

土のキャピラリーバリアの社会実装を考える

森井俊広^{1*}・小林 薫²・藤巻晴行³

(平成29年1月23日受付)

要 約

土のキャピラリーバリア (Capillary barrier: CB) システムの地盤環境工学分野および農業分野における社会実装の可能性を検討する。キャピラリーバリアシステムは、相対的に細粒の土とその下に粗粒の土を敷設した単純な土層地盤をいう。通常、相対的に細粒の土として砂が、粗粒の土として礫が用いられることが多い。浸潤や再分布により表層土から降下移動してくる土中水は、両層の境界面に達したところで捕捉され、下部の礫層さらにそれ以深の地盤に浸潤していくことはない。この層の境界面上部での浸潤水の捕捉は、砂の水分保持能力が、礫層内の相対的に大きな間隙への水の移動を抑制するほど十分に大きなあいだ、継続する。本文では、これまでに進めてきた圃場および野外条件下での試験調査にもとづき、キャピラリーバリアシステムの地盤環境工学ならびにかんがい農業工学分野における実務展開の可能性について検討した。地盤環境工学分野を対象としたケースでは、危険な廃棄物あるいは極低レベル放射性廃棄物を安全に隔離・貯蔵するためのCBを敷設した盛土式廃棄物貯蔵施設を提案する。貯蔵施設の断面規模を決定し、構造設計に重要な役割をもつCBシステムの限界長を室内土槽試験により調べた。2つめのCBの適用は、畑地における画期的なかんがい手法の展開をもたらすと考えられる。CB土層に捕捉された土中水が植栽の生長に及ぼす効果を圃場試験により調べた。パレスチナ国ヨルダン川西岸地区の半乾燥地域に設けたCB試験プロットにおいて土中水分の長期モニタリングを行い、降雨浸潤水がCB土層内に効率よく保水されることを確認した。これらの調査事例を通して、土のキャピラリーバリアシステムが、地盤環境工学分野ならびに農業分野の持続的な発展の推進に役立つことを示した。

新大農研報, 69:33-41, 2017

キーワード：土のキャピラリーバリア，盛土式廃棄物貯蔵施設，節水かんがい，ウォーターハーベスティング，土の不飽和水分特性

はじめに

砂層とその下部に礫層を重ねた層状地盤では、両層の土の相対的な保水性の違いにより、境界面上部の砂層内で降下浸潤水が捕捉され、集積する (図1 (a))。砂層と礫層との境界面が、上部からの水の浸入を防いでいる障壁のようにみえることから、この現象あるいは機能を土のキャピラリーバリア (capillary barrier: CB) という。ここで、境界面に傾斜があると、集積された間隙水は上部の砂層内を集積流 (funneled flow) として傾斜方向に流下し、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遮水機能が発揮されることになる (図1 (b))。この集積流は、常に上層から浸潤水が補給されるため、飽和状態に近くなると重力の作用が不飽和土の保水性能を上回って下層に浸入し始める (breakthrough, ブレークスルー)。上に述べたCBによる遮水機能が発揮される一定の範囲は、このブレークスルーの発生位置に左右される。集積流れが生じる位置からこのブレークスルー発生位置までの水平距離は限界長 (divergence length) と呼ばれ、たとえば廃棄物の貯蔵保管などCBの遮水機能を利用した施設規模を決定する重要な構造設計パラメータとなる。

キャピラリーバリアは、上部に相対的に細粒の土、下層に相対的に粗粒の土があれば機能するが、境界面上部に集積した間隙水を効果的にすみやかに傾斜方向に流下させるには、上で述べた砂層と礫層の組合せが実際のである。土のキャピラリーバリアは、古くは古墳の造営技術に用いられ、石室の湿潤化を

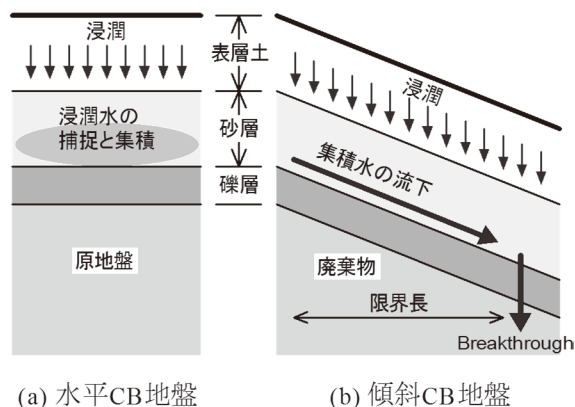


図1 キャピラリーバリアによる浸潤水の捕捉と境界面に沿った流下 (概念図)

防ぐのに役かってきた (渡辺, 1992)。最近では、廃棄物処分場のトップカバーとして利用されており、さらには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への利用が提案されている (日経コンストラクション, 2004; Morii et al., 2014)。廃棄物埋立て層の変形に対する追従性が良いこと、透気性をもつため廃棄物の自然還元効果的であり、さらには維持管理が容易で、自然材料の

¹ 新潟大学農学部生産環境科学科

² 茨城大学工学部都市システム工学科

³ 鳥取大学乾燥地研究センター

* 代表著者: morii@agr.niigata-u.ac.jp

みを用いていることから、きわめて長い供用期間にわたってCB機能が持続するという優れた点をもつ(森井ら, 2015)。

本文では、これまでに進めてきた圃場および野外条件下での試験調査にもとづき、キャピラリーバリアシステムの地盤環境工学ならびにかんがい農業工学分野における実務展開の可能性について検討した。地盤環境工学分野を対象としたケースでは、危険な廃棄物あるいは極低レベル放射性廃棄物を安全に隔離・貯蔵するためのCBを敷設した盛土式廃棄物貯蔵施設を提案している(阪ら, 2014)。この盛土構造の貯蔵施設の断面規模を決定し、構造設計に重要な役割をもつCBシステムの限界長を室内土槽試験により調べ、実用レベルの大きさの限界長を実現するとともに、理論的な考察に基づく限界長の実用的な予測式を明らかにする。2つめのCBの適用は、畑地における画期的なかんがい手法の展開をもたらすと考えられる。CB土層に捕捉された土中水が植栽の生長に及ぼす効果を圃場試験により調べた。パレスチナ国ヨルダン川西岸地区の半乾燥地域に設けたCB試験プロット(森井・藤巻, 2016)において土中水分の長期モニタリングを継続して行い、降雨浸潤水がCB土層内に効率よく保水されることを確認した。これらの調査事例を通して、土のキャピラリーバリアシステムが、地盤環境工学分野ならびに農業分野の持続的な発展の推進に役立つことを示した。

土のキャピラリーバリアの発生メカニズムと要件について

キャピラリーバリアは、上層の細粒の土と下層の粗粒の土との間で生じる不飽和な状態での保水性の相対的な違いにより機能する。そのメカニズムを、図2のように、太さが異なる連続した土の毛細管で考える。同図の上側の相対的に細い毛細管は、上層の相対的に細粒の土の中で形成される間隙を、下側の太い毛細管は粗粒の土の中の間隙を表す。上側の細い毛細管の中を不飽和の状態で行き下ってきた水滴は、細い毛細管と太い毛細管の接合部の直上で毛管力によって保持される。このとき平衡状態で保持される水柱高さ h_c は、

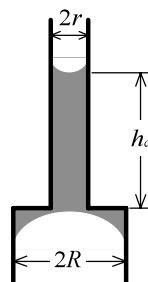


図2 太さが異なる毛細管内に保持される水分

$$h_c = \frac{2T}{\rho_w g} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \quad (1)$$

で表わされる(山口, 1984)。ここで r , R はそれぞれ上側の細い毛細管、下側の太い毛細管の半径、 T (15℃の水で0.074N/m) は水の表面張力、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。この式から、 R に比べ r がより小さくなり、細粒の土と粗粒の土

の間隙の大きさ、つまり粒径の大きさがより異なってくるほど、上側の細い毛細管を形成する細粒の土の層により多くの水分が保持されることが分かる。

このような不飽和状態における土の相対的な保水性の違いは、水分特性曲線(soil-water characteristic curve)でみることができる。図3は、代表粒径0.3mmの砂と5~6mmの礫で測定した水分特性曲線と、この曲線から van Genuchten 式(Stephens, 1996)により推定した不飽和透水係数である。砂

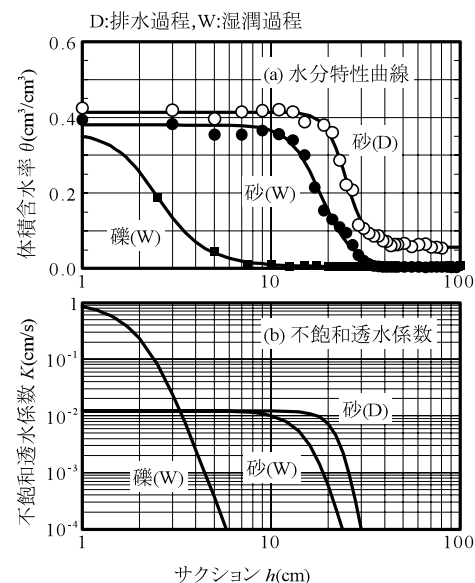


図3 砂と礫の不飽和水分特性の測定例

を上層の相対的に細粒の土、礫を下層の粗粒の土として用いるとして、たとえば、不飽和な状態での上層と下層における境界面でのサクシオンを10cm程度とすると、この状態では、図3(a)から分かるように、砂の保水能力が相対的に大きいため、水は上層の砂に捕捉され、境界面を通して下層の礫層に流下することはない。しかし、境界面上部に、土中水が浸潤し続け飽和度が上がってくると、サクシオンの低下に伴い、砂と礫の保水性の違いは次第に小さくなり、飽和状態になるとついに下層の礫に水分が降下し始め、キャピラリーバリア機能が消失することになる。

したがって、キャピラリーバリアの水分補足機能、あるいは上層で水分を補足し下層への水分効果を抑制することから遮水機能ということもできるが、これらの機能をより効果的に発現させるためには、まず、粗粒と細粒のコントラストを明瞭にすること、そしてキャピラリーバリアの周辺を常に不飽和水分状態にしておくこと、あるいは地表面から浸潤してくる水分量を非常に少なくしておくことが必要となる。

傾斜させたキャピラリーバリア地盤の限界長

キャピラリーバリア地盤では、相対的により大きな保水性をもつ上部の砂層に水分が保留される。上層で水分が多くなると不飽和透水係数も相対的に大きくなるため、境界面に傾斜をつけると、この面に沿って集積流が形成され流下していくこと

になる。しかし、自然環境下では、地表面から斜面全長にわたって降雨浸潤等により水分が供給されるため、集積流は流下するにつれ、次第にその流量を増していく。水分量が増加し砂層がそれ以上の量の水分を保持できなくなると、下部の礫層へ水分が降下浸潤し始め、水平状の地盤と同じように、ブレイクスルーが起きる。集積流の始まりからブレイクスルーが生じる地点までの水平距離を限界長 (diversion length) と呼ぶ (宮崎, 2000)。土のキャピラリーバリアを降下浸潤の遮断あるいは制御の目的で利用しようとする際、この限界長は、キャピラリー・バリア地盤の規模や構造を決定する重要な設計パラメータとなる。

限界長の大きさには、構造因子として境界面の傾斜角、材料因子として砂と礫の不飽和水分特性、ならびに外的因子として浸潤強度が関与し、すでに、これらの因子を取り込んだ限界長の予測式がいくつか提案されている。式 (2) は、その中で比較的精度が良いとされている Steenhuis らによる限界長 L の予測式である (Ross, 1990; Steenhuis *et al.*, 1991)。境界面に向けて浸潤するフラックス q が砂層の飽和透水係数 K_s に比べ十分に小さい場合、 L は、

$$L \leq \frac{K_s}{q} \tan \phi \left\{ \alpha^{-1} + (h_a - h_w) \right\} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 ϕ は砂層と礫層との間の境界面の傾斜角、 h_a は砂の空気侵入値、 h_w は礫の水分侵入値である。式 (2) の α は、砂の不飽和透水係数をサクシヨンの指数関数で近似した場合の係数である。図 4 は、式 (2) に基づく限界長の推定値を、公表されている室内試験結果 (Walter *et al.*, 2000)、野外での測定値 (森井ら, 2009) および室内大型土槽試験結果 (図 5) (Suzuki *et al.*, 2016) と比較したものである。おおむね、式 (2) の良好性を確認することができる。

限界長が、実務的な精度で予測することが可能となれば、たとえば、図 6 に示すようなキャピラリーバリア層で被覆した盛土形式の廃棄物貯蔵施設の構造規模、あるいは貯蔵できる廃棄物の量を合理的に決定することができる。あるいは逆に、問題解決に必要なキャピラリーバリア構造の規模から、それを実現するための土材料の種類を選定することが可能となる。このように、限界長を推定する式 (2) は、いわば、キャピラリーバリアを導入した土構造物の構造設計式であるといえることができる。

キャピラリーバリアは、用いるのが砂と礫の自然材料であり、それ自身、自然環境への負荷が小さいという点で、優れて現代

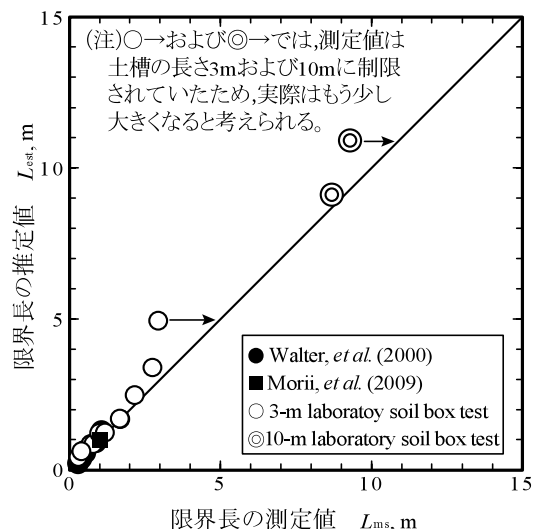


図 4 限界長の測定値と Steenhuis ら (1991) の式による予測値との比較



図 5 限界長を計測するための長さ10m の大型土槽試験装置

的な説得性を持つ。深層部への降雨浸潤の遮断機能に着目すると、斜面すべりを抑制する減災工として利用できる可能性をもつ。この場合、砂層と礫層のすべり安定性を確保しながら、いかに長大な限界長を実現していくかが、構造設計の新たな検討課題となる。キャピラリーバリアは、境界面近傍が飽和状態に

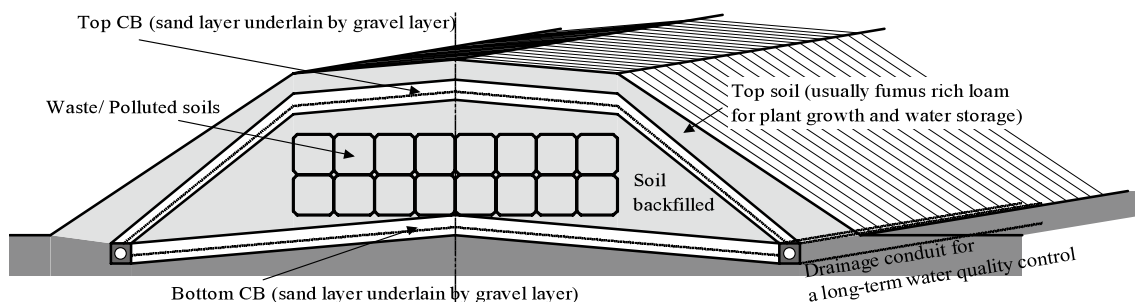


図 6 土のキャピラリーバリアを利用した盛土式廃棄物貯蔵施設の提案

なると機能を発揮しなくなる。上層部に砂を用いると、境界面に沿った集積流の流下が速やかになるという利点が生まれるが、反面、飽和透水係数が大きいため地表面からの浸潤水が多くなり、大きな限界長を期待できなくなる。限界長の確保を優先するとなると、この浸潤水の到達量を極力抑える必要があり、このためには、キャピラリーバリア層の上部に粘性土系の被覆土を敷設することが現実的となる。砂層の上にさらに細粒の粘性土系を設置すると、これもキャピラリーバリア層となり、全体構造として、多層系キャピラリーバリア構造がおそらく現実的な適用形態になると想定される。

土のキャピラリーバリア機能を利用した小規模雨水ハーベスティングシステムの開発

砂層とその下部に礫層を重ねた地盤層は、互いの水分保持特性の相対的な違いにより、キャピラリーバリア機能をもつ。降雨あるいは地表面かんがいにより下方浸潤が生じると、この機能により、砂層と礫層の境界面の上部で浸潤水が保持・貯留され、さらに下方の礫層への水分移動が抑制される。雨水やかんがいが水を不必要に下層へ浸潤させることなく、有効に植物生育に供することができるため、節水かんがいあるいは小規模な雨水ハーベスティングの効果をもつ（森井・藤巻, 2016）。礫材は現地で比較的簡単に入手でき、特別な技術や知識がなくても層状に敷設することができる。また、現地に分布する自然材料であることから、環境調和性にも優れた利点をもつ。農業分野におけるキャピラリーバリアのこのような優れた特性を検証するため、ガラスハウス内に造成した CB 地盤で植栽実験を行い、地表面給水した浸潤水の地盤内における捕捉状況を観察するとともに、植物の生育量に及ぼす捕捉水の効果を調べた（星野ら, 2014）。次いで、小規模な雨水ハーベスティングシステムとしての CB の適用性を探るため、パレスチナ国ヨルダン川西岸地区において進めている、野外条件下での土中水分量のモニター結果をまとめる。2015 年 9 月より、ヨルダン川西岸地区 Ramallah 市郊外の Baituniya 村に CB 試験区を設け、自然気象条件下における土壌水分動態の長期計測を開始した。現地の土からふるい分けにより中礫分サイズの礫を容易に入手できるか、礫層を敷設することにより、降雨量が少ない自然気象条件下でも効果的に土中水分を捕捉できるかどうかについて、現地計測を通して確認することを、当面の調査目的とした。

礫層を敷設した砂地圃場における CB 効果

図 7 に示すように、ガラス室内の砂地圃場に幅 70cm × 長さ 90cm の 6 区画を造成した。まず圃場を深さ 40cm まで掘削したのち、区画に合わせてベニヤ板で作製した木枠を設置し、S 区では全深さにわたって掘削した砂を手で締固めながら埋め戻した。図 7 の断面図に示すように、G10 区および G20 区では、それぞれ、深さ 10 ~ 20cm 間および 20 ~ 30cm 間に礫（珪砂 1 号）を敷設した。上部に砂を投入する際に砂粒子が礫の隙間に侵入しないよう、礫の上面に不織布（商品名：パスライト）を敷いた。図 7 で縦に隣接する区画は、繰返しを計画したもので、たとえば G10 区では、これらを G10-1、G10-2 と区分した。砂礫の投入質量と土層の容積から算定した乾燥密度は、砂層で $1.46\text{--}1.56\text{Mg/m}^3$ 、礫層で $1.69\text{--}1.80\text{Mg/m}^3$ であった。

図 8 は、砂と礫の粒径加積曲線である。平均粒径はそれぞれ 0.3mm と 5mm である。図 9 (a) には、土柱法で測定した砂

と礫の水分特性曲線を示す。測定値を先述した van Genuchten 式にあてはめ、不飽和透水係数を推定すると、図 9 (b) のようになる。図 9 (b) より、砂と礫の境界面のサクションが 3 ~ 4 cm になると、礫の透水性が大きくなり、砂層から下部の

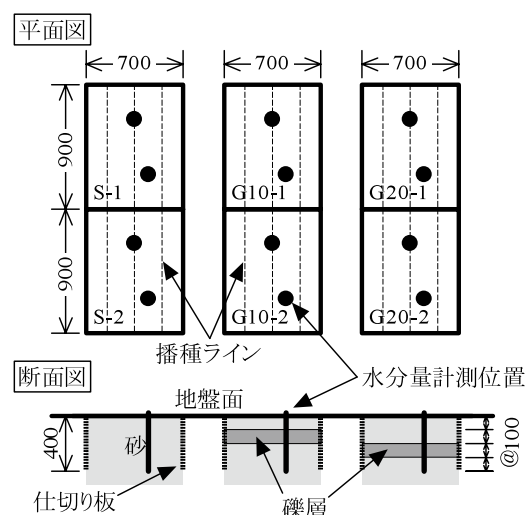


図 7 植栽実験のための CB 試験区

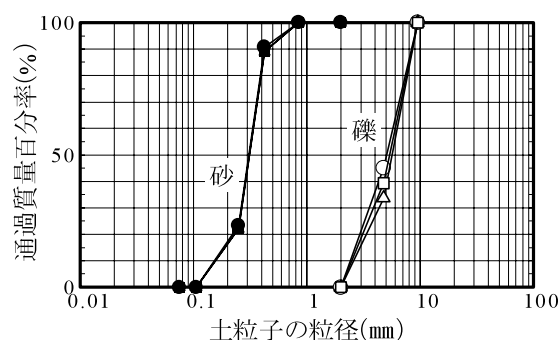


図 8 CB 試験区の砂と礫の粒度

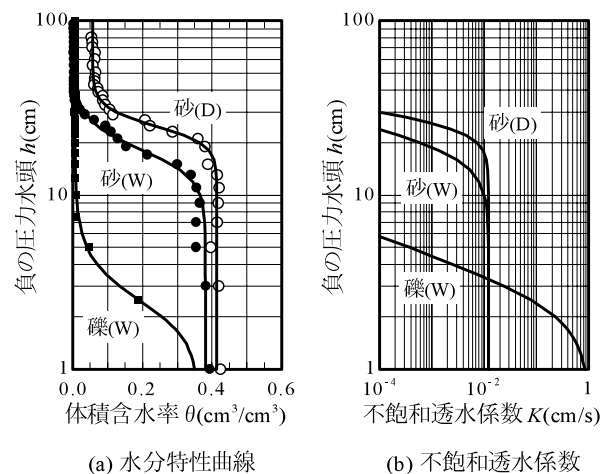


図 9 砂と礫の不飽和水分特性

礫層への浸潤が開始することになる。しかし、図9(a)から分かるように、このような状態になるには、砂層の飽和度がほぼ100%に達する必要がある、蒸発散をとまなう地表散水条件では、礫層への浸潤はほとんど起こらない、つまりCB効果が十分かつ永続的に機能すると期待できる。

実験区画を造成したのち、7月11日にミズナ（商品名：京みぞれ）を図7の平面図内の点線に沿って5cm間隔で3粒ずつ播種し、7月28日に間引き、8月14日に収穫を行い、草丈、新鮮重および乾物重を測定した。播種から間引きまでの期間は前日の計器蒸発量の100%をジョウロで散水かんがいし、間引きから収穫までは節水かんがいとし、計器蒸発量の50%を与えた。この間、図1に示す区画内の位置で、挿入型水分計 Profile Probe (Delta-T Devices 社製) により、深さ40cmまでの範囲で土の体積含水率 θ をモニターした。

図10に、播種翌日から1週間ごとの地盤内の水分分布の変化を示す。砂のみのS区では、かんがい水が地盤の深いところまで浸潤しているのに対し、G10区およびG20区では、いずれも、土のCB機能により砂と礫の境界面の上部で浸潤したかんがい水が保持・貯留されている。G10区では、G20区に比べ、間引きからの節水かんがいの期間で地表面付近の水分量の減少が著しくなっている。これは、礫層の位置が浅く蒸発の影響を受けたためと考えられる。図11は、収穫したミズナ（S区44本、G10区43本、G20区51本）の草丈、新鮮重および乾物重の平均値と標準偏差をまとめたものである。図中の英字a、bおよびcはScheffe法による多重比較検定の結果であり、異なる英字は区画間に統計的に有意な差（有意水準5%）があることを意味する。S区とG10区、G20区との比較では、草丈、新鮮重および乾物重の全ての測定項目が、G10区とG20区で

有意に高くなっている。土のCB機能により貯留された水分が、植物の生育に有効に利用されたといえる。礫の敷設深さによる影響をG10区とG20区の比較でみると、G10区で草丈は有意に高く、また新鮮重と乾物重は平均的に高くなっているのが分かる。収穫したミズナの根が深さ10cm程度までの地表面付近で密であったことから、G20区では貯留された水分の分布位置が深く、根が十分に吸水できなかったためと推察される。

小規模な雨水ハーベスティングシステムとしての適用性を探るための野外計測

パレスチナ国ナヨルダン川西岸地区のRamallah市郊外西方、Wadi Al-Fawar谷の南側斜面部（N31° 53'30", E35° 08'27"）をCB試験区とした。図12にCB試験区を示す。中央のオリーブの樹の手前に広がる小区画が埋め戻したCB試験区である。写真奥側は、Wadi Al-Fawarを挟んで反対にある北側斜面である。手前の木枠はウォーターハーベスティング試験の一環として斜面流出の計測のために設置したものである。中央に立てた銅パイプには、風向・風速計 Davis Cup Anemometer、気温・湿度計 VP-3、雨量計 ECRN-50（いずれも Decagon Devices Inc. 製）で構成される気象観測システムを設置してある。

現地で、風乾状態で求めた土の粒度を図13に示す。おおよそ幅90cm、長さ160cmの長方形区画をスコップで掘り、この掘削土より粒径15mm以上の中礫ないし粗礫をふるい分けた。これを、図14に示すように幅60cm、長さ30cmほどの範囲に厚さ3cmから5cmに敷設し、そののち掘削した土を埋め戻し、手の甲でたたきながら、周辺地盤と同じ程度の密度になるように締固めた。図15に、試験区の平面図と断面図を示す。同図

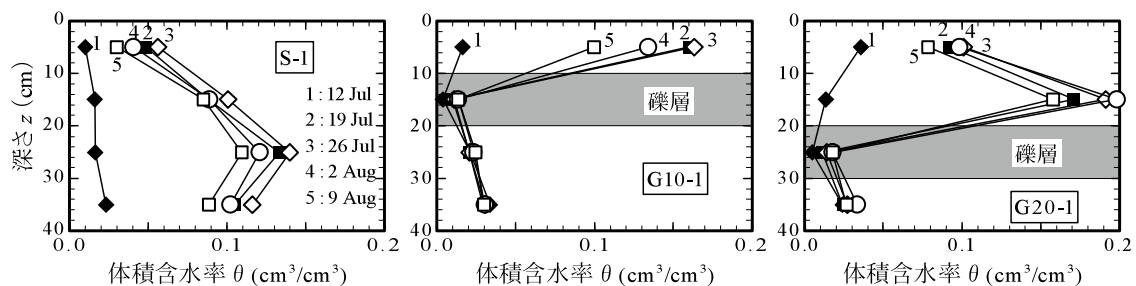


図10 試験区画内の深さ方向の水分分布

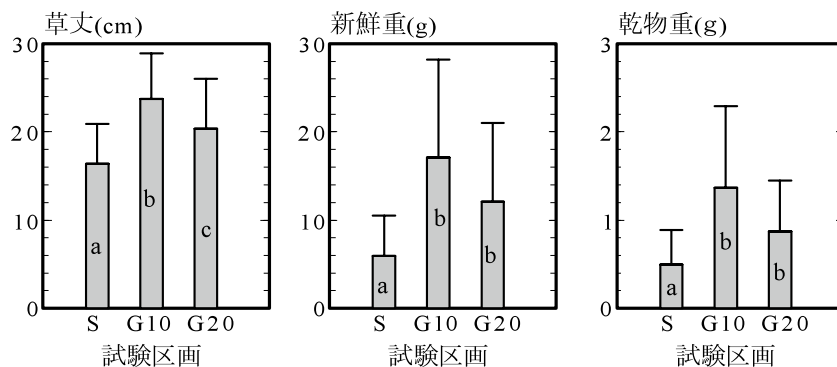


図11 ミズナの生育に及ぼすCBによる土中水の捕捉効果



図12 試験区の全景 (Ramallah 市近郊 Baituniya)

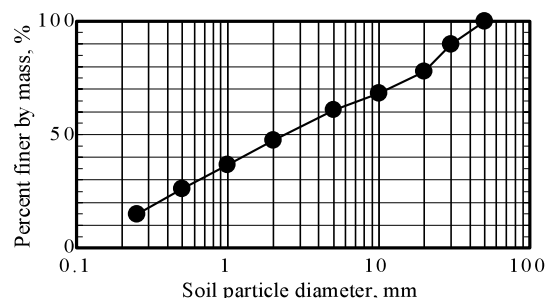


図13 試験区より掘削した土の粒度

の左より、深さ 20cm に礫を敷設した小区画、礫は敷設せず掘削土を埋め戻した小区画、ならびに深さ 30cm 位置に礫を敷設した小区画を準備した。礫層の敷設と埋め戻しに際し、小型土壌水分センサー EC-5 (Decagon Devices Inc. 製) を、図 15 に示すように、計 9 本埋設した。これら 9 本の EC-5 は、同じく Decagon Devices Inc. 製のデータロガー Em 5b に接続し、1 時間のタイムインターバルで計測を始めた。CB 試験区に隣接して、雨量計 ECRN50 (Decagon Devices Inc. 製) を設置し、同じく 1 時間間隔で雨量計測を行った。

図 16 に、2015 年 9 月から 2016 年 2 月にかけての 140 日間にわたる計測結果を示す。横軸に経過時間、縦軸に EC-5 により測定された体積含水率、ならびに第 2 縦軸に雨量計

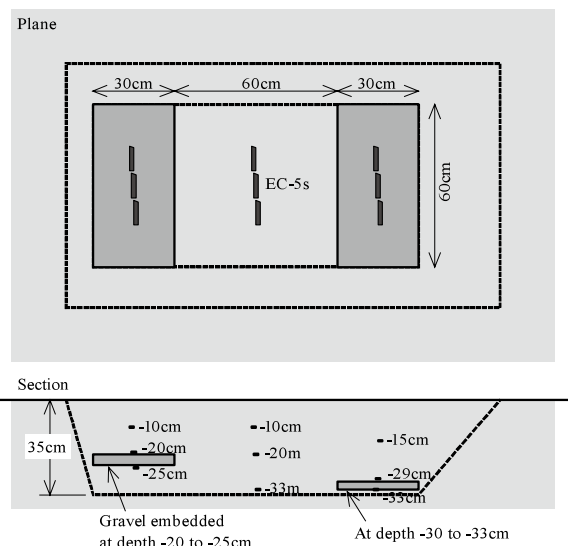


図15 試験区の平面・断面図と水分センサーの埋設位置

ECRN50 による時間雨量をまとめている。当該期間は、相対的に雨の多い雨季とされており、計測開始から 30 日目あたりの 10 月下旬頃より土壌水分は全体に高くなってきている。その中で、相対的にはあるが、礫敷設による CB 機能が十分に発揮されているのが分かる。つまり、礫を敷設していない図 16(b) では、地表水から入ってきた水分は深部（ここでは深さ 33cm 位置）にむけて単純に浸潤するだけであるが、深さ 20cm 位置に礫を埋設した小区画（図 16(a)）では、礫層の直上部で浸潤水が捕捉され、礫層の下部（深さ 25cm 位置）に向けた水分移動はかなり抑制されている。深さ 30cm 位置に礫層を埋設した図 16(c) では、図 16(a) ほど顕著ではないが、礫層による浸潤水の捕捉の様子を見ることができる。



(a) 試験区の掘削



(b) ふるい分けた礫の敷設



(c) 埋戻し・センサーの設置

図14 試験区画の造成の様子

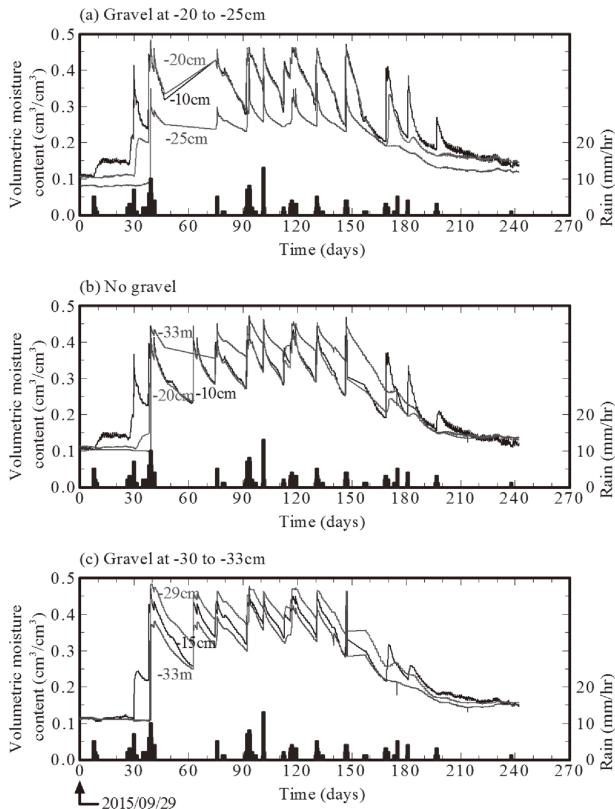


図16 降雨と体積含水率の計測結果
(2015.9.29計測開始；40～80日の間の (a) および雨量は欠測)

まとめ

限界長が、実務的な精度で予測することが可能となれば、たとえば、キャピラリーバリアにより土中水分の浸入を防ぐことができる領域の大きさ、つまりキャピラリーバリア構造の規模を決定することができ、あるいは逆に、問題解決に必要なキャピラリーバリア構造の規模から、それを実現するための土材料の種類を選定することも可能となる。このように、限界長を推定する式(2)は、いわば、キャピラリーバリア層を導入した土構造物の構造設計式であるといえることができる。キャピラリーバリアは、用いるのが砂と礫の自然材料であり、それ自身、自然環境への負荷が小さいという点で、優れて現代的な説得性を持つ。キャピラリーバリアは、境界面近傍が飽和状態になると機能を発揮しなくなる。上層部に砂を用いると、境界面に沿った集積流の流下が速やかになるという利点が生まれるが、反面、飽和透水係数が大きいため地表面からの浸潤水が多くなり、大きな限界長を期待できなくなる。限界長の確保を優先すると、この浸潤水の到達量を極力抑える必要があり、このためには、キャピラリーバリア層の上部に粘性土系の被覆土を敷設することが現実的となる。砂層の上にさらに細粒の粘性土系を設置すると、これもキャピラリーバリア層となり、全体構造として、多層系キャピラリーバリア構造がおそらく現実的な適用形態になると想定される。

砂地盤に敷設した礫層の上部で、浸潤した灌漑水が定常的か

つ効果的に捕捉されること、ならびに捕捉された水分量が植生量に有意な影響を及ぼすことが確認できた。礫層による水分移動の遮断機能は、地下水からの毛管上昇に対しても働くことから、半乾燥地域で問題となっている塩分集積を効果的に制御できる可能性も合わせもつ(12)。土のキャピラリーバリア機能を利用して節水かんがい、あるいは局所的なウォーターハーベスティングを展開することは、技術的に十分に可能であると考えられる。今後、現地計測データを蓄積し、それらの分析にもとづき、キャピラリーバリアの展開を通して水資源が希少な半乾燥地・荒蕪地の農業振興につなげていきたいと考える。

謝辞

本文の一連の調査研究を進めるにあたり、日本学術振興会科学研究費助成事業(科学研究費補助金)基盤研究(A)「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」(課題番号25252043)ならびに挑戦的萌芽研究「現地砂礫を活用した環境調和+節水型の畑地かんがい法の展開」(課題番号15K14819)より支援をいただいた。ここに記して深く感謝するしだいである。

参考文献

- 星野麻衣子・傳田彩・中野友里加・森井俊広・2014. 土のキャピラリーバリアを利用したかんがいの水の効率的な利用と土壌塩分化の抑制. *新潟大学農学部研究報告*, **67**(1): 65-76.
- 宮崎 毅・2000. 環境地水学. 東京大学出版会, pp.126-130.
- 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.
- Morii, T., Kobayashi, K., Matsumoto, K. and Taguchi, K. 2014. Estimation and observation of water diversion in capillary barrier of soil. *Proceedings of the Sixth International Conference on Unsaturated Soils*, Sydney, Australia, 2- 4 July, **2**: 1197-1203.
- 森井俊広・鈴木一兄・鈴木哲也・河合隆行・2015. 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*, **67**(2): 125-132.
- 森井俊広・藤巻晴行・2016. 土のキャピラリーバリア機能を利用した節水かんがいシステムの開発ーヨルダン川西岸地区における適用可能性調査ー. *新潟大学農学部研究報告*, **68**: 37-41.
- 日経コンストラクション・2004. 汚染水の浸出を防止 砂とれきで雨水の浸透を遮断する. *日経コンストラクション*, **50**: 36-39.
- Ross, B. 1990. The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, **26**(10): 2625-2629.
- 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ィ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.
- Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y. and Kung, K.-J. S. 1991. Comment on "The Diversion Capacity of Capillary Barriers" by Benjamin Ross. *Water Resources Research*, **27**(8): 2155-2156.

- Stephens, D. B. 1996. Vadose zone hydrology. pp.183-187. CRC Press, Florida.
- Suzuki, T., Miyatake, N. and Morii, T. 2016. 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. 105-112.
- Walter, M. T., Kim, J.-S., Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y., Heilig, A., Braddock, R. D., Selker, J. S. and Boll, J. 2000. Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: Laboratory investigation. *Water Resources Research*, **36** (4) : 841-849.
- 渡辺邦夫. 1992. 古墳土構造に見る不飽和浸透流制御. *土と基礎*, **40**(1) : 75-83.
- 山口柏樹. 1984. 土質力学. 3 版, 技報堂出版, pp.33-38.

Field implementation of capillary barrier of soil

Toshihiro MORII^{1*}, Kaoru KOBAYASHI² and Haruyuki FUJIMAKI³

(Received January 23, 2017)

Summary

Feasible implementation of a capillary barrier (CB) system of soil in geo-environmental and agricultural fields is introduced and discussed. The CB is a simple soil layer system which constitutes of a finer soil layer underlain by a coarser soil layer. Sand and gravel are usually employed to form the finer soil layer and the coarser soil layer, respectively. Downward percolation of soil water during infiltration or redistribution virtually ceases where the water migrating through the sand layer encounters the gravel layer, and the water accumulates just above an interface between the soil layers with less percolating into the gravel layer lower. This accumulation of water continues until a moisture retention capacity of the sand is sufficiently large to force water to enter large pores of the gravel layer. In the paper, two applications of the CB system to solve a geo-environmental or geotechnical problem relating to waste disposal and an agricultural problem relating to water harvesting are described and their feasibility are discussed based on the fields experiments. In the first application, a shallow land waste repository, in which the CB's are included to reduce water infiltration and to divert percolating water through the waste material, is proposed to isolate a hazardous waste material or a very low level radioactive waste. A diversion length of the CB which determines a structural dimension of the CB system and plays an important role in designing the shallow land waste depository is well studied by using a test soil box. The second application of the CB will contribute to development of an innovative irrigation technique in the agricultural land field. An effect of the water accumulating in the CB on plant growth is analyzed in the field test. A long-term monitor of soil water in the CB experiment plot constructed in a semi-arid region of West Bank of the Jordan River, Palestine, examines a simple and reliable catchment of infiltrating rainwater in the CB soil. Both applications demonstrate that the CB of soil may be effectively and successfully employed to advance sustainable development in our geo-environmental and agricultural fields.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 69:33-41, 2017

Key words: Capillary barrier of soil, Shallow land waste repository, Water saving irrigation, Water harvesting, Unsaturated hydraulic properties of soil

¹ Faculty of Agriculture, Niigata University, Niigata, Japan

² College of Engineering, Ibaraki University, Ibaraki, Japan

³ Arid Land Research Center, Tottori University, Tottori, Japan

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