

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

河村 隆¹, 梅崎健夫², 坪山龍太³

素材の異なる土木用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。その結果と既往研究から読み取った水分特性曲線に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。

キーワード：不織布，水分特性曲線，van Genuchtenモデル，飽和透水係数

1. はじめに

土木用不織布は、降雨時の法面保護、盛土内からの水平排水、吸出し防止、洗掘防止、ろ過など、浸透水や流水に関連する用途に多く用いられている。不織布を法面保護材として使用する場合には、降雨や晴天などの天候の違いによる地表面付近の飽和および不飽和状態における地盤内への水の浸透や地表面付近における水の流れについて評価するために、不織布の保水特性や不飽和透水係数が必要である。また、盛土内に水平排水材として敷設された場合においては、乾燥状態や不飽和状態の不織布へ浸透した雨水の排水性能の評価に、不織布の不飽和透水係数が必要である。しかし、不織布の不飽和透水係数に関する検討は実施されているものの、統一的な評価には至っていない¹⁾²⁾³⁾。一方、不飽和状態の土質材料については、保水特性や浸透特性に関する多くの数学的モデルが提案されており、水分特性曲線から導かれた不飽和透水係数の算定式や不飽和浸透モデルも確立されている。これらのモデルを不織布に適用することができ、さらに、不織布の材料定数を用いて容易に推定することができれば、不飽和状態における不織布の透水・浸透問題に対して非常に有効である。

本研究では、素材の異なる不織布に対して吸引法（水頭型）による保水性試験を実施し、不織布の排水過程における水分特性曲線を求めた。その結果に土質材料の不飽和状態における保水性・透水性の評価に用いられ

る van Genuchten モデル⁴⁾⁵⁾（以下、VG式）による水分特性曲線モデルを適用した。試験結果および既往の研究より読み取ったデータに基づいて、不織布の材料定数として飽和透水係数 k_{ws} に着目し、 k_{ws} 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。

2. 水分特性曲線モデル

現在最も頻繁に用いられている水分特性曲線モデルの一つであるVG式⁴⁾⁵⁾は次式で表される。

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

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

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ーリングパラメータ、 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⁵⁾。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⁴⁾⁵⁾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⁶⁾。

¹正会員，信州大学 工学部 水環境・土木工学科，准教授（〒380-8553長野市若里4-17-1）

²正会員，信州大学 工学部 水環境・土木工学科，教授（〒380-8553長野市若里4-17-1）

³信州大学大学院 総合理工学研究科 工学専攻 水環境・土木工学分野（〒380-8553長野市若里4-17-1）

3. 試験概要

各種不織布に対して吸引法（水頭型）による保水性試験（排水過程）を行った。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ー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 μm）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），排水容器内のオリー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

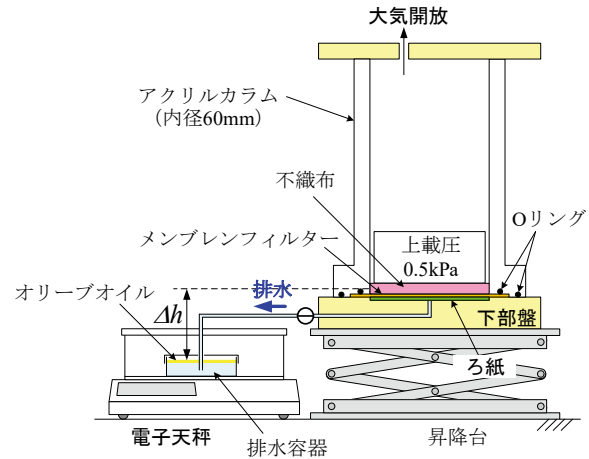


図-1 吸引法（水頭型）による保水性試験装置

表-1 保水性試験を実施した不織布の仕様および諸特性

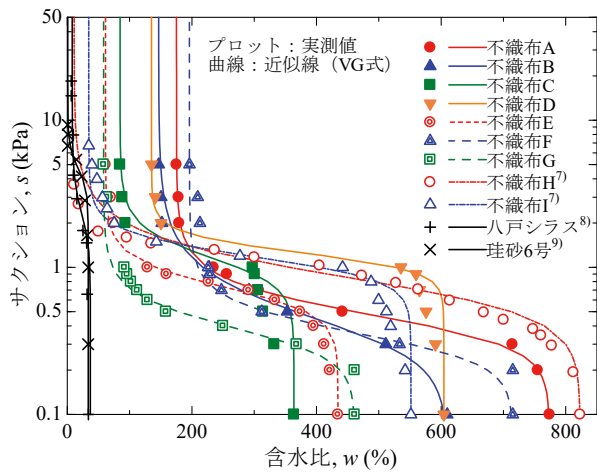
	不織布 A	不織布 B	不織布 C	不織布 D
名称	ポリエステル短繊維不織布	ポリエステル短繊維不織布	ポリエステル長繊維不織布	ポリエステル長繊維不織布
素材	ポリエステル短繊維	ポリエステル短繊維	ポリエステル長繊維	ポリエステル長繊維
製法	ニードルパンチおよびバインダー加工	ニードルパンチ	スパンボンド	スパンボンド
飽和透水係数	1.1×10^2 m/s	3.4×10^3 m/s	2.3×10^3 m/s	1.7×10^3 m/s
厚さ	3 mm	1.7 mm	0.75 mm	3.0 mm
質量※	125 g/m ²	300 g/m ²	100 g/m ²	300 g/m ²
	不織布 E	不織布 F	不織布 G	
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	ネット付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	レーヨン短繊維	
製法	ニードルパンチおよびスパンボンド加工	バインダー加工	バインダー加工	
飽和透水係数	1.8×10^3 m/s	2.8×10^2 m/s	1.6×10^2 m/s	
厚さ	4 mm	5 mm	3.5 mm	
質量※	400 g/m ²	55 g/m ²	—	

※カタログ値

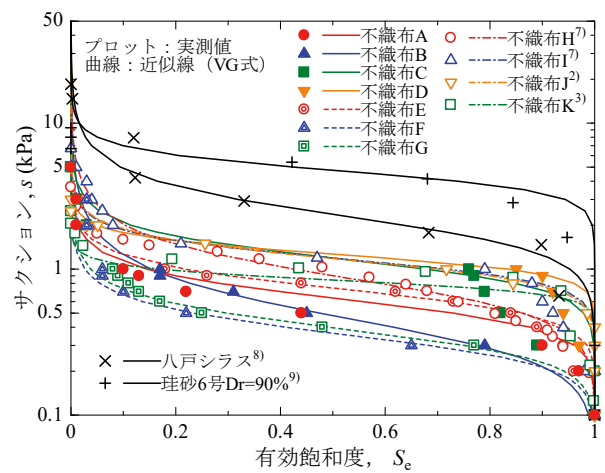
表-2 既往の文献より読み取った不織布の仕様および諸特性

	不織布 H	不織布 I	不織布 J	不織布 K
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	ポリエステル短繊維不織布	ポリプロピレン短繊維不織布
素材	ポリエステル短繊維	ポリエステル短繊維	ポリエステル短繊維	ポリプロピレン短繊維
製法	ニードルパンチ	ニードルパンチ	ニードルパンチ	ニードルパンチ
飽和透水係数	5.0×10^3 m/s	4.0×10^3 m/s	4.0×10^3 m/s	2.7×10^3 m/s ※
厚さ	2.3 mm	1.8 mm	2.3 mm	3.7 mm
出典	BOUAZZA, A. (2006) ⁷⁾	BOUAZZA, A. (2006) ⁷⁾	NAHLAWI, H. (2007) ²⁾	MORRIS, C. E. (2000) ³⁾

※カタログ値



(a)含水比とサクシジョンの関係



(b)有効飽和度とサクシジョンの関係

図-2 不織布の水分特性曲線 (実測値とVG式による近似)

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^{2), 3), 7)}より読み取った4種類の不織布のデータも用いた。表-1および表-2に不織布の仕様および諸特性を示す。表-1における飽和透水係数 k_{ws} は十分に脱気した不織布に対する定水位透水試験 (JISA 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。表-1における厚さは乾燥状態の不織布に対してノギスを用いて測定した値である。

4. 試験結果および考察

図-2 (a), (b)に、不織布の排水過程における水分特性曲線 ($s \sim w$ 関係および $s \sim S_e$ 関係、ここで w : 含水比)を示す。ここで、サクシジョンは、 $s = -(u_a - u_w) = u_w$ として求めた。図中には、既往文献^{8), 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IIについては、 $s = 0.1 \sim 1$ 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、いずれの不織布においても砂質土と同じようなS字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。図-2 (a)に示すように、砂質土よりも空隙が多い不織布の含水比の最大値は400~800%程度であり、広い含水比領域を有する曲線となる。

不織布の空気侵入値AEVは0.2~1 kPaであり、砂質土のAEV=1~5 kPaよりも小さな値となる。

図-3 (a), (b)および図-4 (a), (b)に、図-2 (a), (b)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。図-3 (a), (b)には、ポリエステル製の不織布のデータのみを、図-4 (a), (b)にはすべての不織布のデータを、それぞれ示した。不織布の水分特性曲線には、繊維の表面性状が影響すると考え、ポリエステルの不織布のみを抽出した整理も行った。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⁹⁾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=0.33~1 kPaであり、図-2 (a), (b)より読み取られた不織布のAEV=0.2~1 kPaに整合している。一方、VG定数 n は、 k_{ws} と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-3および図-4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:

$$\alpha = a_1 \times k_{ws}^{a_2} \quad (3)$$

$$n = b_1 \quad (4)$$

全不織布:

$$\alpha = a_3 \times k_{ws}^{a_4} \quad (5)$$

$$n = b_2 \quad (6)$$

ここで、係数 $a_1 \sim a_4$ および b_1, b_2 は表-3にまとめるとおりである。図-3 (a)および図-4 (a)に示すように、式(3), (5)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-3 (b)および図-4 (b)に示

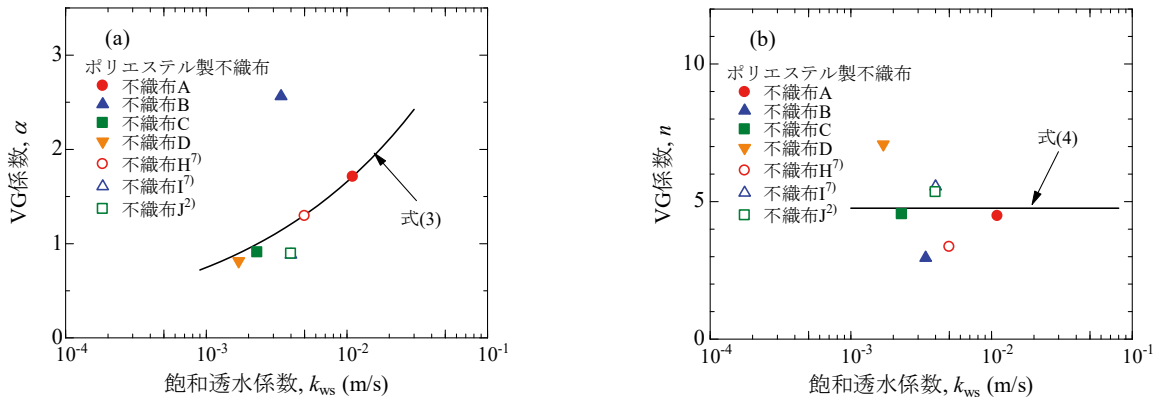


図-3 飽和透水係数 k_{ws} と VG 係数 α および n の関係 (ポリエステル製不織布)

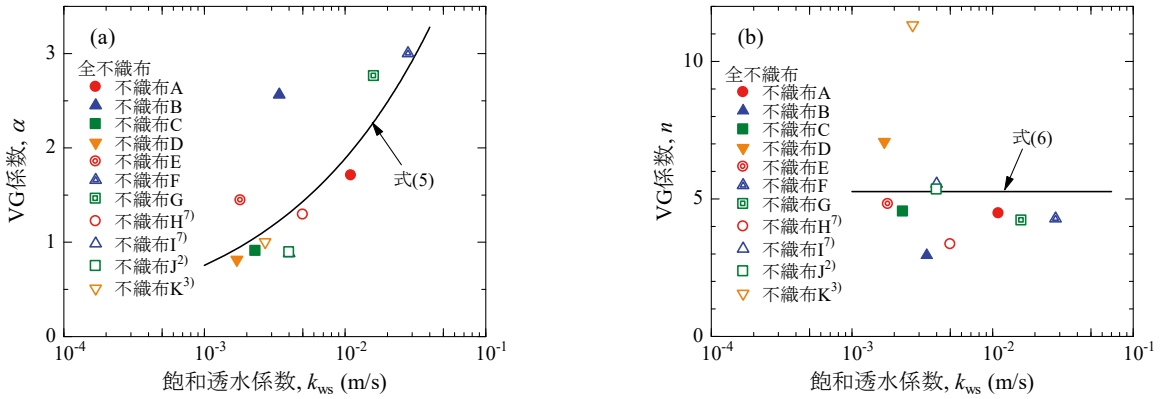
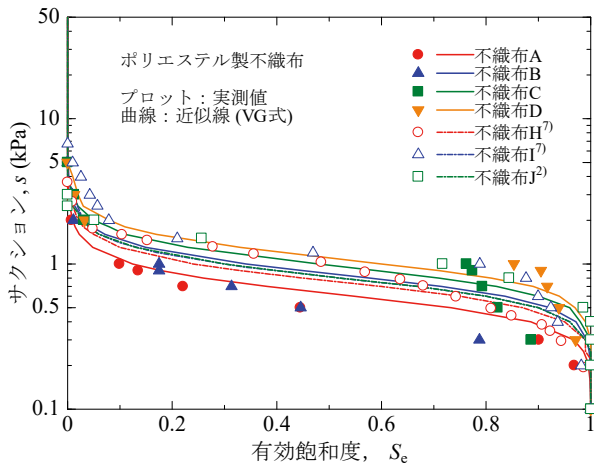


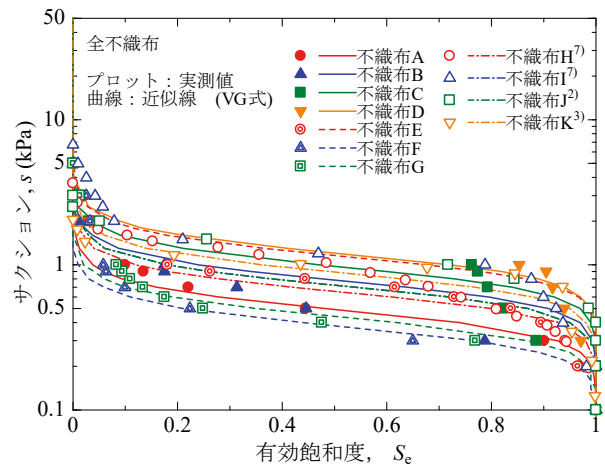
図-4 飽和透水係数 k_{ws} と VG 係数 α および n の関係 (全不織布)

表-3 近似曲線の係数

係数	ポリエステル製不織布 (図-3)		全不織布 (図-4)	
	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)
	$a_1=8.1586, a_2=0.3461$	$b_1=4.759$	$a_1=11.832, a_2=0.3986$	$b_1=5.269$



(a)ポリエステル製不織布



(b)全不織布

図-5 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

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(4)、(6)のように一定と仮定することとした。

表-1 および表-2 に示した不織布の飽和透水係数 k_{ws} および式(3)~(6)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-5 (a)、(b) に水分特性曲線 $s \sim S_e$ 関係を示す。図-5 (a) には式(3)、(4)を用いたポリエステルの不織布のみに対する結果を、図-5 (b) には式(5)、(6)を用いたすべての不織布に対する結果を示している。式(4)、(6)に示すように VG 係数 n を一定としているために、図-5 (a)、(b) いずれにおいても、サ

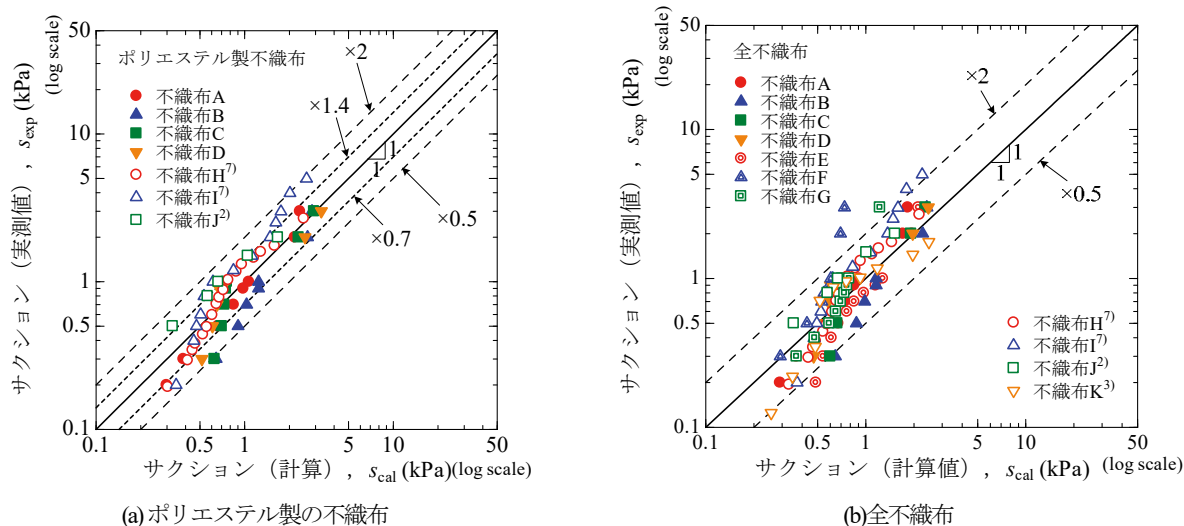


図-6 不織布の飽和透水係数より算定したVG係数を用いて推定した水分特性曲線の適合性

クションが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。

図-6 (a), (b)に水分特性曲線の実測値と計算値を直接比較して示す。図-5 (a), (b)における同一の相対飽和度 S_r に対応するサクシジョン s の実測値 s_{exp} と計算値 s_{cal} を比較したものである。ポリエステル製不織布のみの場合は、図-6 (a)に示すように、両者の関係は概ね0.7~1.4倍程度の誤差の範囲内にある。図-3 (a)に示したように式(3)によるVG係数 α の推定精度の低い不織布Bおよび図-2 (a)に示したように $s = 0.1 \sim 1$ kPaにおいて水分特性曲線の傾向が他と若干異なる不織布Cおよび不織布Iにおいても、誤差は0.5~2倍程度の範囲である。一方、全不織布の場合は、図-6 (b)に示すように、両者の関係は0.5~2倍程度の範囲にある。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。

5. まとめ

ポリエステル、ポリプロピレン、レーヨンを素材とする7種類の不織布に対して、吸引法（水頭法）による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。既往の研究から読み取った4種類の不織布のデータと合わせて、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。得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 不織布の排水過程における水分特性曲線は、素材や製法が異なる場合においても土質材料と同様にS字型の形状となる。また、VG式によって評価することができる。
- (2) 不織布の排水過程における水分特性曲線に対するVG係数 α は、 $\alpha = 1 \sim 3$ であり、不織布の飽和透水係数 k_{ws} が大きいほど大きい。素材や製法に関わらず、不織布のVG係数 α と k_{ws} の間には一意的な関係があり、

k_{ws} を用いてVG係数 α を概略推定することが可能である。一方、VG係数 n と k_{ws} の関係には、 $\alpha \sim k_{ws}$ 関係のような明確な関係は認められないものの、 $n = 3 \sim 7$ 程度の値となる。

- (3) ポリエステル製不織布のみのデータに対して得られたVG係数 α および n の推定式(3), (4)に不織布の飽和透水係数 k_{ws} を適用した場合の水分特性曲線の計算値と実測値の誤差は、0.7~1.4倍程度である。素材を考慮しない式(5), (6)を用いた場合の誤差は0.5~2倍程度である。
- (4) 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。

謝辞：本研究において使用した不織布は、三井化学産資(株)、前田工織(株)より提供いただきました。本研究はJSPS科研費 JP26420480の助成を受けたものです。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Iryo, T. & Rowe, R. K.: On the hydraulic behavior of unsaturated nonwoven geotextiles, *Geotextiles and Geomembranes*, 21, pp.381-404, 2003.
- 2) 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.
- 3) Morris, C. E.: Unsaturated Flow in Nonwoven Geotextiles. SRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics, p.8 2000.
- 4) van Genuchten, R.: Calculating the Unsaturated Hydraulic Conductivity with a New Closed-form Analytical Model, Res. Rep., 78-WR-08, Princeton Univ., Princeton, 1978.
- 5) 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.
- 6) 小杉賢一朗：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.

- 7) Bouazaa, A., Freund, M. & Nahlawi, H.: Water retention of nonwoven polyester geotextiles. *Polymer Testing*, 25, 1038-1043, 2006.
- 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.

WATER RETENTION CURVES IN DRAINAGE PHASE OF NON-WOVEN GEOTEXTILES ESTIMATED BY SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY

Takashi KAWAMURA, Takeo UMEZAKI and Ryuta TSUBOYAMA

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.

KEYWORDS: Non-woven geotextile, Water retention curve, van Genuchten model, Saturated hydraulic conductivity