

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06555

研究課題名(和文) 短時間強雨の増加に対応した盛土構造物の安定性評価に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Evaluation of embankment stability for torrential rainfall in short period

研究代表者

森 啓年 (Mori, Hirotoshi)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：20355803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、降雨による法面への浸透水のみでなく、天端舗装からの排水集中による影響も考慮して、盛土や斜面等のすべりの発生過程をシミュレーション可能な解析プログラムの開発を目的として、模型実験と数値解析を実施した。

模型実験の結果、降雨のみでは深いすべりが起こる可能性は低く、排水集中により、急速に浸潤面が上昇し、深いすべりが発生することが確認された。浸透流解析と円弧すべり解析の結果、模型実験におけるすべりの発生の有無を評価することができた。変形量解析の結果、模型実験と比較して解析の変形量が大きい結果となったが、排水集中の程度によるすべりの有無、発生過程、規模の差違を確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の実施により、盛土や斜面のすべりに与える降雨の影響について、その解明が進んだ。今後、盛土や斜面の効果的かつ効率的な対策の実施に寄与することが期待される。

また、本研究で開発した粒子法による解析技術により、すべりの有無、過程、規模について再現がある程度可能であることが確認された。今後、盛土や斜面から崩壊した土砂の到達距離を計算し、それをもとに宅地やインフラ等の土砂災害に対するリスク評価に使用できる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on the slip failure of embankments by torrential rainfall including drainage from its crest. The model experiments and numerical analysis are carried out to evaluate the embankment stability under the situation.

The experiment results indicated that the embankment remained stable in case for only rainfall. The additional drainage from its crest severely decrease the stability. The numerical analysis by the seepage analysis, the circular slip analysis and the smoothed particle hydrodynamics successfully represented the results of the model experiments for the occurrence, the process and scale of the slip of embankment.

研究分野：地盤工学

キーワード：盛土 浸透 降雨 すべり

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2015年8月の台風15号に伴う降雨により、筑後川の河川堤防では天端法肩からの深いすべりが川表の法面に発生した(図1-1)。この原因は堤防天端のアスファルト舗装(以下、天端舗装)の排水不良により、堤防縦断方向からも雨水排水がすべりの発生箇所集中して流入(以下、排水集中)したためと考えられている。全国的に、集中豪雨が増加する傾向にある中、同様の被災は全国の河川堤防で頻発している。

### 2. 研究の目的

本研究は、降雨による法面への浸透水のみでなく、排水集中による影響も考慮して、盛土や斜面等のすべりの発生過程をシミュレーション可能な解析プログラムの開発を目的として実施した。

### 3. 研究の方法

河川堤防を想定した小型模型を作製し、降雨のみを与えた場合と排水集中も与えた場合について実験し、その際の小型模型の変形状況について把握した。あわせて、その模型実験の結果を、河川堤防の設計において一般的に用いられている浸透流解析と円弧すべり解析を用いた数値解析により再現した。さらに、盛土の変形を再現できる粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法による解析プログラムを開発し、すべりの発生過程と規模についても再現を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) 模型実験

模型実験は実験 A 及び実験 B の 2 つから構成されている。実験 A では降雨のみによるすべりへの影響を、実験 B では降雨に加え排水集中によるすべりへの影響をそれぞれ観察した。実験 A 及び実験 B ともに、前述の筑後川の被災箇所を参考に、図 4-1 に示す小型模型を用いた。旧堤(粘性土:カオリン粘土)が中心部に存在する堤体(砂質土:宇部まさ土)を、基礎地盤上(粘性土:カオリン粘土)に半断面(堤高 250mm, 天端幅 100mm, 法勾配 1:1.5, 奥行き 150mm, 締固め度 78.5%)で作製した。また、天端舗装を模擬し、遮水シートを設置した。本実験で用いたカオリン粘土と宇部まさ土の各種土質試験結果を表 4-1、粒度分布を図 4-2 に示す。



図 1-1 筑後川堤防の法面すべり

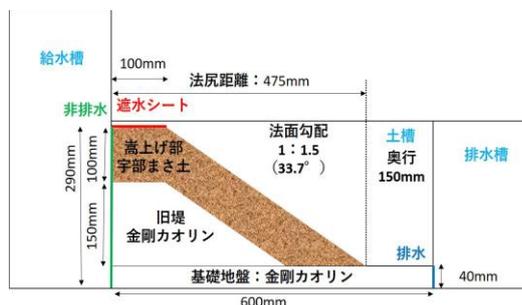


図 4-1 小型模型

表 4-1 土質試験結果

		宇部まさ土	カオリン粘土
施工時含水比	%	10	30
最適含水比	%	10.4	-
乾燥密度	$g/m^3$	1,551	1,438
最大乾燥密度	$g/m^3$	1,975	-
締固め度	%	78.5	-
透水係数	$m/s$	$6.60 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-8}$
粘着力 $c'$	kPa	0.2	-
内部摩擦角 $\phi'$	度	29.6	-

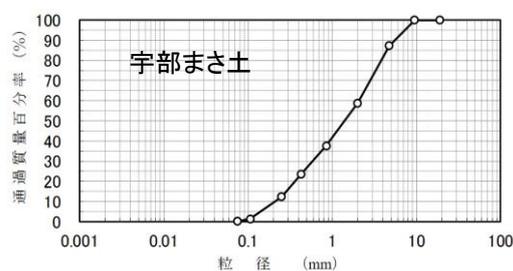


図 4-2 粒度分布

実験 A では小型模型に 72mm/hr の降雨を 120 分間作用させた。なお、時間降雨量は筑後川の被災における最大時間降雨量から設定した。実験 A の結果、筑後川の被災の様な深いすべりは発生しなかった。

次に、実験 B については、実験 A の終了後、天端から排水集中を模した水を供給した。なお、引き続き 72mm/hr の降雨は継続して与えている。実験 B の結果、天端の 9 倍の面積からの排水集中を与えたケースではすべりは発生しなかった。次に、20 倍の面積からの排水集中を与えたケースでは法尻付近に浅いすべりが発生し、その面積が 30 倍に大きくなったケースでは法肩からの深いすべりとなった(図 4-3)。また、法面表層に植生の根茎を模した綿糸を混合した土

羽を厚さ 10mm で設置したケースでは、天端の 20 倍の面積からの排水集中がある場合も、すべりは発生しなかった (図 4-4)。これらから、排水集中の発生によりすべりが発生すること、植生の根茎の存在によりすべりが抑制されることが示唆された。

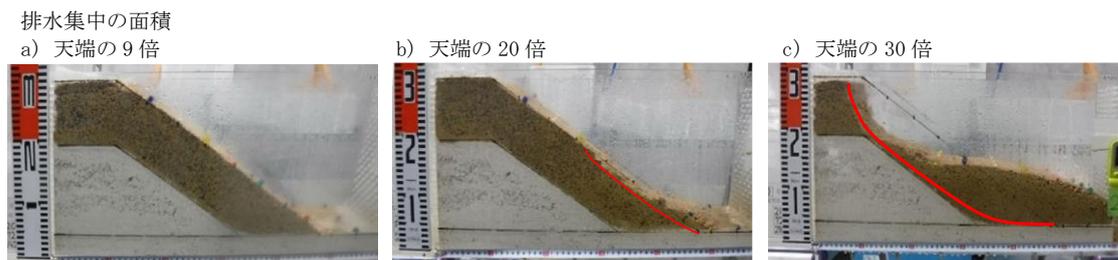


図 4-3 模型実験結果



図 4-4 模型実験結果 (土羽あり)

## (2) 数値解析

数値解析は、前述の実験 B のすべりが観測されなかったケース、浅いすべり法面が発生したケース、深いすべりが発生したケースについて実施した。

解析モデルを図 4-5 に示す。天端舗装を再現するため、堤防天端は不透水境界とし、初期水頭は、基礎地盤と同じ 40mm、降雨量は 72mm/hr を 120 分間与えた後に、法面に排水集中に相当する降雨を与えることで再現した。解析に用いたパラメータを表 4-2 に示す。宇部まさ土とカオリン粘土の不飽和特性は河川堤防の設計において一般的に用いられる「河川堤防の構造検討の手引き (改訂版)」(財)国土技術研究センター, 2012)のものを使用している。なお、透水係数やせん断強さは土質試験値を基本とし、一部文献値を用いている。

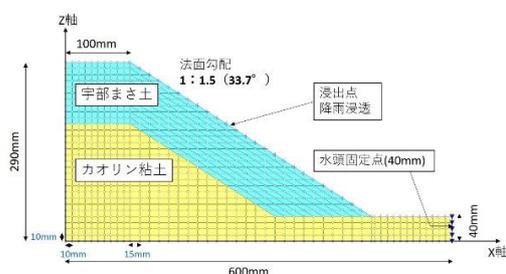


図 4-5 解析モデル

表 4-2 解析パラメータ

		宇部まさ土	カオリン粘土
湿潤密度	kg/m <sup>3</sup>	1,550	1,440
飽和密度	kg/m <sup>3</sup>	1,650	1,540
透水係数	m/s	$6.6 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-8}$
不飽和特性	[S]		[C]
粘着力 $c'$	kPa	0.2	-
内部摩擦角 $\phi'$	度	29.6	-
ヤング率	kPa	$1.00 \times 10^4$	$1.00 \times 10^4$
ポアソン比		0.3	0.3

図 4-6 に浸透流解析の結果を示す。降雨のみでは浸潤面はほとんど上昇しないが、排水集中により浸潤面が顕著に上昇することが分かる。また、それらの浸透流解析の結果を用いて修正フェレニウス法による円弧すべり解析を行った結果を図 4-7 に示す。模型実験においてすべりが発生しなかったケースでは、安全率は 1.0 以上となり、安定との結果となった。一方、法尻に浅いすべりが発生したケースでは、安全率は 1.0 未満となり、すべりに対して不安定になり始め、さらに法尻から深いすべりが発生したケースでは安全率がさらに低下し、より不安定になることが示された。これらより、降雨のみではすべりに対して安定であるのに対して、排水集中の発生により急激に不安定になることが分かる。

次に、SPH 法により変形量解析を実施した。SPH 粒子の初期粒子間隔は 1.0mm であり、カーネル関数は一般的に用いられる cubic spline 関数を用い、影響範囲は初期粒子間隔の 1.2 倍を設定した。解析モデルの左右端は垂直方向にのみ移動可能な半固定条件、下端は固定条件とした境界条件とした。解析モデルはモール・クーロンモデルを用いている。解析に用いたパラメータは表 4-2 に示す通りであり、円弧すべり解析と同様のものを用いた。また、ヤング率、ポアソン比については一般的な値を用いた。なお、大変形時のひずみ軟化現象を再現するため、Bui ら (2009) の手法を参考に、せん断ひずみが一定以上 (0.3) 発生した SPH 粒子について、粘着力及び

内部摩擦角を 0.3 倍に低下させている。間隙水圧は不飽和領域のマトリックサクションも含め、浸透流解析の結果を用いた。

変形量解析の結果を図 4-8 に示す。模型実験においてすべりが発生しなかったケースでは、変形量解析でもすべりは発生しなかった。一方、模型実験において法尻に浅いすべりが発生したケースでは、すべりの過程の初期では法尻付近を中心に変状が発生し、その後法肩まで変状が発達し、最終的には法肩部分から深いすべりが発生する結果となった。また、法肩から深いすべりが発生したケースでは、すべりの過程の初期で、天端に達する変状が発達し、最終的には天端全体を含めた深いすべりが発生した。排水集中の場合、模型実験と比較して解析の変形量が大きい結果となったが、排水集中の程度によるすべりの有無、発生過程、規模の差を確認することができた。

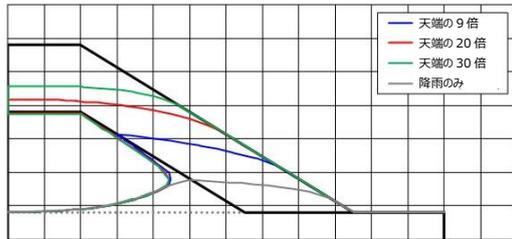


図 4-6 浸透流解析結果

排水集中の面積  
 a) 天端の 9 倍  $F_s=1.14$     b) 天端の 20 倍  $F_s=0.99$     c) 天端の 30 倍  $F_s=0.92$

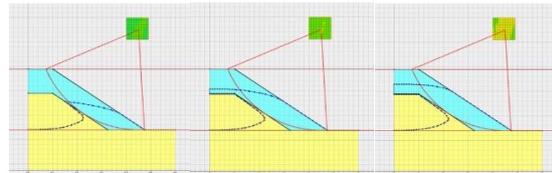
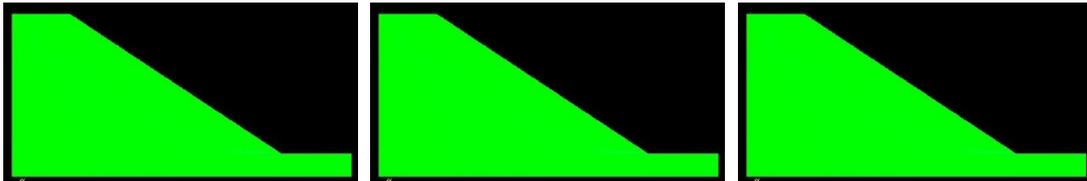


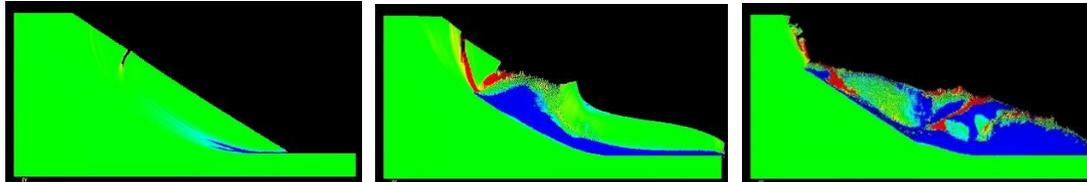
図 4-7 円弧すべり解析結果

排水集中の面積

a) 天端の 9 倍 (0.3s, 1.0s, 5.0s)



b) 天端の 20 倍 (0.3s, 1.0s, 5.0s)



c) 天端の 30 倍 (0.3s, 1.0s, 5.0s)

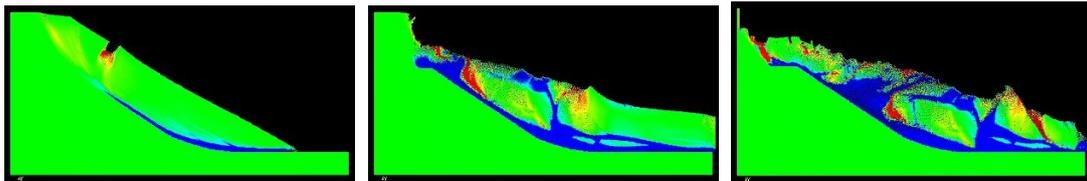


図 4-8 変形量解析結果

### (3) 結論

降雨と天端舗装からの排水集中によるすべり発生への影響を模型実験により把握した。その結果、筑後川において想定されたメカニズムと同様に降雨のみでは、深いすべりが起こる可能性は低く、天端舗装からの排水集中により、急速に浸潤面が上昇し、深いすべりが発生することが確認された。また、植生の根茎の存在によりすべりが抑制されることが示された。

模型実験の結果を、浸透流解析と円弧すべり解析を用いて、定量的評価を試みた。その結果、模型実験におけるすべりの発生の有無を評価することができた。さらに、粒子法 (SPH 法) による変形量解析を実施したところ、模型実験と比較して解析の変形量が大きい結果となったが、排水集中の程度によるすべりの有無、発生過程、規模の差を確認することができた。この成果を活用し、盛土や斜面の崩壊した土砂の到達距離を計算し、それをもとに宅地やインフラ等の土砂災害に対するリスク評価に使用できる可能性が示唆された (図 4-9)。

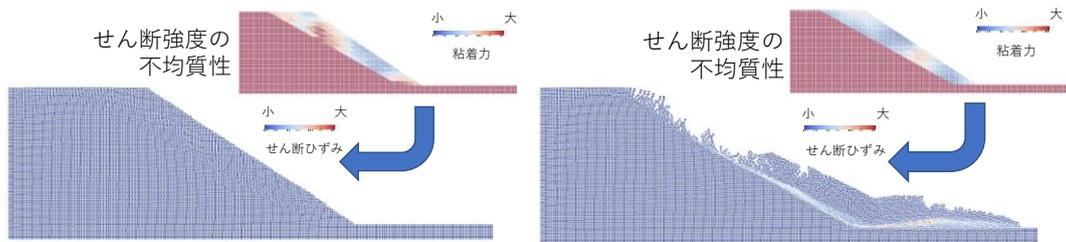


図 4 - 9 せん断強度の不均質性を考慮した崩壊土砂の到達距離の計算例

参考文献

1. 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）2012
2. Bui.H, Sako.K and Fukagawa.R: Slope stability analysis and slope failure simulation by SPH Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mori Hirotooshi, Chen Xiaoyu, Leung Yat Fai, Shimokawa Daisuke, Lo Man Kong	4. 巻 -
2. 論文標題 Landslide hazard assessment by smoothed particle hydrodynamics with spatially variable soil properties and statistical rainfall distribution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Canadian Geotechnical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1139/cgj-2019-0601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中川翔太, 山本周平, 森啓年, 佐古俊介, 下川大介	4. 巻 25
2. 論文標題 植生の根茎を考慮した堤防天端からの排水集中による法面すべりに関する模型実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 571-576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 森啓年, 倉田大輔, 上戸田拓也, 岡本吉央	4. 巻 Vol.24
2. 論文標題 天端舗装からの雨水集中による砂質土堤防のすべりに関する模型実験	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 541-546
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中田 幸男 (NAKATA YUKIO) (90274183)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授  (15501)	