

切土斜面における土壌水分特性パラメータの 空間分布推定方法の提案

METHOD TO ESTIMATE SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL HYDRAULIC PARAMETERS IN A CUT SLOPE

伊藤 真一¹・小田 和広²・臼木 陽平³・小泉 圭吾⁴

Shinichi ITO, Kazuhiro ODA, Yohei USUKI and Keigo KOIZUMI

¹大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: sitoh@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: oda@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³基礎地盤コンサルタンツ株式会社 海外事業本部 (〒136-0071 東京都江東区亀戸 8-19-1)

E-mail: usuki.yohei@kiso.co.jp

⁴大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: koizumi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

Key Words: soil hydraulic parameters, inverse analysis, field measurement, soil test

1. はじめに

国土の7割以上が山地で構成される日本では、毎年全国各地で豪雨による斜面崩壊が発生している。斜面崩壊の発生を予測するためには、斜面全体の雨水浸透挙動を解析的に再現することが重要である。つまり、現地斜面における土壌水分特性の把握が必要である。土壌水分特性を把握するための方法として、現地斜面で不攪乱試料を採取し、保水性試験などを実施することが挙げられる。この方法は、これまでにも数多く用いられてきた¹⁾。しかし、谷ら²⁾は、小型の供試体を利用して求められた土壌水分特性は、斜面スケールの土壌水分特性と必ずしも一致しないことを指摘しており、徳田ら³⁾の研究でも同様の結果が得られている。

近年、通信技術の発達やセンサの小型化・低コスト化により、土壌水分計による体積含水率の現地計測が普及している。それに伴い、体積含水率の現地計測結果に基づき、土壌水分特性を逆解析によって把握する方法が着目されている。例えば、外狩ら⁴⁾

は最尤法を、笹原ら⁵⁾は繰り返し探索法を利用して、現地計測結果と解析結果の残差が最小になる土壌水分特性の推定を試みた。筆者らの研究グループでも、飽和不飽和浸透流解析コード Hydrus⁶⁾を用いて、体積含水率の現地計測結果に基づき、水分特性曲線のパラメータと飽和透水係数の逆解析を行ってきた⁷⁾。Hydrus には、目的関数(現地計測結果と解析結果の残差平方和)を最小にするようなパラメータを探索する Levenberg-Marquardt 法⁸⁾が組み込まれているため、簡易に逆解析を行うことができる。Hydrus の逆解析機能を用いて水分特性曲線のパラメータと飽和透水係数の同定を行った結果、同定されたパラメータと飽和透水係数は、逆解析に用いた現地計測結果を精度良く再現することができた⁷⁾。

ところで、同一の斜面内であっても観測地点が数 m 離れると、現地計測結果が異なる場合が多い³⁾。これは、斜面内の地盤特性の不均質性に起因しており、このことは、土壌水分特性や透水係数も地点ごとに変化していることを示唆している。したがって、斜面全体を適切にモデル化するためには、その斜面

内における土壌水分特性や透水係数の空間的な分布を考慮する必要がある。しかしながら、逆解析を適用することによって斜面内における土壌水分特性や透水係数をできるだけ詳細に調べるためには、数多くの地点での現地計測が必要となる。しかし、それは、センサが小型化し、計測・データ通信が発達した現在においても技術的・経済的に容易ではない。したがって、限られた地点において明らかにされる土壌水分特性や透水係数を空間的に展開し、現地計測が行われていない地点におけるそれを推定する方法が必要である。その方法の一つとして、土壌水分特性や透水係数と地盤調査から得られる土質特性を強引に関連づけ、それによって近似的に推定することが挙げられる。

本研究では、安価かつ簡易な土質試験を利用して、不飽和土の土壌水分特性を表す代表的なモデルである van Genuchten モデル⁹⁾の空間分布推定方法の提案を目的とする。具体的には、まず、主として現地計測結果に基づいて、逆解析を実施して、鉛直1次元の雨水浸透に対する van Genuchten モデルのパラメータを推定する。そして、各観測地点で推定された van Genuchten モデルのパラメータと観測地点毎に行った簡易な土質試験の結果とを関連付ける推定式の導出を試みる。

2. 対象斜面における現地計測と土質試験

(1) 対象斜面の概要

本研究の対象斜面は、九州地方に位置する高速道路沿いの切土斜面である。地質的には、花崗岩が基盤であり、表層土は見た目には概ね均質なマサ土である。この斜面では、降雨時における斜面内の水分挙動を把握するために、土壌水分計(Delta-T社製 SM-150)を斜面内の2側線の合計5ヶ所に設置している。図-1は、上記の2側線の断面を模式的に示している。A側線では、3地点それぞれに2台の土壌水分計を異なる深度(30cmと60cm)に設置している。A側線から約7m離れた場所に位置するB側線では、2地点それぞれに土壌水分計を1台(深度20cm)設置している。センサの設置方法に関しては、図-2に示すように、鉛直にトレンチ掘削を行い、その断面と垂直にセンサを設置している¹⁰⁾。なお、体積含水率の計測は10分間隔で実施している。また、斜面の小段上には転倒柵型雨量計を設置し、現地の降雨量も10分間隔で計測している。

(2) 現地計測

表-1は解析に使用した降雨の特徴を示している。2つの異なる降雨時における現地計測結果を解析に使用した。降雨①(弱)については、降雨期間が6日間と長いものの、最大3時間雨量は小さい。一方、降雨②(強)は計測期間における最大の強度の降雨であり、最大3時間雨量は130(mm/3h)と降雨①(弱)の3倍以上である。表-2はA2地点における各降雨イベントに対する体積含水率の最小値と最大値を示している。体積含水率の最小値に関しては、降雨イベントによる違いがほとんどないものの、体積含水率の最大値に関しては、降雨②(強)におけるそれは降雨①(弱)よりも大きく、特に設置深度が浅い部分において顕著である。

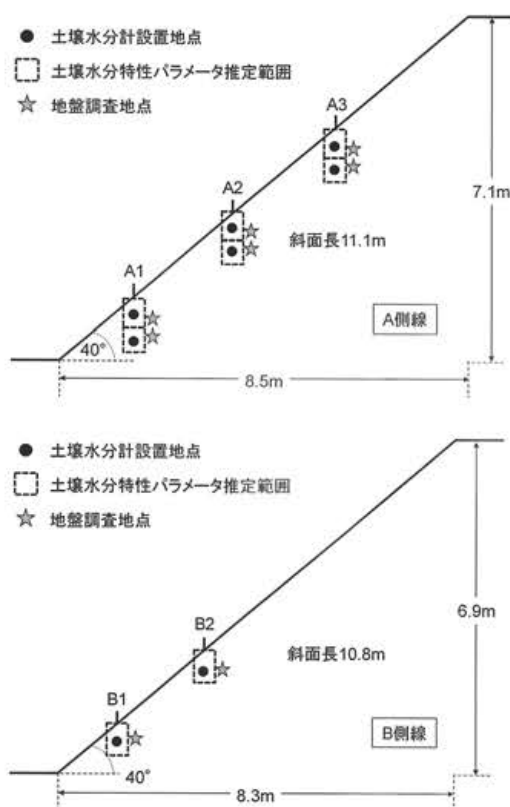


図-1 対象斜面における2側線の断面図

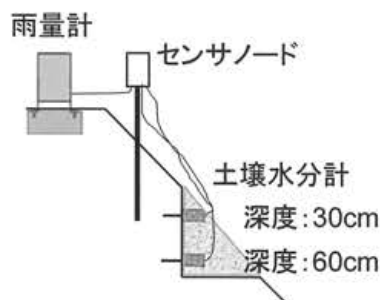


図-2 センサの設置方法¹⁰⁾

(3) 土質試験

5ヶ所の計測地点の近傍において、簡易貫入試験、攪乱ならびに不攪乱試料の採取を実施した。これらの地盤調査結果から、 N_d 、 C_g 、 C_s 、 C_f および ρ_d の5つの土質試験結果を得た。ここで、 N_d は簡易貫入試験における10cmの貫入に必要な打撃回数を表す指標である。また、 C_g 、 C_s 、 C_f (それぞれ Content for gravel, sand, fines)は、それぞれ粒度組成を表す指標である¹¹⁾。 C_g は全土粒子質量に対する礫分の質量比、 C_s は砂分、および C_f は細粒分のそれを表している。これらを用いることで、地点ごとの粒度組成の違いを大まかに評価することが可能である。最後に、 ρ_d は乾燥密度である。表-3は土質試験結果の一覧を示している。見た目には概ね均質なマサ土で形成された比較的小さな斜面ではあるが、地点毎に土質特性は異なっていることが分かる。

表-1 解析に使用した降雨イベントの特徴

	総降雨量	最大3時間雨量	降雨期間
降雨①(弱)	205mm	35mm	6日
降雨②(強)	240mm	130mm	3日

表-2 A-2 地点において計測された降雨イベント毎の体積含水率の最大値と最小値

	設置深度	最小	最大
降雨①(弱)	GL-30cm	0.26	0.43
	GL-60cm	0.31	0.43
降雨②(強)	GL-30cm	0.26	0.51
	GL-60cm	0.30	0.47

表-3 土質試験結果の一覧

	地点	深度	N_d	C_g	C_s	C_f	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$
A側線	A1	0~30cm	2.0	0.125	0.784	0.091	1.16
		30cm~60cm	9.0	0.160	0.745	0.096	1.34
	A2	0~40cm	2.0	0.122	0.753	0.125	1.26
		40cm~80cm	7.0	0.108	0.790	0.102	1.28
	A3	0~40cm	1.0	0.122	0.780	0.098	1.08
		40cm~80cm	6.3	0.120	0.792	0.089	1.18
B側線	B1	0~30cm	2.5	0.188	0.746	0.067	1.33
	B2	0~30cm	3.0	0.132	0.791	0.077	1.22

3. van Genuchten モデルと逆解析の方法

飽和不飽和浸透流解析コード Hydrus の逆解析機能を用いて、現地計測結果に基づき、van Genuchten モデルのパラメータの逆解析を実施する。Hydrus では、以下に示す不飽和土中の連続式であるリチャーズ式¹²⁾を有限要素法により解いている。

$$C \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 C は比水分容量(= $\partial\theta/\partial\psi$)、 θ は体積含水率、 ψ は土壌水分吸引水頭(cmH₂O)を表している。 t は時間(min)、 z は上向き正(cm)、 k は不飽和透水係数(cm/min)である。また、水分特性曲線モデルとしては、以下に示す van Genuchten モデルを用いている。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$k = k_s \cdot S_e^{0.5} \cdot \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right\}^2 \quad (3)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率である。また、 α (1/cm)と n は水分特性曲線の形状を与えるパラメータであり、 k_s は飽和透水係数(cm/min)を表している。van Genuchten モデルにおいて、値を決定すべきパラメータは、 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 k_s の5種類である。

Hydrus では、Levenberg-Marquardt 法⁸⁾を用いて van Genuchten モデルのパラメータの逆解析を行う。この方法は、非線形最小二乗法の1つであり、最急降下法とニュートン法を組み合わせた方法とされ、収束・安定性が非常に良いという特徴を有する¹³⁾。しかし、この方法は、目的関数の勾配情報を用いるため、局所的最適解に収束しやすいという問題点もある。この問題点を解消するために、本研究では、既往の研究⁷⁾から2つの改善を行った。まず、1つ目は、飽和体積含水率 θ_s を土質試験結果から決定した。すなわち、現地で採取した不攪乱試料から得られる乾燥密度 ρ_d を用いて式(4)によって決定した。

$$\theta_s = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (4)$$

ここで、土粒子密度 ρ_s は2.70(g/cm³)であり、深度30cmの地点で採取された試料を用いた土粒子密度試験により算出した。土質試験結果によって θ_s を決定することで、推定するパラメータを4種類に減らすことができる。2つ目の改善点として、パラメー

タの初期値を変更して複数の逆解析を実施した。そして、その中で目的関数(現地計測結果と解析結果の残差平方和)の値が最小となるパラメータを最も妥当なそれとして採用した。これにより、従来よりも大域的最適解に近いパラメータを推定できると考えられる。

4. van Genuchten モデルのパラメータ同定

まず、降雨①(弱)の現地計測結果に基づいて、van Genuchten モデルのパラメータの逆解析を実施した。そして、同定されたパラメータを用いた降雨②(強)に対する浸透解析を通じて、同定されたパラメータの妥当性を検証した。

(1) 1次元解析モデル

逆解析を実施する段階では、重力方向の雨水浸透(不飽和状態)が支配的であると想定し、各観測地点を1次元モデル化した。図-3はA2地点における1次元解析モデルを示している。境界条件としては、モデル上部を降雨境界、モデル下部を重力排水境界とした。

(2) パラメータの推定結果

表-4は降雨①(弱)の現地計測結果を用いて、各観測地点において同定された van Genuchten モデルのパラメータの値を示している。観測地点によって同定されるパラメータの値は大きく異なっている。見た目には概ね均質であると推察されている斜面であっても、斜面内の不均質性によりこのような違いが生じたものと考えられる。図-4は、A2地点において同定されたパラメータを用いた降雨①(弱)に対する再現解析における体積含水率の経時変化を示している。同図より、同定されたパラメータを用いると、逆解析に適用した現地計測結果を精度良く再現できていることがわかる。

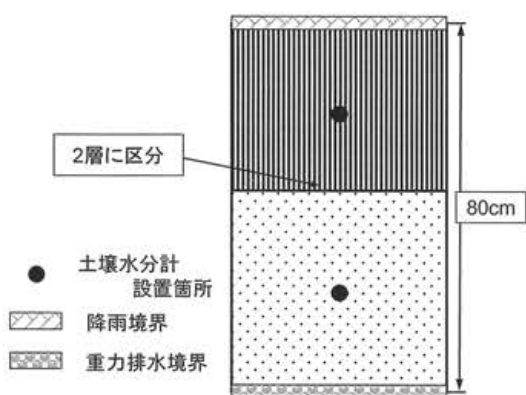


図-3 A-2地点における1次元解析モデル

(3) 同定されたパラメータの妥当性

前節で同定された van Genuchten モデルのパラメータを用いて、降雨②(強)に対する浸透解析を実施した。図-5は、A2地点におけるその体積含水率の経時変化を示している。降雨①(弱)の現地計測結果に基づいて同定したパラメータを用いて、降雨②(強)の現地計測結果を概ね再現できていることがわかる。つまり、弱い降雨時のデータを用いて強い降雨時の浸透挙動を外挿できている。これは、既往の研究⁷⁾では不可能であったことである。以上の結果から、土質試験結果を利用して推定するパラメータの種類を減らし、初期値を変更した複数の逆解析を行い目的関数が最小となるパラメータを採用することで、より現地の状態に近い適切なパラメータを同定できると考えられる。

表-4 各観測地点で同定されたパラメータ

地点	深度	パラメータ					
		θ_r	θ_s	$\alpha(1/cm)$	n	$k_s(cm/min)$	
A側線	A1	0~30cm	0.19	0.57	0.366	1.52	10.2
		30cm~60cm	0.28	0.51	0.179	1.35	23.4
	A2	0~40cm	0.25	0.54	0.016	1.58	0.438
		40cm~80cm	0.23	0.53	0.011	1.29	13.2
	A3	0~40cm	0.22	0.60	0.013	1.73	0.780
		40cm~80cm	0.25	0.56	0.010	1.53	9.00
B側線	B1	0~30cm	0.22	0.51	0.467	1.89	3.84
	B2	0~30cm	0.19	0.55	0.088	1.89	14.4

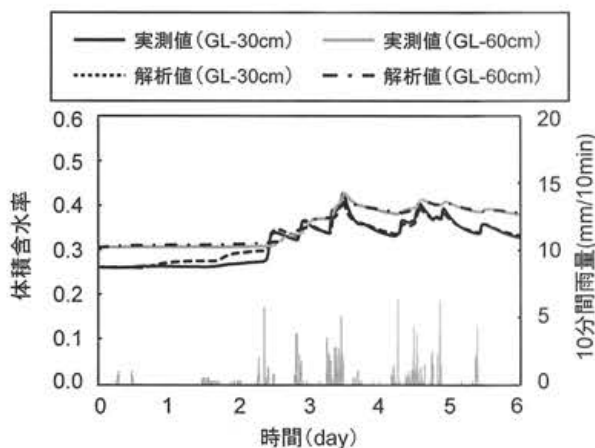


図-4 降雨①(弱)に対する再現解析における体積含水率の経時変化

5. van Genuchten モデルのパラメータの推定式の導出方法

van Genuchten モデルのパラメータの空間分布を推定するためには、簡易に実施可能な土質試験の結果と逆解析により得られる van Genuchten モデルのパラメータを繋ぎ合わせる推定式を導出する必要がある。この推定式を導出することができれば、任意地点での土質試験結果を用いて、その地点の van Genuchten モデルのパラメータを推定できると考えられる。本研究では、線形モデルを仮定し、以下の手順により推定式を導出した。

- ①: N_d , C_g , C_s , C_f および ρ_d のうち、各パラメータ (θ_r , α , n , k_s) と最も相関性の高い指標を見つける。
 ②-(a): ①の指標が N_d や ρ_d の場合
 既往の研究¹¹⁾における方法を参考に、各パラメータと N_d もしくは ρ_d の推定式に C_g , C_s および C_f のうち一つを加えた式を導出する。
 ②-(b): ①の指標が C_g , C_s , C_f のいずれかの場合
 各パラメータとその指標との推定式を導出する。

6. van Genuchten モデルのパラメータの推定式の導出

前章に記載した手順に従い、van Genuchten モデルの各パラメータに対する推定式を導出した。ここでは、 θ_r と α を例として推定式の導出過程を説明する。

まず、 θ_r に対する推定式の導出過程を説明する。

- ①: N_d , C_g , C_s , C_f および ρ_d の各指標について θ_r との関係性を調べたところ、 N_d が最も θ_r との相関性が高かった。図-6 は N_d と θ_r の関係性を示している。 N_d と θ_r の間に直線関係を仮定すると、相関係数は $R=0.67$ であった。

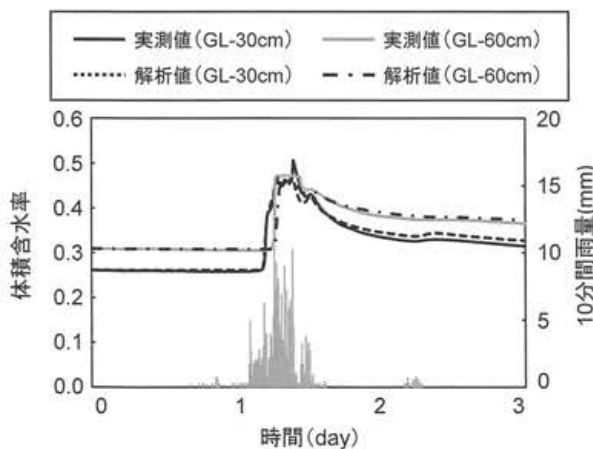


図-5 降雨②(強)に対する浸透解析における体積含水率の経時変化

②-(a): θ_r を決定するパラメータとして N_d とともに、 C_g , C_s , および C_f のうち 1 つを加えた式の作成を試みた。ここでは、 C_s を加えた式の作成手順を例に説明する。図-7 は、 θ_r の推定式の導出に関する説明を示している。まず、 N_d と θ_r の散布図 (図-6) 上に各 C_s の値を書き加え、 C_s の値の大小で 2 つのグループに分ける。白丸で表される C_s の小さいグループの 4 点を対象としたとき、 N_d と θ_r は $\theta_r=0.007 \times N_d + 0.22$ の直線関係で近似される。それに対して、黒丸で表される C_s の大きいグループを対象としたときでは、 $\theta_r=0.009 \times N_d + 0.16$ の直線関係で近似される。この 2 式を比較すると、直線の傾きは概ね等しく、切片の値には大きな差があることが分かる。このことから、 C_s の値の大小によって、 N_d と θ_r の直線関係式における切片の項が変化していると考えられる。実際に、赤池の情報量基準(AIC)¹⁴⁾を用いると、パラメータ θ_r を推定するためのモデルとして、説明変数を N_d と C_s にした場合が、AIC が最小であるモデルとして選択される。以上の結果から、 N_d と θ_r の関係式に C_s を加えた、 $\theta_r = a_1 \times N_d + a_2 \times C_s + b$ という推定式を導出した。

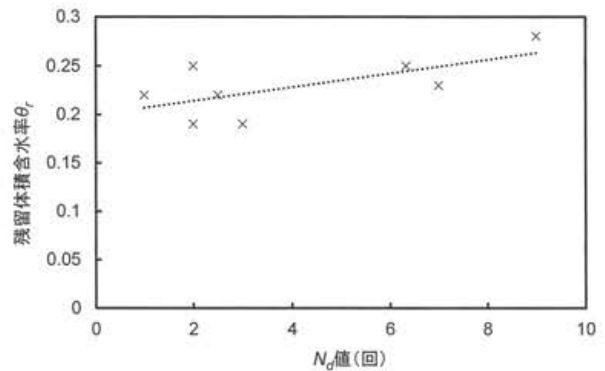


図-6 N_d と θ_r の関係

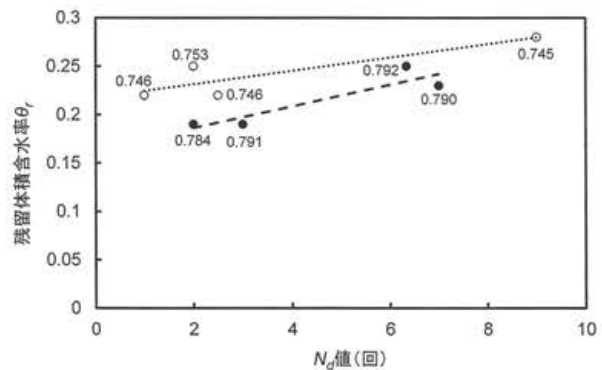


図-7 θ_r の推定式の導出に関する説明

次に、 α に対する推定式の導出過程を説明する。

①: N_d , C_g , C_s , C_f および ρ_d の各指標について α との関係調べたところ、 C_g が最も α との直線近似の相関性が高く、相関係数 $R=0.76$ であった。

②-(b): ①の指標が C_g であったため、説明変数が C_g だけである線形モデルの推定を行った。すなわち、 $\alpha=a_1 \times C_g + b$ という推定式を導出した。

表-5 は van Genuchten モデルのパラメータ θ_r , α , n , k_s について、上記の手順により導出されたそれぞれの推定式とその決定係数を示している。決定係数は相関係数の二乗の値であり、回帰直線の当てはまりの良さを表す指標である¹⁵⁾。表-5 の結果より、決定係数が最大の式を採用すると、 θ_r については $R^2=0.69$, α については $R^2=0.57$, n については $R^2=0.79$, k_s については $R^2=0.69$ であった。このように、van Genuchten モデルの各パラメータの推定式を導出することで、現地計測が行われていない地点におけるパラメータも推定できると考えられる。

7. まとめ

本研究では、水分特性曲線のパラメータの空間分布推定方法の提案を目的として、現地計測結果に基づく逆解析とそれによって同定されたパラメータと簡易な土質試験結果との関連付けを行った。主な知見を以下にまとめる。

- 1) 見た目には概ね均質であると考えられる斜面であっても、斜面内における土質特性は地点毎に大きく異なる。
- 2) 土質試験によって決定される飽和体積含水率 θ_s 以外の4種類のパラメータ (θ_r , α , n , k_s) を Hydrus に搭載されている Levenberg-Marquardt 法による逆解析によって現地計測結果から同定できる。
- 3) 同定されたパラメータを使った順解析は、逆解析に適用した現地計測結果を再現できるだけでなく、逆解析に適用しなかったより強い降雨時における現地計測結果を再現できる。
- 4) 簡易な地盤調査結果と逆解析によって得られるから得られる van Genuchten モデルのパラメータとは、決定係数が $R^2=0.60 \sim 0.80$ 程度の線形和の推定式で関係づけることができる。

参考文献

- 1) 例えば、檀上徹，小山倫史，中村秀樹，鶴澤裕人，藤本将光，福山直紀：国道沿い斜面における地盤内の雨水浸透計測結果を加味した数値解析，第49回地盤工学研究発表会，pp.1751-1752，2014。
- 2) 谷誠，小杉賢一朗，坪山良夫，窪田順平：森林土壌が多様な不均質性をもつ流域の流出特性に及ぼす影響の解明に向けて，日本林学会誌，Vol.80，pp.44-57，1998。

- 3) 徳田早映，小泉圭吾，小田和広，臼木陽平，伊藤真一，竹本将，藤原優，森下泰：現地計測データを用いた二次元モデル作成に関する基礎的研究，第50回地盤工学研究発表会，pp.2111-2112，2015。
- 4) 外狩麻子，島村誠，大野和己：浸透流解析を応用した盛土内土中水分の推定，第39回地盤工学研究発表会，pp.2117-2118，2004。
- 5) 笹原克夫，谷本守道，田村圭司：現地計測データを用いたまさ土斜面の土壌水分特性曲線の同定手法に関する研究，日本地すべり学会誌，Vol.46，No.3，pp.162-174，2009。
- 6) J. Simunek, M. Th. Van Genuchten, M. Sejna: HYDRUS: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION, *Transactions of the ASABE*, Vol.55 (4), pp.1261-1274, 2012.
- 7) 臼木陽平，小田和広，小泉圭吾，徳田早映，伊藤真一，竹本将，藤原優，森下泰：Hydrusによる現地計測結果に基づく雨水浸透の逆解析，第50回地盤工学研究発表会，pp.965-966，2015。
- 8) Marquardt, R. J. and Quirk, J. M.: An algorithm for least-squares estimation of porous solids. *Trans. Faraday.*, 57, pp.1200-1207, 1963.
- 9) van Genuchten, M.: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, *Reserch Report*, No.78-WR-08, Princeton Univ., 1978.
- 10) 小泉圭吾，小西貴士，竹本将，藤原優，藤田行茂，小田和広，平田研二，上出定幸：ユビキタスネットワークによる土砂災害監視システムの改良，Kansai Geo-Symposium 2014—地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム—，pp.141-144，2014。
- 11) 若月強，佐々木良宜，田中幸哉，松倉公憲：マサ土における単位体積重量と粒度組成を用いたせん断強度定数及び透水係数の推定の試み，砂防学会誌，Vol.58，No.4，p.13-21，2005。
- 12) Richards, L. A.: Capillary condition of liquids through porous mediums, *Physics1*, pp.318-333, 1931.
- 13) 日野幹雄，灘岡和夫，佐藤昭人：Marquardt法による不飽和土壌特性パラメータの同定，第30回水理講演会論文集，pp.379-384，1986。
- 14) 馬場真哉：平均・分散から始める一般化線形モデル入門，プレアデス出版，pp.307-329，2015。
- 15) 松原望，縄田和満，中井検裕：統計学入門，東京大学出版会，pp.265-266，2014。

表-5 各パラメータの推定式とその決定係数

パラメータ	推定式	決定係数
θ_r	$\theta_r = 0.007 \times N_d + 0.139 \times C_g + 0.181$	0.46
	$\theta_r = 0.0067 \times N_d - 0.718 \times C_g + 0.756$	0.69
	$\theta_r = 0.0069 \times N_d + 0.732 \times C_f + 0.132$	0.62
α	$\alpha = 5.17 \times C_g - 0.552$	0.57
n	$n = -0.055 \times N_d + 3.68 \times C_g + 1.33$	0.69
	$n = -0.055 \times N_d - 1.02 \times C_s + 2.61$	0.51
	$n = -0.053 \times N_d - 6.79 \times C_f + 2.45$	0.79
k_s	$k_s = 2.1 \times N_d + 25.7 \times C_g - 2.75$	0.65
	$k_s = 2.12 \times N_d + 28.7 \times C_s - 21.6$	0.66
	$k_s = 2.13 \times N_d - 99.7 \times C_f + 9.87$	0.69