

深基坑围护设计与 实例解析

SHENJIKENG WEIHU SHEJI YU SHILI JIEXI

徐长节 尹振宇 编著

**按新规范、新规程编写
详解典型基坑工程实例**



深基坑围护设计与实例解析

徐长节 尹振宇 编著



机械工业出版社

本书系统地剖析基坑设计理论,并结合我国最新颁布的《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)等相关规范和规程进行编写,以便读者更好地理解最新规范的内容,从而更好地掌握基坑设计核心技术。书中大量的各种类型基坑工程实例可以直接为设计人员提供有益的参考。

全书分为十一章,内容主要有:绪论、基本规定、放坡开挖、土钉墙支护、复合土钉墙支护、水泥土重力式挡墙支护、双排桩悬臂式支护、桩墙式围护结构、特殊支护结构、基坑降水体系、基坑监测体系等。

图书在版编目(CIP)数据

深基坑围护设计与实例解析/徐长节编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-111-44967-6

I. ①深… II. ①徐… III. ①深基坑支护—施工设计 IV. ①TU46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 288652 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张 晶 责任编辑:张 晶 刘志刚

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.25 印张·371 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44967-6

定价:46.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

基坑工程是一个古老而又具有时代特点的岩土工程问题。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工程的发展。特别是 20 世纪中叶以来,随着国内外大量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,挖深也不断加深,这样对基坑工程的要求越来越高,出现的问题也越来越多,如何按照“安全、经济、合理”的原则进行基坑围护体系的设计是每个基坑工程必须面对的技术难题。本书在读者已有的专业基础理论的前提下,系统地剖析基坑设计理论,并结合我国最新颁布的《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)等多种规范和规程进行编写,以便读者更好地理解最新规范的内容,从而更好地掌握基坑设计核心技术。书中大量的各种类型基坑工程实例可以直接为设计人员提供有益的参考。

全书分为十一章,内容主要有:绪论、基本规定、放坡开挖、土钉墙支护、复合土钉墙支护、水泥土重力式挡墙支护、双排桩悬臂式支护、桩墙式围护结构、特殊支护结构、基坑降水体系、基坑监测体系等。

本书由浙江大学徐长节教授编著。在编写过程中,杭州浙大福世德勘测设计有限公司张正工程师、刘元昆工程师参加了多个工程实例的编写,杭州浙大福世德勘测设计有限公司林刚工程师、浙江大学的俞建霖老师提供了大量的工程实例材料,在此表示感谢。限于编者水平,加之时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正,以使本书更趋完善。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 基坑工程的发展概况	1
第二节 围护结构常用形式	2
第三节 基坑工程理论分析方法	8
第四节 基坑工程的特点	11
第二章 基本规定	13
第一节 设计原则及设计内容	13
第二节 水平荷载	16
第三节 稳定性验算	20
第三章 放坡开挖	28
第一节 放坡开挖的概述	28
第二节 放坡开挖的设计计算	29
第三节 工程实例	32
第四章 土钉墙支护	35
第一节 土钉墙概述及一般规定	35
第二节 土钉墙的类型及构造要求	36
第三节 土钉墙的设计计算	38
第四节 工程实例	43
第五章 复合土钉墙支护	47
第一节 复合土钉墙概述	47
第二节 复合土钉墙的应用形式	47
第三节 复合土钉墙的设计计算	50
第四节 复合土钉墙的施工及检测要求	54
第五节 工程实例	55
第六章 水泥土重力式挡墙支护	59
第一节 水泥土重力式挡墙概述及一般规定	59
第二节 水泥土重力式挡墙的类型及构造要求	60
第三节 水泥土重力式挡墙的设计计算	61
第四节 水泥土重力式挡墙的破坏形式	65
第五节 工程实例	65
第七章 双排桩悬臂式支护	69
第一节 双排桩支护概述	69
第二节 双排桩支护的类型及布置形式	69
第三节 双排桩受力与变形特点	71
第四节 双排桩的设计计算	73

第五节 工程实例	76
第八章 桩墙式围护结构	83
第一节 概述	83
第二节 结构分析	86
第三节 稳定性计算	95
第四节 围护结构设计	101
第五节 工程实例	114
第九章 特殊支护结构	154
第一节 TRD 工法	154
第二节 可回收式浆囊袋土钉	159
第三节 高压喷射扩大头锚杆	162
第四节 工程实例	164
第十章 基坑降水体系	189
第一节 概述	189
第二节 地下水控制设计	190
第三节 降水引起的地层变形	206
第四节 工程实例	207
第十一章 基坑监测体系	211
第一节 概述	211
第二节 监测项目	213
第三节 监测方法	215
第四节 监测频率及报警	222
第五节 工程实例	225
参考文献	235

第一章 绪 论

第一节 基坑工程的发展概况

基坑工程问题是一个古老而又具有时代特点的岩土工程问题。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工程的发展。特别是 20 世纪中叶以来，随着国内外大量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，与此同时，各类用途的地下空间和设施也得到了空前的发展，包括高层建筑地下室、地铁、隧道、地下商业街等各种形式。建造这些地下空间和设施，必须进行大规模的深基坑开挖，这样对基坑工程的要求越来越高，出现的问题也越来越多，这为合理设计与施工基坑工程提出了许多紧迫而重要的研究课题。

基坑支护既是一个综合性的岩土工程问题，又是涉及土层与支护结构共同作用的复杂问题。它具有地域性、综合性、实践性和风险性。由于深基坑工程设计理论的不足和施工中各种情况的不确定性，造成当前深基坑工程的支护设计与施工存在“半理论半经验”的状况。

据有关资料统计，深基坑工程事故的发生率一般约占基坑工程数量的 20% 左右，有一些城市甚至占到 30%。其中有一部分的原因就是支护结构受到破坏，甚至支撑失效。2008 年，杭州地铁湘湖站深基坑工程发生大面积坍塌事故，人员伤亡和经济损失都很惨重，如图 1-1 所示。这就要求我们必须对基坑支护结构的受力变形有很深的了解，才能避免类似的工程事故发生。



图 1-1 杭州地铁湘湖站工程事故现场照片

自上个世纪 30 年代开始，Terzaghi、Peck 等人已开始研究基坑工程中的岩土工程问题。

在以后的时间里，世界各国的许多学者都投入了研究，并不断地在这一领域取得丰硕成果。在理论分析方法上有早期的古典法、山肩邦男精确解法，以及基于计算机技术发展出的有限单元法。1971 年 Whittle 等学者考虑了不同本构模型和边界条件对求解的影响，目前应用较多。基坑工程在我国的广泛研究是始于 20 世纪 80 年代初，当时随着改革开放的步伐，基本建设如火如荼、高层建筑不断涌现，相应的基础埋深不断增加，开挖深度也就不断发展。特别是到了 20 世纪 90 年代，大多数城市都进入了大规模的旧城改造阶段，在繁华的市区内进行深基坑开挖给这一古老课题增加了新的内容，那就是如何控制深基坑开挖的环境效应问题，从而进一步促进了深基坑开挖技术的研究和发展，产生了许多先进的设计计算方法，而众多新的施工工艺也不断付诸实施，出现了许多技术先进的成功工程实例。

迄今为止，围护形式已经发展至数十种。从基坑围护机理来讲，基坑围护方法的发展最早有放坡开挖，然后有悬臂围护、内撑(或拉锚)围护、组合型围护等。放坡开挖需要有较大的工作面，且开挖土方量较大，但在条件允许的情况下，至今仍然不失为基坑围护的好方法。围护结构最早采用木桩，现在常用钢筋混凝土桩、地下连续墙、钢板桩以及通过地基处理方法采用水泥土挡墙、土钉墙等。钢筋混凝土桩通常有钻孔灌注桩、咬合桩、沉管灌注桩和预制桩等。围护形式的多样化，在扩大了基坑适用的地层和规模、给设计人员更多选择余地的同时，也给如何进行围护方案比选并加以灵活运用方面也带来了新的研究领域。

第二节 围护结构常用形式

基坑支护体系一般包括两部分：挡土体系和止水降水体系。基坑支护结构一般要承受土压力和水压力，起到挡土和挡水的作用。一般情况下支护结构和止水帷幕共同形成止水体系。但尚有两种情况：一种是止水帷幕自成止水体系；另一种是支护结构本身也起止水帷幕的作用，如水泥土重力式挡墙和地下连续墙等。

目前在基坑工程实践中已形成了多种成熟的支护结构类型，每种类型在适用条件、工程经济性等方面各有特点，因此需综合考虑每个工程规模、周边环境、工程水文地质条件等因素合理选用周边支护结构形式。

工程中常用的基坑支护结构有土钉墙、水泥土墙、地下连续墙、排桩、逆作拱墙、原状土放坡或采用上述形式的组合，见表 1-1。设计时应根据每种支护结构形式的特点进行选型。

表 1-1 支护结构选型表

结构形式	适用条件
排桩或地下连续墙	1. 适于基坑侧壁安全等级为一、二、三级 2. 悬臂式结构在软土地中不宜大于 5m 3. 地下水位高于基坑底面时，宜采用降水、排桩加截水帷幕或地下连续墙
水泥土墙	1. 基坑侧壁安全等级宜为二、三级 2. 水泥土桩施工范围内地基土承载力不宜大于 150kPa 3. 基坑深度不宜大于 6m

(续)

结构形式	适用条件
土钉墙	1. 基坑侧壁安全等级宜为二、三级的非软土地 2. 基坑深度不宜大于 12m 3. 地下水位高于基坑底面时应采取降水或截水措施
逆作拱墙	1. 基坑侧壁安全等级宜为二、三级 2. 淤泥和淤泥质土地不宜采用 3. 拱墙轴线的矢跨比不宜小于 1/84，基坑深度不宜大于 12m 4. 地下水位高于基坑底面时应采取降水或截水措施
放坡	1. 基坑侧壁安全等级宜为三级 2. 施工现场满足放坡条件 3. 可独立或与上述其他结构结合使用 4. 当地下水位高于坡脚时，应采取降水措施

支护结构选型还应考虑结构的空问效应和受力特点，采用有利于支护结构材料受力性状的形式。软土地场可采用深层搅拌、注浆、间隔或全部加固等方法对局部或整个基坑底土进行加固，或采用降水措施提高基坑内侧被动土抗力。

基坑在开挖过程中，用于撑护、围护、加固基坑周边的土体，抵抗外部荷载，阻止地下水流失，并使基坑周边的土体、水体及建筑物保持相对稳定的结构、构件等统称为围护结构。

基坑围护结构的形式按施工方法的不同主要有以下几种：放坡开挖及土钉墙、水泥土挡墙、混凝土灌注桩、地下连续墙、SMW 工法桩和钢板桩等。各种围护结构主要特点及适用条件归纳如下。

一、放坡开挖及土钉墙

放坡开挖分为有支护和无支护两种方式，土钉墙虽然在情况特殊时采用直立开挖，但在一般情况下也会设置一定的开挖坡率，故从施工原理上也属于放坡开挖的一种。放坡开挖的设计原则是通过选择安全合理的开挖坡率和支护参数，使开挖后的土体依靠自身或在土钉加固后能保持施工期的稳定。由于基坑敞开式施工，因此具有施工简便、工期短、造价较经济等优点。由于无需支撑体系，也可为主体结构施工提供宽敞的作业空间。放坡开挖的示意图如图 1-2 所示。

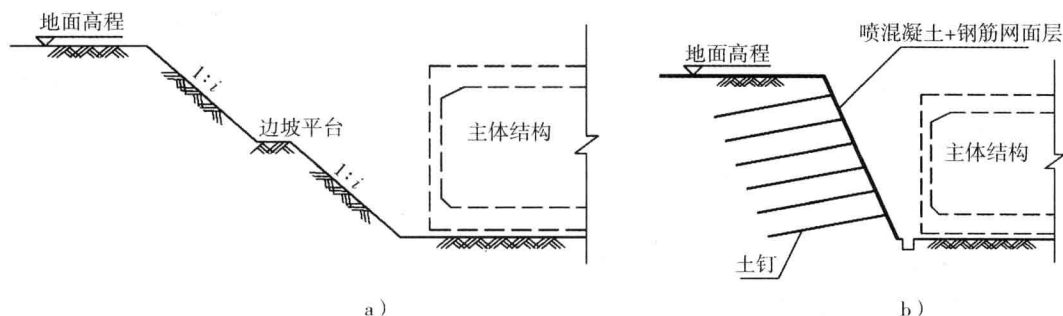


图 1-2 放坡开挖示意图

a) 无支护放坡开挖 b) 有支护(土钉墙)开挖

放坡开挖主要适用于土质较好的浅基坑，要求基坑周围没有重要的影响建筑，并需要有足够的施工场地。适用的基坑开挖深度一般在 5m 以内，配合土钉墙和矮挡墙，在地质较好的无水基坑也有高度达到 10m 左右的案例。

二、水泥土重力式挡墙

水泥土重力式挡墙是指使用水泥搅拌设备，以水泥系材料为固化剂，在基坑周边就地将原状土强制搅拌，以形成具有一定强度和止水性能的柱状加固挡墙，其截面一般采用相互搭接的格栅形式，如图 1-3 所示。

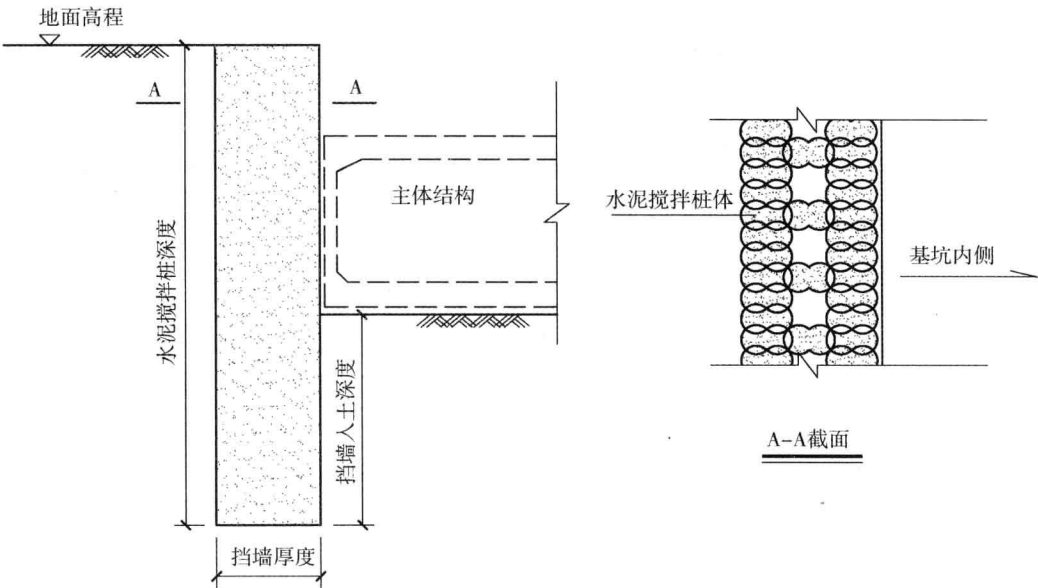


图 1-3 水泥土重力式挡墙围护示意图

水泥土重力式基坑开挖深度一般不超过 7m，除了具有放坡开挖的施工作业空间开阔的优点外，更具有良好的止水性能和土层适用范围，对于地下水位较高和淤泥质软土地质的浅基坑具有明显优势。缺点是位移相对较大，红线宽度较大，当基坑周边存在重要建(构)筑物时，应慎重选用。

三、悬臂式支护结构

悬臂式支护结构常采用钢筋混凝土桩、木板桩、钢板桩、钢筋混凝土板桩、地下连续墙等形式。值得关注的是，钢筋混凝土咬合桩和 SMW 工法目前已经被广泛使用，钢筋混凝土桩常采用钻孔灌注桩、人工挖孔桩、沉管灌注桩及预制桩等。

悬臂式支护结构依靠足够的入土深度和结构的抗弯能力来维持整体稳定和结构安全。悬臂式结构对开挖深度非常敏感，容易产生较大的变形，对相邻建(构)筑物易产生不良影响。悬臂式结构适用于土质较好、开挖深度较浅的基坑工程。

四、拉锚式支护结构

拉锚式支护结构由支护结构体系和锚固体系两部分组成。支护结构体系相同于内支撑支护结构，常采用钢筋混凝土排桩墙和地下连续墙两种。锚固体系可分为锚杆式和地面拉锚式

两种。随着基坑深度不同，锚杆式也可分为单层锚杆、双层锚杆和多层锚杆。地面拉锚式支护结构需要足够多的场地设置锚桩或其他锚固物。锚杆式需要地基土能提供锚杆较大的锚固力，所以一般很少使用。

拉锚支护技术在基坑工程领域经过多年的应用和发展，已经形成多种成熟的、可供选择的形式。如预应力锚杆和非预应力锚杆、单孔单一锚固和单孔复合锚固等。锚杆的具体选型需根据工程水文地质条件、周边环境情况以及基坑工程的规模及开挖深度等特点综合确定。

五、内撑式支护结构

内撑式支护结构的含义可用“外护内支”四个字表述。“外护”，指的是用支护结构对外挡住边坡土体、防止地下水渗漏；“内支”是指利用内支撑系统为支护结构的稳定提供足够的支撑力，内撑式支护结构的竖向支承结构一般为柱式受力，主要是保证水平支撑的纵向稳定，加强支撑体系的空间刚度和承受水平支撑传来的竖向荷载，要求具有较好的自身刚度和较小的竖向位移。而水平支撑结构在发挥其支撑功能时是梁式受力，主要是平衡支护墙外侧水平作用力，要求传力直接、平面刚度好而且分布均匀。

内撑式支护结构由支护结构体系与支撑体系两部分组成。支护结构体系常采用钢筋混凝土排桩墙和地下连续墙。支撑体系可采用水平支撑和斜支撑。根据不同开挖深度又可采用单层水平支撑、双层水平支撑及多层水平支撑，分别如图 1-4a、b 及 c 所示。当基坑平面面积很大，而开挖深度不同时，宜采用单层斜支撑，如图 1-4d 所示。

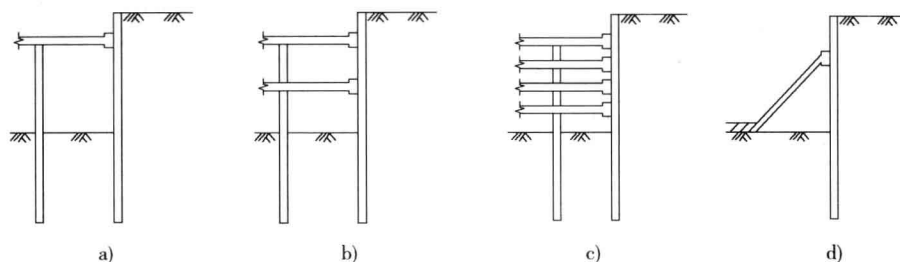


图 1-4 常用的支撑体系类型

支撑采用钢筋混凝土支撑和钢管(或型钢)支撑两种形式。钢筋混凝土支撑体系具有刚度大、整体性好的特点，而且可采取灵活的平面布置形式适应基坑工程的各项要求。支撑布置形式目前常用的有正交支撑、圆环支撑或对撑、角撑结合边桁架布置形式。而钢管支撑的优点是钢管可以回收，且加预压力方便。

钢支撑架设和拆除速度快，架设完毕后不需要等待强度即可直接开挖下层土方，而且支撑材料可重复循环使用，对节省基坑工程造价和加快工期具有显著优势，适用于开挖深度一般、平面形状规则、狭长形的基坑工程中。钢支撑几乎成为地铁转车站基坑工程首选的支撑体系。但钢支撑节点构造和安装复杂以及目前常用的钢支撑材料截面承载力较为有限等特点，使其不适用以下几种情况：

(1) 基坑尺寸不规则，不利于钢支撑平面布置。

(2) 基坑面积巨大，单个方向钢支撑长度过长，拼接节点多易积累形成较大的施工偏差，传力可靠性难以保证。

(3)对周边环境控制要求严格的深大基坑：由于基坑面积大且开挖深度深，钢支撑的刚度相对较小，不利于控制基坑变形和保护周边的环境。

根据上述钢筋混凝土支撑和钢支撑的不同特点，在一定的条件下基坑工程可以充分利用两种材料的特性，采用混凝土与钢组合的支撑形式，在确保基坑工程安全的前提下，可以实现较为合理的经济和工期目标。混凝土与钢组合支撑体系常用的有两种形式，一种是同层支撑平面内混凝土和钢组合支撑；另一种是混凝土支撑平面与钢支撑平面的分层组合的形式。采用混凝土和钢组合支撑时，应注意第一道支撑与其下各道支撑平面应上下统一，以便与竖向支撑系统的共同作用以及基坑土方的开挖施工。

常用的支挡体系有：

1) 钻孔灌注桩围护。钻孔灌注桩围护结构为桩列式挡土墙，根据目前我国常用的施工工艺，钻孔灌注桩围护墙多为间隔排列式，由于不具备挡水功能，仅适用于地下水位深、土质较好地区，在地下水位较高的地区，则常辅以旋喷桩或水泥土搅拌桩作为止水帷幕。咬合桩是利用相互咬合的素混凝土桩(B 桩)与钢筋混凝土桩(A 桩)交错布置的形式，施工时先灌注 B 桩、并采用超缓凝混凝土，利用 B 桩缓凝时间，在相邻两根 B 桩之间压套管切割成孔、浇筑钢筋混凝土 A 桩，形成强度较大且自身具备止水作用的排桩墙体，是近几年在我国发展较快的一项新技术，如图 1-5 所示。

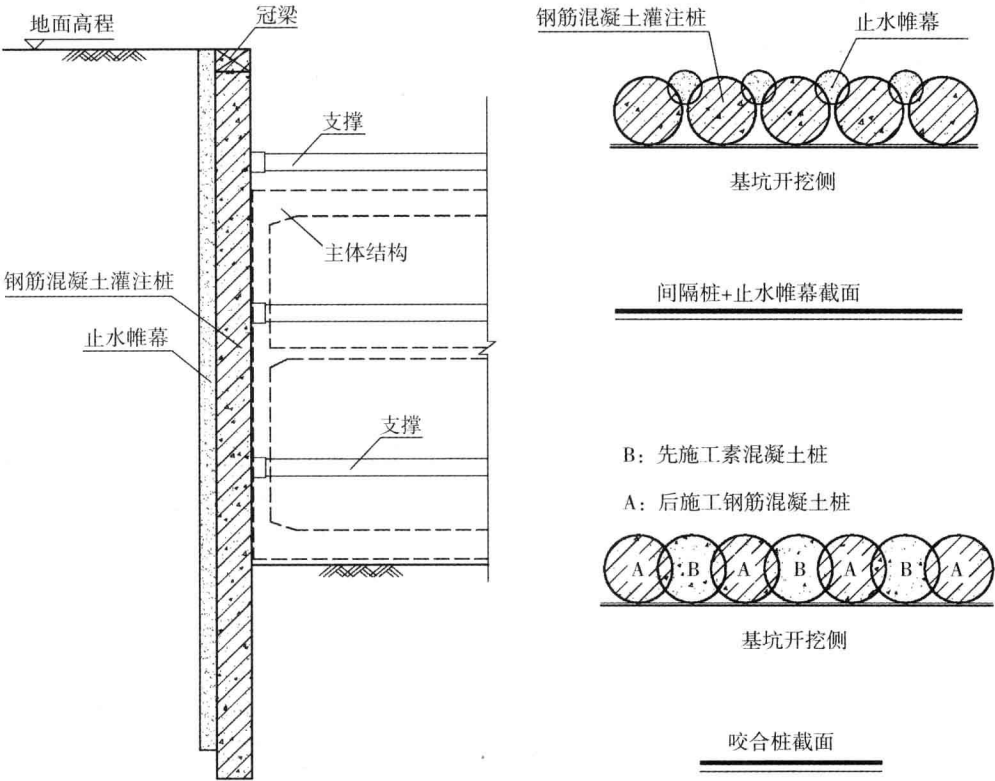


图 1-5 混凝土灌注桩围护示意图

钻孔灌注桩施工具有无噪声、无振动和无挤土的优点，灌注桩围护墙刚度大、抗弯能力强、变形较小，在我国各地得到广泛的应用。设计时常与支撑相结合，可用于深度 7 ~ 15m

的基坑工程。

2) 地下连续墙。地下连续墙是在基坑开挖之前, 通过专用成槽设备在泥浆护壁的保护下开挖深槽, 下放钢筋笼后用导管浇筑水下混凝土而形成地下连续的混凝土墙体。最早于 1950 年在意大利成功运用, 早期主要作为防渗墙, 随着实践经验的积累和施工机械的改进, 理论研究和施工工艺渐趋成熟, 已逐步成为城市地下建设中的一项重要技术。地下连续墙墙体目前厚度多在 600 ~ 1200mm 之间, 采用多头挖槽机分段跳槽开挖, 接头主要有十字钢板和锁口管等形式。

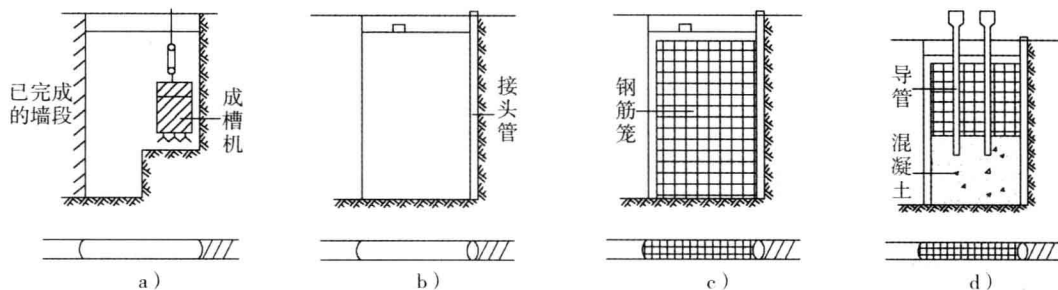


图 1-6 地下连续墙施工工艺示意图

a) 成槽 b) 放入接头管 c) 放入钢筋笼 d) 浇筑混凝土

地下连续墙刚度大、整体性和抗渗性好、基坑变形较小, 施工振动和噪声也较低, 特别适用于周边建筑物密集、用地紧张的城市深基坑工程, 如城市地铁车站、高层建筑较深的地下室等, 已被公认是深基坑工程中最佳的挡土结构之一。其缺点主要是泥浆制备和处理存在一定的难度和污染, 整体工程造价也相对较高。地下连续墙还可配合逆作法施工, 作为地下结构外墙的一部分, 以缩短工期、降低工程造价。

3) SMW 工法桩。SMW (Soil Mixing Wall) 是从日本引进的工法, 国内也称为劲性水泥土搅拌桩法, 该法是利用水泥土搅拌桩, 在原地切削加固土体形成水泥土柱, 然后在搅拌桩内插入型钢(多数为 H 型钢), 形成兼具受力与抗渗两种功能的复合围护墙, 如图 1-7 所示。SMW 工法的搅拌机械多为专用的三轴搅拌机全断面搅拌, 所以搅拌充分, 便于插入 H 型钢, 在主体结构施工完成后型钢还可拔出回收。

SMW 工法围护结构的主要特点为: 施工时基本无噪声, 对周围环境影响小; 结构强度可靠, 凡是适合应用水泥土搅拌桩的场合都可使用, 特别适合于以黏土和粉细砂为主的松软地层; 挡水防渗性能好、不必另设挡水帷幕; 还可以配合多道支撑应用于较深的基坑。如果能够采取工程措施成功回收型钢, 则工程造价远低于地下连续墙, 在对基坑变形控制不严重时, 可代替地下连续墙以节省造价, 因而具有较大发展前景。

4) 拉森钢板桩。拉森钢板桩(图 1-8)作为一种新型建材, 作为围护支撑结构不仅绿色、环保, 而且施工速度快、施工费用低, 具有很好的防水功能。产品按生产工艺划分有冷弯钢板桩和热轧钢板桩两种类型。在工程建设中, 冷弯钢板桩性价比比较高, 工程运用中, 两种类型可以相互替代。基于钢板桩在施工作业中的诸多优点, 国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会于 2007 年 5 月 14 日发布了国家标准《热轧 U 型钢板桩》, 并于 2007 年 12 月 1 日正式实施。

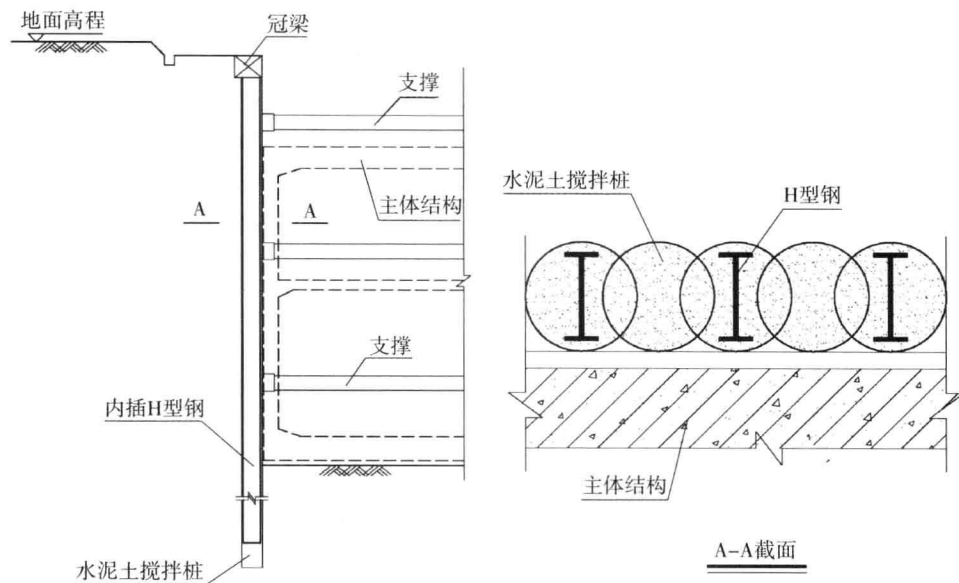


图 1-7 SMW 工法桩围护示意图



图 1-8 拉森钢板桩支护

另外近些年来还发展出一些其他的支挡结构，如异型桩、大直径薄壁现浇混凝土桩等，在工程中均有一定的应用。

第三节 基坑工程理论分析方法

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比较符合实际情况的结果，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。以理论为导向，以量测为定量，以经验、判断相结合的综合方法已成为基坑工程设计和施工的三种重要依据。以内撑式围护结构分析方法为例，主要有以下方法。

1. 古典分析方法

挡土结构内力分析的古典方法主要包括平衡法、等值梁法和塑性铰法等。

平衡法，又称自由端法，要点是采用经典土力学理论计算主动土压力和被动土压力，然后根据力矩平衡条件计算桩的入土深度以满足整体稳定，再验算挡墙抗倾覆、抗滑移稳定性。其适用于底端自由支撑的悬臂式挡土结构和单支点挡土结构。当挡土结构的入土深度不太深时，结构底端可视为非嵌固，即底端自由支撑。图 1-9 为单锚挡土结构在砂性土中的平衡法的计算简图。

等值梁法，又称假想铰法，可以求解多支撑（锚杆）的挡土结构内力。首先假定挡土结构弹性曲线反弯点即假想铰的位置。假想铰的弯矩为零，于是可把挡土结构划分为上下两段，上部为简支梁，下部为一次超静定结构（图 1-10），这样即可按照弹性结构的连续梁求解挡土结构的弯矩、剪力和支撑轴力。

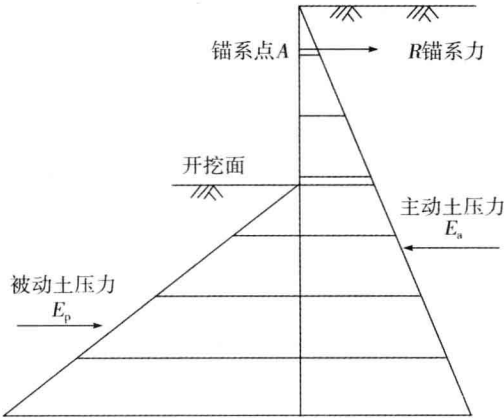


图 1-9 单锚挡土结构平衡法计算简图

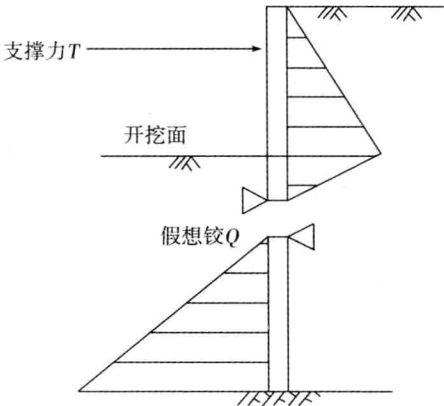


图 1-10 等值梁法计算简图

塑性铰法，又称 Terzaghi 法，该方法假定挡土结构在横撑（除第一道撑）支点和开挖面处形成塑性铰，从而解得挡土结构内力。

2. 解析方法

挡土结构内力分析的解析方法是通过将挡土结构分成有限个区间，建立弹性微分方程，再根据边界条件和连续条件，求解挡土结构内力和支撑轴力。常见的解析方法主要有山肩邦男法、弹性法和弹塑性法。

山肩邦男法的精确解假定：①黏土地层中挡土结构为无限长弹性体；②开挖面主动侧土压力在开挖面以上为三角形，开挖面以下抵消被动侧的静止土压力后取为矩形；③被动侧土的横向反力分为塑性区和弹性区；④横撑设置后作为不动支点；⑤下道支撑设置后，上道支撑轴力保持不变，且下道支撑点以上挡土结构位置不变。山肩邦男法将结构分为三个区间，即第 k 道横撑到开挖面区间，开挖面以下塑性区及弹性区（图 1-11）。基本求解过程是首先建立弹性微分方程，再根据边界条件和连续条件，导出第 k 道横撑轴力的计算公式和变位及内力公式。由于山肩邦男法的精确解计算方程中有未知数的五次函数，计算较为繁琐。山肩

邦男法的近似解法对上述基本假定作了修改，只需应用两个平衡方程就可依次求得各道横撑内力。

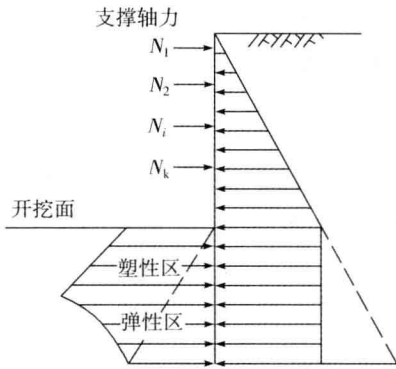


图 1-11 山肩邦男法精确解计算简图

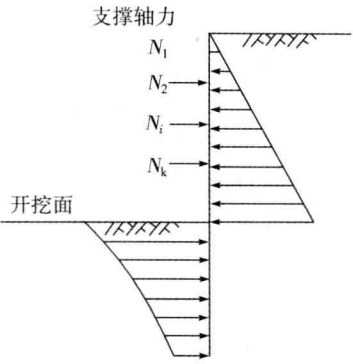


图 1-12 弹性法计算简图

弹性法与山肩邦男法在基本假定上基本相同，只是对土压力的假定有所差别。弹性法中假设主动侧土压力已知，但开挖面以下只有被动侧的土压力，被动侧的土压力数值与墙体变位成正比(图 1-12)。

弹塑性法与上述两种方法的主要区别在于，山肩邦男法和弹性法都假定土压力已知且挡土结构弯矩及支撑轴力在下道支撑设置后不变化，而弹塑性法假定土压力已知但挡土结构弯矩及支撑轴力随开挖过程变化。

弹塑性法的基本假定如下：①支撑以弹簧表示，即考虑其弹性变位；②主动侧土压力假设为竖向坐标的二次函数并采用实测资料；③挡土结构入土部分分为达到朗肯被动土压力的弹性区和土抗力和挡土结构变位成正比的弹性区；④挡土结构有限长端部支承可为自由、铰接或固定。

3. 数值分析方法

早期的古典分析方法和解析方法由于在理论上存在各自的局限性而难以满足复杂基坑工程的设计要求，因而现在已经应用得很少。目前常用的分析方法主要有平面弹性地基梁法和平面连续介质有限元方法。

(1)平面弹性地基梁法。将单位宽度的挡土墙作为竖向放置的弹性地基梁，支撑和锚杆简化为弹簧支座，基坑内开挖面以下土体采用弹簧模拟，挡土结构外侧作用已知的水压力和土压力。平面弹性地基梁法一般可采用杆系有限元方法求解，考虑土体的分层级支撑的实际情况，沿着竖向将弹性地基梁划分成若干单元，列出每个单元的上述微分方程，进而解得单元的位移和内力。

(2)平面连续介质有限元方法。一般是在整个基坑中寻找具有平面应变特征的断面进行分析。土体采用平面应变单元来模拟。挡土结构如地下连续墙等板式结构需要承受弯矩，可用梁单元来模拟。支撑、锚杆等只能承受轴向力的构件采用杆件单元模拟。考虑连续墙与土体的界面接触，可以利用接触面单元来处理。连续介质有限元方法考虑了土和结构的相互作用，可同时得到整个施工过程挡土结构的位移和内力以及对应的地表沉降和坑底回弹等。

第四节 基坑工程的特点

基坑工程包括基坑支护体系设计与施工及土方开挖，是一项综合性很强的系统工程，它要求岩土工程和结构工程人员密切配合。基坑支护体系是临时结构，在地下工程施工完成后，基坑支护体系就不再需要。基坑工程具有下述特点：

1. 安全储备较小，具有较大的风险性

一般情况下，基坑支护是临时措施，地下室主体施工完成时支护体系即完成任务。与永久性结构相比，在强度、变形、防渗、耐久性等方面的要求较低一些，安全储备要求小一些，因此具有较大的风险性。再加上建设方对基坑工程认识上的偏差，为降低工程费用，对设计提出一些不合理的要求，实际的安全储备可能会更小一些。同时，基坑工程在施工过程中应进行监测，并有相应的应急措施。施工过程中一旦出现险情，需要及时抢救。

2. 制约因素多

基坑工程与自然条件的关系较为密切，设计、施工中必须全面考虑气象、工程地质及水文地质条件及其在施工中的变化，充分了解工程所处的工程地质及水文地质、周围环境与基坑开挖的关系及相互影响。基坑工程作为一种岩土工程，受到工程地质和水文地质条件的影响很大，区域性强。我国幅员辽阔，地质条件变化很大，有软土、砂性土、砾石土、黄土、膨胀土、红土、风化土和岩石等，不同地层中的基坑工程所采用的围护结构体系差异很大，即使是在同一个城市，不同的区域也有差异，因此，支护结构体系的设计、基坑的施工均要根据具体的地质条件因地制宜，不同地区的经验可以参考借鉴，但不可照搬照抄。

另外，基坑工程围护结构体系除受地质条件制约以外，还要受到相邻的建筑物、地下构筑物 and 地下管线等的影响，周边环境的容许变形量、重要性等也会成为基坑工程设计和施工的制约因素，甚至成为基坑工程成败的关键，因此，基坑工程的设计和施工应根据基本的原理和规律灵活应用，不能简单引用。基坑支护开挖所提供的空间是为主体结构的地下室施工所用，因此任何基坑设计，在满足基坑安全及周围环境保护的前提下，要合理地满足施工的易操作性和工期要求。

3. 计算理论不完善

基坑工程作为地下工程，所处的地质条件复杂，影响因素众多，人们对岩土力学性质的了解还不深入，很多设计计算理论，如岩土压力、岩土的本构关系等，还不完善，还是一门发展中的学科。

作用在基坑支护结构上的土压力不仅与位移的大小、方向有关，还与时间有关。目前，土压力理论还很不完善，实际设计计算中往往采用经验取值，或者按照朗肯土压力理论或库仑土压力理论计算，然后再根据经验进行修正。在考虑地下水对土压力的影响时，是采用水土压力合算还是分算更符合实际情况，在学术界和工程界认识还不一致，各地制定的技术规程或规范中的规定也不尽相同。至于时间对土压力的影响，即考虑土体的蠕变性，目前在实际应用中较少顾及。

实践发现，基坑工程具有明显的时空效应，基坑的深度和平面形状对基坑支护体系的稳定性和变形有较大的影响，土体所具有的流变性对作用于围护结构上的土压力、土坡的稳定