

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05045

研究課題名（和文）疎水性土を用いた高遮水地盤材料の開発とその自然斜面への適用性の実証試験

研究課題名（英文）Development of highly impervious geomaterials using hydrophobic soil and demonstration of their applicability to natural slopes

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：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、疎水材を用いて、不飽和状態の自然斜面への雨水の浸透に対して、長期的に高度な遮断機能と排水機能を持つ遮水性地盤材料としての可能性を検証した。このため、できるだけ安価で簡単な方法で遮水材料を作製し、遮水層を設置することを一つの目的とした。そして、市販のコンクリート養生材を希釈した溶液を用いて遮水材を作製した。模型土槽による遮水層は26か月間、遮水機能を維持しており、本方法の有効性が実証されたと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、集中豪雨による土砂災害が増加している。土砂災害は、降雨による浸透が土のせん断抵抗を低減し、このことが斜面崩壊を引き起こす原因となり発生すること多い。このため、自然斜面に対して、表層部への降雨浸透に対する強化対策技術の開発は急務であると考えられる。その一つの方法として、自然斜面や土構造物斜面の表層に遮水性の高い疎水性地盤材料を用いることにより表層からの降雨浸透を抑え、表層崩壊を防ぐ方法が考えられる。本研究では、この優れた雨水遮断・排水機能を持つ疎水材料の利点および特性を活かし、遮水材層への適用性と長期持続性を評価して、自然斜面や土構造物斜面の安定性の向上を図ることを目的としている。

研究成果の概要（英文）：Slope failures due to torrential rains cause damage to human lives and property every year, and combined with recent abnormal weather conditions such as guerrilla rains, there is a growing sense of social crisis. In this study, we examined the possibility of using hydrophobic materials as impervious geomaterials with a high degree of long-term interception and drainage functions against rainwater infiltration into unsaturated natural slopes. One of the objectives of this study was to fabricate an impervious material and install an impervious layer in the cheapest and simplest way possible. The impervious materials were prepared using a diluted solution of commercially available concrete curing materials. The impervious layer made by the model soil tank maintained its impervious function for 26 months, and the effectiveness of this method was verified.

研究分野：地盤工学

キーワード：疎水材 遮水層 接触角 模型土槽

## 1. 研究開始当初の背景

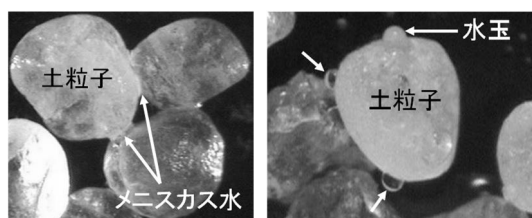
自然状態の土は、一般的に親水性材料であるが、オイル流出などの有機汚染や環境汚染、また山火事などの自然災害により疎水性の土へと変化する可能性がある。土の疎水性は土中水の接触角やその分布に影響を及ぼすため、力学特性が変化する可能性が考えられる。自然状態の土である親水性砂の場合、メニスカス水が存在するが、疎水性砂の場合は土粒子表面に水玉として存在し、表面水の様子は明らかに異なる(図1)。例えば疎水性をもつ豊浦砂は、落下させた水が浸透しにくい地盤材料になる(図2)。

このように疎水性地盤材料は親水性地盤材料と異なる特性を持つので、農学分野においては豪雨時の氾濫の誘因として、また、その遮水性を利用した塩害軽減のための利用を目指して研究がなされてきたが、地盤工学的な研究はほとんどなされていない。そこで、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、疎水材の特性の活かした遮水層の開発を展開していこうとする本研究の方向性は、十分に支持される学術的背景をもつと考える。

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り、疎水材料の地盤工学的な利用に関する適用性を問うことが本研究の目的である。さらに土中水は、不飽和状態では一般に様々な形態で土中に分布する。環境変化等により土粒子の表面性質が親水性から疎水性へと変化した場合、粒子個々の接点での粒子間付着力が変化するだけでなく、土中水の分布形態も変化する可能性があり、これについても実験的な検証を行う必要がある

## 2. 研究の目的

近年、集中豪雨による土砂災害が増加している。土砂災害は、降雨による浸透が土のせん断抵抗を低減し、このことが斜面崩壊を引き起こす原因となり発生すること多い。このため、自然斜面に対して、表層部への降雨浸透に対する強化対策技術の開発は急務であると考えられる。その一つの方法として、自然斜面や土構造物斜面の表層に遮水性の高い疎水性地盤材料を用いることにより表層からの降雨浸透を抑え、表層崩壊を防ぐ方法が考えられる。本研究では、この優れた雨水遮断・排水機能を持つ疎水材料の利点および特性を活かし、遮水材層への適用性と長期持続性を評価して、自然斜面や土構造物斜面の安定性の向上を図ることを目的としている。このような疎水材を用いることのメリットとしては、天然地盤材料に疎水化処理を施すことで容易に作製することができる



(a) 親水性砂 (b) 疎水性砂

図1 親水性砂と疎水性砂の表面水の様子

：疎水性をもつ土粒子の表面は、水に対して拡散障壁として作用。



図2 疎水性をもつ豊浦砂上の水滴の様子

：疎水材になった豊浦砂は、落下した水を浸透させない。

ため、防水シートのような人工材料を用いるよりも、自然環境負荷が小さくなり、かつ耐久性が向上することが挙げられる。疎水性地盤材料は親水性地盤材料と異なる特性を持つので、農学分野においては、その遮水性を利用した塩害軽減のための利用を目指して研究がなされてきたが、地盤工学的な研究はほとんどなされていなかった。そこで、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、疎水材の特性の活かした遮水層の開発を展開していこうとする点が、本研究の学術的な独自性であると考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の内容を明らかにすることを目指している。

疎水材の地盤工学的性質を評価するため、その疎水特性を接触角測定試験および水侵入時間試験により把握する。また、不飽和状態での強度試験や保水性試験により不飽和土力学的・水理学的特性を定量化する。

疎水材の遮水性地盤材料として適用可能性の検証：斜面の表面被覆層として用いる場合、その長期的な安全性を確保する必要がある。よって、実物大模型斜面を用いて、斜面内部の水分量および遮水材の疎水特性の変化の長期観測を行い、この結果を用いて、力学的・水理学的安全性・機能性を評価し、疎水材の遮水性地盤材料として適用可能性を実証する。

このために、シラン処理した疎水材を用い、以下の研究を遂行する。

- (1)シラン処理した疎水材を作製し、土質物性試験により物理特性を、疎水特性を接触角測定試験および水侵入時間試験により把握する。
- (2)疎水材の不飽和状態での強度試験(一面せん断試験)を行う。
- (3)保水性試験装置を改良して保水性試験を実施し、疎水材の不飽和状態の水理学的特性を定量化する。
- (4)疎水材を用いた遮水層を設置した、実物大斜面模型実験を行い、長期に渡って地中の水分量の変化、および疎水材の疎水特性の変化を観測し、遮水層の機能性を評価する。

なお、試験には豊浦砂、DL クレーおよびまさ土(2mmふるい通過分)を主に用いた。これらの試料を用いて、今回は、被覆養生材を用いてシラン処理を行った。この場合、水：被覆養生材：試料を重量比で 50：1：50 の割合で混合後 1 日間放置し、残った溶液を流して、1 日間自然乾燥して疎水性材料を作製した。

以下に各年度に実施する研究全体工程について述べる。

【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および疎水特性を把握する。また、斜面は不飽和状態で存在するので、疎水材の不飽和土強度試験を実施する。また、年度後半に実物大斜面模型実験のための長期測定システムを作製し、その機能性を評価する。

【第2年度】前年度作製した保水性試験装置を用いて、遮水材の保水特性を評価する。さらに、小型土槽(長さ 700 mm、幅 550 mm、高さ 400 mm; 図-3 参照)内に斜面(傾斜角 30 度)を作製し、遮水層を設ける。遮水層は珪砂 5 号を被覆養生材で処理したものを、層厚は 100mm とする。なお、疎水材の接触角は 106 度であった。遮水層上部は、約 30 mm の未処理のまさ土層を設置した。また、遮水層下部にはまさ土層を設置した。土層は各層に必要な量を投入し、目標乾燥密度  $1.50 \text{ g/cm}^3$  となるよう気乾状態の試料を締め固めて作製した。遮水層とその下部の層との境界付近、および下部層内に土壌水分計設置して、その出力を測定した。この土槽を屋外に設置して、傍らに雨量計を設置して、15 分のインターバル

で水分計・雨量計の出力を測定した。また、測定期間中に1か月に数回、斜面よりサンプリングを行い、遮水材の接触角測定試験を実施して、疎水特性の変化を追跡する。

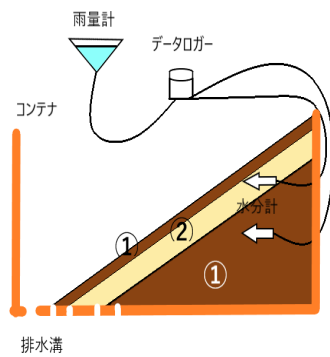


図-3 長期耐水性試験のための小型模型土槽の概要

【第3年度】小型土槽の水分量変化の長期測定を継続する。また、測定期間中に定期的に斜面よりサンプリングを行い、遮水材の接触角測定試験・水侵入時間測定試験を実施して、疎水特性の変化を追跡する。

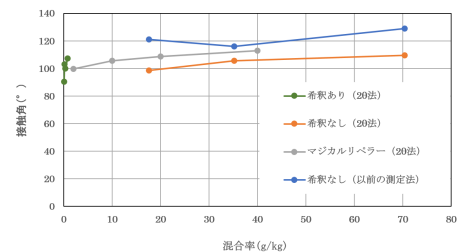
#### 4. 研究成果

##### (1) 接触角測定試験

液滴が材料に付着した時、材料が疎水性を持つ場合は液滴が球体状となって濡れにくく、材料が親水性を持つ場合は濡れ広がる傾向を示す。このような濡れ方の違いは、付着した水と材料表面の表面張力、およびその液体・材料間の界面張力の値に依存する。液滴の液面と材料表面との間で形成される角度は「接触角」と呼ばれ、材料の疎水性を評価する指標の一つとして様々な研究分野、生産管理の現場などで利用されている。接触角が90度以下の材料は、親水性材料として扱われ、接触角が90度以上の材料は疎水性材料として扱われる。本研究では、濃度を変えたシラン処理溶液を用いて豊浦砂をシラン処理し、次の方法により水の接触角を求め、シラン処理溶液の濃度により発揮される疎水性の程度の違いを調べた。

縦、横2cmに切った両面テープの片側部分に、シラン処理した試料を5回程押し付けて付着させる。テープの他の片側を試験台に貼り付ける。マイクロピペットを用いて50 $\mu$ lの水を測り取り、約10mmの高さから試料へ滴下する。水滴の状況をデジタルカメラでマクロ撮影し、得られた画像から水滴の高さ(a)と幅(b)を測定する。得られた水滴の高さと幅を用いて、2法を用いて水滴の材料に対する接触角を求める。

図4は、接触角の溶液濃度に対する変化を示したものである。この図で横軸の混合率は、シラン処理時の試料1kgに対する試薬、あるいは被覆養生材の重量比を示している。まず初めに、試薬を用いた場合の希釈なしの試料について、今回の2法での測定結果(オレンジのプロット)と、撮影した画像のメニスカスに接線を引いて角度を求めた測定結果(ブルーのプロット)を比較する。2法の結



被覆養生材 (2 法)

図-4 接触角測定結果 (疎水性豊)

果は若干低い測定値を示していることが分かる。これは、実際の水滴が完全な球形ではないことが影響していると考えられる。しかし、混合率に対する接触角の変化の傾向については、2 法による測定結果は、希釈なしの試料を用いて画像のメニスカスに接線を引いて求めた結果(ブルーのプロット)とほぼ同様な傾向を示していると考えられる。試薬については、希釈したものを用いてシラン処理した場合に関しても接触角測定を行った(“希釈あり”のグリーンのプロット)。過去の研究で示されているように、シラン処理を行うと僅かな溶液の濃度で 90°以上の接触角を示して疎水性が発揮されていることが分かる。また、被覆養生材の結果は、試薬を用いた場合とほぼ同じ大きさの接触角を示していることが分かる。今回使用した被覆養生材と試薬の同じ重量での市販価格を比較すると、被覆養生材は試薬に比べてかなり安価であるので、今後、この材料に関するデータを蓄積する予定である。

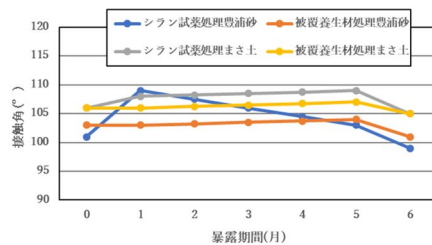


図-5 自然暴露時の疎水材の接触角の変化

次に、シラン試薬および被覆養生材を用いて豊浦砂、まさ土をシラン処理した 4 種類の試料を、各 300 g ずつ約 6 か月間屋外に自然暴露し、定期的に試料の一部を採取して接触角の大きさを 2θ 法により測定した。50 μℓ の水滴を両面テープの片面に設置した試料に滴下して、その形状を撮影して 2 法により接触角を求めた。図 5 は約 6 か月間の接触角の変化を示したものである。試薬処理をした豊浦砂に変化がみられるが、それ以外のデータについては、6 か月間ほぼ一定の接触角を保っていることが分かる。被覆養生材に関しては、コンクリート部材表面に塗布して数年間の耐久性があることがメーカーの試験で確認されている<sup>13)</sup>ので、被覆養生材でシラン処理した疎水材を地中に設置した場合、遮水層として疎水性がかなりの期間の保たれることが期待される。

## (2) 最終年度における真砂土遮水層の測定例

ここでは、遮水層が真砂土の場合、2022 年 5 月 1 日 0:00 から 2023 年 1 月 23 日 0:00 までの雨量計のデータと土壌水分計のデータを示している。

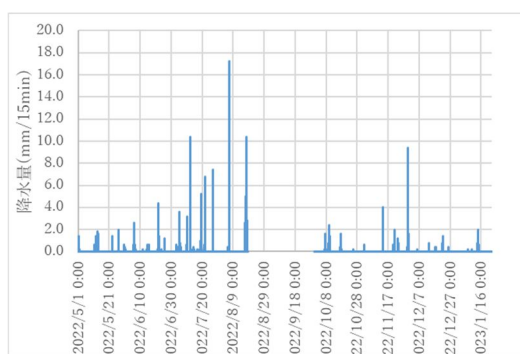


図-6 雨量計による降水量の測定結果

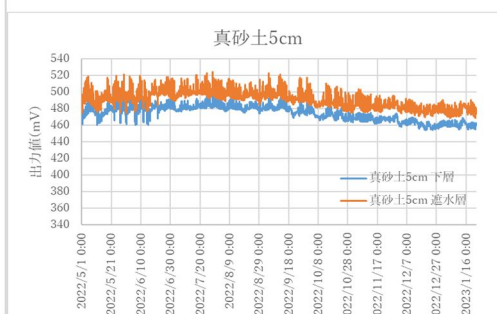


図-7 遮水層真砂土の土壌水分計のデータ

土壌水分計、雨量計ともに 15 分ごとの測定である。測定期間中の 15 分間最大雨量は 17.2mm であるから測定期間中の 1 時間最大雨量は約 69mm であると考えられる。約 9 か月の調査期間で土壌水分計の数値に目立った上昇は見られなかった。また、今回の実験のように METER 社のデータロガーを使用している場合、体積含水率は出力値によって求められるため、測定期間中は体積含水率もおおよそ一定であったことが分かる。これらの結果から発生した降水の浸透を真砂土の遮水層が防いだものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 B.S.Kim, D.Ren, S.W.Park, S.Kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Establishing selection criteria of water repellent sandy soils for use in impervious layer of engineered slope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.conbuildmat.2021.123551	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 該当する

1. 著者名 B.S.Kim, M.Hatakeyama, S.W.Park, H.S.Park, Y. Takeshita, S.Kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Assessment of Water Retention Test by Continuous Pressurization Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geotechnical Testing Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1520/GTJ20190410	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 加藤正司, KIM Byeong-Su, LOHANI Tara, 津田航匡, 村田祐輔, PARK Seong-Wan	4. 巻 63
2. 論文標題 疎水性地盤材料の高性能遮水層への応用に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 建設工学研究所論文報告集	6. 最初と最後の頁 11-22
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金 秉洙	
2. 発表標題 盛土法面の不浸透層の地盤材料としての撥水土の適用に関する数値解析	
3. 学会等名 地盤工学会	
4. 発表年 2021年	

1. 発表者名 加藤正司
2. 発表標題 疎水材を用いた高遮水層の開発のための実証試験
3. 学会等名 地盤工学会
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
研究協力者	金 秉洙  (Kim Byoung-Su)	壇国大学・土木環境工学科・准教授	
研究協力者	ロハニ ターラ  (Lohani N.Tara)	神戸大学・都市安全研究センター・技術職員  (14501)	

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