

陈学军, 薛明明, 宋宇. 水位下降速率对岩溶土洞塌陷的影响分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 922-936.

DOI: 10.11932/karst20240409

水位下降速率对岩溶土洞塌陷的影响分析

陈学军^{1,2}, 薛明明^{1,2}, 宋宇^{1,2}

(1. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 水位升降引起的水气压力变化会导致岩溶土洞塌陷。通过开展物理模型试验与FLAC3D数值模拟相结合的方式, 模拟相同供水速率不同排水速率下的水位升降波动对岩溶土洞的致塌过程, 分析了水位升降波动过程中不同排水速率对既有土洞内水气压力的变化、覆盖层土压、变形的影响, 建立了排水速率、覆盖层变形、塌陷与水气压力的关系, 提出了水位波动对土洞塌陷的作用规律。结果表明: (1) 排水速率对水气压力变化的影响规律基本一致但变化程度不同。水气压力的变化程度、响应时间与排水速率呈正相关。(2) 覆盖层变形量、土压的变化与水气压力变化呈正相关, 但影响程度不同, 排水速率只是加快了其变化程度。(3) 土洞变形、塌陷程度是综合因素所致。排水速率、水位波动次数对既有土洞中水气压力变化、以及土体变形效应均具有不同程度的影响。(4) 数值模拟结果与试验室模型试验所得结论基本吻合。这些规律为进一步研究水动力因素对岩溶塌陷的作用规律提供了重要的理论支撑, 为合理防治、预测岩溶塌陷提供了依据。

关键词: 土洞塌陷; 物理模型试验; FLAC3D数值模拟; 排水速率; 水位波动

创新点: (1) 构建地质概化模型与FLAC3D数值模拟相结合, 模拟不同排水速率下水位升降波动过程中岩溶土洞的演化过程, 监测土洞内水气压力与覆盖层的变形, 建立不同排水速率下水气压力的变化与覆盖层土压、变形的关系; (2) 对比数值模拟应力、位移、塑性区结果, 验证物理模型试验的有效性。

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0922-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

水动力条件是加速岩溶塌陷的关键因素, 尤其是地下水位的变化。人为抽水、强降雨引起的地下水位波动增强了潜蚀、负压吸蚀、正压气爆作用^[1-3], 加速了岩溶土洞塌陷的发生, 引发众多学者对地下水位波动致塌机理进行研究。

建立力学、数学模型可以揭示水位变化下土洞演化过程。He et al. 基于极限理论完善了土洞塌陷的力学模型, 精确划分水位变化下的土洞演化阶段^[4-5];

Guo et al. 建立了地下水骤降条件下考虑洞体空间形状尺寸的覆盖型岩溶土洞地面塌陷力学模型, 揭示初始地下水位及降深、洞体空间形状及大小与土洞空腔负压之间内在关系, 明确了负压变化对土洞演化阶段的稳定性的影响^[6-7]。现场试验可以最大程度的反映水动力条件下岩溶土洞塌陷过程。陈学军等^[8]开展现场抽水试验, 阐明了抽水引起的水位变化是土洞塌陷的主要因素; Jiang et al.、Jia et al. 通过对现场地下水位变化进行长期监测与分析, 揭示了地下水位变化对土洞塌陷作用机制^[9-10], 然而现场试

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC507502); 国家自然科学基金(41967037)

第一作者简介: 陈学军(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事灾害地质与岩土工程方面的研究。E-mail: chenxj@glut.edu.cn。

通信作者: 宋宇(1981—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事特殊性土的工程特性及致灾机理方面的研究工作。E-mail: songyu119@126.com。

收稿日期: 2022-11-27

验应力、边界条件不易控制难以开展,许多学者通过开展物理模型试验的方法研究地下水位变化对土洞致塌的作用规律^[11-12]。雷明堂等从塌陷的原型研究入手,通过大比例尺物理模型试验,再现岩溶塌陷全过程,研究了不同结构土层在岩溶水位变化、不同排水速率条件下的塌陷发育机理,建立了岩溶塌陷与各主要影响因素的关系^[13];Xiao et al. 通过开展模型试验,改变水位变化速率、幅度,阐明了水位变化引起负压吸蚀、潜蚀作用对土洞变形的相对强弱程度,揭示了土洞塌陷的机理是潜蚀与负压吸蚀共同作用所致^[14-15];张鑫通过模拟降雨条件下,不同溶洞开口大小、土层厚度、土体密实度三种主要影响因素的岩溶塌陷过程,建立了水位降幅与三种岩溶塌陷影响因素的关系,提出了水位下降对岩溶土洞的作用规律,并确立了不同工况下的临界水位降幅,为岩溶塌陷防治、预警提供了合理预测^[16];张少波等、洪儒宝等开展水位波动试验,归纳了土洞变形、塌陷难易程度对水位波动的响应及各阶段土洞演化的特征^[17-18];一些研究以数值模拟为载体,展示了水位变化过程中上覆土体的应力、位移变化规律^[19-20];邢宇健归纳了水位下降过程中土洞的演化模式,并采用FLAC3D展示了土洞塌陷过程中力场、位移场、渗流场、塑性区分布的变化,分析、归纳并揭示了土洞演化的破坏机制^[21];熊启华等通过数值模拟,展示了不同水位降幅下土洞的动态演化过程,确定了塌陷临界水位差,为岩溶预测提供了依据^[22-23]。

众多学者从现场试验、模型试验的角度揭示了水位变化引起潜蚀作用、负压吸蚀、正压气爆对土洞的作用规律,从数值模拟的角度阐述了水位变化对土洞致塌的力学机制,是研究水动力条件致塌的重要理论支撑。但目前大多研究是以单一的模型试验或数值模拟方法,这不能较好地将模型试验成果与数值模拟的应力、位移分布对应起来,从内在力学机制到宏观现象较为全面地阐述水动力条件对土洞的塌陷的作用。此外,大多研究是通过控制水位变化速率、幅度,建立水动力因素与土洞塌陷的关系,而对不同排水速率下的水位升降波动对岩溶土洞塌陷的作用规律存在不足,需要进一步研究。本文以桂林市临桂区岩溶塌陷易发区域为研究对象,通过构建地质概化模型,开展物理模型试验与FLAC3D数值模拟相结合的方式,模拟不同排水速率下水位升降波动过程中岩溶土洞的演化过程,监测既有土洞内水气压力与覆盖层的变形,建立不同排水速率

下水气压力的变化与覆盖层土压、变形的关系,并对比数值模拟应力、位移、塑性区结果,分析验证物理模型试验的结论,并提出不同排水速率对土洞塌陷的影响规律。

1 研究区环境地质背景

研究区位于桂林市临桂区,地处湘桂走廊南端,东经109°36′至111°29′、北纬24°15′至26°23′,平均海拔150 m。气象观测数据显示,年降水量合计为1 266.0~1 986.0 mm,前汛期(4~6月)雨量为627.0~1 253.0 mm,后汛期(7~9月)雨量为128.0~305.0 mm。暴雨主要集中在5~6月,人为抽水现象频发,水位变化剧烈;研究区整体呈“∞”型的岩溶盆地,构造分褶皱和断裂两种基本类型,为多期构造的运动产物,构造形迹多呈NEE向和NNW向。

研究区基本地质条件如图1所示,主要由上更新统冲洪积层(Q_3^{al-pl}),上更新统残坡积层(Q_3^{dl-el}),泥盆系上统融县组(D_3r)3种地层组成。各地层岩性特征描述如下:

①上更新统冲洪积层(Q_3^{al-pl}):黄色、褐黄色卵砾石砂土、粉质黏土,由砾石、黏土和少量细沙及卵石组成,厚2~14 m。 Q_3^{al-pl} 冲洪积层形成的粉质黏土,其粘粒含量较低,固结程度及抗剪强度相应较低,抗塌能力差。

②上更新统残坡积层(Q_3^{dl-el}):砖红、浅黄色黏土、砂质黏土、砂质黏土碎石层,含少量石英颗粒,厚0.1~10 m。

③泥盆系上统融县组(D_3r):灰白色,微风化,隐晶质结构,中~厚层状,岩体较完整,岩芯呈柱状,主要矿物为方解石,方解石脉发育,紧密胶结,场地内基岩面起伏变化大,岩溶裂隙较发育^[24]。

2 地质模型概化与试验方案

2.1 地质模型概化

研究区地质条件复杂,需要进行地质模型概化。经收集桂林市临桂区地质钻探资料可知,研究区上覆土层主要可分为单层结构或双层结构,其中单层结构中,上覆土层为黏性土;双层结构主要有两种类型,一类为上细下粗型,上层为黏性土,下层为残坡积碎石类土;另一类为上粗下细型,上层为冲洪积卵

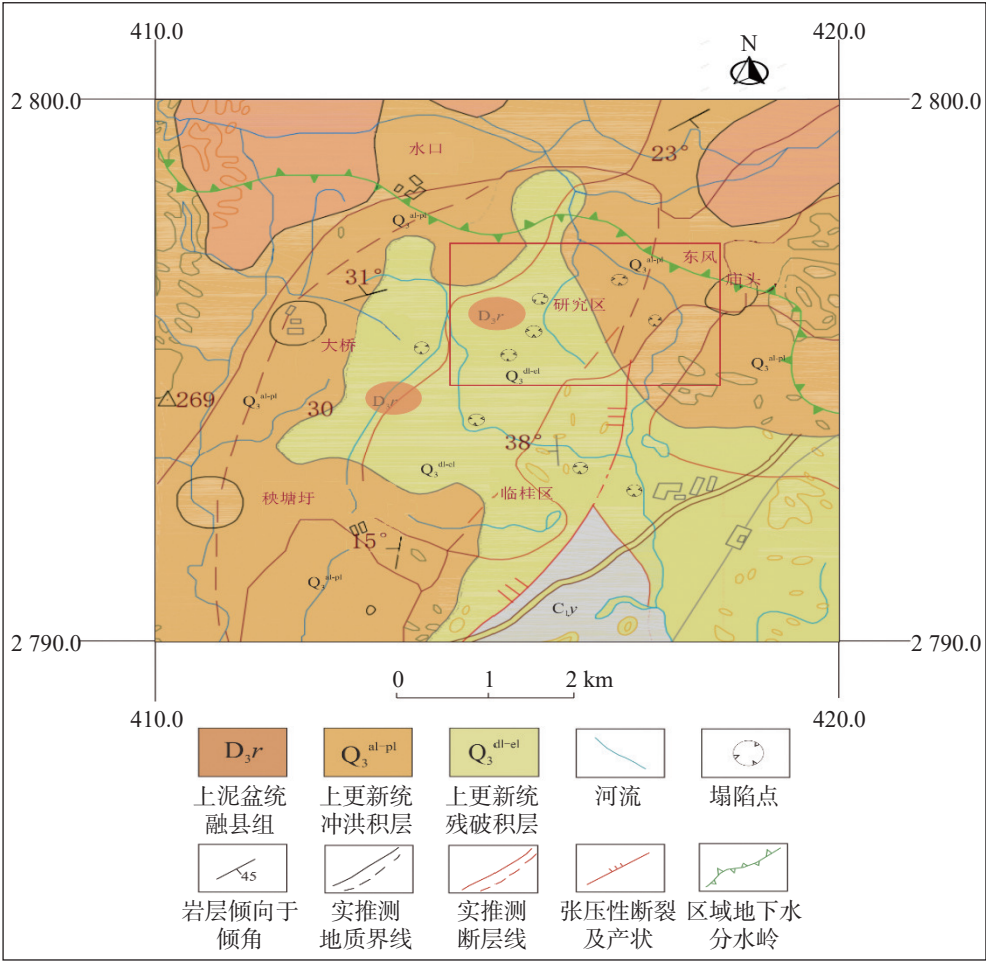


图 1 工程地质图

Fig. 1 Engineering geology map

砾石土, 下层为黏性土(图 2)。室内土工试验测得了红黏土基本物理、力学性质参数(表 1)^[24]。

本文主要以一元结构(红黏土结构层)进行模拟。

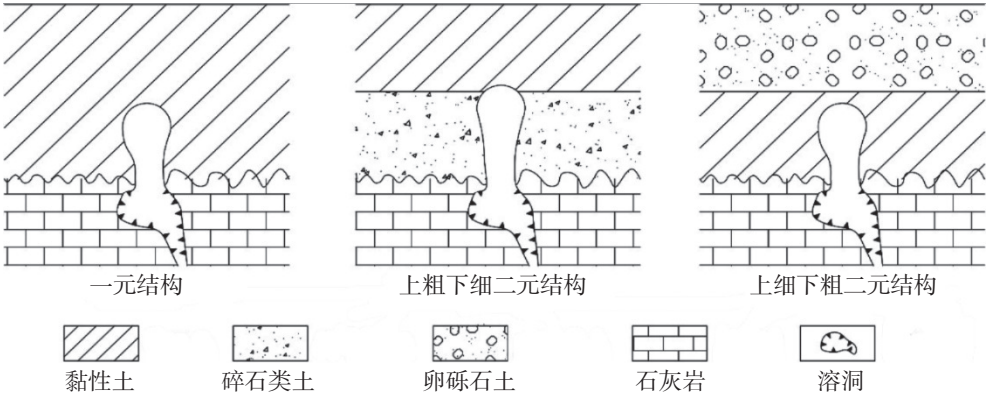


图 2 上覆土层结构类型

Fig. 2 Structure types of overlying soil layers

表 1 土体基本物理、力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil

覆盖层类型	密度/g·cm ⁻³	孔隙率	剪切模量/kpa	体积模量/kpa	内摩擦角/°	粘聚力/kPa	渗透系数/cm·s ⁻¹
红黏土	1.72	0.47	1.354×10 ⁶	4.22×10 ⁶	8.8	25.3	3.22×10 ⁻⁴

2.2 物理模型箱设计

综合考虑现场岩溶塌陷所涉及因素,通过调查、收集研究区域地质、水文、构造等综合条件,并参照相似理论对物理模型相似比进行确定^[25],确定模型几何相似比为1:10,保证基本物理、力学参数与研究区原状土一致。

装置框架采用高强硬度铝合金,侧壁采用5 mm厚度钢化玻璃镶嵌,岩溶通道口设置成半圆形,设置位置为前侧边中点处,通道口上方设置既有土洞,形状为1/4球体,采用预埋特制冰块融化成型。整个物理模型试验装置由三部分组成:主体模型、供排水系统、测试系统。主体模型尺寸为长1 200 mm,宽700 mm,高900 mm,由上下两部分组成。上部为厚度600 mm的土箱,用于模拟上覆土层;下部为高为300 mm水箱,用于模拟基岩内部岩溶空腔及蓄水情况,通过岩溶通道与上部土箱相连。土箱与岩溶空腔具有相互独立的供排水系统,可以根据不同的试验条件进行相应调节。土箱的供排水系统由土箱左右两侧水槽及其底部、侧壁排水孔组成,水位上升时,左右两侧水槽可控制上部土层中水位,使土层中形成稳定水头,水位下降时也可排出水体。岩溶空腔的供水系统通过水箱外接水管控制开关有效对下部水箱进行供水,下部水箱侧壁设置有排水孔(直径100 mm)及开关排水管,蓄水时设置为封闭状态,打开排水管开关,可模拟岩溶空腔内水位下降(抽水或地下水径流)过程。测试系统包含三个方面,一是通过Solinst水位自动监测仪实时记录水位升降过程中既有土洞空腔中的水气压力。Solinst水位自动监测仪水位精度可达到 $\pm 0.05\%$,最低采样频率为0.125s,可实现高频读取实时数据。试验中把水位监测传感器放入桌面读取器固定槽中,并将桌面读取器连接到电脑,启动电脑端数据采集软件,采样频率采用每1 s读一次数据,并依次设定,水位、气压、温度单位等参数。当注水开始时,启动水位自动监测仪,将水位监测传感器放入已经冰块融化的预制土洞中间,利用仪器中实时读取储存数据功能,就可实现水位升降过程中土洞内水气压力的实时监测。二是通过动静态电阻应变仪及土压传感器监测上覆土层的土压。动静态电阻应变仪采用24位高分辨率转换芯片,土压传感器与动静态电阻应变仪通过短接实现数据全桥测量转换。试验中首先将土压传感器连接到电阻应变仪中,数据传输接口接入电脑;保持与水

气压力采集数据间隔一致,测量数据通过电信号的方式传入电脑端数据采集软件中,数据稳定可靠;土压传感器可量测30 kPa以内的土压,误差最大不超过0.5%,可在饱和土体中长时间工作,可满足模型试验条件。试验中将土压传感器的受力面接触土洞顶部(土层深度5 cm处),并埋入压实固定,另一端与动静态电阻应变仪连接,启动数据采集就可实现水位升降过程中的覆盖层土体的实时土压。三是通过摄像头实时记录装置侧壁标尺上既有土洞及上覆土体塌落量、塌陷变形的全过程(如图3所示)。

2.3 模型试验与数值模拟方案

水位下降过程中排水速率的快慢是引起既有土洞内水气压力变化的原因之一,对覆盖层变形和崩塌起着关键作用。因此开展物理模型试验模拟初始水位位于土层表面时相同供水速率不同排水速率引起水气压力变化对土洞致塌的过程,阐明水气压力变化与覆盖层变形之间关系。

试验室测得土层天然含水率范围为19.1%~22.6%,经室内多次预试验及几何相似比例发现,预试验中不同深度含水率平均值为20%,经多次压实的重塑土压实干密度稳定在 $0.84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,因此模型试验中最终确定重塑土体平均含水率为20%,平均压实干密度为 $0.84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;上覆土层厚度范围为0.5~4.5 m,研究区域第四系地层,其冲洪积层中单层结构红黏土阻水型结构盖层塌陷占比较大且大多集中在覆盖层厚度小于2 m(其中小于1 m的的塌陷个数最多),占比最大为30.41%(表2);其次,本文主要是探究地下水位波动对岩溶土洞的作用规律,通过控制易产生塌陷的覆盖层厚度(1 m),根据水动力条件开展模型试验模拟不同工况的水位波动诱发岩溶土洞塌陷的过程。因此选取覆盖层厚度为1 m,按照几何相似比例,在模型试验中,红黏土覆盖层厚度设置为10 cm,既有土洞直径设定为10 cm,用冰块预制融化后形成;将配制完成的土样称取每次试验所需土样质量,确定每次试验土样厚度分层,采用小型手持振动器振实处理并分层装入模型装置内,最终填筑完成土样平均压实干密度达到 $0.84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均密实度接近85%,含水率平均值接近20%。研究区地下水在地下溶洞裂隙中流动过程中平均流速为 $2.14\sim 4.50 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,在岩溶管道中流速更大,可达 $200\sim 1\,000 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,结合现场抽水试验中定量抽水试验结果所确定的研究区水文地

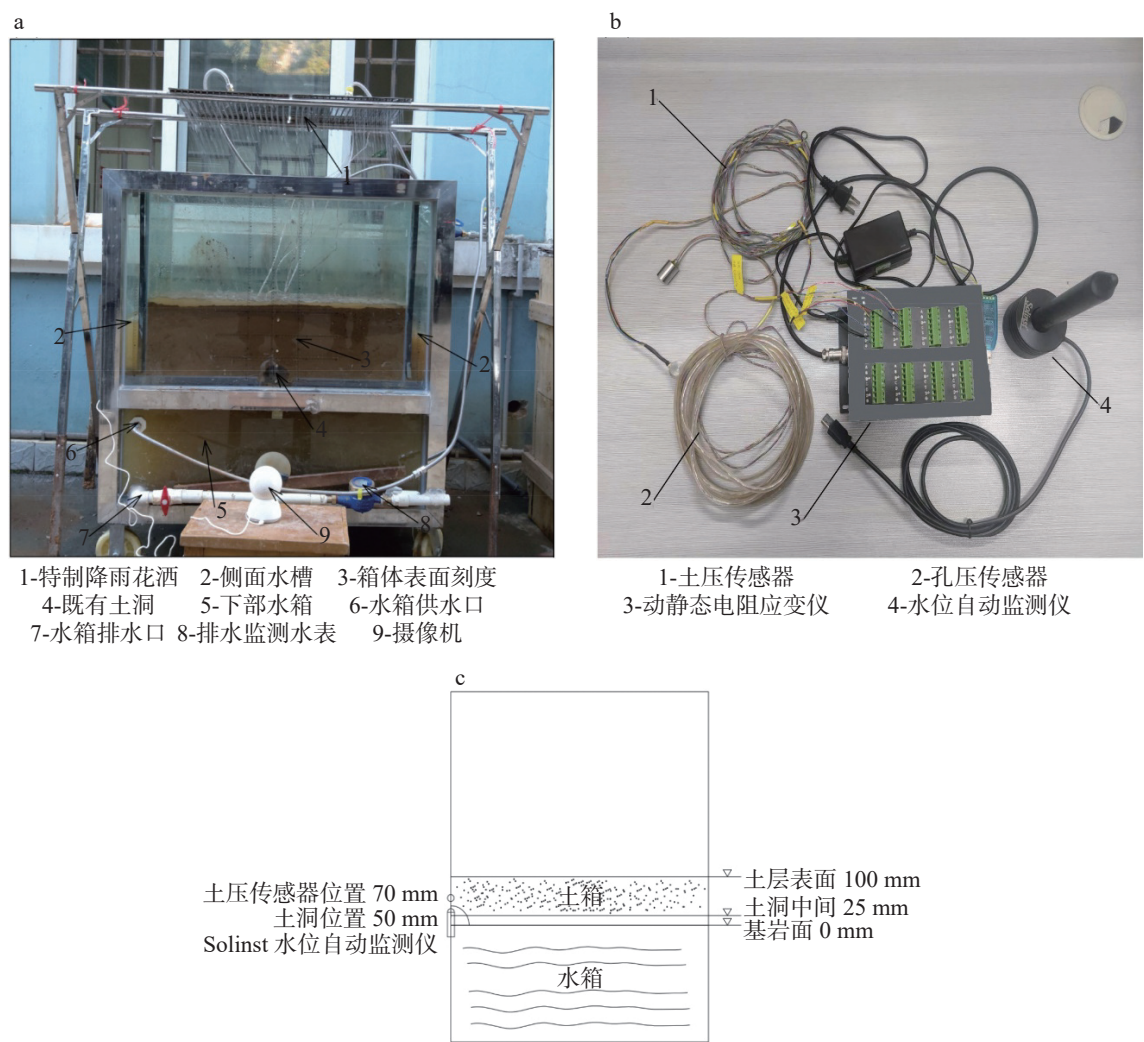


图 3 模型装置及测量设备图(a)模型装置正面图(b)测量设备图(c)模型装置剖面图

Fig. 3 Physical model device and monitoring equipment (a) front view of model device; (b) measurement equipment diagram; (c) profile view of model device

表 2 覆盖层厚度与岩溶塌陷关系统统计表

Table 2 Relationship between cover layer thickness and karst collapse

覆盖层厚度/m	<2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	合计
塌陷个数/个	97	72	69	56	22	2	1	318
占百分比/%	30.41	22.57	21.63	17.55	6.90	0.63	0.31	100

质参数、供排水速率^[8]及模型试验水动力条件相似比例,以基岩面为 0 基准面,保持初始水位位于土层表面,保持水位上升速率在各组工况中一致,并设定三种不同排水速率(模型试验方案详见表 3)。

三组试验操作流程基本一致,下面以排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为例,简述试验步骤:

①打开供水开关,通过供水管阀门调节控制水位上升速度,直至初始水位刚好达到土层表面;

表 3 模型试验方案

Table 3 Model test scheme

方案	土洞直径/cm	初始水位位置	初始水位高度/mm	水位上升速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	水位下降速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	10	土层表面	100	2.78×10^{-4}	4.17×10^{-3}
2					4.17×10^{-4}
3					2.08×10^{-4}

②关闭供水开关,水位自土层表面下降至岩溶空腔中,为一次水位下降过程,通过排水管阀门调节控制水位下降速度。

③一次水位下降过程结束,重复②步骤,直至土层塌陷。

数值模拟采用与物理模型试验 1:1 的方式,在三维建模软件 (Rhino) 中建立岩溶模型,并正确划分计算网格生成岩溶网格模型 (如图 4 所示) 后导入 FLAC3D 中,并按照如下步骤进行:

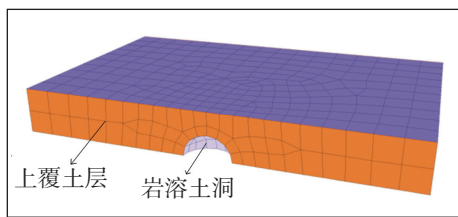


图 4 岩溶网格模型

Fig. 4 Karst grid model

①建立初始水位面位于土层表面的岩溶模型,赋予模型土体本构为 Mohr-Coulomb,并把覆盖层土体物理、力学性质参数赋予 Mohr-Coulomb 本构中。

②模型力学边界条件设置为左右边界约束水平位移,底边界同时约束水平和垂直位移,上边界自由。

③设置重力场及初始应力比,直至模型收敛稳定,生成初始应力场。

④选择单渗流模式。打开流体模式,赋予流体 Isotropy 本构模型,并对本构模型设置流体参数(流体模量、比奥模量、渗透系数、流体密度)。

⑤设定流体边界条件,前后左右底部设置为 0 流量边界,顶面为自由面;并按照试验方案及可以更好的反映不同排水速率下的水位波动过程引起的水气压力变化,分别设置五种梯度递增的排水速率,分别为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $2.78 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $8.34 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

⑥选用主从进程法(流体计算为主进程,力学计算为从进程),设定屈服准则,获取结果云图,最后进行结果分析。

3 模型试验结果

3.1 不同排水速率下水气压力的变化及土体变形响应

水位升降引起岩溶空腔内水位不断变化间接改

变既有土洞内水气压力从而影响土洞及覆盖层的变形。

图 5 分别反映了三组水位升降过程中相同供水速率,不同排水速率条件下既有土洞中水气压力随时间的变化过程。分析可见,排水速率对既有土洞中水气压力的变化及动力响应具有不同程度的影响:

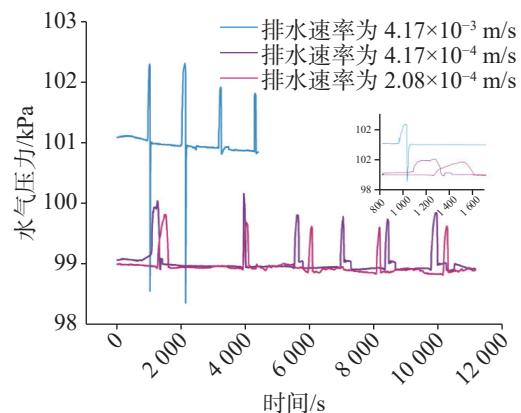


图 5 水气压力随时间变化图

Fig. 5 Variation of water-gas pressure with time

1)不同排水速率下,水气压力变化规律基本一致但变化程度不同。水气压力最低值区域在三种排水速率条件下分别集中出现在 101.5~102.5 kPa, 98.9~98.94 kPa, 98.85~98.945 kPa, 即排水速率越快,水气压力降幅越大。排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,单位时间内渗流量相较于其他排水速率最大,水位降深幅值最大,导致水气压力在排水瞬间急速减小;此外,排水速率最大,水力梯度差、装置侧面与洞内水气压力差最大,既有土洞上覆土体受到的渗流潜蚀作用与负压吸蚀作用最大,加速土体的剥落,形成多条贯通的裂隙,水气压力释放最大。从整体上看,水位升降波动引起既有土洞内水气压力变化规律基本一致。

2)既有土洞内水气压力动力响应时间、消散时间与水位下降速率呈正相关。在水位下降过程中,三种不同排水速率引起水气压力出现明显变化分别历时 1 010 s, 1 260 s, 1 520 s, 且随着水位升降次数的增加,响应时间差逐次增多;此外,水气压力消散时间也随着排水速率的加快而加快(如表 4 所示),即水位下降速率越快,单位时间内的水位降幅越大,对土体产生的渗透力越大,增强了垂向优势流作用,加速水气压力释放。排水速率的快慢只影响水位下降阶段水气压力的下降幅值与动力响应时间,不影响水位下降过程中水气压力的变化规律。

表 4 不同排水速率下一次水位升降过程中水气压力响应、变化及初始环境温度效应

Table 4 Water-gas pressure response, variation and initial ambient temperature effect during one rise and fall process of water level under different drainage rates

排水速率/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	试验时环境初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	既有土洞内初始气压值/ kPa	水气压力响应时间/s	水气压力消散历时/s	水气压力降幅/ kPa
4.17×10^{-3}	20.88	101.083	1 010	10	3.723 3
4.17×10^{-4}	25.85	99.065	1 260	80	1.120 2
2.08×10^{-4}	31.29	98.99	1 510	90	0.850 5

图 6 反映了不同排水速率下,水气压力变化对既有土洞上覆土体变形量的影响。分析可得:

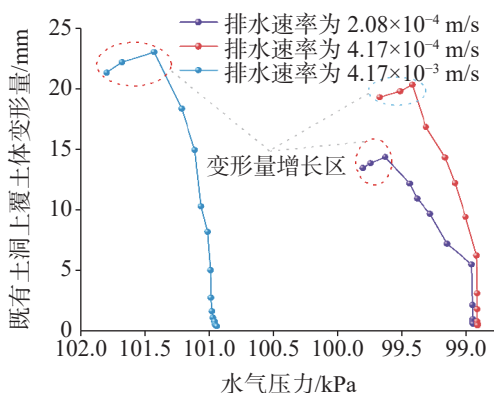


图 6 既有土洞上覆土体变形量与水气压力关系

Fig. 6 Relationship between deformation of overlying soil and water-gas pressure of soil cave

1)既有土洞上覆土体的变形量与水气压力的变化呈正相关,较快的排水速率会引起水位降深增加,水气压力变化越快,增强了对既有土洞上覆土体的负压吸蚀作用,这会导致覆盖层土体剥落加快。当排水速率为 $4.17\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水气压力降幅达到 3.7233 kPa (如表 4 所示),水力梯度差值达到最大,单位时间内产生了较大的渗流力,加强了对既有土洞上覆土体的潜蚀效应,在渗流力与负压吸蚀力的共同作用下,覆盖层不断塌落,最终整个既有土洞与大气相通,土洞扩展至上覆土层表面,上覆土体变形量达到最大。

2)不同排水速率引起的水气压力变化对既有土洞上覆土体变形量的影响规律一致,影响程度不同。覆盖层变形量随水气压力的变化呈先增加再减小最后趋于稳定的规律。在初始排水阶段,曲线上覆盖层变形量出现短暂的增加,这是由于在排水的瞬间,水气压力与潜蚀效应达到最大,导致大量的土颗粒被水流携带而剥落,覆盖层塌落量快速增加。排水速率加快只是改变了覆盖层变形量的变化程度,排水速率越快,单位时间内水气压力降幅越大,对上覆

土体的负压吸蚀作用减弱效果越明显,覆盖层变形量减少幅度变大。

3.2 水位升降过程中覆盖层土压的变化及与既有土洞内水气压力二者之间的关系

水位升降过程中,在不同排水速率下,覆盖层土压随时间变化规律不同。通过试验室模型模拟试验数据,分析、讨论排水速率、水气压力变化对岩溶土洞致塌过程中覆盖层土压的影响规律。

图 7、图 8、图 9 分别反映了岩溶土洞出现塌陷时对应的水位升降过程中既有土洞上覆土体土压随时间的变化,分析可得:供、排水速率直接影响土压的变化。在水位上升过程,土压变化幅值与供水速率相关,供水速率相同,覆盖层土压增量大致相同。当排水速率为 $4.17\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,初期阶段土压下降是由于水位下降幅度大,对土体产生的负压吸蚀作用导致上覆土层已经出现一些气孔贯通,水气压力释放导致土压小幅下降,相应的土压减小;水位下降过程中,当排水速率较小时,随着排水速率的增加,水气压力降幅不断增加,这增强了对覆盖层的负压吸蚀作用,土体剥落加块,土压迅速减少。当排水速率增大至 $4.17\times 10^{-3}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水气压力急剧下降,其降幅达到了 1.99 kPa ,单位时间内对覆盖层产生的负

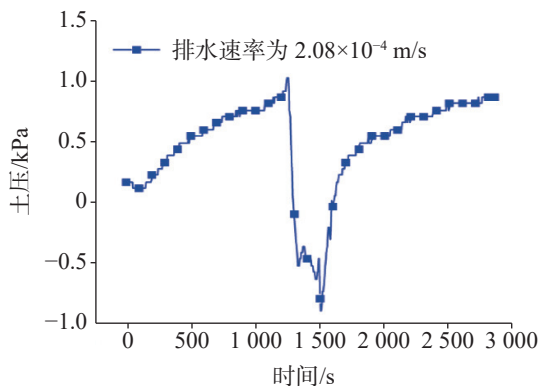
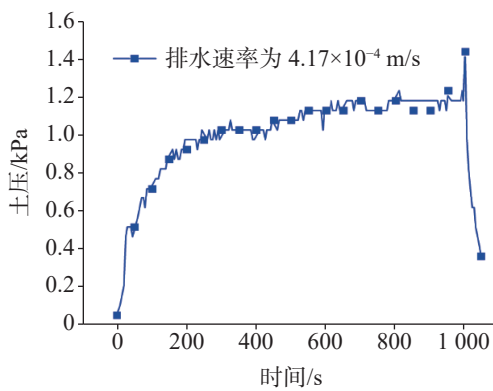
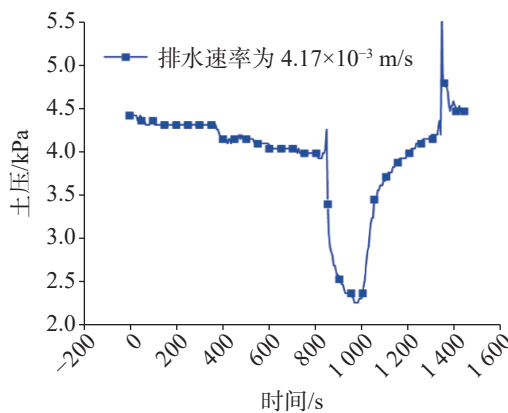


图 7 排水速率为 $2.08\times 10^{-4}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 土压随时间变化图

Fig. 7 Variation of soil pressures with time at the drainage rate of $2.08\times 10^{-4}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

图8 排水速率为 $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 土压随时间变化Fig. 8 Variation of soil pressures with time at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 图9 排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 土压随时间变化Fig. 9 Variation of soil pressures with time at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

压吸蚀作用达到最大, 土体受到较大的径向剥落力, 土压迅速下降。

三种不同排水速率下, 土压随水气压力的变化规律基本一致。下面以相同供水速率, 排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的工况为例, 分析水位升降过程中水气压力对土压的影响。图10、图11分别反映了一次水位升降过程中土压与水气压力关系, 分析可得: 土压的变化随水气压力变化而变化, 但变化程度不同。水位上升会引起水气压力增大, 覆盖层土压随之增大; 水位下降引起的水气压力减少会导致上覆土体的土压迅速减小, 且降幅较大。土压增、降幅相较于水气压力增、降幅较小, 这是因为水气压力不全作用于既有土洞上覆土体。

3.3 排水速率、水位波动次数对洞顶及其上覆土体的变形影响

水位升降常常会引起既有土洞塌陷, 塌陷的时

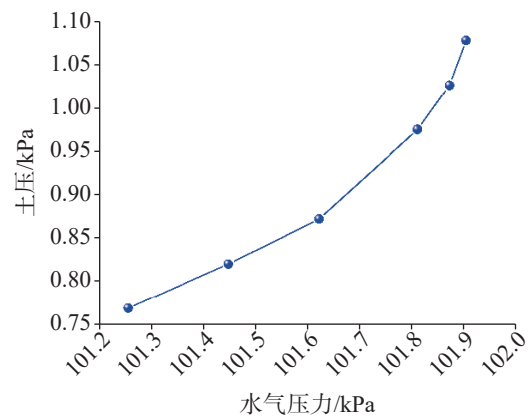


图10 土压与水气压力关系图(水位上升)

Fig. 10 Relationship between soil pressures and water-gas pressures when the water level rises

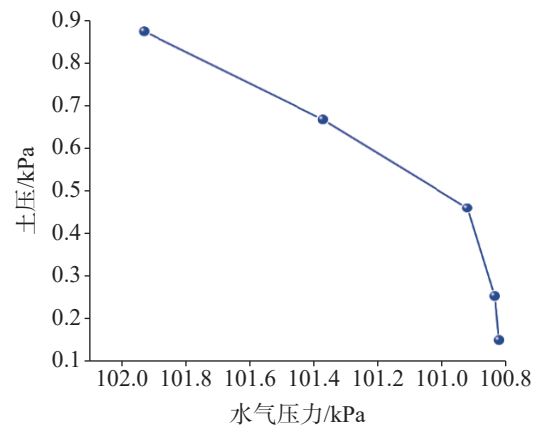


图11 土压与水气压力关系图(水位下降)

Fig. 11 Relationship between soil pressures and water-gas pressures when the water level drops

效性和规模均与水位下降速率、水位波动次数有关。通过对图12分析可得:

1) 土体剥落量对排水速率的快慢时间响应不同。土体塌落量、动力响应时间与排水速率的快慢呈正

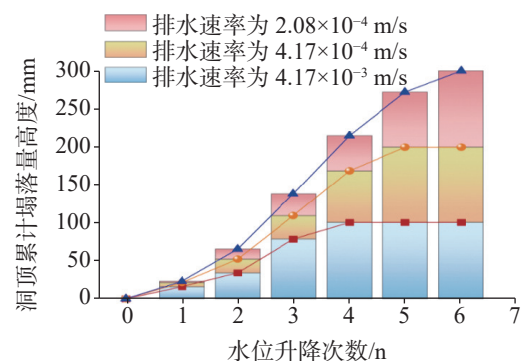


图12 洞顶累计塌落量随水位波动次数的变化图

Fig. 12 Variation of cumulative collapse volumes on the cave roof with the number of water level fluctuations

相关。排水速率越快,在水位波动次数较少时即可出现土体塌落,洞顶累计塌落量出现随着水位升降次数的增多而明显增加。当排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,进行了 1 次水位波动,既有土洞上覆土体就出现局部塌落,而排水速率为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,进行了 2 次水位波动才有少量土体塌落,在响应时间及塌落量上均不及较快排水速率。

2) 水位波动次数与既有土洞上覆土体剥落量呈正相关。洞顶累计塌落量均在塌陷瞬间增长最为明显,随着水位波动次数的增加,累计塌落量会不断增加,但其塌落量增幅会相应减少。

水位变动引起土洞塌陷规模扩大。塌陷口长短半轴长度直观反映土洞塌陷程度。图 13 展示了三种不同排水速率下,塌陷形成后,水位波动对塌陷口长短半轴长度的影响。塌陷形成后,整个半圆柱状塌陷坑与大气相通,处于开放条件。塌陷坑侧壁在水位变动条件下主要受到潜蚀作用而不断剥落,在此过程中塌陷坑的规模会发生变化,以排水速率 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水位升降工况为例,展示 4 次水位变动条件下塌陷口长短半轴长度的变化,并结合图 13 中的曲线说明水位升降次数对岩溶土洞塌陷程度的影响(如图 14 所示)。分析可得:

1) 塌陷口长短半轴的长度变化随着水位升降次数增多呈现逐渐增加再趋于稳定的特点。水位升降次数增多,越接近塌陷坑内壁的土体受到循环饱水作用越强,土颗粒易在渗流潜蚀作用下剥落,塌陷不断横向扩展,长短半轴变化逐渐增加;而远离塌陷坑侧壁的土体由于循环饱水作用的“滞后”与土颗粒之

间的黏聚力而不易被剥落,塌陷口长短半轴的长度变化趋于稳定。

2) 排水速率影响塌陷口长短半轴长度在水位升降频次下的变化程度。排水速率越快,塌陷口长短半轴长度变化越明显,土洞塌陷变化程度越明显。同一排水速率下,塌陷口长轴长度变化相较于短轴变化明显。水位下降引起土体受到渗流潜蚀及负压吸蚀作用造成土洞变形不断横向扩展,导致塌陷口长轴长度变化更明显。

4 数值模拟结果分析

4.1 竖向位移结果分析

根据模型试验结果,排水速率对水位下降过程中既有土洞稳定性影响比较强烈,因此模拟不同排水速率下的一次水位下降过程,展示水位下降过程中既有土洞及上覆土体在不同排水速率条件下的应力、位移、塑性区开展情况。水位下降过程中,既有土洞侧壁及上覆土体受到潜蚀、负压吸蚀作用而出现剥落,洞顶竖向位移不断发生变化,横向位移沿着洞趾方向随之开展,塌陷规模逐渐扩大。

图 15 展示了五种排水速率下的上覆土层的竖向位移分布,分析可得:不同排水速率的水位下降过程中,最大位移均出现在土洞洞顶。位移幅值与排水速率呈正相关。排水速率越快,洞顶竖向位移越大。当排水速率为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,洞顶竖向位移仅为 $1.05 \times 10^{-4} \text{ m}$,随着排水速率的加快,洞顶竖向位移逐渐增大,当排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,洞顶

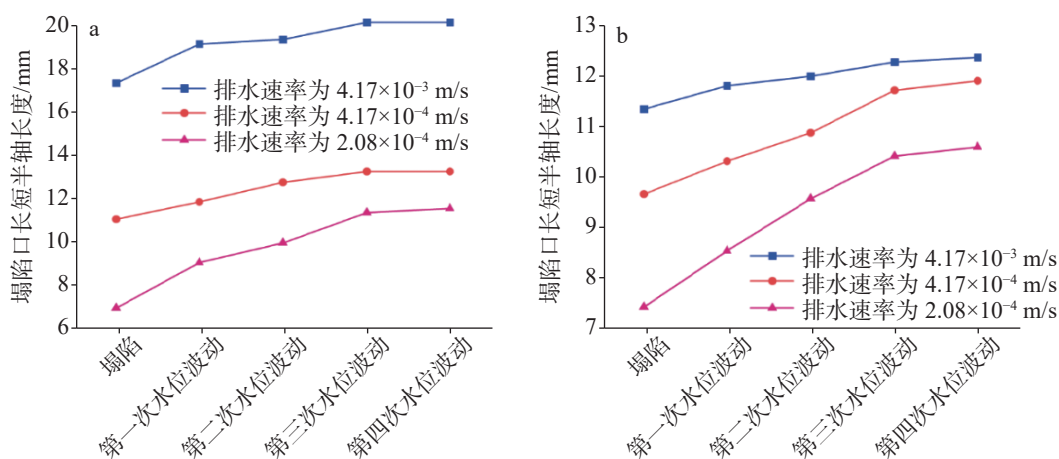


图 13 不同排水速率下塌陷口长短半轴长度变化图

Fig. 13 Variation of the semi-axis lengths of the collapse opening under different drainage rates

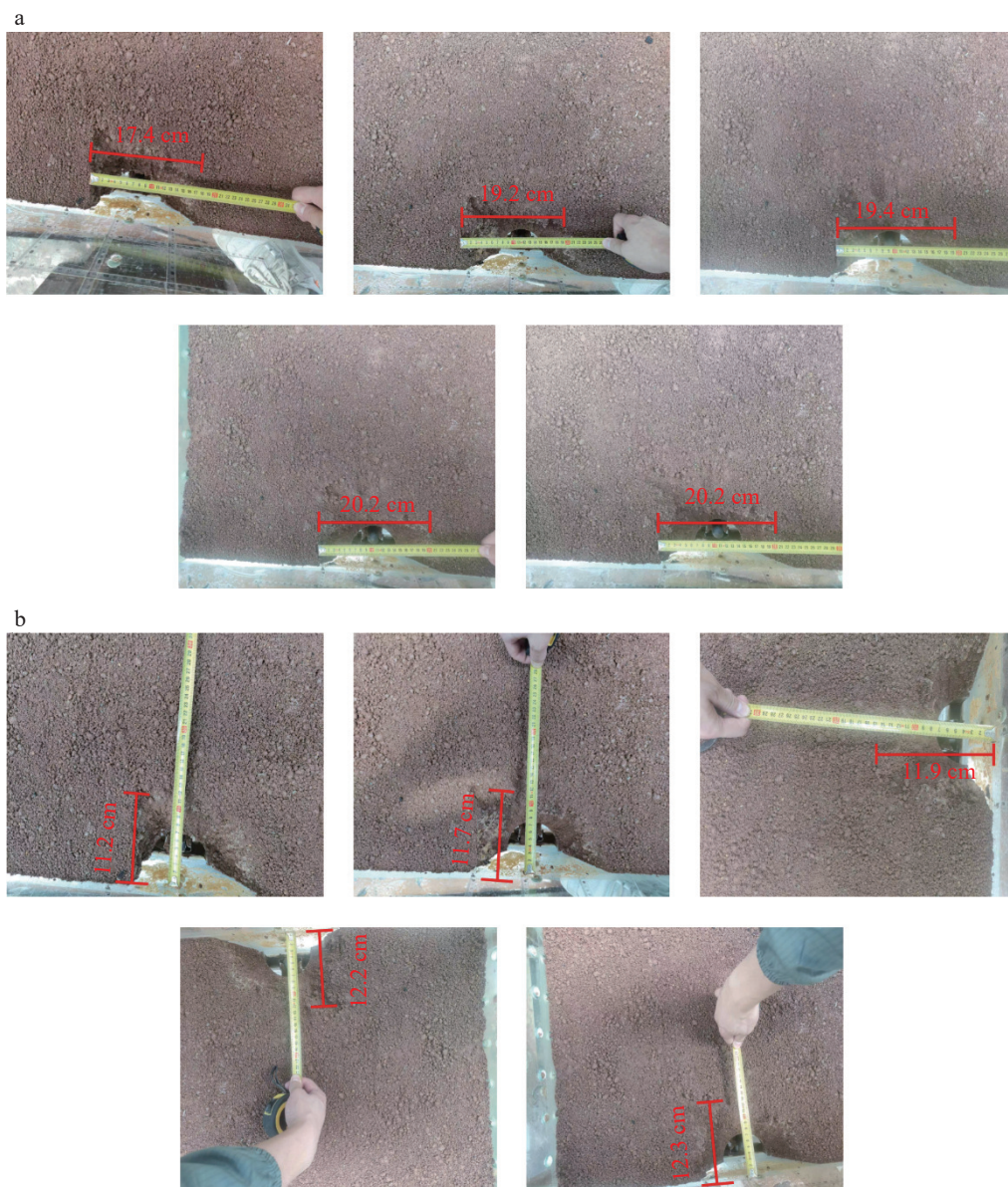


图 14 排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时塌陷口半轴长度测量图；(a) 长半轴测量图 (b) 短半轴测量图

Fig. 14 Measurement diagram of the semi-axis length of the collapse opening at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

(a) diagram of major half axis measurement; (b) diagram of short half axis measurement

竖向位移达到 $1.14 \times 10^{-4} \text{ m}$ ，这主要是由于排水速率较快，单位时间内水位降深较大，水力梯度差在洞顶处达到最大，覆盖层土体受到较大的渗流力与负压吸蚀力，这对既有土洞及上覆土体的渗流潜蚀与负压吸蚀作用加强，加速了土体剥落，垂向、横向位移均增大。

4.2 剪应力结果分析

水位下降过程中，渗流力、负压吸蚀力共同作用于土体，引起渗流场、力场不断发生变化，整个上覆土层应力进行重分布，洞顶处产生应力集中。当致

塌力超过其整个上覆土层的抗剪强度时，土体开始出现塌陷。

图 16 展示了五种排水速率下的上覆土层的剪应力分布，分析可得：五种不同排水速率的水位下降过程均在土洞洞趾处出现最大剪应力，且随着排水速率的加快，自洞趾至洞顶应力变化越明显。水位下降产生的负压吸蚀作用引起上覆土层应力重分布。洞顶出现应力集中，并沿覆盖层向洞趾传递，当洞趾处最大剪应力达到土体抗剪强度时，土体开始剥落，直至在土洞底部形成区域性破坏，洞顶则发生“土拱效应”^[26]，此时出现剪应力低值区，既有土洞及上覆

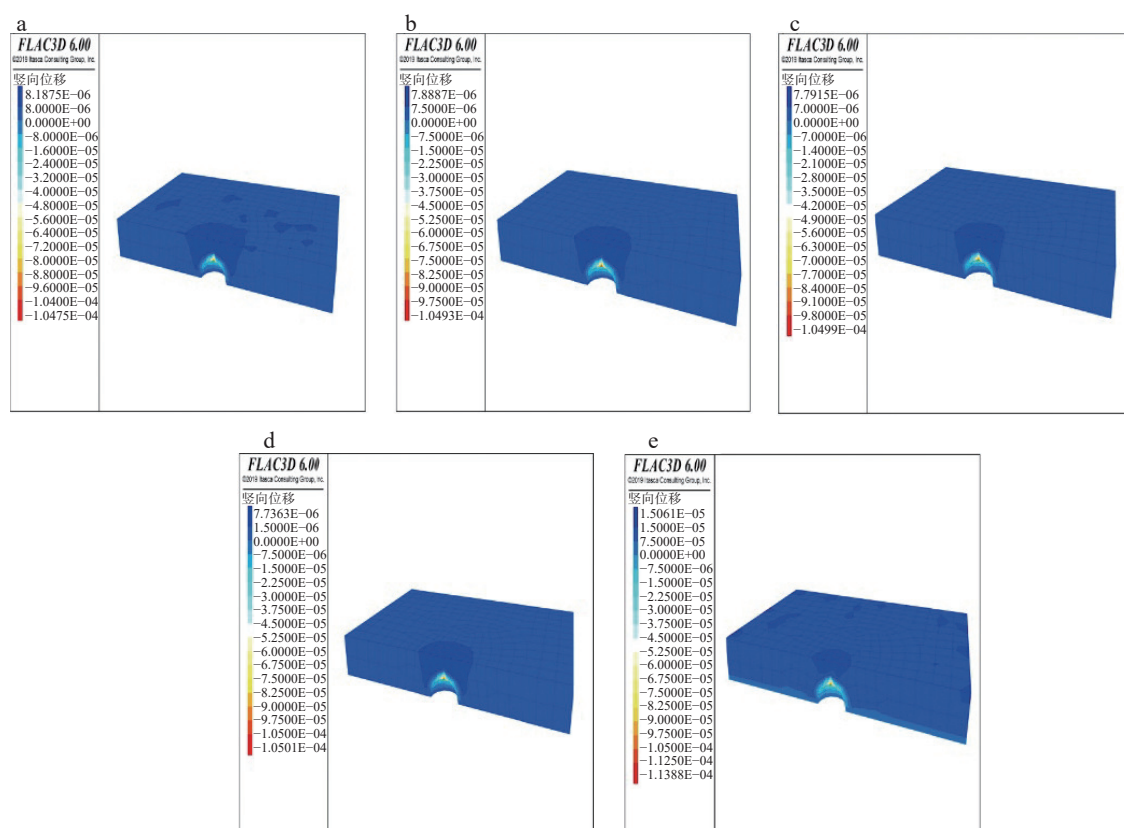


图 15 不同排水速率下竖向位移分布图 (a) 排水速率为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) 排水速率为 $2.78 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) 排水速率为 $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) 排水速率为 $8.34 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) 排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 15 Distribution of vertical displacements under different drainage rates (a) at the drainage rate of $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) at the drainage rate of $2.78 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) at the drainage rate of $8.34 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

土体在渗流潜蚀、负压吸蚀共同作用下,其受到的剪应力超过土体的抗剪强度时,土体不断剥落直至塌陷形成。排水速率与最大剪切应力变化呈正相关。当排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,最大剪切应力为 $1.466 \times 10^3 \text{ Pa}$,这加快了土体剪切破坏,最大剪应力从洞趾向周边土体扩展,加速了塌陷的发生。

4.3 塑性区开展变化分析

土洞在水位下降过程中会受到多种致塌力的共同作用,当达到土层的极限抗剪强度时,土体进入塑性屈服状态,发生破坏而失稳。通过模拟不同排水速率下的水位下降诱发岩溶土洞塌陷的工况,观察土洞塑性区的开展情况,判定上覆土层的稳定状况。

图 17 展示了五种排水速率下的上覆土层的塑性区分布,分析可得:土洞稳定性与排水速率快慢呈负相关。排水速率越快,土洞越易发生塌陷,排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时相较于其他两种排水速率,其

土洞塑性区开展更快贯通至整个土层表面导致上覆土体处于不稳定状态而出现塌陷。

水位下降诱发岩溶土洞塌陷过程中,土洞及上覆土体的应力、位移、塑性区分布直观反映了水位下降对岩溶土洞塌陷的作用机制,并结合物理模型试验揭示了土洞塌陷是综合因素影响所致。

覆盖层变形取决于水位变化引起的既有土洞内水气压力的变化。结合数值模拟土洞演化进程的应力、位移、塑性区分布,不同排水速率对覆盖层的应力重分布效应不同。排水速率快慢直接影响水位降深,造成既有土洞内水气压力变化不同而引起覆盖层土体受到的负压吸蚀作用、渗流潜蚀作用不同。即排水速率改变了水位变化引起的洞内水气压力从而影响了覆盖层变形程度。

排水速率与水气压力变化呈正相关。相较于较低排水速率,较高的排水速率在单位时间水位降深更大,水位变动引起既有土洞内水气压力变化更为明显,加速土体剥落,覆盖层土体更易形成塌陷。排

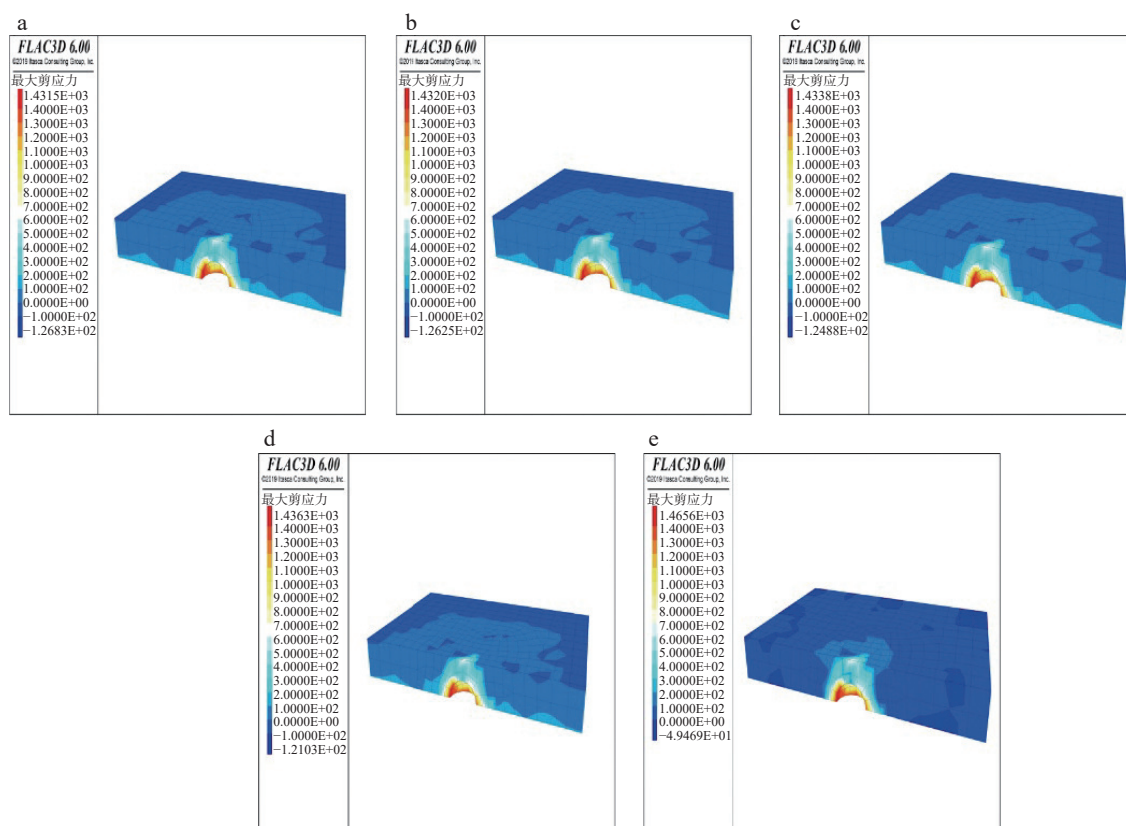


图 16 不同排水速率下最大剪应力分布图 (a) 排水速率为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) 排水速率为 $2.78 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) 排水速率为 $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) 排水速率为 $8.34 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) 排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 16 Distribution of maximum shear stresses under different drainage rates (a) at the drainage rate of $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) at the drainage rate of $2.78 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) at the drainage rate of $8.34 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 其既有土洞内水气压力达到了 102.26 kPa, 结合物理模型试验与数值模拟结果, 在此排水速率下, 洞内水气压力变化明显, 单位时间内覆盖层土体受到的渗流潜蚀及负压吸蚀作用最强烈, 加速了土洞演化进程, 更易形成塌陷。即最大排水速率下的水气压力峰值 102.26 kPa 为研究区水位波动诱发岩溶土洞塌陷的临界值, 当某个既定排水速率下引起的水气压力峰值超过 102.26 kPa, 覆盖层易形成塌陷。

5 结 论

本文以桂林市临桂区岩溶塌陷易发区域为地质背景, 针对研究区一元结构红黏土覆盖层, 通过开展物理模型试验及数值模拟相结合的方式, 模拟三种不同排水速率条件下的水位波动对岩溶土洞的致塌过程, 分析试验数据及数值模拟结果发现了不同排水速率的水位升降过程中水气压力、土压的变化规

律及时间响应、建立了水位波动频次与岩溶土洞变形、塌陷程度的关系。得出以下主要结论:

(1) 排水速率的快慢对土洞内水气压力、覆盖层变形量有明显的影响。不同排水速率条件下, 水位升降引起土体中水气压力变化、以及土体变形效应不同。排水速率越快, 水气压力波动幅度越大, 水位下降过程中对既有土洞产生的负压吸蚀作用越强, 土体剥落加快, 越易形成塌陷。既有土洞内水气压力变化时间响应与排水速率快慢呈正相关, 且随着水位波动次数的增加, 响应时间差逐次增多。排水速率快慢影响土洞塌陷难易程度。排水速率越快, 洞顶塌落量累计越快, 越易塌陷。

(2) 水位的升、降变化对土压、水气压力变化影响不同。土压的变化随水气压力变化而变化, 且两者之间存在相对滞后。水位上升产生的水气压力会导致上覆土体的土压增大, 水位下降土压则减小, 且随着排水速率的加快水气压力降幅出现明显增大。

(3) 水位升降次数对土洞土体剥落量影响作用

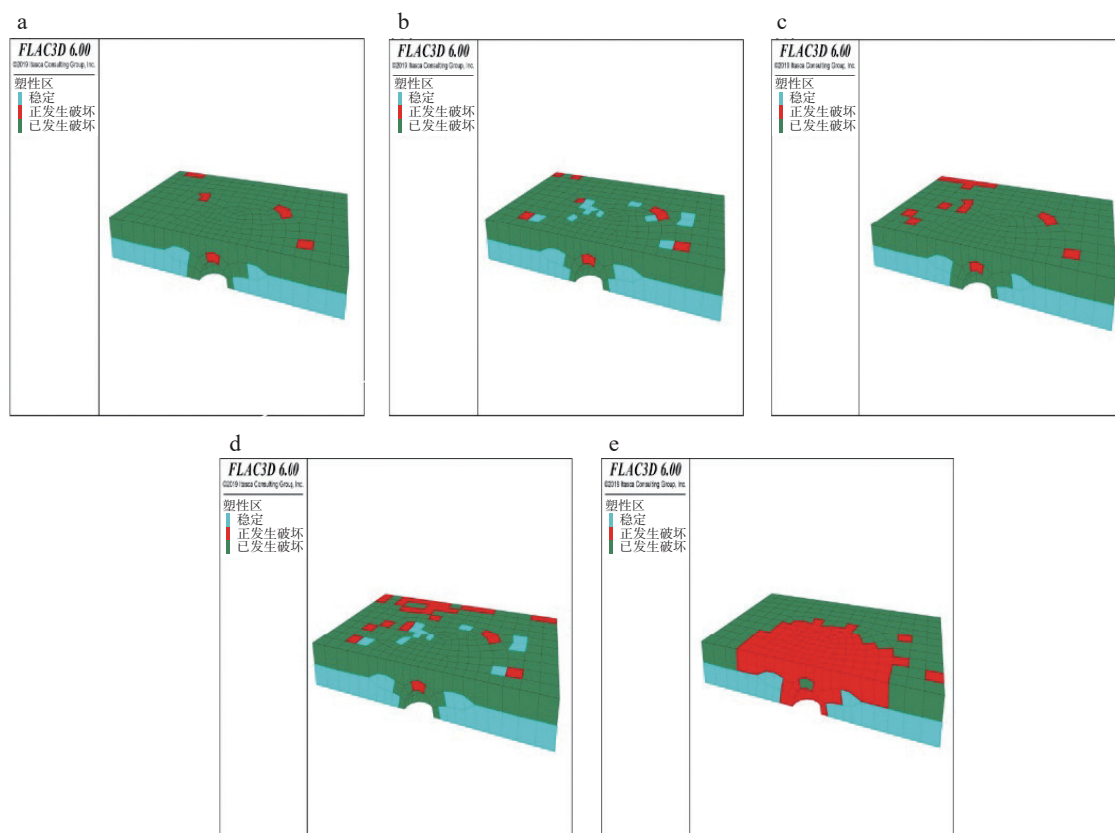


图 17 不同排水速率下塑性区分布图 (a) 排水速率为 $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) 排水速率为 $2.78 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) 排水速率为 $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) 排水速率为 $8.34 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) 排水速率为 $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 17 Distribution of plastic zones under different drainage rates (a) at the drainage rate of $2.08 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) at the drainage rate of $2.78 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) at the drainage rate of $8.34 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) at the drainage rate of $4.17 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

明显。水位升降次数影响既有土洞周边土体剥落量。洞顶累计塌落量均在土洞塌陷瞬间增长最为明显,随着水位波动次数的增加,累计塌落量会不断增加,但其塌落量增幅会相应减少。

(4)土洞塌陷是综合因素影响所致。排水速率的快慢影响塌陷口长短半轴长度在水位波动频次下的变化程度。水位波动次数也是影响既有土洞上覆土体塌陷程度的重要因素。随着水位波动频次的增多,既有土洞再塌陷程度呈先增加再逐渐稳定的规律。

(5)数值模拟能更好的反映水位下降过程中土洞塌陷的变化过程。数值模拟结果展示了三种排水速率下的水位下降过程中既有土洞侧壁及上覆土体内部的应力、位移、塑性区变化规律,并结合物理模型试验揭示了水位波动对岩溶土洞塌陷的作用规律。

参考文献

- [1] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵, 陈志新. 关于物理潜蚀作用及其概念模型的讨论[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 880-886.
- LI Xi'an, HUANG Runqiu, PENG Jianbing, CHEN Zhixin. Establishment of conceptual models of physical sub-ground erosion[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 880-886.
- [2] 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.
- [3] 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): 314-314.
- [4] He K Q, Liu C L, Wang S J. Karst collapse related to over-pumping and a criterion for its stability[J]. Environmental Geology, 2003, 43(6): 720-724.
- [5] He K Q, Wang B, Zhou D Y. Mechanism and mechanical model of karst collapse in an over-pumping area[J]. Environmental Geology, 2004, 46(8): 1102-1107.
- [6] Guo R J, Chen X J, Tang L M, Zhang X C. Study on ground col-

- lapse of covered karst soil caves by sudden drop of groundwater[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 7796401.
- [7] 郭锐剑, 陈学军, 段建, 唐灵明, 张晓宸. 考虑空间形状的覆盖型岩溶土洞降水致陷分析[J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(2): 453-461.
- GUO Ruijian, CHEN Xuejun, DUAN Jian, TANG Lingming, ZHANG Xiaochen. Study on precipitation-induced subsidence of covered karst soil caves regarding spatial shape[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2023, 58(2): 453-461.
- [8] 陈学军, 周明芳, 陈富坚, 肖明贵. 岩溶地区破坏性抽水致塌试验研究: 以广西桂林西城区为例[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(1): 79-82.
- CHEN Xuejun, ZHOU Mingfang, CHEN Fujian, XIAO Ming-gui. Destructive pumping test to study the characteristics of karst collapses in limestone region: A case study in the western urban area of Guilin City[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2002, 21(1): 79-82.
- [9] Jiang X Z, Lei M T, Gao Y L. Formation mechanism of large sinkhole collapses in Laibin, Guangxi, China[J]. *Environment Earth Sciences*, 2017, 76(24): 810-823.
- [10] Jia L, Li L J, Meng Y, Wu Y B, Pan Z Y, Yin R C. Responses of cover-collapse sinkholes to groundwater changes: A case study of early warning of soil cave and sinkhole activity on Datansha island in Guangzhou, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(13): 1-11.
- [11] 沈佳, 简文彬, 苏添金, 洪儒宝, 张少波. 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[J]. *水利与建筑工程学报*, 2020, 18(3): 1-8, 64.
- SHEN Jia, JIAN Wenbin, SU Tianjin, HONG Rubao, ZHANG Shaobo. Soil cave collapse process in karst area: A case study of soil cave collapse in Zhangkeng natural village, Longyan[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2020, 18(3): 1-8, 64.
- [12] Shi H, Li Q M, Zhang Q L, Yu Y Z, Xing Y J, Yu Kun. Mechanism of shallow soil cave-type karst collapse induced by water inrush in underground engineering construction[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(1): 1-8.
- [13] 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.
- [14] Xiao X X, Xu M, Ding Q Z, Kang X B, Xia Q, Du F. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes[J]. *Environment Earth Sciences*, 2018, 77(3): 64-77.
- [15] Xiao X X, Gutiérrez F, Guerrero J. The impact of groundwater drawdown and vacuum pressure on sinkhole development, physical laboratory models[J]. *Geology*, 2020, 279: 1-10.
- [16] 张鑫. 覆盖型岩溶塌陷模型试验与数值模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- ZHANG Xin. Model test and numerical simulation of overburden karst collapse[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [17] 张少波, 简文彬, 洪儒宝, 黄鹏, 陈鸿志, 刘奔. 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.
- ZHANG Shaobo, JIAN Wenbin, HONG Rubao, HUANG Peng, CHEN Hongzhi, LIU Ben. Experimental study on collapse of covered karst under water-level fluctuation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(3): 659-667.
- [18] 洪儒宝, 简文彬, 陈雪珍. 覆盖型岩溶土洞对地下水升降作用的响应及其塌陷演化过程研究[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(1): 240-247.
- HONG Rubao, JIAN Wenbin, CHEN Xuezheng. Study on the response of covered karst soil cave to groundwater fluctuation and its collapse evolution process[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(1): 240-247.
- [19] Lin H, Liu T Y, Li J T, Cao P. A simple generation technique of complex geotechnical computational model[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 1-8.
- [20] Liu H L, Li L C, Li Z C, Yu G F. Numerical modelling of mining-induced inrushes from subjacent water conducting karst collapse columns in Northern China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37(4): 652-662.
- [21] 邢宇健. 岩溶区地下水位动态变化诱发地表塌陷的机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- XING Yujian. Study on the mechanism of overburden collapse induced by groundwater fluctuation in karst area[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [22] 熊启华, 高旭, 徐庆, 王芮琼, 李祖春, 陶良. 覆盖型岩溶塌陷动态演化数值模型研究[J]. *安全与环境工程*, 2022, 29(1): 85-92.
- XIONG Qihua, GAO Xu, XU Qing, WANG Ruiqiong, LI Zuchun, TAO Liang. Dynamic evolution numerical model of cover-collapse sinkholes[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(1): 85-92.
- [23] 熊启华, 高旭, 涂婧, 王芮琼, 晏鄂川, 李祖春. 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.
- XIONG Qihua, GAO Xu, TU Jing, WANG Ruiqiong, YAN E'chuan, LI Zuchun. Mechanism of soil-cave type karst collapse under negative pressure and its mechanical model[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(9): 163-168, 180.
- [24] 薛明明, 陈学军, 宋宇, 高晓彤, 李辉, 甘小卉, 张铭致, 潘宗源, 唐灵明. 基于FLAC3D不同降雨速率下土洞致塌规律研究[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 905-914.
- XUE Mingming, CHEN Xuejun, SONG Yu, GAO Xiaotong, LI Hui, GAN Xiaohui, ZHANG Mingzhi, PAN Zongyuan, TANG Lingming. A study on collapse law of soil cave with different rainfall rates based on FLAC3D[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 905-914.
- [25] Fumagalli E. Model simulation of rock mechanics problem. rock mechanics in engineering practice[M]. London, J. Wiley Bul-

- letin Ismes Nr. 38, 1968: 46-78.
- [26] 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.

JIA Long, MENG Yan, GUAN Zhende. Evolution and numerical simulation of a karst soil cave[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3): 294-298.

Influence of water level dropping rates on the collapse of karst soil caves

CHEN Xuejun^{1,2}, XUE Mingming^{1,2}, SONG Yu^{1,2}

(1. Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The change of water-gas pressure caused by the rise and fall of water level will lead to the collapse of karst soil caves. In this study, we combined the physical model test and FLAC3D numerical simulation to simulate the soil cave collapse caused by water level fluctuation under the same water supply rate and different drainage rates. Besides, we also analyzed the influence of different drainage rates on the variation of water-gas pressure, soil pressure of the overlying soil layer and deformation of soil caves during the fluctuation. We also established the relationship between water-gas pressure and variables such as drainage rates, overburden deformation and cave, and put forward the action law of water level fluctuations on the collapse of soil cave. The results show as follows. (1) The influence of drainage rates on the variation of water-gas pressure is basically the same, but with different degrees. The change degree and response time of water-gas pressure are positively correlated with the drainage rate. (2) The change of overburden deformation and soil pressure is positively correlated with the change of water-gas pressure, but with different influence degrees. The drainage rate can only accelerate the change degree. (3) Degrees of deformation and collapse of soil caves are caused by comprehensive factors. The speed of the drainage rate and the number of water level fluctuations influence the changes of water-gas pressure in different degrees in soil caves and also influence the soil deformation caused by water level fluctuations. (4) The numerical simulation results are basically consistent with the results of laboratory model test. These results provide important theoretical support for further research on the laws of hydrodynamic factors affecting karst collapse and provide a basis for rational prevention and prediction of karst collapse.

Key words soil cave collapse, physical model test, FLAC3D numerical simulation, drainage rate, water level fluctuation

(编辑 张 玲)