

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19164

研究課題名（和文）斜面安定性評価のための遠心場における土中水・空気流れの解明

研究課題名（英文）Soil water and air flow in a centrifuge field for slope stability assessment

研究代表者

齋藤 広隆（Saito, Hirotaka）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・教授

研究者番号：70447514

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：遠心力場内のモデル斜面を用いて、豪雨時の間隙水圧（PWP）と空気圧（PAP）が斜面崩壊に及ぼす影響を検討した。遠心実験によりPWPが正になると斜面崩壊が斜面先端から始まり、水蒸気面が斜面表面まで広がるのが観察された。豊浦砂の場合、飽和帯からの空気移動で斜面頂部のPAPが増加したが、斜面先端付近では飽和によりPAPが減少した。相対密度 $Dr=50\%$ の珪砂では降雨強度が大きいとPAPが減少しPWPが増加、 $Dr=25\%$ の珪砂ではPWPが斜面全体で急激に増加し、PAPも急激に増加したが、顕著な滑りは観察されなかった。崩壊後、斜面頂上のPAPは減少したが、PWPの変化が斜面の安定性に大きな影響を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨時の斜面崩壊における間隙水圧（PWP）と空気圧（PAP）の役割を明らかにすることで、斜面崩壊のメカニズムをより深く理解できるようになった。また、遠心実験を用いた斜面崩壊の研究方法を確立し、他の研究者が同様の手法を用いてさらなる研究を行うための基盤となる。斜面崩壊の予測モデルの精度向上に寄与し、豪雨時の斜面崩壊リスクをより正確に評価するための基礎データを提供し、斜面崩壊による災害の予防と地域の安全性向上が期待できる。また道路、鉄道、ダムなどのインフラ設計において、斜面の安定性評価に関する重要な知見を提供し、豪雨時のインフラ被害を軽減するための設計基準の見直しや改良に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Using a model slope in a centrifugal field, we investigated the effects of pore water pressure (PWP) and pore air pressure (PAP) on slope failure during heavy rainfall. Centrifugal experiments showed that when PWP becomes positive, slope failure starts at the slope toe, and the phreatic surface extends to the slope surface. In the case of Toyoura sand, air movement from the saturated zone increased PAP at the slope crest, while PAP decreased near the slope toe due to saturation. For silica sand with $Dr=50\%$, high rainfall intensity led to a decrease in PAP and an increase in PWP. For silica sand with $Dr=25\%$, PWP rapidly increased across the entire slope, and PAP also increased sharply, but no significant sliding was observed. After failure, PAP at the slope crest decreased, but the changes in PWP had a greater impact on slope stability.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面崩壊 間隙水圧 遠心場 間隙空気圧

1. 研究開始当初の背景

豪雨による自然災害は、地球温暖化と相まって年々その度合いを増しているが、毎年のように繰り返される斜面崩壊に対する安価で実用的な対策はなく、農業工学分野を含めた多くの分野で、より正確な豪雨による安全度指標や対策が求められている。申請者らはこれまで、上記の要求に叶う安全対策のため研究を行ってきた。その過程で、豪雨での斜面崩壊メカニズムを明らかにするために、重力(1g)場において降雨模型実験を実施し、飽和・不飽和圧密解析に基づく崩壊解析システムを構築してきた。その結果、降雨時に浸透した雨水が斜面法先に滞留し、間隙水圧が上昇し正圧となることで、急速に斜面の安定性が損なわれ、すべりが発生することが明らかとなった(Chueasamat, et al., 2018)。そして、開発した飽和・不飽和圧密解析手法を用いて、降雨時の間隙水圧変化や法先での変位が集中することなど、降雨模型実験での観察を再現できた。

斜面法先で浸透が抑制され間隙水圧が上昇する理由の一つとして、封入空気存在が考えられる。近年の研究において、豪雨時に河川堤防基礎地盤内に存在した空気が圧力上昇し塊となり、その塊の移動や圧力上昇による地盤強度の低下により、破壊現象が発生する場合があることが、室内実験や数値解析によって明らかにされつつある(佐藤・桑野, 2015 ほか)。しかし、自然および盛土斜面内の空気の挙動については、ほとんど観察されておらず十分わかっていない。

2. 研究の目的

そこで、本研究は、1g 場および遠心場での模型実験によって降雨下での土中水・空気の変動および斜面変形を明らかにし、それらの挙動が自然斜面において土中水分流れおよび斜面安定に与える影響を評価することを目的とする。本研究の成果によって、豪雨時に斜面中の空気の挙動を制御し降雨浸透を安定化させ、斜面の安定性向上に資する手法の開発につなげることができる。

3. 研究の方法

遠心降雨実験は、農研機構農村工学研究部門において、アーム長 4.8 m のビーム型遠心機を使用して実施した。実験には、長さ 100 cm、幅 30 cm、高さ 50 cm のアルミニウム製コンテナを使用し、前面が強化ガラスになっているため、建設中も試験中も観察できる。また、降雨シミュレーターをコンテナに取り付けることで、実験中に所定の強度の降雨を与えることができる。雨どいは、雨水が壁面に沿って流れるのを防ぐため、モデル斜面より高い位置に設置した。

さらに、土壌斜面からの表面流出水と浸透水を収集するために、遠心機内に 2 つのスチール容器を設置した。表面流出水は、法先に設置した小さなフィルター蛇籠を通して回収し、浸透水はコンテナの底に開けた小さな穴を通して回収した。実験装置を図 1 に示す。

降雨シミュレーターは、加圧水を噴霧できるノズルが 8 個、給水用の鋼管が 2 本、給気用の鋼管が 1 本から構成される。コリオリ力の影響を軽減するため、ノズルは斜面表面から一定の高さに配置した(図 2)。予備試験を実施し、遠心加速度 30G をかけた場合、50mm/h および 100mm/h の降雨量を達成できることが実証された。

遠心機による降雨模型実験では、降雨強度 I と相対密度 D_r を変化させ、豊浦砂と珪砂 6 号(以下、珪砂)を表層砂として用い、DL クレーとよばれるシルトを強固な基盤層に用いた。斜面の高さは 35 cm (DL 粘土基礎の高さ 25cm と表層砂層 10cm を含む)、頂上幅は 30 cm、底辺長さは 60 cm で、勾配は 1:1 (傾斜角度は 45 度)とした。このモデル斜面に 30G の遠心加速度を加えると、1G の条件では斜面 10.5 m、頂上幅 9 m、底辺長 18 m に相当する。表層砂層については、相対密度 $D_r=25\%$ または 50% 、含水率約 $\approx 9\%$ のものを使用した。実験条件は表 1 に示す通りである。

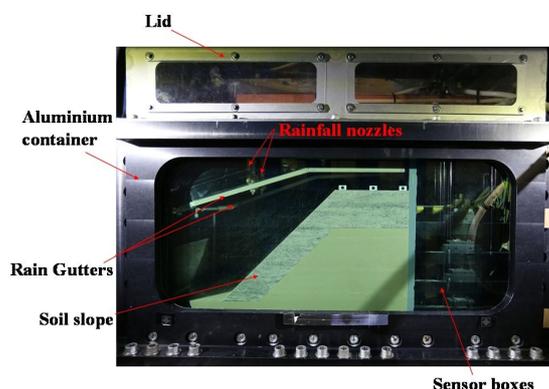


図 1: 遠心実験用コンテナ

表 1：実験条件

Case	Surface sand	Water content ω (%)	Dry density ρ_d (g/cm ³)	Wet density ρ_t (g/cm ³)	Relative density D_r (%)	Degree of saturation S_r (%)	Rainfall intensity I (mm/h)
T-1	Toyoura	8.3	1.489	1.613	49.9	28.35	50
S-2	Silica No.6	8.9	1.556	1.694	49.9	33.41	100
S-3	Silica No.6	8.9	1.474	1.606	25	29.48	100

PWP および PAP 変換器はあらかじめ決められた位置に設置した。PWP 変換器は斜面模型の中央に、PAP 変換器は模型斜面の中心線付近に設置した。PWP と PAP のモニタリングに使用したシステムは、空気侵入値 100 kPa のセラミックカップ、撥水フィルター、細いプラスチックチューブ、空気出力と給水用のバルブを備えた真鍮製のボックス、および真鍮製のボックスに埋め込まれた圧力計で構成されている（図 3）。PWP の場合、飽和させたセラミックカップは、脱気した水を満たしたフレキシブルな細いプラスチックチューブを使って真鍮ボックスに接続した。PAP 測定では、セラミック・カップの代わりに撥水フィルターを使用した。

模型をセットした後、遠心機をスタートさせた。遠心力が 30G に達した時点で、PWP と PAP の測定値が安定するまで約 15 分待った。その後、取り付けした降雨シミュレーターを用いて、

$I = 50 \text{ mm/h}$ または 100 mm/h の一定強度の降雨を与えた（図 2）。すべてのセンサーからのデータは、実験終了時（斜面崩壊時）まで 1 秒間隔で収集した。

4. 研究成果

実験結果は、実時間で降雨開始後の最初の 2 時間（実際の実験時間の 4 分）に着目し示す。以降、時間 t は降雨開始からの実時間における経過時間を用いる。

4.1 間隙水圧

間隙水圧分布の時間変化を図 5 に示す。初期時刻 $t=0$ 分において、砂層とシルト基盤層はすべてのケースで間隙水圧は負の値を示した。ケース T-1（豊浦沙）では、 $t=45$ 分頃に斜面先端部に地下水面（水圧ゼロ）が現れた。この時点で、地下水面が斜面表面に達し、最初の破壊が発生した。この地下水面は時間の経過とともに斜面先端付近で拡大し、最終的に $t = 60$ 分に表層滑りに至った。 $t=60$ 分以降、地下水面は上方には拡大しなかったが、シルト基盤層には広がり続けた。この理由として考えられるのは、砂の表面に溜まっていた浸透水が、斜面が崩壊する間に流出した可能性である。 $t=90$ 分では、基盤層で大きな間隙水圧（PWP）分布の変化が観察された。 $t = 120$ 分において、シルト基盤の斜面肩部付近で正の間隙水圧分布が観察され、このシナリオでは大規模な表層滑りを誘発する可能性がある。

ケース S-2（珪砂）では、斜面の中央付近で一時的な地下水面が観察され、斜面上に広がった。ケース T-1 と比較して降雨強度が高いため、斜面のり先の地下水面が著しく大きくなった。さらに、このケースでは、 $t = 60$ 分頃に斜面先端で初期破壊が発生したことが観察された。破壊後、 $t=90$ 分付近では、PWP は斜面上部には伝播せず、初期破壊後にシルト基盤層に雨水が浸入した。

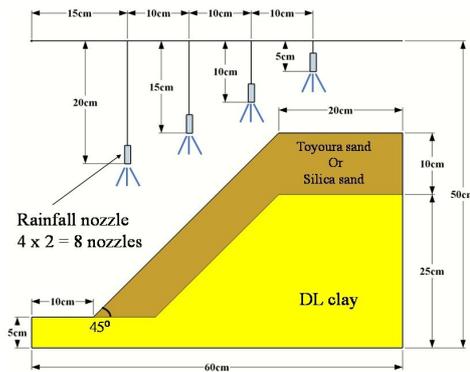


図 2：モデル斜面と降雨シミュレータの模式図

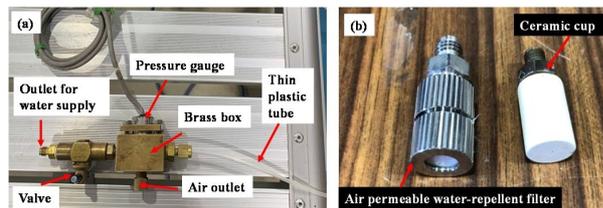


図 4：間隙水圧・空気圧測定用の変換器

その結果、 $t=90$ 分と $t=120$ 分では、シルト基礎層内の正のPWP領域が大きく増加し、表層砂層では減少した。

ケース S-3(珪砂)では、斜面に沿って正のPWPが最初に観察されたのは $t=45$ 分であった。ケース S-2と同様に、時間の経過とともに徐々に斜面表層に広がっていった。 $t=60$ 分には、ケース S-2で見られたように、斜面表層に地下水面が現れ、初期破壊に至った。この事例では斜面の頂上にもかなりの地下水面が現れている。しかし、シルト基礎層では、負のPWPがまだ基礎の中央部にあったため、他のシナリオに比べて正のPWPの増加はそれほど大きくなかった。したがって、破壊が短時間で起こり、降雨強度が強かったため、土の斜面に溜まった雨水は、シルト基礎層に浸透する前に破壊とともに排出された。

4.2 間隙空気圧

多くの斜面安定性に関する研究では、間隙水圧は大気圧と等しいか、あるいは大気圧を超える正圧になると仮定されているが、不飽和帯では間隙水圧は負圧のまま(すなわち大気圧より小さい)である。本研究では、降雨直前の初期条件では、すべてのケースでPAPは大気圧と等しかった(図6)。

ケース T-1では、PA1およびPA2センサーで観測されたPAPは、降雨開始当初は減少していた。それまで間隙を占めていた空気が雨水によって置換され、PAPが低下したためであると推察された。しかし、 $t=50$ 分から $t=90$ 分にかけて、PA1およびPA2センサーのPAPがわずかに増加した。土壌が飽和していた場合、PWPは $t=50$ 分から $t=90$ 分にかけて正の値に増加した。PWPの増加によって間隙内の空気が圧縮され、PAPが増加した。 $t=90$ 分後、PA1とPA2センサーのPAPは、実験終了まで着実に減少した。PAPsの減少は、破壊の際に表面が滑り、土の構造が破壊され、土の斜面から排気したことに関係している。

ケース S-2では、PA1とPA3センサーのPAPが徐々に減少することが観察された。この減少は、PA1では $t=40$ 分まで、PA3では $t=50$ 分まで続いた。 $t=45$ 分では、PA1で測定されたPAPがわずかに上昇し、その後再び減少に転じた。しかし、 $t=100\sim 110$ 分頃、PA1センサーのPAPに一時的な上昇がみられ、その後再び減少に転じた。同様に、PA3センサーのPAPは $t=60$ 分に最高値を示し、その後徐々に減少した。PA4センサーのPAPは、 $t=35$ 分まで漸増傾向を示し、その後 $t=120$ 分まで減少した。PAPが徐々に減少したのは、降雨強度が高くなったためである。このため水圧が高くなり、土壌斜面への雨水の浸透が急速に進んだ。その結果、土壌間隙内の既存の空気が移動し、PAPsが減少した。ケース T-1と比較して、ケース S-2では、降雨強度が高いため、間隙から空気がより大きく移動し、間隙空気圧の上昇が少なく緩やかな減少を示した。

ケース S-3では、PA1とPA2センサーのPAPは他の2つのセンサーよりも大きな値を示し、変動も大きかった。 $t=35$ 分で、これらのセンサーのPAPは急激に上昇した。これは、相対密度が小さいことに関係しており、相対密度が25%に低下したため、間隙が大きくなり、間隙に多くの空気が入るようになった。さらに、降雨量が多かったため、土壌斜面全体が急速に飽和した。急

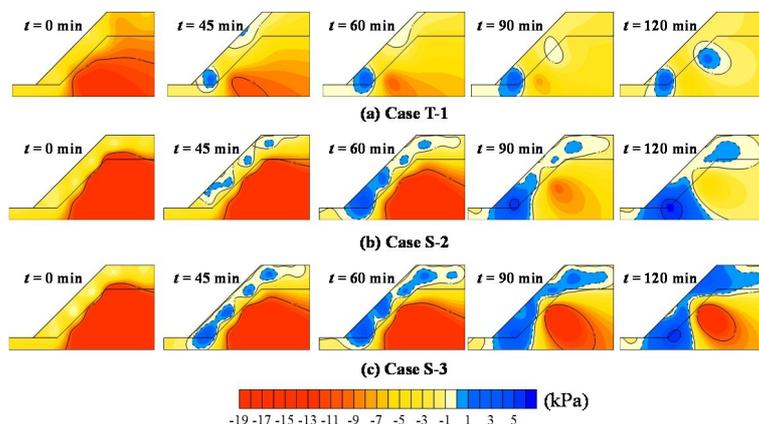


図5：間隙水圧分布の変化

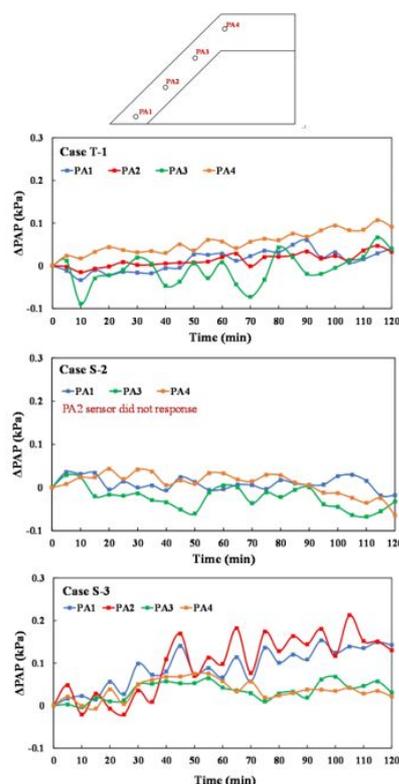


図6：間隙空気圧の変化

速に浸透した雨水が間隙を占め、土壌斜面のほぼ全体が飽和状態に達した。土壌斜面が急速に飽和すると、土壌斜面全体で PWP が増加し、空気がますます圧縮され、移動したり逃げたりする空間が制限され、PAP が増加した。

4.3 斜面崩壊のメカニズム

ケース T-1 では、 $t=45$ 分頃、斜面表面に地下水面が現れた。この時点で、PW2 センサーの PWP 値が 2 kPa に近づき、PW3 センサーの PWP 値がほぼ 0 kPa となり、斜面のつま先から初期破壊が始まった。その後、地下水面は斜面のり先付近で拡大したが、斜面上部には拡大しなかった。また、溜まった雨水はシルト基盤層まで浸透した。さらに、PAP については、斜面のり先では、雨水が浸透して間隙の空気を置換すると、PAP は減少した。逆に、斜面のり先が飽和状態に達すると、PWP が正になって空気が圧縮され、斜面のり先の飽和領域で PAP が再び増加した。斜面のり先での飽和は、不飽和帯への空気の移動または排気をもたらし、斜面頂上での PAP の漸増を引き起こした。また、表層すべり破壊時には、土の構造が破壊されると、土の斜面から空気が逃げるため、PAP が低下した。斜面肩部周辺では、斜面先端へ流れる前の一時的な雨水の貯留により、PAP は変動した。PWP が正となり、斜面のり先付近の斜面表面に地下水面が現れ、斜面先端から崩壊が進行した。斜面全体が飽和に達したわけではないが、表面すべりは他のケースよりも大きかった。

ケース S-2 では、 $t=60$ 分頃に斜面に地下水面が発生し、斜面のり先で初期破壊が発生した。しかし、地下水面は斜面上部には広がらず、砂表層では縮小し、シルト基盤層では正の PWP 領域が拡大した。さらに、このケースでは、急速な雨水の浸透により、土壌の間隙に存在する空気が置換され、PAP が低下した。この場合、斜面の不安定は主に斜面のり先部の PWP の増加によって引き起こされた。PAP の減少も斜面崩壊につながる可能性があるが、このケースでは吸引による不安定化は起こらなかった。ケース T-1 と同様に、斜面のり先が飽和に達した時点で斜面のり先から破壊が始まった。しかし、このケースでは顕著な表層滑りは観察されなかった。

ケース S-3 では、 $t=45$ 分の時点で、斜面全体に大きな一時的な地下水面が現れた。初期破壊は斜面のり先で発生し、 $t=60$ 分に地下水面が斜面表面まで拡大した。他の 2 つのケースとは異なり、地下水面が斜面上部まで拡大したため、地下水面全体で正の PWP 領域が大きくなった。さらに、斜面の頂上部分に地下水面が現れたため、その部分に亀裂や滑り線が生じた。このケースの PAP は、他の 2 つのケースよりも大きな値を示し、変動も大きかった。具体的には、斜面のり先部では PAP は試験終了まで増加し続けたが、頂上部では $t=60$ 分まで増加し、その後わずかに減少した。これは、降雨強度が高く、相対密度が小さいという組み合わせによるものである。降雨強度が大きかったため、土壌斜面全体が急速に飽和した。しかし、相対密度が 25% と低いため、間隙は増加した。土壌斜面全体が急速に飽和すると、PWP の増加によって大きな間隙内の空気がますます圧縮され、斜面のり先の PAP が大幅に増加した。斜面頂部の PAP も、斜面全体が急速に飽和したため、破壊に至るまで増加した。 $t=60$ 分頃に破壊が始まると、空気が抜け斜面頂部での圧縮空気が減少した。PAP の増加だけでは斜面崩壊の直接の引き金にはならないかもしれないが、不安定性の指標となる可能性はある。

遠心場での降雨下において、斜面崩壊のメカニズムを間隙水圧・空気圧の挙動から実験的に明らかにした。今後は、間隙中の水と空気の動きを考慮した飽和・不飽和圧密解析により本実験結果の再現に取り組み、降雨下の斜面崩壊における間隙空気圧の役割をさらに明らかにしていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 MAY THAN THAR, HIROTAKA SAITO, TOMOTAKA SATO, YUJI KOHGO, AKIYOSHI IZUMI
2. 発表標題 Centrifuge experiments on slope failures due to torrential rainfall
3. 学会等名 第73回 農業農村工学会関東支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Cho, M.T.T., Sato, T., Kohgo, Y., Saito, H., Izumi, A
2. 発表標題 Centrifugal investigation on the combined effects of pore water and pore air pressures on the shallow slope failures
3. 学会等名 2023年度（第72回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武田迅, 斎藤広隆, 佐藤友孝
2. 発表標題 排気・非排気条件の違いが繰り返し載荷時に不飽和シルトの強度・変形特性に与える影響
3. 学会等名 2023年度（第72回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年～2030年

1. 発表者名 Takeda, J., Saito, H., Sato, T.
2. 発表標題 Effects of cyclic loading on mechanical characteristics of unsaturated silt under various air circulation conditions
3. 学会等名 The XX CIGR World Congress
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田迅, 斎藤広隆, 佐藤友孝
2. 発表標題 空気・水分条件の違いが繰り返し载荷時に不飽和シルトの⼒学的特性に与える影響
3. 学会等名 令和4年度農業農村工学会関東支部大会 (第73回)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井祐太郎, 向後雄二, 斎藤広隆, 佐藤友孝
2. 発表標題 排気条件の違いが不飽和土の動的な非排水挙動に与える影響
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

〔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
研究分担者	向後 雄二 (Kohgo Yuji) (30414452)	茨城大学・農学部・特任教授 (12101)	
研究分担者	堀 俊和 (Hori Toshikazu) (20414451)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・研究領域長 (82111)	
研究分担者	泉 明良 (Izumi Akira) (10782203)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・主任研究員 (82111)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	登尾 浩助 (Noborio Kosuke) (60311544)	明治大学・農学部・専任教授 (32682)	

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