

遠心模型実験装置を用いた降雨時の斜面安定

SLOPE STABILITY DURING RAIN FALL BY CENTRIFUGE MODEL TEST

金子 広明¹・田中 洋行²・工藤 豊³

Hiroaki KANEKO, Hiroyuki TANAKA and Yutaka KUDOH

^{1, 2, 3}北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

¹ E-mail: h-kaneko@eng.hokudai.ac.jp

² E-mail: tanaka@eng.hokudai.ac.jp

³ E-mail: kudoh@eng.hokudai.ac.jp

Key Words: centrifuge model test, slope stability, rain fall, two layered ground

1. 研究背景と目的

近年、異常気象の影響により、集中的な豪雨が各地で発生している。また、日本列島は急峻な山地を持つ地形であるため、降雨による斜面災害が数多く発生している。降雨時の斜面崩壊の原因として、雨水の浸透により地表付近の土の飽和度が大きくなり、単位体積重量が増えると共に、サクションが消失し、見かけの粘着力が小さくなることが考えられる。したがって、降雨時の斜面の安定性を評価するためには、地下水面より上の不飽和土地盤中の間隙水の挙動を明らかにする必要がある。筆者らは、コストと時間のかかる大規模な実物大実験の代わりに、遠心力装置を用いて、降雨時の不飽和土地盤の挙動に関する一連の研究を行っている^{1), 2)}。本論文では、粘土含有率が異なった二層から成る模型地盤に対して行った降雨実験の結果と斜面崩壊のメカニズムについて述べる。

2. 実験概要

(1) 遠心模型実験装置 (写真-1 参照)

遠心模型実験装置は、縮尺模型地盤においても、自重の影響を再現できる手法である。本研究で用いた遠心力装置は、有効半径1.5(m)、最大加速度150(G)、最大積載量は150(kg)である。

(2) 間隙水圧計 (図-1 参照) と散水装置

本研究で用いた間隙水圧計は、SSK社製である。この間隙水圧計は、図-1に示すように直径が約8mmと非常

に小型であり、縮小模型地盤内に設置可能である。また、受圧面には、セラミックフィルターを用いており、負圧の測定が可能である。

遠心模型実験装置の外部に設置した散水装置により遠心模型実験装置内に水を供給し、水を霧状に散布できる3つの散水バルブによって、模型地盤に降雨を再現した。



写真-1 遠心模型実験装置

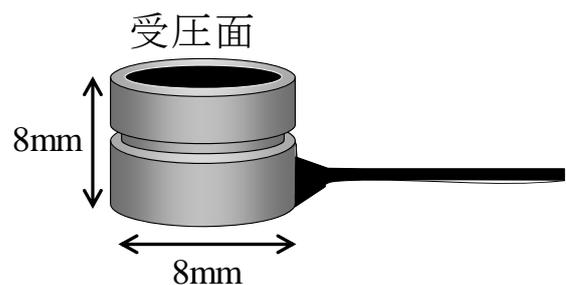


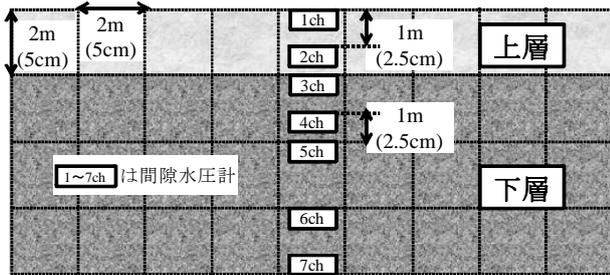
図-1 間隙水圧計 (SSK社製 P306A-1型)

(3) 実験手順

透水係数を変化させるために、豊浦標準砂と笠岡粘土の質量比を 100 : 0(以下、粘土分 0%と呼ぶ)、95 : 5(粘土分 5%)、90 : 10(粘土分 10%)の割合で混合した三種類の試料を用いた。これらの混合土を用いて、二層の平面および斜面地盤を作製し、降雨実験を行った。

模型地盤の作製方法は以下の通りである。砂、粘土、水を所定の配合で十分に攪拌した試料を、一層当たりの厚さが 2.5cm、飽和度が 50%となるように模型土槽(W45×D20×H40cm)内で締め固める。その際に、間隙水圧計を所定の深さに設置する。この作業を繰り返し行い(全部で八層)、平面地盤を作製する(図-2 参照)。斜面地盤の場合には、上記の平面地盤を斜面角度が 45°、斜面高さ 15cm となるように削り出し、斜面地盤を作製する。また、斜面地盤の法先 15cm の位置には排水口を設け、水は排水口により土槽外部へと排水される。平面および斜面地盤はともに 40G の遠心力を載荷し、間隙水圧計の値が安定するまで、すなわち遠心加速度による地盤内の水分移動が終了するまで放置し、その後、降雨を模した散水を行った。

本論文では、模型地盤の挙動は表-1 に示す相似則に従うと考え、寸法と時間を実物に換算し、実験結果を述べることにする。本研究では遠心加速度を 40G と一定で行ったので、対象とする地盤は斜面高さ 6m(模型地盤では 15cm)となる。また、寸法を実地盤に換算した斜面地盤の概略図を図-3、4 に示す(図中の () 内は模型地盤寸法である)。本研究では、上層の厚さが 2m で下層の厚さが 6m(図-3 参照)と、上層、下層ともに厚さが 4m(図-4 参照)の二種類の斜面地盤を対象とした。



注) 遠心加速度は 40 (G)

寸法は実地盤換算をした値で、() 内は模型地盤寸法である。

図-2 平面地盤

表-1 遠心加速度 n (G) における相似則

	実地盤換算
長さ (m)	n
時間 (hr)	n ²
応力 (kPa)	1
降雨強度 (mm/hr)	1/n

3. 実験結果

(1) 平面地盤の降雨実験

平面地盤の降雨実験においては、斜面地盤とは異なり、排水口を設けていないので地下水位は降雨とともに上昇する。表-2 に、平面地盤の実験条件を示す。図-5、6、7 は、地盤内に設置された間隙水圧計から得られた値を用いて、降雨開始からの間隙水圧分布の時間変化を示したものである。

全ての実験結果(図-5~7)において、地表面(深さ 0m)の間隙水圧計の値が変化していないことが分かる。つまり、雨水は地表面に溜まることなく全て地盤内に浸透したと考えられる。また、この様子は模型土槽前面に設置した CCD カメラの映像からも確認できた。

全ての実験において、上層、下層ともに飽和度 50%となるように模型地盤を作製したので、遠心力によって水分が下方に全て浸透したとすると、降雨を開始する前の地下水面は地盤の中央の深さ 4m に生じるはずである。このことは、図-5~7 から確認された。また、地下水面より上の不飽和土地盤において -2~7 kPa の微小なサクションが計測された。しかし、降雨を開始して時間が経つにつれ、このサクションは消失し、地下水面は上昇した。

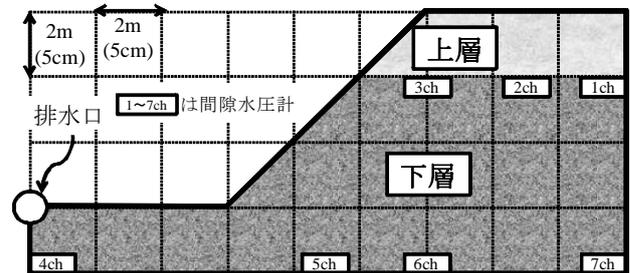


図-3 斜面地盤 (上層厚 2m)

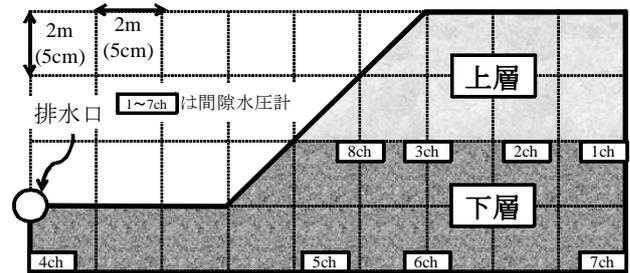


図-4 斜面地盤 (上層厚 4m)

表-2 平面地盤降雨実験条件

実験	上層 粘土分 (%)	下層 粘土分 (%)	降雨強度 (mm/hr)	降雨時間 (hr)
①	0	5	30	35.6
②	5	10		
③	0	10		

実験②, ③ (それぞれ図-6, 7に示す)における0hr (図中記号●)と17.8hr (図中記号▲)を比較すると,境界面(深さ2m)の間隙水圧だけが增加していることが分かる.この理由は,上層(粘土分0%,5%)は降雨強度30mm/hrに比べ透水係数が大きいのに対し,下層(粘土分10%)の透水係数が小さいため,境界面に雨水が溜まり,境界面にも地下水面(‘亩水’状態の地下水面)が形成されたと考えられる.しかし,図-5に示す実験①では,境界面の間隙水圧に大きな変化は見られなかった.これは,上層(粘土分0%)と下層(粘土分5%)はともに降雨強度30mm/hrに比べ透水係数が大きく,降雨によってもたらされた雨水は境界面に滞留することなく,浸透したためと考えられる.

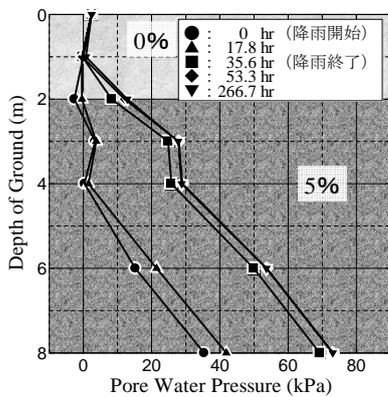


図-5 間隙水圧分布 (実験①)

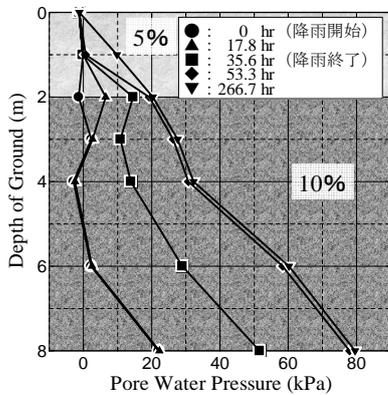


図-6 間隙水圧分布 (実験②)

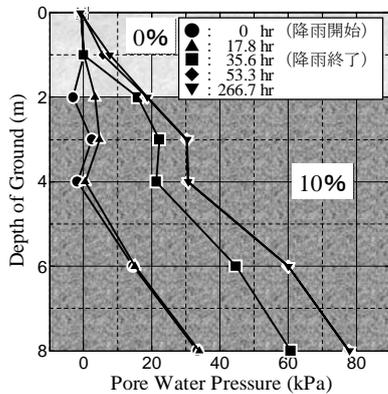


図-7 間隙水圧分布 (実験③)

(2) 斜面地盤の降雨実験

表-3に,斜面地盤の実験条件と降雨による斜面崩壊の有無を示す.斜面崩壊が生じたのは,降雨強度や上層の厚さに因らず,上層が粘土分0%で下層が粘土分10%のときであった.実験④が崩壊しなかったことより,上層の粘土分が0%であっても,必ずしも崩壊が生じるわけではないことが分かる.

崩壊後の斜面の様子を写真-2, 3に示す.実験⑥と⑨は同じ崩壊状況だったので,実験⑥の写真のみを示す.

写真-2, 3より,上層の厚さによらず,斜面崩壊は上層部分で生じていることが分かる.

表-3 斜面地盤降雨実験条件

実験	上層 粘土分 (%)	下層 粘土分 (%)	降雨強度 (mm/hr)	降雨時間 (hr)	斜面崩壊
④	0	5	30	14.8	×
⑤	5	10			×
⑥	0	10			○
⑦	0	5	15	29.6	×
⑧	5	10			×
⑨	0	10			○
⑩	0	5	30	14.8	×
⑪	5	10			×
⑫	0	10			○

注) 実験④～⑨は上層厚2m (図-3参照),
実験⑩～⑫は上層厚4m (図-4参照)
斜面崩壊: ○は崩壊, ×は崩壊せず

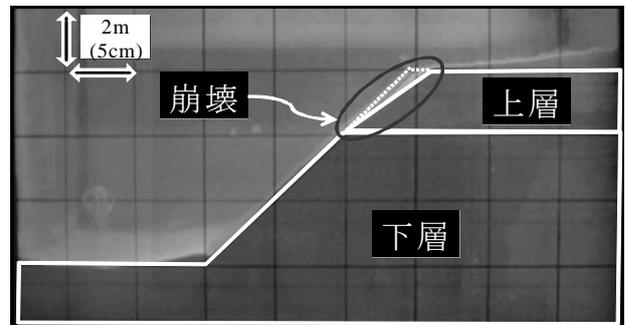


写真-2 斜面崩壊状況 (実験⑥)

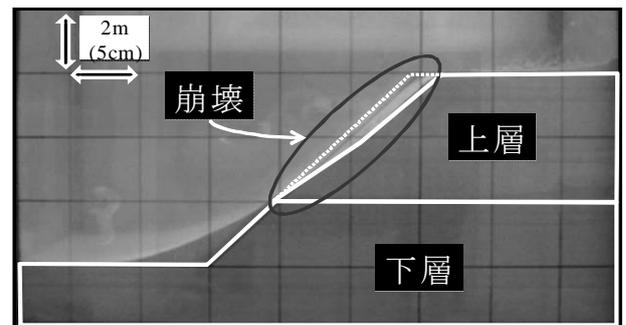


写真-3 斜面崩壊状況 (実験⑫)

図-8～10に実験④～⑥の地下水面形状の時間変化を示す。地下水面は、間隙水圧計によって観測された間隙水圧を静水圧と仮定し、間隙水圧計から地下水面までの深さで求めた。上層と下層の地下水位に着目すると、図-8は境界面に地下水面が形成されていないことが分かる。これは、上層、下層ともに降雨強度に比べ透水係数が大きいいため、雨水は全て下方へ浸透したと考えられる。また、このことは実験①(図-5)で得られた結果と一致する。しかし、図-9、10では、上層と下層の境界面の間隙水圧が上昇していることから、境界面に雨水が溜まり、一時的に‘宙水’状態の地下水面が形成されていることが分かる。これは、図-6、7同様に、下層が粘土分10%と難透水性であったためと考えられる。

境界面に地下水面が形成された図-9と図-10は、同様な結果を示す。しかしながら、ピーク時の上層と下層との境界面の水位を詳細にみると、図-9(図中▲)は均一な水位となっているが、図-10(図中○)では右端の水位が低くなっていることが分かる。これは、図-10の方が上層の粘土分が少ないため、水平方向の水分の移動が生じたと考えられる。つまり、宙水となって境界面に滞留していた雨水は、斜面表面に向かって移動し、この浸透流によって崩壊が生じたと考えられる。

実験④～⑥と地盤条件が同じで、降雨強度が15mm/hrである実験⑦～⑨を見てみる。降雨強度が15mm/hrでも斜面崩壊が生じたのは、上層が粘土分0%で下層が粘土分10%の時だけであった。このことから、降雨強度の違いは、斜面崩壊に大きな影響を与えないと考えられる。しかし、今回の実験条件では、降雨強度を15～30mm/hrの狭い範囲で変化させただけなので、今後、降雨強度を様々に変化させて、降雨強度が斜面崩壊に及ぼす影響を確認する必要がある。

また、上層の厚さが異なる実験⑩～⑫においても、上層が粘土分0%で下層が粘土分10%の時にのみ斜面崩壊が生じた。このことから、層の厚さは斜面崩壊に大きな影響を与えないと考えられる。しかし、写真-2、3から、斜面崩壊の形態は同様であるが、上層の厚さが厚くなると、斜面崩壊の範囲は大きくなる傾向にあることが伺える。

4. 結論

(1) 平面地盤の降雨実験

- 不飽和土地盤において-2～-7 kPaの小さなサクションが観測されたが、降雨によってサクションは消失し、地下水面が上昇した。
- 降雨強度30mm/hrにおいて、粘土分0%、5%の地盤では雨水は、全て下方に浸透した。しかし、粘土分10%

の地盤で境界面に雨水が滞留し、‘宙水’状態の地下水面が形成された。

(2) 斜面地盤の降雨実験

- 平面地盤と同様、下層が粘土分10%の場合には境界面に雨水が滞留し、‘宙水’状態の地下水面が形成された。さらに、上層が粘土分0%の場合には、境界面に溜まった雨水は斜面表面に移動し、その浸透流によって斜面崩壊が生じた。
- 二層からなる斜面の崩壊は、上層と下層の透水係数の差が大きくなると生じると考えられる。また、今回の実験条件の範囲では、降雨強度や層の厚さは斜面崩壊に大きな影響を与えないことがわかった。

参考文献

- 阿倍篤史, 田中洋行, 三田地利之, 工藤豊, 笠間太樹: 遠心力模型実験による降雨時の地下水位の変動, 第41回地盤工学会研究発表会, pp.2179-2180, 2006.
- 金子広明, 田中洋行, 工藤豊, 笠間太樹: 遠心模型実験装置を用いた降雨再現実験での間隙水圧の挙動, 第42回地盤工学会研究発表会, pp.533-534, 2007.

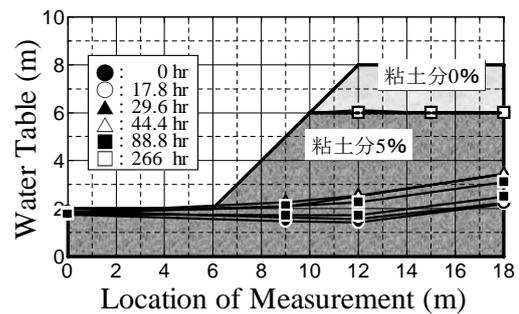


図-8 地下水面変化(実験④)

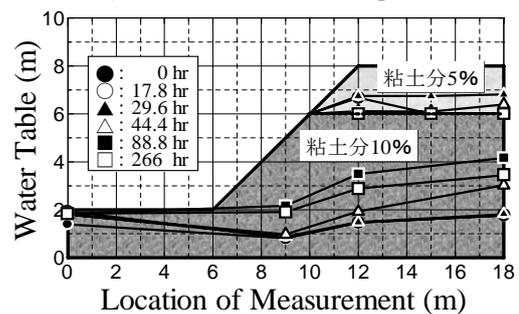


図-9 地下水面変化(実験⑤)

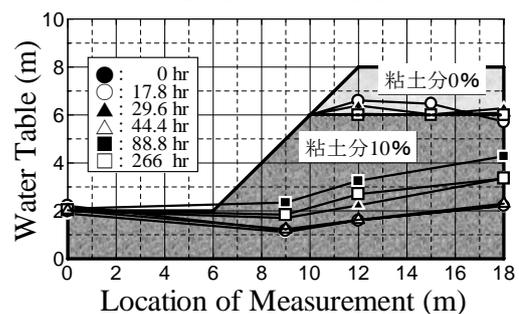


図-10 地下水面変化(実験⑥)