

土砂災害警戒区域の実斜面における人工降雨供給試験

○阿波田康裕¹⁾, 山野井一輝²⁾, 大石哲³⁾

1) 宇宙航空研究開発機構 2) 京都大学防災研究所 3) 神戸大学都市安全研究センター

1. 概要

宇宙航空研究開発機構角田宇宙センター西地区の実斜面において実施した人工降雨供給試験の結果について報告する。対象斜面は1945年以前に切土（勾配約40度）されたと推定される。経年等に伴う表層の崩落がいくつか確認されており、直近では2019年台風19号通過に伴って法肩の一部で表層崩落を生じた。

当該斜面の前面は永らく未利用地となっていたが、新たに創設される官民共創推進系開発センターの敷地に指定されたことから、土砂災害発生の可能性とその規模を推定するとともに、適切な監視・避難体制を確立する必要を生じた。一方で、従来の土壌雨量指数と60分雨量に基づく手法では、降雨流出特性の地域差を反映できず、予測精度には限界があると想定される。そこで本研究では、人工降雨供給試験により斜面の応答を測定し、対象斜面の降雨流出特性や変形特性について検討した。



図-1：対象斜面全景

2. 方法

人工降雨供給試験（以下、「試験」という）は2022年5月28日、同29日の日中に実施された。角田宇宙センターの消防ポンプを用いて最大約120[l/min]の消火用水を供給し、6基のスプリンクラによって対象領域（幅3[m]×延長12[m]）に散水した。斜面には傾斜計（DGP2-NS-5）3点とプロファイル土壌水分計（SoilVUE10）2点を設置して1分毎に観測値を取得した。また、変位計測用のターゲットを約1[m]間隔の格子状に配置し、約1時間ごとに3Dスキャナで位置を計測した。さらに、法尻付近の湧水を集めて三角堰に導き30秒ごとに湧水量を計測した（湧水量計測は観測機器の不具合により29日のみ）。対象斜面全景を図-1に示す。なお、傾斜計と土壌水分計は試験に先立って2021年10月から観測を開始している。

3. 結果

二日間の試験の結果、一部の土壌水分計が飽和、あるいは平衡状態に達したものの、斜面崩壊などの現象を生ずるには至らなかった。

図-3 a)に時間雨量換算した人工降雨供給量を、図-3

b)に傾斜計1の観測結果を、図-3 c)に土壌水分計1の観測結果を、図-3 g)に法尻湧水量の観測結果を示す。横軸は2022年5月28日0時0分を起点とする経過時間T[分]を表す。

3か所すべての傾斜計（図-1の傾斜計0、1および2）において散水に伴う変動（谷方向への傾き増加）を生じたが、散水終了の数時間後には散水前のレベルに戻った。時間当たり傾斜量変化の最大値は0.22[度/時間]であった。なお、傾斜計の座標はX+:谷方向、X-:山方向、Z+:鉛直上向とする右手系である。

2か所の土壌水分計（図-1の土壌水分計1および2）について、すべての観測深度で過去最大観測値に匹敵、あるいはそれらを超過する観測値を得た。特に、深度30cm~50cmにおいて過去の観測最大観測値を大きく超えた。また、深度100cmにおいては、特に初日について、観測値がほとんど変動しなかった。

初日の湧水量データは、残念ながら、観測機器の不具合により失われた。二日目の試験終了直前における湧水量は、人工降雨供給量の約4分の1であった。

ターゲットの変位は誤差範囲と考えられる微小なものであった。

4. 試験の再現計算

4.1 モデルの概要

降雨浸透解析と斜面崩壊の統合モデル¹⁾を用いて試験のシミュレーションを行なった。降雨浸透解析の基礎式はRichards式である。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot \{K(\psi)[\nabla(\psi + z)]\}$$

ここで、 ψ は圧力水頭、 $C(\psi)$ は比水分容量であり、 $K(\psi)$ は透水係数である。本研究では土壌の水分特性（含水率 θ と圧力水頭 ψ の関係）がLognormalモデルによって近似されると仮定し、

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = Q \left[\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right]$$

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

$$K(\psi) = K_s \left[Q \left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right) \right]^{1/2} \left[Q \left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right) + \sigma \right]^2$$

で計算する。ここに、 S_e は飽和度、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 ψ_m はメディアン孔隙径に対応する ψ 、 σ は対数正規分布とした孔隙径分布の標準偏差である。式中の θ_s 、 θ_r 、 ψ_m 、 σ 、 K_s が土層の降雨浸透に関するパラメータである。

斜面崩壊の安全率は簡易Janbu法で算出し、最小安全率断面はDP法によって求める。詳細は論文¹⁾に記載のとおりである。土層の安定に関わるパラメータは内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c 、乾燥単位体積重量 γ である。

4.2 計算条件

角田宇宙センターとその周辺で採取したサンプルの

測定結果をもとに表-1 のとおりパラメータを設定した。計算ノードの配置は、試験対象斜面の形状をもとに図-2 のように設定した。

表-1 設定したパラメータ

パラメータ	値・単位	設定根拠
θ_s	0.470934 [m ³ /m ³]	丸森町の崩壊地で採取したサンプルの pF 試験
θ_r	0.219854 [m ³ /m ³]	
ψ_m	-44.3888 [cm]	
σ	0.956456 [-]	
K_s	0.018002621 [cm/s]	同上の飽和透水試験
ϕ	15.2 [deg]	角田宇宙センター内サンプルの土質試験
c	2.035 [N/m ²]	
γ	1.215 [tf/m ³]	

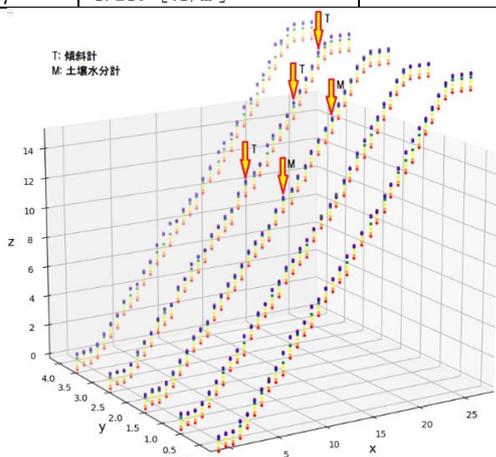


図-2 計算ノードの配置

4.3 計算結果

図-3 d), e), f) は斜面上端と、2 か所の土壌水分計観測地点における土壌水分量（体積含水率）の再現計算結果を示したものである。d), f) では、経過時間およそ T=800[分]で飽和あるいは平衡状態となり、降雨供給を停止した期間には飽和度がわずかに減少する、という実際の挙動(図-3 c)) と矛盾しない結果を得た。ただし、本研究では土中パラメータの不均質性を考慮しておらず、例えば、飽和に近い状態での体積含水率の深さ方向の差異や、ほとんど水が到達していない底層の挙動等は再現されていない。各層のパラメータを正確に設定することができれば、より正確な再現が可能と考えられ、今後の課題とする。

最後に、斜面崩壊に対する安全率の時間変化を図-3 h) に示す。安全率は降雨供給前で約 4.0、全層飽和の時点でも約 3.6 であった。この結果は、斜面崩壊が発生しなかったという試験結果と矛盾しない。ただし上述のとおり土中パラメータの空間分布が正確に反映されていないため、この結果のみから当斜面では崩壊が発生し得ないと結論づけることはできない。

5. 考察と結論

本試験では斜面崩壊などの事象を確認するには至らなかったが、土壌水分量の変動が深さ 50cm 付近で激しく、深さ 1m ではほとんど変動がないことなどに鑑みて、当該斜面においては厚さ 1m 以下の表層すべりの発生が最も疑われる。さらに、より大規模な斜面崩壊については、深さ 1m 地点（またはそれ以深）の土壌水分量の監視によって兆候を察知できる可能性があると考えら

れ、これらの知見をもとにソフト・ハード両面の土砂災害対策立案が可能となった。

さらに、今後も観測を続け、パラメータの正確性を向上させたシミュレーションを行うことで、より正確な斜面崩壊予測が可能となることが期待できる。

以上の検討結果を背景として、官民共創推進系開発センターは 2025 年の完成に向けて鋭意整備中である。

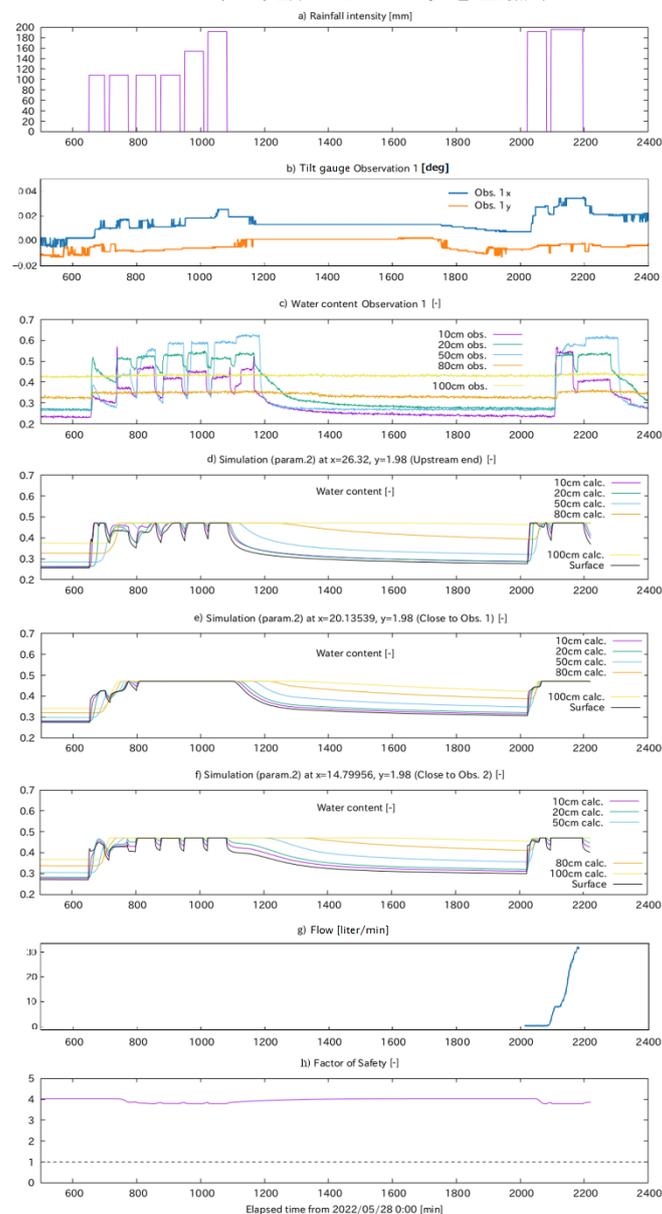


図-3 a) 試験降雨量, b) 傾斜計 1 の観測結果, c) 土壌水分計 1 の観測結果, d) 斜面上端部における土壌水分量の再現計算結果, e) 土壌水分計 1 の近傍における土壌水分量の再現計算結果, f) 土壌水分計 2 の近傍における土壌水分量の再現計算結果, g) 法尻湧水量の観測結果, h) 斜面の崩壊に対する安全率の計算結果

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP21H01436 の助成を受けたものである。

参考文献：

- 1) 堤大三ら, 水工学論文集, 第 51 巻, pp. 931-936, 2007.