

MRI による土の不飽和浸透特性把握の試み

荒木功平¹, 藤森弘晃², 舛谷敬一¹, 熊谷博司³, 坂本肇³, 大西洋³

1 山梨大学・大学院総合研究部・karaki@yamanashi.ac.jp

2 山梨大学・大学院医学工学総合教育部

3 山梨大学・医学部附属病院放射線部

概 要

平成 25 年台風 26 号による伊豆大島土砂災害, 平成 26 年 8 月豪雨による広島市の土砂災害など, 源頭部斜面崩壊の誘因として地盤のパイピング等が指摘されている。脅威化する自然現象と共生していくためには, 住民の地盤災害への理解や防災意識の向上が必要不可欠である。地盤工学への住民の関心を高めるためには, 直観的に理解可能な実験的・視覚的手法が強く求められる。本試みでは, 第一段階として, 小型で金属類を用いない水平浸透試験装置を開発し, 病院等の MRI (核磁気共鳴画像法) 装置で水平浸透挙動を簡単に可視化できるようにした。加えて, 豊浦標準砂とガラスビーズの水平浸透挙動を比較すると, 不飽和浸透特性に大きな違いが生じていることが把握できた。このことは, 不飽和浸透挙動に, 材料の親水性・撥水性が大きく影響することを示している。今後, パイピングの発達過程等の可視化などへの展開が期待され, 将来的な普及・波及が見込まれる。

キーワード: 不飽和浸透, MRI, 可視化, 親水性・撥水性

1. はじめに

近年の代表的な降水に伴う地盤災害として, 平成 25 年台風 26 号による伊豆大島土砂災害, 平成 26 年 8 月豪雨による広島市の土砂災害などが挙げられる。

平成 25 年 10 月 15 日から 16 日にかけての台風 26 号の通過により, 伊豆大島 (東京都大島町) では未曾有の豪雨に見舞われた。観測史上最大の 24 時間降水量 824mm を記録し, 10 月 16 日午前 2 時から 3 時頃にかけて, 元町地区上流域の大金沢を中心とした溪流において, 流木を伴った土砂流出が発生するなど甚大な土砂災害が生じた結果, 死者・行方不明者 40 名の人的被害がもたらされた^{1) 2)}。

平成 26 年 8 月豪雨災害では, 台風 12 号, 11 号および前線と暖湿流などにより日本の広範囲で被害が生じた。中でも広島市安佐北区可部, 安佐南区八木などでは 8 月 20 日午前 3 時 20 分から 40 分にかけて短時間の局地的な降水の影響で住宅地後背の斜面が崩壊し, 同時多発的に大規模な土石流が発生し, 74 名の死者を出すなど甚大な被害をもたらした。広島県災害対策本部のまとめ (8 月 22 日時点) によれば, 広島市一帯で少なくとも土砂崩れ 170 か所, 道路や橋梁への被害 290 か所が確認され, 広島県全体では, 両区を主として, 133 軒が全壊したのをはじめ 330 棟の家屋が損壊し, 4,100 棟以上が浸水被害を受けたと報告されている。

源頭部斜面崩壊の誘因として地盤のパイピング等が指

摘されている³⁾。脅威化する自然現象と共生していくためには, 地盤災害への住民の防災意識を高める必要がある。そのためには, わかりにくい地盤内挙動を直観的に理解可能にする視覚的手法が強く求められる。

近年, 高性能な電子計算機の普及により, 有限要素法や粒子法, それらを組み合わせた解析技術などで急速な進歩がみられている。パイピングやクラックなどの発達過程の解析に大きな期待が寄せられている。ここで, これら解析技術において, まずは簡易的な室内実験の再現が信頼性の確保に求められる。それにより妥当性が確認され, 自然斜面や大規模な土構造物に適用・実用されるようになる。

しかしながら, 室内実験であっても地盤内挙動を直接みることは難しい。一般に解析結果の妥当性は, 地盤の観測点における最終状態と比較することでなされている。

このような背景から, 地盤内挙動を観測点における最終状態だけでなく, 面的に途中過程を簡単に可視化する技術が確立されれば非常に有用性が高いと考えられる。

本試みでは, 平成 25 年台風 26 号による伊豆大島土砂災害, 平成 26 年 8 月豪雨による広島市の土砂災害でみられたパイピング現象に関する一考察を述べる。そして, 将来的にパイピング等の浸透破壊現象の可視化に向けて, 山梨大学医学部附属病院の MRI (核磁気共鳴画像法) 装置で水平浸透試験装置を利用できるように改良している。また, 可視化の検討結果, 不飽和土の浸透挙動 (時間～距離～水分量変化関係) について考察を述べている。

2. 近年の災害と地盤浸透に関する一考察

平成 25 年台風 26 号による伊豆大島土砂災害、平成 26 年 8 月豪雨による広島市の土砂災害など、源頭部斜面崩壊の誘因として地盤のパイピング等が指摘されている。

写真-1(a), (b)は 2013 年 11 月 9 日に伊豆大島(元町)で撮影したパイピング(土中水の浸透力を受けて土粒子が動き、地盤内にパイプ状の水みちができること⁴⁾)とみられる痕跡((a)遠景, (b)拡大)を示している。



(a) 遠景 (b) 拡大
写真-1 パイピングの痕跡(東京都大島町元町)
(撮影日: 2013 年 11 月 9 日)

写真-1 から、滑落崖上部の植生のある地表との境界付近において、空洞がみられる。伊豆大島災害ではこのような空洞が幾つもみられた。パイピングの痕跡と考えられる。調査当時、湧水等は確認できず、崖錐は乾いた火山砂が主であった。一因として、不飽和状態から雨水の浸透に伴い、飽和度が上昇していく過程でパイピングが発達したことが考えられる。

写真-2(a), (b)は 2014 年 11 月 3 日に土石流危険溪流太田川支川 7 2 (広島市安佐南区八木 6 丁目)にて撮影したパイピングとみられる痕跡((a)遠景, (b)拡大)を示している。



(a) 遠景 (b) 拡大
写真-2 パイピングの痕跡(広島市安佐南区八木)
(撮影日: 2014 年 11 月 3 日)

本地点では採土円筒を用いて乱れの少ない試料を採取した。その結果、飽和度が約 83%であり、シルト分・粘土分が質量百分率で 80%以上を占める砂礫混じり細粒土であることがわかっていく。

降水に伴う不飽和地盤の飽和度上昇、すなわち浸透過程を土質特性と関連付け、パイピング等の発達メカニズムを明らかにしていくことは重要とおもわれる。

3. MRI による不飽和浸透特性把握の試み

3.1 概要

近年、高性能な電子計算機の普及により、有限要素法や粒子法、それらを組み合わせた解析技術などで急速な進歩がみられている。パイピングやクラックなどの発達過程の解析に大きな期待が寄せられる。ここで、これら解析技術において、まずは簡易的な室内実験の再現が信頼性の確保に求められる。それにより妥当性が確認され、自然斜面や大規模な土構造物に適用・実用されるようになる。

しかしながら、室内実験であっても地盤内挙動を直接みることは難しい。一般に解析結果の妥当性は、地盤の観測点における最終状態と比較することでなされている。

このような背景から、地盤内挙動を観測点における最終状態だけでなく、面的に途中過程を簡単に可視化する技術が確立できれば非常に有用性が高いと考えられる。

本章では山梨大学医学部附属病院のMRI(核磁気共鳴画像法)装置で利用できる水平浸透試験装置を開発し、不飽和土の浸透挙動(時間~距離~水分量変化関係)の可視化を試みる。

3.2 水平浸透試験装置の概要

不飽和透水係数は比水分容量と水分拡散係数の積で表されるが、水平浸透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⁴⁾。

写真-3 に水平浸透試験装置、図-1 にその概略図を示す。円筒リング(厚さ 10mm, 内径 30mm) 50 個のリングセルと定水位給水装置から成る(連結セルの下には撓まないようにゴム板等を設置する。セルの結合部は防水用にシリコングリースを塗布する)。給水開始後、浸透前線が所定の位置(本試験では 200mm とした)まできたら給水を止め、時間を計測する。その後直ちに、試験装置を解体し、セル毎に試料を採取し、炉乾燥させることで、給水開始位置から各セルまでの距離と含水比変化関係を把握する。



写真-3 水平浸透試験装置概観

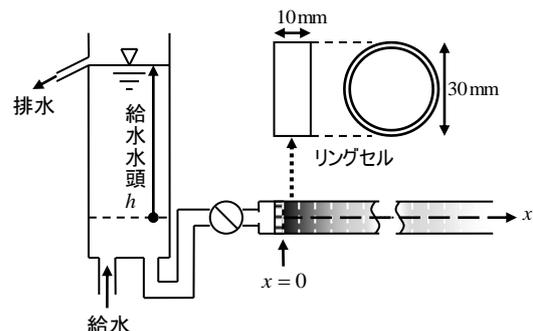


図-1 水平浸透試験装置模式図

不飽和土の試験装置の多くが、多くの時間・経費、高度な知識を必要とする中、本試験自体は数十分から数時間程度（材料に依存する）、炉乾燥まで含めても二日程度である。しかし、実験途中の浸透過程を把握するには、給水時間を変えて数回実験を行う必要があり、時間と手間が肥大化する。また、セル毎に蒸発皿を用意する必要があり、炉乾燥装置の容量などの制限を受ける。

図-2 に乾燥豊浦標準砂を用いた際の含水比 w ～浸透距離関係（以下、水平浸透曲線と称す）を示す。また、近似した折れ線（0～135mm と 135mm～195mm について、最小二乗法で得られた近似直線）を示す。セル毎の乾燥密度の算出は課題となっている。バラツキを多分に有すると考えられたい（乾燥密度 $1.6\text{mg}/\text{mm}^3$ 程度と考えられたい）。目視で浸透線の先端が 200mm に到達するまでの時間 t は 827 秒であった。

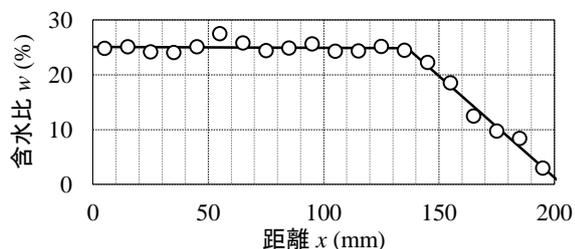


図-2 水平浸透試験結果の例（豊浦標準砂）

3.3 MRI 用水平浸透試験装置の検討

不飽和水平浸透挙動を可視化し、画像解析等により、時間～水分量～距離関係を把握できれば非常に有用である。

本節では、山梨大学医学部附属病院のMRI（核磁気共鳴画像法）装置で、不飽和水平浸透挙動（時間～距離～水分量変化関係）の可視化ができるように改良を試みている。

写真-4 に示すように、写真-3 の水平浸透試験装置をMRI用に改良した。具体的には給水部をマリオットタンクに置き換えることで小型化した。また、金属製部品が使用できないので、連結セルの固定は安価な虫ゴムを使用した。



写真-4 MRI 用水平浸透試験装置概観

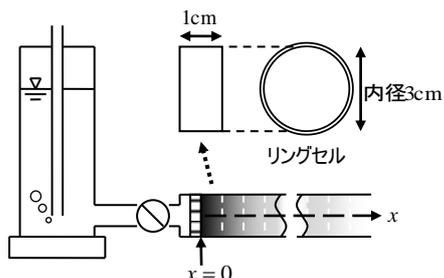


図-3 水平浸透試験装置模式図

写真-4 をみると、連結セルの撓みが解消されていることがわかる（写真-3 を参照）。二方バルブについては、高額（1～2万円程度）になるが樹脂製バルブを用いることによりMRIで撮影できるようにした。

3.4 MRI による不飽和浸透特性把握の試み

写真-5(a), (b)は山梨大学医学部附属病院のMRI装置の概況を示している。人が診療を受ける際と同様に、水平浸透試験装置を診療ベッドに載せて撮影を検討した。万一に備え、土や水が飛散しないように厚手のポリ袋を装置に被せている。実験は二方バルブを開いた時刻を開始時刻とした。撮影はMRI装置の設置室扉を閉めてから行う。



(a) 診療ベッドへの設置状況 (b) 撮影時

写真-5 MRI による水平浸透可視化実験の概況

図-4 は 80 秒後の撮影結果を示している。左端が給水側である。水分が多いほど白く表示される。用いた試料は乾燥豊浦標準砂である（乾燥密度 $1.6\text{mg}/\text{mm}^3$ 程度と考えられたい）が、MRI用に磁石で砂鉄分（質量比で全体の約 0.4%）を除いている。連結セルの下には、外形 50.7mm（内径 47.4mm、高さ 14.1mm）のシャーレを設置し、含水比 w を 25%、20%、15%、10%、5% と変化させた試料（豊浦標準砂）を詰めている。図-4 をみると、含水比 w が 10% を下回るとほとんど映らなくなる様子がわかる。

図-4 をみると、給水開始から 80 秒後では進行方向に対し、ほぼ直交して浸透が進んでいることがわかる。

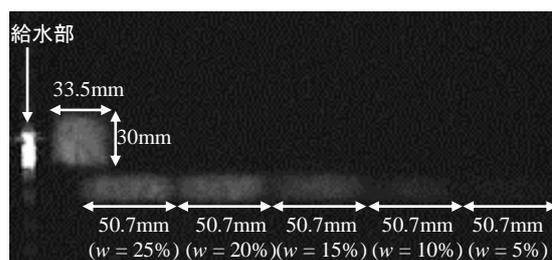


図-4 縦断面（豊浦標準砂、80秒後）

図-5 は 620 秒後の撮影結果を示している。図-5 から時間の経過により、下側ほど浸透が進んでいることがわかる。30mm 程度の高低差でも重力の影響を受けることがわかる。

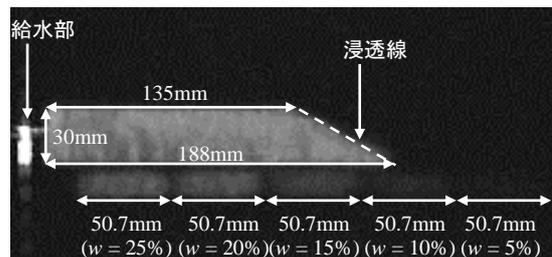


図-5 縦断面（豊浦標準砂、620秒後）

図-2において約135mmの位置で含水比～浸透距離関係が大きく変わったことは、図-5からわかるように連結セル内の上下で浸透の進み方が異なっていることが一因と考えられる。また、浸透線より左側は白く映るが右側は映らない。このことは、浸透線で大きく含水比が異なることを示している。

図-6は931秒後の撮影結果を示している。図-6から下側ほど浸透が進んでいることがわかり、浸透線が湾曲している様子がわかる。また約210mmの位置に丸く黒い部分が見られた。空気のトラップと考えられる。

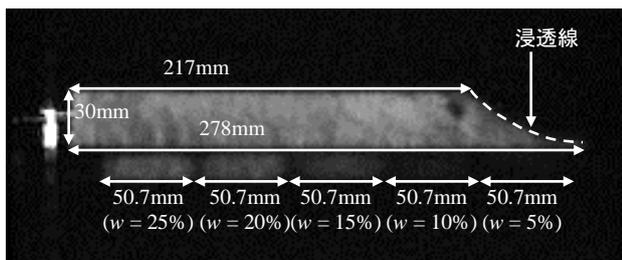


図-6 縦断面（豊浦標準砂，931秒後）

図-7(a)～(d)は667秒後～852秒後の約190mmの位置における横断面を示している。図-7から、リングセルの外側から左上部に向かって浸透していることがわかる。特に図-7(c)，(d)のように、内部に空気のトラップと考えられる丸く黒い部分があらわれている。また、時間と共に小さくなっていることがわかる。

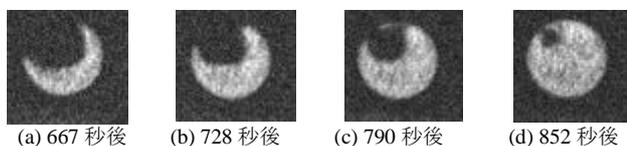


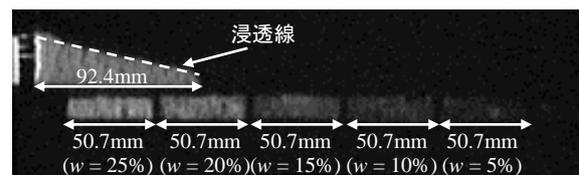
図-7 横断面（豊浦標準砂，x = 約190mm）

図-8(a)，(b)は乾燥ガラスビーズ（粒径0.2mm，土粒子密度2.497mg/mm³）を用いた場合の617秒後と1918秒後の縦断面を示している。ただし、乾燥ガラスビーズが撥水性を示し、浸透しにくかったため、本実験では水頭を10mm与えている。図-8(a)，(b)から、浸透線の勾配は図-8(a)より図-8(b)の方が緩いことがわかる。時間の経過とともに浸透線の勾配が緩くなるとおもわれる。また、図-5と図-8(a)を比較すると、浸透時間は概ね近いにも関わらず、浸透距離に大きな違いが見られていることがわかる。豊浦標準砂の50%通過粒径が概ね0.2mmであることを考えれば、この浸透特性の違いは粒径よりも材料の親水性・撥水性の影響

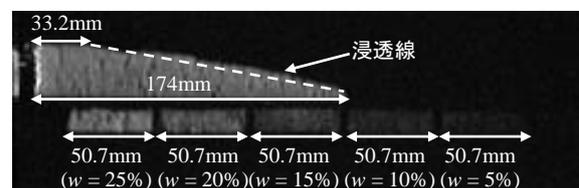
参 考 文 献

- 1) 国土交通省気象庁：災害をもたらした気象事例，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index.html>，(2015年3月11日閲覧)
- 2) 国土交通省気象庁：災害をもたらした気象事例（平成元年～本年），http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_1989.html，(2015年3月11日閲覧)
- 3) 荒木功平・川越清樹・山中稔・ハザリカヘマンタ・原

響と考えられる。



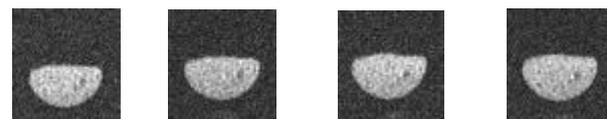
(a) 617 秒後



(b) 1918 秒後

図-8 縦断面（ガラスビーズ）

図-9(a)～(d)は667秒後～852秒後の約130mmの位置における横断面を示している。図-9から、約4分間での浸透の進捗がほとんどみられないことがわかる。また、図-7に示した豊浦標準砂の浸透過程と違い、リングセルの外側から浸透する様子はみられなかった。このことから、浸透過程、特に空気のトラップについて、材料の親水性・撥水性が影響するとおもわれる。



(a) 1673 秒後 (b) 1736 秒後 (c) 1798 秒後 (d) 1860 秒後

図-9 横断面（ガラスビーズ，x = 約130mm）

4. おわりに

本試みでは、水平浸透試験装置を病院等のMRI（核磁気共鳴画像法）装置で可視化できるように改良した。豊浦標準砂とガラスビーズの水平浸透挙動を比較すると、不飽和浸透特性に大きな違いが生じていることが把握できた。このことは、不飽和浸透挙動に、材料の親水性・撥水性が大きく影響することを示している。今後、パイピング等の浸透破壊現象の可視化などへの展開を目指したい。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省平成26年度河川砂防技術研究開発公募地域課題分野（砂防）により実施されました。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 忠・中澤博志・熊本直樹・齋藤修・酒井直樹：平成26年8月豪雨による広島市土砂災害現地踏査・ヒアリング調査結果の速報，第11回環境地盤工学シンポジウム論文集，(掲載決定)，2015。
- 荒木功平・村山啓太・安福規之・大嶺聖・ハザリカヘマンタ：粒度分布を反映した赤土等の土砂流出量算出のモデル化に関する研究，第9回環境地盤工学シンポジウム論文集，pp.213-216，2011。