

## 学 位 論 文 要 旨

学位論文題目	浸透流解析と実物大崩壊実験によるまさ土斜面の降雨浸透および源頭部崩壊メカニズム
氏名(Name)	徳久 晶

### 1. はじめに

2009年7月21日に九州北部から中国地方にかけて発生した豪雨では、日降雨量が山口県防府市で観測史上最大の275mm、山口市で第2位の277mmを記録した。この豪雨は21日早朝から昼頃まで概ね6時間にわたって断続的に降っており、防府市を南流する佐波川の右岸側で崩壊・土石流が多発した。土石流は泥流状となって高速に流下し、大きな被害が発生した。この土石流発生斜面を観察すると、花崗岩の堅岩が露出し、源頭部にはまさ土化した風化残積土が薄く分布しており、特に基盤岩と風化土層との間の透水性の差異がうかがえた。本論文では、まさ土斜面の降雨浸透および源頭部崩壊のメカニズムを解明することを目的とし、上記の特徴を再現した非定常FEM浸透流解析を行った。また、実物大の実験モデル斜面を造成し、裸地斜面と不織布フィルターを敷設した条件で降雨実験を行い、これらの結果を総合的に検討して土石流発生斜面の状態を観測・解析した。

### 2. 浸透流有限要素解析

#### (1) 解析条件

実験のモデルとした2009年7月21日中国・九州北部豪雨災害での土石流発生斜面の観察状況から、表土層が欠如あるいは非常に薄いこと、また、強風化部および旧上石流二次堆積物であるまさ土層と花崗岩との境界に高透水性が示唆される礫を含んだ層が挟在することが特徴として見い出されることから、解析は、①まさ土の上に表土層がある場合、②まさ土の上に表土層がない場合、③まさ土の上の表土層が部分的に分布する場合の3つの条件と、a)風化土層と基盤の間に高透水層がある場合、b)高透水層がない場合をそれぞれ組み合わせて、二次元断面に対して実施した。また、境界条件として、地表面には山口県山口市で観察された2009年7月21日6～12時の降雨波形を地表面からモデル内に与えた。

#### (2) 解析結果

各解析条件の圧力水頭コンター図におけるポイントの位置水頭および圧力水頭より求めた安全率  $F$  がわずかに1.00を下回るのは表土がなく、まさ土層が1.0mで基盤境界に高透水層が分布するケースのみであった。1度目の豪雨後の9:30の時点では  $F \geq 1.00$  であったが、2度目の豪雨時11:30には  $F < 1.00$  となり、土石流発生時刻と一致する解析結果が得られた。流速によって浸透破壊は発生しないが、圧力水頭の増加により安定性が低下したと考える。

### 3. 土石流源頭部での崩壊発生実物大実験

#### (1) 実験方法および条件

2009年7月21日の中国・九州北部豪雨災害で土石流が多く発生した区域内の現地発生のもさ土を用いて、スケール効果を排除した実物大モデルを作成した。周辺からの影響を排除するために、斜面に与

えた降雨のみの影響について観測できる状態とし、溪流中央への周辺からの集水条件を排除したモデルで実験を行った。また、側方摩擦・拘束の起こらない盛土を作製した。幅10m、長さ20mの斜面を平均勾配30°の難透水岩盤上に層厚1.3mの盛土・転圧することにより造成した。時間降雨強度100mm/hの降雨を斜面に最長5時間与え、土石流源頭部の崩壊を再現させる実験を行った。斜面表層は何も保護しない、いわゆる裸地斜面と擬似表土・植生として法面侵食を防ぐ表土の役割を有する不織布フィルターを敷設した条件で実験を行った。

## (2) 実験結果

### 1) 実験中に斜面内で観察された現象

実験中に斜面内で観察された現象について以下に示す。

#### (a) ガリー侵食

裸地斜面では降雨開始から間もなくすると、表流水により斜面下部に浅い溝状のガリー侵食が発生した。

#### (b) ボイリング崩壊

幅20~30cmの深い溝状のボイリング崩壊が発生した。局部的に地表部が高含水の飽和状態となり、噴砂し斜面下部を巻き込んで流出する現象が観察された。ボイリング崩壊は斜面下部で顕著に発生した。ボイリング崩壊跡から排出する湧水は、崩壊後10分程度の経過に伴って流砂を伴わない清水になるが、下流に土石流を発生させるほどの水量・水圧にはならなかった。

#### (c) 斜面崩壊の状況

ボイリング崩壊が多発することにより斜面下部の上塊が失われ、時間の経過に伴って、斜面全体のバランスが崩れ、上流部から長さ約10mの土塊が下流方向に向かって崩落するケースがあった。この崩壊土砂が下流で集水した表面水で泥流化するまで膨れた場合に土石流が発生すると考えられる。

### 2) 斜面内の間隙水圧の挙動および崩壊状況

試験開始から約60分で明瞭なボイリング崩壊が観察された。降雨開始から10~30分の間に間隙水圧が急激に上昇、4kPa前後でボイリング崩壊が発生し、崩壊から30分後には上昇が落ち着いた。このことから、下層に高透水層がある場合は、雨水の浸透を促し、約1時間でボイリング崩壊が発生するレベルまで間隙水圧が上昇することが分かった。また、ボイリング崩壊はいずれも斜面中間より下方で発生していることが確認された。崩壊時の斜面の安全率 $F_s$ を求めると0.96となり、間隙水圧の上昇により斜面の安定性が失われることが安全率からも裏付けられた。

## 4. 結論

双方の結果を総合的に検討したところ、高透水性の粗粒層がまさ土層と不透水層の間に存在することによって、地下浸透と層間地下水流の影響で間隙水圧の急激な上昇が発生し、ボイリングが起きることが崩壊の原因になることが明らかになった。また、不織布フィルターの豪雨時浸透抑制効果が確認された。

(様式 9号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	徳久 晶
審 査 委 員	主 査：鈴木 素之 教授
	副 査：進士 正人 教授
	副 査：中田 幸男 教授
	副 査：吉本 憲正 准教授
	副 査：森 啓年 准教授
論 文 題 目	浸透流解析と実物大崩壊実験によるまさ土斜面の降雨浸透および源頭部崩壊メカニズム (Rainfall infiltration and failure mechanism of source head in Masado slope using Finite Element Analysis of Seepage Flow and full-scale field experiment)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】	
<p>2009年7月21日の中国・九州北部豪雨災害では防府市を中心に土石流が多発し、甚大な被害が発生した。土石流発生溪流の源頭部においては崩壊が発生しており、崩壊面には花崗岩が露頭し、その上位にはまさ土から成る強風化層や崖錐堆積物が薄く分布していた。申請者はこの土層構成が崩壊の原因であることに着目して研究に取り組んだ。本研究では、土石流発生源における降雨浸透と崩壊メカニズムを解明することを目的として、これらの特徴を再現した実験モデルを作成し、土質、寸法効果、降雨強度、周辺からの水の影響等を極力排除した実物大模型を用いた現地実験を行った。また、この現地実験に先立ち、土層構成の異なる場合の土石流源頭部での浸透特性の違いを解明すべく、飽和-不飽和非定常浸透流有限要素解析により斜面内の降雨浸透の挙動を再現した。本研究の成果としては、実物大の模型斜面を造成し、人工降雨を与えて現地崩壊実験を実施したことに加えて、その結果と数値解析の結果をもとに土石流源頭部の崩壊発生をモデル化し、その対策方法を提案したことである。本学位論文では、これらの成果を以下の6章にまとめている。</p> <p>第1章では、研究の背景と目的を述べるとともに、本論文の内容と構成を述べた。</p> <p>第2章では、まさ土および花崗岩斜面の崩壊と土質工学的性質について述べた。まさ土斜面は基盤である花崗岩と表層部の風化したまさ土の境界で崩壊が発生する。まさ土は風化の度合いにより土質工学的性質が異なり、これが崩壊性状に大きな影響を及ぼす。</p> <p>第3章では、土壌侵食防止用不織布フィルターの特徴について述べた。法面緑化工に用いられる不織布フィルターは侵食防止効果があり、特に排水層を設けた多層構造の豪雨対応型不織布フィルターはより法面の腐食に対し高い防止効果が確認された。</p> <p>第4章では、浸透流有限要素解析を行い、豪雨時の浸透特性、特に圧力水頭分布、実流速</p>	

の時間的変化を検討した。対象とした豪雨災害での土石流発生源頭部をモデル化した浸透流解析によると、高透水層が分布するケースにおいて流速は限界流速よりも小さく、まさ土層内の流速は十分遅く安定しているため、流速による浸透破壊には至らないことが分かった。また、ボーリングに対する安全率が 1.0 を下回るのは、表土がなく、まさ土層が 1.0m で、高透水層が基盤境界に分布するケースにおける 2 度目の豪雨時のみであり、これが実際の土石流発生時刻と一致した。

第 5 章では、実物大崩壊実験を行い、降雨浸透および崩壊のメカニズムについて述べた。4 章で検討した土石流発生源頭部の特徴を再現した実物大模型による降雨実験を行った。その結果、高透水性の粗粒層がまさ土層と不透水層の間に存在するとき、豪雨の連続によって斜面下方の土層内の間隙水圧の上昇がボーリング崩壊を発生させ、このボーリング崩壊の拡大により斜面上方が不安定化し、崩壊が発生するメカニズムを明らかにした。また、表層に不織布フィルターを設置した場合の間隙水圧上昇の抑制効果が確認された。

第 6 章では、本研究で得られた成果をとりまとめ、本論文の総括を行った。

公聴会における主な質問内容は、1) 解析モデルの斜面勾配の選定理由、2) 解析結果において着目したポイントの設定理由、3) 実験に用いたまさ土の粘着力をゼロとしたことの妥当性、4) 降雨停止時間の影響、5) 不織布フィルターの効果と施工現場の選定などに関することであり、いずれの質問に対しても発表者からの確かつ十分な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文：計 2 編、\*:申請者の旧姓)

- 1) 松本\* 晶, 河内義文, 兵動正幸, 鈴木素之: まさ土斜面の豪雨時浸透メカニズムと不織布フィルターによる間隙水圧抑制効果, 地盤と建設, Vol.35, No.1, pp.9-16, 2017.
- 2) 松本\* 晶, 河内義文, 鈴木素之, 兵動正幸: 浸透流解析と実物大崩壊実験による豪雨時浸透および源頭部崩壊メカニズム, 地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.2, pp.355-369, 2020.