

土岩组合地质条件下的基坑工程施工风险评估

辛 欣, 万 鹏, 沈圆顺

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 随着经济发展以及城市化进程的加快, 青岛、大连、重庆等岩石地区城市为改善城市交通状况也陆续展开轨道交通建设。岩石地区不同于软土地区在地铁车站基坑工程施工中受多种不确定因素影响, 具有模糊性和随机性。依托青岛地铁三号线某车站基坑工程, 运用事故树法对土岩组合地质条件下地铁基坑施工进行风险识别并建立风险评价指标体系。基于层次分析法和模糊集法建立三级模糊综合评判计算模型对该车站基坑施工风险进行评估, 计算结果表明该方法合理有效, 可为同类工程参考借鉴。

关键词: 基坑工程; 土岩组合; 层次分析法; 模糊综合评判; 风险评估

中图分类号: TU473.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0342-05

作者简介: 辛 欣(1988-), 男, 山东省曲阜人, 同济大学硕士研究生, 从事岩土工程、隧道及地下工程风险方面的研究。E-mail: xinboqingguang@126.com.

Risk assessment of construction of excavations in areas of rock and soil

XIN Xin, WAN Peng, SHEN Yuan-shun

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the acceleration of economic development and urbanization, some cities in rock areas, such as Qingdao, Dalian and Chongqing, has launched rail transit construction to improve the urban traffic conditions. Different from soft soil areas, construction risk of excavations of subway stations in rock areas is affected by various uncertain factors with random and fuzzy behaviors. Based on the subway station construction of Qingdao Subway Line No. 3 Project, a synthetic evaluation index system for excavation construction risk of subway stations in rock and soil areas is established by analyzing the factors that influence subway station construction with the fault tree method. A model of three-stage fuzzy synthetic evaluation on the basis of analytic hierarchy process and fuzzy method is adopted to assess excavation construction risk of the subway station. The analytical results show that the proposed method is practical and helpful to other similar projects.

Key words: excavation engineering; rock-soil combination; analytic hierarchy process; fuzzy synthetic evaluation; risk assessment

0 引言

为改善城市交通状况、满足环境优化的需要, 青岛、大连、重庆、深圳、广州等岩石地区城市纷纷开始轨道交通建设。经过地质变迁和人类活动, 岩石地区浅层往往有一定的第四系覆盖, 地铁车站基坑后基础持力层大多为强风化、中风化或微风化岩体, 这就形成了岩石地区大多数地铁车站基坑特有的上部土体下部岩体的土岩组合地层形态^[1]。土岩组合地质条件下的基坑工程安全相较于土质地层基坑还受岩体类型、风化程度、结构面的形态等多方面因素影响, 并且基坑坑底常采用爆破开挖, 爆破方式等对基坑安全也构成威胁, 因此, 岩石地区基坑工程是一个更为复杂的系统工程, 一旦发生事故其危害程度也更大。对其风险因素进行深入分析, 从而建立风险管理制度,

对土岩组合地质条件下拟建和在建的地铁基坑工程进行风险评估, 继而进行风险控制就显得十分重要。

自美国Einstein在隧道与地下工程中引入风险分析以来, 风险评估及风险管理取得了一定的研究成果并得到了大量的应用。Einstein曾撰写多篇有价值的文献^[2-4], 指出了地下工程风险分析的特点和应遵循的风险分析理念。国际隧道协会(International Tunnel Association, ITA)在2004年撰写了《隧道风险管理指南》(Guidelines for Tunneling Risk Management), 为隧道工程的风险管理提供了一整套参照标准和方法。

同济大学黄宏伟等^[5-7]一直致力于地下工程风险管理方面的研究, 并建立了一套适用于软土隧道全寿

命风险管理的体系, 同时主持编写了我国地铁工程建设风险管理的第一部指南《地铁与地下工程建设技术风险管理指南》以及2012年实施的《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》。王岩, 黄宏伟^[8]分析了影响地铁区间隧道安全体系的各个因素, 建立了层次结构模型。边亦海^[9]等引入模糊数学理论, 计算深基坑工程支护系统失效概率的可能性分布规律, 提出时变风险的概念。周红波等^[10]应用综合集成风险评估方法进行风险评估, 得出各类基坑的风险等级。

目前, 国内外对基坑工程施工风险的研究取得了一定的研究成果, 但主要集中于软土地区基坑工程, 针对岩石地区基坑工程施工风险的研究很少。本文依托青岛地铁三号线某车站基坑工程, 运用事故树法对土岩组合地质条件下地铁基坑施工进行风险识别并建立风险评价指标体系。基于层次分析法和模糊集法建立三级模糊综合评判计算模型对该车站基坑施工风险进行评估, 为进一步采取措施进行风险控制及管理, 并为同类工程的风险评估提供了参考。

1 工程概况

该车站为地下两层14 m岛式站台车站, 长约174.6 m, 标准段宽约22.8 m, 顶板覆土约4.2 m, 基坑深约17.9 m。基坑采用明挖顺作法施工, 支护结构采用上层灌注桩+支撑, 下层锚喷的“吊脚桩”支护方式。

1.1 工程地质概况

钻探揭示场区第四系厚度0.30~15.30 m, 主要由第四系全新统人工填土、洪冲积层、上更新统洪冲积层组成。基岩主要为燕山晚期深成相粗粒花岗岩, 灰岩、花岗岩呈脉状穿插其间。区内岩体节理裂隙普遍发育, 完整性较低。

1.2 水文地质概况

场区地下水主要为第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。地下水水位埋深约为3.30~6.50 m。基岩裂隙水虽水量不大, 但与第四系孔隙潜水水力联系明显。场区地下水主要依靠大气降水入渗和地表水体入渗补给, 水位具有明显的丰、枯水期变化, 受季节影响明显。

2 风险评价指标体系建立及权重确定

2.1 建立风险评价指标

岩石地区地铁车站基坑施工相较于软土地区可能发生诸如下层岩体沿软弱结构面整体滑动造成基坑坍塌、地下水沿第四系地层和基岩接触面位置渗漏造成周边路面塌陷房屋倾斜等安全事故, 因此, 对此类基坑施工风险源的识别与深入分析是进一步进行风险评估的基石。为全面地识别出潜在风险源, 风险识别工作引入工作结构分解(WBS)的思想, 将整个明挖车站按照工程分部进行分解, 将车站施工分解为基坑施工、结构施工、附属设施、不良地质风险、自然灾害风险5个分项, 对每个分项再逐级分解, 同时对分解后的风险项利用事故树法找出风险源, 进而建立土岩组合地质条件下地铁车站基坑工程风险三级评价指标体系。

按照上述原则建立的车站基坑三级风险评价体系, 其中“基坑施工”和“结构施工”的风险树状图如图1, 2所示。

附属设施及设备风险: 出入口和风井施工、附属设备(线缆铺设、防火设施、电气设备、通风设备); 周围环境风险: 建(构)筑物、地下管线、道路; 地质和自然风险: 不良地质风险、自然风险(暴雨、台风、地震)。

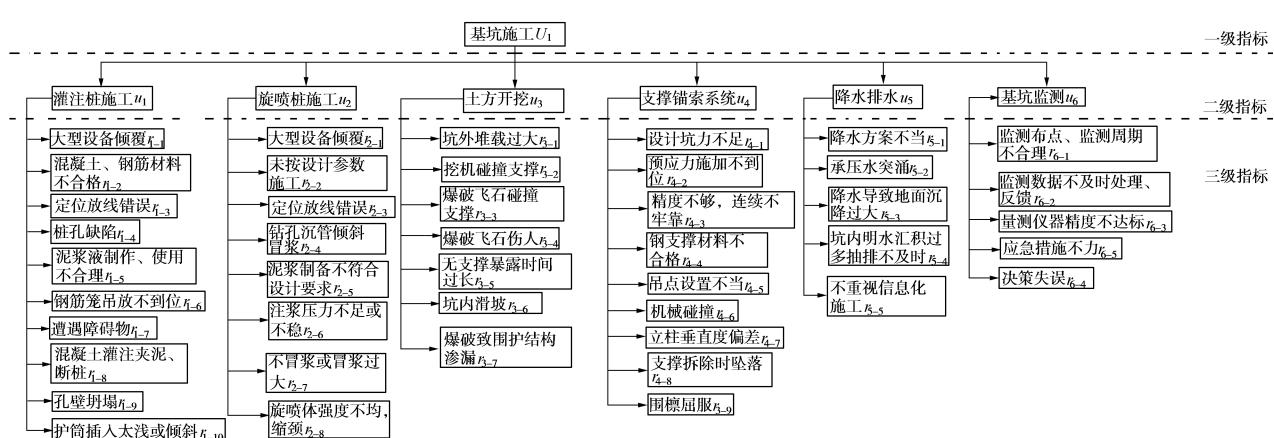


图1 基坑施工风险树状图

Fig. 1 Dendrogram of construction risk of excavations

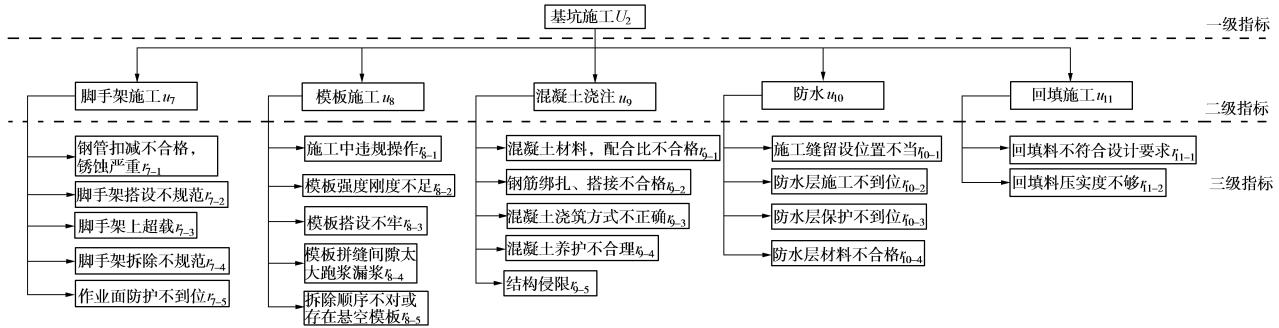


图 2 结构施工风险树状图

Fig. 2 Dendrogram of construction risk of structures

2.2 评价体系中各因素权重的确定

(1) 建立评判因素级

将上述风险评价指标体系 U 分为 U_1, \dots, U_5 五个一级指标, 即 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_5\}$, 使得 $U = \bigcup U_i$, $U_i \cap U_j = \emptyset (i \neq j)$, $i, j = 1, 2, \dots, 5$; 按照相同的原则, 一级指标根据施工工序再细分为 14 个二级指标 u_1, u_2, \dots, u_{14} ; 每个二级指标根据具体情况细分为对应的三级指标, 即三级风险源指标 r , 如 $u_1 = \{r_{1-1}, r_{1-2}, \dots, r_{1-10}\}$ 。

(2) 构造判断矩阵

根据递阶层次结构所确定的上下层因素之间的隶属关系, 将下一层制约因素对上一层准则因素的重要程度运用专家调查法进行两两比较, 并结合 T.L.Saaty^[11]的标度法, 建立各层次因素的判断矩阵 $\bar{U}_i = (c_{ij})_{n \times n}$ 。

以“基坑施工”的二级指标“土方开挖施工”为例, 得到判断矩阵 $\bar{U}_3 = (c_{ij})_{7 \times 7}$, 见表 1。

表 1 土方开挖施工判断矩阵

Table 1 Risk probability level standard of earthwork excavation in subway stations

指标	r_{3-1}	r_{3-2}	r_{3-3}	r_{3-4}	r_{3-5}	r_{3-6}	r_{3-7}
r_{3-1}	1	1/2	1/7	1/5	1/3	1/9	1/5
r_{3-2}	2	1	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5
r_{3-3}	7	7	1	3	5	1/2	3
r_{3-4}	5	5	1/3	1	3	1/5	1/3
r_{3-5}	3	3	1/5	1/3	1	1/5	1/3
r_{3-6}	9	7	2	5	5	1	3
r_{3-7}	5	5	1/3	3	3	1/3	1

同理可以构建出其它制约因素判断矩阵。

(3) 单一准则下元素相对权重的计算

对于判断矩阵 \bar{U} , 先算出最大特征值 λ_{\max} , 求出其对应的特征向量 W , 即

$$\begin{aligned} \bar{U}W = \lambda_{\max} W, \\ \omega_i = \sqrt[n]{\prod_j c_{ij}}, \quad \omega_i = \frac{\omega_i}{\sum_i \omega_i}, \quad \lambda_{\max} = \sum_i \frac{\bar{U}\omega_i}{n\omega_i} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, c_{ij} 为判断矩阵元素, ω_i 为相对权重。排序权向量 W 即为相应的 n 个制约因素的相对权重。通过以上方法, 可以得到各指标因素的所有排序权向量。

在“土方开挖施工”算例中,

$$\bar{\omega}_i = (0.27, 0.34, 2.72, 1.08, 0.63, 3.70, 1.58),$$

$$\omega_i = (0.03, 0.03, 0.26, 0.10, 0.06, 0.36, 0.15).$$

计算最大特征根

$$\bar{U}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/9 & 1/5 \\ 2 & 1 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/7 & 1/5 \\ 7 & 7 & 1 & 3 & 5 & 1/2 & 3 \\ 5 & 5 & 1/3 & 1 & 3 & 1/5 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 9 & 7 & 2 & 5 & 5 & 1 & 3 \\ 5 & 5 & 1/3 & 3 & 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.03 \\ 0.03 \\ 0.26 \\ 0.10 \\ 0.06 \\ 0.36 \\ 0.15 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{array}{l} \bar{U}_3\omega_1 = 0.19 \\ \bar{U}_3\omega_2 = 0.25 \\ \bar{U}_3\omega_3 = 1.94 \\ \bar{U}_3\omega_4 = 0.80, \\ \bar{U}_3\omega_5 = 0.45 \\ \bar{U}_3\omega_6 = 2.60 \\ \bar{U}_3\omega_7 = 1.15 \end{array}$$

$$\lambda_{\max} = \sum_i \frac{\bar{U}\omega_i}{n\omega_i} = \frac{1}{7} \left(\frac{0.19}{0.03} + \frac{0.25}{0.03} + \dots + \frac{1.15}{0.15} \right) = 7.43.$$

则土方开挖施工各因素的排序权向量为

$$w_3 = [0.03, 0.03, 0.26, 0.10, 0.06, 0.36, 0.15].$$

(4) 一致性检验

由于地铁建设安全体系的复杂性和人的认识的多样性, 构造判断矩阵时往往会出现判断不一致的情况, 因此需要对构造的判断矩阵进行一致性检验, 以便将偏差控制在允许的范围内。

引入一致性比例指标 $CR = CI / RI$ 。对于 1 阶、2 阶判断矩阵总是完全一致的, 当阶数大于 2 时, 只要 $CR \leq 0.10$, 则认为这个判断矩阵的一致性是可以接受的。其中平均一致性指标 RI 按表 2 取值, CI 作为度量判断矩阵偏离的指标, 以检验决策者思维的一致性。 CI 值越大, 矩阵不一致的程度就越高,

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad . \quad (2)$$

对上述算例中土方开挖矩阵 \bar{U}_3 进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{7.43 - 7}{7 - 1} = 0.072,$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.072}{1.36} = 0.05 < 0.10.$$

即矩阵 \bar{U}_3 满足一致性检验要求, 土方开挖施工各因素的排序权向量 w_3 可以接受。

同理可以确定评价体系中其他因素权重。

表 2 平均随机一致性指标 RI

Table 2 Mean random consistency index RI

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

3 模糊综合评判

地铁车站基坑施工中存在的各种风险因素大部分难以用数字来准确地加以定量描述, 但可以根据经验或专家知识用语言定性地描述出风险的性质和可能产生的影响, 因此采用模糊理论度量风险更具有现实意义^[12]。依据建立的三级评价体系运用层次-模糊综合评判从三级风险源指标出发, 先对制约层各因素进行一级模糊综合评判, 再对目标层因素进行二级模糊综合评判。

3.1 风险估计

风险估计是从事事故发生的概率和损失两方面考虑, 即

$$R = f(P, C) ,$$

式中, R 表示地铁基坑工程的风险, P 表示风险发生的概率, C 表示风险发生后的损失。基于风险发生概率和损失等级将工程风险等级分为四级, 建立风险等级标准。同时针对不同风险等级确定地铁基坑工程的三级风险源指标的风险估值及接受准则。限于篇幅未具体列出, 可参照城市轨道交通地下工程建设风险管理规范^[13]。

3.2 模糊评判

(1) 建立权重集和风险估值

根据各级指标因素的排序权向量 W , 建立各级指标的权重, 采用专家调查法估计三级风险源指标 r 发生的概率及损失以确定其风险估值矩阵。

a) 定义一级评判因素集 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_5\}$ 的权重为 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_5\}$ 。

b) 定义二级评判因素集 $U_i=\{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in_i}\}$ 的权重为 $A_i=W_i=\{a_{i1}^i, a_{i2}^i, \dots, a_{in_i}^i\}$, $i=1, 2, \dots, 5$, n_i 为每个一级因素对应的二级指标因素个数。

c) 定义三级风险源评判因素集 $u_i=\{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in_i}\}$ 的权重为 $a_i=w_i=\{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in_i}\}$, $i=1, 2, \dots, 14$, n_i 为每个二级因素对应的三级指标因素个数; 以二级因素 u_1 为例, 其对应的三级风险源权重 a_1 和风险估值矩阵 r_1 分别如下:

$$a_1=[a_{1-1}, a_{1-2}, \dots, a_{1-n}] , \quad r_1=[r_{1-1}, r_{1-2}, \dots, r_{1-n}] .$$

(2) 逐级评判

基于本文建立的三级评判模型, 由最低层次风险评价指标的权重及专家评判的风险估值得到的评判结果构成上一层次的模糊矩阵, 进而对上一层次模糊综

合评判, 循此自上而下逐级综合评判。仍以“基坑施工”的二级指标“土方开挖施工”为例, 计算如下:

$$R_{u_3} = w_3 \cdot r_3 = [0.03, 0.03, \dots, 0.36, 0.15] \begin{bmatrix} 50 \\ 75 \\ \dots \\ 75 \\ 50 \end{bmatrix} = 62.8 .$$

同理得到各二级指标风险的综合评判值, 见图 3。根据各二级指标对应的二级指标的权重集和风险评判值, 进行各一级指标的模糊综合评判。结果见图 4。

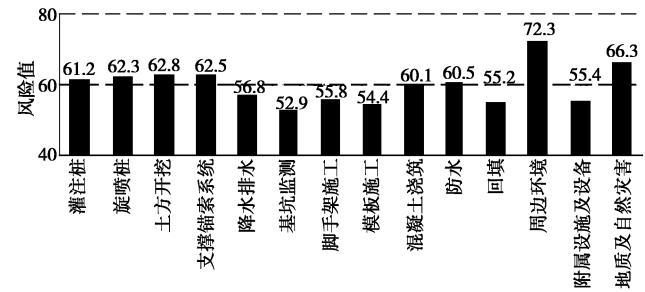


图 3 二级指标风险综合评判值柱状图
Fig. 3 Histogram of comprehensive evaluation risk value for secondary indexes

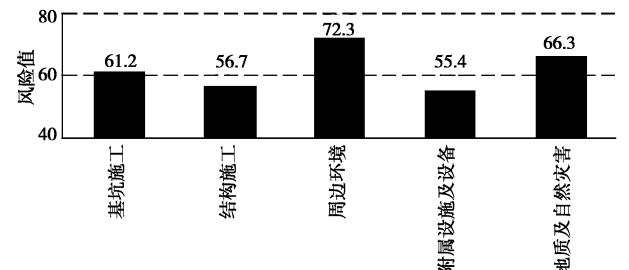


图 4 一级指标风险综合评判值柱状图
Fig. 4 Histogram of comprehensive evaluation risk value for primary indexes

可以看出, 该地铁基坑工程的总体风险从高到低依次为: 周边环境风险、不良地质及自然灾害风险、基坑施工风险、结构施工风险、附属设施及设备风险。其中“周围环境风险”为 II 级, 但风险分值较高, 需要高度重视并加强监测, 这与实际工程周边环境复杂是相符的。二级指标总体风险等级为 II 级, 其中“旋喷桩施工”、“灌注桩施工”和“土方开挖施工”的风险评判值较高, 需采取有力监管措施, 保证如桩体嵌岩深度等项目的施工质量, 降低风险。

4 结 论

(1) 采用层次模糊综合评判法进行风险评估, 降低了评判中的主观随意性, 所得结果更客观, 可信度更高。

(2) 采用事故树法进行土岩组合地质条件下基坑工程风险识别, 可有利于发现事故隐患和薄弱环节并对该类基坑进行后续的风险分析及风险评估。

(3) 土岩组合地质条件下基坑工程普遍采用的吊脚桩围护结构应重视灌注桩及旋喷桩的施工质量, 保证桩体嵌岩深度, 保障基坑施工安全。

(4) 岩石地区基坑工程基坑开挖中涉及爆破施工的应注意进行专项设计降低对围护结构、支撑锚索系统以及周边环境的影响, 降低基坑施工风险。

参 考 文 献:

- [1] 李东. 青岛地区二元结构基坑“吊脚桩”支护设计数值分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学环境工程, 2009. (LI Dong. Numerical analysis on design of dualistic foundation pit with “end-suspended pile” in Qingdao[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [2] DUZGUN H, EINSTEIN H H. Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines[J]. Safety science, 2004, **42**(1): 23 - 41.
- [3] EINSTEIN H H, MINES U S B O. Risk analysis for rock slopes in open pit mines[M]. NTIS, 1981.
- [4] EINSTEIN H H, KARAM K S. Risk assessment and uncertainties[C]. Essen: VGE, 2001: 457 - 488.
- [5] 黄宏伟, 边亦海. 深基坑工程施工中的风险管理[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(4): 611 - 614. (HUANG Hong-wei, BIAN Yi-hai. Risk management in the construction of deep excavation engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(4): 611 - 614. (in Chinese))
- [6] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 13 - 20. (HUANG Hong-wei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 13 - 20. (in Chinese))
- [7] 黄宏伟, 顾雷雨. 基坑工程风险管理研究进展[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 651 - 656. (HUANG Hong-wei, GU Lei-yu. State-of-the-art of researches on risk management of foundation pit engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 651 - 656. (in Chinese))
- [8] 王岩, 黄宏伟. 地铁区间隧道安全评估的层次-模糊综合评判法[J]. 地下空间, 2004, **24**(3): 301 - 305. (WAN Yan, HUANG Hong-wei. Hierarchy-fuzzy comprehensive judgment for safety evaluation of metro running tunnel[J]. Underground Space, 2004, **24**(3): 301 - 305. (in Chinese))
- [9] 边亦海. 基于风险分析的软土地区深基坑支护方案选择[D]. 上海: 同济大学, 2006. (BIAN Yi-hai. Selection of supporting system of deep excavations in soft soil area based on risk analysis[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [10] 周红波, 姚浩, 卢剑华. 上海某轨道交通深基坑工程施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1902 - 1906. (ZHOU Hong-bo, YAO Hao, LU Jian-hua. Construction risk assessment on deep foundation pits of a metro line in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1902 - 1906. (in Chinese))
- [11] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of mathematical psychology, 1977, **15**(3): 234 - 281.
- [12] 赵延喜, 徐卫亚. 基于 AHP 和模糊综合评判的 TBM 施工风险评估[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 793 - 798. (ZHAO Yan-xi, XU Wei-ya. Risk assessment of TBM construction for tunnels based on AHP and fuzzy synthetic evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 793 - 798. (in Chinese))
- [13] GB50652—2011 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范[S]. 北京: 光明日报出版社, 2011. (GB50652—2011 Code for risk management of underground works in urban rail transit[S]. Beijing: Guangming Daily Press, 2011. (in Chinese))

(本文责编 明经平)