

文章编号: 1000-7598(2013)01-0092-09

岩溶区嵌岩桩承载特性影响因素试验研究

张慧乐^{1,2}, 马 凇^{1,2}, 张智浩^{1,2}, 孙映霞^{1,2}

(1. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘 要: 基于室内模型试验, 对岩溶区嵌岩桩承载能力的影响因素进行了研究。试验表明, 随顶板厚度与溶洞位置偏移距离的增大, 极限承载力逐渐增大, 随溶洞直径、赤道半径与极半径的增大, 极限承载力逐渐减小; 破坏核体在竖直方向上基本未超过 $3d$ (d 为桩体直径) 范围, 在水平方向上基本未超过 $4d$ 范围。结合模型试验结果, 影响因素的敏感性分析表明, 敏感度大小的顺序为: 溶洞直径>顶板厚度、赤道半径>极半径>溶洞位置。嵌岩桩的承载能力还与溶洞形状有关, 厚径比为溶洞顶板厚度、赤道半径以及桩体底面积的综合影响因素, 建议引进形状系数 ζ 与底面积尺寸效应系数 η , 提出岩溶区嵌岩桩概念设计的注意事项, 并通过工程实例进行了验证, 现场静载试验与模型试验结果基本一致, 楼房竣工后未发生岩溶危害。

关 键 词: 嵌岩桩; 承载特性; 影响因素; 模型试验; 形状系数

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Test research on factors influencing bearing capacity of rock-socketed piles in karst area

ZHANG Hui-le^{1,2}, MA Lin^{1,2}, ZHANG Zhi-hao^{1,2}, SUN Ying-xia^{1,2}

(1. China Jingye Engineering Corporation Limited, Beijing 100088, China; 2. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., Metallurgical Corporation of China Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Based on indoor model tests, the research on factors influencing bearing capacity of rock-socketed piles in karst area is carried out. The tests indicate that, with the increases of roof thickness and cave migration position, the ultimate bearing capacity increases gradually; with the increases of cave diameter, equatorial and polar radius, the ultimate bearing capacity decreases gradually. The failure zones are less than $3d$ range at vertical direction and less than $4d$ range at horizontal direction. Combined with the model test results, the analysis of influencing factor sensitivities show that, the size order of sensitivities is cave diameter, roof thickness and equatorial radius, polar radius, cave position. The bearing capacity of rock-socketed pile also had relation with cave shape; ratio of thickness to radius is a comprehensive affecting factor with cave thickness, equatorial radius and pile bottom area. The shape factor ζ , bottom area size effect η and notices of conceptual design are introduced to evaluate the bearing capacity of rock-socketed pile, which are verified by engineering examples. The field test results are in agreement with the model test results, and the karst problems not occurred after building completion.

Key words: rock-socketed pile; bearing capacity; influencing factor; model test; shape factor

1 引 言

嵌岩桩具有承载力高、沉降小、抗震性能好等特点, 是各种建筑工程的重要基础型式^[1-2], 但在岩溶区进行嵌岩桩设计与施工时, 需要慎重考虑桩底溶洞对承载能力的影响。桩底存在溶洞时, 嵌岩桩的承载能力与溶洞顶板厚度、形状、围岩特性、岩溶发育程度、嵌岩桩体尺寸等因素密切相关^[3-4]。

正确分析各种因素对岩溶区嵌岩桩承载能力的影响, 对节省费用支出、加快工期起到很大的作用。曹文贵等^[5]利用数值流形方法并引入强度折减技术, 分析了溶洞埋深和溶洞几何形态等因素与岩溶顶板稳定性的关系; 赵明华等^[6-8]通过建立符合工程特点的岩溶区桩端溶洞稳定性分析的力学模型, 对影响溶洞顶板稳定性的各种主要因素进行了深入的探讨; 李仁江等^[9]、阳军生等^[10]利用有限元程序,

收稿日期: 2011-09-30

基金项目: 岩溶地区桩基工程技术综合研究(财企[2008]221号)。

第一作者简介: 张慧乐, 男, 1983年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程施工、科研与设计方面的工作。E-mail: porpsky@163.com

对极限承载力与各影响因素之间的关系进行了模拟；黎斌等^[11]利用三维有限元与多元线性回归的方法，求得桩底到溶洞顶部距离临界值与溶洞大小和单桩设计荷载之间的关系式；刘之葵等^[12]采用弹性理论与格里菲斯强度理论，发现基础底面尺寸、溶洞顶板厚度及溶洞断面形状对极限承载能力影响较大，真空吸蚀作用和洞内填充物对承载能力影响较小。

本文基于室内模型试验，研究了嵌岩桩桩底存在球型或椭球型溶洞，溶洞顶板厚度、大小、赤道半径、极半径与偏移位置等因素对承载能力的影响。结合试验结果对各影响因素的敏感性进行分析，建议引进形状系数 ζ 与底面积尺寸效应系数 η ，对岩溶区的嵌岩桩进行概念设计，并通过工程实例进行验证。

2 岩溶区嵌岩桩模型试验

2.1 试验系统简化

参考《铁路桥涵地基和基础设计规范》^[13]，嵌岩桩单桩承载力标准值为

$$R = (C_1 A + C_2 u l_r) f_{rk} \quad (1)$$

式中： A 为桩底面积； u 为嵌入岩层内的桩孔周长； l_r 为自新鲜岩面算起的桩体嵌入深度； f_{rk} 为桩底岩石饱和单轴极限抗压强度标准值； C_1 、 C_2 为根据岩层破碎程度和清底情况确定的系数。

由式(1)可知，嵌岩桩的承载力主要受基岩持

力层性质的影响。参考《建筑地基基础设计规范》^[14]：嵌岩灌注桩桩端以下3倍桩径范围内无软弱夹层、断裂破碎带和洞穴分布，并应在桩底应力扩散范围内无岩体临空面，说明溶洞、软弱夹层、临空面等因素对嵌岩桩的承载能力有很大影响。

在进行模型试验前，需对岩溶区嵌岩桩与基岩持力层相互作用系统进行适当简化，假定：

(1) 嵌岩桩为简单的端承桩，不考虑上部桩周土侧摩阻力的影响；

(2) 不考虑基岩构造方面的影响，岩体完整，为均匀连续体，溶洞形状为相对规则的球型或椭球型；

(3) 不考虑地下水的影响。

试验主要考虑几何相似、物理相似、荷载相似、边界与约束条件相似，模拟工程实际。几何相似系数取1/20，原型嵌岩桩桩长为10.8 m，桩径为0.8 m，入岩深度为0.8 m。将嵌岩桩与基岩相互作用系统按中心对称模型考虑，模型桩入岩深度 $1d$ （ d 为桩体直径）。

2.2 试验设计

由于溶洞属三维空间结构，研究洞体大小对嵌岩桩承载能力的影响，需要从多角度、多方位考虑。方案主要考虑5种不同因素对岩溶区嵌岩桩承载能力的影响，即顶板厚度 H 、溶洞直径 D 、溶洞位置 l 、溶洞极半径 c 、溶洞赤道半径 a 。具体设计如表1所示。

表 1 模型试验方案
Table 1 Scheme of model test

方案编号	方案	溶洞类型	溶洞直径 D	顶板厚度 H	溶洞距桩中心 线水平位置 l	溶洞极半径 c	溶洞赤道半径 a
1	改变顶板厚度	球型	$3d$	$1d, 2d, 3d, 4d$			
2	改变溶洞直径	球型	$2d, 3d, 4d, 5d$	$2d$			
3	改变溶洞位置	球型	$3d$	$2d$	$0, 1d, 2d, 3d$		
4	改变溶洞极半径	椭球型		$2d$		$0.5d, 1d, 1.5d(b=c)$	$2d$
5	改变溶洞赤道半径	椭球型		$2d$		$2d$	$0.5d, 1d, 1.5d(a=b)$

注： d 为桩体直径；溶洞为球型或椭球型时， a 、 b 为溶洞的赤道半径(沿 x 轴和 y 轴)， c 为溶洞的极半径(沿 z 轴)，其中 $a \geq b$ 。

2.3 相似材料的选择

相似材料是否合适是模拟工程原型的关键。试验中，原岩和模拟基岩的物理力学参数如表2所示。

桩端荷载的传递以及应力扩散范围与桩体几何尺寸、桩体和基岩的刚度比密切相关，按照相似原理，模拟嵌岩桩材料选用尼龙棒。

表 2 原型和模型材料物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters of rock and model material

材料类型	重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	抗压强度 σ_c / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	c / MPa	$\varphi / (^\circ)$
中风化石灰岩	26.8~28.0	32.00~67.90	1.89~5.78	21.70~61.30	0.14~0.39	3.32~5.43	32.50~44.60
模型材料	19.2	2.00	0.29	0.71	0.16	0.54	30.35

2.4 模型制作

模拟基岩是将水泥、石膏、砂、黏土与水按一定配比搅拌均匀后,灌注在预制好的模型箱内,室温 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 时,养护 7 d、自然风干 14 d 而成的。

溶洞的模拟方面,由于试验按照中心对称模型考虑,在制作模拟基岩前,将溶洞模拟物固定在设计位置,随相似材料一起灌注在模型箱内并养护成型,拆模后取出模拟物即可;或者在模拟基岩的侧壁,人工挖出模拟溶洞。

2.5 加载与测试系统

加载采用中国京冶工程技术有限公司地基分公司自行研制的手动液压加载设备,系统最大量程为 50 kN,行程为 120 mm,稳压能力控制范围为 ± 0.1 kN。

测试系统主要包括力与位移传感器、应变片/花、静态应变仪等。

2.6 试验操作与加载终止条件

考虑到维持荷载法历时较长,本次试验采用人工加压、稳压,且外部环境的变化能使试验精度降低,故采用等时距加载法^[15],前两级荷载每级为 1.0 kN,以后每级 0.5 kN。每级荷载维持时间为 8 min,记录时间从 0 min 开始,每隔 2 min 记录一次。出现以下情况之一时,停止加载:①模拟溶洞坍塌;②某级荷载作用下,桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍;③总沉降超过 10 mm。

岩溶区嵌岩桩模型试验照片如图 1 所示。



图 1 模型试验照片

Fig.1 Photo of model test

3 试验结果和分析

通过模型试验绘制岩溶区嵌岩桩的荷载-变形曲线并获得极限承载力 Q_u ,以分析不同影响因素对承载能力的影响。

参考《建筑基桩检测技术规范》^[16]以及前人的研究成果,并结合模型试验,嵌岩桩的极限承载力

Q_u 按下述方法确定:

(1) 陡降型 $Q-s$ 曲线,取发生明显陡降的起点所对应的荷载值;

(2) 缓变型 $Q-s$ 曲线,取 $s=10$ mm 对应的荷载值。

3.1 顶板厚度

岩溶区嵌岩基桩室内模型试验,以洞体直径 $3d$ 为基准,当顶板厚度变化、其他因素不变时,绘制相应试验结果的 $Q-s$ 曲线,如图 2 所示。

由图可知:当顶板厚度为 $1d$ 、 $2d$ 时, $Q-s$ 曲线出现明显的拐点;当顶板厚度为 $3d$ 、 $4d$ 时, $Q-s$ 曲线均呈缓变型。

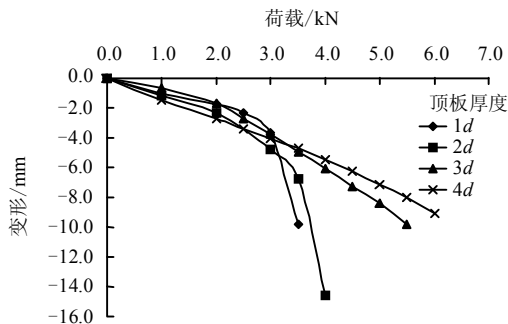


图 2 顶板厚度变化时的 $Q-s$ 曲线

Fig.2 $Q-s$ curves with different roof thicknesses

3.2 溶洞直径

以顶板厚度 $2d$ 为基准,当洞体直径变化、其他因素不变时,绘制相应试验结果的 $Q-s$ 曲线,如图 3 所示。

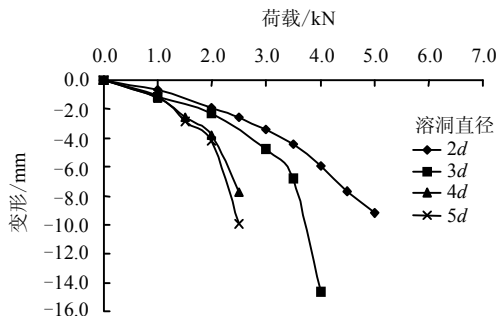


图 3 溶洞直径变化时的 $Q-s$ 曲线

Fig.3 $Q-s$ curves with different cave diameters

由图可知:当溶洞直径为 $2d$ 时, $Q-s$ 曲线呈缓变型;当溶洞直径为 $3d$ 、 $4d$ 、 $5d$ 时, $Q-s$ 曲线出现明显的拐点。

3.3 溶洞极半径

以顶板厚度 $2d$ 、溶洞赤道半径 $a=2d$ 为基准,

溶洞为椭球型或球型，当溶洞极半径 c （此时溶洞极半径 c =赤道半径 b ）变化、其他因素不变时，绘制相应试验结果的 Q - s 曲线，如图 4 所示。

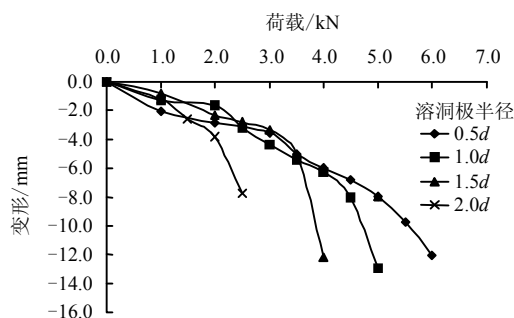


图 4 溶洞极半径变化时的 Q - s 曲线
Fig.4 Q - s curves with different polar radius

由图可知：当溶洞极半径 $c=0.5d$ 时， Q - s 曲线呈缓变型；当溶洞极半径 c 为 $1d$ 、 $1.5d$ 、 $2d$ 时， Q - s 曲线出现明显的拐点。

3.4 溶洞赤道半径

以顶板厚度 $2d$ 、溶洞极半径 $c=2d$ 为基准，溶洞为椭球型或球型，溶洞赤道半径 a （此时溶洞赤道半径 a =赤道半径 b ）变化、其他因素不变时，绘制相应试验结果的 Q - s 曲线，如图 5 所示。

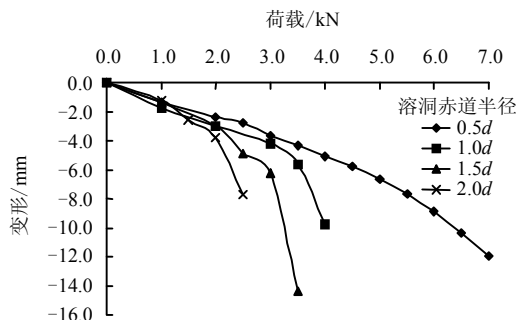


图 5 溶洞赤道半径变化时的 Q - s 曲线
Fig.5 Q - s curves with different equatorial radius

由图可知：当溶洞赤道半径 $a=0.5d$ 时， Q - s 曲线呈缓变型；当溶洞赤道半径 a 为 $1d$ 、 $1.5d$ 、 $2d$ 时， Q - s 曲线出现明显的拐点。

3.5 溶洞位置

以溶洞位于桩体正下方，洞体直径 $3d$ 、顶板厚度 $2d$ 为基准，当溶洞水平位置变化、其他因素不变时，绘制相应试验结果的 Q - s 曲线，如图 6 所示。

由图可知：当溶洞水平偏移位置为 $0d$ 、 $1d$ 、 $2d$ 时， Q - s 曲线出现明显的拐点；当溶洞水平偏移位置为 $3d$ 时， Q - s 曲线呈缓变型。

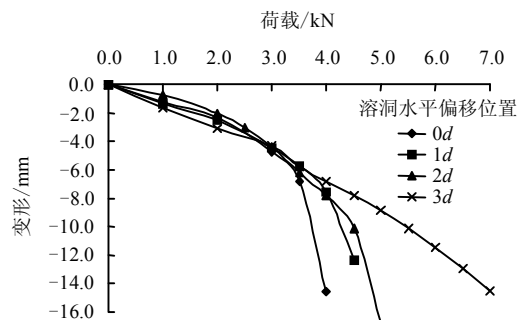


图 6 溶洞位置变化时的 Q - s 曲线
Fig.6 Q - s curves with different cave positions

3.6 试验结果分析

结合图 2~6，不同影响因素时各模型桩的极限承载力统计见表 3。

表 3 不同影响因素时的极限承载力
Table 3 Bearing capacities with different influencing factors

Influencing factors									
改变顶板厚度		改变洞体直径		改变溶洞极半径		改变溶洞赤道半径		改变溶洞位置	
顶板厚度	极限荷载	洞体直径	极限荷载	溶洞极半径	极限荷载	溶洞赤道半径	极限荷载	溶洞位置	极限荷载
厚度	/kN		/kN	极半径 c	/kN	a	/kN		/kN
$1d$	3.0	$2d$	5.0	$0.5d$	5.5	$0.5d$	6.0	$0d$	3.5
$2d$	3.5	$3d$	3.5	$1.0d$	4.5	$1.0d$	3.5	$1d$	4.0
$3d$	5.5	$4d$	2.0	$1.5d$	3.5	$1.5d$	3.0	$2d$	4.5
$4d$	6.0	$5d$	2.0	$2.0d$	2.0	$2.0d$	2.0	$3d$	5.5

由表可知：

(1) 在溶洞大小一致的条件下，随顶板厚度的增加，极限承载力随之增大，但当溶洞顶板厚度由 $3d$ 增大至 $4d$ 时，极限承载力由 5.5 kN 增加到 6.0 kN，趋于稳定，结合极限承载力时模拟基岩的破坏模式，如图 7(a)（顶板厚度为 $3d$ ）、7(b)（顶板厚度为 $4d$ ）所示，破坏接近没有溶洞的情形，说明破坏区在竖直方向上基本未超过 $3d$ 的影响范围。

(2) 在溶洞顶板厚度一致的条件下，随溶洞直径的增大，极限承载力随之减小，但当溶洞直径由 $4d$ 增大至 $5d$ 时，极限承载力同为 2.0 kN，趋于稳定，结合极限承载力时模拟基岩的破坏状态，如图 7(c)（溶洞直径为 $4d$ ）、7(d)（溶洞直径为 $5d$ ）所示，破坏模式均为锥型块体冒落，说明破坏区在水平方向上基本未超过 $4d$ 范围。

(3) 当溶洞赤道半径 $a=2d$ 时，随溶洞极半径 c （此时溶洞极半径 c 等于赤道半径 b ）的增大极限承载力随之减小；当溶洞极半径 $c=2d$ 时，随溶洞赤道半径 a （此时溶洞赤道半径 a 等于赤道半径 b ）的增大极限承载力也随之减小。分析认为，在溶洞

赤道半径 a 一定、极半径 c 变小时, 以及溶洞极半径 c 一定、赤道半径 a 变小时, 破坏区受到的约束增大, 极限承载力也随之增大, 以溶洞跨度 $4d$ 、纵截面直径 $1d$ 为例, 如图 7(e)所示。当溶洞的赤道半径 $a=2d$, $c/a=1$ (即常说的高跨比) 时极限承载力最小, $c/a<1$ 时, 随 c/a 值的减小极限承载力增大; 当溶洞的极半径 $c=2d$, 同样 $c/a=1$ 时极限承载力最小, $c/a>1$ 时, 随 c/a 值的增大极限承载力增大。

(4) 在溶洞大小、顶板厚度一致的条件下, 随溶洞位置偏移距离的增大, 极限承载力也随之增大, 基本呈线性发展; 当水平偏移距离为 $3d$ 时, 极限承载力值与溶洞顶板厚度为 $3d$ 的试验结果一致, 结合极限承载力时模拟基岩的破坏模式, 如图 7(f) (偏移距离 $3d$) 所示, 破坏接近没有溶洞的情形, 说明变形在水平方向上基本未超过 $6d$ 的影响范围。

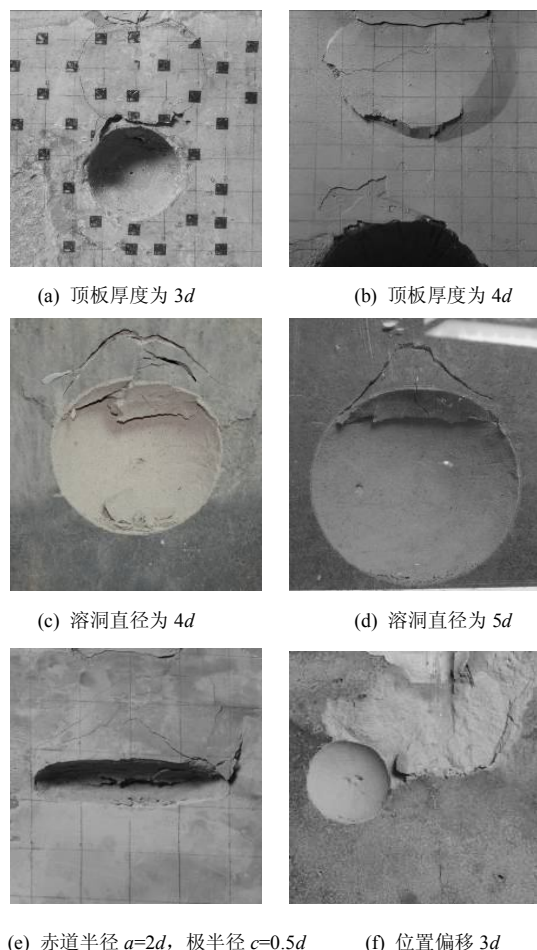


图 7 不同影响因素时的破坏模式
Fig.7 Failure modes with different influencing factors

通过上述分析, 认为桩底溶洞破坏时存在一个破坏核体, 该核体在水平方向上基本未超过 $4d$ 范围, 在竖直方向基本未超过 $3d$ 范围。当溶洞直径大

于等于 $4d$ 时, 嵌岩桩极限承载力基本稳定; 当溶洞顶板厚度大于 $3d$ 时, 嵌岩桩极限承载力同样基本稳定。

4 承载能力影响因素的敏感性分析

以溶洞的顶板厚度、直径、极半径、赤道半径与位置作为状态变量 x_i , 以模型嵌岩桩的极限承载力作为目标函数 F 进行单因素敏感性分析。为了比较极限承载力对各状态变量敏感程度的大小, 需进行无量纲化处理, 绘制极限承载力与状态变量之间相对误差的关系曲线, 该曲线切线斜率的绝对值定义为敏感度函数^[17]:

$$\alpha(x_i^*, \Delta x_i) = |\Delta F / F^*| / |\Delta x_i / x_i^*| \quad (1)$$

式中: F^* 为基准极限承载力值; x_i^* 为基准状态值; ΔF 为极限承载力的差值; Δx_i 为基准状态的差值。

由于本次试验考虑的各影响因素均与尺寸大小有关, 因此, 将敏感度函数定义为

$$\alpha(x_i) = |\Delta F| / |\Delta x_i| \quad (2)$$

4.1 敏感度分析

以直径 $3d$ 、顶板厚度 $2d$ 、水平位置偏移 $0d$ 的溶洞试验结果为基准, 绘制顶板厚度、溶洞直径、偏移位置 3 个因素相对变化状态下极限承载力的相对变化关系曲线, 如图 8 所示。以直径 $4d$ 、顶板厚度 $2d$ 、水平位置偏移 $0d$ 的溶洞试验结果为基准, 绘制溶洞极半径、赤道半径与直径 3 个因素相对变化状态下极限承载力的相对变化关系曲线, 如图 9 所示。

由图 8 可以看出: 当顶板厚度小于等于 $3d$ 时, 随顶板厚度的增加, 相对极限承载力逐渐增大; 当顶板厚度大于 $3d$ 时, 相对极限承载力趋于稳定, 说明顶板厚度因素的敏感区在 $3d$ 范围内。当溶洞直径小于等于 $4d$ 时, 随溶洞直径的增大, 相对极限承载力逐渐减小 (此处相对极限承载力值为绝对值); 当溶洞直径大于 $4d$ 时, 相对极限承载力趋于稳定, 说明溶洞直径因素的敏感区为小于等于 $4d$ 范围。当溶洞水平偏移位置小于等于 $3d$ 时, 随偏移距离的增大, 相对极限承载力变化逐渐增大, 结合前述变形区在水平方向上基本未超过 $6d$ 范围, 溶洞水平偏移位置因素的敏感区在 $6d$ 范围内。

由图 9 可以看出, 随溶洞赤道半径与极半径的增大, 相对极限承载力逐渐减小, 结合前述破坏区在水平方向上基本未超过 $4d$ 范围, 溶洞赤道半径与极半径因素的敏感区在 $4d$ 范围内。

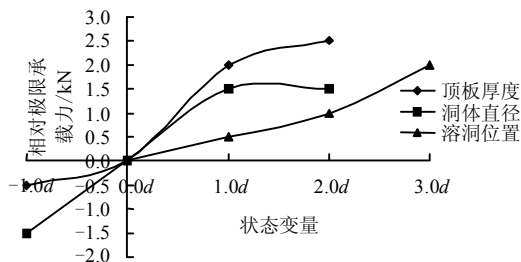


图8 不同顶板厚度、溶洞直径与位置时
相对极限承载力变化

Fig.8 Changes of relative bearing capacity with different
roof thicknesses, cave diameters and cave positions

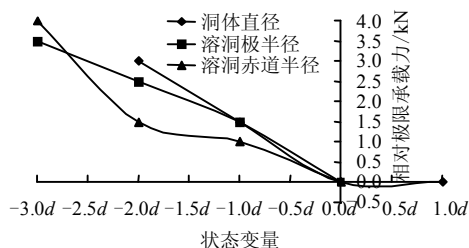


图9 不同溶洞直径、赤道半径与极半径时
相对极限承载力变化

Fig.9 Changes of relative bearing capacity with different
cave diameters, equatorials and polar radius

4.2 敏感度对比

对比不同顶板厚度、溶洞直径、赤道半径、极半径与位置等影响因素,敏感区内极限承载力的敏感性,线性拟合后各曲线的斜率统计见表4。

表4 不同影响因素时的敏感度对比

顶板厚度	溶洞直径	溶洞位置	极半径	赤道半径
1.25	1.50	0.65	1.15	1.25

由表可知,岩溶区嵌岩桩承载特性影响因素敏感度大小的顺序为:溶洞直径>顶板厚度、赤道半径>极半径>溶洞位置。对于溶洞直径因素,此时溶洞的赤道半径 a =赤道半径 b =极半径 c ,属于赤道半径和极半径的综合因素,从影响岩溶区嵌岩桩承载能力大小的单个因素分析,敏感度大小的顺序为:顶板厚度=赤道半径>极半径>溶洞位置。

5 试验分析与概念设计

5.1 影响溶洞承载能力的形状系数 ζ

结合表3,当顶板厚度为 $2d$ 、溶洞横截面积一致时,对比溶洞极半径 c 变化对极限承载力的影响,极限承载力统计见表5;当顶板厚度为 $2d$ 、溶洞纵截面积一致时,对比溶洞赤道半径 a 变化对极限承载力的影响,极限承载力统计见表6;当顶板厚度为 $2d$ 、溶洞体积一致时,对比溶洞形状变化对极限

承载能力的影响,极限承载力统计见表7。

表5 横截面积一致时极半径变化对极限承载力的影响
Table 5 Influence by change of polar radius with
same cross section area

横截面积	变化因素	极限承载力/kN
πd^2	$a=b=c=1d$	5.0
πd^2	$a=b=1d, c=2d$	3.5
$9\pi d^2/4$	$a=b=c=1.5d$	3.5
$9\pi d^2/4$	$a=b=1.5d, c=2d$	3.0

表6 纵截面积一致时赤道半径变化对极限承载力的影响
Table 6 Influence by change of equatorial radius with
same vertical section area

纵截面积	变化因素	极限承载力/kN
πd^2	$a=b=c=1d$	5.0
πd^2	$b=c=1d, a=2d$	4.5
$9\pi d^2/4$	$a=b=c=1.5d$	3.5
$9\pi d^2/4$	$b=c=1.5d, a=2d$	3.5

表7 体积一致时形状变化对极限承载力的影响
Table 7 Influence by change of shapes with same volume

体积	变化因素	极限承载力/kN
$2\pi d^3/3$	$a=b=0.5d, c=2d$	6.0
$2\pi d^3/3$	$a=2d, b=c=0.5d$	5.5
$8\pi d^3/3$	$a=b=1d, c=2d$	3.5
$8\pi d^3/3$	$a=2d, b=c=1d$	4.5
$6\pi d^3$	$a=b=1.5d, c=2d$	3.0
$8\pi d^3/3$	$a=2d, b=c=1.5d$	3.5

由表5可知,在横截面积一致的条件下,极限承载力随溶洞极半径 c 的增大而减小;溶洞横截面积较小时,纺锤型($c/a > 1$)溶洞的极限承载力较球型溶洞小很多;溶洞横截面积较大时,纺锤型溶洞的极限承载力与球型溶洞相近。说明破坏区在水平方向上是有一定范围的,随横截面积减小,破坏受到的约束增大,极限承载力也增大;桩底溶洞的破坏对纺锤型溶洞较敏感。由表6可知,在纵截面积一致的条件下,此时溶洞的横截面为椭圆,极限承载力随溶洞赤道半径 a 的增大而减小,但减小趋势不明显,说明桩底溶洞的破坏对扁平型($c/a < 1$)溶洞的敏感程度相对较低,破坏区在水平方向的发展主要受赤道半径 b 的影响。由表7可知,在溶洞体积一致的条件下,溶洞形状的变化对极限承载力影响较小。

分析认为,破坏核体的发展,在水平方向上主要受溶洞赤道半径 b 的影响,在竖直方向上主要受顶板厚度的影响。嵌岩桩承载能力的大小还与溶洞的形状有关,其对纺锤型溶洞较敏感,对扁平型溶洞的敏感程度相对较低,建议引进溶洞形状系数

ζ ，主要与溶洞的赤道半径 b 、 c/b 有关， ζ 建议值如表 8 所示，其取值还有待进一步的研究。

表 8 形状系数 ζ 建议值
Table 8 Suggested values of shape factor ζ

$b \geq 2d$	$b < 2d$		
	$c/b \leq 1$	$1 < c/b < 2$	$c/b \geq 2$
1.00	0.95~1.00	0.85~0.95	0.70~0.85

5.2 影响溶洞承载能力的底面积尺寸效应系数 η

受荷后，基岩持力层的稳定与破坏除了与本身的力学特性有关外，还受到基础底面附加应力大小的很大影响。基底附加应力的大小除了与荷载有关外，还受基础底面积的影响，因此，在研究岩溶区嵌岩桩承载能力时，必须考虑嵌岩桩底面积的大小。文献[18]基于非线性有限元计算，分析了桩体尺寸效应对嵌岩桩承载性状的影响，文献[19]通过对大量的现场试验数据和观测资料进行统计分析，发现基础底面尺寸效应对墩式基础的承载力有显著影响，得出随墩底直径增大调整系数呈降幂指数规律衰减的结论。建议引进嵌岩桩底面积尺寸效应系数 η ，由于本次试验所用模型桩桩体直径单一，其取值的大小还有待进一步研究。

5.3 影响溶洞承载能力的厚径比关系

基岩持力层的稳定与破坏除了受本身的力学特性、基底附加应力影响外，还与附加应力的影响范围有关，因此，讨论溶洞厚径比（厚径比为溶洞顶板厚度 H 与赤道半径 b 的比值）时，必须考虑嵌岩桩体底面积的影响。

由于本次试验所用模型桩桩体直径单一，此处主要讨论溶洞顶板厚度 H 与赤道半径 b 的比值对嵌岩桩承载能力的影响。结合表 3，当溶洞直径为 $3d$ 或溶洞顶板厚度为 $2d$ 时，随厚径比的增大，极限承载力统计见表 9。由表可知，当桩端底面积一定时，随厚径比的增大极限承载力逐渐增大。

表 9 不同厚径比时的极限承载力
Table 9 Bearing capacities with different ratios of thickness and radius

溶洞直径为 $3d$			顶板厚度为 $2d$		
顶板厚度变化		极限承载力 /kN	赤道半径变化		极限承载力 /kN
顶板厚度	赤道半径		顶板厚度	赤道半径	
$1.0d$	$1.5d$	3.0	$2.0d$	$2.5d$	2.0
$2.0d$	$1.5d$	3.5	$2.0d$	$2.0d$	2.0
$3.0d$	$1.5d$	5.5	$2.0d$	$1.5d$	3.5
$4.0d$	$1.5d$	6.0	$2.0d$	$1.0d$	5.0

同样结合表 3，讨论桩底面积与厚径比一定、顶板厚度与赤道半径 b 变化时的极限承载力，以厚

径比 $H/b=2$ 为例，统计见表 10。由表可知，桩底面积与厚径比一定时，随顶板厚度与赤道半径 b 的变化，极限承载力是不同的。说明岩溶区嵌岩桩极限承载力的变化除了受溶洞形状的影响外，还与桩底面积有关，即厚径比为溶洞顶板厚度 H 、洞体赤道半径 b 以及嵌岩桩体底面积的综合影响因素。

表 10 厚径比一致顶板厚度与赤道半径
不同时的极限承载力

Table 10 Bearing capacities with different roof thicknesses and equatorial radius

变化因素	极限承载力/kN
顶板厚度为 $3d$ ，洞体直径为 $3d$	5.5
顶板厚度为 $2d$ ，洞体直径为 $2d$	5.0
顶板厚度为 $2d$ ，溶洞极半径 c 变化，赤道半径 $b=1d$	4.5
顶板厚度为 $2d$ ，溶洞赤道半径 a 变化，赤道半径 $b=1d$	3.5

5.4 岩溶区嵌岩桩的概念设计与工程实例

在岩溶区，岩溶的发育特别是溶洞的存在，对嵌岩桩的承载能力影响很大，且影响十分复杂。对嵌岩桩的承载能力进行精确计算是非常困难的，因此，可借鉴抗震设防理论，对岩溶区嵌岩桩进行概念设计。根据模型试验结果，概念设计主要考虑如下几点：

(1) 嵌岩桩基岩持力层尽量选择力学性质好、无岩溶发育，特别是无溶洞存在的土层。

(2) 在嵌岩桩桩体直径 d 一定的情况下，当溶洞顶板厚度小于 $3d$ 时，此处基岩不宜做嵌岩桩的持力层。

(3) 在嵌岩桩桩体直径 d 一定、顶板厚度大于等于 $3d$ 的情况下，当溶洞赤道半径 $b < 2d$ 时，可以忽略溶洞对嵌岩桩承载能力的影响，当溶洞赤道半径 $b \geq 2d$ 时，忽略溶洞影响的顶板安全厚度要加大。

(4) 在嵌岩桩桩体直径 d 一定的情况下，当溶洞顶板厚度大于等于 $2d$ 、溶洞偏移位置大于等于 $3d$ 时，可以忽略溶洞对嵌岩桩承载能力的影响。

(5) 当溶洞的形状为纺锤型时，顶板的安全厚度要加大。

结合工程实例对概念设计进行验证，以大连海上体育休闲广场项目为例。大连海上体育休闲广场工程位于大连开发区南戴子南，小坨子西部，金窑铁路的南侧，工程重要性等级为 1 级，场地等级为 2 级，地基等级为 2 级。场地地形平坦，为人工填海整平而成，高程为 $5.78 \sim 4.00$ m，相对高差为 1.78 m，场地地貌单元属海滨地貌。场地地层自上而下为：杂填土、碎石、红黏土、中风化石灰岩。基岩岩溶现象发育，基础采用嵌岩桩，桩基础持力

层为中风化石灰岩,入岩深度不小于一倍桩径。

现以8#楼的4#桩与10#楼的31#桩为例。8#楼4#桩桩长为11.78 m,桩径为1.0 m,设计单桩承载力特征值为5 300 kN,桩底下4.7 m处存在一个近似球型溶洞,洞体直径约1.5 m,施工简图如图10(a)所示。10#楼31#桩桩长为14.89 m,桩径为1.0 m,设计单桩承载力特征值为5 300 kN,桩底下5.1 m、距桩中心线4.2 m处存在一个近似椭圆型的溶洞,溶洞赤道半径 a 和赤道半径 b 为1.0 m,极半径 c 为0.85 m,施工简图如图10(b)所示。

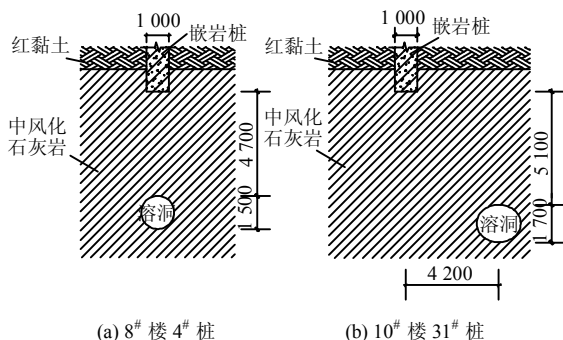


图10 嵌岩桩施工图(单位: mm)

Fig.10 Construction design of rock-socketed pile (unit: mm)

现场静载试验曲线如图11所示。由静载试验结果可知,嵌岩桩承载力满足设计要求,当溶洞顶板厚度与偏移位置超过一定界限后,溶洞的存在对承载能力的影响可以忽略,这与模型试验的结果相一致。本工程2009年竣工,楼房未出现不均匀沉降、开裂等问题,无岩溶危害发生。

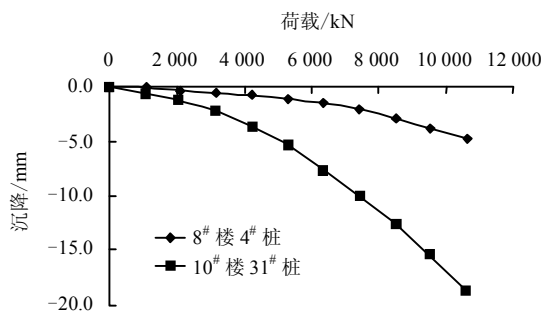


图11 现场静载试验结果

Fig.11 Results of field load test

6 结 论

(1) 随顶板厚度、溶洞位置偏移距离的增加,极限承载力逐渐增大,随溶洞直径、赤道半径、极半径的增加,极限承载力逐渐减小;当溶洞顶板厚度大于等于 $3d$,或溶洞直径大于等于 $4d$,或偏移位

置大于等于 $3d$ 时,极限承载力均趋于稳定。

(2) 桩底溶洞破坏时存在一个破坏核体,其在水平方向上基本未超过 $4d$ 范围,在竖直方向基本未超过 $3d$ 范围,破坏核体的发展主要受溶洞赤道半径 b 和顶板厚度的影响。

(3) 敏感区内影响因素敏感度大小的顺序为:溶洞直径>顶板厚度、赤道半径>极半径>溶洞位置。

(4) 建议引进形状系数 ζ 和底面积尺寸效应系数 η ,形状系数 ζ 主要与溶洞的赤道半径 b 和 c/b 有关;厚径比为溶洞顶板厚度 H 、洞体赤道半径 b 以及嵌岩桩体底面积的综合影响因素,对岩溶区的嵌岩桩进行概念设计,并通过工程实例加以验证。现场静载试验与模型试验结果基本一致,楼房竣工后未发生岩溶危害。

参 考 文 献

- [1] 张建新, 吴东云, 杜海金. 嵌岩桩承载性状和破坏模式的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 320—323.
ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun, DU Hai-jin. Testing study on bearing behaviours and failure mode of rock-socketed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 320—323.
- [2] 吴震, 张建新. 嵌岩桩破坏模式的试验研究[J]. 建筑施工, 2005, 27(7): 8—10.
WU Zhen, ZHANG Jian-xin. Experimental study on failure mode of rock-embedded pile[J]. Building Construction, 2005, 27(7): 8—10.
- [3] 汪稔, 孟庆山, 罗强, 等. 桥基岩溶洞穴顶板稳定性综合评价[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 76—80.
WANG Ren, MENG Qing-shan, LUO Qiang, et al. The comprehensive evaluation on roof stability of karst cave under bridge foundation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(6): 76—80.
- [4] 孟庆山, 陈勇, 汪稔. 岩溶洞穴工程地质条件与顶板稳定性评价[J]. 土工基础, 2004, 18(5): 55—58.
MENG Qing-shan, CHEN Yong, WANG Ren. Evaluation on roof stability and engineering geology condition of karst cave[J]. Soil Engineering and Foundation, 2004, 18(5): 55—58.
- [5] 曹文贵, 程晔, 赵明华. 公路路基岩溶顶板安全厚度确定的数值流形方法研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 621—625.

- CAO Wen-gui, CHENG Ye, ZHAO Ming-hua. Studies on numerical manifold method for determination of safe thickness of karst roof in roadbed[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(6): 621—625.
- [6] 赵明华, 曹文贵, 何鹏祥, 等. 岩溶及采空区桥梁桩基桩端岩层安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 64—68.
- ZHAO Ming-hua, CAO Wen-gui, HE Peng-xiang, et al. Study on safe thickness of rock mass at end of bridge foundation's pile in karst and work-out mine area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 64—68.
- [7] 赵明华, 袁腾方, 黎莉, 等. 岩溶区桩端持力岩层安全厚度计算研究[J]. 公路, 2003, 1(1): 124—128.
- ZHAO Ming-hua, YUAN Teng-fang, LI Li, et al. Computation study on safety thickness of bearing rock strata at ends of piles in karst region[J]. **Highway**, 2003, 1(1): 124—128.
- [8] 赵明华, 蒋冲, 曹文贵. 岩溶区嵌岩桩承载力及其下伏溶洞顶板安全厚度的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1618—1622.
- ZHAO Ming-hua, JIANG Chong, CAO Wen-gui. Study on bearing capacity of rock-socketed piles and safe thickness of cave roofs in karst region[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(11): 1618—1622.
- [9] 李仁江, 盛谦, 张勇慧, 等. 溶洞顶板极限承载力研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1621—1626.
- LI Ren-jiang, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Study on ultimate bearing capacity of upper rock plate of karst cave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1621—1626.
- [10] 阳军生, 张军, 张起森, 等. 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 Jun-sheng, ZHANG Jun, ZHANG Qi-sen, et al. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of circular footing above karst cave[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 296—301.
- [11] 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 Qiu-yan, QIN Feng-rong. Analysis on roof stability of karst cave in karst area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 532—536.
- [12] 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 Zhi-kui, LIANG Jin-cheng, 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.
- [13] 铁道第三勘察设计院. TB10002.5—2005 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 北京: 人民铁道出版社, 2005.
- [14] 中国建筑科学研究院. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [15] 叶琼瑶, 黄绍铿. 软岩嵌岩桩的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 461—464.
- YE Qiong-yao, HUANG Shao-keng. Model testing study on rock-socketed piles in soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 461—464.
- [16] 中国建筑科学研究院. JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [17] 钟岱辉, 马玉梅. 地基极限承载力的参数敏感性分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊): 479—481.
- ZHONG Dai-hui, MA Yu-mei. Parameter sensitivity analysis of the ultimate bearing capacity of the subgrade[J]. **Industrial Construction**, 2005, 35(Supp.): 479—481.
- [18] 张建新, 吴东云, 张淑朝. 嵌岩桩尺寸效应的有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1221—1224.
- ZHANG Jian-xin, WU Dong-yun, ZHANG Shu-chao. Finite element analysis of size effect of rock-socketed piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1221—1224.
- [19] 刘忠昌, 朱浮声, 舒昭然, 等. 黏性土地基墩式基础承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(5): 86—88.
- LIU Zhong-chang, ZHU Fu-sheng, SHU Zhao-ran, et al. Research on bearing capacity test of pier foundation on cohesive soil[J]. **Strcuture Building**, 2008, (5): 86—88.