

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01337

研究課題名（和文）疎水性をもつ土によるキャピラリー・バリア型の自然斜面被覆層としての適用性評価

研究課題名（英文）Application of hydrophobic soil as a capillary barrier type natural slope cover layer

研究代表者

加藤 正司 (Kato, Shoji)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10204471

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）：新たな地盤材料である疎水材を用いて、効率的かつ自然に優しいキャピラリーバリア（CB）を構築するため、いくつかの代表的な地盤材料について数種類の疎水処理方法を適用し、その性能を評価した。その結果、市販されているコンクリート用防水材を用いてCBを作製できる可能性が示された。ただし、疎水材と親水材を混ぜて、CBを作ることはフィンガリング現象を生じさせ、CBの遮水性能が低下することが判明した。自然暴露試験の結果、今回の処理による疎水性は、1年近く保たれることが分かったが、今後、実大模型を用いてその性能を評価することが必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャピラリーバリア（CB）は、すでに、古墳の造営技術に用いられており、1500年以上にわたる長期供用性が保証されている。集中豪雨による斜面の崩壊によって人命や財産の被害で社会的に危機感が高まっている中、不飽和状態である自然斜面を安全に守る新たな地盤材料として疎水材を効率的で自然に優しいCBと結びつけたことが学術的な特色である。本研究の成果は、不飽和状態の自然斜面の安全問題に一つの有望な対処法を提示すと考えられる。そして、これは、将来的に、斜面災害による被害や社会的危機感の低減につながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Several hydrophobic treatment methods were applied to representative geomaterials and their performance was evaluated in order to construct an efficient and nature-friendly capillary barrier using a new geomaterial, hydrophobic material. As a result, it was shown that CB can be fabricated by using commercially available waterproofing materials for concrete. However, it was found that mixing hydrophobic and hydrophilic materials to form CB caused fingering phenomenon and reduced the water shielding performance of CB. As a result of the natural exposure test, it was found that the hydrophobicity by this treatment could be maintained for about one year, but it is necessary to evaluate its performance using a full-scale model in the future.

研究分野：地盤工学

キーワード：疎水性材料 キャピラリーバリア 自然斜面 遮水性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

集中豪雨による斜面崩壊は毎年、人命や財産の被害を生じ、近年のゲリラ豪雨などの異常気象と相まって社会的な危機感が高まっている。本研究では、疎水性をもつ土（以下、『疎水材』と呼ぶ）を用いて、不飽和状態の自然斜面への浸透に対して、長期的に高度な雨水遮断機能と排水機能をもつキャピラリー・バリア (Capillary Barrier ;CB) 地盤材料としての可能性を検証する。自然斜面の安全を守るために、新たな地盤材料である疎水材を用いて効率的かつ自然に優しい CB の構築を提案する。疎水材の力学的および水理学的特性の把握のため、不飽和土一面せん断試験、一定含水比圧縮試験および保水性試験を実施し、その後、実用化に向けて、いくつかの疎水化処理方法を用いて作製した疎水材の適用可能性を明らかにする。

CB は、多くの廃棄物処分場の被覆工として利用されている。すでに 1987 年には CB を用いた放射性廃棄物処分場の構想案が示されている。貯蔵保管のための盛土の規模は、浸潤した土中水が境界面に沿って有効に排出される長さによって決定される。CB は、理論的には優れた機能を持つとされるものの、それを実務レベルで実証した系統的な取り組みは見当たらない。そこで、本研究は、不飽和土を対象とした地盤工学および土質力学の理論枠組みをベースにしながら、疎水材の特性を活かした傾斜 CB を展開していこうとするものである。

一方、親水性をもつ土（以下、『親水材』と呼ぶ）と疎水材においては、メニスカス水の形成に関する水の接触角と土粒子の表面の性質との関係を理解することが重要である。疎水材の表面は、水に対して拡散障壁としての作用を及ぼす。材料による土粒子表面でのこのような性質の違いは、さらに小さなスケールレベルにおいても確認されている。一般的な条件下で親水材上に形成された水の層は、疎水材のそれより 1/10 程度に薄くなる。これらの研究は、土の種類による表面性質の違いがメニスカス水の形成に影響を与えることを示唆し、その結果、不飽和化した場合のせん断挙動へ影響を及ぼす可能性があることが推測される。しかし、現在まで、それらに関する地盤工学的な検討はほとんどなされていないのが現状である。

2. 研究の目的

CB は、砂層とその下に礫層を重ねた単純な土層であり、砂と礫の不飽和水分特性の相対的な違いにより、上部から浸潤してきた土中水は両層の境界面で遮断・保水され、境界面が傾斜していると保水された土中水は境界面に沿って流下し排水される。自然材料のみで構成される非常にシンプルな地盤層システムであるが、保水性に着目すると、乾燥地・半乾燥地域での節水かんがいへの利用に結びつく。浸潤水の遮断性能に着目すると、斜面の安定化工法や廃棄物の表面被覆工として利用などの適用可能性をもつ。

自然状態の土は、一般的に親水性材料であるが、オイル流出などの有機汚染や環境汚染、また山火事などの自然災害により疎水性の土へと変化する可能性がある。土の疎水性は土中水の接触角やその分布に影響を及ぼすため、力学特性が変化する可能性が考えられる。自然状態の土である親水性砂の場合、メニスカス水が存在するが、疎水性砂の場合、土粒子表面に水玉として存在し、表面水の様子は明らかに異なる。疎水性をもつ豊浦砂は、落下させた水が浸透しにくい地盤材料になる。

本研究では、この優れた雨水遮断・排水機能、自然材料であるため極めて長期にわたって機能が維持される利点および疎水材の特性を活かした疎水材層による傾斜 CB の表面被覆

材としての適用性を評価して、自然斜面の安定性の向上を図ることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は3年間の研究期間で行われた。各年度に実施した研究全体工程について述べる。

- (1) 【第1年度】親水材をシラン処理することにより、研究期間全体に必要な量の疎水材を準備する。その後、土質物性実験により疎水材の物理特性を把握する。また、斜面は不飽和状態で存在するので、親水材と疎水材の不飽和土強度試験を実施する。このため連続加圧型の保水性試験装置の設計・製作ならびに、不飽和土の試験装置製作・改良を進める。
- (2) 【第2年度】疎水材のCB地盤材料として疎水材層を設置した室内模型実験を実施するため、その模型土槽を作製して予備実験を行い、その機能性を評価する。また、前年度作製した連続保水性試験装置を用いて、保水特性を評価する。
- (3) 【第3年度】疎水材のCB地盤材料として実用化に向けて、適用可能性を検証する。このため、安価で実務に用いられているコンクリート用防水材を用いた疎水化処理方法を検討し、その適用性について小型模型土槽を用いた室内降雨試験により評価をおこなう。

4. 研究成果

(1) 【第1年度】適切なシラン処理方法の選定のため、数種類の試薬を用い、豊浦砂を用いて、処理後に試料が疎水性を有するかどうかを確認した。その結果、試薬の価格ならびに疎水性発揮の確実性を考慮して、試薬と処理方法を選定した。次に、その処理方法を用いて、試料として豊浦砂、DLクレー、まさ土を用いてシラン処理を行い、疎水性処理を行った場合の基礎的な疎水特性（接触角、水滴侵入時間）について検討を行った。すべての試料において、わずかな試薬濃度により処理を行うことで、接触角の増加ならびに水滴侵入時間の増加が確認された。また、測定された接触角と水滴侵入時間の間には、線形な関係があることが分かった。さらに、シラン処理土を自然斜面の被覆層として用いる場合には、自然暴露した状態で、処理層の疎水性が保持されることが必要である。このため、シラン処理をした豊浦砂を屋外にて約1か月の間暴露し、その間、1週間ごとに基礎的な疎水特性（接触角、水滴侵入時間）について測定を行った。その結果、接触角、水滴侵入時間ともに、ほぼ保持されていることが確認された。なお、この時得られた、接触角と水滴侵入時間の関係は、自然暴露しない試料について得られた関係とほぼ対応しており、自然暴露が、疎水特性に影響しないことが確認された。また、次年度の模型土槽実験の準備のため、模型土槽ならびに降雨装置を試作して、その性能を確認した。この時、シラン処理した豊浦砂を用いたCB層を用いて実験を行った。降雨の侵入はかなり抑えられることが確認されたが、土槽境界での浸透水の排出が、現状の装置では不十分であるため、今後改良することが必要であることが確認された。また、連続加圧型の保水性試験装置については、製作後、基本的な性能確認が行われた。

(2) 【第2年度】実用化に向け、市販のシラン系コンクリート防湿材によるシラン処理方法について検討を行った。このシラン系防湿材を用いると、シラン系試薬を用いた処理の場合に行う炉乾燥処理が必要ではないため、現場の土を処理する際、より簡単な工程で処理が可能となる。実験結果によると、防湿材を用いても豊浦砂では疎水性が発揮されることが確認された。しかし、まさ土のような粒度分布が良い試料の場合、接触角から見ると疎水性は発

揮されるが、豊浦砂に比べて浸透性が良い結果となった。このため、まさ土の場合、遮水層としては、粒度の調整等が必要となる可能性があることが予想された。

次に、疎水性材料のせん断強度試験を行った。シラン処理を行った、まさ土(2mmフルイ通過分)と豊浦砂について、一定密度で飽和度の異なる供試体を用いて一面せん断試験を行った。得られた結果、シラン処理により疎水性が発揮された場合、土の種類にかかわらず強度はやや低下することが確認された。ただし、その低下の程度は、土の種類によって異なることが確認された。このため、自然斜面の表面に疎水性の土を遮水層として用いる場合は、適用する斜面の角度が低くなることが予想された。

また、高い遮水性をもつ疎水性地盤層の実用化の検討のために、CB盛土の室内模型実験により斜面の安定化工法としての適用性を評価した。このため、CB盛土の礫層に珪砂1号を、砂層に豊浦砂の親水材と疎水材の混合物を疎水性地盤層として設置し、降雨強度20、50、100mm/hrの降雨に対して浸透状況の観察によりその遮水機能を調べた。特に、親水材と疎水材の混合率によるCB盛土の遮水機能を表す限界長について検討した。得られた結果として特に注目されるのは、疎水材の混合割合によっては、フィンガーリング現象が生じて限界長が短くなるケースが見られたことである。この結果は、遮水層の設計において注目すべき点であると考えられる。

(3)【第3年度】今年度は、2種類の方法(オクチルトリエトキシシランおよび水希釈したコンクリート被覆養生材を使用)を豊浦砂とまさ土に対して適用して疎水材を作製した。降雨試験では、直径11cm、高さ18cmのアクリル製円筒容器に試料を入れ、土カラム(上下2層)を作製して試験に用いた。カラム上層は未処理の豊浦砂、シラン試薬処理豊浦砂、被覆養生材処理豊浦砂、未処理のまさ土、シラン試薬処理まさ土、被覆養生材処理まさ土である。カラム下層は未処理の豊浦砂の層であり、上下層とも一定の乾燥密度(1.5g/cm³)で設置した。降雨試験では、2cm間隔で正方形配置した降雨装置の注射針から100mm/hrの降雨強度を目安に5時間雨を降らせ、雨水の浸透を疎水材層下端に設置した水分計で確認した。自然暴露試験では、4種類の疎水性材料を約6ヵ月間暴露し続け、定期的に各試料の接触角を測定した。

得られた結果については、以下のようにまとめられる。

- 1) 高濃度のシラン試薬、及び水希釈したコンクリート被覆養生材で処理した土試料を6ヵ月間自然暴露して接触角の変化を測定した結果、接触角にほとんど変化はなく、疎水性は継続されることが確認できた。
- 2) シラン試薬で処理した疎水性材料の場合は強い疎水性を発揮し、100mm/hrの非常に強い雨に対して、5時間以上耐えることができた。コンクリート被覆養生材で処理した疎水性材料は、自然暴露状態のような通常の天候であれば疎水性を発揮し続けられるが、100mm/hrの雨に対しては十分に疎水性を発揮できないことが判明した。
- 3) まさ土は豊浦砂と比べて粒子のばらつきが大きいので、局所的に大きな間隙ができてしまう可能性があり、その間隙から雨水が浸透しやすい。このため、遮水材料として用いる場合は、局所的な間隙を減らすため、より強く締固めて密度の高い状態とする必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 金 兼洙, 畠山 正則, 加藤 正司, 竹下 祐二	4. 巻 14
2. 論文標題 連続加圧方式による疎水性砂における水分特性曲線のヒステリシスに関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 111-121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3208/jgs.14.111	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 金 兼洙, 加藤 正司, Seong-Wan Park, 竹下 祐二.	4. 巻 14
2. 論文標題 疎水性地盤材料の作製方法とその遮水性能に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 343-352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3208/jgs.14.343	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 加藤正司
2. 発表標題 シラン処理による土質材料の疎水性に関する基礎的研究 (その 2: せん断強度特性)
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金兼洙
2. 発表標題 疎水性地盤材料を混合したキャピラリーバリア材の遮水性能に関する研究
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤正司
2. 発表標題 シラン処理による土質材料の疎水性に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会講演
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 小林 弘昌
2. 発表標題 浸透水の非側方流動性を考慮したキャピラリーバリアの砂層における解析的研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会講演
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Park, H.S.
2. 発表標題 Experimental verification of the continuous pressurization method on SWCC
3. 学会等名 ICSMFE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kim, B.S.
2. 発表標題 Evaluation of capillary barrier system under lateral non-flow condition of sand layer
3. 学会等名 ICSMFE (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究協力者	金 秉洙 (Kim Beong-Su)		
研究協力者	ロハニ タラディ (Lohani Trady)		