

66 斜面崩壊の発生機構に及ぼす不飽和浸透の影響

—発生時間・位置と土層厚の関係—

農林水産省森林総合研究所 ○三森利昭・大倉陽一・落合博貴・北原曜

1 はじめに

豪雨による崩壊のおよそ8割が山地斜面の中上部で発生している(吉松ら, 1988)。雨水の浸透から言えば, 斜面下部ほど初期水分量が多く雨水の重力排水によって, 斜面下部がいち早く飽和し不安定化すると考えるのが一般的であり, 斜面上部に発生する発生機構は未だ十分に明らかになっていない。このような崩壊についてその発生機構を検討した例として, 武居(1952), 伊勢田ら(1985), 三森ら(1993)がある。武居は1951年に亀岡市近郊において発生した崩壊箇所の観察から基礎岩盤の浅いところで崩壊が発生しやすくその理由として土層厚の浅い箇所ほど塑性化するのに必要となる水分量が少ないためと推察し定性的な評価を行った。伊勢田らは1982年に長崎市において発生した斜面崩壊について飽和不飽和浸透解析と弾性解析を行って局所安全率を求めた結果, 基礎岩盤の凸型の屈曲部付近で飽和域が生じ局所安全率が1.0以下となる要素が出現したことを報告した。三森らは飽和不飽和浸透解析と極限平衡法による斜面安定解析を組み合わせた数値実験の結果, 不均一な土層厚斜面で上部が下部より薄い場合には浸潤前線の不透水面への到達時間の相違から斜面上部に飽和域が発生し上部で表層崩壊が起こり得ることを示した。これは, 雨水浸透の帰結として生ずる飽和域の位置, すなわち, 崩壊を起こさせるに足る間隙水圧の発生する部位が土層厚によって規定されるとした考え方であり, 斜面中上部での崩壊の発生機構を合理的に説明するものである。そこで浸透と崩壊との関係について, 現実の崩壊において明らかにするため, 土層厚ならびに分布を変えた複数の室内規模の実験を行い崩壊に与える影響について検討を行った。

2 実験方法

使用した土槽は図1に示すように, 水平長5.46m, 幅は0.9mで, 下方平坦部(2.0m), 斜面部(斜面方向3.0m, 傾斜35°), 上方平坦部(1.0m)からなり, 側面の片方は強化ガラス製で崩土の運動が観察可能である。土槽の下流側端面はステンレス製の金網で供試砂は拘束されるが浸透水は速やかに排出される。斜面底部には鋼製の角棒(断面10×10mm, 長さ900mm)を斜面横方向に10cmごとに設置し, 供試砂が底面で容易に滑らないようにした。供試土層の上方にはスプレーノズルを用いた人工降雨装置(所与する降雨強度35~110mm/h)を設置し, 崩壊土槽上の3点で比較的細粒径の雨滴を均等に発生させ降雨を土層に与えることにした。また, 負

から正值までの間隙水圧の空間的・時間的変化を把握するために小型の間隙水圧計(直径18mm, 長さ83mm)を新たに開発し実験に用いた。使用するフィルターは実験開始時の供試砂が十分湿潤であることを条件として空気浸入値で $-60\text{cmH}_2\text{O}$ 程度のガラスフィルター)を使用した。このフィルター

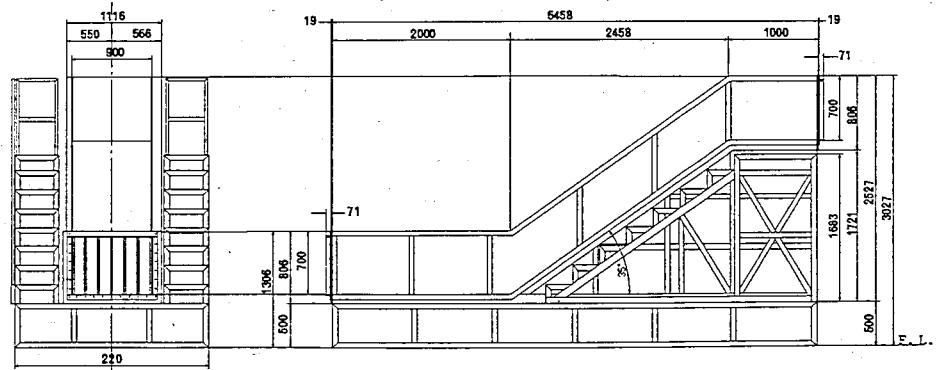


図1 崩壊実験に用いた土槽

の透水性は非常に良く、開発した間隙水圧計は追従性に優れている。間隙水圧計は水平方向長で50cmおきに土層の深さ方向の中央部と底部にそれぞれ1つずつ12地点に計24基配置し、実験中は10秒間隔で間隙水圧値を自動計測した。供試土には山砂を用いたがその乾燥密度は 1.30g/cm^3 で粒度分布は悪く、 D_{10} が 0.144mm 、均等係数(D_{60}/D_{10})は2.59であった。供試砂の透水係数は定水位法により求めたところ $2.0 \times 10^{-2}\text{cm/sec}$ であった。水分特性については土柱法および加圧法を併用して計測したところ飽和体積含水率 θ_s は0.429、残留体積含水率 θ_r は0.051、体積含水率 θ －圧力ポテンシャル ϕ 関係を表すvan Genuchten(1980)式のパラメータ α 、 n はそれぞれ5.60、3.07であった。また、不飽和透水性については三森ら(1991)が提示した方法によって土壌水分特性から推定した。飽和時の土質強度は、現場一面せん断試験機(断面積 $20 \times 20\text{cm}^2$ 、深さ10cm)によって求めたところ、粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' はそれぞれ 8.21kgf/m^2 、 30.4° であった。土層の詰め込み深さについては、土層厚さ別に見た崩壊発生時刻あるいはそれまでの累積降雨量との関係を調べるために、20、30、40、50、60cmの5種類の均一土層厚(run-1~5)と、土層厚の不均一さによる崩壊への影響を明らかにするために、下部の土層が厚い条件(下部平坦部50cm、斜面部40cm、上部平坦部30cm、run-6)と、上部の土層が厚い条件(下部平坦部30cm、斜面部40cm、上部平坦部50cm、run-7)と対照的な土層分布条件として2種類の、合計7実験を行うことにした。この時の斜面部の深度は鉛直方向の値である。供試砂は約50cm上方から少量ずつ落下させ詰め込んだ後、表面を整形して供試土層とした。詰め込み時の含水率が各実験において湿潤な初期水分量で同一となるように配慮するとともに、詰め込み完了から降雨開始までの時間をすべての実験において同一の20時間とした。降雨強度は、供試砂の透水係数が比較的高いことから 110mm/h で全実験を行った。数値実験は室内実験と同様の斜面モデルを用い、既報の解析モデル(1990)によって実施した。解析に必要な諸物理パラメータは全て前述の実測値を用いた。また、斜面内の初期における間隙水圧分布は、実験開始時の実測値に基づき、間隙水圧計の間は線形補間して各要素節点の初期値とした。

3 実験結果と考察

3.1 崩壊発生時刻

室内実験と数値実験による結果の対比を表1に示す。run-1を除くすべての実験では崩土の移動が1~2秒間で終了したのに対し、run-1では小規模な移動が繰り返し生ずるようなクリープ的挙動を呈しており、土砂移動の形態が異なった。このため、run-1の崩壊発生時刻を初回の小規模移動が発生した時刻としたが、形態が異なるrun-1とこれ以外の実験との相互比較には問題があると考え、run-1は数値解析等の検討では割愛することにした。均一土層厚条件下では崩壊は土層厚の小さいものほど早く崩壊する結果が得られたが、土層厚と崩壊発生時間との関係を示した図2によれば両者が線関係にあることがわかる。図3に実際の崩壊時刻と数値実験の結果から得られた崩壊時刻との関係を示す。図3によれば数値

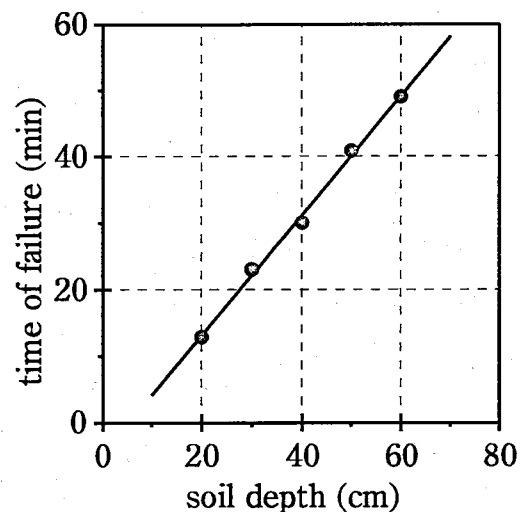


図2 土層厚と崩壊時間との関係

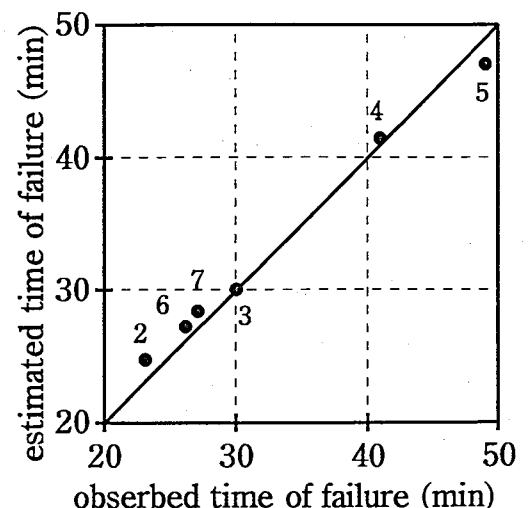


図3 崩壊発生時間の推定値と観測値
(図中の数字は実験の番号)

実験による結果と実際の崩壊実験の結果とは良く一致している。一方、不均一土層厚条件下の崩壊発生時刻については、run-6、run-7と斜面部が同一の土層厚であるrun-3(30分03秒後)より若干早く崩壊する結果が得られた。

表1 室内実験および数値実験結果

Exp. No.	soil distribution	soil depth (cm)	Laboratory Experiment			Numerical Simulation			
			time of failure	total rainfall (mm)	ESS** value at initial cond.	time of failure	total rainfall (mm)	area of slip circle (m ²)	ESS* value at failure
run-1	uniform	20	12' 50~13' 00'	23.5	—	—	—	—	—
run-2		30	23' 09'	42.4	0.5677	24' 47'	45.4	0.4568	0.9010
run-3		40	30' 03'	55.1	0.5735	30' 05'	55.3	0.7211	0.8986
run-4		50	40' 59'	75.1	0.5512	41' 28'	76.0	0.9101	0.9098
run-5		60	49' 02'	89.9	0.5568	47' 00'	86.1	1.1433	0.9102
run-6	non-uniform	50,40,30*	26' 14'	48.1	0.6308	27' 16'	50.0	0.6658	0.9078
run-7		30,40,50*	27' 09'	49.8	0.5848	28' 25'	52.1	0.7119	0.9050

* : Soil depths from bottom to top

** : Effective saturation of slope (SAMMORI et al., 1993)

3.2 斜面の水分状態

降雨開始から崩壊発生時までが斜面からの流出がほとんどなく、降雨量と比較すると無視できる量であるため、所与降雨はほとんど斜面内部で貯留されていると考えられた。ここで三森ら(1993)が提案した斜面の有効飽和度を用いて、降雨開始時すなわち初期水分状態と崩壊時の水分状態について検討した。その結果を表1に示すが、初期水分状態は0.5512~0.6308とその差は比較的少ない。また、崩壊時の斜面有効飽和度は0.8986~0.9102とほぼ一致した値が得られた。

3.3 不均一土層厚条件における間隙水圧の観測結果

室内実験の結果、斜面上部が薄い土層(run-6)では飽和域が斜面上部に発生したのに対し、斜面下部が薄い土層(run-7)では斜面下部にまず飽和域が発生していた。崩壊発生時には、run-6では斜面の下部、run-7では斜面の上部が、それぞれ不飽和状態にあり、各部位における土層厚の違いにより飽和域の発生場所が規定されていることを明瞭に示していた。これに対し土層厚が均一なrun-4等では、飽和域の発生時刻は斜面の各部位で大きな差はない。浸潤前線の降下速度は降雨強度と初期含水率ならびに透水性ならびに保水性等の土性により決定されることから、土性に変化がない均一斜面では浸潤前線の降下速度はほぼ同じである。したがって、土層厚が同一である場合浸潤前線が底部に到達する時刻は斜面部位にかかわらずほぼ同時となり、斜面全体で飽和域が同時に生じる結果となったと理解される。

3.4 崩壊の発生位置

崩壊時の崩土の移動ベクトルと数値実験によって得られた臨界円弧を図4に示す。数値実験により計算された臨界円弧は何れも地表面の傾斜変換点にその下端が一致している一方、移動ベクトルは均一土層厚の場合、run-5を除くと斜面下端の傾斜変換点の近傍にすべりの下端がみられる点が一致している。しかし、土層厚が大きくなるにつれて移動量は平坦部でも増加していく傾向がみられ、run-5ではその傾向が顕著となる。崩壊時の崩土の移動方向であるが、斜面中上部においてはほぼ斜面方向もしくは下向きが見られるのに対し、斜面下部では斜面下方向より上向きの移動を示し、崩土が回転運動をしていることを示している。土層厚を不均一としたrun-6とrun-7における崩土の移動量を比較すると、下部の土層が厚いrun-6で斜面の上方において移動量が大きくこの部位で崩壊が発生しているのに対し、斜面下方が薄いrun-7では斜面部より更に下方の平坦部での移動量が卓越し斜面下方で崩壊が発生している。均一土層深であるrun-3の結果

は、run-6, 7のほぼ中間と
なっていることが図より理解
され、土層厚の不均一さが崩
壊発生位置に影響を与えてい
ることを示している。

4 おわりに

室内実験によって、崩壊の
発生時間と土層厚と一次関係
にあり崩壊時に斜面の有効飽
和度が土層厚に関係がなく一
定であることが確認された。
同様に、土層厚の分布態様を
変えた実験では、土層厚の小
さな箇所に飽和帯が初めに発
生し斜面崩壊の発生の原因と
なる飽和域の発生位置に大き
な影響を与えていることが明
らかになった。室内実験と同
様の条件下で行った数値実験
の結果は、崩壊時間ならびに
形態について符合していたこ
とから使用した崩壊解析モデ
ルが降雨による崩壊を解析す
る際に有効であることがわか
った。この様な土層厚の違い
によって浸透過程に影響を与
える結果、崩壊発生時刻・場
所に生ずる差異は実際の山地
斜面についても考えられ、現
実の山地崩壊について土層厚
に着目した調査を行う必要があ
らう。

参考文献

- 伊勢田ら(1985):長崎豪雨における緩斜面の崩壊機構, 土質工学会論文報告集, vol.25, no.2, pp173-184.
三森ら(1990):浸透現象を考慮した斜面安定解析法に関する研究, 新砂防, vol.43, no.4(171), pp.14-21.
三森ら(1991):土壌水分試験結果を用いた不飽和透水性の推定, 生産研究, vol.43, no.2, pp.110-113.
三森ら(1993):諸パラメーターが表層崩壊に与える影響の数値実験的検討, 新砂防, vol.46, no.1(186), pp.3-12.
武居有恒(1952):亀岡近郊に於ける山崩れに就いて, 新砂防, no.8, pp.15-20.
van Genuchten, M.Th(1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., vol.44, pp.892-898.
吉松弘行ら(1988):がけ崩れ災害の実態, 土木研究所資料no.2583.

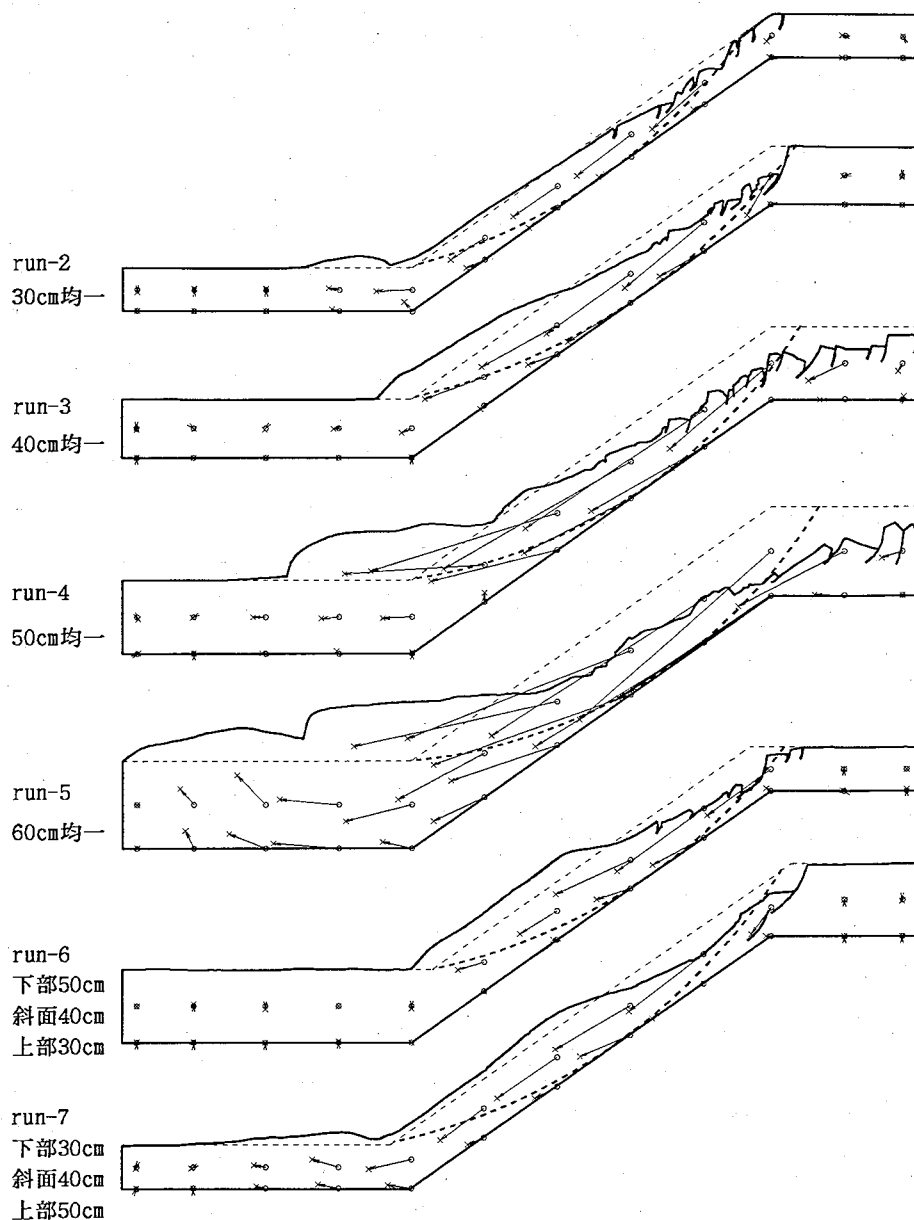


図4 崩壊前後の土層断面, 崩土の移動ベクトルと数値実験により
得られた臨界円弧(太点線)