

MRI を用いた不飽和浸透挙動の材料依存性に関する研究

山梨大学	学生会員	○七澤直斗
山梨大学	学生会員	柏原史弥
山梨大学大学院	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
山梨大学医学部附属病院	非会員	熊谷博司
山梨大学医学部附属病院	非会員	坂本肇
山梨大学大学院	非会員	大西洋

1. はじめに

近年の降水に伴う代表的な地盤災害に、平成 29 年九州北部豪雨による土砂災害、平成 28 年岩手豪雨による土砂災害など、降水に伴う土砂災害が多数報告されている。斜面崩壊等の土砂災害は、降水が地中に浸透し、空気と置換していく過程で発生する。空気と水と土粒子で構成される土は不飽和土と呼ばれる。一方で、不飽和土の浸透に関する試験の多くは未だ確立されていない。一般的に解析技術は、室内試験の再現により信頼性が確保され、実地盤に適用される。しかしながら、通常、解析結果の妥当性は室内試験により得られた試験後の巨視的な状態量との比較により確認がなされる。よって、試験途中の供試体内の挙動を可視化し、視覚的かつ系列的に明らかにする研究が必要である。

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、不飽和浸透特性を明らかにすることを旨とする。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時間、距離、含水比関係の把握と評価を行っている。

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

砂質地盤の再現試料として豊浦標準砂、粘土地盤の再現試料としてカオリン粘土、その他、撥水性材料としてガラスビーズを用いて浸透挙動を比較検討する。この試料に MRI を用いて、画像データを取得、浸透過程を可視化することで、不飽和浸透特性の評価を行う。

MRI とは、高周波の磁場を与え、水素原子に共鳴現象を発生させて信号を撮像する装置である。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水平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。例えば、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る。

図 1 に水平及び鉛直浸透試験装置の模式図^{1),2)}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。水平浸透試験には、厚さ 10mm、内径 30mm のリングセルを 50 個(500mm)用いる。鉛直浸透試験の場合はリングセルを 17 個(170mm)用いる。MRI を使用する際は高磁場が発生することを考慮し、試験装置はすべて非金属の素材で構成されている。リングセル同士をテープで固定し、リングセル内に乾燥試料を密詰めし、樹脂性バルブを開き浸透試験を開始する。

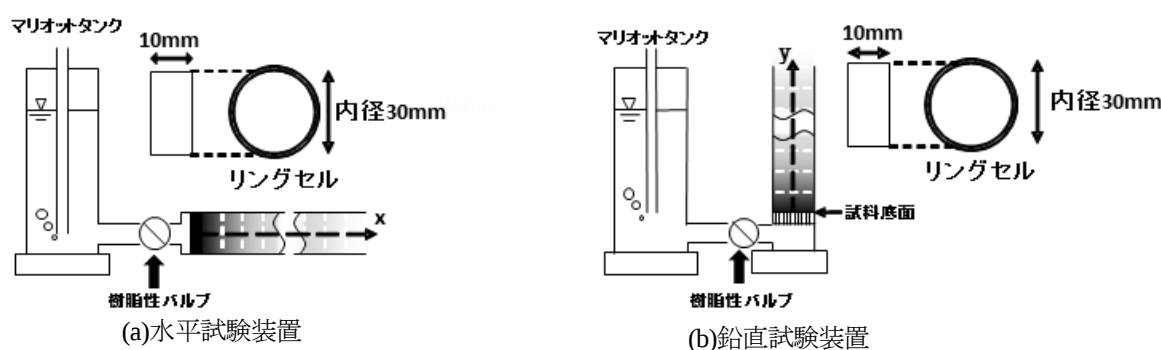


図-1 浸透試験装置模式図

3. 水平不飽和浸透挙動の観察

水平浸透挙動の観察を行う。図-2(a), (b), (c)に MRI 用に磁石で砂鉄分を除いた乾燥豊浦標準砂を詰めた、吸水

キーワード MRI, 不飽和透水, 可視化

連絡先 〒400-0016 山梨県甲府市武田 4-3-11-B-1-124 山梨大学工学部 TEL. 055-220-8528 E-mail: karaki@yamanashi.ac.jp

過程時における 50, 531, 920 秒後の MRI 撮像結果を示す。水分が多いほど白く撮像される。左端が給水部で右方向に浸透する。試験は樹脂製バルブを開いた時刻を開始時刻とした。リングセルの下には外形 50.7mm (内径 47.4mm, 高さ 14.1mm) のシャーレに詰めた含水比の異なる試料を設置している。図-2(a)より, 給水開始直後は浸透方向にほぼ直交し浸透が進むが, 図-2(b), (c)のように時間が経つにつれ下側の浸透が速く進む。30mm 程度の試料厚さでも重力の影響をうけることがわかる。浸透の frontline 部では白と黒の境界が明瞭に現れている。

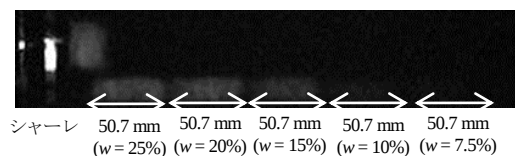
次に, 豊浦標準砂と比較を行うために, ほぼ同粒径(0.2mm)のガラスビーズを用いて試験を行った。ガラスビーズは, 金属成分の有無による解像度の違いの比較に適している。ガラスビーズは撥水性が強く, 水頭差 0mm では浸透がほとんど見られないため, 水頭差 10mm を与えるものとした。図-3(a), (b), (c)にガラスビーズを用いて行った吸水過程における 137, 526, 917 秒後の MRI 撮像画像結果を示す。乾燥豊浦標準砂と同様にシャーレを指標として設置している。浸透の様子から, 吸水部の浸透位置より上方に浸透が及んでいないことがわかる。ゆえに, ガラスビーズには水を吸い上げる力が弱いことが明らかになった。また, 豊浦標準砂と比較すると, 10mm の水頭差を与えているにも関わらず, 浸透速度は小さく, 時間変化とともに浸透速度が低下していることが分かる。この結果から, 親水性, 撥水性のような材料による性質が浸透に影響する要因となることが明らかになった。

4. 鉛直不飽和浸透挙動の観察

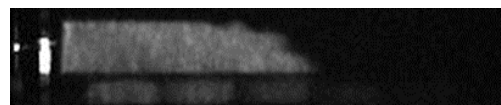
乾燥豊浦標準砂, ガラスビーズ, 乾燥カオリン粘土を用いて鉛直浸透試験を行う。図 4-(a), (b)はそれぞれ, 浸透開始から 486 秒, 2129 秒後における豊浦標準砂の写真である。下端が給水部で上方に浸透していく。試料の右横には, 含水比の指標を配置している。指標の設定含水比は豊浦標準砂の場合, 下からそれぞれ $w=20, 15, 10$ (%)である。

図-5(a), (b)はそれぞれ, 浸透開始から 592 秒, 1352 秒後におけるカオリン粘土の写真である。カオリン粘土における指標の設定含水比は, 下からそれぞれ $w=75, 50, 25$ (%)である。含水比が高ければ, より白く撮像される。豊浦標準砂では, 486 秒で試料底面から 50mm に, 2129 秒で底面から 100mm に, カオリン粘土では, 592 秒で底面から 45mm に, 1352 秒で試料底面から 70mm に達した。

図-6(a), (b)はそれぞれ, 浸透開始から 478 秒, 1157 秒後におけるガラスビーズの写真である。ガラスビーズにおける指標の設定含水比は, 下からそれぞれ $w=25, 20, 15, 10, 7.5$ (%)である。478 秒あたりから浸透が止まり始めるが, 微小ながら浸透し続けていることが確認できる。しかし, 豊浦標準砂やカオリン粘土のように, 上部への浸透は見られなかった。ゆえに, 豊浦標準砂やカオリン粘土と比較して, ガラスビーズでは毛管現象が生じにくいことが確認できる。



(a) 50 秒後

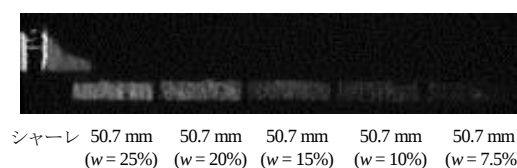


(b) 531 秒後

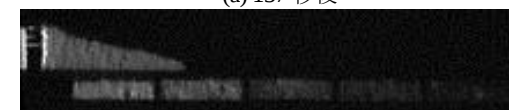


(c) 920 秒後

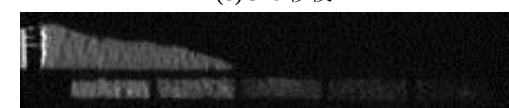
図-2 縦断面図 (豊浦標準砂)



(a) 137 秒後

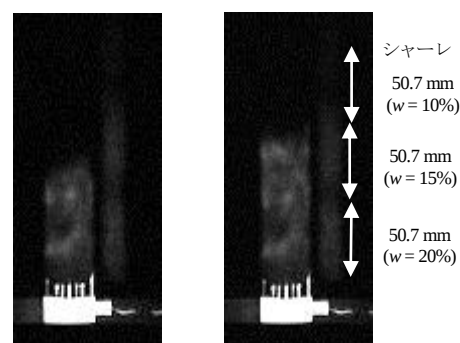


(b) 526 秒後



(c) 917 秒後

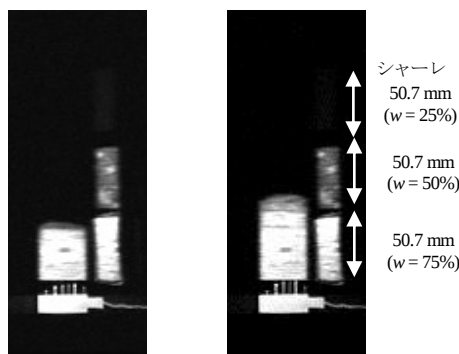
図-3 縦断面図 (ガラスビーズ)



(a) 486 秒後

(b) 2129 秒後

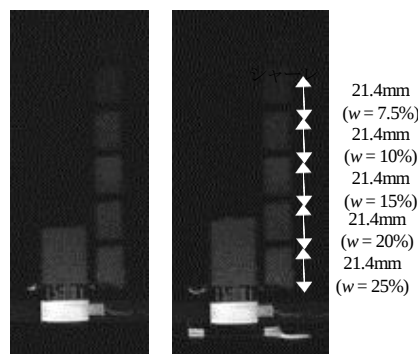
図-4 縦断面図 (豊浦標準砂)



(a) 592 秒後

(b) 1352 秒後

図-5 縦断面図 (カオリン粘土)



(a) 478 秒後

(b) 1157 秒後

図-6 縦断面図 (ガラスビーズ)

5. 試料の含水比測定

MRI 画像から浸透挙動を面的かつ連続的に把握できれば極めて有用である。本研究では、白く撮像された部分を画素値に変換し、含水比を求める。図-7 にシャーレに詰めた豊浦標準砂における含水比調整した試料の画素値と含水比関係における近似曲線の例を示す。決定係数 R^2 は 0.987, 相関係数が 0.974 の高い値が得られたため、画素値と含水比の相関は高いといえる。この曲線を撮影された MRI 画像ごとに求めて、含水比に変換する。

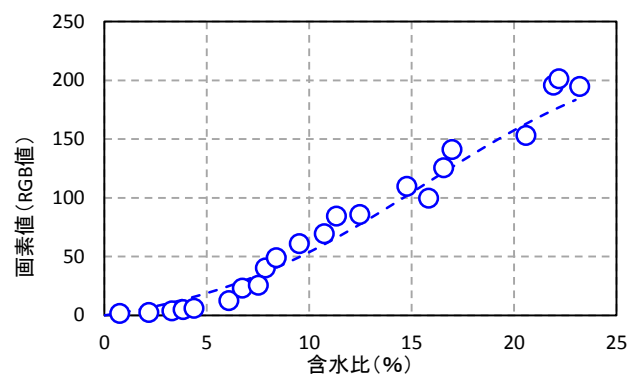


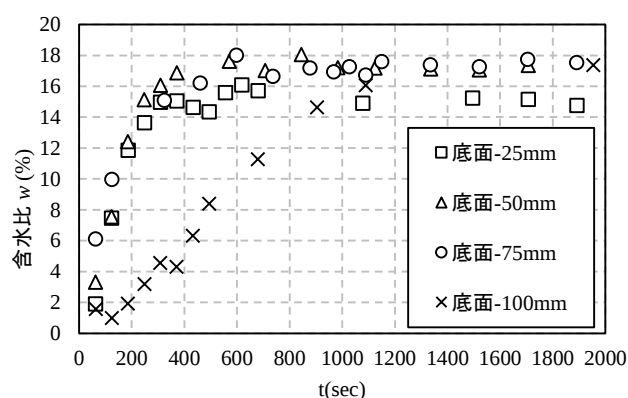
図-7 画素値の含水比変換例

6. 時間-含水比関係, 距離-含水比関係の算出

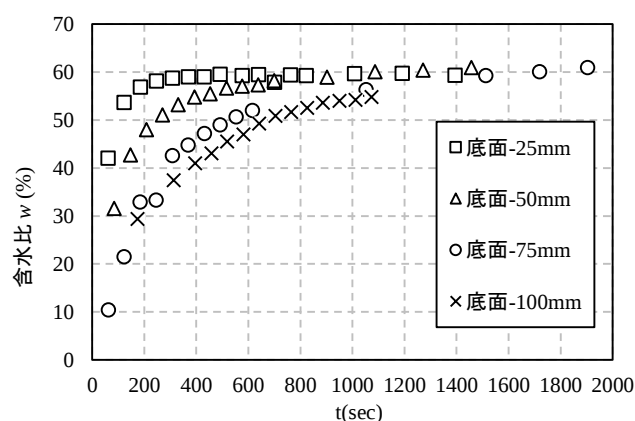
図-8(a), (b) に鉛直浸透試験について撮像された画像について、豊浦標準砂、カオリン粘土のそれぞれ、試料底面から 25mm, 50mm, 75mm, 100mm 地点における時間-含水比関係について、浸透時間ごとに水平方向の画素値を平均して含水比を求めた結果を示す。豊浦標準砂では底面からある程度以上離れると、時間-含水比関係に大きな差が現れる。カオリン粘土は底面から離れると、時間-含水比関係が収束していくことがわかる。

次に、鉛直浸透試験により撮像された画像について、浸透開始からある時間において、浸透距離と含水比関係について求めた。図-9(a), (b)にこの結果を示す。豊浦標準砂では距離-含水比関係にばらつきが大きくみられることから、供試体作成時の締め固めの影響を大きく受けることがわかる。カオリン粘土では距離-含水比関係のばらつきが小さいことから、供試体作成時の締め固めの影響は受けにくいことがわかる。

図-7, 図-8 より豊浦砂標準砂, カオリン粘土において、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分かる。また、カオリン粘土は豊浦標準砂より浸透した距離が小さいことが分かる。これは透水性の違いによるものであると考えられる。

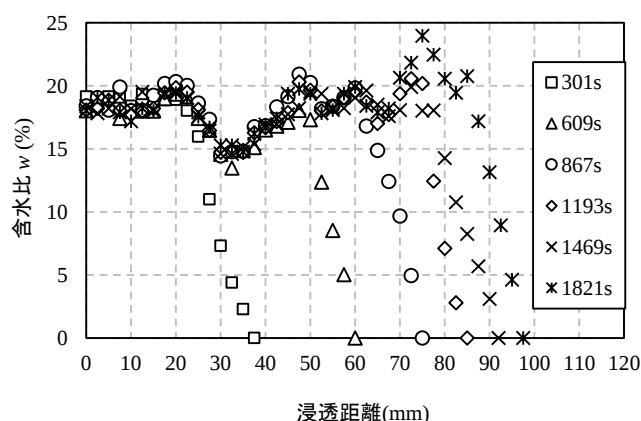


(a) 豊浦標準砂

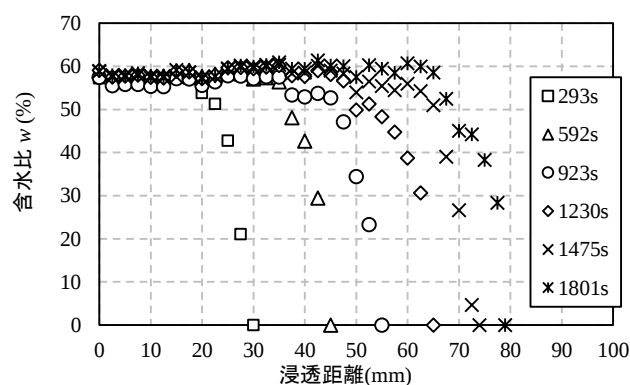


(b) カオリン粘土

図-8 時間—含水比関係



(a) 豊浦標準砂



(b) カオリン粘土

図-9 浸透距離—含水比関係

7. おわりに

本研究では、不飽和浸透試験のMRIを用いた撮像を行った。画素値から含水比を算出し、鉛直浸透試験において、時間-含水比関係を求め、試料底面からの距離が大きいほど浸透速度が小さくなることを確認した。今後、試験装置内のより精緻な把握を行い、不飽和浸透挙動のメカニズム解明し、貢献したい。

【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。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, 舛谷敬一, 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.
- 2) Hiroaki Fujimori, Kohei ARAKI, Keiichi MASUTANI, Hiroshi KUMAGAI, Hajime SAKAMOTO, Hirishi ONISHI: Grasp and evaluation of the unsaturated seepage behavior of soil by using MRI, Geoenvironmental Disasters(2016) 3:28, 2016.