

不飽和浸透特性を考慮した無限斜面法の改良に関する検討

鹿児島大学大学院 学生会員 ○津山雅徳  
 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 正会員 酒匂一成  
 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 正会員 伊藤真一  
 元鹿児島大学 正会員 北村良介

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、不飽和土中の浸透特性を考慮した斜面安定解析手法を提案してきた<sup>1)</sup>。本論文では、無限斜面法を不飽和土中の浸透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で示し、地下水位が変動する際の斜面の安全率について、数値計算を行い、計算結果から、不飽和土の浸透特性を考慮する場合の有用性について、検討を行った。

2.従来の無限斜面法について

ここでは、従来の無限斜面法における体積力法および水圧法の式をそれぞれ示す。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。体積力法では土中の間隙水圧が土塊に与える体積力を浸透力  $J$  と浮力  $P_v$  で表し、力のつりあい式より、次式で表される。

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

ここに、 $c$ :見かけの粘着成分、 $l$ :斜面長さ、 $W$ :スライス自重、 $\beta$ :斜面の傾斜角、 $\phi$ :内部摩擦角。

水圧法は、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  $U$  から、次式のように表される。

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

3.無限斜面法における不飽和浸透の取り扱い

不飽和土中の浸透力は、飽和度に依存すると考えられ<sup>1)</sup>、浸透力が影響する体積  $V_j$  とすると、不飽和土中の浸透力  $J_{unsat}$  は次式のように表される。

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

ここに、 $j$ : 単位体積当たりの浸透力、 $\rho_w$ : 水の密度、 $g$ : 重力加速度、 $i$ : 動水勾配、 $S_r$ : 飽和度。一方、不飽和土中においても負の間隙水圧が発生していることから、浮力に似た体積力が働くと考えられ、

ここでは、圧力水頭差による体積力と定義する。スライス底面とスライス上面に作用する間隙水圧を  $u_{unsat1}$ 、 $u_{unsat2}$  とすると、不飽和土中の間隙水圧が作用する断面積は、飽和度に依存すると考え、それぞれの合力  $U_{unsat1}$ 、 $U_{unsat2}$  は次式でそれぞれ表される。

$$U_{unsat1} = u_{unsat1} \times S_{r1} A \quad (4)$$

$$U_{unsat2} = u_{unsat2} \times S_{r2} A \quad (5)$$

ここに、 $S_{r1}$ :スライス底面の飽和度、 $S_{r2}$ :スライス上面の飽和度

式(4)、(5)より、不飽和域における土塊に働く圧力水頭差による体積力  $P_{v,unsat}$  は次式で表される。

$$P_{v,unsat} = (U_{unsat1} - U_{unsat2}) / \cos\beta \quad (6)$$

水圧法における間隙水圧の取り扱いについても同様に考え、スライス底面に作用する間隙水圧の合力  $U_{unsat}$  は次式で表される。

$$U_{unsat} = U_{unsat1} - U_{unsat2} \quad (7)$$

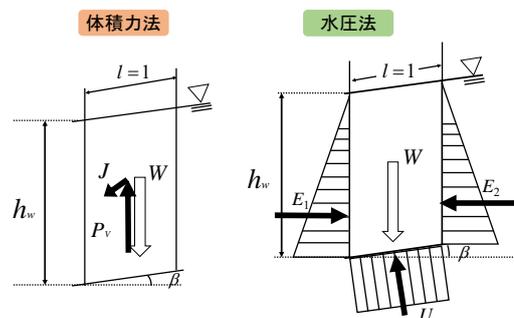


図1 無限斜面に作用する力 (体積力法、水圧法)

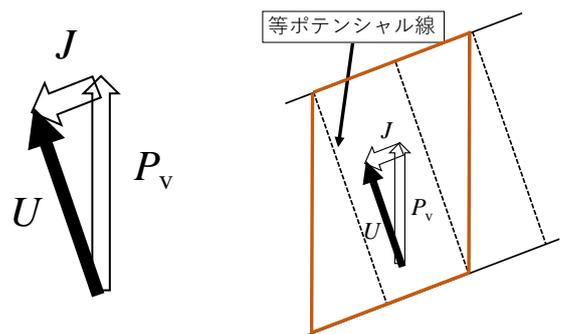


図2 力の多角形 図3 土塊内に働く力の向き

また、飽和域では、体積力法と水圧法の両者が土塊に作用する力学的効果が等しく、力の多角形(図2)は閉じている。加えて、水圧法における間隙水圧の合力が働く向きと等ポテンシャル線が同じ向きであると仮定する(図3)。

4.計算結果と考察

解析条件として、地下水位が変動する場合の安全率について解析を行う。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。図4に試料条件と斜面形状を示した。なお、見かけの粘着成分は、飽和度によって変化しないものとし、すべり土塊の重量は不飽和域の飽和度に応じた重量が考慮されている。すべり面(スライス底面)の位置を0mとして、鉛直下向きに-1.0m、鉛直上向きに+1.0mと高さを設定する。また、解析については、飽和域のみを考慮した体積力法(Case1)、不飽和域・飽和域を考慮した体積力法(Case2)、不飽和域において平均飽和度を用いた体積力法(Case3)、飽和域のみを考慮した水圧法(Case4)、不飽和域・飽和域を考慮した水圧法(Case5)、不飽和域において平均飽和度を用いた水圧法(Case6)として計算を行う。図5に各ケースにおける浸透力、圧力水頭差による体積力、間隙水圧の合力の取り扱いをまとめる。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<sup>2)</sup>による計算結果を用いた(図6)。

計算結果を図7に示す。Case1とCase4が同じ安全率の結果を示すことから、飽和域のみを考慮した水圧法および体積力法による無限斜面法は、従来通り、同じ結果となることがわかる。不飽和領域を考慮した体積力法(Case2)と水圧法(Case5)では、安全率に差が生じた。この結果は、不飽和域において、力の多角形が閉じなくなることが要因であると考えられる。飽和域では、飽和度 $S_r$ が常に1であるため、間隙水圧は深さのみに依存する。しかし、不飽和域の飽和度は水分特性曲線の影響を受けて変化するため、間隙水圧は深さに加えて、飽和度にも依存する。加えて、土塊に働く力として、圧力水頭差による体積力と間隙水圧の合力は、スライス底面と上面の差をとるが、浸透力は流線方向に働く力の合力となる。これより、土塊に働く力が釣り合わず、力の多角形が閉じないことから、不一致の結果となる。また、不飽和域において、飽和度の平均値をとる体積力法(Case3)と水圧法(Case6)

が同じ安全率を示すことから、不飽和域でも飽和度の平均値をとれば、力学的効果が等しくなる。しかし、不飽和域において、対象土塊の上部と底部では飽和度が異なり、平均値をとることは現実的ではない。従って、不飽和域の浸透力を考慮できる体積力法の方が有用であると考えられる。

5.おわりに

本論文では、不飽和浸透を考慮した無限斜面法の計算を行った。その結果、不飽和浸透特性を考慮する際には、体積力法が望ましいことが明確となった。

謝辞：本研究は、河川砂防技術開発公募(地域課題分野【河川】)(研究代表者：酒匂一成)の助成を受けた。ここに謝意を示す。

- 参考文献：1) 津山雅徳, 酒匂一成, 宇都遼太郎, 伊藤真一, 北村良介：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に関する検討, 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.49-54, 2018.  
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.

試料	川内しらす
土粒子密度( $g/cm^3$ )	2.58
間隙比	1.395
粘着成分(kPa)	4.2
内部摩擦角( $^\circ$ )	35.0

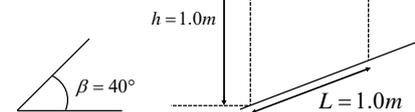


図4 試料条件と斜面形状

	体積力法			水圧法		
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
地下水位以上の不飽和域	$J_{unsat} = 0$ $P_{unsat} = 0$	$J_{unsat} = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot S_r \cdot V$ $P_{unsat} = P_{unsat1} - P_{unsat2}$	$J_{unsat} = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot \bar{S}_r \cdot V$ $P_{unsat} = \rho_w \cdot g \cdot \bar{S}_r \cdot V$	$J_{unsat} = 0$	$U_{unsat} = U_{unsat2} - U_{unsat1}$	$A_s = \bar{S}_r \cdot A$ $U_{unsat} = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot A_s$
地下水面	$J_{sat} = \rho_w \cdot g \cdot i \cdot V$ $P_{v,sat} = \rho_w \cdot g \cdot V$			$U_{sat} = u_{int} \cdot A$		
地下水位以下の飽和域						

図5 解析条件

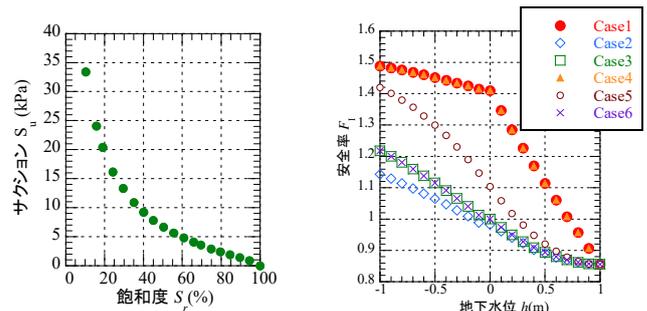


図6 水分特性曲線

図7 計算結果