

地下水の上昇による斜面崩壊の実験的考察

東京都市大学 学生会員 ○帆保康幸
 (独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 正会員 平岡伸隆
 東京都市大学 正会員 伊藤和也

1. はじめに

過去の斜面崩壊による労働災害の6割は降雨や積雪など水に関連して発生している¹⁾。しかし、掘削工事中の斜面安定性に水の存在がどのように影響するのか、また、どのような対策が有効なのか十分に検討されていない。そこで地下水の上昇による斜面崩壊危険度の把握をすることを目的とし、遠心模型実験を行った。

2. 実験概要

遠心場で地下水上昇を再現するため、土槽給水面および排水面の水位コントロールが可能な土槽を作製した。土槽の右側（法肩側）で給水、左側（法先側）で排水を行う。左右の突き出た壁は一部が網目状となっており、まず給水側水位コントロール領域に水が溜まり、網目状の壁から法面側に水が染み込み地下水が形成される。給水側と排水側の壁内の電極棒はモーターによって上下する仕組みとなっており、電極棒が水面に接する高さまで水位が形成される。排水側水位コントロール領域も給水側同様に水が溜まるようになっており、水位を調節することが出来る。

実験モデルを簡略化するため、均一の斜面を整形した。土試料は茨城県笠間産まさ土を使用した。遠心場での実験では粒径の大きさによる影響をより受けてしまうため、より地山の崩壊を再現するために自動ふるい機を使用し、まさ土を2mmふるいにかけた。物性試験の結果を表1に示す。

土槽の作製においては設定乾燥密度 $\rho_d=1.50\text{ g/cm}^3$ (Dc=90%)、初期含水比は最適含水比である17.3%とし、6層構成で締め固めを行い、その後掘削を行った。土槽の側面には摩擦を無くするためにグリスを塗り、モビロンフィルムを張り付けた。

実験は勾配40度と75度の2ケース行い、どちらも土槽のスケールは1/20モデルとし、設定遠心加速度は20G、斜面高さ5mの斜面を模擬した。2ケースの斜面勾配選定理由として勾配40度は日本道路協会が発刊する道路土工 切土工・斜面安定工指針内の切土に対する標準法面勾配²⁾の中で密実でない砂質土5~10mの最大勾配として1:1.2(39.8度)が示されていること、

勾配75度は手掘りでの明かり掘削作業における掘削面の勾配と高さの基準である労働安全衛生規則第356条の中で「斜面高さ5m以上の岩盤または堅い粘土からなる地山」、「斜面高さ2mから5mの間のその他の地山」では掘削面の勾配が75度以下と定められていることから採用した。本実験では土槽作製後、1G場で給水側と排水側の水位をどちらも5cm(20G場に換算すると1m)に設定した状態で通水させ、あらかじめ地下水を形成させた。本実験では土槽を遠心模型実験装置に設置後、設定遠心加速度を5G、10G、15G、20Gと段階的に上昇させた。

表1 まさ土(2mmふるい)の物性試験結果

物性試験結果		
一般	土粒子密度 $\rho_s\text{ g/cm}^3$	2.662
	透水係数 $k_{15}\text{ m/s}$	5.15×10^{-6}
	設定乾燥密度 $\rho_d\text{ g/cm}^3$	1.50
粒度	礫分(2~75mm) %	0
	砂分(0.075~2mm) %	82.7
	シルト分(0.005~0.075mm) %	11
	粘土分(0.005mm未満) %	6.3
	最大粒径 mm	2
	均等係数 U_c	27
締め固め	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}\text{ g/cm}^3$	1.668
	最適含水比 $W_{opt}\text{ %}$	17.3

キーワード 斜面崩壊, 遠心模型実験, 地下水, パイプ流, 掘削, 労働災害

連絡先〒158-0087 東京都世田谷区玉堤1-28-7 TEL03-5707-0104 E-mail:g1418077@tcu.ac.jp

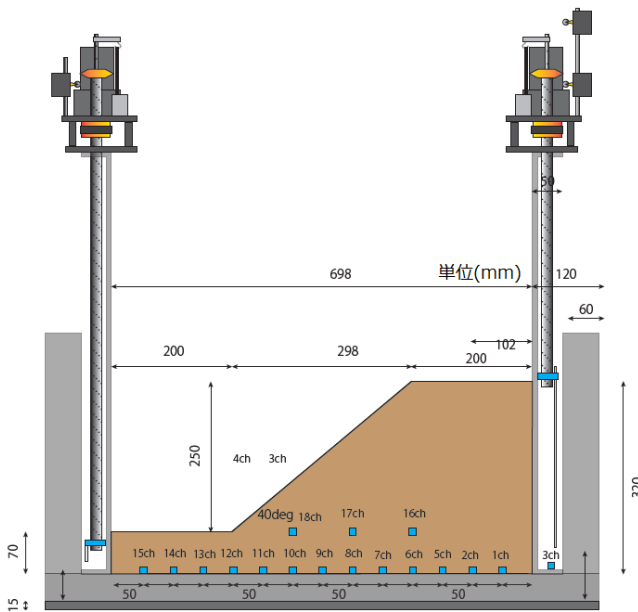


図1 勾配40度の斜面模型

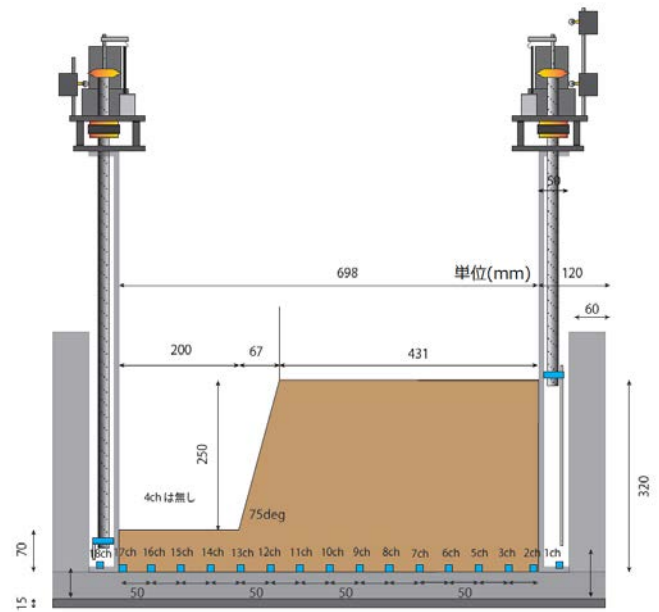


図2 勾配75度の斜面模型

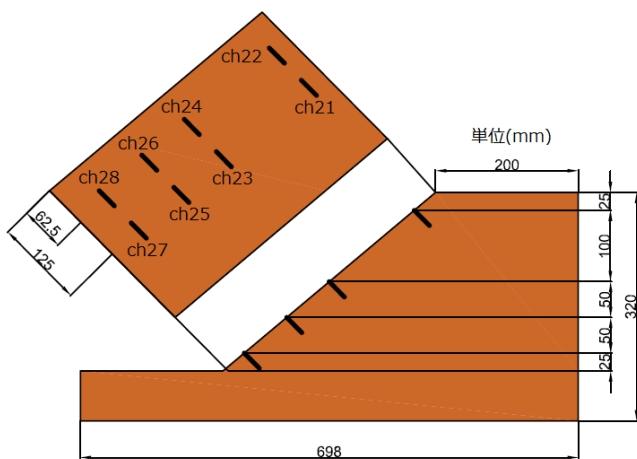


図3 勾配40度斜面の表層ひずみ計

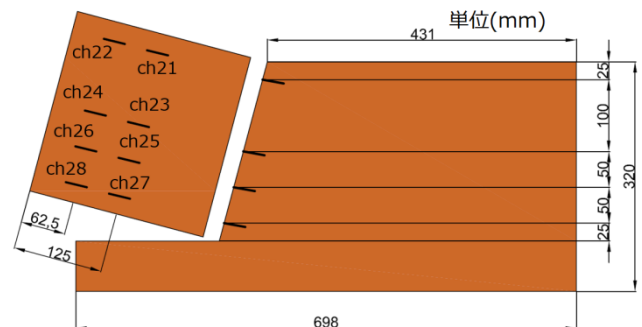


図4 勾配75度斜面の表層ひずみ計

遠心加速度が20 G 到達後、給水側の水位を1分に1 cm のペースで上昇させ(20 G 場に換算すると20 cm)、斜面内の地下水位が上昇し斜面が崩壊するまで給水を続けた。勾配40度と勾配75度の斜面どちらにも斜面内水位の変化による間隙圧力の変化を計測するために土槽内には間隙水圧計を設置し、法面上には変形を計測するため表層ひずみ計を8箇所に設置した。図1に勾配40度土槽、図2に勾配75度土槽、図3に勾配40度斜面に設置した表層ひずみ計、図4に勾配75度斜面に設置した表層ひずみ計を示す。

3. 実験結果

実験時間は水位上昇開始5分前を0秒としデータ整理を行った。勾配40度斜面での地下水上昇中の斜面を図5に示し、実験終了後の斜面を図6に示す。圧力水頭を土槽のスケール内にプロットしたものを図7に示し、ひずみの時系列変化を図8に示す。

勾配40度斜面では開始から551秒後に法先からの水平部に飽和帯が確認され、861秒後に水平部は全て飽和帯になった。その後法先は徐々に浸透性崩壊を起こし、開始から1093秒後に表層ひずみ計ch28の周辺の崩壊を確認した。さらに1208秒後ch28の周りが崩れ続けた。その後も給水を続けると水位上昇開始後1537秒

から 1781 秒にかけて水みち周辺で断続的に浸透性崩壊が発生し, 1628 秒後には ch28 周辺の崩壊箇所からパイプ流が確認され, 1781 秒後に浸透性崩壊が表層ひずみ計 ch26 の上段に設置した ch26 手前まで達した. パイプ流が発生した近傍で高さ 1.5 m の土砂が崩壊し流出した. 約 1900 秒後に給水タンクの水が無くなったため実験を終了した.

勾配 75 度斜面での地下水上昇中の斜面が浸透性崩壊をし始めた様子, ch26 付近が崩壊した様子, 法肩が崩落した瞬間の様子を図 9 に示す. 圧力水頭を土槽のスケール内にプロットしたものを図 10 に示し, ひずみの時系列変化を図 11 に示す.

勾配 75 度斜面では開始から 625 秒で法先からの水平部に飽和帯が確認され, 1046 秒後表層ひずみ計 ch28 の下で浸透性崩壊が始まり, 1074 秒後に水平部は全て飽和帯になった. その後も給水を続けると開始から 1279 秒後に ch28 周辺が崩壊し, 1468 秒で ch26, 1469 秒で ch24, 1490 秒で ch23 付近がそれぞれ短時間の間で崩壊し, 1492 秒で中央から奥側の法肩が崩落した. 1577 秒後に給水を終了し, 1 分に 1 cm のペース (20 G 場で換算すると 20 cm) で給水側の水位コントロール領域の水位を下降させ始めたが, 1690 秒後に中央から手前の法肩が崩落した. 各ケースの実験で発生したイベント時間の比較を表 2 に示す.

4. 考察

勾配 40 度斜面では斜面左側にパイプ流が発生し, その周辺が浸透力によって徐々に崩壊し, 法肩付近での崩壊が確認されなかった. 一方で, 勾配 75 度斜面では法先が浸透性崩壊を起こし, 法先が崩壊したことによって支持力を失い, 法肩が崩落した. 斜面中腹からパイプ流を伴った崩壊が発生し, 勾配 40 度では安定となったが, 75 度は直後に法肩から大崩壊が発生した.

まず勾配 40 度斜面の法肩が崩壊しなかった要因として, 1) 初めに弱部となった斜面左側の崩壊箇所においてパイプ流が発生したことにより, 供給した水の多くがそこを流れ, 排水工の役割をした. 2) パイプ流の発生によって斜面下部の一部が小規模に崩壊しても 20 G 場換算の斜面高さ 5 m, 勾配 40 度斜面では大きな崩壊に至るまでのエネルギーが無かった. 3) 約 1900 秒後に給水タンクの水が無くなり, 以降水位が低下し始めたため, という 3 つの要因が挙げられる.



図 5 地下水上昇中の勾配 40 度斜面



図 6 実験終了後の勾配 40 度斜面

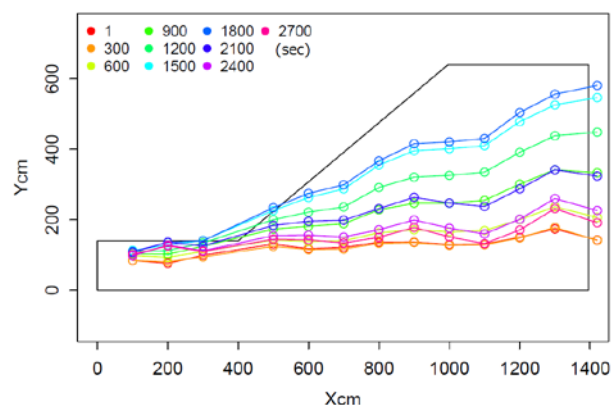


図 7 40 度斜面の水位上昇による圧力変化

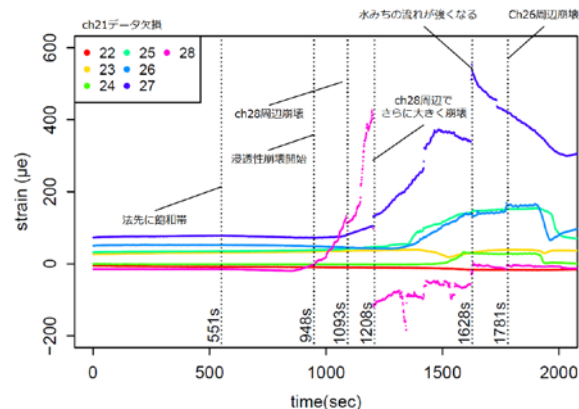


図 8 勾配 40 度斜面上のひずみ時系列変化



(a) 浸透性崩壊開始時 (b) ch26 付近崩壊 (c) 法肩崩落直後

図 9 斜面 75 度の土槽

一方で 75 度は急勾配のため、浸透性崩壊によって不安定化した地山が大きく崩壊したと思われる。崩壊現象の前兆となる法先付近の飽和や地下水位は、間隙水圧計での計測によって把握できる。また、ひずみ計の結果より、各ケースの ch28 周辺の崩壊、では 40 度のケースでは約 2 分、75 度のケースでは 4 分、ch26 周辺の崩壊について、40 度のケースでは約 7 分、75 度のケースでは約 1 分前にひずみ計の上昇が確認でき、適切な個所に計測機器を設置することで予兆が捉えられることが分かった。

5. まとめ

本研究では、異なる勾配を有したモデル土槽に対して地下水を上昇させ、その崩壊過程を観察した。浸透性崩壊が確認でき、急勾配の斜面については、法先崩壊後に法肩から大崩壊が発生した。地下水による斜面崩壊は急速な現象であるため、実斜面においても湧水が確認された場合や法先の小規模な崩壊が発生した場合には、その後にパイプ流を伴った崩壊や大規模な崩壊が発生する危険性がある。法先付近での計測や日常点検を行うことにより、斜面の弱部を早期に発見することが重要であるといえる。

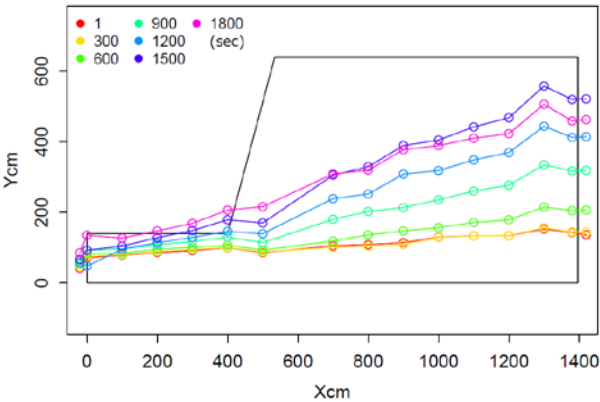


図 10 75 度斜面の水位上昇による圧力変化

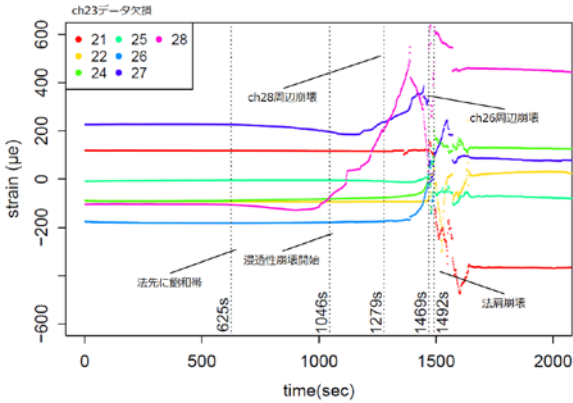


図 11 勾配 75 度斜面上のひずみ時系列変化

参考文献

- 1) 伊藤和也, 豊澤康男, Surendra B.TAMRAKAR, 堀井宣幸: 建設工事中の斜面崩壊による労働災害の調査・分析, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 24-25, 2005.
- 2) 社団法人日本道路協会, 道路土工切土工・斜面安定工指針, p.136, 2009.

表 2 2 ケースのイベント比較

イベント	40°	75°
法先に飽和帯	551 sec	625 sec
浸透性崩壊開始	948 sec	1046 sec
ch28付近崩壊	1093 sec	1279 sec
ch26付近崩壊	1781 sec	1468 sec
ch24付近崩壊	—	1469 sec
法肩崩落	—	1492 sec