

不飽和土塊に作用する力を考慮した無限斜面法における 2 粒子モデルを用いた影響面積の決定方法に関する一考察

鹿児島大学 学生会員 ○岡田 秀斗, 東元 大介
鹿児島大学学術研究院 正会員 酒匂 一成, 伊藤 真一

1. はじめに

一般的に用いられる極限平衡法に基づく斜面安定解析では、不飽和土中の浸透挙動の影響が十分に考慮されていない。そこで、津山ら¹⁾は、不飽和土塊に作用する力を考慮した斜面安定解析手法を提案してきた。しかし、力学的効果が同じであるはずの“不飽和土中の浸透力と圧力水頭差による体積力を考慮した体積力法”と“不飽和土中の負の間隙水圧を考慮した水圧法”から算出される安全率が一致しないという課題が生じた。その原因の一つとして、負の間隙水圧が作用する断面積の影響が考えられる。そこで、本研究では、2 粒子モデルを用いた負の間隙水圧の作用面積の決定方法を検討し、計算結果の改善効果を検証する。

2. 不飽和浸透を考慮した無限斜面法

式(1)、式(2)に津山ら¹⁾により提案された不飽和浸透を考慮した体積力法および水圧法による無限斜面法の安全率の式を示す。

$$F_i = \frac{c + (W - P_{v,unsat}) \cos \beta \tan \phi}{J_{unsat} + (W - P_{v,unsat}) \sin \beta} \quad (1)$$

$$F_i = \frac{c + (W \cos \beta - U_{unsat}) \tan \phi}{W \sin \beta} \quad (2)$$

ここに、 c : 粘着力、 W : すべり土塊の自重、 β : 斜面の傾斜角、 ϕ : 内部摩擦角、 $P_{v,unsat}$: 不飽和域における浮力、 J_{unsat} : 不飽和域における浸透力、 U_{unsat} : 不飽和域における間隙水圧の合力。

不飽和域における浸透力 J_{unsat} は、土塊中に空気が含まれることから、浸透力が作用する体積 (影響体積) が飽和度に依存すると仮定し、次式のように示す。

$$J_{unsat} = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot S_r \cdot V \quad (3)$$

ここに、 S_r : 飽和度、 V : すべり土塊の体積、 ρ_w : 水の密度、 g : 重力加速度、 i : 動水勾配。

不飽和域における浮力 $P_{v,unsat}$ は不飽和状態のすべり土塊に作用する圧力水頭差による体積力として表され、次式のように示される¹⁾。

$$P_{v,unsat} = \frac{U_{unsat}}{\cos \beta} \quad (4)$$

次に、不飽和域における間隙水圧の合力 U_{unsat} に関して、すべり土塊側面に働く水圧の合力 E_1, E_2 は、力の釣り合いから相殺されるため、すべり土塊の上下面に働く間隙水圧の合力を考える。すべり土塊の上面およびすべり土塊の下面に作用する間隙水圧の合力をそれぞれ、 U_{unsat1} 、 U_{unsat2} とすると、間隙水圧の合力は、次式で表される¹⁾。

$$U_{unsat} = U_{unsat1} - U_{unsat2} \quad (5)$$

$$U_{unsat1} = u_{unsat1} \times A_{w1} \quad (6)$$

$$U_{unsat2} = u_{unsat2} \times A_{w2} \quad (7)$$

ここに、 u_{unsat1}, u_{unsat2} : 土塊の上下面に作用する間隙水圧、 A_{w1}, A_{w2} : すべり土塊上下面において間隙水圧が作用する断面積 (影響面積)。

なお、影響面積 A_w は、すべり土塊の上下面の断面積 A と次式のような関係を示す¹⁾。

$$A_w = \alpha \cdot A \quad (8)$$

ここに、 α : 影響面積を決定する係数。

α は飽和度に依存する係数と思われるが、どのような値になるか未解明であり、体積力法と水圧法の結果が一致しない原因になっていると考えられる。

3. 影響面積 A_w を決定する係数 α の決定方法の検討

ここでは、影響面積を決定する係数 α について検討する。Uto ら³⁾は、 α として不飽和域の土塊の平均飽和度を用いていたが、式(9)に示すような津山らが提案した体積と面積の比率に着目した 2 乗 3 乗法則による式を用いることで、体積力法と水圧法の安全率の差が小さくなることが報告されている¹⁾。

$$\alpha = \sqrt[3]{S_r^2} \quad (9)$$

そこで、本研究では、さらに体積力法と水圧法の安全率の差を小さくするために、図-1 に示した 2 粒子モデルから考慮した α の提案を試み、式(10)に示すような α を求めた。

$$\alpha = \frac{\pi r'^2}{\pi (D_s/2)^2} \quad (10)$$

$$r' = \frac{D_s}{2} \sin \theta \tag{11}$$

ここに、 D_s : 粒子の直径、 r' : メニスカス曲率半径、 θ : 土粒子半径とメニスカス曲率半径の接触角。

式(11)を式(10)に代入することで、係数 α は次式のよう
に表される。

$$\alpha = \sin^2 \theta \tag{12}$$

ここで、 α は飽和度に依存する関係であると考えられるため、メニスカス曲率半径の接触角 θ と飽和度の関係について、図-2 から 2 ケース求めた。Case1 は、図-2 の x - y 軸の 2 次元平面から、水を含む面積を空隙全体の面積で割ることで飽和度 S_{rcase1} を算出した。

$$S_{rcase1} = \frac{\sin \theta - \frac{1}{2} \sin \theta \cos \theta - \pi \times \frac{\theta}{360}}{1 - \frac{\pi}{4}} \tag{13}$$

Case2 は、図-2 の y 軸まわりに回転させた 3 次元の空間から、水を含む体積を空隙全体の体積で割ることで飽和度 S_{rcase2} を算出した。

$$S_{rcase2} = \sin^3 \theta \tag{14}$$

斜面安定解析を行う際に、すべり土塊の飽和度は把握できることから、式(13)または式(14)にその飽和度を代入し、 θ を求め、式(12)から係数 α を求めることができる。

4. 提案手法による改善効果の検証

ここでは、津山ら¹⁾が実施した地下水位が変動する場合の解析の条件を用いて、 α に関する提案手法による改善効果について検討する。なお、斜面形状や入力値等は紙面の都合上、参考文献²⁾で確認されたい。

式(9)で計算した安全率を既往研究とし、式(13)と式(10)から求まる係数 α を用いた解析を Case1、式(14)と式(10)から求まる係数 α を用いた解析を Case2 として、安全率の改善効果を検証する。

図-3 に、解析結果を示す。既往研究による安定解析では、地下水位が $h < 0.0\text{m}$ の範囲(すべり面より地下水位が下にある状態)では、水圧法の安全率が体積力法の結果より大きい、地下水位 0.0m (すべり面に地下水位がある状態)付近で急激に低下し、水圧法の安全率の方が小さくなる。地下水位 0.4m 以上 (すべり土塊中に地下水位がある状態) になると体積力法の安全率とほぼ一致していることがわかる。一方で、Case1 では、体積力

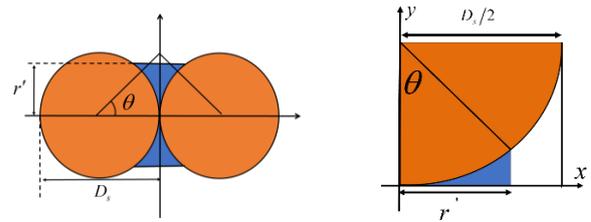


図-1 2 粒子モデル

図-2 1/4 粒子モデル

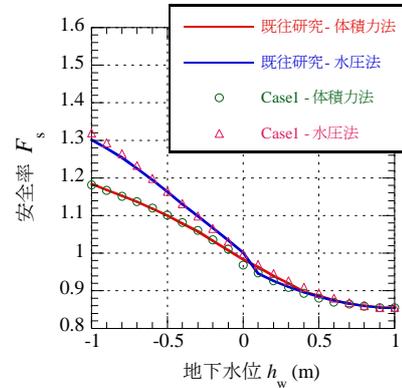


図-3 解析結果

法と水圧法で安全率の大きさが入れ替わることはなかった。また、Case2 は、係数 α は既往研究と一致したが、安定解析において多少の誤差が生じる結果となった。この原因として、飽和度を求める際の近似曲線の取り方に誤差が生じたものと考えられる。以上のことから、2 粒子モデルを用いた影響面積 A_w (負の間隙水圧の作用面積) を決定する α を提案したが、大きな改善効果を得ることはできなかったと言える。

5. おわりに

本研究では、2 粒子モデルを用いた負の間隙水圧の作用面積の決定方法を検討し、既往研究との改善効果を検証した。その結果、既往研究と同程度の計算結果となり改善効果を得ることができなかった。今後、解析結果を改善し得る新たな式の提案を試みたい。

参考文献

1)津山雅徳ほか：不飽和土中の間隙水圧の影響を考慮した無限斜面法の改良に関する検討，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.75, No.2(応用力学論文集 Vol.22), 1_371-1_378, 2019. 2) Sako, K., Tabata, M., Kitamura, R., Niisaka, M.: Slope stability analysis by considering unsaturated seepage force in unsaturated slope, Proc. of the sixth International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT2014), pp.1279-1285, 2014. 3) R. Uto, K. Sako, and R. Kitamura: Study on a slope stability analysis expressed by the body force method considered unsaturated seepage, Proc. of the 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, JGS-016, 2019.