

## 降雨に伴う土中水分量の変化と単一雨量指標 $R'$ との関係

広島工業大学 正会員 ○森脇 武夫  
 元広島工業大学 非会員 伊藤 駿  
 元広島工業大学 非会員 久保 諒真  
 元広島工業大学 非会員 森島 佑介

### 1. はじめに

2017年7月九州北部豪雨災害, 2018年7月西日本豪雨災害, 2019年台風19号豪雨災害など, 豪雨に伴う土砂災害が毎年のように全国で発生し, 建物や社会基盤施設だけでなく, 多くの人的被害が出ている. 土砂災害の被害を防止・軽減するためには, 砂防堰堤の建設などのハード対策だけではなく, ハザードマップの作成や警戒・避難体制の構築などのソフト対策も必須である. ソフト対策のうち, 雨量状況から土砂災害の危険度を評価し, 早期に警戒・避難することは人的被害を少なくすることに効果的であり, 様々な雨量指標が提案されている. その中で, 単一雨量指標  $R'$  は土砂災害の危険度を一つの数値で表すことができ, 過去の土砂災害の発生状況を適切に評価できることが報告されている<sup>1)</sup>. しかし,  $R'$  は降雨量のみから算出され, 地盤の状態には依存しないため,  $R'$  を適切に運用するためには, 地盤中の土中水分量と  $R'$  の関係を調べておく必要がある. そこで本研究では, 土槽を用いた室内降雨実験を行い, 降雨中の地盤内の土中水分量の変化を調べ,  $R'$  の値との関係を明らかにした.

### 2. 単一雨量指標 $R'$ の定義と特徴

土砂災害の発生には, 先行雨量と災害発生時の雨量強度の2つが関係しており, この2つの指標を適切に評価することによって災害発生の危険度を推定することができる. 著者ら<sup>2)</sup> は, 先行雨量を長期実効雨量で, 雨量強度を短期実効雨量で表し, 次式によって土砂災害の危険度を一つの数値で総合的に評価できる単一雨量指標  $R'$  を提案している.

$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad (1) \quad , \quad R_{fw} = \sqrt{(R_l - R_w)^2 + a^2(r_l - r_w)^2} \quad (2)$$

ここに,  $R_w$ : 半減期を72時間とする長期実効雨量(mm),  $r_w$ : 半減期を1.5時間とする短期実効雨量(mm),  $R_l$ : 基準となる長期実効雨量,  $r_l$ : 基準となる短期実効雨量,  $a$ : 重み係数,  $R_{fw0}$ :  $R_w=0, r_w=0$  のときの  $R_{fw}$  値である. また, 過去の事例分析から  $R_l=600\text{mm}, r_l=200\text{mm}, a=3$  とすると,  $R'=125\text{mm}$  程度から住宅地などでのがけ崩れが起こり,  $R'=250\text{mm}$  以上になると土石流が発生し,  $R'=400\text{mm}$  以上で大規模災害になることが分かっている<sup>2)</sup>.

### 3. 実験方法

本研究では, 図-1に示すように, 内径260mm, 高さ1,070mmの円筒形土槽を用い, 土槽上端より1,110mm上方の噴霧器用ノズルから散水する降雨実験を行った. 水源は上水道で, ノズルまでの途中に流量計を設け, 降雨量の調節を行った. 土槽中には土壌水分計(DIK-321E)を深度方向に250mm間隔で4台埋設し, 10分間隔で体積含水率  $\theta$  を計測した.

実験に用いた試料は市販のまさ土で, 4.75mmふるいを通したものだけを用い, その物理的性質は  $\rho_s=2.644\text{g/cm}^3, D_{10}=0.150\text{mm}, D_{50}=0.700\text{mm}, U_c=7.0, U_c'=1.59$  で, 礫質砂(SG)と分類される. このまさ土を初期間隙比が  $e=0.8$  となるように土槽内に詰めた. なお, 間隙比  $e=0.8$  の時の透水係数は  $k=4.2 \times 10^{-5}\text{m/s}$  である.



図-1 降雨実験装置

キーワード 土砂災害, 危険度評価, 雨量指標, 室内降雨実験, 土中水分量

連絡先 〒731-5193 広島市佐伯区三宅二丁目1-1 広島工業大学 工学部 環境土木工学科 TEL 082-921-9173

表-1 に降雨条件と土槽底面の排水条件を示す. 本実験では累積雨量が 300mm となるようにし, 時間雨量 20mm を 15 時間継続した場合 (Case-1 と 2) と, 時間雨量 20mm を 5 時間継続した後で時間雨量を 50mm に増加して 4 時間継続した場合 (Case-3 と 4) で行い, Case-1 と 3 では土槽底面を非排水条件, Case-2 と 4 では排水条件とした. なお, 排水条件とは土槽底面に設けた直径 11mm の排水孔 9 個のうち 5 個を開放したもので, 底面積に占める開口率は 0.89% である.

表-1 実験条件

ケース名	降雨条件	排水条件
Case-1	20mm/hr × 15hr	非排水
Case-2	20mm/hr × 15hr	排水
Case-3	20mm/hr × 5hr + 50mm/hr × 4hr	非排水
Case-4	20mm/hr × 5hr + 50mm/hr × 4hr	排水

## 4. 実験結果

### 4.1 飽和度の深度分布

図-2~5 に飽和度  $S_r$  の深度分布の経時変化を示す. なお, 本研究では土中水分量として, 土壤水分計で計測した体積含水率  $\theta$  から算出した飽和度  $S_r$  を用いた. また, この図では降雨中の飽和度の深度分布を実線で, 降雨停止後の飽和度の深度分布を点線で示してある.

図-2 は, 底面非排水条件で時間雨量 20mm を 15 時間継続した Case-1 の結果を示したもので, 降雨開始から 1 時間までは深度 250mm 以深の飽和度は初期値から変化せず, 2 時間後に深度 250mm の飽和度だけが 46% まで増加していることから, 降雨開始から 1~2 時間の間に浸潤線が深度 250mm を通過したことが分かる. 同様に, 深度 500mm では 3 時間後に, 深度 750mm では 4 時間後に浸潤線が到達し, その後の飽和度は 48~53% 程度の定常状態になっている. 深度 1000mm の飽和度は, 降雨開始から 5 時間までは初期値から変化していなかったが, 6 時間後には 77% まで急増しており, この間に浸潤線が底面まで達し, 底面から地下水位が形成されていると推測できる. その後, 地下水位は上昇し, 9 時間後には全深度で飽和度が 89~95% となり, 降雨停止まで定常状態となった. なお, 地下水位が地表まで達した後も飽和度が 100% にならなかったのは, 土壤水分センサーを下向けに埋設していたため, センサー躯体部分が地下水の上昇を妨げ, センサーピン部分の土が完全に飽和しなかったことが原因の一つと考えられる. 降雨停止後の飽和度は, 1~2% 程度低下しているが, 降雨を停止した 15 時間後とほとんど変化していない. これは土槽の底部が非排水条件であるため, 地下水の移動が起こらなかったためと考えられる.

図-3 は, 底面排水条件で時間雨量 20mm を 15 時間継続した Case-2 の結果を示したもので, 降雨開始から 1 時間後に深度 250mm の飽和度が 32% まで増加しており, 降雨開始から 1 時間で浸潤線が深度 250mm まで到達したことが分かる. Case-1 で浸潤線が深度 250mm まで到達したのは降雨開始後 1~2 時間後であるため,

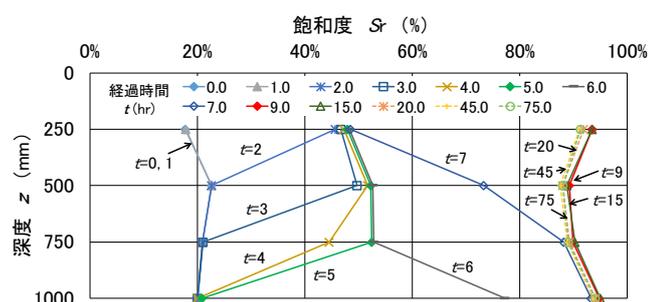


図-2 飽和度の深度分布 (Case-1)

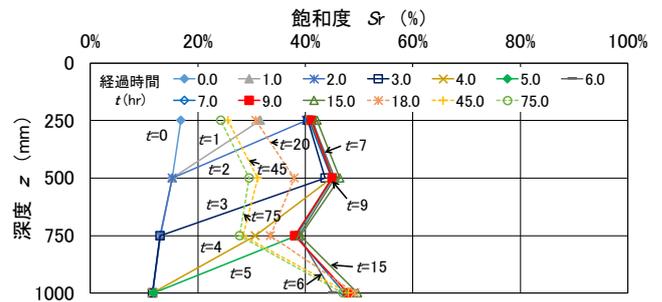


図-3 飽和度の深度分布 (Case-2)

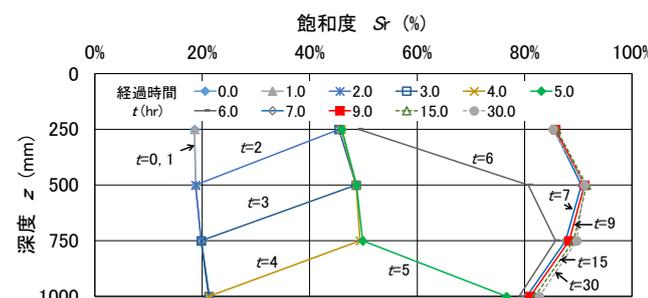


図-4 飽和度の深度分布 (Case-3)

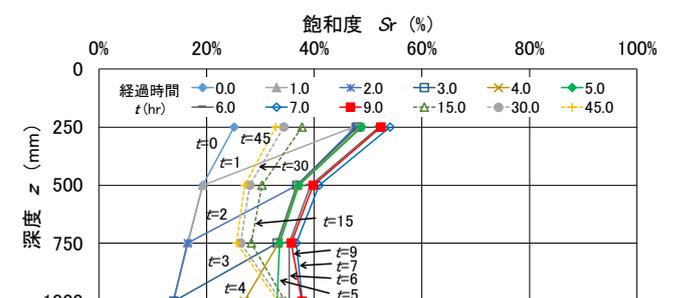


図-5 飽和度の深度分布 (Case-4)

Case-2の方が浸潤線の降下が速い結果になっている。これは、試料の初期状態などの違いにも影響されていると思われるが、Case-2では土槽の底面が排水条件になっているため、土中の空気が下方から排出され、雨水が上方から浸透しやすかったのではないと思われる。深度250mmの飽和度は降雨開始後2時間で40%になり、その後深度500mmでは3時間後に44%、深度750mmでは5時間後に38%、深度1000mmでは6時間後に45%まで増加し、浸潤線が順次下方に降りて、6時間後には底面まで到達していることがわかる。また、降雨開始から6時間以降は、深度1000mmの飽和度が49%まで若干増加しているが、その他の深度ではほとんど変化せず、定常状態になっている。この時の飽和度は38~49%程度で、非排水条件であったCase-1の90%前後とは異なり、全層が飽和状態になってはいない。降雨停止後は上部から飽和度が低下し、75時間後（降雨停止から60時間後）には、深度250mmで24%、深度500mmで30%、深度750mmで28%まで低下しているが、深度1000mmではほとんど低下していない。

図-4は、底面非排水条件で時間雨量20mmを5時間継続した後、時間雨量50mmに増やして4時間継続したCase-3の結果を示したものである。降雨開始から5時間はCase-1と同じ実験条件であるため、飽和度の深度分布もほぼ同じ傾向を示しているが、Case-3では5時間後に深度1000mmで飽和度が77%まで上昇しており、Case-1より地下水位の上昇時期がやや早くなっていた。時間雨量が50mmに増加した5時間後以降は、下方からの飽和度の増加が速く、7時間後には全層にわたって飽和度が81~91%になり、その状態が降雨を停止する9時間後まで継続していた。降雨停止後の飽和度は、Case-1とは逆に1~2%程度増加しているが、底面非排水条件であるため、降雨を停止した9時間後とほとんど変化していない。

図-5は、底面排水条件で時間雨量20mmを5時間継続した後、時間雨量50mmに増やして4時間継続したCase-4の結果を示したものである。降雨開始から5時間はCase-2と同じ実験条件であるため、飽和度の深度分布もほぼ同じ傾向を示しているが、深度1000mmでは飽和度の上昇がCase-2よりやや速く、5時間後には33%まで増加している。時間雨量が増加した5時間後以降は、層全体で飽和度が3~5%増加し、Case-2とは異なる傾向を示したが、飽和度は36~54%程度でCase-2と同様に全層が飽和状態になっていない。降雨停止後はCase-2と同様に上部から飽和度が低下し、45時間後（降雨停止から36時間後）には、深度250mmで33%、深度500mmで27%、深度750mmで26%まで低下しているが、深度1000mmではほとんど低下していない。

## 4.2 飽和度と雨量指標 $R'$ の経時変化

図-6~9に飽和度  $S_r$  と雨量指標  $R'$  の経時変化を示す。時間雨量20mmを15時間継続したCase-1と2では、 $R'$ は降雨開始とともに増加し、 $R'=125\text{mm}$ となるのは降雨開始から2.9時間後、 $R'=250\text{mm}$ となるのは10.1時間後で、降雨を停止する15時間後には $R'=307\text{mm}$ まで増加している。降雨停止後に $R'$ は急激に減少し、 $R'=250\text{mm}$ となるのは降雨開始から18.3時間後（降雨停止から3.3時間後）、 $R'=125\text{mm}$ となるのは52.3時間後（降雨停止から37.3時間後）である。また、時間雨量20mmを5時間継続した後、時間雨量50mmに増やして4時間継続したCase-3と4では、降雨中に $R'=125\text{mm}$ となるのはCase-1と2と同様に降雨開始から2.9時間後になるが、5時間後から降雨強度が強くなるため $R'=250\text{mm}$ となるのは5.8時間後とCase-1と2より早くなり、降雨を停止する9時間後には $R'=461\text{mm}$ まで増加している。降雨停止後の $R'$ は急激に減少し、 $R'=250\text{mm}$ となるのは降雨開始から12.0時間後（降雨停止から3.0時間後）、 $R'=125\text{mm}$ となるのは50.5時間後（降雨停止から41.5時間後）である。

図-6は、非排水条件で時間雨量20mmを15時間継続したCase-1の結果を示したもので、降雨開始時には20%前後であった飽和度が降雨開始後に土槽上部から上昇し、46~53%程度で数時間停留し、今度は土槽下部から上昇し、90%前後に達し、その後一定値を保っていることがわかる。 $R'=125\text{mm}$ となった2.9時間後には深度250mmと500mmでは飽和度が50%程度まで上昇しているが、深度750mmと1000mmでは未だ上昇していない。また、 $R'=250\text{mm}$ となった10.1時間後には全ての深度で飽和度が90%前後まで上昇している。

図-7は、排水条件で時間雨量20mmを15時間継続したCase-2の結果を示したもので、Case-1と同様に飽和度は増加するが、底面が排水条件であるため深度1000mmでも飽和度は約50%までしか上昇しない。降雨停

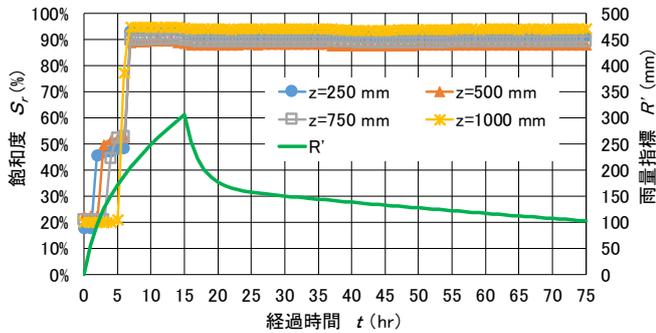


図-6 飽和度と雨量指標  $R'$  の経時変化 (Case-1)

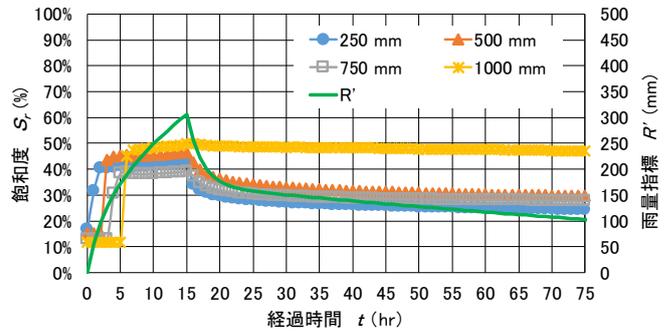


図-7 飽和度と雨量指標  $R'$  の経時変化 (Case-2)

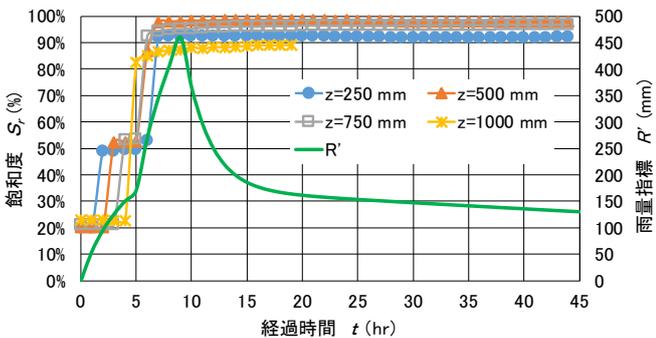


図-8 飽和度と雨量指標  $R'$  の経時変化 (Case-3)

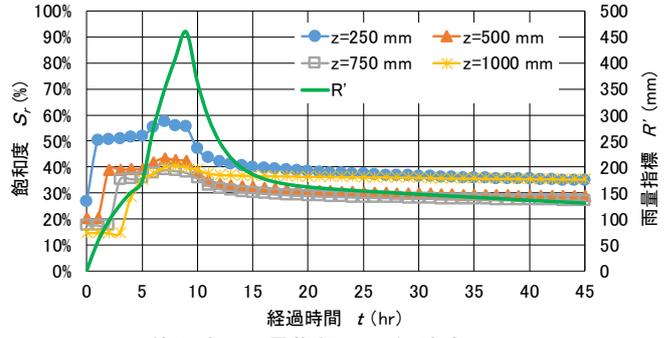


図-9 飽和度と雨量指標  $R'$  の経時変化 (Case-4)

止後は土槽上部から飽和度が急激に低下しているが、深度 1000mm での飽度の低下は非常に緩やかである。

図-8 と図-9 は、非排水条件と排水条件で、時間雨量 20mm を 5 時間継続した後、時間雨量 50mm に増やして 4 時間継続した Case-3 と 4 の結果を示したものである。降雨開始から 5 時間後から降雨強度が強くなっているため、雨量指標と飽和度は急増しているが、全体的にはそれぞれ Case-1 と 2 と同様な傾向となっている。

図-10 は、雨量指標が  $R'=125\text{mm}$  と  $R'=250\text{mm}$  になるときの飽和度  $S_r$  の深度分布を示したものである。 $R'=125\text{mm}$  となる時は、前述したように全てのケースで 2.9 時間後であり、図-10 には降雨開始から 3 時間後の深度分布が示してある。この図で、深度 500mm 以浅ではすべてのケースで、また Case-4 では深度 750mm 以浅で飽和度が初期状態から 35~53% 程度まで上昇しており、 $R'=125\text{mm}$  となる時は浸潤線が 500~750mm まで降下した状態であることがわかる。 $R'=250\text{mm}$  となる時は、前述したように Case-1 と 2 では 10.1 時間後、Case-3 と 4 では 5.8 時間後であるため、Case-1 と 2 では 10 時間後、Case-3 と 4 では 6 時間後の深度分布が示してある。この図から、経過時間の違いに係らず非排水条件である Case-1 と 3 では層全体の飽和度が 90% 程度まで上昇し、排水条件である Case-2 と 4 では深度 1000mm での飽和度が 37~48% まで上昇しており、 $R'=250\text{mm}$  となる時は浸潤線が底面まで達し、非排水条件では層全体が飽和状態、排水条件では層全体で飽和度の高い一様な定常状態になっていることがわかる。

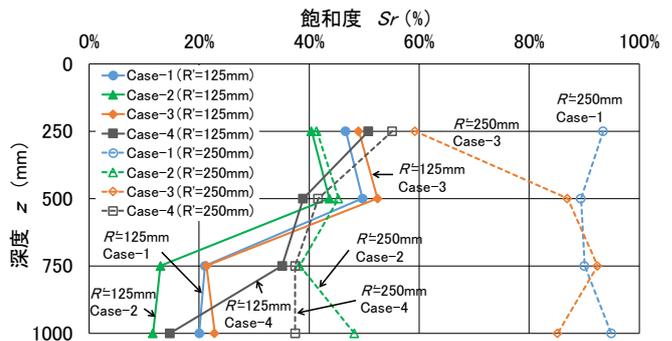


図-10  $R'=125\text{mm}$  と  $R'=250\text{mm}$  のときの飽和度の深度分布

## 5. まとめ

限られた実験条件のもとではあるが、雨量指標  $R'$  の値が同じ時の土中水分量は、雨の降り方にはあまり影響を受けずほぼ同じ深度分布となるが、分布形は底面の排水条件に影響を受けることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 森脇武夫・土田孝・橋本涼太・中井真司・加納誠二・海堀正博：2018年7月豪雨による広島県の土砂災害の特徴(1999年6.29災害と2014年8.20災害との比較), 土木学会論文集 B1, 75巻, 4号, pp.244-259, 2019.
- 2) 中井真司・佐々木康・海堀正博・森脇武夫：警戒・避難のための雨量指標の改良(危険雨量指標  $R_r$  の再吟味と  $R'$  の提案), 広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.53, No.1, pp.53-62, 2004.