

覃剑文,宋光啸,潘光明.城区复杂环境岩溶地面塌陷灾害成因与致灾规律研究:以贵港市北环新村岩溶地面塌陷灾害为例[J].
中国岩溶,2021,40(2):230-237.
DOI:10.11932/karst2020y51

城区复杂环境岩溶地面塌陷灾害成因与致灾规律研究 ——以贵港市北环新村岩溶地面塌陷灾害为例

覃剑文¹,宋光啸²,潘光明³

(1. 广西地质环境监测站, 广西 贵港 537100; 2. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. 山东省煤田地质局第四勘探队, 山东 潍坊 261200)

摘要:岩溶地面塌陷是岩溶发育地区常见的地质灾害类型。岩溶塌陷对基础设施和人民生命财产安全构成极大威胁。文章以贵港市北环新村岩溶地面塌陷灾害为例,采用地质分析与颗粒流离散元数值模拟相结合的方法,研究岩溶塌陷成因与致灾规律。结果表明:本次塌陷是由多类因素共同导致,主要包括地质环境、地下水位波动与管道渗漏及工程建设活动等;白云岩、灰岩差异性风化所形成的粉砂质土极易诱发土洞与岩溶塌陷灾害;塌陷灾害可分为土洞形成阶段、土洞发展阶段和土洞塌陷阶段,其土洞规模、形状及影响存在显著差别;土洞形成发展过程中,地表沉降量从塌陷中心向四周逐渐减小,存在明显的沉降敏感区,塌坑边缘的竖向临空面存在拉应力作用,极易再次诱发塌陷。研究成果可为岩溶地面塌陷灾害防控与预警提供一定的理论参考。

关键词:岩溶地面塌陷;成因分析;临界条件;数值模拟;地表沉降

中图分类号:P642.2 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2021)02-0230-08 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶地面塌陷是指岩溶构造上方土体在自然或人为因素作用下发生变形破坏,并在地面形成塌陷坑的一种岩溶动力作用与现象^[1]。岩溶地面塌陷在我国岩溶地区频繁发生,极易导致道路变形、房屋毁坏、管道破裂等一系列危害,严重威胁人民的生命财产安全。

截至目前,众多学者在岩溶塌陷灾害机理、土洞形成与发育规律以及塌陷影响因素等方面开展了广泛研究。例如,潘宗源等^[2]研究了地下水位恢复对岩溶塌陷的作用机制,认为地下水位在某特定范围内波动更易引发岩溶塌陷;李涛等^[3]定义了圆柱形地陷和圆形塌落漏斗两种地陷模型,提出了软土和粗粒土的塌陷破坏模式;蒋小珍等^[4]针对单层土体结构的

岩溶土洞形成机理开展了研究,并分析了土洞孕育与扩展的3个阶段性特征;万志清等^[5]认为土洞不断发育扩大的原因是超静孔隙水压力或真空吸力和动水压力共同作用的结果;王延岭^[6]基于岩溶发育程度、覆盖土层特征和动力条件3个关键因素,分析了其对岩溶塌陷的影响和作用规律;赵博超等^[7]提出了岩溶塌陷机制的多样性及成因的复杂性,较全面地介绍了各因素对岩溶塌陷影响机制;褚学伟等^[8]根据贵州省地质灾害统计资料及岩溶分布规律,从水文地质条件等方面对岩溶塌陷的影响因素进行了分析总结。

以往研究对于岩溶塌陷类型和具体致塌因素开展了较为充分的分析,加深了人们对于塌陷灾变机理的理解。然而,岩溶地面塌陷的发生环境复杂、地质条件多变、诱发因素众多,导致其灾变规律呈现一

第一作者简介:覃剑文(1972—),男,高级工程师,长期从事地质灾害调查处置工作。E-mail:631680292@qq.com。

通信作者:宋光啸(1993—),男,硕士研究生,主要从事岩溶塌陷地质灾害成因与致灾规律的研究工作。E-mail: songguangxiao@163.com。

收稿日期:2020-01-06

定的离散性和多样性。特别是,近年来城市建设速度加快,对于既有建筑物密集、地下管线交错、工程活动频繁的复杂城区环境,由其自身地质条件与人类生产生活共同作用引起的岩溶地面塌陷尚缺乏系统研究。

本文以典型的城区复杂环境岩溶地面塌陷灾害——贵港市北环新村岩溶地面塌陷为例,结合区域工程地质与水文地质分析,考虑工程建设与居民生活等因素影响,研究该塌陷灾害的成因机制与致灾规律。同时,利用颗粒流离散元软件PFC^{2D}5.0开展数值模拟,并调查灾变演化过程,从而获得塌陷发生的临界条件,分析塌陷诱发的地表沉降变形规律。

1 灾害概况

贵港市位于广西壮族自治区东南部,属岩溶发育区,市区内溶洞、溶沟、溶槽等分布广泛。随着城市建设快速发展,岩溶塌陷灾害进入集中爆发期,对建筑、交通等设施 and 居民安全构成严重威胁。



图1 塌陷点分布及周边环境

Fig. 1 Collapse distribution and surrounding environment

2019年4月11日至14日,贵港市港北区港城街道蓝田社区北环新村一村A区发生一起严重的岩溶塌陷灾害,造成30 m×15 m范围的道路损毁、4户住房基础悬空、周围地面及房屋墙体局部下沉拉裂等,受灾及紧急转移人口达300人。

此次灾害共诱发5处塌陷(图1),标记为TX1~TX5。其中,TX1规模最大,由一处较小塌坑逐渐发展为长约30 m、宽约15 m、总面积约450 m²的大塌坑,可见深度约15 m,在坑底揭露了2~3 m宽的过水溶槽。TX2~TX5位于TX1的东、北侧,塌陷坑长轴约0.4~3.5 m,短轴约0.4~2.4 m,深约1~2 m。此次灾害引发的道路毁坏、管道断裂以及房屋倾斜开裂情况(图2)。



(a)TX1塌坑 (b)房屋开裂、倾斜
(a)TX1 Collapse pit (b)Cracking and tilting of buildings

图2 塌陷坑及其对建筑影响

Fig. 2 Collapse pit and its influence on building

2 地质条件

塌陷区地质条件复杂,塌陷点位于泥盆系上统桂林组(D_{3g}),北侧为泥盆系唐家湾组上段(D_{2t}²),南侧为泥盆系东村组(D_{3d}),东北部发育一条断层(图3)。

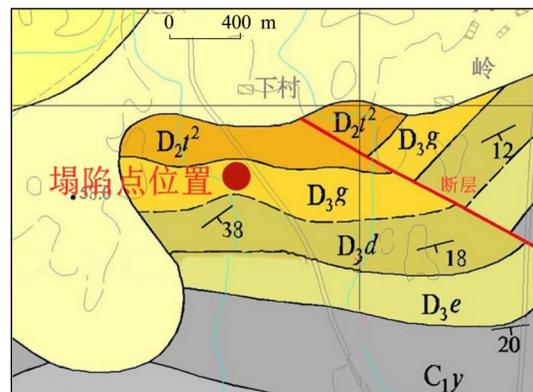


图3 塌陷区地质简图

Fig. 3 Regional geological setting

地质勘查资料表明,灾害发生区域为覆盖型岩溶区,上覆3~6 m厚的第四系溶余堆积层,主要为褐红、褐黄色红黏土,自然状态下呈可塑—硬塑状。下伏基岩为灰岩夹白云岩,岩溶中等发育,遇洞率为22.1%。基岩层厚为403~750 m,地层产状160°∠26°,X型节理裂隙发育,节理间距约为0.5~0.8 m。

北环新村区域的地表与地下水丰富。小区西侧为马草江,水面与北环新村地面高差不足1 m,成为地表水的主要排泄区。在自然条件下,该地区的地下水埋深通常为2~5 m。地下水受小区周边工程活动影响显著。如图1所示,小区周边存在已建成的高层住宅小区,而南侧与东南侧有两处基坑正在施工。受基坑开挖和抽排地下水等工程活动影响,该区域地下水位下降显著,在TX1塌坑处测得的地下水埋深约10 m。

此外, TX1 塌坑揭露的溶槽表明, 该区域地下水由北向南西流动, 溶槽可见深度约 10 m, 水深超过 5 m。灾害出现的各个塌坑通过岩溶通道相互连通。

3 灾害成因分析

对灾害现场进行调查分析, 认为此次地面塌陷灾害的发生是由多类因素共同作用导致的, 主要包括:

(1) 岩性分布不均, 风化差异显著。该区域为覆盖型岩溶区, 灰岩、白云岩不均匀分布, 其风化产物亦存在明显差异。灰岩强风化层的黏性强、透水性差, 而地表水下渗、地下水上升主要通过岩基面附近的白云岩风化粉砂层实现。针对塌陷坑内部揭露的白云岩风化粉砂质土, 开展了颗粒级测试(图 4), 测得粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量为 71.2%, 表明其含砂率高。这种粉砂土遇水饱和极易形成流砂, 被带到岩溶裂隙等构造中, 进而诱发土洞, 形成岩溶塌陷。

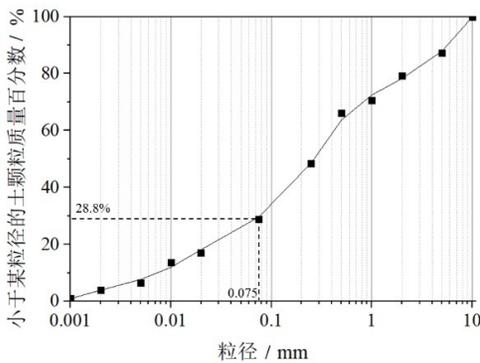


图 4 粉砂质土的颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle grading curve of silty soil

(2) 周边工程建设活动改变地下水流场, 区域地下水位下降成为塌陷诱因。图 5 所示塌陷点附近存在深基坑施工, 地下水向基坑内排泄, 导致基坑周边地下水位显著降低。同时, 基坑不定时抽水导致地下水水位频繁变化, 地下水潜蚀作用增强。

此外, 当水位降至基岩面附近时, 岩溶管道系统中水(气)压力发生变化, 将产生一定的真空吸蚀^[9]和冲爆塌陷^[10]作用。真空吸蚀将加速上覆土层中孔隙水的渗流, 当渗出点处水力坡度大于临界值时, 土体将发生渗透破坏^[11]。冲爆塌陷是指地下水位迅速升高导致密闭较好的岩溶空间产生高压气团和较大静水压力, 冲击土洞顶部并导致破坏。

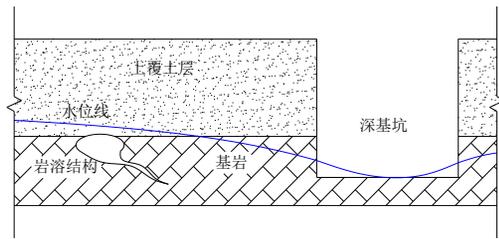


图 5 基坑抽排水导致水位下降示意图

Fig. 5 Water level drop caused by foundation pit drainage

(3) 小区排水不畅, 加速塌陷发展。北环新村小区内排水系统尚未完善, 长期积累的大量生活废水无法顺利排出。小区排水管道接口处采用混凝土封堵, 土体的胀缩变化使得排水管道接缝处发生断裂。在排水管道断裂处, 生活废水渗漏至土层中, 并通过岩溶裂隙进行排泄(图 6)。生活废水的渗透作用, 一方面软化土体, 另一方面将土体中的细小颗粒带出, 起到潜蚀作用。

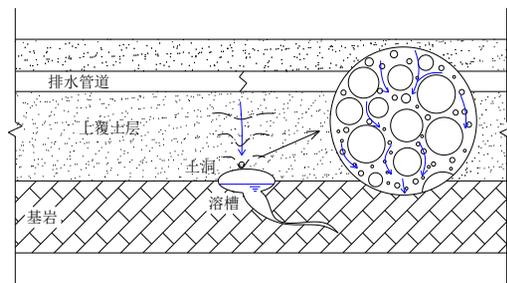


图 6 排水管道渗漏示意图

Fig. 6 Leakage of drainage pipe

由于土体软化和强度降低, 在区域地下水位下降时, 地下水浮托力消失, 土体出现形变, 加速土洞的形成和塌陷的发生。

(4) 工程建设未对环境地质问题进行预判。该区域地表覆盖层薄, 地下岩溶发育强烈, 地下土洞、溶沟、溶槽发育。以往该区域岩溶塌陷灾害出现较少, 故在房屋建设时缺乏详细的地质勘察, 也未选择稳固的基岩作为建构物基础持力层, 而按一般地区选择黏土作为基础持力层, 部分建筑物基础落在了溶槽、溶沟之上或附近, 导致该地区岩溶塌陷发生时建筑物损毁等损失。

综合认为, 北环新村岩溶地面塌陷区域, 地质环境条件复杂, 地下土洞、溶沟、溶槽发育, 小区排水不畅通, 区域工程建设改变水文地质环境, 工程建设缺少对岩溶塌陷问题的准确预判, 最终导致塌陷灾害发生。

4 岩溶塌陷的数值模拟研究

岩溶地面塌陷的成因机制复杂,灾害发生也具有显著的隐蔽性和突发性^[12]。土洞的孕育和发展是塌陷致灾的主要原因,然而在实际灾害发生时及相关模拟试验中,很难直接观测到土洞发育的全过程,难以为灾害预警与防控提供直接有效的参考信息。因此,本文基于贵港市北环新村岩溶塌陷这一典型灾害案例,采用颗粒流离散元程序PFC^{2D}5.0对TX1的塌陷全过程开展了数值模拟研究。

图7为TX1地质剖面示意图,上覆土层为黏土,厚度约6 m,下伏基岩为白云质灰岩,其中发育一开口宽度为3 m的溶槽,溶槽内存在流动的地下水。

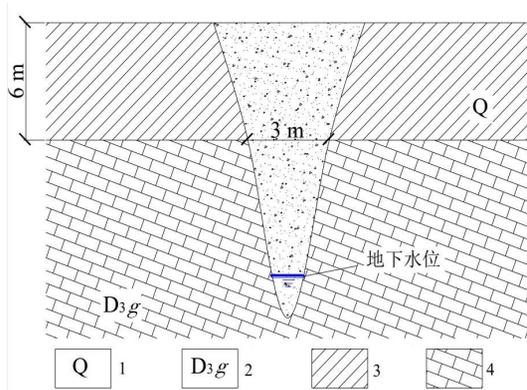


图7 TX1地质剖面示意图

Fig. 7 Sketch of TX1 geological profile

1. 第四系溶余堆积层 2. 泥盆系上统桂林组 3. 黏土 4. 白云质灰岩

4.1 数值模型

根据TX1塌陷的实际情况进行离散元数值建模(图8)。模型长度为23 m,高为6 m,水平尺寸较长以最大程度地消除边界效应。模型包含的颗粒总数为6 184个,粒径范围0.03~0.11 m。

模型的两个侧边设置为水平向位移固定边界,上表面设为自由边界。模型底边首先设为纵向位移固定边界,但在模拟开始前将其中间位置宽度为3 m的墙体(wall)删除,以模拟岩溶构造的上开口。模型建立后,需在自重作用下计算至平衡状态,作为塌陷模拟的初始状态。

4.2 模型参数标定

灾害实际情况表明,TX1呈典型的土洞型^[13]塌陷。TX1周边区域的地表土层为具有结构性的硬塑土,塌陷发生时上覆土体的破坏呈现较为明显的脆性特征。PFC^{2D}5.0数值软件中内置的平行粘结模型

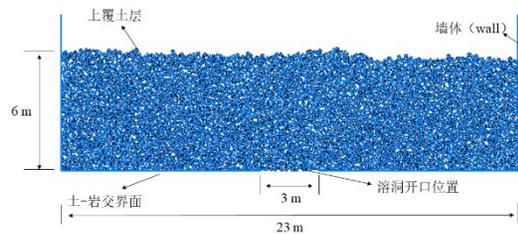


图8 离散元数值模型

Fig. 8 Discrete element numerical model

能够有效模拟该塌陷形式,因此,本文采用平行粘结模型模拟土体力学行为。

为分析土体的基本力学性质,并为模型参数标定提供依据,本研究对塌陷现场土样开展了直剪试验,测得土体的黏聚力为 $c=101.3$ kPa,内摩擦角为 $\varphi=20.25^\circ$,测试结果见图9。

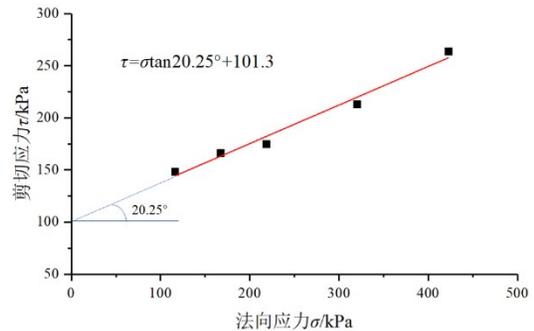


图9 直剪试验测试结果

Fig. 9 Results of direct shear test

基于PFC^{2D}5.0建立土体双轴压缩模型(图10),计算获得土体在不同侧压状态下的破坏强度。通过数值计算获得的侧压—轴压数据绘制了不同应力状态下的莫尔应力圆及其包络线,进一步确定土体的黏聚力及内摩擦角(图11)。

在计算中不断调数值模型的细观参数,直至该参数下获得的模型 c 、 φ 值与直剪试验结果接近(误差

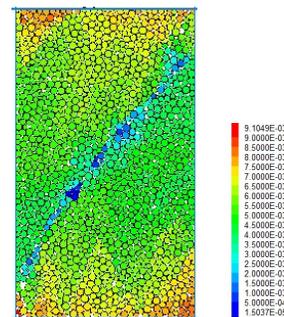


图10 双轴压缩数值模型

Fig. 10 Numerical model of biaxial compression

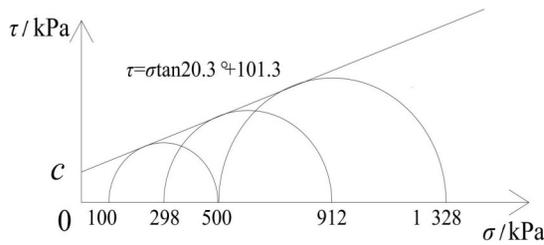


图 11 标定后模型的莫尔应力圆

Fig. 11 Mohr stress circle of calibrated model

在可接受范围内)。此时,模型的细观参数即作为后续数值模拟的标定参数(表1)。

表 1 数值模型颗粒细观参数标定值

Table 1 Micro parameter values of particles in numerical model after calibration

平行粘结模型 细观参数	符号	单位	数值
颗粒密度	ρ	g/cm^3	1.92
法向刚度	k_n	N/m	1×10^7
切向刚度	k_t	N/m	1×10^7
摩擦系数	$fric$	—	0.577
抗拉强度	pb_ten	kPa	190
内聚力	pb_coh	kPa	190
内摩擦角	pb_fa	$^\circ$	40

4.3 塌陷发生的临界条件

上覆土层在地下水与管道渗漏水长期软化和潜蚀作用下,土体逐渐软化,细小颗粒不断流失,共同导致土体力学强度持续降低。当溶洞上方土体强度达到某一临界状态时,塌陷灾害将会发生。在数值模拟中,土体软化与颗粒流失的细观机制极为复杂,最终均会导致土体强度降低并诱发塌陷。本文主要通过调整强度的方法确定灾害发生的临界条件。

在数值模拟中,平行粘结模型的宏观强度主要通过抗拉强度 pb_ten 和内聚力 pb_coh 两个细观参数来控制,通过不断减小两个参数的数值进行试算,直至塌陷灾害发生,此时的参数值即为塌陷发生的临界值。

本文通过3种方法调整两个细观参数值:①保持抗拉强度不变,逐渐减小内聚力;②抗拉强度和内聚力同时减小;③保持内聚力不变,逐渐减小抗拉强度。利用3种方法试算,直至塌陷发生,获得了三组不同的临界值(表2)。

图12所示曲线为三组细观参数临界值(pb_ten 与 pb_coh)拟合而成的关系曲线,即临界曲线。该临界

表 2 细观参数临界值

Table 2 Critical value of micro parameters

细观参数临界值	1	2	3
pb_ten/kPa	190	57	47
pb_coh/kPa	43	57	190

曲线可表示为

$$pb_coh = (40 - 0.92pb_ten) / (1 - 0.021pb_ten)$$

分析认为:当两个参数确定的坐标点位于曲线上时,代表塌陷破坏的临界状态;当坐标点位于曲线下方时,土体的宏观强度低于临界强度,塌陷将会发生。

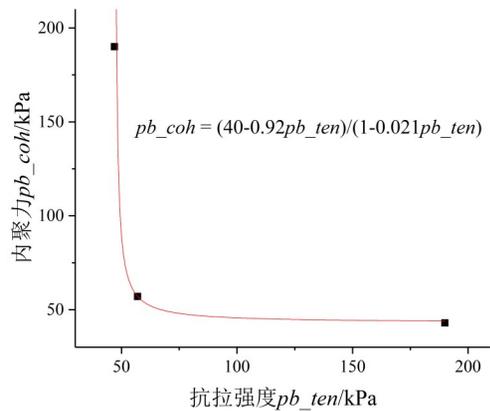


图 12 临界抗拉强度与内聚力的关系曲线

Fig. 12 Relation curve of critical tensile strength and cohesion

选取该曲线两端点、中点这三个最具代表性的点(即表2列出的三组细观参数临界值)进行分析,通过PFC^{2D}双轴压缩数值计算,可获得这三组细观参数条件下的破坏条件,并通过莫尔应力圆求得三组参数各自对应的 c 、 φ 值(图13)。比较图13中三组不同细观参数下的临界破坏条件可知,图13(c)对应的土体强度最大,该组参数即为模型塌陷时临界细观参数,所对应的土体临界破坏条件为:黏聚力 $c=34.88$ kPa ,内摩擦角 $\varphi=21.8^\circ$ 。

4.4 塌陷过程与灾变规律

土洞型塌陷灾害通常是上覆土层自下而上经过多次垮塌而最终发生,因此本研究将土层分为上、中、下三层,自下而上逐步降低土体强度,以模拟塌陷灾变演化的全过程,并将塌陷过程划分为三个阶段:土洞形成阶段、土洞发展阶段和土洞塌陷阶段。

4.4.1 土洞形成阶段

该阶段为岩溶地面塌陷发生的初始阶段。在地

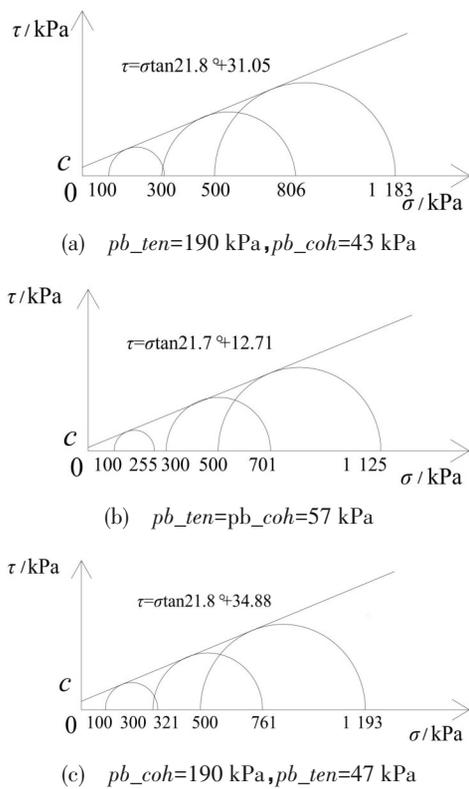


图 13 三组参数条件下的土体破坏临界条件

Fig. 13 Critical conditions of soil failure under three groups of parameters

下水的长期潜蚀和软化作用下,土洞首先从土-岩交界面的岩溶构造开口处孕育,并逐步向上发展,最终形成上窄下宽的拱形土洞,其高度约为上覆土层厚度的 1/4(图 14)。

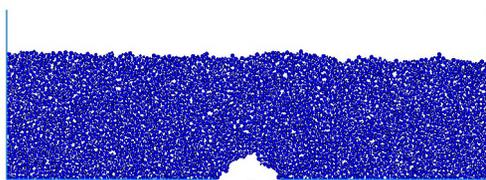


图 14 土洞形成阶段

Fig. 14 Formation stage of soil cave

该阶段的土洞规模较小,对上覆土层的整体稳定性影响不大。然而,随着土洞的孕育和初步发展,上覆土层出现一定程度的沉降变形。为研究上覆土层沉降变形规律,在其上表面不同位置设置 6 个监测点,距离塌陷中心位置分别为 0、2、4、6、8、10 m。图 15 为土洞形成阶段各监测点的沉降变形随计算步的时程变化曲线(图中负号代表沉降位移)。

数值模拟结果表明,在土洞形成阶段,各监测点

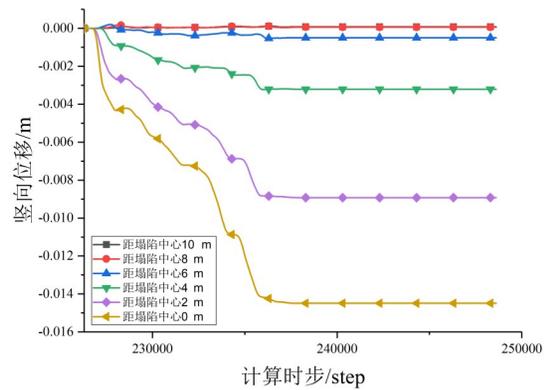


图 15 土洞形成阶段的土层竖向位移变化规律

Fig. 15 Vertical displacement change of soil layer in the formation stage of soil cave

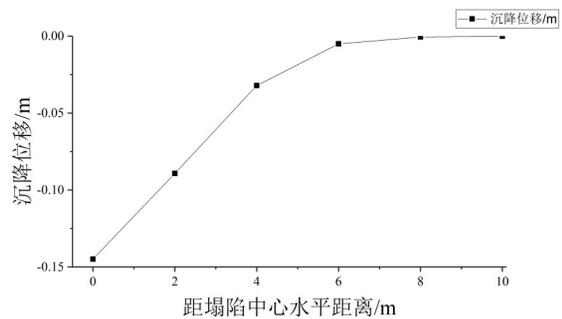


图 16 地表沉降随距离的变化规律

Fig. 16 Change of surface subsidence with distance

的沉降位移首先快速增大,之后大约在同一时间趋于稳定。此外,地表沉降变形由塌陷中心向四周逐渐减小(图 16)。在距离塌陷中心 0~4 m 范围内,沉降位移随距离基本呈线性减小趋势,在塌陷中心处沉降最大(14.5 cm)。当距离塌陷中心超过 4 m 时,地表沉降逐渐变缓,当水平距离增至 6 m 后,沉降变形很小,可忽略不计。由此可见,在土洞形成阶段,地表沉降影响范围约 8 m 左右。

4.4.2 土洞发展阶段

图 17 所示,当土洞继续向上塌落到一定高度时,由于竖向临空面的出现,土洞逐渐横向扩展,形成一个较大的空腔,其高度和宽度达到上覆土层厚度的 2/3 左右,进而对土层的整体稳定性产生显著影响。

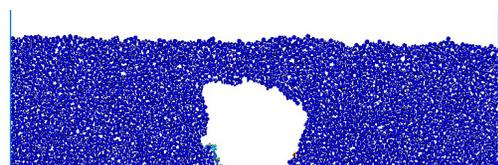


图 17 土洞发展阶段

Fig. 17 Development stage of soil cave

该阶段的地表沉降变化趋势与土洞形成阶段的基本一致,但沉降量明显提升(图18)。地表沉降随时间持续增大,而随监测点距塌陷中心水平距离增大而显著降低,塌陷中心处地表沉降达到0.5 m,在距塌陷中心半径4 m的范围内沉降最为明显,这与土洞形成阶段的影响范围是吻合的。

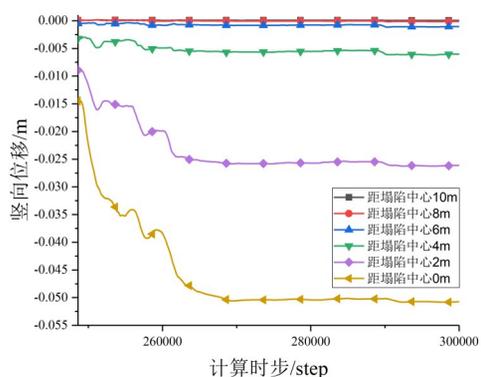


图18 土洞发展阶段土层的竖向位移变化规律

Fig. 18 Vertical displacement change of soil layer in the development stage of soil cave

4.4.3 土洞塌陷阶段

在实际灾害中,由于地面硬化或地基处理使地表附近土层强度得以提升,自稳性较强,因此当土洞扩大至地表附近时,会暂时处于一个稳定状态。该状态下,土洞附近颗粒间的接触力呈拱状结构,其影响范围延伸到地表,并在拱形结构周边出现明显的应力集中现象(图19)。



图19 具有拱状结构的颗粒接触力分布

Fig. 19 Contact force distribution of particles with arch structure

在地下水的持续软化和渗透作用下,以及实际工况中可能存在的地表荷载、振动等外力与降雨、地面积水的影响下,拱结构上部极易发生破坏,土洞继续向上发展直至整体塌陷发生,形成上宽下窄的倒梯形坍塌(图20)。

地表靠近塌坑位置是塌陷影响的敏感区域。为此,在塌坑边缘设立一圆形监测区域(图20),监测其内部颗粒在塌陷发生过程中的水平应力变化(图21)(负值为压应力)。数值模拟结果表明,地面塌陷发生瞬间,水平应力出现陡升,然后迅速回落,直至趋

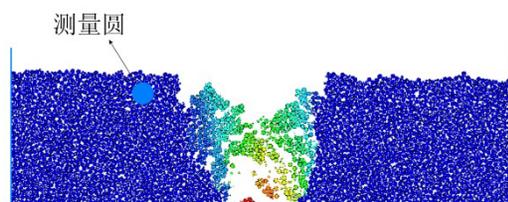


图20 土洞坍塌阶段

Fig. 20 Collapse stage of soil cave

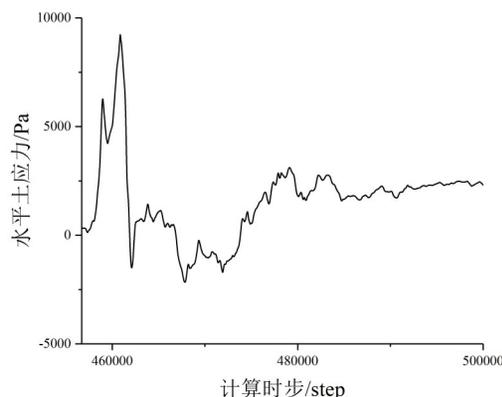


图21 塌坑边缘水平应力变化

Fig. 21 Change of horizontal stress at the edge of collapse pit

于某一稳定值,这是由于土洞冒顶时塌落的土体会对周边土体有一个水平拉力,土体塌落后水平拉力消失,此时塌坑周围为竖向临空面——塌坑边缘土体有向坑内发生倾倒的趋势,进而承受水平拉应力。本文基于数值模拟所获得的塌陷模式及变形规律与实际灾害情况基本吻合。

5 结论

以贵港市北环新村岩溶地面塌陷灾害为依托,采用地质分析与数值模拟相结合的方法,研究了城区复杂环境岩溶地面塌陷的灾害成因、致灾规律、灾变演化过程,获得了塌陷临界条件与地表变形规律。主要结论如下:

(1)城市区域地质环境复杂,地面塌陷往往由多种因素共同导致:岩溶发育的地质环境为塌陷的基础条件;抽排地下水和管道渗漏等人为因素为塌陷诱因;工程建设期间无法完全查清地质情况为后期塌陷发生埋下隐患。此外,城市新建基坑附近地下水环境改变较大,特别在溶沟、溶槽的上覆地层内,地下水位变化迅速,容易诱发塌陷;

(2)白云岩、灰岩差异性风化所形成的粉砂质土遇水饱和形成流砂,进入岩溶裂隙中极易诱发土洞

与岩溶塌陷灾害;

(3)基于数值模拟的平行粘结模型模拟,获得了塌陷发生时抗拉强度与内聚力两个细观参数的关系,并拟合获得了塌陷临界曲线表达式;

(4)塌陷灾变演化过程可分为土洞形成阶段、土洞发展阶段和土洞塌陷阶段,土洞的规模和形状对塌陷的形成存在着显著差别;

(5)土洞形成发展过程中,地表沉降量从塌陷中心向四周逐渐减小,半径4 m范围内为沉降敏感区。土洞整体坍塌后,塌坑边缘的竖向临空面存在拉应力作用,极易发生二次塌陷。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 潘宗源,蒋小珍,戴建玲,等.岩溶矿床疏干区地下水位恢复对岩溶塌陷作用机制的研究:以湖南宁乡大成桥为例[J].中国岩溶,2017,36(6):786-794.
- [3] 李涛,张子真,宗露丹.地下空洞引起土质地层地陷的形成机制与预测研究[J].岩土力学,2015,36(7):1995-2002.
- [4] 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.
- [5] 万志清,秦四清,李志刚,等.土洞形成的机理及起始条件[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1377-1382.
- [6] 王延岭.山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析[J].中国岩溶,2016,35(1):60-66.
- [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] 褚学伟,党爽,丁坚平.贵州岩溶塌陷分布及其影响因素分析[J].人民长江,2015,46(12):42-44,71.
- [9] 徐卫国,赵桂荣.论岩溶塌陷形成机理[J].煤炭学报,1986,(2):1-11.
- [10] 康彦仁.试论岩溶地面塌陷的类型划分[J].中国岩溶,1984,(2):146-155.
- [11] 雷明堂,蒋小珍,李瑜.岩溶塌陷试验、评估与管理方法研究[J].地质灾害与环境保护,2002,13(1):18-22.
- [12] 蒙彦,黄健民,雷明堂,等.基于灰色 Verhulst 模型的岩溶塌陷定量预报预测方法[J].中国岩溶,2009,28(1):17-22.
- [13] 罗小杰.也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J].工程地质学报,2015,23(5):886-895.

Cause and law of karst collapse in the urban complex environment:An example of Beihuanxincun, Guigang City

QIN Jianwen¹, SONG Guangxiao², PAN Guangming³

(1. Guangxi Geological Environment Monitoring Station, Guigang Guangxi 537100, China; 2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 3. The Fourth Prospecting Team of Shandong Coal Geology Bureau, Weifang Shandong 261206 China)

Abstract In karst areas, ground collapse is a common geological hazard, which poses a great threat to the safety of infrastructure and people's lives and properties. Taking Beihuanxincun, Guigang city as an example, this paper studies the cause of the karst collapse and the law of its hazard by using the methods of geological analysis and particle flow discrete element numerical simulation. The results show that this collapse is caused by many factors, including the geological environment, groundwater level fluctuation, pipeline leakage and engineering construction activities. The silty soil formed by differential weathering of dolomite and limestone is easy to induce collapse of soil caves and karst. The collapse hazard can be divided into three stages: formation, development and the collapse. There are significant differences in the size, shape and influence of soil caves in different stages. During the formation and development of the soil cave, the surface settlement gradually decreases from the collapse center to the surrounding area, with existence of obvious settlement sensitive areas. The vertical free face at the edge of the collapse pit has tensile stress, which is easy to induce collapse again. The research results can provide a theoretical reference for prevention and early warning of karst ground collapse.

Key words karst ground collapse, cause analysis, critical condition, numerical simulation, ground settlement

(编辑 张玲)