

极端降雨作用下陕北梯田边坡稳定性分析

温永福^{1,2}, 高鹏^{2,3}, 穆兴民^{2,3}, 赵广举^{2,3}, 孙文义^{2,3}

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了研究在极端降雨作用下梯田边坡稳定性,同时探究土体内部重要参数随降雨入渗变化规律,进行了人工降雨作用下的梯田边坡的室内模型试验研究以及梯田边坡数值模拟分析。研究表明:在实施降雨的前 2 h,平均入渗百分率为 65%,之后,入渗率由于地表径流的增加而随时间逐渐减少,一段时间(8 h)之后,入渗率降到一个相对稳定值(25%);降雨入渗造成土体中含水率增加,致使梯田边坡的抗剪强度由于有效应力的减少及土体吸水软化而降低;降雨入渗影响下梯田边坡的滑动变形区为坡面以下 0~1.0 m,变形量以坡面最大,从坡面到坡体深部逐渐减小,梯田边坡崩塌类型为冲蚀引起的局部浅层崩塌破坏;随着降雨的持续,梯田边坡安全系数不断减小,在降雨 5 h 后安全系数 $k_s < 1$,梯田边坡发生垮塌。

关键词:极端降雨; 梯田边坡; 含水率; 安全系数

中图分类号:S157.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0365-05

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2018.04.053

Analysis on the Stability of Slope in Northern Shaanxi Under Extreme Rainfall

WEN Yongfu^{1,2}, Gao Peng^{2,3}, MU Xingmin^{2,3}, ZHAO Guangju^{2,3}, SUN Wenyi^{2,3}

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To better understand the collapse instability mechanism of terraced slope induced by extreme rainfall conditions and study some important features of soil internal parameters with the effect of rainfall simultaneously, model tests and numerical simulation were carried out to research and discuss the terraced slope under simulated rainfall. The results show that during the first 2 hours of the rainfall, the average infiltration rate was 65%, thereafter, as the runoff increased, infiltration rate decreased over time; 8 hours later, infiltration rate fell to a relatively stable value (25%); under the influence of rainfall infiltration, the sliding deformation zone of the terraced slope was between 0~1.0 m below the slope; the maximum amount of deformation in the slope gradually decreased from the slope surface to the depth of the slope, and the collapse type was caused by the erosion of the local shallow destruction; rainfall infiltration caused the pore water pressure and water content to increase and the suction to decrease, so that the shear strength of slope soil reduced due to the reduction of effective stress and soil water softening. The double effect of rainfall infiltration may be one of the main causes related to erosion and collapse of terraced slope induced by rainfall; the safety factor of the terrace slope is decreasing with the duration of rainfall and terraced slope collapsed after 5-hours rainfall.

Keywords: extreme rainfall; terraced slope; water content; safety factor

梯田边坡在黄原区普遍存在,其主要作用包括以下 2 个方面^[1]:一是能够有效地防止水土流失,创造良好的水、土生态环境,为耕作难以进入地区的农业发展提供

了条件;二是降低了常规斜坡高梯度的危险,维护边坡稳定性。由于在降雨条件下田埂具有持水作用,这必然涉及到入渗问题,梯田改变了原有地面形状,从而使地

收稿日期:2017-08-07

修回日期:2017-09-06

资助项目:水利公益性行业科研专项(201501049);中国科学院西部之光项目;国家重点研发计划专题计划(2016YFC0501707)

第一作者:温永福(1992—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为水土保持和生态水文。E-mail:2548065512@qq.com

通信作者:高鹏(1976—),男,陕西宝鸡人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事水土保持和流域生态水文研究。E-mail:gaopeng@ms.iswc.ac.cn

表入参与斜坡不同。众多事实表明,入渗是影响边坡稳定性,导致边坡失稳的最主要和最普遍的环境因素,是浅层滑坡最关键的触发因素^[2-3]。非饱和土质边坡在天然状态下常常具有较高的稳定性,但入渗导致基质吸力减少,边坡稳定性会大大降低。例如 2013 年延安地区发生的极端暴雨导致大面积梯田边坡塌滑破坏给农业生产造成了严重损失^[4]。

入渗是指降雨通过地表向下运动,补给土体水、地下水,是水分在土体中的一个动态分布过程^[5]。入渗触发滑坡主要包括以下几个因素:雨水入渗产生暂态饱和区,土体重度增加,下滑力增加;湿润区土体的基质吸力降低;雨水对岩土体的软化作用,岩土体粘聚力和内摩擦角降低。目前对上述几个方面的一般性斜坡稳定性研究较多^[6-10],尽管许多学者对梯田边坡进行实地调查和研究,但对梯田边坡入渗稳定性研究还相对较少。一些研究者开展了有益的探索,例如,张杰等^[11]利用 Green-Ampt 模型研究了基于农作物灌溉入渗梯田边坡稳定性分析,讨论了梯田潜在滑裂面位置。杨娟等^[12]以陕南土坎梯田田坎为研究对象,通过室内常规三轴剪切试验,探究了田坎产生破坏的形式及其产生这种破坏的原因。王延贵等^[13]采用土力学中的条分法分析了土体崩塌的原意及崩塌类型。

本文以陕北纸坊沟流域水平梯田边坡为例,采用

表 1 试验用土的基本参数指标

采样点	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	天然 含水率/%	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	饱和渗透系数/ ($m \cdot d^{-1}$)
安塞纸坊沟	1.32	7.86	1.21	28.48	18.92	0.622

1.2 试验装置及填土方式

试验填筑的边坡部分高度为 1.2 m,坡度为 65° 。与模型配套的有人工降雨系统,多物理量测试系统:水分传感器、示踪点、数码相机。模型尺寸见图 1。本次试验采用分层击实填筑的方法:把试验前配制好的土均匀地每隔 10 cm 厚度分层,共分 17 层。分层填筑完成后通过人工削坡得到 65° 边坡和模型所需几何尺寸。在每层填土的分界面处,在中间 0.5 m 的截面上埋设了 13 个 RR-7120 水分传感器,并在靠近有机玻璃的侧面上埋设了 36 个位移监测点^[15]。测试仪器布置见图 2。

1.3 试验方法

试验在陕西省水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅测喷 II 区进行。按坡体运动的实际情况,共分 5 次降雨,每次降雨历时 1 h,降雨间隔为 1 h 左右,降雨强度为 150 mm/h,总降雨量达 750 mm,模拟延安极端降雨条件^[16]。记录产流时间,试验每

室内试验的方法,研究极端降雨条件下梯田边坡的入渗、变形、崩塌,探讨极端降雨对边坡稳定性的影响,同时利用国际通用的二维岩土力学有限差分计算机软件分析梯田边坡安全系数随降雨时间的变化,为梯田边坡崩塌失稳防灾减灾、监测和预报提供可靠的理论依据和丰富的试验数据。

1 材料与试验方法

1.1 研究区概况及试验土体性质

纸坊沟流域位于陕西省安塞县境内,是杏子河的一级支流,属于黄土丘陵沟壑区,地理位置为 $109^{\circ}14'12''$ — $109^{\circ}16'25''E$, $36^{\circ}46'25''$ — $36^{\circ}43'11''N$ 。流域总面积为 $8.2738 km^2$ 。纸坊沟流域地处暖温带半干旱森林草原地带,年平均气温 $8.8^{\circ}C$,年平均降水量 546.1 mm,降雨主要集中于 7—9 月,其降水量占全年降水量的 61%。本文选取安塞县纸坊沟小流域梯田作为研究对象,陕北安塞梯田属于旱地土埂梯田,土体类型为黄绵土^[14],田坎高度 1~3 m,边坡坡度在 60° ~ 70° ,田面主要种植果树、玉米、杂粮等,梯田埂坎植被覆盖率低,损害严重。鉴于此,本试验模拟梯田高度 1.2 m,边坡坡度 65° ,无田埂保护。试验用土取自陕西安塞县纸坊沟,取土深度为 6~8 m,属于 Q4 黄绵土。试验用土的基本参数指标见表 1。

1 min 在出口处收集 1 次径流样。用数码相机每 10 min 记录坡面形态,在坡面形态变化剧烈的时间段可加大照相机拍摄频率。含水率以及位移传感器记录整个试验过程各数据的变化。

1.4 数值模型建立

采用有限元软件 ANSYS 的前处理,导入岩土工程模拟计算软件 Geostudio 中^[17],模型共 2 352 个单元,4 441 个节点,将计算模型底面和左侧固定,顶部和右侧自由。GeoStudio 软件允许在饱和非饱和多孔连续介质中进行流体流动的瞬时模拟。流动计算可以脱离 GeoStudio 中的力学计算独立进行,也可以与其他力学模型进行耦合计算,以控制流固耦合作用的影响。其满足达西定律土体内非恒定渗流,其偏微分方程形式如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \omega = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: h 为总水头; k_x 和 k_y 为 x 和 y 方向的渗透系

数; w 为源汇项; m_w 为比水容量; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; t 为时间。

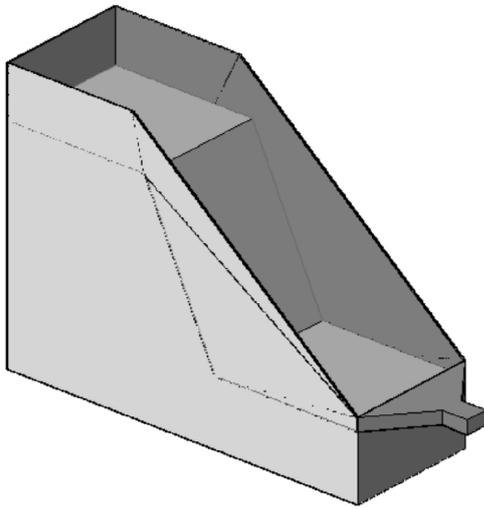
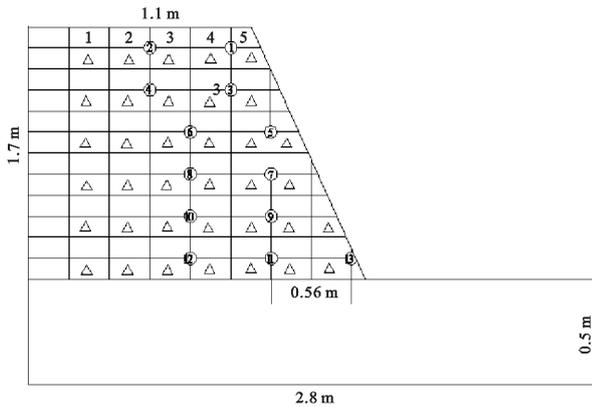


图 1 模型试验装置示意图



注:不同英文字母表示土体层数;数字表示土体列数;○表示土壤含水率传感器;Δ表示位移监测点。

图 2 试验传感器布置图

田面表面及斜坡处取流量边界或定水头边界。分析降水时,程序自动判断降水强度与土体渗透系数的关系。若降水强度小于表面土层渗透系数,则按流量边界处理,大小为降水强度;若降水强度大于表层土体渗透系数,一部分雨水沿坡面流走,会在坡面形成一层薄水膜,此时可按定水头边界处理,由于水膜很薄,因此计算中取水头值等于地表高程;模型左侧、地下水位以下为定水头边界条件,地下水位以上按零流量边界处理;模型底面为不透水边界。

2 结果与分析

2.1 降雨入渗规律

图 3 中的曲线为每次平均降雨(入渗)量及入渗百分率与降雨次数的关系。由图 3 可以看出,在第一次降雨中,平均入渗率在 80%左右,随后降雨,入渗率由于地表径流的增加而逐渐减小,到第 3 次降雨,

入渗率下降到 49.3%,之后维持在 25%左右,有 75%的降雨变成了地表径流,并且对梯田边坡造成了水土流失和雨水冲蚀,形成了细沟。雨水从梯田边坡渗入坡体是一个非饱和到饱和的渗流过程,其入渗速率随时间的变化不仅与非饱和土的初始湿度、基质吸力有关,还与梯田边坡土体的物理特性和结构性有关。通常在入渗的开始阶段,入渗能力大于降雨强度,入渗速率较大,是无压入渗。经过一段时间后,土体开始饱和,土体含水率梯度减小,基质吸力下降,入渗能力减小,当降雨强度大于土体入渗能力时,则产生坡面径流。最后,随着降雨的进行,入渗率逐渐减小直至趋于常数而达到稳定入渗阶段。

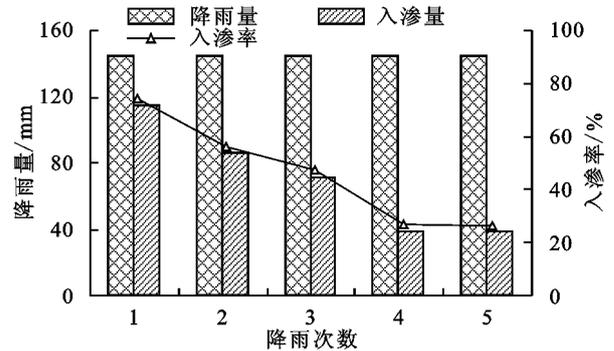


图 3 每次平均降雨(入渗)量及降雨入渗百分率

2.2 梯田边坡含水率变化

根据含水率传感器监测数据,可了解整个过程梯田边坡含水率的变化情况。图 4A 表明:坡体不同深度上各土层含水率随降雨历时及雨后历时变化有所不同。降雨开始 0.5 h 内,坡体 A, B, C 三层含水率增加速度达到 0.83%/h,变化比较明显, D, E, F 三层土体含水率变化很小,这是由于雨水入渗由浅部向深部进行。随着降雨时间增长,雨水不断入渗,整个坡体含水率不断增大,上层土体含水率增加速率约为 2%~2.83%/h,大于之前的 0.83%/h,这是由于土体含水率的不断增加,基质吸力减小,渗透系数不断增大的结果。对于 D, E, F 下三层土体,曲线有一个明显的折点,含水率在 4:00 左右突然增大,说明土体内发生了剧烈活动,土体内部出现深裂缝,土体开始失稳,滑动面正在形成。由此可知:含水率变化对土体破坏有很大的影响。首先,含水率的增加导致了土体的孔隙水压力升高,有效应力降低,从而导致了土体抗剪强度降低;其次,含水率增加,增大了水分的渗透力,从而导致梯田边坡稳定性降低,降雨入渗导致含水率变化的这双重效应可能为降雨诱发梯田边坡失稳的重要原因。并且从图 4B 看出坡顶含水量率上升速度最快,变化幅度最大,在 11 月 11 日 13:00 左右由于梯田边坡垮塌使其暴露于空气中,其含水率迅速降为 0,其次是坡脚,坡中变化最小,幅度也最小。

2.3 位移监测及潜在滑动面形状

典型测点测得:靠近坡顶的测点(A₁, A₂, A₃, A₄)位移为 1.5~3 cm,方向与水平呈 40°~50°,靠近坡面的测点(B₅, C₆, D₆)位移为 8.5~17.5 cm,方向为与水平呈 60°~70°。靠近坡脚的测点(E₇, F₇)位移为 4~6.5 cm,方向与水平呈 80°~85°。埋置在最深处的测点(B₁, C₁, D₁, D₂, E₁, E₂, E₃, F₁, F₂, F₃, F₄,

F₅)位移几乎为零。这说明:土体滑坡时,既有水平运动,又有竖向运动。由位移为零的示踪点可以确定出大概潜在滑动面的深度。如由位移为零的 C₁ 点和 E₃ 测点,可得到潜在滑动面的深度为 0.56 m 和 0.94 m 左右,将各位移为零的示踪点得到的潜在滑面深度同滑坡后缘错开裂隙结合起来,即可确定潜在滑面的位置。潜在滑动面的形状见图 5。

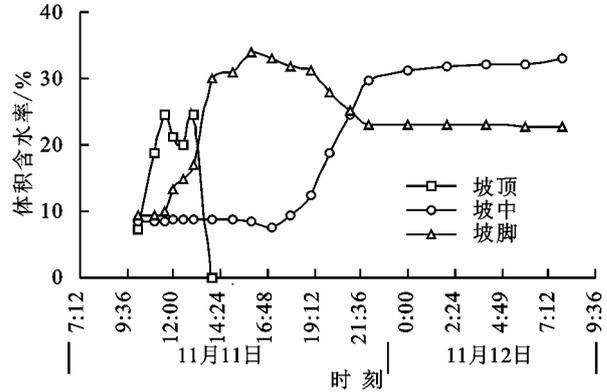
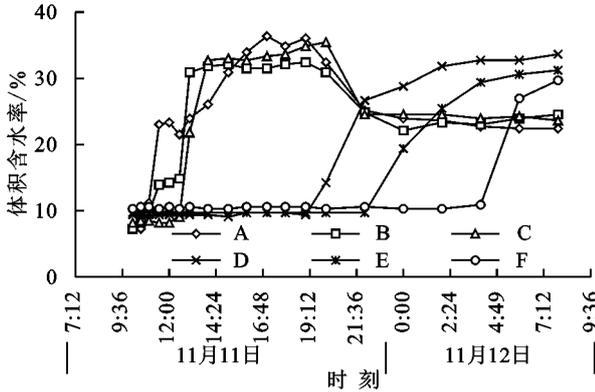


图 4 含水率随时间的变化关系

图 6 为 3 个特征监测点(A₅, C₆, F₇)位移及累计降雨量的关系曲线,从图中可以看出随着累计降雨量的增加土体位移逐渐加大,以坡中处的位移最大,坡脚次之,坡顶最小。在 11 日 14:00 左右坡体崩塌,位移陡增,滑坡结束后,位移增加缓慢,在 12 日 8:00 位移基本不变。坡中、坡脚、坡顶位移分别为 15.5, 6, 3.2 cm。

坡安全系数的重要因子,安全系数随含水率的增大而减小。降雨 5 h 后梯田边坡坡顶、坡中以及坡脚孔隙水压力依次为 0.5, 1.5, 3.5 kPa(图 8)。这与试验过程中该处水分传感器变化相一致,由此可知土壤含水率是影响其孔隙水压力的重要因素。

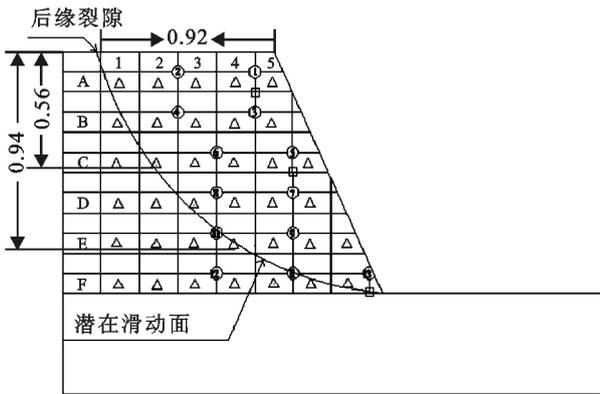


图 5 潜在滑动面形状

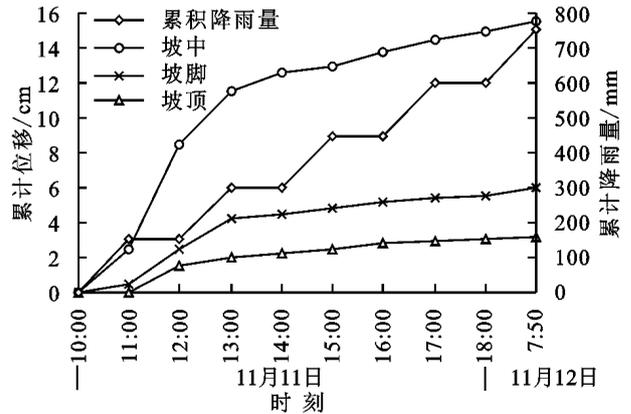


图 6 特征点位移及累计降雨量

2.4 梯田边坡安全系数以及孔隙水压力变化

通过数值模拟梯田边坡安全系数(K_s)与降雨时间的关系见图 7,随着降雨时间的持续 K_s 逐渐减小,在 14:30 左右 K_s 急剧下降且小于 1,梯田边坡失稳,降雨结束后 K_s 缓慢增大逐渐达到稳定状态。与试验一致。

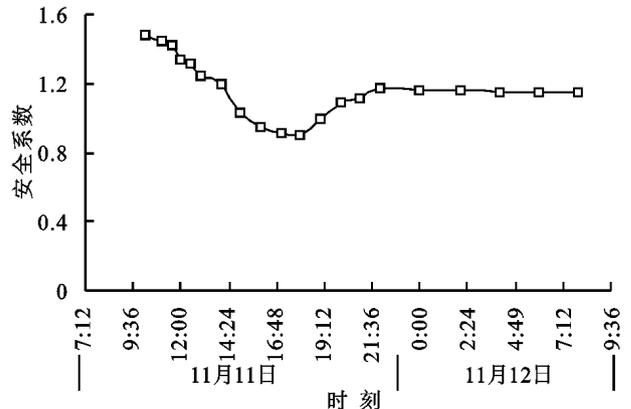


图 7 梯田边坡安全系数随降雨时间变化

通过 Excel 软件对同一时间的梯田边坡安全系数(K_s)与 A, B, C 三层土体含水率均值(W)拟合发现两者存在很好的相关性(K_s = -0.0188W + 1.6029, R² = 0.9228),由此可知含水率是影响梯田边

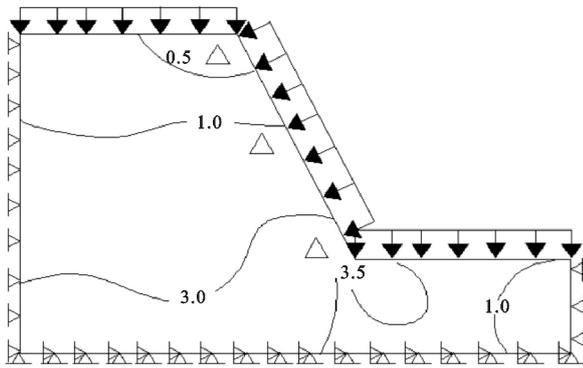


图8 降雨5 h后孔隙水压力分布

3 结论及建议

(1) 在实施降雨的前2 h,平均入渗百分率为65.58%,之后,入渗率由于地表径流的增加而随时间逐渐减少。一段时间(8 h)之后,入渗率降到一个相对稳定值(26.14%)。降雨入渗率的降低是由于边坡土体吸水饱和和使原来张开的裂隙闭合的结果。

(2) 在强降雨作用下,边坡土体吸水饱和,土体内孔隙部分闭合,渗透性降低,排水不畅,在滑动面附近形成暂态的滞水层。滞水层的存在对梯田边坡的稳定极为不利。首先,滞水层的形成导致了土体中孔隙水压力的增加,有效应力降低,从而导致土体抗剪强度的降低;其次,滞水层的形成使得原来非饱和土体充分吸水软化,也导致了土体抗剪强度的降低。降雨入渗的这一双重效应可能是降雨诱发梯田边坡失稳的主要原因之一。

(3) 在降雨作用下,水分向下渗流,但土体内部各点的含水率变化是不一样的,含水率变化较大的区域,其土体运动也是最剧烈的,说明了含水率变化对土体稳定有很大的影响。首先,含水率使土体有效应力降低,从而导致土体抗剪强度降低;其次,含水率增加,导致水分向坡外的渗透力增加,从而使梯田边坡稳定性降低。

(4) 随着降雨时间的持续孔隙水压力逐渐增大、 K_s 逐渐减小,在降雨5 h后坡顶、坡中以及坡脚孔隙水压力依次达到0.5, 1.5和3.5 kPa, K_s 急剧下降且 $K_s < 1$,梯田边坡失稳。同样在降雨5 h后梯田边坡土体内部含水率出现陡增的现象,由此说明含水率是影响梯田边坡孔隙水压力以及安全系数的重要因素,含水率与安全系数呈负相关。

参考文献:

- [1] Corrado C, Marco M, Tiziana A. Rainfall infiltration and groundwater flow in a terraced slope of Valtellina (Northern Italy): Field data and modeling[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 65(4): 1191-1202.
- [2] 刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1705-1709.
- [3] 许建聪, 尚岳全, 陈侃福, 等. 强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3246-3251.
- [4] 白先发, 高建恩, 贾立志, 等. 极端暴雨条件下黄土区典型梯田防蚀效果研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 10-15.
- [5] 刘汗, 雷廷武, 赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 1-6.
- [6] 朱伟, 陈学东, 钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1873-1879.
- [7] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198-204.
- [8] 周家文, 徐卫亚, 邓俊晔, 等. 降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1066-1073.
- [9] 孙冬梅, 朱岳明, 张明进. 降雨入渗过程的水-气-二相流模型研究[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 150-156.
- [10] 李亮, 刘兴旺, 赵炼恒, 等. 降雨入渗对路基稳定性影响因素分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(2): 19-23.
- [11] 张杰, 韩同春, 豆红强, 等. 基于农作物灌溉入渗的梯田边坡稳定性探讨[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014 (S1): 79-85.
- [12] 杨娟, 李光录, 魏舟, 等. 陕南土坎梯田田坎膨胀率与力学性质的试验研究[J]. 中国水土保持, 2015(5): 40-43, 77.
- [13] 王延贵, 匡尚富. 河岸崩塌类型与崩塌模式的研究[J]. 泥沙研究, 2014(1): 13-20.
- [14] 程琴娟, 蔡强国, 胡霞. 不同粒径黄绵土的溅蚀规律及表土结皮发育研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 392-396.
- [15] 陈伟, 骆亚生, 武彩萍. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(5): 100-104.
- [16] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. 水土保持学报, 1992(3): 1-5.
- [17] GEO-SLOPE International Ltd. GEO-SLOPE User's Manual[Z]. Calgary: Alberta, 2001.