
* 试 验 研 究 *

降雨作用下云南省红土抗剪强度与坡面侵蚀模数的关系

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, 云南 昆明 650500)

摘 要: [目的] 揭示降雨作用下云南省红土的含水率、干密度、抗剪强度、坡面侵蚀模数之间的关系, 为进一步研究云南省红土的侵蚀机理提供理论依据。[方法] 运用人工模拟降雨及土槽模型试验、土工试验及相关理论分析相结合的研究方法。[结果] (1) 研究区红土黏聚力随含水率的变化呈二次曲线关系, 且在最优含水率附近存在极大值。红土内摩擦角随含水率的变化接近于线性关系, 且随含水率的增大而减小。当干密度为 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm³ 时, 黏聚力与含水率的相关系数 R^2 最小为 0.754, 最大为 0.934; 内摩擦角与含水率的相关系数 R^2 最小为 0.944, 最大为 0.996。(2) 红土黏聚力和内摩擦角随干密度的变化接近于线性关系; 当含水率一定时, 二者随干密度增大呈增加的趋势。(3) 在试验含水率条件下, 红土抗剪强度随含水率的增加而减小, 当含水率超过最优含水率后减小的幅度尤为明显; 抗剪强度随干密度的增加而增大。(4) 降雨结束后, 不同干密度的红土坡面侵蚀模数与红土抗剪强度呈二次曲线关系, 相关系数 R^2 达 0.988。[结论] 坡面红土雨后抗剪强度与坡面侵蚀模数之间存在较好的相关关系, 可用坡面红土的雨后抗剪强度估算坡面侵蚀量。

关键词: 红土; 含水率; 干密度; 抗剪强度; 侵蚀模数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0001-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 张祖莲, 洪斌, 黄英, 等. 降雨作用下云南省红土抗剪强度与坡面侵蚀模数的关系[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 001-008. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.001; Zhang Zulian, Hong Bin, Huang Ying, et al. Relationship between shear strength and slope erosion modulus of laterite under rainfall conditions in Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 001-008. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.001

Relationship Between Shear Strength and Slope Erosion Modulus of Laterite Under Rainfall Conditions in Yunnan Province

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

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

Abstract: [Objective] The relationship between water content, dry density, shear strength and erosion modulus of laterite in Yunnan Province, was studied under rainfall condition, in order to provide a theoretical basis for further studies on the erosion mechanism of laterite. [Methods] The methods included artificial simulated rainfall and soil trough model experiments, soil test and relative theoretical analysis. [Results] (1) The relation of the cohesion of laterite with water content showed a quadratic curve relation. Near the optimum water content, the maximum cohesion occurred. The internal friction angle was approximate to the linear relationship with the water content change, and the internal friction angle decreased with increasing water content. Under the conditions of initial dry density 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm³, the correlation coefficient (R^2) between cohesion and water content ranged from a minimum of 0.754 to a maximum of 0.934, and the R^2 between internal friction angle and water content ranges from the minimum of 0.944 to the maximum of 0.996.

收稿日期: 2016-06-22

修回日期: 2016-07-16

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”(51269006), “云南红土型大坝的干湿循环效应研究”(51568031); 云南省教育厅科学研究基金“降雨对云南典型红土胶结特性的影响研究”(2011Y354)

第一作者: 张祖莲(1964—), 女(汉族), 云南省绥江县人, 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。

(2) The relation between cohesion and internal friction angle were close to linear relationship with the change of dry density. When the water content was constant, the curve of the relationship between cohesion and internal friction angle with the change of dry density had a certain variation, and the cohesion and internal friction angle increase with the increasing of dry density. (3) The shear strength decreased with increasing water content, and the amplitude was especially obvious when the water content was higher than the optimum water content. The shear strength increased with increasing dry density. (4) By the end of the rain, for laterite with different dry densities, the relationship between the slope erosion modulus and the shear strength showed a quadratic curve relation, and the correlation coefficient (R^2) can be up to 0.988. [Conclusion] There is good correlation between the shear strength and the slope erosion modulus, and estimating the amount of the slope erosion with the shear strength of laterite after rain is possible.

Keywords: laterite in Yunnan Province; water content; dry density; shear strength; erosion modulus

中国是土壤侵蚀极为严重的国家之一,针对土壤侵蚀的发生、发展及危害,中国学者总结、分析、研究了国外降雨侵蚀模型存在的局限性,结合中国各流域的实际情况,建立了适合中国实际的土壤侵蚀模型^[1-3],这些模型对中国土壤侵蚀的防治工作起到了重要作用。造成土壤侵蚀的因素多而复杂,包括:降雨、地形特征、土壤性质、植被覆盖以及人类活动等,而且这些因素之间相互作用、相互影响,使得土壤侵蚀的成因、过程、机理、结果形成了一个复杂的系统。降雨对土壤侵蚀影响的研究大多集中在与雨强、雨量、降雨历时等降雨综合特征指标相关的降雨侵蚀力及相应的土壤侵蚀规律、侵蚀量大小^[4-8]方面。地形特征的影响主要在于坡度、坡长对土壤侵蚀的影响,并基于不同土壤、不同试验方法以及不同水力学参数等,提出了相应的临界坡度和临界坡长^[9-11]。植被能控制径流量、产沙量及土壤养分的流失,是防治土壤侵蚀的有效措施^[12]。人类活动的影响主要在于全面、系统、客观地评价植被破坏、工程建设、农业耕作等对土壤侵蚀的影响,以便进一步定量研究人类活动与土壤侵蚀之间的内在联系^[13]。

土壤是降雨侵蚀的对象,也是影响土壤侵蚀过程、形态、侵蚀量大小的内在原因。土壤的物理性质和力学性质是土壤的 2 个重要性质,而且土壤物理性质与力学性质之间存在着密切的联系。土壤含水率与干密度是反映土壤物理性质的两个重要指标,而土壤抗剪强度又是反映土壤力学性质的重要参数。土壤侵蚀首先在于外营力对土壤结构的损伤和破坏,而土壤结构的破坏往往表现为剪切破坏。因此,研究土壤侵蚀与土壤抗剪强度之间的关系,无疑对进一步认识土壤侵蚀机理有着重要意义。国外学者通过试验,研究了土壤的击溅机理,并根据对试验资料的分析、提炼,证明了溅蚀量与抗剪强度之间存在着密切联系。再者,研究了土壤抗剪强度、降雨、径流、侵蚀之间的关系,认为土壤抗剪强度对土壤侵蚀有着显著影

响,并把沟间侵蚀和土壤抗剪强度联系起来预测土壤侵蚀量^[14-17]。

就现有文献资料来看,中国学者将土壤抗剪强度与土壤侵蚀联系起来进行相关分析、研究的还不多,但都认为土壤抗剪强度与土壤侵蚀之间有着内在的联系^[18-19],并通过室内外试验进行了相关论证。因此,针对红土特殊的工程地质性质及危害严重的云南省红土土壤侵蚀,只有将引起土壤侵蚀的外部动力因素和红土自身特性结合起来,才能从根本上阐明该区红土侵蚀机理,为有效控制和治理红土侵蚀提供相关依据。

本文拟针对云南省红土,在研究降雨作用下含水率、干密度与抗剪强度关系的基础上,进一步研究抗剪强度与侵蚀模数之间的关系,为从不同角度深入研究该区红土的侵蚀问题提供参考。

1 研究方法

2014 年 10 月初开始准备人工模拟降雨试验的相关工作,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,2015 年 11 月底试验基本完成。

1.1 试验用土及试验装置

选用云南省昆明市世博生态城无污染的典型红土作为试验土料,测得其基本特性如表 1 所示。土壤类型为红黏土。

人工模拟降雨试验装置主要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,喷头距离地面高度为 8.5 m,因而大部分雨滴都能达到雨滴终速,能较好的模拟天然降雨,试验区域的雨滴均匀度可达 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,使得土壤的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。

表 1 云南省试验红土的基本特性

比重 G_s	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	最大干密度/ $(\rho_{dmax} \cdot g^{-1} \cdot cm^{-3})$	颗粒质量分数/%			稠度指标/%		
			砂粒 (>0.075 mm)	粉粒 ($0.005 \sim 0.075$ mm)	黏粒 (<0.005 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 试验过程

将野外取回的红土进行风干,剔除树根、草根、石块等杂物,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,以防止红土从底部开口处过多流失,并保证模型土槽的透水性。土槽土体坡长 1.0 m,坡面宽 0.4 m,土体深度为 0.3 m,分 5 层填筑,每层红土倒入土槽后,用垫板、木槌等击实工具轻轻击打、压实到填筑高度,层与层之间的接触面用刮土刀进行刨毛处理,以便土层之间紧密结合。

每次试验前 24 h 进行一次降雨强度为 30 mm/h 的预降雨,降雨到坡面发生产流时停止。预降雨使坡体含水在重力作用下重新分布,并使土槽内土壤含水接近于自然含水分布。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,开始模拟降雨试验。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,称取侵蚀土的质量。

为研究降雨作用下云南红土的含水率、干密度与抗剪强度以及抗剪强度与坡面侵蚀模数之间的关系,人工模拟降雨试验在模型土槽坡度为 20° ,坡长为 1 m 的条件下进行。

试验的每场降雨历时均在 1 h 以上,以便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、雨量大的特点及中国降雨等级划分标准,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。

试验研究了 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm³ 5 种干密度的坡面红土抗剪强度随降雨历时的变化以及降雨结束时坡面红土的抗剪强度。由于在模拟降雨过程中用环刀直接在土槽坡面取样测试抗剪强度会使坡面遭到破坏,影响后续试验,因此,以人工模拟降雨过程中模型土槽坡面土体实测的含水率变化过程为依据,采用控制含水率、干密度进行人工制样的方法制备剪切试样,以研究降雨过程中模型土槽坡面土体抗剪强度随降雨历时的变化。降雨结束时的抗剪强度试验直接用环刀从模型土槽坡面获取剪切试样。对剪切试样进行直剪试验,获得相应的红土黏聚力、内摩擦角和抗剪强度。

2 结果与分析

在红土初始干密度为 1.1 g/cm³ 及含水率为 32.5%,初始干密度为 1.2 g/cm³ 及含水率为 30.9%,初始干密度为 1.3 g/cm³ 及含水率为 29.5% 的条件下,测试、分析了模型土槽坡面平均含水率随降雨时间的变化过程,其结果如图 1 所示。

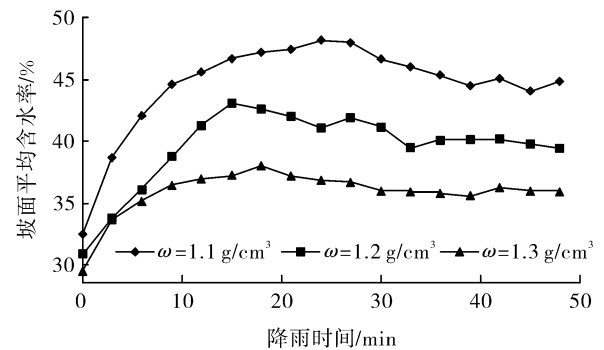


图 1 红土坡面平均含水率随降雨时间的变化过程

图 1 表明:降雨作用改变了模型土槽坡面红土的含水率,而含水率的变化必然引起红土结构的改变,从而导致红土黏聚力、内摩擦角和抗剪强度发生相应变化。为研究降雨过程中土槽坡面红土抗剪强度的变化过程,以图 1 所示的坡面平均含水率随降雨时间的变化过程为依据,针对 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm³ 干密度红土,采用人工制样方法,从低含水率开始,含水率每增加 2%~4% 配置一组试样,直至接近饱和含水率,测试分析试样相应的黏聚力、内摩擦角和抗剪强度,以研究红土黏聚力、内摩擦角和抗剪强度随降雨历时的变化过程。

2.1 红土含水率 ω 与黏聚力 c 及内摩擦角 ϕ 的关系

2.1.1 含水率 ω 与黏聚力 c 的关系 针对 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm³ 干密度的红土,在试验含水率条件下,测试、分析出不同干密度下黏聚力与含水率的关系可拟合为表 2 所示的二次多项式。

表 2 中黏聚力 c 与含水率 ω 的关系可写成通式:

$$c = A\omega^2 + B\omega + D \quad (1)$$

式中: A , D ——与土壤干密度有关的常数; ω ——土壤含水率(%)。

表 2 表明:在干密度一定的条件下,当含水率小

于最优含水率时,红土黏聚力随含水率的增加而逐渐增大,在接近最优含水率 25.5% 左右存在极大值,这与参考文献[20]的结论一致,但与参考文献[21]的结论有差别。这可能是因为试验用土的土壤特性、试验含水率范围不一致造成的。当含水率超过最优含水率后,红土黏聚力随含水率的增加而逐渐减小。

表 2 不同干密度下红土黏聚力与含水率的关系

干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	拟合方程	相关度 R^2	试验点 数 N
1.0	$c = -0.013\omega^2 + 0.682\omega - 2.215$	0.893	11
1.1	$c = -0.052\omega^2 + 2.852\omega - 22.981$	0.754	12
1.2	$c = -0.084\omega^2 + 4.369\omega - 31.823$	0.898	12
1.3	$c = -0.190\omega^2 + 9.662\omega - 84.834$	0.934	11
1.4	$c = -0.321\omega^2 + 15.857\omega - 143.720$	0.905	11

再者,无论黏聚力是随含水率的增加还是减小,都表现出干密度越大,黏聚力随含水率变化的梯度也越大的特点。这是因为:黏聚力的大小主要取决于土壤粒间结合水的连接作用、胶结物的胶结作用和毛细水的连接作用等。含水率对红土黏聚力的影响在于含水率变化所引起的土粒间各种作用的相互变化。针对一定干密度的红土,当含水率较小时,一方面,土粒之间的水膜较薄,主要以结合水的形式存在,此时结合水具有较强的连接作用,而胶结作用、毛细水连接等其他作用相对较弱;另一方面,低含水率使土颗粒间的孔隙以气相为主,气体阻隔、削弱了颗粒间的有效连接,这两方面的共同作用力使得低含水率时红土黏聚力较小。随着含水率的增加,土粒间的水膜逐渐变厚,且土颗粒间的孔隙逐渐被水充填导致气体占据的空间减小,这使得结合水的连接作用逐渐减弱而毛细水的连接作用逐渐增强;且含水率的增加还会使游离氧化物胶体的化学吸附作用相应增强,从而增强了颗粒间的胶结作用,因此红土黏聚力随含水率的增加而增大,且在最优含水率 25.5% 附近红土颗粒之间的连接能力较强,与之相对应,黏聚力也达到极大值。当含水率超过最优含水率后,特别是在接近饱和时,颗粒间的水膜进一步增厚,导致土颗粒间的毛细作用遭到破坏。在毛细水连接作用消失的同时,粒间孔隙部分甚至全部被水充填,土颗粒部分或全部被重力水隔开,土颗粒之间的距离增大,再加上渗流、坡面径流溶蚀带走了部分氧化物胶体,使得粒间的胶结作用逐渐减小甚至消失,这些原因都导致了红土黏聚力随含水率的增加而减小。

干密度越大,土壤颗粒间孔隙越少,含水率的变化对土壤结构的影响更为敏感,因此干密度越大,黏

聚力随含水率变化的梯度也越大。

在表 2 中,当红土的 1.1 g/cm^3 干密度时黏聚力与含水率的回归方程相关系数比其它干密度略低,但若以最优含水率为分界点,右半部分可拟合成为 $c = 207.44 e^{-0.086\omega}$, $R^2 = 0.975$, 试验点数 $N = 6$, 相关度较高。这与参考文献[21]所得的结论较为一致,但因试验用土特性有所不同,因此回归方程中各系数有差别。因此总体来说,红土黏聚力与含水率之间整体上趋于二次函数的关系,若以最优含水率为分界点,把黏聚力与含水率之间的关系分成左右 2 部分考虑,可能更符合实际情况。

2.1.2 含水率 ω 与内摩擦角 φ 的关系 针对 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm^3 干密度的红土,在试验含水率条件下,当含水率 $\omega > 20\%$ 时,测试、分析出不同干密度下红土内摩擦角与含水率的关系可拟合为表 3 所示的关系式。

表 3 不同干密度下红土内摩擦角与含水率关系

干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	拟合方程	相关度 R^2	试验点 数 N
1.0	$\varphi = -0.512\omega + 30.501$	0.975	9
1.1	$\varphi = -0.543\omega + 31.291$	0.996	10
1.2	$\varphi = -0.621\omega + 35.073$	0.976	10
1.3	$\varphi = -0.735\omega + 38.762$	0.978	9
1.4	$\varphi = -0.644\omega + 36.903$	0.944	8

表 3 中内摩擦角与含水率的关系可写成通式:

$$\varphi = E\omega + F \quad (2)$$

式中: E, F ——与干密度相关的常数; ω ——含水率(%)。

表 3 表明:当干密度一定时,红土的内摩擦角与含水率接近于线性关系,且相关度较高。在干密度一定的条件下,红土内摩擦角随含水率的增加整体上呈递减的趋势,但在不同含水率范围内又各有其特点。当含水率在 15%~20% 时,内摩擦角随含水率增加而减小的梯度较小,有的甚至接近水平线;而当含水率大于最优含水率后,内摩擦角随含水率增加而减小的梯度明显增大,这些结果与参考文献[21]中得出的内摩擦角在较低的含水率范围内水对内摩擦角的影响不大,但在高含水率范围内水对内摩擦角的影响是巨大的结论较为一致。内摩擦角之所以随含水率的增加而减小,其原因在于:内摩擦角的大小主要取决于土颗粒间的摩擦作用和咬合作用。当含水率较低时,红土颗粒间水膜较薄,土颗粒间接触面积较大且表面粗糙度较大,这使得土颗粒间相互错动较为困难,因而土颗粒之间的摩擦力较大。再者,由于黏土

颗粒比表面积很大,因此在含水率较低时,颗粒之间的接触点、面较多,颗粒间的咬合力也较大,且颗粒间的咬合力受含水率变化的影响较小,从而使红土具有较大的内摩擦角,且内摩擦角随含水率的增加而减小的梯度相对较小。随着含水率的增加,土颗粒间水膜变厚,这既导致土颗粒间因水膜的阻隔而接触面积减小,又因水膜润滑作用的增强使得土粒间的粗糙度减小,这些都使得土颗粒间因相互错动较为容易而导致摩擦作用减弱;同时,高含水率使土颗粒被重力水隔开,导致了粒间接触的点、面减小,这使得土粒间的咬合作用减弱甚至消失;再者,红土是高液限土,具有吸水膨胀的特性,吸水后孔隙增大,这也促使颗粒间距离增大,这几方面的共同作用导致了红土内摩擦角随含水率的增加而减小,且含水率越高,内摩擦角受含水率变化的影响越显著。

2.2 红土干密度 ρ_d 与黏聚力 c 及内摩擦角 φ 的关系

土壤的干密度不同,其孔隙大小和数目也不同,从而导致土壤结构和降雨作用下土粒间的相互作用力也有所改变,进而影响到土壤的黏聚力、内摩擦角及抗剪强度。

2.2.1 干密度 ρ_d 与黏聚力 c 的关系 针对 11 种不同含水率,测试、分析出黏聚力随干密度的变化如图 2 所示。

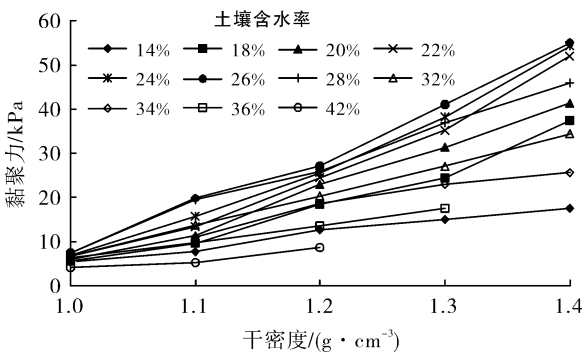


图 2 不同含水率时红土黏聚力与干密度的关系

图 2 表明:在含水率一定的条件下,红土黏聚力随干密度的变化接近于直线关系,但又稍有上凸或下凹,且曲线的形状因含水率不同而有所差异,因此,难以用某种曲线进行拟合。就红土黏聚力随干密度的变化而言,当含水率一定时,黏聚力均随干密度的增大而增大;在干密度相同时,接近最优含水率的红土黏聚力相对较大。这是因为:当含水率一定时,随着干密度的增大,单位体积的土颗粒数量增多,而孔隙比减小,红土颗粒间紧密程度提高,从而缩小了相邻土颗粒之间的距离,结合水的连接作用、氧化物胶体的胶结作用和毛细水的连接作用也得到增强,因而,

当含水率一定时,红土黏聚力随干密度的增大而增大。

2.2.2 干密度 ρ_d 与内摩擦角 φ 的关系 针对 11 种不同含水率,测试、分析出红土内摩擦角随干密度的变化如图 3 所示。

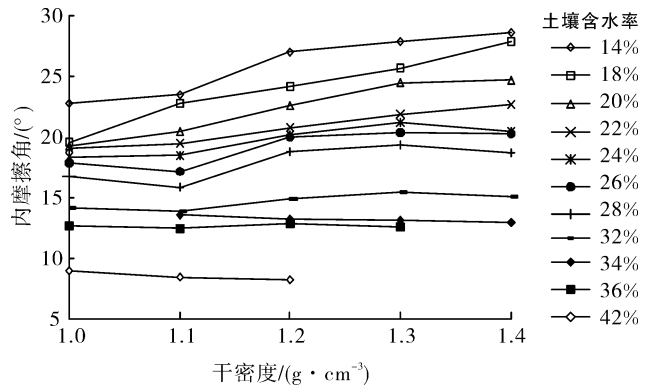


图 3 红土内摩擦角与干密度的关系

图 3 表明:在含水率较低时,内摩擦角有随干密度的增大而增大的趋势;当含水率较高时 ($\omega \geq 32\%$),内摩擦角随干密度的增大而减小的趋势。这主要是因为:内摩擦角的大小主要取决于土颗粒间的摩擦作用和咬合作用。当含水率较低时,随着干密度的增大,土壤的密实程度也增大,土壤中的孔隙减少,颗粒间整体结构性也较好,土颗粒之间逐渐由点接触转化为面接触,因而土颗粒间相互接触、咬合,且错动困难,摩擦能力也较大,导致内摩擦角也相应增大。因此,含水率较低时,干密度的变化对内摩擦角的影响较为明显,且随干密度的增加,内摩擦角有所增大。当含水率较高时,干密度大的土体率先趋向于饱和,且干密度越大,土壤趋于饱和的时间越短。当土壤饱和后,土颗粒即被孔隙水隔开,润滑作用增强,从而使得颗粒之间的摩擦能力和咬合能力有所降低,因而土壤也表现出当含水率较高时,内摩擦角随干密度增大而减小的趋势。

2.3 含水率 ω 及干密度 ρ_d 与抗剪强度 τ_f 的关系

由于每组试样是分别在 4 个不同垂直压力(低含水率试样采用的垂直压力分别为 100, 200, 300, 400 kPa,高含水率试样采用的垂直压力分别为 50, 100, 150, 200 kPa)下进行的直剪试验,因此将不同垂直压力下的抗剪强度按(3)式进行加权处理,并以加权平均抗剪强度为代表值来分析、研究红土抗剪强度与含水率、干密度之间的关系。加权公式为:

$$\tau_f = \frac{\sum_{i=1}^4 \tau_{fi} \sigma_i}{\sum_{i=1}^4 \sigma_i} \quad (3)$$

式中： τ_f ——加权抗剪强度(kPa)； σ_i ——仪器加载的第 i 级垂直压力(kPa)； τ_{fi} ——加载 σ_i 时的抗剪强度(kPa)。

2.3.1 红土含水率 ω 与抗剪强度 τ_f 的关系 针对 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm^3 干密度的红土, 加权平均抗剪强度随含水率的变化如图 4 所示。

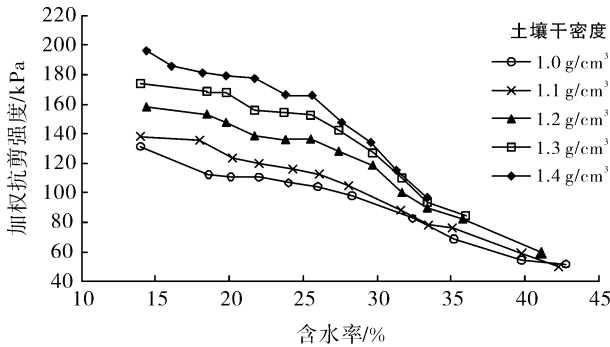


图 4 红土抗剪强度与含水率的关系

图 4 表明:在试验含水率条件下,当干密度一定时,红土抗剪强度总体上随含水率的增大而减小,只是在含水率较低时,抗剪强度的变化梯度随含水率的变化较小,而在含水率较高时,抗剪强度的变化梯度随含水率的增大而增大,这与参考文献[20]的结论较为一致。

2.3.2 红土干密度 ρ_d 与抗剪强度 τ_f 的关系 针对 11 种不同含水率,加权平均抗剪强度与干密度的变化关系如图 5 所示。

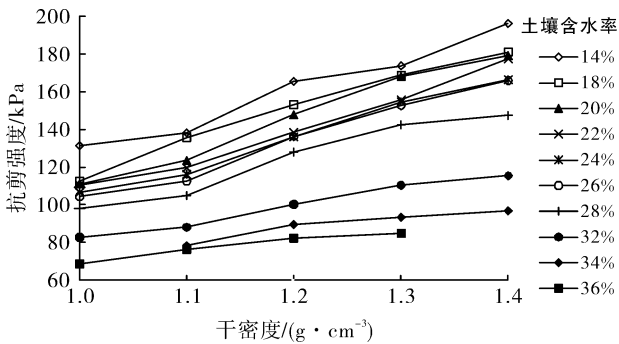


图 5 红土抗剪强度与干密度关系

图 5 表明:当含水率一定时,红土抗剪强度随干密度的增加而增加,特别是在含水率较低时尤为明显。

2.4 红土抗剪强度与侵蚀模数的关系

2.4.1 降雨过程中模型土槽坡面红土抗剪强度与侵蚀模数的关系 针对初始干密度 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm^3 的模型土槽坡面,在坡度 20° , 雨强为 1.4 mm/min 时,测试、分析了坡面产流率随产流时间的

变化过程。结果表明:随着干密度的增加,坡面达到稳流的时间明显提前,且红土的干密度越大,初始产流阶段的曲线越陡,径流到达稳流的时间也越短,坡面稳定产流率也随着干密度增加而增加。

在初始干密度分别为 1.1, 1.3 g/cm^3 , 坡度 20° , 降雨强度为 1.4 mm/min 的条件下,测试、分析得出坡面侵蚀模数与抗剪强度随降雨时间的变化关系如图 6 所示。

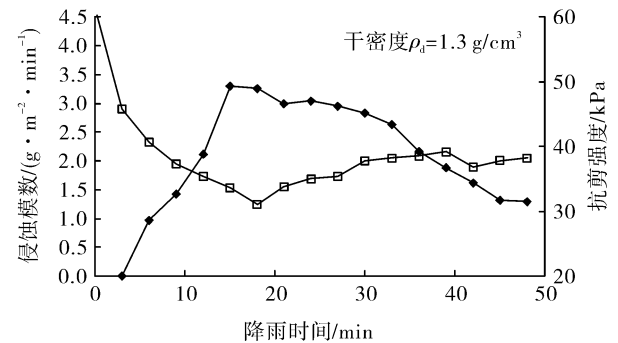
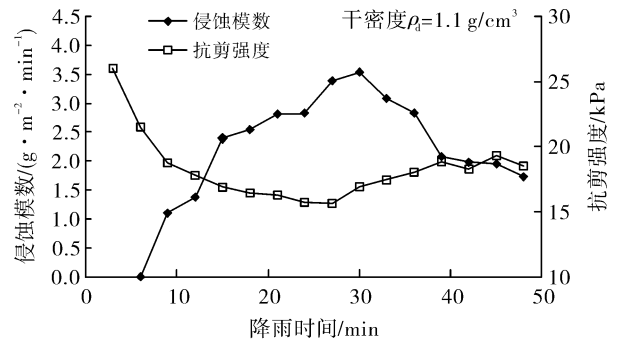


图 6 红土侵蚀模数和抗剪强度随时间的变化

图 6 表明:当雨强、坡度、坡长和初始干密度一定时,在坡面径流达到最大值之前,坡面侵蚀模数随坡面径流量的增加而增加;当坡面径流稳定后,侵蚀模数逐渐减小;而坡面侵蚀模数与红土抗剪强度随降雨历时呈负相关的关系。在坡面没有产生径流前,坡面红土抗剪强度随降雨历时急剧减小。坡面产生径流后,干密度为 1.1 g/cm^3 的坡面红土抗剪强度从 20 kPa 降低到 15 kPa,坡面侵蚀模数从 0 增加到 3.5 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。坡面径流稳定后,抗剪强度从 15 kPa 增加到 18 kPa,坡面侵蚀模数从 3.5 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 减小到 1.7 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。同样,干密度为 1.3 g/cm^3 坡面红土的侵蚀模数与抗剪强度随降雨历时也有相似的变化规律,只是干密度不同,侵蚀模数出现极大值和抗剪强度出现极小值的时间有所不同。这是因为:降雨初期雨水全部入渗,坡面红土含水率急剧升高,导致坡面红土抗剪强度随含水率增加而迅速降低的同时,坡面红土抗侵蚀能力也有所下降。当坡面红土局部区域达到饱和时,坡面开始产流产沙,而且坡

面红土的抗剪强度也因含水率更高而进一步降低。随着红土抗剪强度的降低,雨滴的击溅和径流的冲刷更容易破坏、损伤红土结构,使得红土的剥离、分散、输移更为容易而导致坡面红土的抗侵蚀能力持续下降。红土抗侵蚀能力的减小和径流冲刷作用的增强,使得侵蚀模数逐渐增大。随着降雨历时的延长,坡面红土的含水率由局部饱和向整体饱和和过渡,此时整个坡面红土的平均抗剪强度进一步降低。当坡面径流进入稳流状态时,径流的输沙能力达到最大,坡面大量松散的土颗粒被径流带走,侵蚀模数出现了峰值。同时,坡面表层红土经雨滴压实、细颗粒充填、径流冲刷等作用后,含水率有所降低,导致红土抗剪强度略有提升。降雨后期,雨滴的击溅作用、径流的冲刷作用以及坡面红土的结构强度达到相对平衡状态,侵蚀模数也就逐渐趋于稳定。此外,雨滴作用力对结皮后坡面的干密度、含水率的影响减小,因此,坡面红土的抗剪强度也逐渐趋于稳定。

在一定雨强、坡度、坡长、初始干密度条件下,降雨过程中红土坡面侵蚀模数 M 随抗剪强度 τ_f 的降低而增大,且两者之间的关系可拟合为:

干密度为 1.1 g/cm^3 时:

$$M = -0.391\tau_f + 9.312 \quad (R^2 = 0.740) \quad (4)$$

干密度为 1.3 g/cm^3 时:

$$M = -0.191\tau_f + 9.308 \quad (R^2 = 0.611) \quad (5)$$

公式(4),(5)表明:在一定雨强、坡度、坡长、初始干密度条件下,降雨过程中,红土抗剪强度与坡面侵蚀模数呈线性相关关系,但二者的相关度不太高,仅为 0.740,0.611。

2.4.2 降雨结束后模型土槽坡面红土抗剪强度与侵蚀模数的关系 针对 $1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 \text{ g/cm}^3$ 初始干密度制作的模型土槽坡面进行模拟降雨试验,降雨结束后,从土槽坡面取样进行直剪试验,测试、分析得出降雨结束时侵蚀模数、土槽坡面土体的黏聚力、内摩擦角及抗剪强度随干密度的变化如图 7 所示。

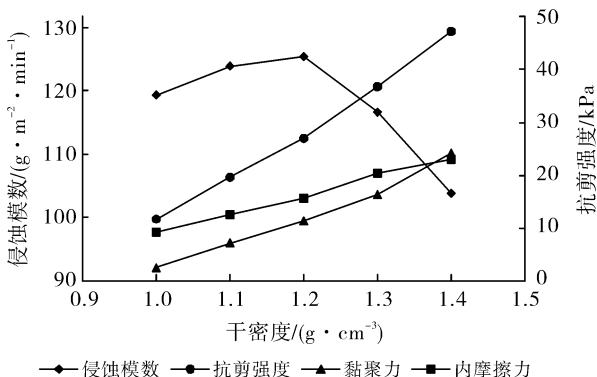


图 7 红土侵蚀模数及抗剪强度随干密度的变化

图 7 表明:降雨结束后,模型土槽坡面红土的黏聚力、内摩擦角及抗剪强度随初始干密度的增大而增大。对坡面侵蚀模数、红土抗剪强度和干密度三者的关系而言,当初始干密度小于 1.2 g/cm^3 时,坡面侵蚀模数随干密度的增加而略有增大,且与红土抗剪强度呈正相关的关系;但当初始干密度大于 1.2 g/cm^3 时,坡面侵蚀模数随干密度的增加呈加速减小的趋势,且与红土抗剪强度呈负相关的关系。其原因在于:坡面侵蚀模数的大小主要决定于雨滴的击溅能力、径流的冲刷能力和土壤的抗侵蚀能力。降雨作用使红土的含水率随降雨历时而变化,导致了土壤抗剪强度和坡面径流特性也不断变化。红土抗剪强度的变化必然引起红土抗侵蚀能力的变化,而径流特性的变化会引起径流冲刷能力的变化,这些导致了坡面侵蚀模数发生相应变化。红土抗剪强度、径流特性、侵蚀模数三者之间相互联系、相互影响、相互制约,形成了复杂的系统,且红土抗剪强度和径流特性又受诸多因素的影响,而干密度仅是反映红土性质的因子之一,因此,在干密度较小时,由于种种因素之间的相互影响,才导致了侵蚀模数随红土抗剪强度的增加而略有增大。

在坡度、坡长、雨强一定的条件下,降雨结束后,不同干密度土槽坡面红土侵蚀模数与抗剪强度的关系可拟合为(6)式:

$$M = -0.037\tau_f^2 + 1.763\tau_f + 104 \quad (R^2 = 0.988) \quad (6)$$

公式(6)表明:在坡度、坡长、雨强一定的条件下,降雨结束后,不同干密度坡面红土抗剪强度与侵蚀模数之间有较好的相关关系。就现有文献资料来看,关于降雨作用下土壤抗剪强度与土壤侵蚀之间关系的研究还不多,但参考文献[18-19]针对中国的黄土,明确了黄土抗侵蚀能力与抗剪强度之间的关系,参考文献[16]对抗剪强度与侵蚀量进行回归分析后也发现,降雨后坡面土壤的抗剪强度与土壤侵蚀量之间有良好的相关关系,这与本文的结论较为吻合。值得注意的是:(6)式是建立在一定雨强条件下的,当降雨强度变化时,还需考虑降雨因子的影响,因为,降雨因子的变化会导致降雨对坡面作用力及坡面径流特性的变化,从而使坡面红土的抗剪强度和侵蚀模数也发生相应变化,但红土抗剪强度与侵蚀模数之间仍存在一定程度的相关关系。

3 结论

(1) 在干密度一定的条件下,云南省红土黏聚力随含水率的增加呈先增大后减小的变化趋势,且在接近最优含水率 25.5% 时存在极大值。红土内摩擦角

随含水率的增加呈减小的趋势。红土的黏聚力与含水率、内摩擦角与含水率之间具有较好的相关关系。在试验含水率的条件下,红土的抗剪强度随含水率的增大而减小。

(2) 在含水率一定的条件下,红土的黏聚力、内摩擦角、抗剪强度整体上随干密度的增加而增大,特别是在含水率较低时变化尤为显著。

(3) 在坡度、坡长、雨强及初始干密度一定的条件下,红土的坡面侵蚀模数与红土抗剪强度随降雨历时呈负相关关系,且侵蚀模数与红土抗剪强度之间有一定程度的线性相关关系。降雨结束后,针对不同初始干密度的模型土槽坡面,红土的侵蚀模数与抗剪强度呈二次曲线关系。因此,在缺乏资料的情况下,可用雨后红土的抗剪强度估算红土的坡面侵蚀量。

[参 考 文 献]

- [1] 肖飞鹏,程根伟,鲁旭阳. 流域降雨侵蚀模型研究进展[J]. 水土保持研究,2009,16(1):98-101,106.
- [2] 张国华,谢崇宝,皮晓宇,等. 红壤坡地次降雨通用土壤侵蚀模型研究[J]. 中国水土保持,2015(7):38-41.
- [3] 李军鹏,董卫国,孟惠芳,等. 降雨条件下坡面细沟侵蚀模型及临界坡度研究[J]. 灾害学,2016,31(1):207-212.
- [4] 张黎明,林金石,于东升,等. 南方不同类型土壤侵蚀量与降雨各因子的关系研究[J]. 水土保持通报,2011,31(2):10-14.
- [5] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等. 珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 农业工程学报,2015,31(8):159-167.
- [6] 李林育,王志杰,焦菊英. 紫色丘陵区侵蚀性降雨与降雨侵蚀力特征[J]. 中国水土保持科学,2013,11(1):8-16.
- [7] 秦伟,左长清,晏清洪,等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报,2015,31(2),124-132.
- [8] 王保田,龚傲龙,杜妍平,等. 广西石漠化地区坡面土壤侵蚀规律研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2015,40(1):228-235.
- [9] 王恒松,熊康宁,张芳美. 地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J]. 水土保持通报,2015,35(4):1-7.
- [10] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报,2010,28(4):415-421.
- [11] 严冬春,文安邦,史忠林,等. 三峡库区紫色土坡耕地细沟发生的临界坡长[J]. 长江科学院院报,2010,27(11):58-66.
- [12] 程圣东,李占斌,李鹏,等. 不同草被格局坡面水土—养分流失动力过程试验研究[J]. 水土保持学报,2014,28(5):58-61.
- [13] 李冰,唐亚. 金沙江下游地区人类活动对土壤侵蚀的影响[J]. 山地学报,2012,30(3):299-307.
- [14] Al-Durrah M, Bradford J M. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(5): 949-953.
- [15] Nearing M A, Bradford J M. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985,49(3):547-552.
- [16] Watson D A, Laflen J M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion[J]. Transactions of the ASAE, 1986,29(1):98-0102.
- [17] Kok H, McCool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength[J]. Transactions of the ASAE, 1990,33(2):501-0506.
- [18] 夏艳华. 黄土抗侵蚀能力与抗剪强度的关系研究[D]. 北京:中国科学院大学,2005.
- [19] 姚军. 黄土坡耕地土壤抗剪强度与侵蚀的关系研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [20] 黄英,张祖莲,金克盛,等. 含水条件变化对云南红土性状的影响[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(6):518-523.
- [21] 王中文,洪宝宁,刘鑫,等. 红黏土抗剪强度的水敏性研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2011,43(1):17-22.