

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計算結果の比較

鹿児島大学大学院 学生会員 ○宇都遼太郎
 鹿児島大学大学院 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きた¹⁾。本論文では、提案した体積力法の妥当性を確認するために、不飽和土中の負の間隙水圧分布を考慮した水圧法を用いた斜面安定解析を行い、計算結果の比較を行った。

2.体積力法と水圧法における無限斜面法

すべり面の形が斜面表面に平行な直線と仮定する無限斜面法を用いて、斜面安定解析を行う。また図1に体積力法と水圧法、それぞれの無限斜面に作用する力を示す。はじめに、体積力法で表される無限斜面法について述べる。斜面に作用する力を体積力で置き換え、斜面方向に浸透力 J 、鉛直上向きに浮力 P_v が作用し、力のつりあい式より、体積力法における安全率 F_l が式(1)で導出される。

$$F_l = \frac{c + (W \cos \beta - P_v \cos \beta) \tan \phi}{J + W \sin \beta - P_v \sin \beta} \quad (1)$$

ここに、 c :見かけの粘着成分、 W :スライス自重、 β :斜面の傾斜角、 ϕ :内部摩擦角。

次に、斜面に作用する力を面積力で置き換えた水圧法で表される無限斜面法について考える。水圧法の場合、スライス側面に働く水圧の合力 E_1, E_2 とスライス底面に働く水圧の合力 U が作用することから、水圧法における安全率の式は、式(2)で表すことができる。

$$F_l = \frac{c + (W \cos \beta - U) \tan \phi}{W \sin \beta} \quad (2)$$

3.不飽和土中に作用する浸透力および浮力

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。体積 V の飽和土中を動水勾配 i で流れる場合の浸透力 J は次式で表される。

$$J_{sat} = j \cdot V = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot V \quad (3)$$

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(3)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。

$$V_j = V_w + V_{s,w} \quad (4)$$

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(4)は、次式のように表される。

$$V_j = S_r \cdot (V_w + V_s) = S_r \cdot V \quad (5)$$

よって、不飽和土中の浸透力 J_{unsat} は次式となる。

$$J_{unsat} = j \cdot V_j = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot S_r \cdot V \quad (6)$$

また、地下水以深における浮力は、次式で示される。

$$P_{v,sat} = \rho_w \cdot g \cdot V = \rho_w \cdot g \cdot (V_w + V_s) \quad (7)$$

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(5)を式(7)に適用させると、次式が得られる。

$$P_{v,unsat} = \rho_w \cdot g \cdot (V_w + V_{s,w}) = \rho_w \cdot g \cdot S_r \cdot V \quad (8)$$

ここに、 $P_{v,unsat}$: 不飽和土中の浮力。

式(1)で表される安全率の式に、上述した飽和土・不飽和土の浸透力や浮力の式を代入することで、体積力法における安全率の値を求める。

4.不飽和土中に作用する負圧

飽和域における水圧については、地下水位 h_w に依存するため、次式で表すことができる。

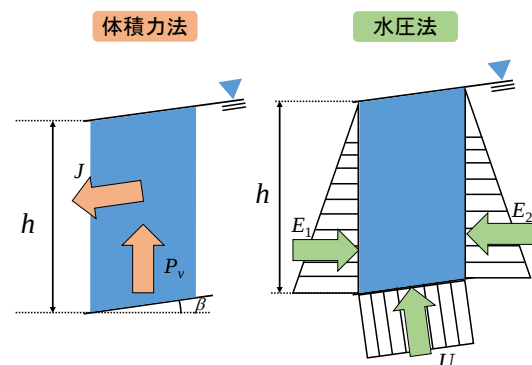


図1 無限斜面に作用する力 (体積力法、水圧法)

$$u_{sat} = \rho_w \cdot g \cdot h_w \quad (9)$$

ここに、 u_{sat} ：飽和域における水圧。

次に、不飽和域における負圧 u_{unsat} について考える。斜面の高さを h とした時、不飽和域の高さは、斜面高さ h と地下水位 h_w の差で求められ、飽和度 S_r が負圧に影響を与えると考えることで、不飽和域における負圧 u_{unsat} を導くことができる。

$$u_{unsat} = \rho_w \cdot g \cdot (h - h_w) \cdot S_r \quad (10)$$

式(9)、(10)で与えられた飽和域・不飽和域における水圧から、 E_1 、 E_2 、 U を計算し、式(2)の安全率の式に代入することで、不飽和土中の間隙水圧を考慮した水圧法における安全率の値を導くことができる。

5. 計算結果と考察

図2に試料条件と斜面形状を示した。その他の条件として、見かけの粘着成分 c は一定値とし、地下水位については、斜面と平行するように上昇するとして、地表面より低い時は不飽和状態、地表面に達した時は飽和状態とする。また、不飽和域の飽和度については、著者らが提案する数値力学モデル²⁾による計算結果を用いた(図3)。本論文では、飽和域のみを考慮した体積力法(Case1)、不飽和・飽和域を考慮した体積力法(Case2)、飽和域のみを考慮した水圧法(Case3)、不飽和・飽和域を考慮した水圧法(Case4)として計算を行い、計算結果を図4に示す。

Case1 と Case3 および、Case2 と Case4 が同じ安全率の値を示すことから、水圧法および体積力法による無限斜面法において、条件が同じであれば、同じ結果を得ることが分かる。また、Case2、Case4 の安全率の値が Case1、Case3 より低い安全率の値を示すため、これは不飽和域の浸透力・浮力および、負圧を考慮することで安全率の値が低下したと考えられる。全てのケースにおいて、地下水位が地表面に達した、飽和状態($S_r = 100\%$)では、同じ安全率の値を示すことから、整合性は取れていると考えられる。

6. おわりに

本論文では、不飽和浸透を考慮した体積力および水圧法による無限斜面法の計算結果を比較し、同じ結果を得ることができたことから、第3章で述べた不飽和土に作用する浸透力と浮力の考え方が妥当である可能性を示すことができた。今後、不飽和浸透による浸透力や浮力の斜面や地盤の安定性に影響について検討していきたい。

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 and R.Kitamura : A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.

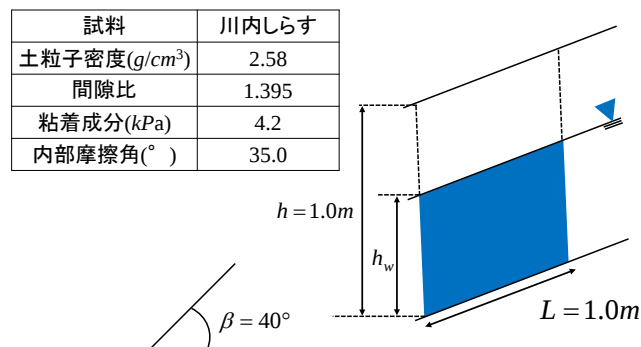


図2 試料条件と斜面形状

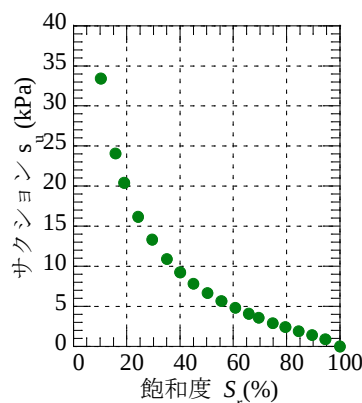


図3 水分特性曲線 (計算値)

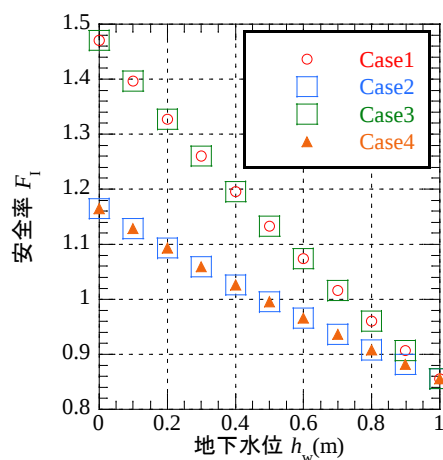


図4 計算結果