

黄明奎, 马璐. 极端降雨对边坡土体强度的影响及其稳定性分析[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 6-9. [HUANG Mingkui and MA Lu. Stability and Soil Strength Analysis of Alope under Extreme Rainfall[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 6-9. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.002.]

极端降雨对边坡土体强度的影响及其稳定性分析^{*}

黄明奎, 马 璐

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘 要: 降雨是影响边坡稳定性的重要因素。在分析重庆市 1951-2015 年降雨特征的基础上, 以重庆市某高速公路高填方路基边坡为研究对象, 分析了极端降雨对边坡土体基质吸力、强度和边坡稳定性的影响。结果表明: 在降雨的初期, 极端降雨对边坡土体基质吸力的影响较大, 随着入渗时间的持续, 基质吸力呈现出降-升-降特征; 当土体入渗稳定时, 基质吸力趋于稳定; 降雨入渗对边坡土体内聚力有小幅增大作用, 对内摩擦角则具有减弱作用, 其平均值可降为初始内摩擦角的 0.68 倍; 降雨入渗降低了边坡的稳定系数, 但降雨入渗稳定后, 边坡的稳定系数趋于稳定。

关键词: 极端降雨; 基质吸力; 黏聚力; 内摩擦角; 稳定性分析; 重庆市

中图分类号: X43; X915.5; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)03-0006-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.002

滑坡是我国最为严重的地质灾害之一, 其中降雨等外界环境影响导致的滑坡灾害在地质灾害中占比较大^[1], 已受到国内外专家、学者及工程技术人员广泛关注, 但其形成机理及预测预警目前仍然是一大难题^[2-4]。因此, 深入研究分析降雨入渗条件下边坡稳定性对滑坡防治具有重要的意义。楼平等^[5]利用实验和数值模拟手段, 研究分析了斜坡的降雨入渗过程, 揭示了非饱和土斜坡降雨入渗特征及其与斜坡稳定性的关系, 分析了土体含水量对其强度的影响。ALI 等^[6]研究了不同透水边界对滑坡的影响, 结果表明: 边界条件对降雨诱发的滑坡影响显著。汤明高^[7]基于非饱和土力学理论和已有研究, 分析总结探讨了地质灾害的灾变机制, 认为降雨入渗引起斜坡土体基质吸力降低, 导致岩土体强度以及稳定性下降而引发滑坡灾害。李修磊等^[8]基于非饱和土强度理论, 建立了边坡土体达到临界破坏状态时的判别方程, 分析了降雨入渗引起的饱和度变化对土体内聚力和内摩擦角的影响, 并开展了其对边坡浅层破坏稳定性影响分析。黄月华等^[9]分析了径流补给作用对边坡稳定性的影响, 得出了考虑径流补给, 边坡安全系数显著降低的结论。

从以上分析可知, 降雨入渗条件下影响边坡稳定性的因素很多, 而目前则大多考虑雨型、降雨历时、边坡条件等外界因素的影响。然而随着全球气候的变暖, 极端气候事件发生的频率逐渐增加, 由此引发的大量的滑坡等地质灾害, 已受

到广泛关注^[10]。因此, 本文将以重庆市某高速公路高填方路基边坡为研究对象, 首先分析了重庆市 1951-2015 年降雨变化特征, 以此为基础, 研究分析极端降雨对边坡土体基质吸力和强度的影响, 进而分析边坡的稳定性, 结果可为极端降雨入渗条件下边坡稳定性分析与评价提供参考

1 边坡模型的建立及降雨特征分析

1.1 边坡模型的建立

为了分析极端降雨对边坡土体强度和稳定性的影响, 本文以重庆市大足区宝顶公路典型填方路基段为分析对象, 以重庆市 1951-2015 年极端降雨为背景开展研究。所选典型路段为高填方路基, 其基本参数如下: 路基路面宽度为 8.0 m, 路基高度为 17.0 m, 路堤坡度为, 压实度为 90%, 填土为粉质黏土^[11]。现场取 6 组试样进行室内常规物理力学实验。试验结果表明: 路基填土天然容重为 20.0 kN/m³, 天然含水量为 20.6%, 塑限为 16.4%, 液限为 30.9%, 孔隙比为 0.647, 压缩模量为 7.92 MPa, 泊松比为 0.35。经土体颗粒分析试验及计算, 该路基填土不均匀系数 $C_u = 2.85$, 颗粒均匀, 级配不良。

1.2 重庆市 1951-2015 年降雨特征分析

基于重庆市 1951-2015 年气候变化资料, 研

* 收稿日期: 2021-01-19 修回日期: 2021-05-04

基金项目: 重庆市教委基金项目(2019501129)

第一作者简介: 黄明奎(1975-), 男, 汉族, 四川隆昌人, 博士(后), 教授, 主要从事岩土力学等方面的教学与研究工作。

E-mail: hmksmile@163.com

究分析了重庆市的降雨变化特征。结果表明: 重庆市 1951 - 2015 年的年平均降水量为 1 091.6 mm, 年降水量最多为 1998 年的 1 508.0 mm, 最少为 1958 年的 739.7 mm。但从整体来看, 在此期间重庆市的降雨年际分配上差值不大; 降雨月份分配上则主要集中在每年 5 - 9 月份, 该期间的平均降雨量为 5.78 mm/d, 降雨集中, 且强度大、持续时间长。

图 1 是通过统计分析了重庆市 1951 - 2015 年近 66 a 的降雨气候资料后, 得到的重庆市日平均降水量曲线。从图中曲线可以看出降雨日数分配上有 3 个降雨集中时段, 即: 5 月 15 日 - 6 月 5 日、6 月 20 日 - 7 月 10 日、9 月 10 - 30 日等 3 个时段。这三个时段降雨量均在 100 mm 以上。从降雨时刻分配上, 多夜雨是重庆降雨的重要特征。据近 66 a 来的降雨统计资料, 1 d 24 h 时段中, 下午 15:00 - 20:00 时降水概率最少, 约为 5% ~ 17%, 凌晨 3:00 - 8:00 时降雨概率为 60% ~ 70%, 两者相差近 4 倍。

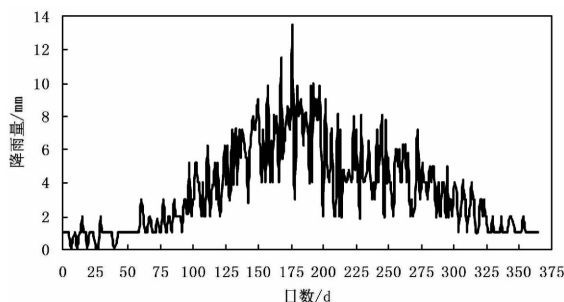


图1 全年日平均降水量

1.3 边坡土体渗透系数函数和土水特征曲线

土体渗透系数和土水特征曲线是研究分析降雨入渗对土体强度和工程稳定性影响的基础。为了分析极端降雨对边坡土体强度的影响和稳定性, 首先必须确定土体渗透系数及土水特征曲线等性质。经现场土体渗透实验研究分析, 结果表明: 本文所研究填方路基土体的饱和渗透系数为 1.24 cm/d, 边坡土体的渗透系数函数曲线如图 2 所示。

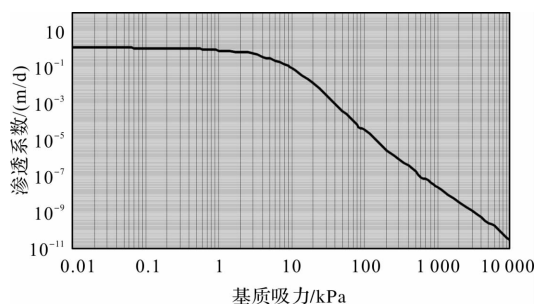


图2 渗透函数曲线

由于在降雨入渗过程中, 边坡土体一般处于非饱和状态, 在研究降雨对边坡岩土体强度参数和稳定性中, 采用目前非饱和土中广泛使用的 FREDLUND 公式^[11]来估算土水特征曲线, 结果如图 3 所示, 其中饱和体积含水量为 35%。

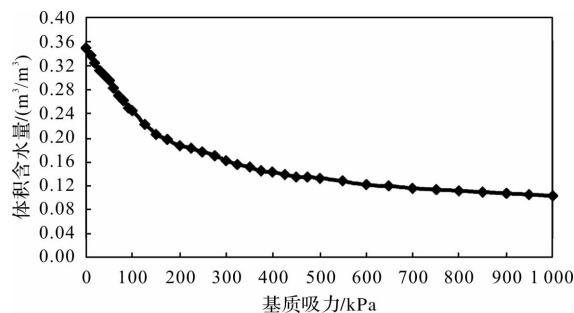


图3 边坡填土土水特征函数曲线

2 极端降雨对边坡土体强度的影响

2.1 极端降雨对边坡湿度场的影响分析

水是引起土体强度变化和工程稳定性的重要因素, 降雨入渗过程必然引起边坡土体湿度场的变化, 进而影响边坡土体强度和工程稳定性。为了分析极端降雨对边坡湿度场的影响, 在研究中采用重庆市极端降雨强度 360.9 mm/d 为降雨入渗作用条件, 选取工程边坡坡顶、坡身、坡脚三个典型断面表层土体含水量的变化作为降雨入渗过程中湿度场变化的表征。分析结果表明, 在整个降雨渗流作用过程中, 坡体表面瞬间达到饱和, 雨水垂直坡面向内部缓慢入渗; 随着降雨量及入渗时间的增加, 降雨逐渐朝土体深部入渗, 坡体含水量逐渐增大, 但总体含水量呈现出由外及内逐渐减小的特征。三个典型断面表层在渗流作用下单位体积含水量变化特征如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 在降雨渗流作用下, 前 3 d 天, 边坡坡身与坡顶的体积含水量呈直线下降, 坡脚含水量则逐渐增大并趋于饱和。主要由于在强降雨作用下, 坡顶和坡身的降雨迅速转为地表径流而流向坡脚, 少量雨水入渗土体, 刚开始由于边坡内土体饱和度较低引起雨水渗透较快, 进而导致坡顶和坡身含水量迅速降低, 坡脚则由于雨水积聚大于入渗引起含水量逐渐增大。随着时间的推移, 边坡内雨水渗透速率降低, 坡顶和坡身含水量减少速率逐渐变缓。当地表径流和入渗速率趋于稳定时, 坡顶和坡身体积含水量最终趋于稳定, 其中, 坡顶体积含水量最终趋于 0.21 m³/m³ 的稳定值, 坡身则趋于 0.26 m³/m³ 的稳定值; 坡脚则由于地表径流和坡脚下土体含水量的变化而导致入渗关系的变化, 引起其体积含水量呈现出先逐渐减小而后增大并趋于饱和的特征。

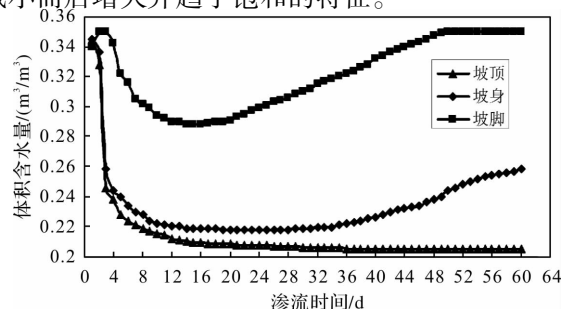


图4 渗流作用下边坡典型断面处表层单位体积含水量变化

2.2 极端降雨条件下边坡基质吸力的影响规律

基质吸力对非饱和土强度特性有重要作用,也是引起边坡稳定性丧失的重要因素^[12]。为了研究分析极端降雨对路基边坡土体强度和稳定性的影响,必然要考虑极端降雨对非饱和土中基质吸力的影响。通过分析,在重庆市极端降雨强度作用下,可得降雨渗流过程中路基边坡坡顶、坡身、坡脚表层处基质吸力的变化规律,其结果如图5所示。从图5中可以看出,降雨当天,坡顶、坡身和坡脚基质吸力均大幅度减小;在降雨第2~3 d,由于土体内部渗流作用,坡顶和坡身处的基质吸力开始增加,而坡脚由于积水饱和,基质吸力为零;第4 d开始,坡顶、坡身和坡脚处基质吸力均开始增大,并于第7 d达到稳定状态。此后,坡顶基质吸力基本不变,表明该处渗流稳定,水分场基本不变;而坡身和坡脚则随着渗流作用的推移,基质吸力均呈现出先增大后逐渐降低的变化关系,并大约在60 d左右趋于稳定,且坡脚则由于其下土体入渗降低及以上土体水的入渗进而逐渐引起地下水位线上升,使该处导致土体饱和,基质吸力降低至零。

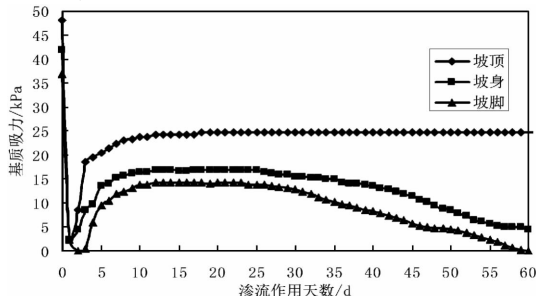


图5 极端降雨后路基边坡表层各处基质吸力变化

从以上分析可知,在极端降雨作用下,所研究断面岩土边坡历时大约在55 d基本达到渗流稳定,非饱和区域基质吸力趋于稳定。

2.3 极端降雨对边坡土体强度的影响

2.3.1 非饱和土力学参数及强度理论

边坡土体在地下水位以上一般存在负的孔隙水压力,即基质吸力,其对边坡土体的抗剪强度和边坡稳定产生重要影响。长期以来,国内外广泛采用FREDLUND等人^[13]提出的以正应力与吸力为变量的抗剪强度公式作为非饱和土的强度分析公式,即非饱和土可采用两个独立应力变量进行强度计算表达,即:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中: c' 为有效黏聚力; u_a 为非饱和土的孔隙气压力; u_w 为非饱和土的孔隙水压力; φ' 为有效内摩擦角; φ^b 为非饱和摩擦角,反应基质吸力 $(u_a - u_w)$ 变化对抗剪强度的影响。

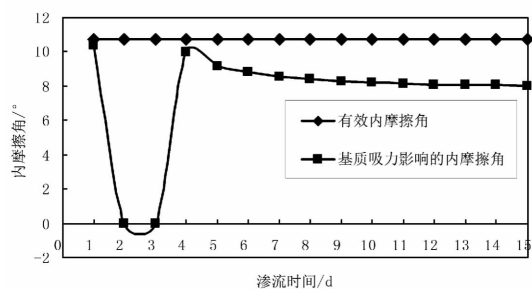
引入Mohr-Coulomb强度准则,则 c' 为非饱和土破坏包线与剪应力 τ 轴的截距,而 φ' 、 φ^b 分别为非饱和土破坏包线与应力变量 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 轴之间的夹角,两个均可视为常数。

在边坡工程稳定性分析中,考虑土体中孔隙气压为大气压力,则在降雨渗流过程中 $(\sigma - u_a)$ 为零,土体剪切强度将随基质吸力而变化,于是边坡土体抗剪强度由式(1)可化简为:

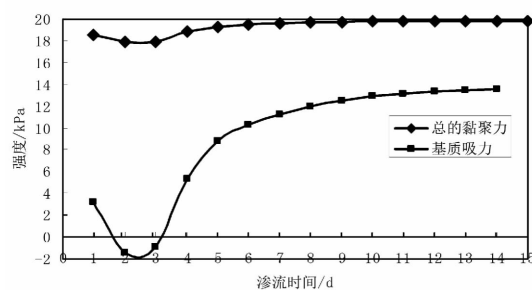
$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

2.3.2 极端降雨对边坡土体强度参数的影响

为了分析极端降雨在渗流过程中对边坡土体抗剪强度的影响,考虑在渗流过程中孔隙气压力为大气压力,即 $u_a = 0$ 。因此,在降雨入渗过程中,边坡土体的基质吸力 $(u_a - u_w) = -u_w$ 。由此可见,边坡土体的有效黏聚力 c' 为基质吸力 $(u_a - u_w)$ 为零时的黏聚力。基于前面研究分析结果,边坡土体的有效黏聚力 $c' = 17.9$ kPa,有效内摩擦角为 $\varphi' = 10.7^\circ$ 。与此同时,为有效分析极端降雨对边坡岩土体抗剪强度的影响,在降雨入渗过程中未考虑法向应力的影响,仅考虑边坡土体基质吸力对土体强度指标的影响。经过研究分析获得了在极端降雨入渗过程中边坡岩土体潜在危险滑移面上强度参数的变化规律,其结果如图6所示。从图6中可以看出,随着渗流时间的推移,边坡土体潜在滑移面上基质吸力逐渐增大,引起岩土体内摩擦角逐渐减小,即由渗流第1 d基质吸力3.20 kPa对应的内摩擦角为 $\varphi^b = 10.35^\circ$ 降低到渗流15 d对应的 $\varphi^b = 8.02^\circ$,且 φ^b 始终小于 φ' ,而内聚力则随渗流的推移有小幅增大,但变化幅度不大。从整个渗流过程统计分析结果表明:边坡土体由于降雨渗流导致基质吸力的变化,进而引起内摩擦角改变,其统计平均值约为初始内摩擦角的0.68倍,即 $\varphi^b = 0.68\varphi'$ 。



(a) 内摩擦角和 φ' 和 φ^b



(b) 基质吸力和总黏聚力

图6 降雨入渗作用对边坡土体抗剪强度指标的影响

3 极端降雨对边坡稳定性的影响分析

边坡的稳定性分析是评判一个因素对边坡工程影响的一种重要手段。因此,为了分析极端降雨对边坡稳定性的影响,本文以边坡最危险滑动面稳定系数作为极端降雨对边坡稳定性影响的评判因素。在研究分析中,采用重庆市极端降雨强度作为降雨作用条件,研究分析了降雨入渗过程对工程边坡潜

在危险滑动面的稳定系数, 其结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 在降雨入渗初期, 边坡潜在危险滑动面的稳定系数随入渗时间的推移有一定程度的减小, 随后, 随着入渗时间的持续进行, 稳定系数有小幅增长, 紧接着随降雨入渗时间的不断增加, 稳定系数逐渐降低, 即呈现出降-升-降特征。当达到降雨入渗稳定(大约 55 d 左右)时, 危险滑动面的稳定系数趋于稳定, 即本文的 1.06 左右, 稳定系数不再变化, 即在极端降雨入渗过程中, 边坡危险滑动面的稳定系数从初始的 1.158 下降到最终的 1.06, 降幅为 8.5%。因此, 降雨入渗作用将降低边坡的稳定性, 在降雨入渗过程中极有可能诱发工程边坡土体失稳。但在降雨至降雨入渗稳定期间, 如果边坡土体稳定, 则后续降雨入渗作用将不会引起工程边坡失稳。

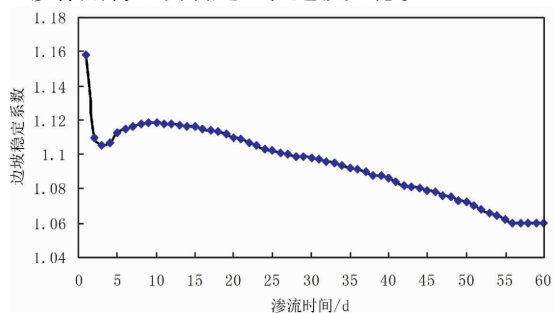


图 7 降雨入渗作用对工程边坡稳定系数的影响

4 结论

本文利用重庆市 1951—2015 年近 66 a 的降雨气候资料, 研究分析了极端降雨对大足区宝顶公路典型高填方路基边坡土体强度及其稳定性的影响, 得到如下结论。

(1) 在降雨的初期, 极端降雨对边坡土体基质吸力的影响较大, 随着入渗时间的持续, 基质吸力呈现出降-升-降特征。当土体入渗稳定时, 基质吸力趋于稳定; 当土体达到饱和状态时, 基质吸力下降为零。

(2) 降雨入渗对工程边坡土体黏聚力有一定程

度的增大作用, 但变化幅度不大; 而对土体内摩擦角具有减弱作用。在整个渗流入渗过程中, 降雨入渗使边坡土体的内摩擦角平均值下降, 其值约为初始内摩擦角的 0.68 倍。

(3) 降雨入渗过程可降低边坡的稳定系数, 但当降雨入渗稳定后, 边坡的稳定系数趋于稳定。因此, 降雨入渗至降雨入渗稳定期是边坡发生失稳破坏的危险期, 若在此期间边坡土体稳定, 则整个降雨入渗过程(假设雨水不发生积聚)将处于稳定状态。

参考文献:

- [1] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 刘子振, 言志信, 彭宁波, 等. 持续小强度降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的动态影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 19-23.
- [3] 姚海林, 郑少河, 李文斌, 等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1034-1039.
- [4] 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.
- [5] 楼平, 程鹏, 金国亮, 等. 非饱和土边坡降雨入渗特征及其对斜坡稳定性的影响[J]. 人民珠江, 2019, 40(2): 45-50, 69.
- [6] ALI A, HUANG J, LYAMIN A V, et al. Boundary effects of rainfall induced landslides[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 341-351.
- [7] 汤明高. 基于非饱和土力学的地质灾害灾变机制探讨[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 1-4.
- [8] 李修磊, 陈洪凯, 李金凤, 等. 基于非饱和土强度理论的土质边坡浅层破坏稳定性分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(2): 61-70.
- [9] 黄月华, 周成, 李洪梅. 降雨中有植被覆盖土坡大孔隙结构对边坡稳定性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 132-137.
- [10] 黄明奎, 马璐. 试论异常气候事件对山区工程建设的影响[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 17-21.
- [11] 马璐. 重庆地区极端气候对非饱和土物理力学性能的影响规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [12] 崔激, 杨建, 刘丽. 连续降雨作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2007(3): 55-58.
- [13] FREDLUND D G, RAHARD J O. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1993.

Stability and Soil Strength Analysis of Alope under Extreme Rainfall

HUANG Mingkui and MA Lu

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Rainfall is an important factor affecting slope stability. Based on the analysis of the rainfall characteristics of Chongqing from 1951 to 2015, and taking the high fill subgrade slope of a highway in Chongqing as the research object, the influence of extreme rainfall on matrix suction, soil strength and stability are studied. The results indicate that the influence of extreme rainfall on soil matrix suction of slope is great at the beginning of rainfall, and with the continues of infiltration time, the matric suction of soil exhibits the characteristics of down, up and down. When the rainwater infiltration is stable, the matrix suction is gradually stable. The cohesion of soil showed a slightly increasing and the internal friction angle can be weakened because of rainfall infiltration. The average value of internal friction angle can be reduced to 0.68 times of the initial internal friction angle. Rainfall infiltration can reduce stability coefficient of slope. When the rainfall infiltration tends to be stable, the stability coefficient of slope tends to be stable.

Key words: extreme rainfall; matrix suction; cohesive strength; internal friction angle; stability analysis; Chongqing municipality