

降雨作用下坡面红土起动条件研究

张祖莲, 洪斌, 黄英, 梁谏杰, 邱观贵

(昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650500)

摘要: 揭示降雨作用下坡面红土起动的影响因素, 建立降雨作用下坡面红土起动条件, 为深入研究云南红土坡面侵蚀提供参考。根据红土特性, 结合降雨作用下坡面红土的侵蚀过程和现象, 采用模型试验及力学模型相结合的研究方法。结果表明: (1) 降雨作用下坡面红土侵蚀主要呈现溅蚀和结皮2种现象。(2) 红土黏聚力对坡面红土颗粒起动有阻碍作用, 且抗剪强度越大, 坡面红土颗粒起动的临界切应力也越大。降雨及孔隙水压力对坡面红土颗粒起动有促进作用, 且雨滴密度与雨滴终速越大, 降雨的影响也越大; 红土颗粒粒径越大、雨滴直径与水深之比越小, 降雨的影响也越小。(3) 建立了坡面红土颗粒在联结和松散状态下起动的临界切应力计算公式。降雨作用下坡面红土颗粒起动的临界切应力与红土颗粒粒径大小、抗剪强度以及降雨雨滴特性、坡面径流特性密切相关。松散状态的坡面红土颗粒在降雨作用下只需很小的径流切应力即可起动。

关键词: 红土; 降雨作用; 起动条件; 临界切应力; 抗剪强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0062-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.011

A Study on the Starting Conditions of Rainfall-affected Laterite Particles on Slopes

ZHANG Zulian, HONG Bin, HUANG Ying, LIANG Jianjie, QIU Guangui

(College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract: The influencing factors of laterite starting on slopes under the effects of rainfall were revealed. The starting conditions of laterite starting on slopes under the effects of rainfall were established, in order to provide a reference for further study on slope erosion of laterite in Yunnan. According to the characteristics of laterite and the erosion processes and phenomena on the slope surface, the method of combining the model test and the mechanical model was adopted. The results indicated that: (1) The splash erosion and crust were the two main phenomena in the processes of erosion of laterite on slopes. (2) The cohesive force of laterite could block the starting of laterite particles on slopes. The greater the shear strength, the greater the critical shear stress of the laterite particles. Rainfall and pore water pressure could promote the starting of laterite particles on slopes. The greater the raindrop density and the final velocity, the greater the impact of rainfall. When the particle size d was larger and the ratio of raindrop diameter to water depth decreased, the effect of rainfall was smaller. (3) The formulas of the critical starting shear stress of laterite particles in the connection and loose state were established. The critical starting shear stress of laterite particles on slopes was closely related to the particle size, shear strength, rainfall characteristics, and runoff characteristics. Under the effects of rainfall, a small flow shear stress could make the laterite particles under loose state start.

Keywords: laterite; rainfall effect; starting condition; critical shear stress; shear strength

云南地处红土高原, 区域性红土广泛分布。由于自然和人为因素的影响, 分布于地表浅部的红土土质疏松, 稳定性较差, 易散落或被水冲蚀, 导致云南红土地区土壤侵蚀日益严重。降雨是坡面土壤侵蚀的重

要外因, 降雨作用下坡面土颗粒的起动, 标志着土壤侵蚀的开始, 因此降雨作用下坡面土颗粒的起动问题是研究土壤侵蚀的基本问题之一。

在已有的研究成果中, 往往借鉴明渠流的相关方

收稿日期: 2016-12-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“云南红土型水库库岸侵蚀失稳机理研究, 云南红土型大坝的干湿循环效应研究, 污染红土的宏微观响应及污染物的迁移机制研究”(51269006, 51568031, 51168022)

第一作者: 张祖莲(1964—), 女, 汉族, 云南绥江人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程及水工结构工程研究。E-mail: zhangzulian@2008.sina.com

法、理论和公式来研究坡面流条件下土颗粒的起动问题,而实际上,由于坡面流水深浅,且受降雨的扰动,所以,与普通明渠流相比有较大差异。因此,普通明渠流中泥沙的起动标准和起动条件并不完全适合于降雨作用下的坡面薄层水流^[1-4]。虽然现有研究成果中也出现了降雨条件下坡面单颗粒泥沙起动的临界切应力公式,分析了降雨对坡面泥沙起动流速的影响等^[5-6],但这些公式、结论都是在忽略了一些因素影响的前提下得出的,这使得研究成果与实际情况存在差异。再者,现有研究成果中,非黏性散体泥沙起动方面的成果居多,而黏性土颗粒由于受颗粒间黏结力的影响,导致其在起动机理方面与非黏性泥沙有所不同^[7-8]。对非黏性散体沙来说,重力往往起主导作用,但对黏性土颗粒来说,颗粒间的黏结力不容忽视。众多研究成果证明:黏性土颗粒的起动主要取决于土颗粒的重力及土体的抗剪强度,还与土体的塑性指数、颗粒组成、干密度等密切相关^[9-14]。作为一种区域性特殊土,红土在物质组成、成因、类型、结构及工程特性方面有别于其他类型土壤。由于红土中存在游离铁、铝氧化物胶

体,且游离氧化物对红土颗粒的胶结作用已得到证实,因此,与红土中游离氧化物胶结作用有关的黏聚力对降雨作用下坡面红土颗粒起动的影响不容忽视。

本文针对云南红土,考虑降雨作用,结合试验所获得的降雨作用下模型土槽红土坡面侵蚀过程、现象及相应的红土宏观特性,通过对坡面红土颗粒的受力分析,建立降雨作用下坡面红土颗粒的受力平衡条件,进而研究坡面红土的起动条件。

1 材料与方法

2014 年 10 月初开始进行人工模拟降雨试验的相关准备工作,11 月初试验装置和模型土槽基本完成并开始初步试验。经多次改进、完善后,于 2015 年 2 月初系统地开展人工模拟降雨试验,并同步开展相关的土工试验,2016 年 3 月底试验基本完成。

1.1 试验土样

试验选取云南昆明世博生态城无污染典型红土作为试验土样,按照《土工试验规程》^[15]测得其机械组成如表 1 所示,土壤类型为红黏土。

表 1 试验土样基本特性

比重 G_s	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	颗粒质量分数/ $\%$			稠度指标/ $\%$		
			砂粒 $>0.075\text{mm}$	粉粒 $0.005\sim0.075\text{mm}$	黏粒 $<0.005\text{mm}$	液限 ω_L	塑限 ω_p	塑性指数 I_p
2.70	25.5	1.50	8.8	41.0	50.2	44.9	28.8	16.1

1.2 试验装置

人工模拟降雨试验装置由人工模拟降雨系统、模型土槽、泥水收集系统 3 部分组成。人工模拟降雨系统采用双喷头下喷式降雨装置,喷头距离地面高度 8.5 m,大部分雨滴都能够达到雨滴终速,能较好的模拟天然降雨,且试验区域的雨滴均匀度达到 80% 以上。模型土槽的尺寸为 1.2 m×0.4 m×0.35 m (长×宽×高),土槽底部有 10×5 个直径 5 mm 的小孔,使得土壤重力水能够自然下渗。泥水收集系统由集流槽和径流泥沙收集量筒组成。

人工模拟降雨试验是在一定模型土槽坡度(20°)和坡长(1 m)条件下进行的。试验中每场降雨历时均在 1 h 以上,以便于观测坡面侵蚀的发生、发展过程。根据云南季节性降雨历时短、雨量大的特点及我国降雨等级划分标准,试验采用 1.4 mm/min 降雨强度,该雨强下 1 h 内的降雨量可达 84 mm,属大暴雨等级。

1.3 试验过程

将野外取回的红土进行风干、剔除杂物、过 10 mm 筛,按照拟定的干密度、含水率制备试验土样。填土前在模型土槽底部铺一层纱布和 2 cm 厚细沙,这样既能防止红土从底部开孔处过多流失,又能保证模型边坡的透水性。模型土槽共分成 5 层填筑。把

红土样倒入土槽,用垫板、木槌等工具轻轻击打到填筑高度,层与层之间接触面用刮土刀进行刨毛处理,以便土层之间结合紧密。

每次试验前 24 h 进行一次降雨强度为 30 mm/h 的预降雨,降雨到坡面产流停止。预降雨使坡体含水在重力作用下进行重新分布,且使边坡土体更接近坡面红土的自然含水分布。

次日降雨试验前进行降雨强度率定,当实际降雨强度达到预定降雨强度时,开始进行模拟降雨试验。从降雨开始起观测、记录模型土槽坡面的变化情况。从产流开始计时,每 3 min 用量筒收集一次泥水样,每次收集时间为 1 min,同时记录径流量,待量筒内悬浊液澄清后,倒去上层清液,用烘干法把剩余泥水样进行烘干,称取侵蚀土质量。

2 结果与分析

2.1 降雨作用下模型土槽坡面红土的侵蚀现象及产沙过程

通过人工模拟降雨试验,观测到模型土槽坡面在降雨作用下主要呈现出溅蚀和结皮 2 种现象。溅蚀为雨滴击打模型土槽坡面造成红土颗粒的分散、跃移,在模型土槽坡面留下密密麻麻大小不等的坑洼现象。溅蚀是降雨雨滴、坡面土壤、坡面径流三者相互

作用的结果。造成溅蚀现象是因为,雨滴具有很大速度,当雨滴与坡面瞬间碰撞时,会产生很大的冲力,这既使坡面土壤击实并形成凹面,破碎的雨滴又侧向冲击土颗粒,使土体松散、破碎。由图 1 可知,在 1.4 mm/min 降雨强度下,降雨初期模型土槽坡面溅蚀现象尤为明显。

降雨过程中坡面溅蚀可分成以下 3 个阶段:

(1)降雨初期:雨滴撞击坡面后,坡面红土被分散和飞溅,模型土槽坡体表面形成疏松的颗粒层。

(2)产流初期:坡面形成薄层径流,此时雨滴作用力仍击打坡面溅起土颗粒,又增强径流的紊动,增大径流携带土颗粒的能力。

(3)坡面径流稳定期:此时坡面土体已被雨滴击打密实,坡面径流也达到一定深度,雨滴击溅坡面的作用力被削弱,坡面溅蚀有所减弱。

降雨结束后,观测到坡面存在粗颗粒,且在雨滴坑周围存在着一层光滑的致密层,即结皮,如图 2 所示。结皮具有减小降雨入渗、增加坡面径流量、增大土壤表层密度、提高土壤抗侵蚀能力等作用,它对降雨作用下红土的坡面侵蚀过程有一定的影响。

红土坡面结皮的形成主要与雨滴的打击、细颗粒的迁移有关。长时间的持续降雨导致土槽坡面表土结构不断压实,同时雨滴击溅分散的细颗粒也随雨水渗入到表土中,填充了土壤孔隙,经过雨滴的反复压实和细颗粒的不断填充,结皮的厚度也越来越大,表面也变得平滑、致密。此外,径流对坡面的压实作用也有助于结皮的形成。结皮导致干密度变大、孔隙率变小,并对坡面红土起到一定的保护作用,因此结皮后坡面抗侵蚀能力有所提高。

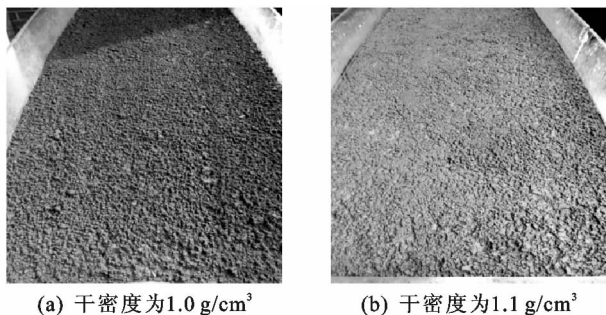


图 1 降雨引起的坡面红土溅蚀现象

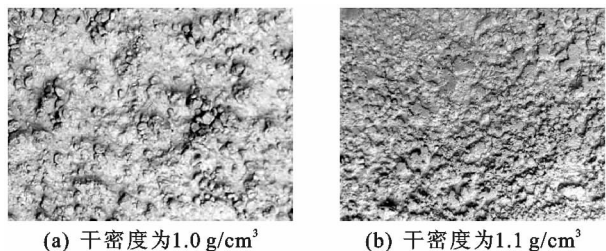


图 2 降雨引起的坡面红土结皮现象

在坡长 1 m、坡度 20°、干密度为 1.2 g/cm³、降雨强度为 0.8, 1.1, 1.4, 1.7, 2.0 mm/min 的试验条件下,得出坡面侵蚀模数随产流历时的变化过程(图 3)。由图 3 可知,人工模拟降雨试验中侵蚀模数随时间呈“先增大后减小”的变化过程,这也表明红土结皮形成后坡面土颗粒的流失量随之减少。值得注意的是:在室内短历时、恒定降雨强度的试验条件下,结皮能提高红土的抗侵蚀能力,但在长历时、非恒定降雨强度下不一定如此。随着降雨强度的增大,当结皮红土的抗侵蚀能力不足以抵抗降雨侵蚀力时,必定会破坏已形成的结皮,结皮破坏后随着降雨时间的持续,又进入新的结皮形成阶段。

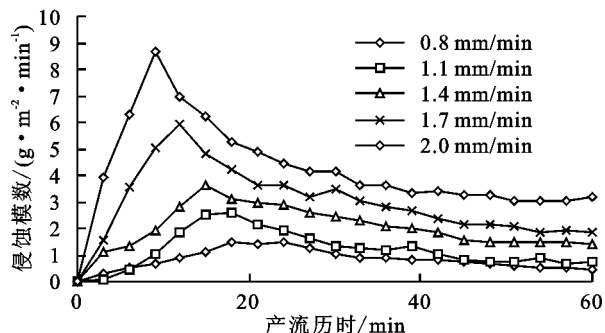


图 3 不同雨强下侵蚀模数随产流历时的变化

对人工模拟降雨试验过程中收集到的侵蚀泥沙按照时间尺度进行颗粒分析,把产流开始阶段(0~6 min)收集到的试样标为 C_1 ,把稳流前后(6~12 min)收集到的试样标为 C_2 ,把降雨试验结束(12~60 min)前收集到的试样标为 C_3 ,分别测试其颗粒组成。由表 2 可知,试样中粘粒含量所占比例最大,粉粒其次,砂粒所占比例较小。在降雨初期,径流量较小,粒径较小的粘粒比粉粒更容易被径流携带;当径流进入稳流期后,径流的输移能力增强,粉粒的流失量逐渐增加;到降雨后期,随着坡面红土中粘粒含量的减小,相应的流失土中的粘粒含量也减小,而粉粒含量在逐渐增加。

表 2 不同降雨时段流失土颗粒组成变化

编号	侵蚀土取样 时间/min	砂粒 含量/%	粉粒 含量/%	粘粒 含量/%
C_1	0~6	8.7	38.9	52.4
C_2	6~12	8.5	40.3	51.2
C_3	12~60	8.5	42.1	49.4

2.2 降雨作用下坡面红土起动条件

从人工模拟降雨试验中观测到的红土坡面侵蚀现象、过程、不同雨强下坡面侵蚀模数随产流历时的变化过程以及收集到的侵蚀泥沙颗粒组成情况可得出:坡面侵蚀红土主要保持颗粒状态,但因红土黏粒含量较高,属于黏性土,土颗粒之间存在着黏聚力,且红土具

动的临界切应力 τ_c 时,坡面红土颗粒就开始起动。分析公式(5)可知:降雨作用下坡面红土颗粒起动受土壤性质、降雨特性和径流特性等因素的综合影响。 c' 、 $\tan\varphi'$ 、 $\gamma_s d^3$ 项反映了土壤特性对坡面红土颗粒起动的影响,且土壤的抗剪强度越大,土颗粒起动的临界切应力 τ_c 也越大。土壤的孔隙水压力对土颗粒起动有促进作用。 $A\rho d_y^4 V_m^2 \cos^2\theta \frac{1}{h^2} e^{-\frac{3d_y^2}{8h^2}}$ 项反映了降雨特性对坡面红土颗粒起动的影响。 γ_{wh} 反映了坡面径流对坡面红土颗粒起动的影响。降雨对坡面红土颗粒起动影响的大小,主要与雨滴密度 ρ 、土颗粒粒径 d 、雨滴中值粒径 d_y 、雨滴终速 V_m 以及雨滴直径与水深之比 $\frac{d_y}{h}$ 有关,雨滴密度 ρ 与雨滴终速 V_m 越大,降雨的影响越大;土颗粒粒径 d 越大、雨滴直径与水深之比 $\frac{d_y}{h}$ 越小,降雨的影响越小,这与文献[3]所得的结论基本一致。

相关文献指出,黏性土的重力项非常小,通常可以忽略而仅考虑黏聚力和摩擦力的作用。所以,在无雨滴击溅的情况下,公式(5)可以简写成:

$$\tau_c = \frac{S_2}{S_1} [c' + (\gamma_{wh} - u_w) \tan\varphi'] \quad (6)$$

式中: $c' + (\gamma_{wh} - u_w) \tan\varphi' \approx \tau_f$, 即坡面红土颗粒起动的临界切应力 τ_c 与土壤的抗剪强度 τ_f 具有线性关系。坡面土颗粒间的有效粘聚力 c' 越大, τ_c 就越大,土壤越不容易被侵蚀,上举力 $u_w - \gamma_{wh}$ 越大,则 τ_c 就越小,土壤越容易被侵蚀。

假设侵蚀状态下,坡面颗粒半球体处于径流中,即 $S_1 = \pi d^2/8$, $S_2 = \pi d^2/4$, 得到无雨滴击溅下坡面红土颗粒的起动条件为:

$$\tau_c = 2c' + 2(\gamma_{wh} - u_w) \tan\varphi' + \frac{4}{3} \gamma_s d (\tan\varphi' - \tan\theta) \cos\theta \quad (7)$$

公式(7)与文献[17]所提出的起动条件一致。研究表明,坡面土颗粒的分散和剥离一般需要很大的径流切应力,在试验条件下测得细沟侵蚀的临界切应力可达到 10 Pa 以上^[18],河道黏性土起动的切应力则更大^[19]。

2.2.2 降雨作用下坡面红土颗粒与坡体分离时的起动条件 当坡面红土颗粒与坡体分离时,土颗粒处于松散状态。与土颗粒和坡体处于联结状态不同,雨滴溅蚀使松散土颗粒容易脱离坡面,以悬移、跃移和推移的方式被径流带走。松散的土颗粒处于悬浮状态,有效重力减小,且颗粒间的黏聚力很小甚至消失,当水流切应力很小时,土颗粒就可起动。

当 $S_1 = \pi d^2/4$, S_2 等于 0 或趋向于 0 时,坡面红土颗粒与坡体脱离,处于松散状态,其受力状态如图

6 所示,其静力平衡条件为:

平行坡面方向

$$S_1 \tau + G' \sin\theta + k F_y \sin\theta - F_f = 0 \quad (8)$$

垂直坡面方向

$$G' \cos\theta + k F_y \cos\theta - N = 0 \quad (9)$$

摩擦力

$$F_f = N \tan\varphi \quad (10)$$

将公式(8)、公式(9)、公式(10)联立可得坡面红土颗粒起动时的径流切应力(τ_c),即土颗粒起动时的临界切应力:

$$\tau_c = \frac{1}{S_1} (G' + k F_y) (\tan\varphi - \tan\theta) \cos\theta \quad (11)$$

将有效重力 $G' = \frac{\pi}{6} (\gamma_s - \gamma_w) d^3$ 代入公式(11)得到降雨作用下坡面红土松散颗粒起动的临界条件:

$$\tau_c = \left[\frac{2}{3} (\gamma_s - \gamma_w) d + \frac{4}{3d^2} k A \rho d_y^4 V_m^2 \cos^2\theta \frac{1}{h^2} e^{-\frac{3d_y^2}{8h^2}} \right] (\tan\varphi - \tan\theta) \cos\theta \quad (12)$$

当坡面土颗粒无雨滴作用时, $F_y = 0$, 那么:

$$\tau_c = \frac{2}{3} (\gamma_s - \gamma_w) d (\tan\varphi - \tan\theta) \cos\theta \quad (13)$$

从公式(12)、公式(13)中可以看出:若土体的内摩擦角 φ 小于坡角 θ 时, $\tan\varphi - \tan\theta < 0$, 则有效重力项和雨滴作用力项乘以系数后为负数,说明坡面松散颗粒不能够自稳,非常容易发生侵蚀。

以上是结合土力学理论、根据滑动起动模式建立的坡面红土颗粒起动条件。在土壤侵蚀实际中,由于降雨作用下坡面土颗粒所处的起动状态很难确定,且水土界面的内摩擦角、黏聚力不易测得,导致试验所得的起动条件在实际中应用较为困难,也很难用来验证相关的理论公式^[20]。

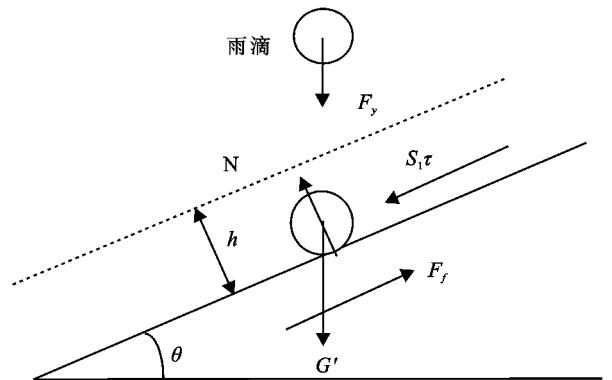


图 6 松散状态下坡面红土颗粒受力示意

2.2.3 基于河流动力学理论的红土颗粒起动条件 半个多世纪以来,我国学者对黏性泥沙起动已进行了较多的研究。黏性泥沙是黏土中的新淤土,与坡面松散颗粒的起动有相似之处,故可借鉴黏性泥沙起动的分析方法研究坡面红土颗粒的起动条件。降雨作用下坡面黏性

土颗粒起动时的受力分析如图7所示。

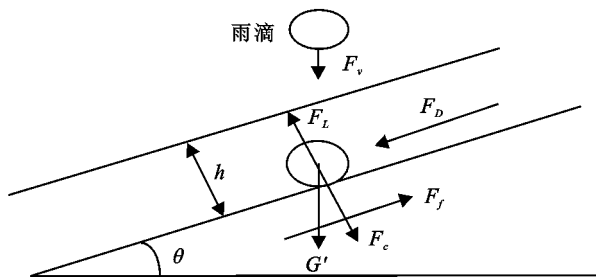


图7 坡面红土颗粒受力分析示意

红土颗粒在坡面所受的力有浮重状态下的有效重力 G' (N)、有效摩擦力 F_f (N)、水流推力 F_D (N)、水流上举力 F_L (N)、颗粒间的黏聚力 F_c (N)、坡面对红土颗粒的正压力 N (N) 等,其静力平衡条件为:

平行于坡面方向

$$F_D + G' \sin \theta + k F_y \sin \theta - F_f = 0 \quad (14)$$

垂直于坡面方向

$$G' \cos \theta + k F_y \cos \theta - F_L + F_c - N = 0 \quad (15)$$

摩擦力

$$\rho u_b^2 = \frac{\left[\frac{4}{3} (\rho_s - \rho) g d + \frac{8}{3} k A \rho \frac{d_y^4 V_m^2}{h^2 d^2} \cos^2 \theta \cdot e \left(-\frac{3d_y^2}{8h^2} \right) \right] (\tan \varphi - \tan \theta) \cos \theta + F_c \tan \varphi}{C_D + C_L \tan \varphi} \quad (21)$$

考虑到颗粒表面的近底流速 u_b 很难测定,一般采用垂线平均流速 U 来代替,本文采用指数型流速分布公式:

$$u_b = (1+m) \left(\frac{d}{h} \right)^m U \quad (22)$$

$$\tau_c = \frac{1}{(1+m)^2} \left(\frac{h}{d} \right)^{2m} \frac{\left[\frac{4}{3} (\rho_s - \rho) g d + \frac{8}{3} k A \rho \frac{d_y^4 V_m^2}{h^2 d^2} \cos^2 \theta \cdot e \left(-\frac{3d_y^2}{8h^2} \right) \right] (\tan \varphi - \tan \theta) \cos \theta + F_c \tan \varphi}{C_D + C_L \tan \varphi} \quad (23)$$

由公式(23)可知,坡面红土颗粒起动的临界切应力 τ_c 的大小主要与土颗粒的重力和黏聚力、雨滴作用力有关,这与滑动起动模式推导的公式(5)、公式(12)基本相同,只是公式(23)的上举力项用流速表达后,已经隐含在 τ_c 中。

公式(23)中的水下休止角 φ 和黏聚力 F_c 与土力学公式中的内摩擦角和黏聚力不同。水下休止角 φ 通常用泥沙干容重 γ' 和稳定干容重 $\gamma'_{s,c}$ 的相对值来表达,而黏聚力 F_c 的表达式则更为复杂,但都有相关的理论公式。现有理论公式中,是把颗粒表面与结合水之间的分子引力当作黏聚力,并考虑颗粒间接触的紧密程度。

公式(23)中水下休止角 φ 和黏聚力 F_c 主要应用于泥沙起动,两个指标的构成因素与干容重有关。黏聚力 F_c 还考虑了分子引力,而土力学中的内摩擦角和黏聚力更为复杂些,其影响因素包含颗粒级配、黏粒含量、密实度、含水率和铁铝氧化物含量等。相比较而言,用水下休止角 φ 和黏聚力 F_c 来推求坡面黏

$$F_f = N \tan \varphi \quad (16)$$

联立公式(14)、公式(15)、公式(16)得到坡面土颗粒的起动方程:

$$F_D + (G' + k F_y) \sin \theta = [(G' + k F_y) \cos \theta + F_c - F_L] \tan \varphi \quad (17)$$

式中的水流推力 F_D 、水流上举力 F_L 、有效重力 G' 均采用文献[21]中的公式,分别为:

$$F_D = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (18)$$

$$F_L = C_L \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (19)$$

$$G' = (\rho_s - \rho) g \frac{\pi d^3}{6} \quad (20)$$

式中: u_b 为作用在颗粒表面的流速 (m/s); d 为土颗粒粒径 (m); g 为重力加速度 (m/s²); ρ_s 为土颗粒的密度 (kg/m³); ρ 为水的密度 (kg/m³); C_D 为水流推力方向的阻力系数; C_L 为水流举力方向的阻力系数。

把公式(18)、公式(19)、公式(20)代入公式(17),化简得:

天然河道的 m 取值 1/6,坡面土颗粒起动切应力 $\tau_c = \rho U^2$,因此,根据公式(21)、公式(22)得到基于河流泥沙动力学理论的降雨作用下坡面红土颗粒起动的临界切应力计算公式:

性土颗粒的起动条件会显得不够全面。因此,基于河流动力学理论的土颗粒起动临界切应力计算公式应用到黏性土坡面,还需对 φ 和 F_c 作改进,使之适用于黏性土而不是仅仅黏性泥沙。

4 结论

(1)降雨作用下坡面红土侵蚀主要存在溅蚀和结皮2种现象。红土坡面侵蚀过程中侵蚀模数随坡面产流历时呈先增大后减小的变化趋势。侵蚀产沙中粘粒所占的比重最大,粉粒次之,砂粒最小。

(2)降雨作用下红土的黏聚力、内摩擦角、颗粒大小、雨滴特性、坡面径流对坡面红土颗粒起动有重要影响。红土的抗剪强度越大,坡面红土颗粒起动的临界切应力也越大,红土颗粒越难起动。雨滴密度 ρ 与雨滴终速 V_m 越大,降雨的影响作用越大。土颗粒粒径 d 越大,雨滴直径与水深之比 $\frac{d_y}{h}$ 越小,降雨的影响作用越小。

(3)基于土力学理论、降雨作用下坡面红土颗粒的受力分析以及滑动起动模式,建立了降雨作用下坡

面红土颗粒与坡体联结和非联结状态下起动的临界切应力计算公式。所建立的公式结构合理,具有明确的物理意义。

由于人工模拟降雨试验模型土槽采用的是重塑土,因此,观测到的侵蚀过程和现象与原状土的实际侵蚀过程可能存在差异。再者,本文仅从降雨作用下坡面红土颗粒的力学机制出发,提出了相应条件下坡面红土颗粒起动的临界切应力理论计算公式,并未用试验或实际观测数据进行相应的计算、验证。公式中包含多个与降雨特性、红土特性和坡面径流特性相关的计算参数。实践表明,无论是红土土壤侵蚀模型试验,还是实际红土土壤侵蚀过程,这些计算参数均随时间和空间的变化而变化,且观测、测试、参数的提取较为困难。因此,在计算降雨作用下坡面红土颗粒起动的临界切应力时,这些参数应如何取值才更符合实际情况,如何通过相关试验或实际观测数据进行计算和分析,以验证所得理论公式的可靠性和适用性,等等,还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Guy B T, Rudra R P, Diekenson W T, et al. Empirical model for calculating sediment transport capacity in shallow overland flows: Model development[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1): 105-115.
- [2] 潘成忠,上官周平.降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(6):843-851.
- [3] 赵春红,高建恩,王宏杰,等.降雨对坡面薄层水流泥沙起动的影响[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(6):1057-1069.
- [4] Guy B T, Rudra R P, Diekenson W T, et al. Empirical model for calculating sediment transport capacity in shallow overland flows: Model development[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1): 105-115.
- [5] 张颖.黄土地区森林植被对坡面土壤侵蚀过程影响机理研究[D].北京:北京林业大学,2007.

(上接第 61 页)

- [11] 王志刚,杨海龙,刘慧博,等.河岸边坡草被减流减沙效应及其坡面流水动力学特征[J].水土保持学报,2016,30(2):8-13.
- [12] 王国梁,刘国彬.黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):227-231.

- [6] 韩浩,高建恩,梁改革,等.降雨条件下坡面径流泥沙起动流速研究[J].人民长江,2010,41(12):49-54.
- [7] 王军,谈广鸣,舒彩文.固结状态下黏性泥沙起动规律试验研究[J].泥沙研究,2014(6):25-29.
- [8] 洪大林,缪国斌,邓东升,等.黏性土起动研究现状综述[J].水利水电科技进,2005,25(6):102-106.
- [9] Briand J L, Ting F C K. Erosion function apparatus for scour rate predictions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(2): 123-129.
- [10] Briand J L, Chen H C. Multiflood and multiflayer method for scour rate prediction at bridge piers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(2): 140-144.
- [11] 韩浩,高建恩,梁改革,等.降雨条件下坡面径流泥沙起动流速研究[J].人民长江,2010,41(12):49-54.
- [12] 吴岩,白玉川.渗流作用下的岸坡非均匀沙起动[J].水利水电技术,2014,45(1):136-138.
- [13] 洪大林,缪国斌,申霞,等.黏性原状土起动流速试验研究[J].人民长江,2012,43(2):39-42.
- [14] 张强,王寅,陈春柏.人工填筑黏性土起动冲刷特性试验[J].水利水电科技进展,2012,32(6):75-78.
- [15] 南京水利科学研究院主编. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京:水利水电出版社,2000.
- [16] 汤立群.坡面降雨溅蚀及其模拟[J].水科学进展,1995,6(4):304-310.
- [17] 吴永,何思明,沈均,等.坡面颗粒侵蚀的水力学机理[J].长江科学院院报,2009,26(8):6-9.
- [18] 张振国.土壤抗侵蚀指标的建立及初步应用[D].北京:中国科学院研究生院,2010.
- [19] 许旭堂,简文彬,柳侃.含水率和干密度对残积土抗剪强度参数的影响[J].地下空间与工程学报,2015,11(2):364-369.
- [20] 洪大林,缪国斌,邓东升,等.黏性土起动研究现状综述[J].水利水电科技进展,2005,25(6):102-106.
- [21] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003.

- [13] 徐炳成,山仑,李凤民.苜蓿与沙打旺苗期生长和水分利用对土壤水分变化的反应[J].应用生态学报,2005,16(12):2328-2332.
- [14] 韩鹏,李秀霞.黄河流域土壤侵蚀及植被水保效益研究[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(2):181-188.