

氏名	Okeke Chukwueloka Austin Udechukwu		
学位の種類	博士 (学術)		
学位記番号	総博甲第 1 1 4 号		
学位授与年月日	平成 2 8 年 9 月 2 6 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項		
文部科学省報告番号	甲第 5 8 2 号		
専攻名	マテリアル創成工学専攻		
学位論文題目	Internal Erosion and Piping Failure of Landslide Dams (土砂ダムにおける内部浸食とパイピングによる破壊)		
論文審査委員	主査	島根大学教授	汪 登武
		島根大学教授	三瓶 良和
		島根大学教授	亀井 淳志
		島根大学准教授	増本 清
		島根大学准教授	酒井 哲弥
		京都大学准教授	王 功輝

論文内容の要旨

Landslide dams are formed in valley-confined settings where favourable geomorphological and hydro-climatic factors result in the downslope movement of weathered slope materials, causing the blockage of river valleys and the creation of barrier lakes. Landslide dams are potentially dangerous natural phenomena which are made up of heterogeneous masses of unconsolidated or poorly consolidated sediments, and thus may fail by seepage or piping. Failure of landslide dams could trigger catastrophic outburst floods and debris flows which could inundate the downstream areas, causing loss of lives and infrastructural damage. Therefore, timely evaluation of landslide dams is important for prevention of catastrophic dam failures and mitigation of disasters caused by downstream flooding of the released water masses. This research performs a series of field investigations, flume experiments and large-scale physical experiments to study the potentials for internal erosion and piping failure of landslide dams.

An integrated geophysical approach comprising the microtremor chain array and self-potential surveys were successfully used to characterize the internal structure of landslide dams and delineate potential seepage zones. The microtremor chain array survey results revealed the internal structure of the landslide dams while the self-potential survey results indicated areas of anomalous seepage or zones of high water saturation. In most of the surveyed sites, the presence of an anomalous seepage was confirmed by a very good correlation between the areas of low phase velocities (80 to 200 m/s) and high negative SP anomalies.

A series of experiments were performed to study the hydromechanical constraints for

landslide dam failure by piping. The experiments were conducted in a 2m*0.45m*0.45m flume, with a flume bed slope of 5°. Uniform dams of height 0.25 m were built with either mixed or homogeneous silica sands. Two laser displacement sensors were used to monitor the behaviour of the dams during the internal erosion process while a linear displacement transducer and a water-level probe were deployed to monitor the onset of internal erosion and the hydrological trend of the upstream lake. Five major phases of the breach evolution process were observed: pipe evolution, pipe enlargement, crest settlement, hydraulic fracturing and progressive sloughing. Two major failure modes were observed: seepage and piping-induced collapse. It is found that an increase in soil density and homogeneity of the dam materials reduced the potential to form a continuous piping hole through the dams. The rate of pipe enlargement is related to the erodibility of the soil, which itself is inversely proportional to the soil density.

Extensive laboratory experiments were performed to evaluate the critical hydraulic and geometrical conditions for seepage-induced failure of landslide dams. The experiments were conducted in a flume tank specifically designed to monitor time-dependent transient changes in pore-water pressures within the unsaturated dam materials under steady-state seepage. Two critical hydraulic gradients corresponding to the onset of seepage erosion initiation and collapse of the dam crest were determined for different upstream inflow rates, antecedent moisture contents, compactive efforts, grain size ranges, and dam geometries. The deformation behaviour of the dams was significantly influenced by particle density, pore geometry, hydraulic conductivity, and the amount of gravel and pebbles present in the materials. The results indicate that the critical seepage velocity for failure of the dams decreased with an increase in downstream slope angle, but increased with an increase in pore geometry, dam height, dam crest width, upstream inflow rate, and antecedent moisture content.

Large-scale (outdoor) physical experiments were conducted to evaluate the premonitory factors for internal erosion and piping failure of landslide dams. Several monitoring sensors comprising pore-water pressure sensors, linear displacement transducers, and turbidity sensors were installed at different parts of the dam to monitor the hydrodynamic changes that occur during the internal erosion and piping. Furthermore, self-potential measurements were made during the experiments by installing several electrodes on the dam crest. The experimental results indicated that the emergence of a high turbidity (300~450 NTU) effluent seepage at the downstream face of the dam coincided with a very high negative self-potential anomaly. This was also found to correlate with the development of high pore-water pressures (4~8 kPa) which subsequently led to a gradual decrease in the dam height (settlement). These large-scale (outdoor) physical experiments provide important information regarding the premonitory factors for piping failure of landslide dams.

Integration of the geophysical surveys, flume experiments, and large-scale (outdoor) physical experiments provides a framework for a better understanding of the likelihood of piping-induced failure of landslide dams. The results of this comprehensive research would aid in the development of accurate dam breach models for the prediction of the breaching time, flood hydrograph and an early warning system for disaster risk reduction.

論文審査結果の要旨

土砂ダムは地質的変動帯において頻繁に形成され、それが決壊すれば、下流に洪水災害を引き起こす危険性を有している。土砂ダムの内部構造は移動土塊の長距離運動により攪乱され、不均一である。さらに、長期的なパイピング浸食により、その内部構造が一層脆弱になる。本研究は、パイピング現象による土砂ダム崩壊プロセスの解明とその予測を目的とした。具体的には、土砂ダム内部構造の探査手法および土砂ダム内における地下水流経路の探査手法の有効性、パイピング現象による土砂ダム破壊のプロセスおよび素因と誘因を議論し、さらに、実務レベルで応用可能な前兆現象因子の抽出を行った。

土砂ダムに関する研究現状を正確にレビューした後、本文では、1) 土砂ダムの内部構造および流動地下水経路を探査するために、表面波チェーン微動アレイ探査手法および自然電位測定法を初めて土砂ダムに適用し、現地の計測を実施したこと；2) 土砂ダムの決壊プロセス、土砂ダム物質構成、土砂ダム形状、および密度構造による臨界動水勾配への影響を解明するために、室内小規模土砂ダム決壊実験を実施したこと；3) 濁度や土砂ダム変形の前兆現象としての妥当性を確認するために、屋外大規模な土砂ダム実験を実施したことが適確に述べられた。

結果として、以下のような新しい知見を得た。1) 表面波チェーン微動アレイ探査法は、地表面に近い部分で高い位相速度が分布している場合、その下に分布する低い位相速度の部分が隠されるため解析できないことになる。しかし、土砂ダムの長距離運動により、その内部構造がゆるくなり、チェーン微動アレイ探査法に適していることが計測したすべての現場で証明された。また土砂ダム内において、常に地下水が流れているため、自然電位の差で地下水流下経路が容易に検知されることが確認できた。2) 土砂ダムの破壊プロセスは、パイプ流発生、パイプ流拡大、ダム頂上沈下、水力破裂、そして、下流斜面解体の5段階に分けることができた。また、破壊プロセスに影響する因子として、動水勾配、間隙形状、土砂ダム下流斜面勾配、細粒部含有率、そして土砂ダム本体の密度が挙げられ、それぞれの影響について定量的に検討された。3) 浸透流による土砂ダム決壊に対して、異なる水力学的条件と土砂ダム条件で行った結果、二種類の土砂ダム変形パターン (type I: 下流斜面の下から上方へ；type II: 下流斜面の上方から下方へ) があることが解明され、内部浸食を発生させる臨界動水勾配および土砂ダム頂上崩壊を発生させる臨界動水勾配がそれぞれ求められた。その結果、内部浸食を発生させる臨界動水勾配は0.042-0.147であり、一般化できることが分かった。4) 土砂ダム下流から流出した水の濁度変化、そして、土砂ダム本体における変形(ダム頂上沈下および内部ひずみ)は崩壊直前に著しく増大することが分かり、決壊予測の指標

として有用であることが分かった。

以上のように、申請者による土砂ダムにおける内部浸食とパイピングによる破壊に関する研究成果は、土砂ダム内部構造の解明、流動地下水経路の同定、パイピング現象発生させる臨界動水勾配の測定、そして土砂ダムの変形や濁度の計測を組み合わせることによって、土砂ダムの決壊予測が可能になることを示した。内容の新規性と方法の合理性に加え、斜面防災分野における新たな知見の創出だけでなく、実務レベルで応用可能な技術の創出も行ったことは、この分野での学術的貢献度が極めて高いと判断された。申請者は筆頭著者として 2 編の関連論文を査読付き国際学術雑誌 *Geoenvironmental Disasters* (独・Springer 社) に受理された。

以上を総合して、本論文は博士(学術)の学位授与のための論文として合格と判断した。