

PDF issue: 2025-07-11

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

<mark>(Citation)</mark> 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

<mark>(Version)</mark> 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¹·河井克之²·Binod TIWARI³·飯塚敦⁴

1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

²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

³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

⁴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いる. 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かある.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¹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壌水分計が、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、地表面でに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



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³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-MP³で は、大野ら⁴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.

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \tag{1}$$

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

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

ここで、 σ' は有効応力テンソル、 σ^{net} は基底応力テン ソル、1は二階単位テンソル、 σ 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_{re} 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.

$$f\left(\mathbf{\sigma}',\zeta,\varepsilon_{v}^{p}\right) = MD\ln\frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_{E}}\left(\frac{q}{Mp'}\right)^{n_{E}} - \varepsilon_{v}^{p} = 0 \qquad (4)$$

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

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

ここで、 n_E は形状パラメーター、 ε_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、 $a \ge n_s$ は不飽和化に 伴う降伏応力の増加を表すパラメーター、 λ 、 κ 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、

$$\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{w}} = -\mathbf{k}_{\mathbf{w}} \cdot \operatorname{grad} h \tag{7}$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{a}} = -\mathbf{k}_{\mathbf{a}} \cdot \operatorname{gradh}_{a}, \ h_{a} = \frac{p_{a}}{\gamma_{w}}$$
(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、 γ_{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⁵、Van Genuchten⁶式を用いる.

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

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

ここで、 k_{rw} 、 k_{rw} はそれぞれ比透水係数、比透気係数、 mは Mualem 定数、 k_{wsat} 、 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.

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

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

ここで、nは間隙率、 ε_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^の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⁸のモデルの中で表現している.これによっ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							
	λ	K	М	p'_{sat} (kPa)	$k_{_{\scriptscriptstyle W\!X}}$ (m/h)	$k_{_{\scriptscriptstyle WY}}$ (m/h)	S_{ri}
	0.087	0.009	1.375	1500	0.156	0.078	0.15
	т	а	n _s	n_E	k_{ax} (m/h)	k_{ax} (m/h)	e_i
	08	10	10	1.00	156	78	07





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%, 礫 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_w, k_w 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, は材料の初期間 隙比である.ここで、 λ , κ , M, p'_{sat} , k_w については, 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, については本田ら⁹の研究を参考 にして決定した. n_{F} 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10の研究を参考に鉛直および水平透水係数の



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 料に加水量を加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-14 降雨 120 分後の浸潤線

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



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の等値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 60mmhの解析条件も追加した.図-15は同じ材料パラメ ーター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



盤への浸透可能流量が制限される.図-15 から斜面勾配 30°では新たに設定した降雨強度 60mmh 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 30mm/h, 60mm/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 30mm/h では地表面は飽和に達してい ないが,降雨強度 60mm/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った結果,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 30mm/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 60mm/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 30mm/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



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 60mmh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.

ここまでの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



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 30mmh 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 60mmh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こり、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: 地盤内のにおい強度と斜面崩壊時の におい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,馬場干児,桝尾 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..
- 大野進太郎,河井克之,橘伸也: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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.