

[文章编号] 1003—4684(2022)05-0093-05

张湾村峡卡河岩溶塌陷数值模拟及成因

钟 瑶

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为探寻地下水位下降时岩溶塌陷的演化过程,以张湾村峡卡河研究区岩溶塌陷为研究对象,结合工程资料,通过 FLAC3D 数值模拟软件对岩溶塌陷的过程进行计算分析,得到计算模型在地下水位下降三个阶段下的应力应变云图,从而得出研究区溶洞的发育规律。研究结果表明:在地下水位下降时,土体受剪应力集中作用发生破坏,导致溶洞直径拓展发育,与溶洞坍塌时呈坛状或碟状塌陷坑形状相符。溶洞顶部出现较大应力应变值,且土层越高应变差值越大,最大垂向位移出现在溶洞的顶部位置,同时顶部塑性张拉区继续向上延伸最终贯通土层表面,导致塌陷破坏,与研究区溶洞的破坏常出现顶部垂向坍塌现象相符。数值模拟分析为张湾村峡卡河研究区岩溶塌陷的防治提供了理论依据。

[关键词] 岩溶塌陷; 水位下降; 演化过程; 数值模拟

[中图分类号] TU43 [文献标识码] A

岩溶塌陷是世界上最常见的地质灾害和环境地质问题之一,严重危害了人类社会与工程建设的发展^[1]。近些年来,国外学者在岩溶塌陷的发育规律、分布特点^[2]、成因机制、致塌原因^[3]、勘测技术^[4]、治理措施、监测预报^[5]和数值模拟^[6]等方面取得了丰富的研究成果。国内学者赵博超等人在国外对岩溶塌陷认识发展的基础上结合我国的地质环境情况,提出了产生岩溶塌陷需要具备一定的发育程度岩溶、岩溶上方的岩土体和岩溶地下水系统三个条件^[7]。郑晓明等人在武汉市已发生的岩溶塌陷基础上,从可溶岩发育程度、地下水水位与基岩面关系,将武汉市岩溶塌陷概化为八类地质模式^[8]。陈标典等人根据盖层上下叠置关系将岩溶塌陷归纳为九种致塌模式^[9]。王飞等人从覆盖层和地下水两个方面分析岩溶塌陷的内部结构,发现“上黏下沙”的盖层结构和孔隙水是塌陷形成的基础^[10]。姜伏伟根据“水—土”相互作用,在包气带、潜水层和承压水层分别建立了崩解作用、潜蚀作用和水力裂隙作用的三种岩溶塌陷发育机理模式^[11]。贾龙等人采用 FLAC3D 软件分析覆盖层塑性区的垂直位移场,提出在松散和坚硬的两种黏土层中会形成坛状和锥碟形两种类型的塌陷坑^[12]。洪儒宝等人在物理模型箱获取多种条件下土体的应力应变信息,提出在地下水位重复升降的过程中,在同一水平面上的土体越靠近溶洞产生的应变越大^[13]。程星等人探讨了

FLAC3D 三维数值模拟应用于岩溶塌陷的模拟技术及方法,提出单一透水型盖层下的抽水致塌过程与致塌机理是吻合的^[14]。王柳宁等人提出岩溶塌陷产生来自于地下水位频繁的升降,改变了上层覆盖土体的状态和强度,引起地下岩溶及土洞空腔内的正负压力的交替变化造成塌陷^[15]。

前人在研究岩溶地面塌陷主要集中在理论分析、现场监测及模型试验三个方面,而借助数值模拟软件对岩溶塌陷进行数值模拟的研究较少。数值模拟可较好的还原现场环境,并获得土层内部的应力应变情况。本文将张湾村峡卡河研究区岩溶塌陷为研究对象,结合工程地质、水文监测资料,采用 FLAC3D 数值模拟软件对地下水位下降时岩溶塌陷过程进行模拟,从应力应变云图的角度分析溶洞内部的发育过程,为研究区岩溶塌陷防治提供参考。

1 研究区基本概况

1.1 地理位置

张湾村峡卡河研究区的岩溶塌陷坑主要集中在峡卡河水库的尾坝附近(图 1),呈线性分布与南北方向,主要发育在东侧山体坡脚与水库交接部位,平面形态呈串珠状,单坑多呈近圆形,坑口直径 3~12 m,深 7~15 m。2002 年 5 月该区开始出现变形,至今已发展成 55 处陷坑,现仍处发展阶段。发育规模最大处位于塌陷区南端,椭圆形陷坑面积约

0.03 hm²,发育陷坑大小不等,形态各异,以坛状、碟形状平面形态为主。塌陷最大深度约 8 m(图 2)。

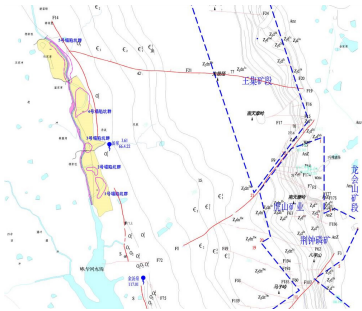


图 1 张湾村峡卡河地面塌陷区地质平面



图 2 峡卡河水库尾坝附近地面塌陷

1.2 水文地质条件

研究区内以构造侵蚀地形为主,呈北北西向带状低山区,地表多为基岩裸露。区内处于碳酸盐岩与非可溶岩的交界部位,隐伏性溶洞呈现不规则形态,最大边长将近 230 m,总平面投影面积大约 16664.4 m²,顶板厚度为 5~20 m 不等。研究区内断裂构造以北北西向压扭性断裂和伴生的张扭性断

表 1 监测孔地下水水位统计表

孔号	监测层位	水位高程/m			
		最大值	最小值	平均值	水位最大变幅
ZK09	志留系裂隙水	118.70	117.10	117.76	1.60
ZK10	岩溶地下水	90.80	36.00	49.61	54.80
ZK11	岩溶地下水	78.04	26.90	39.43	51.14

本文选择由地下水水位快速波动造成塌陷的一号塌陷坑作为研究对象,从而模拟地下水位下降时岩溶塌陷的整个过程并与实际发生塌陷进行对比。因此选取水监 9 号孔到水监 10 孔来作为典型计算断面(图 3),在数值模拟时按照两孔的最大水位和最低水位来反映地下水对岩溶塌陷的影响。



图 3 峡卡河治理区地下水监测工程布置

其中水监 09 孔揭露的岩溶最发育,其揭露的最大洞高 35 m,溶洞内充填砾砂,东侧岩溶发育强度

裂构造相对较发育,这些构造为地下水的运移提供了重要通道,特别是该区东西向的两条断裂构造,对矿区疏排水活动与塌陷区的地下水联系起着重要的作用。

研究区内的地下水主要有两种形式,分别为岩溶裂隙水、基岩裂隙水。其中以岩溶裂隙水为主。区内溶洞较为发育、富水性较好,隔水性能较差,出现闭坑涌水,导致地下水位持续下降。同时由于多年采矿活动造成区域地下水位下降、水库容量减少,破坏了该区地下水平衡,导致各种水环境问题。

2 塌陷概化模型建立

为了验证建立模型的合理性,选取研究区已经发生的典型岩溶塌陷为点作为例子进行验证,对其塌陷的过程进行模拟计算分析,如果实际塌陷发生时的情况与数值模拟过程的分析结果相符合则表示模型设计方案可行。

2.1 典型计算断面确定

根据对研究区的地下水水位监测资料分析,发现监测 1 号塌陷坑群的水监 09 号孔地下水位在 117.10~118.70 m 之间,水位变幅 1.60 m,水监 10 号孔地下水位在 36.00~90.80 m,水位变幅达 54.80 m(表 1),两孔的最大水力梯度达 0.136。初步推测 1 号塌陷坑群是在水位快速波动的情况下,造成了溶洞内填充物流失,形成了岩溶空洞。

较西侧稍弱,推测早期地下水总体向西南径流,在碳酸盐岩与非碳酸盐岩交接部位形成早期地下暗河。因此区域岩溶发育特征可以推测出区内溶洞总体向西侧延伸,计算断面结合水监 09、010 号孔揭露的溶洞高度,综合以上概化出了断面内岩溶洞穴的展布形态(图 4)。

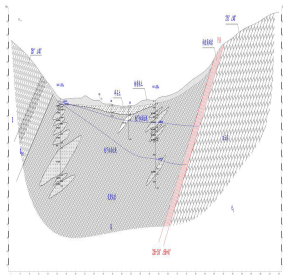


图 4 峡卡河 1 号塌陷坑群典型计算断面

结合实际地下水水位监测孔,并将图 4 断面两

端补至与水平线和竖直线平齐,并将各岩层界线延伸至与边界相交处基于概化计算断面,建立有限元模型如下图 5 所示。

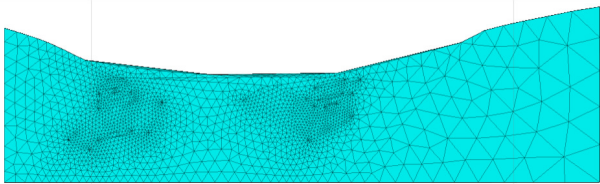


图 5 概化断面有限元模型

2.2 边界条件和参数确定

研究区的岩溶塌陷有限元地质模型基本边界情况设定:研究区南临峡卡河,可设此河流边界为模型的侧向边界并施加水平约束。选取灰质白云岩埋深处为下边界,此边界没有产生水力交换,施加垂向约束。模型的顶部为自由边界。针对建立的岩溶塌陷有限元模型,分析地下水水位的变化对岩溶塌陷的影响,从而对岩溶塌陷成因机制进行概括总结。

- 1)生成初始应力场:有限元模型初始流场设定在 60 m 地下水水位。
- 2)地下水水位下降过程模拟:研究区产生岩溶塌陷的主要原因是地下水水位下降所导致的。在此次数值模拟中,需考虑地下水水位由顶层溶洞以上下降到最底层溶洞以下时模型产生的应力应变情况。

参考勘察报告和相关规范并依据研究区内土工试验、抽水试验获得该模型的物理力学性质指标(表 2)。

表 2 模型基本参数

	粉质粘土	含砾粗砂
渗透系数/(cm·s ⁻¹)	5×10 ⁻⁶	1×10 ⁻³
重度/(N·m ⁻³)	0.018	0.0192
内聚力/Pa	2.2×10 ⁴	1×10 ⁴
体积弹性模量/MPa	13.5	24
孔隙比	0.68	0.30
剪切弹性模量/MPa	5.7	9.8
内摩擦角/(°)	16	25

3 模拟结果分析

3.1 计算分析

考虑到周围矿山开采等活动引起的地下水位下降的作用及原场地应力的作用,计算渗流场变化,溶洞内填充物质随地下水位下降而流失过程中,模型的应力及应变情况。将地下水下降至不同位置的过程分为如下三个阶段进行计算分析。

- 1)第一阶段:当地下水位下降至距基岩面以上 40 m 时,计算的模型应力、应变如图 6 所示。

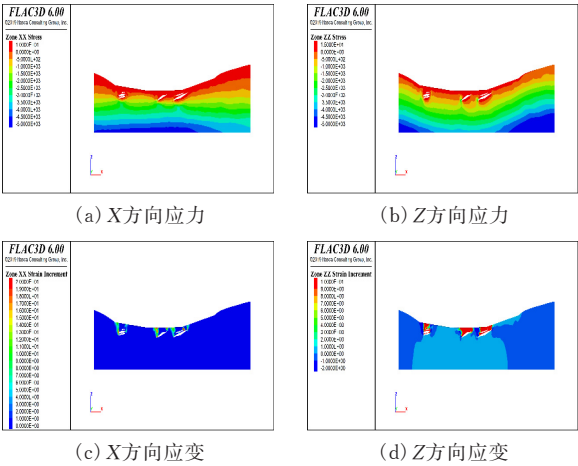


图 6 第一阶段应力、应变云图

由图 6 可以看出,初始状态地下水下降到距基岩面以上 40 m 时计算模型 X 方向应力最大值为 10 kPa,Z 方向应力最大值为 15 kPa,并且顶层溶洞 X 方向应变量为 20,Z 方向应变量为 10。这是由于地下水位下降至顶层溶洞以下时,浮托力减小,土体由有效重度变为天然重度,重力大大增加。同时水力坡度也将增大,潜水与地下水之间的水头差变大,在顶层溶洞的空腔内出现半真空状态,从而形成负压,导致压应力在上部溶洞洞顶形成。同时负压也会对周围土体产生吸蚀作用,这也是 X 方向应力应变产生的原因。

- 2)第二阶段:当地下水位下降至距基岩面以上 20 m 时,计算的模型应力、应变如图 7 所示。

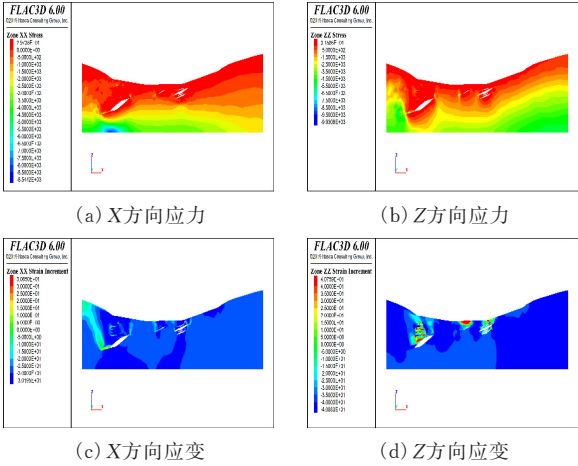


图 7 第二阶段应力、应变云图

由图 7 可以看出,第二段阶段地下水下降到距基岩面以上 20 m 时计算模型 X 方向应力最大值为 29.7 kPa,Z 方向应力最大值为 31.5 kPa,相比于第一阶段的应力值增加了 16.5 到 19.7 kPa。同时 X 方向应变量为 30.7,Z 方向应变量为 40.8。此时 Z 方向的应变值相比第一阶段增加了 30,同时应变出现在溶洞上方覆盖了顶层溶洞,这表明在两次的水位急剧下降时溶洞周围的土体失去平

衡滑落。同时由于受到地下水的浸泡作用溶洞周围土体软化崩解,当水位第二次下降时,水流携带走大量的泥土体,导致顶层溶洞继续得到扩张。

3)第三阶段:当地下水位下降至基岩面时,计算的模型应力、应变如图8所示。

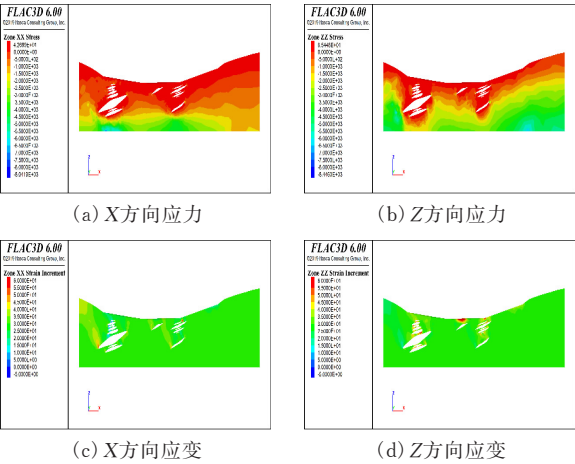


图8 第三阶段应力、应变云图

由图8可以看出,随着地下水位下降到基岩面时,计算模型X方向应力最大值为42.9 kPa,Z方向应力最大值为65.4 kPa,相比第二阶段应力值增加了13.2到33.9 kPa,尤其是Z方向应力值大幅增长了33.9 kPa。同时X、Z方向应变值均为60。Z方向应变值相比第二阶段增加了20,这表明溶洞在发育到临界高度后继续向上扩张,此时溶洞顶部无法支撑上部土体的重量发生剪切变形,同时溶洞顶部塑性张拉区继续向上延伸最终贯通土层表面,导致塌陷破坏。同时软件暂停计算并弹出提示模型已无法收敛,说明在模拟地下水位下降到第三阶段时产生了岩溶塌陷。

根据以上结果显示可知,在地下水位下降至距基岩面以上40 m时,由于渗流的携带作用,顶层溶洞内的填充物流失,溶洞周围的应力增大,出现应力集中现象,且在溶洞的顶端尤为明显。地下水继续下降至距基岩面以上20 m时,位于中间层溶洞的填充物全部流失,溶洞的应力集中更为明显,且Z方向应变差值达到50,当最底层溶洞的填充被渗流掏空时,整个溶洞区域的应力达到峰值65.4 kPa,由计算结果可知,模型在此条件下,已发生塌陷现象。

3.2 岩溶塌陷的成因分析

根据有限元模拟计算结果与现场勘察报告对比分析可知,峡卡河地面岩溶塌陷的形成具备了以下几个条件:

1)地下分布发育大量的岩溶管道和岩溶洞穴
地下一定深度范围内,分布发育有大量的“空洞”才能有塌陷“物质”的储存空间,因此,地下分布发育有

大量的岩溶管道和岩溶洞穴是研究区形成岩溶塌陷的主要条件。据勘查资料分析,塌陷区下覆的岩性主要为可溶的泥质灰岩,岩体破碎,构造发育,地下水丰富,径流条件好,沿构造带方向地下分布发育有大量的岩溶管道和岩溶洞穴。

2)构造破碎与导水断裂致使地下水富集岩溶发育
构造破碎与导水断裂致使地下水富集、岩溶发育,是形成地面塌陷的主要地质条件,其中可溶碳酸盐岩的分布又是形成岩溶的必要条件。研究区地层主要为可溶的碳酸盐岩,构造和岩体节理裂隙极为发育,受到区域构造和岩体节理裂隙的影响,区内岩层产状很大差异,岩层间挤压错动,岩体极为碎裂,致使区内地下水富集在沿断裂带地段,岩溶洼谷、洞穴也极其发育。

3)采矿活动导致地下水位急剧下降促使了塌陷形成
研究区地下水径流、排泄条件良好,溶孔、溶隙、溶洞中大量的微粒物质被地下水携带走,也导致上部覆盖层的土层颗粒不断流失,致使岩溶溶隙、溶孔、溶洞不断被潜蚀淘空、加宽、加深扩大,再加上周边矿区的开采活动,促使地下水位骤变(骤降或骤生),致使上部覆盖层土体的应力平衡状态改变,从而失稳发生塌陷。研究区地下水的活动促使了该地段塌陷的形成。

4 结论

文中运用FLAC3D数值模拟软件对钟祥市张湾村峡卡河研究区的岩溶塌陷过程进行模拟并对地下水位下降时的应力应变进行分析得到以下结论:

1)当地下水下降到距基岩面以上40 m时,溶洞上方出现水位差和剪应力集中现象,渗流潜蚀作用明显,在重力的共同作用下溶洞周围土体软化崩解,水流携带走大量的泥土体,这是溶洞开始形成与拓展的原因。

2)地下水急剧下降到基岩面时溶洞X方向应力应变均发生突变,应变差值达到40。这表明溶洞横向的土体受剪应力集中作用发生破坏,导致溶洞直径拓展发育,符合研究区溶洞最后坍塌时呈坛状或碟状塌陷坑的形状。

3)溶洞顶部Z方向出现较大应力应变值,且土层越高应变差值越大,顶层土体应变差值达到50,最大垂向位移出现在溶洞的顶部位置,此时溶洞顶部发生剪切变形,符合研究区溶洞的破坏常出现顶部垂向坍塌现象。

4)研究区发生岩溶塌陷的主要原因是矿山疏排水引起地下水位落差过大,建议采用止水帷幕等措施,防止岩溶塌陷的产生。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] ZHANG H,XU G,ZHAN H,et al. Formation mechanisms of paleokarst and karst collapse columns of the Middle Cambrian-Lower Ordovician carbonates in Huainan coalfield, Northern China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601(1):1-18.

[3] PANG M, ZHANG T, GUO Y, et al. Re-crushing process and non-Darcian seepage characteristics of broken coal medium in coal mine water inrush[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):1-11.

[4] ZHANG B, LIN Z. Seepage property of karst collapse pillar: experiments and engineering applications[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(11):1-11.

[5] LIN Z B,ZHANG B Y,GONG X F,et al. Analysis and application of the mechanical properties of the karst collapse column fillings[J]. Shock and Vibration,2021(10):1-14.

[6] XU Z M,SUN Y J,GAO S,et al. Comprehensive exploration, safety evaluation and grouting of karst collapse columns in the Yangjian coalmine of the Shanxi province, China[J]. Carbonates and Evaporites,2021, 36(1):16-28.

[7] 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.

[8] 郑晓明,金小刚,陈标典,等.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.

[9] 陈标典,李喜,李祖春,等.湖北武汉白沙洲隐伏岩溶区地质结构与岩溶塌陷分类[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):43-52.

[10] 王飞,柴波,徐贵来,等.武汉市岩溶塌陷的演化机理研究[J].工程地质学报,2017,25(3):824-832.

[11] 姜伏伟.岩溶塌陷发育机理模式研究[J].中国岩溶,2017,36(6):759-763.

[12] 贾龙,蒙彦,管振德.岩溶土洞演化及其数值模拟分析[J].中国岩溶,2014,33(3):294-298.

[13] 张少波,简文彬,洪儒宝,等.水位波动条件下覆盖型岩溶塌陷试验研究[J].工程地质学报,2019,27(3):659-667.

[14] 程星,彭世寿.岩溶区地下水位下降致塌的数值模拟研究[J].地球与环境,2005(S1):119-123.

[15] 王柳宁,高武振.桂林市西城区地下水活动与岩溶塌陷的关系[J].桂林工学院学报,2000(2):106-111.

The Evolution Process and Numerical Simulation Research of Karst Collapse Induced by the Decline of Groundwater Level

ZHONG Yao

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: In order to explore the evolution process of Karst collapse when the groundwater level drops, the Karst collapse in the Xiaka River research area in Zhangwan Village is taken as the research object. Combined with engineering data, the Karst collapse process is calculated and analyzed by FLAC3D numerical simulation software, and the calculation model is obtained in the groundwater. The stress and strain cloud diagrams under the three stages of potential drop, and the development law of Karst caves in the study area can be obtained. The research results show that when the groundwater drops, the soil is damaged by the concentrated action of shear stress, which leads to the expansion and development of the diameter of the cavern, which is consistent with the shape of the pan-shaped or dish-shaped collapse pit when the cavern collapses. Larger stress and strain values appear at the top of the cave, and the higher the soil layer, the greater the strain difference. The maximum vertical displacement appears at the top of the cave. At the same time, the plastic tension zone at the top continues to extend upward and finally penetrates the surface of the soil layer, resulting in collapse and failure. It is consistent with the failure of Karst caves in the study area, which often lead to vertical collapse at the top. Numerical simulation analysis provides a theoretical basis for the prevention and control of Karst collapse in the Xiaka River study area of Zhangwan Village.

Keywords: karst collapse; water level drops; evolution process; numerical simulation