

# 岩溶区钻孔桩泥浆漏失引起土体变形机制与破坏模式试验研究

姜明映<sup>1</sup>, 陈娥梅<sup>1</sup>, 刘永成<sup>1</sup>, 朱亚东<sup>1</sup>, 蒋文奎<sup>2</sup>, 谢瑞庭<sup>3,4\*</sup>

(1. 云南省曲靖市交通建设投资集团有限公司, 云南 曲靖 655000; 2. 中铁建大桥工程局集团 第五工程有限公司, 四川 成都 610500; 3. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 4. 广东粤海粤西供水有限公司, 广东 湛江 524033)

**摘要:** 岩溶区桩孔常常钻穿溶洞诱发泥浆漏失, 引起孔壁失稳、地面塌陷、设备陷落, 阻碍施工顺利进行。掌握钻孔因泥浆漏失而塌陷机制对优化、确定桩孔的施工工艺非常重要。该文采用室内模型试验, 研究岩溶区覆盖层为上部黏土、下部砂土条件下桩孔钻穿溶洞、泥浆漏失引起土体变形机制与破坏模式, 为岩溶区桩基施工方案决策提供试验依据。结果表明: 桩孔钻穿溶洞顶板引起上部黏土、下部砂土覆盖层塌陷的力学原理是桩孔钻穿溶洞顶板后, 泥浆快速下窜导致孔壁应力失去平衡, 砂土因单粒结构而率先移动、充填桩孔, 进而引起的上层黏土失稳下沉。当砂土顶面与水平面形成的夹角约等于内摩擦角时, 砂土滑动停止; 砂土滑动停止后, 上层黏土下沉持续而形成土拱; 土拱形成以后, 地面趋于稳定; 钻孔泥浆下窜诱发地面沉降的历程分为快速下沉、缓慢下沉、稳定3个阶段, 整个过程历时约1 min, 地面形成下沉盆。工程中, 建议对溶洞顶板上部砂土采用注浆法加固, 防止桩孔钻穿溶洞顶板引起地面塌陷, 确保设备人员安全、施工顺利。

**关键词:** 基础工程; 岩溶; 桩孔垮塌; 地面塌陷; 泥浆下窜; 模型试验

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

## Model Test on Soil Deformation Mechanism and Damage Mode Caused by Mud Leakage from Drilled Piles in Karst Area

JIANG Mingying<sup>1</sup>, CHEN E'mei<sup>1</sup>, LIU Yongcheng<sup>1</sup>, ZHU Yadong<sup>1</sup>, JIANG Wenkui<sup>2</sup>, XIE Ruiting<sup>3,4\*</sup>

(1. Yunnan Qujing Transportation Construction Investment Group Co., Ltd., Qujing, Yunnan 655000, China; 2. Fifth Engineering Company, China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 4. Guangdong Yuehai Yuexi Water Supply Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524033, China)

**Abstract:** Pile holes are often drilled through cavities in karst areas, which induces mud leakage and causes hole wall instability, ground collapse, or equipment trapping and hinders smooth construction. It is important to know the collapse mechanism of boreholes due to mud leakage, so as to optimize and determine the construction process of pile holes. In this paper, indoor model tests were used to study the deformation mechanism and damage mode of soil caused by drilling through cavities and mud leakage in pile holes under the conditions of upper clay and lower sandy soil in the karst area, so as to provide an experimental basis for the decision of pile construction plan in karst area. The results show that the mechanical principle of the pile hole drilling through the roof of the cavity and causing the collapse of the upper layer of clay and the lower sand covering layer is that after the pile hole drills through the roof of the karst cavity, the mud quickly goes down and causes the stress of the hole wall to lose balance, and the sand first moves and fills the pile hole due to the single grain structure, which causes the instability and sinking of the upper layer of clay. When the angle between the top surface of the

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52278329); 湖南省交通运输厅科技项目(编号: 202019, 202247)

作者简介: 姜明映, 男, 高级工程师. E-mail: 452529493@qq.com

\*通信作者: 谢瑞庭, 女, 硕士. E-mail: xrt9367@163.com

sand and the horizontal surface is about equal to the angle of internal friction, the sand sliding stops. After the sand sliding stops, the upper layer of clay sinks continuously and forms the soil arch. After the soil arch is formed, the ground tends to be stable. The process of ground sinking induced by drilling mud channeling can be divided into three stages: rapid sinking, slow sinking, and stabilization. The whole process takes about one minute. The ground forms a sinking basin. In the project, it is suggested to reinforce the sand on the top of the roof of the karst cavity by grouting to prevent the ground collapse caused by the pile hole drilling through the roof of the karst cavity, and then the safety of the equipment or personnel and smooth construction can be ensured.

**Keywords:** foundation engineering; karst; collapse of pile hole; ground collapse; mud channeling; model test

## 0 引言

岩溶塌陷按产生原因可分为自然塌陷和人为塌陷<sup>[1-2]</sup>,按成因机制可分为渗压效应致塌、真空吸蚀致塌、潜蚀致塌、震动群塌、重力致塌和人工塌陷等<sup>[3-5]</sup>,塌陷产生的根本原因为溶洞上部覆盖层土体失稳,塌陷土体所受的致塌力大于抗塌力。地下水、强降雨、人类工程活动等常常作为诱发力,通过改变原有的地质条件而加速岩溶的塌陷。王建秀等<sup>[6]</sup>分析了岩溶塌陷演化过程中水-土-岩相互作用,探讨了作用模式,认为岩溶塌陷的发育和水-土-岩相互作用密不可分,塌陷的物质载体是盖层土体和岩层的顶板,而地下水赋存于岩土体内,地下水和岩土体之间存在复杂的物理力学、化学作用,土体和岩体之间也存在着应力传递和物质传输作用;反之,岩土体结构和稳定状态的变化也会改变地下水的渗流运动状态,影响岩土体的结构和稳定状态,直至塌陷产生;卢薇等<sup>[7]</sup>在前人研究基础上进行理论分析和试验研究,认为岩溶塌陷与基岩上覆土体的物理力学性质与土质有关,不同的物理力学性质导致塌陷方式出现差异;李才华等<sup>[8]</sup>在对岩溶塌陷地质模型进行概化的基础上,进行物理模型试验,得出研究区岩溶地面塌陷形成是多种因素共同作用的结果。在岩溶区施工钻孔灌注桩,随着钻头冲击旋转扰动和泥浆漏失,钻孔塌陷常常引起地面塌陷,并且具有不确定性,给施工带来极大困扰。广珠货运铁路广州至珠海线复工工程二标段白泥河特大桥 511# 桥台地层自上而下分别为:人工填土、粉质黏土、中砂、粗砂、全风化石灰岩、强风化石灰岩和弱风化石灰岩,溶洞高度约 7.5 m,桩长为 48.0 m,在冲孔至 33.7 m 位置时,出现漏浆,随之出现大面积塌孔及地表塌陷,地表塌陷直径为 15 m,深度达 6 m,在对桥台处的地层进行粉喷

桩和注浆加固的基础上,为防止再次出现大面积地表坍塌,对钻孔桩基础采取全程钢护筒跟进的施工方<sup>[9]</sup>;吉安赣江铁路特大桥地处岩溶发育地区<sup>[10]</sup>,溶洞成串出现,暗河纵横交错,墩下有 4~7 层溶洞,溶洞最深达 18.52 m,最大高度达 5.89 m,采取将黏土装袋、水泥整包、片石集中,短时间大方量投入孔内,堵漏效果显著;张中善<sup>[11]</sup>针对岩溶地区灌注桩施工中出现的漏浆与塌孔现象,采用片石黏土水泥筑壁法、钢护筒跟进法、素混凝土回填法和预注浆法处理地层中的土洞和溶洞,取得了良好的效果;马骁等<sup>[12]</sup>以深圳市龙岗区龙园路岩溶地面塌陷为例,运用高频率高精度岩溶地下水气压力监测手段,分析桩基施工对岩溶地下水的影响及隐伏土洞发育规律,认为桩基施工导致岩溶地下水气压力突变,使第四系底部软-流塑土体流失而形成土洞,土洞不断向地面发展,最终引发岩溶地面塌陷;周文龙<sup>[13]</sup>认为岩溶区桩基础施工对地下水动力平衡条件造成破坏,诱发岩溶地面塌陷,威胁施工安全,需全面分析诱发原因,采取可靠的防治措施,保证桩基础施工顺利进行;老国健等<sup>[14]</sup>以广佛肇高速公路广州段桥梁桩基施工塌陷为例,分析塌陷原因,认为施工扰动是岩溶塌陷的诱因;张新杰等<sup>[15]</sup>结合广清高速公路改扩建工程,针对岩溶区高速公路改扩建,建立一套基础施工安全风险定性评估方法;毕树峰<sup>[16]</sup>依托实体项目,分析不同类型溶洞多种处理措施及其效果,提出将传统的片石、黏土回填优化为灌注絮凝混凝土、采取引孔爆破辅助措施;陈明晓<sup>[17]</sup>从广东省 3 个大型公路工程发生的地面塌陷事故出发,概述其地貌条件、工程地质条件、水文地质条件及塌陷情况,详细分析发生塌陷的机理及原因,总结发生塌陷的基本条件和影响塌陷的地质因素,按这些因素水平赋予相应的权重,以此作为预测的依据,探讨在工程实践

中如何更有效地对塌陷进行预测;熊志涛等<sup>[18]</sup>通过含水层地下水动态监测和不同部位振动点监测对岩溶区桩基施工过程中的塌陷进行分析,得出冲孔施工过程产生振动波对砂性土性状和结构产生不同程度的影响,对岩溶水和孔隙水流场分别产生作用,因而改变了岩溶地质环境条件,诱发岩溶地面塌陷。

虽然前人已对岩溶自然塌陷<sup>[1-3]</sup>及人为塌陷<sup>[4-18]</sup>展开了一些研究,但是桩孔钻穿溶腔顶板后泥浆突然下窜诱发桩孔塌陷的过程尚不清楚。本文采用室内模型试验,研究岩溶区覆盖层为上部黏土、下部砂土条件下桩孔钻穿溶洞、泥浆漏失引起土体变形机制与破坏模式,为岩溶区桩基施工方案决策提供试验依据。

1 模型试验设计

1.1 模型材料

模型土上层为可塑—硬塑红黏土,中层为中密砂土,下层为基岩。试验红黏土  $d_{\max}<5\text{ mm}$ ,经晾晒、碾碎、过筛,去除大颗粒,试验砂土  $d_{\max}<1\text{ mm}$ 。模型土参数见表1。

表1 模型土参数					
Table 1 Parameters of model soil					
土名	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	压缩模 量/MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	含水量/ %
红黏土	20.80	5.70	18.16	36.12	15.00
砂土	20.00	25.00	32.00	1.50	0.00

根据已有研究<sup>[19-20]</sup>,筛选出适合本试验的模拟灰岩材料配合比为细砂:水泥:石膏粉=5.0:0.8:0.2。采用定制高压PE薄膜模拟泥浆润滑套。泥浆造浆材料选用红黏土掺入适量膨润土,保证泥浆自始至终性能稳定、沉淀极少、护壁效果好、成孔质量高。试验前进行泥浆配合比试验,泥浆性能控制指标见表2。相对密度、黏度、含砂率、pH值、胶体率、失水率的检验方法/仪器分别为泥浆比重计、标准漏斗黏度计、含砂率计、pH试纸、量杯法、气压泥浆式失水量测定器。

钻孔变形属于轴对称问题,为了直接观察试验过程的内部变化,实现可视性,试验采用半圆柱钻孔,半圆柱钻孔紧贴箱体透明侧壁设置。取直径为 $\phi 75\text{ mm}$ 的钻孔,深度为445 mm。综合试验条件,溶腔采用木盒模拟,溶洞尺寸采用 $240\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),因为钻孔穿过溶洞顶板,所以

溶洞顶部位置需预留直径为 $\phi 75\text{ mm}$ 的半圆形孔洞。用厚度5 mm的模板装钉,连接处采用环氧树脂加固。

表2 泥浆性能指标					
Table 2 Index of mud performance					
相对密度	黏度/ s	含砂率/ %	pH值	胶体率/ %	失水率/ [ $\text{mL}\cdot(30\text{ min})^{-1}$ ]
1.1~1.3	18~22	$<4$	8~10	$>96$	14~20

1.2 试验方案及模型安装

试验方案见表3,试验布置见图1。黏土层厚度为188 mm,砂土层厚度为255 mm,试验钻孔直径 $\phi 75\text{ mm}$ 。

表3 试验方案					
Table 3 Test scheme					
钻孔直 径 $D$ / mm	钻孔深 度 $L$ / mm	黏土层 厚度 $D_1$ / mm	砂土层 厚度 $D_2$ / mm	溶洞顶板 厚度 $D_3$ / mm	溶洞尺寸/ ( $\text{mm}\times\text{mm}\times$ $\text{mm}$ )
75	445	188	255	2	$240\times 200\times 120$

注:溶洞位于基岩下2 mm。百分表在靠玻璃面一侧,距钻孔每80 mm放置1个,左右对称,共放置4个。

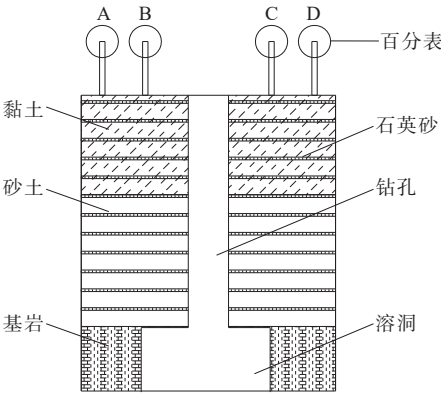


图1 试验布置图  
Figure 1 Test arrangement

试验在模型槽内进行。为了减小边界效应,在模型槽内壁涂抹凡士林,以减小摩擦力,确保隔室与隔室之间不产生相互影响。将预制好的溶洞放置在标记位置,贴近玻璃面。浇筑模型石灰岩至标记高度,用振捣棒振捣密实,振捣时间不少于15 min,再将模型石灰岩表面处理平整,洒水养护28 d。养护完成后进行土层填筑。填筑之前用PVC半圆管放置在钻孔位置预设钻孔,依次填筑砂土、红黏土,填筑过程中控制土层的压实度,确保土质均匀。

由于土体粒径较小,对比度很低,为便于分析,试验前需对土层进行表面纹理构建。采用粒径0.3 mm石英砂,每30 mm模型土铺设一层5 mm石英砂。每

35 mm 采用“钢板+标准砝码”自重均匀压实。示踪粒子直径小、粒间孔隙小,粒间独立性和连续性更好,呈水平条带状,粒间错动面更加清晰。为减小试验过程中光线变化对试验结果的影响,在试验场地搭制摄影棚,在摄影棚中构建恒定光场,为棚内提供稳定的 LED 光源。采用多帧微小变形图像连续分析,在模型箱正面安装高清数码摄像机进行影像采集。地面沉降通过安装百分表测读。

### 1.3 测试方案

将定制高压 PE 薄膜放入 PVC 半圆管,在薄膜内灌入泥浆,刺穿薄膜底部(模拟钻孔钻穿溶洞),将 PVC 辅助管取出。以此为起始时刻,相机全程记录变形破坏过程,测读百分表刻度变化。当土层变形不明显、百分表 3 次位移读数差值小于 0.01 mm,则认为变形稳定,结束拍摄。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 地面沉降规律

图 2 为图 1 所示 4 个百分表 A、B、C、D 获得的沉降时程曲线与沉速时程曲线。

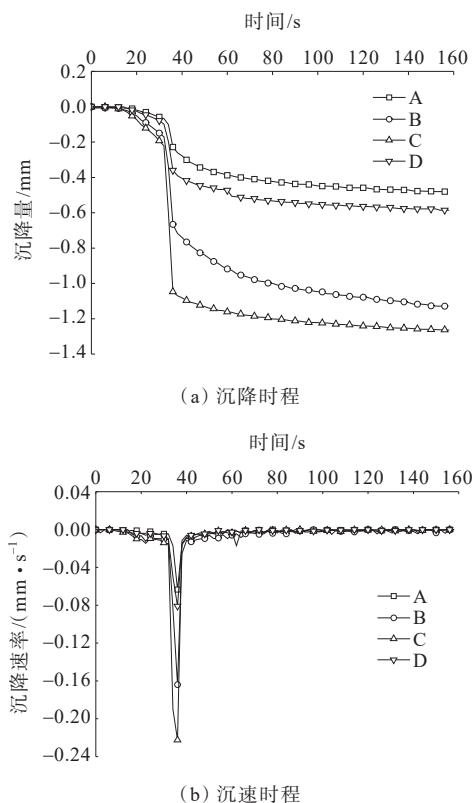


图 2 沉降时程曲线与沉速时程曲线

Figure 2 Relationship between time and sinking or sinking speed

由图 2 可知:

(1) A、D 点的沉降量相对较小,而 B、C 点沉降量较大,说明钻孔泥浆下窜后,地面形成下沉盆。

(2) 泥浆下沉后,在开始的 0~12 s 内,4 个观测点均未产生位移;12~35 s 内沉速迅速变化,呈指数形式上升,最大沉速可达 0.035 m/s;35~60 s 内沉速迅速减小;60 s 之后沉速趋近为零。这说明钻孔泥浆下窜诱发地面沉降的历程为:快速下沉、缓慢下沉、稳定 3 个阶段,整个过程历时约 1 min。

分析原因为:A、D 点处于塌陷区外,而 B、C 点处在塌陷区内,所以 B、C 点沉降量远大于 A、D 点。越接近钻孔中心,沉降量越大,离钻孔中心越远,影响越小,地面沉陷呈“盆状”。溶洞顶板破坏后约 12 s 内,泥浆暂未全部下窜,孔壁暂时稳定,土体未产生滑移,12~35 s,砂土迅速滑移下沉。由于砂土黏聚力为零,所以沉速呈指数形式上升。35~60 s 内沉速迅速减小,砂土基本稳定,而黏土层由于自重产生塌陷,所以沉速并未归零但是迅速减小,60 s 之后沉速趋近于零,最终稳定。

### 2.2 覆盖层土体渐进破坏过程

分析相机拍摄的土体变形、沉降、破坏的全过程图像,获得泥浆下窜诱发岩溶桩孔塌陷过程,见图 3。

(1) 图 3(a)为试验起步阶段。此时,泥浆套完整,泥浆充满桩孔,溶洞覆盖层土体保持稳定。

(2) 泥浆套底面被钢针刺破后,泥浆顶面缓慢下沉到砂土层,见图 3(b)。此时,孔壁稳定,土体未发生位移。当泥浆顶面位于砂土层顶面下 60 mm 左右,即泥浆下降 248 mm 时,孔壁失稳。

(3) 泥浆顶面下沉,初到溶洞内,见图 3(c)。黏土-砂土分界面孔壁土体发生位移,一定深度范围内的土颗粒呈径流形态,砂土层作为松散堆积体开始沿坡面逐层剥落直至滑移,表现为漏斗状。随着砂土层的持续滑落,形成直径约 140 mm、高约 70 mm 的漏斗状空洞,此时覆盖层顶面沉速迅速变化并最终达到峰值,对应图 2 所示“快速下沉”阶段。

(4) 泥浆顶面下沉到溶洞内以后,黏土层开始向下移动并持续,模型外侧可以明显观察到黏土层产生裂隙并伴有黏土颗粒下落,见图 3(d)。对应图 2 所示“缓慢下沉”阶段。

(5) 泥浆顶面下沉到溶洞内较长时间,裂隙持续发展导致黏土塌落,表现为上部形成圆弧形土拱,拱



高 80 mm,最后达到稳定。土体破坏全程呈轴对称状态,见图 3(e),对应图 2 所示“稳定”阶段。

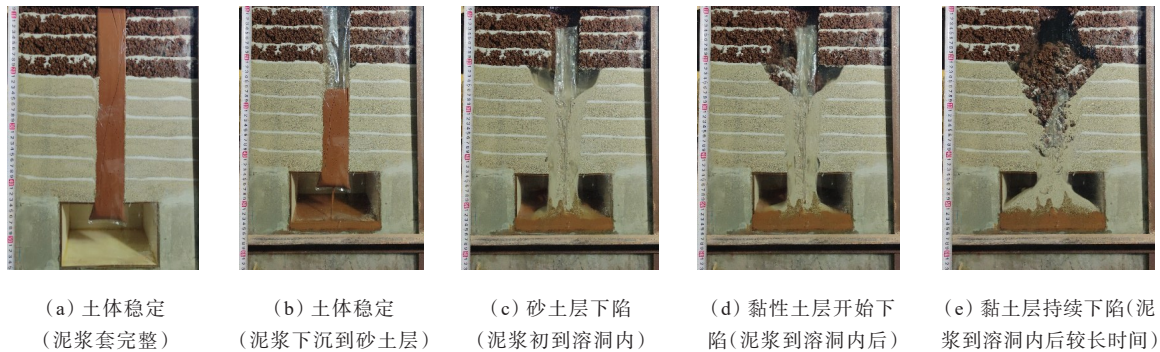


图 3 泥浆下窜后土体破坏过程

Figure 3 Soil damage process with mud channeling

分析原因为:在泥浆下窜初期,上层黏土由于黏聚力作用而保持稳定,且在砂土滑移初期并未产生较大变化。泥浆顶面下沉到砂土层一定深度后,大量砂土颗粒滑移。当黏土破裂面的剪力超过土体的抗剪强度时,黏土层开始产生竖向位移,黏土发生塌陷破坏。

桩孔钻穿溶洞顶板引起地面塌陷的力学原理为:桩孔钻穿溶洞顶板后,泥浆快速下窜导致孔壁应力失去平衡,砂土因单粒结构而率先移动充填桩孔,进而引起上层黏土失稳下沉。当砂土顶面与水平面形成的夹角约等于砂土内摩擦角时,砂土滑动停止。当砂土滑动停止以后,上层黏土下沉持续而形成土拱。土拱形成以后,地面趋于稳定。

### 3 结论

本文采用室内模型试验,研究上部黏土、下部砂土条件下桩孔钻穿溶洞诱发变形的响应模式,得出以下结论:

(1) 桩孔钻穿溶洞顶板后,泥浆快速下窜导致孔壁应力失去平衡,砂土因单粒结构而率先移动充填桩孔,进而引起上层黏土失稳下沉。当砂土顶面与水平面形成的夹角约等于内摩擦角时,砂土滑动停止,上层黏土持续下沉形成土拱,地面趋于稳定。

(2) 钻孔泥浆下窜诱发地面沉降的历程分为快速下沉、缓慢下沉、稳定 3 个阶段,整个过程历时约 1 min,地面形成下沉盆。

(3) 工程中,建议对溶洞上部砂土层采用注浆法加固,防止桩孔钻穿溶洞顶板引起桩孔垮塌、地面塌陷,确保施工顺利。

### 参考文献:

### References:

- [1] 张丽芬,曾夏生,姚运生,等.我国岩溶塌陷研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):126-130.  
ZHANG Lifan, ZENG Xiasheng, YAO Yunsheng, et al. Review on Karst collapse in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 126-130.
- [2] GUTIÉRREZ F, PARISE M, DE WAELE J, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in Karst[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 61-88.
- [3] 康彦仁.论岩溶塌陷形成的致塌模式[J].水文地质工程地质, 1992, 19(4): 32-34, 46.  
KANG Yanren. Collapse-causing models in Karstic collapse process[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992, 19(4): 32-34, 46.
- [4] 查甫生,刘从民,苏晶文,等.铜陵市朝山地区岩溶塌陷形成条件与地面稳定性评价分析[J].地质论评, 2020, 66(1): 246-254.  
ZHA Fusheng, LIU Congmin, SU Jingwen, et al. Formation conditions of Karst collapse and evaluation of ground stability in Chaoshan Area of Tongling City[J]. Geological Review, 2020, 66(1): 246-254.
- [5] 韩庆定,罗锡宜.广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析[J].中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 56-64.  
HAN Qingding, LUO Xiyi. Analysis on the formation mechanism and development process of Karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4): 56-64.

- [6] 王建秀,杨立中,何静.岩溶塌陷演化过程中的水-土-岩相互作用分析[J].西南交通大学学报,2001,36(3):314-317.  
WANG Jianxiu, YANG Lizhong, HE Jing. The coupling interaction of groundwater-soil-rock mass in Karst collapse evolution[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(3): 314-317.
- [7] 卢薇,易顺民.广州市大坦沙岛岩溶塌陷成因分析及防治对策[J].安全与环境工程,2021,28(4):121-130.  
LU Wei, YI Shunmin. Formation analysis and prevention and remediation measures of Karst collapse in datansha island, Guangzhou[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(4): 121-130.
- [8] 李才华,窦鹏冲.岩溶地面塌陷致塌机理的物理模型试验分析[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(增刊2):239-242.  
LI Caihua, DOU Pengchong. Physical model test analysis of collapse mechanism of Karst ground collapse[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(sup 2): 239-242.
- [9] 王喜.白泥河特大桥 511#桥台岩溶地质塌孔原因及处理措施[J].铁道建筑,2012,52(10):31-32.  
WANG Xi. Causes and treatment measures of Karst collapse of abutment 511# of Bainihe Bridge[J]. Railway Engineering, 2012, 52(10): 31-32.
- [10] 傅平.赣江桥岩溶地基钻孔桩施工技术[J].铁道建筑技术,1994(6):11-15.  
FU Ping. Construction technology of bored pile in Karst foundation of Ganjiang Bridge[J]. Railway Construction Technology, 1994(6): 11-15.
- [11] 张中善.岩溶地区灌注桩溶(土)洞及漏浆处理技术[J].施工技术,2017,46(增刊2):238-241.  
ZHANG Zhongshan. Treatment technology of solution (soil) hole and slurry leakage of cast-in-place pile in Karst area[J]. Construction Technology, 2017, 46(sup 2): 238-241.
- [12] 马骁,蒋小珍,雷明堂,等.桩基施工诱发岩溶塌陷的机理模式及防控措施[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):691-700.  
MA Xiao, JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, et al. Mechanism model and prevention and control measures of Karst collapse induced by pile foundation construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 691-700.
- [13] 周文龙.桩基础施工诱发岩溶地面塌陷与防治措施探讨[J].工程建设与设计,2018(23):219-220,223.  
ZHOU Wenlong. Prevention measures exploration of Karst ground collapse induced by pile foundation construction [J]. Construction & Design for Engineering, 2018(23): 219-220, 223.
- [14] 老国健,卢云.城镇地区溶洞桩基施工塌陷及方案调整案例探析[J].建筑结构,2021,51(1):137-142.  
LAO Guojian, LU Yun. Case study of Karst cave collapse during pile foundation construction and scheme adjustment in urban area[J]. Building Structure, 2021, 51(1): 137-142.
- [15] 张新杰,徐光黎,杨超,等.岩溶区高速公路改扩建工程基础施工安全风险评估[J].中外公路,2015,35(2):291-296.  
ZHANG Xinjie, XU Guangli, YANG Chao, et al. Safety risk assessment of expressway foundation construction in Karst area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(2): 291-296.
- [16] 毕树峰.岩溶区高速铁路桩基础施工溶洞处理技术研究[J].中外公路,2014,34(5):200-202.  
BI Shufeng. Study on Karst cave treatment technology in pile foundation construction of high-speed railway in Karst area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 200-202.
- [17] 陈明晓.岩溶覆盖层塌陷的原因分析及其半定量预测[J].岩石力学与工程学报,2002,21(2):285-289.  
CHEN Mingxiao. Cause analysis and quasi-quantitative prediction on the collapse of Karst overburden[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 285-289.
- [18] 熊志涛,刘鹏瑞,杨涛,等.江夏法泗岩溶塌陷区冲孔桩施工引发岩溶塌陷的成因机理[J].中国岩溶,2018,37(1):120-129.  
XIONG Zhitao, LIU Pengrui, YANG Tao, et al. Mechanism of Karst collapse caused by punching pile construction in Jiangxia Fasi Karst collapse area[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 120-129.
- [19] 左保成,陈从新,刘才华,等.相似材料试验研究[J].岩土力学,2004,25(11):1805-1808.  
ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Caihua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805-1808.
- [20] 刘铁雄,彭振斌,韩金田.灰岩岩性模拟试验研究[J].地下空间与工程学报,2005(6):878-881.  
LIU Tiexiong, PENG Zhenbin, HAN Jintian. Research of simulation testing of limestone's lithology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(6): 878-881.