

来弘鹏 著
康 佐

黄土地区地铁隧道穿越 既有线路工程理论与实践



科学出版社

黄土地区地铁隧道穿越 既有线路工程理论与实践

来弘鹏 康 佐 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对黄土地区地铁隧道穿越工程面临的难题,从多个角度进行论述:揭示黄土地层新建地铁隧道浅埋暗挖施工时既有线及地层变形规律与受力特征,给出浅埋暗挖下穿既有地铁构筑物的最小净距建议值及沉降控制标准;推导单洞、双洞下穿既有地铁构筑物的地层计算公式、砂土地层盾构隧道下穿既有地铁构筑物顶推力及刀盘扭矩计算公式,得出土仓压力、注浆压力、注浆范围对既有地铁隧道结构沉降、轨道高差的影响规律及敏感性;给出过街通道上跨既有隧道工程的科学合理施工方案,部分成果已得到实体工程验证。

本书可供从事地铁工程和隧道工程研究、设计、施工的人员参考,也可供隧道工程、岩土工程等专业的高等院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

黄土地区地铁隧道穿越既有线路工程理论与实践/来弘鹏,康佐著. —北京:科学出版社,2018. 1

ISBN 978-7-03-054824-5

I. ①黄… II. ①来… ②康… III. ①黄土区-地铁隧道-隧道施工-研究 IV. ①U231. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 255126 号

责任编辑:张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:照 望

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 1 月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:337 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着城市地下轨道交通的快速发展,节点车站换乘和区间线路交叉等问题日益突出,穿越工程将越来越多。穿越工程的特点是风险大、复杂程度高、控制标准严格,既有结构将不可避免地受新建线路施工产生的附加位移和内力的影响,若新建隧道施工不当,则会降低既有地铁结构的耐久性,甚至影响既有地铁的行车安全。因此,在保证既有结构及列车运营安全的前提下实现新建工程的安全施工,这个要求可能要远远高于新建结构安全对于施工的要求,这是穿越工程的难点所在。北京、上海等地区地铁建设起步较早,穿越施工技术相对成熟,而黄土地区穿越工程还属于新生事物,目前缺少相关的工程经验,加之黄土独特的结构性与水敏性,很有必要有针对性地开展相关研究工作。

本书以暗挖正交下穿既有线、盾构小角度斜下穿既有线、暗挖正交上跨既有线路等穿越工程为背景,从既有线路沉降计算方法、既有线路沉降控制标准、既有线路力学行为、新建隧道施工参数对既有线路变形的影响规律、施工参数敏感性及其优化等方面系统地研究黄土地区地铁隧道穿越既有线路面临的相关问题,主要成果如下:首先揭示了黄土地层新建地铁隧道浅埋暗挖施工时既有线路及地层变形规律,得出既有结构受力特征并给出浅埋暗挖下穿既有线路的最小安全距离;推导了单洞、双洞下穿既有线路的地层沉降计算公式并通过实体工程进行验证;从既有隧道结构变形、受力整体稳定性等角度出发,给出新建隧道近距离下穿既有线路沉降控制标准。其次推导了含砂黄土地层盾构隧道下穿既有线路顶推力及刀盘扭矩计算公式并给出盾构施工的各技术参数;确定了渣土改良的配合比,并结合现场改良效果对其进行优化;得出土仓压力、注浆压力、注浆范围对既有地铁隧道结构沉降、轨道高差的影响规律及敏感性;揭示此类下穿工程既有地铁隧道的变形规律和受力特征。最后给出了异形过街通道上跨既有隧道工程的科学合理施工方案,揭示了黄土地区暗挖通道近距离上跨既有地铁隧道变形规律和力学特征。

本书相关研究得到了陕西省科学技术研究发展计划项目(青年科技新星计划项目)、西安市地下铁道有限责任公司科研项目的资助;同时得到了中铁五局集团有限公司、中铁十局集团有限公司等相关单位的大力支持与协助,在此表示衷心感谢。硕士生赵鑫、郑海伟、王伟、丁杰、赵杰、贾星星等参与了部分研究工作,杨晓强、温克兵、张佳、张坚、马明波、魏琪、薛瑛等为科研工作的顺利开展提供了极大的帮助,在此对上述做出贡献的相关人员表示衷心感谢。另外,书中参考了部

分国内外同行的有关论文、著作,引用和借鉴了他们的研究成果,在此一并表示感谢。

希望本书的出版,能够对完善和提高我国黄土地区地铁隧道穿越工程施工技术做出微薄的贡献。限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017年5月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目的及意义	1
1.2 现有研究成果综述	3
1.2.1 新建地铁隧道下穿既有地铁构筑物影响因素	3
1.2.2 新建地铁隧道下穿既有线力学行为研究现状	4
1.2.3 新建地铁隧道下穿既有线控制标准研究现状	6
1.2.4 穿越工程施工方案的研究现状	8
1.2.5 盾构下穿既有有线施工控制技术研究现状	9
1.3 本书主要内容	10
第 2 章 暗挖下穿既有地铁隧道理论分析	13
2.1 概述	13
2.2 数值模拟基本原理	13
2.2.1 有限差分法软件简介	13
2.2.2 有限差分法分析原理简介	14
2.3 依托工程概况	16
2.4 构建三维计算模型	17
2.4.1 模型概况	17
2.4.2 计算的基本假定及本构关系	17
2.4.3 模拟计算边界条件及物理力学参数	18
2.4.4 模拟计算监测点布置	19
2.4.5 模拟计算工况	20
2.5 既有地铁结构变形分析	21
2.5.1 既有地铁结构沉降变形分析	21
2.5.2 既有地铁结构水平变形分析	29
2.6 地表变形分析	30
2.6.1 沿新建隧道轴线地表变形分析	30
2.6.2 沿既有隧道轴线地表变形分析	34
2.7 地层变形分析	36
2.8 不同下穿净距既有地铁结构受力分析	44

2.9 新建隧道施工工序对既有地铁结构变形和受力影响分析	45
2.9.1 新建隧道施工工序对既有地铁结构变形影响分析	45
2.9.2 新建隧道施工工序对既有地铁结构受力影响分析	49
2.10 本章小结	51
第3章 新建隧道下穿既有有线地层沉降计算方法	52
3.1 概述	52
3.2 单洞隧道下穿既有有线地层沉降计算方法	52
3.2.1 单洞隧道 Peck 经验理论公式	52
3.2.2 新建单洞地铁隧道近距离下穿既有有线地层沉降计算公式	54
3.2.3 工程实例分析	56
3.3 双洞隧道下穿既有有线地层沉降计算方法	59
3.3.1 双洞隧道地层沉降计算	59
3.3.2 新建双洞地铁隧道近距离下穿既有有线地层沉降计算公式	62
3.3.3 工程实例分析	72
3.4 本章小结	77
第4章 暗挖隧道下穿既有线路沉降控制标准研究	78
4.1 概述	78
4.2 新建地铁隧道下穿既有线路判断准则	78
4.3 基于不同因素下穿既有线路沉降控制基准研究	79
4.3.1 基于既有隧道结构最大弯矩沉降研究	80
4.3.2 基于既有隧道结构曲率半径沉降研究	89
4.3.3 基于既有隧道结构容许应力沉降研究	90
4.3.4 基于既有隧道轨道结构变形沉降研究	91
4.3.5 基于既有隧道结构容许切应变沉降研究	93
4.4 基于数值分析的既有隧道沉降标准确定	95
4.4.1 结构受力安全性评价	95
4.4.2 基于结构受力特征的沉降标准确定	96
4.5 新建黄土地铁隧道近距离下穿既有地铁线路预警	99
4.6 本章小结	99
第5章 盾构下穿既有隧道理论分析	101
5.1 概述	101
5.2 依托工程概况	101
5.2.1 工程简介	101
5.2.2 工程地质	104
5.2.3 水文地质	106

5.3 构建三维计算模型	106
5.3.1 模型建立及边界条件	106
5.3.2 本构模型选取及计算假设	107
5.3.3 材料参数	108
5.3.4 初始应力场的建立	110
5.3.5 盾构施工过程的模拟	112
5.4 设计模拟工况	116
5.4.1 试验方法的确定	116
5.4.2 影响因素及水平	117
5.4.3 工况设计	117
5.4.4 正交试验结果分析	119
5.5 施工参数对既有地铁隧道变形的影响分析	121
5.5.1 土仓压力的影响	121
5.5.2 注浆压力的影响	126
5.5.3 注浆厚度的影响	128
5.6 各因素对既有地铁隧道变形的敏感性分析	132
5.6.1 正交试验各工况数值模拟结果	132
5.6.2 极差分析	134
5.7 本章小结	137
第6章 盾构下穿既有地铁隧道施工参数	139
6.1 概述	139
6.2 基于理论计算的盾构掘进参数优化分析	139
6.2.1 土压力控制	140
6.2.2 顶推力控制	145
6.2.3 刀盘扭矩控制	150
6.2.4 掘进速度控制	152
6.2.5 出土量控制	153
6.2.6 盾尾注浆控制	153
6.3 基于数值模拟的盾构掘进参数优化分析	156
6.3.1 土仓压力参数优化	156
6.3.2 注浆压力参数优化	157
6.3.3 注浆范围参数优化	157
6.4 本章小结	158
第7章 渣土改良技术	159
7.1 概述	159

7.2	评价标准	159
7.3	试验方案	160
7.3.1	试验目的及内容	160
7.3.2	试验工况设计	162
7.4	渣土改良试验数据分析	162
7.4.1	钠基膨润土泥浆黏度试验结果分析	162
7.4.2	改良砂土坍落度试验结果分析	163
7.4.3	改良砂土渗透性试验结果分析	165
7.4.4	改良砂土直剪试验结果分析	166
7.5	渣土改良现场效果评价及进一步优化	168
7.6	本章小结	170
第8章	盾构下穿既有地铁隧道力学行为实测	171
8.1	概述	171
8.2	既有地铁隧道变形和受力现场监测方案	171
8.2.1	既有地铁隧道变形监测方案	171
8.2.2	既有地铁隧道受力监测方案	174
8.3	既有地铁隧道变形监测结果及分析	177
8.3.1	既有地铁隧道道床变形分析	177
8.3.2	既有地铁隧道边墙变形分析	179
8.3.3	盾构不同掘进位置时既有隧道竖向位移分析	180
8.3.4	既有隧道单测点沉降时程分析	183
8.4	既有地铁隧道受力监测结果分析	184
8.5	既有地铁隧道力学行为数值分析	187
8.5.1	数值模拟与现场监测结果对比分析	187
8.5.2	变形规律分析	191
8.5.3	受力特性分析	194
8.6	本章小结	210
第9章	暗挖通道上跨既有地铁隧道理论分析	212
9.1	概述	212
9.2	依托工程概况	212
9.2.1	工程简介	212
9.2.2	工程地质与水文地质情况	214
9.2.3	周边建筑物情况	217
9.2.4	地下管线情况	217
9.3	有限元模型的建立	218

9.3.1	模型概况	218
9.3.2	模型计算假定及本构关系	219
9.3.3	有限元单元的选取	219
9.3.4	模型计算边界	220
9.3.5	模型计算参数	220
9.3.6	监测断面布置方案	221
9.3.7	各种模拟工况	222
9.4	不同方案实施对既有地铁结构变形规律的计算分析	224
9.4.1	既有地铁结构竖向变形规律计算分析	224
9.4.2	既有地铁结构水平变形规律计算分析	227
9.5	不同预加固措施下既有地铁隧道受力规律计算分析	230
9.5.1	夹层土体注浆时暗挖通道上跨施工对既有地铁的受力状态影响	231
9.5.2	夹层土体不注浆时暗挖通道上跨施工对既有地铁的受力状态影响	231
9.6	本章小结	232
第 10 章	暗挖通道上跨既有地铁隧道力学特征实测	233
10.1	概述	233
10.2	监测项目及监测要求	233
10.3	监测方法与测点布置	234
10.3.1	监测方法	234
10.3.2	所用测试元件及其工作原理	237
10.3.3	测点布置及其注意事项	238
10.4	现场测试结果及分析	240
10.4.1	既有地铁隧道初期支护与二次衬砌间接触压力测试结果及分析	240
10.4.2	既有地铁隧道二次衬砌混凝土应力测试结果及分析	242
10.4.3	新建上跨通道施工引起地表沉降测试结果及分析	244
10.4.4	既有地铁隧道变形测试结果及分析	245
10.5	本章小结	247
参考文献		249

第 1 章 绪 论

1.1 目的及意义

改革开放以来,伴随着社会经济的快速发展,我国的城市化水平也在不断提高。近年来,由于私家车的大量普及和外来流动人口的蜂拥而至,很多城市出现了人口过度饱和、大气污染严重、资源短缺、建筑空间拥挤、交通堵塞等不良反应,即所谓的“城市综合症”^[1]。其中,交通堵塞似乎已经成为所有城市的顽疾,这严重制约着城市的发展。为了从根本上解决城市环境、资源、人口三大危机,就必须另辟蹊径,将地面人流引入地下,建设高效环保的地下有轨交通。与传统的地面公共交通设施相比,城市地下轨道交通具有运输能力强、快速、便捷、准时、安全、舒适、占地少、无污染、低能耗等优点^[2]。城市轨道交通成为改善城市交通环境、缓解城市交通拥挤以及带动城市经济发展的重要手段。

然而,随着地铁线网的不断完善,节点车站和区间线路的换乘、交叉问题日益突出。这种交叉、换乘的实现方式主要包括穿越施工、预留线路和同期建设。三种方式中又以穿越施工的难度最大,其对既有地铁结构及列车运营的安全威胁最大^[3]。同期修建时不存在新建线路对既有线路的影响问题;预留线路修建时由于提前考虑了后期穿越问题,在修建既有结构时往往会进行土层加固等保护措施,大大降低了新建线路施工对既有结构的影响。然而,由于规划考虑不周或者线路需要调整,往往只能选择穿越施工。根据新建线路与既有线路的相对位置关系,可以将地下穿越工程分为新建线路正交下穿既有线路、新建线路正交上穿既有线路、新建线路斜交下穿既有线路和新建线路斜交上穿既有线路等。表 1.1 列举了部分国内已有的典型既有近距离穿越工程。

表 1.1 既有近距离穿越工程汇总表

序号	穿越工程	穿越角度/(°)	最小净距/m
1	北京地铁 5 号线崇文门站下穿既有地铁 2 号线 ^[4]	90	1.985
2	北京地铁昌八联络路线下穿既有地铁 8 号线	26	3.180
3	北京机场线东直门站下穿既有地铁 13 号线东直门折返线 ^[5]	62	0.2~0.3
4	北京地铁 10 号线国贸站—双井站盾构区间下穿既有地铁 1 号线 ^[6]	90	1.245

续表

序号	穿越工程	穿越角度/(°)	最小净距/m
5	北京南水北调暗涵穿越既有地铁 1 号线五棵松站 ^[7]	90	3.667
6	北京人行通道上穿既有地铁 10 号线 ^[8]	90	1.970
7	北京地铁 6 号线平安里站—北海北站区间下穿既有地铁 4 号线 ^[9]	90	2.613
8	北京地铁 4 号线动物园站—白石桥站区间上穿既有地铁 9 号线 ^[10]	15	1.390
9	北京地铁 4 号线宣武门暗挖车站下穿既有地铁 2 号线 ^[11]	90	1.900
10	上海明珠线浦东大道站—张杨路站区间下穿既有轨道交通 2 号线	32	1.719
11	上海轨道交通 8 号线上穿既有轨道交通 2 号线 ^[12]	90	1.340
12	上海轨道交通 2 号线盾构下穿既有轨道交通 1 号线 ^[13]	90	1.000
13	上海黄浦江行人观光隧道盾构上穿既有轨道交通 2 号线 ^[14]	51	1.570
14	上海外滩通道上穿延安路隧道 ^[15]	90	5.400
15	上海越江隧道下穿既有轨道交通 8 号线	56	2.800
16	上海轨道交通 7 号线常熟路站—肇嘉浜路站区间下穿既有轨道交通 1 号线	79	1.500
17	深圳地铁 2 号线大东区间下穿既有地铁 1 号线 ^[16]	55	1.780
18	深圳地铁 3 号线下穿既有地铁 1 号线 ^[17]	90	1.000
19	青岛地铁 1 号线下穿既有地铁 3 号线 ^[18]	90	1.004
20	广州地下人行通道上穿既有地铁 1 号线 ^[19]	90	0.600
21	杭州地铁 4 号线下穿既有地铁 1 号线	23	2.120

在表 1.1 所列的穿越工程中,既有地铁线路受上穿工程施工的影响较小,既有地铁结构往往会因卸载而发生上浮变形;而对于下穿工程,既有结构会因新建线路施工而产生不均匀沉降,并发生整体弯曲,甚至出现隧道结构与道床剥离的现象,对既有线结构的安全极为不利。因此,对于穿越工程,在保证既有结构及列车运营安全的前提下实现新建工程安全施工的要求可能要远远高于新建结构安全对施工的要求,这是穿越工程的显著特点,更是难点所在。

在西安市城市轨道交通远景规划中,区间隧道的交叉和车站的换乘节点总数为 66 处,穿越工程施工将面临以下两个突出问题:

(1) 黄土属于特殊土,其结构疏松,性质多变,具有大孔隙性,节理裂隙发育,水敏感性;受外界各种荷载的影响其性质会发生变异,产生较大变形。所有这些围岩特征将对隧道下穿既有构筑物施工产生较大影响,对既有构筑物安全及稳定性构成威胁。因此,很有必要研究下穿时既有构筑物的变形和力学行为,给出确

保安全的既有地铁构筑物变形控制标准与措施。

(2) 从地铁隧道的施工方法来看,由于技术上的先进性和优点,以盾构法和浅埋暗挖法作为施工工法的案例层出不穷。在近 100 多年的发展中,不断改善的盾构性能以及不断提高的设计和施工技术理论,使这些施工工艺日趋成熟。然而,在黄土地层,盾构法和浅埋暗挖理论及实践仍需接受时间和工程实例的考验。尤其是施工引起的沉降理论不成熟,既有运营地铁线路对沉降的高要求、地铁运行时对地层的动力作用,这些都要求我们在隧道施工穿越既有地铁构筑物的过程中慎之又慎,突破技术瓶颈,提出黄土地层隧道穿越既有地铁构筑物的关键技术参数,明确穿越时对施工质量起控制作用的敏感参数与取值标准,确保下穿过程中既有线的安全稳定。

鉴于黄土地区新建地铁隧道穿越既有线路工程的上述难题,本书以暗挖正交下穿既有线、盾构斜交下穿既有线、暗挖正交上跨既有线等穿越工程为依托,从既有线沉降计算方法、既有线沉降控制标准、既有线力学行为、新建隧道施工参数对既有线变形的影响规律、施工参数敏感性及其优化等多方面展开论述,具有重要的理论意义和工程实践价值。

1.2 现有研究成果综述

1.2.1 新建地铁隧道下穿既有地铁构筑物影响因素

宋文杰等^[20]依托北京地铁 7 号线下穿地铁 10 号线双井站实体工程,分析了新建隧道与既有车站在不同下穿净距下,既有地铁车站结构不同部位的沉降变形与应力及既有地铁结构周围土体的变形规律;刘镇等^[21]依托珠江新城盾构地铁隧道下穿广州地铁 1 号线区间实体工程,利用实际监控量测数据验证数值模拟计算的有效性和可靠性,从而进一步研究新建盾构地铁隧道下穿既有地铁构筑物时,不同类型的复合地层、既有隧道埋深、两隧道间净距等因素对既有地铁构筑物的影响规律,并根据下穿时不同复合地层引起的既有地铁隧道的沉降特点,制定了相应的沉降控制措施。

宁寅等^[22]根据上海打浦路隧道复线工程,建立了弯曲隧道下穿复杂几何特性的既有隧道的三维计算模型,采用 Newton-Raphson 方法进行非线性求解,分析了泥水盾构施工对围岩与既有隧道的影响;赵晓勇^[23]依托重庆地铁 6 号线下穿涵洞的工程实例,分析了 TBM 施工下既有涵洞的应力和变形;王金龙^[24]结合广州地铁 5 号线盾构施工过程中下穿过街通道的工程实例,对通道桩基基础处理方案进行了分析及优化,提出了钢纤维喷射混凝土与人工挖孔桩相结合的地下过街通道的施工方案;闫朝霞等^[3]通过对北京多条地铁线路穿越情况的对比分析,在确保

最小限度扰动既有线,保证既有线运营和结构安全的基础上,论述了如何制定合适的施工方案,选择合适的辅助施工措施和监控量测手段;朱正国等^[25]依据北京地铁,通过数值分析,研究讨论了不同施工方法、不同预加固范围对下穿施工的影响。

汪伟松^[26]运用激振函数模拟地铁列车的振动荷载,通过 Newmark 隐式积分法,研究分析了在不同的列车振动荷载作用下,立体交叉隧道衬砌结构的动力响应规律,指出了列车振动荷载作用下既有隧道衬砌结构的薄弱部位,并确定了相应的位移大小和受力状态;白冰等^[27]通过数值模拟计算的方法,研究了列车荷载作用下,左右平行隧道过渡到上下平行隧道工况下的三维动力响应;黎杰等^[28]以上下交叠隧道为背景,研究了双向列车振动荷载对隧道结构的动力影响;刘强等^[29]运用有限元方法,分析了高速列车振动荷载作用下,上下交叠隧道结构的动力响应特征,探讨了列车速度、围岩级别、交叉角度等因素对下穿隧道结构动力响应变化规律的影响。

1.2.2 新建地铁隧道下穿既有线力学行为研究现状

邵华等^[30]以上海明珠线浦东大道站—张杨路站区间斜下穿既有轨道交通 2 号线为工程背景,通过分析现场监测数据,得出了盾构施工对既有隧道的影响规律:既有隧道结构的变形以竖向位移为主,随着盾构的掘进,既有隧道纵向呈波浪状并不断向前移动。

胡群芳等^[31]通过对上海明珠线浦东大道站—张杨路站区间 32° 下穿既有轨道交通 2 号线进行现场监测,得到既有线周围土体的变形规律,同时系统地论述了近距离下穿工程的施工技术方案。

张晓丽^[32]分析了下穿施工对地铁行驶限速运营安全、地铁振动效应和新旧地铁隧道下穿净距的影响,提出了新建地铁隧道与既有隧道合理间距的确定方法,同时应用能量分配理论制定了新建隧道施工过程中的既有构筑物分步沉降控制指标体系。

何川等^[33]以广州地铁 3 号线大塘站—沥滘站区间重叠下穿某既有隧道为背景,通过数值模拟和模型试验的手段,分析了既有隧道受盾构重叠下穿施工影响所产生的附加轴力、弯矩和变形等。研究表明,掌子面前方两倍直径处隆起最大,在掌子面前方三倍直径到后方两倍直径范围内出现了不均匀沉降。

白海卫^[34]针对新建地铁隧道下穿既有地铁线路区间结构的类型进行了分类,建模过程中采用弹性地基梁进行分析,推导了既有地铁线路受新建地铁隧道正交下穿施工影响产生的应力计算公式、沉降曲线表达式以及极限沉降表达式。

王子甲^[35]基于南水北调暗涵小间距双线隧道近距离下穿五棵松地铁车站的实体工程,研究穿越区域范围内双线隧道注浆加固效果、车站与浆液横通道之间

的间隔以及两工作面之间的错距对地层沉降的影响,认为6m的工作面错距完全满足降低变形缝差异沉降的要求,而车站与浆液横通道之间的距离对既有线路区间结构沉降影响较小,之后又提出了限速运营沉降控制标准。

杨海平^[36]基于北京地铁10号线垂直下穿1号线的工程背景,考虑到双曲线预测模型与灰色预测模型在计算地层沉降变形方面的不足之处,对误差绝对值进行权重考虑并辅以最小准则的运用,建立了新的加权模型组合。

李东海等^[37]以北京地铁北土城站—芍药居站区间下穿既有地铁13号线为工程依托,通过分析既有隧道结构变形实测数据,得到了既有车站的变形规律并优化了施工参数。研究表明,既有车站结构的变形表现为扭转下沉,侧墙处则发生了半槽型沉降;合理选择盾构顶推力、土仓压力、掘进速度以及加强同步注浆和二次补浆可以有效控制既有车站的变形。

汪洋等^[38]以广州地铁3号线大塘站—沥滘站区间正交下穿某既有隧道为工程依托,通过数值模拟和模型试验相结合,研究既有隧道受下穿施工影响的变形、受力、弯矩等变化规律。研究表明,既有隧道在拱腰处发生内收敛,拱底变位大于拱顶,且最大变位量发生在新建隧道正上方;既有隧道产生了较大的附加轴力和纵向弯矩,既有隧道的内力则表现为“上压下拉”。

房明等^[39]利用有限元方法对广州某盾构隧道正交下穿既有地铁1号线的施工过程进行模拟,得到了既有隧道的位移、应力变化规律。结果表明,既有隧道的变形以符合正态分布的纵向沉降为主,既有隧道的正应力受下穿施工影响较大,隧道埋深、夹层土厚度以及土体的强度对既有隧道的变形和受力也有较大影响。

胡军等^[40]以某盾构隧道下穿既有暗挖地铁隧道为依托,通过数值模拟的手段对既有隧道的力学行为进行研究。研究表明,随着盾构掘进,既有隧道先隆起后沉降,且在盾构脱离既有线路时,沉降的增量达到最大;盾构隧道下穿施工过程中,既有隧道会发生扭转变形,且扭转程度随盾构顶推力的增大而增大。

马振超^[41]以北京地区的下穿实例为研究背景,针对穿越类型及邻近度两方面展开研究,发现采用盾构法施工下穿引起的地层沉降量以及对既有线路区间结构的影响程度均低于浅埋暗挖法。既有线路区间结构会在1~1.5倍洞径范围内产生显著沉降,新建隧道跨度对既有线路结构的影响比较明显,而下穿净距仅对既有线路区间结构的范围影响较大,对沉降最大值影响较小。

张明远^[42]将超近距离下穿隧道工程作为研究对象,应用荷载-结构-基床系数折减法的计算模型,研究下穿影响范围、程度及隧道埋深等条件下既有地铁隧道结构的力学行为,通过改变隧道下方基床系数的取值以及基床系数的分布范围,实时预测施工掘进对既有地铁线路区间的影响。

韩煊等^[43]选取国内外经典地铁隧道的下穿工程,分析实测曲线发现,既有隧道结构呈柔性变形,既有线路结构刚度与辅助加固措施对隧道变形影响显著,考

虑新建隧道埋深、穿越夹角、既有线路结构刚度以及预加固措施等多种影响因素,得到预测既有地铁隧道变形的简便计算方法。

张海彦等^[44]以苏州某盾构隧道正交下穿既有地铁 1 号线为工程依托,通过数值模拟分析了不同夹层土厚度时既有隧道的力学行为。结果表明,新建隧道施工对既有隧道的影响范围为 3 倍直径;为了降低新建隧道施工对既有隧道的影响,夹层土厚度应尽可能大于 0.8 倍新建隧道直径。

康佐等^[45]以西安地铁某盾构区间为工程依托,通过数值模拟的手段分析了正交下穿工程中既有隧道管片的内力、位移及地表沉降的变化规律。研究表明,既有隧道结构发生了不均匀的扭转和侧移,既有结构衬砌在正交位置附近出现了一定程度的拉应力。

王剑晨等^[46]通过对北京地区 10 个下穿工程的 23 组既有线实测变形数据进行拟合,发现绝大多数沉降曲线符合 Peck 公式,并讨论了新建隧道与既有隧道的埋深、新建隧道双洞间距、新建隧道施工工法、既有隧道刚度等因素对经验参数的影响,给出了经验参数的修正公式,为北京地区既有隧道受新建隧道施工影响的变形规律提供了一个简单、可靠的预测方法。

张琼方等^[47]对杭州某盾构地铁小角度近距离下穿既有地铁 1 号线的施工过程进行了现场监测,分析了盾构掘进至不同位置时既有隧道的水平位移、隆沉及收敛位移的变化规律,将既有隧道穿越交叉点位置的水平位移和竖直位移变化过程分为 5 个阶段。

1.2.3 新建地铁隧道下穿既有线控制标准研究现状

新建隧道下穿既有线路区间结构的过程中,既要保证新建隧道的顺利施工,又要保证既有线路区间结构安全和正常运营。研究大量下穿工程实例,发现城市地区下穿施工过程中起主要控制作用的是上部既有线路结构强度以及允许的变形指标。但是关于下穿过程中既有地铁线路结构的变形控制标准至今没有统一的取值基准,本书搜集并整理了我国各大中城市(如北京、广州、深圳、上海、南京等)已修建的新建地铁隧道下穿既有线路区间结构工程实例中提出的控制指标,如表 1.2 所示。

表 1.2 新建隧道下穿既有隧道工程变形控制标准

序号	地区	典型下穿工程	变形控制	
			线路运营	隧道结构
1	北京	地铁 6 号线 下穿地铁 4 号线	道床、轨道等最大 沉降 $\leq 10\text{mm}$	最大沉降量不大于 10mm

续表

序号	地区	典型下穿工程	变形控制	
			线路运营	隧道结构
2	上海	轨道交通 2 号线 下穿轨道交通 1 号线	轨道高差控制 $\leq 4\text{mm}$	位移控制值: $\pm 5\text{mm}$
3		外滩观光隧道 下穿轨道交通 2 号线	轨道高差控制 $\leq 2\text{mm}$	位移控制值: $\pm 5\text{mm}$
4		明珠二期下穿 轨道交通 2 号线		
5	广州	旅客输送系统盾构 隧道下穿地铁 1 号线	轨道高差控制 $\leq 4\text{mm}$	总沉降与位移 $\leq 20\text{mm}$ 位移控制值: $\pm 5\text{mm}$ 纵向变形 $\leq 4\text{mm}$
6	深圳	深圳地铁 11 号线东延线 下穿地铁 1 号线	道床平顺度: $4.0\text{mm}/10\text{m}$ 轨道差异沉降: 4.0mm 三角坑: $4.0\text{mm}/18\text{m}$	结构变形量控制值: 20.0mm 相对变形: $1/2500$
7	南京	地铁 3 号线 下穿 1 号线	最大沉降 $\leq 10\text{mm}$ 轨道高差 $\leq 4\text{mm}$ 轨距: $+6\text{mm}, -2\text{mm}$ 扭曲 $\leq 4\text{mm}/10\text{m}$	隧道结构位移 $\leq 20\text{mm}$

随着城市轨道交通建设的逐渐完善,新建地铁隧道下穿既有地铁区间隧道大量涌现,基于保护地铁结构及保障运营安全,部分地区依据当地的实际情况制定了适合本地区的变形控制标准,例如,上海市制定了地铁隧道保护技术标准,如表 1.3 所示。相关部门依据不同领域的应用需求同样制定了控制标准,如住房和城乡建设部组织制定的《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)^[48],如表 1.4 所示。

表 1.3 上海市地铁隧道保护变形控制值

轨道静态尺寸容许偏差	既有地铁隧道结构
轨道横向高差 $< 4\text{mm}$	地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量 $< 20\text{mm}$
轨距: $+6\text{mm}, -2\text{mm}$	隧道变形曲线的曲率半径 $\geq 15000\text{mm}$
水平及扭曲 $< 4\text{mm}$	相对变形 $\leq 1/2500$

注:以上标准适用于轨距 1435mm、行车速度 120km/h 及以下的线路。

研究上述下穿工程中既有地铁线路结构控制标准的具体性、区域性和部门性的特征,总结得出下穿施工引起既有隧道结构累计变形总位移为 20mm,轨道高差控制值为 4mm。