

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

Numerical Study on Rainfall Infiltration and Seepage Processes Considering Pore-Air Flow

齋藤 雅彦*, 川谷 健**
Masahiko SAITO and Takeshi KAWATANI

*正会員 博士(工) 神戸大学助手 都市安全研究センター(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
**フェロー会員 Ph.D. 神戸大学教授 都市安全研究センター(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

To understand the influence of pore air on rainfall infiltration and seepage, the results of numerical simulation of two-phase flow through porous medium were compared with the results of usual saturated-unsaturated seepage simulation which ignored pore-air flow. It was shown that when ground surface was under the ponded condition a rise in pore-air pressure due to infiltration caused the increase of amount of water seeping out of ground to under-drain. Air flow seeping out of ground reduced the infiltration rate. When ground surface was in non-ponded condition, the degree of pore-air influence highly depended on hydraulic conductivity and size of seepage flow field.

Key Words: 2-phase flow, saturated-unsaturated seepage, rainfall infiltration, finite element analysis

1. 序論

斜面や盛土地盤の安定問題、あるいは農地の灌漑を考える場合、雨水の浸透・浸出過程を適切に把握することが求められる。その手段として、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)}が用いられることが多く、それらの手法は、計算機の性能向上に伴ってすでに広く普及する段階に至っているけれども、地盤間隙内の空気の流動については考慮していない。

一方、降雨浸透開始後の比較的早い段階で、盛土地盤中の排水渠からの浸出水量が急速に増加する現象、あるいは森林地において早い中間流成分が増える現象は、降雨による「新しい水」によって地中に貯留される「古い水」が押し出される結果と考えられている⁴⁾。このいわゆる押し出し流は、間隙内の空気の圧力変化や流動を無視して取り扱えない。このような鉛直浸透過程における間隙空気の影響に関しては、田中⁵⁾、佐藤⁶⁾らの研究、二相流解析を用いた高木・森下⁷⁾の研究が見られる。しかし、これらは主として鉛直方向の流れに着目しているため、水平方向の流れを含むより現実的な流れ場における間隙空気の影響についてはなお不明な点も多い。

本研究では、間隙空気が雨水浸透・地下水流出過程に及ぼす影響を調べるために、多孔質媒体中の気液2相流の基礎式^{8), 9)}に基づく数値シミュレーションを行い、その結果と従来の飽和・不飽和浸透流解析(以下、1相流解析と呼ぶ)によるシミュレーション結果と比較する。また、間隙空気の影響が透水係数および浸透場の大きさによってどのように違うかを明らかにする。

2. 気液2相流の基礎方程式

地盤内を流れる流体F(ここでは水(w)または空気(a))の連続の式は、以下のようになる。

$$\frac{\partial(\eta S_F \rho_F)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_F q_{Fi}) = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 x_i は空間座標、 η は空隙率、 S_F は流体Fの飽和度、 ρ_F は流体Fの密度、 q_{Fi} は流体Fの*i*方向の流速成分である。ここで運動方程式として、ダルシーの法則が成り立つとすると、 q_{Fi} は次式で与えられる。

$$q_{Fi} = -k_{rF} \frac{k_{ij}}{\mu_F} \left(\frac{\partial P_F}{\partial x_j} + \rho_F g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

ここに、 k_{rF} は相対透過係数で飽和度 S_F の関数、 k_{ij} は地盤の固有透過度テンソル、 μ_F は流体Fの粘性係数、 P_F は流体Fの圧力、 g は重力加速度である。

ここで水の密度変化、空隙率の時間変化、および空気に作用する重力を無視し、 $\rho_w=一定$ 、 $\eta=一定$ 、 $\rho_w g=0$ とすると、式(1)および式(2)より、水および空気それぞれについて、次式が得られる。

$$\eta \frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{rw} \frac{k_{ij}}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (3)$$

$$\eta \frac{\partial}{\partial t} (\rho_a S_a) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho_a k_{ra} \frac{k_{ij}}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

次に空気の密度 ρ_a は圧力 P_a と絶対温度 T の関数であり、気体定数を R とすると、

$$\rho_a = \frac{P_a}{RT} \quad (5)$$

であり、標準状態における圧力と温度をそれぞれ P_{as} および T_s とすると、空気の密度は定数として、

$$\rho_{as} = \frac{P_{as}}{RT_s} \quad (6)$$

である。また、一定質量の空気を考えれば、

$$\rho_a V_a = \rho_{as} V_{as} \quad (7)$$

である。ここで、構成体積率 $\beta_a = V_a/V_{as}$ を導入すると、式(7)は、次のように書き換えられる。

$$\rho_a = \rho_{as} \frac{V_{as}}{V_a} = \frac{\rho_{as}}{\beta_a} \quad (8)$$

また、式(8)に式(5)、式(6)を代入すると、 β_a は圧力および温度の関数として、次式で与えられる。

$$\beta_a = \frac{P_{as}}{P_a} \frac{T}{T_s} \quad (9)$$

式(9)を用いると、式(4)は、次式となる

$$\eta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_a}{\beta_a} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_{ra}}{\beta_a} \frac{k_{ij}}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

さらに、水と空気の飽和度については、次の関係が成り立つ。

$$S_a + S_w = 1 \quad (11)$$

また、水の飽和度 S_w は毛管圧 P_c の関数であり、

$$P_c = P_a - P_w \quad (12)$$

であること、および β_a は圧力 P_a の関数であり、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) = \frac{d}{dP_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) \frac{\partial P_a}{\partial t} \quad (13)$$

であることから考慮すると、式(3)および式(10)の左辺はそれぞれ以下のようになる。

$$\eta \frac{\partial S_w}{\partial t} = \eta \frac{dS_w}{dP_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} = \eta \frac{dS_w}{dP_c} \left(\frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \eta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_a}{\beta_a} \right) \\ &= \eta (1 - S_w) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) - \eta \frac{1}{\beta_a} \frac{dS_w}{dP_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} \\ &= \eta (1 - S_w) \frac{d}{dP_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right) \frac{\partial P_a}{\partial t} - \eta \frac{1}{\beta_a} \frac{dS_w}{dP_c} \left(\frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $B = \frac{d}{dP_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right)$ 、 $C = \frac{dS_w}{dP_c}$ とおくと、基礎方程式は、式(16)および式(17)となる。

$$\eta C \left(\frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{rw} \frac{k_{ij}}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \eta \left\{ (1 - S_w) B - \frac{C}{\beta_a} \right\} \frac{\partial P_a}{\partial t} + \eta \frac{C}{\beta_a} \frac{\partial P_w}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_{ra}}{\beta_a} \frac{k_{ij}}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

また、圧力 P_w および P_a を以下のように水頭換算値とし、ゲージ圧で表せば、

$$p_w = \frac{P_w - P_s}{\rho_w T g}, \quad p_a = \frac{P_a - P_s}{\rho_w T g}, \quad p_c = \frac{P_c}{\rho_w T g} \quad (18)$$

$$B' = \frac{d}{dp_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right), \quad C' = \frac{dS_w}{dp_c} \quad (19)$$

ただし、 P_s は大気圧、 $\rho_w T$ は温度 T における水の密度である。さらに固有透過度が等方性で、値が k の場合は、

$$\mu_w' = \frac{\mu_w}{\rho_w T g}, \quad \mu_a' = \frac{\mu_a}{\rho_w T g}, \quad K_w = \frac{k}{\mu_w}, \quad K_a = \frac{k}{\mu_a'} \quad (20)$$

とおくことができ、温度 T が一定と仮定すると、式(16)および式(17)は以下のように書き換えられる。

$$\eta C' \left(\frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{\partial p_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{rw} K_w \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \eta \left\{ (1 - S_w) B' - \frac{C'}{\beta_a} \right\} \frac{\partial p_a}{\partial t} + \eta \frac{C'}{\beta_a} \frac{\partial p_w}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_{ra}}{\beta_a} K_a \frac{\partial p_a}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

境界条件は、圧力規定の境界 Γ_1 上で、

$$p_w = p_{wb}, p_a = p_{ab} \quad (23)$$

流束規定の境界 Γ_2 上で、

$$q_w = -k_{rw} K_w \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) l_i, \quad q_a = -\frac{k_{ra}}{\beta_a} K_a \frac{\partial p_a}{\partial x_j} l_i \quad (24)$$

である。ここに、 l_i は境界の外向き単位法線ベクトルの*i*方向成分である。

ここで、式(21)の左辺第1項および空気の運動を表す式(22)を無視すると、Richardsの式¹⁰⁾に基づく飽和・不飽和浸透流解析の基礎式が得られる。

3. 滞水条件下での鉛直浸透

本節では、雨水浸透の解析に先立って、地表面に極めて薄層の滯水がある場合について浸透過程のシミュレーションを行う。この滯水条件では、物理的には、地表面（上部境界）からつねに浸透能に相当する浸透量が地盤に流入することになる。そしてこの場合、不飽和領域内の間隙空気圧は水の流入に応じて変化し、空気は流動し、徐々に地盤外に排出される。以下では、この現象を気液2相流有限要素解析によって数値シミュレーションを行い、滯水条件下の浸透過程における間隙空気の影響について検討する。さらに、間隙空気の存在を無視した1相流解析の結果と比較することで、空気の影響をより一層明確に把握する。

3. 1 解析条件

図-1に解析領域、境界条件および初期条件の概要を示す。解析領域は幅20m×高さ5mの鉛直2次元地盤であり、基底部の左隅 ($z=0$ m, $0 \leq x \leq 0.5$ m) に排水渠があるものとした。境界条件は、地表面 ($z=5$ m) および排水渠において $p_a = p_w = 0$ m (=大気圧) とした。初期条件は、地下水水面は $z=1.5$ m にあり、水圧は静水圧分布、空気圧は全領域において $p_a = 0$ m (大気圧) とした。それ以外の境界は、不透水性・不透気性境界 ($q_a = q_w = 0$) とした。

図-2は本解析で用いた水分特性曲線である。水分特性曲線は、式(25)に示すVan Genuchten¹¹⁾の式を用いた。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \frac{1}{\left\{ 1 + (\alpha p_c)^n \right\}^m} \quad (22)$$

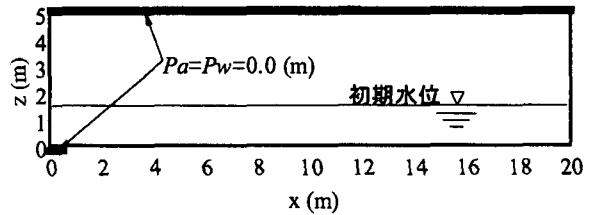


図-1 解析領域、境界条件、初期条件の概要

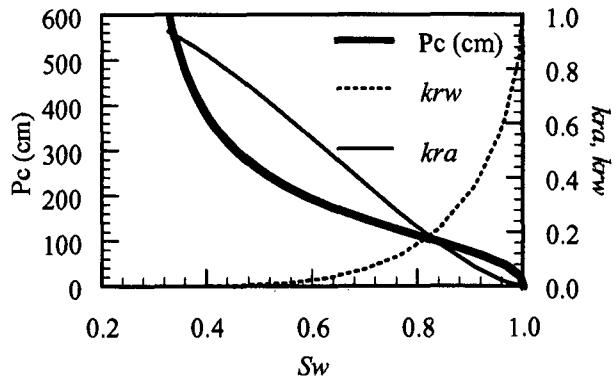


図-2 水分特性曲線 ($n=2.5, \alpha=0.75, S_r=0.25$)

ここに、 α, n, m は形状パラメータであり、 n, m は無次元、 α は圧力水頭の逆数の次元を持つ。 S_e は有効飽和度、 S_r は残留飽和度である。また、 n と m の関係は、次式を用いる。

$$m = 1 - 1/n \quad (23)$$

相対透過係数と有効飽和度の関係は、水、空気それぞれについて

$$k_{rw} = S_e^\varepsilon \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2, \quad k_{ra} = (1 - S_e)^\gamma \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m} \quad (24)$$

と表される。ここに、 ε および γ は空隙の連続性に関するパラメータであるが¹²⁾、一般に、 $\varepsilon=1/2, \gamma=1/3$ が用いられる。また、式(22)を p_c で微分すると次式を得る。

$$\frac{dS_e}{dp_c} = -\alpha mn(1 - S_r)(\alpha p_c)^{n-1} \left\{ 1 + (\alpha p_c)^n \right\}^{-m-1} \quad (25)$$

すなわち、パラメータとして n, α および S_r を与えれば水分特性曲線および飽和度と相対透過係数の関係が得られる。本研究では、 $n=2.5, \alpha=0.75 \text{ m}^{-1}, S_r=0.25$ とした。

透水係数については等方性・均質として $K_w=1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、また、領域内の温度は $T=15^\circ\text{C}$ で一定とした。

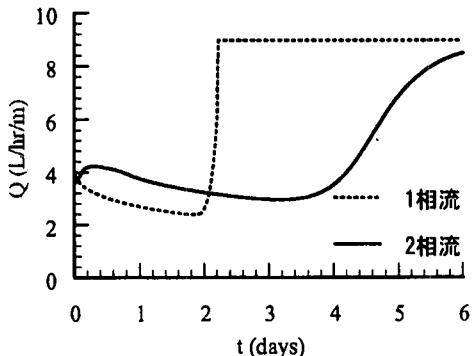


図-3 排水孔からの流出量の時間変化

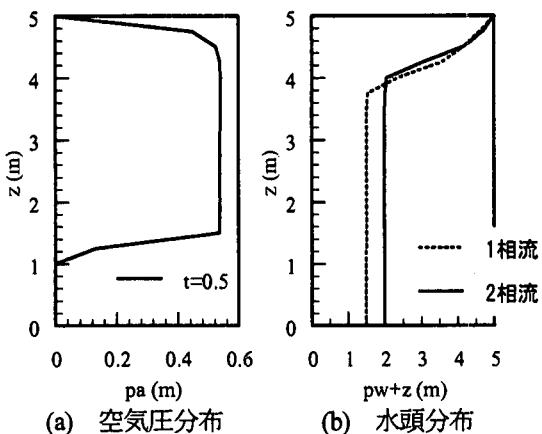


図-4 $t=0.5$ 日, $x=10\text{m}$ 断面における空気圧, 水頭分布

3. 2 解析結果と考察

図-3は、排水渠からの単位時間当たり流出水量を示している。2相流解析では、地表からの浸透が始まるとすぐに流出水量がやや増加した後、ほぼ4日間にわたって徐々に低減する。そして、流出量は約2日間にわたって増加して一定値に近づく。一方、1相流解析では、初期の流出量の増加は見られず、約2日間遅延した後、急速に流出量が増加して一定となる。2相流解析では空気の存在と流動を考慮しており、初期の流出量の増加は、図-4に示すように地表面からの浸透に伴って間隙内空気圧が上昇し、既存の地下水圧も上昇したためである。また、その後の流出水量の増加は地表からの浸透水が既存の地下水に到達したためであるが、その状態になるまでに約4日間を要し、流量増加も比較的緩やかであることから、不飽和域の間隙空気が地盤から排出されるのに時間を要することがわかる。一方、このような間隙空気の挙動を表現できない1相流解析では、浸透水が既存の地下水位に達すると速やかに領域全体が飽和され、定常状態に達するという結果になる。

図-5は、単位時間当たりの地表面からの浸透量を示す。浸透に伴って地盤から空気が流出するため、2相流解析での浸透量は1日後には1相流解析の場合の $1/2$ 程度である。

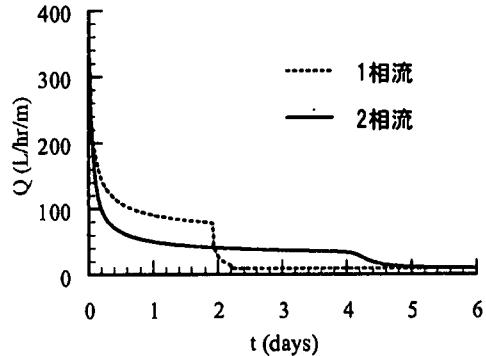


図-5 地表面からの流入量の時間変化（湛水条件）

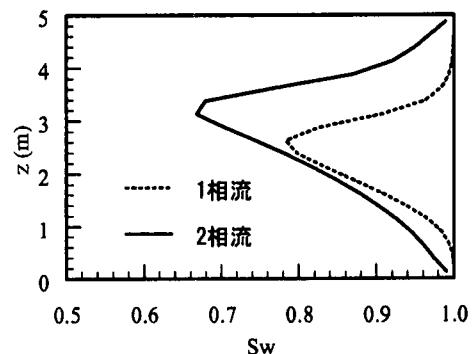
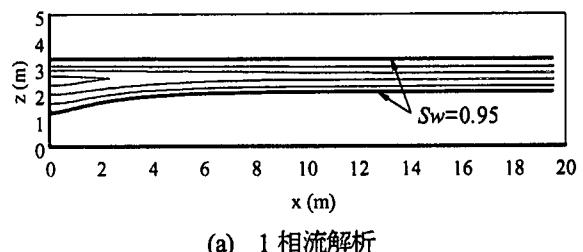
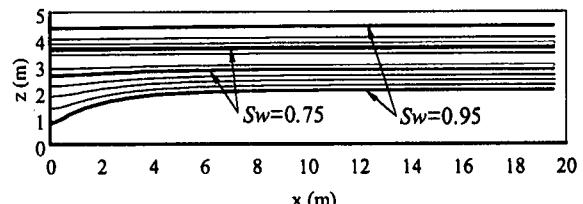


図-6 $t=1.5$ 日, $x=0.05\text{m}$ 断面における飽和度分布



(a) 1相流解析



(b) 2相流解析

図-7 $t=1.5$ 日における飽和度分布

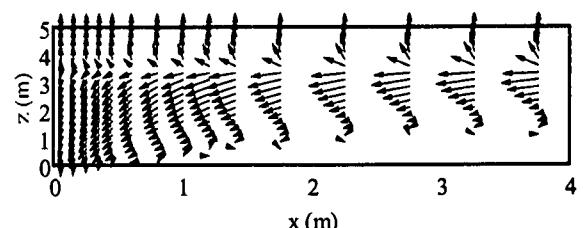


図-8 $t=1.5$ 日における空気の流速ベクトル分布

浸透過程のこのような違いは、図-6と図-7に示す飽和度分布および図-8に示す空気の流速ベクトル分布

からも見てとれる。すなわち、2相流解析の結果では、地表面付近は空気の出口として不飽和状態が保たれるが、1相流解析では、浸潤線が一様に低下して地表面から飽和領域が拡大してゆく。

以上の結果より、湛水条件下での浸透・流出過程では、間隙空気の影響を無視できないことがわかる。

4. 雨水浸透過程の数値シミュレーション

本節では、降雨量が浸透能以下である場合も含めて雨水浸透現象をとりあげ、間隙空気の浸透・流出への影響が地盤の透水係数および浸透場のスケールによってどのように違うかを調べた。

4. 1 解析条件

解析領域は図-1に示した幅20 m×高さ5 mの場合と、それを2倍した幅40 m×高さ10 mの場合である。

降雨条件は図-9に示すように、 $t < 1$ 日で $R_t = 0 \text{ mm/hr}$ 、 $1 \leq t \leq 2$ 日で $R_t = 10 \text{ mm hr}$ 、 $2 < t < 3$ 日で $R_t = 0 \text{ mm hr}$ 、 $3 \leq t \leq 3.5$ 日で $R_t = 10 \text{ mm hr}$ 、 $3.5 < t$ で $R_t = 0 \text{ mm hr}$ である。

初期条件は、空気については全領域で $p_a = 0 \text{ m}$ とし、水については、領域の高さ=5 m のケースで地下水水面は $z=1.5 \text{ m}$ 、領域の高さ=10 m のケースで $z=3.0 \text{ m}$ にあり、水圧は静水圧分布とする。

境界条件は、排水渠において圧力規定で $p_d = p_w = 0 \text{ m}$ であり、地表面において、空気については圧力規定で $p_a = 0 \text{ m}$ 、水については無降雨($R_t = 0$)のとき流束規定で $q_w = 0$ 、降雨時($R_t > 0$)は流束規定で $q_w = R_t$ 、ただし、 $p_w \geq 0 \text{ m}$ となった(すなわち浸透能が降雨量以下となつた)時点で圧力規定 $p_w = 0 \text{ m}$ とする。

飽和透水係数 K_w は、各スケールに対してそれぞれ $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $3.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $5.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ の3種類とする。水分特性曲線については、 $n=2.5$ 、 α は透水係数に応じてそれぞれ $\alpha = 0.75 \text{ m}^{-1}$, 0.86 m^{-1} , 0.92 m^{-1} 、残留飽和度は $S_r = 0.25$ とする。

これらの6ケースについてそれぞれ1相流および2相流解析を行う。以上の一覧を表-1に示す。

4. 2 解析結果と考察

図-10に、Case1, 2 および 3 について、排水渠よりの単位時間当たり流出水量の時間変化を示す。Case1では、前節の湛水条件の場合と同様、2相流と1相流の解析結果に明らかな違いが見られる。しかし、その違いは、透水係数が大きくなるにつれて少なくなっている。ただ2相流解析では、いずれのCaseでも、流出水量は降雨に鋭敏に反応して増加・減少しており、間隙空気が影響していることがわかる。

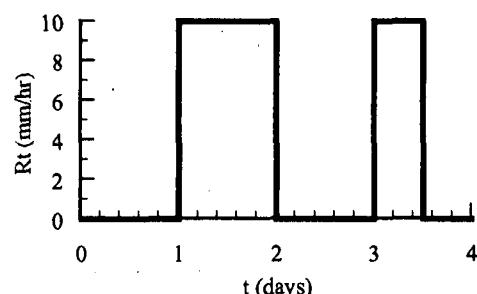
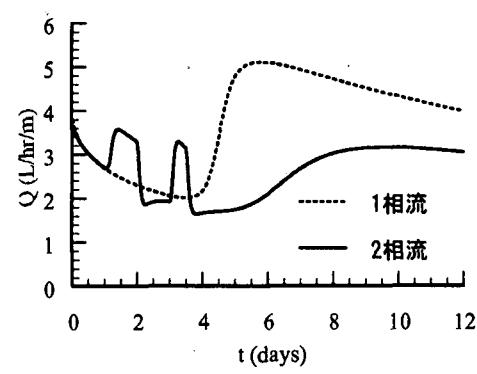


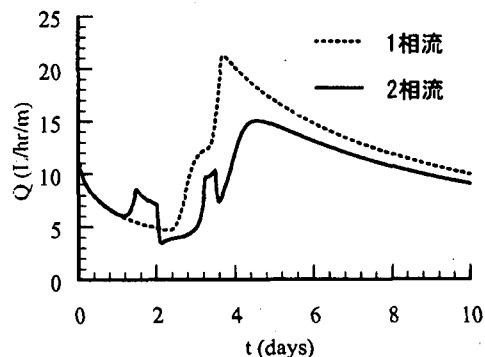
図-9 降雨条件

表-1 解析条件の一覧

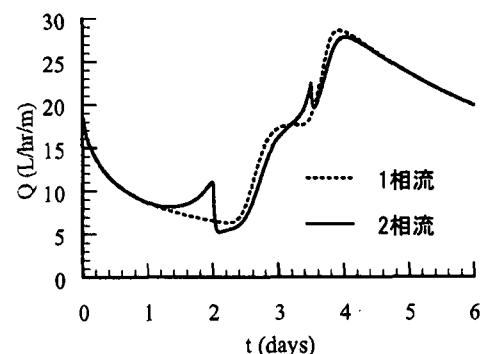
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
スケール	20 m × 5 m				40 m × 10 m	
K_w (cm/s)	1.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
α (m ⁻¹)	0.75	0.86	0.92	0.75	0.86	0.92



(a) Case1

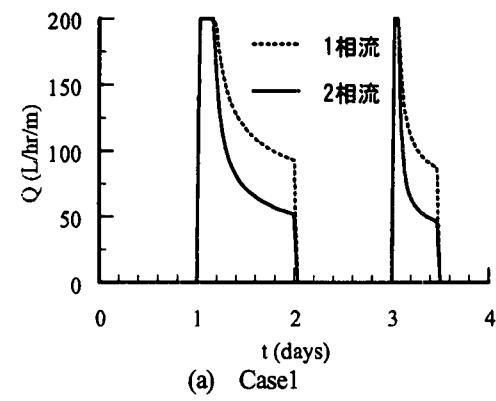


(b) Case2

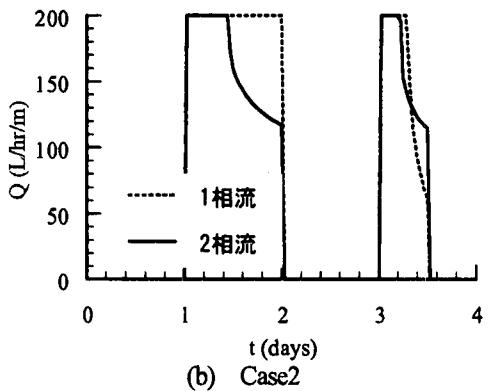


(c) Case3

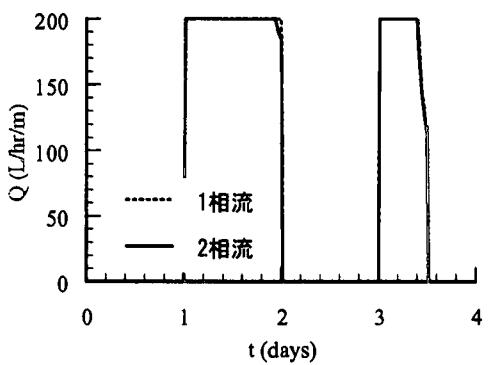
図-10 排水孔からの流出量の時間変化



(a) Case1



(b) Case2



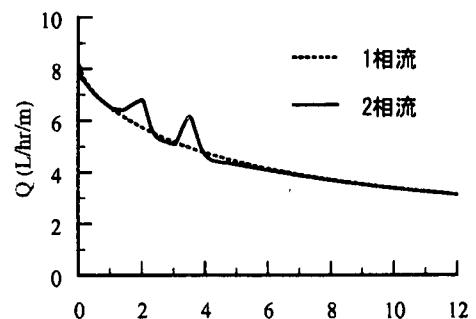
(c) Case3

図-1-11 地表面からの流入量の時間変化

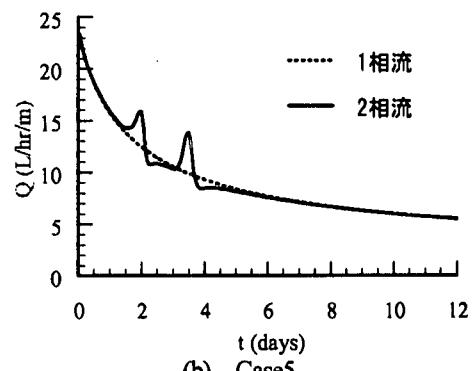
図-1-11は、Case1, 2, 3における単位時間当たりの地表面からの浸透量の時間変化である。Case1では、いずれの解析結果でも、比較的短時間で浸透能が降雨量以下の状態に達しているが、浸透能の値は2相流解析の場合がかなり小さくなっている。前節と同様に、間隙空気の地表面からの流出の影響が見られる。

この空気流出の影響は、Case2の解析結果において一層明確である。すなわち、1回目の降雨中、1相流解析では浸透能がついに降雨量以上であり、湛水条件に至らないのに、2相流解析では降雨開始の約0.4日後($t \approx 1.4$ 日)に湛水が始まる。

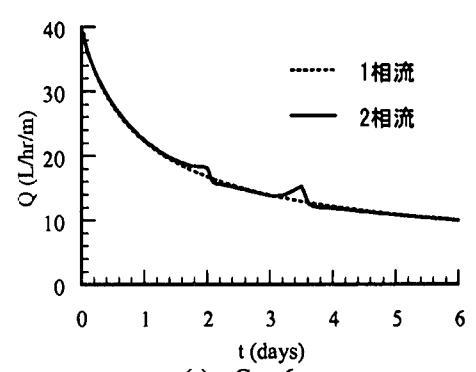
一方、さらに透水係数が大きいCase3の場合、間隙空気の影響はほとんど見られない。これは、透水係数が大きいため、浸透能が降雨強度より十分大きく、地表面付近が不飽和度状態で、空気の流出が妨げられないためと考えられる。



(a) Case4



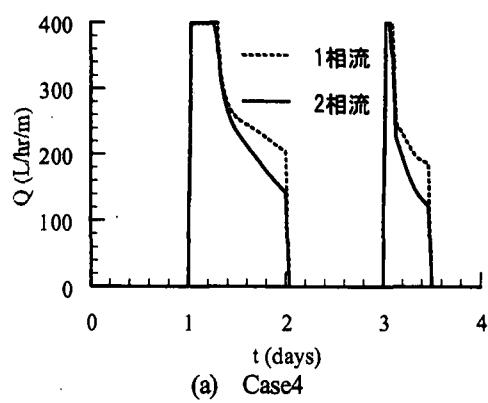
(b) Case5



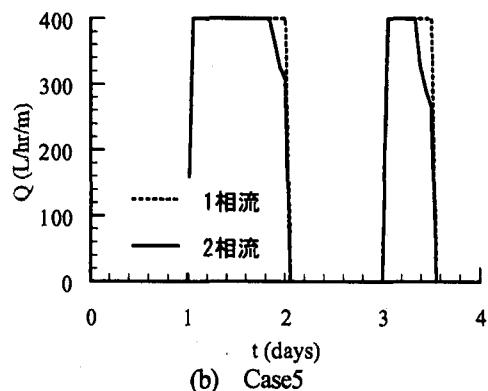
(c) Case6

図-1-12 排水孔からの流出量の時間変化

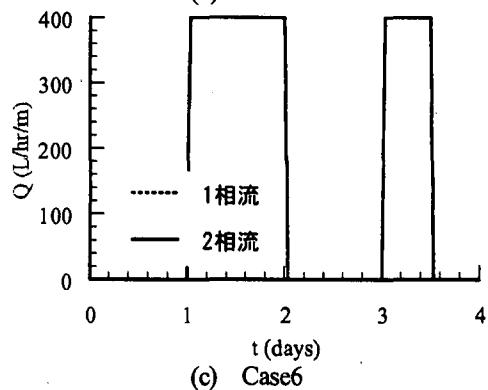
図-1-12は、Case4, 5および6における排水渠よりの単位時間当たり流出水量の時間変化である。いずれの場合も、2相流解析では、降雨に反応して流出量の増加が見られる。しかし流出量やその全般的な過減の傾向には、間隙空気の影響はほとんど現れない。図-1-13は、同じ3ケースにおける単位時間当たりの地表面からの浸透量の時間変化である。これについても、浸透場が小さい場合(Case1, 2, 3)と比較すると、間隙空気はそれほど大きく影響しない。図-1-14は、Case1とCase4における $t=2$ 日時点での空気圧分布(Case1は $x=10$ m断面、Case4は $x=20$ m断面)である。これらを比較すると、空気圧の上昇は、浸透場のスケールが大きいCase4において小さいことがわかる。これは、地盤内に存在する空気の総体積に比べて浸透水量が相対的に小さいため、浸透に伴う空気の体積変化すなわち空気圧の変化が小さくなるためと考えられる。したがって、浸透場のスケールが大きくなると地盤内空気の影響は少なくなると考えられる。



(a) Case4



(b) Case5



(c) Case6

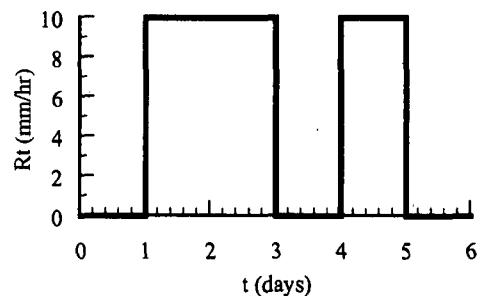
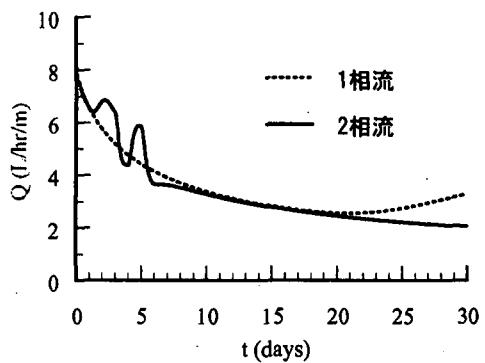
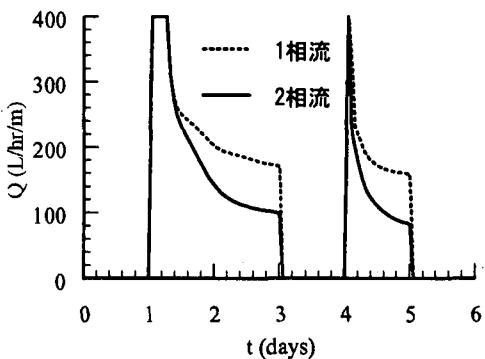
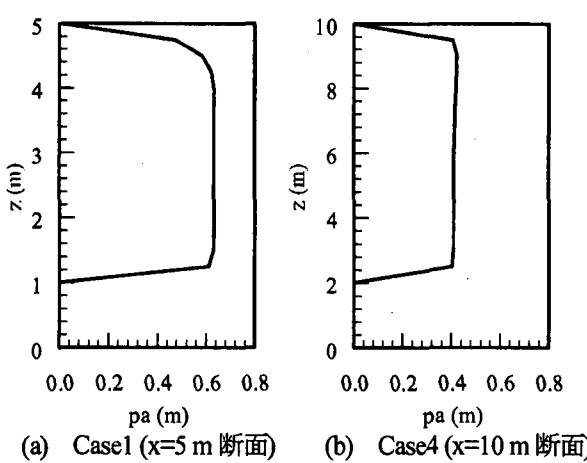
図-13 地表面からの流入量の時間変化
(Case4～Case6)

図-15 降雨条件(Case7)

図-16 排水孔からの流出量の時間変化
(Case7)図-17 地表面からの流入量の時間変化
(Case7)図-14 $t=2$ 日における空気圧分布

つぎに、間隙空気の影響と降雨継続時間の関係を調べるために、Case4 と同条件で、図-15 のように降雨継続時間を2倍にした場合について解析(Case7)を行った。

図-16 および図-17 は、それぞれ排水渠からの流出水量および地表面からの浸透量の時間変化である。図-16 より、 $t=20$ 日以降の流出量が異なることがわかる。これは図-17 に示すように、降雨継続時間が長くなると湛水状態が長くなるため、間隙空気の有無による浸透量の違いが大きくなり、雨水が地下水面上に到達する時間に違いが生じるためである。

5. 結論

本研究では、多孔質媒体中の気液2相流の基礎式に基づいて浸透・流出過程の数値シミュレーションを行い、従来の飽和・不飽和浸透流解析による解析結果と比較することで、間隙空気が浸透・流出に及ぼす影響を調べた。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 滞水条件における浸透過程では、水の流入開始直後から間隙空気圧が上昇し、これに伴って排水流量が増加する。また、地表面付近は水の流入とともに空気が流出するため、長時間不飽和状態が維持される。しかし、飽和不飽和浸透流解析ではこれが考慮されないため流入量が過大評価される。
- 2) 雨水の浸透過程では、透水係数が小さいほど間隙空気の影響を受けやすい。
- 3) 解析領域が大きい場合は、地盤内に存在する空気の体積に対して、流入する水の量が比較的小さいので、空気の圧力変化が生じにくく、その影響は小さくなる。

参考文献

- 1) Neuman, S. P.: Saturated unsaturated seepage by finite elements, *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 in flow 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 (丹保憲仁・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) 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, 1969.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Pinder, G. F. and Gray, W. G.: Finite element simulation in surface and subsurface hydrology, Academic Press, pp.184-190, 1977.
- 9) Meiri, D.: Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, *Water Resources Research*, Vol.17, No.5, pp.1360-1366, 1981.
- 10) Richards, L. A.: Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums, *Physics*, 1, pp.318-333, 1931.
- 11) Van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 12) Maulem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.

(2003年4月18日受付)