

簡易原位置注水実験による試験風化花崗岩残積土の吸水・保水特性の検討

塚田 靖崇¹・北岡 貴文^{1*}・大津 宏康¹・Pipatpongsa Thirapong¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

*E-mail: kitaoka.takafumi.6e@kyoto-u.ac.jp

近年、降雨に起因する土砂災害の発生頻度が増加しつつある状況下で、地質条件としては、風化花崗岩斜面での崩壊事例が多い。特に、風化作用により形成された残積土（まさ土）は、乾燥時には堅固であるが、湿潤に伴い顕著な強度低下特性を示すことが知られている。したがって、風化花崗岩残積土からなる斜面の降雨時の安定性を評価する上では、浸透・保水特性を把握することが極めて重要である。

このような背景から、本研究ではタイ・チェンマイの風化花崗岩残積土を用いた盛土斜面で実施した簡易な注水試験結果における、注水量および深度方向での体積含水率の計測結果に基づき、風化花崗岩残積土（まさ土）の浸透・保水特性について検討を加える。

Key Words : *in-situ experiments, infiltration test, volumetric moisture content, water retention, SWCC*

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う気候変動により、局地的大雨と呼ばれるような短期間集中豪雨が頻発しており、このような降雨に起因する土砂災害の発生頻度が増加しつつある¹⁾。地質条件としては、日本では風化花崗岩斜面での崩壊事例が多い。また、日本における花崗岩質岩体の地盤は、日本国土面積の13%強を占め、一種類の岩種では最大の面積を占めている²⁾。特に、花崗岩の風化作用により形成された残積土（まさ土）は、乾燥時には堅固であるが、湿潤に伴い顕著な強度低下特性を示すことが知られている³⁾。従って、風化花崗岩残積土からなる斜面の降雨時の安定性を評価する上では、風化花崗岩残積土からなる地盤における、浸透・保水特性を把握することが極めて重要である。

不飽和度の浸透特性の実践的な原位置計測方法としていくつかの方法が提案されている⁴⁾。既往の研究において、Touma&Alberge⁵⁾は、人工降雨による浸透とダブルリングを用いた一定水頭による浸透との、地盤内の挙動を比較している。この中で筆者らは、両者の土壌水分量と圧力水頭の関係に大きな差異はないと示している。また、ダブルリング浸透法においては、斜面表層において飽和に近い状態が確認できる。従って、ダブルリング浸透法の方が人工降雨による浸透法よりも、不飽和の土壌水分特性を決定するためにより適していると言及してい

る。ここから、比較的信頼性の高い試験方法は、Instantaneous Profile Method⁶⁾であると考えられる。この方法では、地表面から定水頭状態で浸透させ、地盤内に鉛直一次元の非定常浸透流を発生させている。浸透領域内の鉛直方向の圧力水頭分布と土壌水分量分布の経時変化を測定すれば、対象領域の不飽和透水係数と水分特性曲線を計測することが可能である。しかし、これらの計測にはテンシオメータ等の間隙水圧計や土壌水分計などの複数のセンサーの埋設が必要となる。多大な労力と時間を要するため、その実施は必ずしも容易ではないのが現状である。また、テンシオメータは大型の物が多く、透水性が低い地盤において、この方法で浸透の挙動を計測しやすい地盤表層部に埋蔵することが難しい。表層付近の原位置における飽和・不飽和浸透特性を把握することが難しいのが現状である。上記のことから、降雨浸透による体積含水率（Volumetric Moisture Contents, 以後VMCと称す。）の挙動や、不飽和土の特性として、深度方向による吸水および排水過程の挙動、不飽和状態へ変遷するときのサクション（Air Entry Value, 以後AEVと称す。）といった特性などの斜面安定に関する原位置における十分なデータは蓄積されていない。

そこで本研究では、細粒分が比較的に多く含まれる風化花崗岩残積土からなる盛土斜面を対象とし、斜面表層付近の土壌水分量の変化に着目した簡易的な原位置注水試験を実施した。具体的には、連続注水による浸透能の

低下とVMCの変化、VMCの変化の土被り圧依存性、注水時および注水停止後の保水特性、排水過程およびSWCC（Soil-Water Characteristic Curve）におけるAEVを上回るサクションでの遷移領域⁷⁾へ移行する時のVMCの特性等について検討を加えた。

2. 簡易的な原位置注水試験の概要

筆者ら⁸⁾は、これまでの注水試験および原位置試験の結果から、VMCの変動は、図-1に示されるような特性が見られることを把握している。A点は、浸透によりVMCが上がり始めるときの点である。B点は、急激なVMCの増加が終わり、疑似的飽和状態⁹⁾に達した時の点である。疑似的飽和状態とは、間隙中に取り込まれた封入空気のために完全な飽和状態ではない、現場での飽和状態である。C点は、最大のVMCの点である。D点は、VMCが下がり始め、疑似的平衡状態⁷⁾に達し、緩やかなVMCの減少が見られるようになる点である。E点は、飽和状態から空気が浸入することで、AEVに相当する可能性のあるVMCと定義した。このようなVMCの変化に着目し、VMCを測るという簡易的な方法を用いて土壌の浸透・保水特性を把握することを目的として、注水試験を実施した。

(1) 実験地盤の特性

対象斜面にて粒度試験を行った結果を図-2に示す。深度20cm、40cm、60cmで粒径0.075mm以下の割合はそれぞれ、55.5%、40.4%、35.1%であり、粒径2mm以上の割合はそれぞれ、6.7%、12.8%、10.1%である。ここから、当該斜面は細粒分が多いが、最大粒径も大きく礫混じりな土であることが分かる。また、深度方向の比較として、浅層部は、細粒分含有率が高く、細粒分が卓越している地盤であると判断できる。

(2) 原位置注水試験装置及び手法

本研究で用いた原位置注水試験装置を図-3に示す。アクリル製の浸潤筒、土壌水分計を用いて行った。実験には、誘電率タイプの土壌水分計（DECAGON社製のEC-5）を用い、VMCを計測した。図-3に示すように、土壌水分計は地表面から深度5cm、10cm、20cm、30cmの4か所に設置した。なお、土壌水分計は地盤内に挿入しやすいようにアクリルパイプの中に固定し、先端部分が浸潤筒の中心の真下になるように地盤内に挿入している。実験には浸潤筒は、直径20cmのものをを用い、不飽和地盤に1cm静的に貫入させた。

実験手法は、浸潤筒内に注水し一定水位を保つという

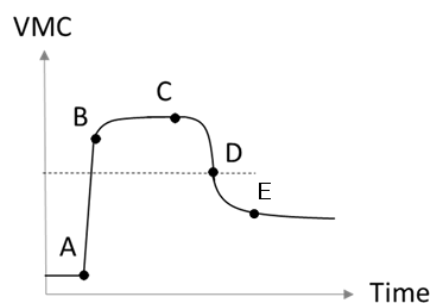


図-1 注水後のVMCの時間変化の概念図

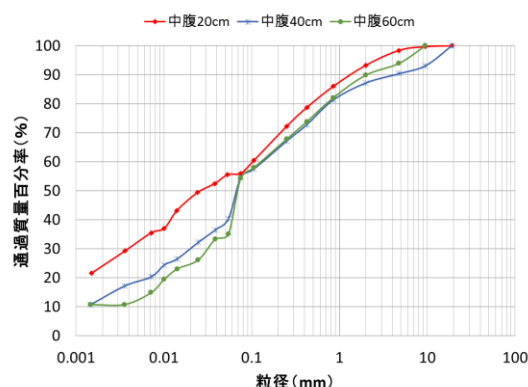


図-2 深度方向の粒径加積曲線

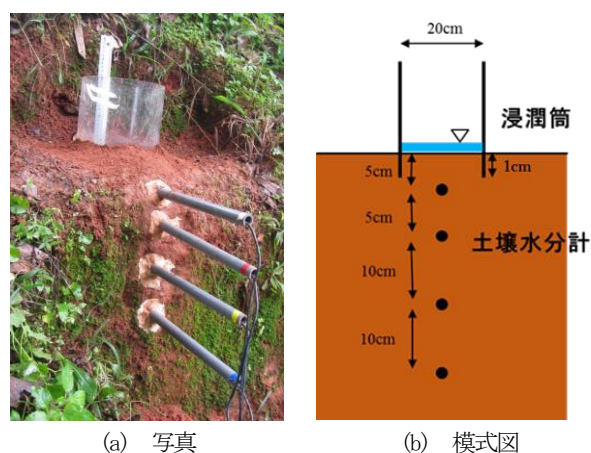


図-3 注水試験装置

ものである。注水量、注水時刻及びその下部のVMCを計測することで、不飽和地盤における鉛直浸透挙動を調べた。注水を終えたのち、地表面からの蒸発による排水を遮断するために、浸潤筒の上部を食品用ラップフィルムで覆い、排水時の体積含水率の変化を計測した。

本研究において、風化花崗岩残積土からなる地盤における、浸透・保水特性を把握するために、大きく2種類の注水・排水条件を変えた原位置注水試験を行った。

1つ目は、連続注水試験である。これは、30分間の注水後、浸潤筒内部の水面が消散したことを確認したのち、20分程度の排水を確保し、再度同様の注水を行い、そのVMCの変化を計測する試験である。4回の注水を1セットとして試験を行った。この時間間隔は、筆者らが透水

表-1 注水試験の概要

実験No.	日付	開始時刻	終了時刻	注水量(ml)	注水時間(min)	注水高さ(cm)	排水時間(min)
1	2017/7/17	11:45	12:05	3800	20	2	75
2		13:25	13:45	1550	20	2	55
3		14:55	15:55	2220	60	2	1020
4	2017/7/18	11:15	11:45	2020	30	2	180
5		15:02	15:32	1250	30	2	20
6		16:22	16:52	870	30	2	1020
7	2017/7/19	10:00	10:30	1380	30	2	20
8		11:05	11:35	1210	30	2	65
9		13:00	13:30	1925	30	2	23
10		14:05	13:35	1525	30	2	30
11		16:05	17:05	1800	60	2	960
12	2017/7/20	10:00	10:30	2400	30	3	20
13		11:15	11:45	1400	30	3	40
14		13:10	13:40	1450	30	3	55
15		15:20	15:30	1250	30	3	990
16	2017/7/21	9:30	10:00	1240	30	2	35
17		11:05	12:05	950	60	2	1380

性の高い地盤で行った同様の実験⁹をもとに、透水性の低い当該地盤において、十分な吸水を行える時間として設定した。この実験は、連続的に降雨が発生した際の、地盤内の浸透・保水特性の把握を目的としている。また、注水高さ（筒内水位）を変えた連続注水試験を行った。これは、降雨強度が異なる場合の地盤内の浸透・保水特性の違いの把握を目的としている。2つ目は、排水時間を確保した注水試験である。これは、60分間の注水を行ったのち、半日以上排水時間を確保し、VMCの変化を計測する試験である。この試験では、排水過程における保水特性や、深度方向での排水特性の違いの把握を目的としている。表-1に実施した注水試験の概要を示す。表中のNo.3, No.11, No.17が排水時間を確保した注水試験である。

3. 原位置注水試験の結果

(1) 注水率の結果

図-4に、注水率の時間変化を示す。注水率とは、1分あたりの注水強度を表す。図中のNo.4に着目すると、時間経過とともに注水率が低下していることが分かる。これはHorton⁹が示す、地盤の浸透能は時間経過とともに低下し、ある一定値に収束することと整合性が見られる。浸透能とは、水が土中にしみこむ程度を表す指標であり、ここでの浸透とは、鉛直浸透量だけでなく、土壤に保持される土壤水分量を含んでいる。図中のほかの2回の注水では、注水率の低下の傾向が見られず、ほぼ一定の値を示している。これは、No.4は前回の注水から十分な排水時間を確保してから注水であったのに対して、No.5とNo.6は、No.4で十分に注水した後の注水であるため、注水当初から浸透能が低下した状態であったと考えられる。このような傾向は、本試験のすべての注水で見

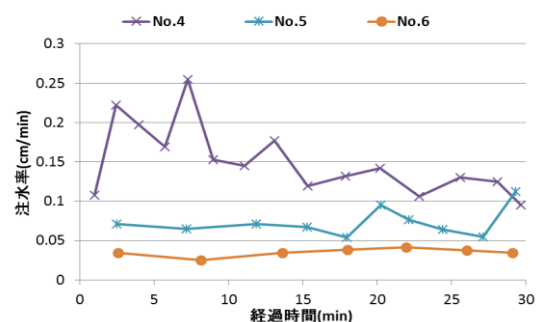


図-4 注水率の時間変化

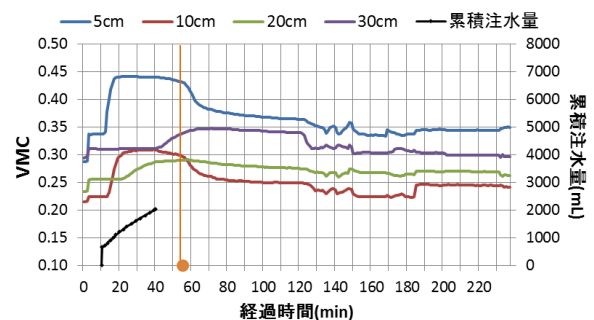


図-5 VMCの時間変化

られ、注水率は0.0 2~0.15cm/min程度に収れんしていた。ここから、本試験においては、疑似的飽和状態まで十分に注水できていると判断する。そのため、風化花崗岩残積土からなる地盤において、十分に吸水したのち排水されるといった過程が計測されたと考えることができる。

(2) VMCの変化

注水No.4のVMCの変化を、図-5に示す。吸水に着目すると、5cmでは注水後すぐにVMCの上昇が見られ、その後、2分後に10cmのVMCの上昇がすぐ見られた。20cmや30cmでは、11分後、30分後と時間遅れを伴い上昇している。このように、深度方向に時間遅れが生じている。これは、地表面から鉛直方向に浸透しているため、深い部分への

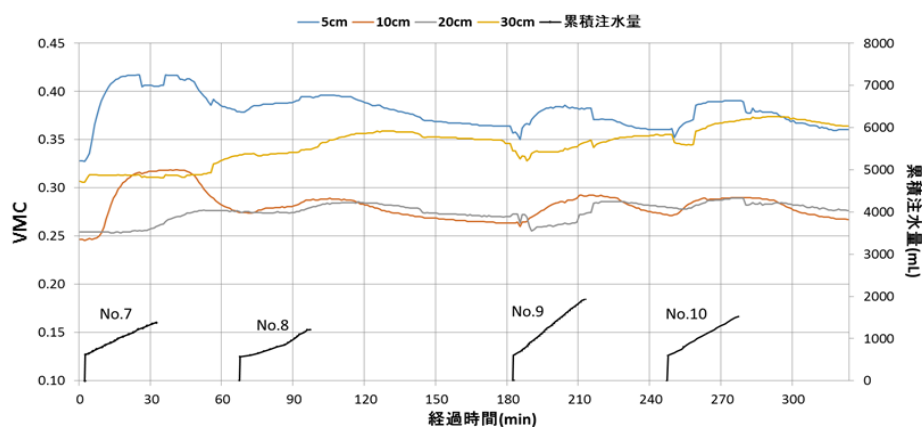


図-6 注水高さ2cmの連続注水試験の結果

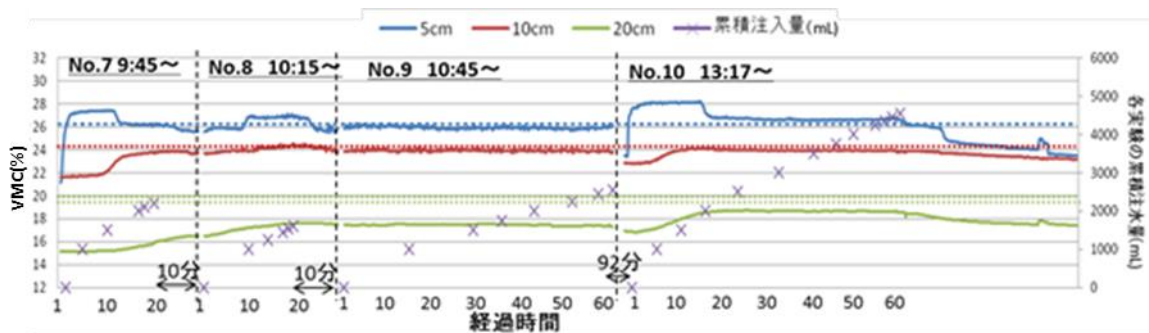


図-7 既往の連続注水試験の結果⁹⁾

浸透に時間を要するためである。またここから、地表面からの浸透が、水みちなどに遮られることなく鉛直方に浸透していると考えることができる。次に排水に着目する。オレンジの線は浸潤筒内部の水が消散した時間を示している。表層部において、筒内部の水面がなくなるとVMCの減少が見られる。ここから、水分の供給を停止すると、鉛直方向の浸透が卓越することが分かり、正しく排水の挙動が計測されていると考える。深部においても、時間遅れは生じているが、VMCの減少が見られる。120分付近のVMCの振幅は、排水中に高強度の降雨が降ったため、VMCの変動が生じたためと考える。

これらのVMCの変化から、本方法において、鉛直方向の浸透・排水の挙動が計測できていると考える。

4. 原位置注水試験に対する考察

(1) 連続注水試験に対する考察

図-6に注水高さ2cmで行った連続注水試験(No.7~No.10)を示す。本実験で行った注水に対しても、図-1に示すような逆コの字型のVMCの変化が見られる。

図-6において、連続的に注水するにしたがって、逆コの字型の大きさが小さくなっていることが分かる。この傾向は、浅層部において明確に見られる。ここから、注水を続けるにしたがって、地盤内に保持できる水分量が

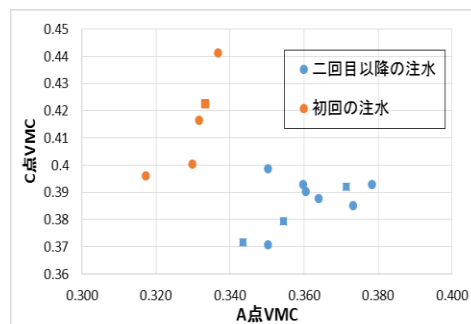


図-8 深度5cmにおけるA点とC点の関係

小さくなることが考えられる。そして、図-4に見られるような浸透能の低下を引き起こすと考える。

図-7に筆者らが過去にプーケット地盤で行った原位置注水試験⁹⁾の結果を示す。図-7に示すように、当該地盤に比べ細粒分の少ないプーケット地盤での結果においても、逆コの字型の大きさ、つまりC点の値が連続注水に伴い小さくなっていることが分かる。すなわち、地盤の特性によらず、地盤の保水性は初期VMCに依存すると考える。また、浅層部では、当該地盤と同様に、逆コの字型が明瞭であり、D点の挙動が確認されている。しかしながら、B点からD点に至るまでの時間の長さは、細粒分を多く含む本研究サイトの地盤の方が長かったことから、細粒分の多寡による、保水特性の違いは見られた。

図-8に、図-1に示すA点とC点の関係を示す。オレンジ色で示す各日初回の注水では、A点が小さく、C点が

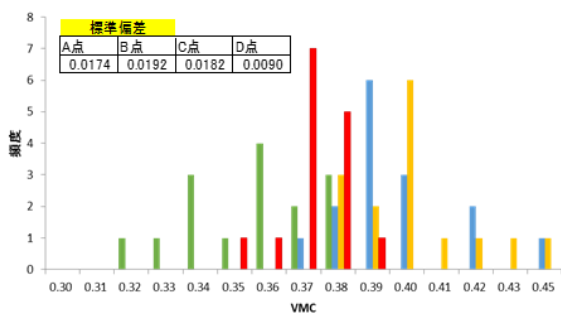


図-9 深度5cmにおける各点のヒストグラム

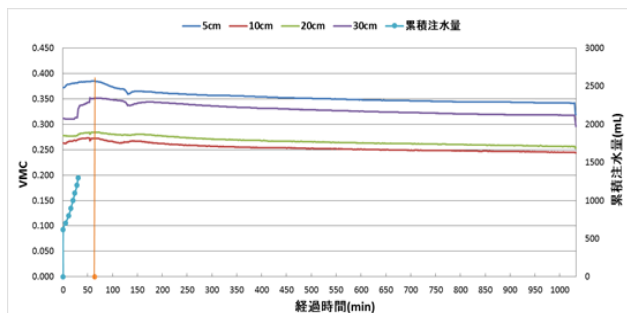


図-10 排水時間を確保した注水試験の結果

大きくなっていることが分かる。ここから、A点つまり初期VMCが小さいほど、VMCが大きな値をとり、多くの水分が保水されることが分かる。図-8の四角のマークは、注水高さ3cmの注水試験を示している。ここからは、明確な相関は見られない。注水高さは筒内部の水位である。つまり、地盤に与えられる筒断面積当たりの一定の水分量であり、降雨強度を表している。ここから、降雨強度が地盤表層の保水性に大きく影響しないと考えられる。すなわち、逆コの字型の大きさで表される地盤の保水性は、降雨強度よりも、初期の地盤内の水分状態に依存していると考えられる。

20cmのNo.7, No.8の注水に着目すると、時間遅れを伴い、VMCが上昇し、一定の値を取り、次の注水でもう一度上昇している。これは、浅層部は疑似的飽和状態になっていたのに対して、20cmでは、一回目の注水では十分な水分供給を得られなかったため、二回目の注水で再度上昇したと考える。ここから、表層が疑似的飽和になっても、深部では不飽和領域が存在していると考えられる。また、一回目に比べて二回目の注水では、20cmの時間遅れが少ない。このことから、初期VMCが小さく乾燥している地盤では、表面に水分が多く貯留されるために、深部への浸透が遅いのに対して、初期VMCが高く湿っている地盤では、表面に貯留される水分が少ないため、深部への浸透が早く表れると考える。これらのことから、表層における明確な逆コの字型が見られない時には、地盤の保水性が低く、深部への浸透が卓越していると考えられることができる。

次に深度方向に着目する。浅層部の5cm, 10cmにおい

ては、注水に対して明確な逆コの字型の変化が見られるが、20cm, 30cmにおいては、明確な逆コの字型が表れていない。Ngら¹⁰⁾は、不飽和地盤内における土の保水特性を評価する指標であるSWCCについて次のように言及している。原位置においては、深度増加に伴い、SWCCにおけるヒステリシスループは縮小し、十分な深度においては、ヒステリシスの影響を無視できると述べている。また、深部では、VMCの変動が小さくなることを示している。これは、拘束圧の影響で空隙の幾何学的形状が均質化するためや、水分の増加による空隙の膨張が抑制されるために起因すると言われている。ここから、深度とともに増加する土被り圧の影響で、空隙内部に水分が吸着されにくくなったためと考える。つまり、土被り圧の影響で、深度方向に保水性が小さくなることが示された。すなわち、深部においてはヒステリシスの影響が少ないことが推察される。

次に、排水に関して考える。平衡状態での排水の開始点であるD点に着目する。図-9に各点のヒストグラム及び標準偏差を示す。ここから分かるように、D点はほかの点に比べてばらつきが少なく、どのような注水に関してもほぼ同じ値を示している。図-6に示すNo.7の注水のように、下部の飽和度が低いと、非定常状態で一過性の過大な保水性が観測されるが、比較的短時間にD点に移行する。No.8以降の連続注水のように、下部の飽和度が高まると、C点とD点の差異が小さくなる。ここから、同一地盤の排水過程は、降雨強度や初期VMCの影響は小さく、同じような過程をとると考える。これは、排水過程では重力による鉛直浸透により排水されるため、吸水過程の影響が小さいためと考える。しかし、本実験において蒸発散による排水を遮ったが、現場では蒸発散の影響によりD点にばらつきが生じる可能性はある。

(2) 排水時間を確保した注水試験に対する考察

排水時間を確保した注水試験の結果を図-10に示す。AEVに関する議論をする際には、サクシオンを計測する必要があるが、本実験では、VMCの計測のみである。ここでは、AEVに相当する可能性のある、VMCを対象とした議論である。図に示されるように、明確な排水性の深度依存性や吸水過程の影響を見ることが難しい。すなわち、SWCCの排水過程を議論するうえで重要な、AEVを上回るサクシオンでの遷移領域へ移行する時のVMCを、本実験から特定することは難しいと考える。対象としている地盤は細粒分を多く含んでいることから、E点を把握するには至らなかった。Hungら¹¹⁾は、細粒分が多い土のSWCCにおいては、AEV以下の勾配が大きく、VMCの変化が大きいと及している。ここから、SWCCにおける遷移領域への移行する時のVMCを特定するためには、実験の排水時間をもっと確保し、VMCの長期

的な変化を考察する必要があると考える。

5. まとめ

本研究では、風化花崗岩残積土からなる地盤における、浸透・保水特性を把握するために、単一の湿潤リングと差し込み型の小型土壌水分計を用いた簡易的な原位置中水試験を行った。得られた知見について下記にまとめる。

- 連続的に注水することによって、地盤の保水性が小さくなることが示された。また、地盤の保水性は降雨強度よりも初期VMCに依存しており、乾いている土ほど保水性が高く、VMCが大きくなることが明らかになった。
 - また、斜面表層の保水性が小さい状態では、鉛直浸透の時間遅れが少なく、深部への浸透が卓越することが示された。
 - 逆コの字型の深度方向の関係から、深さにより土被り圧の影響で保水性が小さくなることが示された。すなわち、深部におけるヒステリシスの影響は少ないと推察される。
 - 排水に関して、D点は注水条件によらず、ある程度まとまった値をとったことから、排水過程は吸水過程の影響をあまり受けないことが示された。
 - 細粒分を多く含む斜面では、短時間のVMCの経時変化からは、SWCCにおける遷移領域へ移行する時のVMCを求めることは困難であると示された。
- これらの観点から、さらなる表層の地盤状態を正しく把握することが、重要であることを指摘した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、カセサート大学（タイ）のSuttisak准教授には現地における場所を提供して頂いた。また、同大学の博士課程後期のDamrong様には、

現地における補助作業、通訳を行って頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 片岡順：土石流の発生及びの予測に関する研究，文部科学省研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」研究成果，1990.
- 2) Miyashiro, A. : Evolution of metamorphic belts, *Journal of Petrology*.2(3), pp.277-312, 1961.
- 3) Phien-wej, N., Nutalaya, P., Aung, Z. and Zhibin, T. : *Catastrophic Landslides and Debris Flows in Thailand*, Engineering Geology, pp. 93-100, 1993.
- 4) Houston, S. L. and Fredlund, D. G. : Unsaturated soil engineering practice, *Geotechnical special publication*, No.68, ASCE, pp.146-161, 1997.
- 5) Touma, J. and Albergel, J. : Determining soil hydrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments: a comparison, *Journal of Hydrology*, No.135, Elsevier Science Publishers B. V., pp.73-86, 1992.
- 6) 社団法人地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価，pp.67-76，丸善，2004.
- 7) Delwyn G. Fredlund and Sandra L. Houston : Protocol for the assessment of unsaturated soil properties in geotechnical engineering practice, *Can. Geotech. J.*, Vol.46, NRC Canada, pp.694-707, 2009.
- 8) 磯部直哉，大津宏康，北岡貴文：原位置試験結果に基づく降雨に伴う浸透能の低下に関する研究，第44回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.34-39，2016.
- 9) Horton, E. R. : An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity, *Soil Sci. Soc. Am.*, Proc.5, pp.399-417, 1940.
- 10) Ng, C. W. W. and Leung A. K. : Geotechnical problems and case histories from the perspective of unsaturated soil mechanics, *Unsaturated Soils – Alonso&Gens(eds)*, Taylor & Francis Group, London, pp.53-90, 2011.
- 11) Hung Q. Pham and Delwyn G. Fredlund : Equations for the entire soil-water characteristic curve of a volume change soil, *Can. Geotech. J.*, Vol.45, NRC Canada, pp.443-453, 2008.

AN INVESTIGATION ON CHARACTERISTICS OF MOISTURE INFILTRATION AND RETENTION IN WEATHERED GRANITE RESIDUAL SOIL BY SIMPLIFIED FIELD INJECTION TEST

Yasutaka TSUKADA, Takafumi KITAOKA, Hiroyasu OHTSU, Pipatpongsa THIRAPONG

Recently, under the situation that the frequency of the landslide disaster due to the rain is increasing, there are many collapse examples at the weathering granite slope as a geological feature condition. Therefore, it is extremely important to grasp infiltration and retention properties in evaluating stability at the time of the rain of the slope consisting of weathering granite residual soil. From such a background, we add examination about infiltration and retention properties of weathering granite residual soil based on the simple infiltration test which carried out at a fill slope in Thailand, Chiang Mai.