



土洞型地面塌陷数值模拟分析与机理研究

薛芬芬, 谢婉丽, 王昱琛, 刘欣鹏

(西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室/西安市黄土动力灾害
防控与地质环境修复重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要 以研究区发生的10例地面塌陷为研究对象,在野外调查的基础上结合研究区的地质环境条件和工程地质资料,分析了研究区的基础地质背景及地面塌陷的发育条件,综合归纳了研究区地面塌陷的类型,揭示了不同地面塌陷类型的诱因、时空分布特征及塌陷形成机制。最后,采用有限差分软件FLAC3D模拟了地道开挖、建房、地下水位抬升、强降雨等条件下地面塌陷的发展过程。通过对土层内部的应力应变,以及地道周围土体、地表位移等分析,揭示了研究区地面塌陷的形成机理。研究结果表明,居民建房增加上覆荷载,地下水位抬升引起洞室周围土体变形、洞室扩大,在季节性强降雨的影响下,地表会产生大的沉降。

关键词 塌陷;机理;地下水;强降雨;数值模拟

中图分类号: P642.22 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2024-01-010

Numerical simulation analysis and mechanism study of soil cave type ground subsidence

XUE Fenfen, XIE Wanli, WANG Yuchen, LIU Xinpeng

(Xi'an Key Lab of Prevention of Loess Dynamic Disaster and Restoration of Environment, State Key Laboratory of
Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract Ten cases of ground subsidence in the study area are taken as the research object. Based on field investigations and combined with the geological environment conditions and engineering geological data of the study area, the basic geological background and ground subsidence development conditions of the study area are obtained. Several types of ground subsidence in the study area are comprehensively summarized, and the causes, spatiotemporal distribution characteristics, and collapse formation mechanisms of different types of ground subsidence are analyzed. The finite difference software FLAC3D was used to simulate the development process of ground collapse under tunnel excavation, building houses, groundwater level rise, and heavy rainfall conditions. The formation mechanism of ground collapse in the study area was obtained by analyzing the stress and strain inside the soil layer, as well as the displacement of the surrounding soil and surface of the tunnel. The research results indicate that the construction of residential buildings increases the overlying load,

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(42372320, 41972292); 陕西省创新能力支撑计划(2021TD-54); 陕西省重点研发计划(2022ZDLSF06-03)。

第一作者: 薛芬芬, 女, 从事地质灾害风险评价、微生物土体改良研究, 1270820482@qq.com。

通信作者: 谢婉丽, 女, 教授, 从事地质灾害防治、监测预警、风险评价等研究, xiewanli@nwu.edu.cn。

and the rise of groundwater level causes deformation of the soil around the cavern, leading to the expansion of the cavern. Under the influence of seasonal heavy rainfall, the surface undergoes significant settlement.

Keywords collapse; mechanism; groundwater; heavy rainfall; numerical simulation

地面塌陷是我国发育最强、分布最广、频率最高、影响最大的地质灾害类型之一,会造成地表出现大量陷坑,地面倾斜、鼓起,耕地破坏,以及周边房屋不均匀沉降、开裂、地基沉降变形、基础脱空坍塌等病害。其影响范围大,受灾人员多,造成了严重的人员与财力损失^[1]。常见的地面塌陷类型有自然条件下发生的地面塌陷和人类工程活动(包括管线渗漏、抽水、隧道开挖或其他地下工程施工等)造成的地面塌陷。近年来,我国部分乡镇地区发生了多起由地道、地下水位抬升、强降雨等多因素引起的地面塌陷事故(见图 1),发生突然、危害性大,严重威胁着乡镇居民的生产和生活。同时,这类型地面塌陷具有突发性、潜伏性、多因素性、高危害性等显著特征,并且数量多、分布密集,威胁一个村甚至一个镇。



图 1 典型塌陷照片
Fig. 1 Typical collapse photo

地面塌陷事故的频繁发生,促使我们对此问题进行深刻的思考。因为没有从本质上认识地面塌陷的诱发因素、形成机理和演化规律,所以无法对地面塌陷事故进行准确的预测预报,使得地面塌陷的防控对策缺乏科学性^[2]。相比于城市,经济较为落后的乡镇地区对于地面塌陷事故的预防难度更大。因此,对这一问题开展系统深入地研究,具有重要的学术价值和现实意义。针对地面塌陷问题,国内外学者已经做了大量的研究,主要通过物理模型试验和数值模拟计算方法分析地面塌陷的影响因素^[3-4]、发育特征^[5-6]、灾变机

制^[7-8]、致塌过程^[9-10]、形成机理^[11-15]、破坏模式^[2]、稳定性分析及危险性评价^[12]。

目前,对地面塌陷的相关研究大多集中在岩溶地下水开采造成的岩溶地面塌陷和采空区地面塌陷,而城镇地质灾害调查主要集中在滑坡、崩塌等常见且易发性高的灾害,对乡镇地区由地道、地下水位抬升、强降雨多因素引发地面塌陷的致塌机制及成灾过程的研究较少。本文通过野外调查,查明研究区内的几种地面塌陷类型,分析不同地面塌陷类型的诱因、时空分布特征及塌陷形成机制,通过 FLAC3D 软件数值模拟进一步研究抗战时遗留地道在地下水位抬升和强降雨情况下的塌陷过程,从而对塌陷机理进行分析。

1 区域地质环境条件

富平县属于渭北黄土高原沟壑区,辖区内共 16 个镇(办),分别为城关街道办事处、东华街道办事处、梅家坪镇、庄里镇、刘集镇、张桥镇、留古镇、宫里镇、曹村镇、淡村镇、齐村镇、薛镇、老庙镇、流曲镇、美原镇和到贤镇(见图 2)。

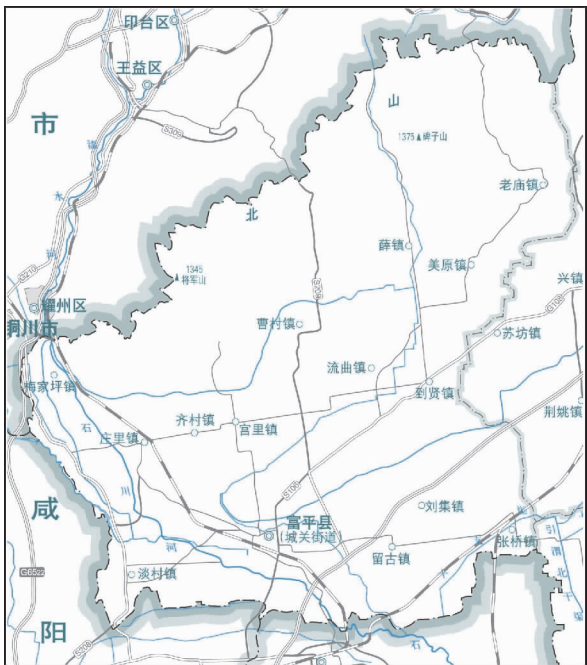


图 2 研究区交通位置图
Fig. 2 Traffic location map of the research area

研究区位于渭河盆地中段北缘与陕北黄土高原的过渡地带,地势总体西北高、东南低、中部起伏不平,海拔 375.8~1 439 m。自地表向下分别是中上更新统风积黄土和中下更新统洪积相、湖积相砂砾卵石、粉土和粉质黏土,上覆黄土厚达 80~100 m。中更新统(Q_2)上部为一套风成黄土堆积,下部为风积、洪积黄土及砂砾卵石。上更新统(Q_3),覆盖于一切老地层之上,厚约 15~30 m,局部可达 50 m 左右。上更新统下部(Q_3^1)岩性主要为粉质黏土及砂卵石。上更新统上部(Q_3^2)为浅棕黄色黄土状粉质黏土,厚 15~25 m。

研究区属暖温带大陆性半干旱季风气候,年平均降水量 500.28 mm,由于季风影响,县境降水具有明显的季节性,降水分布极不均匀,夏秋多冬春少,且夏雨多于秋雨,干湿季节分明。降水多集中于 7、8、9 月份。大气降水是地下水的主要补给源。区内河流是地下水主要排泄途径。地下水按赋存条件分为第四系孔隙水和奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶水。发生地面塌陷区域地下水类型为第四

系孔隙承压水。

自 2020 年 7 月以来,研究区强降雨天气的增多以及引黄灌溉项目的实施,导致该区域地下水位持续上升,在孝义村、北庄村、铁门村、汝林村、曹管村等出现了不同程度的地面塌陷问题,多户居民房屋发生开裂、地基沉降变形等现象,个别居民房屋出现塌陷坑,严重威胁居民生命财产安全。

2 研究区地面塌陷灾害成因分析

2.1 研究区地面塌陷灾害统计

本文通过野外调查,共统计了研究区 2011—2021 年 10 个较为详细的地面塌陷灾害案例(见表 1),发现了研究区地面塌陷灾害发生的时空分布特征和塌陷规模的变化特点。进一步分析灾害发生时的致灾环境和岩土体类型,发现地道、强降雨、地下水位抬升、抽水是造成乡镇地面塌陷的主要因素,黄土是地面塌陷发生的主要岩土体类型。

表 1 研究区地面塌陷灾害统计表
Tab. 1 Statistical table of ground collapse hazards in the study area

编号	年份	塌陷地点	塌陷范围/ m^2	塌陷深度/m	塌陷原因
1	2015	和平村	1 943	5	抗战时修建地道,地下水位抬升,强降雨
2	2017	乔西村	18 443	4	抗战时修建地道,地下水位抬升,强降雨
3	2017	张王村	5 000	10	抗战时修建地道,地下水位抬升,强降雨
4	2015	宏化村	1 950	1	水塔抽水,强降雨
5	2011	韩 村	1 200	2	水管破裂,水渗入地下,抗战时修建地道,强降雨
6	2020	孝义村	53 360	5	抗战时修建土洞型地道,地下水位抬升,强降雨
7	2021	北庄村	24 618	3	抗战时修建土洞型地道,地下水位抬升,强降雨
8	2021	铁门村	159 235	4	抗战时修建土洞型地道,地下水位抬升,强降雨
9	2020	汝林村	72 767	4	抗战时修建土洞型地道,地下水位抬升,强降雨
10	2020	曹管村	148 698	5	抗战时修建土洞型地道,地下水位抬升,强降雨

由于时间久远,对村中地道和地洞分布范围、深度、走向及地道的洞径情况均不太清楚。通过现场勘察,地道顶部距地面 4~6 m。为了查明孝义村、铁门村、汝林村、曹管村 4 个地面塌陷影响严重的场地中的坑、洞、地道等的分布范围,进一步对产生塌陷的原因进行分析论证,收集了部分地质雷达剖面资料(见图 3),得到地下空洞的宽度 3~6 m,深度为 3~7 m,地下存在大量松散区。

2.2 地面塌陷的时空分布特征

将研究区已知的 10 个塌陷点发生的时间按

照月份统计,发现主要集中在 7、8、9 月份,即发生在夏季,初步分析塌陷灾害事故呈现季节化的特点(见图 4)。研究区夏季降雨充沛,降雨量为 80~100 mm,约为其他季节的 2 倍,大部分雨水入渗到浅埋地层中,使土体发生软化,加之该区域存在抗战时遗留人防工程、地下水位抬升、抽水引起地下水位下降的影响,最终造成地面塌陷。

结合塌陷事故的时间分布特征,进一步统计塌陷事故的发生区域。图 5 为 10 个地面塌陷灾害点的分布图。从图中可以发现,塌陷事故主要

发生在黄土塬区和洪积扇区的平原地带,约占 90%。该区域海拔较低,地表水和地下水易于汇聚,岩性为厚约 80 ~ 100 m 的黄土,且平原地区居民建筑区、耕地地区均高于山地丘陵区。由于灌溉导致的地下水位上升诱发该区域内地面塌陷的发生。

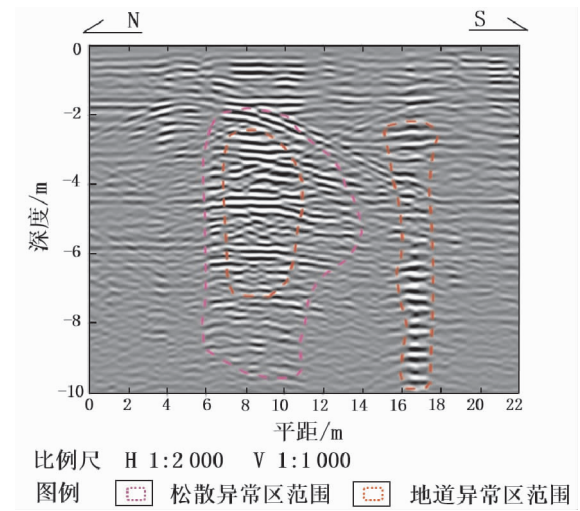


图 3 地质雷达解释剖面

Fig. 3 Geological radar interpretation profile

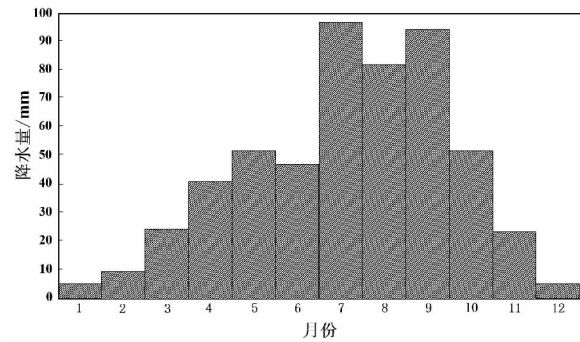


图 4 研究区降水量年内分配图

Fig. 4 Annual distribution map of precipitation in the research area

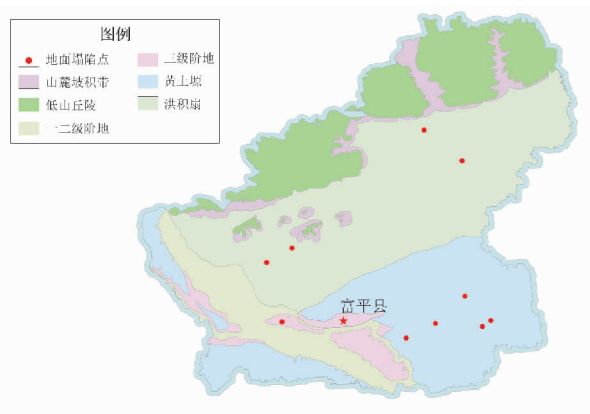


图 5 地面塌陷灾害点分布图

Fig. 5 Distribution map of ground collapse disaster points

2.3 地面塌陷的诱因及形成条件

以研究区发生的 10 个乡镇地面塌陷为基础,从致灾环境、致灾介质组成及塌陷规模等方面分析了研究区地面塌陷的诱因。将研究区地面塌陷类型分为抽水引起的地面塌陷、水管破裂引起的地面塌陷和地下水位抬升引起地面塌陷。其中,地下水位抬升引起地面塌陷约占 75%,是研究区地面塌陷的主要类型。值得注意的是,87.5% 的地面塌陷事故发生都是因为地下存在抗战时遗留的古地道。

2.3.1 抽水引起的地面塌陷

在研究区抽水引起地面塌陷事故中,上覆土层为上更新统风积黄土,大量抽汲地下水是该类型地面塌陷的形成条件。大量抽汲地下水,大幅度降低地下水位,引起塌陷。

2.3.2 水管破裂引起的地面塌陷

在研究区水管破裂引起的地面塌陷事故中,水管破裂、抗战时修建土洞型地道为该类型地面塌陷的形成条件。

2.3.3 地下水位抬升引起地面塌陷

研究区地下水位抬升引起的地面塌陷上的基本形成条件一般有 5 个。

1) 上覆土层为上更新统风积黄土,自身具有湿陷性,易受地下水的影响,同时黏粒含量降低,抗剪强度较低。

2) 抗战时遗留的古地道,为岩土体的塌落提供一定空间。

3) 地下水位抬升为岩土体的塌落提供动力,地下水位上升导致黄土发生湿陷,使原来相对稳定的地道的结构发生变化,并产生细小的微裂隙贯通地面。

4) 下伏土体为上更新统风积黄土(粉质黏土),为地下水的潜蚀和弱化提供可能。

5) 降雨较多,地表水入渗。

地面以下土体由于抗战时开挖形成内部空洞,而引黄灌溉工程导致地下水位抬升,影响地下洞室上覆土层的稳定性,造成地下洞室失稳从而引发地面塌陷。

2.4 地面塌陷形成机制及灾变模式

在认识与分析了地面塌陷灾害的特征与形成条件后,需进一步分析其灾变模式才能为后续的灾变机理研究提供良好的基础。由于前期的灾害诱因分析,发现古地道遗留是造成研究区地面塌陷的最直接因素。根据地面塌陷发生时的致灾环

境,得到研究区灾变模式为地下水位抬升结合季节性强降雨诱发地面塌陷。地下水位抬升导致地下空洞上覆土层和下方土体弱化,使土体强度降低,地下空洞扩大。当空洞扩展到一定程度就会达到临界状态,季节性强降雨使土体发生扰动,造成地面塌陷。

3 数值模拟

3.1 计算模型的建立

根据研究区的野外调查及资料收集,发现该区房屋建筑密集、人口居住较多,选取较为典型的铁门村地面塌陷的基础资料,用 FLAC3D 进行建模并计算分析。FLAC3D 使用有限差分法可以解决一般的岩土工程问题和流体力学问题,丰富的渗流模型能解决地下水变化及饱和状态的渗流问题。同时,考虑渗流场和应力场的相互作用也能进行流固耦合分析。

铁门村位于黄土残塬区,微地貌类型属于平原,地势较为平坦,因此假定地表面为水平地面。首先,建立该区域的数值计算模型[见图 6(a)]。选用各向同性模型,模型的尺寸为 20 m×20 m×15 m。该区域为二元结构覆盖层,地层岩性为第四系夯填土和上更新统马兰黄土。夯填土位于地表以下 0~0.5 m,马兰黄土位于地表以下 0.5~15 m。抗战时修建的地道剖面为马蹄形,埋深为

5 m,地道围岩未支护,基本尺寸如图 6(b)所示。

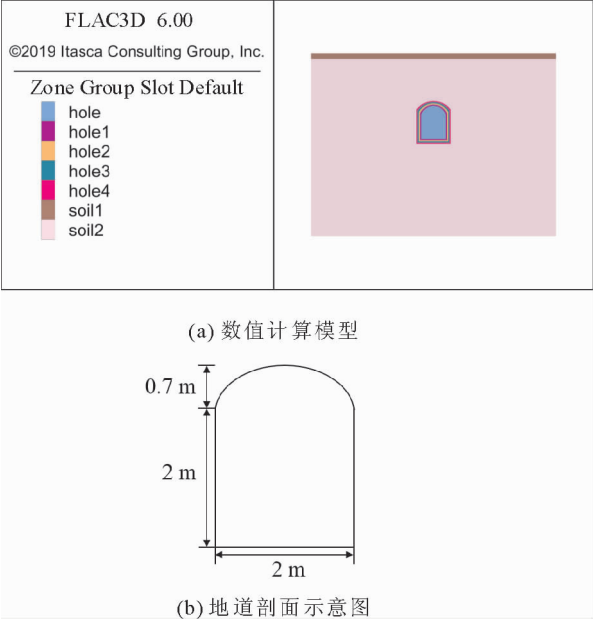


图 6 数值计算模型和地道剖面示意图

Fig. 6 Numerical calculation model and schematic diagram of tunnel profile

本文在数值模拟计算过程中将岩土体视为弹塑性体,选用 Mohr-Coulomb 准则,岩土体的基本物理力学参数如表 2 所示。模型的边界条件定义为:①限制模型前后左右面的 x 、 y 方向的位移;②限制模型底部 z 方向上的位移;③模型表面设定为自由边界;④模型所受自重加速度设定为 9.8 m/s^2 。

表 2 研究区土体基本物理力学参数

Tab. 2 Basic physical and mechanical parameters of soil in the research area

地层厚度	地层年代	岩土体名称	重度/(kN/m^3)	干重度/(kN/m^3)	饱和重度/(kN/m^3)
0.5	Q_4	夯填土	1 480	1 300	1 820
14.5	Q_3	黄土	1 850	1 600	2 070

渗透系数/(m/s)	孔隙率/%	快剪		饱和快剪	
		黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^\circ$)
$2.20\text{e-}4$	0.52	17	20	3.4	18
$3.71\text{e-}5$	0.44	30	22	7	15

3.2 数值模拟试验方案

根据研究区地面塌陷影响因素分析,发现地下水抬升、抗战时遗留地道、强降雨为研究区地面塌陷最主要因素。因此,本次数值模拟选取以下 3 种工况进行计算分析。

1)地道开挖数值模拟研究。模拟开挖出的地道,设置模型初始的地下水位为 $z=0\text{ m}$,考虑

自重应力作用下对地道周围土体最大剪应力、最大剪应变增量及竖向位移进行分析。

2)地下水位抬升数值模拟研究。当研究区地下水位抬升至 $z=2、4、6、8\text{ m}$ 时,地下水使地道周围土体及地表位移发生变化,对地道及周围土体稳定性产生一定的影响。

3)强降雨工况数值模拟研究。降雨强度参

考研究区最大降雨量,为 50 mm/d。因此,模型设置降雨速率为 5.79×10^{-7} m/s,设置模型的地道底部尺寸分别为 2、2.2、2.4、2.6、2.8 m,选择单渗流模式对模型进行分析。首先设置计算模式为渗流模式,设置流体参数、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,用来模拟强降雨作用);其次,打开力学进程,进行力学计算,获取结果云图,分析不同洞室尺寸下地表中心的沉降情况。

3.3 数值模拟计算结果及分析

3.3.1 初始应力场

从图 7 可以看出,竖向应力在模型底部最大,达到 233 kPa,符合自重应力分布规律。在自重作用下,模型最大不平衡力逐渐趋于平衡,整个上覆土层逐渐趋于稳定,初始应力场生成。

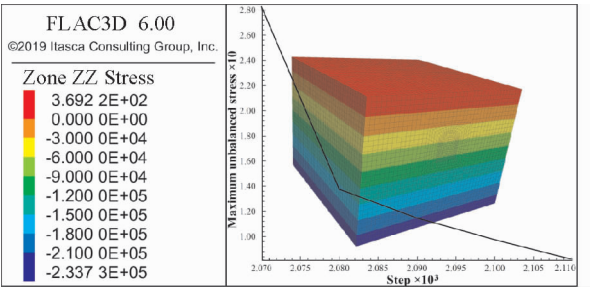


图 7 初始应力场

Fig. 7 Initial stress field

3.3.2 地道开挖数值模拟研究

1) 地道开挖前后最大剪应力分析。图 8 为开挖前后模型最大剪应力分布云图。开挖前后均在模型的最底部出现最大剪应力,开挖前最大剪应力为 58.4 kPa,开挖后最大剪应力值为 62.7 kPa。地道的开挖引起周围土体的移动和地面初始应力状态的扰动,开挖后的土体应力发生重分布,使地道周围土体应力发生较为明显的变化,离地道越近变化越大,地道洞壁左右两侧剪应力高于同一深度的其他土体,洞顶处最大剪应力低于同一深度的其他土体,证明洞顶发生“土拱效应”,出现剪应力低值区,洞顶上方出现了明显的应力曲线下凹现象。

2) 地道开挖后竖向位移和最大剪应变增量分析。图 9 为开挖后模型的竖向位移与最大剪应变增量云图。由图 9(a)可以得到,模型开挖后,竖向变形主要表现为拱顶沉降,洞底隆起,最大沉降位移为 3.27 cm,最大隆起位移为 5.18 cm。地表沉降位移主要发生在洞室上方土体,离洞室中轴线越近,沉降越大,地表最大沉降位移为 1.05

cm,证明由地道开挖引起的地表沉降量为 1.05 cm。如图 9(b)所示,最大剪切应变增量出现在土洞洞趾处。

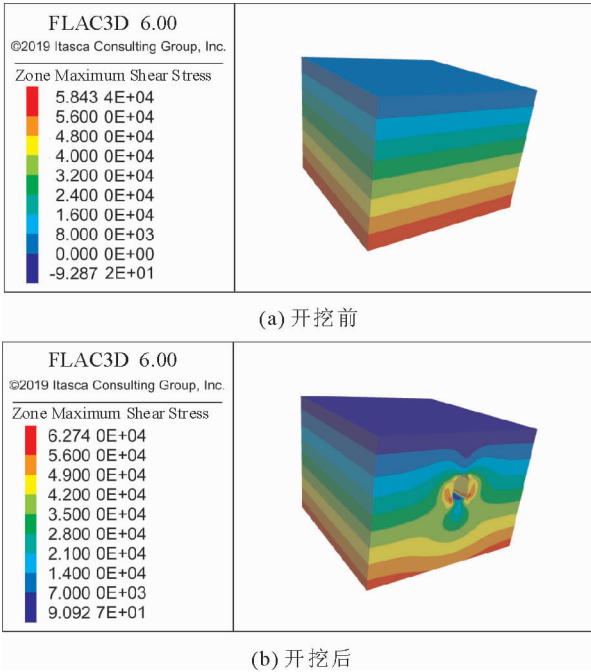


图 8 开挖前后最大剪应力云图

Fig. 8 Cloud map of maximum shear stress before and after excavation

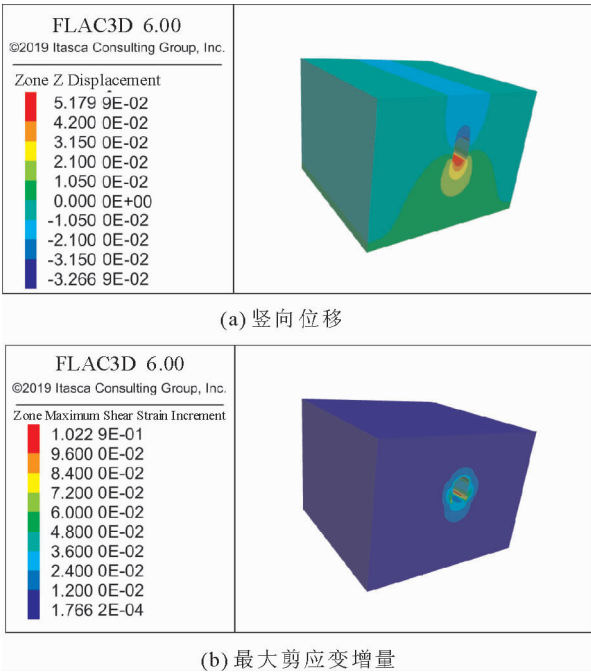


图 9 开挖后竖向位移与最大剪应变增量云图

Fig. 9 Cloud map of vertical displacement and maximum shear strain increment after excavation

3.3.3 地下水抬升数值模拟研究

图 10 为地下水位抬升工况下洞室周围包括洞底、洞趾、洞顶、洞肩、洞壁及地表中心的竖向位移变化图。由图 10 可以看出,仍然呈现洞顶沉降,洞底隆起的现象,洞顶和洞底位移变形量最大,洞壁处位移变形量最小。当地下水位逐步抬升至 2、4、6 m 时,洞顶、洞肩、洞壁及地表中心的沉降量逐渐增大,位移变形增量在 6 ~ 17 mm,洞底及洞趾处隆起量逐渐减小,位移变形量在 5 ~ 10 mm。当地下水位从 6 m 抬升至 8 m 时,洞底、洞趾、洞顶、洞肩、洞壁及地表中心的竖向位移均发生较大的变化。其中,洞底处竖向位移发生较大的隆起,变化增量为 93 mm,洞趾处竖向变形由隆起变为沉降,变化增量为 38 mm,洞壁、洞肩、洞顶处发生了较大沉降,增量在 49 ~ 57 mm,地表中心沉降增量为 52 mm。证明当地下水位距离洞室较远时,地下水位抬升对洞室周围土体和地表变形影响较小,当地下水位距离洞室较近时,地下水位抬升对洞室周围土体和地表变形影响较大。

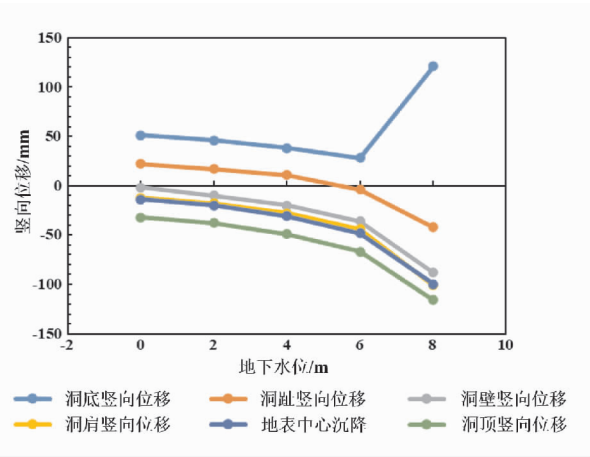


图 10 地下水抬升工况下洞室周围及地表竖向位移
Fig. 10 Vertical displacement around the tunnel and surface under groundwater uplift conditions

3.3.4 强降雨工况数值模拟研究

在强降雨工况下,降雨入渗土体,对岩土体产生软化作用。图 11 为强降雨工况下模型的竖向位移云图。从图 11 可知,随着洞室尺寸的增大,洞顶位移逐渐增大,位移增量依次为 17、15、21、20 mm;洞底位移逐渐增大,位移增量依次为 56、46、52、40 mm。在强降雨工况下,随着洞室尺寸的增大,洞室上方土体位移量逐渐增大。

图 12 为强降雨工况下地表中心的沉降量。从图中可以看出,在强降雨工况下,随着洞室的不断扩大,地表中心竖向位移逐渐增大,位移增长量

为 20 mm 左右,证明在强降雨工况下洞室尺寸的增大对地表沉降影响较大。

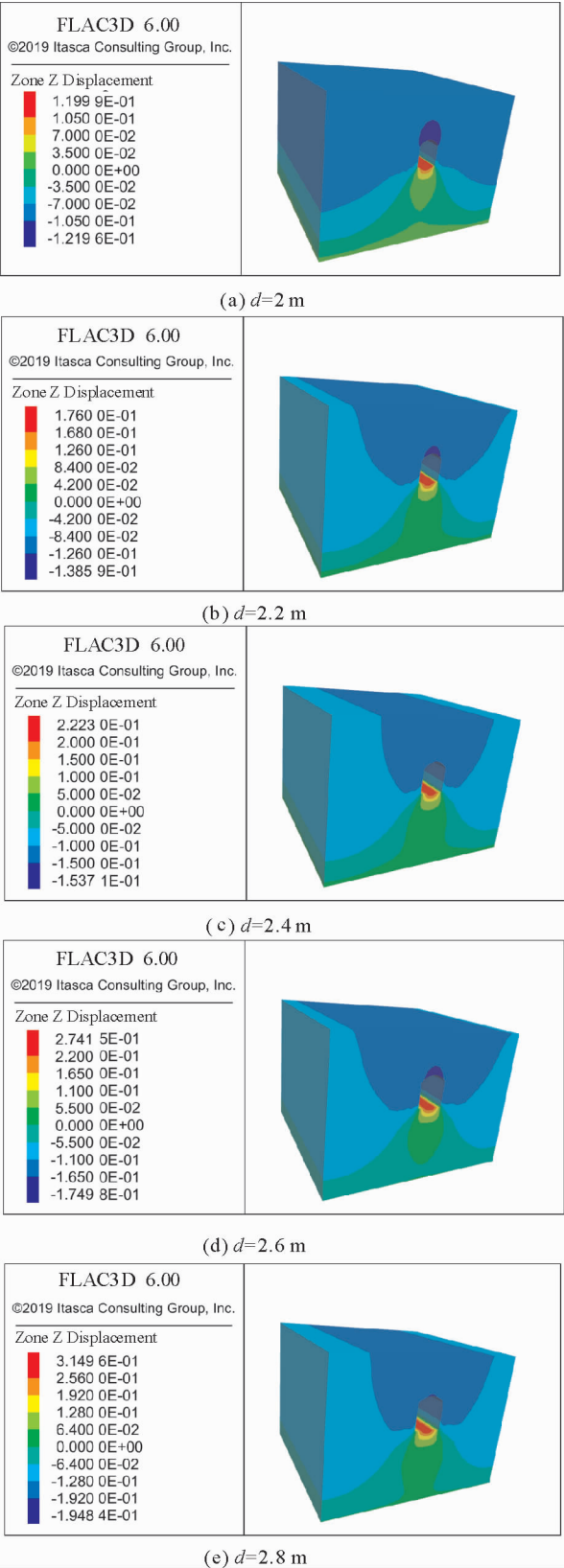


图 11 强降雨工况下模型竖向位移云图
Fig11 Vertical displacement cloud map of the model under heavy rainfall conditions

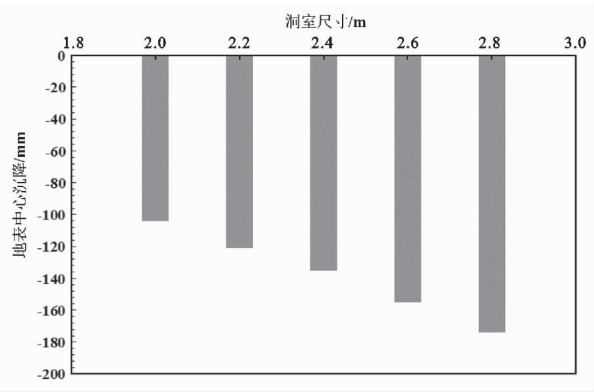


图 12 强降雨工况下地表中心沉降

Fig. 12 Surface center settlement under heavy rainfall conditions

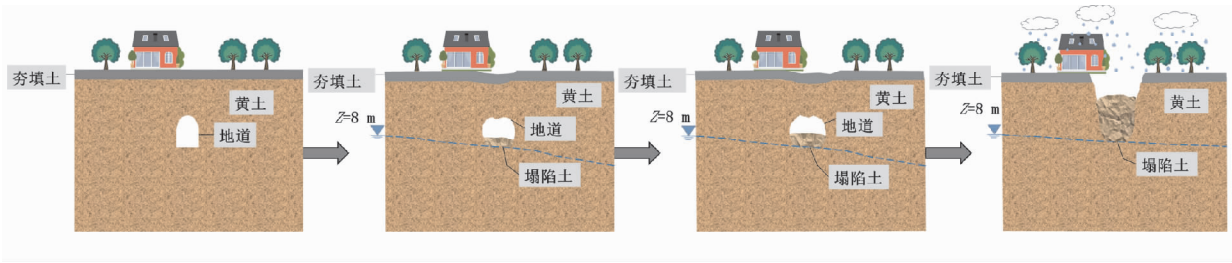


图 13 地面塌陷过程图

Fig. 13 Ground collapse process diagram

当地下水上升时,在势能差的作用下土体发生渗流,引起土颗粒或土骨架的移动。同时,地下水作用下的动水压力,降低土体之间的黏结力,地下水浸泡土体,降低土体强度,使土体发生崩解。另外,地道本身的存在,给更大范围内的渗流破坏提供了渗流通道,使地道不断扩大,在土拱效应下,地面能维持一个临界坍塌状况,在夏季强降雨的情况下,发生急剧变化,导致地面塌陷的发生。

1) 上覆荷载与振动作用。研究区在地道上方修建房屋,增加了上覆层的荷载,加之汽车等交通工具的振动作用,改变了土体结构。

2) 地下水潜蚀作用。研究区发生地面塌陷的几处区域,初始地下水位均在地面以下 15 ~ 20 m 左右,在灌溉工程的实施加之近几年强降雨,地下水位抬升了 6 ~ 8 m,产生水头差,在土体中发生渗流,地道的存在给地下水的运移提供了通道,带走土体中的松散细颗粒,只剩粗颗粒维持骨架,在持续作用下,地道逐渐扩大,上覆土层在重力作用下,产生拉张裂缝。

3) 降雨入渗作用。地表水在下渗过程中增加地道上覆土体的自重,并对土体进行冲蚀^[16],

4 机理研究

由于研究区多数地面塌陷均为抗战时遗留地道、修建居民住宅、地下水位抬升加之季节性强降雨引起,因此,本文重点分析此类地面塌陷的机理。该类型地面塌陷的形成是以抗战时遗留地道为基础条件,地下水位抬升、强降雨、上覆荷载与振动共同作用下形成的。地下水位抬升和抗战时遗留地道引起的地面塌陷的过程主要是(见图 13)。

形成冲蚀裂缝,随着降雨量的增加,逐渐向下入渗。

5 结论

本文基于研究区的 10 个地面塌陷点,分析了不同地面塌陷类型的诱因、时空分布特征及塌陷形成机制,采用有限差分软件 FLAC3D 模拟了开挖地道、地下水位抬升、强降雨工况下的地面塌陷的发展过程,得出如下主要结论。

1) 研究区塌陷灾害点呈现季节化、区域性的特点,塌陷事故发生在夏季的概率明显优于其他季节,塌陷地点主要发生在海拔较低的平原地带。

2) 洞室周围及地表沉降或隆起变形主要由地道开挖和建房导致,随着地下水位的不不断抬升,洞室周围土体变形量逐渐增大,在强降雨工况下,地道的不断扩大,加速了塌陷的发生。

3) 研究区地面塌陷形成机理为:居民建房增加上覆荷载,地下水抬升降低土体强度,地道本身的存在为地下水渗流提供了通道,季节性强降雨进一步诱发地面塌陷。

参考文献

- [1] 宋二祥, 徐明, 吴志轩, 等. 某盾构施工岩溶场地地面塌陷机理和数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1874-1880.
SONG E X, XU M, WU Z X, et al. Mechanism and numerical analysis of ground collapse in a shield tunneling karst site [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1874-1880.
- [2] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机理及其控制[C]//第2届全国工程安全与防护学术会议论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会, 2010.
- [3] 于贺艳. 武广客运专线英德段岩溶塌陷模式及致塌因素的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [4] GOLPASAND M R B, DO N A, DIAS D. Impact of pre-existent Qanats on ground settlements due to mechanized tunneling [J]. Transportation Geotechnics, 2019, 21: 100262.
- [5] 刘贤红, 宁进锡, 刘显丽. 邵东市城区地面塌陷发育特征及成灾机理研究[J]. 价值工程, 2022, 41(24): 78-80.
LIU X H, NING J X, LIU X L. Research on the development characteristics and disaster mechanism of ground subsidence in the urban area of Shaodong City [J]. Value Engineering, 2022, 41(24): 78-80.
- [6] 周正, 李大华, 廖云平, 等. 重庆中梁山岩溶地面塌陷特征及形成机理[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 67-78.
ZHOU Z, LI D H, LIAO Y P, et al. Characteristics and formation mechanism of karst ground collapse in Zhongliang Mountain, Chongqing [J]. Karst China, 2022, 41(1): 67-78.
- [7] 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.
LI T, ZHANG Z Z, ZONG L D. Research on the formation mechanism and prediction of soil subsidence caused by underground cavities[J]. Geotechnical Mechanics, 2015, 36(7): 1995-2002.
- [8] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 303-309.
ZHANG C P, ZHANG D L, WANG M S, et al. Mechanism and control of ground collapse induced by urban tunnel construction [J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(S1): 303-309.
- [9] 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 disaster process caused by covered karst soil caves[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 179-187.
- [10] 冯永, 赵辰, 山傲岩. 基于 FLAC3D 的抽水致塌动态过程模拟分析[J]. 工程勘察, 2015, 43(6): 33-36.
FENG Y, ZHAO C, SHAN A Y. Simulation analysis of dynamic process of pumping induced collapse based on FLAC3D[J]. Engineering Survey, 2015, 43(6): 33-36.
- [11] 胡亚波, 刘广润, 肖尚德, 等. 一种复合型岩溶地面塌陷的形成机理: 以武汉市烽火村塌陷为例[J]. 地质科技情报, 2007, 26(1): 96-100.
HU Y B, LIU G R, XIAO S D, et al. The formation mechanism of a composite karst ground collapse: A case study of Fenghuo Village collapse in Wuhan City [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(1): 96-100.
- [12] 聂玉朋, 王庆雷, 曹光明, 等. 章丘区地面塌陷灾害形成机理及危险性评价研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(6): 11-13.
NIE Y P, WANG Q L, CAO G M, et al. Research on the formation mechanism and risk assessment of ground collapse disasters in Zhangqiu District [J]. Green Science and Technology, 2022, 24(6): 11-13.
- [13] XIA K Z, CHEN C X, ZHENG Y, et al. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China [J]. Engineering Geology, 2019, 249: 129-147.
- [14] 贺桂成, 刘永, 张志军, 等. 衡山石膏矿地面塌陷机理的 FLAC3D 模拟[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(1): 73-76.
HE G C, LIU Y, ZHANG Z J, et al. FLAC3D simulation of ground subsidence mechanism in Hengshan gypsum mine [J]. Mining Research and Development, 2013, 33(1): 73-76.
- [15] 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.
LUO X J. Also on the mechanism of covered karst ground collapse [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 886-895.
- [16] 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.

(编辑 张 欢)