

令和元年6月11日現在

機関番号：23201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12857

研究課題名(和文) Squeezing型土砂移動現象の実態を探る

研究課題名(英文) Investigation of movement phenomena for the squeezing-out landslide

研究代表者

古谷 元 (Furuya, Gen)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：80378926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：Squeezing型の移動現象を模型実験レベルで再現し、詳細な動態計測を通じて、その発生機構の解明を展開した。実験結果よりこの現象は、堆積域地盤の透水性が大きく関与しており、飽和単層条件では、透水性の低い材料ほど地盤の変形範囲が大きく、土塊の載荷により絞り出された堆積域の地盤が新たに形成するすべり面の数も多い。単層地盤で水位を変化させた場合、水位が高いほど破壊領域は大きくなる。透水性が異なる二層地盤では、下層が低透水性の材料の場合に、深いすべり面を有する破壊が幅広く発生する傾向が認められる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、我が国において土砂移動の現象論を究明する上で空白域になっているSqueezing型の土砂移動現象について、模型実験での詳細な計測を通じて、地すべり・斜面崩壊土砂の載荷による破壊の伝播と新たに発生する移動土塊の変形過程について解明を行った。Squeezing型の土砂移動の範囲は、土砂堆積域における透水性が大きく関与していることが解明できたことから、より詳細な土砂災害危険区域の設定や、斜面・地盤対策箇所の効率的な計画の立案への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：To understand the movement mechanism of the squeezing-out landslide, we performed a series of model tests in a flume. Through overserving of the deformation and monitoring of the pore-water pressure within the ground of the landslide accumulation zone, we found that: 1) The movement of this type of landsliding is greatly dependent on the permeability of the soil layers within the ground on the accumulation zone. 2) In case of homogenous soil layer, with decrease of permeability, resultant deforming increases, and the number of sliding surfaces causing squeezing-out in the accumulation zone due to the landsliding mass loading. 3) The squeezing-out phenomenon also depends on the groundwater level within the ground on the accumulation zone; higher groundwater level leads wider deforming area. 4) If the ground of the accumulation zone consists of two soil layers and the underlaid soil layer has smaller permeability, the sliding surface becomes deeper and wider deforming area.

研究分野：複合領域

キーワード：模型実験 変形範囲 破壊の伝播 間隙水圧 透水性 すべり面

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地すべりや斜面崩壊の一般的な形態は、地形学の観点から Varnes(1978)により示されており、崩壊発生域の土砂(土塊)が形状をある程度保ったまま、もしくは変形しながら地形面を移動(下降)し、最終的に停止することが広く知られている。一方、Zaruba & Menci(1969)は、地形学・地質学の観点での地すべり踏査結果や他の研究者の事例をレビューし、Varnes が示した形態の他に、移動土塊が停止する直前に土塊前方の地盤を絞りだし、破壊域を伝播させて新たな移動土塊を形成する形態(Squeezing 型の土砂移動)を指摘した。同様に大八木(2004)は、地すべりの空間構成領域と変形構造について整理し、その中で移動土塊の末端部(堆積域)付近に準変動域とした新たな変形領域が存在する場合があることを示した。上記の破壊域を伝播させるような移動土塊の形態は、海外では地形学・地質学的観点より報告されており、日本国内でも事例は多くないものの、権現山地すべりや根府川駅地すべり(釜井, 1991)、および宝塚ゴルフ場地すべり(横山他, 1995)が報告されている。しかしながら、先行事例では、詳細な内部構造の計測と力学的な検討は実施されていないのが実状である。

近年、我国では、1999年広島豪雨災害を契機にして土砂災害防止法が施行され、住民へ土砂災害警戒区域・特別警戒区域の周知が図られるようになった。この防止法の中で、地すべり・斜面崩壊による警戒区域は、破壊された斜面(移動土塊)が地形に沿った移動を前提とした危険範囲が示されており、移動土塊による新たな破壊域の形成の考慮までには至っていない。したがって、斜面災害の防災・減災施策、特にソフト面でもより精度の高い検討を行う上では、Squeezing 型の土砂移動の実態に関して理解を深めることが重要である。そのためには、移動土塊の堆積域の挙動に関する計測を実施し、時系列的な変形過程の解明と力学的な解釈に関する知見の蓄積が必要になる。

2. 研究の目的

本研究では、これまで国内外で力学的・現象論的に詳細な内部構造と移動機構について解明されていない Squeezing 型の土砂移動に対して、模型実験を通じて地盤変形、間隙水圧等の動態を計測し、これら動態の全容を解明することを目的とした。特に、土塊の堆積域地盤において、試料粒径(透水性)、水位条件を変えた場合の現象の発生状況の解明と、水に粘性を与えることにより詳細な地盤変形、間隙水圧の動態計測の試み、画像解析で時系列的な観察を展開し、Squeezing 型の土砂移動現象の発生機構・条件の実態を探ることとした。

3. 研究の方法

本研究における模型実験は、富山県立大学(本学)の他、森林総合研究所の人工降雨装置付き大型模型斜面で実施した。本学では、図1に示すアクリル製の土槽(移動域を想定)と水槽(堆積域を想定)を組み合わせた装置を用いた。模型地盤は、この水槽内に試料(珪砂)を詰めて作成し、ひずみ計を埋設した。間隙水圧計は水槽底部に取り付けた(一部の試験では、埋設した)。移動土塊(崩土)は、土嚢袋に詰めた砂(16kg)とし、土槽の一端を吊り上げて傾斜を 30° にした後、この土嚢袋を上端より流下させた。実験実施の差異には、並行して水槽側面にて動画撮影を実施した。

森林総合研究所では、人工降雨による実物大に近いスケールの崩壊実験である。実験装置は、幅0.9mで斜面部(移動域~堆積域)が2段階の傾斜を有する土槽(上部が長さ4mで傾斜 32° 、下部が長さ4mで傾斜 10° の構造)であり、土槽内に桜川砂を詰めた斜面とした。この地盤に間隙水圧計とひずみ計、そして側面にマーカーを埋設し(図2)、人工降雨装置より降雨強度80mm/hの降水を散水させて上部側で崩壊を発生させた。この時も側面にて動画撮影を実施した。なお、両実験装置では、ひずみ計および間隙水圧計のサンプリング間隔を100Hzとした。

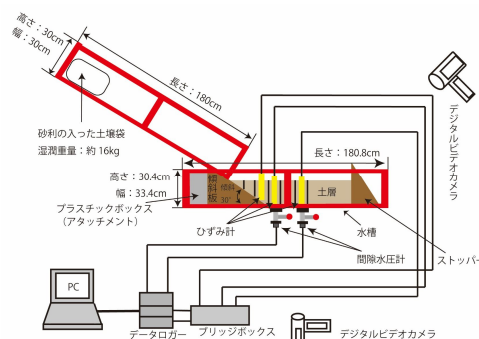


図1 実験装置(本学)

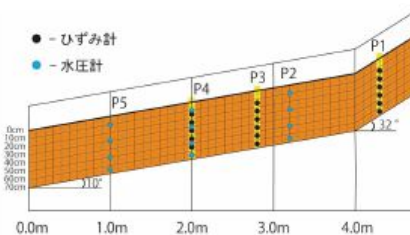


図2 大型模型実験時のセンサ配置図

4. 研究成果

(1) 飽和した堆積域地盤における荷重実験

この荷重実験は、表1に示す条件(計7条件)で実施した。この表には、発生したすべり面の本数、すべり面の最大深度、変形距離、および堆積域の透水係数(定水位透水試験による実測値)が示されている。すべり面の発生本数は、粒径が小さくなるほど多くなる傾向があった。なお、一部の試験では、土塊が荷重された際に、ごく表層が削られた影響で発生した土砂移動が認められたが、今回は2次的に生じたものとして考え、解析に使用していない。図3に単層

-5の実験条件の実験後の状況を示す。すべり面の形成は、土塊が載荷直後に1本目のすべりが発生し、やや遅れて2本目、そして3本目の順に絞り出される形態(Squeezing)で発生した。図3に示すひずみ計と間隙水圧計の計測より、1本目のすべりが発生後、間隙水圧の変化が伝播した後にひずみが発生することが確認された。それぞれの箇所における時間的な遅れ(伝播)は、0.03~0.10秒であった。他の条件下においても、すべり面の発生数に違いはあるが、間隙水圧の伝播時間は、ほぼ同様であった。図4は本条件下における透水係数と変形距離の関係である。この図より、透水係数の値が大きくなるにつれて変形距離は短くなり、非常に良い相関($R^2=0.94$)であることが明らかになった。

(2) 飽和二層地盤における載荷実験

この実験は、堆積域が上層部と下層部で異なる材料で構成された(堆積時の土砂運搬等の環境が異なる)場合を想定したものである。堆積域における地盤は、水槽底部から10cmまで試料を詰め、粒径を変えた試料を詰めた構造とした。用いた材料は、珪砂6号と8号のほか、市販の砂利とした。試料の組み合わせを表2、および二層-4の実験結果を図5に示す。飽和二層条件における実験においても、単層と同様に堆積域ですべり面の発達が認められた。ただし、これらの図表に示すように、それぞれの条件において変形距離は、差異がほとんど生じないが、粒径の大小の組み合わせにより、側面から撮影した画像より計測したすべり面深度が異なる結果になった。特に下層に粒径が大きい(透水性が高い)材料で構成される場合は、上層ですべり面が形成される結果になった。なお、二層-3、および4の条件では、側面部のすべり面深度が浅かったが、ひずみ計では深部にひずみが確認された。この種の実験では、水槽の側面摩擦の影響が境界問題としてあげられる。今

回のケースでは、二層-3、および4の下層部が上層部より粒径が大きいために摩擦が増大し、変形はより上層部に出やすかったものと推察された。このことは、堆積域が谷埋め等の埋没地形が想定される場合においては、変形の横断方向における影響についての新たな検討が生じるものと思われる。

(3) 堆積域で水位条件を変えた載荷実験

堆積域で水位条件を変えた(不飽和地盤)載荷実験では、表3に示すように試料に珪砂8号を用い、水位を底部から5cm、および10cmとした(便宜的にそれぞれ不飽和-1、不飽和-2と呼ぶ)。この表において、不飽和-1におけるすべり面数が2(3)と表記されている。これは、土塊が載荷された箇所付近では、すべり面の数が3本であったが、前方へすべりが発達する過程で、すべり面の形成が次第に不明瞭になったためである。図6に不飽和-2の実験終了時の状況を示す。この時は、すべり面は明瞭に3本発生したことが確認できた。これらの結果と水位が20cm(飽和条件)の結果も加えて、水位と変形距離との関係を整理した結果が図7である。この図より水位が高いほど変形距離が大きくなり、非常に良い相関を示すことが分かる($R^2=0.99$)。実地盤において堆積域が

表1 飽和単層条件における試料条件と結果

実験No.	珪砂	すべり面数	すべり面深度(cm)	変形距離(cm)	透水係数(m/sec)
単層-1	6号	1	12.1	50.8	0.0175
単層-2	6号+7号(7:3)	2	14.9	61.1	0.0068
単層-3	6号+7号(1:1)	2	14.9	69.8	0.0045
単層-4	7号	2	14.4	63.1	0.0044
単層-5	7号+8号(7:3)	3	17.0	68.5	0.0029
単層-6	7号+8号(1:1)	3	17.9	73.3	0.0018
単層-7	8号	3	16.0	78.1	0.0011

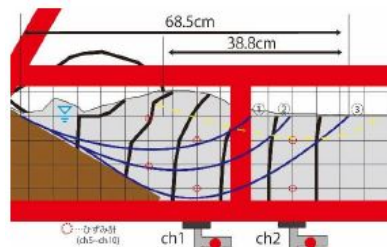


図3 単層-5の実験終了時の状況

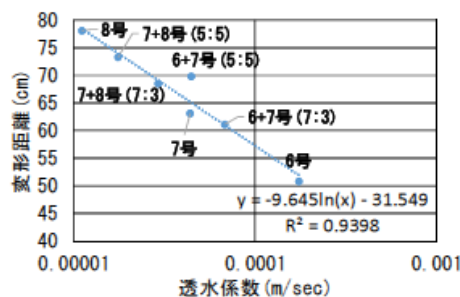


図4 透水係数と変形距離の関係

表2 飽和二層条件における試料条件と実験結果

実験No.	試料	すべり面数	すべり面深度(cm)	変形距離(cm)
二層-1	上層6号;下層8号	2	15.7	62.3
二層-2	上層砂利;下層8号	1	16.5	63.5
二層-3	上層8号;下層6号	3	9.3	66.6
二層-4	上層8号;下層砂利	3	10.1	65.1

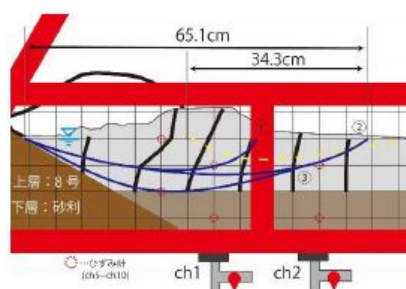


図5 二層-4の実験終了時の状況

表3 堆積域の水位条件および実験結果

実験No.	珪砂	すべり面数	底面からの水位(cm)	すべり面深度(cm)	変形距離(cm)
不飽和-1	8号	2(3)	5	11.6	59.1
不飽和-2	8号	3	10	16.1	70.2

飽和している例は希であるが，図7より Squeezing による変形範囲は，材料の粒径（透水性）だけでなく，水位条件も大きく関与することを示している。

(4) 水の粘性を変えた载荷実験

模型実験では，そのスケールが関連することにより，現象の発生から停止までの経過時間に影響を与える。このような問題を解決するためには，高時間分解能の動的記録器の使用が考えられるが，コストの面に難がある。ここでは，低コストで詳細な現象を把握することを目的として，水にメトロース（メチルセルロース）を溶かして水の粘性を変え，現象発揮の継続時間を延長することを期待した実験を試行錯誤的に実施した。この実験では，試料を珪砂8号とし，メトロース溶液濃度は2.0, 1.0, 0.5, および0.125%とした。その結果，0.125~1.0%までは，濃度が濃なるにつれて現象の発現に若干のタイムラグが発生したが，ひずみや間隙水圧の数値は小さくなる傾向になった。濃度2.0%では，今回使用したセンサ類では，明瞭な変化の検出まで至らなかった。したがって，本研究の場合では，濃度1.0%が適していると判断した。表4は，堆積域を飽和させる際に水を使用した場合と1%のメトロース溶液を使用した場合の間の現象開始の時間の遅れ（タイムラグ）をまとめたものである。この表よりタイムラグは，0.01~0.06秒であり，使用したデータロガーの精度で差異を計測できる結果であった。この結果は，水に粘性を与えることにより，現象の出現と継続時間を遅延させることが可能であることを示している。しかしながら，模型のスケールと適切な粘性の関係を提示するところまでは至っていない。この点は，遠心载荷の場での検討を含めて今後の課題としたい。

(5) 人工降雨による大型模型実験

大型模型実験では，散水を開始してから2時間9分後（総降雨量：172mm）に崩壊が発生し，約6秒間崩壊現象が継続した。この実験では，当初，上部斜面側で広範囲の崩壊発生を想定したが，図2中の斜面尻（P1付近）から，小規模な崩壊が段階的に（11回）後方へ拡大する形態となり，ひずみや間隙水圧の伝播状況を捉えることができなかった。この理由より映像からのマーカ－の挙動と崩壊時の間隙水圧の計測よ

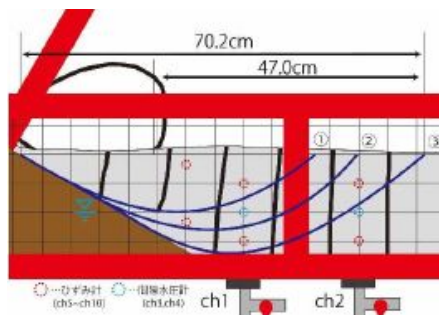


図6 不飽和-2（水位10cm）の実験終了時の状況

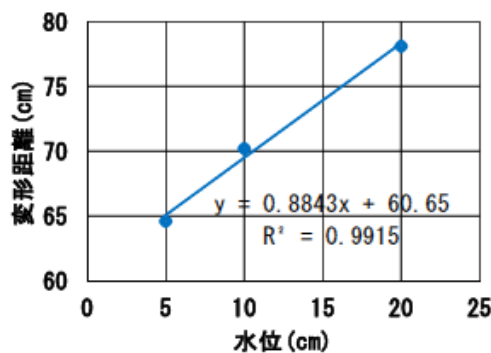


図7 水位と変形距離の関係（珪砂8号）

表4 水とメトロース1%溶液の間における土塊载荷後から現象発現までのタイムラグ

箇所	ch番号および計器		位置	変化開始時間		タイムラグ (sec)
	番号	種別		水	M 1%	
B	ch7	ひずみ	底部から15cm	0.02	0.03	0.01
	ch8		底部から5cm	0.05	0.08	0.03
	ch1	間隙水圧	底部	0.02	0.01	0.01
	ch3		底部から10cm	0.01	0.02	0.01
C	ch9	ひずみ	底部から15cm	0.07	0.10	0.03
	ch10		底部から5cm	0.08	0.12	0.04
	ch2	間隙水圧	底部	0.02	0.08	0.06
	ch4		底部から10cm	0.04	0.10	0.06

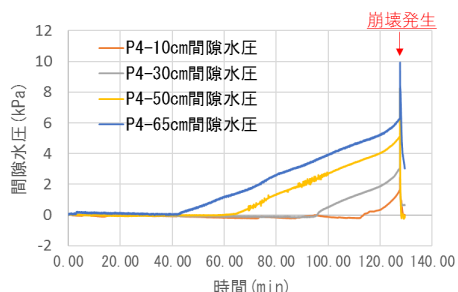
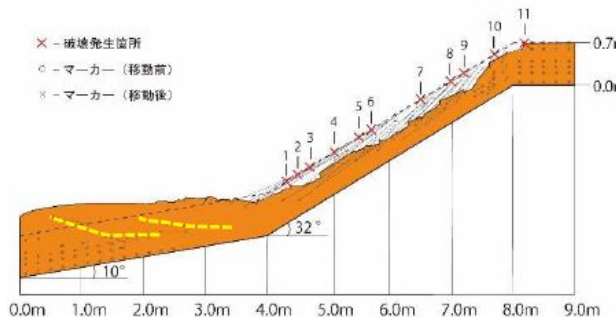
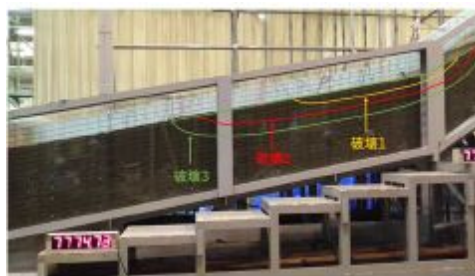


図8 間隙水圧計測結果

図9 大型模型実験における堆積域の変形状況

り現象の確認を実施した。図8はP4における間隙水圧の計測結果である。この図よりP4で飽和した後に最初の崩壊が発生した。映像では、図9に示すように最初の崩壊から3回目まで捉えることができ、マーカーの移動状況より、少なくとも堆積域の2箇所で絞り出されるような形態ですべり面の形成が確認できた。

<引用文献>

- 大八木規夫(2004):地すべり構造,地すべり 地形地質的認識と用語,日本地すべり学会, pp. 29-45.
釜井俊孝(1991):squeeze型地すべりの発生機構 1923年利根川駅地すべり, Journal of Japan Landslide Society 27-4, pp.1-8.
Varnes, D. J. (1978): Slope movement types and processes, Landslides-Analysis and control, eds. Schuster, R. L. et al., Transportation research board, National Research Council, pp. 11-33.
横山俊治, 藤田崇, 菊山浩喜(1995): 1995年兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書, pp.61-77.
Zaruba, Q. and Mencl, V. (1969) Landslides and their control, Elsevier, 205p.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- 濱崎 英作, 丸井 英明, 池田 浩二, 山邊 康晴, 古谷 元, 石川 晴和, 岩盤地すべりにおける定常運動から崩壊に至る加速を表現する質点系ダンパーモデル, 日本地すべり学会誌, 査読有, Vol. 56, No. 2, 2018, pp. 13-20.
佐藤 壽則, 小林 淳一, 伊藤 健二, 稗田 佳彦, 渡部 直喜, 古谷 元, 電磁探査による高塩分濃度地下水湧出機構の可視化 - 新潟県宇津俣地すべり地の適用例 -, 日本地すべり学会誌, 査読有, Vol. 54, No. 5, 2017, pp. 12-17.
古谷 元, 村尾 英彦, 松浦 純生, 南砺市上百瀬で発生した土砂災害, 砂防学会誌, 査読有, Vol. 70, No. 2, 2017, pp. 26-29.

〔学会発表〕(計 6 件)

- 長谷川 雅俊, 古谷 元, 藤森 洋允, 王 功輝, 崩土載荷時における堆積域地盤の変形に関する実験, 日本応用地質学会北陸支部, 2019.
梅島 樹, 古谷 元, 王 功輝, 模型実験による天然ダムの耐侵食性に関する検討, 日本応用地質学会北陸支部, 2019.
長谷川 雅俊, 古谷 元, 藤森 洋允, 王 功輝, 小川 峻, 崩壊土砂載荷時における破壊の伝播に関する研究, 日本地すべり学会, 2018.
長谷川 雅俊, 古谷 元, 寺嶋 智己, 王 功輝, 服部 克巳, 浅野 志穂, 落合 博貴, 崩壊土砂載荷時における土層変形の計測, 日本応用地質学会北陸支部, 2018.
古谷 元, 小川 峻, 地すべり土塊による絞り出しに関する予察的研究, 日本地すべり学会, 2016.
濱崎 英作, 丸井 英明, 加藤 猛士, 古谷 元, 王 純祥, 地すべり移動速度予測のためのダンパー質点系モデル, 日本地すべり学会, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計 0 件)
取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 王 功輝

ローマ字氏名:(WANG Gonghui)