

[付録1]まとめ

斜面の安定

斜面の安定についてまとめておく。

1. はじめに

斜面において、土は重力の作用により、高い部分は低い部分に移動しようとする。

このことにより、土の内部のある面に新しいせん断応力が発生する。

このせん断応力が土のせん断強さを超えると破壊が起きる。

この傾向は斜面の土の含水比が高くなり、土の単位堆積重量が増大するにしたがって強くなる。

雨で斜面の土の含水比が高くなると、せん断強さは低下するので、破壊につながる。

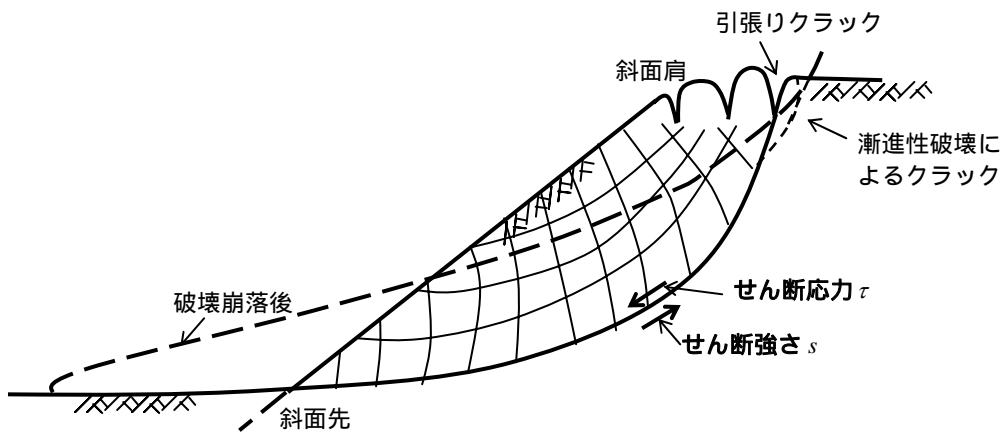


図 1.1 単純斜面の破壊面の典型的な形状（山内：土質力学）

2 固体の摩擦とクーロンの破壊基準

斜面上の物体の重量を W とすると、斜面に垂直な方向の力 N と、斜面に平行な力 T は

$$N = W \cos \theta, \quad T = W \sin \theta \quad (1)$$

斜面と物体の間に生じる摩擦角を ϕ とすると、摩擦力 F は

$$F = N \tan \phi \quad (2)$$

式(2)より

$$\tan \phi = \frac{F}{N} \quad (3)$$

図 1 より、物体がずり落ちようとする力 T と摩擦力 F が等しい $T=F$ のとき、式(3)は

$$\tan \phi = \frac{F}{N} = \frac{T}{N} = \frac{W \sin \theta}{W \cos \theta} = \tan \theta \quad (4)$$

この式より、 $\phi > \theta$ であれば、すなわち摩擦角が傾斜角より大きければ、物体はすべらずに安定を保つ。

$\phi = \theta$ のときを臨界傾斜角という。

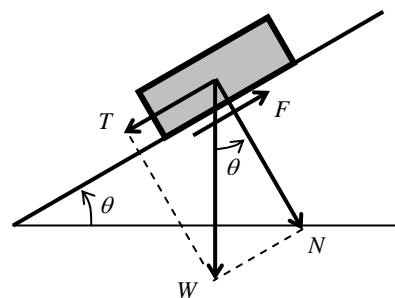


図 2 物体に働く力

もし、斜面と物体の間に粘着力 c' が作用しているとすると、摩擦力 F は式(2)の右辺に、この粘着力を加えたものになる。すなわち

$$F = c' + N \tan \phi \quad (5)$$

両辺を物体の断面積 A で割ると

$$\frac{F}{A} = \frac{c'}{A} + \frac{N}{A} \tan \phi \quad (6)$$

ここで、 F/A はせん断強さ s であり、 N/A は垂直応力 σ である。また、 $c'/A = c$ とおいて粘着力と称すれば、式(6)はクーロンの破壊基準と呼ばれる次式のように表される。

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad (7)$$

これは、すべりに抵抗するせん断強さである。ここに、改めて記号を説明する。

s = 土のせん断強さ

σ = 破壊面に土粒子間に働く垂直応力

ϕ = せん断抵抗角または内部摩擦角

c = 粘着力

$\tan \phi$ = 摩擦係数

c と ϕ を合わせて土のせん断強さ定数という。また、 s 、 σ 、 c の言葉は紛らわしい(慣例に従う)が、全て応力の単位 (kN/m^2) である。

3. すべり面の安全率

(a) 円弧すべり面：すべり面のモーメントに着目

$$F = \frac{\text{すべりに抵抗する力のモーメント}}{\text{すべりを起こそうとする力のモーメント}} = \frac{M_r}{M_o} \quad (8)$$

(b) せん断面のすべり面：すべり面のせん断力

$$F = \frac{\text{すべりに抵抗するせん断強さの和}}{\text{すべりを起こそうとするせん断応力の和}} = \frac{s'}{\tau} \quad (9)$$

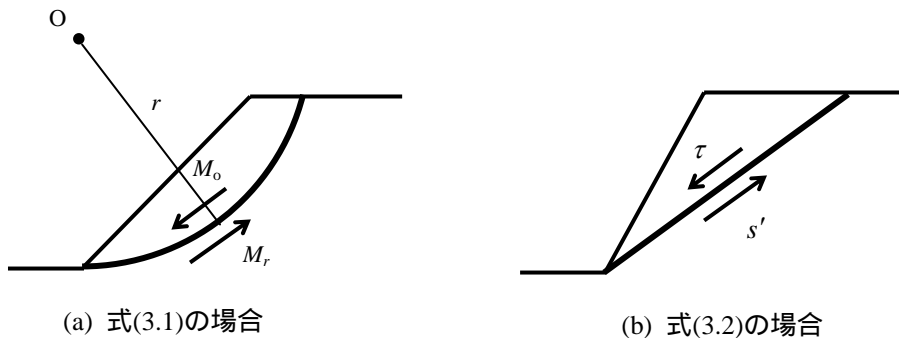


図3 すべりを起こそうとする力とすべりに抵抗する力

4. 粘着力のない砂質土の安全率

4.1 浸透流のない無限長斜面

粘着力のない均一な乾燥状態または飽和度の低い砂質土が傾斜角 i で斜面を作っているとき、表面から任意の深さ z において表面に平行な面を考える。

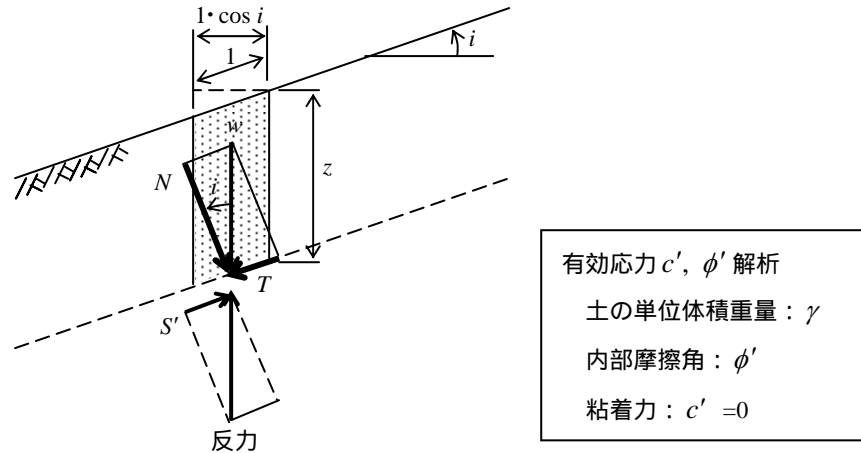


図4 非粘性土の無限長斜面

単位幅当たりの土塊について考える：

すべり面の単位幅に働く鉛直成分：

$$w = (1 \cdot \cos i) \cdot z \cdot \gamma = \gamma z \cos i$$

すべり面に垂直な分力：

$$N = w \cdot \cos i = \gamma z \cos^2 i = \sigma$$

すべり面に沿う分力（すべりを起こさせようとする力）：

$$T = w \cdot \sin i = \gamma z \cos i \sin i = \tau$$

すべり面に沿って作用する有効せん断抵抗（すべりに抵抗する力）：

$$s' = \gamma z \cos^2 i \cdot \tan \phi'$$

ここに、 γ ：土の単位体積重量，

ϕ' ：せん断抵抗角．

また、すべりを起こさせようとする力 T はつねに全応力で扱う．

安全率は式(9)から

$$F = \frac{s'}{\tau} = \frac{\gamma z \cos^2 i \tan \phi'}{\gamma z \cos i \sin i} = \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (10)$$

したがって、斜面が安定である条件は、式(10)が1以上であればよい。すなわち

$$F = \frac{s'}{\tau} = \frac{\tan \phi'}{\tan i} > 1$$

$$\tan \phi' \geq \tan i$$

$$\therefore i \geq \phi'$$

(11)

すなわち、傾斜角が土のせん断抵抗角を超えないとき、この斜面は安定である。

4.2 浸透流のある無限長斜面

前項 4.1 において、斜面の表面まで、表面に平行な浸透流があるときを考える。

4.2.1 斜面の地表面まで地下水位がある場合：

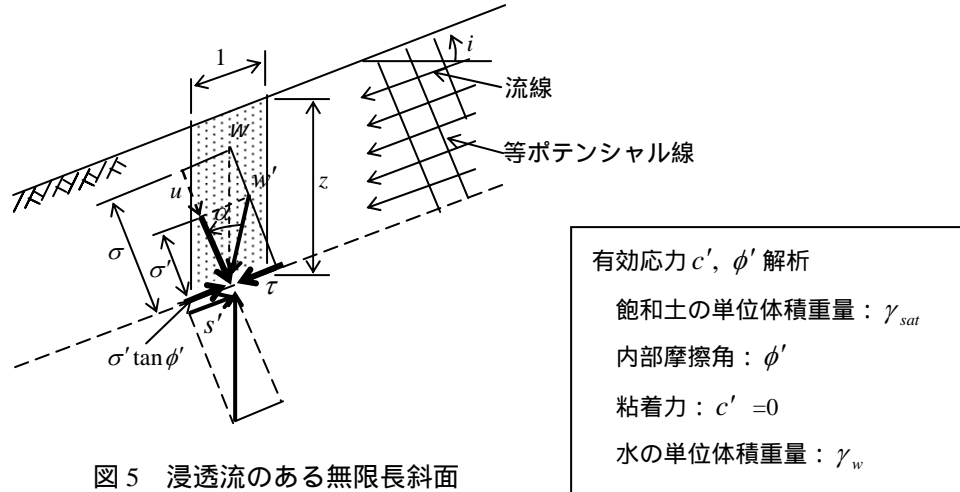


図 5 浸透流のある無限長斜面

単位幅当たりの土塊について考える（記号を多少変える．図 5 参照）：

地表面から鉛直深さ z での間隙水圧：

$$u = \gamma_w z \cos^2 i$$

すべり面の単位幅に働く鉛直成分：

$$w = \gamma_{sat} z \cos i$$

すべり面に働く垂直な分力（全応力）：

$$\sigma = w \cdot \cos i = \gamma_{sat} z \cos^2 i$$

すべり面に働く有効応力：

$$\sigma' = \sigma - u = \gamma_{sat} z \cos^2 i - \gamma_w z \cos^2 i = (\gamma_{sat} - \gamma_w) z \cos^2 i = \gamma' z \cos^2 i$$

すべり面に沿う分力（すべりを起こさせようとする力）：

$$\tau = w \cdot \sin i = \gamma_{sat} z \cos i \sin i$$

すべり面に沿って作用する有効せん断抵抗（すべりに抵抗する力）：

$$s' = \gamma' z \cos^2 i \cdot \tan \phi'$$

ここに， γ_{sat} ：飽和土の単位体積重量，

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ：浮力を考えた土の有効単位体積重量，

ϕ' ：せん断抵抗角．

安全率は式(3.2)から

$$F = \frac{s'}{\tau} = \frac{\gamma' z \cos^2 i \tan \phi'}{\gamma_{sat} z \cos i \sin i} = \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan i} \quad (12)$$

安全であるためには、これが 1 以上であればよい。

4.2.2 地下水位が h_w の場合：

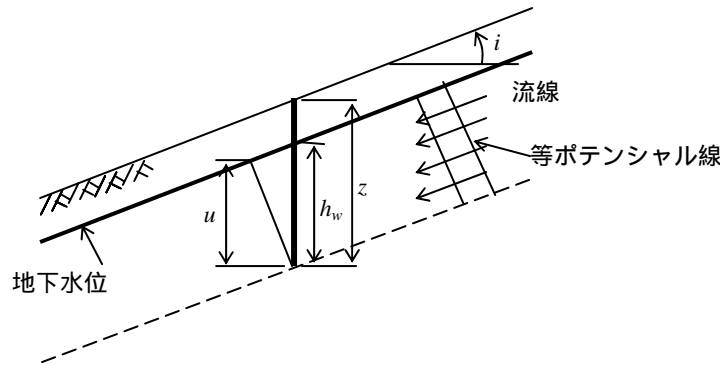


図6 浸透流のある無限長斜面（地下水位が h_w の場合）

単位幅当たりの土塊について考える：

地表面から鉛直深さ z での間隙水圧：

$$u = \gamma_w z \cos^2 i$$

すべり面の単位幅に働く鉛直成分：

$$w = \{\gamma(z - h_w) + \delta_{sat} h_w\} \cos i$$

すべり面に働く垂直な分力（全応力）：

$$\sigma = w \cdot \cos i = \{\gamma(z - h_w) + \delta_{sat} h_w\} \cos^2 i$$

すべり面に働く有効応力：

$$\sigma' = \sigma - u = \{\gamma(z - h_w) + \delta_{sat} h_w\} \cos^2 i - \gamma_w z \cos^2 i = \{\gamma(z - h_w) + \gamma' h_w\} \cos^2 i$$

すべり面に沿う分力（すべりを起こさせようとする力）：

$$\tau = w \cdot \sin i = \{\gamma(z - h_w) + \delta_{sat} h_w\} \cos i \sin i$$

すべり面に沿って作用する有効せん断抵抗（すべりに抵抗する力）：

$$s' = \{\gamma(z - h_w) + \gamma' h_w\} \cos^2 i \cdot \tan \phi'$$

ここに， γ_{sat} ：飽和土の単位体積重量，

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ：浮力を考えた土の有効単位体積重量，

ϕ' ：せん断抵抗角．

安全率は式(9)から

$$F = \frac{s'}{\tau} = \frac{\{\gamma(z - h_w) + \gamma' h_w\} \cos^2 i \tan \phi'}{\{\gamma(z - h_w) + \gamma' h_w\} \cos i \sin i} = \frac{\gamma(z - h_w) + \gamma' h_w}{\gamma(z - h_w) + \gamma_{sat} h_w} \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (13)$$

安全であるためには，これが1以上であればよい．

ここで， $h_w = z$ とおけば式(12)と一致する．

5. 粘着力のある粘性土の安全率

5.1 浸透流のないの場合

粘着力がある場合は、すべりに抵抗する力に粘着力を加えればよい。

すべり面に垂直な分力：

$$N = w \cdot \cos i = \gamma z \cos^2 i = \sigma$$

すべり面に沿う分力（すべりを起こさせようとする力）：

$$T = w \cdot \sin i = \gamma z \cos i \sin i = \tau$$

すべり面に沿って作用する有効せん断抵抗（すべりに抵抗する力）：

$$s' = c' + \gamma z \cos^2 i \cdot \tan \phi'$$

安全率は式(3.2)から

$$F = \frac{s'}{\tau} = \frac{c' + \gamma z \cos^2 i \tan \phi'}{\gamma z \cos i \sin i} \quad (14)$$

5.2 浸透流がある場合

粘着力がある場合は、すべりに抵抗する力に粘着力を加えればよいから、式(13)より単に

$$F = \frac{s'}{\tau} = \frac{c' + \gamma(z - h_w) + \gamma' h_w}{\gamma(z - h_w) + \gamma_{sat} h_w} \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (15)$$

となる。

6. 分割法による斜面の安定計算

分割片の釣合いを考える．ここに，隣り合う分割片の境界に働く力は互いに打ち消しあうものとして無視する．

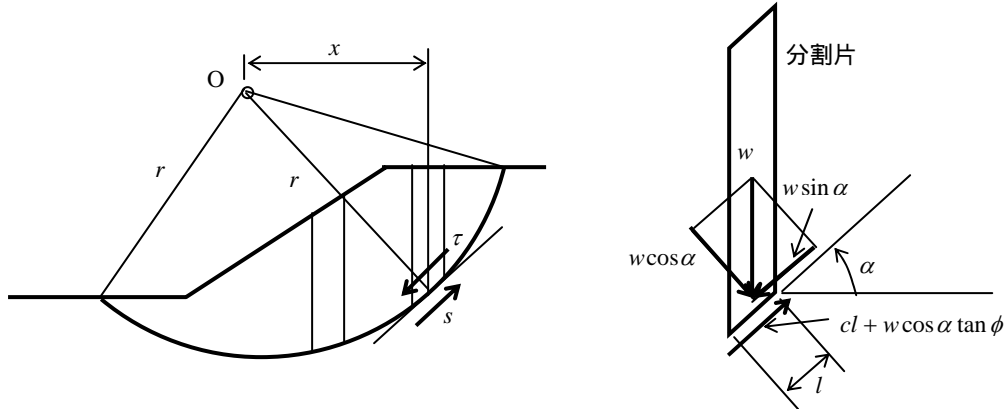


図7 分割法による斜面の安定計算

分割片の重さ：	w
すべり面に鉛直に働く力：	$\sigma = w \cos \alpha$
すべらそうとする力：	$W \sin \alpha$
すべりに抵抗する力（せん断抵抗力）：	$s = c + \sigma \tan \phi$
長さ l の範囲でのせん断抵抗力：	$s = cl + w \cos \alpha \tan \phi$

すべりに抵抗する力のモーメント M_r は、各分割片を合計して

$$M_r = \sum r(cl + w \cos \alpha \tan \phi) = r \sum (cl + w \cos \alpha \tan \phi)$$

すべらそうとする力は

$$M_o = r \sum w \sin \alpha$$

よって間隙水が存在しない場合の安全率は

$$F = \frac{M_r}{M_o} = \frac{r(\sum cl + \sum w \cos \alpha \tan \phi)}{r \sum w \sin \alpha} = \frac{\sum (cl + w \cos \alpha \tan \phi)}{\sum w \sin \alpha} \quad (16)$$

この場合は、非排水せん断試験試験によって得られたせん断強さ定数 c 、 ϕ を用いる．せん断強さは

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (17)$$

である．

間隙水圧が存在する場合は、次のようになる：

$$F = \frac{M_r}{M_o} = \frac{\sum \{c'l + (w \cos \alpha - ul) \tan \phi'\}}{\sum w \sin \alpha} \quad (18)$$

この式はフェレニュウスの式と言われるものである．この場合は、圧密排水せん断試験試験によって得られたせん断強さ定数 c' 、 ϕ' を用いる．せん断強さは

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad (19)$$

である．