

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.026

盾构竖井深基坑工程风险识别与评估

芮大虎¹, 张长海¹, 王 杨¹, 陈永栓², 杨建辉¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100018)

摘 要:随着盾构法的广泛应用,迫切需要对盾构竖井深基坑在设计与施工过程中所存在的风险进行合理评估,以指导相关单位采取动态管理和风险管理等措施的实施,从而实现快速、安全施工。结合北京市南水北调配套工程南干渠 3# 盾构竖井深基坑工程,并根据该工程地质特点及周边环境等条件;采用工程分解结构法(WBS)对该工程分解;然后应用故障树法(FTA)对该工程的风险事件和风险因素进行识别;最后利用综合集成评估方法,计算出该工程风险等级,结果为三级,属较高等级;该评估方法可为同类工程参考借鉴。

关键词:盾构竖井;工程结构分析法;故障树法;风险评估

中图分类号:U455.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0117-04

Risk Identification and Assessment in Deep Foundation Pit Project of Shield Shaft

Rui Dahu¹, Zhang Changhai¹, Wang Yang¹, Chen Yongshuan², Yang Jianhui¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China;

2. China Railway 16th bureau Co., Ltd, Beijing 100018, P. R. China)

Abstract: With the rapid development of shield, construction risk attracts comprehensive attentions in deep foundation pit engineering. Taking as an example the foundation pit excavation construction of 3# shield shaft project in South-North Water Diversion main canal project, the WBS method was brought forward to break down the work of deep foundation pits based on the engineering geological conditions and the condition of surrounding in the 3# shield deep foundation pits. Then its risk events and factors of construction of deep foundation pits were identified by use of the fault tree method. Finally, the construction risk degrees of all kinds were evaluated and decided in accordance with the general integration risk assessment method based on the AHP method. The method could be used to evaluate the risk degree of similar project.

Key words: Shield shaft; Work Breakdown Structure; Fault trees method; Risk assessment

随着城市建设与大型公共设施建设的发展,地下空间开发与利用已成为当前工程建设的主要组成部分。尤其是盾构隧道工程的快速发展,其竖井深基坑工程随之大量涌现。由于深基坑开挖施工具有工期长、施工难度大及对周边环境要求高等特点^[1],因此是一个复杂的系统工程。如 2008 年杭州地铁湘湖车站基坑事故造成 17 人遇难,4 人失踪的重大事故,给国家和社会带来巨大的经济损失和不良影响^[2]。因此,为保证基坑工程顺利实施,应采取科学的方法,对可能遇到的风险进行预测、分析与控制^[3-5]。

现行的风险评估理论和技术主要集中于基于不确定理论、概率与数学统计、工程可靠性、模糊数学等多种理论方法。其中,2011 年 Ondrej 等^[6]将概率风险评估应用于高速公路隧道,使隧道管理决策者能够较好地提出风险解决方案;Isaksson^[7]于 2002 年采用风险分析理论,对地下工程中不同施工方案的工期与费用进行了分析,并通过工程应用验证了所提出的相应评估模型的合理性;Reilly^[8]对大型隧道及地下工程进行风险分析时,着重从工程的风险管理方面进

行研究,并应用到美国许多大型地铁工程的风险分析中;王晶等^[9]提出了地铁隧道施工过程中风险管理的框架,说明了风险管理在地铁隧道施工中的重要性。然而,就目前关于隧道工程的风险评价中,唯独对盾构隧道始发竖井施工时的风险缺乏研究^[10-11]。因此,本文结合北京市南水北调配套工程南干渠 3# 盾构竖井深基坑工程,进行了风险评估探讨。根据该标段 3# 盾构竖井深基坑地质特点以及周边环境等条件,首先采用工程分解结构(WBS, Work Breakdown Structure)法^[12]对基坑工程进行分解,然后采用故障树(FTA, Fault Tree Analysis)法^[12]对该基坑工程风险事件和风险因素进行识别,最后应用综合集成评估方法进行评估。

1 盾构竖井工程概况

1.1 工程地质条件

3# 盾构竖井地层结构为粘、砂、砾多元结构,工程地质条件较简单;上部依次为素填土厚度 0.5~2.5m,粉土夹粉质粘土总厚度为 7~11m;中部依次为中粗砂及粉质粘土,总

收稿日期:2012-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(45415901);河南省科技厅重点攻关项目(102102210206)

作者简介:芮大虎(1969-)男,博士,主要从事岩土工程及地下工程研究,(E-mail)dhrui@hpu.edu.cn。

厚度为 1.6~2.7m;下部为圆砾及卵砾石层。

勘探期间,地下水位高程为 12.6~13.78 m,但局部存在上层滞水,其水位为 29.91~32.42 m;如遇上层滞水应及时将其抽出基坑,防止水泡基坑。其中,主要含水层圆砾层的渗透系数按 80 m/d 考虑。

1.2 工程特点

3#盾构井净长度 80 m,作为盾构始发兼接收井,盾构井始发端、接收端的竖井平面净尺寸均为 13.5 m×9.0 m(长×宽),盾构井中间后配套段净尺寸 53.0 m×6.6 m(长×宽),竖井基坑开挖阶段支护形式采用 C25 钢筋砼钻孔灌注桩+钢管支撑形式,基坑深度 17.651 m。

由于工程施工周期长、开挖深度和跨度大,对支撑围护结构技术要求相对较高,因此如何保证基坑的稳定性成为工程的重点。其中,重点施工工序包括钻孔灌注桩施工、降水施工、基坑开挖及围护支撑和二衬结构施工等。

2 风险识别

根据基坑工程的地质条件和结构特点,首先采用 WBS 法将基坑工程按工序分解为钻孔灌注桩、基坑开挖与支撑、井点降水及二衬结构;然后再对每一个工序可能产生的风险事件进行分析;最后利用故障树法找出致险因子,并建立风险事件清单。基坑工程施工风险清单如图 1 所示。

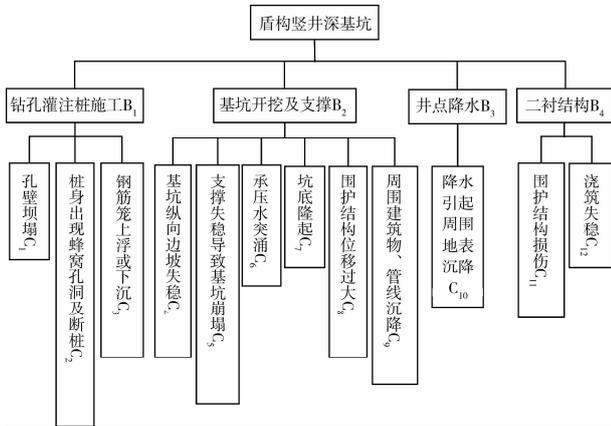


图 1 基坑工程施工风险清单

3 风险评估

风险评估^[13]是利用综合集成法对基坑工程进行评估。该法是首先采用层次分析法对风险致险因子的重要度进行计算;然后根据调查打分法对风险事件发生的概率、发生后果进行调查估值;最后将风险事件的权重与风险可能性和风险影响后果进行综合计算,以保证计算结果更加客观、可靠。

3.1 评价指标权重的确定

权重的确定采用层次分析法(AHP)^[14]。该法是把同级各个因子两两相互比较(包括因子自身比较);然后按重要性大小在一个 9 标度表(表 1)中进行仿数量化,从而使各因子数量值构成一个“构造判断矩阵”。该矩阵经一致性检验后,其最大特征值所对应的向量即为对应各因子的权重向量。具体重要度分析及相应权重向量计算结果分别如表 2、表 3 所示。

表 1 因素两两间相对重要性评估准则及其赋值

标度 b_{ij}	含义
1	i, j 两因素同样重要
3	i 因素比 j 因素稍微重要
5	i 因素比 j 因素明显重要
7	i 因素比 j 因素强烈重要
9	i 因素比 j 因素极端重要
1/3	i 因素比 j 因素稍不重要
1/5	i 因素比 j 因素明显不重要
1/7	i 因素比 j 因素强烈不重要
1/9	i 因素比 j 因素极端不重要
2, 4, 6, 8, 1/2, 1/4, 1/6, 1/8	上述两相邻判断的中间值,如“2”为属同样重要和稍微重要之间

表 2 A-B 判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W
B ₁	1	1/2	3	4	0.335
B ₂	2	1	1	5	0.384
B ₃	1/3	1	1	2	0.202
B ₄	1/4	1/5	1/2	1	0.079

表 3 B-C 判断矩阵

B ₁ -C						w	
B ₁	C ₁	C ₂	C ₃				
C ₁	1	1/5	1/3			0.110	
C ₂	5	1	2			0.581	
C ₃	3	1/2	1			0.309	
B ₂ -C							
B ₂	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	w
C ₄	1	2	5	2	7	1	0.334
C ₅	1/2	1	1	1	2	1/3	0.097
C ₆	1/5	1	1	1/2	1	1/3	0.079
C ₇	1/2	1	2	1	1	1/2	0.101
C ₈	1/7	1/2	1	1	1	3	0.154
C ₉	1	3	3	2	1/3	1	0.235
B ₃ -C							
B ₃	C ₁₀					w	
C ₁₀	1					1	
B ₄ -C							
B ₄	C ₁₁	C ₁₂					w
C ₁₁	1	1/3					0.250
C ₁₂	3	1					0.750

3.2 基坑工程风险计算

风险事件发生的概率 P 和发生后果 C 按照表 4、表 5 估值打分。经过专家调查打分估值后,得出各个风险事件的估值,如表 6 所示。

表 4 风险发生概率 P 等级标准

风险等级	概率范围	风险事件发生概率描述
1 级	0~0.2	很不可能发生
2 级	0.2~0.4	不太可能发生
3 级	0.4~0.6	可能发生
4 级	0.6~0.8	很可能发生
5 级	0.8~1.0	几乎一定发生

表 5 风险发生后果 C 等级标准

后果等级	概率范围	风险发生后果描述
1 级	0~0.2	损失轻微的或没有损失
2 级	0.2~0.4	有一定的损失
3 级	0.4~0.6	损失较大
4 级	0.6~0.8	损失很严重
5 级	0.8~1.0	灾难性的损失

表 6 评价指标估值

风险事件		P	C
钻孔灌注桩施工 B_1	孔壁坍塌 C_1	0.4	0.2
	桩身出现蜂窝、孔洞及断桩 C_2	0.3	0.3
	钢筋笼上浮或下沉 C_3	0.5	0.3
基坑开挖及支撑 B_2	基坑纵向边坡失稳 C_4	0.2	0.6
	支撑失稳导致基坑坍塌 C_5	0.3	0.4
	承压水突涌 C_6	0.2	0.3
	坑底隆起 C_7	0.2	0.5
	围护结构位移过大 C_8	0.3	0.5
	周围建筑物、管线沉降 C_9	0.2	0.6
井点降水 B_3	降水引起周围地表沉降 C_{10}	0.3	0.2
二衬结构 B_4	围护结构损伤 C_{11}	0.2	0.2
	浇筑失稳 C_{12}	0.1	0.2

对风险事件的风险计算,可据式(1)计算^[15]。

$$R = P + C - P \times C \quad (1)$$

式中: R 为风险值; P 为风险发生的概率; C 为风险发生后果等级概率。

例如,风险事件“孔壁坍塌”的风险值 $R = P + C - P \times C = 0.4 + 0.2 - 0.4 \times 0.2 = 0.52$ 。同理,可计算出钻孔灌注桩施工中其他风险事件的风险值,最后将计算出的风险值组成向量: $B_1 = (0.52 \ 0.51 \ 0.65)$ 。

其他工序的风险值向量分别为:

基坑开挖及支撑 $B_2 = (0.68 \ 0.58 \ 0.54 \ 0.6 \ 0.65 \ 0.68)$;

井点降水 $B_3 = (0.54)$;

二衬结构 $B_4 = (0.36 \ 0.27)$ 。

3.3 风险等级确定

按照综合集成的方法,并根据风险等级表(表 7)确定风险等级^[16]。

根据综合集成方法如式(2)所示,计算各个工序层的风险值。

$$R = W \times B \quad (2)$$

式中: R 为风险值; W 为各工序权重向量; B 为各工序风险值形成的向量。

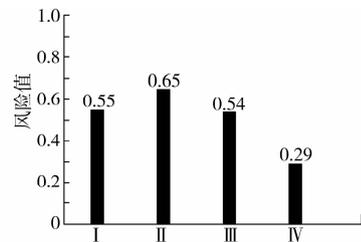
这样可计算出钻孔灌注桩工序的风险值为 0.55,基坑开挖及支撑为 0.65,井点降水为 0.54,二衬结构为 0.29。则各工序的风险值构成的向量即为(0.55 0.65 0.54 0.29),那么基坑工程施工的风险值则为

$$R = W \times B = 0.335 \times 0.55 + 0.384 \times 0.65 + 0.202 \times 0.54 + 0.079 \times 0.29 = 0.57$$

按照风险等级的定义如表 7 所示,该基坑工程属于三级,其风险事故后果严重,对工程施工可能造成一定范围内的破坏。其中,基坑开挖及支撑风险最大,二衬结构的风险最小,各个工序的风险值大小如图 2 所示。基坑开挖及支撑工序中的风险事件的风险示意图如图 3 所示。

表 7 风险等级表

等级	估值	风险描述
1 级	0.0~0.2	风险水平最低等级,风险事故后果可以忽略
2 级	0.2~0.4	风险水平较低等级,风险事故后果值得考虑,应采用一定的应对措施
3 级	0.4~0.6	风险水平较高等级,风险事故后果严重,对工程可能造成一定范围的破坏
4 级	0.6~0.8	风险水平很高等级,风险事故后果非常严重,可能在较大范围内对工程造成破坏并有人员伤亡
5 级	0.8~1.0	风险水平最高等级,风险事故后果是灾难性的



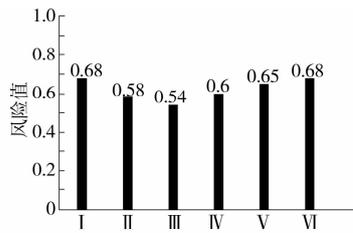
注: I: 钻孔灌注桩; II: 基坑开挖及支撑; III: 井点降水; IV: 二衬结构

图 2 各工序风险值

4 结 语

结合北京市南水北调配套工程南干渠某标段 3# 盾构竖井深基坑工程的风险,进行了分析评估,得到以下结论:

1) 采用工程分解结构法(WBS)对基坑工程进行分解,然后再根据故障树法(FTA)分析识别各个工序的风险,最后采用综合集成法对该基坑工程总体风险值进行了计算,结果为 0.57,判定风险等级为三级,属较高等级。



注: I:基坑纵向失稳; II:支撑失稳导致基坑坍塌;
III:承压水突涌; IV:坑底隆起; V:围护结构位移过大;
VI:周围建筑物管线沉降

图 3 土方开挖及支撑风险排序

2) 根据上述计算结果,可为设计和施工提供风险评估理论依据,并据此采用动态控制与风险管理,优化施工组织设计以确保安全、快速施工。

3) 综合集成评估法在一定程度上克服了数据的主观性,从而使结果更加客观、可靠,可为同类工程提供借鉴经验。

参考文献:

- [1] 吴楠. 基于深基坑施工期风险评估的安全指数研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 604-608.
Wu N. Study of safety index system based on risk assessment in the construction of deep excavation project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 604-608.
- [2] 竺维彬, 鞠世建. 地铁盾构施工风险源及典型事故的研究 [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2009.
- [3] Einstein H H, Vick S G. Geological model for a tunnel cost model [C]//Rapid Excavation and Tunneling Conf, Proc, 1974: 1701-1720.
- [4] Einstein H H. Risk and risk analysis in rock engineering [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 141-155.
- [5] Eskesen S D, Tengborg P. Guidelines for tunneling risk management; International Tunneling Association, Working Group No. 2 [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(3): 217-237.
- [6] Ondrej N, Samuel P, Lukas F. Probabilistic risk assessment of highway tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26: 71-82.
- [7] Isaksson T. Model for estimation of time and cost, based on risk evaluation applied to tunnel projects [D]. Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology Stockholm, 2002.
- [8] Rerilly J J. The management process for complex underground and tunneling projects [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000(15): 31-44.
- [9] 王晶, 王鹏飞, 谭跃虎. 地铁隧道工程施工过程中风险管理研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 385-389.
Wang J, Wang P F, Tan Y H. Study on risk management of subway tunnel engineering during construction process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 385-389.
- [10] 卞晓琳, 何平, 施焯辉. 风险管理在隧道及地下工程中的应用探讨 [J]. 中国安全科学学, 2009, 19(6): 154-158.
Bian X L, He P, Shi Y H. Discussion on the application of risk management in tunnel and underground works [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(6): 154-158.
- [11] 钱七虎, 戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状问题及相关建议 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 649-655.
Qian Q H, Rong X L. State, issues and relevant recommendations for security risk management of china's underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649-655.
- [12] 周红波, 高文杰, 蔡来炳, 等. 基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2703-2726.
Zhou H B, Gao W J, Cai L B, et al. Risk Identification and Analysis of Subway Foundation pit by using Fault Tree Analysis Method based on WBS-RBS [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2703-2726.
- [13] 吴波. 隧道施工安全风险管理研究与实务 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [14] Tarek Z, Mohamed A, Jiayin P. Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP [J]. International Journal of Project Management, 2008, 26(4): 408-417.
- [15] 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(Sup1): 1902-1906.
Zhou H B, Yao H, Lu J H. Construction risk assessment on deep foundation pits of a metro line in Shanghai [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Sup1): 1902-1906.
- [16] Timo A, Mikael, Hilden. The significance of information frameworks in integrated risk assessment and management [J]. Environmental Science & Policy, 2008, 11: 71-86.

(编辑 胡玲)