

# シラスおよびシラスを含む土質材料の不飽和浸透特性に関する研究

工学部 酒匂 一成

## 1. はじめに

降雨時の自然斜面，道路のり面，鉄道盛土および河川堤防などの安定性を定量的に評価するためには，地盤の不飽和土の浸透特性や強度特性を把握することが重要である。そこで，本研究では，特に南九州地域に広く分布しているシラスおよびシラスを含んだ土質材料の不飽和土の保水・浸透特性（水分特性曲線や不飽和透水係数）に着目する。

不飽和土の保水・浸透特性に関する現状の問題点として，それらの土質試験は試験時間が長期にわたることや試験操作が複雑であることなどの問題が挙げられ，試験結果が十分に蓄積されていない。例えば，堤防の安全照査では，不飽和浸透解析および斜面安定解析が行われるが，土の不飽和浸透解析<sup>1)</sup>では，土の保水性や浸透特性，すなわち，水分特性曲線や体積含水率-飽和・不飽和透水係数の関係が必要である。その際に，河川堤防の構造検討の手引き<sup>2)</sup>では，**図-1**や**図-2**に示す様なモデル関数を与えられ，不飽和浸透解析において，このモデルが利用されることが多い。しかしながら，与えられている曲線は，砂質土，粘性土，礫質土・砂質土といった簡単な分類による土に対するモデルであり，実際に利用する場合に，どれを用いるかを判断するには，かなりの経験を要する。また，鹿児島県はシラスなどの特殊土が分布しており，これらの水分特性曲線として，どの曲線を用いるべきかを判断するには，その試験データが少ないことが課題である。

本研究では，シラスおよびシラスを含んだ土質材料に対する室内土質試験（保水性試験，および不飽和透水試験）を実施し，試験データの蓄積を行う。また，著者らは，粒度試験結果と間隙比の値などから，不飽和土の浸透特性を推定する概念モデル<sup>3)</sup>を提案してきて

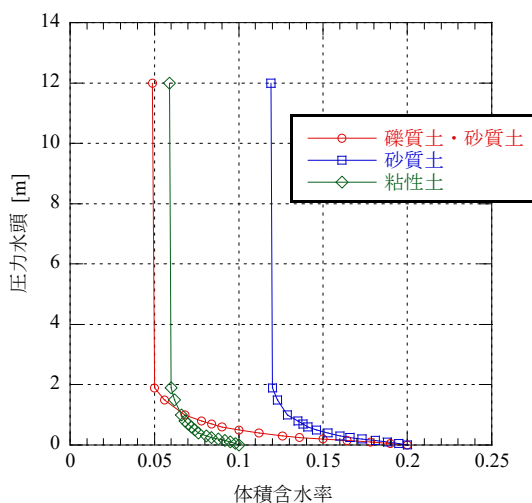


図-1 水分特性曲線のモデル曲線<sup>2)</sup>

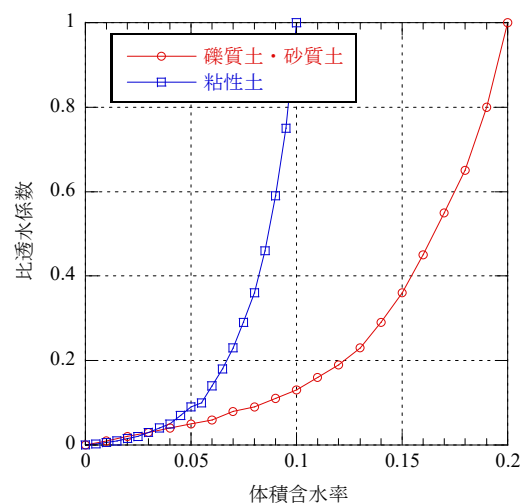


図-2 体積含水率-比透水係数の関係<sup>2)</sup>

おり、土質試験データを用いてモデルの妥当性の評価を行う。

## 2. 露点ミラー方式と簡易蒸発法による土の水分特性曲線の測定について

上述のように、従来の保水性試験では時間がかかるため、河川堤防の構造検討の手引き<sup>2)</sup>では3種類の土質に対応した水分特性曲線の参考値が与えられている(図-1, 図-2)。しかし、南九州地域の河川堤防には築堤材料にシラスが含まれている場合が多く、シラスにおいてそれらの参考値が適用可能であるのかは明らかではない。そこで本論文では露点ミラー方式と簡易蒸発法の2種類の保水性試験を組み合わせることにより、短時間で広範囲の水分特性曲線を得ることを目的とし、さらに水分特性曲線の参考値との比較を行った。

### 2.1 露点ミラー方式による水ポテンシャル測定の概要

露点ミラー方式により水ポテンシャルを測定できる装置(WP4C, decagon 社製)(写真-1)を用いて測定を行った。露点ミラー方式は、サンプルカップ(写真-2)内に設置した供試体の含水量によって、サンプルカップ内の空気中の水分量が変化し、最終的に平衡状態となる。その後、供試体の上部にあるミラーを冷却させ、ミラー周りの空気を冷やしていくことで、ある温度に達すると、内部のミラー表面に結露が生じる。露天温度が計測されることで、結露発生時の温度から飽和蒸気圧値が得られる。サンプルカップ内の供試体の水ポテンシャルと内部の空気の飽和蒸気圧が平衡していると考えられるため、サンプルカップ内の供試体の水ポテンシャルの測定が可能である。ここで、水ポテンシャルの絶対値がトータルサクションであり、トータルサクションは、浸透圧サクションとマトリックサクションの和である。マトリックサクションとは、水の表面張力により発揮されるサクションであり、浸透圧サクションとは、溶液の溶質濃度差による浸透圧がもたらすサクションである。そこで、浸透圧ポテンシャル $\varphi_o$ は次式で表される<sup>4)</sup>。



写真-1 WP4C 本体



写真-2 サンプルカップ

$$\varphi_o = \varphi_{os} \frac{\theta_s}{\theta} \quad (1)$$

ここに、 $\varphi_{os}$ :飽和時の水ポテンシャル、 $\theta_s$ :飽和時の体積含水率、 $\theta$ :測定時の体積含水率。

本試験では、WP4Cで飽和度100%の供試体の水ポテンシャルを測定し、それを $\varphi_{os}$ とした。試験により得られた水ポテンシャルと浸透圧サクションを用いてマトリックサクションが得られる。

### 2.2 水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置の概要

水分特定曲線・不飽和透水係数装置(以下HYPROP, UMS社)は、シンドラー法に基づき、簡易な計測方法で土の水分特性曲線と・不飽和透水係数を同時に測定できる装置である。図-3に示す2本の高さの異なるテンシオメータで土中の2点の負の間隙水圧を測定し、供試体の重量を電子天秤で計測することで、供試体の平均的な含水量を計測することができる。これらのデータから、土の水分特性曲線が得られる。また、供試体の上端から水が蒸発するため、土中で下端から上端へ向けた水の流れが生じる。2点で計測された負の間隙水圧をもとに動水勾配が求められ、電子天秤で蒸発量が測定されることから、蒸発量を流量とし、ダルシー則で不飽和透水係数が得

られる。この方法は、簡易蒸発法と呼ばれ、Wind<sup>5)</sup>によって、その原理が考えられた。また、HYPROPの計測方法は、Wind法の簡略法であり、Shindler<sup>6)</sup>によって確立された。粘土などの高いサクションを持つ材料にも適用するための方法がShindler et al.<sup>7)</sup>によって提案されている。テンシオメータのポーラスカップの空気流入量を考慮した手法もShindler et al.<sup>7)</sup>によって考えられている。簡易蒸発法の有効性については、Peters and Durner<sup>8)</sup>で検証されている。さらに、飽和に近い状態での流体的特性による乱れを取り除く手法が、Peters and Durner<sup>9)</sup>で提案されている。簡易蒸発法は、時間的に普遍的な流体特性に対するリチャードの式が適用できる状態にあり、van Genuchten Mualemモデル(van Genuchten<sup>10)</sup>)が適用できる状態にある土に対して良い結果を得ることができると言われている。

### 2.3 試験結果および考察

試験試料には、シラスを含む堤体土を用いた。WP4Cの供試体には2mmふるい通過試料を使用し、直径3.7mm、高さ4mm、 $e=1.05$ になるように締固めを行い、飽和度5%~100%の間で87回測定を行った。また、飽和度100%の水ポテンシャルをWP4Cにて10回測定し、その平均値を $\varphi_{os}$ とした。これらを式(1)に代入し、得られた浸透圧サクションをトータルサクションから引きマトリックサクションを導出した。一方、HYPROPの供試体には直径7.98cm、高さ5cmのものを使用し、 $e=1.05$ になるように締固め、供試体を一度飽和させた後、測定を開始した。

WP4Cにより測定されたトータルサクション、並びに式(1)より導出された浸透圧サクション、マトリックサクションを図-4に示す。WP4Cの測定結果において、 $20\% < S_r < 40\%$ でマトリックサクションが負の値を示し、 $S_r > 40\%$ では測定値に大ききばらつきがみられた。

WP4Cは高サクション域の計測に適した機器であることを踏まえると、 $S_r > 20\%$ でマトリックサクションが不確かな値となったことから、WP4Cで測定可能な範囲が決まっており、今回の試料において、およそ $S_r < 20\%$ までの測定範囲であると推測できる。

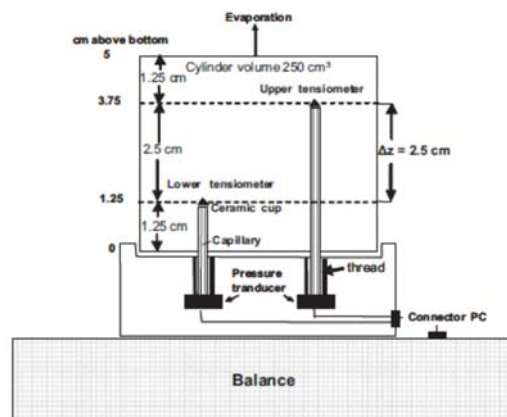


図-3 HYPROP 概要図<sup>7)</sup>



写真-3 HYPROP のペデスタル

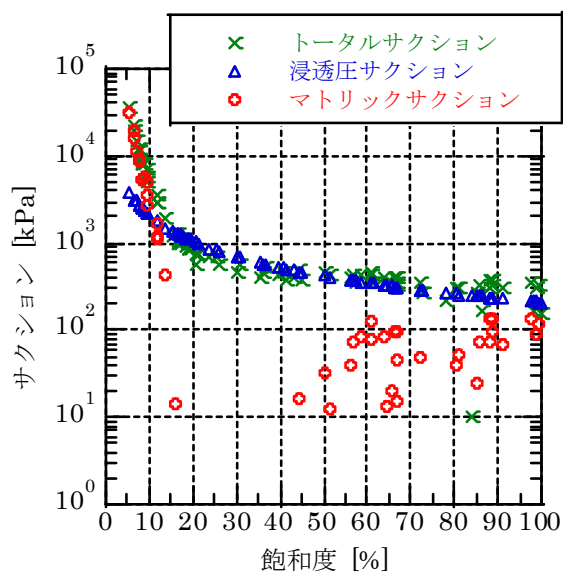


図-4 WP4Cで計測された水分特性曲線

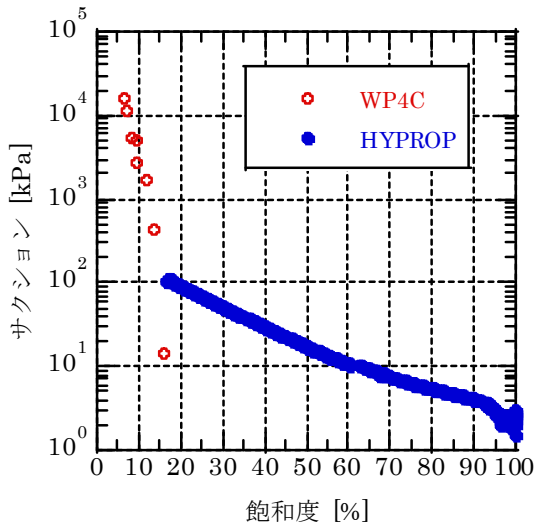


図-5 WP4C と HYPROP により得られた水分特性曲線

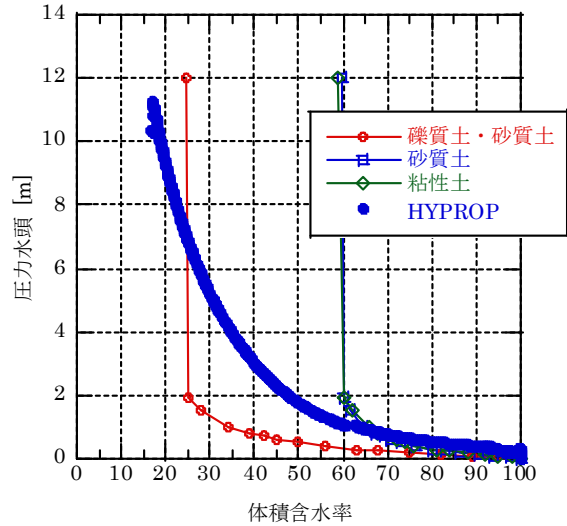


図-6 水分特性曲線の参考値と保水性試験による水分特性曲線の比較

図-5 に WP4C で得られた  $S_r < 20\%$  までの範囲の水分特性曲線と HYPROP で得られた水分特性曲線の結果を示す。HYPROP では  $16\% < S_r < 100\%$  の間で測定が可能であった。 $S_r < 20\%$  の WP4C の結果と、 $16\% < S_r < 100\%$  の HYPROP の結果を比較すると、WP4C の水分特性曲線が、HYPROP の水分特性曲線を補完するようなプロットになっていることが分かる。また WP4C の 1 回の測定時間はおよそ 15 分から 20 分で、HYPROP の測定期間はおよそ 17 日であった。供試体は、細粒分 (0.075mm 未満) が 15% 以上 50% 未満であることから細粒分まじり砂 SF であり、これらは水分特性曲線の参考値では砂質土に対応している。河川堤防の浸透流解析に用いられている 3 種類の土質に対しての水分特性曲線の参考値の横軸を飽和度に換算し、試験より得られた水分特性曲線と比較した結果を図-6 に示す。参考値と試験値を比較すると、 $60\% < S_r < 100\%$  の範囲において砂質土の参考値で表すことのできる可能性が示唆された。

また、HYPROP では、水分特性曲線と同時に不飽和透水係数が計測可能である。しかしながら、今回用いたシラスを含む堤体土では、十分な結果が得られなかった。そこで、装置の特性を把握するために豊浦標準砂を用いた試験を実施した。図-7 に試験結果を示す。豊浦砂の測定結果は、圧力水頭は体積含水率が増加するにつれて圧力水頭が減少するという一般的な傾向がみられ、圧力水頭も豊浦砂で計測される範囲の値を示していることがわかる。不飽和透水係数については、飽和透水係数で除した相対透水係数 (比透水係数) で表しており、体積含水率が低下するとともに相対透

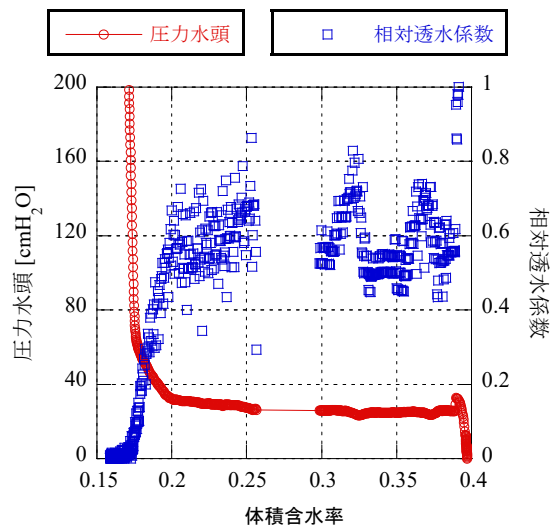


図-7 水分特性曲線と相対透水係数の試験結果

水係数が低下する傾向が得られている。しかし、**図-7**に示す結果では飽和透水係数が得られないため、相対透水係数（比透水係数）を得るためにどの透水係数で除すことの検討が必要である。また、不飽和透水係数そのものの値は、一般的な豊浦砂の値より  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  オーダで小さくなっており、その信頼性については今後検討が必要である。また、相対透水係数と体積含水率の曲線はその土の透水性の水分依存性を把握するために利用できる可能性がある。また、相対透水係数の関数形は、**図-2**に示すモデルとはかなり異なることがわかる。今後、データの蓄積を行い、どのような関数形になるか検討していく必要がある。

### 3. 水分特性曲線に関する概念モデルの検証

著者らが提案する概念モデル（以降、間隙モデルと称す）は、一般的な土質パラメータ（粒径加積曲線、間隙比、土粒子密度）から不飽和土の保水・浸透特性を表す水分特性曲線や不飽和・飽和透水係数を算出することができるモデルである<sup>3)</sup>。また、水分特性曲線や不飽和・飽和透水係数に関する試験結果が一点でもあれば、土の間隙径分布も算定することが出来る特徴を有している。本研究では、上述した土質試験結果を用いたモデルの妥当性の検証を行った。**図-8**に間隙モデルで用いる基本粒状態モデルを示す。このモデルを基本に、粒度分布および間隙比から、土中の間隙径分布を推測し、体積含水率（飽和度）および水分特性曲線を計算し

表-1 入力パラメータ

試料		鹿屋堤体土	
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )		2.48	
水の表面張力 (N/m)		73.48*10 <sup>-3</sup>	
水の粘性係数 (Pa・s)		1.138**10 <sup>-3</sup>	
分割数		360	
円管の傾き $\theta$ の p.d.f の最低高さ $\xi_0$		0.159	
間隙比		1.05	
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	4.25	0.002
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	5.41	0.004
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	8.88	0.007
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	10.81	0.010
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	13.13	0.014
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	16.6	0.023
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	18.92	0.035
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	20.46	0.049
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	45.75	0.075
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	49.58	0.106
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	66.55	0.250
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	78.42	0.425
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	89.02	0.850
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	94.58	2.000
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	97.32	4.750
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)	98.98	9.500

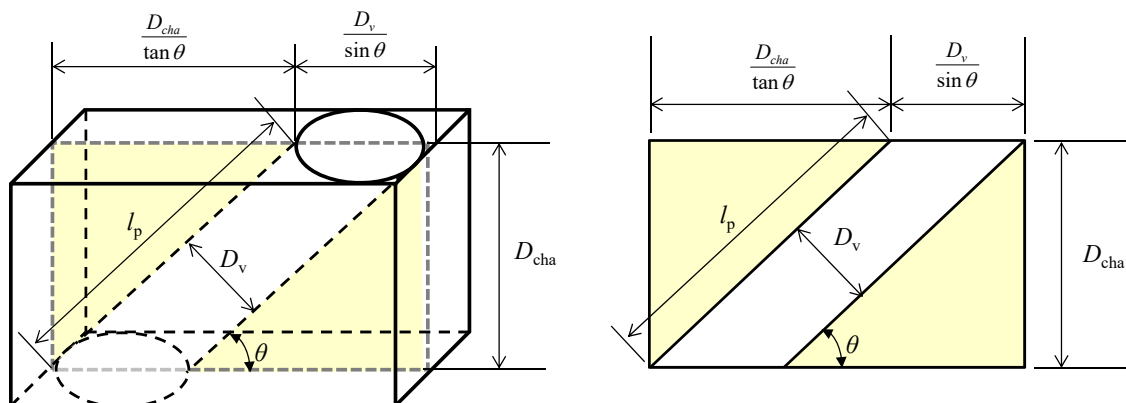


図-8 基本粒状態モデルの幾何学的関係

ている。図中の  $D_v$  は、間隙を表す円筒の直径、 $\theta$  は円筒の傾き、 $l_p$  は円筒の長さ、 $D_{cha}$  は基本粒状状態モデルの高さを表している。 $D_{cha}$  として 10% 通過粒径  $D_{10}$  を用いている。

表-1 に間隙モデルに用いる入力パラメータを示す。入力パラメータとして、土粒子密度、間隙比、粒径加積曲線の一般的な土質試験から得られるデータが必要となる。図-9 に間隙モデルで計算された結果と保水性試験結果を比較した結果を示す。図より、間隙モデルの計算結果は、HYPROP による試験結果よりも保水性が低い値を示している。間隙モデルには、水分特性曲線に寄与する間隙水を考慮して、間隙径分布を修正することで、試験結果に近い結果を得る機能があり、試験結果があれば、より試験結果に近い水分特性曲線を得ることができる。今後、より多くの試験結果との比較から、間隙モデルの妥当性検証を行いたい。このモデルの妥当性が検証されれば、一般的な土質パラメータが得られれば、土の保水性を予測することが可能となる。

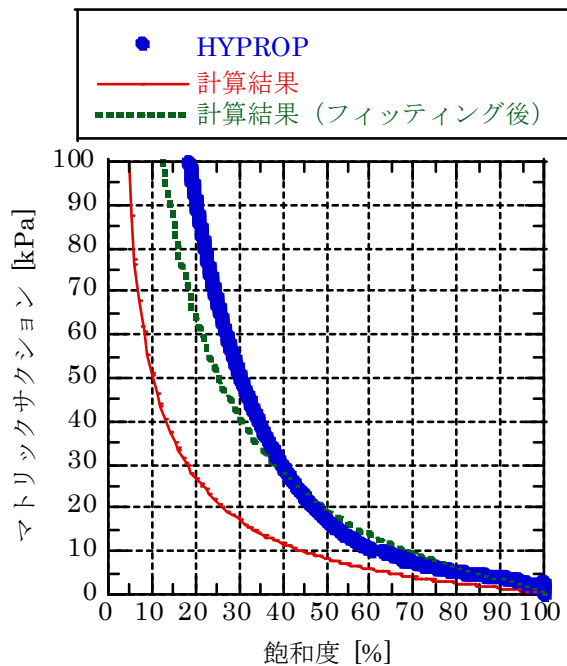


図-9 間隙モデルの結果と HYPROP の結果の比較

#### 4. 鹿児島県内における土試料の収集

著者らは、鹿児島県版地盤情報データベースの構築に取り組んできており、12000 本を超えるボーリングデータの蓄積を行ってきた<sup>1)</sup>。ボーリングデータについては、土質試験データも附属指定場合もあるが、ほとんどのケースで土質試験が含まれていない。また、山間部のボーリングデータが少ないこと、不飽和土に関する保水・浸透特性、強度特性に関する情報が含まれていないなどの課題がある。そこで、鹿児島県内において土試料を採取し、それらの土質試験データおよび不飽和土に関する土質パラメータの蓄積を行っていくことを計画している。そこで、今回収集した土試料の採取箇所について紹介する。



写真-4 崩壊直後の状況

まず、一箇所目は、平成 30 年 7 月 7 日に鹿児島市古里町の国道 224 号沿いの斜面で発生した斜面崩壊箇所であり、鹿児島県内の崩壊箇所の土質パラメータを蓄積していくことを目的に調査を行った。写真-4 は、調査箇所の崩壊直後の写真を示す。写真-4 からわかる様に、崩壊直後にも

かかわらず、道路上にはあまり土砂が堆積しておらず、道路下に流下していた。崩壊発生当時の雨量（図-10）は、鹿児島県河川砂防情報システム（第一古里川流域（国））によると、連続雨量が200mmに達した午後15時頃に国道が通行止めとなったあと、連続雨量約270mmに達した午後17時頃に被災が確認された。

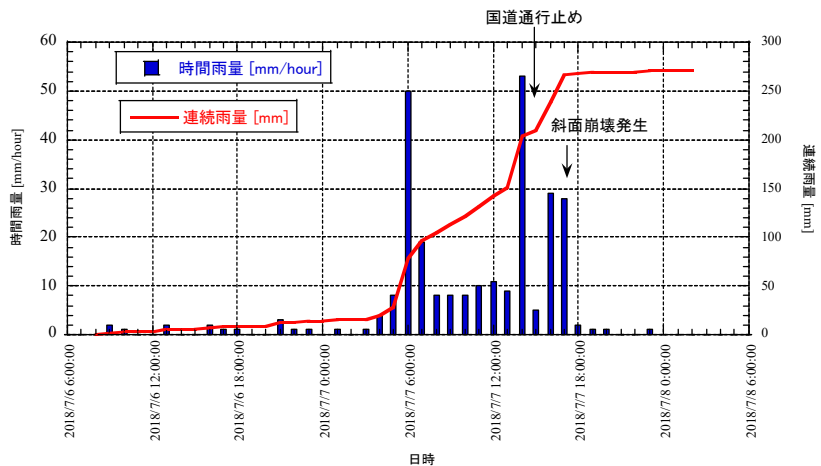


図-10 2018年7月6日午前6時～7月8日午前6時の雨量（鹿児島県河川砂防情報システム，第一古里川流域（国））

発生直後は、多くの水を含んだ表土とボラが国道へ流出しており、斜面の上部の土砂が多くの雨水とともに崩壊したものと推察される。写真-5に崩壊発生約1ヶ月後の晴天時に試料採取した際の斜面表層部の写真を示す。粗粒分の堆積層の上に細粒分が堆積していた。粗粒分の層は非常に崩れやすい状態であるが、表面を細粒分の薄い層が覆うことで約20cmの厚さ、約35度の角度で安定していた。粗粒分と細粒分の互層は幾重にも重なっていたことから、この斜面では過去に何度も斜面崩壊が繰り返されていることが予想される。



写真-5 崩壊箇所の表層土の状況

写真-6は、鹿児島市郡山にある土取り場の様子である。この場所では、試料の採取の土質試験に加え、簡易貫入試験、現場の簡易透水試験などを実施した。今後は、長期的に斜面の状態の変化を調査する予定である。現地で採取された土については、土質試験を実施後に、WP4CおよびHYPROPによる保水性および浸透特性に関する試験を実施し、データの蓄積を行う。



写真-6 鹿児島市内の土取り場

## 5. おわりに

本研究では、鹿児島県に分布する特殊土に関する土質試験や不飽和土の保水・浸透特性の試験

データの蓄積を目的に、露点ミラー方式と簡易蒸発法の2種類の保水性試験を行った。実験結果の組み合わせにより従来の試験法より、短時間で広範囲の水分特性曲線を得られるという可能性が示唆された。また砂質土の水分特性曲線の参考値との比較において、しらすを含む鹿屋堤体土では砂質土の参考値で評価できる可能性があるものの、今回の結果のみで判断するのは難しく、今後、データの蓄積を行い、他の保水性試験の結果と比較し、検討していく必要がある。また、得られた試験結果を用いて概念モデルの妥当性の検証を行った。今後は、土の種類のパラメータの影響などを考察し、一般的な土質試験データから、不飽和土の保水・透水特性を推測できるモデルの精度向上を目指す。

謝意：試料採取に関して、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所、株式会社レモン通商の協力を得た。また、土質試験に関して、鹿児島大学工学部海洋土木工学科の地盤工学研究室の学生諸君に協力いただいた。ここに謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和－不飽和浸透流解析，土木学会論文集，No.264，pp.87-96，1977。
- 2) 財団法人国土技術センター編：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），JICE 資料，第 111002 号，2012。
- 3) K.Sako and R.Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 4) Andraski, B. J. and Scanlon B. R. : Thermocouple Psychrometry, In Dane, J. H. and Topp, G. C.(ed.) Methods of soil analysis. Part 4 Physical Methods, SSSA Book Ser.5. ASA and SSSA, Madison, WI. pp.609-642, 2002.
- 5) Wind : Capillary conductivity data estimated by a simple method,1968.
- 6) Schindler: Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeitim teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk. Berlin 24, pp.1-7, 1980.
- 7) Schindler: The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup, 2010.
- 8) A.Peter, W.Durner: Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties, 2008.
- 9) Peter,A., Durner,W: Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments, 2006.
- 10) M. TH. VAN GENUCHTEN: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, 1980.
- 11) 酒匂一成，北村良介，中田文雄，田中義人：地盤情報データベースの利用法，平成 29 年度自然災害研究協議会西部地区部会報・研究論文集，42 号，pp.25-28，2018。