

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201904060

城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法

董英^{1,2}, 张茂省², 李 宁³, 杨 敏³, 程秀娟², 朱才辉³

(1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 自然资源部黄土地质
灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 城市地下空间地质安全评价是地下空间资源开发利用的基础, 但尚未见针对其评价原理、内容和方法进行的系统研究。文章以主要服务于控制性详细规划和修建性详细规划为目标, 提出了城市地下空间开发利用地质安全评价三方面的内容: (1) 地下空间自身稳定性评价, 分浅埋、深埋硐室对围岩稳定性计算方法进行了评价, 在修正的芬纳公式的基础上提出了以硐室围岩表面刚好达到剪切塑性极限为临界条件的围岩稳定性计算方法; 同时通过构建地质模型, 模拟不同工况下硐室稳定性, 获取大量样本数据, 利用神经网络方法分析建立求解器, 从而建立地下空间自身稳定性的快速评价系统。(2) 城市地下空间开发引起的邻近工程稳定性影响评价, 从地下空间开发对地面工程的影响以及地下工程之间相互影响两方面梳理了评价的内容。(3) 后建地面工程对地下工程稳定性的影响评价, 提出了通过原位监测、数值分析及工程类比等方法对后建地面工程对地下工程稳定性的影响进行评价。

关键词: 地下空间; 地质安全; 工程稳定性; 评价方法; 城市地质; 城镇化

中图分类号: TV554

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0171-08

Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization

DONG Ying^{1,2}, ZHANG Maosheng², LI Ning³, YANG Min³, CHENG Xiujuan², ZHU Caihui³

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;
2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, Ministry of Land and Resources/Xi'an Center of China
Geology Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an
University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Geological safety evaluation of urban underground space is the basis for the development and utilization of underground space resources. However, the content, principle and method of the evaluation have not been systematically studied. Aiming at serving controlling detailed planning and construction detailed planning, this paper puts forward three aspects of the evaluation of geological safety for the development and utilization of urban underground space. One is the evaluation of self-stability of underground space and the calculation method of surrounding rock stability by subsurface and deep buried caverns is used. Based on the modified Fenner formula, the surrounding rock stability calculation method is proposed, in which the surrounding caverns shear plastic limit surface just reaches the critical condition of the surrounding rock stability. At the same time, geological models are built to simulate the caverns stability under different working

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700); 国家自然科学基金项目(41641011; 41530640); 中国地质调查局地质调查项目
(DDT20190463; DD20160261; DD20189270)

第一作者: 董英(1981-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事城市地质及相关领域的研究工作。E-mail: dongy329@163.com

通讯作者: 张茂省(1962-), 男, 研究员, 主要从事城市地质及其他相关领域的研究工作。E-mail: xazms@126.com

conditions, a large sample database is obtained and the neural network method is used. Therefore, a new rapid underground space self-stability evaluation system is established. Second, the evaluation of stability of adjacent engineering caused by the development of urban underground space is sorted out from two aspects, including the influence of underground space development on surface engineering, and the influence between underground engineering. The third is the evaluation of the impact of the post-construction surface engineering on the stability of underground engineering by the methods of in-situ monitoring, numerical analysis and engineering analogy.

Keywords: underground space; geological safety; engineering stability; evaluation method; urban geology; urbanization

随着我国城市化进程不断加快,新型城镇化建设对城市地质工作提出了更新更高的要求^[1]。城市地质工作是城市规划建设的重要基础,贯穿于城市运行管理的全过程。大多数城市发展经历了起步(1950—1978年)、扩容(1979—1999年)、快速发展(2000—2017年)、提质(2018年—)等四个阶段中的一个或多个阶段。城市提质阶段的多要素城市地质调查就是以空间、资源、环境、灾害等要素为调查内容,服务于规划、建设和运行、管理全过程的新型城市地质调查^[2]。随着提质阶段的到来,越来越多的城市需要解决空间资源紧缺、环境恶化等问题^[3]。针对空间不足的问题,位于黄土高原的陕西、甘肃、山西等地方政府都在探索黄土高原城镇化可持续发展路径,延安新区、延安新机场、兰州新区、山西吕梁机场等大规模平山造地工程陆续实施,但平山造地工程带来的环境效应目前仍是学术界讨论的热点^[4]。而地下空间作为城市发展中的一种宝贵资源^[5],是自然资源和国土空间的重要组成部分,其开发利用可为城市的基础设施、生活服务提供新的空间^[6-7],大力开发地下空间资源是城市可持续发展的必由之路^[8]。因此,综合利用地下空间资源,实现城市地下全深度、全功能、全资源的地下空间有序分类和协同开发^[9],提高城市综合承载能力已成为一种趋势。

地下空间开发利用几乎涉及城市功能的各个方面,国内外城市地下空间的开发模式主要包括以轨道交通为核心的地下空间开发利用,以建筑物附属物为主的地下空间利用,偏重经济效益的地下综合体以及地下城等^[10]。城市大规模利用地下空间较早见于地铁建设,1863年建成的世界第一条地铁位于英国伦敦,纽约、东京、莫斯科、斯德哥尔摩、北京、中国香港等大型城市也都较早建成了地铁^[11-12]。大空间、大规模地下构筑物也越来越多,地下大空间的例子如日本大阪的中央体育馆,大规模地下综合体如加拿大的蒙特

利尔地下城等^[13],众多功能不同的地下设施构筑集中在一起,对城市地下空间的布局也提出了更高的要求。在我国工程实践中,对于复杂的地质环境条件和既有建筑物影响下的城市地下空间评价理论还不成熟^[14],地下空间利用需防范的工程地质问题和合理开发利用地下空间的方法研究是关注的热点^[15]。

目前针对不同围岩类型、不同深度、不同尺度的地下空间稳定性评价系统,传统方法如层次分析法、模糊综合评判法和神经网络法等都存在较大的主观性,难以客观体现稳定性评价的意义。为此,需寻求一种合理的、科学的、被广泛接受的地下空间稳定性判据。同时,传统的围岩稳定性分类用于城市地下空间评价时,将面临新的问题,如分类指标是否适合,分类界限是否适当,各指标的评分及权重选取是否合理等等。在开挖面空间效应、开挖进尺优化等方面,地表结构和地下应力分布的关系对城市地下工程稳定性的影响仍需要进一步研究。

基于当前城市地下空间稳定性评价问题,针对控制性详细规划和修建性详细规划阶段,本文提出以地下空间地质调查为基础,以地下空间工程安全运行为核心,以地下空间工程施工与造价为约束条件,以科学开发地下空间为主要目标的系统的地下空间工程稳定性评价新思路。

1 评价思路

根据地下工程几何特征,可将其分为“点”“线”“面”三种地下空间类型^[16]。“点”型空间包括地下工业工程、仓库、油库、地下水库等;“线”型空间包括地下交通工程、市政管线、垃圾管线、物流管线、共同沟等;“面”型空间包括地下商业工程、居住区、旅游区等。

在城市地质调查、地下空间资源评价和总体规划的基础上,突破单纯地质适宜性评价局限,针对每个

“点”“线”“面”地下空间工程,分别评价地下空间结构的稳定性,分析预测各地下工程开发的相互影响,预测各型地下空间开发引起的地面沉降及相互影响导致的变形,并以此为控制条件反馈调节地下空间开发施工方案与加固措施,进而调节工程施工的条件、造价与工期,最终对地下空间开发的布局与优化利用提出科学依据。步骤如下:

第一步,根据城市地质调查和地下空间资源评价结果,开展城市地下空间资源开发利用总体规划;

第二步,按照“点”“线”“面”三种地下空间类型,选择合适的评价方法,分别对不同类型地下空间稳定性进行量化评价,结合已开展的城市地下空间开发适宜性评价结果^[17],优化工程工期及经费;

第三步,综合分析和预测各地下工程开发的相互影响,地下空间开发引起的地面沉降及其对已有工程的影响以及后建工程对地下空间稳定性影响。

地下空间开发利用评价的理论、方法、内容和精度要求应针对服务对象的需求,并解决地下空间开发利用中的安全问题。本文所服务的对象主要是控制性详细规划和修建性详细规划,同时对地下空间建设、运营管理中出现的地质安全问题进行快速评价,目的在于服务城市地下空间开发利用规划。而后续的运营管理阶段主要依靠监测,不作为评价重点。地质安全评价内容包括:城市地下空间的自身定性评价、城市地下空间开发利用引起的邻近工程稳定性评价、后建地面工程对地下工程稳定性的影响评价。

2 城市地下空间的自身稳定性评价

城市地下空间工程的自身稳定性评价旨在对地下洞室和围岩综合体系的稳定性进行评价。目前地下洞室工程及其围岩的评价方法主要依赖于它们的支护结构稳定性评判理论体系,通常按浅埋洞室和深埋洞室两种方法进行计算。

2.1 浅埋洞室围岩稳定性计算方法

地下洞室处于浅埋状态被开挖后,顶部围岩一般会发生较大沉降,甚至有的围岩会产生塌落、冒顶等现象^[18]。浅埋洞室围岩稳定性计算的理论依据主要包括全覆土理论、Terzaghi 土压力理论和比尔鲍曼理论。其中,全覆土理论是将天然地面假设为一无限大的水平面,竖直面和水平面上均只有正应力,而无剪应力,因此对于任意埋深为 h 的土体,竖向受力大小为土体容重与覆土深度的乘积。在实际工程中,由于全覆土理论没有考虑土体的侧摩阻力作用,当地下洞室埋深

逐渐增大,应用该理论计算所得的围岩压力将偏大。Terzaghi 基于滑动面为垂直的假定,推导出松动土压力公式(1943 年)^[19],该土压力理论被广泛应用,但对于土体侧压力系数的选取有待商榷的。比尔鲍曼^[20]理论则考虑了两侧土体的加持作用。

2.2 深埋洞室围岩稳定性计算方法

从许多工程及实验都可以看出,当地下洞室处于深埋状态时,洞室开挖后,洞室顶部围岩发生塌落,但到一定程度后围岩就不再往下滑动,此时围岩处于新的平衡状态^[21],因此深埋围岩压力值通常与埋深无关。目前,深埋洞室围岩稳定性计算方法可从以下三个方面进行评价。

2.2.1 根据收敛变形对围岩稳定性进行评价

没有扰动的围岩在自然状态下是稳定的,当地下洞室开挖后,由于有了空间原来的稳定围岩开始向洞内发生变形。当这种变形超过了围岩本身所能承受的受力能力时,洞室围岩就发生失稳破坏。这种根据围岩收敛变形对围岩稳定性进行评价的方法主要有经验公式法、规范法、修正的芬纳公式等。

(1) 经验公式法

经验公式是洞顶或侧墙的允许变形公式,就是在实际工程中洞室稳定性的评价主要依据洞顶或侧墙的允许变形量。

该方法主要考虑洞室尺寸与岩体单轴饱和抗压强度对围岩稳定性的影响,没有考虑洞室埋深和围岩变形模量(这两个因素对地下洞室开挖后产生的围岩变形有很大影响),导致在实际应用中出现误判。

(2) 规范法

暗挖洞室主要监测项目为控制基准参考值,国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)^[22]为不同级别围岩、不同埋深条件下,高跨比 0.8~1.2 的地下工程洞周相对收敛量(两测点间实测位移累计值与两测点间距离之比)给出了允许值(表 1)^[22]。

规范方法必须具有普遍的适用性。从表 1 可以看出,围岩类别、洞室埋深等主要因素与允许洞周相对收敛量之间的量化关系是经验的、粗糙的、随意性很大的量化标准,这样会给现场应用造成极大的不便。

(3) 修正的芬纳公式

上述两种稳定性评判方法都没有给出洞室临近失稳的变形量与围岩的变形模量、黏聚力、内摩擦角及洞室埋深等主要影响因素的直接量化关系。李宁等^[23]基于地下洞室的最基本稳定性要求,提出以洞室围岩

表 1 规范推荐的允许洞周相对收敛量

Table 1 Allowable convergence according to specification

围岩类别	允许洞周相对收敛量		
隧洞埋深/m	<50	50 ~ 300	300 ~ 500
Ⅲ(围岩跨度不大于 20 m)	0.1(脆性)~0.3(塑性)	0.2(脆性)~0.5(塑性)	0.4(脆性)~1.2(塑性)
Ⅳ(围岩跨度不大于 15 m)	0.15(脆性)~0.5(塑性)	0.4(脆性)~1.2(塑性)	0.8(脆性)~2.0(塑性)
Ⅴ(围岩跨度不大于 10 m)	0.2(脆性)~0.8(塑性)	0.6(脆性)~1.6(塑性)	1.0(脆性)~3.0(塑性)

表面刚好达到剪切塑性极限为临界条件,当实际洞室发生失稳破坏,洞室围岩会产生一定的塑性区,将塑性区半径与失稳临界变形联系起来,在考虑了黏聚力的修正芬纳公式的基础上推出了更合理的围岩稳定性评判指标计算方法,见式(1):

$$\begin{aligned}\delta_{\text{顶}} &= r(1 - \sqrt{1 - K_1 K_2 K_3}) \\ K_1 &= 2 - \frac{1+u}{E} \sin \varphi (\gamma H + c \cot \varphi) \\ K_2 &= \frac{1+u}{E} \sin \varphi (\gamma H + c \cot \varphi) \\ K_3 &= \left[\frac{\gamma H (1 - \sin \varphi) + c \cot \varphi}{(\gamma H + c \cot \varphi) (1 - \sin \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \quad (1)\end{aligned}$$

式中: $\delta_{\text{顶}}$ ——拱顶沉降量/m;

r ——洞室半径/m;

E ——围岩的剪切模量/kPa;

R ——塑性区半径/m;

u ——侧压力系数;

γ ——天然容重/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$);

μ ——泊松比;

c ——黏聚力/Pa;

φ ——内摩擦角/($^{\circ}$)。

2.2.2 支护结构安全评判指标

在实际工程中,当地下洞室开挖时现场人员会采取各种加固措施,此时,洞室围岩的稳定性问题可以认为是支护系统的安全性问题。曲星等^[24]根据现场拉拔试验及若干工程的塌方教训总结提出了支护结构安全性的评判标准主要从支护结构受力绝对量值和绝对量值的变化率两个方面来确定的。

(1) 锚杆安全性的评判

当采用锚杆作为支护措施时,评价锚杆的安全性主要通过锚杆的实测拉拔力,实测拉拔力应小于锚杆的允许拉拔力,其中锚杆的允许拉拔力分钢筋拉断和钢筋拔出两种情况分别计算后取取小值。

(2) 喷射混凝土层的安全评判

实测喷射混凝土层应力应小于喷射混凝土层的强度(拉、压强度)准则。混凝土层安全性评判还可以根据其变形进行判断,也就是实测喷射混凝土层的应变

应小于喷射混凝土层的允许应变准则。

混凝土的变形达到一定程度时会出现裂缝,为了防止喷射混凝土层因过大变形而导致裂缝,可通过现场拉拔试验获取喷射混凝土发生变形时的应变值作为容许应变值,并用于喷射混凝土安全性判定。

(3) 钢拱架的安全评判

钢拱架与围岩多以点对点方式接触,钢拱架的稳定性主要是结构整体的稳定问题,根据钢拱架的布设情况可以通过几何非线性的屈曲,分析出钢拱架失稳临界变形或荷载,从而用以判断钢拱架的整体稳定性。

2.2.3 基于数值分析的围岩-支护结构体系稳定性评价方法

数值分析方法可根据实测洞周收敛参数,跟踪实际施工过程模拟,并对洞周围岩的综合地质力学参数进行数值反演分析,然后根据反演得到的实际参数进行围岩-支护结构体系的稳定性评判,评判标准可以结合规范法中的收敛量,并同时考虑支护结构的抗拉强度,从许可总变形和允许强度方面综合评判系统的稳定性。

除此之外,还可以将地下空间的开挖过程,尤其是掌子面的掘进过程视为边坡的稳定性问题,采用 FEM 或 FLAC 方法获取地下空间开挖过程中安全稳定性系数^[22],提出优于规范法的一种地下洞室围岩稳定性智能化快速评价方法与平台^[25],以快速方便、可靠地评价地下空间的稳定性。

以上评价方法都是针对具体工程的某一指标进行稳定性判断,然而在实际地下工程施工过程中,往往需要快速有效地对地下洞室围岩稳定性作出判断,因此,在地下空间的独特地质条件以及地下空间断面的变化条件下,需寻求多种标准来综合判定洞室围岩稳定性,从而有效地为地下空间开发利用提供可靠依据。

针对这一问题,本文提出新的评价思路:首先对评价区的地质情况进行勘查,建立地质结构模型;然后采用数值仿真方法计算不同尺寸、不同围岩、不同断层等各类工况下单一洞室的稳定性,获得大量计算样本,总结样本演化规律,归纳出样本的约束条件;根据这些约束条件和假设条件,利用正交试验对主要影响因素进

行改变,得到扩充的神经网络训练集与神经网络测试集,对扩充后的训练集进行训练并获得求解器;利用已经建立的硐室埋深、直径、开挖方式、地质环境等与经济、空间利用率、可靠度、环保性、舒适度等因素之间的量化关系,结合获得的求解器,建立地下空间自身稳定性的快速评价系统。系统中的地下空间自身稳定性评价可以采用不同的评价方法。根据该系统可计算出不同地质条件下,不同硐径围岩的最大开挖埋深,为地下空间规划设计提供依据。地下硐室围岩稳定性快速评价流程见图1。

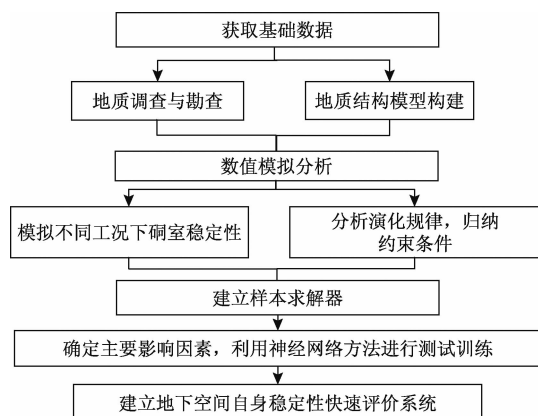


图1 地下硐室围岩稳定性快速评价流程图

Fig. 1 Chart showing assessment of the stability of underground spaces

3 城市地下空间开发利用对邻近工程稳定性的影响评价

城市地下空间的突出特点是城市有密集的建筑群,地下开发不仅要顾及自身的稳定性,还必须考虑地下空间开发对邻近工程稳定性的影响。

3.1 地下空间开发对地面工程稳定性的影响评价

地下空间开发对地面工程的影响主要表现为引起地表建筑物的不均匀沉陷、开裂、倾斜,路面开裂、下陷、隆起,以及地下其他构筑物的开裂、变形等。

地下空间开发引起的沉陷所带来的工程稳定性问题在我国地下构筑物建设的工程实践中屡有发生^[26-28],如:南京地铁1号线一期工程TA10标施工过程中,在汉口路与中山路交汇处曾发生了约15 m²、深2 m的地面道路沉陷,导致道路交通无法正常运行;在TA12标施工过程中,主道路上的一幢房屋曾发生变形开裂,最大裂缝宽达2 mm。2008年,杭州市萧山区地铁一号线湘湖站北二基坑施工现场西侧的风情大道突然倒塌,塌陷范围长达近百米、宽约40 m,路面塌陷

深7 m,造成22人伤亡。2006年,北京地铁十号线掌子面在进行喷混凝土作业时,从硐室左拱角附近涌出大量泥水,约11 h后,该掌子面位置对应的地面产生坍塌。通常地表沉降控制基准值应综合考虑地表建筑物、地下管线及地层和结构稳定等各个因素,应分别确定各允许地表沉降值,并取其中最小值作为控制基准值。重点考虑以下方面:

(1)地下硐室施工会引起地层的差异沉降,从而导致建筑物发生倾斜,因此建议从考虑地表建筑物安全角度确定最大允许地表沉降值,该值是判断建筑物是否安全的一个重要标准。

(2)从考虑地下管线安全的角度确定最大允许地表沉降值。

(3)从考虑地层及支护结构稳定角度的确定最大允许地表沉降值。

(4)从结构承受最大拉应力和变形能力角度来确定地表最大允许沉降值。

以西安地铁二号线下穿钟楼、城墙等对其影响的研究为例,文献[29]就根据实测数据和“刚度修正法”原理预测了地铁下穿城墙施工诱发其基础沉降的规律,并量化分析了城墙所能承受的极限变形能力和承载力;文献[30]建立了能够反应城墙砌体结构的“离散化有限元”模型。从变形和力学两个方面对西安城墙所能承受的极限变形能力进行量化分析,最终提出了西安地铁盾构施工引起地表沉降的控制标准。

3.2 地下工程相互影响稳定性评价

修建地下构筑物时,必然会引起原有的围岩应力场及位移场发生改变,使得既有地下构筑物的稳定性受到极大的影响。如何降低地下构筑物之间的相互影响,是地下空间开发必须考虑的一大问题。关于城市地下工程建设相互影响的稳定性评价内容主要有:

(1)地铁的建设与临近基坑开挖和桩基础施工的相互影响评价;

(2)双线地铁建设相互影响评价:浅层地铁开挖对深层地铁建设的影响,同一高程上左右线地铁开挖的相互影响评价;

(3)临近地下开挖与浅层地下管线施工的相互影响评价。

针对以上城市地下工程相互影响的三方面问题,基于本文提出的围岩稳定性快速评价新思路,同样采用数值仿真法、正交试验法、神经网络训练等方法,计算不同组合地下空间的相互影响,分析主要影响因素的敏感性,并获得求解器,利用已经建立的地下硐室埋

深、直径等参数与经济、空间利用率等因素之间的量化关系,在已建立的快速智能城市地下空间的自身稳定性评价系统的基础上,建立地下空间相互影响的优化设计系统。

4 后建地面工程对地下工程稳定性的影响评价

随着城市建设的扩展,新建工程对既有建筑的影响不可避免。因此,保证既有工程安全,是新建工程的前提。如何评价地下空间结构上方工程的基坑开挖及后续的结构施工对既建地下结构的影响是目前研究的热点。对大量已有工程建设经验的总结表明,上部结构工程建设对地下结构的影响评价主要有以下内容:

(1)后建上部结构荷载或临时堆载等对地下结构稳定性的影响;

(2)后建上部结构的桩基础施工等对地下工程的影响;

(3)后建上部结构的地基加固灌浆压力、回灌等对地下工程的影响;

(4)后建上部结构的基坑开挖卸荷、基坑降水对地下工程的影响;

(5)后建地面工程渗漏水等对地下工程的影响;

(6)区域地面沉降对地下工程的稳定性影响。

常规的弹性地基梁法、布西涅斯可解都是基于最简单的结构和介质模型。由于工程问题的复杂性,如岩土体本构关系、边界条件、施工过程、地下空间结构、岩土体与结构的相互作用等问题的复杂性,这些方法无法用于对该类工程进行稳定性评价。因此实际工程中常采用以下方法进行稳定性评价:

(1)原位监测:通过监测数据反应地下工程在后建地面工程施工过程中的变形和强度变化规律,直观评价后建地面工程施工对地下工程稳定性的影响,从而指导并实现信息化施工;

(2)数值分析方法:根据实际的地质勘查、水文地质条件、施工条件和设计的结构特征建立复杂的反映岩土介质体与结构相互作用的模型,对结构稳定性进行多工况、多因素敏感性分析,为工程设计施工提供参考;

(3)工程类比法:结合已有的工程实际进行工程类比分析也是一条有效的途径,然而地下结构工程往往存在特殊性,类比时需慎重考虑相似条件及其特殊性。

5 结论

(1)主要服务于控制性详细规划和修建性详细规划阶段的地下空间开发利用地质安全评价包括城市地下空间自身稳定性评价、城市地下空间开发利用对邻近工程稳定性的影响评价、后建地面工程对地下工程稳定性的影响评价三方面内容。

(2)地下空间工程的自身稳定性评价旨在对地下结构和围岩综合体系的稳定性进行评价,分浅埋、深埋洞室对围岩稳定性计算方法进行了总结;在修正的芬纳公式基础上提出了以洞室围岩表面刚好达到剪切塑性极限为临界条件的围岩稳定性计算方法,同时通过构建地质模型,模拟不同工况下洞室稳定性,以获取大量样本数据;利用神经网络方法分析建立求解器,从而建立地下空间自身稳定性的快速评价系统。

(3)从地下空间开发对地面工程影响、地下工程相互影响两个方面梳理了城市地下空间开发利用引起的其他稳定性评价内容;针对后建地面工程对地下工程稳定性的影响,提出了六方面评价内容及常用的评价方法。

参考文献(References):

- [1] 张茂省,董英,刘洁.论新型城镇化中的城市地质工作[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(5):581-587. [ZHANG M S, DONG Y, LIU J. Discussion of urban geological work in new urbanization [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2014, 50(5): 581-587. (in Chinese)]
- [2] 张茂省,王化齐,王尧,等.中国城市地质调查进展与展望[J].西北地质,2018,51(4):1-9. [ZHANG M S, WANG H Q, WANG Y, et al. Progress and prospect of urban geological survey in China[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4):1-9. (in Chinese)]
- [3] 钱七虎.城市可持续发展与地下空间开发利用[J].地下空间,1998,18(2):69-74. [QIAN Q H. Sustainable development of the cities and the development and utilization of underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space, 1998, 18(2):69-74. (in Chinese)]
- [4] 张茂省,谭新平,董英,等.黄土高原平山造地工程环境效应浅析——以延安新区为例[J].地质论评,2019,65(6):1409-1421. [ZHANG M S, TAN X P, DONG Y, et al. Initial analysis on

- environmental effect of cutting hills to backfill ditch project on Loess Plateau——Take Yan'an New District as an example[J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1409 – 1421. (in Chinese)]
- [5] 张茂省,李同录,程秀娟,等. 山区城市地下空间资源评价与开发利用模式——以延安新区为例[J]. *山地学报*, 2019, 37(3): 303 – 315. [ZHANG M S, LI T L, CHENG X J, et al. Evaluation of underground space resources in mountain cities and their development models——Taking Yan'an City as an Example[J]. *Mountain Research*, 2019, 37(3): 303 – 315. (in Chinese)]
- [6] BOBYLEV N. Mainstreaming sustainable development into a city's master plan: a case of urban underground space use[J]. *Land Use Policy*, 2009, 26(4): 1128 – 1137.
- [7] HUNT D V L, MAKANA L O, JEFFERSON I, et al. Liveable cities and urban underground space[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 8 – 20.
- [8] 李晓昭,王睿,顾倩,等. 城市地下空间开发的战略需求[J]. *地学前缘*, 2019, 26(3): 32 – 38. [LI X Z, WANG R, GU Q, et al. Prediction of strategic demand of urban underground space development[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 32 – 38. (in Chinese)]
- [9] 王成善,周成虎,彭建兵,等. 论新时代我国城市地下空间高质量开发和可持续利用[J]. *地学前缘*, 2019, 26(3): 1 – 8. [WANG C S, ZHOU C H, PENG J B, et al. A discussion on high-quality development and sustainable utilization of China's urban underground space in the new era[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 1 – 8. (in Chinese)]
- [10] 王化齐,董英,张茂省. 西安市地下空间开发利用现状与对策建议[J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 46 – 52. [WANG H Q, DONG Y, ZHANG M S. Present situation and countermeasures for the underground space utilization in Xi'an city[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 46 – 52. (in Chinese)]
- [11] TENGBORG P, STURK R. Development of the use of underground space in Sweden[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 339 – 341.
- [12] WALLACE M I, NG K C. Development and application of underground space use in Hong Kong[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 257 – 279.
- [13] 李春. 城市地下空间分层开发模式研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. [LI C. The research on development model of urban underground space delamination[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)]
- [14] 陈伟. 城市地下空间开挖对环境的影响与试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006. [CHEN W. Environmental impact and experimental study of urban underground space excavation[D]. Changsha: Central South University, 2006. (in Chinese)]
- [15] 宁国民,陈国金,徐绍宇. 武汉城市地下空间工程地质研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(6): 29 – 35. [NING G M, CHEN G J, XU S Y. Engineering geological research on the underground space of Wuhan City[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(6): 29 – 35. (in Chinese)]
- [16] 夏吉祥,杨志刚,王海英. 城市地下空间工程信息数据库结构的研究与建立[J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(3): 469 – 476. [XIA J X, YANG Z G, WANG H Y. Research and setup of the information database structure for urban underground space project[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(3): 469 – 476. (in Chinese)]
- [17] 张晶晶,马传明,匡恒等. 郑州市地下空间开发地质环境适宜性变权评价[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 118 – 125. [ZHANG J J, MA C M, KUANG H, et al. Geo-environmental suitability assessment with variable weight for underground space exploitation in Zhengzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 118 – 125. (in Chinese)]
- [18] 沈明容. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1991: 162 – 179. [SHEN M R. Rock mass mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 162 – 179. (in Chinese)]
- [19] KARL T. Theoretical soil mechanics[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1943.
- [20] 王毅才. 隧道工程[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2006: 65 – 90. [WANG Y C. Tunnel engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2006: 65 – 90. (in Chinese)]
- [21] 凌贤长,蔡德所. 岩体力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 279 – 291. [LING X C, CAI D S. Rock mass mechanics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 279 – 291. (in Chinese)]

- [22] 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB 50086—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016: 50 - 65. [Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support: GB 50086—2015 [S]. Beijing: Planning Press of China, 2016: 50 - 65. (in Chinese)]
- [23] 李宁, 陈蕴生, 陈方方, 等. 地下洞室围岩稳定性评判方法新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (9): 1941 - 1944. [LI N, CHEN Y S, CHEN F F, et al. Research on tunnel stability criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (9): 1941 - 1944. (in Chinese)]
- [24] 曲星, 李宁. 松散岩体竖向压力计算方法剖析及隧洞深浅埋划分方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2749 - 2757. [QU X, LI N. Analysis of calculation method of vertical pressure in loose rock mass and research on dividing line standard for deep-and shallow-buried tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Sup1): 2749 - 2757. (in Chinese)]
- [25] 李宁, 刘乃飞, 李国峰. 软岩及土质隧洞围岩稳定性评价新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (9): 1812 - 1821. [LI N, LIU N F, LI G F. New method for stability evaluation of soil and soft rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (9): 1812 - 1821. (in Chinese)]
- [26] 廖鸿雁. 矿山法施工地铁隧道时控制地表沉降、地下管线沉降的施工技术[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(3): 25 - 28. [LIAO H Y. Construction technique to control ground settlement and underground pipe settlement in bored metro tunnel [J]. Modern Tunneling Technology, 2002, 39 (3): 25 - 28. (in Chinese)]
- [27] 刘红元, 杨天鸿, 唐春安, 等. 地表塌陷过程的数值模拟研究——地铁开挖引起广州珠海广场地表塌陷探究[J]. 工程设计 CAD 与智能建筑, 2000(8): 26 - 29. [LIU H Y, YANG T H, TANG C A, et al. Numerical simulation study of surface subsidence process——exploration of surface subsidence caused by Guangzhou excavation in Zhuhai square [J]. Engineering Design CAD and Intelligent Building, 2000 (8): 26 - 29. (in Chinese)]
- [28] 李广信. 第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告——杭州地铁一号线湘湖站基坑事故再议[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(6): 273 - 279. [LI G X. Discussion on accident of foundation excavation of Xianghu Station of Hangzhou Subway No. 1 line again [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2015, 29 (6): 273 - 279. (in Chinese)]
- [29] ZHU Caihui. Analysis of surface settlement control with shield tunneling method [C]//The 6th Japan-China Geotechnical Symposium. [s. n.]: Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2015: 10 - 15.
- [30] 朱才辉, 李宁, 张志强. 西安黄土地层盾构施工诱发地面沉降规律分析与预测[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1087 - 1095. [ZHU C H, LI N, ZHANG Z Q. Analysis and prediction of ground settlement induced by shield construction in Xi'an loess strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (7): 1087 - 1095. (in Chinese)]

编辑: 汪美华