

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 フィールド条件下での性能

阪絵梨子¹・森井俊広^{1*}・小林薫²・松元和伸³

(平成26年2月24日受付)

要 約

礫層の上部に砂層を重ねた単純な土層地盤では、土粒子の大きさに起因する砂層と礫層の保水性(毛管力)の違いにより、地表面から浸潤してきた水は境界面の上部で捕捉され、集積する。砂礫層の境界面に傾斜を設けると、集積した水は砂層内を傾斜方向に流下し排水される。その結果、境界面以深の領域は一定の範囲にわたって水の浸入から保護される。この砂層と礫層を重ねた単純な土層地盤にみられる浸潤水の遮断・排水機能を、土のキャピラリーバリア (Capillary barrier of soil: CB) と呼ぶ。

本研究では、高度な浸潤水の遮断・排水機能を有する土層地盤を導入して、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管理するための盛土形式の廃棄物処理方法を提案する。廃棄物の処理においては、拡散防止の観点から、雨水と地下水の遮断・排水が必須となることから、CBによるすぐれた浸潤水の遮断・排水機能を利用し、廃棄物等の貯蔵管理に適用しようとするものである。盛土形式の廃棄物処理施設は、表層部に敷設した上部CB被覆層により降雨による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CB排水層により貯蔵廃棄物中を通過してくる土中水を安全に集水し、排水できる二重の安全構造になっている。盛土形式であるため、地下水の流入はなく、周囲地盤への2次拡散の懸念がない。

新大農研報, 66(2):155-161, 2014

キーワード: キャピラリーバリア機能、廃棄物貯蔵施設、試験盛土、限界長、土の不飽和水分特性

はじめに

礫層の上部に砂層を重ねた単純な土層地盤では、土粒子の大きさに起因する砂層と礫層の保水性(毛管力)の違いにより、地表面から浸潤してきた水は境界面の上部で捕捉され、集積する。砂礫層の境界面に傾斜を設けると、集積した水は砂層内を傾斜方向に流下し排水される。その結果、境界面以深の領域は一定の範囲にわたって水の浸入から保護される。この砂層と礫層を重ねた単純な土層地盤にみられる浸潤水の遮断・排水機能を、土のキャピラリーバリア (Capillary barrier of soil: CB) と呼ぶ。

本研究では、高度な浸潤水の遮断・排水機能を有する土層地盤を導入して、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管理するための盛土形式の廃棄物処理方法を提案する。廃棄物の処理においては、拡散防止の観点から、雨水と地下水の遮断・排水が必須となることから、CBによるすぐれた浸潤水の遮断・排水機能を利用し、廃棄物等の貯蔵管理を実現しようとするものである。

図1に示すように、盛土形式の廃棄物処理施設は、表層部に敷設した上部CB被覆層により降雨による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CB排水層により貯蔵廃棄物中を通過してくる土中水を安全に集水し、排水できる二重の安全構造になっている。盛土形式であるため、地下水の流入はなく、周囲地盤への2次拡散の懸念がない。具体的には、原初あるいは除染時発生放射性物質によって汚染された廃棄物・除去物(がれき、植物、焼却灰など)の仮置きおよび貯蔵

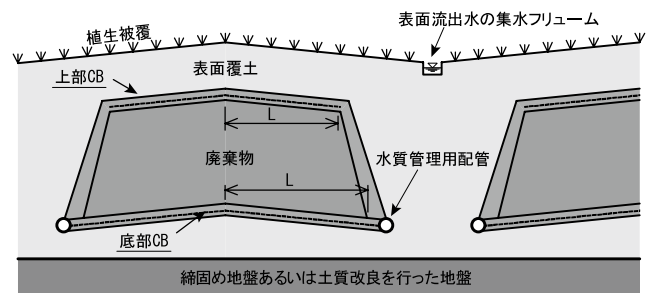


図1 CBを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設の提案

管理に適用できると考える(森井ら, 2012; 森井ら, 2013)。廃棄物処理施設は、廃棄物を入れたトンパック1段または2段積み重ねられる高さ2~3mの長列状の盛土とし、その幅は、使用する現地材料土の不飽和水分特性から決まる限界長、つまりCB機能により浸潤水が層境界面において遮断・排水される最大の水平長さ(森井, 2011)に基づいて決定できる。施工性を考慮すると、およそ片幅10~15mが現実的かと考える。

このような土のCB機能を利用した廃棄物処理施設への応用展開の可能性に着目し、本文ではまず、土のCB機能の物理的な特徴を紹介したのち、続く章で、実規模大のCB試験盛土を造成し、フィールド条件下でのCBの遮水・排水機能について検証する。次いで、CB機能で最も重要となる限界長を実務的な精度で推定することを目指した、長大斜面を利用した室内試験の途中経過を報告する。

¹ 新潟大学農学部

² 神戸市立工業高等専門学校都市工学科

³ 飛鳥建設株式会社技術研究所

* 代表著者: morii@agr.niigata-u.ac.jp

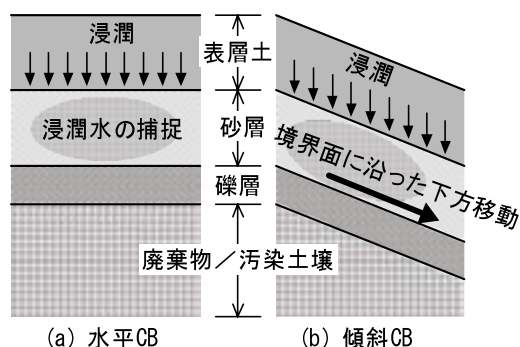


図2 CBによる浸潤水の捕捉と流下 (概念図)

土のCBの物理的特徴

土のCBの物理的特徴

土のCB機能とは、上層に相対的に細粒の土、下層に相対的に粗粒の土が敷設された地盤において、上部から水が浸潤したとき、細粒の土層と粗粒の土層の境界面上部に間隙水が集積し、なおかつこの集積水が層境界面に留まり下層へ浸潤せず留まる機能のことである。CB機能により両層境界面に保持された水は、一定の許容量を超えて集積すると重力の作用により下層に浸潤する(森井ら, 2011)。これは、細粒土と粗粒土の不飽和水分特性の相対的な違いによるものである。ここで、CBを設けた地盤が傾斜しているとき、上層の底部に集積された間隙水は、集積流(funneled flow)(宮崎, 2000)として傾斜した境界面に沿って上層の砂層内を流下する(図2)。集積流にさらに上部からの浸潤水が加わると、流下方向のある地点で、上部の細粒の土層から下部の粗粒の土層へ集積流の降下浸潤(ブレイクスルー)が起きる。境界面に沿った集積流のスタート位置からCBが破れるブレイクスルー位置までの水平距離を限界長(Diversion length)という(宮崎, 2000)。つまり、CB機能の効果が持続する長さの最大が限界長である。CB盛土の構造規模は、CBによる遮水範囲つまり、限界長に支配されるため、限界長の正確な推定が可能となれば、廃棄物処理施設の造成規模を合理的に設計できることになる。廃棄物処理施設への用を考えると、実際としては、5mから10m以上が必要になる。本研究では、限界長の推定に、Steenhuis *et al.* (1991)によって提案された次式を用いる。

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

ここで L は限界長、 K_s は砂層の飽和透水系数、 q は地表面からCB層に入ってくる浸潤量、 ϕ はCB層の境界面の傾斜角度、 h_a は砂の空気侵入値、ならびに h_w は礫の水分侵入値である。 α は、土の不飽和透水系数をサクシジョンの指数関数で表わした場合のべき指数である。式(1)によると、入力条件として浸潤水の量、構造条件として境界面の傾斜角、材料条件として上部砂層の透水系数ならびに砂層と礫層の不飽和水分特性によって限界長が決定することになる。限界長の推定方法が確定できれば、必要とされている廃棄物貯蔵量に対応した盛土規模と構造、あるいは材料の選定を行うことができる。

図3は、式(1)に基づく限界長の推定値を、室内土層実験およびフィールドでの測定値と比較したもの(Walter *et al.*, 2000; Morii *et al.*, 2013)であり、おおむね精度よく限界長が推

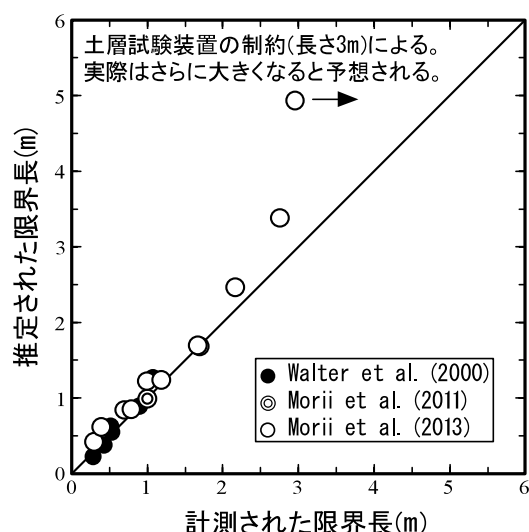


図3 限界長の計測値と推定値の比較

定されている。CBを廃棄物貯蔵施設に適用していくためには、さらに大きな限界長での式(1)の検証が必要となってくる。このため、新潟大学農学部の圃場ビニールハウス内に造成した斜面地盤において、人工降雨装置を用いた限界長の測定試験を行い、大型CBの機能と式(1)の実用性を検討することとした。これについては後述する。

環境調和性と長期供用性に優れた地盤構造物

CBは、使用材料が砂と礫の自然材料であるため、多くの利点を持つ。まず、材料が砂礫のため、CB自体は周囲の環境への化学物質汚染を起こさず、安全性が高い(森井ら, 2013)。また、砂礫層に由来する粒径の異なる層を維持している限り、半永久的に雨水遮断・排水機能を有するので、長期使用が可能である。古くは、古墳にも利用されており、6世紀に造成された願成寺西古墳群(岐阜県揖斐郡池田町)では、古墳内の石室の水分量制御にCB機能が用いられていた。石室は砂利層で覆われ、さらにその上を細粒土である粘土層でおおって古墳が造成されている。上層の粘土層は湿っているが、砂利層にあたる礫混じりの層は乾いており、造成から約1400年経過した今日でもCBの効果が持続されている(渡辺, 1993)。加えて、遍在的に用いられる資材である砂礫を扱う作業のため、CB施工のための作業には、特別な機械を必要とせず、油圧ショベルで一貫して行うことが出来るため、施工の汎用性という点でもすぐれている。

フィールド条件下でのCB機能の検証

CB試験盛土の造成

CB機能の効果は、砂礫層の境界面の造成に依る面が大きく、施工の手順と機材の取り回しが重要となる。そのため、実際にフィールド条件下でのCB盛土を施工し、施工の手順と機材の取り回し方法を確定する必要がある。また、施工後は、CB試験盛土の効果を長期にわたり計測し、CB長期供用性を明らかにするとともに、フィールド条件下でのCB試験盛土の管理法について、検討・確定をする。

CBシステムを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設を想定し、試

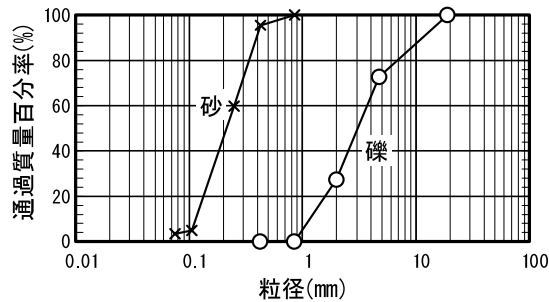


図4 CB試験盛土に用いた砂と礫の粒径加積曲線



図5 法面バケットを用いたCB層の試験施工

験施工を行った。本文では、CB層の施工性を紹介するとともに、5ヶ月にわたる盛土内の土中水分量の測定結果をまとめ、フィールド条件下におけるCBの機能を確認した。CB層には、平均粒径が0.2～0.3mmの砂と6mm程度の礫を用いた(図4)。CB盛土の構造規模は、上述したように、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によって決まる。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 *et al.*, 2013)したのち、図5および図6に示すように、廃棄物貯蔵施設の片側半分を模擬した高さ3m弱、片幅5m、奥行き2mのCB試験盛土を造成した。

造成にあたって、まず原地盤(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。底部CB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CB層と表土を敷設した。これを、上部を下部にCB層を設けたA区画とし、同様の施工手順で、対象実験としてCB層を敷設しないB区画、下部にのみCB層を設けたC区画の計3区画を造成した。施工と並行して、造成された土層には多数の誘電率水分計EC-5(Decagon Devices社製)を埋設し、土中の水分動態をモニターできるようにした。

CB層の限界長、つまりCB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

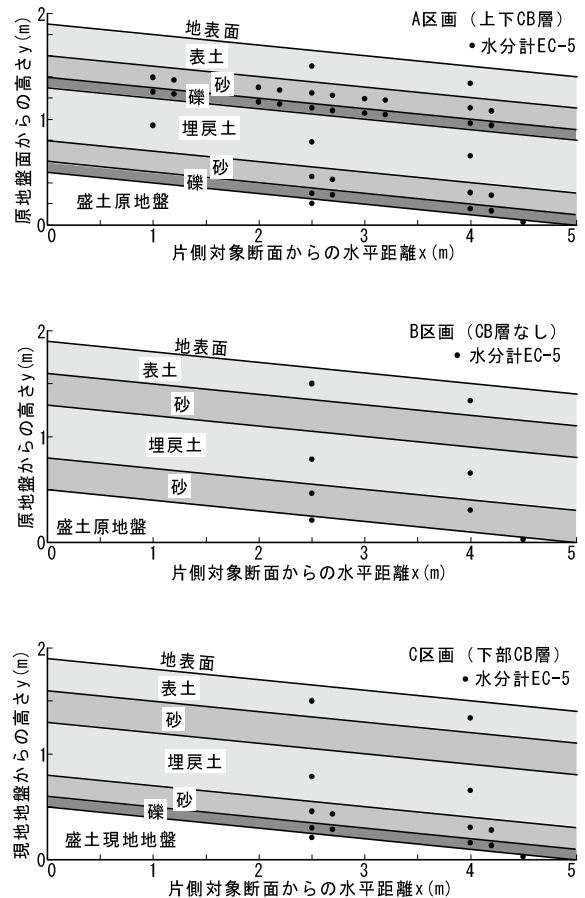


図6 CB試験盛土の施工断面(片側断面)

一性が重要な管理パラメータとなる。締固め後の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を用いた施工によっても、比較的均質な締固めを確保できることを確認した(阪ら, 2014; Morii *et al.*, 2013)。

CB層機能の検証

先の図6の断面をもつCB盛土の奥行きは2mで、その奥側に、対照区としてCB層のない砂のみの盛土区画、および底部CB層のみ敷設した盛土区画を隣接して造成した。盛土内の土中水分量(体積含水率 θ)を測定するため、図2の黒丸記号で示すように、表土、埋め戻土、CB層のそれぞれに複数個のEC-5を埋設した。

図7は、上部と下部にCB層を設けたA区画で測定した θ を、CB試験盛土を造成した2013年7月中旬から同年12月下旬までの5か月にわたってまとめたものである。経過時間は、2013年7月26日を起点として計数している。最上段の図は、雨量計ECRN-100(Decagon Devices社製)を用いて5分間隔で計測した降雨強度である。降雨の計測を開始したのは2013年8月30日であるので、図7では、35日目より表示されている。中段、下段の図で、経過時間60日前後および90日前後で体積含水率が急上昇しているが、これは、日数45日目(9月9日)から96日目(10月末)まで散水装置による表面散水実験を、2回にわたって実施したためである。この時期には、上段の雨量には因らない土中浸潤が生じている。表面散水実験を行った

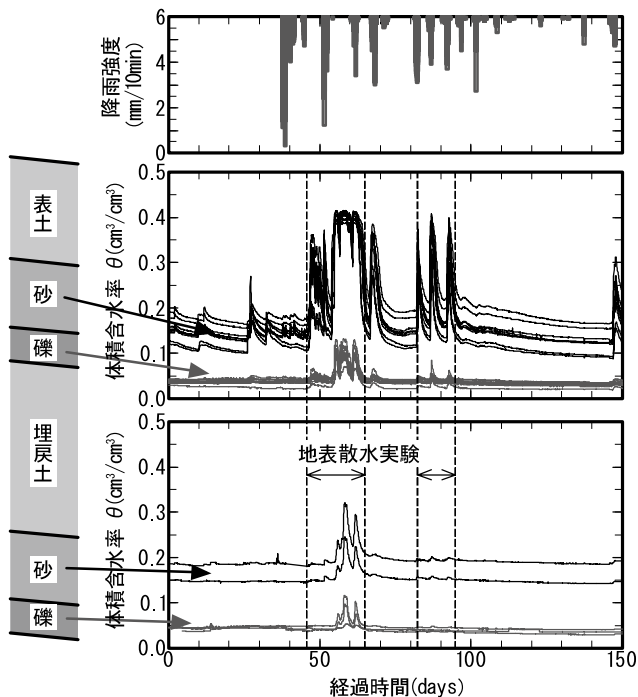


図7 CB試験盛土内で計測された体積含水率の変化(A区画)

のは、異常降雨等を想定して、地表面から大量の水が供給された場合のCB層の遮水機能の回復性を検証するためである。

図7より、表面散水実験を除いた通常のフィールド条件下でみると、かなり大きな降雨に遭遇しても、上部CB層内の礫層の体積含水率が変化することは少なく、概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CB層で、降雨による土中浸潤水がほぼ遮断されており、その下に敷設された下部CB層まで降雨浸潤が到達していないことから、下段図の体積含水率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CB層、下部CB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遮水機能を発揮している。つまり遮水機能の回復は早く、フィールド条件下でのCBの長期供用性を示唆する結果となった。第2回目の表面散水実験では、上部CB層の砂層と礫層の両方の体積含水率が大きく変化しており、降雨浸潤水は上部CB層を通過して下方に移動したと考えられる。その際、下部CB層内の水分量の変化をみると、図7の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、砂層と礫層の境界面上で捕捉され、その下の礫層には浸潤降下が起きていないのが分かる。つまり、底部CB層が二重の安全装置として、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(阪ら、2014)。

室内傾斜地盤試験によるCBの限界長測定

限界長測定試験

CB盛土の造成規模は、CBによる遮水範囲、つまり限界長に支配されていることから、限界長の正確な推定が可能であることを実験によって証明する必要がある。本研究では、現実的なCB盛土の造成を念頭に、5～10mの限界長の測定を目

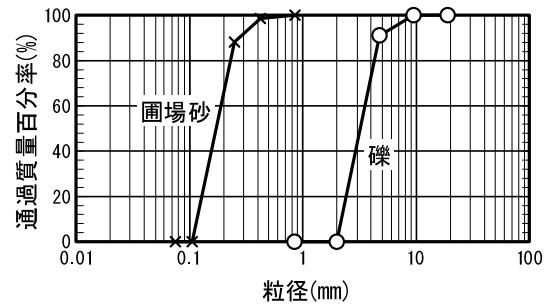


図8 室内CB傾斜地盤試験に用いた砂と礫の粒径加積曲線

表1 室内CB傾斜地盤試験において限界長の予測に用いたパラメータ

パラメータ	パラメータの説明	実際の値
L	限界長	9m
K_s	砂層の飽和透水係数	$8.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
q	地盤に浸潤するフラックス	0.601 mm/h
ϕ	砂層と礫層の境界面の傾斜角	5.2度
h_a	砂の空気侵入値	10cm
h_w	礫の水分侵入値	0.5cm
α	砂の不飽和透水係数を負の圧力水頭の指数関数で近似した場合のべき係数	0.098/cm

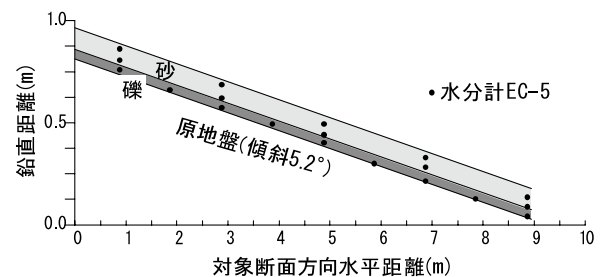


図9 室内CB傾斜地盤の断面構造

指することとした。限界長5～10mとしたのは、廃棄物処理施設を施工するにあたり、5m以下の遮水効果では大規模な廃棄物貯蔵が行えず、10mを超えると大型化しすぎて通常の重機による施工が困難になると考えたためである。

新潟大学農学部の圃場に造成した長さ9mの斜面地盤において、人工降雨装置を用いた限界長の測定試験を行い、CBの遮水機能と式(1)の実務性を検証した。降雨装置を設置したビニールハウス内の地盤を傾斜5°に整地したのち、長さ9.1m、幅0.3m、高さ0.15mの木枠を設置し、この木枠内に礫層を厚さ5cm、次いで砂層を厚さ10cmで締め固め、CB傾斜地盤とした。使用した砂は、平均粒径0.3mm程度の新潟大学圃場砂で、礫には平均粒径5～6mmの市販の珪砂を用いた(図8)。式(1)を用いて限界長を推定するために必要なパラメータは、表1に示すように、土質試験により決定した(表1)。

土中の水分動態は2つの方法により計測した。1つ目は水分計による。前章のCB試験盛土と同じく、CB傾斜地盤内部に合計19本の水分計EC-5を埋設し(図9)、体積含水率 θ を計測した。2つ目の方法では、礫層を浸潤降下し木枠の底部か

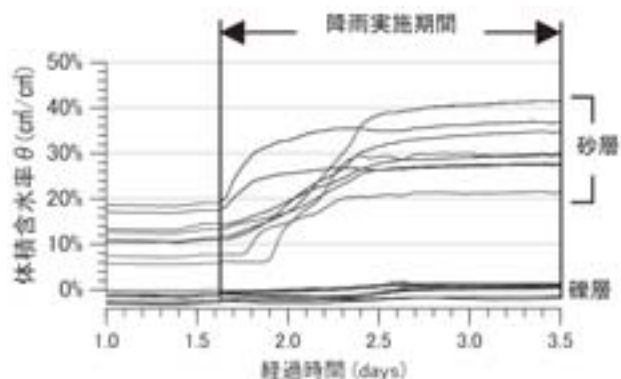


図10 室内CB 傾斜地盤内で計測された体積含水率の時間変化（46時間散水）

ら排水してくる水量を直接計測した。このため、木枠の底面に長さ方向に沿って10cmごとに排水用の直径6mmの小孔をあけ、この排水孔に向けて礫層内を降下してきた浸潤水が集水されるように1辺9mmの角材を木枠底部の幅方向に取り付けた。この角材は、木枠の長さ方向に対して5°程度のわずかな傾斜をつけて木枠底板に接着しているため、木枠を傾斜地盤に設置した後は、傾斜地盤の勾配に従い水位が流れ排水孔に誘導されるようになっている。礫層を通過して木枠の底面に達した水は、この排水孔に接続されたビニールチューブをつたい木枠外側に設置した1リットル容積のポリタンクに集水し、排水量を計測した。計測は、排水量が定常状態になったのち、一定時間計測を行い、1時間あたりに換算した。

限界長測定実験の結果と考察

図10に、CB 傾斜地盤における体積含水率 θ の時間変化をまとめる。水分計による計測では、砂層内で降雨にともない θ が上昇していくのに対し、礫層内では計測期間中ほとんど変化が起きなかった。つまり、水分計を埋設している木枠中央部分では、CB 機能により砂礫層の境界部分において水が遮断されていることと推察される。一方、排水孔からの排水量を直接測定した図11によると、CB 傾斜地盤の上端からの長さ2.5～6mの間で、わずかだが、排水が生じているのが分かる。これは、CB 傾斜地盤の降雨装置側では当然降雨量が多くなり、降雨装置側で一部礫層内に水が流下したことによるものと考えられる。しかし、ブレイクスルーが起きているとすると、わずかな排水がみられたタンクからさらに多くの排水が確認されてもよいはずであり、確認された排水がブレイクスルーによるものとは断定できないことになる。したがって、今回のCB 傾斜地盤の実験において、少なくとも、木枠中央部分での平均降雨量0.48mm/hの状況（図12）で、木枠長さである9.1m以上の限界長が達成できていた可能性が高いと考えられる。

まとめ

CB システムを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設を提案し、試験盛土および傾斜地盤試験により、その施工性とフィールド条件下での遮水・排水機能を調べた。次の結果が得られた。

- (1) CB 層の施工にあたっては、通常の土木工事と同様に、可能かぎり締め密度を確保し、その条件のもとで期待される限界長をもとに、CB 盛土の造成規模を合理的に決定す

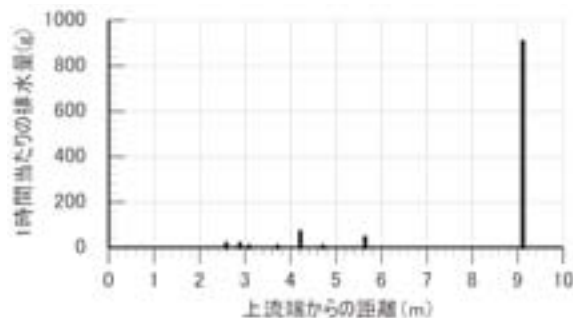


図11 室内CB 傾斜地盤で計測された木枠底部からの1時間あたりの排水量

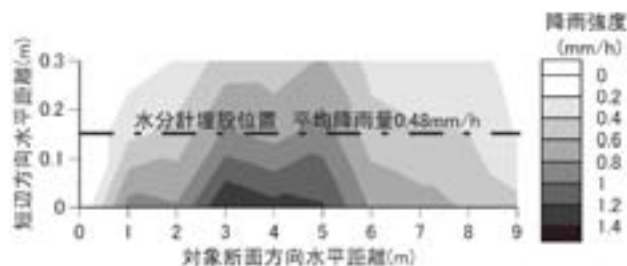


図12 室内CB 傾斜地盤に与えた降雨強度

ることができる。

- (2) 盛土内の土中水分量の計測により、フィールド条件下におけるCBの優れたかつ安定した水分遮水機能を確認できた。
- (3) CB 盛土の施工により、使用作業機の取り回しが確認できた。特に、今回の施工では油圧ショベルとそのアタッチメントの法面バケットの活用が非常に多く、整地、基盤造成、CB 層の造成（砂礫の運搬・敷均し・転圧）の全てにおいて法面バケットを多用することとなった。他の作業で必要となる重機等も、通常の土木工事で用いられるものであり、CB 盛土の施工に特殊な作業機を必要としないことを確認できた。
- (4) CB 傾斜地盤試験においては、木枠中央部分の平均降雨量0.48mm/hの状況で、木枠長さである9.1m以上の限界長が達成できていた可能性が高いと考えられる。

本研究は、科学研究費補助金基盤研究（A）（課題番号25252043）による支援を受けた。試験盛土の造成工事にあたり、（有）TNSの田口勝夫氏と染谷昇氏から多大なご協力をいただいた。ここに記して、厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 宮崎毅. 2000. 環境地工学. pp.126-130. 東京大学出版会、東京.
- 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・門口隆太・小松元太・松元智. 2011. 土のキャピラリーバリア機能を利用した雨水資源の保全・活用技術の開発. 新潟大学農学部研究報告、**63**(2): 99-107.
- 森井俊広・河合隆行・小林薫・松本和伸. 2012. 底部CB排水層を備えた盛土による汚染廃棄物の貯蔵保管工法の提案. 第一回環境放射能除染研究発表要旨集: 43.
- 森井俊広、小林薫、松本和伸、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.
- Morii, T., K. Kobayashi, K. Matsumoto, and E. Saka. 2013. Hydraulic properties of test shallow land waste repository constructed using capillary barrier of soil. Proceedings of the 3rd Korea-Japan Join Workshop on Unsaturated Soils: 27-36.
- 阪絵梨子・森井俊広・小林薫・松元和伸. 2014. 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試験施工. 土木学会関東支部第41回技術研究発表会、Ⅲ-27.
- Steenhuis, T. S., J. K. Parlange and K. J. Kung. 1991. Comment on "The Diversion Capacity of Capillary Barriers" by Benjamin Ross. Water Resources Research, **27(8)**: 2155-2156.
- Walter, M. T., J. S. Kim, T. S. Steenhuis, J. Y. Parlange, A. Heiling, R. D. Braddock, J. S. Selker and J. Boll. 2000. Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil -Laboratory investigation. Water Resources Research, **36(4)**: 841-849.
- 渡辺邦夫. 1993. 地中の虹. pp95-100. 近未来社、名古屋.

Field Performance of Test Shallow Land Waste Repository Constructed Using Capillary Barrier of Soil

Eriko SAKA¹, Toshihiro MORII^{1*}, Kaoru KOBAYASHI² and Kazunobu MATSUMOTO³

(Received February 24, 2014)

Summary

Capillary barrier (CB) is a tilting soil layer system which is composed of a finer soil layer (sand) underlain by a coarser soil layer (gravel), and has an excellent feature of reducing and diverting infiltration water. A shallow land waste repository, in which a top CB and a bottom CB are placed to reduce infiltration due to rainfall and to divert percolating water through the protected waste material respectively, is proposed to isolate effectively a hazardous waste material or a very low level radioactive waste. As the shallow land waste repository is constructed on ground surface, there is no risk that groundwater enters the waste and diffuses pollutants into a surrounding environment. It should be also emphasized that the CB can maintain its function of water diversion for an extremely long duration because it consists of natural materials such as sand and gravel.

Structural dimensions of the shallow land waste repository should be determined by an effective diversion length of water along an interface between soil layers of the CB. The diversion length is estimated based on the infiltration flux, saturated and unsaturated hydraulic properties of the CB soils, and the interface slope. Although the diversion length is theoretically as much as 50 m in a climate with an order of magnitude less infiltration, only 1 to 2 meters of the diversion length, far from practical employment of the CB into the shallow land waste repository, has been observed and published.

In the paper, the diversion length of the CB which can be applied to structural design of the shallow land waste repository are provided based on the laboratory test and the field observation, and some feasible proposition is given for construction of the shallow land waste repository covered by a top CB layer and a bottom CB drainage layer. Observations of soil moisture content in the test land repository which started from July, 2013, will be discussed to show an effectiveness of the CB.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 66(2):155-161, 2014

Key words : Capillary barrier of soil, Shallow land waste repository, Test embankment, Diversion length, Unsaturated moisture properties of soil

¹ Faculty of Agriculture, Niigata University

² Department of Civil Engineering, Kobe City College of Technology

³ Research Institute of Technology, Tobishima Corporation

* Corresponding author: morii@agr.niigata-u.ac.jp