

● 新时代土木工程新技术应用丛书

盾构及暗挖法施工相关影响 现场监测及有限元分析

SHIELD TUNNELING
AND SUBSURFACE EXCAVATION

● 李兵 孙威 周博 陈鑫 闫煦 刘浩◎著

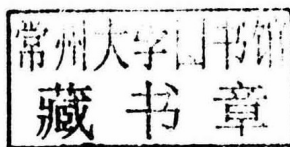
非外借

中国建筑工业出版社

新时代土木工程新技术应用丛书

盾构及暗挖法施工相关影响现场 监测及有限元分析

李兵 孙威 周博 陈鑫 闫煦 刘浩 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

盾构及暗挖法施工相关影响现场监测及有限元分析 / 李兵等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019.8
(新时代土木工程新技术应用丛书)
ISBN 978-7-112-24017-3

I. ①盾… II. ①李… III. ①盾构法-施工监测 ②暗挖法-施工监测 IV. ①U455.43 ②TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 155589 号

责任编辑: 周娟华

责任设计: 李志立

责任校对: 王 瑞 姜小莲

新时代土木工程新技术应用丛书
盾构及暗挖法施工相关影响现场监测及有限元分析
李兵 孙威 周博 陈鑫 闫煦 刘浩 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
北京建筑工业出版社制版
北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 8³/₄ 字数: 214千字
2019年8月第一版 2019年8月第一次印刷
定价: 58.00元

ISBN 978-7-112-24017-3

(34512)

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)

前 言

随着现代化进程的高速发展，越来越多的人口涌入城市，城市道路的运输负荷越来越大，因此，城市地铁成为有效缓解路上交通运输量过大的一种有效途径。

修建地铁离不开隧道的开挖，地铁隧道开挖有许多种施工方法，但是由于地铁隧道大部分位于城市比较繁华的区域，周围的车辆行人较多，地下各类管线错综复杂，例如污水管线、自来水管线、燃气管线等，加之周围建筑物较多，因此像明挖法等隧道施工方法不适合用于城市地铁隧道的开挖。随着地下空间不断被开发利用，地铁施工技术也在不断变革创新，盾构法施工由此发展起来，近几年应用越来越广泛。

盾构法施工有许多优点，不受地面其他因素的影响，同时对地面交通的影响较小；全程采用机械化、自动化的操作系统，施工速度快。盾构法施工被广泛运用于城市地铁建设。虽然盾构法施工有很多优点，但是城市地铁线路不可避免会穿过人群比较密集、周围环境复杂、地下市政管线交错的区域，难免会对周围的环境产生影响，轻则会使周围地基的承载能力下降，使地表产生凸起或者凹陷；重则造成周围建筑物地基损害，引起建筑物出现裂缝、倾斜，更为严重的是造成建筑物失稳破坏，从而威胁建筑物的安全使用，给人民的生命、财产安全造成不同程度的损害。

在地铁车站的主体结构中，为了方便人们的出行安全及提高运输效率，地铁往往需要设置多个出入口及通风管道，这时明挖逆作法无法满足实际要求，多数地区通常选用浅埋暗挖法进行过街通道及通风管道等结构的施工。浅埋暗挖法具有造价低、拆迁少、施工过程中不影响地面交通的正常运输等优点，但是浅埋暗挖法施工过程中会对原状土体产生扰动作用，严重时导致地表变形，路面沉降、塌陷并产生裂缝，也会使邻近建筑倾斜，破坏地下供水、供电管线及通信线路。

所以，针对以上安全隐患，需要对盾构及暗挖法施工相关影响进行监测并加以有限元分析。

本书主要以沈阳地铁两座典型换乘站的建设过程为背景，以站 A 深基坑及盾构区间，站 B 某盾构区间盾构隧道侧穿高架桥桩基础和站 B 的 D 出入口 CRD 工法暗挖通道为研究对象，着重分析盾构施工对深基坑及周围环境产生的影响，盾构在侧穿高架桥桩基时桥桩的内力与变形，以及地铁暗挖隧道施工对内部结构和上部结构的影响。采用 MIDAS GTS NX 有限元软件建立三维盾构隧道、邻近深基坑、高架桥桩基和地铁暗挖隧道的数值模型，对周围环境的变形进行数值模拟分析，分析施工期间对外部环境的影响，通过对模拟结果的分析及以往的工程经验，并结合施工现场实际监测结果进行分析对比，分析影响周围环境的主要因素以及提出减小施工过程中周围环境变形的有效措施，以减少在施工过程中造成的不利影响，将施工对周围环境的影响降到最低，为今后类似的地铁工程建设积累经验。

本书主要由沈阳建筑大学教授李兵撰写，其中孙威、周博、陈鑫、闫煦、刘浩参与了

部分撰写工作，最后定稿和校对由李兵完成。

感谢团队成员近五年的努力工作，谨以本书纪念一起工作、辛勤付出、痛并快乐的日子。感谢我的学生，是他们的辛苦付出使项目顺利完成，团队不断壮大。他们是那琦、邹本春、嵇凤颖、杨路、方冰洋、孙小飞、于景春、马宁、刘亚锋、安赛男、杨光、刘洋、王师、李高科、刘玉强、曲晶彤、隋文、张鸿杰、吴晋豪、张熙哲、贺德龙、黄琛、李卓伦、郑一攀。

限于时间和作者水平，疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者和有识之士批评指正。

著者

2019年8月8日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外盾构及暗挖法施工研究现状	2
1.2.1 盾构法施工对地表沉降影响的研究现状	2
1.2.2 盾构法施工对临近基坑影响的研究现状	4
1.2.3 盾构法施工对桩基影响的研究现状	5
1.2.4 暗挖隧道施工对地表沉降影响的研究现状	6
1.2.5 暗挖隧道施工对桩基影响的研究现状	8
1.3 本书的主要研究内容	9
1.3.1 盾构法的施工分析	9
1.3.2 浅埋暗挖法的施工分析	10
第 2 章 盾构法施工及实测数据分析	11
2.1 盾构法的介绍	11
2.1.1 盾构法的起源	11
2.1.2 盾构机的分类	12
2.1.3 盾构机的构造	12
2.1.4 盾构施工方法的介绍	13
2.2 盾构法施工对周边环境的影响机理	14
2.2.1 盾构法施工影响地层变形分析	14
2.2.2 盾构法施工对桩基的影响分析	16
2.3 盾构法施工的现场监测	17
2.3.1 现场监测的主要内容	17
2.3.2 地表沉降的现场监测	18
2.3.3 站 B 的桥梁沉降及位移现场监测	22
2.3.4 站 B 的拱顶沉降现场监测	23
2.3.5 站 B 的净空收敛现场监测	25
2.3.6 站 B 的围护桩水平位移现场监测	26
2.4 本章小结	28

第 3 章 CRD 工法暗挖隧道施工及监测	30
3.1 浅埋暗挖技术.....	30
3.2 CRD 法施工方案与技术措施.....	31
3.2.1 暗挖隧道工程设计.....	31
3.2.2 暗挖隧道施工方法.....	32
3.2.3 隧道施工技术措施.....	32
3.3 CRD 法暗挖隧道施工的现场监测.....	34
3.3.1 现场监测的主要内容.....	34
3.3.2 地表沉降的现场监测.....	35
3.3.3 桥梁沉降及水平位移的现场监测.....	36
3.3.4 拱顶沉降的现场监测.....	38
3.3.5 净空收敛的现场监测.....	39
3.4 本章小结.....	40
第 4 章 盾构法施工过程的数值模拟分析	42
4.1 MIDAS GTS 有限元软件介绍.....	42
4.2 站 A 工程概况.....	43
4.3 三维模型的建立.....	44
4.3.1 三维模型的基本信息.....	44
4.3.2 计算模型的建立.....	45
4.3.3 基坑和隧道施工阶段的定义.....	46
4.4 模拟结果分析.....	47
4.4.1 地表沉降分析.....	47
4.4.2 地下连续墙变形分析.....	49
4.5 对比分析.....	52
4.5.1 地表沉降 Peck 经验公式与模拟结果对比分析.....	52
4.5.2 围护结构实测值与模拟值对比分析.....	53
4.6 站 B 工程概况.....	54
4.6.1 工程周边环境.....	54
4.6.2 工程地质条件.....	54
4.7 相关参数选取.....	56
4.7.1 土体参数.....	56
4.7.2 衬砌管片参数.....	56
4.7.3 桩单元参数.....	57
4.7.4 注浆参数.....	57

4.7.5	掌子面推力	57
4.8	三维模型的建立	57
4.8.1	三维模型的基本信息	57
4.8.2	计算模型的建立	58
4.8.3	定义施工阶段	59
4.9	模拟结果分析	61
4.9.1	地表沉降分析	61
4.9.2	桥梁沉降及位移分析	63
4.10	本章小结	64
第 5 章	基于站 A 盾构参数影响分析	66
5.1	盾构施工参数对地表沉降的影响分析	66
5.1.1	盾构掘进土层的弹性模量	66
5.1.2	盾构掘进土层的内摩擦角	67
5.1.3	盾构隧道上层覆土厚度	69
5.1.4	衬砌管片混凝土	70
5.2	盾构施工参数对地下连续墙的影响分析	71
5.2.1	盾构掘进压力变化对地下连续墙位移的影响	72
5.2.2	盾构千斤顶推力变化对地下连续墙位移的影响	73
5.2.3	盾构注浆压力变化对地下连续墙位移的影响	74
5.3	施工方案优化设计	76
5.4	本章小结	77
第 6 章	基于站 B 盾构参数影响分析	79
6.1	盾构施工参数对地表沉降的影响	79
6.1.1	隧道埋置深度对地表沉降的影响	79
6.1.2	隧道直径对地表沉降的影响	80
6.1.3	盾构掘进土层弹性模量对地表沉降的影响	81
6.1.4	衬砌管片混凝土对地表沉降的影响	82
6.1.5	土层侧压力系数对地表变形的影响	83
6.2	盾构施工参数对桥梁变形的影响	84
6.2.1	盾构埋深对桩体的影响	85
6.2.2	隧道与桩基水平位移对桩体的影响	86
6.2.3	土体黏聚力 c 、内摩擦角 φ 对桩体的影响	88
6.2.4	不同施工顺序对桥梁的影响	91
6.3	施工方案优化设计	93

6.4	本章小结	95
第 7 章	基于站 B 的 CRD 工法施工过程数值模拟分析	96
7.1	土的本构模型及计算参数的选取	96
7.1.1	土的本构模型	96
7.1.2	计算参数的选取	97
7.2	三维模型的建立	98
7.2.1	三维模型的基本信息	98
7.2.2	计算模型的建立	98
7.2.3	定义施工阶段	100
7.3	CRD 工法暗挖隧道施工模拟结果分析	101
7.3.1	地表沉降的影响分析	101
7.3.2	桥梁沉降与水平位移影响分析	103
7.4	数值模拟结果验证分析	104
7.4.1	地表沉降变形对比分析	104
7.4.2	桥梁位移变形对比分析	105
7.5	本章小结	106
第 8 章	CRD 工法施工参数的影响分析	107
8.1	引言	107
8.2	CRD 工法暗挖施工参数对地表沉降的影响分析	107
8.2.1	施工工序	108
8.2.2	注浆厚度	110
8.2.3	开挖步距	111
8.2.4	隧道埋深	113
8.3	CRD 法暗挖施工参数对桥梁位移变形的影响分析	114
8.3.1	土体的黏聚力 c 、内摩擦角 φ	114
8.3.2	隧道与桩基水平位置关系	117
8.3.3	隧道埋深	118
8.4	施工方案优化设计	120
8.5	本章小结	122
第 9 章	盾构法及暗挖法施工的结论与展望	124
	参考文献	127

第1章 绪 论

1.1 研究背景

近年来,随着现代化进程的飞速发展,越来越多的人口涌入城市,城市道路的运输负荷越来越大,无法满足人们的日常工作和生活需求。这时,城市地铁作为有效缓解运输量过大的路上交通的一种有效途径而出现。城市地铁具有节约地上空间、对周围环境影响小、满载量大、不产生对环境有害的污染气体等优点。而且城市地铁的建设对于地下空间合理的开发,不仅能够积累宝贵的经验,更能促进其他相关行业的蓬勃发展。

地铁运输作为传统运输的补充,给人们的生活带来了巨大便利。中国在20世纪末就将发展城市地铁作为国家进步的一个方向,但由于当时国家资金缺乏,技术手段落后,经济状况不能给地铁发展提供大量的资金。直到1969年,在国内大量专家学者以及一线技术人员的共同努力下,我国第一条自主研发、自主设计施工的城市地铁在北京顺利完成施工,这也标志着我国在城市地铁研发领域迈出了坚实的第一步。随后的几十年内,越来越多的城市地铁出现在我国的大城市内,完成着运输市民的使命。

修建地铁离不开地铁隧道的开挖。地铁隧道开挖有许多种施工方法,但是由于地铁隧道大多位于城市比较繁华的地区,周围的车辆、行人较多,地下各类管线错综复杂,例如污水管线、自来水管线、燃气管线等,加之周围建筑物较多,因此像明挖法等隧道施工方法不适宜用于城市地铁隧道的修建。随着地下空间不断被开发利用,地铁施工技术也在不断变革创新,盾构法施工由此发展起来,近几年应用越来越广泛。

盾构法施工有许多优点,例如,盾构法施工是在盾构外壳的支护下施工,随后在盾尾进行管片的拼装以及注浆加固,因此在施工的过程中能够保证盾构安全、有序向前掘进;盾构法施工不受地面其他因素的影响,因此对地面上的交通影响较小;全程采用机械化、自动化的操作系统,因此施工速度快。基于盾构法施工的优点,盾构法施工被广泛运用于城市地铁建设。虽然地铁盾构法施工有很多优点,但是城市地铁线路不可避免会穿过人群比较密集、周围环境复杂、地下市政管线交错的区域,难免会对周围的环境产生影响。轻则会使周围地基的承载能力下降,使地表产生凸起或者凹陷。重则造成周围建筑物地基损害,引起建筑物出现裂缝、倾斜,更为严重的是造成建筑物失稳破坏,从而威胁建筑物的安全使用,给人民的生命和财产安全造成不同程度的损害。

在地铁车站的主体结构中,为了保证人们的出行安全及提高运输效率,地铁往往需要设置多个出入口及通风管道,这时明挖逆作法无法满足实际要求,多数地区通常选用浅埋暗挖法进行过街通道及通风管道等结构的施工。浅埋暗挖法具有造价低、拆迁少、施工过程中不影响地面交通正常运行等优点,但是浅埋暗挖法施工过程中会对原状土体产生扰动,严重时会导致地表变形,路面沉降、塌陷并产生裂缝,也会使邻近的建筑物倾斜,破坏地下供水、供电管线及通信线路。

1.2 国内外盾构及暗挖法施工研究现状

1.2.1 盾构法施工对地表沉降影响的研究现状

盾构在工作时,会挤压土体,产生的挤压力会使周围的土体产生滑移,在剪切力的作用下,引起土体剪切变形,改变了土体的稳定状态,随着隧道的开挖支护以及土体产生的固结沉降,使土体达到新的稳定状态。通过查阅各类书籍与参考文献,总结出土体变形在盾构开挖至土体固结完成大致经历了以下几个阶段:土体的开挖扰动、挤压变形、注浆压缩、土体压缩变形等。盾构机在地下工作过程中,盾构机对土体产生的影响一定会传到地表,从而影响到其上地表周围的结构物。当盾构机在工作的过程中,会使周围土体产生位移和变形,当地表土体位移超过某一限值后,地表产生的过大变形会引起地层破坏,也会引起地表上部的建筑物产生裂缝甚至破坏,给人民的生命财产安全造成严重的后果。因此,初始设计时,在地铁线路的选择上,首先要尽量避开地下重要的基础设施以及地上重要的建筑物,尤其是具有纪念意义的建筑物,当无法避开时,应制订相应的保护措施,避免对其造成损害。国内外专家学者从未停止过对此类问题的研究。

通过查阅大量的国内外参考文献,总结国内外在此方面的研究现状,得到几种较为常用的方法:Peck公式法、数值分析法、实验分析法以及其他研究方法等。以下简单介绍这几种方法。

1. Peck公式法

国内外许多专家学者通过各种方法预测地铁施工引起的地表沉降,但在工程施工现场应用最多的是Peck经验公式法。经验公式法是通过大量的实验数据,结合实际工程总结出的地表沉降的一般规律,并通过公式表现出来,从而对盾构施工过程中地表可能出现的最大沉降量和地表变形分布规律进行理论推导和预测。经验公式法具有使用方便、参数可以根据施工环境确定等优点。

针对预测地表竖向位移公式法,许多专家都提出了自己的观点。其中,1969年Peck提出的Peck公式和一系列的修正公式应用最为广泛。

$$S_{(x)} = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{zi^2}\right) \quad (1-1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \approx \frac{V_s}{2.5i} \quad (1-2)$$

$$i = \frac{z}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (1-3)$$

式中 $S_{(x)}$ ——距离隧道中线处的地表沉降量 (mm);

S_{\max} ——隧道中线处的地表沉降量 (mm);

x ——距离隧道中线的距离 (m);

i ——沉降槽宽度系数 (m);

z ——隧道中心埋深 (m);

V_s ——隧道单位长度地层损失 (m^3/m)；

φ ——隧道周围土体内摩擦角 ($^\circ$)。

1975年刘建航院士对软土地基中盾构法施工进行了大量的实验研究,分析了在软土介质中盾构法施工过程中地表沉降变化的一般规律,提出了“欠地层损失”概念,并形成了地面纵向沉降的估算公式。计算公式如下:

$$S_{(y)} = \frac{V_n}{\sqrt{2\pi i}} \left[\varphi\left(\frac{y-y_i}{i}\right) - \varphi\left(\frac{y-y_f}{i}\right) \right] + \frac{V_D}{\sqrt{2\pi i}} \left[\varphi\left(\frac{y-y_i'}{i}\right) - \varphi\left(\frac{y-y_f'}{i}\right) \right] \quad (1-4)$$

式中 $S_{(y)}$ ——纵向坐标为 y 处的地表沉降量 (m); 正值代表发生沉降变形; 负值代表发生隆起变形;

y ——沉降点到坐标原点的距离 (m);

y_i ——隧道开挖面推进起始位置 (m);

y_f ——隧道开挖面当前位置 (m);

V_n ——盾构开挖面引起的地层损失;

V_D ——除盾构开挖面外,其他因素导致的地层损失。

其中, $y_i' = y - y_i$, $y_f' = y - y_f$ 。

2014年康庄等在研究隧道施工引起地层变形中考虑了盾构坡角和隆起效应的影响,引入角度系数后对 Peck 公式进行修正,使之可以计算盾构斜交条件下地表平面上任一点的沉降。2014年林存刚等基于岩土体为均质各向同性半无限空间不可压缩弹性体的假定,采用虚拟镜像技术推导了在隧道边界地层不同收敛模式下地表沉降的计算公式。

2. 数值分析法

随着计算机模拟软件的发展,数值模拟软件的使用越来越多,许多专家采用模拟软件来预测地表沉降。之前的大部分实验和理论都是建立在二维平面上的,很难从三维的角度去预测地表沉降。而随着计算机的发展,便可以解决这些问题,同时还可以通过添加和修改参数能够更加清晰地描绘地表沉降过程,了解影响地表沉降的因素。现在,数值模拟方法能够有效地预测地表沉降,被越来越多的人所应用。现阶段有许多种数值模拟方法,每种方法各不相同,但结果一致。数值分析法应用越来越广泛,许多国内外专家学者对此进行了大量的研究论证。

在国外,1982年 T.Ito&M 和 Hisatake 利用数值模拟的方法研究盾构施工对地表沉降的影响。1983年 Rowe.R.K.&Lo.K.Yetal 运用数值模拟法模拟隧道施工与管片衬砌过程的相互影响,并提出用间隙参数 G 来反映盾构法施工对地表沉降的影响,再运用有限元法研究地层变形的规律。

在国内,1986年李桂花最早采用有限元法模拟隧道施工间隙系数,根据工程中的具体情况选择恰当的间隙系数,并由此推导出地层沉降预测公式。2002年孙钧等通过有限元数值分析研究出了扰动地层水平位移的运动状态和应力重分布区的分布范围。2004年张海波等模拟了盾构在掘进过程中各部件与周围土体的相互作用。2005年张志强、何川通过数值模拟的方法研究了盾构在推进过程中引起的土体变形和地表位移,预测实际工程中的地表沉降量,用来防止地表位移过大而引发的安全事故。2006年朱训国、杨庆等利用 ABAQUS 有限元软件对新奥法隧道施工过程进行模拟,较好地解决了隧道施工模拟中的难点问题。

3. 实验分析法

随着社会的发展和科学进步,许多专家开始转向实验的方法来研究盾构隧道施工对地表变形的影响。实验法能够更加真实地反映地表变形的过程。国内外专家对此作出了大量的研究。1993年 Mair 和 Kimura 等通过分析伦敦地铁施工过程对地表沉降的影响,推导出地铁隧道盾构法施工引起的地表水平位移的计算公式。此外, Atkinson 等通过缩小隧道实验模型进行模拟实验,从实验中得出,不同的土体侧压力引起的地表沉降不同。在国内,2012年马险峰等利用离心实验的方法分析盾构施工过程对既有隧道产生的变形规律。2013年何川等模拟室内盾构掘进实验,研究盾构掘进施工对周围地表的扰动变形。施成华、彭立敏等经过大量的实验研究,分析并修改了地表纵向沉降公式。

4. 其他方法

2000年朱忠隆、张庆贺采用动态跟踪的实验方法研究了盾构隧道施工过程对地层扰动的变形规律。2012年 Sirivachiraporn 等通过对盾构施工过程中的监测数据分析,得到了盾构开挖对地层及邻近建筑物影响的一般规律。2015年梁荣柱等基于 Mindlin 解并考虑刀盘挤土效应产生的掘进面附加压力、软土地层中具有软化特性且不均匀分布的盾壳侧摩阻力及同步注浆压力引起的地层位移,结合地层损失引起的地层位移,得到盾构施工过程中地表沉降及深层岩土体水平位移的解。

1.2.2 盾构法施工对临近基坑影响的研究现状

随着城市地下空间的不断开发和城市高层建筑的大量施工,出现了大量的深基坑工程,包括地铁车站基坑、端头井基坑、盾构始发和接收竖井基坑,以及许多高层建筑的地下基坑等。基坑工程占据着越来越大的地下空间,致使许多盾构隧道需要下穿、侧穿及近接基坑工程进行施工,其施工过程会对基坑围护结构的稳定性、位移和内力产生一定的影响。而基坑围护结构作为基坑的主要保护结构,其安全性可想而知。针对这一问题,许多专家学者进行了大量的分析和研究,在研究盾构施工过程中影响范围内地层位移的基础上,进一步研究盾构施工对邻近基坑产生的影响,总结其变化过程的一般规律,为盾构施工的设计和 optimization 提供一些参考。

研究盾构施工对邻近深基坑的影响时,主要的研究对象是基坑的围护桩和地下连续墙。1979年 Morton & King 制作了盾构隧道及其邻近桩基的室内模型,并在室内模型箱内注入软弱土层,按照施工条件对桩基进行承载力和位移研究。试验结果表明,盾构施工对邻近桩基产生的影响不容忽视。Gordon 等使用大型有限元分析软件对敞口式隧道开挖施工及其周围受力桩进行了三维数值模拟分析。若桩基出现在影响范围内,则对桩端的沉降产生很大的影响;若桩基出现在影响范围外,则对桩端沉降产生的影响较小,可以忽略不计。

自 19 世纪后期至今,盾构隧道施工对邻近深基坑的影响一直是备受关注的地下工程问题。近几年国内又有许多专家学者对类似问题进行了试验、模拟及工程研究。

张冬梅等使用三维数值模拟方法对上海地铁 2 号线及邻近竖井基坑进行了研究。假设土体是线弹性介质且土体和墙体是协调变形的,在这一假设成立的前提下,研究了盾构法施工对邻近的竖井基坑产生的影响,总结了围护结构的变形及坑外水、土压力的变化过程。同时,提出了盾构施工对竖井的影响程度与相对距离和相对位置的相关性很大。

李坤使用 ABAQUS 软件建立二维模型, 试图对盾构掘进施工进行分析, 并探究了无桩和有桩两种情况下的土体及桩体的变形, 但二维模型分析结果的准确性较低, 不适合用来分析大型的动态工程, 故提出使用三维模型分析盾构隧道施工的建议。

李东海等研究了土城东路站一区间盾构隧道由西向东斜穿越既有地铁车站工程, 监测穿越过程中的结构变形。探索合理的盾构推进力, 控制施工掘进参数, 从而保证施工的正常有序进行。

曾英俊基于上海地铁 10 号线双线盾构区间穿越下立交深基坑的实际工程, 用 ABAQUS 在岩土中的应用部分建立三维模型, 其中盾构穿越距离为 630m, 最近净距约为 2m, 属于穿越距离较长且净距较小的邻近施工, 因此进行基坑围护结构的影响分析是极其必要的。分析表明, 盾构施工对基坑围护结构底部侧移量的影响非常明显。同时, 基坑围护结构底部的弯矩值处于不断增加的趋势。

张晓刚基于北京市南水北调东干渠工程第 9 标段盾构法施工工程, 对盾构机在富含高承压水的土层掘进进行了研究。盾构机穿越多个竖井, 对端头加固、洞门破除、竖井回填及掘进中的监测和管片注浆的施工进行了阐述, 提出了盾构穿越竖井的风险预测及分析。

刘辉基于沈阳地铁二号线一期某盾构区间穿越深基坑工程, 对工程中可能出现的风险进行预测和分析, 并提出一系列应对措施。

刘军等使用 FLAC/3D 有限元软件模拟了北京地铁盾构的始发和接收施工。盾构的始发和接收实际上是盾构机掘进突破竖井地下连续墙的过程, 研究盾构机对地下连续墙的作用, 减小盾构顶力引起的桩体位移和应力变化, 避免桩体在施工过程中发生破坏。

夏光辉采取了室内模型试验研究的方法。首先, 确定合理的模型的几何尺寸尤为重要, 盾管及地下连续墙的尺寸和材料也很重要; 其次, 根据盾构施工方法进行模型试验, 并观察记录试验现象; 最后, 试验完成后分析盾构施工对地下连续墙产生的影响, 主要研究了地下连续墙的墙身附加应变随隧道掘进的变化情况。

结合以上研究可知, 许多国内外专家学者都对盾构施工对深基坑的影响进行了研究, 但是由于不同国家和地区的地质条件特性和复杂程度都不尽相同, 得到的结论和规律也不能一概而论。所以, 对这一问题进行进一步的研究和探索是十分必要的。经过大量的研究工作, 尝试在未来几年总结和归纳出一地区范围内同类型工程的共性及区别, 为同类盾构施工设计过程的优化和完善提供参考, 为保证施工进度、缩短工期和施工安全提供有力依据。

1.2.3 盾构法施工对桩基影响的研究现状

目前, 国内外的许多专家学者经过仔细研究并一致认为, 盾构法施工对于桥梁桩基的影响是一个十分复杂的过程。盾构开挖时会对盾构机周围的土体产生挤压, 而土体作为媒介则把这种挤压作用传递给相邻桩基, 从而使桩基产生附加弯矩和附加变形, 继而影响桩基础的稳定性。

在国外, 许多年以前很多专家学者便针对此类问题展开大量的研究和探讨, 并取得了一些研究成果。1979 年 King 和 Morton 便开始对此类问题进行了研究, 并根据研究成果提出盾构地下施工会对邻近桩基产生很大影响, 尤其是一些黄土地基等土质较差的区域, 所以在盾构施工过程中要重点注意对桩基的保护。1999 年 Chen L T、Poulos G H 和

Loganathan 分析了盾构在向前掘进的过程中,由于盾构对土体的挤压作用,桩基的内力与变形所产生的变化,利用解析法与边界元法研究其对桩基的影响。2002年 Mroueh 和 I.Shahrour 首先运用了有限单元法对桩体内力与变形进行分析,并着重分析盾构施工过程中,盾构掘进方向与桩基不同时,施工过程对桩基的影响。2007年 Lee C J 等利用离心模型试验进行研究。试验结果表明,当隧道施工时,距离隧道较近的桩基受力较大,并且这种影响会随着隧道开挖而不断发生变化。由于桩基的内力和变形是不断变化的,又会导致桩体周围位移场发生改变,进而对隧道施工带来不利的影响。2004年 Cheng、dasari 等通过对现场监测数据及离心机模型试验结果的对比计算,得出在不同地层损失率下土层位移的计算方法,然后利用有限元软件将土体产生的位移施加在盾构隧道边界上,从而用来模拟隧道施工对周围桩基的影响。

在国内,也有很多专家和学者在此方面进行了研究和探索。在研究盾构施工过程中影响范围内地层位移的基础上,进一步研究盾构施工对邻近桩基础产生的影响,总结桩基变化的一般规律,为盾构施工的设计和 optimization 提供一些参考。2003年李宏安以北京地铁 10 号线为背景,研究亮马河站—农展馆站区间盾构近距离下穿桥梁桩基,在盾构施工之前运用相关计算公式估算出施工过程中地表沉降最大值,并结合施工结束地表沉降趋于稳定后的现场实测数据进行分析对比,对比结果表明计算与实测数据基本吻合。2006年杨晓杰、邓飞皇等通过建立有限差分法模型,分析了盾构施工过程对邻近桩基承载力的影响,并得出盾构施工对桩基的影响主要是桩基轴力的改变。2007年杨超、黄茂松等采用三维整体数值分析方法,建立三维弹塑性模型,从整体上研究黏性土地基中桩基、土体和隧道三者间的相互作用关系。研究表明,盾构距离桩基越近,对桩基的影响越大。桩体的变形和内力受到隧道施工、桩基位置、桩基数量等因素的影响,并且对于群桩基础,隧道施工过程中引起桩体的变形较大。2014年袁海平、朱大勇等结合桥桩结构耦合的基本原理以及有限差分这两种方法,对合肥地铁 1 号线盾构施工侧穿沿线某高架桥过程中不同工况下桥桩的轴力、弯矩等力学性能进行了重点分析。研究结果显示:(1)盾构隧道与桥梁的位置关系是影响桥梁桩基变形的重要因素,并且双向隧道的先后开挖顺序会对桩基产生双重影响;(2)盾尾注浆是影响地表变形的重要因素。

1.2.4 暗挖隧道施工对地表沉降影响的研究现状

在地铁隧道施工的过程中必然会导致隧道周围岩体扰动及隧道自身和周围结构物变形的情况。隧道施工中,隧道结构及周围环境产生重大的变化往往是由很多细小的条件所引起的。地层的位移情况,不仅与施工方案、施工工法及支护条件有关,还与隧道周围岩体稳定性、土体地质条件、地下水位等因素息息相关。在如今城市地铁发展的过程中,由于人们对安全和生命财产的意识逐渐的提高,越来越多的地铁隧道施工的辅助措施逐渐完善。为了保证地铁施工的顺利进行,在暗挖隧道施工过程时,针对由于开挖所引起的地表沉降情况及时、有效的预测与评估手段得到了迅猛发展,国内外许多学者已经取得了多项科学创新成果,正在逐步地应用在实际工程中。

CRD 工法暗挖隧道施工过程中导致其周围环境变形的因素有很多。CRD 工法的自身因素包括隧道的埋置深度、施工工序、开挖步距、注浆厚度等,外界因素包括隧道周围岩体性质、水文地质情况、周围土体属性等,这些因素共同作用表现在隧道附近地表及周围

建筑结构的变形情况。当隧道施工过程中使周围土体变形超过一定限制时,会造成地层破坏、路面开裂的情况,由于附近土层产生剪切破坏,裂缝传递到周围建筑结构中的桩基,使房屋产生不均匀沉降变形,所以在地铁隧道的线路选择时,应避免重要的地下基础设施及地上建筑结构,无法躲避时应采取有限的防护措施,以避免国家财产造成损失。因此,有效地分析出针对隧道开挖所带来的不利影响的解决方法是现阶段的重要研究任务。

地铁隧道施工带来了一系列的环境问题,这引起了国内外大量的专家学者的关注。笔者查阅了大量的国内外文献,汇总出现阶段的研究成果,得到了暗挖隧道施工所导致地表变形研究的主要方法包含以下几种:

(1) 解析法:由于技术的发展,经验公式法已不能完全满足计算和分析要求,所以人们对隧道开挖引起的土体沉降进行了更加深入的研究,许多相关领域的知识也被应用进来,根据土体本身的特性,发展出了在弹性、粘弹性以及弹塑性等不同情况下的理论求解方法。Raymond D.Mindlin 将土体看作弹性体,并将开挖后的隧道看成是具有圆柱形孔洞的弹性半空间体,根据弹性理论得出圆柱形孔洞在重力作用下的半空间体位移,代入半空间体上表面及孔洞周围的自由边界,得到半空间体位移的精确解,该解析表达式即为隧道开挖引起的地层位移。Sagaseta 假设土层为各向同性的和且不可压缩,得到了地层损失所引起的土体应变场。Verruijt&Booker 以 Sagaseta 研究的理论为基础,将土体假设为均质弹性体,并对 Sagaseta 的分析方法做了改进,得到了隧道开挖引起的地层位移的解析表达式。该方法适用范围较广,能考虑不同的土层泊松比的影响,但得到的变形曲线比实测结果要宽,而且水平变形结果偏大。Loganathan 和 Poulos 在 Lee 等人提出的间隙参数及 Verruijt&Booker 得出的闭合解的基础上,认为隧道周围的径向位移不是均匀的,应为椭圆形的非均匀分布形式,并且地层的沉降主要发生在隧道轴线与水平方向呈 45° 夹角的范围内,重新定义了考虑地层损失的系数,最后得到了地层位移的解析式。解析法将地层假定为均匀的,基本都考虑为弹性或者粘弹性问题,所以该方法的边界条件和初始条件都较为简单,没有考虑施工工艺及现场环境对地层位移的影响,这使该方法在应用中受到很大限制。但是解析法仍有很重要的意义,在实测资料不充分或者数据分析存在很大困难,不能很好地估计地表沉降的情况下,简化的理论解析法可计算出不同参数对地层变形的影响程度,可为研究和设计人员提供一定的决策依据。

(2) 数值分析方法:由于地下岩土体分析比较复杂,解析法无法全面考虑各种因素,但是计算机技术的发展和数值分析方法的改进,使得采用数值模型分析岩土体成为可能,为计算和求解提供了另一种有效的方法。在分析隧道开挖引起的地层位移和地表沉降时,数值方法与之前所介绍的经验法、解析法相比,具有以下一些优点:1) 考虑了地质条件的特殊性,如土体的不均匀性;2) 考虑了不同的施工工法;3) 考虑了支护的类型及时间。对岩土体进行研究的数值方法,经过了长期的不断发展,已经形成了较为成熟的理论,常见的有边界元法、有限元法、有限差分法、离散元法等。目前,国内外有很多的数值分析软件,国外的模拟软件应用非常广泛,主要有 FLAC、ANSYS、Midas、ABAQUS 等;国内软件主要有 2D- σ 、3D- σ 、同济曙光等。

地下工程工艺复杂,而且受很多因素的影响,如果所有条件和因素都考虑,就会使模拟计算变得非常复杂。在建模过程中,必须有针对性地选取主要因素,忽略次要因素,并且还要使得所求结果与实际工况吻合。这给数值模拟带来了很大的困难,需要进行长期的

实践和研究。

国外许多学者对于地铁隧道开挖模拟做了大量的工作，并取得了不少研究成果。日本的竹山乔在对已有的弹性体有限元的模拟结果研究的基础上，然后对工程实测资料进行分析，根据实际结果修正了已有的模拟结果，得到的公式比较实用，能够很好地描述地表沉降。T.Ito&M.HISatake 利用边界元法分析了弹性地基中隧道开挖施工引起的地表三维沉陷，得到了较好的结果，并在模拟中考虑了掘进速度、开挖面的深度、隧道衬砌结构的作用等因素的影响。R.J.Finno 和 G.W.Clough 分别对隧道沿纵向和横向两个方向的断面进行平面应变分析。他们认为，可分别对隧道的纵向和横向断面进行二维平面有限元分析，以模拟土压平衡盾构施工时隧道的开挖过程及地表移动。但应用此方法对隧道纵切面采用平面应变分析所得到的结果不太理想。Rowe&Lee 对软土中隧道施工的三维应力场分布及地层位移分布进行分析，对已有的各种简化分析方法进行了比较评价，提出了一种简化的二维平面应变分析法来研究所需的参数，结果显示该法不能有效地估计土体三维位移。

国内也有很多学者利用数值模拟方法开展了隧道开挖导致土体变形的研究，但主要工作集中在具体工程中隧道开挖后土体的变形预测上。李桂花利用弹塑性有限元法计算隧道施工间隙参数，得到了地层沉降分布的估算公式，可模拟出不同的间隙参数对土层沉陷的影响大小。西南交通大学地下工程系对深圳地铁一期工程老街一大剧院区间双孔交叠隧道进行了模拟，分析了在采用矿山法施工情况下的地层变形，得出了双孔重叠近距离隧道施工时的一些非常有意义的结果。

1.2.5 暗挖隧道施工对桩基影响的研究现状

在隧道施工之前，桩基和桩周土体在长期的外荷载和固结过程中已经平衡，隧道施工会破坏原有的平衡状态，引起土体向隧道移动，并对周围结构物产生影响。隧道中心线以上部分的土体会发生向下的位移，使土体相对于桥桩有向下的趋势，桩基产生向下的负摩阻力，增大了桩身轴力，降低了其承载力；隧道中心线以下部分的土体将会发生向上的位移，对桩基下沉有一定的阻碍作用；总的来说，由于桩基负摩阻力的存在，使得桩身轴力增大，导致桩基发生沉降并降低其承载力，而水平的土体位移分量将向着隧道的轴线。

目前，用来研究隧道开挖对既有桩基影响的方法主要有两种：一种方法是整体分析法，即在模拟隧道开挖的过程中，将桩周土体、桩基看作一个整体来分析，采用相关的软件计算出桩和土体产生的变形及内力变化。

整体分析方法的优点是计算较为全面，能综合很多因素进行分析，在对单桩和群桩分析时可考虑桩土之间的相互作用、土体不均匀性和复杂边界条件的情况。缺点是：在进行三维模拟计算时，不仅工作量大、速度慢，而且需要专业的模拟软件进行建模和计算，在工程实际中不便于操作，不能被工程人员广泛接受。

国内外专家学者运用整体分析法开展了暗挖隧道施工对桩基影响的研究。

Lee 等对掌子面掘进时对邻近受荷桩基进行三维弹塑性固结耦合分析，认为在掌子面前方和后方各一倍洞径范围内，土体发生了塑性破坏，桩基沉降大于土体沉降。在该影响范围内，掌子面施工会使得孔隙水在桩顶和桩底分别产生正摩阻力和负摩阻力。

Mroueh 和 Shahour 采用有限元法对隧道开挖后单桩和群桩的变形及受力情况进行了模拟。所得的结果表明：隧道开挖会引起附近桩基位移及内力发生变化，但其内力分布情