

## 人工降雨実験による自然斜面での排水パイプの有効性に関する検討

### Effect of Drainage Pipes on Natural Slopes due to Artificial Rainfall

矢葺健太郎 Kentaro YABUKI (広島大学大学院工学研究科)  
土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究院)  
花岡 尚 Takashi HANAOKA (元広島大学大学院工学研究科)  
川端 昇一 Shoichi KAWABATA (元広島大学大学院工学研究科)

自然斜面が豪雨により崩壊する要因は、地盤の強度低下と重量の増加、間隙水圧の上昇などがあるが、特に降雨に伴う地下水位の上昇が重要と考えられる。地下水位の上昇は、先行降雨の有無によっても大きく左右されることも知られている。自然まき土斜面で人工降雨実験を行い、地盤の不均一性が考えられる自然斜面における降雨浸透過程を調べた。また、浅層地下水を速やかに排除する斜面崩壊対策工法である排水パイプ工法を自然斜面に設置した場合の降雨浸透過程への影響について検討を行った。

キーワード：現地調査，間隙水圧，飽和度，斜面，地下水位 (IGC：C-0, C-8, K-1)

### 1. はじめに

近年の集中豪雨の増加により、土砂災害発生数が増加する傾向にある。豪雨時において土石流や地すべりを引き起こす自然斜面の不安定の原因としては、降雨の自然斜面内への浸透による間隙水圧の上昇、粘着力の増加、自重の増加などが挙げられる。筆者らは自然斜面の継続的な観測により、豪雨時に斜面内においてサクシオンが消失し正圧が発生して地下水位が形成されていることを確認している<sup>1) 2) 3)</sup>。地下水位の発生による斜面崩壊リスクを減少させる対策として、あらかじめ斜面内に排水パイプを設置する工法があり、鉄道盛土や宅地などに採用されている<sup>4) 5) 6)</sup>。本研究では、自然斜面を対象として表層に設置した排水パイプによる斜面の安定化の可能性について検討を行った。

排水パイプが有効に機能するためには、斜面内に地下水の流れが起こるメカニズムを検討する必要がある。豪雨時に斜面内に地下水が発生する過程は、既往の研究により、2種類の降雨浸透過程を推定している。1つ目は、地下水が地盤下端から形成され、上層に向かって上昇する過程である(図-1)。この過程を仮に、地下水位形成過程Aとする。飽和度が比較的低い地盤に降雨があると、降雨が地盤内に浸透し始め、上層から順にある体積含水率の値  $\theta_h$  まで体積含水率が上昇していく(過程1)。その後は、体積含水率  $\theta_h$  をほぼ一定に保った不飽和帯が下層に向かって広がっていく。ここではこの不飽和帯を高含水比帯と呼ぶが、降雨強度が一定の場合、高含水比帯が含水率は一定のまま、

下方に拡大する(過程2)。高含水比帯が基盤層に到達すると基盤層の上面から地下水が形成され(過程3)、下層から上層に向かって地下水位は徐々に上昇する(過程4)。以上の過程では、地下水位が形成されるためには、降雨が浸透して高含水比帯が基盤層に達するまでの時間が必要となる。

2つ目は、高含水比帯が基盤に達する前に浸透流が発生する過程である(図-2)。この過程を仮に、地下水位形成過程Bとする。強雨により、極めて高い  $\theta_h$  の高含水比帯が形成され(過程2)、斜面平行方向の高含水比帯の不飽和透水係数が上昇する。そのため、基盤層に達する前に、高含水比帯中に浸透流が発生する(過程3、4)。

一般に、豪雨時に斜面が崩壊して土石流などの土砂災害

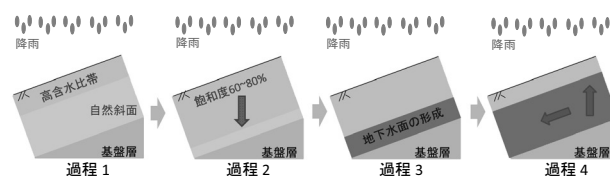


図-1 斜面内における地下水位形成過程 A

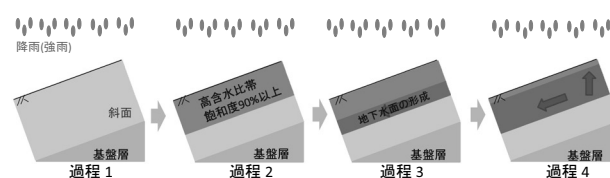


図-2 斜面内における地下水位形成過程 B  
(模式図：表層における地下水位の形成)

を引き起こすメカニズムとしては、地下水形成過程 A が考えられ数値解析にも用いられてきた。地下水形成過程 B は Thi Ha らが斜面内のサクシオンと水分の観測結果からその可能性を示唆しているが、実測データによって確認されていない。しかし、2010年7月に発生した広島県庄原市の豪雨では集中豪雨が発生してわずか2時間で200箇所以上の斜面崩壊が発生<sup>7)</sup>しており、一般的に考えられている地下水形成過程 A では、庄原災害のような短時間での斜面崩壊を説明することができない。つまり、短時間の強い降雨で斜面が崩壊するメカニズムを考える上で、**図-2**に示す地下水形成過程 B についてもその発生条件について検討する必要があると考えられる。

本研究では、自然斜面における人工降雨実験を行い、実験において上記の2つの地下水形成過程について検討し、自然斜面に排水パイプを設置することによる斜面防災対策工としての可能性について検討を行った。

## 2. 人工降雨実験

### 2.1 実験地点の概要

自然斜面での人工降雨実験を行うにあたり、広島大学東

広島キャンパス内のががら山に人工降雨実験地点を設けた。また、**写真-1**は降雨を与える範囲の斜面の様子である。実験地点は、多少の植生があり、礫が少ない。また、斜面の表層には腐葉土が堆積している。

層厚調査には、軽量動的コーン貫入試験<sup>8), 9), 10)</sup>を適用することとし、試験の概要を**図-3**に示す。軽量動的コーン貫入試験は詳細な貫入抵抗値を測定できる。軽量動的コーン貫入試験で得られる貫入抵抗値 $q_d$ [MPa]と簡易動的コーン貫入試験から得られる $N_d$ [MPa]値との間には、次式の関係がある。

$$q_d = \frac{1}{4} N_d \quad (1)$$

簡易動的コーン貫入試験では $N_d$ 値が40以上で強固な地盤と判断することができ、 $N_d$ 値40に相当する $q_d$ は10MPaとなる。よって、本研究の調査では3打撃連続で10MPa以上の $q_d$ を測定した深度を強固な地盤(基盤層)とした。**図-4**に軽量動的コーン貫入試験結果を示す。なお、貫入試験は**図-5**に示す位置で行っており、黒色の点線は貫入試験から求めた推定基盤位置を示している。貫入試験を計6地点行い、試験結果から実験地点の平均層厚は1.96mであった。



写真-1 実験地点

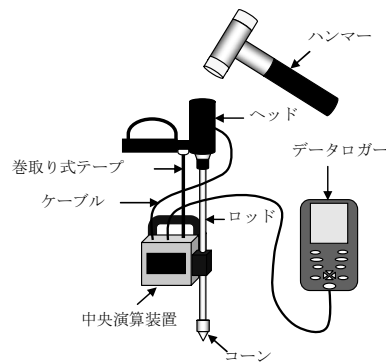


図-3 軽量動的コーン貫入試験の概要<sup>8), 9), 10)</sup>

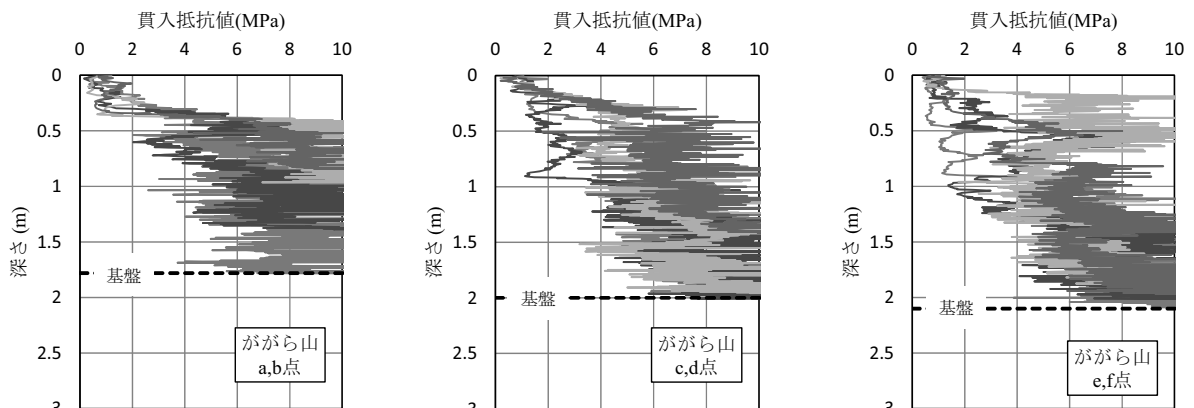


図-4 貫入試験結果

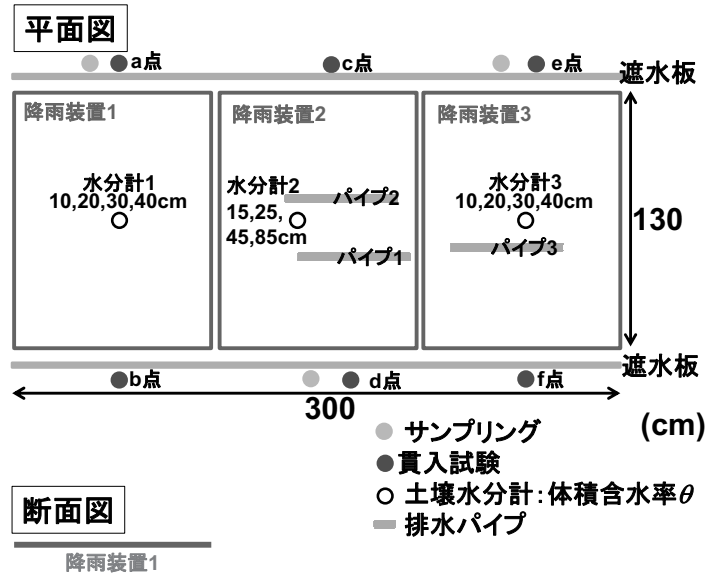


図-5 実験地点の鳥瞰図および断面図

表-1 実験地点の地盤の物性値

乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.29
湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.46
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.67
間隙比 $e$	1.09
間隙率 $n$	0.52
含水比 $w$ (%)	12.9
飽和度 $S_r$ (%)	32.4

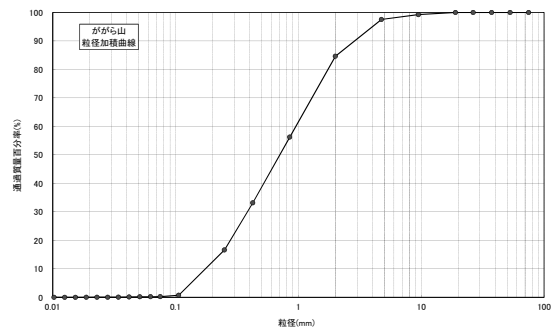


図-6 粒径加積曲線(ががら山)

実験地点の物性値を求めるため、試料採取を行った。また、試料採取は地盤内の間隙比、飽和度を得るための不攪乱試料と、室内で土質試験を行うための攪乱試料を採取した。不攪乱試料の採取には直径 60mm、高さ 70mm のチューブサンプラーを用いた。また、サンプリングを行った地点に関しては図-5 の鳥瞰図に示す。土質試験は、土粒子密度試験、粒度試験を行い、表-1 にそれらの試験から求められた物性値、図-6 に粒径加積曲線を示す。



写真-2 実験風景

## 2.2 人工降雨実験の方法

図-5 に実験地点の鳥瞰図および断面図を示す。図-5 の位置に土壌水分計を設置し、幅 1.3m×縦 3.0m の範囲で人工降雨実験を行った(写真-2)。土壌水分計で体積含水率 $\theta$ を計測した。図-5 に示すように土壌水分計を3本設置し、斜面上方から水分計1、水分計2、水分計3とした。それぞれの水分計位置の層厚および斜面勾配は水分計1で1.5m, 23°, 水分計2は2m, 21°, 水分計3は2m, 12°である。また、排水パイプに関しては、東海道新幹線の鉄道盛土で多くの施工実績のある恒久排水補強パイプ工<sup>6)</sup>を参考にし、図-7 に示すように、長さ1.0m、外形4.8cmの塩化ビニルパイプに幅0.5cm、長さ5.0cmの長方形孔を千鳥配置で開け、自然斜面に水平下向き3°で設置した。土中の排水パイプの深度は20~35cmになるように設置した。パイプから排水される水はペットボトルにより回収した。

写真-3 に、実験に用いた降雨装置を示す。降雨装置は、9cm 間隔で1.0mmの穴を開けた塩化ビニルパイプ10本と、上流端と下流端にそれぞれ穴を開けていない塩化ビニルパイプを接合して作製した。幅は1.3m、奥行きは1.0mである。実験では、図-5 のように3基設置し、幅1.3×縦3.0mの範囲で実験を行った。図-8 に降雨装置への通水システムの概要を示す。まず、池から送水ポンプで水を汲みとり、実験場所まで送水し、ポリバケツで作製した給水タンクに貯留させる(写真-4)。そこから、ポリバケツで作製した定水位供給タンクに水を供給し、タンクからあふれさせることで水位を一定に保ち降雨装置に安定的に送水する。降雨強度は降雨装置に取り付けられたバルブで調整した。タンクや降雨装置から排水される余剰水は、ホースによって、実験地点に影響を及ぼさないところに排水させた。

## 3. 降雨実験結果

実験ケースを表-2 に示す。用いる降雨強度は、1999年の6.29災害で観測された40~70mm/hr<sup>11)</sup>を、参考に50mm/hrと100mm/hrとした。

### 3.1 降雨浸透過程の検討

降雨浸透過程に関して検討を行ったケース1およびケース2の実験結果について説明する。図-9 にケース1(降雨強度50mm/hr)、図-10 にケース2(降雨強度100mm/hr)の時の土壌水分計2と土壌水分計3で観測された体積含水率 $\theta$ を飽和度に換算したものの経時変化を示す。また、体

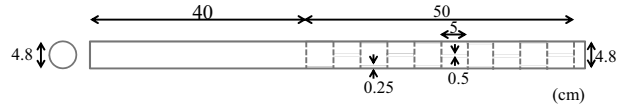


図-7 排水パイプの規格



写真-3 実験に用いた降雨装置

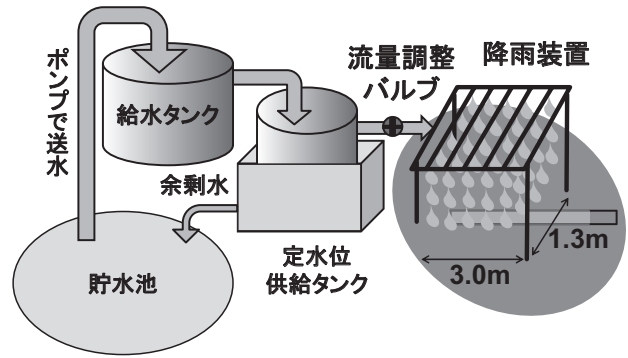


図-8 降雨装置への通水システム概要



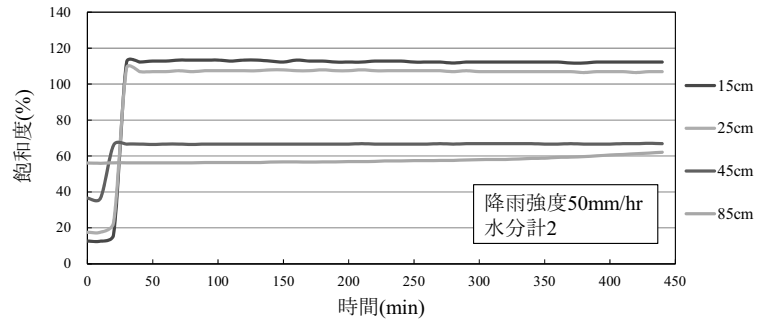
写真-4 給水タンクと定水位供給タンク

表-2 実験ケース

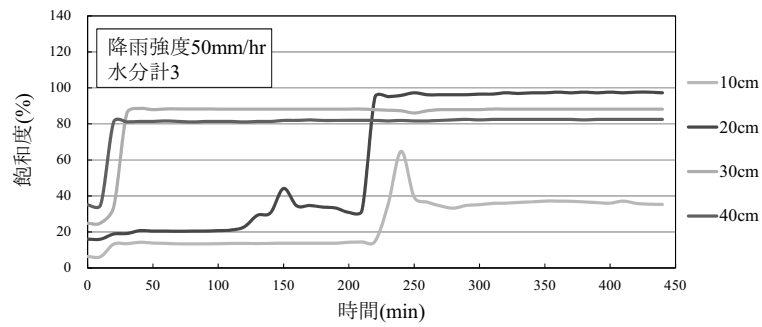
ケース	降雨強度 (mm/hr)	排水パイプ	ねらい
1	50	無	降雨浸透過程の検討
2	100	無	
3	50	有無による比較	排水パイプの有効性に関する検討
4	100	有無による比較	

積含水率 $\theta$ から飽和度に換算した際に以下の式を用いた。

人工降雨実験による自然斜面での排水パイプの有効性に関する検討

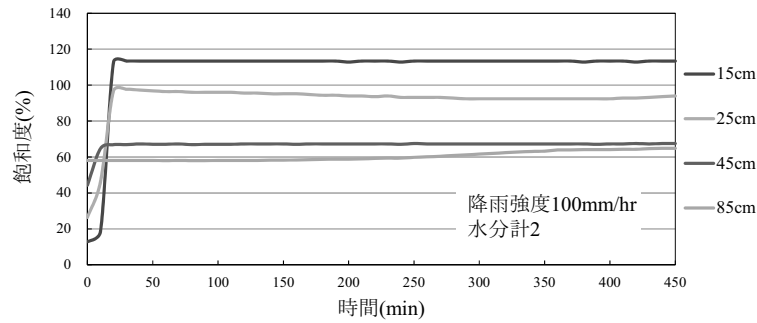


(a) 土壌水分計 2

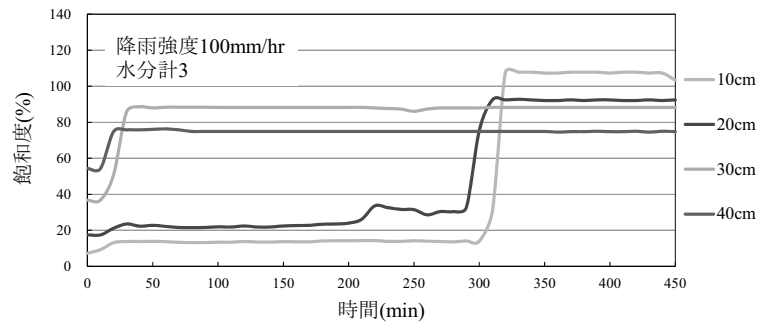


(b) 土壌水分計 3

図-9 飽和度の経時変化(ケース 1)



(a) 土壌水分計 2



(b)土壌水分計 3

図-10 飽和度の経時変化(ケース 2)

$$S_r = \frac{\theta}{n} \times 100 \quad (2)$$

図-9(a)では、降雨開始 30min 後の短時間で深度 15, 25cm の飽和度が上昇し、飽和に達している。図-9(b)では、降雨開始 20min 後に深度 40cm, 30min 後に深度 30cm, 230min 後に深度 20cm で飽和度が上昇し、それ以降定常状態となっている。定常状態になったときの飽和度は深度 20cm で  $S_r=97\%$ 、深度 30cm で  $S_r=88\%$ 、深度 40cm で  $S_r=82\%$  と高い含水状態であった。

図-10(a)では、ケース 1 と同様、降雨開始 20min 後の短時間で深度 15, 25cm の飽和度が上昇し、飽和に達している。図-10(b)では、降雨開始 20min 後に深度 40cm, 30min 後に深度 30cm, 300min 後に深度 20cm, 310min 後に深度 10cm で飽和度が上昇し、それ以降定常状態となっている。定常状態になったときの飽和度は深度 10cm で  $S_r=107\%$ 、深度 20cm で  $S_r=92\%$ 、深度 30cm で  $S_r=88\%$ 、深度 40cm で  $S_r=77\%$  と高い含水状態であった。なお、飽和度が 100% を超えてしまっているが、これは表-1 に示す間隙率のみを使用しているためである。土田ら<sup>10)</sup>の推定式を用いると、

$$e = 1.19 - 0.084 \cdot \ln(q_{d5}) - 0.0074S_r \quad (3)$$

$q_{d5}$  : 土被り圧 5kPa における貫入抵抗値(MPa)

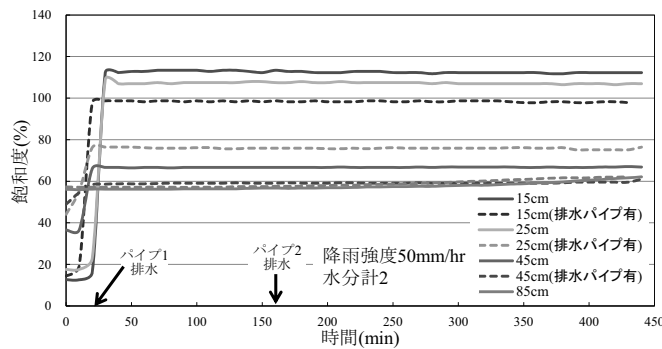
深度 40cm 周辺の間隙比  $e$  は約 0.83 となる。このことから、

深度ごとに間隙率の変化を考慮しないといけないが、今回は深度 10~20cm までのサンプリングデータしかないため表-1 の値のみを使用した。

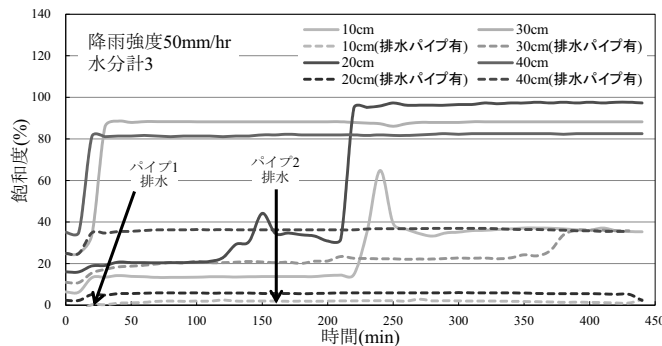
以上、ケース 1 とケース 2 の実験結果より、土壌水分計 2 の周辺では短時間で表層の飽和度が飽和に達していることから短時間で上層から地下水を形成する地下水形成過程 B、土壌水分計 3 の周辺では深い深度から順々に飽和度が上昇していることから一般的によく知られている深い深度(基盤層)から地下水を形成し上昇する地下水位形成過程 A であった可能性がある。地下水位の形成について議論するうえで間隙水圧を考慮することが必要であるが、計器がうまく作動せず計測することができなかった。中川ら<sup>12)</sup>は斜面表層に形成される高含水比帯に着目し、排水パイプの打設によって降雨による斜面の危険度を低下させることができるかどうか、模型土層での降雨浸透実験および浸透流解析により検討した。その結果、負圧が残

表-3 排水パイプの排水状況

	排水パイプ	排水開始時間 (min)	排水量(g)	排水速度 (g/min)
ケース3(50mm/hr)	パイプ1	20	24650	61.6
	パイプ2	160	6265	24.1
	パイプ3	排水なし	-	-
ケース4(100mm/hr)	パイプ1	15	50214	124.0
	パイプ2	96	4886	15.1
	パイプ3	排水なし	-	-



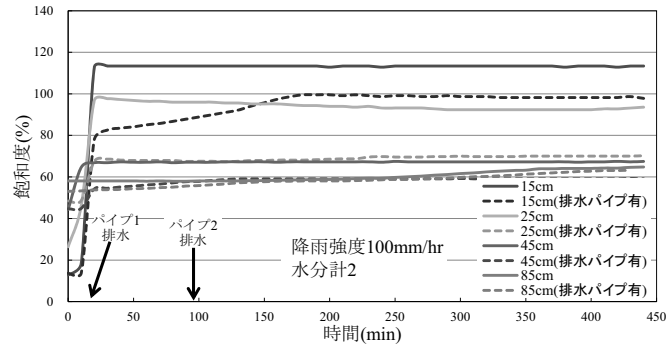
(a)土壌水分計 2



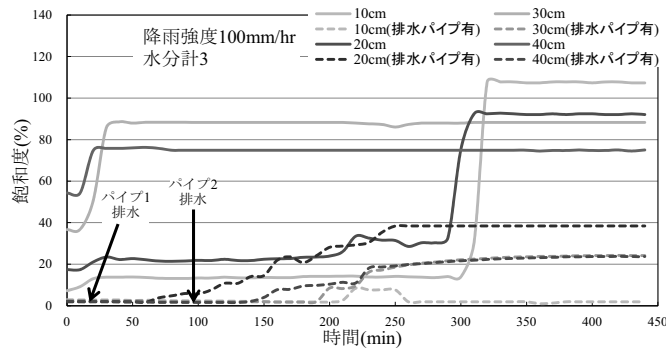
(b)土壌水分計 3

図-11 排水パイプ設置時の飽和度の経時変化(降雨強度 50mm/hr)

人工降雨実験による自然斜面での排水パイプの有効性に関する検討



(a)土壤水分計 2



(b)土壤水分計 3

図-12 排水パイプ設置時の飽和度の経時変化(降雨強度 100mm/hr)

った状態でも、飽和度が 90%以上になった際に地下水が形成されることを確認している。このことから、本研究では飽和度の値から地下水形成の有無を判断した。

このように、土壤水分計 2 と土壤水分計 3 の位置で地下水位形成過程に違いが生じた原因としては、地盤の不均一性が考えられる。次の原因としては、土壤水分計 2 の斜面勾配が 21° と急なのに対して土壤水分計 3 の斜面勾配が 12° と緩かったことが考えられる。つまり、自然斜面の降雨浸透過程は、斜面勾配が急な場合、短時間に上層から地下水を形成する地下水位形成過程 B、斜面勾配が緩やかな場合、一般的に知られている基盤層から地下水を形成する地下水位形成過程 A になる可能性がこの実験から観察された。斜面勾配が降雨浸透過程に与える影響は、今後模型実験などで検討を行う必要があると考える。

### 3.2 排水パイプの有効性に関する検討

排水パイプの有効性に関して検討を行ったケース 3 およびケース 4 の実験結果について説明する。表-3 は各ケースにおける排水パイプの排水状況を示している。ケース 3, 4 とともに土壤水分計 2 の周辺に設置された排水パイプ 1, 2 からは排水されたが、土壤水分計 3 に近い排水パイプ 3 から排水されなかった。排水パイプ 1, 2 から排水された原因としては、土壤水分計 2 の周辺で短時間に地下水を形

成している地下水位形成過程 B であったこと、一方、排水パイプ 3 から排水されなかったのは基盤から地下水を形成する地下水位形成過程 A であった可能性が考えられる。すなわち、土中の排水パイプの深度は 20~35cm の位置になるように設置しているため、表層から近い水位が形成される地下水位形成過程 B の場合は早期にパイプから排水がなされ、地下水位形成過程 A の場合は、基盤面から形成された地下水の上面が排水パイプの先端まで地下水位が達するまでに時間がかかるため、排水されなかったということである。

以上の結果から、パイプからの排水の有無が、3.1 節で述べた土中水分観測点結果より斜面の場所によって地下水位形成過程が異なったという考察とほぼ対応しているといえる。以上の考察の妥当性については、今後模型実験などで検討する必要がある。

図-11 にケース 3(降雨強度 50mm/hr)、図-12 にケース 4(降雨強度 100mm/hr)の時の排水パイプの有無による飽和度の経時変化を示す。なお、実線は排水パイプ無、点線は排水パイプ有の実験結果を示している。図-11(a)、図-12(a)の土壤水分計 2 の周辺では、降雨強度の違いに関わらず降雨浸透がみられた深度 15, 25, 45cm の位置で飽和度の上昇を抑制する効果がみられた。一方、図-11(b)、図-12(b)の土壤水分計 3 の周辺では排水パイプ 3 から排水がなかつ

たのにも関わらず、全深度で飽和度の上昇を抑制する効果がみられた。この原因としては、斜面上部のパイプの排水により地下水の供給が少なかったことが考えられるが今後検討したい。また、パイプ外周部からの排水の可能性などの検討を行ったが、明らかにすることはできなかった。

以上、自然斜面に排水パイプを設置することで、表層付近で形成された地下水を排水し、飽和度の上昇を抑制する効果が示された。表層の排水パイプの有効性は、地下水が基盤から時間をかけて上がってくるのか、あるいは早期に表層に形成されるのかによって大きく異なってくる。今後の課題としては、他の条件下(層厚、まさ土以外の斜面など)において自然斜面の地下水がどのように形成されるか、特に早期に表層に地下水位が形成されるとき条件についてさらに検討を行う必要がある。

#### 4. 結論

本研究では、自然斜面における人工降雨実験を行い、実験において地下水形成過程について検討し、自然斜面に排水パイプを設置することによる斜面防災対策工としての可能性について検討を行った。以下に、結論をまとめる。

- (1) 自然斜面の降雨浸透過程は、斜面勾配が急な場合、短時間に上層から地下水を形成する地下水位形成過程 B、斜面勾配が緩やかな場合、一般的に知られている基盤層から地下水を形成する地下水位形成過程 A になる可能性がある。斜面勾配が降雨浸透過程に与える影響について、今後模型実験などで検討を行う必要があると考える。
- (2) 自然斜面に排水パイプを設置することで、表層付近で形成された地下水(地下水位形成過程 B)を排水し、飽和度の上昇を抑制する効果の可能性が示された。今後の課題としては、他の条件下(層厚、まさ土以外の斜面など)で排水パイプの有効性について検討を行う必要があると考える。

#### 参考文献

- 1) Thi Ha, 佐々木康, 土田孝, 柳田三徳: 自然斜面における雨水浸透・流出の原位置観測の事例紹介, 地下水技術, Vol.49, No.4, pp.11-20, 2007.
- 2) 由利厚樹, 加納誠二, 土田孝: まさ土の土中水分変動に及ぼす降雨特性と地盤条件の影響, 第45回地盤

- 工学学会研究発表会発表講演集, pp.165-166, 2010.
- 3) Thi Ha, 佐々木康, 森脇武夫, 加納誠二: 自然まさ土斜面における土中水分およびサクシンの現地観測, 土と基礎, 第51巻, 11号, pp.38-40, 2003.
- 4) 徐永強, 澤松俊寿, 林豪人: 浸透流解析における盛土排水パイプのモデル化, 第44回地盤工学研究発表会, 発表講演集, pp.997-998, 2009.
- 5) 杉崎英司, 増田幸宏, 岡田勝也, 村石尚: 新幹線盛土排水パイプの機能分析, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第IV部, Vol.44, pp.588-589, 1989.
- 6) 千代田器材株式会社: 恒久排水補強パイプ技術資料, pp.1-5, 2005.
- 7) 花岡尚, 川口将季, 土田孝, 中川翔太, 加納誠二: 2010年7月に広島県庄原市で発生した土砂災害の調査と考察-平行斜面中腹の崩壊メカニズムに関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.295-309, 2012.
- 8) Athapaththu AMRG, 土田孝, 菅和暁: 軽量動的コーン貫入試験によるまさ土斜面地盤の強度評価と自然斜面の危険度評価への適用, 地盤工学会誌, Vol. 55, No.6(593), pp.27-29, 2007.
- 9) 土井豆聡之, 土田孝, 加納誠二, 中井真司, 竹内次郎: 簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験によるまさ土斜面の地盤調査, 地盤と建設, Vol.25, No.1, pp.17-24, 2007.
- 10) Takashi Tsuchida, Athapaththu A.M.R.G., Seiji Kano, Kazuaki Suga: 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.
- 11) 福岡捷二, 渡邊明英: 6月29日集中豪雨による広島県土砂災害, 土木学会誌, 第84巻, 第10号, pp. 54-58, 1999.
- 12) 中川翔太, 土田孝, 梅田賢也, 矢葺健太郎: 一次元土層実験による降雨浸透過程と排水パイプの有効性に関する研究, 地盤と建設, 第30巻, 第1号, pp.85-94, 2012.

(2013年6月24日 受付)