

[2024105111]

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)}, 久保里奈^{A)}, 山田進也^{A)}, 齊藤剛^{A)}, 木村沙綺子^{A)}, 栗田圭輔^{B)}, 原山勲^{B)}, 飯倉寛^{B)}
Masafumi Okawara^{#A)}, Rina Kubo^{A)}, Shinya Yamada^{A)}, Tsuyoshi Saitou^{A)}, Sakiko Kimura^{A)},
Keisuke Kurita^{B)}, Isao Harayama^{B)}, Hiroshi Iikura^{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

地盤工学において、土粒子間の間隙を水が移動する現象は「透水」と呼ばれ、このような水の移動を可能にする土の性質は「透水性」と定義される。土中における透水は、地すべりや斜面崩壊の誘因となるほか、河川堤防の安定性低下や、地下水の揚水に伴う地盤沈下など、さまざまな地盤工学的問題を引き起こす要因となる。これまで、土中の水に関する情報は主に透水量、流速、水圧といった物理量によって評価されてきたが、水が土のどこに存在し、どのような経路をたどって流れるのかといった根本的な挙動については、いまだ未解明な点が多い。これまでに、水の可視化手法としては、着色水による目視観察^[1]や、土粒子と水の密度差を利用した X 線 CT 画像による可視化^[2]などが試みられてきたが、これらの手法では土の内部構造を高い解像度で捉えることに限界があった。そこで本実験では、より高い透過性と水に対する感度を有する中性子ラジオグラフィを用い、砂および粘土中における水の透水挙動の可視化を試みた。

2. 実験方法

2.1 試料

試料は、豊浦砂（山口県豊浦町産）、カオリナイト（インドネシア産）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。カオリナイトは代表的な粘土鉱物のひとつで、膨潤性が低く安定した化学的性質を持つ。

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、上下部か

らの注水の際は高さ 10cm、横 10cm、幅 1cm、横からの注水の際は高さ 10cm、横 20cm、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、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及びカオリナイト入れ、ふるい振とう機を用いて振動により締め固めた。

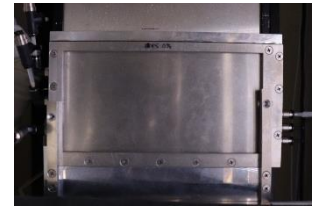
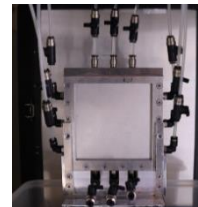


図 1 透水ユニット

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、

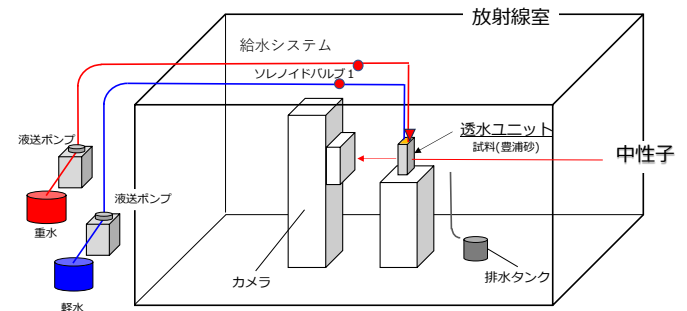


図2 中性子イメージングによる透水システム構成図

[2024105111]

重水は、飽和後の水の流れ（透水）を観察するために軽水通水後に約 100 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 1.0 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)、カオリナイトに上からの注水(実験 4)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。

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

<含水比 3.5%の砂>

図 3 に低含水砂の上部注水による水の浸透の様子を示す。水が下方及び周囲へと同心円状に広がり、均一に浸透していく様子が確認される。

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。

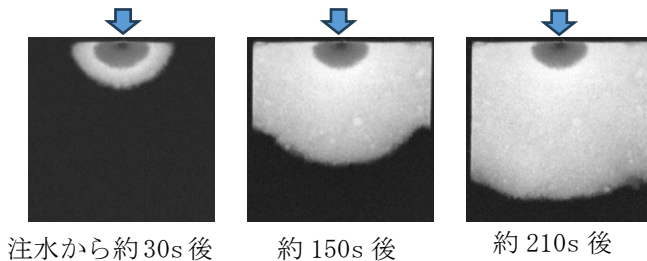


図 3 上部注水による透水の様子(低含水砂)

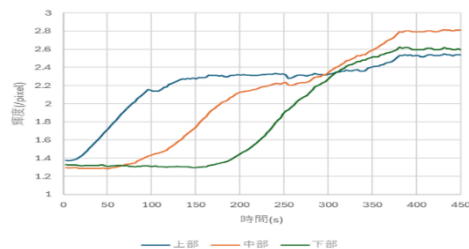


図 4 上部注水時の輝度の時間変化(低含水砂)

<含水比 18%の砂>

図 5 に湿潤砂の上部注水による水の浸透の様子を示す。水が注水されると同時にユニット全体に拡がっている様子が確認できる。

図 6 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。

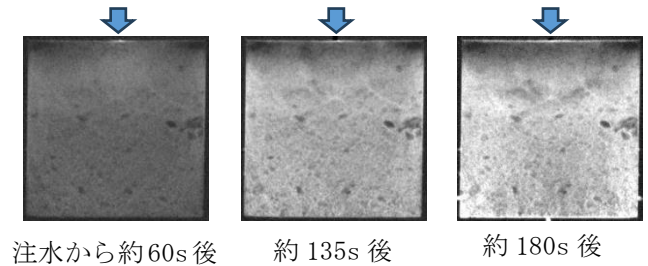


図 5 上部注水による透水の様子(湿潤砂)

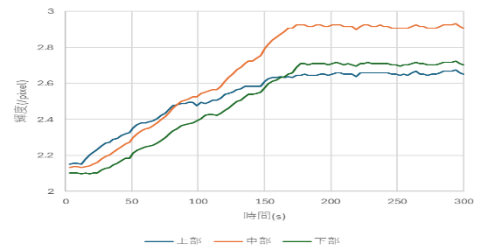


図 6 上部注水時の輝度の時間変化(湿潤砂)

3.2 下部からの注水

<乾燥砂> $w=0\%$

図 7 に乾燥砂の下部注水による水の浸透の様子を示す。下部の注水ポイントから注水した方向に沿って水が流れていく様子が確認できる。

図 8 に輝度の経時変化を示す。下部から中部、上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。

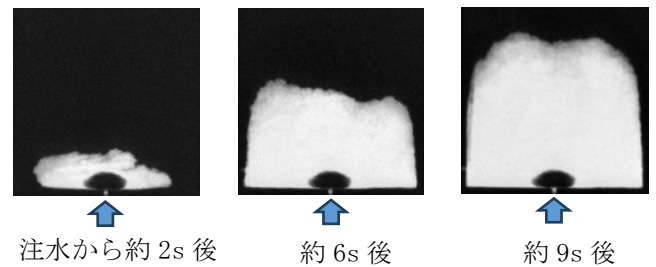


図 7 下部注水による透水の様子(乾燥砂)

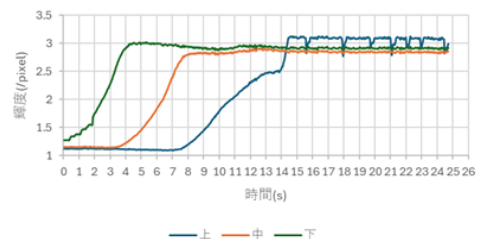


図 8 下部注水時の輝度の時間変化(乾燥砂)

[2024105111]

＜湿潤砂＞ $w=11\%$

図 9 に湿潤砂の下部注水による水の浸透の様子を示す。注水後、全体に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。下部の輝度が最初に高くなり、その後、中部と上部の輝度がほぼ重なるように高くなっている。最初に下部層に水が入った後に、ほぼ同時に中間層、上部層に水が浸透していったことを示す。

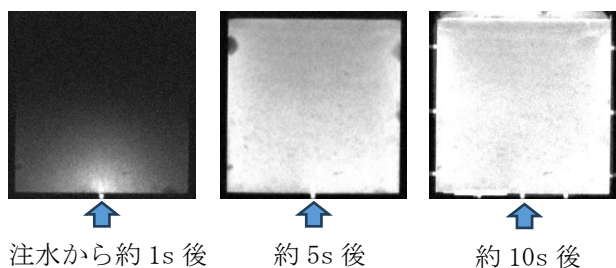


図 9 下部注水による透水の様子（湿潤砂）

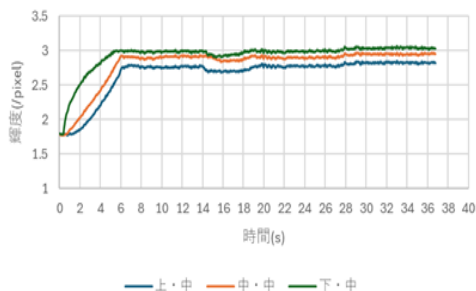


図 10 下部注水時の輝度の時間変化（湿潤砂）

＜含水比 14%の砂＞

図 11 に湿潤砂の下部注水による水の浸透の様子を示す。含水比 11%と同様に注水後、全体に均等に行き渡っているように見える。

図 12 に輝度の経時変化を示す。こちらも含水比 11%と同様に最初に下部層に水が入った後に、ほぼ同時に中間層、上部層に水が浸透していったことを示す結果となった。

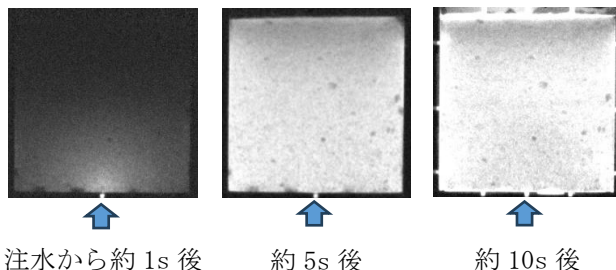


図 11 下部注水による透水の様子（湿潤砂）

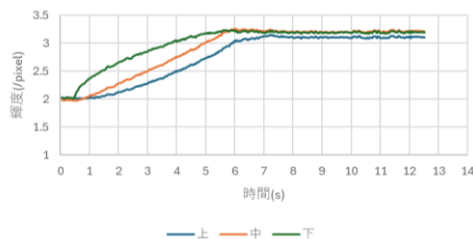


図 12 下部注水時の輝度の時間変化（湿潤砂）

3.3 横（水平方向）からの注水

＜乾燥砂＞ $w=0\%$

図 13 に乾燥砂の横注水による水の浸透の様子を示す。右下の注水ポイントから上方および左方向へと拡がり、全体に向かって徐々に浸透していく様子が確認できる。

図 14 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。

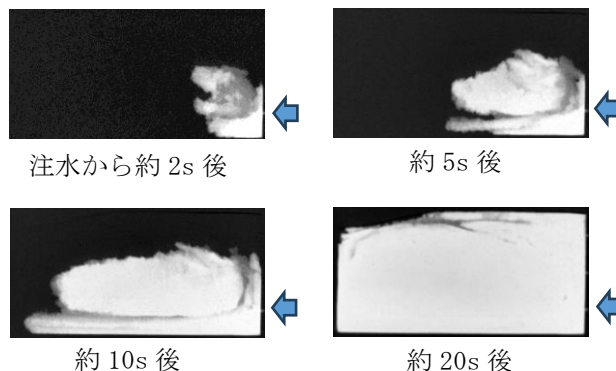


図 13 横注水による透水の様子（乾燥砂）

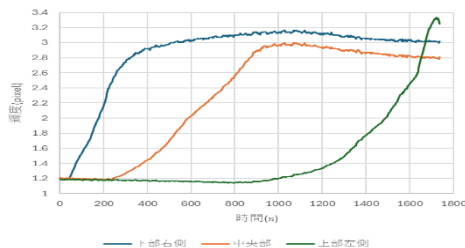


図 14 横注水時の輝度の時間変化（乾燥砂）

＜含水比 3.5%の砂＞

図 15 に低含水砂の横注水による水の浸透の様子を示す。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。乾燥砂と異なり均一に拡がっているように見える。

図 16 に対角線上の輝度曲線を示す。右下から中

[2024105111]

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。

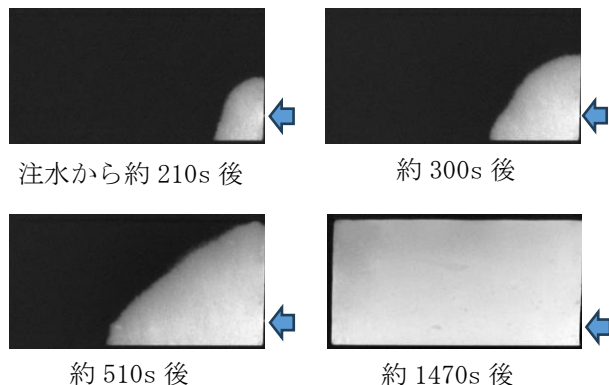


図 15 横注水による透水の様子（低含水砂）

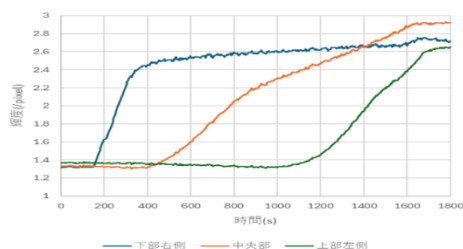


図 16 横注水時の輝度の時間変化（低含水砂）

＜含水比 14%の砂＞

図 17 に湿潤砂の横注水による水の浸透の様子を示す。水が注水されたと同時に水が全体に広がっているように見える。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。

図 18 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、中央から右下、そして左上の順番で高くなっており、これは試料が割れてしまい下部に水が流れにくくなったためと考えている。

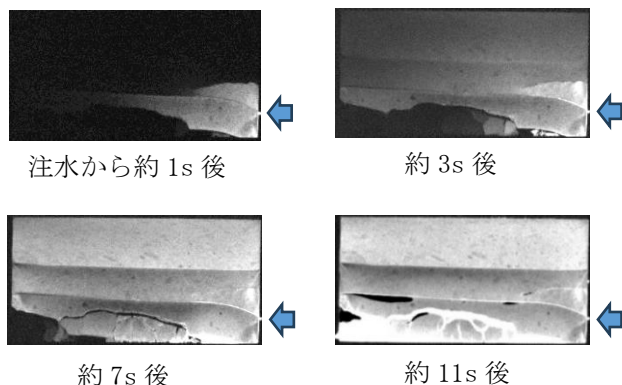


図 17 横注水による透水の様子（湿潤砂）

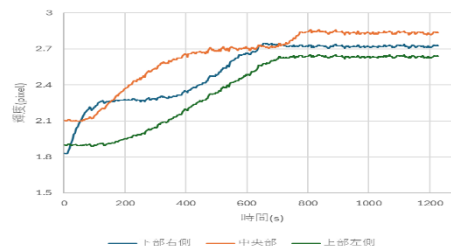


図 18 横注水時の輝度の時間変化（湿潤砂）

3.4 上部からの注水

＜カオリナイト＞ $w=0\%$

図 19 にカオリナイトの上部注水による水の浸透の様子を示す。上部の注水ポイントから下方向に水が流れていく様子がとらえられている。砂試料に比べ浸透するのに著しく時間を要する結果となった。

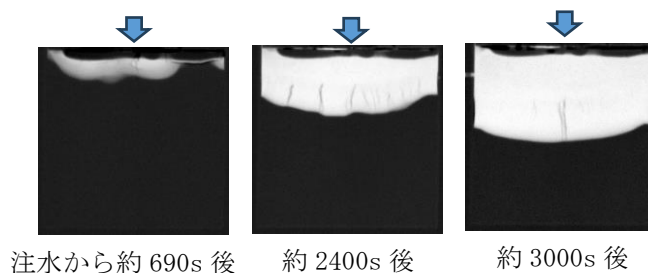


図 19 上部注水による透水の様子（カオリナイト）

3.5 軽水飽和後の重水注水

＜上から $w=3.5\%$ ＞

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。

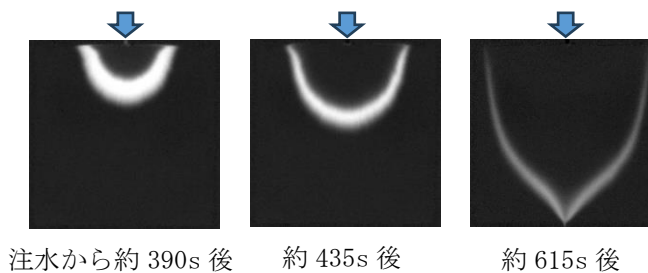
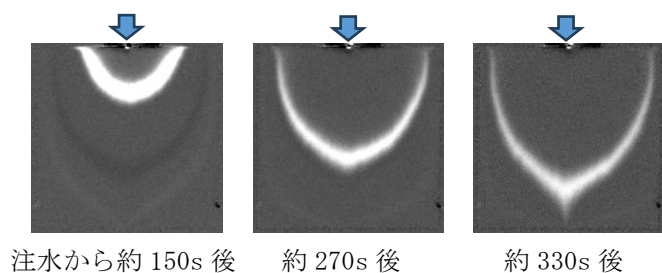


図 20 上部注水による重水の透水挙動

＜上から $w=18\%$ ＞

含水比 3.5%の時と同様に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。

[2024105111]

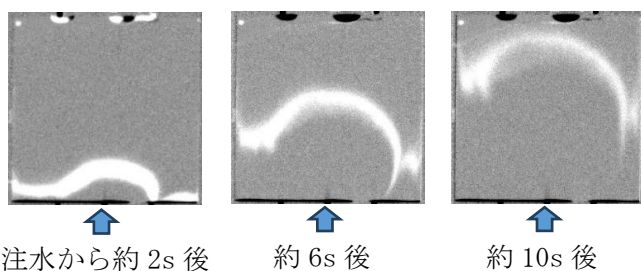


注水から約 150s 後 約 270s 後 約 330s 後

図 21 上部注水による重水の透水挙動

<下から $w=0\%$ >

下部の注水ポイントから円弧を描くように真上に向かって拡大している。

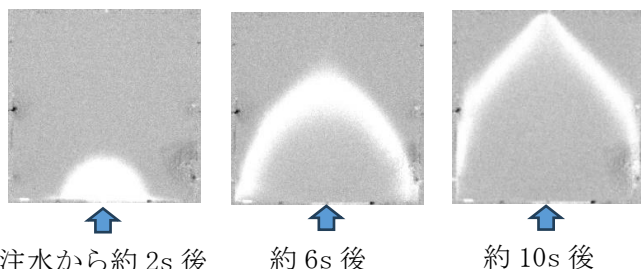


注水から約 2s 後 約 6s 後 約 10s 後

図 22 下部注水による重水の透水挙動

<下から $w=11\%$ >

下部の注水ポイントから注水方向に沿って透水している。

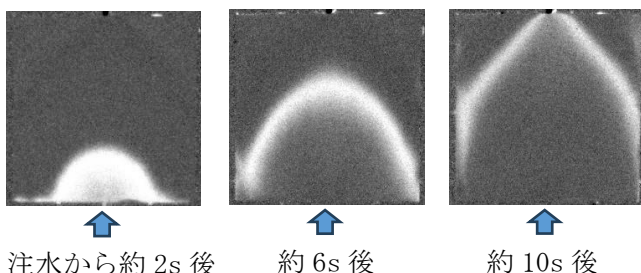


注水から約 2s 後 約 6s 後 約 10s 後

図 23 下部注水による重水の透水挙動

<下から $w=14\%$ >

含水比 11%と同様に下部の注水ポイントから注水方向に沿って透水している。

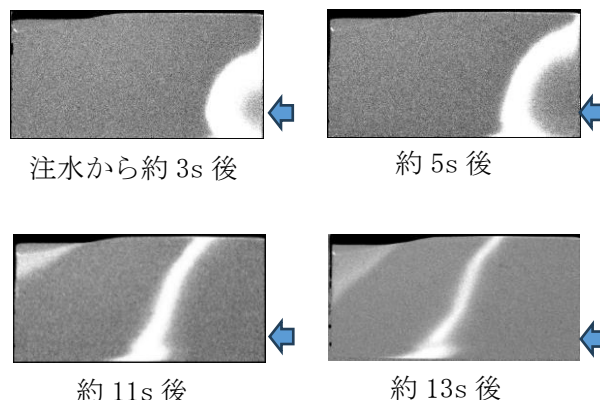


注水から約 2s 後 約 6s 後 約 10s 後

図 24 下部注水による重水の透水挙動

<横から $w=0\%$ >

水の広がり当初、右側から半円状に左方向へと進行したが、下部を伝う流れが優先されることで、拡がりの形状は半円から曲線的な輪郭へと変化している。



注水から約 3s 後

約 5s 後

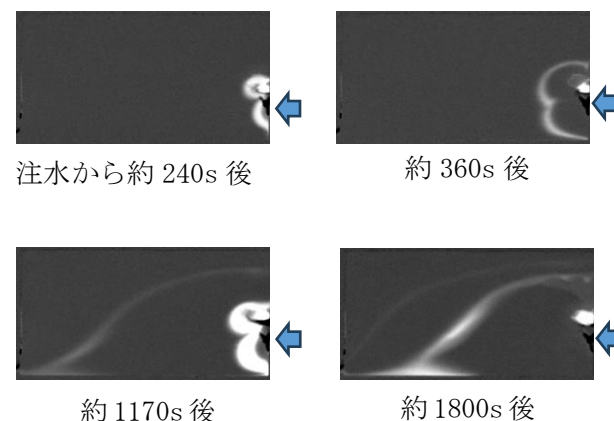
約 11s 後

約 13s 後

図 25 横注水による重水の透水挙動

<横から $w=3.5\%$ >

右から左方向に拡大していくが、注水部付近の試料が崩れていたことにより、透水挙動に影響を及ぼしたと考えられる。



注水から約 240s 後

約 360s 後

約 1170s 後

約 1800s 後

図 26 横注水による重水の透水挙動

<横から $w=14\%$ >

右から左方向に拡大していくが、含水比 3.5%の時と同様に試料が崩れていたことにより、透水挙動に影響を及ぼしたと考えられる。

[2024105111]

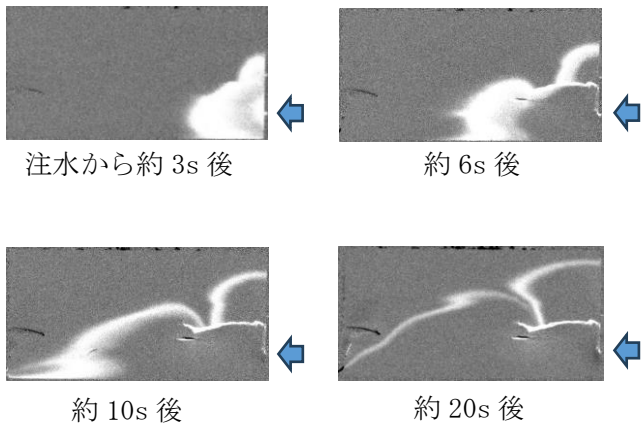


図 27 横注水による重水の透水挙動

<カオリナイト 上から $w=0\%$ >

上部の注水ポイントから下方に向かって徐々に水が透水していく様子が確認された。透水は主に、試料とユニットとの隙間や、試料中に生じたひび割れ部を優先的に通過する形で進行した。また、ひび割れは軽水の注入に伴う試料の収縮により、生じた可能性があると考えられる。

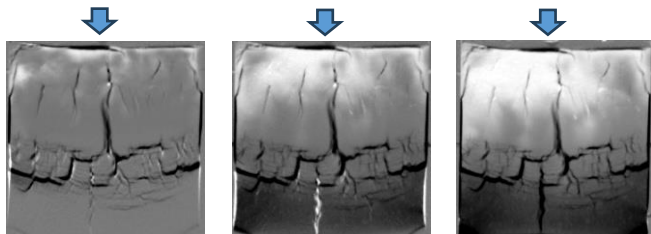


図 28 下部注水による重水の透水挙動

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 29 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 $w=3.5\%$ 、 18% の移動速度に有意な関係は認められない。

図 30 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。含水比が高い試料ほど、重水の移動速度が速くなる傾向が確認された。

図 31 に下部注水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。

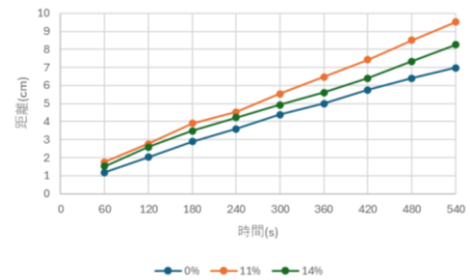


図 31 下部注水時の重水の移動距離と時間関係

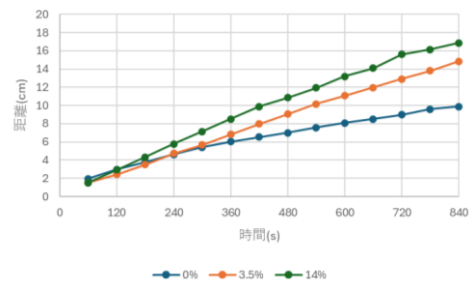


図 30 横注水時の重水の移動距離と時間関係

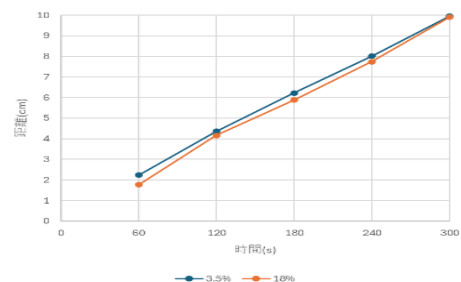


図 29 上部注水時の重水の移動距離と時間関係

4. まとめ

本実験では、中性子ラジオグラフィを用いて砂中の水の透水挙動を可視化した。その結果、乾燥砂と湿潤砂とでは透水挙動に顕著な違いが認められた。乾燥状態では、水は限られた経路（いわゆる水みち）を形成しながら浸透するのに対し、湿潤状態では水が瞬時に広範囲へと面的に拡散し、水みちを形成することなく浸透が進行することが明らかとなった。また、試料が飽和に達した後の透水挙動については、重水を用いた観察の結果、乾燥砂・湿潤砂のいずれにおいても差異は見られず、いずれも瞬時に面的に拡大することが明らかになった。

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-

[2024105111]

04,2003.7.