

1. はじめに

山地河川での河床変動計算の精度向上のためには、流域内での崩壊から河道への土砂供給量の時系列的な変化を予測しなければならない。そのためには安定計算と浸透流解析を組み合わせるなどして崩壊の発生するタイミングを予測する必要がある。既往の研究では崩壊の発生予測を行うために土質定数（粘着力、内部摩擦角）等を流域内で一定値とする処理が行われることがあるが、実際は流域内の土質定数の不均一性が流域内での崩壊の生産土砂量・タイミングに大きく関わっている。広い山地流域を対象に土質定数のばらつきを考慮した崩壊発生予測を行うには、まず崩壊発生に影響の大きい要因を明確にし、その上でその要因を重点的に調査・解析するという方法が効果的である。そこで本研究では、表層崩壊の予測に用いられる無限長斜面の式を無次元化し、式を物理量の比で表すことで、斜面安定に対する各物理量の相対的な関係を明らかにする。そしてこの相対関係をもとに、山地流域における崩壊発生予測の手法を検討する。

2. 無限長斜面の式

本研究では無限長斜面を想定した安定解析を検討する。パラメータの分布を3次元で考えると、無限長斜面は図-1の模式図のように表される。この場合、流域内の任意の点  $(x_1, y_1, z_1)$  における斜面の安定は次式で与えられる。

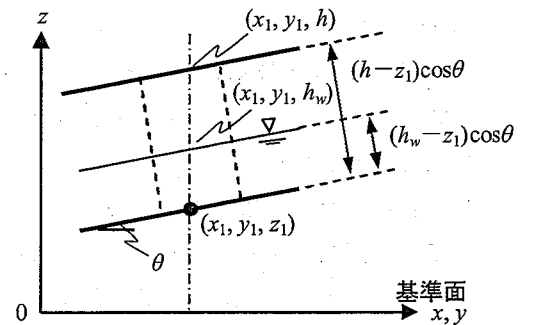


図-1 無限長斜面の模式図

$$F = \frac{c + \left[ \int_{h_w}^h \{(1-n)\gamma_s + nS\gamma_w\} dz + \int_{z_1}^{h_w} (1-n)(\gamma_s - \gamma_w) dz \right] \cos^2 \theta \tan \phi}{\int_{z_1}^h \{(1-n)\gamma_s + nS\gamma_w\} dz \cos \theta \sin \theta} \dots\dots(1)$$

ここで  $h$  : 地表面の位置 (m),  $h_w$  : 地下水面の位置 (m),  $\theta$  : 傾斜,  $\phi$  : 内部摩擦角,  $c$  : 粘着力 ( $N/m^2$ ),  $n$  : 間隙率,  $\gamma_s$  : 土粒子の単位体積重量 ( $N/m^3$ ),  $\gamma_w$  : 水の単位体積重量 ( $N/m^3$ ),  $S$  : 飽和度 ( $0 \leq S \leq 1$ ) である。(1) 式を単純化するため、 $\gamma_s, n$  が深さ方向で一定とし、さらに不飽和部分の飽和度が  $S''$  で一定であると仮定すると、(1) 式は以下のように無次元化される。

$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - \frac{\frac{(h_w - z)}{(h - z)}}{(1-n) \frac{\gamma_s}{\gamma_w} + nS''} + \frac{c}{(h - z) \tan \phi \gamma_w \cos^2 \theta} \dots\dots(2)$$

ここで、 $S''$  は土層の深さ方向での平均の飽和度に相当し  $S'' = \frac{(h_w - z) + (h - h_w)S'}{h - z}$  である。(2) 式はすべて物理量の比で斜面の安定が表現されている。(2) 式中の  $h$  および  $\theta$  は DEM から空間分布を求めることができる。

3. 斜面安定に対する各項の役割

ここでは (3) 式に示されている物理量の比の斜面安定に対する役割を検討する。また、既往の研究によって得られた土質定数 (表-1) を用いた一般的な議論と、筑波大学井川演習林を想定した個別のケースに対する議論を行う。

3.1  $(1-n)\gamma_s / \gamma_w + nS''$

単位体積に含まれる土粒子と水の比重の和である。この項には  $n, \gamma_s, S''$  の3つが変動しうる変数として含まれている。このうち  $\gamma_s$  は有機物を主体とした層を除くとその変動幅が  $2.38 \sim 2.68$  ( $g/cm^3$ ) 程度であり、値そのものの約 10% である (表-1)。さらに地下水深が上昇する過程では土層全体が湿潤であり  $S'' = 0.8 \sim 1$  程度であると想定されることから、3つの変数のうち変動割合 (変動幅/値) が最も大きいのは  $n$  である。つまり  $(1-n)\gamma_s / \gamma_w + nS''$  の変動は主に  $n$  の変動によって決定しているといえる。 $\gamma_w = 9.8$  ( $kN/m^3$ ),  $\gamma_s = 2.6$ ,  $S'' = 0.9$  の条件で様々な地域・地質における  $n$  の分布範囲  $0.35 \sim 0.85$  (表-1) を与えた場合、 $(1-n)\gamma_s / \gamma_w + nS''$  の変動幅は  $1.2 \sim 2.0$  程度となる。間隙率の高い火山灰性地域を除けば、変動幅はこれよりも小さくなる。

3.2  $(h_w - z) / (h - z)$

(3) 式で  $h_w - z$  は  $h - z$  によって除されていることから、流域内での崩壊予測には地下水深そのものよりも、すべり面の深さと地下水深の比  $(h_w - z) / (h - z)$  を知ることが重要であるといえる。(3) 式によると  $(h_w - z) / (h - z)$  が  $(1-n)\gamma_s / \gamma_w + nS'$  によって除されており、 $(h_w - z) / (h - z)$  が斜面の安定に及ぼす影響の大きさには  $(1-n)\gamma_s / \gamma_w + nS''$  が寄与している。 $(h_w - z) / (h - z)$  の変動幅は 0~1 であり、 $(1-n)\gamma_s / \gamma_w + nS'$  (変動幅 1.2~2.0) と比較して変動割合が高い。 $(h_w - z) / (h - z)$  は崩壊発生のタイミングを決定する要因でもあるため、 $(1-n)\gamma_s / \gamma_w + nS''$  と比較して流域内の崩壊発生予測に対する重要性が高いといえる。

### 3.3 tanφ

(3) 式から明らかのように、 $h_w - z = 0$ 、 $c = 0$  の条件の下では、斜面の安定が他のパラメータ ( $\gamma_s$ ,  $n$ , および  $S$ ) の影響を受けずに  $\tan\phi$  と  $\tan\theta$  の比のみによって決定される。さらに (3) 式で  $\tan\phi$  は左辺のみならず粘着力に関する項 (右辺第 3 項) にも入っており、斜面の安定性に関する  $\tan\theta$  と粘着力  $c$  の関係を媒介している。以上のことから  $\tan\phi$  は  $\tan\theta$  と斜面の安定性との関係に大きく寄与しているといえる。様々な地域・地質を含んだ  $\tan\phi$  の変動幅は 0.33~0.94 程度である (表-1)。 $(h_w - z) / (h - z)$  の変動幅が 0~1 であること、さらには (2) 式では両者が乗じられることで安全率が計算されていることから、両者が斜面安定に及ぼす影響力は同程度であるといえる。

### 3.4 c / (h-z)

$c / (h - z)$  は  $h - z$  の大きさによって無限小~無限大まで変動可能であることから、 $c$  の影響力の大きさは  $h - z$  に依存している。このため、与えられた地形 ( $\theta$ ) における斜面安定を考えるとき、粘着力  $c$  そのものよりも  $c / (h - z)$  の大きさを評価すべきである。(3) 式において右辺第 2 項の  $(h_w - z) / (h - z)$  に対応するのが  $\frac{c}{(h-z)\tan\phi\gamma_w\cos^2\theta}$  である。井川演習林での推定値  $h - z = 1$  (m)、 $\tan\phi = 0.78$ 、 $\cos\theta = 1$  (表-1) および様々

な地域における  $c$  の範囲 0~9800 (N/m<sup>2</sup>) を代入すると、 $\frac{c}{(h-z)\tan\phi\gamma_w\cos^2\theta}$  の変動幅は 0~1.67 である。

$(h_w - z) / (h - z)$  の変動幅が 0~1 であることを考慮すると、井川演習林では  $c / (h - z)$  は  $(h_w - z) / (h - z)$  と同程度、あるいはそれ以上に斜面安定に寄与しているといえる。一方で、表-1 と土質定数が同じですべり面の深さが 10 m であるとき、 $\frac{c}{(h-z)\tan\phi\gamma_w\cos^2\theta}$  の変動幅は 0~0.167 であり、 $(h_w - z) / (h - z)$  や  $\tan\phi$  と比較して無

視できるほど小さい。つまり、深層崩壊が卓越した地域では  $c / (h - z)$  の評価はさほど重要でない。

表-1 既往の研究で調査されたパラメータ

引用文献	地質	$\tan\phi$	$c$ (N/m <sup>2</sup> )	$n$	$\gamma_s/\gamma_w$
平松ら (1994)	安山岩	0.33	5390	0.555-0.663	2.538-2.622
土屋・好本 (1995)	砂岩・頁岩	0.805-0.940	1176-2450		
笹原ら (1995)	各種火山岩	0.54	9800	0.535	2.682
吉永・大貫 (1995)	火山灰			0.70-0.85*1	
平松・尾藤 (2001)	砂岩	0.53-0.79	3473-5827	0.50-0.77*1	2.38-2.64*1
梅村ら (2003)	花崗岩	0.55-0.79	0-8800	0.35-0.48	
上記の土質定数の範囲	—	0.33-0.94	0-9800	0.35-0.85	2.38-2.682
井川演習林 (推定値)*2	砂岩・頁岩	0.78	4000	0.5	2.6

\*1 図から判読 \*2 本文中では表の値に加え  $h - z = 1$ 、 $\theta = 40^\circ$ 、 $S = 0.8$  を井川演習林における推定値として用いた

## 4. 山地流域における崩壊予測手法

以上より、河床変動計算のための崩壊発生予測を行うためには  $\tan\phi$ 、 $(h_w - z) / (h - z)$ 、さらに表層崩壊が卓越した地域では  $c / (h - z)$  の把握が必要である。これらの値の広域的な推定には DEM や衛星画像などの地理情報の活用が有効であろう。またこれらの指標の推定には、現地調査の他に流域内での過去の崩壊履歴からの逆解析が利用できると考えられる。河川への土砂供給のタイミングを知るためには  $(h_w - z) / (h - z)$  の時系列的な変化を把握する必要があり、今後の課題である。

引用文献 平松ら (1994) 新砂防, Vol. 46, No. 5, p.3-10; 土屋・好本 (1995) 新砂防, Vol. 47, No. 5, p.3-23; 笹原ら (1995) 新砂防, Vol.48, No.1, p.24-30; 吉永・大貫 (1995) 新砂防, Vol. 48, No. 3, p.22-28; 平松・尾藤 (2001) 砂防学会誌, Vol.54, No.4, p.12-21; 梅村ら (2003) 土と基礎, Vol.51, No.6, p.53-58