



## 降雨時における傾斜地盤内空気の挙動について

川勝, 拓哉

河井, 克之

Tiwari, Binod

飯塚, 敦

---

(Citation)

土木学会論文集A2（応用力学）, 71(2):I\_171-I\_180

(Issue Date)

2015

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2015 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003369>



# 降雨時における傾斜地盤内空気の挙動について

川勝拓哉<sup>1</sup>・河井克之<sup>2</sup>・Binod TIWARI<sup>3</sup>・飯塚敦<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail: 149t116t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 近畿大学准教授 理工学部 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)  
E-mail: kkawai@civileng.kindai.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 Professor, Civil and Environmental Engineering Department,  
California State University, Fullerton (800 N State College Blvd., E-419, Fullerton, CA)  
E-mail: btiwari@fullerton.edu

<sup>4</sup>正会員 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)  
E-mail: iizuka@kobe-u.ac.jp

近年、地球規模での気候変動により集中豪雨が発生し、毎年のように土砂災害を誘発している。また、降雨の範囲がきわめて局所化しているため、いつどこで災害が起こってもおかしくない状況である。減災のためには、土砂災害の前兆現象を察知することが有益である。しかし、前兆現象のひとつである発災前の異音や異臭というものは地盤工学の枠組みの中で十分には説明されていない。本研究では異音、異臭が地盤内の空気の挙動によって発せられているものと考え、土/水/空気連成有限要素解析によって、降雨が地盤内の空気の圧縮挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、地盤内空気の圧縮挙動が境界の排気条件に大きく依存し、浸透挙動にも影響を及ぼすことが明らかとなった。

**Key Words :** Slope, Rainfall, Soil/water/air coupled simulation, Air pressure

## 1. はじめに

日本は山地と海が接近した急峻な地形を有しており、台風や大雨、地震などによる土砂災害が発生しやすい環境にある。さらに近年、集中豪雨がより局所化しており、土砂災害被害を予測することが難しくなってきており、そのため、住民の災害に対する意識の向上が求められており、土砂災害発生の前兆現象を把握することが減災の有効な手段となっている。実際に前兆現象により被災を逃れた例は数多くあり、国土交通省や各自治体が作成しているハザードマップにも土砂災害の前兆現象を紹介している。しかしながら、前兆現象の中には地盤工学の中で説明が十分でない事象がいくつもある。特に発災前の異音、異臭については力学的な発生メカニズムが明らかにはされていない。音もにおいも空気を介して伝達するものであり、地盤内への降雨浸透が地盤内空気に影響を及ぼした結果として生じるものと予想される。そこで、本研究では、降雨時の地盤内空気の挙動に着目し、土/水/空気連成有限要素解析を用いて、傾斜地盤への降雨浸透シミュレーションを行い、地盤内空気の局所化について検討を行う。

## 2. 地盤内空気の挙動に関する既往の研究

土田ら<sup>1)</sup>は、土砂災害発生の前兆現象としての異臭と降雨浸透に注目し、室内模型土槽試験を行っている。図-1に示すように模型土槽は一次元浸透条件を再現しており、土槽に挿入したプロファイル式土壤水分計が、噴霧装置で土槽表面に与えられた模擬降雨によって現れる浸潤線や地下水位を把握できるようになっている。地盤材料としては透水性の高い豊浦標準砂を用いている。土槽下部にはにおい物質として、芳香剤または活性汚泥により発酵させた米ぬかを3cm敷き詰めており、降雨浸透とともに地表面に上昇するにおいの検知のため、土槽上部にニオイセンサーを設置している。その結果、図-2に示す結果を得ている。土槽下部から順に飽和度が上昇していることが確認できる。透水性材料を用いたことで、浸透した降雨は速やかに流下し、実験に用いた降雨強度では地表面からの浸潤線降下よりも地下水位上昇が顕著になっているといえる。地下水位上昇を表す各深度の飽和度上昇の後、地表面でおい強度が急激に上昇していることが分かる。土田らは、この結果より、降雨浸透によ

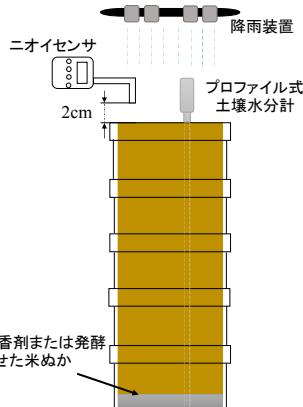


図-1 土田らの降雨浸透実験<sup>1)</sup>

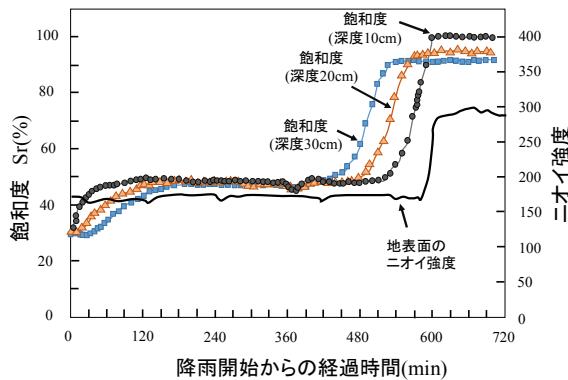


図-2 降雨開始後の土槽内飽和度および地表面のにおい強度<sup>1)</sup>

って形成された地下水位が地盤深部の間隙空気を押し上げているとし、地表面でのにおい発生が地下水位の上昇を示すものとして土砂災害の前兆になっているとした。ただし、においの発生時期や検知されるにおい強度については、におい物質の拡散特性や降雨条件、地盤の材料特性に依存するものとして、さらなる研究が必要であるとしている。小中ら<sup>2)</sup>は河川堤防を模擬した模型地盤で降雨と河川水浸透により地盤内で空気が封入される様子を確認しており、河川堤防に損傷を及ぼすエアブローの原因となり得るとしている。この結果は、水理境界条件によっては地盤内空気が封入されることを示している。

### 3. 土/水/空気連成解析に用いる数理モデル

本研究で用いる有限要素解析コード DACSAR-MP<sup>3)</sup>では、大野ら<sup>4)</sup>が提案する不飽和土構成モデルを、三相混合体理論を用いて土/水/空気連成問題として定式化している。有効応力は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1}, \quad p_s = S_e s \quad (2)$$

$$s = p_a - p_w, \quad S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}'$  は有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^{net}$  は基底応力テンソル、 $\mathbf{1}$  は二階単位テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$  は全応力テンソル、 $s$  はサクション、 $p_s$  はサクション応力、 $p_a$  は間隙空気圧、 $p_w$  は間隙水圧、 $S_r$  は飽和度、 $S_e$  は有効飽和度、 $S_{rc}$  は  $s \rightarrow \infty$  における飽和度である。降伏関数は次式で表される。

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (4)$$

$$\zeta = \exp \left[ (1 - S_e)^{n_s} \ln a \right], \quad MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (5)$$

$$p' = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma}' : \mathbf{1}, \quad q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} = \mathbf{A} : \boldsymbol{\sigma}', \quad \mathbf{A} = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} \quad (6)$$

ここで、 $n_E$  は形状パラメーター、 $\varepsilon_v^p$  は塑性体積ひずみ、 $M$  は限界状態における  $q/p'$ 、 $D$  はダイレタシー係数、 $p'_{sat}$  は飽和状態における降伏応力、 $a$  と  $n_s$  は不飽和化に伴う降伏応力の増加を表すパラメーター、 $\lambda$ 、 $\kappa$  はそれぞれ圧縮、膨潤指数である。

間隙水、空気の流れはダルシー則に従うものとし、

$$\tilde{\mathbf{v}}_w = -\mathbf{k}_w \cdot \text{grad} h \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_a = -\mathbf{k}_a \cdot \text{grad} h_a, \quad h_a = \frac{p_a}{\gamma_w} \quad (8)$$

のように与える。ここで、 $\tilde{\mathbf{v}}_w$ 、 $\tilde{\mathbf{v}}_a$  はそれぞれ間隙水、空気の流速、 $\mathbf{k}_w$ 、 $\mathbf{k}_a$  はそれぞれ透水係数、透気係数、 $h$  は全水頭、 $\gamma_w$  は水の単位体積重量、 $h_a$  は空気圧水頭である。透水係数、透気係数はそれぞれ次のように与えられる Mualem 式<sup>5)</sup>、Van Genuchten<sup>6)</sup>式を用いる。

$$\mathbf{k}_w = k_{rw} \mathbf{k}_{wsat} = S_e^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \mathbf{k}_{wsat} \quad (9)$$

$$\mathbf{k}_a = k_{ra} \mathbf{k}_{ares} = \left( 1 - S_e \right)^{\frac{1}{2}} \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \mathbf{k}_{ares} \quad (10)$$

ここで、 $k_{rw}$ 、 $k_{ra}$  はそれぞれ比透水係数、比透気係数、 $m$  は Mualem 定数、 $\mathbf{k}_{wsat}$ 、 $\mathbf{k}_{ares}$  はそれぞれ飽和状態における透水係数、乾燥状態における透気係数である。三相混合体理論を用いると、間隙水、空気の連続式はそれぞれ次の様に表される。

$$n \dot{S}_r - S_r \dot{\varepsilon}_v + \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_w = 0 \quad (11)$$

$$(1 - S_r) \dot{\varepsilon}_v + n \dot{S}_r - n(1 - S_r) \frac{\dot{p}_a}{p_a + p_0} - \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_a = 0 \quad (12)$$

ここで、 $n$  は間隙率、 $\varepsilon_v$  は体積ひずみ、 $p_0$  は大気圧である。式(4)と釣合式から得られる弾塑性構成モデルと式(11)(12)を土/水/空気連成問題として定式化している。

水分特性曲線モデルとしては、杉井、宇野<sup>7)</sup>の提案するロジスティック曲線式を用い、ヒステリシス表現が可能な河井ら<sup>8)</sup>のモデルの中で表現している。これによつて複雑な水収支の生じ得る傾斜地盤内の含水状態の把握



図-3 模型土槽外観

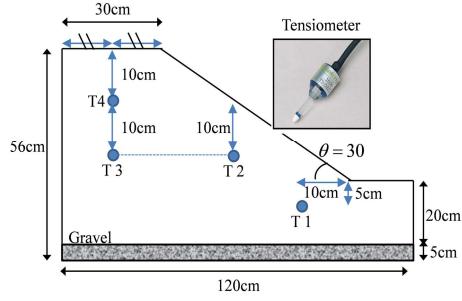


図-4 模型断面およびテンシオメータ設置位置

表-1 解析に用いる材料パラメーター

$\lambda$	$\kappa$	$M$	$p'_{sat}$ (kPa)	$k_{wx}$ (m/h)	$k_{wy}$ (m/h)	$S_{ri}$
0.087	0.009	1.375	1500	0.156	0.078	0.15
$m$	$a$	$n_s$	$n_E$	$k_{ax}$ (m/h)	$k_{ay}$ (m/h)	$e_i$
0.8	10	1.0	1.00	15.6	7.8	0.7

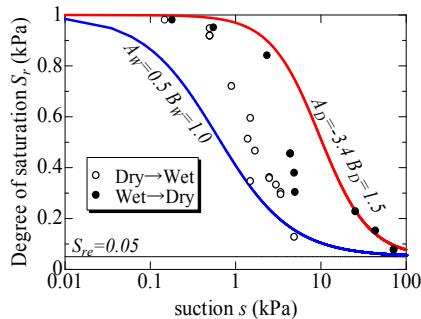


図-5 水分特性曲線

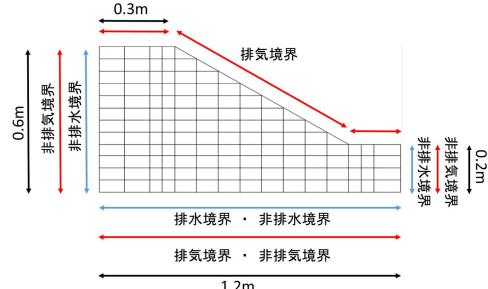


図-6 解析メッシュ図

を可能にしている。

#### 4. 模型土槽降雨浸透シミュレーション

まずは解析手法の妥当性を検討するとともに、解析に用いる地盤定数選定のために、模型地盤への降雨浸透実験のシミュレーションを行った。

##### (1) 模型実験概要

模型実験には、建設土を洗浄し粒度調整を行ったものを用いている。この土はアメリカの統一土質分類で SW に分類される粒度の良い砂である(細粒分 4.8%, 砂 89.1%, 磯 6.1%)。図-3 に実験模型の外観を示す。模型地盤はアクリル容器(1.2m × 1.2m × 1.2m)内で、試料を機械で水平に間隙比 0.7(相対密度 29.3%)まで締固め、その後、盛土斜面の勾配が 30 度になるようにカットし作製した。水平締固めの際、所定の乾燥密度を達成するために、含水比を 3%に調整し、1 層の仕上がり高さが 15cm になるように、所定の高さまで段階的に締固めを行った。模型土槽のアクリル容器の底面部分には、容器底面に浸透水が滞留しないように、直径 5cm の排水管を設置し、浸透雨水を速やかに排水できるようにしている。模型土槽底

部から 1.2m の高さにスプリンクラーを設置し、斜面に降雨を与える。降雨量はスプリンクラーの開口部を変更することにより制御することができる。試験中のサクション計測を行うために、アクリル容器側面に孔を設け、テンシオメータの設置を可能にしている。図-4 に示す位置にテンシオメータ設置し、土槽奥行中央部の水圧計測を行った。降雨の浸透状況についてはアクリル容器表面の土槽の変色の度合いから視覚的に判断した。実験条件となる降雨強度は散布した水量がすべて浸透するように 30mm/h に設定した。

##### (2) 降雨浸透シミュレーションとの比較

解析に用いる土質定数を表-1 にまとめる。ここで、 $k_{wx}$ ,  $k_{wy}$  はそれぞれ水平方向, 鉛直方向の飽和透水係数,  $S_{ri}$  は材料の初期飽和度,  $k_{ax}$ ,  $k_{ay}$  はそれぞれ水平方向, 鉛直方向の乾燥状態での透気係数,  $e_i$  は材料の初期間隙比である。ここで、 $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $M$ ,  $p'_{sat}$ ,  $k_w$  について、別途行った飽和試料での三軸試験および透水試験により得た値である。 $a$ ,  $n_s$  については本田ら<sup>9)</sup>の研究を参考にして決定した。 $n_E$  については Cam-Clay 型降伏関数として設定した。透気係数については試験データがないため、神谷ら<sup>10)</sup>の研究を参考に鉛直および水平透水係数の

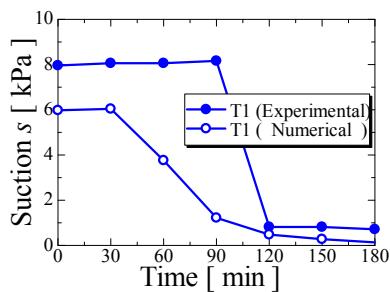


図-7 位置T1におけるサクション変化

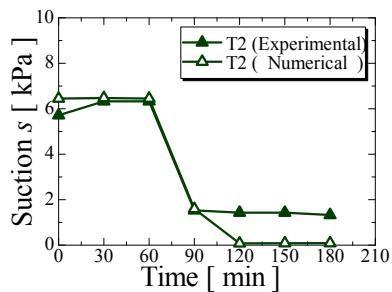


図-8 位置T2におけるサクション変化

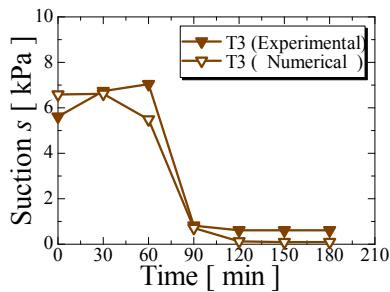


図-9 位置T3におけるサクション変化

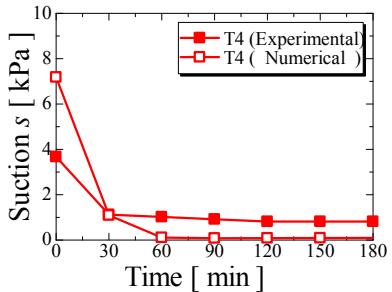


図-10 位置T4におけるサクション変化

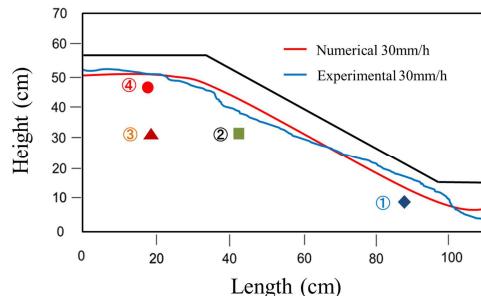


図-11 降雨30分後の浸潤線

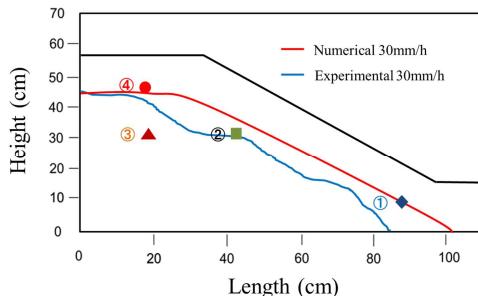


図-12 降雨60分後の浸潤線

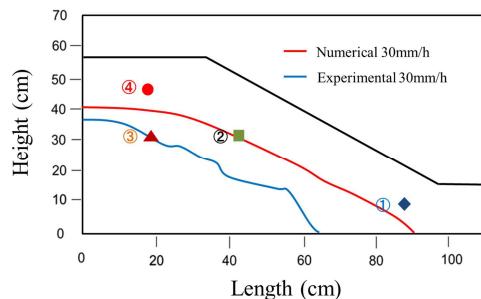


図-13 降雨90分後の浸潤線

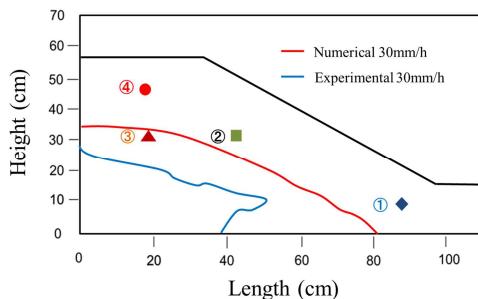


図-14 降雨120分後の浸潤線

100倍とした。図-5に保水性試験の結果および解析に入力する水分特性曲線を示す。保水性試験結果は、乾燥試料に加水量をえたものを締固めて作製した供試体(図中白プロット)および締固め試料を飽和後、乾燥炉で乾燥時間を調整した供試体(図中黒プロット)でサクション計測を行ったものである。そのため、それぞれのプロットはひとつの供試体のサクション～飽和度関係を表しており、連続的な吸水曲線上、脱水曲線上に存在するわけではない。そこで、すべてのサクション～飽和度関係を包含するように水分特性曲線の上限、下限を定め、それぞれを主脱水曲線、主吸水曲線として解析入力パラメータを設定した。

図-6に解析領域のメッシュ図を示す。解析領域左右端は非排気非排水条件とし、解析領域上端は排気条件で降雨強度に応じた流量境界を与えた。このとき、法面については降雨流入方向と垂直ではないため、法面勾配の余弦を降雨強度に乗じて入力した。つまり、天端や法尻右側の水平部分よりも小さい流量が入力されることになる。また、実際の地盤では地表面が飽和すると、降雨は表層流となることから、本解析でも流量境界においては、解析ステップごとに地盤の浸透能を計算し、浸透能を超えて降雨浸透が発生しないように、解析中で流入量を調整するようになっている。模型実験では下端は、排水層になっており、下端に至った浸透水は排水層を流下するよ

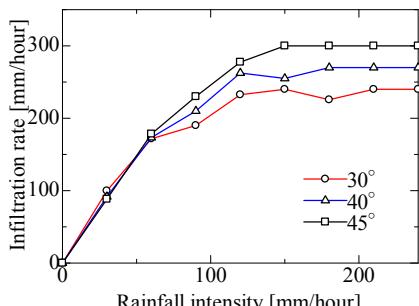


図-15 地盤の浸透能の検討

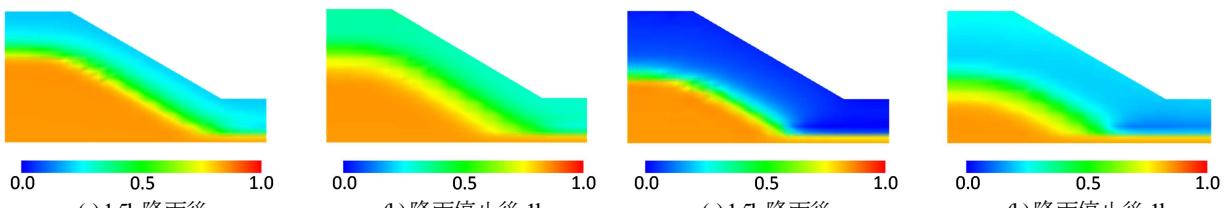


図-16 降雨強度 30mm/h の飽和度分布(排気排水条件)

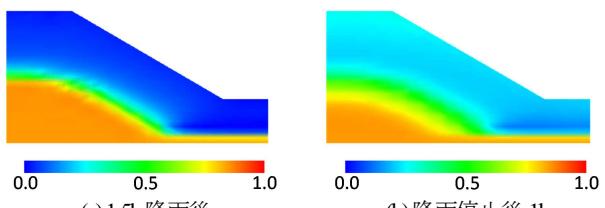


図-17 降雨強度 60mm/h の飽和度分布(排気排水条件)

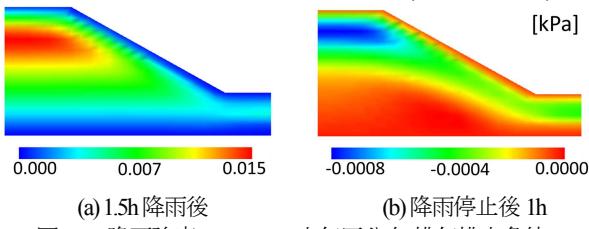


図-18 降雨強度 30mm/h の空気圧分布(排気排水条件)

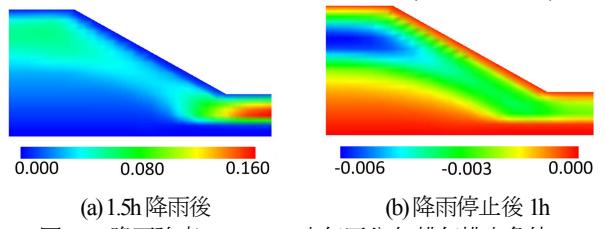


図-19 降雨強度 60mm/h の空気圧分布(排気排水条件)

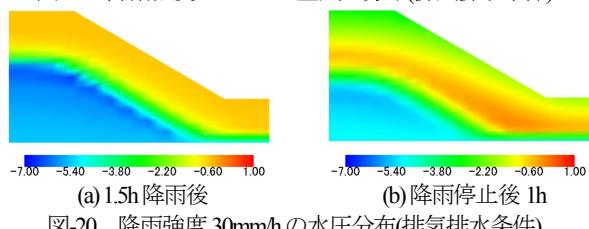


図-20 降雨強度 30mm/h の水圧分布(排気排水条件)

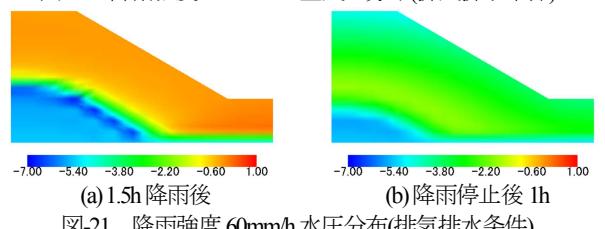


図-21 降雨強度 60mm/h 水圧分布(排気排水条件)

うになっている。そのため、解析領域下端は、排気排水条件とした。この時、排気境界として大気圧相当の空気圧境界、水理境界条件としては解析初期のサクション分布を表現できるように-5.5kPaの水圧を与えた。

図-7~10 にテンシオメーターによる実測値と解析によって得られたサクション値を比較する。その結果、テンシオメーターT1以外は、サクション低下のタイミングもすべて精度よく表現できている。図-11~14 に模型実験で観測された浸潤線と解析によって得られた浸潤線を比較する。実験では目測で求められるため、飽和度が大きく変化する位置が浸潤線と認識される。そこで、解析から得られたサクション分布より、水分特性曲線の吸水曲線上で大きく飽和度上昇が生じるサクション-0.5kPaの等值線を浸潤線としている。実験では土槽下部で浸透水の滞留が起こってしまい、図-14 の結果に乱れが生じているものの全体的によく一致していると言える。このことからも、図-7 で示す T1 の位置では浸潤線が到達している時間でも実測のサクション値の低下が起こっておらず、テンシオメーター先端のセラミックカップと土の接触不

良や経路内のキャビテーション発生によって、テンシオメーターの反応が鈍かったものと判断できる。以上の結果から、用いた解析手法および土質定数の妥当性が確認できたと言える。ここでは、地表面から浸潤線が降下する条件となっており、浸透水により地盤内空気が下方へ押しやられる状態となっている。

### (3) 地盤内空気の挙動表現

模型実験で、内部の空気圧を計測するのは困難であるため、土/水/空気連成解析により降雨による地盤内空気の挙動を検討する。解析条件については模型試験のシミュレーションと同じ下端が排気排水条件で、降雨強度 60mm/h の解析条件も追加した。図-15 は同じ材料パラメータで傾斜角を変えて別途行った斜面への降雨浸透シミュレーションの結果であり、降雨強度と浸潤線降下速度の関係を表している。降雨強度が大きくなるに従い浸潤線降下速度が大きくなるものの、斜面勾配ごとにある値に収束しているのが確認できる。地表面が飽和すると、浸潤線が降下した分のみ降雨が浸透するようになり、地

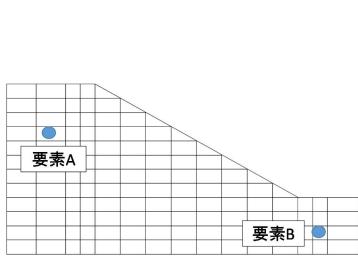


図-22 要素 A, B 位置

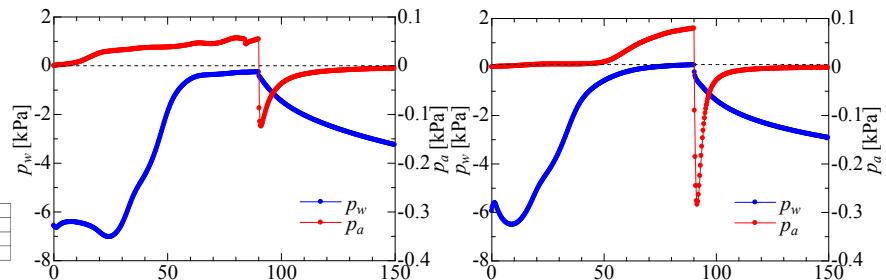


図-23 水圧空気圧変化(要素 A)

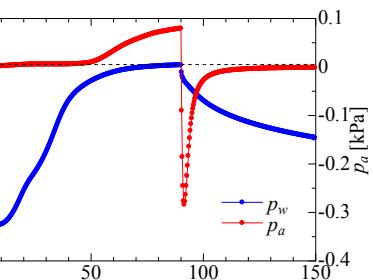


図-24 水圧空気圧変化(要素 B)

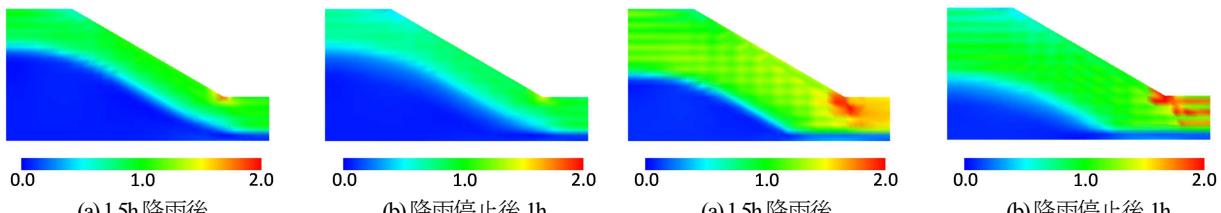


図-25 降雨強度 30mm/h の  $q/p'$  分布(非排気非排水条件)

盤への浸透可能流量が制限される。図-15 から斜面勾配  $30^\circ$  では新たに設定した降雨強度  $60\text{mm}/\text{h}$  は、降雨強度増加に伴う浸潤線降下速度の増加傾向の変曲点となっており、ちょうど浸透能に達する降雨強度であることが分かる。また降雨停止後の挙動にも注目し、降雨継続時間を 1.5 時間とし、その後、地表面は排気非排水条件とすることで放置期間を設け、空気圧の消散挙動を検討した。また、模型実験では模型下部の排水層の排水が十分でなかったことから滞留が生じた。そのため、滞留が生じてからの浸透挙動に実験と解析で相違がみられた。そこで、下部を非排気非排水条件とした場合の解析結果を示すとともに、模型試験における排水層設置の影響を検討する。

図-16, 17 にそれぞれ降雨強度  $30\text{mm}/\text{h}$ ,  $60\text{mm}/\text{h}$  時の飽和度分布を示す。1.5 時間降雨後の飽和度分布を比較すると、降雨強度  $30\text{mm}/\text{h}$  では地表面は飽和に達していないが、降雨強度  $60\text{mm}/\text{h}$  では飽和に至っている。その後、1 時間放置後の飽和度分布から、全体的に飽和度が低下するものの法尻部に周囲よりも飽和度の高い領域が現れる。特に降雨強度の大きい図-17 で顕著である。これは、式(9)で表されるように不飽和透水係数が飽和度に依存することが原因である。降雨によって法面の飽和度が高まるとそれによって透水係数が大きくなる、結果的に斜面上部の浸透水がより透水係数の高い法面方向に誘引され、法面平行方向の流速が大きくなつた結果、法尻周辺に浸透水が集中しやすくなることが原因である。

図-18, 19 に空気圧分布を示す。降雨強度  $30\text{mm}/\text{h}$  時には降雨終了時には天端付近に空気圧の高い領域が存在している。これは解析領域の上下端とも排気境界であるものの、上端は流量境界で下端が排水境界つまり一定水圧の境界であることが原因である。図-20, 21 にそれぞれの水圧分布を示すが、降雨時には地表面は飽和度が増加

するほど透気係数が小さくなり、下端に比べて空気が透過しにくい状態である。そのため、下方へ緩やかに空気圧が減少する拡散傾向がみられる。しかし、降雨停止 1 時間後は空気圧の分布が逆転している。これは降雨停止後、上端から排気できずに内部に封入された空気が、浸透した雨水が流下することで、膨張させられるからである。図-20(b)で水圧の高い領域が法面近傍よりも斜面深部に現れているのは、浸潤線が降雨停止後も降下していることを表している。一方、降雨強度  $60\text{mm}/\text{h}$  の場合、斜面への浸透量が大きく、浸透した雨水が斜面方向により顕著に流下するため、法尻で最も大きな空気圧が発生している。法尻は排気境界に近いものの、地表面は雨水侵入により水圧が高くなっているため(図-18(a))、空気の漏出が生じていないものと考えられる。降雨停止時には、上端を浸潤線による飽和に近い領域が厚く覆うため、降雨強度  $30\text{mm}/\text{h}$  の放置時に比べると、より深い位置に封入された空気の領域が存在する。いずれにしても、封入された空気は放置時には(大気圧よりも)負の値となっている。空気圧と水圧の相互作用に注目し、図-22 に示す天端付近の要素 A と法尻付近の要素 B における、水圧空気圧変化を図-23, 24 に示す。天端付近では、降雨直後は、水圧変化が小さいものの空気圧は増加している。これは浸潤前線到達までに空気相が圧縮されていることを示す。その後、浸潤前線の接近とともに水圧が増加していくのが分かる。そして、降雨を停止すると、下部排水層から速やかに排水がなされるため、水圧空気圧とも減少し始める。この時、水圧の減少量が大きいため、排水直後は封入された空気相の圧力が大きく減少し、やがて内部での空気相の再分配により大気圧に収束している。法尻付近については、下端の排水排気境界への距離が小さいことから圧力変化が生じ始めるまでに比較的時間が

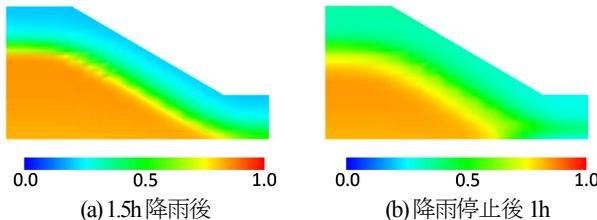


図-27 降雨強度 30mm/h の飽和度分布(非排気非排水条件)

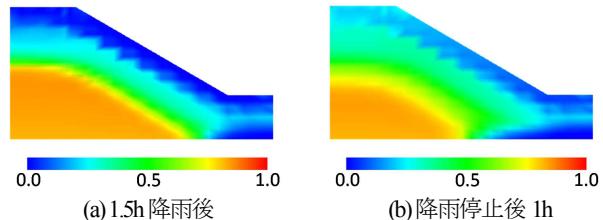


図-28 降雨強度 60mm/h の飽和度分布(非排気非排水条件)

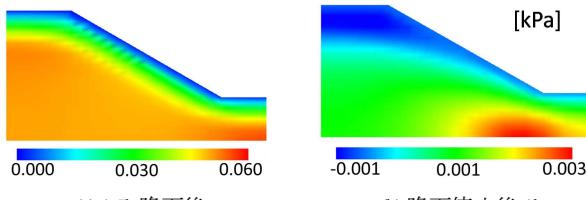


図-29 降雨強度 30mm/h の空気圧分布(非排気非排水条件)

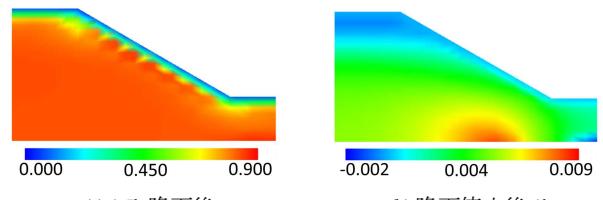


図-30 降雨強度 60mm/h 空気圧分布(非排気非排水条件)

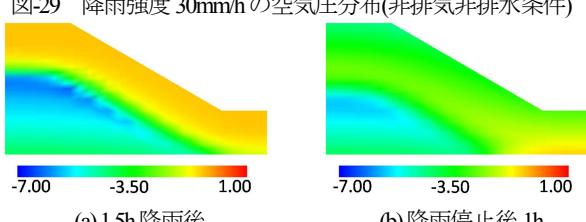


図-31 降雨強度 30mm/h の水圧分布(非排気非排水条件)

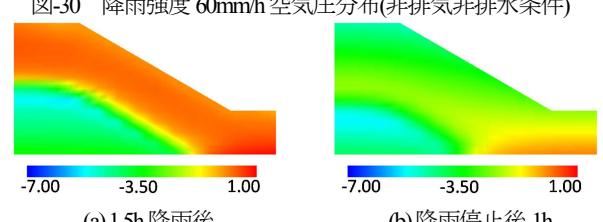


図-32 降雨強度 60mm/h 水圧分布(非排気非排水条件)

かかっている。天端と大きく異なるのは、先に水圧が増加し始めるところにある。これは、先述したように斜面上方からの流入によるものであり、時間遅れを伴って空気圧が増加し始めている。

図-25, 26 に  $q/p'$  の分布を示す、地表面に近い領域では過圧密比が大きいため、 $q/p'$  が大きくても破壊には至っていない。いずれの降雨強度でも、降雨継続後に法尻付近でせん断応力比の大きい領域が表れているが、空気圧、水圧とも大きな、降雨強度 60mm/h の方がせん断応力比も大きくなっている。また、降雨停止後もせん断応力比が大きなまま残ってしまっている。空気圧、水圧は相互に作用するが、これら間隙流体圧の増加が斜面内のせん断応力比変化に影響を及ぼすのは明らかである。

ここまで空気圧の挙動は解析下端の排水境界の影響が表れているものとし、下端を非排気非排水条件として新たに解析を行った。

図-27, 28 にそれぞれ降雨強度 30mm/h, 60mm/h 時の飽和度分布を示す。図-28において、階段状のコンターとなり、メッシュ形状の影響が表れている。降雨については、地表面の節点に流量を与えることで表現しているが、この地表面の節点を共有する要素に影響を与える結果となっている。流量が大きいほど、その影響は大きくなるが、地表面から 2 つ目以深の節点での計算に対しては表面近傍のメッシュ形状に依存しないことを確認しており、全体の浸透挙動に与える影響は小さいと判断する。下端が非排水条件になっていることから、斜面に浸入し

た雨水は流下し下端で滞留することになる。降雨強度が 60mm/h のケースでは降雨後にすでに解析領域右下部で飽和度の高い場所が表れており、滞留していることが確認できる。放置することによってその領域は左方向に広がっている。しかしながら、地表面からの浸潤線の降下領域は排気排水条件と比べると小さい。これは、内部で空気圧上昇が生じ、浸透を抑制しているからである。図-29, 30 空気圧の分布を示す。前述の下端が排気排水条件とは異なり、降雨終了時には降雨強度にかかかわらず、内部で全体的に空気圧が高まっている。これは排気境界が降雨浸透面である上端にしかないため、浸潤線によって空気が下方へ圧縮されるからである。その後、放置時間に浸透した雨水は降下するが斜面に沿う方向への流下が大きく、結果的に空気圧の圧縮領域が法尻に移動しているのが分かる。降雨強度が大きいほど、この時の空気圧が大きくなっている(図-24(b))。解析領域右端を非排水境界としていることから、滞留した浸透水が左方向に移動するため、空気の圧縮領域もやや左側に移動している。図-31, 32 は、この時の水圧分布を表している。解析領域下端にもやや水圧の高い部分があるが、これは下端が非排水であることによって現れる。この様に模型試験のスケールでは排気排水条件が浸透挙動に大きく影響を及ぼすことが分かる。模型試験によってこのような斜面の浸透挙動を再現する場合、対象領域と排気排水条件の選択には注意が必要であることが示唆される。

## 5. 1次元降雨浸透シミュレーション

前章では、降雨の流入境界からの排気が困難で、結果的に下端の境界条件で空気の圧縮挙動が影響を受けることは分かったものの、傾斜地形を模擬したシミュレーション

では、解析領域の幾何形状の影響を含んでいる。より単純な空気および水理境界条件のもとで、基本的な水圧、空気圧の相互作用について検討する必要がある。ここでは土田らの実験同様、一次元浸透条件での降雨浸透シミュレーションを行う。図-33に解析領域を示す。左

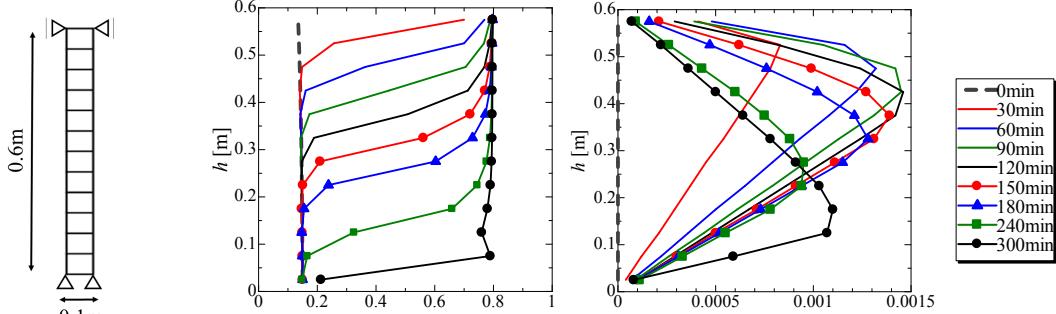


図-33 一次元浸透解析  
解析メッシュ

図-34 降雨強度 30mm/h(排気排水条件)

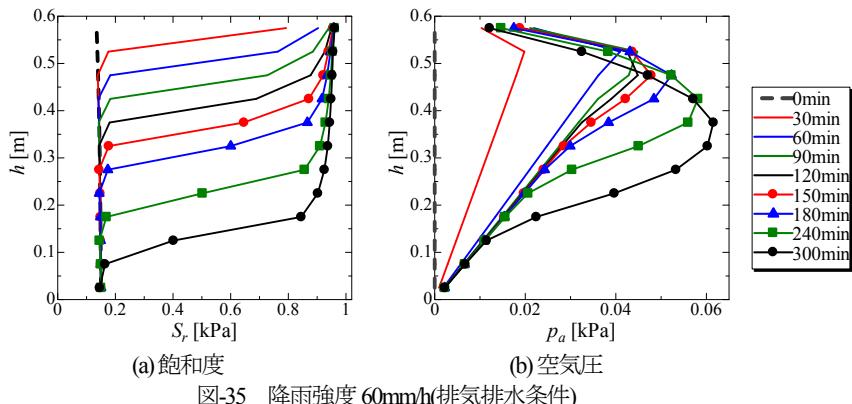


図-35 降雨強度 60mm/h(排気排水条件)

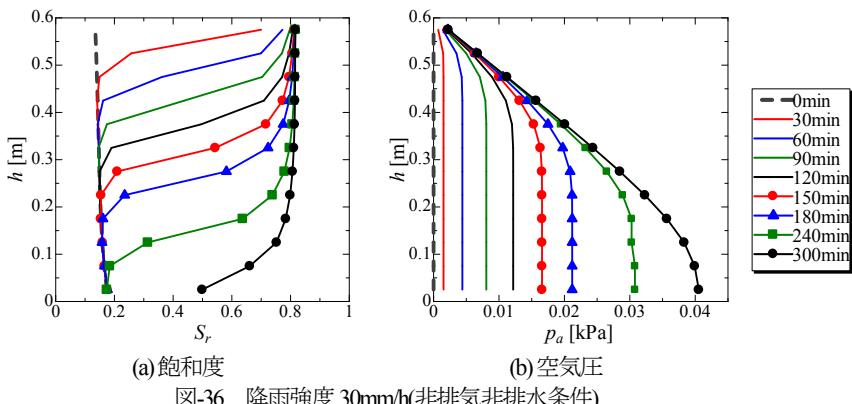


図-36 降雨強度 30mm/h(非排気非排水条件)

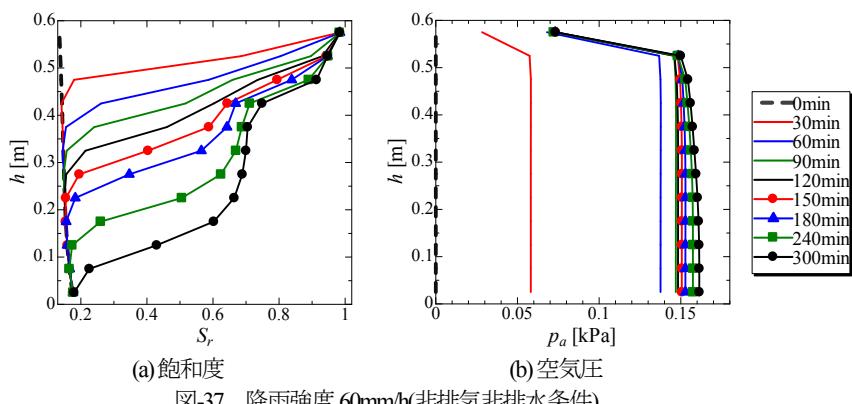


図-37 降雨強度 60mm/h(非排気非排水条件)

右端については非排気非排水境界とし、上端は流量境界として降雨強度相当の流量を与え、排気条件とした。下端については模型地盤の解析と同様に、排気(大気圧)排水(模型土槽の初期サクションを表現できるように-5.5kPaの圧力水頭)条件、および非排気非排水条件について検討を行った。図-34、35にそれぞれ下端が排気排水条件の時の降雨強度30mm/h、60mm/hにおける飽和度、空気圧深度分布の計時変化を示す。まず降雨強度による飽和度分布の違いから浸透挙動の違いが分かる。降雨強度が30mm/hでは飽和度80%ほどの浸潤前線が形成されており、降雨強度60mm/hでは90%を超える飽和度の浸潤線が形成されている。しかしながら、各深度で飽和度が上昇し始める時間については、降雨強度30mm/hの方が早く、雨水浸透深度以上の飽和度分布が緩やかである。それに対して降雨強度60mm/hでは、浸透した雨水は浅い層での飽和度の急激な上昇に寄与しており、各深度における飽和度上昇開始時間が遅くなっている。これは、空気圧の深度分布から説明できる。不飽和地盤に雨水が浸透すると、雨水浸透面から空気を圧縮しながら飽和度を上昇させるが、このとき降雨強度が大きい60mm/hでは浸透に対して地表面近傍で空気の圧縮が顕著に起こり、その空気圧上昇が浸透を抑制している。結果的に浸潤前線の降下とともに、内部の空気は圧縮されながら徐々に圧力を増しつつ降下していく。降雨強度が小さい30mm/hのケースでは、浸透する雨水が比較的少ないことから最大でも飽和度が80%となり地表面からの排気が幾分可能となっている。結果的に最大の空気圧についても降雨開始90分後をピークに徐々に低下していく様子がうかがえる。これは、圧縮された空気が排気境界に接近することで排出されていることを示す。

図-36に、下端を非排気非排水条件とした場合の降雨強度30mm/hでの飽和度、空気圧深度分布の計時変化を示す。図-34で見られたように、飽和度80%の浸潤前線が形成されているが、下端が非排水条件であることから300分後には下端に浸潤前線が至り、下端に浸透水の滞留が起こり始めているのが分かる。一方、空気圧については下端からの排出ができないことから、最下部で最大の値を示し、その絶対値もかなり大きくなっているのが分かる。また、最大空気圧は180分までは、時間ごとの増分がほぼ等しいにもかかわらず、地盤への浸透量が多くなり間隙空気相体積が小さくなってくると、大きく空気圧が上昇することも確認できる。土田らの実験結果は、この様に浸透水が下端非排水境界に到達した後、圧縮された空気が地下水形成により押し上げられた状態であると予想される。図-37は降雨強度60mm/hを与えた時の、下端非排気非排水条件での解析結果である。飽和度分布が不均一になっていることが見て取れる。これは、空気

圧分布より説明できる。下端が非排気境界になったことで全深度で一気に空気圧の上昇が起り、雨水の浸透が阻害されていることが分かる。その結果、地表面の浅い部分で飽和状態に至っており、雨水が浸透できない状態になっている。そのため、降雨初期に浸透した雨水が内部で再分布していく状態が観測されているものと考えられる。これまで、行われてきた不飽和土構成モデルを組み込んだ土/水連成解析でこのような浸透解析を行う場合、空気相の圧力変化を考慮しないため、浸透の抑制効果は浸透面の飽和度上昇に伴うサクションの低減(水圧の上昇)のみであり、ここで示したような空気圧上昇に伴う浸透抑制効果は表現できなかった。しかし、図-37に示すように、浸透と空気圧変化は、排気に関する境界条件によって相互に影響し合うことが分かる。実際の傾斜地盤では幾何学的形状とともに、水理境界条件、排気境界条件が複雑になることから、個別の詳細な検討が必要であると言える。

## 6. 結論

本研究では、降雨時の地盤内の空気圧縮挙動を明らかにするために、土/水/空気連成有限要素解析コードを用いて降雨シミュレーションを行った。まずは、解析手法の妥当性を検討するために、模型土槽内に作製した傾斜地盤への降雨試験との比較を行い、実浸透挙動を精度良く表現できることを示した。次に降雨浸透方向に排気排水条件の異なる仮想地盤において、降雨強度の違いによる地盤内空気挙動の違いを明らかにした。降雨強度が大きい場合には、降雨浸透面からの排気が困難であるため、浸透方向に空気は圧縮されていくことが分かった。この場合、空気圧が大きくなることで浸透が抑制される可能性があることも分かった。また、傾斜地盤においては、浸透水が斜面方向へ流下するため、最終的に法尻付近に空気圧の高い領域が現れることが分かった。排気排水条件の影響を明確にするために行った一次元降雨浸透シミュレーションの結果から、このように圧縮された空気は排気境界に接近すると排出されることが分かった。

これまで、斜面災害で前兆現象とされていた、異音や異臭は、この様な地盤内で圧縮された空気相の漏出であると考えることができる。しかしながら、その挙動は斜面形状や地盤の含水状態などに大きく影響を受けると考えられ、空気相挙動を精緻に計測した模型試験や実地盤挙動との比較の蓄積によって、さらなる検討が必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 土田孝、由利厚樹、加納誠二、中藪恭介、矢葺健太郎、花岡尚、川端昇一: 地盤内におい強度と斜面崩壊時の

- において発生に関する一考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, 339-348, 2013.
- 2) 小中智博, 柴田賢, 坂井宏隆, 前田健一, 馬場千児, 樋尾孝之: 豪雨と気泡のダイナミクスが及ぼす河川堤防の越流強度への影響と対策, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp.929-930, 2010.
  - 3) 金澤伸一: 不飽和土の数理モデルに基づく締固め土構造物の力学挙動評価, 神戸大学博士論文, 2010..
  - 4) 大野進太郎, 河井克之, 橋伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, Vol.63/No.4, pp.1132-1141, 2007.
  - 5) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.514-522, 1976.
  - 6) Van Genuchten: A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
  - 7) 杉井俊夫, 宇野尚雄: 新しい水分特性曲線のモデル化について, 土木学会第 50 回年次学術講演会概要集, pp.130-131, 1995.
  - 8) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.
  - 9) 本田道識, 飯塚敦, 大野進太郎, 河井克之, 汪偉川: 締固め土の圧縮特性に関する評価手法の検討, 土木学会論文集, No.806/III-73, pp.33-44, 2005.
  - 10) 神谷浩二, Bakrie, R., 本城勇介: 保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.3, pp.679-688, 2006.

(2015.6.23 受付)

## PORE AIR BEHAVIOR WITHIN A SLOPING EARTH STRUCTURE DUE TO RAINFALL INFILTRATION

Takuya KAWAKATSU, Katsuyuki KAWAI, Binod TIWARI, Atsushi IIZUKA

Recently, torrential rainfall frequently occurs due to global climate change and it causes sediment disasters. It is difficult to predict when and where slope failure because of localization of rainfall area. Knowing precursory phenomena is effective for disaster reduction. However, some of them have not been explained in the framework of geotechnical engineering. Organic smell and strange sound, known as a precursory phenomenon of slope failure, are generated by air movement. This study focuses on pore air behavior within the ground due to rainfall infiltration. Here, rainfall infiltration to sloping ground was simulated with using the soil/water/air coupled finite element code, DACSAR-MP. Consequently, it was found out that distribution of pore air pressure is dependent on drainage condition of air and there is interinfluences between pore air behavior and rainfall infiltration behavior.