

1. はじめに

森林斜面の表層崩壊を予測するためにはその原因である雨水の浸透による土壌の水分状態を把握するのが非常に重要である。それで水浸透の数値計算においては降雨による飽和不飽和浸透を考慮して多くの研究が行われている。しかし実際、安定解析をする場合には、不飽和土壌水分を考慮せずに飽和土壌水分のみを考慮した研究が多い状態である。降雨中の土壌の不飽和部分は降雨条件と土壌物理特性によって大きく変化し、その変化によって安全率にも大きく影響すると思われるので、より正確な安全率の計算のためには安定解析を行う場合不飽和土壌水分を考慮する必要がある。それで、本研究では無限長斜面安定解析モデルを用いて飽和土壌水分のみを考慮したモデルと不飽和土壌水分の影響を考慮したモデルから計算した安全率を比較し、また、土質強度、土壌特性パラメーターの変動によって変わる不飽和土壌水の影響を評価した。

2. 安定解析モデル

飽和のみを考慮したモデル

$$\begin{aligned} \sigma &= \{Wd \cdot D - (1 - \theta_s) \rho_w Z_w\} \cos^2 \theta \\ \tau_c &= c + \sigma \tan \phi \\ \tau &= \{Wd \cdot D + \theta_s Z_w\} \sin \theta \cdot \cos \theta \\ F_s &= \frac{\tau_c}{\tau} \end{aligned} \quad (1)$$

不飽和を考慮したモデル

$$\begin{aligned} \sigma &= \left\{ Wd \cdot D + \left(\int_{Z_w}^z \theta(z) dz \right) - (1 - \theta_s) \rho_w Z_w \right\} \cos^2 \theta \\ \tau_c &= c + \sigma \tan \phi \\ \tau &= \left\{ Wd \cdot D + \left(\int_{Z_w}^z \theta(z) dz \right) + \theta_s \cdot Z_w \right\} \sin \theta \cdot \cos \theta \\ F_s &= \frac{\tau_c}{\tau} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 σ : 垂直応力 τ_c : せん断抵抗力 Z_w : 水位
 c : 粘着力 ρ_w : 水の密度 τ : せん断力 D : 底面からの土壌の深さ
 F_s : 安全率 θ : 斜面傾斜 Wd : 土の乾燥密度 θ_s : 飽和含水率 θ_r : 残留含水率

ここで、不飽和水部分は Brooks&Corey 式を積分して求めた。上の二つのモデルを基本モデルとしてもっとも簡単な条件の定常状態で地下水位 (z 、 $\phi = -z$) を変動させて底面に対する安全率を計算し、評価方法として安全率を時間的に比較するため、同じ安全率を示している時の水位として検討した。

3. 土壌物理特性、土質強度のパラメーターによる 2 つモデルの比較

諸パラメーターによる 2 つのモデルを比較するために、標準砂を対象として標準斜面を設定し、各パラメーターを変化させて感度分析を行った。使われたパラメーターと評価値を表 1 に示す。

表-1 感度分析の対象パラメーターとその値

パラメーター	斜面勾配 (θ)	土壌深 (D)	粘着力 (C)	内部摩擦角 ($\tan \phi$)
値と単位	30, 28, 32, 34, 36(度)	100, 10, 50, 150(cm)	0, 5, 10, 20, 40(gf/cm)	0.7, 0.6, 0.8
パラメーター	飽和含水率 (θ_s)	残留含水率 (θ_r)	限界毛管水 (ϕ_{cr})	曲率係数 (λ)
値と単位	0.42, 0.32, 0.72	0.05, 0.0, 0.15	-29, -19, -39(cm)	2.3, 1.3, 3.3

注) 各パラメーターの初めの値は標準斜面の値

4. 結果と考察

下の図は 2 つのモデルが同じ安全率を示している時、不飽和を考慮したモデルによる水位から飽和のみを考慮したモデルによる水位を引いた差である。

4. 1 土層厚による両モデルの応答特性

- ・ c (粘着力) = 0 の場合 : 図 1 をみると不飽和を考慮したモデルの方が段々高くなって最高 2-4cm ぐらいまでいってまた下がる傾向が認められる。これは上のモデル式で表現されているように $c = 0$ の場合、水位の上

昇による自重の増大及びせん断抵抗力の減少によって、崩壊まで達するが、同じ水位条件では自重が重い不飽和を考慮したモデルの方の安全率が高くなることを示している。

- $c = 10$ の場合：図 1 (b) をみると不飽和を考慮したモデルの方の水位が高い（正）場合は $c = 0$ の場合の理由と同じ傾向にある。また $D = 10\text{cm}$ の場合、不飽和を考慮したモデルが常に負の水位差を示している。これはモデル式において c に対する自重の比率が安全率を増加させているため、自重が大きく計算される不飽和モデルの場合その影響が飽和に比べて小さくなることによる。また土壌の自重が小さい場合は c の影響が大きくなる。

4. 2 土壌パラメータによる両モデルの応答特性

土壌特性パラメータによる水位の差は飽和含水率と限界毛管水の変化によって 1-2 cm 差が出たが他のパラメータによってはあまり差がみられなかった。内部摩擦角と斜面勾配による変化は図 2 (a) のように水位の差には関係なく、安全率の範囲を移動させる傾向がみられた。

4. 3 c (粘着力) の変化による両モデルの応答特性

図 2 (b) は c によって変化する両モデルの水位差を示している。水位差が負の部分は図 1 (b) の $D = 10$ のところと同じで c が大きくなることによって不飽和を考慮したモデルがより危険側になる傾向を示す。また、正の部分は図 1 (a) のように不飽和の自重が安全率を増加させるが、それも c の増加によって減少していく傾向を示している。

つまり、不飽和水分を考慮して安定解析をすると自重が大きくなって図 1 (a) のように安全率を増加させる傾向とむしる図 2 (b) のように安全率を低下させる傾向の両方が存在し、不飽和土壌水分の影響はそれらの和として表現される。以上の結果から不飽和水分の影響を考慮した場合、自重による安全率の増加より粘着力の影響による低下が大きく、標準砂以外の粘着力が大きい土壌、特に森林土壌においては飽和水のみを考慮したモデルによる計算より安全率がより危険側に算出される傾向があることが示唆される。

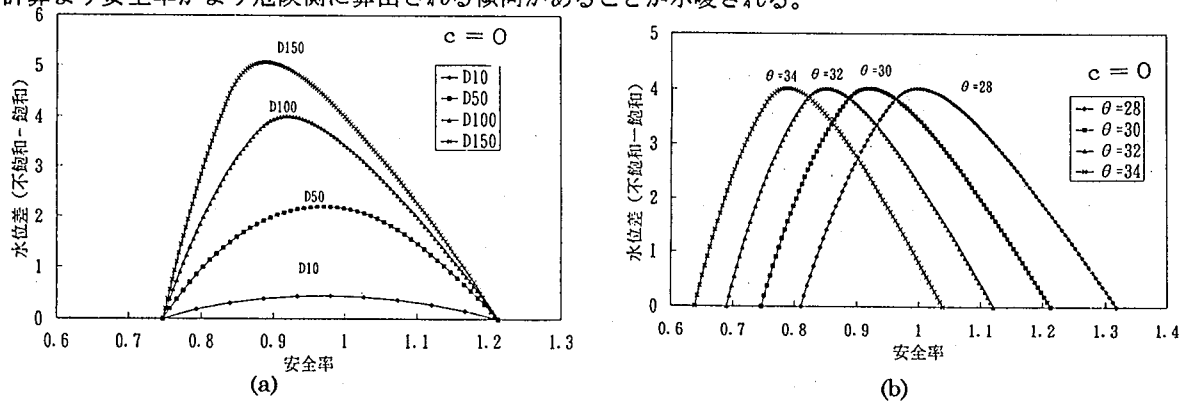


図 1. 土壌深の変化による両モデルの水位の差

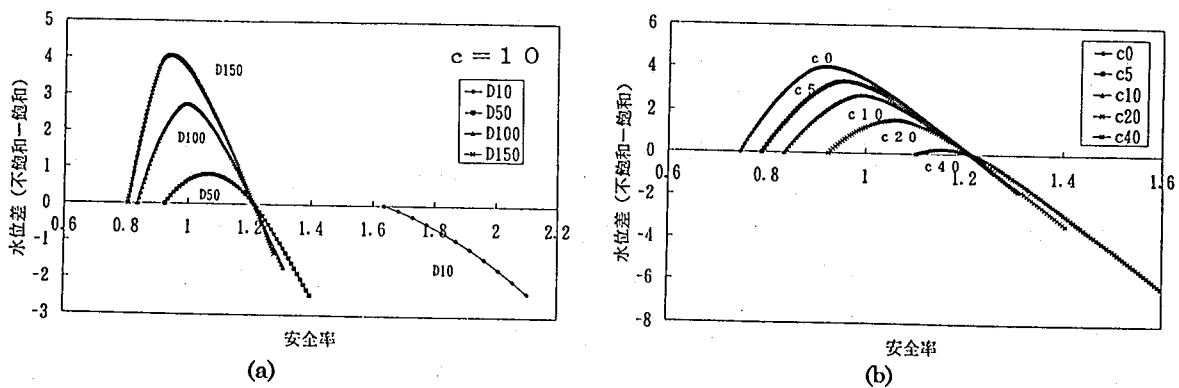


図 2. 斜面勾配と c (粘着力) 変化による両モデルの水位の差