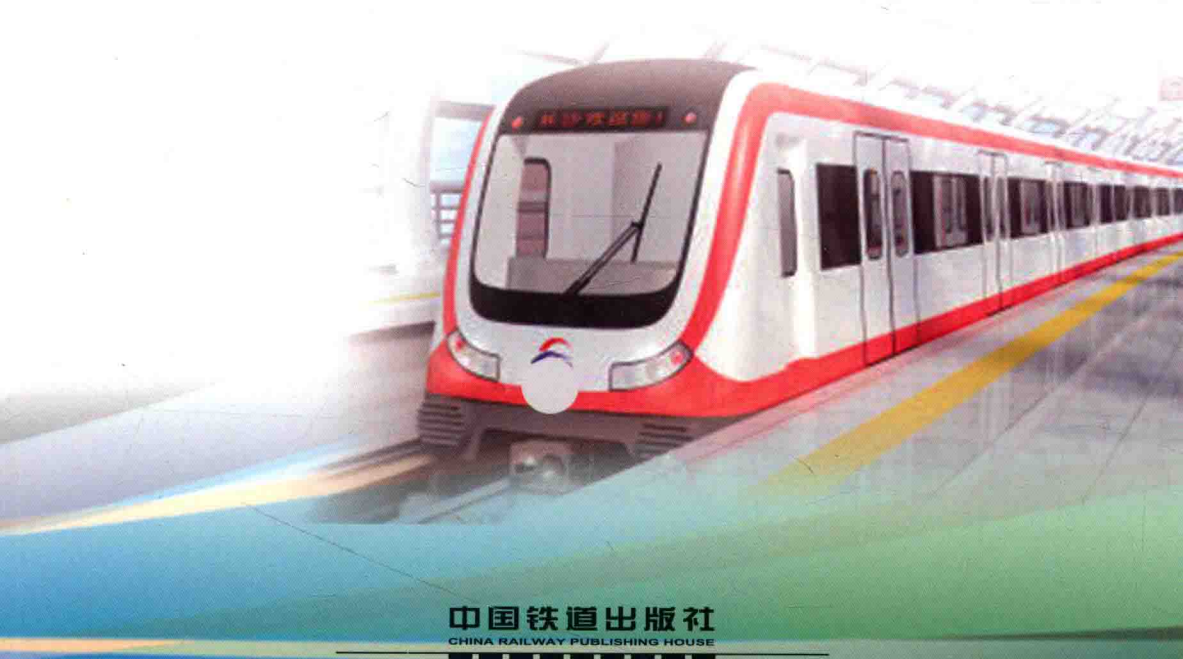


RUANTUQU DITIE SHENJIKENG
YANJIU YU SHIJIAN

软土区地铁深基坑 研究与实践

吴绍升 毛俊卿 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

软土区地铁深基坑研究与实践

吴绍升 毛俊卿 编著

中国铁道出版社

2017年·北京

内 容 简 介

为确保轨道交通车站深基坑施工安全,减小对周边环境的影响,从软土深基坑施工技术、基坑变形控制技术以及软土深基坑承压水抽灌一体化技术等方面对深基坑施工引起的变形进行控制十分必要。

本书以宁波轨道交通仇毕站深基坑工程为依托,研究了软土地铁车站深基坑地下连续墙施工技术,深基坑减压降水成槽技术,深基坑抽灌一体化降水技术,深基坑施工变形规律,考虑时空效应的深基坑有限元分析,考虑承压水降水的深基坑施工变形模拟,深基坑位移反分析,模糊综合评价法安全评价,安全监控指标体系以及变形控制标准等。

本书可供建设、勘察、设计、施工、监理等相关方面的人员、高等院校的师生及其他科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

软土区地铁深基坑研究与实践/吴绍升,毛俊卿
编著. —北京:中国铁道出版社,2017.6

ISBN 978-7-113-22964-1

I. ①软… II. ①吴… ②毛… III. ①地铁隧道—软
土地基—基坑工程 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 066911 号

书 名:软土区地铁深基坑研究与实践
作 者:吴绍升 毛俊卿

策 划:傅希刚
责任编辑:徐 艳
封面设计:王镜夷
责任校对:王 杰
责任印制:高春晓

编辑部电话:63583191

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:三河市兴达印务有限公司

版 次:2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷

开 本:710 mm×1000 mm 1/16 印张:19.75 字数:372 千

书 号:ISBN 978-7-113-22964-1

定 价:58.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

在我国城市轨道交通规划建设中,许多沿海和沿江城市的轨道交通工程建设在深厚软土地层中。软土深基坑工程施工过程中支护结构容易产生变形,周围道路和建筑物可能发生沉降,若是支护结构变形、周围道路和建筑物沉降值过大,必然会给基坑和周边环境带来危害,因此,控制和预测基坑变形对于深基坑工程的安全和周边环境的保护具有重要意义。为确保轨道交通车站深基坑施工安全,减小对周边环境的影响,应从软土深基坑施工技术、基坑变形控制技术以及软土深基坑承压水抽灌一体化技术等方面对深基坑施工引起的变形进行研究。

由于宁波轨道交通仇毕站为四层车站,车站基坑工程深达约 30 m,场地分布着深厚的软土地层,为确保本车站深基坑施工安全,减小对周边环境的影响,需要采取一定的措施对深基坑施工引起的变形进行预测和控制。本书就是在这样的背景下,依托宁波市轨道交通建设工程实践总结而成。首先对国内外软土地层轨道交通深基坑研究现状进行归纳和总结,再对深基坑围护结构施工和控制、深基坑开挖变形预测和控制以及深基坑安全评价等理论和应用开展了相关研究。

全书共十一章,第 1 章绪论,第 2 章软土地铁车站深基地下连续墙施工技术,第 3 章软土地铁车站深基坑减压降水成槽技术,第 4 章软土地铁车站深基坑抽灌一体化降水技术,第 5 章软土地铁车站深基坑施工变形监测研究,第 6 章考虑时空效应的软土深基坑有限元分析研究,第 7 章考虑承压水降水的软土深基坑施工变形模拟研究,第 8 章软土地铁车站深基坑位移反分析研究,第 9 章软土地铁车站深基坑模糊综合评判

法安全评价,第10章软土地铁车站深基坑安全监控指标体系,第11章软土地铁车站深基坑工程施工变形控制标准。本书第1章~第5章由吴绍升撰写,第6章~第8章、第10、11章由毛俊卿撰写,第9章由叶荣华撰写,最后全书由吴绍升、毛俊卿共同统稿、定稿。

本书的撰写得到了宁波轨道交通建设集团有限公司、宁波大学、上海广联环境岩土工程股份有限公司等单位提供相关成果的支持,还得到了顾其波、尹铁锋硕士的支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于撰写时间紧张,书中欠妥之处难免,恳请读者指正。

作者于济南

2016年12月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 国内外研究现状综述	2
1.2 仇毕站概况	13
第2章 软土地铁车站深基地下连续墙施工技术	22
2.1 地下连续墙施工工艺	22
2.2 地下连续墙施工技术	24
第3章 软土地铁车站深基坑减压降水成槽技术	50
3.1 减压降水方案	50
3.2 降水试验结果及分析	53
3.3 槽壁稳定性计算	62
3.4 降水对周边环境影响	65
第4章 软土地铁车站深基坑抽灌一体化降水技术	69
4.1 试验设计与方法	69
4.2 抽水、回灌试验成果分析	72
4.3 抽水、回灌试验数据分析	83
第5章 软土地铁车站基深坑施工变形监测研究	100
5.1 变形监测方案	102
5.2 变形监测结果	105
第6章 考虑时空效应的软土深基坑有限元分析研究	115
6.1 基坑工程的时空效应规律	116
6.2 考虑时空效应的有限元法	118
6.3 考虑时空效应的有限元分析	123

6.4	软土深基坑时空效应影响因素分析	127
6.5	时空效应施工方法	133
第7章	考虑承压水降水的软土深基坑施工变形模拟研究	139
7.1	宁波典型软土地层 HSS 模型参数研究	140
7.2	不考虑回灌的承压水抽水试验	156
7.3	考虑承压水降水的深基坑变形特性	167
第8章	软土地铁车站深基坑位移反分析研究	183
8.1	现有方法及评价	184
8.2	弹性地基梁法	187
8.3	位移反分析法	190
8.4	m 值反演分析	192
第9章	软土地铁车站深基坑模糊综合评判法安全评价	203
9.1	模糊综合评判法原理	204
9.2	深基坑工程安全评价模型	212
9.3	安全评价实例分析	217
第10章	软土地铁车站深基坑安全监控指标体系	228
10.1	基坑本体安全控制指标体系	229
10.2	周围环境安全控制指标体系	235
10.3	道路安全评判方法研究	252
10.4	安全监控指标咨询初值的形成	254
10.5	安全监控指标初值的验证和调整	257
第11章	软土地铁车站深基坑工程施工变形控制标准	268
11.1	支护结构破坏及判定	268
11.2	不同施工阶段控制标准	288
11.3	不同施工阶段控制措施	294
参考文献		302

第 1 章 绪 论

长期以来,深基坑工程一直是我国土木工程领域的热点问题,深基坑支护设计与施工既是我国各大城市基本建设工程的关键问题,又是岩土力学学科中比较复杂和困难的问题。深基坑工程是与众多因素相关的综合性技术,是一个系统工程,与工程地质和水文地质条件、支护结构选型及设计、施工组织、施工开挖及换撑进程、基坑周边应力场温度场等环境条件甚至气候变化等众多条件息息相关,是理论上尚待完善、成熟和发展的,且和实践紧密结合的综合技术学科,是一项值得深入研究的课题。

由于受深基坑设计施工技术发展条件、施工机械机具和社会经济发展整体水平等因素的影响,20 世纪 90 年代以前的深基坑主要采用放坡开挖和木桩围护。此后,出现了各种各样的施工方法,如:地下连续墙、SMW 工法、水泥搅拌桩、旋喷桩等。施工中使用了多种先进的大型施工机械,如 SMW 工法三轴搅拌桩机、100 t 履带吊、槽壁机、长臂挖机、伸缩臂挖机等,显著提高了施工效率,保证了施工质量和安全。在众多施工方法中,如何选择适用于具体工程情况的施工工艺,对于基坑施工的安全性、经济性有着直接的影响。

宁波轨道交通工程穿过密集的建筑群和纵横交叉的管线网,而被轨道交通工程空间取代的又是淤泥质软土层,区域地质条件比较复杂,土体的流变性十分显著,且周边环境较为敏感。在深基坑施工时不仅要保证相邻建筑的安全,而且还要保证城市地下排水管道、电缆、煤气管道的安全及附近道路的正常运行,避免发生地面沉陷,楼房倾斜、开裂,地下输水管道、煤气管道断裂、外溢,地下电缆破坏等。由于基坑周围环境的破坏对工程、社会造成的经济损失都是不可估量的,因此,在软土这样不利的地质条件下修筑地下车站,给保护环境安全和防止基坑的失稳增加了困难,即深基坑施工隐藏着很大的风险,而采用地下连续墙施工技术可以较好地解决这些问题。

近年来,地下连续墙技术的快速发展使得采用地下连续墙技术的建筑物的规模越来越大,很多建筑物都可以做到越来越深、越来越厚,墙的体积已经达到了几十万立方米。地下连续墙能起到挡水、挡土的作用,很多连续墙已经成为建筑物不可或缺的结构,另外还可以传递竖直的负载。为了控制宁波地区深厚软土条件下

轨道交通车站的变形,采用地下连续墙围护结构形式是第一选择,而对其相关的施工控制技术研究是保证基坑本体以及周边环境安全的基础。

本书结合宁波轨道交通 3 号线仇毕站车站深基坑工程,对地下连续墙的施工技术、减压降水成槽技术、地下连续墙的施工质量控制技术、减压降水成槽技术、承压水抽灌一体化技术,以及深基坑开挖的时空效应分析、深基坑变形监测和模拟、施工安全评价等开展研究,最后提出软土深基坑变形控制标准,可以为软土地区地铁车站深基坑施工和变形控制提供技术支持。

1.1 国内外研究现状综述

1.1.1 基坑开挖对地表的影响

宁波软土地区建设的基坑大多处于城市复杂环境条件下,基坑周边紧邻重要的市政高架、重要道路、市政管线、建(构)筑物、既有地铁隧道等。基坑开挖势必会对地表产生不良的影响,并且会影响人们的正常出行。深基坑施工问题越来越引起设计和施工人员的重视。

1. 基坑支护结构的类型

在基坑设计中如何选择合理的基坑支护结构是基坑工程一项重要的内容。基坑支护结构的选择涉及很多方面,比如周边地质情况、基坑开挖深度、基坑开挖面积等。目前,通常用到的基坑支护方式主要有以下几种:重力式水泥土墙、高压旋喷桩、钢板桩、钢筋混凝土板桩、钻孔灌注桩、地下连续墙、土钉墙、SMW 工法。

2. 围护结构的位移形态

基坑围护结构的变形,不仅关系到结构本身的安全与稳定,而且会对周边环境产生较大影响。根据目前围护设计规范,一些大型基坑工程,特别是周边环境较为复杂,一旦出现问题影响很大,对该类基坑,变形控制是围护设计的主要原则。国内外学者在很早以前就开始了这方面的研究。

根据 Clough 和 O'Rourke 的研究,围护结构位移形式大致可以分为三种,如图 1.1 所示。

基坑由于土方开挖引起的围护变形位移形态基本可以分为三种。第一种为悬臂式位移形态,即图 1.1(a)。最大变形发生在基坑顶部,变形随深度的增加逐渐减小,这是由于基坑顶部没有支撑构件,变形发展较大。第二种为深槽向内位移,即图 1.1(b)。基坑顶部由于存在可靠支撑作用,变形被抑制,中部变形发展较大,两端变形较小。第三种为上述两种变形形态的组合,即图 1.1(c)。在开挖初期围护结构顶部尚未架设支撑,变形为悬臂式,顶部变形较大,在支撑架设完毕后,顶部变形受到抑制,整体变形表现为第一种与第二种变形形态的结合。Peck 的研究发

现,基坑开挖工况会影响围护结构的侧向位移模式。若在挖土起始阶段就在围护结构顶部施加支撑,端部变形较早期未施加支撑围护结构明显减小。

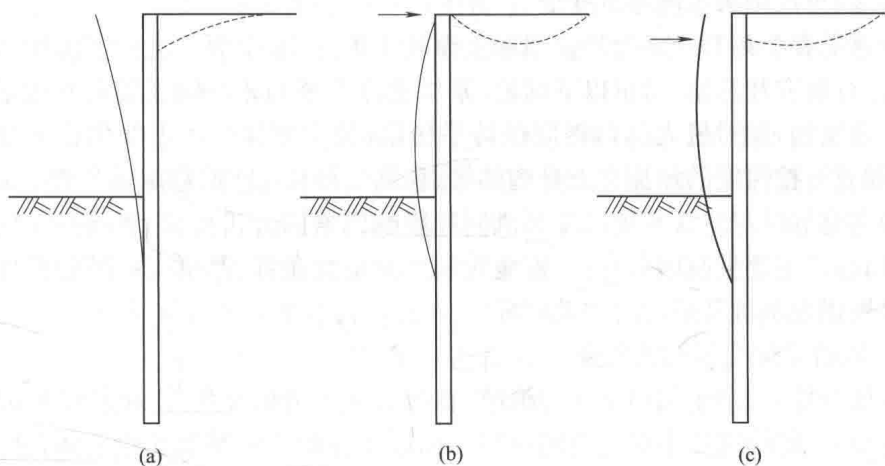


图 1.1 围护结构位移形态

3. 围护结构的位移特性

Masuda 收集日本范围内 52 个地下连续墙围护结构类基坑的施工及实测数据,统计结果表明,砂土类土质中,连续墙的最大侧移约为 $0.05\%H \sim 0.5\%H$ (H 为基坑开挖深度,下同),黏土类土质情况下,最大侧移基本上都小于 $0.5\%H$,采用坑底抽条或满堂加固方法,可以有效减小位移,同时增加围护结构的安全储备。最后,总结出一个将基坑的开挖深度、地质条件、施工工艺等因素考虑在内的变形经验公式。Yoo C. 收集韩国首尔地域为主的基坑工程实测数据,以系统的整理为基础,深入研究了各围护形式的变形规律。研究发现,连续墙类基坑最大侧移平均值约为 $0.05\%H$,其余支护形式(水泥土搅拌桩、钻孔灌注桩、SMW 工法)类基坑最大侧移平均值基本介于 $0.13H \sim 0.15\%H$ 之间,锚杆类基坑与支撑类基坑对比后发现,锚杆类基坑最大侧移值略小。

Moormann 广泛收集了世界各地大量的基坑实测变形数据,根据地质条件不同,分为软土、硬黏土、砂土、成层土和岩石五大类。通过分析各种土层条件下支护结构的变形规律,探讨了不同围护结构对变形模式的响应。其中软土中 27% 的基坑最大变形大于 $1\%H$,40% 的基坑最大变形介于 $0.5\%H \sim 1\%H$,33% 的基坑最大变形小于 $0.5\%H$ 。安关峰等充分利用广州地区众多地铁车站基坑施工的详细监测数据,分析不同基坑变形规律,结合三维模拟软件进行计算分析,将模拟值与实测值进行对比分析,总结各个基坑在设计、施工方面的经验教训。徐中华对收集到的上海地区三百多个基坑工程资料进行了详细的整理,在此基础上进行统计分

析,深入研究了上海地区常规顺作及逆作法基坑围护结构的变形规律,将顺作法与逆作法基坑各自的变形特点、变形异同点进行了说明与揭示,形成有关揭示变形规律的图表,可以用来预测基坑变形。

李琳等在整理和全面分析杭州和上海软土地区 46 个深基坑的实测结果的基础上,进行研究和总结,得出以下结论:基坑支撑系统的相对刚度随着开挖深度的增加迅速增加,相对最大侧移得以保持平稳值,最大侧移基本上发生在开挖面附近,但随着开挖深度的加深有上升的趋势,基坑变形与抗隆起稳定系数大小关系密切。谈金忠等通过对深基坑的变形机制和影响因素的分析得出,影响深基坑变形的因素较多,主要控制因素有:工程地质及水文地质条件、基坑支护结构设计的科学合理性以及基坑开挖的时空效应等。

4. 墙后土体变形性状研究

基坑开挖后,由于坑内土压力消散,在坑外土压力的作用下,围护结构向坑内产生变形,土体随之产生向坑内的位移。深层土体的侧向移动导致土体在竖直方向产生沉降变形,即围护结构墙后土体沉降。墙后土体沉降值与范围大小直接决定了基坑变形对周边环境的影响程度,很多文献在这方面开展了广泛的研究。在 1969 年第九届国际土力学与基础工程会议的报告上,Peck 以芝加哥、奥斯陆等地基坑工程实测地表沉降资料基础提出了一个经验关系曲线,该曲线依据不同土层分类,研究沉降值、沉降范围,同时可以根据该曲线进行沉降预估。沉降曲线如图 1.2 所示。

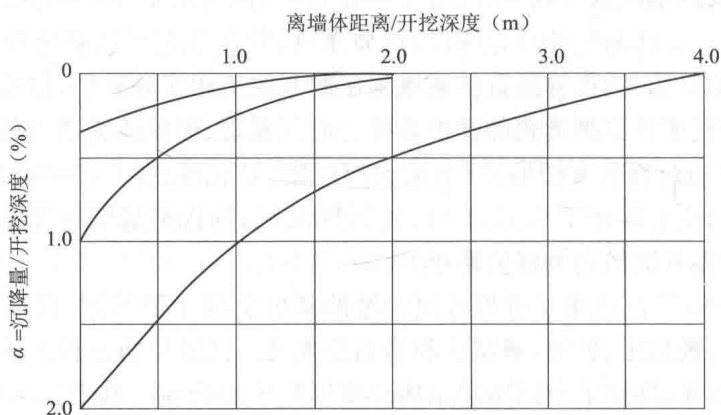


图 1.2 墙后地表沉降沉降分区

Sugimoto 根据地质条件不同将 84 个基坑分成三类,分别为砂土类、黏土类和混合土层类,通过对实测墙后地表沉降数据的整理分析,给出了一个经验图表来预估基坑墙后最大沉降。该方法先根据基坑的开挖深度、桩(墙)体插入比等围

护结构基本参数确定系数 α , 最后根据 α 值通过图表来查询预测地表变形值。Woo S. M. 根据台北地区基坑实测资料, 将墙后地表沉降与开挖深度进行无量纲化处理后发现, 墙后最大沉降值基本上位于 $0.25 \sim 1$ 倍最大侧移之间, 即最大沉降值基本小于最大侧移值, 若最大沉降值超过最大侧移值, 则该基坑有可能发生局部破坏。

Ou C. Y. 根据多年对基坑工程的研究后得出, 基坑墙后地表沉降模式很大程度上与围护结构的变形模式有关。根据沉降类型的不同, 将沉降曲线分为三角形与凹槽型两种类型。三角形曲线最大沉降发生在基坑边, 沉降值随着距坑边距离的增大而减小; 凹槽型曲线最大沉降发生在距坑边一定距离处。Long 经过对大量基坑变形实测数据的统计研究发现, 开挖面处为硬土层且基坑围护范围内软土厚度小于 $0.6H$ 时, 支撑、锚杆和逆作法类基坑墙后最大沉降平均值为 $0.11\%H$ 、 $0.12\%H$ 和 $0.2\%H$ 。若围护范围内软土厚度大于 $0.6H$, 最大沉降平均值为 $0.39\%H$ 。

卢俊义收集上海地区 50 个连续墙类基坑的监测数据, 整理后发现, 若开挖深度小于 15 m , 墙后最大沉降值基本上位于 $0.18\%H \sim 0.48\%H$ 之间, 平均沉降值为 $0.26\%H$ 。若开挖深度大于 15 m , 墙后土体最大沉降值基本上位于 $0.24\%H \sim 0.88\%H$ 之间, 平均值为 $0.48\%H$ 。

综上所述, 围护结构位移模式、墙后地表沉降模式不仅受到地质条件的影响, 同时还受到开挖深度、围护形式、施工水平等众多因素的共同影响。

5. 降水对地表的影响

基坑开挖的过程中, 当承压层水头的压力大于承压层上覆土的重量的时候, 将会发生突涌破坏。因此在深基坑设计和施工时需要处理好承压水。

骆祖江以上海地铁某隧道基坑降水为例, 建立地面沉降与三维渗流耦合模型, 采用有限差分模拟。研究结果表明该耦合模型具有很高的可信度。杨天亮以上海某地铁车站为研究背景, 对该车站深基坑降水进行数据监测, 分析该降水引起的地面沉降效应。研究表明, 导致基坑周边地面沉降的主要原因是减压降水, 控制地面沉降的有效办法是地下水的回灌。对于基坑减压降水, 需要基坑围护结构设计时统一考虑。张莲花研究认为, 基坑减压降水不可避免地带来地表的沉降, 为达到基坑减压降水带来地表的不利影响, 提出降水量最优问题, 优化降水设计方案, 降低降水对地表沉降的影响。

朱瑶宏等人结合宁波轨道交通 1 号线一期工程, 对 13 个车站地下连续墙深基坑工程的监测数据进行统计分析, 从围护结构水平位移和墙后地表沉降两方面对连续墙的变形特性进行了研究。结果表明: 最大侧移介于 $0.18\%H \sim 0.8\%H$ (H 为开挖深度), 平均为 $0.39\%H$, 较其他地区大, 最大侧移所在深度基本位于开挖面附

近,且随墙底以上软土厚度的增加而增大;宁波地区深基坑坑底抗隆起稳定系数 F_s 宜取 1.7;地表沉降主要分布于距离基坑 $2H$ 范围内,最大沉降介于 $0.15\%H \sim 1.2\%H$,平均为 $0.69\%H$ 。最后,结合分析结果,提出了宁波地区深基坑变形控制标准。

赵国强结合宁波地铁盛莫路站深基坑工程,获取了整个施工过程全面详实的监测资料,对围护结构的孔隙水压力、土压力、墙顶水平位移、测斜、墙后地表沉降、墙顶沉降、支撑轴力进行了处理分析,研究了宁波淤泥软土深基坑的变形特征,并对设计及施工方案提出改进意见。

1.1.2 深基坑工程时空效应研究现状

深基坑本身是一个具有一定平面形状和深度的三维开挖空间,而其支护结构又是由挡土结构、坑内水平支撑(或坑外拉锚)、坑内立柱与立柱桩等构成的空间结构,基坑的平面形状、尺寸、开挖深度及开挖步骤等均对基坑的变形及其稳定性有较大影响,即表现为深基坑工程的空间效应。对于软土地区的深基坑工程,土体具有明显的流变特性,尤其是对于软黏土,具有较强的蠕变性,基坑支护结构和周围地层的变形会随时间延长而持续增加,即表现为深基坑工程的时间效应。国内外学者在深基坑工程的时空效应方面进行了很多研究。

Bgerrum 指出由于室内土工试验的时间很短,无法来模拟时间效应,从而使得过去基坑稳定性评价分析中未考虑软黏土的应力、应变与时间效应的密切关系。Tait 和 Taylor 在研究海湾黏土层的深基坑时,给出了围护墙体的水平位移随着开挖与支撑的逐步进行而增加的图表分析。另外,Clough 和 Davision 在研究过程中发现基坑开挖长宽与宽度的比值和基坑稳定性密切相关。两者显示了时空效应对基坑变形与稳定的影响。

Mana 和 Clough 采用平面有限元方法对基坑变形进行了分析。研究发现,在平面应变条件下,开挖宽度会对基坑变形产生明显影响,当基坑开挖宽度从 $0.8H$ (H 为开挖深度)增加到 $3.2H$ 时,基坑支护结构的变形增大 1.6 倍左右,同时坑边地面沉降增大 1.9 倍。Wong 和 Broms 采用二维有限元分析了土体强度、围护结构刚度、开挖深度、开挖宽度、插入深度等因素对围护结构侧向位移的影响,对于软弱土层中开挖的基坑,随着开挖宽度的增加,围护结构的侧向位移呈近似线性增大。

Ou C. Y. 采用三维有限元方法分析了矩形基坑的变形特性,对基坑变形的空间效应和拐角效应进行了研究。研究表明,随着基坑支护结构与拐角距离的增加,其变形逐渐增大,基坑长边的变形明显大于短边的变形,长边中点的变形最大。Lee 等通过实际工程现场监测及三维有限元分析,验证了基坑变形的坑角效应的

存在,影响坑角效应的主要因素有基坑长深比、支撑整体刚度和围护结构插入硬土层的深度。Finno 和 Blackburn 采用基坑平面应变比(PSR)的概念,利用二维平面应变状态及三维模型的有限元对比分析,对基坑的坑角效应影响范围进行了研究,认为 PSR 值采用基坑长深比进行分析,相对于采用长宽比具有更好的收敛性。此外,通过对基坑的长度 L 、宽度 B 、深度 H_e 、支撑系统刚度 $EI/\gamma h^4$ 和坑底抗隆起安全系数 FS_{BH} 等影响因素的综合考虑,提出了 PSR 的经验公式。

蒋洪胜等通过对考虑时空效应的某车站深基坑开挖过程中支撑轴力及相应施工工况的跟踪记录,以及相关监测数据的整理分析,探讨了各道支撑轴力在不同开挖工况下的变化规律,以及支撑安设和预加轴力对墙体变形的影响,并且提出了考虑时空效应的围护结构支撑轴力方面的一些建议。黄院雄等通过对上海地铁车站深基坑工程实测土压力资料的整理分析,探讨了土压力的变化规律,并根据上海软土地区基坑围护设计的需要,给出了根据基坑保护等级与土性来确定主动土压力系数 K 的取值原则,对基坑工程的设计具有借鉴意义。刘建航等在总结 20 世纪 40 年代以来国际上有关深基坑开挖变形研究的基础上,结合上海地铁工程的实践,通过对大量基坑施工现场观测数据的统计、分析与推导,建立了考虑时空效应的计算理论和方法,并将时空效应规律运用到上海软土深基坑的设计与施工中,取得了明显的效果。

俞建霖等采用空间有限元分析方法研究了基坑开挖引起的围护结构位移、土压力的空间分布效应及基坑几何尺寸对围护结构水平位移、土压力的影响,并与按平面问题计算的结果进行了对比分析。结合杭州某基坑工程实例,证明了基坑工程三维分析的必要性及计算模式的合理性。高文华等采用 Mindlin 厚板理论,建立了深基坑支护结构内力与变形时空效应的三维有限元分析模型。结合上海某地下连续墙深基坑工程,利用所编制的计算程序,分析探讨了支撑刚度、墙体刚度、支撑预加轴力、开挖深度、开挖宽度、地基流变等因素对深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响,揭示了相应的规律性,可为深基坑设计及施工提供参考。刘国彬等通过对十几个大型工程现场实测数据的整理,并结合大量的程序反分析和实测被动区土压力反分析,研究了反映土体抵抗变形能力的综合参数——基坑被动区等效水平抗力系数 K_h 的变化规律,归纳出 K_h 分别与土体流变性、空间作用、强度参数、地基加固及开挖深度的关系,并建立了 K_h 的实用计算方法。

李俊才等根据南京某大厦深基坑工程在开挖过程中得到的现场监测数据,分析研究了在相同的土质与施工条件下,单层支点混合支护结构(桩)、悬臂支护结构(桩)、钻孔灌注桩连拱支护结构(桩)三种不同支护型式的侧向变形和地表变形的时空效应。贾坚应用刘建航等学者针对软土流变特性提出的时空效应原理与技术

方法,结合近年来上海典型深基坑工程实例来探讨时空效应法开挖技术在软土基坑变形控制中的应用,通过大量工程实践证明,基坑工程时空效应法技术可解决软黏土地区复杂深基坑的变形控制问题,该项技术在我国沿海软土深基坑设计及施工中具有较广的应用前景。刘燕等针对软土基坑工程存在时空效应的特点,结合上海地铁6号线某明挖区间基坑工程实例,根据现场实测数据分析了基坑围护墙体的变形特征,并在此基础上引入时间、空间因素,采用考虑土体流变性的弹黏性有限元法对基坑变形进行了计算。经过和实测位移的比较分析,进一步证实了软土基坑设计中考虑时空效应原理的必要性。

谢秀栋针对软土的蠕变特性,在土的弹塑性模型的基础上,引入滞后塑性变形的时间概念,提出了土的弹黏塑性本构模型,并借助FLAC3D所提供的二次开发接口,实现该本构模型在FLAC3D中的开发。结合上海地铁车站深基坑工程实例,研究探讨了深基坑施工开挖过程中土体变形安全性状的时间特性。王桂平等在杆系有限元法的基础上,对土体的时空效应规律进行了综合考虑,提出了软土地区基坑支护结构内力与变形的工程实用计算方法。通过对上海某地铁车站深基坑工程的实例分析,证实了该方法的实用可靠性。刘爱华等基于时空效应理论,结合长沙地区某软土深基坑工程,提出了一种能有效控制深基坑变形的施工工艺与方法。工程实践表明,该方法能充分利用土体自身潜力来控制开挖引起的基坑位移,在软土地区深基坑施工过程中具有良好的应用效果。宁超结合昆明地铁1号线行政中心站深基坑工程实例,采用理论分析、现场监测与数值模拟相结合的方法,对深基坑开挖过程中的空间变形规律进行了研究,结果表明:围护结构的变形和支撑轴力的分布均呈现明显的空间效应,因而可适当减小坑角外围护结构和支撑的刚度来优化基坑支护设计;先撑后挖时基坑的变形远小于先挖后撑时基坑的变形,在基坑工程设计、施工时应特别重视。

1.1.3 深基坑工程位移反分析研究现状

在岩土工程中,岩土的力学参数是重要的数据。现场实测信息与理论分析相结合的位移反分析方法为岩土体力学参数的确定提供了一个实用的方法。随着监控量测技术的发展,20世纪70年代提出的位移反分析方法,在岩土工程领域已得到广泛应用,并已发展了多种反分析方法,如逆反分析法、正反分析法等。

Kavanagh和Clough首先提出了岩土工程中位移反分析的基本思想,其基本方法是基于现场实测位移,采用有限元方法来反推岩土体的力学参数。Kirsten在约翰内斯堡召开的岩土工程勘测研讨会上提出了用实测岩体变形值来反分析确定岩体的弹性模量。Kovari等首次提出了一种利用量测到的钢拱内侧两点弦长变化和弦高变化来确定作用于钢拱架上的山岩压力的方法,这种方法其实就是一种

山岩压力位移反分析的方法。Sakurai 和 Abe 在德国亚琛举办的第三届岩土工程数值法国际讨论会上,提出了平面应变问题的弹性问题位移反分析与弹塑性问题位移反分析,并将位移反分析作为地下工程辅助设计的一种技术。Gioda 和 Maier 开始对弹塑性问题的位移反分析进行了研究,利用实测位移值来计算岩体的初始地应力、黏聚力和内摩擦角,在反分析过程中使用了单纯形法、变量轮换法等优化方法,并对不同优化方法应用在位移反分析中的适用性进行了讨论。

Sakurai 和 Takeuchi 在假定岩体均质线弹性的隧道开挖工程中,在泊松比已知且假设竖向地应力即自重应力的条件下,基于有限单元法推导了利用隧道洞室的径向实测位移值来反演初始地应力和岩体弹性模量的逆反分析计算公式。若竖向地应力未知,则只能反演得到地应力与岩体弹性模型的比值,又称标准地应力。Gioda 和 Sakurai 总结了应用于隧道工程领域的反演理论,认为反分析不但可以对岩土材料模型参数进行反演,还可以计算作用在挡土结构和衬砌上的土压力,同时指出了反演理论需要进一步研究的课题。Ooi 和 Ramsey 根据测斜仪量测的基坑支护结构的水平位移数据,对通过拟合曲线来得到曲率的 12 种不同方法进行比较分析,得出了采用分段三次曲线去拟合五点的方法能较合理地计算支护结构的弯矩。

我国对位移反分析的研究开始于 20 世纪 70 年代末,基本上与国际同步。30 多年来,国内的杨志法、冯紫良、杨林德、王芝银、郑颖人、孙均、吕爱钟等学者在位移反分析的理论研究和工程应用方面都作出了独特的贡献。岩土工程领域中,位移反分析法在地下工程中的应用最早,也最为普遍,而在基坑工程中的应用相对较晚。伴随着我国经济的高速发展,大量土木工程的兴建带来大规模的深基坑工程。因为工程实践的需要,国内学者在深基坑工程的位移反分析方面做了很多工作,尤其对地基土水平抗力系数的比例系数 m 进行了较多的工程应用研究。

杨敏等建立了以弹性支点法中的“ m ”法为基础的位移反分析模型,采用加速单纯形法去反推待求的土体 m 值,并对反分析求解过程中解的收敛性和计算时间进行了讨论。最后,给出了位移反分析技术在上海某深基坑工程的应用实例,说明所建立的模型和优化方法是可行合理的。熊巨华等从理论上对 m 值的适用性和按规范确定 m 值的两类方法进行了分析,并针对基坑工程中各类挡土结构的特点,给出了根据规范方法确定 m 值应遵行的原则和注意的问题,最后用试验结果和施工实测数据证明了采用旁压试验和位移反分析法是确定 m 值的合理方法。王旭东等提出了一种建立在弹性抗力法基础上的地基土 m 值的反分析优化方法。根据基坑施工监测数据,采用非线性单纯形法去反演地基土的 m 值,工程实例分

析表明该方法简单可靠、稳定性好,易于实际工程应用。冯俊福根据基坑工程的特点,提出结合位移实测数据和反分析方法去反演各土层的 m 优化值,并编制了相应的反演分析程序。最后,根据杭州城东、城西两个地区大量深基坑工程实例的位移实测数据,对典型土层的水平基床反力系数的比例系数 m 值进行了反演分析,并结合浙江省规范,给出了较适合杭州地区的各地基土 m 值的建议值,可为工程设计及施工提供参考。

钟才根等运用位移反分析原理,得到了考虑软土流变特性的 m 值的确定方法,并通过对上海软土地区大量基坑工程的分析计算,归纳得出了 m 值随时间的变化关系式,可用于工程实践,进而对围护结构的变形进行动态预测,为基坑工程信息化设计、施工的实现创造条件。戴加东根据支护结构的实测位移信息,采用单纯形优化方法去反演基坑开挖过程中的土体参数 m 值,利用反演分析得到的 m 值可较准确地预测下一工况支护结构的位移,说明位移反分析技术应用于基坑工程是可行的。张军平等通过理论计算与实测水平位移的对比,分析了当前常用于软土基坑的两种位移反分析方法。研究发现,基于 m 值的位移反分析法简单实用,适用于浅基坑参数的反演分析,而基于黏弹性增量理论的位移反分析法精度更高,更适于精确的分析和研究,在深基坑参数反演分析中建议采用弹性增量法。

林志繁考虑到土体 m 值会随基坑的开挖而衰减的特点,在国内传统的弹性地基梁位移反分析过程中引入了 m 值的衰减系数 α ,将此考虑基坑分步开挖和 m 值衰减的位移反分析法应用于广州市快速路泵站基坑工程,反演得到的土体 m 值更真实反映了基坑实际工作性态。王强等在弹性地基梁法的基础上,根据现场多支撑动态开挖的过程和支护结构的施工监测数据,提出了采用位移反分析法来反演基坑工程被动区土体 m 值的方法,结合苏州轨道交通 1 号线仓街站深基坑工程,对各个工况下的土体 m 值进行了反演,利用反分析得到的 m 值更为符合工程实际情况,还可准确地预测下一工况的位移,说明位移反分析在深基坑开挖中的应用是合理可行的。

1.1.4 深基坑工程安全评价研究现状

安全评价也称为“风险评估”或“风险评价”,是利用安全系统工程的原则和方法对潜在风险进行预先识别、分析及评估,从而为制定防范措施和管理决策提供依据。安全评价的种类、方法、领域、手段繁多,且评价系统的特征、属性及时间的随机性各不相同,但其思维方式是一致的,可归纳为四个原理:相关性原理、惯性原理、类推原理、量变到质变原理。由于深基坑工程在围护和开挖过程中的复杂性和高不确定性,因而深基坑工程是一项高风险建设工程。随着深基坑工程事故的增多,国内外学者对基坑的安全评价研究越来越重视,深基坑工程安全分析和评价已