

文章编号: 1007-2993(2012)05-0259-04

昆明新机场航站区下伏溶洞地基承载力分析

邓杰文 彭大雷 刘宏

(喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室(贵州大学), 贵州贵阳 550003)

【摘要】 溶洞地基承载力的影响因素众多。溶洞埋深、溶洞直径(跨度)、水平相邻溶洞的间距, 竖向相邻溶洞的间距及溶洞断面形态等对地基的承载力影响很大。应用工程地质分析和数值模拟相结合的方法, 对昆明新机场下伏溶洞地基承载力进行了分析, 得出当单个溶洞埋深大于 2 倍直径后, 上部荷载与下部溶蚀空间的关系较小。当水平相邻溶洞的间距大于 1 倍跨度以及当竖向相邻溶洞间距大于 0.5 倍跨度后, 可以忽略溶洞对上部荷载的影响。溶蚀率每增加 5%, 上部最大荷载 q_{\max} 降低幅度约 6%~10%。当跨度大于 3 倍洞高时, 上部最大荷载的降低幅度相对较小, 竖向型溶洞所能承受的荷载相对较大。

【关键词】 昆明新机场; 下伏溶洞地基; 数值模拟; 承载力

【中图分类号】 P 642.25; TU 431

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.05.011

The Carrying Capacity Analysis of Kunming New Airport Terminal Area Underlying Cave Foundation

Deng Jieweng Peng Dalei Liu Hong

(Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Ministry of Education
(Guizhou University) Guiyang 550003, Guizhou, China)

【Abstract】 There are many factors that affect bearing capacity of Cave foundation, such as Cave depth, the caves diameter (span), spacing vertically adjacent caves and caverns section form the foundation bearing capacity. The way, combined engineering geology analysis with numerical simulation, was applied to analyze the underlying bearing capacity of Cave foundation. According to this way, it concludes that the relationship between the diameter of the upper load and the lower part of the dissolution is smaller when a single cave depth is greater than 2 times, and the impact of the cave to the top load can be ignored when the spacing of the level of the adjacent cave is greater than one times and the vertical distance is greater than 0.5 times of the span. Besides, the upper part of the maximum load q_{\max} decrease about 6% to 10% from each additional 5% of dissolution rate. When the span is greater than three times of the hole high, the decrease range of the maximum load on the top of foundation is relatively small; on the contrary, the load that vertical type caves can withstand is relatively large.

【Key words】 Kunming New Airport; Underlying cave foundation; numerical simulation; Carrying capacity

0 引言

我国的可溶岩分布面积达 $3.65 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积的 1/3, 是世界上岩溶最发育的国家之一^[1]。岩溶地基承载力不足会影响到上部建筑物的安全使用, 其承载力问题在工程界也越来越受到重视^[2]。下伏溶洞地基是指在建筑物基础传递的荷载作用影响范围内一定深度范围发育有溶洞的地基。本文对昆明新机场航站区下伏溶洞地基承载力进行数值模拟分析。

1 航站区下伏溶洞地基发育条件及分布特征

1.1 发育条件

岩溶发育的三个基本条件是岩体为可溶性岩,

节理裂隙发育和有足够的流动性水^[3], 溶洞形成的主要原因是石灰岩地区地下水长期的溶蚀作用。昆明新机场航站区位于龙泉寺和南泉岩两个水文地质单元分水岭交接带的岩溶洼地和岩溶丘陵地貌(F10 断层横穿航站楼腰部), 航站区基岩包括下二叠统阳新组栖霞段灰岩(P_1y^1)、下二叠统倒石头组(P_1d)泥岩、中石炭统威宁组(C_{2w})灰岩、上泥盆统宰格组(D_{3z})白云岩及 F10 附近的构造角砾岩。F10 断层以南出露岩层为 P_1y^1 、 P_1d 、 C_{2w} , 断层以北出露岩层为 D_3z 。其岩溶水含水层从垂向上可分为三个带: 垂直入渗带(一)、强水平径流带(二)和弱水

基金项目: 贵州省优秀青年科技人才培养专项资金项目(黔科合人字 2009-23)

作者简介: 邓杰文, 1986 年生, 男, 汉族, 贵州瓮安人, 岩土工程专业研究生。研究方向: 高边坡与洞室稳定性。E-mail: xiaofei6668@126.com

平迳流带(三)^[4],相应地岩溶发育垂向上也可分为三个带:垂向岩溶裂沟(裂缝或裂隙)及石芽等竖向岩溶分布带(甲带)、水平岩溶管、洞、隙分布带(乙带)和相对均匀岩溶化分布带(丙带)^[5](见图1)。由于中更新

世时期(Q₂时期)断块差异升降运动显著,F10断层破碎带中的节理裂隙发育,强水平迳流带(二)的某些节理裂隙在地下径流长期的溶蚀作用下发育成为溶洞。

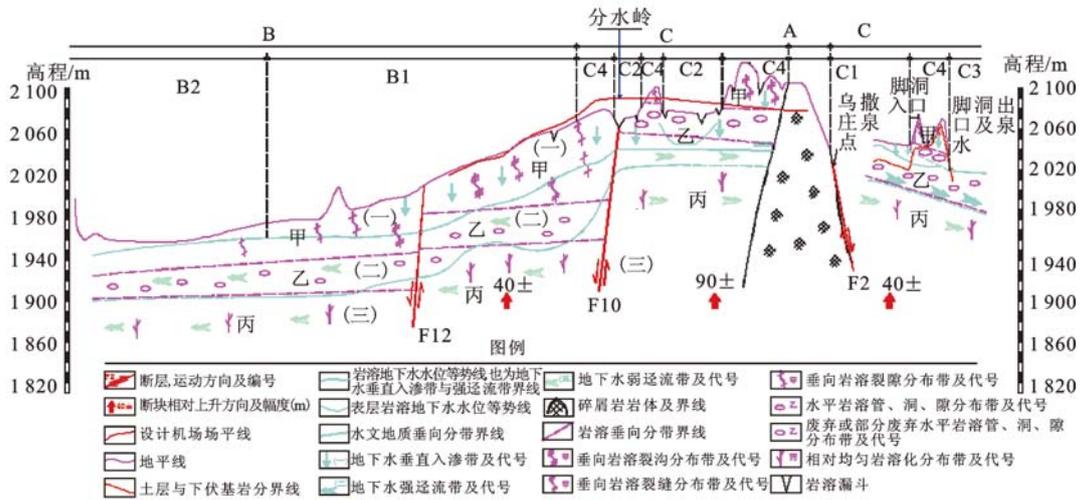


图1 水文地质剖面图

1.2 分布特征

由于航站区溶洞较发育,规模较小而深度较大,各个溶洞的连通性较差,加之在地壳抬升平静期易于堵塞,溶洞近水平向延伸距离有限;甲带中少量规模较大的溶洞,多为地块抬升过程中废弃或部分废弃的乙带的溶洞。航站区发育的溶洞从分布上可以分为单个溶洞、水平相邻溶洞、竖向相邻溶洞及多个相邻溶洞。从洞体形态上可以分为圆形溶洞和椭圆形溶洞两大类。因航站区,特别是在F10断层破碎带上岩体破碎,导致地基承载力不足,在上部工程荷载作用下容易发生破坏。

航站区揭露的溶洞(见图2)总计70个,揭露溶洞情况统计(见表1),总体上,洞高0.5~2 m的溶洞35

个,占50%,洞高2~4 m的溶洞23个,占33%,洞高>4 m的溶洞12个(最大洞高为7.7 m),占17%;充填型溶洞48个,占69%,充填物为可塑—软塑状红粘土,含少量碎石,未充填型溶洞22个,占31%。



图2 航站区揭露的溶洞

表1 钻孔揭露溶洞情况

地层代号	揭露溶洞 /个	溶洞高度/m			溶洞底板埋深/m				充填 /个	未充填 /个
		0.5~2	2~4	>4	<10	10~20	20~30	>30		
P _{1y} ¹	23	16	6	1	3	8	11	2	13	10
C _{2w}	5	2	2	1	2	2	1		5	
D _{3z}	34	15	11	8	4	13	13	4	24	10
D _{2h}	7	2	3	2	1	2	2	2	6	1
Є _{2s}	1		1				1			1
合计	70	35	23	12	10	25	28	8	48	22

2 承载力分析

相邻溶洞的存在对围岩应力有影响,由于围岩

内某一点的总应力等于两个或者多个洞室在该点引起的应力之和,故相邻洞室的存在通常使围岩应力

(主要是压应力)的集中程度增高,对洞室围岩稳定不利^[2]。而地下水产生的“真空吸蚀作用”对地基稳定性的影响很小,洞内充填物对地基稳定的作用不明显^[1]。由于航站区溶洞大多规模较小,本文主要针对中小跨度的溶洞用 GEO-SLOPE 进行分类模拟分析。

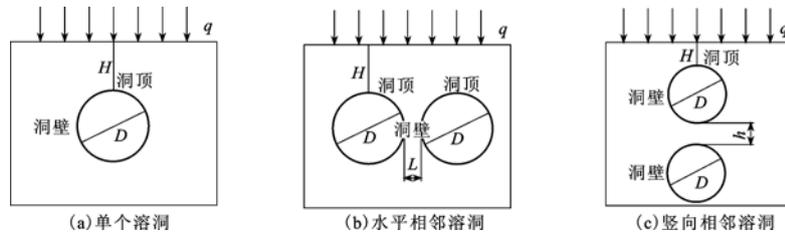


图3 溶洞的地基计算模型

1)将下伏溶洞的地基细分为单个溶洞、水平相邻溶洞、竖向相邻溶洞、多个相邻溶洞及不同的溶洞形态五种情况进行模拟分析。

2)对于单个圆形溶洞直径 D 取 3 m,顶板厚度 H 取 1~12 m,荷载 q 按 250 kPa 幅度增加。对于水平相邻溶洞直径 D 取 3 m,顶板厚度 H 取 3 m,荷载 q 按 250 kPa 幅度增加。对于竖向相邻溶洞直径 D 取 3 m,顶板厚度 H 取 3 m,荷载 q 按 250 kPa 幅

2.1 模拟思路与方法

模拟思路:顶板厚度 H ,顶板上作用有均布荷载 q ,洞径为 D ,各类溶洞地基承载力的计算模型见图 3。当上部荷载 q 逐渐增大过程中,观察溶洞洞壁或洞顶的变形情况,若洞壁或洞顶发生过大变形,则所对应的上部荷载 q 即为地基所能承受的最大荷载 q_{\max} 。部分溶洞地基计算模型见图 3。

度增加。对于多个相邻溶洞,溶洞个数较多且各溶洞间相邻较近时,采用溶洞空间所占的比率(溶蚀率%)进行描述,对于平面问题,采用溶洞面积 A_1 与模型截面积 A 之比来描述。

3)对于溶洞形态的影响,采用溶洞的跨度和高度之比 L_H/L_V 来描述其形态变化, L_H/L_V 的变化范围取 0.5~3。

4)岩体的物理力学参数(见表 2)。

表2 岩体物理力学参数

岩石名称及时代	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 ν	变形模量 E/GPa	抗剪断强度	
				c/MPa	$\varphi/(\circ)$
P_1y^1 中等风化灰岩	26.7	0.25	18	1.3	42
P_1y^1 中等风化灰岩破碎带	26.5	0.30	15	0.7	39
C_2w 中等风化灰岩	26.3	0.30	15	0.8	40
C_2w 中等风化灰岩破碎带	26.0	0.32	13	0.5	38
D_{3z} 中等风化白云岩	26.5	0.25	18	1.5	42
F10 断层角砾岩	26.5	0.28	16	1.0	40

2.2 对上部最大承载力影响因素的分析

下伏溶洞地基承载力分析的出发点是在下部存在溶洞的前提下,以洞室为中心,对洞壁及其周边荷载传递范围内的变形特征进行分析。并借鉴建筑地基承载力计算理论,判断上部地基或持力层能否满足要求。基于数值模拟结果,作出洞壁或洞顶处的最大位移与上部最大荷载的关系内曲线,根据上部最大荷载 q_{\max} 及竖向最大位移 U_y 对曲线上的变化情况进行分析判断。

从实践中可以发现,许多溶洞地基的破坏往往是由局部破坏进而发展到整体破坏,由溶洞内部破

坏再发展到外部塌陷失稳^[1]。由于溶洞常发育于可溶性碳酸盐岩中,这类岩石的强度往往较大,对于浅埋且岩体较完整的溶洞,其破坏多表现为洞室周边岩体的脆性破坏,破坏过程为洞壁岩体应力集中和应力重分布;对于破碎岩体中溶洞的破坏大多表现为坍塌破坏,或因溶洞周边破碎岩体的径向位移过大导致上部岩体随之发生过大位移。无论溶洞周边的岩体以哪种方式破坏或变形,最终的表现形式主要以过大的变形出现,且这种变形的分布特征是以溶洞为中心呈辐射状向四周逐渐减弱。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)中

关于建筑物倾斜控制的规定,高层建筑基础倾斜为0.002~0.004,耸结构基础倾斜为0.002~0.008^[6]。若取基础间距为6 m,基础倾斜是由下伏溶洞发生变形或破坏引起的,若倾斜控制取0.001~0.002作为控制标准,则相应的沉降量容许值为6 m×(0.001~0.002)=6~12 mm。

综上,当溶洞顶板的底部、中部或顶部的竖向位移大于6~12mm时称为发生了过大变形。而在数值计算过程中,当迭代步数足够大后,溶洞顶板的底部、中部和顶部的竖向位移与计算时步关系曲线仍呈线性或非线性发展而未能收敛时称为发生了过大变形,则取相应的荷载值作为上部最大荷载 q_{max} 。昆明新机场各类溶洞地基的模拟结果曲线见图4~图8。

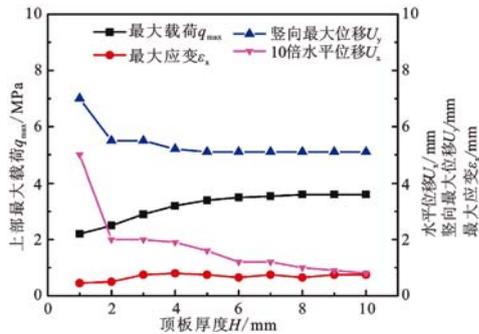


图4 单个溶洞模拟结果曲线

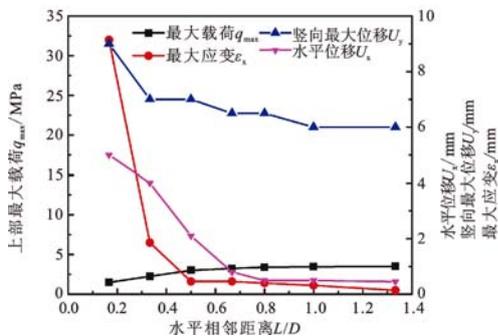


图5 水平相邻溶洞模拟结果曲线

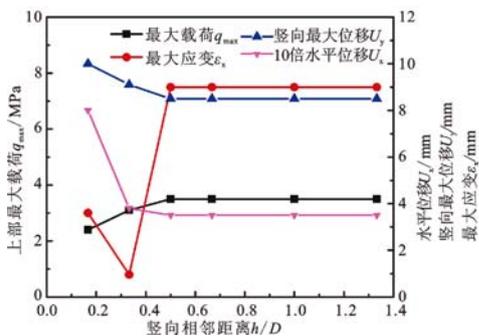


图6 竖向相邻溶洞模拟结果曲线

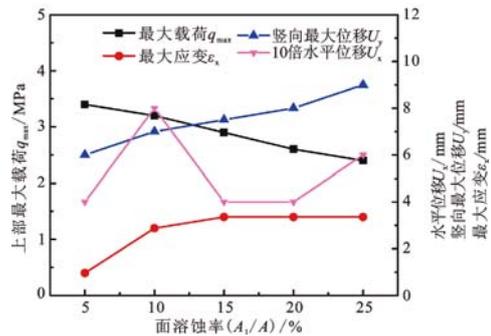


图7 多个相邻溶洞模拟结果曲线

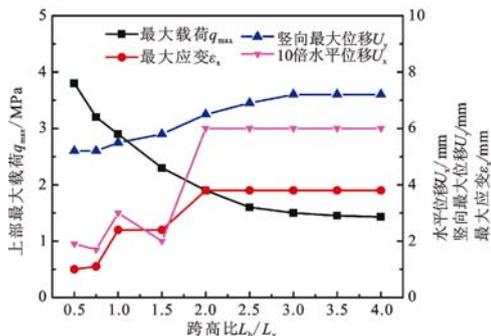


图8 溶洞形态的影响模拟结果曲线

3 结论

1)对于有单个圆形溶洞地基,当顶板厚度 H 与洞跨 D 之比大于 2 后,下伏溶洞对上部荷载的影响较小,即当溶洞埋深大于 2 倍跨度后,上部的最大荷载主要取决于岩体力学强度,而与下部的溶蚀空间关系较小。

2)对于有水平相邻溶洞地基,当水平相邻距离 L 与洞跨 D 之比 L/D 大于 1 后,相邻溶洞对上部荷载的影响较小,即当溶洞水平相邻距离大于 1 倍跨度后,可以忽略水平相邻溶洞间的影响。

3)对于有竖向相邻溶洞地基,当竖向相邻距离 h 与洞跨 D 之比大于 0.5 后,相邻溶洞对上部荷载的影响较小,即当溶洞相邻距离大于 0.5 倍跨度后,可以忽略相邻溶洞间的影响。

4)对于有多个相邻溶洞地基,当面溶蚀率在 5%~25% 范围内变化时,上部最大荷载 q_{max} 随溶蚀率增加呈线性式降低,溶蚀率每增加 5%,上部最大荷载 q_{max} 降低幅度约 6%~10%。

5)溶洞形态对地基承载力的影响明显。随着溶洞跨度的增加,上部所能承受的最大荷载迅速降低,当跨度为 3 倍于高度时,所能承受的荷载约为圆形溶洞的一半;当跨度大于 3 倍洞高时,其降低幅度相对较小,此时上部所能承受的最大荷载主要取决于岩体强度及顶板厚度;当跨度小于高度,即溶洞呈竖向型时,所能承受的荷载相对较大。

(下转封3页)

无法控制,根据对该地区多年的边坡支护工作经验,其最终结果安全性是达不到要求的。另外第三设计方案采用表2中饱和和三轴剪值(相当于泥岩全泥化)计算,结果总造价太高,显然该方案也不合理,原因是该场地地下水较低、泥岩没有完全暴露,其泥岩不可能长期浸泡在水中。为此,第二方案本着从实际出发,首先考虑膨胀岩具有的特性——抗剪强度衰变的时间效应,同时考虑到基坑支护安全要求的特点,结合实际取样分析调整设计,使本工程设计施工达到安全、经济的原则。

在实际基坑施工过程中,我们根据基坑监测情况调整设计,如部分增加或减少锚索数量,以及调整孔间距,重视时空效应,动态设计和信息化施工,完成了该基坑支护施工,后经三年的使用效果良好。

5 结 语

1)通过大量的实际设计施工经验表明,合理选取 c 、 φ 参数,在施工过程中适时取样,调整设计施工图非常重要。在膨胀岩地区选取天然反复剪残余强度试验数据更为合理。

2)注重时空效应是深基坑支护工程未来发展的方向,在膨胀岩土深基坑支护设计中,充分考虑时间效应这个因素更为具体更为重要,能达到省时省力、节省投资的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

[1] 徐建华,莫一星. 广西军事体育学校膨胀岩山体滑坡整治的反思[J]. 广西地质,1999(1):41-45.

- [2] W. G. Holtz and H. J. Gibbs, Engineering, Properties of Expansive Clays, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. 1956:121.
- [3] W. Wittke and B. Pierau, Foundations for the Design and Construction of Tunnel in Swelling Rock, Proceeding of the 4th international Congress on Rock Mechanics, Montreux, Switzerland, 1979.
- [4] H. H. Einstein, Suggested Methods for Laboratory Testing of Argillaceous Swelling Rock, Int. J. Roc Meth. Min. Sci., 1989(3):415-426.
- [5] 扬庆,廖国华. 膨胀岩三轴膨胀试验的研究[J]. 岩石力学与工程学报,1994(1):51-58.
- [6] 谭罗荣,孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土工程力学,2004,25(10):1555-1559.
- [7] 韩华强,陈生水. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):422-424.
- [8] 韩华强,陈生水. 非饱和膨胀土强度及变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(12):1872-1876.
- [9] 中国土木工程学会力学及岩土工程分会主编. 深基坑支护技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [10] 应宏伟,谢康和. 软粘土深基坑开挖时间效应的有限元分析[J]. 计算力学学报,2000(3):350-354.
- [11] 杨正国. 膨胀土高边坡开挖支护设计分析[J]. 路基工程,2010(3):136-138.
- [12] 蒋忠信,冯升龙. 百色盆地膨胀岩强度试验条件效应的研究[J]. 中国地质灾害与防治,1994(1):55-63.

收稿日期:2012-07-04

(上接第262页)

参 考 文 献

[1] 刘之葵,梁金城,朱寿增,等. 岩溶区含溶洞岩石地基稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2003,25(5):629-633.

[2] 刘宏,赵跃平,邬相国,等. 强溶蚀带岩溶地基稳定性研究[J]. 矿业研究与开发,2011,31(3):35-39.

[3] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994:384-386.

- [4] 袁道先. 中国岩溶动力系统[M]. 北京:地质出版社,2002:102-105.
- [5] 王亨林,黄练红,高岩川,等. 昆明新机场航站区岩溶形态特征及其发育规律探讨[J]. 工程勘察,2010(增1):54-60.
- [6] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].

收稿日期:2012-08-08