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

Research on influence of pore-air in the ground on rainfall infiltration and groundwater drainage

齋藤 雅彦*・八木 宗一郎**・正木 寛昭***・市成 準一****

Masahiko SAITO, Soichiro YAGI, Hiroaki MASAKI and Junichi ICHINARI

*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)

**修士(工) 阪急電鉄(〒530-8389 大阪市北区芝田一丁目 16-1)

***神戸大学大学院自然科学研究科 博士課程前期課程(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

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

To understand the detailed processes of rainfall infiltration and groundwater drainage, the lab-scale experiments were conducted. 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 rainfall intensity is stronger than saturated permeability, it is shown that the amount of drainage increased by a rise in pore-air pressure due to compression by rainfall infiltration. In the reproduction by the numerical simulation, when rainfall intensity was strong, only two-phase flow analysis was able to reproduce that phenomenon. However when rainfall intensity was small enough, it is possible to reproduce processes of infiltration and drainage by both of the analysis method.

Key Words: rainfall infiltration, two-phase flow, finite element analysis, groundwater

1. 序論

降雨浸透および地下水排水過程について解析する場合、一般に有限要素法または差分法による飽和・不飽和浸透流解析^{1),2),3)}が用いられている。しかしながら、降雨浸透のように大気と接する境界付近の飽和度が急速に上昇すると、間隙空気の自由な移動が妨げられる。たとえば、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流量が急速に増加する現象等が報告されているが、これは間隙内空気の影響と考えられる⁴⁾⁵⁾。ただし、実験や現地観測等による定量的な裏づけは、現在のところ十分ではないと考えられる。

一方、間隙空気の運動を考慮した解析手法としては気液二相流解析が提案されており、これを用いることによって、間隙空気の流れや圧力の変化を評価し得ることが報告されている^{6),7),8),9)}。

本研究では、降雨浸透・地下水排水過程における間隙空気の影響を室内実験により確認するとともに、気液二相流解析および従来の飽和・不飽和浸透流解析(以下、単相流解析と記す)による数値シミュレーションを実施し、降雨浸透過程の再現に適した解析手法について検討する。

2. 降雨浸透・地下水排水過程に関する実験

本実験では、模型地盤に模擬降雨を与え、鉛直浸透およ

び排水過程における地盤内間隙空気の影響について、間隙内圧力と飽和度、排水量の時間変化から具体的に確認することを目的とする。

2.1 実験方法

(1) 実験装置

降雨実験に用いた実験装置の模式図を図-1 に示す。装置はステンレス製の水槽型式で、前面のみガラス製となっており内部を観察できる構造となっている。

装置の寸法は幅が 2.4m、高さが 1.2m、奥行きが 0.4m である。また、側面には水位調節が可能なタンクが設置されている。装置内部については、地盤と両側空間との境界は水と空気については透過できるよう金属メッシュとなっている。ただし、本実験では、地盤表面から基底面上 0.16m までの両端境界については、ゴム板を密着させることでメッシュを塞ぎ、水及び空気の流出を防いでいる。地下水面については、装置両側にある水位調節タンクを用いることで自由に設定することが可能となっている。また、装置右側の下端に地盤内水分排出のための開閉可能な排水孔が設置されている。また、降雨を与える手法としては、20mm 間隔で直径 1mm の穴の開いた長さ 2m の鋼管を 4 本用い、それを地盤表面から 0.3m の高さに設置し必要量の降雨を与えた。計測は地盤内に埋設した計測器を用い、地盤内の間隙圧力および飽和度を計測する。

①土層幅	②土層高さ	③土層奥行	④
2.0m	1.0m	0.4m	0.2m
⑤	⑥排水口幅	⑦地下水面高さ	
0.2m	0.04m	0.16m	

図-1 装置模式図およびサイズ

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
0.25	0.3	0.15	0.15	0.15	0.6	0.1	0.3
⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	
0.3	0.1	0.6	0.5	0.5	1.0	2.0	

図-2 センサ配置概略図 (単位: m)

表-1 降雨パターン

	CASE-A	CASE-B	CASE-C	CASE-D
降雨強度: R_f (mm/h)	60	120	20	60
降雨強度/飽和透水係数: r	1.042	2.083	0.347	1.042

(2) 計測機器

本実験では、テンシオメータ (4ヶ所)、ADR センサ (5ヶ所)、およびひずみ式間隙水圧計 (4ヶ所) の三種類のセンサを用いて計測を行う。テンシオメータは、地盤不飽和領域における間隙水圧を測定する。ADR センサは地盤不飽和領域における体積含水率を測定する。ひずみ式間隙水圧計は、やや測定精度が低いため、地下水面下 (地盤飽和領域) における間隙内圧力の測定に用いる。それぞれの埋設位置については、図-2 に示す。以降、各センサの識別には図内に示した CH 番号を用いる。

(3) 試料

実験地盤の作成にはマサ土を用いた。試料の粒子密度は 2.633 であり、事前に行った定水位透水試験の結果より、飽和透水係数は $k = 1.60 \times 10^{-5}$ (m/s) が得られている。

(4) 降雨条件

本実験では 4 ケースの実験を行う。CASE-A から CASE-C ではそれぞれ異なる降雨強度を与え、CASE-D では CASE-A と等しい降雨強度を与えるが地盤の初期条件が異なる。

CASE-A は 60mm/h、CASE-B は 120mm/h、CASE-C は 20mm/h の降雨強度で実験を行い、降雨強度の違いが浸透挙動に与える影響について比較する。CASE-D については降雨強度 60mm/h で降雨を与えるが、CASE-B の降雨終了から 22 時間後に再度降雨を与え、他のケース (飽和状態から 5 日間放置) に比べ初期地盤内水分量が增加了状態とする。降雨を与える時間については、計測開始から 1 時間経過した時点より 1 時間降雨を継続させる。また、降雨強度の相対的な大きさは、飽和透水係数を最終浸透能とみなし、降雨強度 R_f と飽和透水係数 k の比 $r = R_f/k$ で表

す (表-1)。

2.2 実験手順

以下に実験手順について、その作業を順に述べる。

- 1) 両側の水位調節タンクを実験装置における地表面高さに設定し、地盤下部から水を浸透させ、実験地盤を飽和状態にする。
- 2) 水位調節タンクを下げ、実験装置両側下部の排水用バルブを開放し、一度地盤内の水分を排出する。地盤内の状態がほぼ定常化するまで約 5 日間排出を行う。
- 3) 地下水面高さを 0.16m に設定するため、水位調節タンクを基底部から 0.16m に固定する。
- 4) 降雨実験を開始する。まず実験地盤の排水孔バルブを開放する (このとき両側面から水が供給される)。この時点をもって計測開始時刻とする。
- 5) 計測開始から 1 時間後、所定の降雨強度による降雨を与える。降雨開始から 1 時間後、降雨を終了する。
- 6) 各センサの出力値がほぼ定常状態になるか、必要時間が経過したところで計測を終了する。

なお、全ての降雨実験が終了し実験地盤を解体する際、各センサの所定位置からのずれを把握した。

2.3 実験結果および考察

CASE-A (60mm/h) の実験結果を図-3 に示す。横軸には、計測開始からの経過時間を、縦軸には間隙水圧、飽和度および排水孔からの排水量の計測値を示している。ただし、(c)、(d) については、計測開始から降雨終了までの 2 時間分に着目し、また、ひずみ式間隙水圧計の計測値については計測開始時点からの変動値を示す。また、埋設型感圧水分センサについては CH01、ADR センサについては CH05、ひずみ式間隙水圧計については CH12 の測定値を示す。

(a) 間隙水圧と飽和度 (CH01, CH05)

(b) 排水量

(c) 降雨中の間隙水圧の変化 (CH01)

(d) 降雨中の地下水面下間隙内圧力の変動 (CH12)

図-3 CASE-A ($R_q = 60 \text{ mm/h}$) の実験結果

図-4 CASE-B ($R_q = 120 \text{ mm/h}$) の間隙水圧と飽和度 (CH01, CH05)

図-5 CASE-D ($R_q = 60 \text{ mm/h}$) の間隙水圧と飽和度 (CH01, CH05)

図-3 (a) より、実験開始時刻から約 3 時間経過したところから間隙水圧と飽和度の値がともに上昇していることから、センサ位置での浸潤線の到達が考えられる。また、図-3 (a), (b), (c) より、浸潤線の到達より早い時刻である実験開始から 1.5~2.0 時間後付近において、排水量の上昇および間隙水圧の上昇 (4~5cm 程度) が見られる。

このとき、排水量が増えるのは、間隙内の圧力が上昇することで地下水面が加圧され、両側面と排水孔より地下水が押し出されるためであると考えられる。また、地下水面下の圧力 (図-3 (d)) はセンサの感度が低い場合、ばらつきが大きく不明瞭であるが 1.5~2.0 時間後付近に上昇が認められる。

また、CASE-B (120mm/h) の実験結果については、先に述べたCASE-Aに比べ浸潤線の到達が0.5時間ほど早くなったことを除けば、浸潤線の到達より早い段階で間隙内

圧力が上昇するなど CASE-A とほぼ同様の結果が得られた (図-4)。

CASE-D (60mm/h) の実験結果については、地盤不飽和領域における初期飽和度が高いことより浸潤線の到達が早く生じるが、それより早い段階で間隙内圧力および排水量の上昇が生じることや、その上昇量はCASE-A とほぼ同様であった (図-5)。

次に、CASE-C (20mm/h) の実験結果を図-6 に示す。実験開始から約 2.3 時間経過した時点から降雨浸透による浸潤線の到達は確認できるが、CASE-A, B のような降雨時における間隙圧力および排水量の上昇は見られなかった。排水量が漸次減少しているのは、排水孔バルブを解放したことにより排水孔近傍の地下水面が緩やかに降下しているためである。また、CASE-A, B では降雨を与えた際に降雨量が浸透能を上回り地表面に湛水が生じたが、本ケースでは与えた降雨は全て浸透した。

(a) 間隙水圧と飽和度 (CH01, CH05)

(b) 排水量

(c) 降雨中の間隙水圧の変化 (CH01)

(d) 降雨中の地下水面下間隙内圧力の変動 (CH12)

図-6 CASE-C ($R_f = 20\text{mm/h}$) の実験結果

以上のことから、降雨強度が浸透能より十分小さい場合には、浸潤線の到達以前には間隙水圧の上昇がほとんど発生しないが、地表面に湛水する程度の降雨強度の場合には、地表面からの雨水の浸透に伴って地盤内の空気が圧縮され、間隙水圧が上昇することがわかる。つまり、CASE-Cでは、降雨時においても地表面から浸透する水と間隙空気の置換が容易に行われるのに対して、CASE-A, Bでは、地表面付近の飽和度が早い段階で上昇し、水と空気の交換が妨げられるためと考えられる。

また、降雨終了後、直ちに圧力の上昇が解消されないのは、実験地盤の地表面上に僅かながらに湛水していたことにより地表面付近の飽和度の低下が遅れたことによると考えられる。さらに、CASE-Cに比べCASE-Aにおいて浸潤線の到達が遅れるのは、間隙空気が地盤内に封入されたことで降雨浸透を妨げているためと考えられる。

3. 数値シミュレーションによる実験の再現

数値シミュレーションにより実験地盤での降雨実験を再現する。再現する降雨実験はCASE-A, Cの2ケースとし、それぞれについて3次元有限要素法による気液二相流解析および単相流解析を行う。両解析結果をそれぞれ実験結果と比較し、再現性について検討する。

3.1 気液二相流の基礎方程式¹⁰⁾

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。

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

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

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、 $P_c = P_a - P_w$ 、 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の規定値である。

流量規定境界の場合、

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

である。ここに、 Q_{wb} は水の流量流束の規定値、 Q_{ab} は流量流束の規定値、 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、単相流解析の基礎方程式が得られる。

(a) CASE-A (b) CASE-C

図-7 水分特性曲線

3.2 解析条件

(1) 間隙率

数値シミュレーションに用いる間隙率は、実験値より決定する。実験において、各降雨実験前吸水終了時の飽和状態における ADR センサより計測された体積含水率 θ を間隙率 η とする。ここで使用した値は CASE-A では $\eta=0.403$ 、CASE-C では $\eta=0.369$ である。

(2) 水分特性曲線

数値シミュレーションに用いる水分特性曲線を、各降雨実験前の吸水時および脱水時において計測した毛管圧と飽和度の関係を用いる。この際、実測値に対し、モデル式から得られる曲線について最小二乗法によるフィッティングを行い、水分特性曲線を決定した。

モデル式には次の van Genuchten の式を用いた¹¹⁾。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \frac{1}{\left\{1 + (\alpha P_c / \rho_w g)^n\right\}^m} \quad (5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (6)$$

ここに、 α 、 n 、 m は空隙の幾何学的な特徴から決定されるパラメータで、 n 、 m は無次元、 α は長さの逆次元を持つ。 S_e は有効飽和度、 S_r は残留飽和度である。

相対透過係数は有効飽和度を用いて次式で表される。

$$\text{水} : k_{rw} = S_e^\varepsilon \left\{1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right\}^2 \quad (7)$$

$$\text{空気} : k_{ra} = (1 - S_e)^\gamma \left(1 - S_e^{1/m}\right)^{2m} \quad (8)$$

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、 $\varepsilon=1/2$ 、 $\gamma=1/3$ である。

この結果、得られたパラメータは、CASE-A については $n=3.660$ 、 $\alpha=13.3\text{m}^{-1}$ 、 $S_r=0.548$ であり、CASE-C については $n=2.256$ 、 $\alpha=17.9\text{m}^{-1}$ 、 $S_r=0.578$ である。両者は同一の試料であるにもかかわらずパラメータが異なるのは、吸水・排水の繰り返しによって空隙構造が変化したためと考えられる。また、シミュレーションに用いた水分特性曲線を図-7 に示す。

(3) 透水係数

数値シミュレーションに用いる地盤の飽和透水係数については、実験で行った定水位透水試験の結果より、 $k=1.60 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ とする。

(4) 解析領域と要素分割および境界条件

図-8 に解析領域と有限要素分割図を示す。有限要素法による離散化は、式(1)、式(2)の基礎方程式に Galerkin 法を適用した¹²⁾。

地盤は、高さ 1m、幅 2m、奥行 0.4m である。地表面は圧力が負の場合は流束規定 (=降雨強度) で、0 に達すると圧力規定 (=大気圧) とする。排水孔は浸出面境界、それ以外の底面部分是不透過性とする。また、側面においては、高さ 0.16m 以下の部分は静水圧分布、それ以外は不透過性境界とした。

初期条件は、まず全体を飽和状態として計算を開始し、5 日後の状態を改めて初期条件とした。

3.3 解析結果と考察

(1) CASE-A (60mm/h)

CASE-A の気液二相流解析結果と単相流解析結果、および実験結果を合わせて図-9 に示す。また、間隙水圧および飽和度、地下水面下間隙内圧力については、解析領域において実験結果で示したセンサの位置と同一ヶ所の値を示している。

気液二相流解析の結果において、降雨浸透による浸潤線の到達 (飽和度の上昇) 以前に間隙水圧および空気圧が 5~6cm 程度上昇しており、実験結果とほぼ同様の結果が得られた。同時に、地下水面が加圧され排水量が増加していることがわかる。またここで、解析開始から 1 時間および 2 時間、3 時間経過後において、地盤右端から 0.6m、奥行方向 0.2m での鉛直方向における間隙水圧分布および間隙空気圧分布を図-10 に示す。両図において、降雨終了間際である 2 時間後の圧力分布より、上述の現象が間隙空気圧の圧力が上昇したことにより生じているということが把握できる。

一方、気液二相流の解析結果と降雨実験結果では、間隙水圧の初期値および各値の上昇量、飽和度の上昇し始める時刻などが異なっている。これは地盤特性として入力した飽和透水係数と水分特性曲線のパラメータの違い、および地盤の不均一性によるものと考えられる。

図-8 有限要素分割図

図-9 CASE-A (60mm/h)

図-10 二相流解析による鉛直方向圧力分布 (地盤右端から 0.6m, 奥行方向 0.2m)

図-11 CASE-C(20mm/h)

まず、飽和透水係数については、前述のとおり定水位透水試験の結果を用い、水分特性曲線のパラメータについては、間隙空気の影響がほとんど生じないと考えられる降雨実験開始前(2.2 実験手順の1, 2)の地盤の吸水時および脱水時の計測値を用いている。つまり事後的なパラメータの最適化は行っていない。これは、パラメータの最適化を行うと二相流解析と単相流解析で異なったパラメータが得られると考えられ、このために解析結果の違いが明確にならないと考えたためである。また、初期条件については、飽和度と間隙水圧を実験値に合わせるためには水分特性曲線(主脱水曲線)を正確に求める必要がある。一方、今回はヒステリシスを無視しているため、主脱水曲線で水分特性曲線を代表させると、吸水過程に差が生じてしまう。したがって両者の中間的な水分特性曲線を使用しているが、このことによって間隙水圧の初期値に10cm以上の差が生じたものと考ええる。また、同様の理由で、吸水過程の挙動について実験とは異なっており、とくに飽和度の上昇時刻に関しては、このことが大きく影響するものと考えられる。

また、模型地盤の作成の際には、できるだけ均一に充填されるよう注意したが、実際にはある程度の空間的不均一性が生じることは避け難く、従って解析で用いたように均一と仮定することによって生じる違いもある程度存在すると考えられる。

次に、単相流解析の結果において、浸潤線の到達が降雨実験および気液二相流解析に比べかなり早く、また浸潤線到達以前における地盤間隙内圧力の上昇およびそれに伴う地下水排水量の増加は確認することができない。また、開始から4時間経過したあたりから、

排水量が大きく増加する。以上のことは、すべて間隙空気の影響を考慮しなかったため、その存在によって阻害されるはずである降雨浸透が円滑に進行したためであると考えられる。間隙水圧および飽和度の上昇量が他に比べ大きいことから、浸透量、浸透速度を過大に評価していることがわかる。

以上の両解析結果と実験結果との比較より、湛水が生じるような降雨に対しては、間隙空気の影響を無視した単相流解析では浸透挙動を適切に評価することが困難であることがわかる。

(2) CASE-C(20mm/h)

CASE-C(20mm/h)の気液二相流解析結果および単相流解析結果、実験結果を図-11に示す。

解析結果より、間隙空気の影響を考慮している気液二相流解析結果において、最大2mm程度の空気圧の上昇が認められる程度で、間隙空気の封入による間隙内圧力の上昇は実験と同様にほとんど表れていない。これは、地表面からの降雨浸透が浸透能に比べ十分に小さく、地表面付近の飽和度が大きく上昇し間隙空気と浸透する水との置換を妨げるようなことが生じなかったためと考えられる。つまり、降雨浸透・地下水排水過程において間隙空気が及ぼす影響がほとんど生じていない。また本ケースでは、気液二相流解析結果と単相流解析結果では差異がないが、これも先に述べたように、間隙空気が降雨浸透により封入されて、その浸透を妨げるといったような現象が起こらないため、間隙空気の影響の有無に関わらず同様の結果を得ることができると考えられる。

またここで、両解析結果と実験結果との差異について着目する。パラメータおよび不均一性による差異を

除いたとしても、全体的に浸潤反応が生じる時刻が早くなっている。これは、同実験地盤にて繰り返し降雨実験および吸水・脱水を行ったことにより、僅かながらに地盤内に水みちが形成されたためと考えられる。このことを除けば、気液二相流解析および単相流解析のどちらにおいても実験結果の再現が可能である。つまり、本ケースのように降雨強度が地盤の浸透能に比べ十分に小さい場合や、地表面が大気に晒されており間隙空気が円滑に置換できるような地盤への浸透現象においては、地盤間隙内の空気存在が降雨浸透・地下水排水過程に影響を及ぼさないため、空気存在を考慮しない単相流解析によっても浸透場をシミュレーションすることは可能であると思われる。

5. 結論

本研究では、降雨浸透・地下水排水過程において地盤間隙内空気の挙動が及ぼす影響を把握するため、室内実験を行い、気液二相流手法および単相流手法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、本研究より得られた結果をまとめる。

- 1) 降雨強度が最終浸透能に比べ大きい降雨では、降雨浸透により地盤間隙内に空気が封入されることで間隙空気圧が上昇し、それに伴い地下水面が加圧され排水孔からの地下水排水量が増加する現象を室内実験により確認した。
- 2) 降雨強度が最終浸透能に比べ十分に小さい降雨では、上述のような現象を生じなかった。
- 3) 室内実験によって確認された間隙空気圧が上昇する現象および排水量が増加する現象を、気液二相流解析により概ね再現することができた。
- 4) 降雨強度が最終浸透能に比べ十分に小さい降雨では、降雨浸透・地下水排水過程に間隙空気がほとんど影響を及ぼさないため、その浸透・浸出過程は気液二相流解析および単相流解析の何れでも再現することが可能である。

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) 丸井敦尚 : 降水の浸透と土層中の間隙空気の圧力伝播, *地質調査所月報*, Vol.43, pp.190-192, 1990.
- 6) 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回水理講演会演集, 1969.
- 7) 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.
- 8) 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, 1978.
- 9) 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.
- 10) Meiri, D. : Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, *Water Resources Research*, Vol.17, No.5, pp.1360-1366, 1981.
- 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) 中川加明一郎, 駒田広也, 宮下国一郎, 村田 満 : 岩盤内圧縮空気貯蔵からの漏気防止条件, *土木学会論文集*, No.310/III-5, pp.233-241, 1986.

(2006年4月13日受付)