

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

森井俊広^{1*}・鈴木一兄²・鈴木哲也¹・河合隆行³

(平成27年2月12日受付)

要約

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する。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・貯蔵するための盛土式廃棄物貯蔵施設を提案し、盛土試験を通して、降雨等による浸潤水を抑制するとともに廃棄物中を通過してきた浸潤水を安全に系外に排出するために導入したキャピラリーバリアシステムの有効性を調べる。かんがい農業工学を対象とした分野では、礫層の上部で捕捉された土中水が植物に効率的に利用されることから、それによってもたらされる畑地農場における節水かんがいへの適用の可能性を探った。礫層は、その下部の地下水位からの毛管上昇を抑えることができるため、かんがい圃場で生じやすい塩分集積も効果的に抑制できる。これらの検討を通して、キャピラリーバリアシステムの実務展開の可能性を明らかにする。

新大農研報, 67(2):125-132, 2015

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、塩分集積の抑制、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、境界面の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)という。境界面の上部に捕捉された間隙水は、一定の質量をこえて集積すると、重力の作用によって下層に浸入し始める(breakthrough、ブレイクスルー)。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ることになる。(図1(b))。

キャピラリーバリアは、上部に相対的に細粒の土、下層に粗粒の土があれば機能するが、境界面の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的である。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、石室の湿潤化を防ぐのに一役かってきた(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いる(日経コンストラクション、2004)。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あるなどの利点があげられている。いずれの適用例においても、長い供用期間にわたって、キャピラリーバリアが持続的に機能することを前提としている。本文では、層構造の土あるいは地盤がもつキャピラリーバリア機能の発現メカ

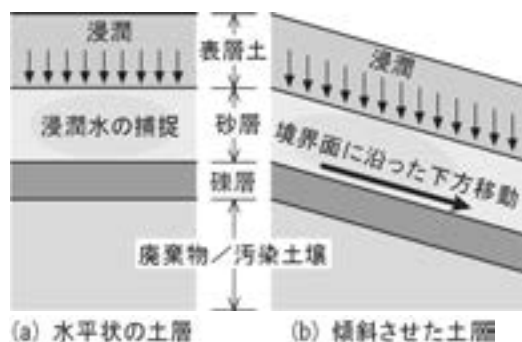


図1 キャピラリーバリアによる浸潤水の捕捉と境界面に沿った流下(概念図)

ニズムについて考察するとともに、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(阪ら、2014;星野ら、2014)にもとづき、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する。

土のキャピラリーバリア機能の発現メカニズムと実務問題への適用展開について

発現メカニズム

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。その発現メカニズムを、図2のように、太さが異なる

¹ 新潟大学農学部

² 愛知県農林水産部(2015年新潟大学農学部生産環境科学科卒業)

³ 新潟大学災害・復興科学研究所

* 代表著者: morii@agr.niigata-u.ac.jp

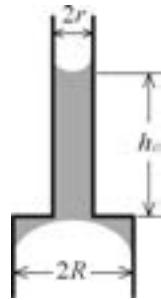


図 2 太さが異なる毛細管内に保持される水分 (概念図)

連続した土の毛細管で考える。図 2 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、

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

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°C の水で 0.074 N/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。

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 0.03 mm の砂と 5~6 mm の礫で測定した水分特性曲線と、この曲線から推定した不飽和透水係数である。砂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ョンを 10 cm 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、境界面を通過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、サクションの低下に伴い、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機能を持たせた層状地盤では、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。上層で水分量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

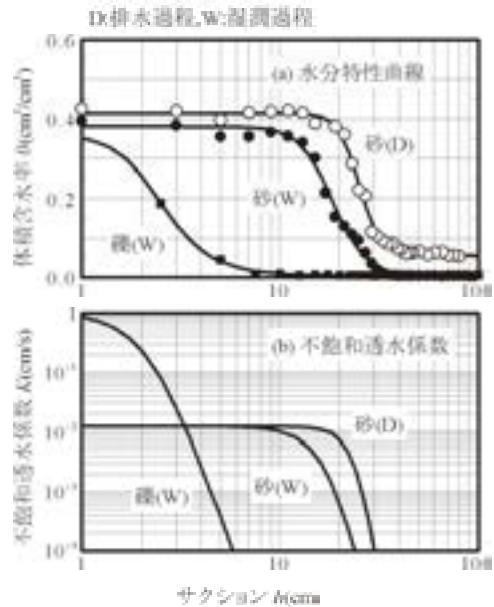


図 3 砂と礫の不飽和水分特性の測定例

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、次第にその質量を増していく。この質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) (宮崎, 2000) と呼ぶ。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 (1991) による限界長 L の予測式である。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、次のようになる。つまり、

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

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ョンの指数関数で近似した場合の係数である。図 4 は、公表値を用いて、式 (2) による限界長の推定値を、室内土槽試験 (Walter ら, 2000) および野外での測定値 (森井ら, 2009) と比較したものである。おおむね、式 (2) の良好性が確認できる。

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、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機能を持つ構造体の規模を決定することができる。あるいは逆に、問題解決に必要なとされる構造体の規模、つまり必要とされる限界長の大きさから、それを実現することができる土材料の種類を選定

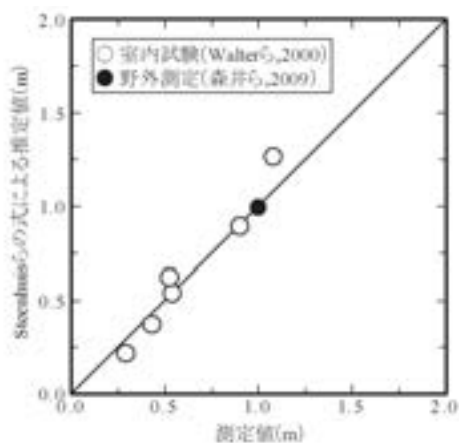


図4 限界長の測定値と予測値との比較

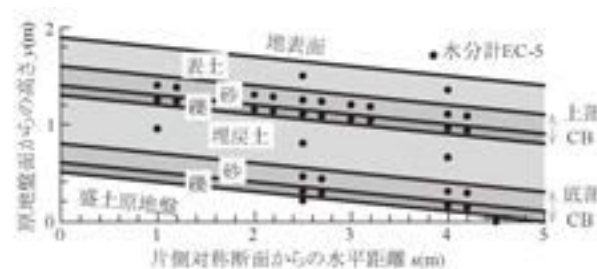


図6 キャピラリーバリア試験盛土の構造断面 (片側断面)

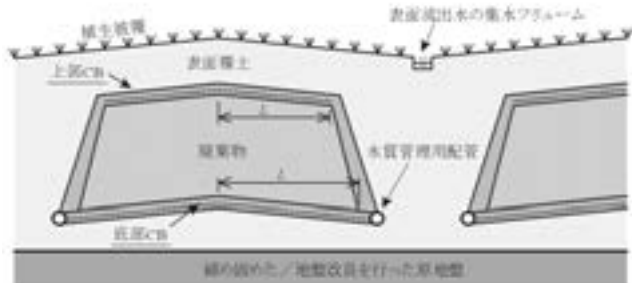


図5 キャピラリーバリアシステムを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設 (提案)



図7 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

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機能を持たせた構造体の構造設計式であるということが出来る。限界長は、雨量の多少によるが、理論的には5から50mほども可能である (Ross, 1990) とされている。

地盤環境工学における実務問題への展開

土のキャピラリーバリア機能を利用した盛土式廃棄物貯蔵施設の提案

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) している (図5)。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システムを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設を想定し、試験施工を行った。本章では、そ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、野外条件下におけるキャピラリーバリア機能の持続性を確認した。

キャピラリーバリア盛土の試験施工

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。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6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7)。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¹⁾ 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)。

キャピラリーバリア地盤の機能

先の図6の断面をもつキャピラリーバリア盛土の奥行き(幅)

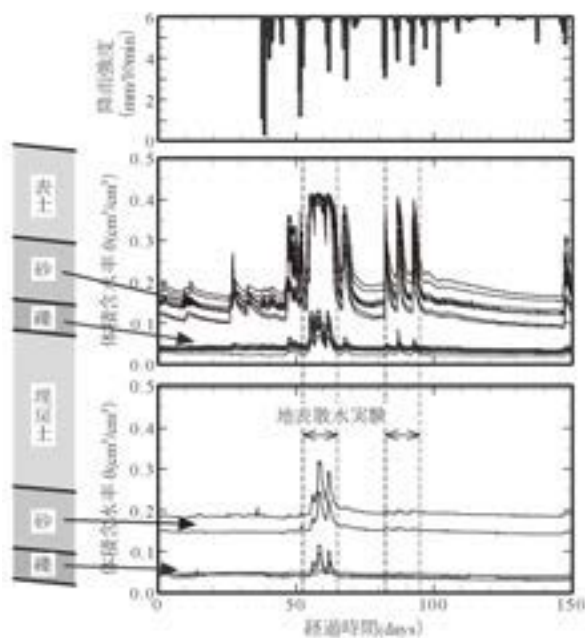


図8 野外条件下でのキャピラリーバリア試験盛土内の水分変化

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6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8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 θ の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

ることができる。

実務展開に向けた課題

本章では、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し、その実現可能性を試験施工とそれに続く野外での性能挙動モニタリングにより調べた。まず、キャピラリーバリア層の施工にあたっては、通常の土工工事と同じように、可能な限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、キャピラリーバリア盛土の構造規模を合理的に決定することができることがあきらかとなった。次いで、盛土内の土中水分量の測定により、野外条件下におけるキャピラリーバリアの優れたかつ安定した水分遮断機能を確認することができ、実務展開の大きな可能性が明らかとなった。

かんがい農業工学分野における実務問題への展開

土のキャピラリーバリアを利用したかんがい水の効率的な利用

砂層とその下部に礫層を重ねた土層で発揮される土のキャピラリーバリア機能により、降雨あるいは地表面かんがいにより浸潤が生じると、砂層と礫層の境界面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。かんがい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、節水の効果をもつ。キャピラリーバリアは、また、下方にある地下水からの毛管上昇を遮断することから、地下水からの供給に由来する塩分集積を抑制することができる。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礫層を敷設することができる。自然材料である礫は長期にわたって劣化することがなく、環境調和性に優れているといった利点も合わせもつ。

本章では、このような土のキャピラリーバリア機能による根群域の保水性向上と地下水からの塩水侵入阻止の機能を圃場実験に基づいて明らかにする（傳田ら、2013）。キャピラリーバリア機能を、広く、条件不利地における新たな農地開発に適用するとすると、圃場全面に礫層を敷設する必要が生じ、工事費用と時間は多大なものとなる。この問題を解決するには、植栽位置の直下に円盤状の礫層を部分的に敷設する方法が効果的である。本章では、上記の圃場実験に続き、部分敷設した礫層でのキャピラリーバリア機能を、圃場での地表点滴かんがい実験により調べる（星野ら、2014）。

キャピラリーバリア機能による保水性向上と塩水侵入阻止

図9の上段に示すように、ビニールハウス内で、原地盤（砂地盤）を30cm程度掘削したのち、内寸L600×W400×H300のコンテナボックスを直列状に配置し、実験プロットを準備した。コンテナボックスは、下部位置でビニールホースにより連結し、定水位給水ボックスにつないだ。定水位給水ボックスからは、ボールタップを利用して、一定水位の地下水をコンテナボックスに独立に供給できるようにした。コンテナボックスを設置したのち、底面から厚さ15cmまで砂を埋め戻し、次いで、図9の上段に示す左側の試験区では、厚さ5cmに礫を敷設し、残りの厚さ10cmには再び砂を埋め戻した。右側の試験区では、引き続き同じ砂を投入し埋め戻していった。これらの試験区を造成したのち、播種後10日経過したミズナを移植した。

ミズナを移植したのち、23日間にわたって、前日の蒸発量

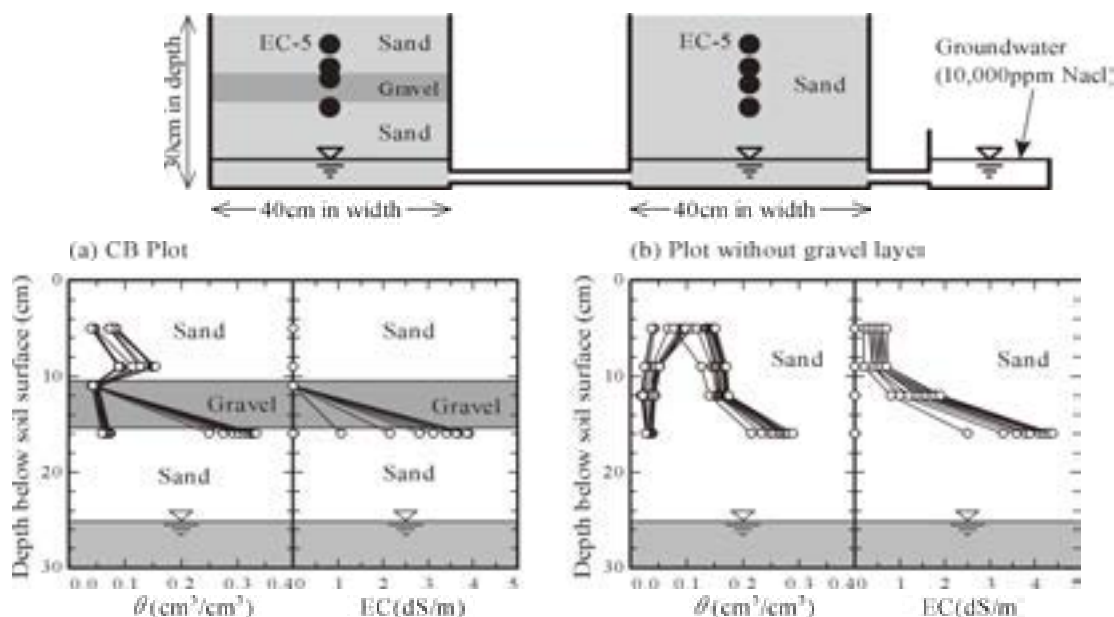


図9 圃場実験により観察されたキャピラリーバリア機能による保水性向上と塩水侵入阻止

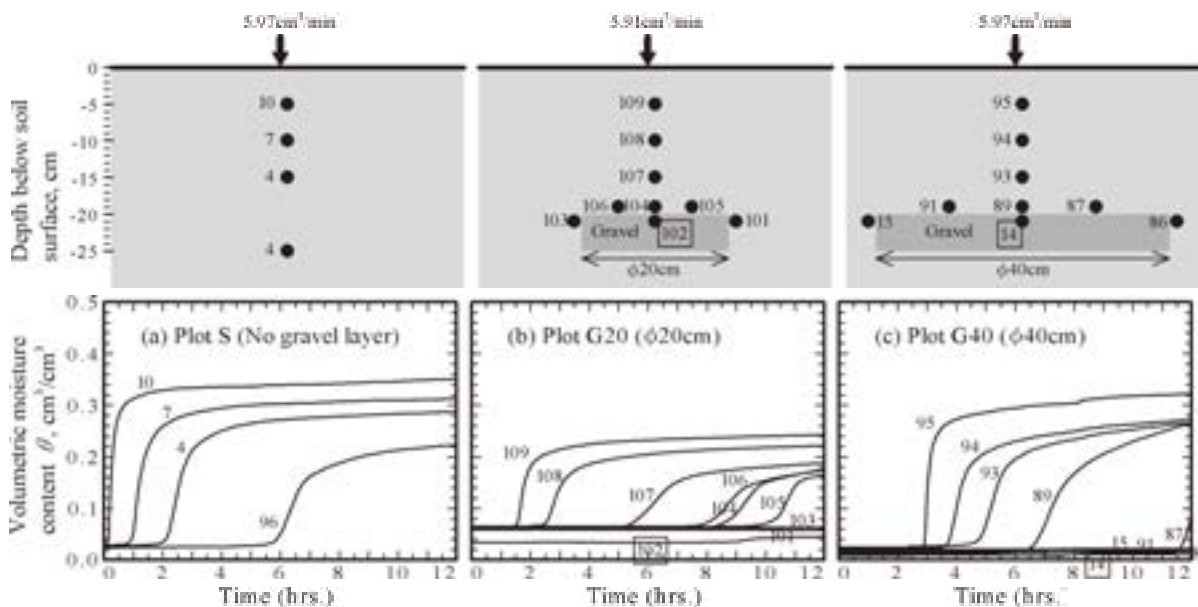


図10 地表点滴かんがい条件下での部分敷設された礫層周辺の土中水分の動き

に相当する水量を毎朝定刻に表面かん水した。その後、この表面かん水に加えて、定水位給水ボックスより、10,000ppmの塩水を各試験区に供給し、20日間継続した。図9の下段に、これらの期間における体積含水率 VMC および電気伝導度 EC の深さ方向の分布の変化をまとめる。礫層の上部で VMC が高くなっており、地表かん水された水分が有効に貯留されていること、ならびに、EC の分布変化から、地下水から上昇してくる塩水が礫層により完全に阻止されていることが確認できる。キャピラリーバリア機能が発揮され、根群域の保水性向上と地下水からの塩水侵入阻止を確実に実現できると判断される。

部分埋設した礫層により発揮されるキャピラリーバリア機能

礫層を根群域程度の深さに敷設することにより、地表面からのかん水を貯留でき、効率的な節水農業が可能になる。しかし、礫層を圃場の全面に敷設するとなると、その工事費用と工事に要する期間は莫大なものとなる。このため、礫層の敷設範囲を植物の根群域に見合った大きさに限定することが現実的となる。その場合、礫層上部で集積された土中水が側方へ逃げ、植物への利用効率が低下してしまう可能性がある。このような限定された大きさの礫層における土中水分の保水・流動特性を調べるため、図10の上段に示すように、直径20cm および40cmの礫層を深さ20cmに敷設し、連続した点滴かんがい条件下での

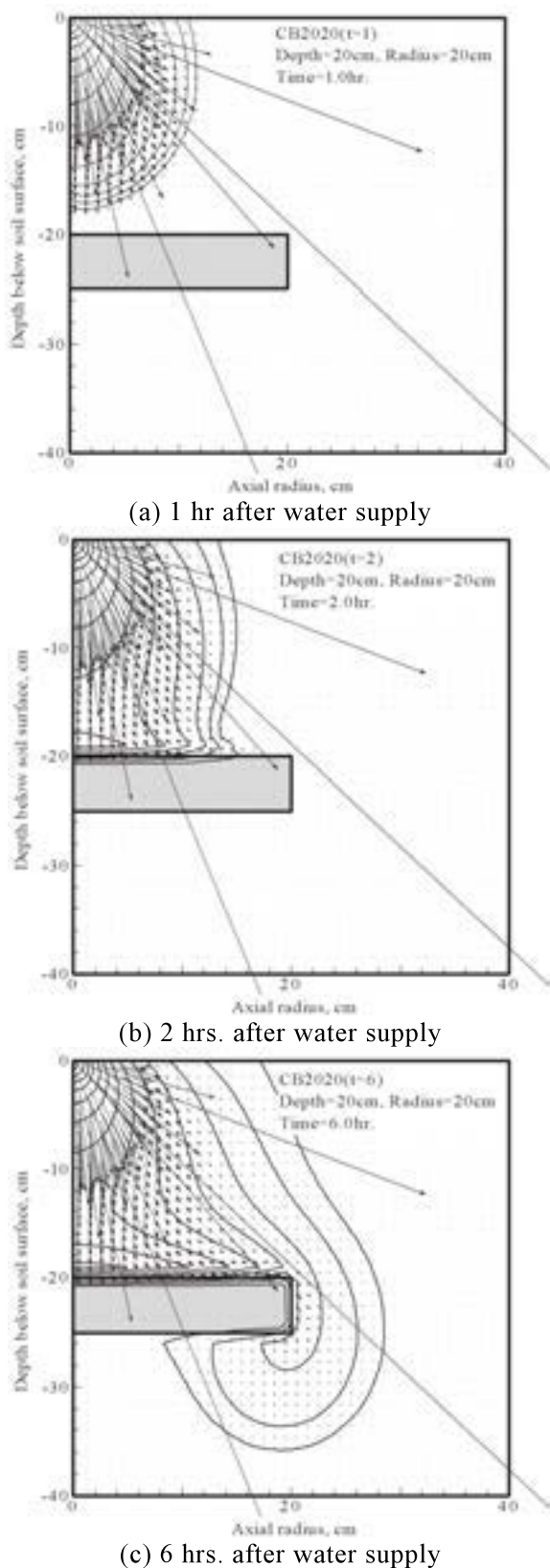


図11 礫層を部分埋設した土中における水分移動の解析結果

土中内の VMC を測定した。

図 10 の下段の試験結果からわかるように、今回設定した礫層の規模と敷設深さの範囲では、かなり長期の連続したかん水条件でも、効果的に浸潤水が捕捉される。この機能は、かん水量とその時間、土の不飽和水分特性あるいは粒度特性、敷設深さと礫層の半径に支配されるため、数値実験の導入を含め、今後、継続的に検討を進めていく必要がある。

飽和・不飽和水分移動解析による土中水移動の推定

前述の圃場実験における土壌水分計の計測結果を補強し、地盤内における土中水の 3 次元動的な動きを把握することができるよう、有限要素法で定式化した数値計算プログラム SUSFEM (Morii, 1999) を用いて、実験地盤内の飽和・不飽和水分移動解析を実施した。計算領域は、今回の圃場での実験を模擬する形で、点給水源の鉛直軸を中心とする軸対称領域とし、深さは 40cm、半径を 40cm とした。領域底面および側面の領域面には、圧力水頭を初期値に固定する境界条件をあてた。地表面は、蒸発量ゼロの流量一定境界とした。

図 11 に、半径 20cm (直径 40cm) の部分埋設型キャピラリーバリア区画における浸潤水の動きを、体積含水率の分布と流速ベクトルの表示でまとめる。領域の軸中央の地表面で給水が行われていることから、この個所と数 cm 深さの個所で土中に浸潤する水分が他の個所に比べて極端に大きくなるため、このような大きなベクトルになっている。図 11 から、次のことが分かる。まず、点給水源から浸潤してきた水分は、球根状に広がりながら地中を降下していき、礫層の直上部に到達すると、キャピラリーバリア効果により、この位置でいったん保水される形になる。しかし、連続的に給水があるため、礫層直上部で形成される動水こう配により、境界面に沿って水平に水分移動が起こり、ついには、礫層の端面を包み込むような形で、礫層上部からさらに下層に向けて水分が流出していく様子が見られる。この礫層上部での水平流れと端面でのさらに下方への降下は、礫層の半径が大きくなると抑制され、その分、キャピラリーバリアによる保水効果が大きくなるといえる。

実務展開に向けた課題

乾燥・半乾燥地域は、太陽エネルギーが豊富で農業生産力は潜在的に大きい。それを制約するのが希少な地表水資源と塩分集積による土壤劣化である。本章における研究の成果は、当該地域のかんがい農業の進展に貢献できると期待される。現地の農家や農業・環境団体によって手軽に造成でき、かつ自然材料のみを用いるため、環境負荷が小さく持続的である点が、優れて現代的な説得性をもつ。

まとめ

キャピラリーバリア地盤は、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。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。

水平状に敷設したキャピラリーバリア地盤は、いわば広大な「植木鉢」である。植物の根が生える深さに応じて礫層を水平状に敷設すれば、地表面から降下浸潤する雨水やかんがい水は礫層の上部に集積し、植物生育に有効に利用される。キャピラリーバリアは、半乾燥地域における小規模な雨水ハーベスティングあるいは節水農法として、制約された水資源を有効に利用できる技術になりうる。礫層による水分移動の遮断機能は、深部の地下水からの毛管水の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類集積を効果的に制御できる可能性を合わせもつ。

謝辞

本文の研究実験を進めるにあたり、新潟大学農学部生産環境科学科の卒業生の高橋幸平氏、中野友里加氏、阪絵梨子氏、傳田彩氏、星野麻衣子氏ならびに太田涼氏より多大のご協力をいただいた。神戸市立工業高等専門学校的小林薫教授、飛鳥建設株式会社技術研究所の松元和伸室長、鳥取大学乾燥地研究センターの藤巻晴行教授ならびに井上光弘名誉教授からは、研究成果の取りまとめにあたって有意義なご支援とご助言をいただいた。ここに記して厚くお礼申し上げたい。本研究は、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」、ならびに鳥取大学乾燥地研究センター共同研究事業より経費支援をいただいで進めている。合わせて、ここに記し、深く感謝したい。

引用文献

傳田彩・星野麻衣子・森井俊広・藤巻晴行. 2013. 土のキャピラリーバリアを利用した混群域の保水性向上と地下水からの塩水侵入阻止に関する研究. 鳥取大学乾燥地研究センター平成25年度共同研究発表会講演要旨集：134-135.
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水の効率的な利用と土壤塩分化の抑制. 新潟大学農学部研究報告、**67(1)**：65-76.

宮崎 毅. 2000. 環境地水学. pp.126-130. 東京大学出版会、東京.
Morii, T. 1999. Prediction of water movement in soil by finite element method. *Bulletin of Faculty of Agriculture, Niigata University*, **52(1)**：41-54.

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.

Morii T., K. Kobayashi, K. Matsumoto, T. Suzuki and E. Saka. 2013. Hydraulic properties of test shallow land waste repository constructed using capillary barrier of soil. *Proceedings of the 3rd Korea-Japan Joint Workshop on Unsaturated Soils*, Seoul: 27-36.

日経コンストラクション（編）. 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., J. Y. Parlange, and K. J. S. 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. Heilig, 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. 1992. 古墳土構造に見る不飽和浸透流制御. 土と基礎、**40(1)**：19-24.

山口柏樹. 1984. 土質力学、3版. pp.33-38. 技報堂出版、東京.

Feasible applications of capillary barrier system of soil in geotechnical and agricultural fields

Toshihiro MORII¹*, Kazuyoshi SUZUKI², Tetsuya SUZUKI¹ and Takayuki KAWAI³

(Received February 12, 2015)

Summary

Feasible applications of a capillary barrier system (CBS) of soil in geotechnical and agricultural fields is introduced and discussed. The CBS 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 water during infiltration or redistribution virtually ceases where the infiltrated 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 CBS to solve a geotechnical problem relating to waste disposal and an agricultural problem relating to soil salinization are described and their feasibility are discussed based on the fields experiments. In the first application, a shallow land waste repository, in which the CBS's are included to reduce water infiltration and to divert percolating water through protected waste material, is proposed to isolate a hazardous waste material or a very low level radioactive waste. Observations of soil moisture content in the test land waste repository are discussed to show an effectiveness of the CBS. The second application of the CBS will contribute to development of an innovative irrigation technique in an agricultural land field. An effect of the water accumulating in the CBS on plant growth is examined in the field experiment. It is also shown that soil salinization caused by upward movement of saline water from groundwater is well prevented by the CBS. Both applications demonstrate that the CBS of soil may be well and successfully employed to attain sustainability in our geotechnical and agricultural fields.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 67(2):125-132, 2015

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

¹ Faculty of Agriculture, Niigata University

² Aichi Prefectural Government. Graduated from Niigata University in 2015

³ Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

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