細粒分に着目したまさ土斜面の降雨崩壊特性

久田 裕史¹・中田 幸男²

¹正会員 西日本高速道路株式会社 滋賀高速道路事務所 (〒520-3016 滋賀県栗東市小野758)

E-mail: h.hisada.aa@w-nexco.co.jp

²正会員 山口大学教授 大学院理工学研究科 (〒755-8505 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nakata@yamaguchi-u.ac.jp

本研究では、降雨によるまさ土斜面の崩壊挙動に与える細粒分含有率の影響を実験的に検討した。ここでは、小型模型斜面に対する降雨による崩壊実験を実施し、細粒分含有率によって変化する崩壊形態や崩壊規模、発生する間隙水圧に着目して考察を加えた。その結果、崩壊に至るまでの変形挙動や間隙水圧の増加挙動によって、“浸透崩壊”と“すべり崩壊”の2つのタイプに区別できた。崩壊は、細粒分含有率が高いほど、すべり崩壊を示しやすく、崩壊規模が大きくなることがわかった。さらに、透水係数と降雨強度から求められる指標によって、斜面の崩壊形態や崩壊規模を評価可能であることがわかった。

Key Words : slope failure, rainfall, model testing, fines content, pore water pressure

1. はじめに

近年、豪雨に伴う土砂災害の多発によりその被害が深刻な問題となっている。平成21年中国・九州北部豪雨では山口県防府市周辺でまさ土地域での表層崩壊を発端とする土石流災害が発生し、多くの死者を出す結果となった。この災害の特徴の一つに、災害現場がまさ土地域である¹⁾という点があげられる。風化残積土であるまさ土は、風化の程度によって細粒化が異なり、細粒分含有率が変わることが知られている。このため、崩壊のメカニズムの理解の上で、細粒分の影響を把握することが重要である。

これまでに、斜面崩壊メカニズムに関する研究において、室内模型実験、土質試験、現場計測など多くの検討が進められている。

八木ら²⁾は、雨水浸透による斜面内間隙圧の増加が斜面崩壊に及ぼす影響の解明するために、斜面崩壊の室内模型実験により雨水浸透時の間隙圧を測定、斜面崩壊の観察を通じて崩壊機構を解明している。この結果、斜面先下部の間隙水圧の増加が斜面崩壊の原因の一つであることや、崩壊形態に、斜面先の一部から崩壊が起こる場合と、降雨後、比較的短い時間で斜面全体にわたり崩壊がおこる場合とがあることを示した。これ以降の研究では、過剰間隙水圧の測定によって様々な知見が得られている。Eckersley³⁾は石炭屑の模型斜面で過剰間隙水圧の発生により、有効応力が0に到達することを示した。また、

王・佐々⁴⁾は、間隙水圧の発生に与える初期間隙比や土槽傾斜角の影響を調べ、あわせて、崩壊形態を分類化し、2種類の崩壊を、後退性崩壊と流動性崩壊と記した。Wang & Sassa⁵⁾は、初期密度により過剰間隙水圧の発生量が異なること、過剰間隙水圧発生量と初期密度の間の関係に極大値が存在すること、すべり速度が過剰間隙水圧の発生量に連動すること、加えて細粒分の多い試料の方が、過剰間隙水圧発生量が大きく、有効応力が0に近い状態に達しやすいことを示した。崩壊挙動に与える諸要因については、土層厚や土槽下部の傾斜角の影響⁶⁾、雨水浸透と基盤層からの湧水の影響⁸⁾、細粒分含有率の影響⁹⁾、粘土分含有率の影響¹⁰⁾、火山灰土斜面に与える凍結融解履歴の影響¹¹⁾などが調べられ、地盤内の詳細な変形挙動の把握¹²⁾¹⁴⁾、崩壊から土石流までの遷移過程に着目した検討¹⁵⁾¹⁷⁾がある。現場で観察された崩壊痕を分類し、工学的性質との関連性を分析された。

まさ土斜面を対象とした検討も行われ¹⁸⁾²¹⁾、降雨時の斜面内の不飽和浸透挙動と変形挙動の把握¹⁸⁾とそのモデリング¹⁹⁾や、現場モニタリングの実施²⁰⁾など、成果が蓄積されつつある、しかし、まさ土の重要な特徴である細粒分が崩壊挙動に与える影響は十分理解されていないといえる。

本研究では、以上のような現状を踏まえ、まさ土の斜面崩壊挙動に与える細粒分含有率の影響を実験的に検討する。ここでは、小型模型斜面に対する降雨による崩壊実験を実施し、細粒分含有率によって変化する崩壊形態、

や崩壊規模、発生する間隙水圧に着目して考察を加える。

2. 模型斜面の降雨崩壊実験

(1) 実験装置

本研究の実験装置は図-1(a)に示すように模型土槽と降雨装置から構成される。模型土槽は長さ 52.0cm, 幅 30cm, 傾斜 20 度の緩斜面部と、長さ 58.5cm, 幅 30cm, 傾斜 40 度の急斜面部からなる。傾斜角度は 2009 年 7 月中国・九州北部豪雨で甚大な被害を受けた山口県防府市の土砂災害現場¹⁾を参考に決定した。また既往の模型斜面を用いた実験で 2 つの異なる勾配を持つものが少なく、さらに実際の崩壊場所の角度は一樣でないため、今回の研究では 20 度と 40 度の 2 つの勾配を持つ模型土槽を用いた。緩斜面部左端は目の細かい網が設置されており、自然に発生する地下水の流出が可能である。なお地下水の流出は土槽側面や土槽底部など他の箇所からは行われない。模型土槽の底面はアクリル板であり摩擦が小さいため、網目を持つプラスチックのシートを引くことで、すべりが土と土の間で発生するようにしている。

模型土槽の側面は、斜面が崩壊する際の土砂の挙動をビデオカメラで録画するために透明なアクリル板を用いた。図-1(b)に示すように実験中の間隙水圧の挙動を確認するために模型土槽の底面の 40 度傾斜部に間隙水圧計 P-1 を、20 度傾斜部に P-2 を設置した。また斜面崩壊時の土砂の挙動を確認するために急斜面部表面に 4 か所、緩斜面部表面に 1 か所の計 5 か所に加速度計 A-1～5 を設置した。この加速度計は一軸方向の計測しか行えないため、角度の変化を加速度と同様にとらえてしまう。そのため本研究では、土砂の挙動の初動や終息など、斜面の変状をとらえるために用いた。また、模型斜面は図-1(b)に示すように 9 層に分け緩斜面部から順に締固めていくが、その際に斜面内部の土砂の追跡を容易にするため模型斜面の各層の境界に 2.8mm のガラスビーズを 5 個ずつ設置した。ガラスビーズは、最上段については地表面から順に、1.1, 1.2, ...1.5 とし、地表面は最上段から順に、1.1, 2.1...7.1 と記す。画像解析により追跡されるこれらのガラスビーズの軌跡から、後述する崩壊領域割合や移動距離を求めているが、最小の計測能力は 1mm である。図-1(b)にはガラスビーズの配置を示している。間隙水圧計および加速度計はひずみ計測ユニットおよび PC ダイレクトインターフェースユニットを介してパソコンと接続し、10回/sec のサンプリング速度で実験開始から終了まで間隙水圧および加速度を計測し、パソコンへのデータの記録を行った。表-1 は、各々のセンサーの形状、大きさ、測定能力を示している。

(a) 土槽及び斜面の寸法と降雨装置

(b) 模型斜面と計測装置

図-1 模型斜面実験装置

表-1 センサーの形状と測定能力

	断面形状	高さ	最大値	最小値
間隙水圧計	8mm φ	6mm	10kPa	0.01kPa
加速度計	10mm × 10mm	20mm	9.8m/s ²	0.01m/s ²

降雨装置は長さ 70cm, 幅 30cm, 高さ 15cm の箱形であり、底部に直径約 1mm の降雨用の針が 6 × 15 の 90 本均等に配置されており、模型土槽の上部に設置する仕様である。装置には排水用・給水用の 2 本のパイプが設置されており、給水用パイプから水をくみ上げ装置内に水をため、排水用パイプを上下させることにより降雨装置内の水位を変化させる。この水位の調整により針内にかかる水圧を変化させ、降雨強度を変化させる仕組みである。

(2) 実験手順

実験は以下の手順で行った。

- 1) 間隙水圧計 P-1, P-2 を模型土槽の底面に設置する。

表-2 試料および実験条件

試料：まさ土		実験条件	
ρ_s	2.604 g/cm ³	降雨強度	60, 70, 90 mm/h
D_{max}	2.0 mm	初期含水比	10 %
F_c	5, 10, 15, 20, 25%	乾燥密度	1.45 g/cm ³
		初期湿潤密度	1.60 g/cm ³
		初期間隙比	0.80
		初期含水比	32.6%

図-2 実験に用いたまさ土の粒度

表-3 実験結果

時間雨量 r (mm)	細粒分 含有率 F_c (%)	飽和透水 係数 (mm/s)	崩壊割合 (%)	間隙水圧増 加量 (kPa)	崩壊形態	反 応 開 始 時 間				側面流出開 始時間 (s)
						P-1 (s)	P-2 (s)	A-3 (s)	A-4 (s)	
70	5	0.45	14.3	0.14	浸透	1868	1298	2225	1930	1706
70	10	0.11	14.3	0.47	浸透	1329	1119	1636	1421	1719
70	15	0.078	40	1.2	浸透 + すべり	1295	965	1505	1250	
70	20	0.050	40	0.97	すべり	1430	1207	1554	1420	
70	25	0.014	60	1.2	すべり	1538	1229	1744	1749	
90	5	0.45	57.1	1.0	すべり	1093	851	1298	1144	1260
60	20	0.050	-	0.2	浸透	1451	1118	1651	1510	

- 2) 試料に初期含水比10%となるように含水量を与え、均一な含水比となるように混ぜる。
- 3) 緩斜面部の層から順に所定の密度となるようにこてを用いて押し固める。その際に各層の境界にガラスビーズを配置する。
- 4) 斜面表面に加速度計A-1～A-5を設置する。
- 5) 降雨装置を設置し、降雨強度の調整を行う。
- 6) 降雨の開始とともにビデオカメラの撮影および間隙水圧計および加速度計のデータの記録を開始する。

(3) 実験条件

実験に用いた試料および実験条件を表-2に示す。試料は、図-2に示すような粒度をもつ宇部まさ土である。採取時の細粒分含有率は20%であった。斜面崩壊挙動への細粒分含有率の影響を明らかにするため、細粒分含有率5, 10, 15, 20, 25%となるように細粒分を調整した試料を用いた。地盤の条件は山口県防府市の土砂災害現場で採取した試料²⁾を参考に、初期含水比を10%、乾燥密度を1.45g/cm³とした。模型斜面は傾斜40度の急斜面部の層厚が底に垂直に10cmとなるように試料を締め固めた。中国・九州北部豪雨では防府市で観測史上1位の1時間降水量72.5mm/hが記録されたため、降雨強度70mm/hの条件で5種類の細粒分含有率の試料を用いた実験を行った。

また降雨強度が斜面崩壊挙動に与える影響を明らかにするため、細粒分含有率5%のケースで降雨強度90mm/h、細粒分含有率20%のケースで降雨強度60mm/hの条件で実験を行った。

3. まさ土斜面の降雨崩壊挙動

本研究では細粒分含有率を5, 10, 15, 20, 25%とした5種類のまさ土を用いて、模型斜面を用いた実験を行い降雨による斜面崩壊を発生させた。図-3に各条件におけるガラスビーズの移動距離および崩壊領域割合の経時変化を示す。ここでのガラスビーズの移動距離は、斜面に設置したガラスビーズ4.1 ($r=90$ mm)については、3.1)の移動距離を指す。また崩壊領域割合とは斜面に設置した35個のガラスビーズのうち崩壊によって移動した数の割合により算出している。この定義で算出しているため、奥行き方向の崩壊領域の違いを無視することになる。細粒分含有率20%、降雨強度60mm/hのケースでは降雨による斜面崩壊が発生したものの、主に斜面表面に変状がみられたため、斜面側面から崩壊領域割合と移動距離を算出することができなかった。図-3から、細粒分含有率によって、崩壊を示すまでの時間や、崩壊規模の拡大の様

図-3 移動距離と崩壊領域割合の経時変化

子に違いがみられた。また、70mm/hの場合、15%の細粒分を含むまき土で、崩壊を示すまでの時間が最も短くなった。今回行った実験の結果を、表-3のように整理している。

(1) 細粒分含有率5%、降雨強度70mm/hの挙動

図-4は降雨強度70mm/h条件下で細粒分含有率5%のケースにおける降雨開始後1200秒からの間隙水圧と加速度およびガラスビーズ移動距離の経時変化であり、写真-1は実験終了時の斜面の様子である。図中の(a)は地下水の土槽左側面からの流出開始、(b)は加速度計A-4の急増開始、(c)は加速度計A-3の急増開始の時間を示したものであり、(d)は斜面崩壊中の最大の間隙水圧増加を見せた時間である。降雨開始後1200秒までは間隙水圧や加速度に変化は見られないが、1298秒経過後に基盤勾配変化部付近の緩斜面部に設置した間隙水圧P-2の値が上昇を開始した。この間隙水圧の上昇は間隙水圧計設置位置において、斜面内に浸透した降雨が基盤に達し、地下水位の形成を開始したことによるものと考えられ、1868秒経過後の間隙水圧P-1の上昇も同様の理由によるものと考えられる。P-2位置の地下水位の形成が進み、1706秒で地下水の流出(図-4中の(a))が始まり、P-1が1.5kPaに達した。試料の厚さが100mmであることから、静水圧であれば1.1kPaとなったところで、地表面に達したことになるが、地表面にそのような形跡は認められなかった。そして1930秒でA-3とA-4設置位置の間に小さな亀裂が生じ、A-4付近の土砂が液状になり流出することにより加速度計A-4が反応を開始した。その後、この変状が徐々に急斜面部中腹部へと後退し、2225秒で加速度計A-3が反応する。さらに、降雨開始後約2090秒から加速度計A-1およびA-2設置位置の中間地点に亀裂が生じ始め、時間がたつにつれ亀裂の幅は大きくなった。しかし、土砂移動

 図-4 間隙水圧と加速度、移動距離の経時変化
($F_c=5\%$, $r=70\text{mm/h}$) (1200~3200 秒)

 写真-1 実験終了時の様子 ($F_c=5\%$, $r=70\text{mm/h}$)

に発展せず、写真-1に示す様子のままで長時間静止した状態となった。

間隙水圧P-1は地下水位形成してから単調に増加した。斜面崩壊中に大きな増加を示した時刻は、降雨開始から約3121秒経過後であり、その値は0.14kPaであった。一方、間隙水圧増加時に明確な加速度計の反応は見られない結果となった。最終的な崩壊領域割合は14.3%であり、ガラスビーズ移動距離は2.58cmと小規模の崩壊であった。

(2) 細粒分含有率25%、降雨強度70mm/hの挙動

図-5は降雨強度70mm/h条件下で細粒分含有率25%のケースにおける降雨開始後1200秒からの間隙水圧と加速度およびガラスビーズ移動距離の経時変化であり、写真-2は実験終了時の斜面の様子である。降雨開始後1200秒までは目立った挙動は見られないが、1229秒経過後にP-2が、1538秒でP-1がそれぞれ地下水位の形成によって上昇を開始した。斜面崩壊が発生したのは1730秒から1760

図-5 間隙水圧と加速度，移動距離の経時変化
($F_c=25\%$, $r=70\text{mm/h}$) (1200~1800 秒)

写真-2 実験終了時の様子 ($F_c=25\%$, $r=70\text{mm/h}$)

秒あたりにかけてであり，その時の挙動を図-6に示す．図中の(a)は間隙水圧P-1の上昇開始，(b)は加速度計A-3の反応開始，(c)は間隙水圧P-1の最大値到達，(d)は加速度計A-3の反応終了の時間を示したものである．(d)において加速度が正の値を示しているが，加速度計の傾斜を検知したためであり，崩壊挙動の終了と判断した．

まず，1735.5秒においてP-1が急激な上昇を始める．このとき加速度計の反応はなく，斜面表面に変状がみられない状態で間隙水圧の上昇が開始した．そして1745秒から崩壊が発生し土砂移動が生じるとともにA-3を含む加速度計の反応が始まり，1748.3秒においてP-1が最大値2.0kPaを記録した．その後，土砂流出が止まり崩壊が終息するとともに加速度の値が一定となった．(a)~(c)にかけての斜面崩壊発生時の間隙水圧P-1の増加量は1.2kPaであり，図-4のケースより高い間隙水圧に達した．また(b)においてA-5を除く全ての加速度計が同時に反応していることから，斜面全域にわたり一度に崩壊したことがわ

図-6 間隙水圧と加速度，移動距離の経時変化
($F_c=25\%$, $r=70\text{mm/h}$) (1730~1760 秒)

図-7 間隙水圧と加速度，移動距離の経時変化
($F_c=5\%$, $r=90\text{mm/h}$) (1290~1330 秒)

写真-3 実験終了時の様子 ($F_c=5\%$, $r=90\text{mm/h}$)

かる．これは，写真-2に示すような基盤勾配変化部付近を中心とした大きな土砂移動を伴う円弧すべりであった．このときのガラスビーズ移動距離は12.1cm，崩壊領域割合は60.0%と全ケースの中で最大規模の崩壊となった．降雨開始から崩壊に至るまでの間，斜面表面に目立った変状は見受けられず，亀裂が生じて数秒で崩壊に至った

ため、斜面表面に関しては目視で崩壊の予兆を見極めることはできなかった。

(3) 細粒分含有率5%, 降雨強度90mm/hの挙動

図-7は、降雨強度を90mm/hとして細粒分含有率5%のケースにおける降雨開始後1290秒～1330秒までの斜面崩壊発生時の間隙水圧と加速度の経時変化であり、写真-3は実験終了時の斜面の様子である。図中の(a)は間隙水圧P-2の上昇開始、(b)は間隙水圧P-2の最大値到達、(c)は間隙水圧P-1の上昇開始、(d)は間隙水圧P-1の最大値到達の時間を示したものである。本ケースではまず(a)～(b)間で加速度計A-3のみが反応しているように、1298秒経過あたりから斜面勾配変化部付近で小さな円弧すべりが発生し、その後、1324秒あたりで大きな土砂移動を伴う円弧すべりが発生した。小さな円弧すべりは間隙水圧計P-2設置位置を中心に発生したため、この崩壊によりP-2が0.61kPa上昇し、その後のP-1設置位置付近を中心に発生した大きな円弧すべりによってP-1が1.0kPaの上昇を記録した。このときのガラスビーズ移動距離は14.6cmであったが、本ケースではガラスビーズ4.1(図-1(b)参照)が計測不可であったため、この値はガラスビーズ3.1のものである。また崩壊領域割合は57.1%と細粒分含有率25%, 降雨強度70mm/hのケースにいで次ぐ大きな崩壊規模となった。

4. 細粒分に着目した降雨崩壊特性

(1) まさ土斜面に見られる崩壊形態

異なる細粒分含有率と降雨強度の条件による実験から、斜面勾配変化部付近からの土砂流出により崩壊が広がるケースと大きな土砂移動を伴う円弧すべりが発生するケースの2つに区別された。本実験については、斜面の変状が観測され、加速度計が応答を示すときにあらわれる間隙水圧の急増量で崩壊形態を判断した。0.5kPa以下の間隙水圧の増加を伴う崩壊では、変状の発生直後から水の流出が観察されることから、浸透崩壊であると判断した。一方、1.0kPa以上の間隙水圧の増加を示す崩壊では、同時にすべりを伴ったため、すべり崩壊と判断した。

一つ目は、土砂流出によって徐々に崩壊が広がるもので、“浸透崩壊”として位置づけることができる。図-4に示す経時変化より、まず(a)において加速度計A-4が反応を開始するとともにガラスビーズ4.1が移動を始めたことがわかる。本ケースでは一旦上昇した間隙水圧は低下せず、1.5kPa程度を保ったまま崩壊が進行した。土砂の流出は、地表面が流体化しつつ生じたものと考えられる。斜面勾配変化部直下の間隙水圧の測定は行っていないが、間隙水圧計P-2設置位置の静水圧は1.1kPaとなり、

図-8 間隙水圧と加速度および移動距離の関係
($F_c=25\%$, $r=70\text{mm/h}$)

記録された間隙水圧P-2は約1.5kPaと静水圧以上の水圧を記録した。

二つ目は、明確に円弧状にすべりが発生する崩壊形態を示すもので、“すべり崩壊”として定義できる。図-5に示す経時変化より、1700秒から1740秒にかけて変形が進むと同時に、それまで0.5kPa程度で安定していた間隙水圧P-1がさらなる上昇を示した。これは飽和化によりせん断変形が進むことで、過剰間隙水圧が発生したためと推察される。この過剰間隙水圧の発生により有効応力の減少をもたらし、せん断強度が低下することによりせん断応力との平衡状態がくずれ、崩壊に至ったものと考えられる。

なお、いずれのケースにおいても、崩壊を示す前に、間隙水圧の増加に対応するように加速度計の値に急な変化が認められることから、崩壊のモニタリングにおける加速度計計の活用の可能性を示唆している。

(2) 細粒分含有率と崩壊挙動

図-8に細粒分含有率25%, 降雨強度70mm/hのケースにおけるすべり面付近に位置する間隙水圧P-1と加速度計A-2およびガラスビーズ移動距離の関係を示す。この図の(a)～(c)は斜面崩壊発生時の間隙水圧上昇過程、(c)～(d)は間隙水圧低下過程を示すものであり、加速度A-2と移動距離ともに間隙水圧上昇過程よりも低下過程において大きな増加あるいは反応を示していることがわかる。これは崩壊による土砂の移動は、主に間隙水圧上昇過程ではなく、間隙水圧P-1が最大値に達し低下している間に生じたことになる。

図-9に細粒分含有率と斜面崩壊発生時の間隙水圧増加量の関係を示す。この図から、70mm/h条件下において、細粒分含有率が高いほど間隙水圧増加量が大きくなるこ

図-9 細粒分含有率と間隙水圧増加量および崩壊領域割合

図-10 間隙水圧増加量と最終崩壊領域割合および移動距離

とがわかる。細粒分含有率の異なる土の非排水単調せん断挙動が包括的に検討され、細粒分によって強度やダイレイタンス挙動が異なることが示されている²⁹⁾。同じ密度の場合、細粒分含有率が少ないほど、強度がより高くなり、正のダイレイタンスを伴うせん断を示すようになる。逆に、細粒分含有率が高くなるほど、負のダイレイタンスにより間隙水圧の増加を伴うせん断を示すようになる。斜面が非排水状態に近いと考えると、細粒分含有率が高いケースでは負のダイレイタンスにより破壊するため、斜面崩壊時の間隙水圧増加量が大きくなることも説明できる。

図-10に斜面崩壊発生時の間隙水圧増加量と崩壊領域割合およびガラスビーズ移動距離の関係を示す。この図から間隙水圧増加量が多いものほど、崩壊領域やガラスビーズ移動距離が増加することがわかる。細粒分含有率が低いケースでは透水係数が大きいため、間隙水圧が蓄積しにくく、消散しやすい。間隙水圧の変化を伴う崩壊が生じたとしても、短時間で回復するため、断続的かつ小規模な崩壊に留まったと考えられる。

図-11 降雨浸透指標と間隙水圧増加量および崩壊領域割合

(3) 降雨浸透特性による崩壊形態の評価

透水係数と降雨強度の関係から崩壊挙動を考察するための指標として、式(1)で表わすことができる降雨浸透指標¹⁹⁾がある。この降雨浸透指標 I_r は、飽和透水係数 k_s を降雨強度 r で除したものであり、ある飽和地盤への降雨の浸透状況を評価するものである。

$$I_r = \frac{k_s}{r} \quad (1)$$

つまり、降雨浸透指標が1以上である場合、飽和透水係数の方が降雨強度より大きいことになり、降った雨水のすべてを飽和地盤が浸透できることを意味する。一方、降雨浸透指標が1未満の場合、雨水すべてを飽和地盤が浸透しきれないことを意味する。

定水位透水試験から求めた透水係数を、この指標に代入し、各実験の崩壊領域割合および間隙水圧増加量を評価すると、図-11のようになる。降雨強度70mm/h条件の結果は、おおむね一義的な傾向を示している。このことは、降雨強度と透水係数の関係が、崩壊挙動の評価において検討すべき観点であることを意味している。しかし、90mm/hの結果は上側に、60mm/hの結果は下側にずれた。このようなずれは、実際の地盤が不飽和状態であることから、透水性がさらに低くなることによるものと推察される。

そこで、図-12のように横軸に飽和透水係数、縦軸に降雨強度をとった座標に、崩壊形態を区別しつつプロットした。図中の破線は $I_r=1$ 、つまり $r=k_s$ を示すものである。透水係数の最も小さい、細粒分が多い実験結果以外は、すべては線の右側に位置した。右側に外れることは、雨水が十分透水できる性質を有していることになる。

すべり崩壊を発生する地盤では、一旦間隙水圧が上昇する。これは、浸透しにくく非排水状態に近い浸透条件

図-12 飽和透水係数と降雨強度

図-13 修正降雨浸透指標による崩壊挙動の評価

であったことを意味している。そこで、崩壊形態が浸透特性の違いとして現れたとし、崩壊形態を区分する境界線を描くことを考える。ここでは、浸透崩壊が発生した後にすべり崩壊が発生した細粒分含有率15%、降雨強度70mm/hのケースをすべり崩壊と浸透崩壊の境界の一つの点とみなし描いた。図中の破線は、式(2)で表わすことができる。

$$r = 98k_s^{0.14} \quad (2)$$

右辺は、雨水を受ける不飽和地盤における崩壊するまでの透水性を評価する式とみなすこともできる。この式(2)を用い、式(3)を与える。

$$I_r' = \frac{98k_s^{0.14}}{r} \quad (3)$$

これを、崩壊形態や崩壊規模などの崩壊挙動の評価を行うための修正降雨浸透指標と考えた。この指標をもとに、図-13に修正降雨浸透指標と間隙水圧増加量と崩壊領域

割合の関係を示す。式(3)を用いることで、修正降雨浸透指標が1以上の透水係数および降雨強度の条件ではすべり崩壊を、1未満の条件では浸透崩壊を示すことになる。その上で、修正降雨浸透指標と間隙水圧増加量および崩壊領域割合との関係に一義的な関係を得ることができる。本実験は降雨強度50~90mm/hまでしか行っていないため、降雨強度がある値以下では崩壊が発生しない場合や、降雨強度がある値以上であると斜面内に浸透せずに斜面表面を削るリル浸食のような場合までを加味してはいない。その一方で、得られた結果の一義性から、不飽和状態から飽和状態の遷移過程の複雑さも含めて、浸透特性と降雨強度の大小関係といった観点での崩壊挙動の評価が重要であることを示唆している。

5. 結論

本研究では細粒分含有率5, 10, 15, 20, 25%の5種類のまき土を用いて降雨による斜面崩壊を実験的に発生させることにより、間隙水圧挙動および土砂の崩壊挙動に与える細粒分含有率の影響について検討した。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 細粒分含有率によって、崩壊を示すまでの時間や、崩壊規模の拡大の様子に違いがみられた。また、70mm/hの場合、15%の細粒分を含むまき土で、崩壊を示すまでの時間が最も短かった。
- (2) 崩壊形態は、“浸透崩壊”と“すべり崩壊”に区別することができた。浸透崩壊は、斜面表面に一旦浸透した雨水の浸透流出を伴う崩壊である。すべり崩壊は、崩壊中に過剰間隙水圧の発生を伴い、すべり面を形成する崩壊である。いずれのケースにおいても、崩壊を示す前には、地表面の加速度の変化を伴った。
- (3) 細粒分含有率の違いにより斜面崩壊発生時の間隙水圧増加量が異なることがわかった。同じ降雨強度の場合、細粒分含有率が高いほど斜面崩壊時の間隙水圧増加量が高くなった。
- (3) 斜面崩壊発生時の間隙水圧増加量の違いにより、崩壊規模や移動距離が異なることがわかった。同じ降雨強度の場合、間隙水圧増加量が多いほど崩壊領域が大きく、移動距離が長くなった。
- (4) 透水係数と降雨強度の関係から求められる修正降雨浸透指標によって、斜面崩壊時の間隙水圧増加量や崩壊規模の崩壊挙動を評価できる可能性を示した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、日本学術振興会から科学研究費補助金「基盤研究（B）22360187」の支援を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 地盤工学会 2009 年 7 月豪雨による山口県土砂災害緊急調査団：2009 年 7 月 21 日豪雨による山口県防府地区での斜面災害，地盤工学会誌，第 57 巻，第 12 号，pp. 39-42, 2011.
- 2) 八木則男，矢田部龍一，山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，第 330 号，pp.107-114, 1983.
- 3) Eckersley, D. : Instrumented laboratory flowslides, *Geotechnique*, Vol. 40, No. 3, pp. 489-502, 1990.
- 4) 王功輝，佐々恭二：降雨による砂質斜面崩壊発生時の過剰間隙水圧と崩土の運動に関する水路実験研究，地すべり，第 37 巻，第 2 号，pp. 40-47, 2000.
- 5) Wang, G. and Sassa, K. : Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests, *Geotechnique*, Vol. 51, No. 7, pp. 587-599, 2001.
- 6) Wang, G. and Sassa, K. : Pore-Pressure generation and movement of rainfall-induced landslides : effects of grain size and fine-particle content, *Engineering Geology*, Vol. 69, pp. 109-125, 2003.
- 7) Acharya, G., Cochrane, T. A., Davies, T. and Bowman, E. : The influence of shallow landslides on sediment supply: A flume-based investigation using sandy soil, *Engineering Geology*, Vol. 109, pp. 161-169, 2009.
- 8) Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M. and Sorbino, G. : Modeling of rainfall-induced shallow landslides of the flow-type, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 1, pp.85-98, 2010.
- 9) Chen, R. H., Kuo, K. J. and Chien, W. N. : Failure mechanism of granular soil slopes under high intensity rainfalls, *Journal of GeoEngineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 21-31, 2012.
- 10) Chen, N. Sh., Zhou, W., Yang, Ch. L., Hu, G. Sh., Gao, Y. Ch. and Han, D. : The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content, *Geomorphology*, Vol. 121, pp. 222-230, 2010.
- 11) 川村志麻，三浦清一，石川達也，横浜勝司：寒冷地にある不飽和火山灰質土斜面の降雨模型実験による崩壊現象とその評価，土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 3, pp. 577-594, 2010.
- 12) 笹原克夫，海老原和重，綱木亮介：急勾配斜面の崩壊発生機構に関する実験的研究，地すべり，Vol. 32, No. 4, pp. 1-8, 1996.
- 13) 笹原克夫：飽和度の上昇に伴う不飽和砂質土のせん断変形機構に関する研究，地すべり（日本地すべり学会誌），Vol. 34, No. 3, pp. 1-8, 1997.
- 14) 笹原克夫：降雨浸透に伴う急勾配砂質土斜面のせん断変形の解析，地すべり（日本地すべり学会誌），Vol. 36, No. 1, pp. 12-19, 1999.
- 15) Igwe, O., Wang, F., Sassa, K. and Fukuoka, H. : The laboratory evidence of phase transformation from landslide to debris flow, *Geosciences Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 31-44, 2014.
- 16) 玉手聡，伊藤直幸，遠藤明：4. 地盤の透水性と降雨強度の関係に着目した斜面の表層崩壊に関する実験的考察，労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNOSH-SRR-NO.35, pp. 33-58, 2007.
- 17) Deangeli, C. : Pore water pressure contribution to debris flow mobility, *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 5, No. 4, pp. 486-492, 2009.
- 18) 笹原克夫，山口純平，酒井直樹，植竹政樹：降雨浸透に伴う砂質斜面の吸水・排水過程における圧縮・せん断変形，地盤工学ジャーナル，Vol. 6, No. 1, pp. 129-140, 2011.
- 19) 笹原克夫，田村圭司：急勾配まさ土斜面における降雨時の地表面変位モデル，地すべり学会誌，Vol. 47, No. 3, pp. 155-160, 2010.
- 20) 檀上徹，酒匂一成，深川良一，酒井直樹，岩佐直人：降雨量，不飽和浸透挙動，変位量の観測結果に基づく降雨時表層すべり型崩壊過程の検証，土木学会論文集 C, Vol. 68, No. 3, pp. 508-525, 2012.
- 21) 奥田靖貴，小堀慈久：降雨による斜面崩壊の要因に関する基礎的研究，中国地方整備局管内技術研究会論文集，Vol. 60, pp. 111-116, 2009.
- 22) 後田真里，中田幸男，兵動正幸，吉本憲正：土石流災害の発生した勝坂および奈美地区におけるまさ土の地盤材料特性，第 46 回地盤工学研究発表会講演集，1830-1831, 2011.
- 23) 兵動正幸，金郁基，中田幸男，吉本憲正：砂・細粒土混合土のせん断挙動に及ぼす細粒分の影響，土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 1, pp. 215-225, 2010.

(2015. 11. 17 受付)

SLOPE COLLAPSE CHARACTERISTICS DUE TO RAINFALL OF DECOMPOSED GRANITE SOILS WITH FINES

Hirofumi HISADA and Yukio NAKATA

The study was conducted to understand the slope collapse behaviour due to rainfall of decomposed granite soils with fines. The small slope model was prepared to perform the collapse tests by rain. The model was made of the decomposed granite soil “Masado” with various contents of fines. The measurement was obtained by accelerometers, water pressure transducers and image analysis. The characteristics were evaluated by collapse pattern, collapse size and pore water pressure generation. Firstly two collapse patterns were found which are “permeation failure” and “slip failure”. Masado with higher content of fines occurred the slip failure. Also the Masado showed higher generation of pore water pressure and larger collapsing size. A new index with permeability and rainfall could be proposed to evaluate the collapse behaviour.