



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

深基坑支护理论与应用

刘剑平 朱浮声 王青 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

深基坑支护理论与应用

刘剑平 朱浮声 王 青 编著

北 京

冶金工业出版社

2013

内 容 提 要

本书在深基坑支护设计方法,合理地选择支护形式和施工工艺,协调好安全、经济、可行三者之间的关系等方面开展了相关研究。全书共分6章,主要内容包括:绪论、深基坑支护方案优选、深基坑排桩支护结构的参数优化、深基坑土钉支护结构的参数优化、深基坑水泥土墙支护结构的参数优化、结论与展望。

本书为高等学校土木工程专业研究生教材,也可供岩土工程、边坡工程、地铁工程等领域的科研和施工人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深基坑支理论与应用/刘剑平,朱浮声,王青编著.
—北京:冶金工业出版社,2013.6
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5024-6346-5

I. ①深… II. ①刘… ②朱… ③王… III. ①深基坑
支护—高等学校—教材 IV. ①TU46

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第125644号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6346-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2013年6月第1版,2013年6月第1次印刷

148mm×210mm;5.875印张;210千字;176页

19.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

深基坑开挖与支护及相关理论是各类建筑和地下工程面对的重要问题之一。随着深基坑开挖越来越深,深基坑支护所需投入的费用也越来越大,这就给工程界提出了新的问题和挑战。由于支护工程方案的非唯一性,在深基坑工程中采用优化设计已成为技术发展的必由之路。因此,深入讨论深基坑支护设计方法,合理地选择支护形式和施工工艺,协调好安全、经济、可行三者之间的关系,是进行深基坑支护设计的关键。《深基坑支护理论与应用》在此行业背景下应运而生。本书重点论述了深基坑安全等级及变形控制等级方案优选理论、根据深基坑支护结构参数优化的需要对标准遗传算法(SGA)所做的改进,以及排桩支护、土钉支护及水泥土墙等三种深基坑支护结构的参数优化。利用本书提出的支护参数优化设计方法和自行开发的改进混合遗传算法(IHGA)计算机程序,分别结合工程实例进行了深基坑排桩支护、土钉支护和水泥土墙支护结构参数的优化设计。通过合理建模并采用IHGA进行优化,不仅保证了深基坑支护工程的稳定性,同时大大降低了工程材料成本。

全书共分6章。

第1章绪论。主要介绍深基坑支护工程的特点、支护方法、当前存在问题,基坑工程研究的历史与现状,基坑支护工程优化设计方法及研究现状。

第2章深基坑支护方案优选。主要讲述优化设计基本原理、深基坑支护方案优选方法、深基坑支护工程的概念设计、深基坑支护结构选型的原则与规定、方案初选、方案的模糊综合评判优选、优选的简化处理、工程实例。

第3章深基坑排桩支护结构的参数优化。包括受力与变形计

算、稳定性计算、优化设计模型的建立、优化设计算法、工程实例。

第4章深基坑土钉支护结构的参数优化。讲述影响基坑支护涉及的主要影响因素、土钉墙土压力计算、土钉支护结构的局部稳定性验算、土钉支护结构整体稳定性验算、优化设计模型的建立、工程实例。

第5章深基坑水泥土墙支护结构的参数优化。包括水泥土墙支护结构受力计算、水泥土墙支护结构变形计算、水泥土墙支护结构稳定性验算、优化设计模型的建立、工程实例。

第6章结论与展望。对本书研究工作进行了总结,对今后深基坑支护研究进行了展望。

本书是作者多年来在深基坑支护领域潜心研究的成果总结,在内容上既涵盖仍然被广泛应用的传统知识,又尽可能体现本学科较为成熟的最新研究成果。其编写的宗旨是,满足当代科学技术发展对深基坑开挖与支护及相关理论的专业知识的需求。

本书的出版得到东北大学教务处教材出版资金的资助,在此表示衷心感谢。同时感谢教务处邱魁处长、肖丽妹老师的支持与帮助。

在编写过程中,刘斌教授对书稿进行了认真细致的修改、评审,提出了许多宝贵意见和建议;顾晓薇教授为本书的出版做了大量的工作,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请广大读者批评指正,也真诚欢迎广大读者就相关问题与作者进行广泛的交流与讨论。

作者

2013年5月

于东北大学

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
冶金建设工程	李慧民 主编	35.00
建筑工程经济与项目管理	李慧民 主编	28.00
建筑施工技术(第2版)(国规教材)	王士川 主编	42.00
现代建筑设备工程(第2版)(本科教材)	郑庆红 等编	59.00
土木工程材料(本科教材)	廖国胜 主编	40.00
混凝土及砌体结构(本科教材)	王社良 主编	41.00
岩土工程测试技术(本科教材)	沈 扬 主编	33.00
工程地质学(本科教材)	张 荫 主编	32.00
工程造价管理(本科教材)	虞晓芬 主编	39.00
土力学地基基础(本科教材)	韩晓雷 主编	36.00
建筑安装工程造价(本科教材)	肖作义 主编	45.00
土木工程施工组织(本科教材)	蒋红妍 主编	26.00
施工企业会计(第2版)(国规教材)	朱宾梅 主编	46.00
工程荷载与可靠度设计原理(本科教材)	郝圣旺 主编	28.00
土木工程概论(第2版)(本科教材)	胡长明 主编	32.00
土力学与基础工程(本科教材)	冯志焱 主编	28.00
支挡结构设计(本科教材)	汪班桥 主编	30.00
居住建筑设计(本科教材)	赵小龙 主编	29.00
Soil Mechanics(土力学)(本科教材)	缪林昌 主编	25.00
岩石力学(高职高专教材)	杨建中 主编	26.00
建筑设备(高职高专教材)	郑敏丽 主编	25.00
岩土材料的环境效应	陈四利 等编著	26.00
混凝土断裂与损伤	沈新普 等著	15.00
建设工程台阶爆破	郑炳旭 等编	29.00
计算机辅助建筑设计	刘声远 编著	25.00
建筑施工企业安全评价操作实务	张 超 主编	56.00
现行冶金工程施工标准汇编(上册)		248.00
现行冶金工程施工标准汇编(下册)		248.00

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 深基坑支护工程的特点	3
1.3 深基坑支护方法	6
1.3.1 放坡开挖	6
1.3.2 土钉支护结构	7
1.3.3 内支撑支护结构	8
1.3.4 柱列式挡土支护结构	9
1.3.5 拉锚式支护结构	10
1.3.6 地下连续墙	11
1.4 深基坑支护工程当前存在的问题	13
1.5 基坑工程研究的历史和现状	14
1.5.1 土压力	14
1.5.2 土与支护结构相互作用分析	15
1.5.3 基坑开挖与支护的数值模拟	16
1.6 基坑支护工程优化设计方法及研究现状	17
1.6.1 设计准则	17
1.6.2 计算理论与设计方法	19
1.6.3 优化设计方法	21
1.6.4 深基坑优化设计面临的难题	22
1.7 本书主要内容	22
2 深基坑支护方案优选	25
2.1 概述	25
2.2 优化设计基本原理	26

2.3	深基坑支护方案优选方法	29
2.4	深基坑工程的概念设计	30
2.5	深基坑支护结构选型的原则与规定	33
2.5.1	深基坑支护结构选型的基本原则	33
2.5.2	深基坑支护结构选型的一般规定	33
2.6	方案初选	34
2.6.1	基坑安全等级的确定	34
2.6.2	基坑变形控制等级的确定	35
2.7	深基坑支护方案的模糊综合评判优选	36
2.7.1	建立因素集	37
2.7.2	建立备择集	37
2.7.3	各方案同步评判	37
2.7.4	一级模糊综合评判	38
2.7.5	二级模糊综合评判	39
2.7.6	深基坑支护方案评价综合指标体系的确定	40
2.7.7	指标因素集权重的确定	42
2.8	深基坑支护优选的简化处理	43
2.8.1	优化指标和其权重值的确定	44
2.8.2	指标相对优属度矩阵 $\hat{k}$ 的确定	44
2.8.3	深基坑支护方案优选方程的确定	45
2.9	工程实例	46
2.9.1	工程概况	46
2.9.2	地质条件	48
2.9.3	深基坑支护方案初步选择	49
2.10	小结	57
3	深基坑排桩支护结构的参数优化	59
3.1	概述	59
3.2	受力与变形计算	60
3.2.1	土压力计算	60

3.2.2	刚度矩阵的形成	61
3.2.3	荷载列阵	63
3.2.4	边界条件	64
3.2.5	单元内力	65
3.2.6	全过程内力及变形分析	66
3.3	稳定性计算	67
3.3.1	基坑底部承载力稳定性验算	67
3.3.2	整体稳定性验算	68
3.3.3	抗管涌验算	69
3.3.4	踢脚稳定性验算	70
3.4	优化设计模型的建立	71
3.4.1	目标函数	71
3.4.2	优化设计变量	72
3.4.3	约束条件	73
3.5	优化设计算法	73
3.5.1	离散变量优化设计的应用概况	73
3.5.2	离散变量优化设计方法的新发展	75
3.5.3	SGA 的特点	78
3.5.4	SGA 的理论基础	80
3.5.5	SGA 应用步骤	84
3.5.6	符号串的编码与解码	84
3.5.7	个体适应度的评价	87
3.5.8	遗传算子	88
3.5.9	SGA 的运行参数	91
3.5.10	SGA 的主要缺点	92
3.5.11	SGA 的改进措施	94
3.5.12	三等分割算法	96
3.5.13	三等分割算法与 SGA 的混合	96
3.6	工程实例	99
3.7	小结	102

4 深基坑土钉支护结构的参数优化	104
4.1 概述	104
4.2 影响基坑支护设计的主要影响因素	106
4.2.1 环境因素	107
4.2.2 力学因素	109
4.3 土钉墙的土压力计算	110
4.4 土钉支护结构的局部稳定性验算	111
4.4.1 土钉的总水平拉力确定	111
4.4.2 土钉轴力的弹塑性分析	112
4.5 土钉支护结构的整体稳定性验算	117
4.5.1 极限平衡法	117
4.5.2 通用条分法	121
4.5.3 有限元法	129
4.5.4 土钉支护结构的设计流程	129
4.6 优化设计模型的建立	130
4.6.1 目标函数	130
4.6.2 优化设计变量	130
4.6.3 约束条件	132
4.7 工程实例	133
4.8 小结	136
5 深基坑水泥土墙支护结构的参数优化	138
5.1 概述	138
5.2 水泥土墙支护结构受力计算	139
5.2.1 土压力系数计算	139
5.2.2 水平荷载计算	139
5.2.3 水平抗力计算	141
5.2.4 水泥土墙自重计算	142
5.2.5 墙体强度验算	142

5.3 水泥土墙支护结构变形计算	143
5.3.1 下墙体的水平位移和转动	143
5.3.2 上墙体的弹性挠曲变形	146
5.3.3 墙顶总位移	146
5.4 水泥土墙稳定性验算	147
5.4.1 抗倾覆稳定性验算	147
5.4.2 抗滑移稳定性验算	147
5.4.3 整体稳定性分析	148
5.4.4 基坑抗隆起验算	149
5.5 优化设计模型的建立	150
5.5.1 目标函数	150
5.5.2 优化设计变量	151
5.5.3 约束条件	151
5.6 工程实例	153
5.7 小结	155
6 结论与展望	157
6.1 结论	157
6.2 展望	159
附录 程序的使用说明	161
参考文献	165

1 绪 论

1.1 引 言

随着城市建设的迅猛发展,有限的地皮难以满足工程项目日益增长的需求,于是人们转向高空和地下发展建筑空间。有人预言,21 世纪将出现城市地下空间开发和利用的高潮^[1]。无论是高层建筑、超高层建筑,还是地下结构,基坑开挖与支护都是需要面对的重要问题。基坑工程是集地质工程、岩土工程、结构工程和岩土测试技术等于一体的系统工程,其中既涉及场地工程、水文地质条件和土体的强度与稳定,又涉及支护结构的内力、变形以及土与结构的共同作用,同时还涉及环境影响评价等一系列问题。由于基坑工程的实践总是走在理论研究前面,这使得对它的分析与设计水平相对滞后,从而在一定程度上阻碍了它的进一步发展,而且其安全性和经济性也缺乏足够的理论保证。因此,对基坑工程的设计理论和方法进行全面系统的研究,具有重要的理论和现实意义。

基坑工程是一个古老而又具有时代特点的岩土与结构工程问题。放坡开挖和简易木桩支护可以追溯到远古时期。随着人类文明的进步,人们为改善生存条件而频繁从事的土木工程活动促进了基坑技术的发展。随着国内外大量高(超高)层建筑及地下工程的兴建,相应的基坑工程数量不断增多,对其要求越来越高,出现的问题也越来越多,这为基坑的合理设计和施工提出了许多紧迫而重要的研究课题^[2]。

深基坑支护是基础工程施工中一个相对年轻的课题,同时也是尚未得到很好解决的岩土工程问题之一,深基坑工程问题实质上归根结底就是稳定性和变形的问题。从最早的放坡开挖,到后来的由于场地的限制而设计附加结构体系的支护系统开挖,深基坑工程已

由土力学经典课题变为 20 世纪 60 年代以来岩土工程界面临的一个重要课题。深基坑支护工程既涉及土力学中的土压力问题,又包含了结构的刚度、变形与稳定性问题,同时还涉及土与支护结构的共同作用。对这些问题的认识及对策的研究,是随着土压力理论、计算分析技术、测试仪器以及施工机械、施工技术的进步而逐步完善的。

随着我国城市高层建筑的大量兴建,建筑越来越呈现出向高空和地下发展的趋势,因而建筑物地下室的层数越来越多,基坑开挖越来越深,而开挖所需投入的费用也越来越大。这就给工程界提出了新的问题和挑战,即如何总结原有的工程经验,发展新的理论依据和探索新的施工工艺,以满足这些问题的解决。基坑开挖及基础工程的费用,在整个工程成本中占有很大的比例,因此,合理地选择支护形式,采用相应的施工工艺,协调好安全、经济、可行三者之间的关系,是进行深基坑支护设计的关键。

基坑支护工程已成为当前岩土工程领域十分关注的工程热点,也是提高工程质量、减少工程事故的重点,同时还是岩土工程领域的难点(其技术复杂、综合性很强),主要表现为^[3~6]:

(1) 基坑支护工程随着社会经济发展逐年增多,问题也日显突出。

(2) 基坑支护事故不仅造成极大的经济损失,而且还会带来一定的社会负面影响。

(3) 基坑支护工程实施的途径并非唯一。

(4) 基坑支护设计是基坑支护成败的关键,直接制约着基坑工程的安全和经济性。

基坑支护实施途径的非唯一性主要表现在^[7]:

(1) 支护方案的非唯一。目前我国工程实践中应用的基坑支护形式不下数十种,如果从构成基坑支护方案的各子项的组合来看,支护方案多达 160 多种。采用何种支护方案,直接影响着支护工程的成败和投资的效益。

(2) 设计理论的非唯一。有关基坑支护工程的设计理论很多,

从设计准则上看,有强度和稳定性设计准则、变形控制设计方法和极限分析理论。从设计方法上看,有常规设计方法、弹性地基梁法和有限元法等。不同的设计理论和设计方法有不同的适用条件,相应地,其设计结果也可能相差悬殊,特别是基坑支护工程实践往往超越其设计理论的发展,从而导致实施过程中一些设计理论的失败。

(3) 支护结构参数的非唯一。再好的设计最终将落实到具体的设计参数取值上。同一支护方案,由于设计参数选用的不同,既可能失败也可能成功,或是偏于保守造成浪费。

由于支护工程实施的非唯一性,在基坑工程设计中必须采用优化设计,优化设计是基坑支护工程发展的必由之路。因此,深入讨论基坑支护设计方法,对更好地设计基坑支护结构,减少基坑工程事故的发生有着重要的意义。

1.2 深基坑支护工程的特点

在建设可持续发展城市的过程中,城市地下空间的开发与利用有着非常重要的作用,它既是调节城市土地使用结构、扩充城市空间容量的重要手段,也是建立现代化城市综合交通体系、防灾救灾综合空间体系的重要途径,同时也是城市基础设施现代化建设的主要方法。自20世纪90年代以来,岩土深基坑围护问题已经成为我国建筑工程界的热点问题之一,总的来说,其具有深、差、密、紧、多等特点,即基坑越挖越深;工程地质条件越来越差;基坑四周已建或在建高大建筑物密集或紧靠重要市政道路及设施;施工工期紧;工程事故多等。软土地区的深基坑还具有地下水位高、基坑变形的时空效应明显等特点^[8]。

深基坑支护工程是一个高难度的岩土工程技术课题,其影响因素较多,与场地条件、地层情况、水文地质条件、施工管理、现场监测及相邻建筑场地的施工相互影响等密切相关,同时深基坑支护工程又是一个复杂的、与众多学科相关的交叉学科,涉及土力学、水文地质、工程地质、结构力学、施工技术 etc 知识,它要求研究的

问题较多,不但要研究土的强度、变形、稳定性问题,还要研究土与结构的相互作用;同时还需研究施工方法及施工过程对岩土体的影响和制约,变形反馈对结构设计的控制等重要问题,因此,深基坑支护工程的设计与施工具有一定的难度^[9]。如设计方案或施工方法不当,容易导致事故的发生。这里简单地以施工过程对设计的影响为例,来说明深基坑支护设计的不确定性和复杂性。一般来说,除了某些与建筑物基础或地下室结合成整体的支护结构外,基坑支护结构属于临时性工程设施,从构筑到退出工作,其工作状态是动态的或者说是不断变化的,因此,要正确分析支护结构在不同工况时的受力状态与变形情况是有一定难度的。从力学的观点来看,场地可以看作本构关系比较复杂的多相半无限体,在基坑开挖之前,半无限体处于平衡状态,基坑开挖打破了原来的平衡,从而使基坑周围一定的范围内土体应力场与渗透场失衡。基坑支护的目的,便是通过支护作用,在基坑开挖的情况下,使土体应力场与渗透场重新处于平衡或动态平衡状态。显然,要精确分析这一类问题,是十分困难的,这不仅在于力学模型的复杂,更是由于水土参数具有较大的不确定性与离散性。从这个简单地分析可以看出,目前基坑支护系统的计算方法都具有明显的近似性,这也给基坑支护设计带来了不确定性。不过虽然深基坑支护工程具有这些复杂性,但它在国内还是蓬勃地发展起来了。人们通过大量的实际应用,总结出了很多的经验和教训,并已经编制了深基坑支护设计与施工的多部国家行业标准及地方的相关法规。

我国从20世纪80年代初开始逐步进入深基坑设计与施工领域,20世纪90年代以后,基坑支护工程在我国开始大范围涌现,经过十几年的发展,目前我国深基坑工程具有以下特点^[10]:

- (1) 建筑趋向高层化,基坑开挖深度越来越深。
- (2) 基坑开挖面积大,长度与宽度有的达数百米,给支撑系统带来较大的难度。
- (3) 在软弱的土层中,基坑开挖会产生较大的位移和沉降,对周围建筑物、市政设施和地下管线产生严重威胁。

(4) 基坑施工工期长、场地狭窄, 降雨、重物堆放等对基坑稳定性影响很大。

(5) 在相邻场地的施工中, 打桩、降水、挖土及基础浇筑混凝土等工序会相互制约与影响, 增加协调工作的难度。

(6) 基坑支护形式具有多样性。迄今为止, 支护形式有数十种。

以结构受力特点来划分, 可将基坑支护类型划分为以下三类:

1) 被动受力支护结构。其特点为支护结构依靠自身的结构刚度和强度被动地承受土压力, 限制土体的变形, 从而保持土体边坡安全稳定。常用的方法多为传统的支护技术, 例如, 人工挖孔桩、机械钻孔桩、钢板桩、钢管桩、支撑围护结构及地下连续墙体。

2) 主动受力支护结构。其特点为通过不同的途径和方法提高土体的强度, 使支护材料与土体形成共同作用体系, 从而达到支护的目的。常用的方法有土钉支护技术和软土地区采用的搅拌桩技术等。

3) 组合形式。组合形式是将前两种支护方法同时应用到同一个基坑工程中。这种支护形式已经在许多工程中成功应用, 表现出很大的优势和潜力。

由于基坑支护的多样性, 所以基坑支护工程的施工途径是非唯一的。基坑支护设计是基坑支护成败的关键, 直接制约着基坑工程的安全和经济。正因如此, 基坑支护工程已成为当前岩土工程领域十分关注的工程热点, 也是提高工程质量、减少工程事故的重点。

由于支护工程实施的非唯一性, 在基坑工程设计中必须采用优化设计, 优化设计是基坑支护工程发展的必由之路。当前, 在实际工程中, 深基坑的支护结构设计存在着两种极端的现象: 一是由于设计和施工方面的原因而导致深基坑工程事故, 造成重大经济损失; 二是支护结构的选择和设计极为保守, 造成浪费。后者往往更加难以引起人们的注意。因此, 深入讨论基坑支护设计方法, 对更好地设计基坑支护结构, 减少基坑工程事故的发生有着重要的意义。

对基坑工程的研究可以从不同的角度进行分类。从研究手段来区分, 可以分为试验研究、理论分析和数值计算三种。试验研究是通过大量基坑进行测试与监测, 总结出一套适合某一地区的支护

和开挖方法;理论分析是以岩土力学、结构力学以及最优化方法为基础对基坑体系进行深入的研究,优化确定基坑支护工程的控制参数,从而指导工程设计;数值计算则是计算机出现后发展起来的一种方法,它以岩土力学、计算力学以及计算机辅助设计为基础,通过具体数据对基坑开挖和支护进行数值分析,是目前比较常用的研究方法。三种方法各有优缺点,同时使用,可以相互弥补不足,但遗憾的是这三者常常都是分开进行的。从研究内容来区分,可以分为基坑稳定性分析、基坑变形分析、基坑中土与支护结构相互作用分析、基坑渗流分析、基坑空间效应分析以及基坑优化设计和基坑边坡土体参数的反分析等等,由于计算手段的提高,许多以前无法进行分析的问题现在也都可以在一定程度上得到解决^[11]。

1.3 深基坑支护方法

关于深基坑开挖和支护,根据场地及施工条件,供选择的方法很多。在众多的方法中,人工挖孔桩资历最深,已有 100 余年的历史了,经逐步发展演化才出现了钻孔桩、钢板桩、预制钢筋混凝土桩、地下连续墙,以及深层搅拌桩和各种支撑等^[12,13]。20 世纪 70 年代以来,世界各国在上述传统方法中大量引入锚固技术,出现了桩锚、板锚、管锚、撑锚等联合支护结构形式,获得了广泛的应用。国际上著名的美国西雅图科拉蒙亚(Columoia)大厦基坑(1984),国内北京地铁西直门车站基坑(1976),都是采用工字钢板加锚杆成功支护的。进入 90 年代,深基坑喷锚网支护法进入建筑市场,以及土钉墙方法的广泛应用,使得可供选择的深基坑支护方法更加丰富。

1.3.1 放坡开挖

图 1-1 为放坡开挖示意图,放坡开挖的特点是造价经济,因此,其是设计时应首先考虑的支护形式。该方法适用于地下水少、基坑土质条件较好的场地。缺点是需要较大的工作空间,雨水多时易发生事故。放坡坡高确定的合理与否,决定着坑壁的稳定性 and 挖方量