

溶洞上方条形基础地基极限承载力有限元分析

胡庆国^{1,2}, 张可能¹, 阳军生¹

- (1. 中南大学 地学与环境工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 长沙理工大学 土木工程系, 湖南 长沙, 410076)

摘要: 针对岩溶地区典型围岩条件, 采用有限元方法对岩溶地区条形基础下溶洞顶板稳定性进行分析计算, 得出溶洞顶板跨度、顶板厚度不同时地基的极限承载力; 分析了极限承载力与各影响因素之间的关系, 给出了溶洞顶板安全厚度的有限元分析结果。研究表明: 溶洞顶板厚度在一定范围内, 当顶板跨度从 B 增加到 $4B$ 时, 地基极限承载力降低 $1/3$; 当跨度一定时, 地基极限承载力随溶洞顶板厚度增加而增加; 当顶板厚度达到安全厚度时, 溶洞对地基极限承载力影响可以不计。

关键词: 溶洞; 条形基础; 极限承载力; 有限元分析

中图分类号: TU 471. 6 文献标识码: A 文章编号: 1672-7207(2005)04-0694-04

Finite element analysis of ultimate bearing capacity of strip footing above Karst cave

HU Qing-guo^{1,2}, ZHANG Ke-neng¹, YANG Jun-sheng¹

- (1. School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Department of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: The ultimate bearing capacity of surface strip footings located above a cylindrical rock void whose axis parallels with the footing axis was investigated. The performance of strip surface footings with and without an underground void was studied using the finite element method. For each footing, there exists a critical depth below which the presence of the void has negligible influence on footing performance. The ultimate bearing capacity values were obtained from the results of analysis and were related graphically to the influencing factors. The results show that the ultimate bearing capacity of foundation drops $1/3$ when the width of rock plate upper cave increases from B to $4B$ within the limits of depth. As the width of rock plate upper cave is certain, the ultimate bearing capacity of foundation increases with the depth, and the caves have little effect on the ultimate bearing capacity of foundation when rock plate upper cave reaches a critical depth.

Key words: Karst cave; strip footing; ultimate bearing capacity; finite element analysis

在岩溶地区进行基础工程设计与施工时, 需要特别考虑基础下方溶洞的影响。岩溶地基承载力不仅与溶洞顶板厚度、围岩的特性和岩溶发育程度有

关, 还与基础的尺寸、工作荷载和溶洞顶板跨度等密切相关。分析并确定不同条件下溶洞上方岩溶地基承载力, 对于保证岩溶地区建筑的安全具有非常重

收稿日期: 2005-02-24

作者简介: 胡庆国(1963-), 男, 湖南湘乡人, 博士研究生, 副教授, 从事地基与边坡工程研究

论文联系人: 胡庆国, 男, 副教授; 电话: 0731-5040686(O); E-mail: hqg1001@sina.com

要的意义。当地基承载力不能满足要求时,需要对溶洞进行有效处理或者对顶板采取加固措施,以保证建筑物的安全。

计算岩溶地区溶洞顶板的稳定性时,通常采用梁、板、塌落拱和压力拱等计算方法^[1]。郭峰等^[2]利用冲切理论进行分析;刘之葵等^[3]利用弹性理论,推导了岩石地基中溶洞周围的应力状态,利用格里菲斯强度理论,对含溶洞岩石地基的稳定性进行定量计算判别,目前,对于土层空区上方条形基础地基极限承载力的确定;M. C. Wang 等^[4,5]得出了不同条件下条形基础的极限承载力的确定方法和确定图表^[3,5];对于岩溶地区溶洞上方地基极限承载力的确定,大多数研究者讨论了桩基础地基承载力,而对条形基础进行的研究较少。在此,作者针对岩溶地区典型的围岩特征,采用有限单元法分析溶洞上方条形基础地基的极限承载力,研究溶洞顶板跨度、厚度等因素对极限承载力的影响。

1 分析方法与有限元计算模型

将溶洞简化为规则矩形空洞,不考虑溶洞内充填物的影响,条形基础正好处于溶洞正上方,且基础的埋置深度为0。根据分析问题的特点,采用平面应变模型(见图1),条形基础宽度为 B ,溶洞顶板跨度为 W ,溶洞顶板厚度为 H ,溶洞的高度为 h ,条形基础的基底压力为 p ,分析中不计水平作用力,仅考虑竖向荷载作用下溶洞顶板的稳定性。

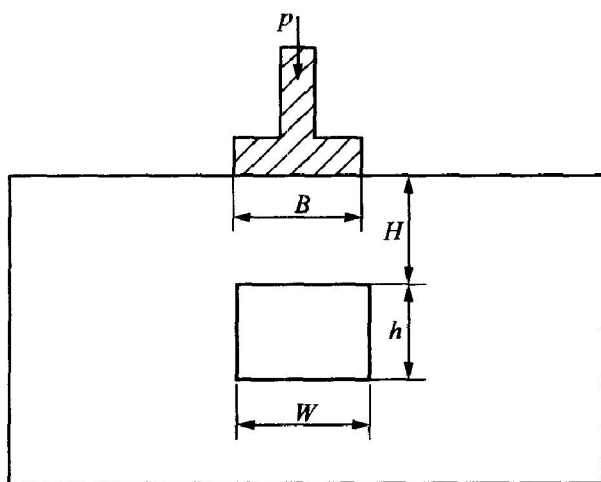


图1 基础/空洞系统的有限元计算模型

Fig. 1 Model of footing/ void system with finite element method

在图1所示的分析模型中,模型边界条件为:底部采用位移边界条件,即水平和垂直方向的位移均约束;侧向则水平方向位移约束。采用四边形等参单元,溶洞围岩假定为均质各向同性的弹塑性材料,采用 Drucker-Prager 屈服准则进行非线性静力分析。采用 ANSYS 程序进行数值分析。

计算中,条形基础的宽度 B 取1 m,溶洞顶板跨度和厚度均为基础宽度的倍数。计算中考虑4种溶洞顶板跨度(W/B 分别为1,2,3和4)、不同的溶洞顶板厚度(H/B 为0.5~8.0)的不同组合类型式,同时以不存在溶洞时的地基承载力进行对比分析。

由于岩溶地基围岩大多为灰岩,其参数变异性较大,为了使分析结果更具有代表性,数值计算采用一种典型岩体参数,即 Hoek 和 Brown 所定义的中等强度岩体,其特征参数为:变形模量 E_m 为9 GPa; Hoek-Brown 系数为12;单轴抗压强度 σ_m 为13 MPa;抗拉强度为-0.15 MPa,内摩擦角 Φ 和内聚力 c 分别为 33° 和3.5 MPa,泊松比为0.25^[6]。

有限元模拟分2步进行:首先,施加初始应力场;然后,分级施加基底荷载,通过指定位移的方法模拟基础的加载。这样,分级增加基础底面位移,直至围岩顶板发生破坏,分析围岩在荷载作用下应力、应变以及塑性区的分布特征,进而分析不同条件下岩溶地基极限承载力。

2 计算结果的分析

2.1 极限承载力的确定

由有限元的分析结果可以得出溶洞顶板岩溶地基内内应力场与位移场、塑性区的分布以及基底压力与位移关系曲线,利用这些结果可以评价岩溶地基的极限承载力。这里,主要通过有限元计算所得的基底压力和基底位移的关系曲线($p-s$ 曲线),综合文献[6-8]中地基的极限承载力确定方法,分析塑性区贯穿溶洞顶板所对应的荷载,同时按照 E. Hoek 等^[7]建议从 $p-s$ 曲线上选取斜率为0或者保持在一稳定的最小值的点^[7],再考虑 C. S. Desai 等^[8]提出的判断准则,即由 $p-s$ 曲线中初始部分的斜率(切线)与曲线的破坏阶段切线的交点确定承载力。综合考察以上3种结果,取其中最小者为有限元分析所得的岩溶地基极限承载力。

研究表明,溶洞高度对于岩溶地基极限承载力的影响不大^[9,10],因此,在进行有限元分析时,溶洞的高度均取基础宽度的2倍即取为 $2B$ 。在不

同溶洞顶板厚度和跨度下,所确定的岩溶地基极限承载力如表 1 所示,通过分析这些数值可以看出溶洞顶板厚度和跨度对岩溶地基稳定的影响。

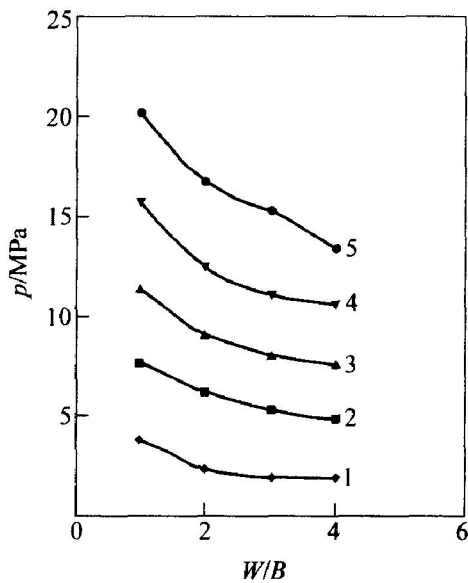
表 1 岩溶地基的极限承载力 p 计算结果

Table 1 Ultimate bearing capacity of footing at different void width and depth MPa

W/B	H/B									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
1	3.83	5.75	7.66	9.34	11.49	15.8	20.11	25.86	-	-
2	2.39	4.31	6.22	7.66	9.10	12.45	16.76	22.02	27.29	-
3	1.92	3.35	5.27	6.7	8.14	11.01	15.32	19.15	24.42	-
4	1.92	2.87	4.79	6.22	7.66	10.53	13.41	17.24	22.02	26.81

2.2 溶洞顶板跨度对极限承载力的影响

当溶洞顶板厚度一定时,溶洞跨度极大地影响岩溶地基的极限承载力和顶板的稳定性。设溶洞顶板跨度为 W ,厚度为 H ,条形基础宽度为 B 。图 2 所示为溶洞顶板厚度不同时极限承载力与溶洞顶板跨度的关系曲线。可见,随着溶洞跨度的增加,岩溶地基极限承载力降低,溶洞顶板 $H/B=1.5\sim 5.5$,溶洞顶板跨度从 B 增加至 $4B$ 时,地基极限承载力降低的幅度几乎相同,即地基极限承载力降低 $1/3$ 。如当溶洞顶板 $H/B=2.5$ 时,溶洞跨度从 B 增加至 $4B$,相应极限承载力降低 $1/3$,即从 11.5 MPa 降低至 7.7 MPa 。



H/B : 1—0.5; 2—1.5; 3—2.5; 4—3.5; 5—4.5

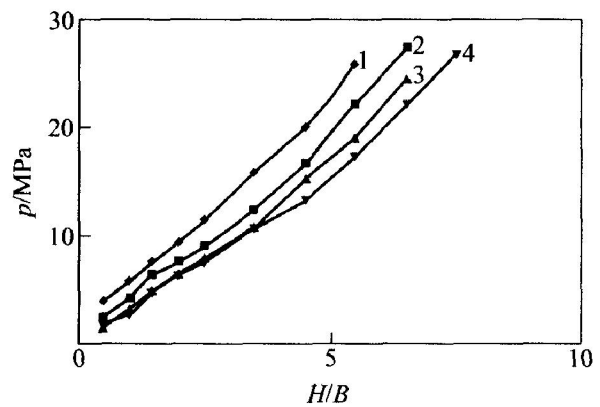
图 2 溶洞顶板厚度不同时极限承载力 p 与溶洞 W/B 的关系曲线

Fig. 2 Variation of ultimate bearing capacity with void width for $H/B=0.5\sim 4.5$

2.3 溶洞顶板厚度对极限承载力的影响

溶洞顶板跨度一定时极限承载力与溶洞顶板 H/B 的关系如图 3 所示。可见,对于一定的溶洞跨度,地基极限承载力随着溶洞顶板 H/B 增加而增大,逐渐接近没有溶洞时的情况;当溶洞顶板 H/B 达到一定值时,溶洞的存在对地基承载力没有明显的影响,这一厚度称为溶洞顶板安全厚度,或者临界厚度 H_s 。同样,该厚度受围岩特性和溶洞尺寸的影响。

溶洞顶板安全厚度可以通过有限元计算结果确定,所得溶洞跨度 W/B 不同时溶洞顶板安全厚度如图 4 所示。可见,对于分析所采用的中等强度岩体,当溶洞顶板厚度为基础宽度的 $6\sim 8$ 倍时,溶洞对于地基承载力的影响可以不计。因此,图 3 和图 4 可供岩溶地区进行条形基础设计时参考。



W/B : 1—1; 2—2; 3—3; 4—4

图 3 溶洞顶板跨度一定时极限承载力 p 与溶洞 H/B 的关系曲线

Fig. 3 Variation of ultimate bearing capacity with void depth at $W/B=1, 2, 3, 4$

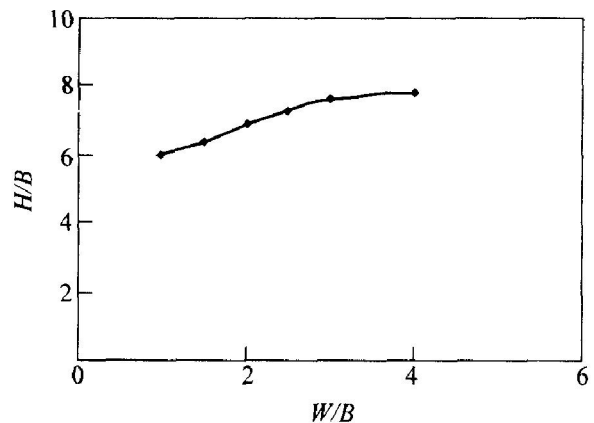


图 4 溶洞顶板 H/B 与 W/B 之间的关系

Fig. 4 Relationship between critical depth and void width

3 结 论

a. 根据已有的地基承载力的确定方法,得到不同条件下岩溶地基极限承载力,以及极限承载力与溶洞顶板的跨度、顶板的厚度的关系曲线。

b. 溶洞顶板跨度对地基极限承载力的影响非常明显。随着溶洞跨度的增加,地基极限承载力降低;顶板厚度在一定范围内,当溶洞跨度从 B 增加至 $4B$ 时,地基极限承载力降低 $1/3$ 。

c. 当围岩条件、基础形式以及溶洞跨度一定时,地基极限承载力随着溶洞顶板厚度增加而增加,当溶洞顶板厚度达到或超过溶洞顶板安全厚度时,溶洞对于地基极限承载力的影响可以不计。溶洞顶板安全厚度一般为基础宽度的 $6\sim 8$ 倍。

d. 不同条件下溶洞上方地基极限承载力的确定方法和相应的确定结果,地基极限承载力、溶洞顶板安全厚度与各个影响因素之间的关系曲线,对于岩溶地区的基础设计和施工,特别是条形基础设计和施工有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
The Committee of Engineering Geology. Handbook of engineering geology[M]. Beijing: Chinese Architecture Industry Press, 1992.

[2] 郭 峰, 孙 康, 王爱民, 等. 冲切破坏理论在浅埋溶洞顶板的利用探讨[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2002, 19(3): 213 - 216.
GUO Feng, SUN Kang, WANG Aiming, *et al.* Probe using the theory of punching shear failure for top plate of shallow Karst cavity[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2002, 19(3): 213 - 216.

[3] 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.
LIU Zhikui, LIANG Jingcheng, ZHU Shou-zeng, *et al.* Stability analysis of rock foundation with cave in Karst area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 629 - 633.

[4] Wang M C, Badie A. Effect of underground void on foundation stability[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1985, 111(8): 1008 - 1019.

[5] Hsieh C W, Wang M C. Bearing capacity determination method for strip surface footings underlain by voids [J]. Transportation Research Record, 1996 (1336): 90 - 95.

[6] Hoek E, Brown E T. Practical estimations of rock mass strength[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34(8): 1165 - 1186.

[7] 阳军生, 张 军, 张起森. 溶洞上方圆形基础地基极限承载力有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 296 - 301.
YANG Junsheng, ZHANG Jun, ZHANG Qiseng. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of circle foundation existed upper karst cave[J]. Journal of Rock Mechanic and Engineering, 2005, 24(2): 296 - 301.

[8] Desai C S, Christian T J. Numerical method in geotechnical engineering[M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1977.

[9] 黎 斌, 范秋雁, 秦凤荣. 岩溶地区溶洞顶板稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 532 - 536.
LI Bin, FAN Qiuyan, QIN Fengrong. Stability analysis of upper plate of Karst cave[J]. Journal of Rock Mechanic and Engineering, 2002, 21(4): 532 - 536.

[10] Baus R L, Wang M C. Bearing capacity of strip footing above void[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1983, 109(1): 1 - 14.