

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.014



强降雨条件下含软弱夹层粘性土坡 稳定性分析

何忠明^{a,b}, 王保林^b, 胡庆国^b

(长沙理工大学 a. 特殊环境道路工程湖南省重点实验室; b. 交通运输工程学院, 长沙 410114)

摘要:为了分析含软弱夹层粘性土坡在强降雨条件下的稳定性,结合某失稳边坡工程现场实际调研资料,基于饱和-非饱和渗流与非饱和抗剪强度理论,提出了一种新的含软弱夹层粘性土坡稳定性分析方法,并利用该方法分析了强降雨条件下边坡的渗流特性及安全系数变化规律。分析结果表明:降雨入渗先在边坡软弱夹层内形成暂态饱和区,且当坡顶入渗的雨水未渗流至软弱夹层时,夹层内暂态饱和区中的雨水会沿夹层上表面向着坡顶方向渗流;降雨入渗过程中,边坡基质吸力与铅直有效应力之间存在严格的正相关变化关系;随着降雨历时的增加,塑性区首先在软弱夹层内部贯通,然后向坡顶扩展,边坡安全系数逐渐降低;降雨停止一段时间后,由于坡顶入渗雨水的补给,软弱夹层内局部将仍存在暂态饱和区,此时,塑性区面积会由坡顶向软弱夹层内部减小,再由夹层内部至坡面逐渐缩减,但边坡安全系数并未明显上升;根据数值计算结果可将粘性土坡失稳过程分为夹层软化、夹层挤压、拉伸裂缝、坡顶沉降和断裂滑移等 5 个阶段。因此,为了降低强降雨对边坡稳定性的影响,在含软弱夹层粘性土坡支护设计时应着重考虑边坡排水系统的合理布设。

关键词:降雨入渗;软弱夹层;稳定性;塑性区;安全系数

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)05-0109-08

Stability analysis of cohesive soil slope with weak interlayer under heavy rainfall

He Zhongming^{a,b}, Wang Baolin^b, Hu Qingguo^b

(a. Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province; b. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: For the stability analysis of cohesive soil slope with weak interlayer under condition of heavy rainfall, a new method is proposed based on the slope investigation data and the theory of unsaturated seepage and shear strength to analysis the seepage characteristics and variation of safety coefficient for soil slopes containing weak interlayers. Analysis results indicate: due to rainfall infiltration, the transient saturated zone is formed in the weak interlayer of slope; Under rainfall infiltration process, there is positive correlation between the suction and the vertical effective stress; With increase of rainfall duration, the

收稿日期:2017-12-28

基金项目:国家自然科学基金(51508042,51678073);湖南省重点研发计划(2016SK2023)

作者简介:何忠明(1980-),男,教授,博士(后),主要从事路基工程研究,E-mail: hezhongming45@126.com.

Received:2017-12-28

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51508042,51678073); Research Foundation of Hunan Province (No. 2016SK2023)

Author brief: He Zhongming (1980-), professor, PhD, main research interest: subgrade engineering, E-mail: hezhongming45@126.com.

plastic zone extended from the inside interlayer to the top of slope, as a result of which the slope safety coefficient decreases; After rain, weak interlayer will still exist in local transient saturated zone, causing less significant decrease of the slope safety coefficient. According to the numerical results, the instability process of cohesive soil slopes can be divided into 5 stages: interlayer softening, interlayer extrusion, tensile crack, slope crest settlement and fault slip. Consequently, to minimize the influence of heavy rainfall on the slope stability, reasonable drainage system should be emphasized in the design of cohesive soil slope with weak interlayer.

Keywords: rainfall infiltration; weak interlayer; stability; plastic zone; safety factor

中国公路、铁路和水利等交通事业的发展方兴未艾,各地区的地质及气候条件差异性大,因此,在公路交通建设中经常会遇到边坡中含有软弱夹层的问题。一般情况下,软弱夹层具有高渗透性,遇水极易软化,软化后其抗滑能力逐步降低,从而影响整个边坡的稳定性^[1]。已有学者对含软弱夹层的边坡稳定性进行了相关研究,如李永亮等^[2]基于有限元强度折减法,建立了软弱夹层影响下的土坡模型,分析了坡高、坡脚、夹层埋深、夹层倾角和夹层厚度这 5 种因素对边坡稳定性的影响;TAKASHI 等^[3]运用刚塑性有限元法对含软弱夹层边坡的安全系数进行了研究;SANTHA 等^[4]重点分析了软弱结构层的粘聚力和内摩擦角等对边坡稳定性的影响;王睿等^[5]通过对含水平软弱夹层的黏性土坡进行离心模型试验,分析了水平软弱夹层的存在对边坡整体稳定性的影响。从上述研究中不难看出,当土质边坡内含水平软弱夹层时,边坡会发生不连续的断裂破坏,这种破坏将直接导致边坡失稳,从而对交通安全造成严重威胁。此外,降雨也是诱发边坡失稳的重要因素,但目前尚较少有学者考虑降雨对软弱夹层的影响,并深入系统分析其稳定性。

鉴于此,笔者所在研究团队在总结已有研究成果的基础上,展开了对降雨入渗条件下含软弱夹层土坡的稳定性研究,如:马勇^[6]对降雨入渗引起的边坡孔隙水压力、体积含水率以及安全系数等变化规律进行了分析,指明了降雨入渗在含软弱夹层粘性土坡内的渗流特性,但未考虑边坡在降雨入渗条件下的稳定性变化规律。为更加深入研究该类边坡的失稳机理,本文结合湖南省长沙地区京珠高速公路某含软弱夹层失稳边坡实例,提出一种由面到点,再到面的软弱夹层边坡稳定性分析方法,对强降雨条件下软弱夹层边坡的稳定性进行深入研究。

1 含软弱夹层边坡稳定性分析方法

含软弱夹层边坡稳定性分析步骤:首先,结合湖

南省长沙市某高速公路含风化夹层失稳边坡现场实际资料,建立相应数值计算模型,根据长沙地区的气候条件设定相应降雨工况。然后,采用 GeoStudio 软件宏观分析强降雨引起的边坡体积含水率以及渗流速度的变化规律来确定雨水的渗流特性;再通过布设监测点监测基质吸力的变化规律来判定雨水入渗至监测点的具体时刻,从而对边坡基质吸力与铅直有效应力的关系进行微观分析。最后,采用 FLAC3D 软件对边坡塑性区变化规律进行宏观研究,通过分析其破坏路径和安全系数来对强降雨条件下含软弱夹层粘性土坡的稳定性进行整体评价(见图 1)。

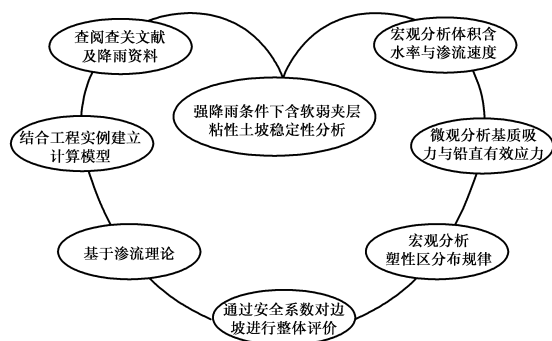


图 1 计算方法流程图

Fig. 1 Flow chart of calculation method

2 研究的理论基础

2.1 饱和-非饱和渗流理论

自然条件下,含软弱夹层的粘性土坡是一种饱和-非饱和的稳定状态,在经历强降雨后,雨水入渗使边坡饱和-非饱和区进行了重分布,其渗流特性满足达西定律

$$v_i = -k_i(\theta)k_j \frac{\partial H}{\partial x_j} \quad (1)$$

式中: v_i 为入渗雨水的达西流速; k_j 为饱和渗透张量; H 为总水头。

强降雨入渗条件下,入渗雨水在饱和区和非饱

和区的渗流运动有所不同,主要体现在渗透系数的不一致。一般认为,在饱和区时,渗透系数为一定值,在非饱和区时,渗透系数为土壤饱和度与基质吸力的一种函数关系,但都满足质量守恒原理,其饱和-非饱和渗流控制微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij} k_y(y) \frac{\partial}{\partial x_i} + k_{i3} k_r(h) \right] + S = [C(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

式中: h 为压力水头; $k_i(h)$ 为相对渗透系数; k_{ij} 为渗透张量; S_s 为单位贮水系数; $C(h)$ 为容水度; S 为源汇项。

含软弱夹层粘性土坡的渗流边界条件参考文献[7],基质吸力与土壤饱和度的函数曲线采用 Van Genuchten 模型来拟合[8],具体方程为

$$S_e = [1 + (\alpha P_c)^n]^{-m} \quad (3)$$

式中: P_c 为基质吸力; m 、 n 、 α 为拟合参数。

根据大量经验验算,参数 m 和 n 之间存在 $n = (1 - m)^{-1}$ 的关系,代入式(3)中可得

$$P_c = P_o [S_e^{-1/m} - 1]^{1/m} \quad (4)$$

式中: $P_o = 1/\alpha$; S_e 为有效饱和度。

2.2 非饱和抗剪强度理论

目前有两类基于 Mohr-Coulomb 准则的非饱和抗剪强度理论公式被岩土工程界所认可[9],分别是 Bishop 公式和 Fredlund 的双应力变量公式。本文数值分析时采用 Fredlund 的双应力变量公式,其非饱和土的抗剪强度通过净法向应力和基质吸力来表达[10]。

$$\tau_t = C' + (\sigma - P_g) \tan \varphi' + (P_g - P_w) \tan \varphi_b \quad (5)$$

式中: τ_t 为抗剪强度; C' 为有效黏聚力; φ' 为有效摩擦角; σ 为正应力; P_g 为孔隙气压力; P_w 为孔隙压力; φ_b 为由基质吸力引起抗剪强度增量的摩擦角。

3 边坡数值计算

3.1 工程概况

京珠高速(长沙—株洲段)某路基左侧失稳粘性土质边坡,总高度达 10 m 左右,沿线长度达 1.2 km。受地形及路线限制,边坡总体按 1:1 的坡比进行开挖,沿线区域地质构造复杂,受亚热带季风气候的影响,该地区常年雨水充沛,强降雨时有发生,地下水系较为发育。经现场钻芯取样发现,该边坡出露部分为长沙地区典型的红粘土结构层,下方为弱风化花岗岩加页岩,由于地质构造及长时间降雨因素的影响,该边坡内部分粘性土层较为松散,裂隙十

分发育,与一些破碎的砂砾及植物残骸夹杂在一起形成了厚度近 1 m 的粉质粘土层,即:强风化软弱夹层。由于该强风化软弱夹层渗透系数较高且表面裸露,每当雨季来临之时,雨水都能较快地入渗至软弱夹层,从而泥化夹层,使夹层的强度迅速降低,导致边坡坡顶处发生不均匀沉降变形,坡面多处出现拉伸裂缝,最终发育形成明显的滑移趋势(见图 2)。为深入了解该类型边坡失稳机理,拟以该边坡为研究对象,对强降雨条件下含软弱夹层粘性土坡的稳定性进行深入研究。

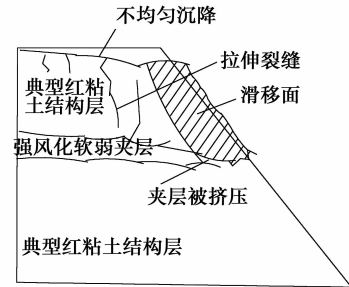


图 2 边坡滑移破坏形式

Fig. 2 Simplified engineering example

3.2 结构层基本假定

要完全真实地模拟含软弱夹层边坡的实际情况,比较困难。因此,在保证分析精度与可靠性的基础上,根据研究目的对边坡结构层进行了适当的简化[11-12],先作出如下假定:

- 1) 降雨工况下含软弱夹层粘性土坡的体系为小变形且只考虑土体自重的应力场。
- 2) 视边坡粘性土层和软弱夹层的各物理参数为常数。
- 3) 粘性土层与软弱夹层之间的接触条件为完全连续接触。
- 4) 粘性土层和软弱夹层均视为各向同性材料。

3.3 计算参数确定

按照《公路土工试验规程》(JTJ E40—2007)取该边坡粘性土及强风化软弱夹层试样进行变水头渗透试验,测得粘性土的饱和渗透系数为 1.02×10^{-7} cm/s,强风化软弱夹层的饱和渗透系数为 1.25×10^{-5} cm/s。通过室内大型直剪试验测得粘性土和强风化软弱夹层的黏聚力分别为:25、16 kPa,内摩擦角分别为:22°、12°,重度分别为:20、15 kN/m³。此外,参考相关文献[13-15],选取本次数值计算的粘性土层和强风化软弱夹层的其他岩土力学参数如表 1 所示。

表 1 边坡各结构层岩土力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of different structural layers of slope

岩性	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	弹性模量 $E/$ $\text{MPa}^{[13-15]}$	泊松比 $\mu^{[13-15]}$	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	厚度 h/m
粘性土层	20	25	22	20	0.30	1.02×10^{-7}	
软弱夹层	15	16	12	5	0.41	1.25×10^{-5}	1

3.4 降雨方案确定

降雨入渗过程可由降雨强度 q 、土壤允许入渗的容量 f_p 、土壤饱和时的水力传导系数 k_w 这 3 个因子来进行描述^[11], 具体为:

1) $q < k_w$ 时, 降雨将全部入渗, 不会产生地表径流。

2) $k_w \leq q < f_p$ 时, 降雨全部入渗, 且 f_p 随着入渗深度的增加而变小。

3) $q \geq f_p$ 时, 由于降雨强度大于土壤的入渗容量, 故降雨在部分入渗的情况下形成地表径流。

本文主要分析强降雨条件下含软弱夹层边坡的失稳机理, 故暂不考虑第 3 种情况。结合历年来湖南省长沙地区雨季的降雨资料及参考相关文献^[16-18], 选取本次数值模拟的降雨强度为 $6.94 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, 历时 72 h, 降雨总量为 179.88 mm, 随后降雨停止 72 h, 总过程历时 144 h。室内试验测得长沙地区粘性土在标准压实度下的饱和体积含水率和残余体积含水率分别为 0.16、0.10, 软弱夹层的饱和体积含水率和残余体积含水率分别为 0.23、0.15, 然后, 利用 Van Genuchten 模型对渗透系数、体积含水率随基质吸力的变化规律进行拟合, 拟合曲线如图 3、图 4 所示。

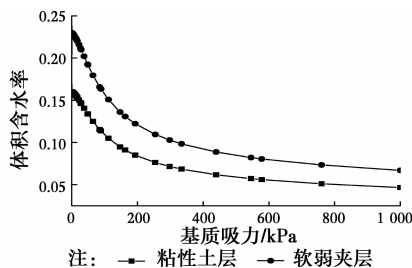


图 3 体积含水率随基质吸力变化规律

Fig. 3 Variation of volumetric moisture content with matric suction

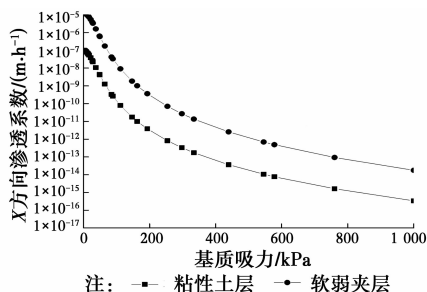


图 4 X 方向渗透系数随基质吸力变化关系

Fig. 4 Relationship between permeability coefficient of X direction and matric suction

3.5 边坡计算模型建立

在参考相关文献^[19-20]的基础上, 结合 3.1 节所述的依托工程实际情况, 采用 GeoStudio 软件建立如图 5 所示的数值计算模型, 其几何尺寸为: 坡高 10 m, 坡宽 10 m, 坡率为 1:1, 基层厚度为 6 m, 宽度 30 m, 软弱夹层厚度为 1 m。在同时考虑计算精度与计算效率的基础上, 将计算模型划分为 1 941 个节点和 1 840 个单元, 并在坡面以下 1 m 处布设监测点 a 、 b 、 c , 坡顶中心处沿节点布设截面 I-I。边界条件为: 坡面和坡顶为降雨入渗边界, 坡脚右侧是公路路面段, 设置为不透水边界, 模型坡底亦设置为不透水边界。

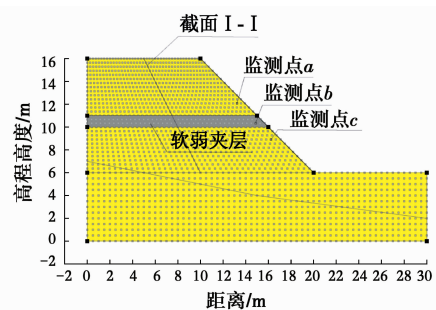


图 5 计算模型

Fig. 5 Computational model

4 计算结果分析

4.1 降雨入渗条件下体积含水率分布规律

土壤体积含水率的增加是诱导边坡失稳的重要因素之一, 尤其是在含软弱夹层的粘性土坡中, 由于软弱夹层的高渗透性, 雨水可以很快入渗至软弱夹层内部, 加快了边坡土壤体积含水率的增加速率, 使其抗剪、抗滑能力迅速降低, 最终导致边坡失稳。为研究强降雨条件下含软弱夹层粘性土坡的体积含水率分布规律, 取沿截面 I-I 中所有节点进行体积含水率的监测, 其分布规律如图 6、图 7 所示。从图中可以看出: 降雨历时 24 h 后, 坡顶含水率为 0.16, 已经到达饱和状态; 在软弱夹层上方的粘性土层中, 体积含水率随降雨历时的增加而增加, 当降雨分别历时 24、48、72 h 时, 土壤体积含水率在高程为 14、13、12 m 处仍为天然含水率, 表明雨水即将但还未渗流至该处, 由此可得雨水平均入渗速度为 41.7 mm/h;

在软弱夹层中,体积含水率明显高于各粘性土层,其最大值在降雨为 24、48、72 h 时,就已经达到 0.20、0.21、0.215,接近软弱夹层饱和含水率 0.23,因此,视软弱夹层在降雨达到 24 h 就已经达到饱和状态;在软弱夹层下方的粘性土层中,高程为 8~10 m 之间的土壤含水率随降雨历时的增加而增加,6~8 m 之间的土壤体积含水率保持不变。降雨停止后,在 13~16 m 之间的体积含水率逐渐减小,11~13 m 之间的体积含水率却慢慢增加,10~11 m 之间软弱夹层的体积含水率基本保持不变,6~10 m 粘性土层的体积含水率逐步增大。

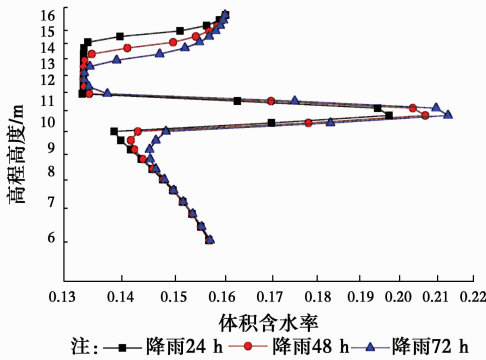


图 6 降雨过程中体积含水率分布图

Fig. 6 Distribution of volumetric water content in rainfall

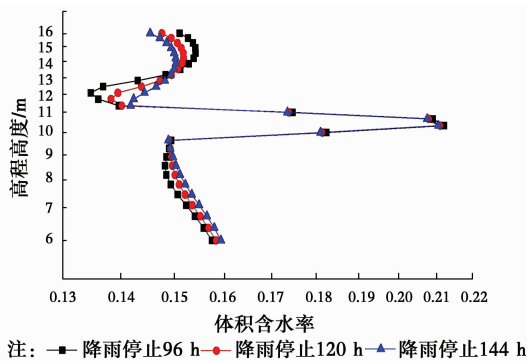


图 7 降雨停止后体积含水率分布图

Fig. 7 Distribution of volumetric water content after rainfall stop

综上所述,在强降雨条件下,雨水先由坡面向软弱夹层内部入渗;当降雨历时 72 h 时,由坡顶入渗的雨水渗流至 12 m 处,并未流至软弱夹层,所以,入渗至软弱夹层内的雨水全部来源于坡面入渗;此外,由于软弱夹层的渗透系数明显高于粘性土层,因此,入渗至软弱夹层内部的雨水会在其内部聚集,形成暂态饱和区;降雨停止后,坡顶饱和区的雨水会继续向下入渗至软弱夹层,对夹层内暂态饱和区进行补给,软弱夹层内部暂态饱和区内的雨水也将缓慢向下入渗,当降雨停止 72 h 后,暂态饱和区仍然局部

存在软弱夹层内部,但是,随着降雨停止时间的延长,其暂态饱和区会慢慢消散。

4.2 含软弱夹层边坡降雨入渗渗流速度分布规律

为分析强降雨条件下,雨水在边坡粘性土层和软弱夹层内的渗流速度分布规律,故给出降雨 72 h 和降雨停止 72 h 的渗流速度矢量图,分别如图 8、图 9 所示。从图中可以看出:降雨过程中,雨水在坡顶处表现为均匀入渗,在坡面处表现为软弱夹层内的渗流速度明显快于粘性土层;降雨达到 72 h 后,坡顶入渗的雨水并未到达软弱夹层区域,相反,由边坡面渗流进入软弱夹层内的少量雨水,会沿夹层上表面向着坡顶方向渗流;当降雨停止 72 h 后,坡顶入渗的雨水已经蔓延至软弱夹层内部,雨水向上渗流的现象消失。

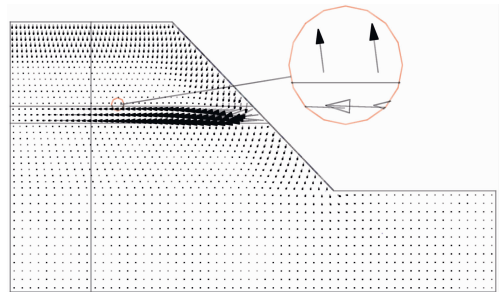


图 8 降雨 72 h 渗流速度矢量图

Fig. 8 Rainfall 72 h seepage velocity vector diagram

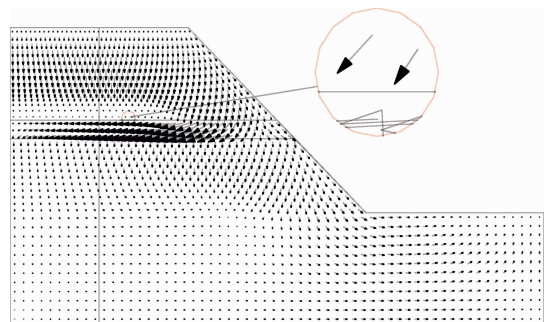


图 9 降雨停止 72 h 渗流速度矢量图

Fig. 9 Rainfall stopped 72 h seepage velocity vector diagram

分析其原因:随着降雨历时的增加,雨水从边坡面软弱夹层处可以很快入渗至夹层内部,形成 4.1 节中所述的暂态饱和区,当降雨达到 72 h 后,坡顶入渗的雨水并未流至软弱夹层区域,所以,在软弱夹层上面的部分粘性土层仍然具有较大的基质吸力,导致软弱夹层内早已形成的暂态饱和区中的雨水沿夹层上表面向着坡顶方向渗流;降雨停止后,由坡顶均匀入渗的雨水会由于重力及吸力作用继续向下蔓延,当降雨停止 72 h 后,坡顶入渗的雨水已经蔓延至软弱夹层,故软弱夹层上面粘性土层的吸力不足以支持雨水向上渗流。

4.3 基质吸力与铅直有效应力关系

为了研究降雨入渗至边坡某处时引起的基质吸力与铅直有效应力之间的关系,分别对监测点的基质吸力及铅直有效应力进行监测,得到的监测点基质吸力和铅直有效应力变化规律如图 10、图 11 所示。从图中可以看出:降雨过程中,随降雨历时的增加边坡监测点基质吸力逐渐减小,铅直有效应力也逐渐减小,降雨停止后,随着入渗雨水的消散,监测点基质吸力逐渐恢复,铅直有效应力也逐渐增大,此外,由于基质吸力和土壤含水率呈现出密切的负相关性,即土壤含水率的增大会引起基质吸力的减小,根据这一关系可以推测当监测点基质吸力明显减小时,降雨会入渗至该监测点。在图 10 中,监测点 a、b、c 的基质吸力分别在降雨历时 2、1、3 h 后开始明显减小,据此认为,在降雨历时 1、2、3 h 时,雨水分别入渗至监测点 b、a、c;再分析图 11 不难看出,当降雨入渗至监测点时,监测点的铅直有效应力开始明显减小。分析上述现象可以认为:降雨入渗过程中,边坡基质吸力与铅直有效应力之间存在着严格的正相关变化关系。

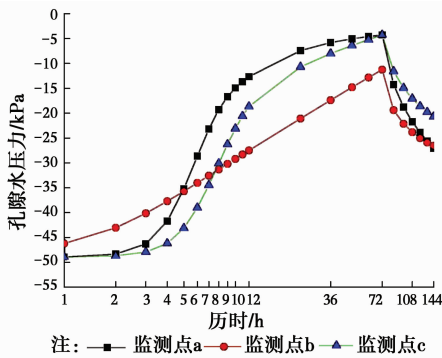


图 10 监测点基质吸力变化规律

Fig. 10 Variation of matrix suction in monitoring sites

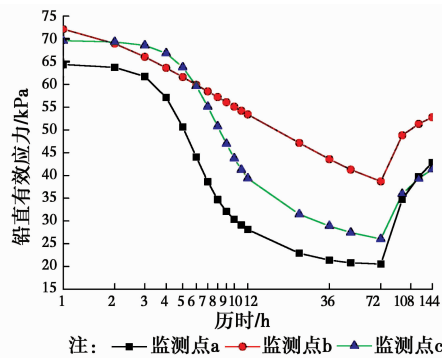


图 11 监测点铅直有效应力变化规律

Fig. 11 Vertical effective stress variation law in monitoring sites

4.4 边坡降雨入渗引起的塑性区分布规律

含软弱夹层粘性土坡的失稳可以认为是塑性区

逐渐扩展至贯通,致使其结构层抗拉、抗剪能力降低,从而进入完全塑流状态的过程。为研究本次数值计算模型在强降雨条件下的塑性区分布规律,在 FLAC3D 软件中建立三维等效模型,并通过自编转换程序将对应时刻的孔隙水压力按网格节点导入到三维等效模型中,具体计算结果如图 12 所示,但由于篇幅限制,本文只给出降雨历时 12、36、72 h 及降雨停止 36、72 h 时的塑性区计算结果。从图 12 可知,降雨工况下,塑性区首先发生在软弱夹层内,在降雨历时 12 h 时,塑性区已经扩展至软弱夹层内部,继而随着降雨的持续,塑性区逐渐向坡顶发展,当降雨达到 72 h 时,其塑性区面积最大;降雨停止后,塑性区面积逐渐减小,并由坡内向坡表软弱夹层出露处缩减。这是因为:软弱夹层较粘性土层而言,其渗透系数较高,降雨初期,雨水可以较快的渗流进入软弱夹层内部,致使其抗拉、抗剪能力迅速降低,因此,塑性区先在软弱夹层内发生,当降雨历时 72 h 时,由于雨水尚未渗流至软弱夹层,所以由坡顶入渗的雨水会存留在软弱夹层和坡顶之间的粘性土层中,增加了该结构层土体的自重,因此,塑性区继续向着坡顶扩展;降雨停止后,由于雨水的出渗,导致边坡基质吸力逐渐恢复,铅直有效应力也逐渐增大,土体自重有所减轻,故塑性区面积会由坡顶向软弱夹层内部减小,继而再由夹层内至坡面逐渐缩减。

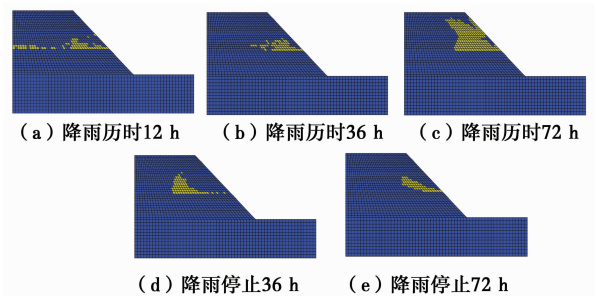


图 12 边坡塑性区分布规律

Fig. 12 Distribution of plastic zone of slope

4.5 边坡安全系数变化规律

降雨入渗条件下,通过强度折减法计算得到的边坡安全系数如图 13 所示。从图中可以看出:边坡安全系数随着降雨历时的增加而逐渐减小,在降雨历时 72 h 时,边坡安全系数由 1.80 降至 1.50,减小了 17%;降雨停止后,边坡安全系数减小的速率明显变缓,在降雨停止历时 72 h 整个过程中,安全系数从 1.50 降至 1.45,仅减小了 3%。分析其中原因为:降雨过程中,雨水逐渐入渗至边坡内部,导致边坡各结构层土体自重增加,其抗滑、抗剪能力降低,

所以,边坡安全系数随着降雨入渗的持续而逐渐减小;降雨停止后,边坡基质吸力逐渐恢复,但是,由于软弱夹层内局部依然存在暂态饱和区,导致雨水不能快速的出渗,所以,边坡安全系数并未出现明显回升。

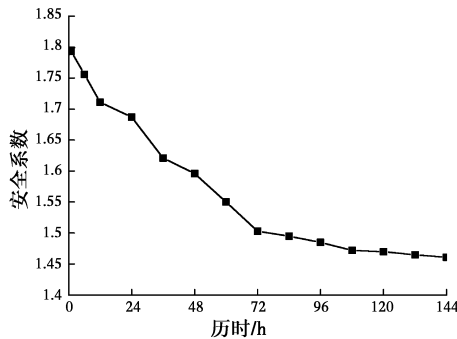


图 13 边坡安全系数变化规律

Fig. 13 Variation rule of slope safety factor

5 含软弱夹层边坡失稳机理分析

根据 4.1 节和 4.2 节的计算结果可以看出,在强降雨条件下,雨水较快渗流进入至软弱夹层,在软弱夹层内形成暂态饱和区,从而使软弱夹层的强度降低,此时为夹层软化阶段;根据 4.3 节计算结果可知,降雨入渗引起软弱夹层上方结构层的铅直有效应力明显减小,导致夹层被挤压变形,此时为夹层挤压阶段;随着降雨的持续,软弱夹层上方结构层的抗剪强度逐渐降低,局部开始出现拉伸裂缝,此时为拉伸裂缝阶段;当拉伸裂缝发到一定程度后,坡顶开始产生不均匀沉降变形,导致夹层进一步被挤压,边坡抗滑能力也逐渐降低,此时为坡顶沉降阶段;根据 4.4 节中的计算结果可以看出:边坡塑性区从夹层挤压处逐渐向坡顶发展至贯通,当降雨达到一定程度后,塑性区土体自重明显增加,使边坡的抗滑能力进一步降低,从而导致边坡沿塑性贯通区发生滑移破坏,并在夹层挤压处断裂,此时为断裂滑移阶段。因此,依托工程边坡的失稳过程分为:夹层软化、夹层挤压、拉伸裂缝、坡顶沉降和断裂滑移这 5 个阶段。因此,为了降低强降雨对边坡稳定性的影响,在含软弱夹层粘性土坡支护设计时应着重考虑边坡排水系统的合理布设。

6 结论

1)在强降雨条件下,雨水在软弱夹层内的渗流速度最快,先在软弱夹层内形成暂态饱和区,当坡顶入渗的雨水未渗流至软弱夹层时,夹层内部暂态饱和区的雨水会沿夹层上表面向着坡顶方向渗流;降

雨停止一段时间后,软弱夹层暂态饱和区得到坡顶暂态饱和区入渗雨水的补给,故夹层局部内依然存在暂态饱和区。

2)在强降雨条件下,可根据软弱夹层粘性土坡降雨入渗至某点时引起该点基质吸力开始明显减小来判定降雨入渗至该点的具体时刻,从而对基质吸力与铅直有效应力之间的关系进行微观分析,确定了两者之间存在着严格的负相关变化关系。

3)随着降雨历时的增加,边坡塑性区首先在软弱夹层内部贯通,继而向着坡顶发展,边坡安全系数逐渐降低;降雨停止后,塑性区面积会由坡顶向软弱夹层内部减小,继而再由夹层内至坡面逐渐缩减,但由于软弱夹层内局部依然存在暂态饱和区,所以,安全系数在降雨停止一段时间内并未得到及时升高。

4)根据数值计算结果可将含软弱夹层粘性土坡失稳过程分为:夹层软化、夹层挤压、拉伸裂缝、坡顶沉降和断裂滑移这 5 个阶段。因此,为了降低强降雨对边坡稳定性的影响,在含软弱夹层粘性土坡支护设计时,应着重考虑边坡排水系统的合理布设。

参考文献:

- [1] 范皓然. 降雨对广西含泥质夹层碎屑岩边坡的稳定性影响研究[D]. 南宁:广西大学, 2015:1-5.
FAN H R. Stability analysis of clastic rock slope with mudstone interlayer under rainfall infiltration in Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2015: 1-5. (in Chinese)
- [2] 李永亮,肖兵,李建举,等. 含软弱夹层土坡稳定性分析研究[J]. 路基工程, 2015(3):84-87.
LI Y L, XIAO B, LI J J, et al. Stability analysis of soil slope with weak interlayer [J]. Subgrade Engineering, 2015(3):84-87. (in Chinese)
- [3] TAKASHI H, SATORU O, KOICHI I. Rigid plastic stability analysis for slope including thin weak layer [J]. Japanese Geotechnical Journal, 2011, 6(2): 191-200.
- [4] SANTHA R A, THOTE N R. Empirical slope design for friable ore bodies with weak wall rocks [J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2011, 4(6):1067-1074.
- [5] 王睿,张嘎,张建民. 降雨条件下含软弱夹层土坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1582-1587.
WANG R, ZHANG G, ZHANG J M, et al. Centrifuge modeling of rainfall-induced deformation of slopes with weak layers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10):1582-1587. (in Chinese)

- [6] 马勇. 降雨工况下考虑软弱夹层影响的粘性土坡稳定性分析[J]. 科技视界, 2017(9):8-9.
MA Y. Stability analysis of cohesive soil slope under the influence of weak interlayer in rainfall condition [J]. Science & Technology Vision, 2017 (9): 8-9. (in Chinese)
- [7] 付宏渊, 史振宁, 曾铃. 降雨条件下坡积土边坡暂态饱和和区形成机理及分布规律[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2):1-10.
FU H Y, SHI Z N, ZENG L. Formation mechanism and distribution of transient saturated areas of residual slope under rainfall conditions [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39 (2):1-10. (in Chinese)
- [8] 魏义长, 刘作新, 康玲玲, 等. 土壤持水曲线 van Genuchten 模型求参的 Matlab 实现[J]. 土壤学报, 2004, 41(3):380-386.
WEI Y C, LIU Z X, KANG L L, et al. Matlab implementation of soil water retention curve van Genuchten model [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (3):380-386. (in Chinese)
- [9] 陈伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 吸力对弱膨胀土强度贡献的试验研究与预测分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7):1783-1787.
CHEN W, KONG L W, GUO A G, et al. Experimental study and predictive analysis of contribution of matrix suction to shear strength of weak expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7):1783-1787. (in Chinese)
- [10] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WILDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3):313-321.
- [11] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1957-1962.
XU H, ZHU Y W, CAI Y Q, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12):1957-1962. (in Chinese)
- [12] 曾铃, 付宏渊, 何忠明, 等. 饱和-非饱和渗流条件下降雨对粗粒土路堤边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10):3614-3620.
ZENG L, FU H Y, HE Z M, et al. Impact of rainfall on stability of granular soil embankment slope considering saturated-unsaturated seepage [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (10):3614-3620. (in Chinese)
- [13] 陈玮, 简文彬, 董岩松, 等. 某含软弱夹层花岗岩残积土边坡稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6):107-111.
CHEN W, JIAN W B, DONG Y S, et al. Stability study of a granite residual soil slope with weak interlayers [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(6):107-111. (in Chinese)
- [14] JIAN H S, LONG J, WAN S W, et al. Study on engineering mechanical properties of mayanpo slope at xiangjiaba hydropower station[J]. Advanced Materials Research, 2012, 548:511-515.
- [15] FEI Y, Y U Z, SHAN X C, et al. Numerical simulation study on the failure mechanism of bedding rock slope based on the lagrangian multiplier method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 513:2603-2606.
- [16] SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155:429-436.
- [17] 吴礼舟, 黄润秋. 非饱和土渗流-变形耦合的数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3):63-67.
WU L Z, HUANG R Q. Numerical analysis of seepage and deformation in unsaturated soils [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3):63-67. (in Chinese)
- [18] 石振明, 沈丹祎, 彭铭, 等. 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8):977-985.
SHI Z M, SHEN D Y, PENG M, et al. Slope stability analysis of multi layer unsaturated soil under rainfall infiltration [J]. Shuili Xuebao, 2016, 47(8):977-985. (in Chinese)
- [19] SUN D M, LI X M, FENG P, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope during rainfall infiltration using coupled liquid-gas-solid three-phase model [J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(3):193-194.
- [20] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于 FLAC^{3D} 平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3):855-861.
JIANG Z M, XIONG X H, ZENG L. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC^{3D} [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3):855-861. (in Chinese)