

文章编号:1672-9331(2017)03-0021-08

强降雨条件下含软弱夹层土坡稳定性 影响因素敏感性分析

何忠明, 王保林, 胡庆国, 周科峰

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了分析强降雨条件下含软弱夹层土坡稳定性影响因素的敏感性, 结合长沙—湘潭高速公路某路堑左侧边坡现场调研资料, 基于饱和—非饱和渗流理论, 建立了含软弱夹层土坡数值分析模型。选取夹层倾角、夹层厚度、夹层埋深以及夹层层数这4种内在影响因素, 分析了各因素变化对边坡稳定性的影响规律。研究表明, 长沙—湘潭高速公路某路段路堑左侧边坡软弱夹层倾角的临界 θ 值范围为 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$; 在降雨阶段, 边坡安全系数随着降雨历时的增加而逐渐降低, 雨停后安全系数又随着入渗雨水的消散而缓慢升高, 但回升速率明显低于下降速率; 在强降雨条件下, 软弱夹层内在因素的变化是导致边坡稳定性降低的主要因素, 其中连续降雨方案的影响程度较大; 无论是否考虑降雨条件, 软弱夹层内在因素变化对边坡稳定性影响的敏感性都为: 夹层层数>夹层倾角>夹层厚度>夹层埋深。

关键词: 强降雨; 软弱夹层; 粘性土坡; 稳定性; 影响因素; 敏感性; 安全系数

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

Sensitivity analysis of factors influencing stability of soil slope with soft interlayer under heavy rainfall conditions

HE Zhong-ming, WANG Bao-lin, HU Qing-guo, ZHOU Ke-feng

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of
Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to analyze the sensitivity of factors influencing the stability of soil slope with soft interlayer under heavy rainfall conditions, based on the field survey data of the left slope of cutting in a section of Changsha-Xiangtan expressway and Saturated-Unsaturated seepage theory, the numerical analysis model of the weak interlayer soil slope is established. And 4 internal factors, such as the dip angle of the interlayer, the interlayer thickness, the interlayer embedment depth and the interlayer number are selected to analyze the influence law of the various factors on the slope stability. The analysis results show that the critical value of the interlayer inclination of the left slope of cutting in a section of Changsha-Xiangtan expressway is $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$. In the rainfall stage, the safety factor of slope decreases gradually with the increase of rainfall duration. After rain stops, the safety factor increases slowly with the dissipation of infiltration rainwater, but the recovery rate is obviously lower than

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508042, 51678073); 湖南省重点研发计划项目(2016SK2023); 湖南省教育厅科学研究一般项目(16C0053)

作者简介: 何忠明(1980—), 男, 湖南永兴人, 长沙理工大学教授, 博士, 主要从事道路工程方面的研究。

the decline rate. Under the heavy rainfall condition, the change of the inner factor of soft interlayer is the main factor that leads to the decrease of slope stability, among which the influence of continuous rainfall scheme is larger. Whether or not the rainfall is considered, the sensitivity of the change of the internal factors to the slope stability is as follows: interlayer number > interlayer inclination angle > interlayer thickness > interlayer buried depth.

Key words: heavy rainfall; soft interlayer; soil slope; stability; influence factor; sensitivity; safety factor

随着公路、铁路等工程建设的不断增加,大量道路边坡在各种因素作用下出现了失稳问题。尤其是当边坡中含有软弱夹层结构层时,其失稳概率会大大提高,对道路行车安全造成极大的威胁,这已经引起了社会各界的高度重视。目前,国内外学者对含软弱夹层边坡的稳定性进行了一些相关研究,如:陈玮等^[1]运用有限元数值模型对某含软弱夹层花岗岩残积土边坡进行了分析,揭示了软弱夹层引起的边坡变形特征;Takashi H.等^[2]运用刚塑性有限元法对含软弱夹层边坡的稳定性进行了研究;唐良琴等^[3]主要分析了软弱夹层的物质组成及粒度等因素对边坡整体稳定性的影响;秦鸿^[4]运用有限差分软件对含软弱夹层边坡结构尺寸及岩土力学参数等因素进行了研究。

目前,国内外学者多数都是针对软弱夹层结构层的岩土力学参数及几何特性展开研究,很少有学者考虑强降雨条件下含软弱夹层土坡内在因素变化对边坡稳定性的敏感性。而已有的相关学者的研究表明^[5-7],降雨会引起边坡土体自重增加,导致其抗滑、抗剪能力下降。尤其是当边坡内含有软弱夹层时,由于软弱夹层的高渗透性,加速了雨水入渗至边坡内部的渗流速率,致使其结构层强度明显降低,从而导致边坡出现滑坡、崩塌等失稳现象。因此,作者着重研究在连续和不连续降雨这两种条件下,软弱夹层倾角、厚度、埋深以及层数等内在因素的变化对边坡稳定性影响的敏感性,为含软弱夹层边坡的支护设计提供理论指导。

1 理论基础

1.1 饱和一非饱和渗流理论

开挖后的含软弱夹层路堑边坡处于一种饱和一非饱和的稳定状态,但是在经历降雨入渗后,边坡内会出现暂态饱和区,从而打破这种稳定状态。

其渗流特性满足达西定律:

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

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

体积含水率 θ_w 和非饱和渗透系数 k 都与基质吸力存在着一定的函数关系,其中,体积含水率 θ_w 与基质吸力的函数关系曲线为土水特征曲线,渗透系数 k 与基质吸力的函数关系为非饱和渗透系数方程。本研究对这两种关系采用 Van Genuchten 模型进行拟合,具体方程如下。

土水特征曲线方程^[8]为:

$$\theta_w = \begin{cases} \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\{1 + [\alpha_w(u_a - u_w)]^{n_w}\}^{m_w}} + \theta_r, & u_w < 0 \\ \theta_s, & u_w \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力,其中, u_w 为孔隙水压力, u_a 为孔隙气压力; α_w 为进气值倒数相关的参数; m_w 与 n_w 存在一定的换算关系,一般取 $m_w = 1 - 1/n_w$ 。

非饱和渗透系数方程^[9]为:

$$k = k_s \frac{\{1 - (-\alpha_w u_w)^{n_w-1} [1 + (-\alpha_w u_w)^{n_w}]^{-m_w}\}^2}{[1 + (-\alpha_w u_w)^{n_w}]^{m_w/2}} \quad (3)$$

式中: k_s 为饱和渗透系数。

软弱夹层土坡的非恒定渗流有限元方程^[10]为:

$$[K]\{H\} + [M]\{H\} = \{Q\} \quad (4)$$

式中: $[K]$ 为单元特征矩阵; $[M]$ 为单元质量矩阵; $\{Q\}$ 为节点流量向量矩阵。

1.2 莫尔-库伦数值模型控制方程

分析连续和不连续强降雨这两种条件下内在

因素变化对软弱夹层土坡稳定性影响的敏感性,需建立含软弱夹层粘性土坡的莫尔-库伦数值模型。为使数值模型较为真实地反映土坡在连续和不连续降雨这两种条件下的初始状态,本研究对其进行了约束,具体如下。

初始边界条件设定为:

$$h(x, y, z, t_0) = h_0(x, y, z, t_0)。 \quad (5)$$

压力边界设定为:

$$P(x, y, z) = \bar{P}(x, y, z)。 \quad (6)$$

流量边界设定为:

$$k_{ij}k_r(P) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_j = I。 \quad (7)$$

饱和溢出边界设定为:

$$P(x, y, z) = 0。 \quad (8)$$

连续-不连续降雨入渗边界设定为:

$$\begin{cases} k_{ij}k_r(P) \frac{\partial h}{\partial x_j} n_j = I, & I < f \\ P = 0, & I \geq f \end{cases}。 \quad (9)$$

式中: h 为总水头; t_0 为初始时间; h_0 为 t_0 时的水头; I 为降雨强度; \bar{P} 为孔压; f 为土体入渗率(不考虑地表积水)。

2 计算模型

2.1 内因素分析

依托工程某路堑边坡位于长沙-湘潭高速公路,边坡所处地质条件及构造环境极其复杂。路堑开挖深度为 1 m,开挖面积为 531.21 m²,沿线坡体自然坡度近 45°,为典型的红粘土层状结构,在经历雨季大量雨水的冲蚀后,出现了明显的崩塌现象(见图 1)。现场调研结果表明,该路堑边坡坡内含有一定的软弱夹层,且在不同的路段其夹层的几何特征也有所不同,但大体有夹层倾角、厚度、埋深以及层数的不同。为了分析连续和不连续强降雨这两种条件下上述内在因素变化对边坡稳定性影响的敏感性,采取固定 3 个参数、变化 1 个参数的模式进行研究(见表 1)。

2.2 外因素分析

边坡在自然条件下是一种稳定状态,但是降雨入渗会打破这种稳定状态。尤其是当边坡内含有一定的软弱夹层时,由于软弱夹层的高渗透、易软化性,缩短了边坡由稳定状态到破坏状态的发

展时间,严重影响了边坡的稳定性。因此,降雨这一外在因素对边坡稳定性的影响是不容忽视的。首先结合湖南省长沙地区历年降雨资料及相关参考文献^[10-12],选取降雨强度为 7.02×10^{-7} m/s,设计了连续降雨和不连续降雨两种降雨方案(见图 2)。

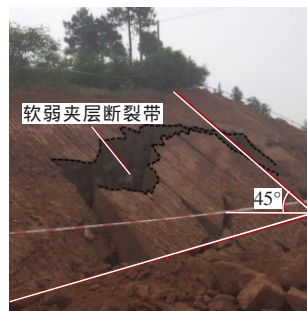


图 1 实例边坡

Fig. 1 Example slope

表 1 内在因素变化范围

Table 1 Range of intrinsic factors

计算 工况	夹层倾角 $\theta/(^\circ)$	夹层厚度 h/m	夹层埋深 l/m	夹层层数 n
1	10~35	1	2	1
2	10	1~3	2	1
3	10	1	2~6	1
4	10	1	2	1~5

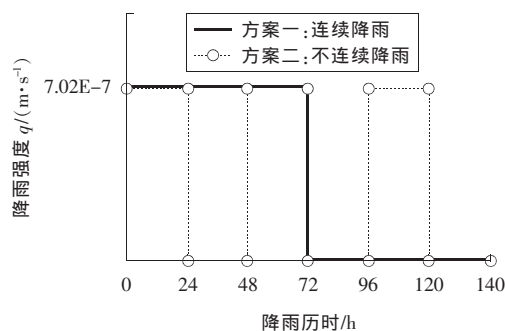


图 2 连续和不连续降雨方案

Fig. 2 Continuous and discontinuous rainfall scenarios

2.3 计算参数

连续和不连续降雨入渗都会使边坡处于一种饱和-非饱和状态,为研究这种状态下边坡内在因素变化对边坡稳定性影响的敏感性,需要得到式(2),(3)的解。通过室内试验测得该实例边坡的红粘土在标准压实度下的饱和体积含水率 θ_s 和残余体积含水率 θ_r 分别为 0.25 和 0.09,软弱夹

层的饱和体积含水率 θ_s 和残余体积含水率 θ_r 分别为0.32和0.13,然后利用Van Genuchten模型对式(2),(3)进行求解,所得解如图3所示。此外,边坡各结构层的其他岩土力学参数参考相关文献及室内外试验结果综合进行取值^[13-15](见表2)。

2.4 计算模型

分析连续和不连续降雨这两种条件下软弱夹层内在因素变化对含粘性土坡稳定性影响的敏感性,需要建立数值计算模型,而计算模型尺寸的选取会直接影响计算结果的精度。已有相关研究表明^[16],当坡顶宽度为坡高的2.5倍、坡脚至模型右侧边界为坡高的1.5倍、坡底向下延伸一个坡高的高度时,为理想的计算模型,此时计算精度较为准确。本研究所依托的湖南省长沙—湘潭高速公路某路堑左侧边坡的开挖深度为10 m,故拟建立坡高为10 m,坡宽为25 m,坡率为1:1的计算模型(如图4所示)。同时为较为真实地模拟实例边坡

的自然状态,对计算模型的边界进行约束:模型左右两侧及底部为不透水边界,坡面和坡顶设置为降雨入渗边界。

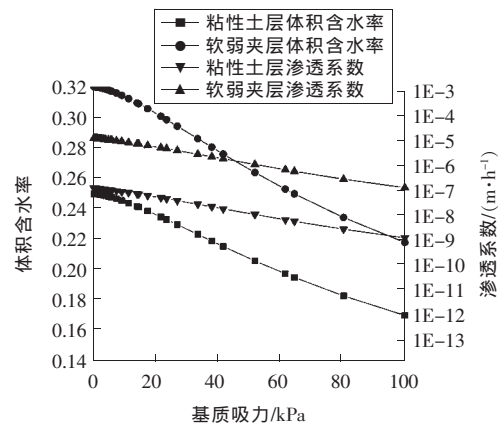


图3 土水特征及渗透系数曲线

Fig. 3 Soil water characteristics and permeability coefficient curves

表2 土力学参数

Table 2 Geotechnical parameters

岩性	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ	渗透系数 K / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和体积含水 率 θ_s	残余体积含水 率 θ_r
粘性土层	22	27	29	16	0.29	1.21×10^{-7}	0.17	0.09
软弱夹层	15	16	13	5	0.38	1.32×10^{-5}	0.23	0.13

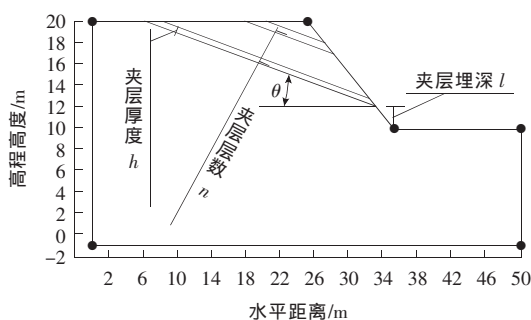


图4 计算模型

Fig. 4 Computational model

3 计算结果分析

3.1 倾角变化对稳定性的影响

图5和图6为连续和不连续降雨条件下倾角变化对安全系数影响规律。从图5,6可以看出,在未施加降雨条件下,边坡安全系数最大值在软弱夹层倾角为 10° 时取得,其值为2.43,最小值在

软弱夹层倾角为 30° 时取得,其值为2.01;研究历时144 h时,在连续降雨条件下,边坡安全系数最大值为2.19,最小值为1.75;在不连续降雨条件下,边坡安全系数最大值为2.31,最小值为1.85。由此可见,连续降雨条件下边坡安全系数的降低幅度较大,不连续降雨次之。当软弱夹层倾角相同时,连续降雨条件下的边坡安全系数明显低于不连续降雨。此外,在连续和不连续降雨这两种条件下,边坡安全系数都随降雨历时的增加而逐渐减小;雨停后,边坡安全系数又缓慢地回升,当软弱夹层倾角 θ 为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时,边坡安全系数随着倾角 θ 的增大而逐渐减小;当软弱夹层倾角 θ 为 35° 时,边坡安全系数反而有所增大。

根据上述分析可以推断出:在未考虑降雨因素时,软弱夹层倾角的变化引起了边坡稳定性的降低,连续和不连续降雨加大了这种降低幅度,但加大程度有所不同,具体为:连续降雨>不连续降雨。

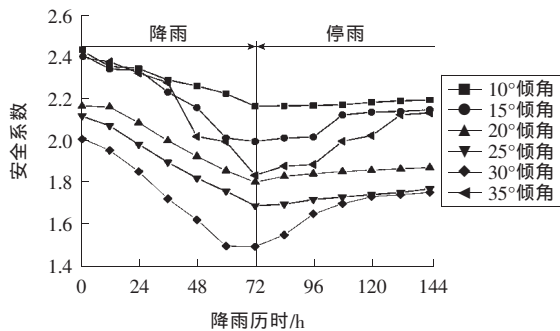


图 5 连续降雨条件下倾角变化对安全系数影响规律

Fig. 5 Influence of inclination variation on safety factor under continuous rainfall condition

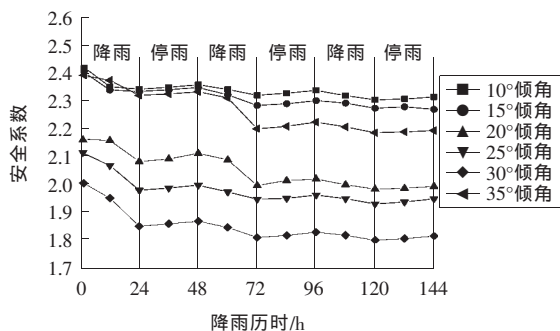


图 6 不连续降雨条件下倾角变化对安全系数影响规律

Fig. 6 Influence of inclination variation on safety factor under discontinuous rainfall condition

此外,根据力学原理可知,含软弱夹层顺层路堑边坡是否能发生滑移破坏,取决于滑动体产生的下滑力 F 与抗滑力 F' 的大小关系,即:当下滑力 $F < \text{抗滑力 } F'$ 时,边坡处于稳定状态;当下滑力 $F = \text{抗滑力 } F'$ 时,边坡处于一种临界状态;当下滑力 $F > \text{抗滑力 } F'$ 时,边坡将发生滑移破坏。设边坡滑动体所受重力为 G ,长度为 L ,对滑动体所受重力 G 进行力学分解(见图 7),可以得出下滑力 F 和抗滑力 F' 与重力 G 之间存在以下关系:

$$F = G \sin \theta. \quad (10)$$

$$F' = cL + G \cos \theta \tan \varphi. \quad (11)$$

由式(10),(11)可知,当软弱夹层倾角 θ 增大时,会引起重力 G 的分量下滑力 F 增大;但同时软弱夹层所包围的滑动体面积逐渐减小,导致滑动体重力 G 减小。因此,顺层软弱夹层路堑边坡的稳定性与软弱夹层倾角 θ 之间并不是简单的单调关系,一定存在某个临界 θ 值,使得下滑力 F 在软弱夹层倾角 θ 小于或大于这个临界值时为单调递增

或递减。由上述倾角变化影响分析结果可知,当软弱夹层倾角 θ 为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时,边坡安全系数随倾角的增大而增大,下滑力 F 表现为单调递增;当软弱夹层倾角 θ 为 35° 时,边坡安全系数较 30° 时有所增大,下滑力 F 表现为单调递减。故本研究所依托的工程实例长沙—湘潭高速公路某路段路堑左侧边坡软弱夹层倾角的临界 θ 值范围为 $30^\circ \sim 35^\circ$ 。

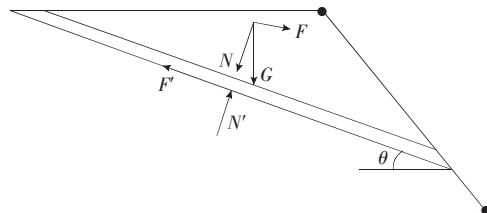


图 7 含软弱夹层土坡滑动体受力分析

Fig. 7 Stress analysis of soil slope with soft interlayer

3.2 厚度变化对稳定性的影响

软弱夹层的厚度直接影响边坡的整体稳定性,当软弱夹层较薄时,由于软弱夹层自身强度较低,在承受其上方土体自重应力作用下容易发生挤压变形,尤其是在降雨条件下,软弱夹层上方土体的自重会因雨水的入渗而有所增加;当软弱夹层较厚时,虽然其抗挤压能力有所提高,但是由于夹层所占边坡面积比明显增加,会直接影响边坡的整体强度。因此,作者对软弱夹层厚度变化影响下的边坡稳定性进行深入研究,并着重考虑降雨因素,其计算结果如图 8,9 所示。

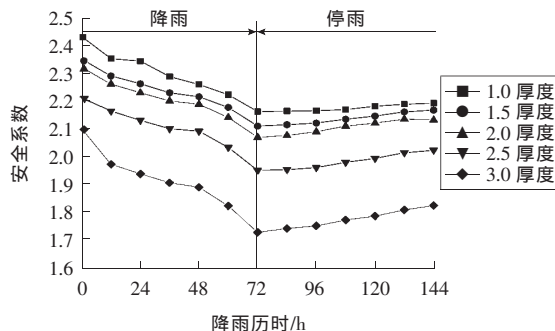


图 8 连续降雨条件下厚度变化对安全系数影响规律

Fig. 8 Influence of thickness variation on safety factor under continuous rainfall condition

从图 8 和图 9 可以看出,在连续和不连续降雨这两种条件下,边坡安全系数随着厚度的增加而逐渐减小,且减小的幅度也在逐渐增大。在研

究范围内,未施加降雨时,边坡安全系数的最大值为 2.43,最小值为 2.10;在连续降雨条件下,边坡安全系数的最大值为 2.19,最小值为 1.80;在不连续降雨条件下,边坡安全系数的最大值为 2.31,最小值为 1.95。从上述分析可以看出,边坡稳定性随着软弱夹层厚度的增大而逐渐减小,且在连续和不连续降雨这两种条件作用下,减小幅度有所增大,这将严重影响边坡的稳定性。

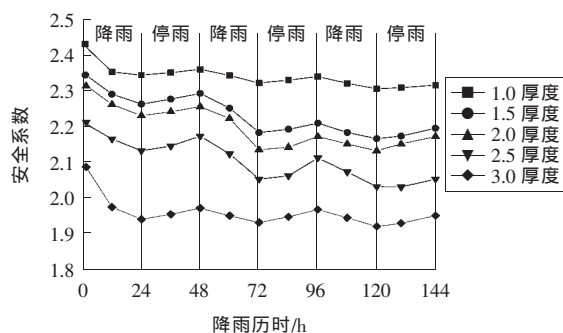


图 9 不连续降雨条件下厚度变化对安全系数影响规律
Fig. 9 Influence of thickness variation on safety factor under discontinuous rainfall condition

3.3 埋深变化对稳定性的影响

软弱夹层埋深是指软弱夹层在边坡面的出露处至坡脚的距离。在自然状态下,边坡一般处在一定的稳定状态。但当边坡经历过雨季的冲刷时,雨水入渗至软弱夹层,会使软弱夹层结构强度有所降低,从而引起边坡沿软弱夹层结构带产生滑移趋势,而夹层埋深又直接影响边坡最可能发生滑移破坏的位置。因此,选取 2,3,4,5,6 m 等不同软弱夹层埋深进行计算(见图 10 和图 11),同时为考虑消除软弱夹层倾角、厚度对边坡稳定性的影响,选取不同夹层埋深影响下的夹层倾角为 10° ,厚度为 1 m。

从图 10 和图 11 可以明显看出,未施加降雨下,软弱夹层埋深从 6 m 降至 2 m,边坡安全系数由 2.47 减小到了 2.43。在强降雨条件下,边坡安全系数随着降雨历时的增加而逐渐降低,雨停后又随边坡内雨水的消散而缓慢升高,其中,在连续降雨条件下,边坡安全系数由 2.38 减小至 2.19;在不连续降雨条件下,边坡安全系数仅由 2.39 减小至 2.31。由此可见,边坡内软弱夹层埋深的变化对边坡安全系数有一定的影响,降雨会增大这种影响程度。

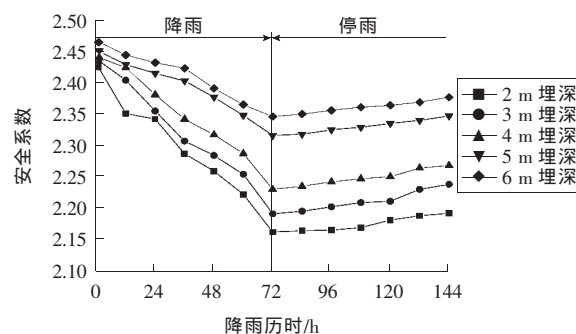


图 10 连续降雨条件下埋深变化对安全系数影响规律

Fig. 10 Influence of buried depth variation on safety factor under continuous rainfall condition

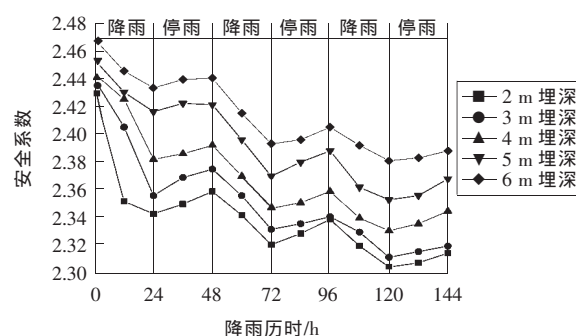


图 11 不连续降雨条件下埋深变化对安全系数影响规律

Fig. 11 Influence of buried depth variation on safety factor under discontinuous rainfall condition

3.4 层数变化对稳定性的影响

本研究所依托的长沙—湘潭高速公路某路段路堑边坡左侧坡体,在实际工程调研时,发现该边坡在不同路段含有不同层数的软弱夹层,其结构层的几何特性十分复杂。因此,想完全模拟出多层软弱夹层在边坡内的存在形式比较困难。所以,在保证研究结果具有可靠性的基础上,对软弱夹层的一些几何特性进行适当地简化:①软弱夹层为规则形状;②软弱夹层与粘性土层之间的接触条件为完全连续接触;③软弱夹层的结构面间距均匀分布为 2 m。

图 12 和图 13 分别为连续和不连续降雨条件下层数变化对安全系数影响规律。从图 12,13 可以看出,边坡安全系数随着软弱夹层层数的增加而逐渐减小。在未施加降雨条件下,边坡安全系数从 2.43 降至 1.92;在连续降雨条件下,边坡安全系数从 2.19 降至 1.65;在不连续降雨条件下,边坡安全系数虽然在停雨阶段有所回升,但是总体趋势仍为下降,由 2.31 降至 1.76。由此可见,软弱夹

层层数对边坡稳定性的影响比较大,且随着软弱夹层层数的增多,边坡安全系数的回升有一定的滞后性。

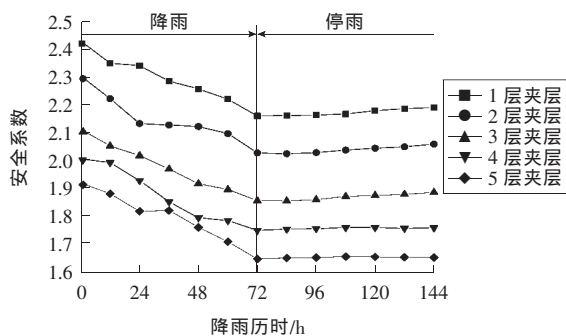


图 12 连续降雨条件下层数变化对安全系数影响规律

Fig. 12 Influence of layer number variation on safety factor under continuous rainfall condition

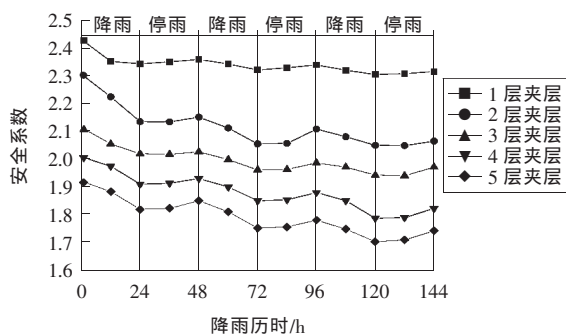


图 13 不连续降雨条件下层数变化对安全系数影响规律

Fig. 13 Influence of layer number variation on safety factor under discontinuous rainfall condition

4 稳定性影响因素敏感性分析

图 14 为内—外多因素敏感性,即分别在未施加降雨、不连续强降雨和连续强降雨这 3 种条件下,对影响边坡稳定性的内在因素进行敏感性分析。从图 14 可以看出,软弱夹层内在因素的变化是导致边坡稳定性降低的主要因素,外在因素连续和不连续降雨明显扩大了这种降低程度,其中,连续降雨的影响程度较大。由此可见,当边坡内在因素确定时,降雨将是导致边坡失稳的最直接因素。因此,在对含软弱夹层边坡进行支护设计时,应根据不同的降雨工况合理布设排水系统。此外,在未施加降雨、不连续降雨和连续降雨这 3 种条件下,软弱夹层内在因素变化对边坡稳定性影响的敏感性都为:夹层层数>夹层倾角>夹层厚度>夹层埋深。

厚度>夹层埋深。

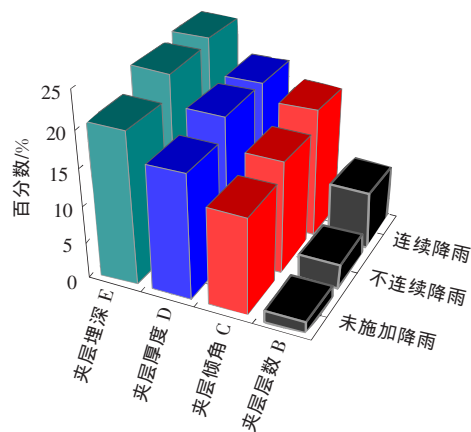


图 14 内—外多因素敏感性

Fig. 14 Internal and external multiple factor sensitivity

5 结论

1) 本研究所依托的湖南省长沙—湘潭高速公路某路段路堑左侧边坡软弱夹层倾角的临界 θ 值范围为 $30^\circ \sim 35^\circ$, 当下滑力 F 在软弱夹层倾角 θ 小于或大于这个临界值时为单调递增或递减。

2) 在降雨阶段,含软弱夹层边坡安全系数随着降雨历时的增加而逐渐降低,在雨停后,安全系数又随着入渗雨水的消散而缓慢升高,但回升速率明显低于下降速率。

3) 在强降雨条件下,软弱夹层内在因素的变化是导致边坡稳定性降低的主要因素,其中,连续降雨方案的影响程度较大。此外,无论是否考虑降雨,软弱夹层内在因素变化对边坡稳定性影响的敏感性都为:夹层层数>夹层倾角>夹层厚度>夹层埋深。

〔参考文献〕

- [1] 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 Wei, JIAN Wen-bin, DONG Yan-song, 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.
- [2] Takashi H, Satoru O, Koichi I. Rigid plastic stability analysis for slope including thin weak layer[J]. Japa-

- nese Geotechnical Journal, 2011, 6(2): 191-200.
- [3] 唐良琴, 聂德新, 刘东燕, 等. 软弱夹层强度参数的主要影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 289-295.
TANG Liang-qin, NIE De-xin, LIU Dong-yan, et al. Analysis of main factors influencing strength parameters of soft intercalation[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 289-295.
- [4] 秦鸿. 软弱夹层边坡变形性状及其影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 282-286.
QIN Hong. Analysis of deformation characteristics and its influencing factors of slope with soft interlayer [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(2): 282-286.
- [5] Harianto R, Alfrendo S N, Eng C L, et al. Effects of groundwater table position and soil properties on stability of slope during rainfall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(11): 1555-1564.
- [6] 张群, 许强, 甯娜. 降雨条件下低缓浅层土质滑坡稳定性影响因素及耦合研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 90-94.
ZHANG Qun, XU Qiang, NING Na. Study on the factors affecting the stability of landslide and coupling low shallow soil under rainfall condition[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(5): 90-94.
- [7] 李海亮, 黄润秋, 吴礼舟, 等. 非均质土坡降雨入渗的耦合过程及稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 70-76.
LI Hai-liang, HUANG Run-qiu, WU Li-zhou, et al. Coupling process and stability analysis of rainfall infiltration in heterogeneous soil slope[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(4): 70-76.
- [8] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [9] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- [10] 付宏渊, 曾铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359-2365.
FU Hong-yuan, ZENG Ling, WANG Gui-yao, et al. Stability analysis of soft rock slope under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2359-2365.
- [11] 易瑾瑜, 宋荷花, 陈春明. 模糊-神经网络模型在长沙汛期逐月降雨量中长期预报中的应用[J]. 有色金属文摘, 2015, 30(1): 9-12.
YI Jin-yu, SONG He-hua, CHEN Chun-ming. Mid-to long-term forecasting of monthly rainfall in Changsha flood season on fuzzy-neural network[J]. Nonferrous Metals Abstract, 2015, 30(1): 9-12.
- [12] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4102-4112.
ZHANG She-rong, TAN Yao-sheng, WANG Chao, et al. Influence of heavy rainfall characteristics on saturated-unsaturated slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4102-4112.
- [13] 胡小荣, 俞茂宏, 唐春安. 岩土体的非均质性及力学参数的条件模拟赋值[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 13-17.
HU Xiao-rong, YU Mao-hong, TANG Chun-an. The heterogeneity of rock and soil and the conditional simulation assignment of mechanical parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 13-17.
- [14] 邢鲜丽, 李同录, 李萍, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53-59.
XING Xin-li, LI Tong-lu, LI Ping, et al. Variation law of shear strength and water content of Loess [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(3): 53-59.
- [15] Haiou S, Fenli Z, Leilei W, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. Soil and Tillage Research, 2016(155): 429-436.
- [16] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21-27.
ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 21-27.