

氏名 ファルーク ハリド

梅雨期や台風期等に全国各地で毎年のように発生する豪雨被害では、多くの尊い人命や社会的財産が失われている。この豪雨被害の中でも土砂被害は、その発生機構あるいは予知体制が確立されていないこともあり、その被害は多大なものがある。この土砂被害の原因は、我が国が年間降雨量 1,800mm/year と世界平均の 2.3 倍の多雨地帯であること、湿度が高く降雨に較べて蒸発散量が約 1/3 と少なく地下への浸透水量が多いこと、日本列島が環太平洋地帯に属し、地質的な安定性に欠けること等が挙げられる。この様な原因からも、斜面崩壊による被害を軽減するために何らかの対策を考えなければならないことは明らかである。

現在、採用されている対策法は大きく二つに分類できる。一つは砂防ダムの建設・のり面の補強・地下水の排除等で物理的に崩壊を抑制しようとする手法である。もう一つは降雨量や地盤の状態を計器によって直接計測し、斜面崩壊の危険をリアルタイムに察知して、警報を発令し避難を促すという手法である。しかし、両者ともに問題を抱えている。前者では、擁壁で抑制するという方法は効果が絶大であるが、全国に無数にある不安定斜面の一つ一つに擁壁を造るということは、その建造費用が莫大なものになりかねない。たとえ可能であっても建造によって自然に与えるダメージははかり知れないものになってしまうだろう。また後者の崩壊を予測するという手法の問題点は、予測に用いられるパラメータはデータ取得が比較的簡易なもののみ（降雨量）となっているため、予測の精度が低いということである。そこで、斜面崩壊の危度をより正確に予測するためにどのようにすればよいかということを検討しなければならない。そこで本研究は、雨水が浸透して起こる斜面崩壊のメカニズムと条件を解明し、斜面の崩壊等を予想する手法を確立することを目的としている。

本研究では、三軸試験や斜面の模型実験といった様々な室内実験をおこなっている。雨水の浸透によって潜在すべり面上の要素に生じる応力経路を再現するために、初期不飽和の供試体、ならびに、初期飽和の供試体を用いて、一定せん断応力下での排水三軸試験を行った。様々なパラメータが降雨による斜面でのせん断破壊の進行にどのような影響を持つのかを調べた。さらに、水の浸透を受ける斜面模型の破壊挙動を調べるために、斜面の模型実験もおこなった。斜面地盤内の間隙水圧、含水率と地中変形を計測するために、様々な場所に間隙水圧計、土壌水分計、せん断変位計を設置した。三軸試験と斜面模型実験における観察と結果にもとづいて、降雨による斜面崩壊の発生をその直前の段階で予測する手法を確立した。

本論文は全体で八章から成っている。その第一章は問題の所在、研究の構成を記述するとともに、降雨に伴う斜面崩壊の被災事例についても若干の説明をしている。

第二章と第三章は、実験材料と実験方法を詳細に説明している。本実験では、過去に大規模な降雨による斜面崩壊を起こした現場二箇所より採取した三種類の土の試料を用いた。それら試料のうち、二種類は群馬県熊野平から得られたもので（砂礫試料とシルト質砂試料）、もう一種類は千葉県小見川から得られたもの（砂試料）である。それぞれの試料の物性を知るために、指標試験も行った。本研究の特徴は、雨水の浸透によって潜在すべり面上の要素に生じる応力経路を再現するために、初期不飽和の供試体、ならびに、初期飽和の供試体を用いて、一定せん断応力下で排水三軸試験を行ったことである。またこの試験のために、応力経路を自動制御できる三軸試験を開発した。初期不飽和土の供試体を用いた一定せん断応力排水試験（これを CSDU 試験と呼ぶ）では、空気を通し難いセラミックディスクを用いて初期のサクションを測定した。供試体中の間隙水圧を計測するため、小型間隙水圧計を供試体内部に設置した。一時間圧密した後、供試体のせん断破壊まで、セラミックディスクの底面から、水を浸透させて、水が浸透している間、供試体の上端は大気に開放されている。実験開始時から飽和した土の供試体を用いた一定せん断応力排水試験（これを CSDS 試験と呼ぶ）では、ある所定の主応力レベルまで圧密された後、全応力一定のもとで供試体内の背圧を増加させ、供試体をせん断した。一方、異なる応力経路での挙動を調べるために、さまざまな応力経路に対し、従来行なわれているような排水および非排水三軸せん断試験（ICD と ICU 試験と呼ぶ）もおこなった。

第四章において一定せん断応力排水試験（CSDU 試験）の結果を報告した。ここでは、初期相対密度、主応力比、水の浸透率、浸透係数、初期飽和度といった各パラメータが降雨による斜面でのせん断

破壊の進行にどのような影響を持つのかを調べた。そして、実験の結果、水が浸透していく初期の段階では、軸ひずみがほとんど生じないが、供試体の飽和度が十分上昇し、(小型間隙水圧計で計測した)過剰間隙水圧が大きくなると、軸ひずみが急速に増加し始めることが分かった。このとき、供試体は降伏点に達し、せん断破壊が始まったものと考えられる。いったんせん断破壊が始まると、その後の変形の進行は、供試体の初期の条件に依存する。せん断破壊が始まった後での応力の増分は、初期主応力比や浸透率が大きくなるほど大きく、一方、初期相対密度、初期拘束圧が大きくなるほど、小さい。同条件下で様々な飽和度でおこなった試験の結果を比べると、初期飽和度の大きい供試体の方が、小さいものよりも、短い浸透時間でせん断破壊に至ることが分かった。しかしながら、その両方の実験においても、ほぼ同じ平均飽和度、過剰間隙水圧でせん断破壊が始まった。さらに、様々な段階で水浸透を停止した実験結果から、ほぼ同じ平均飽和度でせん断破壊が始まることを確認した。また、せん断破壊が始まった後でのひずみ速度は水浸透の継続するかどうかによって依存するということが分かった。ほぼすべての不飽和供試体(CSDU)試験において、試験後に計測された飽和度は、ほとんど完全飽和に近かった。また、供試体内部に設置された小型間隙水圧計により、せん断破壊は供試体中の正の過剰間隙水圧により発生することが認められた。これらの観察から、斜面でのせん断破壊の開始はほぼ飽和した状態で起こるのであろうと結論付け、次に、はじめから飽和した供試体を用いた研究(CSDS試験など)をおこなうことにした。

飽和した供試体の一定応力排水せん断実験(CSDS)結果は第五章に報告されている。初期相対密度、主応力比といった様々な初期条件においても、不飽和供試体の試験(CSDU)とほぼ同様な変形の挙動が観察された。また、CSDS試験、CSDU試験の両方で、せん断破壊の開始後の変形挙動は、収縮的、膨張的といった変形のモードに大きく依存することが認められた。すなわち、収縮性の強い試料では、浸透による間隙水圧の上昇は、収縮せん断破壊を招き、たとえ排水条件であっても、せん断破壊開始後は、供試体内で非排水状態が卓越した。その結果、大きな過剰間隙水圧が発生し、せん断破壊が急速に進んだ。この結果はこれまで多くの研究者が指摘してきたように、降雨による斜面崩壊は、排水的に発生し、非排水的に進行するという仮説を支持するものである。これに対して、膨張性の強い土では、浸透による間隙水圧の上昇は、さらなる膨張を招き、この結果、過剰間隙水圧と減少させるように働き、せん断抵抗力を増加させる。そのため、せん断破壊の進行はゆっくりである。水で飽和した供試体の実験(CSDS試験)で、せん断破壊の開始時の内部摩擦角を測定し、同じ試料を用いた従来型の等方圧密排水三軸試験(ICD)と比較したところ、CSDS試験の摩擦角の方がかなり小さかった。これは従来のICD試験から得られた強度パラメータを用いて斜面安定解析をおこなうと、CSDS試験より得られたパラメータを使う場合よりもせん断耐力を過剰に推定する恐れを示唆している。各試料において、ICD試験から得られた内部摩擦角とCSDS試験から得られた内部摩擦角の間には、簡単な相関が見受けられた。CSDS試験でのせん断破壊開始時における内部摩擦角は、ICD試験から得られた内部摩擦角の0.80-0.88倍であった。

第六章では、斜面の模型実験方法と結果を詳細に報告した。間隙水圧、含水率と地中変形を計測するために、斜面模型の中の様々な場所に間隙水圧計、土壌水分計、せん断ひずみ計を設置した。この模型実験では、水頭一定の水槽から斜面上段へ水を浸透させることにより、雨水の浸透を再現した。模型実験の結果、斜面の変形は飽和度と間隙水圧に大きく関係することが分かった。斜面の崩壊は、表面から約5cmの深さで起こった。雨水の浸透により斜面の一部が飽和し、間隙水圧が上昇すると、表面付近の変形が生じた。斜面模型の実験では、密度と斜面の傾きが変形の過程に及ぼす影響も調べた。これらの結果は、水の浸透により、飽和した砂中の過剰間隙水圧が上昇することによってせん断破壊は起こるといふCSDU試験の結果ともよく整合した。

第七章では、CSDU試験結果に基づいて、ひずみの時刻歴をバイリニアの関係式でモデル化し、重回帰分析を用いて崩壊開始前後のひずみと色々なパラメータの相関係数を計算した。さらに、三軸試験と斜面模型実験における観察と結果にもとづいて、降雨による斜面崩壊の発生を直前の段階で予測する手法を提案した。具体的には、ある斜面の危険度の高い部分に幾つかの土壌水分計と変位計を設置し、斜面地盤の水分(あるいは飽和度)と変位をリアルタイムで観測し、それぞれの値が限界に至ると警報を発令することを提案している。

第八章では、本論文で得られた結論をまとめている。

以上をまとめると本論文は、降雨に伴う斜面崩壊の発生の直前予測という問題に向けて、三軸試験と斜面模型実験という立場から研究したものである。その成果は土砂被害の抑制向上のために有用であり、地盤防災工学上の業績は大きい。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。