公益財団法人大林財団

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	変形追随性を有するソイルベントナイト鉛直遮水壁の動的挙動および遮水性能に関する基礎的研究
研究者名※	渡邉 康司
所属組織※	愛知工業大学 工学部土木工学科 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。
（　）は、報告書提出時所属先。

（研究報告-様式 2）

大林財団２０２２年度研究助成実施報告書

所属機関名　　愛知工業大学
申請者氏名　　渡邉　康司

研究課題	変形追随性を有するソイルベントナイト鉛直遮水壁の動的挙動および遮水性能に関する基礎的研究

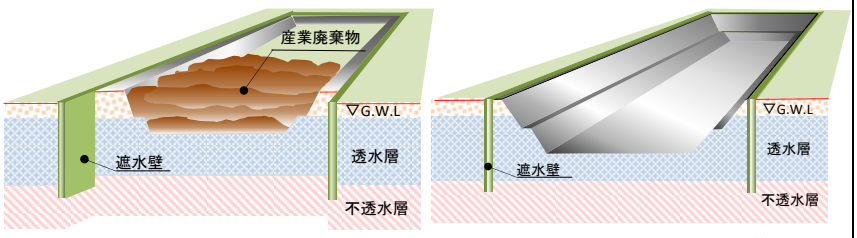
（概要）※最大 10 行まで

近年，工場や廃棄物処分場における汚染土壌や汚染水の封じ込め，調整池や河川堤防などにおける漏水対策の需要が高まっている．汚染土壌の封じ込めや地下水の遮水に対する対策は，従来，ソイルセメント系の地中連続壁，鋼矢板および鋼管矢板などが用いられてきた．しかしながら，ソイルセメント系の地中連続壁を適用した場合，地震時等に大変形が生じた際に壁体にクラック等の損傷が発生し，遮水性能の低下が懸念される．また，鋼矢板や鋼管矢板は，壁体の損傷は生じにくいものの，遮水が大規模になることで大幅なコストアップに繋がることが課題とされてきた．そこで，地震時において変形追随性能（耐震性）を有するとともに，10^{-10}～10^{-8}（m/sec）程度の透水係数となり遮水壁として十分な性能を有しているソイルベントナイト鉛直遮水壁に関する基礎的研究を進めてきた．本研究では，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時挙動に関して未解明な点が多いため，地震時における耐震性能と遮水性能の解明を行った．

１．研究の目的　　（注）必要なページ数をご使用ください。

近年，工場や廃棄物処分場における汚染土壌や汚染水の封じ込め，調整池や河川堤防などにおける漏水対策の需要が高まっている（Fig. 1）．汚染土壌に関しては，2010 年に改正された土壌汚染対策法が施工されたことにより土壌汚染が明らかになるケースが増加するとともに，再開発などに伴い自主的な調査を実施し土壌汚染が発覚するケースも増加している．また，近年多発している異常気象に伴う豪雨により調整池や河川堤防において，浸透流や漏水などによる被害も増加する傾向にある．汚染土壌の封じ込めや地下水の遮水に対する対策は，従来，ソイルセメント系の地中連続壁，鋼矢板および鋼管矢板などが用いられてきた．しかしながら，ソイルセメント系の地中連続壁を適用した場合，地震時等に大変形が生じた際に壁体にクラック等の損傷が発生し，遮水性能の低下や封じ込めが困難になることが懸念される．また，鋼矢板や鋼管矢板は，大きな剛性を有するため壁体の損傷は生じにくいものの，遮水が大規模になることで大幅なコストアップに繋がることが課題とされてきた．

そこで，申請者は，上述の課題を解決し，地震時において変形追随性能（耐震性）を



(a) 汚染土の封じ込め　　**(b)** 調整池の漏水対策

Fig. 1 ソイルベントナイト鉛直遮水壁の概要

有するソイルベントナイト鉛直遮水壁に関する研究を進めている．研究を進めている鉛直遮水壁は，低粘性かつ高濃度の特殊ベントナイト系スラリーを１パス方式で地盤に注入・撹拌することで構築する．本研究で対象としているソイルベントナイト鉛直遮水壁の基礎的な遮水性能に関しては，透水試験などの要素試験による基礎的な研究を実施している．その結果，ソイルベントナイト鉛直遮水壁が，10^{-10}～10^{-8} (m/sec)程度の透水係数を示し，遮水壁として十分な性能を有していることを確認している．本研究で対象としているソイルベントナイト鉛直遮水壁は，低強度でありながら高い変形追随性能を示すため，地震時にクラック等の損傷が生じにくいと考えられ，上述したソイルセメント遮水壁の課題を解決できると考えられる．本研究では，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時挙動に関して未解明な点が多いため，地震時における耐震性能と遮水性能の解明を行う．

２．研究の経過　　（注）必要なページ数をご使用ください。

本研究では，低粘性かつ高濃度の特殊ベントナイトスラリーを地盤に注入・撹拌することにより構築されるソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時性能に関して基礎的な研究を実施した．ソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時性能に関しては，地震時における壁体の変形追随性や破壊の発生，遮水性能の変化などを解明することを目的とする．具体的な研究内容は，下記に示す２つの実験的アプローチにより実施した．

1）要素試験によるソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時挙動および遮水性能の検討

2）動的遠心模型実験による地震時挙動の検討

1）要素試験によるソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時挙動および遮水性能の検討

動的遠心模型実験による地盤とソイルベントナイト鉛直遮水壁の動的相互作用および地震による地盤変形が作用後の遮水性能を検討するために，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の壁体の動的挙動および遮水性能の基礎的検討が必要となる．そこで，本アプローチでは要素試験によりソイルベントナイト鉛直遮水壁の動的挙動および遮水性能を検討した．具体的な検討方法として，振動三軸試験および三軸透水試験を用いた検討を実施した．振動三軸試験は，地盤材料の地震時挙動を確認するために用いられる実験手法であり，地盤内で着目している要素に作用する拘束圧の状態を再現することで，地震時における地盤内の変形強度特性を検証することが可能な実験手法である．一方，三軸透水試験も地盤内で着目している要素に作用する拘束圧を再現した状態で，着目した要素における透水性能を把握することが可能である．地盤材料の変形強度特性や透水性能は，拘束圧によりその挙動が異なる拘束圧依存性を示すため，上述の振動三軸試験や三軸透水試験を用いた検証が有効となる．本研究で対象としているソイルベントナイト鉛直遮水壁も原位置地盤に特殊ベントナイトスラリーを注入して構築されるため，その動的挙動や遮水性能は拘束圧に依存して異なる挙動を示すものと考えられる．本研究では，モデル地盤（砂地盤，混合土地盤）を用いて作製したモデル壁体に対して，振動三軸試験および三軸透水試験を実施した．これらの要素試験は，上述の拘束圧依存性を検証するために３種類の拘束圧（50，100，200kN/m^2）に対して実施した．これらの拘束圧は，実地盤において概ね 5m～20m 程度の深度に対応しており，本研究で対象とするソイルベントナイト鉛直遮水壁が構築されるおおよその深度を網羅している．実験方法は，モデル壁体を用いて直径 50mm×高さ 100mm の供試体を作製し，試験体に対してひずみ両振幅 DA=10%のサイン波を入力し試験体の動的挙動を確認後に，拘束圧が作用した状態で

の透水性能を確認した．本アプローチにより，壁体の動的挙動を解明するとともに，地震による損傷が生じた後の遮水性能を明らかにした．

2）動的遠心模型実験による地震時挙動の検討

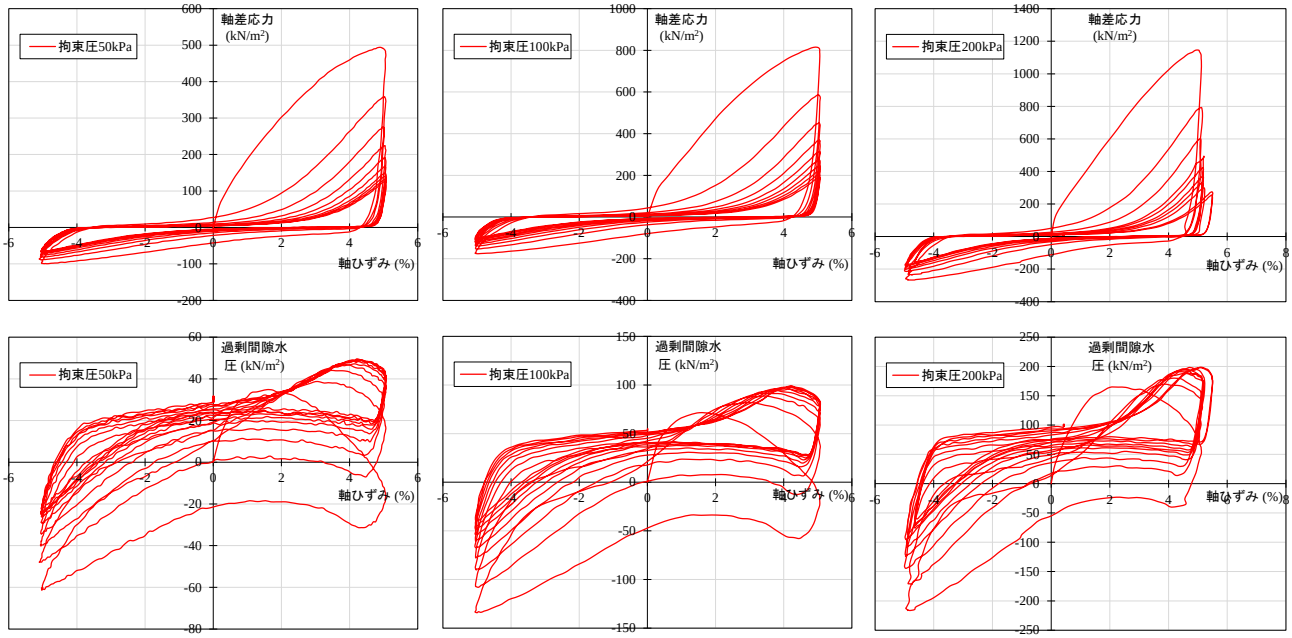
実地盤において構築されるソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時挙動は，遮水壁と周辺地盤との動的相互作用となる．このような地震時挙動を検討する主な手法として，重力場における縮小模型実験と遠心場における縮小模型実験（動的遠心模型実験）が挙げられる．遠心模型実験装置を用いた遠心場における縮小模型実験は，縮小模型を用いて行う実験でありながら，縮小模型の試験体に遠心力を付与させることにより実物大相当の応力場・ひずみ場を再現できる実験手法である．地盤工学分野においては，1)でも言及したように地盤材料の自重の効果（拘束圧の効果）が実現象に対応した挙動を得るうえで支配的となるため，遠心模型実験は非常に有効な実験手法であり，地盤工学分野で広く用いられている．また，地震時挙動のように実大規模の試験体での検証が大掛かりとなる場合にも，破壊現象までの検証が可能となり本研究の遂行において有効な実験手法といえる．そこで，本研究ではソイルベントナイト鉛直遮水壁と周辺地盤の相互作用による動的挙動を動的遠心模型実験により検討した．また，本研究における動的遠心模型実験は，従来技術との比較が必要となるため，一般的に用いられる対策技術であるソイルセメント系の地中連続壁との比較も合わせて実施した．本アプローチにより，従来から用いられる対策技術の課題を明確にできるとともに，ソイルベントナイト鉛直遮水壁が従来から用いられる対策技術の課題を解決することを証明できた．

本アプローチにおいて実施した動的遠心模型実験は，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の壁体条件をパラメータとした．具体的には，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の壁体を構成する地盤材料の材質を砂質土系（砂地盤に構築されるソイルベントナイト鉛直遮水壁を模擬）および混合土系（細粒分を含有する砂地盤に構築されるソイルベントナイト鉛直遮水壁を模擬）とした．これにより，壁体を構成する地盤材料の違いが壁体と地盤の相互作用に与える影響が明らかとなった．また，比較対象として実験を実施したソイルセメント系地中連続壁は，一般的に用いられる一軸圧縮強度 1.0N/mm^2 程度の壁体とした．地盤条件は，地震時に発生する液状化に伴う大変形時における変形追随性および破壊現象，遮水性能を把握するため，相対密度 40%程度の緩い飽和砂地盤とした．また，本研究で用いた試験体は，縮尺比を 1/25 とするため，遠心加速度 25G 場で実験を実施した．加振方法は，微小加振から L1・L2 相当，極大地震レベルを網羅するステップ加振を行い，発生頻度の高い小規模・中規模地震から発生頻度の低い大規模地震に至るまでの挙動を解明した．また，実験ケースは，ソイルベントナイト鉛直遮水壁（砂質土，混合土）およびソイルセメント系地中連続壁に対する実験により基礎的な動的挙動を明らかにした．さらに，遮水壁近傍に構造物等の荷重が作用することを想定したケースを実施した．これは，構造物等の荷重が偏土圧として作用する場合の耐震性能を検証するためであり，より実情に即した条件を模擬した．

３．研究の成果　　（注）必要なページ数をご使用ください。

1）要素試験によるソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時挙動および遮水性能の検討

砂質土における振動三軸試験結果を Fig. 2 に示す．これらの図より，各繰返し過程において，軸ひずみの増加に伴い，軸差応力や過剰間隙水圧が増加することがわかる．また，繰返し回数の増加に伴い，過剰間隙水圧が発生し，軸差応力が減少する傾向となる．これらの傾向は，混合土においても同様の傾向が得られた．



(a) 拘束圧 50kPa　　**(b)** 拘束圧 100kPa　　**(c)** 拘束圧 200kPa

Fig. 2 繰返し三軸試験結果（Case 1）

Fig. 3 は，振動三軸試験の前後で実施した三軸透水試験の結果である．振動三軸試験前の透水係数は，砂質土で 2.93×10^{-10}～1.07×10^{-9}(m/sec)，混合土で 1.22×10^{-10}～4.94×10^{-10}(m/sec)となった．一方，振動三軸試験後の透水係数は，砂質土で 1.78×10^{-10}～8.09×10^{-10}(m/sec)，混合土で 8.81×10^{-11}～3.51×10^{-10}(m/sec)となった．また，混合土の拘束圧 200kN/m² における 2 回目の振動三軸試験後の透水係数は，7.25×10^{-11}(m/sec)となった．したがって，振動三軸試験後の透水係数は，低下する傾向が得られた．これは，繰返し三軸後に試験体の遮水壁材料が密実化したことに影響すると考えられる．また，砂質土，混合土ともに拘束圧が大きいほど，透水係数は小さくなる傾向にある．さらに，拘束圧の関数として，透水係数のフィッティングを行なうと，振動三軸試験の前後に関わらず，砂質土，混合土ともに良好な関係にあることがわかった．

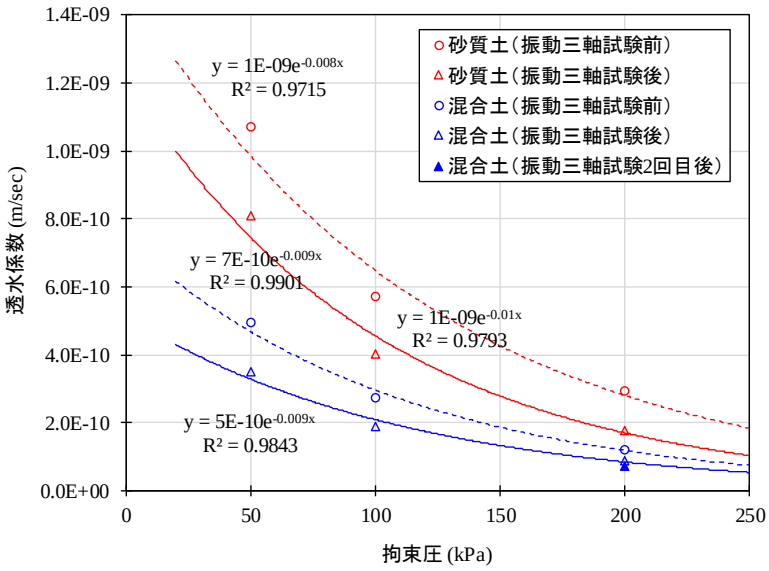


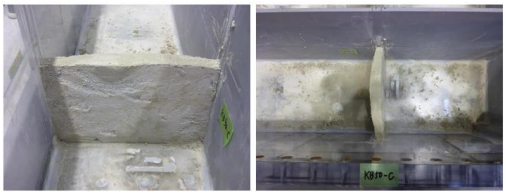
Fig. 3 三軸透水試験結果

2）動的遠心模型実験による地震時挙動の検討

①偏土圧が作用しないケース

壁体の耐震性に影響を与える重要な指標として変形追随性がある．加振前後の耐震性鉛直遮水壁とソイルセメント壁の壁体の変位を算出するために，アクリル面から撮影した動画に対して画像解析を行い，加振中において各壁体に生じる変位を算出した．Fig. 4 に各壁体に生じる水平変位の深度分布を示す．ソイルベントナイト鉛直遮水壁は，地表面付近の水平変位が大きな値を示し，水平方向に凸になる形状が確認された．また，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の壁体の変形は，水平力を受け壁体上部で変形が卓越するモードとなった．したがって，動的載荷を受けた場合のソイルベントナイト鉛直遮水壁の変形は，地盤の側方変形に対して追随していると考えられる．一方，ソイルセメント系地中連続壁の変位は，深度 0m～2.5m での変位の差がさほど見られなく変形をしたままであると考えられる．これは，加振レベルの小さい段階でソイルセメント壁体にクラックが生じたことにより，変形に追随することができなくなったためであると考えられる。加振後の各壁体を調査した結果を Photo 1 に示す．ソイルベントナイト鉛直遮水壁は，クラックの発生や目立った損傷は見られず地盤変形に対して追随した様子を確認できた．しかしながら，ソイルセメント系地中連続壁は，Photo 1(c)中に朱色で示した位置で大きなクラックが発生し，その他にも微細なクラックが発生していた．加振中に

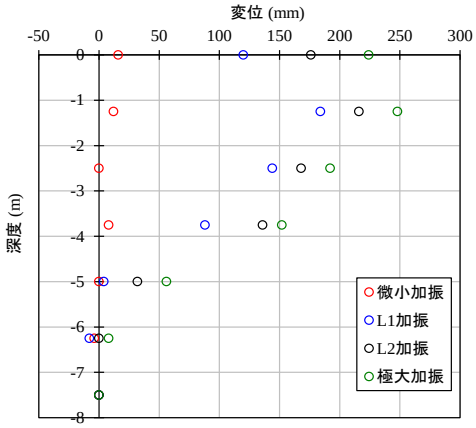
(a) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（砂質土）



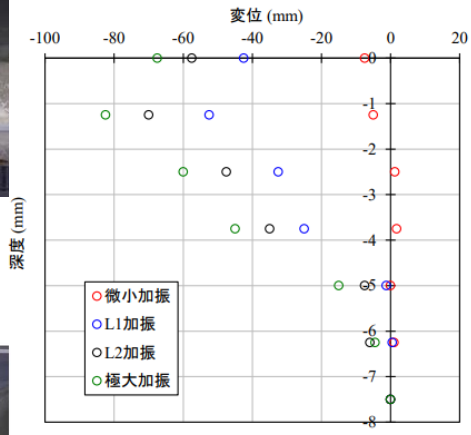
(b) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（混合土）

(c) ソイルセメント系地中連続壁

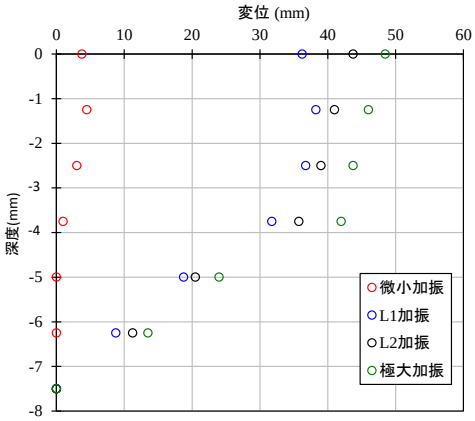
Phot 1 実験後の壁体



(a) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（砂質土）



(b) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（混合土）



(c) ソイルセメント系地中連続壁

Fig. 4 水平変位の深度分布

発生したクラックにより，遮水性能が低下することがわかった．

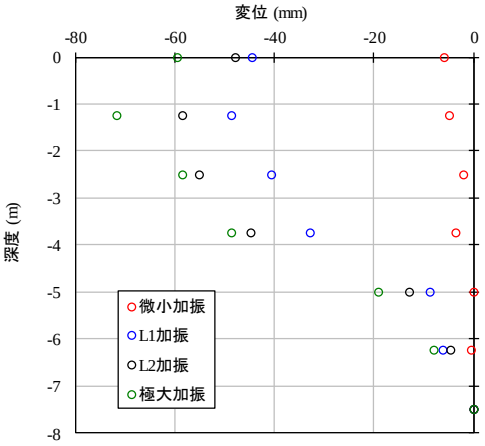
②偏土圧が作用するケース

加振前後の上載荷重（偏土圧）の有無によるソイルベントナイト鉛直遮水壁の壁体の水平変位を算出するために，アクリル面から撮影した動画に対して画像解析を行い，加振中において各壁体に生じる変位を算出した．Fig. 5にソイルベントナイト鉛直遮水壁の壁体に生じる水平変位の深度分布を示す．上載荷重が作用しない場合の耐震性鉛直遮水壁は，地表面付近の変位が大きな値を示し，水平方向に凸になる形状が確認された．また，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の壁体に生じる変形は，上載荷重の有無によらず周辺地盤の土水圧による水平力を受け壁体上部で変形が卓越するモードとなった．したがって，動的載荷を受けた場合の耐震性鉛直遮水壁の変形は，地盤の側方変形に対して追随していると考えられる．一方，上載荷重，すなわち偏土圧が作用する場合のソイルベントナイト鉛直遮水壁の変位は，深度0m～2.5mでの大きな変位を示すとともに，周辺地盤の変形に追随していると考えられる．また，地表面においても偏土圧の作用により変位が大きくなっていることも上載荷重が作用する場合の傾向となる．加振後の各壁体を調査した結果をPhoto 2に示す．ソイルベントナイト鉛直遮水壁は，クラックの発生や目立った損傷は見られず地盤変形に対して追随した様子を確認できた．上載荷重が作用しない場合の耐震性鉛直遮水壁近傍の過剰間隙水圧は，各加振段階でソイルベントナイト鉛直遮水遮の両側で大きな差が生じない結果となった．一方，上載荷重が作用する場合のソイルベントナイト鉛直遮水壁近傍での過剰間隙水圧も各加振段階で壁体両側における過剰間隙水圧の差が見られなかった．このことからも，ソイルベントナイト鉛直遮水壁は上載荷重が作用しても周辺地盤と一体となって挙動するとともに有害な損傷を生じず，遮水性の低下は生じないと推察される．

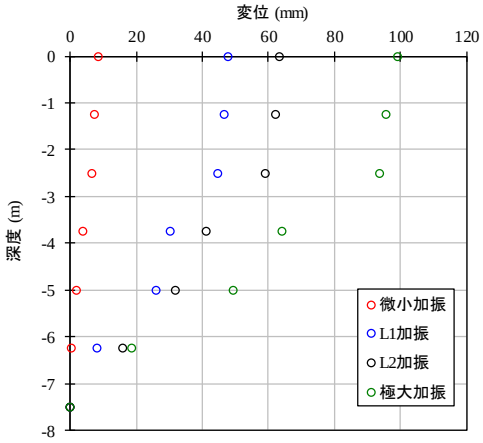
(a) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（上載荷重なし）

(b) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（上載荷重あり）

Photo 2 実験後の壁体



(a) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（上載荷重なし）



(b) ソイルベントナイト鉛直遮水壁（上載荷重あり）

Fig. 5 水平変位の深度分布

４．今後の課題　　（注）必要なページ数をご使用ください。
本研究により，ソイルベントナイト鉛直遮水壁の地震時挙動を実験的に確認した。今後の課題として，実験結果を再現できる解析手法や構成則を検討し，有限要素法を用いた数値解析を実施する必要がある。