

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560588

研究課題名(和文)最終処分場土質系遮水層の許容局所沈下量簡易評価法と遮水性評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on a conventional method of an allowable local settlement and barrier performance of the compacted soil barrier layer in waste landfill

研究代表者

今泉 繁良 (IMAIZUMI, SHIGEYOSHI)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20023335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：Na型ベントナイトを10%添加したベントナイト混合土を締め、室内落し戸実験と屋外大型局所沈降実験・浸透実験を行い、局所沈下に伴い亀裂は混合土層下面の沈下端部から斜め上方にせん断亀裂が発生すること、混合土層表面の亀裂幅が2mmを超えると遮水性が著しく低下すること、混合土層下方にジオネットを敷設すると亀裂の発生・進展が幾分抑制されること、Ca²⁺濃度が高まると亀裂が発生するまでの局所沈下量が低下すること等の結果を得た。また、得られたデータに対して角変形に基づく許容局所沈下量評価法を提案し、亀裂が層厚中央に達する角変形は0.16であり、この値を用いた許容局所沈下量が50mmであると推定した。

研究成果の概要(英文)：Trap door tests in the laboratory and local settlement tests in the field for the compacted soil barrier layer that was made by mixing a sodium type bentonite of 10% into crushed rock sand were conducted. The main results are that a crack appeared on the bottom surface of the soil layer just above the end of settling zone and progressed upward slantingly, the area having a crack wider than 2 mm on the top surface decreased considerably the function of barrier, placing a geonet beneath the soil layer was a bit effective to prevent a crack from creating and progressing and increasing a concentration of calcium ion of the liquid decreased a value of local settlement at which a crack appeared. Then the value of angle deformation at which a crack extended to the middle height of the soil layer was found to be 0.16 by analyzing the experimental data. The allowable local settlement was estimated to be around 50 mm based on the angle deformation.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：廃棄物最終処分場 土質系遮水工 局所沈下 画像解析 模型実験 浸透性

1. 研究開始当初の背景

廃棄物最終処分場では埋立て廃棄物中に含まれる有害物質等が周辺環境を汚染しないように遮水層が設置される。また、汚染土壌対策では汚染土壌を遮水材で封じ込める工法が用いられる。わが国の廃棄物処分場の遮水層は、近年、遮水シートに加えて土質系遮水層を併用する構造(多重遮水構造)が一般的になりつつあり、経済発展が著しい中国やフィリピン、タイなど東南アジアでの廃棄物処分場においても、従来の遮水構造を持たない投げ込みタイプの処分場から遮水層を有する処分場を建設する事例が増えている。このような状況において、安価で安全性が保証された土質系遮水層の建設が強く要求されており、砂にベントナイトを混合して透水性を低めたベントナイト混合土は、ベントナイトの膨潤性と重金属吸着性を活かした土質系遮水材として広く用いられるようになってきているが、遮水効果の適用限界を確認する研究も強く求められている。

すなわち、廃棄物処分場では、投入された廃棄物荷重によって埋立て地盤盤(自然地盤)が圧縮・圧密して底部遮水層が変形したり、廃棄物自体の分解作用による体積の減少にともなって最終覆土遮水層が変形したりする。これらの遮水層の変形は、遮水材料(遮水シートやベントナイト混合土)破損の主要な原因となりうるので、遮水層に破損が生じない許容変形量(沈下量)を求めること、また、それに基づく遮水層の構造設計計算式の確立が学術的・実務的に要求されている。

遮水材料のひとつである遮水シートに関する許容局所沈下量については、Koerner、Giroud、申請者らによって、シートの材質にもよるが20~30mmであることが明らかにされている。しかし、土質系遮水工に関しては、B.V.S.Viswanadhamらが基盤の不等沈下によって生じる亀裂を遠心載荷模型実験で確認した研究、JP.Gourcらが最終覆土に用いた粘土系遮水工が廃棄物の20mm程度の圧縮沈下によって曲げ亀裂を発生することを大型模型実験で確認した研究、申請者らが碎石砂に10%のベントナイトを添加した厚さ10~20cmの混合土層に対して下方基盤の一部を強制沈下させた落とし戸実験を行い亀裂が発生するまでの局所沈下量は約15mm程度であることを示した研究などが発表されているが、実規模(ベントナイト混合土厚さが通常50cm)で亀裂が発生するまでの許容沈下量や亀裂発生メカニズム(曲げ亀裂かせん断亀裂か)、許容沈下量に関する簡易評価式、亀裂発生防止工法についての研究は十分であるとは言えない。

ところで、ベントナイト混合土層の変形挙動を数値解析し、評価するには、申請者らが遮水シートの評価に用いた応力ひずみ関係の非線形性と層間摩擦特性をジョイント要素で評価した有限要素プログラム等が効果的である。しかし、実用設計計算を念頭に置

くと、せん断強度式と梁理論を融合させた評価式の確立も必要と考える。そして、これらの評価に際しては材料特性を把握する必要がある。勝見らはマサ土を用いたベントナイト混合土の一面せん断試験を実施し、締固め直後には粘着力50.9kPaと内部摩擦角 45.5° が発揮されるが、時間経過に伴い強度定数が低下することを示している。また、兵頭らは、珪砂に10~20%のベントナイトを添加した混合土の強度特性に、サクシオンや Ca^{2+} イオンが与える影響を実験的に評価している。申請者もベントナイト混合土を対象とした一辺35cmで深さ14cmのせん断箱を用いる中型一面せん断試験機を試作し、ベントナイト添加率を増大させると非排水せん断強度特性が砂特有の ϕ 材(粘着力がほぼゼロ)としての特性からC材としての特性(内部摩擦角がゼロ)と変化することを示してきた。

土質材料がせん断変形すると、透水性が変化する。本郷らは砂と粘性土を直接せん断してその過程での透水係数を計測しせん断ひずみと透水係数の間に正の相関性があることを示している。膨潤性を有するベントナイト混合土に対してせん断ひずみと透水性の関係を検討した研究は見られないが、申請者らは亀裂を有するベントナイト混合土層から不攪乱試料を採取して透水試験を実施して、亀裂を有する試料は飽和までの浸透量が大きい飽和膨潤後には透水係数が低下することなどを示してきた。しかし、採取試料でなくベントナイト混合土層が亀裂を進展する過程での透水性(遮水性)の変化を明らかにすることは、学術上・実務上重要であると考えられる。また、Na型ベントナイトはカルシウム等の陽イオンを含む液体を浸透させた場合に遮水性が低下することがDaniel、Bouazzaら、勝見ら、小峰ら、申請者によって示されているので、この性質が変形性や遮水性どのように影響するかについての研究も必要である。

最後に、板状・格子状の合成樹脂を地盤材料(ジオシンセティックス)として利用し、地盤の変形を抑制し滑り抵抗を高める工法(補強土工法)が、近年多用されている。この工法をベントナイト混合土層下面に敷設することで、亀裂の発生・進展の抑制に効果があるかを検討することも、重要である。

2. 研究の目的

廃棄物最終処分場や汚染土壌対策現場で遮水材として使用されるベントナイト混合土が局所変形(沈下)を受けると亀裂が発生する。研究では、以下のことを目的とする。

- (1) 亀裂発生までの変形挙動と許容局所変形量(沈下量)を明らかにする。
- (2) 許容局所沈下量の簡易計算法を確立する。
- (3) 膨潤し自己修復性のあるベントナイト

混合土の発生亀裂と遮水性の関連を明らかにする。

(4) ジオネット (GN) の併用による亀裂発生・伝播を防ぐ工法の効果を検証する。

(5) 液体の陽イオンの濃度が変形挙動や遮水性に与える影響も検討する。

3. 研究の方法

(1) 購入する破碎砂に関するベントナイトの限界添加率と最適含水比を締め固め試験とマクロ間隙比概念に基づく推定法で求める。

(2) 平成 22 年度まで使用していた幅 80cm、奥行 20cm、深さ 30cm の小型落とし戸装置に関して、落とし戸 (底盤中央の沈降部) を下げる手動式ジャッキを、図-1 に示すような一定速度で沈降させるようにモーターを利用した電動落とし戸装置に改良する。さらに、土層上面から液体浸透実験ができるように送水・受水およびその流量計測装置を接続する。

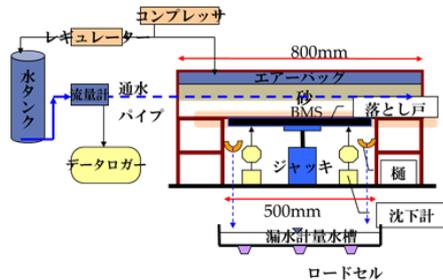


図-1 室内落とし戸沈降・浸透装置概略図

この小型落とし戸装置内に、限界添加率のベントナイト混合土を厚さが 10、20cm となるように目標含水比 17% で静的に締め固める。保護砂とエアバック等をその上部に置き、反力用の鉄蓋を土槽に固定した後、エアバックを介して上部に 200kN/m² 程度の土上載圧を加える。この状態で、落とし戸を 0.5mm/min で降下させ、ベントナイト混合土層上部の土圧と落とし戸の沈下量と支持力を測定する。ベントナイト混合土層の前面には変形観察用のマーカーを設け、変形状況と亀裂発生状況をビデオカメラで撮影・記録し、沈下量と亀裂発生・進展の関係を評価する。このとき、土層下面にジオネット (GN) を敷設する場合と敷設しない場合の模型について実施する。

(3) 落とし戸が 15、30、45mm 沈降した段階で沈降を止め、ベントナイト混合土層上部の川砂層に加圧した水道水を送り、送水量とベントナイト混合土下部からの通過水量を計測し遮水性を評価する。試験終了後、ベントナイト混合土層の含水比分布を計測する。

(4) Ca²⁺濃度を変えた模擬浸出液を、小型浸透装置と小型落とし戸装置内に締め固めたベントナイト混合土層上に注ぎ、通過水量計測実験を実施し、遮水性の変化を評価する。

(5) 屋外に、図-2 に示すような層厚 50cm、幅 300cm、奥行 150cm のベントナイト混合土層を築造し、その下方に最大幅 120cm で、深さを 5、10、20cm と変えた空洞を作製する。このとき、土層の下面に GN を敷設する場合と敷設しない場合の模型を作製する。

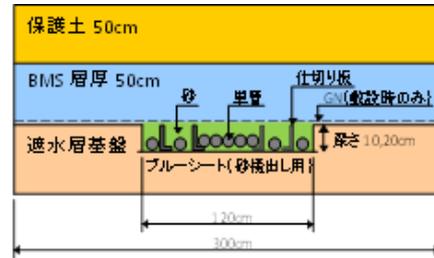


図-2 局所沈下用屋外大型遮水工模型概略図

この模型空洞部の砂・単管を中央から順次除去して空洞を作って局所沈降実験を実施し、空洞幅拡大に伴う変形・亀裂発生状況を観察するとともに、ビデオカメラに記録して、空洞幅と亀裂との関係を評価する。

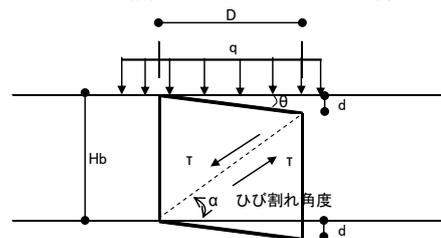
(6) 大型遮水工模型に対する局所沈降実験の終了後、表面亀裂の幅が異なる数ヶ所を選んで円筒水槽を建て (図-3 参照)、初期水深が 80cm となるように水道水を入れ、水位の経時変化を計測する。水位変化から亀裂が無い場合を基準とする透水係数比を評価する。



図-3 浸透実験用円筒水槽と水位計測器

(7) 小型落とし戸実験と屋外大型局所沈降実験で撮影したビデオ映像を画像解析し、ベントナイト混合土層に発生する亀裂近傍のせん断ひずみ分布の変化を評価する。

(8) 実験で得たデータを、構造物のせん断や曲げ変形による二次応力に関係すると言われている図-4 に示す角変形 θ の概念に基づき整理・検討し、亀裂発生時と亀裂進展に応じた角変形の値を評価する。そして、角変形に基づく許容局所沈下量を推定・提案する。



$$\theta = d/D = (d \times \tan \alpha) / (H_b - d)$$

図-4 角変形の概念図

4. 研究成果

(1) ベントナイト添加率 α を5、10、20%に変えた締固め試験を行い、表-1に示す結果を得た。この結果をもとにマクロ間隙比を計算し、図-5に示す「マクロ間隙比-ベントナイト添加率」関係から、限界添加率を10%、その最適含水比を19%と評価した。

表-1 ベントナイト混合土の締固め特性

添加率 α (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
5.0	1.635	18.75
10.0	1.595	19.10
15.0	1.600	19.20
20.0	1.555	19.65

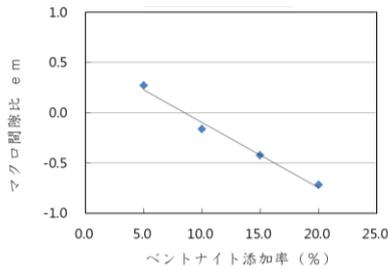


図-5 マクロ間隙比-ベントナイト添加率の関係

(2) 室内小型落とし戸沈降実験の結果、ベントナイト混合土層下面にGNを敷設しない場合、層厚が10cmでは沈降量が2mm程度、層厚が20cmでは沈降量10mm程度で土層下面の落とし戸端部から亀裂が現れ、表-2に示すように落とし戸沈降とともに斜め上方に進展し、最終的に土層上面に達する現象が確認された(図-6(a)参照)。また、土層下面にGNを敷設した場合、層厚10cmで5.5mm程度、層厚20cmで9mm程度沈降した時亀裂が発生し、沈降とともに亀裂が進展した(表-2参照)。そして、図-6(b)に見られるとおり、GNを敷設した場合の変形形状は、落とし戸と固定底盤との境界で丸みを帯び、GNにより土層の落下・せん断が抑制されることを確認した。

表-2 亀裂の進展に対応する沈降量(mm)

層厚 (cm)	10		20	
	無	有	無	有
GNの有無	無	有	無	有
亀裂発生時	2.0	5.5	10.0	9.0
50%進展時	10.0	11.0	22.0	22.0
75%進展時	22.0	14.0	32.0	30.0
上面貫通時	30.0	14.5	40.0	40.0

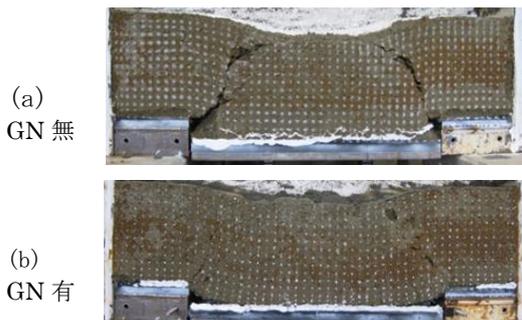
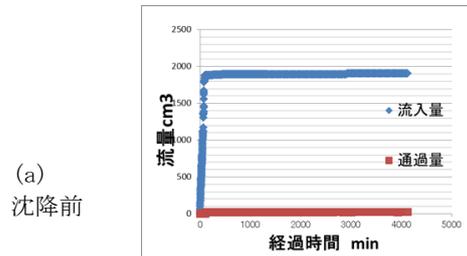


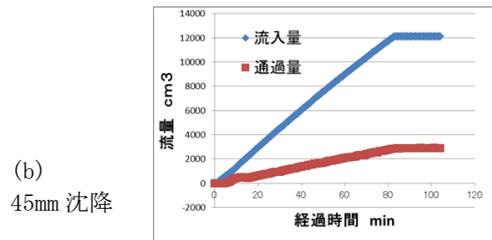
図-6 落とし戸沈降に伴う亀裂発生状況

また、亀裂が水平となす角度は、45° ~65°にあり、GNを敷設するかしないかによる違いは見られず、平均角度は53°であった。

(3) 室内小型落とし戸沈降・浸透実験の結果、図-7に例示(層厚20cm・GN敷設なしにおける落とし戸沈降前と45mm沈降後)する送水量と通過水量の経時変化が得られ、亀裂が土層を貫通すると通過水が確認されベントナイト混合土の遮水性が失われることを確認した。このとき、ベントナイトの洗い流されも確認された(図-8参照)。そして、遮水性を考慮した限界沈降量は、GNを敷設しない場合には層厚10cmで10mm程度、層厚20cmで30mm程度、GNを敷設した場合には、層厚10cmで40mm程度、層厚20cmも40mm程度と推定した。



(a) 沈降前



(b) 45mm沈降

図-7 流入量と通過量の経時変化



図-8 ベントナイトを含む通過水

沈降・浸透実験後の土層内の含水比分布は表-3に例示(層厚20cm)するように、土層上面から5cm付近の含水比は締固め時含水比(=17%)より高く、15cm付近では締固め時含水比に近い値となっており、送られた水が土層上部のベントナイトの吸水膨張によって遮水性が高まり、土層下部まで浸透していないことが確認された。他方、左亀裂近傍の含水比は下部まで高い数値を示し、亀裂の発生によってここが水道となっていることも確認された。

表-3 実験終了時の土層内含水比分布(単位:%)

上面からの深さ	左固定底盤上	左亀裂近傍	落とし戸中央	右亀裂近傍	右固定底盤上
5 cm	19.72	24.31	23.45	22.37	19.58
10 cm	16.90	21.53	16.72	16.97	16.88
15 cm	16.88	21.80	16.47	16.95	17.00

(4) Ca^{2+} 濃度を変えた層厚 5cm のベントナイト混合土に対する室内小型浸透実験では、 Ca^{2+} 濃度と通過水が発生するまでの時間の関係はほぼ双曲線に近似することができ、 Ca^{2+} 濃度が低いときほど濃度変化が遮水性低下に与える影響が大きかった。

また、 Ca^{2+} 濃度を変えた層厚 10cm のベントナイト混合土に対する室内小型落とし戸沈降・浸透実験から、事前散水 Ca^{2+} 濃度と通過水が発生するまでの沈降量の関係として、図-9 が得られた。図に示すように、事前散水 Ca^{2+} 濃度が高いほど亀裂発生までの沈降量は小さく、両者の関係はほぼ双曲線に近似された。そして、近似式から、事前散水 Ca^{2+} 濃度に対する厚さ 10cm の土層の遮水性を考慮した許容局所沈下量を、500mg/L で 10.42mm、1000mg/L で 6.740mm、1500mg/L で 4.585mm、2000mg/L で 3.05mm と推定した。

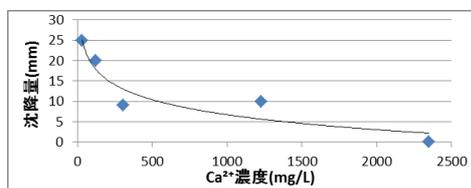


図-9 Ca^{2+} 濃度と通過水発生時沈降量の関係

(5) 屋外大型遮水工模型沈降実験から、土層下部空洞部の砂除去に伴う空洞幅の空洞全幅 (120cm) に対する比 (砂の掻き出し率) と亀裂の発生・進行高さとの関係として、図-10 が得られた。

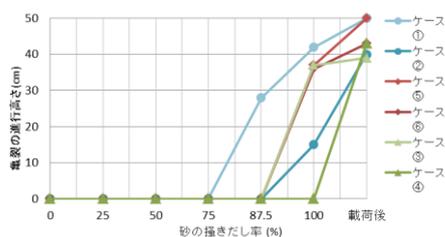


図-10 砂の掻き出し率と亀裂進行高さの関係

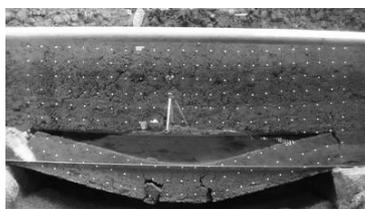


図-11 砂の掻き出し率 100%での亀裂状況

図より、砂の掻き出し率が 75%までは亀裂が発生しないが、砂の掻き出し率が 87.5%~100% (空洞幅 105~120cm) に達すると土層下面から 30~40cm 前後まで亀裂が進展し (図-11 参照)、44kN 載荷後には、空洞深さが 20cm の 3 ケース中 2 ケースで亀裂が土層の上面まで貫通した。そして、土層下面から発生した亀裂の水平とのなす平均角度は 58.9° であり、せん断破壊とみなされることを確認した。

(6) 屋外大型遮水工模型沈降実験後に土層表面に発生した曲げ亀裂の最大亀裂幅、沈下幅等を計測・観察した結果、亀裂幅は空洞深さ 20cm の方が空洞深さ 10cm よりも大きく、沈下幅は GN を敷設した方が広がっていた。そして、GN を敷設すると土層上面からの曲げ亀裂が土層中部・下部から生じるせん断亀裂と連結しにくくなり、土層上面からの水の流下を抑制する効果があることを確認した。

(7) 屋外大型遮水工模型に対する浸透実験の結果、図-12 に示す円筒水槽内水位の経時変化を得た。

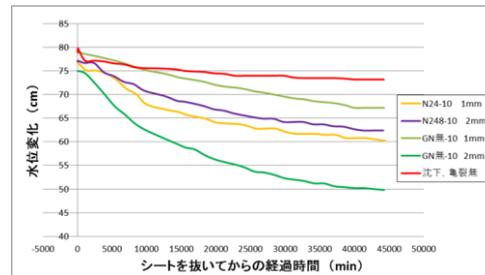


図-12 円筒水槽内水位の経時変化

図から、GN の敷設無しで空洞部深さが 10cm の層上面亀裂幅が 2mm の位置での水位低下は約 25cm であるが、GN の敷設無しと GN を敷いた空洞部深さ 10cm の層上面亀裂幅が 1~2mm の位置での水位低下は約 10~15cm である。この結果を簡単な浸透モデルに基づき透水係数比を評価すると、亀裂幅が 2mm の位置での透水係数比は 19 となり、遮水性が亀裂の無い場合に比べ約 20 分の 1 に低下していた。

(8) 撮影したビデオ映像に関し、ベントナイト混合土層側面に設置した標点の座標変化を画像解析し、3 つの標点で構成する三角形のせん断ひずみを有限要素解析法の考えに基づき評価した結果、肉眼によって亀裂を確認できるときの平均せん断ひずみの絶対値は、室内小型落とし戸沈降実験では 24%~35%、屋外大型遮水工模型実験では 8%~20%にあると評価された。

(9) 小型落とし戸実験で得た亀裂発生時と亀裂が層厚の 50%まで進展した時の平均的沈下量 (表-2 参照) をもとに角変形 θ を計算し、表-4 に示す結果を得た。層厚が 10cm で GN を敷設しない場合で亀裂発生時の変形角の値が他と比べて小さいが、それ以外は、層厚の違いや GN 敷設の有無に依存しない値のように思われ、平均的角変形 θ の値は亀裂発生時で 0.070、50%進展時で 0.160 である。

表-4 角変形 θ の計算値

層厚 (cm)	10		20	
	無	有	無	有
亀裂発生時	0.027	0.077	0.070	0.063
50%進展時	0.147	0.164	0.164	0.164

そこで、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ を想定し、ひび割れ角度を $\alpha = 45^\circ + \phi / 2 = 60^\circ$ とし、実際の処分場で用いる層厚50cmに対する許容沈降量を計算すると、亀裂発生時は19.4mm、亀裂が層厚の50%まで進展する時は42.33mmとなった。空洞部深さを5cmとした屋外大型遮水工模型実験では亀裂の顕著な進展がみられていないことを考慮して、層厚50cmの許容局所沈下量を50mm程度と推定した。

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 S. Imaizumi, S. Usami, S. Matsuyama, H. Kudo, T. Harada, M. Nonoda, H. Kano, Large Model Tests on the Bentonite Mixed Soil Layer undergoing Local Settlement, Proc. of the 14th International Waste Management and Landfill Symposium, 査読有、PF、CD-ROM、2013、B04
- ② 今泉 繁良、小野 泰樹、工藤 賢悟、松山 眞三、宇佐見 貞彦、局所沈下させた大型模型ベントナイト混合土層の亀裂発生と浸透性評価、第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、査読有、2013、pp.259-264
- ③ K. Kudo, S. Imaizumi, Model Tests on Barrier Performance of the Bentonite Mixed Soil Layer undergoing Local Settlement, Proc. of 2012 Japanese-Chinese Joint Symposium, 査読有、CD-ROM、2012、pp.288-294
- ④ S. Imaizumi, K. Kudo, S. Matsuyama, S. Usami, Efficiency of Placement of Geonet under BMS Layer subject to Local Settlement, Proc. of the Seventh Asia-Pacific Landfill Symposium, 査読有、CD-ROM、2012、ID040、pp.P28-595-P28-601
- ⑤ 今泉繁良、安全で合理的・経済的な最終処分場の設計手法を目指して、地盤工学会誌、査読有、Vol.59、No.643、2011、pp.30-31

[学会発表] (計 9件)

- ① 今泉 繁良、宇佐見 貞彦、松山 眞三、柴田 健司、局所沈下させた大型模型ベントナイト混合土層の亀裂発生評価、第24回廃棄物資源循環学会研究発表会、D1-3、2013年11月2~4日、北海道大学(札幌市)
- ② 今泉 繁良、宇佐見 貞彦、松山 眞三、柴田 健司、局所沈下させた大型模型ベントナイト混合土層の亀裂発生に伴う遮水性評価、第24回廃棄物資源循環学会研究発表会、D1-2、2013年11月2~4日、北海道大学(札幌市)
- ③ 今泉 繁良、藤田 恭之、小野 泰樹、落とし戸実験におけるベントナイト混合土層

の許容局所沈下量、第48回地盤工学研究発表会、pp.111-112、2013年7月23~26日、富山国際会議場/富山県民会館(富山市)

- ④ 小野 泰樹、今泉 繁良、現場模型実験によるベントナイト混合土層の沈降・浸透実験、第40回土木学会関東支部技術研究発表会、III-20、2013年3月14~15日、宇都宮大学(宇都宮市)
- ⑤ 藤田 恭之、今泉 繁良、ベントナイト混合土層の沈降量と浸透性に関する模型実験、第40回土木学会関東支部技術研究発表会、III-21、2013年3月14~15日、宇都宮大学(宇都宮市)
- ⑥ 今泉 繁良、宇佐見 貞彦、藤田 泰之、小野 泰樹、厚さの異なるベントナイト混合土層に関する落とし戸・浸透量実験、第23回廃棄物資源循環学会研究発表会、pp.487-488、2012年10月20~24日、仙台国際センター(仙台市)
- ⑦ 藤田 恭之、小野 泰樹、今泉 繁良、局所沈下するベントナイト混合土層の浸透性評価、第9回地盤工学会関東支部発表会、環境3-7、2012年10月5日、日本科学未来館(東京)
- ⑧ 今泉 繁良、工藤 賢悟、亀裂を有するベントナイト混合土層の遮水性評価実験、第47回地盤工学会発表会、p.1007、2012年7月14~16日、八戸工業大学(八戸市)
- ⑨ 宇佐見 貞彦、工藤 賢悟、今泉 繁良、ベントナイト混合土層変形前後の遮水性能比較、第22回廃棄物資源循環学会研究発表会、p.1007、2011年11月3日、東洋大学(東京)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

今泉繁良：平成23年度~25年度科学研究費助成事業(基盤研究C)研究成果報告書(冊子体)「最終処分場土質系遮水層の許容局所沈下量簡易評価法と遮水性評価に関する研究」、全59ページ、平成26年3月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今泉 繁良 (IMAIZUMI, Shigeyoshi)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20023335

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし