

# 74 人工降雨による室内崩壊実験 (I) - 予備実験 -

農林水産省森林総合研究所 ○三森利昭・大倉陽一・落合博貴  
 科学技術庁防災科学技術研究所 森脇 寛

## 1. はじめに

崩壊は、土層内に発生する過剰間隙水圧・含水量の増加によるせん断力の増加・サクシオン解放による土のせん断強度 ( $c'$ 、 $\phi'$ ) の低下などの諸現象の複合によって起こると考えられる。これらは何れも、含水量すなわち圧力ポテンシャルの関数で表記され、圧力ポテンシャルの豪雨下での推移の把握と解析が、崩壊の発生機構を解明するために重要であると考えられる。今回、崩壊が発生するまでの圧力ポテンシャルの推移を把握するため、人工降雨による予備的な崩壊実験を行ない、さらに飽和と飽和浸透流解析と極限平衡法による数値実験との比較を行なったので結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2. 1. 人工降雨実験方法

降雨装置は、科学技術庁防災科学技術研究所の大型人工降雨装置を用いた。図-1に今回の実験に使用した土層と測器(テンシオメーター)の配置を示す。崩壊土槽は、幅50cmで、長さ

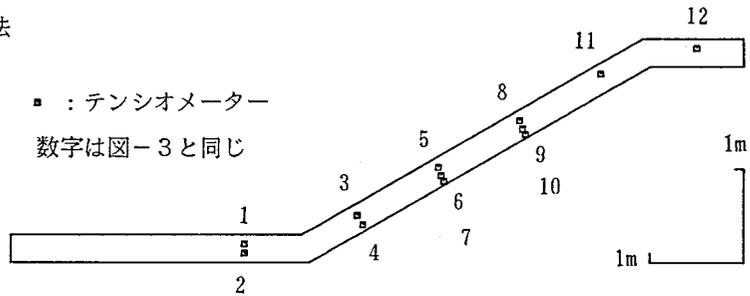


図-1 崩壊土層と測器の配置

3mの斜面下方平坦部、傾斜30°長さ4mの斜面部、長さ1m上方平坦部からなり、土槽の深さは70cmである。土槽下端には金属性のメッシュが設置してあり、下端部に到達した浸透水は土槽外へ排出される。土槽の一方の側壁はガラス製で、崩壊時の土の移動と地下水面変動が観察できる。今回の供試砂は山砂であり、30cmの厚さで土槽に詰め、実験に使用した。実験に際して、ガラス側の側壁にはベントナイトをマーカーとして筋状にガラス壁面に塗布し、崩土の運動が捉えられるようにした。また、崩壊始動時の状況把握のため、下部変曲点付近を中心にビデオ撮影を実験中おこなった。150mm/hの定常降雨を崩壊が発生するまで継続して与えた。この間、テンシオメーターにより1分間隔で圧力ポテンシャル値を計測した。

### 2. 2. 供試砂の土壌物理性とその計測・推定法

供試砂の土壌物理性を図-2に、また供試砂の諸パラメーターを表-1に示す。土壌水分特性は低圧

表-1 供試砂の諸パラメーター

乾燥密度	飽和透水係数	飽和体積含水率	残留体積含水率	$\alpha$	$n$
1.47	$4 \times 10^{-2}$ cm/sec	0.40	0.06	-6.0	4.4

力ポテンシャル域では砂柱法、高圧力ポテンシャル域では加圧法と2つの方法を併用して圧力ポテンシャル-体積含水率関係を計測した上で、Gauss-Newton法による非線形最小自乗法によって、圧力ポテンシャル-体積含水率関係の実験式で

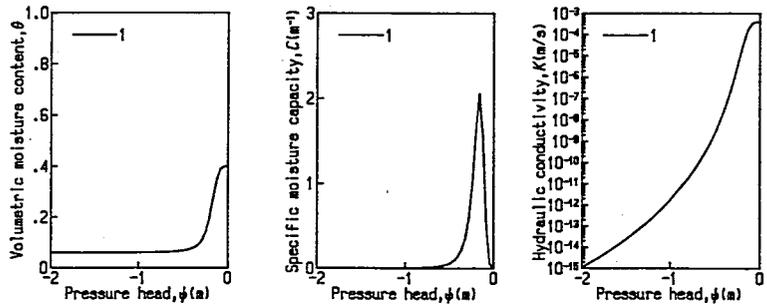


図-2 供試砂の不飽和土壌物理性

あるvan Genuchten式の最適なパラメーター、 $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$ の3つを求めた。透水係数は定水位法によって計測したが、不飽和透水性は実測せずに土壌水分特性からMualemの方法により推定した(1)。供試砂は、土壌水分特性試験から、低圧力ポテンシャル領域で含水量の変化が大きく、高圧力ポテンシャル域では含水量変化が

ほとんどない結果が得られた。これは、供試砂では大孔隙が卓越し小孔隙が少ないことを示している。このため、大孔隙に支配される飽和時の透水係数は、 $4 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ と非常に高いが、不飽和の透水性を規定する小孔隙が少ないため、不飽和時の透水性は非常に低くなる特徴がある。

### 2.3. 数値実験方法

飽和不飽和浸透流解析と極限平衡法(簡易Bishop法)による斜面安定解析の数値実験は、著者ら(2)の方法により行なった。数値実験に必要な土層全体の圧力ポテンシャルの初期値は、詰め込み時の含

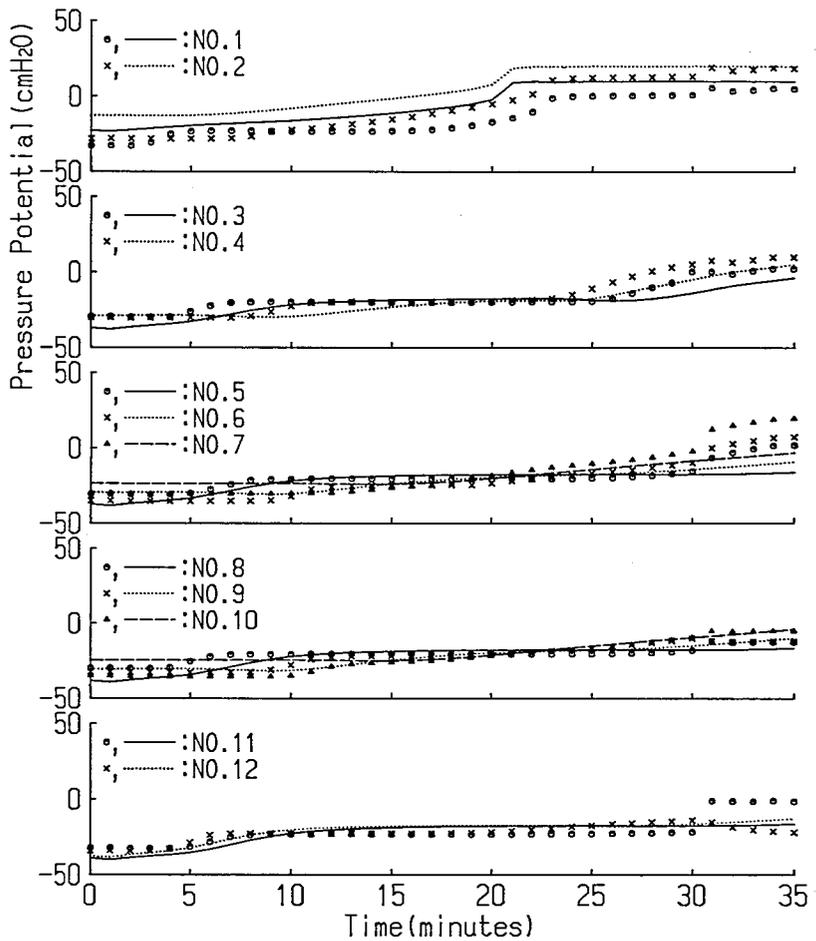


図-3 圧力ポテンシャルの実測値と計算値の対比

水率に見合った圧力ポテンシャル値を全層均一に与えて非定常浸透計算を開始し、降雨開始時である土の詰め込みの時点から約20時間後における圧力ポテンシャルの計算値とした。

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. 圧力ポテンシャルの計測結果と浸透流解析結果との比較

人工降雨実験の結果、崩壊は降雨開始より30分11秒後に発生した。このときの累積降雨量は約75mmであり、浸透流解析の結果、崩壊時の土層内水分総貯留高は110mm、谷(3)の有効貯留量では0.78と推察された。今回の土層では貯留高120mmが飽和であり、崩壊時にはほぼ飽和に近いような水分状態であった。図-3にテンシオメーターの観測結果(マーク)と数値実験結果(線分)を示す。これによると、NO.1・2の観測値を除くと観測結果と数値実験結果とがよく符合しているのがわかる。崩壊6、7分前には斜面下平坦部表面に湛水がみられたが、浸透流解析の結果からは、同時刻の2分ほど前に地下水面の地表面への到達が計算されている。また、観測結果から崩壊が発生する前に、斜面下部の圧力ポテンシャルが徐々に

ではあるが上昇しており、  
 破線は数値実験による最小安全率円弧  
 斜面のり先での圧力ポテンシャルの上昇と崩壊とが関係しているように推察されたが、下部変曲点付近の測器の配置が粗であったため、確認はできなかった。図-

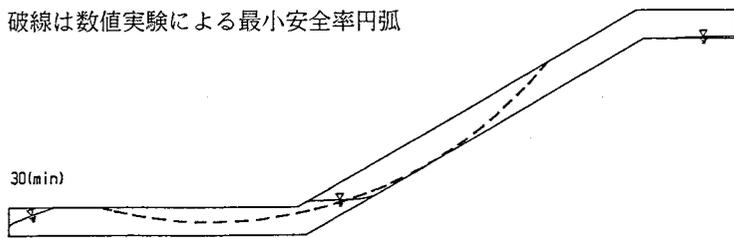


図-4 降雨開始30分後の地下水面形

4に数値実験による降雨開始後30分の地下水面形と最小安全率円弧を示す。円弧に含まれる飽和域は小さく、過剰といえるような間隙水圧は発生していなかった。

#### 3. 2. 斜面安全率の経時変化

図-5に数値実験の結果得られた安全率の推移を示す。今回、供試砂のせん断試験を行っていないため、参考として、 $\phi' = 25, 30^\circ$ としたときの安全率の推移を図中に示している。安定解析の結果  $\phi' = 25^\circ$ とした時、実際の崩壊発生時刻とちよほど符合している。

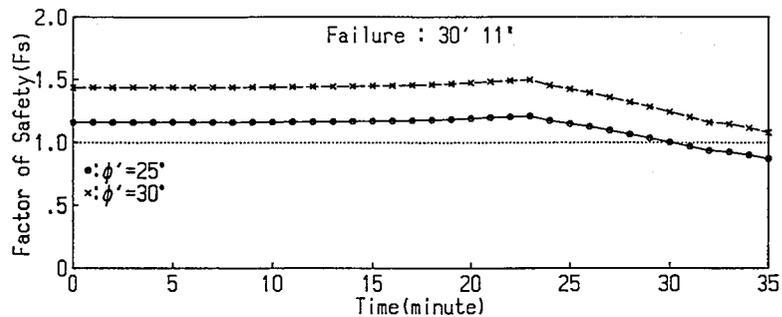


図-5 安全率の時間変化

山砂としては、 $\phi' = 25^\circ$

はこれまでの報告例を参考にすると小さな値であるが、不飽和から飽和になる過程、特に飽和に近い不飽和領域で、土質強度定数  $c' \cdot \phi'$  とともに急激に低下することが、不飽和土質試験の結果から指摘されており、今回のように  $\phi' = 25^\circ$  としても矛盾はしないと考えられるが、不飽和3軸圧縮試験等で不飽和時の  $\phi'$  を計測し確認する必要があると考える。今回の供試砂は粒径の大きな山砂であるため、

安定解析では  $c'_{sat}=0$ としたが、不飽和時はBishopの方法により負の間隙水圧値（見かけの粘着力）を安定解析式の中において考慮した。 $\phi'$ についても土質試験による実態把握の上、 $c'$ 同様に安定解析において考慮する必要があるように思われる。

### 3. 3. 崩壊すべり面の観察結果と考察

崩壊後の土層断面の観察の結果、斜面下方平坦部中ほどに移動土塊の下端がみられた。一方、崩壊の上端は上方平坦面まで達していた。斜面下部は、土砂が比較的早い速度で下方へ移動し、斜面下端平坦部を押し上げるような形でせん断しており、斜面中部より上では、崩土が小さな塊状に形を保ったまま斜面下方に移動し、表面は階段状を呈していた。これは下方の土によるおさえを失ったため小規模の崩壊が生じたと考えられ、この現象が上方へ波及・拡大して行ったような形態となっており、斜面下部の崩土の運動形態と明らかに異なっていた。また、崩土は観察の結果、斜面下部が水分を多く含んでいるのに対し、斜面上部では下部よりも乾いていた。

数値実験によるすべり円弧は、土塊が動き出す瞬間すなわち極限平衡状態でのものであるため、傾斜が大きく移動速度が速い場合、崩土の運動による侵食などのため崩壊後の移動土塊のすべり面形状と異なるのが普通である。斜面下部では、斜面上部から連続して流下する崩壊土砂によって圧縮を受ける斜面下部変曲点付近において、実際のすべり面が数値実験結果より多少深い位置にあったが、他はおおむね一致していた。また、No.8,9,10 テンシオメーターが原形のまま下方へ移動していることと、上部の連続する小崩壊の開始位置がNo.8,9,10 テンシオメーターの直上であること等から、圧縮を受けない斜面上部でも、すべり面は数値実験の結果とほぼ一致していたといえる。

### 4. 終わりに

飽和に近い不飽和領域での土の物理性の把握が、豪雨下に発生する崩壊の発生機構の解析には重要であり、この方面での研究展開が必要と考える。今回の実験結果を受け、今後は下部変曲点付近に密に測器を配置し、変曲点付近の圧力ポテンシャルの変動を細かく観測するとともに、極限平衡状態が崩れる瞬間以降の崩土の運動を観測することによって、極限平衡法の表層崩壊での有効性の確認を行ってまいりたい。

### 引用文献

- 1) 三森、小池、広中、虫明：土壌水分特性を用いた不飽和透水性の推定、生産研究（東大生研）、vol.43、no.2、1991.
- 2) 三森、坪山：浸透現象を考慮した斜面安定解析法の研究、新砂防、vol.43、No.4(171)、1990.
- 3) 谷：山地流域の流出特性を考慮した一次元鉛直不飽和浸透流の解析、日林誌、vol.67、No.11、1985.