

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.02.08

河床透-阻型岩溶塌陷形成机理

余政兴^{1,2}, 金福喜^{1,2}, 段选亮^{1,2}

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;

2. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083)

摘要: 岩溶塌陷具有突发性、隐蔽性等特点, 往往会造成重大灾害。为了预测岩溶塌陷的模式及可能性, 以某地区河床塌陷为研究对象, 对区域内河床透-阻型盖层岩溶塌陷的形成机理进行分析; 并基于潜蚀-失托-重力致塌理论, 建立土洞力学模型, 对岩溶水位下降时土洞的抗塌系数进行初步评价; 进一步采用 FLAC^{3D} 数值模拟对计算结果进行验证。研究表明该地区河床塌陷为地下水潜蚀作用下形成的土洞塌陷, 土洞稳定性与土洞高度、土体物理力学性质、水动力条件变化等因素相关。也表明河床岩溶塌陷往往在附近地下抽排水初期以及土洞形成初期就会发生, 一般先于两岸阶地的地面塌陷, 可作为大范围岩溶塌陷发生的前兆。

关键词: 透-阻型; 岩溶塌陷; 致塌机理; 力学模型; 数值模拟

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)02-0057-10

Formation mechanism of karst collapse with unconfined aquifer-aquited system in riverbed

YU Zhengxing^{1,2}, JIN Fuxi^{1,2}, DUAN Xuanliang^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The karst collapse is characterized by suddenness and concealment, which often causes major disasters. In order to predict the mode and possibility of karst collapse in the riverbed, the formation mechanism of the karst collapse with unconfined aquifer aquited system in riverbed is analyzed. Based on the theory of underground erosion to uplift pressure loss and gravity theory, the soil mechanics model is established to evaluate the collapse coefficient of the soil cave when the karst water level drops. The calculation results are further verified by FLAC^{3D}. The results show that the collapse of the river bed in this area is the collapse of the soil cavern formed by groundwater erosion. The stability of the soil cave is related to the height of the soil caven and the mechanical properties of the soil. The results also show that the karst collapse of the riverbed often occurs in the initial stage of pumping and drainage and in the early stage of soil cave formation. Generally, the riverbed collapses often before which in the land, and can also predict large-scale karst collapse.

Keywords: unconfined aquifer-aquited system; karst collapse; collapse mechanism; mechanical model; numerical simulation

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-10-11

第一作者: 余政兴(1995-), 男, 四川宜宾人, 地质工程专业, 在读硕士, 主要研究方向为地质灾害防治。E-mail: 1131835441@qq.com

通讯作者: 金福喜(1965-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 副教授, 从事地质灾害防治相关教学与科研工作。E-mail: csufxj@126.com

0 引言

河床岩溶塌陷的情况时有发生。1984 年,铜陵市新桥矿区的疏干排水试验,造成圣冲河新、老河道以及附近水塘内出现 30 多处塌陷,河水水位大幅下降、水塘漏失,随后附近房屋大量开裂^[1]。1995 年,临沂市兰山药材批发市场小涑河河床内出现多个圆形塌坑,造成小涑河污水随塌陷坑倒灌污染地下水,调查发现塌陷东边和南边各有一眼抽水井,出水量 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[2-3]。河床塌陷造成河水倒灌,地下水污染,河水断流,影响附近人们的正常生产生活。同时也威胁水利设施,存在严重的安全隐患。鉴此,对河床岩溶塌陷情况应予以充分重视,应查明河床岩溶塌陷形成原因与塌陷机理,为地面塌陷地质灾害防治及规划工作提供依据。

长期以来,大量学者在岩溶地面塌陷的成因机理与预测评价等方面进行了大量研究。程星等^[4]依据覆盖层性质将岩溶塌陷分为单一阻水型、单一透水型、无盖层型、阻一透型、透一阻型、透一阻一透型、阻一透一阻型 7 种概化模型,并对每一种概化模型的致塌机制进行了分析和讨论;康彦仁^[5]按塌陷产生的主导因素和受力状态,将岩溶地面塌陷划分为:重力致塌、潜蚀致塌、气爆致塌、真空吸蚀致塌、振动致塌、荷载致塌、溶蚀致塌和根蚀致塌,并提出了相应 8 种致塌模式。大量调查发现,岩溶塌陷主要诱发因素是降雨、地下水位波动。XIAO H 等^[6]评价了降雨、地下水渗漏和地下水位差对覆盖型岩溶塌陷影响,发现佛罗里达州中部塌陷主要为矿山抽排水造成的地下水位差导致;苏添金等^[7]建立了岩溶塌陷力学模型,并采用 FLAC^{3D}模拟了地下水位下降条件下岩溶土洞的发育过程,得出了岩溶塌陷系数 K 与地下水位差呈线性关系。吴庆华等^[8]基于物理模型试验定量研究了砂土覆盖岩溶塌陷过程与机理。

本文在前人研究的基础上,对研究区岩溶塌陷机理进行定性分析,再从渗透力学、土力学等理论出发,进行相关公式推导与数值模拟,解释岩溶水位下降对河床透一阻型盖层岩溶土洞稳定性的影响,以期为区域覆盖型岩溶塌陷的预防工作提供参考。

1 研究区概况

1.1 岩溶塌陷基本情况

2012 年 11—12 月,某地区河床分别发生 2 处塌陷(图 1),造成河水倒灌,塌陷区影响范围约

5 000 m^2 ,塌陷坑附近 4 户民房严重开裂,直接经济损失约 300 万元。2013 年河床围堰建成后塌陷坑已回填。2013 年 9—10 月,距河床塌陷仅 200 m 的河流阶地出现 2 处塌坑,2014 年 11 月塌坑再次活化和发展,同时附近居民区房屋开始出现大面积开裂。截止 2019 年 6 月,该区域共开裂房屋 105 户,威胁人口达 504 人。由于区域内河床塌陷具有优先性,故研究河床塌陷的成因机理对区域内地质灾害防治工作布置具有重要意义。



图 1 塌陷坑及部分河床

Fig. 1 Karst collapse and partial riverbed

1.2 地质环境概况

研究区主要为溶蚀侵蚀河谷地貌,由于下游有一拦水坝,塌陷处河面高程常年稳定在 86.5 m。区内沟谷宽缓,河谷平坦开阔,地形坡度一般小于 5° 。河床基底为二叠系下统栖霞组(P_1q)灰岩、泥质灰岩。据勘察孔资料,河床内第四系厚度在 4.80 ~ 12.6 m,主要为卵石—粉质黏土二元结构土体(图 2)。区内构造以断层为主,褶曲次之。主要断层逆断层 F5 位于研究区南部,长 20 km,走向近东西;隐伏断层 F8 为 F5 断层北盘分布的北西向次级断层,位于区内的中部,走向北西,走向延展长 1 260 m,该断层控制了区内冲沟的发育方向和地下岩溶的发育走向,导致灰岩溶洞水溃入附近的露采矿坑,是区内主要含水层向采坑直接充水的通道。隐伏断层 F9 为 F5 断层北盘分布的东西向次级断层,位于河流的南侧部,走向近东西,走向延展长约 1 500 m,河床内两处塌陷均位于该断层附近。该断层基本控制了河流南岸附近地下水的流向,使地下水向隐伏断层 F8 汇集流动,最终河水与露采矿坑贯通。

1.3 人类工程活动概况

距塌陷点直线距离 1.2 km 处有一露天采矿场,矿场自 1980 年开采至今已形成一个近东西向的长约 1 600 m,宽约 600 m 的大采坑。采场底部已延深至

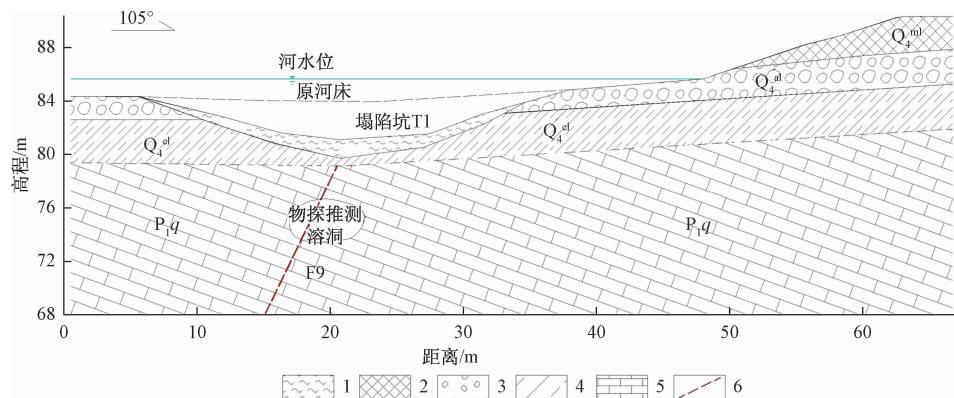


图2 塌陷坑 T1 地质剖面图

Fig. 2 The geological profile of karst collapse

1-淤泥;2-素填土;3-卵石;4-粉质黏土;5-灰岩;6-隐伏断层

±0 m 标高,垂直坑深达 104 m,2012 ~ 2015 年,每天抽水量在 $4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。矿山开采前,地下水流向总体受地形控制,即由高处向低处汇流,由山坡向溪沟,再经溪沟汇入河流。开采后,地下水尤其是下层岩溶水开始由四周向矿坑汇集。在矿山开采的条件下,采坑排水形成了降落漏斗,据有关勘察单位抽水试验结果计算,降落漏斗半径为 2 200 m。塌陷处河水与矿坑坑底水位相差 86.5 m,水平距离约 1 200 m,水力坡降达 72.1‰。同时勘察发现 F8 附近岩溶水位沿矿坑方向逐渐降低,说明河水通过 F8 断层大量排泄到矿坑。水动力条件的改变,使地下水流程变得复杂,以矿坑为中心汇集的岩溶地下水被人工大量排出,导致区域内发生岩溶塌陷。由于大量抽排水造成附近多处塌陷,该矿场已于 2016 年 1 月停产,目前由于地下水补给,矿坑形成巨大水库,水库水位基本与河水位平齐。2016—2019 年,由于地下水位回升,周围未新增塌陷。塌陷坑、断裂带、矿坑相对位置关系见图 3。

2 研究区河床岩溶塌陷致塌机理分析

2.1 塌陷分布特征与发育模式

在时间分布上,两处河床岩溶塌陷均发生在 2012 年 11—12 月,两处阶地塌陷发生于 2013 年 9—10 月,复活于 2014 年 11 月。故区内 10—12 月为岩溶塌陷高发期,且阶地塌陷明显滞后于河床塌陷。根据对阶地塌陷坑 T4 附近的岩溶水位动态监测数据分析(图 4),在两处阶地塌陷复活的 2014 年 11 月,地下水位监测钻孔 K1 测得岩溶水水位为 7.30 ~ 11.40 m,而该处土层厚度约 9 m。可知岩溶水在基岩附近波动时期更易发生地面塌陷。该地区岩溶水位则受降雨以及矿山抽排水共同控制。

空间分布上,4 处岩溶塌陷均分布于二叠系下统栖霞组(P_1q)质纯层厚碳酸盐岩分布区,且沿断裂带 F8、F9 分布;在地形上,区内塌陷与房屋开裂均发育在相对低洼阶地、谷地,标高 85 ~ 98 m;同时,塌陷均发生于第四系相对较薄处,覆盖层厚度为 6 ~ 10 m;区内塌陷的分布受地下水径流作用的控制明显,塌陷与房屋开裂均位于磷矿抽排水降落漏斗影响范围内。

综合上述分析,该地区河床岩溶塌陷发生的主要因素有:(1)区内碳酸盐质纯层厚,岩溶发育强烈。F8、F9 断裂为导水性断层,断层附近岩溶更为发育,致使河水与岩溶地下水有了直接的水力联系塌陷,并且塌陷处有开口型溶洞,存在岩溶塌陷发育的条件;(2)矿山长期疏排岩溶水导致区域水文地质条件发生变化,塌陷区由天然状态下的岩溶水排泄区变成了河水补给岩溶水的补给区(图 5)。在采坑大量抽排水的情况下,河水与采坑之间形成较大水力梯度,造成河水大量渗流补给岩溶水,渗透力增大,加速塌陷产生;(3)由于河水对土体的侵蚀、潜蚀作用,河床内覆盖层较薄,且土体在河水的浸润下力学性质变差,易于塌陷发生。在综合因素的作用下,可溶岩上覆土体的力学平衡遭到破坏,最终导致溶洞上覆土体的抗塌力小于下塌力,土体失稳陷落而形成岩溶塌陷。

该地区河床岩溶塌陷的破坏模式为“潜蚀—失托—重力致塌”型塌陷。即第四系覆盖层在岩溶水位下降后浮托力减小或消失,在地下水流的渗透作用下,使土层产生潜蚀或流失,形成土洞,土层厚度减小。同时上层河水不断补给岩溶水并冲刷土体,致使溶洞上覆的土体塌落,并在自重作用下形成岩溶地面塌陷。

其岩溶地面塌陷可以概括为如下地质过程:(1)

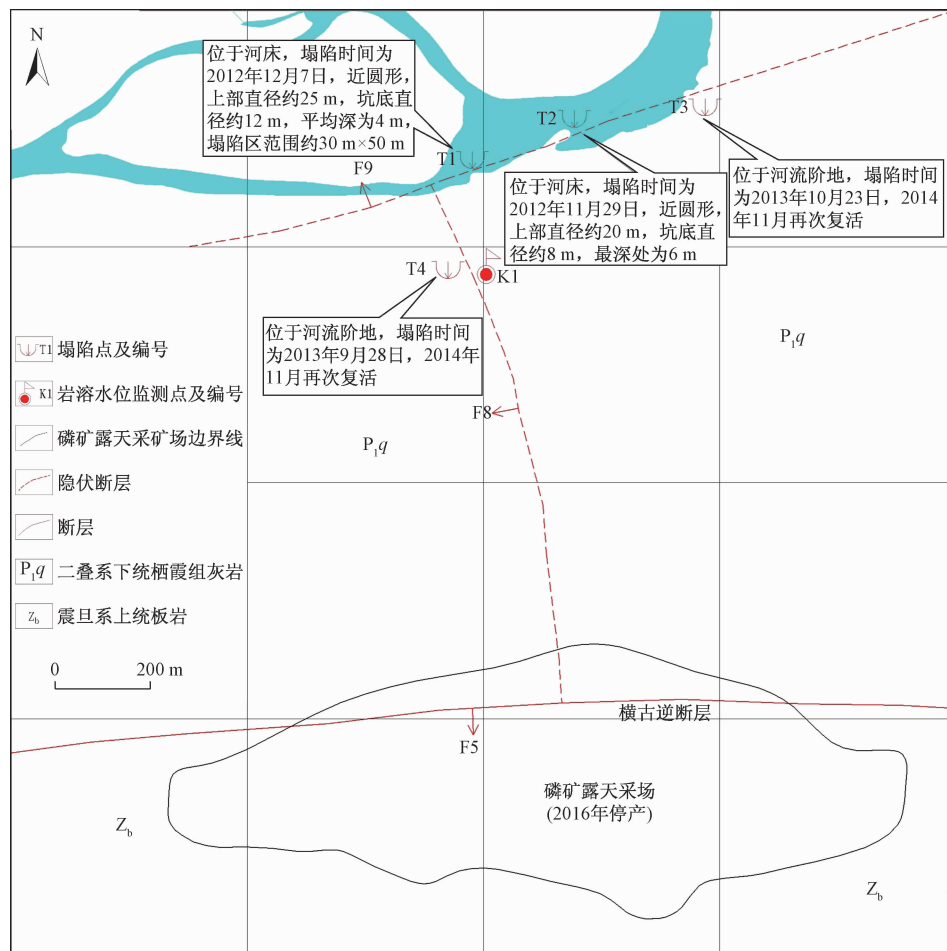


图3 研究区岩溶塌陷分布图

Fig. 3 The distribution of karst collapse in research area

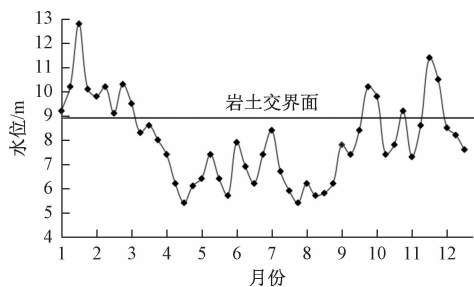


图4 2014年岩溶水位动态监测曲线

Fig. 4 Dynamic monitoring curve of karst water level in 2014

初始状态:可溶岩中岩溶通道与上覆土体连通,但由于岩溶地下水位较高,与河水未形成相对渗流,岩溶通道附近土体保持稳定。(2)塌陷孕育:由于矿山抽排水导致岩溶水位下降,岩溶地下水与河水间形成相对渗流,岩溶通道开口处土体逐渐被水流冲刷带走,土洞初步形成。同时在土岩界面可溶岩开口处的集中渗流效应使得土洞边界不断扩大,土洞开始向上方延伸。(3)塌陷形成:随着土洞不断扩大,土洞顶板不能承受

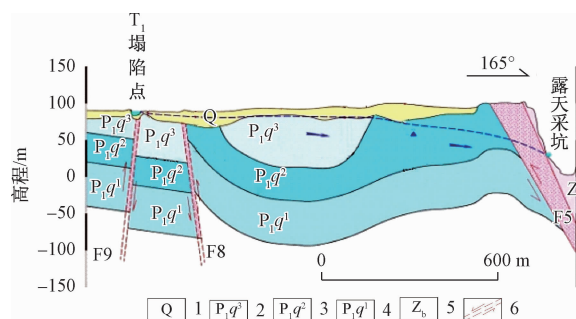


图5 研究区水文地质剖面图

Fig. 5 Hydrogeologic profile of research area

1-第四系覆盖层;2-二叠系下统栖霞组第三段;3-二叠系下统栖霞组第二段;4-二叠系下统栖霞组第一段;5-震旦系上统;6-断裂带

自重与河水重量,开始向下迅速塌落,塌落土体堆积在土洞中并最终形成塌陷坑。(4)塌陷扩大:塌陷坑形成后,河水与岩溶通道完全贯通,河水不断向岩溶通道内补给,同时冲刷并带走通道附近土体,塌陷范围不断扩大。

2.2 塌陷力学分析

该地区塌陷点附近覆盖层厚度较薄,为卵石—粉质黏土二元结构土体。根据勘察资料,河床塌陷 T1、T2 上部卵石层(淤泥层为后期河水冲刷产生)厚度分别为 2 m、2.5 m,下部粉质黏土层厚度分别为 7 m、7.5 m,符合程星等^[4]提出的 7 种模型中的透—阻型盖层地质概化模型。对于该类地质模型,邢宇健^[9]将土洞形态概化为半球体,考虑了水土自重,侧壁摩擦力等,根据极限平衡理论对某一时刻土洞的受力状态进行分析,但尚未考虑地表水渗透对土洞产生的作用力。而陶小虎等^[10]比较了潜水位上升与承压水位下降对阻水层渗透稳定性的影响后发现,水对饱和土壤中土体的作用力主要受渗透坡降的影响。由于矿山开采时间较长(20 世纪 80 年代开始开采),岩溶地下水下降速度较慢,土洞内负压有足够时间消散,故不考虑真空吸蚀作用。为方便力学分析,作出以下假设:(1)河水仅对土体有向下方向的渗透力,不产生水平方向的冲刷力;(2)土洞形态为理想半球体;(3)土洞为完全空腔,内部气压与大气压力相等;(4)不考虑“土拱”作用。综合考虑土体自重、河水荷载、侧壁摩擦力、渗透力等因素,可得该区域岩溶地面塌陷的力学模型(图 6)。

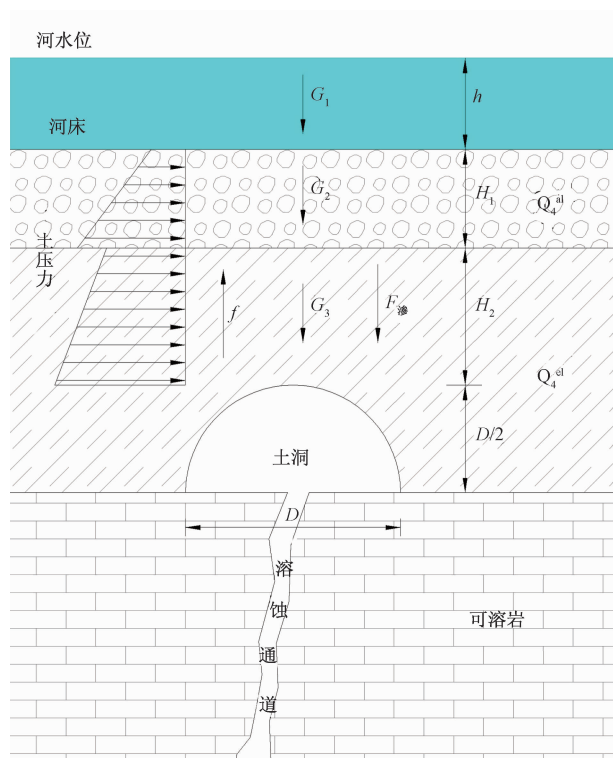


图 6 河床岩溶地面塌陷力学模型

Fig. 6 The mechanical model of karst collapse in riverbed

假设土洞为半球形,水、两层土重度分别为 γ_w 、 γ_1 、 γ_2 (其值等于饱和重度),土洞所受水土自重为:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{\pi}{4} D^2 (\gamma_w h + \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2) \quad (1)$$

式中: G ——土洞上部水土体总重/kg;

G_1 ——土洞上部水体重量/kg;

G_2 ——土洞上部第一层土重量/kg;

G_3 ——土洞上部第二层土重量/kg;

D ——土洞直径/m;

γ_w ——河水重度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

γ_1 ——第一层土体重度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

γ_2 ——第二层土体重度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

h ——河水厚度/m;

H_1 ——第一层土厚度/m;

H_2 ——第二层土厚度/m。

河水对土洞产生的渗透力包括两部分,首先由于土洞内水体排出空气进入,浮力减小,这一过程相对于给土洞顶板施加一个与浮托力大小相同,方向相反的力,其次水流下渗对土体仅产生同方向的拖拽力^[9-10],根据周建等^[11]推导结果,该力可由式(2)表示:

$$F_{\text{渗}} = \frac{\pi \gamma_w D^3}{8} + \frac{\pi \gamma_w u_w^2 D^2}{8g} \quad (2)$$

式中: u_w ——渗透流速, m/s, 通常小于 10^{-4} m/s, 故第二部分计算中可忽略不计。

土洞顶板所受向上荷载主要是土洞顶板侧面产生的静摩擦力,该力主要由土的侧压力产生,借鉴库伦土压力理论,假设外部土体对影响区域内的土体作用处于主动极限平衡状态,则两层土水平侧压力分别为:

$$\sigma_{x1} = K_{a1} \gamma_w H_1 h + (1/2) K_{a1} \gamma_1 H_1^2 - 2C_1 H_1 \sqrt{K_{a1}} \quad (3)$$

式中: σ_{x1} ——第一层土水平侧压力;

K_{a1} ——第一层土主动土压力系数, $K_{a1} = \tan^2(45^\circ - \varphi_1/2)$;

C_1 ——第一层土黏聚力/kPa;

φ_1 ——第一层土内摩擦角/°。

$$\sigma_{x2} = K_{a2} (\gamma_w H_2 h + \gamma_1 H_1 H_2) + (1/2) K_{a2} \gamma_2 H_2^2 - 2C_2 H_2 \sqrt{K_{a2}} \quad (4)$$

式中: σ_{x2} ——第二层土水平侧压力;

K_{a2} ——第二层土主动土压力系数, $K_{a2} = \tan^2(45^\circ - \varphi_2/2)$;

C_2 ——第二层土黏聚力/kPa;

φ_2 ——第二层土内摩擦角/(°)。

最大静摩擦力为:

$$f = f_1 + f_2 = \pi DH_1(\sigma_{x1} \tan \varphi_1 + C_1) + \pi DH_2(\sigma_{x2} \tan \varphi_2 + C_2) \quad (5)$$

式中: f ——最大静摩擦力/kN;

设 K_s 为稳定系数,则:

$$K_s = \frac{\text{抗塌力}}{\text{下塌力}} = \frac{f}{G + F_{\text{渗}}} \quad (6)$$

式中: K_s ——稳定系数。

若第一层土为砂卵石,则 $C_1 = 0$ 。将(1)(2)(5)式带入(6)式可求得 K_s 。当稳定系数 $K_s < 1$ 时,则可能产生地面塌陷,稳定系数 $K_s = 1$ 时处于塌陷临界状态, $K_s > 1$ 时土洞稳定。

将勘察报告提供的塌陷坑 T1 岩土参数表 1 带入(6)式。在塌陷临界状态下,即 $K_s = 1$ 时,得 $D = 4.2$ m,即该塌陷坑临界土洞高度仅为 2.1 m,说明在土洞形成初期就发生塌陷,这也与实际情况相符合。但由于未考虑土拱效应等影响,因此结果比较保守,需要用数值模拟来进一步研究。

表 1 水土参数取值

Table 1 The parameter of soil and water

名称	厚度 h /m	重度 $\gamma'/(kN \cdot m^{-3})$	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
河水	2	10	—	—
卵石	2	22	0	35
粉质黏土	7	19.8	25	12

3 基于数值模拟的岩溶土洞塌陷过程分析

对于岩溶塌陷的数值模拟研究,多采用 FLAC^{3D} 有限差分数值软件^[12-14]。针对研究区河床岩溶塌陷,利用 FLAC^{3D} 进行数值模拟和预测评价,主要模拟地下水

对覆盖层潜蚀作用引起的岩溶土洞扩大的过程,分析土洞大小变化以及岩溶水位下降对地面稳定性的影响,进而进行岩溶塌陷发展预测与评价。

3.1 数值模型的建立

依照地区塌陷附近实际情况设计两组数值模拟方案,其中模型二为对照组,土体 c 、 φ 值均较大,以模拟阶地岩溶塌陷,两种模型土体参数均由勘察报告提供(表 2)。

模型一:覆盖层土体主要分为 2 层:卵石 2 m 厚,粉质黏土 7 m 厚,由此进行简化建立数值模型,模型尺寸为 18 m × 9 m × 9 m,上部施加 20 kPa 的均布荷载,等效于 2 m 河水的自重荷载。由于河水作用,设置土体顶面孔隙水压力为 20 kPa,底部孔隙水压力为 110 kPa。

模型二:覆盖层土体主要分为 3 层:素填土 1 m 厚(等效于 2 m 河水荷载),卵石 2 m 厚,粉质黏土 7 m 厚,模型尺寸为 20 m × 10 m × 10 m。初始状态下,假定地下水位在土体顶面,则土体顶面孔隙水压力为 0 kPa,底部孔隙水压力为 100 kPa。

在河水位为 2 m 情况下,设置两者初始土洞高度均为 1.5 m,土洞按 $\Delta H = 0.5$ m 速率往各方向等速扩大,最终直到土洞破坏,得到临界土洞大小。由于土体中的渗流为持续过程,渗流产生的托拽力仅对土洞的发育过程影响较大,而对某一时土洞稳定性的影响较小,故对临界土洞模拟时关闭渗流功能,仅考虑自重效应以及浮托力消失作用。而在临界土洞条件下,再开启 FLAC^{3D} 渗流计算功能,对抽水前后的孔隙水压力、应力、位移等变化情况进行模拟分析。

本次土体模型选用莫尔-库仑模型,计算满足莫尔-库仑破坏准则,渗流模拟满足达西定律。

表 2 数值模拟土体参数取值

Table 2 The parameter of soil in numerical simulation

模型编号	地层	重度 $\gamma'/(kN \cdot m^{-3})$	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	泊松比	弹性模量/MPa	孔隙度	渗透系数 $K/(cm \cdot s^{-1})$
模型 1	卵石	22	0	35	0.2	30	0.5	5.0×10^{-2}
	粉质黏土	19.8	25	12	0.35	12	0.35	1.0×10^{-6}
	素填土	18.8	12	9	0.37	8	0.4	1.0×10^{-5}
模型 2	卵石	22	0	35	0.2	30	0.5	5.0×10^{-2}
	粉质黏土	19.8	35	15	0.35	12	0.35	1.0×10^{-6}

3.2 计算成果分析

首先研究不同土洞高度在岩溶水位下降后的稳定性,其中模型 1(图 7),共两层土体,划分网格数 11 664 个,底部挖空以模拟天然土洞。由于本次计算未限定

计算步数,故计算后需使不平衡力达到收敛。最大不平衡力随着迭代步数的增加初始不平衡力逐渐减小(图 8),减小至 1×10^{-6} Pa,趋近于 0,说明在天然重力场条件下,模型通过自身的调整可以达到自平衡,天然

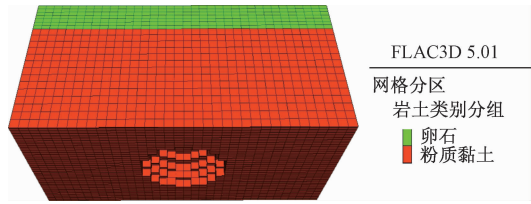


图 7 三维模型网格划分
Fig. 7 Mesh of the 3D numerical model

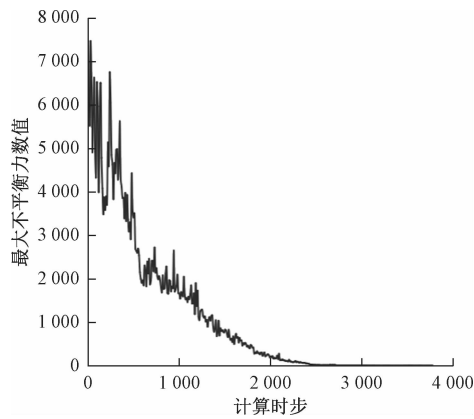


图 8 最大不平衡力曲线
Fig. 8 Maximum unbalanced force curve

应力场顺利形成。

地面塌陷发生的标志为土洞周围塑性区与地表贯通。在模型 1 中,截取模型中心竖直方向剖面(图 9),塑性区首先出现在土洞顶板两侧,随后在地表卵石层也有出现,这是由于卵石层塑性较低,下部土体变形后

极易产生扰动。随着土洞不断扩大,塑性区的范围也越来越大,溶洞顶板处的塑性区也不断地增大。在土洞高度达到 2.5 m 时,土洞顶板塑性区与地表贯通,塌陷发生。故模型 1 中临界土洞高度在 2 ~ 2.5 m,与(6)式计算得到的临界土洞高度 2.1 m 的数值较吻合。而在模型 2 中当土洞高度达到 3.5 m 时塑性区才出现贯通(图 10),这也佐证相似地层条件下,河床岩溶塌陷较陆面塌陷更易发生。

采用模型 1 处于临界土洞($R = 2.5\text{ m}$)时状态进行渗流模拟,定义初始水位为土体顶部以上 2 m,渗流未开始时,不存在超孔隙水压力。未抽水条件下,土体内未产生渗流,最大孔隙水压力出现在模型底部,为 110 kPa,受河水作用,顶部孔隙水压力为 20 kPa(图 11)。

把土洞底部设置为透水边界,以模拟岩溶水位下降到基岩面以下。选取距离模型底部 5 m 处剖面研究孔隙水压力的变化,截取运算时步分别为 500、1 000 和 2 000 时步的孔隙水压力图(图 12)。分析发现:随着渗流进行,中心位置孔隙水压力逐渐降低,且越靠近中心部分,孔隙水压力越小,水位下降越快;同时降落漏斗形成明显,且影响范围逐渐增大。

在剖面中心位置设置孔隙水压力监测点,得到降落漏斗中心水位降深与运算时步对应曲线(图 13),可知在计算时步达到 2 000 后孔隙水压力变化较小,说明土体此时已发生塑性破坏,土体内部已形成贯通的管流通道。

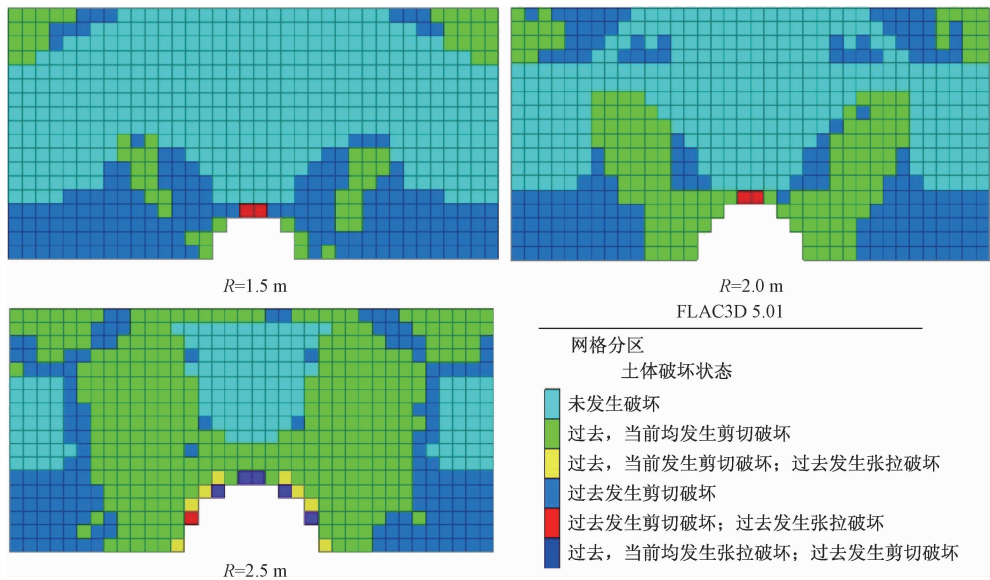


图 9 模型 1 土体塑性区分布
Fig. 9 Distribution of plastic zone in model 1

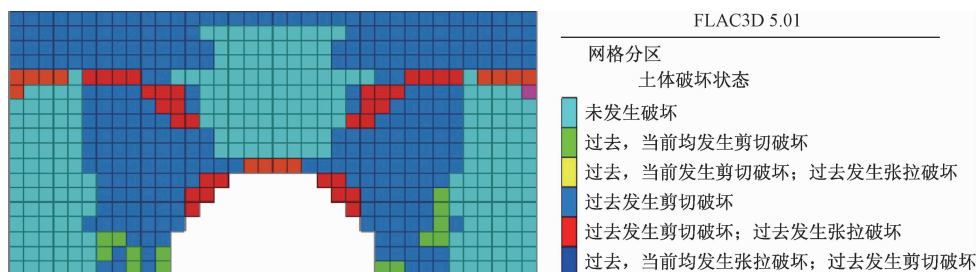
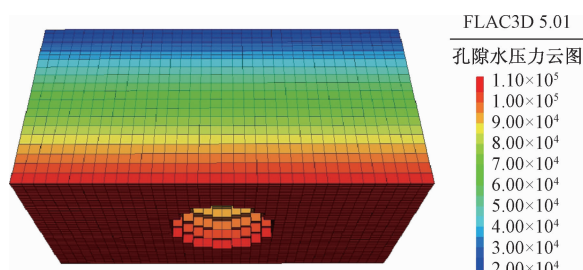
图 10 模型 2 土体塑性区分布 ($R=3.5$ m)Fig. 10 Distribution of plastic zone in model 2 ($R=3.5$ m)

图 11 抽水前孔隙水压力分布

Fig. 11 Pore water pressure distribution before pumping

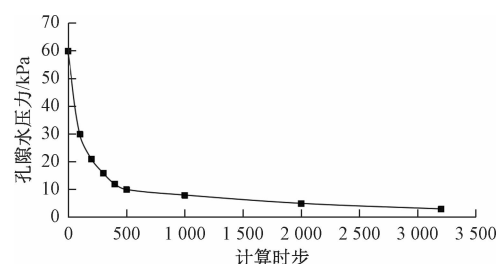


图 13 中心孔隙水压力—计算时步对应曲线

Fig. 13 Center pore water pressure—time step corresponding curve

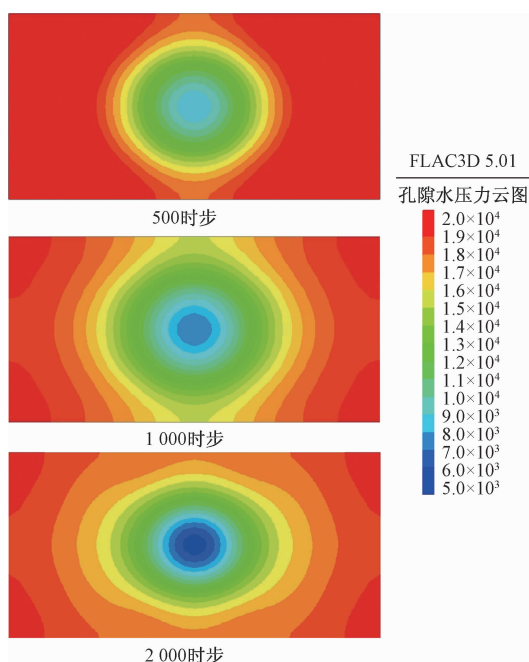


图 12 渗流过程孔隙水压力剖面

Fig. 12 Pore water pressure profile during seepage

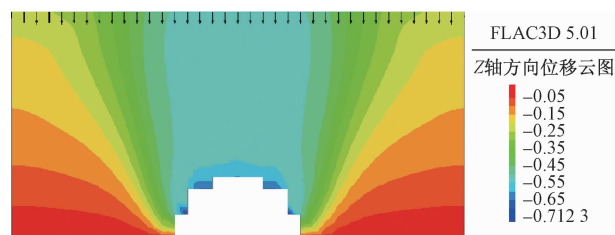
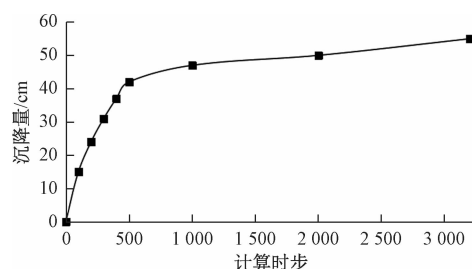
图 14 模型 1 ($R=2.5$ m) 位移云图Fig. 14 Displacement nephogram in model 1 ($R=2.5$ m)

图 15 土洞正上方地表位移监测曲线

Fig. 15 Surface displacement monitoring curve

图 14 为 3 200 时步的位移云图。可看出土洞正上方土体变形大于周围土体变形,说明该土洞先由中心塌陷,周围土体在水流与自重的影响下随后塌陷,以致塌陷范围不断扩大。为更直观的展现变形变化规律,在土洞正上方地表土体位置设置监测点,监测曲线如图 15 所示。随着计算步数增加以及渗流进行,地表

位移量逐步增大,在 500 时步后位移增长明显放缓,3 200 步时位移已达 55 cm。

图 16 为 3 200 时步的的应力云图,由图 16 可知,土洞形成后,地下水渗流会对周围土体应力场造成影响,导致靠近土洞的土体,应力变化更大。这主要受两个方面影响:首先是由于土洞的形成和发展使得周围

土体受到的初始压应力得到释放,以土洞为中心应力重分布。再者由于地下水渗流与重力场共同作用,在土洞顶部形成一个呈漏斗形的应力松弛带,由内向外变化逐渐减小。土洞顶部附近土体由高应力转变为低应力或零应力,导致土体内部发生剪切破坏,最终塌陷发生。

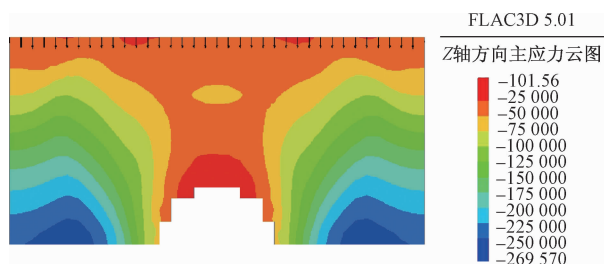


图 16 模型 1 ($R = 2.5$ m) 应力云图

Fig. 16 Stress nephogram in model 1 ($R = 2.5$ m)

4 结论

(1) 该地区河床产生岩溶塌陷主要由于露采矿山大量抽排水使河水与采坑之间水力梯度增大,河水下渗产生强烈潜蚀效应,使土洞形成并逐步向上扩展,当土洞顶板不能支撑自重时,发生地面塌陷。

(2) 理论计算表明岩溶塌陷稳定系数 K_s 主要受土层厚度、土体力学性质、土洞高度、岩溶水下降幅度等影响。计算得出研究区河床塌陷临界土洞高度为 2.1 m,与实际情况较符。

(3) 数值模拟结果表明该地区河床塌陷的临界土洞高度为 2~2.5 m,小于该地区阶地岩溶地面塌陷的临界土洞高度 3.5 m。由于缺少上层滞水的渗透作用,阶地土洞的扩展速度也较慢,能够解释河床塌陷发生后 1~2 年内周围 200 m 内陆续出现地面塌陷的原因。

(4) 渗流模拟结果证明了岩溶水下降后潜蚀效应明显,区内岩溶塌陷产生的根本原因是水动力条件发生变化。故在岩溶地区抽排地下水时,应在控制最大降深,还需要控制抽排水速度,防止出现土体渗透破坏。

(5) 由于河床岩溶塌陷可作为大规模阶地塌陷发生的前兆,故对类似区域的河床、水塘发生的塌陷应引起重视。在河床塌陷发生后应及时对塌陷坑进行注浆或回填,防止岩溶管道被疏通;宜立即停止周围大规模抽排水活动;需对周围地下水变化进行长期监测,地下水在岩土交界面波动时期尤其注意防范地面塌陷。

参考文献:

- [1] 李国峰. 安徽省沿江地区岩溶塌陷机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 20-28. [LI G F. Study on the mechanism of karst collapse along the Yangtze River area in Anhui Province [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015: 20-28. (in Chinese)]
- [2] 姚春梅, 冯克印, 王元波, 等. 数值模拟在岩溶塌陷预警系统建设中的应用——以临沂市城区岩溶塌陷为例[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 94-97. [YAO C M, FENG K Y, WANG Y B, et al. Application of numerical modeling of groundwater flow to the construction of early-warning system of karst collapse: exemplified by the karst collapse in the Linyi urban area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(4): 94-97. (in Chinese)]
- [3] YANG P J. Application of groundwater flow numerical simulation method in early warning of karst collapse in Linyi [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018: 35-37.
- [4] 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. [CHENG X, HUANG R Q. Geological conceptual models of karst collapse [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, 29(6): 30-34. (in Chinese)]
- [5] 康彦仁. 试论岩溶地面塌陷的类型划分[J]. 中国岩溶, 1984, 3(2): 151-160. [KANG Y R. Classification of land collapses in karst regions [J]. Carsologica Sinica, 1984, 3(2): 151-160. (in Chinese)]
- [6] XIAO H, LI H M, TANG Y. Assessing the effects of rainfall, groundwater downward leakage, and groundwater head differences on the development of cover-collapse and cover-suffusion sinkholes in central Florida (USA) [J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 274-286.
- [7] 苏添金, 洪儒宝, 简文彬. 覆盖型岩溶土洞致灾过程的数值模拟与预测[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 179-187. [SU T J, HONG R B, JIAN W B. Numerical simulation and prediction of covered karst collapse [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 179-187. (in Chinese)]
- [8] 吴庆华, 张伟, 刘煜, 等. 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 Q H, ZHANG W, LIU Y, et al. Quantifying the process of karst collapse by a physical

- model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35 (3): 52 - 58. (in Chinese)]
- [9] 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: 18 - 23. [XING Y J. Study on the mechanism of overburden collapse induced by groundwater fluctuation in karst area [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 18 - 23. (in Chinese)]
- [10] 陶小虎, 赵坚, WANG X M, 等. 地下水位变化对透-阻型岩溶塌陷影响的分析 [J]. 中国岩溶, 2017, 36 (6): 777 - 785. [TAO X H, ZHAO J, WANG X M, et al. Analysis of seepage effect on the formation of sinkhole in unconfined aquifer-aquitard system caused by groundwater changes [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36 (6): 777 - 785. (in Chinese)]
- [11] 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. [ZHOU J, ZHANG Y Q, FANG Y G, et al. Analysis of joint action of water level fluctuation and rainfall on the influence of karst ground collapse [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14 (1): 218 - 222. (in Chinese)]
- [12] 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: 44 - 77. [ZHANG X. Model test and numerical simulation of overburden karst collapse [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 44 - 77. (in Chinese)]
- [13] 孙金辉. 覆盖型岩溶塌陷临界参数模型试验与数值模拟研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 35 - 48. [SUN J H. Study on critical parameter in cover karst collapse by model experiment and numerical simulation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 35 - 48. (in Chinese)]
- [14] 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 L, MENG Y, GUAN Z D. Evolution and numerical simulation of a karst soil cave [J]. Carsologica Sinica, 2014, 33 (3): 294 - 298. (in Chinese)]

关于为《中国地质灾害与防治学报》征集照片的启事

为了使本刊论文内容更加形象、生动,便于读者清晰地识别地质灾害的各种地质作用及现象,反映治理措施及治后效果,本刊每期另附彩版照片。凡为彩版或封面提供照片者,每版应附 100 ~ 500 字说明,每张照片也应有相应说明。为保证出版效果,请提供原照片;若用数码相机拍摄,请采用 200 万像素以上的模式拍照。照片的分辨率应在 1 600 × 1 200 dpi 以上 (Fine 或 High 模式); 如照片文件为扫描版,请采用 600 dpi 以上的设置扫描。如用电子邮件发送,请提供照片的原电子文档 JPG 格式 (勿自行用 Photoshop 或 ACDsee 等软件处理), 以保证照片的清晰度。另请提供 1 份 Word 文档,但其仅供排版时参考,不能作为印刷、排版的原始稿件。提供的照片采用刊登后,付稿酬。欢迎各地、各界同仁踊跃选送各种典型照片 (含国外照片)。

感谢您的支持与合作!

本刊网址: www.zgdzzhyfzxb.com

电子信箱: nitx@cigem.cn

《中国地质灾害与防治学报》编辑部