



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下道路隧道运营风险管理

胡群芳 叶永峰 黄宏伟 著



同济大学出版社

TONGJI UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION
国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下道路隧道运营风险管理

胡群芳 叶永峰 黄宏伟 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

上海市高校服务国家重大战略出版工程入选项目

图书在版编目(CIP)数据

城市地下道路隧道运营风险管理/胡群芳,叶永峰,黄宏伟著.--上海:

同济大学出版社,2014.12

(城市地下空间出版工程·防灾与安全系列)

ISBN 978-7-5608-5638-4

I. ①城… II. ①胡…②叶…③黄… III. ①城市隧道—运营管理—
风险管理 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 220328 号

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下道路隧道运营风险管理

胡群芳 叶永峰 黄宏伟 著

策 划: 杨宁霞 季 慧

责任编辑: 季 慧

助理编辑: 陆克丽霞

责任校对: 徐春莲

装帧设计: 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店

制 作 南京前锦排版服务有限公司

印 刷 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.75

字 数 386000

版 次 2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5638-4

定 价 98.00元



版权所有 侵权必究 印装问题 负责调换

内容提要

本书为国家“十二五”重点图书出版规划项目、国家出版基金资助项目、上海市高校服务国家重大战略出版工程入选项目。

全书围绕我国城市地下道路隧道运营安全与防灾问题,通过对国内外公路隧道运营事故收集调研与机理分析,系统阐述了城市地下道路隧道运营安全风险管理体系、安全风险接受准则、安全风险预警技术及运营风险应急救援与人员安全疏散等新理论、新技术。全书内容丰富,反映了当前城市地下道路隧道运营安全风险领域的新成果与新动态,并有助于加深对城市地下道路隧道运营安全风险管理的认识,推动相关基础理论的研究及其在工程实践中的应用。

本书可供从事城市地下道路隧道设计、管理等单位的工程技术人员以及高等学校土木工程专业的师生使用,也可供相关专业的科研和技术人员学习参考。

《城市地下空间出版工程·防灾与安全系列》编委会

学术顾问

叶可明 中国工程院院士
孙 钧 中国科学院院士
郑颖人 中国工程院院士
顾金才 中国工程院院士
蔡美峰 中国工程院院士

主任

钱七虎

副主任

朱合华 黄宏伟

编委(以姓氏笔画为序)

王怀忠 王明洋 叶永峰 闫治国 刘曙光 宋春明
陈 峰 陈之毅 胡群芳 钟桂辉 袁 勇 顾雷雨
赫 磊 蔡 浩 戴慎志

作者简介

胡群芳 工学博士,同济大学上海防灾救灾研究所所长助理、特聘研究员,同济大学副教授、硕士生导师,美国德州大学奥斯汀分校访问学者,中国土木工程学会工程风险与保险研究分会副秘书长、隧道及地下工程分会风险专业委员会副秘书长,美国 ASCE 岩土风险管理委员会和 GeosNet 协会等组织的成员。主要从事隧道及地下结构地层不确定性分析、工程风险分析与风险管理、城市灾害模拟与综合灾害管理等研究。研究成果获得上海市及其他省部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 2 项、三等奖 2 项。在国内外发表学术论文 50 余篇,近五年论文被 SCI、EI、ISTP 检索 16 篇,主持和参编国家标准和指南 3 部,获得国家专利 2 项,开发具有自主知识产权软件 4 项。

叶永峰 工学博士,上海市安全生产科学研究所工程师。主要从事土木工程风险分析、安全评价、预警管理、人员安全疏散等方面的研究工作,先后参与国家级、省部级科研项目十余项,在国内外期刊、会议上发表学术论文 10 篇。

黄宏伟 工学博士,同济大学土木工程学院副院长、教授、博士生导师,教育部长江学者特聘教授,“新世纪百千万人才工程”国家级人选,首批教育部新世纪优秀人才支持计划入选者,上海市优秀学科带头人,首批上海曙光学者,法国南特中央理工大学访问教授,国际土力学与岩土工程学会会员,美国 ASCE 岩土风险管理委员会委员,国际隧道协会委员,国际岩土安全网络组织核心成员,中国土木工程学会工程风险与保险研究分会理事长,中国岩石力学与工程学会常务理事,中国土木工程学会理事,中国土木工程学会隧道及地下工程分会常务理事,上海防灾救灾研究所风险评估研究室主任,国际及国内多家期刊编委。长期从事隧道及地下工程专业的教学和科研工作,研究方向为隧道及地下工程风险与灾害分析、动态反馈分析、隧道长期性态与养护技术等,围绕岩土及地下工程,在国内率先开展了工程风险分析理论与方法的研究,开辟了土木工程领域的工程风险学科新方向。

■ 总 序 ■

FOREWORD

国际隧道与地下空间协会指出,21世纪是人类走向地下空间的世纪。科学技术的飞速发展,城市居住人口迅猛增长,随之而来的城市中心可利用土地资源有限、能源紧缺、环境污染、交通拥堵等诸多影响城市可持续发展的问题,都使我国城市未来的发展趋向于对城市地下空间的开发利用。地下空间的开发利用是城市发展到一定阶段的产物,国外开发地下空间起步较早,自1863年伦敦地铁开通到现在已有150年。中国的城市地下空间开发利用源于20世纪50年代的人防工程,目前已步入快速发展阶段。当前,我国正处在城市化发展时期,城市的加速发展迫使人们对城市地下空间的开发利用步伐加快。无疑21世纪将是我国城市向纵深方向发展的时代,今后20年乃至更长的时间,将是中国城市地下空间开发建设和利用的高峰期。

地下空间是城市十分巨大而丰富的空间资源。它包含土地多重化利用的城市各种地下商业、停车库、地下仓储物流及人防工程,包含能大力缓解城市交通拥挤和减少环境污染的城市地下轨道交通和城市地下快速路隧道,包含作为城市生命线的各类管线和市政隧道,如城市防洪的地下水道、供水及电缆隧道等地下建筑空间。可以看到,城市地下空间的开发利用对城市紧缺土地的多重利用、有效改善地面交通、节约能源及改善环境污染起着重要作用。通过对地下空间的开发利用,人类能够享受到更多的蓝天白云、清新的空气和明媚的阳光,逐渐达到人与自然的和谐。

尽管地下空间具有恒温性、恒湿性、隐蔽性、隔热性等特点,但相对于地上空间,地下空间的开发和利用一般周期比较长、建设成本比较高、建成后其改造或改建的可能性比较小,因此对地下空间的开发利用在多方论证、谨慎决策的同时,必须要有完整的技术理论体系给予支持。同时,由于地下空间是修建在土体或岩石中的地下构筑物,具有隐蔽性特点,与地面联络通道有限,且其周围临近很多具有敏感性的各类建(构)筑物(如地铁、房屋、道路、管线等)。这些特点使得地下空间在开发和利用中,在缺乏充分的地质勘察、不当的设计和施工条件下,所引起的重大灾害事故时有发生。近年来,国内外在地下空间建设中的灾害事故(2004年新加坡地铁施工事故、2009年德国科隆地铁塌方、2003年上海地铁4号线事故、2008年杭州地铁建设事故等),以及运营中的火灾(2003年韩国大邱地铁火灾、2006年美国芝加哥地铁事故等)、断电(2011年上海地铁10号线追尾事故等)等造成的影响至今仍给社会带来极大的负面

效应。因此,在开发利用地下空间的过程中需要有深入的专业理论和技术方法来指导。在我国城市地下空间开发建设步入“快车道”的背景下,目前市场上的书籍还远远不能满足现阶段这方面的迫切需要,系统的、具有引领性的技术类丛书更感匮乏。

目前,城市地下空间开发亟待建立科学的风险控制体系和有针对性的监管办法,《城市地下空间出版工程》这套丛书着眼于国家未来的发展方向,按照城市地下空间资源安全开发利用与维护管理的全过程进行规划,借鉴国际、国内城市地下空间开发的研究成果并结合实际案例,以城市地下交通、地下市政公用、地下公共服务、地下防空防灾、地下仓储物流、地下工业生产、地下能源环保、地下文物保护等设施为对象,分别从地下空间开发利用的管理法规与投融资、资源评估与开发利用规划、城市地下空间设计、城市地下空间施工和城市地下空间的安全防灾与运营管理等多个方面进行组织策划,这些内容分而有深度、合而成系统,涵盖了目前地下空间开发利用的全套知识体系,其中不乏反映发达国家在这一领域的科研及工程应用成果,涉及国家相关法律法规的解读,设计施工理论和方法,灾害风险评估与预警以及智能化、综合信息等,以期成为对我国未来开发利用地下空间较为完整的理论指导体系。综上所述,丛书具有学术上、技术上的前瞻性和重大的工程实践意义。

本套丛书被列为“十二五”时期国家重点图书出版规划项目。丛书的理论研究成果来自国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)、“十一五”国家科技支撑计划、“十二五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金项目、上海市科委科技攻关项目、上海市科委科技创新行动计划等科研项目。同时,丛书的出版得到了国家出版基金的支持。

由于地下空间开发利用在我国的许多城市已经开始,而开发建设中的新情况、新问题也在不断出现,本丛书难以在有限时间内涵盖所有新情况与新问题,书中疏漏、不当之处难免,恳请广大读者不吝指正。



2014年6月

■ 前 言 ■

PREFACE

城市地下道路隧道作为地下立体交通方式之一,由于其在缓解交通压力,解决城市交通干线跨越江河湖海中遇到的困难,缩短道路线路总长度,降低对周围环境和人民生活、生活影响等方面具有明显的优势,在国内外城市交通建设中得到了广泛的重视与发展。目前,我国上海、南京和广州等城市均建成了多条地下交通隧道,上海正在建设全长 19.1 km 的北横通道工程,将通过建设地下道路隧道分流地面及高架交通,释放地上道路空间资源,为解决城市交通拥堵、均衡路网交通等创造条件。城市地下交通隧道与地面或高架线路相比,其最突出的问题之一就是道路隧道的运营安全风险问题。由于地下道路隧道结构设施复杂、通风条件限制、出入口数量少、疏散线路长,灾害或事故发生后破坏迅速、影响范围大,因此,一旦发生灾害或事故,短时间内往往会造成惨重的人员伤亡和重大的经济损失。近年来,国内外频发的道路隧道运营风险事故给城市地下道路隧道建设与运营管理提出了严峻的挑战,城市地下道路隧道运营安全风险已成为国内外政府管理部门以及科研人员关注的重大问题之一。

本书通过收集国内外大量的隧道运营事故案例,从隧道运营安全事故发生的诱因入手,对隧道事故发生的规律进行了统计分析,研究了可能导致事故发生的隧道结构因素、外界条件变化和运营车辆影响,系统讨论了隧道运营安全风险发生机理。基于国内外道路隧道运营管理体系分析和安全监控设施设置对比,从动态风险控制角度构建了城市地下道路隧道运营安全动态评价模型,并采用事故树和事件树对典型运营事故的发生原因及其影响进行了分析。建立了道路隧道运营安全风险事件的风险接受准则,包括基于事故后果的风险接受准则和基于实时监控指标如运营安全状态、CO 浓度、能见度等多态运营风险接受准则。考虑地下道路隧道运营中的预警因素和特征变化,提出了三阶段预警体系,包括瞬时预警、短期预警和长期预警,并建立了预警信息决策方法及发布体系。地下道路隧道工程运营中难免会发生意外事故或灾害,研究中结合道路隧道结构特征和运营功能要求,提出了隧道运营事故应急救援模式,结合典型事故工况建议了隧道运营应急救援疏散方案。针对隧道运营中的人员安全疏散问题,分析了火灾工况下隧道火灾变化及发展破坏影响,利用工程可靠性原理建立了基于风险的人员安全疏散对策模型与处置方案,为实现城市地下道路隧道突发灾害或事故下的科学高效救援提供技术支撑。本书附录详细列出了收集的 1949—2007 年来国内外发生的主要隧道事故案例,并对城市地下道路隧道运营风险动态评估指标与标准进行了补充介绍,相关内容可为

类似研究提供参考。

本书的研究成果得到了“十二五”国家科技支撑计划课题(编号:2012BAJ11B01)和国家高技术研究发展计划(863计划)(编号:2006AA04Z442)的资助支持。

在本书的组织和编写过程中,得到了上海市建设和交通委员会及黄浦江越江隧道建设运营管理相关单位等的大力支持和帮助,限于篇幅,不一一列出,在此谨表谢意。

感谢同济大学出版社对本书出版发行的大力支持以及所做的辛勤工作。

由于作者的才疏学浅,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请各位专家及同行批评指正。

著 者

目 录

CONTENTS

总序 前言

1	绪论	1
1.1	概述	2
1.2	公路隧道长度划分	4
1.3	相关研究现状及发展趋势	5
1.3.1	公路隧道运营安全风险研究	5
1.3.2	公路隧道运营安全评价研究	7
1.3.3	工程风险接受准则研究	11
1.3.4	公路隧道运营安全预警研究	12
1.3.5	人员安全疏散研究	12
1.4	本书主要研究内容	14
2	公路隧道运营事故发生机理	17
2.1	隧道运营事故数据库	18
2.2	隧道运营事故统计分析	19
2.2.1	运营事故趋势分析	19
2.2.2	运营事故年度分析	19
2.2.3	季节变化影响	21
2.2.4	工作日的影响	22
2.2.5	隧道长度影响	23
2.2.6	运营事故类型分析	25
2.2.7	车辆类型影响	27
2.2.8	隧道断面类型影响	30

2.2.9	道路隧道运营事故总体分析	31
2.3	隧道运营事故机理分析	32
2.3.1	运营事故致灾因素分析	33
2.3.2	基于人员伤亡的机理分析	40
2.3.3	基于经济损失的机理分析	41
2.3.4	基于隧道运营中断的机理分析	41
2.3.5	道路隧道运营事故分类	42
3	城市地下道路隧道运营安全风险	45
3.1	现有城市地下道路隧道运营管理体系分析	46
3.1.1	国内外道路隧道安全设施配置标准	46
3.1.2	国内外道路隧道运营安全管理对比	51
3.1.3	现有管理框架结构及工作原理	53
3.1.4	现有管理体系控制指标	53
3.1.5	运营安全动态管理体系框架	55
3.2	道路隧道运营安全动态评价模型	57
3.2.1	运营安全动态评价模型构建	57
3.2.2	评价指标体系	57
3.2.3	动态评价模型	58
3.2.4	动态评价系统程序开发	68
3.3	典型运营事故的事故树与事件树分析	70
3.3.1	典型运营事故的事故树分析	70
3.3.2	典型运营事故的事件树分析	77
4	城市地下道路隧道运营安全风险接受准则	81
4.1	风险接受准则类型	82
4.1.1	人员安全风险	82
4.1.2	经济风险	87
4.1.3	环境风险	88
4.1.4	综合风险分析方法	88
4.2	城市地下道路隧道运营安全风险接受准则标准	89
4.2.1	基于事故后果的风险接受准则	90
4.2.2	基于实时监测指标的运营瞬时安全状态风险接受准则	102

5	城市地下道路隧道运营安全风险预警	113
5.1	预警体系构建思路与框架	114
5.1.1	预警管理的基本原理与思想	114
5.1.2	预警管理体系的构建思路及基本系统构成	115
5.1.3	预警管理体系的系统分析与预测方法	117
5.2	长期预警体系分析	119
5.2.1	长期预警指标体系的建立	119
5.2.2	长期预警分析	120
5.2.3	基于长期预警信息的瞬时预警修正系数	121
5.3	短期预警体系分析	122
5.3.1	短期预警指标体系的建立	123
5.3.2	短期预警分析	126
5.3.3	基于短期预警信息的瞬时预警修正系数	126
5.4	瞬时预警体系分析	127
5.4.1	瞬时预警指标体系的建立	127
5.4.2	瞬时预警分析	129
5.4.3	瞬时预警结果的修正	133
5.5	预警信息决策分析	134
5.5.1	应急对策决策的基本问题	134
5.5.2	基于满意准则的运营事故应急对策决策分析	135
5.5.3	事故应急对策实施	139
5.6	预警信息发布体系	140
5.6.1	道路隧道运营安全预警标识的设计	140
5.6.2	预警信息的发布	140
6	城市地下道路隧道运营安全风险应急救援	145
6.1	道路隧道运营风险应急救援模式和方法	146
6.1.1	道路隧道运营风险应急救援基本原则	146
6.1.2	道路隧道运营风险应急救援主要内容	147
6.2	城市典型地下道路隧道运营风险应急救援与疏散	148
6.2.1	道路隧道应急救援体系	148
6.2.2	道路隧道内的救援组织	150
6.2.3	突发火灾等风险下隧道救援实施	151

7	城市地下道路隧道运营安全疏散及工程应用	155
7.1	工程概况与分析软件	156
7.1.1	工程概况	156
7.1.2	软件介绍	157
7.2	道路隧道火灾场景分析	157
7.3	道路隧道运营期人员安全疏散分析	159
7.3.1	人员疏散设计要求	159
7.3.2	人员疏散影响参数研究	162
7.4	基于风险的人员安全疏散对策与处置	180
7.4.1	人员安全疏散风险的计算	180
7.4.2	工程应用实例	181
7.4.3	安全疏散控制对策分析	185
7.4.4	火灾事故应急处理流程	187
附录 A	1949—2007 年隧道运营安全风险事故案例	189
附录 B	上海城市地下道路隧道运营监控系统现状调研	207
附录 C	城市地下道路隧道运营风险动态评价指标与标准	211
C.1	隧道健康度指标	212
C.1.1	衬砌裂缝的判定标准	212
C.1.2	渗漏水的判定标准	212
C.1.3	衬砌材质劣化的判定标准	213
C.1.4	衬砌背后空洞的判定标准	214
C.1.5	衬砌变形、移动、沉降的判定标准	215
C.1.6	衬砌起层、剥落的判定标准	215
C.2	设备完备性指标	216
C.3	交通特性指标	217
C.3.1	交通组成	217
C.3.2	交通量	218
C.3.3	车速	218
C.4	运营环境安全舒适性指标	218
C.4.1	路面状况综合评价指标	219
C.4.2	CO 浓度	219
C.4.3	能见度	220

C. 4. 4	亮度	221
C. 5	运营管理绩效性指标	222
C. 5. 1	隧道运营管理水平	222
C. 5. 2	驾驶人员安全行为水平	223
C. 6	自然灾害性指标	224
C. 6. 1	暴雨	224
C. 6. 2	地震	224
附录 D	城市地下道路隧道运营安全风险预警标识	227
D. 1	道路隧道运营风险标识图	228
D. 2	道路隧道运营风险分级标识	228
参考文献		229
索引		236



1 绪论

1.1 概述

自 20 世纪 80 年代后期,国际隧道协会(International Tunnelling Association, ITA)提出“大力发展地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议以来,地下空间开发利用作为解决人口、环境、资源三大难题的重大举措,在世界各国得到了积极的响应。城市地下交通隧道作为立体交通方式之一,不仅可以缓解交通压力,解决交通干线跨江越海受到的限制,而且可以缩短线路里程,降低对周围环境和人民生活、生活的影响,在国内外大型城市建设中得到了广泛重视。近十年来,我国的铁路隧道和公路隧道分别以每年约 300 km 和 150 km 建设速度在增长(郭陕云,2004;刘伟,2004;何川,2006)。从各类隧道的数量、规模和建设速度来看,我国已成为世界上隧道工程最多、最复杂、发展最快的国家(刘伟,2004;何川,2006)。据中华人民共和国交通部的统计数据,截止到 2008 年底,我国已建成公路隧道 5 426 座,总长度达 3 186.4 km*。其中特长隧道 120 座,总长度约 525.7 km;长隧道 743 座,总长度约 1 226.2 km(中华人民共和国交通部,2009)。各类地下交通隧道在提升国家交通路网的同时,城市地下道路隧道在城市交通中,尤其发挥了重要作用。就上海地区而言,自从上海市第一条道路隧道——打浦路隧道于 1970 年通车以来,已有 12 条黄浦江越江道路隧道、1 条跨越长江隧道等众多的通道工程投入运营,另外还有 8 条越江道路隧道正在规划中。表 1-1 中列出了截至 2010 年上海市已有的和规划中的城市道路隧道。

表 1-1 上海市城市道路隧道工程

编号	名称	修建时间/年	结构形式	设计时速/ (km·h ⁻¹)	通风型式	基本尺寸/m		
						外径	内径	长度
1	打浦路隧道	1965—1970	1 管 2 车道	40	全横向通风	10.00	8.80	2 736
2	延安东路隧道	1984—1995	2 管 4 车道	40	全横向通风+纵向通风	11.00	9.90	2 261
3	外环隧道	2000—2003	3 管 8 车道	80	纵向通风	9.30×43.00		2 883
4	大连路隧道	2001—2003	2 管 4 车道	40	纵向通风	11.00	10.04	2 500
5	复兴东路隧道	2001—2004	2 管 6 车道	40	纵向通风	11.00	10.04	2 785
6	翔殷路隧道	2003—2005	2 管 4 车道	80	纵向通风	11.36	10.40	2 600

* 数据来源于新华社通讯社,2002 年一篇名为《我国铁路公路隧道总长度居世界第一》的报道。