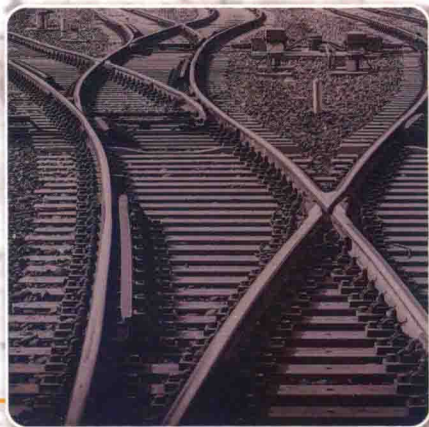


土压平衡盾构机在全断面富水砂层 穿越高铁道岔区沉降控制技术

刘建国 杨云飞 朱军 梅源 著



土压平衡盾构机在全断面富水砂层 穿越高铁道岔区沉降控制技术

刘建国 杨云飞 朱 军 梅 源 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土压平衡盾构机在全断面富水砂层穿越高铁道岔区
沉降控制技术/刘建国等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 5

ISBN 978-7-112-23752-4

I. ①土… II. ①刘… III. ①高速铁路-铁路隧
道-隧道施工-盾构法 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 093074 号

本书采用调查研究、现场试验、数值分析、现场监测等多种手段, 依托西安市地铁四号线工程土建施工项目 D4TJSG-17 标工程, 采用多种手段研究盾构穿越高速铁路施工过程中, 盾构选型及适应性改造, 地表沉降控制措施, 数值分析方法、重要风险源智能监测技术等内容。深入分析并论证了土压平衡盾构机作为黄土地区富水砂层地铁隧道施工机具的可行性, 为类似工程土压平衡盾构选型、改造及施工参数优化提供理论依据。本书内容共 6 章, 包括: 综述, 富水砂层地铁隧道施工盾构选型及风险分析, 土压平衡盾构穿越富水砂层施工综合试验研究, 基于综合试验的全断面富水砂层盾构施工技术研究, 土压平衡盾构下穿高铁道岔区沉降控制技术, 结论。

本书可作为盾构法科研和工程技术人员用书, 也可供先关专业教师、研究生阅读使用。

责任编辑: 王华月 杨 杰

责任校对: 王 瑞

土压平衡盾构机在全断面富水砂层穿越高铁道岔区沉降控制技术

刘建国 杨云飞 朱 军 梅 源 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

天津翔远印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{4}$ 字数: 242 千字

2019 年 6 月第一版 2019 年 6 月第一次印刷

定价: 78.00 元

ISBN 978-7-112-23752-4

(34067)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

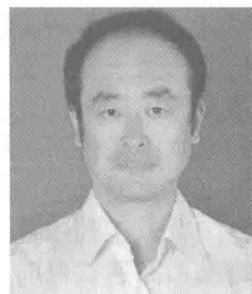
(邮政编码 100037)

作者简介

刘建国，高级工程师，中铁七局集团有限公司主任工程师，地下空间与工程建造领域资深项目经理。湿陷性黄土、膨胀性土、富水砂层、淤泥质黏土等多种地质条件下的地铁车站及盾构施工管理专家。主持并完成多项重大工程科研课题，获集团公司特等奖 1 项。获准省部级工法 1 部，持有国家专利多项。



杨云飞，男，1979 年 5 月生，中铁七局集团第三工程有限公司项目总工程师，高级工程师，主要从事地铁及高铁施工技术管理工作，参与多条地铁及高铁建设，发表专业论文多篇，获准国家专利 3 项，完成科研课题 1 项，获得省级科技成果 2 项，获得省级技术创新成果一等奖 1 次。



朱军，男，1985 年 12 月生，中铁七局集团第三工程有限公司项目总工程师，工程师，主要从事地铁及铁路工程施工技术管理工作，参与多条地铁及铁路线路建设，发表专业论文多篇，获准国家专利 3 项，完成科研课题 1 项，获得省级工法 1 项，集团公司科学技术特等奖 1 次。



梅源，男，1983 年 6 月生，西安建筑科技大学土木工程学院副教授，博士，硕士生导师，主要从事岩土工程及土木工程施工方向的教学和研究工作。近年来，主持国家自然科学基金项目 1 项，省部级科研项目 1 项，厅局级项目 3 项，完成企业横向课题 20 余项。出版专著 1 部。在国内外高水平期刊或会议上发表论文 30 余篇，获准国家专利 10 余项。获得省部级科技进步一等奖 1 项，省高等学校科学技术二等奖 1 项。



前 言

盾构法施工以其环境影响小、施工速度快、自动化程度高、安全环保等优点得到了大范围的应用,我国在土压平衡盾构施工、泥水盾构施工中积累了许多经验。国内外学者做了很多关于土压平衡盾构机掘进参数、渣土改良、掘进引起的沉降等问题的研究工作,但在黄土地区土压平衡盾构在砂层中下穿高铁道岔等重要风险源的研究却很少,因此,研究土压平衡盾构机在全断面富水砂层穿越风险源的施工技术与管理策略具有重要的理论意义和应用价值。

本书的研究得到了中铁七局科技研究开发计划项目《土压平衡盾构机在全断面紧密富水砂层中穿越高铁道岔区的沉降控制技术》的资助。采用调查研究、现场试验、数值分析、现场监测等多种手段,依托西安市地铁四号线工程土建施工项目D4TJSG-17标工程,采用多种手段研究盾构穿越高速铁路施工过程中,盾构选型及适应性改造,地表沉降控制措施,数值分析方法、重要风险源智能监测技术等内容。深入分析并论证了土压平衡盾构机作为黄土地区富水砂层地铁隧道施工机具的可行性,为类似工程土压平衡盾构选型、改造及施工参数优化提供理论依据;开展了大量的渣土改良试验,提出了典型断面砂土在不同含水率条件下的膨润土配比;引进建(构)筑物变形智能监测设备,形成了整套地铁隧道下穿重要风险源施工智能化监测与预警技术。

背景工程中黄土地区富水砂层地铁盾构下穿运营高速铁路施工尚属首例,但地铁穿越路基型高速铁路时,不可避免地会对周围地层土体产生扰动,引起周围地层损失及路基沉降,可能造成高速铁路轨道的纵横向不平顺,影响列车运营平顺性及安全。高速铁路列车对轨道的纵横向平顺性要求极为严格,地铁盾构穿越高速铁路路基工程属于高风险工程,轨道和路基变形属特级风险源。本项目的研究成果,对于地铁盾构穿越既有高速铁路工程具有非常重要的理论和现实意义。

本书是由中铁七局科技研究开发计划项目《土压平衡盾构机在全断面紧密富水砂层中穿越高铁道岔区的沉降控制技术》课题研究报告、陕西省级工法《黄土地区复杂环境下土压平衡盾构穿越全断面砂层微扰动施工工法》、工程施工过程中产生的技术资料系统总结而成。本书由刘建国、杨云飞、朱军、梅源共同执笔撰写,张宗明、常海燕、谷雨、田新宇、薛茜、李雅丽、张雨童、冯超参与了本书的编写工作。

本书的撰写是在众多领导、专家的悉心指导及大力帮助下进行的,在课题开展的过程中针对本课题提出了许多宝贵意见。诸位领导、专家严谨的工作态度和敬业精神,都将使课题组及全体项目部成员受益终生。

本书全体作者诚挚地感谢西安铁路局,西安市地下铁道有限责任公司,中国中铁七局集团有限公司,中国中铁七局集团第三工程有限公司以及工程其他参与单位领导同志的关心和指导,各位领导、专家不仅在工作上对项目部悉心指导,在生活上也给予了项目部成员深厚的关爱,在此特向各位领导、专家表达无尽的谢意!

由于本书内容较多,课题过程比较复杂,因此,许多帮助过课题组的专家姓名定有遗漏,但他们对课题组的帮助与支持对于课题的顺利完成是不可或缺的,在此表示歉意和由衷的谢意!

目 录

第 1 章 综述	1
1.1 盾构施工法及其技术特点	1
1.1.1 盾构施工法基本概念及原理	1
1.1.2 盾构施工法的技术特点	1
1.2 盾构施工法的优缺点	2
1.3 国内外研究现状	3
1.4 工程概况及技术难题	5
1.4.1 工程概况	5
1.4.2 工程技术难题	6
1.5 本书研究的目的和方法	7
1.5.1 研究的目的	7
1.5.2 研究方法和手段	7
1.6 本书研究的关键技术	8
第 2 章 富水砂层地铁隧道施工盾构选型及风险分析	9
2.1 盾构选型理论概述	9
2.1.1 盾构的类型简介	9
2.1.2 盾构选型的原则及依据	9
2.1.3 盾构选型的主要步骤和方法	11
2.1.4 盾构选型时必须考虑的特殊因素	12
2.2 土压平衡盾构机简介	13
2.2.1 土压平衡盾构的基本配置	13
2.2.2 开挖面稳定机理	16
2.2.3 土压平衡盾构的地质适应范围	17
2.2.4 土压平衡盾构工法	18
2.3 本书工程盾构选型	19
2.3.1 施工环境及条件分析	19
2.3.2 本书工程盾构选型	24
2.4 施工风险分析及应对措施	28
2.4.1 穿越不良地质	28
2.4.2 穿越重要管线及地下结构锚索	29
2.4.3 穿越重要建(构)筑物	30
2.5 本章小结	32

第3章 土压平衡盾构穿越富水砂层施工综合试验研究	34
3.1 现场掘进试验	34
3.1.1 试验区概况	34
3.1.2 初始掘进参数设置	34
3.1.3 掘进试验进度	34
3.1.4 试验结果统计	35
3.1.5 试验结果与建议	43
3.2 渣土改良试验研究	47
3.2.1 盾构掘进渣土改良理论概述	47
3.2.2 试验段工程概况	49
3.2.3 工程调研及试验准备	50
3.2.4 试验过程及结果分析	52
3.3 土压平衡盾构机改造技术试验研究	56
3.3.1 盾构改造一般原则及必要性分析	56
3.3.2 撕裂刀具改造	58
3.3.3 铰接密封改造	59
3.3.4 加泥设备改造	60
3.4 特殊问题的处理	62
3.4.1 地表沉降异常	62
3.4.2 渣样含水率波动幅度大	63
3.4.3 膨润土泥浆单泵输送距离不足	63
3.4.4 管片上浮量异常	64
3.4.5 盾构进洞安全控制难点	64
3.4.6 穿越大直径污水管的风险高	65
3.5 本章小结	65
第4章 基于综合试验的全断面富水砂层盾构施工技术研究	67
4.1 关键施工参数分析与统计	67
4.1.1 参数分析	67
4.1.2 参数统计	72
4.2 施工专项措施	73
4.2.1 选用加强型管片	73
4.2.2 加固地层与注浆	76
4.2.3 注入克泥效	78
4.2.4 沉降控制	78
4.3 施工控制效果对比分析	79
4.3.1 地表沉降及建(构)筑物变形	79
4.3.2 隧道上覆土工后空洞地质雷达检测	94
4.4 主要施工控制措施分析	95
4.4.1 盾构推力控制	95

4.4.2	土压力控制	97
4.4.3	掘进速度与渣土状态控制	97
4.4.4	出土量控制	97
4.4.5	同步注浆控制	98
4.5	本章小结	99
第5章	土压平衡盾构下穿高铁道岔区沉降控制技术	102
5.1	工程概况	102
5.1.1	工程范围及地理位置	102
5.1.2	区间下穿段客专概况	102
5.1.3	客专涵洞结构及基础形式	102
5.1.4	工程地质概况	104
5.1.5	地表污水管道、地下管线情况	106
5.2	盾构主要掘进参数	108
5.3	盾构下穿高铁道岔区数值模拟与分析	109
5.3.1	计算参数与基本方法	109
5.3.2	计算步骤	113
5.3.3	数值模拟结果与分析	114
5.4	施工期智能化安全监测	127
5.4.1	监测方案	127
5.4.2	监测数据分析	138
5.5	本章小结	149
第6章	结论	150
	参考文献	154

第 1 章 综 述

1.1 盾构施工法及其技术特点

1.1.1 盾构施工法基本概念及原理

盾构施工法简称盾构法，就是用盾构修建隧道的方法，是地下暗挖隧道的一种施工方法，它使用盾构在地下掘进，在边防止软基开挖面土砂崩塌和保持开挖面稳定的同时，边在机内安全地进行隧道的开挖作业和衬砌作业，从而构筑成隧道的施工法。盾构法是由稳定开挖面、盾构挖掘和衬砌三大要素组成。

盾构施工的主要原理就是尽可能在不扰动围岩的前提下完成施工，从而最大限度地减少对地面建筑物及地基内埋设物的影响。开挖面的稳定方法是盾构工作原理的主要方面，也是盾构区别于岩石掘进机的主要方面。岩石掘进机与盾构的主要区别就是不具备承受泥水压、土压等维护掌子面稳定的功能，而盾构施工主要由稳定开挖面、掘进及排土、管片衬砌及壁后注浆三大要素组成^[1-3]。

盾构在地层中推进时，通过盾构的外壳和管片来支撑四周围岩，防止土砂崩塌。闭胸式盾构是用泥土加压或泥水加压来抵抗开挖面的土压力和水压力，以维持开挖面的稳定性；敞开式盾构是以开挖面自立为前提，否则需要采用辅助措施。

初期的盾构施工法是用人工开挖式或机械开挖式盾构结合使用压气施工法，边保证开挖面稳定，边进行开挖。在围岩渗漏很严重的情况下，用注浆法进行止漏加固，而对软弱地层则采用封闭式施工。

盾构法一般适用于从岩层到土层的所有地层。但对于复杂的地质条件，或特殊地质条件，应进行认真的论证并选型^[1]，选择合适的盾构形式。对于盾构穿越复杂地层，应结合盾构性能进行细致分析和论证：整体性较好的硬岩地层、岩溶、高应力挤压破损、膨胀岩、含坚硬大块石的土层、卵砾石层、高黏性土层，或可能存在不明地下障碍物的地层等。

1.1.2 盾构施工法的技术特点

盾构法的施工过程需先在隧道区间的一端开挖竖井将盾构吊入竖井中安装，盾构从竖井的预留洞门处开始始发掘进，并沿设计线路推进直至到达另一竖井。

盾构法施工的主要技术特点如下^[4-7]：

(1) 对城市的正常功能及周围环境的影响很小。除盾构竖井处需要一定的施工场地以外，隧道沿线不需要施工场地，无须进行拆迁，对城市的商业、交通、住居影响很小。可以在深部穿越地上建筑物、河流；在地下穿过各种埋设物和已有隧道而不对其产生不良影

响。施工时一般不需要采取地下水降水等措施,也无噪声、振动等施工污染。

(2) 盾构是根据隧道施工对象“度身定做”的。盾构是适合于某一区间隧道的专用设备,必须根据施工隧道的断面尺寸、埋深条件、围岩的基本条件进行设计、制造或改造。当将盾构转用于其他区间或其他隧道时,必须考虑断面尺寸、开挖面稳定机理、围岩粒径等基本条件是否相同,有差异时要进行针对性改造,以适应其地质条件。盾构必须以工程为依托,与工程地质紧密结合。

(3) 对施工精度的要求高。区别于一般的土木工程,盾构施工对精度的要求非常高。管片的制作精度几乎近似于机械制造的程度。由于断面不能随意调整,对隧道轴线的偏离、管片拼装精度也有很高的要求。

(4) 盾构施工是不可后退的。因为管片内径小于盾构外径,所以盾构施工一旦开始,盾构就无法后退。如要后退必须拆除已拼装的管片,这是非常危险的。另外盾构后退也会引起的开挖面失稳、盾尾止水带损坏等一系列的问题。所以,盾构施工的前期准备工作是非常重要的,一旦遇到障碍物或刀具磨损等问题,只能通过实施辅助施工措施后,打开隔板上设置的出入孔,从出入口进入土舱进行处理。

1.2 盾构施工法的优缺点

盾构法与传统地铁隧道施工方法相比,具有地面作业少对周围环境影响小、自动化程度高、施工快速、优质高效、安全环保等优点。随着长距离、大直径、大埋深、复杂断面盾构施工技术的发展、成熟,盾构法越来越受到重视和青睐,目前,已逐步成为地铁隧道的主要施工方法。

(1) 盾构法施工主要具有以下优点^[8-10]:

① 快速。盾构是一种集机、电、液压、传感、信息技术于一体的隧道施工成套专用设备。盾构法施工的地层掘进、出土运输、衬砌拼装、接缝防水和盾尾间隙注浆充填等作业都在盾构保护下进行,实现了工厂化施工,掘进速度较快。

② 优质。盾构法施工采用管片衬砌,洞壁完整光滑美观。

③ 高效。盾构法施工速度较快,缩短了工期,较大地提高了经济效益和社会效益。同时,盾构法施工用人少,降低了劳动强度、降低了材料消耗。

④ 安全。盾构法施工,改善了作业人员的洞内劳动条件,减轻了体力劳动量,施工在盾壳的保护下进行,避免了人员伤亡,减少了交通事故。

⑤ 环保。场地作业少,隐蔽性好,因噪声、振动引起的环境影响小;穿越地面建筑群和地下管线密集区时,周围可不受施工影响。

⑥ 隧道施工的费用和技术难度基本不受覆土深浅的影响,适宜于建造覆土深的隧道。当隧道越深、地基越差、土中影响施工的埋设物越多时,与明挖法相比,经济上、施工进度上越有利。

⑦ 穿越河底或海底时,隧道施工不影响航道,也完全不受气候的影响。

⑧ 自动化、信息化程度高。盾构采用了计算机控制、传感器、激光导向、测量、超前地质探测、通信技术,是集机、光、电、气、液、传感、信息技术于一体的隧道施工成套设备,具有自动化程度高的优点。盾构具有施工数据采集功能、盾构姿态管理功能、施

工数据管理功能、施工数据实时远传功能,实现了信息化施工。

(2) 盾构法施工主要存在以下不足之处:

① 施工设备费用较高。

② 陆地上施工隧道,覆土较浅时,地表沉降较难控制,甚至不能施工;在水下施工时,如覆土太浅,则盾构法施工不够安全,要确保一定厚度的覆土。

③ 用于施工小曲率半径隧道时,掘进较为困难。

④ 盾构法施工的隧道上方一定范围内的地表沉降尚难完全防止,特别在饱和含水松软的土层中,要采取严密的技术措施,才能将沉降限制在很小的限度内。目前,还不能完全防止以盾构正上方为中心土层的地表沉降。

⑤ 在饱和含水地层中,盾构法施工所用的管片对达到整体结构防水性的技术要求较高。

⑥ 施工中的一些质量缺陷问题尚未得到很好解决,如衬砌环的渗漏、裂纹、错台、破损、扭转,以及隧道轴线偏差和地表沉降与隆起等。

1.3 国内外研究现状

目前,国内外针对黄土地区盾构施工的研究不多,尤其是盾构下穿重要风险源的相关文献更少。

(1) 盾构机掘进参数研究现状

土压平衡盾构机施工过程中,正确地选择掘进参数可以有效地保持开挖面稳定、减少土体位移和地面沉降,其中主要的掘进参数有千斤顶推力、刀盘扭矩、推进速度、螺旋机转速、注浆压力和刀盘开口率等。朱合华、徐前卫等^[11-20]进行了土压平衡盾构机模型室内掘进试验,得出了盾构机不同土层中掘进时各施工参数之间的匹配关系,对盾构工法的优化有着一定的指导作用。魏纲、魏新江等^[21-27]根据现场盾构机的施工情况研究了盾构机参数关系及其对地层位移的影响。这些结论的取得为盾构施工参数之间及其与地层特性之间的适应性理论提供了有益的帮助。

(2) 盾构施工渣土改良研究现状

土压平衡式盾构需要在盾构密封舱内充满开挖泥土,通过对开挖土体施加压力来平衡开挖面上的水土压力,因此土压平衡式盾构压力舱内土体的理想状态应为“塑性流动状态”^[28]。现有的评价土体改良效果的室内试验方法主要是岩土工程和混凝土的试验方法^[29-32],如坍落度试验、搅拌试验、渗透试验、压缩试验、稠度试验、剪切试验等。为保证土压平衡盾构顺利施工,国内外学者在对盾构施工改良土体性质方面展开了大量研究。Quebaud 等^[33]的研究表明,气泡混合土的渗透性和气泡添加量有直接关系。Bezuijen 等^[34]通过向压力舱模型注入气泡,研究了砂土与气泡混合土的渗透性、压缩性、黏滞性。Jancsecz 等^[35]的研究表明,使用泡沫可以有效地改善被开挖土体的性能,改良后土体合理的坍落度范围在 200~250mm 之间。Raffaele 等^[36]通过坍落度试验研究改良土的性质。Sotiris^[29]研究了泡沫对砂性地层的改良作用,发现颗粒的大小是决定土体性能的重要参数。唐益群等^[20]以泡沫剂和肥皂水为改良剂,对在添加剂作用下砂性土的流塑性、保水性以及开挖面动态土压平衡机理作了较深入的探讨。胡长明等^[37]针对穿越砂

层的盾构施工进行了渣土改良试验,通过对比处理前后渣土的抗剪强度、渗透性及坍塌度,得到了合理的膨润土用量及泥浆掺入比。张立泉^[38]针对无水砂层,采用泡沫剂和膨润土进行渣土改良。王春河等^[39]结合北京地铁的工程实践,确定了钠基膨润土在粉质黏土、细中砂以及砂卵石地层中的改良配比。石晶等^[40]确定了泡沫注入率与土的渗透系数及土质颗粒级配的关系。宁士亮^[41]确定了以膨润土浆液为主,泡沫剂为辅的改良方案,提出以掘进速度和出渣稠度为主要依据调节膨润土掺入量和膨润土浆液注入量、以刀盘扭矩和螺旋机出渣情况为依据调整泡沫剂掺量和注入量的改良策略。

(3) 地层沉降分析方法研究现状

盾构法是城市轨道交通施工最常用的方法,虽然相比其他隧道开挖方法优点众多,但是盾构隧道施工作为暗挖法之一,不可避免地会引起周围地层损失和邻近结构物的受力变化。即使施工质量良好,盾构施工都会对周围的土体产生扰动,引起地层损失进而导致盾构区域上方地面沉降。盾构推进对土体和邻近既有结构物的影响是一个复杂的三维动态过程,在盾构施工引起的地层沉降分析方面,国内外的专家都做了很多深入的研究。有关地表竖向位移方面的经验公式最早是在1969年由美国科学家Peck^[42]提出的。他在对隧道横向沉降槽分布的研究中发现,地表沉降曲线大致相当于正态分布曲线。经过对大量实测数据的总结,Peck提出著名的Peck公式: $S_x = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2)$ 。英国是最早拥有地铁的国家,英国学者Reilly^[43]等研究了在不同地层中应用不同施工方法最终引起的地表沉降问题,得出了沉降宽度,并且得出预测地表沉降的公式。将隧道单洞开挖引起的地表沉降进行叠加,可以得到隧道双洞的地表沉降公式。我国刘建航院士在总结上海等地区的软土隧道施工经验的基础上,提出了负地层损失的概念,并将地层损失分为开挖面和盾尾后的地层损失两部分对计算纵向沉降的Peck公式进行了修正,得到了隧道纵向地面沉降估算公式。同济大学的侯学渊等^[44],在对修正剑桥模型和比奥固结的分析及现场测试基础上,得出了可算出沉降槽的分布形状、大小及反弯点地出现的位置计算公式,与Peck法计算得出的结果差异比较小。徐方京^[45]等通过采用有限元计算方法,研究多孔介质和孔隙水压力流动产生的粘弹塑性,进而预测出所产生的沉降;在研究了随机介质概念的基础上,贺跃光^[46]等学者得到了隧道开挖估算沉降槽公式。

近年来,计算机技术的进步推动了数值模拟软件的发展,通过有限元法研究盾构隧道受力变形及沉降预测的技术日趋成熟。有限单元法可以根据一些施工条件对盾构法施工的过程进行模拟,这种方法也是目前一种被广泛采用的地表沉降预测方法。我国专家学者结合软件模拟和实际工程监测数据也得出了一系列有效地研究结论,徐干成等^[47]结合北京地铁14号线马家堡站—永定门外站区间隧道盾构穿越京津城际案例对下穿方案进行了模拟。陈靖^[48]结合南京地铁三号线南京站—新庄站隧道区间盾构下穿沪宁城际铁路工程引起的地层沉降规律及其沉降控制措施进行了研究。霍军帅^[49]等人以苏州轨道交通2号线区间盾构穿越高速铁路沪宁城际铁路为背景采用有限元方法研究总结了盾构开挖引起的地表沉降规律,并对无砟轨道结构进行了动力响应分析。孙玉永、周顺华^[50]把盾构开挖对周围地层的影响分为3个阶段,根据数值计算所得隧道上方不同深度土层的横向沉降槽曲线建立用于预测隧道上方深层土体沉降的修正Peck公式,计算结果与数值结果吻合较好。王俊生^[51]以北京地铁十四号线下穿京津城际高速铁路为工程背景,对下穿京津城际铁路段的盾构隧道施工过程进行三维数值模拟,分析出盾构掘进过程中京津城际铁路路基

和地表的沉降特征与规律。刘英诚^[52]结合广州地铁3号线盾构下穿广深准高速工程实例对多种盾构下穿方案进行了比较。肖广良^[53]结合上海地铁11号线盾构下穿沪宁铁路工程实例采用数值模拟方法,对施工后的路基沉降进行了预测。邢焯炜^[54]结合北京市地铁14号线穿越京津城际工程,采用有限元方法分析探讨了不同工况下京津城际路基及轨道结构的变形规律,为盾构穿越工程提供合理建议并分析了由于施工后产生的轨道变形对车辆走行性能和轨道动力特性的影响,为保障既有地面线的运营提供了有效参考。此外,还有很多学者^[55-74]也对各种隧道开挖实例进行三维数值模拟,主要是根据试验或测试结果找出规律,然后提出假设,再根据某一条件来预测结构的整体行为,为盾构隧道的数值模拟提供了可靠的参考。

从上述研究现状可以看出,国内外学者做了很多关于土压平衡盾构机掘进参数、渣土改良、地表沉降等问题的研究工作,但盾构在黄土地区砂层中下穿建筑物,且下穿风险源属于特级风险源的高铁道岔的研究很少,所以,为了保证盾构机的顺利掘进,并且控制地表沉降在合理的范围内,做好盾构下穿过程中的渣土改良、加固措施以及下穿前的沉降预测是很有必要的。

随着城市地铁盾构、城际铁路以及高速铁路的快速发展,地铁盾构穿越高速铁路和城际铁路的工程将会大量涌现,但在地铁盾构穿越高速铁路和城际铁路方面的相关研究还存在如下问题:

(1) 对地铁盾构穿越路基型高速铁路的研究成果较少,地铁、地层、路基及轨道结构之间的相互作用关系还没有系统的研究及说明,各结构之间的相互作用关系仍待进一步研究。

(2) 地层变形引起的轨道变形与轨道不平顺之间的相互关系研究较少,它们之间的相互换算关系还不明确。盾构施工参数及地层参数等对轨道影响规律研究的系统性、理论性和全面性还待加强。

(3) 地铁盾构穿越高速铁路施工的关键控制措施尚不完善。将地铁隧道开挖与高速列车运行一起研究的成果比较罕见,仍有待系统的理论及实验研究。

1.4 工程概况及技术难题

1.4.1 工程概况

由中铁七局承建的西安市地铁四号线工程土建施工项目 D4TJSG-17 标凤城九路站~凤城十二路站~元朔路站盾构区间,位于西安市明光路地下,区间从凤城九路站始发,沿明光路地下向北,沿线建(构)筑物较多,管线复杂。盾构区间标准断面为单线单洞盾构隧道。

其中凤城九路站~凤城十二路站区间位于西安市明光路与凤城十路十字路口南侧~明光路与凤城十二路十字之间地下,区间一直沿明光路下方布设;区间出凤城九路站后,首先以 $R=2000\text{m}$ 的曲线向东偏转至明光路下方,沿线路前行,再以 $R=2000\text{m}$ 的曲线向西偏转,进入凤城十二路站。区间纵断面先以 14‰ 的坡下至凤城十一路,再以 23‰ 的坡向上至凤城十二路,最后以 2‰ 的坡向下到达凤城十二路站。

凤城十二路站~元朔路站区间位于西安市明光路地下,区间从凤城十二路站起,沿明光路地下向北,在明光路与元朔路十字到达元朔路站,沿线下穿绕城高速、北三环南辅道、北三环北辅道等建筑。区间场地位于未修筑的明光路规划段,中段地面上方位于北三环及其辅道,此段东西向车流量大,交通繁忙。区间标准断面为单线单洞盾构隧道,区间隧道洞顶覆土 10.29~16.9m,线间距 13.5m,区间左、右线各含一处平曲线,曲线半径为 2000m。线路纵坡为单面坡,最大纵坡 19.9‰。

尚新路站~尚北区间盾构吊出井区间位于西安市明光路、北客站北广场规划路地下,区间从尚新路站起,沿明光路地下向北,在明光路与规划路交叉口处区间向东转向规划路,沿线下穿西宝高铁明光路两处涵洞,在规划路北侧地到达盾构吊出井,沿线构筑物较多,管线众多。盾构区间标准断面为单线单洞盾构隧道,区间隧道洞顶覆土 16.2~23.2m,线间距 13.5m。区间左、右线各含一处平曲线,曲线半径为 450m。线路纵坡为“V”字坡,最大纵坡 28‰。

1.4.2 工程技术难题

本工程主要存在的工程技术难题包括:

(1) 下穿明光路,现场车流量大,地表沉降要求严格

元朔路站至尚北吊出井盾构区间需纵穿两座高铁涵洞、凤城十二路站至元朔路站盾构区间纵穿北三环南、北高架桥及绕城高速涵洞,盾构过高铁涵洞时对沉降及差异性沉降要求非常严格。元朔路站至尚北吊出井盾构区间不可避免地需下穿某公司厂房,由于某公司厂房内有非常精密的药物压力萃取仪器,对沉降要求也非常严格,如果沉降控制不严格,一旦萃取仪器变形有可能造成有毒有害气体(液体)泄漏或爆炸。

根据地质报告显示,本标段地质围岩较差,全断面富水砂层,盾构施工沉降控制难度非常大。明光路位于西安市未央区,双向 6 车道及两侧非机动车道南北走向,是城北及北三环通往市中心的主要道路,车流量非常大,对地表沉降要求严格。盾构法施工时,应控制地表沉降值不超过 30mm,地表隆起值不超过 10mm,通过承压式混凝土管及燃气管附近时,地表沉降应控制在 15mm 以内。

(2) 区间地跨多个行政辖区及自然村,外部干扰大

临时驻地于西安北客站附近,因驻地附近还未形成住宅区,水电及网线安装都需经过协调解决。盾构区间经明光路下穿北三环高架桥和绕城高速涵洞以及西宝、西成高铁涵洞,盾构施工方案受多家单位进行审批难度大。

(3) 本工程为盾构标,需从其他单位始发、两次过站,施工接口多

本标段主要为盾构施工,根据施工总体安排,盾构机从凤城九路站始发,经过凤城十二路站及元朔路站至尚北区间吊出井吊出。盾构开工时间受相邻标段车站进度制约严重。

(4) 盾构在全断面紧密富水砂层中掘进,掘进速度低

本标段凤城九路站~凤城十二路站区间隧道洞顶埋深为 10~14m,凤城十二路~元朔路站区间埋深为 12~14m,元朔路站~吊出井区间埋深为 11~24m,隧道穿越地层为粉砂层、中砂层及砾砂层,三个区间均位于地下常水位以下,盾构机在紧密富水砂层中土仓建压困难,将间接影响掘进速度。

(5) 区间下穿西宝高铁明光路涵洞、某公司厂房的保护

根据本标段工程邻近建（构）筑物及管线较多的特点，施工过程中对邻近建（构）筑物及管线的保护将是本标段工程的一个重点，尤其是对盾构下穿西宝、西成两处高铁涵洞及某公司厂房的保护是重中之重。

（6）盾构需在砂层中掘进

本工程三个盾构区间掘进主要在位于水下的砂层中进行，其渗透性较好，易产生流砂、涌砂现象。如何保证盾构机在中、粗砂、粉细砂和杂填土土层中安全掘进，防止漏水、涌砂、涌水并顺利通过是难点。

（7）盾构掘进时地面沉降控制较难

由于本标段盾构长距离在道路下方穿行，对现有道路路面的沉降控制要求非常高。根据国内外盾构施工经验，土压平衡盾构在不采用地层加固的情况下正常施工，地面沉降一般能够控制在 $-30\sim+10\text{mm}$ 范围内，能够保证建筑物和管线的安全。

1.5 本书研究的目的和方法

1.5.1 研究的目的

背景工程中黄土地区富水砂层地铁盾构下穿运营高速铁路施工尚属首例，但地铁穿越路基型高速铁路时，不可避免地对周围地层土体产生扰动，引起周围地层损失及路基沉降，可能造成高速铁路轨道的纵横向不平顺，影响列车运营平顺性及安全。高速铁路列车对轨道的纵横向平顺性要求极为严格，地铁盾构穿越高速铁路路基工程属于高风险工程，轨道和路基变形属特级风险源。因此，本项目依托背景工程，采用多种手段研究盾构穿越高速铁路施工过程中，盾构选型及适应性改造，地表沉降控制措施，数值分析与地表沉降预测方法、重要风险源智能监测技术等内容。对于地铁盾构穿越既有高速铁路工程具有重要的指导意义。

1.5.2 研究方法和手段

首先进行调查研究，通过对文献检索与分析，类似工程调研，针对工程地质情况开展盾构选型研究，深入论证土压平衡盾构应用于背景工程及类似工程的可行性，并建设性地提出盾构机改造措施。

其次配合现场试验，采用室内试验，结合监测数据，分析背景工程及类似工程中土压平衡盾构掘进的施工参数、土体改良剂种类、配比等关键施工问题，形成整套掘进方案。

采用数值分析，利用有限元软件模拟土压平衡式盾构机掘进富水砂层的过程。对背景工程重要风险源可能的变形及内力进行系统分析，论证掘进方案的可行性及合理性。

进行现场监测，采用测量机器人自动化监测系统对该范围内的变形监测，对富水砂层土压平衡式盾构机穿越重要风险源施工过程进行实时监控，建立完善的富水砂层土压平衡式盾构机施工智能化监测技术。

最后进行理论分析，综合数值模拟及智能化监测结果，依据现有理论提出富水砂层土压平衡式盾构机施工地表沉降预测方法，提出有关计算公式。

1.6 本书研究的关键技术

(1) 土压平衡盾构穿越全断面砂层渣土改良技术：在砂质地层中，土体流动性较差，土颗粒之间摩擦阻力很大，当土舱内充满渣土时，刀盘扭矩、螺旋输送机扭矩及千斤顶推力大大增加，严重时可能导致开挖困难；砂质地层中土体流塑性差，这会导致大颗粒砾石滞留在土舱底部，使得盾构机姿态控制十分困难，严重时盾构无法推进。本研究通过对砂性土层开展大量的渣土改良试验，得到了盾构掘进渣土改良剂的最优配比。

(2) 全断面砂层土压平衡盾构机适应性改造技术：相对于黄土地层的顺利掘进，土压平衡盾构机在黄土地区砂层，特别是在高标贯、高密实、长距离及全断面砂层掘进初期出现的诸多机械上的问题主要包括：土舱压力难以建立、出渣困难、地面沉降变化大、盾构机推力大、掘进速度缓慢、盾构刀具磨损较快。本研究通过对背景工程掘进情况及试验结果进行对比分析，提出了较为完备的土压平衡盾构机适应性改造技术。

(3) 微扰动施工技术：通过地表沉降监测、数值模拟与分析、地质雷达检测，对盾构施工造成的地层扰动进行实时评估，并据此动态调整盾构施工参数。结合盾尾注浆工艺的改进，以及渣土改良和盾构机改造等方法，将盾构施工对周围环境的扰动控制在最小范围内，对地面建（构）筑物起到较好的保护作用。

(4) 盾构下穿高铁道岔区智能监测技术：盾构下穿风险源期间，需要对地面及风险源进行沉降变形的监测，由于人工测量误差较大、得到的监测数据不够精确，本项目将研究自动化智能监测技术，减少传统意义上形变观测中的人为观测误差及资料整编分析中的可能造成的数据差错。

第 2 章 富水砂层地铁隧道施工盾构选型及风险分析

2.1 盾构选型理论概述

2.1.1 盾构的类型简介

盾构的类型是指与特定的盾构施工环境，特别是与特定的基础地质、工程地质和水文地质特征相匹配的盾构种类。

根据施工环境，隧道掘进机（包括盾构和硬岩掘进机）的类型分为软土盾构、硬岩掘进机（即通常所说 TBM，主要用于山岭隧道）、复合盾构三类。因此，盾构的类型分为软土盾构和复合盾构两类。软土盾构是指适用于未固结成岩的软土、某些半固结成岩及全风化和强风化围岩条件下的一类盾构。软土盾构的主要特点是刀盘仅安装切削软土用的切刀和刮刀，无需滚刀。复合盾构是指既适用于软土，又适用于硬岩的一类盾构，主要用于既有软土又有硬岩的复杂地层施工。复合盾构的主要特点是刀盘既安装有用于软土切削的切刀和刮刀，又安装有破碎硬岩的滚刀，或安装有破碎砂卵石和漂石的撕裂刀。

盾构的机型是指在根据工程地质和水文地质条件，盾构所采用的最有效地开挖面支护形式。盾构按支护地层的形式主要分为自然支护式、机械支护式、压缩空气支护式、泥水支护式、土压平衡支护式五种机型。根据这个定义，盾构的机型主要有敞开式盾构（采用自然支护式和机械支护式）、压缩盾构（压缩空气支护式）、泥水盾构（泥水支护式）和土压平衡盾构（土压平衡支护式）等四种。目前，敞开式盾构和压缩空气盾构已基本被淘汰，本书重点研究目前应用最广的土压平衡盾构和泥水盾构两种机型。

盾构的操作模式是指在一定型的基础上，根据特定的盾构施工环境，盾构所采用的最有效的“出渣进料”操作方式。操作模式是盾构在施工过程中采用的一种操作方式。如复合式土压平衡盾构的操作模式可分为敞开式、半敞开式（气压式）、闭胸式（土压平衡模式）三种。

盾构的形式涉及盾构的型和操作模式。

不论是适用于单一软土地层的软土盾构，还是适用于复杂地层的复合盾构，都包含有土压平衡盾构和泥水盾构两种机型。

盾构的型是指盾构的类型和机型，是在施工前决定的；而操作模式则是在施工过程中根据具体的施工环境由操作人员实时决策的。

2.1.2 盾构选型的原则及依据

盾构选型是盾构法隧道能否安全、环保、优质、经济、快速建成的关键工作之一，盾