

[2023105108]

中性子イメージングによる砂・粘土中の透水可視化

Visualization of Water Permeability in Sand and Clay using Neutron Radiography

大河原正文^{#A)}, 中村大樹^{A)}, 木村沙綺子^{A)}, 米澤愛樹^{A)}, 栗田圭輔^{B)}, 飯倉寛^{B)}, 原山勲^{B)}
Masafumi Okawara^{#A)}, Daiki Nakamura^{A)}, Sakiko Kimura^{A)}, Itsuki Yonezawa^{A)},
Keisuke Kurita^{B)}, Hiroshi Ikura^{B)}, Isao Harayama^{B)}

^{A)} Faculty of Science and Engineering, Iwate University, ^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In geotechnical engineering, the phenomenon of water moving through the pores of soil is called permeability, and the property of soil that allows water to pass through is called permeability. Water permeating through the soil induces landslides and slope failures, causing various geotechnical problems such as destabilizing river embankments and ground subsidence due to groundwater pumping. In this research, used neutron radiography to visualize water permeability behavior in sand. The results revealed that the permeability behavior was significantly different between dry sand and wet sand. In other words, in a dry state, water gradually permeates in the direction of flow, but in a wet state, water instantly permeates throughout, increasing the amount of water throughout.

Keyword: Permeability, Gravity Water, Neutron Radiography

1. はじめに

地盤工学において、土の間隙を水が移動する現象を透水といい、水を通す土の性質のことを透水性という。土中を水が透水することにより地すべりや斜面崩壊が誘発され、河川堤防の不安定化、地下水の揚水による地盤沈下など、地盤工学上の諸問題が発生する。土中の水に関する情報は、これまで透水量、流速、水圧といった物理量によって示されてきたが、そもそも水が土のどこに存在し、土の中をどのように流れているのかといった基本的事項については未解明の部分が多い。これまで水を可視化する方法として、着色水の目視観察^[1]、土粒子と水の密度差を利用した CT 画像による可視化^[2]などが試みられてきたが、いずれの方法も土の内部を鮮明に捉えるには限界があった。本実験では、中性子ラジオグラフィを用いて砂中の水の透水挙動を可視化した。

2. 実験方法

2.1 試料

試料は、豊浦砂（山口県豊浦町産）を用いた。豊浦砂は、粒径が 0.2 mm 程度と粒子サイズが揃っており、透水性が良好で地盤工学分野において多くの研究に用いられている。

2.2 透水ユニット

中性子ラジオグラフィ用として小型の透水ユニットを製作した。ユニットのサイズは、TNRF の照射野（横 255mm × 縦 305mm）に収まるよう、高さ 10cm、横 10cm、幅 1cm とし、放射化の影響を少なくするためにアルミニウム製とした（図 1）。ユニットの上下左右から注水、



図 1 透水ユニット

排気できるようにバルブを取り付けた。実験では、透水ユニットに含水比を調整した砂を入れ、ふるい振とう機を用いて振動により砂を締め固めた。

2.3 透水撮影方法

図 2 に実験装置の構成を示す。透水ユニットを TNRF 内の台座に設置し、照射室外部から液送ポンプにより軽水、重水を供給する仕様とした。なお、重水は、飽和後の水の流れを観察するために軽水通水後に約 30 秒間、通水させた。透水状況の撮影は、透水ユニットを Andor 製冷却型 CCD カメラ (iKon-L936、画素数 2048×2048 pixel) 85mm レンズで撮影した。露光時間は 1.2 秒である。撮影は連続撮影で設定し、各条件の開始と終了の時間と枚数を記録した。

含水比を調整した豊浦砂に上からの注水（実験 1）、下からの注水（実験 2）、横（水平方向）からの注水（実験 3）により透水状況を撮影した。なお、初期含水比 w は、絶乾状態に相当する $w = 0\%$ 、最適含水比の $w_{opt} = 11\%$ 、最小透水係数 k_{min} に対応する含水比 $w_{min} = 14\%$ 、そして乾燥側 $w = 3.5\%$ 、湿潤側 $w = 18\%$ に設定した。

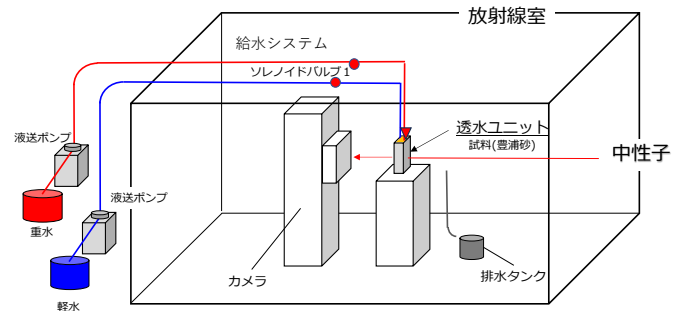


図2 中性子イメージングによる透水システム構成図

[#]E-mail : okawara@iwate-u.ac.jp

[2023105108]

3. 実験結果

生画像にノイズ除去などバックグラウンド処理
1) を行い水の透水状況を可視化した。

3.1 上部からの注水

＜乾燥砂＞ $w=0\%$

図 3 に乾燥砂の上部注水の様子を示す。水が流下していく様子がとらえられているが、まっすぐ下がるのではなく、水平方向に若干横に流れして層状を呈した後に下に落ちていく。

図 4 に輝度の経時変化を示す。上部から中部、下部へと輝度が時間遅れで高くなり、水が順次下方に流れていることが示されている。



注水から約 75s 後 約 370s 約 670s

図 3 上部注水による透水の様子（乾燥砂）

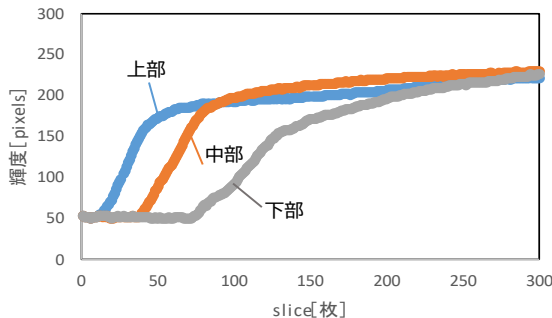
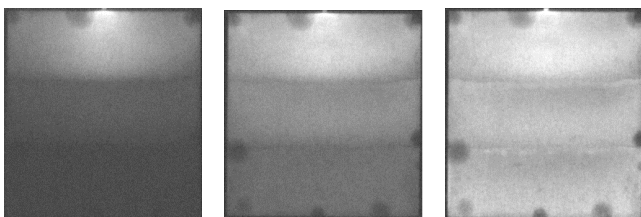


図 4 上部注水時の輝度の時間変化（乾燥砂）

＜湿潤砂＞ $w=11\%$

図 5 に湿潤砂の上部注水の様子を示す。水が注水されると同時に水が層全体に拡がり、乾燥砂に見られたような水みちは観察されない。3 段に層状を呈しているのは、3 層に分けて砂を締め固めたからである。上部層から中部層、そして下部層に水が浸透している。

図 6 に輝度の経時変化を示す。上部の輝度が最初に高くなり、その後、中部と下部の輝度がほぼ重なるように高くなっている。最初に上部層に水が入った後に、ほぼ同時に中部層、下部層に水が浸透していったことを示している。



注水から約 60s 後 約 150s 後 約 270s 後

図 5 上部注水による透水の様子（湿潤砂）

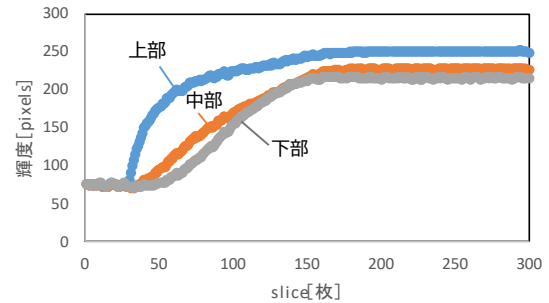


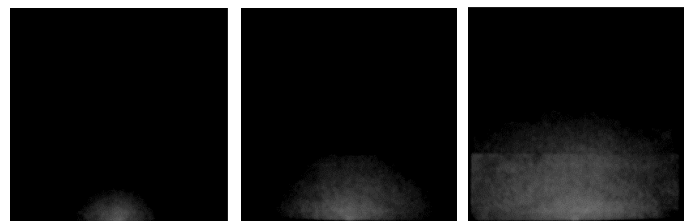
図 6 上部注水時の輝度の時間変化（湿潤砂）

3.2 下部からの注水

＜含水比 3.0%の砂＞

図 7 に含水比 3.5%の低含水状態の様子を示す。下部の注水ポイントから上方に拡大していく様子がとらえられているが、明瞭な輪郭がなく霧状に拡散しているように見える。

図 8 に輝度の経時変化を示す。上部から中部、下部へと輝度が時間遅れで高くなり、水が下から上方に順次拡大していることが示されている。



注水から約 10s 後 約 40s 後 約 100s 後

図 7 下部注水による透水の様子（低含水状態）

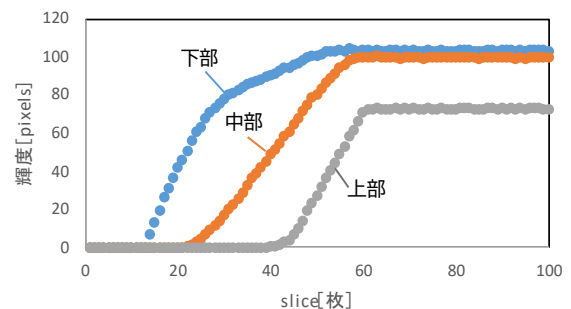


図 8 下部注水時の輝度の時間変化（低含水状態）

＜湿潤砂＞ $w=11\%$

図 9 に湿潤砂の下部注水の様子を示す。水みちのようなものは観察されず、全体が均等に行き渡っているように見える。図 10 に輝度の経時変化を示す。上部、中部、下部の輝度曲線は重なっており、ほぼ同時に水がむらなく全体に行き渡り、浸透していることを示している。

[2023105108]

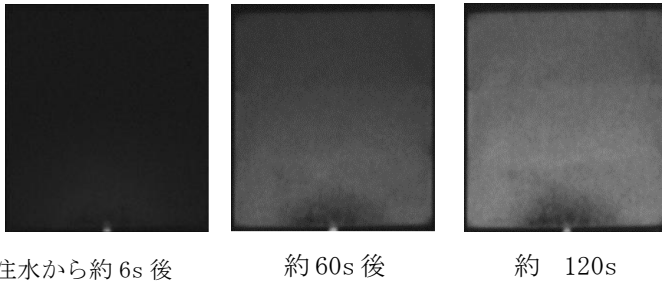


図 9 下部注水による透水の様子（湿潤砂）

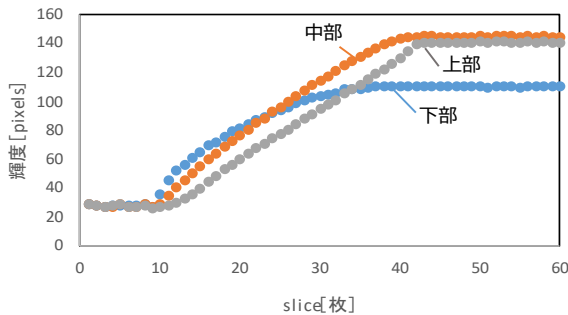


図 10 下部注水時の輝度の時間変化（湿潤砂）

3.3 横（水平方向）からの注水

＜乾燥砂＞ $w=0\%$

図 11 に乾燥砂の横注水の様子を示す。右下の注水ポイントから左方向に水が流れていく様子がとらえられている。流れの先端部を見ると枝状の突起があり、これは締め固め時の粒子配向部を水が優先的に流れたためと考えている。

図 12 に右下、中央、左上の対角線上の輝度曲線を示す。輝度曲線は、右下から中央、そして左上の順番で高くなり、注水ポイントから水平方向が先に流れ、それに続くように上方向にも拡大していくことを示している。

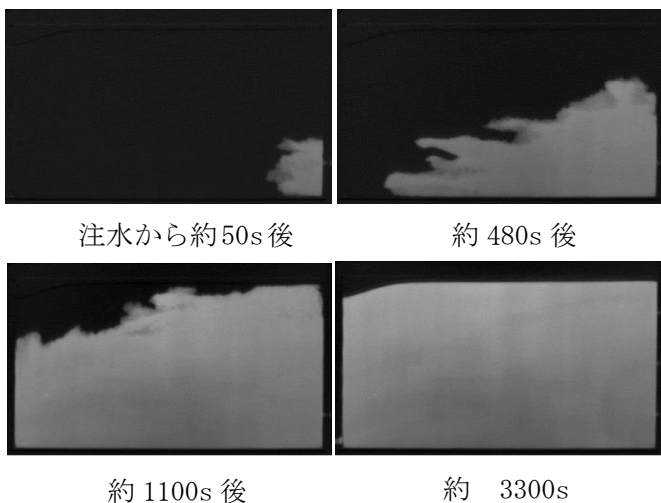


図 11 横注水による透水の様子（乾燥砂）

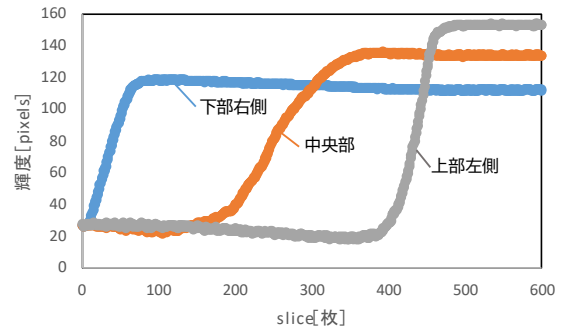


図 12 横注水時の輝度の時間変化（乾燥砂）

＜湿潤砂＞ $w=11\%$

図 13 に湿潤砂の横注水の様子を示す。右下の注水ポイントから左方向に拡大していく様子がとらえられている。乾燥砂のような枝状の水みちは確認されず、明瞭な輪郭もなく全体的に拡大しているようである。

図 14 に対角線上の輝度曲線を示す。右下から中央、そして左上の順番で高くなり、乾燥砂と同じ順番で高くなっているが、上部は二次曲線的な立ち上がり方をしている点で乾燥砂とは異なる。

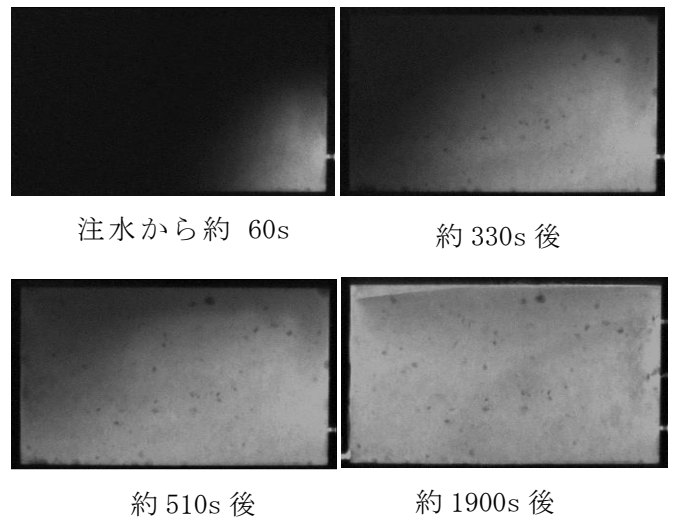


図 13 横注水による透水の様子（湿潤砂）

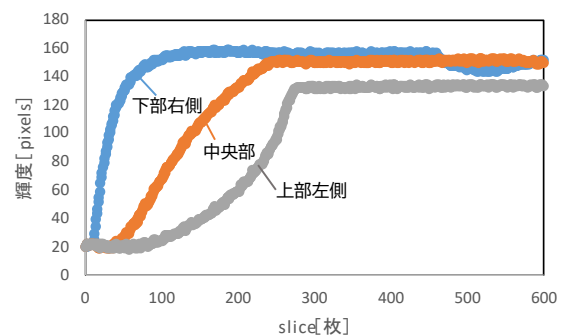


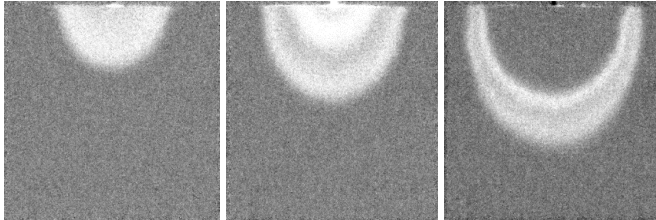
図 14 横注水時の輝度の時間変化（湿潤砂）

[2023105108]

3.4 軽水飽和後の重水注水

<上から $w=14\%$ >

上部の注水ポイントから同心円状に真下に向かって拡大している。

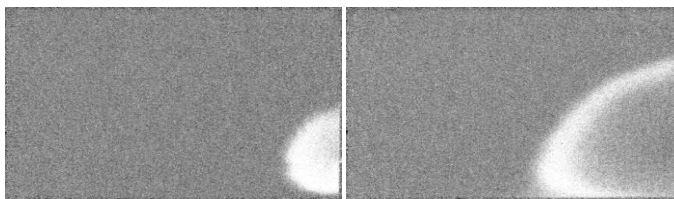


注水から約 90s 後 約 180s 後 約 330s 後

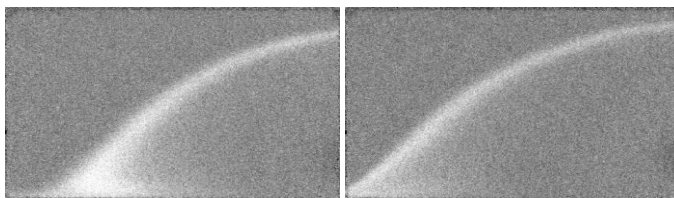
図 15 上部注水による重水の透水挙動

<横から $w=14\%$ >

右から半円状に左方向に拡大していくが、最下部の流れの方が優先されているようで半円から曲線的なラインに移行している。



注水から約 90s 後 約 360s 後



約 750s 後 約 990s 後

図 16 横注水による重水の透水挙動

3.5 飽和状態での重水を利用した流速測定

重水の移動状況から飽和状態における水の流速を測定した。測定は注入ポイントから重水の先端部までの距離を移動距離として到達時刻との関係を整理した (図 17)。

図 18 に上部注水による重水の移動距離と時間との関係を示す。図より初期含水比 $w=0\%$ 、 11% 、 14% の移動速度に有意な関係は認められない。

図 19 に横からの注入による重水の移動距離と時間との関係を示す。含水比 0% 、 11% 、 14% にわずかな違いがあるものの含水比の大小と明瞭な関係は認められない。本実験では飽和状態での透水に初期含水比の影響は確認されなかった。

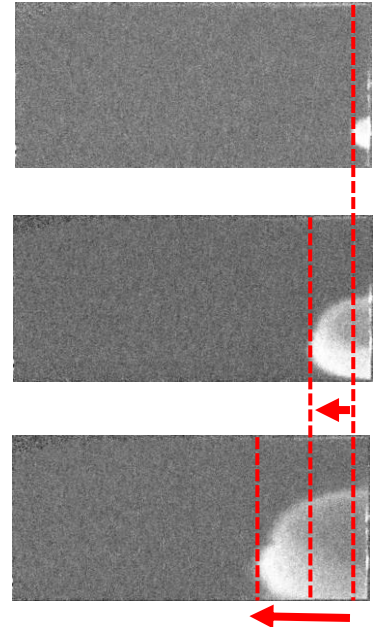


図 17 重水の移動距離の測定

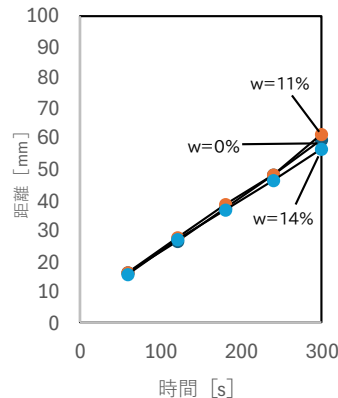


図 18 上部注水時の重水の移動距離と時間関係

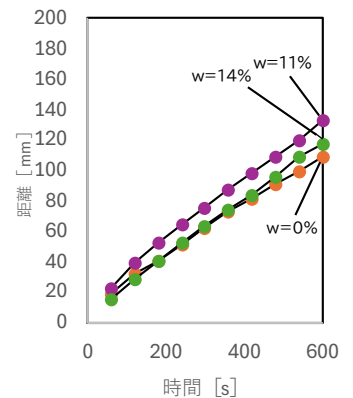


図 19 横注水時の重水の移動距離と時間関係

4. まとめ

本実験では、中性子ラジオグラフィを用いて砂の水の透水挙動を可視化した。その結果、乾燥砂と湿潤砂で透水挙動が大きく異なり、乾燥状態では水みちをつくり流れていくが、湿潤状態では瞬間的に全体的、面的に水が広がっていき、水道のような透水形態をとらないことが明らかになった。また、飽和後の透水状況については、重水の流れ観察から、乾燥砂、湿潤砂の違いは認められず、いずれも同心円状を呈して拡大していく。

参考文献

- [1] 安江絵翔, 前田健一, 鈴木悠真, 丹羽俊介: 砂質地盤内で生じる浸透流が開水路流れの抵抗特性に及ぼす影響, 土木学会論文集 B1, Vol.76, No.2, I_1243-I_1248, 2020.
- [2] 徳永健介, 大谷順: X 線 CT 法を用いた混合土中の透水に関する定量的評価, 第 38 回地盤工学研究発表会, D-04, 2003.7.