圧の経時変化(二相流非排水)

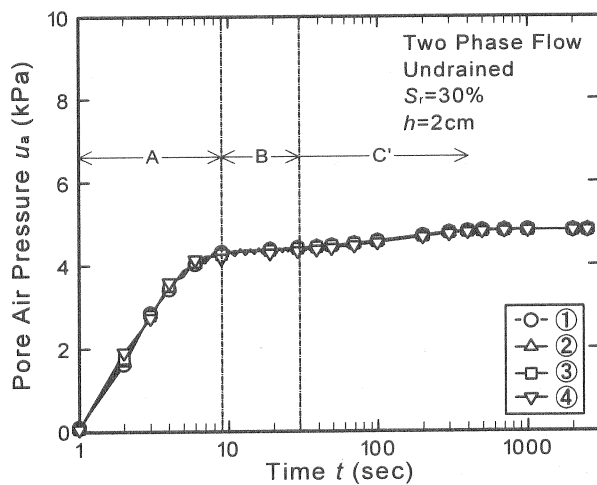


図-18 間隙空気圧の経時変化(二相流非排水)

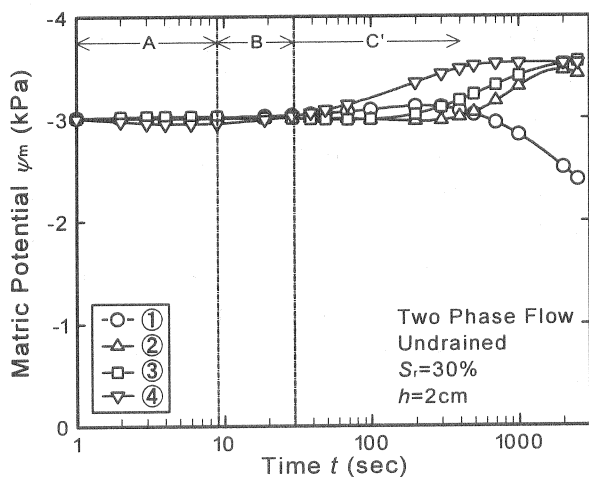


図-19 マトリックポテンシャル  $\psi_m$  の経時変化  
(二相流非排水)

が上昇しても空気圧は上昇せず、常に大気圧状態であるために、今回のような解析結果となった。このことから、排水条件等、空気圧の影響を受けない浸透現象は、一相流問題で表現することができるが、非排水条件などの空気圧

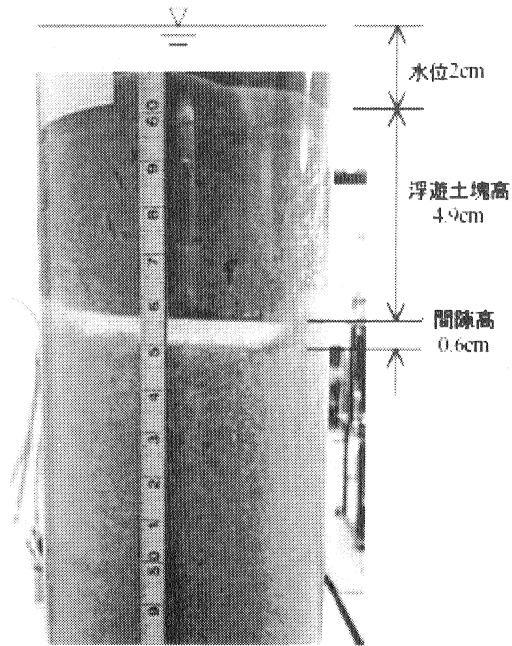
縮を伴う浸透現象は、一相流問題では表現できず、空気圧が上昇するような問題には対応できないことがわかる。

二相流不飽和浸透流 FEM 解析では、境界条件は図-16 に示すように、下部において水、空気とも非排水、非排気境界とした。上部は、一定圧力境界とし、水には実験条件の水圧を与え、初期条件として空気には大気圧を与えた。

図-17, 18, 19 にそれぞれ間隙水圧,  $\psi_m$ , 間隙空気圧の経時変化を示す。図-17 より、流入開始直後に、間隙水圧が急激に増加していることがわかる。ここで図-18 を見ると、間隙水圧の上昇分に近い値の空気圧増加が見られる。また同時に図-19 に着目すると、流入直後の急激な飽和度上昇は認められず、間隙水圧、間隙空気圧のみが増加していることがわかる。これらの値の上昇、下降の挙動は、実験結果とほぼ同じ挙動であることが確認できる。ここで、グラフの形状は実験と解析で異なることが見てとれるが、それについての考察は後述することとする。

次に、間隙空気圧に着目すると、流入開始後 10sec 程で急激に上昇している様子がわかる。透気係数は、透水係数に比べ非常に大きいことから、間隙の空気は瞬時に間隙内を移動できる。しかしながら、上部からの水の浸入により、表層付近の飽和度が上昇すると、透気係数は急激に小さくなり、上部で蓋をされたような状態となり、空気の流れは小さくなり、その結果、体積収縮を起こしながら、空気圧が上昇する(図-18 の A 区間)。そして、全体にほぼ均一な空気圧を保ったまま一定状態を保持する(図-18 の B 区間)。その後、間隙空気が閉塞された状態のまま、上部と下部で水圧差が若干生じる(図-17 の C' 区間(ここで、C' と表記したのは、実験結果の図に表記している C, D 区間と現象は似通ったものであるが、後述するように要因が異なるものを含むことから区別している。))。そして、全水頭としてのバランスを保とうとするために、上部の  $\psi_m$  は低下し、下部の  $\psi_m$  が増加して行く(図-19 の C' 区間)。それに伴い、間隙空気圧も緩やかに上昇する(図-18 の C' 区間)と考えられる。

解析結果と実験結果を比較してみると、浸透の初期において、解析では、急激な間隙水圧の増加を示すが、実験では、浸透後しばらくしてから同様の現象が生じる(図中の A 区間)。このような差が生じる理由は、解析においては浸潤面が面で進行するためと考えられる。つまり、骨格の変形がないことで空気の存在する空間が一定であることと、上部から水が一様に進入することで上部の飽和度が急に上昇して空気が抜けられなくなるためと考えられる。一方、実験では、一次元条件としているが、断面内において浸潤面が一様ではなく、初期に空気と水が置換され、空気の排気が若干生じるため、間隙水圧の上昇にタイムラグが生じるものと考えられる。その後、間隙空気が閉塞された条件になると、解析、実験共に間隙水圧、間隙空気圧、マトリックポテンシャルのいずれもが平衡状態に至る(図中の B 区間)。ここまでは、浸透初期のタイムラグを除いて解析と実験は良い対応を示していることがわかる。しかし、

写真-2 浮遊現象 ( $S_r=30\%$ ,  $h=2\text{cm}$ )

これ以降の間隙水圧、間隙空気圧、マトリックポテンシャルの変化（実験におけるC、D区間と解析におけるC'区間）は、同じ原因に起因して起こっているものではないと考えられる。実験におけるC区間は、土粒子の骨格の変形も含めた水と空気置換であり、急激な間隙水圧の上昇を示している。そして、水と空気がほぼ入れ替わった後、再び平衡状態に至っており、これは、ほぼ飽和に近い状態に至っているものと思われる。一方、解析においては、解析自体が土粒子骨格の変形による水と空気の移動を表現できるモデルではないため、実験で見られる平衡状態と解析においてその状態に至る原因は異なる。解析におけるC'区間の挙動は、間隙空気が閉塞された不飽和試料における、間隙水圧、間隙空気圧、マトリックポテンシャルがバランスするために、少しずつ変化しているために生じている挙動である。

以上より、二相流の不飽和浸透流解析においては、浸透初期に若干のタイムラグが認められるものの、土粒子の骨格の変形が生じない間において、比較的良くその挙動を表現しうることがわかった。

非排水の実験において、稀ではあるが、写真-2のような上部土塊が浮遊する現象が確認された。この土塊が浮遊する現象は、浸潤面上での水の流入と空気の排出が行われず、空気が留まることで、浸潤面上部の試料と水の重さと、浸潤面以下の空気圧がつりあったため生じた結果と考えられる。この現象について、Bishopの有効応力式(式(20))を用いて検討した。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (20)$$

ここで、 $\chi$ はBishopの有効応力パラメータであり、飽和土の場合 $\chi=1$ であり、乾燥土の場合 $\chi=0$ であり、不飽和土の場合、 $0 < \chi < 1$ の値を持つ。写真-2中には、検討に必要な浮遊土塊の高さと水位を併せて示している。土塊の飽和度は浸透水量が不明であるため初期飽和度から変化していないと仮定し全応力 $\sigma$ を算出した。間隙空気圧は、前述の方法で算出された値である。ここで土塊が浮遊するため、浮遊する瞬間その境界では水の存在がなくなると考え、 $\chi$ は0とした。これより、Bishopの式の右辺第二項は無視できる。これより算出した結果、全応力 $\sigma=1.0\text{kPa}$ 、間隙空気圧 $u_a=2.9\text{kPa}$ より、有効応力 $\sigma'=-1.9\text{kPa}$ が得られた。ここで負の値を示したのは、浮遊した土塊とアクリル製円筒の間に作用する摩擦力とつりあうためと考えられる。

次に解析結果とBishopの有効応力式を利用して、有効応力が0になる深度について検討した。対象とした条件は、土塊の浮遊現象が生じた場合と同じであり、飽和度 $S_r=30\%$ 、水位 $h=2\text{cm}$ の条件である。ここで、全応力 $\sigma$ は、湿潤密度と深度、水位により表される。したがって、有効応力が0になるときの深度を求めるにあたって、Bishopの有効応力式を以下のように書き換えた。

$$\sigma < u_a - \chi(u_a - u_w) \quad (21)$$

式(21)より、右辺が左辺以上になると、有効応力は0以下となりうる。また、左辺は深度に応じて値が変化するため、右辺以下の値をとりうる全ての条件において土塊の浮遊現象が生じる条件となることになる。ここで、 $\chi$ は、飽和度に応じて値を持つことから、飽和度と正比例の関係にあると考え、飽和度に応じて決定した。また、間隙水圧および間隙空気圧は時間的に変化するが、ここでは、実験において間隙水圧が一定になり、浮遊現象が生じたことから、間隙水圧が一定値となる10sec後の計算値を用いて、その時に有効応力がどのように変化するか調べた。計算に用いた $\chi$ は、0.65である。その結果、深度は13.5cm以浅において有効応力が0になりうるということがわかった。つまり、地表より、これらの深度のどの深度においても有効応力が0になりうる。今回の実験においては、写真-2に示すように約5cmの深さにおいて空気の層が出来ており、ここで、有効応力が0と考えると、解析結果からも説明できることがわかった。

## 6. まとめ

本研究では、水の浸透に伴う間隙中の空気の運動が浸透にどのような影響を及ぼすかを実験、解析の両面から考察した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 間隙空気の圧力上昇がない場合においては、一相流不飽和浸透流FEMにおいて、実験結果を良く表現できることが明らかとなった。

- (2) 間隙空気の圧力上昇がある場合においては、間隙空気の運動を考慮できる二相流不飽和浸透流 FEM において、実験結果を概ね良く表現できることが明らかとなった。しかしながら、浸透初期においては、間隙水圧の上昇のタイムラグが生じるなど表現が困難な部分も見受けられた。
- (3) 加えて、土粒子骨格の変形などが生じ、その結果、空気と水の置換が容易に進むような現象についても、二相流不飽和浸透流 FEM では、表現することが難しい。
- (4) また、間隙空気が閉塞されるような場合には、土塊の浮遊現象が生じることがある。これは、間隙空気が閉塞されることによる間隙空気圧の上昇による有効応力の低下によって生じるものであることがわかった。
- (5) これより、間隙空気の排気が速やかに起こらないような条件で水の浸透が急激に生じる場合には、間隙空気圧が上昇し、有効応力が低下し、地盤の破壊へと繋がる可能性があることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会：不飽和地盤の挙動と評価, p.50, 2004.
- 2) 田中正：地中水に関する研究動向, 地下水技術, Vol. 37, No.11, pp.1-11, 1995.
- 3) 田中茂：土壌間隙空気の圧縮を考慮した地中への鉛直浸透, 第 13 回水理講演会講演集, pp.61-66, 1969.
- 4) 佐藤邦明：間隙空気の圧縮を伴う鉛直浸透に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第 216 号, pp.21-28, 1973.
- 5) 高木不折, 森下忠司：2 相流としての不飽和鉛直浸透解析, 土木学会論文報告集, 第 271 号, 1978.
- 6) van Genuchten, R. : Calculating the Unsaturated Hydraulic Conductivity with a New Closed-form Analytical Model, Res. Rep., 78-WR-08, Princeton Univ., Princeton, 1978.
- 7) van Genuchten, M. T. : A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil, Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp.892-898, 1980.
- 8) van Genuchten, M. T. and Nilsen, D. R. : On Describing and Predicting the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Ann. Geophys., Vol. 3, pp.615-628, 1985.
- 9) Mualem, Y. : A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resour. Res., Vol. 12, pp.513-522, 1976.
- 10) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠：有限要素法による飽和—不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 第 264 号, pp.87-95, 1977.
- 11) Meiri, D. : Two-phase Flow Simulation of Air Strage in an Aquifer, Water Resources Res, Vol. 17, No.5, pp.1360-1366, 1981.
- 12) 地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会：不飽和地盤の挙動と評価, p.14, 2004.

(2006 年 6 月 30 日 受付)