

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

磯部 直哉^{1*}・大津 宏康¹・北岡 貴文¹

¹京都大学大学院工学研究科（〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂）

*E-mail: isobe.naoya.65e@st.kyoto-u.ac.jp

近年、従来日本においては想定されていなかった短期的局所的豪雨の発生回数が増加しつつある中、豪雨に起因する斜面災害の発生を検討する上では、流出浸透特性を把握することが最重要課題である。本研究では、原位置での浸透実験結果、および原位置計測サイトでの流出量計測結果を用いたタンクモデルでの逆解析結果に基づき、斜面崩壊につながる危険性が高い降雨継続時間が比較的長い降雨時の浸透能の低下特性について考察を加える。また、これらの検討結果より、原位置での流出量計測結果が、斜面の安定性を評価する上での一指標となる可能性についても言及する。

Key Words : slope failure, heavy rainfall, infiltration capacity, surface runoff, initial abstraction

1. はじめに

近年、日本において従来は想定されていなかった短期的局所的豪雨の発生回数が増加しつつある中、豪雨に起因する斜面災害の発生を検討する上では、流出浸透特性を把握することが最重要課題である。

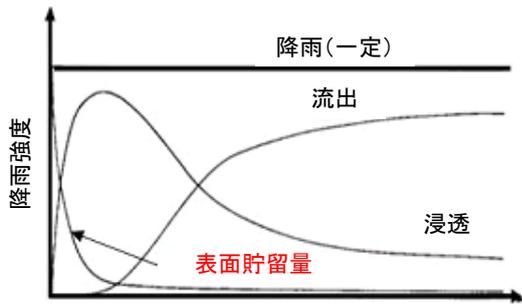
降雨は、斜面においては、図-1 に示すように流出量、浸透量、および斜面表面に貯留される量の3成分に区分される¹⁾。さらに、これら3成分の内、斜面崩壊の主要因となる浸透量は、不飽和土では土壌水として吸収される量と、表層流および深層流（地下水）へ供給される量に区分される。筆者らは、これまでの研究において、原位置計測結果を用いた逆解析により、その3成分を分離して流出浸透特性を評価する手法を開発してきた²⁾。さらに、逆解析結果での推定浸透量を流量境界条件としたFEM解析結果を実測値と比較することで、その推定精度について検証を加えてきた³⁾。ただし、これらの研究は、降雨継続が比較的短い事例を対象としたものである。一般に、岡田ら⁴⁾が提唱する土砂災害早期警戒体制に示されるように、短時間集中豪雨で斜面崩壊が発生することは極めて稀であり、斜面崩壊は累積量が高まることで発生する。したがって、豪雨が比較的長く継続する場合の流出浸透特性の変化を評価することが重要となる。

従来より、降雨に伴う地盤の浸透特性は、降雨継続時間とともに変化することが指摘されている。例えば、

Horton⁵⁾は地盤の浸透能は降雨継続時間とともに減少することを示している。また、Linsleyら⁶⁾は降雨に伴う流出が発生する雨量強度を閾値(ϕ -index)と定義し、その閾値が降雨継続時間に伴い低下する傾向があることを示している。これら理論の基本概念は、いずれも浸透量が土壌水として吸収される率が、飽和度の上昇とともに減少することを示すものと解釈される。つまり、図-1の模式図に示したような比較的短時間の一降雨ではなく、実際の豪雨時の降雨波形、すなわち変動降雨強度が繰り返し発生する状況での流出浸透特性を検討することが重要となる。

このような観点から、本研究では、風化花崗岩の残積土からなる切土斜面での原位置浸透実験結果、および原位置での流出量計測結果を用いたタンクモデルでの逆解析結果より、降雨継続に伴う浸透能の低下現象を明らかにする。なお、タンクモデルでの逆解析では、浸透能の低下は土壌水として吸収される率が、飽和度の上昇とともに減少することを明らかにするため、乾季と雨季に観測された降雨継続時間が比較的長い降雨記録を用いて検討を加える。さらに、これらの検討結果より、原位置での流出量計測結果が、斜面の安定性を評価する上での一指標となる可能性についても言及する。

2. 原位置試験の概要



注) 文献1)に加筆修正

図-1 一定降雨強度下での水収支の成分

(1) 試験サイトの概要

本研究において対象とする斜面は、タイ・バンコクの南約600kmに位置するタイ・プーケット南部の国道 (highway number 4028) 脇の切土斜面である。平均傾斜は約1対1.3 (V:H)、すなわち約37.5°であり、その地質は、風化花崗岩 (まさ土) で構成されている。

当該斜面における飽和透水係数は、2種類の原位置試験を実施することで求めた。前者は、ボアホールパーミアメータ法であり、後者はアクリルパイプと小型水位計を用いて斜面表層部からの浸透量を、水位低下量として計測する簡易試験装置を用いた方法である。表層地盤の飽和透水係数が $10^4 \sim 10^6 \text{m/sec}$ 程度であり、深度2~3m付近では 10^6m/sec と表層に比べて若干透水性が低下している。なお、当該斜面の地盤条件の詳細については、文献2)および3)を参照されたい。

(2) 原位置浸透実験の概要

当該斜面の中腹部で実施した浸透実験の手法について記す。この実験は、表層部の体積含水率を計測することで地盤の浸透能が降雨継続に伴ってどのような挙動を示すかを把握することを目的として行われた。具体的には、図-2に示すように、整地した地表面に、底が細かい網になっており水を通わせることができる直径20cm、深さ5cmの円柱状の容器を埋め込み、その内外に水を入れることで浸透実験を行う。一定水位を維持するために、容器中の目印を目安に実験中は常に1cmの水位を保つように注水を行った。計測項目は、注水量、注水時間に加えて、深度5cm、10cm、20cmの3深度の体積含水率である。

(3) 原位置計測システムの概要

当該斜面での原位置計測システムの概要を述べる。まず、計測器配置に関する断面図および平面図を、図-3に示す。同図に示すように、当該斜面では、土壌水分計、テンシオメータ、水位計および雨量計を設置して、

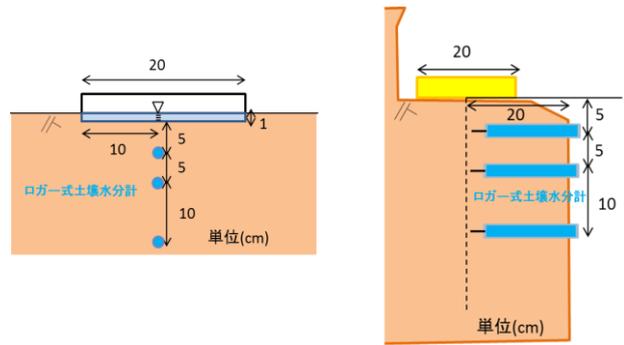
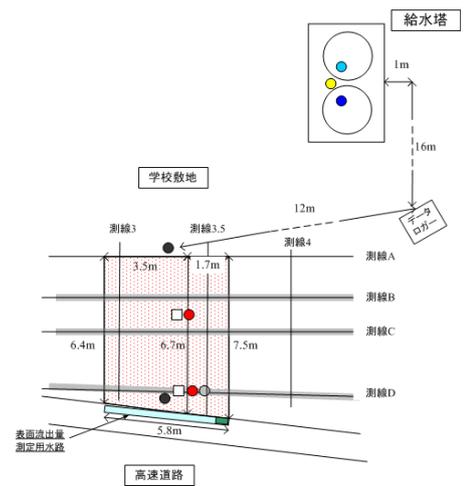
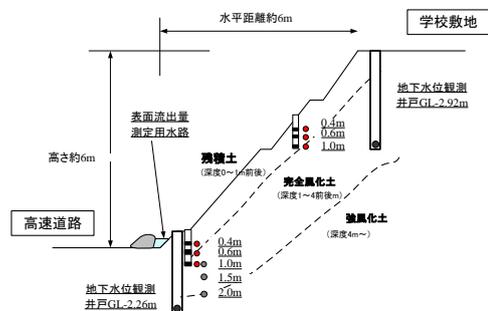


図-2 浸透実験の概要



(a) 平面図



(b) 断面図

図-3 計測器配置図

それぞれ体積含水率、間隙圧、表面流出量、および降雨量を計測している。また、当該斜面における集水面積は 38m^2 であるが、斜面の平均傾斜が 37.5° であるため、有効集水面積は 30.15m^2 となる。なお、各計測機器はいずれも無降雨時は10分間隔で、降雨時には1分間隔での計測に切り替わるように設定している。

3. 原位置浸透実験

当該斜面での浸透実験は、注水時間および注水中断

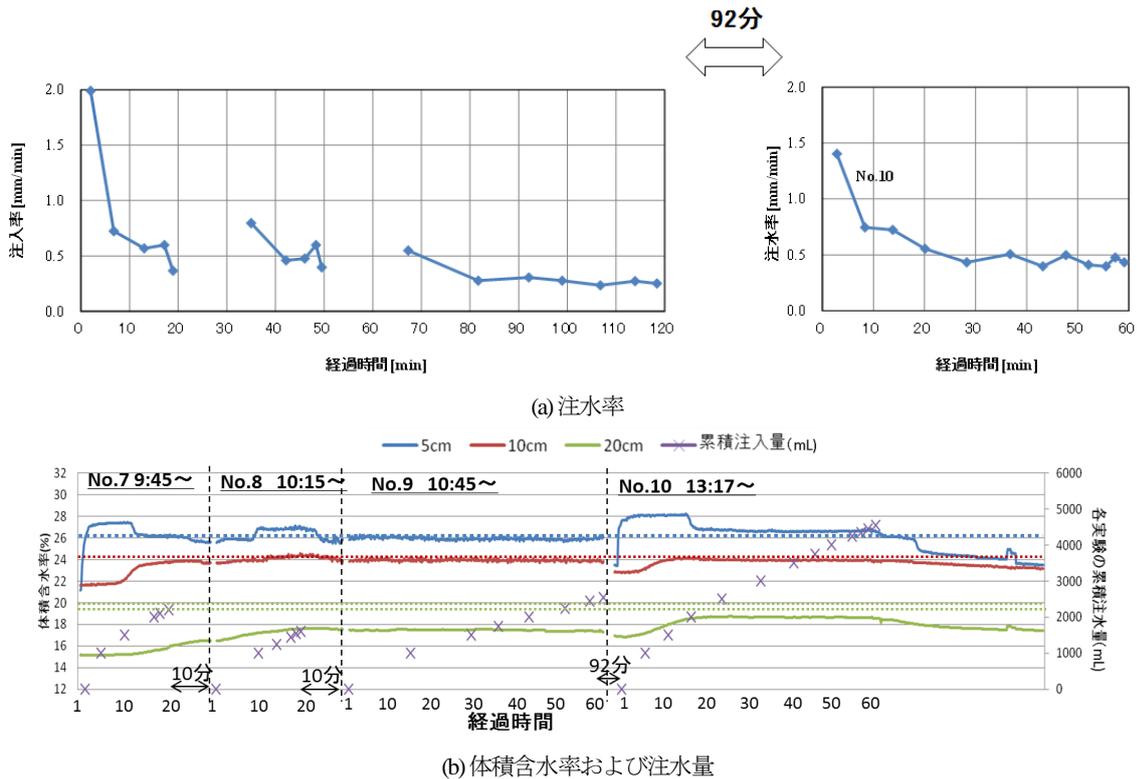


図-4 浸透実験結果 (No.7-No.10)

時間を変えて10回実施したが、ここでは注水を連続的に実施したNo.7からNo.10の実験結果を、図-4に示す。同図に示すように、No.7での結果は、注水開始時から時間が経過するにつれて減少し、ほぼ一定値に収れんする傾向がある。すなわち浸透能の低下が認められる。この傾向は、既往の原位置試験結果⁷⁾および室内試験結果⁸⁾に示されている結果と調和的である。次に、No.7に後続する注水中断時間がそれぞれ10分間と比較的短いNo.8およびNo.9では、注水開始時の注水率がそれぞれ減少し、ほぼ一定値に収れんする。この傾向に関して、注水中断時間が10分間では、体積含水率の変化がほとんど認められない。特に、No.9では、注水しているにも関わらず体積含水率がほぼ一定の定常状態となっている。次に、注水中断時間が92分間のNo.10では、注水開始時の注水率がNo.8およびNo.9に比べ大きくなっている。この傾向について、注水中断期間にNo.9の試験終了後から体積含水率が低下していることによると言える。

以上の結果より、浸透能の低下は、浸透が土壌水として吸収される率が、飽和度の上昇とともに減少することに起因することが確認された。なお、既往の研究結果^{7), 8)}において同様な結果が得られているが、これらは、1回の注水に対する結果を示したものである。これに対して、本実験は、実際の降雨のように降雨が継続

する場合の状況を評価するために、注水中断時間を変動させたものである。この結果として、後続する降雨での浸透特性は、先行降雨の影響、すなわち降雨開始時の体積含水率あるいは飽和度に影響されることが明らかとなった。

なお、本実験では図-1に示す水収支の成分の内、流出については考慮していないが、実験結果より以下の事項が推察される。すなわち、降雨開始時には浸透が土壌水として吸収される率が高いために、ほとんど流出が発生しない。その後、降雨が継続すれば、土壌水の増加に伴う浸透率は低下するにつれて、流出は増加する。特に、No.9の結果に示したように、体積含水率は最大値に達した場合には、流出が顕著になると推察される。

4. 原位置における流出量を用いた逆解析

(1) タンクモデルおよび逆解析の概要

タンクモデルとは、斜面をタンクに見立てて、表面流出量と浸透量をモデル化したものである。本研究では、斜面表層のみの水収支を考慮しているため、1段のタンクモデルを適用した。また、本研究の計測サイトであるタイ・プーケットの斜面は比較的面積が小さい

P: 降雨量 E: 蒸発散 X: 貯留量
 α : 流出係数 H: 流出孔高さ β : 浸透係数

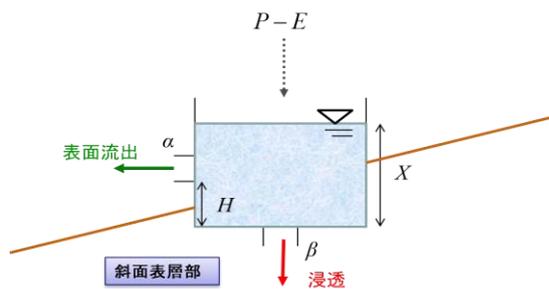


図-5 タンクモデル概略図

ため、1つのタンクモデルで斜面全体の水収支を表現できると考えられる。本研究で適用したタンクモデルの概略図を図-5に示す。

図中の流出係数、浸透係数はタンクの流出孔、浸透孔の絞りを示しており、0から1の値をとる。タンクモデルにおける流出量、浸透量を表す式を式(1)および式(2)に示す。

$$\text{If } \begin{cases} X - H \leq 0 & q_R = 0 \\ X - H > 0 & q_R = \alpha \cdot (X - H) \end{cases} \quad (1)$$

$$q_I = \beta \cdot X \quad (2)$$

式(1)および式(2)において、 q_R は流出量、 q_I は浸透量を示す。

タンクモデルにおけるパラメータを同定する手法として、逆解析手法であるカルマンフィルタを用いている。従来の手法では、流出係数、浸透係数は時間によらず一定として、1つの降雨で1つの値が算出されたが、本研究では流出係数、浸透係数は時間とともに変動すると仮定し、パラメータの推移を求めた。これにより、流出係数、浸透係数の降雨継続中の推移、各パラメータと各降雨指標との時系列的相関性を明らかにするとともに、より精度の高い浸透量を推定することが可能となった。

(2) 流出量の計測結果

タンクモデルの逆解析で観測方程式に用いる原位置での流出量の計測結果について示す。図-6は、当該斜面で2012年3月～11月に観測された24降雨の流出比（累積流出量/累積雨量）と累積雨量の関係を示す。同図では、乾季から雨季の初期（3月～8月、図中では期間1と表記）と雨季（9月～11月）に分けて結果を示した。同図に示すように、期間2の流出比は、全般的に期間1に

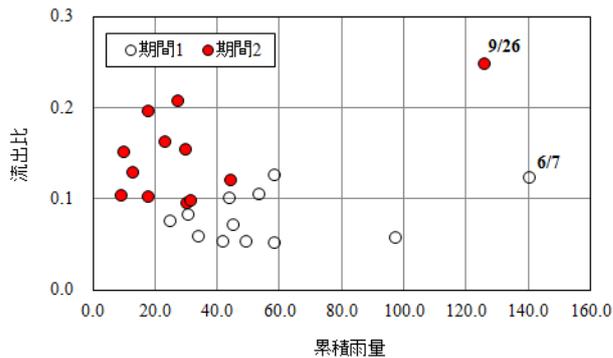
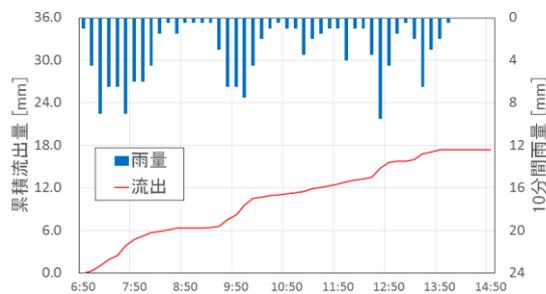
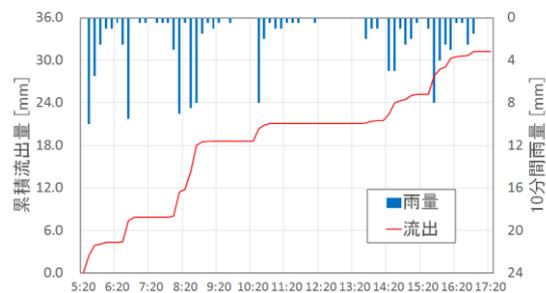


図-6 流出比と累積雨量の関係



(a) 6月7日



(b) 9月26日

図-7 10分間雨量と累積流出量の推移

比較して大きくなっている。この結果は、期間1の地盤の状態は期間2に比較して、低い体積含水率の状態にあると仮定すれば、浸透が土壤水に吸収される率が高いことを反映している。

なお、本研究は降雨が継続する場合の浸透流出特性を検討することである。このため、図-6に示す結果の中で、期間1および期間2からは、それぞれ6月7日および9月26日の降雨を抽出して検討を加える。その一例として、図-7に6月7日および9月26日の降雨に対する10分間雨量と累積浸透量の推移を示す。両日時における降雨継続時間には差があるものの、10分間雨量での相違はわずかである。低い体積含水率の状態にある6月7日の降雨では、流出は降雨継続とともにほぼ一定の比率で増加しているのに対し、9月26日の降雨では、流出の発生率が加速している状況が認められる。

これらの体積含水率の状態、あるいは土壤水分量に

2012年10月13日 11:30~12:50

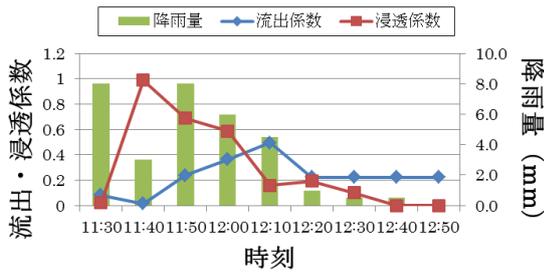


図-8 パラメータの推移 (10月13日)

依存する浸透流出特性については、次節のタンクモデル解析結果により考察を加える。

(3) タンクモデル解析結果

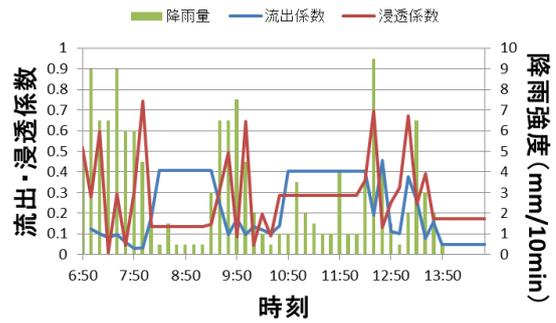
まず、タンクモデルを用いた逆解析結果の一例として、降雨継続期間が短く1雨からなる10月13日に観測された降雨における流出・浸透係数の推移を図-8に示す。同図に示すように、1雨での降雨継続中の流出係数および浸透係数の変動は、図-1に示した水収支関係と調和的である。

次に、検討対象とする6月7日および9月26日の降雨に対する降雨継続中の流出係数および浸透係数の算定結果を図-9示す。また、同日時における、累積流出量と10分間雨量の推移を図-10示す。

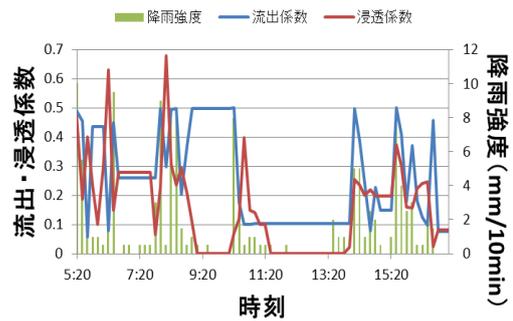
まず、6月7日の降雨は、主として3つの降雨波形に分類されるが、それぞれの波形に対する流出係数および浸透係数の変動は、いずれも図-8の算定結果と同様に、図-1に示した水収支関係と調和的である。この結果を、図-4に示した浸透実験結果と比較すると、降雨開始時期での土壌水分量が低いために、No.9に示したように体積含水量が上限値まで至っていないものと推察される。

次に、9月26日の降雨は、主として4つの降雨波形に分類されるが、それぞれの波形に対する流出係数および浸透係数の変動は大きく異なっている。第1および第2の降雨波形に対する浸透係数の変動は、6月7日の降雨と類似しているが、流出係数は大きい値が維持されており、特に第2の降雨に対しては大きな値となっている。この変動は、図-7に示した10分間雨量と累積流出量の推移で、顕著な流出量の増加を反映したものである。さらに、第3および第4の降雨波形に対しては、浸透係数は比較的小さい値で変動するとともに、流出係数は第1および第2の降雨波形に対する結果と同様に、大きい値が維持されている。

タンクモデル解析によって得られた6月7日と9月26日における累積浸透量と累積雨量の推移を図-10に示す。図が示すように9月26日では6月7日より降雨継続に伴



(a)6月7日



(b)9月26日

図-9 流出係数および浸透係数の変動

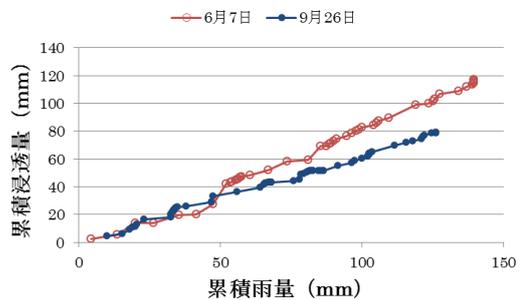


図-10 累積雨量と累積浸透量の推移

う累積浸透量が小さくなっている。

以上の結果より、降雨の継続に伴う浸透能の低下に関して、次の事項が推察される。すなわち、浸透能の低下は、図-8に示すような降雨継続期間が短く1雨からなる降雨において発生するが、図-9(b)に示す後続する降雨に対しても発生する。前述のように、図-1の水収支関係に示したように、降雨開始時は浸透が卓越するが、これは土壌水分量へ吸収されるものである。この際の土壌水分量へ吸収される率は、降雨開始時の体積含水率に支配される。したがって、6月7日の降雨では降雨開始時の体積含水率が低いため、土壌水分量へ吸収される率が高くなるため、流出の発生率が低くなる。これに対して、9月26日の降雨では降雨開始時に土壌水分量へ吸収される率が低く、その後流出の発生率が高

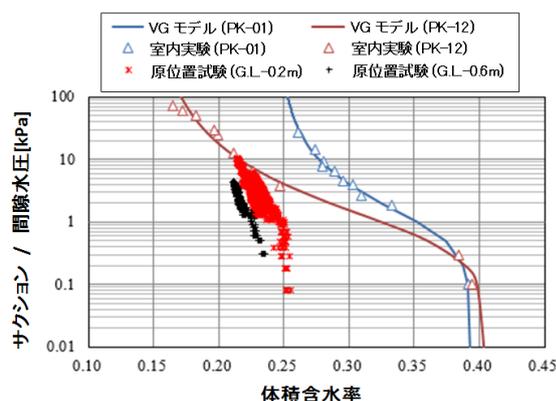


図-11 原位置での体積含水率-サクシヨン関係³⁾

くなる。

この9月26日の降雨での体積含水率の変動について、原位置での体積含水率-サクシヨン関係を用いて考察を加える。図-11は、図-6に示した雨季に相当する期間2の内、9月～10月の原位置で中腹GL-0.2mおよびGL-0.6mで計測した体積含水率-サクシヨン関係に、室内試験結果を併せて示したものである。同図に示すように、浅層部の中腹GL-0.2mでの原位置計測結果では、9月26日の降雨時には、サクシヨンが低下するがその際には体積含水率が0.25でほぼ最大値となっている。すなわち、この段階では、図-4に示した浸透実験結果でのNo.9のように体積含水率が上限値近くまで到達して、流出が卓越した状態となったことが確認される。

以上の検討結果より、流出は地盤内の土壌水分状態を反映したものである。一般に降雨に伴う浸透流出特性を検討するためには、図-3に示したように体積含水率およびサクシヨンが計測される。しかし、体積含水率-サクシヨン関係は非線形であり解釈が困難である。このため、原位置での流出量計測が、斜面の安定性を評価する上での一指標となる可能性がある。

5. 結論

本研究では、風化花崗岩の残積土からなる切土斜面での原位置浸透実験結果、および原位置での流出量計測結果を用いたタンクモデルでの逆解析結果について検討を加えた。この結果は、以下のように要約される。

- ・浸透能の低下は土壌水として吸収される率が、飽和度の上昇とともに減少することを明らかにした
- ・原位置での流出量計測結果が、斜面の安定性を評価する上での一指標となる可能性がある。

参考文献

- 1) Premchitt, J., Lam, T.S.K., Shen, J.M. & Lam, H.F. : Rainstorm Runoff on Slopes (GEO Report No. 12), *Geotechnical Engineering Office, Hong Kong*, pp1-104, 1992.
- 2) 古賀博久, 堀田洋平, 大津宏康, 前田良刀, 高橋健二, 矢部満 : 熱帯性豪雨に伴う斜面表層部における水収支に関する検討, *地盤工学ジャーナル* 9(3), pp.341-358, 2014.
- 3) H. Ohtsu, H. Masuda, T. Kitaoka, K. Takahashi, M. Yabe, S. Soralump and Y. Maeda : A Simulation of Surface Runoff and Infiltration due to Torrential Rainfall Based on Field Monitoring Results at a Slope Comprising Weathered Granite, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 46, No.1, pp.12-21, 2015.
- 4) 岡田勝也, 杉山友康, 村石尚, 野口達雄 : 統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法, *土木学会論文集*, No.448/III-19, pp.25-34, 1992.
- 5) Horton, E. R. : An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity, *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 5, pp.399-417, 1940.
- 6) Linsley, R.K., Kohler, M.A. and Paulhus, J.L.H. : *Hydrology for Engineers (Third edition)*, McGraw-Hill, New York, p.508, 1982.
- 7) Geotechnical Control Office: *Geotechnical Manual for Slopes (Second edition)*, Geotechnical Control Office, Hong Kong, p.295, 1984.
- 8) Nassif, S. H. and Wilson, E. M. : The influence of slope and rainfall intensity on runoff and infiltration, *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol.29, No.4, pp.539-553, 1975.

A STUDY OF REDUCTION IN INFILTRATION CAPACITY CAUSED BY RAINFALL BASED ON THE RESULT OF FIELD TEST

Naoya ISOBE, Hiroyasu OHTSU and Takafumi KITAOKA

Recently, unexpected heavy rainfall occurs more frequently in Japan. Therefore, it is necessary to clarify the characteristic of infiltration when we consider the occurrence of slope disaster caused by heavy rainfall. In this study, we consider the decrease in infiltration capacity during relatively long term rainfall based on the result of field infiltration experiment and the Tank model analysis result by using runoff data of field measurement. Additionally, we describe the possibility of runoff data of field measurement to evaluate slope stability.