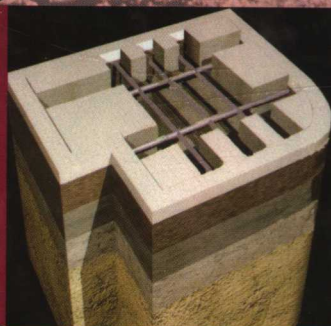




上海市科学技术协会
“晨光计划”资助出版

RUAN
TU
JI
KENG
KAO
LU
SHI
KONG
XIAO
YING

软土基坑考虑时空效应的 三维动态设计与过程控制

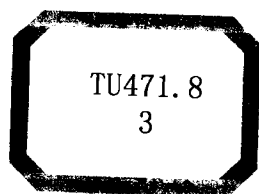


■ 范益群

DE
SAN
WEI
DONG
TAI
SHE
JI
YU
GUO
CHENG
KONG
ZHI

■ 上海科学普及出版社

■ 范益群



RUAN
TU
JI
KENG
KAO
LU
SHI
KONG
XIAO
YING

软土基坑考虑时空效应的 三维动态设计与过程控制

DE
SAN
WEI
DONG
TAI
SHE
JI
YU
GUO
CHENG
KONG
ZHI

■ 上海科学普及出版社

图书在版编目(CIP)数据

软土基坑考虑时空效应的三维动态设计与过程控制/
范益群著. —上海: 上海科学普及出版社, 2005. 4
ISBN 7-5427-2922-5

I. 软... II. 范... III. 软土地基—基础(工程)—工程施工 IV. TU471.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 100720 号

责任编辑 董 放

**软土基坑考虑时空效应的
三维动态设计与过程控制**

范益群

上海科学普及出版社出版发行

(上海中山北路 832 号 邮政编码 200070)

<http://www.pspsh.com>

各地新华书店经销 苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 202 000

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—1 500

ISBN 7-5427-2922-5/TU·48 定价: 38.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题

请向出版社联系调换



上海科技发展基金会(www.sstdf.org)的宗旨是促进科学技术的繁荣和发展,促进科学技术的普及和推广,促进科技人才的成长和提高,为推动科技进步,提高广大人民群众的科学文化水平作贡献。本书受“上海科技发展基金会”资助出版。

“上海市科协资助青年学者出版科技 著作晨光计划”出版说明

“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”由上海市科协和上海科技发展基金会主办,上海科学普及出版社协办。该计划定向资助 40 周岁以下的上海青年学者出版首部个人原创性科技著作,旨在支持和鼓励学有所成的上海青年学者著书立说,加快培养青年科技人才的成长,切实推动“科教兴市”战略的实施。该计划每年资助不超过 5 人,每人资助1 500册以内的出版费用。申请资助的作者需要通过其所在学会(协会、研究会)向上海市科协学术部推荐,申请表
下载网址: www.sast.stn.sh.cn。

总 序

尊重知识、尊重人才,在积极发现、培养、使用、凝聚优秀科技人才的同时,大力促进创新人才特别是年轻人才脱颖而出,是推动科技进步和创新的重要任务,也是上海市科学技术协会及其所属科技团体的重要职责。上海市科协联合上海科技发展基金会、上海科学普及出版社,新推出的“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”,是履行这一职责的重要体现。

上海是我国科技人才集聚和青年科技人才涌现的地区之一。上海的青年科技工作者,长期以来为贯彻实施“科教兴国”战略,推动科技进步和创新,在科研和教学实践中默默耕耘,逐渐形成了一些新的工作成果,推出了不少新的学术思想,然而,这些优秀青年想要为自己的创新成果或创新思想著书立说,却受到资金、渠道等多种因素的困扰。“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”,就是为这些优秀青年科技人才而设立的,就是要雪中送炭,支持和鼓励学有所成、干有所长的上海青年科技人才著书立说,从而促进青年科技人才的成长,繁荣学术交流,加快科学技术新思想、新方法和新知识的传播。

众人拾柴火焰高,科学事业的繁荣要依靠社会各界的关心和支持,尤其需要科技团体发挥独特作用。纵览目前国内的资助出版项目有很多,但“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”在资助青年学者出版首部个人原创性科技著作上具有鲜明的特色。我衷心希望这项计划的实施,能对上海青年科技人才的成长有所帮助,能向世界展示上海青年科技人才的新面貌。

上海市科学技术协会主席

沈文庆

2005年1月

序 言

范益群博士撰写的《软土基坑考虑时空效应的三维动态设计与过程控制》一书,即将由上海科学普及出版社出版,我有机会事先阅读原稿,实感荣幸。作者嘱我写篇序言,我也欣然同意了。

在流塑及软塑黏土层中进行基坑工程施工,常由于无规则的开挖和支撑,开挖中被扰动地层土体的应力路径及土体参数变化无常,致使基坑变形无法准确预测,因而不能科学地采取治理对策。为解决基坑变形的预测和控制问题,有不少专家探求了多种理论联系实际的方法,考虑基坑工程时空效应的设计和施工方法就是其中的一个途径。

范博士近十年来,一直从事地下工程施工体系的理论与方法研究,先后做了大量的科研课题和工程项目,尤其从1998年10月至2000年4月,紧密联系上海轨道交通二号线河南中路站的施工和环境保护实践,应用时空效应的设计理论和方法取得了一系列成果。首先,作者在探讨时空效应理论与工程控制论的内在联系基础上,提出了考虑时空效应理论的三维动态设计方法,同时通过对实践中已掌握的有效控制手段的控制系统分析和控制方法研究,初步探讨了实时监测和实时控制的理论,并将此方法运用于157#地块基坑工程。其次,在157#地块基坑工程实践中,对紧靠短桩独立基础的七层高层建筑的不规则软土深基坑,采用上述理论和方法,按预先设定的基坑边侧建筑的沉降控制值,从设计上提出了控制基坑变形保护周围环境的技术方法,在施工中又能按预测计算中所提出的各施工步骤的基坑挡墙的变形速率预测警戒值,使施工监控能按基坑变形监测反馈数据,及时采取以调整施工参数为主的控制措施,确保了整个基坑开挖施工引起的坑侧建筑物沉降量与设计预测的12 mm允许沉降量相符,使一座对沉降极为敏感的商业建筑物——东海商都在整个施工阶段得以安全使用。以后,作者又结合该工程实例,进一步比较了时空效应计算参数与实测值,从而加深了对软土基坑时空效应的认识。

在以上研究成果的基础上,范博士撰写了《软土基坑考虑时空效应的三维动态设计与过程控制》一书,汇总了他的研究精华,也代表了当前软土基坑工程的研究和应用的较高水平。我相信本书的出版问世,对我国软土基坑工程的进一步研究将起到有益作用。

欣喜之余,写了个人感受,谨以为序。

中国工程院院士

2004年10月于上海

前 言

自 20 世纪 90 年代以来,在软土中进行深基坑工程施工过程中,事故一直较多,如 1993 年上海市发生了近四十起基坑事故,南京、深圳等地的基坑事故率也很高。大量的事故不仅带来了巨大的经济损失,也造成了不良的社会影响。

造成基坑工程的高事故率,其原因很多,如对场地水文地质条件和周围环境的了解不足;基坑支护形式发展迅速,而原有的计算土力学理论跟不上;设计者未能从建筑施工的角度来设计而造成施工中对围护结构的损伤;为赶工期忽视施工质量和支撑工序,进行超挖或支撑不及时;缺乏严格的监督,未使用或未充分利用观测系统等。这些原因都是由于技术人员缺乏经验或主观努力不够,可以通过规范基坑设计市场,加强质量管理等措施和对策来解决。那么对基坑工程内在客观规律的认识是否已尽善尽美了?

刘建航院士在长期地下结构工程的实践中认识到:上海地区近十年来施工的深基坑工程大多数处于地下 30 米范围内的流塑及软塑黏土层,由于基坑无规则的开挖和支撑,开挖中被扰动地层土体的应力路径及土体参数变化无常,致使基坑变形无法准确预测,因而不能科学地采取治理对策。于是提出了在基坑开挖过程中有计划地对基坑中的土体进行多种形式的划分,如分层、分条、分块、对称、平衡、限时地进行开挖,以及通过适当减少每步开挖土方的空间尺寸和减少开挖未支撑前基坑挡墙所暴露的时间,来科学地利用土体自身控制地层位移的潜力,以解决软土深基坑稳定和变形的问题。在此基础上与同济大学侯学渊、刘国彬教授等共同研究了基坑工程时空效应的设计理论和方法。近十年来,他们组织同济大学和原上海地铁总公司的多位教授和技术人员对该理论和方法进行了系统的总结,并在上海市地铁系统中大面积推广。

本人自 1994 年在大连理工大学工程力学研究所攻读博士学位以来,以国家基础性研究重大项目“重大土木及水利工程安全性与耐久性的基础研究”中的子项目“高层建筑深基坑安全性分析”研究为背景,在钟万勰院士和李锡夔教授指导下从事地下工程施工体系的理论与方法研究。当时认为施工安全问题主要是由于对环境、地质、荷载等因素揭示不够、认识不足而导致设计和施工中的某种失误和疏忽所致。因此主张在建造和施工阶段进行合理的分析,及时修改设计、调整施工方法和采取合理的施工控制措施,以避免重大的工程事故。于是对基坑支撑开挖过程中各种瞬态的过程(如弹性非饱和土、黏性土的结构损伤)进行了详细的分析研究,以后又将研究工作延伸到岩土力学弹性/弹塑性参数反演,并在 JIGFEX 程序系统基础上开发了考虑施工过程的大型计算机辅助信息反馈分析软件系统。1996 年 9 月至 12 月,我来到上海淞沪土木工程技术服务咨询公司,在张昌权高工的协助下,进行深基坑围护结构的有限元数值解法的研究,并应用于工程实践,第二章的内容即为我与顾汉梁高工协作完成。

1997 年 12 月至 1998 年 9 月,在博士后工作期间,我开始从事施工体系的优化与控制研究。1998 年 10 月至 1999 年 11 月,师从刘建航院士从事上海轨道交通二号线河南中路站的施工和环境保护研究。在上海轨道交通二号线河南中路站建设的近三百个日日夜夜,

刘院士与我们共同奋战在建设工地上,他对工程认真负责和对学术研究严谨认真的态度及对事业执着的追求和奉献精神时刻影响着我们。更难能可贵的是,他毫无保留地将如何运用理论解决实际问题的高超技术传授给我们。在和刘院士的共事过程中,我的思维和学术思想发生了根本性的变化,逐渐认识到,从原有欧氏空间的力学概念过来的施工力学体系并不完整,决心用基于状态空间的力学概念来重新认识和建立新的施工力学体系,使之更符合工程实际,并更好地为工程实践服务。

在上海市建委科研项目“软土基坑工程时空效应理论与实践”和“软土基坑三维动态设计与过程控制”的资助下,本人重点对上海轨道交通二号线河南中路站1号和4号出入口的两个不规则形状的深基坑的设计和施工进行了深入的研究。其间得到了孙巍高工、黄海滨博士、杨国伟博士、王如路高工的支持、帮助和协作。1999年11月进入上海市隧道工程轨道交通设计研究院后,继续进行了监测数据的整理工作,并指导学生施冬莉、牟远庆、刘清华等作了一些深入的理论探讨和工程应用研究工作。2000年10月,该课题进行了专家评审,成果鉴定为国际先进。随着以后在设计院工作的展开,越发觉得上述工作不但是对“基坑工程时空效应施工22条”和“地铁车站基坑施工技术规范”作了一个理论基础的补充说明,而且对现有软土基坑工程的设计施工实践有着重要的指导意义,于是萌发了撰书系统介绍考虑时空效应的软土基坑三维动态设计与过程控制的念头。在上海市科学技术协会晨光计划的资助下,终于得以完成本书稿。

本书系统而深入地介绍了考虑时空效应的软土基坑三维动态设计与过程控制的理论和方法,其中包括了近十年来与他人合作的成果。本书还列出了数十篇参考文献,为读者进一步深入研究提供了必要的信息和线索。本书的工作成果大部分曾以论文形式发表于各类期刊杂志;2000年10月,由上海市建设和管理委员会组织专家对本书的工作成果进行评审,以后工作中又将本书的成果渗透到工程实践之中。本书可供有关从事地下结构工程的技术人员及科研人员阅读,特别适用于从事地下结构工程施工理论研究的研究人员参考。

在本书即将出版之际,首先要感谢河海大学、同济大学、大连理工大学、上海地铁系统的众多师长对我的教育、培养、关心和帮助。承蒙尊敬的中国工程院院士、上海市市政管理局的刘建航院士为本书作序,并对本书提出了十分中肯的意见;同济大学地下工程系的侯学渊教授认真地审阅了书稿。另外国内多名专家、同行学者和我进行了有意义的探讨并提供了宝贵的资料,使我受益匪浅;本书作者的妻子孙燕妮博士承担了本书稿的文字整理和校对工作;我曾指导过的学生牟远庆、施冬莉及同事陈炯工程师为本书稿的公式编排和图形处理作了大量细致的工作,在此一并表示衷心的感谢。

我衷心地欢迎读者对本书提出宝贵的意见。

范益群

2004年5月于上海

目 录

1. 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 基坑工程设计与施工理论概述	1
1.2.1 基坑工程设计与施工的现状	1
1.2.2 传统设计与施工方法存在的问题	2
1.2.3 动态设计及信息化施工技术	4
1.2.4 软土深基坑考虑时空效应的设计、施工理论及方法	6
1.2.5 传统动态设计理论与基于时空效应的设计理论的区别	7
§ 1.3 软土基坑考虑时空效应的三维动态设计与过程控制的基本思想	7
参考文献	8
2. 时空效应理论与软土深基坑工程现代设计概念	9
§ 2.1 引言	9
§ 2.2 时空效应理论与工程控制论	9
2.2.1 时空效应理论的基本概念	9
2.2.2 时空效应理论与工程控制论	11
§ 2.3 以时空效应理论为基础的软土深基坑工程设计概念	13
§ 2.4 结论	15
参考文献	15
3. 关于软土基坑围护结构空间计算模型的探讨	17
§ 3.1 引言	17
§ 3.2 软土基坑围护设计中关于计算模型的几个问题及解决对策	17
3.2.1 平面框架计算模型	17
3.2.2 不协调空间计算模型	17
3.2.3 拟协调空间计算模型	18
§ 3.3 基坑围护支撑体系子结构协调的空间计算模型及有限元数值解法	18
§ 3.4 上海某工程基坑围护设计实例	20
3.4.1 工程概况	20
3.4.2 基坑围护结构的设计	20
3.4.3 围护结构的主要计算成果	22
§ 3.5 结论	24
参考文献	24

4. 软土深基坑考虑时空效应的空间计算模型预测分析	30
§ 4.1 引言	30
§ 4.2 考虑时空效应原理的深基坑围护结构设计计算模型	30
§ 4.3 考虑施工时空效应原理的深基坑围护结构的有限元子 结构数值解法	31
§ 4.4 计算参数确定	33
4.4.1 等效土体水平抗力系数 K_h	33
4.4.2 墙后土压力变化规律	33
§ 4.5 上海某工程基坑围护设计实例	34
4.5.1 工程概况	34
4.5.2 基坑围护结构的设计	34
4.5.3 围护结构的主要计算成果	37
§ 4.6 支撑节点的构造及支撑次应力分析	38
§ 4.7 结论	39
参考文献	39
5. 上海轨道交通二号线河南中路地铁站 4 号出入口及 157# 地块基坑动态 设计	40
§ 5.1 工程概况	40
5.1.1 157# 地块情况	40
5.1.2 工程地质情况	43
5.1.3 周边环境	43
§ 5.2 基坑围护结构的设计	43
5.2.1 设计依据	43
5.2.2 基坑围护方案简介	44
5.2.3 基坑开挖方案	44
5.2.4 计算理论与主要计算成果	45
§ 5.3 157# 地块深基坑考虑时空效应的环境保护设计	52
5.3.1 将基坑工程的总变形控制指标分解为分阶段的控制指标	53
5.3.2 满足各施工流程对地表沉降控制要求的环境保护措施及其技术要求	53
5.3.3 环境保护的信息化施工	55
§ 5.4 上海轨道交通二号线河南中路站 4 号出入口及 157# 地块土建工程施工监测 设计方案	56
5.4.1 软土地基深基坑开挖控制施工安全的监测内容	57
5.4.2 监测点的布置	57
5.4.3 监测控制值	59
5.4.4 监测频率	59

6. 实时监测和基坑施工过程的过程控制

(——施工工序与参数优化及在信息化施工中调整规律研究)	60
§ 6.1 引言	60
§ 6.2 软土基坑施工过程中基于时空效应的有效控制手段及其力学机理分析	60
§ 6.3 基于有限元分析的基坑施工过程动态优化控制模型	63
§ 6.4 基坑施工过程动态优化控制的实现	65
6.4.1 动态规划法	65
6.4.2 离散系统线性二次控制问题的最优反馈控制	68
§ 6.5 参数的识别	71
6.5.1 极大似然估计法确定目标函数	71
6.5.2 极大似然法参数估计的实现	73
§ 6.6 最优控制策略的实现方法及在信息化施工中的调整规律	73
§ 6.7 工程实例分析	74
6.7.1 工程概况	74
6.7.2 动态控制策略集及最优控制策略	74
6.7.3 施工中施工工序及参数的调整实例	78
§ 6.8 结论	88
参考文献	89

7. 土压力与等效水平抗力系数的进一步探讨

§ 7.1 引言	90
§ 7.2 等效土体水平抗力系数现有理论计算方法	90
7.2.1 公式介绍	90
7.2.2 计算图表分析	91
§ 7.3 用现场实测数据反算 K_h 值	93
§ 7.4 现有理论公式计算与实测 K_h 值之比较与修正	99
§ 7.5 结论	102
参考文献	102

8. 被动区土体等效水平抗力系数解析

§ 8.1 引言	103
§ 8.2 被动区土体水平抗力系数的分析方法	104
8.2.1 基本思路	104
8.2.2 有限元子结构分析的基本概念	104
§ 8.3 空间因素对 K_h 值的影响	105
8.3.1 计算模型及参数	105
8.3.2 开挖过程对 K_h 值的影响	107
8.3.3 被动区土体宽度大小对 K_h 值的影响	108

8.3.4 盆式开挖过程对 K_h 值的影响	109
8.3.5 施工扰动对 K_h 值的影响	111
8.3.6 与实测曲线比较分析	111
§ 8.4 土性对 K_h 值的影响	111
8.4.1 土的工程性质	111
8.4.2 c 和 φ 值对水平抗力系数的影响	112
8.4.3 加固被动区土体对水平抗力系数的影响	113
§ 8.5 时间因素对 K_h 值的影响	113
8.5.1 土体的流变性	113
8.5.2 模型介绍及分析	114
8.5.3 时间因素对 K_h 值的影响分析	115
8.5.4 与实际工程曲线的比较及分析	116
§ 8.6 结论与展望	117
8.6.1 结论	117
8.6.2 展望	118
参考文献	118
9. 深基坑围护设计中基坑周围地表沉降预测模型及有限元数值解法	120
§ 9.1 引言	120
§ 9.2 基坑周围地表沉降的指定位移计算模型	120
§ 9.3 参数反分析及地表沉降动态预测模型	122
9.3.1 极大似然估计法建立目标函数	122
9.3.2 极大似然法参数估计的实现	123
9.3.3 地表沉降动态预测	124
§ 9.4 数值算例	125
§ 9.5 结论	127
参考文献	127
10. 总结及展望	128
§ 10.1 本书主要成果	128
§ 10.2 今后工作的展望	129

1. 绪 论

§ 1.1 引言

随着我国经济的迅猛发展,城市建设中地下空间开发利用愈来愈多,深基坑工程也愈来愈普遍,这对深基坑开挖设计理论和施工技术提出了更高的要求,要求改进设计计算理论,提高设计水平。近年来,大量的基坑工程实践证明:正确的深基坑围护结构设计,既要保证整个围护结构在施工过程中的安全,又要控制结构的变形及其周围土体的变形,以保证周围建筑和地下管线的安全。

在现行的基坑设计中,一般是假定某一工况下的土压力和弹性抗力系数是保持不变的,围护结构应力状态与开挖后围护结构暴露时间、开挖空间大小及开挖次序等施工参数无关,基坑土体应力和变形是在瞬间完成的。这种计算模式的简化,造成计算变形、内力与实测结果相差较远,常使其对工程的实际指导意义不大。随着基坑工程的不断实践,在实测中发现土压力及弹性水平抗力系数是变化的,基坑变形也随时间变化而变化,而且基坑变形除了与土性、支护结构参数相关外,还与基坑的开挖方式、时间、开挖次序、空间等施工参数相关。由此可见,现行的设计模式是一种设计观念陈旧的静态模式,该模式将设计与以后的施工过程脱节,使得施工带有很大的随意性,造成了施工状态与原始设计出现较大的偏差,因此在施工中出现了很多事故。例如,由于基坑开挖引起地面和地层的变形常常使建筑物倾斜、开裂甚至破坏,使道路开裂、下陷而影响正常使用,以及地下市政工程管网断裂等。因此深基坑工程设计一定要分析其施工进度,从而保证设计的可靠性。

另外,不管设计多么周到,在实际施工过程中,总是存在方方面面不可预见的扰动因素,使得施工进度与初始设计有所不同。为了保证真实的施工进度与初始设计过程偏离最小,施工中需要严密监视实际发生的进程(监测),进行对比分析,并采取措施,这实际上是一种控制过程。

因此,现今的深基坑开挖设计需要研究设计人员密切结合工程实践,使得初始设计具有足够满足施工进度的可靠性,在施工阶段能进行适当的现场监测和反馈分析,及时修改设计,调整施工方法和采取合理的施工控制措施,从而保证工程安全,节约造价,方便施工,缩短工期,使深基坑的设计水平有较大的进步。

§ 1.2 基坑工程设计与施工理论概述

1.2.1 基坑工程设计与施工的现状

近年来,我国出现了众多的高层、超高层建筑,市政规模也不断扩大,使地下室埋深达二十多米,而且开挖环境日趋复杂化,传统的基坑围护手段往往不再适应要求,由此各种先进的深基坑支护设计计算方法、施工工艺不断产生。

进行深基坑施工首先要进行设计和分析,即围护结构理论的研究。最早提出分析方法的是 Terzaghi 和 Peck 等人,他们早在 20 世纪 40 年代就提出了预估挖方稳定程度和支

撑荷载的总应力法^[1],随后经过不断改进,一直沿用至今。20世纪50年代 Bjerrum 和 Eide 给出了计算深基坑地板隆起的方法^[1]。到60年代开始在奥斯陆和墨西哥城软黏土深基坑中使用了仪器进行监测,此后大量实测资料提高了预测的准确性,并从70年代起,产生了相应的指导开挖的法规^[1]。从80年代开始我国逐渐步入深基坑设计与施工领域,其理论研究得到较大的发展。1986年,在由国家建设部举办的北京深基础国际学术会议上,深大基坑围护结构的设计和施工成为会议讨论的重要内容^[2]。进入90年代,为了总结我国深基坑支护设计与施工经验,开始着手编制深基坑支护设计与施工的有关法规^{[3][4]}。

随着越来越多地在大城市建筑物和其他地下或地面已有工程设施密集的地区进行深基坑的开挖,城市环境(如相邻建筑物、地下管网和地面交通)对基坑开挖期间产生不利影响的限制越来越严格,即不仅要确保边坡的稳定,而且要满足基坑周围地面的变形控制要求,于是现场测试技术和有限元等现代分析工具被广泛地用于准确估计由于开挖引起的土体和支护系统的变形。

与分析、计算方法的进步相对应的是基坑开挖支护技术发展。围护边坡稳定的传统做法是板桩支撑系统或板桩锚拉系统,但支撑往往是在开挖以后施加的,以致变形难以避免,拔出板桩时仍旧会引起边坡土体的进一步变形等。混凝土排桩以及地下连续墙支撑工艺被广泛采用后,有效避免了传统做法的缺点。开挖深度从最初的几米增加到目前的几十米。施工方法除了正作法外,还开发了逆作法并辅助一些加固等特殊施工措施(如预先降水等),基本保证了基坑施工过程的安全与稳定。

值得一提的是,原上海地铁总公司的刘建航院士和同济大学侯学渊教授借鉴国外学者的研究成果和研究方法的经验,并紧密联系上海基坑工程的实际,通过引入施工工序和施工参数作为必须的设计依据,提出了考虑时空效应的预测基坑挡墙内力和变形的设计计算理论以及相应的施工工艺^[5]。该理论在上海软土深基坑工程实践中取得了很好的成果。

随着人们在各种地质条件下深基坑方面实践经验的积累,深基坑的设计和分析及施工技术还将得到进一步发展。

上述实践表明,基坑工程这个历来被认为是实践性很强的岩土工程问题,发展至今天,已迫切需要理论来指导、充实和完善。基坑的稳定性、支护结构的内力和变形以及周围地层的位移对周围建筑物和地下管线等的影响及保护的计算分析,目前尚不能准确地得出定量的结果,但是,有关地基的稳定及变形的理论,对解决这类实际工程问题仍然有非常重要的指导意义,故目前在工程实践中采用“理论导向、量测定量和经验判断”三者相结合的方法^[6],对基坑施工及周围环境保护问题作出较合理的技术决策和现场的应变决定;在理论上,经典的土力学已不能满足基坑工程的要求,考虑应力路径(卸载)的作用、土的各向异性、土的流变性、土的扰动、土与支护结构的共同作用等的计算理论以及有限单元法理论和系统工程等软科学的研究日益引起基坑工程专家们的重视,这些理论逐渐形成了一专门的学科——基坑工程学^[6]。

1.2.2 传统设计与施工方法存在的问题

传统的围护系统设计法以开挖的最终状态为基础,采用极限平衡的分析方法,验算基坑土体在所设计的围护条件下的稳定性,这一设计方法是与开挖的实际情况不相符合的。具体说来,主要表现在下列几方面^{[7][8]}。

(1) 土压力的计算

传统的设计方法将土压力作为已知的外荷载,用以求解围护桩墙的内力及验算稳定性。实际上只有在主(被)动极限平衡状态下,土压力才是一个已知的定值,而主(被)动极限平衡状态是否达到,与围护桩墙的位移大小是密切相关的。在基坑外侧的主动区,桩墙向坑内侧位移量级达 $10.1\% \sim 0.33\% H$ (H 为开挖深度)后,就可能出现主动极限平衡状态。而在基坑内侧的被动区,桩墙向坑内侧位移量级达 $2\% \sim 5\% H$ 后,才能达到被动极限平衡状态,这样大的位移量又是围护桩墙的安全所不允许的,所以该部位作用的实际上不是被动土压力,而是某种土抗力,它随着围护桩墙的位移大小而变化,是个不确定量。即使在主动区,在主动极限平衡状态到达之前,土压力也仍然是一个未知的不确定量。在围护结构的设计中,将未知的土压力作为已知的外荷载,其设计结果的不准确性是可想而知的。

(2) 围护结构与土体的变形问题

围护系统和土体的变形是支护结构各部分与土体及外界因素相互作用的反映,是结构内力变化与调整的宏观结果。其特征既是整个系统是否正常工作最直观的标准,又是突发性事故发生的前兆,因而是施工控制的主要依据。土层的沉降及位移更直接地影响到周围建筑物、地下管线及道路的正常运营。但传统的设计法由于所采用的是刚塑性模型理论,只能进行强度与稳定分析而难以进行变形计算。虽然目前有一些经验可进行估算,但存在地区局限性并缺乏足够的理论依据。

(3) 围护结构的内力计算

传统设计中支撑力是通过开挖最终状态的系统静力平衡条件确定的。而基坑实际施工过程中,支撑是在土层开挖、挡土桩墙有一定变形后设置的。下一道支撑是在上一道支撑受力变形,基坑继续开挖后设置的,由于支撑并非同时设置,实际受力条件与设计明显迥异,其数值理所当然地偏离设计值。在传统的设计法中,围护桩墙的内力也是按开挖最终状态的土量和支撑力计算的。如前所述,侧土压力和支撑力在开挖过程中是不断变化的,桩墙的内力也将随着改变,而不可能是固定不变的。虽然近来有些工程用增量法进行考虑施工过程的内力计算,但因为在内力计算中仍然引用静力平衡条件,而无法考虑形变相容和位移协调关系,所以仍然是相当粗糙的。

(4) 土质参数的选择

众所周知,土的物理力学性质参数是随其生成条件及存在环境而改变的。即使在同一城市的不同地点,同一土层的参数也不可能是完全一样的,因而每一工程在设计计算之前都面临着土质参数的选择问题,而参数选择恰当与否对计算结果又有很大的影响。在传统设计法中,土质参数是设计者在勘察资料所提供的众多数据中凭经验选择的,其准确性难以检验。这也是许多工程设计失败的重要原因之一。

(5) 施工

传统的施工是严格地按施工图进行的,除非在出现事故或确知结构处于危险状态时,才允许采取应急措施,改变设计方案。如果说这样的施工过程对上部结构还是可以接受的,那么对于深基坑开挖来说就十分不合适了。如前所述,在深基坑支护体系的设计中,不确定的因素太多,结构的安全度难以掌握,要使设计符合实际情况是很难的,至少在目前的技术发展水平上是太难了。设计者只有两种选择,一是设计得比较保守,以确保安全;二是要冒较大的风险,以节省投资。不论作何种选择,应该说工程的安全与经济都难两全。较好的方法

应该是根据施工过程的信息反馈不断修正设计,以指导施工。

由以上分析可知,传统设计法的主要问题在于一个“静”字,以开挖的最终状态为对象,进行定值的设计。然而基坑开挖工程与其他工程的最大不同之处又在于一个“动”字,在开挖过程中,包括某些土质参数在内的各种参量,诸如侧土压力、结构内力、土体应力及变形等都在变化,而其变化规律目前还未被充分掌握,这就产生了设计结果与实际情况的差别,从而较易引发各种工程事故,或者可能造成浪费。

1.2.3 动态设计及信息化施工技术^[8]

动态设计及信息化施工技术包含密切联系的两个组成部分,即动态设计与信息化施工。本技术的基本思路是:在设计方案优化后,通过动态设计模型,按施工过程对围护结构进行逐次分析,预测围护结构在施工过程中的性状,例如位移、沉降、土压力、孔隙水压力、结构内力等,并在施工过程中采集相应的信息,经处理后与预测结果比较,从而作出决策,修改原设计中不符合实际的部分。一般而言,将所采集的信息作为已知量,通过反分析推求较符合实际的土质参数,并利用所推求的较符合实际的土质参数再次预测下一施工阶段围护结构及土体的性状,再采集下一施工阶段的相应信息。如此反复循环,不断采集信息,不断修改设计并指导施工,将设计置于动态过程中。通过分析预测指导施工,通过施工信息反馈修改设计,使设计及施工逐渐逼近实际。这一技术的初型与基本模式以往已在软基堆载预压工程中使用,即设计的预压荷载要通过施工过程中的信息反馈(例如地面沉降、地基侧向变化、孔隙水压力消散等)不断地修正,并进行施工控制,才能保证预压工程的成功。但在深基坑施工中还刚开始应用。在深基坑施工中应用这一技术显然要比堆载预压工程复杂得多。

动态设计及信息化施工技术,就其工作内容来说,主要包括三个部分,即围护方案的优化设计及预测分析;施工全过程的监测及信息的反馈处理;围护体系性状的全程动态分析。

(1) 围护方案的优化设计及预测分析

这一阶段的主要工作是根据基坑的工程地质及水文地质条件、开挖深度、施工条件等选择合适的基坑支护方案并加以优化;构造设计计算模型及利用该模型进行分析预测。

① 基坑围护方案的确定。

基坑围护体系应根据其工程地质及水文地质条件、基坑的尺寸及形状、开挖深度和施工条件等拟定若干方案,并进行技术经济比较,从而确定一个最优的围护方案。

② 计算模型。

构造合适的计算模型是动态设计的重要内容。由于传统的支护结构设计方法是以土的刚塑性理论为基础的方法,只能验算强度及稳定性而难以预测变形。所以动态设计中只能采用数值分析法,如有限单元法、边界元法等,目前多采用有限单元法。计算中土体的性状可对不同土类选用合适的本构模型,如线弹性模型、非线性弹性模型及弹塑性模型等;对桩墙体也应选用合适的材料模型;一般对钢筋混凝土桩墙可采用线性弹性本构模型。为考虑土体与桩墙接触面的摩擦特性,还应设置接触面单元。计算结果的准确性还取决于模型参数的选择,因此,在进行工程勘察时应进行相应的试验以提供模型参数。如果基坑开挖时需降低地下水位,设计时还要进行降水计算。

③ 预测分析。

预测分析是动态设计的重要步骤。在构造了计算模型后,即可应用该模型进行预测分析,内容可包括支护结构、土体及相邻建筑物的运行状态预测、风险性预测和效益预测。而