

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

Permeability Mechanism of Slope Consisting of Weathering Granite Soil during Heavy Rain
and Suppression Effect of Pore Water Pressure Due to Multi Function Filter

松本 晶 Aki MATSUMOTO (多機能フィルター(株))
河内義文 Yoshihumi KOCHI ((株)ケイズラブ)
兵動正幸 Masayuki HYODO (山口大学大学院)
鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院創成科学研究科)

2009年7月21日の山口・防府豪雨災害では、山口市と防府市の境界付近を中心に土石流が多発した。このような土石流発生斜面を観察すると、花崗岩の堅岩が露岩し、源頭部にはまさ土化した風化残積土が非常に薄く分布しており、特に透水性に関しての異方性が顕著であった。本研究では、これらの特徴を再現した実物大の実験モデル斜面を作成し、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ことによって、間隙水圧の急激な上昇とそれに伴うボイリング崩壊が観察された。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。

キーワード：降雨実験，豪雨，まさ土，間隙水圧，不織布フィルター (IGC：E06)

1. はじめに

2009年7月21日に山口県中央部を襲った豪雨では、日降雨量は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。この豪雨は概ね6時間で降っており、山口市と防府市の境界付近を中心に土石流が多発した。これらは、高速に流下した泥流状の土石流に特徴付けられ、防府市で14名の死者、23戸の全壊家屋を出すなど大きな被害が発生した¹⁾。

このような土石流発生斜面を観察すると、岩盤が露頭している岩山の形状を呈する。土石流源頭部には、基盤岩強風化部や崖堆積物が薄く分布しているが、土質・粒度は均質ではなく、その影響により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、土石流源頭部には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^{2)~4)}。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^{5), 6)}。しかし、過去に実施された実験⁷⁾では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場合においても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。

また鈴木ら¹⁾は、土石流源頭部の土を用いて、水中での

安息角と土石流発生斜面の勾配を比較し、水中安息角以下の斜面でも土石流が発生していることを示し、その原因として浸透圧によって有効応力が低下して崩壊に至ったことを示唆している。

一方で、源頭部の観察結果から源頭部滑落崖に地下水が流れた孔の存在が報告され⁸⁾、地下水の流れが土石流発生原因であるとする考えもある。

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った。この実験によって、まさ土斜面における土層構成の違いによる豪雨時の間隙水圧の変動、崩壊の過程および表層に不織布フィルターを設置した場合の間隙水圧抑制効果を観測した。実験においては、以下の(1)~(5)で示すような配慮を行い、不確定な変数を極力排除した条件で実験を実施した。

(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(幅10m、長さ20m)を作成した。

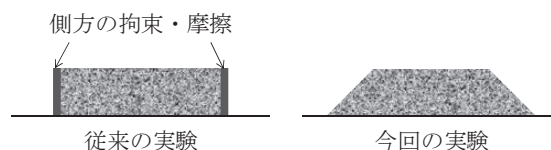


図-1 盛土の断面形状 (イメージ図)

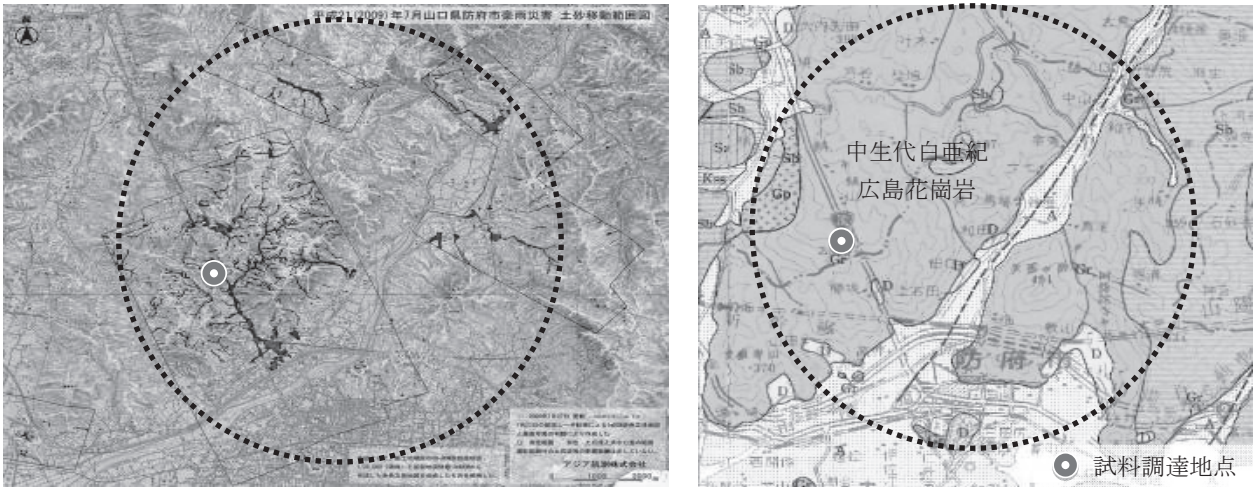


図-2 土石流災害発生範囲と地質図 (アジア航測 (株) 阪口和之氏提供)

(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 の降雨によるまさ土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成した (図-1)。

以下に、豪雨時におけるまさ土斜面の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について述べる。

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。

2.1 地質

土石流が発生した地域は、図-2 の山口県地質学会における地質図⁹⁾に示されるように中生代白亜紀に形成された広島花崗岩が分布している。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。

2.2 地形・規模

土石流源頭部の崩壊は、図-3 に示されるように平均崩壊深 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。また、崩壊源頭部はいわゆる 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から下方へ 10~20m 程度離れていることが報告されている¹⁰⁾。

2.3 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

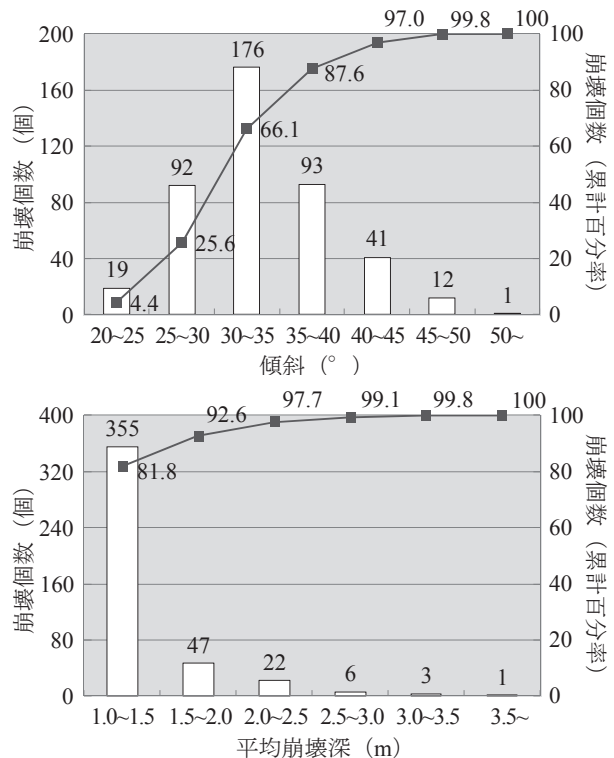


図-3 2009 年 7 月 21 日に防府地域で発生した土石流の特徴¹⁰⁾

およびシダを加えた面積は 93%を超える¹⁰⁾。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。まさ土と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. 土石流源頭部での崩壊発生実験

3.1 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に基づ



写真-1 源頭部の植生と地盤状況 (表土, 風化層厚)

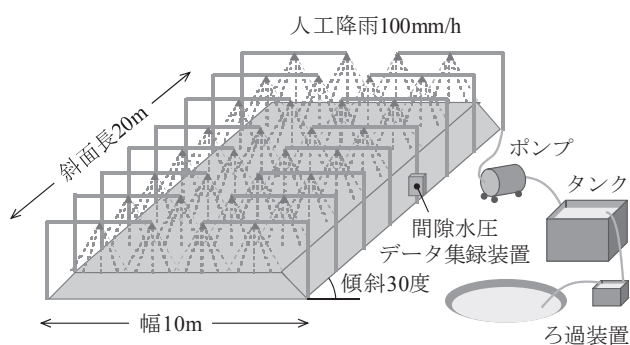


図-4 土石流発生実験模式図

表-1 盛土 (まさ土層) の物理的・力学的性質

土粒子密度	ρ_s	g/cm^3	2.588
最大乾燥密度	ρ_{dmax}	g/cm^3	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	1.04×10^{-3}
内部摩擦角	ϕ_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)		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

いて以下に示す実験モデル斜面を作成した。また、裸地斜面と不織布フィルターを敷設した斜面の条件で実験を行った。

(1) 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 (モデルでは鉄筋入り張りコンクリート $t=13\text{cm}$) 上に層厚1.3mの盛土することにより作成した (図-4)。

(2) 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¹⁾を参考に調達したまさ土であり (図-2に試料調達地点を示す)、盛土は、締固め度 $D_c=85\%$ で締固め、現場透水係数 (JGS1316) は平均 $5 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ となった。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、室内実験では締固め度 $D_c=85\%$ においては、透水係数 $k=1.04 \times 10^{-3}\text{cm/s}$, $\phi_d=34.1^\circ$ ($c_d=0\text{kPa}$)、水中安息角 32° であった。その結果、斜面勾配 $\alpha=30^\circ$ に対しては $\alpha < \phi_d$ なので間隙水圧の増加がない場合は安定した斜面状態であることが示される。

(3) 降雨実験に用いた水および降雨強度

実験斜面の末端に 100m^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循環利用した。 1m^2 当たり1時間100Lの水をスプリンクラーで散水して、時間降雨強度 100mm/h の降雨とし、斜面に最長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。

(4) 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¹²⁾ (以後、フィルター) を敷設した条件で実験を行った。ここで、不織布フィルターの浸透能力等に注目した検討はないため、本論文では示していない。

(5) 盛土条件および観測機器

2.3に示す土石流発生斜面に見られる特徴を参考にして、盛土は実験1ではまさ土層1.3mのみとし、実験2ではまさ土層1.0mと粗粒砂層0.3mの2層構造、実験3~5ではまさ土層1.0mと礫層0.3m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常時飽和させた状態の間隙水圧計 (容量 200kPa 、精度 0.01kPa) を設置し測定を行った。

3.2 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。ガリー侵食の状況を写真-2に示す。

(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

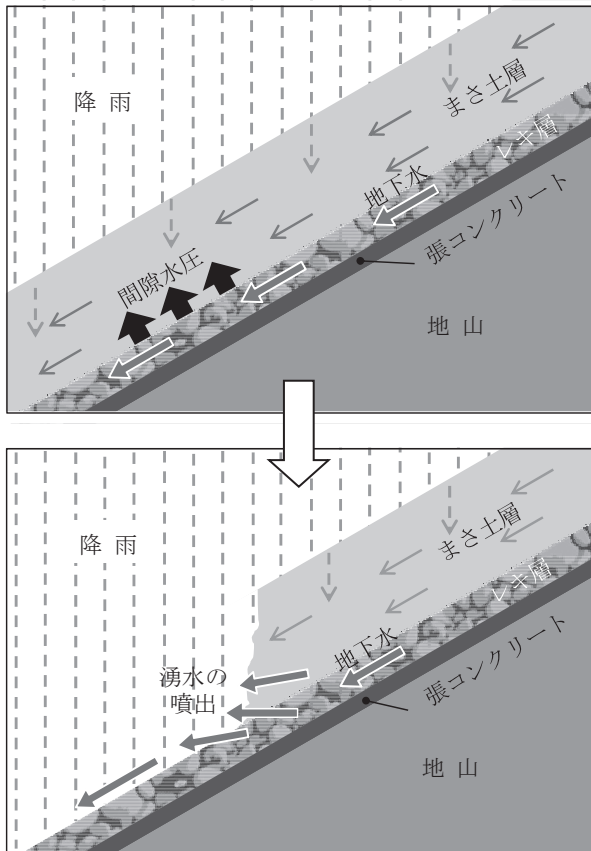


図-5 ボイリング崩壊 (模式図)



写真-2 ガリー侵食発生状況

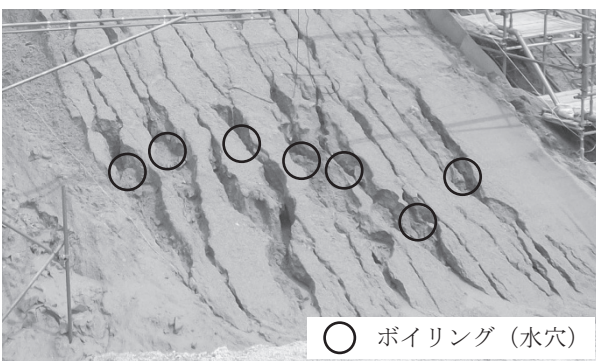


写真-3 ボイリング崩壊の発生状況

写真-4 実験2の崩壊状況

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	80	101	—	—	—	—	3時間降雨量 209mm	252
実験1	100	100	—	—	—	—	—	2時間降雨量 100mm	1,583
実験2	100	100	0	100	※100	—	—	5時間降雨量 400mm	6,848
実験3	100	100	100	※100	—	—	—	4時間降雨量 400mm	10,973
実験4	100	100	0	100	100	100	—	6時間降雨量 500mm	14,445
実験5	100	100	100	100	100	—	—	5時間降雨量 500mm	21,069

※ 途中崩壊発生

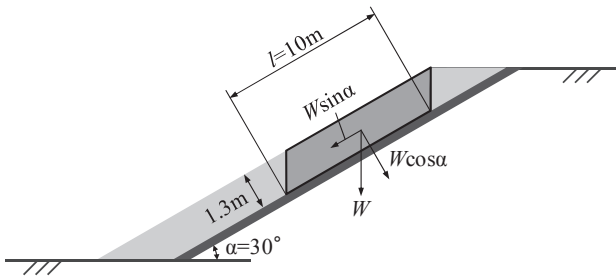


図-6 崩壊時の斜面模式図

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-5に、ボイリング崩壊の状況を写真-3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。ボイリング崩壊から排出する湧水は、時間の経過に伴って清水になるが、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。

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⁹⁾。この解析は土石流源頭部の斜面を30°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1.0mで基盤境界に高透水層が分布する』場合、地表から1.0m深位置の地下水水頭が、限界動水勾配を超えボイリングが発生することが解析されている。この解析では、下層の透水性が高く上層との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イリング崩壊のメカニズムが説明されている。

(3) 斜面崩壊の状況

時間の経過に伴って下流部のボイリング崩壊周辺が流亡し、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壊した。写真-4に実験2の崩壊状況を示す。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。

崩壊時の斜面を図-6のように定義して、このときの安全率 F_s を修正フェレニウス法¹³⁾で求めると(奥行き1mと仮定)。

$$F_s = \frac{cl + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi}{W \sin \alpha} \quad (1)$$

ここに、

c : 粘着力 (kN/m²)

l : すべり面の長さ (m)

u : 崩壊時の間隙水圧 (kN/m²)

$u=4\text{kPa}$ と仮定する

α : 斜面勾配 (°)

ϕ : 内部摩擦角 (°)

W : 土塊の自重 (kN)

$W = A \times \gamma_t$

A : 断面積 (m²)

γ_t : 崩壊時の湿潤単位体積重量 (kN/m³)

$$F_s = \frac{0 \times 10 + (10 \times 1.3 \times 20 \times \cos 30^\circ - 4 \times 10) \tan 34.1^\circ}{10 \times 1.3 \times 20 \times \sin 30^\circ}$$

$$= 0.96$$

となり、 $u=4\text{kPa}$ の時に安全率 $F_s < 1.00$ となり、源頭部崩壊の危険性が高まることが分かる。なお、後述の降雨実験結果において $u=4\text{kPa}$ 程度まで間隙水圧が上昇していた。

3.3 降雨強度と降雨停止時間(インターバル)の設定

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¹⁴⁾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¹³⁾。

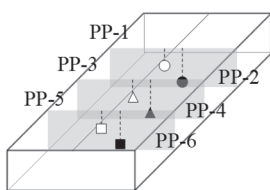
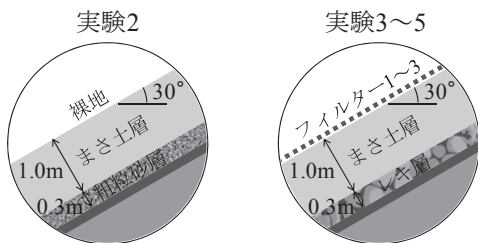
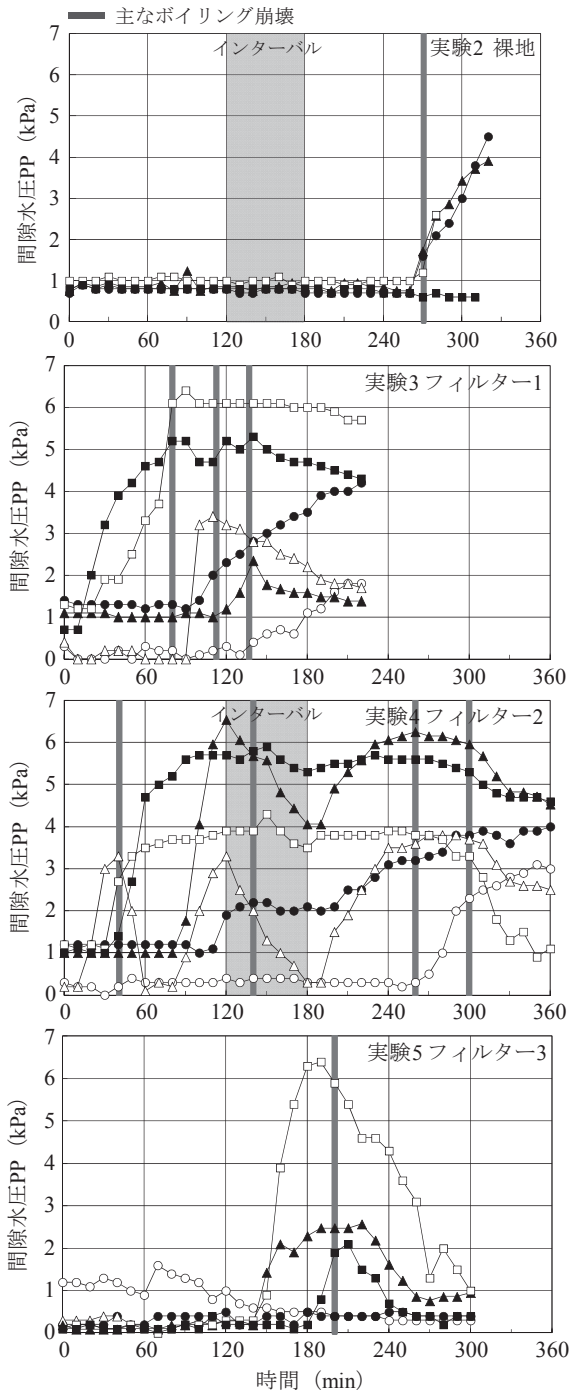
表-3に示されるように2009年7月山口・防府豪雨災害では降り始めから2~4時間目の豪雨では土石流が発生せず、一旦降雨停止時間(インターバル)を挟んで2回目の豪雨中で7時間目に土石流が発生した。本実験では降雨の中断が土石流の発生にどのような影響を及ぼすかを検討するために実験2および実験4では120分の降雨の後にインターバル60分を設置した。

3.4 斜面内の間隙水圧の応答とインターバルの影響

実験2~5の間隙水圧の時刻歴(0~360min)を図-7に示す。ただし、間隙水圧計を飽和させた際の滞水状況によって初期値が異なる。また、実験2の間隙水圧計設置はPP-2, 4, 5, 6のみ、その他ボイリング崩壊時に地上に露出する等で測定不能となったものは、それまでの値のみをプロットした。ここで、ボイリングの発生条件は、有効上載圧 W' と間隙水圧 U の比で求められるが ($F_s = W'/U$)、間隙水圧の計測場所がボイリング崩壊の発生箇所と同位置とは限らないので、本論文では検討していない。

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

一方、下層に高透水性のレキ層がある実験4では、降雨継続中に発生したボイリング崩壊に伴い間隙水圧(PP-3)の低下が見られる。その後再び上昇しインターバル中にボ



間隙水圧計	下端からの距離 (m)	左岸からの距離 (m)	平均深さ (m)
○ PP-1	14.0	9.5	0.5
● PP-2	14.0	10.5	1.3
△ PP-3	10.0	9.5	0.5
▲ PP-4	10.0	10.5	1.1
□ PP-5	6.0	9.5	0.5
■ PP-6	6.0	10.5	1.0

図-7 実験 2~5 の間隙水圧の時刻歴 (0~360min)

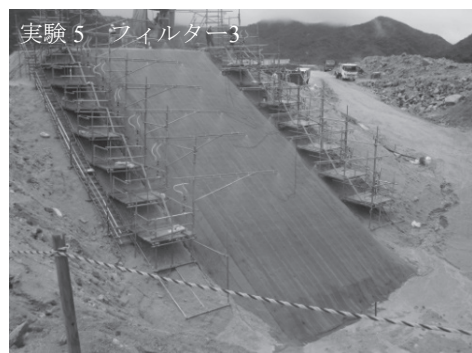
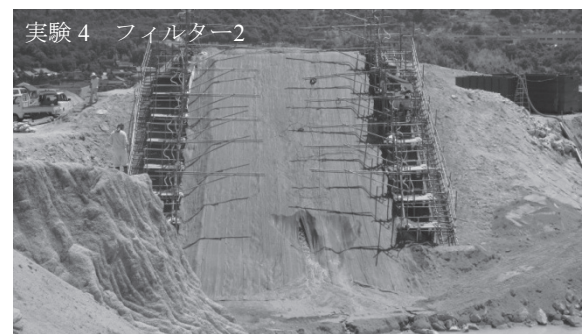
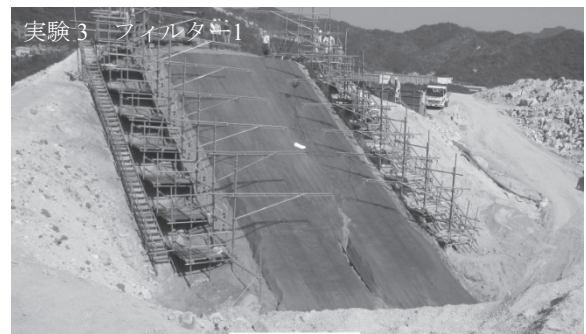
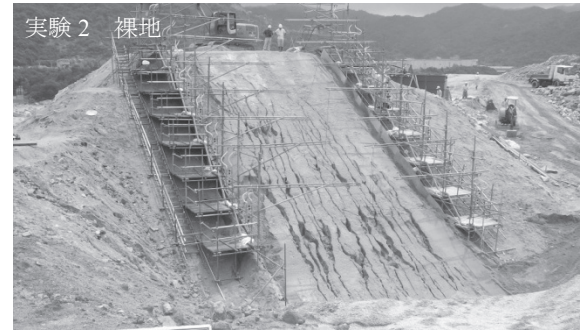
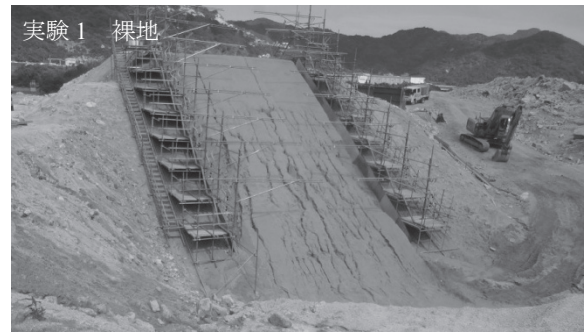


写真-5 降雨開始から2時間後の斜面状況

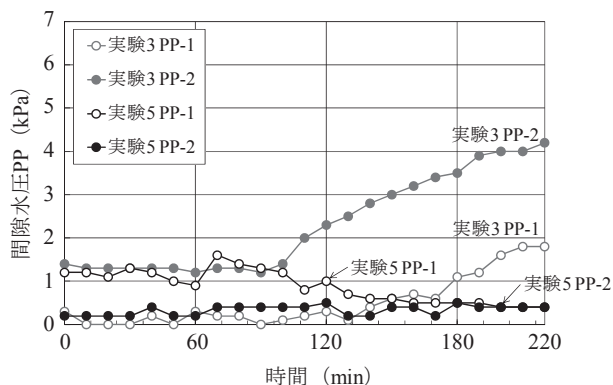


図-8 実験 3, 5 の斜面上部間隙水圧

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
5	フィルター3 厚	上昇なし	到達なし

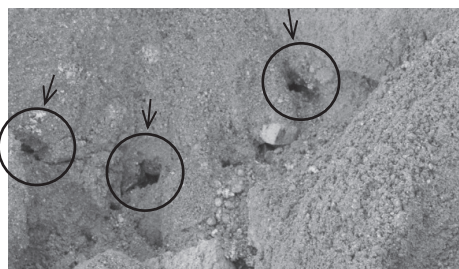


写真-6 ボイリング崩壊内に見られるパイプ

イリング崩壊が発生し、それに伴って間隙水圧が急減した。一方で PP-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。このことから単一土層とは異なり 2 層構造では流速の差によって、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、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、この厚さと透水性の土層における特徴であるものと推定される。また、図-7 には条件の異なる実験 3, 5 の間隙水圧の時刻歴も示しているが、間隙水圧の挙動が実験 4 とは異なっていることが分かる。

3.5 構成層の違いによる降雨の浸透状況

写真-5 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。

2 層構造で 2 層目が粗粒砂の実験 2 では、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-6 の間隙水圧が最大 4kPa 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さ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イ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。

3.6 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、十分の豪雨耐力を有すると判定される。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が上昇した。

3.7 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-8 に示す。また、図-8 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おり、表-3 に示すようにリターンピリオドは 21,069 年となった。

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。

3.8 源頭部に観察されるパイプについて

実験中にボイリング崩壊が発生した部分を観察すると、浸透水が通過した、いわゆるパイプが観察された(写真-6)。パイプは高透水性の粗粒層内あるいは粗粒層の直上に形成され、形状は円筒状ではなく、細粒物が流亡し、周辺粗粒礫などがブリッジ効果で側壁・天端を安定的に保護しており、一見すると平行四辺形、菱形、角形を示し、直径に換算すると 2~5cm 程度の大きさであった。

また、ボイリング崩壊時はパイプから細粒分を含んで濁った浸透水が流出するが、約 10 分程度後には見た目では清水が流出しており数時間を経た実験終了時に至るまで孔壁が拡大する傾向は見られなかった。浸透水の流出量はボイリング崩壊の発生直後をピークとして周辺まさ土を細長く泥流化させるが、崩壊後はパイプからは被圧されていない水の流出が続くのみであるので、周辺土石を押し流す勢いにはならなかった。

4. まとめ

今回の実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 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に差をもたせた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。
- (2) 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⁹⁾を裏付ける結果となった。
- (3) 時間の経過に伴い下流部のボーリング崩壊周辺が流亡し、斜面全体のバランスが崩れ、上流部から下流方向に向かって崩壊が発生した。
- (4) 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。
- (5) 降雨が一旦停止するインターバル時間に、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。
- (6) 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 21,069 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（浮遊懸濁物質：Suspended Solids）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。

また実験中に観察された現象では、ボーリング崩壊頭部にパイプが形成された。このパイプはボーリング崩壊時の圧力源となったものと推定されるが、ボーリング崩壊発生後の小径のパイプからは、圧力を持たない清水が流出するので、このようなパイプが多く集まっても、排水では直接土石流の原因となるには至らないものと推定される。

謝辞

降雨実験は（公財）新技術開発財団新技術開発助成によって実施しました。ここに記して厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木素之, 兵動正幸, 阪口和之, 河内義文, 川崎秀明, 中田幸男, 朝位孝二, 吉本憲正, 石蔵良平: 2009年7月21日山口県防府地区での土石流災害の実態とその発生メカニズムの多角的検討, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.185-194, 2010.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Kochi, Y., and Suzuki, M.: A study on the causes of debris flow focusing on groundwater infiltration., *Proceeding of the TC105 ISSMGE international symposium on Geomechanics from Micro to Macro*, Cambridge, UK, pp.895-903, 2014.
- 7) 例えば, アタパッツ A.M.R.G., 丸野雄太郎, 土田孝, 丸田亮, 米良知己: パイプフローが斜面の安定に及ぼす影響に関する実験的研究, 地盤と建設, Vol.33, No.1, pp.131-138, 2015.
- 8) 例えば, 大川侑里, 金折裕司, 今岡照喜: 防府市と山口市で発生した土石流の性状と発生メカニズム, 第5回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.117-122, 2010.
- 9) 山口県地学会: 地質図, 2012.
- 10) 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>, 2010.2.16.
- 11) 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, Vol.57, No.12, 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, No.1, pp.89-97, 2011.
- 13) 日本道路協会: 道路土工, 切土工・斜面安定工指針, p.399, 2009.
- 14) 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>, 2015.7.27.

(2017年6月14日 受付)