

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14820

研究課題名（和文）スレーキングが生じた盛土の内部浸食メカニズムと劣化シナリオの解明

研究課題名（英文）Internal erosion mechanisms and degradation scenarios of slaking embankments

研究代表者

加村 晃良（Kamura, Akiyoshi）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80761387

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、スレーキングが生じた盛土内部の力学的変化を評価し、地下水位の変動（乾湿履歴）に着目して、盛土の劣化および変状メカニズムの解明を試みた。スレーキング性を有するシルト質泥岩を対象に、現場調査、室内試験、そして地下水位の変動シナリオを踏まえた数値解析を実施した。その結果、対象としたシルト質泥岩は、乾湿履歴を受けて粒度分布が変化し、特に粘着力が減少することが明らかとなった。強度特性や内部浸食に伴う粒度分布の変化に伴い、地下水位条件によっては、盛土の安全率が1.0を下回る可能性が示された。このため、適切な地下水位設定と、継続的な地下水位計測の重要性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スレーキングにより変状が報告されている盛土内部では、粒子の細粒化と地下水の流れによって、内部浸食が生じ、盛土全体の安定性が低下することが懸念されている。しかし、研究開始時点においては、スレーキングに関する調査手法や力学的変化の評価法、そして長期的維持管理のための体系的知見がない状況にあった。本研究では、盛土全体系の不安定化とスレーキングの関係性を明らかにし、現場調査から室内試験、安定解析手法まで、社会実装が可能な評価フレームを構築した。適切な地下水位の管理と、盛土供用後においても継続的に地下水位を計測し安定解析にフィードバックすることの必要性について、維持管理に資する成果として提案できた。

研究成果の概要（英文）：This study evaluated the mechanical changes in embankments due to slaking. An attempt was made to characterize the degradation and alteration mechanisms of the embankment materials, focusing on the groundwater table variation (dry/wet history). Field investigations, laboratory tests, and numerical analysis based on groundwater table variation scenarios were conducted on silty mudstone with slaking properties. The results showed that the grain size distribution of the silty mudstones changed in dry and wet conditions, especially the decrease in cohesion. It was shown that the safety factor of the embankment could be lower than 1.0 depending on the groundwater table conditions due to changes in strength properties and grain size distribution caused by internal erosion. Therefore, the importance of appropriate groundwater level setting and continuous groundwater level measurement was clarified.

研究分野：地盤工学

キーワード：スレーキング 盛土 内部浸食 泥岩 シルト岩 安定解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国土の約7割が山地・丘陵地である我が国では、斜面の安定性の確保やその長期的維持管理は重要な課題である。特に、高速道路などの盛土では、半永久構造物として維持する中で、地盤材料自体の劣化が問題となっている。この地盤材料の劣化要因の一つに、土の塊や軟岩が乾燥・吸水の作用を繰り返すことで、粒子が表面から細粒化するスレーキング現象がある。地盤内でスレーキングが生じると、地下水の流れによって、細かい粒子（細粒分）が移動・流出し、地盤内に不可逆的な構造変化、即ち内部浸食が引き起こされる。この内部浸食は、維持管理の観点において、盛土の劣化シナリオと対応付けて考える必要があるが、現状で盛土の強度低下や変状との力学的因果関係が明らかになっていない状況にあった。

特に泥岩やシルト岩を母材とした道路盛土において、スレーキングによる進行性の変状が複数報告されていた。盛土内でスレーキングが生じ、地下水の流れによって、内部浸食が生じている懸念もあった。しかし、研究開始時点においては、スレーキングに関する現場調査手法や力学的変化の評価手法、そして長期的維持管理のための体系的知見がない状況にあった。

以上の背景により、本研究テーマが社会的・学術的に強く求められることとなった。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では、スレーキングが生じた盛土の内部で生じている力学的変化を評価し、地下水位の変動（スレーキングを引き起こす乾湿履歴）に着目して、盛土の変状メカニズムを解明することとした。

学術的問いとして、①盛土内で内部浸食が起こりうる条件は何か？②スレーキングが生じた盛土の力学挙動はどのように変化し、安定性はどの程度低下するのか？③維持管理の観点から、盛土の劣化シナリオはどのように考えればよいか？を提起した。これら問いに対応するため、現場調査から室内試験、そしてスレーキングを考慮した数値解析によって、地下水の変動による影響評価を実施し、維持管理に資する知見を得ることとした。

3. 研究の方法

(1) 盛土の変状調査

実際に変状が確認された秋田県内の道路盛土（図1）を対象に、既存の資料調査、盛土と同一母材の試料サンプリング、そして盛土断面における表面波探査を実施した。母材のサンプリングは、建設時の資料を参照に、当時の採取地点から同一岩種のシルト質泥岩を採取した。表面波探査は、図1に示す測線で実施した。

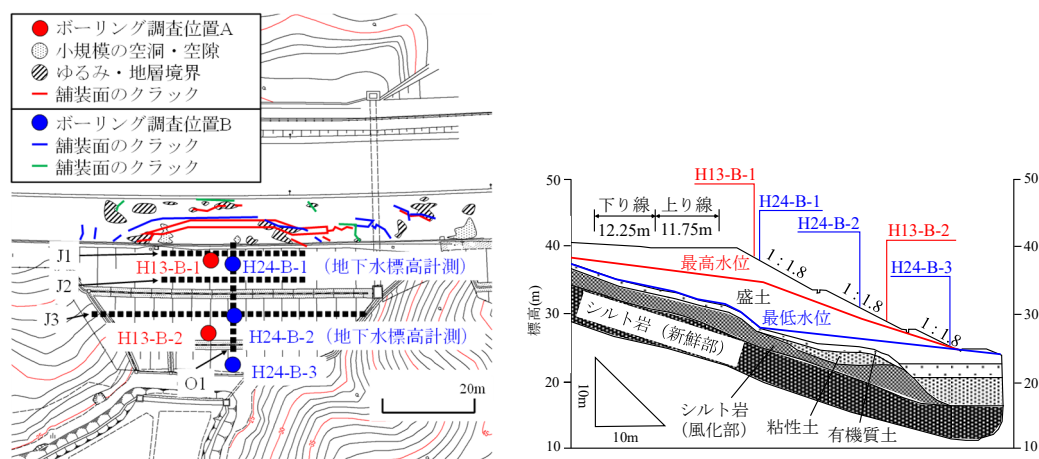


図1 対象盛土平面図および断面図

(2) 採取試料の分析と室内試験

実際の盛土から採取した盛土材と今回採取した泥岩質材料と用いて、粉末 X 線回折による主要鉱物組成の分析と pH 試験を実施し、盛土材と泥岩質材料が同じ組成であるか確認するとともに、本材料の鉱物構成を確認した。さらにスレーキング率試験を実施し、試料の状態を確認した。

(3) 給排水条件下でスレーキング履歴を与える三軸試験

既往のスレーキングに関する室内試験では、浸水過程と炉乾燥による乾燥過程を繰り返すものが殆どである。しかし、実際の盛土内ではそこまで極端な飽和と絶乾を繰り返しているとは考えにくく、試験結果を実盛土の劣化状況と関連付けて考えることは困難であった。本研究では、より現実的な盛土内の現象を模擬するために、採取試料を対象に供試体内で拘束圧を与えながら、通水による給水とサクシオン負荷による排水を繰り返すことで給排水履歴を与える三軸圧縮試験を実施し、スレーキングによる力学特性や粒度分布の変化について考察した。

(4) スレーキングを考慮した数値解析

室内試験結果を踏まえて、スレーキングによる土の力学特性の変化を模擬した斜面安定解析を実施した。地下水位や強度定数を段階的に変化させることで、法面の安定性に与える影響について評価した。地下水位の変動は、観測結果に基づき設定した。

4. 研究成果

(1) 現場盛土に用いられたシルト質泥岩のスレーキング特性の把握

表面波探査により測定された盛土内のせん断波速度分布を図 2 に示す。盛土部と地山部の境界を明瞭に確認できる。表土を除く盛土部では、せん断波速度は 90~219 m/s の範囲にあり、平均値は 149 m/s であった。図 3 には、スレーキング試験前後の試料の様子を示す。水浸-炉乾燥後 (5 サイクル) では、細粒化が進行していることが確認できる。このときのスレーキング率は 78% と高い値を示した。このことは、本試料が乾湿の繰返し作用に対して粒子破碎が生じる、脆弱な材料であることを示している。

図 4 には、X 線回折結果を示す。不定方位法の測定により、実盛土試料、泥岩質試料で検出された鉱物は長石、石英、トリディマイトであった。また、吸水に伴い著しく体積を増大させ粒子間の結合力を低下させることで、風化を進行させるスメクタイト等の膨潤性粘土鉱物は、ともに検出されなかった。2θ=28° 付近 (長石) では泥岩質試料 (新鮮部) でピークが大きく出ているのに対し、泥岩質試料 (風化部) と盛土試料ではピークがみられなかった。このことは、泥岩質材料の新鮮部が風化する過程で長石が溶出している可能性を示唆している。その他の鉱物に関しては、それぞれのピークの差はみられなかった。

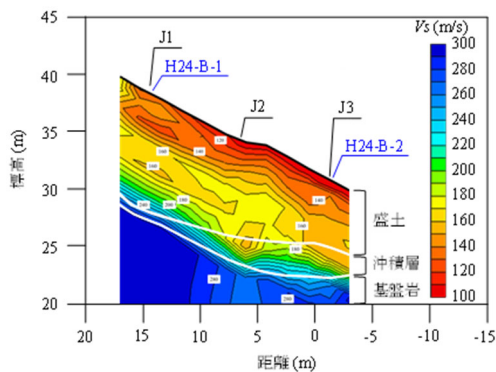


図 2 01 測線 (断面) のせん断波速度分布

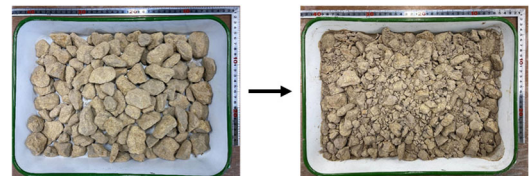


図 3 スレーキング率試験前後の状況

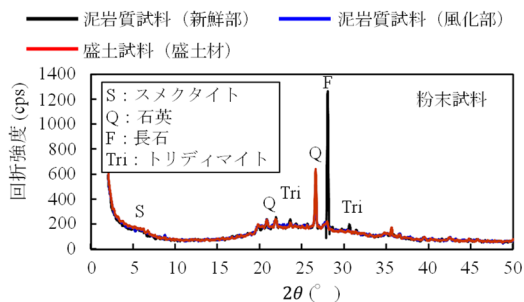


図 4 X 線回折結果

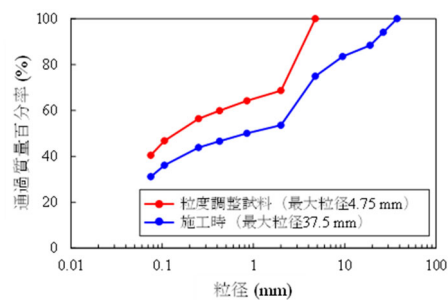


図 5 現地盛土と三軸試験用の粒度分布

(2) 給排水履歴を与えた室内三軸試験により得られた知見

図 6 には、拘束圧 50 kPa で給排水サイクルが 0, 2, 4 回のときの粒度分布の変化を示す。これより、給排水回数が増えると、細粒分の割合が徐々に大きくなるのが分かる。したがって、三軸室内の拘束圧条件下においても、スレーキングが生じていることが確認された。

図 7 に給排水サイクル回数ごとの CUB 試験の有効応力経路を示す。給排水サイクルの回数による経路の違いに着目すると、給排水サイクルが 0 回のときは、せん断応力の増加に伴い、有効応力がほぼ直線的に増加し、破壊線まで達した。一方、給排水サイクル 2 回以上の供試体では、ある程度までせん断が進行すると有効応力は減少傾向を示しながら破壊線に達しており、スレーキングにより骨格構造が変わったことが示唆される。先行研究では、スレーキング率が高い泥岩材料では、乾湿繰返しによって土骨格構造が低位化することで過圧密が解消しやすく、せん断中に塑性膨張を伴う硬度の程度が小さくなり、強度が低下する傾向があると指摘されている。本試験で実施した給排水繰返しにおいても、給排水サイクル 0 回では、供試体にせん断を与えることで正のダイレイタンスーによる有効応力の増加を示すが、給排水サイクルが進むにつれて、土粒子の骨格構造が変化することで、負のダイレイタンスーに伴う過剰間隙水圧が発生し、せん断強度が低下したものと考えられる。

給排水サイクルごとの強度定数 (c' , ϕ') の変化について、内部摩擦角は給排水サイクルが 0, 2, 4 回のとき、それぞれ 26.3°, 26.3°, 27.1°と給排水による変化はほとんどなかった。一方、粘着力では給排水サイクルが 0 回のときは、19.4 kN/m² であったが、給排水サイクルが 2, 4 回ではそれぞれ 3.9 kN/m², 0.6 kN/m² と低下した。

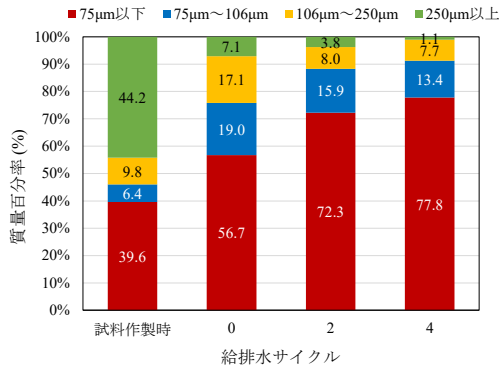


図 6 給排水サイクル回数と粒度分布の変化

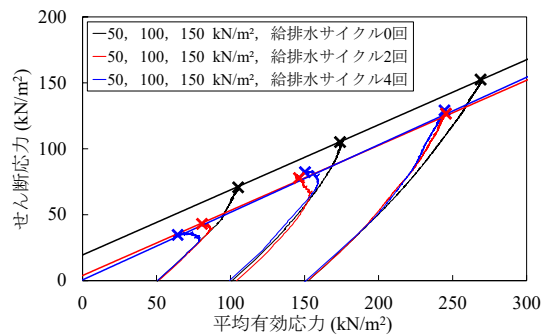
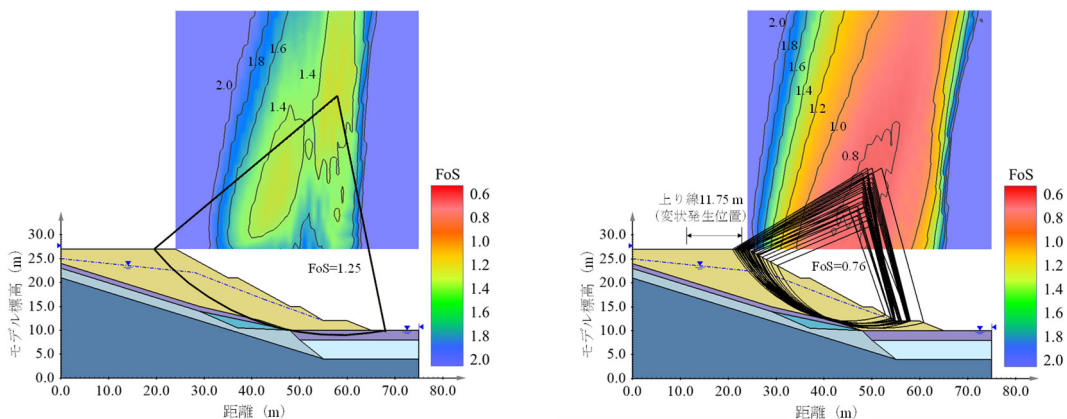


図 7 各給排水サイクルの有効応力経路

(3) 盛土の安定性評価と劣化シナリオとの対応

室内試験結果より、設計時には想定していない盛土内での地下水位の変動に伴い、スレーキングによる強度低下が生じ、盛土の安定性が損なわれる可能性が示された。このことから、推定地質横断面をもとに作成したモデル法面を対象に、室内試験結果から得られた強度定数の低下を反映した極限平衡法による安定解析を実施した。



(a) $c'=20\text{ kN/m}^2$

(b) $c'=4\text{ kN/m}^2$ (最小値から30番目までのすべり面)

図 8 円弧すべり面と安全率の分布図 (最高水位のケース)

図 8 に円弧すべり安全率の分布図（最高水位）の一例を示す。(a) $c' = 20 \text{ kN/m}^2$ では、安全率は 1.25、すべり面は下部の有機質土層を含む円弧となっているが、(b) $c' = 4 \text{ kN/m}^2$ では、安全率は 0.76 と 1.0 を下回った。すべり面については、盛土部の粘着力が有機質土層の 6 kN/m^2 より小さくなるため、盛土内部を通る円弧となっている。コンター図の赤色で示された範囲はすべり安全率が 1.0 以下となる円弧中心点であり、粘着力が低下すると、図の赤色部分の面積が拡大していることが分かる。粘着力 $c' = 4 \text{ kN/m}^2$ では広範囲で安全率 1.0 以下となった。実際に 2012 年 11 月に発生した盛土のクラックでは、地下水位の計測期間中で最も水位が高いとき（H24-B-1 孔：標高 34.74 m、H24-B-2 孔：標高 29.19 m）に生じたものであり、また、実盛土の変状発生位置は高速道路上り線部分で、最小の安全率から 30 番目までのすべり面の範囲に含まれていたことから、安定解析は実事例と調和的な結果が得られていると判断できる。

図 9 には、全解析ケースにおける粘着力とすべり安全率の関係を示す。いずれの水位でも粘着力の低下に対して、安全率の低下傾向は同様のトレンドを示している。地下水位ごとの安全率に着目すると、地下水位を既往最低水位（観測値）に設定したケースでは、粘着力が 0 kN/m^2 近傍になるまですべり安全率が 1.0 を下回ることにはなかった。一方、地下水位が最頻水位のときは、 $c' = 2 \text{ kN/m}^2$ 、最高水位では $c' = 8 \text{ kN/m}^2$ 以下になるとすべり安全率が 1.0 を下回る結果となった。本研究で実施した三軸圧縮試験では、給排水サイクルを与えると粘着力は 4 kN/m^2 以下まで低下した。このことから、盛土内で給排水履歴を受けることでスレーキングが生じて粘着力が低下し、さらに降雨等の影響で地下水位が上昇することにより、盛土の自重が増加することで、変状が生じるというシナリオが考えられる。

すなわち、スレーキングの恐れのある母材を用いた盛土においては、給排水履歴の影響によって粘着力の低下が盛土の変状の原因となることから、予め粘着力の低下の程度を把握することが盛土維持管理の観点から必要であることが示された。また、そのときに想定される地下水位の値も安定性に影響を及ぼすことから、事前調査に基づく適切な地下水位の設定と、盛土供用後においても継続的に盛土内地下水位を計測して安定解析にフィードバックすることを提案したい。

特に地下水位に着目すれば、現場で実施した表面波探査の結果、地下水位の最頻値を境界に上下でせん断波速度が有意に異なることが図 10 に示す通り明らかとなっており、剛性の変化の観点においても、本研究成果に基づき更なる検討を進める計画である。

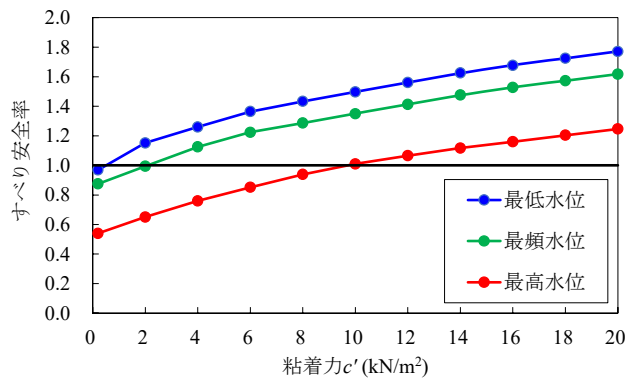


図 9 各地下水位のシナリオにおける粘着力とすべり安全率の関係

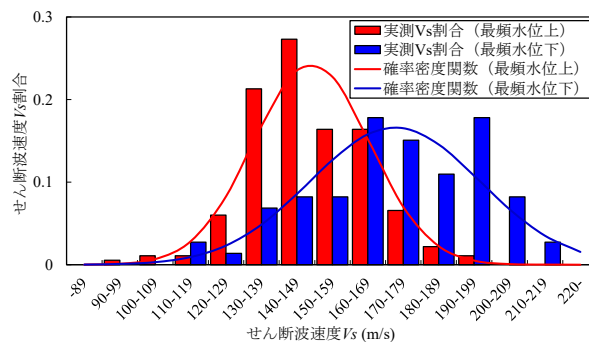


図 10 最頻水位より上側と下側のせん断波速度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Mihira Lakruwan, Hiromu Oikawa, Akiyoshi Kamura, Motoki Kazama
2. 発表標題 VARIATION IN DISCHARGE OF HORIZONTAL DRAINS WITH PERFORATION PATTERN AND ENVELOPE THICKNESS, AND EFFECT OF PHYSICAL CLOGGING
3. 学会等名 Asian Conference on Physical Modelling in Geotechnics (Asiafuge-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤野幸輝, 長尾和之, 加村晃良
2. 発表標題 スレーキング性を有する高速道路盛土の劣化を考慮した維持管理手法に関する提案
3. 学会等名 地盤工学会東北支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井林拓郎, 加村晃良, 風間基樹
2. 発表標題 給排水履歴を受けた泥岩由来の盛土材料のせん断特性の変化
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加村晃良, 井林拓郎, 橋本拓海, 風間基樹
2. 発表標題 給排水および繰返しせん断履歴を受けたスレーキング性盛土材料のせん断特性
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

近年の主な研究テーマと成果「特殊土や風化作用を受ける土」 東北大学地盤工学分野
<https://sites.google.com/view/geotech-tohoku/research#h.wgeuw5nna79>
本研究に関連する成果は、投稿中のものを含めWebページ上に適宜掲載する。

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