

# 施工结构设计

邓子胜 编著

SHIGONG JIEGOU SHEJI

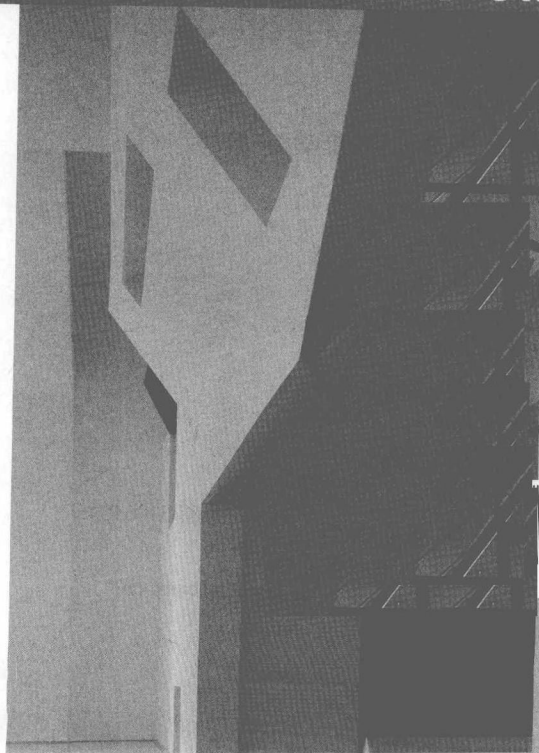


华南理工大学出版社

# 施工结构设计

邓子胜 编著

SHIGONG JIEGOU SHEJI



华南理工大学出版社  
·广州·

## 内容提要

本书结合工程实例,介绍了常用施工结构设计的基本原理与方法,包括基坑支护结构设计、脚手架设计、模板设计和现场垂直运输设施设计。同时,介绍了品茗施工安全设施计算软件的主要功能及使用,给出了基坑支护结构水平荷载和抗力标准值的计算程序。各章均附有思考题或习题。

本书可作为房屋建筑、道路桥梁、水利水电、市政工程、岩土工程等相关专业的本、专科学生的教材和工程技术人员的培训用书,也可供工程设计人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

施工结构设计/邓子胜编著. —广州:华南理工大学出版社, 2009. 9  
ISBN 978 - 7 - 5623 - 3191 - 9

I. 施… II. 邓… III. 建筑结构-结构设计-高等学校-教材  
IV. TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 139696 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼 邮编 510640)

营销部电话:020-87113487 87110964 87111048 (传真)

E-mail: z2cb@scut.edu.cn http://www.scutpress.com.cn

策划编辑:赖淑华

责任编辑:何小敏 赖淑华

印刷者:惠州市海天印刷有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:10.75 字数:269 千

版次:2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

印数:1~2 000 册

定价:20.50 元

版权所有 盗版必究

# 前 言

凡为施工活动的操作、安全及现场运输需要而设置的结构和与之相互影响的岩土或其他结构物均属施工结构。施工结构多为临时结构，也有的成为建（构）筑物永久结构的一部分。施工活动涉及房屋建筑、道路桥梁、水利水电、市政工程等领域的各类建筑物、构筑物的结构、装饰和维修施工。施工结构设计包括基坑支护结构设计、脚手架设计、模板设计和现场垂直运输设施设计等。

目前，我国的施工技术水平已接近或达到国际先进水平。然而，在工程施工成本和安全方面还存在较大差距，由于施工结构设计不合理（有的甚至不做设计）而导致的安全事故时有发生，造成工程建设资金浪费的情况比比皆是。近年来，我国对施工结构设计的研究和探索越来越重视，政府建设主管部门对这方面的管理也越来越规范和严格。

施工结构的内容涉及方方面面，针对的具体工程更是多种多样，即使是同一工程，也可有多个不同的施工结构设计方案。本书结合工程实例，主要介绍基坑支护结构设计、脚手架设计、模板设计和现场垂直运输设施设计的基本原理与方法。

施工结构设计中存在大量的重复计算和查表工作，而且编制施工专项方案的时间一般都非常紧，应用计算机软件进行施工结构辅助设计是大势所趋，本书对品茗施工安全设施计算软件的功能和使用进行了介绍。此外，基坑支护结构设计时，土压力作为作用在支护结构上的荷载，通常要事先算出，为此本书给出了支护结构水平荷载和抗力标准值的 CASIO 编程计算器计算程序。

编 者  
2009 年 5 月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1 基坑支护结构设计 .....             | 1  |
| 1.1 概述 .....                 | 1  |
| 1.1.1 基坑工程的发展 .....          | 1  |
| 1.1.2 基坑工程的内容与分级 .....       | 2  |
| 1.1.3 基坑开挖与支护方法分类 .....      | 3  |
| 1.1.4 基坑支护设计理论与计算方法 .....    | 7  |
| 1.2 基坑工程勘察 .....             | 14 |
| 1.3 基坑支护结构设计 .....           | 15 |
| 1.3.1 支护结构选型 .....           | 15 |
| 1.3.2 支护结构的围护墙计算 .....       | 24 |
| 1.3.3 支护结构的撑锚体系计算 .....      | 53 |
| 1.4 基坑工程现场监测 .....           | 64 |
| 1.4.1 监测目的 .....             | 64 |
| 1.4.2 监测项目及仪器设备 .....        | 64 |
| 1.4.3 测点布置 .....             | 66 |
| 1.4.4 监测系统设计原则和监测的基本要求 ..... | 67 |
| 1.4.5 监测项目安全警戒值 .....        | 67 |
| 1.4.6 监测结果的分析评价与应用 .....     | 68 |
| 1.4.7 监测报告 .....             | 69 |
| 思考题 .....                    | 69 |
| 习 题 .....                    | 69 |
| 2 脚手架设计 .....                | 71 |
| 2.1 概述 .....                 | 71 |
| 2.1.1 脚手架的分类 .....           | 71 |
| 2.1.2 扣件式钢管脚手架 .....         | 71 |

|        |                  |    |
|--------|------------------|----|
| 2.1.3  | 碗扣式钢管脚手架 .....   | 73 |
| 2.1.4  | 门式钢管脚手架 .....    | 74 |
| 2.2    | 脚手架荷载计算 .....    | 75 |
| 2.2.1  | 永久荷载标准值 .....    | 75 |
| 2.2.2  | 施工均布活荷载标准值 ..... | 76 |
| 2.2.3  | 水平风荷载标准值 .....   | 77 |
| 2.2.4  | 荷载效应组合 .....     | 77 |
| 2.3    | 脚手架设计计算 .....    | 78 |
| 2.3.1  | 基本设计规定 .....     | 78 |
| 2.3.2  | 纵向、横向水平杆计算 ..... | 79 |
| 2.3.3  | 脚手架的稳定性计算 .....  | 80 |
| 2.3.4  | 连墙件计算 .....      | 84 |
| 2.3.5  | 立杆地基承载力计算 .....  | 84 |
| 2.3.6  | 模板支架计算 .....     | 85 |
| 2.4    | 脚手架设计实例 .....    | 85 |
| 2.4.1  | 参数信息 .....       | 85 |
| 2.4.2  | 大横杆计算 .....      | 87 |
| 2.4.3  | 小横杆计算 .....      | 88 |
| 2.4.4  | 扣件抗滑力计算 .....    | 89 |
| 2.4.5  | 脚手架立杆荷载计算 .....  | 90 |
| 2.4.6  | 立杆稳定性计算 .....    | 91 |
| 2.4.7  | 最大搭设高度计算 .....   | 91 |
| 2.4.8  | 连墙件计算 .....      | 92 |
| 2.4.9  | 立杆地基承载力计算 .....  | 93 |
| 2.4.10 | 脚手架配件数量匡算 .....  | 94 |
| 2.4.11 | 结论和建议 .....      | 94 |
|        | 思考题 .....        | 95 |
| 3      | 模板设计 .....       | 96 |
| 3.1    | 模板的选材和选型 .....   | 96 |
| 3.2    | 模板系统的荷载计算 .....  | 96 |
| 3.2.1  | 荷载标准值 .....      | 96 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 3.2.2 荷载分项系数及荷载折减 .....      | 98  |
| 3.2.3 荷载组合 .....             | 99  |
| 3.3 模板结构设计计算要点 .....         | 99  |
| 3.4 组合模板配板设计 .....           | 100 |
| 3.5 模板设计实例 .....             | 105 |
| 3.5.1 梁模板支撑设计 .....          | 105 |
| 3.5.2 楼板模板支撑设计 .....         | 118 |
| 思考题 .....                    | 124 |
| 习 题 .....                    | 124 |
| 4 垂直运输设施设计 .....             | 125 |
| 4.1 井架设计 .....               | 125 |
| 4.1.1 荷载计算 .....             | 125 |
| 4.1.2 立杆稳定性验算 .....          | 127 |
| 4.1.3 井架的整体稳定性验算 .....       | 127 |
| 4.2 塔式起重机基础与附着装置设计 .....     | 128 |
| 4.2.1 塔式起重机的基本形式 .....       | 128 |
| 4.2.2 塔式起重机基础设计 .....        | 130 |
| 4.2.3 塔式起重机附着装置设计 .....      | 134 |
| 4.3 塔式起重机基础与附着装置设计实例 .....   | 139 |
| 4.3.1 塔式起重机基础设计 .....        | 139 |
| 4.3.2 塔式起重机附着装置设计 .....      | 143 |
| 思考题 .....                    | 147 |
| 附录一 支护结构水平荷载和抗力标准值计算程序 ..... | 148 |
| 附录二 品茗施工安全设施计算软件简介 .....     | 156 |
| 参考文献 .....                   | 164 |

# 1 基坑支护结构设计

## 1.1 概述

### 1.1.1 基坑工程的发展

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工程的发展。特别是20世纪中叶以来,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,这为合理设计和建设基坑工程提出了许多紧迫而重要的研究课题。

20世纪30年代, Terzaghi 和 Peck 等人最先从事涉及基坑工程的岩土工程问题研究,于40年代提出了预估挖方稳定和支撑荷载大小的总应力法,这一理论沿用至今。50年代 Bjerrum 和 Eide 提出了分析基坑底板隆起的方法。60年代在奥斯陆等地的基坑开挖中开始实施施工监测。此后的大量工程实践经验积累和理论研究提高了基坑工程设计的可靠性。从70年代起,许多国家陆续制订了指导基坑工程设计和施工的法规。

我国于20世纪80年代初才开始重视对基坑工程的研究。此前,除70年代建成的北京地铁东站等少量深基坑外,国内为数不多的高层建筑的地下室多为一层,基坑深不过4 m,常采用放坡开挖。80年代,随着高层建筑的大量兴建,出现了一批较深的基坑。北京、上海、广东等地开始出现两层地下室,开挖深度一般在8 m左右,少数超过10 m。90年代以来,我国的高(超高)层建筑发展迅速,各地还兴建了许多大型地下市政设施、地下商场、地铁车站等。这一时期多层地下室逐渐增多,基坑开挖深度超过10 m的比比皆是,如上海经贸大厦主楼基坑深达32 m,国家大剧院基坑深度达32.5 m。基坑开挖面积也越来越大,许多基坑平面面积已超过10 000 m<sup>2</sup>,其中上海港汇广场大厦基坑开挖面积达50 000 m<sup>2</sup>。

目前,基坑工程呈现出深、大、差、密、多、低的特点。基坑深度和宽度不断增大,且大多分布在沿海工程地质条件较差、建(构)筑物密集的大中城市。基坑工程的施工工艺和设计计算方法多种多样,施工工艺除传统的放坡开挖外,有支护开挖的形式已发展至数十种;计算理论除极限平衡法外,弹性地基反力法得到日益广泛的应用,有限元分析方法也开始应用于一些重要工程的辅助设计。虽然我国业已成功设计和建设了许多技术先进、经济合理的基坑工程,但由于问题的复杂性,总体上看基坑工程事故还不少,成功率仍偏低。据统计,基坑工程事故发生率竟占基坑总数的1/4以上。特别是对于深基坑,还

存在着许多迫切需要解决的问题，对深基坑工程的理论和应用研究越来越具有重大的意义，这一课题已经成为土木工程界的热点与难点。

近 20 年来，我国先后召开了若干关于深基坑工程的国内、国际学术交流会。国家先后颁布实施了行业标准《建筑基坑工程技术规范（YBJ 9258—1997）》和《建筑基坑支护技术规程（JGJ 120—1999）》。上海、深圳、武汉、广东、浙江、江苏等省市也陆续制订了基坑工程的地方标准。国家标准《建筑地基基础设计规范（GB 50007—2002）》也增加了“基坑工程”这一章内容。

### 1.1.2 基坑工程的内容与分级

#### 1.1.2.1 基坑工程的内容

基坑是房屋建筑、道路桥梁、水利水电、市政工程等在施工时所开挖的地坑。基坑工程是为保证基坑和地下结构安全施工及周围环境不受损害而进行的基坑支护、地下水控制、土方开挖与回填等技术工作和完成实体的总称，包括勘察、设计、施工和监测等内容。

基坑工程中采用的围护墙、撑锚体系、止水帷幕等结构体系总称为支护结构。围护墙也称为挡墙，一般起挡土和止水双重作用，但对排桩组成的围护墙通常需另设止水帷幕；有时围护墙还是地下结构的一部分，如地下连续墙除用作基坑开挖的围护墙外，通常还是地下室的外墙。撑锚体系是内支撑和拉锚的统称，承受围护墙传来的水土压力等荷载，以保证围护墙的稳定和控制其变形。

地下水控制主要是采用集水明排、井点降水、截水和回灌等方法，以保证基坑开挖和地下结构施工在“干燥”的状态下进行。降水还可减小水压力、防止产生流砂等。回灌主要是为了保护周围环境。

土方开挖是基坑工程的主要内容，主要有逐层全面开挖、盆式开挖、岛式开挖、分段开挖及逆筑法开挖等方式。回填则是待地下结构施工完成后，将其与基坑壁之间的空间填充和压实。

基坑工程设计是应用勘察资料进行支护结构和地下水控制、土方开挖、监测、环境保护方案等的设计。

基坑工程施工是根据施工组织设计或施工方案进行土方开挖、支护结构和降排水设施施筑与拆除、土方回填等工作。

基坑工程勘察是为基坑工程的设计和施工提供水文地质工程资料，一般与主体工程的勘察同步进行。

基坑工程监测是对基坑施筑和使用过程实施跟踪监测，掌握支护结构的位移和内力、周围建（构）筑物和地下管线的变形情况，以确保施工和环境安全，并为基坑工程优化设计提供信息。

#### 1.1.2.2 基坑工程的分级

尽管工程界流行深、浅基坑的说法，但目前并没有严格区分深、浅基坑的统一标准。Terzaghi 和 Peck 曾于 1967 年建议把深度超过 6 m 的基坑称为深基坑，但未得到普遍认可。

## 1 基坑支护结构设计

国内也有人视深度超过 5 m 的基坑为深基坑。现在一般认为,当开挖深度大于 5 m 时,便可以看作是深基坑。

我国《建筑基坑工程技术规范 (YBJ 9258—1997)》根据基坑工程的土质条件、深度、环境要求将基坑工程分为三级 (表 1-1);《建筑基坑支护技术规程 (JGJ 120—1999)》根据支护结构破坏的后果,将建筑基坑侧壁安全等级分为三级 (表 1-2)。

表 1-1 基坑工程分级

| 基坑深度 $h$ (m) | $h > 15$ | $15 \geq h \geq 8$ | $h < 8$ |
|--------------|----------|--------------------|---------|
| 等 级          | 一级       | 二级                 | 三级      |

表 1-2 建筑基坑侧壁安全等级

| 安全等级 | 支护结构破坏后果                  | 重要性系数 $\gamma_0$ |
|------|---------------------------|------------------|
| 一级   | 对基坑周边环境影响很严重              | 1.10             |
| 二级   | 对基坑周边环境影响小,对本工程地下结构施工影响严重 | 1.00             |
| 三级   | 对基坑周边环境及地下结构施工影响不严重       | 0.90             |

### 1.1.3 基坑开挖与支护方法分类

我国土木工程技术人员在借鉴国外基坑开挖支护设计和施工经验的基础上,结合国内各地区的地质条件、施工设备、可用材料及工程经验等实际情况,在工程实践中开发应用了许多基坑开挖与支护方法。目前对这些开挖与支护方法的分类多而繁杂,认识很不统一,给设计选型带来了不便。为使问题清晰化,便于应用和研究,本书将基坑开挖分为无支护开挖和有支护开挖两大类,并从支护加固机制角度,将基坑支护分为被动支护和主动支护两类。

#### 1.1.3.1 基坑开挖方法

##### 1. 无支护开挖

基坑无支护开挖多为放坡开挖,是开挖基坑最简单和最经济的方法。当施工现场有足够的放坡场地,且地基土质为硬质、可塑性粘土或良好的沙质土,基坑安全等级为三级时,应首选放坡开挖。当地下水位低于基坑坑底标高、土质和开挖深度满足要求时,其挖方边坡也可做成直壁形式。

##### 2. 有支护开挖

有支护开挖是先在基坑周围设置排桩或地下连续墙等围护墙,然后开挖土方,也有边开挖边设置围护墙的情况,必要时还应设置内支撑或拉锚。当施工现场狭窄,或地基土质较差,或对深度较大的一、二级基坑放坡开挖不经济时,应采用有支护开挖。这是目前广泛应用的深基坑开挖方法。根据地基土质、基坑面积和深度、工期要求等,可采用逐层全面开挖、盆式开挖、岛式开挖、分段开挖及逆筑法开挖等方式开挖土方。基坑面积较小时一般采用逐层全面开挖;盆式开挖多用于较密集支撑下的土方开挖;岛式开挖常用于土锚或边桁架等大空间支撑系统的基坑开挖;分段开挖适于土质较好的粘土和密实的砂土,可

节约支护投资，但工期将延长；逆筑法开挖适于深度大、工期紧而要求上下部同时施工的情况。

无论是无支护开挖还是有支护开挖，当开挖至地下水位以下时，土中含水层被截断，地下水会不断地渗入基坑，容易造成流沙、边坡失稳和使地基承载力下降等不良后果。因此，在基坑开挖前和开挖过程中应做好地下水的控制。

### 1.1.3.2 基坑支护方法

支护结构主要承受侧向压力，包括水土压力及地面超载、邻近建筑物基底压力、相邻场地施工荷载等引起的附加压力，以水土压力为主。土压力是基坑周围一定范围内的土体与支护结构之间相互作用的结果。传统的支护设计理论是把基坑周围的土体当作荷载，作为支护结构的“对立面”，然后根据围护墙的位移情况，分别按静止土压力、主动土压力或被动土压力来进行支护设计，称此类支护为被动支护。事实上，基坑周围的土体具有一定的自支撑能力，可以将它用作支护材料的一部分，源于这一观点的支护设计是设法充分发挥和提高基坑周围土体的自支撑能力并补强其不足部分，称此类支护为主动支护。

#### 1. 被动支护

这是一种传统的、被广泛应用的基坑支护方法。支护结构主要包括围护墙和撑锚体系，对排桩式围护墙通常还包括止水帷幕。

##### 1) 围护墙

被动支护的围护墙常用形式目前主要有排桩式围护墙和地下连续墙两类。

##### (1) 排桩式围护墙

为简便起见，并参照《建筑基坑支护技术规程（JGJ 120—1999）》的规定，本书把采用钻孔灌注桩、人工挖孔桩、预制钢筋混凝土桩、钢板桩等桩型按队列式布置组成的墙体均归为排桩式围护墙。对于不能放坡或不能应用水泥土桩等重力式支护结构，开挖深度在6~10 m之间各安全等级的基坑均可采用排桩围护墙支护。排桩围护墙通常由桩土间隔组成，故一般需另外设置止水帷幕。

按布桩方式，排桩围护墙可分为以下三种。

①柱列式排桩围护墙：当地基土质较好、地下水位较低时，为利用土拱效应，可采用布置为一定间距的稀疏排桩支挡土体。桩间距越小，桩间土成拱效应越强，越利于坑壁稳定。应根据土质和支护深度等计算确定布桩间距。

②连续排桩围护墙：在软土中一般不能形成土拱效应，排桩通常连续密排。

③双排桩围护墙：为了减小桩墙位移或当基坑较深时，可采用双排桩围护墙，前后排桩可呈梅花形或矩形布置。

各种现场浇筑钢筋混凝土支护桩的混凝土强度等级应不小于C20。

##### (2) 地下连续墙

地下连续墙是先在地面以下开挖一段狭长的深槽，其内充满泥浆以使槽壁稳定，然后吊放钢筋笼，水下浇筑混凝土（强度等级不小于C20），筑成一段钢筋混凝土墙段，再将这些墙段连接起来形成地下墙壁。它在施工时减少了噪音和振动，除用作基坑施工时的围护墙外，一般还是地下结构的一部分。地下连续墙在欧洲和日本等国早已得到了广泛的应用，近20年来在我国的应用逐年增多。它适用于各种地质条件和安全等级的基坑，并可

进行逆筑法施工。

### 2) 撑锚体系

#### (1) 内支撑

内支撑是设置于基坑内部,承受围护墙传来的水土压力等外荷载的结构体系,由支撑、围檩(腰梁)和立柱等构件组成,排桩式围护墙顶部还设置帽梁(冠梁)。在软土地区,特别是建(构)筑物密集的城市中开挖深基坑时,内支撑被广泛应用。目前采用的支撑材料主要有型钢、钢管和钢筋混凝土(强度等级不小于 C20)等。内支撑平面布置形式除了惯用的井字形加角撑外,还针对不同的基坑平面形状,巧妙地运用力学原理,近 20 年来还开发应用了圆形、椭圆形钢筋混凝土环梁封闭式桁架平面布置。为达到增大坑内挖土空间,而又能保证支撑体系刚度的目的,还采用了边桁架代替传统的围檩,受力性能良好的曲线型杆代替单一的直杆、桁架杆代替实腹杆等新技术。此外,还常将一些方便施工的栈桥和起重机架等与内支撑结构相结合,使之成为整体的支撑系统,以达到增加支撑刚度和方便施工的双重目的。

#### (2) 拉锚

当施工场地周围条件许可且工程地质较好时,可采用坑外拉锚形成对围护墙的支撑作用。拉锚形式有土层锚杆、锚碇拉锚和锚桩拉锚等。土层锚杆在深基坑支护中被广泛应用,它设置在围护墙背后,为挖土、地下结构施工创造了条件。土层锚杆的一端通过围檩与围护墙连接,另一端深入稳定的土层中。土层锚杆由锚固头、拉杆和锚固体组成,分自由段和锚固段两部分。拉杆可以是粗钢筋、钢筋束或钢绞线,以钢绞线为多用。传统土层锚杆的锚固体为水泥砂浆圆柱体,近 20 年出现了带扩大头或通过多次高压注浆形成的葫芦串锚固体。为回收拉杆材料,还成功地设计和施工了可拆卸式土层锚杆。目前土层锚杆的设计理论还落后于工程实践,致使设计和施工不当而造成的浪费和工程事故时有发生。

### 2. 主动支护

这是以充分发挥和提高基坑周围土体自支撑能力的新型支护方法。发挥和提高土体自支撑能力可以从物理、化学和几何的途径着手,相应的支护形式主要有以下几种。

#### 1) 水泥土墙支护

水泥土墙是在搅拌桩的基础上基于化学加固土体的机制,于 20 世纪 70 年代初在瑞典发展起来的一种主动支护形式。我国于 70 年代末开始研究和应用,90 年代初才开始大量应用于基坑工程实践中。它是利用水泥系材料作固化剂,通过特殊的拌和机械(如深层搅拌机或高压旋喷机)就地将原状土和固化剂(粉体或浆体)强制拌和,经过土与固化剂(或掺和料)产生一系列物理化学作用,形成具有一定强度、整体性和水稳性的重力式支护结构。一般适用于开挖深度不大于 6 m,基坑侧壁安全等级为二、三级,且水泥土桩施工范围内地基土承载力不大于 150 kPa 的情况。

在水泥搅拌桩内加劲型钢,形成复合围护墙,这种在日本已经成熟应用的方法(SMW 工法),由于我国早年经济条件不允许消耗大量造价高的型钢,而未能得到推广应用。近 20 年来,由于工字型钢拔出技术、钢管甚至竹木加劲部分地取代型钢加劲技术的研究成功,使 SMW 工法在我国得到推广应用并有所创新。特别是在上海、广州、深圳等沿海城市,已广泛使用。上海轨道交通明珠线宝兴路车站,采用这一技术的基坑开挖深度

达 14 m，挡墙深度达 25.2 m。

## 2) 土钉墙支护

土钉墙是在新奥法的基础上基于物理加固土体的机制，于 20 世纪 70 年代在德国、法国和美国发展起来的一种主动支护形式。我国于 80 年代初应用于矿山边坡支护，近 20 年来才在基坑支护中迅速推广应用。它由被加固土、放置于原位土体中的细长金属杆件（土钉）及附着于坡面的混凝土面板组成，形成一个类似于重力式的支护结构。土钉墙通过在土体内放置一定长度和密度的土钉，使土钉与土共同作用来大大提高原状土的强度和刚度。土钉墙支护一般适用于开挖深度不大于 12 m，侧壁安全等级为二、三级的非软土地地基坑。当地下水位高于坑底时，应采取降排水或截水措施。

## 3) 喷锚支护

喷锚支护也是在新奥法的基础上基于物理加固土体的机制，于 20 世纪 90 年代在我国发展起来的一种主动支护形式。它与土钉墙支护在施工工艺上有相似之处，但在构造、作用机理和适用等方面有较大差别。构造上，喷锚支护的锚杆较长，要伸入滑动线以外的稳定土层中，分自由段和锚固段；土钉则较短，大多位于滑动线以内或附近，无自由段、锚固段之分。此外，土钉设置间距比锚杆密得多。工作机理方面，喷锚支护是利用锚杆逐次超前“缝合”优势滑动控制面的裂缝而使土体形成整体的自稳能力，土钉墙支护则利用土钉与土体的共同作用，以弥补土体自身强度和刚度的不足。在适用性方面，土钉墙支护一般不适于流沙、淤泥和淤泥质土等粘结力低的软弱土层，而喷锚支护则在这类土层中有较好的适应性。喷锚支护基坑最大开挖深度目前已达 18 m，在淤泥地基，坑深也已超过 10 m。

## 4) 冻结支护

冻结支护是基于物理加固土体的机制，应用人工制冷技术，使基坑周围土层中的水结冰形成一道具有一定强度、整体性的冻土墙，它既能挡土又能止水。冻结法施工在采矿工程中已经得到了广泛的应用，进行了大量的研究，积累了较丰富的经验，而用于基坑支护则是近十来年的事。冻结支护适应于各种复杂的地质条件，尤其在淤泥、淤泥质土及流沙层中更显示出其优越性。采用冻结支护时，基坑工程的设计内容和要求将有非常大的变化，目前仅做了少量试验性工程。在某些地区，它是一种很有前途的基坑支护新技术。

## 5) 拱形支护

拱形支护是基于围护墙的几何形状与受力特性方面的考虑，我国于 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型的主动支护形式。它是利用基坑有利的平面现状，把围护墙做成圆形、椭圆形、组合抛物线形或连拱式等形式，以充分发挥支护结构的空间效应、土体的结构强度和材料的力学性能。一方面作用在闭合拱形围护墙上的水土压力大部分可自行平衡或得到调节；另一方面利用土体自身的起拱作用，可减小作用于围护墙上的水土压力；再者，围护墙基本处于受压状态，可充分发挥混凝土材料的强度特性。围护墙可采用排桩、地下连续墙或现浇逆作拱墙等。根据受力情况，可设置围檩甚至内支撑或土层锚杆。其中逆作拱墙犹如人工挖孔桩的护壁施工，是一种无嵌固深度的围护墙，它一般适用于开挖深度不大于 12 m，侧壁安全等级为二、三级的基坑；当地下水位高于坡脚时，应采取降水措施，对淤泥或淤泥质土不宜采用。排桩、地下连续墙拱形支护结构的适用条件与前述排桩、地

下连续墙作为一般支护结构的适用相同。

上述基坑开挖与支护的基本方法及其适用范围归纳如图 1-1。在实际工程中常常将它们其中的某几种方法联合应用。

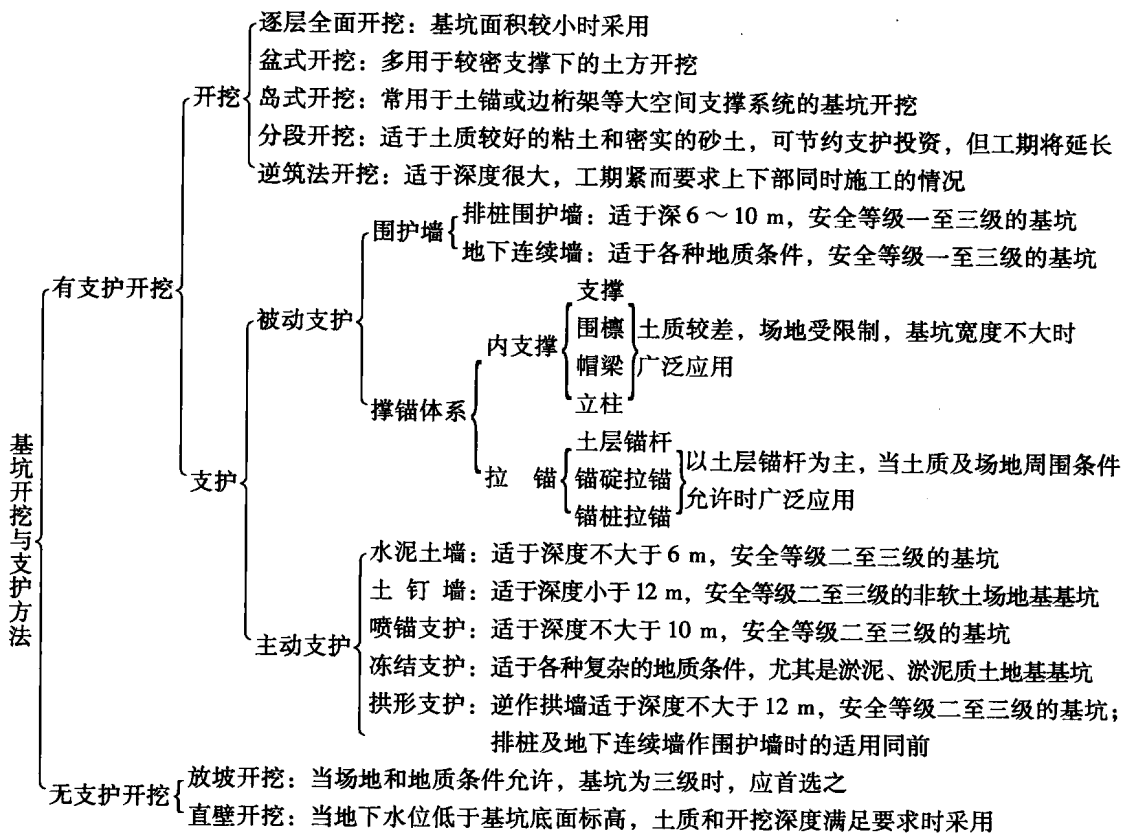


图 1-1 基坑开挖与支护方法分类

#### 1.1.4 基坑支护设计理论与计算方法

##### 1.1.4.1 基坑支护设计的内容

根据《建筑基坑支护技术规程（JGJ 120—1999）》的规定，基坑支护结构应采用以分项系数表示的极限状态设计方法进行设计。支护结构的极限状态分为两种。

###### （1）承载能力极限状态

这种极限状态，对应于支护结构达到最大承载能力或土体失稳、过大变形导致支护结构或基坑周边环境破坏。

###### （2）正常使用极限状态

这种极限状态，对应于支护结构的变形已妨碍地下结构施工或影响基坑周边环境的正常使用功能。

基坑支护结构均应进行承载能力极限状态的计算，对于安全等级为一级及对支护结构变形有限定的二级建筑基坑，尚应对基坑周边环境及支护结构变形进行验算。为此，基坑

支护设计一般包括下列内容：

- ①支护体系方案的技术经济比较和选型；
- ②支护结构的强度和变形分析与计算；
- ③基坑稳定性验算；
- ④基坑开挖中的变形验算；
- ⑤基坑降、排水设计；
- ⑥基坑施工监测方案设计。

#### 1.1.4.2 支护结构强度和变形分析与计算方法

对前述各种基坑支护结构形式，按受力特点可将它们分成四类：悬臂式支护结构、单（多）支点式支护结构、重力式支护结构和拱形支护结构。而分析与计算它们的强度、变形的的方法主要有三类：极限平衡法、土抗力法和有限元分析法。

##### 1. 极限平衡法

极限平衡法在基坑支护设计发展早期一直被广泛应用，且仍是目前我国相关设计人员最熟悉的基坑支护设计计算方法之一。由于它具有计算简单，可以手算，且在目前情况下即使应用弹性地基反力法计算支护结构内力，但嵌固深度一般还是要用极限平衡法确定；对空间效应不明显的三级基坑和地层较稳定、周围环境较简单的二级基坑中的悬臂支护结构及单支点支护结构采用极限平衡法计算也是适宜的。所以，在今后一段时期内，极限平衡法还会得到一定程度的应用。

等值梁法、静力平衡法、泰沙基法、二分之一分割法等都属于极限平衡法。国内较多采用等值梁法和静力平衡法。等值梁法是将计算宽度的围护墙视为竖梁，认为在开挖面以下净土压力零点处梁的弯矩也为零。在该处将竖梁断开为两段，则断梁的弯矩与原整梁的弯矩一样，即断梁是原整梁的等值梁。据此，在净土压力零点处将竖梁断开作为两个相连的简支梁来计算。静力平衡法则认为围护墙在各力作用下绕开挖面以下某点转动，该点围护墙无变位，净土压力为零。转动点以上墙体向坑内偏移，坑外侧作用着主动土压力，坑内侧开挖面以下作用着被动土压力；转动点以下墙体的主、被动土压力则与上述相反。据此，可按静力平衡条件计算围护墙的入土深度和内力。等值梁法和静力平衡法在分段计算带支点支护结构内力时，都不考虑设置支撑（或锚杆）前、后墙体产生的位移，假定支撑点为不动点，下层支撑（或锚杆）设置后，上层支撑（或锚杆）的支撑力（或锚拉力）保持不变，而这与实际情况是不相符合的。

极限平衡法假定作用在围护墙前后的土压力分别到达被动土压力和主动土压力，在此基础上再作某些力学上的假设，把超静定的力学问题简化为静定问题求解。它未考虑围护墙位移对土压力的影响，也不能反映支护结构的变形情况，尤其是对于有支撑（或锚杆）的支护结构采用等值梁法时，对支点力的计算假定与支点刚度系数无关，因而不能模拟分步开挖工况。此外，该方法没有也无法考虑基坑的空间效应。所以，极限平衡法无论在理论上还是在应用中都存在很大的局限性。

##### 2. 土抗力法

土抗力法又称为基床系数法或地基反力法。当假定地基为弹性时也称为弹性地基反力法，我国《建筑基坑支护技术规程（JGJ 120—1999）》推荐采用弹性支点法。

土抗力法在横向受荷桩的分析中被广泛应用。如图 1-2 所示, 在地面受水平力  $H_0$  和力矩  $M_0$  的桩, 其入土部分的挠曲线微分方程为

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + \bar{p}(z, y) - \bar{q}(z) = 0 \quad (1-1)$$

式中  $E$ ——桩身材料的弹性模量;

$I$ ——桩横截面的惯性矩;

$\bar{p}(z, y)$ ——由于挠度使桩身受到的地基反力集度;

$\bar{q}(z)$ ——桩身受到的水平分布荷载集度, 应按残余水压力和桩背土压力考虑。

按地基反力的不同假设, 对式 (1-1) 的求解方法主要有以下三种。

### 1) 极限地基反力法

该方法是针对刚性结构的应力问题, 按极限状态下的静力平衡推求桩的横向抗力, 没有考虑桩的变形, 即假设地基反力只是深度的函数。

$$p = p(z) \quad (1-2)$$

式中  $p$ ——桩侧单位面积上的地基反力。其与地基反力集度的关系为  $p = \bar{p}/b$ ,  $b$  为桩的计算宽度。以后若无特别说明, 地基反力系指单位面积上的地基反力。

### 2) 弹性地基反力法 (包括线性弹性地基反力法和非线性弹性地基反力法)

该方法假定地基土为服从胡克定律的弹性体, 按梁的弯曲理论求解桩的横向抗力。它假定地基反力与桩的挠度  $y$  的  $m$  次方成比例

$$p = kz^n y^m \quad (1-3a)$$

或写为

$$p = K(z) y^m \quad (1-3b)$$

式中  $k$ ——由土的弹性决定的系数, 量纲与  $n (\geq 0)$  和  $m (1 \geq m > 0)$  有关;

$K(z)$ ——地基的水平反力系数 (即地基土的水平基床系数)。

当  $m=1$  时, 为线性弹性地基反力法。其中  $n=0$  时为张有龄法;  $n=1$  时为  $m$  法;  $n=0.5$  时为 C 法。线性弹性地基反力法在桩的整个挠度范围内均假定地基土为线性弹性体, 这与实际情况不符, 且胡克定律也仅适用于小变形的情况。

当  $m \neq 1$  时, 为非线性弹性地基反力法。其中以 Rifaat 提出的  $m=0.5$  的日本港湾研究所方法最具代表性。根据地基的特性, 港研法又分为  $n=1$  的久保法和  $n=0$  的林-宫岛法。非线性弹性地基反力法可以更广泛地说明桩的动态, 该方法可用于竖直桩等有较大位移的结构计算。但由于该法的复杂性, 在实用中往往受到限制。

### 3) 复合地基反力法 ( $P-y$ 曲线法)

该方法把桩周土分为塑性区和弹性区两个区域, 对塑性区按极限地基反力法计算; 对弹性区按线性或非线性弹性地基反力法计算。从理论上说, 该法更接近实际情况, 问题在

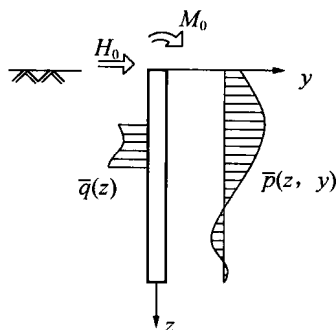


图 1-2 横向受荷桩入土部分受力图

于对弹、塑性区的划分及土性的模拟十分困难，处理不当将使最终计算结果严重失真。

这些方法不同程度地考虑了桩与土之间的共同作用。目前应用最多的是假定地基反力系数为深度的线性函数的线性弹性地基反力法。

基坑支护结构强度和变形分析计算的土抗力法是在横向受荷桩分析方法的基础上改进发展而来的。早期的基坑支护结构分析土抗力法由于受计算技术的限制，都对实际情况作了很大的简化，以便可以用解析方法求解。例如日本的“山肩邦南法”“弹性法”和“弹塑性法”等，它们都假定围护墙后作用已知的主动土压力。“山肩邦南法”和“弹塑性法”将开挖面以下墙前土分成塑性区和弹性区；“弹性法”则假定开挖面以下均为弹性区。

随着计算技术的发展，使土抗力法可以采用数值解法。20 世纪 50 年代 Bowles 提出了求解弹性地基梁的有限元程序，大大促进了土抗力法的发展。目前，通用的土抗力法是弹性地基反力法，它是在地基基础设计计算的弹性地基梁分析方法基础上形成的，并引用横向受荷桩的分析方法改进而来。即将计算宽度的围护墙视为竖向地基梁，支撑（或锚杆）简化为与其截面积和弹性模量有关的二力杆弹簧。开挖面以下墙前土对梁的地基反力用土弹簧来模拟；墙后荷载常用两种计算图式：采用主动土压力（我国现行规程采纳）和用土弹簧模拟。土弹簧系数即为地基土的水平基床系数。按荷载的施加情况划分，求解方法有“总量法”、“增量法”等。

目前采用的弹性地基反力法部分地考虑了支护结构与土的线性共同作用，分析中所需参数单一且土的水平基床系数取值已积累了一定的经验，并可有效地计入基坑开挖过程中多因素的影响。如作用在围护墙两侧土压力的变化、支撑（或锚杆）数量随开挖深度的增加而变化、预紧力及支撑（或锚杆）设置前的围护墙位移对内力和变形的影响等，因而可大体模拟分步开挖各工况。同时，从支护结构的水平位移可以初步估计基坑开挖对周围环境的影响。因此，弹性地基反力法得到日益广泛的应用。但在应用中没有考虑支护结构与土的非线性共同作用。我国现行规程推荐的弹性支点法对墙后开挖面以上按主动土压力、开挖面以下则按定值土压力考虑，这些都与工程实际存在很大的差距，需作进一步研究和完善。

近年来对土抗力法的研究基本上集中在对作用于围护墙上的土压力或土抗力的模拟。日本的森重龙马首先提出了围护墙位移对土压力产生增减的计算方法。我国学者吴伟强基于土压力随位移线性变化的设想提出了一种具体的位移土压力计算方法；陆瑞明提出了一个计算挡土拱圈内力和位移的非线性共同作用方法；郭玉荣提出了在开挖面上下分别考虑土压力和土抗力的非线性计算模型；赵永伦等对常用弹性杆系有限元法中的水平抗力系数进行了修正。此外，对锚杆支撑情况，还有学者提出了考虑竖向分力作用的梁-柱理论。

### 3. 有限元分析法

由于基坑工程的复杂性，采用常规分析方法很难反映诸多因素的综合影响，近年来多采用数值方法——主要是有限单元法，来分析基坑的整体性状，即把包括地基土在内的整个基坑作为一个空间结构体系，并考虑开挖过程、支护结构与土共同作用、渗流、时间等