

西安地铁沿线地面沉降活动趋势及危险性评价^{*}

王震¹, 黄强兵², 孙晓涵³, 张宁², 杨成生²

(1. 西安市地下铁道有限责任公司, 西安 721000; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 3. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

摘要: 地面沉降是西安市典型城市地质灾害之一, 严重制约了西安城市地下空间的开发和利用, 尤其是严重阻碍了城市轨道交通的发展。地层不均匀沉降变形增大, 使地铁隧道衬砌结构产生纵向开裂破坏和隧道渗漏水等病害, 这给西安地铁的建设及运营留下安全隐患。本文基于2007—2012年间120个地面沉降监测点的监测数据, 根据等速率外推法预测了地铁沿线未来的地面沉降活动速率, 运用单位变形量法计算出了地铁沿线地面沉降最大沉降量, 其中胡家庙地面沉降中心最大沉降量为1 960 mm, 小寨、大雁塔、沙坡及西工大等地面沉降中心为400~700 mm, 而辛家庙、含元殿地面沉降中心为200~300 mm。结合地铁工程自身的特点和重要性, 对地铁沿线各区域地面沉降的危险性进行了评价, 认为区域地面沉降对地铁线路的影响主要集中在地面沉降中心范围内, 整体上线路南段危险性明显大于中段和北段。研究结果可为西安地铁工程规划设计、施工建设及安全运营提供重要依据。

关键词: 西安地铁; 地面沉降; 活动趋势; 危险性评价; 沉降量预测

中图分类号: U231

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1676-08

The Activity Trend and Risk Assessment of Land Subsidence along Metro Lines in Xi'an City

Wang Zhen¹, Huang Qiangbing², Sun Xiaohan³, Zhang Ning², Yang Chengsheng²

(1. Xi'an Underground Railway Co., Ltd., Xi'an 721000, P.R. China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, P.R. China;

3. School of Civic Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P.R. China)

Abstract: Land subsidence is one of the most typical urban geological hazards in Xi'an, China, which seriously restricts the development and utilization of Xi'an urban underground space, especially severely hinders the development of urban rail traffic. The uneven stratum settlement often induces the longitudinal cracking failure of metro tunnel lining structure and leakage and other metro diseases, which brings potential safety hazard to Xi'an metro construction and operation. Therefore, based on the field monitoring data of 120 land subsidence monitoring points from 2007 to 2012, the method of equal velocity extrapolation was proposed to predict the trend of the land subsidence along the metro lines and the largest settlement value was predicted with the method of the unit deformation. It is concluded that the maximum subsidence of Hujia temple land subsidence center is up to 1960mm, the maximum subsidence of Xiaozhai, Great Wild Goose Pagoda, the Xi Gongda land subsidence center is about 400~700 mm, and the maximum subsidence of Xijia temple, Hanyuan temple land subsidence center is about 200~

^{*} 收稿日期: 2018-06-09(修改稿)

作者简介: 王震(1975-), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通质量安全、科研项目等管理工作。

E-mail: wangzhen_work@163.com.

通讯作者: 黄强兵(1972-), 男, 湖南安化人, 博士, 教授, 主要从事岩土及地下工程等方面的科研工作。

E-mail: dedgx24@chd.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41372328); 西安市地下铁道有限公司项目(D3-YJ-032012057)

300 mm. The regional land subsidence geohazard along the metro lines was evaluated according to the characteristics and importance of the metro engineering. The results show that the influence of regional land subsidence on metro lines is mainly concentrated in the range of land subsidence center, and the risk of the southern section of metro lines significantly greater than the middle and northern sections. The above results can provide an important reference for Xi'an metro construction and safe operation.

Keywords: Xi'an metro; land subsidence; activity tendency; risk assessment; settlement prediction

0 引言

城市地铁建设促进了城市经济的发展和地下空间的利用,但随着地铁运营时间的增长,隧道结构极易产生纵向的差异变形^[1-2]。其中,区域地面沉降是诱发隧道纵向大范围不均匀沉降的主要原因之一。地面沉降是一种由多种因素引起的地面标高缓慢降低的环境地质灾害,它多发生在大中城市^[3-7],过量抽取地下水是主要诱因。西安市是中国三大地面沉降区之一的汾渭地堑沉降区的典型城市,随着经济发展,工业、农业和生活用水量均大幅增长,由于过量开采城区地下水,造成承压水位下降,引起地面沉降。西安市地面沉降速率和不均匀性在全国各大城市中最为突出^[8-9],加之构

造作用的影响,从而导致地层不均匀沉降变形增大。当地铁隧道穿越地面沉降区域时,过量的地层不均匀沉降将诱发隧道衬砌环缝张开而发生渗漏甚至产生管片开裂^[10],这样将加大地铁隧道的维修费用甚至危及地铁的安全运营。

西安地铁第一轮线网规划共 6 条线,北至火车北站,南至长安韦曲,西至咸阳森林公园,东至纺织城,线路全长 251.8 km。西安地铁 6 条线全部穿越地面沉降区,无法避让,如图 1 所示。根据长期监测,目前地面沉降向西南方向迁移,2011 年最大沉降量达 11.92 cm,对地铁 3 号线构成一定影响;又如西安地铁 2 号线,南延段会展中心—杜陵路段穿越地面沉降槽,2008 年 9 月至 2010 年 4 月该沉降



图 1 西安市短期轨道交通规划网

Fig.1 The short-term rail transit planning network in Xi'an

凹槽中心最大累积沉降量高达 22.57 cm。因此,有必要对地面沉降历史及未来可能发展趋势进行分析,并对最大沉降量进行预测,以确定区域地面沉降范围及程度,为西安地铁建设及运营提供安全保障,这对西安城市地铁建设具有十分重要的现实意义和工程应用价值^[8]。

1 地铁沿线地面沉降活动趋势分析

由于西安地面沉降主要是由于过量开采地下水导致的,要预测地铁沿线地面沉降未来活动趋势,先要预测地铁沿线地下水的变化趋势。当承压水位处于持续下降状态时,地面沉降以较快的速率发展,累计沉降量不断增加;当承压水位基本不变时,地面沉降的速率则有减缓的趋势;当承压水位上升时,地面沉降的速率减缓得更快些。考虑地面沉降和地下水水位的关系,在分析水位的总体变化规律和多年动态变化的基础上,可以预计由于小寨、西工大、辛家庙、胡家庙、铁炉庙等沉降中心水位上升,其累计沉降量趋于一个稳定值,年沉降速率也趋于减缓。而鱼化寨、东三爻等新地面沉降中心由于中心处承压水位持续下降,且年均水位下降速率较大,故预计这些地区的累计沉降量会持续增大,沉降的速率随着水位下降的速率变化,有增大的可能。

地面沉降的预测方法主要有历史演变趋势法、工程地质类比法、统计分析法和数学模型法等^[9]。其中统计分析法是根据长期地下水开采(回灌)量、地下水位和地面沉降动态监测资料建立合理的统计分析数学模型进行预测评价,要求具有长于 10 年的动态监测资料。数学模型是采用地下水流运动模型与土层变形模型两者结合的地面沉降耦合模型进行模拟预测,要求具有详细的地下水开采情况以及进行大量的土层力学性质试验。由于西安市从 20 世纪 90 年代以来,特别是 2000 年后便没有开展过大规模的连续精密水准监测,因此,对现今的地面沉降发展状况的了解都基于 2007—2010 年及 2012 年的 InSAR 监测数据,部分地区甚至连这四年的监测数据都缺失。短暂的监测时间序列限制了多种地面沉降预测方法的采用。

在评价区域地面沉降对京津城际轨道交通工程影响时,许再良等^[11]认为工程沿线在目前的开采条件和气候条件下,短期内地铁沿线地面沉降维持现有速率,利用短期地面沉降的速率预测区域地面沉降量。因此,本文采用相同的等速率外推法,

计算表达式如下:

$$\Delta V = \frac{S_b - S_a}{b - a} \quad (1)$$

$$S_c = S_a + \Delta V \cdot (c - a) \quad (2)$$

式中, ΔV 是 $a-b$ 年的平均沉降速率; S_a, S_b, S_c 分别是 a, b, c 年的累积沉降量。

为验证该方法的准确性,本文通过预测西安市 120 个地面沉降测试点 2007—2012 年的累计沉降量,并与实测值进行对比,结果如图 2 所示。其中测试点地面沉降的年平均沉降量为 2007—2010 年实测沉降量的年平均沉降量。图中的点可以反映实测值和预测值的接近程度(如果实测值和预测值越接近,则点越接近 $y=x$ 直线)。从图 2 可以看出,绝大多数测试点的预测结果和实测沉降相对误差在 +30% 至 -10% 之间,即预测量 = 实测量 $\times k$ ($k = 0.9 \sim 1.3$),且随着沉降量的增大,实测结果和预测结果的符合程度更好。该方法避免了监测数据波动带来的误差,认为地面沉降是一个缓变的过程,在较短的时间内地面沉降的速率变化很小。从测试结果还可以看出,预测结果偏于安全,且有应用实例。故本次预测采用监测资料较为完整的 2007—2012 年的年平均速率作为未来短期的沉降变形速率(图 3),来预测地铁沿线未来地面沉降趋势。其中,2007—2020 年地面沉降的上下限确定是根据这 120 个监测点的统计结果,认为实际沉降量在预测量的 $1/1.3 \sim 1/0.9$ 之间变化, $1/1.3$ 为 2007—2020 年累计地面沉降量的下限, $1/0.9$ 为 2007—2020 年累计地面沉降量的上限。

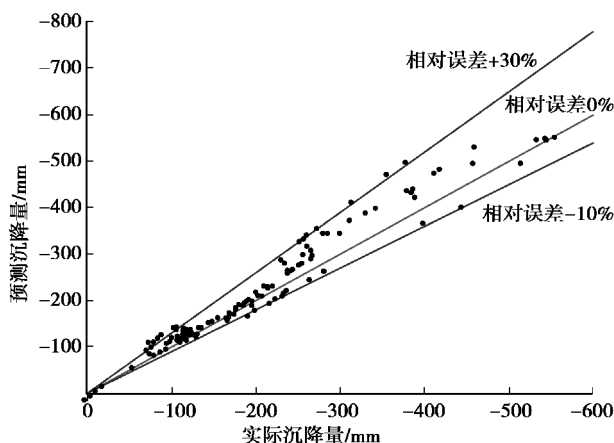


图2 地铁沿线沉降量预测检验结果

Fig.2 Prediction test results of land subsidence along Xi'an metro line

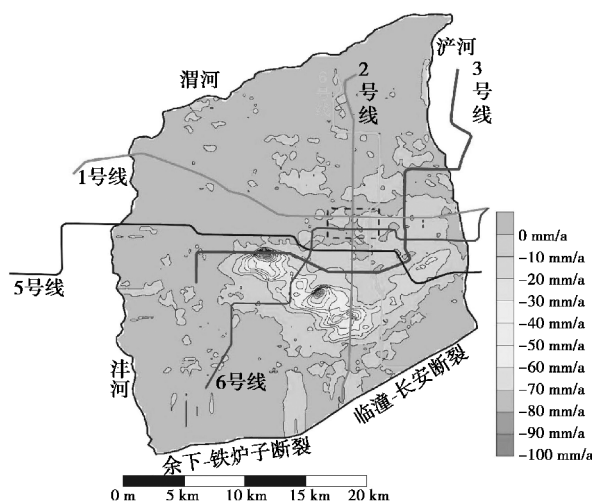


图3 西安市2007~2012年地面沉降年平均速率图

Fig.3 The annual average activity rate of land subsidence from 2007 to 2012 in Xi'an

2 地铁沿线地面沉降最大沉降量预测

地铁沿线区域地面沉降的最大沉降量预测目的是计算地铁沿线在极端条件下可能发生的最大沉降量。在沉降量的计算中,关键是确定符合实际的土层变形的初始压力值。通常的做法是根据西安地区典型地段的地表变形与承压水头的长期观测,采用类似土工试验中确定前期固结压力的做法来确定变形地层与整体实际相符的初始应力值。这种方法需要长期的观测资料 and 与之同步的承压水位监测资料。这对于局部地区不是很难达到,但进行区域性的地面沉降最大沉降量预测,对观测资料的要求非常高,目前西安市还达不到这个水准。因此,本文采用了一种新方法来计算地面沉降的最大沉降量,即单位变形量法。该方法是在地面沉降数据较少情况下比较适用的一种地面沉降计算方法。其基本假设是:对于某一地点,地层变形量与水位升降幅度之间呈线性关系。方法为:根据已有的地面沉降实际观测资料,计算地层在某一特定时段(水位上升或下降)内,含水层水位变化1 m时其相应的变形量(称为单位变形量),然后根据预测期水位的升降幅度,确定地层在该水位变化幅度下的变形量(即地面沉降量)。最大沉降量的计算表达式为:

$$\Delta S = \frac{S_b - S_a}{H_b - H_a} \quad (3)$$

$$S_{\max} = S_b + \Delta S(H_b - H_{\min}) \quad (4)$$

式中: ΔS 为单位变形量; S_a, S_b 分别为a年、b年的

累积沉降量; S_{\max} 为预测的最大沉降量; H_b, H_a 分别是a年和b年的承压水水位; H_{\min} 为最低的承压水水位。

根据西安地下水的开采历史,1971—1975年是西安市承压水开采最为强烈的阶段,该阶段开采量大、地下水降落漏斗中心水位年变幅近5 m,并形成了4个地下水区域降落漏斗,此后水位持续下降。1972年,西安市开始进入地面沉降加速沉降期。因此可以假设:在经历了地下水强烈开采的3~8年,地面沉降进入加速阶段的6年后,西安市的承压水位就是当时的先期固结水头,在这个水位基础上的水位变化会导致地层发生明显的变形。在1976—1997年的近20年内,尽管西安市加强了地下水开采的管理,但由于实际开采井数和实际开采量仍在逐年增加,深层承压水位下降的趋势仍在继续,区域地下水漏斗面积仍在扩大,中心区降深仍在不断增加。在1976—1997年西安市城郊区承压水集中开采区水位普遍下降20~100 m,1997年承压水位最大埋深达157 m,为有记录的最大值。故也可以假设,1996年的承压水位也是当时地层的先期固结水头,地层在1978年和1996年两个时刻处于正常固结状态。由此,可根据土层的变形规律^[12],将在未来承压水位降低到某个值时产生的沉降量表示在水位埋深-最大沉降量图上。1978年的承压水位、1978年的沉降量、1996年的承压水位、1996年的沉降量以及给定的水位和相应的最大沉降量,这3个点在同一条直线上。直线的斜率为地层的单位变形量,也就是水位下降1 m时整个地层产生的变形量(如图4)。

根据实际拥有的资料量,选择大雁塔、南稍门、小寨、西工大、胡家庙、辛家庙、含元殿、沙坡8个典型地面沉降中心为预测点。

根据收集到的《1977年8月承压水流场图》,提取1976年的各预测点承压水位值;根据《1960—1978年西安市地面沉降等值线图》,提取1978年各预测点的沉降量;根据分布在城区的承压水长期观测孔,提取1996年的各预测点的承压水位值;根据《1959—1996年地面沉降等值线图》,提取各预测点的沉降量。

对于沉降量计算中水头变化值的计算,还需要确定各典型地段开采地下水时的最低水位。一般情况下,可将承压含水层的顶面标高作为最低水位。但考虑到西安地区部分地下水降落漏斗区承压水位最低时已经低于承压含水层顶部,小寨、沙

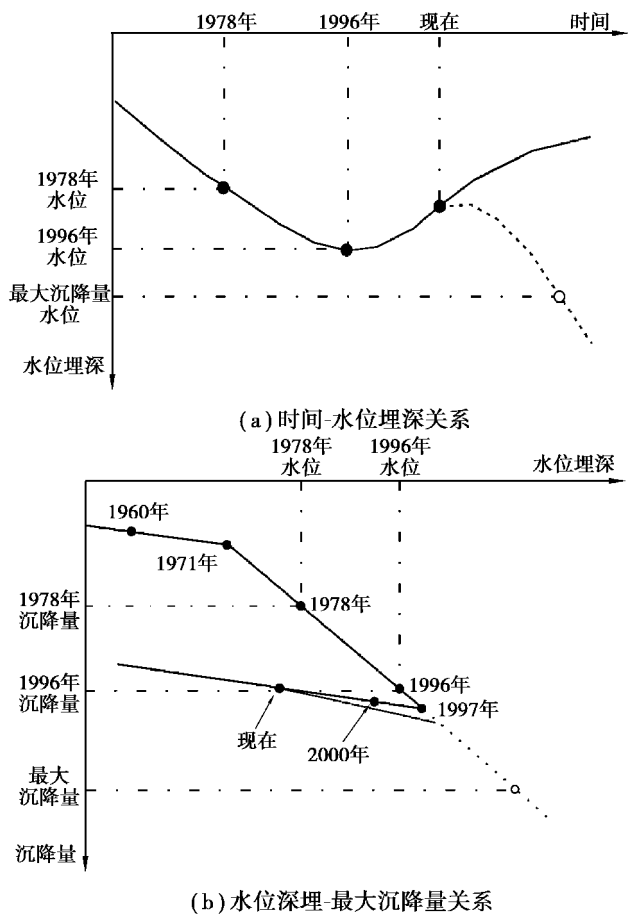
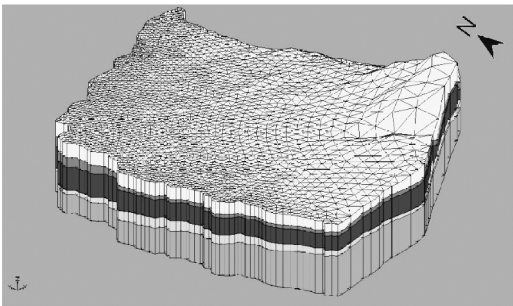


图 4 最大沉降量计算示意图

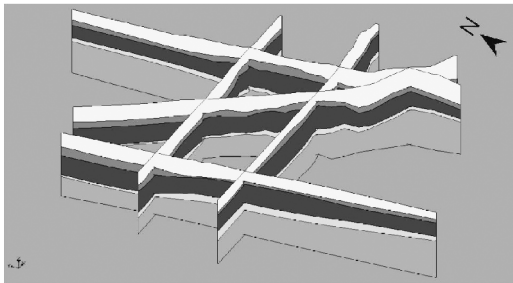
Fig.4 The calculation diagram of the maximum settlement

坡沉降中心承压水位甚至低于第一承压含水层中部,在极端干旱的条件,将大量抽汲地下水作为应急供水水源时,承压水位可能进一步降低,过量开采地下水常常会导致严重的地面沉降和与其相伴生的地裂缝地质灾害问题^[13],西安市政府采取封井压采等措施,从源头缓解地面沉降。为此,对承压水水位第一承压含水层中部以上的,选择第一含水层中部(顶板标高和底板标高平均值)作为开采地下水时的最低水位;对承压水位在第一承压含水层中部以下的,选择第一承压含水层底板作为开采地下水时的最低水位。第一承压含水层的顶底板高程从 GMS(groundwater modeling system) 软件建立的三维地质模型上提取,该软件通过收集的西安市的 500 多个钻孔,每一个钻孔分层(即对每一个钻孔分为潜水含水层、第一弱透层、第一承压含水层、第二弱透层、第二承压含水层),然后对每一个钻孔的顶底板数据进行空间上的插值,得到每一层含水层顶底面的高程,用可视化的形式表现,如图 5 所示。对于单位变形量,可以根据 1978 年

的沉降量、水位和 1996 年的沉降量、水位加以计算,如表 1 所示。单位变形量法预测最大沉降量计算公式和结果如表 2 所示。可见,当水头维持在以上限定范围内时,这些典型地区的剩余最大沉降量较为有限。但如果地下水的过量开采使得地下水头低于第一承压含水层中部或将第一承压含水层疏干,则最大沉降量、剩余沉降量可能更大。



(a) 实体图



(b) 联合剖面图

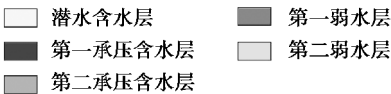


图 5 西安三维地质模型

Fig.5 Three-dimensional geological model of Xi'an

表 1 单位变形量计算结果

Tab 1 The calculation results of unit deformation

实测点名称	1978 年 实测水 位/m	1960~1978 年 实测沉 降量/mm	1996 年 实测水 位/m	1960~1996 年 实测沉 降量/mm	计算单 位变形 量/mm
大雁塔	351	150	306	1800	36.67
南稍门	346	190	320.3	1400	47.08
小寨	348	130	300	1932	37.54
西工大	350	103	315	1100	28.49
胡家庙	345	180	322	1800	70.44
辛家庙	365	150	321	900	17.05

表 2 最大沉降量计算结果
Tab 2 The calculation results of maximum ground settlement

预测点名称	1996 年水位/m	最低承压水位/m	1996 年后最大沉降量/mm	1960 年后最大沉降量/mm	1960~2008 年累计沉降量/mm	2008 年后最大剩余沉降量/mm
	实测(1)	假设(2)	(3)= 单位变形量×{(1)-(2)}	(4)=(3)+{1960 至 96 年实测沉降量}	实测(5)	(6)=(4)-(5)
大雁塔	306	282	881	2681	2300	381
南稍门	320.3	291	1380	2780	2100	680
小寨	300	261	1465	3397	2961	436
西工大	315	290	713	1813	1200	613
胡家庙	322	288.5	2360	4160	2200	1960
辛家庙	321	289.8	532	1432	1200	232

3 区域地面沉降危险性分区评价

3.1 危险性分区评价原则和方法

在综合分析地铁沿线区域地面沉降现状和未来发展趋势的基础上,围绕对地铁造成影响的地面沉降的分布特点,结合地铁工程自身的特点及重要性,全面权衡、准确合理地划分地质灾害危害程度与危险性大小区带。

本次综合评估采取危险性定性评价、分区范围定量计算的方法来进行。具体原则如下:

(1)工程第一的原则。本着为工程服务的宗旨,综合评价的结果以评价范围内的地质灾害对地铁工程的危害为主要依据。

(2)预测优先的原则。预测的结果更能反映工程建设将会遭受和引发、加剧地质灾害的可能性,对工程建设及未来安全运营更有指导意义。因此,综合评估的结果中凡是预测危险大的区段,直接定为危险大。

(3)“区内相似,区际相异”的原则。即将相类似的地区划归为同一单元,而把不相似的地区划归为另一单元,在相似的区域控制内控制和影响地质灾害的因子和因素具有相似性。

3.2 危险性综合评估的定性分析

地面沉降为缓慢渐进型地质灾害,其危害性远不及突发性灾害明显,但如果沉降速率过大,会改变地铁线路的原设计纵、横坡率,影响地铁工程的正常营运,同时,过大的差异沉降会导致地铁隧道衬砌变形裂损或破坏、道床板及轨道变形破坏和地

铁隧道渗漏水。

根据地面沉降地质灾害的特点及对拟建地铁工程的危害情况,结合“工程第一,预测优先以及区内相似,区际相异”的原则,综合确定危险性评估分区危险性(如表3)。

表 3 危险性综合定性评价表

Tab 3 Risk comprehensive qualitative evaluation results

综合危险性	灾害危害程度	地面沉降发育程度
危险性大	大、中	沉降速率大
		沉降速率中但差异沉降大
危险性中	大、中、轻	沉降速率中
		沉积速率小但差异沉降大
危险性小	中、轻	沉降速率小并且差异沉降小

注:地面沉降速率等级划分:年沉降速率大于 50 mm/a 为大,20~50 mm/a 为中,小于 20 mm/a 为小。对地铁工程的危害程度:结构破坏为大,局部可控漏水为中,轻微变形为轻。

3.3 危险性分区范围定量计算方法

地面沉降是一种区域性的面状地质灾害,可以在很大的范围内分布。由于其影响直接表现为地面标高的降低及区域不均匀沉降,故对地面沉降影响范围内的危险性分区,可根据年平均地面沉降速率进行。根据这一原则,可以计算每条地铁沿线位于各地面沉降速率区的范围。

3.4 地面沉降危险性综合评估结果

根据上面的危险性的定性评价及范围的定量计算,最终将地铁 1 号线、2 号线、3 号线划分为 3

个危险性等级。各条地铁区段详见表 4~6。

表 4 地铁 1 号线沿线地面沉降危险性综合评价结果
Tab 4 The risk comprehensive evaluation results of land subsidence along Metro Line 1

起止位置	特征描述	危险性综合评价	区段长度/km
全线	区内地面沉降不发育,老地面沉降中心活动趋于减弱	小	36.3

表 5 地铁 2 号沿线地面沉降危险性综合评价结果
Tab 5 The risk comprehensive evaluation results of land subsidence along Metro Line 2

起止位置	特征描述	危险性综合评价	区段长度/km
西安北客站—南郊西北政法大学	区内地面沉降趋于减缓,包括老地面沉降中心小寨和八里村在内的年地面沉降量小于 20 mm/a。	小	20.7
西北政法大学—电视塔南	区内地面沉降速率 20 ~ 50 mm/a,	中	1.9
省交警总队(电视塔南)—雁环路	区内地面沉降速率达 50 ~ 80 mm/a,较大的沉降量发生在一个相对较小的范围内,差异沉降明显。	大	0.8
雁环路—航天北路	区内地面沉降速率>20 mm/a,有继续增大的趋势	中	1.5
航天北路以南	远离中心城区,沉降速率小于 20 mm/a	小	6.8

通过对分区结果分析,可以发现:

(1)评估区内受区域地面沉降影响的范围主要集中在新地面沉降中心,且地铁线路与地面沉降中心距离越近的部位危险性越大。

(2)区域地面沉降对地铁的影响集中在地面沉降中心的范围内时,当地铁线路不在沉降中心的范围内,地面沉降速率急剧减小至背景值,危险性等级随之降低。

(3)总体上看,地面沉降对各条地铁线路的影响主要集中在城南段。线路北段受地面沉降影响小,预测今后的地面沉降速率小,故其危险性整体

小于中段和南段。

表 6 地铁 3 号沿线地面沉降危险性综合评价结果
Tab 6 The risk comprehensive evaluation results of land subsidence along Metro Line 3

起止位置	特征描述	危险性综合评价	区段长度/km
晁家庄至鱼化寨西皂河	地面沉降速率随着自西向东靠近鱼化寨沉降中心而逐渐增大,但沉降速率始终小于 20 mm/a。	小	7.6
皂河—团结南路和唐延路的中点	为鱼化寨沉降中心的强烈影响地段,最大年沉降速率达 90 mm/a,差异沉降量大。	大	2.5
唐延路以东路段	随着远离鱼化寨沉降中心,沉降量急剧减小到每年不足 20 mm,等沉降速率线开阔舒缓,差异沉降较小。	小	34

地面沉降危害程度轻微、危险性小的区段,建设场地适宜地铁工程建设。地面沉降危害程度较大、危险性中等的区段,在对其进行必要的防治措施后,建设场地基本适宜地铁工程。地面沉降严重、危险性大的区段,建设地铁适宜性差,防治难度大,应采取针对性较强的工程结构来适应其变形方可穿越。

总之,在根据地质灾害危险性等级的不同采取了合理的工程结构措施后,工程建设场地总体是适宜的。

4 结论

(1)利用等速率外推法,基于近几年西安市地铁沿线的地面沉降监测数据,可以较准确地预测未来地面沉降速率。

(2)基于地层单位变形量法得到了地铁沿线各区域地面沉降中心的最大沉降量。其中原胡家庙地面沉降中心的沉降量最大达到了 1 960 mm,小寨、大雁塔、沙坡、西工大等地的沉降量介于 400 ~ 700 mm 之间,辛家庙、含元殿等处的最大沉降量最小在 200 ~ 300 mm 之间。

(3)当水头维持在一定的限定范围内时,西安市地铁沿线地面沉降中心的剩余最大沉降量较为有限,但当地下水过量开采使得地下水头低于第一

承压含水层中部或将第一承压含水层疏干时,最大沉降量及剩余沉降量将增大。

(4)区域地面沉降对地铁线路的影响主要集中在地面沉降中心范围内,整体上线路南段危险性明显大于中段和北段。

(5)地铁线路穿越沉降速率较大,且在危险性较大的地面沉降区域,地铁工程需采取必要措施使其适应地面沉降变形。

参考文献(References)

- [1] 林永国,廖少明,刘国彬. 地铁隧道纵向变形影响因素的探讨[J]. 地下空间, 2000, 20(4): 264-267. (Lin Yongguo, Liao Shaoming, Liu Guobin. Discussion of the factors effecting on longitudinal deformation of subway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2000, 20(4): 264-267. (in Chinese))
- [2] 姜洲,高广运,戴海峰,等. 车载下地基差异沉降对地铁隧道结构的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1433-1439. (Jiang Zhou, Gao Guangyun, Dai Haifeng. Influence of differential subgrade settlement on metro tunnel structure under train load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1433-1439. (in Chinese))
- [3] 薛禹群,张云. 第四纪研究[J]. 2003, 23(6): 585-593. (Xun Yuqun, Zhang Yun. Land subsidence in China and its problems [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 585-593. (in Chinese))
- [4] 殷跃平,张作辰,张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 16(2): 1-8. (Yin Yueping, Zhang Zuochen, Zhang Kaijun. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 1-8. (in Chinese))
- [5] 段永侯. 我国地面沉降研究现状与 21 世纪可持续发展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 1-5. (Duan Yonghou. Research status on land subsidence and sustainable development in the 21st century of China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(2): 1-5. (in Chinese))
- [6] 周载阳. 地下水开采引起地面沉降的机理研究[J]. 工程勘察, 2012(3): 22-26. (Zhou Zaiyang. Mechanism research of land subsidence caused by groundwater extraction [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012(3): 22-26. (in Chinese))
- [7] Poland J F, Davis G H. Land subsidence due to withdrawals of fluids [A]//Reviews in Engineering Geology[C]. Boulder, Colorado, Geological Society of America, 1996: 187-269
- [8] 彭建兵,黄强兵. 区域地面沉降对西安地铁工程建设的影响及应对措施研究[R]. 西安:长安大学, 2014 (Peng Jianbing, Huang Qiangbing. The influence of regional land subsidence in Xi'an subway engineering construction and countermeasures research[R]. Xi'an: Chang'an University, 2014 (in Chinese))
- [9] 万伟锋. 西安市地下水开采—地面沉降数值模拟及防治方案研究[D]. 西安:长安大学, 2008. (Wan Weifeng. Numerical simulation of land subsidence due to ground water withdraw in Xi'an and its prevention scheme [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese))
- [10] 郑永来,潘杰,韩文星. 软土地铁隧道沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 67-74. (Zheng Yonglai, Pan Jie, Han, Wenxing. Analysis on the settlement of metro tunnel in soft soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 67-74. (in Chinese))
- [11] 许再良,李国和,孟庆文. 区域地面沉降对京津城际轨道交通工程的影响及防治对策[J]. 工程地质学报, 2006(14): 394-398. (Xu Zailiang, Li Guohe, Meng Qingwen. The influence of the regional land subsidence on the orbit transportation engineering of Beijing city to Tianjin city and the cure counter-plans for it [J]. Journal of Engineering Geology, 2006(4): 394-398. (in Chinese))
- [12] Holzer T L. Preconsolidation stress of aquifer systems in areas of induced land subsidence[J]. Water Resources Research, 1981, 17(3): 693-704.
- [13] Schumann H H, Cripe L S. Land subsidence and earth fissures caused by groundwater depletion in southern Arizona, U. S. A. [A]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Land Subsidence, Venice [C]. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Science Press, 1986: 841-851.