



特种建(构)筑物建造安全控制技术丛书

城市地下工程施工 安全预警系统构建指南

李慧民 田卫 郭海东 盛金喜 著

北京

冶金工业出版社

2018

前 言

本书结合城市地下工程规模愈益增大、埋置愈益加深、施工环境愈益复杂的发展趋势，系统阐述了城市地下工程施工安全预警系统构建的理论与实践基础。全书共分6章，其中，第1章介绍了城市地下工程的分类、特点、各类事故占比及施工安全预警现状；第2章系统总结、论述了施工安全预警系统的相关概念、基本要素、依据规范、基础理论、系统构成、构建程序以及监测方法与监测仪器，并给出关键环节较为合理的参考建议；第3章基于施工安全管理的科学性、综合性、协调性与人的不安全行为的随机性、难量测性等特点，提出了施工安全管理水平综合评价与危险源管控相结合的施工安全管理预警系统；第4、5章分别结合基坑工程、隧道工程的施工方法与安全事故特征，阐述了两类工程施工安全技术预警系统的主要内容，并辅以案例说明；第6章针对施工难度更大、环境更为复杂的地下穿越工程，梳理总结了其分类与安全风险，尤其是新建工程与既有建（构）筑物的相互影响关系，在此基础上说明了地下穿越工程的施工安全技术预警方法，并辅以案例说明。

本书主要由李慧民、田卫、郭海东、盛金喜撰写。各章撰写分工为：第1章由李慧民、田卫、盛金喜、钟慧娟撰写；第2章由郭海东、田卫、米力、钟兴举撰写；第3章由李慧民、徐珂、郭海东、李燕撰写；第4章由唐杰、李慧民、田卫、孟磊撰写；第5章由郭平、郭海东、盛金喜、林瑶撰写；第6章由韩树国、

徐红玲、柴庆、唐杰、郭平撰写。

在本书撰写过程中，得到了西安建筑科技大学、郑州交通建设投资有限公司、百盛联合集团有限公司、中铁二十一局等单位的教师、工程技术和安全管理人员的大力支持与帮助，并参考了有关专家学者的研究成果与文献资料，在此一并向他们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中不足之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2017年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 城市地下工程概述	1
1.1.1 城市地下工程发展	1
1.1.2 城市地下工程分类	4
1.1.3 城市地下工程施工特点	4
1.2 城市地下工程施工安全事故统计	5
1.2.1 城市地下工程施工安全风险	5
1.2.2 城市地下工程施工安全事故类型	6
1.2.3 城市地下工程施工安全风险因素	9
1.3 城市地下工程施工安全预警现状	10
1.3.1 预警技术发展历程	10
1.3.2 地下工程施工安全预警理论	10
1.3.3 城市地下工程施工安全预警系统研究	11
1.3.4 城市地下工程施工安全预警系统应用	14
2 施工安全预警系统构建基础	16
2.1 施工安全预警内涵	16
2.1.1 施工安全预警相关概念	16
2.1.2 施工安全预警基本要素	18
2.2 施工安全预警依据规范与基础理论	20
2.2.1 规范标准	20
2.2.2 基础理论	21
2.3 施工安全预警系统功能	22
2.3.1 安全预防功能	22
2.3.2 动态监测功能	23
2.3.3 警情预报功能	23
2.3.4 矫正控制功能	23
2.3.5 灾害应急功能	23
2.3.6 警情免疫功能	24

2.3.7 信息高效与可视化功能	24
2.4 施工安全预警系统构成	24
2.4.1 施工安全管理预警系统	25
2.4.2 施工安全技术预警系统	26
2.5 施工安全预警系统构建程序	36
2.5.1 施工安全预警系统构建原则	36
2.5.2 施工安全预警系统构建步序	37
2.6 地下工程监测方法与监测仪器	38
2.6.1 地下工程监测方法	38
2.6.2 地下工程监测仪器	53
3 施工安全管理预警系统	56
3.1 施工安全管理内容	56
3.2 施工安全管理水平综合评价及预警	58
3.2.1 施工安全管理水平综合评价指标体系	58
3.2.2 施工安全管理水平综合评价等级划分及报警限确定	63
3.2.3 施工安全管理水平综合评价方法	66
3.2.4 施工安全管理水平改进策略制定	71
3.3 施工危险源管控	71
3.3.1 危险源概述	71
3.3.2 施工危险源检查及报警	72
3.4 施工安全管理预警系统实例	79
3.4.1 工程概况	79
3.4.2 施工安全管理水平综合评价方法	80
3.4.3 施工安全管理水平综合评价结果	86
3.4.4 施工安全管理水平改进策略制定	87
4 基坑工程施工安全技术预警系统	89
4.1 基坑工程施工方法概述	89
4.1.1 基坑工程施工方法	89
4.1.2 基坑支护	90
4.2 基坑工程施工安全风险	91
4.3 基坑工程施工安全风险防控措施	95
4.3.1 土体滑坡防控措施	95
4.3.2 坑底隆起、突涌防控措施	95

4.3.3	支护结构破坏防控措施	95
4.3.4	周边环境安全风险防控措施	96
4.4	基坑工程施工安全技术预警方法	96
4.4.1	基坑工程施工安全技术预警指标及监测方案	96
4.4.2	基坑工程施工安全技术预警警戒值	105
4.4.3	基坑工程施工安全预警等级及区间划分	105
4.4.4	基坑工程施工技术诊断报警	105
4.5	基坑工程施工安全预警控制措施	108
4.5.1	预警阶段控制措施	108
4.5.2	安全事故控制措施	109
4.6	基坑工程施工安全技术预警案例	110
4.6.1	工程概况	110
4.6.2	基坑工程安全风险	111
4.6.3	工程监测预警	112
4.6.4	施工警情诊断	115
4.6.5	施工安全预警控制措施	118
5	隧道工程施工安全技术预警系统	119
5.1	隧道工程施工方法概述	119
5.1.1	浅埋暗挖法	120
5.1.2	盾构法	122
5.2	隧道工程施工安全风险	123
5.3	隧道工程施工安全风险防控措施	125
5.3.1	浅埋暗挖法施工安全风险防控措施	125
5.3.2	盾构法施工安全风险防控措施	127
5.4	隧道工程施工安全技术预警方法	129
5.4.1	隧道工程施工安全技术预警指标及监测方案	129
5.4.2	隧道工程施工安全技术预警警戒值	138
5.4.3	隧道工程施工安全预警等级及区间划分	140
5.4.4	隧道工程施工安全技术	140
5.5	隧道工程施工安全技术预警控制措施	141
5.5.1	预警阶段控制措施	141
5.5.2	安全事故控制措施	141
5.6	隧道工程施工安全技术预警案例	142
5.6.1	工程概况	142

5.6.2	工程安全风险	144
5.6.3	监测方案	145
5.6.4	施工警情诊断	147
5.6.5	施工安全预警控制措施	149
6.0	地下穿越工程施工安全技术预警系统	151
6.1	地下穿越工程定义、分类及特点	151
6.1.1	地下穿越工程的定义及分类	151
6.1.2	地下穿越工程的特点	151
6.2	地下穿越工程施工安全风险	152
6.2.1	新建工程对既有结构的影响	153
6.2.2	既有地铁对新建工程的影响	153
6.2.3	地下穿越工程安全事故	154
6.3	地下穿越工程施工安全技术预警方法	154
6.3.1	安全监测范围界定	154
6.3.2	工前既有结构检测评价	154
6.3.3	安全风险评估	156
6.3.4	监测方案	156
6.3.5	警情诊断	159
6.4	地下穿越工程施工安全技术预警案例	160
6.4.1	工程概况	160
6.4.2	工程施工安全风险	164
6.4.3	安全风险预防控制措施	173
6.4.4	工程监测预警	186
6.4.5	基于 BIM 平台的施工安全技术预警系统	189
	参考文献	195

1 绪 论

城市地下工程具有投资大、周期长、技术复杂、不可预见风险因素多和对社会环境影响大等特点，是一项高风险建设工程，且施工期间一旦发生安全事故，损失后果严重甚至无法恢复，因此有效地防御或减少城市地下工程灾害已成为迫切需要解决的问题。自 2004 年以来，“安全、费用与风险”已成为国际隧道与地下空间协会每年年会的主题。城市地下工程施工安全预警系统作为信息化的管理手段，具有动态监测、预先诊断、高效决策、大量信息快速处理等特点，可以有效地预防和控制城市地下工程施工安全风险事件，成为城市地下工程施工安全风险管控的重要手段。

1.1 城市地下工程概述

人类社会对地下空间的开发利用有着悠久的历史，建于公元前 2690 年左右的胡夫金字塔是世界上最大的金字塔，也是标志性的地下工程建筑；中国地下空间的开发多用于建造陵墓和满足宗教建筑的一些特殊要求，如 1974 年 3 月在陕西西安发现的秦始皇兵马俑。20 世纪，尤其是 60 年代到 70 年代，世界主要工业发达国家处于政治稳定、经济飞速发展时期，人口向城市大量积聚，为解决城市交通问题，轨道交通及地铁建设进入全面发展阶段；伴随着地铁建设，地下街、地下车库以及多层地下室等地下空间也得到较大发展。地下建筑工程的开发利用可以有效缓减城市交通矛盾，改善城市生态环境，增强城市防灾减灾能力，2001 年建设部出台了关于修改《城市地下空间开发利用管理规定》的决定，对城市地下空间建设提出明确规定，为我国城市地下空间开发利用指明了方向。21 世纪以来，我国城市化率由 2000 年的 36.22% 上升到 2016 年的 57.35%，城市化正属于加速发展时期，城市地下工程建设已经进入到大规模开发阶段。

1.1.1 城市地下工程发展

1.1.1.1 城市地下建筑工程

进入 21 世纪，伴随世界人口的急剧增长，城市集约化程度的提高，人均占有耕地的减少及环境生态的破坏，人们越来越重视对城市地下空间的开发利用，主要表现在城市地下停车场、城市地下人防工程、城市地下街、地下综合体的发展。

随着经济的发展，各个城市的汽车总量不断增加，为了解决城市中心区的公

共停车和小区的个人停车难问题,地下停车场的建设必不可少,既有效地解决了停车难的问题,又适当地缓解了地上交通压力。目前,我国各大城市中大多数企业事业单位或者小区已建造了自用或公用的地下停车库;有的地下停车场已同地下街相结合,成为地下综合体的一部分。

城市地下人防建筑工程是为了保障战时人员和物资掩蔽、人民防空指挥、医疗救护而单独修建的地下防护建筑,以及结合地面建筑修建的战时可用的防空地下室。人防工程是地下工程的重要组成部分,它是城市抗灾救灾不可或缺的生命线工程,是防备空中袭击、有效保护人员和物资、保证战争潜力的重要设施。我国从20世纪60年代起进行人防工程建设,其中比较著名的有“816工程”,全名为“三线建设进洞的原子能反应堆及化学后处理工程”。现在,新建的人防工程要求既要考虑到战时防空的需要,又要考虑到平时经济建设、城市建设和人民生活的需要,具有平战双重功能。

为了更好地适应日益丰富和变化的城市生活,地下综合体、地下街等多功能多元化地下空间设施正在大量兴建,此类购物设施的建设,有利于节约地上空间资源,缓解城市中心人口压力。

1.1.1.2 城市地铁

地铁是一种运量大、行驶速度快、占用道路空间资源少、能耗和污染低的城市轨道交通系统,其发展符合我国目前大多数城市高度密集的居住人口和道路空间资源有限的现状。2000年,国家首次把“发展地铁交通”列入国民经济“十五”计划发展纲要,并作为拉动国民经济持续发展的重大战略;2011年4月,国家交通运输部提出,要充分发展轨道交通和快速公交在城市交通系统中的骨干作用,300万人口以上的城市加快建设以轨道交通和快速公交为骨干、以城市公共汽电车为主体的公共交通服务网络。2013年5月,《国务院关于取消和下放行政审批项目等事项的决定》发布,明确城市轨道交通项目由省级投资主管部门按照国家批准的规划核准。在国家相关政策的引导以及社会发展的趋势下,我国的地铁建设发展朝气蓬勃,城市轨道交通事业发展迅速。2015年末,国内累计已有26个城市开通城市轨道交通运营,共计116条线路,总长度达3618km,其中,当年新增运营长度445km,同比增长14%,完成投资3683亿元,同比增长27%。参考中国城市轨道交通协会数据,整个“十二五”期间国内轨道交通总投资额约1.2万亿元,而2016年3月印发的《交通基础设施重大工程建设三年行动计划》中指出,2016~2018年国家将在城市交通领域重点推进103个项目前期工作,新建城市轨道交通2000km以上,共涉及资金1.6万亿元,仅3年时间投资额已超越“十二五”期间的投资总额,因此,预计整个“十三五”期间轨道交通发展将进一步提速。2015年中国城市轨道交通运营线路制式结构见图1-1,全国城市轨道交通运营线路长度见图1-2。

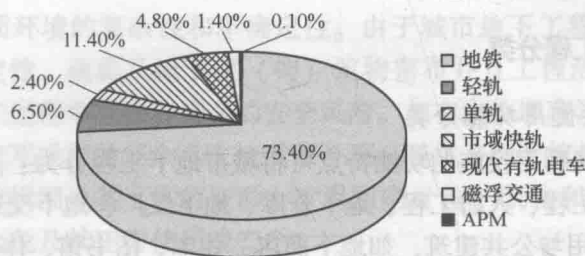


图 1-1 2015 年中国城市轨道交通运营线路制式结构



图 1-2 全国城市轨道交通运营线路长度

1.1.1.3 城市地下综合管廊

地下综合管廊是指城市在规划建设过程中，在道路或管线走廊带开辟一个公用的隧道空间，将供水、排水、电力、电信、光缆、热力、燃气等各种公共类管线及其附属设备按照一定的设计方案集中铺设在一起，以实现多个管道的共同建设、共同管理。地下综合管廊建设是现代城市规划的一个重要环节，对于城市的建设发展具有重要的意义。1832 年，法国巴黎规划建设出世界上第一条综合管廊，自此，综合管廊的建设理念由此兴起。1958 年，在天安门广场地下建设了第一条综合管廊，标志着我国地下综合管廊规划与建设的起步，随着改革开放以及城市化进程的加快，我国城市地下综合管廊建设逐渐走向成熟。

从 2003 年起到 2005 年，在广州大学城地下共建设了长约 18km 的综合管廊；2010 年，上海为了迎接世博会，向世界展现中国现代化城市的发展成果，在世博园地下启动建设了长约 6km 的综合管廊。根据“十一五”规划，我国全面启动地下综合管廊建设，并力争到 2020 年建成一批具有国际先进水平的城市地下综合管廊。2015 年 7 月底，国务院常务会议对综合管廊建设作出部署，要求在年度建设中优先安排综合管廊，并制定地下管廊建设专项规划。我国 2015 年确定了包头、沈阳、哈尔滨等 10 个地下综合管廊试点城市，2016 年确定了郑州、广州、石家庄等 15 个地下综合管廊试点城市。根据住建部的统计，截至 2016 年 12 月 20 日，全国 147 个城市、28 个县已累计开工建设城市地下综合管廊 2005km。

1.1.2 城市地下工程分类

1.1.2.1 按使用功能分类

按照地下空间利用设施的功能特点可将城市地下工程分为：地下民用与公共建筑、地下市政工程、人防工程、地下仓库、地下工厂、地下交通工程等。

- (1) 地下民用与公共建筑，如地下商店、住宅、图书馆、体育馆等。
- (2) 地下市政工程，如综合管廊、给水、污水、管线等。
- (3) 人防工程，如人员隐蔽部、指挥所、疏散干道、救护站等。
- (4) 地下仓库，如粮食、油料、蔬菜等的储藏库。
- (5) 地下工厂，如水力或火力发电站的地下厂房以及各种轻、重工业厂房等。
- (6) 地下交通工程，如铁路隧道、公路隧道、城市地下铁道等。

1.1.2.2 按开挖深度分类

浅层地下工程，一般指地表至-10m 深度空间内的地下工程，主要用于地下建筑、商场、文化和部分业务空间。

次浅层（中层）地下工程，一般指-10~-30m 深度空间内的地下工程，主要用于地下交通、地下市政工程等公用设施。一般城市地铁都属于次浅层（中层）地下工程。

深层地下工程，一般指-30m 以下的地下工程，可以建设高速地下交通隧道、危险品仓库、冷库、油库等。

1.1.3 城市地下工程施工特点

城市地下工程施工，一般是指在岩（土）体中施工修建建筑物、隧道等，其施工难度大、质量要求高、涉及安全风险因素众多，施工直接受到工程地质、水文地质和施工条件的影响，风险因素隐蔽且不确定，施工环境具有特殊性恶劣性等特点。

城市地下工程施工是在岩体或土体中开挖空间结构工程，与地面工程施工相比，地下工程施工主要有以下几个特点：

(1) 工程受力特点不同。地面工程是建筑经过施工形成后再承受自重、风雪以及其他静载或者动载，而城市地下工程在工程施工之前就已经存在地应力荷载。

(2) 工程荷载的不确定性。对于城市地下工程，工程围岩的地质岩体不仅是支护结构的荷载，同时又是承载体，其作用到支护结构上的荷载难以计算，给设计施工增加难度。

(3) 破坏模式的不确定性。地面工程的破坏模式比较容易确定，如强度破坏、变形破坏、旋转失稳等，而城市地下工程的破坏模式却一般难以确定，它不仅取决于岩土体工程、水文地质条件，而且还与开挖顺序、支护方式、施工工艺、支护时间等密切相关。

(4) 地质环境的复杂性和不确定性。由于城市地下工程所处地质环境的复杂性和不确定性、地面及地下建(构)筑物密布并且工程活动频繁,使得城市地下工程施工过程中存在着诸多的安全风险。如在水位埋藏浅、多个透水土层和弱透水土层交互成层的复杂水文地质条件下,基坑工程开挖势必引起周围环境发生变化,导致周围地基土体的变形,对周围建(构)筑物和地下管线产生影响,严重时甚至会危及其正常使用或安全。

1.2 城市地下工程施工安全事故统计

1.2.1 城市地下工程施工安全风险

由于特殊的地理位置,城市地下工程通常是在软弱地层中施工,而且周边环境又极为复杂,各种工程条件及其影响存在较大的不确定性。一般认为,城市地下工程建设的安全风险主要分为工程自身和周边环境安全风险两类,其中以周边环境安全风险更为突出。城市地下工程施工主要特点如下:

(1) 城市地层通常为软弱地层且变化频繁,地层条件的不确定性将带来较大的安全风险。

(2) 城市地下工程施工过程中稳定性控制不力,易出现施工过程中的结构及地层失稳。

(3) 城市地下工程施工时,遇到胶结较差的砂岩泥岩等软弱围岩,一旦遇到涌水,岩体坍塌,可能伴有突泥发生,易埋没结构,影响作业面安全。

(4) 城市地下工程开挖时破坏含水层或含水的破碎带、断层、大溶洞容易发生较大的集中涌水,水量大流速快,会迅速增加地下工程空间内的积水,设备及施工人员的安全受到威胁。

(5) 地下水位的变化,对城市地下工程施工影响很大。水位上升,会对地下结构物有浮托作用,降低地基承载力,就建筑物结构本身而言,当基础底面下压缩层内水位上升,水浸湿和软化岩土,使地基土的强度降低,压缩性增大,建筑结构易产生沉降,导致地基发生严重的变形。

(6) 城市地下结构埋深较小,在地下工程施工中必然会对地表造成较大影响,与地面结构物的作用关系不确定性增加,安全风险增大。

(7) 城市地面建筑物和地下管线密布,增大了城市地下工程的施工难度与安全风险。

(8) 目前隧道及城市地下工程学科理论尚不成熟,加之地层及工程条件的复杂性与独特性,难以做到精细化设计和施工。

(9) 由于城市中心城区人员集中,发生安全事故将造成非常严重的经济损失和社会影响。

1.2.2 城市地下工程施工安全事故类型

在对 2007~2017 年 45 起典型地下工程施工安全事故统计分析的基础上,根据事故类型进行分类,各事故类型占比见图 1-3,其中坍塌事故占比远高于其他类型事故,达到 60%;同时对地下工程在不同施工方法下所发生的安全事故进行统计分析,所占比例见图 1-4,由统计分析可知明挖法、盾构法施工安全事故占比达到 80%以上,尤其是明挖法所占比例高达 60%。



图 1-3 地下工程安全事故类型统计



图 1-4 不同施工方法安全事故占比

在此基础上,分别对明挖法、盾构法、浅埋暗挖法进行各事故类型统计,事故类型占比以及事故发生部位统计如图 1-5~图 1-10 所示。



图 1-5 明挖法安全事故类型统计

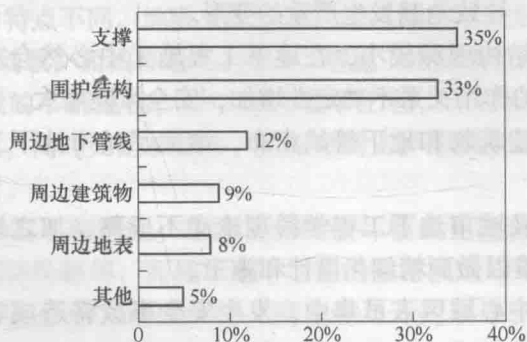


图 1-6 明挖法安全事故部位统计



图 1-7 浅埋暗挖法事故类型统计

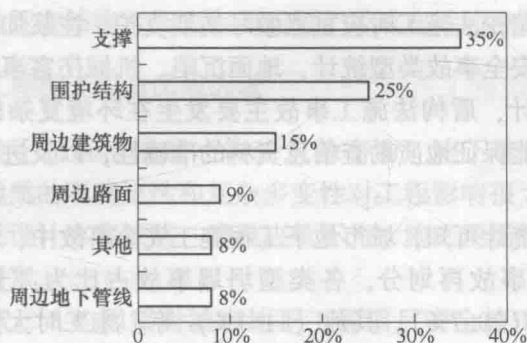


图 1-8 浅埋暗挖法事故部位统计



图 1-9 盾构法安全事故类型统计

对明挖法进行安全事故类型统计，可知坍塌事故在明挖法地下工程施工过程中所占比例最大；按照事故发生部位统计，支撑与围护结构部位分别占比 35%、33%，因此在安全管理中应加强边坡稳定验算、围护结构设计、基坑稳定性验算，现场监测时应注重围护结构、支撑的变形与受力变化。

对浅埋暗挖法进行安全事故类型统计，坍塌、透水、隧道变形事故占比较大比

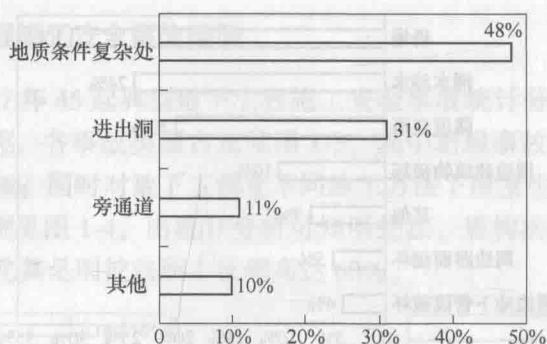


图 1-10 盾构法安全事故部位统计

例，因此在使用浅埋暗挖法施工时应重点做好初期支护、注浆加固、降水措施等。

对盾构法进行安全事故类型统计，地面沉陷、机械伤害事故占较大比例；按照事故发生部位统计，盾构法施工事故主要发生在环境复杂的地层和进出洞口处，因此还需尽可能保证地质勘查信息资料的准确性，以及进出洞作业时各项工作的安全管控。

根据事故类型统计可知，城市地下工程施工安全事故中，坍塌事故所占比例最大，这里将坍塌事故再划分，各类型坍塌事故占比为：土体与支护的坍塌（62%）、地表沉陷（20.7%）、其他（11.1%）等。施工时大量的土方开挖及施工扰动可能引起土体过量变形、地层失稳、地表沉陷、地下水位的大幅度变化等问题。其中，地层损失、孔隙水压力及固结压密、次固结沉降极易引起地表变形。同时，塌落物的自重较大，作用范围很广，易产生群伤事故，且危及地上周边的建筑物及各种城市生命线的安全。地层变形、围岩失稳、支护不当是城市地下空间工程环境风险的主要诱因，主要表现为地层过度变形、突发性变形和土体失稳。

基坑坍塌事故的主要原因如下：（1）基坑开挖时坡度不够；（2）基坑边坡顶部的荷载超出支护的承载力；（3）由于路面机动车辆的震动，造成滑坡；（4）支护方式不合理、施工方法采用不当、开挖程序不正确；（5）超标高开挖；（6）支撑设置或拆除顺序不正确；（7）降水排水措施不合理等。

隧道坍塌事故的主要原因如下：（1）地质条件的复杂多变，原有支护措施不当；（2）支护的不及时、暴露时间过长，导致围岩风化严重、变形失稳；（3）隧道穿过断层及其破碎带，一经开挖，潜在应力释放，导致围岩失稳；（4）岩层软硬相间，或有软弱夹层的岩体，在地下水的作用下，软弱面的强度大大降低，因而发生滑塌；（5）施工方法选择不当，或工序间距安排不合理；（6）喷锚不及时，或喷射混凝土质量、厚度不符合要求等。

支护坍塌的原因主要有两个方面：一是支护结构实际受到的荷载作用超过了

其承载能力,特别是稳定承载能力;二是支护结构受到了不应有的荷载作用(侧力、扯拉、扭转、冲砸等),或者发生了不应有的设置与工作状态变化(倾斜、滑移和不均匀沉降等),导致发生非原设计受力状态的失稳破坏。

地表沉降是指自然因素或者人为因素作用在地表岩、土体上,原岩、土体向下陷落,在地面形成塌陷坑(洞)的一种地质现象。城市地下空间工程的施工会引起地表沉降,在一定作用范围内形成一个凹槽,位于该凹槽作用范围内的建(构)筑物、道路、地下管线等会受到不同程度的影响。地表移动与变形对既有建筑物的损害形式主要包括:(1)地表均匀沉降损害;(2)地表倾斜损害;(3)地表曲率损害;(4)地表水平变形损害。在实际工程中,既有结构的损害往往由几种变形同时作用,应综合考虑城市工程施工过程中引起地表沉降的多种因素,并结合周边既有结构可能发生的问题,采取有效的防范措施。

1.2.3 城市地下工程施工安全风险因素

拟建的城市地下工程沿线建(构)筑物密布、地下管线设施密集且复杂、工程地质与水文地质的不确定性和复杂多变性对工程影响很大,而且城市地下工程设计理论不足及设计方案缺陷、建设决策不力、施工现场管理不当等也是影响工程安全的重要因素。

(1) 人的因素。人的因素对城市地下工程项目安全施工的影响,取决于两个方面:一是指直接参与工程项目建设的决策层、管理层和作业层人员的安全意识及安全素质,主要体现在决策层、管理层人员对施工安全现状的洞察力、安全态势的宏观控制力、安全事故的处理决策能力、安全生产的社会责任感等,以及作业人员的施工作业安全意识的培养、突发事件下应急自救能力的培养等;二是指承担建设工程项目策划、决策或实施的建设单位、勘察设计单位、咨询服务机构、工程承包企业等实体组织的安全管理体系及其安全管理能力,尤其是勘察设计单位,由于城市地下工程施工环境的特殊性,其勘察资料的准确性会直接影响作业人员的施工安全。

(2) 物的因素。物的不安全状态是指能导致事故发生的物质条件,包括物本身存在的缺陷、防护保险方面的缺陷、物的管控方法的缺陷、作业方法导致物的不安全状态、保护器具信号、标志和个体防护用品的缺陷等,以及机械设备、各类技术方案、安全防护、施工工法、施工材料的适应性,施工机械的安全性,技术方案的合理性等。在施工期间应保证机械设备使用、搬运的规范性,并定期对施工设备进行检查和保养,使设备处于安全的工作状态,保证施工安全;同时,在施工期间也应对施工材料质量进行检验,首先规范材料进场质量验收,保证材料符合现场施工要求,其次也用注重现场材料运输、存储的管理,保证施工材料的安全性。

(3) 环境因素。环境因素包括: 1) 城市地下工程建设项目水文地质条件复杂、多为不良地质和特殊地质, 易发生土方(结构)坍塌、路面塌陷、土体滑坡、管涌等, 这加大了城市地下工程施工技术难度和建设风险; 2) 城市地下工程对场地周围土体的扰动大, 易对场地周围建(构)筑物、地下管线、桥梁、既有地铁、居民生活等造成影响, 使得城市地下工程施工风险不仅具有内部因素的多样性, 而且还具有鲜明的层次性, 使得施工风险更加复杂化; 3) 施工现场的通风、照明、安全卫生防护设施等劳动作业环境, 这些环境条件直接影响城市地下工程安全施工, 加大了地下工程施工现场安全风险管控难度; 4) 城市地下工程上部荷载不是单一的, 而是多方面的荷载和叠加体, 如上部建筑物荷载、上部车辆通行的活荷载、车辆通行的冲击荷载等, 这些荷载都会对地层变形有影响, 危及施工安全。

1.3 城市地下工程施工安全预警现状

1.3.1 预警技术发展历程

“预警”最早出现于军事领域, 它是指通过预警雷达、预警卫星等工具来提前发现、分析和判断敌人的信号, 并把这种信号的威胁程度报告给相关的指挥部门, 以采取措施来应对。随着预警研究技术的逐步成熟, 安全预警技术开始从国家领域向企业领域扩展。20 世纪 80 年代, 美国开始对企业危机管理进行预警研究; 同时期, 我国余廉教授作为国内研究预警管理较早的学者之一, 首次提出了企业走出逆境的管理理论, 并且编写了对预警管理理论研究起到促进作用的阶段性的成果丛书——《企业预警管理》。随着我国安全生产预警理论不断发展, 一些学者专家将安全生产预警技术应用于企业管理、社会管理、建筑业、煤矿等领域。

1.3.2 地下工程施工安全预警理论

地下工程施工安全预警是指在明确工程施工安全风险及事故致因机理的基础上, 对能够综合反映工程安全事故可能发生的安全预警指标进行动态监测, 通过监测数据采用科学适用的诊断分析方法从时间和空间尺度上度量工程施工偏离既定安全状态的现状, 并预测其未来的发展趋势, 工程参与各方安全管理决策者结合预报的警情与现有控制技术手段, 在综合判断警情的可控性后, 及时采取相应的矫正控制措施或应急管理措施, 以最大限度地降低可能造成损失的一系列活动。

地下工程施工安全预警从时空角度可以将其划分为时间预警和空间预警两种类型, 空间预警是指在一定条件下划分可能发生安全事件的地域或地点, 时间预