

岩溶区土洞塌陷演化过程研究

——以龙岩市樟坑自然村土洞塌陷为例

沈佳¹, 简文彬^{1,2,3}, 苏添金¹, 洪儒宝^{1,2,4}, 张少波¹

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108; 2. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108;
3. 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 福建省地质环境监测中心, 福建 福州 350002)

摘 要: 以福建省龙岩市樟坑自然村发生的岩溶区土洞塌陷为研究对象, 通过室内物理模型试验及数值模拟分析, 对岩溶区土洞塌陷过程中覆盖层土体的应力、应变(位移)、塑性区分布规律等进行研究, 从而再现土洞塌陷演化过程, 总结土洞塌陷演化规律。结果表明, 在土洞孕育、形成及扩展过程中, 土体中始终存在土拱效应, 其发挥程度受初始洞径及覆盖层厚度影响, 土洞塌陷过程其实是土拱效应产生及失效过程。土体中最大剪应力主要集中于拱脚位置, 而塑性区分布则以拱顶为主, 土体竖向变形也以拱顶为中心向四周递减。塌陷后土洞呈中心大、两头小的纺锤状, 其最大洞径与初始洞径及覆盖层厚度呈线性正比例关系。同时, 根据塌落土体累计质量的增量大小可将土洞塌陷演化过程简化为三个阶段: 土洞发育形成、内部塌陷扩展以及地表塌陷阶段。

关键词: 土洞塌陷; 土拱效应; 室内模型; 数值模拟; 塌陷演化

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)03-0001-08

Soil Cave Collapse Process in Karst Area

——A Case Study of Soil Cave Collapse in Zhangkeng Natural Village, Longyan

SHEN Jia¹, JIAN Wenbin^{1,2,3}, SU Tianjin¹, HONG Rubao^{1,2,4}, ZHANG Shaobo¹

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Institute of Geotechnical and Engineering Geology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. Fujian Provincial Key Laboratory of Geological Hazards, Fuzhou, Fujian 350002, China;

4. Fujian Center of Geo-Environmental of Monitoring, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: By taking the soil cave collapse occurred in the Zhangkeng Natural Village, Longyan City, Fujian Province as an example, the stress, strain (displacement) and plastic zone distribution of overburden soil during the collapse process of karst soil cave were analyzed through indoor physical model test and numerical simulation analysis. The evolution process of an earth cave collapse was simulated and summarized based on the evolution law of earth cave collapse. The results show that in the process of gestation, formation and expansion of soil caves, the soil arching effect always exists in the soil, and its degree of exertion is affected by the initial hole diameter and the thickness of the overburden. The collapse process of soil caves is actually the generation and failure process of soil arch effect. The maximum shear stress in the soil mainly concentrates at the arch foot, while the plastic zone is mainly distributed at the arch top, and the vertical deformation of the soil decreases from the arch center to the surrounding area. After the collapse, the hole shape is a spindle with great center and small ends, and the maximum hole diameter is linearly proportional to the initial hole diameter and overburden thickness. At the same time, according to the incremental mass of the collapsed soil, the collapse process of soil cave can be simplified into three stages: the formation of soil caves, the expansion of internal collapse and the collapse of the surface.

Keywords: soil cave collapse; soil arching effect; indoor model; numerical simulation; evolution of collapse

收稿日期: 2020-01-17

修稿日期: 2020-02-27

基金项目: 福建省科技厅科技重大专项(2016YZ0002-1)

作者简介: 沈佳(1995—), 女, 福建长汀人, 硕士研究生, 研究方向为边坡工程。E-mail: shen_jiaaa@163.com

通讯作者: 简文彬(1963—), 男, 福建永定人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与工程地质教学与科研工作。E-mail: jwb@fzu.edu.cn

岩溶塌陷是一种岩溶动力作用和现象^[1],是喀斯特地区的主要地质灾害之一。根据溶洞发育的地层类型不同,可将岩溶塌陷划分为土洞塌陷和基岩塌陷两种,土洞塌陷由于埋藏浅、突发性高,造成的危害往往更为严重,因而目前已经成为国际社会共同关注的热点问题之一。

长期以来,针对土洞塌陷的致塌因素及演化机理,国内外学者进行了大量的研究并提出了许多有建树性的理论,如潜蚀论、真空吸蚀论、气爆论、液化论等^[2-9]。随着大量工程经验的积累,大部分理论都得到了有效的发展,但由于土洞塌陷具有极强的隐蔽性,且土体具有较大的不均匀性,土洞致塌机理仍要进一步明确和探索,在此期间,对于土洞塌陷演化过程的认识就尤为重要。学者罗小杰^[10]曾根据岩溶覆盖层物质成分及塌陷过程中土颗粒的运动特征,将岩溶塌陷机理划分为沙漏型、土洞型和泥流型等 3 种类型;王飞等^[11]通过对土洞扩展过程的模拟,发现土洞在地下水潜蚀作用下会出现应力重分布现象,这将会引起土洞的进一步扩展;贾龙等^[12]则运用数值模拟的方法,对土洞演化过程中的应力和位移进行分析,得到判断土洞稳定性和极限土洞大小的方法。只有对土洞塌陷的演化过程有一个直观的认识,对塌陷内部的应力变形特征能够清晰地把握,才能够对塌陷的机理有更深层次的理解。但截至目前为止,大多数学者都只从理论推导或数值仿真方面去探讨分析,并未对岩溶土洞具体的塌陷过程进行充分研究,对于其演变阶段及演化规律等尚不能完全掌握,亟需进一步的认识和完善,因而开展有关的土洞塌陷演化过程的试验就显得十分必要。

福建省常年温暖湿润、台风暴雨频发,省内岩溶塌陷灾害多发生于 2 月—6 月的梅雨季节及 7 月—8 月的台风雷雨季节,降雨影响不可忽视。但纵观国内目前大部分的研究,对于降雨状况的涉及相对较少,大多集中于对水气压变化及上覆荷载影响的研究^[13-15]。因此本次模型试验以降雨为主要致塌力,力求在符合实际情况的条件下有所创新和突破。

2015 年 2 月—6 月,龙岩市永定区樟坑自然村陆续出现房屋塌陷,以福兴楼为中心的几栋民房相继出现地表开裂、墙体变形、基础下沉、地面塌陷险情,共形成十余处塌陷坑,所幸抢救及时,并未造成人员伤亡。本文以此为研究背景,结合现场实际情况按照相似性原理构建室内物理模型,通过设计多组对比试验对降雨入渗条件下岩溶塌陷的演化过程

展开全面研究,同时,利用有限差分软件 FLAC^{3D} 对土体应力、位移和塑性区分布规律进行分析,以期进一步揭示土洞塌陷的致塌机理,为福建省岩溶塌陷灾害的监测预警、预防治理研究提供参考依据。

1 降雨入渗下岩溶土洞塌陷试验

1.1 研究区工程地质条件

1.1.1 地形地貌

樟坑自然村在地形上属山间溶蚀盆地,周围被丘陵低山环绕,地面高程为 500 m~530 m,高低起伏 30 m 左右,盆地内东北高西南低,总体呈不规则的狭长状,面积约 20 000 m²。盆地中部发育溪沟,自北往南径流,平常流量约 20 L/s。

1.1.2 岩土体性质

根据勘查揭露,樟坑岩溶塌陷区内,自上而下覆盖岩土体类型有:素填土、砾卵石、含角砾粉质黏土、中风化灰岩。其中主要覆盖层为含角砾粉质黏土层,厚度 10.0 m~20.5 m,以黏粒为主,角砾含量约为 25%,细小的粘粒颗粒极易在地下水的渗透下沿角砾骨架间流失。根据密度计法测试和计算可知,该层土体不均匀系数 $C_u = 40 > 10$,存在发生潜蚀作用的可能,此外,通过现场调查发现,土洞主要形成于该土体内部。

1.1.3 地质构造

研究区位于东西向和南北向构造体系的南东部,断裂构造发育,区内主要见有两条北东向断裂和一条东西向断裂,岩石破碎,以张性、张扭性断裂为主,导水性强,极有利于雨水的入渗。

1.1.4 气象条件

樟坑自然村地处低纬度区,属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润、雨量充沛,年均气温 20.1℃,降水量 1 770.6 mm,最大降水量 2 630.5 mm,日最大降雨量为 159.2 mm。雨水通过软化崩解及入渗冲刷作用使得土洞周边土体不断流失,土洞规模不断扩大,是造成此次土洞塌陷的主要因素之一。

1.2 试验概况

1.2.1 试验模型和土体参数

试验模型为箱式构造,主体部分长宽高为 0.60 m×0.60 m×0.65 m,侧壁及底部由有机玻璃组成,上部留空,底部玻璃板可进行替换。根据试验需要,分别制作 5 块中心留有直径为 5 cm、8 cm、10 cm、12 cm、15 cm 圆洞的有机玻璃板,用于模拟不同尺寸的土洞大小。

试验土体为研究区内采取的含角砾粉质黏土,

根据相似理论,模型制作中在覆盖层土体含水率、密度、抗剪强度参数等方面与现场原状土相似。在填筑时采用质量控制法分层填筑,每层填筑厚度为5 cm,填筑过程中,将传感器铺设固定到所需位置,填筑后用布条覆盖好静置48 h,使土体进行充分的应力与水分调整。静置后土体参数如表1所示。

表1 土体物理力学参数

土层名称	天然重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	孔隙比 e
含角砾粉质黏土	18.5	27.5	20.8	18.9	0.819

1.2.2 试验方案

根据以往的气象资料显示,研究区日最大降雨量为159.2 mm,为了方便观测,试验尽量安排在白天12 h内完成。将两者经过简单计算可得,其平均小时降雨量为13.3 mm,而室内设备雨强变化范围为15 mm/h~150 mm/h,综合以上考虑,设计试验降雨强度为15 mm/h,进行长时间连续降雨。同时,为了探究土洞演化规律及响应情况,将土洞尺寸及覆盖层厚度作为自变量进行对比研究,其方案设计如表2所示。

表2 试验方案设计

试验编号	底部空洞直径/cm	覆盖层厚度/cm	监测土压力盒/只	传感器光纤/根
1-A	5	5	2	1
1-B		10	2	1
1-C		15	4	1
1-D		20	4	1
2-A	8	8	2	1
2-B		16	2	1
2-C		24	4	1
2-D		32	4	1
3-A	10	10	2	1
3-B		20	4	1
3-C		30	4	1
3-D		40	4	1
4-A	12	12	2	1
4-B		24	4	1
4-C		36	4	1
4-D		48	4	1
5-A	15	15	2	1
5-B		30	4	1
5-C		45	4	1
5-D		60	4	1

1.2.3 传感器布置

试验所需的传感器名称及数量如表2所示。具体布置方法为:模型箱底部埋设一根光纤及2只土压力盒,光纤位于中轴上,土压力盒则分别埋置于中心及边缘处,随着覆盖层厚度增加,部分试验增设两只土压力盒。以初始空洞直径(后文简称洞径)10 cm,覆盖层厚度20 cm为例,布置方法如图1所示。

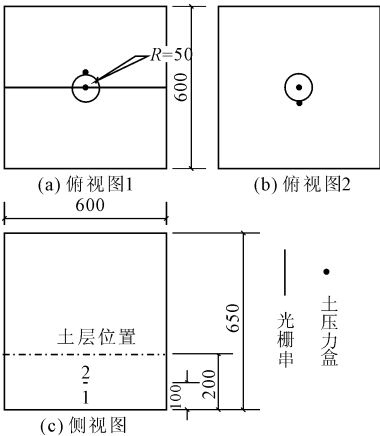


图1 传感器埋设示意图(单位:mm)

2 土洞致塌演化过程研究

2.1 土拱效应的确定和分析

2.1.1 土体应变分析

在设计好5种不同洞径的前提下,分别做覆盖层厚度为1倍~4倍洞径的相关性试验。沿模型箱底部中心水平方向铺设光栅串一根,其上分布5个光纤监测点,对各点最大应变值进行监测,分辨率可达0.1 $\mu\epsilon$,试验结果如图2和图3所示(本文大部分只绘出最大、最小洞径对应的最大、最小覆盖层厚度的两组图,对应试验1-A、1-D、5-A和5-D)。

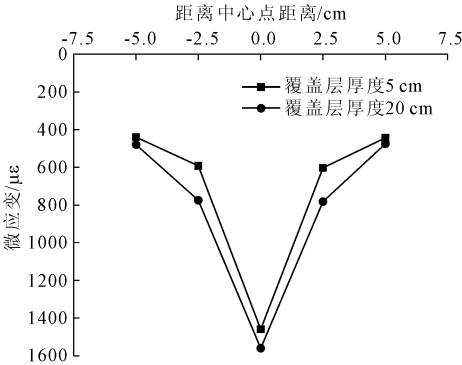


图2 不同覆盖层厚度下5 cm洞径的土体最大应变

在图2和图3中,土体应变变化趋势基本相同,离中心越远,最大应变值越小,覆盖层越厚,最大应

变值越大。从试验中观察到的现象来看,底部空洞中心处首先发生塌落,该处土体最早有应变响应且较为迅速,而随着土体不断塌落,塌陷发展至空洞边缘及远处,但其变化相对于中心处要小得多。太沙基^[16]认为,若土体中有支撑拱脚的存在,且土体在外力或自重作用下出现不均匀压缩变形和应力传递现象,则极有可能产生土拱效应,从试验现象和结果来看,土洞塌陷过程中极有可能出现该种情况。

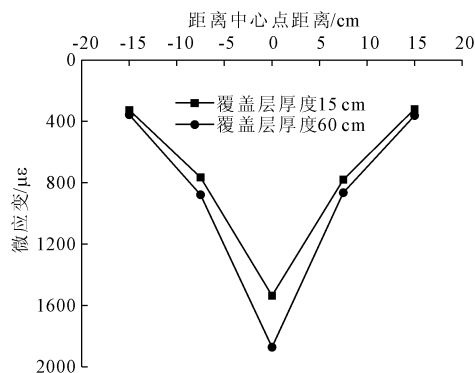


图 3 不同覆盖层厚度下 15 cm 洞径的土体最大应变

2.1.2 土压力分析

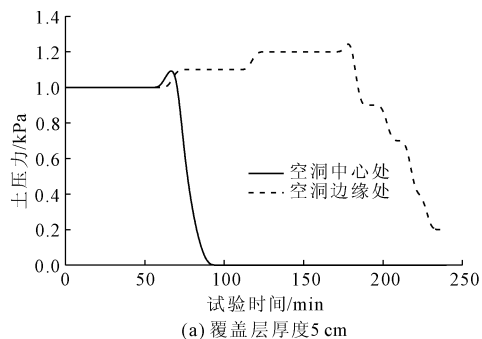
为了进一步确定和研究塌陷土体中的土拱效应,将土压力作为另一个监测变量。按照试验方案埋设土压力盒,监测空洞中心及边缘的土压力变化,分辨率可达 0.1 kPa,监测结果如图 4、图 5 所示。在图 4 和图 5 中,土压力在起始阶段受降雨影响均有所上升,但增长幅度很小,随着试验的进行,中心处的土压力首先出现下降趋势,并迅速降为 0 kPa,随之发生塌陷。与此同时,边缘土压力则是继续上升并在一段时间后达到峰值,经过简单的计算发现,该峰值要远大于降雨所带来的自重影响,说明边缘处此时发生了应力集中现象,边缘的应力要较大于中心压力。结合前文所述,土体在存有支撑拱脚的前提下,发生了不均匀位移或变形,且边缘出现应力增大的现象,这几点均满足土拱效应产生的条件,有效证实了土拱效应的存在。

2.1.3 土拱效应分析

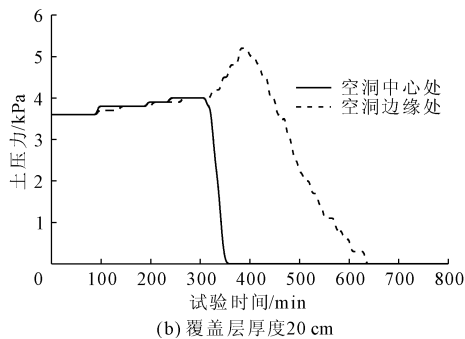
前两节已明确了在降雨入渗下土洞塌陷过程中土拱效应的存在,为了对土拱效应有更明确的定义,现提出土拱效应系数这一概念,其意义为土压力增加量与初始土压力的比值。现将这一概念代入不同洞径条件下进行计算分析,通过试验第 1 组、第 3 组和第 5 组,计算结果如图 6 所示。

从图 6 可以看到,在不同空洞直径下,土拱效应系数与覆盖层厚度的关系曲线变化情况基本一致,即在 1 倍的空洞直径下,土拱效应系数均较低,接近

20%,而当覆盖层达到两倍洞径,土拱效应系数均有所增加,达到最大值 32% 左右,这说明土拱效应的大小与土体覆盖层的厚度有直接的关系,究其原因主要是在于土拱结构的形成,只有当覆盖层达到一定厚度时,能够在土体中形成完整的拱形结构,土拱效应才能够完全体现,而在此之后,随着覆盖层与洞径的比值增大,土拱效应逐渐减小并最终维持在 30% 左右。

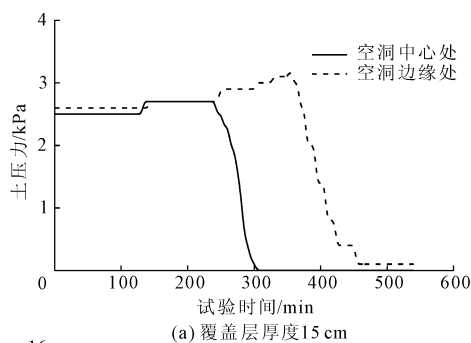


(a) 覆盖层厚度 5 cm

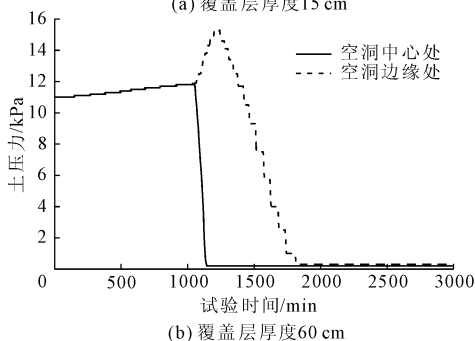


(b) 覆盖层厚度 20 cm

图 4 不同覆盖层厚度下 5 cm 洞径的土压力曲线



(a) 覆盖层厚度 15 cm



(b) 覆盖层厚度 60 cm

图 5 不同覆盖层厚度下 15 cm 洞径的土压力曲线

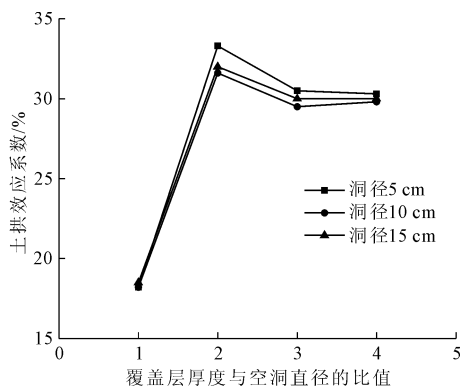


图 6 不同空洞直径下土拱效应系数

2.2 土洞塌陷过程分析

2.2.1 土压力分析

随着时间推移,在降雨入渗的影响下,土洞塌陷不断向上发展,为了更深入地了解土洞塌陷的演化过程,在部分试验中,增加埋设一层(土层中间,2只)土压力盒,监测土压力变化情况,监测结果如图 7、图 8 所示。

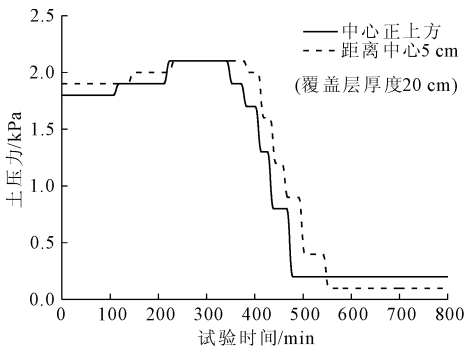


图 7 5 cm 洞径土体的土压力变化曲线

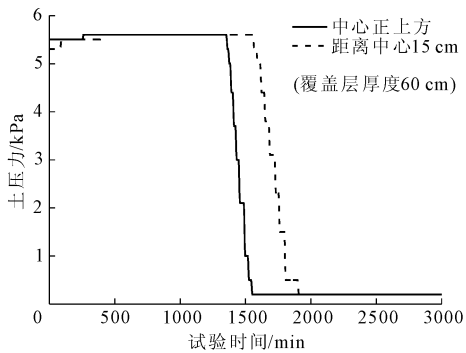


图 8 15 cm 洞径土体的土压力变化曲线

从图 7 和图 8 中可以看出,在试验初期,受降雨润湿作用土压力均有一定增长,但幅度较小,仅为 0.1 kPa ~ 0.3 kPa 左右,随后中心处土压力在短时间内呈阶梯式降至为 0 kPa,另一土压力盒也在一段时间后发生同样变化。这说明土体在塌陷过程中,

向上发展的速度要大于纵向发展速度,使得中心处的土体首先发生塌落。同时,土体的塌落形式为团块状间歇式塌落,即某一时刻发生塌落后土体会在一段时间内处于平衡状态,直至下一次塌落发生时,平衡状态才被破坏。

2.2.2 土洞塌陷发展分析

为了对土洞塌陷过程有更直观的认识,在试验过程中使用相机拍照记录不同时期的塌陷情况,以底部空洞直径 15 cm、覆盖层厚度 60 cm(试验 5 - D)为例进行说明,如图 9 所示。从图 9 中可以看到,中心处的塌陷深度要大于边缘处,土洞形成的塌落面是呈拱形的,而非平面的,这就与所提出的土拱效应相互吻合,由此我们可以认为,土洞的塌陷过程其实是“初始土洞形成 - 土拱效应产生 - 土洞受力平衡 - 降雨下渗产生下拉渗流力 - 土拱效应失效 - 土洞继续塌陷直至地表”的过程。

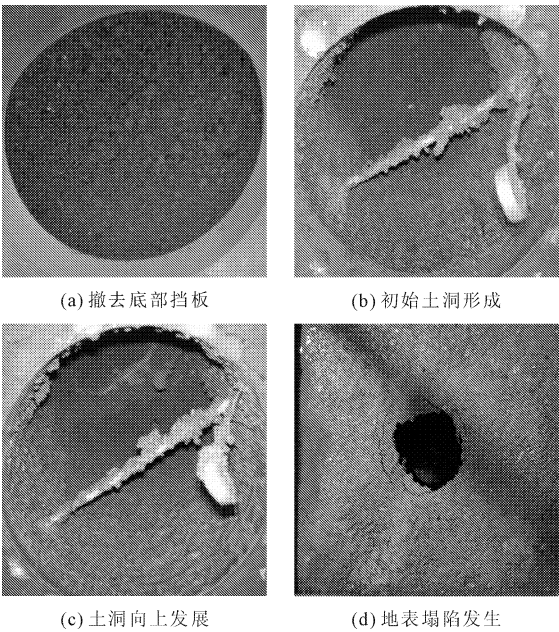


图 9 15 cm 洞径的土洞塌陷过程

2.2.3 塌陷土洞形状分析

在试验结束后,对土体进行剖面切割并拍照,以便能够更清晰地观察塌陷后土洞的形状,如图 10 所示(以试验组 3 为例)。

从图 10 中可以看到,当底部空洞直径一定时,随着覆盖层厚度的增加,塌陷土洞的影响范围也相应增加,而土洞的形状也由近似的圆柱状向中间大两头小的纺锤状转变,同时,塌陷土洞的最大洞径也在不断增大。类似的情况在其它洞径条件下也能见到。

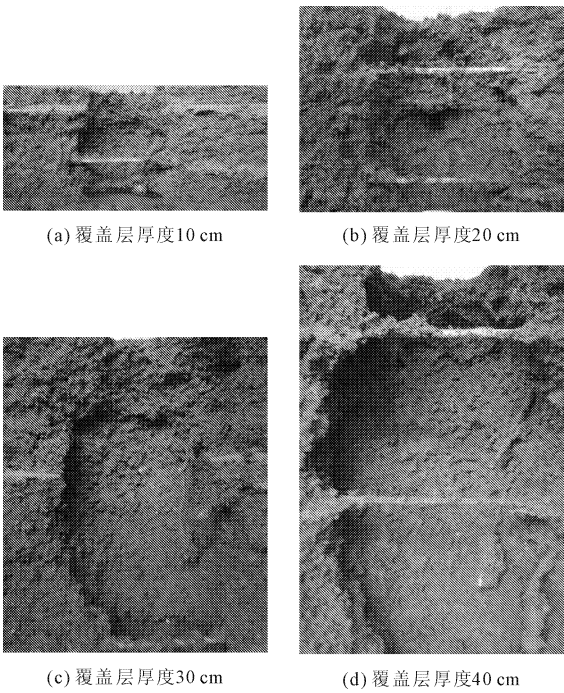


图 10 10 cm 洞径的塌陷土洞剖面

为了更清晰地表示土洞塌陷后最终的形状,根据试验获得的数据绘制出试验组 3 塌陷土洞的形状剖面图,如图 11 所示。从图 11 中可以看到,在覆盖层厚度较小时,土洞形状更近似于圆柱状,土洞洞径基本没有发生变化,而随着覆盖层厚度的增加,土洞形状逐渐转变为纺锤状,同时土洞最大洞径也随之增大。出现该现象的原因在于:当覆盖层厚度较薄时,土洞塌陷很快发展至地表,纵深方向的土体塌落相对较少,土洞形状基本为圆柱状;而当覆盖层厚度增加时,纵深方向的塌落尺度随之增加,但总体速度上依然是竖直方向要大于纵深方向,因此塌陷土洞的形状才呈现为纺锤状。

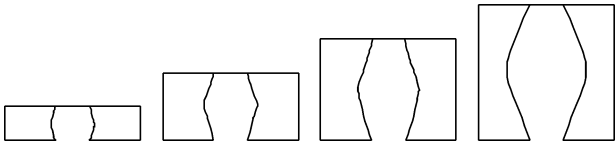


图 11 塌陷土洞剖面

将 3 组试验出现的最大洞径值进行整理并进行拟合分析,当空洞直径一定时,塌陷形成的最大洞径与覆盖层厚度成线性关系,拟合优度较好。同时,对比 3 组拟合方程发现,方程的一次项系数均为 0.3 左右,而常数项则跟底部空洞直径十分接近,由此,不妨假设塌陷的最大洞径 y 与覆盖层厚度 x 及空洞直径 D 间满足以下关系: $y = 0.3x + D$,拟合结果见

表 3。由表 3 可知,拟合优度 R^2 虽有所降低,但仍接近于 1,说明拟合结果较为准确,拟合关系具有较高的适用性。

表 3 拟合优度分析

空洞直径/cm	拟合方程	拟合优度 R^2
5	$y = 0.3x + 5$	0.958
10	$y = 0.3x + 10$	0.968
15	$y = 0.3x + 15$	0.974

2.3 土洞塌陷演化阶段分析

岩溶土洞的塌陷是一个不断发展和演化的过程,通过对土洞塌陷过程中塌落土体的累积质量增量进行记录和分析,力求能够将复杂的塌陷过程划分为几个简单的演化阶段,以便于理解和研究。以试验 3-C 所得曲线为例,如图 12 所示。根据塌陷土体质量的增量变化情况,可以将岩溶土洞的塌陷过程划分为 3 个阶段:土洞发育形成、内部塌陷扩展以及地表塌陷阶段。具体表现为:在挡板移除之后,土体在自重及降雨作用下发生变形和塌落,初始土洞由此形成,但此阶段塌陷土体质量小,增长速度较慢;随后土洞不断扩展,土拱效应逐渐消失,塌落速度明显增加,塌陷土体累积质量迅速增大;而当上覆土层厚度无法支撑土体自重时,土体随即发生破坏,瞬间出现大量塌落,并在地表形成塌陷坑。

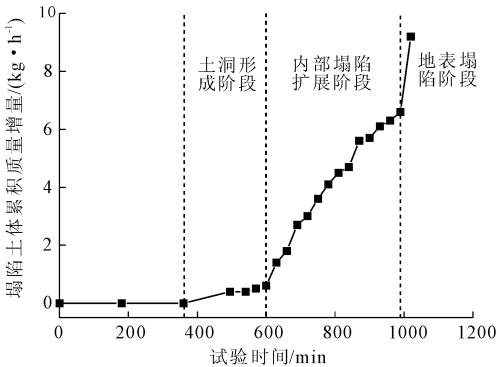


图 12 塌陷土体累积质量增量变化曲线

2.4 现场情况

需要指出的是,当土洞发展到一定规模而土拱失效,地表随即发生塌陷。由于这一过程通常在瞬间完成,因而塌陷坑所形成的洞壁往往呈直立式,这与现场的大多情况基本吻合^[14],此外,从图 13 中我们可以发现,塌陷坑左侧洞壁有向土体内侧倾斜的趋势,与模型试验结果一致,由此我们可以推测:土洞在向上发展的过程中极有可能带动两侧的土体发生塌落,使得土洞在横向空间上也有所延伸,从而形

成“两头窄中间宽”的纺锤状塌陷。



图 13 地表塌陷坑

3 岩溶土洞塌陷演化数值模拟

3.1 模型建立及参数选取

限于篇幅,本文仅选取洞径为 15 cm,覆盖层厚度为 45 cm 的试验进行详细说明,其他条件下的演化规律基本类似。本次模拟假设初始土洞为球状土洞,土体呈饱和状态,通过扩大土洞半径,实现土洞发展演化过程的模拟,建立的数值模型如图 14 所示。根据土工试验资料,对土层参数进行赋值,如表 4 所示。

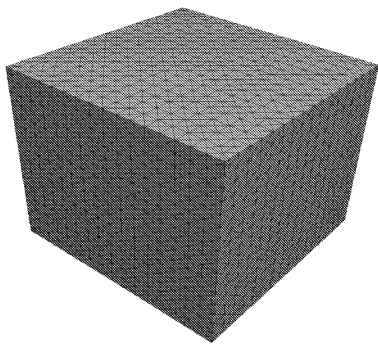


图 14 基本模型

表 4 模型物理力学参数

土层名称	密度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	渗透系数 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹性模量 /MPa
含角砾粉质黏土	1850	20.8	18.9	5.0×10^{-5}	10.0

3.2 数值模拟结果分析

将土洞塌陷过程分阶段进行模拟,在不平衡力达到要求后,终止计算,得到各阶段下土体应力、位移和塑性区等变化情况,现对其进行分析。

3.2.1 剪应力分布规律

各阶段土体的剪应力分布情况如图 15 所示,可以发现,在土洞塌陷的不同阶段,土拱效应始终存在,这主要表现于:随着土洞的向上发展,土洞洞径

不断增大,但土中最大剪应力值始终出现在拱脚位置,随着拱脚的移动而发生变化。由此可见,在塌陷过程中,土中最大剪应力值分布区域并不是一成不变的,不会一直维持在最初的底部位置,而是会随着土洞的发展而发生移动。此外,由于土体临空,下部失去依托,洞顶的剪应力在塌陷过程中始终要小于其它部位,当土洞发展至临塌阶段时,洞顶应力值基本与覆盖层上部一致,形成连通的应力低值区,这也预示着塌陷即将发生。

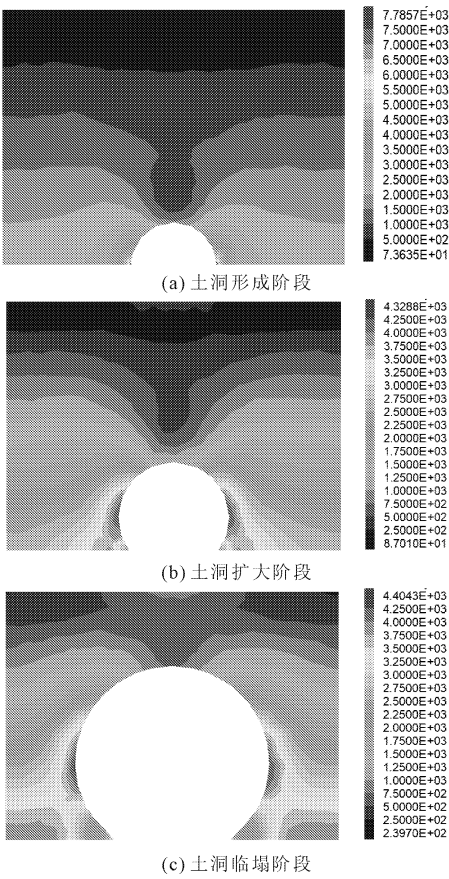


图 15 剪应力分布图

3.2.2 竖向位移分布规律

土洞塌陷不同阶段的土体竖向位移变化情况如图 16 所示。从图 16 中可以看到,相较于其他部位,拱顶处土体在整个塌陷过程中产生的竖向位移更大,形成了多个纺锤形的位移分布环,环中心位于洞室的最顶端,这与室内模型试验的试验效果一致。同时可以发现,在土洞形成和扩大阶段,土体竖向位移变化并不明显,阶段间差值不大,但第三阶段位移却迅速增长,这说明在土洞塌陷过程中,土体内部的变形是一个相对缓慢的过程,而当土洞发展至地面时,地表的塌陷却在瞬间内完成,这也从侧面体现了土洞塌陷极强的隐蔽性和突发性。

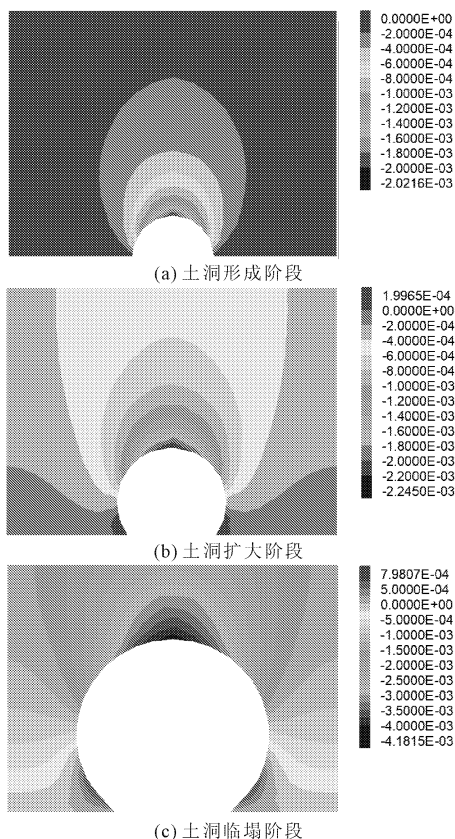


图 16 竖向位移分布图

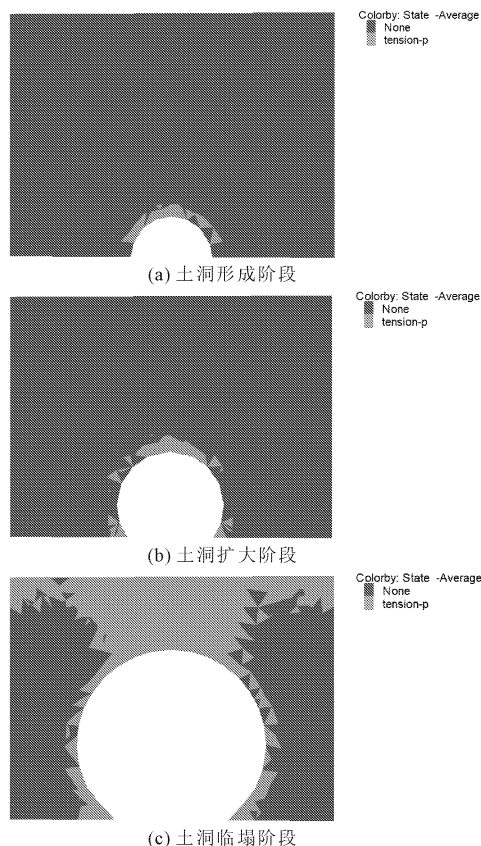


图 17 塑性区分布图

3.2.3 塑性区分布规律

塑性区可以用来反映土体潜在的破坏范围,因此,研究覆盖层塑性区分布情况,可以得到岩溶土洞进一步发展演化的趋势与潜在的破坏形式,见图 17。可以发现,土洞在发展扩大的过程中,土洞周围一定范围内的土体会首先进入塑性屈服状态,且以张拉破坏为主,同时由于土拱效应的存在,塑性区主要分布于拱顶及拱脚以下位置,且以拱顶分布为主。随着土洞的扩大,塑性区范围逐渐增大,向上发展的趋势愈加明显,在这种情况下,拱顶土体首先发生张拉破坏,继而向上发展直至贯穿地表,最终在地面上形成塌陷坑。

4 结 论

(1) 通过试验结果可确定在土洞塌落的初期存在土拱效应。其发挥程度主要受覆盖层厚度的影响,当覆盖层厚度达到底部初始空洞直径的 2 倍后,其发挥程度基本保持不变;可将土拱效应失效过程总结为“初始土洞形成 - 土拱效应产生 - 土洞受力平衡 - 降雨下渗产生渗流力 - 土拱效应失效 - 土洞继续塌陷直至地表”的过程。

(2) 塌陷土体的累积质量经历了缓慢增加 - 基本匀速增加 - 迅速增加的变化,可将岩溶土洞的塌陷过程划分为三个阶段:土洞发育形成、内部土洞塌陷扩展和地表塌陷。

(3) 在土洞塌陷数值模拟中,土体的最大剪应力始终集中于土洞的拱脚处,而竖向位移分布则是以洞顶为中心向两侧延伸的纺锤形环状分布,其中心处位移值最大。覆盖层土体由于洞顶张拉破坏而发生塌落,并最终形成地表塌陷。

(4) 岩溶土洞的塌陷演化机理:可溶岩中的裂隙在地下水的作用下扩大形成岩溶空洞,上覆盖层在重力及下渗水体等作用下形成塌陷土洞。土洞向上部不断扩展发育,当覆盖层厚度低于某一临界值时,上覆土体不能承受其自身重力而发生塌陷,形成地表塌陷坑,此时塌陷土洞呈现为中心大、两端小的纺锤型。

参考文献:

- [1] 蒋小珍,雷明堂,郑小战,等. 岩溶塌陷灾害监测技术[M]. 北京:地质出版社,2016.
- [2] 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.

(下转第 64 页)

荷裂隙倾向坡外(卸荷裂隙产状为 $5^\circ \angle 80^\circ$),且走向与边坡面基本平行(边坡面产状为 $0^\circ \angle 70^\circ$),这一特定的组合模式导致了交棱线倾向上游且倾角相对较缓,从而使得楔体的稳定性较好,在不同工况下的稳定安全系数均满足规范要求。

(2) 卸荷裂隙产状为 $350^\circ \angle 80^\circ$,层面产状为 $220^\circ \angle 50^\circ$ 和卸荷裂隙产状为 $0^\circ \angle 80^\circ$,层面产状为 $220^\circ \angle 50^\circ$ 在极端降雨工况时,受侧滑面扬压力作用,块体将脱离侧滑面沿层面单面滑动,滑动块体体积分别为 $2.34 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $12.69 \times 10^4 \text{ m}^3$,需尽量清除表面危岩孤石,然后采用锚杆结合主被动柔性防护技术以及锚索结合框格梁进行支护。

参考文献:

- [1] 李万逵. 激光扫描在阿尔塔什右岸高边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 66-72.
- [2] 王玉杰. 新疆阿尔塔什水利枢纽工程右岸高陡边坡稳定性专题研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [3] 王吉亮, 李会中, 等. 乌东德水电站右岸引水洞进口边坡稳定性研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1271-1278.
- [4] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 孙超, 孙益哲, 单博. 某变电站边坡稳定性分析及评价[J]. 吉林建筑大学学报, 2019, 36(6): 7-12.
- [6] 陈祖煜. 岩质边坡稳定性分析—原理、方法、程序

[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

- [7] 韩鸿彬. 极限平衡法在边坡稳定分析中的应用[J]. 中国矿业, 2008, 17(S1): 186-187.
- [8] 袁闻, 徐青, 陈胜宏, 等. 边坡稳定分析的三维极限平衡法及工程应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 56-61, 84.
- [9] 宋胜武, 巩满福, 雷承第. 峡谷地区水电工程高边坡的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 226-234.
- [10] 孙平, 陈玺, 王玉杰. 边坡稳定极限分析斜条分上限法的全局优化方法[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 741-748, 756.
- [11] 吴梦喜, 杨家修, 湛正刚. 边坡稳定分析的虚功率法[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 663-672.
- [12] 寇昊, 李宁, 郭双枫. 地震作用下岩体边坡破坏机制及稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 81-88.
- [13] 宋丹青, 陈志荣, 陈俊栋. 岩质边坡地震动力响应研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6): 1-7.
- [14] 马冲, 邢天海, 郑有雷, 等. 近断层地震动对边坡稳定性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 49-53, 60.
- [15] 水工建筑物抗震设计规范: SL 51247—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [16] 水利水电工程边坡设计规范: SL 386—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [17] 祁小辉, 李典庆, 曹子君, 等. 考虑地层变异的边坡稳定不确定性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1385-1396.

(上接第 8 页)

- [3] Thomas M T. Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes[J]. Engineering Geology, 1999, 52(1/2): 23-33.
- [4] 刘之葵, 梁金城, 周建红. 岩溶区土洞发育机制的分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 45-49.
- [5] 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(3): 126-130.
- [6] 李前银. 再论岩溶塌陷的形成机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3): 52-55.
- [7] 罗小杰, 罗程. 土洞型岩溶地面塌陷物理模型[C]//2016 年全国工程地质学术年会论文集, 北京: 科学出版社, 2016: 1246-1254.
- [8] 张少波, 简文彬, 洪儒宝, 等. 水位波动条件下覆盖型岩溶塌陷试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 659-667.
- [9] 周建, 张映钱, 方亿刚, 等. 水位变动及降雨入渗联合作用对岩溶地面塌陷的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 218-222.
- [10] 罗小杰. 也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 886-895.
- [11] 王飞, 柴波, 徐贵来, 等. 武汉市岩溶塌陷的演化机理研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 824-832.
- [12] 贾龙, 蒙彦, 管振德. 岩溶土洞演化及其数值模拟分析[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 294-298.
- [13] 丁庆忠. 弱透水盖层岩溶塌陷的水—气压力致塌机理物理模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [14] 曹细冲. 矿井疏干区岩溶塌陷的水击气爆作用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [15] 刘奔. 覆盖型岩溶致塌模式及其临界判据研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- [16] Karl T. Theoretical Soil Mechanics [M]. 4th Edition. New York: John Wiley & Sons, 1947: 66-76.
- [17] 林军, 池永翔. 永定县培丰镇樟坑自然村地面塌陷地质灾害调查监测报告[R]. 福州: 福建省地质调查研究院, 2015.