



不均一性と間隙空気を考慮した数値解析による豪雨時の斜面内浸透流に関する研究

齋藤, 雅彦

増田, 竜士

(Citation)

土木学会論文集B1(水工学), 74(4):I_7-I_12

(Issue Date)

2017

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2017 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005915>

不均一性と間隙空気を考慮した数値解析による豪雨時の斜面内浸透流に関する研究

齋藤 雅彦¹・増田 竜士²

¹正会員 神戸大学助教 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail:msaito@kobe-u.ac.jp

²非会員 加古川市役所 (〒675-8501 加古川市加古川町北在家 2000)
E-mail: ryu-ichi-zero9821@i.softbank.jp

豪雨時の斜面崩壊の誘因となる地盤内の水分量や水位・水圧分布については、浸透流解析による予測／推定がある程度可能であるが、通常は地盤物性値等は空間的に均一と仮定され、実際の斜面に見られる不均一性は考慮されない。本研究では、透水係数の空間分布モデルを用いて疑似的にばらつきと偏りのある不均一斜面を生成し、気液2相流解析によって間隙空気を考慮した豪雨時の斜面内浸透流の性質について検討した。その結果、均一場を仮定することによって斜面内の間隙水圧を過小評価する可能性があること、また、間隙空気の影響は、不均一場でより大きくなる可能性があることを示した。

Key Words: slope stability, 2 phase flow analysys, non-uniformity, geostatistical model, infiltration

1. 序論

近年においても、豪雨による土砂災害が毎年のように頻発している。限られた予算のもと、効率的な災害対策を講じるためには、潜在的な危険度を可能な限り的確に評価する必要があるが、その前提として、崩壊のメカニズムを明らかにすることはきわめて重要である。豪雨による斜面崩壊に関する研究は、国内外を問わず古くから活発に行われておらず、崩壊メカニズムに関しても、理論的／実験的を問わず、またフィールド調査も含めて、すでに多くの知見が蓄積されている。崩壊予測モデルに関しても、簡易なものから詳細なものまで、様々な手法が提案されている。これら従来の崩壊理論においては、崩壊危険度は素因（土の力学的性質や地形・地層構成）と、誘因（降雨強度や総降雨量、あるいは地下水位）が条件として与えられ、安定解析等により安全率として評価されるのが一般的である。しかしながら、実際の斜面では、工学的に同一と見なし得る地層内においても、物性値（透水係数等）は空間的に大きなばらつきを有することが知られているにもかかわらず、通常はこのような不均一性が考慮されることではなく、モデル化の際には、地盤物性値等は空間的に均一と仮定されることがほとんどである。

また、崩壊の誘因となる地盤内の水分量や水位・水圧

分布については、浸透流解析による予測／推定がある程度可能であるが、異常な豪雨時には地盤内の間隙空気の排出が阻害されることにより、間隙水圧の上昇を促進すると考えられ^{1) 2)}、間隙空気の挙動を無視した従来の浸透流解析ではこのような挙動を適切に評価することはできない。

本研究では、豪雨時の斜面崩壊に密接に関係する斜面内浸透流について、通常の浸透流解析では無視されている物性値の空間的不均一性について、透水係数の空間分布モデルを用いて疑似的にばらつきと偏りのある不均一な2次元斜面を生成し、また、気液2相流解析によって間隙空気を考慮した豪雨時における斜面内の間隙水圧・間隙空気圧の空間分布、およびそれらの時間変化について、その特徴を定性的／定量的に把握することを試みた。

2. 基礎方程式と透水係数の空間分布モデル

(1) 気液2相流の基礎方程式³⁾

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、 $K_{ws}=\rho_w gk/\mu_w$ 、 $K_{as}=\rho_w gk/\mu_a$ 、 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、

$$B' = \frac{d}{dp_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right), \quad C' = \frac{dS_w}{dp_c}, \quad p_c = p_a - p_w \text{である。}$$

ここで、式(1)の左辺第1項および空気の運動を表す式(2)を無視すると、Richardsの式に基づく不飽和浸透流解析の基礎式となる^{4,6}。

(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、ここでは以下のvan Genuchten⁷の式を用いる。

$$S_e = \left\{ 1 + (\alpha p_c)^n \right\}^{-m} \quad (3)$$

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。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (4)$$

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。

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

また、比透水係数、比透気係数と有効飽和度の関係は、水、空気それについて

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

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

と表される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あるが、一般に、 $\varepsilon=1/2$ 、 $\gamma=1/3$ が用いられる。式(3)を p_c で微分すると次式を得る。

$$\frac{dS_w}{dp_c} = -\alpha mn(1 - S_r)(\alpha p_c)^{n-1} \left\{ 1 + (\alpha p_c)^n \right\}^{-m-1} \quad (8)$$

水分特性曲線のヒステリシスについては、Scott *et al.*⁹の方法を用いて考慮する。このとき、主脱水曲線と主吸水曲線が必要となるが、式(3)における α で主吸水曲線と主排水曲線を区別し、それぞれ α_w と α_d とする。ここで両者の関係は、Luckner *et al.*¹⁰を参考に $\alpha_w=2\alpha_d$ と仮定した。

(3) 透水係数の空間分布モデル

透水係数の空間分布は齋藤ら^{11, 12}によって提案されている確率的フラクタルモデルに基づいた空間分布モデルを用いて発生させた。これは、飽和透水係数の対数変換値($Y=\log(k_s)$)のパワースペクトル密度関数が次式のように f^ζ 型となるものである。

$$S(|f|) \propto |f|^{-\zeta} \quad (9)$$

ここに、 f は空間周波数ベクトル、 $S(|f|)$ はパワースペクトル密度、 ζ は空間的な相関性を表すパラメータであり、2次元モデルの場合 $\zeta=2$ である。また、本モデルでは、 $\log(K_{ws})$ の分散 σ^2 と解像度（要素数） N の間に式(17)の関係が成り立つため、解像度に応じた同質地盤を容易に表現できる。

$$\sigma^2 = \lambda \log N \quad (10)$$

ここに、 λ は不均一性の強さを表すパラメータである。

3. 解析条件

(1) 解析領域と境界条件

図-1に解析対象とした2次元斜面モデルの概要を示す。斜面は、上流部($x<70m$)、中流部($70m < x < 130m$)、下流部($x>130m$)でそれぞれ異なる基盤面勾配を持ち、層厚 D は、5mおよび10mの2ケースとする。境界条件は、基盤面および上流端($x=0m$ 断面)は不透水・不透気性境界、地表面は降雨浸透境界とする。これは、空気圧は $p_a=0m$ （=大気圧）で一定、水については $p_w<0m$ のとき浸透量 $q_w=r_t$ （ r_t は降雨強度）、 $q_w < r_t$ のとき（地表面が飽和した場合） $p_w=0m$ とするものである。また、下流端($x=200m$ 断面)は浸出面境界とする。

(2) 解析ケース

解析条件は、均一場および飽和透水係数分布の異なる2パターンの不均一場AとBに対して、層厚については $D=5m$ と10m、飽和透水係数（不均一場については幾何平均値）は $1.0 \times 10^{-5} m/s$ と $2.0 \times 10^{-5} m/s$ のそれぞれ2種類とした。また、解析方法については、従来の飽和・不飽和浸透流解析（1phase）と空気の運動を考慮した2相流解析（2phase）の両方について実施したため、解析ケースの合計は24ケースである。

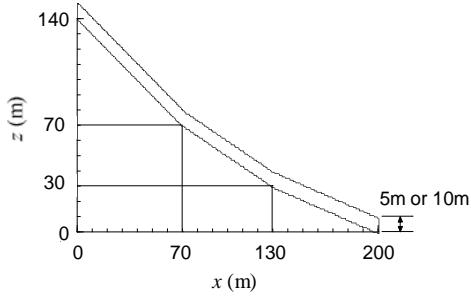


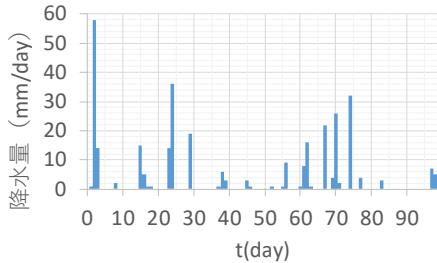
図-1 2次元斜面モデルの概要

$\log_{10}K_{ws}$ (m/s)

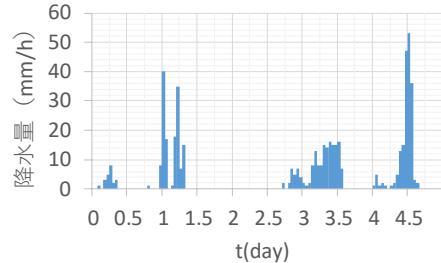
-6.0 -5.5 -5.0 -4.5 -4.0

(a) 不均一場 A
(b) 不均一場 B

図-2 飽和透水係数分布 ($D=10\text{m}$, K_{ws} の平均値 = $1.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$)

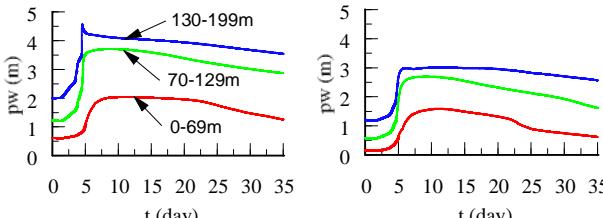


(a) 先行降雨 (100 日分)



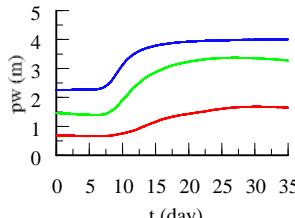
(b) 豪雨時の降雨強度 (5 日分 ; 518mm)

図-3 降雨条件

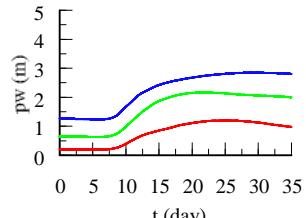


(a) $D=5\text{m}$, $K_{ws}=1.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$

(b) $D=5\text{m}$, $K_{ws}=2.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$



(c) $D=10\text{m}$, $K_{ws}=1.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$



(d) $D=10\text{m}$, $K_{ws}=2.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$

図-4 斜面内各区間における間隙水圧の最大値の時間変化 (均一場, 1phase)

また、不飽和浸透特性については、 α_d を飽和透水係数 K_{ws} の関数として次式で与え、空間分布を考慮している。

$$\alpha_d^{-1} = -37.35 \log_{10} K_{ws} - 16.22 \quad (11)$$

ここに、 α_d の単位は cm^{-1} 、 K_{ws} の単位は cm/s である。同様に式(3)における残留飽和度 S_r についても K_{ws} の関数として空間分布を考慮し、以下の式で与えた。

$$S_r = -0.15 \log_{10} K_{ws} - 0.2 \quad (12)$$

その他の物性値は、間隙率は $\phi=0.4$ 、式(3)における n は $n=20$ 、不均一場における式(10)のパラメータは $\lambda=0.04$ とした。
図-2は $D=10\text{m}$ の場合の飽和透水係数分布であるが、 $D=5\text{m}$ の場合は地表面側の5mをこれより除いている。

(3) 初期条件と降雨条件

まず、仮の初期条件として、基盤面における水圧 p_w を 0m (=大気圧)とし、鉛直方向に 2m までは静水圧分布、それより上方は $p_w=2\text{m}$ で一定とした。この状態から図-3(a)に示す先行降雨を 100 日分与えることによって、各ケースにおける豪雨直前の水分状態を求めた。この状態を $t=0$ 日として、図-3(b)に示す豪雨時の降雨条件を 5 日分与え、その後 30 日の無降雨期間を設定した。つまり、計算期間は合計 135 日分であるが、先行降雨期

間の 100 日を除いた 35 日分を検討対象とした。また、ここで用いた降雨波形は、実際に多くの斜面崩壊が発生した際に観測されたものである。

4. 解析結果と考察

(1) 均一場について

図-4は、最も基本的な均一場の1phase解析について、斜面内の3つの区間における間隙水圧の最大値の時間変化を示したものである。まず、 $D=5\text{m}$ の場合は降雨開始から概ね 5 日~ 7 日後に間隙水圧が最大値に達し、その後緩やかに低下するのに対し、 $D=10\text{m}$ の場合は降雨終了後の 7 日~ 10 日後付近から緩やかに上昇、その後ほぼ一定値となっている。これは、層厚が大きいほど地表面から浸透した雨水が地下水まで不飽和帯を通過する距離が長くなり、地下水まで到達するまでの時間も長くなるためである。また、透水性の違いに着目すると、どちらの層厚でも透水性が大きくなるほど間隙水圧の上昇量は小さいが、間隙水圧が上昇するタイミングには大きな違いはない。これは不飽和帯における不飽和透水係数は、おもに浸透強度に依存するためと考えられる。

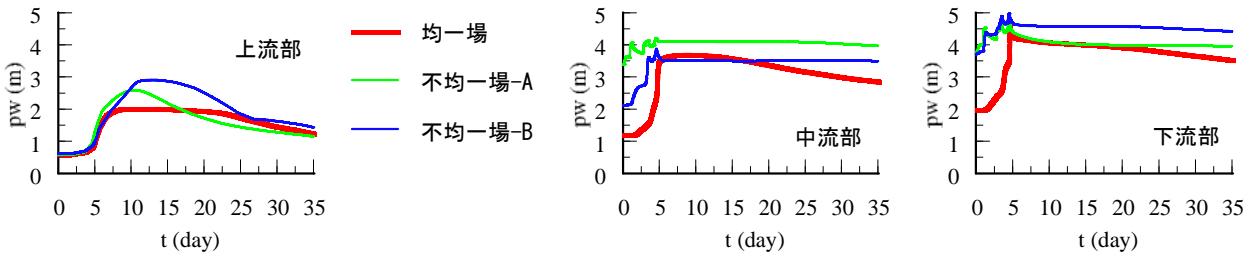


図-5 各斜面内（上・中・下流部）の間隙水圧の最大値の時間変化 (1phase, $D=5\text{m}$, $K_{ws}=1\times 10^{-3}\text{cm/s}$)

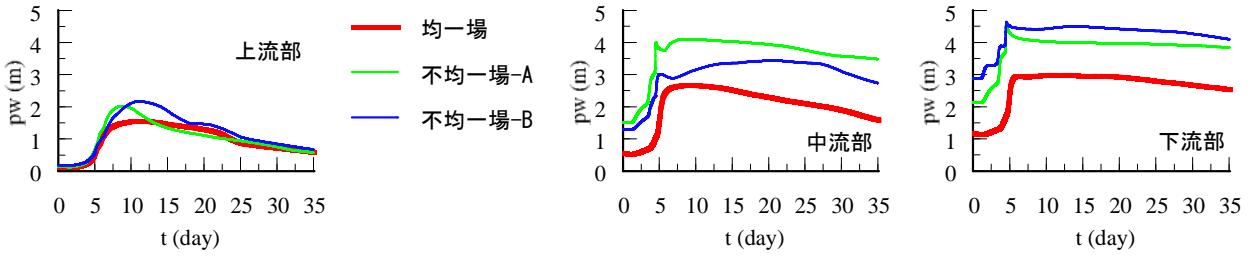


図-6 各斜面内（上・中・下流部）の間隙水圧の最大値の時間変化 (1phase, $D=5\text{m}$, $K_{ws}=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$)

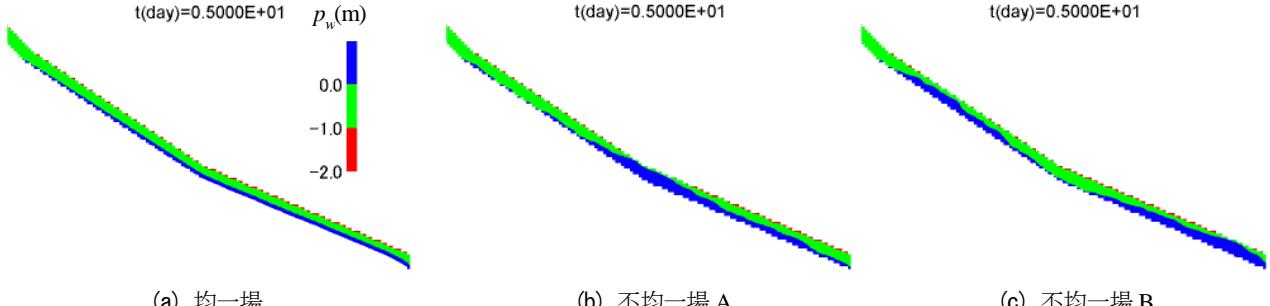


図-7 中・下流部 ($x>70\text{m}$) の間隙水圧分布 (1phase, $K_{ws}=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$, $D=5\text{m}$, $t=5\text{日}$)

(2) 均一場と不均一場の比較

図-5 および図-6 に、応答の早い $D=5\text{m}$ について、3つの斜面内における間隙水圧の最大値の時間変化を示す (1phase 解析)。また、それぞれ図-5 は $K_{ws}=1\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 、図-6 は $K_{ws}=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ のケースである。まず、上流部について、 p_w の最大値は $K_{ws}=1\times 10^{-3}\text{cm/s}$ において不均一場 B では均一場より 1m 程度大きく、不均一場 A も 0.5m 以上大きい。 $K_{ws}=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ においても、同様の傾向を示しているが、均一場と不均一場の差はやや小さくなる。また、初期値 ($t=0$ 日) における p_w の最大値については、均一場と不均一場では概ね同程度である。一方、中流部と下流部については、 $K_{ws}=1\times 10^{-3}\text{cm/s}$ では均一場と不均一場の差は最大 0.5m 程度なのに対し、 $K_{ws}=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ では最大値に 1m 以上の差が生じており、上流部とは逆の傾向が見られる。また、 $K_{ws}=1\times 10^{-3}\text{cm/s}$ においては、均一場と不均一場で初期値も大きく異なっている。このことから、斜面勾配と斜面の透水性によって、不均一性の影響の生じ方が大きく異なることが示唆される。このような結果が得られた要因の一つとして、まず下流部に着目すると、 $K_{ws}=1\times 10^{-3}\text{cm/s}$ では均一場でもピーク時の p_w は約 4.5m に達しており、層厚は 5m であるから斜面内がほぼ飽和に近い状態となる。これに対して $K_{ws}=2\times 10^{-3}$

cm/s では 3m 程度であるため、不均一性による地下水位の上昇余地がより大きくなり、顕著な差が生じやすくなると考えられる。また、上流部では、均一場のピーク時の p_w は $K_{ws}=1\times 10^{-3}\text{cm/s}$ において約 2m、 $K_{ws}=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ で約 1.5m と、両者とも地下水位の上昇の余地は大きいため、比較的透水性の小さい場合により大きく不均一性に伴う水位変化が生じるものと推察される。

図-7 に、 $K_{ws}=2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 、 $t=5$ 日における中流部および下流部の間隙水圧分布を示す。いずれのケースにおいてもこの時点での下流端から中流部上端付近まで地下水位が発生しているが、均一場では滑らかな水面形が得られているのに対し、不均一場では斜面内の透水性のばらつきに応じて空間的に大きな水位変化が生じている。たとえば、図-2 より不均一場 A では中流部と下流部の中間 ($x=130\text{m}$) 付近に低透水性の領域があり、この部分で地下水位が大きく上昇しているのに対し、不均一場 B では中流部と下流端付近の低透水性領域のため、この領域で地下水位が大きく上昇している。このような不均一性に伴う地下水位の空間的変化は、一般的な均一場を仮定した浸透流解析では考慮されないため、斜面安定解析における地下水位の設定には、一定の余裕を見込む必要があると思われる。

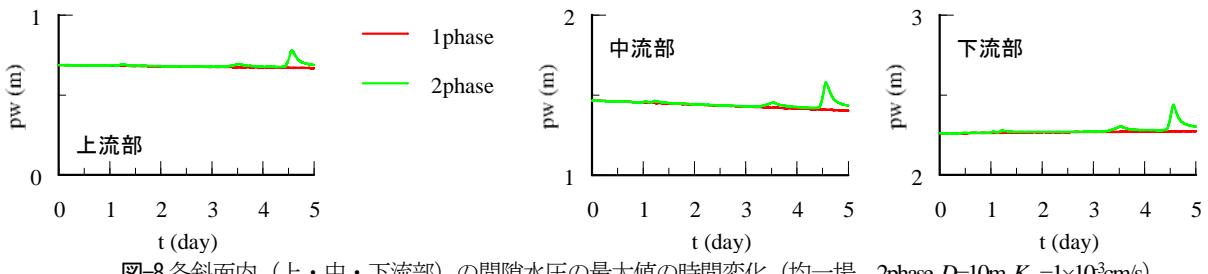


図-8 各斜面内（上・中・下流部）の間隙水圧の最大値の時間変化（均一場，2phase, $D=10m$, $K_{ws}=1\times 10^3\text{cm/s}$ ）

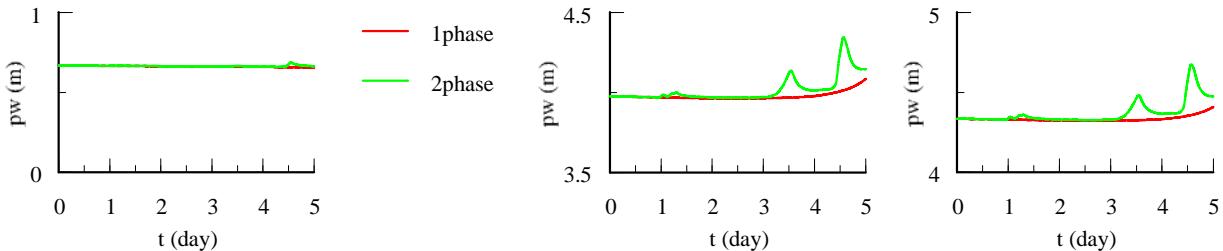


図-9 各斜面内（上・中・下流部）の間隙水圧の最大値の時間変化（不均一場 A, 2phase, $D=10m$, $K_{ws}=1\times 10^3\text{cm/s}$ ）

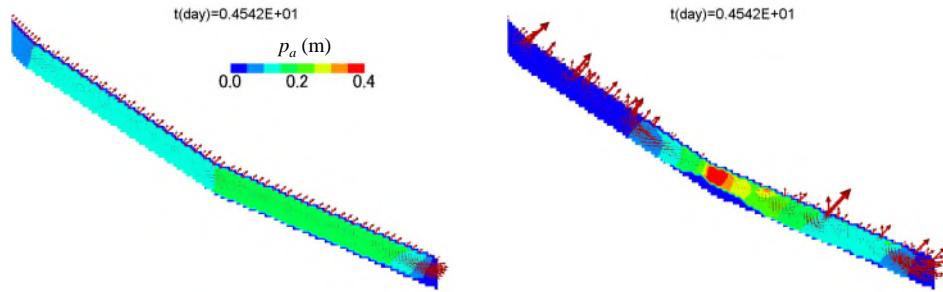


図-10 中・下流部 ($x>70m$) の空気圧分布と空気の流速ベクトル分布 (2phase, $K_{ws}=2\times 10^3\text{cm/s}$, $D=10m$, $t=4.54$ 日)

(3) 間隙空気の影響について

1phase 解析と 2phase 解析の相違については、 $D=10m$ のケースにおいて比較的顕著に表れた。図-8 および図-9 は、 $D=10m$ について、3 つの斜面内における降雨中の間隙水圧の最大値の時間変化を示す（2phase 解析、 $K_{ws}=1\times 10^3\text{cm/s}$ ）。また、それぞれ図-8 は均一場、図-9 は不均一場 A のケースである。まず、1phase 解析では、降雨に反応するような間隙水圧の上昇は全く生じていない。これは、前述のように $D=10m$ のケースでは地表面から地下水まで不飽和帯が長いため、地表面から浸透した降雨が地下水に到達するのに時間を要するためである。一方、2phase 解析では、 $t=3.5$ 日および $t=4.5$ 日付近で明確な間隙水圧の上昇が見られるが、これは間隙空気圧の上昇に伴うものである。つぎに、均一場の 2phase 解析において、上流部では 0.1m 程度、中流部および下流部では 0.2m 程度の間隙水圧の上昇が発生している。一方、不均一場では、中流部および下流部では最大 0.4m 程度の上昇が発生している。これより、間隙空気圧の上昇に伴う間隙水圧の上昇は、不均一場においてより顕著に発生し得ることがわかる。このような間隙水圧や間隙空気圧の上昇は、有効応力の減少をもたらすため、斜面の安定性の低下につながるものと考えられる。

図-10 は、中・下流部 ($x>70m$) の空気圧分布と空気の流速ベクトル分布を示している。均一場においては、斜面内の間隙空気圧が概ね均等に上昇し、間隙空気も地表面全体から地表に排出される。一方、不均一場においては、透水性の低い部分で局所的に間隙空気圧が上昇し、透水性の高い部分から排出されていることがわかる。これは、同じ降雨強度でも透水性が低い場合は地表面が飽和状態に到達しやすく、間隙空気の封入が生じやすくなるためと考えられる。また、間隙空気の流れについても透水性の高い領域に迂回するような傾向が見られ、これによって空気のスムーズな排出が阻害されることも一つの要因と考えられる。

5. 結論

本研究では、豪雨時の斜面内浸透流について、物性値の空間的不均一性および間隙空気の運動を考慮した気液 2 相流解析によって、豪雨時における斜面内の間隙水圧・間隙空気圧の空間分布、およびそれらの時間変化について、その特徴を定性的／定量的に把握することを試みた。これにより得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 降雨によって地下水表面が上昇するタイミングは、斜面の層厚に強く依存する。また、地下水表面の上昇量は、斜面の透水性に強く依存する。
- 2) 地盤の不均一性の影響については、斜面勾配や平均的な透水性によって生じ方が異なることが示唆された。また層厚との関係で地下水位の上昇余地が大きいほどより顕著に不均一性の影響が表れ、とくに透水性が低い領域において地下水位が大きく上昇することを示した。
- 3) 間隙空気の影響については、層厚が10mのケースにおいて最大約0.4mの間隙水圧の上昇をもたらし、とくに不均一場においては透水性の低い領域において局所的に上昇する可能性があることを示した。

これらの結果は、比較的簡単な2次元斜面モデルの数値解析によって得られた結果であるが、定性的には概ね妥当なものであると考える。一方、現実の斜面はさらに複雑な3次元構造を持っており、より信頼性の高い解析モデルの構築に関しては今後の検討課題したい。

謝辞：本研究はJSPS科研費(16K06491)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 田中 茂：土壤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。
- 2) 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。
- 3) Meiri, D. : Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, *Water Resources Research*, Vol.17, No.5, pp.1360-1366, 1981.
- 4) Neuman, S. P. : Saturated unsaturated seepage by finite element, *Proc., ASCE HY*, Vol.99, No.12, pp.2233-2250, 1973.
- 5) 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.
- 6) 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。
- 7) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 8) Maulem, Y. :A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 9) Scott, P. S., Farquhar, G. J. and Kouwen, N. :Hysteretic Effects on Net Infiltration, In *Advances in Infiltration*, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, pp.163-170, 1983.
- 10) Luckner, L., van Genuchtn, M.Th. and Nielsen, D.R.: A Consistent Set of Parametric Models for the Subsurface, *Water Resources Research*, Vol.25, pp.2187-2193, 1989.
- 11) 齋藤雅彦、川谷 健：透水係数の空間分布に関する理論的考察、土木学会論文集、No.645, III-50, pp.103-114, 2000.
- 12) 齋藤雅彦、川谷 健：透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察、土木学会論文集、No.694, III-57, pp.245-258, 2001.

(2017.9.29受付)

NUMERICAL STUDY ON SEEPAGE FLOW IN SLOPE AT HEAVY RAIN CONSIDERING NON-UNIFORMITY AND PORE AIR FLOW

Masahiko SAITO and Ryuji MASUDA

Prediction / estimation by seepage flow analysis is possible for the moisture content, groundwater level and water pressure distribution in the slope which is the trigger of the slope collapse at the time of heavy rain. However, since it is usually assumed that the ground physical property is spatially uniform, the non-uniformity observed in the actual slope is not taken into consideration. In this study, we investigated the nature of seepage flow in the slope at heavy rainfall considering pore air flow by two phase flow numerical analysis using nonuniform slope models with variations using a spatial distribution model of hydraulic conductivity. As a result, it is shown that there is a risk of underestimating the pore water pressure of the slope in the case of assuming the field is uniform, and that the influence of pore air may be larger in the nonuniform field.