

降水浸透による斜面の表層崩壊

鳥取大学（正） 榎明潔・（学）安達和徳・○松浦秀幸
 不動産建設（正） 中村正邦・萩野芳章

1. はじめに

自然斜面の崩壊の多くは、表層土の下に基岩がある表層崩壊である。このような斜面において降雨・融雪等の浸透流の挙動を知ることは、斜面安定を知る上で重要となる。本研究では、降水による斜面の鉛直飽和浸透及び定常浸透流に関しての理論的仮説を提案し、それに基づき定常降雨時の間隙水圧の挙動を模型実験より考察する。

2. 斜面における降水浸透流の挙動

・降雨の鉛直浸透過程：降水の浸入に伴うウェッティング・フロント（以下 W・F）の斜面深部方向への下降過程において高さ H の土柱について考えると、鉛直方向の動水勾配 i が 1 であることから、Darcy の法則より地盤内に浸入する流速 v は鉛直方向の透水係数を k_v とすると $v=k_v \cdot i=k_v$ となる。従って降雨強度 R がどんなに強くても、実際に単位面積当たりの地盤に浸入する流量は k_v で、残りは地表流となる。以上のことから地盤への浸入量 r は、 $r=\min(R, k_v)$ で表される。次に W・F が基岩まで到着するのに要する時間について、土柱がほぼ飽和する時間 T を考える。土柱の間隙の合計は $H \cdot n_e$ であり（ここで有効間隙率 $n_e=(1-S_r)e/(1+e)$ ； e :間隙比、 S_r :初期の飽和度）、浸入量は r であることから T は次式となる。

$$T=H \cdot n_e / r \quad (1)$$

・無降雨時の定常浸透流：図1のような無限斜面に水深が H_w の基岩に平行方向の定常浸透流が存在するとする。地下水面と基岩面は明らかに流線であり、図に示すような流線群と等ポテンシャル線群が描ける。そして微小距離 ds だけ離れた A 線と B 線に着目すると両線の全水頭差は $ds \sin \theta$ であることから動水勾配は $\sin \theta$ となり、基岩と平行方向の透水係数を k_b とすると各流線上の流速は $v=k_b \sin \theta$ であり、この浸透流による単位奥行き・時間当たりの流量 Q は透水断面が $H_w \cos \theta$ であることから、次式と得られる。

$$Q=v H_w \cos \theta=k_b H_w \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

・定常浸透流による間隙水圧：また図1中の P 点の圧力水頭は Q 点の位置水頭との関係より求まる。従って、深さ H_w なる定常浸透流がある場合の基岩面での間隙水圧 u は次式で示される。

$$u=\gamma_w H_w \cos^2 \theta \quad (3)$$

・降雨時の定常浸透流：図2のような地表面から単位面積・時間当たり r 相当の浸入量がある場合について考える。また地下水流に対しては Dupuit の仮定が成立するとする。図2の A 面と B 面に入出入りする水の質量保存則は次の通りである。

$Q_1+r \cdot ds \cos \theta=Q+dQ$ ここで式(2)より $dQ=d s (dH_w/ds) k_b \sin \theta \cos \theta$ であるから結局次式を得る。

$$\begin{aligned} dH_w/ds &= r / (k_b \sin \theta) & \text{この解は次式となる。} \\ H_w &= s \cdot r / (k_b \sin \theta) + H_{w0} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで H_{w0} は対象としている領域の最上流部での水深である。

3. 模型斜面による降雨浸透実験

・試料：鳥取県八頭郡用瀬町周辺で採取されたまさ土を 5 mm ふるいで調整したもの及び鳥取砂丘砂を用いた。試料の物性値を表1に示す。

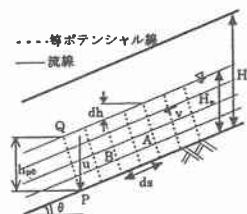


図1 斜面表面と基岩が平行な無限斜面における無降雨時の定常浸透流

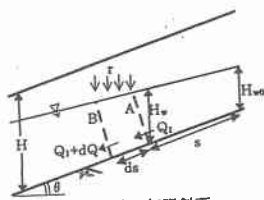


図2 降雨時の無限斜面における定常浸透流

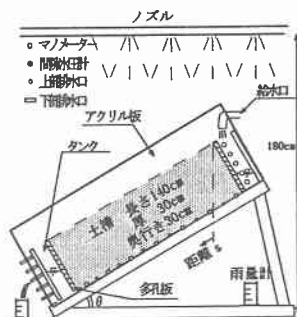


図3 降雨装置概略図

・実験方法 実験装置の概略図を図3に示す。なお降雨装置(15 cm 毎に12ヶ所のノズルがありこれを2本交互に配列)は雨量が均等になるようにしてある。上記の実験装置に乾燥状態のまさ土($e=0.7$)及び砂丘砂($e=0.62$)を、供試体厚さが30 cmになるよう6層に分け締め固め作成した後に土槽を傾け、(まさ土については $\theta=10^\circ$ 及び 30° 砂丘砂については $\theta=30^\circ$)降雨装置より80,160,240 mm/h 程度の降雨量を継続的に与え、アクリル面からW・Fの下降状況を、間隙水圧計ならびにマンメーターからは間隙水圧の経時変化を測定する。さらに計測が終了し水平な状態で24時間程度の排水を与えた後、再び土槽を傾け湿潤状態での供試体に降雨を与え、同様の測定を行う。なお、無降雨時の定常浸透流は、斜面上端側のタンクから単位時間あたり一定の水を供給し、かつ上下両端のタンクの排水口から水を越流させることにより人工的に作り出した。そして下端側のタンクから越流する水量が単位時間当たり一定になったときの流量を定常時の流量 Q とした。

4. 実験結果および考察

図4に間隙水圧の経時変化の一例を示す。この図のようにW・Fの実測到達時間 T は各測定地点においてほぼ同じであった。図5に、W・Fの到達時間の提案式より得られる値 T と実測値 T との関係を示す。なお、全てのケースにおいて $R < k_r$ である。砂丘砂においては乾燥・湿潤に関わらず T'/T は0.85前後となり提案式の妥当性がほぼ認められた。まさ土において T'/T は0.37~0.83となったが、これはサクシジョンの影響及び、完全飽和浸透がなされていないためと考えられる。図6は無降雨時のまさ土における浸透流の水深と流量の関係を示す。傾斜角に関わらず比例関係が伺え、この関係から得た透水係数の異方比は $k'=k_b/k_r=6.1$ (k_r :基岩に垂直方向の透水係数)となり、基岩に平行方向の透水係数が基岩に垂直方向の透水係数を卓越していることが認められた。図7に傾斜角 30° のまさ土における浸透流の水深の場所的分布を示す。この図のように今回の実験は相当量の降雨を与えたが、Dupuitの仮定が成立しなくなるケース(まさ土の $\theta=10^\circ$)を除いて提案式との適合性が認められた。

5. おわりに

斜面の崩壊においては、間隙水圧の上昇が多大な影響を及ぼしていると考えられる。その上で間隙水圧上昇の抑制について検討する必要があるが、まずは降雨時の間隙水圧の挙動を知るべきであると考え、理論的仮説を提案し模型実験により検討した。まず、式(1)は砂丘砂については適合性が認められた。式(2)の適合性は確かめられた。式(4)はDupuitの仮定成立下において適合性が認められた。

参考文献

- 1)榎明彦: 降雨時の斜面崩壊—研究の現状と課題—, 鳥取県建設技術協会講演資料, pp6-pp8, 1996

表1 試料の物性値

	まさ土	砂丘砂
土粒子の比重 G_s	2.63	2.65
最大間隙比 e_{max}	0.94	0.84
最小間隙比 e_{min}	0.62	0.54
透水係数 k_r (cm/s)	1.23×10^{-2}	5.5×10^{-2}
10%粒径 D_{10} (mm)	0.12	0.29
60%粒径 D_{60} (mm)	1.7	0.6

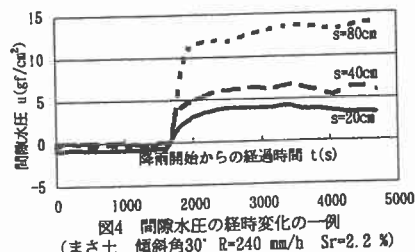


図4 間隙水圧の経時変化の一例
(まさ土 傾斜角 30° $R=240$ mm/h $Sr=2.2\%$)

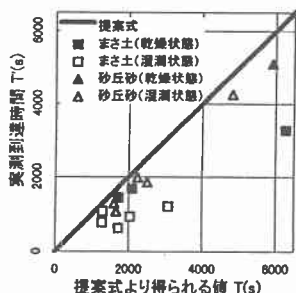


図5 W・F到達時間の理論値と実測値の関係

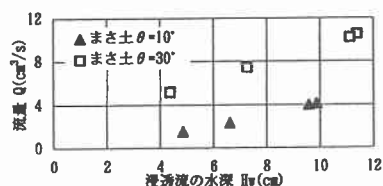


図6 無降雨時の定常浸透流における流量と水深の関係

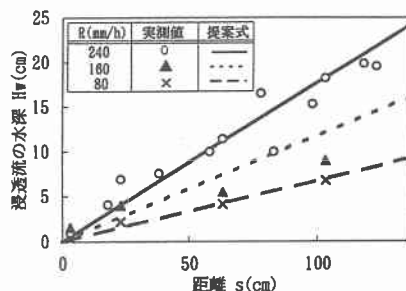


図7 傾斜角 $\theta=30^\circ$ のまさ土における浸透流の水深の場所的分布