

論文の内容の要旨

Experimental Study on Failure Initiation in Sandy Slopes due to Rainfall Infiltration (降雨浸透による砂質斜面の崩壊開始に関する実験的な研究)

ファルーク ハリド

「降雨が引き起こす斜面崩壊」は、降雨中あるいは降雨後に、何の兆候もなく、かつ短時間に起こるために、もっとも深刻な被害をもたらす災害のひとつである。このような斜面崩壊による災害は、毎年多くの国で起こり、多くの人命を奪うだけでなく、社会インフラに多大な被害を及ぼす。斜面崩壊災害の危険を減らすためには、降雨による斜面崩壊に対する予報システムを構築することが大切であり、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。

そのため、本研究では、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3種類の土の試料を用いて、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た。それら試料のうち、2種類は群馬県熊野平から得られたもので、もう1種類は千葉県小見川から得られたものである。それぞれの試料の物性を知るために、指標試験も行った。

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(CSD)を行った。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、空気を良く通す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。高さ155 mm、直径75 mmの供試体は湿潤締固め法によって、特定の相対密度と飽和度になるように製作した。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。供試体はまず等方圧密され、その後、崩壊斜面現場の主応力比になるよう鉛直応力を増加させた。そして一時間圧密した後、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、水を浸透させた。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。軸荷重はコンピューターにより鉛直応力が一定になるように制御されている。

初期には飽和した土の供試体を用いた一定せん断応力排水試験試験(これをCSDS試験と呼ぶ)では、供試体は飽和しており、ある特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をせん断するまで、供試体内の背圧を増加させた。降雨による斜面崩壊のすべり面は、一般に浅いことを考慮し、本研究においては、20-50 kPaという比較的小さな拘束圧で実験をおこなうこととした。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。

不飽和土の一定せん断応力試験 (CSDU) 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、軸ひずみにはほとんど発生しないが、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することが分かった。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、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ということが分かった。しかしながら、その両方の実験において、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が止められた実験結果から、ほぼ同じ平均飽和度でせん断破壊が始まったことを確認した。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も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) では、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、せん断破壊が始まった後の変形挙動は、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、せん断破壊は急速に進んだ。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 CSD

S試験から得られた内部摩擦角の間には、簡単な相関は見受けられた。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0.75～0.86倍であった。

従来の異方圧密排水三軸せん断試験（ACD試験）、異方圧密非排水三軸せん断試験（ACU試験）における変形挙動を見ても、CSDS試験のものとは異なっている。同じ初期条件では、CSDS試験での変形挙動は主に膨張的であるのに対し、ACD試験では収縮的であった。ACU試験では、それぞれの試験で、供試体の膨張性、収縮性に応じたひずみ軟化やひずみ硬化を見せた後、0.5%以下の非常に小さい軸ひずみにおいて、ピーク強度を発現した。

水の浸透を受ける斜面モデル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。斜面モデルは、高さ70cm（上段までの高さ90cm、下段までの高さ20cm）で、湿潤締固め法で製作した。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、表面付近の変形が起こった。斜面モデルの実験では、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うCSDU試験の結果ともよく整合した。

三軸試験と斜面モデル実験における観察と結果にもとづくと、降雨による斜面崩壊の直前発生を予測する手法が確立された。そして、大部分の地盤が完全に飽和して間隙水圧が上昇を開始し、その後にせん断破壊が始まること、すなわち間隙水圧の上昇が破壊の前兆になるとことを示したことが、本研究の成果である。このことは、予報システム確立に大きな示唆を与える。従って、ある斜面の危険度の高い部分に、飽和度を感知する水分計、間隙水圧の上昇を感知する間隙圧計を設置し、それらをネットワークで結ぶことで、降雨による斜面崩壊がもたらす深刻な被害を警告することが可能であると結論付けられる。