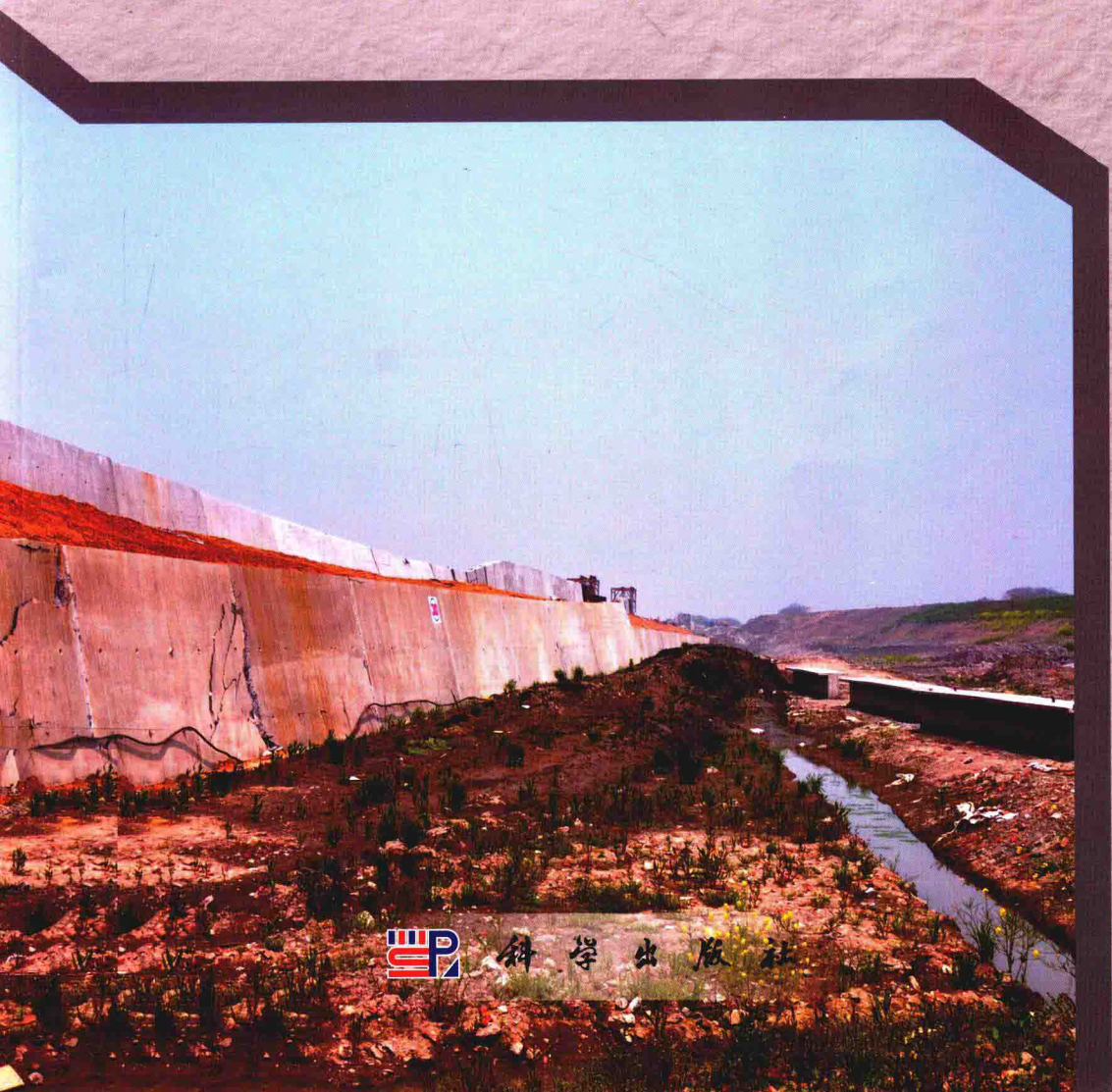


挡土墙和基坑围护结构土压力 理论研究与工程应用

王保田 殷德顺 著



科学出版社

挡土墙和基坑围护结构土压力 理论与工程应用

王保田 殷德顺 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对挡土墙和基坑围护结构上作用的土压力理论、模拟以及工程监测问题进行系统的研究. 主要内容包括作用于支护结构上的土压力, 土压力与支护结构变形的关系, 基坑开挖条件下土的本构关系及数值模拟, 基坑开挖过程有限元模拟实例及规律性分析, 基坑工程施工期安全监测以及基坑安全监测方法等. 另外, 还从理论、规范和实践等方面探讨了挡土结构设计时的土压力问题. 许多研究成果来自工程实践基础上的理论升华, 而且部分成果已经在南京地区的多个基坑工程中应用, 现场观测结果表明基坑围护结构稳定、安全.

本书可供岩土工程、水利工程和工程力学领域的科研工作者及设计施工技术人员参考, 也可作为高等院校岩土工程、水利工程和工程力学专业研究生参考书.

图书在版编目(CIP)数据

挡土墙和基坑围护结构土压力理论与工程应用/王保田, 殷德顺著. —北京: 科学出版社, 2015.5

ISBN 978-7-03-044249-9

I. ①挡… II. ①王… ②殷… III. ①挡土墙-土压力-研究 ②基坑工程-围护结构-土压力-研究 IV. ①TU432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 094957 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 胡小洁

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 5 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 5 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 214 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

人生苦短,转眼已过 50 岁了,从大别山区到金陵古城求学,让我与河海大学结下一生的缘分。从 1997 年承担南京太阳宫深基坑施工期安全监测开始,本课题组陆续承担了南京地铁、无锡地铁等多项重点工程的深基坑安全监测任务,还进行了几座大型桥梁的桥头承台填土土压力与位移研究。结合这些工程,进行了比较系统的室内试验和数值分析工作,研究了土压力发生发展规律。本书将这 10 多年的工作进行初步总结。

进入 21 世纪以来,我国加快了城市化进程,10 多个大城市都宣称要建立国际化大都市,许多大中城市都在成片建设高层建筑,甚至你追我赶地建所谓地标性高层建筑,这些建筑同时加快了地下空间开发。同时,我国地铁建设在 10 多个城市快速铺开,过江隧道、穿海隧道日益增多。到 2011 年底,我国高速公路通车里程达到 8.5 万千米。这些基础工程建设,催生大量基坑工程,挡土结构变形和土压力研究具有突出的学术和实践价值。

本书在李守德、张文慧、殷德顺、葛卫春、姜志强、王培清、叶文武等研究生的硕士学位论文和江苏省交通科技项目“施工工艺对挡土结构土压力的影响”(项目编号:04Y04)的基础上完成。共分 7 章,第 1 章主要介绍我国基坑工程的发展和挡土结构类型与发展趋势。第 2 章介绍了作用在支护结构上的土压力理论和规范的计算方法及土压力与挡土结构变形之间的相互关系。第 3 章依据室内试验和现场测试结果,研究了挡土结构土压力随支护结构变形发展的规律,提出了土压力与支护结构位移的相互关系理论公式。第 4 章研究基坑工程挡土结构的土压力与位移的关系,根据本课题组提出的土压力与挡土结构变形之间的相互关系的本构模型,进行了基坑工程土压力与支护结构位移相互作用数值分析,为挡土结构设计提供了合理建议。第 5 章以有限元分析手段,考虑基坑开挖过程中挡土结构变形与土压力发展相互作用和基坑三维效应作用。第 6 章根据课题组多年来的基坑安全监测经验,提出了基坑安全监测内容、布置设计方法和报警值控制标准。第 7 章针对安全监测中变形、应力、孔隙水压力监测常用仪器,介绍了各仪器的原理、使用方法、使用注意事项和仪器精度。

本书由王保田负责总体布局大纲,殷德顺负责统稿。具体执笔分工为:王保田编写了第 1 章、第 2 章和第 5 章,殷德顺编写了第 3 章和第 4 章,张福海编写了第 6 章和第 7 章。

本书的出版得到了教育部博士点基金 (2010009411002)、河海大学重点学科建设和江苏省优势学科平台建设经费的资助, 在研究过程中得到了河海大学堤坝工程与岩土力学教育部重点实验室和江苏省岩土工程技术工程中心的大力支持. 作者感谢河海大学长期培养和优良的学术研究氛围, 在未来岁月将以更努力的工作和高质量的研究成果回报学校和我们的祖国. 由于作者水平有限, 本书存在很多错误和遗漏在所难免, 恳请读者不吝赐教, 以利于作者提高. 欢迎国内外同行与作者共同探讨, 为我国地下工程和边坡防护工程建设作出贡献.

王保田

2014 年秋

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 基坑工程的发展	1
1.2 基坑围护结构的类型	2
1.3 基坑围护结构设计方法	4
1.4 深基坑安全监控和信息化施工	12
参考文献	13
第 2 章 挡土结构和支护结构上的土压力	16
2.1 概述	16
2.2 土压力理论	17
2.3 朗肯土压力理论	19
2.4 库仑土压力理论	28
2.5 静水压力和有效应力	35
2.6 永久挡土结构物上的土压力	41
参考文献	44
第 3 章 土压力与支护结构变形的关系	45
3.1 概述	45
3.2 侧向卸载试验	47
3.3 考虑土体变形的支护结构土压力	54
3.4 挡土墙后填土碾压的土压力位移分析	59
参考文献	66
第 4 章 基坑开挖条件下土压力变化规律与本构模型	67
4.1 概述	67
4.2 基坑开挖过程中土体的应力路径与土压力分析	68
4.3 不同应力路径下的非线性弹性模型	70
4.4 接触面单元	82
参考文献	89
第 5 章 基坑开挖土压力与围护结构变形规律有限元分析	91
5.1 不同方向卸载对支护位移和土压力的影响	91
5.2 支护水平位移对支护结构土压力的影响	96
5.3 考虑空间效应的土压力有限元分析及算例	99

参考文献	114
第 6 章 基坑工程施工期土压力与变形安全监测实例	116
6.1 概述	116
6.2 监测范围	117
6.3 测点布置	118
6.4 监测项目的报警值	121
6.5 基坑安全监测测点布设方案设计工程实例	123
参考文献	130
第 7 章 基坑安全监测方法与工程实例	132
7.1 概述	132
7.2 水平位移监测方法	132
7.3 竖向变形监测方法	138
7.4 周边建筑物倾斜、裂缝和地下水位监测方法	142
7.5 围护结构内力与土压力监测方法	146
7.6 工程实例 —— 基坑安全报警文件	159
参考文献	160
索引	162

第 1 章 绪 论

1.1 基坑工程的发展

我国自 20 世纪 90 年代以来兴建了大量的高层建筑、道路桥涵及地下管线等公共设施,另外,近年来我国许多大城市都在建设和规划建设地铁项目,相应地出现了大量的深基坑施工工程问题,如基坑开挖、支护、降水等,而且基坑规模和深度都在不断加大,随之出现了许多与深基坑开挖有关的新的岩土工程课题。尤其在建筑物密集的大城市闹市区、地下管线密集、交通要道等施工条件苛刻的区段,深大基坑的开挖、降水、支护体系的安全稳定性以及由此产生的城市环境岩土问题,如周围地表及地下管线沉降、周围建筑物倾斜开裂等,使地下结构的设计施工成为工程建设中的重点、难点和热点问题。目前,我国的工程技术人员在基坑的设计、计算、施工技术和监测手段等方面已经取得了长足的进步,获得了丰富的经验。进入 21 世纪后,随着计算机技术水平的不断进步、基坑测试技术的不断创新,基坑工程将会进入一个新的快速发展时期,特别是在基坑支护体系的稳定、变形以及考虑地下水作用等流、固耦合问题的研究将成为基坑工程新的发展方向。

基坑工程主要包括围护体系设计、施工、开挖。基坑支护体系的稳定和变形研究,主要包括下述几方面:围护体系的合理形式及适用范围、围护结构的设计及优化、围护结构的变形以及基坑开挖对周围环境的影响等。但是基坑工程往往具有很强的整体性和技术综合性,是一个复杂的系统工程,它涉及岩土、结构、力学、渗流以及水文地质和工程地质等众多学科,并要考虑土与结构的共同作用,它集稳定、变形、渗流以及时空效应、环境效应于一体。目前,深基坑围护结构设计理论虽然有了很大的发展,但仍存在诸多不足。如开挖过程的数字模拟、本构模型中参数的合理选取等还需进一步研究。在基坑整体稳定分析中,往往很少考虑承压水和渗透力,甚至考虑得不对,因此,需要更严密系统地考虑和处理问题。另一方面,基坑工程还表现出明显的区域性和个性,大多数情况下是临时工程,而有时却又是永久工程,因此,安全等级经常取用不合理。在控制基坑工程安全的主要因素方面,有的基坑工程由于土压力引起围护结构的稳定性丧失是主要矛盾,有的由于地下水渗流引起的水土流失破坏是主要矛盾,有的控制基坑周围地面变形量是主要矛盾等。目前土压力理论还很不完善,静止土压力一般按经验确定或按半经验公式计算,主动土压力和被动土压力按库仑 (1776) 土压力理论或朗肯 (1857) 土压力理论计算,这

些都出现在 Terzaghi(太沙基)有效应力原理问世之前。在考虑地下水对土压力的影响时,是采用水土压力分算,还是采用水土压力合算较为符合实际情况,在学术界和工程界认识还不一致。作用在围护结构上的土压力与挡土结构的位移有关,基坑围护结构承受的土压力一般是介于主动土压力和静止土压力之间或介于被动土压力和静止土压力之间。另外,土具有蠕变性,作用在围护结构上的土压力还与作用时间有关。因此强调基坑工程地域性和个性是很重要的。基坑围护结构的设计施工、开挖以及位移应力监测都要因地制宜,不同地区的工程经验可以借鉴,但是绝不能照抄照搬。

随着城市建设的发展,高层建筑建设项目已越来越多。相应地,产生了大量的深基坑工程,且规模和深度亦在不断加大。由于城市施工现场的限制,基坑施工往往不可能采用大放坡开挖施工,而是采用挡土支护下垂直开挖施工。影响基坑支护结构变形的因素有很多,目前还不能根据理论模型准确地计算其变形,因此,对基坑支护工程进行变形监测显得十分必要。只有及时提供准确的变形监测数据,才能保证设计人员正确地进行综合分析和修改施工方案,确保施工的安全和质量。

1.2 基坑围护结构的类型

基坑的围护结构主要承受基坑开挖卸载所产生的土压力和水压力,并将此压力传递到支撑,是保证基坑在开挖到回填期间稳定的一种临时支挡结构。

1. 围护结构类型

围护结构类型可以归纳为如下六种:

(1) 板桩式围护结构。又可分为:钢板桩、钢管桩、钢筋混凝土板桩、主桩横挡板等。板桩式围护结构施工方便、工期短、造价低,很多还可以重复使用。但是它们止水性差,而且打桩时容易破坏土体的强度,引起土体发生移动,导致周围地表发生较大沉降。

(2) 柱列式围护结构。按照桩的施工方式不同,最广泛使用的是钻孔灌注桩和挖孔灌注桩两种,这是目前运用得比较多的两种围护形式。它的特点是施工噪声和振动小,桩体刚度大,可以就地浇筑施工,对周围环境的影响小。该工艺适合软弱土层使用,施工方便,造价低廉。不过它的整体性差,所以一般在围护桩的顶部加一道圈梁,不但可以增加围护结构的刚度,还可以增强围护桩之间的整体性。柱列式围护结构止水性比较差,在地下水位高的地方通常要加止水帷幕,一般用水泥土搅拌桩作止水帷幕。

(3) 地下连续墙。地下连续墙是目前为止整体性最好的围护结构,它在设计理论和施工技术上都已经取得了很大的成就。地下连续墙具有以下优点:①可减少工

程施工时对环境的影响,施工时振动小,能够紧邻相近的建筑及地下管线施工,对沉降及变位较易控制;②墙的墙体刚度大,整体性好,因而结构和地基变形都很小,既可用于超深围护结构,也可用于主体结构。地下连续墙围护结构整体连续,加上现浇墙壁厚度一般不小于30cm,故耐久性好,抗渗透性能也很好;③可实行逆作法施工,有利于施工安全,并加快施工进度,降低造价。

但是地下连续墙也存在着很多的缺点:弃土多、废泥浆多,切处理难度较大,不但要增加工程费用,还会造成环境污染。开挖时遇到地下水位高的透水性土层时,护壁泥浆浓度急剧下降,容易引起槽壁坍塌。地下连续墙造价通常比其他围护结构高,因此,通常仅在工程安全性要求高、基坑很深或者软塑和流塑性的黏性土层中采用。

(4) 自立式水泥土挡墙。主要分为:深层搅拌桩挡墙、高压旋喷桩挡墙。适合于开挖深度小于7m,对环境保护要求不高的软土地区的基坑工程。它的主要特点是:施工噪声低、振动低、止水性能较好、造价低。但由于围护结构抗折强度低,只适合于开挖比较浅的基坑。

(5) 组合法。目前工程上用得比较多的是SMW工法。SMW工法是指在水泥土搅拌桩中加入工字形型钢,这样不但可以利用水泥土搅拌桩很好的抗渗性,而且由于加入了工字形型钢,使得围护结构的强度有了很大的提高。它的止水性能好,适合于各种土层,在一定方式下可以取代地下连续墙,且费用比连续墙低,是一种很有发展前途的围护形式。

(6) 沉箱法。具有施工占地面积小、超挖量小、稳定性好等优点,可应用于工程用地与环境受到限制或埋深较大的地下构筑施工中。但是沉箱造价高。

2. 支撑结构的类型和布置形式

当基坑开挖超过一定深度,单靠围护结构保持稳定变得困难,这时需要采用支撑结构来提高围护结构的稳定性。在软弱土层的深基坑工程中,支撑结构是承受围护结构所传递的土压力、水压力的结构体系。支撑结构体系包括围檩、支撑、立柱及其他附件。支撑按材料主要可分为现浇钢筋混凝土支撑、钢支撑和混合撑三类。

钢筋混凝土支撑布置形式灵活,无论直线还是曲线杆件现浇均无困难。整体性好、刚度大,有利于控制围护墙变形和保护周围环境。由于承载力大,所以支撑间距较远,便于机械下坑开挖。其缺点是不能重复使用,用后还必须拆除,如果采用爆破方式拆除会对周围环境产生一定影响。支撑的浇筑和养护时间相对较长,若组织不当造成养护时间不够时即受力,容易产生时间效应,对基坑稳定不利。

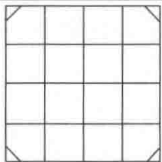
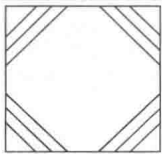
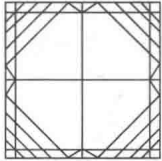
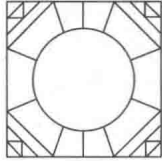
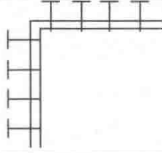
钢支撑多为H型钢或钢管,规格按计算确定。钢支撑自重轻,拆装方便且迅速,可减少围护墙因为无支撑暴露时间过长,土体蠕变而增大变形,即减少时间效应。钢支撑不用养护时间,还可施加预应力,且可根据围护墙变形的发展及时调整预应力值,以控制变形。钢支撑是工具式结构,可多次重复使用。因此,钢支撑优点

显著, 条件允许时宜优先选用. 但其结点构造相对复杂, 刚度不如混凝土支撑, 多为直线杆件, 无法适应曲线形支撑的需要. 而且抗弯刚度小, 易发生失稳破坏.

混合撑充分利用混凝土和钢材两种材料的特性, 扬长避短. 在实际工程中, 结合基坑深度、基坑形状、周围环境保护要求和挖土方法, 经比较后选用支撑. 亦可在同一基坑中, 既使用混凝土支撑 (多在上部), 又使用钢支撑 (多在下部), 各用其所长.

支撑结构不仅分类多样, 平面布置形式也是多种多样的. 主要的布置形式如表 1-1 所示.

表 1-1 支撑结构平面布置形式

序号	布置形式	图例	特点
1	井字集中式布置		常采用钢筋混凝土材料, 与角撑相结合, 用于对环境保护要求不高的条件下, 便于施工.
2	角撑体系布置		便于开挖和主体施工, 但整体稳定及变形控制效果不及井字集中式布置
3	边桁架		便于开挖和主体施工, 但整体稳定及变形控制效果不及井字集中式布置
4	圆形环梁布置		便于开挖和中间筒体施工, 圆形结构受力条件较好, 可以发挥混凝土受压强度高的特点, 节省钢筋混凝土用量, 不过在坑外荷载不均匀时慎用
5	拉锚		挖土方便, 造价经济, 挡土桩、墙的位移小, 适用于土质较好的基坑, 软土地区不适用

1.3 基坑围护结构设计方法

基坑工程设计与施工是岩土工程和基础工程中的一个传统课题, 同时又是综合

性的岩土工程难题。既涉及土力学中典型的强度、稳定与变形问题,同时还涉及土与支护结构的共同作用问题。对这些问题的认识及对策研究,是随着土力学理论、测试技术、计算技术、施工机械及施工技术的发展而逐步完善的。

Terzaghi 和 Peck 等早在 20 世纪 40 年代就提出了预估挖方稳定程度和支撑荷载大小的总应力法,这一理论原理一直沿用至今,但已有了许多改进和修正。Bjerrum 和 Eide 在 50 年代给出了分析深基坑底板隆起的方法。60 年代在奥斯陆和墨西哥城软黏土深基坑中,开始使用仪器进行监测,此后通过对大量实测资料的研究,提高了基坑稳定预测的准确性,并从 20 世纪 70 年代起,制定了相应的指导开挖的法规。我国自 20 世纪 80 年代末开始重视,至今深基坑工程技术已逐渐趋于成熟,地方和国家关于基坑工程的规范、规程已陆续编制并颁布实施,使基坑工程的设计与施工“有章可循,有法可依”。深基坑工程在 1998 年被建设部列为今后推广的十项新技术的第一项。在基坑工程设计中,主要的研究内容为支护结构计算理论、变形理论、土压力理论,这三者相互联系、密不可分。

1.3.1 支护结构计算理论

现有的基坑支护结构的内力变形计算的方法有很多,如等值梁法、连续介质有限元法以及弹性地基杆系有限元法等。等值梁法把围护结构简化为梁进行计算,这种简化显然不能准确计算围护结构的位移,是典型的强度控制设计方法,但由于其计算简单,所以在单支撑的基坑工程中仍然用到这一方法。随着计算机的普及,有限元法开始在基坑设计中得到广泛应用,有限元兼有广泛通用性和灵活性,可模拟复杂的施工过程,成为一种很有前途的基坑设计计算方法。但目前连续介质有限元法由于土的本构关系尚在发展中,缺乏真实反映土的应力-应变关系的本构模型,以及计算模型参数难以准确确定,也不能准确计算出支护结构及土体的位移。杆系有限元法作为一种计算方法具有概念清晰、计算简单、计算参数较少的特点,受到基坑工程设计人员的青睐,但现有的杆系有限元法的计算参数的取值因为众多复杂因素的影响尚没有较好的计算方法,取值多凭设计者本人的经验,因而计算结果与实际差别较大,计算结果不稳定且精度很低,不能满足对变形要求较严格的、大型复杂的基坑工程的设计的要求。总之,现有的基坑工程设计方法均从保护基坑工程的稳定出发,属于强度控制设计范畴。

在基坑支护设计中,确定了支护结构形式之后,选择正确的计算模型进行详细设计计算是至关重要的。基坑支护设计计算方法与基坑工程规模、挡土结构类型和性质、支撑形式等多种因素有关。表 1-2 列出了具有代表性的挡土结构内力分析方法。从表中可以看出,目前基坑支护设计计算方法大致可分为三类^[1]:第一类是常规设计方法(极限分析法);第二类称为弹性抗力法;第三类是有限元法。

表 1-2 挡土结构内力分析方法^[2]

结构性质	挡土结构类型	分析方法	
刚性	重力式刚性挡土墙	地基承载力验算, 稳定性验算	
	深层搅拌桩等	(以边坡理论的圆弧法为主)	
介于刚性与柔性之间	多撑式连续墙 柱列式灌注桩 SMW 工法等	解析法	山肩邦男法
			弹性法
			弹塑性法
		土抗力法	m 法
			常数法等
柔性	混凝土板桩 钢板桩等	有限元法	弹性杆系有限元法
			连续介质有限元法
			等值梁法
		极限平衡法	静力平衡法
			太沙基法

1. 极限分析法

该法是最常用的方法, 主要指极限平衡法, 见表 1-2. 极限平衡法是当前我国工程界计算围护结构所受土压力的最常用方法. 该方法不能够考虑结构的变形, 国内采用较多的有等值梁法和静力平衡法.

静力平衡法适用于悬臂式或底端自由支承的单锚式挡土结构. 当挡土结构的入土深度不太深时, 亦即非嵌固的情况下, 由于挡土结构后土压力的作用而形成极限平衡的单跨简支梁. 等值梁法将在第 4 章中详细讨论.

常规设计方法的要点是: 对悬臂式挡土墙选择一定的入土深度以满足整体稳定、抗隆起和抗渗要求的前提下, 用经典土力学理论计算主动土压力和被动土压力(或对计算的土压力作某些经验修正). 对重力式刚性挡墙验算其抗倾覆、抗滑移稳定性, 安全系数沿用设计规范中对普通挡土墙的规定. 计算柔性挡墙(悬臂式或有支锚结构)的内力, 对墙身和支锚结构进行设计. 这种方法对于普通挡土墙或开挖深度不深的钢板桩是比较合适的. 但对深基坑, 特别是软土中的深基坑支护结构设计, 就难以考虑更为复杂的条件和难以分析支护结构的整体性状, 且无法提供设计所需的墙体水平位移, 由于计算中不考虑支撑设置前墙体已有的位移, 所以不能反映墙体受力的变化, 如支护结构与周围环境的相互影响, 墙体变形对侧压力的影响等. 此外, 支锚结构设置过程中墙体结构内力和位移的变化, 内侧坑底土加固或坑内、外降水对支护内力和位移的影响, 压顶圈梁的作用与设计, 复合式结构的受力分析等都不能考虑, 这些问题有时却成为控制支护结构性状的主要因素.

2. 弹性抗力法

弹性抗力法针对常规方法中挡土墙内侧被动区土压力计算中的问题提出了改

进^[4]. 其概念是由于挡墙位移有控制要求, 内侧不可能达到完全的被动状态, 实际上仍处在弹性抗力阶段, 因此引用承受水平荷载桩的横向抗力的概念, 将外侧主动土压力作为施加在墙体上的水平荷载, 用弹性地基梁的方法计算挡墙的变位和内力. 这种方法可以看做对常规方法的改进, 它用压缩刚度等效的土弹簧来模拟地基土对墙体变形的约束作用, 将支护体看做弹性地基上的梁, 按此方法计算支护体的内力和变形. 此法可以跟踪施工过程, 逐阶段的进行计算, 该法计算简单、受力明确、参数要求少, 而且工程实践证明计算结果比较符合实际, 所以在工程界一直受到很大重视, 但是该方法仍没有解决前一种方法的其余问题. 计算与实际符合与否取决于基床系数的选取, 通常用 m 法计算, 即基床系数 k 随深度比例增长, 比例系数为 m .

3. 有限元法

随着电子计算机的普及, 有限元法在挡土结构分析中得到了广泛应用^[5]. 尤其是杆系有限元模拟实际施工工况, 取得了较为符合实际的结果. 在杆系有限元分析中, 把支撑、土体都作为弹性杆, 挡墙作为弹性梁单元, 在开挖的各个阶段, 分别求得挡墙内力及水平位移和支撑杆的轴力, 其中支撑杆处挡墙的位移量大部分是在支撑杆安装之前先期发生的. 因此, 与实际挡墙的变形极为接近. 但采用杆系有限元法进行计算, 仅可以得到挡土墙自身的内力位移及支撑轴力, 不能描述墙后土体变形. 近年来挡土结构计算中连续介质有限元法也得到了广泛应用. 计算中一般假定挡墙为二维弹性体, 土体模型可假定为线弹性体、非线性弹性体、弹塑性体或其他特性的材料, 挡墙及土体一般采用八结点等参单元, 支撑为一维弹性杆单元. 同样, 考虑开挖施工过程求解挡墙的内力、位移、支撑轴力、基坑周围土体及基底土体的位移. 若土体采用弹塑性模型, 还可计算得土体在各施工阶段的塑性区范围. 连续介质有限元计算一般是采用施加释放应力的办法, 在挡墙与土体界面上采用 Goodman 接触面单元, 但由此所得的土体位移量通常偏大, 尤其是基底隆起量偏大, 所以在一些计算中引入了“残余应力”的概念计算释放应力以解决问题^[6]. 连续介质有限元法应用于基坑工程中, 从理论上讲, 它为基坑开挖过程的分析提供了一个更合理的方法, 它可以从空间、时间上比较全面地反映各类因素 (固结、渗流、流变等) 对支护结构及周围土体应力、位移的影响, 还可以对分级开挖施工过程进行模拟, 用有限元法来分析基坑开挖的性状无疑是一种最有效的方法. 但是实际应用中许多因素制约着有限单元法计算结果的可靠性, 如开挖卸载后土体应力路径的影响、合适的描述土体的应力-应变特征的本构模型选择、模型参数的确定等, 卸土后开挖面以下土中残余应力的考虑、被动区工程桩作用等. 尤其是模型参数取值的困难, 实际开挖工程很少有提供如此详细的土体参数指标, 另外有限元法也不易被一般工程设计人员掌握, 种种原因决定了连续介质有限元法目前在基坑工程中多

是应用在科研和辅助分析上。

1.3.2 土压力研究

国内外大量学者通过试验研究和理论分析对经典土压力理论进行不断修改和完善,形成更加符合实际的土压力计算方法。目前,土压力研究主要分为两大类:试验研究和理论研究。

1. 试验研究

对于刚性挡墙而言,只有当土体水平位移达到一定值、土体产生剪切破坏时,库仑和朗肯土压力理论计算的结果才是正确的,当挡土结构绕墙趾转动时,主动土压力为三角形分布^[7];当挡土结构平移、绕墙顶转动和绕墙中部转动时,主动土压力为非线性分布。也有学者^[8,9]通过对砂性填土模型试验发现:主动土压力为非线性分布,其分布形式取决于挡土结构的变位方式,但不同挡土结构变位方式达到主动土压力状态所需的位移量基本一致,土压力合力作用点随着土的密度增加而上升。对于被动土压力,当墙体平移时,为直线分布;墙体转动时,为非线性分布,且其大小与合力作用点和墙体的变位方式有关。Bang^[10]提出了“中间主动状态”的概念,指出土压力计算应同时考虑墙体变位方式和变位大小,并建立了绕墙趾转动时的主动土压力表达式。在国内,周应英^[11]研究发现:刚性挡土墙绕墙顶转动时,主动土压力的分布是上部土压力大而下部土压力小的抛物线形;绕墙底转动时是近似的三角形分布;墙平移时是一重心偏下的抛物线形,但底部土压力不为零;有学者^[12]通过离心模型试验得出:土压力沿墙高呈两端小中间大的曲线分布。合力作用点位置在0.5左右。另外,还有学者研究分析了黏性土的蠕变作用对于侧压力的影响问题,并说明,如果挡土墙外移动被阻止,土压力将逐渐增大接近静止土压力。

对于柔性挡墙而言,由于内支撑系统及入土段土体的约束,在墙后土体的压力下,墙体产生挠曲变形,引起土压力重新分布。Rowe^[13]在锚杆有足够的弹性变形条件下进行排桩模型试验,发现土压力分布为三角形分布,并且最大弯矩随排桩柔性的增加而减小。而在开挖面以下,由于变形受到限制,土压力分布形式与经典土压力分布有着明显的不同,在临近开挖面区域,被动区土压力大于经典土压力值,在排桩墙趾,由于位移小,主动土压力大于经典土压力值。刘晓立等^[14]通过一个大型室内模型试验表明:对于悬臂式模型板桩,在主动侧,上部土压力随着被动侧挖砂深度的增加逐渐趋近朗肯主动土压力,但挖砂深度达到一定深度后,挖砂面以下主动侧土压力减至小于朗肯主动土压力而接近一个常量;在被动侧,其上部土压力接近朗肯被动土压力,而下部则远小于朗肯被动土压力。对于单锚式模型板桩,板后主动侧土压力随开挖面深度增加,最终会出现上部区域(拉锚附近)土压力值大于朗肯主动土压力值,下部区域土压力值小于朗肯主动土压力值;板前被动区的土压力

亦不同于朗肯被动土压力,其分布形态仍为上大下小,与悬臂板实测情况相同,被动区土体仅是一部分达到被动状态.对于基坑工程,多支撑支护结构的现场观测表明,尽管土压力的大小与朗肯土压力值较为接近,但土压力分布却并非三角形分布.我国学者谭跃虎^[15]对某基坑支护桩做了较全面的测试工作,表明:实测的主动土压力小于朗肯理论值,随深度呈“R”形分布,当变形小于 $5\% H$ 时,被动土压力仍能得到充分发挥,与传统的土压力理论相矛盾.

总之,通过实验发现:无论刚性还是柔性挡墙其墙后土压力的分布都会受多种因素影响,包括挡墙变形模式、土体性质、支撑位置等,至今还没有可以被大家广泛接受的土压力分布结论.

2. 理论研究

从理论上来说,作用在基坑支护结构后侧的土压力大小介于主动土压力和静止土压力之间,而接近于主动土压力,作用在基坑支护结构前侧的土压力介于静止土压力和被动土压力之间,同时,土体强度和变形参数还是随位移和应力状态变化的,实际土压力的值究竟为多少,目前还没有定量的计算方法.在现行的基坑设计规范中,一般是假定某一工况(或某一开挖深度)下土压力是保持不变的,但在实测中发现土压力是变化的,工程实践中发现土压力的实测值与现有的各种理论(如库仑土压力和朗肯土压力)和经验方法(如 Terzaghi、Peck 等提出的方法)计算出的土压力值存在着很大的差别,在软土地区尤为明显;同时,在围护结构设计中,土压力的取值相当混乱,要么取值过大,造成不必要的浪费;要么取值过低,安全系数极低,甚至由此造成基坑坍塌事故^[43].

现在,广泛使用的土压力理论仍然是库仑土压力理论和朗肯土压力理论.对于作用在挡土墙上的土压力,人们更多讨论地是水土合算和水土分算的问题.所谓水土合算就是用水土总应力通过朗肯理论来计算作用在挡土墙上侧向压力(包括土压力和水压力);所谓水土分算就是挡土墙上水、土压力分别考虑,用有效应力计算作用在挡土墙上的侧向土压力,侧向水压力直接由竖直方向水压力计算.从有效应力角度而言,应该水土分算更加合理,但是,大量实测数据表明:水土分算得到的水土压力往往远大于实测值.由于水土合算计算的土压力小于水土分算,所以,人们在设计时往往采用水土合算来计算侧向水土压力.李广信^[16]通过研究指出在一定条件下水土合算可能有一定微观基础;杨晓军^[17]从土的有效应力原理出发,分析了软黏土中深基坑开挖的土压力计算问题,着重讨论了孔隙水压力对土压力的影响,指出当采用总应力法计算时,原则上应采用卸载强度指标,他认为以下两个原因使得水土压力合算法在软黏土地区的临时性开挖工程中土压力计算值与实测值较接近:一是卸载引起负超孔压,卸载总应力强度指标大于常规三轴加载总应力强度指标;二是渗流引起主动区孔压减小,被动区孔压增大.也有学者^[18]强调在不拖延基

坑开挖的进度情况下,水土压力大小及分布与静水时的明显不同,且此时较宜用库仑土压力理论.在有上层滞水情况下,用水土合算大体上是可以接受的.在有承压水情况下,其作为抗力的被动土压力可能丧失殆尽.基坑外人工降水与基坑内排水相比,更有利于基坑的稳定.正的超静孔压大大提高了土压力,负的超静孔压明显减少土压力.在有很多有渗流的情况下,不宜用朗肯土压力计算土压力,而应当用库仑土压力理论的图解法来搜索可能滑裂面.刘国彬^[19]认为软土地区既可采用水土合算,又可采用水土分算.给出了水土合算时的侧压力系数的取值方法;同时提出了水土分算时,土压力与水压力应分别乘以相应的系数.总之,水土压力计算问题尚无定论,还有待于土压力理论的进一步完善,从而解决这个争论.

1.3.3 变形理论

计算基坑支护变形的理论已经非常完备,因为基坑支护的材料性质(主要是混凝土或钢材等)比较清楚,所以,在知道支护上的作用力的情况下,设计工作者能够比较方便地计算出支护的变形.但问题的关键就在于设计者无法知道支护上的作用力,特别是作用在支护上的土压力.试验已经无数次说明:土压力的大小与土体变形紧密联系,所以,广大科技工作者主要研究的变形理论,实际上是土压力与土体变形之间的关系,即土压力位移关系.

有关土压力位移关系的研究已经有不少,有的学者^[8,20-23]通过大型模型试验来研究,由于相对于真实情况,模拟装置还是太小,所以无法真正反映挡墙或支护结构的变形,只能模拟挡墙或支护结构的刚性平动或转动,而且这种研究方法的工作量往往非常大;有的学者^[24-30]直接利用有限元法的某些本构模型来研究,这种研究方法应该是一种有效的研究方法,它可以模拟不同情况下的挡墙或支护结构的不同变形,但是这种研究方法所选用的本构关系是否合适,是研究结果是否可靠的关键.还有的学者^[6,31-40]根据土压力与支护结构位移的非线性关系,提出不同曲线形式来模拟,这种研究方法往往需要预知发动主动或被动土压力所需的位移量.这些研究方法都具有各自的优点,也有它们的不足.

对于土压力与支护结构位移呈非线性关系,学者们根据自己的研究提出了很多位移土压力模型,下面介绍几种常见的模型.

陈书申^[40]指出了朗肯土压力理论的两点不足,引入了 Reimbert 提出的与位移和强度相关的土压力计算公式,将不同强度土层土压力与位移的关系画在同一坐标系内,认为正常固结土的土压力与位移和强度两个因素有关,且在小变形范围内,力与位移间基本呈线性关系.

作者对于以上几个系数给出了一定的取值方式,在此基础上,提出了一个与超固结比 OCR 相关的系数 η_{p3} ,认为 $\eta_{p3} = \text{OCR}^{2/3}$,但作者的这些取值方式有待实测资料加以实证.