土の毛管遮断機能と植生による地盤内の雨水浸透抑制効果

上原るり香[1]・神田美沙[2]・森井俊広[3*]

（平成20年12月26日受付）

要　約

土の毛管遮断機能（キャピラリー・バリア）を利用することにより、地盤に浸透した降雨水を表層部で効果的に捕捉し、斜面末端に流下させることができる。これにより、地盤深部への雨水浸潤が低減し、土の強度の低下あるいは自重の増大を抑制することができる。この雨水浸透抑制効果により、自然地山斜面やため池堤防斜面を対象とした斜面すべり減災技術の開発が可能となる。本研究では、キャピラリー･バリアの基本性能を確認するため、圃場斜面に砂層と礫層の２層構造の地盤を造成し、キャピラリー・バリアのもつ雨水浸透に対する抑制効果を調べた。キャピラリー・バリアの表層部は砂層である。雨滴衝撃による表面浸食が起きやすく、性能が短期間に劣化する可能性が大きいため、植生被覆による法面保護が必要となる。本研究では、合わせて、植生斜面における土中水分動態の観測を行い、降雨浸潤の抑制に及ぼす植生被覆の相乗効果についても調べた。圃場で造成した砂層と礫層の層構造地盤における土中水分動態のモニターにより、雨水浸透に対するキャピラリー・バリアの抑制効果を確認することができた。また、植生被覆により降雨の斜面浸透が効果的に抑制されることから、キャピラリー・バリアとの相乗効果を定量化していくことが今後の重要な課題となることを指摘した。これにより斜面減災技術の実務性は格段に増すと期待される。

新大農研報, 61(2):175-180, 2009

キーワード：毛管遮断機能、キャピラリー・バリア、雨水浸透、斜面、植生被覆

土の毛管遮断機能（キャピラリー・バリア）を利用することにより、地盤に浸透した降雨水を表層部で効果的に捕捉し、斜面末端に流下させることができる。これにより、地盤深部への雨水浸潤が低減し、土の強度の低下あるいは自重の増大を抑制することができる。キャピラリー・バリアは、砂層とその下部に礫層を重ねて傾斜させた、単純な構造の土層地盤をいう。砂層と礫層の境界面の上部では、互いの土粒子の大きさ（間隙サイズ）に伴う保水性の違いにより、降下浸潤水が集積し、傾斜方向に流下していく。両層の境界はあたかも不透水面のバリアとして機能し、それ以深の領域は水の浸入あるいは湿潤化から保護されることになる（森井ら、2005；Rahardjo ら、2007）。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。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）。本研究を含め、古来の知恵を活用した技術と位置づけられる。いずれの利用形態にしろ、用いられるのが砂と礫の自然材料であることから、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もつ。

本研究は、キャピラリー・バリアがもつ雨水浸透抑制効果に着目し、自然地山斜面やため池堤防斜面を対象とした斜面すべり減災技術の開発を目的としたものである。本文では、まず、キャピラリー・バリアの基本性能を確認するため、圃場斜面に砂層と礫層の２層構造の地盤を造成し、キャピラリー・バリアのもつ雨水浸透に対する抑制効果を調べた（森井ら、2008）。

キャピラリー・バリアの表層部は砂層である。このため、雨滴衝撃による表面浸食が起きやすく、性能が短期間に劣化する可能性が大きい。降雨による表面浸食に対しては、植生被覆による法面保護が効果的であるとされている。土質構造物の斜面への植栽は、環境調和性あるいはアメニティ性の観点から一般的となっており、これをキャピラリー・バリアの機能保持に活用し、ひいては斜面災害の減災に役立てていくことは合理的な選択といえる。本研究では、植生斜面における土中水分動態の観測を通して、降雨浸潤の抑制に及ぼす植生の効果についても調べた（森井ら、2007；上原、2008）。

キャピラリー・バリアによる降雨浸潤遮断

１．原位置観測試験の方法

新潟大学農学部圃場内の砂地斜面で、砂層とその下に礫層を敷設したキャピラリー･バリア地盤を造成し､約４ヶ月にわたって、地盤層内の水分動態をモニターした。図１に示すように、原地盤の斜面天端近傍から斜面長約 220cm に沿って、深さ約 30cm、幅約 50cm のトレンチを掘削し、周辺をベニヤ板で土留めしたのち、まず、３層に礫材を投入し、厚さ 10cm 程度になるように人力で締固めた。礫材には購入の乾燥硅砂１号（粒径４～７mm）を用いた。次いで､礫層の上面全体に 24 メッシュのポリプロピレン製ネットを張り、この上に掘削した砂を埋め戻し、５cm 厚さ程度の薄層仕上げで、約 20cm の厚さになるように締固めた。最終的なキャピラリー・バリア地盤の大きさは、水平距離 200cm、幅約 48cm、傾斜角約 20 度で、砂層の厚さ約 20cm、その下部の礫層の厚さ約 10cm とした。図２に造成斜面と計測の状況を示す。定容積採土により得られた上部の砂層の乾燥密度は 1.38t/m^3､透水係数は 8.2×10^{-3}cm/s であった。砂の最大粒径は図３に示すように２mm 程度である。土柱法から求めた砂の水分特性曲線は、図４に示すとおりである。図中の相対透水係数は、不飽和透水係数の飽和透水係数に対する比である。投入質量と仕上がり層の容積から算出した礫層の

[1] 新潟市土木部（前新潟大学農学部生産環境科学科）

[2] 大和ハウス工業株式会社（前新潟大学農学部生産環境科学科）

[3] 新潟大学自然科学系（農学部）

* 代表著者：morii@agr.niigata-u.ac.jp

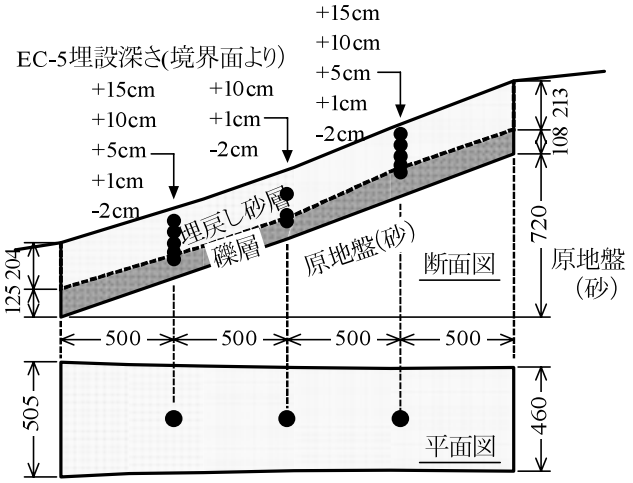


図１　砂地斜面に造成したキャピラリー・バリア地盤

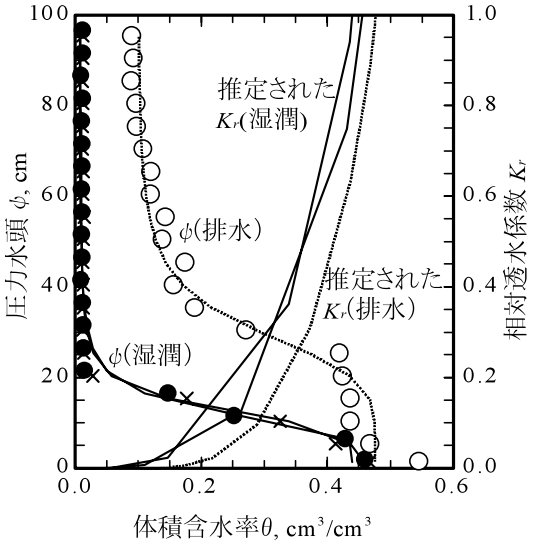


図４　砂の不飽和水分特性

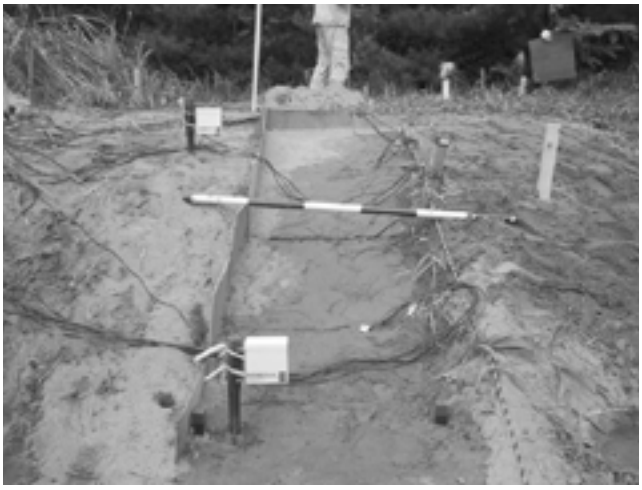


図２　キャピラリー・バリア地盤と計測システム

図５　土壌水分センサー EC-5

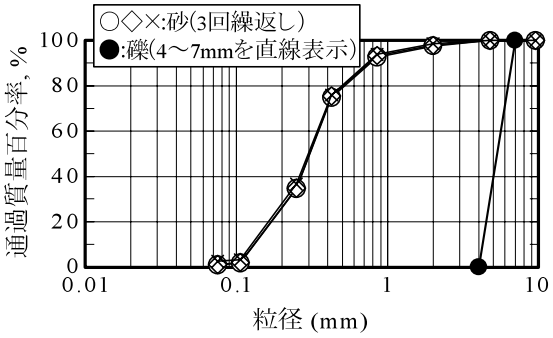


図３　砂と礫（硅砂１号）の粒径加積曲線

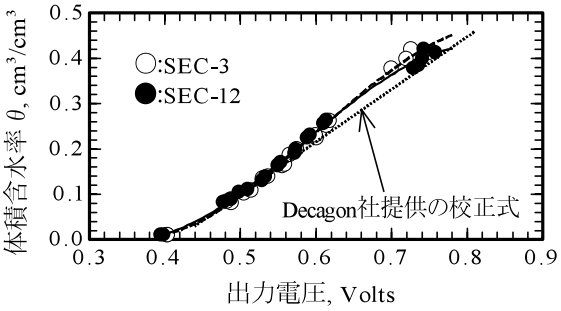
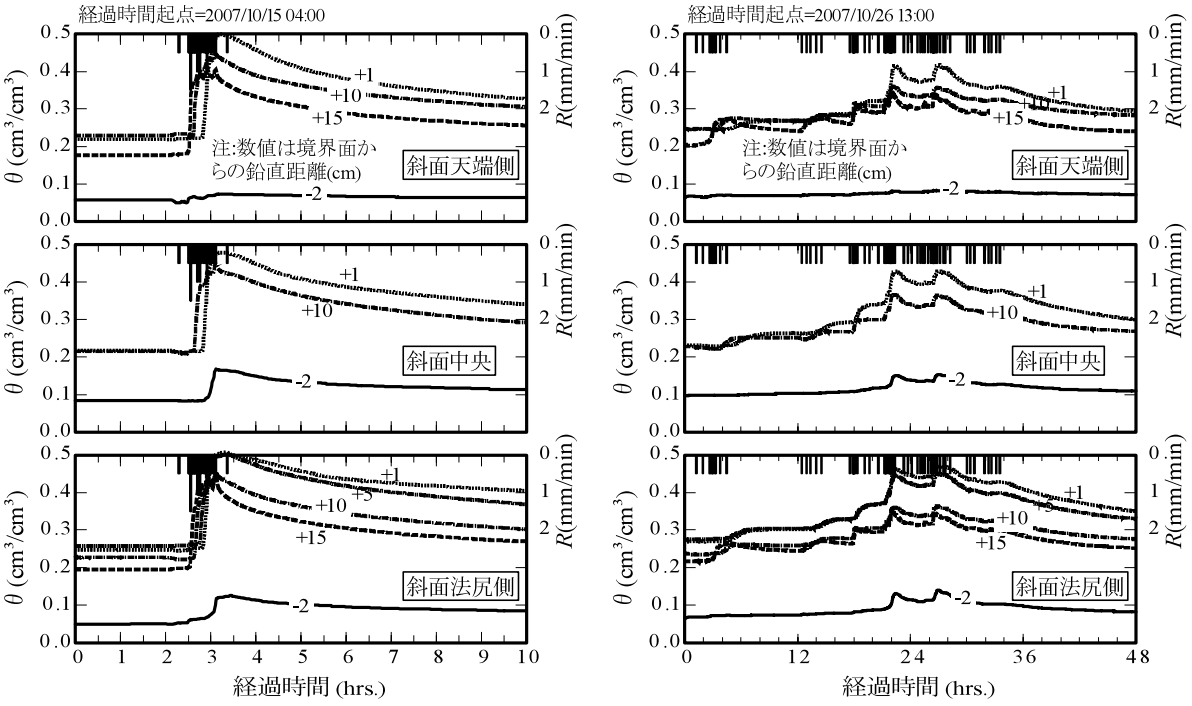


図６　EC-5のキャリブレーションカーブ（一例）



(a) 短時間に大規模な降雨が発生したケース　　(b) 長時間に渡って大規模な降雨が発生したケース

図７　代表的な降雨におけるキャピラリー・バリア地盤内の体積含水率の変化

密度は 1.713t/m^3 となった。

水分動態のモニターには土壌水分センサー ECH$_2$O 誘電率計モデル EC- 5（Decagon Devices 社製）を用いた（図５参照）。EC- 5 のプローブは、寸法が長さ 8.9cm（本体部 5.5cm）、幅 1.8cm、厚さ 0.7cm（本体部 0.2cm）とコンパクトであり、土中へ比較的スムースに埋設できるといった実務上の利点を持つ。キャピラリー・バリア地盤を造成したのち、斜面天端位置から、水平距離で 50cm、100cm、150cm の断面で礫層に達する小孔を掘削し、EC- 5 を埋設した。砂層内には、境界面から上に鉛直距離１、５、10 および 15cm の位置に２個ないし４個を、礫層内には境界面直下の－２cm の位置に１個を埋設した。礫層へのセンサーの埋設に際しては、境界面上のネットをいったんカッターナイフで切りはがした。すべてのセンサーを埋設したのち、小孔を埋め戻し締固めた。図６は、EC- 5 のキャリブレーション試験結果の一例を示したものである。出力電圧と体積含水率との間には相関性の高い３次式の関係が成り立つ。降雨量は、斜面の天端付近と法尻付近に設置した２個の雨量計 ECRN-50（Decagon Devices 社製、精度１mm）で測定した。土壌水分センサー 13 個および雨量計２個の計 15 チャンネルの自動計測を行うため、造成地盤近傍の斜面に、データロガー Em50（同じく Decagon Devices 社製）を３台設置した。自動計測の間隔は１分とした。

２．キャピラリー・バリアによる雨水浸潤の抑制効果

2007 年 10 月 12 日に計測を開始し、約４ヶ月間にわたってキャピラリー・バリア地盤内の水分動態をモニターした。この間に大小規模の降雨が発生した。このうち、短時間（約１時間）に大規模な降雨が発生したケース、ならびに比較的長期（約１日）にわたって大きな降雨が継続したケースについて、キャピラリー・バリア地盤内の水分量の変化をまとめると、図７のようになる。

図７（a）は、短時間（約１時間）に大規模な降雨が発生したケースにおいて、キャピラリー・バリア地盤内の体積含水率 θ の時間変化をまとめたものである。降雨強度 R は、右軸の軸座標を用いて下向きの棒グラフで表している。斜面の天端近く、中央部および法尻近傍のいずれの位置においても、砂層内の水分量が、降雨浸潤に応じて、地表面付近から（図１では、境界面からの鉛直位置＋ 15cm、＋ 10cm、＋５cm、＋１cm

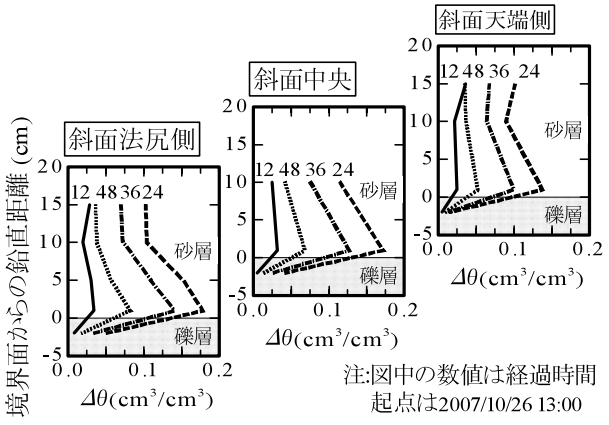


図８　降雨発生後のキャピラリー・バリア地盤内の水分量の変化

図９　植生被覆の影響を調べるための植生プロットと裸地プロット

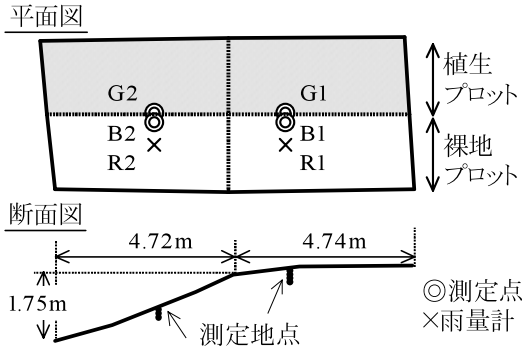
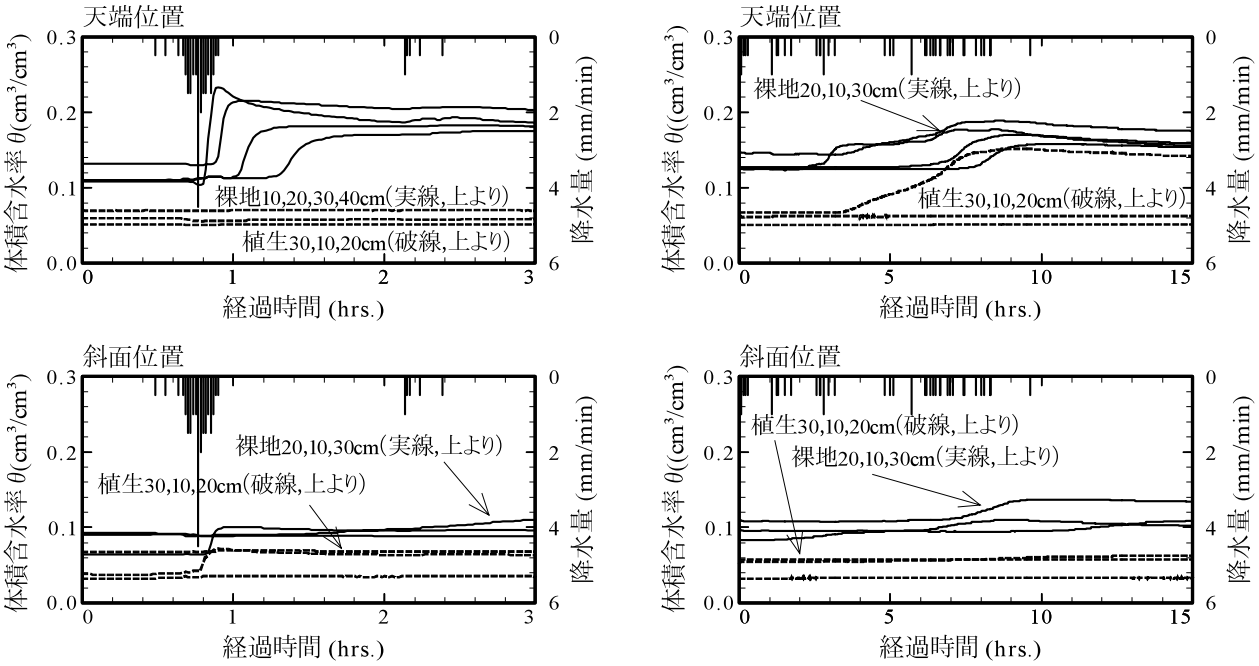


図10　植生被覆の影響を調べるための試験プロットと測定点



(a) 短時間の強い降雨で生じた水分量変化　　(b) 長時間の弱い降雨で生じた水分量変化

図11　代表的な降雨における植生プロットと裸地プロットでの土中水分の変化

の順で)順次上昇しているのに対し､礫層内の－２cm位置では、水分量の上昇変化はほとんど生じていないことが分かる。図７(b) は、比較的長時間（約１日）にわたって大きな降雨が継続したケースでのθの時間変化である。上記のケースと同じ抑制効果が発揮されているのが確認できる。降雨開始時を起点にして地盤内の体積含水率の変化量$\Delta\theta$をまとめると、図８のようになる。３つの図の下側の陰影部は、礫層に対応する領域である。いずれも、境界面の直上で水分量が増えているが、礫層への下方浸透は、２日間にわたって、ほぼ完全に抑制されていることが分かる。

降雨時における斜面の土中水分動態と植生被覆の効果

１．原位置観測試験の方法

前章の現地観測試験を実施した同じ砂地斜面内において、自生の植生プロットと除草した裸地プロットで土中水分動態を観測し、植生被覆による降雨浸潤の抑制効果を調べた。図９に示すように、植生の優占種はイネ科のチガヤで、植被率はほぼ95％であった。調査地盤は均質な砂質土よりなり、平均透水係数は約 9.0×10^{-3}cm/s 、平均乾燥密度は 1.369g/cm^3 であった。

図 10 に、調査斜面を示す。植生プロットの天端位置Ｇ１と斜面中腹 G2、および裸地プロットの天端位置Ｂ１と斜面中腹 B2 の４箇所を測定点とした。土中水分の測定には、前章と同じく、EC- ５を用い、Em50 による自動計測とした。Ec- ５を、

４箇所の測定点で、表層から深さ10cm、20cm、30cm、Ｂ１では加えて40cmの地点に埋設した。測定点Ｂ１およびＢ２の近傍Ｒ１およびＲ２に、雨量計ECRN-50を設置した。

２．植生被覆による降雨浸潤抑制の効果

図11に、特徴的な観測結果を示す。このうち、図11（a）は、2007年9月25日の短時間の強い雨にともなう土中の体積含水率の変化を、図11（b）は、2007年9月28日の長時間降り続いた弱い雨における水分量の変化をまとめたものである。

まず、前者の短時間の強い降雨における土中水分動態についてみると、次のことがいえる。つまり、裸地プロットでは、天端位置、斜面位置のいずれにおいても、降雨が始まるとともに、速やかに表層から順に体積含水率が増加している（図11（a））。これに対し、植生プロットでは異なる水分動態がみられる。天端では水分量があまり増加せず（図11（a）の上図）、また、斜面では、表層に近い深さ10cm位置で、裸地プロットと同じように、水分量の増加がみられたものの、深部の深さ20cmと30cm位置では水分量の変化は生じていない（図11（a）の下図）。これらのことから、植生被覆により、降雨の遮断効果が発揮されたといえる。観察によると、この降雨によって裸地斜面において表層浸食がみられたが、植生斜面では生じなかった。植生による雨滴衝撃エネルギーの吸収効果や土壌流出の防止効果が発揮され、斜面の保護につながったことによるものと考えられる。

次に、長時間にわたって弱い雨が続いた際の土中水分動態についてみてみる。裸地プロットでは、図11に示されているように、天端、斜面のいずれにおいても、降雨とともに表層から順に体積含水率が増加している。これに対し、植生プロットでは、天端において、深さ10cmや20cmの表層部でも大きな変化はみられない（図11（b）の上図）。斜面においては、深さ10cmの表層部でゆるやかな増加がみられるが、その増加は裸地に比べてもごくわずかであり、深さ20cmや30cmでは大きな変化がみられなかった（図11（b）の下図）。以上のことから、長時間の弱い雨においても降雨の遮断効果が発揮されたといえる。

まとめ

圃場で造成した砂層と礫層の層構造地盤における土中水分動態のモニターにより、雨水浸透に対するキャピラリー・バリアの抑制効果を確認することができた。今後、長期間にわたる機能の持続性について、計測により確認していく必要がある。上部層の砂層は降雨により浸食を受けやすいため、植生被覆が必要となる。降雨強度や継続期間による違いはあるが、植生の被覆効果を確認することができた。植生被覆により降雨の斜面浸透が効果的に抑制されることから、キャピラリー・バリアとの相乗効果を定量化していくことも重要な課題である。これにより斜面減災技術の実務性は格段に増すと期待される。

参考文献

森井俊広・竹下祐二・井上光弘・松本智．2008．キャピラリー・バリアを利用した斜面減災技術の開発研究．第43回地盤工学研究発表会、1083-1084.

森井俊広・竹下祐二・井上光弘・細山麻衣．2007．降雨時における斜面の土中水分動態と植生の影響．第42回地盤工学研究発表会発表講演集、1019-1020.

森井俊広・堀江昭仁・菊地将太・竹下裕二・井上光弘．2005．砂礫層地盤におけるキャピラリー・バリア効果の予測と管理．第40回地盤工学研究発表会平成17年度発表講演集、1325-1326.

日経コンストラクション編集．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、350 : 36-39.

Rahardjo, H., Krisdani, H. and Leong, EC. 2007. Application of unsaturated soil mechanics in capillary barrier system. Proceeding of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils edited by Yin, Z., Yuan, J. and Chiu, A. C. F., 127-137.

上原るり香．2008．降雨時における斜面の土中水分動態と植生被覆の効果．平成19年度新潟大学農学部生産環境科学科卒業論文.

Rainwater Infiltration into Slope Soil Restrained by Capillary Barrier of Soil and Plant Cover over Soil Surface

Rurika UEHARA[1], Misa KANDA[2] and Toshihiro MORII[3*]

(Received on 26 December, 2008)

Summary

Capillary barrier is a simple soil layer system which is composed of a fine soil layer underlain by a coarse soil layer. Water infiltrated into soil is halted just above a boundary surface between the fine and coarse soil layers due to a physical difference in water retention characteristics of both layer soils. When the boundary surface between soil layers tilts, water retained flows along the boundary surface, and a downward movement of infiltration water into the soil below the boundary surface is restricted. Waterproof by the capillary barrier with a tilted boundary surface decreases rainwater infiltration into soil, and keep a soil slope stable because of small deterioration of soil strength due to wetting as well of small increase of soil mass. This special and attractive feature leads to a possible adoption of the capillary barrier as effective measures for slope protection of natural soil or embankment. In the study soil moisture contents were measured in sand soil layer underlain by gravel layer constructed in a natural sand slope. After a trench about 50cm wide was excavated in the natural sand slope, gravel was compacted into the layer of 10cm thickness in the trench, and then the sand excavated was put back and compacted into about 20cm thick layer. Inclination of the boundary surface between the soil layers was 20 degrees. The sand is classified into "Sand" with less-5% fine and coarse fractions, and the gravel is siliceous with typical particle size of 4 to 7mm. Dielectric probes ECH2O were employed to measure volumetric moisture contents at 15, 10, 5 and 1cm above and 1cm beneath the boundary surface between the soil layers. The volumetric moisture contents in the soil were measured during four months together with precipitation. The results showed effective waterproof by the capillary barrier of soil.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 61(2):175-180, 2009

Key words : Capillary barrier, Rainwater infiltration into soil, Soil slope, Plant cover on soil

[1] Niigata Government City, Niigata (Formerly, Faculty of Agriculture, Niigata University, Niigata)

[2] Daiwa House Industry Co., Ltd (Formerly, Faculty of Agriculture, Niigata University, Niigata)

[3] Institutes of Science and Technology (Faculty of Agriculture), Niigata University, Niigata

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