

2層地盤における鉛直浸潤時の間隙空気の挙動に関する研究

Study on Pore-Air effect on vertical infiltration into 2-layered ground

齋藤 雅彦*・正木 寛昭**・市成 準***

Masahiko SAITO, Hiroaki MASAKI and Junichi ICHINARI

*正会員 博士(工) 神戸大学助教 都市安全研究センター(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**正会員 修士(工) 株式会社商船三井(〒105-8688 東京都港区虎ノ門 2-1-1)

***神戸大学技術専門職員 工学部市民工学科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

To understand the detailed processes of rainfall infiltration into 2-layered ground, the lab-scale experiments were conducted by using sand and decomposed granite. And the two phase flow and the saturated-unsaturated seepage analysis were carried out to reproduce the experiments, and compared results of these analysis methods. In the experiments, when the surface layer has low permeability, pore pressure increased as soon as the rainfall was started. On the other hand, in the case of reverse layer system, pore pressure increased after the wetting front reached the sensors. It seemed to be no influence of pore air, but the two phase flow analysis reproduced the experimental results better and the results of the analysis showed the increasing of the pore air pressure obviously.

Key Words: layered ground, rainfall infiltration, 2-phase flow, finite element analysis

1. 序論

降雨による鉛直浸潤過程を解析する手法として、一般に差分法や有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析^{1), 2), 3)}が広く用いられている。

一方、降雨浸潤開始後の比較的早い段階で、盛土地盤中に設けられた排水渠からの流出量が増加する現象が見られることがあり、これは押し出し流あるいはピストン流と呼ばれている⁴⁾。このような現象は、降雨の浸潤に伴う間隙内の空気圧の上昇によって生じると考えられるが、空気の流動を無視した飽和・不飽和浸透流解析では取り扱うことができない。とくに、降雨強度が地盤の最終浸透能を上回り、地表面に湛水が生じるような浸潤過程を適切に把握する際には、間隙空気の流動を考慮した解析手法である気液2相流解析^{5), 6)}が適当であることが、既往の研究により指摘されている^{7), 8), 9), 10), 11)}。

間隙空気の挙動に関する従来の研究においては、主に1層からなる地盤が検討の対象とされてきたが、実地盤は性質の異なる土層がいくつか積み重なって層構造を作っており、こうした成層土中への降雨浸潤過程は1層の地盤への浸潤過程と比較して複雑なものとなる¹²⁾。

本研究では、成層土への降雨浸潤過程における地盤内間隙空気の影響を把握するために、2層構成の模型地盤を用いて室内実験を行う。また実験での浸潤過程を有限要素法による数値シミュレーションを用いて再現することを試み、その際用いる解析手法として間隙空気の流動を考慮し

ない飽和・不飽和浸透流解析(以下、1相流解析と記す)および間隙空気を考慮した気液2相流解析の両解析手法を適用し、再現性を比較する。

2. 2層地盤への鉛直浸潤過程に関する模型実験

2種類の試料を用いて作成した模型地盤に降雨を与え、降雨浸潤過程における地盤内の間隙空気の影響を間隙水圧と飽和度の変化から把握することを目的とする。

2.1 実験の概要

図-1に本実験で用いた実験装置の概略図を示す。模型地盤は幅2.0m、高さ1.0m、奥行き0.4mであり、2層構成とする。層厚は下層が0.7m、上層が0.3mとし、地下水面は0.15mに設定する。装置側面には地下水位を調節するためのタンクが設置されており、地盤と両側タンクとの境界は、基底部から0.05mの両側側面に関してのみ水および空気が透過可能となっている。降雨は、20mm間隔で直径1.2mmの開口部を持つ長さ2m、外径12.7mmの鋼管を4本用い、これを地盤表面から0.3mの高さに設置して与える。降雨強度は、流量計の流量調節バルブを用いて調節し、また降雨中は雨滴の集中を防ぐために送風を行った。

測定に用いたセンサーは、間隙水圧計測のための埋設型感圧水分センサー(以下、間隙水圧計と記す)、および体積含水率計測のための土壌水分センサー(以下、ADRセンサーと記す)である。

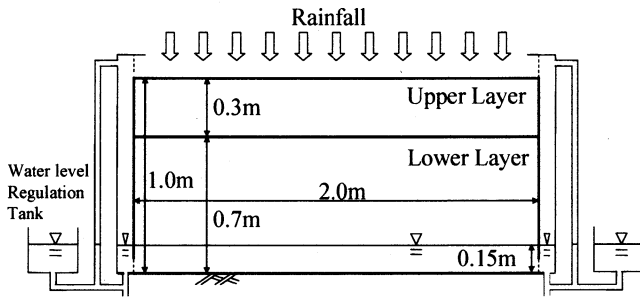


図-1 実験装置概略図

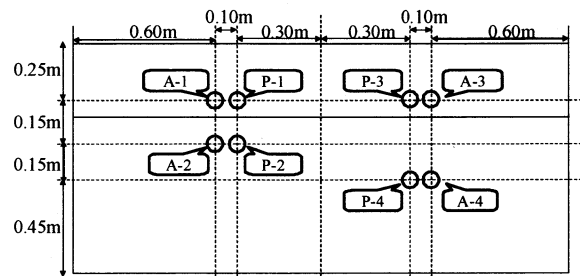


図-2 センサー配置図

表-1 土層の構成

	CASE-A	CASE-B
Upper Layer	まさ土	砂
Lower Layer	砂	まさ土

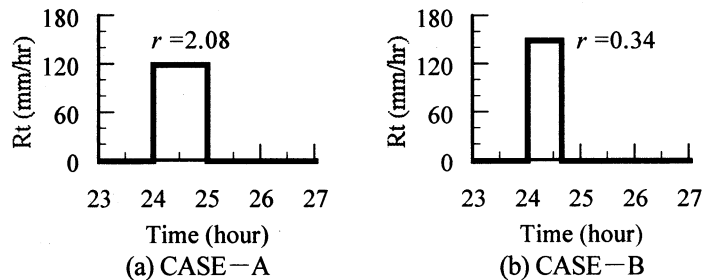


図-3 降雨条件

各センサーの埋設位置に関しては、模型地盤の間隙水圧と飽和度の関係（水分特性曲線）を把握するために、両センサーを近接して埋設する。それら一対の間隙水圧計と ADR センサーを一括りに扱い、図-2 に示す 4 か所に配置する。図中に示した番号（P-1～P-4、A-1～A-4）により各センサーを識別する。ここで、P-1～P-4 は間隙水圧計、A-1～A-4 は ADR センサーである。各センサーから得られた出力電圧は、事前に求められた較正曲線により水圧と体積含水率に換算した。

模型地盤作成に用いた試料は、砂（ $D_{20}=20\%$ 通過径 $=0.25\text{mm}$ ）とまさ土（ $D_{20}=0.03\text{mm}$ ）である。各試料の飽和透水係数 k は、定水位透水試験より、砂について $k=1.21 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 、まさ土について $k=1.60 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ が得られた。

実験手順は、まず地盤全体を飽和させた状態から水位調節タンクを地下水面高さが 0.15m となるように降下させ、地盤内の脱水を開始する。この時刻を実験開始時刻とする。実験開始後 24 時間経過した後、降雨を開始し、所定の時間継続して一定の強度で降雨を与えることとする。

実験は、模型地盤の作成条件により表-1 に示す 2 ケースとする。また各ケースでの降雨条件を図-3 に示す。図中の r は、降雨強度 R_t と上層の飽和透水係数 k の比 $r=R_t/k$ である。上層の飽和透水係数を最終浸透能とみなせば、 $r \geq 1$ では湛水が生じ、 $r < 1$ では湛水は生じないと想定される。

2.2 実験結果と考察

(1) CASE-A

図-4 に CASE-A の実験結果を示す。それぞれ横軸には経過時間を、縦軸には圧力水頭または飽和度を示す。実験開始 24 時間後から降雨を開始し、降雨開始 10 分後頃から地表面に湛水が生じた。センサー値の変化について、上層に関しては 24～24.5 時間にかけて、下層に関しては 24.5～25 時間にかけて、圧力水頭と飽和度の値が急激に上昇

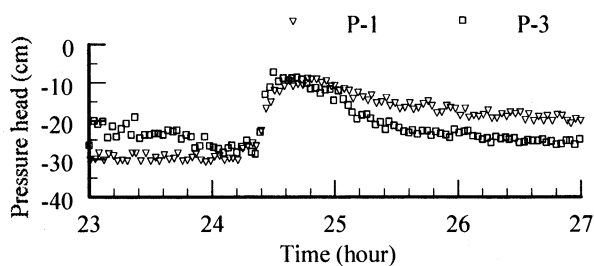
していることが確認できる。これより、この時点で浸潤前線がセンサーに到達したものと考えられる。図-5 は降雨開始から 24 分間（実験開始から 24～24.4 時間）の圧力水頭の変化を拡大して示したものである。P-3（上層右）を除く 3 点で降雨開始から約 10 分後（＝湛水が生じ始めた時刻）から明確な圧力の上昇が見られるが、飽和度については、この時点では反応がなく、浸潤前線は到達していないと考えられる。さらに、これら間隙水圧計の値が上昇し始めるのとほぼ同時刻に、実験装置両側の水位調節タンクを介して模型地盤からの流出が確認された。

これらの現象は、地盤の浸透能を超え湛水が生じる降雨を与えたことが原因であると考えられる。すなわち、降雨初期段階から地表面付近の飽和度が急激に上昇したため雨水と間隙空気との円滑な置換が阻害され、地表面から間隙内に水が満たされていくことで地盤内の間隙空気が浸潤前線と地下水面の間に封入される。これに伴って地盤間隙内の圧力が上昇し、地下水面が加圧され土層の底部の水が押し出されて流出したものと判断できる。

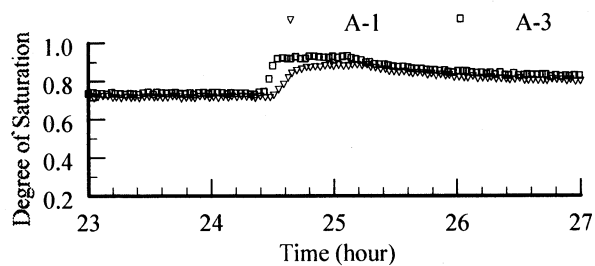
また、間隙空気の封入による間隙水圧の上昇量に関しては、上層と下層でほぼ等しく、5～6cm 程度となっている。したがって、地表面に湛水が生じる際には、間隙空気の封入により地盤全体にわたって圧力が上昇し、その上昇量も層構造に寄らず地盤全体でほぼ一定となると考えられる。

(2) CASE-B

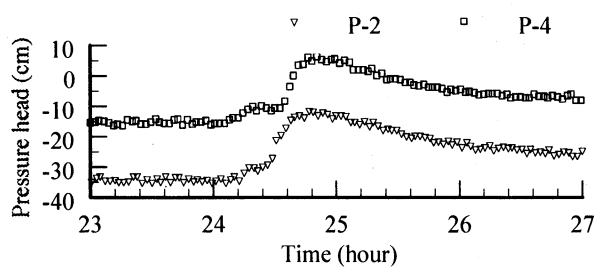
図-6 に CASE-B の実験結果を示す。CASE-B では、CASE-A よりも降雨強度が大きい 150mm/h の降雨を与えたが、上層にまさ土と比べて透水性の良い砂を配しているため、地表面に到達した雨滴が直ちに地盤内へと浸透していった。また、CASE-A と同様に上層・下層ともに圧力水頭と飽和度の値が急激に上昇する時刻があり、浸潤前線がセンサーに到達したことが確認できる。



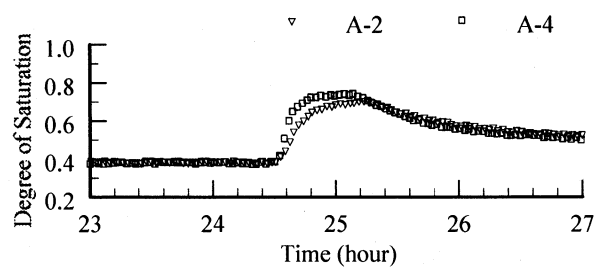
(a) 上層の間隙水圧の時間変化



(b) 上層の飽和度の時間変化

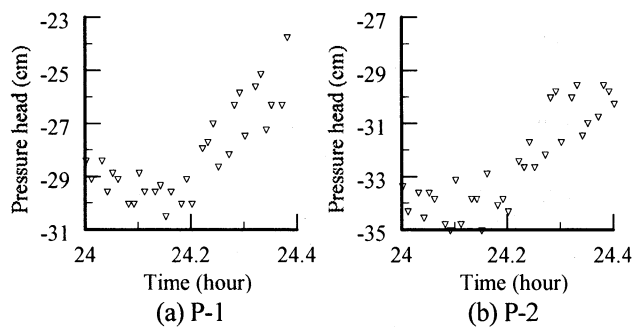


(c) 下層の間隙水圧の時間変化



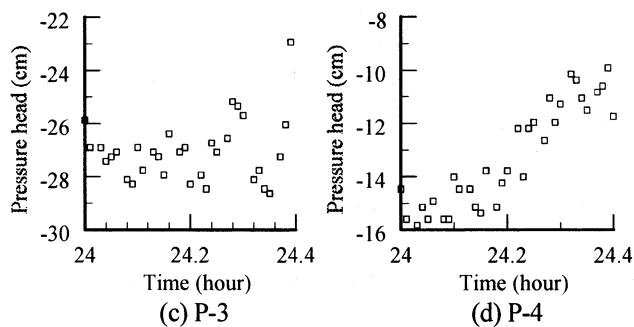
(d) 下層の飽和度の時間変化

図-4 圧力水頭と飽和度の測定結果(CASE-A)



(a) P-1

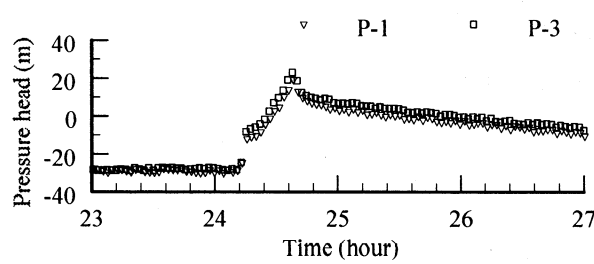
(b) P-2



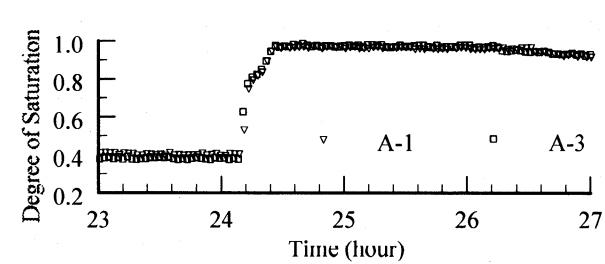
(c) P-3

(d) P-4

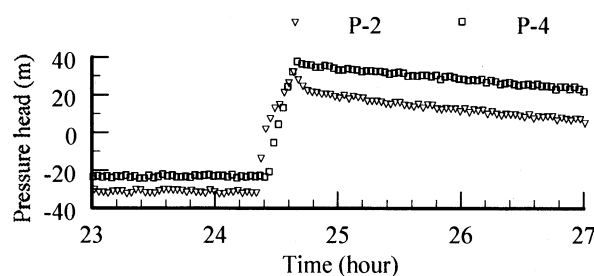
図-5 降雨開始から24分間の間隙水圧変化



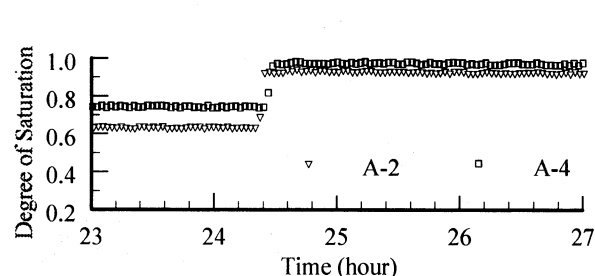
(a) 上層の間隙水圧の時間変化



(b) 上層の飽和度の時間変化



(c) 下層の間隙水圧の時間変化



(d) 下層の飽和度の時間変化

図-6 圧力水頭と飽和度の測定結果(CASE-B)

降雨開始から 38 分後には地表面に湛水が生じ始めるとともに、上層の圧力水頭が概ね静水圧に達したことから降雨を停止したため、この時点から測定値の下降が始まっている。一方で、CASE-A で見られたような浸潤前線の到達以前に圧力水頭の値が顕著に上昇する現象は確認することができなかった。

3. 数値シミュレーションによる模型実験の再現

数値シミュレーションにより模型実験で得られた圧力および飽和度の時間変化の再現を試みる。それぞれの実験について有限要素法による 1 相流および 2 相流解析を行い、実験結果と比較してその再現性について検討する。

3.1 基礎方程式

水および空気の基礎方程式は、連続式とダルシー則に基づき、式(1)および式(2)となる⁹⁾。

$$\eta \frac{dS_w}{dP_c} \left(\frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{rw} \frac{k_{ij}}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\eta \left\{ (1 - S_w) \frac{d}{dP_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) - \frac{1}{\beta_a} \frac{dS_w}{dP_c} \right\} \frac{\partial P_a}{\partial t} + \eta \frac{1}{\beta_a} \frac{dS_w}{dP_c} \frac{\partial P_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_{ra}}{\beta_a} \frac{k_{ij}}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

ここに t は時間、 x_i は空間座標、 η は空隙率、 k_{rw} 、 k_{ra} はそれぞれ水と空気の相対透過係数、 k_{ij} は地盤の固有透過度、 μ_w 、 μ_a はそれぞれ水と空気の粘性係数、 P_w 、 P_a は水と空気の圧力、 P_c は毛管圧 ($=P_a - P_w$)、 S_w 、 S_a はそれぞれ水と空気の飽和度、 β_a は構成体積率、 g は重力加速度である。

境界条件は、圧力規定の場合、

$$\begin{aligned} \text{水} &: P_w = P_{wb} \\ \text{空気} &: P_a = P_{ab} \end{aligned} \quad (3)$$

である。ここに、 P_{wb} および P_{ab} は、境界上の水圧および空気圧である。また、流量規定境界の場合は、

$$\begin{aligned} \text{水} &: -k_{rw} \frac{k_{ij}}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) n_i = Q_{wb} \\ \text{空気} &: -k_{ra} \frac{k_{ij}}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} n_i = Q_{ab} \end{aligned} \quad (4)$$

である。ここに、 Q_{wb} は水の境界流束、 Q_{ab} は空気の境界流束、 n_i は境界の外向き単位法線ベクトル、 ρ_w は水の密度である。ここで、 $P_a = 0$ (大気圧) として、式(1)の左辺第一項および式(2)を無視し、 $P_c = -P_w$ とすると、1 相流解析の基礎式が得られる。

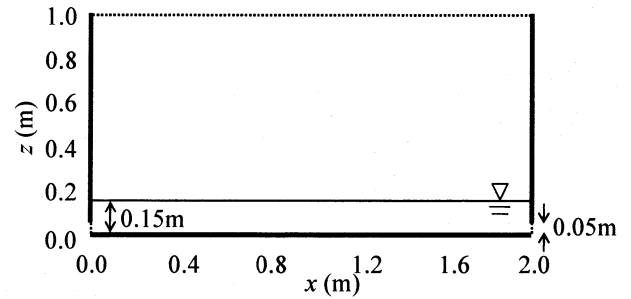


図-7 解析領域の概要

3.2 解析条件

(1) 解析モデル

図-7 に解析領域の概要を示す。解析領域は高さ 1.0m、幅 2.0m の鉛直 2 次元地盤である。模型実験をシミュレートする際の初期条件は、水位を地表面に設定し、飽和地盤として、水圧は静水圧分布、空気圧は全領域において大気圧とする。

側面 ($x=0$ m および $x=2$ m) における境界条件は、 $z > 0.05$ m で $Q_{wb} = Q_{ab} = 0$ 、また両側面の底部から $z \leq 0.05$ m における境界条件は、実験で両側タンクの水位を降下させるのに要した時間 (15 分) と同時間をかけて境界条件を地下水面の 0.15m 低下させ、その後は地下水深 0.15m で一定とした。

地表面では、空気について圧力規定で $P_a = 0$ m (=大気圧)、水については無降雨 ($R_f = 0$) のとき流束規定で $q_w = 0$ 、降雨時 ($R_f > 0$) は流束規定で $q_w = R_f$ 、ただし、 $P_w \geq 0$ m となった (すなわち浸透能が降雨量以下となった) 時点で圧力規定 $P_w = 0$ m とする。

(2) 水分特性曲線の推定

実験において、降雨開始前の吸水時および脱水時に計測した毛管圧と飽和度の関係を用い、以下の式(5)に示す van Genuchten¹³⁾ の式によりフィッティングを行い、主排水曲線および主吸水曲線のパラメータを推定した。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{S_f - S_r} = \frac{1}{\left\{ 1 + (\alpha h_c)^n \right\}^m} \quad (5)$$

ここに S_e は有効飽和度、 α 、 n 、 m は形状パラメータであり、一般に $m = 1 - 1/n$ 、 S_r は残留飽和度、 S_f は $P_c = 0$ における飽和度、 h_c は毛管圧 P_c の水頭換算値 $h_c = P_c / \rho_w g$ である。ここでは S_f については $S_f = 1.0$ とする。

パラメータの主排水曲線と主吸水曲線の間の関係は、 n と S_r は共通と仮定し、 α についてのみ、それぞれ α_d と α_w として区別する。推定の手順は、まず主排水曲線のパラメータ n 、 α_d 、 S_r を同定し、吸水曲線については排水曲線の同定で得られた n を固定して α_w と S_r を同定する。ただし、吸水曲線の同定で得られた S_r は、主吸水曲線とは異なるので無視する。図-8 は一例として CASE-A における各層のフィッティング結果、表-2 は同定されたパラメータの一覧を示す。なお、同定に用いた測定結果は、各層ともに左側のセンサーから得られたものである。

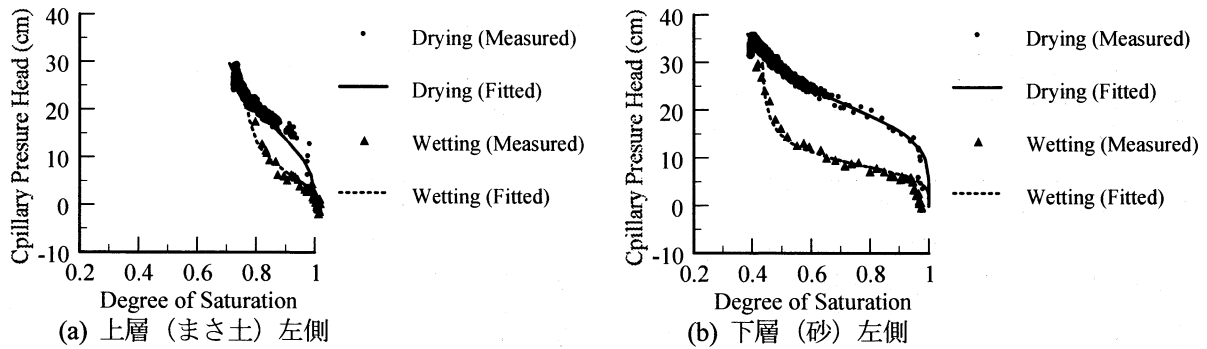


図-8 水分特性曲線の推定例(CASE-A)

表-2 水分特性曲線のパラメータ一覧

	upper layer				lower layer			
	n	α_d (1/cm)	S_r	α_w/α_d	n	α_d (1/cm)	S_r	α_w/α_d
CASE-A	3.11	5.92×10^{-2}	0.600	2.500	4.84	4.64×10^{-2}	0.291	2.500
CASE-B	3.51	5.48×10^{-2}	0.211	1.400	2.50	8.31×10^{-2}	0.529	1.300

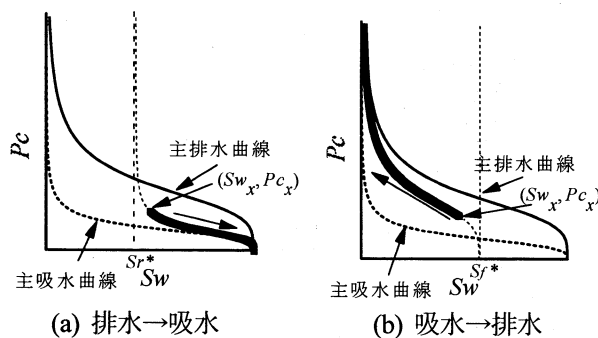


図-9 ヒステリシスの取扱い

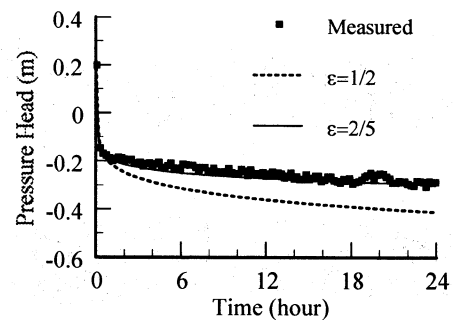


図-10 フィッティングの一例 (CASE-A; 上層左側)

(3) 水分特性曲線のヒステリシスの取扱い

一般に、飽和度と毛管圧の関係はヒステリシスにより初期の保水状態や吸排水履歴に依存し、一義的には決定できない。主排水曲線と主吸水曲線からヒステリシスを表現する走査曲線を推定する方法として、本研究では Scott *et al.*¹⁴⁾の方法を用いて以下のように取り扱った¹⁵⁾。

いま、排水状態にある点 (S_{wx}, P_{cx}) から吸水状態に変化する場合、式(5)に、 $S_{wx}, P_{cx}, \alpha_w, n, m, S_f$ をそれぞれ代入すると、仮想の残留飽和度 S_r^* が求められ、これを新たな吸水時の走査曲線のパラメータとする (図-9(a))。また逆に吸水状態にある点 (S_{wx}, P_{cx}) から排水状態に変化する場合、式(5)に、 $S_{wx}, P_{cx}, \alpha_d, n, m, S_f$ をそれぞれ代入し、仮想の S_r^* を求め、これを新たな排水時の走査曲線とする (図-9(b))。

(4) 透水係数の推定

比透水係数、比透気係数と有効飽和度の関係は、水、空気それぞれについて以下の関係を用いた^{13), 16)}。

$$k_{rw} = S_e^\epsilon \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right) \right\}^2 \quad (6)$$

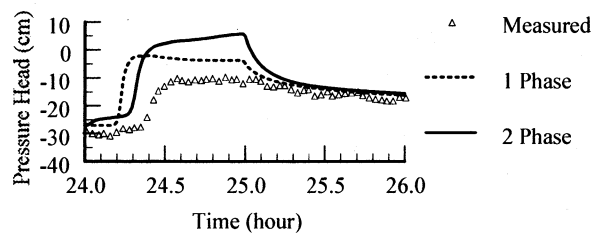
表-3 透水係数の推定結果

	k_{up} (cm/s)	k_{lo} (cm/s)	ϵ
CASE-A	2.50×10^{-3}	5.00×10^{-2}	5/2
CASE-B	5.00×10^{-2}	2.00×10^{-3}	1/4

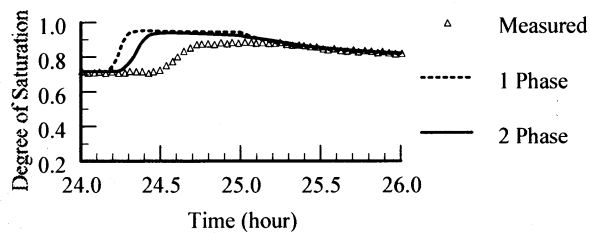
$$k_{ra} = (1 - S_e)^\gamma \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m} \quad (7)$$

ここに、 ϵ および γ は空隙の連続性に関わるパラメータである。

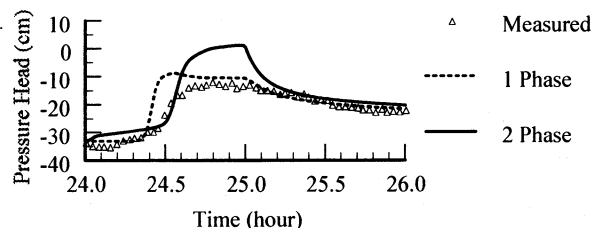
シミュレーションで用いる透水係数は、以下のように同定した。まず、実験開始時刻から降雨開始までの脱水過程 (24 時間) においては、間隙空気の影響は無視できると考えられる。そこで、上層および下層の飽和透水係数と比透水係数のパラメータ (式(6)の ϵ) を、この間の間隙水圧変化を良好に再現するよう試行錯誤により求めた。すなわち、フィッティングに用いたパラメータは、上層と下層の飽和透水係数 k_{up} 、 k_{lo} および比透水係数 k_{rw} に関わる ϵ である。表-3 にフィッティングより求めたパラメータを示す。透気係数については、飽和透水係数と水の粘性係数から固有透過度を逆算し、また比透気係数に関するパラメータ γ は、一般に用いられる値 ($\gamma=1/3$) を用いた¹⁷⁾。



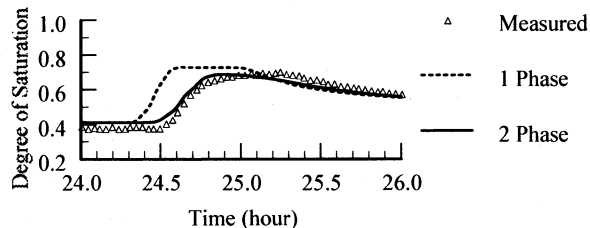
(a) 上層の間隙水圧 (P-1) の時間変化



(b) 上層の飽和度 (A-1) の時間変化



(c) 下層の間隙水圧 (P-2) の時間変化



(d) 下層の飽和度 (A-2) の時間変化

図-11 実験結果と解析結果比較 (CASE-A)

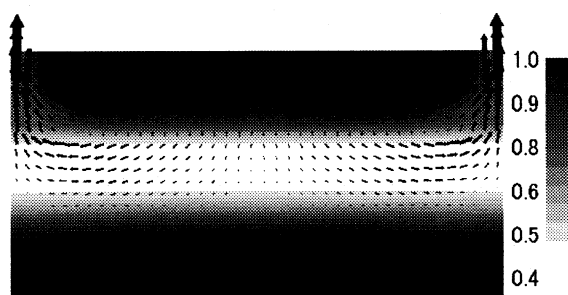


図-12 間隙空气の流動と飽和度分布 (CASE-A; 20 分後)

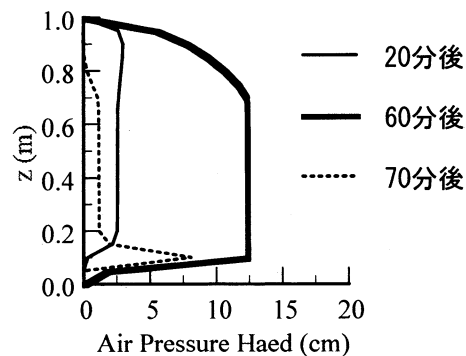


図-13 空气圧分布 (x=0.65m 断面)

(5) 降雨条件

図-3 に示す実験と同様の降雨条件で数値シミュレーションを行う。降雨の与え方については、土槽両端から 0.2m の部分は補強のためのカバーが取り付けられており、上部から直接降雨を与えることが困難であった。このため、数値シミュレーションにおいては、送風による多少の回り込みを考慮して地盤両端から 0.15m に関しては降雨を与えないこととする。

3.3 解析結果と考察

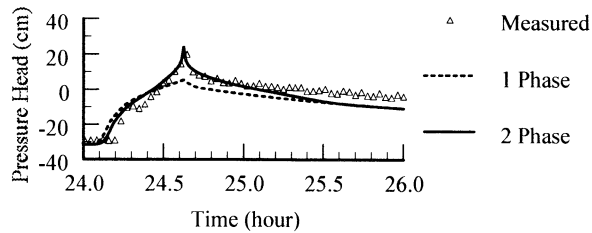
(1) CASE-A

図-11 に CASE-A の実験結果と解析結果の比較を示す。上層、下層とも地盤左側に配置したセンサーの値を用いている。間隙水圧変化の比較において、2 相流解析では模型実験と同様に降雨直後の浸潤前線が到達していない段階から間隙水圧の上昇が確認できる。この点については、1 相流解析では、当然のことながらこのような上昇は生じていない。一方、間隙水圧の上昇量に関しては、2 相流解析結果の方が大きく評価されており、間隙空气の影響を過大評価していると考えられる。これは、実験では降雨が完全に均一に与えられておらず、地表面より部分的に空气が抜けやすい状態となっており、その結果、封入される間隙空气の量が少なかったためであると考えられる。

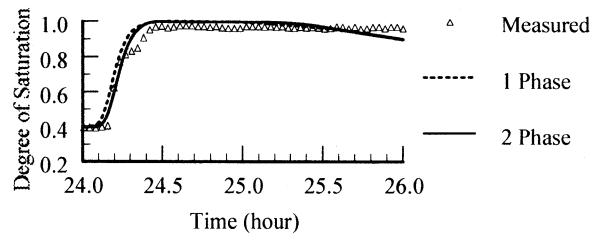
一方、飽和度の時間変化について、浸潤前線がセンサーに到達するまでの時間は 2 相流解析結果の方が実験結果に近い。特に、下層については実験結果が良好に再現されている。これらの結果から、間隙水圧変化については、2 相流解析では間隙空气の影響が過大に評価されているものの、降雨開始直後の水圧の上昇は適切に評価されているとともに、飽和度の変化についても、2 相流解析の再現性が高く、CASE-A のように地表面に湛水が生じるような降雨条件では、浸潤過程における間隙空气の影響は無視できないと考えられる。

図-12 は 2 相流解析結果における降雨開始 20 分後の空气の流動と飽和度分布を示したものである。降雨により地表面付近の飽和度が上昇し、降雨が与えられていない地盤両端部からの空气の放出が確認できる。一方、地盤中央付近においては下方向への空气の流れがあり、間隙空气を排除しながら浸潤前線が進行する様子が明瞭に現れている。

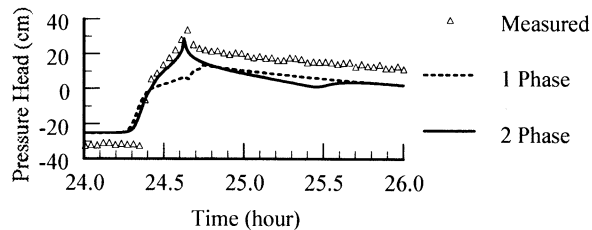
図-13 は降雨時の鉛直方向の空气圧分布を示す。降雨開始後から上層、下層ともほぼ一様に間隙空气圧が上昇していることがわかる。その時間変化については、降雨開始 60 分後、すなわち降雨停止時刻まで上昇を続け、降雨停止とともに下降する。以上のことから、浸透能を超え、湛水が生じる降雨強度が与えられた場合、層構造に関わらず地盤全体で一様に間隙空气圧が上昇することがわかる。



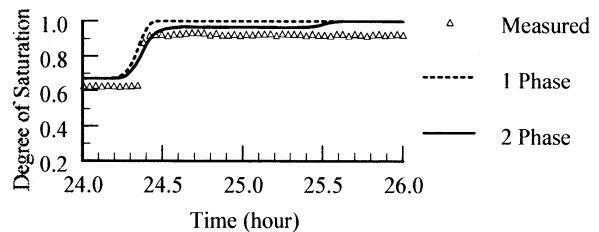
(a) 上層の間隙水圧 (P-1) の時間変化



(b) 上層の飽和度 (A-1) の時間変化

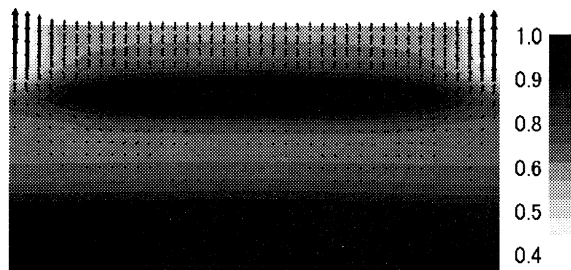


(c) 下層の間隙水圧 (P-2) の時間変化

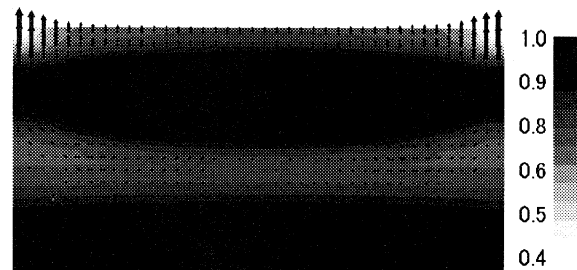


(d) 下層の飽和度 (A-2) の時間変化

図-14 実験結果と解析結果比較 (CASE-B)



(a) 降雨開始から 20 分後



(b) 降雨開始から 30 分後

図-15 間隙空気の流れと飽和度分布 (CASE-B; 20 分後)

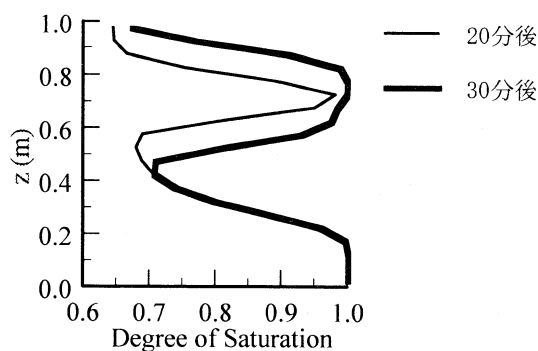


図-16 飽和度分布 ($x=0.65\text{m}$ 断面)

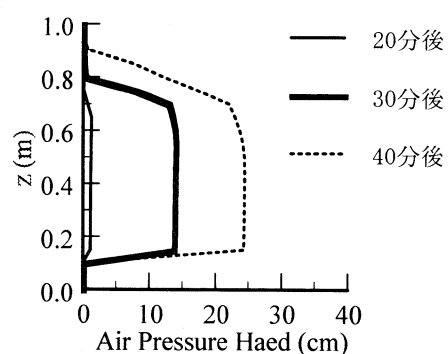


図-17 空気圧分布 ($x=0.65\text{m}$ 断面)

(2) CASE-B

図-14 は CASE-B の実験結果と解析結果を比較したものである。下層では降雨前の脱水過程のシミュレーションで生じた誤差のため計算値は実験値より幾分大きくなっているが、その後の間隙水圧、飽和度の変化は2相流解析によってきわめて良好に再現されていることがわかる。とくに、降雨停止時に生じている間隙水圧の最大値については、実験では上層で約 20cm、下層で約 30cm に達しているのに対して、1相流解析ではそれぞれ 5cm および 15cm 程度と過小評価されている。

図-15 は降雨浸潤時の空気の流れと飽和度分布である。降雨開始 20 分後の時点では、地表面からほぼ一様に間隙空気が放出されているが、降雨開始 30 分後になると地盤中央部からの放出量が減少し、下層地盤内では下方向への流動が大きくなっている。よって、浸潤前線が上層の砂層から下層のまき土層へと浸潤していく際に2層の境界面に水が滞留して飽和状態となり、まき土層内に存在する間隙空気の封入が始まっているものと考えられる。また、この時点では上下層のセンサーにはすでに浸潤前線が到達しているため、水圧の上昇が水分量の増加に伴うものか、

あるいは間隙空気圧の上昇に伴うものかを実験結果のみから判断することは困難である。

図-16に降雨時の鉛直方向の飽和度分布を、図-17に空気圧分布をそれぞれ示す。両図より、降雨開始20分後から30分後にかけて、2層の境界面付近が飽和状態となり、それに伴い下層地盤内の間隙空気圧が上昇していることがわかる。このとき、下層地盤内では不飽和状態($P_c > 0$)であるにもかかわらず、間隙水圧は正の値($P_w > 0$)となる。

このような下層地盤内の間隙空気の封入の発生条件は、上下層の初期水分状態や上層厚によって異なると考えられるが、傾向としては上層地盤が薄く、また、降雨強度が下層地盤の浸透能を上回る場合には生じ得る現象と思われる。

4. 結論

本研究では、成層土への降雨浸潤時における間隙空気の影響を検討するために、2層構造の実験地盤を用いて模型実験を行い、また1相流解析および2相流解析による数値シミュレーションにより降雨実験結果の再現を試みた。以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) 細粒土層から粗粒土層への浸潤過程について、実験より降雨直後から地表面に湛水が生じる降雨を与えた際、間隙空気が封入されることで浸潤前線到達以前に間隙内圧力が上昇し、それに伴い地下水面が加圧され地下水が流出する現象を確認した。
- (2) 地表面に湛水が発生し、間隙空気が封入される際の空気圧の上昇量は、各層の地盤特性に関わらず同程度となり、地盤内全体にわたって様な分布となった。ただし、数値シミュレーションでは間隙水圧の上昇が過大に評価された。これは実験では降雨が均一に与えられなかったため、局所的な空気の排出が生じていたためと推察される。
- (3) 粗粒土層から細粒土層への浸潤過程についての降雨実験結果は、2相流解析によって良好に再現され、地表面に湛水が生じない場合でも、間隙空気圧の影響が確認された。
- (4) 粗粒土層から細粒土層への浸潤過程では、2層の境界面付近に水が滞留し、局所的に飽和度が上昇することで下層の間隙空気が封入され、地盤内圧力が上昇する。

参考文献

- 1) Neuman, S.P.: Saturated unsaturated seepage by finite element, *Proc., ASCE HY*, Vol.99, No.12, pp.2233-2250, 1973.
- 2) Neuman, S.P.: Galerkin method of analyzing non-steady flow in saturated-unsaturated porous media, *Finite Element Method Inflow Problem*, edited by C. Taylor, O. C. Zienkiewicz, R. H. Gallagher, John Wiley & Sons, Chap.19, 1974.
- 3) 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, 土木学会論文集, 第264号, pp.87-96, 1977.
- 4) 小川滋: 森林と水資源(丹保憲二・丸山俊朗編, 水文大循環と地域水代謝, 第3章), 技報堂出版, p.53, 2003.
- 5) Pinder, G. F. and Gray, W. G.: Finite element simulation in surface and subsurface hydrology, *Academic Press*, pp.184-190, 1977.
- 6) Meiri, D.: Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, *Water Resources Research*, Vol.17, No.5, pp.1360-1366, 1981.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 高木不折・森下忠司: 2相流としての不飽和鉛直浸透解析, 土木学会論文集, 第271号, pp.37-44, 1978.
- 10) 齋藤雅彦, 川谷健: 間隙内空気の運動を考慮した数値シミュレーションによる雨水浸透・浸出過程に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.865-872, 2003.
- 11) 齋藤雅彦, 八木宗一郎, 正木寛昭, 市成準一: 降雨浸透・浸出過程における地盤内間隙空気の影響に関する実験と数値解析, 応用力学論文集, Vol.9, pp.901-908, 2006.
- 12) 中野政詩: 土の物質移動学, 東京大学出版会, pp.26-29, 1998.
- 13) 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.
- 14) Scott, P. S., Farquhar, G. J. and Kouwen, N.: Hysteretic Effects on Net Infiltration, pp.163-170, In *Advances in Infiltration*, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 1983.
- 15) 社団法人地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, 丸善, pp.40-41, 2004.
- 16) Maulem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 17) Helmig, R.: *Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface*, Springer, p.75, 1997.

(2008年4月14日 受付)