

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01674

研究課題名(和文) 繰返し降雨による斜面の変形と破壊のメカニズム - 土砂災害警戒避難基準雨量の高度化 -

研究課題名(英文) Practical study on rainfall water infiltration and slope failure mechanism in natural stratified slopes based on distributed sensor observations

研究代表者

若井 明彦 (Wakai, Akihiko)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：90292622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、降雨時、降雨後の静穏期、再降雨時など、繰返し降雨条件が斜面の安定性に与える影響とこれに関わるクリープ様の斜面変動過程を明らかにするため、実斜面における観測、模型実験、要素試験などに基づいて、崩壊前の早い段階で前兆的に観察されることのある変動現象を表現するための力学モデルを提案するとともに、こうした複雑な斜面変動現象の本質に関わるいくつかの重要な知見を得た。さらに、同モデルを実装した有限要素解析コードを開発し、現象予測と防災の実務に適用する可能性を検証した。以上の成果は、降雨が断続的に続く雨季の斜面災害防止の重要な手掛かりとなる警戒避難基準雨量の高度化に資するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、斜面変動のメカニズムを多面的に解釈した点にあり、成果は斜面変動予測の実務に資する。現地計測との連携などを通じて、急傾斜地対策工事における突発的な土砂災害の防止、あるいは、豪雨時や融雪時などに急速に速度を増加させる恐れのある地すべり運動の監視業務等において、現場技術者の適切な意思決定を支援することにもつながる。また、斜面近傍の住民や社会基盤施設の安全確保のための早期警戒避難の発令や降雨後の警報解除の適切な時期選定を考える上での基準雨量の高度化に資することが期待され、地球規模の気候変動に伴う今後の極端気象災害防止に向けた実践的な研究として、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, the attention was paid to the repeated rainfall conditions which follow the process such as rainfall, quiet period, and re-rainfall. In order to clarify the effect of rainfall on slope stability and its creep deformation, field observations, model experiments, and element tests were carried out. In addition to development a mechanical model to simulate characteristic phenomena that may be observed at an early stage before the slope failure, a few important findings related to the essence of such complicated phenomena relevant to rainfall-induced slope failures were obtained. Furthermore, a finite element code that implements the above model was developed and the possibility of applying it to the practice of disaster prevention was validated. The obtained results is an important clue to prevent slope disasters in the rainy season when rainfall continues intermittently, and contribute to the sophistication of warning and evacuation standard.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面 変形 クリープ 繰返し降雨 地すべり 崩壊 構成則 有限要素法

## 1. 研究開始当初の背景

任意の降雨履歴の下で斜面の変動・不安定化の程度を経時的に評価するためには、斜面の内部で発生している微視的なせん断変形の進行速度を巨視的な安定性すなわち斜面変動量等と結びつけて解釈するための実斜面における観測や要素試験の実施、それらを体系的に記述するための数値解析技術の開発が不可欠である。あわせて、任意の降雨によってどのようにせん断変形の進行速度が変化するかを、種々の繰返し降雨履歴を想定したせん断変形の進行速度の変化傾向として体系的に取りまとめることが必要となる。

例えば、繰返し降雨による砂質斜面のせん断変形と破壊のメカニズムについては、(1) 斜面中のせん断ひずみは、吸水中の期間のみならず、排水中の期間にも増加する（特に深い土層の方が排水時のひずみ増加が大きい）、(2) 繰返し降雨下の斜面内のサクシオンとせん断ひずみの関係として、吸水時のせん断ひずみ増加は少なく、むしろその後の排水時のせん断ひずみ増加が多い、(3) 繰返し降雨下での地表面変位と地下水位の関係として、降雨イベント1において地下水位が上昇し、それに伴って変位が増加した後、降雨イベント2が降ると、先の降雨イベントにおける最大地下水位までは変位増加は小さく、それを超えると変位は著しく増加する、などの一般的傾向のあることが分かっている。

こうした知見等に基づいて、複数の降雨による地すべりの運動(変位)特性を解明するためには、(1) 地すべり活動を活性化させる大量の降雨があると、地すべりの移動は降雨中に開始するものの、降雨後の無降雨期間(小規模降雨を含む)にも移動は継続し、移動量はむしろ降雨後の方が大きいと予想されるが、こうした現象を説明するためにはどのような実験・観察と理論的考察が必要であるか、(2) 地すべり土塊中の深さ方向のせん断変形特性の相違(浅い土層では降雨イベント直後の短い期間での移動が主であり、深い土層では降雨イベント直後には移動量の増加が見られるものの、むしろそれ以外の、降雨イベントに影響を受けない期間の移動が主な移動量の主な成分である)を力学的に記述するためには、どのような理論的な枠組みを構築することが適切であるか、の検討が不可欠である。以上のような背景から本課題研究に取り組んだ。

## 2. 研究の目的

本課題研究では、降雨時→降雨後の静穏期→再降雨時など、繰返し降雨が斜面に与える影響と各時点での斜面変動の進行過程を明らかにする。実斜面における観測や要素試験などに基づいて、崩壊に至る前の早い段階で前兆的に観察されることのある変動現象、ならびに崩壊直前に見られる急速かつ自発的な変形の進展を、いずれも繰返し降雨下での地下水位変動場において精度良く表現するための力学モデルを開発する。

粘性土はもとより、斜面崩壊の予測を意図した砂質土の応力一定条件下での変形特性に関する既往の研究は少ない。そもそも従来の古典的な斜面安定理論によれば、斜面を構成する材料の強度と斜面への作用力との間の力学的平衡、すなわち斜面の全体安全率に基づいてその安定性が論じられることが基本であり、見かけの応力状態(全体安全率)が変化しないにもかかわらず斜面の安定性が次第に(自発的に)失われていくような状態は想定されていない。本研究の学術的独自性・創造性として強調されるべき点は、こうした土の応力一定条件下のクリープ変形に応力変化の影響を組み込む際、任意の降雨履歴を前提とした地下水位変動の条件を考慮することで、繰返し降雨によって斜面が崩壊に向かうのか、降雨後に変位が次第に収束する傾向に向かうのかを、効率的に予測するための手法を開発することである。

本研究の成果は、現在急速に発達している斜面の現地計測システムとの連携などを通じて、急傾斜地対策工事における突発的な土砂災害の防止、あるいは、豪雨時や融雪時などに急速に速度を増加させる恐れのある地すべり運動の監視業務等において、現場技術者の適切な意思決定を支援することにつながる。また、斜面近傍の住民や社会基盤施設の安全確保のための早期警戒避難の発令や降雨後の警報解除の適切な時期選定を考える上での基準雨量の高度化に資することが期待され、地球規模の気候変動が懸念される我が国の今後の極端気象災害防止に向けた実践的な研究として、意義が極めて大きい。

## 3. 研究の方法

斜面が繰返し降雨時に突発的に崩壊する機構は地質条件により大きく異なるため、本申請課題においては、その中でも典型的な二種類の地質の斜面をそれぞれ対象として整理する。すなわち、主として表層崩壊を呈する砂質土の斜面の崩壊と、残留強度を発揮する地すべり粘土の進行性破壊をもたらす地すべり斜面の崩壊の二種類である。

材料が砂質土であれ、粘性土であれ、応力状態の変化を伴わない条件下でどのように変形が進行しうのかを実験・観察し、「地下水位上昇に伴って変位が増加する領域」が、その後の「地下水位の上昇に無関係で変位が増加する領域」の時間-変位関係に対してどのように影響を与えるのかを十分把握することは特に重要である。本課題研究では、既存の傾斜せん断試験装置を大幅に改良した試験装置を製作し、水位を調整しながらせん断変位の進行速度を計測する実験を行った。また、実斜面における観測データに基づく同様の検討を行うとともに、それを再現するための変形特性をモデル化したFEM解析手法を開発した。以上の知見に基づいて、斜面内部

の力学機構を可視化し、繰返し降雨下で崩壊に至る限界降雨量の閾値を推定するため、土の構成モデルならびに数値解析手法をさらに高度化することを試みた。

#### 4. 研究成果

研究期間の終盤はコロナ禍の影響を受け、予定通りの現地調査や共同研究を進めることが困難であったが、その前年度までに実施してきた研究成果をもとにして、当初の研究目的の達成に少しでも近づくことができるよう、代替的な研究作業を柔軟に実施した。課題研究を終えるにあたって得られた主な研究成果を以下に総括する。

砂質土については、従来、繰返し降雨条件下において、地下水位上昇（降雨）期間と地下水位非発生（無降雨）期間の変位速度 - 加速度関係が同様の傾向があることが確認されている。斜面勾配、土層の密度と降雨強度が異なっても、地表面変位から求めた変位速度 - 加速度の関係は、両対数軸上で同一の線形関係を示していることを考慮すると、異なる応力履歴経路での変位の進行では、同じ土であれば、変位速度 - 加速度は同一であると言える、という重要な事実が、本課題研究を通じて示唆された。一方、粘性土に関しては、既存のリングせん断試験を改良し、機械的摩擦を大幅軽減して実験精度が向上したことを確認した。試験機改良によって粘性土の残留状態におけるせん断クリープ曲線が滑らかになり、提案した力学モデルによる予測値と近い状況になった。砂質土を主体とする斜面の繰返し降雨時の変形挙動、また、粘性土を主体とする斜面における同様の現象解明に資する物性評価装置の開発、それぞれが計画通りに進められた。

繰返し降雨に伴う斜面変動現象はどの時々々の力学状態に応じた土のクリープ変形の特徴をいかに適切に表現するか、という問題に帰着する。このため、以上に述べた砂質土、粘性土の実験的成果に基づいて、これらの変形特性を正確に再現するための構成則の改良とそれに基づく FEM 変形解析に取り組んだ。特に、各要素の見かけの局所安全率とひずみ速度との経験則を数値化した理論（図-1）を基本とした構成則は実際の斜面変動を再現（図-2）できる精度にまで向上したと言える。ただし、3次クリープを表現するために土のひずみ軟化特性を導入する検討はまだ途上のため、今後も引き続きモデルの改良を進め、砂質土および粘性土の実験的検討で得られた知見と融合した成果を得るべく、解析的研究を継続する予定である。

以上と並行した特筆すべき研究成果としては、FEM 浸透流解析に関連した理論的研究である。考察に基づいて、飽和領域の比貯留係数の算定に圧縮指数を用いるよりも膨張指数を用いる方が同一時刻における斜面内の水圧が大きいことが分かった。また、その時間差は土質に影響され、比較した2種類の砂質土においては、10mm/h の降雨時に斜面破壊に達する時間に最大 2.5h の差が生じたことも示された。

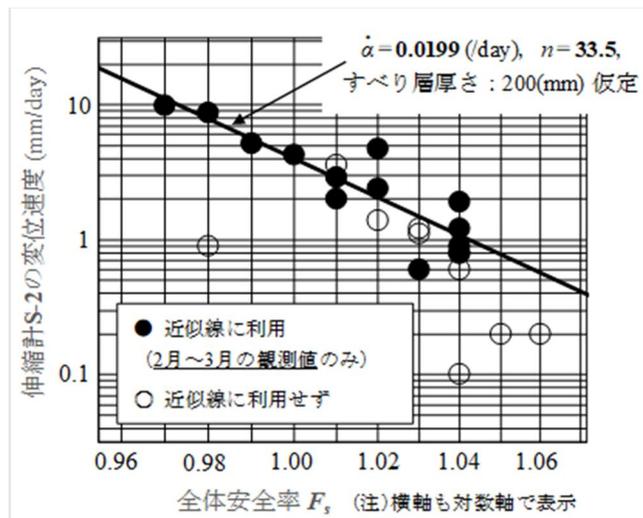


図-1 見かけの安全率と変位速度に基づくモデル化。

変位強調倍率：20倍  
（赤字：変形前，黒字：変形後）

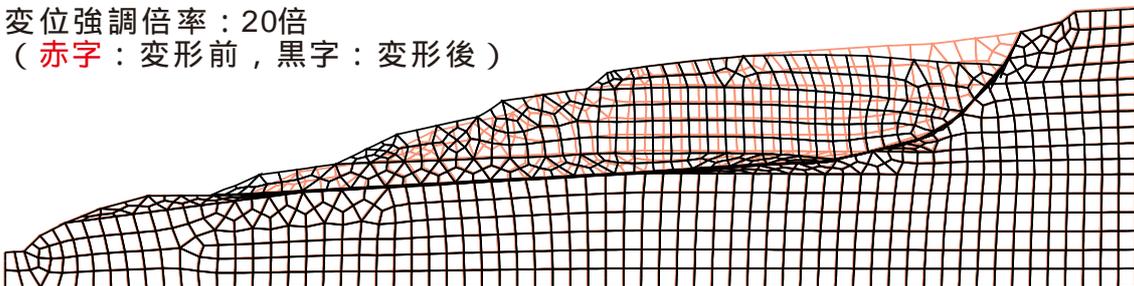


図-2 開発された構成モデルを用いた斜面変動の FEM シミュレーションの例。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 笹原克夫	4. 巻 56(2)
2. 論文標題 高知県小島地すべりにおける異なる深さのせん断帯の変位量増加に対する降雨の影響の相違	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本地すべり学会誌	6. 最初と最後の頁 pp.3-12
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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 笹原克夫, 平岡伸隆, 吉川直孝, 伊藤和也	4. 巻 14(4)
2. 論文標題 二次元方向の変位計測に基づく多段階掘削時の実大規模模型斜面の不安定度評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 pp. 363-375
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3208/jgs.14.363	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 笹原克夫	4. 巻 56(3)
2. 論文標題 高知県小島地すべりにおける異なる深さのせん断帯の変位量増加に対する降雨の影響の相異	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本地すべり学会誌	6. 最初と最後の頁 3-12
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 有
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 -
1. 著者名 若井明彦, 小谷健太, 大澤宗一郎, Deepak Raj Bhat, 相楽 渉	4. 巻 58(1)
2. 論文標題 安全率とすべり速度の経験則を粘性定式化に応用した地すべり運動の有限要素シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本地すべり学会誌	6. 最初と最後の頁 1-15
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 有
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13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Deepak Raj Bhat, Kenta Kotani and Akihiko Wakai
2. 発表標題 FEM-based numerical analysis of a creeping landslide
3. 学会等名 第58回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小谷健太, 大澤宗一郎, 若井明彦
2. 発表標題 弾粘塑性有限要素法による地下水位と連動した地すべり運動のパラメトリックスタディ
3. 学会等名 第58回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笹原克夫
2. 発表標題 繰り返し降雨を受ける砂質模型斜面の変位速度 - 加速度関係
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bhandary N.P.
2. 発表標題 Residual-state Shear Creep Behavior of Landslide Clay Materials
3. 学会等名 Nepal Geotechnical Society Silver Jubilee Memorial Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢野貴洋, バンダリ・ネトラ・ブラカシュ, 内藤周平
2. 発表標題 GIS解析を用いた平成30年7月豪雨による広島県呉市東部広域傾斜地の不安定化マップの作成
3. 学会等名 平成31年度地盤工学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maria D. S. R.N.J., Bhandary N.P., Kato R.
2. 発表標題 Use of XRAIN data in analyzing localized influence of rain intensity on slope failure in Kure area of Hiroshima during the 2018 heavy rain-induced disasters
3. 学会等名 平成31年度地盤工学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤杏一, 蔡飛
2. 発表標題 地盤の形状に応じた比貯留係数の算定と地盤内に与える影響に関する検討
3. 学会等名 第16回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤杏一, 蔡飛
2. 発表標題 平面ひずみ状態の貯留係数の算定と堤防の浸透に与える影響に関する検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Deepak Raj Bhat, Akihiko Wakai and Kenta Kotani
2. 発表標題 Numerical Simulation of a Creeping Landslide: A Case Study
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小谷健太, Deepak RAJ BHAT, 若井明彦
2. 発表標題 クリープ性地すべりのモデル化とパラメトリックスタディ
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若井明彦, Deepak Raj Bhat, 小谷健太
2. 発表標題 すべり面の間隙水圧と変位速度の履歴経路を再現するための解析的試み
3. 学会等名 第57回日本地すべり学会研究発表会講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wakai, A., Raj Bhat, D. and Kotani, K.
2. 発表標題 Finite element simulation for the creeping behaviour of a landslide induced by snow melt water
3. 学会等名 Proc. 7th Technical Conference in Eastern Asia on Geo-Natural Disasters (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笹原克夫
2. 発表標題 高知県小島地すべりにおける異なる深さのせん断帯での変位に対する降雨の影響の相異
3. 学会等名 第57回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2018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	笹原 克夫  (Sasahara Katsuo)  (90391622)	高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授   (16401)	
研究分担者	Bhandary Netra Prakash  (Bhandary Netra Prakash)  (10363251)	愛媛大学・社会共創学部・教授   (16301)	
研究分担者	蔡 飛  (Cai Fei)  (20312902)	群馬大学・大学院理工学府・准教授   (12301)	

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
---------	---------