

高寒地区公路特长隧道风险评估优化应用^{*}

赵茗年,王永刚,庞小冲,张建,李涛

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司,兰州 730030)

摘要: 长期以来,隧道工程建设过程中安全事故发生的概率高于其它工程,隧道风险评估一直都是工程建设领域中的一个重点课题。本文依托高寒地区公路特长隧道阿尔金山隧道,采用专家调查法进行评估。结果显示专家调查法存在同一事件各级别所得投票数相等时无法确定级别、未考虑其他级别所得票数对结果的影响等缺点。为此通过对专家投票过程中风险概率和后果等级加权修正,对阿尔金山隧道风险评估进行优化处理后评估结果与专家调查法结果基本一致,但有两个事件的风险等级发生了变化,最终结果更为客观,增加了后续风险控制措施设计的针对性,降低了工程造价,工程资源利用更合理。

关键词: 高寒地区; 隧道风险评估; 专家调查法; 加权修正

中图分类号: U25

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2020)增1-0426-05

Optimization Application of Risk Assessment for Super Long Highway Tunnel in Alpine Region

Zhao Mingnian, Wang Yonggang, Pang Xiaochong, Zhang Jian, Li Tao

(Gansu Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, P.R. China)

Abstract: For a long time, the probability of safety accidents in the process of tunnel construction is higher than that of other projects. Tunnel risk assessment has always been a key subject in the field of engineering construction. This article relies on the Altyn mountain tunnel, an extra-long highway tunnel in the high-cold area, and uses expert investigation methods for assessment. The results show that the expert investigation method has disadvantages such as the inability to determine the level when the number of votes obtained at each level of the same incident is equal, and the impact of the number of votes obtained at other levels on the result is not considered. For this reason, by weighting the risk probability and consequence level in the expert voting process, the risk assessment of the Altun mountain tunnel is optimized and the assessment result is basically consistent with the expert survey method. However, the risk level of two events has changed, and the final result is more objective. The pertinence of subsequent risk control measures design increases, and the project costs reduce, which makes the use of project resources more reasonable.

Keywords: alpine region; tunnel risk assessment; expert investigation method; weighted correction

0 引言

近年来,随着复杂地形、地质条件下特长隧道工点的持续增加,由于施工环境、地质条件、不确定因素的差异,隧道事故呈现“易发、频发、多发”的

特点^[1]。根据原国家安监总局隧道施工事故统计,2008~2016年共发生62起隧道施工安全事故,死亡213人^[2]。隧道施工安全事故的发生造成了严重的人员伤亡和经济损失。控制特长隧道施工过程中的事故风险,在隧道建设前期开展安全风险评

^{*} 收稿日期: 2020-05-07(修改稿)

作者简介: 赵茗年(1989—),男,甘肃武威人,硕士,工程师,主要从事隧道工程设计工作。

E-mail: 583818960@qq.com

估尤为重要。2011 年,交通运输部颁布《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行)》^[3],公路项目中逐步开展隧道安全风险评估。

由于我国地域差异较大,各公路隧道所处的地形地质千差万别,公路隧道在施工阶段面临塌方、突涌水、软岩大变形、岩爆等问题越发普遍,隧道施工安全面临严峻挑战。面对错综复杂的安全隐患,主要采用的评估方法有:专家调查法^[4]、模糊层次综合评估法^[5]、层次分析法^[6]、统计调查法^[7]、模糊网络分析法^[8]等评估方法,在上述风险评估方法的基础上,国内外学者开展了深入研究,针对具体工程刘学增^[9]为公路隧道施工过程中的各类风险问题建立了一系列的风险评价指标体系和分级标准。丁烈云等^[10]从施工安全组织管理、施工安全技术管理、施工环境安全管理和施工安全监控预警管理 4 个方面建立了地铁工程施工过程的安全评价标准。Liu 等^[11]应用探索性因子分析方法和结构方程模型对地铁隧道风险因素进行分析,建立了评价风险因素与隧道风险因果关系的系统性方法。Ding 等^[12]基于对武汉地铁隧道的数值模拟分析提出了地铁隧道建设的系统性风险管理方法。但这些规范标准及评估方法在实际应用中都存在一些问题,如评估指标体系不够完整、分级标准不够客观、打分方法不够合理等问题。

鉴于此,为使规范标准更加完善实用,风险评估过程更为有据可依,本文依托高寒高海拔地区阿尔金山隧道,采用专家调查法开展风险评估后,通过引入加权修正方法,对评估过程进行优化,对比分析表明,优化后的评估结果更符合工程实际,可供类似项目参考。

1 工程概况

阿尔金山隧道自西北向南东向斜穿当金山和阿尔金山山脉,进口位于大鄂博头沟右岸,出口位于当金山南坡,起讫桩号 K285+435~K292+962,双洞长 7 527 m,最大埋深 530 m,隧址区海拔 3 200~3 760 m,属高寒半干旱气候区,季节性温差较大,多年平均气温 3.1℃,最低-34.3℃,最高 35.9℃,最冷月平均气温-13.1℃,相对湿度 30%。雨季和旱季较为明显,年均降水量 127 mm,年均蒸发量 3 297.9 mm,最大积雪厚度约 16 cm,最大季节性冻土深度约 233 mm,属高寒高海拔特长公路隧道。

2 工程地质及水文地质

隧道位于中高山区,区域内山势陡峻,植被稀少,多基岩裸露且沟谷纵横,隧道所在区山体宽度约 13 km,区域内沟谷大多呈“V”字形,沟谷两侧自然山坡坡度 30°~60°,阿尔金山隧道北坡陡峻,南坡相对较缓,地表风化严重,岩体破碎。隧址区受东西向断裂构造控制,隧道穿越山梁南坡通过区域断裂 F5、F7、F6,受构造影响强烈,地势相对较低,地表切割强烈,岩体风化严重,褶皱发育,形成众多山间沟谷;北坡受区域断裂影响较小,山体陡峻,地势较高。隧道轴线方向 SE149°,隧址区海拔 3 200~3 760 m,相对高差约 560 m。

隧址区地层按时代及成因分类,在勘察深度范围内上覆地层为第四系全新统坡积、洪积粉土、碎石土、角砾土,下伏长城系石英片岩、大理岩、玄武岩,加里东期花岗岩及断层角砾岩。隧址区地下水主要为基岩裂隙水和第四系松散堆积层孔隙水,预测隧道单洞最大涌水量为 16 900 m³/d。

3 风险评估程序和评估方法

3.1 评估对象及目标

风险评估对象主要为隧道施工过程中的安全、环境、投资及工期,侧重于安全风险。通过隧道安全风险评估,识别所有潜在风险因素,确定风险等级,提出风险处理对策,将各类风险降至可接受水平,以达到确保安全、环境保护、投资合理、保障工期、提高效益的目的。

3.2 评估方法及流程

阿尔金山隧道安全风险评估采用专家调查法进行。专家调查法是目前一种常用方法,其应用由两步组成:首先辨识出某一特定项目可能遇到的所有风险,列出风险调查表;然后利用专家经验对可能的风险因素的重要性进行评价,综合成整个项目可能面临的主要风险。本隧道评估流程如图 1。

3.3 风险等级的确定及对不同风险等级的接收准则和处理措施

根据事故发生的概率等级和后果等级,将风险等级分为 I 级(低度)、II 级(中度)、III 级(高度)、IV 级(极高)四级。风险等级标准见表 1。

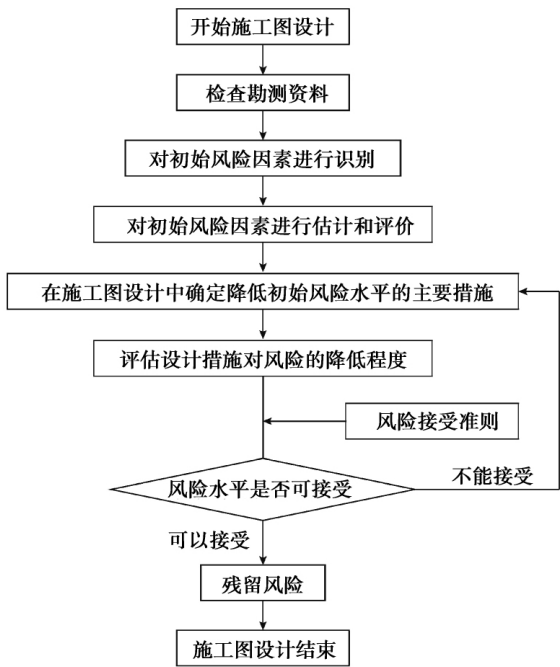


图 1 风险评估流程

Fig. 1 Risk assessment process

表 1 风险等级标准

Table 1 Risk level standard

		后果等级				
风险概率		1	2	3	4	5
		轻微	较大	严重	很严重	灾难性
1	很不可能	I 级	I 级	II 级	II 级	III 级
2	不可能	I 级	II 级	II 级	III 级	III 级
3	偶然	II 级	II 级	III 级	III 级	IV 级
4	可能	II 级	III 级	III 级	IV 级	IV 级
5	很可能	III 级	III 级	IV 级	IV 级	IV 级

公路隧道风险接受准则与采取的风险处置措施。风险接受准则见表 2。

表 2 风险接受准则

Table 2 Risk acceptance criteria

风险等级	接受准则	处置措施
I 级	可忽略	风险可以接受,不经评审即可接受
II 级	可接受	风险有条件接受,实施预防措施将提升安全性
III 级	不期望	风险有条件接受,应尽快实施消减风险的预防措施
IV 级	不可接	风险不可接受,放弃项目执行

4 阿尔金山隧道风险分析与评估

4.1 阿尔金山隧道主要风险分析

根据地质详勘成果,隧道主要风险为洞口及浅埋段失稳、塌方、突涌水、软岩大变形、岩爆、运营和防冻保温等风险,隧道典型风险事件分析如下。

4.1.1 洞口及浅埋段失稳风险

隧道进口段地形较缓,表层覆盖第四系坡积粉土及角砾层,片岩夹大理岩零星裸露,节理裂隙发育,岩体破碎,围岩自稳能力较差,存在拱顶局部掉块问题;隧道出口段地形较平缓,坡体稳定,由于洞口位于冲沟内,暴雨时有轻微泥石流现象;表层覆盖第四系洪积角砾层,花岗岩基岩裸露,节理裂隙密集发育,完整性极差,围岩自稳能力差,存在洞口泥石流冲刷、拱顶掉块等问题。

4.1.2 塌方风险

隧道洞身通过 F5、F7 区域断裂带及其影响带,断层破碎带物质组成主要为糜棱岩、石英片岩及炭质板岩,大部分岩石原岩结构已破坏,云母含量极高,手掰易碎,岩性软弱,强度低,围岩极破碎,自稳能力极差,会出现冒顶、塌方等工程问题。

4.1.3 突涌水风险

在区域构造作用下,断层破碎带、褶皱带、节理密集带、岩性接触带及大理岩溶蚀发育区为地下水的贮存运移创造了良好条件,隧址区地下水集中赋存于区域断裂 F5、F6、F7 和褶皱核部,其次分布在次级断层、节理密集带及不同岩性接触带内,构成本区基岩裂隙水含水层(体),开挖后洞室以股状或线状流水为主,局部出现突涌水现象,富水段应采取工程防排水及施工预案,防止突涌水灾害。

4.1.4 软岩大变形风险

隧道洞身通过 F6 区域断层破碎带及其影响带,断层破碎带物质组成主要为糜棱岩,局部为断层泥及角砾岩,大部分岩石原岩结构已破坏,云母含量极高,手掰易碎,岩性软弱,强度低,围岩极其破碎,断层破碎带易富集地下水,对隧道影响表现为断层破碎带软岩大变形。

4.1.5 岩爆风险

岩爆一般发生在埋深较大的高地应力地层,且地层岩体强度较高、完整性较好,同时岩石具有较高的脆性和弹性,本项目隧道洞身通过石英片岩、花岗岩地层时,围岩较完整,岩性较坚硬,推测埋深超过 210 m 段落存在高应力及岩爆可能。

4.1.6 运营风险

隧道运营风险是指在隧道运营过程中,由于外部环境的复杂性、变动性及主体认知能力的局限性而可能产生的风险。运营风险主要受以下风险因素影响:①隧道通风、②隧道结构防水耐久性、③环境影响、④隧道交通事故、火灾及地震等自然灾害、⑤施工工法。

4.1.7 防冻保温风险

寒区隧道冻害影响因素包括:温度、围岩、水文、隧道断面形状、衬砌材料和厚度、施工工艺等。此外,设计和施工缺陷也可能导致隧道冻害的发生。鉴于本项目隧道地处高海拔寒冷地区,必须在隧道洞内采用保温设施,使围岩裂隙水保持一定的温度不被冻结而顺利排出洞外。设计阶段对本隧道采取以下措施:①隧道进口 700 m、出口 800 m 范围衬砌作防冻保温设计;②拱脚以上全断面铺挂聚酚醛热固性保温材料,厚 50 mm,表层敷设 6 mm 厚纤维增强板;③隧道进、出口约 1 000 m 范围将中心水沟设置在仰拱下方,以满足冻深要求,中心水沟出口采用防冻保温设计;④在隧道行车入口段 100 m 范围设置电加热辅助措施,防止洞内路面结冰,提高运营安全;⑤隧道防渗等级为 P8 等综合防冻保温措施,降低隧道风险。

4.2 阿尔金山隧道风险评估

本次风险评估邀请 15 位相关专家,对阿尔金山隧道洞口及浅埋段失稳、塌方、突涌水、软岩大变形、岩爆、运营和防冻保温七类风险事件进行评估,得出风险概率及后果等级,各类事件中无 I 级(低度)及 IV 级(极高)事件,洞口及浅埋段失稳、塌方、软岩大变形、岩爆、防冻保温五类事件风险等级为 III 级(高度),突涌水和运营两类事件风险等级为 II 级(中度),评估结果如图 2 所示。

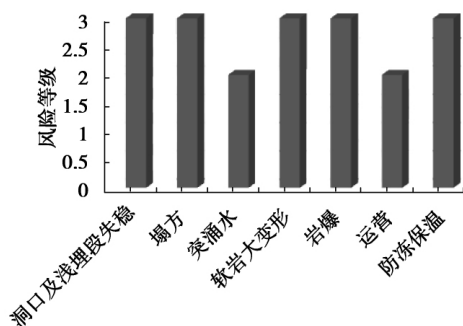


图 2 阿尔金山隧道风险评估结果

Fig. 2 Results of risk assessment for the Arjin mountain tunnel

5 阿尔金山隧道风险评估优化

5.1 阿尔金山隧道风险评估存在的问题

阿尔金山隧道风险评估过程中,针对某一事件各专家按照 5 种不同级别分别对风险概率及后果等级进行投票,最终以票数最多者作为最终风险概率及后果等级,而后根据风险等级标准判定该事件的风险等级,该种评估方法存在以下问题:

(1) 同一事件的风险概率和后果等级各级别所得投票数相等时,无法以票数较多者确定级别需重新评估。

(2) 同一事件风险概率和后果等级以票数最高者确定,未考虑其他级别所得票数,结果较主观。

5.2 阿尔金山隧道风险评估优化

针对本次评估过程中存在的问题,通过对专家投票过程中风险概率和后果等级加权修正,对阿尔金山隧道风险评估进行优化处理,具体如下:

对于同一事件设风险概率各级别的加权修正值为 ξ_1, \dots, ξ_5 ; 对于同一事件设后果等级各级别的加权修正值为 η_1, \dots, η_5 ; 设风险概率各等级所得票数为 $\alpha_1, \dots, \alpha_5$; 设后果等级各等级所得票数为 β_1, \dots, β_5 ; 定义风险概率加权修正值和后果等级加权修正值为:

$$\xi_i = \frac{i \times \alpha_i}{\sum_{i=1}^5 i \times \alpha_i} \quad (1)$$

$$\eta_i = \frac{i \times \beta_i}{\sum_{i=1}^5 i \times \beta_i} \quad (2)$$

求得加权修正后风险概率级别和加权修正后风险概率级别为:

$$A = \sum_{i=1}^5 i \times \eta_i \quad (3)$$

$$B = \sum_{i=1}^5 i \times \xi_i \quad (4)$$

规定当 $A(B)$ 为小数时采用四舍五入取整。

根据以上公式采用加权修正值对风险概率及后果等级进行优化评定后,得出各类事件中无 I 级(低度)及 IV 级(极高)事件,洞口及浅埋段失稳、塌方、软岩大变形、运营、防冻保温五类事件风险等级为 III 级(高度),突涌水和岩爆两类事件风险等级为 II 级(中度),优化后岩爆风险等级由 III 级(高度)降至 II 级(中度),运营风险由 II 级(中度)升至 III 级(高度);风险评估优化对比结果如下

图 3。

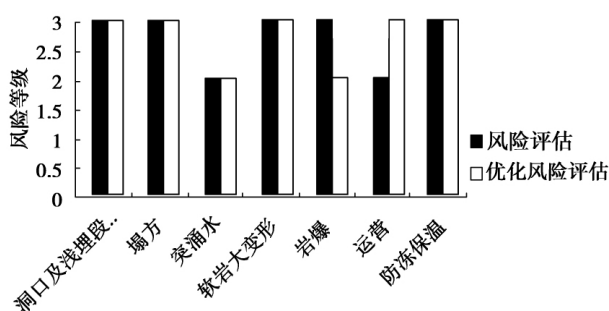


图 3 阿尔金山隧道风险评估优化结果对比

Fig. 3 Comparison of the results of risk assessment and optimization of Arjin mountain tunnel

5.3 阿尔金山隧道风险评估优化对比分析

阿尔金山隧道评估风险在增加加权修正值后,大部分事件与原评估结果一致,但有两个事件的风险等级发生了变化,其原因为加权修正时充分考虑了其他等级的票数,最终结果更为客观。

6 结论

(1) 针对依托工程概况,确定隧道主要风险为洞口及浅埋段失稳、塌方、突涌水、软岩大变形、岩爆、运营和防冻保温七类风险事件。

(2) 运用专家调查法对复杂地质条件下高寒地区公路特长阿尔金隧道进行了风险评估,结果显示岩爆风险等级为Ⅲ级(高度),运营风险等级为Ⅱ级(中度)。

(3) 专家调查法存在同一事件各级别所得投票数相等时无法确定级别、未考虑其他级别所得票数对结果的影响等缺点。

(4) 通过对专家投票过程中风险概率和后果等级加权修正,对阿尔金山隧道风险评估进行优化处理后评估结果与专家调查法结果基本一致,但有两个事件的风险等级发生了变化,最终结果更为客观。

参考文献(References)

- [1] 林志,李洪建,李真真.公路隧道施工总体风险评估方法优化研究[J].工程建设,2017,49(8):16-20.
- [2] 郑艾辰,黄锋,林志,等.2008年至2016年我国隧道工程施工安全事故统计与分析[J].施工技术,2017,46(增):833-836.
- [3] 交通运输部工程质量监督局.公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [4] 刘伟.山岭公路隧道施工风险评价及其应用研究[D].西安:长安大学,2011.
- [5] Wang Z Z, Chen C. Fuzzy comprehensive Bayesian network-based safety risk assessment for metro construction projects[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 70: 330-342.
- [6] 马安震.长大隧道施工安全风险评估及其应用研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [7] 曹文贵,翟友成,张永杰.新奥法隧道施工风险非线性模糊评判方法[J].土木工程学报,2010,43(7):105-112.
- [8] 郭发蔚,王宏辉.基于Bayesian隧道施工风险模糊综合评估方法[J].铁道科学与工程学报,2016,13(2):401-406.
- [9] 刘学增.公路隧道建设安全风险动态评估与控制技术[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [10] 丁烈云,吴贤国,骆汉宾,等.地铁工程施工安全评价标准研究[J].土木工程学报,2011,44(11):121-127.
- [11] Liu W, Zhao T, Zhou W, et al. Safety risk factors of metro tunnel construction in China: an integrated study with EFA and SEM[J]. Safety Science, 2018, 105: 98-113.
- [12] Ding L, Zhang L, Wu X, et al. Safety management in tunnel construction: case study of Wuhan metro construction in China[J]. Safety Science, 2014, 62: 8-15.