1次元タンクモデルを用いた集中豪雨時の斜面 表層部における降雨流出浸透特性に関する研究

大津 宏康1*・北岡 貴文1・高橋 健二2・矢部 満3・奥岡莞司4

¹京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻(〒615-8140京都市西京区京都大学桂4)
 ²水文技術コンサルタント(〒160-0004東京都新宿区三矢六丁目13-5)
 ³応用地質株式会社・クアラルンプール営業所(1600 Pennsylvania Avenue NW, Washington, DC 20500)
 ⁴京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻(〒615-8140京都市西京区京都大学桂4)
 *E-mail: kitaoka.takafumi.6e@kyoto-u.ac.jp

本研究では、比較的短期間に高強度降雨が集中する際の斜面表層部における表面流出・雨水浸透特性に ついて、原位置計測結果に基づき検討を加えた。研究対象サイトは、タイにおいて降雨による斜面災害が 高い頻度で発生している風化花崗岩からなるタイ・プーケットの切土斜面である。本研究ではまず、原位 置で計測した表面流出量の計測結果の妥当性を検討した。次に、表面流出量に影響を及ぼす様々な因子の 内、降雨特性に着目し、その影響度合いについて検討した。さらに、表面流出量および浸透量の時系列的 変動を検討する手法として、1次元タンクモデルを適用した。以上の検討結果として、短期間降雨強度が 斜面表層部における表面流出・浸透、および斜面安定に関する主要因となる可能性があることを示した。

Key Words : slope, runoff, tank-model

1. はじめに

降雨に起因する斜面崩壊の発生機構については、これ までに多くの研究成果が蓄積されており、それらの成果 を踏まえ、近年では住民避難、道路・鉄道通行規制等の 斜面リスク低減を目的とした様々な降雨指標を用いた土 砂災害早期警戒体制¹⁾³も提案されている.

まず,斜面崩壊の発生機構は,既往の研究によれば, 地下水位の形成を伴わない表層部の飽和度上昇に伴う粘 着力の低下に起因する崩壊4と、地下水位の形成・上昇、 すなわち有効応力の低下に起因する崩壊 % とに大別され る. 2種類の崩壊メカニズムの相違について、松四ら%は 風化岩盤からなる表層部地盤の透水性に起因すると指摘 している. 次に, 降雨指標を用いた土砂災害早期警戒体 制は、主として横軸に長期降雨指標(連続雨量・実効雨 量・土壌雨量指数等)、縦軸に短期降雨指標(時間雨量、 半減期1.5時間雨量等)からなる平面に、降雨履歴をプ ロットし、過去の被災事例から限界降雨包絡線を設定す るものである. なお、従来の提案手法の多くは、広域で の早期警戒体制の立案を目的としているため、比較的降 雨継続時間の長い降雨を対象に時間降雨量を基準値とし て各種降雨指標を採用しているが,斜面崩壊の主要因は, 地中への浸透量であることに留意されたい.

斜面における降雨は、Linsleyら⁷が示したように、 降雨開始直後の捕捉量,表面流出量および地中への 浸透量に分離される.この内,捕捉量については, Premchittら⁸は降雨強度が低い場合には顕著であるが、 降雨強度が増加するに連れて降雨量に占める割合が 小さくなると指摘している.次に、表面流出量は、 斜面の地盤特性(主として透水性),降雨特性(雨 量・降雨継続時間・降雨強度等),および植生等の 影響を受ける. Premchittら⁸は、香港において風化花 崗岩の切土斜面,および風化火山岩の残積土を用いた盛 土斜面で、異なる植生の状態の下で表面流出量の原位 置計測を実施した結果として、

以下の知見を示して いる. すなわち, 草で覆われた風化花崗岩の切土斜面 での総雨量に対する表面流出量の比(以下,流出比と称 す)は0.27と最小になり、他の条件の斜面に比較して浸 透量が卓越する.

前述の既往の知見からは、比較的降雨継続時間の短い 集中豪雨では、降雨開始直後の捕捉量の割合は小さ くなるとともに、草で覆われた風化花崗岩の切土斜面 では流出比は小さくなるため、地中への浸透が顕著とな り斜面の安定性に影響を及ぼすことが懸念される.

このような観点から、本研究ではタイ・プーケット の風化花崗岩からなり全体的に草で覆われている切土斜 面(以下, P-サイトと称す)での原位置計測結果を用い て,短期集中豪雨時の斜面表層部における表面流出・雨 水浸透特性について検討を加える.具体的には,表面流 出量に関して,既往の研究成果と比較することで,地盤 特性(透水性)の影響を検討するとともに,計測結果の 妥当性について示す.次に,表面流出量に影響を及ぼす 様々な因子の内,降雨特性(降雨継続時間・降雨強度) に着目し,その影響度合いについて検討を加えた.さら に,計測により得られた表面流出量および浸透量の時系 列的変動を検討する手法として,1次元タンクモデルを 適用する.同モデルに含まれる解析パラメータについて は,逆解析手法の一つであるカルマンフィルタを用いた浸透量 に関する解析結果に基づき,その浸透が斜面安定に及ぼ す影響について検討を加える.

2. 原位置計測の概要

本研究において対象とする斜面のプーケットサイト (以下, Pサイトと称す)は、タイ・バンコクの南約 600kmに位置するタイ・プーケット南部に位置し、Ban Kata School (カタ小学校) に隣接する高速道路(highway number 4028)の道路脇の切取り斜面である. 当該斜面は 道路に沿って傾斜を持っており、その平均傾斜は約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.

Pサイト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10⁴~10⁶m/sec程度であり、深度2~3m 付近では10⁶m/secと表層に比べて若干透水性が低下して いる.

Pサイト斜面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-1 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,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38m² 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30.15m²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.なお,Pサイト斜面の 原位置計測システムの詳細については,文献9)を参照さ れたい.



3. 表面流出量の計測結果の分析

(1) 雨量と表面流出量の相関

図-2は、P-サイトにおいて計測された総雨量と総表面 流出量の相関を示す.図-2には、比較のために地盤条件 および植生が類似している、Premchittら⁸⁰の風化花崗岩 切土斜面(図中では、H-サイトと表示)での計測結果に 加えて、次式に示すOvertonら¹⁰によって示されたUS Department of Agricultureの半経験則に基づきCN(Curve Number)をパラメータとして算定される雨量と表面流 出量の関係を示す.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \tag{1}$$

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$
 (2)

ここに、*P*は雨量、Sは雨量から降雨開始時の初期捕捉 量を除いた量を表す。

また, 図-3は, P-サイトおよびH-サイトで計測された 雨量と流出比の相関を示す. まず、図-2に示す雨量と表面流出量の相関はばらつき を示すが、H-サイトの結果は、CNが55-85の範囲にプロ ットされるのに対して、P-サイトの結果は、CNが50-80 の範囲にプロットされることから、P-サイトの表面流出 の方が多少小さい.この傾向は、図-2に示す雨量と流出 比の相関についても同様である.すなわち、いずれのサ イトの結果ともばらつきを示すが、P-サイトの流出比の 方が多少小さな値となっているが、ほぼ同じ範囲にプロ ットされている.この結果より、P-サイトにおける表面 流出の計測結果は、H-サイトでの結果とほぼ同等である と解釈される.

以上の結果より, P-サイトの計測結果は, 地盤条件お よび植生が類似しているH-サイトとほぼ同等であり, 表 面流出量に比べて, 浸透量が卓越することが確認された.

(2) 降雨継続時間・降雨強度と流出比の相関

1. で述べたように、表面流出量は、斜面の地盤特性、 降雨特性(雨量・降雨継続時間・降雨強度等),お よび植生等の影響を受ける.この内、地盤特性およ び降雨量の影響については3.(1)に示したため、こ こではその他の降雨特性、すなわち降雨継続時間お よび降雨強度の影響について着目する.

図-4は、降雨継続時間と流出比の相関を示す.ここで、 Horton¹¹⁾は、地盤の浸透能は降雨が継続するにつれて低 下すると指摘している.この知見に基づけば、降雨継続 時間が長くなるにつれて流出量が増加するため、流出比 は増加することになる.図-4に示す結果は全般的にばら つきを示すが、降雨継続時間が1時間以内から3時間程度



図-2 雨量と表面流出量の相関(P-サイト)



図-3 雨量と流出比の相関(P-サイト)

と短い降雨を除けば、降雨継続時間の増加に伴い流出比 が大きくなる傾向が認められる.

次に、図-5は、降雨強度(10分間最大雨量)と流出比の相関を示す.図-5に示す結果はばらつきを示しているが、全般的に10分間最大雨量の増加に伴い流出比が減少する傾向が認められる.言い換えれば、10分間最大雨量の増加に伴い浸透量が増加することとなる.

ここで,前述のように,本研究の目的は,比較的短期 間に高強度降雨が発生する場合の斜面表層部における表 面流出・雨水浸透特性について検討を加えることである.

以上の検討結果より,短期集中豪雨時の表面流出・浸 透特性は雨量の総量ではなく,時系列で変動する降雨強 度に依存する可能性がある.この可能性を検証するため, 次節では,1次元タンクモデルを用いて,降雨および表 面流出・浸透の非定常挙動について検討を加える.

4. 1次元タンクモデルを用いた逆解析手法

(1) 1次元タンクモデルの概要

タンクモデルは菅原¹⁰によって考案された広域を対象 とした流出計算手法であり、簡易に各流域の水収支およ び水循環を表現することを可能とする複数の直列タンク モデルである.本研究においては、計測斜面が比較的小 さいため、斜面全体を1段タンクモデルで表現するもの とする.なお、詳細については、文献9)を参照されたい.



(2) パラメータ同定手法

計測結果をもとにしたタンクモデルのパラメータ(流 出係数α,浸透係数β)の同定手法について記す.

まず,流出孔までの高さH, すなわち表面流出が発生 するまでに必要な水量を推定するため,累積降雨量と総 流出量の関係に着目する.P-サイトの計測結果では,累 積降雨量と総流出量の関係より,累積降雨量が2.7mmを 超えるまでは流出が発生せず,2.7mmを超えた後,表面 流出量が回帰直線で示したようにほぼ線形的に増加する 傾向が確認される.この計測結果より,流出孔までの高 さHは2.7mmに設定する.

次に,カルマフィルタを用いたパラメータ(の同定手 法は,以下のように要約される.

カルマンフィルタの観測方程式に必要となる観測値と して、本研究ではタンクの側孔からの流出量のみを対象 とする.ここで、表層タンクにおける水収支の関係式を 式(3)に示す.

$$\frac{dX(t)}{dt} = [R(t) - E(t)] - \alpha \cdot [X(t) - H] - \beta \cdot X(t)$$
(3)

ここに, *R* は降雨量, *E* は蒸発散量である.また, 前述したようにカルマンフィルタの概念は,未知パラメ ータがある離散型の状態変化において線形方程式に従っ ている場合に適用することができるが,1次元タンクモ デルにおける構成式は非線形であるため,本研究ではテ ーラー展開によって線形化を行っている.

X(t), $\alpha(t)$, $\beta(t)$ はテーラー展開を用いて式(4)から式 (6)で表される.なお,2次以降の微小項は無視している.

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t \cdot \frac{dX(t)}{dt}$$
(4)

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + \Delta t \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt}$$
(5)

$$\beta(t + \Delta t) = \beta(t) + \Delta t \cdot \frac{d\beta(t)}{dt}$$
(6)

(3) 誤差計算

カルマンフィルタで同定されたパラメータセットをそれぞれタンクモデルに代入し、流出量、および浸透量の 解析値を得る.そして、観測値と解析値の誤差の和、および最大値を計算し、それぞれのパラメータセットの偏差値を式(7)で求める.ここでは、n個のパラメータセットが得られているとする.

$$y_i = \frac{10(x_i - \mu_i)}{\sigma_i} + 50$$
 (7)

ここに、 y_i は偏差値、 x_i は誤差、 μ_i は誤差の平均、 σ_i は 誤差の標準偏差を表す。

最後に,式(8)で偏差値の和を求め,その和が最小となるパラメータセットiを最適パラメータとする.

$$z = \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{8}$$

ここに, yiはそれぞれの偏差値, zは偏差値の和, nはパ ラメータの個数を表す.

以上の手法を用いて得られたパラメータを用いてタン クモデルの計算を行うことで水収支分析を行う.

5. 1次元タンクモデルを用いた解析結果

(1) 解析パラメータの同定結果の検証

4.に述べた手法により同定された最適パラメータセットを示すとともに、そのパラメータセットを1次元タンクモデルに適用した検証結果を示す.本研究では、短期集中豪雨時の表面流出・浸透特性について検討することを目的としているため、図-4に示した降雨の内、降雨継続時間が10時間を上回るものは検討対象から除外した.

図ー6は、同定された最適パラメータセットと10分間最 大降雨強度の関係を示す.流出係数αは、ほぼ0.1~0.2の 範囲でばらついているが、10分間最大降雨強度と明確な 相関は認められない.一方、浸透係数βは、多少ばらつ きを示すが、10分間最大降雨強度とかなり明確な正の相



図-6 最適パラメータセットと10分間最大降雨強度の関係



図-7 同定パラメータを用いた表面流出量の検証結果 (2012年11月21日)

関が認められる. すなわち, 10分間最大降雨強度が増加 するにつれて, 浸透係数βも増加する. この結果より, 短期集中豪雨時の浸透特性は,降雨強度に依存して増加 することが検証された.

次に、これらのパラメータを用いて行ったタンクモデ ル計算結果を図-7 に示す. 図-7 に示すのは、2012 年 11 月 21 日に観測された 10 分間最大降雨が 12.5mm の短期 間集中豪雨である. 図-7 に解析値と計測値の各時刻の 相関図を示しているが、切片を原点とした近似直線の傾 きが 0.93 と 1.0 に近く、その相関係数は R²=0.93 である. また、紙面上図は割愛するが、10 分間最大降雨が 8.0mm と、図-7 に示した結果に比較して降雨強度が低 い 2012 年 9 月 12 日の降雨での解析結果でも、解析値と 計測値の時系列変化が整合していることが読み取れた.

以上の結果から、降雨強度の強弱に関わらず、比較的 再現性の高い表面流出の解析結果が得られている.

(2) 水収支解析結果

図-8および図-9は、それぞれ2012年11月21日および 2012年9月12日の降雨記録を用いた1次元タンクモデルに よる水収支解析結果を示す.

筆者ら%は1次元タンクモデルを水収支解析において、 降雨開始直後の捕捉量を表面貯留量と定義した.表面貯 留量はタンクモデルにおいて、降雨量と表面流出量の差 を斜面への実流入量とし、その実流入量と浸透量の差と 定義される. 図-7および図-8に示すように、降雨開始直 後は、図中にピンク色で着色した表面貯留量が卓越する が、その後時間が経過するにつれて表面貯留量は消失す る. ただし、降雨強度に着目すると、降雨強度の高い11 月21日の降雨では、15分程度で表面貯留量は消失するの に対して、降雨強度の高い9月12日の降雨では、30分以 上表面貯留量の発生が継続した後消失する.次に、降雨 量と表面貯留量の関係に着目すると、高い降雨強度が継 続する11月21日の降雨では、降雨直後から大きな浸透量 が発生するとともに、比較的早い時期から表面流出が発 生するため、降雨量に対する表面貯留量の比率は低い. 一方,比較的低い降雨強度が継続する9月12日の降雨で



(a)11月21日



図-8 最適パラメータを用いた水収支解析結果



図-9 11月21日の間隙水圧変動(中腹部)

は、降雨直後の浸透量は小さく、かつ表面流出の発生に 時間遅れを伴うため、降雨量に対する表面貯留量の比率 は高い.

以上の結果において、表面貯留量をLinsleyら⁷の指摘 する降雨開始直後の捕捉量と等価とすると、Premchitt ら⁹による、捕捉量は降雨強度が低い場合には顕著で あるが、降雨強度が増加するに連れて降雨量に占め る割合が小さくなるという指摘と整合する.

(3) 斜面安定性への影響

図-6および図-8で示したように、降雨に起因する斜面 崩壊の主要因である浸透量は、降雨強度に依存するこ とが確認された.このため、浸透特性の相違が斜面 安定に及ぼす影響について検討を加える.

筆者ら¹³は, P-サイトでの計測結果において,地中の 間隙水圧は正圧になることはないが,粘着力の低下によ り安全率が1.0近くまで低下することを示している.こ の知見に基づき,2012年11月21日の降雨時の,地中への 浸透特性と地中で計測された間隙水圧の相関について検 討を加える.

図-9は、2012年11月21日の降雨時の斜面中腹部GL-0.2m、GL-0.6mおよびGL-1.0mにおける間隙水圧の計測結 果を示す.図に示す高い降雨強度が継続する11月21日の 降雨では、地中への浸透量が大きいため、間隙水圧は降 雨直後の比較的早い時期から深度方向に時間遅れを伴い ながら上昇する.この内、筆者ら¹³が斜面の安全率を算 定した結果で最小値となったGL-1.0mにおいて、0.0kPa近 くまで上昇している.

この結果より,地下水位の形成を伴わない表層部の飽 和度上昇に伴う粘着力の低下に起因する崩壊パターンに 分類される斜面においては,11月21日の降雨のように, 比較的短期間に高強度降雨が集中する際には斜面の安定 性に影響を及ぼす可能性があることが示唆される.

6. まとめ

本研究では、比較的短期間に高強度降雨が集中する際 の斜面表層部における表面流出・雨水浸透特性について 原位置計測結果に基づき検討を加えた.本研究により得 られた知見は、以下のように要約される.

- 1)P-サイトで計測した表面流出量に関して,既往の研究 成果と比較することで,P-サイトの計測結果は,地盤 条件および植生が類似しているH-サイトとほぼ同等で あり,表面流出量に比べて,浸透量が卓越することが 確認された.
- 2)計測結果を用いた1次元タンクモデル解析結果より、 斜面における表面流出・浸透特性は、降雨強度に 依存することが検証された.また、10分間最大降 雨強度が増加するにつれて、タンクモデルの浸透係数 βも増加することから、斜面崩壊の主要因となる浸透 特性は、短期集中豪雨のような降雨強度が大きい場合 には顕著な増加傾向を示す。

参考文献

- 杉山友康,岡田勝也,野口達雄,村石尚:盛土表層 部における土の強度の鉛直・平面方向の空間分布特性, 土木学会論文集, No.457/Ⅲ-21, pp. 33-40, 1992.
- 2) 倉本和正,鉄賀博己,菊池英明,守川倫,門間敬一, 古川浩平:急傾斜地における斜面要因を考慮したがけ 崩れ発生限界雨量線の設定手法に関する研究,土木学 会論文集,No.658/VI-48, pp.207-220, 2000.
- Soralump, S.: Geotechnical Approach for the Warning of Rainfall-Triggered Landslide in Thailand Considering Antecedence Rainfall Data, Geotechnical Engineering, Vol. 41, No.1, pp.39-44, 2010.
- 4) 例えば、北村良介、酒匂一成、加藤俊二、水島俊基、 今西肇:降雨時しらす斜面の浸透・崩壊に関する室内 土槽試験、地盤工学ジャーナル、Vol. 2, No. 3, pp.149-168, 2007.
- 5) 例えば,八木則男,矢田部龍一,山本浩司:雨水浸透 による斜面崩壊,土木学会論文報告集,No.330, pp.107-114, 1983.
- 6) 松四雄騎,松倉公憲:透水性の異なる砂岩と泥岩からなる 丘陵地における斜面崩壊の発生機構と発生位置,地形,第 25巻第2号, pp.139-159,2004.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. and Paulhus, J.L.H.: Hydrogy for Engineers (Third edition), McGraw-Hill, New York, p.508, 1982.
- 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, pp.1-104, 1992.
- 9) 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, Vol. 9, No. 3, pp.341-358, 2014.
- Overton, D.E. and Meadows, M.E.: Storm Modelling, Academic Press, New York, p. 358, 1976.
- Horton, E. R.: An approach toward a physical interpretation of infiltrationcapacity, Soil Sci. Soc. Am., Proc.5, pp.399-417, 1940.
- 12) 菅原正巳:水文学講座流出解析法,共立出版, pp206-211, 1972.
- 13) 大津宏康,前田良刀,益田浩,高橋健二. 矢部満:短期間 集中豪雨に起因する斜面崩壊機構に関する研究,材料, Vol.63, No.3, pp.271-278, 2014.

A STUDY ON THE CHARACTERISTIC OF RUNOFF – INFILTRATION NEAR SLOPE SURFACE USING 1-D TANK-MODEL

Hiroyasu OHTSU, Takafumi KITAOKA, Kenji TAKAHASHI, Mitsuru YABE and Kanji OKUOKA

In this research, we examined the surface runoff and the characteristics of rainfall infiltration into subsoil on the surface part of the slope during torrential rainfall, based on the results of in-site measurement. First, this study examined the validity of the measuring result of the amount of surface runoff measured in the in-site measurement. Next, we examined the influence and degree various factors have on the amount of surface runoff while focusing on the characteristics of rainfall. Furthermore, we applied the one-dimensional tank model as the technique for considering serial change of the amount of surface runoff and the amount of infiltration.