

轨道交通工程建设 安全管理

泉域环境下工程风险控制

弭彬 王建涛 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书根据济南特殊的工程水文地质情况,对济南轨道交通工程建设安全技术风险管控的经验进行总结,介绍了工程建设从勘察到竣工全过程的安全风险管理体系。

本书适合城市轨道交通工程、隧道及地下工程、地下空间工程等领域的管理及工程技术人员使用,也可作为复杂地层条件地下工程安全风险管理专业的授课教材。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通工程建设安全管理:泉域环境下工程风险控制/弭彬,王建涛著. —北京:清华大学出版社, 2022.12

ISBN 978-7-302-61247-6

I. ①轨… II. ①弭… ②王… III. ①城市轨道交通—铁路工程—安全管理—研究—济南 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 112190 号

责任编辑:刘一琳 王 华

封面设计:陈国熙

责任校对:赵丽敏

责任印制:曹婉颖

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市东方印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.25

字 数:565 千字

版 次:2022 年 12 月第 1 版

印 次:2022 年 12 月第 1 次印刷

定 价:118.00 元

产品编号:093978-01

著者委员会

主任：弭 彬 王建涛

主 审：马建勋 许 领 刘凤洲 李 虎 路林海 张骞之

副主任：弭 辉 刘德荣 石锦江 梁天乐 邱光明 秦 帅

主要著者（按姓氏拼音为序排列）

陈小科 邓伟明 丁 琦 郭 晨 郭建民 海 涛 韩 林 韩占成
侯杰山 胡莲生 胡卫广 黄惠轩 李 昂 李 超 李 春 李 罡
李 敬 李 伟 李 文 李江宁 李勤兴 李圣岩 李世才 梁芝军
林玉成 刘 颂 刘 艳 刘家海 刘瑞琪 刘啸天 刘耀东 刘迎展
鲁 涛 门燕青 齐晓明 商金华 石 柱 孙存存 孙华盛 孙立建
孙连勇 唐绍凯 王 磊 王 亮 王德超 王利平 王启民 王绍辉
王文文 王永亮 谢振鹏 邢慧堂 薛海儒 杨培盛 仪晓立 运乃建
张 程 张 冲 张 锟 张 曦 张加卫 张金磊 张同江 张文静
种记鑫 朱传刚

协作单位：

西安交通大学	湖北工业大学
清华大学出版社	山东省交通运输厅工程建设事务中心
中共山东省委机关政务保障中心	山东九建工程技术有限公司
济南轨道交通集团有限公司	济南城市发展集团有限公司
中铁一局集团有限公司	中铁二局集团有限公司
中铁三局集团有限公司	中铁四局集团有限公司
中铁十局集团有限公司	中铁十一局集团有限公司
中铁十四局集团有限公司	中铁十六局集团有限公司
中铁二十一局集团有限公司	中铁二十二局集团有限公司
中铁上海局集团有限公司	中国建筑第八工程局有限公司
山东育广工程咨询有限公司	山东正信招标有限责任公司
	广东九为工程安全科技股份有限公司

清华大学出版社

改革开放 40 多年来,我国的经济得到持续快速发展,其中很重要的标志就是城市化进程的急剧加快。改革开放之初,我国的城镇化率为 17.98%,而到 2020 年我国的城镇化率已达 60%,预计 2050 年可达 75%,这与我国基本实现现代化的目标相协调。与发达国家一样,城市化进程加快带来的交通拥堵、环境恶化等问题也正在我国各大中城市中出现,发达国家的经验表明,地下铁路的开发和利用是一条有效的解决途径。截至 2020 年年底,我国大陆地区共有 45 个城市开通城市轨道交通运营线路 244 条,运营总里程为 7969.7km;同时,轨道交通建设正在实施的城市 61 个,在建轨道交通线路总长为 7085.5km,而且有 65 个城市的轨道交通线网规划获批。一段时间内,城市轨道交通建设规模十分庞大,以济南为例,2020 年 10 月,轨道交通二期建设规划获批,总规模 159.6km。众所周知,城市轨道交通线路基本分布于主城区,在交通主干路和市政管网下方,工程水文地质及周边环境复杂,临近大量市政管线、道路、铁路、桥梁、建筑物等,风险极高,社会关注度大。因此,轨道交通工程建设必须在已有施工安全管理基础上,结合信息化等先进科技手段,建立健全工程安全风险技术管理体系。

济南轨道交通集团自成立后就组织开展了保泉工作、安全风险管控体系建设、安全管控信息化系统研究与应用等科研项目,结合国家、山东省、济南市下发的关于“双体系”建设的要求和济南特殊的保泉要求,采用物联网、移动互联网、人工智能、大数据和云计算等技术,建立健全了轨道交通工程建设安全风险管理体系。经过一段时间的推广及应用,取得良好的效果,也积累了丰富的经验和作法。

本书分为安全风险管理体系研究理论及现状、泉水地理与轨道交通、泉域安全风险管理体系总论、安全风险控制技术、安全风险管理体系、信息化系统建设、安全风险管控案例七章。其中,安全风险管理体系研究理论及现状介绍了风险管理体系的国内外背景、相关理论知识和轨道交通风险工程特点、研究现状;泉水地理与轨道交通介绍了泉水的地质构造和地下水环境、济南轨道交通复杂多变的地质、济南建设轨道交通面临的挑战;泉域安全风险管理体系总论规定了工程建设各阶段、各单位的安全风险管理体系目标、内容及程序;安全风险控制技术由 8 个技术指南构成,从技术控制上对风险管理体系提出了指导;安全风险管理体系包括 10 个管理办法,对工程建设全过程的风险管理体系提出了明确的要求;信息化系统建设介绍了四维地质信息平台、安全管控中心建设、安全风险管控等系统以及系统使用管理办法,发挥了互联网、即时通信等在安全风险管控方面的作用;安全风险管控案例介绍了 2 个土建工程安全风险管控案例。

本书由弭彬、王建涛著,撰写过程中得到了各协作单位的大力支持。由于作者的水平和时间有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者不吝赐教。

作 者

2022 年 9 月

清华大学出版社

第 1 章	安全风险管理研究理论及现状	1
1.1	绪论	1
1.1.1	综述	1
1.1.2	国外背景	1
1.1.3	国内背景	2
1.1.4	安全风险管理国内外研究现状与发展	4
1.2	工程项目安全风险管理理论	5
1.2.1	风险的概念与特征	5
1.2.2	风险的性质和分类	6
1.2.3	风险分析	7
1.2.4	风险分析案例	8
1.3	轨道交通土建工程风险分析	12
1.3.1	工程自身风险	12
1.3.2	周边环境风险	13
1.3.3	复杂工程水文地质风险	13
1.4	轨道交通其他工程风险分析与对策	13
1.4.1	总体分析	13
1.4.2	设备系统施工安全风险管理	14
1.4.3	设备系统功能安全风险管理	17
1.4.4	各设备系统安全风险管理	19
1.5	轨道交通工程安全风险管理	41
1.5.1	轨道交通工程安全风险管理实施意义	41
1.5.2	轨道交通工程安全风险管理现状	42
1.5.3	轨道交通工程安全风险管理存在的问题	43
第 2 章	泉水地理与轨道交通	45
2.1	泉水概论	45
2.1.1	济南泉水文化	45
2.1.2	济南泉水成因的探索	46
2.1.3	泉水断流主要原因	48
2.1.4	泉水保护探索和实践	49
2.2	泉城地理	49

2.2.1	地形地貌	49
2.2.2	地质条件	51
2.3	泉域地下水	55
2.3.1	泉域的概念	55
2.3.2	泉域的界定	55
2.3.3	泉水保护研究历程	56
2.4	泉域轨道交通	57
2.4.1	建设轨道交通的必要性	57
2.4.2	复杂多变的泉域轨道交通地质	58
2.4.3	泉域建设轨道交通面临的挑战	67
2.4.4	一波三折的轨道交通上马路	68
第3章	泉域安全风险管理的总论	70
3.1	安全风险管理的理念	70
3.2	安全管理组织机构及职责	71
3.3	规划及可行性研究阶段的安全风险管理	73
3.3.1	规划阶段的安全风险管理	73
3.3.2	可行性研究阶段的安全风险管理	76
3.4	勘察及周边环境调查的安全风险管理	76
3.4.1	岩土工程勘察	76
3.4.2	周边环境调查	78
3.5	总体设计阶段的安全风险管理	80
3.6	初步设计阶段的安全风险管理	81
3.7	施工图设计阶段的安全风险管理	83
3.8	施工阶段的安全风险管理	84
3.9	工后阶段的安全风险管理	90
第4章	安全风险控制技术	92
4.1	保泉技术	92
4.1.1	勘察管理及监测措施	92
4.1.2	设计措施	92
4.1.3	封闭降水+原位回灌	93
4.1.4	海绵城市	99
4.2	环境调查技术	99
4.2.1	总则	99
4.2.2	基本规定	99
4.2.3	初步调查	100
4.2.4	详细调查	101
4.2.5	管线初查	103

4.2.6	管线详查	104
4.2.7	重点环境现状检测	105
4.2.8	施工阶段环境核查	105
4.2.9	成果分析及管理	106
4.3	环境安全风险评估技术	106
4.3.1	总则	106
4.3.2	基本规定	107
4.3.3	组织机构与职责	107
4.3.4	工前评估	107
4.3.5	施工过程评估	109
4.3.6	工后评估	110
4.4	建设工程监测技术	111
4.4.1	总则	111
4.4.2	基本规定	111
4.4.3	监测项目及要求	112
4.4.4	监测点布设原则	115
4.4.5	监测方法及技术要求	122
4.4.6	监测点布设与保护	128
4.4.7	监测点编号原则	131
4.4.8	监测频率与周期	134
4.4.9	监测仪器设备	136
4.4.10	测点埋设标准化	136
4.5	浅埋暗挖施工安全控制技术	140
4.5.1	总则	140
4.5.2	施工准备	140
4.5.3	施工方法	141
4.5.4	辅助施工措施	145
4.5.5	初期支护	150
4.5.6	二次衬砌	152
4.5.7	防排水	154
4.5.8	超前地质预报	154
4.6	地层超前预加固施工技术	158
4.6.1	总则	158
4.6.2	基本规定	158
4.6.3	超前预加固方案选择	159
4.6.4	超前预加固技术要点	159
4.7	地下水控制技术	170
4.7.1	总则	170
4.7.2	基本规定	170

4.7.3	地下水控制方案选择	172
4.7.4	降水设计技术要点	172
4.7.5	止水设计技术要点	177
4.7.6	降水施工技术要点	181
4.7.7	止水施工技术要点	183
4.7.8	后期处理	190
4.7.9	地下水保护应急预案	190
4.8	风险工程分级与设计技术	191
4.8.1	总则	191
4.8.2	风险工程分级的主要原则	191
4.8.3	自身风险工程分级标准	192
4.8.4	环境风险工程分级标准	193
第5章	安全风险管理的	238
5.1	岩土工程勘察管理	238
5.1.1	总则	238
5.1.2	职责划分	238
5.1.3	管理流程	239
5.1.4	质量管理	240
5.1.5	安全管理	241
5.1.6	文明施工管理	241
5.1.7	进度管理	241
5.1.8	投资管理	242
5.1.9	成果管理	242
5.1.10	考核管理	242
5.2	建设工程监测管理	243
5.2.1	总则	243
5.2.2	术语	243
5.2.3	职责与权限	243
5.2.4	工作程序及要求	245
5.3	建设工程安全巡检管理	250
5.3.1	总则	250
5.3.2	术语	250
5.3.3	职责与权限	250
5.3.4	工作程序及要求	251
5.4	建设工程预警及安全风险状态评价管理	254
5.4.1	总则	254
5.4.2	组织机构及职责	254
5.4.3	工作程序及要求	255

5.5	建设工程专家巡检活动管理	258
5.5.1	总则	258
5.5.2	组织与职责	259
5.5.3	专家巡检准备	259
5.5.4	专家巡检	260
5.5.5	巡检成果及意见落实	260
5.6	建设工程安全风险考核管理	260
5.6.1	总则	260
5.6.2	术语	261
5.6.3	组织机构及职责	261
5.6.4	安全风险检查	261
5.6.5	违约管理	262
5.6.6	考核排名	264
5.7	盾构施工管理	264
5.7.1	编制原则	264
5.7.2	盾构设备管理	264
5.7.3	人员及组织机构建设	266
5.7.4	盾构施工过程管理	267
5.7.5	施工安全管理	274
5.7.6	施工质量管理	276
5.7.7	施工量测管理	276
5.7.8	盾构信息管理	277
5.7.9	应急处置管理	277
5.7.10	考评	277
5.8	建设工程施工准备期风险管理	277
5.8.1	总则	277
5.8.2	职责与权限	278
5.8.3	工作程序及要求	279
5.9	重大环境风险施工技术方案论证管理	281
5.9.1	总则	281
5.9.2	组织机构及职责	282
5.9.3	方案编制	282
5.9.4	方案审核	282
5.9.5	方案论证	283
5.9.6	重大环境风险管理	283
5.10	关键节点施工前条件核查管理	283
5.10.1	总则	283
5.10.2	核查职责	284
5.10.3	核查程序及标准	285

5.10.4	核查内容	286
5.10.5	监督检查及处罚	287
第6章	信息化系统建设	288
6.1	四维地质信息平台	288
6.1.1	建立水文地质动态监测网	288
6.1.2	四维地质信息平台	288
6.2	安全管控中心	289
6.2.1	安全管控中心功能	290
6.2.2	安全管控中心应用要求与功能	290
6.2.3	安全管控中心建设	291
6.3	安全风险管控系统	297
6.3.1	系统概况	297
6.3.2	系统功能	297
6.3.3	系统构成及使用	299
6.4	盾构远程监控系统	304
6.4.1	系统概况	304
6.4.2	系统功能	305
6.4.3	系统构成及使用	306
6.5	视频监控系统	309
6.5.1	系统概况	309
6.5.2	系统功能	309
6.6	建设工程视频监控管理	310
6.6.1	总则	310
6.6.2	管理职责	310
6.6.3	系统建设	312
6.6.4	系统使用	317
6.6.5	考评	317
6.7	安全管控信息化系统管理	318
6.7.1	总则	318
6.7.2	组织机构及职责	318
6.7.3	安全风险管理	318
6.7.4	安全风险监控信息报送要求	319
6.7.5	安全风险预警信息报送要求	320
6.7.6	安全风险基础资料报送要求	320
6.7.7	安全风险总结报告报送要求	321
6.7.8	设计资料报送要求	321
6.7.9	盾构资料报送要求	321
6.7.10	安全风险其他报告报送要求	322

6.7.11	人员设备信息报送	322
6.7.12	文明施工信息报送	322
6.7.13	质量管理信息报送	322
6.7.14	应急管理信息报送	323
6.7.15	考核	323
6.8	安全管控信息化系统推广应用对策	323
6.8.1	行业应用现状	323
6.8.2	推广应用对策	324
第7章	安全风险管控案例	325
7.1	4号线小高庄站明挖基坑施工	325
7.1.1	工程简介	325
7.1.2	地理位置与环境	326
7.1.3	围护结构及支撑体系形式	326
7.1.4	工程水文地质条件	326
7.1.5	工程重难点分析及对策	327
7.1.6	实施过程风险管控	327
7.1.7	风险监测	341
7.1.8	风险巡检	343
7.1.9	特殊情况下频率调整原则	344
7.2	3号线西周家庄站-工业北路站盾构区间下穿铁路施工	344
7.2.1	工程简介	344
7.2.2	地质概况	344
7.2.3	水文条件	346
7.2.4	盾构隧道与既有线路位置关系	346
7.2.5	现场周边环境调查及既有设备技术数据	348
7.2.6	隔离桩加固施工	348
7.2.7	盾构施工	350
7.2.8	施工监测	353
7.2.9	施工注意事项	353
	参考文献	355

清华大学出版社

1.1 绪论

1.1.1 综述

经济的飞速增长和城市化进程的不断推进给人们带来了更多的出行需要,人口正在持续快速地向城市集中,导致人口的增长与资源、环境的协调发展失衡,出现了交通拥堵严重、环境急剧恶化及城市建设用地资源紧张等问题。为了建设集约型社会,实现可持续发展,有效解决城市交通拥挤状况,改善城市环境,充分利用地上、地下的多层次空间成为未来城市发展轨道交通的一种趋势,全国大中城市掀起了轨道交通建设热潮,同时济南也迎来了城市轨道交通快速发展的时期。安全、便捷、协调、高效、有序的城市轨道交通网络化运营,是促进城市未来经济持续发展、城市功能不断完善的有力手段。

1.1.2 国外背景

随着经济的发展及城市的日渐扩大化,城市人口的增加给城市交通带来的压力越来越明显,交通堵塞问题已成为制约城市经济发展的瓶颈,然而城市化的发展绝不可以被交通压力所约束,所以,与传统的地上交通相对应的地下交通就成为缓解交通压力的新渠道。地铁单向运量每小时4万~6万人次,传统公交车、电车每小时运量仅1万人次,地铁交通凭借其大运量、安全、快捷、准时、方便、舒适等诸多优势,引起各国政府对其发展的重视,目前已逐步成为解决城市交通拥挤问题的重要手段。同时地铁运输舒适、准时、快捷、占地少、环保、节能、安全,地铁交通所到之处,交通压力缓减、楼宇兴旺、土地增值、人口增加,居住、产业、文化、社区等功能迅速形成,对解决城市交通堵塞、改变城市布局、实现城市环境和交通综合治理、引导各国城市走可持续发展之路起到很大作用。

从1863年英国伦敦建成世界上第一条城市地铁开始,国外地铁的发展已经历了相当长的时间,至20世纪末,地铁建造总长度超过5500km,有效地保证了世界大城市的大规模乘客运输。进入20世纪20年代以来,世界各国由于城市化进程加快、城市用地紧张、基础设施落后以及环境恶化等问题日渐突出,为解决这些问题,一些发达国家开始大规模地利用城市地下空间,特别是欧洲各国、美国和日本。日本东京首条地下高速路“东京中央环状新宿

线”于 2007 年 3 月开通后,经过池袋、新宿和涩谷三个重要商业区,不仅大大缩短了通行时间,而且还有效缓解了市中心地区的交通拥挤,减轻了市内环境污染问题;巴黎的地下机动车交通系统,在巴黎构筑两环加放射的地下道路网,可解决机动车在城市内部的拥堵问题。

由于地铁施工环境复杂,工艺繁杂,安全风险和各种突发事件都会酿成社会公共安全问题。比较典型的有:

(1) 2004 年 4 月 21 日,位于新加坡黄金地带的购物中心黄金坊(Golden Mile Complex)后面、尼浩大道旁的地铁环线施工现场发生坍塌事故,塌方面积约有一个足球场大小,造成 1 人死亡、3 人受伤、3 人失踪。经调查,事故原因是土质松软导致尼浩大道附近正在施工中的地铁环线地下支架倒塌,造成公路坍塌。

(2) 2007 年 1 月 15 日,巴西圣保罗地铁 4 号线皮涅罗斯(Pinheiros)车站约 40m 长的新奥法隧洞及邻近的竖井基坑倒塌,7 名不幸的遇难者从地面坠落,并被深埋在坍塌的岩石和土壤下死亡。原因是勘察成果不精确,8704 孔位没有揭露岩脊,未能考虑岩石不同风化程度带来的危害。

(3) 德国拉施塔特铁路是全德最为繁忙的线路之一,每天约有 200 列火车经过。在拉施塔特铁路的下方是一段施工中的铁路隧道,这条隧道为长 4270m 的双管隧道,建设成本约 3.12 亿欧元。盾构隧道的直径为 10.97m,最大深度 19m,穿过疏松沙土层和砾石沉积层,距离地面轨线最小仅 4m。工程不仅使用了盾构技术,还采用了明挖法和暗埋法,并使用钢板桩、连续墙、喷射混凝土、水下浇筑混凝土、冻结法等技术进行地基加固。在盾构机穿凿约 5m 覆土区域时,建设方将地面进行冻结,冻结长度约 290m。然而,2017 年 8 月 12 日午时,隧道中涌入大量地下水,且地上铁轨出现下陷变形,火车运营被迫停止,直接造成约 1200 万欧元/日的损失。自事故发生后,乘客必须换乘大巴以继续行程,因此造成了地面大范围的交通堵塞。德国顶尖理工科大学卡尔斯鲁厄理工学院(Karlsruher Institut für Technologie)铁道技术专业的教授埃伯哈德·霍内克(Eberhard Hohnacker)在接受媒体采访时表示,隧道之所以塌陷很有可能是建造方出于成本考量,在施工中未使用大型钢梁的原因。但建造方德铁方面却不接受这一观点,并且在隧道事故点,使用 10 500m³ 的混凝土,将内有价值 1800 万欧元海瑞克加气泥水平衡盾构机的隧道进行了填埋。随后,项目方公布调查结果显示,轨道下方隧道内 7 块厚 500mm、长 2m 的衬砌环出现了位移,继而造成空隙,导致水土渗入。另有言论认为,事故原因是当时的高温与暴雨天气造成冻结失效,或盾构超挖。

因此,分析地铁施工过程中各类事故的风险因素,制定预防事故相关对策以及突发事件后的救援措施,确保地铁建设的顺利进行,具有十分重要的意义。

1.1.3 国内背景

改革开放 40 多年来,我国的经济得到了持续快速的发展,其中很重要的标志就是城市化进程的急剧加快。改革开放之初,我国的城镇化率为 17.98%,而 40 年后的 2020 年已达 60%。据预测,到 2025 年我国的城镇化率将达 65.5%,约到 2050 年将达 75%,逼近城镇化率 85% 的峰值饱和度,进入发达国家的行列,这与我国基本实现现代化的目标是相协调的。

同发达国家一样,城市化进程加快带来的交通拥堵、环境恶化等问题也正在我国各大中城市出现,发达国家的经验表明,地下铁道的开发和利用是一条有效的解决途径。

中国城市轨道交通建设始于1965年开通的北京地铁1号线,此后中国先后出现两次城市轨道交通建设高潮,且批准建设的项目基本集中在北京、上海、广州三地。回顾21世纪初,全国仅有4城市共7条轨道交通线路,总里程146km。从2003年至今,中国城市轨道交通建设已经步入全面快速发展期,尤其是2008年以后,我国大型城市加快了城市轨道交通建设。2019年我国新增城市轨道交通运营线路26条,累计达211条。截至2021年4月,全国(不含港澳台)共有45个城市开通城轨交通运营线路244条,运营线路总长度达7085.5km。

就济南而言,目前已开通1号线(R1线)、2号线(R2线一期工程)和3号线(R3线一期工程)三条市域快线,线路总长84.1km,设站43座,总投资500.96亿元人民币。二轮建设规划已批复,包含3号线二期、4号线、6号线、7号线一期、8号线、9号线一期等6个项目,总规模159.6km,总投资约1118.1亿元人民币,济南将面临点多、线长、面广、体大的轨道交通网络化建设形势。济南市轨道交通第二轮建设规划图见图1-1。



图 1-1 济南市轨道交通第二轮建设规划

轨道交通工程是一个规模巨大、专业繁多、技术复杂、参建方多、工期紧张、施工点多、自身投资大的系统工程,建设管理面临的人的不安全行为和物的不安全状态以及管理上的缺陷等,风险因素更加复杂、不可预测、难以控制,加之各地对工程建设安全风险管理认知不统一、投入不到位、管理不科学,国内进行轨道交通建设的城市几乎均发生过安全事故。其中,影响较大的包括2003年7月上海地铁4号线董家渡越江隧道涌水坍塌事故、2005年11月北京地铁10号线熊猫环岛车站基坑坍塌事故、2008年11月杭州地铁1号线湘湖站基坑坍塌事故、2018年2月佛山地铁2号线一期工程湖涌站至绿岛湖站盾构区间透水坍塌重大事故、2019年5月青岛地铁4号线轨道交通工程静港路站至沙子口站区间较大涌水突泥灾害事故等(表1-1)。

表 1-1 近年来国内城市轨道交通工程建设事故一览表

时 间	地 点	事 故 后 果
2003 年 7 月	上海地铁 4 号线涌水坍塌事故	造成 3 幢建筑物严重倾斜,中山南路 847 号 8 层楼房主楼裙房部分倒塌。黄浦江防汛墙由裂缝、沉降演变至塌陷,区间隧道由渗水、进水发展为结构损坏,附近地面也出现不同程度的裂缝、沉降,并发生了防汛墙围堰管涌等险情。造成直接经济损失约为 1.5 亿元人民币
2005 年 11 月	北京地铁 10 号线熊猫环岛车站基坑坍塌事故	事故造成车站基坑部分坍塌,面积超过 400m ² ,工地内多条污水、自来水管线断裂或弯曲,燃气管线外露,多根通信电缆断开
2008 年 11 月	杭州地铁 1 号线湘湖站基坑坍塌事故	事故导致基坑大面积坍塌,造成 21 人死亡、24 人受伤,直接经济损失 4961 万元人民币
2010 年 7 月	北京地铁 15 号顺义站基坑支撑坠落事故	基坑内作业的 8 名工人被头顶上方突然脱落的钢支撑砸伤;2 名工人失踪,后证实死亡
2011 年 5 月	天津地铁 2 号线建国道—天津站区间突泥涌水导致盾构机被埋事故	盾构机螺旋机观察孔突砂涌水,导致地面塌陷,致使左右线隧道均封堵回填,区间左右线重新改线施工
2012 年 6 月	北京地铁 10 号线二期角门东站水淹事故	2 号出入口及 1 号风道区域基坑北侧管线渗漏,坑外土体出现空洞引起地表大面积塌陷
2018 年 2 月	佛山地铁 2 号线一期工程湖涌站至绿岛湖站盾构区间透水坍塌重大事故	隧道及路面坍塌,造成 11 人死亡、1 人失踪、8 人受伤,直接经济损失约 5323.8 万元人民币
2019 年 5 月	青岛地铁 4 号线轨道交通工程静港路站至沙子口站区间较大涌水突泥灾害事故	左线发生涌水突泥,造成现场施工人员 5 人死亡、3 人受伤,直接经济损失 785 万元人民币
2019 年 7 月	青岛地铁 1 号线开封路站至胜利桥站区间轨道交通工程一般坍塌事故	造成 1 人死亡
2019 年 12 月	广州市在建轨道交通 11 号线沙河站施工区域地面塌陷事故	3 人遇难

1.1.4 安全风险管理国内外研究现状与发展

20 世纪 30 年代后,随着一大批新工艺、新技术、新设备、新能源等在工业中的应用,造成了各工业事故频发的形势。1931 年,美国著名的安全工程师海因里希通过分析工伤事故的概率,为保险公司的经营提出了海因里希法则,使人们开始考虑如何通过风险管理,减少事故的风险源,避免潜在隐患和事故的发生。20 世纪 60 年代后,随着安全管理行业与保险业的发展,安全风险管理在西方发达国家逐渐形成系统学科,出现了诸多风险管理类的专著和期刊。

进入 21 世纪,国外在工程项目安全风险管理领域进一步细分,如在体系建设方面,新西兰出版了《风险管理手册》,美国项目管理协会提出了风险管理体系建立和运行理论;在分级研究方面,斯特克(Sturk)提出工程建设分析方法;在信息化研究方面,费奥纳(Fiona)等对风险监控系统的开发进行了研究,2006 年 GeoDATA 公司推出了风险管理信息平台。

改革开放后,我国经济高速发展。很多外商将西方的安全风险管理理论引入我国的大型项目建设,我国也逐渐意识到项目安全风险管理的重要性,诸多专家、学者也投入安全风险管理理论研究工作中,国内安全风险管理迎来了飞速发展时期。陈志超等针对交通行业主管部门的管理模式和业务特点,基于“互联网+”技术构建了集成“十大”应用系统的交通工程智慧监管平台,方便公众服务及政府监督业务管理。北京市轨道交通建设管理有限公司于2008年10月初步建立并推广工程建设安全风险管理体系,研发了安全风险信息化管理平台;在国内率先应用贯穿地铁建设(地下工程)土建实施全过程(勘察→设计→施工)的安全风险技术管理体系及安全风险信息管理信息平台,出版了《北京轨道交通工程安全风险管理体系》。2016年1月,国务院全国安全生产电视电话会议明确要求,要在高危行业领域推行风险分级管控和隐患排查治理双重预防性工作机制。2021年5月6日国务院安全生产委员会办公室印发《关于加强城市轨道交通安全工作的紧急通知》,要求有效防范和化解重大安全风险。2018年于鑫结合北京轨道交通工程建设发展历程及安全监控中心建设,开展了基于网格化的轨道工程建设安全风险管理模式研究,将轨道交通工程建设过程中涉及的多方面管理系统相连接,高效、实时地传递数据,进行全方位管理。程波等开展了轨道交通建设隐患排查治理系统的设计研究,为城市轨道交通工程安全管理提供技术保障。耿敏等着重介绍了城市轨道交通安全事故隐患排查信息化技术的内容,提出了隐患排查治理信息化建设在公司安全质量体系建设中的重要核心作用。

1.2 工程项目安全风险管理理论

1.2.1 风险的概念与特征

人类通过实践活动对风险的认识与理解不断地加深和发展,人类从事某项活动总是有多种行动方案,不同的行动方案所蕴含的风险是不同的,其带来的结果也不同,人们总是希望选择最优的行动方案来获得一个最好的结果,达到趋利避害的目的。

人们对风险研究由来已久,目前已存在多种定义。按照传统的理解,风险总是与灾害或损失联系在一起的,风险的本质是有害的或是不利的。例如,英国风险管理学会(Institute of Risk Management, IRM)将风险定义为“不利结果出现或不幸事件发生的机会”。此外,一些学者对风险有多种定义,典型的如:风险是意外结果出现的概率;风险是事件出现差错并影响工作(任务)完成的可能性;风险是特定威胁发生的概率或频率以及后果的严重性;风险是影响工作(任务)成功完成的高概率事件;风险是因采取特定活动所涉及的可变性导致经济、财务损失、身体伤害或伤亡等的可能性。

不同的行业,风险也有着不同的定义。例如,在保险行业,风险被定义为可保险以规避事故或损失的项目或条款,它表明承担保险责任的保险公司存在损失机会;在管理术语中,风险被视为变化或不确定性;在加工工业特别是化学工业中,风险指活载、泄漏、爆炸、人员伤亡、财产损失、环境损害、经济损失等灾害事件。

以上定义被称为狭义的风险,只反映风险的一个方面,即风险是有害的和不利,给项目带来威胁。而风险的另一方面,即风险也可能是有利的和可以利用的,能给项目带来机会,被称为广义的风险。项目风险可能带来损失,但也可能带来收益,项目环境和条件的多

变,以及项目参与方认知的缺陷,使项目最终结果不符合项目利益相关者的期望,从而给利益相关者带来损失或利润的可能性。越来越多的国际性项目管理组织开始接受“风险是中性的”这一概念。

英国项目管理协会(Association for Project Management, APM)将“风险”定义为“对项目目标产生影响的一个或若干个不确定事件”,英国土木工程师学会(Institution of Civil Engineers, ICE)更明确定义“风险是一种将影响目标实现的不利威胁或有利机会”。2009年11月15日,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)召开会议,130多个国家代表经过4年多的讨论,制定了ISO 31000:2009《风险管理——原则与指南》标准,“风险”被定义为“某一事件发生的概率和其后果的组合,体现为不确定性对目标的影响”。

概括起来,广义的风险可以定义为未来变化偏离预期的可能性以及其对目标产生影响的大小。其特征包括:

- (1) 风险是中性的,既可能产生危害,也可能是有利的;
- (2) 风险的大小与变动发生的可能性有关,也与变动发生后对项目影响的大小有关。变动出现的可能性越大,变动出现后对目标的影响越大,风险就越高。

1.2.2 风险的性质和分类

1. 风险的性质

(1) 客观性。风险是客观存在的,无论是自然现象中地震、洪水,还是现实社会中的矛盾、冲突等,不可能根除,只能采取措施降低其对工程项目的不利影响。随着社会发展和科技进步,人们对自然界和社会的认识逐步加深,对风险的认识也逐步提高,但仍然存在大量的风险。

(2) 可变性。风险可能发生,造成损失甚至重大损失,也可能不发生。风险是否发生,风险事件的后果如何都是难以确定的,但是可以通过历史数据和经验,对风险发生的可能性和后果进行一定的分析预测。

(3) 阶段性。工程项目的不同阶段存在的主要风险是不同的,是因时而变,不是一成不变的。

(4) 多样性。依据行业和项目不同具有特殊性,必须结合行业特征和不同的结果来识别风险。

(5) 相对性。项目不同的风险管理主体可能会有不同的风险,而且同一风险因素对不同主体的影响是不同的,甚至是相反的;如工程风险对业主而言可能产生不利后果,而对于保险公司而言,正是工程风险的存在才使保险公司有了通过工程保险而获利的机会。

2. 风险的分类

基于不同的分类标准,风险可以有多种划分,表1-2为工程项目风险分类。

工程项目可能有各种各样的风险,从不同的角度出发可以进行不同的分类,但有些分类会有交叉。按系统分,有个体风险和系统风险;按阶段分,有前期阶段风险和实施阶段风险;按性质分,有政治风险、经济风险、财务风险、技术风险和社会风险等;按内外因素分,有内在风险和外在风险;按控制能力分,有可控风险和不可控风险等。对于轨道交通建设项目,项目风险分类主要包括按发生概率分类、按后果严重程度分类、按引发的原因分类、按

造成的结果分类、按发生的对象分类、按关联程度分类等。

表 1-2 工程项目风险分类

分类方法	风险类型	特点
按风险来源	自然风险	自然灾害、事故造成的人员、财产伤害或损失
	非自然风险(人为风险)	人为因素而造成的人员、财产伤害或损失
按风险事件主体的承受能力	可承受风险	风险的影响在风险事件主体的承受范围内
	不可承受风险	风险的影响超出了风险事件主体的承受范围
按技术因素	技术风险	技术进步或不成熟等原因造成的风险
	非技术风险	非技术原因带来的风险,如管理风险等
按独立性	独立风险	风险独立发生
	非独立风险	风险依附于其他风险而发生
按风险的可管理性	可管理风险	可以通过购买保险等方式来控制风险的影响
	不可管理风险	不能通过购买保险等方式来控制风险的影响
按风险的边界划分	内部风险	风险发生在风险事件主体的组织内部,如生产风险、管理风险等
	外部风险	风险发生在风险事件主体的组织外部,只能被动接受,如自然风险等

1.2.3 风险分析

1. 风险分析的作用

风险分析是识别风险因素、估计风险概率、评价风险影响并制定风险对策的过程。风险分析是一种系统分析,贯穿于项目分析的各个阶段和全过程。只要在项目实施前正确地认识到相关的风险,并在实施过程中进行控制,大部分的风险影响是可以被降低和防范的。

2. 风险分析程序

项目风险分析是认识项目可能存在的潜在危险因素,评估这些因素发生的可能性及由此造成的影响,制定防止或减少不利影响而采取对策的一系列活动,包括风险识别、风险估计、风险评价与风险对策四个阶段。每个阶段都是从定性分析到定量分析,再从定量分析到定性分析的过程。具体包括,首先从认识风险特征入手去识别风险因素;其次根据需求和可能选择适当的方法估计风险发生的可能性及影响;再次按照相关标准、规范,评价风险程度,包括单因素风险程度和多因素风险程度;最后提出针对性的风险对策,归纳、提出风险分析结论。

1) 风险识别

(1) 风险识别是指认识和确定项目究竟可能存在哪些风险因素,风险因素给项目带来的影响是什么,原因是什么。

(2) 风险识别是风险分析的基础,目的在于对风险进行分类,分析风险产生的原因和发生的条件,寻找风险事件,明确风险征兆等。

(3) 风险识别是风险分析中比较耗费时间、精力和费用的阶段,需要进行规范化工作,包括建立规范化的风险识别框架,明确风险识别的范围和流程,以提高效率、节省时间、降低成

本；选择合理、恰当、经济、可靠的风险识别方法；组建多专业、富有经验的风险识别小组等。

(4) 风险识别的阶段主要可划分为确定目标、选择方法、收集资料、识别风险四个阶段。

(5) 风险识别的主要方法包括解析法、风险结构分解法、专家调查法、故障树法、事件树法、问卷调查法和情景分析法等。

2) 风险估计

(1) 风险估计主要是对风险事件发生可能性的估计、风险事件影响范围的估计、风险事件发生时间的估计和风险后果对项目严重程度的估计。根据不同的风险因素特征,为了对项目面临的风险做出全面的估计,风险估计应采取定性描述与定量分析相结合的方法。

(2) 风险估计的方法包括风险概率估计方法和风险影响估计方法两类。前者分为主观估计和客观估计,后者有概率树分析、蒙特卡罗模拟等方法。

3) 风险评价

(1) 风险评价是通过相应的指标体系和评价标准,对风险程度进行划分,揭示影响项目成败的关键风险因素,以便针对关键风险因素,采取防范对策。工程项目风险评价的依据主要有工程项目类型、风险管理计划、风险识别成果、工程项目进展状况、数据的准确性和可靠性、概率和影响程度等。

(2) 风险评价包括单因素风险评价和整体风险评价。单因素风险评价主要有风险概率矩阵法、专家评价法。整体风险评价即综合评价若干主要风险因素对项目整体的影响程度。

(3) 风险评价三个步骤分别为:确定风险评价基准,确定项目的风险水平、确定项目风险等级。其中,风险评价基准是项目主体针对每一种风险后果确定的可接受水平。风险的可接受水平可以是绝对的,也可以是相对的。一般工程项目的风险水平取决于工程中存在风险的多少和风险对工程目标的影响程度。项目风险等级是将项目风险水平与评价基准对比,判断项目风险是否在可接受的范围之内,确定不同风险对工程项目目标的重要性,按照重要程度排序,为项目决策提供依据。

4) 风险对策

(1) 风险对策的基本要求为针对性、可行性、经济性,对策研究是项目有关各方的共同任务。在风险对策研究中,常采用风险-控制矩阵,针对不同的风险程度和控制能力,采取不同的策略。

(2) 应对风险的对策可以归纳为消极风险或威胁的应对策略、积极风险或机会的应对策略。前者的具体对策一般包括风险回避、风险减轻、风险转移和风险接受,针对的是可能对项目目标带来消极影响的风险;后者针对的是可以给项目带来机会的某些风险,采取的策略总是着眼于对机会的把握和充分利用。本书中陈述的风险对策仅涉及消极风险或威胁的应对策略。

1.2.4 风险分析案例

以京沈客专北京段望京隧道盾构段工程为例,建立 N-K 模型,从宏观角度分析风险因素的耦合作用,并提出基于解耦思想的施工安全风险控制策略。

1. 工程概况

望京隧道设计为双单线,位于北京五环、六环之间,大致沿京承高速公路走行,隧道起讫

里程 DK18+550—DK26+550,隧道全长为 8000m,该隧道自草场地南路北侧入地,由南向北下钻南皋路、北小河、机场高速公路、机场快轨、京密路、来广营东路、地铁 15 号线马泉营站、湿地公园、顺白路、机场南线高速后在清河以南、京承高速东侧出隧道。京沈客专北京段望京隧道地理位置示意图 1-2。



图 1-2 京沈客专北京段望京隧道地理位置示意

望京隧道出口侧分为盾构隧道和明挖段隧道、暗挖段隧道。望京隧道出口侧平面图和盾构横断面布置示意分别见图 1-3、图 1-4。其中出口过渡段明挖 430m,暗挖 210m,2~3 井盾构井间隧道长 3180m,采用盾构法施工。在 DK25+900 处设 3 井,为盾构始发井;DK22+700 处设 2 井,为盾构接收井。



图 1-3 京沈客专北京段望京隧道出口侧平面图

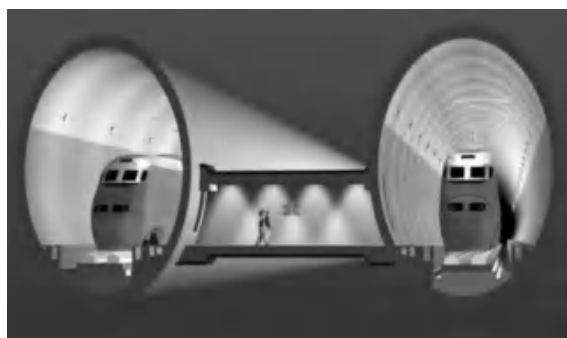


图 1-4 望京隧道盾构横断面布置示意

盾构隧道采用直径为 10.87m 的泥水平衡盾构机施工,3 井、2 井竖井之间的段采用两台盾构机掘进,每台盾构机掘进一条单洞,由沈阳向北京方向掘进施工。盾构隧道外径 10.5m,内径 9.5m,壁厚 0.5m(C50),管片环宽 2m,采用“8+1”的 9 分块设计。

2. 工程地质、水文地质

1) 工程地质

隧道始发段沿线范围内地层主要为人工填土层(Q^{ml})、第四纪全新世冲洪积层(Q_4^{al+pl})、第四纪晚更新世冲洪积层(Q_3^{al+pl})。勘探深度范围内主要地层为第四系人工堆积

层(Q_4^{ml})素填土、杂填土、填筑土,第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})黏土、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂,第四系上更新统冲洪积层(Q_3^{al+pl})黏土、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂、圆砾。人工堆积层主要分布于沿线城区、村庄、道路、沟渠及河流堤坝,厚度变化较大,一般为2~5m,局部可达7m以上。

隧道接受段地质主要以黏土、粉质黏土、粉细砂层为主,根据设计地勘资料显示:自地表以下地层条件分布为:0~-0.9m为素填土;-0.9~-4.8m为黏土;-4.8~-10.1m为黏土;-10.1~-18m为粉质黏土;-18~-24.7m为黏土;-24.7~-28.4m为细砂;-28.4~-30m为粉砂;-30~-33.8m为黏土。

2) 水文地质

隧道始发段内赋存两层地下水,地下水较为丰富。上层滞水主要接受大气降水、农田灌溉及侧向径流补给,以蒸发、侧向径流、向下越流补给的方式排泄;潜水主要接受侧向径流及越流补给,以侧向径流、向下越流方式排泄;层间水主要接受侧向径流及越流补给,以侧向径流、向下越流方式排泄。

隧道接受段工程范围内地下水类型按地下水的赋存条件主要为基岩裂隙水和第四纪松散沉积物孔隙水;线路沿线工程影响范围内的地下水主要为第四纪松散沉积物孔隙水,其赋存介质主要为砂土、碎石土和粉土,根据其水利性质不同可分为上层滞水、潜水及承压水。隧道场区范围内上层滞水埋深1.10~3.80m,含水层主要为粉土层,埋深21.9~24.7m的粉砂 $③_{4-4}$ 层中未见地下水,但在隧道其他段发现该砂层中赋存地下水,因此按有水(饱和)考虑。涉及钻孔量测混合水静止水位埋深为7.35~7.80m,静止水位高程为27.42~27.80m。地下水位情况见表1-3。

表 1-3 地下水位情况

序号	地下水类型	含水层顶板埋深 /m	稳定水位埋深 /m	稳定水位标高 /m	主要含层
1	潜水	8.20	8.30	26.85	② ₃₋₁ 粉土 ② ₄₋₃ 粉砂
2	层间水(不具承压性)	27.40	29.70	5.45	③ ₅₋₄ 细砂
3	层间水(不具承压性)	36.50	36.50	-1.35	③ ₆₋₄ 细砂
4	承压水(具承压性)	50.00	38.60	-3.45	③ ₅₋₄ 细砂

3. 施工风险分析

望京隧道盾构段工程为京沈客专首次在北京城区施工的地下高速铁路,施工组织要求高,社会关注度高。出口段隧道开挖直径达10.9m,开挖直径大,盾构隧道地质水文条件复杂、水压高、穿越重要建(构)筑物多,掘进控制要求严格,施工难度大,风险极高。具体体现为:

(1) 此类地层中采取盾构法施工,一般可能遇到的岩土工程问题有掌子面失稳、地表隆起或沉降、刀具抱死以及既有建(构)筑物或地下管网的破坏。

(2) 隧道沿线施工沉降要求较高的建(构)筑物较多,如地铁15号线马泉营站、机场南线高速,且沿线管线复杂,如高压走廊、电缆、天然气、供水等。施工开挖面距离机场南线高速既有桥梁的桥桩较近,会引起桥桩的应力环境发生变化,影响桥桩及承台的承载性状,从

而影响桥的正常使用。施工难度大。

针对望京隧道盾构段风险特点,对大直径盾构隧道施工安全风险耦合的风险影响因素进行辨识,如表 1-4 所示。

表 1-4 大直径盾构隧道施工安全风险影响因素

风险影响因素	影响因子
人的因素	作业人员身体状态不佳上岗、安全观念及意识不强、工作责任心欠缺、心理素质不强大、注意力不集中、缺乏纪律、操作不熟练、险情处置能力不够、缺少工作经验、违规操作
物的因素	盾构机、刀盘、刀具选型不合理,设备设计、制造缺陷,设备老化、磨损及故障,设备维保不及时,设备备件不足,浆液油脂等辅助材料质量不佳,管片生产、养护质量不达标,管片运输成品保护不到位
环境因素	工程地质、水文地质条件,周边建(构)筑物及管线,地下不明障碍物,可燃气体,高温、高压、高湿环境,工作空间狭小,隧道直径、埋深等自身特性,周边工程活动,不可预见因素,阻挠施工等社会环境因素
管理因素	组织架构不合理,管理制度不健全,人员素质不高,管理人员职责不明晰,教育培训不到位,规范、方案执行落实不到位,现场管理水平差

大直径盾构隧道施工安全风险自身具有一定的防御和修复特性,单个风险一般很难造成事故。当四个风险子系统出现缺陷后,就会突破各自的防御体系,向风险链传递,一旦遇到其他类型的风险因素产生的突发事件就会发生传递到耦合振荡器,若这种耦合没有及时得到破坏,就会突破最后一道防御系统,形成正向耦合,导致风险加大。如图 1-5 所示。

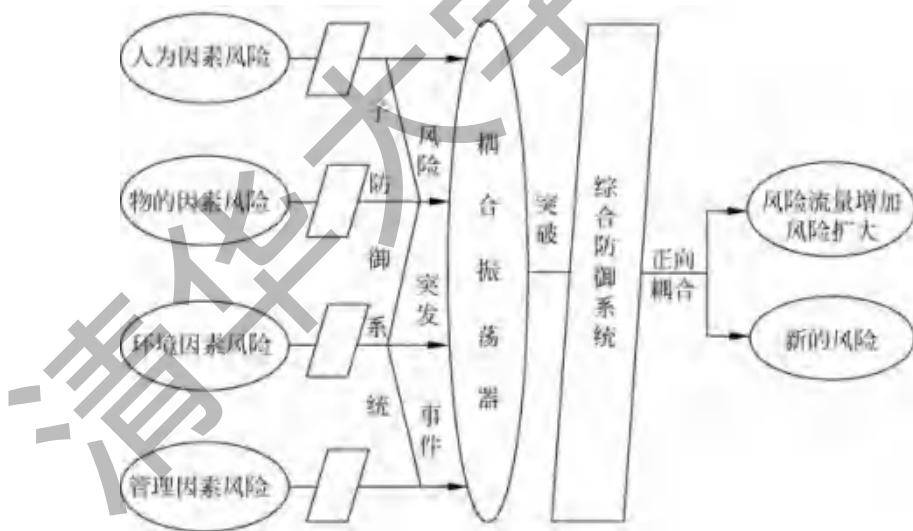


图 1-5 大直径盾构隧道施工安全风险因素耦合机理

通过建立 N-K 模型,从宏观角度对四类风险因素的耦合作用后的风险进行计算,计算结果表明:

(1) 尽管耦合后的风险事故发生概率相对较小,但是一旦发生,耦合作用的风险因素种类越多导致的风险损失越严重。

(2) 人、物、环、管四类风险因素共同参与发生耦合作用引发的风险是最大的,但不表明三因素耦合引发的风险一定高于二因素耦合引发的风险,体现出耦合作用的不确定性。

(3) 在大直径盾构隧道中,“物”特别是设备和人员因素若能充分发挥,能够显著降低耦合引发的风险。

(4) 正向耦合易造成安全风险事故,通过采取合理的技术措施及现场管理,可以使正向耦合变为零耦合或负向耦合,基于消阻、波动、积极的解耦思想是大直径盾构隧道安全风险系统设计的重要环节,以此降低事故发生率。

4. 施工风险对策

1) 盾构浅覆土始发技术

针对望京隧道浅覆土始发地表沉降难以控制、设备成本高、投入大等问题,结合建立的 N-K 模型进行验证、分析及总结,确定了始发端头土体加固技术:始发井端头采用 $\phi 1800@1500\text{mm}$ 超高压旋喷桩加固,始发端头加固长度 13m,宽度为隧道两侧各 5m,高度为隧顶以上 5m 到隧底以下 6m。同时优化施工参数,避免始发过程中可能产生的问题。

2) 盾构下穿地铁 15 号线马泉营站沉降控制技术

盾构隧道在里程 DK22+904.900 左右与地铁 15 号线马泉营车站近似正交,拟建盾构隧道顶距离车站底板 9.903m,距离车站围护桩底 3.98m 左右,距离车站降水井不足 0.5m。下穿段隧道范围内地层主要有细砂、粉土、粉质黏土、黏土,拱顶地层为细砂。

首先在盾构穿越位置采取地质雷达结合人工探槽的手段,确定掘进范围内存在的既有车站降水井管,探明后采取地面注浆措施,将井管填充密实。在盾构下穿影响区域 75m 范围内采用加强型管片,并在盾构隧道施工影响段管片上预留 25 个注浆孔,采用长 3m 直径 42mm 钢花管进行径向注浆,注浆浆液采用水泥-水玻璃双液浆。严格控制穿越阶段主要掘进参数,按照“高黏优浆、合理低压、精细控制、平稳推进、快速拼装、禁止停机、一次通过”的原则,严格掘进过程管理控制,严控泥水压力和注浆压力,防止压力大的波动。穿越过程中加强监控量测,配备自动化监测装置,在施工中进行实时、连续监测,及时掌握马泉营站结构的变形情况。

1.3 轨道交通土建工程风险分析

1.3.1 工程自身风险

轨道交通工程项目在施工过程中,在车站及区间的施工中工法有盾构法、矿山法、明挖法、盖挖法等,施工本身具有较大风险。

盾构法施工时,主要风险是工作井塌方、工作面失稳、漏水漏浆、轴线偏差过大、机械设备故障等。矿山法施工时,主要风险包括地表下沉、周边建筑物和管线沉降超标、变形开裂、隧道或岩体坍塌等。明挖法施工时,深基坑施工风险是最主要的风险,开挖和支护是最主要的工序,应采取有效措施防止基坑围护渗漏、支护结构整体失稳、坑底管涌流砂、坑底隆起、坑内滑坡、塌方等事故的发生。盖挖法与明挖法相比,施工风险还包括临时立柱与围护结构沉降不均匀造成的顶板开裂。共性的自身风险包括降水不当,围护或支护渗漏、变形、失稳,工作面涌水流砂、失稳坍塌,主体结构渗漏、破坏等。

据统计,自身风险导致事故的占比为:矿山法 37%、明挖法 33%、盾构法 25%。

1.3.2 周边环境风险

轨道交通工程基本贯穿城市主干道,区间隧道下穿江、河、湖、海、泉等水体和成片的住宅区、商业区、市政桥梁、管线等复杂周边环境。区间穿越水体时容易造成河底被击穿,导致隧道倒灌、喷涌,盾构机栽头及被困。老旧建筑物多在区间上方或邻近车站基坑,容易产生沉降开裂或倒塌风险;地铁线路的管线数量众多、排布密集、年久失修,有些产权单位都对其埋深、位置不甚明确,很容易在地铁施工时遭受破坏。

据统计,周边环境遭破坏的主要表现为:路面塌陷 48%、建筑物开裂 26%、管线破坏 17%。

1.3.3 复杂工程水文地质风险

轨道交通工程多为地下工程,工程地质条件复杂,地下水系发育。工程穿越的复杂地层包括富水强渗透性的粉、细、中砂地层和圆砾地层,以及石炭系、泥盆系可溶性灰岩地层,土质主要有填土、软土、黏性土、膨胀土、黄土等。岩溶常有溶洞、土洞、溶沟、溶槽、溶隙、竖井、落水洞、暗河及岩溶塌陷区伴生,岩溶发育程度及充填情况、覆盖层厚度等差异较大,富水性较强且含水极不均匀,另外还有地裂缝、采空区、断裂带、复杂地层(复合地层、硬质岩脉、地貌突变、岩相突变、岩性突变、基岩突起、风化深槽等)等的不良影响。复杂多变的工程水文地质是城市轨道交通工程建设的重要风险因素之一。

不良地质对不同工法的轨道交通工程作用如下:

(1) 明挖法主要风险。基坑开挖过程中,可能发生突水、涌泥、涌砂、机械陷落、地基承载力不足、地基不稳定等风险。

(2) 矿山法主要风险。矿山法隧道施工时,对周边溶洞、土洞造成扰动,可能破坏其结构平衡诱发塌陷;或直接被揭露,从而发生岩溶水突涌现象,导致突水、突泥等事故的发生。

(3) 盾构法主要风险。盾构隧道掘进施工过程中,可能破坏岩溶、土洞原有平衡,发生洞穴塌陷,进而导致地面塌陷和地面建筑物沉降过大的风险;溶洞的存在使地层软硬不均,易发生盾构姿态偏移;遇见未查明岩洞、土洞时,易发生仓内瞬间失压、盾构栽头风险;盾构隧道施工过程中,易发生岩溶水击穿盾尾密封,增加岩溶水涌入隧道的风险;可溶岩表层黏性土及充填黏性土的存在以及大块岩石堆积在仓底,易发生结泥饼、滞排、喷涌风险;特别是富水强透水的圆砾地层中,盾构刀盘磨损严重、需频繁换刀、地层改良加固难度大,易产生“喷涌”现象等问题。

据有关数据统计,复杂地质条件带来的风险占比情况为:高水位地层占 23%、复合地层占 22%、富水砂层 18%。

1.4 轨道交通其他工程风险分析与对策

1.4.1 总体分析

轨道交通其他工程主要是指设备系统类工程。设备系统类安全风险管理是指从设备系

统的专业特点出发,对人、机、物、法、环等管理对象施加影响和控制,排除不安全因素,以达到安全生产和功能安全为目标的闭环管理,主要包括遵循通用管理要求和细化设备安全与功能安全的管理要求两方面。

设备系统安全管理与土建工程不同,除了施工、监理等单位,还包括系统集成商、供货商、安全评估单位。主要有害因素包括指挥和操作错误等人的因素、设备设施和施工工具缺陷等物的因素、室内外作业环境不良等环境因素以及组织机构不健全、规章制度不完善等管理因素。通过对设备系统危险有害因素的分析,设备系统的安全风险管理包括两个方面:一是设备系统施工安全风险管理,在工程施工的各阶段中对工程的安装和调试现场安全风险进行管理,使工程安全得到有效保障;二是设备系统功能安全风险管理,对各设备系统固有和潜在的风险进行识别,并使这些风险在建设阶段得到有效控制,为安全运营提供保障。二者的管理对象不同,因此在管理的目的、目标、工作依据、控制对象、风险识别和风险控制、主抓单位和实现方法均不同。具体如下:

设备系统施工安全风险管理是在工程施工中对工程的安装质量和安全隐患进行管理,杜绝较大及以上事故,控制一般事故,以合同、监理规程和工程建设标准为工作依据,主要控制施工现场的风险,过程中主要利用法律、法规规定的风险检查点以及大量安装工程建设经验进行风险识别,充分发挥监理单位在施工过程中的作用,由施工单位负责具体实施,产出为监理记录、旁站、巡检、检测等。这一阶段包括初步设计、施工图设计、招投标、开工核查、设备安装调试(含动车调试)等。其中动车调试阶段是设备系统风险较大的阶段,是实现整体功能交付的关键一环。动车调试期间由于全系统尚在完善中,调度体系具有临时性,车辆运行区域还有大量未完工的工程,运行、调试、施工交叉进行,因此动车调试期间安全风险最高,是关注的重点。

设备系统功能安全风险管理是对系统固有和潜在的风险进行识别,并使这些风险在建设阶段得到有效控制,为安全运营奠定基础,将风险控制在安全矩阵中可接受的风险范围,以合同标准(EN 50126: 1999、EN 50128: 2001、EN 50129: 2003 等)、技术资料为工作依据,主要控制系统功能所带来的风险。通过标准中推荐的分析方法对系统进行风险识别和安全分析,形成控制措施清单,充分发挥安全评估单位的作用,由系统功能负责单位牵头落实控制措施,产出为文档评估、安全审计、旁站抽测、抽样检查等。该阶段风险分析及规避主要是依据既有的国家推荐标准及国际应用实践,根据实际经验和自身实际制定相应准则。从设备系统生命周期入手,主要包括工程定义和计划阶段、需求及系统设计和风险分析阶段、工程详细设计阶段、产品生产制造阶段、安装测试阶段、联调联试阶段、跑图运行阶段、试运营阶段。

1.4.2 设备系统施工安全风险管理

城市轨道交通设备系统安装阶段是工程实体的形成阶段,从工程特点进行分析和总结,设备系统施工安全风险管理主要包括交叉作业安全管理、大件设备运输及吊装安全管理、轨行区安全管理。

1. 交叉作业安全管理

1) 风险分析

在同一工作面进行不同的作业,在同一立体空间不同的作业面进行不同或相同的作业,

两个以上生产单位在同一作业区域内进行生产作业、两种或以上不同工种的人在同一工作场地内同时或交替作业,凡一项作业可能对其他作业造成危害、不良影响或其他作业人员造成伤害的均构成交叉作业。

车站工程中的土建结构施工完成后,设备系统进场施工。由于设备系统专业多,涉及单位多,各单位施工相互干扰、相互制约,存在大量的交叉施工。区间工程中结构完成后移交设备系统施工,轨道作业施工与机电、供电、疏散平台、通号安装作业都存在交叉施工。交叉作业施工作业空间有限、施工人员多、工序复杂、机械设备多样、联络沟通不畅、施工班组相互干扰等特点,容易造成高处坠落、物体打击、机械伤害、车辆伤害、触电、火灾等安全事故。

2) 风险对策

(1) 制定相关管理办法,明确车站或区间牵头单位。制定施工区域管理办法,明确管理制度,车站设备区委托机电施工单位牵头统一施工管理,轨行区委托轨道安装单位牵头统一施工管理。牵头单位统一安排施工管理工作,制定运行及审批施工计划,合理安排交叉作业施工。各施工单位与牵头单位签订安全协议,受牵头单位统一管理,遵守牵头单位各项管理。

(2) 施工准备阶段防范措施。要求施工单位根据现场实际情况,在施工组织设计中明确交叉作业施工措施和方法,编制作业指导书和交叉作业专项施工防范。要求牵头单位与其他设备施工单位签订安全生产协议书,告知施工现场特点,作业场所危险因素、防范措施以及事故应急措施。各设备施工单位服从牵头单位的统一管理,加强安全教育培训,加强从业人员管理。牵头单位编制应急预案,明确应急救援范围和体系,熟悉应急程序,掌握应急技能,逐步完善上报流程,定期组织应急事件演练,提高风险防范意识,降低事故危害程度。

(3) 施工阶段防范措施。交叉作业时,作业面大、各专业穿插施工多,为保护设备安全及时发现隐患,需要合理安排人员巡视,防止意外发生。牵头单位封闭受作业影响的危险区域,做好安全防护,切实加强现场消防保卫、文明施工管理;在容易产生安全事故地点设立安全警示标志,同时加强巡视检查,做到施工现场文明整洁、材料堆放整齐有序稳固。各设备施工单位要配备合格的劳动防护用品并监督员工正确佩戴。在施工前与牵头单位和其他单位充分协调,尽量减少施工交叉机会。设备维修时,按规定设置警示标志,必要时采取相应安全措施,谨防误操作引发事故。

2. 大件设备运输及吊装安全管理

1) 风险分析

轨道交通工程大件设备主要有车站工程中的扶梯、直梯、风机、制冷机组、配电箱(柜)、低压开关柜、机柜、自动售票机等,高架区间工程中的电缆盘、配电箱等,地下区间工程中的射流风机、水泵、风机水泵电控柜等。电客车偶尔也采用公路运输。根据不同设备尺寸和质量大小,选用合适的运输起重设备和方式。大件设备一般选择起重机等方式运输吊装。

相对小型设备的运输吊装,大件设备运输吊装存在更多、更严重的安全风险。起重吊装作业是事故高发作业,特别是大件吊装,风险大,起重大件吊装作业因起重机活动范围大、旋转机会多,容易发生倾覆;吊钩捆绑点摩擦力过小,导致捆绑处钢丝绳滑动,引起吊装不平衡发生设备倾覆、坠落;同时也存在坠臂、脱钩、设备坠落、物体打击、钢丝绳断裂、碰撞、触电等重大事故风险。

2) 风险对策

(1) 严格起重吊装作业人员及方案审核。起重吊装必须由专业队伍进行,信号指挥人员必须持证上岗。起重吊装作业前应根据施工组织设计要求,划定施工作业区域,设置醒目的警示标志和专职监护人员。起重回转半径必须与高压电线保持安全距离。

起重机械进场前,查验合格证、年检证、行驶证等相关证件。起重司机应持证上岗,要严格按起重机械安全技术规程进行操作,同时应了解起重设备的构造、性能、传动原理、安全规程等;要严格遵守各项规章制度、遵章守纪、坚守工作岗位;及时发现起重机械异常情况,并加以妥善处理。

在施工前必须抓住各施工阶段的组织关键,采取相应的对策和预防措施。在施工准备阶段对重要岗位(起重工等)的操作工人进行岗前再培训,做好安全交底和技术交底。

(2) 做好设备检查和技术把关。现场构件应有专人负责,合理存放,并在施工组织设计中明确吊装方法,确定汽车式起重机摆放位置,安排专人对汽车式起重机所在位置进行检查。起重机械司机及信号人员应熟知和遵守设备性能及施工组织设计中吊装方法。多机抬吊时单机负载不得超过该机额定重量的80%。塔式起重机路基铺设和轨道的安装必须符合国家标准及原厂使用规定,并办理验收手续,经检验合格后,方可使用;在使用中定期进行检测。塔式起重机的安全装置必须齐全、灵敏、可靠。塔式起重机吊装作业时,必须严格遵守施工组织设计 and 安全技术交底中的要求,吊物严禁超出施工现场的范围。六级以上强风必须停止吊装作业。

考虑到施工现场、施工难度等,为保证足够的吊装空间,应清理安装现场有阻碍的物资,吊装危险区域应确保无交叉作业。运输吊装时要服从指挥,不得擅自离岗,各岗位动作应协调一致。

(3) 现场盯控和安全防护必须到位。吊装作业前,应详细了解天气情况,禁止在雨天、雾天、雷电、六级以上大风天气进行吊装。吊装时吊物下方严禁站人或人员通过,人员不得与吊物一同升降。

进入现场,必须佩戴安全帽,高空作业人员必须体检合格方可上岗,高空作业配好安全带,并将安全带系挂在安全可靠的物体上。起重作业现场应设明显的标志和警戒线,并有专人盯控,非施工人员不得擅自入内。

吊装过程中如出现故障,必须先使吊物落地。施工前,必须对机械电气设备进行专人维护,并做好安全记录。吊装结束后,吊装设备拆除,及时清理场内垃圾。

3. 轨行区安全管理

1) 风险分析

轨行区是指土建施工单位正式移交给轨道安装单位的工作面,具体指地下轨道两侧结构、上方范围内及区间隧道结构范围内的区域。轨行区施工注意包括轨排吊装、行车运输、钢轨焊接、电缆敷设等作业,会一定程度地影响轨行区轨道设备结构、轨下基础稳定,可造成轨道几何尺寸变化或侵入行车限界,影响行车和人身安全。

为避免轨行区施工过程中发生的挤压-扎伤-碰撞-轨道车脱轨、倾覆等一系列生产安全事故,以及现场各施工单位作业相互影响、相互制约的问题,轨行区管理单位应对可能存在的风险源进行辨识并制定安全管控措施。

轨行区作业存在较多的风险,具体包括:长大隧道内施工照明不足、光线较差、隧道信