

# 降雨浸透模型実験による不飽和斜面の変形メカニズムに関する検討

(独) 防災科学技術研究所 ○ 酒井直樹  
 高知大学農学部 笹原克夫  
 (独) 防災科学技術研究所 植竹政樹  
 (独) 防災科学技術研究所 福園輝旗

## 1. はじめに

降雨時の斜面の不安定化を予測するためには、不飽和状態における降雨浸透に伴う変形メカニズムを知る必要がある。一般に降雨浸透時の地盤の状態は、「飽和度」や「マトリックサクション（間隙水圧）」等により記述される。これらの関係は含水状態により大きく変わり、その含水状態の変化が土のせん断特性に大きな影響を与えると考えられる。また降雨時の斜面崩壊は表層数mで発生するため、小土被り圧でしかも異方応力状態である。以上のような複雑な水分状態および応力条件下で降雨浸透時の変形過程から崩壊に至るメカニズムは十分に明らかにされていない。一方で著者の一人は急勾配条件下での模型実験を行い、不飽和状態でのせん断変形の重要性を指摘している<sup>1)</sup>。そこで、本研究では不飽和状態における水分状態と斜面の内部ひずみの関係に着目し、30度および40度の中型斜面模型を用いて不飽和まさ土斜面に対する降雨による崩壊実験を行い、不飽和状態での斜面内部のせん断変形の特徴を考察した。

## 2. 実験模型と崩壊実験の概要

試料には、筑波山まさ土を用いた。その粒度特性は、礫分 41.5%、砂分 48.8%、シルト分 9.7%、均等係数  $U_c=22.23$ 。飽和透水係数は、 $2.5 \times 10^{-3}$  (cm/sec)である。加圧板法による保水性試験より得られた水分特性曲線<sup>2)</sup>を示す(図1)。

実験に用いた土槽<sup>3)</sup>は、斜面部(長さ6m)が平坦部(長さ2m)が組み合わさった形状で、幅1.5m、深さ0.5mの鋼製で作られており、斜面勾配は30°、40°が可能である。平坦部手前土留め壁は排水穴を設け排水境界としている。その他の境界は不透水境界である。斜面底面には突起を設置し粗度としている。模型地盤の作成方法は、初期含水比8%のマサ土を20cmごとに人力による締固めを行った。

センサーの設置は以下のように行った<sup>3)</sup>。地表面変位計は3箇所(D1-3)、地中内部傾斜計1箇所(C1-6, 6深度)、土壌水分計3箇所3深度(10,25,40cm, VW1-9)、テンシオメータ3深度(T1,2,3(土壌水分計と同深度, VW4,5,6と対応))地下水計6箇所(P1~P6)である。地中内部傾斜計は、長さ9.2cmの円筒形の傾斜計をジョイントによって複数個を接続したものである。本研究では、ある深度における傾斜角度を変換して傾斜計一つ分の移動量に変換し、その移動量に対して基準長9.2cmを元にひずみに変換した。層毎のひずみとして考える場合には、傾斜計の真ん中部分(4.6cm)を層の代表とした。

## 3. 実験結果と考察

ここでは斜面土槽の中央部における平行斜面部での結果を用いて考察する。

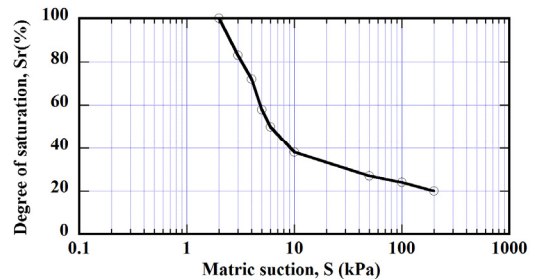


図1 まさ土の水分特性曲線 (AEV=2kPa)

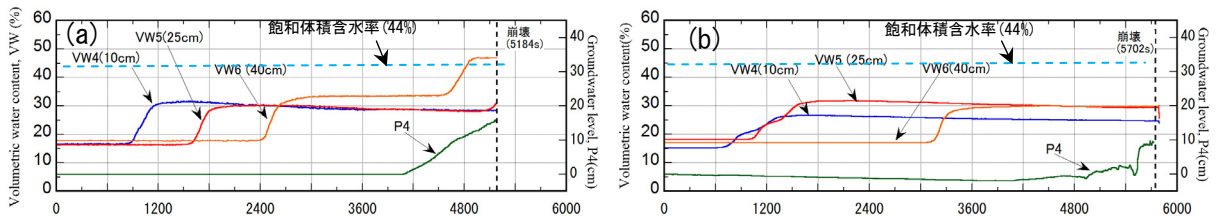


図2 降雨時の体積含水率と地下水位の時系列変化 ((a) 30° 斜面, (b) 40° 斜面)

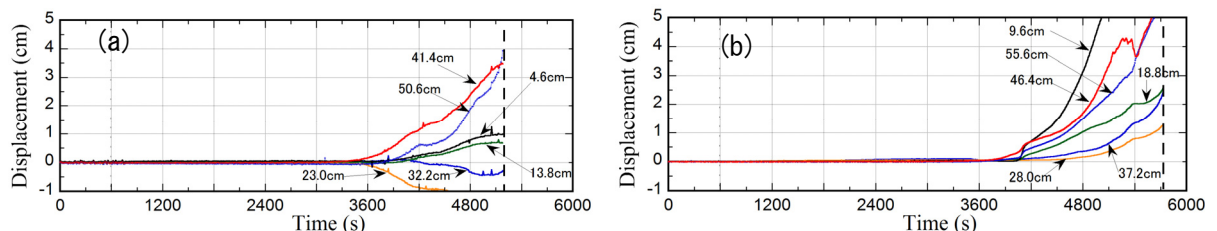


図3 降雨時の地中内部傾斜計の時系列変化 ((a) 30° 斜面, (b) 40° 斜面)

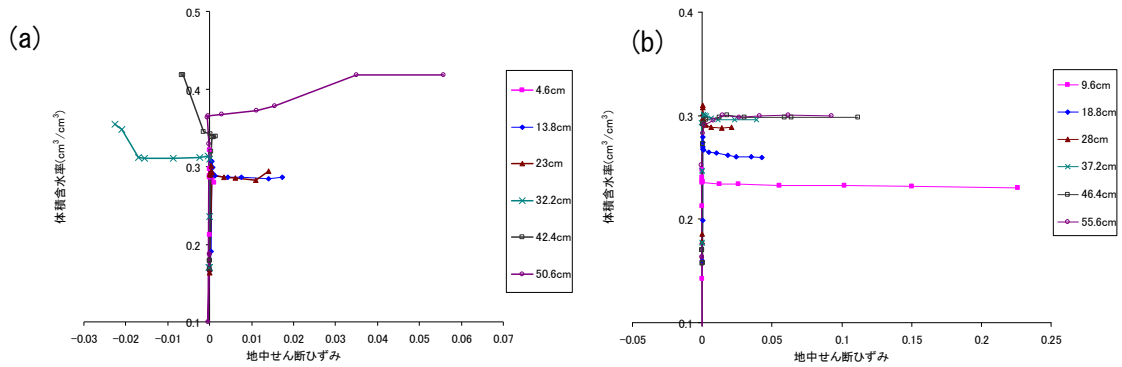


図 4 体積含水率と地中せん断ひずみとの関係 (a) 30° 斜面 (b) 40° 斜面

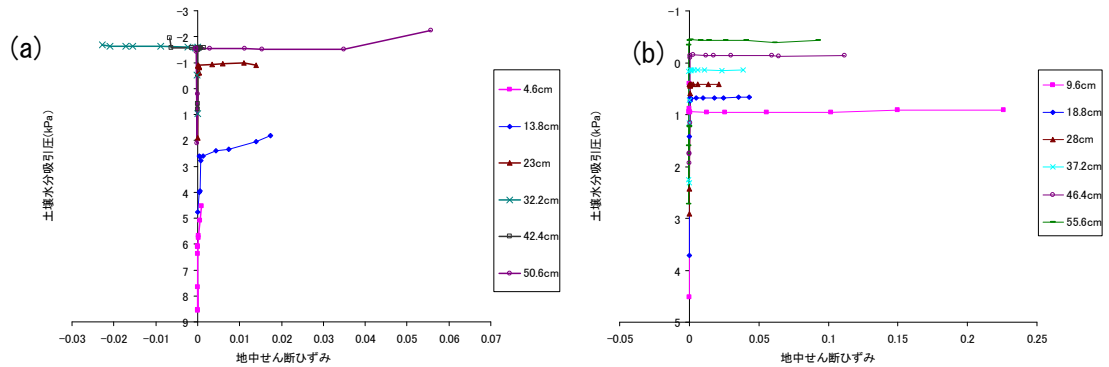


図 5 土壌水分吸引圧と地中せん断ひずみとの関係 (a) 30° 斜面 (b) 40° 斜面

＜浸透と変形挙動＞ 図 2 では、降雨時の体積含水率と地下水位の変化を表している。30° 斜面、40° 斜面いずれにおいても、体積含水率が上昇し、30%前後で一定になったのち、しばらくして地下水位が上昇している。その上昇の程度は、40° 斜面の方が低い。また図 3 より地中のせん断変形は地下水位上昇より前に変形をし始めているのがわかる。その後地下水位の上昇とともに変形が大きくなっている。斜面勾配が大きい方が、不飽和状態においてせん断変形が大きいのがわかる。（詳細な結果は、酒井ら、2009<sup>3)</sup>を参照。）

＜不飽和状態とせん断ひずみ関係＞ 降雨時の変形を、体積含水率および土壌水分吸引圧（サクシオンに相当）と地中せん断ひずみの関係でみる。ここでは、傾斜計の深度による層毎のひずみで表し、体積含水率および土壌水分吸引圧は計測値をその深度毎に内挿または外挿して求めている。また、体積含水率が飽和体積含水率付近の時、また、吸引圧が負の時の両方を満たすときと考える。斜面勾配が 30° の場合（図 4(a)、図 5(a)）では、吸引圧が 0kPa より小さくなった 32.2cm より深い位置では、せん断変形が急激に進行した。その際体積含水率の上昇に伴いせん断ひずみが進行する。表層の飽和度が低い地点では、最終的なせん断ひずみは上記に比べてそれほど大きくなり、吸引圧の減少に伴いせん断ひずみが大きくなるという関係が認められる。

斜面勾配 40° の場合（図 4(b)、図 5(b)）では、いずれの深さでも初期土壌水分吸引圧が 4kPa 程度より小さくかなり湿潤である。そして降雨浸透に伴って土壌水分吸引圧が 1(kPa)以下になると、土壌水分吸引圧および体積含水率がほぼ一定の条件下でせん断が急激に進行する。ただしこの時の体積含水率の値は 0.3 程度より小さい。これは応力の変化に依存しないクリープ的な変形であることが示唆される。この挙動を水分特性曲線（図 1）でみると、飽和度 70%(およそ体積含水率 30%)以上では、2~4kPa のサクシオンを示すが、模型実験結果では飽和度上昇後は、1kPa 以下程度（図 5(b)）を示している。以上の結果より、降雨時の斜面変形過程を考える場合、含水状態（飽和度とサクシオン）と斜面の応力条件（斜面勾配と土被り圧）との関係の一端を明らかにできた。

#### 4. まとめ

斜面勾配 30° と 40° の不飽和まさ土の模型実験より次の結果を得た。初期土壌水分吸引圧が高い場合は、降雨浸透に伴う吸引圧の減少に伴ってせん断ひずみが進行する。初期土壌水分吸引圧が低く飽和に近い場合は、降雨浸透に伴い土壌水分吸引圧が 0(kPa)程度以下になると、急激にせん断が進行する。斜面勾配 30° の場合は体積含水率の上昇に伴ってせん断が進行するが、斜面勾配 40° の場合は体積含水率もほぼ一定の下でせん断が進行する。この挙動の差異が体積含水率に起因するのか、それとも斜面勾配（応力比）に起因するのかは現在の所不明である。

#### ＜参考文献＞

1) 笹原克夫・海老原和重・綱木亮介、1996、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, 4, 1-8. 2) HENG VUTHA・豊田浩史、2008、降雨による斜面崩壊に及ぼす降雨履歴の影響、長岡技術科学大学修士論文。3) 酒井直樹・笹原克夫・土橋修司・植竹政樹・福園輝旗、2009、まさ土斜面模型実験による斜面勾配の違いが降雨浸透に伴う変形挙動に及ぼす影響、H21 年度砂防学会研究報告会、広島。