

“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧

黄宏伟 薛亚东 邵 华 杜 军 著

城市地铁盾构隧道病害 快速检测与工程实践



复杂地质与环境条件下
隧道建设关键技术
丛书



上海科学技术出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧



复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书

城市地铁盾构隧道病害 快速检测与工程实践

黄宏伟 薛亚东 邵 华 杜 军

著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市地铁盾构隧道病害快速检测与工程实践 / 黄宏伟等著. —上海: 上海科学技术出版社, 2019.1

(复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4203 - 4

I. ①城… II. ①黄… III. ①地铁隧道—隧道施工—盾构法—隧道病害—检测 IV. ①U231.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 220481 号

城市地铁盾构隧道病害快速检测与工程实践

黄宏伟 薛亚东 邵 华 杜 军 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 22 插页 12

字数 450 千字

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4203 - 4 / U · 71

定价: 160.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书围绕城市地铁盾构隧道结构病害检测,介绍了隧道常见病害的机理,以及相应病害的检测方法、原理、仪器设备、数据处理等内容。全书分为 10 章,首先介绍了现有的隧道人工巡检内容、方式、要求;随后重点论述了三维激光扫描、摄影成像扫描、地质雷达探测等新技术、新方法在盾构隧道结构检测中的应用;特别对隧道检测获取的各类图像,论述了基于人工智能深度学习方法的图像处理框架与模型;最后给出了三维激光扫描、摄影成像扫描、地质雷达探测等检测方法的实际工程应用案例。

本书理论与实践相结合,可供地铁工程、隧道工程结构病害检测领域的科研人员、技术人员以及高等院校相关专业师生参考。

重大工程建设关键技术研究

总主编

孙 钧 同济大学教授,中国科学院院士

学术顾问

邱大洪 大连理工大学教授,中国科学院院士

钱七虎 中国人民解放军陆军工程大学教授,中国工程院院士

郑皆连 广西大学教授,中国工程院院士

陈政清 湖南大学教授,中国工程院院士

吴志强 同济大学教授,中国工程院院士

王 平 西南交通大学教授

刘斯宏 河海大学教授

杨东援 同济大学教授

复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书

编委会

主 任

钱七虎

委 员(以姓氏笔画为序)

王守慧 石振明 石新栋 朱雁飞

刘 浩 孙 钧 杨志豪 李术才

李利平 李晓军 吴惠明 吴德兴

陈 健 周文波 洪开荣 姚占虎

黄宏伟 曹文宏 曹国侯 龚 剑

蒋树屏 解东升

总 序

近年来,我国各项基础设施建设的发展如火如荼,“一带一路”建设持续推进,许多重大工程项目如雨后春笋般蓬勃兴建,诸如三峡工程、青藏铁路、南水北调、三纵四横高铁网、港珠澳大桥、上海中心大厦,以及由我国援建的雅万高铁、中老铁路、中泰铁路、瓜达尔港、比雷埃夫斯港,等等,不一而足。毋庸置疑,我国已成为世界上建设重大工程最多的国家之一。这些重大工程项目就其建设规模、技术难度和资金投入等而言,不仅在国内,即使在全球范围也都位居前茅,甚至名列世界第一。在这些工程的建设过程中涌现的一系列重大关键性技术难题,通过分析探索创新,很多都得到了很好的优化和解决,有的甚至在原来的理论、技术基础上创造出了新的技术手段和方法,申请了大量的技术专利。例如,632 m 的上海中心大厦,作为世界最高的绿色建筑,其建设在超高层设计、绿色施工、施工监理、建筑信息化模型(BIM)技术等多方面取得了多项科研成果,申请到 8 项发明专利、授权 12 项实用新型技术。仅在结构工程方面,就应用到了超深基坑支护技术、超高泵送混凝土技术、复杂钢结构安装技术以及结构裂缝控制技术等多项创新性的技术革新成果,有的达到了世界水平。这些优化、突破和创新,对我国工程技术人员将是非常宝贵的参考和借鉴。

在 2016 年 3 月初召开的全国人大全体会议期间,很多代表谈到,极大量的技术创新与发展是“十三五”时期我国宏观经济实现战略性调整的一项关键性驱动因素,是实现国



家总体布局下全面发展的根本支撑和关键动力。

同时,在新一轮科技革命的机遇面前,也只有在关键核心技术上一个个地进行创新突破,才能实现社会生产力的全面跃升,使我国的科研成果和工程技术掌控两者的水平和能力尽早、尽快地全面进入发达国家行列,从而在国际上不断提升技术竞争力,而国力将更加强大!当前,许多工程技术创新得到了广泛的认可,但在创新成果的推广应用中还存在不少问题。在重大工程建设领域,关键工程技术难题在实践中得到突破和解决后,需要把新的理论或方法进一步梳理总结,再一次地广泛应用于生产实践,反过来又将再次推动技术的更进一步的创新和发展,是为技术的可持续发展之巨大推动力。将创新成果进行系统总结,出版一套有分量的技术专著是最有成效的一个方面。这也是出版“重大工程建设关键技术研究”丛书的意义之所在。以推广学术上的创新为主要目标,“重大工程建设关键技术研究”丛书主要具有以下几方面的特色:

1. 聚焦重大工程和关键项目。目前,我国基础设施建设在各个领域蓬勃开展,各类工程项目不断上马,从项目体量和技术难度的角度,我们选择了若干重大工程和关键项目,以此为基础,总结其中的专业理论和专业技术使之编纂成书。由于各类工程涉及领域和专业门类众多,专业学科之间又有相互交叉和融合,难以单用某个专业来设定系列丛书,所以仍然以工程大类为基本主线,初步拟定了隧道与地下工程、桥梁工程、铁道工程、公路工程、超高层与大型公共建筑、水利工程、港口工程、城市规划与建筑共八个领域撰写成系列丛书,基本涵盖了我国工程建设的主要领域,以期为未来的重大工程建设提供专业技术参考指导。由于涉及领域和专业多,技术相互之间既有相通之处,也存在各自间的不同,在交叉技术领域又根据具体情况做了处理,以避免内容上的重复和脱节。

2. 突出共性技术和创新成果,侧重应用技术理论化。系列丛书围绕近年来重大工程中出现的一系列关键技术难题,以项目取得的创新成果和技术突破为基础,有针对性地梳理各个系列中的共性、关键或有重大推广价值的技术经验和科研成果,从技术方法和工程实践经验的角度进行深入、系统而又详尽的分析和阐述,为同类难题的解决和技术的提高提供切实的理论依据和应用参考。在“复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书”(钱七虎院士任编委会主任)中,对当前隧道与地下工程施工建设中出现的关键问题进行了系统阐述并形成相应的专业技术理论体系,包括深长隧道重大突涌水灾害预测预警与风险控制、盾构工程遇地层软硬不均与极软地层的处理、类矩形盾构法、水下盾构隧道、地面出入式盾构法隧道、特长公路隧道、隧道地质三维探测、盾构隧道病

害快速检测、隧道及地下工程数字化、软岩大变形隧道新型锚固材料等,使得关键问题在研究中得到了不同程度的解决和在后续工程中的有效实施。

3. 注重工程实用价值。系列丛书涉及的技术成果要求在国内已多次采用,实践证明是可靠的、有效的,有的还获得了技术专利。系列丛书强调以理论为引领,以应用为重点,以案例为说明,所有技术成果均要求以工程项目为背景,以生产实践为依托,使丛书既富有学术内涵,又具有重要的工程应用价值。如“长大桥梁建养关键技术丛书”(郑皆连院士任编委会主任、陈政清院士任副主任),围绕特大跨度悬索桥、跨海长大桥梁、多塔斜拉桥、特大跨径钢管混凝土拱桥、大跨度人行桥、大比例变宽度空间索面悬索桥等重大桥梁工程,聚焦长大桥梁的设计创新理论、施工创新技术、建设难点的技术突破、桥梁结构健康监测与状态评估、运营期维修养护等,主要内容包括大型钢管混凝土结构真空辅助灌注技术、大比例变宽度空间索面悬索桥体系、新型电涡流阻尼减振技术、长大桥梁的缆索吊装和斜拉扣挂施工、超大型深水基础超高组合桥塔、变形智能监测、基于 BIM 的建养一体化等。这些技术的提出以重大工程建设项目为依托,包括合江长江一桥、合江长江二桥、巫山长江大桥、桂广铁路南盘江大桥、张家界大峡谷桥、西堠门大桥、嘉绍大桥、港珠澳大桥、虎门二桥等,书中对涉及具体工程案例的相关内容进行了详尽分析,具有很好的应用参考价值。

4. 聚焦热点,关注风险分析、防灾减灾、健康检测、工程数字化等近年来出现的新兴分支学科。在绿色、可持续发展原则指导下,近年来基础建设领域的技术创新在节能减排、低碳环保、绿色土木、风险分析、防灾减灾、健康检测(远程无线视频监控)、工程使用全寿命周期内的安全与经济、可靠性和耐久性、施工技术组织与管理、数字化等方面均有较多成果和实例说明,系列丛书在这些方面也都有一定体现,以求尽可能地发挥丛书对推动重大工程建设的长期、绿色、可持续发展的作用。

5. 设立开放式框架。由于上述的一些特性,使系列丛书各分册的进展快慢不一,所以采用了开放式框架,并在后续系列丛书各分册的设定上,采用灵活的分阶段付梓出版的方式。

6. 主编作者具备一流学术水平,从而为丛书内容的学术质量打下了坚实的基础。各个系列丛书的主编均是该领域的学术权威,在该领域具有重要的学术地位和影响力。如陈政清教授,中国工程院院士,“985”工程首席科学家,桥梁结构与风工程专家;郑皆连教授,中国工程院院士,桥梁设计施工专家;钱七虎教授,中国工程院院士,防护与地



下工程专家;吴志强教授,中国工程院院士,城市规划与建设专家;等等。而参与写作的主要作者都是活跃在我国基础设施建设科研、教育和工程的一线人员,承担过重大工程建设项目或国家级重大科研项目,他们主要来自中铁隧道局集团有限公司、中交隧道工程局有限公司、中铁十四局集团有限公司、中交第一公路工程局有限公司、青岛地铁集团有限公司、上海城建集团、中交公路规划设计院有限公司、陆军研究院工程设计研究所、招商局重庆交通科研设计院有限公司、天津城建集团有限公司、浙江省交通规划设计研究院、江苏交通科学研究院有限公司、同济大学、河海大学、西南交通大学、湖南大学、山东大学等。各位专家在承担繁重的工程建设和科研教学任务之余,奉献了自己的智慧、学识和汗水,为我国的工程技术进步做出了贡献,在此谨代表丛书总编委对各位的辛劳表示衷心的感谢和敬意。

当前,不仅国内的各项基础建设事业方兴未艾,在“一带一路”倡议下,我国在海外的重大工程项目建设也正蓬勃发展,对高水平工程科技的需求日益迫切。相信系列丛书的出版能为我国重大工程建设的开展和创新科技的进步提供一定的助力。

孙 钧

2017年12月,于上海

孙钧先生,同济大学一级荣誉教授,中国科学院资深院士,岩土力学与工程国内外知名专家。“重大工程建设关键技术研究”系列丛书总主编。

序

进入 21 世纪以来,随着经济的持续发展、综合国力的不断提升及高新技术的不断应用,我国隧道及地下工程得到了前所未有的迅速发展。我国已成为世界上隧道及地下工程规模最大、数量最多、地质条件和结构形式最复杂、修建技术发展速度最快的国家。同时,随着城市地铁建设力度的不断加大,跨江越海隧道工程数量不断增加,国家的重点建设项目如长距离供水、水下交通、西气东输等工程都将涉及穿越江河的问题,铁路、公路、市政、供水、供气、防洪、水电等隧道工程的建设都使隧道的数量大幅度增多。

在隧道建设技术方面,高速铁路隧道技术体系已基本形成;艰险山区复杂地质条件长大隧道建造技术不断取得进步;大断面软弱围岩隧道建造技术取得了很大进展;城市大跨浅埋隧道、越江跨河水下隧道的建造技术都已取得突破;隧道掘进机研发与制造取得了很大进步,这些都标志着我国隧道建设技术达到了一个新的发展水平。尤其是我国幅员辽阔,地质条件复杂,极端复杂的地质条件是制约隧道安全、高效建设的主要因素,是公认的隧道建设难点。依托一大批重难点工程,如青藏铁路关角隧道、兰渝铁路西秦岭隧道、港珠澳大桥沉管隧道、大瑞铁路高黎贡山隧道、武汉三阳路长江隧道等的相继贯通,我国在隧道及地下工程尤其是复杂地质与环境条件下的隧道工程建设方面,取得了很大成就和较多创新成果。为此,针对地形与地貌类型复杂、地质构造复杂、岩土体工程地质不良等复杂地质条件,以重难



点工程的突破创新成果为基础,丛书编委会与上海科学技术出版社共同策划了本丛书。

丛书从地质探测、预警与风险控制、设计、施工、数字化应用等角度,系统梳理了山岭、水下、软硬不均地层等复杂地质与环境条件下隧道的建设关键技术,以学术专著的形式,介绍了近年来在复杂地质隧道建设过程中形成的创新成果和核心技术。丛书中涉及和介绍的创新成果与技术在国内属于领先水平,有的已形成具有自主知识产权的核心技术,且均已在重大工程中得到了应用,使得丛书具有前沿性、原创性、创新性、引领性的特点。例如,洪开荣的《软硬不均与极软地层盾构处理技术》,从理论上、技术上、工程案例上阐述软硬不均地层与水下隧道极软地层的盾构处理技术,代表了软硬不均地层隧道及地下工程的最新理论与实践;曹国侯、刘浩的《隧道地质三维探测技术》,依托作者主持的科研项目“国防工程地质预测及质量无损检测系统”,并结合团队多年的研究和应用成果,全面介绍了隧道复杂地质地球物理探测的新理论、新方法与新技术;李术才的《隧道突涌水监测方法与预警技术》,依托国家重大科研仪器设备研制专项“用于掘进机施工的隧道不良地质定量超前预报综合地球物理探测仪器”、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目“隧道突水突泥机理与灾害控制”等重大科研项目,介绍了在复杂地质隧道突水突泥灾害源超前预报技术及其在大型隧道工程中的应用;等等。丛书中涉及的工程应用案例还包括四川成兰铁路跃龙门隧道、济南黄河隧道工程、鄂西高速齐岳山隧道、青岛胶州湾隧道、南京长江隧道、武汉地铁8号线过江隧道等一批重难点工程。

在国家大力推进“一带一路”建设、实施创新驱动发展战略、建设交通强国的战略背景下,希望丛书的出版不仅能够更好地总结上述技术成果、推动创新技术的推广应用,更希望能在基础理论研究和共性关键技术的突破方面起到促进作用,在技术创新模式的培育、专业人才的培养方面能够起到积极的作用。丛书在研讨策划、组织、编写和审稿的过程中得到了相关大型企业、高校、研究机构和学会、协会的大力支持,许多专家在百忙之中给丛书提出了很多非常好的建议和想法,在此一并表示感谢。

2018年8月

钱七虎先生,中国人民解放军陆军工程大学教授,中国工程院院士。“复杂地质与环境条件下隧道建设关键技术丛书”编委会主任。

前 言

随着我国城镇化率接近 60%，城市地铁工程正由“建设为主”向“建养并重”转变。有关统计表明，城市地铁采用盾构法的隧道平均比例在 70%~80%。由于建设速度快、工期紧张、技术人员及现场工人短缺、隧道施工拼装存在问题、运营后隧道周边环境扰动等原因，盾构隧道运营中存在不同程度的结构病害。这些病害已经严重威胁到隧道结构运营安全和结构耐久性，其引起的地铁安全问题已经成为各级政府和全社会的关注热点。为此，对地铁盾构隧道结构安全评估与管理提出了更高的要求，更需要掌控结构安全状态的精细化信息，这其中包括表观与隐蔽结构问题，如渗漏水、裂缝、裂损、错台、掉块、注浆层不均、轨道板缺陷或脱空等。如何来精准地检测这些病害，基于什么原理、方法及技术，对这些问题进行介绍和讨论，就成为本书的主要内容。

撰写本书时，我们不由得联想起整整十年前，当时同济师生连续三年与上海申通地铁维保公司通力合作，开展上海运营地铁隧道结构病害的检查工作。主要方式为人工手电筒照明、人眼观察、相机拍照、手工记录、第二天分析整理。每天晚上 00:00 地铁完全停运后开始工作，凌晨 3:00 结束，平均每天检查 2~3 个区间单洞。另外由于是手工记录，现场检查完成后还需要进行数据整理，也因隧道环境灰暗，经常出现病害照片模糊、部分病害遗漏拍照、病害所在隧道位置不够准确或无记录等情形，所以总体效率很低。后来虽然



开发了基于 iPad 的检查助手,但仍然没有从根本上解决问题。随着地铁隧道运营里程以及服役年限增加,基于自动化、智能化的隧道结构病害检测与分析评估成为发展的必然需求。

本书基于这十年来的隧道病害机理、检测监测、仪器开发、诊断评估等研究成果,在各类病害调查分析的基础上,重点讨论了相应病害的检测方法、原理、仪器设备和数据处理等内容。为了增加本书的实用性与可操作性,书中除了这些重点讨论的内容外,特别针对三维激光扫描、摄影成像扫描、地质雷达探测等技术提供了实际工程应用案例。

全书共分为 10 章:第 1 章绪论,主要介绍了城市轨道交通的发展、隧道主要结构形式以及隧道病害检测技术现状(黄宏伟、薛亚东);第 2 章城市地铁隧道结构病害,基于大量隧道结构病害调查结果,总结分析了结构病害的类型与特征(薛亚东);第 3 章盾构隧道结构病害常规人工检查,对现有的人工巡检内容、方式、要求等做了阐述(邵华);第 4 章盾构隧道三维激光扫描检测,针对目前常用的地面三维激光与移动三维激光技术,介绍了相关的设备、原理以及操作,并对隧道测量激光点云数据的处理方法做了讲述与案例说明(黄宏伟、薛亚东);第 5 章盾构隧道摄影成像扫描检测,介绍了摄影测量原理,并重点针对隧道结构特点,详细论述了移动式隧道病害检测系统的组成及其使用方法,对扫描图像的传统处理方法做了简要介绍(薛亚东、黄宏伟);第 6 章盾构隧道壁后注浆探地雷达无损探测,介绍了地质雷达的基本原理,并通过大量实验建立了盾构隧道衬砌管片壁后注浆层的雷达探测方法与解译程序(杜军、黄宏伟);第 7 章基于深度学习的图像处理,针对隧道检测技术发展趋势,重点论述了基于深度学习方法的图像处理框架与模型(薛亚东、黄宏伟);第 8 章盾构隧道结构检测的其他方法,介绍了用于渗漏水检测的红外摄像方法和用于隧道纵向沉降的静动态监测方法(黄宏伟、薛亚东);第 9 章盾构隧道结构检测实例,给出了有关上述三维激光扫描、摄影成像扫描、地质雷达探测等检测方法的实际工程应用案例(邵华、杜军);第 10 章总结与展望,分析展望了城市地铁盾构隧道结构病害检测的技术发展(黄宏伟、薛亚东)。

本书汇集了各类比较实用的盾构隧道检测方法及我们的最新研究成果,希望帮助读者对地铁盾构隧道结构病害相关的检测研究有一个较为系统的了解,并能把握现有最新技术及发展方向。研究承蒙国家自然科学基金委员会、同济大学、上海勘察设计院(集团)有限公司、瑞士安伯格公司(肖书安博士)、上海通芮斯科土木工程技术有限公司

公司(刘铁中)、无锡悟莘科技有限公司等的大力支持;感谢课题组孙龔、吴昌睿、杨睿、李庆桐、张森等研究生参与地铁隧道结构病害的现场检测工作;本书的出版承蒙笔者的恩师孙钧院士的多次指导,在此一并表示我们作者团队最衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之相关的检测技术及图像处理算法的快速更新,书中错误、不足或不妥之处在所难免,请广大读者批评指正。

黄宏伟

2018年8月于同济园

目 录

第 1 章 绪论 1

- 1.1 城市地铁发展现状 / 1
- 1.2 地铁隧道结构病害现状 / 3
- 1.3 地铁隧道结构病害检测技术 / 5
 - 1.3.1 基于摄像测量的自动检测技术 / 6
 - 1.3.2 基于激光扫描的自动检测技术 / 7
 - 1.3.3 探地雷达无损探测技术 / 8
- 1.4 地铁隧道结构病害检测技术发展趋势 / 9

第 2 章 城市地铁隧道结构病害 11

- 2.1 地铁隧道衬砌结构、施工方法和病害基本类型 / 11
 - 2.1.1 地铁隧道的结构形式 / 12
 - 2.1.2 地铁隧道的施工方法 / 13
 - 2.1.3 地铁隧道结构病害的基本类型 / 14
- 2.2 上海地铁盾构隧道运营环境与结构病害 / 26
 - 2.2.1 上海地铁隧道运营环境 / 27
 - 2.2.2 上海地铁隧道病害调查 / 34
 - 2.2.3 隧道结构病害特征与规律总结与分析 / 44
- 2.3 隧道结构检测项目及措施 / 48
 - 2.3.1 隧道结构检测项目 / 49
 - 2.3.2 隧道结构检测措施 / 51

第 3 章 盾构隧道结构病害常规人工检查 53

- 3.1 检查类型及作用 / 53
- 3.2 检查内容 / 54



- 3.2.1 渗漏水 / 55
- 3.2.2 管片损伤 / 58
- 3.2.3 结构形变 / 59
- 3.2.4 结构裂化老化 / 59
- 3.2.5 其他病害 / 61
- 3.3 资料成果要求 / 62
- 3.3.1 记录表 / 62
- 3.3.2 记录影像 / 66
- 3.3.3 其他信息 / 66

第4章 盾构隧道三维激光扫描检测 68

- 4.1 三维激光扫描检测原理 / 68
- 4.1.1 脉冲飞行时间测距法 / 69
- 4.1.2 调制波相位测距法 / 69
- 4.2 三维激光扫描检测设备及其选用 / 70
- 4.2.1 三维激光扫描检测设备 / 70
- 4.2.2 三维激光扫描检测设备的选用 / 73
- 4.3 三维激光扫描检测软件 / 74
- 4.3.1 数据采集 / 74
- 4.3.2 坐标系配准 / 76
- 4.3.3 点云去噪 / 78
- 4.3.4 数据压缩 / 80
- 4.3.5 三维模型重建 / 82
- 4.3.6 纹理映射 / 85
- 4.3.7 工程与数据管理 / 86
- 4.4 三维激光扫描检测数据处理方法 / 87
- 4.4.1 隧道变形与轮廓限界 / 87
- 4.4.2 病害图像处理 / 90
- 4.5 三维激光扫描检测发展趋势 / 91

第5章 盾构隧道摄影成像扫描检测 94

- 5.1 摄影技术概述 / 94
- 5.1.1 摄影发展简史 / 94