

鹿児島大学 学生会員 ○宇都遼太郎
鹿児島大学院 正会員 酒匂一成

1.はじめに

著者らは、降雨時の斜面の安定性を定量的に評価するために、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¹⁾。本論文では、提案する解析手法に、飽和度の増加に伴う見かけの粘着成分の低下を考慮した解析を行い、従来の解析手法と比較する。

2.不飽和土中の浸透力および浮力を考慮した斜面安定解析

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。

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

ここに、 J_{sat} :飽和土中の浸透力、 j :単位体積当たりの浸透力、 ρ_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。不飽和土中の浸透力は水と接する土粒子のみに作用していると考えられ、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、次式で表される。

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

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

水と接する土粒子の体積 $V_{s,w}$ 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式(2)は、次式のように表される。

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

よって、不飽和土中の浸透力 J_{unsat} は次式となる。

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

また、地下水以深における浮力は、次式で示される。

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

ここに、 $P_{v,sat}$: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)に適用させると、次式が得られる。

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

ここに、 $P_{v,unsat}$:不飽和土中の浮力。

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。体積力法による安全率の式は式(7)で表され、上述した不飽和土の浸透力や浮力を代入して計算を行う。

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

ここで、 F_j :安全率、 c :見かけの粘着成分、 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、 ϕ :内部摩擦角、 α :斜面の傾斜角。

3.飽和度と見かけの粘着成分に関する数値力学モデル

飽和度と見かけの粘着成分の関係を考慮した斜面安定解析を行うために、Sako らが提案する式(8)に示すような数値力学モデル²⁾を用いた。

$$c_1 = \frac{\pi}{4 \cdot (\pi - 2)} \cdot \bar{F}_i \cdot N_c \cdot \tan \phi \quad (8)$$

ここに、 $\bar{F}_i$:粒子接触面に垂直に働く粒子間力、 N_c :単位体積当たりの粒子接点数、 ϕ :内部摩擦角、 c_1 :サクシオンに起因する見かけの粘着成分。

なお、粒子間力は、次式で表される。

$$F_i = 2 \cdot \pi \cdot r' \cdot T_s + \pi \cdot r'^2 \cdot s_u \quad (9)$$

ここに、 r' :メニスカス曲率半径、 T_s :表面張力、 s_u :サクシオン。

4.計算結果と考察

図1に試料の条件と斜面形状を示す。また、斜面内の飽和度は一様に変化すると仮定する。

本論文では、図1の条件の下、1)不飽和土中の浸透力を考慮しない従来の斜面安定解析(Case1)、2)不飽和土中の浸透力を考慮した解析(Case2)、3)Case2に加え、飽和度と見かけの粘着成分を考慮した解析(Case3)について検討する。

図2に Case1 と Case2 を比較した解析結果を示す。図より乾燥時と飽和時では同じ値を示すが、それ以外

の飽和度では不飽和土中の浸透力を考慮した安全率 (Case2)のほうが小さくなることが分かる。また、Case1では、飽和時のみに浸透力を考慮するため、 $S_r=100\%$ 時に安全率が急激に低下していることが分かる。

図3は、Case2とCase3の解析結果を比較したものである。飽和度と見かけの粘着成分の関係は図4に示される結果を用いている。飽和度が増加すると共に粘着成分が低下するため、高飽和度域において、Case3の安全率がCase2よりも小さくなることが分かる。しかし、図3のグラフのCase2とCase3を比較すると、安全率に大きな差が見られなかった。これは、見かけの粘着成分の変化が微小であったため、安全率にあまり影響を与えなかったと考えられる。また、今回は飽和度 $S_r=56.2\%$ 、見かけの粘着成分 $c=36.9\text{kPa}$ の試料を用いたため、飽和度 $S_r=56.2\%$ 付近では、Case2とCase3は同じ安全率となる。

7.おわりに

本論文では、不飽和土中の浸透力・浮力および飽和度と見かけの粘着成分の関係を考慮した斜面安定解析手法を示した。今後は、不飽和浸透解析を組み合わせた安定解析を行いたい。

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.

2) K.Sako, R.Kitamura, M.Yamada:A consideration on effective cohesion of unsaturated sandy soil, Proc. of the 4th International Conference on Micromechanics of Granular Media, Powders and Grains 2001, pp.39-42,2001.

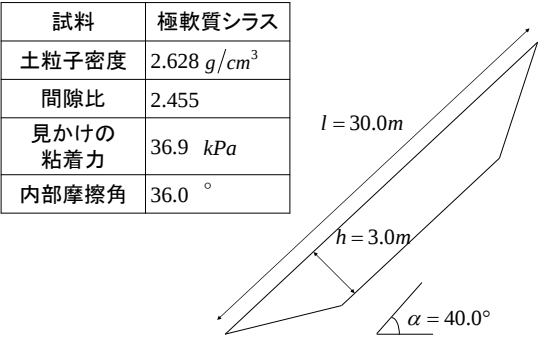


図1 試料の条件と斜面形状

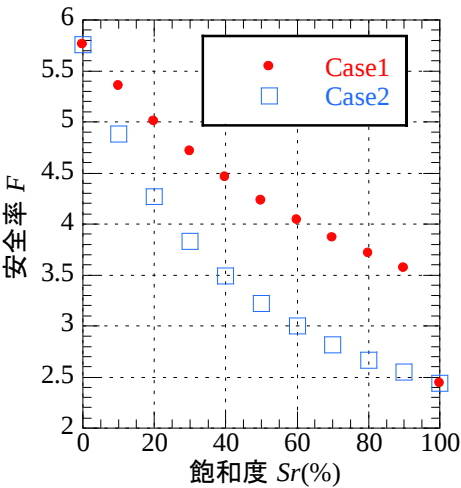


図2 飽和度と安全率の関係(Case1とCase2)

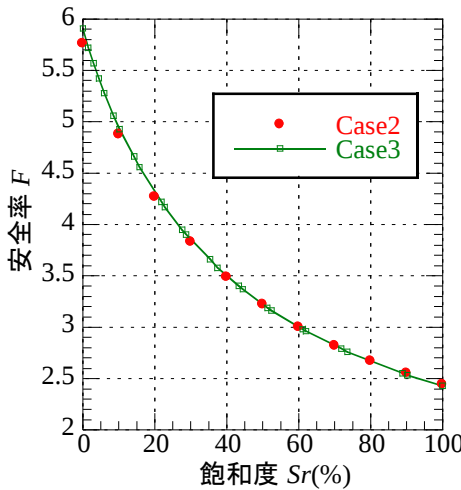


図3 飽和度と安全率の関係(Case2とCase3)

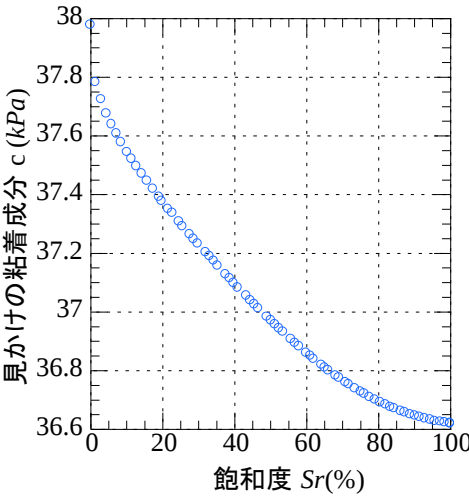


図4 飽和度と見かけの粘着成分の関係