



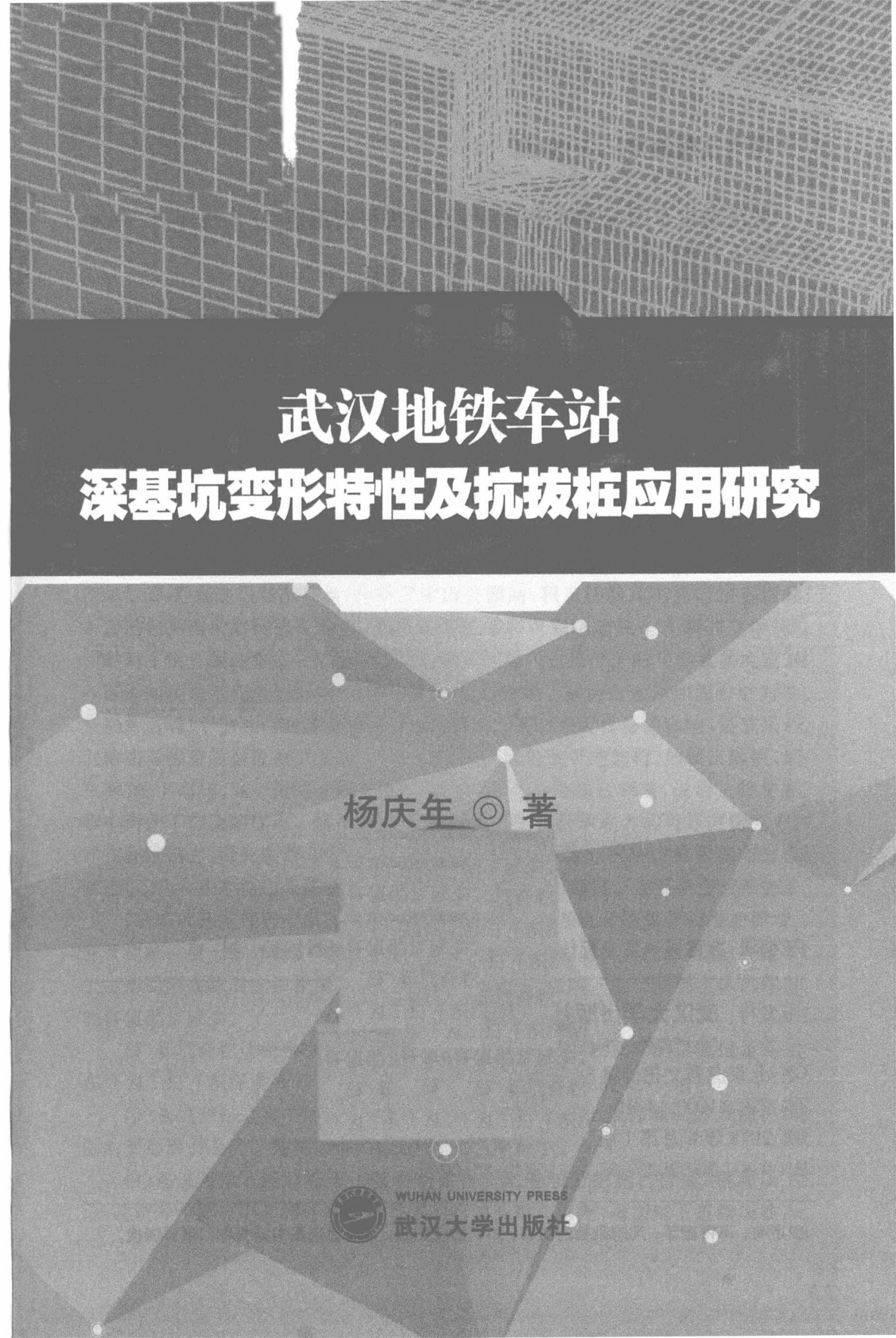
武汉地铁车站 深基坑变形特性及抗拔桩应用研究

杨庆年 © 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



武汉地铁车站 深基坑变形特性及抗拔桩应用研究

杨庆年 © 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

武汉地铁车站深基坑变形特性及抗拔桩应用研究/杨庆年著. —武汉: 武汉大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-307-20237-5

I. 武… II. 杨… III. 地下铁道车站—深基坑—研究—武汉
IV. U231.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 106568 号

责任编辑:方竞男

责任校对:刘小娟

装帧设计:吴 极

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: whu_publish@163.com 网址: www.stmpress.cn)

印刷: 北京虎彩文化传播有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 10.25 字数: 200 千字

版次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-20237-5 定价: 85.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

随着我国经济和基础设施建设的快速发展,城市交通条件改善,城市轨道交通建设显得日益重要。城市轨道交通的建设必将涉及大量的深基坑工程,而这些深基坑工程往往又处于人口密度大、道路交通繁忙、地下管线密集的地区,因此控制基坑施工引起的变形是十分必要的。

本书主要结合武汉市轨道交通 2 号线工程分析基坑变形及抗拔桩在工程中的应用进行探讨,分为两篇。第 1 篇针对武汉市轨道交通 2 号线,利用有限差分软件 FLAC3D,并结合现场实测值,分析了中山公园站、积玉桥站和循礼门站基坑开挖引起的包括围护结构挠曲变形、基坑地层位移和坑底隆起三个方面的变形规律。同时对中山公园站重点分析了地下连续墙不同插入比条件下的变形及基坑施工对相邻高架桥桩基变形的影响;对积玉桥站重点分析了基坑内土体加固参数对基坑变形的影响;对循礼门站重点分析了不同降水方案对基坑变形的影响,尝试采用无网格法对渗流问题进行了分析。第 2 篇针对大量的地下建筑物,如城市地铁、地下车库、地下商场、地下民防工事及地下变电站等在沿海地区兴建,说明抗拔桩在工程中得到了广泛的应用。利用 Beta 分布给出了抗拔桩承载力的可靠度研究方法,并在此基础上,研究利用开挖条件下承载力的折减系数分析抗拔桩承载能力极限状态(USL)、正常使用极限状态(SLS)和系统(SYS)可靠度。主要研究成果如下:

(1)基坑开挖过程中引起地下连续墙的侧移随着基坑开挖深度的增加而增大,除开挖第一层土体外,地下连续墙的最大侧移均发生在基坑开挖面附近,开挖面以上由于受到支撑的支护作用,限制了侧移量,而开挖面以下由于受到土体的作用其侧移值逐步减少。

(2)基坑开挖过程中引起的地表沉降呈抛物线状,地表沉降的最大值始终发生在约为 1 倍开挖深度处,其沉降影响范围为基坑开挖深度的 4~5 倍。

(3)基坑开挖过程中的基坑底部隆起是由于基坑底面处卸载回弹及围护结构侧向变形而引起的。基坑底部的隆起中间大,两端小。

(4)通过对地下连续墙未入基岩的条件下的基坑开挖进行分析,得到以下结论:基坑开挖能够引起相邻高架桥桩基的附加变形和弯矩,增加地下连续墙插入比

对减少相邻高架桥桩基的变形作用不明显;高架桥桩体距基坑越近,其附加变形和弯矩越大,桩体的变形随距基坑距离的增加而明显减少。

(5)基坑内土体的加固方式、加固深度对控制基坑变形的效果非常明显。基坑变形随裙边加固宽度和深度的增加而降低。裙边加固宽度和深度均有合理的取值问题。抽条加固宽度对基坑变形的影响要比裙边加固宽度影响更大一些。

(6)对基坑降水引起的基坑变形,从两种降水方案来看,基坑降水这一施工工序是影响基坑变形的主要因素之一,一次性降水和分步降水均引起较大的基坑变形,采取一次性降水方案引起的基坑变形要比分步降水大。

(7)边界类型无网格法是一种新型的数值计算方法,通过几个数值算例说明,该方法在渗流问题分析中是有效的,且计算精度很高,其应用前景广阔。

(8)根据可靠度计算结果,给出了基于荷载抗力系数设计法的抗拔桩抗力系数。由于荷载抗力系数设计法克服了容许应力设计法的不足,因此,给出的抗力系数更符合工程实际。

(9)开挖深度对抗拔桩承载力有显著的影响,随着开挖深度的增加,抗拔桩承载力下降得很快;当开挖深度较大时,开挖半径对抗拔桩承载力有显著的影响。开挖深度和开挖半径对承载力可靠度、正常使用极限可靠度和系统可靠度指标的影响规律与对承载力的影响规律相同。

(10)由于开挖条件下基桩受各种不确定因素的影响且抗拔桩研究资料匮乏,准确地研究开挖条件下抗拔桩可靠度是较为困难的。本研究是在诸多假设的情况下开展的,开挖条件下抗拔桩的可靠度研究仍需大量进一步的研究工作。

本书撰写过程中参考并引用了有关研究成果,其中一些图片来自互联网上的公开资料,限于篇幅,不再一一列举,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2018年3月

目 录

0 绪论	(1)
0.1 研究的背景和意义	(1)
0.2 深基坑工程变形研究现状	(5)
0.3 抗拔桩试验研究和数值模拟等理论研究现状	(12)
0.4 主要研究内容和研究技术路线	(14)

第1篇 武汉地铁车站深基坑变形特性

1 FLAC3D 基本原理和渗流理论	(19)
1.1 概述	(19)
1.2 FLAC3D 的特点和基本原理	(20)
1.3 土体的渗流原理	(26)
1.4 本章小结	(31)
2 围护结构插入深度对基坑变形及既有构筑物的影响	(32)
2.1 概述	(32)
2.2 工程概况	(32)
2.3 工程地质条件	(34)
2.4 数值分析计算模型	(35)
2.5 计算结果与分析	(36)
2.6 本章小结	(43)
3 基坑内土体加固参数对基坑变形的影响	(44)
3.1 概述	(44)
3.2 工程概况及水文地质条件	(44)
3.3 测点布置及土体加固方案	(47)

3.4	数值分析计算模型	(48)
3.5	计算值及与实测值的对比分析	(51)
3.6	基坑内土体加固参数对基坑变形的影响分析	(56)
3.7	本章小结	(63)
4	基坑降水引起的变形分析	(65)
4.1	概述	(65)
4.2	基坑降水实例分析	(65)
4.3	无网格法在渗流分析中的应用	(71)
4.4	本章小结	(85)
5	结论、展望与建议	(86)
5.1	结论	(86)
5.2	展望	(87)
5.3	建议	(88)

第2篇 基于Beta分布的开挖条件下抗拔桩可靠度研究

6	抗拔桩应用研究概述	(93)
6.1	抗拔桩单桩可靠度研究现状	(94)
6.2	开挖对抗拔桩承载力影响的研究现状	(95)
6.3	本篇研究的主要内容	(96)
7	结构可靠度分析的基本理论	(97)
7.1	结构可靠度的基本概念	(98)
7.2	变量相互独立时的可靠度指标计算方法	(103)
7.3	变量相关时的可靠度指标计算方法	(110)
7.4	可靠度指标的等步长求法	(112)
7.5	本章小结	(114)
8	基于Beta分布的抗拔桩承载力可靠度分析	(115)
8.1	极限状态方程的建立	(115)
8.2	随机变量的概率特性分析	(117)
8.3	可靠度的计算	(119)

8.4 抗力系数的确定	(125)
8.5 本章小结	(126)
9 开挖条件下抗拔桩的可靠度研究	(127)
9.1 开挖条件下抗拔桩承载力的可靠度指标计算	(128)
9.2 开挖条件下抗拔桩正常使用极限状态可靠度指标的计算	(130)
9.3 开挖条件下抗拔桩系统可靠度指标的计算	(131)
9.4 实例分析	(132)
9.5 本章小结	(139)
10 结论与建议	(140)
10.1 结论	(140)
10.2 建议	(141)
参考文献	(142)

0 绪 论

0.1 研究的背景和意义

0.1.1 研究的背景

随着我国国民经济的逐步发展壮大,大中城市的地下工程进入了前所未有的发展阶段。到了 21 世纪的今天,大规模的地铁建设时代已经到来。截至 2017 年年底,除港澳台地区外,我国已有 31 个城市开通和运营城市轨道交通,运营总里程共 3965 km,已有 53 个城市开工建设轨道交通。截至 2017 年,规划建设规模超过 9000 km,在建规模约 5770 km,居世界第一位。在“十三五”期间,国家仍将城市轨道交通建设作为城市基础设施建设领域重点投资对象给予关注和支持。如此大规模的建设项目,大量的岩土工程技术难题必将会不断涌现。地铁工程是一个涉及大量参数的复杂地下隐蔽工程,由于其跨度长、埋深大、管径大,穿越的土层复杂多变,相比结构工程设计的钢筋、混凝土材料,岩土参数不确定性更大,即使是在同一土层,也表现出非常大的空间变异性。

武汉市素有“九省通衢”之称,是中国内陆最大的水陆空交通枢纽、长江中游航运中心,其高铁网辐射大半个中国,拥有 53 条境外直达航线,是华中地区唯一可直航全球四大洲的城市。随着武汉市经济和现代化进程的飞速发展,传统的地面交通难以满足居民的日常出行需求。为了保证武汉市经济的平稳、快速发展,必须改善武汉市的城市交通状况。武汉市轨道交通首条线路——武汉市轨道交通 1 号线于 2004 年 7 月 28 日开通运营,使武汉市成为中国中部地区第一个开通轨道交通的城市。截至 2017 年 12 月,武汉市轨道交通运营线路共有 7 条,包括 1 号线、2 号线、3 号线、4 号线、6 号线、8 号线、阳逻线(21 号线),共 167 座车站,线路总长 237 km,线路长度居中国内地第 7 位,运营线路如图 0-1 所示。在建线路共有 16 条(段),包括 2 号线南延线、蔡甸线、5 号线、7 号线 1 期、纸坊线、8 号线 2 期、8 号

线3期、11号线东段1期、11号线东段2期、12号线、前川线等线路,在建里程360 km(图0-2)。到2020年,武汉市轨道交通将形成11条线路,总共长达401 km的轨道交通线网,基本形成“主城联网、新城通线”的轨道交通网络系统。截至2018年1月,武汉市轨道交通日均客运量270万乘次,最高日客运量达347.1万乘次,稳居全国第六,客流强度1.5万~1.8万人次/km,占全市公交客运量的38%。这标志着武汉市轨道交通时代即将到来。

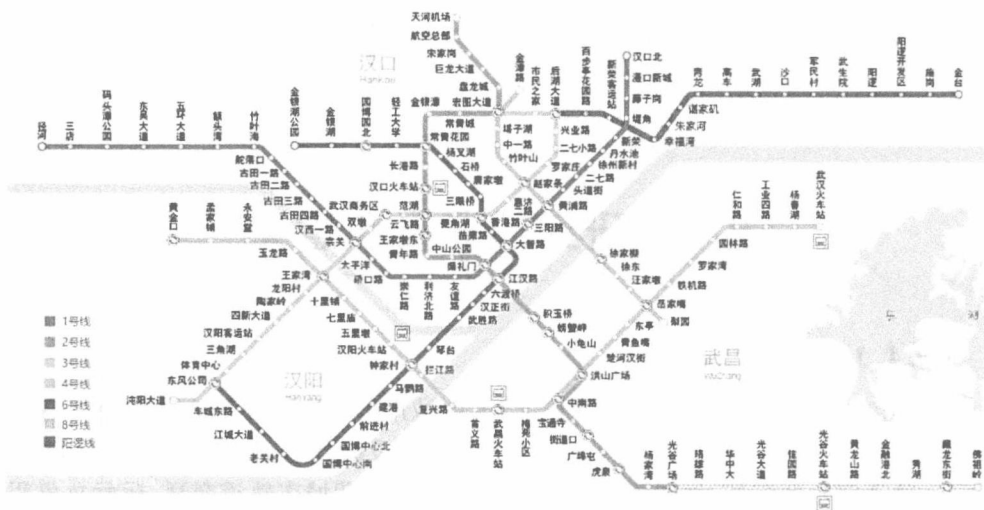


图 0-1 武汉市轨道交通运营线路图

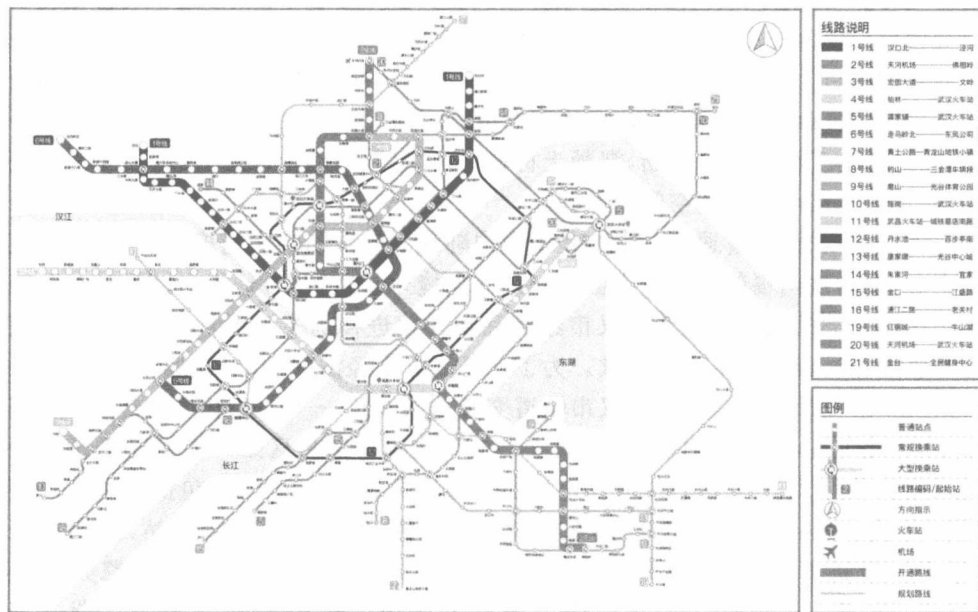


图 0-2 武汉市轨道交通规划线路图

城市地下工程的主要特点有:①地质条件复杂多变;②周边环境复杂;③结构埋藏浅、与邻近结构相互影响;④围岩稳定性难以判断。这些特点决定了地下工程施工中安全稳定问题应受到特别重视,而地下工程施工过程中引起的地表变形,不仅危及周围建(构)筑物和各种地下管线的安全,还会造成非常严重的经济损失和恶劣的社会影响。例如2008年11月15日杭州发生的地铁车站基坑坍塌工程事故(图0-3),共造成17人死亡,4人失踪。2018年2月7日,广东省佛山市禅城区地铁2号线绿岛湖—湖涌盾构区间工地发生地面塌陷事故(图0-4),导致11人死亡,1人失联。目前,虽然国内外学者对复杂条件下基坑开挖引起的地层位移和围护结构变形进行了大量的研究,但是其理论上的进展仍然非常缓慢。

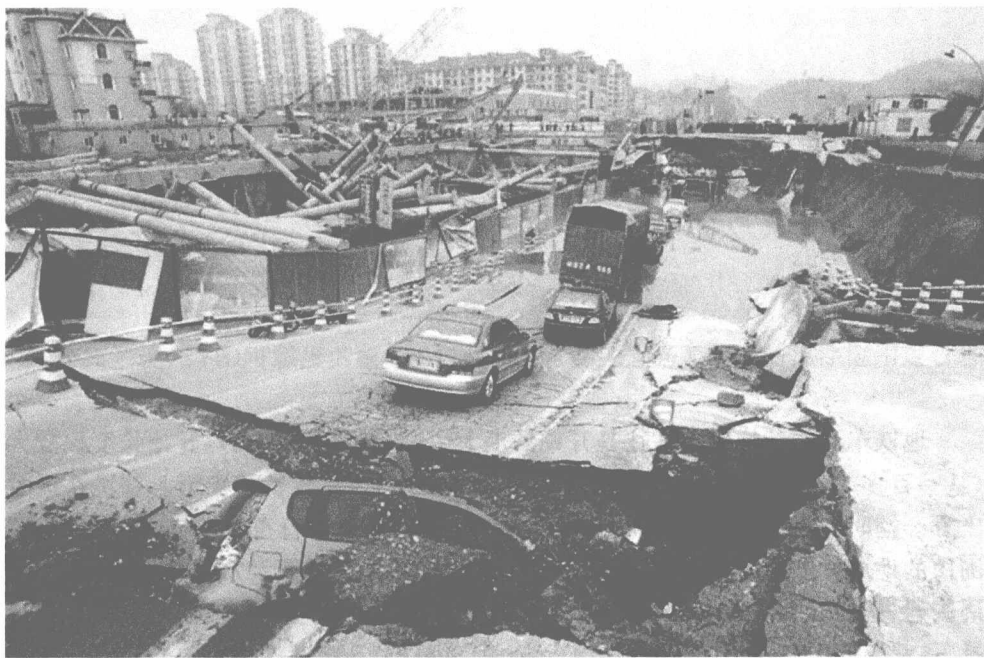


图 0-3 杭州地铁事故现场

地铁的修建一方面加快了城市发展的步伐,另一方面使传统的岩土工程领域面临了许多新的课题。地铁的特点决定了其车站要修建在人流集中的区域,然而人流集中的区域往往建筑林立,各种地下管线纵横交错,地面及地上高架交通繁忙,周边环境非常复杂。在这样的环境下进行地铁车站的施工必然会对周边环境产生不良的影响。所以地铁车站的建设过程中,在保证地铁本身工程质量和工程进度的条件下,如何安全、经济、有效地控制地铁车站深基坑开挖引起的变形问题,如何保护邻近的建筑、道路和各种管线等显得尤为重要。



图 0-4 佛山地铁事故现场

地铁车站的基坑特点往往是开挖深度大(一般都将近 20 m),开挖长度比较大(从一百多米到数百米不等),开挖宽度为 20 m 左右,呈狭长的矩形。基坑在进行土方开挖时,直接的后果就是周围土层受到扰动,应力进行重新分布,导致一定范围内的地层发生应变而移动,使地表产生较大的不均匀沉降及水平位移,从而引起周围建(构)筑物的破坏。武汉市地处长江中下游,汉江与长江相聚武汉并穿城而过,将武汉分为三镇。受长江和汉江两个河流冲积影响,武汉地区地质具有典型的河流相二元沉积结构特点,总体特征为上部颗粒较粗,下部颗粒较细,上面分布黏性土,下面分布砂性土,在黏性土和砂性土间存在一定厚度的粉土层、粉砂层和淤泥质土层。其地下水含量丰富,且与长江和汉江水位相联系。地下水类型主要有四种:① 上层滞水;② 潜水;③ 孔隙承压水;④ 岩溶裂隙水。

0.1.2 研究的意义

不同地区深基坑开挖引起的变形规律应用于其他地区的基坑工程设计时往往存在适用性的问题。由于基坑设计、施工方法和土层条件的相似性,区域性的

研究成果对指导本地区的基坑工程设计和施工更有意义。因此,本书依托武汉地区的实际工程,采用数值方法并结合现场实测数据,对修建的武汉市轨道交通2号线1期工程的地铁车站基坑开挖进行了分析,找出基坑开挖过程中基坑变形的有关规律,针对不同的工程特点,进一步对基坑的相关设计参数进行了讨论。这对指导武汉地区后续地铁车站以及其他基坑工程的设计和施工将具有重要的意义。

武汉地下水埋藏浅,长江穿城而过,地铁车站等地下建筑物通常需承受巨大的浮力,抗拔桩作为抗拔基础的主要形式之一在工程中应用十分广泛。因此,抗拔桩桩基的安全性在工程中的地位日益重要。但是目前关于抗拔桩可靠度的研究资料十分匮乏,严重制约了可靠度理论在桩基工程中的应用。

在现有研究桩基可靠度方面,相关学者将承载力的概率分布拟合为常见的正态分布、对数正态分布和极值分布。但是这三种常见的概率分布的拟合精度不高。另外,在基坑开挖条件下,随着开挖深度和开挖半径的增大,抗拔桩的承载力有显著的损失,大大降低了桩基的安全性。开挖对抗拔桩可靠度的研究资料还未见报道。

鉴于以上两大问题,本文拟利用拟合精度较高的Beta分布拟合抗拔桩承载力的概率分布,并在此基础上研究抗拔桩承载力的变化规律。同时,利用开挖条件下承载力的折减系数提出了抗拔桩承载能力极限状态(USL)、正常使用极限状态(SLS)和系统(SYS)可靠度的研究方法,为抗拔桩在基坑工程中的抗浮应用进行理论探讨。

0.2 深基坑工程变形研究现状

基坑开挖引起的变形主要包括围护结构的变形、基坑外地层的变形和基坑底部土体的变形。基坑施工开挖过程中产生坑底卸载和侧向卸载,坑底卸载导致基坑开挖面土体回弹隆起;侧向卸载导致坑外土体向基坑内移动,引起围护结构发生水平位移(侧移)和基坑外部土体沉降。同时,围护结构的侧移和基坑外土体沉降导致作用于围护结构上的作用力产生变化,而作用力的变化进一步引起基坑变形(围护结构的位移、坑底隆起和坑外土体沉降统称为基坑变形)的调整,在这种应力-应变的不断调整过程中,最终达到一定的平衡状态。

0.2.1 国外基坑变形研究现状

国外学者从20世纪50年代开始就对深基坑变形问题进行了大量的研究,研

究的主要内容有深基坑开挖施工引起的基坑变形估算、预测和警戒值的确定等。基坑变形估算和预测常用的方法是经验公式法、半解析法和数值仿真法等。

Peck 于 1969 年在第七届国际岩土力学与基础工程会议上首次提出了预测坑外地表变形及其范围的经验关系曲线法。

Goldberg 于 1976 年分析了 63 个基坑变形的实测资料,通过研究围护结构的最大侧移与土层条件及围护结构类型的关系,得到在软黏土地层中,65%采用排桩或钢板桩围护的基坑,其围护结构最大侧移往往大于开挖深度的 1%,钢板桩等柔性围护结构比地下连续墙等刚性围护结构的变形要大,地下连续墙最大侧移值一般约为开挖深度的 0.25%;在硬黏土、砂土和砂砾地层中,75%的基坑围护结构的最大侧移值小于开挖深度的 0.35%,且支撑类型和围护结构类型对基坑变形的影响很小。而基坑墙后的最大地表沉降在硬黏土、砂土和砂砾地层中小于开挖深度的 0.5%。

Mana 于 1978 年在其博士学位论文中通过有限元数值模拟研究了基坑围护结构变形和地表沉陷与基底隆起稳定安全系数之间的关系,并建立起与之相关的经验公式。

Mana 于 1981 年利用黏性土中基坑开挖工程现场观测资料,分析得到在正常的施工条件下,围护结构最大侧向位移量与基坑抗隆起稳定安全系数之间有某种确定的关系。通过有限元计算分析,提出了用来预估围护结构和基坑外地表最大位移值的稳定安全系数法。

Potts 于 1984 年采用理想弹塑性本构关系模型,利用有限元法分析了开挖和填方及土的初始应力对单支撑围护结构的影响,得到了土体的变形主要取决于基坑的几何形状、土体的性质、支撑的作用点、围护结构的类型以及土中的初始应力等。

Cording 于 1985 年利用已有的弹塑性有限元分析成果,在大型模型试验和现场观测数据的基础上,提出了围护结构侧向位移与其刚度、土体的强度之间的关系,总结出了一系列的经验公式和图表。

Karlsrud 于 1986 年对挪威首都奥斯陆软黏土基坑进行研究后,得到了地表最大沉降值与土层总厚度的比值随与坑壁间距离变化的关系以及与基坑抗隆起稳定安全系数的关系。

Sugimoto 于 1986 年通过对大量基坑外地表最大沉降值与距基坑边缘距离的统计分析,给出了一个计算坑外最大地表沉降的经验方法,最大沉降值与被建议系数之间的关系通过基坑开挖现场的土质条件来确定。

Nicholson 于 1987 年研究了土体的强度、基坑开挖深度、围护结构刚度等对基坑变形的影响,得到了基坑变形的一些有意义的结论。

Wong 于 1989 年通过分析土的不排水抗剪强度、基坑开挖宽度和围护结构刚度等对基坑变形的影响,提出了估算围护结构和地表沉降的经验计算公式。

Tsui 于 1989 年利用数值方法分析得到基坑底部土体最大隆起量与基坑开挖深度呈指数关系。

Masuda 于 1993 年在日本收集和整理了 52 个采用地下连续墙支护的基坑变形观测资料,分析得到砂土地层中的地下连续墙最大水平侧移为开挖深度的 $0.05\% \sim 0.5\%$,黏土层中最大侧移一般不超过开挖深度的 0.5% ,采用基坑内土体加固或逆作法等措施时可以有效减小基坑变形,并给出了一个根据开挖深度、支撑参数、地层参数、施工方法等多个参数来计算变形的经验公式。

Clough 于 1990 年通过分析软黏土到中等坚硬黏土地层中的基坑工程,得出围护结构最大水平侧移与支撑刚度和基坑抗隆起稳定安全系数的关系,并给出了地下连续墙和钢板桩的变形的差异。当基坑抗隆起稳定安全系数相等时,地下连续墙的侧移比钢板桩的侧移要小得多;当基坑抗隆起稳定安全系数低于 1.4 时,围护结构的侧移增加幅度很大。

Hsieh 于 1998 年在已有文献基础上进行了更深入的研究,给出了基坑外地表沉降呈凹槽形和三角形两种变形形态的预测,并将基坑外地表变形影响范围划分为主要变形区和次要变形区。

Bowles 于 1988 年提出基坑外地表沉降呈三角形分布的预测方法。

Carder 于 1995 年分析了英国大量硬黏土地层条件下利用地下连续墙和灌注桩围护的基坑变形数据,经统计分析发现支撑系统的刚度在弱、中和强时围护结构最大水平侧移上限值分别为基坑开挖深度的 0.4% 、 0.2% 和 0.125% 。

Fernie 于 1996 年整理分析英国硬黏土地层中基坑围护结构的最大水平侧移处于开挖深度的 $0.15\% \sim 0.2\%$ 。他们统计的基坑地层均为硬黏土,其结果不适用于估算软黏土的基坑变形。

Ou 于 1996 年利用有限元对典型的软-中等坚硬黏土基坑的围护结构挠曲情况进行了数值分析,通过对深基坑二维数值分析得到的计算结果来估算三维空间围护结构最大侧移。

Hashash 于 1996 年采用有限元数值模型试验对均质波士顿蓝黏土地质条件下,不同的地下连续墙埋入深度、不同的支撑竖向间距、不同的应力历史等对地表土体沉降的影响进行了回归分析。结果表明:仅当基坑的开挖深度处于极限值(由于坑外土层变形太大而使数值计算无法收敛时所对应的基坑开挖深度)时,增大围护结构插入比才会对其侧移产生一定的影响,否则插入比对其侧移的影响可以忽略。对于正常固结黏土而言,基坑底部的回弹随着开挖深度的增加

而快速增长,但对于 $OCR=2$ 和 $OCR=4$ 的黏土而言,基坑底部回弹量与基坑开挖深度呈线性关系。

Wong 于 1997 年对新加坡快速公路中若干基坑开挖的数据进行了分析研究,得到上硬下软的土层中开挖基坑引起地表最大沉降值、围护结构侧移最大值与基坑开挖深度的关系为:当软土层厚度小于 90% 的开挖深度时,围护结构最大侧移不超过开挖深度的 0.35%;而当软土层厚度小于 60% 的开挖深度时,最大侧移值不超过开挖深度的 0.2%,且第一道支撑靠近地表能够有效地控制基坑的变形。

Ng 于 1998 年分析了剑桥某个多支撑开挖的深基坑工程,利用非线性 Brick 模型进行了有限元模拟,分析了泥灰质黏土的特性,并对实测的围护结构变形、弯矩、支撑轴力和地表变形较小的原因进行了探讨。

Bose 于 1998 年利用有限元法对印度一个深 13.6 m 地铁车站的典型支护基坑进行了参数分析,土体本构关系利用修正剑桥模型,模拟分析了层状土中不排水条件下基坑开挖施工过程。通过模拟分析得到:① 围护结构外的地表沉降主要发生在 3 倍的基坑开挖深度范围内;② 在满足基坑开挖稳定的条件下,增加围护结构的插入比能够有效地降低围护结构底部的变形,但在围护结构最后一道支撑以上变形影响变化很小;③ 基坑的开挖宽度的增加会引起土体中的塑性区域的增多,从而引起基坑变形的增大,但不会改变围护结构的侧向受力平衡;④ 对支撑施加预加轴力能够有效地降低围护结构上部的变形,但开挖面以下的围护结构基本不受影响。

Long 于 2001 年收集和整理了世界上大量基坑变形的实测数据,由于统计数据的来源广泛,离散性非常大,这与各地设计和施工水平、地质条件和工程经验有很大关系。Long 根据基坑地质条件对基坑进行了分类,并研究了不同条件下的基坑变形,讨论了影响基坑变形的因素如基坑开挖深度、坑底抗隆起稳定安全系数、支撑刚度等,这对于进一步研究基坑变形的规律起到了积极的作用。Moormann 于 2004 年也做了同样的工作,得到的结论与 Long 的结论基本相同。

Yoo 于 2001 年分析了韩国首尔等地区基坑工程的实测数据,得到上层为沉积土、下层为坚硬基岩的地层中基坑的变形规律为:采用地下连续墙支护的基坑最大侧移平均值约为开挖深度的 0.05%,而采用其他类型支护的基坑,围护结构最大侧移平均值为开挖深度的 0.13%~0.15%。

Lin 于 2003 年通过研究一个开挖深度为 10 m 的正方形基坑的变形,得到自基坑边缘到边界的距离达到 3 倍的开挖深度时,基坑外地表沉降和围护结构的变形迅速减少,并很快达到收敛。

Roboski 于 2004 年利用三维有限元对基坑开挖深度、平面尺寸及支撑刚度等参数进行了研究,并考虑了三维效应对基坑变形的影响。得到基坑开挖深度与基坑长度的比值对三维空间效应影响较大,基坑长度和宽度的比值对三维空间效应影响也较大,增大墙体刚度,对长墙变形的影响较短墙要小。同时,根据数值模型分析,对比了基坑边缘到模型边界的不同距离对基坑变形的影响,分析得到当达到 5 倍的开挖深度时,地表的变形可以忽略不计。随后,Roboski 于 2006 年分析了美国芝加哥一个基坑工程的完整观测数据,提出对墙后地表纵向沉降形态采用概率正态分布函数模拟的方法。

Osman 于 2006 年利用塑性理论,根据不排水剪切试验得到土体的强度参数,提出了一种用于基坑开挖的设计计算方法,并可以用来预测基坑的变形。

Finno 于 2007 年根据 150 个基坑工程的有限元分析成果,考虑边界条件、本构模型和施工过程等因素,研究了黏性土基坑的变形特性,进一步分析了基坑开挖深度、长度和宽度等因素对基坑变形的影响。

Kung 在 2007 年提出了一个可以适合从软到中等硬度土体的预测基坑变形的半经验模型。该模型以已有的现场实测数据和有限元分析为基础,能较为准确地预测基坑开挖所引起的基坑变形。

0.2.2 国内基坑变形研究现状

国内学者研究基坑开挖引起的变形起步稍晚,但随着我国经济的迅速发展,从 20 世纪 80 年代开始,随着基础建设涉及的基坑工程问题越来越多,大量的科研人员和工程技术人员开始投入极大的热情对基坑工程问题进行研究。主要的研究手段有统计分析、模型试验、数值分析等。

夏明耀于 1984 年通过对基坑隆起模型试验进行了系统的分析研究后,提出了计算坑底隆起的经验表达式,该公式能够考虑基坑地层性质、开挖深度、墙体入土深度和地表超载等因素对基坑底回弹量的影响,但计算值与实测值往往有较大差距。

侯学渊于 1989 年对基坑开挖导致的地表沉降进行了系统研究,从理论计算结果得出以下结论:地表沉降影响范围与围护结构入土深度大体相当,基坑开挖完成时,地表变形的总面积与围护结构的侧移面积比值约为 0.6,当孔隙水压力完全消散后,围护结构的侧移基本上不发生变化,而地表变形的增加幅度却较大,导致其比值增加到 0.85 左右。

徐方京于 1990 年对基坑开挖后基底下各层土体的回弹规律进行了研究,提出了基坑回弹量的预测方法。随后徐方京于 1993 年建议采用 Reyleigh 分布函数来分析基坑开挖后地表变形的分布规律。