

突大斜面模型を用いた崩壊実験における崩壊発生・流下過程

防災科学技術研究所 ○森脇 寛・井口 隆
 筑波大学・院 八反地剛・佐々木良宜・小暮哲也
 森林総合研究所 落合博貴
 京大防災研究所 佐々恭二

1. はじめに

崩壊土砂の運動予測は土砂災害研究の重要なテーマのひとつである。特に崩壊土砂の流動化現象は甚大な被害をもたらすため、近年、関心が高まっている。現在、土質力学試験や数値計算など種々の方法で検討されているが、筆者らは模型斜面に散水し、崩壊現象を人為的に再現させて計測する手法をとった。ただし、小規模な模型では相似則を満足させることが難しいうえ、埋設センサーやそのケーブルが崩壊発生・土砂流下の妨げになることもあるので、実物大の斜面模型を製作して崩壊実験を試みた。その結果、明瞭な流動化現象は見られなかったが、崩壊時のすべり面の形成過程や急激な間隙水圧の上昇など、いくつかの興味深い知見が得られたのでその概要について報告する。なお、本実験は文部科学省科学技術振興調整費「地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明」の一環として行われたものである。

2. 実験の概要

(独) 防災科学技術研究所の大型降雨実験施設内に総斜面長 23m、高さ 8m の長大斜面模型を製作した。模型形状は上部から天端 1m、30 度斜面 10m、10 度斜面及び水平部 6m からなる複合斜面で、幅 3m、深さ 1.6m の鋼製水路である (図 1)。水路の片側壁は土層内部の変形・破壊状況が外側から観測できるように強化ガラスを用いた。水路底面には、粗度の役割を持たすため一定間隔で横断方向に鉄角材 (1.7cm) が溶接されている。また、水平部の末端は金網付スリット型擁壁で土砂を抑えている (浸透水は金網を通して自然排水)。実験用土は茨城県桜川砂 (比重 2.69、 $D_{50}=0.38\text{mm}$) を用いた。斜面土層はこの桜川砂を水路底面形状に平行に 3 回に分けて充填し、均一に締め固めながら成形した。実験時の土層深は 1.2m、土層の乾燥密度は 1.46、初期含水比は 5.8% である。散水は 100 mm/h の一定降雨強度下で行われた。

計測項目は主に地表面移動量 (30 度斜面のみ、回転・滑動抵抗型)、底面水圧 (固定、半導体ダイヤモンド型)、間隙水圧 (strain gauge type、土層中に非固定で埋設) である。これらの記録は全て PC にて 100 Hz の Sampling rate で行った。また、各方向からビデオカメラならびにモータドライブカメラによる動態撮影も行っている。

3. 実験結果と考察

3.1 崩壊発生前までの浸透水の挙動と地表面移動

斜面土層表面から浸透した雨水は全て斜面土層に浸透し、表面流の発生は見られなかった。底面水圧計のデータによると、散水開始後約 114 分過ぎから飽和層の発生・上昇が始まっている。ほぼ同時に斜面土層の変位が 30 度斜面の上端から始まった。これは不飽和浸透の状態では安定を保っていた砂質土層が飽和層の形成により粘着力成分はほぼゼロとなって、斜面下方への応力が増加したためと考えられる (ただし、この状態では斜面全体の安全率は 1.0 以上)。この後、約 40 分間、飽和層の発達とともに地表面移動量は徐々にクリープ的增加を続け、斜面上方の変位が約 4.7cm に達した時に急激な変動を示して崩壊を生じた (図 2)。斜面崩壊長 (10 m) に対する崩壊発生限界歪は約 0.005 である。最小限界歪 0.006¹⁾ よりもやや小さい値となった。

崩壊直前の地下水位面を図 3 に示す。10 度斜面の上端ならびに水平部と 10 度斜面の接続部付近で水位が高くなっている。水平部土層の水位は水平部土層の末端から自由に排水できるようになっているため、末端に向けて少しずつ低下している。崩壊時には全体的にきわめて高い水位状態であったことがわかる。斜面土層が 30 度という緩勾配のため、もともと安定度が高く、水位がかなり上昇しないと崩壊しなかったものと推測される。

3.2 崩壊発生時の土塊の運動と急激な水圧変動

<破壊面の形成> 斜面土層は散水開始後 154 分で一挙に崩壊した。

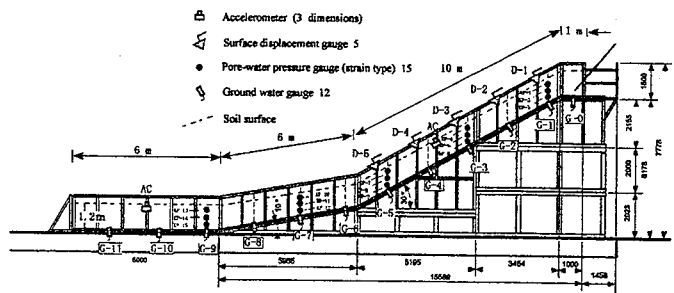


図1 斜面模型とセンサーの位置

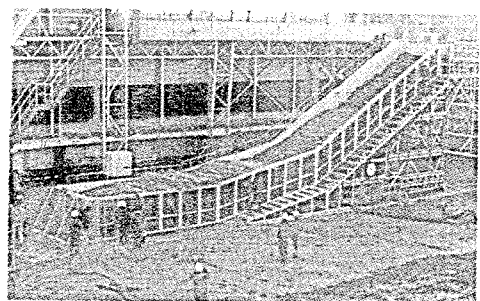


図2 崩壊後の写真

崩壊発生から停止するまでの時間は約5秒間である。図4は土層と強化ガラスの間に一定間隔で垂直に埋めたインデックス（カラー砂；幅6cm）の変形を連続写真から詳しく解析したものである。最上段の図は崩壊直前、最下段の図は停止時の状況を示す。30度斜面の土層が最初に崩壊を生じて、10度斜面の土層を押し出し、ついで水平部土層を圧縮して停止していることがわかる。崩壊後の水平部土層の地表面は、圧縮による数列からなる褶曲構造を呈している（図2参照）。また、斜面上部では引っ張り破壊によるブロックスライドが見られた。

＜土塊の運動＞ 図5,6は崩壊時の地表面移動量ならびに移動速度の変化を示す。崩壊発生前までの動きが、緩速で、微小であるのに対し、崩壊時の運動はそれまでのクリープ変動とは異なり、明らかに区別ができる高速運動を示している。30度斜面中央部付近の土層はほぼ一体となって約3.8m流下した。速度分布は上に凸型の正弦波のような動きを示し、最大流下速度も約1.2m/sを記録している。

＜水圧の変動＞ 図7,8はそれぞれ崩壊発生時の底面水圧の変化ならびに流下土層中の間隙水圧（斜面中央部、深さ30、60、90cm）の変化を示している。参考までに両図とも斜面中央部の移動量（D-3）の変化を合わせて表示している。底面水圧は、崩壊発生とともに水平部も含めた全層にわたって急激な上昇傾向を示す。水平部土層をもたない斜面模型による実験¹⁾でも同様の傾向を示している。斜面上部の底面水圧は土層の移動に伴い土層厚さが減少するため、低下しているのに対して、10度勾配ならびに水平部のそれは土層厚さも大きく、すぐには低下していない。図8に示す流下土層中の変化を見ると、表面深さ30cmの間隙水圧はもともと、飽和層が埋設深さまで到達していないため、変化は見られないが、60、90cm深さのそれは崩壊発生と同時に急上昇する傾向が見られた。

この崩壊時の水圧の急上昇は過剰間隙水圧の発生を意味し、その値の大きさによっては、崩壊発生と同時に流動化する可能性があることを示唆している。昨年の水俣災害など豪雨による斜面崩壊の流動化機構解明の手がかりになるかもしれない。

4. おわりに

本実験では実大模型による崩壊実験により、斜面内部の変形・破壊過程や崩壊発生時には間隙水圧が急上昇することが明らかになった。しかし、当初の目的である流動化について、砂質土のためか、顕著な現象は見られなかった。一方、平成15年11月に行われた茨城県加波山の現地公開崩壊実験（森林総合研究所）では表層の火山灰層が崩壊し、かなりの流動性が見られた。これは主として斜面構成材料の違いによるものと考えられる。次の機会には粘性土を用いた崩壊実験により、土の種類が流動化に及ぼす影響を明らかにしたい。

＜参考文献＞

- 1) 森脇 寛 (2001) : 地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価. 地すべり, 第38巻, 第2号, 11-18.
- 2) 森脇 寛ほか (2003) : 大型模型実験における崩壊現象と崩壊時の水圧変動. 第42回地すべり学会研究発表会講演集, 269-272

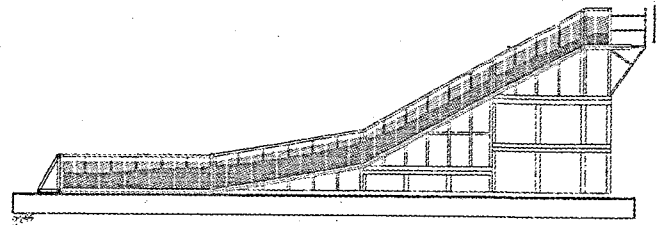


図3 崩壊直前の地下水位(暗色部分)

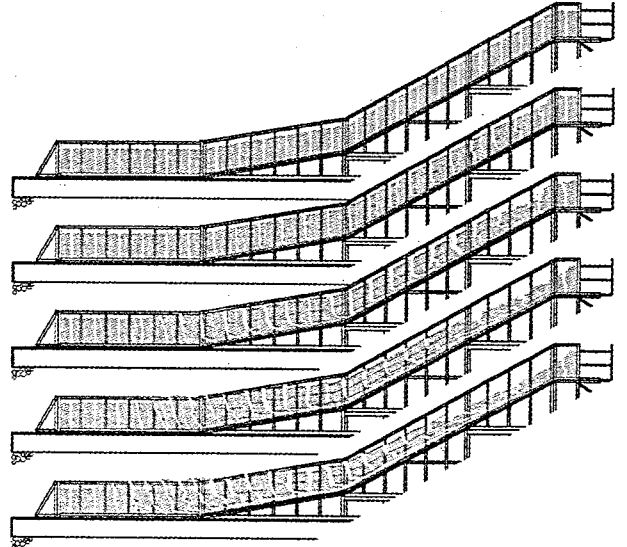


図4 崩壊発生時の斜面変形の発達状況 (5秒間)
(側面に埋設井したインデックスの変化を追跡)

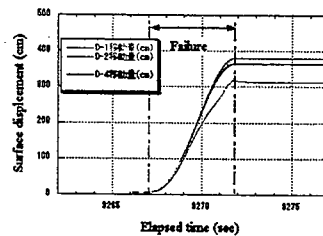


図5 崩壊発生時の地表面移動量の変化

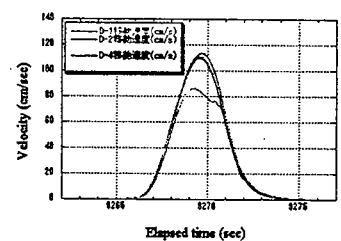


図6 崩壊発生時の移動速度の変化

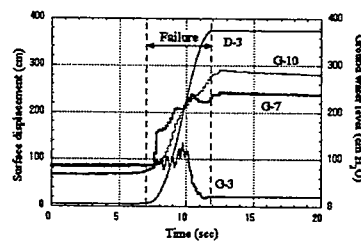


図7 崩壊時の底面水圧の変化
(D-3は斜面中央部の移動量変化を示す)

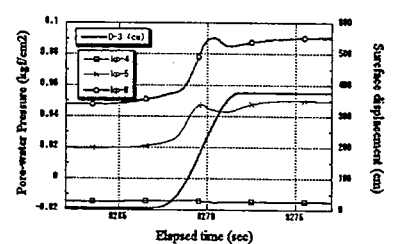


図8 崩壊時の流動土砂中の間隙水圧の変化
(埋設深さはいずれも0.6m)