

敏感环境条件下

深大基坑支护关键技术

及

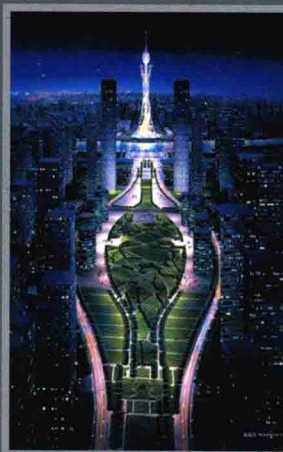
对周围环境安全性评价分析研究

程 群 姚兆明 王 强 / 编著

Mingan Huanjing Tiaojianxia

Shenda Jikeng Zhihu Guanjian Jishu Ji

Dui Zhouwei Huanjing Anquanxing Pingjia Fenxi Yanjiu



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国股份科技研发课题(CSCEC-2013-Z-10)

敏感环境条件下深大基坑支护关键技术及 对周围环境安全性评价分析研究

程 群 姚兆明 王 强 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以广州珠江新城复杂敏感环境深大基坑工程为背景,针对复杂敏感环境条件下深大基坑工程的设计施工新技术开展研究,主要包括:针对珠江新城区域敏感环境下深大基坑工程特,优化基坑支护形式,通过集成创新,形成适用于该地区深大基坑围护设计与施工系列关键技术;采用在水泥土中掺加不同含量的脱硫石膏和粉煤灰的技术路线,通过大量实验室试验,研发了强度高、抗渗性能好、造价低的高性能新型注浆材料,并在深基坑工程中得到大量成功应用。针对珠江新城地区基坑周边的复杂环境,提出了基坑开挖条件下基于建(构)筑物与土体相互作用的位移控制分析方法,并给出基于建(构)筑物承受能力的基坑开挖对邻近建(构)筑物影响的变形控制指标。

图书在版编目(CIP)数据

敏感环境条件下深大基坑支护关键技术及对周围环境
安全性评价分析研究/程群,姚兆明,王强编著. —徐州:中国
矿业大学出版社,2015.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2792 - 8

I. ①敏… II. ①程… III. ①深基坑支护—研究
IV. ①TU46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 186827 号

书 名 敏感环境条件下深大基坑支护关键技术及对周围环境安全性评价分析研究
编 著 程 群 姚兆明 王 强
责任编辑 杨 洋
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 12.75 字数 320 千字
版次印次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着我国经济持续快速的发展,城市化进程不断加速,人们正以前所未有的速度消耗着城市建设用地,土地的需求与供应的矛盾日益突出。为解决城市空间拥挤、交通堵塞、环境恶化、资源匮乏等问题,地下空间的开发利用成为城市建设的热点。城市建筑物如高层及超高层建筑地下室、地下商场的建设,城市地铁隧道、城市地下综合管廊、地下停车场、地下交通枢纽等工程建设,都需要深基坑工程的开挖。深基坑工程已经成为一门综合性很强的新型学科,是在理论上尚待不断发展和完善的综合学科。

进入 21 世纪以来,基坑工程向着“深、大、紧、近”的特点发展,开挖面临着越来越多的新问题。总结深基坑开挖引起的工程事故主要缘于两个方面:一是支护方案不合理造成支护系统本身失稳破坏;二是支护结构产生过大变形引起周边环境的显著变化,如周边建筑物出现开裂破坏、地表沉陷、地铁隧道变形过大,地下管线变形断裂、道路裂缝等。因此,在深基坑开挖过程中如何确保支护结构的稳定、控制其合理变形,如何减少基坑开挖对周围土层的扰动、最大限度降低基坑施工对邻近建(构)筑物的影响,成为工程界广为关注的热点之一。

本书的撰写人员及分工如下:

第 1 章由中建四局第六建筑工程有限公司程群、陈晨、刘芳玲撰写,主要介绍了城市中心区域深基坑工程特点与施工重难点、研究现状及本书研究方法、内容和意义。

第 2 章由安徽理工大学王强、姚兆明撰写,主要介绍了广州珠江新城地区岩土力学参数统计及 CSMDFEM 反分析。

第 3 章由姚兆明、王强、程群、周洋、赵小龙、汪海波、吴新星撰写,主要介绍了敏感环境下基坑开挖对邻近地铁隧道的影响,包括基坑变形规律研究,深大基坑施工对地铁隧道变形影响规律研究,深大基坑的安全性评价。

第 4 章由程群、陈晨、姚守涛、王强、管聪聪撰写,主要介绍了多个典型深大基坑支护形式组合与深大基坑多项创新支护的总结与研究,包括多种常用的深大基坑支护形式组合、可回收锚索技术、对拉锚索技术、扩大头锚索技术、新型脱硫石膏—粉煤灰复合水泥土注浆材料、基坑临时支护与地下室永久结构合一设计及施工技术。

本书在撰写过程中得到了许多一线工程项目技术人员的大力支持和帮助,

在此致以诚挚的谢意。本书引用了大量的参考文献,在此一并致谢。由于时间仓促,加之作者水平所限,书中难免存在缺点和错误,恳请读者和同行批评指正。

作 者

2015 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本书主要研究内容	8
第 2 章 岩土参数统计与反分析	10
2.1 参数统计	10
2.2 CSMDFEM 反分析	10
2.3 本章小结	17
第 3 章 敏感环境下基坑开挖对邻近隧道的影响	18
3.1 引言	18
3.2 基坑变形规律	18
3.3 深大基坑施工对隧道变形影响规律	34
3.4 深大基坑的安全性评价	95
3.5 本章小结	114
第 4 章 深大基坑工程多项创新支护的总结与研究	115
4.1 多个典型深大基坑支护形式优化组合	115
4.2 几种新型锚索支护技术	136
4.3 新型脱硫石膏—粉煤灰复合水泥土及注浆材料的研究与应用	156
4.4 基坑临时支护与地下室永久结构“二合一”设计及施工技术	171
4.5 本章小结	187
总结	188
参考文献	189

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着我国经济的飞速发展,全国性的经济特区及地方政府划定的经济开发区如雨后春笋一般迅猛发展,这些特区或者经济开发区往往承担着引领经济拉动投资的重任,所以这些区域高楼林立、交通便捷、地下管线复杂,这都给该区域后期建(构)筑物的施工带来了极大的难度,广州珠江新城就是在这种背景下发展起来的典型经济开发区。

广州作为中国大陆第三大经济体城市,是华南地区政治、经济、科技、教育和文化的中心,其城市形态的发展和变化一直备受关注,珠江新城位于广州新城市中轴线,北起黄埔大道,南至珠江,优越的地理区位使珠江新城的开发成为必然。

20世纪90年代初,为满足城市发展的需求,加强中心城市的影响力,广州市提出“15年基本实现现代化,准备建设国际化大都市”的目标。在1993年完成了《广州市新城市中心珠江新城综合规划方案》。1993年珠江新城建设方案的提出正值全国经济快速发展时期,然而1994年我国开始实行经济紧缩政策,同时1997年受到东南亚金融危机的影响,到2003年经过10年的发展,珠江新城的开发并不尽如人意,并没有达到预期的发展规模和空间效果。

到2003年初,《珠江新城规划检讨》正式颁布实施,成为指导珠江新城下一步规划设计和建设管理的文件依据,规划检讨从建设国际性城市的战略高度重新提出把珠江新城建设成为二十一世纪中央商务区的目标,依据新的规划:珠江新城规划总用地面积约 6.5 km^2 ,规划总建筑面积 $1\,496\text{ 万 m}^2$,其中办公面积 757 万 m^2 ,住宅面积 624 万 m^2 ,将容纳17万~18万居住人口,提供近30万个就业岗位。规划中,珠江新城是21世纪广州市中心商务区的重要组成部分,将发展成为集国际金融、贸易、商业、文娱、外事、行政和居住为一体的城市一级工程设施区,推动国际文化交流与合作的基地。珠江新城建成后以冼村路为界,分东、西两区,东区以居住为主,西区以商务办公为主,两区以珠江滨水绿化带和东西向商业活动轴线贯通。

经过十年的发展,广州CBD珠江新城已经初具规模,地面行车交通系统组成“四横两纵”干道网,地下交通有广州地铁三号线、五号线和城市新中轴线地下集运系统穿过,周边兴建大量高级写字楼、星级酒店、社区配套公建,包括广州歌剧院、广州新图书馆、广东省新博物馆——超高摩天双塔(东塔和西塔)、电视观光塔以及广州市第二少年宫等39栋标志性与旗舰型建筑(图1-1)。据不完全统计,截至2013年年底政府在珠江新城地区累计投资超过300亿元人民币。

珠江新城区域快速发展的同时,受到土地资源的限制,高层建筑物数量越来越多,高度也越来越高,开发和利用地下空间已成为必然趋势,与此同时基坑工程向超大面积方向发展。在城市中心地带开挖基坑,由于场地狭窄,周边环境条件复杂,地下管线密布,深大基坑

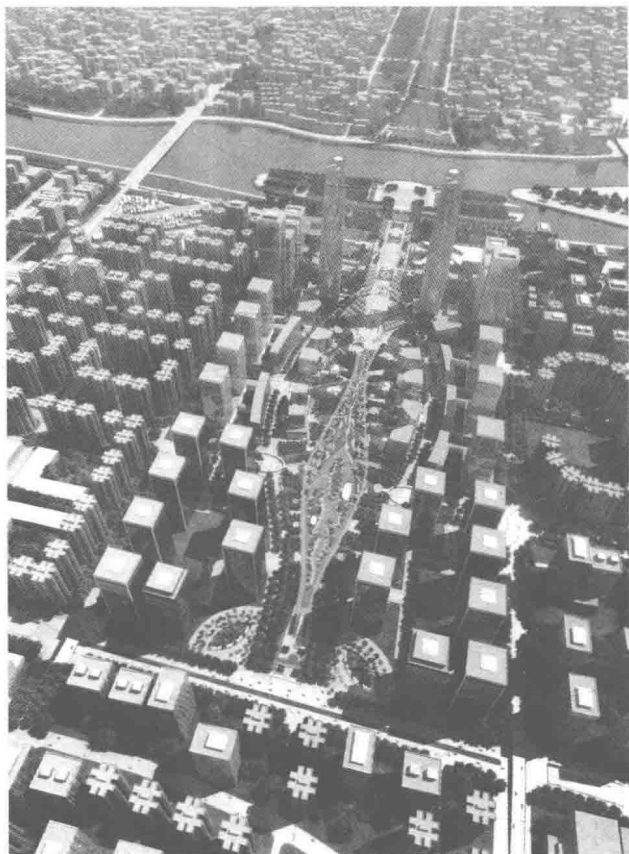


图 1-1 广东珠江新城建设效果图

的开挖支护工程问题正日益成为业内的热点和难点。

本书在认真分析研究该区域的几个典型深基坑案例后,总结出珠江新城区域基坑工程的几个施工难点:

① 基坑规模大、场地狭小。

珠江新城地区基坑普遍规模较大,大面积地下车库、地下商业与休闲中心一体化,使得基坑面积通常达到 $1\text{万}\sim 5\text{万 m}^2$,同时由于建筑物密集,基坑施工场地狭小,很多基坑的基坑边缘紧贴道路红线或建筑外边线。

② 基坑深度大。

珠江新城区域土地可谓寸土寸金,为了满足高人流量的要求,建筑物不断向空中和地下扩展,建筑物的高度越拔越高,超过 300 m 的建筑已经达到 9 座,地下商业街也越挖越深,甚至达到地下五层、六层,很多基坑的深度达到 $20\sim 30\text{ m}$ 。

③ 基坑周边地下环境复杂。

珠江新城地区经过十几年的快速发展已初具规模,地面行车交通系统与地下交通枢纽已形成一个立体的交通网络,为了满足数十万人的日常办公和生活,各种地下管线也是纵横交错,这些都给基坑的开挖提出了更高的要求。

④ 传统、单一的支护方案难以满足要求。

基坑支护方法众多,如重力式挡土墙、板桩墙、地下连续墙、桩锚支护、土钉墙等。然而

由于该区域基坑周边环境复杂,传统单一的支护形式很难同时满足基坑强度和变形的要求,该区域绝大多数基坑均采用了多重支护方式的优化组合。如高德项目基坑东侧、西侧及北侧采用的是支护桩+土钉墙+锚索支护体系,而基坑南侧则采用的是支护桩+多边角撑;佛奥项目基坑的东面、东南面及东北面采用支撑桩+预应力锚索的支护形式,而基坑的西面、西北面及西南面则采用支护桩+内支撑的支护形式;东塔项目基坑西侧、南北两侧均采用连续墙+钢支撑或连续墙+混凝土支撑支护体系,而基坑东侧则采用连续墙+索脚锚索的支护体系。

⑤ 安全性评价指标有待完善。

为了满足基坑稳定性的要求,现行规范仅仅给出了不同类型基坑在不同支护方式下的变形范围,在实际施工中很难指导实际施工,施工现场往往都是根据传统经验估算出一个预警值指导施工,这种依据经验的估算值带有很强的主观性没有科学依据,如果变形容许设置值太大,可能导致思想麻痹,过小又可能造成不必要的浪费。另外,该预警值仅仅是从基坑稳定方面考虑,没有把基坑周边建筑物的变形综合考虑进去,即使基坑强度满足要求,但是基坑周边建筑物变形过大,同样也是不能满足要求的。因此,完善这种基坑及周边建筑的安全评价体系意义重大。

图 1-2 为珠江新城高德置地广场项目基坑施工现场。



图 1-2 珠江新城高德置地广场项目基坑施工现场

1.2 国内外研究现状

1.2.1 基坑开挖围护结构变形及地表沉降研究现状

关于围护墙的侧向变形通常呈现一定的分布规律,其分布特征与墙体材料性质、围护结构形式、支撑条件等密切相关,并伴随开挖施工过程而变化,这方面工作国内外文献已有广泛报道,例如:

唐孟雄和赵锡宏(1996)采用抛物线方程来近似拟合围护墙体变形曲线,根据实测数据,采用最小二乘法来计算曲线方程中的参数。

徐中华(2007)收集了上海地区 300 多个基坑工程实例,给出了支护结构与主体地下结构相结合的墙后地表最大沉降的变化范围和平均值,并指出了地表最大沉降值与围护结构最大水平位移的经验公式。

Roboski 和 Finno(2006)根据芝加哥一个基坑工程的监测数据,采用补误差函数来近似拟合围护墙后地表纵向沉降曲线,并基于经验公式,对东京、台北和芝加哥地区的其他工程进行了预测,取得了较好的效果。

罗智勇(2010)通过对上海市地铁换乘站的连续墙侧向位移分析研究得到,连续墙侧向位移呈现中间小,两头大的趋势,最大水平位移出现在距离开挖面上部几米的位置上。

赵丽华和徐刚(2013)通过对大连市的地铁车站深基坑变形特性实测数据的分析研究,探讨了基坑围护结构位移、地表沉降的变形特性。

关于基坑周边地表沉降性状及预测方法的研究,Peck(1969)在第九届国际土力学与基础工程会议的报告上,根据美国芝加哥、挪威奥斯陆等地的现场地表观测资料,提出的无因次曲线(图 1-3),可用以得到下沉的数量级及沉降分布曲线,主要基于柔性支护结构体系提出的,其将图形分为三个区域。其中Ⅰ区对应于砂土和硬黏土,地表沉降最小,最大沉降小于 $1\% H$;Ⅱ区和Ⅲ区是根据坑底抗隆起稳定系数及坑底以下软土的厚度而定,其最大沉降量可达 $(1\% \sim 3\%) H$ 。

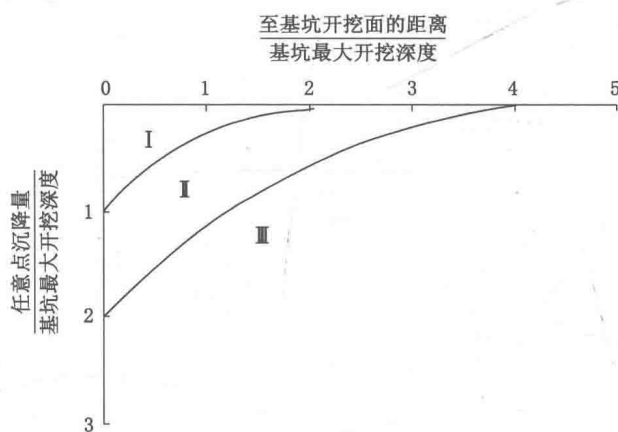


图 1-3 围护墙后地表沉降分布图

Clough 和 Denby(1977)认为坑后地表横向沉降的分布形式取决于沉降量的大小,沉降小时,离开围护结构的沉降量最大;当沉降量较大时,最大沉降位置发生在紧靠围护结构顶部的地面处。

徐方京和谭敬慧(1993)等分析了坑外地层移动的影响范围,提出地下连续墙后地表沉降曲线可以采用 Reyleigh 分布函数来表示。

$$S(x) = (V_s x e^{x^2/2i^2})/x \quad (1-1)$$

式中 $i = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 2ac}}{2a}$ ——极大值位置;

V_s ——各步开挖引起的坑外底层损失;

x ——距坑边的位置坐标。

白云和刘千伟(1995)根据现场实测成果,运用综合分析和函数逼近方法分析了软土深基坑外侧土体的位移场,理论分析过程考虑了墙体刚度、支撑时间、支撑预应力和刚度、基坑宽度和硬土层距地表的深度等多种因素对计算值的影响。

李佳川和夏明耀(1995)采用空间8节点非协调等参元有限元手段对地下连续墙基坑分段开挖的空间效应进行了数值分析,结合实测结果,得到了上海地区长条形地铁深基坑工程墙后的地表纵向沉降的分布规律,并提出了沉降传递系数的概念,用以预测地表以下土体的纵向沉降。

Hsieh 和 Ou(1998)提出了将地表沉降区域划分为主要影响区域和次要影响区域。从基坑边到2倍基坑开挖深度属于主要影响区,2~4倍基坑开挖深度属于次要影响区。主要影响区由于沉降曲线比较陡,对周边环境的影响比较大,而次要影响区由于沉降曲线比较缓,对周边环境的影响相对较小。对于凹槽型坑外地表沉降,最大沉降量位于距离墙后 $0.5H$ (H 为基坑开挖深度)处,紧靠墙体处的沉降为最大沉降的0.5倍。

侯学渊和陈永福(1989)对基坑开挖引起周围地基土沉降进行了理论计算,得出沉降范围与墙体入土深度大体相等。基坑开挖刚结束时,地表沉陷的总面积与支护结构侧移面积之比约为0.6;孔压完全消散后墙体侧移基本上没有变化,而地表沉陷面积却增加较多,其比值达到0.85;地表沉陷曲线与墙体侧移曲线形状存在一定的相关性,主要有两种:一种是“三角形”,另一种是“抛物线形”。地表沉陷范围可取围护墙后滑动棱体的宽度。对“三角形”地表沉陷模式来说,地表沉陷范围为 $x_0 = H_0 \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$,最大沉陷发生在基坑边缘处;对于“抛物线形”地表沉陷,侯教授借用 Peck 教授估算隧道上方地表沉陷的指数函数给出了相应的估算式。

1.2.2 支持向量机在岩土工程反分析中的研究现状

岩土工程是土木工程的一个重要分支且是一门非常复杂的系统工程。岩土工程中的问题具有高度非线性、不确定性、随机性和模糊性特点,并且大多数是“数据有限”的,很难用确定的数学模型来表示,智能岩石力学中的专家系统方法在领域知识获取方面存在一定“瓶颈”,人工神经网络方法的推广能力又较差。支持向量机(support vector machine,简称 SVM)可以很好地解决以上问题,为岩土工程领域的智能化研究提供了一条新途径。

SVM 是基于小样本和结构风险最小化的一种学习方法,通过对样本的学习即可获得因变量和自变量之间复杂的非线性映射关系,因此建模无需太多数据,也不必明确因变量与自变量之间的关系,非常适合小样本的岩土工程问题,并且具有很强的推广能力。近年来,国内外学者致力于 SVM 在岩土工程应用研究中,创造性地提出了一系列的 SVM 模型,取得了很大的成功。

赵洪波(2007)针对边坡可靠性问题,将 SVM 与一阶二次矩结合,建立了安全系数与随机变量之间的映射关系。徐飞等(2009)针对硐室围岩的变形预测,提出 ACA-SVM,用 ACA 搜索 SVM 的参数,滚动预测围岩变形量,提高了预测的准确性,将该方法用于锦屏一级水电站工程硐室变形预测。针对影响边坡稳定的主要因素提出了 ACO-LSSVM 模型,采用 ACO 优化搜索 LSSVM 参数,提高了预测精度。董辉等(2011)以范例推理进行相似范例的检索,为 SVM 预测建模提供工程先验知识。通过对通渝隧道 K19+994 断面拱顶下沉进行预测验证了模型的优越性,但是要建立完备的范例库具有一定难度。张明远等(2012)基于 SVM 和独立量分析(ICA)建立了超大直径钢管桩极限承载力的预测模型 ICASVM-Q,

预测效果明显优于以原始数据作为学习样本的 SVM 模型。

岩土工程问题是一个复杂的系统工程问题,现有的工作都没有考虑所有的影响因素。所以,随着人们对岩土工程问题认识的深入,有必要考虑各种因素影响下的参数识别问题,以及每一种因素对参数识别的影响程度,这是一个重要且符合实际的研究方向。现阶段的参数识别是以唯一性作为前提的,所得出的参数是平均意义上的参数,对参数的识别还有很多工作要做。在 SVM 应用中,还未有充分利用 SVM 的统计学习理论进行统计意义上的研究,应力图从本质上对其力学行为有一定的了解。

1.2.3 深基坑开挖对地铁隧道影响的研究现状

基坑工程开挖等城市建设过程中的工程活动比比皆是,其中包括越来越多的位于隧道或地铁两侧的项目。这些邻近开挖不可避免的会导致地铁隧道产生不均匀沉降,特别是现在广泛用于软土地区的盾构隧道,严重时可导致隧道渗水漏泥或局部损坏,更甚者将使轨道产生纵向变形,因而造成对地铁隧道结构安全和列车正常运行的严重威胁。随着城市地铁隧道周边的基坑工程越来越多,国内外的研究学者针对基坑开挖对邻近既有隧道影响开展了许多研究。

万鹏等(2010)基于上海市某地铁附近的深基坑工程的现场实测数据,依据不同施工阶段围护结构的测斜,周边土体的测斜和地铁隧道的纵向变形,对其进行数据的处理与分析。最后得出:平行于基坑壁的地铁隧道在基坑拐角处出现收敛变形突变以及纵向沉降反弯点。隧道沿纵向的沉降变形与水平直径收敛呈线性关系。

蒋洪胜(2002)基于对某基坑的实测数据及基坑开挖引起的位移场进行分析,从几种不同的角度分析了开挖对周边既有隧道的影响。研究表明,地铁隧道本身的存在在很大程度上可以阻断基坑开挖引起的位移场的传递,但是这种作用会反作用于隧道,会使隧道本身的侧向变形加剧。

郑宜枫等(2009)采用了 TCA2003 全自动动态监测系统对基坑周边的地铁隧道进行了监测,通过对监测数据的分析为基坑的开挖提供了依据。

Hu ZF 等(2003)基于上海市某邻近地铁隧道的深基坑工程,对该基坑工程的设计与施工工艺进行了深入的探讨。

刘建航等(1991)主编的《基坑工程手册》一书中指出:基坑开挖对临近地铁隧道的影响是一个十分复杂的动态三维过程。紧靠基坑的正在运行的隧道,在基坑开挖到底部过程中,随着挡墙水平位移的增加,隧道已产生水平位移并伴随横向水平直径增大的圆环变形,而且隧道水平位移是不均匀的呈一定的曲率。

汪小兵(2009)运用三维有限元数值模拟了紧邻地铁隧道的深大基坑变形情况和整体开挖和分区开挖两种工况对隧道的变形,得出了分区开挖对邻近隧道的影响较小。

蔡建鹏等(2010)提出了基坑开挖对邻近地下管线影响分析的位移控制有限单元法,并分别考虑在均质地基和层状地基条件下,对基坑开挖对邻近地下管线变形和受力的影响进行了研究,并与基于受力控制的整体有限元法进行了对比分析,两种方法得出的管线的变形规律和受力分布规律基本一致。

张陈蓉等(2010)采用三维 DCFEM 法对基坑开挖引起临近地埋管线的影响进行了分析,并通过一个算例分析,将 DCFEM 法与两阶段理论分析方法进行了对比,验证了该方法的合理性及有效性。

王强(2011)对某邻近地铁区间隧道的深基坑施工进行全过程跟踪监测,应用三维有限元分析手段,对地铁隧道在基坑施工过程中所产生的影响进行弹塑性分析,表明整体有限元方法可以较好地模拟此类工程问题。

Chi-Te Chang(2001)等通过台北快速通道隧道建设过程中,Panchiao 线的隧道区段因为临近基坑而遭到破坏这一事实,说明建立临近隧道的基坑开挖的标准的重要性。得出了一些结论:① 隧道抗弯能力取决于隧道的平面形状;② 测斜仪读数并不代表隧道的变形,应当用来判断隧道衬砌挤压的程度;③ 隧道表现为梁的形式将降低地面变形包括临近基坑和地面工程的变形。

王卫东等(2004)采用数值分析方法研究了上海新金桥广场基坑开挖对下方地铁隧道的影响,模型中采用了上海软土卸荷模量,并考虑了土体加固、运用时空效应原理开挖土方等控制措施。研究表明:① 地铁隧道在基坑开挖引起的土体变位的带动下产生一定的位移,隧道的位移形态以刚体变位为主,表现为竖向上抬。② 采取对隧道周围土体进行加固,以及施工过程中合理运用时空效应等控制措施,能基本将地铁隧道变形控制在允许范围内。③ 地铁变形的大小取决于土体卸荷模。

在地铁隧道的保护技术标准方面,目前的有关标准还相当不成熟。比如上海市地区在考虑基坑开挖、高层建筑桩基施工、工程降水以及地面堆载等各种加载和卸载的建筑活动对地铁工程设施的影响的基础上,规定地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量不大于 20 mm,隧道变形曲线的曲率半径不小于 15 000 m。尽管该项规定较为明确,但由于其不仅仅针对基坑开挖的施工影响,同时也没有考虑到不同地铁隧道结构本身的差异性,所以该项规定显得比较宽泛,而且允许值的确定主要基于工程实践经验得到,具有一定的随意性且缺乏较强的理论基础,故有必要结合基坑开挖施工的影响以及盾构隧道本身的特殊构造,进一步针对地铁隧道对附加变形的承载能力进行深入研究。

1.2.4 基坑变形控制标准的研究现状

基坑的变形控制指标研究涉及基坑的自由土体变形、建(构)筑物的承受能力、建(构)筑物的附加变形等,是一个复杂的基坑开挖作用下建(构)筑物与土体的相互作用问题。其主要指标包括:① 围护结构的侧向位移和侧向位移速率;② 地表下沉量及下沉速率;③ 邻近建(构)筑物的沉降、倾斜等。

基坑开挖本身就是一个复杂的三维时空问题,支护结构的变形与诸多因素有关,如基坑形状、地层条件、支护形式、施工程序、施工工艺等,要给出一个统一的基坑支护结构的变形控制指标非常困难。基坑围护结构变形的现场实测数据是围护结构在各种影响因素下的综合反应,为基坑工程的变形控制指标研究提供了实践基础。由于基坑具有很强的区域特征,各地区的土层条件、围护结构形式、开挖方法、工程经验等均不一样,因此这些相关的研究结果是否适合于广州珠江新城地区不同围护形式的变形控制标准确定仍有待进一步研究。

基坑变形控制指标的建立要求突破传统的力控制模式的研究思路,不针对某个具体的基坑工程施工实例,而从位移控制的角度出发,建立基坑的变形与结构物变形的联系。位移控制分析主要包括位移控制有限元方法和位移控制两阶段简化分析方法。位移控制有限元法(Displacement-controlled finite element method/DCFEM)不考虑基坑开挖的实际施工过程,而是通过在应力自由面施加位移边界条件来模拟基坑开挖引起的应力释放,即在基坑开挖临空面和坑外地表施加位移边界条件。针对建筑物的简化问题,Potts 和 Adenbrooke

(1997)采用梁单元的相对刚度(抗弯刚度和轴向刚度)来代表结构刚度,较为详细地研究了结构物刚度和沉降的关系,提出了一个能够考虑结构刚度作用的相对刚度法。这个方法应用起来较为简便,但由于是基于数值分析的结果,其可靠性需要工程实践的验证,特别是在结构刚度的处理上过于理想化。另外,该方法只能得到考虑结构刚度的修正的挠曲比和水平应变,而无法得到完整的建筑物变形曲线。韩焯(2006)在考虑了 Potts 和 Addenbrooke (1997)方法的局限性并对伦敦 JLE 工程大量实测数据进行分析的基础上,提出了一个能够考虑结构刚度的受隧道开挖影响的建筑物沉降预估方法,即刚度修正法,并在此基础上研究了建筑物的三维变形特性。针对基坑开挖引起邻近建筑物变形的研究,涉及关于基坑开挖、建筑物结构与地基之间的复杂相互作用问题,由于其影响因素众多,且相关实测资料匮乏,导致这方面的研究非常少见。

目前北京、南京、广州、深圳、上海等城市已制定基坑变形控制的保护等级标准。但各地对基坑变形控制标准的规定存在一定差异,有的采用绝对变形指标控制,有的采用相对变形指标控制,有的同时采用绝对变形指标和相对变形指标进行控制。当前基坑的开挖深度总是在不断增大,实践表明,随着基坑深度的加大,围护结构的水平位移与地表沉降均随深度成非线性增长,这将导致即使基坑自身处于正常工作状态,围护结构的水平位移和地面沉降将超过绝对变形控制标准。此外,基坑周边不同保护对象对变形的控制要求也不同,地表沉降(绝对沉降、沉降差、倾斜、局部倾斜)是建(构)筑物的主要变形控制指标,坑外地层水平侧移是基坑侧边地铁隧道的主要变形控制指标,坑底隆起是基坑下方地铁隧道的主要变形控制指标,坑外地层水平侧移和地表沉降是基坑侧边桩基础的主要变形控制指标。因此,具体工程的变形控制标准应根据基坑周边环境对变形的要求来确定。

1.3 本书主要研究内容

深基坑支护是一门综合性很强的工程技术,总结深基坑开挖引起的工程事故主要缘于两个方面:一是支护方案不合理造成支护系统本身失稳,二是支护结构产生过大变形引起周边环境的显著变化,如周边建筑物出现开裂破坏、地表沉陷、地下管线变形断裂、道路裂缝等,因此在深基坑开挖过程中如何确保支护结构的稳定,控制其合理变形,保护好周边的环境非常重要。根据前期对深基坑工程事故的分析,总结出本书的研究方向,从这两个方面对珠江新城区域的深基坑进行分析总结有着非常重要的现实意义。

一是针对珠江新城地区基坑周边的复杂环境,在考虑建筑物的结构形式、基础形式的差异以及隧道的变截面特性的基础上,提出了基坑开挖条件下基于建(构)筑物与土体相互作用的位移控制分析方法,并提出了基于建(构)筑物承受能力的基坑开挖对邻近建(构)筑物影响的变形控制指标。

二是对该区域的深大基坑的多种创新支护技术进行优化组合,不同的支护结构组合形式适应于不同的水文地质条件、基坑深度、基坑周边环境,本书以高德置地广场基坑工程、周大福国际金融中心基坑工程、广州太古汇基坑工程、广州地铁基坑工程为例,分析和总结各种深基坑支护结构组合形式的施工要点及使用范围,为类似基坑工程的设计和施工提供参考。同时对该区域多个深大基坑创新支护技术、支护材料进行总结分析,研究各种创新支护技术及支护材料的适用性,进而有效指导该区域类似基坑的设计与施工。

第2章 岩土参数统计与反分析

2.1 参数统计

主要针对广州珠江新城地区岩土参数进行了统计分析,包括各层的密度(干密度、湿密度)、含水量、孔隙比、饱和度、液限、塑限、塑性指数、液性指数、压缩系数、压缩模量、直快黏聚力、直快摩擦角、固结快剪黏聚力、固结快剪摩擦角、三轴压缩试验(UU/CU/CD)、渗透系数(水平、垂直)等。通过统计分析给出了广州珠江新城地区深基坑工程设计参数的建议值范围。

2.2 CSMDFEM 反分析

2.2.1 引言

在深基坑支护工程中掌握岩土力学参数与支护结构位移和地表沉降之间的关系对工程的安全性至关重要。首先利用正交试验和位移控制有限元模型(DCEM)得到支持向量机的训练样本,其次采用交叉验证的方法建立基坑周围地表沉降与岩土力学参数的非线性关系,最后根据广州东塔深基坑地表沉降的实测资料,利用支持向量机对岩土力学参数进行反分析。一方面支持向量机(VCM)代替有限元计算提高了计算分析速度,另一方面用参数循环寻优算法,可以选择不同寻优方式和标准选择最优模型,避免优化过程中目标函数陷入局部极小值而无法继续寻优的状态,提高了反演的效率和精度。实例证明,预估的岩土力学参数合理,且利用反演得到的岩土力学参数进行有限元正分析所得位移与现场实测结果更加接近。

在本书中,对于高度非线性映射的特征存在的深地基沉降和土壤的物理参数之间的周边地,如在以前使用的土壤的物理参数的自变量,作为构思的位移的结果变量的基础上,采用排量为自变量,机械性能参数为因变量,并引入人工智能技术,SVM 全局随机搜索能力,建立了支持向量机模型,地质力学位移反分析。由于该位移测量是经济又方便,并能反映实际的问题,该方法已被广泛应用于岩土工程。最后,用一个项目的例子,说明这种方法的有效性。

2.2.2 基于支持向量机和交叉验证法的位移反分析模型

2.2.2.1 支持向量机模型

基于岩土工程中岩土体结构的复杂性及特殊性,岩土体的力学参数与基坑周围地表沉降很难用显式的数学公式来描述其之间的关系,然而支持向量机却能很好地被用来描述岩土体力学参数与围护结构位移和周围地表沉降之间的高度非线性映射关系。

表 2-1 基坑工程设计参数统计表

土层代号	数值统计	密度 /(g/cm ³)	快剪			固结快剪		基床系数		静止侧 压力系 数 K_0	三轴 UU			三轴 CU			渗透试验	
			C /kPa	φ /(°)	C_i /kPa	φ_i /(°)	C /kPa	φ /(°)	水平 /(MPa/m)	垂直 /(MPa/m)	C /kPa	φ /(°)	C /kPa	φ /(°)	C' /kPa	φ' /(°)	K_v /(cm/s)	K_H
② 3 粉质黏土	平均值	1.95	29.00	12.25	40.48	12.55	19.87	14.89	0.46	44.74	0.9	24.75	22.25	6.75	29.15	1.07e-6	1.75e-6	
	标准差	0.036	8.869	4.871	10.659	2.353	3.355	5.35	0.051	19.149	0.767	10.73	3.145	5.972	2.339	1.454e-6	3.454e-6	
② 4 粉质黏土	平均值	1.92	18.88	8.85	30.78	12.81	20.17	18.36	0.44	38.85	0.42	17.55	24.45	2.45	33.15	1.18e-5	1.54e-5	
	标准差	0.029	13.464	5.986	5.082	2.362	3.504	1.855	0.033	8.98	0.319	4.059	5.382	1.368	1.483	1.351e-5	1.142e-5	
② 5 中砂	平均值	1.93	9.34	30.67	9.4	31.79	49.16	44.03	0.32	34.20	7.39	16.83	29.87	4.13	37.35	7.36e-4	1.18e-3	
	标准差	0.059	3.574	3.327	3.231	2.89	12.966	12.732	0.047	10.691	6.111	24.18	4.593	1.031	3.337	1.161e-3	1.835e-3	
③ 1 粉质黏土	平均值	1.94	23.79	18.33	27.80	19.35	26.93	25.20	0.43	50.70	3.62	21.95	22.87	7.44	29.75	8.38e-6	1.06e-5	
	标准差	0.041	9.323	5.305	11.442	4.726	6.132	5.548	0.053	19.624	3.584	20.603	4.889	10.369	8.72	2.129e-5	2.232e-5	
③ 2 粉质黏土	平均值	1.93	25.05	17.51	27.4	18.05	24.29	24.55	0.42	41.71	1.85	31.73	23.09	9.88	31.55	5.61e-6	6.79e-6	
	标准差	0.036	10.97	9.77	9.77	5.035	6.268	5.52	0.063	10.731	2.246	18.22	5.311	7.684	3.37	1.431e-5	1.194e-5	
④ 全风化泥岩	平均值	2.01	55.44	13.12	55.03	15.47	29.99	28.8	0.46	72.62	2.1	48.08	19.07	27.55	36.59	2.86e-7	3.71e-7	
	标准差	0.032	16.755	2.905	11.249	2.989	5.842	6.139	0.057	20.385	1.808	19.162	3.318	15.725	3.305	3.085e-7	6.841e-7	

支持向量机是 Corinna Cortes 和 Vapnik 等在统计学习理论的基础上提出的,这是一种新的学习方法,它可以根据很少的样本训练就能得到极好的泛化能力。而且支持向量机可以进行机器学习,是一个很好的通用学习机,在它建模之前我们不需要提前知道自变量与因变量之间的关系,我们只需对样本进行学习就可以获得自变量与因变量之间的非常复杂的非线性映射关系。

在进行支持向量机回归学习时,为解决回归学习算法,是通过求解二次型的参数 a_i, a_i^* 获得,即:

$$\min \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) (a_j - a_j^*) (x_i x_j) - \sum_{i=1}^n y_i (a_i - a_i^*) + \varepsilon \sum_{i=1}^n (a_i + a_i^*) \right] \quad (2-1)$$

其约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) = 0 \quad (0 \leq a_i, a_i^* \leq C; i=1, 2, \dots, n) \quad (2-2)$$

对上述各相应参数进行求解后,我们可以得到 SVM 的拟合函数如下:

$$f(x) = wx + b = \sum_{i=1}^k (a_i - a_i^*) (x \cdot x_i) + b \quad (2-3)$$

其中, $(a_i - a_i^*)$ 不为 0 所对应的样本数据就是支持向量。

关于复杂的非线性 SVM 回归问题,可以将原问题通过非线性映射关系映射到高维特征空间中的线性问题进行求解。针对高维特征空间中的线性问题,我们可以用核函数来代替线性问题中的内积运算,其中核函数可以利用原空间中的函数来实现。目前主要有以下几种常用的核函数:

① 多项式核函数(Polynomial Function Kernel):

$$K(x, y) = [s(x \cdot y) + 1]^d \quad (d=1, 2, 3, \dots) \quad (2-4)$$

② 径向基核函数(Radial Basis Function Kernel):

$$K(x, y) = \exp \left[-g \cdot \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2 \right] \quad (2-5)$$

③ 柯西核函数(Cauchy Function Kernel):

$$K(x, y) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{1 + u(x_i - y_i)^2} \quad (2-6)$$

④ 拉普拉斯核函数(Laplace Function Kernel):

$$K(x, y) = \prod_{i=1}^n e^{-u|x_i - y_i|} \quad (2-7)$$

为了得到岩土力学参数与岩土位移之间的支持向量机模型,有必要给出一组学习样本,并对 SVM 模型进行训练和检验,可以通过数值模拟的方法获得用来训练和检验的样本。由于反演的参数很多,为了减少试验次数和计算量,本书采用正交试验的设计的方法对不同参数组合进行有限元分析,这样得到的试验点安排的具有代表性且比较均匀,因此能以比较少的试验获得较好的结果。

2.2.2.2 交叉验证法随机样本的构建

不管是两类分类还是函数估计,所建模型质量与训练数据集本身密切相关。不仅需要选择因素与预期输出量是否关联密切外,还需要考虑所选取用来训练的样本集