

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：51101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04356

研究課題名(和文) 間隙構造に着目した盛土の健全性評価手法と強靱化対策工の提案

研究課題名(英文) Soundness evaluation method and toughening proposition for embankment focussing on soil structure

研究代表者

清原 雄康 (Kiyohara, Yukoh)

八戸工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20369911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：18年が経過した野外盛土の降雨後の水分移動特性の変化を再調査し、施工当時との挙動比較、内部侵食との関連性の考察を行った。盛土表層付近では細粒分が顕著に減少、間隙比が増加し、内部でも植物根の侵入が生じていた。繰返し荷重作用時のしらす土粒子単体の圧縮性、摩耗を定量的に把握した。土水連成解析にて、その圧縮性、摩耗性を考慮した解析を行った。さらに、しらす土の構成則について、別途陽解法によるプログラムを作成し、土構造を反映する移動硬化則の背応力の応力比依存性について実測結果と比較検証した。ベントナイトによる細粒分補充効果について透水性の低下には寄与するものの、強度向上効果は得られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

施工後長期間経過した盛土の降雨時浸透挙動の変化を18年という長期間にわたって計測し、その間の植生変化が保水性、水分特性に及ぼす影響、表層付近での細粒分の流失、間隙比の増加を明らかにした。これは降雨時の浸透挙動、浸潤線の上昇の予測精度を上げることに寄与し、豪雨時の土砂災害ハザードマップ作成の際にも有用な情報源となる。表層付近の空隙を密実化するためのベントナイト粒子の補填実験を室内で行ったところ、透水性の低下回復は顕著であった。また、混入による最大強度が増加したが、せん断定数向上までは期待できなかった。

研究成果の概要(英文)：Rainfall infiltration behavior and storage capacity on 18 years passed embankment composed of Shirasu soil(volcanic ash sand) were investigated to verify influence of degradation by measuring water content and suction during and after rainfall. The dry density and fine content at a surface area had especially been decreased to small value. By void expansion, water retention capacity had been tended to decrease during these 18 years. Compressibility and abrasive wear on Shirasu soil particles were also quantified. Then soil-water coupled FEM step by step analyses were performed to clarify the liquefaction process considering those properties. Computer programs for nonlinear elasto-plastic model with kinematic hardening law were made and verified under strain or stress controlled condition. Permeability and maximum strength on Bentonite mixed Shirasu soil whose fine particle had been lost were improved.

研究分野：地盤工学

キーワード：盛土 降雨 不飽和浸透

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

盛土の劣化は寒冷地域における凍結融解, 急激な温度変化や地震, 雨の影響など厳しい自然環境に暴露され, 確実に進行している. また植根や土粒子構造の変化, 浸透, 強度特性も変化している. 特に, 昭和 30 年代から 40 年代にかけて造成された宅地地盤などで, 近年になって地震時に崩壊を起こす事例が増えている. 豪雨の発生頻度が急増し, 想定される外的要因の見直しが迫られ, 内的な構造劣化に起因する脆弱化した自然斜面, 河川堤防の決壊などの被害が今後増加するものと思われる.

劣化した盛土の評価方法

地盤斜面の危険度予測精度向上のためには, 土質特性に応じた評価が必要である. 盛土作製からの初期せん断応力や植栽の変化, 降雨時の細粒分の流失, 凍結, 融解など経年劣化について, 人為的な亀裂を作ったの研究はあるものの, 実態が明らかにされていない. 本研究で予定している実地盤の経年変化による土構造変化までを定量的に考慮し, 斜面安定性評価を行っている研究はほとんどなされていない.

既設盛土の水分特性から土構造を推察し劣化の度合いを定量的に判定

申請者はこれまでに不飽和非排水三軸応力状態下で, 火山灰質土をせん断変形させて, 水分量と毛管上昇高さの関係(水分特性)変化からせん断時の間隙構造変化を推測する手法を提案している. また降雨・地震時に被害をもたらした「しらす土」(火山灰質土)の降雨時浸透特性の研究のために, 野外盛土を 13 年前に作製し, 研究終了後, 自然暴露されているものが当時のまま残っている. 写真 1, 2 に示すように, この 13 年間で地表面の植栽植物も自然に変化した.

それらを背景にして, 既設盛土を用いて, すでに把握している施工当時における降雨時の盛土内水分変化時の水分特性変化挙動, 浸透特性に加え, 13 年経過後の水分, 浸透特性の再評価, 比較, 新たに考案した間隙構造推測システムの応用による劣化の程度評価などを行う.

しらすなど多孔質土粒子単体の圧縮性, 破砕性, 摩耗, に関しての情報がなく, 固相の体積弾性係数や摩耗による固相と液相間の質量移動などを把握し, メカニズム解明に生かす必要がある.

近年のゲリラ豪雨, 地震などによる地盤災害の高精度予測

さらに, 北東北に広く存在するしらすの地震時, 降雨時の斜面崩壊被害メカニズム, しらすのような多孔質材料の特性をより正確に把握するためには, 気圧, 蒸気圧, 保水性などをふまえた固体・流体間の移動挙動の記述の追加が必要であり, これらを考慮した新しい高精度三相連成有限要素解析コードを完成させ, メカニズムの理解を深め, 災害予知, 対策工の検討ツールに活かす.

2. 研究の目的

火山灰質土である八戸しらすからなる盛土の降雨時浸透挙動解明のために作製した試験盛土を、野外に暴露して12年が経過した。その間の植栽、自然条件の変化など、外的な不確定要素を受けた環境下での、不飽和浸透挙動、水分特性の変化を把握し、盛土作製当初と現在での地盤浸透特性の比較を行う。

得られた結果を基に、申請者が開発した水分特性履歴と間隙構造変化との関係を、劣化との関連性研究に役立て、地盤材料からなる危険斜面のモニタリング技術確立に生かす。

また、多孔質なしらすの土粒子固体界面での水分の吸水・蒸発などの移動現象を考慮した飽和・不飽和浸透流解析コードの信頼性検証を行う。

さらに、塑性指数が高い事で知られるベントナイト微粒子をトレーサー物質と考え、雨水を輸送媒体とする地中への移流拡散、各種イオンの吸着移動挙動を、野外実測結果を基に解明し、斜面に過剰な雨水が浸透するのを抑制し、靱性を回復させる技術を確立する。

3. 研究の方法

野外盛土の降雨時浸透挙動の実験後、約18年間自然環境下に暴露させていた間に変化した植栽、土構造の影響、浸透特性の変化を、雨量、土壌水分、サクシオン、土中温度、湿度、気圧という項目で再調査し、作製当時のデータとの比較から、貯留特性、浸透特性の変化を把握する。さらに、計測された水分特性から間隙径を推測する手法を用いて、土構造変化を明らかにする。

不飽和浸透流解析コードを用い、雨量実測値を境界条件とする盛土内の浸透挙動を計算し、実測値との整合性比較、安定性評価も行う。

不飽和浸透流有限要素解析コードを基に、多孔質なしらす特有の固体内への水や空気の移動（吸と排）、水分特性曲線の変化を考慮したコードを提案する。

ベントナイトを地盤に浸透させることによる透水係数の低下効果、流失した細粒分の充填効果などを、ベントナイトミルクを用いた室内透水試験を用いて検証する。ベントナイト鉱物に反応する電気伝導度から、ベントナイト成分の地中への拡散挙動を把握する。三軸圧縮試験による強度改善効果も把握する。細粒分の充填効果、自己修復機能、粘着力を利用し、盛土間隙内に浸透させる際の、多孔質なしらす土粒子内や粒子間の移動挙動を把握する。

4. 研究成果

火山灰質土であるしらすからなる野外盛土を2004年に作製して2021年で18年が経過した。降雨時における体積含水率やサクシオンの変化、草木本類の有無が浸透挙動に及ぼす影響、貯留率や水分特性曲線による保水性の経年変化などを定量的に把握した。盛土表層付近では細粒分が顕著に減少、間隙比が増加し、内部でも植物根の侵入が生じていた。木本類が

有る時の方が無い時より体積含水率は低めに推移し、降り始めから体積含水率が最大になるまでや表面流下が生じ始めるまでの所要時間、連続雨量は増加傾向で、葉面貯留の影響が生じた盛土内部の貯留率は2018年以降で最大60%と2004年の最大80%より約20%低下し、保水性が低下する傾向に変化した。

「施工後18年経過したしらすからなる野外盛土の降雨時浸透挙動の変化」と題して、土木学会論文集C(査読付き)に2023年3月に採択が確定した。

野外盛土の降雨時浸透挙動を再現するために、実測各測点での初期体積含水率がその該当節点での解析初期条件となるよう準反復法によりサクシオン解を求めた。さらに、実測水分特性曲線の主吸水過程と主排水過程間の遷移曲線を考慮できる2次元不飽和浸透流有限要素解析コードを開発した。様々な降雨イベントに対し、ほぼ同じ設定水分特性曲線パラメータを用いて、体積含水率の変化挙動をほぼ再現出来た。

繰返し荷重作用時のしらす土の摩耗を定量的に評価し、土水連成有限要素解析コードを用いて所定の時間間隔で節点間の相対変位量に応じた摩耗の考慮、それに伴う間隙比の増加、せん断剛性低下を想定した計算を行ったところ、摩耗有りの方が早期に液状化に至ることを把握出来た。

飽和砂を用いたひずみ制御繰返し三軸試験を行い、移動硬化則の背応力を制御した陽解法プログラムにて得られた解析結果との比較検証を行った。応力反転時、背応力を応力比に置き換えると良好な整合性が得られた。

三相連成問題の基礎となる等方硬化や移動硬化則の降伏関数、カムクレイ型塑性ポテンシャル関数からなる構成則の構築、2次元の陽解放、陰解法プログラムを自作して動作検証を行った。

細粒分が流失した盛土へのベントナイトの補填、回復効果について、細粒分を除いたしらす土を供試体とした室内透水試験装置にベントナイトミルクを投入して透水性変化を把握した。透水係数は $10^{-5}m/s$ から $10^{-7}m/s$ オーダーへと低下した。細粒分のない供試体の方が、充填、透水係数低下に時間を要した。溶出試験によるEC値の推測から、ベントナイトの地盤深さ方向への捕捉量を定量的に把握出来た。細粒分がない供試体では、ベントナイトの捕捉量は増加する傾向にあり、充填効果を確認出来た。

ベントナイト混合土の強度特性について、細粒分が15%に低下したしらす土と、それにベントナイトを混合し細粒分を25%に増やしたしらす土のせん断強度試験を行い、内部浸食の評価、対策効果の検討を行ったところ、混合土の方が最大強度 q_{max} は約1.4~2倍、粘着力は4.7kPa増加したが、 ϕ は若干減少した。修正カムクレイモデルによる計算の結果、混合土の突固め効果を過圧密効果として考慮すると、ダイレイタンシー挙動、応力経路など良好な整合性が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 清原 雄康	4. 巻 55
2. 論文標題 硬化を伴う一次元弾塑性バイリニアモデルを用いた非線形計算手法の確認とコンピュータプログラムへの実装	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 八戸工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 77-83
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24704/hnctech.55.0_77	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 Y. KIYOHARA, M. KAZAMA	4. 巻 1
2. 論文標題 Evaluation of liquefaction/mudflow resistance of improved volcanic sandy ash soils focusing on dissipated energy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE Sendai, Japan - September 13th to 18th, 4e-0002	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 有
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 清原 雄康	4. 巻 Vol.15
2. 論文標題 三軸繰返し荷重作用時の砂や各種改良しらす土の挙動と基準化累積損失エネルギーによる評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 15-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3208/jgs.15.15	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 清原 雄康	4. 巻 -
2. 論文標題 基準化累積損失エネルギーによる砂や各種しらす土の繰返し挙動評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 エネルギーに基づく液化化予測手法に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 359-365
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 清原 雄康	4. 巻 -
2. 論文標題 飽和田子しらすの単調および繰返しせん断挙動と浸透型薬液による改良効果	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第61回地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 289-292
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 清原雄康, 風間 基樹	4. 巻 79
2. 論文標題 施工後18年経過したしらすからなる野外盛土の降雨時浸透挙動の変化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集, 2023 年 79 巻 5 号, 論文ID: 22-00303	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-00303	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14件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 清原雄康, 長内 涼花
2. 発表標題 小型繰返し一面せん断試験装置を用いたしらす土粒子摩耗量の評価
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. KIYOHARA, M. KAZAMA
2. 発表標題 Evaluation of liquefaction/mudflow resistance of improved volcanic sandy ash soils focusing on dissipated energy
3. 学会等名 17WCEE Sendai (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中茉優・清原雄康
2. 発表標題 移動硬化則を用いた弾塑性構成モデルの構築と三軸繰返し挙動の再現解析
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清原雄康, 中山美優, 宮内亘紀
2. 発表標題 しらす土におけるベントナイトミルク浸透挙動とフィルタリング効果
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張間 遍・清原雄康
2. 発表標題 施工後長期間経過した八戸しらす野外盛土の降雨時浸透特性
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清原雄康, 赤坂綾斗
2. 発表標題 一軸圧縮試験によるしらす土粒子の圧縮強度と体積弾性係数の評価
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 清原雄康, 端本蓮, 木村匡伯
2. 発表標題 施工後14年経過した八戸しらす盛土の降雨時浸透挙動
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 端本蓮, 清原雄康
2. 発表標題 水分特性曲線を利用した野外盛土の間隙径推測と劣化度評価
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 清原 雄康
2. 発表標題 基準化累積損失エネルギーによる砂や各種しらす土の繰返し挙動評価
3. 学会等名 エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清原 雄康
2. 発表標題 ベントナイト15%混合八戸しらす土のせん断強度特性
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会 (平成30年度)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 粒来 真優子
2. 発表標題 低飽和度下における二戸しらすの繰返し挙動に及ぼす飽和度の影響
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会（平成30年度）
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 清原 雄康
2. 発表標題 不飽和珪砂7号の非排気繰返しせん断挙動と累積損失エネルギー
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 清原 雄康
2. 発表標題 降雨時・地震時における地盤の挙動と防災
3. 学会等名 1968年十勝沖地震50周年シンポジウム - 過去を見つめこれからを考える -（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清原雄康
2. 発表標題 降雨時しらす盛土表層部における雨水の表面流下と浸透挙動
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

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 三軸圧縮試験方法及び三軸圧縮試験装置	発明者 清原 雄康	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-134523	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

research map 清原雄康 https://researchmap.jp/read0205010/
--

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