

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420480

研究課題名(和文) 豪雨時の斜面防災技術のための高分子通気防水シートを用いたキャピラリーバリアの構築

研究課題名(英文) Capillary barrier using geosynthetics for slope disaster prevention at heavy rain

研究代表者

河村 隆 (KAWAMURA, Takashi)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：50324231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：各種不織布に対して保水性試験を実施し排水過程における水分特性曲線を求めた。その結果にvan Genuchtenモデル(以下、VG式)を適用し、不織布の飽和透水係数を用いた排水過程における水分特性曲線の推定について検討した。その結果、不織布の水分特性曲線は、素材が異なる場合においても土質材料と同様にS字型の形状となり、VG式によって評価することができることを示した。また、不織布の飽和透水係数から推定したVG係数を用いた水分特性曲線の予測式の誤差は0.5～2倍程度であり、不織布の飽和透水試験を実施するだけで、不織布の排水過程の水分特性曲線を推定できることが示唆されることを示した。

研究成果の概要(英文)：A series of water retention tests were carried out for seven nonwoven geotextiles in different materials and processes of manufacture. The van Genuchten model was applied to the water retention curve obtained from the above-mentioned test and published data. Estimation of the water retention curve using the saturated hydraulic conductivity of nonwoven geotextile was examined. Main conclusions are as follows. The water retention curves in drainage phase of nonwoven geotextiles are S-shaped curve just like that of soil materials. And the curves of nonwoven geotextiles can be estimated by the van Genuchten model. By carrying out only the permeability test of saturated nonwoven geotextiles, it is suggested that the water retention curve in drainage phase can be estimated.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 斜面防災 不飽和土 サクション ジオシンセティックス 保水特性 透水性 圧密特性

1. 研究開始当初の背景

(1)研究動向および位置づけ

豪雨や融雪時には、地表面付近の不飽和土は雨水の浸透によってサクションが減少し、地下水面下の飽和土は間隙水圧が増加する。そのため急激にせん断強度の低下が生じ、甚大な斜面崩壊が引き起こされている。一方、降水量が地盤の浸透能力を上回った場合は、地表水となって地表面が洗屈されて流出した土砂が下流の砂防施設などに堆積し、その寿命を短くしている。斜面災害の多く発生する山岳地域には、地下水涵養域、帯水層および水源などが多く分布しており、水資源環境として非常に重要な地域である。しかし、斜面災害が発生すると、帯水層の破壊や地下水流の遮断のために湧水や井戸の枯渇が生じるなど、水資源環境に多大な影響を及ぼす。斜面災害の防止や砂防施設の延命化、水源保護、地下水流の保全のためには、浸透水や表面水に対する斜面保護によって、斜面災害を防止することは非常に重要な課題である。

(2)着想に至った経緯とこれまでの研究成果

有害物質の漏出が懸念される廃棄物処分場では、雨水の浸入による有害物質の漏出・拡散を抑制し、廃棄物から発生するガスを処分場外に排出するために、処分場の上面を覆うキャッピング層として高分子通気防水シートが用いられている。このような材料を斜面災害の危険性が高い場所の表面保護材として用いてキャピラリーバリアを構築できれば、豪雨や融雪に起因する斜面災害の防止に十分寄与することができると考えられる。

これまでに粘性土の保水性試験の効率化に関する検討を行ってきており、1つの供試体を用いて連続的な収縮特性を1週間以内の短時間で求めることができることを明らかにしている。このように、保水性試験を実施するための十分な経験と知見を有している。

研究代表者は、鋼材と摩擦低減剤の摩擦特性に関する科研費（基盤研究（C）、平成 25～27 年度、研究代表者：梅崎健夫）の研究分担者であり、一面せん断試験装置を用いて土（笠岡粘土および豊浦砂）と鋼材の間の摩擦試験を実施している。本研究において、高分子通気防水シートと土との摩擦試験を実施するための装置の改良や実験における留意点などの十分な経験と知見を有している。

2. 研究の目的

本研究では、通気防水シートを用いた斜面災害防止技術を確認のための基礎データの蓄積を目的とする。そのために、通気防水シートの斜面災害防止技術への適用性として、通気防水シートを斜面に設置した場合の防水効果について明らかにする必要がある。本研究では、その端緒として、以下の項目について明らかにする。

(1)高分子通気防水シートおよび土との複合

材料に対する保水性試験（加圧膜法、加圧板法）を実施し、シート単体および土の複合材料の保水特性として、サクション s と含水比 w および飽和度 S_r の関係を明らかにする。

(2)現有の一面せん断試験装置を用いて、高分子通気防水シートと飽和土および不飽和土との接触面におけるせん断試験を実施し、飽和土および不飽和土と高分子通気防水シートとの摩擦特性を明らかにする。さらに、豪雨時の地盤の吸水を想定して、吸水時の摩擦低下特性についても明らかにする。

(3)斜面への敷設を想定した模型実験を実施し、保水特性およびキャピラリーバリア効果に及ぼす傾斜角度の影響について明らかにする。

3. 研究の方法

(1)通気防水シートと土質材料の摩擦試験

通気防水シートと豊浦砂の一面せん断試験を予備試験として実施した。通気防水シートを接着した鋼材を一面せん断試験装置の下箱内に設置し、上箱内に気乾状態の豊浦砂を敷き詰めて供試体として、一面せん断試験（JIS A 0560-2009）を実施した。

(2)不織布の圧密試験

不織布の圧縮特性に基づいて飽和含水比 w_0 を評価するために、段階載荷による圧密試験（JIS A 1217）を実施した。直径 6cm に切り取った不織布 5 枚を十分に脱気し、それらを重ねて圧密試験容器に設置した。飽和度を十分に高めるために純水を満たした圧密容器を真空デシケータ内に静置しさらに脱気を行った。その後、圧密圧力 $p=4.9 \sim 1256 \text{ kN/m}^2$ の段階載荷を実施した。試料には後述する表-1 の不織布 E を用いた。

(3)不織布に対する吸引法（水頭型）による保水性試験（排水過程）

保水性試験を実施し、得られた結果に対して、現在最も頻繁に用いられている水分特性曲線の一つである van Genuchten モデル^{1), 2)}（以下、VG 式）による水分特性曲線モデルを適用した。VG 式^{1), 2)}は次式で表される。

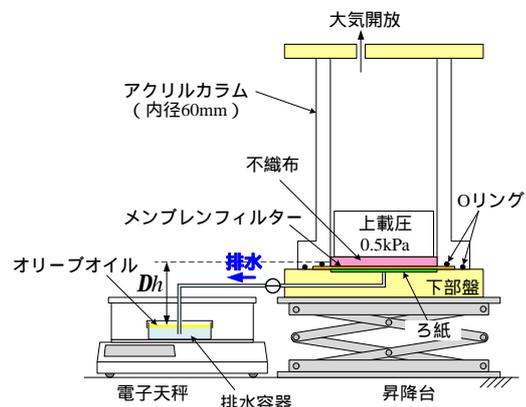


図-1 吸引法（水頭型）による保水性試験装置

表-1 不織布の仕様および諸特性

	不織布 A	不織布 B
名称	ポリエステル短繊維不織布	ポリエステル短繊維不織布
素材	ポリエステル短繊維	ポリエステル短繊維
飽和透水係数	1.1×10^{-2} m/s	3.4×10^{-3} m/s
厚さ	3 mm	1.7 mm
	不織布 C	不織布 D
名称	ポリエステル長繊維不織布	ポリエステル長繊維不織布
素材	ポリエステル長繊維	ポリエステル長繊維
飽和透水係数	2.3×10^{-3} m/s	1.7×10^{-3} m/s
厚さ	0.75 mm	3.0 mm
	不織布 E	不織布 F
名称	ポリプロピレン長繊維不織布	ネット付ポリエステル・レーヨン短繊維不織布
素材	ポリプロピレン長繊維	ポリエステル, レーヨン短繊維
飽和透水係数	1.8×10^{-3} m/s	2.8×10^{-2} m/s
厚さ	4 mm	5 mm
	不織布 G	
名称	ネット付レーヨン短繊維不織布	
素材	レーヨン短繊維	
飽和透水係数	1.6×10^{-2} m/s	
厚さ	3.5 mm	

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + (-\alpha \cdot s)^n \right\}^{-m} \quad (1)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

ここで、 S_e :有効飽和度、 θ :体積含水率、 θ_s :飽和体積含水率、 θ_r :残留体積含水率、 s :サクション、 α : s の逆数の次元を持つスケリングパラメータ、 n : m :無次元パラメータ($n > 1$, $0 < m < 1$)である(以下、VG係数 α および n)。VG係数 α は、空気侵入値AEVの逆数と相関があることが知られている²⁾。式(1)、式(2)に基づいた不飽和透水係数モデル(不飽和透水係数 k_{ws} と S_e の関係)^{1), 2)}も確立されており、両者の組み合わせは現在最も広く使われている不飽和浸透特性モデルである³⁾。

図-1に試験装置の概要を示す。下部盤からの排水を風防付きの電子天秤(最小目盛り0.001 g)の上に静置した排水容器に接続し、その質量変化より排水量を算定した。排水容器の水面をオリブオイルで覆うことにより蒸発を抑制した。下部盤と排水容器とを接続した管路を脱気水で飽和した後、純水に水浸した状態で-95 kPa以下の真空圧を24時間以上負荷して脱気したろ紙3枚およびメンブレンフィルター(ADVANTEC,セルロースアセテートタイプ,孔径0.20 μ m)1枚を下部盤

の上に設置し、その上に同様の方法で脱気した直径60mmの不織布1枚を設置した。メンブレンフィルターと不織布の密着を高めるために、重り(上載圧0.5 kPa)を不織布の上に設置した。装置の上部を大気開放して不織布内の空気圧を大気圧に保った状態で(間隙空気圧 $u_a = 0$ kPa)、排水容器内のオリブオイルの表面と不織布の中央高さの水頭差 Δh によって不織布に負圧(間隙水圧 $u_w = \Delta h \cdot \gamma_w$, ここで、 $\gamma_w = 9.8$ kN/m³)を与える吸引法(水頭型)によって保水性試験を実施した。昇降台によって装置を上昇させることによって、水頭差を $\Delta h = 1$ cmから50 cm($u_w = 0.1$ kPaから5 kPa)の間で段階的に増加させて不織布から間隙水を排水させた。1時間あたりの排水量が0.01g(含水比の変化約0.01%)未満になったのを確認して、次の段階へ移行した。

不織布には、素材、製法、飽和透水係数 k_{ws} 、厚さの異なる7種類を用いた。また、VG式の適用性の検討には、既往の文献3)~5)より読み取った4種類の不織布のデータも用いた。表-1に不織布の仕様および諸特性を示す。飽和透水係数 k_{ws} は十分に脱気した不織布に対する定水位透水試験(JIS A 1218)より求めた実測値である。不織布などのジオテキスタイルの面に対して垂直な方向の透水性能を評価するための試験基準(JIS0931-2009)では、親水剤を混合した水に供試体を水浸し静かに攪拌して気泡を除去した後、12時間以上放置すると規定されている。本試験においては、保水性試験の結果への親水剤の影響を除外するために、保水性試験および透水試験においては親水剤を使用せず、減圧下において十分に脱気することにより、不織布の飽和化を行っている。

(4)異なる拘束圧を受けた不織布に対する吸引法による保水性試験

表-1の不織布Eに対して、拘束圧 $\alpha = 0.5$ kN/m²および5 kN/m²を載荷し田状態で、(3)と同様の吸引法(水頭法)による排水過程の保水性試験を実施した。

4. 研究成果

(1)通気防水シートと土質材料の接触面における摩擦特性

通気防水シートと豊浦砂の接触面における摩擦角は、 $\delta = 21^\circ$ 程度と豊浦砂の摩擦角($\phi = 47^\circ$)の1/2程度と非常に小さく、急傾斜地の斜面保護層としての適用性が低いことが判明した。そこで、通気防水シートに代わるシート状材料として、不織布に着目した。既往の吉岡らの研究⁶⁾において、不織布と土質材料との摩擦角は、土質材料の摩擦角とほぼ等しいことが示されており、不織布は急傾斜地へ敷設した場合においても、十分な表面摩擦を有しており、斜面保護層としての適用性を有していると考えられる。

(2)不織布の圧密特性

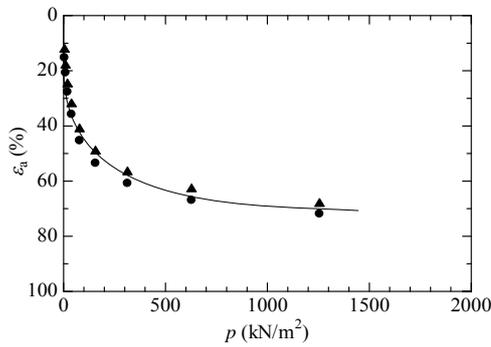


図-2 鉛直ひずみと圧密圧力の関係

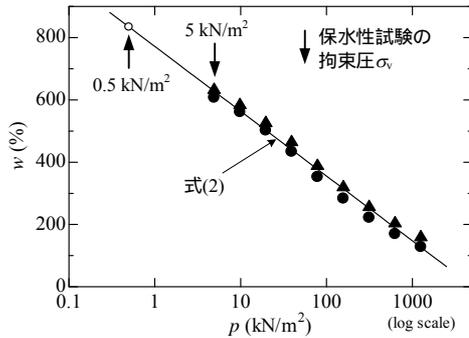


図-3 含水比と圧密圧力の関係

図-2に圧密圧力 p と鉛直ひずみ ε_a の関係を示す。土質材料と比較して、不織布の圧縮性は非常に大きく、圧密圧力の増加に伴って ε_a が急激に増加する。 $p=100\text{kN/m}^2$ 程度において $\varepsilon_a=50\%$ 程度、 $p=1000\text{kN/m}^2$ 程度において70%程度の鉛直ひずみが生じる。

図-3に圧密圧力 p と含水比 w の関係を示す。 w は $S_r=100\%$ を仮定した求めた値である。 $w \sim \log p$ 関係は、土質材料と同様に直線関係となり、次式で近似することができる。

$$w = -197 \log p + 756 \quad (3)$$

図中に示す矢印は、後述する保水性試験における拘束圧 σ_v を示したものである。式(3)に $p=\sigma_v$ を適用し対応する含水比を求めることにより、 $s=0\text{kPa}$ における飽和含水比 w_0 を推定できると考える。

(3)不織布の保水特性

図-4に、不織布の排水過程における水分特性曲線($s \sim S_e$ 関係)を示す。ここで、サクシオンは、 $s = -(u_a - u_w) = u_w$ として求めた。図中には、既往文献7)~9)より読み取った砂質土(珪砂6号, 八戸シラス)の結果もあわせて示している。また、図中の曲線は、実測値に(1)式,(2)式のVG式をフィッティングさせたものである。フィッティングは、Microsoft EXCELのソルバー機能を用いて、一致係数が最大となるように行った。不織布Cおよび不織布Iについては、 $s = 0.1 \sim 1\text{kPa}$ において徐々に含水比が低下しており、他の不織布とは若干異なる傾向を示している。しかし、い

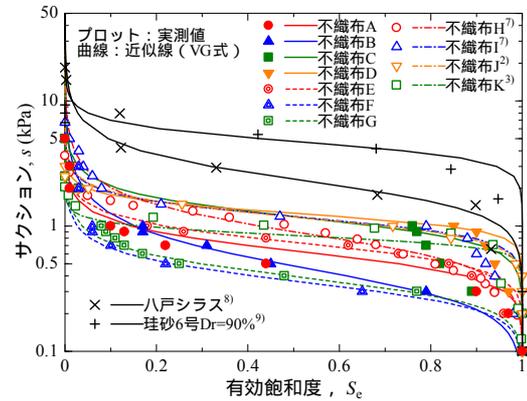


図-4 不織布の水分特性曲線(実測値とVG式による近似)

ずれの不織布においても砂質土と同じようなS形状の排水過程における水分特性曲線が得られる。また、VG式によるフィッティングの適合性は、砂質土と同様に不織布の場合も高い。不織布の空気侵入値AEVは0.2~1kPaであり、砂質土のAEV=1~5kPaよりも小さな値となる。

図-5(a),(b)に、図-4のVG式を用いたフィッティングから得られたVG係数 α および n と飽和透水係数 k_{ws} の関係を示す。VG係数 α の値は不織布の素材によらず $\alpha=1 \sim 3$ 程度であり、 k_{ws} の大きい不織布のほうが大きな値となる。VG係数 α は、空気侵入値AEVの逆数と相関がある2)ことから、透水性が高いほどAEVは小さくなることを示している。AEV=1/ α =1/3~1/1=0.33~1kPaであり、図-4より読み取られた不織布のAEV=0.2~1kPaに整合している。一方、VG定数 n は、 k_{ws} の間には一意的な関係は認められないものの、ポリエステル製の不織布のみの場合は $n=3 \sim 7$ 程度の値となる。素材を考慮しない全ての不織布の場合は、不織布Hのみが $n=11$ と異なるものの、そのほかの不織布については、 $n=3 \sim 7$ 程度の値となる。

図-5におけるVG係数 α および n と k_{ws} の関係をそれぞれ次式で近似する。

ポリエステル製不織布:

$$\alpha = a_1 \times k_{ws}^{a_2} \quad (4)$$

$$n = b_1 \quad (5)$$

ここで、係数 $a_1 \sim a_2$ および b は表-2にまとめるとおりである。図-5(a)に示すように、式(4)については、不織布Bを除いて、VG係数 α と k_{ws} の関係を概略表している。図-5(b)に示すように、VG係数 n については、不織布Kを除いて $n=3 \sim 7$ の範囲であるため、式(5)のように一定と仮定することとした。

表-1に示した不織布の飽和透水係数 k_{ws} および式(4),(5)を用いて算定したVG係数 α および n を式(1),(2)に代入して求めた不織布の水分特性曲線モデルの推定精度について検討する。図-6に水分特性曲線 $s \sim S_e$ 関係を示す。式(4),(5)から求めたVG係数を用いた近

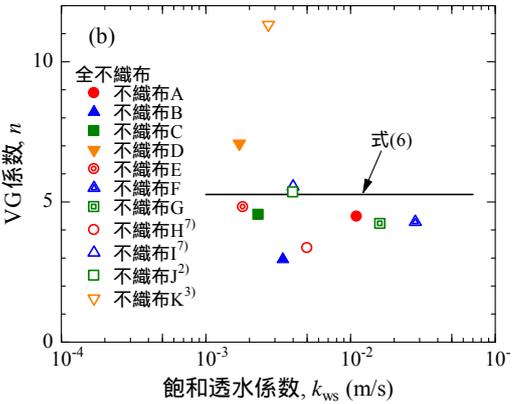
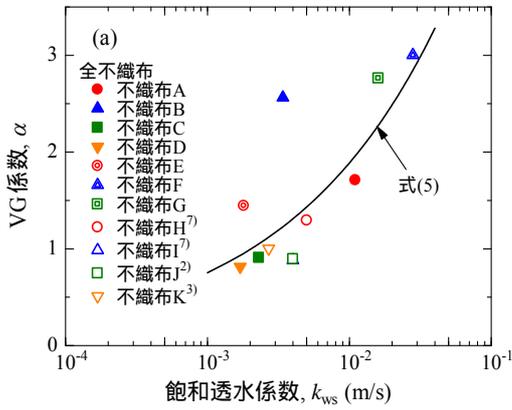


図-5 飽和透水係数 k_{ws} と VG 係数 α および n の関係 (全不織布)

表-2 近似曲線の係数

	全不織布 (図-4)	
	式(5)	式(6)
係数	$a_1=11.832, a_2=0.3986$	$b_1=5.269$

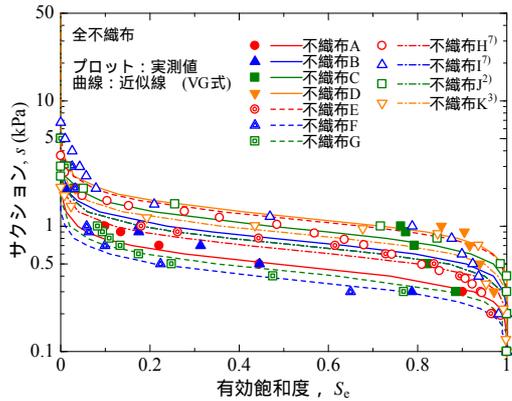


図-6 不織布の飽和透水係数より算定した VG 係数を用いて推定した水分特性曲線

似線を示している。式(5)に示すように VG 係数 n を一定としているために、サクシオンが AEV よりも高い領域において、水分特性曲線は同じ傾きで推移する曲線となる。

(4)拘束圧を受けた不織布の保水特性

図-7 に拘束圧を受けた不織布の水分特性曲線 ($s \sim S_r$ 関係) を示す。図中の曲線は、極

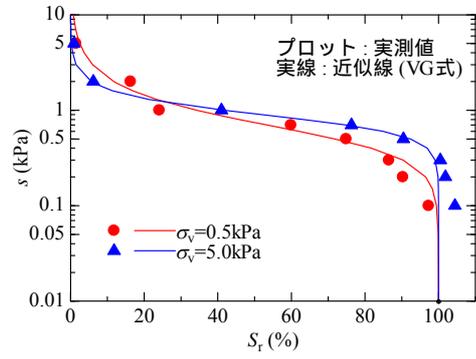


図-7 水分特性曲線 ($s \sim S_r$ 関係)

表-3 VG 係数

σ_v	α	n	R^2
0.5 kPa	1.743	2.697	0.6413
5.0 kPa	1.191	4.294	0.8736

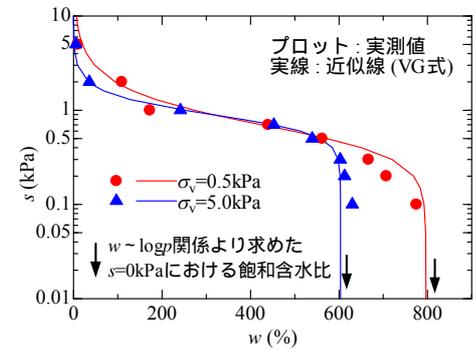


図-8 水分特性曲線 ($s \sim w$ 関係)

限値を $S_{r0}=100\%$, $S_{rr}=0\%$ として、実測値に式(1)の VG 式をフィッティングさせたものである。フィッティングは、Microsoft EXCEL のソルバー機能を用いて、決定係数 R^2 が最大となるように行った。同定された VG 係数を表-3 に示す。拘束圧が異なる場合においても、VG 式によるフィッティングの適合性は高く、砂質土と同じような S 形状の水分特性曲線が得られる。サクシオン s を増加させると、初期においては飽和度 $S_r=100\%$ が保たれているものの、あるサクシオンから急激に飽和度が低下して不飽和化する。このときのサクシオンは空気侵入値 AEV として定義されており、不織布の AEV は拘束圧が大きい場合の方が大きく、 $\sigma_v=0.5\text{kN/m}^2$ の場合、 $\text{AEV}=0.57\text{kPa}$ 程度、 $\sigma_v=5.0\text{kN/m}^2$ の場合、 $\text{AEV}=0.84\text{kPa}$ 程度である。拘束圧が大きいほど AEV が大きくなる傾向は、土試料において、乾燥密度が大きいほど、または、間隙比が小さいほど、AEV が大きくなる傾向と同様である^{10), 11)}。

図-8 に水分特性曲線 ($s \sim w$ 関係) を示す。図中の近似線のパラメータとして、図-7 の $s \sim S_r$ 関係において決定した VG 係数 α および n (表-3) と残留含水比 $w_r=0\%$ を用い、 $s=0\text{kPa}$ における飽和含水比 w_0 には、式(2)に $p=\sigma_v=0.5\text{kN/m}^2$ および 5.0kN/m^2 を代入して求めた含水比 $w=815\%$ および 618% を用いた。実測値と

の適合性は比較的高く、本研究で実施したVG係数と極限值 w_0 の決定法の有効性が示唆される。

<引用文献>

- 1) van Genuchten, R.: Calculating the Unsaturated Hydraulic Conductivity with a New Closed-form Analytical Model, Res. Rep., 78-WR-08, Princeton Univ., Princeton, 1978.
- 2) van Genuchten, M. Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Am. J., Vol.44, pp.892~898, 1980.
- 3) Nahlawi, H., Bouazza, A. & Kodikara, J.: Characterisation of geotextiles water retention using a modified capillary pressure cell. Geotextiles and Geomembranes, 25, pp.186-193, 2007.
- 4) Morris, C. E.: Unsaturated Flow in Nonwoven Geotextiles. SRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics, p.8 2000.
- 5) Bouazza, A., Freund, M. & Nahlawi, H.: Water retention of nonwoven polyester geotextiles. Polymer Testing, 25, 1038-1043, 2006.
- 6) 吉岡淳, 久楽勝行, 佐藤正博: ジオテキスタイルと土とのせん断試験, ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集, Vol. 2, pp.49-55, 1987.
- 7) 小杉賢一郎: 不飽和浸透特性のモデル化, 不飽和地盤の挙動と評価, pp.35-45, 地盤工学会, 2004.
- 8) 小林薫, 松元和伸, 中房悟, 森井俊広, 西村友良: キャピラリーバリアの限界長に及ぼす砂層の乾燥密度の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.591-602, 2013.
- 9) 清原雄康, 岩淵光生, 風間基樹: キャピラリーバリアにおける八戸しらすの適用性に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.4, 329-337, 2007.
- 10) 宮崎 毅, 西村 拓: 非相似多孔質体モデルを用いた土壌のスケーリング手法, 農業土木学会論文集, pp.41-48, 1994.
- 11) 河井 克, 軽部大蔵, 芦田 涉, 嘉戸喜胤: 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 土木学会論文集, pp. 291-302, 2000.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

河村 隆, 梅崎健夫, 坪山龍太: 不織布の飽和透水係数を用いた排水過程における水分特性曲線の推定, ジオシンセティックス論文集, 第31巻, 149-154, 2016, 査読有

DOI:10.5030/jcigsjournal.31.149

[学会発表](計2件)

河村 隆, 不織布の排水過程における水分特性曲線に及ぼす拘束圧の影響, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.7.12(発表確定), 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)
河村 隆, 各種不織布の水分特性曲線に対する van Genuchten 式の適用(その1), 第51回地盤工学研究発表会, 2016.9.14, 岡山大学(岡山県岡山市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

河村 隆 (KAWAMURA, Takashi)
信州大学・学術研究院工学系・准教授
研究者番号: 50324231

(2)研究分担者

梅崎 健夫 (UMEZAKI, Takeo)
信州大学・学術研究院工学系・教授
研究者番号: 50193933