

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24241061

研究課題名(和文)パイピング現象による土砂ダム決壊前兆現象の抽出および決壊予測法の開発

研究課題名(英文) Prediction method development and precursory phenomenon extraction of landslide dam failure caused by piping

研究代表者

汪 発武 (Wang, Fawu)

島根大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号：10324097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はパイピング現象による土砂ダム決壊を研究する。2004年中越地震による東竹沢及び寺野地すべりダム、2011年紀伊半島集中豪雨による赤谷及び栗平地すべりダム、そして、キルギス Kel-tor 巨大地すべりダムなどの調査を通して、表面波チェーン微動アレイ探査法が土砂ダムの内部構造評価に有効であることを検証した。自然電位探査法は土砂ダム内の地下水流動脈の探査に有効である。人工土砂ダムの破壊実験より土砂ダムの決壊過程が定性的に解明され、パイピング発生及び決壊発生に臨界動水勾配が存在することが発見された。土砂ダム表面沈下、内部動水勾配の変化、流出した水の濁度変化は前兆現象として使えることを見出した。

研究成果の概要(英文)：We proposed using microtremor chain array survey to detect the inner structure of landslide dam, and self-potential survey to find groundwater flowing path inside it. They were verified effective through field investigation in Higashi-Takezawa and Terano landslide dams, which were triggered by 2004 Chuetsu earthquake, Akatani and Kuridaira landslide dams, which were triggered by 2011 Kii Peninsula intensive rainfall, and Kel-tor giant landslide dam in Kyrgyz. Artificial landslide dam failure tests were conducted to investigate the failure process and the critical hydrodynamic condition to cause the piping and dam failure. It is found that critical hydraulic gradients for piping erosion and crest failure controlled the failure process. During the failure process, dam crest subsided, hydraulic gradient inside the landslide dam changed, and the turbidity of the water flowing out of the landslide dam suddenly changed. Those phenomena can be used to predict landslide dam failure.

研究分野：防災科学

キーワード：土砂ダム 決壊前兆 現地調査 チェーン微動アレイ 自然電位 模型実験 動水勾配 予測

1. 研究開始当初の背景

2011年9月に紀伊半島で集中豪雨により広い範囲で斜面崩壊が発生し、多数の土砂ダムが形成された。下流地域に洪水災害を及ぼす危険性が高いため、土砂ダム決壊予測が急務であった。特に、パイピング現象による土砂ダム崩壊の隠蔽性が高く、決壊の前兆現象と抽出ことも重要とされている。

2. 研究の目的

本研究の目的は土砂ダムの内部構造、そして、地下水流動脈の存在場所を探査する有効な方法を提案・検証し、土砂ダム決壊の過程を解明するうえで、決壊前兆現象としての因子を見出すことを目的としている。

3. 研究の方法

- 本研究には、四つの方法を用いた。
- (1) 表面波チェーン微動アレイ探査法を用いて、土砂ダムの内部構造を探査する；
 - (2) 土砂ダム表面での自然電位測定で土砂ダム内部の地下水流動脈の存在場所を探査する；
 - (3) 室内土槽で土砂ダムの模型を作って、ダム形状、土砂成分や密度などを変化させ、土砂ダムの破壊過程を解明する；
 - (4) 屋外で小規模人工土砂ダムを作成し、破壊させる過程において、土砂ダム決壊の前兆現象を抽出する。

4. 研究成果

以下、四つの方法で得た研究成果の概要を述べる。

- (1) 表面波チェーン微動アレイ探査法は今までに土砂ダムの調査において、あまり利用されていない。本研究では、まず地盤構造の分かりやすい溜め池ダムを対象に、表面波チェーン微動アレイ探査法を用いて、この方法の有効性を検証した。図1はその結果である。V字谷に人工盛土の軟弱構造がはっきり表れている。

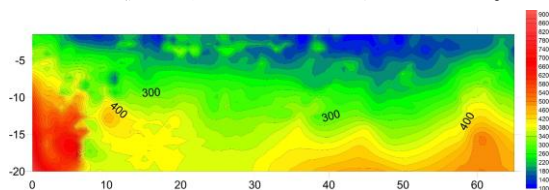


図1 三次IC溜め池ダムの位相速度構造

この方法の有効性が検証された後、新潟県2004年中越地震による東竹沢地すべりと寺野地すべりによって形成された土砂ダム、キルギス国のKel-tor地すべりダムにも提供され、土砂ダムの内部構造を鮮明に解明した。図2、3、4はその結果を示す。図2、3はそれぞれ東竹沢地すべりと寺野地すべりの縦断面で計測したものであり、傾斜しているすべり面の上に、緩い構造を持つ地すべり土塊が載っていることが分かる。図5はKel-tor地すべりダム最下位の横断面であり、右半分

は別の土石流堆積物で、左半分はパイピング浸食によって空洞化されている地すべりダム構造になっている。

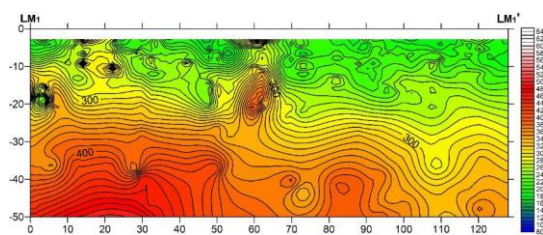


図2 新潟県東竹沢地すべりダムの内部構造 (縦断面)

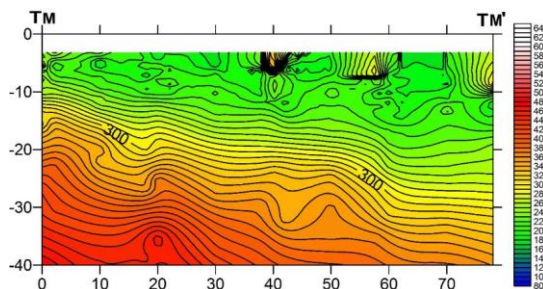


図3 新潟県寺野地すべりダムの内部構造 (縦断面)

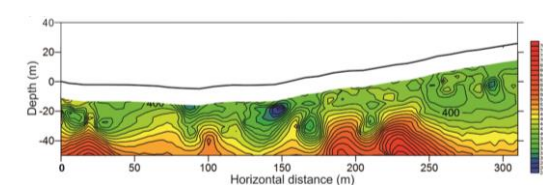


図4 Kel-tor地すべりダムの内部構造 (横断面)

- (2) 土砂ダムの内部構造が分かれば、ダム堤内の地下水流動脈の存在場所の特定は対策案を考える時に重要である。本研究では、いろいろ現場で自然電位法を用いて、地下水流動脈の探査を実施し、この方法の有効性を検証した。図5はキルギス国Kel-tor地すべりダムでの計測結果であり、下流にある湧水区間と対応して(左半分)、自然電位が負の値となっている。

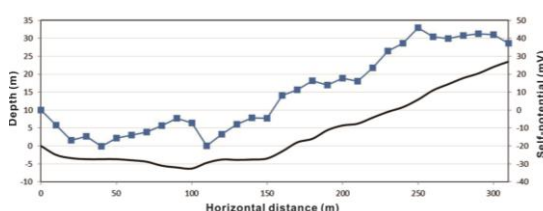


図5 Kel-tor地すべりダムにおける自然電位計測結果

- (3) 室内土槽試験において、異なる配合の土試料を用いて、異なる初期間隙比の土砂

ダム模型を作成し、上流側の水頭を上げることによって、土砂ダム模型を決壊させた。結果として、以下の結論を得た。まず、図6に示すように、土砂ダム結果の段階を五つに区分した:(a) 湿した点の出現;(b) パイピング穴の形成;(c) パイプ流の進行と拡大;(d) パイプ流頂部の崩落;(e) 土砂ダム全壊。

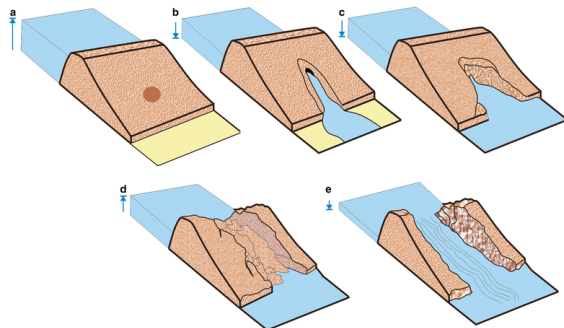


図6 土砂ダム決壊の5段階

また、室内土槽実験を通して、土砂ダム決壊に必要な動水勾配を求め、初期パイピング現象およびダム頂部落下が発生させるための臨界動水勾配の測定、考察を行った。

(4) 小規模土砂ダム実験においては、島根県出雲市御幡地すべりから土砂を採取し、松江市江島で高さ約2メートルの人工土砂ダムを形成・決壊させることによって、土砂ダムの決壊前兆現象として使える因子を求めた。中には、ダム下流の湧水の濁度、ダム内部のひずみ、ダム頂部の沈下、そしてダム頂部の自然電位の変化をパラメータとして、計測・観察を行った。図7から図10に示すように、以下の有益な結論を得た。

- ① 土砂ダム形成直後、動水勾配の増加に従って、ダム下流側湧水の濁度が増加する。一回大きな濁流が発生した後、次の高い動水勾配が来るまでに濁流はあまり発生しない(図7)。
- ② 大きな濁度の変化には土砂ダム頂部の大きな沈下現象が伴う(図8)。
- ③ 土砂ダム頂部の大きな沈下には、頂部の自然電位に大きな減少現象が伴う(図9)。
- ④ 土砂ダム頂部の沈下に、土砂ダム内部のひずみが伴っているが、不連続である(図10)。

以上の実験結果から、土砂ダムの変形現象を把握するために、形成初期では、濁度の変化は重要な因子として使える一方、決壊直前になると、最も信頼性の高い因子はやはり土砂ダム頂部の沈下現象である。土砂ダムの沈下はInSAR技術をはじめとする衛星観測技術が使える可能性が高いので、今後検証していく必要がある。

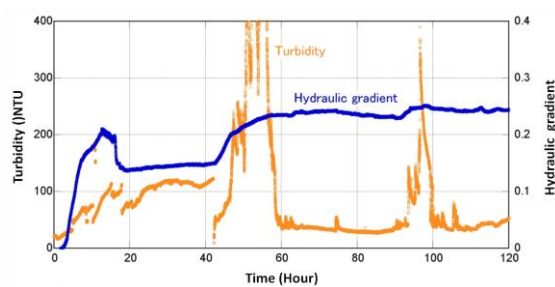


図7 濁度変化と動水勾配の関係

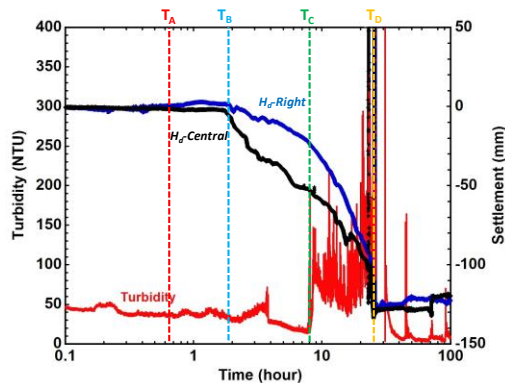


図8 土砂ダム頂部の沈下 (H_d) と濁度変化の関係

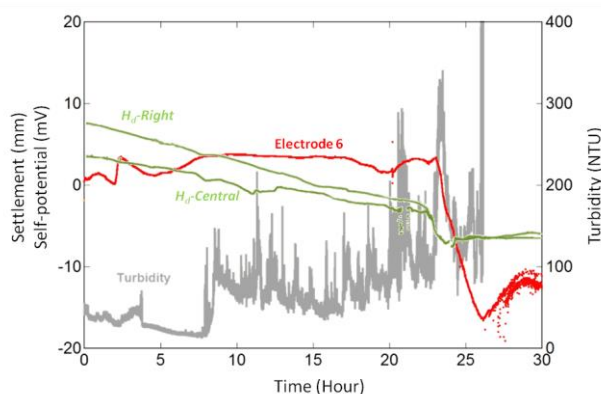


図9 土砂ダム頂部で観測された自然電位と頂部沈下 (H_d) の関係

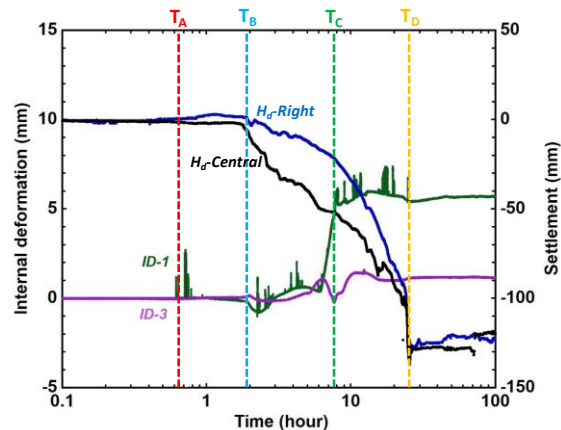


図10 土砂ダム内部のひずみ(ID-1, 3)と頂部沈下 (H_d) の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Austin CU Okeke, Wang FW, Hydromechanical constraints on piping failure of landslide dams: an experimental investigation, *Geoenvironmental Disasters*, 査読有, 3 巻 4 号, 2016, pp.1-17. DOI 10.1186/s40677-016-0038-9
- ② Austin CU Okeke, Wang FW, Critical hydraulic gradients for seepage induced failure of landslide dams, *Geoenvironmental Disasters*, 査読有, 3 巻 9 号, 2016, pp. 1-22. DOI 10.1186/s40677-016-0043-z
- ③ Zili Dai, Wang FW, Yu Huang, Kun Song, Akinori Iio, SPH-based numerical modeling for the post-failure behavior of the landslides triggered by the 2016 Kumamoto earthquake, *Geoenvironmental Disasters*, 査読有, 3 巻 24 号, 2016, pp. 1-14. DOI 10.1186/s40677-016-0058-5
- ④ Wang FW, M Miyajima, R Dahal, M Timilsina, T Li, M Fujiu, Y Kuwada, Effects of topographic and geological features on building damage caused by 2015.4. 25 Mw7. 8 Gorkha earthquake in Nepal: a preliminary investigation report, *Geoenvironmental Disasters*, 査読有, 3 巻 7 号, 2016, pp.1-17. DOI 10.1186/s40677-016-0040-2
- ⑤ Zili Dai, Wang FW, Kun Song, Akinori Iio, A first look at a landslide triggered by the 2016 Kumamoto earthquake near the Aso Volcanological Laboratory, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 査読有, 50 巻 2 号, 2016, pp.111-116. DOI 10.1144/qjgeh2016-085

[学会発表] (計 8 件)

- ① Austin UC Okeke, Wang FW, et al (2017) Experimental study of the premonitory factors for internal erosion and piping failure of landslide dams. 4th World Landslide Forum, 29 May - 2 June 2017, Ljubljana (Slovenia) (Oral presentation)
- ② Wang FW (2016) Comprehensive study on failure prediction of landslide dam by piping. ISL-2016, 12-19 June 2016, Naples (Italy) (Oral presentation)
- ③ Wang FW (2016) Prediction of landslide dam failure by piping. 14th International Symposium on Geo-disaster Reduction, 10-13 October 2016, Chengdu (China) (Keynote lecture)
- ④ Wang FW (2015) The effect of local topographic and geological structure on the house and building damages caused by the 2015.4.25 Mw7.8 Gorkha earthquake, Nepal.

13th International Symposium on Geo-disaster Reduction, 9-11 August 2015, Prague (Czech) (Oral presentation)

- ⑤ Wang FW (2014) Premonitory phenomena of landslide dam failure by piping. 12th International Symposium on Geo-disaster Reduction, 5-6 September 2014, Fullerton (USA) (Oral presentation)
- ⑥ Wang FW (2014) Detecting premonitory phenomena of landslide dam failure by piping. IAEG-Congress, 15-19 September 2014, Torino (Italy) (Oral presentation)
- ⑦ Wang FW (2014) Using microtremor array survey to evaluate the possibility of piping-induced landslide dam failure. 3rd World Landslide Forum, 2-6 June 2014, Beijing (China) (Oral presentation)
- ⑧ Wang FW (2013) Using chain array of micro-tremor to detect inner structure of landslide dam for piping risk evaluation. 11th Int' Symposium on Geo-disaster Reduction, 22-28 October 2013, Kathmandu (Nepal) (Oral presentation)

[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]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

汪 発武 (Wang Fawu)

島根大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：10324097

(2)研究分担者

丸井 英明 (Marui Hideaki)

新潟大学・災害・復興科学研究所・特任教授
研究者番号：10219545

志比 利秀 (Shibi Toshihide)

島根大学・大学院総合理工学研究科・助教
研究者番号：60311792

小暮 哲也 (Kogure Tetsuya)

島根大学・大学院総合理工学研究科・助教
研究者番号：70534006

松本 健作 (Matsumoto Kensaku)

群馬大学・大学院理工学府・助教
研究者番号：90302455

酒井 哲弥 (Sakai Tetsuya)

島根大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：90303809