

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01528

研究課題名(和文) 微視構造を核とした締固め土のパフォーマンス記述：盛土材料の耐侵食性向上を目指して

研究課題名(英文) Performance description of compacted soils on the basis of their microfabric:
Toward improvement of erosion resistance of compacted fill material

研究代表者

渡部 要一 (Watabe, Yoichi)

北海道大学・公共政策学連携研究部・教授

研究者番号：00371758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：盛土材料のパフォーマンスを最大限に引き出すことを研究目的として位置付け、締固め状態に応じて得られる土の骨格構造に着目し、これとせん断特性や侵食特性とを関連づける研究を実施した。具体的には、堤防盛土材料を対象として、突固めによる締固め試験、三軸せん断試験、侵食試験を実施した。土の骨格構造とせん断強度特性との関係については、土骨格に起因したダイレーション特性により特徴付けられることを示した。また、土の骨格構造と侵食特性との関係については、同じ土質の土であっても、実際には締固め時の含水比と乾燥密度で定義される締固め条件、すなわち締固め時の土の骨格構造が侵食特性を支配していることを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路盛土、堤防、宅地盛土など、社会インフラを支える盛土を築造するには、十分に締め固める必要があることは広く知られている。しかし、同じ湿潤密度まで締め固めたとしても、締固め条件によって土が有する内部の状態、すなわち、微視構造(骨格構造)は異なっている。本研究では、一連の試験・観察結果から、微視構造によって強度特性や侵食特性が異なることを明らかにした。盛土の性能を最大限に引き出すために、ここで得られた研究成果が、盛土の施工管理基準などに反映されて役立てられることを期待している。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to maximize the performance of embankment soil. We focused on the skeletal structure (soil micro-structure/micro-fabric) of soil compacted at variety of compaction conditions, which is defined by a combination of dry density and compaction water content, and attempted to correlate soil skeletal structure and shear characteristics and erosion characteristics. Specifically, soil compaction tests, triaxial tests, and erosion tests were conducted on the soil (artificial mixture of clay and sand). We found out that the relationship between the soil skeletal structure and the shear properties can be characterized by the dilation characteristics caused by the soil skeletal structure. Also, regarding the relationship between the skeletal structure of the soil and the erosion characteristics, it was clarified that the soil compaction conditions governs the erosion characteristics as well.

研究分野：地盤工学

キーワード：締固め 骨格構造 せん断特性 侵食特性 盛土

1. 研究開始当初の背景

現地で発生する土、あるいは近隣で入手しやすい土を使用して造成できる盛土は、他の土木構造物に比べて環境面および経済面でも優れているため、盛土は河川堤防、道路盛土、宅地盛土などとして多くの用途で用いられている。安定した盛土を築造するにあたっては、土の力学的性質（斜面安定や支持力確保のためのせん断強さ）や透水性・遮水性などを改善することが必要であり、その代表的な工法が締固めである。締固めは土の密度を高くすることで力学的安定性を向上させることを目的としている。

一般に土の強度は乾燥密度と正の相関がある。しかし、締固め曲線はピークを有する上に凸な曲線であることからわかるように、締固め曲線上であっても同じ乾燥密度に対応した含水比が乾燥側と湿潤側の2つ存在し、これらの状態では、同じ締固め度であっても含水状態が異なるために強度が異なっている可能性が高い。同じ乾燥密度、すなわち見かけ上は同じ土粒子からなるパッキング状態でも強度特性が異なるのは、締固めによって形成される土の骨格構造が違うためであると考えられる。

研究代表者らの既往の研究から、同じ乾燥密度の土（同じ締固め度の土）であっても、土の締固め条件によって透水係数が100倍も異なるという試験結果が得られており、その理由が土の骨格構造（微視構造）に起因したものであることを明らかにした経験から、締固め条件の違いによるせん断特性の違い、さらには侵食特性の違いなどを調べてみようと考えたことが本研究の背景にある。

2. 研究の目的

本研究では、土の力学的性質のうち強度特性に着目し、含水比、締固め条件、骨格構造との関係を解明することを目的としている。加えて、これらの締め固められた土の侵食特性を明らかにすることも目的としている。具体的には、粘性土（現地発生土）と砂質土（購入土）を混合させた盛土材料を試料として、種々設定した含水比と乾燥密度を有する試料を締固めにより作製し、三軸圧縮試験を行い、締固め条件に対応した強度特性を明らかにすることを試みた。また、河川堤防における盛土の耐侵食性を評価することを目指して、締固め条件を変えて作製した試料に対して侵食試験を実施し、締固め条件と侵食特性との関係を明らかにすることを試みた。

締固めにより築造される盛土の性能を向上させるため、土の骨格構造に着目して締固め土の力学特性を最大限に引き出すにはどのような締固め条件を適用したら良いかを解明し、また、締め固めた盛土材料の耐侵食特性を評価し、施工管理のあり方を提案することを目指す必要がある。土の骨格構造と強度特性の関係がわかれば、締固め時に加えるエネルギーと含水比を設定することによって、締固め土の骨格構造を制御することが可能になり、盛土材料が発揮する強度をもっと引き出すことに繋がる。また、締固め状態が、盛土の侵食特性と関連していることがわかれば、河川堤防などの締固め管理に反映できるものと考えられる。

侵食試験では、締め固められた粘土質砂の締固め条件（含水量と締固めエネルギーで表される）と侵食性（侵食速度で表される）との関係について、小型侵食試験機を用いて調べるとともに、走査型電子顕微鏡（SEM）とX線CTで観察された土の骨格構造とを関連付けて考察した。

3. 研究の方法

実施した三軸試験の内容、骨格構造の観察方法、侵食試験の方法について説明する。試験に用いた試料は、粘性土（現地発生土）と砂質土（購入土）を混合させた盛土材料である。締固め試験によって締固め特性を把握した後、締固め曲線を基準として、それよりも上側（さらに密詰状態）や下側（さらに緩詰状態）、また、最適含水比よりも左側（乾燥側）および右側（湿潤側）に締固め条件を設定し、三軸試験や侵食試験の供試体を締固めにより作製した。直径50mm、高さ100mmの供試体を用いて三軸圧密非排水圧縮試験（以下、三軸試験）を、また、締固めにより作製した直径60mmの供試体を用いて侵食試験を実施した。

三軸試験では、圧密・非排水試験（三軸CU試験）を実施し、間隙水圧を計測した。主応力差と軸ひずみの関係、ならびに応力経路（主応力差と平均有効主応力の関係）から供試体の強度や変形特性を、また、過剰間隙水圧と軸ひずみの関係、ならびに間隙水圧の変化率と応力比から供試体のダイレーション特性に着目した骨格構造に関連した考察を行い、強度・変形特性と骨格構造との関係を明らかにすることを目指した。

骨格構造の撮影では、X線CT画像と顕微鏡写真を用いて、異なる締固め条件の供試体について骨格構造を観察することを目指した。

侵食試験では、締固め条件が侵食特性に与える影響、すなわち、上記の試験・観察から得られる成果を踏まえて、締め固めた土の骨格構造が侵食特性に与える影響について明らかにすることを目指した。

4. 研究成果

(1) せん断特性

乾燥密度が同じで含水比が異なる場合、締固め飽和度が同じで乾燥密度が異なる場合、ならびに、乾燥密度が同じでも含水比が異なる場合を想定した締固め条件を設定して供試体を作製し、非排水三軸せん断試験を実施した。実施した三軸試験ならびに骨格構造観察から得られた結論を以下にまとめる。

- ① 同じ乾燥密度であっても骨格構造内に形成される間隙の大きさが異なり、乾燥側には光学顕微鏡写真による供試体断面の骨格構造観察で確認できるほど明瞭な間隙であるマクロポアが多数存在する。一方で、湿潤側には光学顕微鏡写真や X 線 CT 画像では確認できないほど微細な間隙のミクロポアが多数存在している。
- ② 乾燥密度が同じでも含水比が異なる場合、乾燥側では骨格構造内に広がるマクロポアがせん断変形に伴う体積圧縮相当分を吸収するため、体積圧縮傾向（負のダイレーション傾向）をより顕著に示す。一方で、湿潤側ではミクロポアの割合が高いため、非排水条件では、せん断過程で体積圧縮傾向をほとんど示さず、むしろダイレーションによる負の過剰間隙水圧が発生してせん断強さが高くなる。
- ③ 締固め飽和度が乾燥側の締固め条件であっても、乾燥密度が増加することでマクロポアの割合の減少するため、せん断過程における体積圧縮量も減少し、負の過剰間隙水圧を発生する。
- ④ 締固め飽和度が乾燥側の締固め条件の場合、乾燥密度の増加よりも締固め度の増加の方が強度への影響は大きい。一方で、湿潤側では乾燥密度が高い締固め条件の方が負の過剰間隙水圧が多く発生するため、せん断強さが高くなる。
- ⑤ 今回使用した供試体は試料の配合比と締固め条件が異なっているが、過剰間隙水圧の変化率と応力比 q/p' で整理すると類似の挙動を示していることから、配合比と締固め条件によらずダイレイタンスー挙動は類似する。

(2) 侵食特性

最適含水率周辺で締固め曲線よりも上側と下側の計 2 グループの締固め条件、ならびに、広範囲にわたる締固め時含水比に対応した締固め曲線よりも上側と下側に計 12 グループの締固め条件を設定し、ウォータージェットを使った小型の侵食試験装置を用いて侵食特性を調べる試験を実施した。本研究で実施した侵食試験ならびに骨格構造観察から得られた結論を以下にまとめる。

- ① 試験に用いた盛土材料土（粘土と砂の混合土）の侵食特性は、土の種類（土質）に基づいて、既往の研究で提案されている侵食特性カテゴリーチャートから中程度の侵食性に分類された。
- ② 侵食性は、間隙比を制御する土の乾燥密度と、土の微視構造を制御する締固め時の飽和度の両者によって支配される。湿潤側で締め固められた土は侵食されにくいですが、乾燥側で締め固められた土は侵食されやすい。
- ③ 上記 2) のような傾向が表れる主な要因は、締め固められた土の微視構造であると考えられる。締め固められた土でマクロポロシティが発達した場合、すなわち、乾燥側で緩詰状態の締固め条件の場合（細粒分が団粒を形成して土骨格に組み込まれた状態）、土はより侵食されやすくなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8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 7件）

1. 著者名 鈴木日向, 渡部要一	4. 巻 1
2. 論文標題 異なる骨格構造を持つ盛土材料の力学特性の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第54回地盤工学研究発表会	6. 最初と最後の頁 669-670
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 無
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 Egy Crystal Soesilo, Yoichi Watabe	4. 巻 1
2. 論文標題 Influence of compaction condition on microscale erosion of clayey sand	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第54回地盤工学研究発表会	6. 最初と最後の頁 683-384
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 無
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 鈴木日向, 渡部要一	4. 巻 1
2. 論文標題 土の骨格構造に着目した締固め材料の力学特性の評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第53回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 801-802
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 無
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 Watabe, Y. and Sassa, S.	4. 巻 1
2. 論文標題 Experimental study on erodibility of cement/steelmaking-slag treated soils by means of small jet erodometer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scour and Erosion IX (Proceedings of the 9th International Conference on Scour and Erosion, ICSE 2018)	6. 最初と最後の頁 567-574
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 無
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 鈴木日向, 渡部要一	4. 巻 1
2. 論文標題 締固め条件が盛土材料のせん断特性に与える影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第59回地盤工学会北海道支部技術報告集	6. 最初と最後の頁 133-136
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 無
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 Soesilo, E. C. and Watabe, Y.	4. 巻 1
2. 論文標題 Influence of compaction condition on microscale erosion of clayey sand	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第54回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 383-384
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 無
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 鈴木日向, 渡部要一	4. 巻 1
2. 論文標題 異なる骨格構造を持つ盛土材料の力学特性の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第54回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 669-670
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 無
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 Yoichi Watabe, Egy Crystal Soesilo, Shinji Sassa	4. 巻 1
2. 論文標題 Influence of compaction conditions on erodibility of clayey sand	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-10)	6. 最初と最後の頁 991-1000
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鈴木日向, 渡部要一
2. 発表標題 異なる骨格構造を持つ盛土材料の力学特性の評価
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 Egy Crystal Soesilo, 渡部要一
2. 発表標題 Influence of compaction condition on microscale erosion of clayey sand
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 鈴木日向, 渡部要一
2. 発表標題 土の骨格構造に着目した締固め材料の力学特性の評価
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡部要一, 佐々真志
2. 発表標題 Experimental study on erodibility of cement/steelmaking-slag treated soils by means of small jet erodometer
3. 学会等名 the 9th International Conference on Scour and Erosion, ICSE 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木日向, 渡部要一
2. 発表標題 締固め条件が盛土材料のせん断特性に与える影響
3. 学会等名 第59回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Egy Crystal Soesilo, 渡部要一
2. 発表標題 Influence of compaction condition on microscale erosion of clayey sand
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 鈴木日向, 渡部要一
2. 発表標題 異なる骨格構造を持つ盛土材料の力学特性の評価
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 渡部要一, 佐々真志
2. 発表標題 Influence of compaction conditions on erodibility of clayey sand
3. 学会等名 The 10th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-10) (国際学会)
4. 発表年 2021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	佐々 真志 (Sassa Shinji) (10392979)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長 (82627)	
研究 分担者	椋木 俊文 (Mukunoki Toshifumi) (30423651)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授 (17401)	
研究 分担者	西村 聡 (Nishimura Satoshi) (70470127)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

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