

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14822

研究課題名（和文）スレーキング現象の数値モデルによる記述と泥岩盛土の沈下安定性低下メカニズムの解明

研究課題名（英文）Numerical Modeling of Slaking Phenomenon and Mechanism of Settlement Stability Reduction of Mudstone Embankment

研究代表者

酒井 崇之（Sakai, Takayuki）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：20773592

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）：SYS Cam-clay modelに不飽和土および膨潤性鉱物の概念を導入した弾塑性構成則を用いて、乾湿繰返し圧縮試験の再現を実施し、圧縮試験を再現できた。解析結果から乾湿繰返しにより塑性変形が進展していくことで、構造が徐々に崩壊していく。乾湿繰返しを受けることにより、徐々に強度が低下していく原因は乾湿を与えることによるサクシジョンの変化に起因する応力の変化である。盛土内においても、降雨により地下水位が変化していくことで、同様の減少が起きていることが考えられる。泥岩盛土安定性の向上方法として、置換押え盛土工法を提案し、数値解析により、耐震性向上に対して非常に効果的な工法であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、スレーキング進行中の泥岩の挙動を数値解析で表現することにより、スレーキングによりなぜ強度低下が発生するのかについて、数値解析を用いて説明することが可能となった。これによりスレーキング進行のメカニズムがある程度解明することができたと考える。

また、置換・押え盛土工という泥岩盛土の耐震性向上の方法を明示することができた。押え盛土の形状も含めて検討することで、最も効果の出やすい形状を提案するとともに、耐震性向上のメカニズムも明らかにした。従来は鉄筋による補強が主だったが、スレーキング進行により泥のようになった場合は有効でない可能性があるが、本工法を用いることで盛土の強化が可能となる。

研究成果の概要（英文）：Using the elasto-plastic constitutive model that introduces the concepts of unsaturated soil and swelling minerals into the SYS Cam-clay model, it was possible to reproduce the compression test by dry-immersion cyclic compression. The analysis results showed that the structure gradually decayed as the plastic deformation progressed due to dry-immersion cycles. The reason for the gradual decrease in strength due to repeated dry-immersion cycles was the change in stress caused by the change in suction during dry-immersion. Similar reduction may occur within the embankment due to changes in the groundwater table caused by rainfall. A replacement/counterweight fill method was proposed as a method to improve the seismic stability of mudstone embankments, and numerical analysis showed that this method was very effective in improving seismic resistance.

研究分野：地盤工学

キーワード：泥岩 盛土 スレーキング 耐震性

1. 研究開始当初の背景

泥岩で造成された盛土は、新東名高速道路をはじめ、多数存在している。しかし、泥岩盛土内では砕けた泥岩（泥岩岩砕）がスレーキング現象を起こし、細粒化することで、沈下や安定性の低下を引き起こす。応募者は、これまで、粉碎した泥岩に乾燥・湿潤を繰り返し与え、スレーキングを促進させた試料を作製、三軸試験を実施し、実験結果を再現に成功している。そして、スレーキングを骨格構造概念に基づき説明した。再現により得られた材料定数を用い、GEOASIA による地震時変形解析により、これらの道路盛土崩壊の再現を行い、崩壊メカニズムを明らかにした。しかし、これらの試験では、スレーキングを供試体作製前に与えている。実際の盛土は、施工後にある応力状態になっており、そこからスレーキング進行していく。また、泥岩そのものに着目すると、泥岩に含まれる膨潤性鉱物が原因でスレーキングが起き、泥岩が礫からシルト・粘土に変化することで力学特性が変化していく。膨潤性鉱物と粒径の変化の 2 点が通常の土材料と大きく異なる点である。本研究では、この特徴に着目し、メカニズムを明らかにする。具体的には、既存の飽和土の構成則に不飽和土と泥岩に含まれる膨潤性鉱物の概念および泥岩の細粒化を考慮した計算手法を開発する。そして、実際の盛土を想定した上で、スレーキング進行中の圧縮挙動やせん断挙動を把握する力学試験の再現を行い、スレーキング進行により盛土内で何が起きるのかを明らかにする。また、既設のスレーキングが進行してしまった泥岩盛土に対する耐震対策工も重要となる。以上の背景より、以下の通り、研究目的を設定した。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の 3 つである。

- 1) 膨潤性鉱物の存在や粒径の変化を追う構成則の開発
- 2) 1)の構成則による乾湿繰返し圧縮試験の再現およびスレーキング進行のメカニズムの解明
- 3) 既設泥岩盛土に対して有効な対策工の提案

3. 研究の方法

- 1) 膨潤性鉱物の存在や粒径の変化を追う構成則の開発

泥岩の膨潤性を考慮するために、京川らが膨潤性鉱物を Cam-clay model に導入した方法を参考にする。京川らは間隙内の水溶液のイオン濃度差による浸透圧を考慮し、溶液の濃度が薄くなる時の浸透膨潤や濃度が濃くなる時の浸透圧縮を再現している。応募者らの実験では、間隙水の濃度を変えているわけではないが、図 1 に示す概念図の通り、乾燥過程において間隙内の水が少なくなることにより、層間水が抜けて乾燥中に圧縮する。乾燥後の水浸過程においては、間隙水のイオン濃度が層間よりも薄くなるため、層間に水が入り膨潤すると考えた。また、9.5mm 未満に調整し締固めた供試体（スレーキング前）と 425μm 未満に調整し作製した供試体（スレーキング後）の 2 つの粒度の異なる泥岩に対して等方圧密試験を実施し、どのようなパラメータが変化するかを調べた。

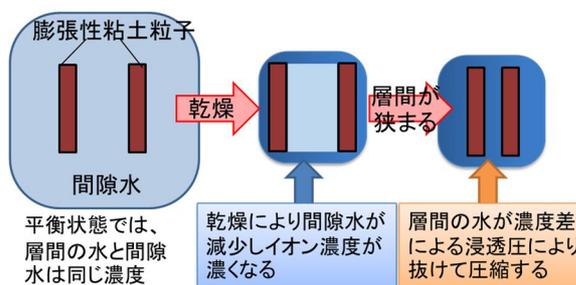


図 1 乾燥時に圧縮するメカニズム(水浸時は逆)

- 2) 1)の構成則による乾湿繰返し圧縮試験の再現およびスレーキング進行のメカニズムの解明

本研究で用いた泥岩が、スレーキング率が 80% であるスレーキングしやすい泥岩である。なお、膨潤性鉱物はあまり含んでいない泥岩であった。この泥岩に対し、乾湿繰返し圧縮試験を用い、実際の盛土と同様に応力を与えた状態で乾湿を与えてスレーキングを促進させる。泥岩の初期粒径を 26.5 ~ 37.5mm に調整し、モールド内で静的に締固めた供試体を、乾湿繰返し圧縮試験機にセットした。そして、鉛直荷重を作用させた状態で、供試体に乾湿繰返しを与えた。本試験機において乾燥過程では 110°C の熱風で容器内を充満させ供試体を乾燥させ、湿潤過程ではモールド底部と載荷板の孔から水を供試体に通している。本試験においては、高さ 20cm の供試体を用いるため、乾燥 13 日間、湿潤 3 日間の計 16 日間を乾湿サイクル 1 回とした。乾湿圧縮後にモールドから供試体を脱型し、三軸試験機にセットした後、飽和化、等方圧密、非排水せん断を実施した。そして、その乾湿繰返しから非排水せん断までの一連の過程を、構成則を用いて再現することにより、スレーキングの進行のメカニズムを、骨格構造概念を用いて解釈する。計算においては、荷重を与えた状態の乾湿圧縮から、非排水三軸圧縮試験までの一連の過程をシミュレーションした。本研究で実施した試験ケースを表 1 に示す。乾湿を与えるパターンやそうでないパターンを比較することによりスレーキングの影響を調べた。

表 1 試験ケース

	Test-1-100	Test-1-300	Test-2-100	Test-2-300	Test-3-100	Test-3-300
供試体密度	Dc95 %		Dc95 %		Test-1 の乾湿後比体積に調整	
サイクル数	3 回		0 回		0 回	
載荷荷重(kPa)	100	300	100	300	100	300
空気間隙率 v_a (%)	16.0	16.0	16.0	15.9	9.3	7.1
作製時含水比 w (%)	21.4	21.4	21.4	21.4	22.8	22.8

3) 既設泥岩盛土に対して有効な対策工の提案

本研究では有効な対策工として、置換・押え盛土工を提案する。置換・押え盛土工は図 2 に示すように、盛土の一部を掘削し、良質な土へ置き換える工法である。この際、盛土ののり尻を改良前と変えないことで、用地買収の必要をなくしている。また、図 3 に示すように押え盛土の高さなど、形状をいくつか検討し、最も効果的な掘削、押え盛土形状について考察を行った。なお、地震動は図 4 に示す兵庫県南部地震において神戸海洋気象台にて観測された地震動を用いた。

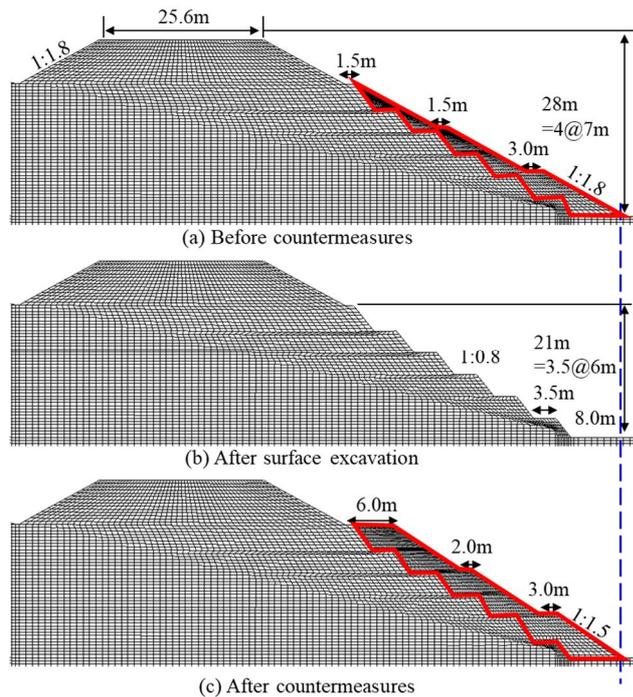


図 2 置換工・押え盛土工の手順

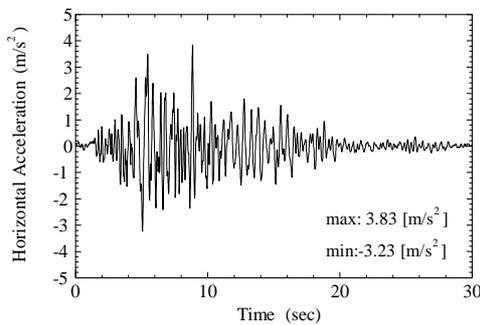


図 4 入力地震動

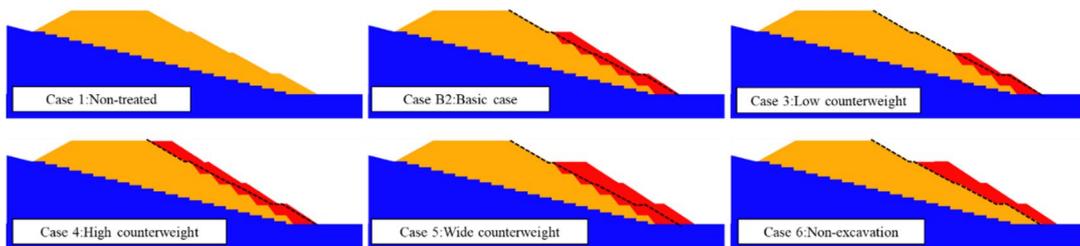


図 3 検討した置換・押え盛土工のケース

4. 研究成果

図 5 に過去に実施された乾湿繰返し圧縮試験、図 6 から不飽和および膨潤性鉱物を考慮した SYS Cam-clay model により計算した結果を示す。なお、図 5 の結果は粒度の情報が高かったため、図 6 の計算では粒度の変化を考慮していない。どちらの結果も乾燥により圧縮し、水浸により膨潤する特徴的な結果を示した。また、緩く詰めると沈下が大きくなり、密に詰めると沈下や膨潤の程度が小さく、全体の沈下量が小さくなるのが再現できた。このことから、提案した構成則は泥岩の乾湿圧縮挙動を再現することができることが明らかになった。

図 7 は、粒度の異なる泥岩に対して実施した等方圧密試験の結果である。圧縮線の傾き λ や正規圧密線の切片 N が変わっていることわかる。9.5mm 以下の場合、 $\lambda = 0.09$, $N = 1.83$ である。425 μ m 以下の場合、 $\lambda = 0.11$, $N = 1.96$ であった。

図 8 は乾湿圧縮中の比体積 - 時間関係を示す。Test-1 では、乾燥過程で圧縮、湿潤過程で膨張し、乾湿回数が増えるにつれて圧縮が進行した。乾湿 1 回で 100kPa の場合、比体積が 0.06 減少(体積ひずみ 4.0%)、300kPa の場合、比体積が 0.09 減少(体積ひずみ 5.9%)、乾湿 3 回では、100kPa の場合、比体積が 0.1 減少(体積ひずみ 6.0%)、300kPa の場合、0.13 減少(体積ひずみ 8.1%)した。特に乾燥過程における圧縮挙動が顕著であり、特に 1 回目の乾燥における圧縮が顕著であることがわかる。一方、Test-2 と Test-3 では、ほとんど圧縮が進行しなかった。また、Tes-1 と Test-3 を

比較すると、Test-3 の比体積は、Test-1 の乾湿圧縮後の比体積とほぼ同じ値であり、Test-3 において狙い通りの供試体が作製できたことがわかる。

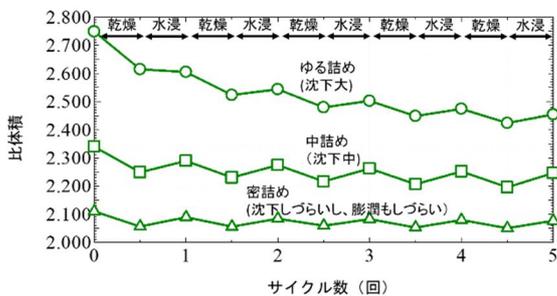


図5 乾湿繰り返し中の比体積変化 (実験)

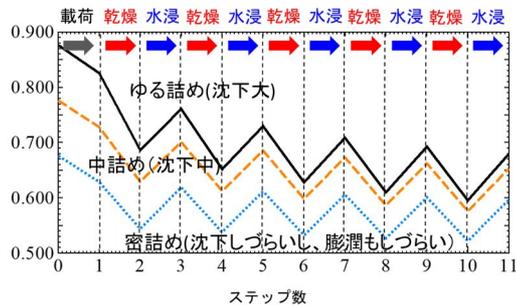


図6 乾湿繰り返し中の比体積変化 (解析)

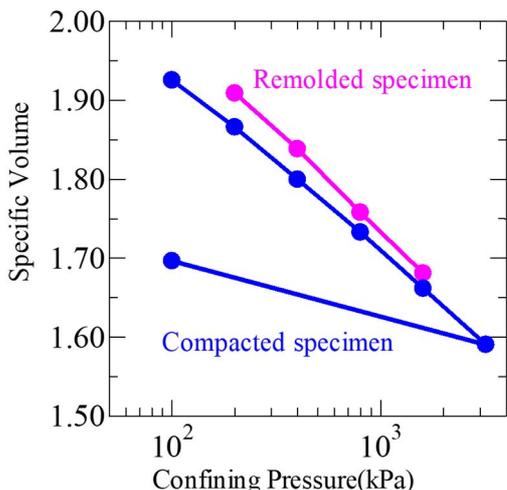


図7 等方圧密試験の結果

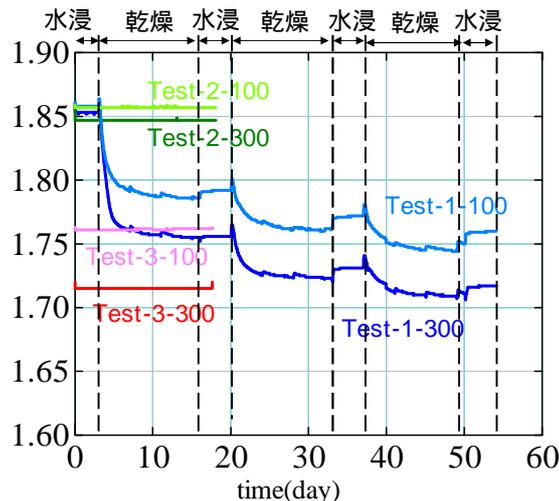


図8 乾湿圧縮中の比体積変化

図9 は三軸圧縮試験後の粒径分布を示す。三軸圧縮試験後の供試体を2つに分割し、片方を粒度試験に用いた。なお、粒度試験はふるい分析のみ実施した。なお、地山から削った泥岩を26.5~37.5mmに粒度調整したため、削った時の原粒度は不明である。Test-1 は乾湿繰り返し圧縮やせん断により粒径が変化している。Test-2 と比較して2~20mmの粒度のみが最大10%細粒化している。本試験で用いた泥岩は、スレーキング率が80%を超えている。つまり、非拘束圧条件下で乾湿5回を与えることで、26.5~37.5mmに調整した試料が細粒化することにより、19mmふるいを80%以上通過する。本試験のように拘束圧条件下で乾湿繰り返しを与えた場合、非拘束圧条件下とは異なる結果を示した。以上のことから、拘束圧条件下では、泥岩粒は細粒化しづらくなる。

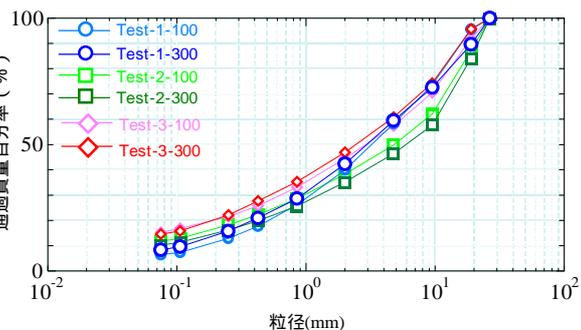


図9 試験後供試体に対して行った粒度試験結果

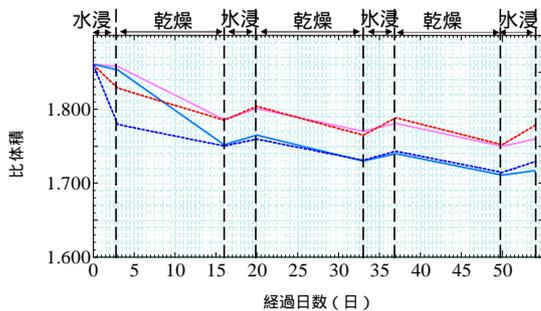


図10 乾湿圧縮過程の再現結果

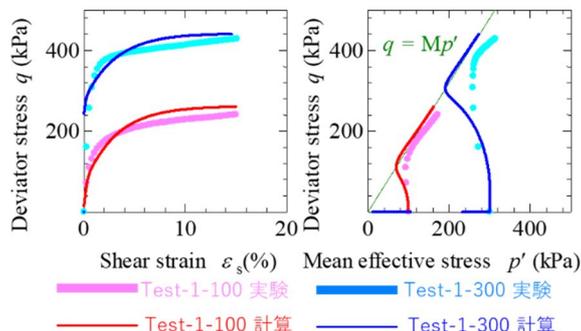


図11 Test-1 の非排水せん断の再現結果

図 10 に図 8 の Test-1 の計算結果の再現結果を示す。併せて、図 11 は、乾湿繰返し圧縮後の非排水せん断試験の実験結果および再現結果を示す。図 10 においては、点線が実験結果、実線が解析結果を示しており、乾燥過程における圧縮や湿潤過程における膨張を再現できており、その圧縮量や膨張量も概ね再現できた。図 11 においては、太い線が実験結果、細い線が解析結果をそれぞれ示している。それぞれ密度や応力履歴の異なる各ケースの試験結果を概ね再現することができた。なお、対象とした泥岩は膨潤性鉱物をあまり含んでおらず、また図 9 から粒度の変化もなかったため、不飽和土の概念のみ導入した SYS Cam-clay model で計算を行った。

図 12 は構造の程度の変化を示している。乾湿回数の増加に伴い、徐々に構造が低位化していることがわかる。Test-1 と Test-3 は、せん断直前の状態においてほとんど同じ密度であるが、受けている応力履歴が異なる。乾湿により土骨格に作用する応力が増減し、構造が低位化したため、Test-1 の方が、最大軸差応力が低下したと考えられる。

図 13 は、図 4 の地震動終了直後のせん断ひずみ分布を示す。また、表 2 に盛土の右のり肩の沈下量・水平変位を示す。無補強 (Case 1) の場合、盛土と地盤の境目に 30% 以上 (赤い部分) のせん断ひずみが発生している。一方、基本ケース (Case 2) の場合、盛土と地盤の境目においてひずみが発生しているものの、せん断ひずみが 30% 以上発生している部分 (赤い部分) が減少しており、盛土全体の変形が抑えられている。ただし抑え押し盛土天端と既設盛土の境界付近で 30% 以上のせん断ひずみが発生しており、材料の違う境界ではせん断が集中することが伺える。また、右法肩の沈下量については、Case 2 は Case 1 よりも約 30% 軽減された。

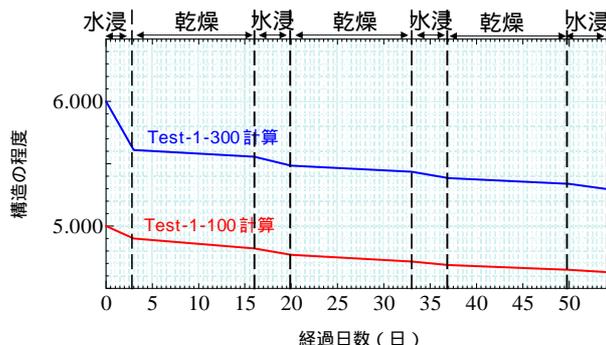


図 12 乾湿圧縮中の構造の程度の変化

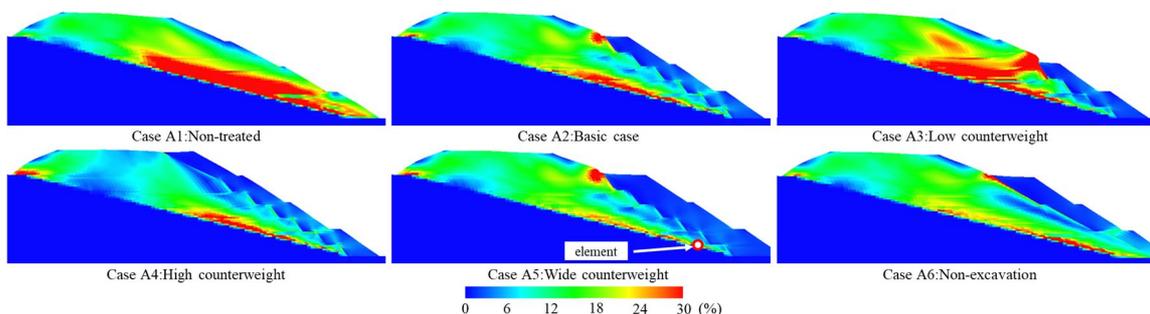


図 13 せん断ひずみ分布 (Material A)

表 2 天端の変位量 (Material A)

	左法肩 沈下量 (cm)	右法肩 沈下量 (cm)	左右の 沈下量の差 (cm)	右法肩 水平変位 (cm)	路面勾配 (%)
Case 1: Non-treated	65.1	211.0	145.9	300.4	5.70
Case 2: Basic case	60.6	148.1	87.5	220.8	3.42
Case 3: Low counterweight	64.4	213.7	149.3	304.0	5.83
Case 4: High counterweight	46.5	109.8	63.3	86.3	2.47
Case 5: Wide counterweight	60.5	136.5	76.0	202.6	2.97
Case 6: Non-excavation	58.7	142.4	83.7	219.9	3.27

抑え押し盛土の高さと幅、掘削の有無に着目する。無補強 (Case 1) と抑え盛土が小さい場合 (Case 3) では、法肩の沈下量や水平変位にほとんど違いがない。Case 3 は Case 1 に比べ、法尻付近のせん断ひずみ分布が減少しているものの、抑え押し盛土と既設盛土の境界において大きなせん断ひずみが発生し、法肩の沈下量・水平変位を抑制できていない。そのため、耐震性の向上は図られていない。しかし、基本ケース (Case 2) や抑え盛土が高い (Case 4) と比較すると、抑え盛土が高くなるにつれて、右のり肩の沈下量や水平変位が軽減されていく。抑え盛土が高いケースは、無補強の場合と比較して、左右の沈下量の差や右法肩の水平変位がおよそ半分になっており、対策の効果が明確に見られた。抑え盛土の幅を広い (Case 5) については、基本ケース (Case 2) よりも法肩の沈下量や水平変位が小さくなっているが、Case 4 よりも大きい。このことから、法肩の沈下量や水平変位を軽減するには、抑え盛土の幅を大きくすることよりも高さを大きくすることが重要であることが示された。ただし、Case 4 と Case 5 の比較から、盛土と地盤におけるひずみの軽減の程度については、抑え盛土幅を広くした方が有効である。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Sakai, T., Nakano, M., Inukai, S. and Inagaki, M.	4. 巻 63
2. 論文標題 Improvement in seismic resistance using replacement/counterweight fill method for existing high embankments on inclined ground constructed with various embankment materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2023.101284	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 酒井崇之, 中野正樹, 稲垣太浩
2. 発表標題 置換・押え盛土工における押え盛土の形状が傾斜地盤上の盛土の耐震性に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 稲垣太浩, 中野正樹, 酒井崇之
2. 発表標題 傾斜地盤上の砂質盛土の耐震性向上に有効な工法に関する数値解析的検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井崇之, 中野正樹, 稲垣太浩
2. 発表標題 傾斜地盤上の既設高盛土の表層置換・押え盛土工の耐震性に関する数値解析的検討
3. 学会等名 第32回中部地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 犬飼翔吾, 酒井崇之, 中野正樹
2. 発表標題 置換・押え盛土工法による既設盛土改良効果についての数値解析的検討
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 酒井崇之, 中野正樹, 犬飼翔吾, 山本道信
2. 発表標題 締固め後に乾湿繰返しを与えた泥岩碎石集合体のせん断挙動の骨格構造概念に基づく解釈
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〕

令和2年度中部支部賞-研究奨励賞受賞, 2021年4月16日, 傾斜地盤上の既設高盛土の表層置換・押え盛土工の耐震性に関する数値解析的検討

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
研究協力者	中野 正樹 (Nakano Masaki)	名古屋大学・工学研究科・教授	

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
研究協力者	犬飼 翔吾 (Inukai shogo)	名古屋大学・工学研究科・博士後期課程	

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