

石头坪景区边坡几何形态对稳定可靠度的影响分析

王江荣¹, 袁维红¹, 赵睿¹, 欧国海²

(1.兰州石化职业技术学院信控学院,甘肃兰州 730060; 2.兰州市西固区城乡建设局,甘肃兰州 730060)

摘要:兰州金城公园石头坪景区提升改造工程存在大量的自然边坡和人工边坡。因边坡土体物理力学参数存在变异性,采用了蒙特卡洛随机抽样法和极限平衡法按不同坡高及坡度计算分析了边坡稳定可靠性指标及其变化规律,结果表明在景区实际坡高、坡度范围内边坡是稳定可靠的,适宜景区建设,但当坡高、坡度达到实际范围的最大值或超范围时,边坡处于基本稳定或欠稳定状态,建议采取加固措施。

关键词:边坡几何形态;蒙特卡洛随机抽样法;极限平衡;安全系数;稳定可靠度

中图分类号:TU476+.3;P634.3+1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)09-0066-05

Analysis on the Influence of Slope Geometry on Stability Reliability in the Shitouping Scenic Area/WANG Jiang-rong¹, YUAN Wei-hong¹, ZHAO Rui¹, OU Guo-hai²(1.College of Information Processing and Control Engineering, Lanzhou Petrochemical Polytechnic, Lanzhou Gansu 730060, China; 2.Lanzhou Xigu District Urban and Rural Construction Bureau, Lanzhou Gansu 730060, China)

Abstract: There are a large number of natural slopes and artificial slopes in the upgrading project of the Shitouping scenic area in Jincheng Park of Lanzhou. Due to the variability of the physico-mechanical parameters of slope soils, the Monte Carlo random sampling method and limit equilibrium method were used to calculate and analyze the slope stability reliability indexes and the change rules according to different slope heights and gradients. The results show that the slope is stable and reliable in the area of the actual slope height and slope gradient range, which is suitable for the scenic spots construction. However, when the slope height and slope gradient reach the maximum or over-range of the actual range, the slope is in a basically stable or under-stable state, the reinforcement measures are suggested.

Key words: slope geometry; Monte Carlo random sampling method; limit equilibrium; safety factor; stability reliability

0 引言

金城公园二期是兰州市西固区南山省级森林公园石头坪景区提升改造工程,拟建设场地如图 1 所示,分北侧区(A区)和南侧区(B区),A区、B区拟建设场地西侧邻接元托冒沟,沟谷呈宽缓V形,沟与工程场地之间形成高陡边坡,边坡坡度在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$,边坡高度 $30 \sim 55$ m,边坡土体主要由马兰黄土(Q_3^{col})和粉土(Q_3^{1+p1})组成,两区占地面积约 231.75 亩(154500 m^2),总建筑用地面积 56000 m^2 。实测工程地质剖面图(42-42')如图 2 所示。

边坡的稳定可靠性直接关系着坡顶建筑物(古典风格的建筑群)的安全和人民生命财产安全。坡高和坡率(坡度)是影响边坡形态的两个主要因素(其次是边坡台阶及宽度等)^[1],一般情况下,边坡越



图 1 拟建场地卫星影像图

收稿日期:2018-04-19; 修回日期:2018-06-22

基金项目:兰州市西固区科学技术局计划项目(编号:西科发[2017]29号);兰州市科学技术局计划项目(编号:兰财建发[2015]85号);甘肃省财政厅专项资金立项资助(编号:甘财教[2013]116号)

作者简介:王江荣,男,汉族,1966年生,教授,硕士,主要从事边坡稳定性分析、控制理论与应用方面的研究工作,甘肃省兰州市西固区山丹街1号,lzshwj@163.com

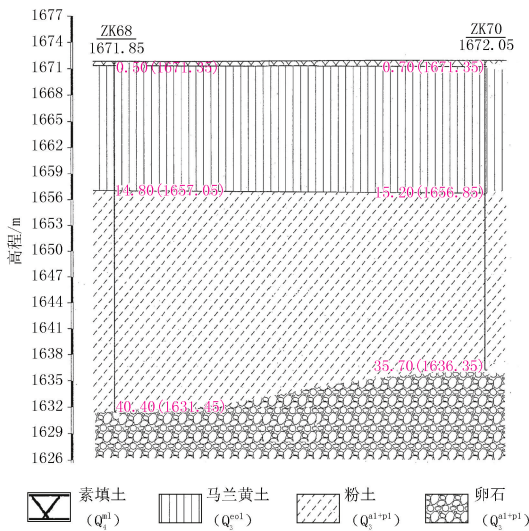


图 2 工程地质剖面图(42-42')

高越陡,则边坡失稳风险就越大;坡高和坡率增大时,坡内点应力也增大,而边坡上部受拉区域、下部受剪区域范围变大使得边坡容易破坏。因此,研究坡高和坡率对石头坪景区边坡安全稳定性影响规律具有重要安全意义和经济意义。

由于边坡土体土性参数存在变异性,仅靠安全系数难以反映边坡稳定性的真实风险水平。为此,本次研究引入了建立在概率统计理论方法上的失效概率和可靠度指标,利用安全系数、失效概率和可靠度指标综合描述边坡的安全稳定性,三者的结合比单一安全系数描述边坡稳定性更全面、更合理、更真实。当坡高及坡率给定时,边坡稳定可靠度与失效概率仅与土体参数变异性有关。所以,本文按不同坡高和坡率并依据土体参数的变异性来分析讨论边坡稳定可靠度指标及其变化规律,在具体研究分析时选择 B 区边坡为研究对象,采用蒙特卡洛随机抽样算法与极限平衡原理相结合的方法计算边坡在天然工况下(只考虑自身重力的情况)的可靠度指标和失效概率^[2-3],利用 GeoStudio 软件完成相关计算及分析,得出的结论对边坡加固、维护及边坡优化具有指导意义。

1 计算模型的建立

1.1 勘察方法及结论

依甘肃省地方标准《岩土工程勘察规范》(DB 62/T 25-3063-2012)和《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999),采用钻孔及探井并配以现场

原位测试、采取原状土样、扰动土样及室内试验等方法对 A、B 区马兰黄土、粉土进行标准贯入试验,对卵石层进行了超重型动力触探试验。根据钻孔揭示,并结合试验资料,在钻探深度内,自上而下依次为:素填土(Q_4^{pl} ,层厚 0.5~4.8 m),马兰黄土(Q_3^{col} ,层厚 3.7~16.9 m),粉土(Q_3^{al+pl} ,层厚 4.3~52.2 m),卵石(Q_3^{al+pl} ,最大揭露厚度 10 m)。因本文选择 B 区边坡为研究对象,从 B 区工程地质剖面图来看,素填土厚度比较均匀且大多不足 1 m,马兰黄土厚度比较集中约 15 m,而粉土厚度变化幅度较大且大多在 13~52.2 m 间,卵石为基岩层,本次研究取其厚度为 10 m。另外,层土近似水平状,即岩土倾角接近 0°。

1.2 计算模型

建模过程中假设土体各层均质且等厚度。由于素填土较均匀且大多不足 1 m,对边坡稳定性影响较小,故可忽略。在建模过程中马兰黄土厚度取定值 15 m,粉土厚度分别取 15、20、25、30、35、40 m,边坡整体坡度分别取 35°、40°、45°、50°、55°、60°,卵石层(基岩层)厚度设定 10 m,共需建立 36 个模型进行稳定可靠度计算。这 36 个模型几何形态变化方案均不考虑台阶,坡率(坡度)用坡角代替(坡率等于坡角的正切)。

下面仅给出坡高 55 m,坡度 60°的几何模型(利用 GeoStudio2012 软件建模),岩土各层呈水平状,建模时不考虑开挖卸荷或加载作用,如图 3 所示。另外,由于景区地处干旱少雨地带(具有降水稀少,日照充足,蒸发量大,气候干燥,昼夜温差大,季节变化显著等特点),故不考虑降雨对边坡稳定可靠性的影响。

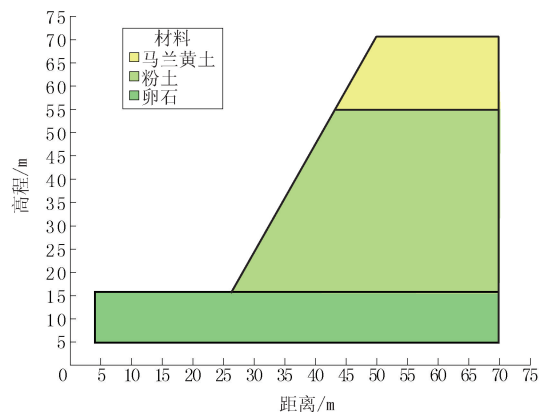


图 3 坡高 55 m 坡度 60°的几何模型

2 边坡岩土体参数确定

根据边坡的工程地质勘察资料,结合室内直剪、三轴压缩试验等确定了石头坪景区边坡土体的物理力学参数:粘聚力 c 、内摩擦角 φ 和重度 γ ,见表1。边坡土性参数存在变异性,且大多数参数可看成服从正态分布的随机变量^[4]。

表1 各土层物理力学性质指标

土层	项目	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
马兰黄土	均值	20.5	23	14.7
	标准差	3.83	2.27	0.784
	变异系数	0.187	0.099	0.051
	分布规律	正态分布	正态分布	正态分布
粉土	均值	20.670	22.83	15.386
	标准差	4.630	1.23	0.686
	变异系数	0.224	0.0545	0.043
	分布规律	正态分布	正态分布	正态分布
卵石		25	32	20.7

研究表明,影响边坡稳定可靠度的主要因素是土体的粘聚力 c 和内摩擦角 φ ^[5]。另外,从表1可看出,土体重度的变异系数较小,说明重度 γ 的变异性对边坡可靠度影响不明显,故可将重度 γ 按常值处理。另外,由于基岩为卵石,其变异性对边坡稳定性影响较小(非主要因素),故本次研究不考虑卵石层的变异性。

3 边坡可靠性的蒙特卡洛模拟方法

3.1 边坡可靠度分析的基本原理

蒙特卡洛法^[6-8]是一种数值计算方法,又称为随机模拟法,是目前可靠度计算相对精确的一种方法。选择摩根斯坦-普莱斯(Morgenstern-Price)极限平衡法为功能函数 $F_j = F_s(c, \varphi, \gamma)$ ($j=1, 2, \dots, N, N$ 为

抽样次数且足够大);将土体参数所服从的正态分布函数转化成抽样函数,抽得的参数样本值代入 F_j ,计算出使 $F_j < 1$ 的样本数 M ,最后得出边坡失效概率 $P_f = M/N$ 。设极限状态函数 $Z = F_s - 1$,则有:

$$\mu_z = \mu_{F_s} - 1 \quad \sigma_z = \sigma_{F_s} \quad (1)$$

式中: μ_z, μ_{F_s} ——分别为随机变量 Z 和 F_s 的均值; σ_z, σ_{F_s} ——分别为 Z 和 F_s 的标准差。

于是边坡稳定可靠指标 β 和破坏概率 P_f 可表述为:

$$\beta = \mu_z / \sigma_z = (\mu_{F_s} - 1) / \sigma_{F_s} \quad (2)$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = P(Z < 0) = M/N \quad (3)$$

式中: $\Phi(\beta)$ ——标准正态分布函数。

3.2 不同几何形态的边坡可靠度分析

固定边坡坡角为 60° ,对坡高分别赋予 30、35、40、45、50、55 m,共计算 6 个数值模型。使用 GeoStudio2012 中的 slope/w 模块,并选用 Morgenstern-Price 极限平衡法为功能函数,打开蒙特卡洛参数设置对话框,输入表1中参数统计特征值,模拟次数设定为 5000 次。执行蒙特卡洛算法,输出稳定系数直方图及密度曲线,如图4所示(仅给出坡高为 55 m 的情形图);输出的安全系数均值、可靠度及失效概率见表2。

表2 坡度 60° 的计算结果

坡高/ m	安全系数 均值	可靠度	失效概率	最小安全 系数	最大安全 系数
30	2.0364	13.9920	0.000000	1.77980	2.3910
35	1.3702	6.4510	0.000000	1.14920	1.5830
40	1.3094	5.2676	0.000000	1.08330	1.5181
45	1.2524	4.7985	0.000000	1.05200	1.4632
50	1.1848	3.6232	0.020016	0.98476	1.3842
55	1.1333	2.7318	0.320064	0.94780	1.3310

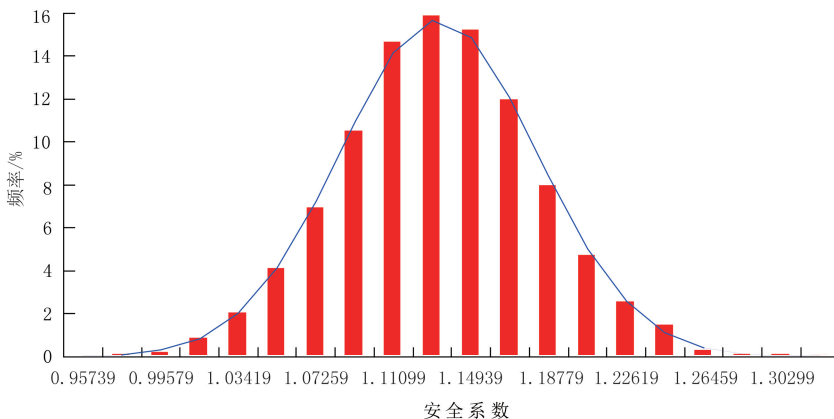


图4 安全系数直方图及密度曲线

由图 4 知边坡安全系数呈现出正态分布特征,说明稳定性分布规律符合实际。

固定边坡坡高 55 m,对坡度分别赋予 35°、40°、45°、50°、55°、60°,共计算 6 个数值模型。使用 GeoStuido2012 中的 slope/w 模块,并选用 Morgenstern-Price 极限平衡法为功能函数,打开蒙特卡洛参数设置对话框,输入表 1 中参数统计特征值,模拟次数设定为 5000 次。执行蒙特卡洛算法,输出的安全系数均值、可靠度及失效概率等见表 3。

表 3 坡高 55 m 的计算结果

坡度/ (°)	安全系数 均值	可靠度	失效概率	最小安全 系数	最大安全 系数
35	2.2802	15.8780	0.000000	1.9926	2.6658
40	1.9827	12.5080	0.000000	1.7171	2.3428
45	1.8111	11.2730	0.000000	1.5673	2.1384
50	1.6277	9.5033	0.000000	1.4037	1.9154
55	1.3818	6.4686	0.000000	1.1614	1.6248
60	1.1333	2.7318	0.320064	0.9478	1.3310

其他 34 种几何形态的计算结果不再给出。下面根据表 2 和表 3 绘制安全系数均值、可靠度的变化趋势图,如图 5 及图 6 所示。

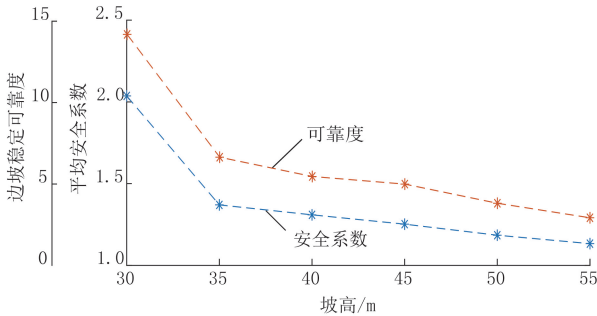


图 5 坡度 60°的边坡安全系数及可靠度变化趋势

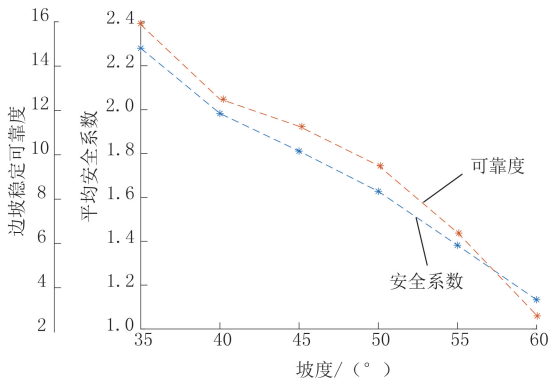


图 6 坡高 55 m 的边坡安全系数及可靠度变化趋势

结果分析:(1)从图 5 可看出在坡度(坡率)给定时,边坡安全系数与可靠度指标均随坡高的增加而

减小;从图 6 可看出当坡高给定时,边坡安全系数与可靠度指标均随坡角的增大而减小。当坡度 60°,坡高为 55 m 时即本文设定的最大坡度和最大坡高时,失效概率为 32%,参考边坡破坏概率的等级评价标准(表 4)^[9],表明景区自然边坡处于中等危险状态;平均安全系数为 1.1333,最小安全系数为 0.9478,参考边坡稳定性安全系数规范标准(表 5)^[10],边坡处于基本稳定或欠稳定状态。

表 4 稳定性等级评价标准

稳定性	等级	破坏概率/%
必然破坏	1	>90
高危险	2	60~90
中等危险	3	30~60
低危险	4	5~30
稳定	5	<5

表 5 边坡稳定性安全系数规范标准

边坡类型	永久边坡		临时边坡
	一般工况	地震工况	
一级边坡	1.35	1.15	1.25
二级边坡	1.30	1.10	1.20
三级边坡	1.25	1.05	1.15

(2)当坡度 50°且坡高 55 m 时(B 区坡度坡高上限),边坡失效概率均远小于 5%,平均安全系数为 1.3818,最小安全系数为 1.1614,由表 4 和表 5 中的标准知景区(B 区)自然边坡处于稳定状态,达到了二级甚至一级边坡安全水平。再由结果分析(1)知,当坡度<50°,坡高<55 m 时,可靠度和安全系数增大明显,而失效概率(破坏概率)为 0,最小安全系数均大于 1,表明此时边坡稳定性达到了一级安全标准,适宜建设。

(3)总之,对于景区(B 区)边坡坡度 $\geq 50^\circ$,坡高 ≥ 55 m 的边坡,其稳定性好,无需采取整体加固;对于坡度 $> 50^\circ$,坡高 > 55 m 的边坡应采取适当的加固措施,特别当边坡顶部增加了荷载(建筑物等)时,为了边坡的长期稳定性,结合相关规范规程及工程建设经验,对景区边坡采用“格构锚杆护坡+植草+护脚墙”等支护加固措施。

4 结论与建议

(1)坡度变化对边坡安全系数及可靠度的影响规律:安全系数及可靠度随边坡坡度的增大而降低,呈负相关性;坡高变化对边坡安全系数及可靠度的影响规律:安全系数及可靠度随边坡坡高的增大而

降低,呈负相关性。

(2)当坡度为 50° ,坡高为55 m时,石头坪景区(B区)自然边坡处于稳定状态,达到了二级甚至一级标准的安全水平;当坡度 $>50^\circ$,且坡高 >55 m时,景区(B区)边坡处于基本稳定或欠稳定状态,有滑坡的可能,故需采取加固措施。但B区西侧元托冒沟与建设场间的边坡高度在30~55 m之间,坡度在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 之间,所以这类几何形态的边坡处于稳定可靠状态,适宜建设,这与实际情况相吻合。

(3)采用可靠度及失效概率来评判边坡安全稳定性,较单一安全系数评判更科学、更真实。

(4)本次研究的不足之处:用二维平面模型难以反映边坡的实际情况,计算结果难免会出现误差;将模型的尺寸及边界设定为理想值和理想状态,所以计算结果会与实际有一定的偏差。另外,将各层岩土厚度看成均匀且水平,这与实际情况不完全一致,这也是本研究的缺陷。再者,素填土平均厚度不足1 m,在研究时未考虑其影响力;坡高与坡度的回归关系因样本数量少而未考虑。以上不足,在后续研究中加以完善。

(5)考虑到地震、暴雨等工况容易造成边坡失

稳,极有可能发生滑坡现象,应对坡度、坡高较大的边坡采用“格构锚杆护坡+植草+护脚墙”等加固措施,作好防灾工作,以确保景区边坡长期稳定。

参考文献:

- [1] 付玉宁.边坡形态与岩层产状对反倾向边坡稳定性影响的数值分析[D].陕西西安:长安大学,2015.
- [2] 朱晴晴,倪万魁,王衍汇,等.陕北某黄土高填方边坡可靠性分析及坡型优化[J].工程地质学报,2016,24(S1):438-444.
- [3] 雷德鑫,易武,柳青,等.三峡库区卧沙溪滑坡稳定性的可靠度及敏感性分析[J].安全与环境工程,2018,25(1):23-28.
- [4] 丁孝勇.不同类型土坡稳定可靠度分析方法及其应用[D].广东广州:华南理工大学,2014.
- [5] 高德彬,倪万魁,梁伟.基于 Monte-Carlo 模拟的公路黄土高边坡可靠性研究[J].公路交通科技,2005,22(9):66-68.
- [6] 杨明,张可能,刘宇飞,等.基于 MATLAB 的均质土坡稳定可靠度的蒙特卡罗模拟[J].地质与勘探,2009,45(1):89-94.
- [7] 聂士诚.土质边坡稳定的可靠度分析及其土性参数的敏感性研究[D].湖南长沙:中南大学,2002.
- [8] 徐飞.边坡稳定的有限元可靠度分析方法及参数敏感性研究[D].贵州贵阳:贵州大学,2015.
- [9] 徐卫来,张志腾.滑坡失稳破坏概率及可靠度研究[J].灾害学,1995,10(4):33-37.
- [10] GB 50330-2013,建筑边坡工程技术规范[S].