

斜面不安定化機構に水みちによる間隙水圧上昇が与える影響に関する実験的研究

国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 田中健貴・鈴木啓介

株式会社建設技術研究所 笹山隆・中西宏彰・戸舘光

1. はじめに

斜面土層内には水みちやパイプと呼ばれる連続した孔隙（以後、水みち）が存在することが知られている（Bernatek-Jakiel, & Nadal-Romero, 2022）。水みちはこれまで斜面崩壊跡地で見られ、近年報告されている緩勾配斜面における斜面崩壊跡地でも水みち痕跡が報告されている（海堀ら, 2018）。

このように、水みちが斜面崩壊発生に影響を与えていることが示唆されており、水みち閉塞による間隙水圧上昇（多田ら, 2002; Sharma, 2015）や水みち勾配変化や合流（Tanaka et al., 2019）によって間隙水圧が上昇し、斜面が不安定化することが指摘されてきた。水みち閉塞や勾配変化、合流といった水みち形状の変化はいずれも水みち排水機能の低下をもたらし、その結果水みち周辺土層への水移動が生じ、間隙水圧上昇をもたらすと考えられる。一方、この時水みちから周辺土層へ水移動が生じるため、土層重量も増加すると予想される。斜面安定を考えるうえでは、間隙水圧と土層重量の両方を考慮する必要があるが、これまでの研究では間隙水圧上昇のみが着目されてきた。

そこで、本稿では水みち形状ごとの間隙水圧および土層重量の時系列変化を模型実験によって計測し、水みち排水機能低下が斜面不安定化に与える影響を分析した。

2. 方法

本稿では図-1 の模型実験により水みちによる間隙水圧上昇および土層重量増加が斜面不安定化をもたらすプロセスを分析した。模型構造の詳細は Tanaka et al. (2019) を参照されたいが、緩勾配での斜面不安定化プロセスを考慮するため、実験土層の勾配は 25° と既往研究の勾配よりも小さくした。

ここで、水みちが縦断方向に形状変化することで、水みち排水量が低下し、水みち周辺土層への水移動が増加、これによって間隙水圧が上昇、斜面が不安定化すると考えた。これを検証するため、以下のケースを設定した。

- ・水みちを土層に埋設しない（ケース1, 2）
- ・土層に埋設した1本の水みちが勾配変化（ケース3, 4）
- ・土層に埋設した水みちが3本から1本に合流（ケース5, 6）
- ・土層に埋設された1本の水みちが閉塞（ケース7, 8）

なお、合流点および閉塞点は、勾配変化点より斜面上方に位置する。給水は人工降雨、貯水槽、高水槽から与えた。ここで人工降雨で与えた給水量は 8.8mm/sec である。貯水槽と高水槽からは Tanaka et al. (2019) と同様に30分ごとに5cmずつ給水水位を上げて給水した。



図-1 使用した模型

また、実験土層に設置したマンノメータ（実験土層上流側からA~J）によって実験土層底面の水位を5分毎に記録した。さらに、実験土層の重量を重量計で計測した。

水みちによる間隙水圧上昇および重量変化が斜面不安定化に与える影響を分析するため、計測したマンノメータ水位と重量を用いて無限長斜面の安定解析の式（1）、（2）で分析した。なお、崩壊時の粘着力は0と仮定した。

$$F_s = \frac{c + (\gamma - m\gamma_w)Z \cos^2 \theta \tan \varphi}{\gamma Z \cos \theta \sin \theta} \quad (1)$$

$$m = 1 - \frac{Z_w}{Z} \quad (2)$$

Fs:安全率, c:粘着力, γ_w :水の単位体積重量, Z:土層厚, θ :土層勾配, φ :内部摩擦角, Z_w :土層厚と水深の差

3. 結果

3.1 各ケースでの実験土層の不安定化プロセス

各ケースにおける不安定化までの時刻を示す。水みち1本のケースは他ケースと比較し不安定化までの時間が125分、125分と長い。水みちが3本合流するケースは実験開始直後から不安定化が始まっており、最終的に2ケースとも31分経過時に不安定化した。閉塞するケースは閉塞によるマンノメータ水位上昇と連動して32分、34分で不安定化が生じた。

3.2 各ケースのマンノメータ水位、重量、安全率の時系列変化

各ケースにおける斜面不安定時に最大値を示したマンノメータ水位、重量、安全率の時間変化を図-2に、各ケースのマンノメータごとの水位を図-3に示す。水みち1本が勾配変化す

るケース（ケース3, 4）は、水みちが無いケース（ケース1, 2）と比較してマノメータ水位は実験開始後60分までは小さく、60分以降は大きい。また、実験継続時間が長くなると、より斜面上方のマノメータ水位も上昇していた（図-3 ケース3, 4）。一方で、重量は60分頃までは小さい。水みちが合流するケース（ケース5, 6）は、実験開始直後からマノメータ水位が大きい。一方で、重量は1ケースで水みち無し（ケース1, 2）と水みち1本（ケース3, 4）よりも小さく、もう1ケースでは同程度だった。水みちが閉塞するケース（ケース7, 8）は、閉塞に連動してマノメータ水位が上昇した。重量は2ケースとも水みち1本（ケース3, 4）と同程度だった。

式(1)、(2)から求められるFsを斜面不安定化時の最大値を記録したマノメータ水位を用いて算出した（図-2 右）。その結果、勾配変化点、合流点、閉塞点は斜面不安定化が見られた際には、 $F_s < 1.0$ となっていた。

4. 考察

各ケースとも給水量が勾配変化点、合流点、閉塞点での排水能力を超過すると、マノメータ水位が上昇したと考えられる。ここで、水みち1本は他のケースと比較して、実験土層が不安定化する時刻が遅い。これは、勾配変化による水みち排水機能の低下が合流や閉塞と比べて小さいためと考えられる。つまり、実験開始後早い段階の給水水位が小さい時間では、ケース3, 4では水みちによる排水が機能したと予想される。その後、給水水位が大きくなると、十分に排水できず、水みち周辺土層の間隙水圧が上昇したと考えられる。このプロセスは、従来閉塞について考えられてきたが、勾配変化や

合流でも同様に考えられることが分かった。

水みちが1本のケースでは、勾配変化点を起点として間隙水圧上昇が上流側に伝播する様子が見られた。このことは、このケースにおいて斜面の広い範囲が不安定化する要因となったと考えられる。

5. まとめ

本稿では、模型実験によって水みち形状ごとの斜面不安定化プロセスを分析した。その結果、給水量が水みち排水量を上回る場所および時刻で間隙水圧が上昇し、斜面不安定化をもたらしたと考えられた。今後、斜面上方への間隙水圧上昇伝播が斜面不安定化に与える影響についても分析したい。

参考文献

- Bernatek-Jakiel, A., & Nadal-Romero, E. (2022). Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48, 72–86.
- 海堀正博ら：平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害、砂防学会誌, Vol. 71, No. 4, pp. 49-60, 2018.
- 多田泰之ら (2002)：パイプの存在が斜面崩壊に与える影響の実験的検討, 砂防学会誌, vol.55, No.3, p.12-20
- Sharma, R. H. (2015) : Laboratory experiments on the influence of soil pipes on slope failure, *Landslide*, 12, 2, p.345-353
- Tanaka, Y., Uchida, T., Nagai, H., & Todate, H. (2019). Bench-Scale experiments on effects of pipe flow and entrapped air in soil layer on hillslope landslides. *Geosciences*, 9(3), 138.

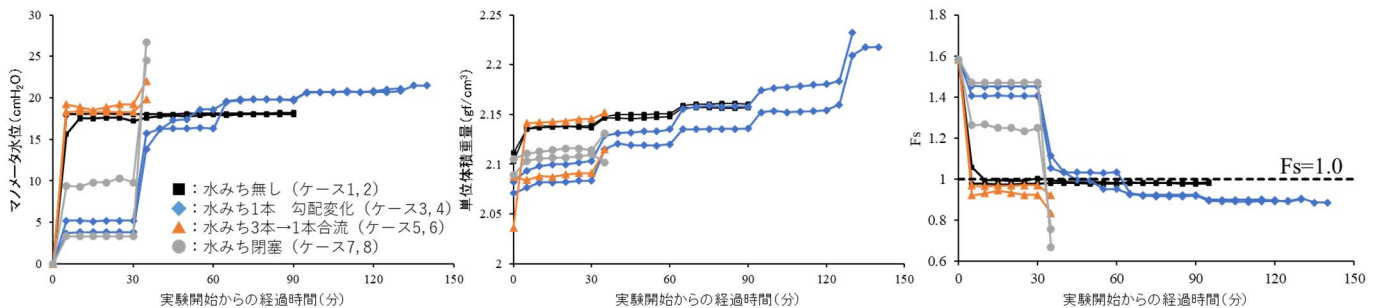


図-2 勾配変化点・合流点・閉塞点のマノメータ水位（左）、重量（中央）、安全率（右）の時間変化

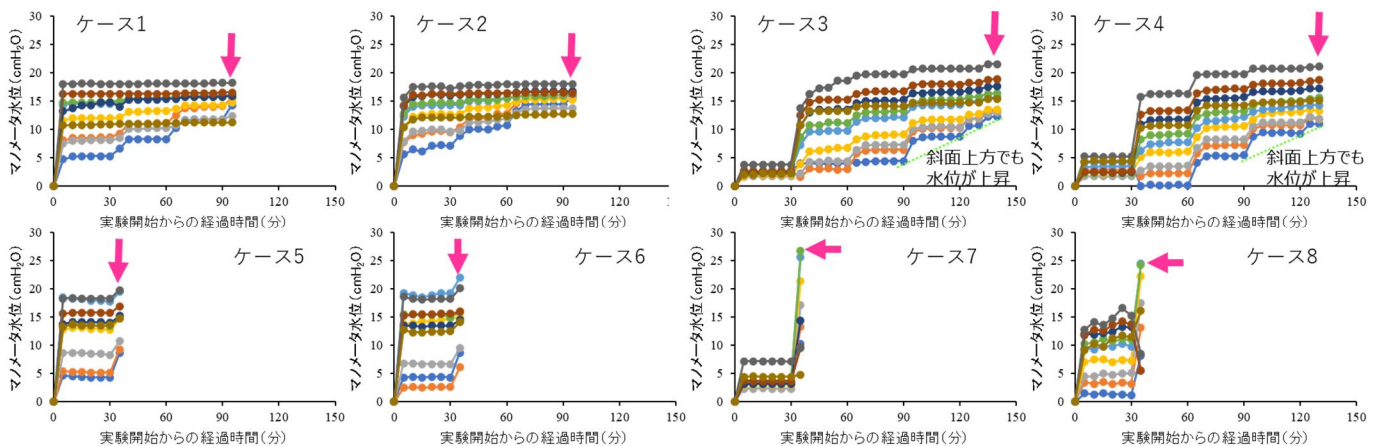


図-3 各ケースにおけるマノメータごとの水位の時間変化 矢印は不安定化タイミングを示す