



CHENGSHI DITIE GONGCHENG SHIGONG
JISHU PINGJIA JI GONGCHENG YINGYONG

城市地铁工程施工 技术评价及工程应用

梁 波 洪开荣◎编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

城市地铁工程施工技术 评价及工程应用

梁 波 洪开荣 编著

中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

本书重点探讨了地铁工程施工技术的现状、分类及发展趋势,不同地质条件下地铁施工技术的应用要求,各类施工技术中的关键技术,施工过程中的灾害风险评价与安全评估,信息化施工中的事故处治系统研发以及各类典型复杂施工技术案例分析。对目前科学技术和经济发展水平下地铁工程施工有关的技术、条件、措施等相关内容,特别是针对我国特有的复杂多样的地质条件、安全评估的理念、施工过程中的事故处治等问题,进行了系统总结和分析评价。

图书在版编目(CIP)数据

城市地铁工程施工技术评价及工程应用/梁波,洪开荣编著. —北京:中国铁道出版社,2011.3
ISBN 978-7-113-12095-5

I. ①城… II. ①梁… ②洪… III. ①城市铁路:地下铁道—铁路工程—工程施工 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 257282 号

书 名: 城市地铁工程施工技术评价及工程应用

作 者: 梁 波 洪开荣 编著

责任编辑:李丽娟 电话:(010) 51873135 电子信箱:LLJ704@163.com

封面设计:崔 欣

责任校对:孙 玫

责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:三河市华业印装厂

版 次:2011年3月第1版 2011年3月第1次印刷

开 本:787 mm×1 096 mm 1/16 印张:19.25 字数:472 千

书 号:ISBN 978-7-113-12095-5

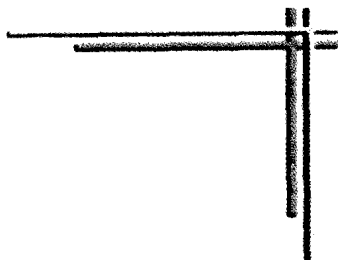
定 价:49.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010) 51873170,路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010) 63549504,路电(021) 73187



Preface 序言

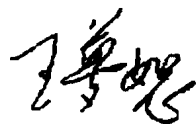
中国作为全球第一人口大国,其经济发展速度和城市化速度目前位居世界之首。国际智库专家曾预言,21 世纪世界上最具影响的事件是美国的高科技和中国的城市化。目前,中国 100 万人口以上的城市已从 1949 年的 10 个,发展到 2008 年的 122 个。但是经济的快速增长和城市化进程的加快却引发出一系列的矛盾和问题,诸如环境污染、资源短缺以及越来越严重的城市交通堵塞问题等。为解决上述矛盾和问题,从集约化和可持续经济发展战略以及国防战备需要出发,大城市向地下空间的开拓已成为 21 世纪的一个重要发展方向,包括我国在内的世界各国都日益重视地下空间的开发利用,这一思路也符合国际上普遍流行的一个观点,即“19 世纪是桥梁发展的世纪,20 世纪是高层建筑的世纪,21 世纪则是地下空间开发的世纪”。

目前,城市地下空间的开发利用主要是以城市地铁工程建设为主,兼顾开发地下共同管廊、地下停车场等。在解决城市交通拥堵、节约土地资源、保护和改善城市环境、加强国防及防灾减灾能力、减少碳排放等方面,地铁建设具有十分重要的现实意义。

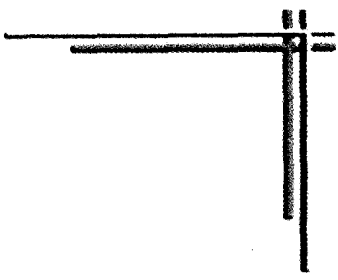
从 1863 年 1 月 10 日用明挖法施工的世界上第一条地铁在伦敦建成通车到现在,地铁工程建设已有近 150 年的历史。我国从 1965 年开始修建第一条北京地铁至今已有 45 年的历史,根据国家中长期发展规划,今后 20~30 年是我国城市轨道交通建设的鼎盛时期,要在大城市中心区基本形成“地铁+公交”的公共交通体系。城市地铁工程的设计、施工技术是决定城市地下工程成败的关键技术。目前,与地铁建设相关的土建工程设计、施工技术、技术装备和技术措施发展很快,有关新奥法、浅埋暗挖法、盾构法、沉管法以及辅助工法等施工技术的著作也出版

了不少。但不同城市、不同地质及地下水的施工环境却给施工单位和施工技术人员带来了许多困惑:在众多的地铁施工技术中,采用哪一种方法更经济合理,在现场具体条件下怎么应用;施工中遇到不同的地质情况时,技术方案如何转换;施工过程中如何做到及时量测、及时反馈、及时修正的信息化管理和对事故的快速处理等;北京、上海、广州等城市地铁施工经验对我们有什么启示?作者带着这些问题,对城市地铁工程施工技术和应用进行了综合评价和归纳总结。

本书作者多年来一直从事隧道与地下工程的科研和施工工作,在地铁施工技术领域具有较为丰厚的学养和经验。本书结合相关研究课题和典型工程应用案例,对地铁工程施工有关的技术、地上地下周边环境、工程措施等相关内容,特别是针对我国特有的复杂多样的地质条件、安全评估的理念、施工过程中的事故处治等问题的经验与教训进行了系统总结、分析和评价。该书对地铁建设具有现实的指导意义,同时对城市地铁工程的规划、风险评估、设计及施工也将起到借鉴作用,具有很强的实用性。



二〇一〇年十一月十九日



Foreword 前言

近年来,随着我国城市化进程的加快以及公共交通的大力发展,城市轨道交通建设的鼎盛期已经到来,与地铁建设相关的规划、设计理论、施工技术和技术装备与日俱增,相关设计理论和施工技术的著作也较多,但针对城市地铁工程施工技术进行综合评价和归纳总结的著作还不多见。

本书结合广州市建委科技项目[DX(2005)13]——“城市地下工程施工新技术的应用研究”和交通部西部科技项目(2006ZB09)——“公路隧道建设中数字化技术应用研究子题——隧道特大病害综合处治研究”,系统论述了城市地铁各类工程施工技术并对其进行了评价以及工程应用案例分析。

本书重点探讨了地铁工程施工技术的现状、分类及发展趋势,不同地质条件和环境条件下地铁工程施工技术的应用要求,各类施工技术中的关键技术和主要措施,施工过程中的灾害风险评价与安全评估,信息化施工中的事故处治系统研发以及各类典型,复杂施工技术应用案例分析。对我国特有的复杂多样的地质条件、安全评估的理念、施工过程中的事故处治等问题,进行了系统总结、分析和评价。

本书的形成和编著得到了王梦恕院士的肯定和支持,并于2008年底审阅了部分书稿内容并提出了许多宝贵的意见和建议,对此表示衷心的感谢。

本书分为6章,第1~3章由梁波(重庆交通大学)、洪开荣(中铁隧道集团)执笔,第4章由梁波、梁庆国(兰州交通大学)执笔,第5章由梁波执笔,第6章由洪开荣、梁波执笔。其中,梁庆国参与了第1章,许原骑(华东勘察设计院华东分院)参与了第2~3章,吴连波(深圳市交委)、柳林超(重庆市沙区建委)参与了第5章相关内容的研究分析、资料收集和 data 整理工作。此外,赵宁雨(重庆交通大学)参与了全书的统稿工作,在此一并表示感谢。

本书对于如何选择和如何应用城市地铁工程施工技术具有现实的借鉴和指导作用,具有很强的实用性,可供从事城市市政工程设计、施工和科研的人员参考使用,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

编 者

2010年10月

Contents 目 录

1 绪 论	1
1.1 背景及问题	1
1.2 城市地铁工程现状及地铁工程技术综述	3
1.3 城市地铁工程施工技术特征及现状	6
1.4 城市地铁工程施工技术分类及发展趋势	18
1.5 研究城市地铁工程施工技术评价及工程应用的重要性及现实意义	19
参考文献	20
2 不同条件下地铁工程施工技术的适用性和应用要求	23
2.1 不同地层条件下施工技术的适用性和应用要求	23
2.2 施工场地附近构筑物对施工技术的影响	57
2.3 不同建筑界限和地铁结构对施工技术的应用要求	59
2.4 环境保护条件下的评估与对策	68
2.5 地铁工程施工技术应用条件小结	71
参考文献	72
3 城市地铁工程各类施工方法中的关键技术和技术措施	74
3.1 明挖法和盖挖法修建城市地铁结构的关键技术和技术措施	74
3.2 浅埋暗挖法修建城市地铁结构的关键技术和技术措施	79
3.3 盾构法修建城市地铁结构的关键技术和技术措施	84
3.4 TBM 法修建城市地铁结构的关键技术和技术措施	94
3.5 沉管法修建城市地铁结构的关键技术和技术措施	99
3.6 顶管法修建城市地铁结构的关键技术和技术措施	103
3.7 各类地铁施工方法关键技术简要归纳	107
参考文献	108
4 城市地铁工程施工的风险分析与评价	110
4.1 地下工程安全风险评价的必要性和紧迫性	110
4.2 工程风险评价体系及安全评估原则与方法	111
4.3 城市地铁工程灾害体系	124
4.4 地铁施工可能造成的环境风险分析	128
4.5 不同施工方法可能造成的施工灾害风险分析	133
4.6 城市地下工程地震灾害风险分析	136
4.7 城市地下工程火灾风险分析	141
4.8 城市地下工程水灾风险分析	144
4.9 小 结	144

参考文献	145
5 地铁工程施工中的风险灾害处治系统研发与预防	148
5.1 研究现状及意义	148
5.2 浅埋暗挖地铁隧道施工风险灾害处治系统研发	152
5.3 考虑风险评估的盾构隧道施工灾害处治软件研究	176
5.4 地铁隧道施工风险预防与处治	186
参考文献	208
6 地铁工程施工技术应用案例分析	210
6.1 北京地铁工程施工技术的应用案例分析	210
6.2 上海地铁工程施工技术的应用案例分析	224
6.3 广州地铁工程施工技术的应用案例分析	232
6.4 暗挖车站及站台隧道综合施工技术应用案例分析	241
6.5 地铁车站和隧道下穿既有线施工技术应用案例分析	276
6.6 地铁工程施工技术应用案例分析总结	296
参考文献	298

1.1 背景及问题

城市是人类社会经济发展到一定阶段的产物,是人文、工商财经、科学技术与文化复合而成的高度集中的社会实体,是—定地域范围内政治、经济、文化的中心。它包括国家或地区按行政区域划分而设立的首都、直辖市、县、镇(乡)及独立的工矿区 and 城市型居民点^[1]。改革开放以来,随着经济的发展,我国城市化水平进入了加速发展阶段,中国国家统计局在 2009 年 9 月 17 日发布的报告显示,中国城市数量已从新中国成立前的 132 个增加到 2008 年的 655 个,城市化水平由 7.3% 提高到 45.68%。中国 100 万人口以上城市已从 1949 年的 10 个,发展到 2008 年的 122 个。预计到 21 世纪中叶城市化水平将达到 65%,我国的城市将由现在的 600 多个增加到 1 000 多个,接近世界发达国家的城市化水平。中国是全球第一人口大国,其经济发展速度和城市化速度目前位居世界之首,目前平均发展成本高出世界平均水平 1/4,因此,国际上的专家曾预言,21 世纪世界上最具影响的事件是美国的高科技和中国的城市化^[2~3]。但是经济的快速增长和城市化进程的加快却引发了一系列的矛盾和问题,诸如:人口爆炸、破坏性建设、文化摧毁(包括城市的历史肌理与文化)、环境污染、资源短缺以及越来越严重的交通问题等^[1,4,5]。为解决上述矛盾和问题,从集约化和可持续的经济发展战略以及国防战备需要出发,大城市向地下空间的开拓已成为 21 世纪的一个重要发展方向,包括我国在内的世界各国都日益重视地下空间的开发利用,因此,国际上一种普遍流行的观点就是:19 世纪是桥梁的世纪,20 世纪是高层建筑的世纪,21 世纪则是地下空间的世纪,号召人们“往深处想”,把地下空间当成一种新型的国土资源,并在总体上称之为“地下产业”(Underground Industry)^[6~8]。城市地下空间的开发利用主要是依托地下工程建设进行的,主要解决的应当是交通系统、市政公用设施系统、防空防灾系统和能源及物资储备系统等。城市地下空间的开发利用对于保护和改善城市环境,节约土地资源、缓解城市交通拥挤、建设城市地下市政管线公用隧道、治理城市大气污染、减少城市酸雨、消除垃圾围城现象、加强国防及防灾减灾能力,从而整体提高城市生产生活质量,都具有十分重要的理论和现实意义^[9~10]。城市地下空间的开发利用可用图 1-1 来简要说明。从图中关系可知,城市地铁工程建设为当前地下空间开发的核心。

1.1.1 我国大中型城市的交通问题

城市交通问题是 20 世纪以来工业发达国家一直为之困扰的问题。进入 20 世纪 80 年代以来,我国城市的经济贸易和社会活动日益繁忙,城市交通发生了前所未有的迅速增长,传统

的道路交通设施已经不能适应现代社会的需要。当前,我国城市特别是大城市的交通拥堵问题极其严重,如果不能得到有效解决和根本治理的话,必将影响城市发展。

(1)我国城市交通的发展

1980年后,随着我国改革开放的深入进行,城市化速度迅速提高,到1990年和2000年分别达到18.96%和

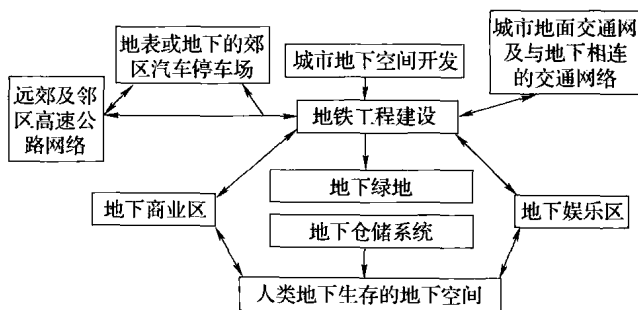


图 1-1 城市地下空间开发利用类型及关系

29%,2001年广州市成为继上海、北京、重庆、天津之后的第五座人口超过千万的特大城市。据估计,我国城市数量到21世纪中叶将增至1000个。那么怎样才能解决我国的城市交通紧张、逐步实现城市交通的现代化呢?我们首先必须弄清这个问题的原因。

(2)我国城市交通面临的问题

当前大城市交通面临的主要问题归纳起来有如下五条:道路容量严重不足;汽车增长速度过快;公共交通日趋萎缩;交通管理技术水平低下;缺乏整体的交通发展战略。

1.1.2 大力发展城市公共交通的必要性

城市的固有性质是人多地少、车多路少,要解决这个基本矛盾就必须提高客运效率。解决城市交通究竟主要靠什么?是个体交通还是公共交通,这是城市交通发展的战略问题。20世纪60年代法国巴黎最先提出公共交通优先的战略,后来几乎所有国家和地区都鲜明地选择了优先发展公共交通的政策。欧美在近40多年的实践中形成了丰富的城市公共交通体系,取得了显著成效并成为解决城市交通堵塞的根本办法。城市公共交通在缓解城市交通压力,节约土地和道路资源,保护环境,降低社会经济运行成本起到了重要作用,且具有社会公益的性质和重要的社会意义。因此要解决我国城市交通问题,必须坚持公共交通优先的原则。

交通阻塞、车速慢、停车难等是我国很多城市遇到的普遍问题,各城市都想方设法新建道路、拓宽道路。北京的城市道路宽度、立交桥数量在全国堪称第一,然而北京的塞车亦是全国闻名的。南京为拓宽道路,砍掉了令南京人自豪的法国梧桐树,遭到许多专家和市民的抗议。随着我国城市小汽车增长速度加快,城市交通矛盾将会长期存在,为解决这个问题,必须另寻出路。

从世界城市交通发展的经验上来看,要实现机动性和可达性的有机结合,就需要大力发展大容量的城市快速轨道交通系统,使之成为大城市交通系统的主骨架。目前,伦敦、巴黎、莫斯科、纽约和东京等城市的地铁承担了一半以上的客流量,人们借助地铁可以到达城市的任何一个地方^[1]。城市地下空间对大气、噪声、景观的影响降低到了最低程度。以地铁为代表的地下公共交通,以其快速、安全已成为很多特大城市的交通支柱。

因此,我国要想解决大城市的交通拥挤和机车污染问题,必须坚持发展城市快速轨道交通系统,城市交通最终以轨道交通为主,这是解决城市交通拥堵的根本办法。

1.1.3 研究地铁施工和地铁施工技术的重要性

对于城市地下工程而言,现行的施工技术多达近十种,而大多数施工技术都有数十年的发

展,甚至上百年的发展。由于城市地下工程施工是一门牵涉多方面学科的、影响因素复杂的综合性科学,具有很强的实践和社会性,因此,地铁施工技术应该着眼于实践过程中为改进施工技术而出现的新材料、新设备、新理念、新思路、新工艺等对施工技术有长远发展和影响的创新技术上来。开发地下空间与开发地表空间有很大区别,所使用的技术也有很大的区别。地铁施工及施工技术的重要性有如下几条^[3]:

(1)地铁施工技术对城市宝贵的地下空间资源来说意义重大。地下空间利用成本很高,而地下空间资源宝贵,需要重视施工技术对结构安全和耐久性的影响。

(2)地铁施工技术的选择应符合节约型社会的要求。不合理的施工方法是造成浪费的原因之一。

(3)地铁施工技术的选择应使其对城市环境的影响降到最小。

总之,地铁施工难度大,不可预见因素多,地铁施工技术作为地下工程的前期环节和重要组成部分,是决定地下工程成败的关键因素之一。因此研究城市地铁工程施工技术评价及工程应用就具有重要的理论和现实意义。

1.2 城市地铁工程现状及地铁工程技术综述

1.2.1 城市地铁工程建设现状

从1863年1月10日用明挖法施工的世界上第一条地铁在伦敦建成通车到现在,地铁工程建设已有近140余年的历史。而盾构法施工技术于1890年首次在伦敦采用也有近120年的历史,可以说轨道交通的历史比汽车还悠久^[12]。

1892年6月6日,芝加哥建成世界上第二条蒸汽驱动地铁,1895年5月6日建成世界第二条电气化地铁;1896年5月8日,布达佩斯建成世界第三条、欧洲大陆第一条电气化地铁,并由奥匈帝国皇帝弗朗西斯·约瑟夫剪彩通车;1897年9月1日,波士顿建成世界上第四条电气化地铁;1898年5月9日维也纳也建成世界上蒸汽驱动地铁。

1900年7月9日,巴黎建成世界第六、欧洲第二条电气化地铁;1901年12月10日,纽约建成第七条蒸汽驱动地铁,该条铁路于1904年10月27日实现电气化。1902年2月18日柏林建成世界第八,欧洲大陆第三条电气化地铁。20世纪上半叶,东京、莫斯科等几座城市相继修建了地铁。截止到1963年的一百年间,世界上建有地铁的城市共有26座。1964年到1980年的17年中又有30座城市修建了地铁,到1985年世界大约共有60座城市正在有计划地修建地铁,当时全世界地铁运营的里程总计3000 km。据1994年7月德国出版的《地铁世界》一书统计资料,到1990年世界有98个城市约5300 km轨道交通投入运营,另有29个城市,94条线约1000 km在建。近20年来增加的线路是1863年到1963年一百年建成地铁总长度的3倍。运营线路长度排名前十位的城市依次为:纽约、伦敦、巴黎、莫斯科、东京、芝加哥、墨西哥城、柏林、波士顿、圣彼得堡,线路总长2300 km,占世界轨道交通的43%。

目前,就我国的实际情况来看,首当其冲的问题就是解决交通拥挤,并向地下开拓城市居民的生存空间,其中尤以修建地铁和轻轨为主^[9,13]。据有关预测分析,今后30~50年是我国城市轨道交通建设的鼎盛时期,在大城市中心区基本建成“地铁+轻轨”。“十一五”(2006~2010年)是我国城市地铁建设与城市建设整合、高效、综合开发利用地下空间资源的重要历史时期^[6,9]。

我国继 20 世纪 60 年代在北京、70 年代在天津、80 年代在上海兴建地铁后,目前有 10 余个城市正在修建地铁,包括北京、上海、天津、南京、广州、深圳、重庆、西安、武汉、成都等,截至 2008 年底运营里程达到 776 km,目前,22 个城市 79 条地铁规划获批。到 2015 年前后,我国建成和在建轨道交通线路将达到 158 条,总里程将超过 4 189 km。其中,部分城市的现状和远期规划分别为:

北京:地铁工程始于 20 世纪 50 年代,当时地铁为深埋方案,拟建地铁隧道埋设在距地表 100 多米的砂砾岩中。在 1962 年经周总理建议才确定北京地铁以交通为主,采用浅埋方案。1965 年 2 月 4 日毛主席对修建地铁作了重要批示:“精心设计、精心施工”,当年 7 月 1 日北京地铁一号线正式开工,全长 23.6 km,1969 年 9 月建成。至 2008 年底,北京地铁运营里程共计 200 km。到 2015 年北京将开通地铁总里程 561 km,实现“三环、四横、五纵、七放射”的轨道交通网络,届时北京地铁线路总长将超越伦敦、巴黎等世界大都市,中关村、金融街、奥林匹克公园和 CBD 等地区都将有多条地铁相连,市民在四环内出行,平均步行 1 km,就可以达到地铁站。

上海:上海地铁一号线 1995 年全线通车。到 2010 年 4 月,上海轨道交通线网已开通运营 11 条线,运营里程达 410 km,近期规划达到 510 km,远期达到 970 km。

广州:全长 18.48 km 的一号线、全长 23 km 的二号线已建成通车。目前通车里程已达 116 km。规划线网总长 206 km,7 条线。

南京:地铁南北线一期工程 17.0 km;南京城市轨道交通规划了 10 条线路,在主城范围内里程达 300 km 以上。

深圳:地铁一期工程正线全长 19.468 km,总投资 105.85 亿元。到 2015 年,深圳将斥资 328 亿人民币建设超过 120 km 的轨道交通。

此外,重庆、成都、青岛、长春、大连、杭州等 20 多座城市也正在筹建或建设城市地铁。

1.2.2 城市地铁工程技术综述

我国地铁施工不能追求盲目的先进。更不能追求不合理的豪华或低造价,应以安全可靠和适用作为前提。因此我们对地铁工程技术及其应用范围要有清楚的认识。

地铁工程技术主要分为三个方面:地质调查技术、设计技术和施工技术。

(1) 地质调查技术^[14]

调查技术分为施工前期调查和施工期间调查。前者用于设计和编制施工计划,以获得信息为目的,包括施工现场场地调查、埋设物调查、地层调查;后者用于管理,它包括施工管理调查、环境保护调查。

地层调查的主要技术有以下几种:资料调查、地质勘测、钻孔调查、孔内原位试验、物理勘测、地下水调查、土体和岩石物理实验、土体和岩石力学实验。

(2) 设计技术

由于地下工程的支护系统环境条件数量化表达十分困难,所以地下结构的设计技术和地面工程结构不同。地下结构设计大致可分为两大块:工程类比的经验方法和数值计算方法。另外,近些年来提出了地下工程信息化设计的理念,即把工程开工前根据地质调查和岩土力学试验进行的设计称为“预设计”,施工过程中进行信息监测,利用实际参数和反分析技术进行调整,从而修正“预设计”的一种动态设计方法。

(3) 施工技术

建造地下工程,不仅要考虑结构物形式、地层条件等因素,更重要的是选择合适的施工方法,施工技术中需要选择主要的施工技术、辅助施工技术、周边环境保护对策、既有结构物保护对策、弃土和建筑垃圾处理对策等要素。

1) 地铁隧道结构物主要施工方法

① NATM 施工法(新奥法)。此方法取代传统的山岭隧道暗挖法,是利用锚杆与喷射混凝土形成支护结构,充分发挥岩体自身强度,进行现场监测管理的隧道施工方法。适用于硬岩和软岩地层,在软土地层要注意地层强度和开挖断面的规模。

② TBM 施工法。此法是采用隧道钻凿机(TBM)的隧道施工方法。其优点是掘进速度快,但对岩层变化适应性差,在破碎带中掘进困难,价格较高,开挖直径变化困难。适用于硬岩和中软岩地层。

③ 盾构法。该法可防止地层坍塌,是在保护外壳内部进行安全开挖与管片预制衬砌的施工方法。适用于软土和部分软岩地层,需要注意护盾类型和掘进长度。

④ ECL 工法(Extruded Concrete Lining,即挤压混凝土衬砌施工法)。其开挖施工法与盾构施工法相同,但衬砌采用现浇混凝土,能有效地控制地面沉降,阻止地层变形。适用于软岩和部分软土地层,但需要注意地层强度和地下水。

⑤ 顶管法。此法是利用千斤顶作用于预制管片,一节节压入的施工方法。此方法适用于软土地层,需要注意掘进长度和曲线施工。

⑥ 明挖法。选择明挖还是暗挖要视地表使用情况和经济性而定。适用于软土和部分软岩地层,需要注意其占地情况。

2) 平面结构物主要施工方法

① 基坑施工法。建造复杂平面结构物最一般的施工法。

② NATM 施工法(新奥法)。

③ 沉井施工法。构筑好结构物主体段,从内部将土挖出并向下沉放,反复进行构筑、挖土与沉放,将结构物沉放到预定深度的施工法。大致分为开放沉井施工法和气压沉井施工法两种。适用于软土和软岩地层,需要注意水压。

3) 辅助施工法

① 地层加固工法。指以增加软弱地层的强度,减小地层沉降等为目的的工法,有排水法、固结法和搅拌法等。

② 注浆法。注浆的目的有加固地层和封堵地下水两种。

③ 冻结施工法。冻结施工法主要利用冻土的稳定性与不透水性,对含水软土层进行短期冻结,在结构物建好后,再对冻土进行解冻。该法几乎适用所有的土层,具有优良的挡水性能,但由于土层冻胀与解冻收缩,可能会对邻近的构筑物带来不利的影响。

④ 降水法。主要有井点降水法、深井降水法等,视土粒情况而定。采用降水法时要对周边水井利用情况、软土的压缩沉降、排水场等进行调查。

4) 其他的施工技术

① 保护环境的对策。减小施工产生噪声、振动、沉降及水质污染等问题的技术。

② 弃土与垃圾处理。在必须抑制垃圾产生的同时,要处理弃土破坏、污染道路环境与城市排水。

5) 施工方法及施工技术的选择

主要根据地层强度等情况来选择,还要考虑施工振动、噪声等给周围环境带来的影响。另外还受经济条件、工程规模、占地条件及主体结构形式等制约。

1.2.3 城市地下工程环境及防灾安全技术现状综述

(1)环境保护技术

地下空间利用的关键技术是内部环境技术和周围环境技术,新开发出来的地下空间内部环境称作“内部环境”,地下空间影响范围内的环境成为“外部环境”。

地层环境恶化包括地下水变化、土层力学性质变化、土壤污染等;地面环境恶化包括大气污染、噪声、振动等。地面、地下都存在污染问题,包括水质污染、热、微生物、生化、放射性污染,而社会环境污染主要是指景观、交通以及弃土等问题。防止这种情况发生的技术,将根据具体情况的不同而有所区别,如地下水位下降时的止水施工法和回灌法,地下水位上升时的抽水、降低水压、采用透水性支护施工法和旁通管法,漏水时的止水处理,地层固结沉降时的上面的地下水位上升与漏水对策技术、地层加固、结构物加固,地表沉降、开挖侧向变形时采用适当的支护体系与衬砌、地层改性、结构物加固、回填与压实等。

内部环境的保护技术分别从卫生方面和舒适方面考虑。卫生要素是指空气、温度、空气质量,与之相关的环保技术有空调系统、换气系统和体感型空调等。舒适性要素指声音、振动、光、空间造型等。与声音有关的环保技术有消除噪声、不断变化背景音乐、提高声音最小可听值,与振动有关的有金属弹簧防振装置、硬橡胶防振装置、空气弹簧防振装置和浮筏基础防振装置。与光线有关的有利用阳光和照明等。空间设计考虑颜色、开阔程度和绿化程度等。

(2)防灾安全技术

地下灾害主要包括火灾、煤气瓦斯爆炸、浸水、漏水、停电等,另外地下灾害还有地震灾害、火山喷发、潮汐、风和水灾、滑坡山崩、雪灾、雷击、爆炸、交通事故、结构灾害、大气污染缺氧、泄漏、犯罪等。与其他灾害相比,火灾是地下工程危害最大的灾害,应把防火灾措施放在首要位置。

目前,地下空间防灾、安全措施的研究重点在其应用技术上。对于新型地下设施,必须结合新型和现有的防灾安全技术,以突破现有模式,建立综合防灾方案评价系统。

目前几项优先发展的新技术包括^[3]:低耗水型灭火设施;安全蔽体;抗灾技能培训系统与救灾系统;监视烟浓度、方向的排烟控制系统;防灾机器人与救援中心;智能化的综合防灾系统;防灾、安全设施自身防灾能力等技术。

1.3 城市地铁工程施工技术特征及现状^[15]

地下工程的类型很多,工程特点各异,相应的施工方法和技术也各不相同,表 1-1 和表 1-2 分别是我国目前城市地下工程中应用于地铁区间隧道和地铁车站的施工方法及其比较^[16~19]。无论是何种特定的施工方法,都应包括最基本的开挖技术、支护技术和相应的辅助技术。目前盾构法和新奥法较为流行,在我国也被大范围使用。其中盾构法是上海地铁和市政隧道采用的主要方法,已取得较好的效果,并具备自主创新的能力,处于国内领先,国际先进的水平,其他城市也均有使用。以下对其中主要的一些技术进行探讨。

表 1-1 地铁区间隧道施工方法一览表

序号	施工方法	适用条件	优 点	缺 点	辅助技术和设备等
1	明挖法	市郊施工场地开阔, 软岩和土体(如北京、天津)	进度快, 工作面大, 便于机械化和大量劳动力投入	破坏生态环境, 影响交通, 带来尘土和噪声污染	井点降水系统, 可靠的支撑系统, 大型土方机械, 混凝土搅拌及运输机械
2	矿山法 (钻爆法)	岩石和坚硬土体(如青岛、重庆)	地面干扰小, 造价低	进度慢, 劳动强度高, 风险大	1) 多臂凿岩台车, 自动装药引爆装置; 2) 控制爆破技术, 喷锚支护, 信息反馈指导设计和施工
3	暗挖法	埋深较浅(如北京、哈尔滨等)	地面干扰少, 造价低, 可用人工法施工	机械化程度低, 劳动强度高, 环境恶劣, 风险大	1) 冻结法、注浆、深层搅拌桩等地基和围岩加固技术; 2) 小型灵活的地下开挖机械; 3) 可靠的临时支护措施和机具
4	盾构和顶管法	城市软地层, 埋深隧道(如上海、南京、广州)	地面影响小, 机械化程度高, 安全, 工人劳动强度低, 进度快	机械设备复杂, 价格昂贵, 施工工艺繁琐, 需要专业施工队伍	适应能力强, 自动更换刀盘, 超前探测排障技术, ECL 法, 三维仿真计算机管理系统, 自动导向, 中途对接异型盾构
5	沉管法	跨越江河湖海或软地基(如广州、宁波、上海过江隧道)	造价低, 速度快, 隧道断面大	封锁江河水面, 专业的驳运, 水下作业, 风险大	1) 大型涵管制作及驳运技术; 2) 下沉, 对接机具; 3) 地下定位对接, 防水技术
6	TBM 法	坚硬岩石地质(如广州、重庆)	速度快, 机械化程度高, 安全地面无干扰	造价高, 使用掌握复杂, 刀具易磨损	开发国产高性能凿岩机, 改进高强合金刀具, 完善后备系统, 超前不良地质探测系统

表 1-2 地铁车站施工方法一览表

序号	施工方法	场地要求	优 点	缺 点	辅助技术和设备等
1	明挖法	浅埋车站, 有宽阔的施工场地(如北京、天津地铁站)	进度快, 造价低, 便于机械和大量劳动力投入	破坏和污染环境, 影响市区居民生活, 风险大	1) 开发大型导板式开凿机, 深层地下连续墙, 桩排墙施工技术; 2) 预应力支撑技术; 3) 地面变形监控技术; 4) SMW 土钉墙支护
2	矿山法 (钻爆法)	坚硬岩石介质, 地下水位低	地面影响小, 造价低,	进度慢, 劳动强度高, 风险大	1) 多臂钻孔台车, 自动装药引爆装置; 2) 光面爆破, 喷锚支护, 监控数据反馈指导设计和施工; 3) 大型土方机械
3	浅埋暗挖法	土体、埋深浅, (如北京、哈尔滨等)	地面干扰小, 造价低	地下作业风险大, 机械化程度低	1) 发展可靠的浅层地基处理技术; 2) 小型灵活的地下开挖机械; 3) 可靠的临时支护措施和机具
4	盖挖法	市郊浅埋地铁车站, (如上海地铁 1、2 号线淮海路和南京路上的车站)	占用场地时间短, 对地面干扰少, 安全	施工工序复杂, 交叉作业, 施工条件差	1) 建立合理的施工管理网络, 交叉施工, 流水作业; 2) 地下小型施工机械; 3) 地下连续墙施工技术、钻孔桩柱施工质量控制和托换技术
5	逆作法 (半逆作法)	车站上面有高层建筑, 埋深较深(如上海地铁新闻路车站)			
6	异型盾构 (或凿岩机法)	市区深埋车站, 线路交汇换乘下层车站	影响小安全, 机械化程度高	机械复杂, 造价高, 安装操作难度大	1) 开发研制国产大型三心圆, 割圆异型盾构; 2) 开发新型衬砌支护材料和装配技术

1.3.1 明挖法

明挖法是指挖开地面,完成隧道主体结构,最后回填基坑或恢复地面的施工方法。明挖法施工顺序:围护结构施工→内部土方开挖→工程结构施工→管线恢复及覆土。

随着我国地下空间的发展,地下工程建设项目的数量和规模也迅速增大,产生了大量的深基坑工程,并形成了种类齐全的多重基坑围护开挖技术。

从支撑技术上形成并发展了重力式、支撑式、土锚式、土钉式等多种技术,从围护工法上形成并发展了简易围护墙法、木板桩法、钢板桩法、钢管桩法、灌注桩法、地下连续墙法、逆作法(又叫盖挖法)等多种工法。基坑工程的设计理论、计算方法也得到不断改进,基坑工程的设计规范也有一定的发展。

明挖法适合于场地开阔,交通及环境允许的地区。埋深较浅的区间隧道,应该优先使用施工速度快、施工作业面多、工期短、易保证工程质量、造价较低的明挖法施工。明挖法施工的隧道结构通常采用矩形断面,一般为整体现浇或装配式结构,其优点是其内轮廓与建筑限界接近,内部净空可以得到充分利用,结构受力合理,顶板上便于铺设城市地下管网和设施。

明挖法是目前我国地铁车站采用最多的一种修建方法,主要有放坡明挖和维护结构内的明挖(即基坑开挖)两种方法。明挖顺筑法技术上的进步主要反映在基坑的开挖方法和维护结构上,适应于不同的土层。

1.3.2 新奥法

新奥法(NATM——New Austrian Tunneling Method)是新奥地利隧道施工方法的简称。新奥法是20世纪60年代L. V. Rabcewicz等奥地利工程师总结前人的隧道工程实践经验后提出的一套隧道设计、施工的新技术。光面爆破、喷锚支护和变形量测是新奥法的三大支柱。其中,喷锚支护是新奥法的基础,围岩变形量测是新奥法的灵魂,没有围岩变形量测的喷锚支护就不是新奥法。由于其理论上的合理性,在世界各地得到了广泛应用。新奥法是在20世纪60年代进入我国的,随后以其快速、节省、安全及其很高的灵活性与优越性越来越受到学者和工程技术人员青睐,现在几乎所有重点难点工程都离不开新奥法。

我国有些工程技术人员将新奥法和矿山法混为一谈,认为新奥法不过是矿山法的改进而已,其实二者有着本质的区别。矿山法认为在地层中开挖坑道必然要引起围岩坍塌掉落,开挖的断面越大,坍塌的范围也越大。而新奥法则是应用现代岩体力学的理论,以充分维护和利用围岩的自承能力为出发点。

国内于1979年在皖赣线下坑单线铁路隧道中首次采用新奥法施工,以后不断积累经验并成功应用于许多工程之中。20世纪80年代中期在修建北京地铁复兴门折返段时,成功地应用了从军都山铁路隧道黄土段施工总结出的浅埋暗挖法的“十八字经”即:管超前,严注浆,短开挖,强支护,快封闭,勤量测^[20~22]。此外,像日本的“隧道十训”、奥地利的“22点原理”以及关宝树教授总结出的隧道施工十六字诀:“爱护围岩,内实外美,重视环境,动态施工”等都充分体现了新奥法的精髓和活力,并且这种思想和理念也深刻地影响和应用于其他类型的方法之中,如盾构法等^[6,23~25]。

新奥法主要类型有:全断面法、台阶法(长台阶法、短台阶法、超短台阶法)和分部开挖法

(单侧壁导坑法、双侧壁导坑法)。采用新奥法设计和施工地铁隧道时,其开挖方法主要根据地质条件、断面大小及周边环境条件等因素选择,开挖方法主要采用类比法,并结合数值分析确定。根据国内外的经验,主要开挖方法的特点和适用范围见表 1-3。

表 1-3 新奥法基本施工方法适应性评价

施工方法 比较项目	台 阶 法	中 壁 法	侧导坑开挖法
	短台阶法和上半断面临时封闭台阶法	CD 法或 CRD 法	双侧导坑超前开挖法(眼镜法)
掌子面的稳定性	可采用可靠性强的超前支护,能确保掌子面的稳定	因纵向分割断面,开挖跨度小,能确保掌子面的稳定	开挖端面分割细,可确保掌子面的稳定
隧道周边松弛的控制效果	超前支护作为支护结构的效果不十分清楚,但从改善开挖地层的角度考虑,可以在一定程度上控制拱顶范围的松弛	因开挖断面小,半端面开挖支护及时,可防止隧道周边松弛的扩大	因分割断面细,及时支护,能控制隧道周边松弛的扩大
地质变化的适应性	在超前支护、辅助工法的效果不明显或不经济时,可改变为 CD 法施工	根据地质状况的变化,可改变为 CRD 法,上半断面超前工法	地质变好时,改变工法困难。超前导坑能确认前方的地质状况,对不良地质可在施工前采取措施
施工条件	因开挖断面大,可采用大型机械快速施工	拆除中壁作业复杂,施工条件差,不宜采用大型机械快速施工	因开挖断面小,大型机械使用困难,施工条件差
适应性评价	在超前支护辅助工法配合施工的基础上,能适应各类围岩条件下的施工,并能形成有效的支护体系,是一个适应较广的工法	属于大断面分割施工,在埋深浅的情况下能控制地表沉降,施工安全,在地质不良地段也可应用。和上半台阶法可以互换	同上。但和上半断面台阶法和中壁法互换困难。隧道全长均采用一种施工法,开挖效率低

目前国内对于断面较小的区间隧道,主要采用台阶法,地质条件较差或地表沉降控制要求严格时,可考虑采用 CD 法(Center Diaphragm),并根据需要采用辅助施工措施解决,以提高施工速度;而对于断面较大的地铁车站和折返线,考虑工程安全和保护周边环境,多采用 CRD 工法(Cross Diaphragm)或双侧壁导坑工法(眼镜工法)^[26~27]。

1.3.3 浅埋暗挖法

1986~1987 年,在北京地铁复兴门折返线施工时,采用王梦恕提出的方案,首次应用从军都山铁路隧道黄土段施工总结出的浅埋暗挖法。在开挖宽度 14.5 m、拱顶覆土 5.9 m 的第四纪冲洪砂砾层中获得成功,其成果通过了北京市和铁道部的科学成果鉴定,经过讨论正式取名为“浅埋暗挖法”,浅埋暗挖法作为隧道及地下工程修建方法之一,从此载入地下工程的修建史册。后来,王梦恕院士又在多年工程实践和理论研究的基础上,撰写了我国第一部全面系统论述“浅埋暗挖法”理论、设计、施工的专著——《地下工程浅埋暗挖技术通论》,对浅埋暗挖技术的理论基础、工程理念、设计与施工方法进行了全面论述。

浅埋暗挖法的理论不同于新奥法,新奥法的核心是以维护和利用围岩的自承能力为基础,使围岩成为支护体系的组成部分。而作用于浅埋地下工程上的地层压力是覆盖层的全部或部分土柱重,作用在支护上的地层压力 and 支护的刚、柔关系不大,从减少地表沉陷的角度出发,还