

1. はじめに

降雨時の表層の斜面崩壊を考えるには、不飽和土の浸透特性や強度特性を考慮する必要がある。しかしながら、従来の斜面安定解析では十分に不飽和域の浸透特性が考慮されていない。そこで、Sakoら<sup>1)</sup>は不飽和土中の浸透力や浮力を考慮した斜面安定解析手法を提案している。本論文では、提案する解析手法を用いて従来の解析手法と比較した。斜面内の飽和度が一様に変化する場合と、地下水位が変化する場合を計算し、その結果を示す。

2. 不飽和土中の浸透力について

浸透力とは、土塊中での浸透水の流れが土粒子に及ぼす力である。ある体積Vの飽和土中をある動水勾配iで水が流れる場合の浸透力は次式で表される。

$$J_{sat} = j \cdot V = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot V \quad (1)$$

ここで、 $J_{sat}$ :飽和土中の浸透力、 $j$ :単位体積当たりの浸透力、 $\rho_w$ :水の密度、 $g$ :重力加速度。

不飽和土中の浸透力についても、水のみが存在する部分で考えると単位体積当たりの浸透力は式(1)で表すことができる。不飽和土の体積は間隙中の水と空気、それとそれぞれに接する土粒子に分けることができる。不飽和土中の浸透力は水と接する土粒子のみ作用していると考えられる。そこで、不飽和土中の浸透力が作用する体積について考えると、浸透力が影響する体積 $V_j$ は次式のように示される。

$$V_j = V_w + V_{s,w} \quad (2)$$

ここで、 $V_w$ :間隙中の水の体積、 $V_{s,w}$ :水と接する土粒子の体積。

飽和度 $S_r$ は間隙中の水の体積の割合で求めることができ、水と接する土粒子の体積と土粒子の体積 $V_s$ の比は、飽和度と相関があると考えられる。よって式(2)は次式で示すことができる。

$$V_j = S_r (V_v + V_s) = S_r \cdot V \quad (3)$$

式(3)より、不飽和土中の浸透力 $J_{unsat}$ は次式で示される。

$$J_{unsat} = j \cdot V_j = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot S_r \cdot V \quad (4)$$

3. 不飽和土中の浮力について

地下水以深における浮力は、次式で示される。

$$P_{v,sat} = \rho_w \cdot g \cdot V = \rho_w \cdot g (V_w + V_s) \quad (5)$$

ここで、 $P_{v,sat}$ :飽和土中の浮力。

不飽和土中の水部分にも浮力が働くと考えると、式(4)を式(5)に適用して次式が得られる。

$$P_{v,unsat} = \rho_w \cdot g (V_w + V_{s,w}) = \rho_w \cdot g \cdot S_r \cdot V \quad (6)$$

ここで、 $P_{v,unsat}$ :不飽和土中の浮力。

4. Janbuの斜面安定解析について

本論文では、斜面安定解析手法として非円弧のすべり面に対応できる極限平衡法の一つであるJanbu法を用いた。体積法による安全率の式は次式のように求められる。

$$F_J = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{cb_i + (W_i - \Delta V_i - P_{vi}) \tan \phi + (J_{xi} \sin^2 \alpha_i + J_{zi} \cos^2 \alpha_i) \tan \phi}{(\cos^2 \alpha_i + \sin \alpha_i \cos \alpha_i \tan \phi / F_{ji})} \right]}{\sum_{i=1}^n [(W_i - \Delta V_i - P_{vi}) \tan \alpha_i + J_{zi}] \quad (7)$$

ここで、 $F_J$ :安全率、 $c$ :見かけの粘着力、 $b$ :スライス幅、 $W$ :スライスの自重、 $V$ :鉛直成分のスライス間力、 $\phi$ :内部摩擦角、 $\alpha$ :斜面の傾斜角。

5. 計算結果と考察

式(7)中の浸透力・浮力に対して式(4)、(6)を適用することで不飽和状態の斜面の安定性を評価することができる。そして、不飽和土中の浸透力・浮力を考慮する提案する解析と考慮しない従来の解析との安全率の変化を比較する。

|         |                        |
|---------|------------------------|
| 試料      | 川内しらす                  |
| 土粒子密度   | 2.58 g/cm <sup>3</sup> |
| 間隙比     | 1.395                  |
| 見かけの粘着力 | 4.2 kPa                |
| 内部摩擦角   | 38.0 °                 |

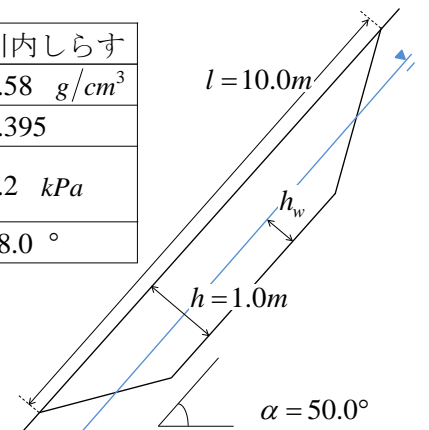


図1 入力値と斜面形状

Case1として、斜面内の飽和度が一様に変化する場合を考え、計算結果を図2に示す。入力値と斜面形状は図1に示す通りとし、今回はせん断強度パラメータ( $c, \phi$ )は飽和度に依存せず一定とした。図2より、乾燥時と飽和時で安全率が一致することがわかる。これは、従来の解析では飽和時のみ浸透力・浮力を考慮するため、安全率が急激に低下している。従来の解析での安全率の低下は土塊自重の増加によるが、提案した解析では土塊の自重の増加に加えて不飽和土中の浸透力・浮力の影響を考慮したため、従来の安全率を常に下回っている。提案した解析手法では安全率の低下が連続的な変化を示していることから、不飽和土中の評価方法は妥当ではないかと考えられる。

Case2として、地下水位が変化する場合を考え、計算結果を図4に示す。入力値と斜面形状はCase1と同様である。また、せん断強度パラメータもCase1と同様に一定とした。地下水面は図1に示すように斜面と等しい角度とし、水位 $h_w$ はすべり面で0m、斜面表面で1mとした。また、地下水面に直行するように等ポテンシャル線を設定した。等ポテンシャル線上では、間隙水圧は静水圧分布となり、地下水が浅の間隙水圧は負(サクション)になる。Case2の不飽和域における飽和度分布は、間隙水圧分布から図3に示す水分特性曲線をもとに設定した。結果より、従来の解析では地下水位上昇に対して、直線的に安全率が低下している。提案した解析では地下水位上昇に伴い、不飽和域が減少するため、徐々に安全率は低下している。また、地下水位が高くなるとすべり土塊中の飽和度がほぼ飽和に近くなり、安全率の低下が小さくなる。また、地下水面が斜面表面と一致すると従来の結果と同じ値を示した。よって、提案した解析手法では、地下水位変動時の斜面の安定性をより合理的に評価できると考えられる。

## 6. おわりに

本論文では、不飽和土中の浸透力・浮力を考慮した斜面安定解析の計算例を示し、合理的な結果を得たと考えられる。今後、不飽和浸透解析と組み合わせた安定解析を行う予定である。

**謝辞:**本研究は、科研究費(若手 A)(24686056、酒匂)の支援を受けた。ここに、謝意を示す。

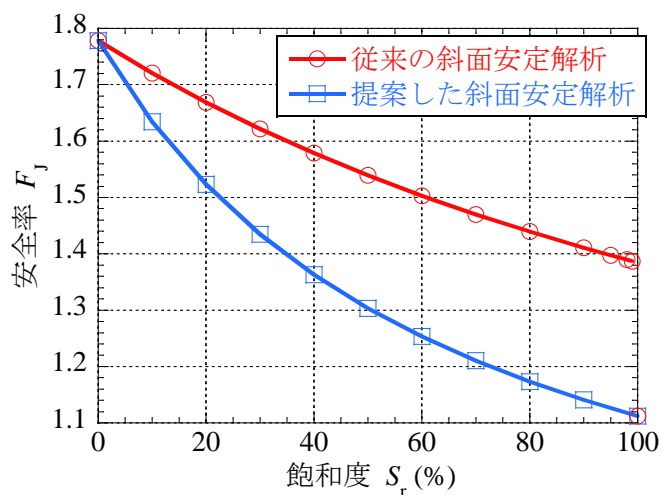


図2 Case1:飽和度が一様に変化する場合

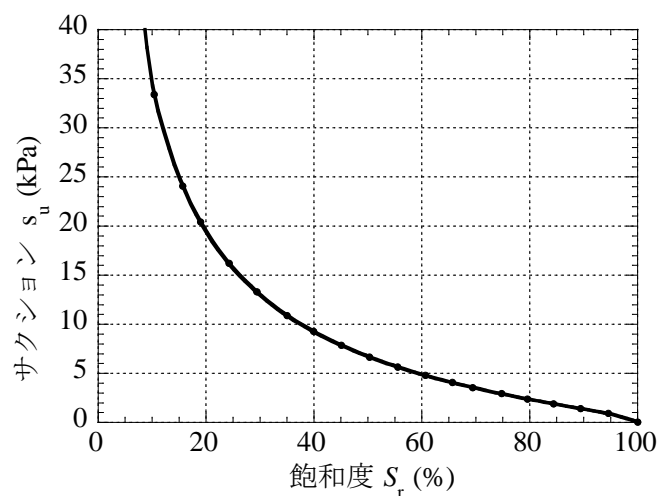


図3 水分特性曲線

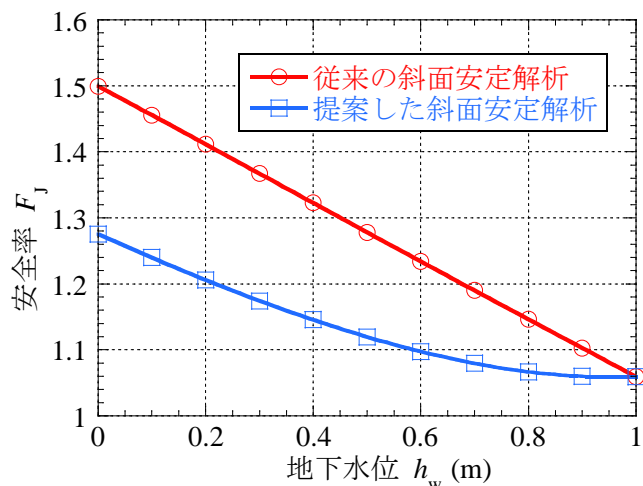


図4 Case2:地下水位が変化する場合

**参考文献:** 1) K. Sako, M. Tabata, R. Kitamura, M. Niisaka: Slope stability analysis by considering unsaturated seepage force in unsaturated slope, Proc. of the sixth International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2014), pp.1279-1285, 2014.