

まさ土よりなる自然斜面中の 土壌水分特性曲線の降雨強度依存性

DEPENDANCY OF SOIL AND WATER CHARACTERISTIC CURVE ON
RAINFALL INTENSITY IN THE NATURAL SLOPE MADE OF GRANITE SOIL

小林 公明¹・片山 弘憲²・丸岡 雄一郎³・荒木 義則⁴

中井 真司⁵・小野 秀史⁶・柳崎 剛⁷・笹原 克夫⁸

Kimiaki KOBAYASHI, Hironori KATAYAMA, Yuuichirou MARUOKA, Yosinori ARAKI,
Shinji NAKAI, Hidefumi ONO, Go YANAGISAKI and Katsuo SASAHARA

¹株式会社 荒谷建設コンサルタント (〒730-0831 広島市中区江波西 1-25-5)

E-mail: kimiaki.kobayashi@aratani.co.jp

²株式会社 荒谷建設コンサルタント (〒721-0973 広島県福山市南蔵王町 2-1-1)

E-mail: hironori.katayama@aratani.co.jp

³株式会社 荒谷建設コンサルタント (〒730-0831 広島市中区江波西 1-25-5)

E-mail: yuuichirou.maruoka@aratani.co.jp

⁴中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30)

E-mail: araki@cecnet.co.jp

⁵復建調査設計株式会社 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

E-mail: nakai@fukken.co.jp

⁶株式会社 エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山市北区津島京町 3-1-21)

E-mail: ono-hi@ej-hds.co.jp

⁷株式会社 建設技術研究所 (〒541-0045 大阪市中央区道修町 1-6-7)

E-mail: yanagisk@ctie.co.jp

⁸高知大学農学部 (〒783-8502 高知県南国市物部乙 200)

E-mail: sasahara@kochi-u.ac.jp

Key Words: field measurement, soil and water characteristic curve, rainfall intensity, water content

1. はじめに

降雨に伴う斜面の表層崩壊発生には、雨水浸透過程が多大な影響を及ぼす。これは、雨水浸透に伴う単位重量の増加や間隙水圧の発生のみでなく、土粒子間に作用するサクシヨンの消失に因るところが大きい。したがって斜面崩壊予知のためには、雨水浸透過程を把握する必要があり、その手段として飽和・不飽和浸透流解析が広く用いられている。解析パラメータとしては、透水係数ならびに土壌水分特性曲線があり、このうち土壌水

分特性曲線の設定方法が解析上の課題であるといえる。これまでは、現地で採取した不攪乱試料について吸引法等の室内試験を実施することで求めていたが、水分特性曲線にはヒステリシスがあり、斜面崩壊が吸水過程で発生することから、必ずしも適切なパラメータを得られていない可能性が考えられる。また近年では、土壌の誘電率に基づいて体積含水率を計測する TDR 式土壌水分センサーなどが開発され、テンシオメータと併用することにより、原位置計測結果より土壌水分特性曲線を得ることが可能になっている。

著者らは、斜面崩壊予知のための基礎的研究として、原位置計測結果から求められる土壌水分特性曲線について、その特性や再現性の面から、飽和・不飽和浸透流解析に用いるパラメータとしての設定方法を検討している^{1),2),3),4),5)}。本稿は、この研究の一環として、降雨イベントによる土壌水分特性曲線の形状変化、さらには吸水曲線勾配の降雨強度依存性について分析することにより、原位置計測結果から解析パラメータを特定する手法を検討したものである。

2. 原位置計測の概要

原位置計測を行っているのは、1999年6月29日に周辺地域で土石流災害が多発した広島県廿日市市に位置する溪流沿いの山腹斜面である。当該地は広島型花崗岩類の分布域であり、対象斜面には同岩体起源の風化土である“まさ土”が被覆している。なお斜面勾配は45°程度と急峻な地形を呈する。

計測に用いた機器は、テンシオメーターとTDR式土壌水分センサーであり、いずれも表層から30cmの深度に設置している。本斜面周辺では、計4対のテンシオメーターとTDR式土壌水分センサーをほぼ同じ深度に設置して計測を実施しているが、今回検討には最もデータのばらつきが少ない箇所計測結果を用いた。表-1に各計測機器の諸元を示す。計測データとしては、10分間隔でそれぞれの計測機器により土壌水分吸水水頭(ϕ :cmH₂O)ならびに体積含水率(θ :cm³/cm³)をサンプリングしている。

なお原位置計測結果から土壌水分特性曲線を求める場合、テンシオメーターと土壌水分センサーの計測原理の相違により、両者の測定範囲が異なるという問題点がある。しかし小型サンプラーにより採取した不攪乱試料を用いた室内試験では、マクロポア等の影響に伴う不均質な浸透水の流れを再現できず、これを解決する

には、本研究のような実斜面内での計測データが有利であるといえる。これについて梁ら⁶⁾は、原位置計測データから定めた土壌水分特性を用いた降雨浸透の再現計算結果が、室内試験データを用いた場合より良好であったと報告している。以上より、本研究では実斜面内における計測データから得られた土壌水分特性曲線について検討することとした。

また計測地点近傍でトレンチ調査を行った結果⁷⁾、表層より5cmまでは落葉・腐植物を主体とするA0層、40cmまでが崖錐性3次堆積物であるA層、120cmまでが崖錐性1~2次堆積物であるB層、それ以深が原岩の強風化変質残留部であるC層という層序を確認している。すなわち、検討に用いた原位置計測データは、A層相当で得られたものであると考えられる。A層は中・細粒砂分の基質を主体とし、植生根およびその残留痕跡を包有する層であり、動的コーン貫入試験から得られたNd値は1程度、山中式土壌硬度計指標値は6~11cmの範囲にある。

3. 原位置計測データに基づく土壌水分特性曲線

(1) 原位置計測結果(θ - ψ 関係)

検討対象とした2008年4月から9月の6か月間の原位置計測データについて、体積含水率(θ)と土壌水分吸水水頭(ϕ)の関係(以下、 θ - ϕ 関係と記す)を図-1に示す。図を見ると、計測機器の不具合や感度の問題等に起因して異常値を示す箇所が部分的にある。しかし全体的な傾向としては、土壌水分吸水水頭が100cmH₂O以上の高い領域では、 θ - ϕ が概ね同一の関係に収束するのに対し、土壌水分吸水水頭が低い領域では θ - ϕ 関係が大きく分散している。

表-1 計測機器の諸元

計測機器	項目	仕様
テンシオメーター	形式	DIK-3023-12 (大起理化学工業㈱)
	全体寸法	φ18mm×(埋設深さ+16cm)
	テンシオカップ	φ18mm×90mm (素焼部寸法φ18×60mm)
	指示方式	ゲージ圧
	定格圧力	0~-98.07 kPa
	精度	±0.5FS (23±5°Cのとき)
	温度特性	0点 0.05%FS/°C以下
TDR式土壌水分センサー	アナログ出力	出力電圧 1~5V
	形式	C-CS616 (Campbel Scientific社)
	ロッド寸法	長さ300mm×φ3.2mm
	ヘッド部寸法	長さ85mm×幅63mm×高さ18mm
	分解能	0.10%
	最大分解能	10-6m ³ /m ³
	精度	±2.5%
測定伝導度の精度	0.5dS/m以下	
測定比重の精度	1.5g/cm ³ 以下	
測定含水率の精度	0~50%	

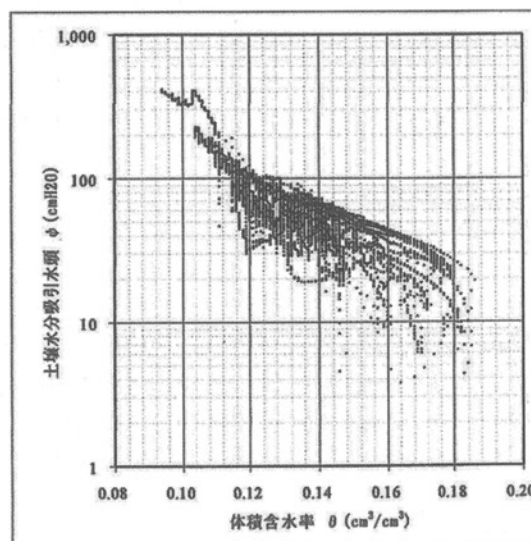


図-1 全計測データの θ - ψ 関係

このような傾向を示す要因として、ひとつには、全データ数 26,170 に対して土壌水分吸引水頭が 100 cmH₂O 以上となるデータが 5,141 であり、土壌水分吸引水頭の高い領域のデータが少ないために収束するよう見えることや、逆に飽和体積含水率 θ_s に近づくような土壌水分吸引水頭の低い領域におけるデータが得られていないために、その領域での収束傾向が表現できていないことが挙げられる。もうひとつは、土壌水分特性曲線における吸水時と排水時のヒステリシスに起因する分散であるといえる。すなわち、図-1 には吸水と排水の2つの過程が混在して描かれているために相関図が分散していると捉えることができる。

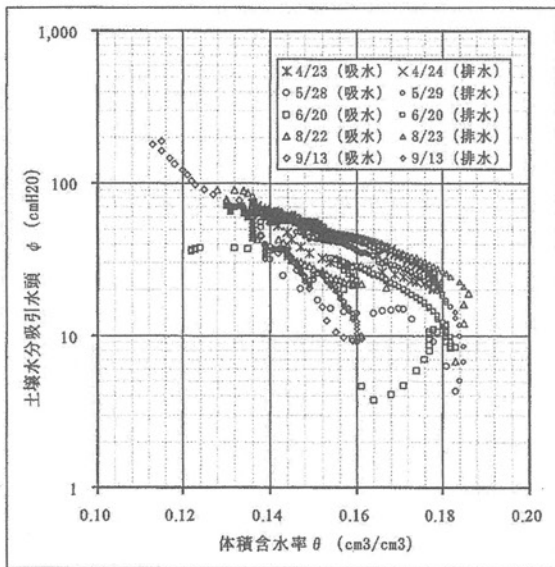


図-2 θ - ψ 関係の吸・排水過程分離

(2) 吸・排水過程のヒステリシス

θ - ψ 関係における吸水時と排水時のヒステリシスを明確化するために、吸・排水過程を分離して整理した。吸・排水過程の分離にあたっては、まず期間中の主な降雨イベントとして、総降雨量が 20mm 以上の際の計測データを抽出した。次に抽出した計測データを吸水過程と排水過程に分類した。ここで吸水過程とは、体積含水率 θ が降雨に伴う上昇を開始した時点からピークに達する時点までと定義した。また排水過程は、上記の吸水過程が終了した時点から次の吸水過程が開始するまでの区間とした。なお計測データの抽出にあたって、計測機器の不具合や感度の問題等に起因すると考えられる異常値は棄却した。

図-2に分析期間中の各月の代表降雨イベント毎の θ - ψ 関係を示す。図では、白抜きのマーキングが吸水過程、塗りつぶしが排水過程を表しているが、これからも明らかなように、 θ - ψ 関係は吸水過程と排水過程で違う経路を辿り、全体として明瞭なループを描いている。すなわち原位置計測データから得られた土壌水分特性曲線は、吸水時と排水時のヒステリシスを有すると判断できる。また図-2における θ - ψ 関係の全体傾向を見ると、吸水過程で大きく分散し、唯一の主吸水曲線が認められないのに対し、排水過程では排水曲線が唯一の主排水曲線に収束するよう見える。

(3) 降雨イベント毎の土壌水分特性曲線の形状変化

降雨イベント毎の θ - ψ 関係とそのイベントにおける累積降雨量を抜粋して図-3 に示すが、それぞれの θ -

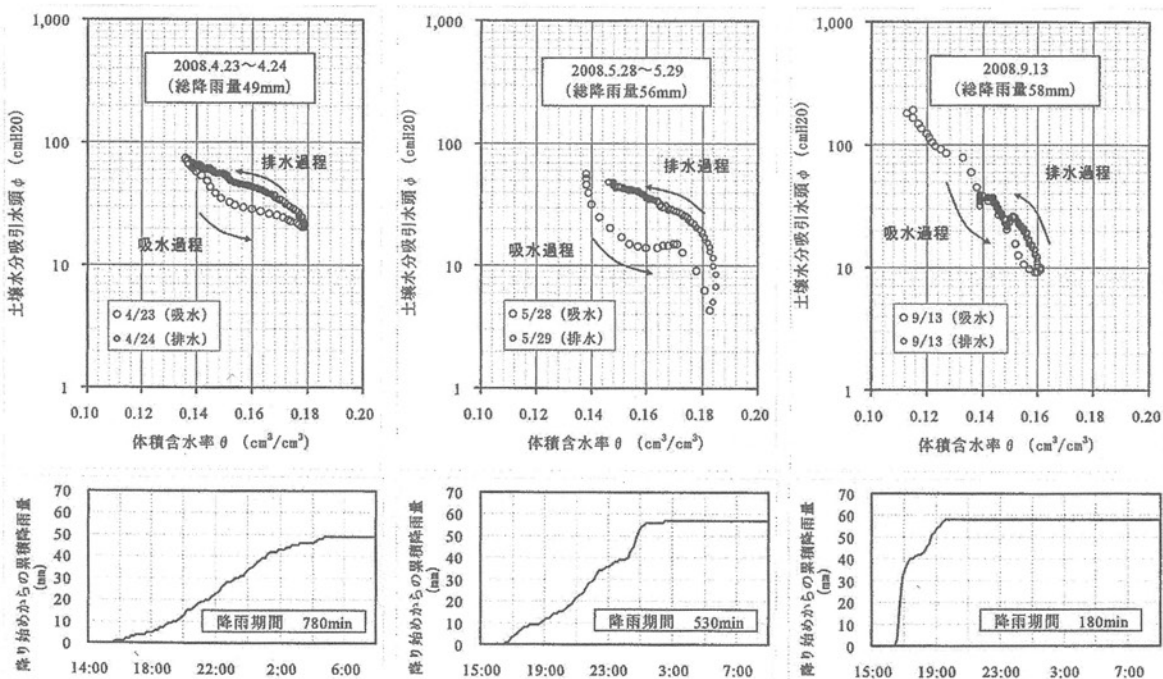


図-3 θ - ψ 関係と累積降雨量の比較

ϕ 関係の形状は、その時の降雨特性によって大きく変化する。図-3 には同程度の雨量の降雨イベントにおける θ - ϕ 関係の差異を示しているが、これからもわかるように、特に降雨強度が大きくなると、 θ - ϕ 関係の吸水過程における勾配が大きくなる傾向、すなわち比水分容量 ($-d\theta/d\phi$) が小さくなる傾向が認められる。

以上を総括すると、原位置計測結果に基づいて飽和・不飽和浸透流解析のパラメータである土壌水分特性曲線を設定する際には、吸・排水過程のヒステリシスとともに、降雨強度等の影響を加味する必要があると考えられる。

4. 吸水走査曲線の降雨強度依存性検討

(1) 検討方法

ここでは、降雨強度等の影響を加味して飽和・不飽和浸透流解析パラメータを設定するために、吸水走査曲線の降雨強度依存性について検討する。

土壌水分特性曲線の形状は、ある体積含水率 (θ) における土壌水分吸水水頭 (ϕ) の値と、曲線勾配である比水分容量 ($-d\theta/d\phi$) で表現される。そこで、降雨強度と比水分容量の相関を図-4 に示すが(降雨イベント毎のデータ抽出方法は、4-(2) で後述)、両者には 3-(3) で想定したような明瞭な相関は認められない。これは降雨浸透に伴う時間差等に起因するものと考えられ、降雨強度から直接的にその依存性を表現するのは困難であると判断できる。

降雨強度は地表面での浸透速度に大きな影響を与えると同時に、地中における浸透速度にも関与するため、これを降雨強度の間接的な指標と捉えることができる。また地中での浸透速度は、ある深さにおける体積含水率の時間変化量 ($d\theta/dt$)、すなわち吸水速度で表現

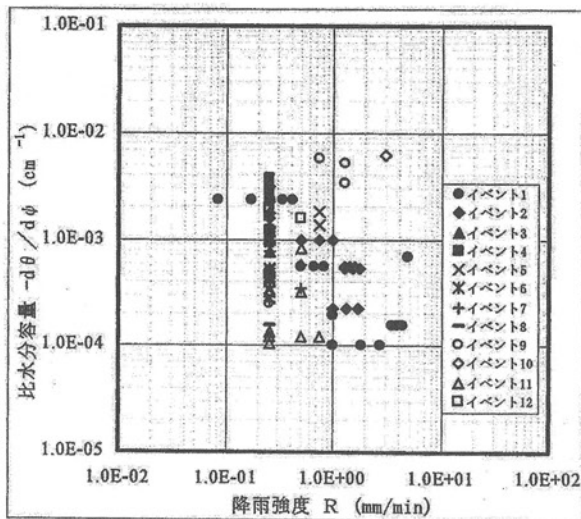


図-4 降雨強度と比水分容量の相関

できる。従って、ここでは比水分容量への吸水速度の影響を分析することとした。なお土壌水分特性曲線の形状からも明らかのように、体積含水率ならびに土壌水分吸水水頭の値によって比水分容量(曲線勾配)は刻々と変化する。そこで分析では、体積含水率もしくは土壌水分吸水水頭のレンジ毎に吸水速度と比水分容量の関係を再整理した。

(2) 吸水速度と比水分容量の相関

分析には、前述した 2008 年 4 月から 9 月の 6 か月間の原位置計測データのうち、体積含水率が増加し、かつ土壌水分吸水水頭が減少する期間を抽出して用いた。抽出期間は表-2 に示す 12 イベントである。なおテンシオメータの計測精度の問題から、土壌水分吸水水頭が 10cmH₂O 以下の計測結果は棄却した。

図-5 に降雨イベント毎の吸水速度(体積含水率増分, $d\theta/dt$)と比水分容量(曲線勾配, $-d\theta/d\phi$)の相関図(以下、 $(d\theta/dt)$ - $(-d\theta/d\phi)$ 関係と記す)を示す。図で

表-2 分析に用いた計測データ情報

降雨イベント	計測日	抽出時間 (min)	降り始めから抽出終了時刻までの累積降雨量(mm)
1	4/7	210	26
2	4/9	150	19
3	4/17	140	31
4	4/23~4/24	180	42
5	5/19	110	40
6	5/19	80	48
7	5/24	40	37
8	5/28	70	39
9	6/20	30	41
10	8/23	160	29
11	9/13	170	58
12	9/21	30	43

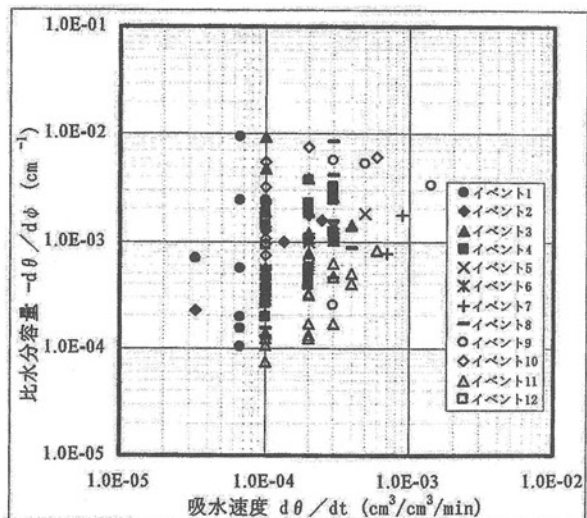


図-5 吸水速度と比水分容量の相関

は吸水速度の増大に伴う比水分容量の増加傾向が認められ、3-(3)で想定した降雨強度と比水分容量の相関傾向とは相反する結果となっている。これは地中の吸水速度が、降雨強度以外にも、その計測深度や地盤の不飽和特性などの様々な因子によって影響を受けているためであり、結果的には、これをもって土壌水分特性曲線の降雨依存性に言及することはできない。しかし降雨強度の間接的な指標となる吸水速度への依存性が認められたことは、土壌水分特性曲線のモデル化に向けて有用な情報であるといえる。

なお吸水速度と比水分容量に正の相関関係が認められるメカニズムとしては、流量フラックスの増大に伴い、サクシオンに寄与するメニスカス水よりも、寄与しないポンド水が卓越してくるために、体積含水率の増分に較べて土壌水分吸引水頭の増分が小さくなる現象であると考えられる。また相関図のもつ幅は、単なる計測データの分散のみではなく、その時点の体積含水率や土壌水分吸引水頭の差異を示していると捉えることができる。

(3) $\theta \cdot \psi$ を指標とした $(d\theta/dt) - (-d\theta/d\psi)$ 関係の整理

体積含水率 (θ) ならびに土壌水分吸引水頭 (ψ) の値を指標とするために、各値のレンジ毎に吸水速度 ($d\theta/dt$) と比水分容量 ($-d\theta/d\psi$) の相関を整理した。なお図-6に各計測値の頻度分布を示すが、 θ は概ね正規分布、 ψ はポアソン分布となる。

体積含水率 (θ) を $0.01\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ピッチで区分し、そのレンジ毎の $(d\theta/dt) - (-d\theta/d\psi)$ 関係を図-7に示した。図中には、データ分布範囲の包絡線を追記しているが、全体的にデータの分散がみられるものの、各レンジで $(d\theta/dt) - (-d\theta/d\psi)$ 間に正の相関関係が確認できる。

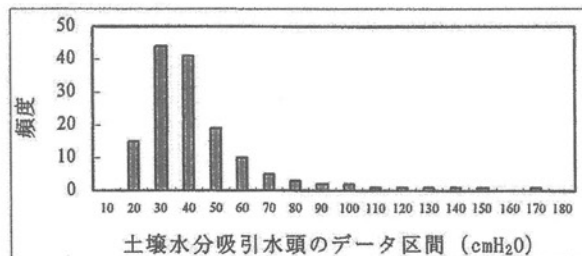
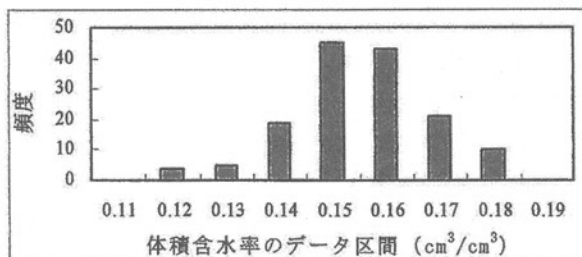


図-6 体積含水率ならびに土壌水分吸引水頭計測値の頻度分布

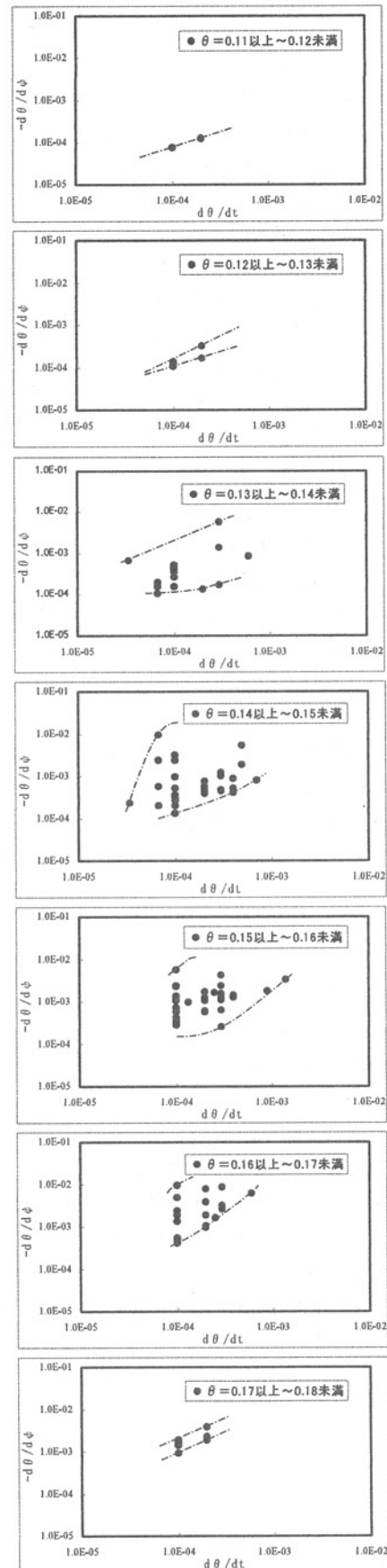


図-7 θ レンジ毎の吸水速度 ($d\theta/dt$) と比水分容量 ($-d\theta/d\psi$) の関係整理

また同一吸水速度での比水分容量の分布幅を見ると、 $d\theta/dt=1.0\times 10^{-4}\text{ cm}^3/\text{cm}^3/\text{min}$ において、 θ が $0.12\sim 0.13\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ のレンジでは $-d\theta/d\phi=1.2\times 10^{-4}\sim 1.4\times 10^{-4}\text{ cm}^{-1}$ 、 θ が $0.14\sim 0.15\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ のレンジでは $-d\theta/d\phi=1.3\times 10^{-4}\sim 3.2\times 10^{-3}\text{ cm}^{-1}$ 、 θ が $0.16\sim 0.17\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ のレンジでは $-d\theta/d\phi=4.0\times 10^{-4}\sim 9.5\times 10^{-3}\text{ cm}^{-1}$ となり、体積含水率の増加に伴い $(d\theta/dt)-(-d\theta/d\phi)$ 関係が $(-d\theta/d\phi)$ 軸の+側へ推移する傾向が認められる。これは、吸水走査曲線が θ 軸の+方向に勾配が緩くなる形状に一致している。なお $(d\theta/dt)-(-d\theta/d\phi)$ 関係における下限値包絡線の傾きに注目すると、 θ が $0.15\sim 0.16\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ならびに $0.16\sim 0.17\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ のレンジで大きくなっているものの、それ以外は概ね類似した傾きを示す。

一方、土壤水分吸引水頭(ϕ)のレンジ毎に整理した場合、ここでは分析結果は割愛するが、 ϕ 変化に伴う明瞭な傾向は確認できず、 $(d\theta/dt)-(-d\theta/d\phi)$ の相関関係自体も一部不明瞭となる。これは、土壤水が鉛直浸透する場合に、土壤水分吸引水頭の変化が透水係数や流量フラックスに直接影響し、これを指標とすると相関が複雑化するためであると考えられる。

以上の結果、土壤水分特性曲線の吸水速度依存性を評価する場合、体積含水率を指標として吸水速度と比水分容量の関係を整理できる可能性があることがわかった。なお今回計測で得られている体積含水率は、**図-6**のように正規分布を示しているため、統計的にも扱いやすいデータであるといえる。

5. おわりに

本研究では、斜面崩壊予知のための基礎的研究として、原位置計測結果から求められる土壤水分特性曲線について、降雨強度依存性という観点から、降雨イベントによる曲線の形状変化、さらには比水分容量の吸水速度依存性について分析した。その結果、吸水速度(体積含水率増分、 $d\theta/dt$)と比水分容量(曲線勾配、 $-d\theta/d\phi$)に相関が認められるとともに、体積含水率 θ のレンジ毎に吸水速度と比水分容量の関係を整理すれば、その相関がより明瞭になることがわかった。すなわちこれは、原位置計測結果から土壤水分特性曲線を特

定する場合に、吸水速度と体積含水率を指標にして比水分容量を整理できる可能性を示したものである。

今後は、吸水速度や初期体積含水率などを考慮した土壤水分特性曲線のモデル化を行い、それを用いた飽和・不飽和浸透流解析により解析精度の向上を図っていきたい。そのためにも、より多くの計測データを用いて土壤水分特性曲線を定量的に導く手法を確立するとともに、どのような土で吸水速度依存性が高くなるかも検討する必要がある。また、解析過程においてアウトプットデータとなる吸水速度を、どのように解析に取り入れるかも課題である。

なお浸透流解析の精度向上のためには、解析パラメータの深度方向の変化や、浸透過程における側方流の発生等も課題として挙げられるため、これらについても詳細な検討を加えていきたいと考えている。

謝辞：本研究の実施にあたり、貴重な資料およびご助言をいただいた国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所担当者の各位に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 丹下ら：原位置計測より求めた土壤水分特性曲線を用いた降雨浸透過程の再現計算，平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集,pp220-221
- 2) 岩田ら：原位置計測データに基づく土壤水分特性曲線の算定方法に関する一考察，平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集,pp222-223
- 3) 片山ら：土壤水分特性曲線の吸水時と排水時のヒステリシス，平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集,pp390-391
- 4) 丸岡ら：降雨強度が土壤水分特性曲線に与える影響，平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集,pp128-129
- 5) 岩田ら：降雨浸透時の土壤水分特性の相違が土の降雨浸透速度に及ぼす影響，平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集,pp130-131
- 6) 梁ら：降雨鉛直浸透に関する土壤水分特性パラメータの特定手法に関する考察，砂防学会誌,Vol.59,No.3,pp3-12
- 7) 小野ら：広島西部山系花崗岩風化土斜面の土層構造についての一考察，平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集,pp110-111

(2010. 5. 14 受付)