

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1944

考虑荷载位置偏移的空洞岩石地基极限承载力计算方法

雷 勇, 邓加政, 刘泽宇, 李君杰, 邹 根

(湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 荷载位置偏移量对下伏空洞岩石地基的极限承载力有较大影响。当荷载位置偏移量较小时, 基于双对数螺旋曲线模型, 采用极限分析上限法建立了下伏空洞岩石地基破坏体的功能方程, 推导得到了荷载位置偏移下空洞岩石地基极限承载力计算表达式。当荷载位置偏移量较大时, 空洞地基发展成为 Prandtl 破坏模式。并进一步分析了岩石地基厚度 h 、荷载位置偏移量 e 及内摩擦角 φ 对空洞岩石地基极限承载力的影响。最后进行了不同荷载位置偏移量和厚度下的空洞地基极限承载力模型试验研究, 并与理论进行了对比验证分析。结果表明: 当荷载位置偏移量 e 一定时, 随着岩石地基厚度 h 的增加, 空洞岩石地基极限承载力大致呈线性增长, 并逐渐趋向于完整基岩承载力; 当岩石地基厚度 h 一定时, 随着荷载位置偏移量 e 的增大, 岩石地基极限承载力呈非线性增长, 增大到一定值时接近完整基岩承载力; 当岩石地基厚度 h 和荷载位置偏移量 e 一定时, 随着内摩擦角 φ 的增大, 岩石地基极限承载力增长的幅度逐渐变大。

关 键 词: 空洞岩石地基; 极限分析; 极限承载力; 双对数螺旋曲线; 试验研究

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 10-3326-07

A method to calculate ultimate bearing capacity of rock foundation with cavities considering load position offset

LEI Yong, DENG Jia-zheng, LIU Ze-yu, LI Jun-jie, ZOU Gen

(Hunan Province Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: The offset of load position greatly influences the ultimate bearing capacity of the underlying rock foundation with cavities. Based on double logarithmic spiral curve model, the limit analysis method is adopted to establish the underlying rock foundation with cavities damage body function equation when the load position offset is small. Then, the calculation formula of ultimate bearing capacity of hollow rock foundation is deduced. When the offset of load position is large, Prandtl failure mode is developed in the rock foundation with cavities. Furthermore, the influence of the thickness h of rock foundation, load position offset e and internal friction angle φ on the ultimate bearing capacity of rock foundation with cavities are analyzed. Finally, the model test of the ultimate bearing capacity of the rock foundation with cavities under different load position offset and thickness were carried out, and the results were compared and verified with the theory. The results show that when the offset of position is constant, the ultimate bearing capacity of rock foundation increases linearly and the foundation tends to be complete rock foundation with the increase of h . The ultimate bearing capacity of rock foundation with cavities increases non-linearly with the increase of e when h is a certain value. When the h reaches a certain value, the ultimate bearing capacity is close to the value of complete bedrock. When h and e are constant, the limit bearing capacity of the rock foundation with void increases gradually with the increase of the angle of internal friction φ .

Keywords: rock foundation with cavities; limit analysis; ultimate bearing capacity; double logarithmic spiral curve; experimental study

1 引 言

随着我国采空区的增多及岩溶区桥梁工程建设

的不断推进, 巷道岩石地基、采空区岩石地基及溶洞岩石地基等下伏空洞岩石地基承载力问题一直备受关注。大量工程实践经验表明, 下伏空洞岩石地

收稿日期: 2019-11-17

修回日期: 2020-05-09

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51878270)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51878270).

第一作者简介: 雷勇, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事桩基础及特殊土地基处理研究。E-mail: leiyonghnu@163.com

基具有一定的自承能力, 且能满足上部结构荷载的需求。当下伏空洞岩石地基具有一定厚度时, 如充分加以利用, 可降低施工难度及成本。然而下伏空洞岩石地基承载能力的计算方法相对落后于实践。因此, 开展下伏空洞岩石地基极限承载力的研究对于完善特殊地基承载力理论和指导下伏空洞地基的工程设计具有重要意义。

国内外学者对下伏空洞岩石地基承载力的计算进行了大量的研究。刘之葵等^[1]从弹性理论出发, 推导出溶洞周围应力状态, 并引入格里菲斯屈服准则对溶洞周围岩体稳定性进行了评判。Waltham 等^[2]针对诺丁汉的若干人工洞穴承载力问题, 基于模型试验和 FLAC 数值模拟, 研究了荷载位置偏移作用对空洞岩石地基承载力的影响。彭芳乐等^[3]利用有限元分析空洞存在时其位置对浅基础承载力与沉降的影响, 拟合得到空洞影响下浅基础承载力计算方法。刘辉等^[4]采用极限分析上限方法得到中心荷载下空洞地基和无空洞地基的极限承载力计算方法, 分析了岩石地基厚度及洞径大小对承载力的影响。Kiyosumi 等^[5]在平面应变条件下, 在具有连续方形孔洞的刚性地基上进行了一系列 1g 加载试验, 分析无空洞和有空洞时的破坏模式。张慧乐等^[6-7]基于室内模型试验, 考虑岩石地基厚度、溶洞直径、溶洞位置偏移距离等因素对岩溶区嵌岩桩承载能力的影响, 并进行了敏感性分析。Lee 等^[8]采用有限元分析了空洞上方不排水黏土地基的承载力问题, 分析了洞高、洞宽、洞到基础的竖向和横向距离、双洞间距、土壤的刚度和不均匀性等因素的影响。雷勇等^[9]通过极限分析上限法, 推导得到中心荷载下空洞岩石地基极限承载力计算方法。在此基础上, 袁维等^[10]基于广义 Hoek-Brown 准则, 采用极限分析上限法推导得到溶洞顶板临界厚径比的计算公式, 并结合规范分析不同岩体基本质量指标下的临界厚径比。赵明华等^[11]采用上限有限元法计算了不同工况下地基承载力, 并分析空洞宽度、空洞岩石地基厚度和内摩擦角对地基极限承载力的影响规律; 随后又结合室内试验^[12]进一步分析了不同厚跨比条件下溶洞顶板的冲切特性。

既有文献关于荷载位置偏移下空洞岩石地基极限承载力的研究集中于室内试验和有限元分析, 而理论部分重点研究了中心荷载下空洞岩石地基极限承载力, 关于荷载位置偏移下空洞岩石地基极限承载力的理论计算方法却鲜有研究。

尹君凡等^[13]提出了一种适用于偏心荷载作用下溶洞顶底板极限承载力的计算方法, 但仅考虑冲

切破坏模式, 使其随着偏心距离的增加, 未能平缓地接近完整基岩承载力。本文基于摩尔-库仑强度准则, 假定空洞岩石地基破坏模式由冲切破坏到双对数螺旋曲线破坏 (过渡破坏), 最后发展成为完整基岩破坏, 采用极限分析上限法推导得到了荷载位置偏移下空洞岩石地基极限承载力计算方法, 进一步分析了岩石地基厚度, 荷载位置偏移量以及内摩擦角 φ 对空洞岩石地基极限承载力的影响规律, 得到一些有益结论, 可为工程设计提供参考。

2 考虑荷载位置偏移的空洞岩石地基极限承载力上限分析

2.1 基本假定

一般而言, 空洞岩石地基极限承载力与岩体力学性质、岩石地基厚度、空洞跨径、荷载板相对空洞的位置均有较大关系。雷勇等^[14]研究了岩石地基厚度对空洞地基极限承载力的关系, 得到厚度与承载力呈线性关系的结论。Waltham 等^[2]针对诺丁汉的若干人工洞穴承载力问题, 通过数值模拟得到其破坏模式随着荷载位置偏移量的增加, 由破坏曲线由内凹转向外凸, 近似为双对数螺旋线。赵明华等^[11]提出了一种适用于偏心荷载作用下溶洞顶底板极限承载力的计算方法, 假定偏心荷载下去除顶端破坏为轴对称, 简化了破坏模式。但实际加上顶端破坏, 即可近似假定为双对数螺旋破坏。基于前人的研究, 针对荷载位置偏移问题, 本文假定如下:

(1) 岩体破坏满足服从摩尔-库仑屈服准则且为性质均一的 $c-\varphi$ 材料, 且满足相关联的流动法则。

(2) 荷载板为刚性板, 假定为条形基础, 荷载尺寸和空洞跨径一致。

(3) 空洞岩石地基在荷载位置偏移下发生如图 1 所示的破坏模式, 由冲切破坏模式 (见图 1(a)) 向双对数螺旋破坏模式 (见图 1(b)) 发展为 Prandtl 破坏模式 (见图 1(c))。特别是, 荷载位置偏移量为 0 时, 由双对数螺旋模式退化到冲切破坏模式。

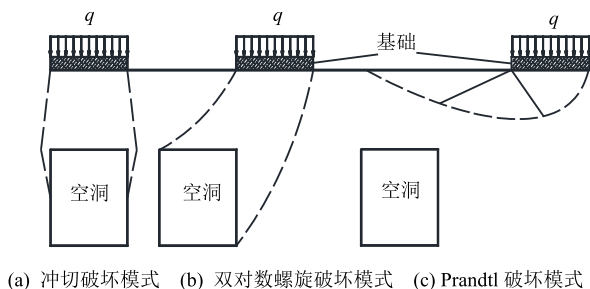


图 1 3 种破坏模式

Fig.1 Three failure mechanisms

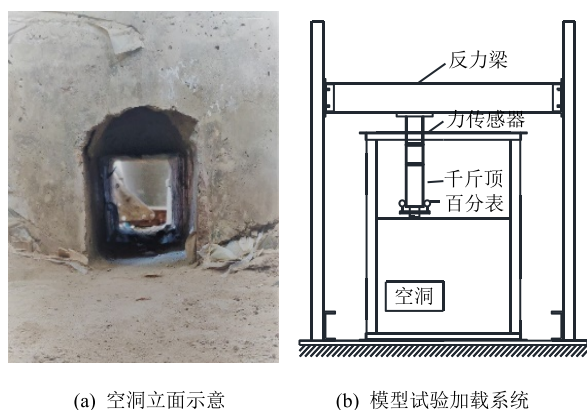
破坏机构需要满足下列约束条件:

$$\left. \begin{aligned} r_{OA} < r_{OB} \\ x_0 - h > 0 \\ 0 < \theta_1 < \theta_2 < \pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

在变量满足约束关系式 (19) 的条件下, 对地基极限承载力的目标函数进行优化求解, 可通过编写 Matlab 优化程序计算得到。

3 空洞地基载荷试验研究

为验证本文理论方法的合理性, 开展了多组室内模型试验进行对比验证。基岩由水泥、水、砂、石膏和红黏土按一定比例混合模拟, 材料的配比为 1.54: 2.17: 10.51: 1.0: 1.0。模型试验示意图如图 3(a) 所示, 加载系统如图 3(b) 所示。



(a) 空洞立面示意

(b) 模型试验加载系统

图 3 空洞地基模型试验

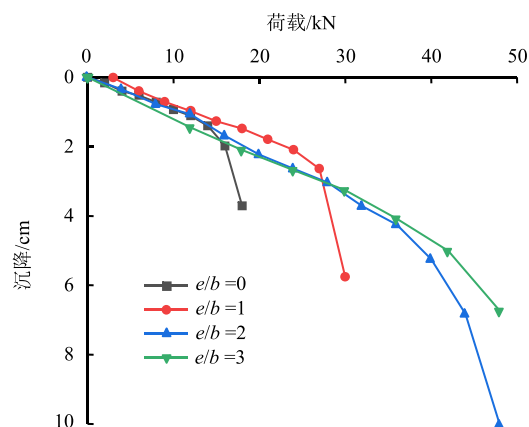
Fig.3 The hollow foundation model test

通过多组模拟材料试块的直剪试验测得其黏聚力约为 $c=825$ kPa, 内摩擦角约为 30° 。圆形荷载板的直径 $b=5$ cm, 洞直径与荷载板直径一致。

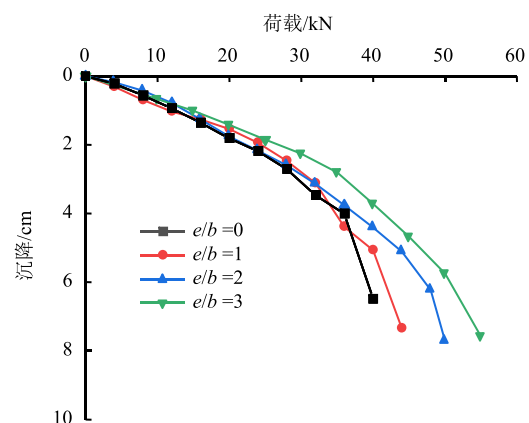
图 4 为不同荷载位置偏移量下基岩的荷载-沉降曲线图。由图 4(a)可知, $h/b=1$ 时, $e/b=0, 1, 2$ 时荷载-沉降曲线均出现陡降点, 即为极限承载力值, 分别为 16、27、44 kN, $e/b=3$ 时, 未出现明显陡降, 加载时发现不能加载到 54 kN, 并出现大裂缝, 故取上一级荷载 48 kN 作为极限承载力值。由图 4(b)可知, $h/b=2$ 时, 在 $e/b=0, 1$ 时出现陡降点, 分别为 36、38 kN, $e/b=2, 3$ 时, 未出现明显陡降点, 取其出现大裂缝的上一级荷载, 分别为 48、50 kN。

图 5 选取了相同的参数与文献[17]的有限元结果进行了对比, 结果基本吻合, 验证了本文假定的条形基础下的二维破坏模式和计算方法的合理性。

在此基础上, 考虑到基础形状对于极限承载力的影响, 需引入基础形状修正系数。当基础为圆形时由式 (17) 计算得到的极限承载力解析值需乘以一个 1.2 的修正系数^[18-19]。通过式 (17) 得到的极限承载力值与室内试验得到的实测值如表 1 所示。



(a) $h/b=1$ 时荷载-沉降曲线



(b) $h/b=2$ 时荷载-沉降曲线

图 4 不同荷载位置偏移量下荷载-沉降曲线
Fig. 4 Load-settlement curves under different load positions offsets

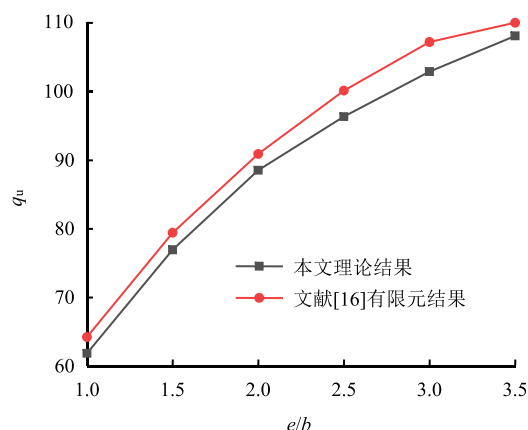


图 5 二维平面结果对比

Fig.5 Comparison of two-dimensional plane results

表1 极限承载力理论值与实测值对比分析

Table 1 Comparison and analysis of theoretical value and measured value

e/b	$h/b=1$			$h/b=2$		
	实测值 /kN	理论值 /kN	误差 /%	实测值 /kN	理论值 /kN	误差 /%
0	16	17.7	10.6	36	36.3	0.8
1	27	28.4	5.2	40	39.6	1.0
2	44	42.4	3.6	48	46.6	2.9
3	48	50.0	4.2	50	53.6	7.2
完整	64	58.6	8.4			

4 参数分析

由上述公式可知,承载力系数 N_c 与荷载位置偏移量 e 、基岩厚度 h 、内摩擦角 φ 等参数有关,在分析荷载位置偏移量 e 、基岩厚度 h 与承载力系数 N_c 的关系时,取内摩擦角 $\varphi=30^\circ$,下面分述说明。

4.1 承载力系数 N_c 与 h/b 的关系

图6为荷载位置偏移量 e 一定时,理论得到的承载力系数随 h/b 的变化曲线。由图可知,荷载位置偏移量一定时,空洞岩石地基极限承载力系数随岩石地基厚度大致呈线性增长,且到达一定厚度时,接近完整基岩承载力^[20],空洞对承载力无影响。基岩厚度达到 $3b$ 时,不同荷载位置偏移量下承载力系数均接近完整基岩承载力系数,与文献[3]规律一致。

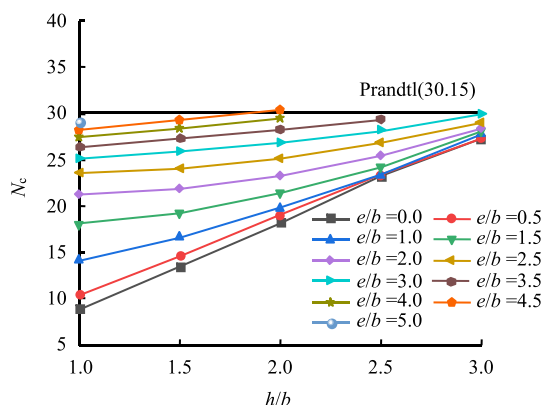


图6 承载力系数随岩石地基厚度变化规律

Fig.6 The bearing capacity coefficient varies with the thickness of roof

4.2 承载力系数与 e/b 的关系

图7为岩石地基厚度 h 一定时,理论计算得到的承载力系数随 e/b 的变化曲线。由图可知,岩石地基厚度一定时,承载力系数随荷载位置偏移量呈非线性增长。且荷载位置偏移量到达一定距离时,逐渐趋近于完整基岩承载力,空洞对承载力无影响。这也验证了地基破坏模式由对数螺旋模型破坏模式

发展成为完整基岩破坏模式,且因为岩石地基厚度的不同,接近完整基岩承载力的荷载位置偏移量的临界点也不同。

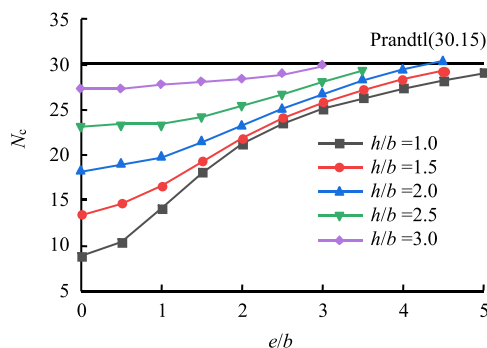


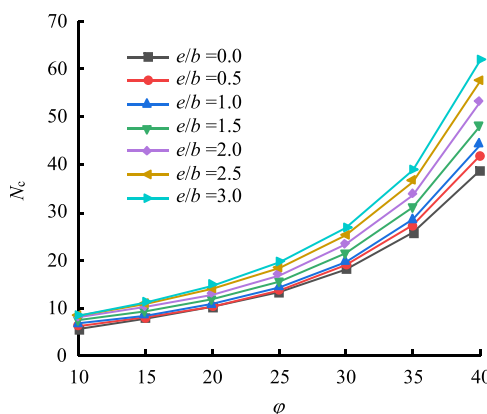
图7 承载力系数随偏心距变化规律

Fig.7 The bearing capacity coefficient varies with eccentricity

当 $h/b=1$ 时, $e/b=5$ 左右达到临界值;当 $h/b=2$ 时, $e/b=4$ 左右达到临界值;当 $h/b=3$ 时, $e/b=3$ 左右达到临界值,与文献[3]采用有限元分析的规律一致。因此,在设计时不能仅考虑岩石地基厚度,还应考虑荷载位置偏移量。

4.3 承载力系数 N_c 与内摩擦角 φ 的关系

本文选取空洞跨度 $h=2b$ 为研究对象,分析摩擦角 φ 分别为 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 45° 时承载力系数随内摩擦角 φ 的变化,如图8所示。由图可知,承载力系数随着内摩擦角呈非线性增长,当内摩擦角低于 20° 时,极限承载力的增长曲线较为平缓;当内摩擦角超过 20° 时,极限承载力的增长曲线越来越陡。文献[6]中得到岩溶区石灰岩的内摩擦角参数在 $30^\circ \sim 42^\circ$ 之间,此区间内承载力系数的增长幅度最大。

图8 $h=2b$ 时承载力系数随 φ 变化规律Fig.8 The bearing capacity coefficient varies with φ when $h=2b$

5 结 论

本文假定岩石地基破坏由冲切破坏向双对数螺旋破坏模式(过渡破坏模式)到 Prandtl(完整基岩破坏模式)发展。特别的是,荷载位置偏移量为 0 时,由双对数螺旋模式冲切破坏模式,采用极限分析上限法,推导得到荷载位置偏移下下伏空洞岩石地基极限承载力计算方法,并进行相关参数的分析,得到以下结论:

(1) 当荷载位置偏移量一定时,随着基岩厚度的增加,空洞岩石地基极限承载力大致呈线性增长,当基岩厚度达到 $3b$ 时,不同荷载位置偏移量下承载力均接近完整基岩承载力。

(2) 当岩石地基厚度 h 一定时,随着荷载位置偏移量 e 的增大,岩石地基极限承载力呈非线性增长,当荷载位置偏移量到一定距离时,空洞岩石地基承载力无影响,达到完整基岩承载力。 $h/b=1$ 时, $e=5b$ 左右达到临界值; $h/b=2$ 时, $e=4b$ 左右达到临界值; $h/b=3$ 时, $e=3b$ 左右达到临界值。因此,在设计时不能仅考虑岩石地基厚度,还应考虑荷载位置偏移量。

(3) 岩石地基厚度 h 和偏移量 e 一定时,随着内摩擦角的增大,岩石地基极限承载力呈非线性增长。当内摩擦角低于 20° 时,极限承载力的增长曲线较为平缓;当内摩擦角超过 20° 时,极限承载力的曲线增长率越来越大。因此,在设计时应合理选取参数。

参 考 文 献

- [1] 刘之葵, 梁金城, 朱寿增, 等. 岩溶区含空洞岩石地基稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 629-633.
LIU Zhi-kui, LIANG Jin-cheng, ZHU Shou-zeng, et al. Analysis of stability of rock foundation in karst zone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 629-633.
- [2] WALTHAM A C, SWIFT G M. Bearing capacity of rock over mined cavities in Nottingham[J]. **Engineering Geology**, 2004, 75(1): 15-31.
- [3] 彭芳乐, 清住真, 高伟, 等. 空洞的存在对浅基础承载力与沉降的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1123-1131.
PENG Fang-le, QING Zhu-zhen, GAO Wei, et al. Analysis of influence of void on bearing capacity and settlement of shallow foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1123-1131.
- [4] 刘辉, 杨峰, 阳军生. 空洞上方浅基础地基破坏模式与极限承载力分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3373-3378.
LIU Hui, YANG Feng, YANG Jun-sheng. Failure mechanism and ultimate bearing capacity of strip footing above void[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3373-3378.
- [5] KIYOSUMI M, KUSAKABE O, OHUCHI M. Model tests and analyses of bearing capacity of strip footing on stiff ground with voids[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(4): 363-375.
- [6] 张慧乐, 张智浩, 王述红, 等. 岩溶区嵌岩桩的试验研究与分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 92-103.
ZHANG Hui-le, ZHANG Zhi-hao, WANG Shu-hong, et al. Experimental study and analysis on rock-socketed pile in karst area[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2013, 46(1): 92-103.
- [7] 张慧乐, 马凛, 张智浩, 等. 岩溶区嵌岩桩承载特性影响因素试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 92-100.
ZHANG Hui-le, MA Lin, ZHANG Zhi-hao, et al. Test research on factors influencing bearing capacity of rock-socketed piles in karst area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 92-100.
- [8] LEE J K, JEONG S, KO J. Undrained stability of surface strip footings above voids[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 62: 128-135.
- [9] 雷勇, 陈秋南, 马缤辉. 基于极限分析的桩端岩层冲切分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 631-638.
LEI Yong, CHEN Qiu-nan, MA Bin-hui. Punching analysis of rock at pile tip on limit analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(3): 631-638.
- [10] 袁维, 刘尚各, 聂庆科, 等. 基于冲切破坏模式的嵌岩桩桩端溶洞顶板临界厚度确定方法研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2789-2798.
YUAN Wei, LIU Shang-ge, NIE Qing-ke, et al. Determination of critical roof thickness of rock-socketed pile tip karst cave based on impact failure model[J]. **Rock**

- and Soil Mechanics**, 203, 40(7): 2789-2798.
- [11] 赵明华, 卢晓明, 张锐. 下伏空洞地基极限承载力与破坏模式上限有限元法[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 229-236, 246.
- ZHAO Ming-hua, LU Xiao-ming, ZHANG Rui. Upper limit finite element method for ultimate bearing capacity and failure mode of underground cavity foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 229-236, 246.
- [12] 赵明华, 唐咸力, 肖尧, 等. 考虑厚跨比的基桩下伏溶洞顶板冲切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1159-1167.
- ZHAO Ming-hua, TANG Xian-li, XIAO Yao, et al. Experimental study on the impact characteristics of the roof of a submerged karst cave under foundation pile considering the thick-span ratio[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1159-1167.
- [13] 尹君凡, 雷勇, 陈秋南, 等. 偏心荷载下溶洞顶板冲切破坏上限分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2837-2843.
- YIN Jun-fan, LEI Yong, CHEN Qiu-nan, et al. Analysis of upper limit of punching failure of karst cave roof under eccentric load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 2837-2843.
- [14] 雷勇, 刘一新, 邓加政, 等. 冲切破坏模式下溶洞岩石地基极限承载力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2162-2169.
- LEI Yong, LIU Yi-xin, DENG Jia-zheng, et al. Calculation of ultimate bearing capacity of karst cave roof under punching failure mode[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 37(9): 2162-2169.
- [15] XIAO Y, ZHAO M, ZHAO H. Undrained stability of strip footing above voids in two-layered clays by finite element limit analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 97: 124-133.
- [16] LIANG Q, YAO C, XU J. Upper bound stability analysis of shield tunnel face in nonhomogeneous and anisotropic soils[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2017, 47(3): 1-11.
- [17] 卢晓明. 下伏空洞地基稳定性上限有限元方法分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- LU Xiao-ming. Finite element analysis of upper bound stability of underlying hollow foundation[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [18] WYLLIE D C. Foundations on rock[M]. London: Chapman and Hall, 1992: 114-116.
- [19] KULHAWY F H. Settlement and bearing capacity of foundation on rock masses[C]//Engineering in Rock Masses. Oxford: Butterworth Heinemann, 1992: 231-245.
- [20] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1975.