

软岩深埋地铁车站初支拱盖法施工 WBS-RBS-AHP风险评估

付铁军¹, 张照秉², 张晨阳^{3*}

¹重庆市轨道交通(集团)有限公司, 重庆

²重庆潼南高新技术产业开发区管理委员会, 重庆

³重庆大学土木工程学院, 重庆

Email: ftjyeah@qq.com, *SC_ZCY@163.com

收稿日期: 2021年5月1日; 录用日期: 2021年5月15日; 发布日期: 2021年5月27日

摘要

文章依托重庆轨道交通九号线一期工程红岩村车站, 采用WBS-RBS风险耦合识别技术对红岩村车站初支拱盖法施工进行了风险识别, 得到了施工过程中的23个风险源, 而后采用AHP分析法对识别出的风险源进行风险评估, 找出风险权重较大的风险源, 为针对性的风险控制和深入研究指明了方向, 同时也证明了该方法在工程实际中的有效性, 能够为地铁车站初支拱盖法施工提供科学、实用的理论指导。

关键词

地铁车站, 初支拱盖法, 风险评估, WBS-RBS, 层次分析法

WBS-RBS-AHP Risk Assessment of Deep-Buried Soft Rock Subway Station Construction with Primary Support Arch-Cover Method

Tiejun Fu¹, Zhaobing Zhang², Chenyang Zhang^{3*}

¹Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd., Chongqing

²Management Committee, Tongnan New & Hi-Tech Development Zone, Chongqing

³School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing

Email: ftjyeah@qq.com, *SC_ZCY@163.com

*通讯作者。

文章引用: 付铁军, 张照秉, 张晨阳. 软岩深埋地铁车站初支拱盖法施工 WBS-RBS-AHP 风险评估[J]. 土木工程, 2021, 10(5): 428-438. DOI: 10.12677/hjce.2021.105049

Received: May 1st, 2021; accepted: May 15th, 2021; published: May 27th, 2021

Abstract

This paper is based on Hongyancun Station of Chongqing Rail Transit Line 9 phase I project. WBS-RBS risk identification technology is utilized to identify the risks of the construction of Hongyancun Station with Primary Support Arch-Cover Method, and 23 risk sources during the construction process are obtained. Then, Analytic Hierarchy Process (AHP) is utilized to perform risk assessment on the identified risk sources, to find out the risk sources with larger weight. It points out the direction for specific risk-controlling and in-depth research. And the effectiveness of this method in engineering practice is also proved, which can provide scientific and practical theoretical guidance for construction of subway station with Primary Support Arch-Cover Method.

Keywords

Subway Station, Primary Support Arch-Cover Method, Risk Assessment, WBS-RBS, Analytic Hierarchy Process

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市地铁工程是一项极其复杂的系统工程，具有工程规模大、投资成本高、建设周期长、施工技术复杂、社会效应强等特点，同时由于施工场地的地质条件和周边环境比较复杂，存在较大的不确定性和安全风险，一旦发生安全事故，势必造成经济损失甚至人员伤亡。因此，为较好地加强施工过程中的安全管理、减少各类安全事故的发生，非常有必要对地铁车站工程中存在的风险源进行识别和评估，并根据评估结果采取相应的预防和控制措施，将建设过程中的损失降低到最小，以达到安全、经济和高效的管理目标。

目前，国内外学者从不同角度选用不同的识别与评估方法对地铁车站施工风险进行了相关研究，薛洪松[1]采用专家调查和 WBS-RBS 风险耦合分析相结合的方法对富丰桥车站进行了风险识别，找出 14 个风险因素，然后建立了三层次的递阶风险评估模型并采用模糊层次分析法计算了风险因素的权重，最后对风险因素进行评价，同时与定性分析结果相对比。杜宪武等[2]通过对某 PBA 地铁车站及暗挖区间进行调查分析，确定了隧道施工的风险源，然后采用贝叶斯网络与模糊综合评估相结合的方法对风险源进行了评估，评估结果与工程相一致。王路杰[3]分别采用 AHP-模糊综合评价法和 BP 神经网络评价模型对青岛地铁 2 号线延安路站主体施工风险进行了评估，二者确定的风险等级均为 II 级，符合工程实际。王堯等[4]在地铁事故数据调查的基础上，采用 WBS-RBS 风险耦合分析法得到了地铁施工过程中的风险因素和风险事件，然后采用故障树分析法对风险因素进行了敏感度分析，并按照风险系数进行排序，最后提出了针对性的控制措施。李晓兵[5]在 WBS-RBS 风险耦合分析法的基础上，采用专家调查法对青岛地铁 4 号线错埠岭站进行了风险识别，采用层次分析法对识别到的风险因素进行评估，确定了风险权重并划

分了风险等级。

本文结合重庆轨道交通九号线一期工程红岩村车站实例,运用 WBS-RBS 风险耦合识别技术和 AHP 方法分析初支拱盖法施工过程中可能存在的风险因素及其权重,证明该识别评估方法在实际工程中应用时具有良好的科学性、可行性和有效性,能够为类似工程风险评估提供参考。

2. 工程概况

重庆轨道交通九号线一期工程红岩村车站为地下两层暗挖车站,车站总长(内皮) 262.3 m,总宽(内皮) 21.8 m,中心里程处车站轨面埋深约 106.37 m,车站采用 13 米岛式站台,长度 140 m,单拱双层结构,车站隧道采用复合式衬砌,开挖净宽 24.24 m,开挖高度 21.23 m。车站共设两座风道,4 个出入口(其中 2 个为预留),一个换乘通道,6 个安全出入口,均为暗挖复合衬砌结构,采用钻爆法施工。

车站最大埋深为 100 m,围岩以侏罗系中统沙溪庙组(J2s)中风化砂质泥岩为主。砂质泥岩天然和饱和单轴抗压强度分别为 16.8 MPa 和 10.5 MPa,属于软岩。车站隧道围岩地下水以松散孔隙水和基岩风化裂隙水为主,地下水总体较贫乏。

红岩村车站采用初支拱盖法施工。拱盖法是在明挖法、盖挖法和洞桩法(PBA)施工方法基础上提出的适用于围岩“上软下硬”条件的一种暗挖施工方法。其适用范围一般应用于围岩等级Ⅳ级以上、地质条件较好的市内主要干道和不允许采用盖挖法或明挖施工的地铁车站。而初支拱盖法是对二衬拱盖法的进一步改进。该方法采用初支拱盖代替二衬拱盖,以达到加强拱部强度或刚度的效果,能有效地控制拱部上方土体的沉降和变形,保证隧道在施工过程中的稳定。待隧道开挖完成后,一起施作拱部和边墙二衬,在保证车站开挖安全和施工进度的时候,较好地保证了二衬和防水施工质量。

3. 车站施工风险识别

重庆轨道交通九号线一期工程红岩村车站是首次采用初支拱盖法施工的软岩深埋车站,经验不足且不确定因素较多,因此有必要通过风险识别揭示潜在的风险因素,继而确定哪些风险是主要的、应该的或者必须考虑的,形成合理可靠的风险清单。

风险识别的常用方法主要有专家调查法、检查表法以及 WBS-RBS 风险耦合分析法和故障树分析法等。本文中采用 WBS (Work Breakdown Structure)-RBS (Risk Breakdown Structure)风险耦合分析法进行风险识别。WBS-RBS 法主要基于工程结构分解思想,并结合风险矩阵进行耦合分析以达到风险全面辨识的目的。该方法具有逻辑性强、思路清晰、风险识别针对性强等优势,应用较为广泛。

3.1. 工程结构分解

WBS 是指项目工作分解结构,或称作业分解树,作业树中每一个独立的单位就是一个作业包。考虑到初支拱盖法的施工特点和工作分解原理,按施工过程进行 WBS 分解,见图 1。

3.2. 风险结构分解

RBS 是指风险分解结构,或称风险分解树。在参照相关地铁车站工程的基础上,充分考虑各方面致险因素,将该地铁车站工程的风险因素分解为施工风险、技术风险、管理风险和環境风险 4 个方面,并逐层进一步分解,其中,施工风险主要考虑施工质量不合格、工人违章作业和设备不达标,技术风险主要考虑勘察和设计因素,管理风险主要考虑管理不足、违章指挥、聘用无资质人员、安全意识缺乏问题和工期问题,環境风险主要考虑地质和周围环境等因素,RBS 分解结构见图 2。

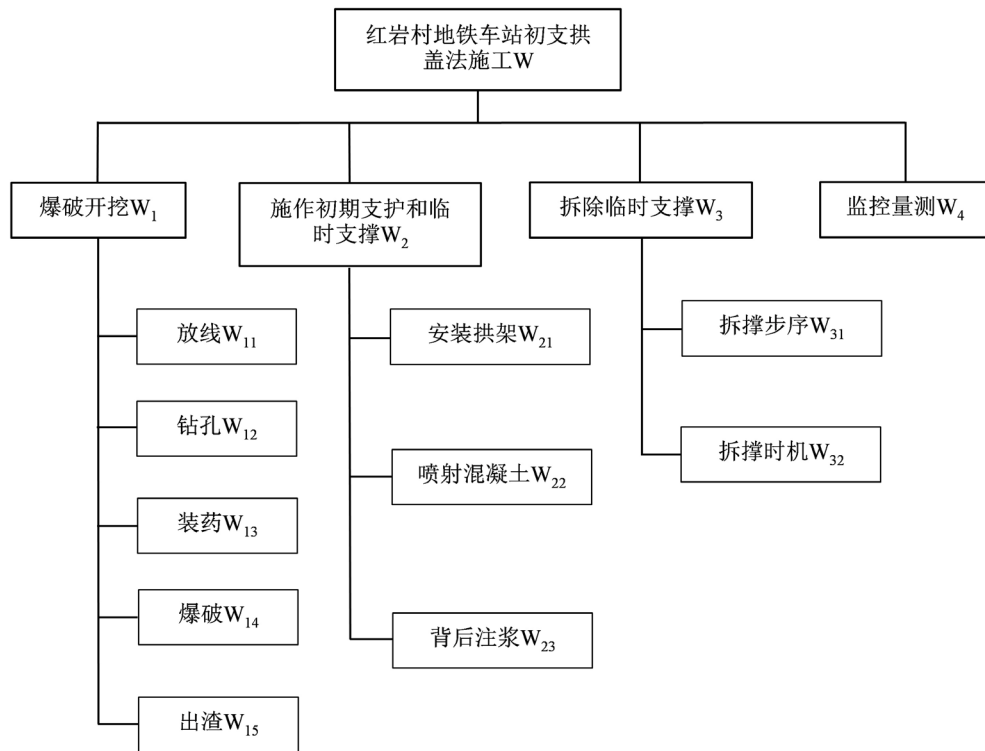


Figure 1. Construction work breakdown structure
图 1. 施工工作分解结构

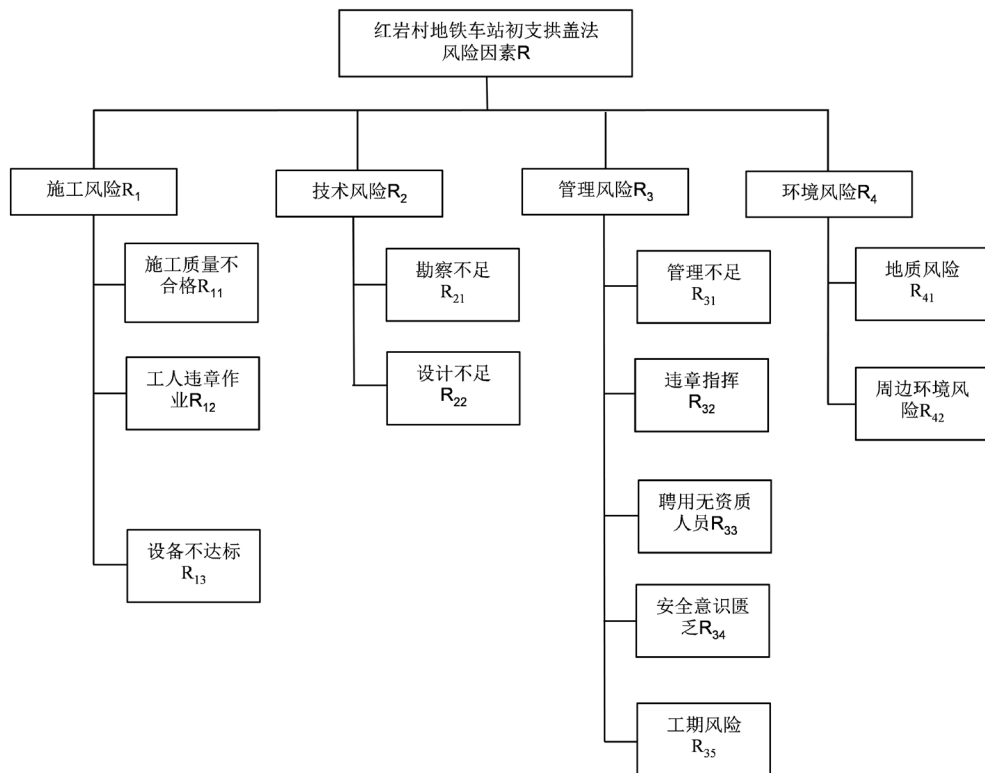


Figure 2. Station risk breakdown structure
图 2. 车站风险分解结构

3.3. 风险清单

利用 WBS-RBS 方法的交叉矩阵识别风险因素, 然后进行问卷调查, 按照矩阵元素逐一判断风险是否存在及其大小程度, 汇总专家意见, 形成最终风险因素清单, 全面、系统地辨识风险, 有助于提高后续风险评估结果的可靠性。

首先构建 WBS-RBS 矩阵, 按照矩阵元素逐一判断风险是否存在及其大小程度, 根据施工工作分解结构和风险分解结构, 建立红岩村车站 WBS-RBS 耦合矩阵, 见表 1。

Table 1. WBS-RBS coupling matrix of station

表 1. 车站 WBS-RBS 耦合矩阵

RBS	WBS		W ₁			W ₂			W ₃		W ₄	
	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₁₅	W ₂₁	W ₂₂	W ₂₃	W ₃₁	W ₃₂		
R ₁	R ₁₁	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
	R ₁₂	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
	R ₁₃	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
R ₂	R ₂₁	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	R ₂₂	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1
R ₃	R ₃₁	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	R ₃₂	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
	R ₃₃	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
	R ₃₄	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
	R ₃₅	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
R ₄	R ₄₁	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
	R ₄₂	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0

在耦合矩阵中, 数字 1 表示两者耦合产生风险事故, 数字 0 表示不产生风险或风险小到可以忽略, 而对于难以界定的风险项, 暂且认定其存在, 后续根据专家打分确定其权重。根据耦合结果分析并统计得到包括施工风险、技术风险、管理风险和環境风险 4 个方面 23 个风险源, 风险辨识清单如表 2 所示。

Table 2. Risk identification list

表 2. 风险辨识清单

序号	风险分类	风险源
1	施工风险 A ₁	爆破施工不合格 A ₁₁
2		爆破影响初期支护 A ₁₂
3		锚杆施工不合格 A ₁₃
4		喷射混凝土厚度不足 A ₁₄
5		掌子面封闭不及时 A ₁₅
6		临时支撑拆除过早 A ₁₆
7		单次拆撑长度过大 A ₁₇
8		监测点布设不合格 A ₁₈
9		监控量测不及时 A ₁₉

Continued

10		爆破设计不合理造成超欠挖 A_{21}
11		岩土参数离散性大 A_{22}
12	技术风险 A_2	开挖工序设计不合理 A_{23}
13		初支设计强度不足 A_{24}
14		位移控制基准设定不合理 A_{25}
15		管理制度不完善, 未严格落实 A_{31}
16		组织架构不合理, 执行力不足 A_{32}
17	管理风险 A_3	人员安全意识不足 A_{33}
18		现场管理不足, 施工混乱 A_{34}
19		监管缺失, 问题整改不到位 A_{35}
20		地下管线发生位移 A_{41}
21	环境风险 A_4	周边建筑物发生位移 A_{42}
22		道路下沉 A_{43}
23		人防隧道变形 A_{44}

4. 车站施工风险评估

风险评估方法有定性分析法(包括专家评议法、德尔菲法、失效模式和后果分析法等)、定性定量分析法(包括事故树法、决策树法、影响图法、因果分析法、风险评价指数和矩阵法等)和定量分析法(包括层次分析法、蒙特卡洛法、风险图法和神经网络法等)。本文采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP), 将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统, 将目标分解为多个目标或准则, 进而分解为多指标(或准则、约束)的若干层次, 通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序(权数)和总排序, 以作为目标(多指标)、多方案优化决策。该方法条理性强, 理论基础成熟, 可以处理很多用传统的最优化技术无法解决的问题, 应用范围比较广, 能够满足地铁车站初支拱盖法施工风险评估的需求。

4.1. 建立风险评估模型

根据识别出的风险清单, 建立红岩村车站风险评估模型, 如图 3。

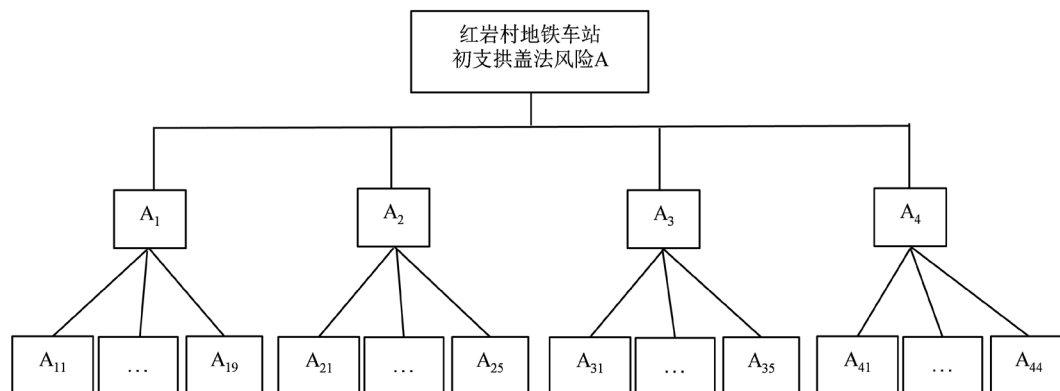


Figure 3. Risk assessment model of station

图 3. 车站风险评估模型

4.2. 确定层次内相对权重

本文在专家问卷调查(是指通过专家研讨会或信函调研等方式,紧密结合工程基础性资料,确定风险清单或进一步进行风险权重分析)的基础上对得到的数据进行整理和分析,采用本章介绍的方法分别对各层次风险构造判断矩阵,同时采用风险权重计算公式计算在各层次中单个风险的相对权重,并进行一致性检验。

鉴于专家打分是构建风险判断矩阵及计算风险权重的重要依据,在具体评估时应选择具有丰富的软岩深埋地铁车站建设或初支拱盖法施工理论知识和工作经验的专家,评分应以实际工程资料和相关研究成果为依托,体现各风险因素的影响程度。

评判准则表如表 3 所示。

Table 3. The comparative quantitative value of factors
表 3. 因素对比量化值

含义	量化值
i 元素与 j 元素同等重要	1
i 元素比 j 元素略重要	3
i 元素比 j 元素较为重要	5
i 元素比 j 元素非常重要	7
i 元素比 j 元素绝对重要	9
两相邻判断的中间值	2, 4, 6, 8
i 元素与 j 元素有 $B_{ij} \times B_{ji} = 1$	倒数

注:同一级元素进行两两重要性对比分析,以彼此为戒尺,进行重要性比较,确定判断矩阵。

1) 求判断矩阵每行所有元素的集合平均值 $\bar{\omega}_i$ 。

$i = 1, 2, \dots, n$, n 为 $\bar{\omega}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$ 为判断矩阵阶数。

2) 将 $\bar{\omega}_i$ 归一化,计算本层次隶属于上一层某元素的第 i 个元素重要性的权值。

$$\bar{\omega}_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i}$$

3) 计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n\bar{\omega}_i}$$

式中, A 为判断矩阵 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$; $T(AW)_i$ 为向量 (AW) 的第 i 个元素。

4) 一致性检验

为了考察判断矩阵对于各元素重要性的对比设定是否标准一致,需要在各层次单排序中进行一致性检验。当一致性比率 $CR < 0.10$ 时,判断矩阵才有满意的一致性,否则,需要调整判断矩阵。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$CR = CI / RI$$

其中, RI 的值如表 4 所示。

Table 4. The value of *RI***表 4.** *RI* 取值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

综上, 各层次风险判断矩阵及一致性检验如表 5~9 所示。

Table 5. Judgment matrix of risk A**表 5.** 风险 A 判断矩阵

风险因素重要性	风险因素重要性				风险权重
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	
A ₁	1	1/3	2	4	0.242
A ₂	3	1	4	6	0.552
A ₃	1/2	1/4	1	2	0.134
A ₄	1/4	1/6	1/2	1	0.072

计算一致指标 $CR = 0.0532 < 0.1$, 满足一致性检验要求。

Table 6. Judgment matrix of construction risk A₁**表 6.** 施工风险 A₁ 判断矩阵

风险因素重要性	风险因素重要性									风险权重
	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆	A ₁₇	A ₁₈	A ₁₉	
A ₁₁	1	1/5	2	1/6	1/4	1/3	1/4	1/3	1/3	0.032
A ₁₂	4	1	6	1/2	1	1/2	1	2	2	0.122
A ₁₃	1/2	1/6	1	1/8	1/5	1/7	1/6	1/4	1/4	0.021
A ₁₄	6	2	8	1	3	2	3	4	4	0.267
A ₁₅	4	1	5	1/3	1	1/2	1	2	2	0.114
A ₁₆	5	2	7	1/2	2	1	2	3	3	0.190
A ₁₇	4	1	6	1/3	1	1/2	1	2	2	0.117
A ₁₈	3	1/2	4	1/4	1/2	1/3	1/2	1	1	0.068
A ₁₉	3	1/2	4	1/4	1/2	1/3	1/2	1	1	0.068

计算一致指标 $CR = 0.0687 < 0.1$, 满足一致性检验要求。

Table 7. Judgment matrix of technical risk A₂**表 7.** 技术风险 A₂ 判断矩阵

风险因素重要性	风险因素重要性					风险权重
	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₂₄	A ₂₅	
A ₂₁	1	1/3	1/5	1/6	1/6	0.044
A ₂₂	3	1	1/3	1/4	1/4	0.088
A ₂₃	5	3	1	1/2	1/2	0.200
A ₂₄	6	4	2	1	1	0.334
A ₂₅	6	4	2	1	1	0.334

计算一致指标 $CR = 0.0752 < 0.1$ ，满足一致性检验要求。

Table 8. Judgment matrix of manage risk A_3

表 8. 管理风险 A_3 判断矩阵

风险因素重要性	风险因素重要性					风险权重
	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}	A_{35}	
A_{31}	1	1	1/2	1/4	1/3	0.088
A_{32}	1	1	1/2	1/4	1/3	0.088
A_{33}	2	2	1	1/3	1/2	0.153
A_{34}	4	4	3	1	2	0.414
A_{35}	3	3	2	1/2	1	0.258

计算一致指标 $CR = 0.0843 < 0.1$ ，满足一致性检验要求。

Table 9. Judgment matrix of manage risk A_4

表 9. 管理风险 A_4 判断矩阵

风险因素重要性	风险因素重要性				风险权重
	A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}	
A_{41}	1	1/3	1/3	1/4	0.088
A_{42}	3	1	1	1/2	0.239
A_{43}	3	1	1	1/2	0.239
A_{44}	4	2	2	1	0.433

计算一致指标 $CR = 0.0869 < 0.1$ ，满足一致性检验要求。

综上所述，每一层判断矩阵均符合一致性检验条件，足以说明专家打分情况较好，能够体现出重庆轨道交通九号线一期工程红岩村车站的风险问题。

4.3. 风险评估结果

按照递阶层次从上到下逐层计算得到最低层风险事件关于最高层总目标的重要性权值，并进行排序，如表 10 所示。

Table 10. Overall risk weight

表 10. 风险整体权重

风险权重		A_i 层次				A_{ij} 权重	排序
A_{ij} 层次		A_1	A_2	A_3	A_4		
名称	编号	0.242	0.552	0.134	0.072		
爆破施工不合格	A_{11}	0.032				0.0078	18
爆破影响初期支护	A_{12}	0.122				0.0296	9
锚杆施工不合格	A_{13}	0.021				0.0051	20
喷射混凝土厚度不够	A_{14}	0.267				0.0647	3
掌子面封闭不及时	A_{15}	0.114				0.0277	11

Continued

临时支撑拆除过早	A ₁₆	0.190	0.0459	6
单次拆撑长度过大	A ₁₇	0.117	0.0283	10
监测点布设不合格	A ₁₈	0.068	0.0165	15
监控量测不及时	A ₁₉	0.068	0.0165	15
爆破设计不合理造成超欠挖	A ₂₁	0.044	0.0241	12
地质勘察离散性大	A ₂₂	0.088	0.0488	5
开挖工序设计不合理	A ₂₃	0.200	0.1106	2
初支设计强度不足	A ₂₄	0.334	0.1842	1
位移控制基准设定不合理	A ₂₅	0.334	0.1842	1
管理制度不完善, 未严格落实	A ₃₁	0.088	0.0118	17
组织架构不合理, 执行力不足	A ₃₂	0.088	0.0118	17
人员安全意识不足	A ₃₃	0.153	0.0205	13
现场管理不足, 施工混乱	A ₃₄	0.414	0.0554	4
监管缺失, 问题整改不到位	A ₃₅	0.258	0.0345	8
地下管线发生位移	A ₄₁	0.242	0.0174	14
周边建筑物发生位移	A ₄₂	0.552	0.0397	7
道路下沉	A ₄₃	0.134	0.0096	16
人防隧道变形	A ₄₄	0.072	0.0052	19

从表 8 中, 我们可以看出该工程最大的风险为“初支设计强度不足以及位移基准设计不合理”, 此外, 风险权重大于 0.05 的风险源还有开挖工序设计不合理、岩土参数离散性大、喷射混凝土厚度不够和临时支撑拆除过早, 主要都集中在技术风险方面, 需给予重点关注, 这可能是因为初支拱盖法第一次应用于深埋地铁车站, 尚未有类似工程经验做参考, 在设计方面可能存在较大不确定性, 因此, 需要我们重点关注并提出针对性的预防和应对措施, 同时加强对初支拱盖法在深埋地层中施工安全性的研究。此外, 各风险因素在地铁工程施工过程中的权重会随着工程的推进不断变化, 可在今后的风险分析相关研究中引入时间因子, 使风险评估结果更加科学合理有效。

5. 结论

地铁工程在重庆立体公共交通体系中具有举足轻重的地位, 而重庆轨道交通九号线一期工程红岩村车站又是初支拱盖法应用于软岩深埋地铁车站的首次尝试, 施工过程风险大, 不确定因素多。对此, 本文采用 WBS-RBS 风险耦合识别技术和 AHP 方法相结合的方法对其初支拱盖法施工进行了风险评估, 建立了全面系统的地铁车站风险清单, 确定了该地铁车站施工中时所面临的主要风险, 为施工过程中的风险控制 and 后续研究提供了思路, 对重庆轨道交通地铁车站施工具有指导意义, 同时也值得类似工程借鉴与推广。

参考文献

- [1] 薛洪松. A 地铁暗挖车站工程施工阶段安全风险研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [2] 杜宪武, 刘运思, 牟天光. PBA 地铁车站及暗挖区间隧道施工风险评估[J]. 工程建设与设计, 2019(19): 167-168+176.

- [3] 王路杰. 浅埋暗挖地铁车站施工风险评价研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- [4] 王堯, 刘保国, 亓轶. 基于 WBS-RBS 与故障树耦合的地铁施工风险与评价[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S2): 772-779.
- [5] 李晓兵. 双侧壁导坑法地铁车站开挖施工安全风险管理研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.