

文章编号: 1000-7598(2009)09-2703-06

基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析

周红波, 高文杰, 蔡来炳, 张 辉

(上海建科建设监理咨询有限公司, 上海 200032)

摘 要: 针对地铁基坑工程环境复杂、影响因素多的特点, 提出以故障树分析为基础结合工作分解结构(WBS)-风险分解结构(RBS)进行风险识别的方法。此方法引入 WBS-RBS 将地铁基坑工程工作分解结构和风险源分解结构耦合判断并说明相应风险因素或风险事件, 并按照故障树建树原则根据彼此间的逻辑关系, 用逻辑门连接上下层事件, 形成地铁基坑工程主要故障树。在此基础上, 对风险因素进行敏感性分析并提出相应的预防措施。

关 键 词: 地铁基坑; 故障树分析; 工作分解结构(WBS); 风险分解结构(RBS); 风险识别; 敏感性分析

中图分类号: U 231^{+.1}

文献标识码: A

Risk identification and analysis of subway foundation pit by using fault tree analysis method based on WBS-RBS

ZHOU Hong-bo, GAO Wen-jie, CAI Lai-bing, ZHANG Hui

(Shanghai Jianke Project Management Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The engineering environment of subway foundation pit is complex with too many influencing factors; and the analysis of risk factors is incomprehensive due to the uncertainty of risk events in the construction of foundation pit. However, up to now, the conventional risk identification method can't consider all the risk factors. A risk identification method based on the fault tree analysis (FTA) method is proposed to identify the risk factors with the combination of the work breakdown structure (WBS) and risk breakdown structure (RBS). The risk factors or risk events are judged and explained by the coupled analysis of WBS and RBS; and then the fault tree of subway foundation pit risk is established. Furthermore, sensitivity analysis is carried out based on FTA; and then precaution measures of risk events in subway foundation pit are proposed.

Key words: subway foundation pit; fault tree analysis; work breakdown structure (WBS); risk breakdown structure (RBS); risk identification; sensitivity analysis

1 引 言

由于地铁基坑开挖工期长、施工难度大、技术复杂、现场施工条件差、对环境影响控制要求高, 近年来事故频发, 如 2008 年 11 月 15 日 15 时 20 分, 杭州地铁基坑坍塌, 造成 17 人遇难, 4 人失踪的灾难性事故; 2004 年新加坡 Nicholl Highway 站基坑坍塌, 导致 4 人死亡。因此, 地铁基坑是高风险工程, 有必要对其风险事件进行识别与分析, 采取相应预防措施, 避免事故的发生。

目前, 国内外对于基坑工程风险的研究尚处于起步阶段, Matsuo^[1]、Bjerrum^[2]、Choi^[3]等人利用可靠性原理对基坑工程进行分析。Xu^[4]、Huchzermeier^[5]提出了基于风险分析的基坑工程管理。基坑工程风险识别多用故障树分析方法(FTA)。Wang^[6]等应用故障树方法专门分析了深基坑工程风险源。何锡兴^[7]、仲景冰^[8]、毛金萍^[9]等分别编制了基坑工程边坡开挖、深基坑地下连续墙支护结构体系的故障树图并进行了分析。

综上所述, 基坑工程风险的研究侧重于支护体

收稿日期: 2008-12-08

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(07QB14030); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAJ01B04-02)。

第一作者简介: 周红波, 男, 1972 年生, 工学博士, 高级工程师, 总工程师, 主要从事项目管理、风险管理和岩土工程等方面的研究。

E-mail: zhouhongbo72@yahoo.com.cn

系的失效研究,建立的故障树多是基于经验推断,不能全面系统反映周边环境、工程地质水文地质等众多不确定性因素对基坑工程的影响。因此,本文采用 WBS-RBS 法对基坑工程工作结构和风险源进行系统分解并耦合形成相关风险因素和事件,然后根据其逻辑关系用逻辑门连接建立地铁基坑工程故障树,并在此基础上通过敏感性分析确定关键风险因素并提出相应的预防措施。

2 故障树分析方法

故障树分析 (Fault Tree Analysis, 简称 FTA) 是综合识别和度量风险的有力工具,该方法把所关心的结果事件作为顶事件,用规定逻辑符号表示,找出导致这一结果事件发生的所有直接因素和原因及处于过渡的中间事件,直至事故基本事件为止,并通过基于故障树最小割集的敏感性分析方法判定系统的危险度及基本事件对于顶事件的贡献度^[10]。

2.1 故障树顶事件

一般将易于发生且后果严重的事故作为顶事件,可以根据事故调查或头脑风暴法确定。

2.2 顶事件原因分析

从人、机、物、料、环五方面分析顶事件发生的原因。由于地铁基坑工程结构复杂、影响因素多,首先采用 WBS (横观)-RBS (纵观) 方法将复杂的工程项目和风险因素分别分解成比较简单的、容易认识和理解的基本单元,再将其耦合,找出风险因素,即故障树的中事件和基本事件。

2.2.1 工作分解结构 (WBS)

工作分解结构 (WBS) 是将整个工程项目进行系统分解 (工程总体—单位工程—分部分项工程—工序),以分解后的“工序”层作为目标块,见图 1。

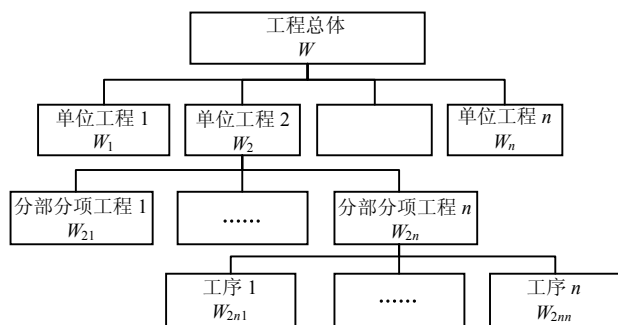


图1 WBS图

Fig.1 Flow chart of WBS

2.2.2 风险分解结构 (RBS)

按类别对风险源进行分解,见图2。

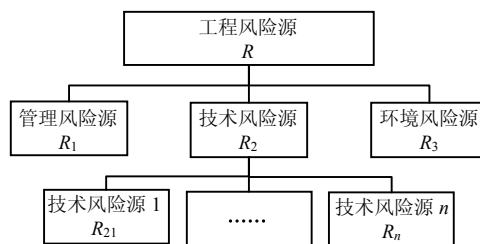


图2 RBS图

Fig.2 Flow chart of RBS

2.2.3 建立 WBS-RBS 耦合矩阵

以 WBS “工序” 层为行向量, RBS “基本风险源” 作为列向量形成耦合矩阵, 见表 1。其中, “0” 表示耦合不产生风险因素, “1” 表示二者耦合能够产生风险因素, 且不同位置的 “1” 代表不同的风险事件或因素。

2.3 故障树作图

按建树原则, 从顶上事件起, 逐层往下分析各自的直接原因事件, 根据彼此间的逻辑关系, 用逻辑门连接上下层事件, 直到需要的分析深度, 形成一株倒置的逻辑树形图, 即故障树图, 如图 3。

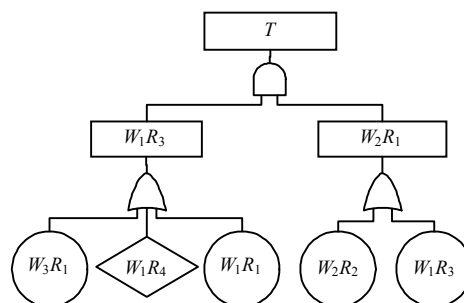


图3 故障树图

Fig.3 Fault tree structure

2.4 敏感性分析

敏感性分析是对故障树的定量分析, 目的是揭示基本事件对于顶事件的贡献程度, 具体计算方法如下。

2.4.1 计算最小割集

故障树最小割集通过布尔运算求得, 设为:

$$\{K_i, i=1, \dots, n\}$$

式中: K_i 为第 i 个最小割集。

2.4.2 顶事件概率

通过下式计算顶事件概率。

$$F_s = P(T) = P(K_1 + K_2 + \cdots K_n) = \sum_{i=1}^n P(K_i) - \sum_{i < j=2}^n P(K_i K_j) + \sum_{i < j < l=3}^n P(K_i K_j K_l) + \cdots + (-1)^{n-1} P(K_1 K_2 \cdots K_n) \quad (1)$$

式中：\$P(T)\$ 为顶事件 \$T\$ 的概率值。

2.4.3 风险因素敏感系数

通过下式可以计算故障树顶事件中各基本事件（风险因素）的敏感系数。

$$I_g(i) = \frac{\partial F_s}{\partial F_i} \times \frac{F_i}{F_s} \quad (2)$$

式中：\$I_g(i)\$ 为第 \$i\$ 个风险因素的敏感系数。

3 地铁基坑工程风险识别与分析

3.1 地铁基坑风险故障树顶事件

根据参考文献[11]，地铁基坑工程计有 6 种事故类型：渗流破坏、支撑失稳、坑内滑坡、踢脚破坏、突涌破坏、机械伤人，其事故发生概率分别为：62 %、13 %、13 %、8 %、2 %、2 %。本文选取事故概率 10 % 以上的事件作为地铁基坑工程故障树顶事件：①围护结构渗漏；②支撑失稳；③坑内土体滑坡。

3.2 地铁基坑工程工作分解结构

地铁基坑围护多采用地下连续墙，本文以地墙做为围护结构的地铁基坑为对象进行 WBS 分解，见图 4。

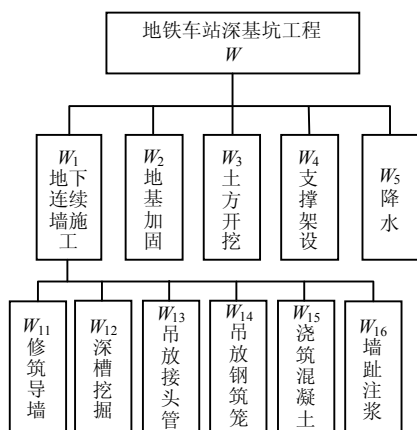


图 4 地铁基坑工作分解结构
Fig.4 WBS of subway foundation pit

3.3 地铁基坑风险分解结构

地铁基坑风险源包括管理、技术、周边环境等各个方面，其中技术因素分别从勘察、设计、施工 3 个阶段考虑，周边环境主要考虑台风、不良地质

或地下障碍物及地下管线，RBS 分解结构图见图 5。

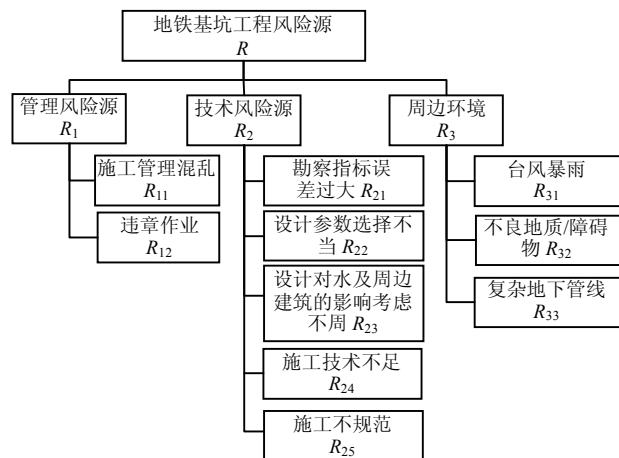


图 5 地铁基坑工程风险分解结构
Fig.5 RBS of subway foundation pit

3.4 地铁基坑 WBS-RBS 耦合矩阵的建立

根据前面的分析，建立的地铁基坑 WBS-RBS 耦合矩阵，见表 1。

表 1 地铁基坑 WBS-RBS 耦合矩阵
Table 1 WBS-RBS coupled matrix of subway foundation pit

		W_1					W_2	W_3	W_4	W_5
		W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}	W_{16}			
R_1	R_{11}	0	0	1	1	0	0	0	1	0
	R_{12}	0	0	1	1	0	0	0	1	0
R_2	R_{21}	0	1	0	0	0	0	1	0	0
	R_{22}	0	1	0	0	0	0	0	1	1
	R_{23}	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	R_{24}	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	R_{25}	0	1	1	1	1	0	1	1	1
R_3	R_{31}	0	0	0	0	0	0	1		1

通过耦合作用，得到表中每个“1”代表的风险事件或因素，\$W_{11}R_{24}\$、\$W_{12}R_{24}\$：垂直度偏差；\$W_{12}R_{21}\$：槽壁坍塌；\$W_{12}R_{22}\$：围护结构入土深度不够；\$W_{12}R_{25}\$：槽底沉渣过厚；\$W_{13}R_{11}\$、\$W_{14}R_{11}\$、\$W_{13}R_{12}\$、\$W_{14}R_{12}\$：人员伤亡；\$W_{13}R_{24}\$、\$W_{13}R_{25}\$：混凝土绕流；\$W_{14}R_{25}\$：刷壁不彻底；\$W_{15}R_{24}\$：浇筑不均匀；\$W_{15}R_{25}\$：提管过快；\$W_{16}R_{24}\$：注浆不到位；\$W_2R_{21}\$、\$W_2R_{24}\$：加固效果不好；\$W_2R_{25}\$：钻孔封堵部密实；\$W_3R_{11}\$：超挖；\$W_3R_{22}\$：坡度选取不当；\$W_3R_{24}\$：土体加固效果差；\$W_3R_{25}\$：坡顶堆载；\$W_3R_{31}\$：浸泡土体；\$W_3R_{32}\$：降低土体强度；\$W_4R_{12}\$：车辆等在支撑上行走；\$W_4R_{22}\$、\$W_4R_{23}\$：支撑抗力不足；\$W_4R_{24}\$：与围檩连接不可靠；\$W_4R_{25}\$：支撑不及时/机械碰撞；\$W_5R_{25}\$、\$W_5R_{31}\$：降

水不到位。

3.5 地铁基坑故障树

以 WBS-RBS 耦合分析得到的风险因素及风险事件（故障树中间事件）为基础，分别对 3 个顶事件进行故障树分析。形成故障树的中间事件或基本事件与 WBS-RBS 耦合矩阵一一对应，见图 6~8。

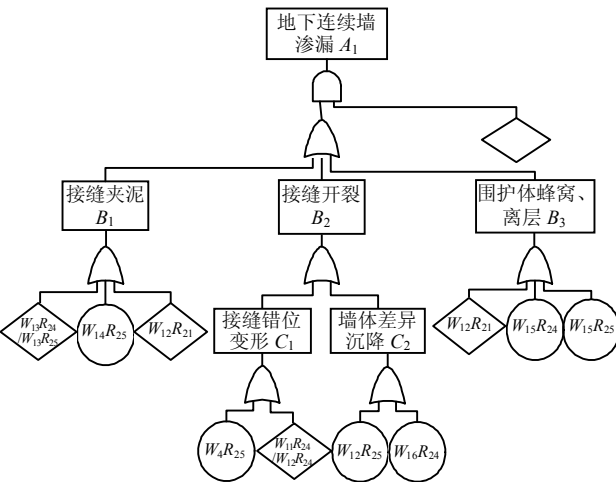


图 6 地下连续墙渗漏故障树
Fig.6 Fault tree of leakage of diaphragm wall

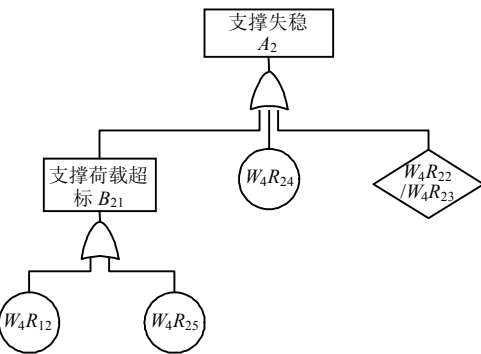


图 7 支撑失稳故障树
Fig.7 Fault tree of instability of support structure

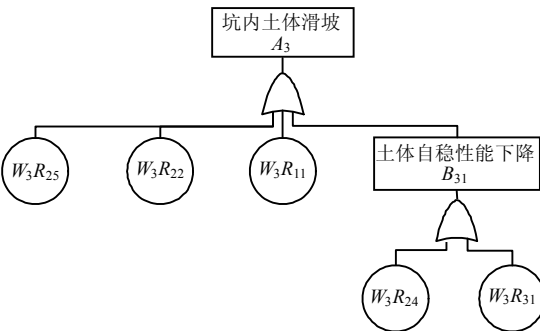


图 8 坑内土体滑坡故障树
Fig.8 Fault tree of landslides in the pit

3.6 地铁基坑风险因素敏感性分析

本文以坑内土体滑坡故障树为例简要介绍敏感

性分析过程。

(1) 坑内土体滑坡故障树的最小割集

$$\{W_3R_{25}, W_3R_{22}, W_3R_{11}, W_3R_{24}, W_3R_{31}\}$$

(2) 以参考文献[11]中事故原因的百分比近似为发生概率：降水不到位是坑内滑坡的首要因素，占 50%，削坡严重使坡度太陡和土体加固效果差，减弱土体自稳能力是坑内滑坡的内因，分别占 20% 和 30%。无统计记录的风险因素理解为发生概率较小，设定其概率比既有统计数据低一个数量级，为 0.01，因此，有：

$$P_{W_3R_{25}} = 0.30, P_{W_3R_{22}} = 0.01, P_{W_3R_{11}} = 0.20, \\ P_{W_3R_{24}} = 0.01, P_{W_3R_{31}} = 0.50$$

代入式（1）得：

$$F_s = P(A_3) = 0.725\ 572 \approx 0.73$$

(3) 将求得的坑内土体滑坡事件概率和参考文献[1]中的相关数据代入式（2），可得：

$$I_g(W_3R_{25}) = \frac{\partial F_s}{\partial F_{W_3R_{25}}} \frac{F_{W_3R_{25}}}{F_s} = \\ \{1 - (P_{W_3R_{22}} + P_{W_3R_{11}} + P_{W_3R_{24}} + P_{W_3R_{31}}) + \\ (P_{W_3R_{22}}P_{W_3R_{11}} + P_{W_3R_{22}}P_{W_3R_{24}} + P_{W_3R_{22}}P_{W_3R_{31}} + \\ P_{W_3R_{11}}P_{W_3R_{24}} + P_{W_3R_{11}}P_{W_3R_{31}} + P_{W_3R_{24}}P_{W_3R_{31}}) - \\ (P_{W_3R_{22}}P_{W_3R_{11}}P_{W_3R_{24}} + P_{W_3R_{22}}P_{W_3R_{11}}P_{W_3R_{31}} + \\ P_{W_3R_{22}}P_{W_3R_{24}}P_{W_3R_{31}} + P_{W_3R_{11}}P_{W_3R_{24}}P_{W_3R_{31}}) + \\ P_{W_3R_{22}}P_{W_3R_{11}}P_{W_3R_{24}}P_{W_3R_{31}}\} \frac{0.3}{0.73} = 0.127\ 4 \approx 0.13$$

同理，可得，

$$I_g(W_3R_{22}) = 0.003\ 8, I_g(W_3R_{11}) = 0.01, \\ I_g(W_3R_{24}) = 0.003\ 8, I_g(W_3R_{31}) = 0.39$$

按照敏感系数的大小对坑内土体滑坡故障树中各风险因素进行排序，见表 2。

表 2 坑内土体滑坡各风险因素敏感性排序 Table 2 Risk factors' sensitivity of landslides in the pit			
序号	因素代号	敏感系数	风险因素
1	W_3R_{31}	0.39	降水不到位
2	W_3R_{25}	0.13	超挖
3	W_3R_{11}	0.01	坡顶堆载
4	W_3R_{22}	0.003 8	坡度太陡
5	W_3R_{24}	0.003 8	暴露时间过长

同理，可以得到围护结构渗漏和支撑失稳故障树中各风险因素的敏感系数，如表 3 和表 4。

表 3 地下连续墙渗漏风险因素敏感性排序
Table 3 Risk factors' sensitivity of leakage of diaphragm wall

序号	因素代号	敏感系数	风险因素
1	W_5R_{25}/W_5R_{31}	0.369 0	降水不到位
2	W_4R_{25}	0.072 0	围护支撑不及时
3	$W_{11}R_{24}/W_{12}R_{24}$	0.072 0	围护结构垂直度偏差
4	$W_{12}R_{21}$	0.067 7	槽壁坍塌
5	$W_{13}R_{24}/W_{13}R_{25}$	0.066 0	混凝土绕流
6	$W_{14}R_{25}$	0.066 0	刷壁不彻底
7	$W_{12}R_{25}$	0.006 4	槽底沉渣过厚
8	$W_{16}R_{24}$	0.006 4	墙趾注浆不到位
9	$W_{15}R_{24}$	0.001 7	混凝土浇筑不均匀
10	$W_{15}R_{25}$	0.001 7	浇筑混凝土时提管过快

表 4 支撑失稳各风险因素敏感性排序
Table 4 Risk factors' sensitivity of instability of support structure

序号	因素代号	敏感系数	风险因素
1	W_4R_{25}	0.350 0	机械碰撞
2	W_4R_{22}/W_4R_{23}	0.063 5	支撑抗力不足
3	W_4R_{24}	0.032 7	与围檩连接不可靠
4	W_4R_{12}	0.014 0	车辆等在支撑上行走

本文选取敏感系数大于 0.1 的风险因素作为各风险事件的主要风险因素，因此，坑内土体滑坡和围护结构渗漏对于降水不到位最为敏感，由于不规范施工导致土体超挖是造成滑坡的另一主要因素；而支撑失稳多是由于机械碰撞等造成其受力状态改变导致。

3.7 风险应对

根据敏感性分析结果，有针对性的制定各风险事件的应对措施。

围护结构渗漏对地下水最为敏感，因此，施工时务必保证围护结构充分的插入深度以切断（微）承压水层；其次必须保证围护结构的密闭性和接缝的严密性，避免形成坑外地下水进入坑内的通道；必要时进行坑外降水以降低基坑内外水头差，或者对围护结构的接头处预先施工高压旋喷或深层搅拌止水帷幕。

预防支撑失稳首先应在设计时不仅计算地层压力等常规荷载，而且要考虑地下水及周边建筑、施工机械行走等非常规荷载的影响；其次支撑与围檩连接要可靠，保证轴向受荷；施工过程中加强管理，严格控制支撑预加的轴力，并定期按照开挖工况及时进行轴力复核，同时施工机械不得碰撞支撑或在其上行走。

坑内土体滑坡应对措施包括：分层分块开挖且合理设置临时留坡的坡度；在开挖过程中地下水位始终保持在开挖面以下 0.5~1.0 m；雨水季节施工时，提前做好坡面防护，坡脚设排水明沟，及时排水；坡顶严禁堆载，行走机械不得在坡顶停留作业。

4 结 语

采用 WBS-RBS 耦合矩阵分析方法建立地铁基坑工程故障树的顶事件，有助于解决地铁基坑工程由于环境复杂，不确定因素多导致风险分析不全面的问题。

基于相关事故调研并结合理论分析，建立了地铁基坑工程主要风险事件的故障树，对风险因素进行了敏感性分析，并提出了相应的应对措施。能够迅速有效抓住基坑工程的主要矛盾，利于有限资源的合理配置。

研究成果对地铁基坑工程设计与施工具有指导意义，同时也能够为诸如隧道掘进等地下工程的风险分析提供方法借鉴。

参 考 文 献

- [1] MATSUO M, KAWAMURA K. A design method of deep excavation in cohesive soil based on the reliability theory[J]. *Soils and foundations*, 1980, 20(1): 61—75.
- [2] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavation in clay[J]. *Geotechnique*, 1996, 6(1): 32—47.
- [3] CHOI H H, CHO H N, SEO J W. Risk assessment methodology for underground construction projects[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2004, 3: 258—272.
- [4] XU T H, BI S P, CHEN J R. Safety management of deep foundation pit based on construction risk analysis[C]// 2008 Isecs International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. [S. l.]: [s. n.], 2008, 3: 268—272.
- [5] HUCHZERMEIER A, LOCH C H. Project management under risk: Using the real options approach to evaluate flexibility in R & D[J]. *Management Science*, 2001, 47: 85—101.
- [6] WANG J C, HOU W H, WANG X Z. Analysis of accident and risk sources factors for deep foundation pit[J]. *Progress in Safety Science and Technology*, 2005, (5): 476—481.