

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

九州大学大学院 学 ○奥村謙一郎、正 安福規之 山梨大学大学院 正 荒木功平
長崎大学大学院 正 大嶺聖、九州大学大学院 正 ハザリカ・ヘマンタ、石蔵良平

1. はじめに

地球温暖化等の気候変動に伴う大雨や渇水の頻度増加が指摘されるようになり、各種産業への影響が懸念されている。沖縄県では、亜熱帯特有の高温多雨気候により、土壌侵食を受けやすく、農地から流出する赤土等は、水産業、観光業に影響を与え、1950年代頃から問題化しており、1998年には宜野座村でモズク養殖が壊滅し、大きな社会問題になった。地球温暖化時代を見据え、長期的な視点で更なる悪影響に備える地域特有の適応策の計画や土壌侵食メカニズムの解明といった研究が必要とされている¹⁾。

本文では、気候変動下における土壌侵食量評価を最終的な目標と位置づけ、土粒子の力学的安定条件を評価することで地表面流発生時の流出限界粒径の算出を行っている。具体的には、まず、沖縄県国頭郡宜野座村で採取した赤土（国頭マージ）の浸透特性を水平浸潤試験²⁾により把握している。次に、宜野座村の最寄りの気象観測所（東村）の降雨データを利用し、降雨時における地表面流量の評価、また、土粒子の力学的安定条件に基づき、流出限界粒径の算出を行った。さらに、沖縄県宜野座村で行っている適応策効果の把握を目的とした現地実験¹⁾において計測された流出土砂の最大粒径との比較を行った。

2. 浸透能～時間関係の算出

図-1に宜野座国頭マージの水平浸潤特性を調べるために作成した試験装置の概略図を示している。試験装置は、連結させた50個のリングセル(厚さ1cm、内径3cm)と定水位給水装置から成る。給水水頭(全水頭)は、給水位置や連結リングセルを鉛直方向に移動させることにより、変化させることができる。試験は、リングセル内に炉乾燥試料を充填し、1つ目のリングセルの左端を給水開始位置($x=0\text{cm}$)として行うものとした。給水開始後、浸潤前線が所定の位置($x=20\text{cm}$)に達したら給水を止め、各セルの含水比 w を測定する。なお、本試験では、給水水頭は与えておらず($h=0\text{cm}$)、初期含水比 w_0 は0%とした。図-2に測定結果及びその回帰曲線を示す。約20cm浸潤させるのに要した給水時間 t_0 は3時間55分23秒であった。ここで、図-2を利用して、土に浸透した水の量を求めることができる。(図-2の曲線に囲まれた面積が乾燥土量あたりの吸水量を表す)。実際に数値計算を行えば、吸水量は約9.05cmと算出され、1時間あたり約2.3cmとなる。このことは、目安として、乾燥地盤に時間雨量23mm以上の雨が降れば、地中に浸透せず、地表水が発生することを示唆している。浸透能～時間関係の評価は式(1)に示すフィリップの式³⁾を用いて行った。また、式(2),(3)は収着性($\text{cm}/\text{hour}^{0.5}$)、ボルツマン変数($\text{cm}/\text{hour}^{0.5}$)を示す。

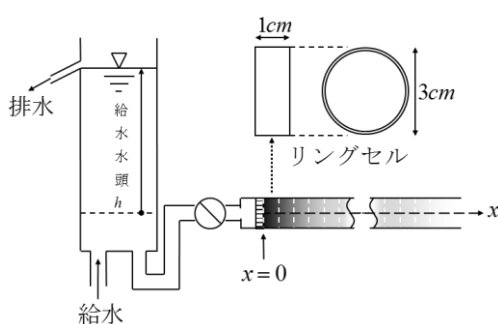


図-1 試験装置外略図

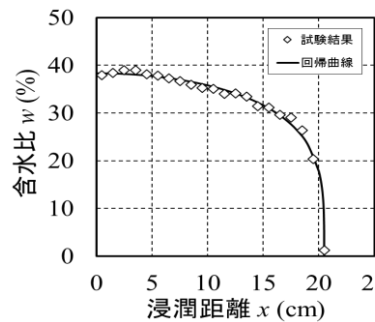


図-2 浸潤特性

$$f(t) = \frac{1}{2\sqrt{t}} S_i + k_w \quad (1)$$

$$S_i = \int_{w_0}^{w_{\text{sat}}} \eta dw \quad (2)$$

$$\eta = \frac{x(w)}{\sqrt{t_0}} \quad (3)$$

f : 浸透能 t : 経過時間 S_i : 収着性

k_w : 飽和透水係数 w_0 : 初期含水比

w_{sat} : 飽和含水比 η : ボルツマン変数

3. 降雨時における地表面流量 Q の算出

東村の気象観測所における降雨データ⁴⁾を用いて図-3に示す降水量、浸透能～時間関係を求めた。2013.4.26~2013.5.30の期間に現地実験より観測された流出土砂の最大粒径とモデル式による流出限界粒

径の比較を行うため、降雨データにはモデル式により算出した流出最大粒径が最も大きい値を示した2013.5.11の降雨データを用いた。降雨量のうち浸透能を上回る部分の面積の値を地表面流量 $Q(\text{mm})$ とし、それ以外の部分を地盤への浸透量とした。表-1に累積雨量、総表流量を示す。

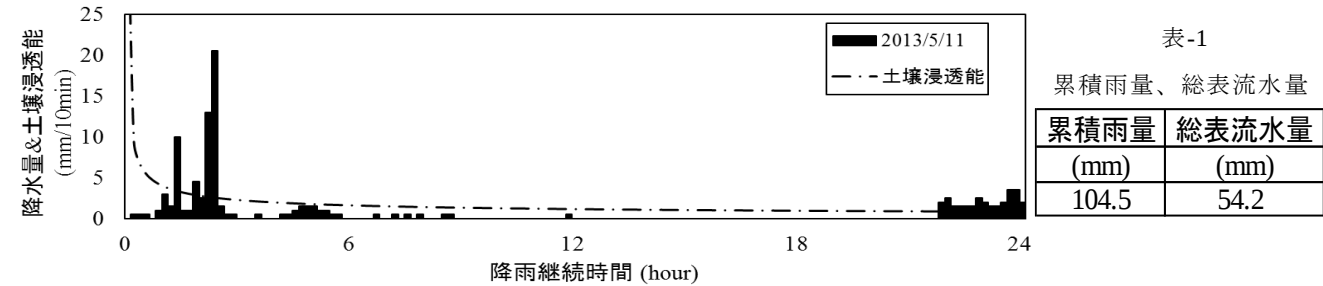


図-3 降水量、土壌浸透能～時間関係

4. 流出限界粒径の算出

傾斜角 θ の斜面上の土粒子にかかる力のつり合いから式(4)を提案する。図-4に一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(5)に F_q の算出式、式(6)に F_c の算出式、式(7)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(8)の関係があり、 χ は S_r と式(9)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(10))、水の体積を V_w (式(11))、水の密度を ρ_w (1.0 g/cm^3)、重力加速度を g (9.8 m/s^2) とした。土粒子密度は土質試験により $\rho_s = 2.731(\text{g/cm}^3)$ を用いた。また、降雨時を仮定し飽和度 S_r は $100(\%)$ 、傾斜角 θ は圃場の一般的な角度から $\theta = 3(\text{度})$ とした。式(12)に直径 D の土粒子の体積 V_s を、式(13)に式(4)から導かれる流出限界粒径の算出式を示す。式(13)より求めた流出限界粒径と現地実験で観測された流出最大粒径を表-2に示す。なお、内部摩擦角 ϕ 、接点あたりの粘着成分 c はそれぞれ 30° 、 2 kPa とし、間隙比 e には現場の表層乾燥密度($e = 0.902$)を用いた。現地実験は幅 1.5 m 、流下距離 6.0 m 、勾配 3% の区画で行っており、表-2には裸地区画から流出した土砂のデータを用いている。

表-2 最大粒径の比較

$W \sin \theta + F_q \geq W \cos \theta \tan \phi + F_c$ (4) $F_q = Q \rho_w A g \sin \theta$ (5)

$F_c = cA$ (6) $A = (eV_s)^{\frac{2}{3}} S_r^{-\frac{1}{3}}$ (7) $\chi = \frac{A_w}{A}$ (8)

$\chi \cong S_r$ (9) $A_w = (V_w)^{\frac{2}{3}}$ (10) $V_w = eV_s S_r$ (11)

$V_s = \frac{\pi}{6} D^3$ (12) $D \leq \frac{(c - Q \rho_w g \sin \theta) S_r^{-\frac{1}{3}} (\pi/6)^{\frac{1}{3}} e^{\frac{2}{3}}}{(\rho_s - \rho_w S_r) g (\sin \theta - \cos \theta \tan \phi)}$ (13)

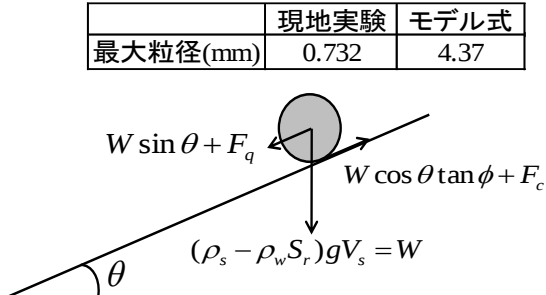


図-4 一粒子における力のつり合いモデル

5. まとめ

本研究では、短時間で土の浸潤特性を評価できる水平浸潤試験に着目し、赤土国頭マージの浸透能の算出を行った。また、東村の降雨データを利用し、地表面流量の算出を行った。さらに、土粒子の力学的安定条件の観点からモデル式を作成し、流出限界粒径を求めた。モデル式より算出した流出限界粒径と現地実験で観測された流出土砂最大粒径を比較したところ、モデル式で流出最大粒径を過大評価していることがわかった。理由としては、モデル式では乾燥地盤を前提条件としていることや粒子同士の相互作用、雨滴エネルギーを考慮していない点を考えている。今後、これらの評価に加え、表層付近の c 、 ϕ の評価手法を確立することでモデル式の精度向上につとめたい。

(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、九州大学工学研究院若手研究者育成研究助成、(社)九州建設技術管理協会の建設技術研究開発助成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) 荒木功平, 奥村謙一郎, 安福規之, 大嶺聖: 九州の亜熱帯化と亜熱帯地域での土壌侵食問題への適応策効果把握の試み, 土木学会論文誌G(環境), Vol. 68, No. 5, pp. 1,267-1,272, 2012. 2) 不飽和地盤の挙動と評価, 社団法人地盤工学会, pp63-65, 2004. 3) 水村和正: 水文学の基礎, 東京電気大学出版局, p.107, 2008. 4) 気象庁ホームページ「気象庁 過去の気象データ検索」。