

降雨強度を変化させた大型斜面模型実験による浸透挙動が崩壊に及ぼす影響

(独) 防災科学技術研究所 ○酒井直樹, 福園輝旗

1. はじめに

斜面崩壊の予測には、どこで(場所)、どの程度(規模)、いつ(時間)が必要である。近年では、降雨指標を用いた土砂災害の予測として、気象庁より“土砂災害警戒情報”として実用化されている。また、防災科研では、降雨指標の高精度化に向けてMPレーダを用いて500m四方の降雨観測およびその予測に取り組み、その成果は一般に公開されている(土砂災害発生予測支援システム(Lapsus)¹⁾)。今後はさらに狭い範囲における予測精度の向上が望まれている。しかし、狭いある特定の急傾斜地における表層崩壊の予測では、その発生頻度が多いにも関わらず、未だ確立されていない。これは崩壊前の変形挙動が極端に小さく、規模も小さいためである。そのため表層崩壊の予測、特に崩壊時間の予測には、崩壊前における斜面内部の情報は不可欠と考えられ、斜面のモニタリングや数値解析からのアプローチを試みている²⁾。そこで、本研究では、実際の斜面崩壊規模に近い大型斜面模型を用いて、大小降雨の経時変化による斜面内の土壌水分および地下水位そして地表面変位を計測し、崩壊に至るメカニズムを考察した。特に本報告では地下水位と地表面変位の関係に注目して考察を行った。

2. 実験模型と崩壊実験の概要

実験は、防災科学技術研究所にある大型降雨実験施設内に大規模斜面模型を作製し実験を行った(写真1)。模型の形状は、総斜面長は、23m(うち斜面部16m)、幅3m、深さ1.6m(土層深1.2m)、高さ7.8mの複合斜面型模型(図1)であり枠組みは鋼製である。水路末端はスリット型擁壁(浸透水は金網を通じて自然排水)で斜面土層を抑止している。水路末端以外は非排水条件である。斜面底面には粗度として、棧が水平方向に一定間隔で固定されている。また、片側壁は強化ガラスを用いて、土層内部の変形状況が外側から確認できるようになっている。

計測には、地表面変位計(D1~D9)、土壌水分計(PW1~PW15)、間隙水圧計(G0~11)を図1に示す位置に設置した。土壌水分計測より飽和度を算出し、間隙水圧計測より土層内の地下水分布を算出している。

試料には、市販の佐原砂を用いた。その粒度特性は、礫分9%、砂分84%、シルト分7%、均等係数 $U_c=4.2$ 、 $D_{20}=0.185$ である。土槽模型は、初期含水比8%の試料を用いて、人力により湿潤密度が 1.45g/cm^3 を目標に作製した。飽和透水係数は、 $2.71\times 10^{-2}(\text{cm/sec})$ である。

3. 実験結果と考察

ケース1では、初期状態(飽和度40%で均質)から、 100mm/h の降雨を与えた。ケース2では、およそ1週間の間に、4回の散水を行い降雨履歴を与えた後、 100mm/h の降雨を与えた。以上の2ケースの実験結果を比較し検討した。

＜ケース1＞ 降雨浸透と地下水位の変化の関係を、図-2に示す。降雨開始後、湿潤前線が基盤に達し、地下水位を形成し始めるまでに、約1時間半かかっている。その後開始2時間後④の水位に達するまでに、水平部、 10° 斜面において地下水位が形成され、 30° 斜面には、まだ水位はない。その後、④→③まで上昇して、斜面上部まで水位が連続的に基盤に沿って形成され、その後③→②→①と基盤とほぼ平行に急激な上昇を続け、崩壊に至っている。また、地表面変位の時間変化(図-3)を追うと、湿潤線が基盤に到着したのとほぼ同時な約5000s前後から変位が発生し始める。その後、④から③に至るまで徐々に変位が増加している。

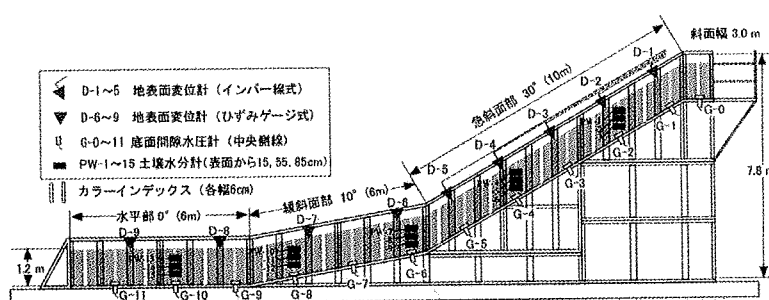


図-1 大型斜面模型の概略図とセンサー設置位置図

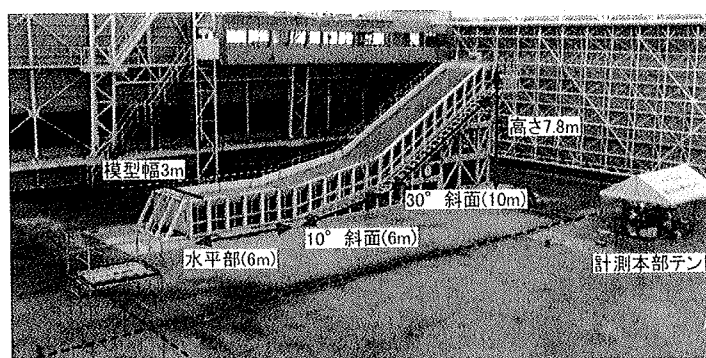


写真-1 大型斜面模型全景

水位が基盤に平行に急激に上昇をしている③→②→①間では、移動速度が急激に大きくなり、崩壊に至っている。崩壊形態は、図-2の四角内に示すように、30° 斜面全体において、水位線下において基盤に平行にすべり線が発生し土塊が一体となって崩壊している。

＜ケース 2＞ 模型斜面に降雨履歴を与えるため、実験前 1 週間の間に①～④まで計 4 回の降雨を与えた（図-4）。図-4には、その降雨イベントとそれぞれに対応する地下水位の経時変化（30° 斜面部）を示した。いずれの降雨に対応する水位変化の場合でも、斜面下部から中部において（G-5,4,3），最大で 20cm 程度の水位が発生しているが、上部までは完全には形成されていない。また、30° 斜面上の地下水は、およそ 1 2 時間程度で完全に消失し、飽和度は斜面鉛直下層にいくほど飽和度が高い（40～60%程度）。降雨履歴としては、30° 斜面には水位がなく、水平部を中心に水が貯留された状態である。

本実験として、降雨履歴期間後の水位を初期状態（図-5 初期水位、一点鎖線で表示）として、ケース 1 と同じ降雨条件（100mm/h）で行った。その時の地下水位挙動（図-5）と地表面変位の経時変化（図-6）を示す。降雨開始後、1 時間 10 分（4200s）ほどで、30° 斜面において水位が上昇し始めた後、④まで水位が上昇した。その 10 分後には斜面上部まで水位が発生（③）し、その後、③→②→①と一気に斜面上で水位が上昇し①の水位で崩壊に至った。このときの変位は③→②の過程で移動速度が大きくなりはじめ、②→①で急激に移動速度が上昇し崩壊に至った。崩壊時のすべり線は、ケース 1 とほぼ同様な傾向で発生している（図-5 四角内）。

以上の 2 つ実験結果より、30° 斜面部において、基盤と平行に水位が上昇し始めると、地表面変位も移動速度を増しはじめ土塊として一体で運動し、その後も水位の上昇が続くと変位速度も急激に上昇し崩壊に至ることがわかった。これは、砂質層が降雨浸透により飽和度が上昇し強度が低下したことで、変形が加速することが考えられ、今後、土質力学的な検討が必要である。G5 点での破壊時の水位を比べると、ケース 1 では 80cm（図-2 上矢印）、ケース 2 では 85cm（図-5 上矢印）とほぼ同じ水深に達した時に崩壊に至っており、この条件での限界水深の可能性が考えられる。さらに崩壊時間は、降雨履歴に大きく左右される、つまり斜面の貯留状態（水位）に依存するため、崩壊の早期予測には、水位のモニタリングが有効である。

参考文献

1) <http://lapsus.bosai.go.jp/lapsus/dosha/top.htm>

2) 笹原克夫・酒井直樹・栗原淳一・孫躍・阪上最一、

2007、降雨浸透に伴う斜面の地表面変位及び崩壊時刻の予測への FEM 解析手法の適用、第 42 回地盤工学会研究発表会。

＜ケース 1＞

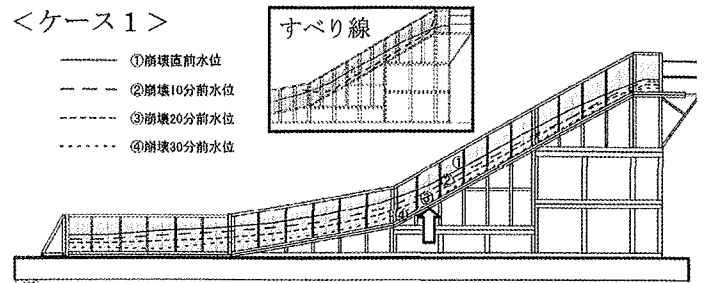


図-2 土槽内での地下水位線の推移（崩壊 30 分前から）

（降雨開始から崩壊まで、約 7800 s. 上矢印は G-5）

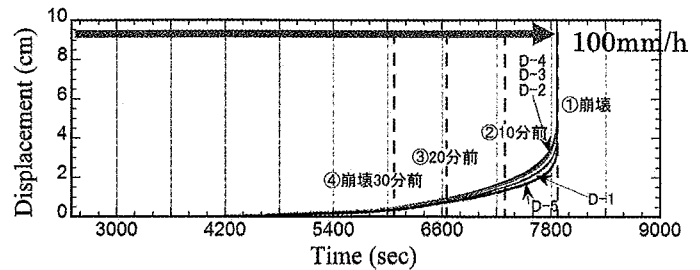


図-3 降雨実験時の地表面変位（30° 斜面部、D-1,2,3,4,5）

＜ケース 2＞

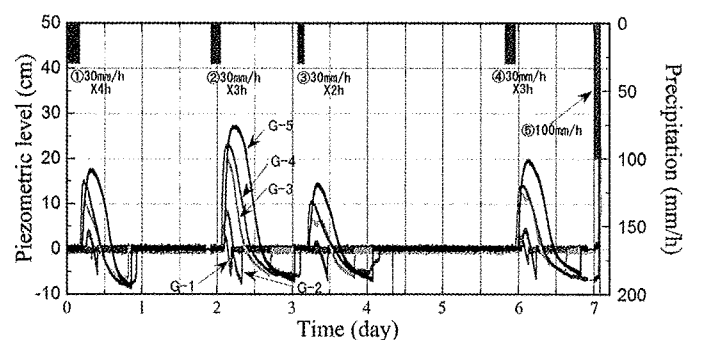


図-4 30° 斜面部での地下水位の変化（⑤が本実験）

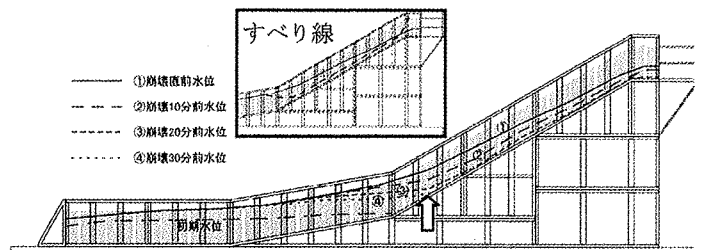


図-5 土槽内での地下水位線の推移（崩壊 30 分前から）

（降雨開始から崩壊まで、約 6100 s. 上矢印は G-5）

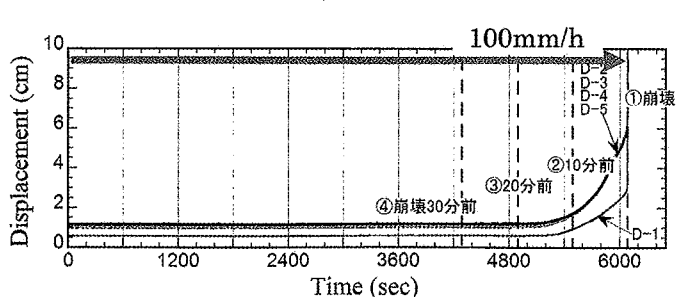


図-6 降雨実験時の地表面変位（30° 斜面部、D-1,2,3,4,5）

（変位がゼロではないのは、降雨履歴時の累積のため）