

# 岩溶区桩基极限承载力有限元上限分析

李春

(广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530000)

**摘要:** 根据上限有限元的基本原理,依托 Matlab 平台编制了有限元上限分析程序,将修正的 Hoek-Brown 屈服准则嵌入有限元计算程序中;引入参数  $k$  来表征溶洞存在对桩基极限承载能力的削减程度,探讨了土体自重、嵌岩深度、溶洞半径、桩与溶洞水平和垂直距离对桩基上限承载力的影响。结果表明:参数  $k$  随着土体自重、嵌岩深度、溶洞半径的增加而逐渐降低,随着溶洞与桩端水平距离、溶洞与桩端垂直距离的增大而非线性增大;从溶洞各参数对极限破坏模式的影响展开讨论,极限破坏模式主要有:溶洞顶板的冲切破坏,溶洞侧壁发生破坏,溶洞顶板冲切和侧壁的联合破坏,岩体的整体剪切破坏。最后,通过与无溶洞条件下桩端极限承载力对比,验证了该文所提方法的正确性。

**关键词:** 岩溶区; 桩基; 承载力; 有限元; 极限分析

中国岩溶地貌具有分布广泛性,地质状况复杂多样性等特点,特别是在广西境内,岩溶地貌构成了桂林山水等旅游景点,但也给岩溶区基础设施建设的开展带来了巨大的难度,往往桥梁需要穿越岩溶发育区进行桩基础的施工作业,因此探究岩溶区桥梁桩基极限承载力对实际工程具有较大实践价值。

当前,在试验研究方面,赵明华等基于相似理论,通过控制变量设计了桩基下伏溶洞的室内试验,得到了不同厚度条件下桩基的极限承载力的大小;雷勇等开展了对比性较强的模型试验,通过变化溶洞顶板厚度以及位置偏移量探究了桩端极限承载力及其破坏模式,并得到了顶板厚度对嵌岩桩极限承载力的影响规律。在理论研究方面,赵明华等建立了嵌岩桩桩端极限承载力的平面应变模型,采用复变函数求解出嵌岩桩桩端约束力,并引入 Griffith 强度破坏准则对溶洞稳定性进行了评价;贺建清等基于极限分析上限定理,通过假定岩楔体的破坏模式,得到了岩溶区桩端极限承载力的计算公式以及溶洞顶板所需的最小安全厚度。在数值研究方面,黎斌等利用 Ansys 软件分析了嵌岩桩桩端荷载作用下溶洞顶板的受力状况,并采用回归分析法拟合出顶板最小安全厚度与溶洞大小对桩基设计荷载的影响关系式;尹凯丽等则采用三维有限元软件对武汉地区的溶洞展开了正交数值模拟试验,研究了溶洞高度、顶板厚度、顶板跨度等因素对桩基承载力的影响。虽然上述有限元方法能较大程度模拟实

际情况,但仍存在计算结果不收敛、效率偏低等缺陷。

近几年发展起来的有限元极限分析法可以克服以上方法的不足。其基本思想是将极限分析的原理嵌入到有限元中,借助计算机强大的计算能力求解得到问题的上限解。该方法能够弥补传统上限分析法需人为构造机动场的不足。因此,该文将结合极限分析和有限元的基本原理,依托 Matlab 编译平台编制相关计算程序,重点分析土体自重、嵌岩深度、溶洞形状和溶洞位置对桩基上限承载力的影响,并对其极限破坏模式展开讨论。

## 1 有限元上限分析法简介

### 1.1 传统上限分析法

传统极限分析法包括了上限定理和下限定理,通过上、下限定理可分别得到上限解和下限解。上限定理,是指当荷载达到某一值时,在任一运动许可的速度场中,外力所做的功正好等于内部的能量耗散,此时的荷载大小即为极限破坏荷载的上限值,实际问题求解时,需要人为假定运动许可的速度场,对解决复杂问题较为困难。

### 1.2 有限元上限分析的计算机实现

有限元上限分析的求解过程如图 1 所示,该文拟依托 Matlab 平台编制相关上限分析的程序,并借助 Tecplot360 软件实现数据信息的可视化。具体过程的

论述可参考文献[11]。

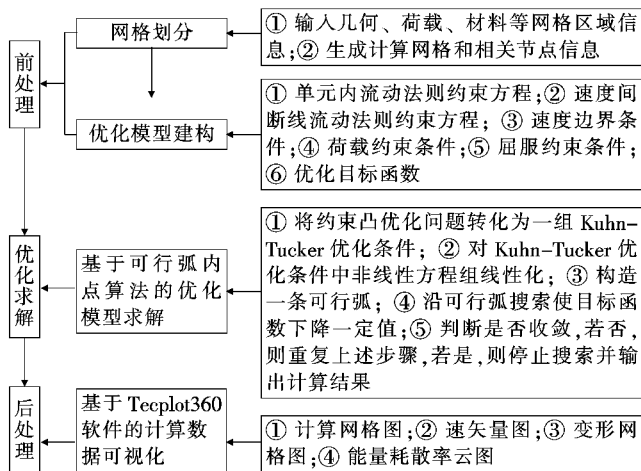


图 1 有限元上限分析的计算机实现

2 问题的描述

2.1 计算模型

Serrano 对嵌岩桩桩端极限承载力的研究表明:三维模型比二维模型承载力大约高 1.3 倍;廖丽萍等对地基中椭球形空洞稳定性进行了分析,分析结果表明:在远场应力状态相同的条件下,椭球洞比椭圆孔洞更为稳定。鉴于此,该文将岩溶区桩基承载力问题简化为二维平面模型,计算模型如图 2 所示,并假定:①将嵌岩桩视为端承桩,不考虑桩侧摩阻力;②溶洞截面形状为圆形,周边岩层为均质材料,且符合修正的 Hoek-Brown 准则。

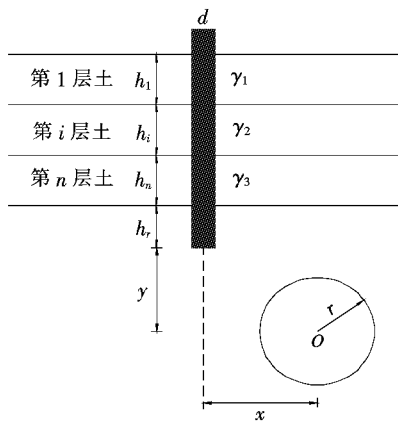


图 2 计算模型

图 2 中: $d$  为桩径; $h_1$ 、 $h_i$ 、 $\cdots$ 、 $h_n$  分别为第 1、 $i$ 、 $\cdots$ 、 $n$  层土的厚度; $\gamma_1$ 、 $\gamma_i$ 、 $\cdots$ 、 $\gamma_n$  分别为第 1、 $i$ 、 $\cdots$ 、 $n$

层土的重度; $h_r$  为嵌岩深度, $x$ 、 $y$  分别为桩端中心与溶洞中心的水平距离和垂直距离; $r$  为圆形溶洞的半径。

2.2 网格划分及边界条件

该文上限分析采用网格自适应三角形单元,分 3 次迭代进行,将计算模型划分成 6 000 个单元。分析域宽  $30d$ ,高  $20d$ ,模型左右边界及桩侧进行法向约束,底部采用完全约束,网格划分如图 3 所示,由于该文不考虑桩侧摩阻力,桩端荷载  $q_u$  作为极限荷载,上覆土层视为均布荷载  $q_s$  的形式作用于岩层上,其表达式如下:

$$q_s = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1)$$

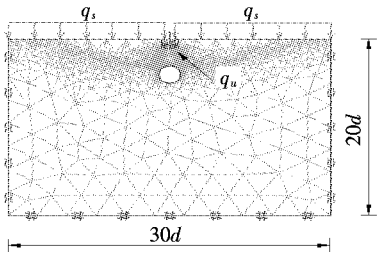


图 3 网格划分及边界条件

2.3 参数取值及评价指标

为了描述岩石非线性破坏的特点,拟采用修正的 Hoek-Brown 准则,其表达式如式(2)所示:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^a \quad (2)$$

式中: $\sigma'_1$  和  $\sigma'_3$  分别为最大、最小主应力; $\sigma_{ci}$  为岩石单轴饱和抗压强度,该文取  $\sigma_{ci} = 40$  MPa; $m_b$ 、 $s$  和  $a$  为与地质强度指标  $GSI$  有关的参数,其表达式为:

$$m_b = m_i \exp[(GSI - 100)/(28 - 14D)] \quad (3)$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/(9 - 3D)] \quad (4)$$

$$a = 1/2 + (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})/6 \quad (5)$$

式中: $m_i$  为与岩石完整程度有关的常数; $D$  为扰动参数,现场无扰动岩体为 0,而非常扰动岩体为 1,该文取  $D = 0$ 。

采用 Hoek-Brown 准则的关键在于确定岩体参数  $GSI$  和岩石参数  $m_i$  的范围。对于岩体参数  $GSI$ ,Sonmez 等综合考虑了岩石风化程度、粗糙度等因素的影响,提出了较为细致的  $GSI$  定量评价方法。通过插值查  $GSI$  表可以获得。对于岩石参数  $m_i$ ,Hoek 等结合室内试验和工程经验,提出了较为全面的  $m_i$  取值方法。鉴于岩溶主要成分为碳酸盐,其岩石参数  $m_i$  的取值见表 1,根据表 1 可知岩溶区的岩石参数  $m_i$  变化范围为 6~15。

表 1 碳酸盐类岩石参数  $m_i$  的取值

粗糙的 (结晶灰岩)	中等的 (粉晶灰岩)	精细的 (微晶灰岩)	非常精细的 (白云石)
12±3	10±3	9±2	9±3

综上分析并结合工程实际,该文取岩石单轴饱和抗压强度  $\sigma_{ci}=40$  MPa,岩体参数  $GSI=50$ ,  $m_i=10$ ,岩石的弹性模量  $E_m=30$  GPa,泊松比  $\nu=0.2$ ,岩石的重度  $\gamma=25$  kN/m<sup>3</sup>。

### 3 影响桩基上限承载力因素分析

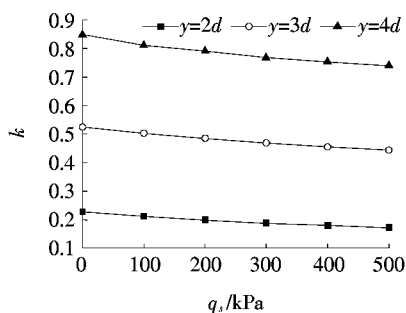
影响岩溶区桩基上限承载力的因素主要有:① 土体自重  $q_s$ ;② 嵌岩深度  $h_r$ ;③ 圆形溶洞半径  $r$ ;④ 桩端中心与溶洞中心的水平距离  $x$ ;⑤ 桩端中心与溶洞中心的垂直距离  $y$  等。为了便于探讨溶洞对桩基上限承载力的影响,定义一个无量纲参数  $k$  来表征溶洞存在对桩基承载能力的削减程度,如式(6)所示。

$$k = \frac{q_{u1}}{q_{u2}} \quad (6)$$

式中: $q_{u1}$ 为溶洞存在时桩基的上限承载力; $q_{u2}$ 为无溶洞时桩基的上限承载力, $k$ 的取值范围为  $0 \sim 1$ ,越接近 1 说明溶洞的存在对桩基承载能力的削减程度越弱。

#### 3.1 土体自重 $q_s$ 对参数 $k$ 的影响

取  $d=1$  m,  $h_r=1d$ ,  $x=0$ ,  $r=d$ ,  $q_s$  与  $k$  的关系如图 4 所示。

图 4  $q_s$  对  $k$  的影响

由图 4 可知:参数  $k$  随着土体自重  $q_s$  的增加而逐渐降低,说明土体自重对桩基的承载力产生不利的影响,在实际工程设计时,应对土体自重加以考虑。

#### 3.2 嵌岩深度 $h_r$ 对参数 $k$ 的影响

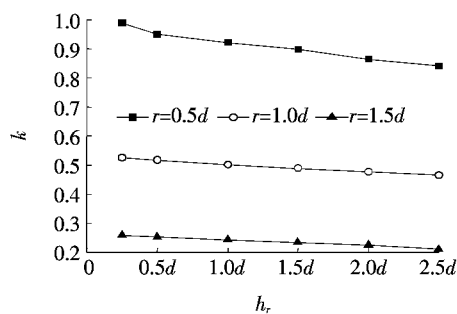
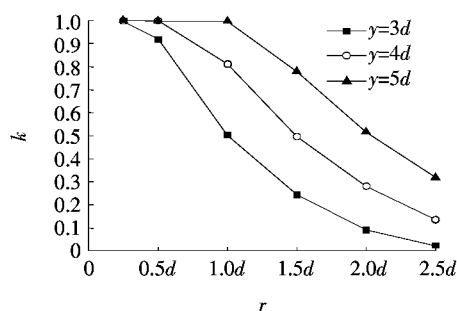
取  $q_s=100$  kPa,  $d=1$  m,  $x=0$ ,  $y=3d$ ,  $h_r$  与  $k$  的关系如图 5 所示。

由图 5 可知:随着嵌岩深度  $h_r$  的增大,参数  $k$  随

之减小,因此,嵌岩深度的增加可以提高桩基的承载力,当溶洞半径  $r \geq 1d$  时,参数  $k$  与嵌岩深度  $h_r$  大致呈线性递减,溶洞半径  $r$  越小,参数  $k$  越接近 1。

#### 3.3 溶洞半径 $r$ 对参数 $k$ 的影响

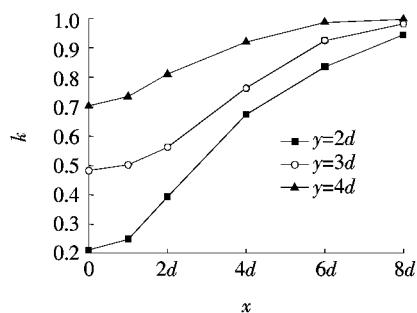
取  $q_s=100$  kPa,  $d=1$  m,  $h_r=1d$ ,  $x=0$ ,  $r$  与  $k$  的关系如图 6 所示。

图 5  $h_r$  对  $k$  的影响图 6  $r$  对  $k$  的影响

由图 6 可知:参数  $k$  随着溶洞半径  $r$  的增加而非线性降低,值得注意的是,当溶洞半径  $r \leq 1d$ 、溶洞与桩基的垂直距离  $y \geq 5d$  时,参数  $k$  接近于 1。

#### 3.4 水平距离 $x$ 对参数 $k$ 的影响

取  $q_s=100$  kPa,  $d=1$  m,  $h_r=1d$ ,  $r=1d$ ,  $x$  与  $k$  的关系如图 7 所示。

图 7  $x$  对  $k$  的影响

由图 7 可知: $k$  随着  $x$  的增大而非线性增大,当  $x \geq 4d$  时,增加速度逐渐放缓;当  $x \geq 6d$  时,参数  $k \geq 0.8$ ,溶洞存在时桩基承载力的  $q_{u1}$  可达到无溶洞条件

下桩基承载力  $q_{u2}$  的 80% 以上, 当  $x=0$  时, 参数  $k$  最小, 即轴对称情况为最不利情况。

### 3.5 垂直距离 $y$ 对参数 $k$ 的影响

取  $q_s=100$  kPa、 $d=1$  m、 $h_r=1d$ 、 $r=1d$ ,  $y$  与  $k$  的关系如图 8 所示。

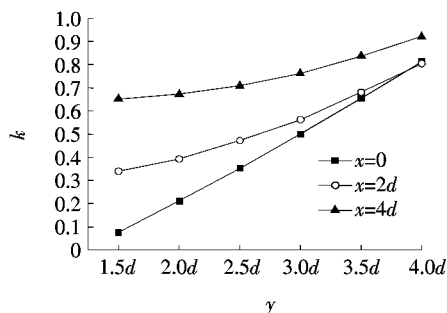


图 8  $y$  对  $k$  的影响

由图 8 可知: 随着溶洞与桩基的垂直距离  $y$  的增大, 参数  $k$  随之增加, 当  $x=0$  时,  $k$  与  $y$  大致呈线性递增, 因此, 增大溶洞与桩基的垂直距离  $y$  对于提高桩基的承载力较为明显, 在实际工程中, 应注意保证溶洞顶板具有足够的安全厚度。

## 4 极限破坏模式

溶洞的存在是影响桩基极限破坏模式的最主要因素, 下文将以剪切耗散作为控制指标, 从溶洞各参数对极限破坏模式的影响方面展开讨论。

### 4.1 溶洞半径 $r$ 对破坏模式的影响

取  $q_s=100$  kPa、 $d=1$  m、 $h_r=1d$ 、 $x=0$ 、 $y=3d$ , 得到不同  $r$  条件下的极限破坏模式如图 9 所示。当  $r \leq 1d$  时, 溶洞发生冲切破坏并伴有侧壁破坏, 当  $r \geq 2d$  时, 溶洞主要发生顶板的冲切破坏。

### 4.2 水平距离 $x$ 对破坏模式的影响

取  $q_s=100$  kPa、 $d=1$  m、 $h_r=1d$ 、 $r=1.5d$ 、 $y=3d$ , 得到不同  $x$  条件下的极限破坏模式如图 10 所示。当  $x \leq 2d$  时, 溶洞顶板主要发生冲切破坏, 破坏面随着  $x$  的增大, 从溶洞顶面向溶洞侧壁发展; 当  $4d \leq x < 6d$  时, 溶洞侧壁发生破坏, 且破坏面延伸到岩层顶面。当  $x \geq 6d$  时, 一条破坏面为经过桩底和圆形溶洞底面的曲线, 一条破坏面接近以直线形式通过溶洞顶面并延伸到岩层顶面。

### 4.3 垂直距离 $y$ 对破坏模式的影响

取  $q_s=100$  kPa、 $d=1$  m、 $h_r=1d$ 、 $r=1.0d$ 、 $x=0$ , 得到不同  $y$  条件下的极限破坏模式如图 11 所示。

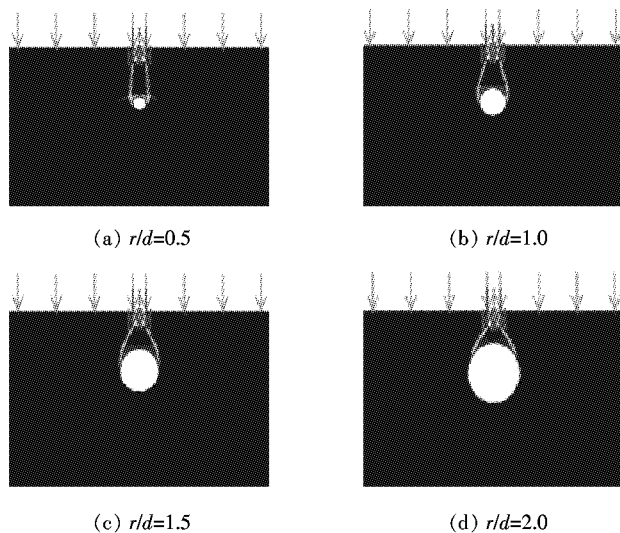


图 9 不同  $r$  的溶洞极限破坏模式

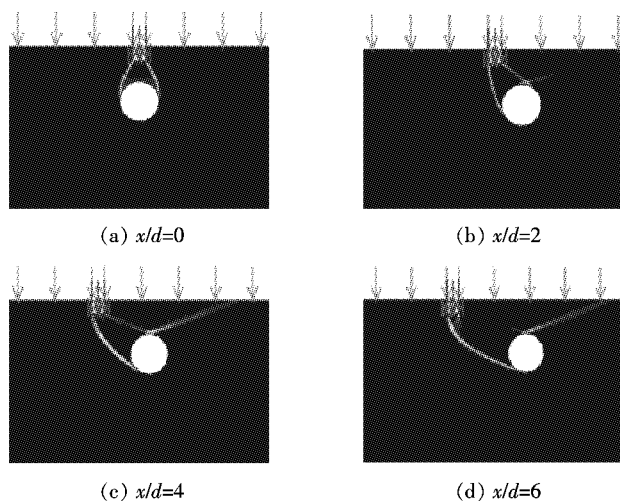


图 10 不同  $x$  的溶洞极限破坏模式

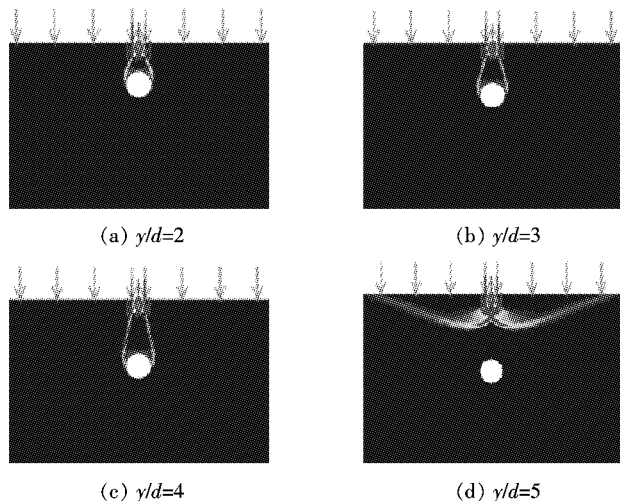


图 11 不同  $y$  的溶洞极限破坏模式

当  $y \leq 4d$  时, 溶洞顶板主要发生冲切破坏; 当  $y \geq 5d$  时, 溶洞与桩端垂直距离对破坏模式影响不大, 以整体剪切破坏为主。可见, 随着桩端至溶洞中心垂直距离的增加, 溶洞的破坏模式从顶板发生冲切破坏向整体剪切破坏转变。

## 5 结果验证

为了验证该文方法的正确性, 考虑无溶洞条件下, 对嵌岩桩桩端极限承载力进行计算, 将计算结果与 Serrano 的研究成果进行对比, 计算参数  $q_s = 108$  kPa,  $d = 0.8$  m,  $\gamma = 15$  kN/m<sup>3</sup>,  $GSI = 15$ ,  $m_i = 15$ 。对比结果如表 2 所示。

表 2 无溶洞条件下桩端极限承载力

$h_r$ /m	$\sigma_{ci}$ /MPa	桩端极限承载力/MPa		
		解析解	FLAC <sup>2D</sup>	该文解
0.8	5	4.3	4.6	4.42
0.8	2	2.5	2.6	2.51
4.0	5	5.9	6.5	6.25
4.0	2	3.1	3.5	3.35

由表 2 可知: 该文所得无溶洞存在时桩端极限承载力位于解析解与 FLAC<sup>2D</sup> 解之间, 与解析解的误差在 5% 以内, 验证了该文程序的准确性。

## 6 结论

(1) 根据极限分析上限定理, 依托 Matlab 平台编制了有限元上限分析计算程序, 并基于 Hoek-Brown 准则计算了岩溶区桩基极限承载力, 并通过计算无溶洞条件下桩端的极限承载力, 与已有研究成果进行了对比, 验证了该文程序的准确性。

(2) 引入参数  $k$  来表征溶洞存在对桩基极限承载能力的削减程度, 参数  $k$  随着土体自重  $q_s$ 、嵌岩深度  $h_r$  增加而降低, 当溶洞半径  $r \geq 1d$  时, 参数  $k$  与嵌岩深度  $h_r$  大致呈线性递减; 当溶洞半径  $r \leq 1d$ , 溶洞与桩基的垂直距离  $y \geq 5d$  时, 参数  $k$  接近于 1; 当溶洞与桩端水平距离  $x \geq 6d$  时, 溶洞存在时桩基承载力可达到无溶洞条件下桩基承载力的 80% 以上; 随着溶洞与桩基垂直距离  $y$  的增大, 参数  $k$  随之增加, 在实际工程中, 应保证溶洞顶板具有足够的安全厚度。

(3) 极限破坏模式主要有: 溶洞顶板的冲切破坏, 溶洞侧壁发生破坏, 溶洞顶板冲切和侧壁的联合破坏, 岩体的整体剪切破坏。

## 参考文献:

- [1] 赵明华, 吴高桥, 肖尧, 等. 不同厚度溶洞顶板与基桩作用机理室内模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017(6).
- [2] 雷勇, 尹君凡, 陈秋南, 等. 下伏溶洞嵌岩桩极限承载力试验研究[J]. 矿冶工程, 2017(3).
- [3] 雷勇, 尹君凡, 陈秋南, 等. 溶洞顶板极限承载力计算方法及试验研究[J]. 公路交通科技, 2017(5).
- [4] 雷勇, 尹君凡, 陈秋南. 岩溶区桩端基岩极限承载力及破坏模式试验研究[J]. 应用力学学报, 2017(4).
- [5] 赵明华, 肖尧, 徐卓君, 等. 基于 Griffith 强度准则的岩溶区桩基溶洞稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2018(1).
- [6] 贺建清, 喻畅英, 肖兰, 等. 基于上限定理确定岩溶区桩端极限承载力及其下伏溶洞顶板安全厚度[J]. 自然灾害学报, 2017(2).
- [7] 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(4).
- [8] 尹凯丽, 郝世龙. 武汉地区岩溶对桩基承载力影响数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2015(6).
- [9] 赵明华, 张锐. 有限元上限分析网格自适应方法及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2016(3).
- [10] 陈慧发. 极限分析与土体塑性[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [11] 张锐. 基于非线性规划的有限元极限分析方法及其工程应用[D]. 湖南大学博士学位论文, 2015.
- [12] Serrano A, Olalla C, Galindo R A. Ultimate Bearing Capacity at the Tip of a Pile in Rock Based on the Modified Hoek-Brown Criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 83-90.
- [13] 廖丽萍, 杨万科, 王启智. 椭圆形空洞地基稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010(s2).
- [14] Hoek D E, Marinos D P, Hoek E, et al. A Brief History of the Development of the Hoek-Brown Failure Criterion[J]. Soils and Rocks, 2007.
- [15] Sonmez H, Ulusay R. Modifications to the Geological Strength Index(GSI) and their Applicability to Stability of Slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(6): 743-760.
- [16] Hoek E, Brown E T. Practical Estimates of Rock Mass Strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1165-1186.