

九州大学大学院 学 ○岩見康平, 山梨大学大学院 正 荒木功平
九州大学大学院 正 安福規之, 石蔵良平, ハザリカ・ヘマンタ

1 はじめに

地球温暖化等の気候変動に伴い、多くの地域で大雨の頻度の増加が問題となっている。特に沖縄県では、他県と比べて雨の強度が大きく、土壌（赤土）が流出しやすい条件にあり、生態系や産業に大きな影響を与えている。こうした中、地球温暖化時代を見据え、長期的な視点で効果的な適応策や土壌侵食メカニズムの解明が求められている。本研究では、斜面上の一土粒子に着目し、地盤表面の抵抗性や表流水をもとに粒子の力学的安定条件から流出する最大粒径を求め、粒度分布からその粒子の存在確率を評価することで土砂流出量を算出している。さらに、室内降雨装置を用いた土砂流出実験より得られた結果と比較することで、モデルの精度を検証した。

2 土砂流出量算出モデルの概要

傾斜角 θ の斜面上の土粒子にかかる合力から式(1)を提案する。図-1に一粒粒子にかかる力のつり合いモデルを示す。 F_q は地表面流の斜面方向の力、 F_c は粘着力 c による1接点あたりの粘着抵抗力、 W は土粒子の自重を表す。式(2)に F_q の算出式、式(3)に F_c の算出式を示す。ここで、 $Q(\text{mm})$ は地表面流量を表し、降水量のうち地盤の浸透能を上回る部分の面積の値になっている。図-2に30mm/hの雨が180分間継続して降り続けたと仮定した時の降水量、土壌浸透能~時間関係を示す。浸透能は奥村らが行った水平浸潤試験の結果¹⁾を用いた。式(4)に F_q 、 F_c の算出の際に用いた粒状面に働く合力の切口面積 A を示す。面積 A はBishopの χ と式(5)の関係があり、 χ は飽和度 S_r と式(6)の関係がある。ここで、粒状面に関して水の占める面積の切口面に対する投影面積を A_w (式(7))、水の体積を V_w (式(8))、水の密度を ρ_w (1.0 g/cm³)、重力加速度を g (9.8m/s²)とした。土粒子密度は土質試験により $\rho_s = 2.65(\text{g/cm}^3)$ を用いた。また、降雨時の飽和度を仮定し S_r は100(%)、傾斜角 θ は圃場の一般的な角度から $\theta=1.7(\text{度})$ とした。内部摩擦角 ϕ 、接点あたりの粘着成分 c はそれぞれ40(度)、0.16(kN/m²)とした。この値は、表層せん断試験²⁾より得られた最小値を用いた。間隙比 e には現場の間隙比($e=0.902$)を用いた。式(9)に直径 D の土粒子の体積 V_s を、式(10)に式(2)から運動方程式より導かれる流出最大粒径の算出式を示す。得られた流出最大粒径と図-3に示す国頭マージ(沖縄県国頭郡宜野座村の農地より採取した赤土)の粒度分布の関係から流出最大粒径の存在確率 P_i を求め、体積 V (表面積 $\times D_{50}$)での乾燥土壌の質量(流出可能土砂量) W_s (式(12))を掛けることで流出量 M (式(11))を算出する。

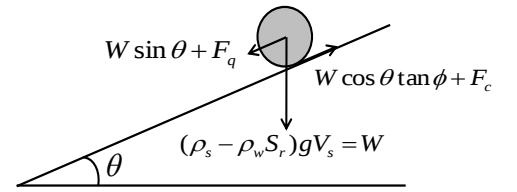


図-1 一粒粒子にかかる力のつり合い

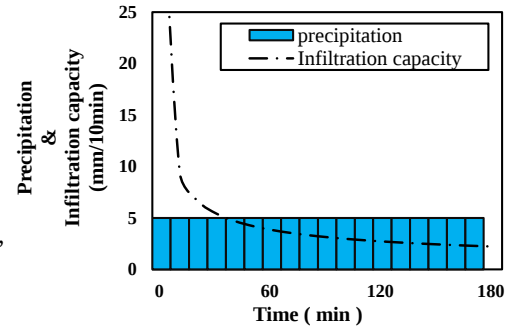


図-2 降水量、土壌浸透能~時間関係

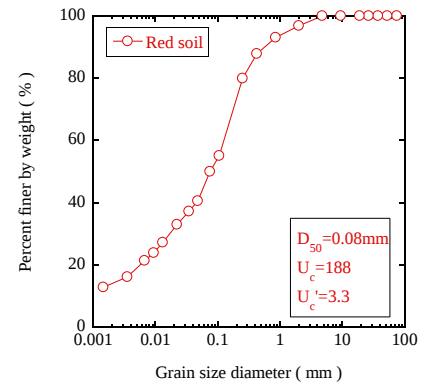


図-3 粒度分布

$$F = W \sin \theta + F_q - W \cos \theta \tan \phi + F_c \quad (1) \quad F_q = Q \rho_w A g \sin \theta \quad (2) \quad F_c = cA \quad (3) \quad A = (e V_s)^{\frac{2}{3}} S_r^{-\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$\chi = \frac{A_w}{A} \quad (5) \quad \chi \cong S_r \quad (6) \quad A_w = (V_w)^{\frac{2}{3}} \quad (7) \quad V_w = e V_s S_r \quad (8) \quad V_s = \frac{\pi}{6} D^3 \quad (9)$$

$$D \leq \frac{(c - Q \rho_w g \sin \theta) S_r^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\pi}{6} \right)^{-\frac{1}{3}} e^{\frac{2}{3}} \times t^2}{(\rho_s - \rho_w S_r) \{g(\sin \theta - \cos \theta \tan \phi) \times t^2 - 2l\}} \quad (10) \quad W_s = \frac{V}{1+e} \rho_s \quad (11) \quad M = P_i W_s \quad (12)$$

3 降雨装置を用いた土砂流出実験とモデルの比較

3.1 降雨装置の概要及び測定方法

図-4 は試験で使用する土槽 (30cm×30cm×30cm) と室内降雨装置 (30cm×30cm×8cm) を示している。土槽の流末部には越流した表流水を捕捉するためのポケットが取り付けられており、捕捉した表流水はチューブを通してメスシリンドラーに流れる仕組みになっている。土槽の底面は排水可能である。降雨装置は外径 1.25mm の注射針からできており、雨滴落下距離は 250cm である。降雨装置には水槽に流入する水量を一定にするために定水位状態を保つことができるタンクを取り付けた。実験は土槽の勾配を 3% (1.7°) に固定し、10 分ごとの表流水を捕捉する。その際、表流水に含まれる土砂の粒度を測定する。土砂流出量は表流量 (ml) とその濃度 (g/ml) を乗じて求める。

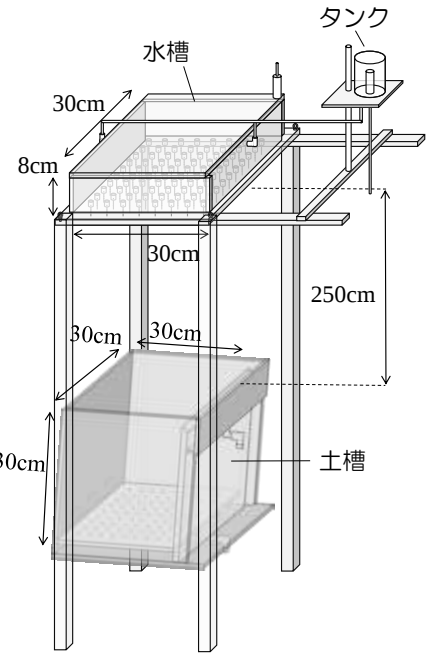


図-4 降雨装置

図-5, 6 に降雨実験とモデル予測の時間と流出最大粒径、赤土流出量の関係を示す。降雨実験の結果を比較すると、流出最大粒径は時間雨量 90mm/h の方が少し大きくなった。これは、時間雨量が大きくなると地盤に浸透することができない雨水が多くなるので、表流水の量が増し、より大きな掃流力を生んだからだと考えられる。その結果、赤土流出量も時間雨量 90mm/h の方が大きくなったと考えられる。降雨実験の結果とモデル予測を比較すると、時間雨量 30mm/h の時はモデル予測では降雨開始 30 分まで表流水は発生せず土砂流出は起こらないのに対し、降雨実験の結果では降雨開始 10 分で土砂流出は起きている。これはモデルでは地盤表面全体から一様に表流水が発生することを想定しているが、実際には地盤表面の小さな凹凸の影響を受けて、溝の部分に水が集約されて侵食が起こるためと考えられる。けれども、降雨時間 180 分での流出最大粒径は実験値で 0.0571mm, モデル予測値 0.0572mm, 赤土流出量は実験値が 4.52g, モデル予測値が 4.37g と非常に近い値になった。このことから、モデル予測は時間雨量 30mm/h で有効だと言える。一方、時間雨量 90mm/h では流出最大粒径はモデル予測の方が大きく、赤土流出量は実験値の方が大きな値となった。流出最大粒径に差が生じた原因としては、実験値の最大粒径を測定する際に、大きな粒径のものがポケットとチューブの境目に貯まってしまい、すべてを捕捉できなかったことが考えられる。また、モデル予測の赤土流出量が小さくなった原因としては、流出可能土砂量 W_s を過少に評価したためだと考えられる。以上のことから、時間雨量 90mm/h に関しては今後も深く検討していく必要がある。

4 おわりに

本研究は、一土粒子の力学条件に着目した土砂流出量算出モデルと降雨装置を用いた土砂流出実験の結果を比較した。時間雨量 30mm/h では実験結果とモデル予測は近い値を示し、モデル予測が有効であることが分かったが、時間雨量 90mm/h では近い値を示さなかった。今後、雨量によらず活用できるようにモデルの改良に努めたい。

（謝辞） 本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費（S8-2（2））（研究代表者：小松利光）、JSPS 科研費 24760381 の助成を受けたものです。また、沖縄県、宜野座村の関係者の方々、藤田智康氏、青木憲氏、富坂峰人氏、橋本幹博氏、下村幸男氏はじめ多くの方に多大なご支援をいただきました。ここに深甚の謝意を表します。

（参考文献） 1) 奥村謙一郎, 安福規之, 荒木功平: 土粒子の力学的安定条件に着目した流出限界粒径の算出に関する研究, 平成 25 年度 土木学会 西部支部研究発表会 III-004, 3-004, 2014 2) 岩見康平, 荒木功平, 安福規之: 室内表層せん断試験装置を用いた赤土の表面抵抗性の把握, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp305-306, 2014

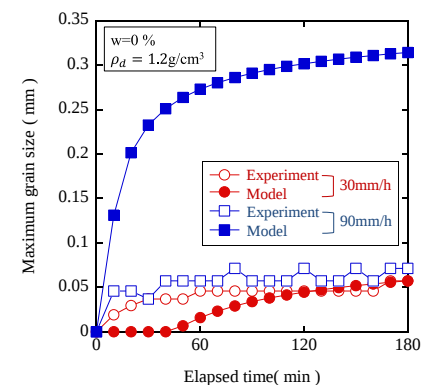


図-5 時間～流出最大粒径関係

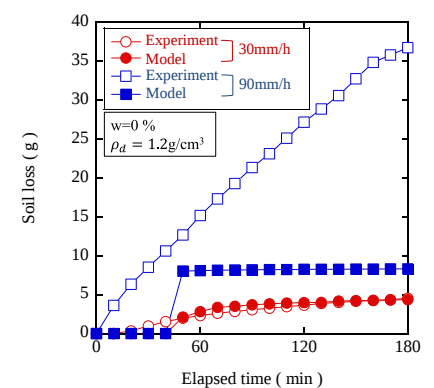


図-6 時間～赤土流出量関係