様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ５ 月 １３ 日現在

機関番号：１５４０１
研究種目：若手研究
研究期間：2023～2024
課題番号：２３Ｋ１３４０４

研究課題名（和文）泥水浸潤時の土中間隙ミクロ構造変化に着目した泥膜形成メカニズムの解明

研究課題名（英文）Clarification of mechanism of mud film formation focusing on microscale structural changes in soil pores during slurry infiltration

研究代表者

木戸　隆之祐（Kido, Ryunosuke）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：４０８４７３６５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ベントナイト系およびポリマー系の安定液を砂に浸潤させた際の土粒子間隙内におけるベントナイトの空間分布を可視化し，泥膜形成とそれによる透水性変化のメカニズムを考察した．ベントナイト濃度や浸潤圧力が高く，砂の粒径が小さいほど明瞭な泥膜が形成されるとともに，泥膜下部の土粒子間隙内に体積の大きいベントナイトが目詰まりしやすい傾向がわかり，透水性の低下に寄与していることがわかった．ポリマー系安定液の場合は，泥膜が形成されず安定液の高粘性によって透水性が低下することがわかった．

研究成果の学術的意義や社会的意義
安定液浸潤時の泥膜形成については，基本的に土表面に形成される泥膜の目視や電子顕微鏡を用いた表面観察に留まっていた．これに対して本研究は，安定液浸潤試験にX線CTを適用する試験体系を新たに構築し，泥膜形成に加えてその下部にもベントナイトが局所的に目詰まりし透水性低下をもたらすことを明らかにしており，学術的な新規性の高い成果である．本研究の成果に基づき，安定液浸潤時の泥膜形成プロセスの予測法の開発につなげていく．これにより，泥膜が形成される条件が明確化され，アースドリル工法等での地盤掘削をより確実・安全に実施できるようになることが期待される．したがって本研究成果の社会的意義は大きい．

研究成果の概要（英文）：The spatial distribution of bentonite within the pore spaces of sand was visualized after infiltration with bentonite-based and polymer-based stabilizing fluids, and the mechanism of mud film formation and the resulting changes in permeability were examined. It was found that higher bentonite concentrations, higher infiltration pressures, and smaller sand particle sizes led to more distinct mud film formation. In addition, bentonite tended to clog the pore spaces beneath the mud film, contributing to a reduction in permeability. In contrast, for polymer-based stabilizing fluids, no mud film was formed, and the reduction in permeability was attributed to the high viscosity of the stabilizing fluid.

研究分野：地盤工学

キーワード：安定液　ベントナイト　泥膜　X線CT　画像解析　浸潤

１．研究開始当初の背景

図 1 に泥水を用いた地盤掘削の概略図と本研究の着目点を示す．泥水が孔壁に浸潤し形成された泥膜は不透水層となり，泥水圧が土圧と地下水圧に抵抗するため孔壁が安定する．一方，泥膜が未形成の場合，逸泥（泥水が地盤へ流出する現象）により孔壁が崩壊し，人命に関わる重大事故につながる要因となる．このように泥膜は，安全に地盤掘削する上で重要な役割を果たす．泥膜形成メカニズムを解明できれば，泥膜の形成状況の予測法や逸泥による孔壁崩壊リスク評価法の確立に寄与し，より安全な土木構造物の施工に資すると考えられる．

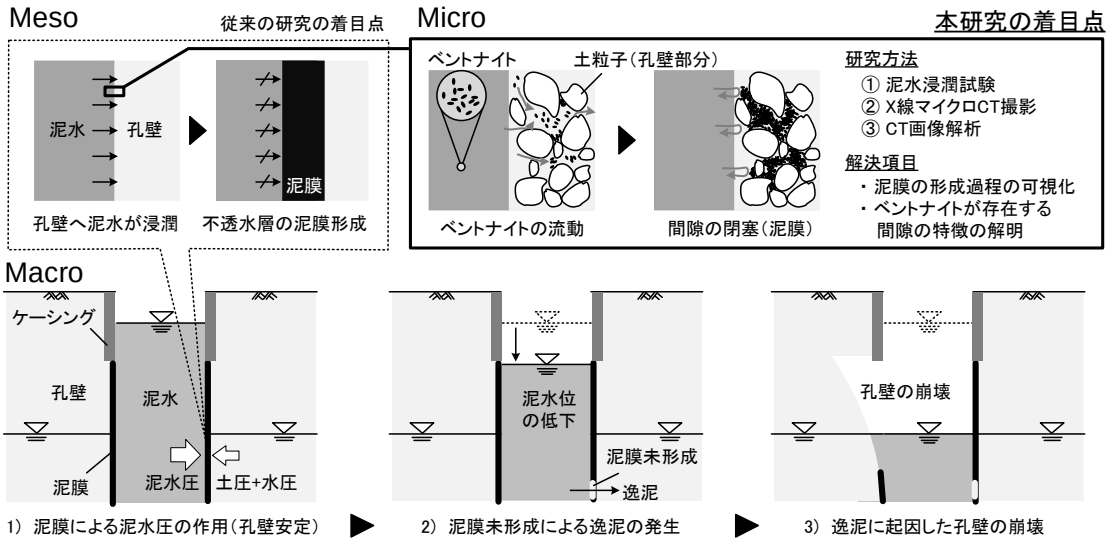


図 1　泥水を用いた地盤掘削の概略図と本研究の着目点

２．研究の目的

本研究の目的は，泥水が地盤に浸潤する際の泥膜形成メカニズムの解明である．

３．研究の方法

図 2 に研究方法の概要を示す．安定液浸潤試験に X 線 CT 撮影を適用し，得られた CT 画像に画像解析を実施することで，試料内部の間隙を占めるベントナイトの体積を定量化し，その分布状況を明らかにした．加えて，浸透流画像解析を実施し，ベントナイトが間隙内に詰まる前後での間隙内流速分布や透水性変化を定量化した．安定液はアースドリル工法で作製される標準配合を参考に，ベントナイト，CMC（カルボキシルメチルセルロース），水を混合して作製した．浸潤試験では，安定液内のベントナイト濃度，CMC 濃度，浸潤圧力，砂の粒径を変化させた．浸潤試験の様子と浸潤後の砂表面の泥膜形成状況の一例を図 3 に示す．また，浸潤試験で測定した安定液の累積流量の時間変化の一例を図 4 に示す．浸潤開始時には線形的に流量が増えていくが，ある段階で浸潤が停止して累積流量が一定に収束する傾向が見られる．この収束が見られたケースではいずれも砂表面に明確な泥膜が形成された．

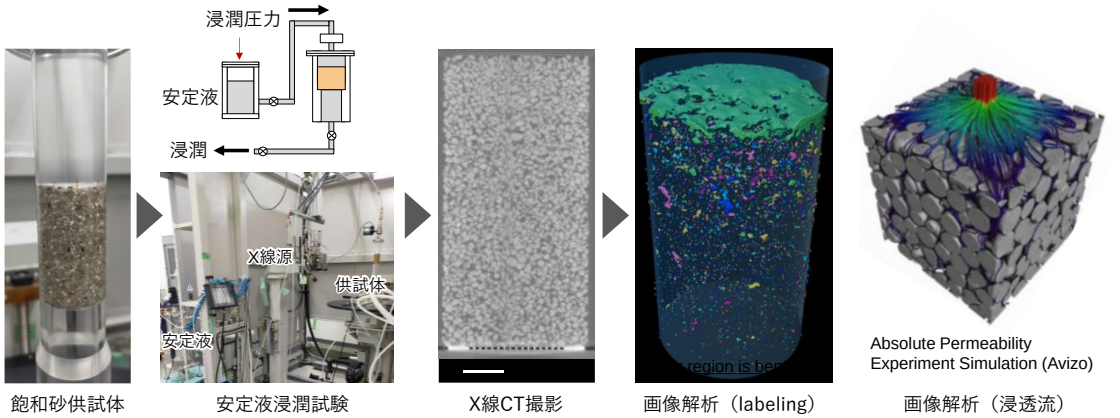


図 2　研究方法の概要

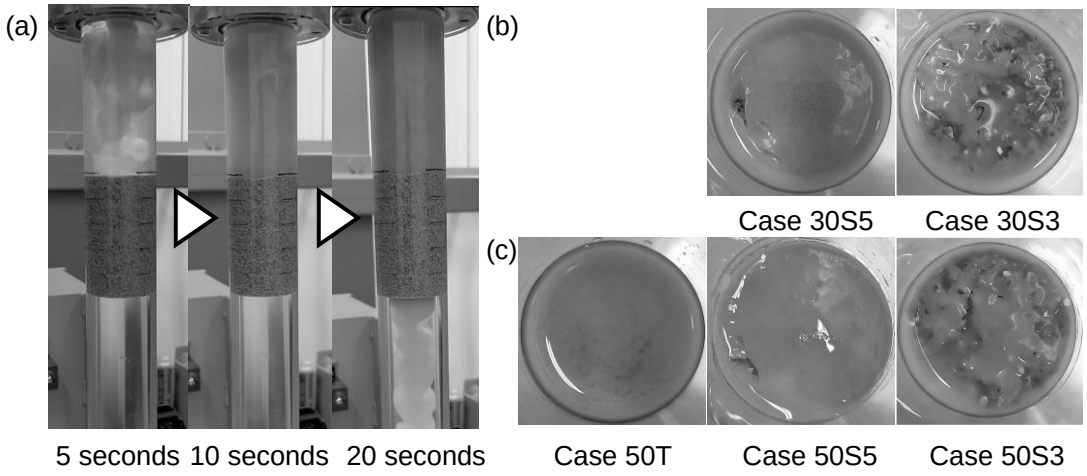


図 3　浸潤試験の様子と浸潤後の砂表面の泥膜形成状況の一例

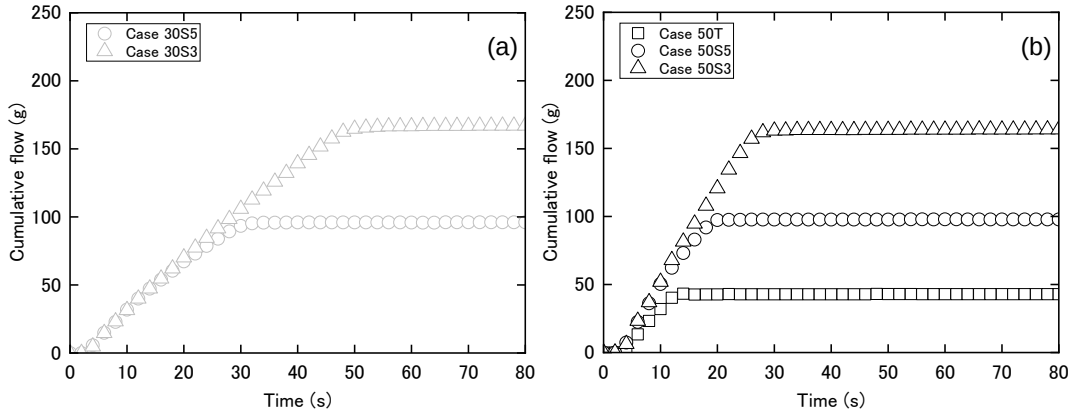


図 4　累積流量の時間変化の一例

４．研究成果

本研究では，安定液浸潤前後の供試体内部を X 線 CT で可視化し，泥膜形成や土粒子間隙内のベントナイトの空間分布を明らかにすることができた．CT 画像の一例を図 5 に，ベントナイトの空間分布を図 6 に示す．図 6 から，泥膜の存在だけでなくその下部にもベントナイトが空間的に分布していることが明らかとなった．また，安定液の浸潤圧力が高いほど，ベントナイト濃度が高いほど，明確な泥膜が形成され，土粒子間隙内に目詰まりするベントナイトの体積が大きいことが明らかとなった．

また，浸透流画像解析を行い得られた，ベントナイトが目詰まりした箇所における浸潤前の間隙内流速とベントナイト体積の関係を図 7 に示す．安定液濃度が大きいほど，体積のより大きなクラスターが存在し，間隙の流速が相対的に速い箇所にベントナイトが閉塞しやすいという特徴が明らかとなった．

さらに，ベントナイト系とポリマー系の安定液の浸潤試験を行い，得られた累積流量の時間変化とベントナイトの空間分布を図 8 に示す．ベントナイト系安定液の場合，ベントナイト濃度が高い場合は明確な泥膜が形成されて浸潤が停止する傾向があるのに対して，ポリマー系安定液の場合は CMC 濃度が高い場合，泥膜が形成されていないにも関わらず浸潤が停止する傾向が見られた．この結果から，ポリマー系安定液の透水性低下メカニズムはベントナイトではなく CMC による高粘性化が主要因であることが明らかとなった．

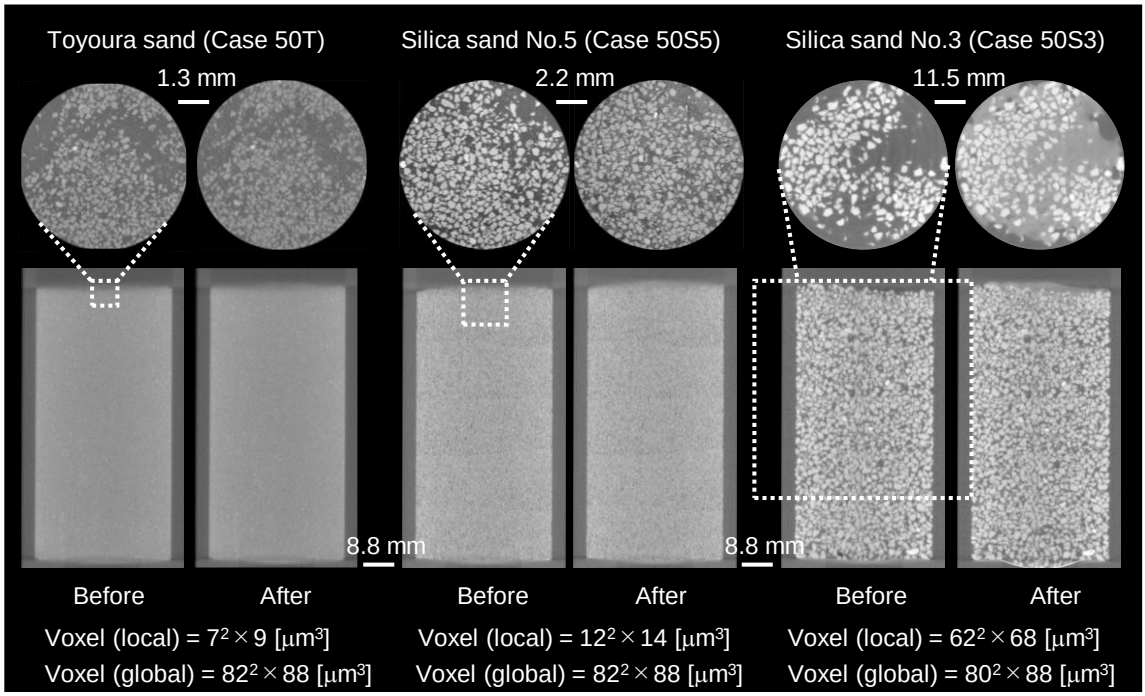


図 5　浸潤前後の供試体内部の可視化結果の一例

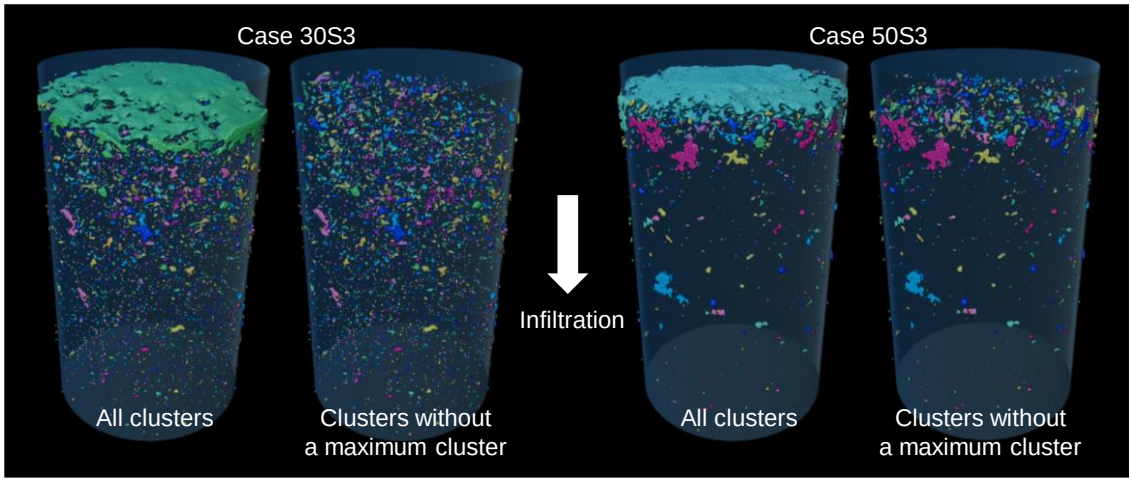


図 6　ベントナイトの空間分布（カラー部分はすべてベントナイトで，色の違いはそれぞれ独立して存在するベントナイトを指す ID である．上部に存在する一色の部分が泥膜であり，その下部にもベントナイトが空間的に存在していることがわかる）

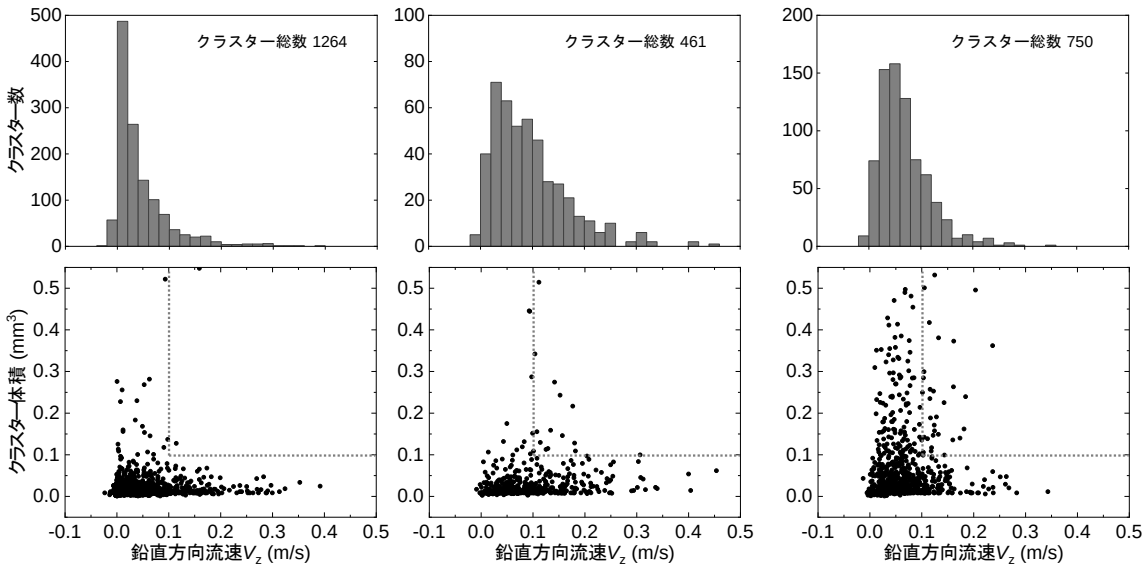
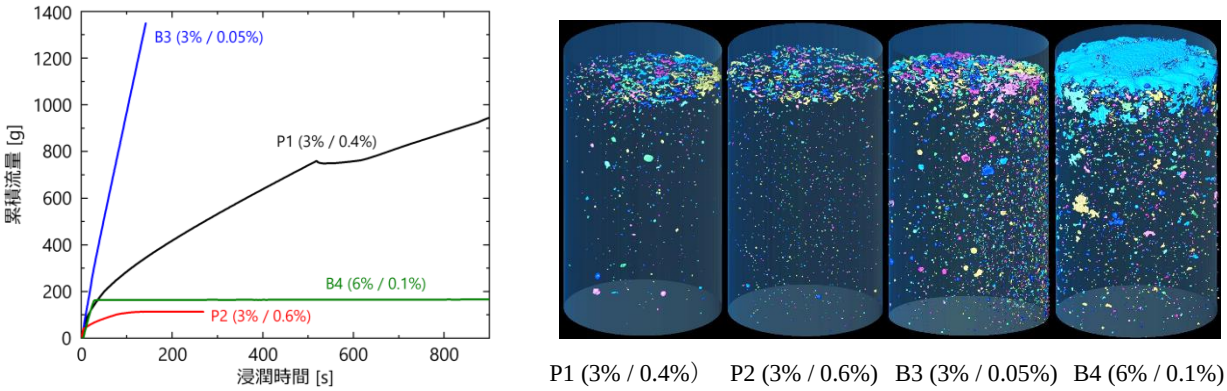


図 7　クラスター体積と浸潤方向の流速の関係



P1 (3% / 0.4%)　P2 (3% / 0.6%)　B3 (3% / 0.05%)　B4 (6% / 0.1%)

図 8　ベントナイト系・ポリマー系安定液の累積流量－時間関係およびベントナイト空間分布

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Kido R.、Ueda H.	４．巻 15
２．論文標題 Microscale investigation of bentonite distribution in pore spaces of sand after infiltration of stabilising solution	５．発行年 2025年
３．雑誌名 Geotechnique Letters	６．最初と最後の頁 1～6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jgele.24.00053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計5件（うち招待講演　0件／うち国際学会　2件）

１．発表者名 Kido, R. and Ueda, H.
２．発表標題 Pore-scale investigation on mud film formation during infiltration of bentonite slurry solution
３．学会等名 33rd ALERT Geomaterials Workshop（国際学会）
４．発表年 2023年

１．発表者名 上田　聖，木戸隆之祐，木村　亮
２．発表標題 濃度が異なる安定液浸潤後の土粒子間隙におけるベントナイト存在領域の可視化
３．学会等名 第58回地盤工学研究発表会
４．発表年 2023年

１．発表者名 木戸隆之祐，上田　聖
２．発表標題 土粒子間隙内の流速分布に着目した安定液浸潤時のベントナイトの閉塞特性
３．学会等名 第59回地盤工学研究発表会
４．発表年 2024年

１．発表者名 Kido, R. and Ueda, H.
２．発表標題 Microscopic distribution of bentonite in pore spaces of sand after infiltration of stabilizing solution with different concentrations
３．学会等名 IS-Grenoble2024（国際学会）
４．発表年 2024年

１．発表者名 堀　温人，上田　聖，木戸隆之祐
２．発表標題 X線マイクロCTを用いたポリマー系安定液浸潤後の土粒子間隙の可視化
３．学会等名 第59回地盤工学研究発表会
４．発表年 2024年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

―

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究協力者	肥後　陽介 (Higo Yosuke)		

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関