



引文格式: 王涛, 李林, 董英, 等. 西安地面塌陷地质特征及其易发性评价[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 277-286. DOI: 10.12401/j.nwg.2024047

Citation: WANG Tao, LI Lin, DONG Ying, et al. Geological Characteristics and Susceptibility Evaluation of Ground Collapse in Xi'an[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 277-286. DOI: 10.12401/j.nwg.2024047

西安地面塌陷地质特征及其易发性评价

王涛^{1,2}, 李林^{1,2,*}, 董英^{1,2}, 王化齐^{1,2}, 张戈^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要: 随着西安市城市建设速度加快、规模扩大, 地面塌陷情况越来越多的出现在人们的生活中, 因其隐蔽性、突发性、高危害性, 成为威胁城市安全的主要问题之一。笔者结合西安市主城区钻探、工程勘察数据, 根据研究区地层分布情况, 利用“土拱效应”理论, 综合研究地面塌陷的形成过程与机理, 建立地面塌陷的临界跨径与上覆土层厚度以及上部荷载间的数值公式, 通过数值计算得出不同工况条件下地面塌陷的易发性。结果显示: 西安市地面塌陷事故多以雨水渗漏、管道破裂、工程施工引起; 相同地质条件下上覆土层厚度越大, 空洞的极限跨径越大; 将西安市划分为地面塌陷高易发区、中等易发区、低易发区; 发现当土层处于低压实度或高含水量时, 地下空洞承载的临界跨径越小, 地面塌陷易发程度越高。评价结果可为西安地面塌陷预防和治理决策提供建议。

关键词: 地面塌陷; 临界跨径; 易发性评价; 西安

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0277-10

Geological Characteristics and Susceptibility Evaluation of Ground Collapse in Xi'an

WANG Tao^{1,2}, LI Lin^{1,2,*}, DONG Ying^{1,2}, WANG Huaqi^{1,2}, ZHANG Ge^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: With the speed and scale of urban construction in Xi'an city, ground collapse has appeared more and more in people's life. Because of its hidden, sudden and high hazard, it has become one of the main problems threatening urban security. Combined with the drilling and engineering prospecting data in the main urban area of Xi'an, According to the stratum distribution in the study area, the formation process and mechanism of ground collapse are comprehensively studied by using the theory of soil arch effect, and the numerical formula between the critical span of ground collapse, the thickness of overlying soil layer and the upper load is established. The susceptibility of ground collapse under different working conditions is obtained through numerical calculation.

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-09-27; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“西安多要素城市地质调查”(1212011220031)、“西安市地质安全体检与风险评估示范”(DD20211317)联合资助。

作者简介: 王涛(1987-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: 476644953@qq.com。

*通讯作者: 李林(1976-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事地学空间分析及地学信息化建设工作。E-mail: llin@mail.cgs.gov.cn。

The results show that the ground collapse accidents in Xi'an are mostly caused by rainwater leakage, pipeline rupture and engineering construction. Under the same geological conditions, the greater the thickness of the overlying soil layer, the greater the limit span of the cavity. Xi'an city is divided into high-medium-and low-prone areas of ground collapse. It is found that when the soil layer is in low-or high-water content, the smaller the critical span of the underground cavity, the higher the ground collapse susceptibility. The evaluation results can provide suggestions for the prevention and treatment of ground collapse in Xi'an.

Keywords: ground collapse; critical span; susceptibility evaluation; Xi'an

近年来,随着中国城市化进程的加快,城市环境地质问题也逐渐得到了人们的广泛关注。城市地面塌陷作为威胁城市地质安全的主要问题之一,因其隐蔽性、突发性、高危害性成为人们关注的焦点。

目前多数学者对地面塌陷的研究,多针对岩溶洞穴、采空区土洞造成的地面塌陷进行研究。随着城市建设中地下水超采、地下管网铺设、填挖道路、地铁交通密集建设、管线老化渗漏等情况的产生,城市地面以下逐渐存在大量隐伏空洞和不密实区域,专家、学者开始将研究重点转移到城市地面塌陷上。

地面塌陷研究主要包括了理论研究、试验研究和数值模拟研究。理论研究方面,部分学者通过土拱效应的形成机理及存在条件的研究,推导出土中洞室上覆土层厚度及相应最大临界跨径公式(吴子树等, 1995);通过土洞形成机制研究,推导出临界水位降深、临界地下水流速及临界抽水涌水量的数学表达式(万志清等, 2003);试验研究方面,学者们建立各种实验装置模拟不同工况进行室内试验,如自主设计循环变水压渗透实验装置进行室内实验,运用渗流破坏理论解释了地基土体在地下水扰动作用下的变形破坏机制(陈国庆等, 2013);建立自动抽压装置,通过试验发现随着漏损流量的逐渐增加,土体侵蚀破坏形式有所不同,并将整个土体流失划分为土体静止、稳定侵蚀孔洞和完全流化等3个状态(何勇兴, 2017);建立渗流侵蚀模拟试验装置,模拟路面塌陷的全过程,发现当存在一定尺寸的地下空洞时,即使动荷载较小,但在足够多的振动循环作用下土洞也会失稳导致路面坍塌,不均匀系数较高土体的静力稳定性较强,动力稳定性较弱(高程鹏, 2020)。数值模拟方面,学者多利用已有的商业软件进行数值分析,如FLAC3D软件、PFC3D颗粒流分析程序、ANSYS软件等,发现上覆土层厚度减小可以明显增大塑性区的范围,当塑性区发展至地表,地陷就会发生(张子真, 2012);进行数值模拟与理论计算结果对比,验证了地陷安全系数计算公

式以及分析和预测方法的合理性(李涛等, 2015);模拟管线渗漏引发地面塌陷,发现管道顶部渗漏要比底部渗漏造成的影响范围和水土流失量更大(付栋等, 2018)。

西安作为国家中心城市之一,新一线城市,地处黄土地区,地面塌陷研究较少(董英等, 2019; 冯旻譔等, 2023; 史元博等, 2023)。因此,针对西安主城区开展西安地面塌陷研究具有必要性和迫切性,本次研究区选择西安三环内以及南部航天城为边界(图1),旨在研究西安地区岩土体本身形成塌陷的易发程度,基于西安地区钻孔资料以及相关勘查资料,利用临界跨径数学公式确定不同岩土体不同深度地下空洞的稳定性,建立地面塌陷易发程度分区表,完成西安地面塌陷易发性评价。

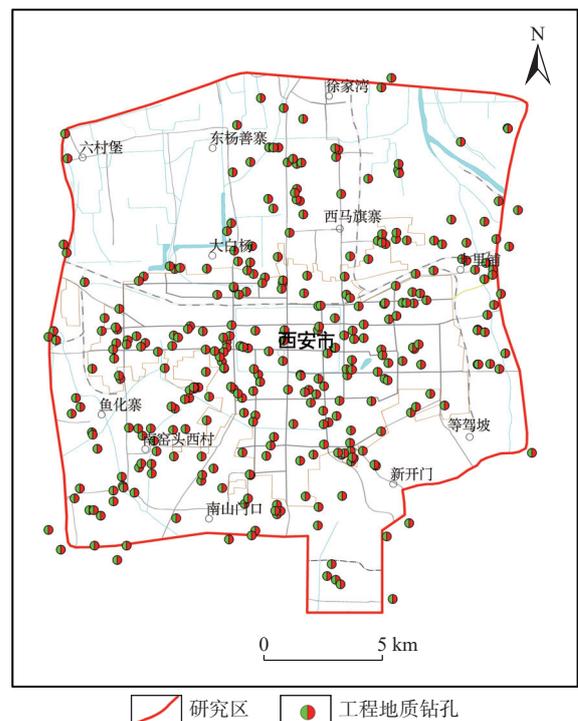


图1 研究区范围及钻孔位置图

Fig. 1 Study area and borehole location map

1 西安市工程地质条件

1.1 地貌单元分布

研究区地处关中盆地内,地貌类型多样,受地质构造影响,研究区地貌单元包含冲积平原、冲洪积平原以及黄土台塬(朱立峰等,2005)。其中,冲积平原包括河漫滩、渭河一级阶地、渭河二级阶地;冲洪积平原包括一级冲洪积平原、二级冲洪积平原、三级冲洪积平原(图 2)。

1.2 地质结构分布特征

研究区工程地质层土体类型主要有黄土(A)、砂土(B)、一般黏性土(C)、碎石土(D)4类。工程地质结构

划分为砂土、一般黏性土、碎石土互层结构,黄土+砂土、一般黏性土、碎石土互层结构两大类(表 1)。砂土、一般黏性土、碎石土互层结构分布于河漫滩、渭河一级阶地及一级冲洪积平原;黄土+砂土、一般黏性土、碎石土互层结构分布于黄土台塬、渭河二级阶地、二级、三级冲洪积平原区。(董英等,2021;杨驰等,2022)

通过收集的 26 000 个钻孔中选取 323 个钻孔,均匀分布于研究区内,再经过 323 个钻孔信息的筛选(图 1),查阅相关工程勘察资料以及相关文献(李忠明等,1990;梅源等,2016;张亚龙等,2021),确定研究区不同地貌单元的 30 m 以浅的土的物理学参数(表 2)以及地层结构(图 3)。

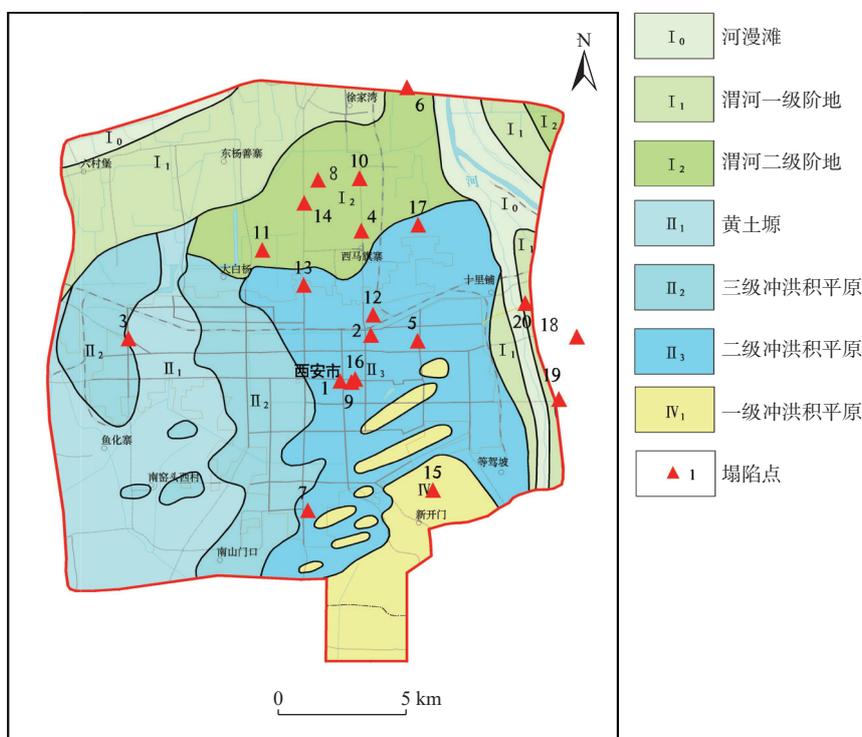


图 2 西安市地貌图

Fig. 2 Geomorphological map of Xi'an City

表 1 工程地质结构划分表

Tab. 1 Division table of engineering geological structure

土体类型	工程地质层代号	地貌单元								
		冲积平原			冲洪积平原			黄土台塬		
		漫滩	一级阶地	二级阶地	三级阶地	一级冲洪积平原	二级冲洪积平原	三级冲洪积平原	一级黄土台塬	
特殊土	黄土	A		A	A		A	A	A	
	砂土	B	B	B	B	B	B	B	B	
一般性土	一般黏性土	C	C	C	C	C	C	C	C	
	碎石土	D	D	D	D	D	D	D	D	
工程地质结构类型			B+C+D			A+B+C+D		B+C+D		A+B+C+D

表2 研究区不同地貌单元物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of different geomorphic units in the study area

地貌单元	岩层岩性	厚度(m)	粘聚力c(Kpa)	内摩擦角 φ ($^{\circ}$)	容重(KN/m ³)	主动压力系数Ka
河漫滩	圆砾	3.7	0	38.0	14.8	0.24
	粉质黏土	2.0	13.5	24.2	20.3	0.42
	砾砂	0.7	0	38.0	14.8	0.24
	粉质黏土	9.1	13.5	24.2	20.3	0.42
	中砂	7.0	0	32.0	21.5	0.31
	粉质黏土	7.5	13.5	24.2	20.3	0.42
渭河一级阶地	杂填土	2.4	5.5	19.0	18.6	0.51
	黄土状土	0.3	16.0	10.6	19.8	0.69
	圆砾	4.7	0	38.0	14.8	0.24
	粉质黏土	15.6	13.5	24.2	20.3	0.42
	圆砾	4.4	0	38.0	14.8	0.24
	粉质黏土	2.6	13.5	24.2	20.3	0.42
渭河二级阶地	杂填土	2.3	5.9	10.0	16.5	0.70
	黄土	12.4	25.0	22.0	15.2	0.45
	古土壤	2.4	25.0	21.0	18.6	0.47
	粉质黏土	1.7	26.0	24.0	19.4	0.42
	中砂	6.8	0	32.0	21.5	0.31
	粉质黏土	4.4	26.0	24.0	26.0	0.42
一级冲洪积平原	素填土	2.8	12.5	10.0	16.5	0.70
	黄土状粉质黏土	7.8	24.0	20.0	19.8	0.49
	古土壤	4.2	34.7	24.5	18.9	0.41
	粉质黏土	10.0	34.0	20.0	20.1	0.49
	中粗砂	2.4	0	32.0	20.5	0.31
	粉质黏土	2.8	34.0	20.0	19.8	0.49
二级冲洪积平原	杂填土	1.3	15.0	10.0	18.8	0.70
	黄土状粉质黏土	11.1	32.0	20.0	19.9	0.49
	中砂	2.0	0	33.0	18.9	0.29
	粉质黏土	4.7	32.0	22.0	19.5	0.45
	中砂	10.9	0	34.0	20.5	0.28
三级冲洪积平原	素填土	2.6	15.5	14.5	18.0	0.60
	黄土	11.0	24.0	17.0	19.8	0.55
	古土壤	3.7	28.0	17.5	20.0	0.54
	黄土	12.7	27.0	17.0	20.2	0.55
黄土塬	素填土	1.8	15.5	14.5	18.0	0.60
	黄土	8.2	27.0	22.5	17.0	0.45
	古土壤	4.5	32.3	24.0	18.4	0.42
	黄土	5.0	28.3	24.7	19.1	0.41
	古土壤	2.0	34.3	24.9	18.9	0.41
	黄土	4.5	30.7	24.5	18.8	0.41
	古土壤	4.0	35.7	25.6	19.1	0.40

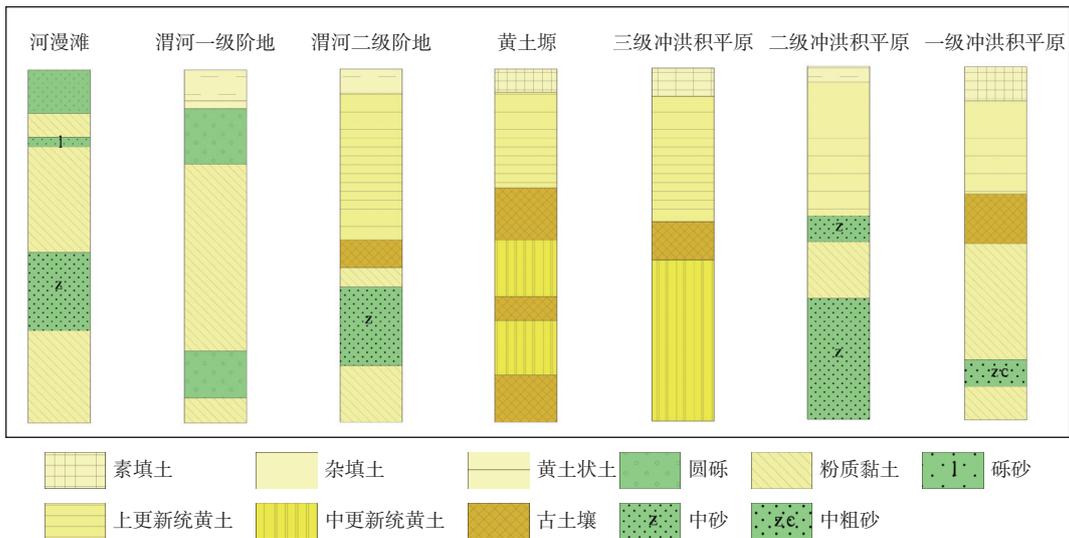


图3 西安不同地貌单元钻孔柱状图

Fig. 3 Borehole column map of different geomorphic units in Xi'an

2 西安地区地面塌陷基本情况

统计 2004~2022 年西安地区发生的地面塌陷事件, 可查的案例约为 20 例(表 3, 图 2), 可以看出地面塌陷多集中于渭河一级阶地、渭河二级阶地、三级冲洪积平原之上。其中, 渭河一级阶地地面塌陷多由于工程施工、管道破损引起; 渭河二级阶地地面塌陷多由于雨水渗漏、管道破损引起; 三级冲洪积平原地面塌陷多由于雨水渗漏、管道破损、工程施工引起。总体而言, 西安地区城市地面塌陷较少, 损失较小, 但是随着城市化进程加快, 地面塌陷出现的频次也在增大, 总结西安地面塌陷的主要原因包括 3 个方面: ①自然因素雨水渗漏, 土体湿陷, 路基破损。②地下管道破损, 长期漏水, 掏空地下土体。③地下工程施工造成的扰动。

3 西安地面塌陷形成机理及其评价方法

3.1 地面塌陷的形成过程以及机理

地面塌陷的过程其实就是地下空洞的形成发展到地下空洞的失稳, 从而形成地面塌陷。工程地质认为当地下空洞上覆土层较厚时, 土洞便形成自然拱, 而不易引起地面塌陷, 即为土拱效应。土体具有颗粒间的粘结力与摩阻力, 所以具有形成土拱的作用, 在荷载或自身重力的作用下, 土体产生压缩或沉降, 当土中存在着洞穴、软弱材料或边界条件不一致时, 将

产生不均匀位移, 由于位移的不均一性, 致使土颗粒间产生“楔紧”作用, 于是就在一定范围的土层中产生“拱效应”。现实中影响地面塌陷形成的原因很多, 如随着空洞的不断扩大, 地面荷载以及施工扰动的外界条件下, 空洞进一步扩大, 最终导致了整体路面的塌陷。然而在空洞最终破坏前, 土体不断进行着应力变化, 比如土体骨架效应、土拱效应, 土体的这种自稳能力使得土体结构在渐变过程中存在一个最终塌陷前的临界状态, 此处根据土体中土拱效应的形成条件和原理, 推导地下空洞塌陷前地下空洞的极限临界跨径与上覆土层厚度以及上部荷载之间的关系。

3.2 评价方法

地面塌陷易发性评价多采用经验指标评估法、模糊综合评价法, 属于半定量评价方法, 本次易发性评价主要考虑岩土体本身可能形成塌陷的易发程度, 根据土体中土拱效应的形成条件和原理, 推导出地下空洞塌陷前地下空洞的极限临界跨径与上覆土层厚度以及上部荷载之间的数学关系, 实现量化计算, 可使得评价结果更为准确。通过钻孔以及土工试验资料的收集, 建立基础地质结构数据, 统计 30 m 以浅的各地貌单元的土层物理力学参数; 建立符合西安地面塌陷易发程度分区表, 根据实际情况设置可能发生地面塌陷工况, 根据各工况下的物理参数数据, 利用公式计算出不同工况下的地面塌陷的临界跨径值, 结合西安地面塌陷易发程度分区表确定不同地貌单元地面塌陷易发程度。

地下空洞塌陷破坏时往往是空洞上覆土体结构

表3 西安地面塌陷事故统计表

Tab. 3 Statistical table of ground collapse accidents in Xi'an

序号	时间	地点	事故影响	事故原因
1	2004/12/23	东大街促进巷1号院院门下	深约2.5 m、宽约2 m、长约3 m的大坑, 院门全部悬空, 周围几间住房部分地基下陷	老旧排污管道破损
2	2009/7/17	朝阳门外康家村17号	房屋地面突然下陷深1 m	地下有一个40年前挖的防空洞, 防空洞出现失稳现象
3	2011/12/26	城西客运站门口汉城路与枣园路十字的一处绿化带	地面塌陷, 现场目测半径在3~4 m, 深约4 m	地下管道漏水
4	2012/9/28	北二环与太华十字北200 m	塌方面积约半个篮球场大, 一辆途经此处的水泥罐车被陷入其中并将天然气管道破坏	自来水管渗漏以及黄土湿陷造成
5	2013/5/8	西安地铁三号线东二环通化门至胡家庙	暗挖隧道顶部塌方, 死亡5人	盾构结构不稳定, 下雨导致土质疏松, 顶部和侧面发生塌陷
6	2013/7/27	北三环北辰立交以西500 m路南	路面塌陷, 形成大小超过10 m ² 、深7 m的大坑, 水泥罐车落入坑中	长期雨水渗漏以及排水管渗漏
7	2015/8/15	雁南一路	路面塌陷致一辆送水车侧翻	长期雨水渗漏以及排水管渗漏
8	2015/8/20	凤城五路与开元路十字	路面塌陷, 一辆渣土车发生侧翻	长期雨水渗漏以及排水管渗漏
9	2015/8/22	建国三巷西口	路面突然出现一个大洞, 抢修人员开挖后, 发现路面下方是一个长约5 m, 宽约2.5 m, 深约3 m的大坑	由于树根压断一根自来水管, 漏水长期浸泡路基所致
10	2019/4/7	凤城五路与太华路十字西南角	路面塌陷, 非机动车及部分人行道损坏	雨水渗漏, 土体湿陷, 路基破损
11	2019/5/14	纬三十街明光路十字西边	路面塌陷、车辆侧翻, 塌陷长12 m, 宽1 m, 深度约0.7 m	雨水渗漏, 土体湿陷, 路基破损
12	2019/11/3	大华一坊路, 靠近建华路	路面塌陷, 约有长6 m、宽3 m、深4 m, 坑内露出树根, 一根自来水管用一根木头吊着固定, 深坑周围有不少裂缝	地下管道漏水
13	2020/10/20	未央路龙首村十字西南角	路面塌陷, 塌陷面积较小, 约占用一个车道	地铁施工扰动以及后期运行震动导致
14	2020/10/25	未央路凤城三路十字以南80 m	路面下沉塌陷面积约80 m ²	雨水渗漏, 土体湿陷, 路基破损
15	2021/5/13	雁翔路岳家寨地铁站	发生塌陷的路面形成了一个直径8 m、深度约5 m的深坑, 死亡1人	地铁施工扰动以及后期运行震动导致
16	2021/5/17	建国一巷	路面塌陷, 一辆货车侧翻	雨水渗漏, 土体湿陷, 路基破损
17	2021/8/22	辛家庙立交向北100 m, 北辰路路东、浐灞大道西口	路面上有两个直径约5 m和3 m的大坑, 路面塌陷面积约30 m ²	雨水渗漏, 土体湿陷, 路基破损
18	2021/9/1	灞桥区新医路	路面塌陷, 塌陷面积约200 m ² , 塌陷深度初步估计在10~20 m, 人员有伤亡, 塌陷造成水、气管道破损, 直接将车辆淹没	各类工程施工造成地基不密实, 可能存在地裂缝的穿过
19	2022/2/23	咸宁东路穆将王立交桥下	路面塌陷, 影响交通	自来水管破裂, 造成路面塌陷
20	2022/11/7	西安浐灞御景城水岸云萃西门外浐河东路	路面塌陷, 产生一长约3 m, 宽约2 m, 深约5 m的空洞	下部排水管渗漏, 水体渗漏, 产生空洞

发生整体性的破坏, 推导地下空洞塌陷时的极限临界跨径时, 假定上覆土体沿空洞的边壁滑动破坏(图4)。

整个系统中, 地下空洞上覆土体在外部荷载 P , 土体自重 W 和土洞两侧壁抗塌落阻力 Q 三者共同作用保持临界塌陷状态。其中, 塌落面的侧压力 P_a 为:

$$P_a = K_a \gamma (H + h) \quad (1)$$

式中: $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ 为主动土压力系数; γ 为上覆土体容重; H 为上覆土体厚度; h 为地下空洞的拱高;

一侧塌落面的粘聚力为 C , 一侧塌落面深度

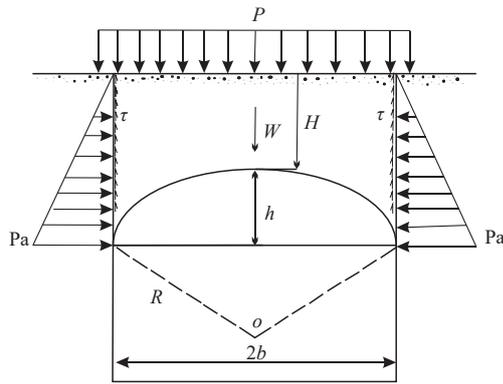


图4 地下空洞临界极限跨径计算图

Fig. 4 Calculation diagram of critical limit span of underground cavity

(H+h)处的总力为:

$$L = c + P_a \tan \varphi = c + K_a \gamma (H+h) \tan \varphi \quad (2)$$

式中: φ 为内摩擦角。

将上式在(H+h)的长度方向上积分, 得到一侧总的抗塌落阻力 Q 为:

$$Q = c(H+h) + \frac{1}{2} K_a \gamma (H+h)^2 \tan \varphi \quad (3)$$

再者计算上覆塌落土体的重量 W 为:

$$W = 2b(H+h)\gamma - \frac{2b^2\gamma \arctan h/b}{\sin^2(2 \arctan h/b)} + \frac{b^2\gamma}{\tan(2 \arctan h/b)} \quad (4)$$

式中: 2b 为塌落极限临界跨径。

为了便于计算将 $2 \arctan \frac{h}{b} = A$, 将公式中的函数按照泰勒级数展开并忽略其中三次方项得到:

$$W = 2b \left(H + \frac{1}{3} h \right) \gamma \quad (5)$$

当上覆土体处在极限平衡时有:

$$P + W = 2Q \quad (6)$$

将式(3)、(5)和(6)联立得到地面塌陷的临界跨径 2b 为:

$$2b = \frac{2c(H+h) + K_a \gamma (H+h)^2 \tan \varphi - P}{\gamma \left(H + \frac{h}{3} \right)} \quad (7)$$

从所得公式可知, 地下空洞承载的极限临界跨径与空洞周围土体的粘聚力、上覆土体厚度、容重、内摩擦角、外部荷载有直接关系。

4 地面塌陷易发性分区及评价

根据西安地区可能发生地面塌陷深度, 设置不同情景, 具体情景如下:

- (1) 上覆土层厚度为 2 m, 地下空洞拱高分别为 0.5 m、1 m;
- (2) 上覆土层厚度为 5 m, 地下空洞拱高分别为 0.5 m、1 m、2 m、3 m;
- (3) 上覆土层厚度为 10 m, 地下空洞拱高分别为 0.5 m、1 m、2 m、3 m、5 m。

将不同地貌单元内的物理力学参数带入地面塌陷的临界跨径计算公式(7)中进行计算, 其中上覆荷载按照公路一级车道荷载 10.5(kn/m), 得到不同情况下各地貌单元内的地面塌陷的临界跨径(表4)。

表4 不同地貌单元地下空洞临界极限跨径计算结果

Tab. 4 Calculation results of critical limit span of underground cavity in different geomorphic units

地貌单元	上覆土层厚度(m)	地下空洞拱高(m)	地下空洞临界极限跨径(m)	地貌单元	上覆土层厚度(m)	地下空洞拱高(m)	地下空洞临界极限跨径(m)
河漫滩	2	0.5	0.21	渭河一级阶地	2	0.5	0.97
		1	0.41			1	1.36
		0.5	1.49			0.5	1.49
	5	1	1.83		5	1	1.66
		2	2.35			2	2.04
		3	3.00			3	2.58
	10	0.5	2.99		10	0.5	2.80
		1	3.22			1	3.04
		2	3.69			2	3.51
		3	4.15			3	3.99
		5	5.11			5	4.96

续表 4

地貌单元	上覆土层厚度(m)	地下空洞拱高(m)	地下空洞临界极限跨径(m)	地貌单元	上覆土层厚度(m)	地下空洞拱高(m)	地下空洞临界极限跨径(m)		
渭河二级阶地	2	0.5	1.13	一级冲洪积平原	2	0.5	1.81		
		1	1.91			1	2.30		
		0.5	3.16			0.5	2.95		
	5	1	3.56		5	1	3.30		
		2	4.32			2	3.97		
		3	5.07			3	4.63		
		0.5	4.65			0.5	4.09		
		1	4.92			1	4.38		
	10	2	5.46		10	2	4.99		
		3	6.01			3	5.60		
		5	7.09			5	6.81		
		<hr/>							
二级冲洪积平原	2	0.5	2.97	三级冲洪积平原	2	0.5	2.17		
		1	3.68			1	2.73		
		0.5	3.94			0.5	3.10		
	5	1	4.31		5	1	3.42		
		2	5.04			2	4.04		
		3	5.74			3	4.66		
		0.5	4.83			0.5	4.25		
		1	5.09			1	4.48		
	10	2	5.60		10	2	4.94		
		3	5.99			3	5.41		
		5	6.76			5	6.20		
		<hr/>							
黄土塬	2	0.5	2.63	黄土塬	10	0.5	4.96		
		1	3.30			1	5.26		
		0.5	3.78			2	5.85		
	5	1	4.16		5	3	6.44		
		2	4.88			5	7.59		
		3	5.59			<hr/>			

对研究区进行地面塌陷易发性分区, 共分为 3 个区, 包括高易发区、中等易发区、低易发区。根据西安地区的上覆土层厚度、地下空洞拱高建立不同区域

的易发程度分区表(表 5), 通过表格对比来确定区域的地面塌陷易发性。

根据西安地面塌陷易发程度分区表, 结合各地貌

表 5 地面塌陷易发程度分区表

Tab. 5 Partition table of ground collapse susceptibility

上覆土层厚度(m)	2	5	5	10	10
地下空洞拱高(m)	≤1	≤1	≥1	<5	≥5
高易发区	2b<1	2b<2	2b<3	2b<4	2b<5
中等易发区	1<2b<2	2<2b<3	3<2b<4	4<2b<5	5<2b<6
低易发区	2b>2	2b>3	2b>4	2b>5	2b>6

单元内的地面塌陷的临界跨径计算结果确定不同地貌单元地面塌陷易发性(图5), 其中, 河漫滩、渭河一级阶地为地面塌陷高易发区, 渭河二级阶地、一级冲洪积平原为中等易发区, 二、三级冲洪积平原、黄土

塬为低易发区(表6)。总体而言计算结果与土体性质吻合, 土体结构松散稳定性较差, 土体结构致密稳定性较高, 同时随着上覆土体厚度的增大, 空洞内的极限临界跨径值变大。

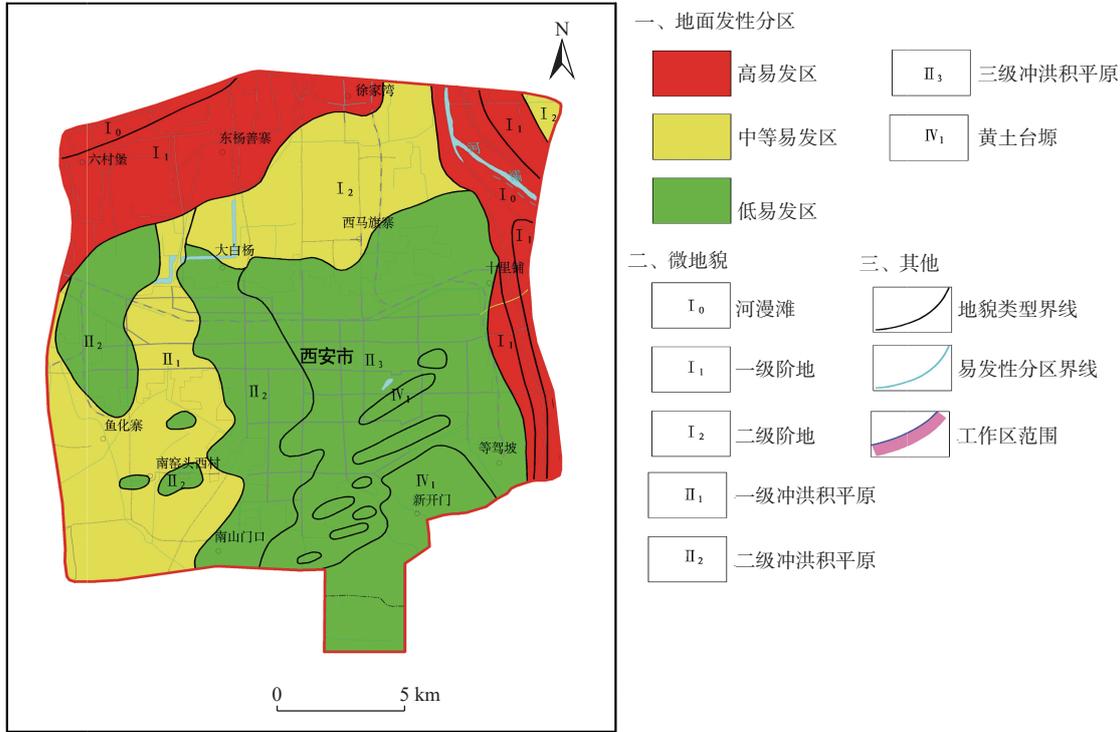


图5 西安主城区地面塌陷易发性分区图

Fig. 5 Zoning map of ground collapse susceptibility in main urban area of Xi'an

表6 西安地面塌陷易发性评价成果表

Tab. 6 Evaluation results of ground collapse susceptibility in Xi'an

地貌单元	河漫滩	渭河一级阶地	渭河二级阶地	一级冲洪积平原	二级冲洪积平原	三级冲洪积平原	黄土塬
易发性	高易发区	高易发区	中等易发区	中等易发区	低易发区	低易发区	低易发区

5 结论及讨论

(1)研究区地貌单元多样, 工程地质层丰富, 总体城市地面塌陷事故较少, 事故原因以雨水渗漏、管道破裂、工程施工为主。

(2)地下空洞承载的极限临界跨径与空洞周围土体的粘聚力、上覆土体厚度、容重、内摩擦角、外部荷载有直接关系。粘聚力、容重、内摩擦角一定时, 上覆土层越厚, 空洞的极限跨径越大。

(3)研究区地面塌陷易发区分布于河漫滩、渭河一级阶地, 中等易发区分布于渭河二级阶地、一级冲洪积平原, 低易发区分布于二、三级冲洪积平原、黄

土塬。说明当土层处于低压实度或高含水量时, 地下空洞承载的极限临界跨径越小, 地面塌陷易发程度越高。

(4)从结果上看, 易发性程度高并不代表该地区容易发生地面塌陷, 外界的各种诱因在其中占据了主导作用, 如降雨、管道破损、工程施工等, 在这些诱因作用下, 产生了地面塌陷, 笔者将由诱因产生的地面塌陷归属于地面塌陷危险性。

参考文献(References):

陈国庆, 李天斌, 贺宇航等. 地下水扰动作用下地基土体渗透破坏试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 52-55.
 CHEN Guoqing, LI Tianbin, HE Yuhang, et al. Seepage Failure Test of Foundation Soil Under Ground Water Perturbation[J]. Journ-

- al of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 52-55.
- 董英, 曾磊, 李林, 等. 西安多要素城市地质调查报告 [R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2021.
- 董英, 张茂省, 刘洁, 等. 西安市地下水与地面沉降地裂缝耦合关系及风险防控技术 [J]. 西北地质, 2019, 52(2): 95-102.
- DONG Ying, ZHANG Maosheng, LIU Jie, et al. Coupling Relationship between Groundwater and Ground Fissures of Land Subsidence in Xi'an City and Risk Prevention and Control Technology [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 95-102.
- 付栋, 蔡剑韬, 张海. 上海地区由管线渗漏引发地面塌陷数值模拟研究 [J]. 岩土工程技术, 2018, 32(4): 189-193.
- FU Dong, CAI Jiantao, ZHANG Hai. Numerical Simulation of Ground Collapse Caused by Pipeline Leakage in Shanghai [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2018, 32(4): 189-193.
- 冯旻譞, 齐琦, 董英, 等. 利用 Sentinel-1A 数据监测大西安 2019~2022 年大西安地表形变 [J]. 西北地质, 2023, 56(3): 178-185.
- FENG Minxuan, QI Qi, DONG Ying, et al. Monitoring Surface Deformation in Xi'an City from 2019 to 2022 Based on Sentinel-1A Data [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 178-185.
- 高程鹏. 管道破损引发渗流侵蚀过程的模型试验 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1646-1650.
- GAO Chengpeng. Model Tests on Seepage Erosion Progress Caused by Damage of Municipal Pipeline [J]. Chinese Journal of Space and Engineering, 2020, 16(6): 1646-1650.
- 何勇兴. 地下管道漏损对周围土体侵蚀影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- HE Yongxing. Study on the soil erosion around underground pipe leakage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- 李涛, 张子真, 宗露丹. 地下空洞引起土质地层的形成机制与预测研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1995-2000.
- LI Tao, ZHANG Zizhen, ZONG Ludan. Study of Formation Mechanism and Prediction of Sinkholes in Soil Stratum Induced by Subterranean Cavity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1995-2000.
- 李忠明, 孙有胜, 申玉高, 等. 西安市工程地质勘察报告 [R]. 西安: 陕西省地矿局第二水文地质工程地质队, 1990.
- 梅源, 胡长明, 王雪艳, 等. 西安地区湿陷性黄土地铁车站深基坑开挖引起的地表及基坑支护桩变形特征 [J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 9-10.
- MEI Yuan, HU Changming, WANG Xueyan, et al. Deformation Characteristics of Ground Surface and Retaining Pile Induced by Deep Foundation Pit Excavation of Subway Station in Collapsible Loess of Xi'an Area [J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 9-10.
- 史元博, 朱兴国, 卢全中, 等. 西安凹陷 f12 地裂缝发育区第四系及裂缝沉降特征 [J]. 西北地质, 2023, 56(5): 185-196.
- SHI Yuanbo, ZHU Xingguo, LU Quanzhong, et al. Drilling Sedimentation and Subsidence of Ground Fissure (f12) in Xi'an, Shaanxi [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 185-196.
- 吴子树, 张利民, 胡定. 土拱的形成机理及存在条件的探讨 [J]. 成都科技大学学报, 1995, 83(2): 15-19.
- WU Zishu, ZHANG Limin, HU Ding. Studies on the Mechanism of Arching Action in Loess [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995, 83(2): 15-19.
- 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): 1377-1379.
- WAN Zhiqing, QIN Siqing, LI Zhigang, et al. Formation mechanism and initial condition of soil cavity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1377-1379.
- 杨驰, 陶福平, 袁旭东. 陕西省主要盆地地下水动态特征分析 [J]. 西北地质, 2022, 55(3): 345-354.
- YANG Chi, TAO Fuping, YUAN Xudong. Analysis of Groundwater Dynamic Characteristics in Major Basin Areas of Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 345-354.
- 张子真. 土质地层地陷机理分析及数值模拟 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- ZHANG Zizhen. Analysis and Numerical Simulation of Sinkhole Mechanism in Soil Stratum [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- 朱立峰, 李益朝, 刘方, 等. 西安地裂缝活动特征及勘查思路探讨 [J]. 西北地质, 2005, 38(4): 102-107.
- ZHU Lifeng, LI Yizhao, LIU Fang, et al. Features on Ground Fractures and Exploration Train of Thought in Xi'an [J]. Northwestern Geology, 2005, 38(4): 102-107.
- 张亚龙, 张玉峰, 宋奇昱, 等. 西安饱和软黄土高水位核心区基坑降水技术 [J]. 施工技术, 2021, 50(4): 91-92.
- ZHANG Yalong, ZHANG Yufeng, SONG Qiyu, et al. Dewatering Technology of Foundation Excavation in High Water Level Core Area of Saturated Soft Loess in Xi'an [J]. Construction Technology, 2021, 50(4): 91-92.