



Mechanism analysis of unsaturated slope failure based on the suction stress

胡, 德普

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2025-03-25

(Date of Publication)

2027-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9199号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496480>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 胡 德普

専 攻 市民工学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Mechanism analysis of unsaturated slope failure based
on the suction stress

サクション応力に基づく不飽和斜面崩壊のメカニズム解析

指導教員 加藤 正司

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

(氏名： 胡 德普 NO. 1)

斜面崩壊は、世界的に一般的な自然災害の一つである。主な原因には以下の 4 つが挙げられる：

1. 水文および気候：降雨量の増加，浸透，地下水位の変化が主な自然要因である。豪雨などの異常気象は，地滑りと土壌浸食の頻度を増加している。
2. 地質および土壌：岩石の種類，その構造，割れ目，土壌の含水率や密度が斜面の安定性に影響する。土壌の物理的・化学的特性も重要な決定要因である。
3. 地形特性：斜面の角度と高さが安定性に直接影響する。急な角度は安定性を低下させる。人間活動も斜面の安定性に影響を与える場合がある。
4. 植生と土地利用：植生の根系は土壌の安定性を高めるが，過放牧や森林伐採などの不適切な土地利用は侵食や地滑りのリスクを高めている。

これらの要因のうち，特に熱帯・亜熱帯地域では，斜面崩壊の大部分は降雨の浸透によって引き起こされている。さらに中国では，20 世紀に発生した大規模地すべりの 46%が豪雨によるものであったと述べられている。また，気象庁によれば，2023 年に発生した土石流災害の約 40%は降雨による浸透が原因であると報告されている。この降雨の浸透による斜面崩壊には，主に 2 つの形態が考えられる。一つは，降雨が斜面上部の地表に沿った特定の地点で浸透し，斜面下部で円弧状の浸透経路を経て滲出し，それが引き金となり崩壊するものである。もう一つは，降雨の浸透によって地盤内のサクションが低下し，斜面の全体的な強度が低下するために生じるものである。降雨による斜面崩壊の形態は複雑で多様であり，土壌の物理的・力学的特性，降雨の強度や継続時間などの要因も関連していると考えられる。しかし，最新のモニタリング技術やそれを用いた解析手法を用いることで，降雨による斜面崩壊時期をより正確に予測することができると考えられる。降雨は表層や浅い土層に集中する傾向があり，これらの領域において水理条件の急激な変化を引き起こし，地すべりの危険性が増大すると考えられる。しかし，これまでの研究においては，不飽和状態にある斜面に対して，有効な崩壊予測方法はほとんど提案されていない状況にある。不飽和地盤と飽和地盤の最も大きな違いは，不飽和地盤中に空気が存在することである。不飽和土の特性を評価する際には，間隙水圧だけでなく間隙空気圧も考慮する必要がある。飽和土では有効応力の原理が広く適用されるが，不飽和土でサクションが存在するため，土の挙動はより複雑になる。このため，これまでさまざまな弾塑性成モデルが提案されているが，サクションの影響を考慮した統一的なモデルはまだ発表されていない状況である。

以上のように，降雨によって誘発される斜面崩壊に関する広範な研究と探求にもかかわらず，特に降雨浸透によって引き起こされる不飽和斜面の崩壊に関する有効な評価方法はまだ確立されていないと考えられる。そこで本研究では，降雨によって誘発される不飽和土斜面の破壊メカニズムに焦点を当てた検討を行っている。地盤工学で広く使用されている

斜面安定解析ソフトウェア Geostudio を統合し、不飽和斜面内の降雨浸透を解析している。そして、さまざまな降雨シナリオと湿乾サイクルにおける斜面地盤の安全係数と内部強度の変化を調べることで、外部条件データを必要としない斜面破壊予測方法を提案している。さらに、本研究では、不飽和土に対する連続加圧保水性試験装置と光強度に基づく光ファイバーセンサーの適用性を拡大するため、室内実験を通じてその有効性を検証している。本研究は、降雨による斜面崩壊のより効果的な予測方法に関する現在の要求に応え、測定装置を改良し、実用性を拡大するものであり、理論的、実用的に大きな価値を有するものである。

本論文は 6 章から成り、以下、各章の概要を述べる。

第 1 章では、不飽和土壌における雨水浸透による斜面崩壊の発生メカニズムについて議論する。この章では、雨水浸透によって引き起こされる崩壊の種類を分析し、過去の研究トピックの背景と重要性を紹介している。

第 2 章では、不飽和土の特性から出発し、土壌・水特性曲線 (SWCC) モデルや地盤工学における一般的な透水性モデルについて述べている。不飽和土の有効応力原理 (skeleton stress) と二つの独立応力変数の構成モデルへの適用性を比較し、不飽和土のせん断強度の理論とサクション応力の概念を説明している。

第 3 章では、設計実務でしばしば見過ごされがちな SWCC のヒステリシス (湿潤・乾燥サイクルによる影響) に焦点を当て、その影響を無限長斜面を仮定した場合について検討している。斜面の材料は、代表的な土質材料である豊浦砂、風化花崗岩土 (マサ土)、DL クレーの三種類とし、SWCC のヒステリシスが無限斜面の安定性に及ぼす影響を検討している。検討結果から、低い粘着力と空気進入値を持つ材料では、安全係数 (FOS) が SWCC ヒステリシスの影響を大きく受けることが示された。また、選択した滑り面と斜面表面との間の深さが増すにつれて、湿潤時の FOS と乾燥時の FOS の差が顕著に減少する傾向がみられた。

第 4 章では、斜面の土壌水分の変化に FOS を関連付けることで、降雨による斜面安定性を評価する正確で適用性の高いモデルを提案している。異なる降雨条件下での FOS、サクション、およびサクション応力の関係を分析した結果、FOS の減少パターンが常に一定であり、環境や斜面の形状の変化が FOS-サクション応力関係曲線の全体的な傾向に影響を与えないことを示した。これに基づき、降雨による斜面安定性評価方法として RSS (Reference

suction stress) 方法を提案し、斜面の安全係数の変化を決定するための参照システムとして機能させる方法を提案した。また、RSS 閾値と早期警戒点の概念も提案し、斜面不安定警告指標の柔軟な適用を可能にすることを示した。

第 5 章では、次章で示す RSS 予測モデル検証のための斜面降雨実験に用いる、新たなプラスチック光ファイバーセンサー (POF) 技術を提案している。この技術は、芥川らが提案した POF の光強度の考え方に基づいており、土の特定の点での水分を高い感度と十分な安定性で測定することを可能にしている。まず、三種類の代表的な土質材料を用い、POF により異なる密度での飽和変化に対応する光強度変化を測定した。さらに、実際の斜面降雨状況を想定した、小型円筒土層を用いた不飽和土浸透試験を実施した。得られた結果から、POF 技術は、従来の水分センサーと比較して、土壌の特定点での微細な水分変化を監視するのに適していることが示された。この結果は、POF が災害防止とインフラ安全のための信頼性の高いツールとして大きな可能性を持つことを示している。

第 6 章では、理論分析と室内降雨土槽実験を組み合わせることで RSS 予測モデルを検証する。このため、不飽和無限斜面を仮定し、極限平衡法を用いて FOS の算定式を導出した。その後、降雨の斜面への影響を再現するため、模型土槽を用いた降雨試験を行った。斜面内の土壌特性の変化を測定するために POF 技術を使用した。得られた、滑り面の深さ、破壊時のサクション応力の値、体積水分含有率などを導出した算定式に適用した結果、水分含有率による単位重量の変動を無視すると、FOS とサクション応力の関係は線形性を示し、実験結果は RSS 予測モデルによる予測と密接に一致することが示された。この結果は、RSS 予測モデルの実務レベルへの適用性が高いことを示すものである。