

人工降雨による斜面崩壊実験で認められたせん断変形について

国立研究開発法人森林総合研究所 岡田康彦

1 はじめに

地球温暖化の影響も受けてか、極端な集中豪雨が頻発している。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、豪雨により斜面が多数崩壊し、甚大な被害が報告されるに至っている。集中的な降雨による斜面崩壊の発生・運動メカニズムの解明から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いる。

福園(1985)は、長さ 10m、幅 4m の準実物大の模型斜面を用いて厚さ 1m の砂層斜面に人工降雨を与えて崩壊を誘発させた。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。福園(2007)は、傾斜計を多数連ねたセンサを開発した。模型斜面の傾斜方向に対し垂直に砂層斜面に埋設することにより、斜面内部での変形を詳細に計測して、早期警戒の可能性を検討した。Okura et al. (2000)は、長さ 9m、幅 1m の大型斜面模型を用いて、人工降雨による崩壊実験を実施して、模型の上下流における土層厚の分布と土層内部で発生する過剰間隙水圧の関係、崩壊発生時の土層の運動について検討を行った。

本研究では、Okura et al (2000)と同じ斜面模型を用いて、人工降雨により砂層斜面を崩壊させる。この中で、模型の片側側面に多数埋設した視認用マーカの移動を詳細に追跡することにより、土層内部で発生するせん断変形を面的に捉える。斜面の縦断方向および深度に対するせん断変形の相違を調べる。せん断ひずみの生じる方向と斜面崩壊発生との関係を検討する。

2 模型斜面および供試砂

斜面模型は、全長が 9m、幅は 1m で、下流側から傾斜 10 度（水平長さ 4m）、32 度（同 4m）、0 度（同 1m）の 3 セクションからなる（図-1、2）。模型側面の一方は強化ガラス製とし、側部から斜面の変形を視認できるようにしてある。間隙水圧計は、模型の縦断水平方向に 1m 毎、鉛直方向 3 深度に埋設して、浸透水の流れを計測した。与えた人工降雨は、時間雨量 100 ミリとした。使用した砂質土は桜川砂で、土粒子密度が $2.62 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、平均粒径が 0.50mm、均等係数が 4.31、曲率係数が 0.93、間隙比が 0.76 から 0.81、含水比が 9.6%から 10.5%である。

3 斜面崩壊実験の結果

崩壊実験は、土層厚 0.7m で実施した。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、0.17m×0.3m 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。

毎時 100mm の降雨開始後、4,000 秒で斜面が崩壊した。模型の下流部末端から約 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。

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。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 地点で、崩壊発生前 500 秒、300 秒、60 秒、1 秒の時点でのひずみ変

形を解析した。垂直ひずみとせん断ひずみの双方について極座標図を作成することにより、ひずみの大きさと発生している方向が視覚的に容易に判断できることとした。その結果、6.6m 地点に関しては、浅部と中部はほぼ同じ大きさでひずみが発生しているが、深部はひずみが小さいことがわかった。5.6m 地点については、浅部から深部にかけて深い位置ほど大きなひずみが。6.6m および 5.6m 地点の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 地点よりも発生したひずみが大きく、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。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 地点で発生したひずみが 5.6m 地点のそれよりも大きく変形がより進行していた。

このように発生したひずみの大きさと崩壊発生もしくは非発生箇所の関係は単純ではない。一方、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）と交差する角度を検討すると、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、浅部でやや大きく、中部および深部で小さいことがわかった。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 地点に較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。最大せん断ひずみの発生している方向と同様に、5.6m 地点および 6.6m 地点の浸透水の流下方向と模型底面方向の交差角を検討した。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 地点のそれに較べ模型底面方向により近い方向であることがわかった。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た。従って、垂直ひずみ、せん断ひずみの双方に関して直感的に大きさと発生している方向が理解可能となる極座標図を用いた解析が有効であることが示された。



図-1 斜面崩壊実験に使用した大型模型

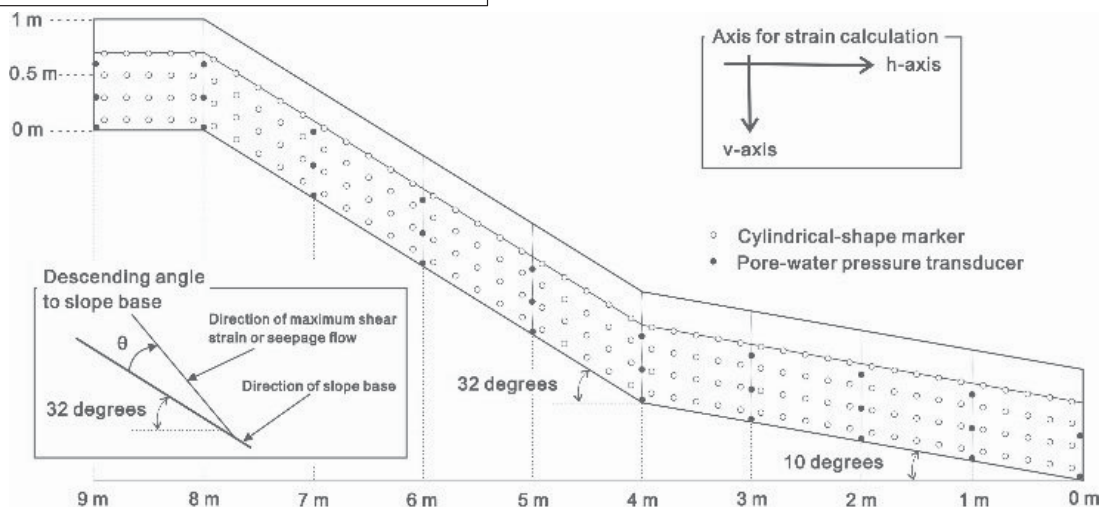


図-2 斜面崩壊実験で与えた供試体の条件（間隙水圧計やマーカ）とひずみ解析における軸の設定