

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14243

研究課題名（和文）遠心力場降雨実験による豪雨時の斜面表層崩壊メカニズムの解明と安定性評価

研究課題名（英文）Study on the surface failure mechanism caused by heavy rainfall and evaluation of slope stability through centrifuge model experiments

研究代表者

小野 耕平（ONO, Kohei）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・講師

研究者番号：30804166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、遠心力場で降雨を再現する散水装置を開発し、不飽和土への雨水の浸透実験を実施した。強度の異なる降雨の再現に成功し、地盤内の水分量の変動をサクシオンと体積含水率の計測により捉えることができた。既往の水分移動特性モデルと一次元の鉛直浸透流方程式を組み合わせることにより、地盤の透水性と保水性、および降雨強度により変化する擬似飽和時の体積含水率を定量評価することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、雨水の地盤内への浸透過程を評価することができ、体積含水率の推定手法に関して一定の妥当性が得られた。さらなる研究の発展により、豪雨時の斜面崩壊の予兆を事前に検出できるようになることが期待される。また、遠心载荷装置を用いた降雨再現実験に関する実験技術の開発は、同分野における将来的な研究の発展に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：We examined the requirements for a rainfall simulator that can replicate a rainfall of a given intensity in the centrifuge, and conducted a series of vertical rainfall infiltration experiments. The variation of water content in the ground was captured by measuring suction and volumetric moisture content. The quasi-saturated volumetric water content under different conditions of soil permeability and rainfall intensity was evaluated by combining models of moisture movement characteristics and one-dimensional vertical infiltration flow equations.

研究分野：地盤工学

キーワード：降雨浸透 不飽和透水係数 水分特性曲線 遠心模型実験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動に伴う降雨の激甚化によって斜面崩壊が世界的に頻発しており、人命やインフラに深刻な被害を与えている。被害を最小限に抑えるためには、斜面崩壊の予兆をできるだけ早い段階で検知し、住民避難や道路の通行止めなどの適切な対応を行うことが必要である。

降雨時の斜面の表層崩壊は、斜面表層への雨水の浸透を契機として発生するため、斜面崩壊の兆候を察知するためには、地中の水分量を把握することが極めて重要である。その中で、近年では Tsuchida et al. (2014) や Koizumi et al. (2019) などが、雨水が鉛直下方に浸透する過程における土の体積含水率の変化に着目している。降雨強度が地盤の浸透能よりも低い場合、雨水はすべて地盤内に浸透できるが (図 1(a))、浸透した雨水によって形成された浸潤面は、土の不飽和透水係数が降雨強度に一致するまで土の体積含水率を増加させながら降下していく (図 1(b))。この雨水の流入量 (降雨強度) と流出量 (不飽和透水係数) が釣り合う平衡状態では体積含水率が一時的に一定となり、これは疑似飽和状態と呼ばれる。近年の豪雨では、疑似飽和状態に至るまでの短時間の間に斜面崩壊が発生した事例が報告されているとともに、疑似飽和状態後に地下水位が上昇に転じる (図 1(c)) ことで生じるサクシオンの低下や浸透流の発生が表層崩壊に繋がることは予てより知られている。以上のことから、この疑似飽和状態における体積含水率の検出が斜面崩壊発生の予測手段となることが期待されている。

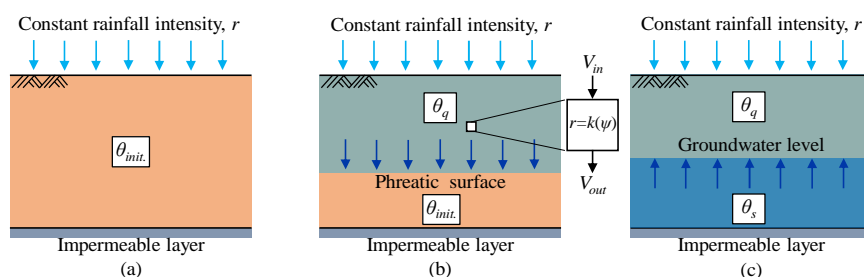


図 1 降雨浸透時の模式図：(a) 初期状態，(b) 浸潤面の降下，(c) 地下水位の上昇

2. 研究の目的

上記の通り、疑似飽和状態の検出は斜面崩壊の予測において重要であるが、土の保水性や透水性、降雨強度によって変化すると考えられる疑似飽和時の体積含水率を定量的に評価する手法は未だ確立されていない。これまで、物理現象の理解には模型実験が重要な役割を果たしてきたが、降雨浸透時の斜面の安定性を評価するためには、自重効果や応力状態、毛管上昇高さなどを原型のスケールに近づけることが不可欠である。既往研究は厚さ 0.5 m 以下の比較的薄い土層を対象とした小規模な模型実験に基づいたものであり、降雨による表層破壊が起こり得る厚さ 1.0 m 以上の土層に関する研究はこれまで行われていない。Ng 場での遠心模型実験は、小型模型でありながら毛管上昇高さを $1/N$ のスケールまで縮小し、雨水の浸透時間も大幅に短縮することができるため、比較的低コストで再現性の高い実験が可能である。しかしながら、遠心力場の実験においては、雨粒の大きさ、降雨強度、コリオリ力、液体の粘性など、降雨を正確に再現する上で不明確な検討事項が多く残されている。

そこで本研究では、はじめに、遠心装置内で均一な降雨強度分布を再現するための要件を検討し、所定の降雨強度を再現できる散水装置の開発を行った。その後、散水装置を用いて雨水の鉛直浸透実験を行い、疑似飽和状態の土の体積含水率を取得し、評価することを研究の目的とした。地盤の透水性や降雨強度の異なる条件下における疑似飽和時の体積含水率を、Mualem-van Genuchten モデルを用いて定量的に評価する方法について検討した。

3. 研究の方法

3.1 降雨装置の開発

図 2 に愛媛大学の遠心装置、図 3 に降雨システムの概要図を示す。本研究では、強度の高い微小な雨滴を発生させるために、2 流体型スプレーノズルを使用した。直列に複数個配置したスプレーノズルにエアコンプレッサーからロータリージョイントを介して圧縮空気と加圧水を別系統から供給することで、微小なミストを散水した。ミストの粒子径はメーカー公表値で 20 ~ 30 μm である。噴霧量は供給する各々の圧力で調整し、各経路に設置された電磁弁を遠隔操作することで散水の開始と停止をコントロールした。また、回転座標系上を移動する物体には移動方向と垂直な方向に見かけの力 (コリオリ力) が作用するため、遠心力場で散水装置から射出された雨滴は曲線を描きながら地表面に達する。そのため、雨滴の落下位置はスプレーノズルを遠心装置の回転方向に傾斜させることで補正した。



図2 遠心载荷装置

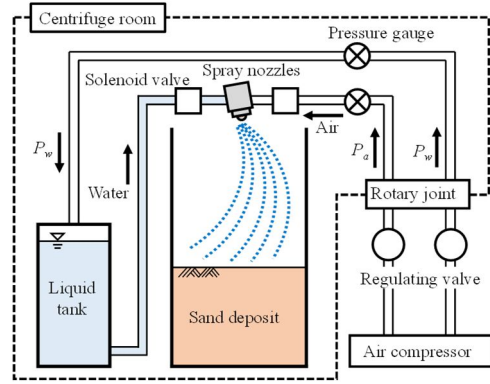


図3 降雨システムの全体図

降雨強度分布を検証するための予備実験を行った。降雨強度は原型スケールで 5, 20, 60 mm/h の 3 パターンを設定した。遠心加速度が 40 g に達した後、土槽内に配置した直径 22 mm の小型軽量カップ上に散水し、1 g に戻した後に各カップ内に溜まった水の高さを測定することで降雨強度を算出した。図 4 は、降雨強度の分布とそれに対応する列毎の平均値を示したものである。土槽の奥行方向には多少のばらつきがあるものの、スプレーノズル直下の長さ方向には概ね均一な分布となっており、中央列の平均値は目標値とほぼ同等であることがわかる。なお、散布中は降雨量が一定に保たれていたことも水圧の計測により確認している。本研究では、ノズル直下の地盤内に各センサーを埋設し、ノズル直下で測定した降雨強度を用いて浸透挙動を評価した。

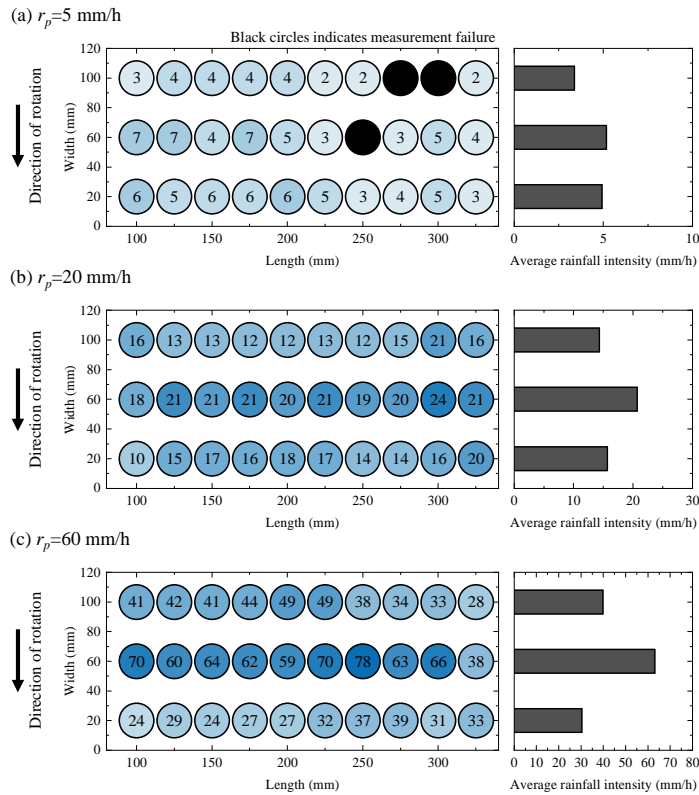


図4 降雨強度分布

3.2 浸透実験の概要

実験模型の概略図を図5に示す。長さ 430 mm、幅 120 mm、深さ 230 mm の剛土槽内に、東北硅砂 8 号を用いて、厚さ 80 mm の均一な水平砂層を作製した。砂の含水率は 15% または 2% で、目標相対密度 80% になるように 4 層に分けて締め固めた。間隙水圧計と土壌水分計を所定の深さに設置した。実験は、遠心加速度 40 g 場で計 7 ケース実施した。R60, R20, R5 の 3 ケースは、降雨強度が 60, 20, 5 mm/h と異なる基本ケースである。R5V4 と R5V12 の 2 ケースでは、メチルセルローズ水溶液からなる 4, 12 cSt の粘性液体を雨水に用いた。両モデルとも噴霧強度は 200 mm/h であるが、相似則に基づくと降雨強度は 20, 60 mm/h に相当する。R5W2 のケースでは、初期含水比が 2% になるように調整した。R240 のケースは遠心加速度が 10 g で、R60 と同じ降雨条件だが、遠心加速度が 4 倍異なるため、降雨強度は 4 倍 (240 mm/h) とみなせる。一連の実験で使用した砂の飽和透水係数 ($k_s = 9.3 \times 10^{-5}$ m/s) は、降雨強度の単位に換算すると 335 mm/h になる。飽和透水係数が浸透能と等しいと仮定すると、全ケースの降雨強度は浸透能以下であり、雨水の全量が地中に浸透できる条件である。

4. 研究成果

4.1 雨水の浸透プロセス

図 5(a)は、R20 モデルの散水中の体積含水率の時刻歴である。浸潤面の降下に伴い、約 13 時間後に体積含水率が上昇を開始する。約 18 時間経過後は体積含水率の増加率が低下し、 $\theta = 0.24 \sim 0.26$ 程度に落ち着く。この時、地盤内には少量の間隙空気が閉じ込められており、疑似飽和状態にあると考えられる。その後、浸潤面が土槽底面に到達して反転し、地下水位が上昇する。これに伴い、約 27 時間経過後には体積含水率が再度上昇し始める。この過程で間隙空気が消失し、最終的には飽和体積含水率と概ね等しい $\theta = 0.48$ 程度となる。

図 5(b)は、R20 モデルの間隙水圧の時刻歴を示している。負の間隙水圧の絶対値はサクションを示している。間隙水圧は、浸潤面が降下するにつれて地表に近い深さから順に応答する。最初の反応までに要する時間はセンサーの深さに概ね比例しており、浸潤面の降下速度がほぼ一定であることを示している。また、P1、P3 の間隙水圧は、体積含水率と同様に一旦上昇した後、一時的に一定となる時間帯がある。この間、間隙水圧は深さに関係なく負の値を示していることから飽和には至っておらず、これは体積含水率の結果と整合している。地下水位の上昇に伴い、間隙水圧は逆に P3、P1 の順に再度上昇を始め、センサー周囲が完全に飽和することで大気圧に等しい 0 kPa を示す。

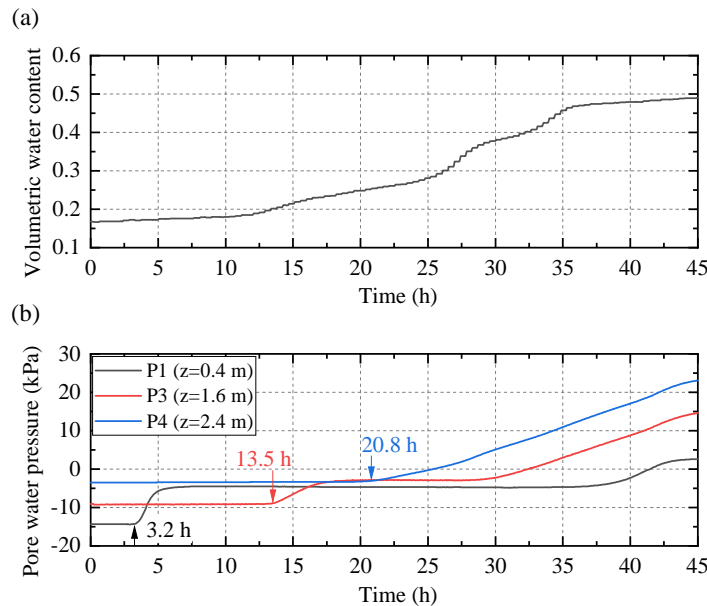


図 5 R20 の時刻歴：(a) 体積含水率，(b) 間隙水圧

4.2 降雨強度と粘性係数の影響

図 6 は、降雨強度と疑似飽和時の体積含水率 (θ_q) の関係、および降雨強度と疑似飽和状態に至るまでに要する時間 (t_q) の関係をそれぞれ示す。グラフは非線形な相関を示しており、降雨強度が高いほど θ_q は高く、 t_q は短くなっている。R5 モデルと R5W2 モデルの違いは初期体積水分量のみであるが、 θ_q は 1.5 倍、 t_q は約 2~2.5 倍と大きな差がある。見かけの降雨強度が等しい R20 モデルと R5V4 モデルの θ_q と t_q は同程度であり、相似則に従っている。しかし、R5V12 モデルと R60 モデルを比較すると、 θ_q で約 1.5 倍、 t_q で約 2 倍の差があることがわかる。R5V12 モデルでは、散布開始直後から地表に泡が発生し、粘性流体が地表に湛水していることが確認された。一方、R60 モデルでは、湛水は確認されなかった。このことから、散布した液体の総量が中に浸透しきれず、有効降雨強度が低下し、体積含水率が低下したことが推測される。

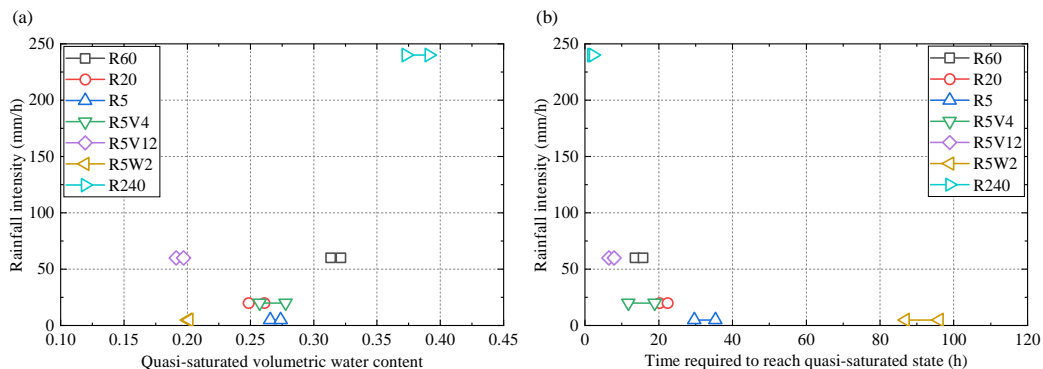


図 6 降雨強度と(a) 疑似飽和時の体積含水率の関係，(b) 疑似飽和に至るまでの時間の関係

4.3 体積含水率の評価

式(1)で表される Mualem-Van Genuchten モデルは、土壌の保水性を表す経験式として、最も広く用いられているものの一つである。

$$K_r = \frac{k(\psi)}{k_s} = S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]^2 \quad (1)$$

ここで、 K_r は比透水係数であり、不飽和透水係数と飽和透水係数の比として定義され、 $k(\psi)$ は不飽和透水係数を表す。 S_e は有効飽和度であり、式(2)で与えられる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha \psi|^n \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2)$$

ここで、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 α と n は曲線の形状を決定するフィッティングパラメータである。式(1)、(2)から、 K_r は土の体積含水率（または圧力水頭）によって一意に決定されるため、式(2)で表される水分保持特性が既知の土の場合、 K_r と θ の関係は図 7 に示すように、1つの曲線で表すことができる。

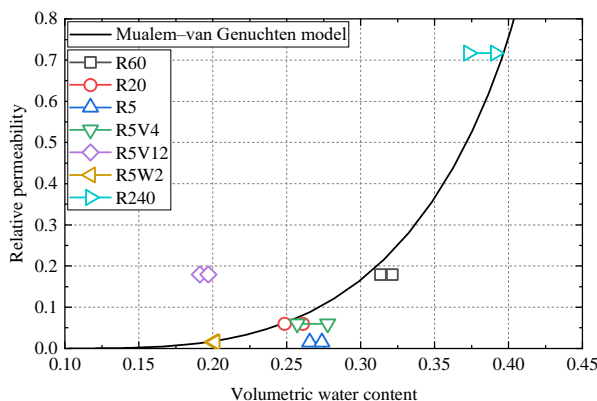


図 7 体積含水率と比透水係数の関係

降雨強度が一定の条件下では、浸潤面が通過後には降雨の流入と流出がバランスしており、降雨強度と不飽和透水係数が一致する。よって、疑似飽和状態に限っては、比透水係数は式(3)で表すことができる。

$$K_r = \frac{k(\psi)}{k_s} = \frac{r}{k_s} \quad (3)$$

式(3)から得られる比透水係数と鉛直浸透実験で得られた θ_q の関係を図 7 にプロットし、 K_r と θ の関係曲線と比較した。R5 および R5V12 モデルを除いて、概ね関係曲線と実験結果は一致している。これは、Mualem-VG モデルから得られる関係曲線が、ある降雨強度に対する θ_q の理論的な上限を表していることを示している。R5V12 モデルが曲線の外側にある理由は、上述した通りである。R5 モデルの場合、モデルの関係曲線から得られる降雨強度 5 mm/h に相当する θ_q は 0.19 であり、初期体積含水率 0.21 は散布前にすでに θ_q を超過している。これは、その強度の雨水が浸透するために十分な不飽和透水係数を地盤がすでに有していることを意味しており、それゆえ、R5 モデルの θ_q は関係曲線の右側にプロットされている。一方、R5W2 の初期体積含水率は 0.03 であり、 θ_q より十分小さいため、 θ_q はほぼ曲線上にプロットされている。

Mualem-VG モデルは、飽和透水係数と水分特性曲線を介して不飽和透水係数と体積含水率の関係を示すモデルであるといえる。具体的には、疑似飽和状態において、不飽和透水係数と降雨強度は理論的に等価であり、それゆえ、体積含水率は飽和透水係数と降雨強度の 2 つで表すことができる。すなわち、水分特性曲線と土の飽和透水係数が既知であれば、任意の降雨強度に対する疑似飽和状態における体積含水率を推定できることが実験的に示された。

参考文献

1. Tsuchida, T., Athapaththu, A.M.R.G, Kano, S., Hanaoka, T.: Individual landslide hazard assessment of natural valleys and slopes based on geotechnical investigation and analysis, *Soils and Foundations*, 54(4), 806-819, 2014.
2. Koizumi, K., Oda, K., Komatsu, M., Ito, S., and Tsutsumi, H: Slope structural health monitoring method against rainfall-induced shallow landslide, *7th Int. Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum*, 615, 1-8, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小野耕平, 岡村未対	4. 巻 12
2. 論文標題 遠心力場での降雨実験の紹介と課題	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 35, 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐伯瞭太
2. 発表標題 降雨強度と地盤の透水性が斜面表層崩壊に与える影響に関する遠心模型実験
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 升田圭亮
2. 発表標題 数量化理論II類を用いた豪雨時の斜面の崩壊危険度の分析
3. 学会等名 令和4年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯瞭太
2. 発表標題 水平地盤に対する雨水の浸透挙動に与える降雨強度と地盤の透水性の影響
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 升田 圭亮
2. 発表標題 土砂災害警戒情報の精度向上に向けた豪雨時の斜面崩壊の素因と誘因の分析
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Ono
2. 発表標題 Centrifuge modelling of rainfall infiltration into the soil affected by rainfall and soil characteristics
3. 学会等名 10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------