

# 曲靖马龙区通泉镇单层阻水型盖层地面塌陷成因研究

朱凯<sup>1</sup>, 尹艳<sup>1</sup>, 刘皓<sup>2</sup>

(1. 曲靖市车马碧水库工程建设管理局, 曲靖 655099;

2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650041)

**摘要:** 论文以曲靖市马龙区通泉镇内已发生的塌陷为研究对象, 在充分认识研究区地质背景、水文地质条件、塌陷地质原型的基础上, 重点针对塌陷区典型的单层阻水型地面塌陷成因机制开展研究。首先, 基于相似理论构建了单层阻水型覆盖型塌陷室内地质物理模型, 并开展了符合实际的实验工况, 模拟不同地下水位降速下的溶洞内压强变化和单层阻水型盖层变形演化规律, 并提出了溶腔压强与地下水位降速的关系式。在此基础上, 基于极限平衡理论, 对单层阻水型盖层进行受力分析, 提出了考虑溶洞真空压强与地下水位降速关系的盖层稳定性的判别公式。研究表明: (1) 地下水位下降在溶洞中形成负压带, 由此产生的真空吸蚀在塌陷过程中起主导作用; (2) 实验尺度下, 马龙区通泉镇单层阻水型盖层发生塌陷的临界水位降速约为 0.98 m/d, 当超过该临界值时形成塌陷。

**关键词:** 岩溶塌陷; 模型试验; 单层结构; 地下水位下降; 致塌机理

**中图分类号:** P642.25; P642.26; TV131.61 **文献标识码:** A

## STUDY ON THE CAUSE OF KARST COLLAPSE OF SINGLE-LAYER AQUICLUDE COVER IN TONGQUAN TOWN, MALONG DISTRICT, QIJING CITY

ZHU Kai<sup>1</sup>, YIN Yan<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>2</sup>

(1. Qujing City Chemabi Reservoir Engineering Construction Administration, Qujing 655099, China;

2. Power China Kunming Engineering Co. LTD., Kunming 650041, China)

**Abstract:** Based on the geological background, hydrogeological conditions and geological prototype of the subsidence area, the paper focuses on the genetic mechanism of typical single-layer aquiclude karst collapse in Tongquan Town, Malong District, Qujing City. Firstly, based on the similarity theory, an indoor geological physical model of a single-layer aquiclude cover collapse was constructed, and experimental conditions were carried out to simulate the pressure changes in the karst cave and the deformation evolution law of the single-layer aquiclude cover under different groundwater level drop rates. On this basis, based on the limit equilibrium theory, the force analysis of the single-layer aquiclude cover is carried out, and the discrimination formula of the cover stability considering the relationship between the vacuum pressure of the cave and the drop rate of the groundwater level is put forward. The results show that: (1) the decrease of groundwater level forms a negative pressure zone in the cave, and the resulting vacuum erosion plays a leading role in the collapse progress; (2) At the experimental scale, the critical water level drop rate of the

collapse of the single-layer aquiclude cover in Tongquan Town, Malong District is about 0.98 m/d, and the collapse occurs when the critical value is exceeded.

**Key words:** Karst collapse; physical model experiment; unitary structure; groundwater drawdown; collapse mechanism

岩溶塌陷是岩溶区中一种常见的地质灾害,可对塌陷区的土地利用和生态环境带来严重影响,同时还威胁着当地群众的生命及财产安全<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着全球气候变化和人类工程活动的增多,岩溶地面塌陷呈高频高发的趋势<sup>[4-6]</sup>。

岩溶地面塌陷成因机理一直是学者们热议的话题,众多学者开展过岩溶塌陷的成因机制和致灾机理研究,包括对岩溶塌陷的影响因素、形成条件、盖层稳定性等进行了系统分析,对岩溶塌陷的盖层结构进行过概化并提出过多种塌陷模式<sup>[7-14]</sup>。一般认为,岩溶塌陷的形成具备几个主要条件:①下部岩溶高程度发育;②上覆一定厚度的松散土体或岩体;③存在地下水活动。这3个条件总体表现为“岩-土-水”的相互作用,最终可能导致上覆盖层失稳,形成地面塌陷<sup>[15-16]</sup>。大量实例显示,地下水活动是触发岩溶塌陷最主要的因素<sup>[17-18]</sup>。

岩溶塌陷盖层结构对其塌陷过程和盖层变形演化行为影响很大,有学者对此展开了一系列的研究。程星等<sup>[19]</sup>以岩溶塌陷实例为基础,提出了单层阻水型、单层透水型、无盖层、阻-透、透-阻、阻-透-阻与透-阻-透共7种盖层地质概化模型。这些不同结构的盖层,在不同的条件下,表现出的塌陷特征与塌陷模式具有显著的差异。刘之葵等<sup>[20]</sup>利用散体极限平衡条件,推导了单层地基塌陷土层的应力计算公式。王延岭等<sup>[21]</sup>研究了泰莱盆地岩溶塌陷的分布特征、地质结构模式及其形成机理,结果表明单层结构土层岩溶塌陷的形成历经“真空吸蚀-崩解剥落-塌陷”3个阶段。黄敬军等<sup>[22]</sup>分析监测数据,识别岩溶塌陷与岩溶水水位变化的关系认为,超量开采岩溶水是岩溶塌陷的诱发因素。陈标典等<sup>[23]</sup>通过调查武汉纸坊-庙山一带老黏土区的岩溶地面塌陷将区内的地质结构划分为3类,认为单层结构黏土盖层主要发生土洞型塌陷。

传统的研究方法以现有发生的岩溶塌陷为研究对象,对其塌陷成因进行分析,这导致无法认识到岩溶塌陷孕育、发展和最终塌陷的全过程。而物理模型试验能够以野外所调查的地质条件和水文地质条件入手,引入地质过程-力学机制分析的思想,基于相似理论构建室内地质物理模型,开展不同影响因

素的工况实验,通过监测模型上的塌陷控制因素,可全面展现塌陷的孕灾、成灾及致灾的全过程<sup>[24]</sup>。20世纪末期,岩溶塌陷著名学者雷明堂及其团队<sup>[25-26]</sup>分别以武昌、唐山为原型建立大比例尺的物理模型试验,对单一结构和二元结构土层塌陷的全过程进行了模拟,得到了这两种结构形成岩溶塌陷的地下水临界坡降,为后续对塌陷成因机理的研究奠定了理论基础。刘秀敏<sup>[27]</sup>结合物理模型模拟了地下水位升降及地表水入渗情况下典型岩溶地质结构物的塌陷过程。Xiao, et al.<sup>[28]</sup>使用物理模型揭示了地下水位下降过程中盖层在水-气相互作用下盖层从变形到塌陷的演化规律。李才华等<sup>[29]</sup>在概化塌陷地质模型的基础上,进行物理模拟试验,研究了岩溶塌陷形成机制,确定其塌陷诱发因素。可见,物理模拟试验是研究岩溶塌陷一种科学有效的方法。

力学模型也是研究岩溶地面塌陷的重要手段之一。当前,不少学者已通过建立岩溶塌陷力学模型对塌陷的力学机制开展了深入分析。贺可强等<sup>[30]</sup>根据普氏理论及极限平衡理论分别建立了内部塌陷阶段临界土洞的高度表达式及地表塌陷阶段的渗压效应致塌力学模型,经过对枣庄市的岩溶塌陷验证分析,表明建立的表达式与模型基本上反映了该地区岩溶塌陷的形成机理。王滨等<sup>[31]</sup>根据泰安市东羊娄岩溶塌陷形成机理的分析结果,分3部分建立了岩溶塌陷的致塌力学综合模型。武鑫等<sup>[32]</sup>将徐州地区岩溶塌陷进行概化,分析其破坏方式和致塌模式,建立了内部塌陷阶段以及地表塌陷阶段的综合力学模型,确定了最大水位降深空间分布,据此作为岩溶塌陷的水位控制红线。熊启华等<sup>[33]</sup>依托武汉市江夏区乌龙泉矿区岩溶地面塌陷实例,通过建立三铰拱结构力学模型,研究了负压吸蚀力、土拱厚跨比、强度参数对土拱破坏模式和稳定性的影响机制。可见,力学模型分析的优点在于,它可以量化覆盖层所受的致塌力、抗塌力大小和关系,基于极限平衡理论可提出塌陷稳定性的判别公式,从而提出岩溶塌陷失稳的临界条件。但力学模型不足之处在于多数情况下忽略了一些影响因素,缺少实际工程案例验证或实验数据的支撑,导致这些理论公式在实际应用中受到限制。

尽管目前国内外学者对岩溶塌陷成因机制开展过大量的研究,但对这些不同盖层结构的塌陷的成因并未有较好的总结,尚存在对不同盖层结构类型的塌陷成因机制认识不清等问题。由此,本论文结合前期所开展的塌陷专题研究,重点对该研究区单层阻水型结构地面塌陷为对象,在充分开展野外地质调查、测试分析和水文地质条件认识的基础上,在室内构建了符合现场实际的试验模型,开展了多组室内试验,旨在研究地下水位下降速率对盖层破坏的本质关系。在此基础上,进一步利用极限平衡理论,建立单层阻水型地面塌陷的力学模型,对其塌陷的临界条件进行了深入分析,并将物理模拟试验结果与力学分析模型相结合期望对该塌陷区单层阻水型盖层的成因机制进行深化讨论。研究结果可为当地地面塌陷防治和减灾提供重要理论支撑和工程指导价值。

## 1 岩溶塌陷地质原型

车马碧水库引水隧洞工程于 2017 年底开始施工,2019 年马龙区通泉镇开始陆续出现地面塌陷,同时区内河流、泉点水位下降甚至干涸。截至 2021 年 9 月,区内出现多处地面塌陷,经野外调查,发现区内杨官田村、缪家田龙潭水库库尾和让田社区 3 个塌陷区中的 39 处地面塌陷(野外编号 TX01~TX39)。塌陷点在研究区的分布位置示意图 1。

野外调查及勘察结果显示,塌陷区内的覆盖层主要是由砂土、黏土组成的冲洪积层( $Q^{pal}$ )和由角砾土、碎石土、黏土等组成的残坡积层( $Q^{cdl}$ )。下伏基岩主要包括上志留统庙高组( $S_3m$ )泥岩夹泥灰岩、关底组( $S_3g$ )砂岩夹泥灰岩;中寒武统双龙潭组( $\epsilon_2s$ )白云岩、白云质灰岩夹泥质灰岩、泥岩和下寒

武统统龙王庙组( $\epsilon_1l$ )泥质灰岩、白云岩夹粉砂岩。区内下寒武统龙王庙组、中寒武统双龙潭组中的可溶岩,是控制研究区岩溶发育的地层条件;马龙河为研究区的主要河流,属牛栏江水系。马龙河作为区内最低排泄基准面,控制着研究区的地下水补给、径流和排泄,是控制研究区岩溶发育的地下水条件。此外,研究区内陡倾、北东北-北东向的逆断裂发育,造成岩体破碎和断裂带附近地下水活动强烈,是控制研究区岩溶发育的主要构造条件。调查显示,区内岩溶较为发育,裂隙、溶蚀管道、溶洞等溶蚀空腔分布具有沿水系、断裂走向发育的总体规律。

区内塌陷点大多分布在河道两侧,有些分布在河道中,据当地居民反映,塌陷发生前出现了河流断流、泉点干涸及地下水位显著下降的过程。天然条件下,区内地下水以马龙河为最低基准排泄面,从高处向低处径流,整体上呈东高西低的流场特征。输水隧洞施工形成新的导水通道,地下水向输水隧洞处排泄,形成以输水隧洞为轴的降落漏斗,并且随着时间的增长,降落漏斗的范围逐渐增大(图 2)。因此,初步分析认为,车马碧水库引水隧洞施工开挖,支洞排水导致地下水位快速下降,可能是造成研究区地面塌陷的主要原因之一。

据野外调查可知,单层阻水型岩溶塌陷的盖层主要由含砂率较低、透水性较差的黏土组成。根据现场土体渗透系数测定试验结果,将渗透系数小于 0.01 m/d 的盖层土体确定为单层阻水型盖层。由于塌陷区单层阻水型盖层塌陷数量较多、规模及危害性大的特点,因而本文重点关注单层阻水型地面塌陷的成因机制。研究区中共有 15 处单层阻水型地面塌陷,占塌陷总数量的 38.5%,这些塌陷点的基本特征见表 1。

表 1 研究区单层阻水型地面塌陷基本特征统计表

| 塌陷区              | 塌陷坑编号 | 平面形态 | 平面尺寸/m            | 剖面形态 | 可见深度/m |
|------------------|-------|------|-------------------|------|--------|
| 杨官田塌陷区           | TX03  | 近椭圆形 | 长轴约 11.0,短轴约 6.0  | 碟状   | 0.5    |
|                  | TX11  | 似圆形  | 直径约 3.25          | 圆柱状  | 2.0    |
| 缪家田龙潭水库<br>库尾塌陷区 | TX22  | 不规则  | 长轴约 41.0,短轴约 14.0 | 漏斗状  | 2.4    |
|                  | TX23  | 近椭圆形 | 长轴约 3.0,短轴约 2.0   | 碟状   | 1.1    |
|                  | TX24  | 近椭圆形 | 长轴约 5.0,短轴约 2.0   | 碟状   | 1.1    |
|                  | TX25  | 近椭圆形 | 长轴约 9.2,短轴约 5.8   | 圆柱状  | 1.5    |
|                  | TX26  | 长条形  | 长轴约 7.9,短轴约 3.2   | 碟状   | 1.4    |
|                  | TX27  | 近椭圆形 | 长轴约 5.2,短轴约 4.7   | 漏斗状  | 1.8    |
| 让田塌陷区            | TX28  | 近椭圆形 | 长轴约 4.7,短轴约 3.9   | 碟状   | 1.3    |
|                  | TX30  | 近椭圆形 | 长轴约 2.2,短轴约 1.5   | 坛状   | 0.8    |
|                  | TX31  | 半椭圆形 | 长轴约 4.1,短轴约 2.8   | 坛状   | 1.2    |
|                  | TX33  | 近椭圆形 | 长轴约 2.4,短轴约 1.4   | 碟状   | 0.8    |
|                  | TX35  | 似圆形  | 直径约 4.1           | 碟状   | 0.5    |
|                  | TX36  | 似圆形  | 直径约 1.7           | 圆柱状  | 0.6    |
|                  | TX37  | 长条形  | 长轴约 1.8,短轴约 1.5   | 圆柱状  | 0.7    |

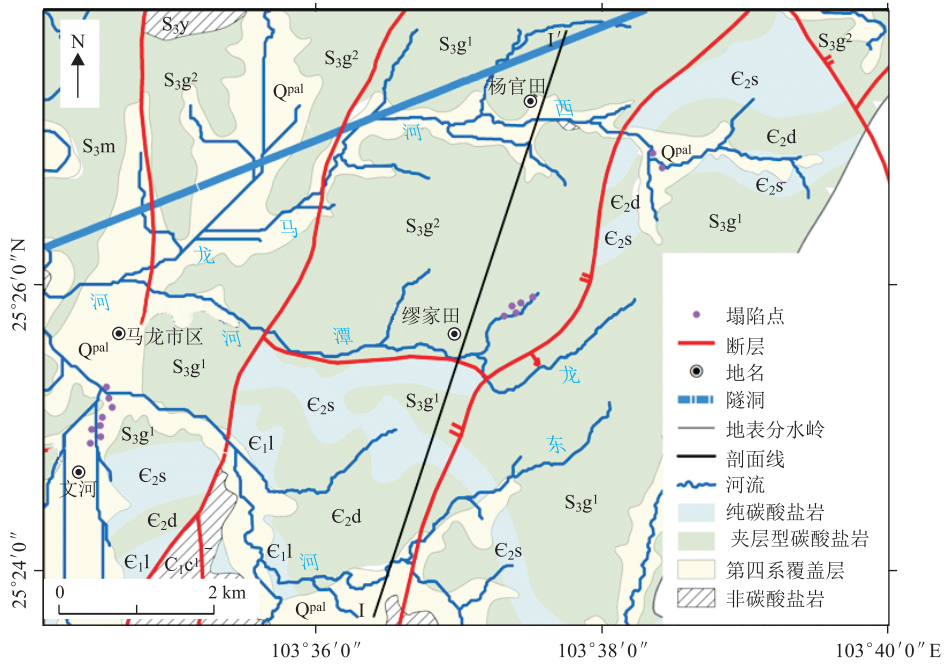


图1 研究区单层阻水型岩溶塌陷分布示意图

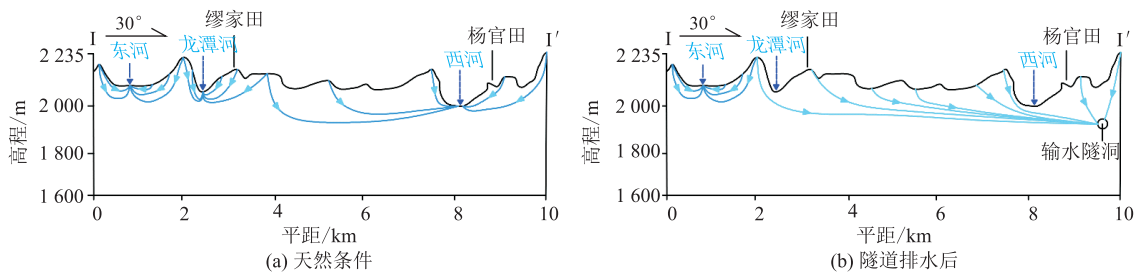


图2 地下水流系统袭夺演化图

通过构建力学模型和物理模型来探究研究区内的单层阻水型岩溶地面塌陷的致塌机理就要选取合适的地质原型, 本论文选取杨官田塌陷区 TX11(图3)作为地质原型。TX11 的盖层土体主要为黏土, 盖层结构为单层阻水型, 下伏寒武系中统双龙潭组 ( $E_2s$ ) 地层, 塌陷坑近似圆形, 直径约为 3.25 m, 剖

面形态为圆柱状, 可见深度约 2 m。由于盖层土体砂土透水性较差, 地下水位处于溶洞内, 盖层内不存在潜水。以 TX11 典型单层阻水型岩溶地面塌陷为原型, 将其概化为单层阻水型地质模型, 在此基础上对单层阻水型岩溶地面塌陷的致塌机制进行研究。

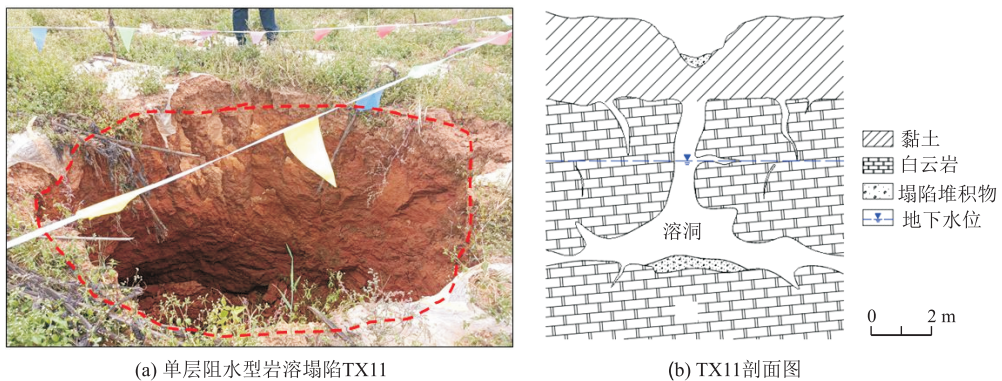


图3 单层阻水型岩溶塌陷地质原型 TX11

## 2 单层阻水型岩溶塌陷物理模型试验

### 2.1 相似原理

根据前述,将塌陷区的 TX11 塌陷点为例,开展单层阻水型岩溶塌陷物理模拟试验。为了确保物理模型尽可能还原天然工况下的地质原型以及试验结果准确可靠,物理模型试验设计遵循相似理论<sup>[34-35]</sup>,需要确保模型和自然界岩溶塌陷地质实体各物理量间满足一定的相似关系,即几何相似、盖层材料相似、水动力条件相似和边界条件相似。根据塌陷实例的规模及模型箱的尺寸,确定本次试验的相似比  $\lambda$  为 1:100,即模型与原型各参数之间的比例应满足下式:

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{W_m}{W_p} = \frac{H_m}{H_p} = \lambda = \frac{1}{100} \quad (1)$$

表 2 地质原型土样物理力学性质及水理性质参数

| 含水状态  | 密度<br>/kg·m <sup>-3</sup> | 含水率<br>/% | 砂土比 | 内聚力<br>/kPa | 内摩擦角<br>/° | 渗透系数<br>/m·d <sup>-1</sup> | 容水度<br>/% | 给水度<br>/% | 持水度<br>/% |
|-------|---------------------------|-----------|-----|-------------|------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 黏土 天然 | 1.41                      | 7.5       | 1:5 | 23.9        | 17.6       | 0.001 5                    | 26.2      | 3.4       | 22.8      |

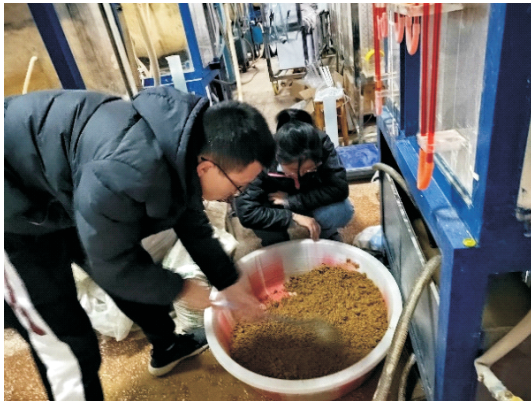


图 4 配置盖层土样

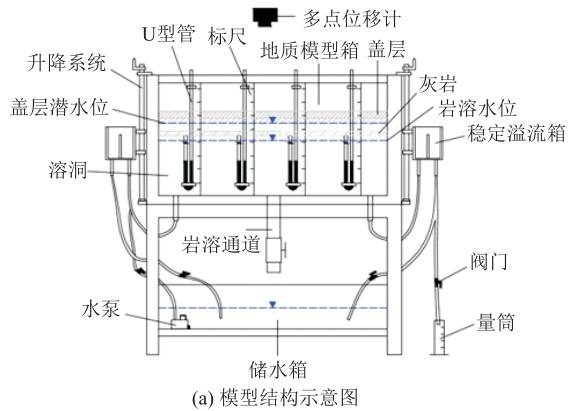
### 2.2 试验装置

试验装置的外观尺寸长 1.5 m、宽 0.6 m、高 1.8 m,主要由地质体模拟箱、供排水系统及数据监测装置组成(图 5a)。

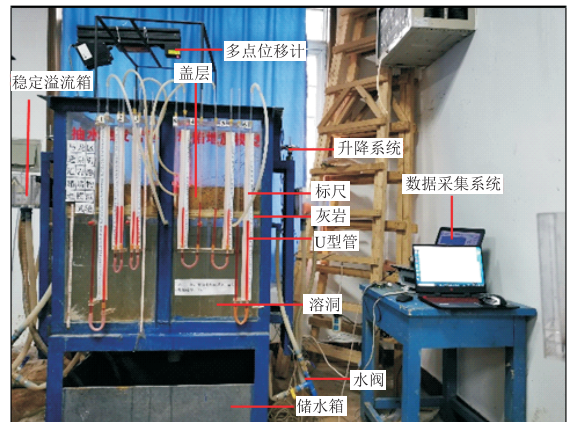
地质体模拟箱长宽高为 1 m×0.5 m×0.9 m,箱体上部为地质体模拟箱,用来铺设土样模拟地质原型的覆盖层,箱体上部开口,其他 5 个面均用 2 cm 厚的透明有机玻璃材料填充。箱体中部设有水平有机玻璃板,中央留有直径 10 cm 的圆孔,用于模拟岩溶通道。水平有机玻璃板以下的箱体用于模拟溶洞,尺寸为 1 m×0.5 m×0.5 m,箱体底部中央设置有 2 cm 的开口连接排水阀,可以控制溶洞模拟箱的排水速率。

式中, $m$  代表物理模型; $p$  代表地质原型; $L$ 、 $W$ 、 $H$  分别表示长度、宽度和厚度; $\lambda$  为几何相似常数。

铺设盖层一般采用现场土,或用砂和黏土根据原型土体的颗粒的粒径级配进行配比,并加水湿润、压密,尽量保持试验用途的成分组成和物理性质参数与原型一致。由于运输不便,本次试验没有采用现场土,而是以周边黏土为骨料加入粉砂与水混合搅拌配置达到与地质原型的盖层土体的物理力学性质参数(表 2)一致。首先通过现场渗水试验以及室内试验获得地质原型盖层土体和试验土样的含水率、砂土比、黏聚力、内摩擦角等物理力学性质参数;然后根据二者的天然含水率和砂土比计算所需水的质量和砂的质量;最后将试验土样和粉砂混合并加水不断搅拌,使之混合均匀(图 4),得到用于铺设盖层的相似材料。



(a) 模型结构示意图



(b) 物理模型试验装置实物图  
图 5 物理模型试验装置

在地质体模拟箱的下部设有储水箱,两侧设有稳定溢流箱,通过软管连接,组成供排水系统。储水

箱的尺寸为  $1\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ , 用来储存试验用水或排水, 内部设有水泵。用软管将稳定溢流箱、储水箱中的水泵以及溶洞模拟箱相连, 试验时通过水泵向地质体模拟箱供水。稳定溢流箱可以通过自由旋转的升降系统调节高度, 溶洞模拟箱中的水位也会随之改变。稳定溢流箱溢流的水以及试验结束溶洞中的水都会回流到储水箱中循环利用, 形成闭路水循环系统。

数据监测系统主要由“U”型测压管和多点位移计组成。地质体模拟箱侧壁同一高度上等间距设置了 6 排带有刻度的“U”型测压管, 测压管与溶洞相连, 用来监测溶洞内的真空压强。“U”型管内装有滴入红墨水的蒸馏水, “U”型管两侧的液面差反映了溶洞模拟箱中的气体压强大小, 可用  $P = \rho g \Delta h$  来计算。在试验装置上设置 ZLDS200 型激光位移计来监测溶洞上覆盖层的实时累计形变量。传感器发射激光束打到覆盖层表面发生漫反射, 反射光被传感器接收端接收并在 CCD 上成像, 通过计算光点位置可获得物体表面的高度数据。同时, 利用摄像机录制盖层表面的变化。激光位移计的精度为  $0.1\text{ mm}$ , 监测频率为  $10\text{ 次/s}$ 。试验装置实物图见图 5 (b)。

### 2.3 试验方案

如前所述, 经过野外调查初步推测地下水位的变化是引起区内岩溶塌陷的重要因素, 因此将地下水位降速作为变量展开试验, 设计试验方案如下:

(1) 试验前期应做准备工作, 如检验试验装置气密性、确保供排水系统正常工作、监测系统的调校等。

(2) 盖层铺设。首先调节两侧稳定溢流箱到预定高度, 打开水泵向溶洞模拟箱中注水, 使箱体内水位达到设计高度并保持, 然后根据地质原型的覆盖层厚度按照相似比  $\lambda = 1 : 100$  确定物理模型的盖层厚度, 将地质原型的覆盖层厚度缩小 100 倍即为物理模型的盖层厚度。根据钻孔揭示, 单层阻水型岩溶塌陷地质原型 TX11 的覆盖层厚度为  $2.5\text{ m}$ , 因此设计单层阻水型岩溶塌陷物理模型的盖层厚度为

$2.5\text{ cm}$  (图 6)。将配置好的试样土样按照设计的厚度铺设在地质体模拟箱的水平有机玻璃板上。

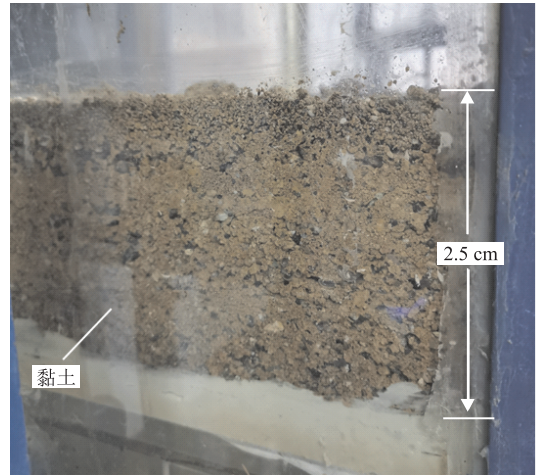


图 6 物理模型盖层

(3) 打开仪器开始采集数据。将激光位移计通过线缆与 PC 端口对接, 对监测系统进行调校, 监测其采集样本的频率。在调校阶段, 盖层会在重力作用下产生一些微小变化, 当盖层稳定后即可开始试验。

(4) 排水。打开溶洞模拟箱下的水阀排水, 通过旋转水阀控制水位下降速率, 使溶洞中的地下水位按照设定的速率下降。根据相似性原理中的弗劳德相似准则, 流速比例系数  $V_m/V_p = \lambda^{1/2} = 1/10$  ( $V_m$  表示物理模型地下水位降速,  $V_p$  表示地质原型地下水位降速), 即物理模型的地下水位降速是地质原型地下水位降速的  $1/10$ 。根据车马碧水库输水隧洞的施工支洞排水记录和观测井数据, 选取典型工况进行试验。观测“U”型管内液位高差变化以及盖层变形情况, 摄像、记录。

(5) 结束试验。当“U”型管液位不再变化或盖层破坏液位恢复原状一段时间后, 记录试验数据, 结束试验。排出溶洞内的泥水混合物, 清理盖层模拟箱和溶洞模拟箱中残余的土块, 准备下一组试验。

试验方案如表 3 所示。

表 3 岩溶塌陷物理模型试验方案

| 工况 | 盖层结构  | 盖层土体 | 盖层厚度/cm | 岩溶水初始水位/cm<br>(溶洞顶板=0) | 岩溶水降速/<br>$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 监测数据      |         |
|----|-------|------|---------|------------------------|------------------------------------------|-----------|---------|
|    |       |      |         |                        |                                          | 盖层土体表面位移量 | 溶洞内真空压强 |
| 1  |       |      |         |                        | $0.8 \times 10^{-6}$                     |           |         |
| 2  | 单层阻水型 | 砂土   | 2.5     | -1                     | $1.0 \times 10^{-6}$                     | √         | √       |
| 3  |       |      |         |                        | $1.2 \times 10^{-6}$                     |           |         |

### 2.4 试验结果分析

试验结果显示, 工况 1、2 未发生塌陷, 工况 3 在

276 min 发生了塌陷。下面从溶洞内真空压强变化、盖层孔隙水压力变化以及盖层土体表面位移对

试验结果进行分析。

(1) 溶洞内真空压强变化分析

从溶洞内真空压强时变曲线(图 7)和真空压强增长速率时变曲线(图 8)可以看出,无论塌陷与否,溶洞内的真空压强都会有一个峰值。在到达峰值前,溶洞内的真空压强增长速率大体上呈下降趋势,在到达峰值后,对于未发生塌陷的工况 1、2,真空压强逐渐下降并趋于稳定,对于发生塌陷的工况 3,在塌陷瞬间,真空压强消失。

溶洞内的真空压强并非线性的,在排水初期,在溶洞顶板和地下水位之间形成了负压带,随着溶洞中的地下水位持续下降,负压带的体积也随之增长,导致溶洞内的真空压强以较快的速率迅速增大。真空压强的增长速率随着时间呈波动式下降,这是由于盖层土体中存在一些孔隙,并且在真空吸蚀作用下,盖层出现了一些微小裂缝,大气通过这些孔隙和微小裂缝向溶洞内进行补给。同时,负压带的体积也在不断增大,这就导致了真空压强的增长速率呈波动式下降。过了一段时间后,工况 1、2 下溶洞接受大气补给速率逐渐赶上真空压强的增长速率,真空压强不再增长,逐渐趋于稳定;工况 3 溶洞内产生足够大的真空压强,盖层土体发生塌陷,在塌陷瞬间,溶洞与外界大气连通,真空压强立刻消失。

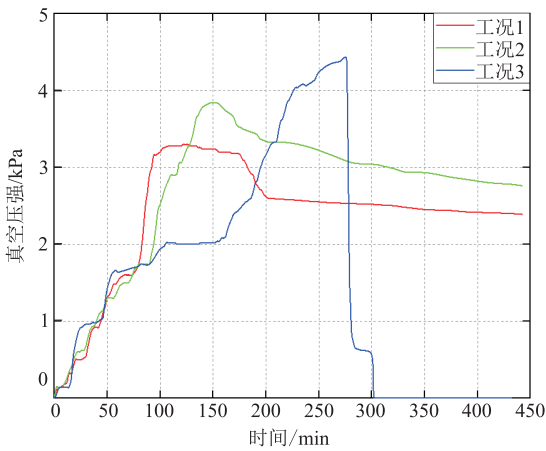


图 7 溶洞内真空压强时变曲线

工况 1 的峰值压强为 3.30 kPa,工况 2 的峰值压强为 3.84 kPa,工况 3 的峰值压强为 4.42 kPa,可以看出,地下水位降速越大,溶洞内的真空压强峰值也就越大。同时,溶洞内真空压强与时间的关系并非线性的,不能简单地通过  $\Delta P = \rho gh$  进行计算。为了得到地下水位降速与真空压强的关系,增加了几组试验测试不同地下水位降速下溶洞内的真空压强峰值,结果如表 4 所示。对不同地下水位降速下溶洞内的真空压强峰值进行拟合(图 9),可以

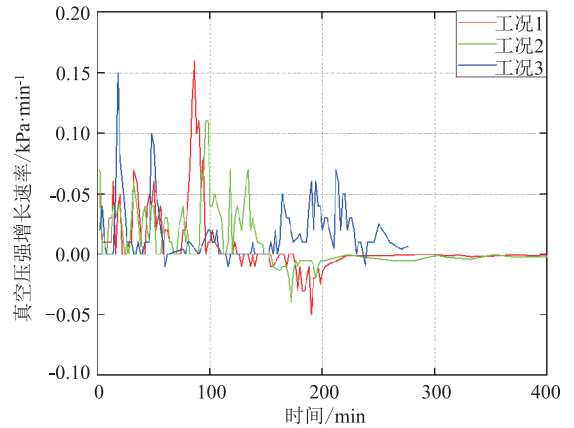


图 8 溶洞内真空压强增长速率时变曲线

得到:

$$\Delta P = -10.52e^{-\frac{v}{7.3 \times 10^5}} + 6.93 \quad (2)$$

式中,  $\Delta P$  为真空压强峰值, kPa;  $v$  为地下水位降速, m/s。

表 4 不同地下水位降速下溶洞内的真空压强峰值

| 工况 | 地下水位降速/ $m \cdot s^{-1}$ | 真空压强峰值/kPa |
|----|--------------------------|------------|
| 1  | $0.8 \times 10^{-6}$     | 3.30       |
| 2  | $1.0 \times 10^{-6}$     | 3.84       |
| 3  | $1.2 \times 10^{-6}$     | 4.42       |
| 4  | $1.6 \times 10^{-6}$     | 5.96       |
| 5  | $2.0 \times 10^{-6}$     | 6.10       |
| 6  | $2.4 \times 10^{-6}$     | 6.32       |

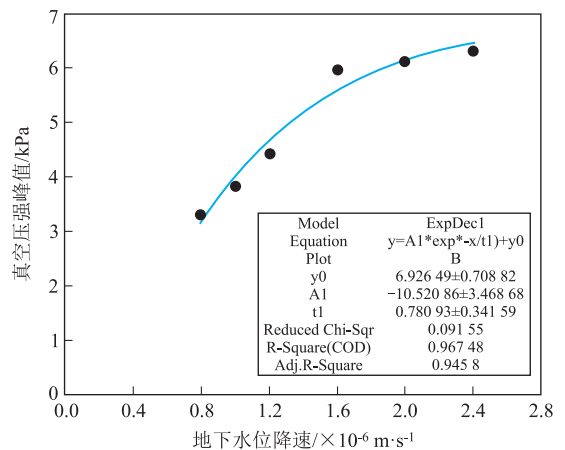


图 9 真空压强-地下水位降速最佳关系曲线

(2) 盖层土体表面位移量变化分析

以工况 1 和 3 为例,根据试验过程中的盖层表面变化可以看出,工况 1 试验前后表面并无明显变形(图 10a),工况 3 试验在岩溶通道上方形成了以平面形态近圆形的塌陷坑,周围可见裂缝(图 10b)。

根据盖层土体表面位移量看出,工况 1 下盖层表面仅产生了微小形变,岩溶通道上方土体的位移

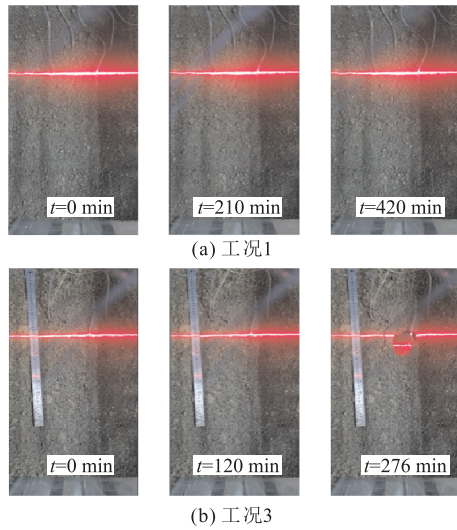


图 10 盖层表面变化情况

比较大,盖层最大位移量为 17.41 mm(图 11a),工况 3 岩溶通道上方的土体掉落形成塌陷坑,塌陷坑的剖面形态大致呈圆柱状(图 11b),这与地质原型的平面形态及剖面形态相似。从盖层土体表面位移量可以发现:无论是否塌陷,岩溶通道上方盖层土体形变发生最早,位移量也最大,其他区域则是随着真空吸蚀力的影响范围不断扩大也发生形变。这是由于盖层内的水都流向岩溶通道,岩溶通道上方的土体受到的冲刷更强烈,并且直接受到溶洞内的真空吸蚀力。塌陷的发生并非渐进性发展,前期发展缓慢,盖层土体逐渐形变,但变化不大,当溶洞内产生足够大的真空压强时,塌陷突然发生,瞬时完成。

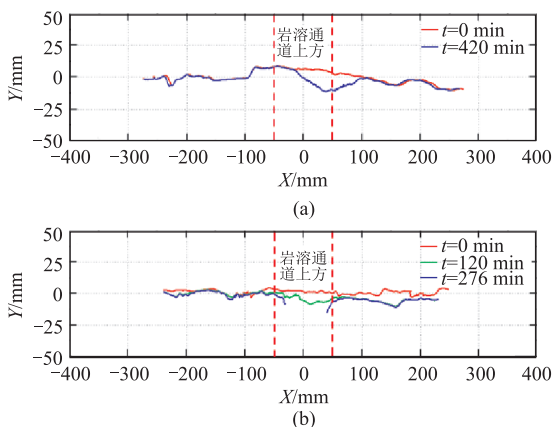


图 11 盖层土体表面位移量

### 3 单层阻水型岩溶塌陷力学模型

#### 3.1 力学模型构建

根据前述物理模型试验结果可知,单层阻水型

岩溶塌陷的发生主要是由于地下水位下降导致溶洞内产生真空压强,在负压吸蚀的作用下导致盖层失稳塌陷。现采用极限平衡理论构建单层阻水型岩溶塌陷力学模型。

马龙区通泉镇单层阻水型岩溶塌陷的概化模型如图 12a 所示,对盖层土体进行受力分析(图 12b)。盖层土体受到向上的抗塌力和向下的致塌力的作用,令塌陷判别系数为  $K$ ,  $K = F_{\text{抗}} / F_{\text{致}}$ ,当向下的致塌力大于向上的抗塌力时,即  $K < 1$  时,塌陷产生。

盖层土体受到的致塌力主要包括盖层土体自重、真空吸蚀负压。抗塌力则主要为塌陷体周侧所受的侧壁摩擦阻力,也就是说,盖层土体破坏的极限平衡方程为:

$$K = \frac{F_{\text{抗}}}{F_{\text{致}}} = \frac{f}{G + F} = 1 \quad (3)$$

式中,  $f$  为侧壁摩擦阻力,  $N$ ;  $G$  为土体自重,  $N$ ;  $F$  为真空吸蚀负压,  $N$ 。

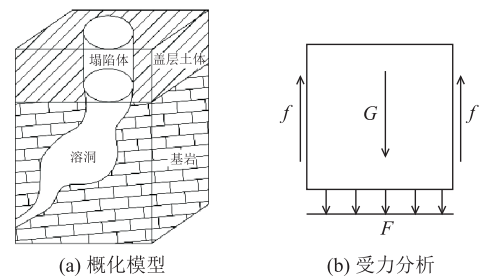


图 12 单层阻水型岩溶塌陷力学模型

#### (1) 盖层土体自重 $G$

塌陷体自重为岩溶通道上部的盖层土体,则:

$$G = \frac{\gamma H \pi d^2}{4} \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  为土体的重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $H$  为塌陷体的厚度,  $\text{m}$ ;  $d$  为岩溶通道的直径,  $\text{m}$ 。

#### (2) 真空吸蚀负压 $F$

由于真空负压差是作用在岩溶通道上方盖层土体的均布载荷,因此其产生的作用力为:

$$F = \frac{\Delta P \pi d^2}{4} \quad (5)$$

结合式(2)则有:

$$F = \frac{(-10.5e^{-\frac{v}{7.3 \times 10^5}} + 6.93) \pi d^2}{4} \quad (6)$$

#### (3) 侧壁摩擦阻力 $f$

塌陷体所受的侧壁阻力主要是由土体的抗剪强度引起的,根据库伦强度理论,高度为  $H$  的塌陷体的侧壁摩擦阻力为:

$$f = \left( \frac{\sigma_n \tan \varphi}{2} + c \right) \pi d H \quad (7)$$

式中,  $\sigma_n$  为塌陷体受到的垂直滑动面的主应力, kN;  $\varphi$  为土体内摩擦角, °;  $c$  为土体内摩擦力, kN。

假定塌陷体为圆柱体, 滑动面为直立平面, 则有

$$\sigma_n = K_0 \gamma H \quad (8)$$

式中,  $K_0$  为土体侧压力系数。

将式(8)代入式(7), 则其摩阻力可表达为:

$$f = \left( \frac{K_0 \gamma H \tan \varphi}{2} + c \right) \pi d H \quad (9)$$

因而, 可以将式(4)、(6)、(9)代入公式(3)中, 判断盖层的稳定性。

从马龙区通泉镇单层阻水型岩溶塌陷力学模型来看, 土体的密度、抗剪强度、覆盖层的厚度、岩溶通

道的大小、地下水位降速都是影响盖层能否破坏塌陷的因素。但是对于研究区内, 土体的物理性质以及覆盖层的厚度都相差不大的情况下, 地下水位降速是诱发岩溶塌陷的最主要因素。

### 3.2 模型验证

将表 2 中的盖层土体物理性质参数以及物理模型盖层的厚度及岩溶通道的直径, 土体侧压力系数  $K_0$  取经验值 0.4, 忽略试验过程中土体抗剪强度的变化, 代入式(4)、(6)、(9)中对物理模型能否塌陷进行计算分析。将计算结果与物理模型试验结果进行对比, 结果见表 5。

表 5 力学模型计算结果

| 工况 | 地下水位降速/ $m \cdot s^{-1}$ | 致塌力/N      |             | 抗塌力/N      |      | 是否塌陷 |  |
|----|--------------------------|------------|-------------|------------|------|------|--|
|    |                          | 盖层土体自重 $G$ | 真空吸蚀负压力 $F$ | 侧壁摩擦阻力 $f$ | 力学模型 | 物理模型 |  |
| 1  | $0.8 \times 10^{-6}$     |            | 24.92       |            | 否    | 否    |  |
| 2  | $1.0 \times 10^{-6}$     | 2.77       | 31.44       | 37.83      | 否    | 否    |  |
| 3  | $1.2 \times 10^{-6}$     |            | 36.70       |            | 是    | 是    |  |

将表 2 和表 5 中的各项参数代入式(2)、(4)、(6)、(9)中, 可以得到物理模型盖层发生塌陷的临界水位降速。物理模型尺度下单层阻水型盖层发生塌陷的临界水位降速  $V_{m透}$  为  $1.13 \times 10^{-6} m/s$ 。通过对比可以看出力学模型的计算结果与物理模型试验结果一致, 说明力学模型比较可靠。

根据相似性原理中的弗劳德相似准则, 流速比例系数  $V_m/V_p = \lambda^{1/2} = 1/10$  ( $V_m$  表示物理模型地下水位降速,  $V_p$  表示地质原型地下水位降速), 即地质原型的地下水位降速是物理模型的 10 倍, 可以得到地质原型的临界水位降速。单层阻水型盖层发生塌陷的临界水位降速  $V_{透}$  为  $1.13 \times 10^{-6} m/s$  ( $0.98 m/d$ ), 当马龙区通泉镇地下水位降速大于  $1.13 \times 10^{-6} m/s$  ( $0.98 m/d$ ) 时, 区内单层阻水型盖层发生塌陷。

## 4 马龙区单层阻水型岩溶塌陷致塌机理

### 4.1 岩溶塌陷发育过程

物理模型试验结果显示, 地下水位下降会在溶洞中形成负压带, 当地下水位降速达到或超过临界降速时, 就会在溶洞中产生足够大的真空压强, 由此引发的真空吸蚀力作用在盖层土体上, 盖层土体的抗剪强度不足以抵抗盖层土体自身重力、真空吸蚀力等向下的致塌力, 盖层失稳塌陷。

塌陷的发生并非渐进性发展。根据工况 3(图 13)的岩溶通道中心处( $X=0$ )盖层土体表面形变量

时变曲线以及塌陷过程中溶洞内的真空压强变化特征可将单层阻水型岩溶塌陷的演变过程分为 4 个阶段:

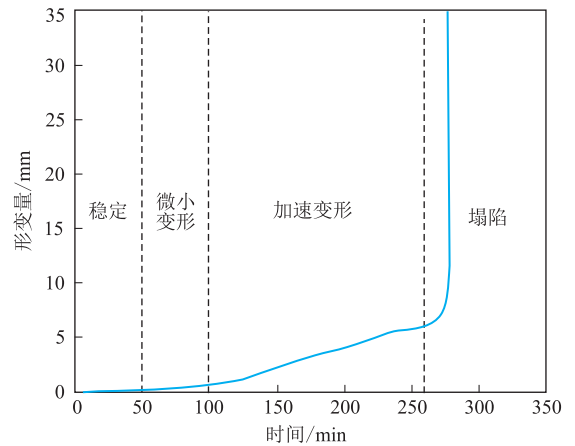


图 13 岩溶通道中心( $X=0$ )盖层土体表面形变时变曲线

(1) 盖层稳定阶段: 该阶段盖层土体的形变量不大。在这一阶段, 溶洞内的真空压强刚刚产生, 真空压强较小, 但增长迅速, 产生的真空吸蚀力较小, 对盖层土体的影响较小, 盖层处于稳定状态。

(2) 微小变形阶段: 该阶段盖层土体开始发生微小形变。在这一阶段, 随着地下水位的持续下降, 溶洞内的真空压强也持续增加, 盖层土体在真空吸蚀力的作用下开始发生微小形变。

(3) 加速变形阶段: 该阶段盖层土体加速变形。

在这一阶段,溶洞内的真空压强仍在增加,但由于外界大气透过盖层中的裂缝和土体中的微小孔隙向溶洞中补给,增长速率有所减缓,盖层土体在真空吸蚀的作用下不断地掉落进溶洞,盖层土体的形变量也因此增加。

(4) 盖层塌陷阶段:该阶段盖层土体形变量陡崖式增加。在这一阶段,溶洞内的真空压强仍因地下水位下降在不断增加,当溶洞内的真空压强足够大时,盖层土体的抗剪强度不足以抵抗自身重力、真空吸蚀力等向下的致塌力作用,盖层结构瞬间破坏,土体在极短的时间内掉落,形成塌陷。此时,溶洞内的真空压强达到峰值,在塌陷瞬间,溶洞与外界大气连通,洞内的真空压强立刻消失。

#### 4.2 岩溶塌陷致塌机理

通过物理模型试验和力学模型计算分析可知,盖层土体的密度、抗剪强度、覆盖层厚度、溶洞直径等都影响着盖层稳定性,研究区地下水位降速是诱发区内单层结构覆盖型岩溶塌陷的最主要因素。一定厚度的覆盖层为岩溶塌陷提供了物质源,加之区内地下水活动剧烈,具备发生岩溶塌陷的条件。

塌陷与否实质上取决于致塌力与抗塌力之间的关系。受力分析认为,作用于盖层上的致塌力主要包括土体自身重力和因地下水位下降所产生真空吸蚀力。物理模型试验和力学模型计算均表明,真空吸蚀作用将在单层阻水型盖层地面塌陷过程中起主导作用。

地下水下降会在溶洞中水位上方造成负压带,在溶腔内形成了真空吸蚀力。其大小与地下水位降速密切相关,地下水位降速越大,真空吸蚀力也就越大。当地下水位下降速率相对较小时,溶洞中的真空吸蚀力会随着水位持续下降而不断增大,但是由于外界大气通过盖层中的裂缝和土体中的微小孔隙向溶洞中补给,溶洞中真空吸蚀力增长速率减缓。当大气补给速率与溶洞中的真空吸蚀力增长速率相持达到一种平衡状态时,溶洞中的真空吸蚀力便趋于稳定。此时作用在盖层土体上的致塌力并未超过盖层土体的自身抵抗破坏的能力,盖层土体处于相对稳定的状态,仅发生微小形变,但不会整体塌陷。若地下水位降速足够大,溶洞中产生了足够大的真空吸蚀力,此时盖层土体自身的抗剪强度不足以抵抗真空吸蚀力,盖层表面形变量急剧增加,盖层发生破坏,形成塌陷现象。

据力学模型分析计算可知,当地下水位降速大于  $1.13 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  ( $0.98 \text{ m/d}$ ) 时,产生足够大的真空吸蚀力可导致此类单层阻水型盖层塌陷。

## 5 结论

本研究在地质环境条件和塌陷结构特征的认识基础上,通过物理模型试验和力学模型计算分析,针对研究区单层阻水型岩溶塌陷的致塌机理进行了探究。总体获得如下认识:

(1) 曲靖市马龙区有超过 1/3 的塌陷体盖层结构为阻水层,地下水位下降导致在相对封闭的溶腔中产生一定的真空吸蚀力,地下水位快速下降形成较大真空吸蚀力短时间内可触发塌陷。

(2) 论文采用极限平衡理论对阻水盖层进行受力分析,提出了考虑盖层自重力、真空吸蚀力、侧壁摩阻力等的塌陷判别模型。在此基础上,采用物理模拟试验确定了溶腔真空压强与地下水位降速的关系。结合塌陷判别模型,试验结果显示,研究区单层阻水型盖层塌陷的临界地下水位降速约为  $1.13 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  ( $0.98 \text{ m/d}$ ),认为地下水位降速超过该临界值时,单层阻水型盖层可触发塌陷。

#### 参考文献

- [1] Augarde C E, Lyamin A V, Sloan S W. Prediction of undrained sinkhole collapse [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2003, 129(3): 197-205.
- [2] 袁道先. 新形势下我国岩溶研究面临的机遇和挑战[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(4): 4-6.
- [3] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 101-111.
- [4] F Gutiérrez, M Parise, J De Waele, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 61-88.
- [5] Jiang X Z, Lei M T, Gao Y L. Potential Karst Collapse Assessment Along a Bridge Foundation of High-Speed Rail, Anshan, China [J]. *ENGINEERING GEOLOGY FOR SOCIETY AND TERRITORY*, 2015: 539-543.
- [6] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(3): 411-417.
- [7] 徐卫国, 赵桂荣. 试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J]. *地质评论*, 1981, 27(2): 174-183.
- [8] 项式均, 康彦仁, 刘志云, 等. 长江流域的岩溶塌陷[J]. *中国岩溶*, 1986, 5(4): 23-40.
- [9] 康彦仁. 岩溶塌陷的形成机制[J]. *广西地质*, 1989, 2(2): 83-90.
- [10] 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.
- [11] 吴亚楠, 杨云涛, 焦玉国, 等. 山东省岩溶塌陷发育特征及诱因分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 128-138, 148.
- [12] 程星. 岩溶塌陷机理及其预测与评价研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006.

- [13] 唐万春,许模,于贺艳.武广客运专线英德段岩溶塌陷发育规律研究[J].地质与勘探,2011,47(4):699-704.
- [14] A Klimchouk, V. Andreejchuk. Karst breakdown mechanisms from observations in the gypsum caves of the Western Ukraine; implications for subsidence hazard assessment [J]. Environ Geology, 2005, 48(3): 336-359.
- [15] 李海涛,陈邦松,杨雪,等.岩溶塌陷监测内容及方法概述[J].工程地质学报,2015,23(1):126-134.
- [16] Dogan U, Yilmaz M. Natural and induced sinkholes of the Obruk Plateau and Karapinar-Hotamis Plain, Turkey. [J]. Asian Earth sci., 2011, 40(2): 496-508.
- [17] Xianxuan Xiao, Zhaofeng Li, Guojun Cai, et al. Effects of declining water levels on water-air interactions in cover collapse sinkhole[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 2545-2556.
- [18] 赵博超,朱蓓,王弘元,等.浅谈岩溶塌陷的影响因素与模型研究[J].中国岩溶,2015,34(5):515-521.
- [19] 程星,黄润秋.岩溶塌陷的地质概化模型[J].水文地质工程地质,2002,29(6):30-34.
- [20] 刘之葵,梁金城,朱寿增,等.岩溶地中塌陷土层应力和变形的计算分析[J].勘察科学技术,2003,(3):10-13.
- [21] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等.山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J].中国岩溶,2015,34(5):495-506.
- [22] 黄敬军,武鑫,缪世贤,等.江苏徐州新生街岩溶塌陷形成条件及与岩溶水水位变化的关系探讨[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):125-129,136.
- [23] 陈标典,李喜,熊启华,等.武汉纸坊-庙山老黏土区岩溶地面塌陷形成演化与检测[J].中国岩溶,2023,42(2):361-369.
- [24] 罗小杰,罗程.岩溶地面塌陷三机理论及其应用[J].中国岩溶,2021,40(2):171-188.
- [25] 雷明堂,蒋小珍,李瑜.岩溶塌陷模型试验——以武昌为例[J].地质灾害与环境保护,1993,4(2):39-44.
- [26] 雷明堂.唐山市岩溶塌陷模型试验研究[J].中国地质灾害与防治学报,1997,8(S1):179-186.
- [27] 刘秀敏,陈从新,沈强,等.覆盖型岩溶塌陷的空间预测与评价[J].岩土力学,2011,32(9):2785-2790.
- [28] Xiao X X, Xu, Ding Q Z, et al. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes[J]. Environmental Earth Science, 2018, 77(3): 64.
- [29] 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(工学报版),2021,54(2):239-242.
- [30] 贺可强,王滨,万继涛.枣庄岩溶塌陷形成机理与致塌模型的研究[J].岩土力学,2002,23(5):564-569.
- [31] 王滨,李治广,董昕,等.岩溶塌陷的致塌力学模型研究——以泰安市东羊娄岩溶塌陷为例[J].自然灾害学报,2011,20(4):119-125.
- [32] 武鑫,王艺霖,黄敬军,等.江苏徐州地区岩溶塌陷致塌力学模型及水位控制红线[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(2):67-77.
- [33] 熊启华,高旭,涂婧,等.负压作用下土洞型岩溶塌陷机理及力学模型研究[J].人民长江,2022,53(9):163-168,180.
- [34] 左东启.模型试验的理论和方法[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [35] 李炜,徐孝平.水力学[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,2000.

作者简介: 朱凯(1976—),男,高级工程师,研究方向:水利水电工程。E-mail:zk12345678901207@163.com