

# 降雨浸透過程と排水パイプによる斜面崩壊リスク低減効果に関する研究

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○中川 翔太  
 広島大学大学院工学研究科 正会員 土田 孝  
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 梅田 賢也  
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 川端 昇一  
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 花岡 尚

## 1.背景・目的

近年、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。降雨時の斜面不安定化を与える主要因として、降雨浸透による水分量の上昇や地下水位の形成が考えられる。降雨時において斜面が不安定化し崩壊にいたるメカニズムとしては、降雨が高含水比帯を形成して徐々に降下した後、基盤に到達して地下水位を形成し、地下水位の上昇が斜面のすべり安全率を大きく減少させることが知られている<sup>1)</sup>。一方、強い降雨が続いた場合には、高含水比帯が基盤に達する以前に高含水比帯の中で地下水面が形成され、斜面に沿った流れが発生している可能性が、現地観測結果から報告されている<sup>2)</sup>。2010年に広島県庄原市で発生した大規模な土砂災害では3時間弱の降雨により膨大な数の自然まさ土斜面の崩壊が発生したが、斜面表層で多くの水の流れが観察されている。本研究では、降雨時に斜面表層に形成される高含水比帯<sup>1)</sup>に着目し、地下水位形成前に高含水比帯中に不飽和浸透流が発生するか検討するために、排水パイプを用いた1次元模型実験を行った。また、3次元浸透流解析による1次元模型実験の再現を行い、降雨浸透特性の検討を行うとともに想定した斜面に対して排水パイプを打設した際の地下水位低減効果について検討を行った。

## 2.1 次元模型実験

高含水比帯中の体積含水率  $\theta_h$  は、水分特性と降雨強度に影響するため<sup>1)</sup>、試料と降雨強度を変化させ、実験を行い、高含水比帯中に不飽和浸透流が流れる際の  $\theta_h$  を調べることを試みた。実験ケースを表-1に、模型概要図を図-1に示す。排水パイプは、塩化ビニルパイプを材料として作成し、土層下端から高さ30cmの位置に予め27.5cm埋め込んだ。パイプは6°の勾配を設け、不飽和浸透流が排水できるように設置した。下端から高さ20,30,40,50cmの位置の体積含水率と高さ20,40cmの位置の圧力水頭、地下水位、排水量の計測を行った。

本実験では、高含水比帯下降時の不飽和浸透流を確認するために排水パイプを設置したが、土の種類、降雨強度を変化させた6パターン全てで不飽和浸透流を確認することができなかった。その中でも、高含水比帯の飽和度が最も高い値を計測できたCase6について詳細に説明する。

図-2、図-3にCase6での降雨開始からの各時間における深度-飽和度、深度-圧力水頭の関係を示す。試料には豊浦砂を用い、降雨強度は122.8mm/hrとした。降雨が浸透すると、降雨開始20min後には、土層上層に飽和度73%程度の高含水比帯が形成され、下層に向かって下降し始めた。その後37min後には、高含水比帯が土層下端に達し、地下水位が形成された。そ

表-1 実験ケース

Case	試料	降雨強度 (mm/hr)	排水材	e	初期 $\theta$	透水係数 (cm/s)			
1	豊浦砂	20.7	無	0.80	0.18	$2.4 \times 10^{-2}$			
2			有						
3			無						
4		有							
5		無							
6		有							
7	まさ土	42.4	無	0.65		$1.9 \times 10^{-1}$			
8			有						
9			無						
10	まさ土	121.0	有						$4.7 \times 10^{-3}$
11			無						
12			有						

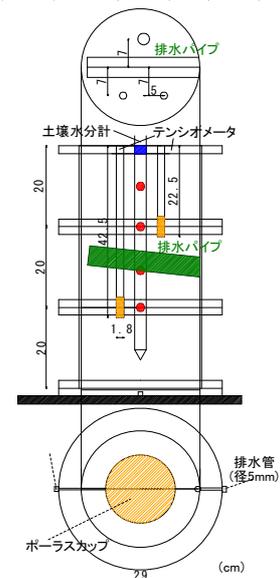


図-1 模型概要図

の時のパイプ位置(高さ 30cm)の飽和度は 76%で、負の圧力水頭は-24cm 残留しており、排水パイプからの排水はなかった。このような条件では水は土中に保持され、不飽和浸透流は発生しないと考えられる。その後、地下水位の上昇に伴い、パイプ位置の飽和度は上昇したが、飽和度が 96%に達しても、排水は開始されず、負の圧力水頭も -22cm 程度残留していた。排水が開始されたのは、降雨開始 62min 後であり、このときパイプ位置の飽和度は 99%で、圧力水頭は-5cm 程度であった。以上のように、飽和度が上昇しても負の圧力水頭が残留するとパイプを通じた排水は発生しなかった。不飽和浸透流が発生しなかった理由として、負の圧力水頭が残留していたからだと考えられる。このように、今回の模型実験では、ほぼ飽和に等しい( $S_r=99%$ )程度の含水状態であっても、不飽和浸透流を確認することができなかった。1次元模型実験では、水平方向の飽和度が等しく、浸透流が水平方向に流れなかったと考えられる。

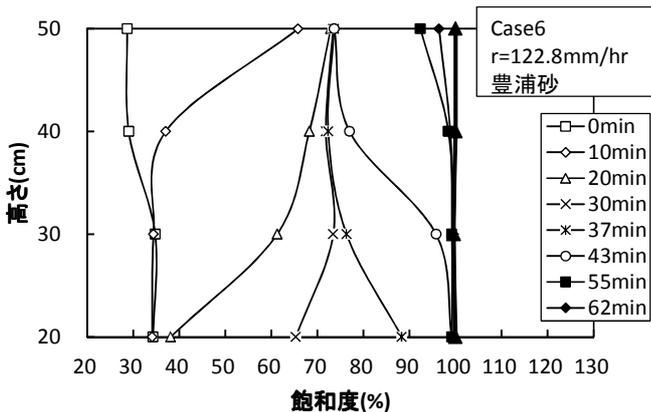


図-2 飽和度の経時変化

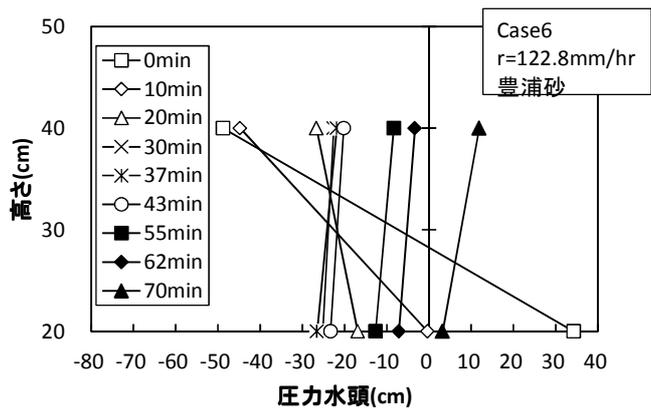


図-3 圧力水頭の経時変化

### 3. 3次元浸透流解析による1次元模型実験の再現

模型実験で得たデータを基に、VGモデルとの水分特性曲線のフィッティングを行った。フィッティングは体積含水率と不飽和透水係数の実験値と式(3.1)、式(3.2)のようなVGモデルによる体積含水率と不飽和透水係数の近似値の差の二乗の和が最小となるようにフィッティングを行った。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \{1 + |\alpha\psi|^n\}^{-m} \quad (0 \leq S_e \leq 1, \alpha \geq 0) \quad (3.1)$$

$$k_\theta/k_s = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3.2)$$

ここで、 $S_e$  : 有効飽和度,  $\theta_s$  : 飽和体積含水率,  $\theta_r$  : 残留体積含水率,  $\psi$  : サクション,  $\alpha$  : 定数,  $n$  : 定数,  $m = 1 - 1/n$  ( $0 < m < 1, n > 1$ )  $k_\theta$  : 体積含水率  $\theta$  の時の不飽和透水係数,  $k_s$  : 飽和透水係数

今回の実験では、 $\theta=0.18$  程度の一様な初期状態から降雨を与えているため、給水走査曲線の水分特性曲線となる。Scott(スコット)<sup>3)</sup>らが導入した仮定によると、走査曲線は排水・給水過程において  $\alpha, n$  の値はそれぞれの主曲線と同じで、 $\theta_s, \theta_r$  の値を適宜変えることで表現できる。そのため、今回のフィッティングで変化させるパラメータは、 $\alpha, n, \theta_r$ (残留体積含水率),  $K_s$ (飽和透水係数)とし、 $\theta_{sat}$ (飽和体積含水率)は実験値を用いた。図-4にCase1の実験結果を基にフィッティングを行った結果を示す。

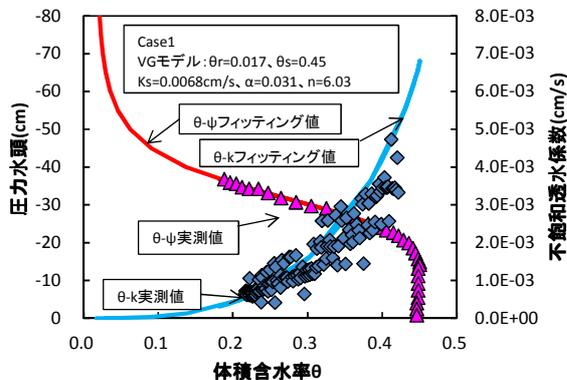


図-4 フィッティング結果

フィッティングして求めた水分特性を用いて、模型実験の再

現を行い、解析の妥当性を検証するとともに、排水パイプのモデル化の検討を行った。排水パイプのモデル化では、排水パイプの側面の要素に浸出面境界条件を与えた。浸出面境界は水が浸出する飽和(動的)領域に対しては、均一な圧力水頭ゼロを指定する。一方、不飽和領域に対しては、水分は土に負圧で(毛細)保持されているので、不透水境界を指定する。モデルの大きさや初期条件は模型実験を基に決定した。図-5に Case2 における高さ 20cm の体積含水率と圧力水頭の経時変化、図-6に地下水位の実験値と解析値の比較を示す。体積含水率および圧力水頭、地下水位の経時変化は良好に整合していることがわかる。このことから、適切な水分特性を設定すれば、実験と精度よく整合するように降雨浸透過程を解析することができることがわかった。また、排水パイプのモデル化については、浸出面境界を与えることで、実験の地下水位の位置と整合することがわかった。

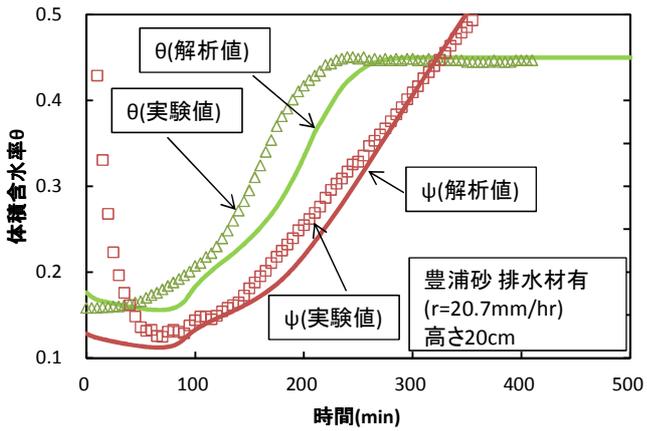


図-5 体積含水率と圧力水頭の比較

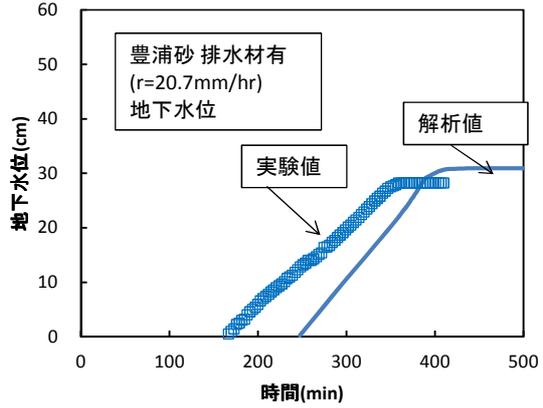


図-6 地下水位の比較

4. 想定斜面での排水パイプ打設による地下水位低減効果の検討  
 今回の実験では、強い降雨があっても下降過程の高含水比帯には負圧が残留しておりパイプを通じた排水はないこと、パイプによる排水は高含水比帯が基盤に達し地下水位がパイプ位置に届いたときに始まることわかった。この条件で排水パイプの排水が起る場合の地下水低減効果を検討した。斜面モデルは、勾配 16°, 層厚 1.5m の平行斜面(谷地形でない斜面)を想定した。斜面長はあらかじめ、斜面下端上端の境界条件の影響が出ないように、十分に斜面長の長いモデルを設定した。図-7 に示すように、斜面下端断面の境界条件を浸出面境界、側面は側方斜面に勾配がない平行斜面を想定しているため、不透水境界とした。ピッチ間隔は、横方向は斜面幅を、斜面長方向は排水パイプの打設間隔を変更し、表現した。解析は縦横のピッチ間隔と降雨強度、パイプ挿入長さを変更して解析を行った(表-2)。水分特性は前述した豊浦砂を使用した。なお、地下水位低減効果を示す指標として、降雨量と排水量が釣り合う定常状態での地下水位を斜面基盤中央の位置の圧力水頭の値から測定した。

図-8 に排水パイプを長さ 2.0m 打設した際の地下水位を示す。これは、縦ピッチ 1.0m 固定時の横ピッチと地下水位の関係を示

表-2 解析ケース

	変化項目	変化数
横ピッチ(m)	1.0,1.5,2.0,2.5	4
縦ピッチ(m)	1.0,1.5,2.0,2.5	4
降雨強度(mm/hr)	40,50,60	3
パイプ挿入長さ(深さ)(m)	1.5,1.7,2.0	3

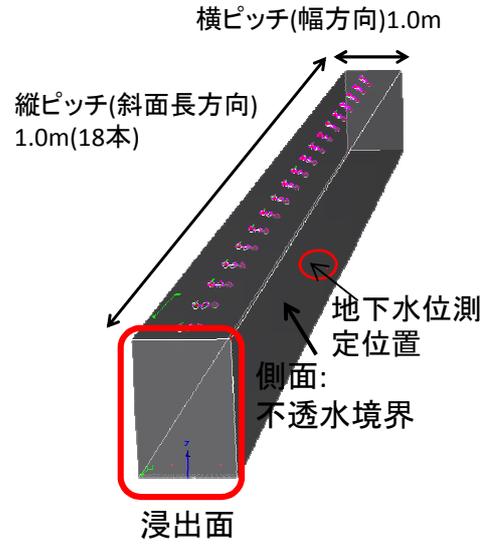


図-7 解析モデル

している。この図より、降雨強度ごとに、それぞれのピッチ間隔と地下水位には線形関係があることがわかる。また、同様の線形関係は、全てのピッチ間隔と地下水位の関係に確認することができた。図-9 に解析により求めた地下水位と線形関係を基に推定した地下水位の関係を示す。最大誤差は0.9cm となった。このように、ピッチ間隔と地下水位の線形関係より、排水パイプの打設ピッチを任意に変更した際の地下水位は精度良く推定できることがわかった。図-10 に勾配16°、層厚1.5m、100m<sup>2</sup>の平行斜面に排水パイプを長さ2.0m 打設する本数と地下水位を示す。このように、勾配と層厚を想定した斜面において、排水パイプを打設した際の地下水位低減効果について示すことができた。

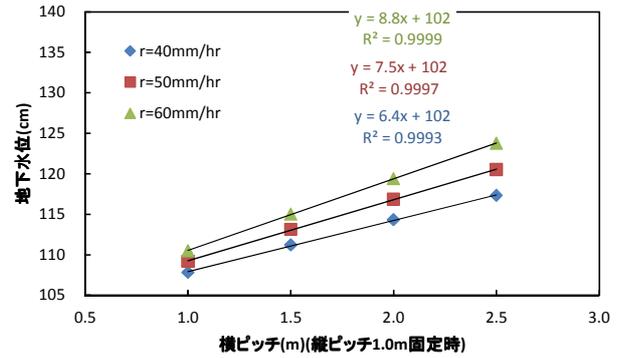


図-8 崩壊発生時の地下水面(ケース 1)

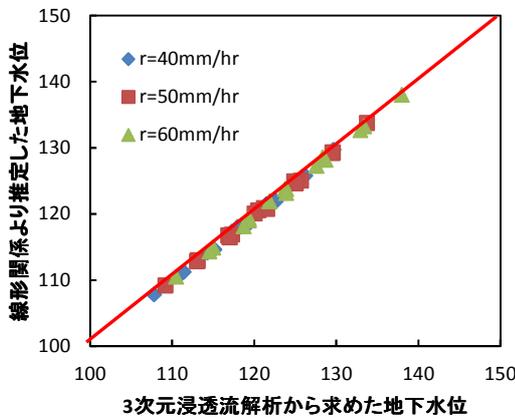


図-9 推定によって求めた地下水位の誤差

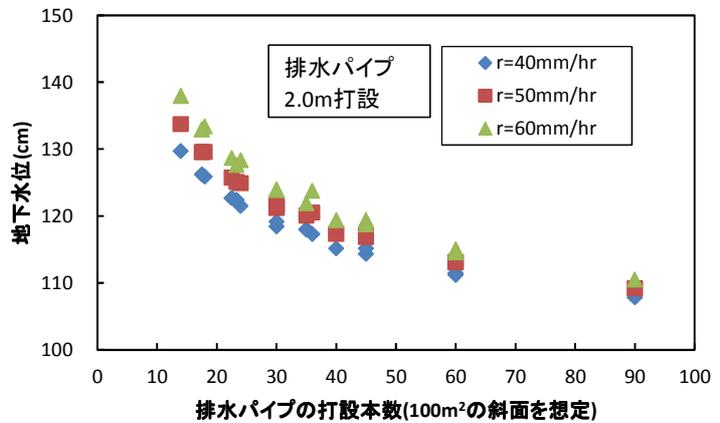


図-10 排水パイプ打設による地下水位低減効果

5. 結論 本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 1次元模型実験より、強い降雨により下降時の高含水比帯が飽和に近い飽和度( $S_r=96\%$ )であっても、サクシオンが残留し、パイプからの排水が発生しないことがわかった。現地観測や崩壊事例で観察される降雨初期での斜面表層での地盤内の水の流れについては、さらにそのメカニズムを検討する必要がある。
- (2) 模型実験より得たデータを基に、水分特性曲線のフィッティングを行った。また、フィッティングした水分特性曲線を用いて、3次元浸透流解析を行い、実験値と比較を行った結果、実験値との整合性を得た。
- (3) 勾配と層厚を想定した斜面に対して、排水パイプを考慮した3次元浸透流解析を行い、排水パイプを打設した際の地下水位低減効果について定量的に示すことができた。

参考文献：

- 1) 由利厚樹：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回地盤工学会研究発表会，発表講演集，165-166
- 2) THI HA，土田 孝，加納 誠二：原位置観測による森林斜面における雨水浸透・流出メカニズムおよび森林土壌の保水機能の評価，土木学会河川技術論文集 Vol.14, pp.199~204, 2008
- 3) Scott, P.S., Farquhar, G. J. and Kouwen, N. :Hysteretic Effects on Net Infiltration, pp.163~170, In advances in Infiltration, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 1983.