

近接建筑物条件下 隧道施工安全与风险管理的 理论与实践

彭立敏 安永林 施成华 编著

 科学出版社
www.sciencepress.com

近接建筑物条件下隧道施工安全 与风险管理的理论与实践

彭立敏 安永林 施成华 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分为两个部分。第一部分:风险管理的理论体系,内容包括风险管理的理论及流程、隧道施工突变机理及人机环境系统分析、隧道施工时邻近结构物变形控制标准探讨、隧道施工阶段风险管理体系,具体见第2~5章。第二部分:风险管理的应用,包括隧道过邻近结构物段重大风险源专项评估、隧道过风化槽坍方突发性事件风险评估、进口人工填土超浅埋段风险评估和隧道常见风险源评估,具体见第6~8章。

本书的读者对象主要为从事隧道与地下工程、地铁的风险管理与施工的工程技术人员,以及隧道工程的设计、监测人员及高等院校相关专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

近接建筑物条件下隧道施工安全与风险管理的理论与实践 / 彭立敏, 安永林, 施成华编著. —北京: 科学出版社, 2010
ISBN 978-7-03-027720-6

I. ①近… II. ①彭…②安…③施… III. ①隧道工程-工程施工-安全管理: 风险管理-研究 IV. ①U458

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 094985 号

责任编辑: 任加林 / 责任校对: 耿耘

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 6 月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—2 000 字数: 264 600

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(环伟))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

中国隧道及地下工程建设规模大、发展快的客观事实以及地下工程严峻的安全形势决定了隧道风险管理的必要性和紧迫性。隧道施工期安全性及其对邻近结构物的影响既是个工程问题,也是个社会问题,受到了国内外工程界与学术界的关注,也得到了相关政府部门的高度重视。隧道风险管理作为防灾减灾的重要手段,虽然在我国隧道工程领域开展的比较迟,但也取得了可喜的成绩。

在吸收消化已有隧道风险管理相关研究成果的基础上,本书所做的主要工作是:统计分析隧道风险事故,研究隧道风险发生机制,并从人机环境系统角度分析隧道风险;结合现有的管理组织机构和制度,考虑现场施工情况,从风险管理的依据、风险管理流程、风险管理的组织机构和制度等方面进行系统研究;探讨隧道无邻近结构物时下穿不同种类和接头形式的管线、下穿不同结构类型的公路、近桥施工的变形控制标准,建立基于变形的风险监测及预警体系,研究变形对围岩参数敏感性和影响性状。针对武广客运专线浏阳河隧道过邻近结构物段,如下穿排水箱涵段、邻近牛角冲互通立交桥段、下穿京珠高速段等的主要风险源进行评估;统计分析隧道坍方的原因及坍方形态,进而基于范例推理、可拓学、强度折减法等多侧面评估隧道施工坍方风险,并研究制定隧道不同坍方规模的应急措施。

在内容结构上,本书主要分为风险管理的理论研究和应用研究两部分,其中理论研究部分包括风险管理的理论及流程、隧道施工突变机理及人机环境系统分析、隧道施工时邻近结构物变形控制标准探讨、隧道施工阶段风险管理体系;应用研究部分包括隧道过邻近结构物段重大风险源专项评估、隧道过风化槽坍方突发性事件风险评估、进口人工填土超浅埋段风险评估和隧道常见风险源评估。

在本书编写过程中,参考了有关论文、著作,吸收了其中的技术成就和丰富的实践经验,在此作者致以最诚挚的谢意;同时本书研究成果得到了湖南省研究生创新基金“基于风险与性能的隧道邻近结构物的变形控制技术”等项目的资助,在此也表示感谢。

由于隧道工程风险管理涉及的学科较多,我国还处在初步阶段,无论是理论还是实际应用都还有待完善,目前所取得的成果基本上处于定性分析阶段,真正量化的研究成果很少,再加上水平和条件所限,书中还会存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.1.3 风险基本概念	4
1.2 研究现状及存在的问题	5
1.2.1 隧道施工风险管理研究现状	5
1.2.2 隧道施工对地层变形的影响研究现状	8
1.2.3 隧道施工对邻近结构物影响的研究现状	13
第 2 章 隧道施工风险机理分析	17
2.2 隧道施工风险本质解析	17
2.2.1 风险事故统计分析	17
2.2.2 风险发生原因	19
2.2.3 风险发生机制	20
2.3 隧道施工风险突变分析	24
2.3.1 突变基本理论概述	24
2.3.2 风险事故突变机理分析	25
2.4 隧道施工风险人-机-环境系统分析	27
2.4.1 人子系统	27
2.4.2 机子系统	28
2.4.3 环境子系统	28
2.4.4 人-机-环境评价指标体系及流程	29
2.4.5 人-机-环境系统分析实例	31
2.4.6 基于人-机-环境系统分析的隧道安全改善措施	39
第 3 章 隧道施工风险管理方法	42
3.1 风险识别	42
3.1.1 风险识别过程	42
3.1.2 风险识别方法	43
3.2 风险评估	50
3.3 风险应对	65

3.4	风险监控	66
第4章	隧道施工风险管理体系	68
4.1	风险管理相关法规文件	68
4.2	隧道风险管理体系	68
4.2.1	风险管理目标和流程	68
4.2.2	风险管理组织机构与职责	71
4.3	隧道风险管理制度措施	74
4.3.1	风险管理措施	74
4.3.2	风险预警与风险干预应急措施	77
第5章	隧道施工邻近结构物变形控制标准分析	78
5.1	变形控制基准确定原则	78
5.2	隧道无近邻结构物段变形控制标准研讨	79
5.2.1	从围岩稳定角度推导变形标准	79
5.2.2	根据经验公式推算变形标准	81
5.2.3	根据相关规范确定变形标准	83
5.3	隧道下穿公路时变形控制标准探讨	87
5.3.1	公路路面性能要求	87
5.3.2	公路沉降下变形模型分析	88
5.3.3	选取地基模型	89
5.3.4	推算基床系数	89
5.3.5	等效处理多层路面结构	91
5.3.6	无限柔性路面变形标准推导	92
5.3.7	柔性路面变形标准推导	93
5.3.8	无限刚性路面变形标准推导	95
5.4	隧道下穿管线时地表变形控制标准分析	95
5.4.1	接头允许转动无限柔性管线变形标准研究	96
5.4.2	接头不允许转动无限柔性管线变形标准分析	104
5.4.3	柔性管线变形标准研究	104
5.4.4	无限刚性管线变形标准分析	106
5.5	隧道邻近立交桥施工时变形控制标准分析	106
5.5.1	隧道施工变形对立交桥影响分析	106
5.5.2	由相关规范确定墩台沉降标准	107
5.5.3	由墩台沉降标准推求地表沉降标准	108
5.6	等代圆法等效非圆形隧道	109
5.7	隧道邻近结构物变形风险预警体系	110

5.7.1	变形管理基准拟定和监测流程	110
5.7.2	变形监测小组职责	112
5.8	围岩参数对地层变形的影响分析	112
5.8.1	围岩参数的敏感性分析	112
5.8.2	围岩参数对变形的影响分析	115
第6章	隧道重大风险源识别的工程应用	117
6.1	隧道工程概况	117
6.2	隧道邻近结构物变形控制标准的应用实例	118
6.2.1	无邻近结构物段变形控制标准拟定	118
6.2.2	下穿京珠高速公路的变形控制标准拟定	120
6.2.3	过排水箱涵段变形控制标准拟定	121
6.2.4	近桥梁段变形控制标准拟定	122
6.3	浏阳河隧道风险管理的主要方法	127
6.4	隧道开工前风险识别情况	127
6.4.1	隧道进口人工填土超浅埋地段	127
6.4.2	隧道下穿排水箱涵地段	128
6.4.3	过牛角冲互通立交桥地段	128
6.5	隧道施工过程中风险再识别	128
6.6	隧道施工安全风险事件的风险因素分析	129
6.6.1	隧道进口人工填土超浅埋地段	129
6.6.2	隧道过邻近结构物地段施工风险因素分析	131
6.6.3	隧道过风化槽地段施工风险因素分析	131
第7章	隧道过邻近结构物段重大风险源评估的工程应用	133
7.1	隧道斜下穿排水箱涵段风险评估与应对	133
7.1.1	现场概况	133
7.1.2	风险评估	134
7.1.3	风险应对措施安全性分析	136
7.1.4	风险监控	147
7.1.5	风险应急预案	151
7.2	隧道邻近牛角冲互通立交桥风险评估与应对	152
7.2.1	现场概况	152
7.2.2	风险评估	154
7.2.3	风险应对措施安全性分析	155
7.2.4	风险监控	163
7.2.5	施工阶段风险应急预案	165

7.3	隧道斜下穿京珠高速公路风险评估与应对	166
7.3.1	现场概况	166
7.3.2	风险评估	167
7.3.3	风险应对措施安全性分析	169
7.3.4	风险监控	172
7.3.5	风险应急预案	175
7.4	修正变形监测标准	175
第8章	隧道过特殊地质地段风险评估的工程应用	176
8.1	2号竖井风化槽地段隧道坍方风险与应对	176
8.1.1	隧道坍方与掌子面崩塌统计	176
8.1.2	隧道过风化槽段地质情况探测	182
8.1.3	隧道坍方风险评估	184
8.1.4	强度折减法分析隧道坍方风险形态	189
8.1.5	过风化槽段风险应对措施	197
8.1.6	隧道施工坍方预防措施和应急预案	198
8.1.7	过风化槽段的施工效果分析	200
8.2	隧道进口人工填土超浅埋地段管理	201
8.2.1	施工阶段风险评估	201
8.2.2	施工阶段风险应对	202
8.2.3	施工阶段风险应对措施注意事项	204
8.2.4	施工阶段风险应对措施实施效果	205
参考文献		206

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

1.1.1 研究背景

20 世纪 80 年代,国际隧道协会提出了“大力开发地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议^[1];科学预测同样指出 21 世纪将是大规模开发利用地下空间的年代;日本也提出了利用地下空间、把国土扩大 10 倍的设想。现在,各国政府都把地下空间的利用作为一项国策,来推进其发展。

《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》明确提出“有条件的大城市和城市群地区要把轨道交通作为优先领域,超前规划,适时建设。”《国家中长期科学和技术发展规划纲要》也把城镇化与城市发展列为重点领域,把城市地下空间开发利用技术列为优先主题。中国现在是世界上地下空间开发利用的大国,随着“西部大开发”的深入推进,城镇化的进一步加快,客运专线和城市轨道交通(地铁、城际轨道交通)的大量修建,隧道的数量和规模也在不断刷新^[2]。

然而,由于隧道施工场地狭小、地质条件复杂多变、不可预见风险因素多,对周边各种各样既有结构物的环境影响大等;技术和管理力量难以充分保证;对隧道工程安全风险的认识不客观,风险管理不科学,风险管理的投入不到位,所以,隧道工程建设中,事故频发,形势非常严峻,令人堪忧,国内外隧道施工造成周边结构破坏及重大生命财产损失和工期延误等方面的教训不胜枚举^[2,3]。

2003 年 7 月 1 日上海地铁四号线出现漏水、坍塌事故,导致附近数栋大厦倾斜或倒塌,如图 1.1 所示。2004 年 4 月 20 日新加坡地铁环线一地下隧道支架倒塌造成公路坍塌,如图 1.2 所示。2007 年 8 月 5 日宜万铁路野三关隧道发生特大突水事件造成 3 人死亡、7 人失踪,直接经济损失 1349 万元,如图 1.3 所示。2007 年 11 月 20 日宜万铁路高阳寨隧道岩崩事故造成遇难者达 30 人,如图 1.4 所示。2008 年香港地铁隧道施工时的路面沉降,如图 1.5 所示。2008 年 11 月,杭州地铁 1 号线基坑工地突然坍塌,造成 21 人遇难或失踪,如图 1.6 所示。

中国隧道及地下工程建设规模大、发展快的客观事实以及地下工程严峻的安全形势决定了隧道风险管理的必要性和紧迫性^[3]。2007 年交通部提出要“建立桥隧工程设计和施工安全风险评估制度”,2007 年铁道部也做了“关于加强铁路隧道工程安全工作的若干意见”。同年,铁道部副部长卢春房在铁路隧道施工安全现场



图 1.1 上海地铁施工引起高层建筑物倾斜

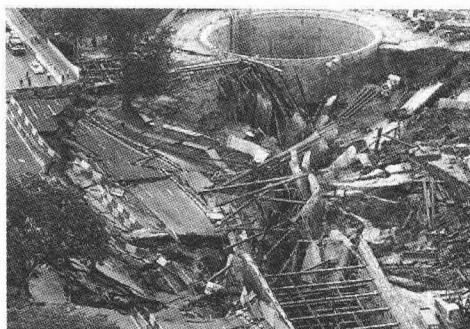


图 1.2 新加坡地铁施工造成路面沉陷破坏



图 1.3 野三关隧道救援现场

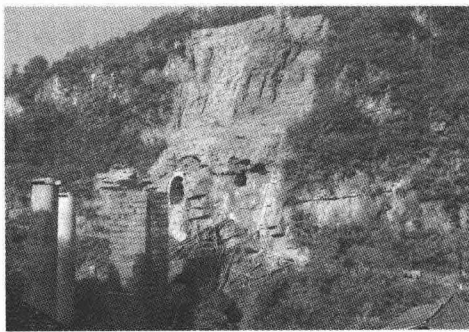


图 1.4 高阳寨隧道事故现场



图 1.5 香港地铁施工引起路面沉陷



图 1.6 杭州地铁施工造成路面沉陷破坏

会上的讲话也明确了“牢固树立安全发展理念,坚持安全第一”。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议》中也明确提出要“坚持节约发展、清洁发展、安全发展,实现可持续发展”,首次把安全生产与

节约资源、保护环境的基本国策相提并论,一起作为转变经济增长方式的重要内容。胡锦涛总书记强调指出:“把安全发展作为一个重要理念纳入我国社会主义现代化建设的总体战略,这是我们对于科学发展观认识的深化。”实现科学发展首先要做到安全发展,和谐社会首先要切实保障人的生命安全。从安全生产到安全发展,决不仅仅是字面上的变化,而是发展理念上的巨大飞跃。

在全球金融危机影响下,围绕全国“扩大内需、抓经济、保增长;重安全、促发展”的工作中心,面向国家发展地下空间及轨道交通、加快城市化进程等重大需求,贯彻党和政府的安全政策,深入开展隧道风险管理研究及邻近结构物的安全评估,积极应对隧道施工面临的高风险问题变得非常迫切,也凸现重大意义!

1.1.2 研究意义

从20世纪90年代联合国提出的“减灾十年”开始,安全就成为全世界关注的焦点。美国土木工程学会出版的《2025年的土木工程》未来峰会报告中也指出风险与性能的研究将成为未来土木工程的发展趋势和前沿。

隧道施工期安全性及其对邻近结构物的影响既是个工程问题,也是个社会问题,受到了国内外工程界与学术界的关注,也得到了相关政府部门的高度重视,如铁道部已组织撰写了《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》^[4],住房和城乡建设部和土木工程学会也已制定了《地铁及地下工程建设风险管理指南》^[5],并着手地下工程风险管理规范的编制研究。

本书在系统推导变形控制标准的基础上,综合数值模拟、监控量测等多种方法,评估隧道施工期风险和邻近结构物施工风险,具有以下重要的工程意义和学术意义^[2,6]:

1) 扩展隧道风险评价及监测的手段。隧道风险评价中定性因素或者半定性因素较多,而与土木工程中数值仿真、监控量测等结合的较少,本书在这方面做了探索性尝试,并基于突变理论和人机环境系统对隧道进行风险管理。

2) 丰富隧道存在邻近结构物时的变形控制理论。目前对隧道邻近结构物的变形控制标准研究较少,且基于不确定理论和风险理论的研究更少,本书以既有结构物安全性能为基准,探讨变形基准和控制措施,对其是很好的补充。

3) 掌握隧道施工对邻近结构物的影响程度。为了保护邻近结构物的安全,有关部门根据工程经验对隧道开挖提出了地表变形的限制要求。尽管如此,因隧道开挖而引起的结构物损坏事故时有发生,这说明在某些条件下的地下开挖,要求邻近结构物完全不出现变形和裂缝是不可能的,问题的关键在于要知道隧道的开挖是否会对结构物产生影响,影响的规律和范围如何,做到心中有数,以推断对结构物所造成的损害程度。

4) 预警隧道施工及邻近结构物风险。根据所了解的隧道风险大小及其对邻

近结构物影响的程度不同,选择相应的保护和控制措施,做到有的放矢,从而从根本上保护邻近结构物的安全。

1.1.3 风险基本概念

风险是一外来语,源于法文的 *risque*,在 17 世纪中叶被引入到英语,拼写成 *risk*,其最早出现在保险交易中。许多学者试图用简明扼要的语言对风险的含义作出描述^[7];Mowbray A. H. 等认为风险是一种不确定;Rosenbloom J. S. 将风险定义为损失的不确定;Crane F. G. 称风险是未来损失的不确定;Arthe William C. 等将风险定义为给定情况下的可能结果的差异性;Cooper D. F 和 Chapman C. B 认为风险是由于从事某项特定活动过程中存在的不确定性而产生的经济或财务的损失、自然破坏或损伤的可能性;卢有杰等认为风险就是活动或事件消极的、人们不希望的后果发生的潜在可能性;黄华明认为风险是在特定的客观情况下,在特定的期间内,某种损失发生的可能性。

下面为《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》^[4]中的相关概念:

1) 风险(*risk*): 在隧道施工期间发生人员伤亡、环境破坏、财产损失、工程经济损失、工期延误等潜在的不利事件的概率(P)和后果(C)的集合,表达式为 $R = f(P, C)$ 。

2) 风险分析(*risk analysis*): 它是风险管理的第一步,其是对工程项目所面临的和潜在的风险加以分析、判断、归类的过程。包含风险识别和风险估计,对工程项目中的风险因素(事件)进行确认和分类,并对各种风险发生的可能性及不利后果进行估算。

3) 风险评价(*risk evaluation*): 它是在风险识别和风险估计的基础上,对风险发生的概率、损失程度和其他因素进行综合考虑,对风险因素和风险事件进行分析和等级评定。

4) 风险处理(*risk treatment*): 根据风险评价结果,对风险因素进行处置和应对,决定是否需要采取控制措施,以及控制措施采取到什么程度。其内容包括风险接受、风险减轻、风险转移和风险规避。

5) 风险监测(*risk monitoring*): 跟踪已识别的风险,监视残余风险和识别新的风险,保证计划执行,并评估这些计划对降低风险的有效性。

6) 风险管理(*risk management*): 参与工程建设的各方通过风险分析、风险评价、风险处理和风险监测,以求减少风险的影响,以较低合理的成本获得最大安全保障的管理行为。

7) 风险接受准则(*risk acceptance criteria*): 工程参与各方及第三方可接受或可容忍的最大风险,采用定性或定量的等级指标描述。常用的是 ALARP(*as low as reasonably practicable*)接受准则,其将风险分为三个区域,如图 1.7 所示。

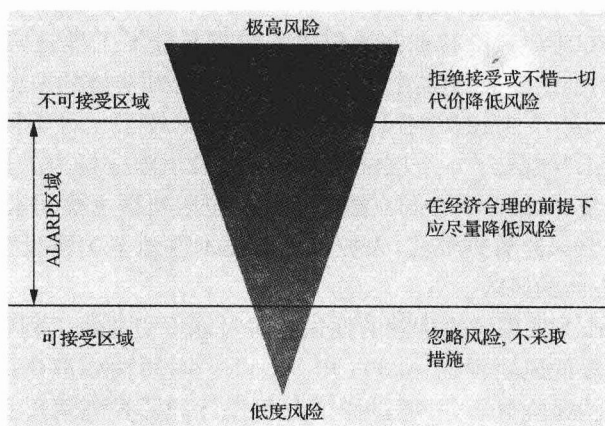


图 1.7 ALARP 风险接受准则

1.2 研究现状及存在的问题

隧道邻近结构物施工作为岩土环境工程的一个新兴课题,国内外学者开展了很多研究工作,得出许多有意义的结论,为科学评价隧道施工对邻近结构物的影响提供了一定的理论基础。隧道风险管理作为防灾减灾的重要手段,虽然在我国隧道工程领域开展的比较迟,但也取得了可喜的成绩。

下面从隧道施工风险管理、隧道施工对地层变形的影响、隧道施工对邻近结构物的影响、隧道施工邻近结构物控制措施等角度综合全面论述国内外相关研究现状,并着重探讨基于 Peck 公式的地层变形预测、隧道邻近管线、桥梁、路面施工影响、隧道施工期风险管理的研究现状,进一步归纳总结研究趋势及有待研究的问题。

1.2.1 隧道施工风险管理研究现状

已有大量的文献和工程案例表明:隧道工程由于地质环境复杂、基础信息缺乏、加之勘察手段等各方面的限制,开挖前不可能将施工中的地质状况完全掌握,必须通过开挖过程中所揭示的具体地质条件对原设计的方案进行必要的调整和修正。因此隧道工程的设计无法确保在施工前做到万无一失,隧道施工阶段存在着很大的不确定性和高风险性。施工阶段的风险管理是风险能否得到有效控制的关键!目前国内外对此进行了大量研究工作,研发了一些风险识别及评价的方法,并已用于重要的隧道工程项目中。

(1) 国外隧道风险管理研究进展

自 20 世纪 70 年代风险管理开始应用于隧道及地下工程领域以来,获得了不少研究成果,现在其已经成为隧道及地下工程领域必须实施的一项重要内容。

1994 年 Einstein^[8]考虑长期风险和施工风险比较了 3 种不同施工方案总成本。1996 年 Sturk^[8]提出了一个以统计概率方法及风险分析为工具的地下工程决策和风险分析系统。1999 年 Snel^[8]提出了一个包括列举主要因素清单、预防措施和额外措施的 IPB 风险管理模式,来控制复杂技术性地下工程设计施工过程中工期、造价和质量方面的风险。

2002 年 Clark^[8]采用风险指数的评估方法对地下交通线工程规划和初步设计阶段进行了各阶段的风险评估。2003 年 Woude^[8]对盾构隧道在初步设计和投标阶段进行了广泛的风险分析,并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。2004 年 McFest-Smith^[8]提出了由 15 个风险种类包含 33 个风险类型组成的 IMS 风险评价体系。

英国隧协和保险业协会于 2003 年联合发布了《英国隧道工程建设风险管理联合规范》^[3];国际隧道及地下空间协会 2004 年发布了风险管理的指导方法^[3];澳大利亚/新西兰 2004 年颁布了风险管理标准文献^[3];国际隧道工程保险集团(ITIG)于 2006 年发布了《隧道工程风险管理实践规程》^[3],这个实践规程是基于上述英国联合规范而编制的。

2006 年 Yoo^[9]研发了基于地理信息系统(geology information system, GIS)和人工智能(artificial intelligence, AI)的隧道风险管理信息系统。2008 年 Martinnelli^[10]从风险的角度优化了铁路隧道设计。2009 年 Holicky^[11]结合概率和风险理论对隧道施工措施进行了优选。

(2) 国内隧道风险管理研究进展

同国外隧道风险管理研究的进展相比,虽然风险管理和风险分析引入到我国比较晚,在隧道工程中应用也刚刚起步,但是自 20 世纪末隧道安全风险及其相关学科的研究已陆续开展。

毛儒^[12]是国内最早接触隧道风险理论的学者,他写了不少论文介绍发达国家隧道工程风险管理的动态和经验,简述风险管理的理念以及各项过程的具体操作方法。黄宏伟^[2,12]等在地下工程安全风险研究方面开展了大量的工作,如风险的接受准则、风险管理软件开发、工期风险、地层变异风险研究等。

2007 年吴贤国^[2]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概率和影响后果。2008 年易小明^[2]阐述了城市隧道下穿工程中环境风险、变形风险的控制要点。2008 年赵延喜^[2]提出了基于模糊概率的深埋隧洞岩爆风险评价模式。2008 年周建昆、2008 年周峰、2009 年王燕、安永林研究了隧道坍方的风险评估^[2]。2008

年王景春应用指数法评价了海底隧道的安全性^[2]。

2004年11月27日,中国土木工程学会隧道及地下工程分会风险管理专业委员会的正式成立以及2005年6月主办的全国地铁与地下工程技术风险管理研讨会推动了这一领域的快速发展。2007年建设部颁发了《地铁及地下工程建设风险管理指南》,同年铁道部也推行了《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》,标志着我国隧道风险管理正逐步走向稳步发展的道路。

综合分析以上国内外研究现状发现:虽然隧道工程风险管理起步较晚,却因其特有的生命力得到了各国学者的高度关注,已经取得了较多的阶段研究成果。但是隧道工程施工阶段的风险研究中,还存在以下问题^[2,4]。

1) 基于变形控制的风险评估研究较少。目前,隧道工程设计中传统的强度控制理论已逐渐让位于变形控制理论。施工变形控制,特别是近接建筑物的变形控制,是隧道近邻结构物施工安全评估及风险管理的重要内容,也是实施监测的重要依据。但是我国现在尚没有成熟的规范或行业标准可供参考,也没有一套行之有效的研究办法。现在虽有一些变形控制方面的文章,但是进一步结合变形控制的风险评估却很少见报道。

2) 结合地质预报、监控量测和数值计算的风险评估较少。风险管理起源于保险行业,在商业、保险等领域已有较完善的理论与评价体系,并有着广泛的应用实例,但是在隧道工程应用中绝对不能照搬。隧道工程的一大特点就是围岩地质条件的不确定性,而这可以通过超前地质预报、现场监控量测等手段而进一步判定,从而减少围岩不确定性的风险。隧道工程施工阶段的风险评估是在超前地质预报和围岩量测基础上进行的^[4],这也是用数据(定量)进行说话,用数据进行评估,但综合分析已有相关隧道风险的研究进展可知:关于结合地质预报和监测的风险评估方面的研究甚少。

《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》和《地铁及地下工程建设风险管理指南》中关于介绍的风险评价方法上,未提到数值分析方法,而数值分析却是隧道工程(可拓展到土木工程)常用的研究手段,可用于隧道施工安全分析、邻近结构物在隧道施工下的变形特性及安全性评估。从国内外研究文献综述中可知,基于数值模拟的隧道风险评估也很少涉及。

3) 风险评价定量化困难及可信度低。由于我国隧道风险研究起步晚,缺乏隧道风险管理案例的收集和统计,造成目前进行隧道风险分析时无历史资料可借鉴,因此只能靠专家或技术人员的经验,将定性分析结果凭经验进行分类,然后运用层次分析法或模糊综合评判法等方法将定性结果定量化,充其量只能称为半定量方法,评价结果也往往难令人信服^[12]。如隧道风险事故(事件)在没有发生之前,谁也不知道会有多少损失,谁也不知道其发生概率具体是多少,因为概率是基于众多统计而来的,在不知道多少概率发生的条件下,进行损失统计特别是事故前损失估

计则显得有些苍白;这不同于事故后损失,事故后损失进行统计即可。因此,真正的风险定量分析研究是否能够进行?如何进行?能进行到什么程度?这些问题还有待进行深层次的思考和研究。

4) 缺乏规范的安全风险管理体系。虽然,国内已经发布了一些指导性文件,但是目前国家对隧道工程施工阶段的安全风险管理还没有操作性较强的、具有一定强制意义的法规体系,因而风险管理在项目施工中的地位没有明确^[3]。工程预算中也没有列入风险管理费用,从而造成了风险管理投入不够,风险管理得不到应有重视的状况。这些因素使得国内隧道工程安全风险管理体系尚处于无序状态,表现为实施安全风险管理体系的内容和流程不完善、不规范。

1.2.2 隧道施工对地层变形的影响研究现状

随着隧道的开挖,地层变形不断发生变化^[13,14]:一般经历前期微小变形、变形急剧增大、缓慢变形三个阶段。诱发地层变位的基本原因^[14]是隧道施工引起的地层损失和周围围岩受扰动或受剪切破坏的重塑土的再固结。

地层损失^[14]是多种因素作用的结果:隧道开挖卸载时开挖面岩土体会向隧道内移动、隧道支护结构刚度偏低从而在围岩压力的作用下产生变形、支护结构未及时闭合造成围岩的挤入、隧道支护结构背后存在一定的空隙、隧道施工方法不当造成围岩失稳以及隧道结构的整体下沉等都会产生地层损失,并最终导致地层发生移动和变形。

固结沉降可分为主固结沉降和次固结沉降^[14]:主固结沉降为超孔隙水压力消散引起的土层压密,次固结沉降是由于土层骨架蠕变引起的剪切变形沉降。

目前,地层变形影响研究主要有 Peck 公式法、理论解析法、随机介质方法、数值模拟及神经网络、支持向量机(support vector machine)等系统预测方法。

(1) Peck 公式

1969 年 Peck 在墨西哥国际土力学地基基础会议上^[14],基于当时大量隧道开挖施工引起的地表沉降实测资料,提出了地表下沉的实用方法,即 Peck 公式(图1.8)

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1.1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_i}{2.5i} \quad (1.2)$$

式中: $S(x)$ ——距离隧道中心轴线为 x 处的地表沉降;

$S_{\max}$ ——隧道中心线处的地表最大沉降;

i ——沉降槽宽度系数,即隧道中心至反弯点的距离;

V_i ——隧道单位长度的地层损失。

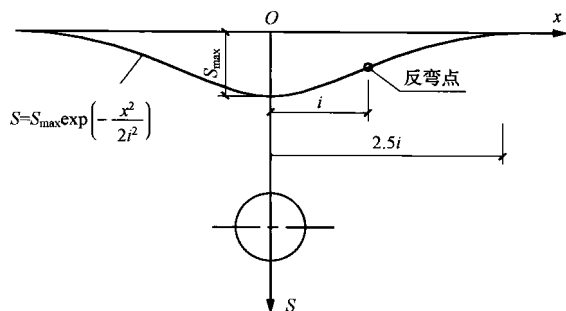


图 1.8 地表横向沉降槽

根据 Peck 公式可得隧道施工引起的水平位移分布、地表曲率和沉降槽等^[15], 如图 1.9 所示。从图中分析可以看出:

① 地表倾斜在隧道中心线处为 0, 随着与隧道中心轴线距离的增加, 倾斜逐渐增加, 在 $x = \pm i$ 最大, 随后逐渐减小直至为 0; 同时地表曲率在 $x = \pm i$ 处为 0, 在隧道中心线处凹曲率最大, 在 $\pm\sqrt{3}i$ 凸曲率最大。

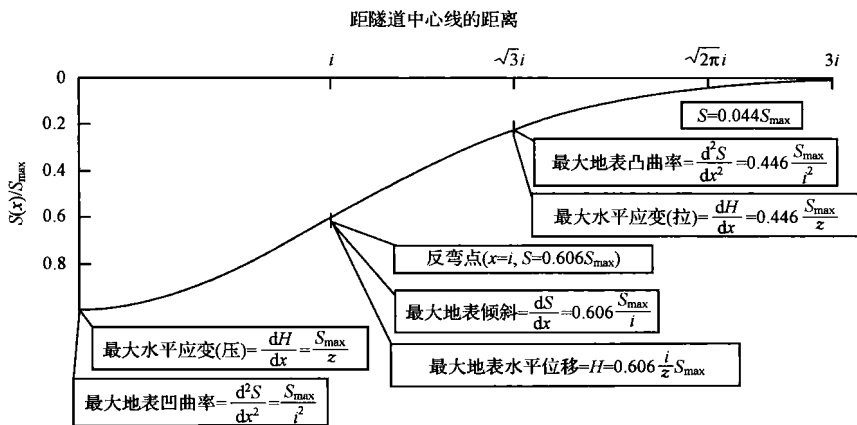


图 1.9 单孔隧道半地表横向沉降槽

② 隧道中心线两侧地表产生了指向隧道中心轴线方向的水平移动。在隧道中心线处水平位移等于 0, 随着与隧道中心线的距离的增加, 地表水平位移逐渐增大, 在 $x = \pm i$ 处, 地表水平位移达到最大置值, 随后, 地表水平位移逐渐减小直至趋近于 0。

③ 地表在 $(-i, i)$ 范围内, 地表发生压缩变形, 在隧道中心线上方地表产生最大的压缩变形, 在区域 $(-\infty, -i)$ 和 $(i, +\infty)$ 内地表产生水平拉伸变形, 在 $\pm\sqrt{3}i$ 处水平拉伸变形最大。