

71 斜面崩壊発生の限界雨量に与える透水係数の影響

京都大学農学部 鈴木雅一

1 はじめに

斜面崩壊の発生予測を、水文学的雨水浸透計算と土質工学的斜面安定計算を組み込んだモデルによって解析する研究では、モデルの構築と同時にモデル計算に関係する多くの要素（地形、雨水浸透、土質強度、降雨条件など）のそれぞれが崩壊発生にどのような影響を持つかを知ることも重要な課題である。近年では、パラメータの感度分析として、モデルに与えるパラメータを変化させ、斜面が不安定となる条件がいかに変化するかの数値計算がおこなわれてきた。しかし、崩壊発生をもたらす降雨条件とモデルパラメータの一つである表層土の透水係数の関係には、一見矛盾する2つの見解が示されている。一方は、透水係数が大きいとき鉛直不飽和浸透が速くなり、早く飽和地下水面上昇が始まるので危険側にはたらくという見解。他方は、透水係数が大きいとき飽和側方流を流下させるのに飽和水深が小さくなるから安全側にはたらくという見解である。つまり、鉛直浸透と側方流に関わる2つの条件が存在するので、前提のおき方で評価が逆になるのである。したがって、前者が卓越する条件と、後者が卓越する条件を、鉛直（不飽和）浸透と側方流の両者を含むモデルを用いて解明しておく必要があるが、いまだ十分に論じられていない。本研究は、この点をできるだけ解析的に検討することを課題とした。

2 飽和・不飽和浸透モデルと無限長斜面安定モデルによる崩壊発生の限界雨量解析

2.1 解析の考え方

① 斜面表層崩壊の発生場はいわゆる0次谷で、3次元形状の集水性、安定解析を必要とするが、問題の単純化のために、傾いた基盤上に一定厚さの表層土層があるに2次元断面を対象とする。（図-1）

② この斜面に降雨を与え、浸透計算により基盤上に形成される地下水面形 $Z_w(x, t)$ を求める。

③ 無限長斜面の安定条件から得られる限界地下水位 Z_{wc} に対し、 $Z_{wc} < Z_w(x, t)$ となる最小の降雨強度 r 、連続雨量 R が限界降雨強度 r_c 、限界連続雨量 R_c である。

④ 限界地下水位 Z_{wc} に関する条件は、土質強度 C 、 $\tan \phi$ 、土の密度 γ 、斜面勾配 ω 、土層厚 D

浸透に関与する条件は、透水係数 K_s 、不飽和浸透 ($\theta - \psi$, $K - \psi$) パラメータ、および、鉛直浸透に対して、土層厚 D 、側方流に対して、斜面長 L 、斜面勾配 ω

の諸パラメータが関係する。限界雨量解析は、 r_c 、 R_c をこれらパラメータの関数として表現することが課題である。（パラメータの関係が複雑だから、個別的な条件で数値計算せずに、各パラメータ影響の見通しがつくように解析的に進める。）

⑤ 以上の枠組みの中で、表層土層の透水係数が限界降雨強度 r_c 、限界連続雨量 R_c に与える影響を整理する。

2.2 モデルの設定

以下の検討には、降雨がただちに地下水面に与えられ飽和側方流を形成するという単純なモデル（飽和流モデル）と、つぎに説明する飽和・不飽和流モデルを対比しながら用いる。飽和・不飽和流モデルは、鉛直不飽和浸透と飽和側方流の両者を扱うことができ、かつ地下水位発生を数値計算に頼らず検討することができるように、2次元飽和・不飽和浸透の基礎式を次のように簡略化した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x} K_x \sin \omega \cos \omega \quad (1)$$

ここに、 X ：水平座標、 Z ：鉛直座標、 θ ：体積含水率、 ψ ：圧力水頭、 K ：鉛直浸透流の透水係数、 K_x ：側方流の透水係数、 ω ：斜面勾配。鉛直方向の透水係数は $K = K_s \cdot f(\psi)$ と圧力水頭で変わるものとし、側方流透水係数は飽和（ $\psi \geq 0$ ）のとき $K_x = K_s$ 、不飽和（ $\psi < 0$ ）のとき $K_x = 0$ とする（ K_s ：飽和透水係数）。これは、通常の不飽和浸透の基礎式と鉛直浸透については変わらず、側方流について飽和のときだけ流動するように簡略化したものである。

また、初期条件として、土層の鉛直方向の水分分布は任意に与えるが、斜面部位 X でその分布が変わらないものとする。 $\psi(x, z, t_0) = \psi_i(z)$

このようにモデルを設定すると、一定の降雨強度で降雨が継続するときの定常地下水面形は、飽和流のみを扱うモデルと同様になり、また斜面方向に初期水分一定の条件より飽和水深発生までの鉛直浸透も斜面方向に変わらず、扱いが簡単になる。

2.3 飽和側方流モデルと(1)式の飽和・不飽和流モデルの応答の対比

飽和帯水深 Z_w のときの側方流の流量 q_x は、

$$q_x = K_s \cos \omega \sin \omega \cdot Z_w \quad (2)$$

一定降雨強度 r に対する定常水面形は、

$$Z_{ws}(x) = \frac{r(L-x)}{K_s \cos \omega \sin \omega} \quad (3)$$

定常水位が限界水位 Z_{wc} となる斜面部位 x_c は、

$$L - x_c = \frac{Z_{wc} K_s \cos \omega \sin \omega}{r} \quad (4)$$

(2)～(4)式は、飽和流モデル、(1)式のモデルとも同じ結果である。

地下水位上昇は、 x において水位が定常する時刻（到達時間） $t_r(x)$ まで

$Z_w(x, t) = f(r, t)$ 、と x によらずに（初期条件が斜面方向で変わらないために）上昇する。飽和流モデルでは $f(r, t) = r t / w'$ （ w' は有効間隙率）である。(1)式のモデルでは、不飽和流のために $f(r, t)$ は初等関数形として表現できないが、谷(1982)で解析されたように飽和透水係数、土層の厚さと土壤水分特性のパラメータで定まる固有の上昇曲線を描く（図-2）。到達時間以降は(3)式の水位で定常する。

また、到達時間 $t_r(x)$ は、

$$\frac{r(L-x)}{K_s \cos \omega \sin \omega} = f(r, t) \quad (5)$$

を満たす t であり、 $t_r(x) = F(r, L-x, K_s, \omega, D, \dots)$ と表現できる。飽和流モデルでは $t_r(x) = w'(L-x) / (K_s \cos\omega \sin\omega)$ である。

以上より、限界降雨強度 r_c は、

$$r_c = \frac{Z_{wc} K_s \cos\omega \sin\omega}{L - x_c} \quad (\text{飽和流モデル、(1)式モデル共通}) \quad (6)$$

限界連続雨量 R_c は、

$$R_c = F(r, L-x, K_s, \omega, D, \dots) \cdot r_c \quad (\text{飽和流モデルのとき、} R_c = w' Z_{wc}) \quad (7)$$

つまり、条件1：飽和モデル、飽和・不飽和モデルに共通な降雨強度の条件と、条件2：飽和モデル、飽和・不飽和モデルで異なる連続雨量の条件の、両者が満たされたときに斜面が不安定になる。

3 モデルによる応答の解釈

3.1 飽和流モデルの場合

斜面の地下水位発生を、 x, t, Z_w の3次元図上の立体として表現すると、この x, t 平面に斜面が不安定になる領域が図示できる。図-3が x, t, Z_w 座標上の地下水面形成の図である。この立体を x, Z_w 面、 t, Z_w 面、 x, t 面に投影すると、 x, Z_w 面には定常水面形が、 t, Z_w 面には水位上昇曲線が、 x, t 面には定常状態となる場所 x の軌跡と斜面が不安定となる領域が示される。飽和モデルの場合に透水係数のみが異なる土層について、斜面が不安定となる条件の差異は図-4に示される。飽和透水係数が大きくなると、図-4 x, Z_w 面の定常水面形の傾きがゆるくなり、これが x, t 面の斜面不安定領域を小さくする。 R_c は K_s で変わらず、 r_c は K_s が大きくなると増加する。(透水係数が大きいとき飽和側方流を流下させるのに飽和水深が小さくなるから、安全側に動くのである。)

3.2 飽和・不飽和モデルの場合

図-4に相当する図を描くと、図-5のようになる。この図で、透水係数が変わるとき、 x, Z_w 面の定常水面形の傾きが変わるだけでなく、 t, Z_w 面の地下水位上昇曲線も変わる。このとき、 x, t 面の危険範囲が意味するところは、透水係数が大きいと不安定化する部分は長い斜面の下流端部に限られるが不安定化するまでの時間(=不安定化するまでの連続雨量)は小さくなる。この差は、鉛直浸透にかかる時間に起因している。ただし、不安定化する部分は飽和流モデルと同様に透水係数が小さい場合の方が大きいので、不安定化するまでの連続雨量のみをもって単純に透水係数が大きいときは危険側になるとすることはできない。

ここで、連続雨量-降雨強度図に上記の限界条件を示すことを試みた(図-6)。

4. まとめ

表層土の透水係数は鉛直不飽和浸透と飽和側方流の両者に影響し、崩壊発生限界雨量に両者の影響がどのように現れるかという、問題の構造が明らかになった。しかし、その表現方法は不十分で、さらに検討を要する。

引用文献：谷 誠、日本林学会誌、64、409-418、(1982)

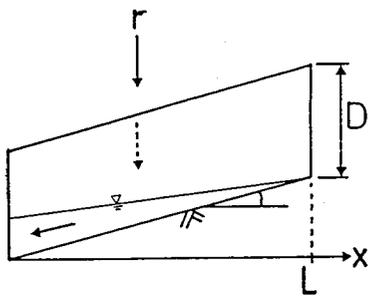


図-1 解析モデル

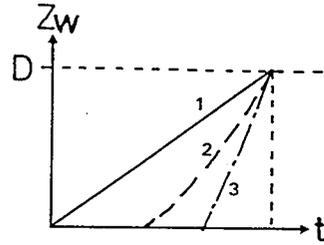


図-2 地下水位上昇曲線

- 1:飽和流モデル、
- 2:不飽和モデル(透水係数:大)、
- 3:不飽和モデル(透水係数:小)

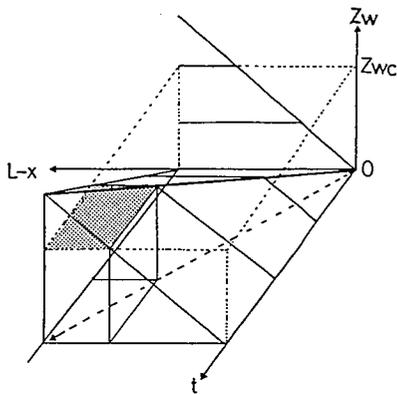


図-3 地下水位形成説明図(飽和流モデル)

L-x, Zw面: 水面形、t, Zw面: 地下水位上昇曲線、
L-x, t面: 特性曲線(水位上昇停止地点の走時曲線)
立体の網目より上の部分は、限界水位を越えている。

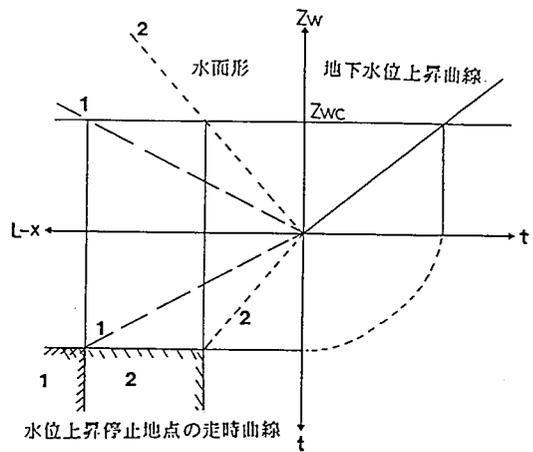


図-4

斜面が限界水位を越える条件(飽和流モデル)

1:透水係数 大、2:透水係数 小

(この図は図-3の投影図である。)

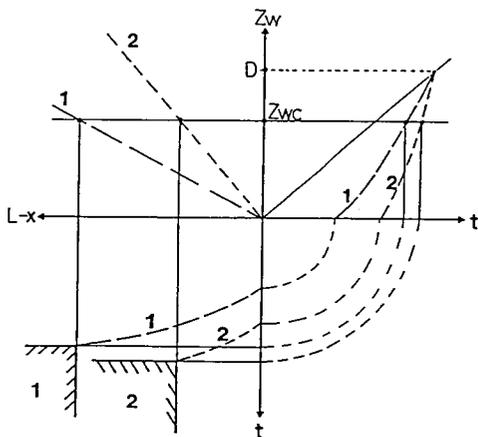


図-5 斜面が限界水位を越える条件

((1)式のモデル)

1:透水係数 大、2:透水係数 小

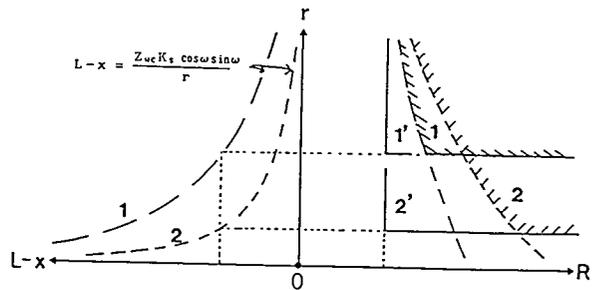


図-6 連続雨量-降雨強度平面上の崩壊発生条件

1:透水係数 大、2:透水係数 小

(ダッシュつきは、飽和流モデルの限界条件)