

# 土砂災害危険区域の林地斜面における 降雨の浸透過程の解明

STUDY ON RAINFALL INFILTRATION PROCESSES  
ON FOREST SLOPE IN SEDIMENT DISASTER WARNING AREA

寺尾晃平<sup>1</sup>・内田龍彦<sup>2</sup>・梶昭仁<sup>3</sup>・宮田英樹<sup>4</sup>・河原能久<sup>5</sup>

Kohei TERAO, Tatsuhiko UCHIDA, Akihito KAJI, Hideki MIYATA, Yoshihisa KAWAHARA

<sup>1</sup>正会員 東京都建設局 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1 東京都庁第二本庁舎)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 広島大学大学院准教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 株式会社東京建設コンサルタント関西本社 環境防災部 (〒530-0042 大阪府大阪市北区天満橋1-8-63 トーケン大阪ビル)

<sup>4</sup>正会員 株式会社東京建設コンサルタント関西本社 (同上)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

Recently torrential downpours leading to sediment disasters have become more frequent and severe, which highlights the importance of advancement of the prediction methods of sediment disasters. In this study, as a first step towards the elucidation of the mechanisms of slope failures and debris flows, we conducted field observations and small scale experiments in the laboratory to reveal the rainfall infiltration and runoff processes on the forest slope of Mt. Takamatsu where debris flow occurred in August 2014. Field observation showed that at low intensity rains, the vertical infiltration downward from the ground surface occurred while at high intensity rains, the water movement in the upward direction was accompanied by a sharp rise in the pressure head in the deeper layer, whose value exceeded the actual ground water level. From the small scale experiment, it was confirmed that the pore water pressure of the lower layer increased in the similar way as the field observation.

**Key Words:** volumetric water content, macro pore, pore water pressure, throughfall, rainfall infiltration

## 1. 序論

地球温暖化の進行につれて降雨強度や降雨量の増大, 台風の強大化が将来にわたり予測されている中, 近年, 土砂災害は頻発化や激甚化してきている。現在, 対応策として, 気象庁は市町村に対して土砂災害警戒情報<sup>1)</sup>を公表している。しかし, 個々の傾斜地における植生や地質, 風化等が考慮されておらず, 土砂災害の誘因として雨量のみを考慮して危険度を算出することから, 土砂災害の発生時間, 発生規模などの点で十分な予測は出来ない<sup>2)</sup>。そのため, 林地斜面の降雨浸透の実態に基づいた予測手法の確立が喫緊の課題となっている。

林地斜面の降雨は樹木や葉による降雨遮断を受ける。林内の降雨の浸透に対しては, 林外雨から遮断を受け,

樹冠通過雨量と樹幹流下量が地表面に達する。その割合は林外雨に対し, 樹冠通過雨は約70~80%, 樹幹流は10%以下と言われている<sup>3)</sup>。そのため, 伊藤ら<sup>4)</sup>の室内実験による樹冠通過雨の空間分布に関する研究や, 渡邊ら<sup>5)</sup>の現地観測による樹冠遮断量, 樹冠通過雨量の定量的評価の研究が行われている。しかし, 林地斜面における降雨の土壌への浸透は, 降雨強度や降雨量といった気象条件や樹木の繁茂条件だけでなく, 以下に示すように土壌条件にも影響を受ける。

自然土壌内の浸透・流出過程のメカニズムを解明するためには, 土壌における降雨浸透に関し, マクロポアやパイプの重要性が指摘されている<sup>6)8)</sup>。ここで, 土壌中の連続した間隙構造はマクロポア, 地表面とほぼ水平に連続した空洞はパイプと呼ばれ, 成因は植物根や礫の貫入によるものや動物の活動によるもの, 地下水による浸



写真-1 崩壊箇所之源頭部

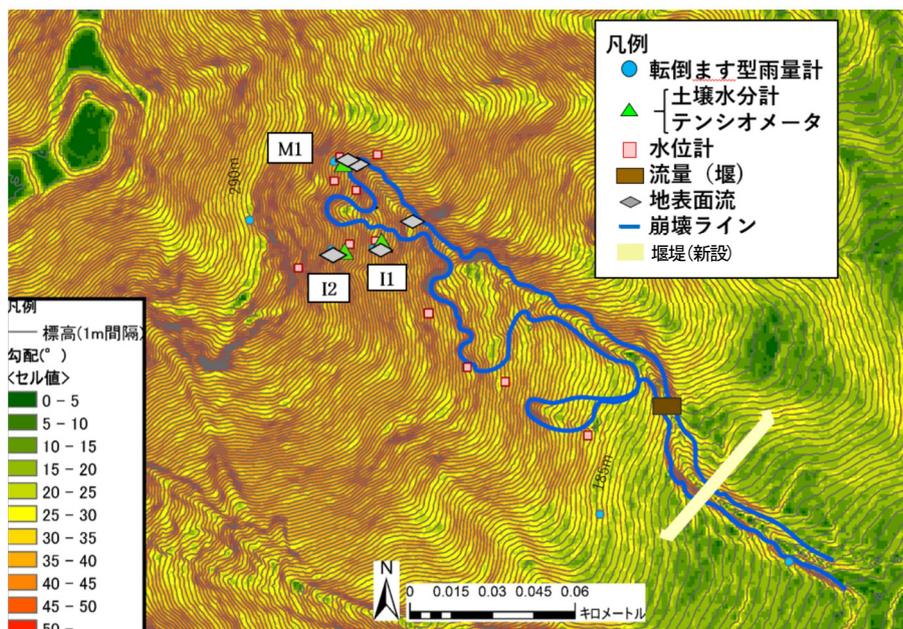


図-1 観測機器の設置場所

食などが挙げられる<sup>3)6)</sup>。関連する研究として、例えば、安池<sup>6)</sup>の土壌中のマクロポアを有した室内実験、内田ら<sup>7)</sup>のパイプ流に関する研究、および、岩田ら<sup>8)</sup>の自然斜面による短期間の現地観測による浸透に関する研究等がある。しかし、現地林地斜面において、土砂災害予測手法の開発に必要な降雨浸透の詳細なメカニズムについては不明な点が多い。

本研究では、土砂災害予測手法のため、斜面崩壊や土石流発生機構の解明に向けた第一ステップとして、土石流が発生した林地斜面における浸透・流出過程を、現地観測と模型実験から明らかにすることを目的としている。

## 2. 現地観測

### (1) 現地観測の概要

観測場所は2014年8月の豪雨による広島土砂災害の被害を受けた広島県広島市安佐南区可部町の高松山とした。研究対象を一つの小流域に絞り、観測範囲は2.1 haとしている。小流域の平均斜面勾配は29°、集中観測を実施

した3箇所での斜面勾配は約40°となっている。地質は主に広島花崗岩類であり、マサ化した花崗岩が一部分布していることが確認されている<sup>9)</sup>。崩壊箇所の断面はいまだむき出しになっており、パイプのような大きな穴が開いていた。その様子を写真-1に示す。樹木はヒノキの針葉樹と、コナラ、アラカシといった広葉樹が分布している。

観測機器の設置場所を図-1に示す。転倒ます型雨量計を6地点に設置した。樹冠通過雨量の定量的評価を行うために、林外に1台、樹冠通過雨の針葉樹地点に1台、広葉樹地点に4台設置した。林地斜面における降雨の浸透を考慮するにあたり、斜面水平方向と流下方向の浸透機構を検討するために、斜面崩壊箇所の源頭部直上 (M1地点) を含む3箇所に集中観測地点 (I1, I2, M1) を設け、体積含水率、サクシオンを1地点に3深度 (30 cm, 60 cm, 90 cm) 計測した。また、鋼管をできる限り地中に打ち込み、圧力式水位計を用いて下層の水圧 (深度90 cm~150 cm) を11箇所にて計測した。また、圧力式水位計によって地表面流を5箇所にて計測するとともに、小流域の末端に堰を設け、流量を計測した。

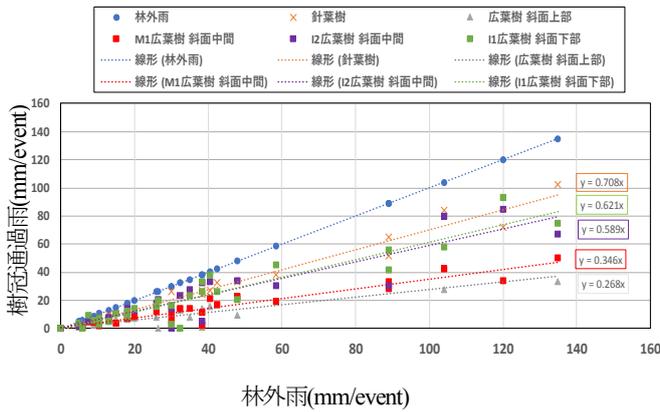


図-2 林外雨と樹冠通過雨の回帰分析

表-1 降雨減少と開空率の関係

場所	針葉樹	広葉樹斜面下部(I1)	広葉樹斜面中間部(I2)	広葉樹斜面中間部(M1)	広葉樹斜面上部
樹冠通過雨/林外雨 (%)	70.8	62.1	58.9	34.6	26.6
開空率 (%)	20.9	15.9	13.8	15.6	15.2

今回は2017年5月から12月までの観測期間で得られたデータをもとに検討を行う。

## (2) 観測結果と考察

### a) 降雨の観測結果

2017年5月31日から11月9日の観測期間中に観測した29の降雨イベントを対象として樹冠通過雨と林外雨の回帰分析を行った。樹冠通過雨量と林外雨量の関係を図-2に示す。針葉樹に比べ、広葉樹の方が降雨遮断は大きく、広葉樹でも斜面上部になるほど降雨の減少が顕著である。この広葉樹の結果は小田ら<sup>10)</sup>の研究と同様である。降雨の減少が起きる理由を検討するために、転倒ます型雨量計の真上の開空率を魚眼レンズを用いて計測した。表-1に示す。その結果、開空率の減少に伴って林内雨が減少することを確認した。以上のことから、林内雨量が減った原因は雨水が樹木に付着し、枝や幹を流れる樹幹流の割合が増加したことによることと考えられる。

### b) 体積含水率と下層の圧力の観測結果

降雨浸透に関する検討を行うために、表土層の体積含水率と圧力式水位計による表土層下部での圧力の観測結果を示す。これらの観測結果は計測期間全体を通して、集中観測地点、降雨強度の大小により、反応が異なっていた。このため、計測期間の中で、総降雨量と降雨強度の大きい場合と小さい場合の降雨イベントを選択し、検討を行う。また、計測期間全体から体積含水率の比較を行っていくにあたり、転倒ます型雨量計で得られたような場所による樹冠通過雨量の違いは、降雨に対して斜面上部のM1地点が素早く反応していることから、浸透に対してはあまり影響を与えないことが考えられた。ただし、後述する下層のマクロポア、パイプへの水の供

表-2 降雨イベントの特徴

イベント期間	林外雨 累積雨量	降雨強度
イベント 1 9/11 9時～ 9/13 3時	104mm	72mm/h
イベント 2 10/21 12時～ 10/23 12時	120mm	12mm/h

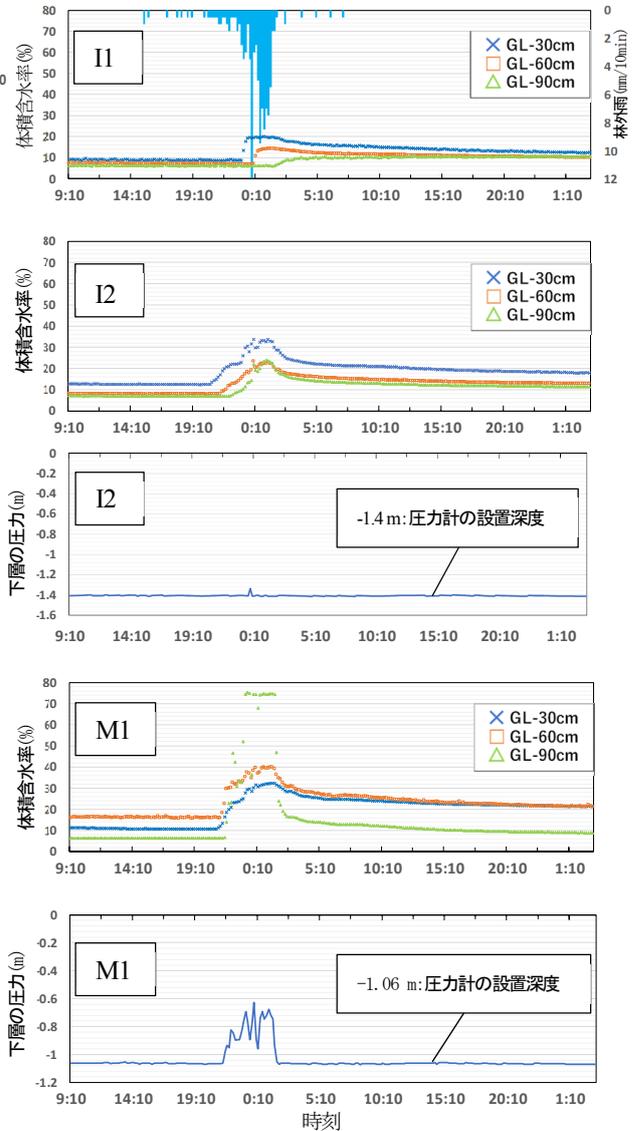


図-3 降雨イベント1の観測結果

給に樹木の存在は関係していると考えられ、さらなる検討が必要である。

集中観測地点3箇所での浸透過程を考慮するため、2回の計測結果(降雨イベント1とイベント2)を比較する。降雨イベント1, 2の特徴を表-2に示す。体積含水率と地表面を基準とした下層の圧力の時間変化の降雨イベント1を図-3に、降雨イベント2を図-4に示す。

降雨イベント1に関し、I1地点に関しては、体積含水率の上昇が少なく、降雨に対する反応も遅い。特にGL-90cmは立ち上がりが遅く浸透までの時間がかかってお

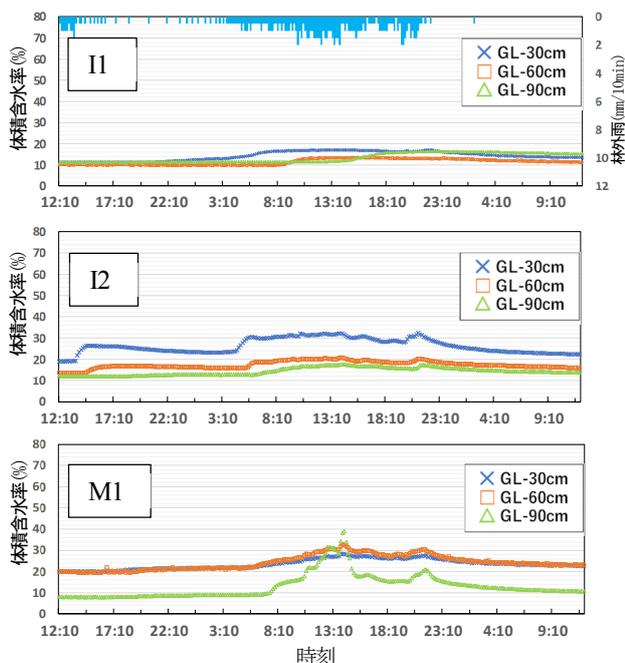


図-4 降雨イベント2の観測結果

り、鉛直下方向の浸透が起きたと考えられる。一方、I2地点では、降雨のピーク時に、GL-90 cm地点での体積含水率がGL-60 cmの地点よりも高い値を観測した。また、下層（-1.4 m）の圧力もピーク時に上昇した。M1地点においては、降雨に対し急激な体積含水率の上昇が観測された。特にGL-90 cmでは、急激な上昇と降雨後の急激な低下が見られた。同時刻には、地下水計の設置位置である-1.06 mにおいて圧力が上昇した。降雨強度の上昇と共に、地表面から約60 cm程度までの圧力水頭の上昇が起き、降雨強度の低下とともに急激に減少した。

降雨イベント2に着目すると、I1地点のGL-90 cmでは降雨に対する反応は遅いが、変化量がGL-30 cmとGL-60 cmより大きかった。これは、地面から鉛直下向きに浸透が生じているが、降雨時間が長かったために、GL-90 cmより下方に体積含水率が高い層が形成されたためであると推測される。I2地点では、GL-30 cmとGL-60 cmでは降雨強度の小さい雨に対しても多少の反応があるものの、GL-90 cmではほとんど反応が見られなかった。M1地点では、下層の圧力に反応がなかったものの、GL-90 cmでの体積含水率に大きな上昇が見られた。

### c) M1地点での体積含水率の降雨への応答特性

M1地点において、GL-90 cmの体積含水率がGL-30 cmやGL-60 cmにおける体積含水率よりも高くなる現象は鉛直下向き浸透では説明することができない。図-5は、2017年6月14日から11月9日までの観測期間中で、この現象が起きた時間までの累積雨量とその時の降雨強度を示す。図より、この現象は、累積雨量より降雨強度に関係していること、降雨強度が一定値以上であれば発生することを確認することができる。すなわち、降雨強度が一定値を超すと、鉛直浸透以外の機構で表土層の下部へ水

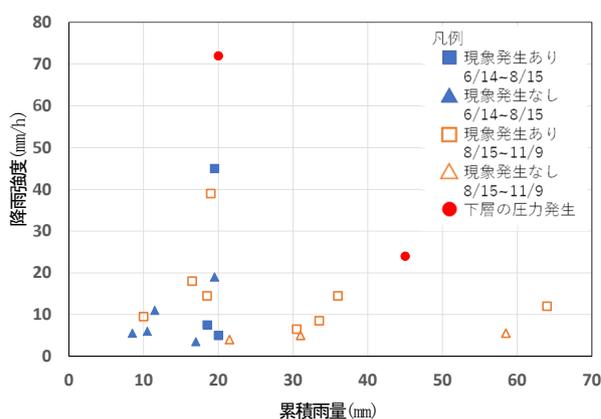


図-5 M1地点での降雨による検討

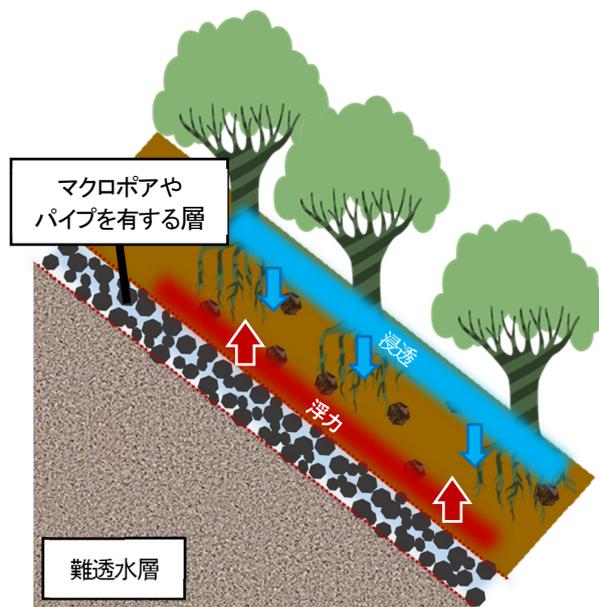


図-6 林地斜面における雨水浸透と斜面崩壊機構の仮説

が供給されることを意味している。また、図を詳細に見ると、その閾値は8月15日前後で変化し、8月15日以降閾値が低下している。また、本観測より降雨強度が24 mm/h以上となった場合、表土層下部では土壌が飽和し高い水圧が計測された。

### (3) 現地観測による林地斜面の降雨浸透機構の仮説

図-3, 4に示したように降雨強度が大きい場合、地表面から鉛直下向きに発生する浸透だけでなく、表土層の下部において降雨に対する急激な湿潤上昇が起き、降雨の終了後に急激な湿潤低下が起きていた。また、さらに強い降雨では下層の圧力の急激な上昇も見られた。

特に、M1地点に関しては降雨イベント1において深度1.06 mで計測された圧力式水位計による下層のピエゾ水頭の上昇は地表から深さ約60 cm程度まで達していたが、体積含水率はGL-90 cmの方がGL-60cmより高く、時間的にも変化している。このため、下層の地下水計の設置深度付近の層内では速いパイプ流などによって間隙水圧が高まっていたことが原因と考えられる。地下水計付

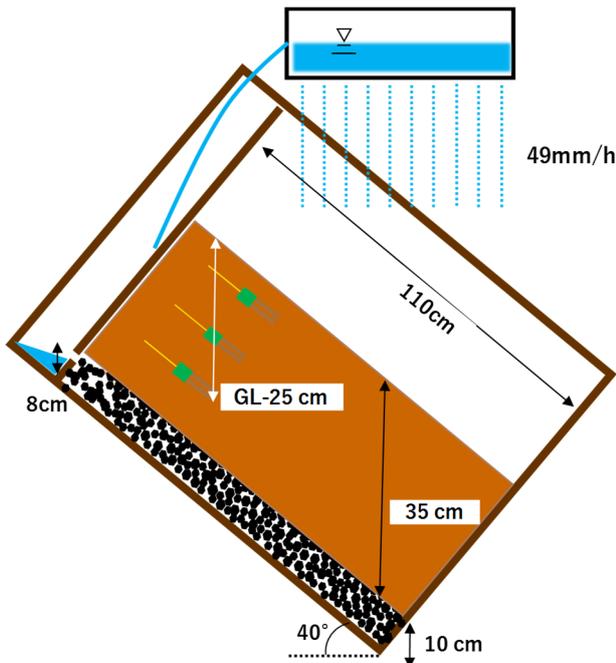


図-7 実験装置の概要

表-3 実験条件

実験条件	目的	上層と下層の間	先行降雨	下層への流入
実験1	下層からの湿潤の評価	金網	2時間	2時間
実験2	間隙水圧上昇による上層の不安定性の評価	ビニール	2時間	1時間

近の層内では、根茎や礫の影響により、マクロポアやそれが発達したパイプが存在すると考えられる。本観測では、降雨強度が5.5 mm/h以上に高まると下層からの湿潤が卓越し、さらに24 mm/h以上になると下層内が水で満たされ、管路流れが出来上がると考察された。

現地観測結果を踏まえ、雨水浸透と斜面崩壊過程を図-6のように考える。地中内にマクロポアやパイプを有した層が存在している土壤の場合、降雨強度が高まると、鉛直下方向の雨水浸透だけでなく、マクロポアやパイプを有した層に水が供給され、管路流のような流れを引き起こす。この水は斜面上方からの供給によるものと考え、層内の間隙水圧の上昇が起きる。下層内の間隙水圧の上昇により、上層を浮上させる力が働き、上層の不安定性をもたらすと考えられる。ただし、斜面上方から下層への水の供給が、短時間内にどこで行われるのかに関する観測データを今の時点では取得できていない。このような仮説が成り立つ層は、かつての土石流が運んだ土砂、あるいは、節理や破碎が進んだ岩により、土層内にマクロポアが形成され、徐々に水の影響で発達すると考えられる。また、このような空隙を含む土層は偏在するものと考えられる。現地調査では多くの地点で地下水圧を計測したが、水圧が降雨に敏感に反応した地点は限られており、現地においてそのような箇所を特定することは別の大きな課題である。

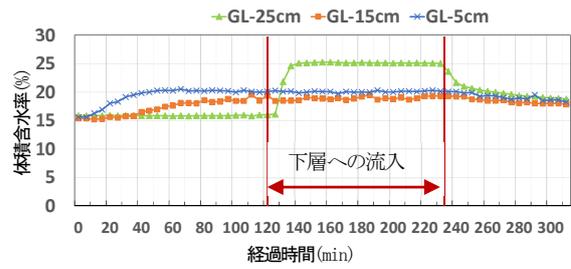


図-8 実験1の結果

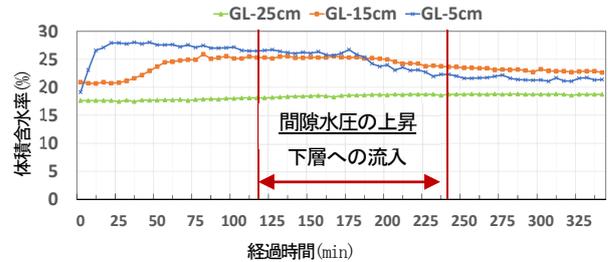


図-9 実験2の結果

### 3. 実験

#### (1) 実験方法

現地観測により考えられた仮説が起こりうるのかを検証するため、マクロポアを有した下層を有する斜面において、降雨の鉛直下向きの浸透と下層のパイプ流による下層からの湿潤過程と間隙水圧の上昇による上層の不安定性の評価を目的として実験を行った。

実験装置を図-7に示す。下層(10 cm厚)は礫(15 mm~20 mm)を敷き詰めることでマクロポアのような空隙を再現し、上層(35 cm厚)は真砂土(2 mm以下)を均一に詰めて作製した。

実験条件を表-3に示す。実験1では、上層と下層の材料が混入しないように層の間に金網を挿入しているが、空気と水の交換が可能となっている。実験2では、ビニールシートを挿入し、空気と水の交換をないようにしている。これは、下層内の間隙水圧の上昇をより顕著なものとして、比較するためである。計測機器は土壌水分計(深さ5 cm, 15 cm, 25 cm)とマノメータ(深さ35 cm)を用い、降雨強度49 mm/hの降雨を与えた。

実験手順は、実験前に土層の初期の体積含水率を均等にするために、入れ直しを行い、締固めを行いながら、真砂土を敷き詰める。計測を開始し、先行降雨を与え、時間経過後に図-7に示すように上流端の水深を8 cmに定常設定し、下層への水の流入を行う。時間経過後に、降雨と下層への水の供給を止め、降雨後の浸透過程が分かる2時間程度、計測を行った。なお、下層下流端は閉じており、水は溜まっていく。



図-10 実験1での土層の様子

## (2) 実験結果と考察

実験1の体積含水率の時間変化を図-8に、実験2の結果を図-9に示す。実験1では降雨に対して、鉛直下向きに浸透がゆっくりと起こるのに対し、下層に水が流入されるとGL-25 cmにて急激な体積含水率の上昇が見られ、流入を終えると急激な低下を示した。これは、降雨イベント1においてM1地点やI2地点で観測された状況に類似している。

実験2では体積含水率の時間変化は下層からの水の供給がないために、GL-5 cmとGL-15 cmでは徐々に降雨の浸透が見られたが、GL-25 cmではほとんど変化は見られていない。下層の末端を塞いだため、下層内に水がたまり、間隙水圧は下端のマノメータにより約20 cmH<sub>2</sub>Oの上昇が観測された。その後、間隙水圧の上昇により、下層の末端付近で上層の土を押し上げるような現象が起き、空気の逃げ場が無くなり、マノメータの周りの空隙に逃げ、上層に亀裂が生じた。図-10に示す。

実験より、マクロポアを有した層を下層に持つ斜面の場合、鉛直下向きに浸透よりも側方からのパイプ流のような流れが生じていると、下層から急激に湿潤すると考えられる。ただし、今回の実験では現地観測と比べて、体積含水率が低く、実験では地下水面の高さが低かったと考えられる。下層の間隙水圧の上昇が上層の不安定性をもたらすことは、下層内のマクロポアが水で満たされ、間隙水圧上昇を起こし、上層の間隙の空気の逃げ場が無くなることにより、強度を失い、斜面の不安定性をもたらす可能性があると考えられる。

## 5. 結論

降雨イベントの降雨強度、累積雨量により浸透過程は異なり、集中観測地点3箇所によって、斜面水平方向と流下方向の浸透過程への関係は得られなかった。林地斜面の斜面崩壊箇所の源頭部直上においては、降雨強度が高まると鉛直方向からの浸透では説明のつかない、速い

パイプ流のような流れが生じ、下層からの湿潤が起きることを確認した。下層の圧力の上昇はその層内の間隙水圧を高めることを示していた。今後、マクロポアやパイプを有する土層への水の供給源の特定、マクロポアの存在位置の推定などを行う必要がある。

実験により、パイプ流のような流れが下層に存在する場合、急激な下層からの湿潤が起き、上向きの浸透が生じることが確認された。下層内の水の流れにより空隙が水で満たされることで、上層に間隙水圧がかかると考えられる。実験での現地土壌の再現性を高めるとともに、より定量的な評価が必要である。

## 参考文献

- 1) 岡田憲治：土壌雨量指数と土砂災害警戒情報，技術手帳，地盤工学会誌，Vol.62，No. 3，pp.66-67，2014.
- 2) 気象庁：土壌雨量指数，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownbosai/dojoshisu.html>.
- 3) 塚本良則：森林水文学，文永堂出版，pp.78-79，pp.215-218，1998.
- 4) 伊東茜，恩田裕一，南光一樹，福山泰治郎，森脇寛：ヒノキ樹冠通過雨の空間分布に関する実験的研究，水文・水資源学会誌，Vol.21，No.4，pp.273-284，2008.
- 5) 渡邊信剛，児島利治，篠田成朗，大橋慶介，玉川一郎，斎藤琢：常緑樹林及び落葉樹林における樹冠遮断現象の現地観測とそのモデル化，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.4，pp.1759-1764，2012.
- 6) 安池慎治：土壌中のマクロポアと間隙空気圧の影響を考慮した降雨浸透実験と数値解析：地理学評論，Vol.69，No.10，pp.832-846，1996.
- 7) 内田太郎，小杉賢一朗，大手信人，水山高久：パイプ流が斜面安定に与える影響，水文・水資源学会誌，Vol.9，No.4，pp.330-339，1996.
- 8) 岩田直樹，中井真司，片山弘憲，柳崎剛，笹原克夫：平成26年8月の広島県廿日市市において観測された降雨浸透と斜面の変形，地盤工学ジャーナル，Vol.10，No.4，pp.623-634，2015.
- 9) 近畿中国森林管理局：8月19日からの大雨による広島市における山地災害検討委員会第1回（平成26年11月18日），[http://www.rinya.maff.go.jp/kinki/tisan/hirosima\\_saigai/pdf/20141120\\_siryou-2-2.pdf](http://www.rinya.maff.go.jp/kinki/tisan/hirosima_saigai/pdf/20141120_siryou-2-2.pdf).
- 10) 小田智基，平岡真合乃，佐藤貴紀，堀田紀文，大手信人，鈴木雅一，内山佳美：落葉広葉樹の優占する山地斜面における林内雨量の空間分布特性，平成26年度砂防学会研究発表会概要集，P1-74，2014.

(2017. 4. 3受付)