

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560810

研究課題名（和文） ベントナイト・珪砂混合緩衝材の損傷時のマルチスケール性能評価

研究課題名（英文） Multi-scale performance evaluation of damaged buffer material made by bentonite-silica sand mixture

研究代表者

小高 猛司（KODAKA TAKESHI）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：00 252271

研究成果の概要（和文）：放射性廃棄物処分で使用されるベントナイト・珪砂混合緩衝材の損傷後の性能を評価した。各種飽和度の緩衝材の力学特性を評価するため、一面せん断試験と三軸試験を実施し、飽和度上昇につれて、せん断強度が低下し、ダイレイタンス特性が変化することを示した。また、 $\mu$ -XCT によるマイクロ観察によって損傷後の緩衝材に密度変化が生じていないことを示すとともに、マクロな透水試験によって緩衝材の遮水性能に損傷の影響がないことを示した。

研究成果の概要（英文）：Performance of the damaged bentonite-silica sand mixture, which is used as a buffer material for the radioactive waste disposal, has been evaluated. From the results of the direct shear test and the triaxial test, which were carried out to grasp the change of mechanical properties of buffer material with various degree of saturation, it was shown that the shear strength and dilatancy property rapidly changed with changing the degree of saturation. Furthermore, the change of density due to shearing in the damaged buffer material specimen was not able to be observed by the  $\mu$ -XCT. Macroscopic permeability test was also conducted to confirm the maintaining of the sealing performance of the buffer material after shearing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：地層処分，緩衝材，ベントナイト

## 1. 研究開始当初の背景

原子力発電に伴い発生する高レベル放射性廃棄物は、地下 300m 以深の岩盤内に地層処分される計画である。地層処分では、ガラス固化された高レベル放射性廃棄物を金属製容器のオーバーパックに封入し、その周り

を緩衝材で覆った上で岩盤層に静置する。その際の緩衝材の役割は、オーバーパックを安全に支持しながら、周辺岩盤のクリープ変形や地震等の外力から守りつつ、地下水環境内に放射性核種が漏れ出すことを防ぐことである。そのため、緩衝材の有力候補は、高密

度の珪砂・ベントナイト混合体である。

ベントナイトは、極めて吸水膨潤性の高いモンモリロナイトを主原料としているため、間隙が地下水で飽和される前後において、緩衝材の力学性能は大きく異なる。処分場作業時には緩衝材は不飽和状態であるが、処分場が閉鎖されて、地下水が処分場内に浸潤する再冠水状態となると、緩衝材は徐々に飽和状態に近づくが、その吸水によって膨張しようとするベントナイトは、周辺岩盤層からの変位拘束によって大きな膨潤圧が発生する。地盤材料特有のダイレイタンスーに加えて、この膨潤圧によっても間隙圧が変動するために、ベントナイトを主体とする緩衝材には、通常の地盤材料力学で用いる「有効応力」の概念を適用することが難しい。さらに、完全飽和状態となっても、普通の地盤材料とは異なり顕著な膨潤特性を有するために、緩衝材の挙動を正確に記述できる構成モデルはないのが現状である。さらに、緩衝材が飽和化するには数十年から百年程度かかり、膨潤挙動が終息するにはさらに長い期間を要する。そのため、不飽和状態を含めて緩衝材の変形・破壊挙動を解明することは、処分場の安全性検討には必至の研究課題であるが、不飽和ならびに不飽和から飽和への遷移時の緩衝材の力学特性に関する研究はほとんど進んでいない。

一方、緩衝材の長期的な性能保証を考慮する場合、長い年月の間に処分場サイトが経験すると考えられる各種のイベントによって、緩衝材が損傷を受ける可能性についても検討しておく必要がある。例えば、周辺岩盤のクリープ破壊や地殻変動に伴う破壊伝播などが挙げられる。それらのイベントによって緩衝材が損傷を受けたとしても、基本的な性能を維持できるかどうか十分に検証しておく必要がある。

## 2. 研究の目的

(1) 不飽和、飽和、およびその遷移過程における緩衝材の力学特性の解明

不飽和、飽和、およびその遷移過程におけるベントナイト・珪砂混合体のせん断試験を実施し、それぞれの飽和条件における力学特性の解明を行う。特に、飽和遷移過程にある緩衝材においては、珪砂混合率や供試体密度によって浸潤飽和時に発生する膨潤挙動が異なるが、膨潤圧や膨潤量がせん断強度特性やダイレイタンスー特性に及ぼす影響を照査することにより、ベントナイトを主材とする緩衝材特有の力学特性を解明することを試みる。

(2) 損傷した緩衝材のマルチスケール性能評価

種々の飽和条件下で損傷を受けたベント

ナイト・珪砂混合体に対して、せん断特性ならびに遮水性などの緩衝材として具備すべき基本的な力学特性を中心に性能評価を行う。具体的には、マイクロスコープ、マイクロフォーカス X 線 CT 等を用いてマルチスケールの評価から、せん断試験や透水試験によるマルチスケールの評価までマルチスケールで性能評価を実施する。特に、ベントナイトの自己修復性能も評価するために、不飽和状態で損傷を受けた場合には、浸潤飽和に伴う、せん断特性の変化、遮水性の回復などについても照査する。

## 3. 研究の方法

(1) 不飽和から飽和の遷移状態における緩衝材のせん断試験

高圧一面せん断試験装置ならびに三軸試験装置を用いて、不飽和から飽和にかけての遷移状態の緩衝材のせん断強度特性やダイレイタンスー特性を求める。また、それと同時に、損傷度合いを評価するために破壊挙動の観察も行う。供試体は、ベントナイト・珪砂混合体や粒状ベントナイトなど実際の使用が想定される材料を用いる。試験時には、マイクロスコープを用いて供試体に伝播する破壊領域の観察を行い、試験後には破壊後の供試体を対象に、マイクロフォーカス X 線 CT を用いて、より微視的な観察を行うことにより、せん断破壊時に緩衝材が受ける損傷度の性質について詳細に検討する。

(2) 損傷を受けた供試体の力学特性の把握

一面せん断試験によるせん断破壊によって損傷を受けた試験後供試体を用いて、破壊領域を含む供試体と含まない供試体を同時に成形し、超小型透水試験を実施し、損傷を受けた緩衝材の遮水性能を評価する。飽和供試体に対しては、試験後の破壊領域を含む損傷供試体の透水試験を実施するが、不飽和状態の損傷供試体においては、実際の処分場においても損傷後も徐々に飽和が進行することを想定し、各種荷重条件、拘束条件下で浸潤飽和を行った上で、透水試験を実施し、長期的な視点に立脚した性能評価を行う。

## 4. 研究成果

(1) 一面せん断試験による不飽和、飽和、およびその遷移過程における緩衝材の力学特性の解明

試料には、粉末状ベントナイト（クニゲル V1、初期含水比 10%）に三河珪砂 6 号を乾燥質量比 30%混合したものを用いた。霧吹きで蒸留水を少量ずつ加水し、目標含水比より 2% 高く調整した後、団粒化した部分を取り除いて試験試料とした。この加水調整試料をせん断箱に詰め、縦 5cm×横 5cm×厚さ 2cm の立方体に圧縮成型した。乾燥密度は 1.60Mg/m<sup>3</sup>、

目標含水比を 15%, 20%, 25%, 30% と設定した。

図 1 に今回実施した一面せん断試験におけるせん断抵抗角と飽和度の関係を整理したものを示す。これを見ると、飽和度が高くなることによって、徐々にせん断強度が低下するのではなく、飽和直前で急激に飽和供試体と同等のせん断強度まで低下することがわかった。

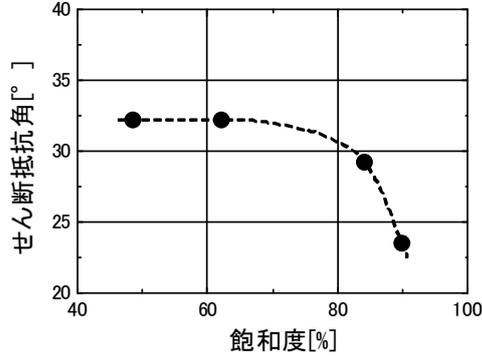


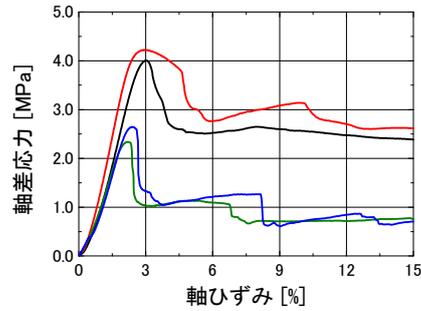
図 1 飽和度とせん断抵抗角との関係

(2) 三軸試験による不飽和、飽和、およびその遷移過程における緩衝材の力学特性の解明

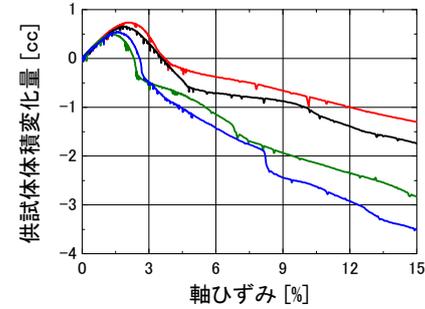
試験試料は、(1)の一面せん断試験と同様である。供試体寸法は直径 35mm、高さ 70mm であり、供試体の乾燥密度は  $1.60 \text{ Mg/m}^3$  とし、所定の含水量となるよう加水してから、油圧ジャッキで圧縮成型した。作製した供試体は 2 重セル構造の三軸試験装置にて、拘束圧を 0.1MPa、0.5MPa とし、非排気非排水条件で三軸圧縮試験を実施した。せん断は載荷速度  $0.5\%/min$  で軸ひずみ 15% まで行った。

図 2 に自然含水供試体による試験結果を示す。凡例は拘束圧を示す。図 2 (a) の軸差応力～軸ひずみ関係より、いずれの供試体においても軸ひずみ 3% 程度まで軸差応力が急激に増加し、最大軸差応力に到達している。その後、供試体はひずみ軟化挙動を示し、軸ひずみ 6% 付近からは残留状態を示している。図 2 (b) にせん断中の供試体体積変化量～軸ひずみ関係を示す。供試体の体積変化量は正の値では供試体体積の圧縮を示し、負の値では供試体体積の膨張を示している。いずれの供試体においても、軸差応力が最大となる少し前までは体積圧縮し続けている。最大軸差応力を示す軸ひずみにおいて、供試体体積は膨張に転じており、膨張割合が最大となっている。また拘束圧 0.5MPa の供試体に比べ、拘束圧 0.1MPa の方がせん断終了時の体積変化量が大きく、正のダイレイタンスが大きく発現していることがわかる。図 2 (c) のモールの応力円より、粘着力  $c_u$  は 0.5MPa、内部摩擦角  $\phi_u$  は  $42.3^\circ$  となった。

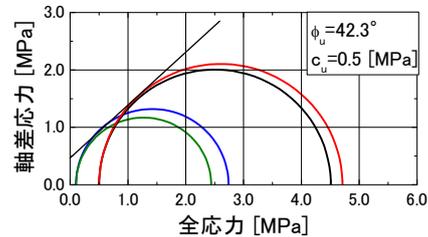
図 3 に疑似飽和供試体による試験結果を示す。凡例は供試体の飽和度と拘束圧を示す。



(a) 軸差応力～軸ひずみ関係



(b) 供試体体積変化量～軸ひずみ関係

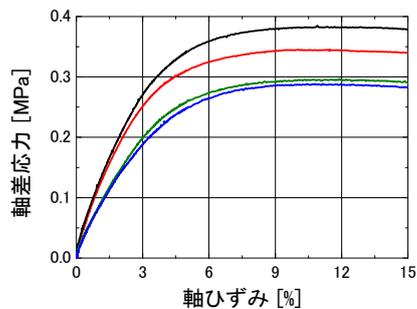


(c) モールの応力円

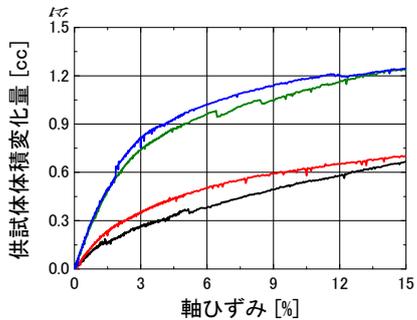
図 2 自然含水供試体の三軸試験結果

ただし、この飽和度は供試体成型時の値であり、等方圧縮時の体積変化量は反映していない。図 3 (a) の軸差応力～軸ひずみ関係より、いずれの供試体においても軸ひずみの増加に伴い軸差応力が増加し、軸ひずみ 10% 程度で最大軸差応力に到達している。図 3 (b) にせん断中の供試体体積変化量～軸ひずみ関係を示す。いずれの供試体においても軸差応力の増加に伴い、供試体体積は圧縮し続けている。また拘束圧 0.1MPa の供試体に比べ、拘束圧 0.5MPa の方がせん断終了時の体積変化量が小さい値となった。これは等方圧密時に、供試体内の気相の体積が減少している可能性が考えられる。図 3 (c) のモールの応力円より、粘着力  $c_u$  は 0.12MPa、内部摩擦角  $\phi_u$  は  $6.1^\circ$  となり若干の  $\phi_u$  が見られた。

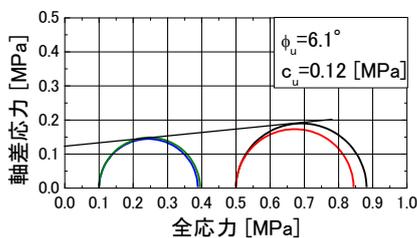
図 4 に各種不飽和供試体による試験結果を示す。凡例は供試体の飽和度と拘束圧を示す。図 4 (a) の軸差応力～軸ひずみ関係より、いずれの供試体でもせん断開始と共に軸差応力が急激に増加している。拘束圧 0.5MPa の



(a) 軸差応力～軸ひずみ関



(b) 供試体体積変化量～  
軸ひずみ関係

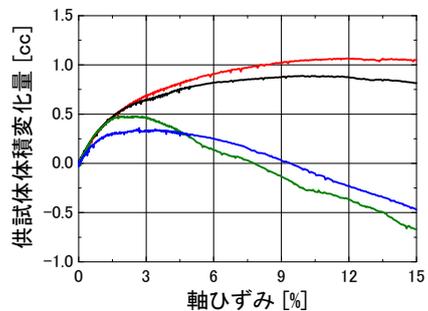
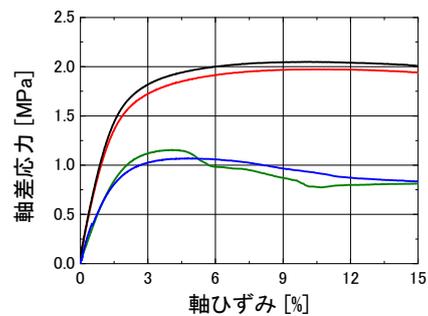


(c) モールの応力円

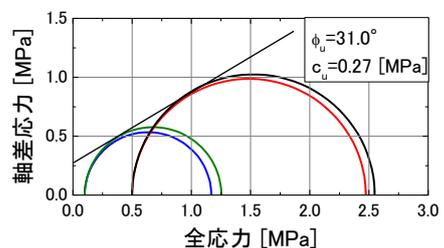
図3 疑似飽和供試体の三軸試験結果

場合では、せん断が進むと共に軸差応力が増加し続け、軸ひずみ 10%程度で最大軸差応力に到達している。しかし拘束圧 0.1MPa の場合では軸ひずみ 5%程度で最大軸差応力に到達した後、ひずみ軟化の挙動を示している。図 4 (b) にせん断中の供試体体積変化量～軸ひずみ関係を示す。拘束圧 0.5MPa では軸差応力の増加に伴い、供試体体積が圧縮し続けている。拘束圧 0.1MPa では軸ひずみ 3%程度まで供試体は体積圧縮し続け、最大軸差応力となる軸ひずみ 5%では体積膨張に転じている。残留状態からは、供試体体積の膨張は緩やかになっている。図 4 (c) のモールの応力円より、粘着力  $c_u$  は 0.27MPa、内部摩擦角  $\phi_u$  は  $31.0^\circ$  となった。

これらの供試体について比較を行う。軸差応力～軸ひずみ関係では、供試体の飽和度が高くなるほど最大軸差応力は小さい値となった。自然含水供試体ではひずみ軟化挙動が見られたのに対し、疑似飽和供試体では見られなかった。各種不飽和供試体では、拘束圧によっていずれかの傾向となった。供試体の体積変化については、自然含水供試体は最大



(b) 供試体体積変化量～  
軸ひずみ関係



(c) モールの応力円

図4 各種飽和度供試体の三軸試験結果

軸差応力の手前まで圧縮を続け、その後膨張に転じるのに対し、疑似飽和供試体は圧縮し続けた。各種不飽和供試体については、拘束圧によって体積変化の挙動が異なる結果となった。モールの応力円については、供試体の飽和度が高くなるにつれて粘着力と内部摩擦角は小さくなった。

### (3) 損傷した緩衝材のマルチスケール性能評価

損傷した緩衝材の性能評価を行うために、一面せん断試験によってせん断帯が内部に発生している試験後供試体について、ミクロな視点からマイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて観察を行うと共に、ミクロな遮水性能の評価も行った。本研究では、緩衝材が損傷を受けるのは処分場が再冠水して完全に飽和した後であるとの想定の下、試験後の飽和供試体を対象に試験を実施した。

図 5 のように試験後飽和供試体の中心部から円柱供試体を取り出し、高解像度で X 線 CT 撮影を行った。図 6 に X 線 CT 結果を示す。

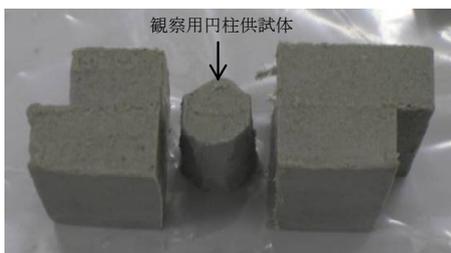


図 5 試験後供試体から観察用円柱供試体の切り出し

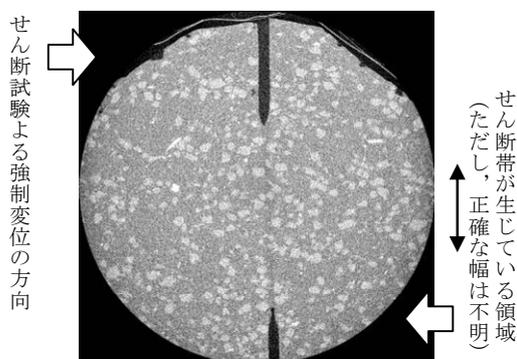


図 6 観察用円柱供試体の X 線 CT 結果

上下に入っている黒い 2 本の線は、せん断方向がわかるようにカッターナイフで付けた溝である。また、供試体中の珪砂 6 号の最大粒径が約 0.4mm であり、画像内に分布した白い斑点のものが珪砂にあたる。この CT 画像からはせん断変形に伴う密度変化は見られない。供試体の上下方向における CT 値の変動を調べたが、せん断変位 6mm もの大変位が存在するはずの供試体中央部においても、CT 値の有意な変動は確認できなかった。以上より、飽和後の緩衝材にせん断帯が発生するような損傷を受けたとしても、密度変化が発生しないことが示された。

次に、X 線 CT によるミクروسケールの観察では、飽和状態の緩衝材に密度変化が認められなかったが、実際に遮水性能が維持されているのか確認するため、マクروسケールの透水試験を行い、遮水性能の検討を行った。本研究では、極めて透水性の低い圧縮ベントナイトの透水係数を計測するために、超低透水性材料用の透水試験装置を新たに作製し、試験を実施した。

透水試験用の供試体は、図 7 に示すように、一面せん断試験後の供試体からせん断帯を含む供試体と含まない供試体を切り出して、直径 1.5mm、厚さ 0.3mm とした。

図 12 に、既往の 30%珪砂混合の圧縮ベントナイトの透水係数とともに、本研究の透水試験の全データを示す。本研究の透水係数は、既往の研究の透水係数とほぼ同じ領域であり、かつ、供試体中のせん断帯の有無で有意

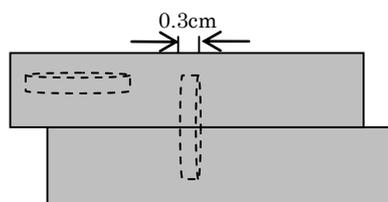


図 7 透水試験用供試体の作製方法

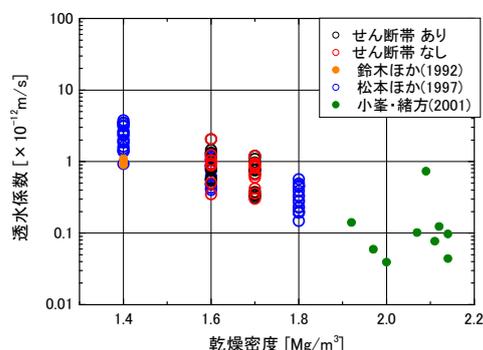


図 12 緩衝材の遮水性能評価結果

な差が現れなかった。したがって、ベントナイト・珪砂混合体の緩衝材は、せん断破壊を受けて損傷を受けたとしても、遮水性能の低下は引き起こさないことが示された。

## 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 5 件)

- ① 高田英典, 元山泰久, 小高猛司: 放射性廃棄物の地下処分における粉末および粒状ベントナイト緩衝材の変形・強度特性, 第 24 回中部地盤工学シンポジウム論文集, 査読無, pp. 43-50, 2012.
- ② 元山泰久, 平手寿大, 小高猛司: 圧縮ベントナイト緩衝材の損傷実験, 理工学研究報告, 第 51 号, 査読有, pp.138-145, 2010.
- ③ 元山泰久, 平手寿大, 小高猛司: 各種の供試体条件が圧縮ベントナイトのせん断強度特性と破壊挙動に及ぼす影響, 第 22 回中部地盤工学シンポジウム論文集, 査読無, pp. 37-44, 2010.
- ④ Kodaka, T. and Teramoto, Y., Hirate, T., Motoyoma, Y., Higo, Y. and Oka, F.: Shear Failure Development in Compacted Bentonite Specimens, Proc. of the International Symposium on Geomechanics and Geotechnics: From Micro to Macro, IS-Shanghai 2010, 査読有, Vol. 1, pp. 29-34, 2010.
- ⑤ 小高猛司, 寺本優子, 平手寿大, 元山泰久: 圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破

壊時の性能評価, 地盤工学ジャーナル, 査読有, Vol.5, No.2, pp. 207-218, 2010.

〔学会発表〕(計16件)

- ① 高田英典, 小高猛司, 崔 瑛: 各種飽和状態の高密度ベントナイトの力学特性とダイラタンシー特性, 2013年9月4日, 習志野市・日本大学
- ② 小高猛司, 崔 瑛, 高田英典: 各種飽和度の圧縮ベントナイトの非排気非排水三軸試験, 第48回地盤工学研究発表会, 2013年7月24日, 富山市・国際会議場
- ③ 小高猛司, 崔 瑛, 高田英典: 各種飽和度の圧縮ベントナイトの非排気非排水三軸試験, 平成23年度土木学会中部支部研究発表会, 2012年3月8日, 長久手市・愛知工業大学
- ④ Kodaka, T., Takada, H.: Failure behavior and sealing performance of damaged compacted bentonite, International meeting "Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement", フランスモンペリエ市・国際会議場
- ⑤ 高田英典, 小高猛司, 元山泰久, 岡二三生, 肥後陽介: 圧縮粒状ベントナイトの力学特性と破壊挙動, 土木学会全国大会第67回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋市・名古屋大学
- ⑥ 小高猛司, 高田英典, 元山泰久, 岡二三生, 肥後陽介: 粒状ベントナイト緩衝材の変形・強度特性, 第47回地盤工学研究発表会, 2012年7月13日, 八戸市・八戸工業大学
- ⑦ 高田英典, 元山泰久, 小高猛司, 岡二三生, 肥後陽介: 圧縮粒状ベントナイトの一面せん断試験とX線CTによる観察平成22年度土木学会中部支部研究発表会, 2012年3月7日, 長野市・信州大学
- ⑧ 元山泰久, 小高猛司: 圧縮粒状ベントナイトのせん断強度特性, 土木学会全国大会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 松山市・愛媛大学
- ⑨ 小高猛司, 元山泰久, 平手寿大: 不飽和珪砂・ベントナイト混合体の飽和度上昇に伴うせん断抵抗角の低下, 土木学会全国大会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 松山市・愛媛大学
- ⑩ 小高猛司, 元山泰久, 平手寿大: 各種含水条件下での圧縮ベントナイトのせん断強度, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月7日, 神戸市・神戸国際会議場
- ⑪ 元山泰久, 平手寿大, 小高猛司: 各種飽和度の圧縮ベントナイト供試体の試作,

平成22年度土木学会中部支部研究発表会, 2011年3月4日, 春日井市・中部大学

- ⑫ 元山泰久, 平手寿大, 小高猛司, 岡二三生, 肥後陽介: 損傷を受けた飽和圧縮ベントナイトのX線CTによる観察, 土木学会全国大会第65回年次学術講演会, 2010年9月1日, 札幌市・北海道大学
- ⑬ 平手寿大, 元山泰久, 小高猛司: 珪砂・ベントナイト混合体のせん断強度特性に及ぼす珪砂混合率ならびに乾燥密度の影響, 土木学会全国大会第65回年次学術講演会, 2010年9月1日, 札幌市・北海道大学
- ⑭ 小高猛司, 寺本優子, 平手寿大, 元山泰久, 高稲敏浩: 飽和圧縮ベントナイトの一面せん断破壊挙動の数値解析, 第45回地盤工学研究発表会, 2010年8月18日, 松山市・愛媛大学
- ⑮ 小高猛司, 平手寿大, 元山泰久, 寺本優子: 不飽和圧縮ベントナイトのせん断破壊挙動に及ぼす供試体密度の影響, 第45回地盤工学研究発表会, 2010年8月18日, 松山市・愛媛大学
- ⑯ 小高猛司, 元山泰久, 平手寿大, 寺本優子: 飽和圧縮ベントナイトのせん断強度特性に及ぼす供試体密度と供試体作製方法の影響, 第45回地盤工学研究発表会, 2010年8月18日, 松山市・愛媛大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小高 猛司 (KODAKA TAKESHI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号: 00252271

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし