



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

GONGLU SUIDAO JIANSHE

ANQUAN FENGXIAN DONGTAI PINGGU YU KONGZHI JISHU

公路隧道建设

安全风险动态评估与控制技术

刘学增 俞文生 王华牢 杨志峰 桑运龙/编著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.



“十二五”国家重点

中国隧道及地下工程

GONGLU SUIDAO JIANSHE

ANQUAN FENGXIAN DONGTAI PINGGU YU KONGZHI JISHU

公路隧道建设

安全风险动态评估与控制技术

刘学增 俞文生 王华牢 杨志峰 桑运龙/编著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书参考国内外相关文献、现行规范、诸多工程经验,阐述了公路隧道不同建设阶段安全风险评估的要点、方法及流程,提出并倡导"各阶段风险评估宜相互衔接、设计阶段风险评估应作为设计文件主要组成部分"的理念,重点分析、建立了施工阶段安全风险的动态(快速)评估方法与体系,并从施工工法角度讨论了常见风险与控制技术措施,建立了公路隧道施工安全预警与控制技术体系。此外,本书对逐渐增多的近接施工、原位扩建问题也作了相关讨论,提出了简易可行的近接施工与原位扩建风险评估方法及控制措施。

本书可供隧道工程设计、施工和监理监测技术人员使用,也可作为高等院校相关专业的研究生辅导教材和教师的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道建设安全风险动态评估与控制技术/刘学增等编著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.1

ISBN 978-7-114-12046-6

I. ①公… II. ①刘… III. ①公路隧道—隧道施工—安全管理 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024205 号

书 名:公路隧道建设安全风险动态评估与控制技术

著 作 者:刘学增 俞文生 王华牢 杨志峰 桑运龙

责任编辑:李 坤

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:11

字 数:214 千

版 次:2015 年 1 月 第 1 版

印 次:2015 年 1 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12046-6

定 价:36.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着我国社会主义经济持续稳定的发展,国家对基础设施建设的投资力度不断加大,我国的公路隧道建设进入了一个大发展时期,隧道总数、单洞长度不断增加,同时由于交通量的需要,单洞3、4车道的大跨度公路隧道逐渐增多,近接施工与原位扩建问题也逐渐出现。由于建设项目的增多,安全风险事故也随之增多,为此,在设计阶段和施工阶段应对潜在的安全风险进行评估并制定控制措施,以减少建设阶段的安全事故。为规范风险评估体系与评估流程,国内外相关机构和组织推出了诸多的行业标准或指南,如国际隧道协会推出的《隧道风险管理指南》、我国推出的《铁路隧道风险评估暂行规定》、《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》等。

然而,大量工程实践表明,当前风险评估工作仍存在不完善之处,如侧重于静态评估,难以适应公路隧道的动态建设过程;不同建设阶段风险评估工作脱节,未有效利用上阶段评估成果;对超前地质预报、现场监测工作以及重大风险源的跟踪不重视,难以及时监控风险源的动态变化,致使塌方、突水涌泥等突发性事故较多。针对上述现状,本书作者在借鉴国内外相关行业标准、结合大量工程经验的基础上,对公路隧道建设安全风险动态评估与控制技术展开了深入研究,取得了一些有益的研究成果。本书具体章节如下:

第1章为绪论。综合国内外隧道建设安全风险评估的研究现状,对风险、风险源等相关术语给出定义,探讨了不同建设阶段风险评估的重点与安全风险分级标准,指出了公路隧道建设安全风险评估体系还需改进之处,从而明确了本书的主要研究内容与技术思路。

第2章为公路隧道建设典型风险事故分析。针对塌方、突水涌泥、大变形三类常见风险,通过案例统计分析,并结合典型案例致险原因探究,明确了不同安全风险致险机理与主要影响因素,为后续安全评价指标的提炼、分级标准提供了工作基础。

第3章为公路隧道设计阶段安全风险评估。借鉴《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南》,并以六盘山公路隧道为例,将设计阶段风险评估划分为初步设计阶段与施工图设计阶段两部分,对设计阶段评估目标、评估依据、评估流程、评估方法、常见风险与风险源、风险控制原则与管理措施进行深入讨论,明确了初步设计与施工图设计阶段风险评估工作的区别和联系。

第4章为公路隧道施工阶段安全风险动态评估。通过阐述各阶段安全风险评估的联系,提出了公路隧道建设各阶段安全风险评估的统筹管理模式,并倡导“设计阶段风险评估应作

为设计文件主要组成部分”的理念。施工阶段安全风险动态评估建议分两步,一是开展基于施工组织设计的安全风险动态评估,以定量分析为主,基于第2章案例统计分析建立了塌方、突水涌泥、大变形典型风险的动态评价指标体系,并给出分级标准;二是建设过程中,开展基于施工过程的安全风险动态快速评估,以定性分析为主,推荐采用打分法。

第5章为公路隧道近接施工安全风险分析与评估。通过对公路隧道近接施工类型进行探讨,明确了近接度的划分标准,结合既有隧道健康度调查,提出了近接施工常见风险与评估方法,并针对既有隧道、新建隧道、中间地层提出了安全控制措施。

第6章为公路隧道原位扩建安全风险分析与评估。基于原位扩建分类,讨论了原位扩建设计流程、方案的选取原则,明确了扩建前既有隧道的调查指标,以既有隧道健康度、运营年限、扩建断面、不良地质为主要评价指标,提出了公路隧道原位扩建安全风险的简易评价方法。

第7章为基于施工工法的公路隧道建设安全风险分析与控制。结合公路隧道施工常见的全断面法、台阶法、中隔壁法、双侧壁导坑法等典型施工工法,系统分析了关键工序与控制要点,从施工角度讨论了安全风险的形成机制,并有针对性地提出了风险控制措施与监控重点。

第8章为公路隧道施工安全预警与控制技术。公路隧道施工安全预警应综合考虑安全风险评估、超前地质预报及现场监控量测结果,建立事前、事中联动预警系统。随后编制了风险源普查、风险等级记录、风险控制措施跟踪等表单,并从建设全过程角度讨论了常见的安全控制对策,形成基于建设过程的公路隧道安全控制体系。此外,本章对塌方、大变形等典型风险的控制措施也作了讨论,给出了推荐的应对流程与控制对策。

本书内容是交通运输部西部交通课题“西部地区公路桥隧工程风险评估研究”、原铁道部重点项目“隧道施工安全预警量化指标体系研究”、江西省交通建设项目“长大公路隧道三维数字化建管系统开发及应用”等课题成果的系统总结与升华,成稿过程中也得到了同济大学、江西省高速公路投资集团有限责任公司井冈山厦坪至睦村高速公路项目办等单位的大力支持与协助,本人的研究生米东阳、陈国柱、索超峰作了大量的理论分析与研究工作,游贵良、张昱辉、朱文轩、李学锋等人负责部分图文整理与校稿编辑工作,在此深表谢意。

本书的成稿与出版仅是我们研究工作迈出一小步,尚有许多问题需要进一步的研究与探索,作者期待本书的出版能起到抛砖引玉的作用,促进当前公路隧道建设安全风险评估体系的不断完善。由于作者水平有限,挂一漏万以及不足之处在所难免,敬请各位读者批评指正,不胜感激。

编者

2014年12月于上海

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 隧道工程风险评估研究进程	2
1.3 公路隧道建设安全风险现状	4
第2章 公路隧道建设典型风险事故分析	10
2.1 塌方	10
2.2 突水涌泥	28
2.3 大变形	42
第3章 公路隧道设计阶段安全风险评估	55
3.1 初步设计阶段安全风险评估	55
3.2 施工图设计阶段安全风险评估	60
3.3 风险评估案例	63
第4章 公路隧道施工阶段安全风险动态评估	72
4.1 施工阶段安全风险动态评估体系	72
4.2 基于施工过程的安全风险动态评价指标体系与分级标准	76
4.3 基于施工过程的安全风险动态快速评估方法	97
第5章 公路隧道近接施工安全风险分析与评估	105
5.1 近接度划分	106
5.2 既有隧道调查与评估	114
5.3 近接施工的主要安全风险分析与评估	116
5.4 近接施工安全风险控制对策	117
第6章 公路隧道原位扩建安全风险分析与评估	121
6.1 原位扩建分类	122
6.2 前期调查与评估	123
6.3 风险评估	124
6.4 风险控制措施	124
第7章 基于施工工法的公路隧道建设安全风险分析与控制	126
7.1 全断面法及其风险控制	126

7.2 台阶法及其风险控制	129
7.3 中隔壁法及其风险控制	134
7.4 双侧壁导坑法及其风险控制	138
第8章 公路隧道施工安全预警与控制技术	142
8.1 公路隧道施工安全预警机制	142
8.2 基于建设过程的安全风险控制方法	143
8.3 常见风险事件的安全控制技术	149
参考文献	158

1	公路隧道施工安全预警与控制技术	1.1
2	公路隧道施工安全预警机制	2.1
3	公路隧道施工安全预警方法	3.1
4	公路隧道施工安全预警系统	4.1
5	公路隧道施工安全预警应用	5.1
6	公路隧道施工安全预警案例	6.1
7	公路隧道施工安全预警总结	7.1
8	公路隧道施工安全预警展望	8.1
9	公路隧道施工安全预警参考文献	9.1
10	公路隧道施工安全预警附录	10.1
11	公路隧道施工安全预警附录	11.1
12	公路隧道施工安全预警附录	12.1
13	公路隧道施工安全预警附录	13.1
14	公路隧道施工安全预警附录	14.1
15	公路隧道施工安全预警附录	15.1
16	公路隧道施工安全预警附录	16.1
17	公路隧道施工安全预警附录	17.1
18	公路隧道施工安全预警附录	18.1
19	公路隧道施工安全预警附录	19.1
20	公路隧道施工安全预警附录	20.1
21	公路隧道施工安全预警附录	21.1
22	公路隧道施工安全预警附录	22.1
23	公路隧道施工安全预警附录	23.1
24	公路隧道施工安全预警附录	24.1
25	公路隧道施工安全预警附录	25.1
26	公路隧道施工安全预警附录	26.1
27	公路隧道施工安全预警附录	27.1
28	公路隧道施工安全预警附录	28.1
29	公路隧道施工安全预警附录	29.1
30	公路隧道施工安全预警附录	30.1
31	公路隧道施工安全预警附录	31.1
32	公路隧道施工安全预警附录	32.1
33	公路隧道施工安全预警附录	33.1
34	公路隧道施工安全预警附录	34.1
35	公路隧道施工安全预警附录	35.1
36	公路隧道施工安全预警附录	36.1
37	公路隧道施工安全预警附录	37.1
38	公路隧道施工安全预警附录	38.1
39	公路隧道施工安全预警附录	39.1
40	公路隧道施工安全预警附录	40.1
41	公路隧道施工安全预警附录	41.1
42	公路隧道施工安全预警附录	42.1
43	公路隧道施工安全预警附录	43.1
44	公路隧道施工安全预警附录	44.1
45	公路隧道施工安全预警附录	45.1
46	公路隧道施工安全预警附录	46.1
47	公路隧道施工安全预警附录	47.1
48	公路隧道施工安全预警附录	48.1
49	公路隧道施工安全预警附录	49.1
50	公路隧道施工安全预警附录	50.1
51	公路隧道施工安全预警附录	51.1
52	公路隧道施工安全预警附录	52.1
53	公路隧道施工安全预警附录	53.1
54	公路隧道施工安全预警附录	54.1
55	公路隧道施工安全预警附录	55.1
56	公路隧道施工安全预警附录	56.1
57	公路隧道施工安全预警附录	57.1
58	公路隧道施工安全预警附录	58.1
59	公路隧道施工安全预警附录	59.1
60	公路隧道施工安全预警附录	60.1
61	公路隧道施工安全预警附录	61.1
62	公路隧道施工安全预警附录	62.1
63	公路隧道施工安全预警附录	63.1
64	公路隧道施工安全预警附录	64.1
65	公路隧道施工安全预警附录	65.1
66	公路隧道施工安全预警附录	66.1
67	公路隧道施工安全预警附录	67.1
68	公路隧道施工安全预警附录	68.1
69	公路隧道施工安全预警附录	69.1
70	公路隧道施工安全预警附录	70.1
71	公路隧道施工安全预警附录	71.1
72	公路隧道施工安全预警附录	72.1
73	公路隧道施工安全预警附录	73.1
74	公路隧道施工安全预警附录	74.1
75	公路隧道施工安全预警附录	75.1
76	公路隧道施工安全预警附录	76.1
77	公路隧道施工安全预警附录	77.1
78	公路隧道施工安全预警附录	78.1
79	公路隧道施工安全预警附录	79.1
80	公路隧道施工安全预警附录	80.1
81	公路隧道施工安全预警附录	81.1
82	公路隧道施工安全预警附录	82.1
83	公路隧道施工安全预警附录	83.1
84	公路隧道施工安全预警附录	84.1
85	公路隧道施工安全预警附录	85.1
86	公路隧道施工安全预警附录	86.1
87	公路隧道施工安全预警附录	87.1
88	公路隧道施工安全预警附录	88.1
89	公路隧道施工安全预警附录	89.1
90	公路隧道施工安全预警附录	90.1
91	公路隧道施工安全预警附录	91.1
92	公路隧道施工安全预警附录	92.1
93	公路隧道施工安全预警附录	93.1
94	公路隧道施工安全预警附录	94.1
95	公路隧道施工安全预警附录	95.1
96	公路隧道施工安全预警附录	96.1
97	公路隧道施工安全预警附录	97.1
98	公路隧道施工安全预警附录	98.1
99	公路隧道施工安全预警附录	99.1
100	公路隧道施工安全预警附录	100.1

第1章 绪 论

1.1 引 言

截至2013年年底,全国公路隧道总数达11359座、960.56万m,秦岭终南山隧道、厦门翔安海底隧道等重点工程相继建成;由于车流量的增加,近接施工与原位扩建项目也日益增多^[1]。在公路隧道大规模建设进行的同时,由于地质条件的复杂性等因素,施工安全风险事件也逐步增加,不仅造成了巨大的社会财产损失,还严重威胁着广大施工技术人员的安全。

为确保施工安全,国内外学者将风险管理理论引入隧道施工领域,开展了大量的风险评估与管理研究,并取得了不少研究成果:在理论基础方面,探讨了隧道施工的常见风险事件、主要风险源及常用的风险评估方法,提出了比较完善的风险评估模式与流程;在工程应用方面,编制了成套的风险检查、评估与对策表格,并开发了可视化的风险评估与预警系统;在行业法规方面,编写了《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南》、《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》、《铁路隧道风险评估暂行规定》等^[2-3],一定程度上减少了安全事故的发生。

然而,受地下工程自身特点,地质条件、施工管理的复杂性,以及目前对安全风险评估的不重视或流于形式等因素的影响,导致各类安全风险事件依然较多,其主要原因集中于以下几方面:

(1)公路隧道施工期安全风险是不断变化的,而当前的研究更多地侧重于设计阶段的静态风险评估,对施工阶段的动态风险评估还不够重视。此外,已有施工风险评估指标还需要进一步完善,在保证合理性的同时,加强快速评估方法的研究。

(2)作为安全风险跟踪和控制的有效手段,超前地质预报、现场监控量测工作还需要进一步加强。

(3)近接施工与原位扩建项目逐渐增多,但尚未建立相适应的风险评估方法。

(4)设计阶段的安全风险评估由设计人员自行开展,导致设计和安全风险评估无法有效区分,不能很好地从安全风险评估的角度开展评估工作,或者评估工作流于形式。

(5)施工人员对安全风险评估不够重视,或者还没有掌握施工阶段安全风险评估的

方法。

因此,在构建和谐、可持续发展社会的背景下,深入开展公路隧道建设安全风险动态评估与控制技术的研究是迫切的,此研究不仅可以建立高效的公路隧道施工风险评估与预警体系,减少施工过程中的人员伤亡,降低经济损失,还具有巨大的社会效益。

1.2 隧道工程风险评估研究进程

美国被公认为安全评价管理的先行者。1974年,美国 Einstein. H. H 教授在“Geological Model for Tunnel Cost Model”一文中,首次将风险评估引入至隧道工程领域^[4],标志着隧道及地下工程风险评估研究的正式启动。历经近40年的发展,在国内外学者的不懈努力下,地下工程风险管理逐渐发展成为一门新的、系统的学科,涵盖风险界定、风险辨识与评估、风险控制等方面。

1.2.1 国外研究进程

20世纪70年代,风险评估技术首次被引入隧道工程,在 Einstein、Salazar、Narayanan 等人的努力下,隧道工程风险分析的特点和应遵循的理念得到初步阐述^[5-6]。20世纪90年代,多起隧道安全事故的发生,使得人们对于隧道风险问题关注度骤增,全球范围内掀起了一股地下工程风险评估研究的热潮。1992年,B. Nilsen 等人对复杂地层条件下海底隧道的风险进行了相对深入的研究^[7]。1996年,Sturk 等人给出了地下工程安全评估与决策中可用的几种评估方法,有故障树法、危险和可操作性分析法、专家调查法等,并且将这些分析技术应用于斯德哥尔摩环形公路隧道^[8]。1998年,Kampmann 将风险评估技术运用于哥本哈根地铁工程,提出了10种风险类型,对发生的可能性和影响结果提出了具体的分类,给出了48种风险控制措施,并使用蒙特卡罗方法和表格来构建风险模型^[9]。同年,日本的佐藤久等在隧道工程的事故统计方面做了大量细致的工作,给出了矿山法、盾构法和顶管法三种工法施工中发生灾害事故的统计资料^[10]。1999年,A. J. M. Snel 和 D. R. S. Van Hasselt 在考虑投资、工期和工程质量的前提下研究了阿姆斯特丹南北地铁线路设计和施工中的风险管理问题,提出了预防措施和额外措施的“IPB”风险管理模型,用于控制复杂的、技术性的地下工程设计施工过程中的工期、造价和质量方面的风险,该方法的优势在于可以获得最佳的解决方案,不会出现陷入绝境的工程线路的风险^[11]。2000年,J. Reilly 提出“隧道工程的建设过程就是全面的风险管理和风险分担的过程”,将地下隧道工程中的主要风险分为四类风险,即造成人员受伤或死亡、财产和经济损失的风险,造成项目造价增加的风险,造成工期延误的风险以及造成不能满足设计和使用要求的风险^[12]。2002年,美国华盛顿国家运输局,就工程费用超支的问题研究开发了 CEVP 程序,

它将“可能费用范围”的概念引入到了费用估计中,提高了预测的准确性^[13]。2003年,Woude对Betuweroute盾构隧道在初步设计和投标阶段进行了广泛的风险分析,通过详细分析设计和监控隧道工程的施工来进行风险控制,介绍了风险管理在隧道各个阶段的应用过程以及各阶段风险管理的任务和责任^[14]。2004年,Soren Degn Eskesen等人在“Guidelines for Tunneling Risk Management”中全面讨论了隧道工程的风险评估模式,以及风险分析中需要考虑的风险因素。2006年,Yoo研发了基于地理信息系统和人工智能的隧道风险管理信息系统。2009年,Holicky结合可能性和风险理论对隧道施工措施进行了优化。

此外,国际性组织也纷纷讨论并颁布了风险管理规范:2003年,英国隧道协会与保险业协会发布了《隧道工程建设风险管理联合规范》;2004年,国际隧道协会发布了《隧道风险管理指南》;2006年,国际隧道工程保险集团发布了《隧道工程风险管理时间规程》,对隧道工程的风险评估模型、评估需要考虑的问题做了系统的讨论,为隧道工程的风险管理提供了一整套参照标准和方法^[15]。

可以看出,隧道风险管理的研究及应用在国外已经相当普遍,且早在2004年随着《隧道风险管理指南》的颁布,已达到相当全面、成熟的水平。

1.2.2 国内研究进程

与国外相比,我国风险评估的研究起步相对较晚,初期以翻译国外理论知识为主,处于技术学习与积累阶段,虽然尝试性地指导了相关项目的风险评估工作(如上海沪崇通道),但距离国外水平仍有较大的差距^[16-21]。直至2004年,受国内隧道大规模建设规划的刺激,在各大高校与科研机构的推动下,我国隧道工程风险管理研究才进入了一个蓬勃发展的时期。以发表文献数量为例,笔者进行了简单统计,发现1987~2003年期间,与隧道风险相关的文献总量为70多篇,而仅2004年新增文献就有40余篇。近几年,更是以年均300余篇的速度增加,至2013年,总数已达2500余篇,为过去15年的30多倍。

自2004年以来,黄宏伟、刘学增等人对隧道工程风险管理开展了大量的研究工作,不仅对风险的定义、致险机理、接受准则等基本概念进行了讨论,还针对公路隧道、地铁盾构等结构,在风险辨识的基础上,重点分析了隧道的工期风险、人员安全风险及成本风险^[22-35]。2005年,王梦恕指出了厦门海底隧道设计、施工、运营中存在的重大安全风险,并提出了相应的风险规避措施^[36]。同年,王良、油新华等人对地铁施工风险进行了综合系统分析,针对地铁施工的安全风险,详细论述了施工风险综合分析系统的定义、目标和原则、基本内容和程序以及具体的实施方法,并以地铁下穿古建文物施工的风险分析为案例进行了论证^[37]。2006年,天津大学宫志群对地铁盾构区间隧道施工风险进行了分析和评价,详细研究了地铁盾构区间隧道施工风险分析评价的各部分内容,包括风险识别、风险

估计、风险指标体系、风险评价各个方面的内容^[38]。2007年,吴贤国等对武汉长江隧道盾构施工主要风险因素进行识别和分析,提出一些相应的风险防治措施,且半定量地确定了各风险因素发生可能性和影响后果^[39]。2008年,张顶立、易小明分析城市隧道穿越工程体中的环境风险、变形风险控制重点,结合工程实践,对风险管理中风险预评估、风险监控、过程控制指标的制定、风险的预控制和控制过程、应急预案五个要素进行了总结,从而完善了城市隧道风险管理体系^[40]。2008年,周峰等人对隧道施工塌方采用模糊层次综合评判法进行风险评估,统计分析得到各个因子与塌方发生的可能性、塌方量之间的隶属函数,并采用综合赋权法确定评价指标的权重,从而建立塌方风险模糊层次评估模型^[41]。2009年,赵延喜综合分析了影响TBM施工的主要风险因素,提出了TBM施工风险综合评价指标体系,并且基于风险影响因素的层次性,创建了TBM施工风险二级模糊综合评判模型,采用层次分析法计算各级因素权重,运用模糊集法确定隶属函数,并划分了风险接受等级^[42]。2010年,长安大学赵峰、夏永旭等人在国内首次建立了一套较完整的公路隧道运营风险评估体系和评估方法,主要包括运营事故统计分析、运营风险接受准则、运营风险定量风险分析方法、火灾热释放率及逃生研究等几部分内容^[43]。2011年,尧光祥、黄建清、李雪淋以沈阳庄河至盖州高速公路第九标段戴峪岭2号隧道为例,初步探讨了动态风险评估在隧道施工风险控制中的应用^[44]。2012年,张国军探究了特殊结构——分叉隧道结构的施工风险评估与控制技术,提出了分叉隧道施工安全风险的评估指标与相应风险管理措施,为大连1号线地铁相关段的设计与施工提供了一定参考^[45]。

为了促进工程安全风险管理的标准化、程序化和规范化,各种行业标准规范相继颁布,如2007年的《地铁及地下工程建设风险管理指南》与《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》、2011年的《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南》(试行本)、2012年的《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》(试行本)^[40-50]。上述行业标准的颁发,极大地推动了隧道及地下工程安全风险研究的全面开展,标志着我国隧道风险管理已逐渐发展成熟,积极地指导了国内的隧道建设安全风险评估与控制工作^[51-52]。

当前,我国公路隧道建设规模持续快速增加,为确保国家基础建设的速度与质量,各级部门对隧道施工风险给予了足够重视,在交通运输部2010~2020年《公路、水运交通主要技术政策》中,已将交通基础设施建设项目安全风险评价列为重点研究问题。

1.3 公路隧道建设安全风险管理现状

1.3.1 风险的定义

因侧重点不同,各国学者对于风险的描述略有不同,但总体上都是围绕风险事件、发

生的可能性、造成的后果等几个影响风险计算的问题展开的^[53]。针对隧道与地下工程,在项目正常施工和运营为目标的行动过程中,如果某项活动存在足以导致承险体系统发生各类直接或间接损失的可能性,那么就称这项活动存在风险,而这项活动所引发的后果就称为风险事故。

一般而言,公路隧道工程建设风险可表示为在施工、运营期间发生人员伤亡、经济损失、环境破坏、工期延误等潜在不利事件的可能性(P)与可能后果(C)的集合;或在设计阶段发生的,可能导致施工阶段出现上述不利后果的相关因素的集合。

1.3.2 风险事件与风险源

风险事件是工程中发生的人员伤亡、经济损失、环境破坏、工期延误等不利事件的统称,可能导致风险事件发生的因素则被称为风险源。

基于公路隧道建设经验,国内外学者对于常见风险事件及风险源的认知比较一致,常见的风险事件包括洞口失稳、塌方、大变形、突水涌泥、瓦斯、岩爆、结构风险、交通事故及火灾等,主要风险源则分为隧道建设条件、结构方案、施工技术以及运营管理四个方面,如表 1-1 所示。

常见风险源分类

表 1-1

类 型	亚 类
建设条件	地形地貌
	地质(工程地质、水文地质)
	不良地质、特殊岩土
	周边环境
结构方案	设计方案
	设计理论
	新技术、新材料
施工技术	施工方案
	新技术、新材料、新工艺
运营方案	线形、通风、防灾、救援逃生、照明

1.3.3 风险评估内容与流程

现代风险管理流程的雏形源于 1991 年英国的 UkMoD 模型,包含初始辨识、分析和规划管理三部分。1997,在荷兰、澳大利亚等技术人员的不断努力下,风险管理流程逐渐完善,包含风险定义、风险辨识、风险估计、风险分析、风险评估、风险处置、风险监控九部分。2002 年,国际隧道协会颁布的隧道及地下工程风险管理指南中提出了风险辨识、风险估计、风险评价、风险决策、风险控制的五阶段流程。

基于国外研究经验,并考虑我国公路隧道建设的自身特点,国内学者将风险决策纳入到风险评价流程中,认为风险评估与控制的主要步骤为:风险界定→风险辨识→风险估计→风险评价→风险控制^[54],如图 1-1 所示。

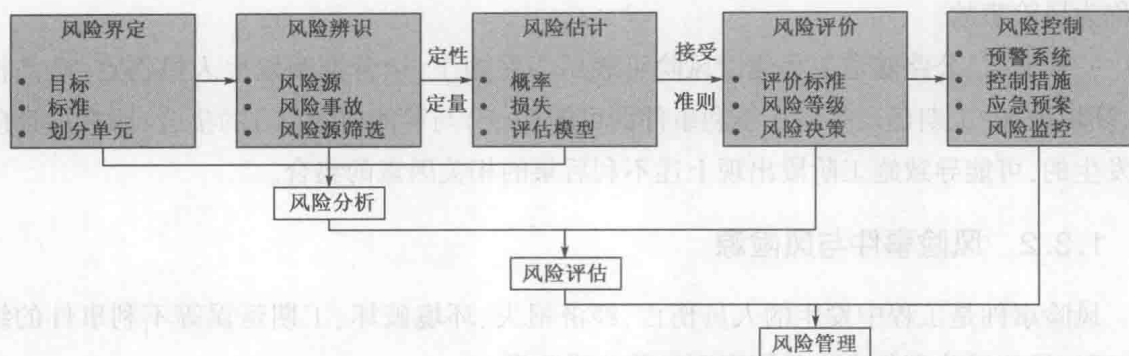


图 1-1 公路隧道建设安全风险评估与控制流程

需要注意的是,各个阶段的评估目标有所不同:

(1)初步设计阶段,安全风险评估应从隧道建设条件、结构设计、施工方案以及通风、防灾救援、照明方案等可能导致施工、运营阶段发生的突发性事件开展评估工作,给出不同隧道方案的安全风险等级,为隧道选线服务。

(2)施工图设计阶段,重点对隧道方案进行重大修改或者初步设计阶段残留风险较高的区段进行评估,特别是对采用新技术、新材料、大断面复杂地质条件隧道,关键是提出安全控制措施,制定应急预案。

(3)施工阶段,重点对施工单位的施工组织设计在施工过程中可能导致的安全风险事件进行动态评估,修改、完善安全风险控制措施,并监督和落实措施的有效实施,对措施的实施过程和效果进行登记;根据施工过程,进行动态评估,根据评估结果,及时调整施工方案。

(4)运营阶段,重点在通风方案、防灾救援方案、照明方案以及监控方案的基础上,结合运营期的运营管理方案、交通流量对运营期可能出现的交通事故、火灾安全风险事件进行评估,从而优化设计方案。

1.3.4 常用风险评估方法

在国内外学者的不断努力下,适用于隧道工程风险评估的方法越来越多,总体上可以分为定性、定量、半定性半定量三大类方法。具体评估时,应根据工程不同建设阶段的特性,选择合理的评估方法(一种或者多种方法相结合)。此外,在不同的隧道建设阶段,各评估方法的适用性也不同,特别是施工阶段的安全风险评估方法应区别于设计阶段。国内专家依工程经验,给出了相应的建议方法:

(1)初步设计阶段,限于初勘提供资料有限,宜采用专家调查法,结合层次分析法、事故树法、模糊综合评价法等进行安全风险分析。

(2)施工图设计阶段,考虑详勘提供的资料进一步丰富,宜采用专家调查法、层次分析法、事故树法、模糊综合评价法、蒙特卡罗方法等多种方法相结合,综合进行定量、定性风险分析。

(3)施工阶段,分两步进行:施工单位进场前,依托详勘资料与施工组织设计,进行施工前的静态风险评估,方法参考施工图设计阶段,但考虑风险源、评价指标宜更加全面、详细;进入施工阶段后,考虑地勘资料变更、监控量测结果反馈、施工组织落实等,宜进行动态、快速风险评估,以定性评价为主,同时结合定量分析,如《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》中推荐的打分法。

1.3.5 安全风险分级标准

根据安全风险定义,公路隧道安全风险分级包括三个方面:事故发生可能性等级、损失后果等级和安全风险等级。其中,安全风险等级是事故发生可能性等级、损失后果等级按照风险矩阵推算得到的。

(1)事故可能性等级

参照我国在编的《公路隧道建设安全风险评估指南》,风险事件发生的可能性(频率)可分为五级,如表 1-2 所示。每级对应不同的颜色,如表 1-3 所示。

风险事件可能性等级标准

表 1-2

可能性等级	可能性范围	可能性等级描述
1	<0.0003	几乎不可能发生
2	$0.0003 \sim 0.003$	难以发生
3	$0.003 \sim 0.03$	偶然发生
4	$0.03 \sim 0.3$	可能发生
5	>0.3	频繁发生

注:当可能性值难以取得时,可用频率代替可能性,时间区间可以工程期考虑。

风险事件可能性等级颜色标识

表 1-3

可能性等级	1	2	3	4	5
颜色	绿色	蓝色	黄色	橙色	红色

(2)事故损失后果等级

事故发生损失后果包括人员伤亡、经济损失、质量问题、工期延误和环境影响五方面,后果等级也分为五级,具体等级标准见表 1-4 ~ 表 1-8。

①人员伤亡是指在参与工程建设活动过程中所发生的人员伤亡事故。依据人员伤亡的类别和严重程度进行分级,如表 1-4 所示。

人员伤亡等级标准

表 1-4

等 级	定 义
1	重伤人数 ≤ 5 人
2	人员死亡(含失踪)人数 ≤ 3 人或 5 人 $<$ 重伤人数 ≤ 10 人
3	3 人 $<$ 人员死亡(含失踪)人数 ≤ 10 人或 10 人 $<$ 重伤人数 ≤ 50 人
4	10 人 $<$ 人员死亡(含失踪)人数 ≤ 30 人或 50 人 $<$ 重伤人数 ≤ 100 人
5	人员死亡(含失踪)人数 > 30 人或重伤人数 > 100 人

注:参考国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》(2007-06-01)和《企业职工伤亡事故分类标准》(GB 6441—1986)。

②经济损失是指风险事件发生后造成工程项目发生的各种费用的总和,包括直接费用和事故处理所需的各种间接费用,如表 1-5 所示。

经济损失等级标准

表 1-5

等 级	定 义	
	经济损失	相对经济损失
1	经济损失 ≤ 100 万元	$< 1\%$ 工程造价
2	100 万 $<$ 经济损失 ≤ 500 万元	$< 1\% \sim 5\%$ 工程造价
3	500 万 $<$ 经济损失 ≤ 1000 万元	$< 5\% \sim 10\%$ 工程造价
4	1000 万 $<$ 经济损失 ≤ 2000 万元	$< 10\% \sim 20\%$ 工程造价
5	经济损失 > 2000 万	$> 20\%$ 工程造价

注:参考国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》(2007-06-01)。

③环境影响是指隧道施工对周围建(构)筑物破坏或损害、环境污染等,根据其影响程度进行分级,如表 1-6 所示。

环境影响等级标准

表 1-6

等 级	损失严重程度描述
1	临时的,且轻微的;可忽略的
2	临时的,且严重的;较小的环境事件
3	长期的;要求管理投入的环境事件
4	永久的,但轻微的;引起诉讼或环保者行动的环境事件
5	永久的,但严重的;不可恢复的影响或者威胁公众健康或自然资源保护的严重环境事件

注:参考《国家处置城市地铁事故灾难应急预案》(2006)、《建设项目环境保护管理条例》(1998-11-18)和《中华人民共和国环境影响评价法》(2003-9-1)。

(3) 风险等级

基于上述评价结果,按照风险矩阵模式,可得到典型安全风险的等级(共划分为四级)如表 1-7 所示。

风 险 等 级 标 准

表 1-7

损失等级 可能性等级		轻微的	较大的	严重的	很严重的	灾难性的
		1	2	3	4	5
几乎不可能发生	1	I 级	I 级	II 级	II 级	III 级
难以发生	2	I 级	II 级	II 级	III 级	III 级
偶然发生	3	II 级	II 级	III 级	III 级	IV 级
可能发生	4	II 级	III 级	III 级	IV 级	IV 级
频繁发生	5	III 级	III 级	IV 级	IV 级	IV 级

(4) 风险接受准则

公路隧道风险接受准则与采取的风险处理措施见表 1-8。

风 险 接 受 准 则

表 1-8

风 险 等 级	接 受 准 则	处 理 措 施
I 级, 低度	可忽略	此类风险较小, 不需采取风险处理措施和监测
II 级, 中度	可接受	此类风险次之, 不需采取风险处理措施, 但需予以监测
III 级, 高度	不期望	此类风险较大, 必须采取风险处理措施降低风险并加强监测, 且满足降低风险的成本不高于风险发生后的损失
IV 级, 极高	不可接受	此类风险最大, 必须高度重视并规避, 否则要不惜代价将风险至少降低到不期望的程度

第2章 公路隧道建设典型风险事故分析

隧道工程施工过程中,常见的地质灾害问题^[55-56]有塌方、突水涌泥、大变形、岩爆、瓦斯等,其中塌方、大变形、突水突泥尤为突出,发生的概率较高。本章基于大量的案例统计分析,结合典型案例,分析各类典型风险的特点与致险原因,探究不同类型风险事故的主要致险因素,为后续风险评估指标的提炼与制定控制措施提供指导。

2.1 塌 方

2.1.1 塌方风险分类

塌方的分类标准较多,如按塌方范围、形态、部位、发展速度、影响范围、塌方机理等,见表2-1。其中,按照塌方机理分类更易于体现不同塌方类型的特点与致险因素的差异性,对于提炼塌方风险的评价指标,建立相适应的塌方风险评估体系有一定的帮助^[57-58]。

常见塌方分类

表2-1

塌方类别		塌方特征
范围	整体塌方	由于岩性软弱,C值低,塑性区变形过大而引起;大多发生在软弱围岩中,坍塌往往是从边墙或拱脚变形增大开始,进而波及拱部
	局部塌方	坍塌往往是从局部掉块开始,进而引起连锁反映,形成较大范围坍塌。当层间胶结差,间有泥层,与层面相交的节理较发育,岩体呈相对破碎状,或是多条裂隙相交、有滑动面,顺层滑动的坍塌一般是不对称的
形态	拱形塌方	一般发生在层状岩体或碎块状岩体中,分两类:一类仅出现在拱部,另一类为包含侧壁崩塌在内的拱形塌方。对于浅埋隧道,往往通顶;对于深埋隧道,由于出现拱效应,塌方高度多在4~20m,规模较大
	异形塌方	由于特殊地质条件(溶洞、陷穴等),如浅埋、偏压等原因产生的塌方,在特殊地层中修建隧道时,应调查清楚溶洞或陷穴的规模、与隧道关系、充填物等,从而选择正确施工方法并防止塌方