

## 不飽和浸透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力学的検討

鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 ○東元 大介, 岡田 秀斗  
鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 正会員 酒匂 一成, 伊藤 真一

### 1. はじめに

これまでに、多くの研究者が降雨時の浸透挙動を考慮した斜面安定解析手法を提案している<sup>1)</sup>が、不飽和浸透を考慮した斜面安定解析の検討は不十分であるように思われる。そこで、津山ら<sup>2)</sup>は極限平衡法の一種である無限斜面法において、不飽和土中の浸透挙動を考慮した斜面安定解析を提案してきた。しかし、力学的効果と同じであるはずの“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（以下、影響面積）の影響が考えられる。そこで、本研究では、土粒子間における水と空隙の割合を評価することができる2粒子モデルを用いて、影響面積の決定方法を力学的に検討し、既往研究の結果との改善効果を確認した。

### 2. 不飽和浸透を考慮した無限斜面法

本研究では、津山らによって提案された不飽和浸透を考慮した体積力法と水圧法による無限斜面法を用いて斜面安定解析を行った。式(1)に体積力法の安全率  $F_b$ 、式(2)に水圧法の安全率  $F_w$  をそれぞれ示す。

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

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

ここに、 $c$ : 見かけの粘着成分、 $W$ : すべり土塊の自重、 $\beta$ : 斜面の傾斜角、 $\phi$ : 内部摩擦角、 $P_{v,unsat}$ : 不飽和域における圧力水頭差による体積力、 $J_{unsat}$ : 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。

紙面の都合上、不飽和域における浸透力  $J_{unsat}$  と圧力水頭差による体積力  $P_{v,unsat}$  の詳細は参考文献<sup>2)</sup>を参照されたい。式(3)は、不飽和域における間隙水圧の合力  $U_{unsat}$  を示す。これは、すべり土塊の上面およびすべり土塊下面に作用する間隙水圧の合力の差から決定した。

$$U_{unsat} = u_{unsat,bottom} \times A_{w,bottom} - u_{unsat,top} \times A_{w,top} \quad (3)$$

ここに、 $u_{unsat,top}, u_{unsat,bottom}$ : すべり土塊の上下面に作用する間隙水圧、 $A_{w,top}, A_{w,bottom}$ : すべり土塊の上下面の影響面積。

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。

$$A_w = \alpha \cdot A \quad (4)$$

ここに、 $\alpha$ : 影響面積を決定する係数。

$\alpha$  は飽和度に依存する係数と思われるが、どのような値であるかは未解明である。このことが、体積力法と水圧法の安全率が一致しない要因となっている。そこで、体積力法と水圧法の安全率が一致するような  $\alpha$  を力学的に決定する必要がある。

### 3. 影響面積 $A_w$ を決定する係数 $\alpha$ の決定方法の検討

ここでは、影響面積を決定する係数  $\alpha$  の決定方法について検討を行う。Uto ら<sup>3)</sup>は、 $\alpha$  として不飽和土塊の平均飽和度を用いたが、現実的でない。そこで、式(5)に示すような、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と、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る<sup>2)</sup>。

$$\alpha = \sqrt[3]{S_r^2} \quad (5)$$

ここに、 $S_r$ : 飽和度。

この  $\alpha$  は、飽和度の持つ体積の比率を、影響面積の持つ面積の比率に変換したものであるため、影響面積を力学的に評価するには不十分であると考えられる。そこで、図-1の土粒子間における水と空隙の割合を評価するための2粒子モデルを用いて次式のような  $\alpha$  を提案した。

$$\alpha = \frac{\pi r'^2}{\pi \left( \frac{D_s}{2} \right)^2} \quad (6)$$

$$r' = \frac{D_s}{2} \sin \theta \quad (7)$$

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

式(6)に式(7)を代入し、 $\alpha$  は次式のように表される。

$$\alpha = \sin^2 \theta \quad (8)$$

キーワード: 不飽和浸透, 斜面安定解析, 極限平衡法, 無限斜面法, 2粒子モデル

連絡先: 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40, 電話:099-285-8482

2粒子モデルを用いると、 $\alpha$ は接触角 $\theta$ によって決定される。また、 $\alpha$ は飽和度に依存する係数と思われるため、飽和度と接触角の関係を求めた。具体的に、飽和度は体積の比率を持つため、図-2に示す1/4粒子モデルを $y$ 軸まわりに回転させた空間から、水を含む体積を空隙全体の体積で割ることで飽和度を算出した。

$$S_r = \sin^3 \theta \quad (9)$$

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ため、式(9)にその飽和度を代入すると $\theta$ を求めることができる。さらに、式(8)にその接触角を代入すると、 $\alpha$ を求めることができ、式(5)と同じ形になることが確認された。したがって、既往研究の $\alpha$ を2粒子モデルから力学的に評価できることが示唆された。

#### 4. 提案手法による改善効果の検証

ここでは、津山らが行った地下水位が変動する場合の解析の条件を用いて、 $\alpha$ に関する提案手法の改善効果について検討する。すべての解析において、図-3に示す斜面形状と試料条件の下で解析を行った。すべり面(すべり土塊底面)の位置を0mとして鉛直下向きに-1.0m、鉛直上向きに+1.0mと高さを設定した。また、地下水位は斜面の傾斜角と同じ角度で存在し、平行に変動すると仮定する。本研究では、地下水位が-1.0mから+1.0mに到達するまで0.1m間隔で斜面安定解析を行った。なお、すべり土塊の重量の計算や見かけの粘着成分の設定については、既往研究<sup>2)</sup>と同様とした。

図-4は、解析結果を示す。 $\alpha$ に式(5)を用いた解析をcase1とし、式(8)と式(9)から求まる $\alpha$ を用いて解析をcase2として安全率の改善効果を検証する。解析結果から、体積法では、すべての地下水位の範囲においてcase1とcase2の安全率はほぼ同程度となっている。一方で、水圧法では、case2の安全率はcase1の安全率よりも若干大きくなっていることがわかる。その結果、体積法および水圧法の安全率の差はcase2の方がcase1よりも大きくなった。これは、case2の方が $\alpha$ の決定方法が複雑化したことにより、飽和度に乱れが生じたことで間隙水圧の合力の値に影響したことが原因だと示唆される。

また、地下水位が0m付近では、case1の水圧法の安全率の曲線が折れるように変移している。一方、case2では、滑らかに変移しておりcase1で見られた体積法と水圧法の安全率による曲線のねじれは、case2では生

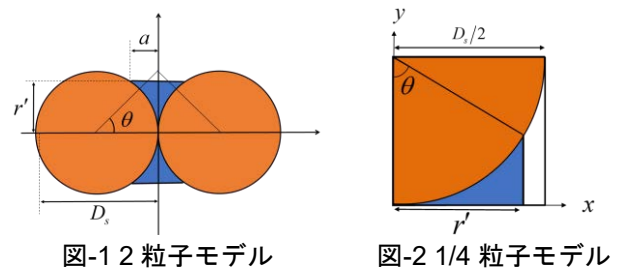


図-1 2粒子モデル

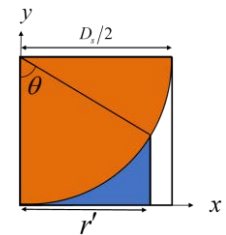


図-2 1/4粒子モデル

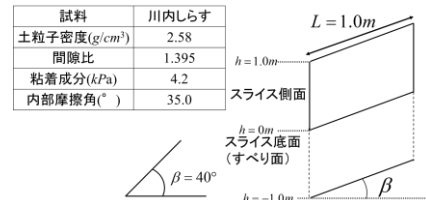


図-3 斜面形状と試料条件

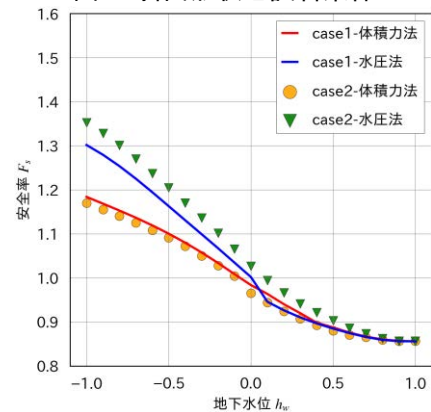


図-4 解析結果

じなかつた。このことも、係数 $\alpha$ を求める際の飽和度の決定方法の違いの影響を受けている可能性がある。

#### 5. おわりに

本研究では、2粒子モデルを用いて負の間隙水圧の作用する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、 $\alpha$ は既往研究と同様の形になることを力学的に説明することはできたものの、大きな改善効果を得ることはできなかった。今後は、影響面積の決定方法以外にも解析結果に与える影響がないか、解析条件などの検討も試みたい。

#### 参考文献

- 1) Duncan, J.M.: State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.122, No.7, pp.577-596, 1996.
- 2) 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.
- 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.