

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202306152024081983

文章编号: 1674-599X(2024)04-0057-08

引用格式: 陈伟明, 郁金平. 含泥质粉砂夹层的土质边坡稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 57-64, 92.

Citation: CHEN Weiming, YU Jinping. Stability analysis of soil slope with muddy silty sand interlayer[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 57-64, 92.

含泥质粉砂夹层的土质边坡稳定性分析

陈伟明¹, 郁金平²

(1. 中铁十二局集团市政工程有限公司, 广东 广州 511458; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘 要: 为探究双层砂质软弱夹层不同参数下边坡安全系数的变化规律, 基于极限平衡理论构建了含双层软弱夹层的复合土层结构边坡计算模型, 选取上层软弱夹层厚度(贴近地表)、下层软弱夹层厚度(远离地表)、重度、黏聚力、内摩擦角作为边坡稳定性的影响因素, 并设计相关正交试验。研究表明: 上述5个参数对边坡稳定性的影响程度从大到小依次为内摩擦角、黏聚力、重度、上层软弱夹层厚度、下层软弱夹层厚度; 在一定范围内, 软弱夹层黏聚力、内摩擦角越大, 重度、厚度越小, 边坡则越稳定; 自然工况下边坡滑移面多沿上层软弱夹层发展, 而最危险的滑移面位于上层软弱夹层中。

关键词: 软弱夹层; 复合土层结构边坡; 稳定性; 正交试验; 敏感度分析

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Stability analysis of soil slope with muddy silty sand interlayer

CHEN Weiming¹, YU Jinping²

(1. Municipal Engineering Co., Ltd. of China Railway 12th Bureau Group, Guangzhou 511458, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: A calculation model of composite soil layer slope with double weak intercalations is constructed based on the limit balance theory to explore the variation law of slope factor of safety under different weak intercalation parameters. The thickness of weak intercalations close to the surface (upper layer), the thickness of weak intercalations far from the surface (lower layer), gravity, cohesion, and internal friction angle are selected as factors of slope stability, and relevant orthogonal tests are designed. The research results indicate that the sensitivity of the above five parameters to slope stability is in descending order, internal friction angle, cohesion, gravity, thickness of upper weak interlayer, and thickness of lower weak interlayer. The greater the cohesion and internal friction angle of the weak interlayer in a certain range, the smaller its weight and thickness, and the more stable the slope. According to the specific geological conditions of the slope, use retaining wall or anti-slide pile to prevent the slope, pay attention to drainage problems and prevention measures.

Key words: weak interlayer; composite soil structure slope; stability; orthogonal test; sensitivity analysis

我国的西南地区, 广泛分布着碎屑岩沉积物。特别是在云南地区, 地形以山地为主, 地势复杂多变。在这样的自然条件下, 建设高速公路及其

他基础设施时, 不可避免地会面临黏土高边坡的挑战。当这些边坡中夹杂着砂质软弱夹层时, 其稳定性便大打折扣。在开挖作业或遭遇降雨时, 这些边

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 重庆企、事业单位委托项目(cqjt-2022-290)

通信作者: 陈伟明(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事公路与市政道路方面的研究工作。E-mail: 385565489@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

坡极易发生滑坡,给工程建设及后续运营带来严重的安全隐患。因此,在进行基础设施建设时,必须高度重视边坡稳定性问题,采取有效措施预防滑坡等地质灾害的发生。针对含软弱夹层的边坡稳定性,国内诸多学者进行了相关分析:胡涛等^[1]研究了沉积岩覆盖区域中沉积型软弱夹层的成因,采用“成因、物理性质、强度特征”的研究思路确定了不同类型的软弱夹层物理性状指标和强度指标的关系,为其他类型软弱夹层的强度取值提供了参考。刘新喜等^[2]通过强度折减法分析了软弱夹层倾角、内摩擦角、黏聚力、厚度等指标对边坡稳定性的影响,发现这些指标对边坡稳定性的影响程度从大到小依次为软弱夹层倾角、内摩擦角、黏聚力、厚度,边坡稳定性最差时软弱夹层倾角为 45° 。殷博等^[3]采用类似的方法进行研究,却得出软弱夹层倾角对边坡稳定性的影响程度介于内摩擦角和黏聚力之间的结论,这可能是由于软弱夹层参数的设置存在差异。杨启帆等^[4]在强度折减法的基础上,结合流固耦合理论分析了相关指标对含缓倾软弱夹层边坡稳定性的影响程度,发现软弱夹层倾角越小、内摩擦角越大,边坡则越稳定,其关于黏聚力对边坡影响的分析结果与刘新喜和殷博的略有不同,杨启帆等认为在干湿循环作用下,软弱夹层内部颗粒之间的力不是固定不变的,因此随着软弱夹层黏聚力的增加,边坡稳定性会上下浮动。上述学者均未考虑多层软弱夹层的影响。

许四法等^[5]研究了软弱夹层数量及位置对边坡稳定性的影响规律,发现当软弱夹层位于滑坡中层时,软弱夹层数量越多、埋深越深,边坡越不稳定,但未考虑软弱夹层位于滑坡上层及深层的情况。徐鹏等^[6]指出除了应考虑软弱夹层的位置外,还应考虑软弱夹层形状对于边坡稳定性的影响,基于极限分析法进行研究后发现:软弱夹层越接近坡面,其形状的变化对边坡安全系数的影响越明显。皮晓清等^[7]发现随着软弱夹层深度的增加,边坡逐渐趋于稳定,且软弱夹层与边坡土体的相对强度越大,边坡中不受影响的软弱夹层的深度越浅。穆成林等^[8]通过建立物理模型,分析了含多层软弱夹层的顺层高边坡失稳的破坏形式,发现浅层滑坡滑面以软弱夹层剪切为主,深层滑坡则由软弱夹层剪切破坏和陡倾裂隙共同组成了阶梯形滑面,虽未具体分析软弱夹层位置和强度对边坡的影响,但对其他学者研究含多层软弱夹层的顺层边坡稳定性仍具

有一定的指导意义。

总体而言,大多数学者都认同软弱夹层内摩擦角对边坡稳定性的影响程度最大^[9-11],其次是黏聚力和厚度,但以往的研究大多缺乏软弱夹层重度对边坡稳定性影响程度的分析,且仅针对单层软弱夹层边坡。唐雨生等^[12]在其关于含软弱夹层边坡的滑坡稳定性研究中提到在滑坡推移过程中,推重比 T/M (后缘推力/滑体自重)越大,软弱夹层软化越快,滑坡越不稳定,但未考虑软弱夹层自身重度的影响。基于此,本文参考云南省巍山县某在建高速公路路基边坡形式,采用Geo-Studio软件建立相关模型,研究不同位置软弱夹层厚度、黏聚力、摩擦角、重度对边坡稳定性的影响程度及相应变化规律,为边坡防治工程提供参考。

1 含双层软弱夹层边坡有限元模型构建

在大理至南涧高速公路巍山段的建设过程中,发现有一段路基边坡出现了明显的蠕滑迹象,这一地质变动导致滑坡后缘附近产生了裂缝,进而导致周边居民房屋出现开裂的现象,对居民生活安全构成了潜在威胁。地质勘察报告表明,该滑坡体地表覆盖层主要为第四系全新统河流洪积堆积粉质黏土和第四系更新统泥质粉砂岩、黏土岩,地质剖面示意图如图1所示。各层地质信息如下:

粉质黏土(单元层代号①):呈紫红色、灰褐色,可塑状,承载力基本容许值为160 kPa,摩阻力标准值为50 kPa;厚度为0.6~1.2 m,较薄。

泥质粉砂岩(单元层代号②):呈黄褐、灰白、灰褐色,半成岩,软化层,胶结程度差,承载力容许值为180 kPa,摩阻力标准值为50 kPa。

泥质粉砂岩(单元层代号③):呈灰褐色、灰绿色,半成岩,胶结程度差,承载力基本容许值为250 kPa,摩阻力标准值为70 kPa。

黏土岩(单元层代号④):呈灰褐色、紫红色,半成岩,软塑状,地表水软化,胶结程度差,承载力基本容许值为120 kPa,摩阻力标准值为30 kPa。

黏土岩(单元层代号⑤):呈灰褐色、灰绿色,半成岩,胶结程度差,承载力基本容许值为250 kPa,摩阻力标准值为70 kPa。

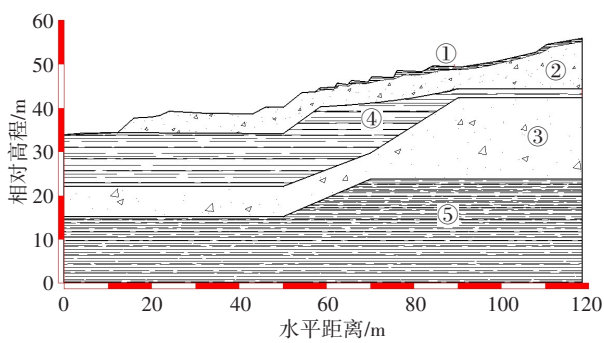


图1 边坡工程地质剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of slope engineering geological section

该边坡软弱夹层主要为泥质粉砂岩,在实际工况中,坡体内软弱夹层的分布极为不均,但整体上从上至下可大致划分为两层:第一层软弱夹层紧邻地表,其厚度为5~10 m;第二层则位于滑坡的中部区域,厚度为10~20 m。由于本文研究了软弱夹层厚度参数对边坡稳定性的影响,为方便计算,参照图1,对计算模型进行合理简化。简化后的模型如图2所示。

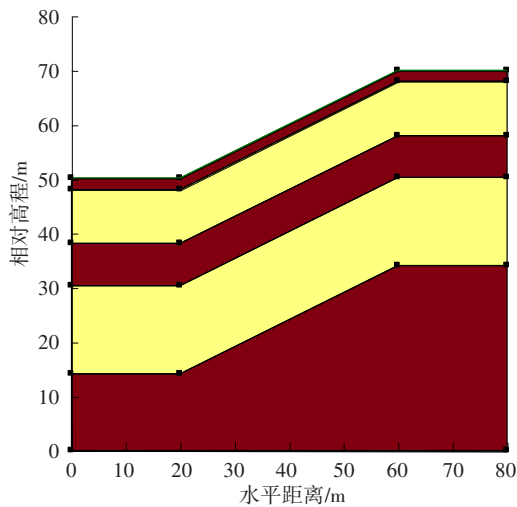


图2 简化边坡计算模型

Fig. 2 Schematic diagram of simplified slope calculation model

图2中浅色部分为软弱夹层,以粉砂岩为主,深色部分为边坡主体,以黏土为主。模型的边界条件为:底部为固定约束,左右两侧为法向约束,坡面设为自由边界。假设各层土体均为满足 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性材料,其中泥质粉砂岩(软弱夹层主要土质)的相关参数通过在现场取样并进行室内常规物理力学试验得到(表1),选取合理范围,样本数设置为10,各层土体参数如表2所示。

表1 软弱夹层物理力学指标统计表

Table 1 Statistical table of physical and mechanical indicators of weak interlayers

数值	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
最小值	17.4	14.2	10.2
最大值	19.6	16.2	14.2

表2 各土层主要物理力学指标

Table 2 Main physical and mechanical indicators of each soil layer

岩土名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
黏土岩	19.6	0.30	34.2	11.4
泥质粉砂岩	15.0~20.0	0.24	12.0~17.0	10.0~15.0

2 正交试验设计

正交试验设计是一种高效且简洁的试验方法,它巧妙地运用正交表来规划涉及多个因素和多个水平的试验。这种方法旨在通过选取具有代表性的水平组合,在减少试验次数的同时,确保全面而有效地探索各因素及其交互作用对试验结果的影响。对这些精选出的水平组合进行试验后,收集并分析所得数据。本文以大理至南涧高速公路巍山段某边坡治理项目为工程背景,基于正交试验基本原理,选取上层软弱夹层厚度、下层软弱夹层厚度、重度、黏聚力、内摩擦角作为试验因素,并根据实际工况选取了5个不同的水平值进行试验,各因素及其水平取值如表3所示。

表3 影响因素及水平

Table 3 Influencing factors and levels

水平值	上层厚度 h_U/m	下层厚度 h_L/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
1	5.00	10.00	15.00	12.00	10.00
2	6.25	12.50	16.25	13.25	11.25
3	7.50	15.00	17.50	14.50	12.50
4	8.75	17.50	18.75	15.75	13.75
5	10.00	20.00	20.00	17.00	15.00
变化范围	5.00~10.00	10.00~20.00	15.00~20.00	12.00~17.00	10.00~15.00

为了高效地组织一组包含5个独立因素且每个因素均有5个不同水平的正交试验,本文选用了正交试验表L25(56)的一个调整版本,即去除了原表中最后一列水平的版本,安排了25次试验对砂质软弱夹层的影响因素进行分析。基于此,能够在减少不必要试验次数的同时,全面且有效地探索各因素对试验结果的影响,从而得出更为精确、可靠的结论。

基于 Morgenstern-Price 法选择 Geo-Studio 软件的 SLOPE/W 分析模块进行滑坡稳定性模拟验算。其力平衡方程如下:

$$F_f = \frac{\sum c' \beta \cos \alpha + (N - \mu \beta) \tan \varphi' \cos \alpha}{\sum N \sin \alpha - \sum D \sin \omega} \quad (1)$$

$$F_m = \frac{\sum c' \beta R + (N - \mu \beta) R \tan \varphi'}{\sum W_x - \sum N_f \pm \sum Dd} \quad (2)$$

式中: F_f 为力平衡安全系数; F_m 为力矩平衡安全系数; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; μ 为孔隙水压力; α 为滑块底部倾斜角; N 为滑块底部法向力; W 为滑块重量; D 为线荷载; d, β, ω 均为几何参数。

对计算模型进行自然工况下的稳定性验算, 正交试验水平组合及其验算结果见表4, 取最小安全系数为 F_{f0} 。

表4 正交试验水平组合及其结果

Table 4 Horizontal combinations of orthogonal experiments and their results

试验序号	因素水平					最小安全系数
	h_{\pm}	h_{\mp}	γ	c	φ	
1	1	1	1	1	1	0.995
2	1	2	2	2	2	1.045
3	1	3	3	3	3	1.099
4	1	4	4	4	4	1.147
5	1	5	5	5	5	1.198
6	2	1	2	3	4	1.112
7	2	2	3	4	5	1.181
8	2	3	4	5	1	0.965
9	2	4	5	1	2	0.872
10	2	5	1	2	3	1.049
11	3	1	3	5	2	1.001
12	3	2	4	1	3	0.914
13	3	3	5	2	4	0.979
14	3	4	1	3	5	1.159
15	3	5	2	4	1	0.934
16	4	1	4	2	5	1.056
17	4	2	5	3	1	0.837
18	4	3	1	4	2	1.019
19	4	4	2	5	3	1.077
20	4	5	3	1	4	0.990
21	5	1	5	4	3	0.975
22	5	2	1	5	4	1.166
23	5	3	2	1	5	1.070
24	5	4	3	2	1	0.850
25	5	5	4	3	2	0.913

2.1 极差分析

对正交试验获取的数据进行分析时, 主要采用

两种分析方法: 极差分析法和方差分析法。其中, 极差分析法因其计算简便、结果直观且易于理解的优势, 是最为常用的分析方法。本文使用极差分析法对表4数据进行分析, 确定最优因素和最佳水平组合, 分析步骤如图3所示。

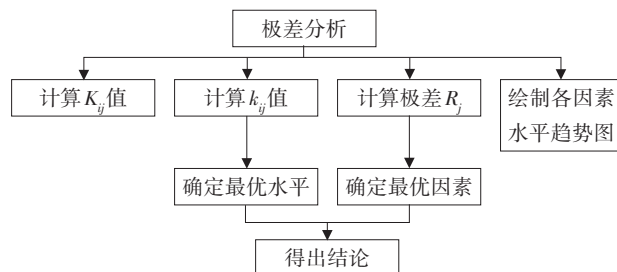


图3 极差分析流程

Fig. 3 Range analysis process

图3中, K_{ij} 为 i 因素下第 j 水平对应试验结果之和, 例如 K_{11} 为 h_{\pm} 因素第1水平下试验结果(最小安全系数)之和; k_{ij} 表示 K_{ij} 对应试验结果的平均值; R_j 为 k_{ij} 极差, 其表达式如式(1)所示:

$$R_j = \max \{k_{ij}\} - \min \{k_{ij}\} \quad (1)$$

最小安全系数及极差的分析结果见表5。

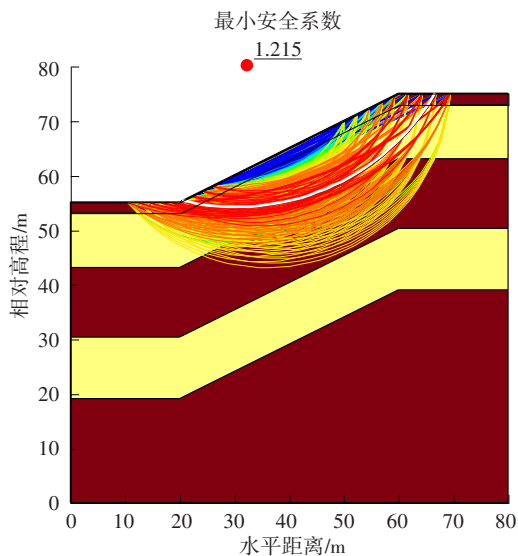
表5 最小安全系数及极差

Table 5 Minimum safety factor and range

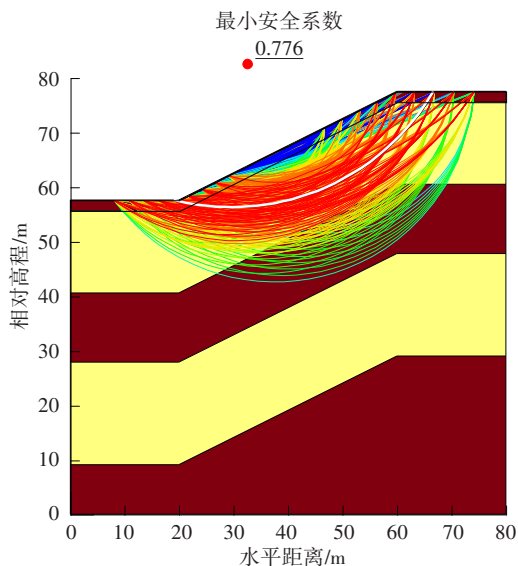
项目	h_{\pm}	h_{\mp}	γ	c	φ
K_{11}	5.484 0	5.139 0	5.388 0	4.841 0	4.581 0
K_{12}	5.179 0	5.143 0	5.238 0	4.979 0	4.850 0
K_{13}	4.987 0	5.132 0	5.121 0	5.121 0	5.114 0
K_{14}	4.979 0	5.1050	4.995 0	5.256 0	5.394 0
K_{15}	4.974 0	5.084 0	4.861 0	5.407 0	5.664 0
k_{i1}	1.096 8	1.027 8	1.077 6	0.968 2	0.916 2
k_{i2}	1.035 8	1.028 6	1.047 6	0.995 8	0.970 0
k_{i3}	0.997 4	1.026 4	1.024 2	1.024 2	1.022 8
k_{i4}	0.995 8	1.021 0	0.999 0	1.051 2	1.078 8
k_{i5}	0.994 8	1.016 8	0.972 2	1.081 4	1.132 8
R_j	0.102 0	0.011 8	0.105 4	0.113 2	0.216 6

根据极差分析的结果, 本文在探究双层泥质粉砂软弱夹层对复合土层结构边坡稳定性影响的研究中, 确定了5个主要因素对边坡稳定性影响程度从大到小的排序为: 内摩擦角(φ)、黏聚力(c)、土体重度(γ)、上层软弱夹层厚度(h_{\pm})、下层软弱夹层厚度(h_{\mp})。安全系数越大(K_{ij} 越大), 边坡越稳定。因此, 本文选取表5中 K_{ij} 较大的各因素水平, 由此可以确定最佳因素水平组合为 $h_{\pm}1$ 、 $h_{\mp}2$ 、 $\gamma1$ 、 $c5$ 、 $\varphi5$, 即当上层软弱夹层厚度为5.00 m, 下层软弱夹层厚度为12.50 m, 软弱夹层土的重度为15.00 kN/m³,

黏聚力为17.00 kPa,内摩擦角为15.00°时,边坡处于最稳定状态,此时边坡最小安全系数为1.215。最差因素水平组合为 $h_{上5}$ 、 $h_{下5}$ 、 γ_5 、 c_1 、 φ_1 ,即当上层软弱夹层厚度为10.00 m、下层软弱夹层厚度为20.00 m、软弱夹层土的重度为20.00 kN/m³、黏聚力为12.00 kPa、内摩擦角为10.00°时,边坡处于最不稳定状态,以此因素水平组合作为模型参数,计算得到此时边坡最小安全系数为0.776(图4)。



(a) 最佳因素水平组合计算结果



(b) 最差因素水平组合计算结果

图4 典型组合分析结果

Fig. 4 Optimal factor level combination calculation results

由图4可以看出,两种组合分析结果中的最危险滑动面(图4中粗线)均位于上层软弱夹层中,且计算滑动面的最深处均位于下层软弱夹层上方,并未触及下层软弱夹层,这表明自然工况下具有双层

砂质软弱夹层的土坡失稳滑动时滑动面一般沿上层贯通软弱带发展。但此计算结果并未考虑边坡渗水的影响,假设边坡受到降雨入渗的影响,下层软弱夹层土体吸水,导致强度下降,滑动面大概率会沿着下层软弱夹层发展而导致二次滑坡。

2.2 单因素敏感性分析

在单因素敏感性分析中,忽略各个因素的交互作用,通过依次改变单个不确定性因素,分析各因素如何独立地对试验结果产生影响,从而识别出各因素对试验结果的影响程度。假设边坡稳定安全系数为 $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,令 $m = |\Delta y_i / y_i|$,且 $M = |\Delta x_i / x_i|$,则边坡稳定性因素敏感度 S_i 可用式(2)表示:

$$S_i = \frac{m}{M} = \left| \frac{\Delta y_i / y_i}{\Delta x_i / x_i} \right| \quad (2)$$

式中: Δy 为安全系数变化; Δx_i 为各因素水平变化; x_i 为各因素水平; m 为影响因素 i 下的边坡稳定安全系数 y_i 的相对变化率,由于选取的5个影响因素量纲不同,因此参照表5中各因素极差的相对变化率作为 y_i 的相对变化率;参照表3得出 M ,即边坡稳定性影响因素 i 各水平下的相对变化率。 S_i 越大,表明该因素对边坡稳定性影响程度越大。

单因素敏感性分析计算结果如表6所示,计算结果表明,在忽略各因素间交互作用的条件下,针对含有双层泥质粉砂软弱夹层的复合土层结构边坡,其稳定性影响因素的敏感性分析与极差分析结果高度一致,即软弱夹层砂质土内摩擦角对边坡稳定性影响最大,黏聚力次之,而后是土体重度,软弱夹层厚度对边坡稳定性影响最小,其中上层软弱夹层厚度对边坡稳定性的影响程度远比下层厚度的大。

表6 单因素敏感性分析结果

Table 6 Results of single factor sensitivity analysis

因素	上层厚度 $h_{上}$	下层厚度 $h_{下}$	重度 γ	黏聚力 c	内摩擦角 φ
敏感度	0.014 560	0.001 048	0.016 208	0.017 920	0.034 736

3 含双层软弱夹层土质边坡稳定性影响因素分析

为进一步探究上、下层软弱夹层厚度、重度、黏聚力及内摩擦角对边坡安全系数的影响规律,以表5的分析结果为基础,分别得到各参数在不同水平下边坡的最小安全系数变化趋势。

3.1 软弱夹层厚度对边坡稳定性影响

以表5中 $h_{上}$ 因素对应的 $k_{i1} \sim k_{i5}$ 数据为基础,绘制边坡最小安全系数变化趋势图,如图5所示。

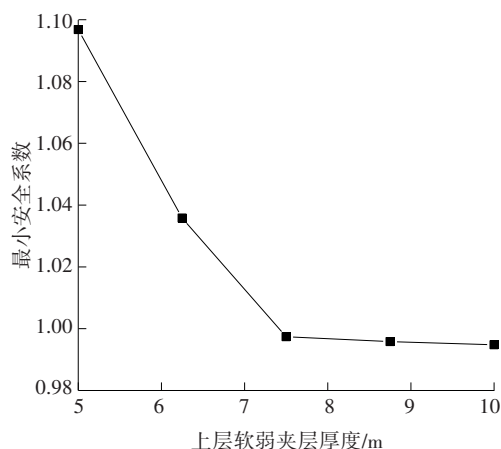


图5 上层软弱夹层厚度对边坡稳定性的影响

Fig. 5 The influence of the thickness of the upper weak interlayer on the stability of the slope

由图5可知,当上层软弱夹层厚度小于一定值时,其与边坡稳定性呈负相关关系,即上层软弱夹层厚度越厚,边坡稳定性越差;但是当厚度大于一定临界值时,上层软弱夹层厚度的变化对边坡稳定性几乎没有影响。

同样地,以表5中 $h_{下}$ 因素对应的 $k_{i1} \sim k_{i5}$ 数据绘出下边坡最小安全系数变化趋势图,如图6所示。

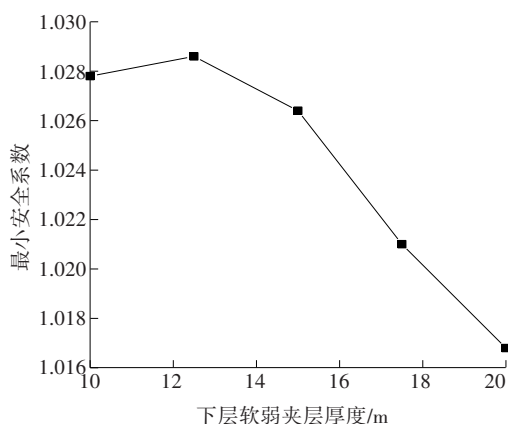


图6 下层软弱夹层厚度对边坡稳定性的影响

Fig. 6 The influence of the thickness of the weak interlayer in the lower layer on the stability of the slope

从图6可以看出,下层软弱夹层厚度对边坡稳定性的影响整体上也呈负相关关系,但与上层软弱夹层影响规律不同的是,当下层软弱夹层厚度小于一定临界值时,下层软弱夹层越厚,边坡反而越稳定。

软弱夹层厚度增大会导致边坡水平位移增大,

不利于边坡稳定。但接近地表的软弱夹层厚度对边坡稳定性的影响有限,说明当上层软弱夹层厚度增大到一定值之后基本不会影响边坡水平位移;而远离地表的软弱夹层厚度对边坡稳定性则有一定正效应,可能是由于当边坡未发生失稳破坏时,下层软弱夹层相比于其上下土体具有更好的渗透性,使得边坡在此处不易积水而未形成滑动面。但是当厚度超过某范围时,其对边坡水平位移的影响大于渗透性对边坡水平位移的影响。

当边坡仅有一层接近地表的软弱夹层且厚度较小时,可忽略其对边坡稳定性造成的影响;当软弱夹层厚度超过7 m时,可采用常见的挡土墙对边坡进行支护;若坡体出现多层软弱夹层,则要考虑软弱夹层位置及厚度,并选择合理的防护工程,下层软弱夹层(远离地表)厚度超过20 m时建议采用抗滑桩对边坡进行支护。

3.2 软弱夹层重度对边坡稳定性的影响

根据实际工况,软弱夹层土体重度变化范围为 $15 \sim 20 \text{ kN/m}^3$,以表5的最小安全系数分析结果为基础,边坡稳定性随软弱夹层土体重度的变化规律如图7所示。

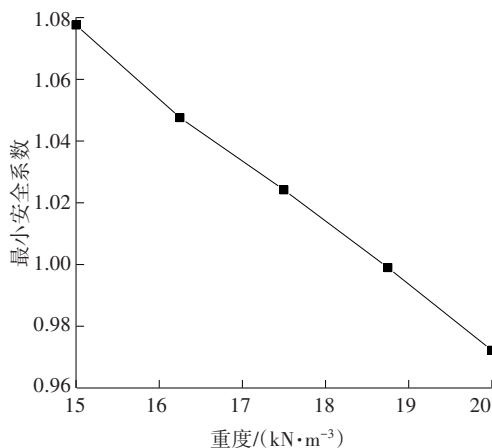


图7 软弱夹层重度对边坡稳定性的影响

Fig. 7 The influence of soft interlayer weight on slope stability

结合表6可知,在选取的3个软弱夹层土体参数中(重度、黏聚力及内摩擦角),重度对边坡稳定性的影响程度最小,且软弱夹层土体重度越大,边坡越不稳定。这是因为随着软弱夹层土体重度的增加,夹层自重增大,进而导致下滑力增大,使得边坡整体趋于不稳定状态。但对于一确定土体而言,由于其重度变化范围不大,且相比于黏聚力和内摩擦角对土体抗剪强度的影响,土体重度对于下滑力

的影响十分有限,因此土体重度对于边坡稳定性的影响相对较小。进行边坡抗滑防治工作时,应当着重考虑如何优化坡面设计以及加强防治工程的排水措施。这是因为改善排水条件能够有效降低软弱夹层土体重度对边坡稳定性的不利影响,进而提升边坡的整体稳定性。

3.3 软弱夹层黏聚力对边坡稳定性的影响

根据该边坡实际情况,软弱夹层土体黏聚力变化范围为12~17 kPa,其对边坡稳定性的影响规律如图8所示。

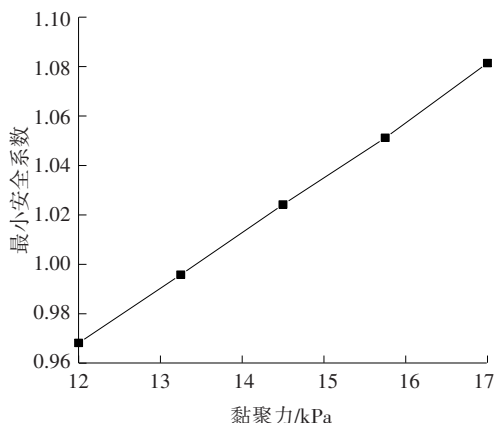


图8 软弱夹层黏聚力对边坡稳定性的影响

Fig. 8 The influence of weak interlayer cohesion on slope stability

从图8可以看出,软弱夹层黏聚力越大,边坡越稳定,这是因为黏聚力的增加可以提高土体抗剪强度。虽然软弱夹层土体黏聚力与边坡稳定性呈正相关关系,但由表6中单因素敏感性分析结果可知,软弱夹层黏聚力对滑坡稳定性的影响程度略比重度的大,而远比内摩擦角的小,这可能是因为该边坡软弱夹层的土体以粉砂土为主,其黏聚力相比于边坡主体黏性土小很多,而软弱夹层与坡体土体的相对强度越大,边坡越稳定。

3.4 软弱夹层内摩擦角对边坡稳定性的影响

本文中软弱夹层内摩擦角变化范围为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。最小安全系数分析和单因素敏感性分析结果表明:相较于其他参数,软弱夹层内摩擦角对边坡稳定性的影响最为显著,基于最小安全系数的分析结果,可得出在软弱夹层内摩擦角影响下的边坡最小安全系数的变化趋势,如图9所示。

由图9可知,软弱夹层内摩擦角与边坡稳定性呈正相关关系,即随着软弱夹层内摩擦角的增大,边坡趋于稳定状态。内摩擦角与黏聚力作为衡量土体抗剪强度的两个重要指标,其对边坡稳定性的

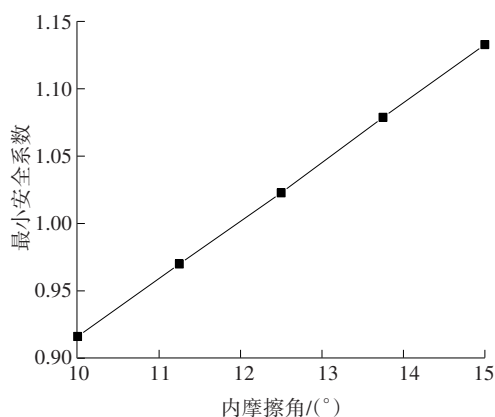


图9 软弱夹层内摩擦角对边坡稳定性影响

Fig. 9 The influence of internal friction angle of weak interlayer on slope stability

影响主要体现在对土体抗剪强度的影响上。而在本文中,软弱夹层土体以砂性土为主,其抗剪强度主要取决于内摩擦角的大小,因此软弱夹层内摩擦角对边坡稳定性影响权重最大。

由图8可得出软弱夹层黏聚力与边坡稳定性的关系曲线的表达式为:

$$F_s = 0.0226c + 0.69652 \quad (3)$$

同样地,由图9可得出软弱夹层内摩擦角与边坡稳定性的关系曲线的表达式为:

$$F_s = 0.04332\varphi + 0.483 \quad (4)$$

式中: F_s 表示边坡最小安全系数; c 表示软弱夹层黏聚力; φ 表示软弱夹层内摩擦角。袁翔等^[13]采用MICP技术(微生物诱导碳酸钙技术)提高了软弱夹层抗剪强度,研究结果显示:加固处理后的软弱夹层,其黏聚力显著提升,增幅约为63.1%,同时内摩擦角也增加了约21.5%。因此,采用此类技术对边坡的软弱夹层进行固化处理,可显著提升边坡的稳定性,其稳定性增强幅度预计在10.2%~17.7%。

4 结论

基于极限平衡理论及正交分析法探究了软弱夹层相关参数对土坡稳定性的影响规律,得到了典型组合滑动面的分布状况,结论如下:

1) 选取了5因素5水平正交试验表,对具有双层泥质粉砂软弱夹层的复合土层结构边坡稳定性相关影响因素进行试验分析,结果表明:软弱夹层相关参数对边坡稳定性影响程度从大到小的排序为内摩擦角、黏聚力、重度、上层软弱夹层厚度、下层软弱夹层厚度,其中内摩擦角、黏聚力与重度都

呈现单一相关性,即软弱夹层土体重度越小、黏聚力越大、内摩擦角越大,则边坡越稳定。

2) 整体而言,上下两层软弱夹层厚度与边坡稳定性都呈负相关关系,但又略有差异,当上层软弱夹层厚度大于一个较大的临界值时,其对边坡稳定性的影响性微乎其微,当下层软弱夹层厚度小于一个较小的临界值时,其反而与边坡稳定性呈正相关关系。

3) 当土坡具有双层砂质软弱夹层时,自然工况下边坡最危险的滑动面一般沿上层软弱夹层发展,且计算滑动面的最深处均位于下层软弱夹层上方,但未触及下层软弱夹层,说明自然工况下下层软弱夹层对边坡稳定性影响很小。

参考文献(References):

- [1] 胡涛,任光明,聂德新,等.沉积型软弱夹层成因分类及强度特征[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(1):124-128. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8035.2004.01.027.
HU Tao, REN Guangming, NIE Dexin, et al. Strength characteristics with genesis and type of the sedimentary weak intercalated layers [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 124-128. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8035.2004.01.027.
- [2] 刘新喜,戴毅,张平,等.炭质泥岩软弱夹层岩质边坡稳定性影响因素分析[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2017,29(1):65-69,73. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6146.2017.01.015.
LIU Xinxi, DAI Yi, ZHANG Ping, et al. Analysis of influencing factors of rock slope stability in weak interlayer of carbonaceous mudstone [J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2017, 29(1): 65-69, 73. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6146.2017.01.015.
- [3] 殷博,朱爱军,刘鹏程,等.含软弱夹层缓倾顺层岩质边坡稳定敏感性分析[J].建筑科学,2019,35(3):45-50. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.03.007.
YIN Bo, ZHU Aijun, LIU Pengcheng, et al. Stability sensitivity of gentle dip bedding rock slope with weak interlayer based [J]. Building Science, 2019, 35(3): 45-50. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.03.007.
- [4] 杨启帆,胡斌,马利遥,等.流固耦合作用下含缓倾软弱夹层边坡稳定及参数敏感性研究[J].金属矿山,2023(2):196-202. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202302027.
YANG Qifan, HU Bin, MA Liyao, et al. Stability and parameter sensitivity study of slope with softly dipped interlayer under fluid-structure interaction [J]. Metal Mine, 2023 (2): 196-202. DOI: 10.19614/j. cnki. jsks.202302027.
- [5] 许四法,姜伙军,孙昌一,等.降雨强度对双层软弱夹层边坡稳定性影响分析[J].浙江工业大学学报,2022,50(5):492-497. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4303.2022.05.004.
XU Sifa, JIANG Huojun, SUN Changyi, et al. Influence of rainfall intensity on stability of double-layer weak interlayer slopes [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(5): 492-497. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4303.2022.05.004.
- [6] 徐鹏,尚念林,鲍晶晶,等.极限分析法求解含软弱夹层边坡稳定性[J].西南交通大学学报,2022,57(4):919-925. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20200156.
XU Peng, SHANG Nianlin, BAO Jingjing, et al. Stability analysis of slopes with weak layers using limit analysis method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(4): 919-925. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20200156.
- [7] 皮晓清,李亮,唐高朋,等.基于有限元极限上限法的含软弱夹层边坡稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(2):351-358. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2019.02.010.
PI Xiaoqing, LI Liang, TANG Gaopeng, et al. Stability analysis for soil slopes with weak interlayers using the finite element upper bound limit analysis [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 351-358. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2019.02.010.
- [8] 穆成林,裴向军,王睿,等.基于物理模型试验的含多层软弱夹层顺层开挖高边坡变形破坏特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):61-67. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-07.
MU Chenglin, PEI Xiangjun, WANG Rui, et al. Analysis on deformation characteristics of a cutting high bedding rock slope with multiple weak layers based on physical model tests [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 61-67. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-07.
- [9] ALKASAWNEH W, HUSEIN MALKAWI A I, NUSAIRAT J H, et al. A comparative study of various commercially available programs in slope stability analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(3): 428-435. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.06.009.
- [10] 张家明.含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2020,28(3):626-638. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-377.
ZHANG Jiaming. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 626-638. DOI: 10.13544/j.cnki. jeg.2019-377.
- [11] RODRÍGUEZ-OCCHOA R, NADIM F, HICKS M A. Influence of weak layers on seismic stability of submarine slopes [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 65: 247-268. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.04.007.

(下转第92页)

参考文献(References):

- [1] 曹景, 刘志才, 冯希训. 箱形截面直线桥及曲线桥抗倾覆稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 69-74.
CAO Jing, LIU Zhicai, FENG Xixun. Analysis of overturning stability of straight and curved bridges with box sections[J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 69-74.
- [2] 刘四田. 连续箱梁独柱墩桥抗倾覆能力分析[J]. 公路, 2021, 66(4): 151-154.
LIU Sitian. Analysis of overturning resistance of continuous box girder single-column pier bridge [J]. Highway, 2021, 66(4): 151-154.
- [3] YI R Y, ZHOU R Y. Reason and risk of bridge collapse in recent 15 years [J]. Transportation Science & Technology, 2015(5): 61-64.
- [4] 王志浩. 独柱墩梁桥的抗倾覆分析及加固对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WANG Zhihao. The research of anti-overturning and structural-reinforcement analysis on a girder bridge with single pedestal piers [D]. Xi'an: Changan University, 2014.
- [5] DAN D H, YU X W, YAN X F, et al. Monitoring and evaluation of overturning resistance of box girder bridges based on time-varying reliability analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34 (1): 04019101. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001375.
- [6] 何雄君, 刘鑫, 梁亚兰. 大跨度小半径曲线梁桥抗倾覆性能研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 89-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.016.
HE Xiongjun, LIU Xin, LIANG Yalan. Research on the anti-overturning performance of long-span small-radius curved beam bridges [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 89-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.016.
- [7] 熊文, 鲁圣弟, 龚玄, 等. 独柱墩梁桥倾覆临界状态分析及规范法的适用性[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 49-58. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.03.006.
XIONG Wen, LU Shengdi, GONG Xuan, et al. Critical condition analysis of overturned bridges with single-column piers and applicability of design standards [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 49-58. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.03.006.
- [8] 吕毅刚, 饶攀, 韩伟威, 等. 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆实用计算方法研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.006.
LYU Yigang, RAO Pan, HAN Weiwei, et al. Research on the practical calculation method of anti-overturning of the curved box girder bridge with single column pier[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.006.
- [9] 宫亚峰, 何钰龙, 谭国金, 等. 三跨独柱连续曲线梁桥抗倾覆稳定性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 113-120. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20161241.
GONG Yafeng, HE Yulong, TAN Guojin, et al. Anti-overturning stability analysis for three-span continuous curved girder bridge with single column pier[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 113-120. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20161241.
- [10] 甘世泽. 支承间距及方式对独柱墩箱梁桥抗倾覆稳定性影响分析[J]. 公路与汽运, 2017(6): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2017.06.045.
GAN Shize. Analysis on the influence of bearing spacing and mode on overturning stability of box girder bridge with single column pier [J]. Highways & Automotive Applications, 2017 (6): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2017.06.045.
- [11] 陈勇, 杨培伟. 独柱墩桥梁抗倾覆加固改造技术[J]. 施工技术, 2021, 50(8): 84-88. DOI: 10.7672/sjgs2021080084.
CHEN Yong, YANG Peiwei. Anti-overturning reinforcement technology of single column pier bridge [J]. Construction Technology, 2021, 50(8): 84-88. DOI: 10.7672/sjgs2021080084.
- [12] 唐雨生, 苏培东, 马云长, 等. 含软弱夹层的顺层岩质滑坡渐进破坏研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(6): 155-165. DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0617.
TANG Yusheng, SU Peidong, MA Yunchang, et al. Progressive failure of bedding rock landslide with weak interlayer [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(6): 155-165. DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0617.
- [13] 袁翔, 滕伟福, 俞伟, 等. MICP技术对巴东组第三段软弱夹层土体的加固试验研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5): 101-106, 130. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210084.
YUAN Xiang, TENG Weifu, YU Wei, et al. Experimental study on reinforcement of weak intercalated layer in the third member of Badong Formation based on MICP technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(5): 101-106, 130. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210084.

(责任编辑:薛仪;英文编辑:王佳)

(上接第64页)

(责任编辑:薛仪;英文编辑:冯硕)