

令和 6 年 5 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01421

研究課題名(和文) 内部侵食を受ける火山灰質砂盛土における液状化ポテンシャル：細粒分は善か悪か

研究課題名(英文) Liquefaction potential of pumice sand fill subjected to suffusion: are fine particles are good or bad?

研究代表者

渡部 要一 (Watabe, Yoichi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：00371758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、細粒分含有率を調整した3種類の火山灰質砂試料を用いて締固め度および締固め時含水比を調整して作製した供試体に対し、動水勾配を与えて浸透流により内部侵食を発生させる場合と発生させない場合とについて、それぞれ圧密非排水三軸試験ならびに繰返し非排水三軸試験を実施した。内部侵食の発生、非排水せん断強さの変化、液状化強度の変化について、締固め時に形成される骨格構造、特に乾燥側の締固め条件で形成されるマクロポロシティとの関連性を考察した。その結果、細粒分が抜け出しても粗粒分を主体とする土骨格が保持された状態にとどまっていれば、内部侵食によりこれらの強度はむしろ増加する傾向にあることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2018年北海道胆振東部地震で液状化被害を受けた札幌市里塚地区は、1970年代に切土・盛土によって造成された。この地区の盛土材は3～4万年前の支笏火山噴火に伴う火砕流堆積物であり、当時の土地造成では締固めが十分に行われていない緩詰め状態であったことがわかっている。施工管理がしっかりなされれば、同様の液状化被害は防げるものと考えられる。しかし、造成直後に発生する細粒分の流出(サフュージョンと称する内部侵食)が多少なりとも発生することは避けられない。本研究から得られた非排水せん断強さや液状化強度に与える細粒分含有率およびその変化の影響は、今後の盛土の品質管理の上で役立つ重要な知見となる。

研究成果の概要(英文)：In this study, using volcanic ash sands with adjusted three fine particle contents, soil specimens were prepared by compaction at different degree of compaction and water content. Consolidated undrained triaxial tests and cyclic loading undrained triaxial tests were conducted with and without internal erosion. The relationship between the occurrence of internal erosion, changes in undrained shear strength, and changes in liquefaction strength were discussed in association with the skeletal structure formed during compaction, especially the macroporosity formed under dry-side compaction conditions. As a result, it was confirmed that if the soil skeleton, which is mainly formed with coarse particles, remains intact even when the fine particles are migrated, their strength tends to increase due to internal erosion.

研究分野：地盤工学

キーワード：細粒分含有率 内部侵食 せん断強さ 液状化強度 火山灰質砂 締固め 骨格構造

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

平成30年北海道胆振東部地震では、札幌市南部の宅地盛土で大規模な液状化被害が発生した。中でも札幌市清田区里塚一条の被害は、谷埋め盛土の液状化により盛土下流端から盛土内部の土砂が流出し、上流側の住宅地が著しく沈下するなど甚大な被害が発生した。液状化被害が発生した主たる原因は、建設時には施工管理基準が制定されていなかったために不十分な締固めで緩詰め状態の盛土であったことである。一方、細粒分が40%以上も含まれる火山灰質砂が使われており、非塑性の細粒分が多いことにより骨格間隙比(細粒分を間隙と見なした間隙比)が高い状態となり、液状化強度が低下したことも要因の一つと考えられている。骨格の形成に寄与していない非塑性細粒分は、力学挙動上は「間隙」として振る舞うため、物理的な密度を上げることに寄与していても、結果的には密度増加の効果とは逆に実質的な間隙(骨格間隙比)を増加させ、結果として液状化強度を低下させた可能性もある。

現地の状況を記述するもう一つ状況として、降雨による、あるいは埋設された排水管の排水機能低下による地下水位上昇があり、地下水位の上昇は排水管周辺の土に大きな動水勾配を生じさせるために、盛土の土骨格の中から細粒分が流出する「内部侵食」が引き起こされる。常時は清水が流れていても、降雨時などに地下水位が上昇すると濁り水が流れることからわかるように、細粒分が徐々に流出していることが示唆される。細粒分の流出は内部侵食の一形態であり、これが続くといずれは土骨格が骨粗鬆症のような状態になって脆くなり、せん断強さや液状化強度が低下してしまうと懸念される。特に、粗粒分が土骨格を作り、その隙間に細粒分のマトリックスが充填されているような骨格構造の土では、粗粒分が形成する土骨格の隙間から細粒分が流出しやすと考えられる。

近年は盛土の施工管理基準が制定され、液状化しないように十分な締固めが施されるが、それでもなお、施工当初には雨水の浸透によりサフュージョンと呼ばれる内部侵食(土骨格が保持されたまま細粒分が流出する内部侵食)で細粒分が流出することから、これがせん断特性や液状化特性に与える影響を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

土の骨格構造は、締固め度のみならず、乾燥側で締め固めるか、湿潤側で締め固めるかで著しく変化することが知られている。締固め曲線をプロットする乾燥密度と締固め含水比の関係において、最適含水比、最大乾燥密度を通る同一飽和度の曲線付近を境界として、左側(締固め含水比が低くなる方向)が乾燥側、右側(締固め含水比が高くなる方向)が湿潤側である。湿潤側で締め固めると均質な骨格構造が得られる。このとき、粗粒分の隙間を細粒分が均質に埋め尽くすため、マイクロポロシティと呼ばれる微小な隙間が均質に分布する。一方、(乾燥しすぎない程度に)乾燥側で締め固めると、細粒分の一部が団粒を形成して粗粒分とともに骨格構造に取り込まれ、マクロポロシティと呼ばれる大きな隙間のネットワークを形成する。この隙間のネットワークは水みちになり、隙間水が集中的に流れて細粒分を流出させるため、内部侵食を促進する可能性が危惧される。

非塑性の細粒分は液状化強度を低下させる原因となるため、これが内部侵食によって減少すると、液状化強度が増加する可能性がある。このことは、細粒分の流出により脆弱化する傾向とは逆のことを言っており、感覚的にも矛盾しているが、既往の知見から導き出される傾向であることも事実である。この矛盾を解くためには、細粒分の役割をしっかりと理解する必要があると考えられるが、明確な答えはよくわかっていない。さらに話をややこしくするのが、上述した土の締固め状態の違いである。締固め度に加え、乾燥側で締め固めるか、湿潤側で締め固めるかによって、非塑性の細粒分が多く含まれる土であっても異なる骨格構造を形成する。すなわち、乾燥側の締固め条件では、細粒分が形成した団粒が骨格構造を形成するのに対して、湿潤側の締固め条件では、細粒分は粗粒分が形成した骨格構造の隙間を埋めるマトリックスを形成する。このとき、同じ細粒分であっても、土の骨格構造の中で果たす役割が異なっており、せん断特性や液状化特性の違いとなつてその影響が表れてくるはずである。細粒分が液状化強度を低下せる可能性がある一方で、細粒分は粗粒土粒子同士の隙間に充填されて土の密度を増加させるため、液状化強度を上げることに貢献する。このように考えると、長期的な内部侵食により細粒分が流出した後の盛土地盤のせん断特性や液状化特性がどのように変化していくかという問いに対して明確に答えられない。この学術的な問いに対する答えを見つけることが、本研究の主な目的である。

3. 研究の方法

非塑性細粒分を多く含む火山灰質砂(細粒分含有率約45%)を対象として、細粒分含有率を変化させるために、これから細粒分を取り除いた試料(細粒分含有率約15%)と、取り除いた細粒分を当初の試料に加えて細粒分を増加させた試料(細粒分含有率約70%)の計3種類の試料を準備した。これらの試料を用いて締固め度のみならず、締固め時の含水比を調整して飽和度の異なる供試体を作製し、内部侵食あり・なしの条件によって非排水せん断強さを比較した。また、

これらの試料に対して、締固め条件によって土の骨格構造がどのようになっているか、内部侵食（サフュージョン）によって細粒分がどのように土骨格の中で移動しているかをCTスキャナにより観察した。

細粒分含有率45%の試料については、各種締固め条件の下で、内部侵食の有無による液状化強度の変化について調べるため、繰返し非排水三軸試験を実施した。

これらの一連の試験において、締固め度は今後の盛土建設の施工管理を考慮して締固め度90%以上を想定し、締固め度90%、95%、97%、100%などを設定した。また、これらと比較するため、一部の試験では締固め度80%の比較的緩詰め状態の供試体も作製して試験を実施したが、それでも、平成30年北海道胆振東部地震で大規模な液状化が発生した地区の締固め度（地震後の調査で締固め度が約70%程度であることがわかっている）よりも高い締固め度の条件設定になっている。

4. 研究成果

締固め条件と細粒分含有率、内部侵食の有無の観点から非塑性細粒分が非排水せん断強さや液状化強度に与える影響について考察した。得られた研究成果の主なものを以下に記述する。

- ・締固め条件に着目すると、同一の細粒分含有率・締固め度で作製した供試体であっても、含水状態に応じて骨格構造が異なることが示唆され、乾燥側で締め固めた場合にはマクロポロシティが発達した骨格構造となりやすく、内部侵食を受けやすい。また、試料ごとに同じ締固め条件で比較すると、細粒分含有率が高いほど細粒分粒子も骨格を形成する主要な構成要素となり、内部侵食では細粒分が抜け出しにくく、かつ、非排水せん断強さやせん断剛性を増加させる。
- ・最適含水比で最大乾燥密度付近（締固め度97%）まで締め固めた場合、細粒分の増加は非排水せん断強さを減少させる。
- ・細粒分の多い試料（細粒分含有率45%と70%）を締固め度90%まで締め固めた場合、締固め時の含水比が最適含水比よりも5%程度湿潤側の条件では著しいダイレーション傾向を示したが、最適含水比および最適含水比よりも5%程度乾燥側の条件では比較的緩やかなダイレーション傾向を示した。
- ・細粒分の少ない試料（細粒分含有率15%）はせん断抵抗角が $\phi' = 41^\circ \sim 54^\circ$ と比較的大きくなる傾向を示したが、細粒分の多い試料（細粒分含有率45%と70%）はせん断抵抗角 ϕ' がいずれも約 41° で同程度の値を示し、粗粒分の方が細粒分よりも土粒子のアンギュラリティが高いことが示唆された。
- ・内部侵食を受けたとき、密詰め条件の場合には非排水せん断強さが減少する傾向が見られるが、緩詰め条件の場合には、非排水せん断強さのみならず初期剛性も増加しており、内部侵食を受けることによって力学特性はむしろ改善される傾向にあることがわかった。これらの挙動は、締固め条件で決まる土の骨格微視構造とも密接に関連していることが示唆された。
- ・透水によって生じる火山灰質砂の細粒分粒子の流出や目詰まりの挙動をCTスキャンすることによって可視化した結果、サフュージョンは供試体内で均質に起こるのではなく、大きな間隙周辺で局所的に起こること、（本研究の試験条件・侵食率では）透水によってサフュージョンが進行すると目詰まりにより細粒分で間隙のボトルネックとなっている部分が埋まり、土骨格が補強されることがわかった。
- ・非塑性細粒分が多い火山灰質砂（細粒分含有率45%）の場合、締固め度90%では液状化抵抗（液状化強度比） R_{L20} は0.2程度しか期待できず、これを0.3以上にするには締固め度95%以上に締め固める必要がある。一方、同じ乾燥密度であっても骨格構造が重要であり、締固め度95%では、乾燥側の締固め条件の方が高い液状化抵抗を期待できる。なお、液状化時の変形に関する粘り強さは、乾燥側の締固め条件の方が失われている可能性があるため、液状化に対する粘り強さにも留意するべきである。
- ・静的載荷試験では、内部侵食により剛性が改善（増加）する傾向が見られるが、繰返し載荷試験では、締固め度90%の試験において、内部侵食により塑性的な変形挙動が現れ始めるまでに必要な繰返し載荷回数が増える傾向として確かめられるとともに、液状化強度比 R_{L20} も増加した。しかしながら、締固め度95%の試験においては、そもそも液状化強度比 R_{L20} は大きい値であるものの、締固め度90%の場合とは逆に、内部侵食により液状化強度比 R_{L20} が低下する傾向が見られた。

以上をまとめると、非塑性細粒分が多いとせん断抵抗角が低下する傾向にあること、サフュージョンと呼ばれる内部侵食（土骨格を保持したまま細粒分の一部が流出する現象）により細粒分が抜け出しても、非排水せん断強さや液状化強度は増加する傾向（ただし、極めて密詰めになるまで締め固められている場合には若干の強度低下が見られるが、そもそも強度が高い）にあること、などが明らかになった。細粒分が果たす役割について善悪を明確に色分けすることはできないが、少なくとも「悪」を強調する必要はないことは上記の知見から確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 志田恭一, 渡部要一	4. 巻 64
2. 論文標題 細粒分を多く含む火山灰質砂の締固め条件および内部侵食が液状化特性に与える影響	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 j地盤工学会北海道支部技術報告集	6. 最初と最後の頁 1-8
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 Sarmah, R. and Watabe, Y.	4. 巻 63(6)
2. 論文標題 Suffusion in densely compacted Satozuka pumice sand and its impact on static loading undrained shear strength and dilation behaviour	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2023.101397	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 Watabe, Y.	4. 巻 No.2/2023
2. 論文標題 Influence of compaction conditions on the liquefaction characteristics of pumice sand with non-plastic fines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 BULLETIN of L.N. Gumilyov ENU. Technical Science and Technology Series	6. 最初と最後の頁 8-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32523/2616-7263-2023-143-2-8-18	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 Watabe, Y., Kubota, S., Mukunoki, T. and Sassa, S.	4. 巻 1
2. 論文標題 Influence of suffusion on shear characteristics of pumice sand with non-plastic fines in relation to compaction condition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-11)	6. 最初と最後の頁 1-11
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 渡部要一, 窪田 翔, 椋木俊文, 佐々真志	4. 巻 1
2. 論文標題 非塑性細粒分を多く含む火山灰質砂の非排水せん断特性に及ぼす締固め条件と内部侵食の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第58回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 13-6-2-02
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 福嶋健汰, 渡部要一	4. 巻 1
2. 論文標題 非塑性細粒分含有率が異なる火山灰質砂における締固め条件と内部侵食がせん断特性に与える影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第58回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 13-6-1-06
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 志田恭一, 渡部要一	4. 巻 1
2. 論文標題 細粒分を多く含む火山灰質砂の非排水せん断挙動における有効拘束圧と締固め度の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第58回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 13-6-2-01
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 志田恭一, 渡部要一	4. 巻 1
2. 論文標題 火山灰質砂における細粒分含有率と締固め条件が非排水せん断特性に与える影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第57回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 20-4-1-06
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 渡部要一, 佐々木将仁, 畠山正則, 持田文弘	4. 巻 1
2. 論文標題 札幌市里塚地区の火山灰質盛土材の液状化特性に与える締固め条件の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第57回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 20-4-3-05
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 Sarmah, R., Kubota, S. and Watabe, Y.	4. 巻 1
2. 論文標題 Influence of suffusion on shear strength and dilatancy characteristics of pumice 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 1034-1043
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 窪田 翔, 渡部要一, 佐々木将仁	4. 巻 1
2. 論文標題 里塚地区盛土材における細粒分が内部侵食と非排水せん断挙動に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第56回地盤工学研究発表会講演集	6. 最初と最後の頁 13-1-2-05
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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 渡部要一, 窪田 翔, 椋木俊文, 佐々真志
2. 発表標題 Influence of suffusion on shear characteristics of pumice sand with non-plastic fines in relation to compaction condition
3. 学会等名 The 11th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-11) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡部要一
2. 発表標題 Influence of suffusion on shear characteristics of pumice sand with non-plastic fines in relation to compaction condition
3. 学会等名 The 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡部要一, 窪田 翔, 棕木俊文, 佐々真志
2. 発表標題 非塑性細粒分を多く含む火山灰質砂の非排水せん断特性に及ぼす締固め条件と内部侵食の影響
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福嶋健汰, 渡部要一
2. 発表標題 非塑性細粒分含有率が異なる火山灰質砂における締固め条件と内部侵食がせん断特性に与える影響
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 志田恭一, 渡部要一
2. 発表標題 細粒分を多く含む火山灰質砂の非排水せん断挙動における有効拘束圧と締固め度の影響
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡部要一, 佐々木将仁, 畠山正則, 持田文弘
2. 発表標題 札幌市里塚地区の火山灰質盛土材の液状化特性に与える締固め条件の影響
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 志田恭一, 渡部要一
2. 発表標題 火山灰質砂における細粒分含有率と締固め条件が非排水せん断特性に与える影響
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 Rupali Sarmah, 窪田 翔, 渡部要一
2. 発表標題 Influence of suffusion on shear strength and dilatancy characteristics of pumice 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

1. 発表者名 窪田 翔, 渡部要一, 佐々木将仁
2. 発表標題 里塚地区盛土材における細粒分が内部侵食と非排水せん断挙動に及ぼす影響
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〕

-

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)	

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