

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210704001

岩溶区空间变异性边坡建筑荷载作用下稳定分析*

仇文岗^{1,2,3}, 孟凡胜¹, 何昌杰⁴, 黎泳钦¹, 李建新⁵

(1.重庆大学土木工程学院,重庆 400045; 2.重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045;
3.重庆大学库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心,重庆 400045; 4.中国建筑第五工程局有限公司,湖南长沙 410004; 5.中建五局第三建设有限公司,湖南长沙 410004)

摘要:基于长沙湘江欢乐城废弃矿坑进行改造再利用工程项目,为保证上部工程建筑安全,对地质条件复杂且常有岩溶发育的矿坑高陡边坡稳定性开展了系列研究。考虑岩土体固有的空间变异性及岩溶孔洞影响,采用确定性和可靠度分析相结合的方法对边坡稳定性进行评价。首先针对土岩结构多级高边坡采用 Morgenstern-Price 法计算非圆弧滑动面条件下的安全系数;随后基于随机场理论,考虑岩土体抗剪强度指标的空间变异性,对不同变异特征下受结构荷载作用的高陡分级边坡稳定性开展了概率分析;并探讨了岩溶空洞的发育情况及位置对高陡边坡可靠度的影响。结果表明,在土-岩二元结构的边坡中,滑动破坏往往只发生在性质较差的上层土体中。考虑岩土体力学特性的空间变异特征对边坡稳定性分析具有重要意义,忽略空间变异性可能高估边坡的失效概率;溶洞位置和形状都会影响边坡稳定性,溶洞越靠近陡峭临空面对边坡影响越大,整体来说圆形溶洞比方形溶洞更容易造成边坡失稳破坏。

关键词: 废弃矿坑; 边坡稳定性; 空间变异性; 岩溶

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)02-0316-08

Stability Analysis of Slope with Spatial Variability in Karst Area under Building Load

ZHANG Wengang^{1,2,3}, MENG Fansheng¹, HE Changjie⁴, LI Yongqin¹, LI Jianxin⁵

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of MOE of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. National Local Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. China Construction Fifth Engineering Division Corp., LTD., Changsha 410004, China; 5. 3rd Construction Co., Ltd. of China Construction 5th Engineering Bureau, Changsha 410004, China)

Abstract: To ensure the safety of the superstructure rising from the slope rock wall, extensive studies on the stability of a high and steep slope in a karst area with complex geological conditions were carried out, with reference to the Changsha Xiangjiang happy city rose from a deep abandoned mining pit. In this study, considering the inherent spatial variability of rock and soil and the influence of karst caverns, slope stability is evaluated through both deterministic and reliability analysis. Firstly, the safety factor of the multi-step high slope with a non-circular sliding surface is calculated using the Morgen-

* 收稿日期:2021-07-04;修回日期:2021-12-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078086)、重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-jq0087)、重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0003)资助

作者简介:仇文岗(1983—),男,教授,博导,博士。主要从事岩土工程可靠度和风险控制研究。E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn

stern-Price method. Then the probability analysis of the high steep stepped slope subjected to structural load is carried out considering spatial variability of the shear strength indices based on the random field theory. Additionally, the effect of the karst carven condition on the reliability of the high and steep slope is discussed. The results indicate that in the soil-rock dual structural slope without the effect of the karst cavern, the sliding failure generally develops only in the upper soil mass with poor mechanical properties. And the spatial variability has a significant impact on the failure probability of slopes, ignoring the variation leads to an overestimation of the failure probability. As for the karst caverns, the location and shape of the cave both significantly affect the slope stability. The closer the cave is to the steep free face, the greater the influence of the slope is. Generally speaking, circular caverns are more likely to cause slope instability and damage than square caverns.

Keywords: abandoned mine; slope stability; spatial variability; karst

0 引言

人类在开采挖掘矿产资源的同时,遗留下了大量的矿坑。废弃矿坑形成的高陡边坡临空面,一方面破坏了原始地应力平衡,存在着稳定性问题,另一方面也影响着生态环境美观。随着城市化的推进,我国建筑用地愈发紧张,地下空间开发愈发得到重视,历史遗留的废弃工矿区也成为重点改造对象。对废弃矿坑进行合理规划及改造开发,充分发挥其价值,对于致力于建成资源节约型、环境友好型社会的中国具有重要社会经济价值。

在改造开发深废矿坑的过程中,边坡稳定性将直接影响建筑施工安全,因此对于矿坑高陡边坡的稳定性分析至关重要。如梁志荣等^[1]对佛顶宫矿坑的边坡进行了二维有限元研究,发现无论静力还是地震工况下,边坡最大位移均发生在坡顶及坡面为残积土层和强风化岩层中;师文豪等^[2]对抚顺西露天矿南帮进行了节理岩体边坡稳定性分析,发现此边坡处于极限平衡状态,坡脚与坡顶裂缝呈现贯通趋势,存在整体滑移的可能性。边坡稳定性会受到多种不确定性因素的影响,其中包括岩土体参数固有的空间变异性^[3]。空间变异性是指岩土体在形成的历史过程中由于经受的沉积条件及物理化学等作用的不同,在不同的空间位置处会表现出不同的性质。已有研究表明,若忽略岩土体物理力学参数空间变异性的影响,会导致计算结果偏离客观实际^[4-6]。因此,近年来越来越多学者通过可靠度等概率分析方法,以评估岩土体参数空间变异性的客观存在以及其对边坡稳定性的影响。Y.Huang等^[7]在利用概率密度演化方法进行边坡动力可靠度分析

的基础上,通过模拟相关的非正态随机场来考虑土体参数的空间变异性,并且发现失效概率随着土体参数间相关系数的增大而增大;L.Wang等^[8]考虑了孔隙比的空间变异性对非饱和边坡稳定性的影响,发现在渗流分析中若忽略此参数的空间变异性会导致后续对边坡失效概率的高估;李典庆等^[9]则通过提出基于子集模拟的高效随机有限元法,显著地提高了边坡可靠度评估中失效概率的计算效率及失效样本的生成能力,拓宽了可靠度理论在小失效概率水平下的实用性。

然而在针对空间变异性边坡的相关研究中,同时考虑高陡边坡在岩溶地区发育,即岩溶孔洞对空间变异性边坡稳定性影响的研究十分有限。而已有研究表明,岩溶孔洞在边坡稳定中有着显著影响。杨先寿等^[10]对贵州表层岩溶特点及岩溶边坡的失稳模式进行了总结,运用模糊数学方法并结合7项影响因子的调查监测情况,对岩溶区边坡的稳定性进行了简单判别;刘海燕等^[11]分析了三峡库区岩溶作用对泥质灰岩边坡的影响,将岩溶作用下边坡的破坏类型归纳为薄层-中厚层块裂式破坏、中-厚层点裂式破坏及巨厚层层裂式破坏三类;张科等^[12]针对地下溶洞空间特征难以探测的问题,基于城门山铜矿钻孔数据,借鉴极限平衡条分法思想,提出了一种溶洞随机生成模型以评估岩溶地区岩质边坡的稳定性,发现考虑溶洞影响时,城门山铜矿边坡的安全系数明显降低。因此,针对岩溶地区空间变异性边坡稳定性的分析中,同时考虑参数空间变异性和岩溶作用,分析其对边坡稳定的影响规律是十分必要的。

鉴于此,本文基于长沙湘江欢乐城项目,针对深废矿坑施工改造中的高陡边坡稳定性问题,综合

考虑岩土体物理力学参数空间变异性以及场地发育岩溶孔洞两方面的影响,基于二维极限平衡软件SLIDE,采用Morgenstern-Price法和随机场方法对边坡展开稳定性分析,所得结论可为岩溶区边坡稳定分析提供一定参考价值。

1 工程概况

长沙湘江欢乐城项目位于长沙市岳麓区坪塘镇山塘村—狮峰山村地段,场地原始地貌为湘江河流冲积堆积阶地,后经人工采石形成了近似椭圆状的岩质矿坑,矿坑顶部有土层覆盖。边坡较高且坑壁坡度较陡,项目主体建筑通过墩柱结构直接支承于矿坑各级岩壁之上,因此对坑壁稳定性的分析尤为关键。

1.1 地层岩性特征

根据勘察报告,场地岩土层分布自上而下分别为杂填土、粉质黏土、灰岩。杂填土由黏性土混杂灰岩碎石、块石以及砂卵石等组成,在场地分布广泛,平均厚度7.81 m;粉质黏土为网纹状结构,含有少许铁锰质氧化物,在场地局部分布,平均厚度8.21 m;灰岩分为上下两层,上层灰岩为裂隙块状或中厚层状构造,节理裂隙较发育,岩体完整性程度介于较破碎—破碎之间,岩体基本质量等级为IV级;下层灰岩为厚层状构造,节理裂隙较发育,岩体完整性程度位于较完整—完整之间,岩体基本质量等级为III级,属坚硬岩,该层为场地基岩。

1.2 岩溶情况

场地岩层分布有基岩裂隙水,有利于岩溶发育,经过勘察发现整个矿坑范围都存在岩溶现象。岩溶形态以溶洞或溶隙为主,其次为溶蚀小孔,基岩顶部发育有溶沟。在钻探过程中多孔在微风化岩层中出现循环水漏失或不返水现象,说明在两层灰岩中岩溶较为发育。边坡内部溶洞发育,对于边坡稳定性极为不利,特别是边坡承受较大荷载时,容易导致沿溶洞部位形成滑动面,产生滑坡现象,因此有必要分析岩溶因素对边坡稳定性的影响。

2 数值模型和方法

针对矿坑高陡边坡坑壁承受大荷载时的稳定

性问题,采用二维边坡极限平衡分析软件SLIDE建立考虑溶洞存在的矿坑边坡数值模型,采用Morgenstern-Price法计算安全系数,采用随机场方法模拟岩土体参数的空间变异性。

2.1 数值模型

根据地质勘察报告,选取典型剖面进行数值建模。为方便进行计算分析,对边坡形态进行简化,假设各地层为近似水平分布,所建矿坑边坡模型如图1所示。考虑坑壁所承受的上部建筑结构大荷载,每级台阶模拟施加500 kN/m的集中力。分别在两层灰岩中较为危险位置设置岩溶孔洞,即分别位于集中力荷载正下方且临近边坡临空面,以充分考虑岩溶对边坡稳定性的影响。孔洞以设置相应部位材料重度及强度等参数为0的方式施加,具体位置如图1所示。采用摩尔-库伦弹塑性本构模型表征岩土体性质。根据勘察报告及规范,确定各层岩土体参数见表1、2,其中统计性参数来源于已发表文献^[13-14]。

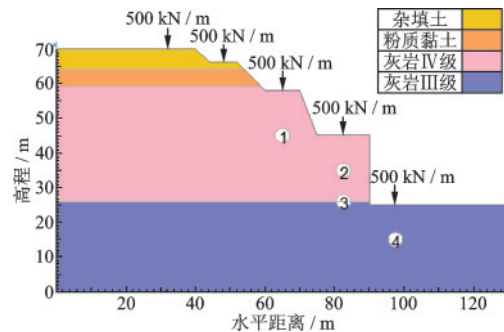


图1 边坡计算模型

Fig.1 Slope calculation model

2.2 稳定性分析方法

2.2.1 Morgenstern-Price法

安全系数的计算是边坡稳定性分析的重点,极限平衡法物理意义明确,计算操作简单,在边坡稳定性分析中得到了广泛的应用。常用的极限平衡法包括简化Bishop法、Janbu法、Morgenstern-Price法等。其中Morgenstern-Price法属于严格条分法,对滑动面的形状不做要求,更适用于岩质边坡的滑动分析,该方法同时满足力的平衡及力矩平衡,因此普遍认为计算结果更为精确^[15-17]。

基于SLIDE软件,采用Morgenstern-Price法计算安全系数,非圆弧滑动面法自动搜索滑面。当溶

表 1 土层统计力学参数

Table 1 Statistical mechanical parameters of soil layers

地层	参数	均值	变异系数	分布类型	波动范围	相关系数
杂填土	黏聚力 c /kPa	8	0.3	对数正态分布	$\delta_h = 20$ m $\delta_v = 2$ m	$\rho_{c,\varphi} = -0.5$
	内摩擦角 φ /($^\circ$)	10	0.2	对数正态分布	$\delta_h = 20$ m $\delta_v = 2$ m	
	重度 γ /(kN/m ³)	18.8	—	—	—	—
粉质黏土	黏聚力 c /kPa	50	0.3	对数正态分布	$\delta_h = 20$ m $\delta_v = 2$ m	$\rho_{c,\varphi} = -0.5$
	内摩擦角 φ /($^\circ$)	19	0.2	对数正态分布	$\delta_h = 20$ m $\delta_v = 2$ m	
	重度 γ /(kN/m ³)	19	—	—	—	—

表 2 岩层统计力学参数

Table 2 Statistical mechanical parameters of rock layers

地层	参数	均值	变异系数	分布类型	波动范围	相关系数
灰岩Ⅳ级	黏聚力 c /kPa	450	0.3	对数正态分布	$\delta_h = 40$ m $\delta_v = 4$ m	$\rho_{c,\varphi} = -0.5$
	内摩擦角 φ /($^\circ$)	33	0.2	对数正态分布	$\delta_h = 40$ m $\delta_v = 4$ m	
	重度 γ /(kN/m ³)	24.5	—	—	—	—
灰岩Ⅲ级	黏聚力 c /kPa	1 100	0.3	对数正态分布	$\delta_h = 40$ m $\delta_v = 4$ m	$\rho_{c,\varphi} = -0.5$
	内摩擦角 φ /($^\circ$)	44.5	0.2	对数正态分布	$\delta_h = 40$ m $\delta_v = 4$ m	
	重度 γ /(kN/m ³)	26.5	—	—	—	—

洞位于 1 号位置时,取表 1、表 2 中岩土体参数均值进行确定性分析,所得最小安全系数及最危险滑动面如图 2 所示。由图可知,滑动面发生于上部软土及土层岩层交界面,此时岩溶孔洞的存在未对边坡失效路径造成显著影响。

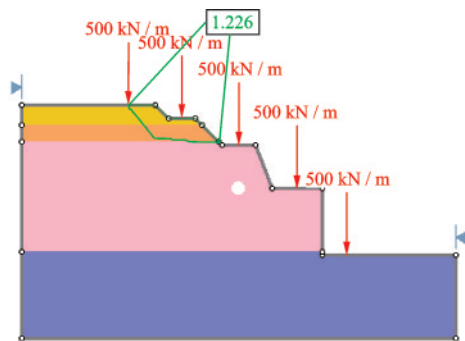


图 2 最小安全系数及滑面

Fig.2 Minimum safety factor and sliding surface

2.2.2 随机场理论

岩土体参数在形成过程中由于沉积及物理化

学作用的不同,在不同空间位置表现出一定的变异性和自相关性。E.H.Vanmarcke^[18]首先提出用随机场方法来模拟岩土体参数的空间变异性,相比于传统的随机变量模型,随机场模型将岩土体参数看作与空间坐标位置相关的随机函数,具有自相关的结构特性,因此可以更合理地模拟岩土体参数的空间分布情况。由于工程现场所得勘察试验数据非常有限,基于真实岩土数据难以建立表征参数相关性的自相关函数,因此一般采用理论自相关函数来近似表征空间变异性^[19]。本文采用二维马尔可夫理论自相关函数模拟随机场^[20]。

与随机取样法相比,拉丁超立方体抽样具有很好的—维投影和均匀分层分布特性,抽样估值稳定,采样点能均匀覆盖概率分布的尾部,样本具有更好的代表性和均匀性,用较少的样本即可反映变量的概率分布情况,可大大提高后续可靠度分析的计算效率^[21]。因此,本文采用拉丁超立方体抽样生成样本,令软件自动划分网格,以保证网格尺寸相对

于模型大小可以满足精度要求,按网格坐标进行随机场离散。随机场统计特征参数见表1和表2,溶洞位于1号位置时,内摩擦角 φ 生成的一次随机场模型如图3所示,由于水平波动范围 δ_h 远大于竖向波动范围 δ_v ,可见各地层存在明显的水平分层现象,证明了所生成随机场模型的准确性。图4则表明,2 000次随机场抽样实现后,计算所得失效概率 P_f 的收敛情况。经检验,所有工况计算所得失效概率均已达到收敛。

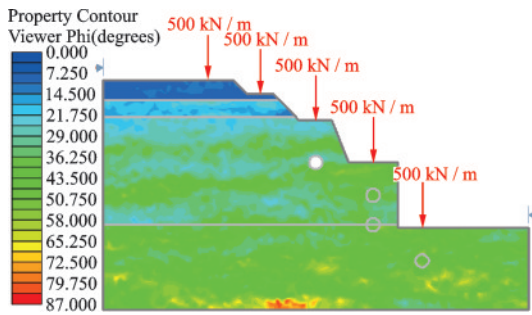


图3 内摩擦角 φ 的随机场模型

Fig.3 Random field model of internal friction angle φ

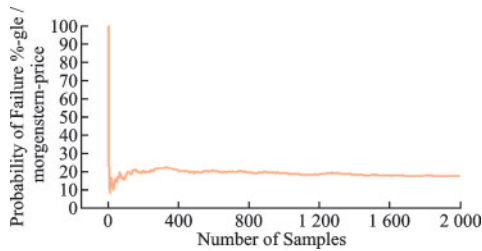


图4 失效概率收敛过程

Fig.4 Convergence process of failure probability

3 结果分析

考虑岩体空间变异性及存在的溶洞对深废矿坑高陡边坡稳定性的影响,对矿坑边坡失效概率进行可靠度计算。分析了包括黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的变异系数、相关系数、波动范围在内的空间变异性统计参数,以及溶洞形状和位置对失效概率的影响。

3.1 空间变异性的影响

为了考虑空间变异性的影响,将溶洞固定于1号位置进行边坡稳定性分析。随机场方法可以较好地模拟岩土体参数空间变异性,通过比较随机变量

模型和随机场模型,图5表明了空间变异性对边坡失效概率的影响。为了方便比较,令 c 和 φ 的变异系数相等,即 $COV_c = COV_\varphi$,变化范围为0.1~0.5,随机场模型其余统计参数见表1、表2。结果表明,不管是随机变量模型还是随机场模型,随着 c 和 φ 变异系数的增加,失效概率都呈近似线性增长趋势,变异系数为0.5时比变异系数为0.1时失效概率增长可达3~4倍。在任何变异系数下,随机场模型相比随机变量模型计算所得失效概率都更小,说明空间变异性对深废矿坑边坡稳定性有显著影响,若忽略岩土体的空间变异性特征将高估边坡的失效概率。

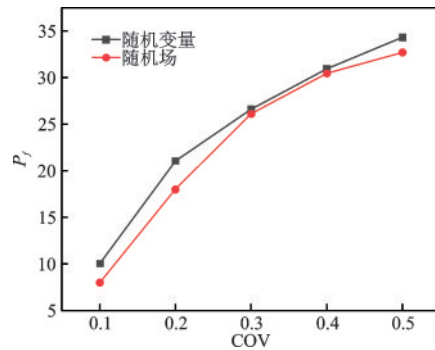


图5 空间变异性对失效概率的影响

Fig.5 Influence of spatial variability on failure probability

3.1.1 变异系数的影响

图6为分别考虑黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的变异程度对边坡失效概率的影响, c 和 φ 的变异系数变化范围为0.1~0.5,考虑到岩土体中 φ 的变异程度一般低于 c ,因此考虑 c 的变异性时 φ 取固定值0.2,分析 φ 的变异性时 c 取固定值0.3,相关系数和波动范围见表1、表2。结果表明, c 和 φ 的变异系数对失效

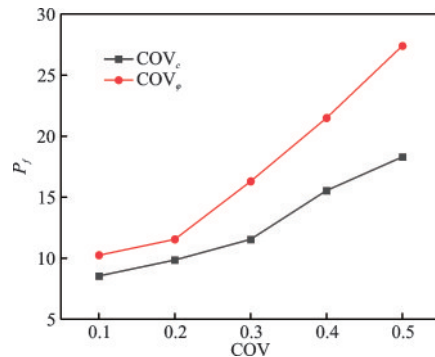


图6 COV_c 和 COV_φ 对失效概率的影响

Fig.6 Influence of COV_c and COV_φ on failure probability

概率都有影响,失效概率随 c 或 φ 变异系数的增大呈增大趋势,并且相比 c ,失效概率受 φ 变异系数影响更大,因此在边坡稳定性分析中应更加重视 φ 变异性的影响,这与文思成等^[22]的研究结论是一致的。

3.1.2 相关系数的影响

岩土体中 c 和 φ 并不是相互独立,而是具有一定相关性的,图7所示为随机场模型中 c 和 φ 的相关系数对边坡失效概率的影响。相关系数分别取值 -0.7 、 -0.5 、 -0.3 、 -0.1 、 0.1 、 0.3 ^[19],其余随机场参数按表1、表2参数选取。结果表明,从 -0.7 到 0.3 ,失效概率随着相关系数数值的增大而增大, c 和 φ 的负相关性越强,失效概率越低,边坡相对更稳定,而 c 和 φ 的正相关性越强,则失效概率越大,边坡越容易失稳破坏。

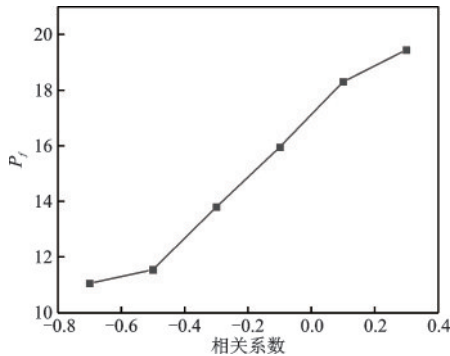


图7 相关系数对失效概率的影响

Fig.7 Influence of correlation coefficient on failure probability

3.1.3 波动范围的影响

由于土体及岩体波动范围不同,为了整体考虑水平波动范围 δ_h 及竖向波动范围 δ_v 的影响,引入一个波动范围变化系数,使土体及岩体中 c 和 φ 的波动范围进行相同倍数的增减。保持一个方向波动范围不变,对另一方向波动范围的变化影响展开分析。取波动范围变化系数分别为 0.5 、 1 、 2 、 3 、 5 共5种工况,相应的水平波动范围 δ_h 及竖向波动范围 δ_v 见表3,而 δ_h 及 δ_v 对边坡失效概率的影响如图8所示。结果表明,整体来看,随着岩土体中黏聚力 c 和内摩擦角 φ 波动范围的增大,失效概率增加,边坡更易失稳破坏。相比于水平波动范围 δ_h ,失效概率受竖向波动范围 δ_v 影响更为显著。此外从图8中可以看出,波动范围变化系数在 $0.5 \sim 3$ 时,失效概率的变化范围更大,即失效概率对波动范围变化更为敏感,而波动范围超过一定值后继续增大,对失效概

表3 水平及竖向波动范围变化情况

Table 3 Changes of horizontal and vertical scale of fluctuation

波动范围变化系数	地层	水平波动范围 δ_h/m	竖向波动范围 δ_v/m
0.5	杂填土、粉质黏土	10	1
	灰岩Ⅳ级、灰岩Ⅲ级	20	2
1	杂填土、粉质黏土	20	2
	灰岩Ⅳ级、灰岩Ⅲ级	40	4
2	杂填土、粉质黏土	40	4
	灰岩Ⅳ级、灰岩Ⅲ级	80	8
3	杂填土、粉质黏土	60	6
	灰岩Ⅳ级、灰岩Ⅲ级	120	12
5	杂填土、粉质黏土	100	10
	灰岩Ⅳ级、灰岩Ⅲ级	200	20

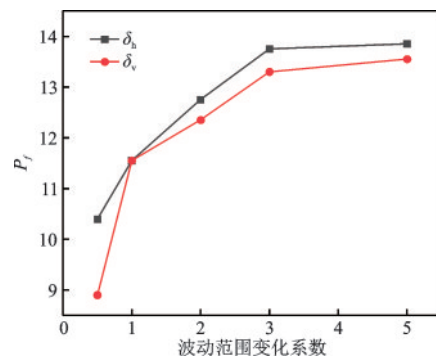


图8 波动范围对失效概率的影响

Fig.8 Influence of scale of fluctuation on failure probability

率影响已经很小。以上所得结果与 F.Y.Chen 等^[23]的研究结论也是一致的。

3.2 岩溶的影响

为了研究溶洞位置及形状对矿坑边坡稳定性的影响,在考虑岩土层空间变异性的基础上,取直径为 4 m 的溶洞分别位于图1所示4个位置,溶洞形状分别设置为圆形及方形,计算结果见表4。

由表4统计结果可知,当溶洞位于边坡岩体不同位置时对失效概率的影响有很大区别。相比较而言,当溶洞位于2号位置时,边坡失效概率最大,位于1号位置时失效概率最小,可知溶洞越接近边坡临空面且临空面越陡峭,溶洞对失效概率影响越大。对于不同形状溶洞影响分析,比较相同大小及位置的溶洞计算结果可知,整体来看方形溶洞下边坡失效概率更低,相同直径下圆形溶洞更易造成边坡失稳破坏。因此对于岩溶区边坡,在地质勘察及稳定性分析过程中要特别注意陡峭临空面附近圆

表4 溶洞对失效概率影响情况

Table 4 Influence of karst cave on failure probability

溶洞位置	溶洞形状	失效概率/%
1	圆形	11.55
	方形	8.40
2	圆形	17.40
	方形	16.30
3	圆形	12.90
	方形	12.30
4	圆形	14.15
	方形	15.40

形溶洞的发育情况。

4 结 论

考虑岩土体物理力学参数的空间变异性及存在的岩溶孔洞对深废矿坑高陡边坡稳定性的影响,通过 Morgenstern-Price 法和随机场法对深废矿坑边坡的失效概率进行了计算。分析了包括黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的变异系数、相关系数、波动范围在内的空间变异性统计参数,以及溶洞形状和位置对失效概率的影响,所得结论如下:

(1) 岩土体参数的空间变异性对含溶洞高陡边坡稳定性有显著影响,若忽略参数的空间变异性可能导致边坡稳定性分析中对失效概率的高估。

(2) 随机场参数中,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的变异系数、相关系数、波动范围都对失效概率有一定影响,失效概率分别随着变异系数、相关系数、波动范围的增大而增大。

(3) 相比于黏聚力 c ,失效概率受内摩擦角 φ 变异系数影响更为显著,相比于水平波动范围,失效概率受竖向波动范围影响更为显著,因此在对边坡进行稳定性分析时应格外关注 φ 的变异程度及参数竖向波动范围 δ_v 的取值准确性。

(4) 不同溶洞位置及形状对边坡失效概率影响具有明显区别,越靠近陡峭临空面,溶洞对边坡影响更大,圆形溶洞比方形溶洞更易造成边坡失稳破坏。

参考文献:

[1] 梁志荣,张菊连,李伟,等.佛顶宫矿坑边坡的二维静动力有限元模拟分析研究[J].土木工程学报,2015,

48(增2):208-213.

Liang Z R, Zhang J L, Li W, et al. Two-dimensional static and seismic finite element simulation and analysis of Foding Palace mine pit[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup2): 208-213. (in Chinese)

[2] 师文豪,杨天鸿,王培涛,等.露天矿边坡岩体稳定性各向异性分析方法及工程应用[J].岩土工程学报,2014,36(10):1924-1933.

Shi W H, Yang T H, Wang P T, et al. Anisotropy analysis method for stability of open-pit slope rock mass and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1924-1933. (in Chinese)

[3] 郭重阳,李典庆,曹子君,等.考虑空间变异性条件下的边坡稳定可靠度高效敏感性分析[J].岩土力学,2018,39(6):2203-2210.

Guo C Y, Li D Q, Cao Z J, et al. Efficient reliability sensitivity analysis for slope stability in spatially variable soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (6) : 2203-2210. (in Chinese)

[4] Cho S E. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability [J]. Engineering Geology, 2007, 92 (3): 97-109.

[5] Griffiths D V, Huang J S, Fenton G A. Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1367-1378.

[6] 谭晓慧,董小乐,费锁柱,等.基于KL展开的可靠度分析方法及其应用[J].岩土工程学报,2020,42(5):808-816.

Tan X H, Dong X L, Fei S Z, et al. Reliability analysis method based on KL expansion and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 808-816. (in Chinese)

[7] Huang Y, Zhao L, Li X R. Slope-dynamic reliability analysis considering spatial variability of soil parameters [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20 (6): 04020068.

[8] Wang L, Wu C Z, Li Y Q, et al. Probabilistic risk assessment of unsaturated slope failure considering spatial variability of hydraulic parameters [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(12): 5032-5040.

[9] 李典庆,肖特,曹子君,等.基于高效随机有限元法的边坡风险评估[J].岩土力学,2016,37(7):1994-2003.

Li D Q, Xiao T, Cao Z J, et al. Slope risk assessment using efficient random finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1994-2003. (in Chinese)

- [10] 杨先寿, 蒋忠诚. 贵州表层岩溶边坡失稳的模式、机理及评价[J]. 中国岩溶, 1998, 17(4): 62-69.
Yang X S, Jiang Z C. Model and mechanism of epikarst slope distabilization in Guizhou[J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(4): 62-69. (in Chinese)
- [11] 刘海燕, 伍法权, 祁生文, 等. 三峡库区泥质灰岩溶蚀作用与边坡岩体破坏[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 37-41.
Liu H Y, Wu F Q, Qi S W, et al. The dissolution process and the rock mass breakage of marlite slope in Three Gorges Reservoir Region[J]. Coal Geology and Exploration, 2006, 34(4): 37-41. (in Chinese)
- [12] 张科, 杨红宣, 范文臣. 基于溶洞随机模型的岩质边坡稳定性评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1381-1386.
Zhang K, Yang H X, Fan W C. Rock slope stability analysis based on karst cave stochastic model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1381-1386. (in Chinese)
- [13] Lv Q, Xiao Z P, Zheng J, et al. Probabilistic assessment of tunnel convergence considering spatial variability in rock mass properties using interpolated autocorrelation and response surface method[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(6): 1619-1629.
- [14] 蒋水华, 魏博文, 姚池, 等. 考虑概率分布影响的低概率水平边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1071-1080.
Jiang S H, Wei B W, Yao C, et al. Reliability analysis of soil slopes at low-probability levels considering effect of probability distributions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1071-1080. (in Chinese)
- [15] 张立舟, 瞿嘉玮, 邓湘波, 等. 极限平衡 Morgenstern-Price 法与有限元 ABAQUS 法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2013, 27(6): 23-27.
Zhang L Z, Qu J W, Deng X B, et al. Research on the application about limit equilibrium of Morgenstern-Price method and finite element analysis of ABAQUS method in slope stability analysis[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2013, 27(6): 23-27. (in Chinese)
- [16] 凌道盛, 戚顺超, 陈锋, 等. 一种基于 Morgenstern-Price 法假定的三维边坡稳定性分析法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 107-116.
Ling D S, Qi S C, Chen F, et al. A limit equilibrium method based on Morgenstern-Price method for 3D slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 107-116. (in Chinese)
- [17] 陈昌富, 朱剑锋, 龚晓南. 基于响应面法和 Morgenstern-Price 法土坡可靠度计算方法[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 166-172.
Chen C F, Zhu J F, Gong X N. Calculation method of earth slope reliability based on response surface method and Morgenstern-Price procedure[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 166-172. (in Chinese)
- [18] Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1997, 103(11): 1227-1246.
- [19] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 508-518.
Jiang S H, Li D Q, Zhou C B, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 508-518. (in Chinese)
- [20] Javankhoshdel S, Luo N, Bathurst R J, et al. Probabilistic analysis of simple slopes with cohesive soil strength using RLEM and RFEM[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2017, 11(3): 231-246.
- [21] 马春辉, 杨杰, 程琳, 等. 基于混合核函数 HS-RVM 的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增1): 3409-3415.
Ma C H, Yang J, Cheng L, et al. Slope stability analysis based on HS-RVM with mixed kernel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup1): 3409-3415. (in Chinese)
- [22] 文思成, 张洁, 黄宏伟. 强震作用下土质高边坡的可靠度分析[J]. 固体力学学报, 2016, 37(增1): 16-22.
Wen S C, Zhang J, Huang H W. Reliability analysis of soil high slope stability under strong seismic condition[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2016, 37(Sup1): 16-22. (in Chinese)
- [23] Chen F Y, Zhang R H, Wang Y, et al. Probabilistic stability analyses of slope reinforced with piles in spatially variable soils[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2020, 122: 66-79.

(本文编辑: 池营营)