

李京天, 朱凯, 肖先焯, 等. 水位下降诱发覆盖型岩溶塌陷发育机理[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 406-420.

DOI: 10.11932/karst2024y010

水位下降诱发覆盖型岩溶塌陷发育机理

李京天¹, 朱凯², 肖先焯¹, 尹艳², 刘皓³, 许模¹, 何志攀³

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059; 2. 曲靖市车马碧水库工程建设管理局, 云南曲靖 655099; 3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650041)

摘要: 岩溶塌陷是岩溶区主要的地质灾害类型, 具有突发性和隐蔽性的特征, 给当地人们的生命财产安全造成威胁。文章以曲靖市马龙区东侧岩溶塌陷为研究对象, 以多元结构盖层的地面塌陷为例, 在室内构建了与原型相符的地质物理模型, 开展两种典型工况下的地下水位下降触发岩溶塌陷试验。基于试验数据分析, 提出此类型盖层的致塌机理, 并分析透—阻—透型塌陷变形演化特征。研究表明: (1) 地下水位下降导致盖层和溶洞中均出现负压带, 盖层内的孔隙水压力和溶洞中的真空压强会随着排水波动增长至峰值, 地下水位降速越大, 压强的增长速率和峰值就越大; (2) 根据压强和盖层形变量随时间的演化特征, 可将塌陷演化过程分为土洞发育阶段、土洞扩张阶段和盖层失稳塌陷3个阶段; (3) 马龙区的水位降速达到 $0.1 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($1.44 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$) 时, 所产生的真空压强能提供足够大的真空吸蚀力, 联合渗透压力可导致覆盖层塌陷。研究结果可为马龙区岩溶塌陷灾害的防治减灾及其塌陷预警预报提供参考。

关键词: 岩溶塌陷; 模型试验; 多元结构; 地下水位下降; 致塌机理

创新点: 通过物理模型模拟透—阻—透型岩溶地面塌陷演化过程, 揭露塌陷过程中压强、临界地下水位降速等变化特征, 为岩溶塌陷防治预警提供数据参考。

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2024) 02-0406-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶塌陷是岩溶区常见的地质灾害^[1-4]。近年来, 随着社会、经济的不断发展, 城市化进程加快, 工农业生产和人民生活用水量的增加, 人类活动和工程建设越来越频繁, 对环境的干扰和破坏越来越严重, 引起的岩溶塌陷日益增多^[5-7]。作为岩溶区主要地质灾害, 岩溶塌陷灾害不仅引起水土流失等环境问题, 还威胁到人类生命财产安全^[8-11]。

许多学者运用试验模拟^[12]、数值模拟^[13]、数学理论^[14]、风险性分区^[15]等技术方法对其形成条件、成

因机理、诱发因素、结构特征等做出了大量的探索和研究^[16-25]。有关成因可分为三类: 潜蚀论^[26]、真空吸蚀论^[27]以及两者的复合型^[28-29]。

传统的岩溶塌陷成因及其影响因素研究大多以岩溶塌陷的最终状态为研究对象, 由于岩溶塌陷具有突发性、隐蔽性, 想要了解岩溶塌陷过程较为困难, 对岩溶塌陷的形成机理缺乏全面、深入的认识。岩溶塌陷室内物理模拟试验可以在一定条件下控制或模拟研究对象, 再现塌陷过程, 可直接探索其现象、性质、规律, 并且能保证试验结果与实际情况的相对一致性, 是研究岩溶塌陷成因机

资助项目: 四川省科技计划项目—应用基础项目(2021YJ0320)

第一作者简介: 李京天(1999—), 男, 在读硕士研究生, 地质资源与地质工程专业。E-mail: lj1999a3@163.com。

通信作者: 肖先焯(1985—), 男, 副教授, 主要从事水文地质与工程地质相关教学与科研工作。E-mail: sassoon1123@126.com。

收稿日期: 2022-11-18

理的有效方法之一^[30-31]。雷明堂等^[32]通过大比例的物理模型试验,证明了无论何种地质结构的土层,岩溶水位下降都是发生塌陷的重要因素之一,并得到了对于黏性土层和砂性土层破坏时的临界水位下降速率以及单一结构和二元结构的黏性土覆盖层发生破坏的临界坡降。H. Mole^[33]通过试验分析了土洞规模对岩溶塌陷发生的影响,为评价土体抗塌能力提供了有力依据。蒋小珍等^[34]通过分析广西桂林阳朔高速公路雁山段和西气东输二线工程广西贵港段单层土体结构的岩溶土洞,建立室内试验模型进行崩解试验,得出单层土体结构的岩溶土洞是从基岩层逐渐往地表发育的结论。罗小杰等^[35]在砂性土在塌陷中的运动学响应特征及其周围土体变形表现的基础上,建立沙漏型地面塌陷的地质模型进而概化出物理模型,从物质守恒定律推导出数学表达式,反映了沙漏型地面塌陷的基本规律。吴庆华等^[36]通过物理模型试验定量研究了岩溶塌陷过程,验证了砂土覆盖岩溶管道塌陷机理为“渗流液化论”的正确性。肖先焯^[37]依据盖层结构划分为单层透水型盖层、单层阻水型盖层、双层上透下阻型、双层上阻下透型,建立了相应的概念模型,提出了相关临界指标表达式及相关控制方程,揭示了这4种盖层的岩溶塌陷机理。

尽管有不少学者对岩溶塌陷的形成机理做出大量研究,取得了一系列的成果^[38-40],但由于岩溶塌陷突发性、隐蔽性、多因素性与不确定性等特点,至今尚未形成系统的、统一的岩溶塌陷理论^[41-42]。因此,为对现有岩溶塌陷研究理论体系进行补充,本文以研究区多元结构覆盖型岩溶塌陷为研究对象,通过

室内物理模型试验,监测覆盖层内孔隙水压力和溶洞中的真空压强以及覆盖层土体的位移量变化,研究多元结构覆盖型土层的致塌机理,以期对岩溶塌陷的防治减灾提供参考。

1 研究区岩溶塌陷发育模式

研究区位于云南省曲靖市马龙区,地处云贵高原的滇东北丘陵区,滇中高原与黔西高原分界处。

截至2021年7月,区内已经出现多处地面塌陷。经实际走访调查,发现区内主要有杨官田村塌陷区、缪家田龙潭水库库尾塌陷区和让田社区3个塌陷区,共发现地面塌陷39处(野外编号TX01—TX39),岩溶塌陷多集中分布于岩溶地下水降落漏斗及其影响范围内,其中多元结构的覆盖型岩溶塌陷(图1)数量最多,共有19处,占区内地面塌陷的一半。区内岩溶塌陷主要沿河流分布,集中分布在河流两岸50m的范围内。可见,地下水活动对区内岩溶塌陷的发生有着重要的影响。

研究区地层出露主要寒武系、志留系与第四系(图2)。区内第四系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^{edl})。根据钻孔和物探资料,区内覆盖层厚0.5~20m,覆盖层土体结构大致分为三层:①黄色砂质黏土,稍湿,硬塑,干强度较高,韧性一般,混少量强风化泥灰岩碎石;②灰黑色黏土,可塑,湿,干强度高,韧性一般,混少量中风化泥灰岩碎石;③浅黄色砂土,稍湿,硬塑,干强度高,混少量强风化泥灰岩碎石。

区内广泛分布可溶岩,特别是输水隧洞两侧,出



图1 研究区内多元结构覆盖型岩溶塌陷

a. 杨官田村塌陷区 TX12 b. 缪家田龙潭水库库尾塌陷区 TX22 c. 让田社区塌陷区 TX27 1. 白色虚线代表土层分界线

Fig. 1 Multi-structure covered karst collapse in the study area

a. the subsidence area TX12 of Yangguantian village; b. the subsidence area TX22 of tail of Longtan reservoir in Miaojitian; c. the subsidence area TX27 of Rangtian residential compound 1. The white dotted line represents the boundary of the soil layer.

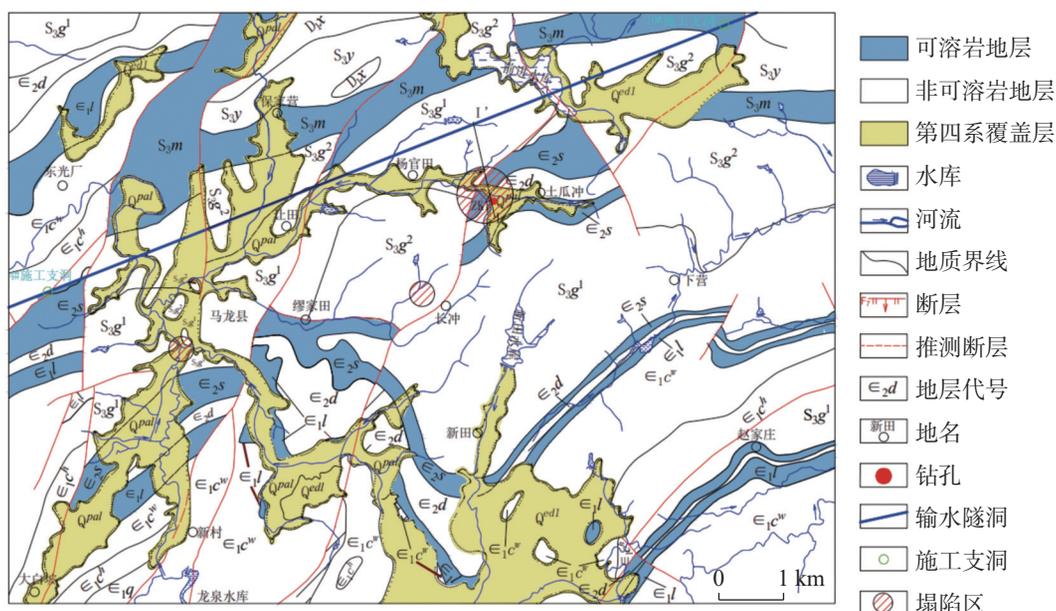


图2 研究区水文地质略图

Fig. 2 Hydrogeology of the study area

露的碳酸盐岩地层有志留系上统庙高组(S_3m)、寒武系中统双龙潭组(C_2s)、下统龙王庙组(C_1l)，地层岩性多为灰岩、白云岩及白云质灰岩，夹薄层泥灰岩、泥岩、砂岩、粉砂岩及页岩，碳酸盐岩以夹层形式分布在这些地层当中。现场调查发现，研究区碳酸盐岩层组地表岩溶较发育，岩溶管道受地质构造和岩性的控制，其走向多与区域中构造线方向一致，地表水和岩溶管道直接连通。管道多沿轴向顺层发育，是区域地下水一个重要的排泄出口。根据钻孔和物探资料显示，寒武系下统龙王庙组(C_1l)、志留系上统庙高组(S_3m)地层存在多处半填充溶洞，主要成分为细砂、黏土，埋深约20~60 m，密闭性较好。区内主要存在岩溶水、裂隙水和孔隙水3种地下水类型，岩溶水是区内最主要的地下水类型，分布较广。

研究区内岩溶发育，岩溶管道、地下溶洞等为地面塌陷提供了存储场所及运移通道，同时也是地下

水强烈运动的良好场所，并且有足够厚度的覆盖层为岩溶塌陷提供了物质基础(图3a)。2017年曲靖市马龙区车马碧水库输水隧洞工程开始施工，导致区域内地下水水位下降(图3b)。由于盖层和溶洞中的渗透性差异会出现双水位的现象(图3c)，地下水水位下降导致盖层以下的岩溶地下空间的水动力场复杂，也使得内部各不同部位的水压变化，能量重分布等，由于盖层具有一定封闭性，地下水水位以上的岩溶地下空间中的气压也随之变化，这导致盖层承受了与水位未变动时不一样的外界力，从而可能出现变形破坏，造成塌陷(图3d)。

2 岩溶塌陷发育模拟试验

2.1 试验模型

通过野外调查，对塌陷区的地质背景有了初步

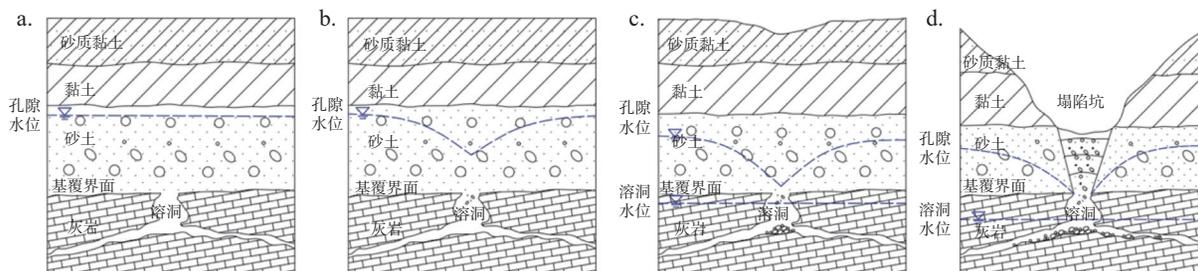


图3 研究区岩溶塌陷形成模式图

Fig. 3 Formation model of karst collapses in the study area

的了解,但塌陷的致灾机理和过程尚未厘清。通过物理模型试验,可再现塌陷过程,并可以对塌陷过程中的各种物理量进行实时监测,量化岩溶塌陷过程,从而对岩溶塌陷的机理有更深刻的理解。

本次试验选取杨官村塌陷区 TX04 塌陷坑作为地质原型。TX04 塌陷坑紧邻土瓜冲溪沟,溪沟两岸覆盖层土体向下陷落形成 TX04 塌陷坑。平面形态大致呈椭圆形,长轴约 35 m,短轴约 31 m,塌陷坑最深处约有 5 m。坑底和坑壁均可见大量裂缝,缝宽 1~10 mm。塌陷坑内南侧有地表水流入,流量约 $2\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

塌陷坑的剖面形态大致呈漏斗形,剖面结构为多元结构。根据钻孔揭示,周围覆盖层最上层为①黄褐色砂质黏土,厚度约为 2.5 m;中间土层为②灰黑色黏土,厚度约为 2 m;最底层为③浅黄色砂土,厚度约为 3.5 m;覆盖层中混有少量强风化泥灰岩碎石,下伏寒武系双龙潭组(C_2s)白云岩,在地表下约 30 m 处有半填充溶洞,填充物主要成分为细砂、黏土,高约 2 m。

本文以云南省曲靖市马龙区杨官田村塌陷区的覆盖型透—阻—透多元结构岩溶塌陷为地质原型建立物理模型,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,根据相似性原理^[43-44],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。本次试验按照相似比 $\lambda=100$ 将地质原型等比例缩小 100 倍建立模型。

2.2 试验装置

本试验的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和供排水系统组成(图 4a)。地质体模拟箱长宽高为 $1\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.9\text{ m}$,箱体主体框架采用 5 cm 的角钢焊接而成,箱体上部开口,其他五个面均用 2 cm 厚的透明有机玻璃材料填充。箱体上部为可填充土样模拟盖层的盖层模拟箱,中部水平有机玻璃板,中央留有直径 $\phi=10\text{ cm}$ 的圆孔,用于模拟岩溶通道部分,水平有机玻璃板以下为 $1\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的箱体用于模拟溶洞,并在该箱体的底部中央设置有 5 cm 的开口连接排水阀,用于试验结束时排出装置里的水。在地质体模拟箱的最底部设置 $1\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的储水箱,用于储存试验用水或排水。在试验装置的主体两侧各安装一个稳定溢流箱,通过软管将稳定溢流箱分别和储水箱中的水泵以及溶洞模拟箱相连。储水箱中的水泵在试验时可向试验装置供水,稳定溢流箱通过可以自由旋转的升降系统调节稳定溢流箱的水位,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。物理模型试验装置实物见图 4b。

2.3 试验方法

物理模拟试验的盖层结构与野外地质原型的盖层结构应保持一致,用来铺设盖层的土样也应与野外原型的盖层土体相似,从上至下①第一层为砂质黏土,②第二层为黏土,③第三层为砂土。在盖层铺

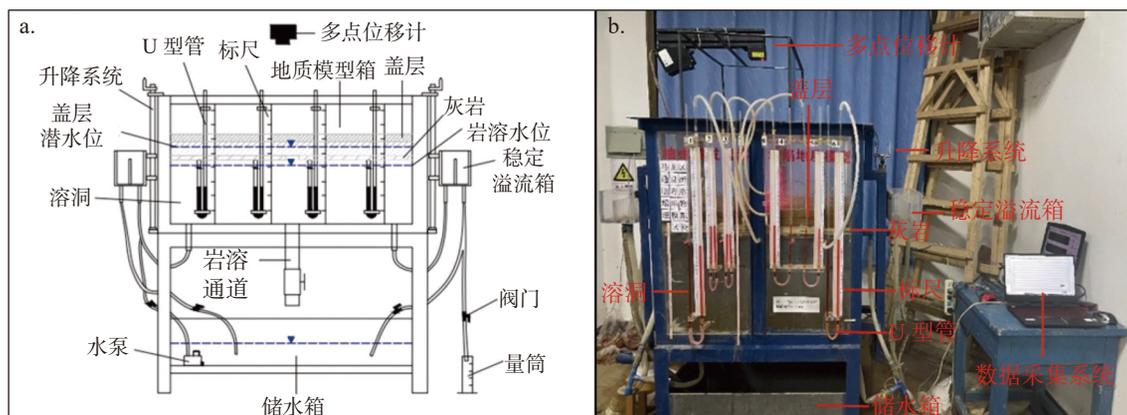


图 4 模型试验装置图

a.模型结构示意图 b.物理模型试验装置实物图

Fig. 4 Diagram of model experiment device

a. schematic diagram of model structure; b. diagram of physical model experiment device

表 1 地质原型土样物理力学性质参数

Table 1 Property parameters for physical mechanics of geological prototype soil samples

序号	土样	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	砂土比/%	含水率/%	粘聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
1	砂质黏土	1.48	33	8.8	29.8	27.8
2	黏土	1.63	20	7.5	34.4	25.2
3	砂土	1.41	50	11.2	26.9	26.0

设时,要按照原型土样的含水率和砂土比进行配土,试验土样以成都周边的黏土为骨料与粉砂加水混合搅拌配置而成。为尽量保证铺设盖层的土样与野外原型的盖层土体相似,通过在成都周边的黏土中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 1)一致。首先用烘干法测得成都附近黏土的含水率 w_0 以及地质原型盖层土体的含水率 w_1 ,再用筛分法大致得到其砂土比 cs_0 和地质原型盖层土体的砂土比 cs_1 ,然后根据二者的天然含水率和砂土比进行计算所需水的质量和砂的质量,最后将砂和黏土混合并加水不断地搅拌,使之混合均匀。

本次试验主要监测盖层土体的位移量、盖层中的孔隙水压力以及溶洞中的真空压强。

在模型侧壁同一高度上等间距布置了 6 排带有刻度的 U 型测压管,测压管与溶洞真空空间相连,用来监测溶洞内的真空压强。U 型管内装有冷却后的蒸馏水(忽略温度对密度的影响,水的密度 $\rho=1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,加入少量红墨水以便于观察液面高差),通过观察 U 型管液位变化可知溶洞内部气压变化,当溶洞模拟箱内气压与大气压相同时,U 型管两侧测压管液面

保持同一高度,而当洞内气压与大气压不同时,U 型管两侧液面管液面就会存在高差,U 型管后贴有标尺,用来测量 U 型管两侧液面管的高差,这个高差即为洞内的表面相对压强,也直接反映了作用于盖层的气体压力,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 mm,监测频率为 10 次/s。

在覆盖层中布置 3 根孔隙水压力传感器(图 5a)用于监测盖层中孔隙水位变动而产生的压强变化。3 根传感器以相同间距布置在距玻璃板中央圆孔 2 cm 处,相邻的 2 个传感器成 60° 夹角(图 5b)。据现场调查和历史地质资料推断,发生塌陷前地下水位处于覆盖层中。为查明孔隙水压力在塌陷过程中的作用,传感器探头插入盖层的潜水中,即盖层底层砂土层中,距盖层土体表面深度约 6.5 cm。传感器量程为 $-100\sim 20\text{ kPa}$,精度 1 Pa,监测频率为 1 次/s。

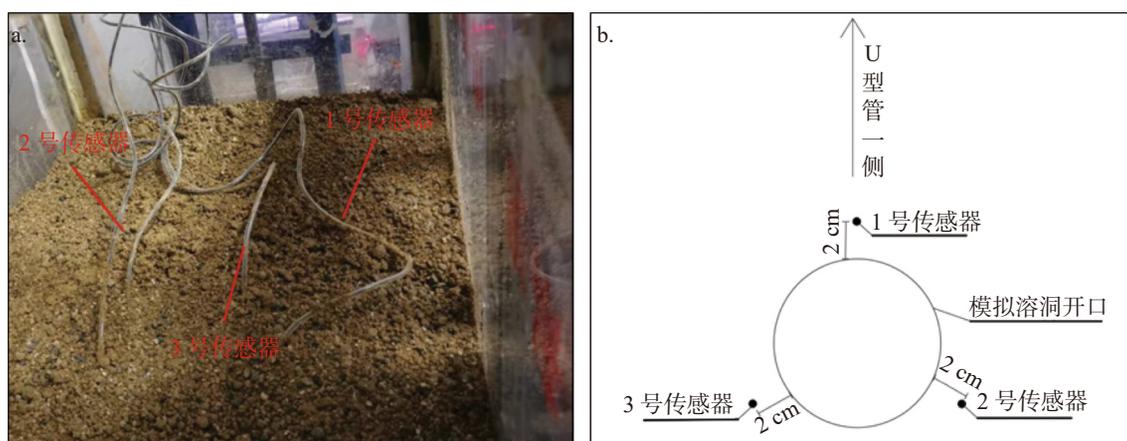


图 5 孔隙水压力监测系统

a.孔隙水压力传感器 b.孔隙水压力传感器布置平面示意图

Fig. 5 Monitoring system of pore water pressure

a. sensors of pore water pressure; b. layout of sensors for pore water pressure

表 2 岩溶塌陷物理模型试验工况设计

Table 2 Physical model experiment schemes of karst collapses

工况	潜水初始水位/cm (溶洞顶板=0)	潜水降速	岩溶水初始水位/cm (溶洞底板=0)	岩溶水降速 /cm·min ⁻¹	地层结构	盖层土体物理参数		
						含水率/%	砂土比	厚度/cm
1	3.5	自由降落	48	0.007	上层砂质黏土层	8.8	1/3	2.5
					中间黏土层	7.5	1/5	2.0
2	3.5		48	0.010	下层砂土层	11.2	1/2	3.5

注：物理模型试验岩溶水位降速由推测的现场岩溶水位降速依相似比等比例缩小得出。

Note: The rate of karst water drawdown of the physical model experiment is obtained by reducing the rate of inferred field karst water drawdown in equal proportion according to the similarity ratio.

本文主要研究不同地下水下降速率对岩溶塌陷的影响，试验方案见表 2。根据钻孔揭示，近年来研究区地下水位从覆盖层中下降到下伏地层基岩中，地下水位在下降过程中由于盖层和溶洞渗透性差异，会出现盖层和溶洞中同时存在水位的现象。基于此，试验设计为双水位，即在覆盖层内和溶洞内都存在地下水。设计试验方案如下：

(1) 试验前期准备，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。再按照一定含水率、含砂

量配置好土样，以杨官田村 TX04 塌陷坑为地质原型，将不同含水率、砂土比的土样分三层铺设于地质体模拟箱内，保证物理模型的盖层结构与地质原型结构一致，盖层的厚度按照相似比 $\lambda=100$ 将覆盖层厚度等比例缩小。从上到下①第一层为砂质黏土层，含砂量为 33%，含水率为 8.8%，铺设厚度为 2.5 cm；②第二层为黏土层，含砂量为 20%，含水率为 7.5%，铺设厚度为 2.0 cm；③第三层为砂土层，含砂量为 50%，含水率为 11.2%，铺设厚度为 3.5 cm(图 6a)。最后向盖层中注水，使盖层内水位位于第二层和第三层的交界处，即距覆盖层土体表面 4.5 cm 处。铺设好的盖层如图 6b 所示。

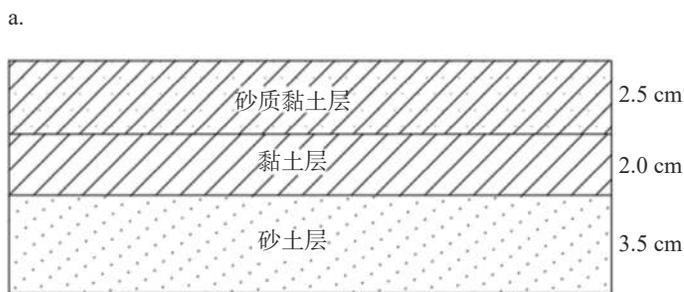


图 6 物理模型盖层

(a. 盖层结构概化图; b. 物理模型盖层)

Fig. 6 Overburden layer of physical model

(a. generalization of overburden structure; b. overburden layer of physical model)

(3) 打开仪器开始采集数据。将激光位移计和孔隙水压力计通过线缆与 PC 端口对接，对监测系统进行调校，监测采样频率，在调校阶段，盖层和孔隙水位会在重力作用下产生微小变化，当盖层和孔隙水位稳定后即可开始试验。

(4) 排水。使盖层中的地下水自由降落，同时打开溶洞模拟箱下的水阀排水，使溶洞中的地下水下降，通过旋转水阀控制水位下降速率。据现

场资料(图 7)，距离地质原型 TX04 塌陷最近的 7 号施工支洞于 2018 年 7 月开始抽排水，随着施工的进行，排水量不断增加，导致地下水位逐渐下降，截至 2021 年 5 月共抽排地下水约 900 万 m³。受岩溶地下水降落漏斗的影响，于 2019 年底，区内开始陆续发生塌陷。结合施工支洞的排水流量以及观测井的水位数据，推测区内地下水位下降速率最大时可达 1.5 m·d⁻¹(0.104 cm·min⁻¹，这里取 0.1 cm·min⁻¹)，

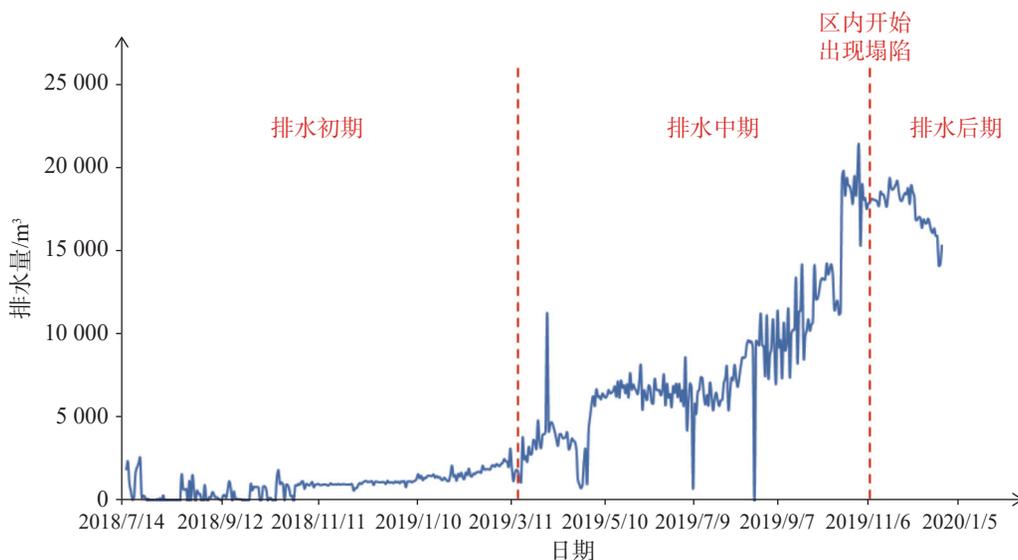


图7 施工前期排水量变化图

Fig. 7 Diagram of discharge changes in pre-construction period

根据弗劳德相似准则, 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 $1/10$ 。因此, 设定地下水位降速为 $0.01 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 为一种工况。由于地下水位降速由水阀控制, 使地下水位降速至 $0.007 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, 因此, 将这个地下水位降速设定为一种工况作为对比。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。

3 试验结果及分析

通过调节模型底部的阀门来控制溶洞中的排水量和排水速率, 孔隙水和岩溶水同时分别在盖层的弱透水层中和溶洞中下降。工况 1 的岩溶水位降速为 $0.007 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, 试验共进行了 900 min, 在工况 1 的岩溶水位降速条件下, 试验没有发生塌陷。工况 2 的岩溶水位降速为 $0.010 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$, 试验共进行了 250 min, 在工况 2 的岩溶水位降速条件下, 试验在排水后 142 min 发生了塌陷。

3.1 压强变化分析

根据孔隙水压力时变曲线(图 8)和真空压强时

变曲线(图 9)可知, 在工况 2 发生塌陷前, 2 种工况下的孔隙水压力和溶洞内的真空压强变化特征大致相同。由于在开始试验前就向盖层注水, 因此在排水前盖层中就存在一定的孔隙水压力。盖层中的孔隙水压力以及溶洞内的真空压强在地下水位下降的过程中总体上均呈波浪形波动并逐渐增大, 盖层中的孔隙水压力波动尤为明显, 溶洞内的真空压强则偶有微小波动。中间黏土层相对密闭、气密性较好, 大气难以补给到包气带空间和溶洞中, 造成了空气的滞后补给, 导致盖层中的孔隙水压力以及溶洞中的真空压强出现了这种波动。同时, 盖层中的地下水会流向岩溶通道补给到溶洞中, 由于土体的持水作用导致盖层中的潜水向溶洞的补给速率小于潜水在弱透水层中的渗透速率, 所以孔隙水压力变化曲线波动得更剧烈。在工况 2 的岩溶水位降速条件下, 盖层土体发生塌陷, 在此之后, 2 种工况下的孔隙水压力和溶洞内的真空压强变化特征出现较大差异。

根据盖层中的孔隙水压力以及溶洞内压强变化曲线的曲率可以将试验过程分为三个阶段:

(1) 第一阶段: 主要表现为孔隙水压力和溶洞内真空压强增加, 分别出现在工况 1 条件下排水 0~350 min 和工况 2 条件下排水 0~75 min。在地下水位开始下降后, 盖层孔隙中和溶洞内都立即产生了负压, 孔隙水压力和真空压强不断增加, 且增加速率较快。试验开始后, 盖层中的地下水在重力作用下通过岩溶通道向溶洞内渗透滴落, 水位下降, 包气带中的空

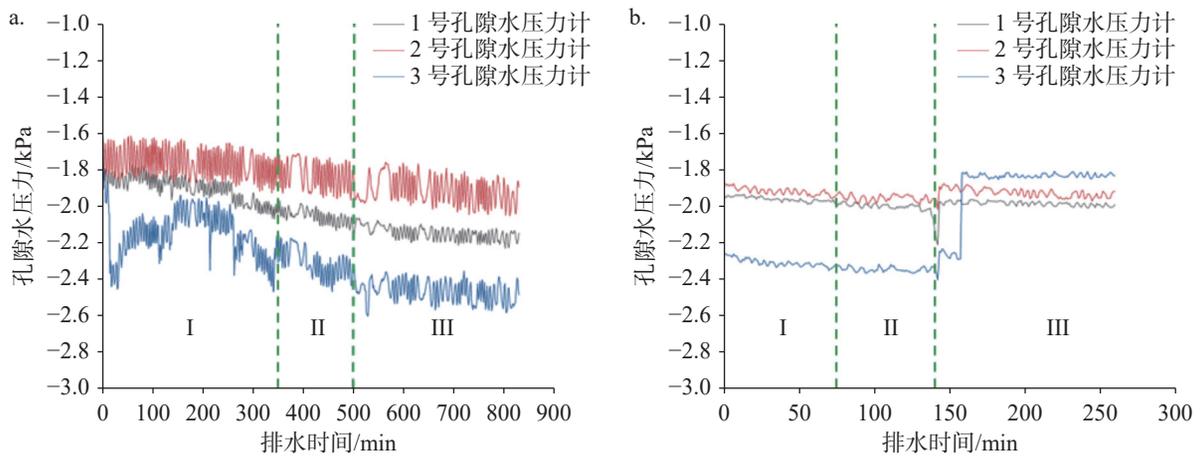


图 8 孔隙水压力时变曲线

a. 工况 1 b. 工况 2

Fig. 8 Time-varying curve of pore water pressure

a. working condition 1 b. working condition 2

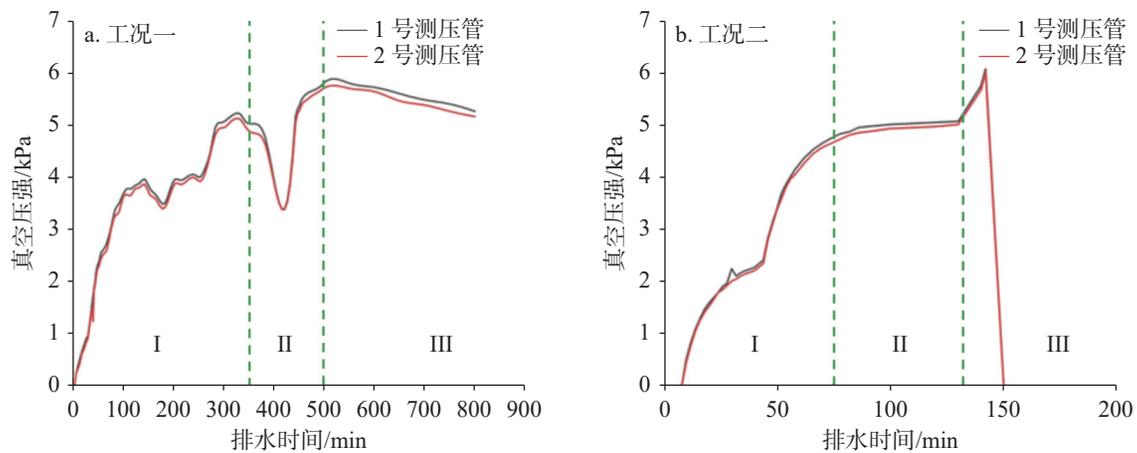


图 9 溶洞内真空压强时变曲线

a. 工况 1 b. 工况 2

Fig. 9 Time-varying curve of vacuum pressure in the karst cave

a. working condition 1 b. working condition 2

间体积增加。同时，溶洞的排水速率远大于从盖层中接受补给的速率，溶洞中的水位也持续下降，溶洞中的空间体积也在增加。外界的大气很难及时穿透中间相对封闭的、气密性较好的黏土层补给包气带空间和溶洞，这样，在潜水位以上、中间黏土层底板以下的包气带空间以及地下水位以上、溶洞顶板以下的空间里就产生了负压带。该阶段内由于地下水位持续下降，盖层中和溶洞内的负压带体积都不断增加，孔隙水压力和真空压强都随之增加，且增加速率较快。

(2)第二阶段：主要表现为孔隙水压力和溶洞内真空压强增加速率变缓，分别出现在工况 1 条件下排水 350~500 min 和工况 2 条件下 75~135 min。在

这一阶段工况 2 条件下盖层中的孔隙水压力和溶洞内的真空压强一直再以很小的速率缓慢上升；工况 1 条件下盖层中的孔隙水压力也在缓慢增加，但溶洞内的真空压强变化特征出现部分差异，溶洞内的真空压强迅速下降至 3.5 kPa 又迅速上升。这是由于部分土体松动掉落至溶洞内，对溶洞内的负压带空间造成扰动，使得真空压强出现这种变化。此时，在盖层中和溶洞中的负压带产生的真空吸蚀力作用在盖层上，盖层在地下水的冲刷盖和真空吸蚀的联合作用下，盖层土体开始发生微小形变。随着试验的进行，由于中间黏土层并非完全封闭，盖层土体发生微小形变，外界大气会穿越盖层进入到包气带空间和溶洞中水面以上的空间。因此，盖层中的孔隙水

压力和溶洞内真空压强的增加速率逐渐变缓。

(3)第三阶段:若没有发生塌陷,主要表现为孔隙水压力和溶洞内真空压强趋于稳定,出现在工况 1 条件下排水 550 min 后;若发生塌陷,主要表现为真空压强迅速消失,出现在工况 2 条件下排水 135 min 后。该阶段的孔隙水压力和真空压强变化特征在 2 种不同的工况下出现了较大差异。工况 1 盖层中的孔隙水压力随着排水时间,波动幅度和增长速率都逐渐减小,工况 1 的孔隙水压力最后在 -2.0 kPa 左右波动,3 处孔隙水压力虽略有不同,但相差不大。在试验开始后 500 min 左右时,测压管出现了最大液面差,此时 1 号测压管和 1 号测压管的最大液面差分别为 58 cm 和 57 cm,说明溶洞内的压强在此时达到了峰值,峰值压强为 5.75 kPa 在达到峰值后,真空压强随时间缓慢减小。工况 2 溶洞中的真空压强在该阶段以较快速率迅速增大,在试验开始 142 min 时,盖层中孔隙水压力和溶洞内的真空压强均达到最大值,塌陷发生。1~3 号水压力传感器的最低值分别为 -2.2123 kPa、 -2.0185 kPa、 -2.4042 kPa。此时岩溶通道至传感器埋置处的水力梯度达到最大,水头达到最小值,其中 3 号孔隙水压力计的孔隙水压力变化最大,说明此处的破坏最为严重。峰值过后,孔隙水压力迅速减小,最后趋于稳定在 -1.9 kPa 左右波动。同时,测压管的液面差也达到最大,1 号测压管和 2 号测压管的最大液面差分别为 60.8 cm 和 60.2 cm,说明此时溶洞内的真空压强在此时也到峰值,压强峰值为 6.05 kPa。峰值过后,由于塌陷发生,溶洞与外界大气联通,溶洞内的真空压强迅速消失恢复至大气压强。

通过对比工况 1(图 8a,图 9a)和工况 2(图 8b、图 9b)的孔隙水压力和真空压强变化特征可以发现:

(1)在工况 2 的较快的地下水位降速条件下,孔隙水压力和真空压强的增长速率和峰值均要大于工况 1。这说明地下水位降速越大,孔隙水压力和真空压强的增长速率和峰值也就越大。

(2)盖层在工况 1 较慢的地下水位降速条件下没有发生塌陷,而在工况 2 较快的地下水位降速条件下发生塌陷。这说明地下水位下降是岩溶塌陷的主要触发因素,当地下水位降速足够大时就会产生足够大的真空吸蚀力联合渗透压力导致盖层塌陷。

(3)在工况 1 和工况 2 不同的地下水位条件降速下,孔隙水压力大小相差不大,变化特征也仅在工况 2 塌陷前短时间内出现差异,在这前后的变化特征大致相同,而真空压强的峰值和变化特征则出现了较大差异。这说明在塌陷时真空吸蚀力起主导作用,工况 1 虽然没有发生塌陷,但是盖层表面也发生了微小形变说明孔隙水压力在塌陷的前期也对盖层的影响比较显著。

3.2 盖层位移量变化分析

由于试验中盖层内因孔隙水下降所产生的孔隙水压力较小,忽略孔隙水压力消散后盖层土体的固结沉降。根据试验过程中的盖层表面变化(图 10a,图 10b)可知,工况 1 试验前后表面并无明显变形。根据盖层表面位移量(图 11a)可知,工况 1 试验盖层表面产生微小形变,盖层最大位移量为 1.6 mm。这说明在因孔隙水位下降产生的渗透压力以及在盖层

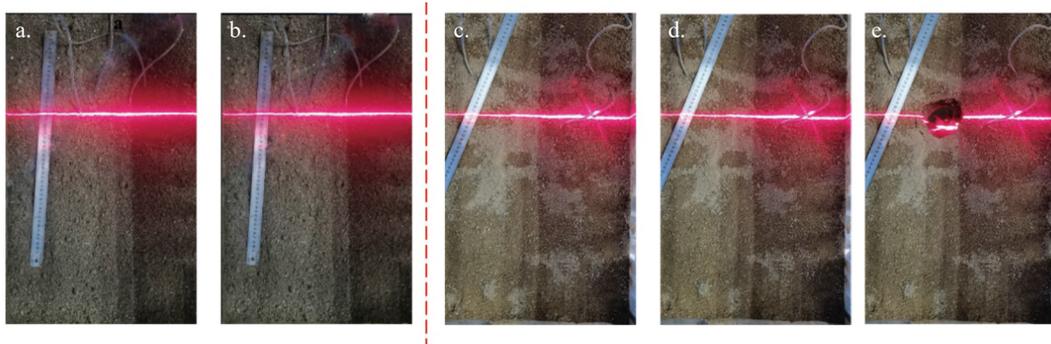


图 10 盖层表面变化情况

(a.工况 1 排水前; b.工况 1 排水后; c.工况 2 排水前; d.工况 2 排水 130 min; e.工况 2 排水 142 min)

Fig. 10 Change of overburden surface

(a. working condition 1 before discharge; b. working condition 1 after discharge; c. working condition 2 before discharge; d. working condition 2 after discharge for 130 minutes; e. working condition 2 after discharge for 142 minutes)

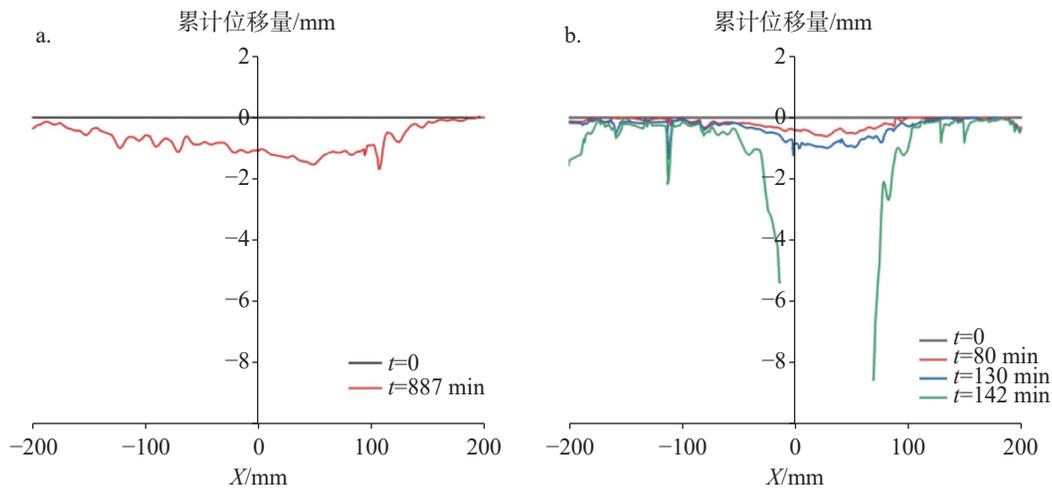


图 11 盖层表面累计位移量

(a.工况 1; b.工况 2)

Fig. 11 Cumulative displacement of overburden surface

(a. working condition 1; b. working condition 2)

中和溶洞中的负压带对土体的吸蚀作用下,盖层表面虽产生微小变形,但盖层自身强度足以保持稳定。

根据试验过程中的盖层表面变化(图 10c, 图 10d, 图 10e)可知,工况 2 试验在岩溶通道上方则形成了一平面形态近圆形的塌陷坑,周围可见裂缝。通过盖层表面位移量(图 11b)可知,工况 2 试验所形成的塌陷坑剖面形态大致呈漏斗状。工况 2 试验所形成的塌陷坑平面形态及剖面形态与杨官田村 TX04 塌陷坑地质原型相似。

通过对比工况 1(图 11a)和工况 2(图 11b)两种不同地下水位降速下的试验结果可以发现:

(1)工况 2 试验盖层表面形变在随着时间逐渐增加,最终形成了塌陷。形成的塌陷坑虽然位于岩溶通道的正上方,但是塌陷坑的中心和岩溶通道的中心并不重合。

(2)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。

(3)岩溶通道上方盖层土体的位移量最大,土体已经完全掉落。另外,在曲线上还能看到有多处下凹,这是塌陷坑周围裂缝的反映。两侧的土体也有一定程度的形变。

(4)通过对比不同时间的累计位移量曲线发现,岩溶塌陷发展不规律,岩溶通道上方形变发生最早,这是因为盖层内的水都流向岩溶通道,对此处土体

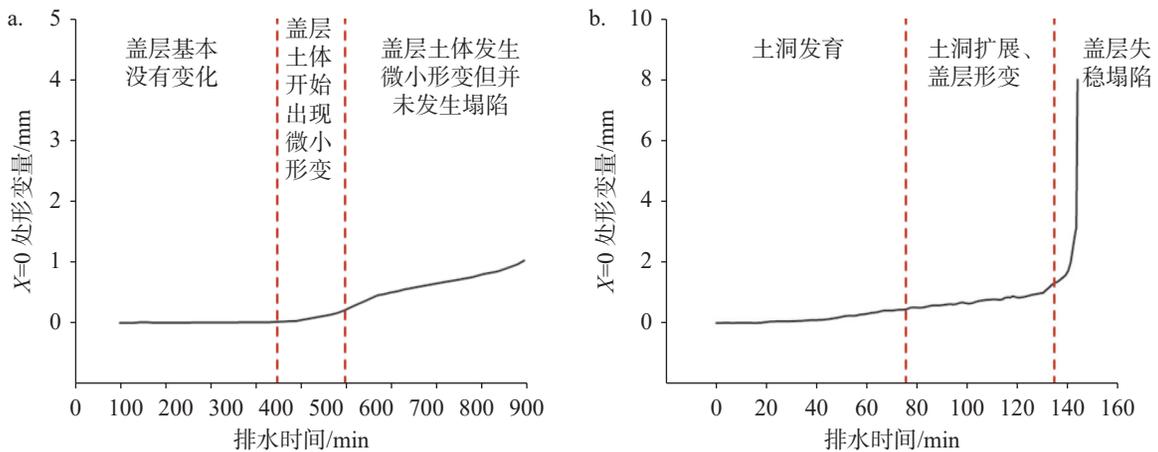
冲刷更强烈,并且直接受到溶洞内的真空吸蚀力,土体不断向下掉落,其他区域随着塌陷不断扩大也发生形变,有的地方还出现了裂缝。

4 岩溶塌陷发育过程及条件

4.1 发育过程分析

通过物理模拟试验发现,地下水位下降是研究区岩溶塌陷发生的直接原因。由于土层和溶洞的渗透性差异,地下水位在下降过程中会出现“双水位”的现象,即盖层和溶洞中同时存在地下水位。盖层中的地下水位下降,土层的水力坡度增加,地下水对土层的浮托作用消失,并且土层内的渗透压力会随之增大,带走土层中的细颗粒或岩溶填充物。在这一过程中,由于中间黏土层相对封闭,气密性较好,发挥了“阻气”的作用,下层砂土层中的地下水位下降在地下水面上、黏土层底板以下就会形成负压,表现为孔隙水压力。同时,溶洞中的地下水位下降,也会使盖层以下的溶洞内产生负压,对土体产生真空吸蚀作用。由此可以推断,对于马龙区内的覆盖型多元结构的岩溶塌陷在地下水位下降所导致真空吸蚀作用主导下产生的。

根据工况 1(图 12a)和工况 2(图 12b)的岩溶通道中心处($X=0$)地表形变量时变曲线以及塌陷过程中盖层中的孔隙水压力和溶洞内的真空压强变化可将覆盖型透-阻-透多元结构岩溶塌陷的演变过程分

图 12 岩溶通道中心($X=0$)形变量时变曲线

(a. 工况 1; b. 工况 2)

Fig. 12 Time-varying curve of the deformation quantity of karst channel center ($X=0$)

(a. working condition 1; b. working condition 2)

为三个阶段。

(1)土洞发育阶段: 该阶段盖层土体的形变量变化不大, 形变非常微小。盖层中的孔隙水位下降会使水对土体的浮托作用消失, 并且产生的渗透压力使岩溶通道上覆土体软化崩解, 随渗流沿着岩溶管道掉落, 形成土洞。在这一阶段, 盖层中的孔隙水压力和溶洞中的真空压强刚刚产生, 增加速率较快, 主要是孔隙水对盖层土体的冲刷和盖层内负压带中产生的孔隙水压力和真空吸蚀联合作用对盖层的稳定性产生影响, 但这种影响只是导致盖层中的潜水面以上的土层出现微小形变。

(2)土洞扩展阶段: 该阶段盖层土体的形变量开始缓慢地增加。随着盖层中因水位下降产生的渗透压力和孔隙水压力以及溶洞中的真空压强逐渐增加, 增加速率变缓, 土体在重力、渗透压力、真空吸蚀力联合作用下不断地被水流携带掉落进溶洞, 土洞随之扩大, 上覆土体也因此发生变形, 形变量逐渐增大。在这一阶段, 盖层中的孔隙水压力和溶洞中的真空压强还在逐渐增加, 但是增加速率变缓。

(3)失稳塌陷阶段: 该阶段盖层土体无法承受真空吸蚀力, 在极短时间内掉落, 形成塌陷, 盖层土体形变量陡崖式增加。当土洞发展到一定程度, 盖层的结构受到破坏, 盖层整体强度降低, 溶洞中的真空压强迅速增加直至上覆土体的抗剪强度不足以抵挡重力、孔隙水压力、真空吸蚀力等的作用, 此时盖层中的孔隙水压力和溶洞内的真空压强迅速增长达到峰值, 上覆土体失稳, 发生剪切破坏, 瞬间掉落, 最终

形成塌陷。在这一阶段中, 主要是溶洞内的真空吸蚀力对整个盖层的稳定性产生影响。溶洞内的真空压强先达到最大, 盖层土体无法承受真空吸蚀力, 发生塌陷, 盖层土体塌陷瞬间, 溶洞与外界大气连通, 洞内的真空压强立刻消失。

4.2 发育条件

以地下水位降速为自变量展开两组岩溶塌陷物理模拟试验, 对比两组试验的结果发现:

(1)当地下水位降速较小时($V < 0.01 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$)时, 盖层中的孔隙水压力和溶洞内真空压强都会受地下水位下降的影响而逐渐增加, 但随着排水时间的增加, 由于空气的滞后补给, 二者都逐渐减小并趋于稳定。盖层中的渗透压力和孔隙水压力以及溶洞内的真空压强都不大, 盖层土体的强度足以抵抗。因此, 在这种条件下, 盖层仅存在微小形变, 可以保持稳定。

(2)当地下水位降速较大时($V \geq 0.01 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$)时, 盖层中的孔隙水压力和溶洞内真空压强随增长速率明显更快, 当盖层中的孔隙水压力和溶洞中的真空压强足够大时, 盖层土体的强度不足以抵抗外界施加的力时, 就会瞬间破坏发生塌陷。此时溶洞中的真空压强达到峰值, 由于盖层破坏, 溶洞与大气连通, 峰值过后真空压强迅速消失, 盖层中的孔隙水压力则在减小后趋于稳定。

通过物理模型试验可以得出, 在物理模型的尺度下, 当地下水位降速达到 $0.01 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 即可产

生足够的压强导致盖层失稳发生塌陷。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), 即天然工况下马龙区盖层破坏的临界地下水位降速为 $0.1 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($1.44 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$)。

5 结 论

本研究基于地质环境条件和塌陷结构特征的认识基础上, 重点关注透—阻—透这类型盖层在由水位下降产生的真空吸蚀作用下塌陷演化过程和内在机理, 在室内开展了两种典型工况下的物理模型试验, 对数据进行了充分的分析和阐述。总体上, 获得如下认识:

(1) 地下水位下降在盖层内和溶洞中均会产生负压带, 盖层在真空吸蚀作用下致塌。在地下水位下降的过程中, 盖层中包气带的空间和溶洞中的真空空间会不断增大, 但由于弱透水层相对密闭造成的空气滞后补给以及盖层土体的持水作用, 盖层中的孔隙水压力和溶洞中的真空压强波动增长直至峰值。地下水位降速越大, 压强的增长速率和峰值也就越大。

(2) 根据塌陷过程中的压强以及地表形变量变化特征可将覆盖型透—阻—透多元结构的岩溶塌陷分为土洞发育阶段、土洞扩展阶段和失稳塌陷阶段。在土洞发育阶段, 主要是上层弱透水层和中间强透水层, 即潜水面以上的土体受到孔隙水的冲刷和盖层内负压带中产生的孔隙水压力真空吸蚀作用, 在土洞扩展阶段和失稳塌陷阶段, 则是溶洞中的真空压强对整个盖层土体的真空吸蚀起主导作用。

(3) 地下水位的降速是导致研究区塌陷的主要因素, 当地下水位降速小时, 盖层土体可能会发生微小形变但不会发生塌陷, 当地下水位降速大时, 则有可能发生塌陷。在马龙区地下水位降速达到 $0.1 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($1.44 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$) 条件时, 区内透—阻—透型多元结构覆盖层会在真空吸蚀的主导作用下致塌。

参考文献

- [1] 康彦仁, 项式均, 陈健, 等. 中国南方岩溶塌陷[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1990.
KANG Yanren, XIANG Shijun, CHEN Jian, etc. Karst collapse of South China[M]. Nanning: Guangxi Science & Technology Publishing House Co., Ltd., 1990.
- [2] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 廖武林. 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 Lifen, ZENG Xiasheng, YAO Yunsheng, LIAO Wulin. Review on karst collapse in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 126-130.
- [3] Roberto Salvatia, Ira D Sasowsky. Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 264(1): 1-11.
- [4] Xiao Xianxuan, Li Zhaofeng, Cai Guojun, Yang He. 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.
- [5] 雷明堂, 蒋小珍. 岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(3): 1-6.
LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen. Research on the present situation and developing tendency of karst collapse and techniques for its supporting[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(3): 1-6.
- [6] 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.
YUAN Daoxian. Challenges and opportunities for karst research of our country under the new situation[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 4-6.
- [7] 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.
- [8] 杨立中, 王建秀. 国外岩溶塌陷研究的发展及我国的研究现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(Suppl.): 6-10.
YANG Lizhong, WANG Jianxiu. Karst collapse study's development abroad and domestic present studying situation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(Suppl.): 6-10.
- [9] 贾龙, 蒙彦, 戴建玲. 广佛肇地区岩溶塌陷易发性分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 819-829.
JIA Long, MENG Yan, DAI Jianling. Analysis of karst collapse susceptibility in Guang-Fo-Zhao regions[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 819-829.
- [10] I A De Bruyn, F G Bell. The occurrence of sinkholes and subsidence depressions in the far west Rand and Gauteng Province, South Africa, and their engineering implications[J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2001, 7(3): 281-295.
- [11] F Gutiérrez, M Parise, J De Waele, H Jourde. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 61-88.
- [12] 马骁, 蒋小珍, 曹细冲, 潘宗源. 岩溶空腔水气压力脉动效应的发现及意义[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 404-410.
MA Xiao, JIANG Xiaozhen, CAO Xichong, PAN Zongyuan. Discovery and significance of water-gas pressure pulsation effect within karst cavity[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 404-410.
- [13] 黄友金, 李恺. 采动作用下浅埋岩溶洞塌陷的数值模拟研究[J]. 江西煤炭科技, 2019(4): 70-74.

- HUANG Youjin, LI Kai. Numerical simulation study on subsidence of shallow-buried karst caves under mining[J]. *Jiangxi Coal Science & Technology*, 2019(4): 70-74.
- [14] 陈学军, 陈李洁, 宋宇, 毕鹏雁. 熵权-正态云模型岩溶塌陷预测分析[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1389-1394.
- CHEN Xuejun, CHEN Lijie, SONG Yu, BI Pengyan. Prediction and analysis of karst collapse with entropy-normal cloud model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1389-1394.
- [15] 涂婧, 刘长宪, 姜超, 郑晓明, 熊志涛, 廖明政, 李海涛. 湖北武汉岩溶塌陷易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 94-99.
- TU Jing, LIU Changxian, JIANG Chao, ZHENG Xiaoming, XIONG Zhitao, LIAO Mingzheng, LI Haitao. Susceptibility assessment of karst collapse in Wuhan City[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 94-99.
- [16] 王志清, 秦四清, 祁生文. 桂林市岩溶塌陷及防治[J]. *工程地质学报*, 2001, 9(2): 199-203.
- WAN Zhiqing, QIN Siqing, QI Shengwen. The karstic collapse and its protection in Gulin City[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(2): 199-203.
- [17] 李海涛, 陈邦松, 杨雪, 胡伏生, 房浩. 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.
- LI Haitao, CHEN Bangsong, YANG Xue, HU Fusheng, FANG Hao. Review on monitoring contents and methods for karst collapse[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(1): 126-134.
- [18] 罗小杰. 也论覆盖型岩溶按塌陷机理[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(5): 886-895.
- LUO Xiaojie. Further discussion on mechanism of covered karst ground collapse[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(5): 886-895.
- [19] 吴亚楠, 周绍智, 王延岭, 焦玉国, 陈伟清, 程凤, 赵志伟. 国内外岩溶塌陷监测方法综述[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(12): 1-6.
- WU Ya'nan, ZHOU Shaozhi, WANG Yanling, JIAO Yuguo, CHEN Weiqing, CHENG Feng, ZHAO Zhiwei. Summary of karst collapse monitoring methods in China and abroad[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(12): 1-6.
- [20] 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.
- MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 411-417.
- [21] 冯亚伟. 山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 205-214.
- FENG Yawei. Distribution and genesis of karst collapse in Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 205-214.
- [22] 康彦仁. 岩溶塌陷的形成机制[J]. *广西地质*, 1989, 2(2): 83-90.
- KANG Yanren. On the mechanism of karst collapse[J]. *Geology of Guangxi*, 1989, 2(2): 83-90.
- [23] 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 & Engineering Geology*, 1992, 19(4): 32-34, 46.
- [24] 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(6): 30-34.
- CHENG Xing, HUANG Runqiu. Geological conceptive models of karst collapse[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002(6): 30-34.
- [25] 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.
- TANG Wanchun, XU Mo, YU Heyan. Study on karst collapse developing regularity of the Yingde section on the Wuhan-Guangzhou passenger special line[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(4): 699-704.
- [26] 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.
- LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 101-111.
- [27] 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.
- XU Weiguo, ZHAO Guirong. The implication of suction action for ground subsidence in karst mining areas[J]. *Geological Review*, 1981, 27(2): 174-183.
- [28] 熊志涛, 刘鹏瑞, 杨涛, 邵勇. 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, SHAO Yong. Mechanism of karst collapse caused by punching pile construction in Jiangxia Fasi karst collapse area[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 120-129.
- [29] 郑晓明, 金小刚, 陈标典, 刘鹏瑞, 杨戈欣, 李海涛, 杨涛. 湖北武汉岩溶塌陷成因机理与致塌模式[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 75-82.
- ZHENG Xiaoming, JIN Xiaogang, CHEN Biaodian, LI Pengrui, YANG Gexin, LI Haitao, YANG Tao. Mechanism and modes of karst collapse in Wuhan City, Hubei Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 75-82.
- [30] 赵博超, 朱蓓, 王弘元, 赖柄霖. 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.
- ZHAO Bochao, ZHU Bei, WANG Hongyuan, LAI Binglin. Influence factors and mathematical models of karst collapses[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(5): 515-521.
- [31] Jiang F W, Dai J L, Lei M T, Qin Y Q, Jiang X Z, Meng Y. Experimental study on the critical triggering condition of soil failure in subsidence sinkholes[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 693-701.
- [32] 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*, 1993, 4(2): 39-44.
- LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LI Yu. Model experiment of

- karst collapse: Taking Wuchang as an example[J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 1993, 4(2): 39-44.
- [33] 蒋小珍, 雷明堂, 管振德. 单层土体结构岩溶土洞的形成机理[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(4): 426-432.
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, GUAN Zhende. Formation mechanism of karst soil-void in single-layer soil structure condition[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 426-432.
- [34] Molek H. Engineering-geological and geomechanical analysis for the fracture origin of sinkholes in the realm of a high velocity railway line[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2003: 551-558.
- [35] 罗小杰, 罗程. 沙漏型岩溶地面塌陷物理模型[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(1): 88-93.
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Physical model of ground collapse of hourglass type in karst region[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 88-93.
- [36] 吴庆华, 张伟, 刘煜, 崔皓东. 基于物理模型试验的岩溶塌陷定量研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(3): 52-58.
WU Qinghua, ZHANG Wei, LIU Yu, CUI Haodong. Quantifying the process of karst collapse by a physical model[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(3): 52-58.
- [37] 肖先焯. 覆盖型岩溶区水气相互驱动盖层变形演化及塌陷机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
XIAO Xianxuan. Deformation behavior evolution and collapse mechanism of karst covers under water-air interaction in karst area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [38] 王飞, 柴波, 徐贵来, 陈龙, 熊志涛. 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.
WANG Fei, CHAI Bo, XU Guilai, CHEN Long, XIONG Zhitao. Evolution mechanism of karst sinkholes in Wuhan City[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(3): 824-832.
- [39] 武鑫, 王艺霖, 黄敬军, 潘欢迎, 万军伟. 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.
WU Xin, WANG Yilin, HUANG Jingjun, PAN Huanying, WAN Junwei. Mechanical model of karst collapse and red line of groundwater level of Xuzhou region in Jiangsu Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 67-77.
- [40] 吴远斌, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 贾龙, 潘宗源, 马骁, 周富彪. 重庆中梁山地区隧道工程影响下岩溶塌陷形成演化模式及防治对策[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 246-252.
WU Yuanbin, YIN Renchao, LEI Mingtang, DAI Jianling, JIA Long, PAN Zongyuan, MA Xiao, ZHOU Fubiao. Triggering factors and prevention-control countermeasures of collapses caused by tunnel construction in the Zhongliangshan area, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 246-252.
- [41] 金晓文, 陈植华, 曾斌, 张文慧, 史婷婷. 岩溶塌陷机理定量研究的初步思考[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(4): 437-445.
JIN Xiaowen, CHEN Zhihua, ZENG Bin, ZHANG Wenhui, SHI Tingting. Preliminary thinking of quantitative research on the mechanism of karst collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(4): 437-445.
- [42] 罗小杰, 罗程. 岩溶地面塌陷三机理理论及其应用[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 171-188.
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-Mechanism Theory(TMT) of karst ground collapse and its application[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 171-188.
- [43] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜. 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(Suppl.1): 179-186.
LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LI Yu. Model experiment of karst collapse in Tangshan[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1997, 8(Suppl.1): 179-186.
- [44] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
LI Wei, XU Xiaoping. *Hydraulics*[M]. Wuhan: Wuhan University of Water Resources and Electric Power Press, 2000.

Development mechanism of covered karst collapses induced by groundwater drawdown

LI Jingtian¹, ZHU Kai², XIAO Xianxuan¹, YIN Yan², LIU Hao³, XU Mo¹, HE Zhipan³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Qujing Chemabi Reservoir Engineering Construction Administration Bureau, Qujing, Yunnan 655099, China;

3. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, Yunnan 650041, China)

Abstract With continuous development of society and economy, acceleration of urbanization, increase of water consumption in industry and agriculture and improvement of people's life, the interference and destruction of environment caused by human activities and engineering construction are increasingly serious, and the number of karst collapses is rising day by day. As a major type of geological disaster in karst areas, karst collapses threaten local people's life and property because of their suddenness and covertness. Therefore, it is of great significance to study the induced factors and development mechanism of karst collapses. Since the construction of the diversion tunnel of

Chemabi reservoir in 2017, a large number of ground collapses have occurred in Malong district of Qujing City. The field geological investigation found that there is a Quaternary overburden layer with sandy clay–clay–sand structure in the study area in which occur strong karst development and frequent groundwater activities. Karst collapses in the study area are mainly distributed near rivers.

In this study, we took karst collapses in the east of Malong district, Qujing City as the research objects. On the basis of fully understanding the geological conditions, hydrodynamic conditions and geological prototypes of collapses in the study area, we took the collapses of multi-structure overburden as examples, among which we selected a typical karst collapse as the prototype. Then we scaled down the geological prototype in equal proportion under the principle of similarity. Meanwhile, we prepared the materials similar to the physical parameters of the soil samples from overburden layers of the geological prototype, and constructed a geophysical model consistent with the prototype in the laboratory. Subsequently, according to the water discharge of the construction near the subsidence area and the data of observation well, we estimated the rate of groundwater drawdown, and monitored the pore water pressure in the overburden layer, the vacuum pressure in the karst cave and the cumulative displacement of the overburden soil. Finally, we carried out the experiments of karst collapses triggered by the groundwater drawdown under two typical working conditions. According to the experiment data, we put forward the collapse mechanism of the overburden layer, and the evolution characteristics of karst collapses with permeable layer–aquiclude–permeable layer.

The results show as follows: (1) Negative pressure zones in covered layers and karst caves may occur because of groundwater drawdown. Due to the air recharge caused by relatively closed aquitards and the water-holding effect of the soil in overburden layers, the pore water pressure in overburden layers and vacuum pressure in karst caves will increase to the maximum with the fluctuation of groundwater discharge. The faster the rate of groundwater drawdown becomes, the greater the growth rate and peak of pressure will be. (2) According to the evolution characteristics of pressure and the deformation quantity of overburden layer, the collapse evolution can be divided into 3 stages: the stage of development of soil caves with rapid pressure increase but small displacement of overburden surface, the stage of soil cave expansion with the reducing growth rate of pressure but a rapid increase of displacement of overburden surface and the stage of instability and collapse of overburden layers when both pressure and displacement of the overburden surface reach the maximum. At the first stage, upper aquitards and middle strong permeable layers, i.e. the soil above the water level, are subjected to the erosion of pore water and the vacuum suction effect of pore water pressure generated in the negative pressure zone within the overburden layer. At the second and third stages, the vacuum pressure in the karst cave plays a leading role in the vacuum suction erosion of the entire overburden soil. (3) The rapid decrease of groundwater level is the main factor leading to the collapses in the study area. When the rate of groundwater drawdown is relatively small, the overburden soil may undergo minor deformation but will not collapse. However, when the rate of groundwater drawdown in Malong district reaches $0.1 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($1.44 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$), the vacuum pressure can provide the force of vacuum suction erosion. Together with osmotic pressure, this force is large enough to generate collapses. The research can provide reference for the prevention and early warning of collapse disaster in Malong district.

Key words karst collapse, physical model experiment, multi-structure, groundwater drawdown, collapse mechanism

(编辑 张玲)