

公路隧道设计阶段风险评估中的问题与对策

田伟, 王文星

(浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 分析了公路隧道设计阶段风险评估中存在的安全风险等级判断标准宽松和简单化、不重视数值分析、缺乏模糊综合评价指标体系和交通事故与火灾事件量化标准、评估单位和专家对评估结论的贡献度欠明确等问题;为提高评估结论的客观性和背靠背评估时结论的一致性,提出提高事故等级判断标准和综合考虑各类事故后果,在洞口稳定、塌方、岩爆、结构风险概率评估中发挥数值分析的作用,细化和完善模糊综合评价指标体系,将交通事故、火灾发生率和运行速度差作为评价交通事故和火灾风险的依据,评估单位和专家评价结果分别按 60%、40% 的权重比例汇总成最终风险等级值的措施建议。

关键词: 工程管理;公路隧道;设计阶段;风险评估;风险等级;评价指标

中图分类号:U415.12

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)01-0134-05

公路隧道工程的安全状态与地形地貌、工程地质、水文等建设条件,工程设计、施工组织方案及运营管理经验、交通流量和组成等使用环境息息相关,并在勘察设计、施工建设、运、管、养等各阶段、各环节都不同程度地存在。风险评估是隧道建设领域降低项目全生命周期安全风险的通用做法。考虑到初步设计是确定工程建设方案的阶段,也是工程安全管控的重要环节,交通运输部于 2010 年下发《关于在初步设计阶段实行公路桥梁和隧道工程安全风险评估制度的通知》,要求从当年 9 月 1 日开始在初步设计阶段推行公路桥梁和隧道工程方案的安全风险评估制度,对需要评估的四类特殊隧道作了界定,并在《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南》(下称《指南》)中对评估流程和方法作了要求。这一制度的实施对于强化公路隧道设计和建设过程中的安全风险意识、降低事故概率、减少经济损失起到了积极作用。

安全风险评估是涉及路线、地质、结构、通风、照明、监控和交通安全等多个专业的系统性工程。国内外学者结合具体工程,对风险评估流程、方法作了研究,如 Rita L. Sousa、Audun Borg 等采用贝叶斯方法开展风险评估,Ondrej Nyvlt 等采用故障树法进行隧道运营火灾风险事故评估,王立军利用专家分析法和层次分析法确定风险控制因素与权值,白文琦等采用 Monte Carlo 法确定地质风险评估参数的敏感性和波动性,何美丽等引入信息熵理论确定塌方风险源指标的权重并依照置信度识别准则判定

风险等级,秦胜伍等采用最大熵原理和属性区间识别理论建立了隧道塌方风险评价模型,侯东赛等采用综合赋权—TOPSIS 法评估隧道突水涌泥风险,杨卓等采用 BP 神经网络方法预测岩溶隧道突涌水风险,黄宏伟等开发了基于数据库的隧道工程风险管理软件。总体而言,现有研究主要针对某一风险事件的评估方法,对风险评估指标体系的完备性、围岩稳定量化计算、风险综合等级判定准则一致性等方面还有待进一步研究。此外,评估单位与专家之间的职责分工含糊,有些单位将专家调查表直接作为风险评估报告。该文结合近年来参与的 30 余座隧道风险评估体会,从安全等级判断标准、数值分析作用、模糊综合法评价指标体系、交通事故和火灾定量化评价、评估小组与专家对评估结论贡献度等方面探讨公路隧道设计阶段风险评估中存在的问题与对策。

1 风险等级判断标准偏于宽松和简单化

风险损失暨事故发生后果包括人员伤亡、经济损失、质量问题、工期延误和环境影响等方面,每类后果等级分为 5 级。《指南》中有关风险等级的判断标准偏于宽松和简单化。

1.1 单个事故发生后果的判断标准偏于宽松

风险损失等级判断标准直接决定评估结论,但目前的标准过于宽松。如人员伤亡等级参考国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》和《企业职工伤亡事故分类标准》确定判断标准(见表 1)。

表 1 人员伤亡等级判断标准

等级	《指南》中的判断标准	建议调整的标准
1	重伤人数 5 人以下	重伤人数 3 人(含)以下
2	3 人以下死亡(含失踪)或 5 人以上 10 人以下重伤	重伤人数 4~9 人
3	3 人以上 10 人以下人员死亡(含失踪)或 10 人以上 50 人以下重伤	1 人(含)以下死亡(含失踪)或重伤 10~29 人
4	10 人以上 30 人以上人员死亡(含失踪)或 50 人以上 100 人以下重伤	死亡 2~3 人(含失踪)或重伤 30~49 人
5	30 人以上人员死亡(含失踪)或 100 人以上重伤	死亡 4 人(含)以上(含失踪)或重伤 50 人(含)以上

当前,公路工程建设已普遍落实安全生产责任制,全面推进施工安全标准化建设,目标是实现公路建设“零事故、零伤亡”。《指南》中如此宽松的人员伤亡等级判断标准,已无法体现新时代尊重生命、以人为本的理念,也无法达到风险控制的预期效果,建议大幅度提高标准(见表 1)。

环境影响等级判断标准也类似,如 2 级判断标准为“需紧急转移安置人数 50 人以上 100 人以下”,这种情况已经是非常严重的社会影响。建议从地下水流失、危化品泄露、地表植被破坏面积等方面加以细化,并降低标准指标值。

1.2 确定风险后果等级的方法不够周全

《指南》中评估风险事件严重程度包括 5 个因素,并按照“就高”原则以等级最高的因素作为风险后果等级。如果各因素的等级非常接近,则这种确定风险后果等级的方法过于简单化。评价一个风险事件的严重程度应综合各种风险事件发生后的影响,考虑各种影响的累加效应。因此,建议将各种风险后果折算成经济损失,如重伤 1 人的等价经济损失为 20 万元、死亡 1 人为 300 万元、工期延误 1 d 为 10 万元等,最后的总风险后果等级指标值为 5 项等价经济损失的累加值,再按照《指南》中经济损失等级判断标准综合判断风险后果等级。

2 风险发生概率缺乏定量化评估手段

《指南》推荐的风险源发生概率和风险损失评估方法包括专家调查法、概率分析法、层次分析法、事故树法和模糊综合评价法,并均推荐采用专家调查法。专家调查法、层次分析法、模糊综合法以其简便、明确的优点而成为最常用的风险评估方法。但这种以定性为主、指标体系法为辅的评估方法得出的结论与专家的经验 and 乐观程度有很大关系,实际评估中经常会出现不同专家给出的结论存在较大偏差的现象。因此,建议借助数值分析方法作为风险评估的重要手段。

2.1 基于有限元强度折减法洞口失稳概率分析

隧道洞口稳定性是一个三维问题,建议采用基于有限元强度折减法的边坡稳定性系数作为评估洞口失稳风险事件发生的概率。强度折减法也称为强度储备法,其边仰坡稳定安全系数定义为使边仰坡刚好达到临界破坏状态时岩土体抗剪强度(凝聚力 c 、摩擦角 φ)折减程度,即岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时折减后抗剪强度的比值。其计算过程是对强度指标凝聚力 c 、摩擦角 φ 进行折减[见式(1)、式(2)],然后对隧道洞口进行数值计算分析,不断加大折减系数反复计算,直至其达到临界破坏,此时得到的折减系数即为安全系数 F_s 。

$$c_F = \frac{c}{F_{\text{trial}}} \quad (1)$$

$$\varphi_F = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi}{F_{\text{trial}}} \right) \quad (2)$$

式中: c_F 为折减后凝聚力(kPa); F_{trial} 为折减系数; φ_F 为折减后摩擦角($^{\circ}$)。

分析时,建议参照《建筑边坡工程技术规范》对边坡稳定安全系数的要求,将安全系数 1.50、1.25、1.00 分别作为风险事件发生概率等级 1、3、5 的定量分界值。

2.2 基于地层结构法的塌方和岩爆概率分析

地层结构法将隧道结构和围岩作为一个整体进行分析,在满足变形协调条件的前提下分析隧道衬砌内力及围岩的位移场、应力场、应变场。围岩通常可采用非线性弹性、弹塑性或粘弹塑性模型,并采用释放荷载和增量法模拟施工过程,最后根据围岩的屈服接近度、塑性区范围、衬砌构件的安全系数等判断围岩和隧道结构的稳定性。

岩爆分析也可采用地层结构法,通过施工过程模拟得到隧道开挖后重分布的应力场,获得最大主(拉)应力 σ_1 、最大切向应力 σ_θ ,并根据岩石天然极限抗压强度 R_c 、饱和单轴抗压强度 R_b ,采用卢森判据 σ_θ/R_c 、陶振宇判据 R_c/σ_1 、樊建平判据 R_b/σ_1 预测岩爆的烈度。3 种判据的判别标准见表 2。

表2 岩爆判断标准

分级	卢森判据 σ_{θ}/R_c	陶振宇判据 R_c/σ_1	樊建平判据 R_b/σ_1
无岩爆	<0.20	>14.5	>6
轻微岩爆	$0.20\sim0.30$	$14.5\sim5.5$	$3\sim6$
中等岩爆	$0.30\sim0.55$	$5.5\sim2.5$	$3\sim6$
强烈岩爆	>0.55	<2.5	<3

实际分析时,推荐采用陶振宇判据,将轻微、中等、强烈岩爆分别作为风险事件发生概率等级1、3、5的定量分界值。

3 模糊综合评价法亟需可操作的指标体系

模糊综合法采用模糊理论和最大隶属度原则对多因素系统进行评价,获得目标风险的量化评价指

标,进而获得对应评价等级,其中评价等级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ对应的评价指标范围分别为 $[1,1.5)$ 、 $[1.5,2.5)$ 、 $[2.5,3.5)$ 、 $[3.5,4]$ 。该方法的基础是建立风险事件评价指标体系。但《指南》中并未给出各单一风险事件的评价指标体系,包括风险源的二级指标和权重、评价因素指标的分界值等,导致评估人员无据可依,只能按照各自的认知水准确定评价指标,很难保证不同工程师在背靠背情况下评估结论一致。下面以隧道施工过程中最常见的塌方和洞口失稳两个风险事件为例,提出评价因素指标体系。

3.1 塌方事件的评价因素指标

导致塌方的原因主要有地质地貌、天气水文、勘察设计、施工方法等4个客观与主观方面的因素,据此建立表3所示评价因素指标体系。

表3 塌方模糊综合评价因素指标的分界值

一级指标	二级指标	二级指标权重	评价因素指标的分界值		
			$a_{k,1}$	$a_{k,2}$	$a_{k,3}$
岩性及风化程度	围岩级别 A_1	0.50	3级	4级	5级
	风化程度(完整性系数) A_2	0.25	0.75	0.35	0.15
	单轴饱和抗压强度 A_3	0.25	60 MPa	30 MPa	15 MPa
地质构造	断层或侵入岩等软弱夹层的厚度 B_1	0.50	30 m	30~50 m	50 m
	断层或侵入岩等软弱结构面与隧道的轴线关系 B_2	0.50	夹角 $>60^\circ$, 倾角 $>75^\circ$	其他	夹角 $<30^\circ$, 倾角 $30^\circ\sim75^\circ$
地形及埋深	地表横向坡度 C_1	0.50	10°	40°	70°
	拱顶覆盖层厚度 C_2	0.50	3B	2B	1B
地下水	地下水类型及状况 D_1	1.00	基岩裂隙水、贫乏	基岩裂隙水、富水	富水且与地表水系有水力联系
施工工艺	监控量测方案 E_1	0.30	有监控量测+地质超前预报	仅有监控量测(选测+必测)	仅有必测项目
	开挖工艺 E_2	0.40	CD、CRD、双侧壁等	台阶法	全断面
	辅助施工措施方案 E_3	0.30	钢管棚	小导管	砂浆锚杆

注: B 为隧道开挖洞径(m)。

3.2 洞口稳定的评价因素指标

隧道洞口埋深较浅,围岩压力大,其稳定性受地

质条件、水文条件、地形地貌、气候、工程扰动等多种因素控制。因此,建立表4所示评价因素指标体系。

表4 洞口稳定模糊综合评价因素指标的分界值

一级指标	二级指标	二级指标权重	评价因素指标的分界值		
			$a_{k,1}$	$a_{k,2}$	$a_{k,3}$
岩性及风化程度	单轴饱和抗压强度 A_1	0.20	60 MPa	30 MPa	15 MPa
	粘聚力 A_2	0.20	0.05 MPa	0.15 MPa	0.30 MPa
	内摩擦角 A_3	0.20	35°	25°	15°
	风化程度(完整性系数) A_4	0.40	0.75	0.35	0.15

续表 4

一级指标	二级指标	二级指标权重	评价因素指标的分界值		
			$\alpha_{k,1}$	$\alpha_{k,2}$	$\alpha_{k,3}$
地形偏压及埋深	地表横向坡度 B_1	0.30	10°	40°	70°
	地表纵向坡度 B_2	0.30	10°	40°	70°
	软弱覆盖层厚度 B_3	0.40	2.5B	1.5B	0.5B
地下水情况	地下水类型及状况 D_1	0.34	基岩裂隙水、贫乏	基岩裂隙水、富水	富水且与地表水系有水力联系
	渗透系数 D_2	0.33	5 m/d	20 m/d	30 m/d
	地下水渗透力与滑动方向夹角 D_3	0.33	方向相反	钝角	锐角
灾害性天气	预测 24 h 暴雨强度 C_1	1.00	50 mm	100 mm	250 mm
施工方案	隧道内开挖工法 E_1	0.50	CD、CRD、双侧壁等	台阶法	全断面
	隧道外开挖工法 E_2	0.50	基坑法、先墙后洞法	盖挖法	预留核心土拉槽
辅助施工措施	地表辅助施工措施方案 F_1	0.50	抗滑桩	地表注浆+钢管	地表注浆
	洞内辅助施工措施方案 F_2	0.50	双层或直径超过 $\phi 108$ 的大管棚支护	直径 $\phi 108$ 的大管棚支护	直径小于 $\phi 108$ 的大管棚支护

4 交通事故和火灾风险事件缺乏量化标准

交通事故和火灾是隧道运营阶段的两个主要风险事件,与隧道平面线形、纵坡、横断面、通风排烟方案、救援能力、监控方案等因素有关,交通事故和火灾风险决定隧道能否如期发挥交通功能。但《指南》中欠缺这两个风险事件发生概率和事故等级判断量化标准。建议以交通事故率、火灾发生率的量化测算和隧道路段运行速度差作为两个风险事件评估依据。

4.1 交通事故率和火灾事故率的量化测算

根据《公路隧道设计规范》16.3.2 条文说明,交通事故和火灾发生率主要与长度、交通量有关,按下式计算:

$$P=\alpha Lq\times 365\times 10^{-9}\tag{3}$$

式中: P 为隧道内年事故概率估计值; α 为隧道百万车公里事故率; L 为隧道长度(m); q 为隧道单洞年平均日交通量(辆/d)。

参考国外标准和中国国情,该规范取隧道百万车公里事故率为 0.1、火灾事故率为 0.04。

4.2 隧道路段的运行速度检验

公路交通事故与相邻路段较大的运行速度差有直接关系。运行速度是指在特定路段(无横向干扰等),在干净、潮湿条件和自由流的情况下,85%的驾驶员行车不会超过的行驶速度,简称 v_{85} ,它与公路平面、纵面、横断面和车型比例等设计参数有关。运行速度差越大,则事故率越高,由追尾等交通事故诱

发的火灾发生率提高。因此,可将该指标作为交通事故和火灾风险事件发生概率等级评定依据。

评估时,先对隧道或隧道群内路线进行单元路段划分,然后按照《公路项目安全性评价指南》中的预测模型计算单元路段特征点的运行速度 v_{85} ,进而得到各单元路段特征点的运行速度差 Δv_{85} 。当同一隧道内或毗邻隧道群内设计速度与运行速度的差值大于 20 km/h 时,则对该路段进行安全性检验,如平曲线半径、缓和曲线长度、最小直线长度、停车视距等检验。建议将运行速度差 10、15、20 km/h 作为交通事故风险事件发生概率等级 1、3、5 的量化分界值。

5 评估单位和专家的关系欠明确

根据《指南》,风险评估中需邀请不少于 10 名专家进行风险发生概率等级、损失等级等调查,得到各事件区段风险等级值的一维矩阵 $[R_1]$;评估单位也需采用一些定量与定性相结合的方法得到各风险事件等级值 $[R_2]$ 。但《指南》并未明确如何根据这两个风险事件等级值得到最终风险等级值 $[R]$,有些单位则直接将专家调查结果作为风险评估等级。

为体现评估单位的主体责任,同时吸收专家的智慧,建议按照评估单位 60%、专家调查 40% 的权重比例汇总得到最终风险等级值,即:

$$[R]=0.4\times [R_1]+0.6\times [R_2]\tag{4}$$

如果出现自评结果与专家调查结果偏差较大的情况,则进行偏差分析,以免较高等级的风险因为

“被平均”而遗漏。

6 结语

针对公路隧道设计阶段安全风险评估中存在的问题,结合大量风险评估体会,提出一些对策措施,如严格化风险事故后果的判断标准,将各种风险后果折算成经济损失并将总损失作为风险等级评价标准;在洞口稳定性、塌方、岩爆等风险事件评估中将数值分析结果作为风险发生概率评估依据;细化和完善模糊综合评价法的指标体系;将交通事故和火灾发生率、运行速度差作为评价交通事故和火灾风险的依据;将评估单位和专家调查结果分别按60%、40%的权重比例汇总成最终风险等级值。这些对策措施尚属个人浅见,还需收集更多的工程案例进行验证,并开展多种评估方案之间的平行、对比研究,提高研究结论的客观性和在背靠背情况下评估结果的一致性,为《指南》的修订提供参考。

参考文献:

- [1] Directive 2004/54/EC, Minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network[S].
- [2] Alan N Beard. Tunnel safety, risk assessment and decision-making[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(1).
- [3] Rita L Sousa, Herbert H Einstein. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto metro case study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27(1).
- [4] Audun Borg, Henrik Bjelland, Ove Nja. Reflections on Bayesian Network models for road tunnel safety design: A case study from Norway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43.
- [5] Ondrej Nyvlt, Samuel Privara, Lukas Ferkl. Probabilistic risk assessment of highway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1).
- [6] 王立军. 高速公路山岭隧道设计阶段安全风险评估[J]. 交通运输研究, 2012(24).
- [7] 白文琦, TIONG L K R. 隧道开挖中地质风险评估的敏感性分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8).
- [8] 何美丽, 刘霖, 刘浪, 等. 隧道坍方风险评价的未确知测度模型及工程应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(9).
- [9] 秦胜伍, 吕江峰, 陈剑平, 等. 基于最大熵一属性区间识别的隧道坍方风险评价[J]. 人民长江, 2017, 48(19).
- [10] 侯东赛, 张霄, 王磊. 基于综合赋权-TOPSIS法隧道突涌水风险评价及应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(6).
- [11] 杨卓, 马超. 基于BP神经网络方法的岩溶隧道突涌水风险预测[J]. 隧道建设, 2016, 36(11).
- [12] 黄宏伟, 彭铭, 胡群芳. 上海长江隧道工程风险评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1).
- [13] 孙昕. 铁路隧道风险评估指标体系及方法研究[J]. 铁道工程学报, 2012(9).
- [14] 周庆昕, 薛亚东. 公路隧道施工风险评估若干问题的探讨[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2014, 36(4).
- [15] 何发亮. 铁路隧道风险评估若干问题探讨[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1).
- [6] Shigenobu Kainuma, Muye Yang, Young-Soo Jeong, et al. Experiment on fatigue behavior of rib-to-deck weld root in orthotropic steel decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 119(11).
- [7] 吉伯海. 我国缆索支承桥梁钢箱梁疲劳损伤研究现状[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5).
- [8] 唐亮, 黄李骥, 刘高, 等. 正交异性钢桥面板顶板贯穿型疲劳裂纹研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(2).
- [9] 李爱群, 王浩. 子模型法在超大跨悬索桥钢箱梁应力分析中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2).
- [10] 周绪红, 朋茜, 秦凤江, 等. 钢桥面板顶板与纵肋连接焊根位置疲劳损伤特征[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1).
- [11] 王益逊, 傅中秋, 孙童, 等. 钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳寿命研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2016, 40(2).
- [12] JTG D64-2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [13] 卜一之, 杨绍林, 崔闯, 等. 轮迹横向分布对钢桥面板疲劳应力幅的影响[J]. 桥梁建设, 2015, 45(2).
- [14] 王涛. 高速公路桥梁交通荷载调查分析及仿真模拟[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [15] 刘黎萍, 孙立军. 高速公路不同车道车型组成分析[J]. 中外公路, 2004, 24(1).
- [16] 赵锋军, 杨鑫. 水泥砼桥面沥青铺装受力特性研究[J]. 公路与汽运, 2017(2).
- [17] 邹小魁. 钢筋混凝土桥桥面铺装层应力分析与计算[D]. 西安: 长安大学, 2009.

收稿日期: 2019-07-02

收稿日期: 2019-03-15