

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.06.002

# 双溶洞建筑边坡变形破坏模型试验研究

冯祖浚<sup>1</sup>, 祝方才<sup>1</sup>, 李大建<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 深圳市太科检测有限公司, 广东 深圳 518053)

**摘要:** 以某岩溶地区建筑边坡为工程背景, 将建筑物荷载简化为坡顶荷载, 根据相似材料原理, 建立上下布置双溶洞相似材料平面应变模型; 采用三阶段荷载模式, 即预加载模拟建筑物荷载、模拟开挖和继续加超载直至边坡整体破坏, 研究溶洞顶板沉降、靠近坡面溶洞洞壁中部水平位移、坡体内岩体压力和分层开挖坡面位移变化特征。研究表明: 溶洞顶板位移在整个过程中呈增加趋势, 在第三阶段出现急剧增加特征。近坡面一侧溶洞洞壁中部水平位移在第一阶段均呈缓慢增加趋势; 在第二阶段上溶洞受开挖扰动的影响水平位移呈现急剧跳跃态势, 下溶洞水平位移突然增加而后稳定; 第三阶段上溶洞水平位移出现急剧增加然后跌落特征, 下溶洞水平位移基本无变化。在整个试验过程中岩体压力呈增加态势, 且近坡面处压力增幅较大。在第一、二阶段, 边坡沿高度方向坡面水平位移呈中间大两头小的中鼓增加态势, 而在第三阶段, 坡面底部出现挤出效应而出现水平位移明显增大特征。

**关键词:** 溶洞; 边坡; 顶板沉降; 水平位移

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)06-0007-05

## An Experimental Study on the Slope Deformation and Collapse with Double Karst Caves

FENG Zujun<sup>1</sup>, ZHU Fangcai<sup>1</sup>, LI Dajian<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Shenzhen Taike Test Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518053, China)

**Abstract :** With the background of slopes with building loads in karst areas, where the building loads are to be simplified as loads on the top, and based on similar material theory, a similar material plane strain model of double karst caves has been built, with double caves laid out from top to bottom, and a three-stage load procedure has been proposed for the preloading, simulation of slope excavation and an overloading involving slope collapse. A research has been carried out on the roof deflection (RD) of karst caves, as well as the horizontal displacement in the middle of sidewall close to the slope surface (HDMS) of double caves, the rock pressure (RP) and the horizontal displacement of layered slope surface (HDLS) formed by excavation. The research results show that: in the whole process, RD shows an increasing trend, especially with a dramatic increase at the third stage; at the first stage, HDMS show a slowly-increasing trend, with a sharp fluctuation with HDMS at the top cave at the second stage, and with a constant sharp increase with HDMS of the bottom cave at the third stage. HDMS of the top cave rises rapidly and then drops quickly, whereas HDMS of the bottom cave exhibits little change. Rock pressure (RP) is increased in the whole test process, with a more remarkable increase close to the slope surface; at the first and second stages, a slow increase trend of HDLS is exhibited in a similar parabolic form; and at the third stage, HDLS increases markedly, showing an extrusion effect at the bottom of the slope surface at the third stage.

**Keywords :** Karst caves; slope; roof deflection; horizontal displacement

收稿日期: 2016-10-09

基金项目: 湖南省自然科学基金资助重点项目 (13JJ2033)

作者简介: 冯祖浚 (1991-), 男, 湖南怀化人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为隧道稳定性, E-mail: fengzujun@qq.com

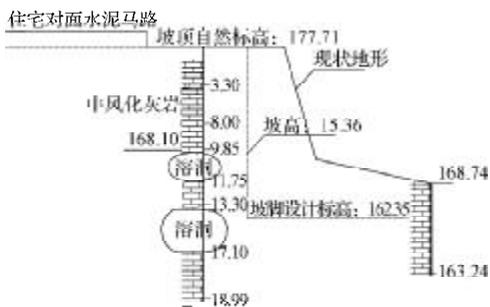
岩溶在我国南方地区广泛分布,岩溶空洞降低了边坡岩体的结构强度和完整性,容易使边坡发生局部变形破坏,甚至整体失稳。在土建工程中,需要考虑溶洞对边坡稳定性的影响<sup>[1]</sup>。在建筑物荷载作用下,如何分析岩溶边坡稳定性及开挖效应是有待解决的问题。有不少学者作了相关的研究,例如:高振鯤等<sup>[2]</sup>研究了地下隐伏溶洞对边坡稳定性的影响;江学良等<sup>[3]</sup>研究了岩石地下洞室与边坡的相互影响,建立了边坡下伏地下岩石洞室深埋与浅埋的计算模型;刘之葵<sup>[4]</sup>研究了岩溶区溶洞及土洞对建筑地基的影响;阳军生等<sup>[5]</sup>对溶洞上方圆形基础地基极限承载力进行了有限元分析。溶洞的分布形式较为复杂,本文结合某房地产项目建筑边坡,通过室内模型试验研究建筑物荷载下边坡变形破坏特征,以期对岩溶地区建筑边坡施工和支护提供参考。

## 1 工程概况

湖南省郴州市某房地产项目建筑边坡,位于岩溶地区,溶洞有一定程度的发育,场地和边坡情况如图1所示。经现场调查,选取某一典型边坡进行研究。该边坡有2个竖向分布大小不同近似球形的溶洞,溶洞中软黏土局部填充,按照不同深度垂直依次分布,直径分别约为1.9 m和3.8 m,距离坡顶分别为9.85 m和13.30 m。边坡采用直立式开挖,开挖深度15 m,边坡表层为0~0.4 m的残积黏土,内部为中风化灰岩层,需要评价该边坡的稳定性。



a) 场地情况



b) 边坡剖面(单位:m)

图1 某岩溶建筑边坡及剖面

Fig. 1 A typical slope and a cross section with a building in karst

## 2 试验模型与方法

### 2.1 模型材料参数设计

根据该场地岩溶地质条件,参考建筑边坡场地地质勘察报告,中风化灰岩及相似材料物理力学参数如表1所示。

表1 中风化灰岩和相似材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of moderately weathered limestone and similar materials

材料类型	密度 $\rho$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗压强度 $\sigma_c$ / MPa	抗拉强度 $\sigma_t$ / MPa	弹性模量 $E$ / GPa
灰岩	25.6	38.70	1.890 0	17.680
相似材料	19.8	1.01	0.037 7	0.421

材料类型	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )
灰岩	0.27	1.300	47
相似材料	0.25	0.029	46

### 2.2 模型尺寸及制作

根据溶洞影响范围<sup>[6]</sup>以及边坡开挖的深度和扰动影响来确定模拟范围<sup>[7]</sup>。参考岩体边坡模型试验<sup>[8]</sup>,比例尺取1:30,模拟边坡模型尺寸:长 $\times$ 宽 $\times$ 高=1 000 mm $\times$ 500 mm $\times$ 1 000 mm,如图2所示(图中数据单位:mm)。

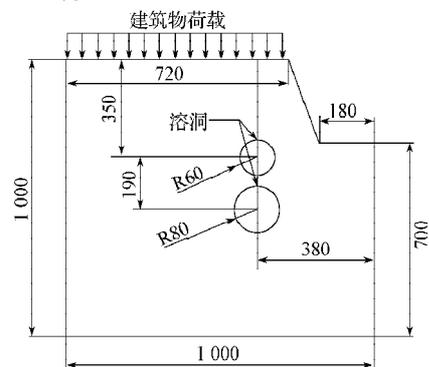


图2 含双溶洞建筑边坡试验模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test model of the slope with double cavities

模型试验箱采用10 mm厚钢板和角钢加工而成,模型箱内壁设置0.3 mm厚的聚四氟乙烯板,以降低边界效应,如图3所示。

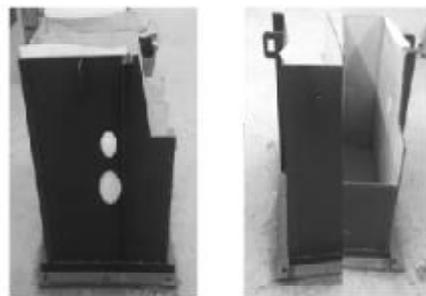


图3 含双溶洞建筑边坡模型试验实物图

Fig. 3 Setup of model tests of building slope with double cavities

2.3 监测方法

模型试验中主要监测位移和岩土体压力, 测试仪器包括百分表、土压力盒和位移计。制作模型时, 按照设计位置预先埋设直径为 9 mm 的微型应变式土压力盒。考虑到压力大小和测量精度的不同, 分别选取量程为 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 MPa 的土压力盒, 共布置 14 个压力监测点, 如图 4 所示 (图中数据单位: mm)。

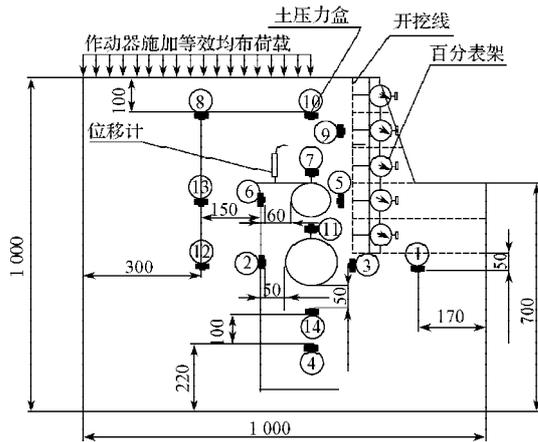


图4 监测点布置图

Fig. 4 Layout of monitoring points

位移监测包括溶洞顶板沉降以及临近边坡一侧水平位移、边坡开挖临空面的各层测点水平位移。用量程为 30 mm 的百分表监测边坡开挖临空面各层水平位移、下溶洞拱顶沉降与溶洞临近边坡一侧水平位移。上溶洞采用阜新福传感器有限公司的 FXg-81/±15 cm 型直流位移传感器 (量程为 ±15 cm, 分辨率为 0.1 mm) 进行位移监测。位移传感器和百分表布置如图 5 所示 (图中数据单位: mm)。

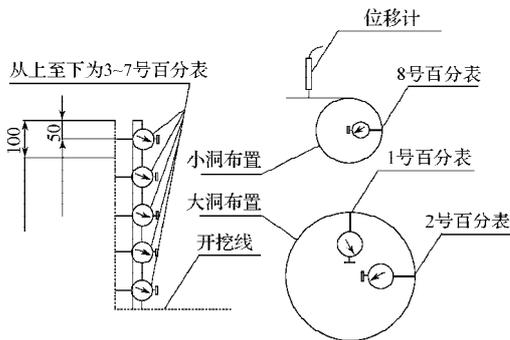


图5 百分表及位移传感器布置图

Fig. 5 A dial gauge and displacement sensor layout

2.4 建筑荷载模拟方法和开挖方案

模拟开挖主要研究工程开挖对含双溶洞建筑边坡稳定性状的影响, 模拟开挖不考虑时间效应。开挖过程中, 施加静态荷载, 大小保持为 10 kN。由于相似材料强度较低, 采用电钻辅助开挖, 从坡顶向

下垂直分为 5 层, 总开挖高度为 0.5 m, 每层开挖 0.1 m。预先设置开挖线, 并尽量控制每层开挖面形成的基坑边坡坡面垂直, 以较好地模拟出基坑边坡坡面。每层开挖完成后, 使破碎的岩块自然地滑落至坡脚, 通过百分表的读数变化确定变形是否稳定, 然后再进行下一步开挖。

采用西安力创公司的微机控制同步多点加载系统, 对边坡模型坡顶逐级施加荷载。模型顶部设置长×宽×厚=565 mm×245 mm×20 mm 的矩形钢板, 并在其上焊接一带有加筋肋的 50# 槽钢, 如图 6 所示。



图6 模型加压系统

Fig. 6 A model pressurization system

由于基坑边坡坡段开挖前坡顶存在建筑物荷载, 为了模拟该工况, 根据原型边坡场地坡顶已存在的建筑物荷载形式和荷载大小, 且不考虑建筑基础形式的前提下, 在开挖前先在坡顶施加一定等级的模拟建筑物均布荷载, 根据相似原理, 可求得时间相似常数。采用平面应变模型, 按照相似时间进行分级预加载, 预加载方案如表 2 所示。

表2 溶洞建筑边坡模型分级预加载方案

Table 2 Scheme of hierarchical preloading for a slope model of a building in karst

荷载级别	等效模拟建筑荷载 /kN	加载速率 / (N · s <sup>-1</sup> )
第一级	0~2	30
第二级	2~4	30
第三级	4~6	30
第四级	6~8	30
第五级	8~10	30

采用液压伺服作动器向坡顶施加等效均布面荷载, 每级荷载 5 kN, 从 10 kN 开始加载, 加载速率为 50 N/s, 以模拟坡顶堆载或建筑物荷载引起边坡变形破坏失稳的情况。

2.5 试验过程

模型试验分 3 个阶段进行: 第一阶段, 开挖前分级预加载 (试验阶段编号 1~6); 第二阶段, 分层开挖 (试验阶段编号 7~16); 第三阶段, 开挖后分级加超载直至边坡破坏 (试验阶段编号 17~29), 如表 3 所示。

表3 模型试验不同阶段描述  
Table 3 Model tests of different stages

试验阶段	试验阶段编号	试验阶段描述	试验阶段对应时间/s
开挖前 分级预加载	1	初始 0 kN	0
	2	2 kN	100
	3	4 kN	280
	4	6 kN	460
	5	8 kN	1 170
	6	10 kN	1 370
开挖过程	7	1层开挖前	1 390
	8	1层开挖后	1 510
	9	2层开挖前	1 570
	10	2层开挖后	1 690
	11	3层开挖前	2 170
	12	3层开挖后	2 270
	13	4层开挖前	2 510
	14	4层开挖后	3 560
	15	5层开挖前	5 120
	16	5层开挖后	7 040
分级加超载	17	15 kN	7 240
	18	20 kN	7 440
	19	25 kN	7 640
	20	30 kN	7 790
	21	35 kN	7 990
	22	40 kN	8 190
	23	45 kN	8 465
	24	50 kN	8 540
	25	55 kN 上溶洞出现裂纹	8 765
	26	60 kN	9 015
	27	65 kN	9 190
	28	70 kN	9 465
	29	74 kN 边坡破坏	9 540

### 3 试验结果分析

#### 3.1 边坡变形破坏特征分析

试验过程相对应各个时间阶段的溶洞顶板位移变化曲线如图7所示。

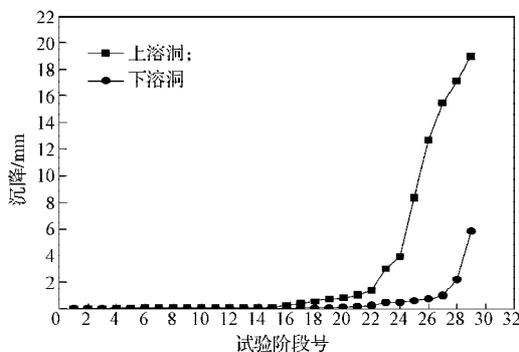


图7 双溶洞边坡模型溶洞顶板沉降曲线

Fig. 7 Settlement curves of karst cave roof with a double-cavity slope model

从图7可以看出,双溶洞建筑边坡开挖时,上、

下溶洞顶板沉降很小,第三阶段加载开始后,上、下溶洞顶板沉降逐渐增加,溶洞接近破坏时,达到最大。上溶洞顶板沉降响应特征较下溶洞明显,且上、下溶洞分别在40 kN和60 kN先后进入变形破坏阶段,加载到74 kN时,上、下溶洞顶板先后塌陷,边坡整体失稳坍塌。

试验过程相对应各个时间阶段的临近边坡一侧溶洞水平位移变化曲线如图8所示。从图8可以看出,随着开挖的进行,下溶洞临近边坡一侧的水平位移基本没有变化,而上溶洞临近边坡一侧的水平位移变化较为明显,其值先减小后增大(规定指向临近边坡一侧位移为正),第三层开挖完成后,达到最大值约0.7 mm。开挖结束后继续施加荷载,下溶洞临近边坡一侧水平位移变化较小,而上溶洞临近边坡一侧洞壁水平位移变化复杂,原因可能是电钻辅助开挖时对上溶洞扰动较大,接近破坏时,上溶洞洞壁水平位移达到最大值。

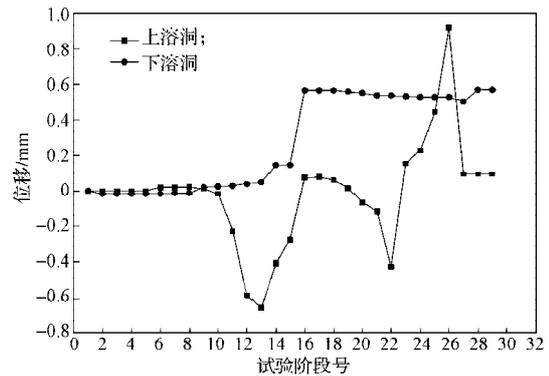


图8 临近边坡一侧溶洞水平位移变化曲线

Fig. 8 Curves of horizontal displacement of a karst cave near the side slope

#### 3.2 边坡岩体压力分析

试验过程相对应各个时间阶段的边坡岩体压力变化曲线如图9所示。

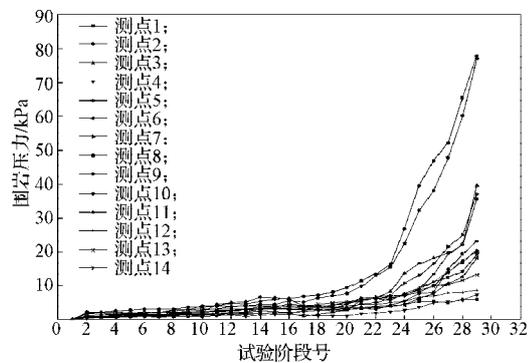


图9 各测点围岩压力变化曲线

Fig. 9 Pressure change curve of surrounding rocks at each measuring point

从图9可以看出,预加载和开挖阶段,边坡上部

岩层压力变化要大于下部岩层压力,这较好地反映了加载情况。距离溶洞越远,溶洞水平中心轴线处的压力变化越小;相同深度处,距离坡面越近,岩体水平压力越大。在开挖过程中,上、下溶洞围岩靠近边坡附近测点(如编号3,5,9,11)波动幅度较大。第三阶段临近边坡开挖面和溶洞之间岩体水平压力和坡脚位置水平压力,随荷载增大逐渐增加,接近破坏时增幅明显。

### 3.3 边坡坡面水平位移分析

边坡坡面水平位移是在第一层开挖完成后开始监测直到边坡破坏。试验过程相对应各个时间阶段的坡面各开挖层中点水平位移变化曲线如图10所示。从图10可以看出,坡面各层测点水平位移随着坡顶荷载的增大而逐渐增大,边坡开挖过程中,第三层坡面中点水平位移变化响应特征明显,这表明临近溶洞坡面的岩体结构变形较大;边坡开挖完成后施加第三阶段荷载,边坡坡面最大水平位移出现在坡脚和临近上溶洞顶板附近坡面,这反映了边坡坡脚的挤出效应。

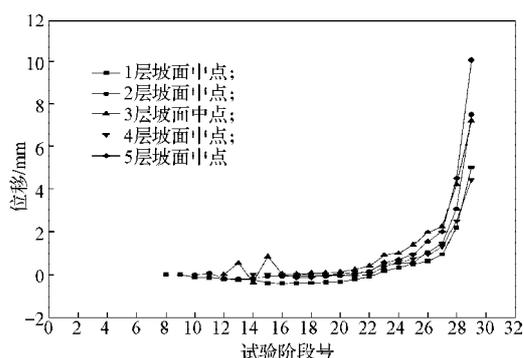


图10 边坡坡面各开挖层中点水平位移变化曲线

Fig. 10 Curves of horizontal displacement of the middle point of each excavation layer on the slope

## 4 结论

根据相似理论建立了岩溶地区建筑荷载作用下双溶洞室内试验模型。基于超载法边坡稳定分析模型,将室内相似材料模型试验的加载过程分为3个阶段,研究了预加载、模拟开挖和加载超载过程中边坡变形破坏特征,可得如下结论:

1) 上下溶洞顶板沉降和洞壁水平位移反映了3个阶段变形破坏特征,上溶洞变形破坏更为明显,上溶洞对下溶洞具有遮挡效应;

2) 边坡坡面水平位移在预加载和开挖阶段呈现中间大两头小的中鼓效应,而在超载破坏阶段边坡坡脚挤出效应明显;

3) 边坡水平岩体压力在接近破坏时坡脚处增幅

明显,与边坡坡脚挤出效应一致。

### 参考文献:

- [1] 万文. 地下空区对边坡稳定性的影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.  
WAN Wen. Study on the Stability of Slope Influenced by the Underground Vacant Area[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [2] 高振鲲, 刘玮静, 王成锋. 地下隐伏溶洞对边坡稳定性的影响[J]. 山西建筑, 2008, 34(12): 112-113.  
GAO Zhenkun, LIU Weijing, WANG Chengfeng. The Influence of Underground Underlying Karst Cave on Slope Stability[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(12): 112-113.
- [3] 江学良, 杨慧, 曹平. 边坡下伏地下圆形洞室的弹性应力解析[J]. 计算力学学报, 2012, 29(1): 62-68.  
JIANG Xueliang, YANG Hui, CAO Pin. Elastic Stress Analytic Solution of the Round and Underground Cavern Under Slope[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(1): 62-68.
- [4] 刘之葵. 岩溶区溶洞及土洞对建筑地基影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.  
LIU Zhikui. Study on Effect of Cave and Cave Soil on Building Foundation in Karst Region[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [5] 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 Junsheng, ZHANG Jun, ZHANG Qisen, 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.
- [6] 张强勇, 张绪涛, 向文, 等. 不同洞形与加载方式对深部岩体分区破裂影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1564-1571.  
ZHANG Qiangyong, ZHANG Xutao, XIANG Wen, et al. Model Test Study of Zonal Disintegration in Deep Rock Mass Under Different Cavern Shapes and Loading Conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1564-1571.
- [7] 唐红梅, 陈洪凯, 曹卫文. 顺层岩体边坡开挖过程模型试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 435-440.  
TANG Hongmei, CHEN Hongkai, CAO Weiwen. Model Experiment in Excavation of Rock Bedding Slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 435-440.
- [8] 徐前卫, 朱合华, 丁文其, 等. 直立岩质边坡的渐进性破坏模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 33-37.  
XU Qianwei, ZHU Hehua, DING Wenqi, et al. Experimental Study on Progressive Failure of Vertical Rock Slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 33-37.

(责任编辑: 邓光辉)