

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760379

研究課題名(和文) 封じ込め技術の信頼性向上に向けた、遮水壁の品質管理手法の開発と汎用性の向上

研究課題名(英文) Quality assessment of cutoff walls for reliability improvement of containment techniques

研究代表者

高井 敦史 (Takai, Atsushi)

京都大学・地球環境学堂・助教

研究者番号：30598347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：原位置の土とベントナイトを混合・攪拌することによって構築されるソイルベントナイトを対象とし、(1)オンサイトでの品質評価手法の確立、(2)変形や損傷に対する遮水性能の変化ならびに自己修復性、の2点について各種実験を行った。その結果、地盤調査に広く用いられる電気式静的コーン試験を応用することで、オンサイトで空間連続的な品質評価が可能であること、ソイルベントナイトの高い柔軟性と試料中のベントナイトの再膨潤による自己修復性が期待でき、損傷が発生しても遮水性能は著しく低下しない可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on soil-bentonite which is one of the most common barrier materials, and consists of bentonite and in-situ soil. Various laboratory tests were conducted from the viewpoint of: 1) on-site quality assessment, and 2) self-sealing capability against hydraulic defects. The experimental results indicate that the piezocone test, which is widely applied on site investigations, can detect the hydraulic defects caused by less bentonite amount with a spatial continuity. It was also verified that the soil-bentonite can display self-sealing capability and recover its hydraulic barrier performance when the specimen has an intentional defect due to the combined effects of its deformability and the reswelling of bentonite.

研究分野：地盤環境工学

キーワード：土壌地下水汚染 封じ込め ソイルベントナイト 電気式静的コーン貫入試験 自己修復性 透水試験  
品質保証・品質管理

### 1. 研究開始当初の背景

狭隘で山地が多い国土を持つ我が国において、土地資源の戦略的な有効活用が重要である。汚染地や廃棄物処分地への対策方法として、汚染物の掘削除去が依然として多く採用されているが、この場合、汚染物質が除去されるので当該地の環境は改善されるものの、単に汚染土壌を他所に移動させたのみで、移動に伴う拡散リスクや処分場容量の逼迫等の観点から、必ずしも合理的な対策となっていないのが現状である。

原位置封じ込め工法は、図-1 に示すように汚染そのものには手をつけず、土壌汚染や廃棄物が存在する範囲の周囲を低透水性の遮水材で取り囲むことによって汚染の拡散を防止する技術である。この工法は、既設構造物下に汚染が存在する場合や、汚染が広範な場合等に有効である。しかし地中に遮水壁を設けることから、直接視覚的に品質を確認することは不可能で、評価手法や影響因子について完全に確立されていないのが現状であり、封じ込め技術の普及を阻害する要因となっている。したがって、構築された遮水壁の品質を現場において的確に評価する手法の確立及び遮水性を確保しうる条件の定量化が急務の課題であり、この問題が解決されれば封じ込め技術の適用も増え、かつ汚染地が放置されるブラウンフィールド問題の解決も進むと考えられる。

### 2. 研究の目的

封じ込め技術に用いられる遮水材については、土質系材料や鋼製材料など様々な材料や施工方法が開発されている。研究代表者らはこれまで、原位置の土とベントナイトを混合・攪拌することによって構築されるソイルベントナイトを開発し、その遮水性能や地震時挙動について、室内試験による評価を重点的に行ってきたが、現場における空間連続的な品質評価に取り組んだ研究例はなく、技術及び評価スキームの確立が急務である。またソイルベントナイトは変形追従性に富み、クラックが発生した場合においてもベントナイトが空隙を充填し、透水係数を自ら回復させる自己修復性を有していることが確認されているが、地下水中に化学物質を含有する地盤での施工を想定した自己修復性は、十分に検証されているとは言い難いのが現状である。そのため、封じ込め技術そのものの信

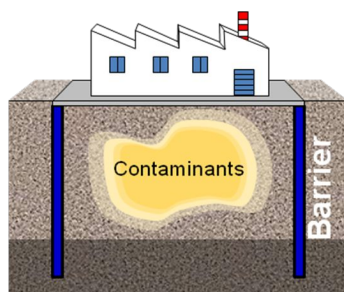


図-1 原位置封じ込め工法

頼性を向上させ対策技術として普及させるためには、上記の事象に対する科学的な取り組みが不可欠である。

そこで本研究では、ソイルベントナイト遮水壁を対象とし、(1) オンサイトで空間連続的な品質評価手法の確立、(2) 変形や損傷に伴う遮水性能の変化ならびに自己修復性の定量的評価、の2点について各種実験を行い、環境調和型の地盤汚染対策技術である原位置封じ込め工法の普及を促し、合理的な土壌汚染対策の推進に寄与することを目的とするものである。

### 3. 研究の方法

TRD 工法によるソイルベントナイト遮水壁の実施工においては、初めにベントナイト懸濁液を吐出・攪拌しながら先行掘削することで地盤の流動性を高め施工性を確保した後、粉体状のベントナイトを添加・攪拌して構築される。本研究ではその施工手順を室内で再現するため、初めに、飽和砂地盤を想定し、自然含水比に調整した7号硅砂に、10%濃度のベントナイトスラリーを  $15 \text{ kg/m}^3$  となるよう混合し、ソイルミキサーを用いて攪拌した。その後、粉体ベントナイトを  $25, 50, 100 \text{ kg/m}^3$  添加し、再度混合・攪拌することでソイルベントナイトを作製した。なお、粉体ベントナイト添加量  $100 \text{ kg/m}^3$  は、現場施工において一般的に採用されている配合量であり、 $25, 50 \text{ kg/m}^3$  のベントナイト添加量は、貧配合を模していることになる。母材の間隙水に電解質が含まれる供試体を作製する際は、 $\text{CaCl}_2$  溶液を用いて含水比調整を行った。

#### (1) オンサイトで空間連続的な品質評価手法の確立

遮水壁のような土質系地中構造物の品質を評価する場合、一般的には余掘りした箇所等から試料を採取し、室内試験で評価する方法が一般的である。しかしこの方法による品質評価では、室内試験に持ち帰るため現場の構築物を直接評価できないことや、限られた試料数の試験結果が面全体を代表することになり、空間連続的な評価とはなっていないといった課題がある。またボーリング孔を用いた現場透水試験のように、現場で直接評価する方法もあるものの、低透水性材料の性能を評価する上では未施工部の砂地盤による影響が大きく、さらに要求性能を満足しない場合に、不良部の特定ができない。このような技術的課題を鑑み、本研究では、オンサイトでの精細で空間連続的な品質評価手法の確立を目指し、地盤調査に広く用いられる電気式静的コーン貫入試験の適用性を室内試験により評価した。電気式静的コーン試験は、地中への貫入に伴い先端抵抗  $q_t$ 、周面摩擦  $f_s$ 、間隙水圧  $u$  の3つのパラメータを同時に取得できることから、ベントナイト添加量の不足に伴う不良箇所を、力学特性の差異から検知しうる考えられる。

図-2 に示す鋼製の大型土槽に、直径 0.5 m

の自立式のメッシュ (SUS 網, ナイロンメッシュ) を設置し, その内部に遮水壁を模擬し, ソイルベントナイトを詰めた。また, その周囲には排水用として砂質材料を充填した。試料を充填する際には常に地盤高さよりも高い水位を維持し, 空隙を無くしながら充填した上で, 最終的な水位は地表面と同位にした。土槽の天板にはコーン貫入のための円形孔を設け, 貫入に伴い供試体上部が盛り上がるのを防ぐため, 試験の際にはエアバッグを介して約 30 kPa の上載圧をかけた。コーン部は JGS 1435-2003 に規定される仕様のものを用い, 測定精度を確保するため貫入速度は 1.0 cm/s とした。所定の深度で一時貫入を止め, 貫入に伴い発生した過剰間隙水圧の消散過程を計測し, 透水係数を推定した。過剰間隙水圧の消散速度は, 周辺地盤の遮水性や圧縮性により異なることから, 消散速度の差異から透水係数を求めることができる。実験ケース一覧は図-3 に示すとおりである。

先述のとおり, 電気式静的コーン試験による品質評価は, ソイルベントナイトの力学特性の差異を検知するものであることから, 非圧密非排水 (UU) 三軸圧縮試験を行い, 強度変形特性を評価した。

## (2) 損傷に対する遮水性能と自己修復性

ソイルベントナイトの遮水性能は, ベント

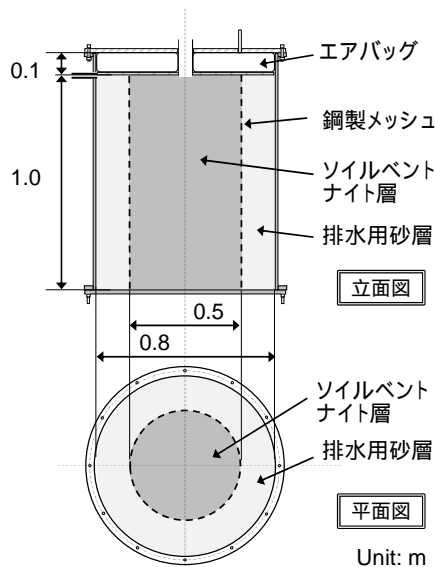


図-2 土槽の概要図

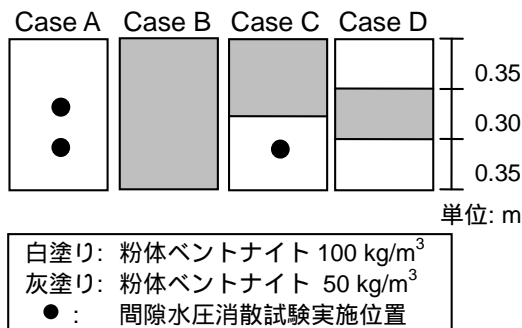


図-3 電気式静的コーン試験のケース一覧

ナイトの膨潤性に依存している。そのため, 地震時等のせん断に伴い亀裂等の損傷が発生した場合, 十分に膨潤できる状態であれば, ベントナイトが自ら損傷箇所を充填し透水係数を回復しようと考えられるものの, 化学物質濃度が高い場合には, ベントナイトの膨潤が阻害され, 十分に自己修復できない可能性が懸念される。地盤汚染の封じ込めに用いられる遮水壁は, 対策実施中の全期間で高い遮水性能を維持することが求められ, 例え極小の損傷であったとしても, そこから汚染物質が流出することになるため, ソイルベントナイトに期待できる遮水性能の自己修復性は, フォールトトレラント設計の概念からも極めて重要と言える。

そこで本研究では, ASTM D5084 に準拠した柔壁型透水試験を行い, 実験的に自己修復性に及ぼす化学物質の影響を評価した。初めに, 母材の間隙水の  $\text{CaCl}_2$  濃度が表-1 に示す値となるよう含水比調整し, 粉体ベントナイト添加量  $100 \text{ kg/m}^3$  でソイルベントナイトを作製した。作製したソイルベントナイトを圧密セルに充填し, 19.6, 39.2 kPa の 2 段階で計 48 時間予備圧密を行い, 圧密セルから取り出した。その後, 図-4 に示すように, 亀裂を有する場合には, ワイヤソーを用いて供試体を直径方向に分割し, 再度密着させて透水試験装置にセットした。開孔を有する場合には, 直径 2 mm のステンレス棒を透水

表-1 透水試験のケース一覧

間隙水の $\text{CaCl}_2$ 濃度 (mol/L)	供試体の状態	湿潤密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	間隙比
0	損傷なし	1.84	0.92
	亀裂あり	1.81	0.90
	開孔あり	1.83	0.94
0.02	損傷なし	1.84	0.94
	亀裂あり	1.83	0.95
	開孔あり	1.82	0.97
0.05	損傷なし	1.87	0.90
	亀裂あり	1.84	0.93
	開孔あり	1.84	0.93

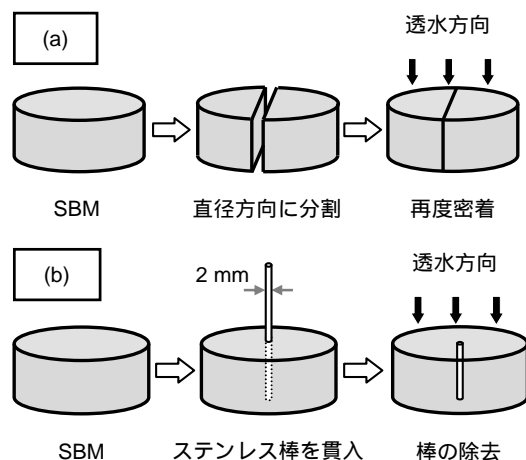


図-4 損傷を有する供試体の作製手順

方向に押し込み，貫通孔を設けた。透水試験は拘束圧 30 kPa，動水勾配約 30 で行い，透水溶液には水道水を用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) オンサイトでの空間連続的な品質評価手法の確立

電気式静的コーン試験について，ソイルベントナイト層が複層で構成されている Case C ならびに Case D の結果をここでは述べる。コーンの貫入に伴い，図-5 および図-6 に示す先端抵抗，周面摩擦および間隙水圧三成分のデータが連続的に得られた。これらの結果から，先端抵抗値に関しては粉体ベントナイト添加量 50 kg/m<sup>3</sup> と 100 kg/m<sup>3</sup> の境界付近で異なる挙動を示していることがわかる。Case C では，上部の粉体ベントナイト添加量 50 kg/m<sup>3</sup> の貧配合層で最大約 1.3 MPa の先端抵抗値であったのに対し，下部の 100 kg/m<sup>3</sup> の層では約 0.1 MPa で推移している。これは，ベントナイト添加量 50 kg/m<sup>3</sup> の上部層ではソ

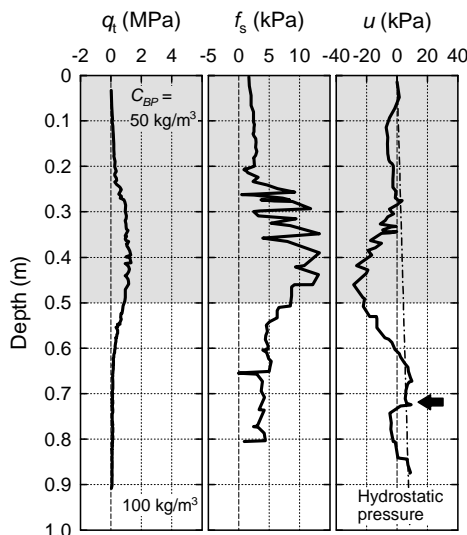


図-5 Case C の結果

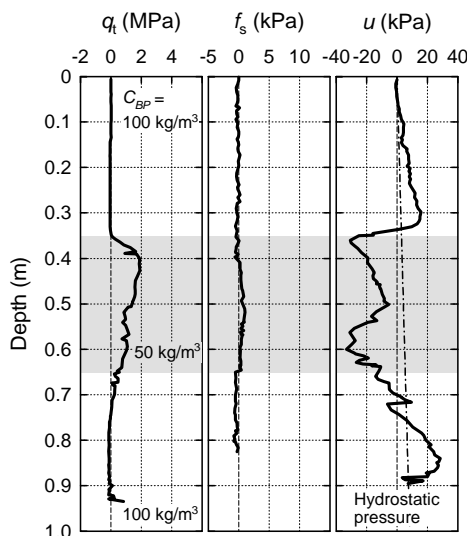


図-6 Case D の結果

イルベントナイトの細粒分含有率が約 4% であり，砂分が主体であることから貫入抵抗が大きくなったためであると考えられる。間隙水圧は，粉体ベントナイト添加量が 50 kg/m<sup>3</sup> のソイルベントナイトでは負圧が発生するなど，過剰間隙水圧が発生しないのに対し，粉体ベントナイト添加量が 100 kg/m<sup>3</sup> へと変化する境付近から線形的に増加傾向を示すことがわかる。貫入に伴い負圧が発生する現象は，砂層への貫入時に見られるものであり，上部のソイルベントナイト層が砂分主体であることを踏まえると妥当であり，UU 試験の結果と整合が取れる結果と言える。これらの結果から，ソイルベントナイトの配合の違いに起因する力学特性の差異を電気式静的コーン試験で検知できると言え，ベントナイト量の不足に起因する不良箇所を特定する可能性が示された。

所定の深度で貫入を止め実施した間隙水圧消散試験では，異なる消散率から透水係数を算出した。図-7 に示すとおり，消散率に関わらず同等の透水係数を示しており，短時間で同程度の測定精度を確保しうると考えられる。またそれらの値は，透水試験から算出した透水係数の 1.4~1.6 倍の値を示しており極めて精度良く推定しうる。図-8 は，他のケースも含め，透水試験から求めた透水係数と間隙水圧消散試験の消散率 50% から求めた透水係数の値を比較したものであるが，両者

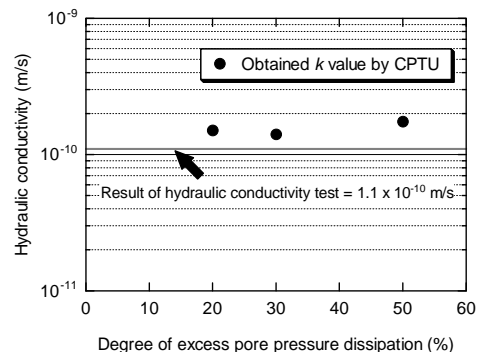


図-7 異なる消散率から算出した透水係数

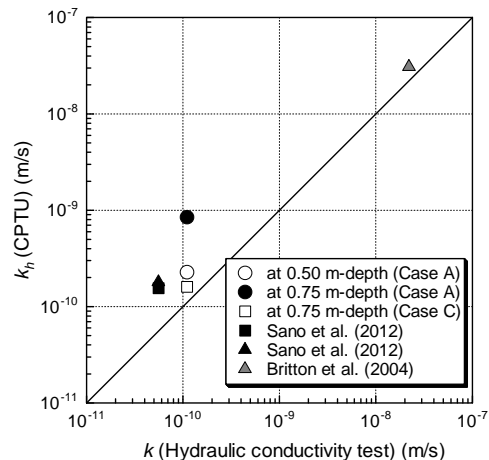


図-8 透水試験で求めた透水係数との比較

の間には良い相関があることがわかる。透水試験では一次元透水であり、間隙水圧消散試験では三次元的に消散することから、電気式静的コーン試験で求めた透水試験の方が大きい値を示したと考えられるが、10倍以内には納まっている。

これらの結果に基づき、図-9に示す電気式静的コーン試験による品質評価フローを提案した。まず、数m間隔で電気式静的コーン試験を行い、取得される三成分のプロファイルから均質性を評価する。この際、先端抵抗や間隙水圧に顕著な変化が見られる場合には、不均質箇所が存在が考えられることから、混合・攪拌を再度行う。均質性が確認された後、別の箇所で再度コーンを貫入し、所定の深度で間隙水圧消散試験を実施する。消散試験で求められる透水係数が、配合設計時の透水試験結果と比較し10倍以上の値を示せば、遮水性能が十分でない可能性と判断できることから、ベントナイトの再添加を検討する。この方法によりオンサイトで空間連続的に品質を評価できることから、ソイルベントナイト遮水壁の信頼性向上に寄与しうると考えられる。

## (2) 損傷に対する遮水性能と自己修復性

亀裂を有する各供試体の、透水係数の経時変化を、健全な供試体の結果と併せて図-10に示す。母材のCaCl<sub>2</sub>濃度が0.02 mol/Lのケースにおいては、亀裂の発生により透水初期の透水係数に顕著な増加が見られたが、経時的に透水係数は減少し、透水開始から40時間程度で損傷の無い供試体の数倍程度の透水係数となった。その他のケースでは、透水開始時から健全な供試体と同等の透水係数を示した。

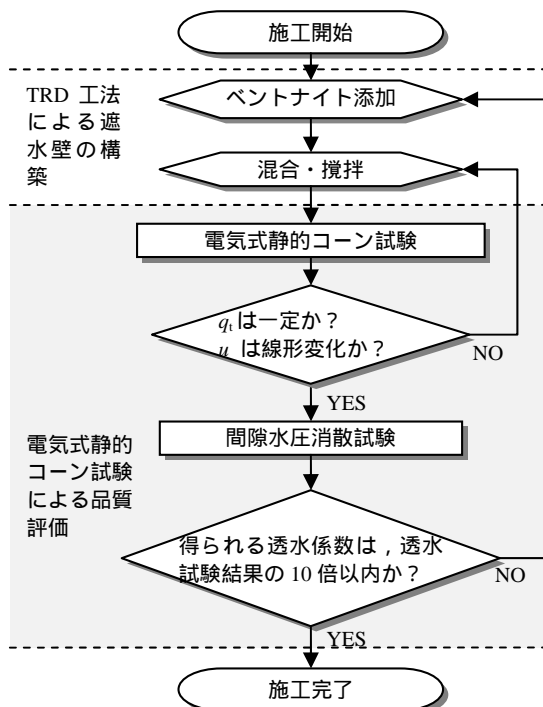


図-9 電気式静的コーン試験による品質評価フロー

開孔を有する各供試体の、透水係数の経時変化を、健全な供試体の結果と併せて図-11に示す。透水方向に開孔が発生した場合であっても、母材間隙水のCaCl<sub>2</sub>濃度に関わらず、透水初期から透水係数に大きな差は見られなかった。そのため、面積比で0.1%程度の開孔である程度の上載圧が作用する深度であれば、ソイルベントナイトの遮水性能は大きく損なわれない可能性が示唆される。

図-12は、透水係数の時間変化が相対的に小さいと判断できる60時間経過以後の平均値を、母材間隙水の初期CaCl<sub>2</sub>濃度に対してプロットしたものである。この図からも、損傷を受けた場合でもソイルベントナイトは健全な場合の2~3倍以内の透水係数を示すと判断でき、本研究で実施した条件下であれば、母材に含まれる化学物質の初期濃度に関わ

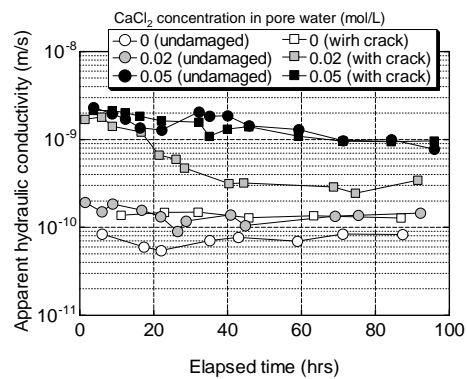


図-10 亀裂の有無が透水係数に及ぼす影響

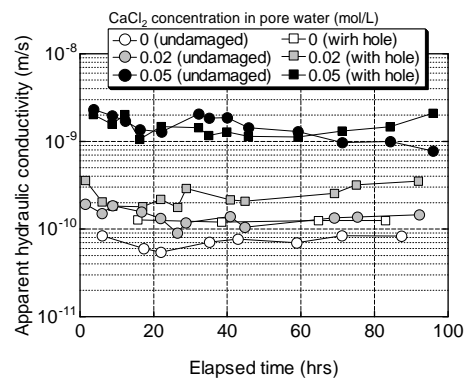


図-11 開孔の有無が透水係数に及ぼす影響

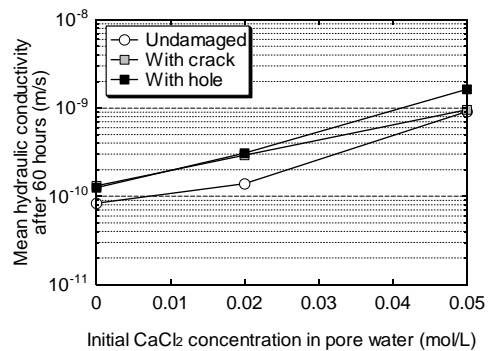


図-12 60時間経過以後の透水係数の平均値比較

らず自己修復性が期待できるといえる。この自己修復性のメカニズムは、1) 柔軟性の高いソイルベントナイトが、拘束圧の作用により変形することで亀裂面が密着あるいは開孔が閉塞したこと、2) 供試体の間隙水及び電解質を含まない透水溶液に対してベントナイトの再膨潤が起こり、損傷部を充填したこと、の2つの要因によると考えられる。損傷の発生による透水係数の上昇は数倍程度であることから、性能基準を十分に満足する条件下で施工された場合には、損傷が発生しても性能基準を満足できる可能性が高いと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計13件)

Takai, A., Inui, T., Katsumi, T., Kamon, M., and Araki, S. (2014): Experimental study on the self-sealing capability of soil-bentonite mixture cutoff walls, *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Geotechnics - Lessons, Learnings & Challenges* -, A. Bouazza, S.T.S. Yuen, B. Brown (eds.), Engineers Australia, Melbourne, pp.411-416., 査読有

高井敦史・中澤祐樹・佐野和文・勝見 武・乾 徹・嘉門雅史・荒木 進 (2014): 変形や損傷を受けたソイルベントナイト遮水壁の遮水性能に関する実験的検討, 第11回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.51-56., 査読有

Li, Z., Katsumi, T., Inui, T., and Takai, A. (2013): Fabric effect on hydraulic conductivity of kaolin under different chemical and biochemical conditions, *Soils and Foundations*, Vol.53, Issue 5, pp.680-691., 査読有

Takai, A., Inui, T., Katsumi, T., Kamon, M., and Araki, S. (2013): Hydraulic barrier performance of soil bentonite mixture cutoff wall, *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics - From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications*, M. Manassero, A. Dominijanni, S. Foti, and G. Musso (eds.), CRC Press, pp.707-714., 査読有

高井敦史・最上裕生・乾 徹・勝見 武・吉村 貢・荒木 進・嘉門雅史 (2012): 地盤汚染拡散防止に用いられるソイルベントナイト遮水壁の均質性, 地盤材料試験・地盤調査の精度とばらつきに関するシンポジウム論文集, pp.189-196., 査読有

##### [学会発表](計13件)

中澤祐樹,ソイルベントナイト鉛直遮水壁の自己修復性に及ぼす化学物質の影響,第49回地盤工学研究発表会,2014年7月14

日,北九州国際会議場(福岡県北九州市)中澤祐樹,Hydraulic performance assessment on damaged soil-bentonite mixtures, Geo-Environmental Engineering 2014, 2014年5月30日,ホテル鹿の湯(北海道札幌市)

田村成仁,ソイルベントナイト鉛直遮水壁の変形挙動と遮水性に関する検討,第48回地盤工学研究発表会,2013年7月24日,富山国際会議場(富山県富山市)

田村成仁, Effect of deformation on the hydraulic barrier performance of SBM cut-off wall, Geo-Environmental Engineering 2013, 2013年5月31日,ソウル(韓国)

佐野和文,電気式静的コーン貫入試験によるソイルベントナイト遮水壁の遮水性能評価,第47回地盤工学研究発表会,2012年7月15日,八戸工業大学(青森県八戸市)

佐野和文, Quality assessment of SBM cut-off wall using piezocone, Geo-Environmental Engineering 2012, 2012年5月30日,カーン(フランス)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

高井敦史 (TAKAI, Atsushi)  
京都大学・地球環境学堂・助教  
研究者番号: 30598347

##### (2)連携研究者

勝見 武 (KATSUMI, Takeshi)  
京都大学・地球環境学堂・教授  
研究者番号: 60233764

乾 徹 (INUI, Toru)  
京都大学・地球環境学堂・准教授  
研究者番号: 90324706