



降雨浸透による間隙水圧変化と降雨特性の関係に関する研究

齋藤, 雅彦
加藤, 正司
川谷, 健

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 8:157-163

(Issue Date)

2004-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00422469>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00422469>



降雨浸透による間隙水圧変化と 降雨特性の関係に関する研究

Study on Pore Pressure Variation Caused by Rainfall Infiltration
Relative to Rainfall Characteristics

齋藤 雅彦¹⁾

Masahiko Saito

加藤 正司²⁾

Shoji Kato

川谷 健³⁾

Takeshi Kawatani

概要: 豪雨による地盤災害の軽減を図るためには, 間隙水圧変化を適切に予測することが重要である。間隙水圧の上昇量および上昇速度は, 地盤の透水性, 保水性等の地盤特性のほか, 総降雨量, 降雨強度, 降雨継続時間といった降雨特性の影響も強く受ける。本報では, 気液2相流の基礎式に基づくFEM解析を用いることによって間隙内空気の運動を考慮した上で, 降雨特性および地盤特性と間隙水圧変化の関連について考察した。その結果, 透水性のよい地盤においては, 降雨強度が大きいほど間隙水圧は上がりやすいこと, また透水性の悪い地盤においては, 降雨継続時間が長いほど間隙水圧が上がりやすいことが確認された。

キーワード: 降雨浸透, 降雨特性, 間隙水圧, 数値解析

1. はじめに

斜面や盛土地盤の安定問題を考える場合, 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。とくに, 豪雨による地盤災害は, 雨水の浸透に伴う地下水位・間隙水圧の上昇が大きな要因となって発生するため, 間隙水圧変化を適切に予測することが被害の軽減を図る上で重要となる。間隙水圧の上昇量および上昇速度は, 地盤の透水性, 保水性等の地盤特性のほか, 総降雨量, 降雨強度, 降雨継続時間といった降雨特性の影響も強く受ける。このような浸透プロセスを評価する方法として, 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)}の適用が考えられる。また, 近年における計算機の性能向上に伴って, この方法はすでに広く普及する段階に至っている。

しかしながら, 降雨浸透問題の場合, 大気と接する境界付近の飽和度がはじめに上昇するため, 大気と地盤内の空気の自由な交換が阻害される。このとき, 間隙内空気の圧縮とこれに伴う空気圧および水圧の上昇が生じるが, 飽和・不飽和浸透流解析では空気の運動を無視しているため, 上記のような浸透挙動を適切に評価できない場合があることが指摘されている^{4), 5), 6), 7)}。

本研究では, これらの問題に対して, 気液2相流の基礎式に基づくFEM解析^{8), 9)}を用いることによって間隙内空気の運動を考慮した上で, 降雨特性および地盤特性と間隙水圧変化の関連について考察する。

2. 気液2相流の基礎方程式と物性値

(1) 基礎方程式

地盤内の気液2相流の基礎方程式は、連続の式とダルシーの法則、不飽和浸透特性、空気の圧縮性等を考慮して、以下のように表される。

$$\phi C' \left(\frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{\partial p_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{rw} K_{ws} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\phi \left\{ (1-S_w) B' - \frac{C'}{\beta_a} \right\} \frac{\partial p_a}{\partial t} + \phi \frac{C'}{\beta_a} \frac{\partial p_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_{ra}}{\beta_a} K_{as} \frac{\partial p_a}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 x_i は空間座標、 p_w および p_a はそれぞれ水圧および空気圧（いずれも水頭換算値）、 ϕ は間隙率、 S_w は水の飽和度、 β_a は構成体積率、 k_{rw} は比透水係数、 k_{ra} は比透気係数である。また、 $K_{ws} = \rho_w g \frac{k}{\mu_w}$ 、 $K_{as} = \rho_w g \frac{k}{\mu_a}$ 、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 k は固有透過度、 μ_w および μ_a はそれぞれ

水と空気の粘性係数であり、 $B' = \frac{d}{dp_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right)$ 、 $C' = \frac{dS_w}{dp_c}$ 、 $p_c = p_a - p_w$ である。

境界条件は、圧力規定の境界 Γ_1 上で、

$$p_w = p_{wb} \quad , \quad p_a = p_{ab} \quad (3)$$

流束規定の境界 Γ_2 上で、

$$q_w = -k_{rw} K_{ws} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) l_i, \quad q_a = -\frac{k_{ra}}{\beta_a} K_{as} \frac{\partial p_a}{\partial x_j} l_i \quad (4)$$

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。

(2) 水分特性曲線

解析に必要な物性値である比透水係数 k_{rw} および比透気係数 k_{ra} は飽和度の関数、飽和度 S_w は毛管圧 p_c の関数と考えられる。これらの関係（水分特性曲線）を数学的にモデル化する試みがなされ、多くのモデルが提案されているが、ここでは式(5)の Van Genuchten¹⁰⁾ の式を用いる。

$$S_e = \left\{ 1 + (\alpha p_c)^n \right\}^{-m} \quad (5)$$

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。また、 S_e は次式で定義される有効飽和度である。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (6)$$

ここに、 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。

$$m = 1 - 1/n \quad (7)$$

また、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

$$k_{rw} = S_e^\varepsilon \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad (8)$$

$$k_{ra} = (1 - S_e)^\gamma \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m} \quad (9)$$

と表される。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が¹¹⁾、一般に、 $\varepsilon = 1/2$ 、

$\gamma=1/3$ が用いられることが多い。また、式(5)を p_c で微分すると次式を得る。

$$\frac{dS_w}{dp_c} = -\alpha mn(1-S_r)(\alpha p_c)^{n-1} \{1 + (\alpha p_c)^n\}^{m-1} \quad (10)$$

すなわち、パラメータとして α および n と、残留飽和度 S_r を与えれば不飽和浸透特性が得られる。

(3) 水および空気の粘性係数

水の粘性係数は温度の関数として次式で与えられる¹²⁾。

$$\mu_w(t_w) = \frac{\mu_{w0}}{1 + 3.368 \times 10^{-2} t_w + 2.2099 \times 10^{-4} t_w^2} \quad (11)$$

ここに、 μ_{w0} は 0°C 、1気圧における水の粘性係数($=1.78 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{sec}$)、 t_w は水温($^\circ\text{C}$)である。水の粘性係数の圧力依存性はきわめて小さいため、ここでは無視する。

空気の粘性係数は、 $p_a=1$ 気圧の場合、絶対温度 T_a の関数として次式で与えられる¹⁶⁾。

$$\mu_a(T_a) = \mu_{a0} \left(\frac{T_a}{T_{a0}} \right)^{2/3} \quad (12)$$

ここに、 μ_{a0} は 0°C 、1気圧における空気の粘性係数($=1.72 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)、 T_a は空気の絶対温度(K)、および $T_{a0}=273.2$ (K)である。空気の粘性係数の圧力依存性は、1.0MPa以下ではきわめて小さく、特に高圧の場合以外は無視できると考えられる。

3. 解析条件

(1) 解析領域と初期条件・境界条件

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($z=0 \text{ m}$, $0 \leq x \leq 0.5 \text{ m}$)に排水渠があるものとした。境界条件は、排水渠において $p_a=0 \text{ m}$ (=大気圧)と $P_w \leq 0 \text{ m}$ および $q_w \leq 0$ ($p_w < 0$ のとき $q_w=0$, $q_w < 0$ のとき $p_w=0$)、地表面($z=5 \text{ m}$)において $p_a=0 \text{ m}$ と $p_w \leq 0$ および $0 < q_w \leq Q_r$ (Q_r は降雨強度)($p_w < 0$ のとき $q_w=Q_r$, $0 < q_w < Q_r$ のとき $p_w=0$)、ただし無降雨時は $q_w=0$ とする。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。初期条件は、地下水面は $z=1.0 \text{ m}$ にあり、水圧は静水圧分布、空気圧は全領域において $p_a=0 \text{ m}$ とした。

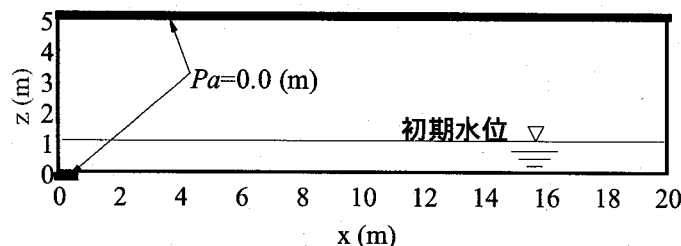


図-1 解析領域、境界条件、初期条件の概要

(2) 地盤物性値

飽和透水係数は、 $K_{ws}=1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ の3種類とする。また水分特性曲線をVan Genuchtenの式を用いてあらわす場合、パラメータとして α , n , および残留飽和度 S_r を与える必要がある。しかし、これらの不飽和浸透特性と飽和透水係数との関係については明確にされていない。このため本研究では、砂質土を用いた谷中ら¹³⁾、およびガラスビーズを用いた中川ら¹⁴⁾によって報告されている室内試験結果(図-2)に基づき、飽和透水係数 K_{ws} と α の関係を式(13)のように決定した。

$$\alpha^{-1} = -37.35 \times \log_{10} K_{ws} - 16.22 \quad (13)$$

ここに、 α の単位は cm^{-1} 、 K_{ws} の単位は cm/s である。

また、残留飽和度については、一般的に K_{ws} が大きいほど S_r は小さくなる傾向があることから、 α と同様に K_{ws} の関数として両者の関係を式(14)のように仮定した。

$$S_r = -0.15 \times \log_{10} K_{ws} - 0.2 \quad (14)$$

ここに、 S_r は無次元、 K_{ws} の単位は cm/s である。

パラメータ n については、 K_{ws} との明瞭な相関関係を確認できなかったため、一定値 ($n=2.5$) とした。これらの一覧を表-1に示す。

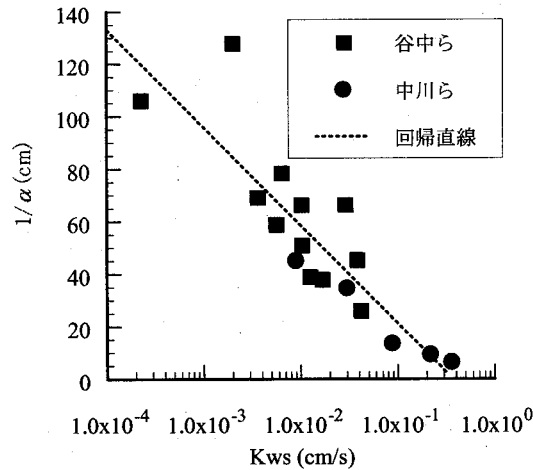


図-2 飽和透水係数と α の関係^{18), 19)}

表-1 地盤物性値

	K_{ws} (cm/s)	n (-)	α (cm ⁻¹)	S_r (-)
Case-1	1.0×10^{-2}	2.5	1.71×10^{-2}	0.10
Case-2	1.0×10^{-3}	2.5	1.04×10^{-2}	0.25
Case-3	1.0×10^{-4}	2.5	7.51×10^{-3}	0.40

(3) 降雨条件

降雨条件として、総降雨量は一定 (=240mm) とし、降雨開始時刻は初期状態から 24 時間後、降雨強度は、総降雨量を降雨継続時間で割ったものとする。また、降雨継続時間は、表-2に示すとおり 4 時間から 144 時間まで 8 段階 (降雨パターン A~H) で設定した。

表-2 降雨条件

降雨パターン	A	B	C	D	E	F	G	H
降雨継続時間(hr)	4	8	12	24	36	48	96	144
降雨強度(mm/hr)	60	30	20	10	6.67	5	2.5	1.67

3. 解析結果と考察

(1) Case-1 について

図-3および図-4に、Case-1の点(20m, 1m)における水圧および点(20m, 2m)における空気圧の時間変化を示す。水圧の最大値は、降雨Aの場合が約0.3mで最も大きく、降雨強度が低下するにしたがって低下している。また、透水係数が大きいため、地下水面が低下する速度も速く、降雨が地下水面に到達するまでの間は1日あたり約0.1mのペースで水位が低下している。このように透水係数が大きい場合は、降雨強度が大きいほど水圧が上昇しやすいことがわかる。

一方、空気圧については、最大値は約 0.015m であり影響はほとんど現れていない。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状態で、空气の流出が妨げられないためと考えられる。

図-5は、初期条件を基準として領域内水分の変化量 ($=\Delta Q$) を示している。領域内水分が最大となる時点は降雨終了時であるが、間隙水圧のピークはこれより約1日遅れで発生していることがわかる。

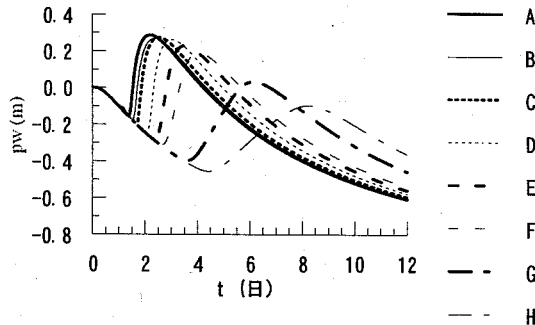


図-3 間隙水圧の時間変化 (Case-1)

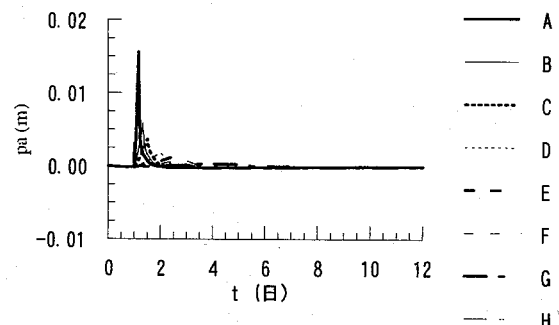


図-4 間隙空気圧の時間変化 (Case-1)

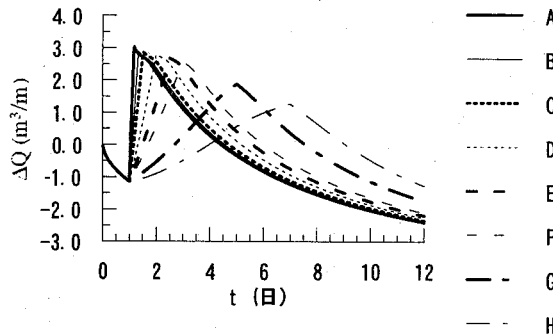


図-5 領域内水分の変化量 (Case-1)

(2) Case-2 について

図-6および図-7に、Case-2の点 (20m, 1m) における水圧および点 (20m, 2m) における空気圧の時間変化を示す。水圧の最大値は、降雨 A の場合が最も小さく、最大は降雨 C で約 1.2m となっている。また、図-8に降雨 A,B,C に対する地表面から流入する水の時間変化を示す。降雨 A および降雨 B では、降雨強度が浸透能を上回っているため表面流が発生し、浸透量は降雨量より小さくなっているのに対し、降雨 C では浸透量と降雨量が一致している。すなわち、降雨強度が一定以上であれば浸透に寄与しない分が多くなるため水圧の上昇量も小さくなると考えられる。

一方、空気圧については、降雨強度が大きい場合に顕著な上昇が見られる。これは、地表面付近が短時間で飽和するため空气の流出が妨げられるためである。

図-9は領域内水分の変化量である。間隙水圧の最大値は、水分量のピークより約2日遅れで発生している。

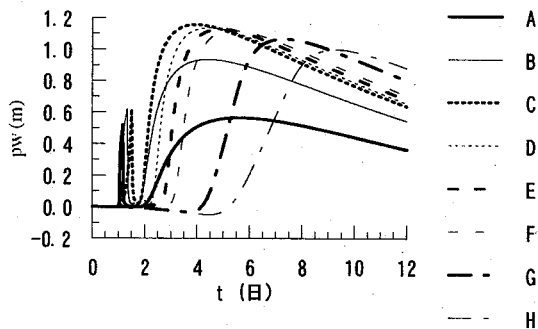


図-6 間隙水圧の時間変化 (Case-2)

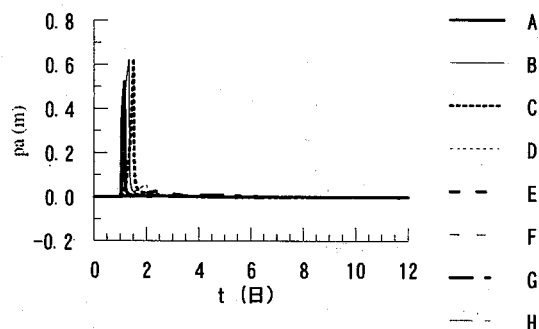


図-7 間隙空気圧の時間変化 (Case-2)

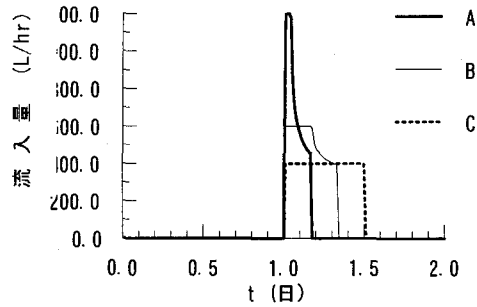


図-8 流入量の時間変化 (Case-2)

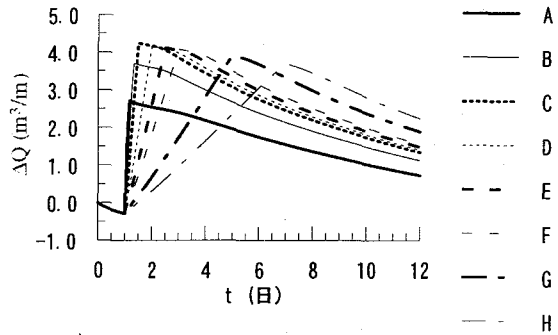


図-9 領域内水分の変化量 (Case-2)

(3) Case-3 について

図-10および図-11に、Case-3の点(20m, 1m)における水圧および点(20m, 2m)における空気圧の時間変化を示す。水圧の最大値は、Case-2と同様に降雨Aの場合が最も小さく、最大は降雨Hで約2.3mとなっている。また、図-12に降雨F,G,Hに対する地表面から流入する水の時間変化を示す。ここでは、降雨Hの場合のみ降雨量と流入量が等しくなっている。このように透水性の悪い地盤では、弱い雨が長時間継続するような場合に間隙水圧が大きく上昇することがわかる。さらに、Case-1およびCase-2と比較して水圧の上昇量が大きくなっているのは、透水係数が小さいので残留飽和度が大きく、初期状態の水分量が他のケースよりも多いこと、および排水孔からの排水量が小さいためと考えられる。

空気圧については、降雨Gの場合に最も上昇量が大きくなっており、最大約1.0mに達している。また、すべての降雨において空気圧の上昇が見られる。これより、透水係数が小さくなるほど間隙空気の影響が顕著に現れることがわかる。

図-13は領域内水分の変化量であるが、やはり降雨Hの場合に最大となっている。

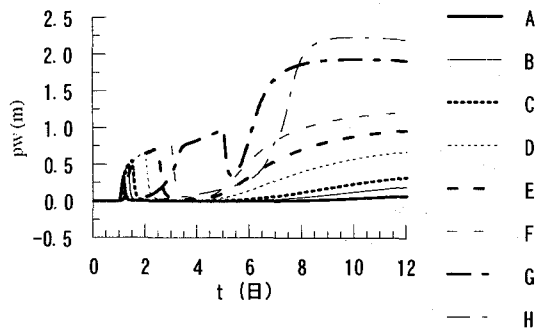


図-10 間隙水圧の時間変化 (Case-3)

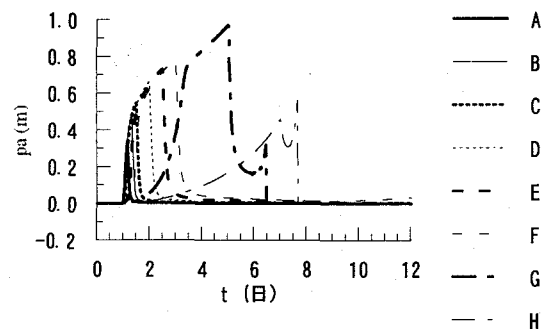


図-11 間隙空気圧の時間変化 (Case-3)

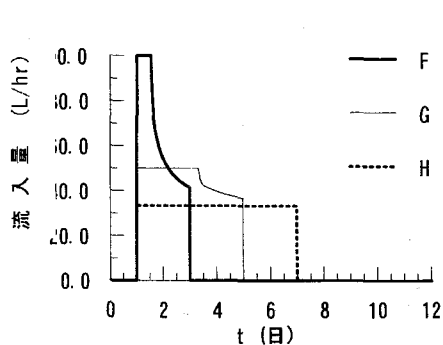


図-12 流入量の時間変化 (Case-3)

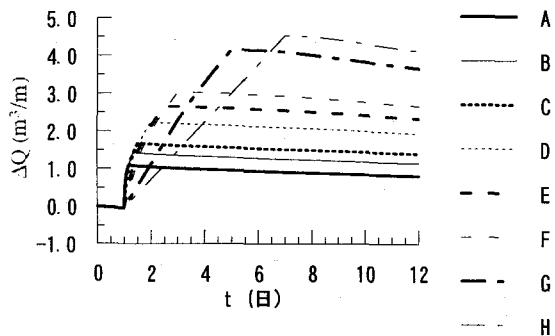


図-13 領域内水分の変化量 (Case-3)

4. おわりに

本研究により、得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 透水性のよい地盤 ($K_{ws}=10^{-2}\text{cm/s}$) においては、降雨強度が大きいほど間隙水圧は上がりやすい。
- 2) 透水性の悪い地盤 ($K_{ws}=10^{-4}\text{cm/s}$) においては、降雨継続時間が長いほど間隙水圧が上がりやすい。
また、保水性が大きいため水圧の上昇量は大きくなる。
- 3) 透水係数が小さいほど間隙空気の影響を受けやすい。

謝辞

本研究は、平成 15 年度神戸大学都市安全研究センター特別プロジェクト研究 (A)「降雨時の斜面崩壊機構へ地盤の不飽和性が与える影響の解明」(研究代表者：齋藤 雅彦)の研究助成により実施された。ここに記して感謝の意を表する。

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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 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) 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.
- 11) Maulem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 12) 日本機械学会編: 技術資料, 流体の熱物性値集, 1983.
- 13) 谷中仁志, 石田哲朗: 砂質土における比透水係数曲線 ($\theta-k_r$) の検討, 第33回地盤工学研究発表会, pp.1817-1818, 1998.
- 14) 中川啓, 岩田将英, 筑紫二郎, 粕井和朗: 不飽和-不均一多孔媒体における物質輸送特性について, 水工学論文集, 第47巻, pp.337-342, 2003.

著者: 1) 齋藤雅彦, 都市安全研究センター, 助手; 2) 加藤 正司, 都市安全研究センター, 助教授; 3) 川谷 健, 都市安全研究センター, 教授

STUDY ON PORE PRESSURE VARIATION CAUSED BY RAINFALL INFILTRATION RELATIVE TO RAINFALL CHARACTERISTICS

Masahiko Saito
Shoji Kato
Takeshi Kawatani

Abstract

In order to aim at mitigation of the slope failure by the heavy rain, it is important to predict pore water pressure change appropriately. The amount of rises of pore water pressure is strongly influenced of the rain characteristic. In this report, the relationship between pore pressure variation and a rainfall characteristic was considered by using FEM analysis based on the governing equations of two-phase flow of air and water through porous.