

# 南昌地铁二号线隧道开挖风险性可拓学评价

朱晓亮, 范建华, 林小敏

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:** 地铁建设中始终面临着隧道开挖风险和毗邻建筑环境的风险, 对其进行详细评价并找出主要影响风险源, 对于控制工程风险、提高工程安全性和投资效益是地铁工程建设不可忽视的重要环节。应用可拓学方法, 分别对南昌地铁二号线翠苑路-地铁大厦区间的隧道开挖风险和毗邻开挖区的建筑环境的风险进行评价, 找出了最主要的风险影响因子, 对同类工程建设具有借鉴意义。

**关键词:** 隧道开挖; 风险性评价; 可拓学; 南昌地铁二号线

**中图分类号:** U455; P642.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2014)01-0040-04

**Extension Assessment on the Risk of Excavation for Nanchang Metro Line 2/ZHU Xiao-liang, FAN Jian-hua, LIN Xiao-min** (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** There are always the risks for subway construction in tunnel excavation and adjacent building safety, a detailed risk assessment is necessary to find out the main risk source to control project risk, guarantee the engineering safety and improve the investment benefit. This paper introduces the risk assessment on Nanchang metro, the main risk factors are found out by extension theory, which can provide reference to similar engineering construction.

**Key words:** tunnel excavation; risk assessment; extension theory; Nanchang metro Line 2

## 0 前言

可拓学<sup>[1,2]</sup>是我国有独立知识产权的数学方法,其核心是物元细胞和其包容、可拓展特性,摒弃了以往其他数学评价方法非此即彼的评价结论模式,其计算原理为物元分析。物元分析是研究解决不相容问题的规律和方法的新兴学科,集思维科学、系统科学、数学方法于一身的交叉边缘学科,其数学工具为建立在可拓集合理论上可拓数学。其摒弃了传统的形式逻辑方法,而是集形式逻辑与辩证逻辑所长,允许系统的开放性和人工智能的积极参与,能够解决具有多样性、可变性、不确定性和不完全性的各种问题,使事物的内、外在联系得以有机联系,通过矛盾的对立性描述物的同一性,通过矛盾的统一性描述物或特征的深层关系<sup>[3]</sup>,正是这些描述蕴含了基于对立认知模型的矛盾统一。评价结果更具合理性和可靠度。30年来,国内外一些专家学者在不同领域进行了可拓学的理论研究和实际应用,在工程学、医学、社会学等方面获得较广泛应用,取得了丰硕研究成果<sup>[6]</sup>。尤其在近年来,在高等级科研项目申请中,可拓学的应用也崭露头角。据不完全统计,截止到2010年,国家自然科学基金资助的有关可拓学的理论研究和应用研究项目42项;国内有

367家期刊发表了关于可拓学的论文。

众所周知,地质体是我们所见自然客体中非常复杂的系统之一,尤其是经历长期的地质改造后,在空间分布,力学性状改变等诸多方面都具有复杂性,尤其是大面积的地下工程中,考虑地下水作用,施工时,既有建筑物的安全影响、开挖工程自身施工风险等,构成了多风险集合的复杂系统,都需要用更加合理的评价模型进行综合风险预测。结合南昌地铁二号线工程复杂地质情况和地下线路工程毗邻区既有建筑物的不同风险设防要求,尝试采用可拓学方法进行评价,既考虑了评价目标的层性特征,又考虑了其数值特征,还考虑了各待评事物间的相互联系和相互作用,能够更真实地刻画待评事物的本来面貌。

## 1 可拓学基本评价方法

可拓学的逻辑细胞是物元。通过定义物元: $R = (N, C, V) = (\text{事物}, \text{特征}, \text{量值})$ 来描述事物的自然基本赋存状态下的共性与特殊性。以物元为基础,建立的包含信息、知识、人工智能和待解问题的可拓模型,通过确定拟定评价区各评价因子的经典域、节域和物元,确定各评价指标关于各类别等级的关联度等的数学变换和运算,最终确定评价等级。

收稿日期:2013-06-27; 修回日期:2013-11-20

作者简介:朱晓亮(1989-),男(满族),吉林长春人,吉林大学硕士研究生在读,地质工程专业,研究方向为地质勘探,吉林省长春市西民主大街938号, zhuxiaoliang823@126.com。

## 2 评价区风险性体系

研究对象的风险性同时涉及到受地铁隧道开挖影响的沿线毗邻区域的建筑环境安全和隧道开挖过程中自身安全。二者既相互独立,又相互影响,构成了复杂工程系统,有必要运用可拓学理论和方法进行关联性研究。结合工程实际,按照可拓学评价要求,本文给出了建筑环境风险性、隧道开挖风险性2个相关联的评价体系<sup>[7]</sup>。根据研究场地的工程地质条件及其地表(或浅地表)基础设施、建(构)筑物的特点,建筑环境的风险性因子提出了3类范畴包含的9个可能对建筑环境产生影响的因子<sup>[8,9]</sup>;根据开挖可能涉及到的问题,给出了5个隧道开挖风险性因子,各自内容如表1、表2。

表1 建筑环境风险性评价指标体系

目标	一级评价指标层	二级评价指标层
A 建筑环境 风险性评价	B1 建筑与开挖隧道 边缘距离	C1 距离分级
		C2 等级/重要性
		C3 基础类型
	B2 建筑物属性特征	C4 基础埋深
		C5 上部结构类型
		C6 建筑物层、高度
		C7 基础所在土层力学特征
	B3 地质条件	C8 土层受扰孔隙水压力变化
		C9 土层的受渗透变形破坏

表2 隧道开挖风险性评价指标体系

目标	一级评价指标层	二级评价指标层
隧道开挖 风险性评 价	B4 隧道通过层易开挖性	C10 土层分类
	B5 地下水对隧道开挖影响	C11 渗透系数分类
	B6 隧道开挖层潜在地质灾害	C12 地质灾害
	B7 开挖层底板强度( $E_s/\text{MPa}$ )	C13 底板强度分类
B8 隧道开挖引起的建筑环境风险	C14 建筑环境风险值	

其中,各因子的含义如下:

C1 建筑物基础与隧道边缘的距离;理论上,建筑物与施工隧道的距离越近,其可能受的影响也越大;

C2 建筑物基础类型(浅基础,桩基础,箱基础);基础的类型与其抗变形能力直接相关,浅基础最易受影响,承台结构、箱基础的变形能力则较强;

C3 建筑物基础埋深;在盾构隧道底板高度以上的建筑物基础都有可能受到影响,埋深越大,影响越小;

C4 地面建筑物类型(等级/重要性:历史建筑,地标建筑,公用建筑,工业建筑,民居住宅,体育场地,绿地、休闲场地等);用以表征地面建筑物类型在遭受破坏时引起的后果的严重性不同;

C5 建筑物上部结构类型(砖混,框架);用以表征其受外力时的易破坏程度;

C6 建筑物高度——建筑物越高,抗轻抚能力越差;

C7 基础所在土层力学特征(压缩模量):表征受影响范围内的岩土体力学传导特征;

C8 基础所在土层受扰动时孔隙水压力传导、释放情况:饱和土层受施工扰动时粗、细粒土内部孔隙水压力变化差异较大,细粒土内部易保存超孔隙水压力;

C9 土层易受渗透变形破坏情况:其易受渗透变形的土层容易在工法不当时产生过量的受渗透变形,进而发生隧顶坍塌、地下掏空和地面突发性塌陷等。

C10 隧道开挖通过地层的易开挖性;用以表征工程难易性及成本风险;

C11 隧道开挖层渗透系数分类;用以表征开挖时的水害影响;

C12 开挖层潜在地质灾害;用以表征砂土液化、渗透变形、局部软土等的对开挖形成的潜在风险;

C13 开挖层底板强度( $E_s/\text{MPa}$ ):用于表征隧道开挖和运营过程中轴线变形及其对工程安全性的影响;

C14 隧道开挖引起的建筑环境风险;用以关联建筑环境风险对开挖风险的影响。

## 3 工程应用实例

### 3.1 工程概况

南昌地铁二号线是在一期工程基础上连通南昌新老两个城核心区域的重要交通干线,全长23.3 km,起始于南昌西站,途经南昌火车站等站,止于辛家庵站,全线设车站21座,设计线路通过能力约每小时30对。二号线是在一期工程建设对加强新老核心城区的功能和各自优势起着重要作用,通过对地铁车站、上盖空间及沿线周边各类相关资源整合与开发,形成以地铁站点为中心的集交通、商业、居住、文化等产业于一体的现代城市新格局。

工程将采用盾构法施工,线路区通过多个文物保护单位(建筑),和不同城区类型,道路两侧浅表层埋设有供水管、污水管、通讯光缆、煤气和路灯线等管线,因此,二号线跨越新老城区时必将分别面临着不同的建筑环境风险和隧道工程掘进风险。

### 3.2 环境工程地质条件

研究区为6度抗震设防烈度的Ⅲ类场地,翠苑路站~地铁大厦站区间隧道段近平行于赣江左侧距离赣江约1.5 km,研究区位于冲海相沉积平原区的赣江冲积平原区一级阶地上,地层由全新统( $Q_4^{al}$ )

冲积层组成。第四系覆盖层厚度约 20.0 m,地层由上至下为人工填土层、粉质粘土、细砂、中砂、粗砂、砾砂、圆砾、卵石、泥质粉砂岩基岩,其间偶夹少量淤泥质土透镜体,场地内局部上覆细砂和中砂层具有中等液化势。上述冲积层中的地下水与地表水联系紧密,场地地下水位与赣江水位在丰水期和枯水期同步涨落,并具有承压特性和中等腐蚀性特点。

### 3.3 评价数据提取

按照设定的评价体系要求,分别在研究场地按 20 m×20 m 网格设置数据采集点,面图上沿隧道开挖中心线左右偏离 120 m,共采取了 780 个点的数据。

### 3.4 划分经典域

按照评价因子的各自特性,确定各因子的经典域划分标准,如表 3、表 4。

表 3 建筑环境风险评价分类经典域划分标准

风险等级	S <sub>1</sub> 建筑物基础与隧道边缘距离/m		S <sub>2</sub> 建筑物基础类型		S <sub>3</sub> 建筑物基础埋深/m	S <sub>4</sub> 建筑物类型		S <sub>5</sub> 建筑物上部结构类型		S <sub>6</sub> 建筑物层高	S <sub>7</sub> 基础所在土层力学特征 E <sub>0</sub> /MPa	S <sub>8</sub> 基础所在土层受扰动时孔隙水压力传导、释放情况		S <sub>9</sub> 土层的易受渗透变形破坏情况	
	类型	赋值	类型	赋值		类型	赋值	结构类型	赋值			孔隙水压力释放	赋值	液化-渗透变形破坏	赋值
无	>120	箱基础	0	≥17	绿地	0		0	0	0	2(砂砾类)	释放快(粗砂砾砂)	1	无液化-渗透变形	1(粘土,砾类)
轻度	60~120	承台基础	1	12~17	运动场地及附属设施	1	钢结构框架混凝土框架	1	1~2	0.3(圆砾)			2	轻微液化-受渗透变形破坏影响弱	2(含砾砂)
中度	30~60	深埋桩基	2	5~12	附属群配楼	2			3~7	0.25(粗砂,砾砂)		释放中等(中砂细砂)	3	中等液化-中等潜在渗透变形破坏	3
较高	20~30	浅埋桩基	3	2~5	交通干线公用建筑民居住宅工业建筑	3			7~12	0.15(细砂)			4	较易液化-较易受渗透变形破坏	4(中、细砂)
高	<20	条形基础	4	<2	历史建筑地标建筑	4	砖混	4	>12	0(粉砂,素填土)		释放缓慢(粉砂)	5	严重液化-易受渗透变形破坏	5(粗砂)

表 4 隧道开挖风险性评价经典域划分标准

危害等级	S <sub>1</sub> 隧道通过层的易开挖性		S <sub>2</sub> 开挖层渗透系数 / (m·d <sup>-1</sup> )	S <sub>3</sub> 开挖层潜在地质灾害		S <sub>4</sub> 开挖层底板强度 E <sub>s</sub> /MPa	S <sub>5</sub> 开挖引起的建筑环境风险值
	易开挖性	评价指标赋值		潜在地质灾害	评价指标赋值		
无	砂层	1	0.1	无潜在地质灾害	1	2(砂砾类)	无(1)
轻度	软土	2	2	潜在轻度砂土液化	2	0.3(圆砾)	低(2)
中度	硬塑土	3	5	潜在中等砂土液化 潜在轻度渗透变形	3	0.25(粗砂,砾砂)	中度(3)
较高	含砾石层	4	10	潜在中等渗透变形 较高等级砂土液化	4	0.15(细砂)	较高(4)
高	砾石层	5	>30	潜在严重砂土液化 潜在严重渗透变形	5	0(粉砂,素填土)	高(5)

### 3.5 建立经典域和节域

$$R_{\text{环境}i} = (N_i, C_i, V_i) = \left[ \begin{array}{l} N_{\text{环境}i} \quad C_1 \quad V_1(20.0, 120.0) \\ C_2 \quad V_2(1.0, 5.0) \\ C_3 \quad V_3(2.0, 17.0) \\ C_4 \quad V_4(1.0, 5.0) \\ C_5 \quad V_5(1.0, 5.0) \\ C_6 \quad V_6(0, 12.0) \\ C_7 \quad V_7(0, 2.0) \\ C_8 \quad V_8(1.0, 5.0) \\ C_9 \quad V_9(1.0, 5.0) \end{array} \right]$$

其中,  $R_{\text{环境}i}$  为环境评价物元,  $N_{\text{环境}i}$  为环境因子的第  $i$  个评价类别,  $C_i$  为第  $i$  个评价指标,  $V_i$  为  $C_i$  所规定的经典域。

### 3.6 建立等级关联度

通过可拓学理论建立各单项评价指标的等级关联度:

$$K_i(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, V_{ij})}{|V_{ij}|} & (v_i \in V_{ij}) \\ \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{pi}) - \rho(v_i, V_{ij})} & (v_i \notin V_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\rho(v_i, V_{ij}) = \left| v_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2};$$

$$|v_{ij}| = |b_{ij} - a_{ij}|$$

$$\rho(v_i, V_{pi}) = \left| v_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$$

确定待评物元关于等级  $t$  的关联度:

$$K_t(p) = \sum_{i=1}^n W_i K_i(v_i) \quad (2)$$

式中:  $W_i$ ——评价指标的权重。

确定评价等级,若:  $K_{t_0}(p) = \max K_t(p)$ , 则评

定  $p$  属于等级  $t_0$ 。

### 3.7 计算过程

先将获取环境风险数据代入专门编制的程序进行计算,得到各评价点的关于环境风险值,再将各点的环境风险值带入到开挖风险数据中叠加,又得到了受环境影响的隧道开挖风险值。通过地理信息软件,将环境风险值和隧道开挖风险值分别投影到各自影响区域,按地理坐标绘制出环境风险等值线和隧道开挖风险等值线图,如图 1、图 2 所示。



图 1 翠苑路—地铁大厦区间地铁建设综合风险图(前段)



图 2 翠苑路—地铁大厦区间地铁建设综合风险图(后段)

## 3.8 风险分析

### 3.8.1 建筑环境风险性分析

在建筑环境风险影响区域内,对各评价点的主要影响因素进行统计,得到图 3 所示的风险因素组合关系。可见,岩土土的潜在渗透变形引起的建筑环境风险性最高,最可能的情况是由于工法失当引起地下被掏空,导致地表塌陷或地表建筑物的毁损,对

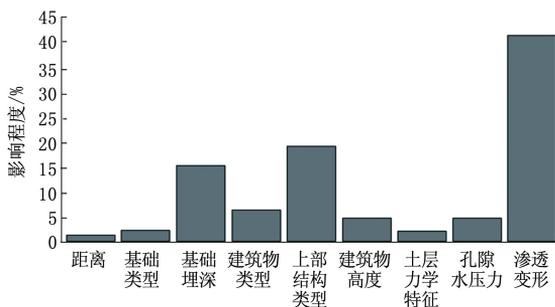


图 3 建筑环境风险性主要风险因素组合

建筑物自身而言,其基础埋深和上部结构类型是主要影响因素。

### 3.8.2 隧道开挖风险性分析

在隧道开挖风险影响区域内,对各评价点的主要影响因素进行统计,得到图 4 所示的风险因素组合关系。其中,岩土土的易开挖性对开挖风险的影响最大,在盾构机近平行穿越土质覆盖层与基岩分界面时,形成不同岩土切屑工况,对刀盘和切屑工艺控制增加了难度,岩质的不均一性可能造成掘进效率低下和频繁更换刀具造成的工期延误、开挖成本提升的风险;其次是隧道开挖与建筑环境风险的关联性,主要表现在开挖风险的增加会波及到地表构筑物的安全。岩土土的易开挖性主要表现在开挖过程中岩性变化导致的工期滞后和开挖成本的提升。

(下转第 48 页)

论。

(1)在复杂线路条件下,盾构掘进往往较一般条件下要复杂的多,盾构掘进的各参数是互相关联、相辅相成的统一体。

(2)千斤顶组最大、最小推力相差越大,地表横断面沉降槽不对称就越明显。千斤顶作用推力较大的一侧土体受较大推力而迫使土体向上隆起,而较小一侧受另一侧的挤压作用;土体受扰动范围增大,因此沉降值也越大。同时开挖面上的塑性区为不对称分布,推力较大一边剪切屈服区范围较大。

(3)盾构通过过程中,地层与盾壳之间间隙的存在(8 cm)和周围地层拢动的固结是地表沉降的主要因素。

(4)对同步注浆条件下等代层取不同弹性模量进行计算后,等代层弹性模量的变化对地表沉降的影响不是很明显。

(5)盾尾通过后,由于砂浆的固结和地层拢动后的固结,其沉降量较大。针对目前强透水地层和较深埋深,通过采用加大同步注浆量将地表隆起

方法来减小沉降。出土量控制在理论值的95%左右,保证盾构切口上方土体能微量隆起,以减小土体的后期沉降量。

#### 参考文献:

- [1] 董华珍,王仲林.城市轨道交通中小半径曲线问题探讨[J].四川建筑,2005,25(3):41-42.
- [2] 凌宇峰,李章林.小曲线半径盾构轴线控制技术[J].上海建设科技,2003,(1):34.
- [3] 赵运臣.盾构隧道曲线段管片破损原因分析[J].西部探矿工程,2002,(3):73-74.
- [4] 李强,曾德顺.盾构千斤顶推力变化对地面变形的影响[J].特种结构,2002,19(4):45-48.
- [5] 李永靖,张向东.城市地铁开挖对地表建筑物影响研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(8):1326-1329.
- [6] 衡朝阳,滕延京,陈希泉.地铁盾构隧道周边建筑物地基基础变形控制研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(8):1336-1340.
- [7] 张成龙.大坡度并小半径曲线段盾构操作与纠偏施工控制研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(9):80-84.
- [8] 吴涛.大坡度并小半径曲线连续穿越建筑群沉降施工控制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(11):80-84.

(上接第43页)

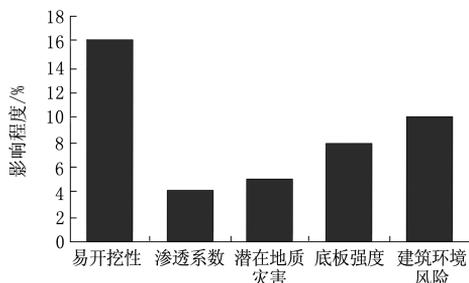


图4 隧道开挖风险性主要风险因素组合

#### 4 结语

在较复杂的地质环境中,地铁建设面临着隧道开挖风险和毗邻建筑环境的风险,因此,在地铁的勘察与设计阶段就应采用合理的风险评价方法对上述风险性进行详细评价,并找出主要影响风险源,以便在工程实践中对其危害性给予足够重视和防范,这对于控制工程风险、提高工程安全性和投资效益是完全必要的,是大型工程建设不可忽视的重要环节。本文在评价方法选取、风险因子组合遴选等方面为同类工程提供了可借鉴的示例。此外,还通过对评

价结果的再分析,给出了风险性程度与因子的耦合关系,这对有针对性地加强工程防范具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 蔡文,杨春燕,何斌.可拓逻辑初步[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] 蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
- [3] 中国原创学科可拓学30年走出新路[EB/OL].<http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2011/4/243385.html? id=243385>.
- [4] 第四期可拓学国际研究学者班将在罗马尼亚科学院举办[EB/OL].<http://web.gdut.edu.cn/~extenics/XueShuJiaoLiu.html>.
- [5] 美国、英国、印度、罗马尼亚等学者专程来华学习可拓学理论,并应用在所属的研究领域[EB/OL].<http://web.gdut.edu.cn/~extenics/XueShuJiaoLiu.html>.
- [6] 可拓学网址[EB/OL].<http://web.gdut.edu.cn/~extenics/>.
- [7] 范建华.环滇池城区地质环境资源综合评价与规划[D].吉林长春:吉林大学,2008.
- [8] Zou Ran, FAN Jianhua, CHEN Jianping, XIAO Yunhua. Suitability planning of urban underground space exploiting based on extenics of Kunming City[J]. Global Geology, 2012, 15(4): 297-301.
- [9] 刘卫林.基于多指标多级可拓评价的地下水环境脆弱性分析[J].地质灾害与环境,2007,18(1):83-87.