



疎水性スラグの遮水性評価に関する実験的研究

岳, 千皓
胡, 德普
加藤, 正司
ロハニ, ニディ タラ

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 29:208-218

(Issue Date)

2025-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100496665>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496665>



疎水性スラグの遮水性評価に関する実験的研究

Experimental study on evaluation of impermeability of hydrophobic slag

岳 千皓¹⁾
Yue Qianhao
胡 德普²⁾
Hu Depu
加藤 正司³⁾
Kato Shoji
Tara Nidhi Lohani⁴⁾

概要: 降雨は不飽和状態にある斜面内部のサクションを低下させ崩壊を誘発する。このため、降雨浸透を防ぐ対策工がなされる場合もあるが、高コストであり環境負荷が大きいことが問題である。一方、疎水化処理がなされた地盤材料は、そのような問題を解決する可能性が期待される。本研究では、疎水化処理を行ったスラグ試料(以下;疎水スラグ)の遮水性能を評価するため、数種類の室内試験を実施して浸透に対する遮水性能を検討した。水滴侵入時間試験および接触角測定試験から、疎水スラグは基本的な材料特性として高い疎水性を示すことが確認された。水浸入水頭試験から、疎水スラグの乾燥密度を高めることで耐浸透性が向上することが示唆された。その結果、湿潤履歴を考慮したバリアが浸透を抑え、初期含水量が流動経路を左右することを確認した。また、光ファイバーを用いた土カラム浸透試験から、疎水スラグによる遮水層が浸透流に対し十分な遮水効果を持つことが示された。

キーワード: スラグ, 疎水化処理, 遮水性能, 光ファイバー

1. 研究背景および目的

近年、持続的かつ強度の高い降雨に伴う斜面災害が頻発しており、その主な要因の一つとして、降雨に伴う地盤内のサクションの低下が挙げられる。不飽和土のサクションが低減すると、土のせん断強度が低下し、結果として斜面の不安定化や斜面崩壊を引き起こす可能性が高まる。従来の斜面防護対策は、雨水の浸透を抑制することでサクションの低下を抑制し、斜面の安定性を向上させることを目的としているが、それらは施工コストが高く、維持管理の負担が大きいという課題を抱えている。加えて、コンクリートや防水シートなどの使用に伴う環境負荷の増加も懸念される^{1, 2)}。

そこで、本研究では人工的に疎水性を付与した土質材料の活用に着目し、降雨に対する新たな斜面安定化技術の開発を目指すものである。疎水性土質材料を適用することで、材料内部への水分浸透を抑制し、長期的かつ安定的な斜面保全が可能となると期待される³⁾。

本研究の最終的な目的は、以下の3点に要約される。1.疎水性土の選定方法の標準化: 本研究では、スラグを対象とし、疎水化処理を施した上で、その疎水性を評価する。具体的には、水滴浸透時間、接触角、および水浸入水頭試験などの指標を用いて、適切な疎水性土の選定基準を確立することを目的とする。2. 土カラムの定水位下の浸透特性試験による遮水性能評価: 土カラム試験を実施し、定水位下での水の浸透過程を異なる遮水層の条件により検討する。これにより、疎水性土の適用が降雨時の水分移動および斜面安定性に及ぼす影響を定量的に評価する。3.リアルタイム水分監視システムの開発: 低コストで高精度なプラスチック光ファイバー (Plastic Optical Fiber; POF) 監視システムを開発し、リアルタイムでの水分動態計測を可能にする。これにより、現場における迅速かつ高精度なモニタリングを実現し、降雨時の斜面安定性の評価に貢献する。

2. 疎水性土について

疎水性土は、固有の撥水性により従来の土と大きく異なる水理特性を示す特別な土質材料である³⁾。疎水性を有する土粒子は水滴の付着や浸透に対して強く抵抗し、その分布や流動形態は通常の土と顕著に異なったものとなる。図 1 および図 2 は、疎水化処理をしない砂粒子(親水性砂粒子)と疎水化処理を行った砂粒子(疎水性砂粒子)における保水状況を示したものである。親水性砂粒子では毛管力により粒間子に水が矢印で示されるようにメニスカスとして存在するのに対し、疎水性砂粒子では矢印で示されるように粒子表面に独立した水滴が付着する形で保持されていることが分かる⁴⁾。

自然状態にある多くの土材料は親水性であるが、植生の分解、森林火災、石油汚染などによる有機物質の化学的作用を受けた天然の疎水性土も存在する。疎水性土の場合、土粒子に対する水滴の接触角や土粒子表面エネルギーが撥水性の強度を左右し、その結果、浸透・蒸発、侵食、水文学的バランスなどに大きな影響を及ぼす。しかし、自然に付加された疎水性は不安定な場合が多く、実務的に利用する場合には制約がある。そこで、人工的に均質かつ制御可能な疎水性土を作製し、その特性を十分に把握することが実務へ適用するためには不可欠となる⁵⁾。こうしたメカニズムの解明と適用方法の開発は、雨水浸透制御など地盤工学的課題への新たな解決策をもたらす可能性が高いと考えられる。

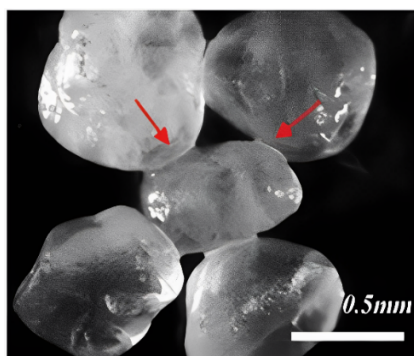


図 1 親水性砂粒子間のメニスカス⁴⁾

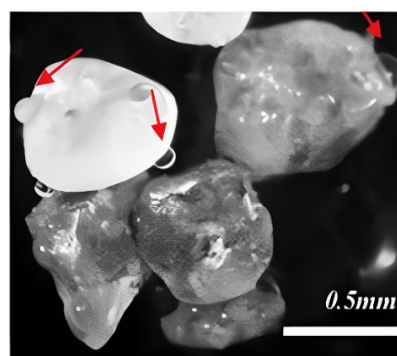


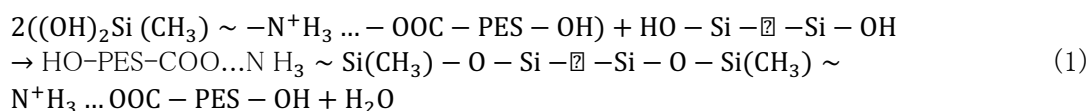
図 2 疎水性砂粒子表面の水滴⁴⁾

3. 疎水スラグ材料の作製方法

本研究では、市販のコンクリート被覆養生材⁶⁾(以下、被覆養生材)を水で希釈した溶液(被覆養生材溶液)を用いて、土試料を疎水化処理する方法を採用した。被覆養生材は加熱やエネルギー線照射を要さず、ケイ素系化合物を架橋剤として利用することで安全・簡便に水分散系ポリエステルを硬化させることができる。

水系ポリエステルは界面活性剤を用いなくても水に分散し、特殊な硬化剤との組み合わせで常温硬化が可能な高分子素材である。主な特長としては、(1)低温・短時間で施工できる、(2)高い密着性と耐摩耗性を有する、(3)疎水性の高い基材による優れた耐水性・耐酸性有するなどの点が挙げられる。

被覆養生材溶液に土試料を浸漬すると、硬化時に土粒子表面がコーティングされる。たとえば珪砂を含む試料では、加水分解したシランカップリング剤の水酸基が珪砂中の SiOH と縮合し、砂やガラスなどケイ素を有する材料に存在するシラノール基(Si-OH)とも結合することで、以下の化学反応式のように疎水性が付与される⁴⁾。



本研究でのスラグ試料の疎水化処理は、次の手順で実施した。まず、水と被覆養生材を重量比 50:1 で混合し、被覆養生材溶液を作製した。次に、ビーカー内でこの溶液にスラグ試料を浸し、約 3 分間攪拌を行った。なお、この際の混合比(水 : 被覆養生材 : スラグ試料)は 50 : 1 : 50 とする。その後、攪拌後の混合物を 1 日間静置し、ビーカー内に残留した溶液を除去したのち、試料を完全に乾燥するまで自然乾燥させた。

4. 実験に用いた試料

実験に用いた試料として、粒状高炉スラグ (Granulated Blast Furnace Slag; GBFS) および DL クレーを用いた。GBFS は生鉄の製造過程で生じる副産物であり、単位体積質量は 1.19 g/cm^3 である。最適含水比は 14.1% で最大乾燥密度 1.467 g/cm^3 を示し、土粒子比重 (G_s) は 2.67 g/cm^3 である。

一方、DL クレーは主にシルトから構成され、粘土含有量が約 10% である。土の内部摩擦強度指標として一軸圧縮強度 $c_u = 4.58 \text{ kPa}$ 、土粒子比重 $G_s = 2.65$ を有し、粒度特性は平均粒径 $D_{50} = 0.0171 \text{ mm}$ 、10% 粒径 $D_{10} = 0.004 \text{ mm}$ である。

5. 水滴浸透時間試験、接触角試験および水浸入水頭試験について

本研究では、水滴浸透時間 (Water Drop Penetration Time: WDPT) 試験、接触角 (Contact Angle: CA) 試験、および水浸入水頭試験 (Water Infiltration Head: WIH) 試験⁷⁾を行い、材料特性としての基本的な疎水性能を検討した。WDPT 試験は操作が簡便で短時間に測定が可能のため、土質材料や多孔質材料の疎水性を把握する際に一般的によく用いられている。具体的には、一定体積の純水を試料表面に滴下し、水滴が完全に浸透するまでの時間 (浸透時間) を計測することで、材料の疎水性能を定量的に評価する。CA 試験では、水滴がほぼ球状をなすと仮定し、平面的に散布した材料の表面上の水滴と水平面との接触角を測定した。この手法によって得られる接触角に基づき、材料表面が示す疎水または親水の度合いを評価することができる。最後に、WIH 試験では、試料に一定の水頭を与えて静置し、試料内に浸透が生じるときの水頭である臨界水頭 (WIH) を求めることで、材料の遮水性を評価する。斜面や埋立地などの遮水設計においては、材料の乾燥密度 (ρ_d)、配合や厚さ (Z_L) などを変化させつつ WIH 試験を行い、得られた WIH 値を評価指標として、遮水性能を確認すると同時に、実際の遮水層設計や材料選定の基準とすることができる。

6. 光ファイバーを用いた土カラム浸透試験について

本研究では、プラスチック光ファイバー⁸⁾ (Plastic Optical Fiber; POF) センサーを用いた土柱浸透試験を実施し、疎水性土壌による遮水層が浸透特性や土壌含水量分布に及ぼす影響を評価するとともに、強降雨による斜面崩壊を防止する手段としての POF センサーの有効性を検証した。本実験では、図 3 に示すキャップ型 RR プロブ (Cap-type RR Probe) を採用し、テーパ状のアクリル製キャップ内に 2 本の光ファイバーを配置した。1 本 (Fiber 1) は光の送信を、もう 1 本 (Fiber 2) は反射光の受信を担当する。光ファイバーセンサーの光路としては、図 3 および 4 に示されるように、光源から発せられた光が Fiber 1 を通ってキャップ表面 A に入射し、一部が屈折して表面 B に到達する。その後、表面 B からの反射光が再度キャップ内部を通過し、その一部が Fiber 2 へ戻り光学受信器で解析される。こうした測定方法によって、光ファイバーにより土壌中の水分をより安定かつ正確に測定できる。

キャップ型 RR プロブの校正試験は、次のように行った。内径 50 mm、高さ 50 mm の円柱容器内に DL クレー試料を締固めて供試体を作製した。乾燥密度 (ρ_d) は 1.30、1.40 および 1.50 g/cm^3 とし、それぞれ最初に飽和度 10% となるように試料を含水比調整後に締固めた。その後、光ファイバーを所定の位置に設置し、その後、供試体に加水して飽和度を 20% から順に 90% まで段階的に増加して測定を行った。各段階での光ファイバーの測定値が平衡状態となったのちに、加水して次の段階に移行した。こうして得られた、各乾燥密度での測定値～水分量関係はほぼ線形関係となったので、その直線の傾きから POF センサーの水分量に関する校正係数を決定した。

次に、図 5 に示すような、直径 158 mm、高さ 250 mm の円筒型土柱容器を用いて土カラム供試体の浸透試験を行った。試料には DL クレーを用い、容器内に最大乾密度の 85% (1.30 g/cm^3) で数層に分けて締固めて高さ 200 mm の供試体を作製した。なお、容器側壁には直径 2 mm の通気孔を 24 箇所設け、PTFE フィルターを貼付して土や水の流出を防止しつつ空気のみを排出できるようにした。図 6 に示すように、試験時には土柱上部に 30 mm の水頭を保持した。底面からの高さが 50 mm と 150 mm の位置にそれぞれ水分量測定用の EC5 センサー (EC5-1, EC5-2) を設置し、その周囲に 3 本ずつ (計 6 本) の光ファイバー (番号 1 ~ 6) を配置して、別途、水分量を測定した。水頭により生じる浸透流が土柱内部を下方に進む過程と、底部から上方へ拡大する飽和帯が下層センサーを浸潤し終えるまでの

過程を連続的に観測し、土壌内の含水量分布や飽和領域の拡大状況を詳細に把握した。

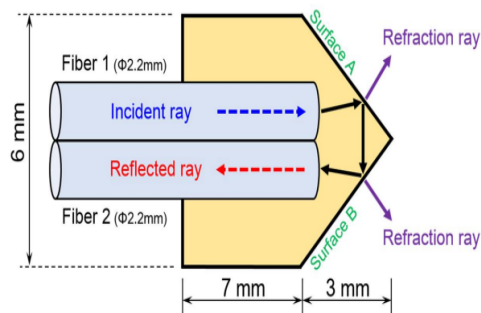


図3 キャップ型 RR プロブの構造と光路

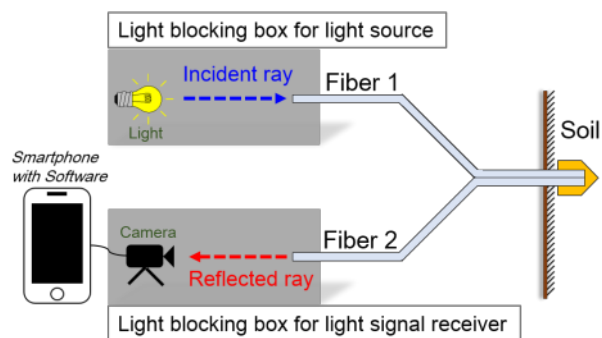


図4 RR プロブによる測定方法

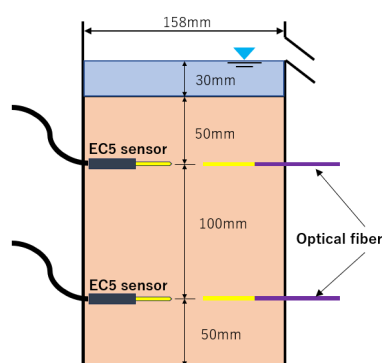


図5 土カラム浸透試験の概略図

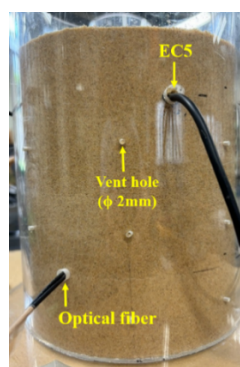
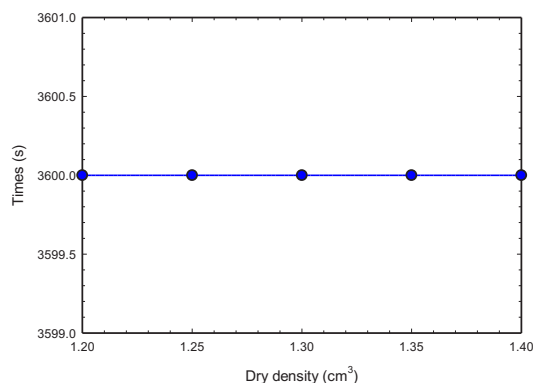


図6 土カラム浸透試験での浸透の様子

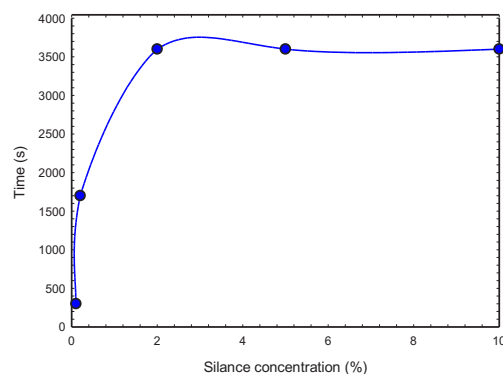
7. 試験結果および考察

(1) 水滴侵入時間試験

図7(a)、(b)は、供試体の乾燥密度と試料作製時の被覆養生材溶液濃度が浸透時間に与える影響を示したものである。図7(a)に示されるように、疎水性スラグは乾燥密度の違いにかかわらず浸透時間が常に3600秒を超え、極めて高い疎水性を示した。さらに、乾燥密度 1.25 g/cm^3 の疎水処理試料について、図7(b)に示すとおり浸透時間～被覆養生材溶液濃度の関係を検討した。その結果、疎水剤濃度が2%未満では浸透時間が顕著に低下し、一方で2%を超えると浸透時間が3600秒を常に上回ることが判明した。これらの結果から、スラグ試料は乾燥密度によらず非常に高い疎水性を示すと同時に、疎水化処理時の被覆養生材溶液濃度が疎水性を左右する主要因であることが示唆された。特に、高濃度の場合には長時間にわたり浸透を抑制できる可能性が高いと考えられる。



(a)乾燥密度～浸透時間関係

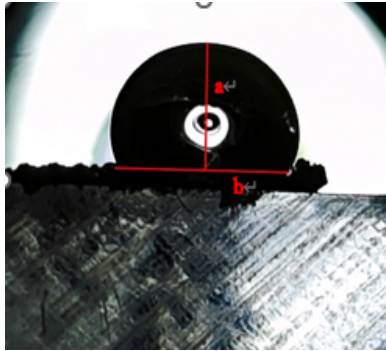


(b)被覆養生材溶液濃度～浸透時間関係
(乾燥密度 1.25 g/cm^3)

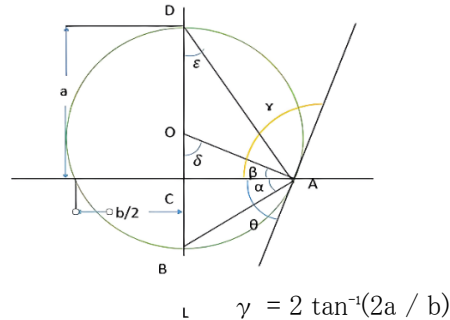
図7 乾燥密度と被覆養生材溶液濃度が浸透時間に与える影響

(2) 接触角測定試験

材料の疎水性を評価する際には、水滴が材料表面上で形成する接触角が重要な指標となる。本研究では、図 8(a)に示すように材料表面上の水滴を撮影して、図 8(b) に示す水滴の球面形状を球と仮定した 2θ 法を用いて、接触角を定量的に求めた。撮影した画像から垂直長 a と水平長 b をソフトウェアを用いて測定し、 2θ 法により誘導される $\gamma = 2 \tan^{-1}(2a / b)$ の関係に基づき、接触角 γ を算出した。



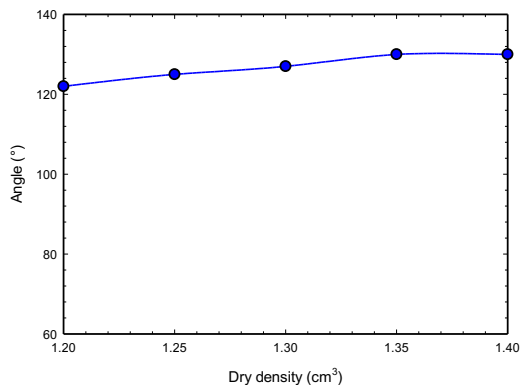
(a) 接触角の測定例



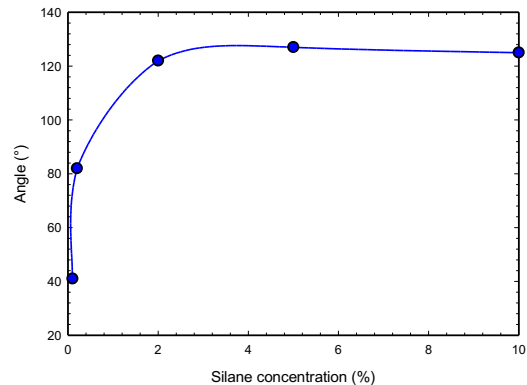
(b) 2θ 法による接触角の決定

図 8 接触角の撮影例と 2θ 法による接触角の決定

図 9(a)、(b) は、乾燥密度～接触角関係、および 1.25 g/cm^3 の疎水スラグ試料について疎水処理時の被覆養生材溶液濃度～接触角に与える影響を示したものである。図 9(a)に示されるように、乾燥密度の増加に伴い接触角はわずかに増加する傾向を示した。また、図 9(b)に示されるように、被覆養生材溶液濃度の増加に伴い接触角が増加し、濃度が 2% を境に 120° 以上を維持することが確認された。すなわち、2% を超える被覆養生材溶液濃度では接触角が一貫して 120° を上回るのに対し、2% 未満では急激に低下する傾向が認められた。これらの結果から、被覆養生材溶液濃度としては 2%以上であれば十分な疎水性が得られるものと判断される。



(a) 乾燥密度～接触角関係



(b) 被覆養生材溶液濃度～接触角関係

図 9 乾燥密度と被覆養生材溶液濃度が接触角に与える影響 ($\rho_d = 1.25 \text{ g/cm}^3$)

(3) 水浸入水頭試験

本研究では、乾燥密度と 水浸入水頭 (Water Infiltration Head; WIH) の関係を検討するため、1.20、1.25、1.30、1.35、1.40 g/cm^3 の乾燥密度に締固め高さ 5.0 cm の供試体を用いて WIH 試験を実施した。次に、同様の乾燥密度条件下で疎水性スラグと未処理スラグの混合材料を用いて、試料の混合比と WIH との関係を検討した。試験はいずれも室温 $20 \sim 24^\circ \text{C}$ 、相対湿度 46～66% の室内環境下で行われた。

WIH 試験の手順は以下のとおりである。(1) 内径 5.0 cm のアクリル製シリンダー底部にフィルターペーパーを敷き、通気を確保した状態で所定の乾燥密度で高さ 5.0 cm に試料を締固める。(2) 試料表面を乱さないよう注意しながら、1.0 mm の高さに相当する水を試料上端に静かに注ぎ、試料内へ浸透が

ないかを 10 分間観察する。この作業を、浸透が確認できるまで繰り返す。(3) 試料に水が浸透し始めたときの水頭 (h_w) を、WIH として定義する。

図 10 は、乾燥密度と WIH の関係を示している。結果から、疎水スラグの乾燥密度を高めることで耐浸透性が向上することが示唆される。これは、乾燥密度の増加により空隙率が低下し、粒子の詰まりが良好になることで疎水バリアが強化されるためである。そのため、疎水スラグの実務的適用においては、適切な乾燥密度の設定が遮水効果の向上に不可欠となる。総合的に見て、WIH 試験は疎水スラグの性能を評価するうえで有効な手段である。材料が耐え得る最大水頭を把握することにより、斜面遮水層の設計や施工に関する判断が可能となる。図 10 に示す結果から、乾燥密度の増加が材料の疎水性を強化し、耐水性を向上させることが確認された。

図 11 は、乾燥密度を 1.25 g/cm^3 に固定して、試料高さ(遮水層厚さ)を 0.5 cm から 0.5 cm 刻みで増加して WIH 試験を実施した場合の、WIH と遮水層厚さの関係を示したものである。この結果から、遮水層厚さが 2.5 cm から 5 cm まで増加しても、WIH はほとんど変化しないことが分かる。よって、遮水層厚さは 2.5 cm 程度でも、高い遮水性能が得られるものと考えられる。

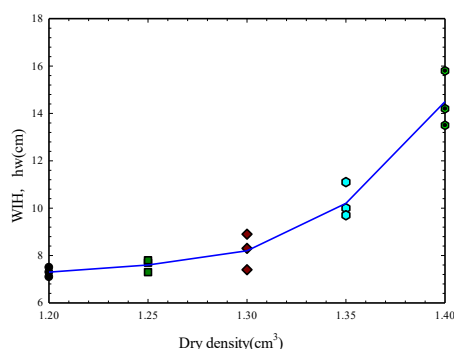


図 10 乾燥密度と WIH の関係

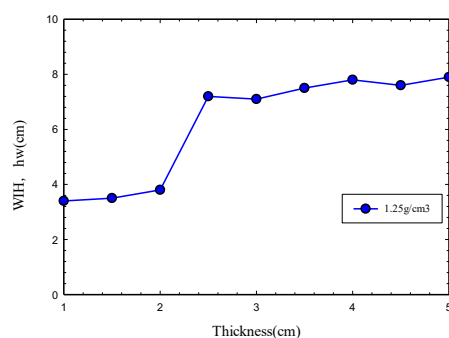


図 11 遮水層厚さと WIH の関係

さらに別途試験を行い、疎水スラグと未処理スラグの混合材料を用いて、混合比(重量比)が浸透挙動に及ぼす影響を検討した。表 1 はその結果を示している。未処理スラグの割合が増加するほど WIH が著しく低下することが分かった。具体的には、すべてが疎水スラグの場合(10:0)の平均 WIH は約 $7.73 \text{ cmH}_2\text{O}$ であるのに対し、2:8 の比率では約 $1.07 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、すべてが未処理スラグのみ(0:10)の比率では約 $0.03 \text{ cmH}_2\text{O}$ まで低下した。これらの結果から、疎水スラグと未処理スラグの混合土において、疎水スラグの割合の増加が水分浸透を大幅に抑制し、混合土の疎水特性を顕著に強化することが明確に示された。

表.1 異なる混合比でのスラグの WIH 結果

No.	混合比 (疎水スラグ:未処理スラグ)					
	10:0	8:2	6:4	4:6	2:8	0:10
	水浸入水頭試験による WIH(cm)					
1	7.8	7.7	7.1	5.8	1.2	0.1
2	7.9	7.2	6.9	5.4	1.1	0
3	7.5	7.6	7.3	5.6	0.9	0
平均値	7.73	7.50	7.1	5.6	1.07	0.03

(4) 光ファイバーを用いた土カラム浸透試験

図 12 は 図 5 に示した状況で実施した、DL クレー を用いた土カラム浸透試験における EC5 および POF センサーの測定結果を示したものである。各図中、ドットが測定値、同色の線が回帰分析結果、赤線が EC5 の計測結果であり、図中のオレンジ線は飽和体積含水率に基づく飽和状態を示している。

DL クレーでは浸透速度が遅く、上層の EC5 センサーが含水比の変化を検出するまでに約 4 分を要した。EC5 の測定領域は、センサー周囲 40 mm の楕円柱の領域である。このため、湿潤前線が上層の EC5 センサーの測定領域上端に達すると計測値が変化し始めて、下端まで達すると計測値が安定

するものと考えられる。その後、下層の EC5 センサーが同様な変化を示したものと考えられる。一方、POF は特定点での水分変化を主に捉え、湿潤前線がセンサー位置を通過した後も、直下部は不飽和となり浸透が継続する傾向を示している。最終的には EC5 と POF の両方が飽和状態に対応して安定し、相互に良好な一致を示した。なお、上部では水頭が常にかかっているため土層が不安定になりやすく、計測値に若干の揺らぎがみられるものの、下層の計測にはそのような影響は及ばなかったと考えられる。

本試験結果から、EC5 および POF センサーは測定領域の違いによりそれぞれ異なる浸透挙動を捉えつつ、最終的には飽和近傍で整合性のある値を示し、土柱内の含水量変化を包括的に把握できることが確認された。

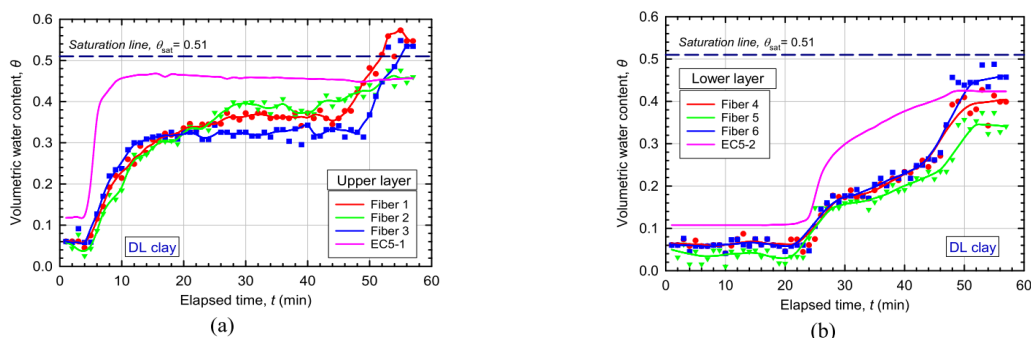


図 12 DL クレーの土柱浸透試験の結果: (a) 上層と(b) 下層

(5) POF を用いた土カラム浸透試験によるシラン処理スラグの透水性の評価

a) 疎水スラグ層の設置位置を変えた場合

ここでは、25 mm の層厚の疎水スラグ層を図 13 および 14 に示すように、供試体上端面から 70 mm と 130 mm に設置した場合について、(4) 節で検討したのと同様な土カラム浸透試験を行い、遮水層の設置深さについて検討を加えた。図 12 に示した疎水スラグ層を設置していない場合では、上部からの通水後 4 分程度で 1 層目の EC-5 センサーおよび光ファイバーセンサー(4-6 番)に水分が到達し、DL クレーが効率的に水の伝播を促進することが確認された。一方、図 13 に示すように、DL クレー中に厚さ 25 mm、WIH= 73 mm、最大接触角 $\theta_{\max} = 145^\circ$ の疎水スラグ層を深さ 70 mm に設置すると、図 15(a)に示すように上層は 6 分程度でセンサーに水が達しているが、図 15(b)に示すように、下層では DL クレーは乾燥状態を保つことが示された。別途、水頭を徐々に上昇させながら観測を行ったが、水頭が 73 mm を超えない限り疎水層を通過できないことが確認された。

図 16(a), (b)は疎水スラグ層を供試体上端面から深さ 130 mm に設置した場合(図 14)の上層と下層の測定結果をそれぞれ示している。浸透水頭が層の WIH を上回ると水が疎水スラグ層を突破し、非設置時と同様の速度で下層が湿潤化していることが分かる。しかし、疎水スラグ層内部の体積含水率は上昇が緩やかで、依然として部分的に不飽和状態にとどまり、明確な飽水帯は形成されない傾向を示している。一方、図 12 に示すような遮水層を設けない場合や、別途実施した遮水層として未処理スラグを用いた場合は、湿潤前線がほぼ均一に伝播し、約 50 秒で湿潤化が完了することが確認された。これらの知見から、疎水材の有無や設置位置は、浸透挙動を大きく左右し、水頭が疎水層の WIH を超えない限り、下層の湿潤化を効果的に抑制できることが示唆される。

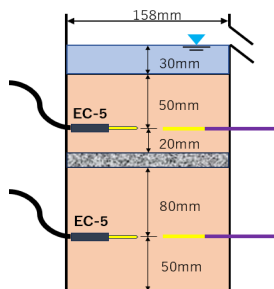


図 13 疎水スラグが上端面から 70mm の位置に設置した場合

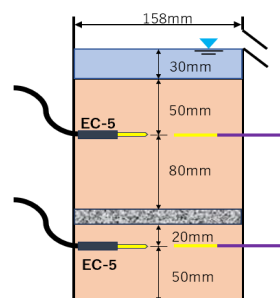
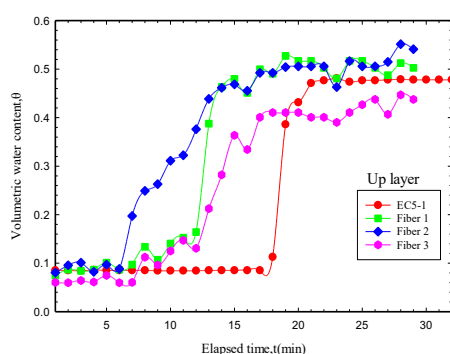
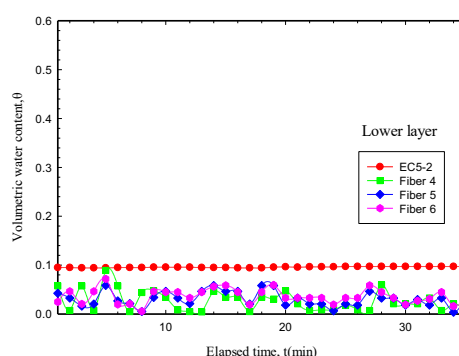


図 14 疎水スラグが上端面から 130mm の位置に設置した場合

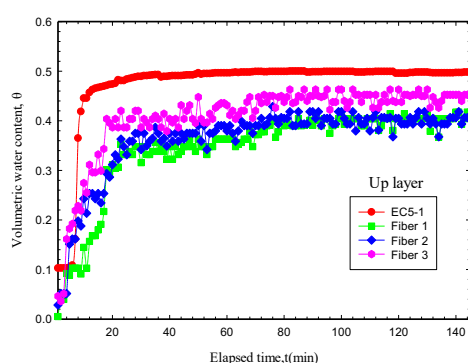


(a) 上層の測定結果

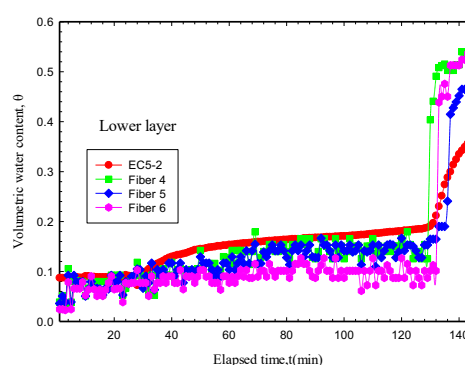


(b) 下層の測定結果

図 15 疎水スラグを上端面から 70mm の位置に設置した場合の測定結果



(a) 上層の測定結果



(b) 下層の測定結果

図 16 疎水スラグを上端面から 130mm の位置に設置した場合の測定結果

b) 遮水層に疎水性スラグと未処理スラグを混合した材料を用いた場合

疎水化スラグ層の導入は土壌内の水分移動を大きく変化させる。このため、疎水スラグ 100%の遮水層を作製することが遮水特性を向上させると考えられる。しかし、疎水スラグは撥水性を持つため、スラグの水硬特性が十分に発揮されない可能性がある。そこで、未処理スラグと疎水スラグを混ぜることにより、スラグの水硬特性が発揮されて斜面の補強材としての効果が期待されるが、遮水性能が低下することが予想される。そこで、疎水化処理を行わない未処理スラグを混ぜることにより、遮水性能がどのように変化するのかについて検討を加えた。疎水スラグの割合が 100% (接触角 $\theta_{\max} = 145^\circ$, WIH = 73 mm) の場合と 40% (接触角約 140°) の場合について、図 17 に示すような土カラムを作製して試験を行った。いずれも接触角の測定結果から疎水性を示すことが確認されるが、実際の浸透挙動は異なるものと考えられる。とくに接触角のみでは実際の地下水移動を十分に説明できず、WIH やコラム試験結果が疎水性の実質的な水理応答を把握するうえで有効である。

図 18、19 は疎水性スラグの割合が 100%の場合の結果を示している。図 18(a)に示されるように、遮水層がない状態である上層では約 10 分で高い含水比 (VWC ≈ 0.5) に達し、短時間でほぼ飽和状態に近づいていることが分かる。一方、図 18(b)に示されるように、遮水層の下に位置する下層は顕著な変化が見られない。これに対し、疎水スラグの割合が 40% 程度の場合、図 19(a)に示されるように遮水層がない状態である上層の浸透は早いものの、図 19(b)に示されるように遮水層の下に位置する下層の湿潤化が大幅に遅れ、水頭が遮水層の WIH (73 mm) を超えた段階で急激な水分上昇が観測されている。しかし、含水率は完全には飽和状態とならず、不飽和状態が持続していることが分かる。

総括すると、疎水層の有無や処理割合により、上・下層の水分移動挙動が大きく変わり、WIH は接触角以上に遮水バリアの水理特性を反映する重要な指標となるものと考えられる。

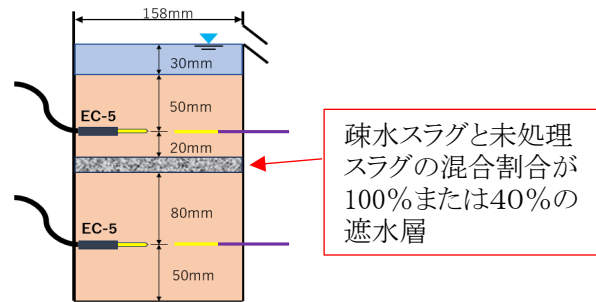


図 17 疎水性スラグと未処理スラグを混合した材料を用いた場合の遮水層の設置位置

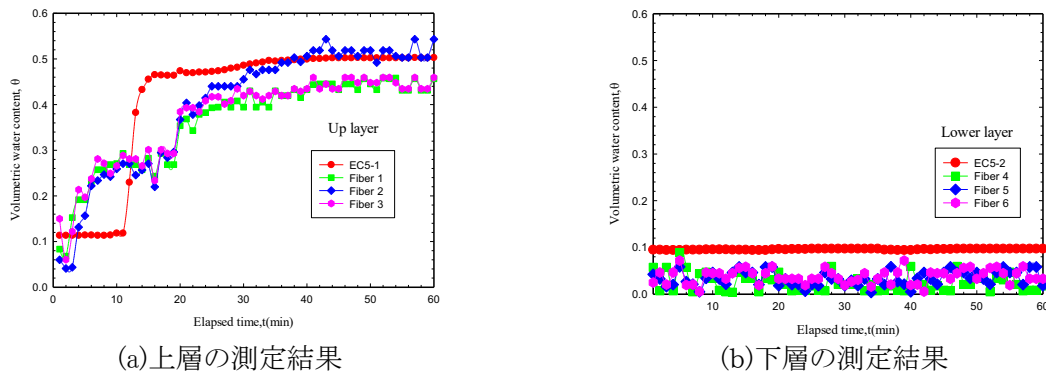


図 18 疎水性スラグの混合比が 100%の場合の測定結果

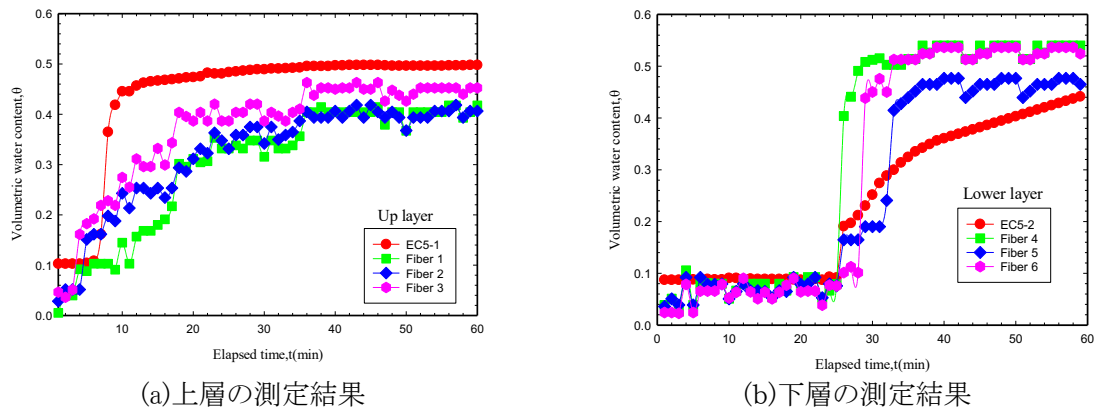


図 19 疎水性スラグの混合比が40%の場合の測定結果

8. 結論

本研究では、疎水処理がなされたスラグ試料の遮水性能を評価するため、水滴浸透時間試験、接触角試験、水浸入水頭試験、および光ファイバーを用いた土カラム浸透試験を実施して、浸透に対する遮水性能を検討した。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 水滴浸透時間試験結果から、疎水スラグ作製時の疎水剤濃度が 2%以上になると、一定の疎水性が得られることを確認された。また、水浸入水頭試験結果から、乾燥密度の増加が材料の疎水性を強化し、耐水性を向上させることが確認された。さらに、層厚も水浸入水頭に影響することが示された。
- 2) 疎水スラグと未処理スラグの混合比が浸透挙動に及ぼす影響を検討した。疎水スラグの混合割合が増加すると水浸入水頭は大幅に低下して浸透を遅延させる効果を持つことが確認された。疎水材の有無や設置位置は、浸透挙動を大きく左右し、水頭が疎水層の WIH を超えない限り、下層の湿潤化を効果的に抑制できることが示唆された。
- 3) 土カラム浸透試験の結果から、POF センサーは EC-5 センサーよりも局所的な水分変化を精密に計測することが可能であり、実験や小規模プロジェクトでの有用性が高いことが示された。また、遮水層としての疎水性スラグの水浸入水頭が、材料特性としての接触角よりも実際の浸透挙動を適切に反映し、

疎水材の遮水性能を評価する指標として有効であることが示唆された。今後は、フィールド規模での WIH 評価や長期耐久性検証などが課題となるものと考えられる。

参考文献

- 1) 金 秉洙, 渡 優樹, 加藤 正司, 竹下 祐二, 河川堤防材料の細粒分含有率が浸透特性に及ぼす影響, 地盤と建設, 地盤工学会中国支部論文報告集, 34, 1, 45-5, 2016.
- 2) 金 秉洙, 加藤 正司, Seong-Wan Park, 竹下 祐二, 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, 地盤工学ジャーナル, 14, 4, 343-352, 2019.
- 3) De Rooij, G. H., Ritsema, C. J., Water repellency in natural soils: A review of causes and consequences, *Hydrological Processes*, 14, 7, 1129-1137, 2000.
- 4) Kim, B.S., Evaluation of the Water Shielding Performance of a Capillary Barrier System through a Small-Scale Model Test, *Applied Sciences*, 11, 5231, 2021.
- 5) Chandler, R. J., Engineering synthetic geomaterials for water repellency, *Geotechnical Testing Journal*, 28, 3, 253-265, 2005.
- 6) Kim, B.S., Ren, D., Park, S.W., Kato, S., Establishing selection criteria of water repellent sandy soils for use in impervious layer of engineered slope, *Construction and Building Materials*, 293, 123551, 2021.
- 7) Kim, B.S., Kobayashi, H., Kato, S., Park, S.W., Takeshita, Y., Effect of Fine Fraction Content in Soil Materials on Stability of River Dike, *Proceedings of Chugoku Branch of Japanese Geotechnical Society*, 35, 1, 2017.
- 8) 杉井 良平, 芥川 真一, 松村 匡樹, プラスチック光ファイバーと携帯端末を用いた地盤への水分浸透状況の観測手法の検討, 土木学会論文集 C(地圏工学), 78, 4, 355-368, 2022.

筆者:1) 岳 千皓、神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻、学生;2) 胡 德普、神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻、学生;3) 加藤 正司、神戸大学大学院工学研究科、准教授;4) Tara Nidhi Lohani、神戸大学都市安全研究センター、技術職員

Experimental study on evaluation of impermeability of hydrophobic slag

Yue Qianhao

Hu Depu

Kato Shoji

Tara Nidhi Lohani

Abstract

Prolonged, intense rainfall can destabilize unsaturated soils by significantly lowering matric suction, often triggering slope failures. Conventional measures mitigate infiltration but are expensive, maintenance-intensive, and may pose environmental concerns. As an alternative, artificially hydrophobic soils offer uniform, durable water repellency, though their behavior under repeated wetting remains insufficiently characterized.

This study addresses three objectives: (1) standardizing hydrophobic soil selection by treating slag and assessing its water repellency via water drop penetration time, contact angle, and infiltration height tests, (2) investigating rainfall-driven infiltration through column studies experiments at multiple scales, and (3) developing a low-cost plastic optical fiber (POF) system for real-time moisture monitoring. Results show that calibrated hydrophobic soil barriers significantly reduce infiltration, with initial moisture content strongly influencing flow paths. Furthermore, POF sensors accurately capture transient moisture variations, offering early-warning capabilities.

©2025Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.