

## 模型斜面を対象にした人工降雨による崩壊実験におけるせん断変形と浸透水の変化

岡田康彦 (森林総研)

**要旨** : 長さ 9 m, 幅 1 m の大型模型に形成した砂層斜面に, 人工降雨 (雨量強度 : 毎時 100 mm) を与える斜面崩壊実験を実施した。土層厚は 0.7 m および 0.5 m の 2 種類で与えたところ, それぞれ降雨開始後 4,000 秒ならびに 2,931 秒で崩壊が生じた。実験では, 視認用マーカの移動を画像解析技術により追跡し崩壊に至るまでの砂層斜面のせん断変形を調べると共に, 斜面に埋設した間隙水圧計による圧力水頭値の変化から等全水頭線 (等ポテンシャル線) を近似して浸透水の流れる方向を計測した。砂層斜面は可能な限り均一になるように詰めたが, 浸透水の流れならびにせん断変形挙動は斜面内で一様ではなくバラツキが認められた。斜面崩壊は, 模型の底面に飽和水帯が形成されてから生じた。斜面が崩れた箇所では崩れなかった箇所に比べ, 最大せん断歪み方向ならびに浸透水の流れる方向が重力の斜面に水平な下方成分方向により近い結果が得られた。このことから, 最大せん断歪みおよび浸透水の方向性が降雨による斜面崩壊の発生に影響を及ぼした可能性が示唆された。

**キーワード** : 人工降雨崩壊実験, せん断変形, 浸透水

**Abstract** : Two shallow landslides in a large-scale model slope were induced by artificial heavy rainfall (100 mm per hour), in which the sand layer heights were set at 0.7 and 0.5 m. A total of 2,931 s rainfall triggered a relatively large landslide in a sand layer 0.5 m high. Conversely, only a small landslide was produced by a total of 4,000 s rainfall in a sand layer 0.7 m high. Shear strain and seepage flow conditions were monitored. By tracing the movements of the markers imbedded inside the sand layers, changes in shear strain were analysed and expressed as Mohr's circles. Also by approximating the equi-potential lines from data observed on pore-water pressure, changes in seepage flow directions were calculated. Although the sand layers were uniformly packed, the observed shear deformation and seepage flow conditions were not homogeneous. Just before the landslide was triggered, water tables were formed in almost all slope sections. Directions of maximum shear strain and seepage flow generally correlated to the slope-base direction in the parts inside the landslide, indicating their possible influence on the landslide.

**Keywords** : shallow landslide experiment by artificial rainfall, shear deformation, seepage flow

### I はじめに

急峻な山地斜面が国土の多くを占める我が国においては, 豪雨の発生毎に各地で斜面が崩壊することから, 降雨による斜面崩壊の発生予測に関して, 従来より多くの研究がなされてきた。例えば (2) では, 長さ 10 m, 幅 4 m の準実物大の模型斜面を対象に厚さ 1 m の砂層斜面に人工降雨を与えて崩壊を誘発させる実験が実施された。斜面の土層内部に土圧計を 3 方向 (斜面の縦断方向において, 受圧面の垂線が互いに 60 度で交差する方向) に埋設し, 降雨によって斜面が変形し, 最終的には崩壊するまでの応力状態の変化 (主応力値や方向の変化) を詳細に計測した。この中で, 地下水の発生・増加現象が崩壊の発生に果たす役割の詳細な検討が重要と述べられている。(1) は, 土層厚を変えた砂層斜面を対象にした降雨による崩壊実験, ならびにこれらを模した数値実験を実施して, 崩壊の発生時間は土層厚と一次関係にあること, 崩壊時の斜面の有効飽和度は土層厚と関係が無く一定で

あることを示した。(3) は, 砂質土斜面の人工降雨による崩壊現象に関して, 伸縮計による表面の移動速度の逆数を変数に, 崩壊の発生時間を予測するモデルを提案した。

上述の研究では, 地表面移動速度を用いた崩壊発生予測, あるいは崩壊発生時に生じる間隙水圧値の変動の追跡が主たる対象となっていた。一方, 斜面変形や浸透水の変動と崩壊発生の詳細関係は明らかになっていない。本研究では, 斜面崩壊の発生機構の解明を目指し, また, 今後の危険度予測研究の基礎情報とすべく, 長さ 9 m, 幅 1 m の大型斜面模型を用いて, 人工降雨により砂層斜面を崩壊させる。この中で, 砂層斜面の側面のほぼ全面に多数埋設した視認用マーカの移動追跡によりせん断変形を面的に捉える。また, 多数埋設した間隙水圧計の圧力水頭値の変化から等全水頭線 (等ポテンシャル線) を近似して求めることにより, 地下水面の形成の有無のみならず浸透水の流れる方向について調べ, 斜面崩壊現象

Yasuhiko OKADA (For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba, Ibaraki, 305-8687) Shear behaviour and seepage flow prior to rainfall-induced landslide by means of large scale slope-model

の発生との関係を検討する。

## II 斜面模型・計測システム・供試砂

崩壊実験は、土層厚を変えて2回実施した(実験1の土層厚は0.7m, 実験2は同0.5m)。使用した斜面模型の形状と、実験1における変形視認用のマーカおよび間隙水圧計の埋設位置を図-1に示す。模型の底面における崩壊を抑止するために、高さ0.015m, 奥行き0.015m, 幅1mの突起を、縦断方向に関して0.1m毎に設置して粗度を与えた。斜面模型の側面片側は強化ガラス製とし、砂層の変形を視認できるようにした。散水用のノズルは縦断方向に4カ所設置しできるだけ斜面に対し均一な降雨となるように調整してある(4)。

せん断変形を追跡する画像解析用のマーカは、水平方向に0.2m間隔で砂層に埋設し、深さ方向には、実験1において4深度、底面から0.1m, 0.3m, 0.5m, 0.7m, 実験2において3深度、底面から0.05m, 0.25m, 0.45mの位置に設置した。間隙水圧計(歪みゲージタイプ, 定格容量:70kPa, 精度:0.015% BSL)は水平方向に1m間隔で設置し、深さ方向には、実験1において3深度、底面、底面から0.3m, 0.6m, 実験2において3深度、底面から0.05m, 0.25m, 0.45mに埋設した。間隙水圧計による計測データは、100Hzでサンプリングした。低速デジタルビデオカメラ(毎秒30フレーム, 縦横480×640画素)による砂層斜面の映像は水平方向に約2.5mを撮影しており、1画素の長さは約 $4 \times 10^{-3}$ m相当となる。

実験に用いた砂は、土粒子密度( $\rho_s$ )  $2.62 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ , 平均粒径( $D_{50}$ ) 0.50mm, 均等係数( $U_c$ ) 4.31, 曲率係数( $U_c'$ ) 0.93であった。実験室の天井に設置してある移動式のホッパーに砂を詰め、斜面模型の上部に移動させてからゆっくりと砂を落下させることにより斜面模型に砂を詰めた。砂層は約0.15mから0.20m程度の厚さを詰める毎に、体重が約550Nの人間が、 $0.17\text{m} \times 0.3\text{m}$ の板をつけた下駄を履いて締め固め、可能な限り均一になるように調整した。供試体は緩詰めに調整し、間隙比は実験1が0.79, 実験2が0.76である。

## III 実験結果

毎時100mmの降雨開始後、実験1については4,000秒、実験2については2,931秒で斜面が崩壊した。実験2では、模型の下流部末端から約8mの位置(模型の中流部と上流部の連結部付近)を源頭部に、急勾配の模型中流部のほぼ全層が崩れ下方へ運動した。他方、実験1では、同約6mを源頭部に水平長さ1.8m程度の土砂が浅く崩れた(最大深さ0.4m弱程度)。

浸透水については、従来より知られている通り、降雨は地表面に到達すると浸潤前線を形成しながらほぼ鉛直方向に浸透した。その後、模型底面に到達すると上部に飽和帯を形成すると共に、鉛直方向とは異なる方向へと浸透する結果が得られた。

砂層の変形については、マーカの移動を画像解析し、以下の式により定量化した。

$$\Delta V_i = \frac{\partial V}{\partial v} \times V_i + \frac{\partial V}{\partial h} \times H_i \quad (i=1,2)$$

$$\Delta H_i = \frac{\partial H}{\partial v} \times V_i + \frac{\partial H}{\partial h} \times H_i \quad (i=1,2)$$

$$\varepsilon_v = -\frac{\partial V}{\partial v} \quad \varepsilon_h = -\frac{\partial H}{\partial h} \quad \gamma_{hv} = \frac{\gamma_{hv}}{2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial H}{\partial v} + \frac{\partial V}{\partial h} \right)$$

ここで、鉛直ひずみ( $\varepsilon_v$ )、水平ひずみ( $\varepsilon_h$ )、せん断ひずみ( $\gamma_{hv}/2$ )である。なお、垂直歪みは圧縮時を、せん断歪みは反時計回り方向時を正としている。

斜面崩壊は急勾配の斜面内(模型中流部内)で生じたことから、模型末端部より水平距離で4.6m, 5.6m, 6.6m, 7.6mの位置におけるひずみ変形を調べた。図-2は、実験1に関して、頭部の崩壊面が砂層表面に表出した約6m地点の上流側および下流側、つまり、6.6mおよび5.6m地点のひずみのモール円を示している。視認用のマーカは4深度に埋設してあることから、解析対象は浅部、中部、深部とし、崩壊発生前500秒, 300秒, 60秒, 1秒の時点での変形結果を示している。6.6m地点のひずみのモール円(図2a, b, c)の大きさを較べると、浅部と中部はほぼ同じ大きさで変形が進行しているが、深部はモール円が小さいことがわかる。5.6m地点(図2d, e, f)については、浅部から深部にかけて深い位置ほどモール円が大きくなっている。また、両者を対応する深さで比較すると、浅部と中部では6.6m地点で5.6m地点よりもモール円が大きく、深部では逆に5.6m地点が6.6m地点よりも大きくなっており、水平距離1mの両者においても斜面の変形が不均一に進行していることがわかった。前述の通り、斜面は6m地点近傍を源頭部に、最大深さ0.4m弱程度、水平長さ1.8m程度で発生した。つまり、6.6m地点では砂層は崩れなかったのだが、特に浅部と中部については、6.6m地点でのモール円が5.6m地点のそれよりも大きく、つまりよりひずみ変形が進行していた。

実験2では、水路末端部から8m地点近傍を源頭部に、深さが0.4m程度で、急勾配斜面のほぼ全層が崩壊した。実験1と同様に模型末端部から6.6mおよび5.6mにおける歪みのモール円を求めて比較すると、実験1とは異なり両者には大きな違いがないこと、浅部よりも深部でより変形が進行していることが示された。

#### IV せん断変形と浸透水の効果の検討

実験1の模型中流部の3深度に関して最大のせん断ひずみ方向が斜面模型底面方向(つまり、32度傾斜方向)と交差する角度(図-1中の $\theta$ )を算出した(図-3)。なお、最大のせん断歪み方向と32度傾斜の模型底面の交差角については、図-1のように交差する場合を正としてある。実験1の崩壊の源頭部を挟む模型端部から5.6mおよび6.6mの他に、参考として4.6mおよび7.6mのデータも併せて示す。これらの図より、最大のせん断ひずみ方向と模型中流部底面の方向の交差角は、浅部(図-3a)でやや大きく、中部および深部(図-3b, c)で小さいことがわかる。また、6.6m地点の交差角は、浅部、中部、深部のいずれにおいても5.6m地点のそれよりも大きいことがわかった。つまり、5.6m地点では、最大のせん断ひずみの方向が6.6m地点に比べより斜面勾配に近づく方向に発達していたことが示された。一番上流側の7.6m地点の交差角は、5.6m地点および6.6m地点の交差角の中間程度の値であること、4.6m地点の交差角は最も小さく、中部と深部においてはマイナス値(つまり、32度の模型勾配よりも緩い方向)を示す場合もあり、最大のせん断ひずみ方向が砂層の地表面に向かうことが示された。

続いて、最大のせん断ひずみ方向と模型底面方向の交差角と同様に、5.6m地点および6.6m地点ほかの浸透水の流下方向と模型底面方向の交差角を検討する。等ポテンシャル線をより詳細に決定し、この線に垂直に交わる方向に浸透水が流下しているとして、浸透水の流下方向と模型底面方向の交差角を算出した。土砂は最大深さ0.4m弱程度で崩壊したことから、この近傍の深さにおける浸透水の流下方向を示す(図-4)。その結果、6.6m地点の浸透水の流れる方向は、模型底面方向に対し約68度から52度と相当量大きな交差角を示した。他方、5.6m地点では、約45度から40度程度と6.6m地点のそれに比べ模型底面方向により近い方向であることがわかった。

また、4.6m地点ならびに7.6m地点のそれは、いずれも6.6m地点よりも小さな交差角を示しており、崩壊発生1秒前においては、40度弱に収斂していることがわかった。

降雨の浸透により斜面が崩壊する現象においては、地下水の発生・増加現象の果たす役割の検討が重要とされている(2)。実際、土粒子には浸透水の流れる方向へ透水力が作用することから、透水力が斜面傾斜方向へ作用する場合が最も危険であると推定される。6.6m地点の浅部および中部ではひずみのモール円が5.6m地点に比べて大きい結果(図-2)となったが、最大のせん断ひずみ方向はより大きな角度で模型底面と交差していた(図-3)。また、透水力が作用する方向についても、より大

きな角度で模型底面と交差することが示された(図-4)。一方、5.6m地点については、最大のせん断ひずみ方向および透水力が作用する方向に関して、斜面傾斜方向により近い結果が得られた。これらの事実から、最大せん断ひずみ方向および透水力の作用する方向が模型斜面の傾斜方向により近づく変化が、斜面崩壊発生に影響を及ぼした可能性が示唆される。

一方、模型中流部の砂層斜面がほぼ全域にわたり崩壊した実験2に関して、底面から0.15mでの最大のせん断ひずみ方向および透水力の作用方向が模型底面と交差した角度を図-5に示す。最大のせん断ひずみ方向の交差角は約7度から12度と、実験1の中部と較べてほぼ同等あるいはやや大きめの結果となっているが、4地点において概ねまとまっていると言える。透水力の作用方向の交差角については4地点でバラツキはあるものの、いずれについても崩壊発生1秒前で20度以下と小さな値に収束しており、急勾配の斜面(模型中流部)においてはほぼ全域にわたり一気に崩壊が発生した可能性がある。

#### V まとめ

- ・砂層の斜面は可能な限り均一になるように形成したものの、浸透水の流れならびに斜面内部のせん断変形挙動は一様ではなく、バラツキが生じる場合がある。また、斜面崩壊は、飽和水帯が模型底面近傍の概ね全域に形成された後に発生した
- ・斜面が崩れた箇所では崩れなかった箇所に比べ、最大せん断ひずみ方向が斜面模型の傾斜方向により近い結果が得られた。また、浸透水の流れる方向も同様の結果となった。これらから、両方向の変化が降雨による斜面崩壊の発生に影響を及ぼした可能性がある。

#### 引用文献

- (1) 福園輝旗 (1978) 降雨による斜面崩壊と内部応力状態について. 国立防災科学技術センター研究報告 : 20, pp.101-122
- (2) 福園輝旗 (1985) 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法. 地すべり : 22(2), pp.8-13
- (3) 三森利昭・大倉陽一・落合博貴・北原曜 (1995) 降雨を原因とする斜面崩壊に土層厚が及ぼす影響. 新砂防 : 48(1), pp.12-23
- (4) OKURA, Y., KITAHARA, H., OCHIAI, H., SAMMORI, T. and KAWANAMI, A. (2002) Landslide fluidization process by flume experiments, Engineering Geology : 66, pp.65-78

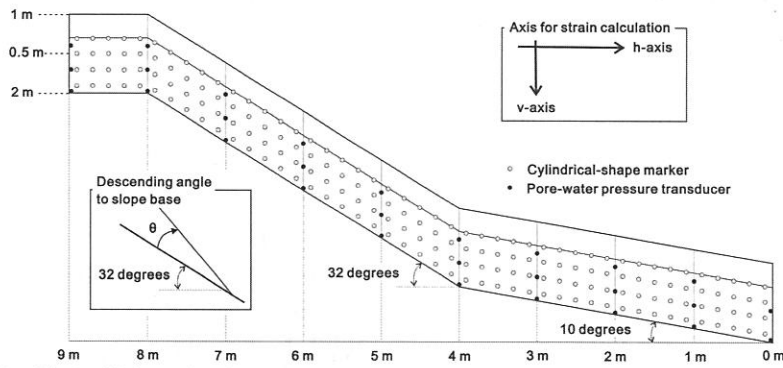


図-1. 大型斜面模型の模式図 (間隙水圧計, マーカ, ひずみ解析の座標軸, 模型底面との交差角)  
 Fig. 1. Schematic of model slope (pore-water pressure transducer, marker, axis for strain analysis, descending angle to slope base)

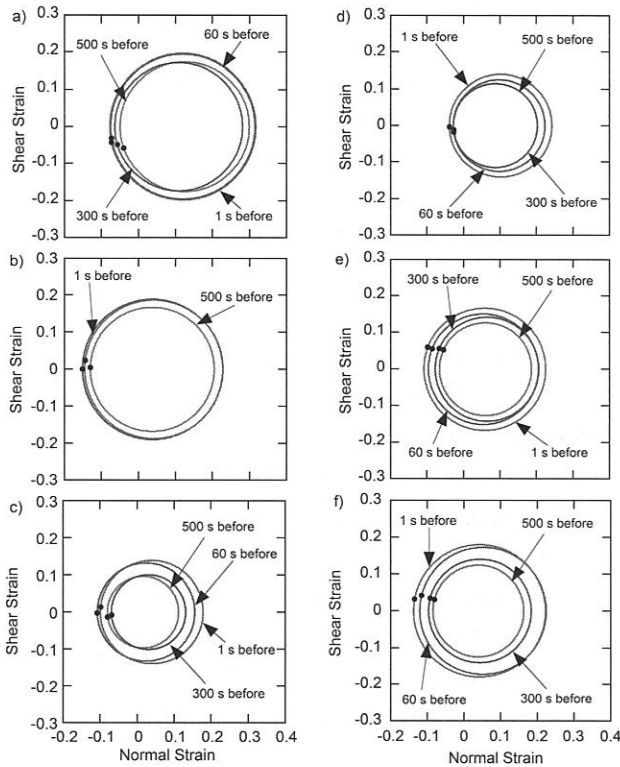


図-2. モーリングの時系列変化(実験1). 水路末端から 6.6m 位置での a)浅部, b)中部, c)深部, 同 5.6m 位置での d)浅部, e)中部, f)深部.  
 Fig. 2. Changes in Mohr's circles in Ex. 1. a) shallow, b) middle, c) deep parts at 6.6 m positions, and d) shallow, e) middle, f) deep at 5.6 m positions.

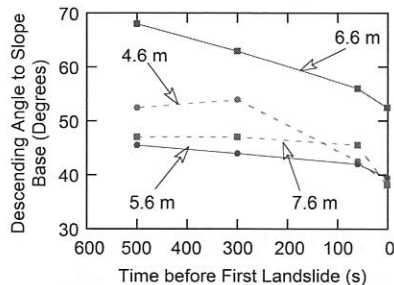


図-4. 浸透水の流下方向と模型底面の交差角 (実験1).  
 Fig. 4. Changes in descending angle between seepage flow and steep slope base in Ex. 1.

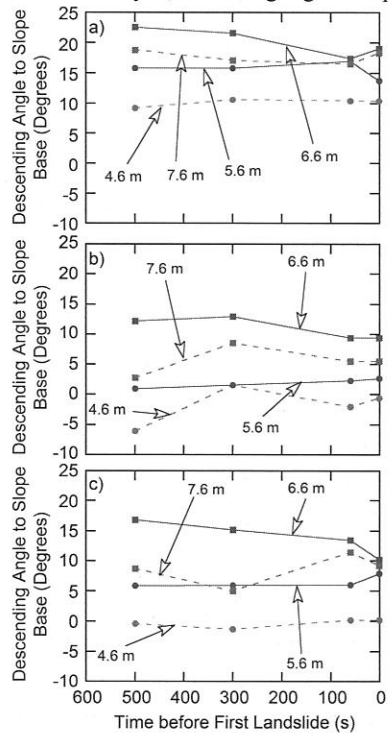


図-3. 最大せん断ひずみ方向と模型底面の交差角の変化 (実験1). a) 浅部, b) 中部, c) 深部.  
 Fig. 3. Changes in descending angle between maximum shear strain and steep slope base. a) shallow, b) middle, c) deep.

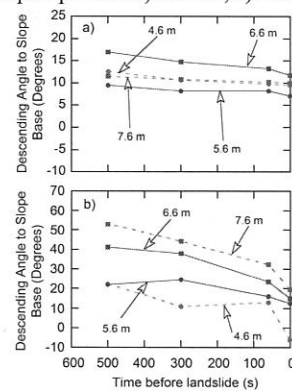


図-5. 模型底面との交差角 (実験2). a) 最大せん断歪み, b) 浸透水.  
 Fig. 5. Changes in descending angle to steep slope base. a) maximum shear strain, b) seepage flow.