

## 体積含水率からすべり面深度を予測する手法の検討

大阪大学 正会員 ○小泉 圭吾  
 大阪大学 非会員 塚部 聡太  
 岡山大学 正会員 小松 満  
 西日本高速道路(株) 正会員 堤 浩志

### 1. はじめに

近年、気候変化に伴う自然災害が多発している。特に突発的かつ局所的に発生する斜面災害はここ数年増加傾向にあり、その対策が課題として挙げられている。現行のソフト対策として、時間雨量、連続雨量、土壤雨量指数など、雨量を指標とした種々の基準が設けられているが、斜面崩壊の危険性を個別に評価することは難しい。これに対し、斜面への雨水浸透や水位の発生、変形を直接モニタリングすることで、個々の斜面の健全性を診断するための研究が進められている(例えば<sup>1)</sup>)。これらの研究は主として砂質土の斜面を対象としており、崩壊の要因となるすべり面の深度推定には一般に $N_d$ 値が用いられている。一方、 $N_d$ 値はあくまで地盤の締まり具合や硬さを表す指標であることから、実際に水位が発生するかしないかを直接推定できるわけではない。従って、すべり面を精度よく推定するためには、 $N_d$ 値から得られる情報に加え、地盤の透水性、保水性を評価するための指標が求められる。そこで本研究では、現在モニタリングに使用している土壤水分計の計測結果に着目し、この結果を使って斜面内の透水性、保水性を評価することですべり面の存在とその深度を推定する手法を検討した。

### 2. すべり面の予測手法

ここでは砂質土の斜面を対象に、体積含水率の変化からすべり面を推定する手法を検討する。任意の斜面において、降雨後、土中内の雨水が下方へと浸透していく過程において、すべり面を形成するような透水性の悪い層がある場合、すべり面の上層では水分が下層に排水できず浸潤面が停滞することで水位が形成されるものと考えられる。図1はすべり面が存在する場合と存在しない場合の、降雨直後からある時間までの深度ごとの体積含水率の減少速度を概念的に表した図である。同図における、“すべり面あり”の場合、浅い深度の水分は重力によって下方へ浸透するが、すべり面付近やその直上では飽和帯や毛管水帯が形成されることから、深度が深くなるに従って体積含水率の減少速度は相対的に遅くなることが予想される。従ってすべり面の上層を構成する砂質土の毛管水帯の高さが小さいと仮定すると、深度ごとの体積含水率の減少速度を直線で結び、減少速度がゼロとなる深度にすべり面が存在する可能性が考えられる。一方、“すべり面なし”においても、浅い深度に比べて深度が深いほど上方からの水分供給により体積含水率の減少速度は遅くなることが予想されるが、その差は“すべり面あり”よりも小さく、時間経過と共に、両者の違いが明瞭になる可能性が考えられる。

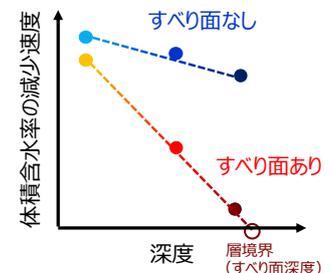


図1 体積含水率の減少速度と水位の関係

### 3. 解析による予測手法の妥当性の検証

図1に示す仮説の妥当性を検証するため、すべり面を模擬した一次元解析モデルを作成し、飽和-不飽和浸透流プログラム(HYDRUS)を用いて評価した。

#### 3.1 解析による予測手法の妥当性の検証

図2に解析モデルを示す。ここでは層境界(すべり面と仮定する)を深度120cmとし、すべり面あり、なしを模擬するために上・下層の透水係数に差を設けた。具体的には、表1に示す2ケースの解析モデルを用意し、上層に対して下層の透水係数を1倍、1/10倍、1/100倍、1/1000倍の4パターン設定し、下層の透水係数が小さい方がすべり面ありに分類される。上層の透水係数は一般的なマサ土が持つと思われる大よその透水係数の上限と下限を想定して設定し、それ以外の水分特性パラメータは既往の文献等を参考に設定した。また、観測深度は実斜面におけるセンサの設置位置に合わせて、深度20cm、80cm、100cmとした。降雨強度は30mm/hとし、浸潤面が境界層に到達した時点で停止した。その後、各観測深度における体積含水率が減少し始めた時点の時点と、12分後、32分後、60分後と時間間隔を変化させて、各経過時間における体積含水率の減少速

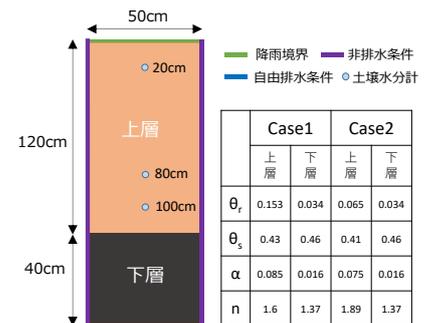


図2 解析モデル

表1 解析モデルの透水係数

| Case  | 層  | $K_s$ (cm/min)    |                      |                      |                      |
|-------|----|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|       |    | ①                 | ②                    | ③                    | ④                    |
| Case1 | 上層 | $k_1: 0.57$       |                      |                      |                      |
|       | 下層 | $k_1 \times 10^0$ | $k_1 \times 10^{-1}$ | $k_1 \times 10^{-2}$ | $k_1 \times 10^{-3}$ |
| Case2 | 上層 | $k_2: 0.074$      |                      |                      |                      |
|       | 下層 | $k_2 \times 10^0$ | $k_2 \times 10^{-1}$ | $k_2 \times 10^{-2}$ | $k_2 \times 10^{-3}$ |

キーワード 表層崩壊, 体積含水率, すべり面

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科

TEL:06-6879-7346

度を算出し、図1の概念図を基に推定されるすべり面深度（以下、推定すべり面深度とする）について評価を行った。

### 3.2 解析結果と考察

図3はCase1-①および④の体積含水率の減少速度の経時変化を示している。なお、層境界に飽和帯が形成されたことにより、減少速度が負の値（上向き）を示した場合、その減少速度は便宜上ゼロとしてプロットする。これらの図より、すべり面の深度は時間経過と共に変化しており、図1の概念図のように一義的に決まらないことが確認できる。Case1-①では、60分経過後の推定すべり面深度が層境界である120cmと概ね一致するが、時間が経過するにつれてその深度は深い方（図中矢印）へと変化していることがわかる。一方、Case1-④では、60分経過後の推定すべり面深度は120cm付近を示すが、時間経過と共にその深度は浅い方（図中矢印）へと変化していることがわかる。

図4はCase2-①および④の体積含水率の減少速度の経時変化を示している。図3と同様、減少速度が負の値（上向き）を示した場合、その減少速度は便宜上ゼロとしてプロットする。Case2-①では、時間経過と共に推定すべり面深度は深い方へと変化するのに対し、Case2-④では浅い方へと変化しており、図3のCase1-①および④と同様の傾向を示した。そこでこれらの関係を明らかにするために、図5、図6にCase1-①～④およびCase2-①～④における推定すべり面深度の経過時間ごとの変化をそれぞれ示す。

図5より、経過時間が60分までは下層の透水係数に関係なく推定されるすべり面深度はほぼ同一の値を示し、また時間経過と共にその深度が深くなる傾向が確認された。その後、120分、180分と時間が経過するにつれて推定されるすべり面深度に違いが見られることがわかる。具体的には、透水係数が大きなCase1-①、②では、時間経過と共に推定すべり面深度が深くなる傾向がみられる。これに対し、Case1-③のように透水係数が小さくなると傾きが緩やかになり、推定すべり面深度が層境界である120cm付近に近づいている傾向がみられる。またCase1-④のように更に透水係数が小さくなると、時間経過と共に推定すべり面深度が層境界よりも浅い方へと変化していることがわかる。これは層境界に到達した浸潤線によって飽和帯が形成され、毛管水帯の影響で深度100cmの減少速度が負の値（上向きの速度）に変化したことが原因である。これらの結果を基に図6の結果を解釈すると、図5と同様、透水係数が大きなCase2-①、②では、時間経過と共に推定すべり面深度が深くなる傾向がみられ、逆に透水係数が小さいCase2-③、④では、層境界と概ね一致する120分後の推定すべり面深度を最下点とする下に凸の分布傾向が見られた。

以上の結果を考察すると、推定されるすべり面深度の経時変化を捉えることで、層境界の有無、すなわちすべり面あり、なしの判別が可能であり、またすべり面ありと判別された場合の深度は時間経過と共にグラフの傾きがゼロに近づいた時点の深度、或いは下に凸のグラフの最下点付近の深度である可能性が示唆された。

### 4. 結言

本研究では表層崩壊の素因の1つであるすべり面の有無とその深度を予測することを目的に、降雨後の土中の体積含水率の減少速度から、これらを予測する手法を解析的に検討した。その結果、体積含水率の減少速度の経時変化を分析することで、すべり面の有無およびその深度を推定できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究の一部は科研費（17K0061 および 19K04599）による支援を受けた。ここに記して謝辞を述べる。

#### 参考文献

1) 小泉圭吾, 堤浩志, 小田和広, 伊藤真一, 小松満: 擬似飽和体積含水率に着目した現場計測データに基づく豪雨時ののり面監視手法に関する研究, 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, pp. 287-291, 2019.

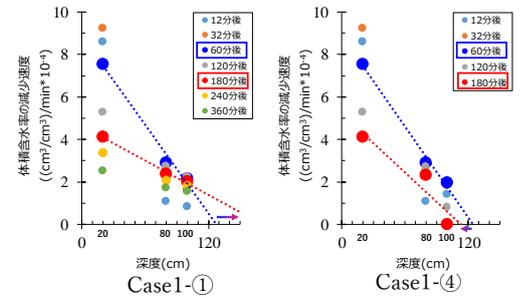


図3 体積含水率の減少速度の経時変化(Case1)

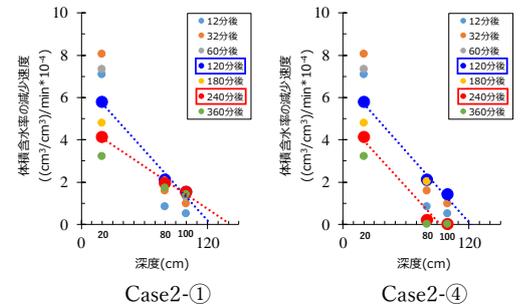


図4 体積含水率の減少速度の経時変化(Case2)

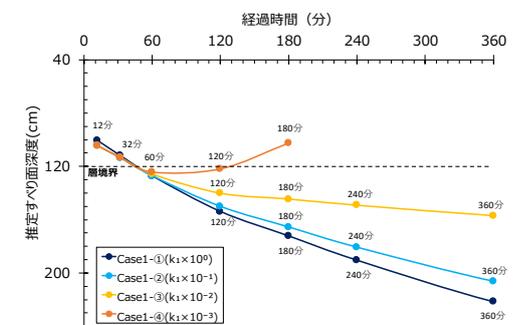


図5 推定すべり面深度の経過時間ごとの変化(Case1)

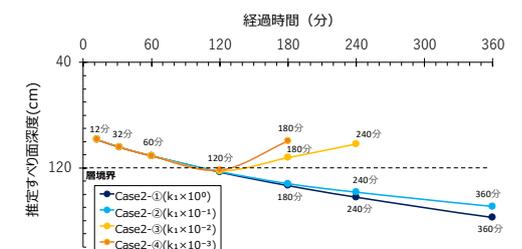


図6 推定すべり面深度の経過時間ごとの変化(Case2)