

# 土石流源頭部を再現した 実物大モデルによる降雨実験

RAINFALL EXPERIMENTS WITH FULL-SIZE MODEL THAT REPRODUCES THE  
DEBRIS FLOW SOURCE HEAD

松本 晶<sup>1</sup>・河内 義文<sup>2</sup>・兵動 正幸<sup>3</sup>

Aki MATSUMOTO, Yoshifumi KOCHI and Masayuki HYODO

<sup>1</sup>多機能フィルター株式会社 (〒744-0061 下松市葉山2丁目904番地の16)

E-mail: matsumoto@takino.co.jp

<sup>2</sup>株式会社ケイズラブ (〒753-0212 山口市下小鯖3553番地4)

E-mail: kslab@mve.biglobe.ne.jp

<sup>3</sup>山口大学大学院特命教授 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: hyodo@yamaguchi-u.ac.jp

**Key Words:** debris flow, rainfall experiments, weathering granite, heavy rain, multi function filter

## 1. はじめに

土石流発生斜面を観察すると、岩盤の露出が観察される。源頭部には、基盤岩強風化部や崖錐堆積物が薄く分布しているが、土質は均質であることはなく、特に透水性に関しての異方性が顕著であることは明らかである。この事象に対し、その源頭部にパイプ流出の痕跡があり、このパイプ流の斜面崩壊への寄与を指摘し、パイプ流の特性や流れ、水圧が斜面安全率や斜面崩壊に与える影響が実験的、解析的に検討されている<sup>1)~3)</sup>。また有限要素法を用いた浸透流解析によってパイプ流の存在する斜面の地下水の流れが検討されている<sup>4) 5)</sup>。しかし、実験に使ったモデルが小さい場合が多く、以下の弊害を生むと考える。①斜面側方の拘束・摩擦、②土石流を起こした土質材料を使用した時のモデルサイズとスケール効果。その結果、これら実験は定性的な検討を行っているに過ぎないものとなる。

本研究では、土石流源頭部を再現した実物大モデルによる降雨実験を行い、表層状態や土層構成の違いによる間隙水圧の変動、崩壊の過程を観測することを目的として、以下に示すように不確定な変数を極力排除した実験を実施した。

### ① 材料

2009年7月21日山口・防府豪雨災害で土石流が多発した区域内の現地発生土を用いた。

### ② スケール効果を排除したモデル

土石流源頭部を再現した実物大モデルを作成した。

### ③ 雨量強度の再現

近年の豪雨災害の降雨量を参考に時間降雨強度100mm/hの降雨による斜面への影響を観察した。

### ④ 周辺からの影響の排除

斜面に与えた降雨のみの影響について観測できる状態で、溪流中央への周辺からの集水条件も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成した(図-1)。

以下に、その実験結果と考察を述べる。

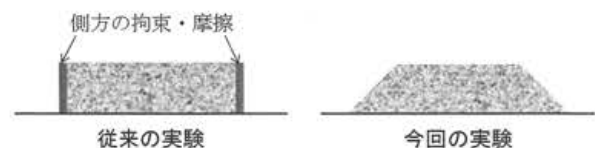


図-1 盛土の断面形状(イメージ図)

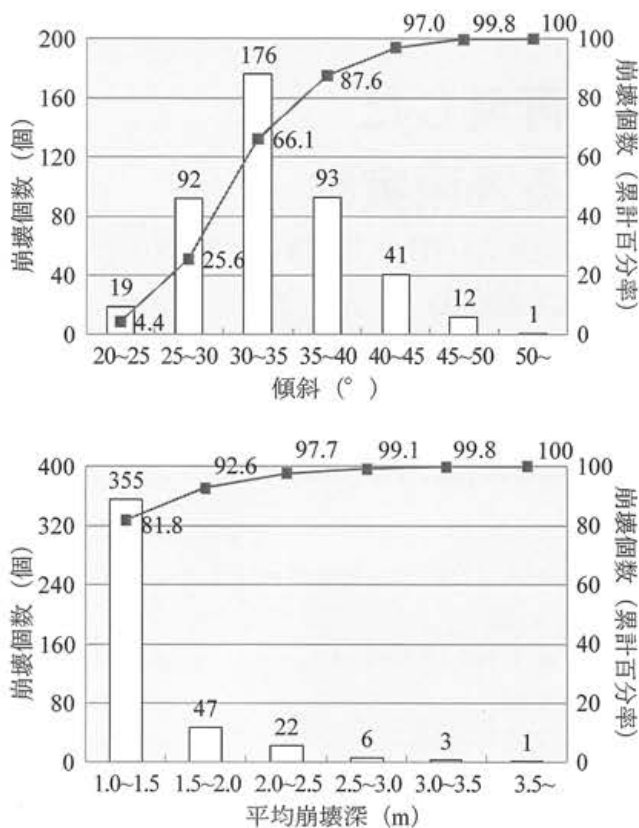


図-2 2009年7月21日に防府地域で発生した土石流の特徴<sup>6)</sup>



写真-1 源頭部の植生と地盤状況 (表土, 風化層厚)

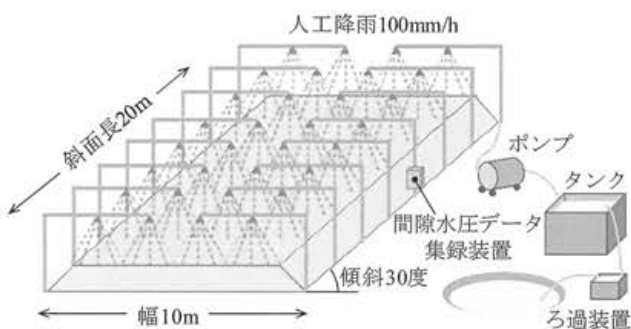


図-3 土石流発生実験模式図

## 2. 実験モデルの参考とした土石流の概況

この実験モデルの参考とした2009年7月21日山口・防府豪雨災害での土石流発生斜面は以下に示すような特徴があった。

### (1) 地質

土石流が発生した地域は中生代白亜紀に形成された広島花崗岩の分布域である。この付近の山地には花崗岩の堅岩が露岩し、まさ土化した風化残積土が谷部などに非常に薄く分布するのが特徴である。

### (2) 地形・規模

土石流源頭部の崩壊は、平均崩壊深 1.5m 以下のものが多く、斜面勾配は 25~40°が多く、特に 30~35°に集中している (図-2)。また、いわゆる0次谷であり、周辺よりやや凹形を示す場所である。源頭部は尾根や谷頭の下へ 10~20m 程度離れていることが報告されている<sup>6)</sup>。

### (3) 表土・植生の特徴と地層構成

写真-1に示すように、表土のA0層が乏しいのが特徴である。植生状況は崩壊地の50%が広葉樹林、これにマツおよびシダを加えた面積は93%を超える<sup>6)</sup>。これは二次林のマツが枯死した後、遷移した幼齢の広葉樹が占め、土壌を緊縛する根系の発達が乏しい状況であることを示す。地層構成は概ね厚さ1.0~1.5mのまさ土化した花崗岩強風化部、あるいは崖錐性の二次まさが分布し、基盤には未風化・難透水性の花崗岩岩盤が分布する。岩盤との境界には基盤岩の風化角礫化部、崖錐堆積物の基底礫層が分布する箇所があり、高透水性が示唆される。

## 3. 土石流発生実験

### (1) 実験方法および条件

2章に挙げた山口・防府豪雨災害の土石流の特徴を再現した以下に示す実験モデル斜面を作成した。また、有効な不織布フィルター構造を検討するために条件を変え、比較として裸地での実験も行った。

#### a) 実験盛土の規模等

2009年7月21日の山口・防府豪雨災害で土石流が多発生した区域内の現地発生のみさ土を用いて、幅10m、長さ20mの斜面を前述した土石流源頭部の特徴を参考に平均的勾配30°傾斜の難透水岩盤(モデルでは張りコンクリート)上に層厚1.3mの盛土を作成した(図-3)。

#### b) 実験に用いた試料およびその力学的性質

実験に用いた試料は、2009年7月豪雨の際の土石流源頭部斜面で採取された土の粒度分布<sup>7)</sup>を参考に

表-1 盛土（まさ土層）の物理的・力学的性質

土粒子密度	$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2.588
最大乾燥密度	$\rho_{max}$	g/cm <sup>3</sup>	1.823
最適含水比	$w_{opt}$	%	14.37
平均粒径	$D_{50}$	mm	0.78
均等係数	$U_c$		15.71
曲率係数	$U_c'$		1.59
間隙比	$e$		0.666
透水係数	$k$	cm/s	$1.04 \times 10^{-3}$
内部摩擦角	$\phi_d$	°	34.1
粘着力	$c_d$	kPa	0.0
水中安息角		°	32

表-2 実験条件

実験 No.	条件	表層		盛土		
		シート厚 (mm)	層数	まさ土層 (m)	粗粒砂層 (m)	レキ層 (m)
1	裸地	—	1層	1.3	—	—
2	裸地	—	2層	1.0	0.3	—
3	フィルター-1	7	2層	1.0	—	0.3
4	フィルター-2	12	2層	1.0	—	0.3
5	フィルター-3	20	2層	1.0	—	0.3

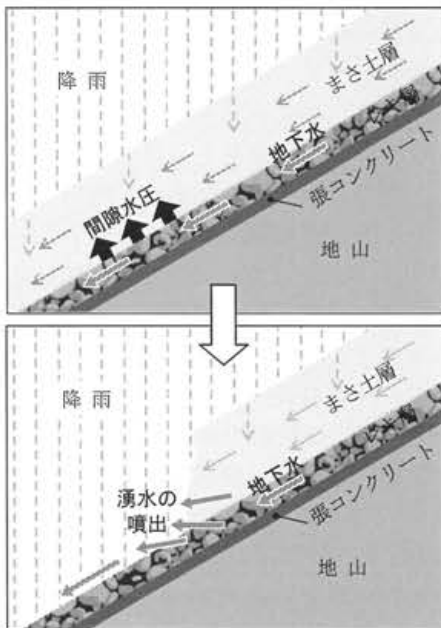


図-4 ボイリング崩壊模式図

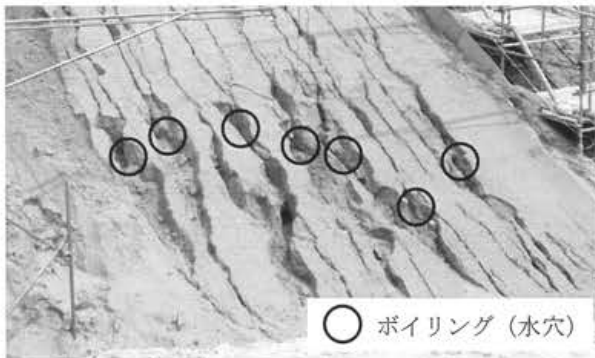


写真-2 ボイリング崩壊発生状況

調達したまさ土であり、盛土は、締固め度  $D_c = 85\%$  で締固め、現場透水係数を平均  $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  となるよう管理して作成した。盛土に用いたまさ土の物理的・力学的性質を表-1 に示すが、締固め度  $D_c = 85\%$  においては、 $\phi_d = 34.1^\circ$  ( $c_d = 0 \text{ kPa}$ )、水中安息角  $32^\circ$  であった。その結果、斜面勾配  $30^\circ$  に対しては、間隙水圧の影響がない場合は安定した斜面状態であることが示される。

c) 降雨実験に用いた水および降雨強度

実験斜面の末端に  $100 \text{ m}^3$  規模の調整池を設置し、沈殿ろ過装置を通して用水として利用した。  $1 \text{ m}^2$  当たり 1 時間  $100 \text{ L}$  の水をスプリンクラーで散水して、時間降雨強度  $100 \text{ mm/h}$  の降雨を最長 5 時間与え、土石流の源頭部崩壊を再現させる実験を行った。

d) 斜面表層

斜面表層は表-2 に示すように、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同等の役割を有する不織布フィルター<sup>8)</sup> (以後、フィルター) 敷設した条件で実験を行った。

e) 盛土条件および観測機器

盛土は実験 1 ではまさ土層  $1.3 \text{ m}$  のみとし、実験 2 ではまさ土層  $1.0 \text{ m}$  と粗粒砂層  $0.3 \text{ m}$  の 2 層構造、実験 3~5 ではまさ土層  $1.0 \text{ m}$  と礫層  $0.3 \text{ m}$  の 2 層構造として、層の構成の違いによる降雨浸透の状況を観測した。このうち、実験 2~5 においてはまさ土層に間隙水圧計を設置し測定を行った。

(2) 実験中に斜面内で観察された事象

実験中に斜面内で観察された事象について以下に示す。

① 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。

② ボイリング崩壊

降雨が連続し地盤内の間隙水圧が高まり、上位の土塊重量を超えたときに深い溝状崩壊が発生した。これをボイリング崩壊と呼ぶ。ボイリング崩壊模式図を図-4 に、ボイリング崩壊の状況を写真-2 にそれぞれ示す。ボイリング崩壊は斜面下部で顕著に発生した。

ボイリング崩壊については河内らが FEM 浸透流解析を行っている<sup>5)</sup>。この解析は土石流源頭部の斜面を  $30^\circ$  勾配とし、花崗岩岩盤上に風化土層があり、これらに挟まれて高透水性の粗粒部分を設定してモデル化している。解析結果では『表土がなく風化層が  $1.0 \text{ m}$  で基盤境界に高透水層が分布する』場合、地表から  $1.0 \text{ m}$  深位置の地下水水頭が、限界動水勾

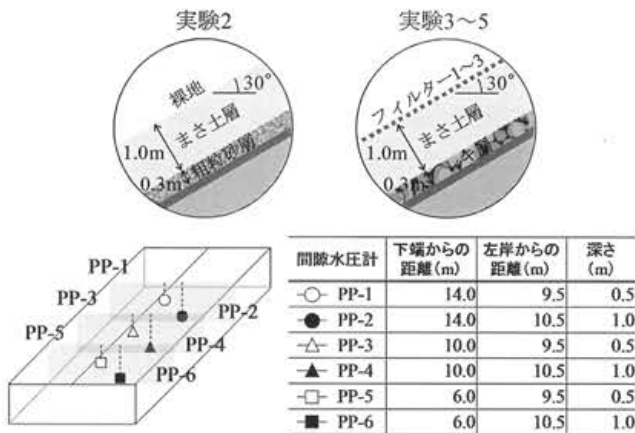
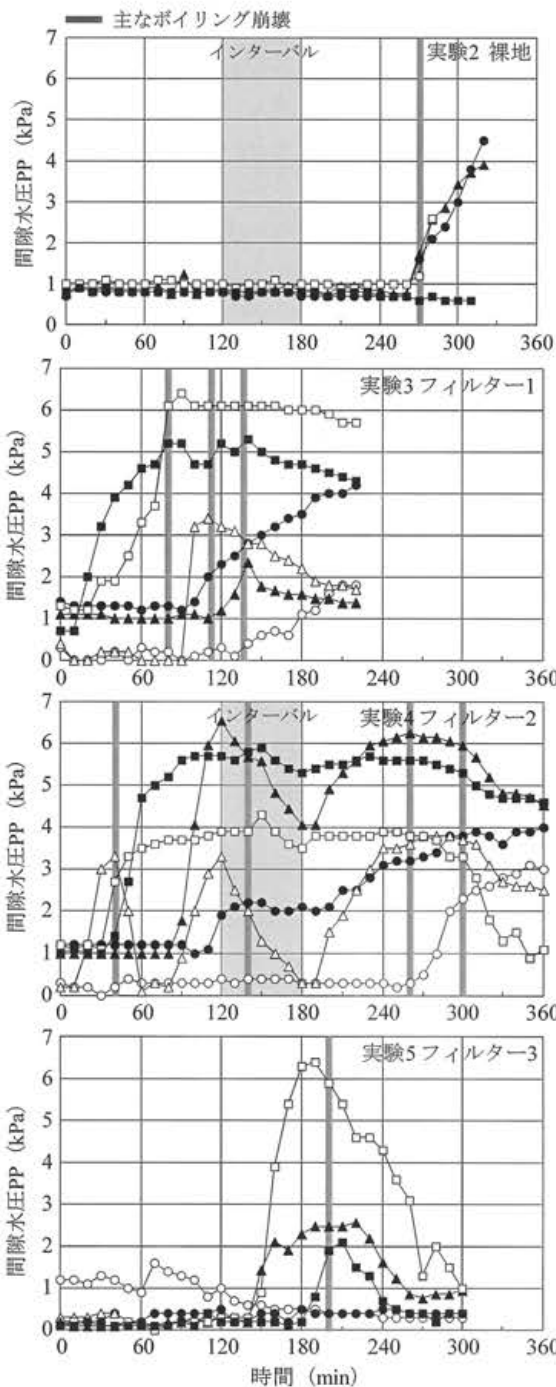


図-5 実験 2～5 の間隙水圧

表-3 降雨強度

	1時間降雨量							降雨量	リターンピリオド (年)
	1	2	3	4	5	6	7		
2009年7月21日(山口)山口・防府豪雨災害	2.5	36.5	74.5	49.5	3.0	53.0	49.5	7時間降雨量 268.5mm	461
2014年8月10日(三入)広島豪雨災害	28.0	80.0	101.0	-	-	-	-	3時間降雨量 209.0mm	252
実験2	100.0	100.0	0.0	100.0	-	-	-	4時間降雨量 300mm	2,814
実験5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	-	-	5時間降雨量 500mm	28,215

配を超えボーリングが発生することが解析されている。この解析では、下層の方が透水性が高い場合、すなわち上下の透水性が逆転し、さらに透水性に差が大きい場合に発生し、まさ土層内の浸透水の集積流が圧力水頭によって表層に噴出するボーリング崩壊のメカニズムが説明されている。

### (3) 降雨強度と降雨停止時間（インターバル）の影響

実験 2～5 の間隙水圧を図-5 に示す。降雨強度について本実験と 2009 年 7 月山口・防府豪雨災害および 2014 年 8 月広島豪雨災害の比較を表-3 に示す。降雨強度を評価するために用いたリターンピリオドは土木研究所アメダス確率降雨計算プログラム<sup>9)</sup>より算出した。ここでリターンピリオドとは、ある事象の生起確率の逆数をとったもの(年/回)で、降雨の場合、指定した規模の降雨が、平均して何年に一回の割合で降る可能性があるかを表す<sup>9)</sup>。

表-3 に示されるように 2009 年 7 月山口・防府豪雨災害では降り始めから 2～4 時間目の豪雨では土石流が発生せず、一旦降雨停止時間（インターバル）を挟んで 2 回目の豪雨中で 7 時間目に土石流が発生した。本実験では降雨の中断が土石流の発生にどのような影響を及ぼすかを検討するために実験 2 および実験 4 では 120 分の降雨の後にインターバル 60 分を設置した。

下層を粗粒砂とした実験 2 ではインターバル中（120～150 分）に、間隙水圧の変動は見られなかった。

下層に高透水性のレキ層がある実験 4 では図-5 の間隙水圧 PP-3, 4 で顕著に見られるように、120 分の降雨で間隙水圧が PP-3 は 3.3kPa, PP-4 は 6.5kPa に上昇し、その後インターバル中にボーリング崩壊が発生し、それに伴って間隙水圧が急減している。一方で PP-2, 5, 6 に見られるようにインターバル中には間隙水圧変化は非常に小さいが 30 分は引き続き上昇し、その後は低下に転じる傾向が認められる。このことから地下水は流速が遅いのでインターバル中にも遅れて間隙水圧が上昇することもあるが、

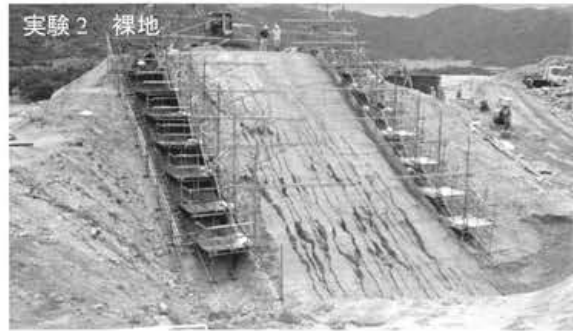


写真-3 降雨開始から2時間後の斜面状況

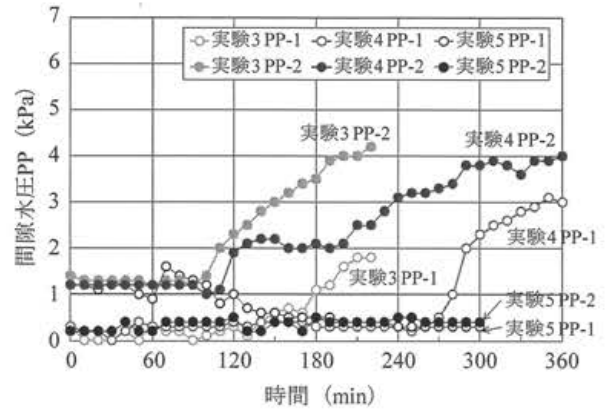


図-6 実験3～5の斜面上部間隙水圧

表-4 間隙水圧 PP-2

実験 No.	条件	上昇開始時間 (min)	4kPa到達時間 (min)
3	フィルター1 薄	100	194
4	フィルター2 中	115	356
5	フィルター3 厚	上昇なし	到達なし

徐々に緩和されることが推測される。しかし、60分程度の降雨インターバルでは間隙水圧の低下量は充分ではなく、PP-3, 4は降雨再開からおおよそ90分後に再び間隙水圧がピークを迎える様子も認められる。これは山口・防府豪雨災害の土石流発生タイミングとほぼ同じであった。各実験の間隙水圧のピークは降雨開始から2時間後もしくはインターバルをはさんで降雨再開から1時間半後であるという傾向がみられた。この傾向は、この厚さ、透水性の土層における特徴であるものと推定される。

#### (4) 構成層の違いによる降雨の浸透状況

写真-3にそれぞれの実験の降雨開始から2時間後の状況を示す。1層構造の実験1では2時間の降雨に対して表面がガリー侵食しただけで他の実験2～4に比較しても健全な状態で崩壊にも至っていない。

実験2は2層構造で2層目が粗粒砂の場合は、降雨開始から2時間後には斜面下部にボイリング崩壊が顕著に発生している。インターバルを除いて約3時間半後に間隙水圧が急激に上昇するとともに、ボイリング崩壊が斜面下部全体に拡がり、斜面上部が不安定化し土石流状の崩壊に至っている。

実験3, 4のように、2層目が透水性の高い礫の場合は、特に降雨開始後60分以内にPP-5の間隙水圧が最大6kPaを超えるレベルまで著しく上昇し、斜面下部では表層に設置したシートに大きな窪みとして現われているボイリング崩壊が発生している。

このことから、不透水性基盤上に分布する薄いまき土層において基盤上に透水性の良い土層を挟む場

合にはボーリング崩壊の誘因となる間隙水圧の著しい上昇を発生させるものと推定される。

#### (5) 盛土の降雨浸透

前述したように、表層部 1.0m 厚さのまさ土層は  $5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  の透水性である。実験 2 に示す一般的な盛土で用いられるような土層状況であれば、100mm/h の豪雨であっても、間隙水圧が上昇するにはインターバルを含むとはいえ 180 分以上を要する。これは、表-3 に示すリターンピリオド 2,800 年を超えるレベルであり、十分な豪雨耐力であると判定される。しかし、大きく透水性に差を作った 2 層モデルでは、実物大モデルにおける 1.0m の深度においても 60 分以内で斜面内部の間隙水圧上昇に影響している。

#### (6) 表層の違いによる土層内間隙水圧の変化

実験 3~5 の斜面上部の間隙水圧をまとめたものを図-6 に示す。また、図-6 から PP-2 の値を抜粋したものを表-4 に示す。最も厚いフィルターを用いた実験 5 では間隙水圧の上昇が抑えられている。

このことから、斜面表面の浸透能の違いが、前述した 2 層構造の最も不利な透水性のモデルにおいても、間隙水圧に影響を与えているものと推定される。

## 4. まとめ

今回の実験で得られた知見を以下に示す。

- 2009 年山口・防府土石流災害で観察された源頭部のように、難透水性岩盤上に透水性を逆転させた 2 層の盛土を配置した実物大実験では、豪雨の連続により土層内の間隙水圧はボーリング崩壊を発生させた。
- 層の構成によって間隙水圧の変動に違いが生じ、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、間隙水圧の急激な上昇が見られた。これは河内らの FEM 浸透流解析<sup>5)</sup>を裏付ける結果となった。
- 降雨が一旦停止するインターバル時間には、一部に間隙水圧の低下が見られた。また降雨再開から 90 分後に再び間隙水圧のピークがくることが明らかとなった。
- 実物大の盛土内への降雨浸透は、 $5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  の透水性の盛土が 1.0m 厚さで分布していても、下層に高透水帯がある場合は、60 分以内の短時間でボーリング崩壊に至る深度までの浸透が発生した。

間隙水圧の上昇を最も遅らせたのは、表層に厚いフィルター敷設の条件で、リターンピリオドは

28,215 年となった。このことより、不織布フィルターの有無が斜面崩壊に大きく影響することが推測される。今回の実験のモデル斜面は模擬岩盤には斜面中央を凹地形とはしておらず、岩盤まで達した浸透水は周辺部に排水される傾向にあった。よって、本実験は、斜面に与えた降雨のみの影響による間隙水圧の変動を観察している。実際の土石流が発生するような谷地形は凹断面となっており、周辺からの表流水が集まるので、さらに間隙水圧のピーク時間は早まるものと考えられる。

不織布フィルターは従来の研究より、SS 抑制効果、ガリー侵食防止効果が実証されているが、本実験により豪雨時浸透抑制効果が確認されたので、土石流発生の予防対策に適用可能であると考えられる。

謝辞：土石流実験は公益財団法人新技術開発財団新技術開発助成によって実施した。ここに記して厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 北原曜：森林土壌におけるパイプ流の特性，水文・水資源学会誌，Vol.5.No.1,pp.15-25,1992.
- 多田泰久，奥村武信，久保田哲也：パイプの存在が斜面崩壊に与える影響の実験的検討，砂防学会誌，Vol.55,No.3,pp.12-20,2002.
- 内田太郎・水山高久：パイプ流が斜面の安全率の変化に及ぼす影響に関する数値計算を用いた考察，砂防学会誌，Vol.55，No.2,pp.14-23,2002.
- 渡辺邦夫・今井久：水みちを持つ斜面内の非定常地下水流れの性質，応用地質，Vol.25，No.1，pp.1-9，1984.
- 河内義文・鈴木素之：地下水の浸透流に着目した土石流発生原因の検討，第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.193-198,2014.
- 平成 21 年 7 月 21 日豪雨山地災害対策検討委員会報告書，<http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cmsdata/8/f/d/8fd95c8d192496f6e07d2e64a5119800.pdf>
- 地盤工学会 2009 年 7 月豪雨による山口県土砂災害緊急調査団：2009 年 7 月 21 日豪雨による山口県防府地区での斜面災害，地盤工学会誌，57-12 (693)，pp.39-42，2009. 12
- 坪郷浩一・中村勝美・山本一夫・上俊二・福田靖：不織布フィルターを用いた降雨時の法面侵食防止に関する研究，地盤と建設，Vol.29.1,pp.89-97,2011.
- 国立研究開発法人土木研究所水災害研究グループ水文チーム：アメダス確率降雨量計算プログラム，<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/offer/amedas/top.htm>，2015.8.1

(2016. 5. 31 受付)