

水みちの存在に着目した降雨及び地下水流を伴う斜面地盤の力学的安定性評価

長崎大学工学部 学生会員 ○加藤 優奈 長崎大学大学院 正会員 杉本 知史
長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 大嶺 聖

1 はじめに

近年、異常気象や梅雨期における集中豪雨が多発し、それに伴う斜面崩壊をはじめとした数多くの土砂災害が発生している。降雨時には、雨水浸透による間隙水圧の増大や地下水の流入量の増大に伴い、地盤内の有効応力が減少し、斜面崩壊へと至る可能性がある。また、山麓部の斜面では地下水位の変化が大きく、上流からの地下水流入量の影響も考慮すべきである。本研究では、水みちが存在すると想定される斜面内の浸透流と間隙水圧の変化を明らかにするため、数値解析により、経年的に地すべりが進行することで、斜面内の水みちに部分的に閉塞が生じる状況を再現した上で、地下水流が地下水位の変化に及ぼす影響を検討し、原位置の再現と降雨を伴う斜面地盤の安定性評価を行うことを目的としている。

2 対象斜面の概要

対象斜面は佐世保市内に位置する安定型産業廃棄物処分場跡地であり、地表面付近に土砂主体の産業廃棄物、その下が崖錐堆積物、基盤岩で構成されている。2013 年の大雨が原因で変状が生じ斜面下段で孕み出し、中段付近に大規模クラックが生じたことから、土砂の切り返しによる緩勾配化と表層 50cm 程度の覆土による遮水工が施されている。現状の斜面形状は法面勾配 1:1.5、高さは約 40m である。現在でも、降雨後に地下水位の上昇や軽微な斜面変状がモニタリング結果から確認されている。

3 数値シミュレーションについて

対象とする地盤を連続体とみなす代表的な数値解析手法としては、有限差分法と有限要素法が挙げられる。有限差分法(FDM)は構成則の定式化が容易であるため、陽解法による定式化に基づき時間増分ごとに応力-変形の計算を実行する場合には、有限要素法などよりも有利である。本研究では、P.A.Cundallらが開発した陽解法を基本とした大変形有限差分法解析コードである FLAC を用いることにした。

FLAC は多孔質媒体を対象とした浸透解析の機能を有しており、応力変形解析とは別に浸透解析単独での実施が可能であり、また、応力-浸透流連成解析も行える。

斜面の変状傾向や降雨、地下水位の条件に着目した弾塑性 FDM 解析を行うため、二次元斜面モデルを作成し、斜面の構成地質について異なる条件を与え、せん断強度低減法に基づいた斜面安定解析を実施した。シミュレーションの流れは、①斜面モデルの作成、物性値の設定、②地下水流の定常状態の再現、③降雨に伴う地下水流増の再現、④重力解析による斜面崩壊の有無の判定、の大きく 4 つに分けられる。

3.1 斜面モデルについて

対象とする斜面と同じ寸法の奥行き 140m、高さ 61.7m に設定した解析モデル(図-

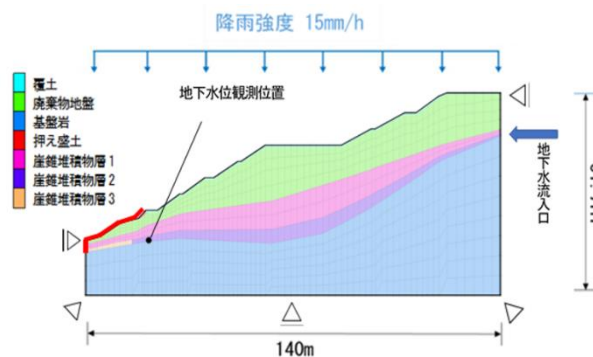


図-1 解析モデルの断面図

表-1 解析に用いる地盤物性値

	乾燥密度	せん断抵抗角	粘着力	ポアソン比	変形係数	間隙率	透水係数
	$\rho_d(\text{kg/m}^3)$	$\Phi(^{\circ})$	$c(\text{kN/m}^2)$	$\nu(-)$	$E(\text{MN/m}^2)$	$n(-)$	$k(\text{m/s})$
基盤岩	2300	-	-	0.15	1000	0.2	5.0×10^{-7}
崖錐堆積物1	1700	35	0	0.3	300	0.3	5.0×10^{-5}
崖錐堆積物2	1700	35	0	0.3	300	0.3	2.5×10^{-2}
産業廃棄物	1400	37	8	0.3	200	0.3	3.0×10^{-5}
覆土	1400	15	10	0.3	200	0.2	5.0×10^{-7}
押さえ盛土	2300	-	-	0.15	300	0.2	3.0×10^{-5}

表-2 崖錐堆積物層3の地盤物性値

	乾燥密度	せん断抵抗角	粘着力	ポアソン比	変形係数	間隙率	透水係数
	$\rho_d(\text{kg/m}^3)$	$\Phi(^{\circ})$	$c(\text{kN/m}^2)$	$\nu(-)$	$E(\text{MN/m}^2)$	$n(-)$	$k(\text{m/s})$
ケース①	1700	35	0	0.3	300	0.3	1.0×10^{-2}
ケース②							5.0×10^{-3}



写真-1 対象斜面末端

で確認された水みち

1)を作成した。解析に用いる物性値は表-1, 表-2 に示すように既往の研究に基づいて設定した。対象斜面での地下水位は, 斜面下方において数十 mm の降雨時に約 1~3m 上昇することが確認できた¹⁾。また, 地下水位の変動が降雨直後に生じており, 敏感な反応も確認できた。この状況を再現するため, 既往の研究結果に基づいて地盤内に水みちの存在が想定されるが, 実際写真-1 に示すように, 対象斜面末端で水みちを確認している。水みちは斜面土質内に存在するマクロポアやソイルパイプと呼ばれる大孔隙が, 土層中の水流の選択流となり, 斜面流出プロセスにおいて非常に重要な役割を果たすことが知られている。また, 水みちの閉塞等により急激に間隙水圧が上昇することによって斜面安定が低下することが, 斜面崩壊の要因の1つとも考えられている²⁾。水みちのイメージは図-2 の通りである。今回は, 水みちの末端部が閉塞されたと仮定し, 図-1 に示す崖錐堆積物層3の透水性が低下したと想定する部分の透水係数を2通りの $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ (ケース①), $5.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (ケース②) で解析を行った。

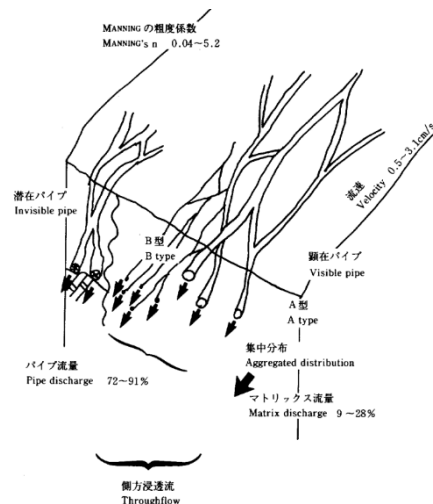


図-2 水みちのイメージ³⁾

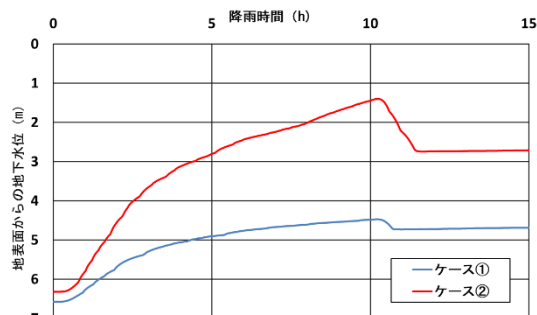


図-3 降雨時間と地表面からの水位の変化

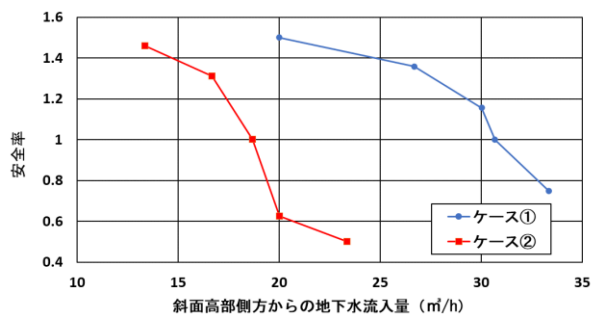


図-4 斜面高部側方からの地下水流入量と安全率の変化

3.2 地下水の定常状態と降雨と地下水位の変化

解析の手順として, それぞれ斜面高部側方から地下水の流れを与え, 定常的な地下水面 (地表面から約 6.5m) を再現し, 次に斜面表層から降雨強度 15mm/h, 総雨量 150mm を与え, 降雨を再現した。また, 降雨に伴い, 斜面高部境界からの地下水流入量も増加させた。図-3 に斜面高部境界からの地下水流入量が $20.01 \text{m}^3/\text{h}$ のときの降雨と地下水位の関係を示す。ケース①, ②の結果から斜面下部の透水係数を 1/2 倍にすると地表面からの地下水位の変化が約 2.5 倍となり, 現地で観測されている水位変化と同じ傾向を示した。

3.3 重力解析による斜面の安定性評価

本研究では, せん断強度低減法による全体安全率を算定した。また, 斜面高部境界からの地下水流入量の増加が安全率に与える影響を確認した。図-4 から斜面末端部の透水係数を 1/2 倍にすると, 安全率が 1.0 を下回るのに必要な地下水流入量が大幅に減少した。このことから, 水みちを伴う斜面において, わずかな地すべりによる変化がこの閉塞をもたらし, ひいては崩壊の危険性を高めることを示唆している。

4 おわりに

斜面地盤内に水みちが形成された後, 地すべりにより, 斜面末端部での水みちの閉塞による透水係数の低下によって, 降雨後に地下水が急上昇しやすくなり, 安全率が急激に低下することを確認した。斜面末端の水みちの閉塞の状況により崩壊の危険性が高まることから, 斜面末端部の透水係数を悪化させないための対策を講じることが必要である。

参考文献

1)山田直輝ら: 降雨および地下水流入に伴う斜面の力学的安定性に関する研究, 令和2年度土木学会西部支部研究発表会語概要集(CD-ROM), pp,321-322, 2021. 2)堤大三ら: 斜面土質内の選択流プロセスに関する実験とモデル化, 日本森林学会大会発表データベース, pp,437-437, 2009. 3)北原曜: 森林土質中の水移動におけるパイプ孔隙の特性に関する研究, 森林総合研究所研究報告, pp,42-43, 1994.