

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18147

研究課題名(和文)スレーキング現象の弾塑性力学に基づく解釈と泥岩盛土の地震時に有効な対策工の提案

研究課題名(英文) Interpretation of slaking phenomenon based on the elasto-plastic mechanics and proposal of effective seismic countermeasures for 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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：乾湿繰返し圧縮試験機を用いて、実際の盛土を想定した上載荷重を与えながら、乾湿を与えて三軸試験用の供試体を作製した。三軸試験を実施すると乾湿を与えたことにより、強度が低下した。試験後の供試体の粒度は乾湿を与えても変化しなかったが、粒は軟化した。粒の軟化により強度が低下したと考えられる。

盛土形状により、効果的な耐震対策工法は異なる。しかし、のり面保護工はいずれの形状に対しても、効果的な補強工法であった。対策していない場合と比較すると、地震による変位は約30%まで軽減することができた。ただし、補強部材の多くは、降伏してしまうこともわかった。

研究成果の概要(英文)：The specimen for triaxial compression test is made with drying-wetting cycles under one-dimensional compressive stress. The triaxial compression test result showed that the strength of the specimen is decreased by drying-wetting cycles. The specimen's grain size before and after drying-wetting was almost same. However, the grain is softened by drying-wetting. From the above, the reason for the strength degradation is the grain softening in dry-wetting cycle. The effective seismic countermeasures for mudstone embankment is different from the embankment form. However, slope protection is effective seismic countermeasures for every embankment form in this study. The slope protection embankment deformation of top of slope is one-third of the non-countermeasure embankment deformation. However, the reinforcing material is yielded by the earthquake.

研究分野：地盤工学

キーワード：泥岩 盛土 スレーキング 地震応答解析 耐震対策

1. 研究開始当初の背景

近年、地震・降雨による盛土崩壊が頻繁に起きている。2007年に起きた能登半島地震における道路盛土崩壊では、盛土材としてふさわしくない凝灰角礫岩が用いられていた。また、2009年に発生した駿河湾地震においては東名高速道路牧之原 SA 付近の盛土が崩壊した。この崩壊の原因は、盛土の下部に使用した泥岩が水の作用によって泥濘化(スレーキング)したことが挙げられている。応募者は、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、現時点では、崩壊メカニズムの解明に留まっており、盛土の耐震性を向上させる方法までは示すことができていない。また、今までの泥岩の実験については、乾湿繰り返しを作用された泥岩粒を締め固めて供試体を作製しており、実際の盛土のスレーキング進行とは状態が異なる。したがって、実際の盛土のように供試体に上載荷重が作用している状況でスレーキングを促進させて、試験を実施すべきである。また、能登半島地震では水平地盤上の盛土は崩壊せず傾斜地盤上の盛土のみ崩壊した。しかし、現在の施工基準は盛土の造成場所や盛土の形状に依らないことが多い。盛土を造成する地盤や盛土の形状に応じてどこが弱点箇所になり、どのような対策をすれば良いのか示すことができれば、効率の良い耐震補強方法が提案可能になる。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

(1) 盛土内におけるスレーキング進行過程とスレーキング進行の泥岩碎石集合体の力学挙動や骨格構造への影響の把握

既往の研究と異なり、締め固めた粉碎泥岩供試体に乾湿繰り返しを与え、繰り返しサイクル回数が泥岩の力学特性(強度・変形特性)にどのような影響を与えるのか調べる。さらに、繰り返しサイクル回数による細粒化をスレーキング進行ととらえ、スレーキング進行の程度と強度低下の程度との関係、特に、スレーキングがある程度進行したら、強度低下しなくなるのか、また締め固めによりスレーキングの影響が軽減できるのか明らかにする。なお、本研究では盛土の最も危険な状態を考え、飽和土を対象とした。

(2) 水～土連成有限変形解析による盛土の地震時安定性の評価と弱点箇所の抽出および、弱点箇所に応じた耐震補強工法の提案

スレーキング進行の程度や、盛土の形状(水平地盤上や傾斜地盤上の盛土や盛土高さの違い)の異なる盛土～地盤系構造物に対して、解析コード GEOASIA を用いて地震時

変形解析を行う。この時、南海トラフ巨大地震を想定した地震動を入力し、地震時の道路盛土の安定性を評価する。また、変形解析によって、盛土の要素ごとの応力状態や、盛土全体における変形の局所化など明らかになるため、それに応じた各種耐震補強工法を提案することができる。そして、補強後の盛土についても地震時変形解析を行い、耐震性を評価し、補強による耐震メカニズムも明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 盛土内におけるスレーキング進行過程とスレーキング進行の泥岩碎石集合体の力学挙動や骨格構造への影響の把握

a) 泥岩盛土材のスレーキング特性、物性などの把握：本研究を行うのに先立ち、各地から泥岩を採取、スレーキング率や物性を把握し、いずれもスレーキングしやすい泥岩であることを把握した。また、乾湿繰り返し細粒化率試験によって、詳細にスレーキング特性も把握している。

b) スレーキングが盛土材の力学特性へ及ぼす影響の把握：道路盛土の締め固め基準を想定し、締め固め度 95%かつ空気間隙率 10%を満たす供試体を作製する。そして、乾湿繰り返し圧密試験機を用い、上載荷重を与えたまま乾湿繰り返しを与えスレーキングを進行させる。すなわち、実際の盛土の状態に近い状況下でスレーキングを進行させる。そして、三軸試験を行いスレーキングが盛土の力学特性にどのような影響を及ぼすのか、乾湿繰り返し細粒化率試験の結果も絡めて考察していく。なお、試験機は NEXCO 総研にあるため、借りて使用する。

c) 泥岩に対して行った三軸試験の再現とスレーキング現象の骨格構造概念に基づく考察：得られた三軸試験結果を SYS Cam-clay model で再現することを試みる。締め固められた泥岩の力学特性の再現について実績はあるが、必要に応じて構成則の改良・高度化を行う。再現により得られた結果から、スレーキングが骨格構造に及ぼす影響を調べる。また、先ほどと同様に乾湿繰り返し細粒化率試験の結果も絡めて考察していく。

(2) 水～土連成有限変形解析による盛土の地震時安定性の評価と弱点箇所の抽出および、弱点箇所に応じた耐震補強工法の提案

スレーキングの進行程度と形状が異なる盛土に対して地震時変形解析を実施し、盛土の安定性を評価し弱点箇所を抽出する。そして、その弱点箇所に応じた耐震補強工法を提案する。

a) 盛土の代表断面の設定：本研究では4つの断面を選定する。水平地盤上の盛土 傾斜地盤上の盛土 水平地盤上の高盛土 水平地盤上の高盛土の4つである。

b) 入力地震動の設定：入力地震動は現在用いられることが多い、阪神淡路大震災の時に神戸海洋気象台で観測された地震動だけではなく、内閣府が発表した南海トラフ巨大地震

を想定した地震動を用いる。

c) 数値解析結果の考察：数値解析によりスレーキングの進行程度や断面の違いに応じた道路盛土の安定性を評価する。そして、変形を起こした盛土については、その弱点箇所を整理していく。さらに、解析結果を詳細に観察し崩壊したメカニズムを解明するため、様々な視点から数値解析結果を調査する。
d) 数値解析結果に基づく耐震補強工法の提案：数値解析結果より、弱点箇所や崩壊したメカニズムが明らかになったら、それに基づいた耐震補強の方法を提案する。また、この時技術者と打ち合わせを行い、現実的に可能な方法であるのかについても、検討を行う。

4. 研究成果
泥岩の初期粒径を 26.5~37.5mm に調整し、直径 10cm、高さ 20cm のモールドに締固め度 D_{c95} で静的に締固め、試験機にセットした 100kPa, 300kPa, 900kPa の鉛直応力を与え 3 日間水浸させた後、乾燥 4 日間、水浸 3 日間の計 1 週間を乾湿 1 回として行った。図-1 は試験結果を示す。なお、煩雑になることから、300kPa の結果のみを示す。Test-2, Test-3 は乾湿を与えず、Test-1 は乾湿を 3 回与えた挙動である。乾湿を与えることにより、大きく圧縮することがわかった。特に乾燥過程において圧縮した。

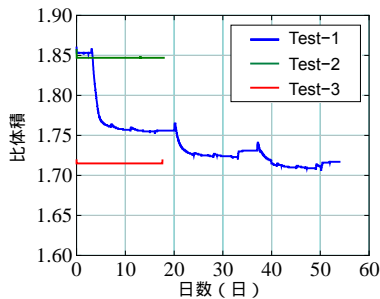


図1 Test1~3の乾湿圧縮中の沈下 - 時間関係

図2に乾湿3回のTest-1, および乾湿を作用させない乾湿0回のTest-2のせん断挙動を示した。乾湿繰り返しを作用させたTest-1の方が、乾湿0回のTest-2よりも最大軸差応力は大きくなった。この理由として、せん断試験前の鉛直荷重一定下での乾湿繰り返し作用によって泥岩粒供試体が圧縮し、密度が増加したことが挙げられる。

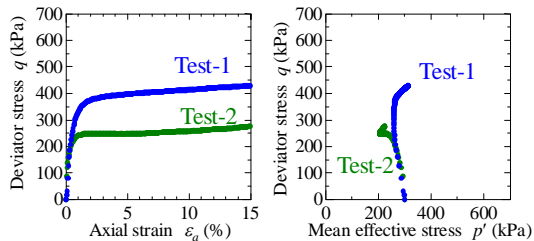


図2 Test-1とTest-2の非排水三軸圧縮試験結果

図3には、Test-1のせん断直前の密度と同じにした乾湿0回の圧密非排水せん断試験結果 (Test-3) を示す。同じ密度における乾湿作用があるか無いかのせん断挙動の比較を

示しており、Test-3の方がより大きな最大軸差応力を示している。図4はせん断終了後の粒径分布を計測したものである。Test-1はTest-2と比較して、せん断によって粒径が変化し、粒度範囲2~20mmの粒度のみが最大10%細粒化している。またTest-1とTest-3を比較すると、若干Test-3の細粒分の方が多い。これは密に締固めた際に起こった粒子破碎の影響と考えている。

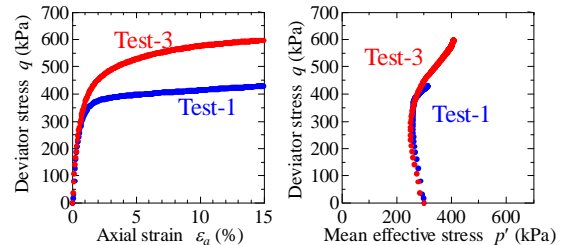


図3 Test-1とTest-3の非排水三軸圧縮試験結果

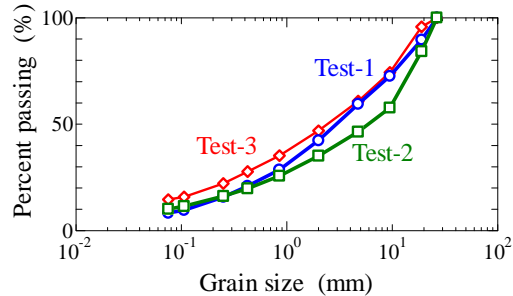


図4 せん断後供試体の粒度分布

試験終了後、複数の泥岩粒に対し、参考までに、針貫入試験を実施したところ、ばらつきがあるが、Test-3の貫入荷重の方が大きく、粒が硬い傾向があるようである。粒が柔らかくなったことが、力学挙動が変わった原因として、考えられる。

Test-1~3について、SYS Cam-clay modelによる再現を行う。図5にその結果を示すが、ある程度再現できたと考えている。初期値について、考察をすると、乾湿を与えたTest-1と与えていないTest-2, Test-3の比較から、乾湿繰り返しにより、構造が小さくなり、過圧密比は小さくなる。ただし、乾湿を与えてもTest-1のように圧縮した場合は、Test-2よりも過圧密比は大きくなった。

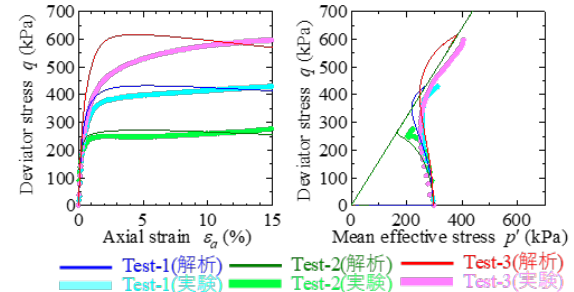


図5 Test-1,2,3の再現結果

次に耐震対策の検討を行う。図6に示すような4つの盛土について、検討を行った。

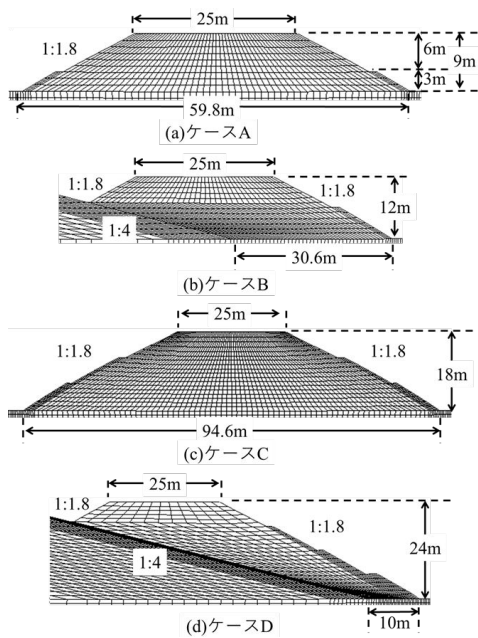


図6 解析ケース

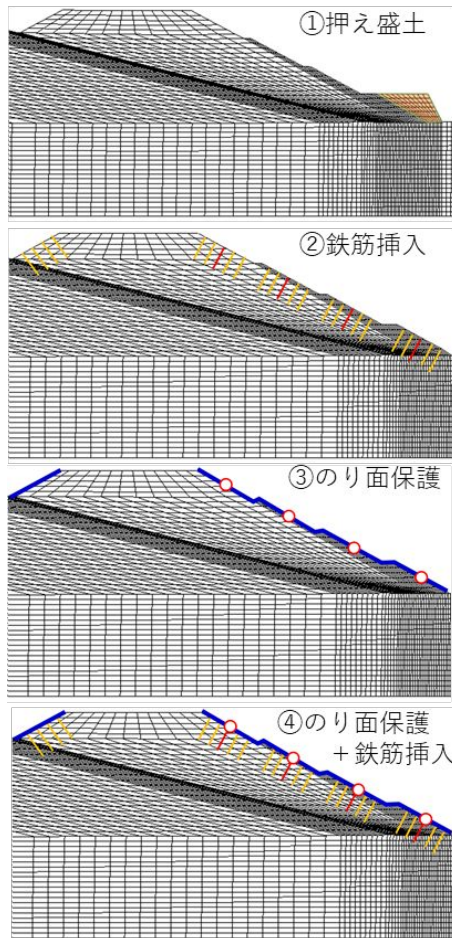


図7 対策工

図7に本研究で対象としている対策工を示す。図7には代表としてケースDの例を示すが、ケースA~Cも同様の対策工を対象とした。対策工は4つであり、押え盛土、鉄筋挿入工、のり面保護工、のり面保護工+鉄筋挿入工である。鉄筋挿入工については、

図-1の橙線、赤線のように長さ5mの鉄筋を1mピッチで挿入したケースを想定しており、鉄筋の両端にある2節点の変位が変わらない束縛条件を課すことにより鉄筋をモデル化した。押え盛土工については、礫を想定した。のり面保護工については、コンクリートを想定した一相系弾性体として、有限要素を追加していくことによってモデル化した。

図8はケースDの地震後におけるせん断ひずみ分布を示す。表1に各ケースの地震直後における右のり肩の水平変位および最も沈下している箇所の沈下量を示す。なお、考察については、ケースA~Dについて、行う。無対策では、いずれのケースでものり尻にせん断ひずみが生じ、高盛土の方が、ひずみが大きい。特に傾斜地盤上の高盛土(ケースD)は、地盤と盛土の境目に大きいひずみが発生した。高盛土は水平変位が3~4m、沈下量が2~3m程度である。また、通常の盛土はいずれのケースも高盛土の半分程度の水平変位・沈下量であった。押え盛土工に着目すると、押え盛土を設置することにより、のり尻部のひずみが軽減されたことがわかる。しかし、高盛土の場合は、のり尻以外の部分、例えば、地盤と盛土の境目のひずみが進展した。また、変位および沈下量を見ると、無対策と比較して0~10cmしか軽減されていない。これは、押え盛土を盛土の第一のり面にのみ設置したため、のり尻は変形しなくなったが、盛土全体の変形を抑えることができないことが原因として考えられる。次に鉄筋挿入工に着目する。鉄筋を挿入することにより、のり面付近のひずみが軽減された。また、のり面のはらみ出しも軽減されている。しかし、高盛土の場合、せん断ひずみが進展している部分に鉄筋が達していない箇所については、ひずみが抑制されていない。特にケースDは顕著であり、水平変位、沈下量は30~40%程度しか抑制されていない。一方、通常の盛土は水平、傾斜地盤ともに水平変位および沈下量が約80%軽減されており、鉄筋挿入工は、高盛土でなければ有効であることが示された。のり面保護工とのり面保護+鉄筋挿入工に着目すると、いずれのケースについても無対策と比較してせん断ひずみが抑制されていることがわかる。しかし、水平地盤の高盛土については、沈下量が30%程度しか減少しておらず、盛土のゆすり込み沈下には効果的ではない。一方、傾斜地盤の高盛土については、地盤と盛土の境目のひずみやのり尻でのひずみが抑制され、水平変位や沈下量も60~70%軽減されており、さらに鉄筋を挿入することで、変位量が抑えられていることがわかる。また、盛土については、水平地盤、傾斜地盤とも、沈下量や水平変位が減少しており、のり面保護+鉄筋挿入工については、水平変位、沈下量ともに約10cmである。

このように、盛土形状によって、効果的な補強工法とそうでない工法があることがわかった。なお、補強部材については、多くが

降伏してしまったこともわかった。

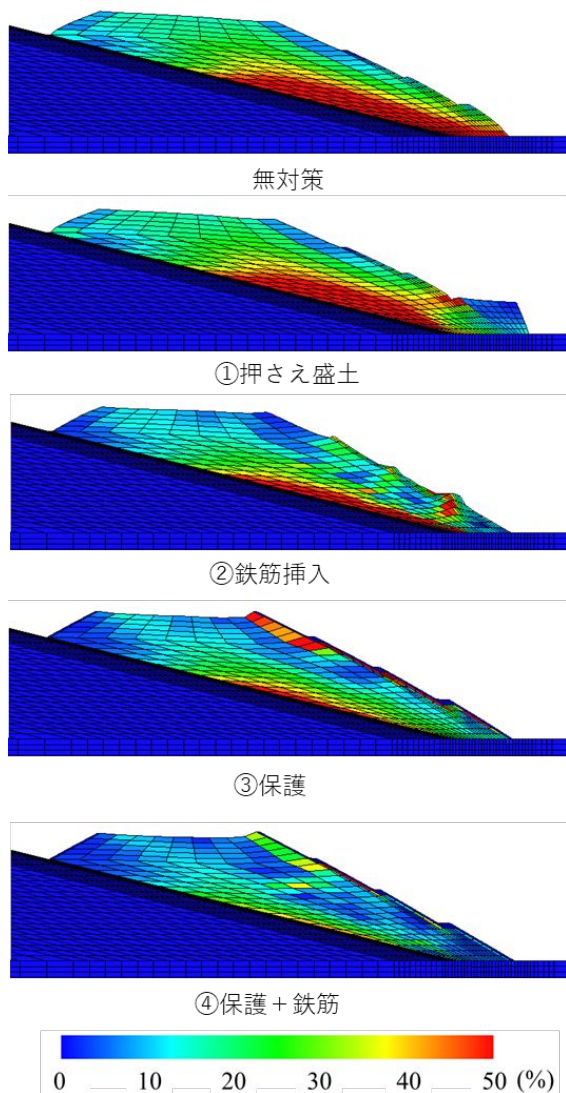


図8 せん断ひずみ分布(ケースD)

表1 天端沈下量とのり肩水平変位

	ケースA		ケースB		ケースC		ケースD	
	水平変位	沈下量	水平変位	沈下量	水平変位	沈下量	水平変位	沈下量
無補強	1.5m	0.9m	1.8m	0.9m	3.1m	2.8m	4.0m	2.2m
押え盛土	1.5m	0.9m	1.6m	0.8m	2.9m	2.6m	4.0m	2.2m
鉄筋のみ	0.3m	0.3m	0.5m	0.2m	1.6m	1.6m	2.9m	1.5m
のり面保護	0.2m	0.5m	0.6m	0.7m	2.0m	0.8m	1.5m	1.0m
のり面保護+鉄筋	0.1m	0.0m	0.1m	0.1m	1.5m	0.8m	1.2m	0.5m

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 4 件)

1. 酒井崇之，中野正樹，早野智彦，中村

洋丈，小林一：乾湿繰返し圧縮試験機によって作製した供試体に対する三軸圧縮試験，平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.287-288，2018.

2. 早野智彦，酒井崇之，中野正樹，中村洋丈，小林一：乾湿繰返し圧縮試験機による泥岩碎石集合体のスレーキング進行特性と圧縮特性の把握，土木学会第 72 回年次学術講演会，pp. 27-28，2017.
3. 酒井崇之，中野正樹，工藤佳祐，早野智彦：締固め時の粒径が泥岩碎石集合体の力学挙動に及ぼす影響，第 52 回地盤工学研究発表会，pp.421-422，2017.
4. 酒井崇之，中野正樹，工藤佳祐，早野智彦：スレーキングの進行程度が泥岩の力学特性に及ぼす影響，平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会，pp235-236,2017.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

- (1)研究代表者

酒井 崇之 (SAKAI, Takayuki)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：20773592

(2)研究分担者

(3)連携研究者

中野 正樹 (NAKANO, Masaki)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00252263

中村 洋丈 (Nakamura, Hirotake)
(株)高速道路技術研究所道路研究部 土工研究室 主任研究員
研究者番号：

小林 一 (Kobayashi, Hajime)
(株)高速道路技術研究所道路研究部 土工研究室
研究者番号：

(4)研究協力者

早野 智彦 (Hayano, Tomohiko)
名古屋大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生