

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25252043

研究課題名(和文)キャピラリー・バリア盛土による放射性廃棄物・汚染物質の長期貯蔵保管工法の提案

研究課題名(英文) Feasible proposition of a shallow land waste repository constructed by using a capillary barrier of soil to isolate a hazardous waste material or a very low level radioactive waste.

研究代表者

森井 俊廣 (Morii, Toshihiro)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30231640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,100,000円

研究成果の概要(和文)：砂層とその下に礫層を敷設したキャピラリーバリア(CB)土層では、地表面から浸潤してきた土中水は、土の不飽和水分特性の違いにより、その境界面で遮断される。CBを導入して、危険な廃棄物あるいは低レベル放射性廃棄物を安全に隔離するための盛土式廃棄物貯蔵工法を提案し、その実用性を、盛土試験を中心に調べた。特殊な施工技術・重機を必要とせず、砂層の密度管理を通して通常の土工工事と同じように築造できる。盛土内の土中水分量の長期測定からは、野外条件下におけるCB層の安定した水分遮断機能を確認できた。大型土槽試験に基づき、遮水範囲(限界長)の推定式を確立し、盛土の構造規模を合理的に決定できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Capillary barrier (CB) is a sloping soil layer system which is composed of sand layer underlain by gravel layer, and can divert water infiltrating from the soil surface. A shallow land waste repository, in which upper CB and bottom CB were placed to divert infiltration due to rainfall and to drain water percolating through the protected waste material respectively, is proposed to isolate a hazardous waste material or a very low level radioactive waste. In the study a test shallow land waste repository was constructed to investigate the CB's performance in the field. Diversion length of the CB was determined based on the laboratory soil box test to determine the structural dimensions of the shallow land. Then soil moisture contents within the shallow land were measured. They showed an excellent and stable water diversion of the CB in the field.

研究分野：農業工学，地盤工学

キーワード：土のキャピラリーバリア 廃棄物貯蔵・保管工法 試験盛土 限界長 遮水・排水機能 土の不飽和水分特性

1. 研究開始当初の背景

社会は生活の利便さと引き換えに“やっかい”な物質を抱えてしまった。2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所事故で生じた放射性汚染土壌、そして事故とは関係なく発電所の50年サイクルの廃止措置によって必ず生じる被曝建屋等の解体に伴う極低レベル放射性廃棄物である。長期にわたる安定した貯蔵保管にあたっては、拡散防止の点から、地下水と雨水からの確実な遮断が確保されなければならない。盛土形式で、かつ高度な雨水遮断機能と排水機能をもつキャピラリーバリア地盤を敷設した貯蔵保管工法を提案し、その実効性を、実形式の盛土を用いた築造・計測試験により検証する。盛土表面の植生被覆のもつ浸潤抑制効果、長期豪雨時の水理学的安全性、ならびに地震動に対する耐震性能を配慮したものとする。

2. 研究の目的

キャピラリーバリア(CB)は、砂層とその下に礫層を重ねた単純な土層をいう。砂と礫の不飽和水分特性の相対的な違いにより、上部から浸潤してきた土中水は両層の境界面で遮断・保水され(図1(a))、境界面が傾斜していると保水された土中水は境界面に沿って流下し排水される(図1(b))。自然材料のみで構成される非常にシンプルな地盤層システムであるが、たとえば保水性に着目すると、乾燥地・半乾燥地域での節水かんがいに結びつく。浸潤水の遮断性能に着目すると、斜面の安定化工法や廃棄物の表面被覆工として

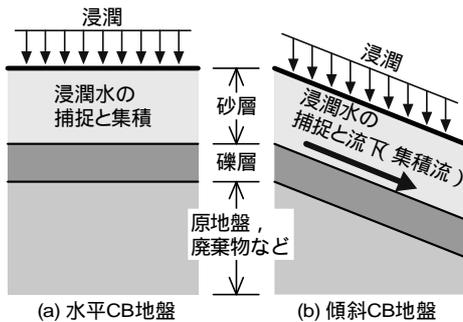


図1 CBによる浸潤水の遮断・排水機能

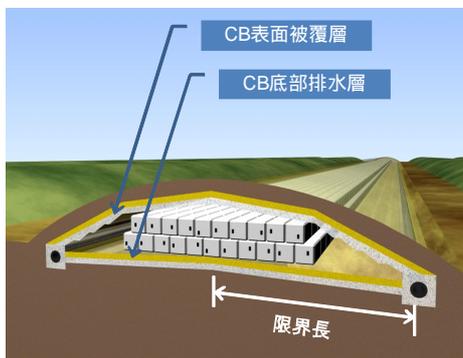


図2 CB実装盛土による放射性廃棄物等の貯蔵保管工法の提案

利用できるなど、さまざまな適用可能性をもつ。本研究では、この優れた雨水遮断・排水機能と、自然材料であるため極めて長期にわたって機能が維持される利点を活かして、傾斜キャピラリーバリアを表面被覆層と底部排水層に敷設した盛土(図2)を提案し、放射性汚染土壌および極低レベル放射性廃棄物の貯蔵保管工法の展開を図る。

3. 研究の方法

上記2で提案した貯蔵保管工法の実用化を探るため、実規模大の試験盛土を造成し、CBの施工性ならびに野外条件下でのCBの遮水・排水機能を調べた。貯蔵保管盛土の構造規模、したがって貯蔵できる廃棄物等の容量は、CB層が野外条件下で効果的に遮水できる範囲に左右される。CBが効果的に遮水できる片側幅の距離を限界長と呼ぶ。長さ10mの降雨装置を備えた室内大型土層試験装置を試作し、この限界長の発現メカニズムと材料特性に応じた大きさ(長さ)を調べた。

4. 研究成果

4.1 盛土試験によるCB機能の確認

4.1.1 キャピラリーバリア盛土の試験施工

砂層とその下に礫層を敷設した単純なキャピラリーバリア地盤システムでは、地表面から浸潤してきた土中水は、土の不飽和水分特性の違いにより、両土層の境界面に沿って

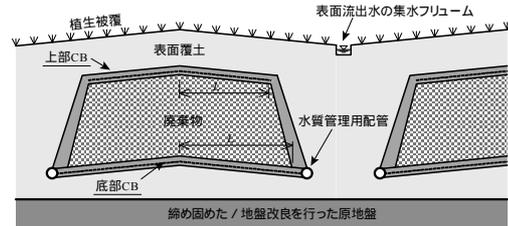


図3 キャピラリーバリアシステムを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設(提案)

遮断される(森井, 2011)。このキャピラリーバリアシステムを導入して、危険な廃棄物あるいは低レベルの放射性廃棄物を安全に隔離するための盛土式廃棄物貯蔵施設を提案(森井ら, 2013; 阪ら, 2014)した(図3)。表層部に敷設した上部キャピラリーバリア被覆層によって降雨にともなう浸潤水を遮断するとともに、万が一に浸潤が生じた場合、底部キャピラリーバリア排水層により貯蔵廃棄物を通過してくる土中水を安全に集水し排水できる構造となっている。盛土形式であるため地下水の流入はなく、かつ砂と礫の自然材料であることから非常に長期にわたる供用性をもつ。

キャピラリーバリア層には、平均粒径0.22mmの砂と6.0mmの礫を用いた。キャピラリーバリア盛土の構造規模は、砂の飽和透水係数、砂と礫の不飽和土水分特性、層の傾斜角ならびに浸潤量によって決定される限界長(傾斜したキャピラリーバリア層が上か

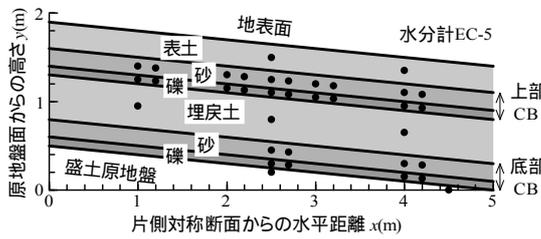


図 4 キャピラリーバリア試験盛土の構造断面（片側断面）



図 5 法面バケットによるキャピラリーバリア土層の試験施工

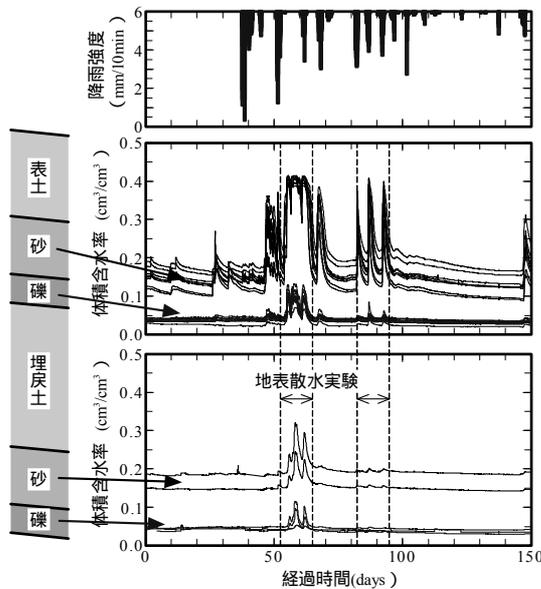


図 6 野外条件下でのキャピラリーバリア試験盛土内の水分変化

らの浸潤を遮断し境界面に沿って排水できる距離)によって決まる(森井ら, 2009)。土槽試験から, おおよそ限界長として 5m 程度が可能であることを確認 (Morii ら, 2013) したのち, 図 4 に示すように, 貯蔵施設の片側半分を模擬した高さ 2m 弱のキャピラリーバリア盛土を試験造成した。原地盤(ローム)を 10%の傾斜をつけて整地したのち, 法面バケットを用いて礫を厚さ 10cm, 続いて砂を厚さ 20cm で静的に締固めた(図 3)。底部キャピラリーバリア層を敷設したのち, 現地の砂質土を締固め, その上に貯蔵体を想定して

砂質土を詰めたトンパックを設置し, さらにその上に上部キャピラリーバリア層と表土を敷設した。キャピラリーバリア層の限界長したがってキャピラリーバリア盛土の構造規模は砂の透水係数の大きさに比例して変化することから, 砂層の締固め密度の均一性が重要な管理パラメータとなる。採土による密度測定から, バックホーに取り付けた法面バケット用いた施工(図 5)によっても, 比較的均質な締固めを確保できることを確認した (Morii ら, 2013)。

4.1.2 キャピラリーバリア地盤の機能

先の図 4 の断面をもつキャピラリーバリア盛土の奥行き(幅)は 2m で, その奥側に, 対照区としてキャピラリーバリア層のない砂のみの盛土, および底部キャピラリーバリア層のみ敷設した盛土を連続して造成した。盛土内の土中水分量(体積含水率 θ)を測定するため, 図 4 の黒丸記号で示すように, 表土, 埋め戻し土, キャピラリーバリア層のそれぞれに複数個の誘電率水分計 EC-5 (Decagon Devices 社製)を埋設した。図 6 に, キャピラリーバリア盛土の試験造成後, 7 月中旬から 12 月下旬までの 5 か月にわたる測定結果をまとめる。最上段の図は, 10 分間隔で計測した降雨強度である。中段, 下段の図で, 経過時間 60 日前後および 90 日前後で θ が急増しているが, これは, これらの期間に表面散水実験を行い, 異常降雨等を想定して地表面から大量の水を供給したためである。

これらの表面散水実験期間を除いた通常の野外条件下でみると, かなり大きな降雨に遭遇しても, 上部キャピラリーバリア層内の礫層の θ が変化することは少なく, おおむね降雨浸潤に対する遮水機能が維持されていることが分かる。上部キャピラリーバリア層で, 降雨による土中浸潤水がほぼ遮断されているため, その下に敷設された底部キャピラリーバリア層に降雨浸潤が到達していないことから, 下段図の θ にはほとんど変化が起きていない結果となっている。第 1 回目の表面散水実験では, 上部キャピラリーバリア層, 底部キャピラリーバリア層ともに多量の浸潤水が通過しているが, その後はすぐに本来の機能を発揮している。つまり, 遮水機能の回復は早く, 野外条件下でのキャピラリーバリアの長期供用性を示唆する結果となっている。第 2 回目の表面散水実験では, 上部キャピラリーバリア層の砂層と礫層の θ がいずれも大きく変化しており, 降雨浸潤水は上部キャピラリーバリア層を通過して下方に移動したと考えられる。その際の底部キャピラリーバリア層内の水分量の変化をみると, 下段図から分かるように, 砂層内にわずかに浸潤水が降下してきたものの, 境界面上で捕捉され, その下の礫層には流れておらず, 底部キャピラリーバリア層が 2 重のセーフティとしての遮水または排水機能を適切に発揮していると考えられることができる。

4.2 限界長の推定（盛土規模の決定）

4.2.1 設計パラメータとしての限界長

図 1(b)の傾斜境界面に沿って上部の砂層内を流下する土中水は、地表面からの絶え間のない浸潤水の供給により、次第にその質量を増し、境界面に沿ってある一定の距離地点において、下部の礫層へ降下浸潤し始める(Ross, 1990; Walter et al., 2000)。境界面に沿った流れが生じる地点から、この礫層への降下浸潤（ブレイクスルー）が生じる地点までの水平距離を、CBの限界長（Diversion length）とよぶ。限界長は、CBシステムの構造規模と形状を決定する際、あるいは相対的に細粒の土と粗粒の土の組み合わせを選択する際に、重要な設計パラメータのひとつとなる。

4.2.2 大型土槽試験による限界長の測定

CBシステムの境界面に沿った流れに生じるブレイクスルーを直接観測し限界長を決定するため、一連の室内土槽試験を実施した。図 7 に、長さ 10.0m、幅 0.2m、高さ 0.5m のアクリル製土槽を示す。土槽は、鋼製フレームで支保する構造になっており、その上部には、定水位条件化で水滴を落下させ CBシステムに浸潤フラックスを供給するための給水槽（長さ 10.0m、幅 0.2m）を設置している。最初に土槽を水平に置き、礫層を 7.5cm 厚さで均質に締固め、次いで砂を 20cm 厚さに締固めた。砂層の締固めの際に、砂粒子が下部の礫層の間隙内に落ち込まないようにするため、礫層の上面に、完全に透水性のポリプロピレン布（商品名パスライト）を敷いた。仕上がった砂層表面上に、給水槽からの降下水滴で地表面の浸食が起きないようにするためガーゼを敷いたのち、鋼製フレームの底



図 7 限界長を測定するための大型土槽試験装置

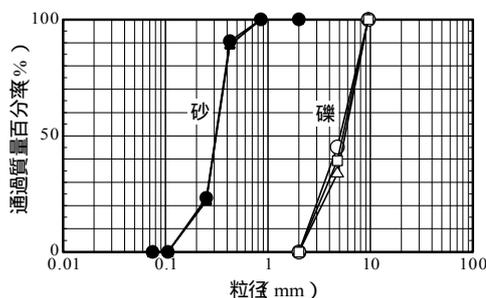


図 8 土槽試験に用いた砂と礫の粒径加積曲線

部に取り付けた油圧ジャッキで土槽の片側を持ち上げ、CB土層に傾斜をつけ、そのうち、給水層の底板上に 5cm 大の格子状に取り付けた内径 0.3mm の工業用注射針を通して、浸潤フラックスを供給した。土層の側壁を伝って水滴がしみ込んでいかないようにするため、注射針が側壁の真上に位置しないようにした。水滴の落下量（浸潤フラックス強度）は、給水槽に連結して併設した定水位貯水槽の水位により調整した。浸潤フラックス強度の土層表面における均一性は、ピーカーでの測定により確認した。

図 8 に、一連の室内土槽試験で用いた砂と礫の粒径加積曲線を示す。砂は、代表粒径が 0.3mm で、細粒分含有率と粗粒分含有率はいずれも 5%以下である。礫材には市販の珪砂を用いた。その粒径幅は 2mm から 10mm、代表粒径は 5.5mm 程度である。

4.2.3 限界長の測定

砂層の締固め密度を最大乾燥密度 1.616 Mg/m^3 の 90%とした土層、次いで 85%とした土層について限界長を測定した。それぞれの土層について、境界面（CB土層）の傾斜角は 5 度および 10 度の 2 通り、浸潤フラックス強度は 5、10 および 20mm/h の 3 通りとして、計 12 ケースの測定を実施した。CBシステムの機能は、砂層と礫層の不飽和状態における相対的な水分保持特性によって発揮されるため、ブレイクスルーが生じたのち一定期間、排水すれば、連続して実験計測を行うことができる。礫層にブレイクスルーして降下浸潤してきた土中水は、土槽の底面内側に 10cm 間隔で取り付けられた高さ 3cm の隔壁板に沿って集め、これを、土槽側壁の最も低い位置に穴を開けそこに挿入したシリコンチューブを通してピーカーに排水するようにした。限界長は、土槽の長さ方向に設置したこれらのピーカーに集水された水分量を観察し計測することによって測定した。図 9 は、代表的な測定例として、砂層の締固め度 90%、傾斜 10 度、および浸潤フラックス 10mm/h の条件での土槽実験で、土槽の長さ方向に観測された仕切り板からの排水量をまとめたものである。この測定例において、10 分計測で土槽全体から排水される流量は平均 1077.4 cm^3 であった。これを 10 度傾斜した土

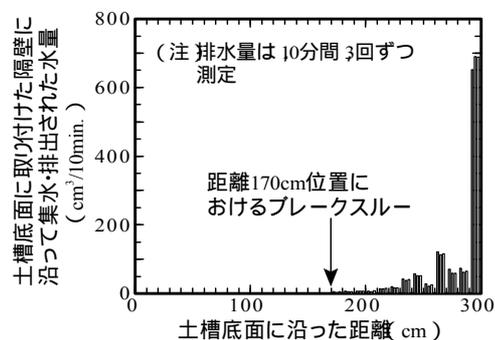


図 9 土槽底面に取り付けられた隔壁から集水排出された水量の測定例

層の地表面積で除すと 10.6mm/h となり，実験条件で設定した給水槽からの浸潤フラックス 10mm/h とほぼ対応していることから，土層全体への流入量と流出量のマスバランスは十分に満足されるものであることが分かる。図 9 から，この実験ケースでは，限界長を 170cm と読み取ることができる。

4.2.3 限界長の推定

CB システムの限界長を推定するための理論式がいくつか提案されている (Kung, 1990; Ross, 1990; Steenhuis, et al., 1991)。これらの中で，Steenhuis et al. (1991) による提案式が，比較的有効に採用しうるとされている (Walter, et al., 2000; Smesrud and Selker, 2001)。この提案式によると，浸潤フラックスの強度 q が，砂層の飽和透水係数に比べ十分に小さい場合，限界長 L は次式で与えられる。つまり，

$$L = \frac{K_s}{q} \tan \phi \left[\alpha^{-1} + (h_a - h_w) \right] \quad (1)$$

ここで， K_s は砂の飽和透水係数， ϕ は CB 土層の境界面の傾斜角， h_a と h_w はそれぞれ砂の空気侵入値と礫の水侵入値である。 α は，飽和に近い状態にある砂の負の間隙水圧 h と不飽和透水係数 K を指数関数で表した場合のべき乗係数であり，次のように記述される。つまり，

$$K = K_s \quad |h| < h_a; \quad (2)$$

$$K = K_s \exp[\alpha(h - h_a)] \quad |h| > h_a$$

一連の 12 ケースの室内土槽試験で測定された限界長を，式(1)および(2)により推定した値と比較すると図 10 のようになる。ここで，定水位透水試験で測定した 90% 締固め度および 85% 締固め度の砂の K_s は，それぞれ 1.31×10^{-4} m/s および 1.91×10^{-4} m/s であった。砂の不飽和水分特性は，図 10 の測定結果に基づいて， $h_a=0.13$ m， $\alpha=12.0$ m⁻¹ と算出した (Nakafusa, et al., 2012)。礫の水侵入値は，元来，あまり大きくなく，ソイルカラム法で正確に測定することが難しいことから，おおよ

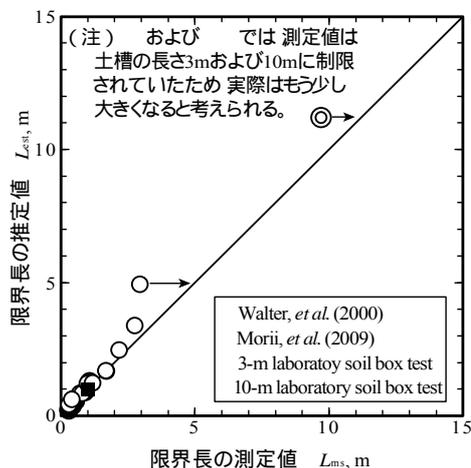


図 10 土槽試験で測定した限界長と提案式による推定値との比較

そ $h_w=0.01$ m と設定した。図 10 には，一連の室内土槽試験の結果のほか，Walter, et al. (2000) および Morii, et al. (2012) によって計測された限界長の推定値との対比も示している。室内土槽試験結果のうち矢印を付けたプロットは，土槽の長さによってプレートスルーが観測されなかったケースであるため，実際の限界長の大きさは 10m 以上であったと推察される。図 10 において，限界長の実測値と推定値はおおむね良好な対応を示している。つまり，Steenhuis, et al. (1991) の提案する式(1)および(2)は，CB システムの限界長を推定する上で実務的に使用できることになる。合わせて，図 10 からは，先の図 8 の粒度をもつ砂と礫を用いることにより，おおよそ 10m 程度の限界長を達成することが可能であることが分かる。図 2 または 3 の提案でいうと，片側幅が 10m 程度，したがって全幅 20m 程度の断面規模の低盛土式廃棄物貯蔵施設が築造可能ということになる。

< 引用文献 >

- Kung, K.J.S. (1990) Preferential flow in a sandy vadose soil, 2, Mechanism and implications. *Geoderma*, 46, pp.59-71.
- Morii, T., Takeshita, Y., Inoue, M. & Matsumoto, S. (2009) Alternative measures for soil slope stability using capillary barrier of soil. *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*, pp.319-324.
- Nakafusa, S., Kobayashi, K., Morii, T. & Takeshita, Y. (2012) Estimation of water diversion provided by capillary barrier of soils. *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*, 2, pp.773-777.
- Ross, B. (1990) The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, 26(10), pp.2625-2629.
- Smesrud, J.K. & Selker, J.S. (2001) Effect of soil-particle size contrast on capillary barrier performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), pp.885-888.
- Steenhuis, T. S., Parlange, J.Y. & Kung, K.J. (1991) Comment on "The Diversion Capacity of Capillary Barriers" by Benjamin Ross. *Water Resources Research*, 27(8), pp.2155-2156.
- Walter, M.T., Kim, J.S., Steenhuis, T.S., Parlange, J.Y., Heilig, A., Braddock, R.D., Selker, J.S. & Boll, J. (2000) Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: Laboratory investigation. *Water Resources Research*, 36(4), pp.841-849.
- 森井俊広・竹下祐二・井上光弘・松本智 .2009 . キャピラリーバリア地盤における雨水浸潤挙動の現地計測と限界長の評価．*農業農村工学会論文集*，263：91-97．
- 森井俊広．2011．土のキャピラリーバリア．*地盤工学会誌*，59(2)：50-51．

森井俊広, 小林薫, 松元和伸, 中房悟 .2013 .
通気・遮水性に富むキャピラリーバリアシステムを用いた廃棄物・汚染土の中間貯蔵 .
第2回環境放射能除染研究発表会要旨集 :
63 .
阪絵梨子・森井俊広・小林薫・松元和伸 .2014 .
土のキャピラリーバリア機能を利用した
試験的な盛土式廃棄物貯蔵施設のフイールド条件下での性能 . 新潟大学農学部研究報告 , 66(2) : 155-161 .

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計13件)

小林薫・松元和伸・森井俊広・中房悟 : キャピラリーバリアの性能に及ぼす細粒土層厚さの影響 . 地盤工学会誌 , 査読有 , 64(2) , pp.10-13 , 2016 .

森井俊広・鈴木一兄・鈴木哲也・河合隆行 : 土のキャピラリーバリアの発現メカニズムと実務展開に向けた可能性調査試験 , 新潟大学農学部研究報告 , 査読無 , 67(2) , pp.125-132 , 2015 .

T. Morii, K. Kobayashi, K. Matsumoto and K. Taguchi: Estimation and observation of water diversion in capillary barrier of soil, Proceedings of the Sixth International Conference on Unsaturated Soils, 査読有 , Sydney, Australia, 2-4 July, 2014, Vol.2 pp.1197-1203, 2014 .

小林薫・松元和伸・森井俊広・中房悟・川端淳一・小澤一喜 : 多層傾斜キャピラリーバリアの限界長に関する実験的研究 . Experimental Study on Diversion Length of the Inclined Multiply Capillary Barrier of Soil , 地盤工学会誌 , 査読有 , 62(5) , pp.6-9 , 2014 .
中房悟・小林薫・松元和伸・森井俊広 : キャピラリーバリアを利用した盛土式廃棄物処分施設における底部集排水砂層の垂直応力下での排水に関する性能評価 , 地盤工学ジャーナル , 査読有 , 8(2) , pp.197-207 , 2013 .

Toshihiro Morii, Kaoru Kobayashi, Kazunobu Matsumoto and Satoru Nakafusa: Water diversion and drainage in shallow land waste repository constructed using capillary barrier of soil, Proceedings of the Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, 査読有 , Nagoya, Japan, November 13-15, pp.193-198, 2013 .

[学会発表](計19件)

Tomoyasu Suzuki, Naoyuki Miyatake and Toshihiro Morii: Water Movement and Diversion in Capillary Barrier Soil Layer, Proceedings of the Fourth Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils, 27 Feb. 2016, Okayama University (Okayama), 2016 .

森井俊広・鈴木友康・宮竹直之・鈴木一兄 : 土のキャピラリーバリア機能を利用した

土中水移動制御技術の展開 , 第23回雨水資源化システム学会大会研究発表会講演要旨集 , 2015年11月3日 , 桜華会館(名古屋市) , pp.70-75 , 2015 .

森井俊広・松元和伸・小林薫・中房悟・阪絵梨子 : キャピラリーバリアシステムを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設の遮水機能 , 土木学会第69回年次学術講演会概要集 , 2014年9月10~12日 , 大阪大学豊中キャンパス(大阪市) , pp.343-344 , 2014 .

[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]

<http://www.agr.niigata-u.ac.jp/~morii/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

森井 俊広 (MORII, Toshihiro)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号 : 30231640

(2)研究分担者

小林 薫 (KOBAYASHI, Kaoru)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号 : 80443638

竹下 祐二 (TAKESHITA, Yuji)
岡山大学・環境生命科学研究科・教授
研究者番号 : 90188178

加藤 正司 (KATO, Shoji)
神戸大学・工学部・准教授
研究者番号 : 10204471

藤巻 晴行 (FUJIMAKI, Haruyuki)
鳥取大学・乾燥地研究センター・教授
研究者番号 : 90323253

河合 隆行 (KAWAI, Takayuki)
新潟大学・災害・復興科学研究所・特任助教
研究者番号 : 20437536

(3)連携研究者

(4)研究協力者

井上 光弘 (INOUE, Mitsuhiro)
鳥取大学・名誉教授