

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

Experimental Study on the Effect of Pipeflow on Stability of Slopes

アタパッツ A.M.R.G.	A.M.R.G. ATHAPATHTHU	(広島大学大学院工学研究院)
丸野雄太郎	Yutaro MARUNO	(広島市役所)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究院)
丸田 亮	Ryo MARUTA	(広島大学工学部)
米良 知己	Tomoki MERA	(広島大学工学部)

近年、豪雨時における自然斜面の土砂災害が多発している。自然斜面が崩壊する要因のひとつとして、降雨に伴う地下水位の上昇があげられる。地下水位の上昇には、自然斜面に存在するパイプが大きく作用すると考えられる。しかし、パイプの斜面崩壊に対する影響は明らかになっていない。本論では、自然斜面に存在するパイプを再現した模擬パイプを用い、パイプを挿入した模型斜面に人工降雨装置による散水を行い、パイプが斜面崩壊に与える影響を検証した研究に関して報告する。模擬パイプの有無または長さや配置の異なる実験ケースを行った。実験ケースの比較から土中のパイプが斜面崩壊の危険度を上昇させる要因であることが明確になった。

キーワード：パイプフロー，斜面安定，模型実験，降雨強度 (IGC : E-6, E-7, E-14)

1. はじめに

西日本では豪雨時の斜面崩壊は一般的な自然災害であり、地域的な崩壊の多くがまさ土として知られている風化花崗岩で覆われた斜面で発生したことが判明している¹⁾。特に、2014年8月20日に発生した広島大規模土砂災害は、死者74名という人的被害としては過去30年間で最多となる災害であった²⁾。自然斜面が崩壊する要因は、飽和度上昇による地盤の強度低下と重量の増加、間隙水圧の上昇などであり、それらは降雨に伴う地下水位の上昇が主な要因である³⁾。激しい降雨などが原因となり地下水の排除が追い付かず斜面崩壊につながる。また、斜面内の排水システムが原因と考えられる土砂災害が多く見受けられる。特にパイプと呼ばれる、植物根の枯死跡や小動物などの作用によって形成されたマクロ細孔は自然斜面、多くの場合、日本の崩壊した斜面や谷の上方で見られるが、これまでパイプの斜面崩壊に対する影響は明らかになっておらず、ほとんどの場合でこれらの効果は考慮されてこなかった。このパイプを通る水の流れはパイプフロー^{4), 5)}と呼ばれ、また、パイプの存在は山地斜面⁶⁾で共通であり、山地斜面での水力学⁷⁾に影響するとされている。一部の研究者はパイプフローが地下侵食^{6), 8), 9), 10)}や地すべり⁸⁾の発生に影響を与えることを指摘している。地下水流れと自然斜面を分析するために利用可能な文献は多数あるが、パイプの存在と斜面の安定性への影響はいまだ完全には解明されていない^{11), 12), 13)}。また、土壌のパイプを通る地下水の流れはこれらのモデルのほ

とんどで考慮されていない⁶⁾。

パイプの存在は様々な面で斜面安定に影響を及ぼし得る。パイプには地中のパイプが途中で途切れ、パイプに放水口がないものとパイプが表層あるいは法面まで続いているものの主に二つのタイプがある。激しい降雨時には、放水口がないパイプは地中の一箇所に水を集中させるため斜面の不安定性を引き起こす可能性がある。斜面の不安定性は放水口のないパイプの数、大きさ、土壌の空隙率、せん断強度特性などの多くの要因に依存し得る。これとは対照的に、放水口のあるパイプは水の円滑な排出を容易にする。したがって、これらのパイプは排水性を改善し、間隙水圧を下げることにより斜面安定性を向上させ得る¹⁴⁾。パイプの崩壊によって、一般的には様々な放水口に水が迂回するが、水が別の空洞を通り流れることができない場合には流れがせき止められる¹⁴⁾。このことは、斜面の有効応力を低下させ、最終的には地すべりを発生させる、間隙水圧の大きな蓄積を引き起こす可能性がある。

本研究における実験では、模型斜面にまさ土を用いた地盤を形成し、人工降雨実験により研究を行った¹⁵⁾。パイプ流が地盤内に及ぼす影響を検証するために、模型斜面に設置したピエゾメーターによって地下水位の上昇過程を調べ、ビデオカメラで実験の様子を撮影し、斜面の崩壊過程を記録した。さらに、模擬パイプの有無やパイプの長さ、配置を変えた実験ケースを設定し、それぞれの実験結果の違いからパイプ流が斜面安定に及ぼす影響を検証した。

2. 人工降雨実験

本章では、模型斜面における人工降雨実験を行うにあたり、実験に用いた模型と降雨の概要、実験方法について述べる。

2.1 模型斜面および模擬パイプの概要

本研究では模型実験の土試料はホームセンターで購入した園芸用のまさ土を使用した。この土試料の物性値を得るため、土質試験を行った。土質試験は、土粒子密度試験、粒度試験、土の最小密度・最大密度試験、土の定水位透水試験を実施した。土質試験から求めた土試料の物性値および粒径加積曲線を表-1 および図-1 にそれぞれ示す。本実験では、4章の安定解析において内部摩擦角および粘着力の決定に用いた図-10 および図-11 で使用されているまさ土である、2mm以下のものを使用した。

図-2 に本実験で使用した模型の寸法と人工降雨装置の設置状況を示す。斜面の傾斜は30°、土層厚は10cmで条件を固定した。不透水基盤層は模型斜面に油粘土を敷き詰めて作成した(図-3)。また、地下水位の上昇過程を把握するため、土層最深部にピエゾメーターを設置した。ピエゾメーターの配置図を図-3 に示す。図-3 を見ると、斜面中央にピエゾメーターが一直線に配置されていないが、地下水位が斜面の水平方向に対して平行に上昇すると仮定することで、一直線に配置した場合と同じように地下水位の上昇過程を測定できるとした。ピエゾメーターは18個設置しており、piez-9, 18のみ並列している。

図-4 に擬似パイプの概要を示す。パイプの内径は1cmである。これは、自然斜面で観測されるパイプ径の多くが1cm前後であるためである¹⁶⁾。本研究では、実際のパイプを再現するために、メッシュ状の鉄網を用いて擬似パイプを作成した。強度の高い鉄網を使用することでパイプ内の空洞を保った状態で本実験における土層の土圧にも耐えることができる。また、鉄網で作成したパイプにろ紙を巻いて、パイプ内に土試料が侵入するのを防いだ。さらに、そのうえから目の細かいネットを覆い、パイプ内に水のみが流れるようにした。ろ紙やメッシュ状の素材でパイプを作成することで、パイプ側面における水の流入を可能にしている。

2.2 実験方法

実験ケースを表-2 に示す。なお、簡略的に模型斜面上端から下端までの長さのパイプをフルパイプ、フルパイプのほぼ半分の長さのパイプをハーフパイプと呼ぶこととする。実験における初期飽和度 S_r は30%で固定して行った。本実験では水道圧を利用した人工降雨装置を用い、模型斜面に雨を降らし、人工的な斜面崩壊を発生させた。降雨時には30秒毎に各ピエゾメーター横に設置し

表-1 土試料の物性値

基本的な特性	値
土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.56
最大間隙比, e_{max}	0.98
最小間隙比, e_{min}	0.58
透水係数, k (cm/s)	2.48×10^{-2}

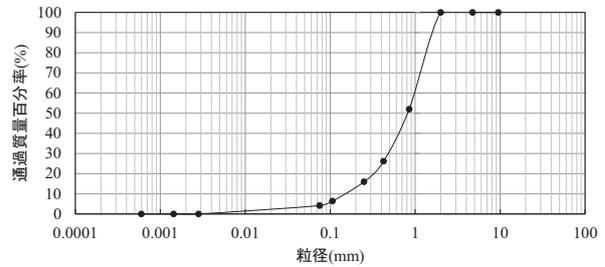


図-1 粒径加積曲線

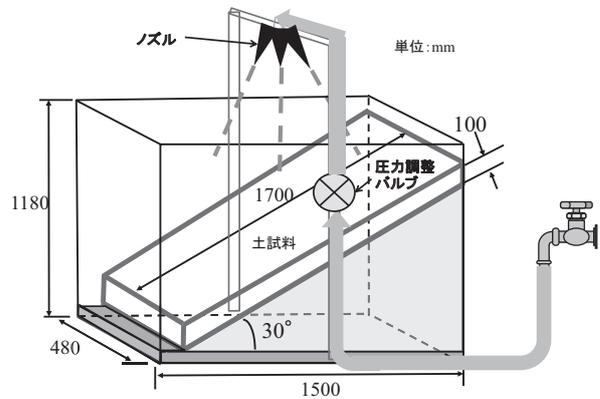


図-2 模型の概要

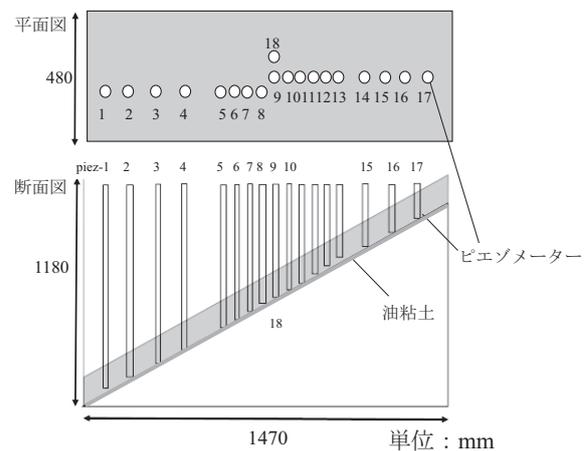


図-3 ピエゾメーターの配置図

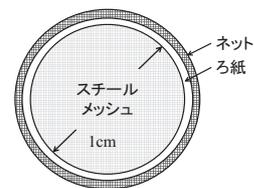


図-4 模擬パイプの概要

表-2 実験ケース

実験ケース	間隙比 e	初期飽和度 S_r (%)	パイプの本数(本)	降雨強度 r (mm/hr)	パイプの有無	パイプの基盤面からの垂直方向距離	崩壊までにかかった時間
1	0.90	30	0	120 (128)	なし		9分55秒
2	0.98			120 (113)	なし		9分5秒
3	0.90			70 (65)	なし		30分
4			70 (65)	ハーフパイプ	2cm	29分30秒	
5			70 (75)	ハーフパイプ	5cm	18分40秒	
6			70 (65)	フルパイプ	5cm	崩壊せず	
7	120 (120)		ハーフパイプ	5cm	8分40秒		

注) 降雨強度の () 内の値は実験終了後の水量測定により算出

た目盛りを読み取り、地下水位の変動を観察した。ピエゾメーターの読み取りは、斜面崩壊が起きるか、人工降雨実験開始から 60 分経過しても模型斜面が崩壊に至らなかった時点で終了とした。なお、本実験では斜面の土砂が移動し、動きが止まらない状態となることを崩壊の定義とした。また、斜面下端には斜面内の水が排水されるよう 75 μ m の網（外枠が縦 12cm、横 48cm の矩形）を設置し、斜面内から流れる水量をコンテナとはかりを用いて計測した。なお表-2 における降雨強度は実験前に行ったキャリブレーションをもとに設定した。また、降雨強度の () 内の値は実験終了後の水量測定により算出した。



(a) 実験前 (b) 実験後

写真-1 ケース 3 における実験前後の斜面状況

3. 実験結果

本章では、本研究の実験の内、特に実験ケース 3, 4, 5, 6 の各実験結果について述べる。なお、実験ケース 3, 4, 5, 6 における地下水位の経時変化の図-6, 7, 8, 9 では、代表的な測定点について示した。

3.1 実験ケース 1

実験ケース 1 (パイプなし, 降雨強度 $r = 120$ (128) mm/hr, 間隙比 $e = 0.90$) では、キャリブレーションの結果より降雨強度 $r = 128$ mm/hr のとき、斜面崩壊時に斜面内に含まれる水は約 24.2kg であった。さらに、崩壊時の平均飽和度は $S_r = 65.4\%$ であった。また、崩壊時における各ピエゾメーターの計測値の平均は約 4.0cm であった。

3.2 実験ケース 2

実験ケース 2 (パイプなし, 降雨強度 $r = 120$ (113) mm/hr, 間隙比 $e = 0.98$) では、キャリブレーションの結果より降雨強度 $r = 113$ mm/hr のとき、斜面崩壊時に斜面内に含まれる水は約 22.4kg であった。さらに、崩壊時の平均飽和度は $S_r = 56.5\%$ であった。また、崩壊時における各ピエゾメーターの計測値の平均は約 2.0cm であった。

3.3 実験ケース 3

実験ケース 3 (パイプなし, 降雨強度 $r = 70$ (65) mm/hr,

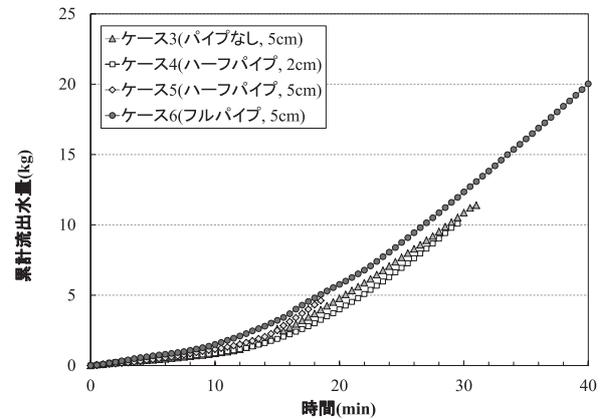


図-5 ケース 3, 4, 5, 6 での斜面からの累計流出水量

間隙比 $e = 0.90$) の実験前と実験後の斜面状況を写真-1 に示す。また、図-5 にケース 3, 4, 5, 6 での斜面からの累計流出水量の測定結果を、図-6 にケース 3 におけるピエゾメーターの経時変化をそれぞれ示す。ピエゾメーターの読み取り間隔は、30 秒ごとに行った。

写真-1 を見ると、斜面全体で崩壊が起こっていることがわかる。崩壊はまず、斜面上部あたりにひび割れが発生し、ひび割れが模型幅まで伸びたのちに崩壊した。その直後に模型斜面最上部で再度ひび割れが形成され、再び崩壊が起こった。

図-6 を見ると、斜面下部に位置する piez-1, 2, 6, 7 のピエゾメーターが高い値を示している。したがって、斜

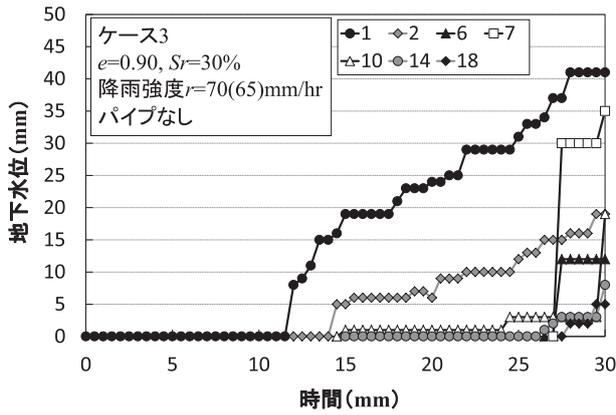


図-6 ケース3における地下水位の経時変化

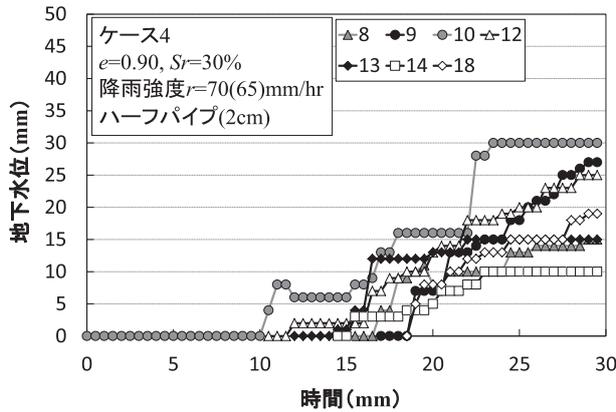


図-7 ケース4における地下水位の経時変化

面下部から基盤面より上に地下水位が上昇していることが推測できる。また、piez-7など崩壊直前に急激に地下水位が上昇しているピエゾメーターがいくつか存在している。これは、斜面内で内部浸食が発生し、それによる土塊の移動によって強い土圧がかかったこと、あるいは作成した土層の締固めの不具合などによる斜面内の地盤の不均一性によって、水が集中的に溜まりやすい地点がいくつか存在していた可能性が考えられる。さらに、崩壊時におけるピエゾメーターの計測値は地下水位の高い地点に着目すると約3.2cmであった。

図-5を見ると、ケース3では実験開始30分後で約11.0kgの水が浸透水あるいは表層流として斜面下に排水されている。キャリブレーションによって、降雨強度 $r = 65\text{mm/hr}$ のとき、5分間で約4.0kgの水が人工降雨装置によって散水されているのが分かっている。したがって、30分間で約24.0kgの水が降雨として散水され、約11.0kgが排水されている。つまり、崩壊時に斜面内に約24.6kgの水が含まれていたといえる。さらに、そこから崩壊時の平均飽和度を算出すると、 $S_r = 63.6\%$ であった。しかし、本実験では測定していないが、ケース3に限らず各地点における飽和度は土層の高さによって異なると考えられるため、今後は各地点における深度ごとの飽和度を観測することが必要であるといえる。

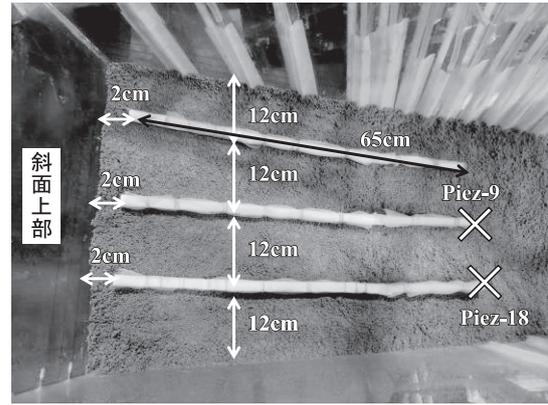
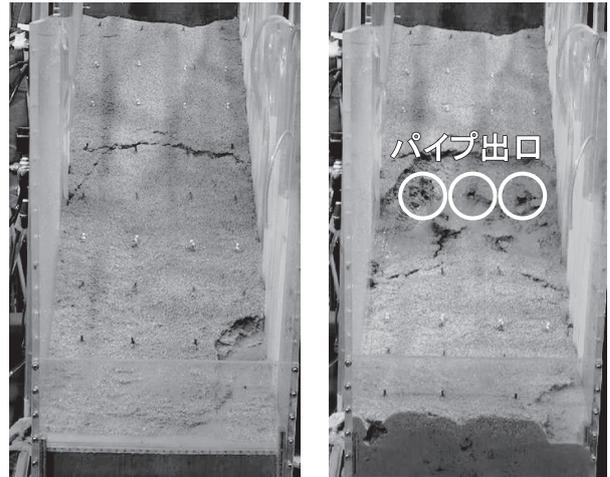


写真-2 模型斜面内のパイプの設置状況



(a) 崩壊直前

(b) 崩壊時

写真-3 ケース4における崩壊時の斜面状況



写真-4 ケース4における実験終了時の斜面状況

3.4 実験ケース4

実験ケース4(基盤面からの垂直方向距離2cmにハーフパイプ、降雨強度 $r = 70(65)\text{mm/hr}$ 、間隙比 $e = 0.90$)における模型斜面内のパイプの設置状況を写真-2に示す。パイプは基盤面から2cmの高さに設置している。パイプの出口付近は地下水位が上昇しやすい状況であるため、ピエゾメーターの配置間隔を狭めている。また、パイプは写真-2のように等間隔で3本設置し、各パイプの長さ

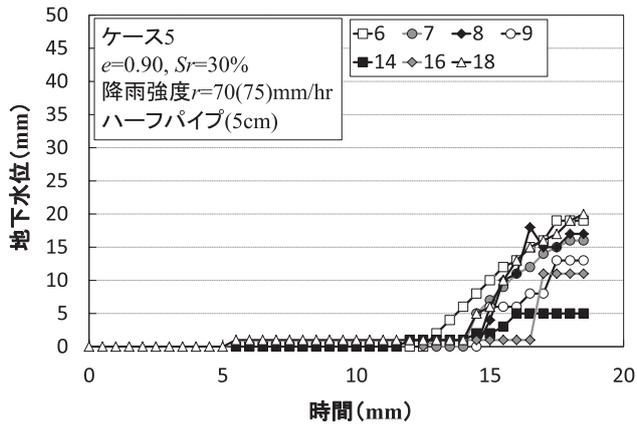


図-8 ケース5における地下水位の経時変化



写真-5 ケース5における実験終了時の斜面状況

は65cmである。

写真-3に崩壊時の模型斜面の状況を、写真-4に実験終了時の斜面状況を、図-7にケース4における地下水位の経時変化をそれぞれ示す。

写真-3を見ると、パイプの出口付近である斜面中腹部から崩壊しているのが確認できる。パイプ出口付近(斜面中腹部)から発生したひび割れが徐々に広がり、そこから一気に崩れた。また、実験開始から崩壊までは29分30秒であった。この結果は、パイプの有無のみで条件が異なるケース3の場合とほぼ同程度であった。

図-6,7よりケース3とケース4における地下水位の上昇過程の違いを確認できる。まず、ケース4では反応を示したピエゾメーターのほとんどが斜面中腹部に位置するものであった。特にパイプ出口のごく近傍である piez-9, 10 が最も高い値を示した。したがって、擬似パイプによる水の流れがパイプ出口付近で溜まり、地下水位の上昇につながったと考えられる。また、図-7より崩壊時におけるパイプ出口付近のピエゾメーターの計測値は地下水位の高い地点に着目すると約2.9cmであった。

図-5を見ると、実験開始後13分後まではケース3、ケース4ともに同じような挙動を示しているが、それ以降は、ケース3のほうが斜面からの流出量が多いことがわかる。ケース4では、崩壊時斜面の保有していた水量は約25.1kgで、その時の平均飽和度は $S_r=64.7\%$ であった。

3.5 実験ケース5

実験ケース5(基盤面からの垂直方向距離5cmにハーフパイプ、降雨強度 $r=70(75)$ mm/hr、間隙比 $e=0.90$) ではパイプの設置深さを基盤面から5cmの地点に設置し、その他の斜面内の条件は実験ケース4と同じである。

写真-5に実験終了後の模型斜面の状況を、図-8にケース5における地下水位の経時変化をそれぞれ示す。

崩壊は写真-5のように、斜面全体で発生した。また実験ケース4と同様にパイプ出口付近でひび割れが発生し、そのひび割れが広がって崩れた。その後、残っていた斜

面上部の斜面も斜面下部が崩れたことで抵抗力を失い、パイプごと斜面下部に崩れ落ちた。崩壊までにかかった時間は18分40秒と実験ケース4と比べて約11分早い。降雨強度が実験ケース4の場合よりも大きいこと、そしてパイプの設置深さの違いが崩壊をよりはやく引き起こしたと考えられる。

図-8を見ると、実験ケース4と同様にパイプ出口付近での多くのピエゾメーターが反応しているのがわかる。したがって、パイプ流がパイプ出口で土の壁にぶつかり斜面中腹部にたまり崩壊に至ったと考えられる。さらに、全体的に地下水位が上昇し始める時間が実験ケース4と比べて早い。したがって、パイプの設置位置が高いことが影響している可能性がある。また、実験ケース5では崩壊時におけるピエゾメーターの計測値はパイプ出口付近に着目すると約1.8cmであり、実験ケース4よりも比較的低い地下水位で崩壊に至っている。これは、ケース5がケース4よりも設置パイプの基盤面と垂直な方向の距離が離れているため、斜面を薄く削る崩壊が起きたためと考えられ、写真-4と写真-5の比較からも確認できる。

図-5を見ると、実験ケース5では斜面からの流出率が実験ケース3,4よりも高いことがわかる。しかし、斜面からの排水量が多いにも関わらず崩壊が早く発生しているため、パイプの設置高さが高いことが斜面安定の低下につながっている可能性が考えられる。また、実験ケース5において崩壊時に斜面が保有していた水量は約23.2kgで平均飽和度は $S_r=59.7\%$ であった。

3.6 実験ケース6

実験ケース6(基盤面からの垂直方向距離5cmにフルパイプ、降雨強度 $r=70(65)$ mm/hr、間隙比 $e=0.90$) における斜面内のパイプの設置状況を写真-6に示す。ケース6はパイプを斜面上端から下端まで延びているフルパイプの実験で、パイプの設置高さは基盤面から5cmの地点である。また、パイプは写真-6のように等間隔で3本設

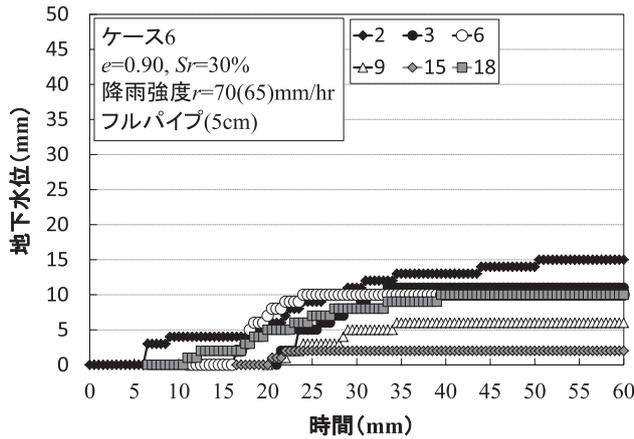


図-9 ケース 6 における地下水位の経時変化

置し、各パイプの長さは 135cm である。

写真-7 に実験終了後の模型斜面の状況を、図-9 にケース 6 における地下水位の経時変化をそれぞれ示す。

ケース 6 では、実験開始後 90 分経過しても模型斜面は崩壊に至らなかった。写真-7 をみると、斜面下部に多くのくぼみが確認できる。これは、ノズルから散水された水滴が衝撃力となり、表層の土粒子を移動させ、長時間の実験によってそれが大きくなったためと考えられる。

図-9 を見ると、実験開始後 30 分以降、各地点の地下水位がほとんど変化していない。したがって、斜面内に設置したパイプが排水パイプとしての効果を果たし、地下水位の上昇を抑えたと考えられる。また、地下水位の計測は実験開始後 60 分で終了したが、終了時の各ピエゾメーターの計測値はすべての地点で 2.0cm を下回り、平均は約 0.9cm であった。地下水位の計測終了後も降雨装置による模型斜面内への散水は継続し、実験を続けた。しかし、実験開始 90 分経過しても斜面崩壊に至らなかったため、実験を打ち切った。

図-5 を見ると、ケース 6 では同じ降雨強度であるケース 3, 4 に比べて流出率が高いことがわかる。また、ケース 6 における実験終了時の斜面内に存在する水量は約 23.6kg で、その時の平均飽和度は $S_r=61.0\%$ であった。

3.7 実験ケース 7

実験ケース 7(基盤面からの垂直方向距離 5cm にハーフパイプ、降雨強度 $r = 120 (120) \text{ mm/hr}$ 、間隙比 $e=0.90$) では、キャリブレーションの結果より降雨強度 $r = 120\text{mm/hr}$ のとき、崩壊時の平均飽和度は $S_r=57.9\%$ であった。また、崩壊時における各ピエゾメーターの計測値の平均は約 1.3cm であった。

4. 模型斜面における安定解析

本章では、模型実験の条件下での安全率の算出について述べる。



写真-6 ケース 6 におけるパイプの設置状況



写真-7 ケース 6 における実験終了時の斜面の状況

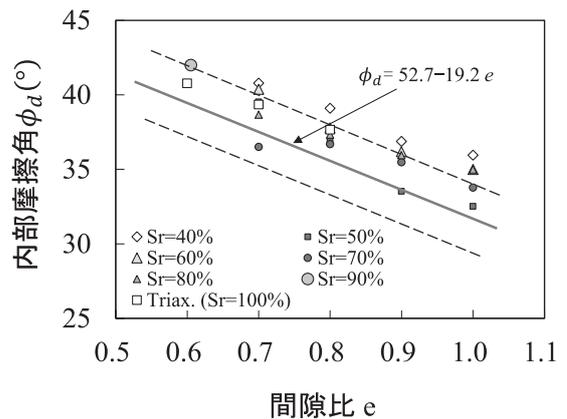


図-10 間隙比と内部摩擦角の関係¹⁷⁾

4.1 安全率の算出

安全率の算出には、不透水基盤上に水位が形成され、平行浸透流が発生した無限長斜面に対する安定計算手法

を用いた。安全率 F_S を表す式を式(1)に示す。

$$F_S = \frac{c_d + \{\gamma_t(H - h_w) + (\gamma_{sat} - \gamma_w)h_w\} \cos^2 \beta \tan \phi_d}{\{\gamma_t(H - h_w) + \gamma_{sat}h_w\} \cos \beta \sin \beta} \quad (1)$$

ここで c_d : 粘着力, γ_{sat} : 飽和密度, γ_t : 湿潤密度, H : 表土層厚, h_w : 水の密度, h_w : 地下水位, β : 地盤の勾配, ϕ_d : 内部摩擦角である。

4.2 粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_d の決定方法

図-10にまさ土における間隙比と内部摩擦角の関係¹⁷⁾, 図-11にまさ土における間隙比と粘着力の関係¹⁷⁾を示す。図-10 から得られた間隙比と内部摩擦角の関係式を式(2)に, 図-11 から得られた粘着力と間隙比および飽和度の関係式を式(3)に示す。

$$\phi_d = 52.7 - 19.2 e \quad (2)$$

$$c_d = 27.5 - 14.2 e - 0.146 S_r \quad (3)$$

式(2), (3)を用いて, 間隙比および飽和度から各実験ケースにおけるまさ土の粘着力および内部摩擦角を算出した。

4.3 計算結果と考察

4.2の結果から間隙比 $e=0.90, 0.98$ の2パターンにおいて地下水位 $h_w=0$ の場合, 飽和度 $S_r=30\%$ に設定し, その他の地下水位では崩壊時の飽和度が $S_r=100\%$ でこの時の粘着力は $c_d=0$ と仮定し, その時の安全率 F_S を計算した。式(2), (3)より算出した各条件における内部摩擦角 ϕ_d および粘着力 c_d を表-3に, 式(1)より算出した地下水位ごとの安定計算の結果を表-4にそれぞれまとめた。3章で述べた各ケースにおける崩壊時または実験終了時の地下水位よりそのときの各ケースでの安全率を式(1)より算出すると, ケース1からケース7まで順に0.92, 0.99, 0.97, 0.99, 1.07, 1.14, 1.11であった。 $e=0.90$ の各ケースにおける崩壊時の地下水位と安全率を図-12に示す。なお, 図-12中における各ケース名横に記載の数字は降雨強度である。

すべてのケースにおいて実験における崩壊の有無と図-12の安全率を比較すると, ケース5, ケース7を除くケースは, 斜面が崩壊したケースでは安全率が1.00より低く, 斜面が崩壊しなかったケースでは安全率が1.00より高くなり, おおむね一致した。ただし, 本章で扱った安定解析は単純なモデルと実験から求めた地下水位から求めており, パイプ流による影響は考慮していない。安定解析が一致しなかったケース5, ケース7はハーフパイプモデルであり, パイプ流の影響が大きかったと考えられる。今後, パイプ流を考慮した安定解析を行い, 再検討を行う必要がある。

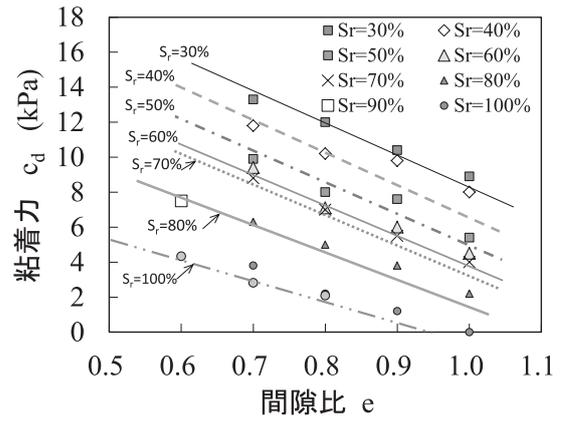


図-11 間隙比と粘着力の関係¹⁷⁾

表-3 各条件における強度定数の値

間隙比 e	0.90		0.98	
飽和度 S_r (%)	30	100	30	100
内部摩擦角 ϕ_d (°)	35.42		33.50	
粘着力 c_d (kPa)	10.24	0	8.82	0

表-4 地下水位ごとの安定計算の結果

h_w (cm)	安定計算	
	F_S ($e=0.90$)	F_S ($e=0.98$)
0	17.6	16.2
1	1.14	1.07
2	1.06	0.99
3	0.99	0.93
4	0.92	0.86
5	0.85	0.79
6	0.79	0.73
7	0.72	0.67
8	0.66	0.61
9	0.61	0.56
10	0.55	0.51

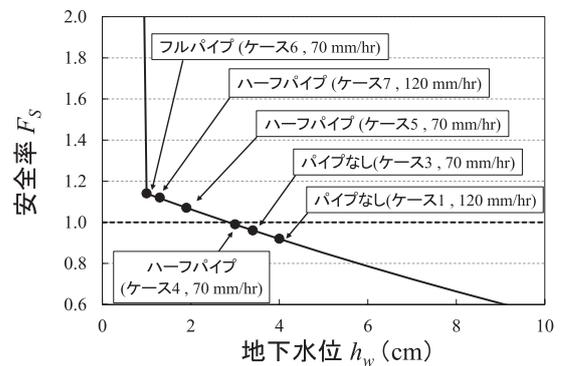


図-12 各ケースにおける崩壊時の地下水位と安全率

5. 結論

本研究では, 層厚10cmの土層の模型斜面にピエゾメーターを設置し, 人工降雨実験を行った。土層試料にはまさ土を使用した。自然斜面に見られるパイプ流を再現す

るため、作成した擬似パイプを模型斜面に設置し、実験を行った。本実験では、パイプ流が地下水位の上昇過程や斜面の崩壊過程に与える影響について検証することを目的とし、以下の結論を得た。

- (1) パイプなしのモデルにおける斜面崩壊時の斜面全体の平均飽和度を斜面から流出した水量、人工降雨装置からの散水量、実験前に斜面に含まれている水量から算出すると、 $S_r=56\sim66\%$ であることがわかった。特に、実験ケース1と3に関しては崩壊時の平均飽和度が $S_r=65\%$ 前後と非常に近い値を示した。しかし、土層の深度によって各地点における飽和度は異なると考えられるため、今後は各地点における深度ごとの飽和度を観測することが必要であるといえる。
- (2) ハーフパイプモデルはフルパイプあるいはパイプなしのモデルと比較して崩壊までの時間が短いことから、ハーフパイプの斜面崩壊に与える危険度が最も高いことを示した。また、ハーフパイプのパイプ位置を高くすることで斜面を薄く削るような崩壊が起こり、短時間で比較的低い地下水位状態で崩壊に至る可能性があるといえる。
- (3) フルパイプのモデルでは、崩壊に至らず、すべての地点において2.0cmを下回る地下水位であった。したがって、パイプが排水パイプとして機能し、斜面内の地下水位の上昇を抑えることを示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、一般社団法人中国建設弘済会より多大なご支援をいただいた。ここに期して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Athapaththu, A.M.R.G., Yabuki, K. and Tsuchida, T. : Geotechnical assessment of natural slopes and valleys based on real time rainfall data, *International Journal of Geomate*, Vol.10, No.1, pp.1584-1594, 2016.(掲載決定)
- 2) 土木学会・地盤工学会：平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団報告書，2014.
- 3) 地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測，p.45，2006.
- 4) Uchida, T., and Mizuyama, T. : The contribution of pipeflow on shallow landslide initiation at steep hillslopes, *International congress, Interpraevent 2002 in the Pacific Rim-Matsumoto/Japan Congress Publication*, Vol.2, pp.559-569, 2002.
- 5) Beven, K.J., and Germann, P.F. : Macropores and water flow in soils, *Water Resources Research*, Vol.18, pp. 1311-1325, 1982.
- 6) Uchida, T. : Clarifying the role of pipe flow on shallow landslide initiation, *Hydrological Processes*, Vol.18, pp.375-378, 2004.
- 7) Kosugi, K. I., Uchida, T., and Mizuyama, T. : Numerical calculation of soil pipe flow and its effect on water dynamics in a slope, *Hydrological Processes*, Vol.18, pp. 777-789, 2004.
- 8) Gattinoni, P., and Francani, V. :A tool for modelling slope instability triggered by piping, *World academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.3, No.8, pp. 434-440, 2009.
- 9) Uchida, T, Kosugi, K., and Mizuyama, T. :Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed, *Journal of Hydrology*, Vol.222, pp.18-36, 1999.
- 10) Bryan, R.B., and Jones, J.A.A. : The significance of soil piping process : inventory and prospect, *Geomorphology*, Vol.20, pp.209-218, 1997.
- 11) Iverson, R.M. : Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resource Research*, Vol. 36, No.7, pp.897-910, 2000.
- 12) Casadei, M., Dietrich, W.E., and Miller, N.L. : Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslides initiation in soil-mantled landscapes, *Earth Surface Process and Landform*, Vol.28, pp.25-950, 2003.
- 13) Crosta, G.B., and Frattini, P.: Distributed modeling of shallow landslides triggered by intense rainfall, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.3, pp.81-93, 2003.
- 14) Uchida, T., Kosugi, K., and Mizuyama, T. : Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide : a review of pipeflow studies in forested headwater catchments, *Hydrol Process*, Vol.15, pp.2151-2174, 2001.
- 15) 緒方 洸, Athapaththu A.M.R.G., 矢葦健太郎, 小原雄哉, 土田孝：土中に作成されたパイプが豪雨時の自然斜面の安定に及ぼす影響に関する研究，第49回地盤工学研究発表会，pp.1777-1778, 2014.
- 16) Uchida, T., Meerveld, I.T., and McDonnell, J.J. : The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response : an inter comparison of non-linear hillslope response , *Journal of Hydrology*, Vol.311(1-4), pp.117-133, 2005.
- 17) Tsuchida, T., Athapaththu, A.M.R.G., Kano, S. and Suga, K. : Estimation of In-situ Shear Strength Parameters of Weathered Granitic (Masado) Slopes Using Lightweight Dynamic Cone Penetrometer, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.3, pp.497-512, 2011.

(2015年6月18日 受付)