



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家“十三五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·运营与维护管理系列

总主编 钱七虎 副总主编 朱合华 黄宏伟

城市地下工程结构检测与评价

杨新安 丁春林 王瑶 郭乐 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家“十三五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·运营与维护管理系列

总主编 钱七虎 副总主编 朱合华 黄宏伟

城市地下工程结构 检测与评价

杨新安 丁春林 王 瑶 郭 乐 编著



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

城市地下工程结构检测与评价/杨新安等编著. —
上海:同济大学出版社,2018.12

城市地下空间出版工程.运营与维护管理系列/钱
七虎总主编

ISBN 978-7-5608-8083-9

I. ①城… II. ①杨… III. ①城市建设—地下工程—
工程结构—质量检验 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 184886 号

城市地下空间出版工程·运营与维护管理系列

城市地下工程结构检测与评价

杨新安 丁春林 王 瑶 郭 乐 编著

出品人: 华春荣

策 划: 杨宁霞 胡 毅

责任编辑: 李 杰

责任校对: 徐春莲

封面设计: 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(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

排版制作 南京月叶图文制作有限公司

印 刷 上海安兴汇东纸业有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.25

字 数 356 000

版 次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-8083-9

定 价 88.00 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“十三五”重点图书规划项目、国家出版基金资助项目、上海市高校服务国家重大战略工程入选项目。本书介绍了城市地下工程结构及其病害、结构检测与病害调查、状态与评价。首先总结了城市地下工程结构的特点,阐述了城市地下工程结构检测与评价的意义。从城市地下空间类型、建筑与构造、结构三个方面论述了城市地下工程结构与构造。其次,针对地下工程常见的病害和危害,分析了各种病害和危害的成因、机理及其防治方法,并详细介绍了地下工程结构检测方法原理。最后,结合工程实例,论述了地下工程结构状态评价方法。

本书可供隧道与地下工程、城市轨道交通、城市地下空间工程、市政工程等专业方向的本科生和研究生使用,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·运营与维护管理系列”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

总主编

钱七虎

副总主编

朱合华 黄宏伟

编委(以姓氏笔画为序)

朱合华 许玉德 杨新安 束 昱
张 旭 倪丽萍 黄宏伟 谢雄耀

作者简介

杨新安,工学博士,同济大学交通运输工程学院教授,博士生导师,交通隧道研究室主任。国家科技奖励工作办公室评审专家,教育部学位中心评审专家,广东省、山西省、河北省科技评审专家。中国地下工程与地下空间学会理事,上海市土木工程学会地下工程专业委员会委员。主要从事隧道工程、城市地下工程等方面的研究工作,主讲“铁路隧道”“隧道病害与防治”“城市隧道工程”等课程。在隧道支护与加固理论、城市隧道工程技术方面有突出贡献。研究成果获省部级科技奖6项,发表论文130余篇,其中EI和ISTP检索50篇,获国家专利8项,开发具有自主知识产权软件2项。出版著作7部。

丁春林,工学博士,同济大学交通运输工程学院副教授,博士生导师。主要从事地铁设计理论与施工环境控制、隧道与地下工程安全评估和防水加固技术、工程数值模拟计算技术等方面的研究。先后主持或参与国家自然科学基金项目、铁道部科技发展计划项目以及上海地铁、南京地铁、广州地铁、无锡地铁、合肥地铁、京新高速、大西客运专线、杭黄高铁、怀邵衡铁路、蒙华铁路、引黄工程等多项科研课题。研究成果获省部级二等奖3项,三等奖1项。申请发明专利10余项,获软件著作权2项。发表论文60余篇,编写教材和著作3部。

王瑶, 硕士, 现任职于上海申通地铁集团有限公司, 上海轨道交通监护管理办公室。主要从事上海轨道交通安全保护区监护管理工作。发表《复合地层大直径盾构刀盘刀具磨损分析》《包神铁路转龙湾隧道施工风险评估》等论文 6 篇。

郭乐, 工学博士, 毕业于同济大学交通运输工程学院城市轨道与铁道工程系, 师从交通隧道研究室主任——杨新安教授, 主要研究方向为隧道工程、城市地下工程。已发表论文 8 篇, 其中 EI 检索 3 篇, 获国家发明专利 1 项。曾参与上海市轨道交通 14 号线、15 号线、18 号线盾构隧道工程和龙耀路越江隧道盾构工程施工管理工作。

总序

PREFACE

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余年。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,且其周围邻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,需要有深厚的专业理论和科学的技术方法来指导。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”“十三五”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、不当之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

剑心虎

前言

FOREWORD

本书是“十三五”国家重点图书出版物出版规划项目、国家出版基金项目“城市地下空间出版工程·运营与维护管理系列”中的一本。

城市地下工程处在天然岩土体中,具有结构复杂、造价高、维修难、环境影响显著、隐蔽性强等特点。城市地下工程是保障城市运行的重要基础设施,其中地铁等还是城市生命线工程。因此,对城市地下工程结构进行定期和专项检测,根据检测结果对其健康状态进行评价,掌握其健康状态与水平,并对发现的可能病害与危害及时整治,保障其功能与运营状态的正常是十分重要和必要的。城市地下工程结构检测与评价是城市地下工程运营与维护中的重大课题之一。

本书以地铁隧道、城市道路隧道等城市地下工程为主要对象,分为六章。第1章“绪论”总结了城市地下工程结构的特点,阐述了城市地下工程结构检测与评价的概念和意义,总结分析了城市地下工程结构检测与评价发展的三个阶段,并指出了其未来发展趋势与方向;第2章“城市地下工程结构与构造”从城市地下空间类型、建筑与构造、结构三个方面进行论述;第3章“地下工程结构病害”针对常见的病害和危害——渗漏水、衬砌裂损、冻害、衬砌腐蚀、震害、空气污染等,分别介绍了病害和危害的现象及影响,分析了各种病害和危害的成因、机理及其防治方法。第4章“地下工程结构检测方法 with 原理”包括限界检测、结构检测、无损检测、地下空间有害气体与光照度测定等内容。第5章“地下工程结构病害调查与检测”从计划、内容、方法、要点和结果分析与整理等方面进行论述。第6章“地下工程结构状态与评价”从地下工程结构状态、评价指标和方法三个方面进行阐释。

本书第1, 2, 4章由同济大学杨新安编写,第3章由同济大学丁春林编写,第5章由申通地铁集团公司王瑶编写,第6章由新城控股集团股份有限公司郭乐编写,全书由杨新安统稿。此外,同济大学研究生吴超、陈翔协助查阅资料并整理书稿。

本书在编写过程中,参阅了大量论文和技术资料,恐未全部列出,在此谨向有关专家和作者表示感谢!由于作者学术水平有限,书中疏漏乃至错误之处恐难避免,欢迎读者批评指正,意见请发送至邮箱:xyang@tongji.edu.cn。

杨新安

2018年2月于同济园

目 录

CONTENTS

总序 前言

1	绪论	1
1.1	城市地下工程结构特点	2
1.2	城市地下工程结构检测与评价概述	3
1.2.1	概念	3
1.2.2	作用和意义	4
1.3	城市地下工程结构检测与评价的发展历史	4
1.3.1	第一阶段——人工观察、测量与钻孔取芯检测阶段	4
1.3.2	第二阶段——无损检测阶段	5
1.3.3	第三阶段——自动检测、在线检测、车载检测阶段	6
1.4	城市地下工程结构检测与评价的发展趋势	8
1.4.1	基于物联网的地下工程检测与评价	8
1.4.2	建养一体化理念与数字化技术	8
1.4.3	隧道结构健康监测系统	9
2	城市地下工程结构与构造	11
2.1	城市地下空间结构与构造	12
2.1.1	城市地下空间结构形式	12
2.1.2	地下空间结构与工程地质条件	13
2.2	地铁	17
2.2.1	组成与形态	17
2.2.2	结构与构造	19
2.3	城市地下公路与道路	25
2.3.1	组成与形态	25
2.3.2	结构与构造	27
2.4	地下街	29

2.4.1	组成	30
2.4.2	构造	30
2.4.3	结构	31
2.5	地下停车场	31
2.5.1	组成	32
2.5.2	结构与构造	32
2.6	地下综合管廊	33
2.6.1	类型与组成	34
2.6.2	设计与施工及其构造	36

3	地下工程结构病害	39
3.1	地下工程结构水害	40
3.1.1	水害的种类及其危害	40
3.1.2	水害的成因	42
3.1.3	地下工程防水设计	43
3.1.4	地下工程结构水害防治	45
3.2	地下工程结构裂损	51
3.2.1	地下结构裂损类型	52
3.2.2	地下结构裂损的成因	54
3.2.3	地下结构裂损的防治	55
3.3	地下工程结构冻害	58
3.3.1	地下结构常见的冻害种类	58
3.3.2	冻害的成因	61
3.3.3	冻害的预防与整治	61
3.4	地下工程结构腐蚀	65
3.4.1	地下结构物理性腐蚀	66
3.4.2	地下结构化学性腐蚀	67
3.4.3	地下结构腐蚀的防治措施	69
3.5	地下工程结构震害	71
3.5.1	地下结构震害的类型	71
3.5.2	地下结构震害的表现形式	73
3.5.3	地下结构震害设防与整治	75
3.6	地下空间环境与有害气体	78
3.6.1	地下空间内部环境特点	78
3.6.2	地下空间内部有害气体	79
3.6.3	地下空间空气卫生标准	80
3.6.4	地下工程结构通风	82

4	地下工程结构检测方法与原理	89
4.1	地下工程结构限界检测与管理	90
4.1.1	限界检测方法	90
4.1.2	断面与限界管理	93
4.2	地下工程结构混凝土性能检测	94
4.2.1	回弹法检测	95
4.2.2	声波测试	99
4.2.3	超声波检测	100
4.2.4	超声回弹综合检测	102
4.3	地下工程结构与周围地层(围岩)检测	103
4.3.1	地质雷达法	103
4.3.2	红外热像法	111
4.4	地下空间空气质量与照明检测	112
4.4.1	空气质量检测	112
4.4.2	照明检测	115
4.5	地下工程结构耐久性检测	118
4.5.1	地下结构耐久性及其要求	118
4.5.2	衬砌耐久性检测	119
4.5.3	钢筋的检测	122
5	地下工程结构病害调查与检测	125
5.1	地下结构设施及病害检查检测	126
5.1.1	地铁隧道结构设施的检查内容及方法	126
5.1.2	地铁隧道病害检测计划	129
5.1.3	城市道路隧道检查与检测	130
5.2	地下工程结构变形检测	132
5.2.1	地铁隧道变形的控制指标	132
5.2.2	地铁隧道结构变形监测	133
5.2.3	隧道变形监测频率	133
5.3	地铁隧道结构变形检测方法	134
5.3.1	长期沉降检测	134
5.3.2	长期收敛检测	136
5.3.3	工程监护监测	137
5.4	城市地下道路隧道变形检测	143
5.4.1	盾构法隧道变形检测	143
5.4.2	沉管隧道变形检测	146

5.4.3	盾构法双层隧道变形检测	148
5.5	城市其他类型地下结构检查与检测	150
5.5.1	检查内容及要求	150
5.5.2	地下结构健康检测与监测	152
5.6	隧道结构病害预警制度及结构评估	153
5.6.1	隧道结构安全状态评估	154
5.6.2	隧道结构预警	155
5.6.3	隧道结构检测评估	155
5.7	工程检测实例	156
5.7.1	地铁工程检测实例	156
5.7.2	城市公路隧道检测实例	166

6 地下工程结构状态与评价 169

6.1	城市地下工程结构状态	170
6.1.1	渗漏水	170
6.1.2	地下工程结构裂损与腐蚀	172
6.1.3	结构变形	176
6.1.4	杂散电流的腐蚀	179
6.2	地下工程结构状态评价体系的建立	179
6.2.1	渗漏水评价指标和标准	182
6.2.2	地下结构衬砌裂损的评价指标和标准	184
6.2.3	结构变形的评价指标和标准	188
6.2.4	其他评价指标和标准	190
6.3	地下工程结构状态评价方法	192
6.3.1	模糊综合评价模型	193
6.3.2	人工神经网络综合评价模型	198
6.3.3	主成分分析综合评价模型	201
6.4	地下工程结构状态评价案例分析	203
6.4.1	工程概况	203
6.4.2	结构状态评价	203
6.4.3	一级评价	207
6.4.4	二级评价	208
6.4.5	评价结果分析	208

参考文献 210

索引 213

1 绪 论

我国地域辽阔、人口众多,是城市地下空间开发与利用大国,目前处在城市化的快速发展期。我国城市地下空间具有类型多、总量大、地域分布广泛、地质与气候类型多样等特点。

截至 2017 年年末,我国大陆共有地铁线路 171 条,运营线路总长度 5 083.45 km,其中,2017 年运营线路增加 44 条,线路总长度增加 882.89 km。随着城市的发展,全国多座城市已经建成或开始建设轨道交通线路,因此,地铁数据每年都会快速变化。

目前,国家积极推进城市地下综合管廊建设。2016 年,全国新建城市地下综合管廊 1 791 km,形成廊体 479 km。国办发〔2015〕61 号文件指出:到 2020 年,建成一批具有国际先进水平的地下综合管廊并投入运营。因此,城市地下空间开发利用将进入一个新的发展时期。目前,69 座城市规划的地下综合管廊工程已达 1 000 km。

1.1 城市地下工程结构特点

城市地下工程结构是指构成地下空间的人工结构体。由于地下工程修建于岩土介质之中,围岩(或周围地层)往往也是隧道结构不可分割的组成部分,即城市地下结构与所在地的地质、水文地质条件关系密切相关。因地下结构穿越地层的工程地质条件、气候条件、水文地质条件和设计、施工、运营等条件复杂多变,以及受修建时期的设计与施工技术条件和水平的限制,早期修建的城市地下结构可能出现变形、渗漏水等病害,这导致目前许多城市地下结构存在着多种类型的病害甚至危害,相当一部分处于病害发育的亚健康状态,因此,如何对运营的城市地下结构进行周期性或专门检测、状态与健康评价、病害与灾害预防和控制就显得极为重要。

运营中的城市地下结构与一般工程结构物(如地上建筑物)在性质上有很大区别,其特征主要表现为以下几个方面。

(1) 结构形式和类型多样

城市地下结构由于功能和修建方式不同,而具有不同的结构形式和多种多样的类型。以地铁为例,车站、区间隧道、联络通道、出入口结构形式各不相同,而区间隧道又因采用盾构、矿山法和明挖法等施工方法的不同而具有不同的结构形式和断面类型。

(2) 由多种材质组成,多为复合结构

城市地下结构因修建方式不同,通常由多种材质组成,从径向分层和纵向分段的特点来看,一般为复合结构,而非单一材质的结构。以矿山法隧道为例,由“初期支护+防水层+二次衬砌”构成所谓的“复合式衬砌结构”,该复合结构具有显著的径向分层、纵向不连续的特点。纵向不连续的施工缝、变形缝、沉降缝是结构的薄弱之处,常为渗漏水的通道与病害易发之处。

(3) 处于岩土介质中,并长期受其影响

地下结构的最大特点是其修建在岩土这种天然介质之中,与所处的岩土体之间存

在相互作用,二者之间的关系是长期的、动态变化的,存在着软土的蠕变、砂土液化、地下水的水压和腐蚀、地质构造运动等一系列可能的影响。

地下结构所处的工程地质条件、水文地质条件决定了工程的设计与施工,地层类型的不同也会对地下结构产生不同的影响,还将影响工程的长期使用,如围岩和地下水条件变动的影 响,不同季节的地下水位就会影响地下工程结构渗漏水的强弱。

(4) 隐蔽性

地下工程施工完成后,通常要被岩土材料或地面建筑覆盖,这种隐蔽性使得工程人员无法迅速发现结构物的变异,而必须借助于检测技术,特别是不破坏结构状态的无损检测技术和方法。

(5) 结构复杂,难维修

地下结构复杂,包括整体式结构(无缝)和节段式结构,较深的地下结构则存在于围护结构叠合和非叠合的侧面结构中,对地下结构的安全性有直接影响。地下结构属于难于维修的一类,因此,在设计时都按百年工程设计,且在隧道与地下结构的设计施工中建立少维修的理念非常必要,也非常重要。

(6) 环境影响显著

城市地下结构的运营环境,如列车运行振动引起的结构疲劳、电力的迷流等,对结构物的使用寿命有影响,有些长期影响是十分显著的,而其影响和规律目前还不十分清楚和明了。

(7) 不同类型的地下结构稳定性差异显著,既有结构物的状态差异大

地铁、市内公路隧道、越江通道、综合管廊等不同类型的地下结构,其施工方法、埋深、断面结构差异性均较大,纵向分段也有差别,导致其结构长期稳定性的问题各异,差别显著。既有结构物则由于修建时的设计水平、服务年限长短、结构物变异状态和程度等的不同,导致其状态差异大。

正是由于隧道结构物的特殊性,对隧道结构物的耐久性、可靠性及可维修性提出了更高的要求。

1.2 城市地下工程结构检测与评价概述

1.2.1 概念

1. 城市地下工程结构检测

城市地下工程结构检测是指采用检测仪器和手段,对其进行周期性或专门检测,根据检测结果对其健康状态进行评价,掌握其健康状态,并对发现的可能病害与危害及时整治,以保障其功能与运营状态正常。这里的检测包括检查、监测、测试等含义。

城市地下结构的检查和检测对其养护和维修具有重要意义。通过全面细致地检测,获得地下结构及其所处环境的关键参数,掌握地下结构的现状,发现对隧道安全和