

MRI を用いた不飽和土の鉛直方向の浸透挙動の評価に関する一考察

山梨大学工学部 学生会員 ○荒木大輝

山梨大学大学院 正会員 荒木功平

山梨大学大学院 非会員 舩谷敬一

山梨大学大学院 学生会員 藤森弘晃

山梨大学医学部 非会員 熊谷 博司, 坂本 肇, 大西 洋

1. はじめに

普段私たちが目にしている土は不飽和状態である。土中水が取り得るサクシジョンの範囲は広く、土質だけでなく含水比によっても推移する。そのため、統一的に不飽和透水特性（不飽和透水係数など）を明らかにする方法は未だ確立されておらず、複数の試験方法を組み合わせて、複数回行う必要があるのが現状である。さらに、それら不飽和透水試験を実施するには熟練の技術・高額な実験装置が必要である。また、模型装置内の浸透挙動（時間～距離～土中水分関係）をシミュレーションするには高度な解析技術とともに、多くの装置（土中水分計やテンシオメーターなど）を必要とし、技術的なハードルが極めて高い。

本研究では、MRI（核磁気共鳴画像法）装置を用いて地盤内の可視化を行うことにより、不飽和浸透挙動を明らかにすることを目指す。具体的には、山梨大学医学部附属病院のMRI装置を用いて浸透過程を可視化した画像データから定量的な把握と評価を行っている。

2. 不飽和浸透特性の把握と評価方法

2.1 用いる試料

豊浦標準砂、カオリン粘土を用いて試験を行う。ただし、豊浦標準砂については、磁石を用いて砂鉄を除いた（乾燥質量比で0.5%程度）ものを使用した。

2.2 MRI 撮像に際する水平及び鉛直不飽和浸透試験装置の概要

MRI（Magnetic Resonance Imaging）とは、医療分野で病変の発見に用いられる、直接目視できない人体内部の撮像を行う装置である。また、長時間撮像を続けることが可能である。MRIにより土中の不飽和浸透挙動を可視化し、水分移動を把握できれば非常に有用である。不飽和浸透挙動を把握するための試験装置は、ボルツマン変換法を用いて水分拡散係数を求める際に用いられているものである。

図-1 (a), (b) に、水平及び鉛直浸透試験装置の模式図を示す。試験装置はリングセルとマリ奥特タンク、樹脂性バルブからなる低水位給水装置から構成される。MRIを用いて試験することを考慮し、試験装置はすべて、非金属の素材で構成されている。図-1 (a) の水平浸透試験装置は、厚さ10mm、内径30mmのリングセルを50個（500mm）連結して用いている。図-1 (b) の鉛直浸透試験装置はリングセルを17個（170mm）連結して用いている。リングセル同士をテープで固定し、乾燥試料を密詰めする。試験はバルブを開いた時刻を開始時刻とした。

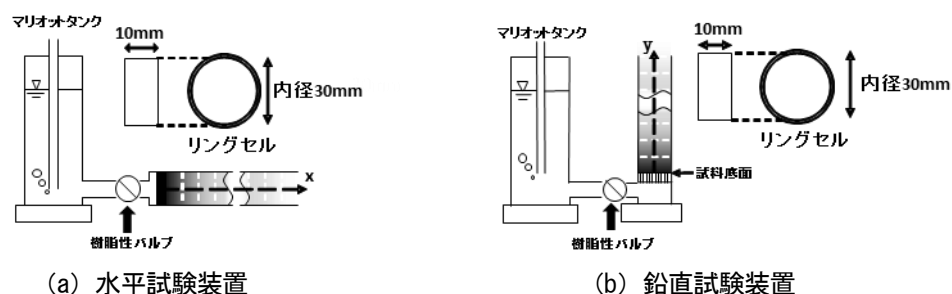


図-1 浸透試験装置模式図

キーワード MRI 可視化 不飽和土

連絡先 〒400-0016 山梨県甲府市武田 4-3-11 TEL. 055-220-8528 E-mail: karaki@yamanashi.ac.jp

3. MRI 撮像結果および考察

3.1 水平方向の不飽和浸透挙動に関する一考察

図-2 (a), (b), (c) に豊浦標準砂を用いて水平方向に吸水（給水水頭 0m の m）させ、50, 531, 920 秒後の MRI 撮像結果を示す。左端が給水部で右方向に浸透する。土中水分が多いほど白く撮像される。リングセルの下には外形 50.7mm（内径 47.4mm, 高さ 14.1mm）のシャーレを設置している。各々のシャーレの中には、含水比を変えた試料（左から 25, 20, 15, 10, 7.5%）を詰めている。図-2 (a), (b), (c) をみると、浸透の前線部では白と黒の境界が明瞭に表れている。図-2 (a) をみると、給水開始直後は浸透方向に均等に進むが、図-2 (b), (c) をみると、時間が経つにつれ下側の浸透が速く進むことがわかる。このことは、30mm 程度の試料厚さでも重力分布（鉛直方向の分布）が生じていることを示している。

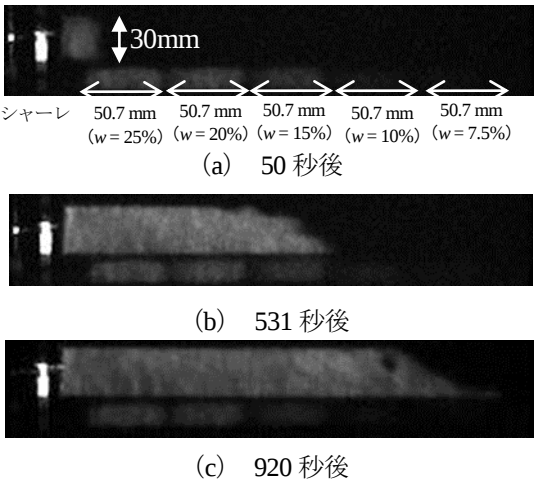


図-2 縦断面図（豊浦標準砂）

3.2 土質の違いによる鉛直方向の不飽和浸透挙動に関する一考察

鉛直方向の不飽和浸透試験は豊浦標準砂とカオリン粘土を用いて行う。表 1、表 2 は豊浦標準砂とカオリン粘土の物性及び試験時の初期条件である。下端が給水部で上方に浸透していく。試料の右横には、含水比の指標を配置している。

図-3 (a), (b) はそれぞれ、浸透開始から 609, 1193 秒後（約 10, 20 分後）の豊浦標準砂の MRI 撮像結果である。指標の設定含水比は豊浦標準砂の場合、下からそれぞれ $w=20, 15, 10$ （%）である。

図 4- (a), (b) はそれぞれ、浸透開始から 592, 1230 秒後（約 10, 20 分後）のカオリン粘土の MRI 撮像結果である。指標の設定含水比は下からそれぞれ $w=75, 50, 25$ （%）である。また、図-3 の豊浦標準砂と比較すると、より白く撮像されていることがわかる。これは、カオリン粘土の方が、間隙比が大きく、水を多く取り込むため、MRI による信号が強くなることを示している。

約 10 分後の図-3 (a) と図 4- (a) あるいは、約 20 分後の図-3 (b) と図 4- (b) を比較すると、浸透前線の位置に大きな違いがみられないことがわかる。このことは、浸透前線の位置が、土質による違いの小さい限界毛管高さや空気侵入値（土質によって異なるが、サクシオンで 0～数 kPa 程度の変化しかない）に依存するため、大きな違いがみられないと考える。

表 1 豊浦標準砂の鉛直試験条件

土粒子密度 g/cm	間隙比	給水水頭 mm
2.645	0.6	10

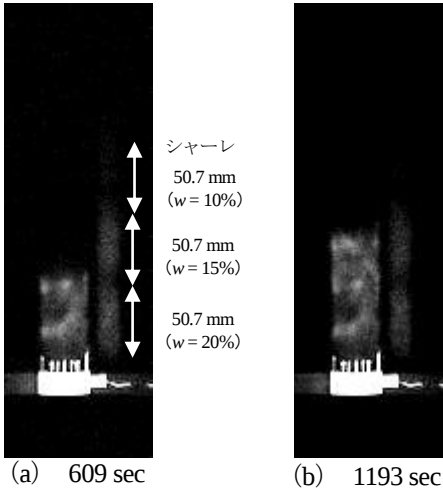


図-3 豊浦標準砂縦断面

表 2 カオリン粘土の鉛直試験条件

土粒子密度 g/cm	間隙比	給水水頭 mm
2.301	1.0	10

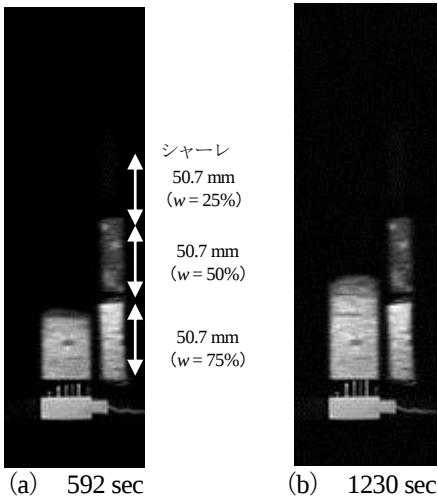


図-4 カオリン粘土縦断面

4. MRI 法による試験途中の含水比評価

4.1 含水比～画素値関係の算出

MRI 撮像結果から浸透挙動を面的かつ連続的に非破壊で把握できれば極めて有用である。MRI により白く撮像された部分を画素値に変換し、時間ごとに分析することで、含水比～浸透距離～浸透時間の関係の定量化を図る。具体的には、あらかじめ含水比調整しておいたシャーレを含水比ごとに画素値変換し、含水比と画素値の関係を求める。なお、含水比が 0 でも画素値は 0 でないため対数近似式で変換するものとした。図-5 にカオリン粘土の、画素値—含水比関係の例を示す。決定係数 R^2 は 0.92 以上（相関係数 R は 0.96 以上）の高い値を得られたため画素値と含水比の相関は高いといえる。

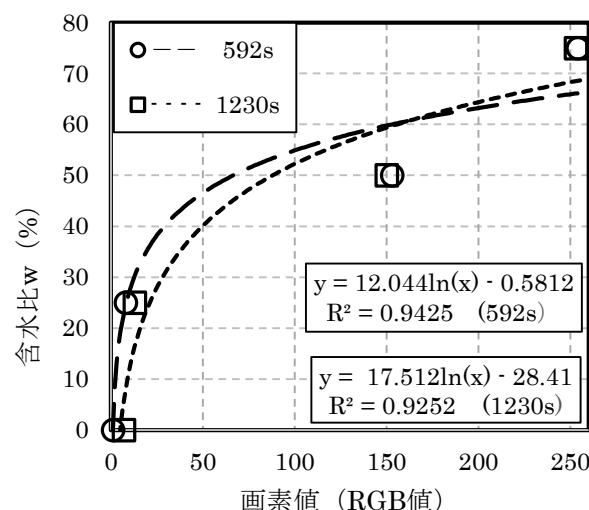
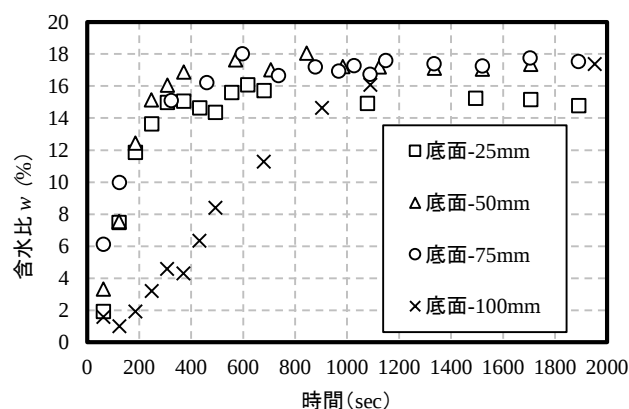


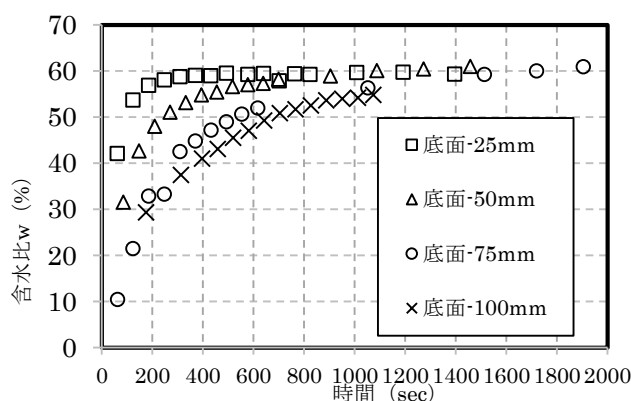
図-5 画素値の含水比変換例

4.2 土質の違いによる鉛直方向の含水比～時間関係の考察

鉛直浸透試験の撮像結果について、豊浦標準砂とカオリン粘土それぞれ、試料底面から 25mm, 50mm, 75mm, 100mm 地点における含水比～時間関係について考察する。浸透時間ごとに水平方向の画素値を平均して含水比を求める。図-6 (a), (b) にそれぞれの結果を示す。



(a) 豊浦標準砂



(b) カオリン粘土

図-6 時間—含水比関係図

図-6 (a) をみると、豊浦標準砂においては 25～75mm 地点では浸透に要する時間（含水比が増加する時間）にあまり変化は見られないが、100mm 付近では明らかに大きく異なっていることがわかる。また、図-6 (b) をみると、カオリン粘土においては、25, 50, 75, 100mm と浸透が上方に進むにつれ、浸透に要する時間が大きくなっている。この図-6 (a) と図-6 (b) の浸透挙動の違いは砂（豊浦標準砂）と粘土（カオリン粘土）の水分特性の違いを反映している。すなわち、粘土の方が砂よりサクションが大きいいため、含水比がより高くなることと、サクションにより吸水が安定して行われる（砂は残留体積含水率付近で急激にサクションが増加するため不安定になる）ことを表している。

4.3 土質の違いによる鉛直方向の距離～含水比関係の算出

次に、鉛直浸透試験の撮像結果について、浸透開始からある時間における浸透距離と含水比関係について考察する。図-7 (a), (b) に豊浦標準砂とカオリン粘土の結果を示す。図-7 (a), 図-7 (b) より豊浦砂標準砂とカオリン粘土、双方において、浸透が底面から上方に進むにつれて、浸透速度が小さくなることがわかる。また、同じ時間

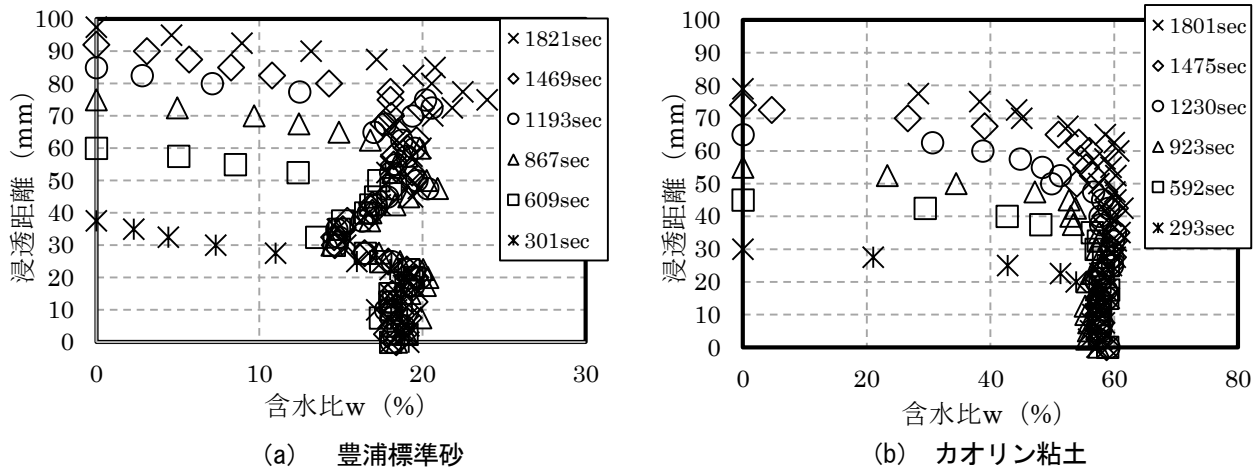


図-7 浸透距離～含水比関係図

5. 層構成地盤における鉛直方向の浸透挙動に関する一考察

鉛直浸透試験において、豊浦標準砂層の上にカオリン粘土層を設けた場合の浸透挙動について考察する。

図-8に試験条件の模式図を示す。円筒を160mm準備し、下半分に砂の再現試料である豊浦標準砂を、上半分に粘性土の再現試料であるカオリン粘土を密詰めにし、境界付近の浸透挙動のMRI撮像を行う。円筒の左側には含水比を調整した指標を配置している。下3個は豊浦標準砂で、それぞれ20, 15, 10%に、上二個はカオリン粘土で、それぞれ50, 25%に調整している。

図-9 (a), (b), (c) に試験開始から901, 1025, 1147秒後のMRI撮像結果を示す。境界付近で、砂から粘土に浸透する際には急激に含水比が変化することが確認できる。すなわち、層構成を有することで不連続な含水比境界（キャピラリーバリア）を設けることができることを示している。

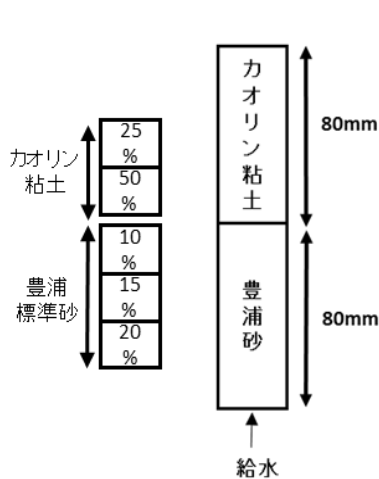


図-8 試験装置概要

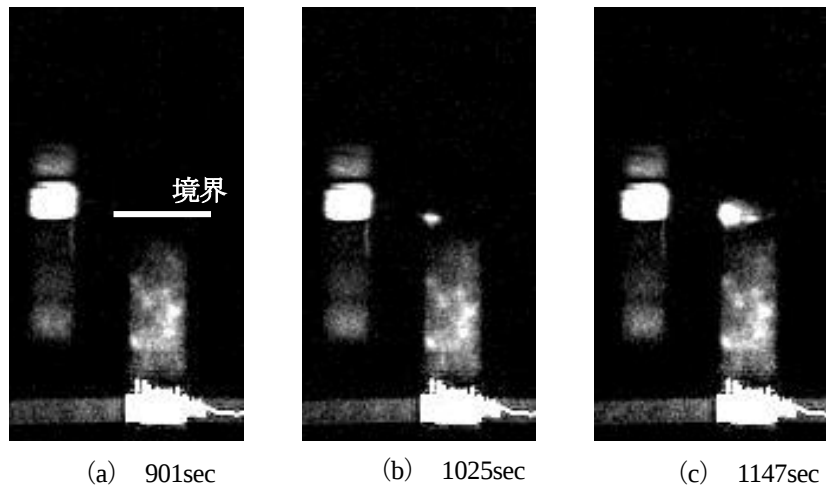


図-9 境界付近での浸透挙動

9. おわりに

本研究では、MRIを用い不飽和浸透挙動の撮像を行った。画素値から含水比を算出することで複雑な不飽和浸透挙動（時間～距離～含水比関係）を定量的に明らかにした。また、層構成地盤において砂から粘性土に浸透前線が推移する際に、境界では土中水分が急激に吸い上げられる現象を明らかにした。

【謝辞】本研究は、国立大学法人山梨大学の平成27年度戦略・公募プロジェクト（スタートアップ研究支援）、平成28年度萌芽的融合研究プロジェクトのご支援をいただきました。本研究の一部は、国土交通省の河川砂防技術研究開発公募地域課題分野（砂防）（代表：荒木功平（山梨大学））のご支援をいただきました。ここに深甚の謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 荒木功平, 藤森弘晃, 舩谷敬一, 熊谷博司, 坂本肇, 大西洋: MRIによる土の保水・透水特性把握に向けた新たな試み, 地域性を考慮した地盤防災減災技術に関するシンポジウム論文集, pp.43-46, 2015.