

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

Fundamental Study on the Application of Hydrophobic Geomaterials to Highly Impervious Layers

加藤 正司 金 秉 洙 Tara Lohani
 Shoji Kato Byeong-Su Kim
 津田 航 匡 村 田 祐 輔 Seong-Wan Park
 Kazumasa Tsuda Yusuke Murata

1. はじめに

自然状態の土は、通常は水に濡れやすい親水性（水を含む性質）を持っている。しかし、動植物の腐食による有機汚染物質の生成（環境の復元過程）、山火事のような自然災害、原油やオイル流出のような環境汚染事故などの影響によって疎水性（水と混ざりにくい性質）を持つ土へと変化する場合があります^{1),2)}。そのような疎水性を有する地盤材料は、水との親和力が低いため、土の表面で撥水性（水をはじく性質）を持つことが特徴である³⁾（写真1）。上に述べたような環境の変化により、疎水性をもつ土粒子の表面には、両親媒性分子（分子内に疎水性の部位と親水性の部位を持つ分子）の疎水性をもつ端部が土の表面を覆うように吸着する。図1は、そのメカニズムを示した概念図であり、このようにして水分子が反発力を受け、土粒子は撥水性を持つことになる。写真2は、親水性砂および疎水性砂の表面に水がどのように分布しているかを Kim ら⁴⁾ が顕微鏡により観察したものである。写真2から、親水性砂の場合はメニスカス水が土粒子接点によく分布している様子が分かる。一方、疎水性砂の場合、粒子表面が水と反発する作用のため、水は水玉の状態になって土粒子表面に付着している様子が観察できる。よって、このような親水性砂と疎水性砂の水の分布状況の違いは、保水特性や力学特性に違いをもたらすものと考えられる。例えば、不飽和状態にある疎水性地盤材料は、写真2に示されるように土中水は水滴として存在するため、親水性材料の不飽和状態のように、メニスカス水によるサクシオンにより生じる粒子間付着力は期待できない。このため、通常の親水性地盤材料の不飽和状態にみられる力学特性とは異なる可能性が考えられる。例えば金ら⁵⁾は、人工的に作製した疎水砂を用いて不飽和状態でのせん断挙動について実験的に検討を行い、親水性砂と疎水性砂との間に有意な強度特性の違いがあることを明らかにしている。



写真1 疎水性をもつ豊浦砂上の水
（水滴は幅約5mm）

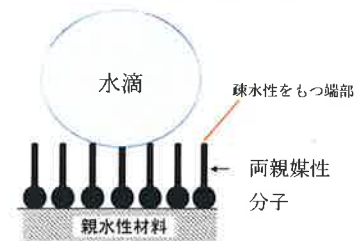
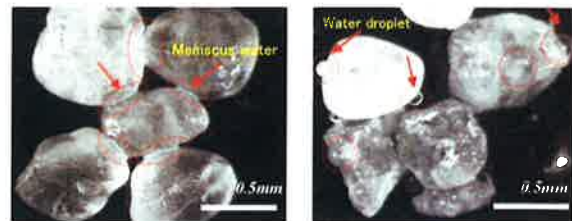


図1 親水性材料が疎水性を持つメカニズムの概念図



(a) 親水性砂

(b) 疎水性砂

写真2 親水性砂と疎水性砂の表面に水が付着する様子⁴⁾

このような疎水性地盤材料に関して、地盤工学的な検討を行った研究データは少ないのが現状である。しかし、疎水性地盤材料の物理特性や力学特性・水理学特性などを把握することより、その特殊な性質を生かして新たな地盤材料として活用できる可能性が考えられる。例えば、その撥水性を利用して、降雨浸透による土構造物（堤防、盛土など）の浸透破壊の発生に対する、斜面表層部での遮水層材料として有効に適用できる可能性が考えられる（図 2）。近年は局地的な集中豪雨が頻繁に生じる気候環境であり、地盤構造物においても排水施設を設ける必要性が高まっている。一般的に、地盤内に降雨浸透をさせない方法として、地盤構造物の地表面にコンクリート構造物や遮水シートなどが設置されている。この場合、地表面全面積をカバーすることになるため、工事費が高くなり、自然環境にも悪影響をもたらすデメリットがある。また、地表面をカバーする材料の経年劣化による性能低下が生じる可能性が

考えられる。一方、疎水性地盤材料の場合、施工時に一般の地盤材料と同じように扱われるので、施工性がよいと判断される。また、疎水性地盤材料は、半永久で疎水性を持つ材料であるので、施工後から長期的に遮水層として機能する。さらに、疎水性地盤材料は安価な費用で作製できるため、経済的であると判断される。なお、農業土木分野では、塩分を含んだ地下水による塩害の防止に疎水性地盤材料を適用するための研究が既に行われている⁶⁾。さらに今後の研究課題として、廃棄物埋立地の被覆や盛土の斜面などへの遮水性能を持つ疎水性地盤材料の適用が考えられる⁷⁾。

本研究では、代表的な 3 種類の試料を用い、2 種類のシラン処理により人工的に疎水性材料を作製し、高性能遮水層への応用のための基礎的な試験を実施した。まず、それらの試料の疎水性を接触角測定試験により確認した。そして、長期透水試験ならびに一面せん断試験を行い、シラン処理による透水性と強度特性への影響を検討した。さらに、疎水材料による遮水層を含んだ土カラムを作製し、降雨装置の下で数時間、土砂災害が生じるレベルの降雨を与えて、遮水性が保持されるかどうかを確認した。最後に、小型模型土槽内に遮水層を含んだ斜面を作製し、長期間の自然暴露状態で生じる劣化による遮水特性の変化に関して検討した。

2. 疎水性地盤材料作製時のシラン処理における化学反応について

本研究では、コンクリートや金属の材料の表面を疎水化させる方法として実績のあるシラン処理（Silanization process）を利用して人工的に疎水性地盤材料を作製した。なお、シラン処理では、わずかな量の薬剤を用いることで疎水性が発揮されるため⁸⁾、経済的な処理方法であると考えられる。

また、本研究のシラン処理では、シラン試薬及び市販のコンクリート用シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材（以後、被覆養生材と呼ぶ）を用いた。この被覆養生材は液状で、コンクリート表面に塗布されると、コンクリートの細孔内に浸透し、シラン反応を生じて撥水性をコンクリートに持たせる。これにより、コンクリート表面からの水の侵入を軽減し、コンクリートの吸水量を減少するものである。シラン試薬については、その化学反応は次式で示される。



式（1）の化学反応は、以下のようなシラン処理中に生じるものである。材料にシラン処理を行う場合、材料の表面を活性化する必要があり、酸素プラズマ処理や UV オゾン処理等を行って材料表面のケイ素にヒドロキシ基（hydroxyl group, OH-）が結合した状態にする必要がある。砂粒子の場合は、表面に存在するケイ素は水が吸着する過程でヒドロキシ基を形成している⁹⁾。シラン処理に用いた試薬は n-オクチルトリエトキシシラン（ $\text{C}_{14}\text{H}_{32}\text{O}_3\text{Si}$ ）で、ケイ素原子を中心に、直鎖炭化水素（ C_8H_{17} ）と 3 つのアルコキシ基（alkoxyl group, OC_2H_5 ）が結合した分子構造で、弱い粘性を持つ透明な液体である。このシラン処理試薬を体積比で 10% になるようイソプロピルアルコール（IPA）で希釈した溶液に地盤材料を浸して容器を密封し、できるだけ空気との接触を避け、常温下で 72 時間反応させる。アルコキシ基は加水分解し

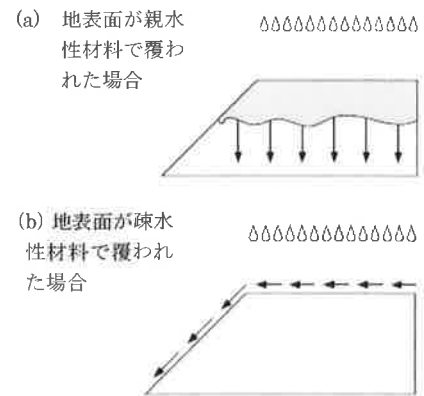


図 2 地表面が親水性材料と疎水性材料で覆われた場合の降雨の流れの違い

てヒドロキシ基が付加し、副産物としてエタノール (ethanol, C₂H₅OH) が生成される。加水分解したシラン試薬は、地盤材料のケイ素表面に付着する。この操作における砂粒子の表面においてシラン分子を獲得する過程で凝結が生じ、シラノール基のヒドロキシ基は、脱水縮合反応により砂粒子表面で水素と結合しながら水分子を放出する (図 3)。

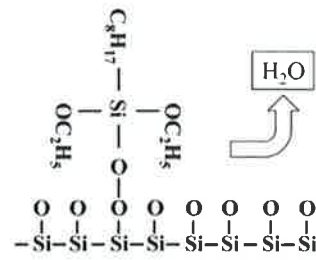


図3 砂粒子の表面に吸着されたシラン分子と副産物 (水分子)

シラン処理によりシラン分子が様々な厚さで形成されるため、砂粒子の表面は微細な凹凸を生じ、これが疎水性の増加につながる¹⁰⁾。また、反応時間を長くすることで、シラン分子は多くの層を形成し、交差結合を形成できる機会が増えることになる。これによって表面の粗さはさらに増加する¹¹⁾。なお、シラン溶液中で十分に化学反応を終えた土粒子の表面は、有機物で覆われて粘性を持つ状態になるため、処理した材料を水で洗浄し、その後、24 時間以上炉乾燥して、疎水性材料を作製している。

また、本研究では次章で述べるように、市販の被覆養生材を用いたシラン処理も行っている。この被覆養生材はシランとシロキサンを適量混合することによってシランの弱点を解決し、長期間コンクリートの吸水防止性能を確保することを可能にした材料である。

3. 試験に用いた試料と試薬および被覆養生材によるシラン処理方法について

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。各試料の物理特性を表 1 に、粒径加積曲線を図 4 に示している。これらの試料を用いて、試薬 (オクチルトリエトキシシラン) を用いた表 2 に示す 3 種類の手順でシラン処理を行った。1 つは、試薬を水で希釈しない方法で、イソプロピルアルコール 50ml に対して定量の試薬の量を変えて加えた溶液に土試料を投入して 3 分間攪拌し、3 日間放置後、残った溶液を流して、1 日炉乾燥する (「希釈なし」と呼ぶ)。別の方法として、イソプロピルアルコールと試薬を 10 : 1 の割合で混ぜた溶液に水を加えてものに、土試料を投入して、同様に攪拌・放置・炉乾燥する方法である (「希釈あり」と呼ぶ)。これは、少量の試薬によりシラン処理の効果が得られるかどうかを確認するものである。

表 1 試験に用いた試料の物理特性

試験試料	豊浦砂	まさ土	DL クレー
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.64	2.67	2.65
均等係数 U_c	1.49	78.46	4.58
平均粒径 D_{50} (mm)	0.172	0.38	0.0171

表 2 本研究で用いたシラン処理の種類

名称	備考
試薬 (希釈あり)	イソプロピルアルコール+試薬
試薬 (希釈なし)	イソプロピルアルコール+試薬+水
被覆養生材	水 : 被覆養生材 : 試薬 = 50 : 1 : 50

さらに今回は、被覆養生材を用いて同様な処理を行った。この場合、水 : 被覆養生材 : 試薬を重量比で 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。

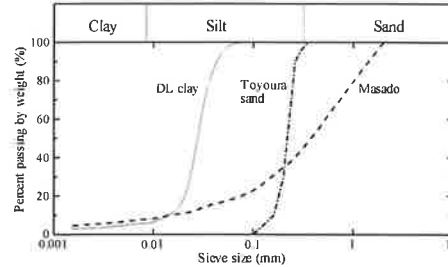


図 4 試験に用いた試料の粒径加積曲線

4. 各種試験の方法および結果・考察

4. 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 (写真 3)、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、3. で述べ

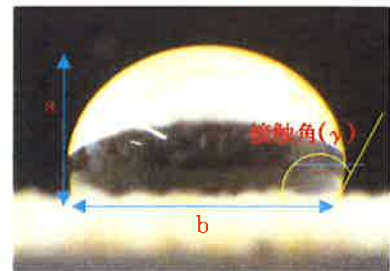
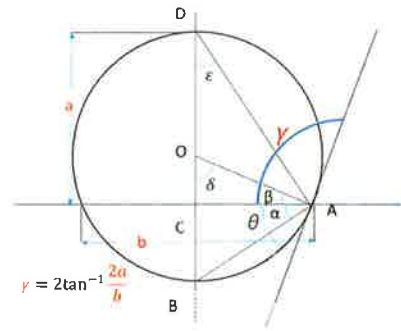


写真 3 疎水性豊浦砂上の水滴の高さ a と幅 b の撮影状況

た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。①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。②テープの他の片側を試験台に貼り付ける。③マイクロピペットを用いて 50 μℓ の水を測り取り、約 10 mm の高さから試料へ滴下する。④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 (図 5)。⑤得られた水滴の高さと幅を用いて、2θ法を用いて水滴の材料に対する接触角を求める。2θ法では、図 5 に示すように水滴の形状を球の一部と仮定して導かれる幾何学的関係を用いて、写真 3 の画像上で (a/b) の値 (a; 水滴の高さ, b; 水滴の下端の長さ) を画像上で市販の測定プログラムにより測定し、接触角 γ を $\gamma = 2 \tan^{-1}[(2a)/b]$ として求めている。



点 A での液面の接線と、BD の延長線の交点を L とする。△OAL と △ACL, △ADB と △CAB の相似性から、接触角 $\gamma = 2 \tan^{-1}[(2a)/b]$ となる

図 5 2θ法において仮定されている幾何学的関係

図 6 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 1 kg 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 2θ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。2θ法の結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、2θ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¹²⁾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。

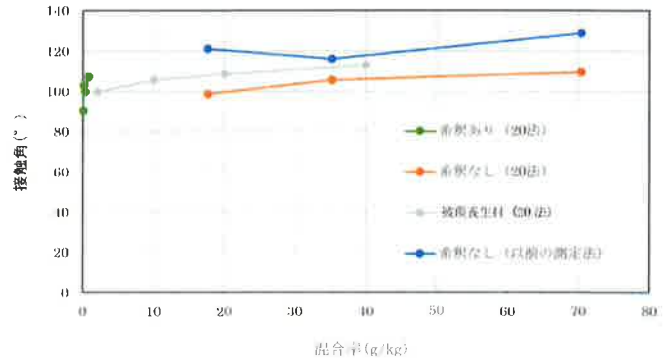


図 6 接触角測定結果 (疎水性豊浦砂)

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 2θ法により接触角を求めた。図 7 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

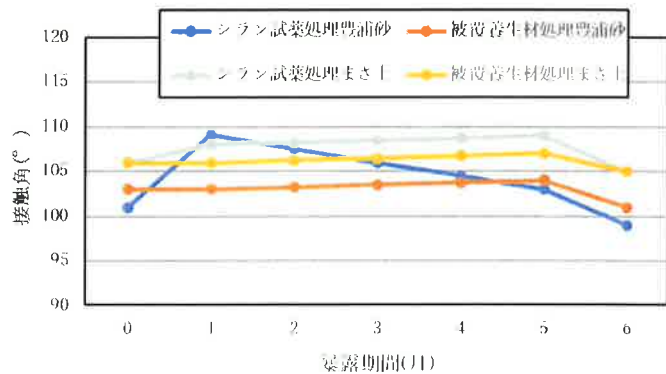


図 7 自然暴露時の疎水材の接触角の変化

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¹³⁾ので、被覆養生材でシラン処理した疎水性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。

4. 2 長期透水試験

疎水性材料の浸透防止特性を調べるために、簡易な土槽（写真4；土供試体の直径は約69mm，高さ約80mm）を用いて長期の透水性について、以下のような手順で試験を実施した。①内径69mmの円筒に、インクで着色した、乾燥した豊浦砂（乾燥密度1.5g/cm³）で高さ30mmのフィルタ層を締固めて作製する。②その上に、疎水性材料で高さ50mmの層を締固めて作製する（乾燥密度1.5g/cm³）。③内径37mmのパイプを土槽に刺し、水を土表面から高さ約50mmまで注ぐ（降雨強度50mm/hで1時間降った場合を想定）。④フィルタ層の土槽壁面にあるスリットに水分計を差し込み、水が浸透した場合にその時刻を計測する。なお、スリット部分は幅30mm，高さ2mmであり、水分計を設置しても通気可能な状態となっている。

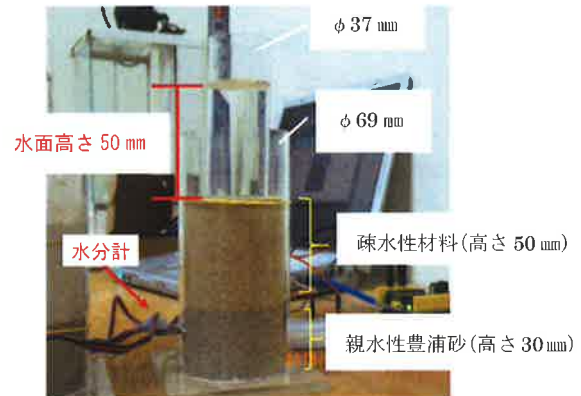


写真4 簡易な土槽を用いた長期透水試験の状況

時刻を計測する。なお、スリット部分は幅30mm，高さ2mmであり、水分計を設置しても通気可能な状態となっている。表3は、実施後2~3か月までの測定結果を示している。希釈なしの豊浦砂およびDLクレーについては浸透が生じなかったため、表中の長期不透水性はあるもの（○印）と判断した。希釈なしのまさ土については、設置後数時間で浸透を生じたため、長期不透水性はないもの（×印）と判断した。希釈なしのまさ土の接触角は、別途行った接触角測定試験により豊浦砂とほぼ同じ程度であることが確認されている。よって、このような透水性の違いは試料の粒径が影響しているものと考え、0.25，2mmふるいをを用いて、粗い粒径をカットしたまさ土試料を用いて、同様な試験を行った。表4は、その結果を示したものである。この試料では、試薬の濃度を約10倍にしてシラン処理を行っている。この場合には、まさ土でも不透水性を維持していることが分かる。よって、まさ土のような粗い粒径を含んだ試料でも、粒度調整して高い濃度の試薬を用いれば良いものと考えられる。浸透性吸水防止材については10mmの水面高さであれば不透水性を維持していることが分かる。

表3 長期透水試験結果

疎水性材料	長期不透水性	備考
豊浦砂（希釈なし）	○	混合率 17.6g/kg，乾燥密度 1.5g/cm ³ で 3 ヶ月経過
DL クレー（希釈なし）	○	混合率 17.6g/kg，乾燥密度 1.5g/cm ³ で 3 ヶ月経過
まさ土（希釈なし）	×	混合率 17.6g/kg，乾燥密度 1.5g/cm ³ で 3 ヶ月経過
豊浦砂（被覆養生材）	○	混合率 5g/kg，乾燥密度 1.5g/cm ³ ，水面高さ 1cm で 2 ヶ月経過

表4 ふるったまさ土の長期透水試験結果

項目	まさ土* (希釈なし)	まさ土* (希釈なし)	まさ土 (被覆養生材)
ふるいの 目の開き(mm)	2	0.25	0.25
混合率 (g/kg)	176	176	100
長期不透水性	○	○	○
備考	水面高さ 5cm で 2 週間経過	水面高さ 5cm で 2 週間経過	水面高さ 1cm で 2 週間経過

*) 試薬の濃度を 10 倍にして試験を実施。

4. 3 一面せん断試験およびせん断強度特性

疎水性材料のせん断特性を調べるために、DL クレーおよびまさ土試料により、不飽和土用一面せん断試験装置⁵⁾(図8)を用いて試験を行った。試験方法は、過去の研究⁵⁾と同様に、以下の手順で行った。①含水比調整した試料を用いて、飽和度 30, 40, 50, 60%の供試体(直径 60 mm, 高さ 20 mm)を乾燥密度 1.5g/cm³で締固めて作製する。(まさ土については、2 mmフルイ通過分を使用している)②50kPa の鉛直応力で圧密後、上下せん断箱間に 0.5mm の隙間を設置する。③0.02mm/min のせん断速度で 7mm までせん断を行う。図 9, 10 は親水性・疎水性のまさ土試料に関するせん断応力～水平変位関係および垂直変位～水平変位関係をそれぞれ示したものである。親水性の試料の場合、飽和度が高いほどせん断強度が小さく、ダイレイタンシーも圧縮側になる傾向を示しており、飽和度増加によるサクシオン減少の影響が見られる。しかし、疎水性試料の場合、飽和度の影響は、親水性に比べ顕著ではないことが分かる。また、図 11, 12 は DL クレーおよびまさ土についての、初期飽和度～最大せん断応力関係を示している。親水性の DL クレーの結果を除くと、最大せん断強度は、親水性・疎水性材料とも初期飽和度 50%のものが最大であり、初期飽和度 50%のものが最小となる傾向を示していることが分かる。親水性の DL クレーの結果については、初期飽和度がさらに高いところに、最大せん断強度のピーク値が存在する可能性が考えられる。図 13 は過去⁵⁾に行われたジュムジン砂の親水性・疎水性材料における初期飽和度～最大せん断応力関係を示しているが、同様の傾向を示していることが分かる。サクシオンによるせん断強度増分には、水分量と間隙水の分布形態が影響すると考えられる。疎水性材料の場合には土中水が粒子表面で水滴となる可能性が考えられるが、今回の結果では強度への影響は、親水性の場合とほぼ同様であると考えられる。なお図

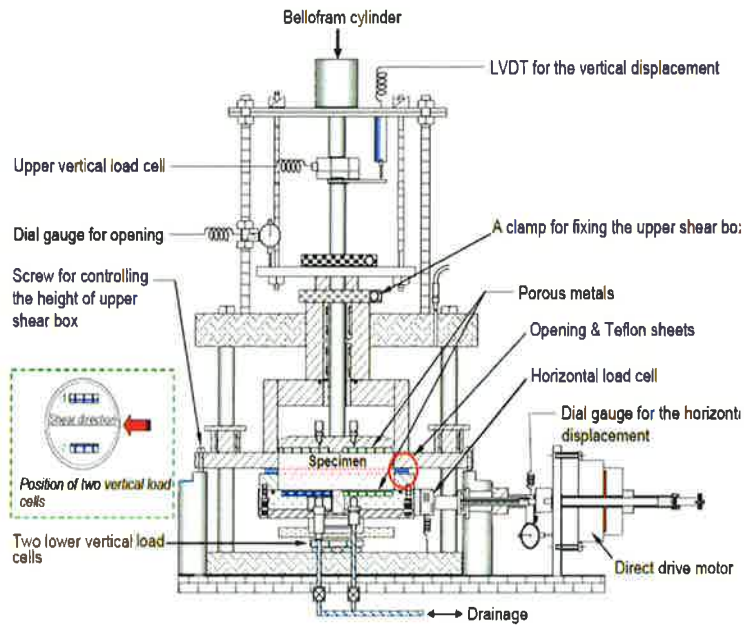


図 8 試験に用いた一面せん断試験装置⁵⁾

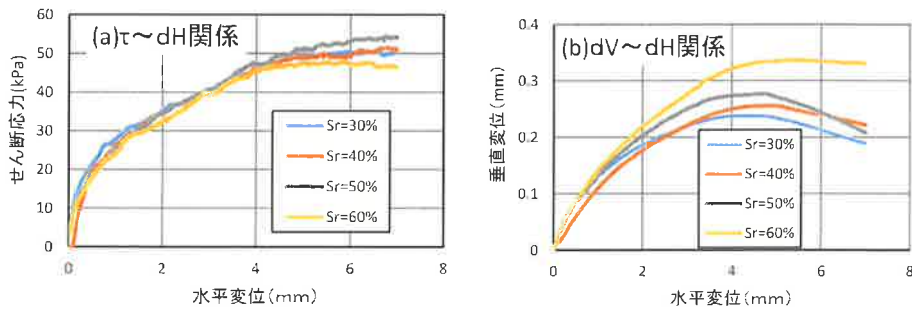


図 9 親水性まさ土の一面せん断試験結果

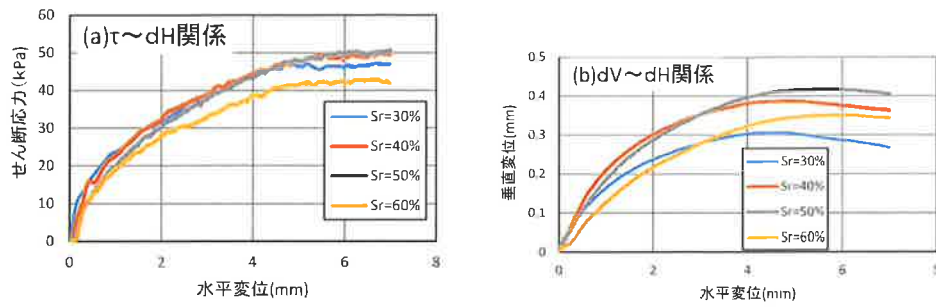


図 10 疎水性まさ土の一面せん断試験結果

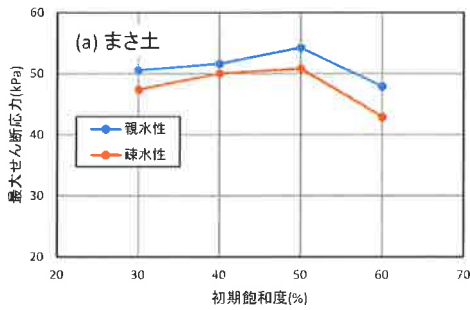


図 11 まさ土の初期飽和度～最大せん断応力関係

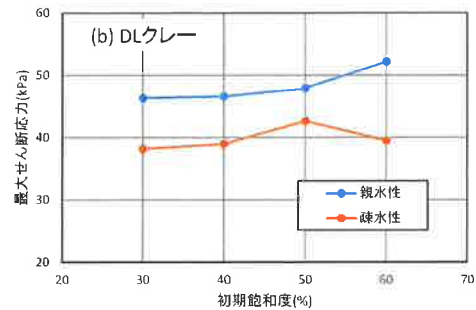


図 12 DL クレーの初期飽和度～最大せん断応力関係

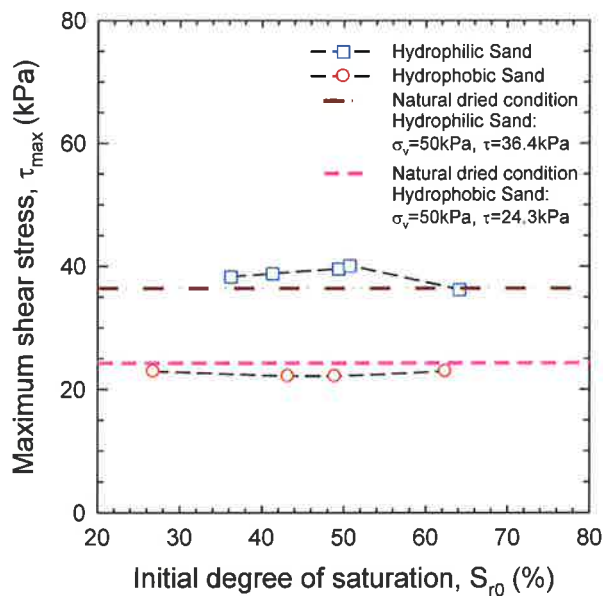


図 13 ジュムジン砂の初期飽和度～最大せん断応力関係⁵⁾

11, 12, 13 から、土の種類にかかわらず、疎水性材料のせん断強度は親水性材料より小さくなることが確認された。また、図 9, 10 のまさ土試料の結果では、最大圧縮時のせん断応力の平均値は、親水性材料で 47.2(kPa)、疎水性材料で 46.9(kPa)であり、文献 5) と同様、疎水材料ではシラン処理による土粒子の物理摩擦の低下が強度へ影響していると考えられる。

4. 4 土カラムによる降雨耐水性試験

内体積 1800ml のアクリル円筒容器 (高さ 18cm, 内径 11.2 cm) に表 5 に示す 6 種類の土カラム (写真 5) を作製して降雨試験に用いた。カラムの上層は 4.5cm (試薬処理土) あるいは 9 cm (被覆養生材) の層厚とし, 下層は未処理の土を入れて, 各層の乾燥密度を 1.50g/cm^3 に調整して作製した。なお, 試料はすべて気乾状態である。また, 上・下層の境界付近の下層内に土壌水分計を設置している。このカラムを図 14 に示す降雨試験装置内に設置した。降雨試験装置の水タンク, 人工降雨装置は, 高さ約 180 cm の組み立てアングル棚に設置されている。土カラム上面と人工降雨装置までの距離は約 20 cm である。水タンクからの水流をコックの開閉状態をあらかじめ調整して, 1 つのカラムに対し 100mm/hr の降雨を 5 時間連続して与え, 水分計の出力変化を測定した。表 4 に今回の試験結果をまとめて示している。表中の右から 2 列目の「降雨試験結果」については, 5 時間以上浸透を生じなかった場合を◎, 5 時間以下で浸透が生じた場合を○, 降雨後, 短時間で浸透を生じた場合を×と表示している。上層が未処理土の場合, 降雨開始から水分計の出力値は上昇しはじめ, 経過時間 20 分程度で一定値となった。このため, 降雨開始から浸透が始まり, 20 分程度で下層へ水が達したものと判断された。一方, 処理土の場合, ⑥のまさ土の被覆養生材では 3.5 時間 (210 分) 程度で水分計の出力値が変化を示した。しかし, それ以外の処理土では 5 時間の降雨に対しても水分計の出力値はほぼ一定の値となり, 水の侵入は確認されなかった。表 4 には別途行った 6 か月間の自然暴露後の試料の接触角の値も合わせて示している。これらの結果から, シラン処理を行った疎水材は遮水層として有用であると判断される。



写真 5 作製した土カラムの状況



(a) 人工降雨装置
(下側から見たところ)

(b) 各部品の設置状況

(c) 各部品の設置図

図 14 降雨試験装置の概要

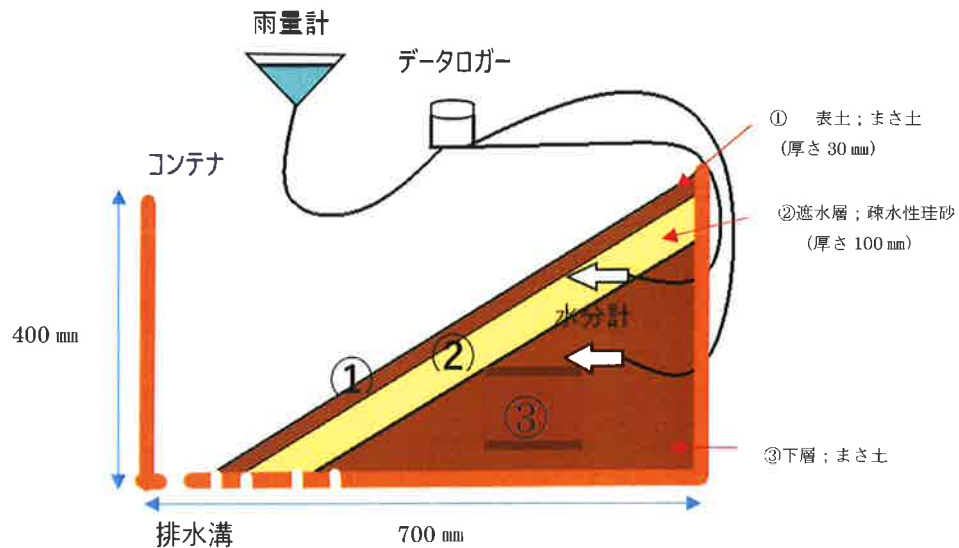
表 5 土カラムによる降雨耐水性試験の条件と測定結果

土カラムの種類	概要	降雨試験結果	最終的な接触角
① 未処理の豊浦砂	全て未処理の豊浦砂	×(浸透)	—
② シラン試薬処理豊浦砂	上層 4.5cm シラン試薬処理豊浦砂 下層 13.5cm 未処理の豊浦砂	◎(5hr)	99°
③ 被覆養生材処理豊浦砂	上層 9cm 被覆養生材処理豊浦砂 下層 9cm 未処理の豊浦砂	◎(5hr)	101°
④ 未処理まさ土	全て未処理のまさ土	×(浸透)	—
⑤ シラン試薬処理まさ土	上層 4.5cm シラン試薬処理まさ土 下層 13.5cm 未処理のまさ土	◎(5hr)	105°
⑥ 被覆養生材処理まさ土	上層 9cm 被覆養生材処理まさ土 下層 9cm 未処理のまさ土	○(3.5hr)	105°

4. 5 小型土槽を用いた遮水層の長期耐水性試験

4.4 節の結果を考慮して、小型土槽（長さ 700 mm、幅 550 mm、高さ 400 mm）内に斜面（傾斜角 30 度）を作製し、遮水層を設けた（図 15）。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 とした。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 g/cm^3 となるよう気乾状態の試料を締固めて作製した。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。

図 16 は、設置後約 2 か月間の降水量と水分計出力値の経時変化を示したものである。土壌水分計の測定結果を体積含水率ではなく、出力値で表示しているのは、まさ土、珪砂とも水分量が気乾状態で供試体作製したため、両者の体積含水率はゼロに近くになるので、表示が重なって見えにくくなることを避けるためである。降水量・水分計ともに 15 分ごとの測定間隔であり、測定中の降水量の最大値は 10 mm/hr 程度であると考えられる。土壌水分計の出力値に目立った上昇はなく、期間中に発生した雨水の浸透を遮水層が防いでいるものと考えられる。

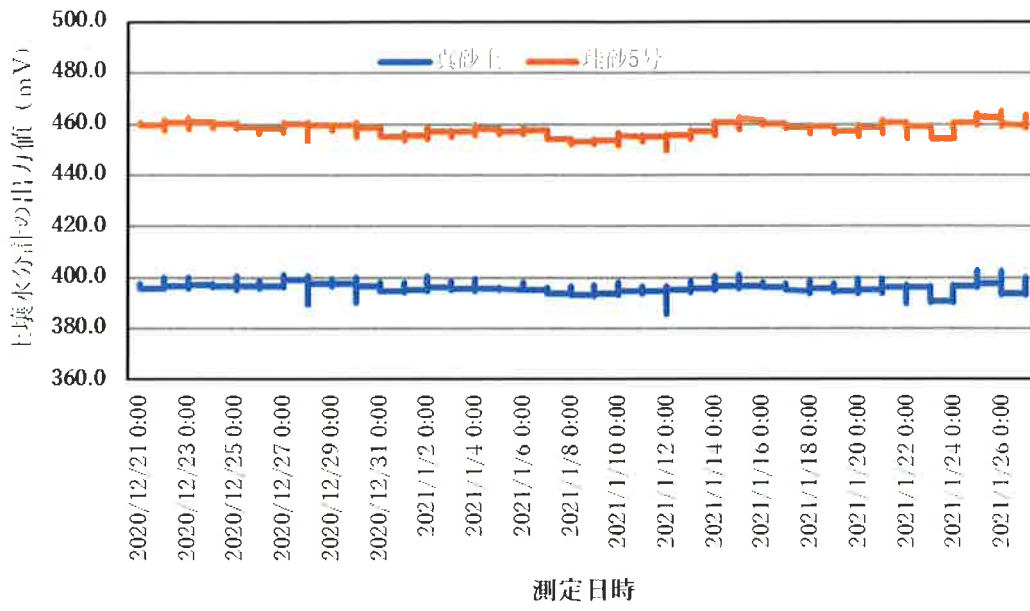


(a) 側面から見たスケッチ

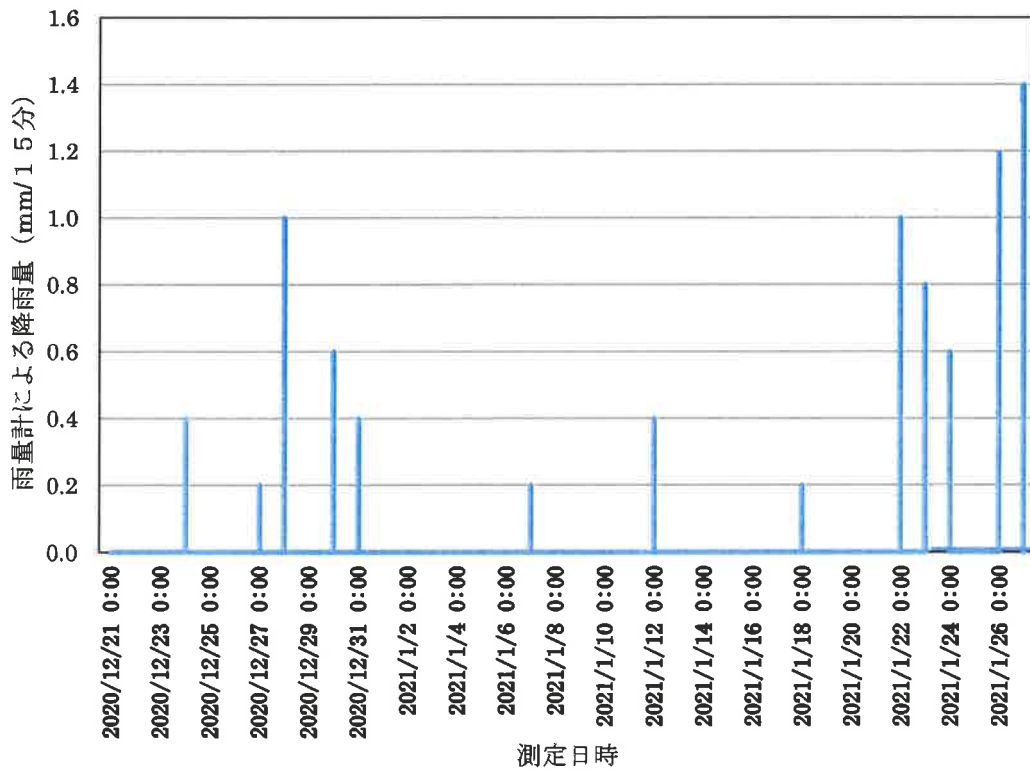


(b) 設置状況

図 15 長期耐水性試験のための小型模型土槽の概要



(a) 土壌水分計の出力変化



(b) 雨量計による降水量の測定結果

図 16 土壌水分計の出力変化と雨量計による降水量の測定結果

5. 結論

本研究では、代表的な3種類の試料（豊浦砂，DLクレー，まさ土）を用い，シラン処理により人工的に疎水性材料を作製し，高性能遮水層への応用のための基礎的な試験を実施した。シラン処理による疎水化の効果を確認するため，疎水性材料の接触角測定試験を実施した。また，疎水性材料を用いて，一面せん断試験を行い，シラン処理による強度特性への影響を検討した。さらに，疎水材料による遮水層を含んだ土カラムを作製し，降雨装置の下で数時間の降雨を与えて，遮水性を確認した。最後に，小型模型土槽内に遮水層を含んだ斜面を作製し，自然暴露状態において浸透性能を検討し，疎水性材料の高性能遮水層への適用性を検討した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. シラン試薬および被覆養生材を用いてシラン処理を行った疎水性材料は，約6か月間の測定期間中，接触角に大きな変化が見られないことが判明した。被覆養生材に関しては，部材表面に塗布して数年間の耐久性があることが確認されている¹²⁾ので，地中に設置する遮水層としての疎水材もかなりの期間の耐久性があることが期待される。
2. 3種類の疎水性材料を用いて，長期透水試験を行ったが，粒度分布の良いまさ土の場合，透水性が高いことが判明した。しかし，まさ土でも，粗い粒径をカットして粒度調整し，試薬の濃度を約10倍にして高い濃度の試薬を用いれば不透水性を維持されることが分かった。
3. 一面せん断試験の結果から，疎水性材料が不飽和化してもせん断強度は不飽和化の程度に関わらず大きく変わらないことが分かった。これは，疎水性材料の場合，間隙水が粒子表面に水玉状に存在し⁴⁾，粒子接点の周囲にメニスカスが生じにくいためであると考えられる。
4. 土カラム試験の結果において，疎水性材料を遮水層として用いた場合，100 mm/hrの降雨を10時間与えても浸透は生じず，遮水機能が保持されることが分かった。また，小型土槽を用いて遮水層を含む模型斜面を約1ヶ月間自然暴露したところ，最大10 mm/hr程度の降雨があったが土層に浸透が生じなかった。これらの結果は，疎水性材料の高性能遮水層への適用性を示すものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) DeBano, L., and Krammes, J.: Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 14-19, 1966.
- 2) DeBano, L.F.: Water repellent soils: a state-of-the-art, *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep.*, PSW-46, pp. 21, 1981.
- 3) Byun, Y.H., Tran, M.K., Yun, T.S., and Lee, J.S.: Strength and stiffness characteristics of unsaturated hydrophobic granular media, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 35, No.1, pp. 1-8, 2011.
- 4) Kim, D.H., Kim, Y.J., Lee, J.S., and Yun, T.S.: Thermal and Electrical Response of Unsaturated Hydrophilic and Hydrophobic Granular Materials, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 34, No. 5, pp. 1-9, 2011.
- 5) 金乗洙, 加藤正司, Seong-Wan Park, 竹下祐二: 不飽和状態の親・疎水性砂のせん断挙動に及ぼすメニスカス水の影響, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 10, No. 2, pp. 267-276, 2015.
- 6) 美濃規央, 長光左千男, 脇田由実, 山田修, 田尾本昭, Stephen John: 撥水砂技術の開発と応用, *環境技術特集*, Vol. 58, No. 2, pp. 109-112, 2012.
- 7) Lourenço, S.D.N., Wang, G.-H., Kamai, T.: Processes in model slopes made of mixtures of wettable and water repellent sand: implications for the initiation of debris flows in dry slopes, *Engineering Geology*, Vol. 196, pp. 47-58, 2015.
- 8) Leelamanie, D.A. and Karube, J.: Effects of hydrophobic and hydrophilic organic matter on the water repellency of model sandy soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, Vol. 55, pp. 462-467, 2009.
- 9) Da Re, G.: Physical Mechanisms Controlling the Pre-Failure Stress-Strain Behavior of Frozen Sand, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, *Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, MA., 2000.

- 10) Sun, C., Aston, D. E., and Berg, J. C.: Structural evolution of octyltriethoxysilane films on glass surfaces during annealing at elevated temperature, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 248, No. 1, pp. 96-102, 2002.
- 11) Howarter, J. A., and Youngblood, J. P.: Optimization of silica silanization by 3-aminopropyltriethoxysilane, *Langmuir*, Vol. 22, No. 26, pp. 11142-11147, 2006.
- 12) Leelamanie, D.A., Karube, J. and Yoshida, A.: Clay effects on the contact angle and water drop penetration time of model soils *Soil Science and Plant Nutrition*, 56, 371-375, 2010.
- 13) https://nn-techinfo.jp/NNTD/files/1069/1069_1302.pdf; 2021/09/03 確認.

著 者

加藤 正司 研究員, 博士 (工学), 地盤工学
金 乗洙 岡山大学大学院, 博士 (工学), 地盤工学
Tara Lohani 神戸大学都市安全研究センター, 博士 (工学), 地盤工学
津田 航匡 旭化成, 工学士, 地盤工学
村田 祐輔 東洋建設, 工学士, 地盤工学
Seong-Wan Park 檀国大学, PhD, 地盤工学