

◆ 高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材 ◆

深基坑支护设计与 施工新技术

SHENJIKENG ZHIHU SHEJI YU SHIGONG XINJISHU

◎ 年廷凯 孙 旻 主编

中国建筑工业出版社

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材

深基坑支护设计与施工新技术

年廷凯 孙 旻 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深基坑支护设计与施工新技术/年廷凯, 孙旻主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 11

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材

ISBN 978-7-112-20119-8

I. ①深… II. ①年… ②孙… III. ①深基坑支护-施工设计-高等学校-教材②深基坑支护-工程施工-高等学校-教材 IV. ①TU46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 285372 号

本书是高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材之一, 书中系统介绍了深基坑支护设计与施工新技术。全书共分 11 章, 主要内容包括: 深基坑支护设计国内外现状, 挡土结构土压力计算, 桩墙式挡土结构设计计算, 土钉支护设计与施工, 土层锚杆设计与施工, 基坑降水与土方开挖, 地下连续墙施工技术, 逆作法施工技术, 深基坑信息化施工技术, 高层建筑深基坑支护工程实例, 深基坑支护与施工新技术展望等内容。

本书可作为土木工程专业(含建筑工程、桥梁工程、地下工程、道路与铁道工程四个方向)卓越工程师教育培养计划相关院校本科生教材, 以及土木工程专业本科生、研究生参考教材; 亦可供城市地下空间工程、矿井建设工程、交通工程、水利工程等有关专业的师生、设计与施工技术人员和感兴趣的读者学习、参考。

责任编辑: 李天虹

责任校对: 李欣慰 焦 乐

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材

深基坑支护设计与施工新技术

年廷凯 孙 旻 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{3}{4}$ 字数: 333 千字

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月第一次印刷

定价: 46.00 元

ISBN 978-7-112-20119-8

(29602)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材 编写委员会

主任委员：

陈廷国 大连理工大学

马荣全 中国建筑第八工程局工程研究院

副主任委员：

王宝民 大连理工大学

苗冬梅 中国建筑第八工程局工程研究院

年廷凯 大连理工大学

孙学锋 中国建筑第八工程局工程研究院

委员（按姓氏笔画排序）：

于洪伟 中国建筑第八工程局工程研究院

王子寒 河北工业大学

王吉忠 大连理工大学

方兴杰 中国建筑第八工程局工程研究院

孔琳 中国建筑第八工程局工程研究院

牛辉 中国建筑第八工程局工程研究院

白羽 中国建筑第八工程局工程研究院

艾红梅 大连理工大学

石运东 天津大学

冉岸绿 中国建筑第八工程局工程研究院

孙旻 中国建筑第八工程局工程研究院

刘莎 大连理工大学

邱文亮 大连理工大学

李玉歧 上海大学

陈兴华 中国建筑第八工程局工程研究院
肖成志 河北工业大学
何建军 中国建筑第八工程局工程研究院
张建涛 大连理工大学
张明媛 大连理工大学
何 政 大连理工大学
李宪国 中国建筑第八工程局工程研究院
吴智敏 大连理工大学
张婷婷 大连理工大学
罗云标 天津大学
武亚军 上海大学
周光毅 中国建筑第八工程局工程研究院
范新海 中国建筑第八工程局工程研究院
郑德凤 辽宁师范大学
武震林 大连理工大学
姚守俨 中国建筑第八工程局工程研究院
姜韶华 大连理工大学
赵 璐 大连理工大学
徐云峰 中国建筑第八工程局工程研究院
郭志鑫 中国建筑第八工程局工程研究院
徐博瀚 大连理工大学
殷福新 大连理工大学
崔 瑶 大连理工大学
韩玉辉 中国建筑第八工程局工程研究院
葛 杰 中国建筑第八工程局工程研究院

前 言

本书作为高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材之一,编写时汲取了国内外有关深基坑支护设计方法与施工技术的最新进展,坚持内容体系的科学性、系统性和先进性。该系列教材旨在满足土木工程专业的特色培养,以土木工程专业工程师培养为重点,以土木工程执业的基本资质为导向,借鉴国外优秀工程师培养的先进经验,探索并形成具有“工文交融”特色的卓越工程师培养模式。以“工程教育”为重点,建立“工程”与“管理”、“工程”与“技术”相融通的课程体系,树立“现代工程师”的人才培养观念。通过专业知识的学习,学生们应基础扎实、视野开阔、发展潜力大、创新意识强、工程素养突出、综合素质优秀,掌握土木工程的专门知识和关键技术。

本教材是以国内外基坑支护发展为背景,以国内现有规范为原则,以当今国内支护结构的施工技术为基础所编写的一本相对完整的图书。本教材借鉴了国内外大量的研究成果和施工技术,是将理论教学内容与实际工程相结合,以理论为指导,以实践为目的,努力使学生将理论知识转化为施工技术,达到学有所用的目的。同时,本教材作为国内少数介绍“深基坑支护技术”的图书之一,对各建筑单位的施工技术也具有指导和借鉴的意义,也将有力推动我国“深基坑支护技术”的研究与发展,从而减少现场施工对场地等条件的要求,提高建筑功能和结构性能,实现“四节一环保”的绿色发展要求,促进我国建筑业的整体发展。

由于国内深基坑支护结构体系在计算与功能方面尚不完善,我国尚未出版相对全面的教材,不能为初学者提供相对权威的依据。因此,本教材致力于从全方位、多角度阐述国内基坑支护结构的内容和施工方法。教材编写组主要成员以我校土木工程学院与中建八局工程研究院专家为主,兼顾国内工科院校从事基坑工程设计与研究的优秀青年教师为核心组成的,所有成员长期工作在教学科研或工程实践第一线,主讲土木工程专业课程,教学经验丰富,深受学生的喜爱。教材编写前积累了多年的教学和实践经验,编写组成员对本教材的编写做了大量的前期工作,收集、研读了国内外相关的教材与文献,力图取其长,用其精。

本教材根据“深基坑支护设计与施工新技术”的教学大纲编写而成,将研究+工程技术型教学模式体现在教材中,内容涵盖深基坑支护设计方法、最新进展、信息化施工技术、工程案例等。同时,紧密结合工程实际,在多个章节加入“工程实例及分析”内容,使学生充分认识到课程在实际工程中的重要地位。

本书主要内容包括:深基坑支护设计国内外现状,挡土结构土压力计算,桩墙式挡土结构设计计算,土钉支护设计与施工,土层锚杆设计与施工,基坑降水与土石方开挖,地下连续墙设计与施工,逆作法施工技术,深基坑信息化施工技术,高层建筑深基坑支护工程实例,深基坑支护与施工新技术展望等。本书具备以下特点:

1. 内容全面,编排合理。本教材从最简单的深基坑支护结构的概念出发,涵盖了必

要的基础知识。注重理论基础和实例分析,重点突出,结构严谨。具有系统性、一致性和可扩展性。国内尚无合适的教材,本教材适应了部分本科生课程的实践化趋势。

2. 结构合理,循序渐进。本教材作为应届本科生走向建筑岗位的首要选择,内容由浅入深,详略得当,可为初学者打下良好基础,为进一步研究深基坑支护结构的性能与施工技术提供理论依据。

3. 适应国情,通俗易懂。近20年来,深基坑支护结构在我国得到了长足的发展,研究更加深入,但另一方面人们意识到深基坑支护结构的潜力还有待进一步发掘,本书的出版能进一步推动深基坑支护结构与施工技术在我国的 Research 与发展,使该项技术得到进一步提升,逐步实现建筑行业的绿色施工标准。在重要概念的引入时,尽可能做到简明扼要、自然浅显。

4. 主编教师团队从事建筑基坑与边坡工程的设计、施工多年,在高校和研究院任职,有扎实的理论基础与现场实践能力,还有丰富的教学经验。

5. 本教材配备了思考题,题型丰富,题量适度,使学生学有所思、学有所想,避免传统式灌输式教学,可供学生自学和相关科技工作者阅读;同时,结合软件优化设计,有助于学生更好的理解深基坑支护结构设计概念,加深学生对大型设计软件的认识和使用。

本书由年廷凯、孙旻主编,肖成志、徐云峰、武亚军副主编,冉岸绿、方兴杰、李玉歧、郑德凤、王子寒等参加编写。具体分工如下:前言、第1章、第6章第2节由大连理工大学年廷凯编写;第2章、第3章由河北工业大学肖成志编写,河北工业大学王子寒参与部分章节编写;第4章由上海大学李玉歧编写;第5章由上海大学武亚军编写;第6章第1节由辽宁师范大学郑德凤编写;第7章由中国建筑第八工程局工程研究院方兴杰编写;第8章、第9章由中国建筑第八工程局工程研究院徐云峰编写;第10章第1节、第11章第4节由中国建筑第八工程局工程研究院孙旻编写;第10章和第11章剩余章节由中国建筑第八工程局工程研究院冉岸绿编写;最后由年廷凯、孙旻统稿。

本书能够顺利出版,感谢大连理工大学教育教学改革基金(MS201536、JG2015025)和教材出版基金(JC2016023),以及辽宁省本科教育教学改革基金项目(201650)、住建部土建类高等教育教学改革项目土木工程专业卓越计划专项(2013036)的资助,特别感谢中国建筑第八工程局工程研究院的领导和专家、中国建筑工业出版社的领导和责任编辑的大力支持。对于书中所引用文献的众多作者(列出的和未列出的)表示诚挚的谢意!

由于编者水平所限,加之编写时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2016年10月

目 录

前言

第 1 章 深基坑支护概述	1
1.1 深基坑支护工程现状	1
1.2 深基坑支护结构分类	4
1.3 深基坑支护设计原则与工作流程	9
1.4 本书的主要内容	10
1.5 本书的学习重点	10
第 2 章 挡土结构土压力计算	12
2.1 土压力及计算公式	12
2.2 特定地面荷载下（均布、集中等）土压力分布与计算	22
2.3 不同挡土结构条件下土压力分布	26
2.4 复杂条件下挡土结构计算模型和数值分析方法	28
第 3 章 桩墙式挡土结构设计计算	39
3.1 悬臂式排桩/桩墙	39
3.2 单层支点排桩	41
3.3 单层预应力锚杆排桩支挡结构	43
3.4 多层预应力锚杆排桩支挡结构	46
3.5 双排桩支挡结构设计	49
3.6 支护桩墙稳定验算	54
3.7 构造要求	59
3.8 工程实例	60
第 4 章 土钉支护设计与施工	68
4.1 概述	68
4.2 土钉支护的作用机理与工作性能	70
4.3 土钉喷射混凝土设计	72
4.4 土钉支护的内部稳定分析	76
4.5 土钉墙的外部稳定安全	78
4.6 土钉支护施工	80
4.7 工程实例	83

第 5 章 土层锚杆设计与施工	87
5.1 锚杆支护技术.....	87
5.2 锚杆构造及类型.....	89
5.3 锚杆抗拔作用.....	91
5.4 锚杆的承载能力.....	92
5.5 锚杆设计.....	94
5.6 锚杆稳定性分析计算	102
5.7 锚杆的抗拔试验	102
5.8 锚杆施工	104
5.9 工程实例	105
第 6 章 基坑降水与土方开挖	114
6.1 基坑降水	114
6.2 土方开挖	123
第 7 章 地下连续墙施工技术	131
7.1 工艺原理及适用范围	131
7.2 施工准备	132
7.3 施工工艺流程	134
7.4 导墙	140
7.5 泥浆	141
7.6 挖槽	143
7.7 槽段接头及结构接头	144
7.8 钢筋笼	147
7.9 混凝土浇筑	147
7.10 施工质量标准.....	149
7.11 槽段接头改进实例.....	151
第 8 章 逆作法施工技术	154
8.1 概述	154
8.2 逆作法施工技术	155
8.3 工程实例	157
8.4 逆作法施工技术展望	160
第 9 章 深基坑信息化施工技术	162
9.1 深基坑工程信息化施工	162
9.2 监测手段与信息采集及处理技术	162
9.3 深基坑工程紧急预案	166

9.4 工程实例	168
第 10 章 高层建筑深基坑支护工程实例	173
10.1 上海.....	173
10.2 北京.....	181
10.3 广州.....	185
第 11 章 未来深基坑支护与施工新技术	192
11.1 基于 BIM 的深基坑设计	192
11.2 超深地下连续墙施工新工艺.....	194
11.3 绿色高效能可回收的基坑支护组合技术.....	198
11.4 新型拼装式 H 型钢结构内支撑技术	199
参考文献	208

第 1 章 深基坑支护概述

本章学习要点:

了解深基坑支护工程现状和本书主要内容,掌握深基坑支护结构分类及其适用条件以及深基坑支护设计原则与工作流程。

1.1 深基坑支护工程现状

随着大规模的基础设施建设,城市的可利用土地资源日趋紧张,向高空和地下争取建设空间成为城市建设和改造的必然趋势。因此,高层建筑的高度记录不断刷新,地下空间的开发规模和开挖深度逐渐增加,与之相伴的深基坑支护问题也日益凸显。

深基坑通常指深度超过 5m (含 5m),地质条件、周围环境及地下管线特别复杂的基坑工程。基坑的开挖卸荷过程,通常会引起坑底土体向上的竖直位移和坑壁土体的水平位移,造成基坑周围的地层移动;随着基坑开挖深度增加,水土压力以及地面超载的作用,将会促使基坑围护结构外侧的土体推动围护结构向基坑内侧移动,基坑周围土体产生塑性变形,造成基坑底部向上隆起以及基坑外围地表沉降。因此,需要根据实际情况采取合适的基坑支护技术对基坑侧壁进行支挡、加固或保护,以满足地下工程的施工要求,且维持基坑周边环境的稳定。具体来说,基坑支护要求确保坑壁稳定,邻近建筑物、构筑物和管线安全,有利于挖土和地下空间构造,并且支护结构施工方便、经济合理。

深基坑支护工程一般包括支护结构选型、支护结构设计、支护结构监测和支护结构施工等方面的主要内容。其中,支护结构可分为围护结构结合内支撑系统的被动式支护形式和围护结构结合拉锚结构的主动支护形式,深基坑工程中常用的围护结构类型详见图 1-1。目前国内,开挖深度在 5m 以内的基坑通常采用土钉墙支护技术,开挖深度在 8m 以上的基坑主要采用钻孔灌注桩、地下连续墙、钢筋混凝土支撑结构或者钢管支撑结构等支护技术。具体支护形式的确定,则需要综合考虑场地的工程地质和水文地质条件、基坑开挖深度和降排水要求、周边环境因素和荷载作用、支护结构使用期限和地下室施工要求等因素,因地制宜,确保安全经济。表 1-1 列出了不同地域的深基坑工程通常面临的不同设计和施工难点,因此需要有针对性的选用合适的支护形式。针对确定的支护结构形式,支护结构的设计方法目前可采用的主要为极限平衡法、弹性地基梁法和有限元法。其中,极限平衡法因计算分析简便而被广泛采用,但采用该方法需要进行较多假设且在计算过程中忽略变形和时间效应,计算结果常与实际情况相差很大。有限元法能够模拟分析实际工程,但是数值模拟结果中安全系数的有效确定问题仍待解决;另外,有限元求解的复杂性、收敛性和计算耗时等问题也限制了该方法在工程实践中的应用推广。弹性地基梁法充分考虑支护结构的平衡条件以及土体与结构的变形协调条件,计算参数较少,计算结果相对合理。深基坑支护工程涉及土体与围护结构之间动态的相互作用问题,单独依靠经验

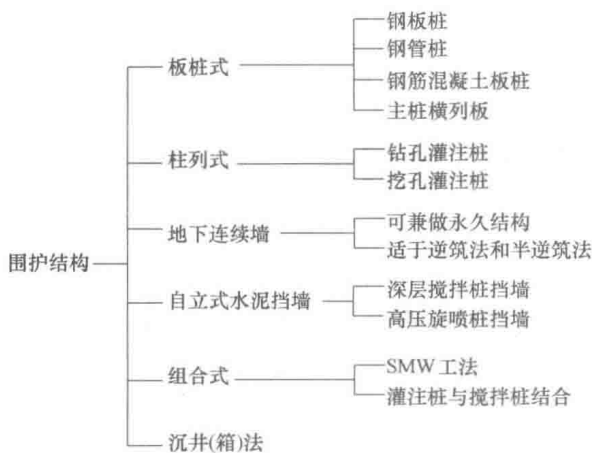


图 1-1 深基坑工程常用围护结构类型
(刘建航和候学渊, 1997)

估计和理论分析难以预测基坑潜在的变形破坏,也难以完成安全经济的基坑支护设计。因此,系统开展支护结构监测有助于完善支护结构理论设计,并且能够及时发现问题,采取必要措施防止工程事故发生。目前,深基坑支护工程中现场监测的主要项目及相应的测试方法详见表 1-2。支护结构施工阶段,基坑的开挖方式会直接影响支护结构的内力和变形,进而影响基坑的稳定与安全,因此,需要根据实际情况制定详细周密的施工方案,严格按照支护结构的设计工况进行土方开挖,遵循开槽支撑、先撑后挖、分层开挖和严禁超挖的准则。

采用不同支护方式的典型深基坑工程 (余志成和施文华, 1997)

表 1-1

深基坑工程名称	支护形式
北京新亚综合楼工程	土钉墙支护
北京京城大厦	H 型钢桩土层锚杆
北京方庄芳城园	悬臂式双排桩(刚架)支护
北京华侨公寓地下车库	桩墙合一、地下室逆作法
上海广播电视塔	钢板桩
上海虹桥友谊商城	水泥搅拌桩与钻孔灌注桩组合支护
上海金茂大厦	地下连续墙
上海国际贸易中心大厦	加肋式地下连续墙
上海环球世界商业大厦	SMW 工法
上海电视演播大楼	支护基坑周围底层注浆加固
广东南海市瑞安花园	高压旋喷桩与灌注桩组合支护
烟台芝新大厦	灌注桩、土层锚杆、岩层锚杆、锚钉组合支护

监测项目和测试方法 (李钟, 2001)

表 1-2

监测项目	测试方法
地表、围护结构及深层土体分层沉降	水准仪及分层沉降标
地表、围护结构及深层土体水平位移	经纬仪及测斜仪
建(构)筑物的沉降及水平位移	水准仪及经纬仪
建(构)筑物的裂缝开展情况	观察及测量
建(构)筑物的倾斜测量	经纬仪
孔隙水压力	孔压传感器
地下水位	地下水水位观察孔
支撑轴力及锚固力	钢筋应力计或应变仪
围护结构上土压力	土压力计

土木工程领域新课题的产生与发展通常都是工程实践与理论研究紧密结合并且不断相互促进的产物。深基坑支护工程的进步与发展,具体表现为日益复杂的深基坑问题迫切需要发展新型支护结构,新型支护结构的应用推广则需要改进或革新相应的理论设计方法,最终通过大量的工程实践深入认识新型支护结构的支护机理,进而完善新型支护结构的设

计理论, 更好的指导和开展基坑支护。此外, 深基坑支护工程的进步与发展也体现为支护结构选型和设计理念的转变, 即由造价高、施工空间狭窄、施工工期长、高能耗、环境污染严重的传统技术(如钻孔灌注桩、地下连续墙、钢筋混凝土支撑结构和钢管支撑结构等)向造价低、施工空间大、施工工期短、绿色环保节能、资源可重复利用的新型技术(如水泥搅拌桩及 SMW 工法、旋喷搅拌加劲桩支护技术和预应力鱼腹梁钢结构支撑技术等)的转变。

目前, 深基坑支护工程在支护技术和设计理论方面虽已取得很大的发展, 但仍然存在诸多有待研究和解决的问题, 主要包括深基坑的时空效应和变形控制问题。实测资料表明深基坑支护结构向基坑内侧的水平位移呈现“中间大两边小”的特征, 其空间效应将会导致基于平面应变假设的支护结构设计方法脱离实际, 最终影响基坑分布开挖尺寸和开挖时间的定量计算。此外, 基坑开挖转角部分所出现的应力集中现象, 以及软土蠕变特性导致的基坑支护结构变形随着无支撑时间的延长而增加的“时间效应”, 在目前的支护结构设计中均未能给予考虑。对于高层建筑和市政管线密集区域附近的深基坑工程, 支护结构设计应该同时满足强度要求和正常使用要求, 因此采用强度设计理论时需要对接口的变形进行控制, 以确保基坑在施工过程中自身和周围建筑物的安全稳定。例如, 上海地铁基坑工程根据不同的环境保护要求将基坑的变形控制分为三个等级, 详见表 1-3。

上海市地铁基坑等级标准 (上海市规范, 2010)

表 1-3

基坑等级	地面最大沉降量及围护墙水平位移控制要求	环境保护要求
一级	1. 地面最大沉降量 $\leq 0.1\% H$ 2. 围护墙最大水平位移 $\leq 0.14\% H$ 3. $K_s \geq 2.2$	基坑周边以外 $0.7H$ 范围内存有地铁、共同沟、煤气管、大型压力总水管等重要建筑或设施, 必须确保安全
二级	1. 地面最大沉降量 $\leq 0.2\% H$ 2. 围护墙最大水平位移 $\leq 0.3\% H$ 3. $K_s \geq 2.0$	离基坑周边 $H \sim 2H$ 范围内有重要管线或大型的在使用的建(构)筑物
三级	1. 地面最大沉降量 $\leq 0.5\% H$ 2. 围护墙最大水平位移 $\leq 0.7\% H$ 3. $K_s \geq 1.5$	离基坑周围 $2H$ 范围内没有重要或较重要的管线、建(构)筑物

注: H 为基坑开挖深度; K_s 为抗隆起安全系数, 按圆弧滑动公式计算。

深基坑支护工程作为岩土工程的重要领域, 其复杂的水文地质条件、多样的支护结构形式和多变的支护结构受力状态, 在增加支护结构设计难度的同时, 也为支护技术的发展与革新提供了广阔的空间。目前, 深基坑支护技术的发展与革新主要集中于以下几个方面: (1) 支护结构设计理念的革新, 通过改变传统的静态设计理念, 逐步建立以施工监测为主导的信息反馈动态设计体系; (2) 推广考虑变形控制的工程设计方法, 充分考虑支护结构体系变形的空间和时间效应; (3) 研究新型支护结构设计方法, 使其能够计算分析受力结构与止水结构相结合, 临时支护结构与永久支护结构相结合, 基坑开挖方式与支护结构形式相结合的组合支护形式; (4) 深基坑支护结构的优化设计, 避免因设计缺陷或施工失误造成工程事故和因支护结构选型与设计保守造成资源浪费; (5) 信息监测与信息化施工技术的发展, 根据实际监测结果动态调整支护结构的设计和施工方案, 确保基坑工程的安全稳定。

1.2 深基坑支护结构分类

支护结构一般由挡土（挡水）结构和支撑系统（保持墙稳定的系统）两部分组成，简称挡土墙系统。而挡土部分因工程地质、水文地质情况不同又分为透水部分及止水部分，透水部分的挡土结构需在基坑内外设排水降水井，以降低地下水位；止水部分挡土结构防水抗渗，不使基坑外地下水进入坑内，如作防水帷幕、地下连续墙等，只在坑内设降水井。各种墙和支撑系统的适用性见表 1-4。

各种挡土结构和支撑系统的适用性

表 1-4

挡土结构类型	最适合的条件	缺 点
钢板桩	容易打入黏土、砂土和砂粘混合物	在软弱土中可能产生较大位移。 不能穿过障碍物和坚硬土层。 要求有效降水
桩板墙	超固结黏土、具黏性的砂土和能适当降水的砂土	挡板无法设置在坑底以下。 要求有效降水。 在软弱土中可能产生较大位移
钻孔桩/墩	比较硬的黏性土层和岩层，要求无打桩振动和噪声场合	要求有效降水。桩间土可能塌落
地下连续墙	要求控制水平位移的地下水位以下的软黏土和松砂。要求无打桩振动和噪声场合	单纯作为支护结构费用高。 在坚硬土层中用泥浆槽沟法施工时速度慢和困难
支持系统	最适合的条件	缺 点
横杆支撑	比较窄的开挖	在软弱土中可能产生较大墙位移
斜撑和反压	比较宽而浅的开挖	在软弱土中可能产生较大墙位移
锚杆式	需要控制位移的任何开挖宽度和深度	要求在锚能达到的范围内有适合锚的岩土层。锚固力的竖向分量对墙有影响
锚定式(锚座)	在开挖工程中只能单层放置，因而适合不太深的开挖。这种结构主要用于岸边填筑物和边坡填筑物中	在深开挖工程中墙的中下部位移可能比较大

1.2.1 深开挖挡土结构类型

目前深开挖挡土结构常用以下四种类型：

(1) 钢板桩（H 型钢或工字钢桩加横插板挡土）

将带锁口或钳口的热轧型钢用板桩锤或振动打桩设备打入土中并相互连接起来形成钢板桩墙，如图 1-2 (a) 所示。钢板桩的强度重量比高，可重复使用，广泛用于容易打入的黏土、砂土和砂黏土中挡土和挡水，在坚硬地层容易打坏。

(2) 桩板式墙

将工字型钢以 2~3m 间距打入地层中，然后随着开挖在工字钢后翼面插入 50~100mm 厚的木板形成桩板墙，如图 1-2 (b) 所示。亦可只挖至工字钢前翼面，焊上螺栓，装上接触板，用螺母紧固，这种施工方法简单，而且墙外土的水平位移较小，因此较流行。桩板墙适合于超固结黏土、黏土质砂以及能充分降水的砂层中。

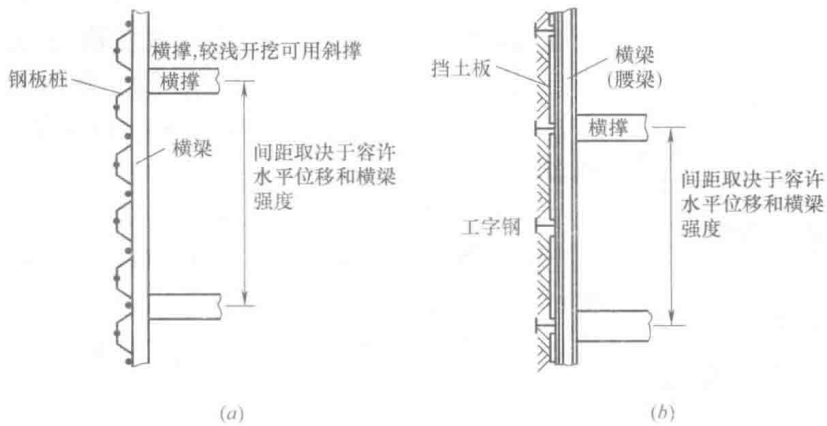


图 1-2 钢板桩墙和桩板墙平面图

(a) 钢板桩墙；(b) 桩板式墙

(3) 钻孔灌注桩

以一定间距排列的大直径钻孔灌注桩（或双排桩）形成的挡土结构，如图 1-3 (a) 所示。桩顶可用混凝土梁联系起来，可采用后拉式或内撑式支撑系统。这种结构利用桩间土拱作用挡土。这种挡土结构近年来在我国用得越来越多，其主要优点是墙刚度大，施工简单，可插入坚硬土层和岩石中，而且没有打桩振动和噪声。缺点是不能挡水，桩间土可能坍落等。

以较密间距打设或插入预钻孔中的工字型钢桩（不带挡板）同钻孔桩一样，也是利用桩间土拱作用挡土，如图 1-3 (b) 所示。

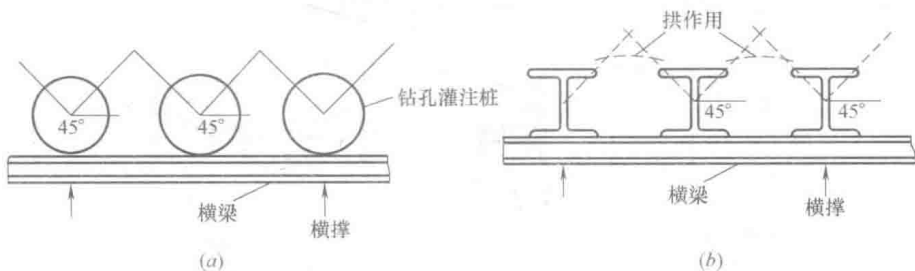


图 1-3 钻孔灌注桩墙和工字钢桩墙平面图

(a) 钻孔灌注桩；(b) 工字钢

(4) 地下连续墙

在地面上沿着开挖工程周边（如地下结构的边墙等），用特制挖槽机械，在泥浆护壁情况下开挖一定长度沟槽（一个单元槽段），然后用吊车将钢筋笼吊放沟槽内，再用导管向充满泥浆的沟槽中浇注混凝土，逐段施工，最后形成连续的地下墙，其施工程序如图 1-4 所示。墙的厚度一般 50~100cm，槽段长 7m 左右，深度可达 50m 以上，最深已达 100m。这种结构具有挡土、截水、防渗兼作主体承重结构多种功能，限制墙外地面沉降和土的水平位移效果好。因此，在建筑物地下室、地下油库、地下街道、地下停车场、地下铁道、蓄水池、污水处理场以及各种挡土、水防渗墙等工程中均可使用。连续墙单纯作为深开挖的支护结构则费用昂贵，故很少如此使用。

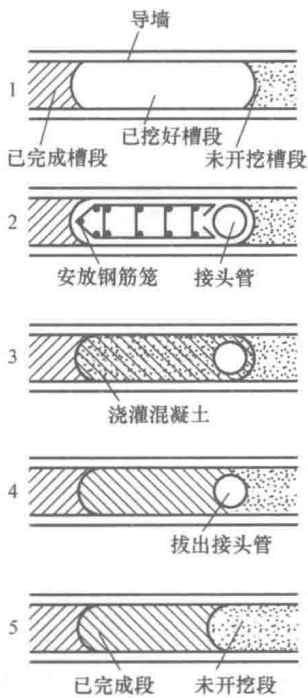


图 1-4 钢筋混凝土地下连续墙施工顺序

国外也逐渐广泛应用一种预制桩式或板式连续墙。这种施工方法在成槽后，用自凝泥浆置槽用的护壁泥浆，或者直接以自凝泥浆成槽。再在自凝泥浆内插入预制管桩、方桩、H 型钢、钢管或预应力空心板等结构件，形成连续墙。

此外，钢筋混凝土钻孔灌注桩除单排灌注桩（疏排混凝土灌注桩、密排桩）外，尚有双排灌注桩、连拱式灌注桩挡土、桩墙合一地下室逆作法以及土钉支护法等。为了实现止水功能，也常考虑采用插筋补强支护、深层搅拌水泥土墙、密排桩间加高压喷射水泥注浆桩等。

1.2.2 支撑系统

深开挖挡土结构物的支撑类型较多，主要支撑系统如图 1-5 所示。按支撑与否及支撑方式，挡土墙支撑系统可划分为以下几种类型：

(1) 悬臂式挡土墙

悬臂式挡土墙，墙上没有内撑或锚杆完全靠足够的入土深度来保持墙的稳定，见图 1-5 (a)。对钢板桩来说，由于刚度小，容易产生较大水平变位，对荷载和土质变化特别敏感，一般只适合深 3~4m 的临时开挖工程。砂土中钢板桩插入挖土线以下深度可参考表 1-5。钢筋混凝土钻孔桩和地下连续墙也可采用悬臂式，由于刚度大，因而可维持较大开挖深度，但费用较高。

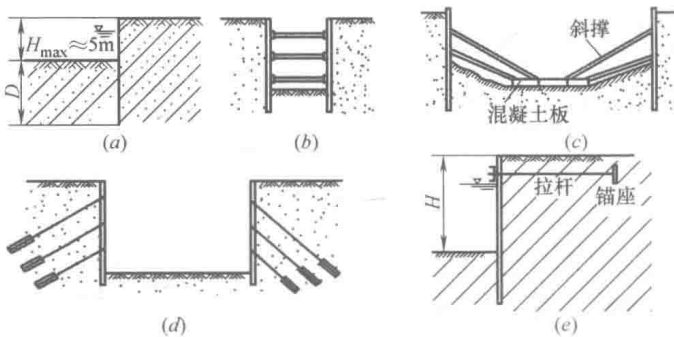


图 1-5 深开挖挡土结构物的支撑类型

(a) 悬臂式；(b) 横撑式；(c) 斜撑式；(d) 锚杆式；(e) 锚定式

悬臂式钢板桩的入土深度

表 1-5

SPT(N 值)	相对密度(D_r)	入土深度(H 墙高)
0~4	极松	$2.0H$
5~10	松	$1.5H$
11~30	中密	$1.25H$
31~50	密实	$1.0H$
>50	极密	$0.75H$

(2) 内撑式挡土墙

内撑式系统由撑杆和腰梁等组成。有横撑（平横）和斜撑两种，分别如图 1-5 (b) 和 (c) 所示。横撑主要用于开挖断面较小的线性建筑，如地铁和地下管道等工程，但也可用于“窄沟法”施工墙柱的宽度较大的深开挖工程。斜撑用于开挖深度不大而断面尺寸较宽的场所，施工时可配合斜撑在边脚压重，斜撑的后座可采用混凝土板或短工字钢桩。

(3) 锚杆挡土墙

锚杆挡土墙是深大开挖最常采用的支撑方式，如图 1-5 (d) 所示。锚杆的作用和内撑杆一样，只不过一个是从内向外推墙，一个是从后拉墙，使墙保持稳定。锚杆适用于在墙外一定范围内具有适合锚固的地层条件和各种墙。主要优点在于，预应力锚杆增强了承载能力和刚度，使水平变位和墙外沉降得到控制，且提供了自由开挖空间；缺点是锚杆力的竖向分量有可能使墙向下移动并产生弯曲，因而要求较好的墙基支承条件。

施工顺序如图 1-6 所示，先沿墙挖比较窄的沟槽，供施工机械下第一层锚，然后进行内部开挖，再下第二层锚杆，直到开挖标高。每个锚杆经验收试验后一般可锁定在 75%~80% 以上设计荷载，而对永久锚杆或严格限制墙后沉降场合，可锁定在 100% 设计荷载。

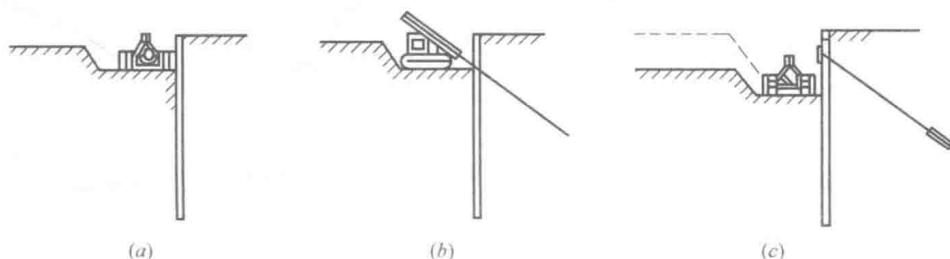


图 1-6 锚杆墙施工顺序

(a) 设置墙以后挖槽；(b) 设第一层锚杆；(c) 内部开挖，准备设第二层锚杆

(4) 锚定板桩墙

单层锚杆或多层锚杆的第一层可用锚定块代替，见图 1-5 (e)，这种墙常称为锚定板桩墙。锚定块可以是混凝土块、短桩、叉桩或连续构件，锚定板桩墙主要用于岸边挡土结构中。此外，在桥墩深开挖工程中也广泛采用压缩环（环形、矩形）以保持墙稳定。

(5) 环梁支撑法

环梁支护体系：分外接圆式（见图 1-7）和内接圆式（见图 1-8），还有椭圆式环梁及复合式环梁支护。环形支护是将基坑支护桩上设置一道或几道环梁，把土压力传到圆形环梁，使受弯拉力转化为压力，以发挥混凝土受压的特性。该方法适用于四周有地下连续墙、密排挡土桩等情况。

环梁支撑法的特点是：①由于环梁支撑，增加基坑稳定，减少位移；②解决软土地区不

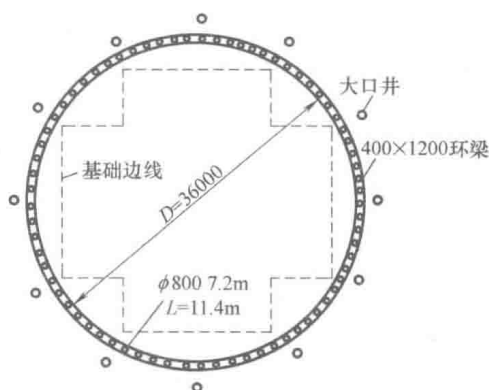


图 1-7 基坑平面示意图