

砂質土を対象とした人工降雨による模型斜面崩壊実験における

歪みならびに浸透水の変化

独立行政法人森林総合研究所 ○岡田康彦

1 はじめに

長さ 9m、幅 1m 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 100mm）を与える斜面崩壊実験を実施した。土層厚は 0.7m および 0.5m 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。

2 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。特に、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。他方、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されていない。そこで、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 9m、幅 1m 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、斜面崩壊現象の発生との関係を検討する。

3 斜面崩壊実験の概要および結果

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）。実験に用いた砂は、土粒子密度（ ρ_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、0.17m×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、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。

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ところ、6.6m 地点のひずみのモール円は、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モール円が大きくなっていった。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。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。

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）と交差する角度を算出した。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。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。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 地点に較べて大きい結果となったが、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。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。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、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た。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）においてほぼ全域にわたり一気に崩壊が発生した可能性がある。



写真 斜面崩壊実験に使用した大型模型