

# 深基坑支护新技术

——加筋水泥土桩锚支护设计与工程应用

徐至钧 李宪奎 李景 编著

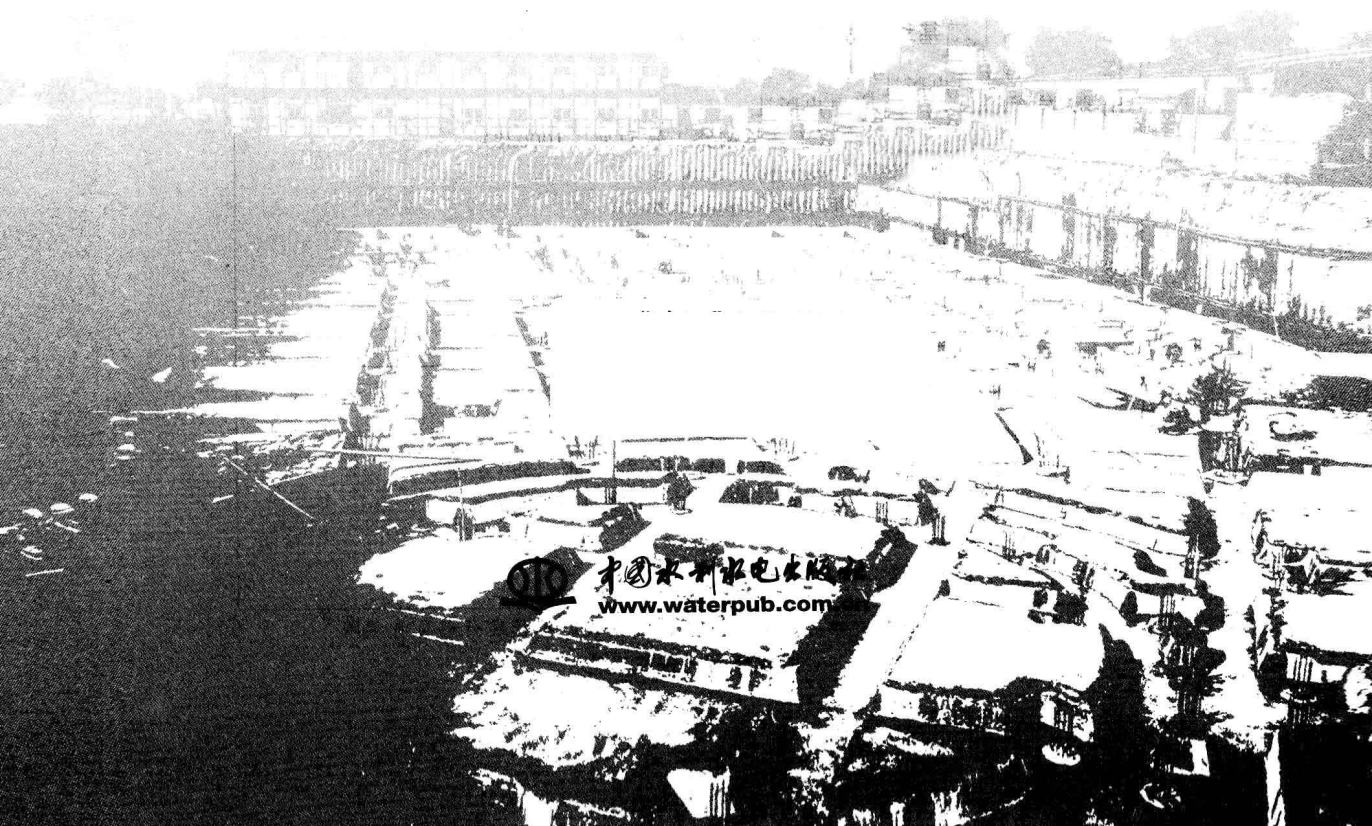


中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 深基坑支护新技术

——加筋水泥土桩锚支护设计与工程应用

徐至钧 李宪奎 李景 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com

## 内 容 提 要

本书介绍加筋水泥土桩锚支护等深基坑支护技术的发展、加固机理、工程应用实例和造价分析等。全书共14章,内容包括:深基坑支护工程的技术进步与发展,加筋水泥土桩锚支护技术概述,水泥土的加固机理,水泥土的主要物理、力学指标,水泥土搅拌桩支挡结构的设计与计算,水泥土搅拌法的施工与质量检验,水泥土搅拌桩工程应用实例,加筋水泥土桩锚支护的工程设计与施工、监测、工程验收及工程应用实例,深基坑支护技术工程造价分析,扩大支盘搅拌劲芯桩技术等。

本书工程案例丰富,有很强的应用性,可供设计、施工和科研单位相关工程技术人员使用,也可供高等院校基坑工程、土木工程等专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

深基坑支护新技术:加筋水泥土桩锚支护设计与工程应用 / 徐至钧,李宪奎,李景编著. — 北京:中国水利水电出版社,2012.8

ISBN 978-7-5170-0103-4

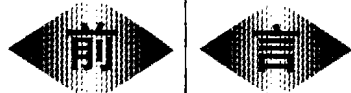
I. ①深… II. ①徐… ②李… ③李… III. ①深基坑支护 IV. ①TU46

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第204873号

书 名	深基坑支护新技术——加筋水泥土桩锚支护设计与工程应用
作 者	徐至钧 李宪奎 李景 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 290千字
版 次	2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



随着大规模工程建设的发展,我国在深基坑设计施工方面也不断进步。根据地质条件和各种影响因素,基坑支护形式有多种维护墙和支撑体系可供选择。采用计算机设计结果精确,目前已基本达到国际水平,但仍有一些问题需要进一步研究和提高。

我国基坑支护技术的发展大体上可分为三个阶段,第一阶段,从简单的钢板桩支护起步,到从国外引进复杂的地下连续墙支护,之后又结合国情采用改良的地下连续墙施工支护技术——柱列式灌注桩排桩加锚杆支护,并且在软土地区发展和采用了钢构架及混凝土构架内支撑和锚杆支护技术。在这一阶段,基坑支护工程复杂,支护笨重,工程的造价高,施工进度受到影响。

第二阶段,出现了简便快速的土钉墙支护,实现基坑支护的喷、锚、网,使基坑支护的施工速度加快、用料减少、工程造价降低,以后又从土钉支护发展到采用复合土钉墙即土钉加锚杆,基坑支护施工高度达到20m,但在城市内施工深基坑,往往因周围施工环境比较恶劣,场地周围邻近建筑物、道路及地下管线、电缆等,所以又出现了深基坑的逆作法,在地下基础施工的同时还可以进行地上建筑物的施工,并利用地下结构自身的柱、梁、楼板作为地下基坑的支撑,既稳妥又经济。

第三阶段,地下结构支护的发展又出现加筋水泥土深层搅拌支护和加筋水泥土桩锚支护技术,并可根据工程的实际情况采用不同的组合体,如悬臂式、人字形、门架式、复合式、多排式、后仰式锚拉支护、水平咬合拱圈支护等,基坑支护从复杂笨重变为施工简单快速、工程造价明显降低,基坑支护新技术得到大力发展。

基坑工程是近30多年来土木工程领域新发展起来的一门新学科,它包括基坑支护结构的设计和施工、地下水控制、基坑土方开挖、工程监测和周围环境保护等,涉及工程地质、土力学和基础工程、结构力学、工程结构、施工技术等学科,是一门综合性学科。再加上基坑工程实践性强,影响基坑工程的不确定因素多(如土工参数的准确性、气候影响、计算假定、施工条件

和队伍的素质等), 周围环境的多样性 (如邻近房屋的结构和基础形式、结构现状和重要程度, 地下各种管线的种类、距离、埋深、材质和接头形式, 周围道路情况及其重要性等), 都使基坑工程成为风险性较大的一种工程。

我国地域广阔, 土层变化大。如我国东南沿海一带除少数城市地质条件较好外, 主要是海相沉积的软土地层, 不少地区以淤泥及淤泥质土为主, 土质松软、地下水位高、含水量饱和、土的渗透系数大、土壤内摩擦角和粘聚力小、具有蠕变特性。对大城市而言, 建筑物密集、地下管线众多、交通网络纵横、环境保护要求较高, 给基坑工程设计和施工带来很多困难。因此, 进行基坑工程的设计和施工要结合具体情况, 因地制宜, 不能生搬硬套, 否则会带来严重后果。当前深基坑支护的工程造价、建设工期明显降低, 并大幅度减少工程事故, 有效解决制约我国深基坑工程建设中面临的工程造价高、建设工期长、基坑支护事故多的问题。我国在深基坑工程方面, 总体水平有很大提高, 基本上达到国际先进水平。

本书重点介绍加筋水泥土桩锚支护技术及工程应用实例, 内容包括深基坑支护工程的技术进步与发展, 水泥土搅拌桩工程应用实例, 加筋水泥土桩锚支护的工程设计、工程施工与监测、工程验收和应用实例以及深基坑支护技术工程造价分析等, 旨在总结和推广这一新技术, 实用性与应用性很高。

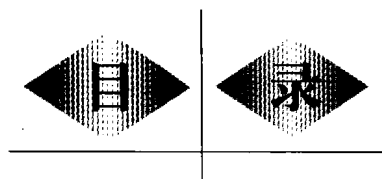
本书由教授级高级工程师徐至钧、专利发明人李宪奎以及李景博士编著, 参加本书编写工作的还有李鹤、李涛、付细泉、张勇、徐昊、赵尧钟、林婷、张睿等。

在撰写本书过程中, 使用了一些科研、教学及工程单位的研究成果和技术总结, 在参考文献中已尽量注明出处, 但难免有遗漏, 在此谨向原作者表示深切的谢意。

由于作者水平所限, 书中不妥之处, 尚祈读者不吝指正。

**编者**

2011年12月于深圳



## 前言

<b>第 1 章 深基坑支护工程的技术进步与发展</b> .....	1
1.1 基坑工程技术的发展.....	1
1.2 建筑深基坑的支护类型.....	2
1.3 深基坑支护的传统方法面临严酷现实.....	16
1.4 深基坑支护工程的特点和施工要求.....	18
1.5 深基坑支护的变形特征及变形控制标准.....	20
1.6 深基坑支护工程技术的进步与展望.....	26
<b>第 2 章 加筋水泥土桩锚支护技术概述</b> .....	29
2.1 水泥土搅拌桩支护技术.....	29
2.2 加筋水泥土桩锚支护技术.....	30
<b>第 3 章 水泥土的加固机理</b> .....	32
3.1 一般水泥的固化原理.....	32
3.2 水泥系固化剂的固化原理.....	34
3.3 普通硅酸盐水泥和矿渣水泥的特性及其适用条件.....	35
<b>第 4 章 水泥土的主要物理、力学指标</b> .....	37
4.1 室内试验方法.....	37
4.2 室内水泥土配比试验的主要物理力学指标.....	38
4.3 上海地区淤泥质黏土配制水泥土的主要物理力学指标.....	40
4.4 水泥土物理、力学指标的经验取值.....	44
<b>第 5 章 水泥土搅拌桩支挡结构的设计与计算</b> .....	45
5.1 壁状水泥土搅拌桩挡墙.....	45
5.2 拱形水泥土搅拌桩挡墙的设计计算.....	52
<b>第 6 章 水泥土搅拌法的施工与质量检验</b> .....	58
6.1 水泥浆喷射搅拌法施工.....	58
6.2 水泥粉喷射搅拌法施工.....	65
6.3 水泥土搅拌桩的质量检验.....	69

<b>第 7 章 水泥土搅拌桩工程应用实例</b> .....	74
【工程实例 1】 水泥土搅拌桩在土钉支挡结构中的应用 .....	74
【工程实例 2】 拱壁形水泥土搅拌桩挡墙 .....	77
【工程实例 3】 水泥搅拌桩和土钉墙在道路工程中的联合应用 .....	83
【工程实例 4】 多层住宅地基采用短水泥粉喷桩的加固效果 .....	86
<b>第 8 章 水泥土搅拌桩设计中的若干误区</b> .....	89
8.1 概述 .....	89
8.2 几种常见的误区 .....	89
8.3 小结 .....	95
<b>第 9 章 加筋水泥土桩锚支护的工程设计</b> .....	96
9.1 桩锚支护的工程设计——加筋水泥土桩成型与计算 .....	97
9.2 悬臂式加筋水泥土桩锚支护 .....	99
9.3 人字形加筋水泥土桩锚支护 .....	101
9.4 门架式加筋水泥土桩锚支护 .....	102
9.5 复合式支护 .....	104
9.6 加筋水泥土桩墙与多排加筋水泥土桩锚支护 .....	106
9.7 后仰式锚拉钢桩支护 .....	107
9.8 水平咬合加筋水泥土拱圈支护 .....	108
9.9 多向加筋水泥土桩锚支护 .....	109
<b>第 10 章 加筋水泥土桩锚支护的工程施工与监测</b> .....	111
10.1 一般规定 .....	111
10.2 技术要求 .....	112
10.3 工程监测 .....	113
<b>第 11 章 加筋水泥土桩锚支护的工程验收</b> .....	115
11.1 一般规定 .....	115
11.2 检验项目 .....	116
11.3 合格判定 .....	118
<b>第 12 章 加筋水泥土桩锚支护工程应用实例</b> .....	119
【工程实例 1】 广州地铁二号线新港东站基坑围护结构 .....	119
【工程实例 2】 芜湖信仪玻璃厂二期深基坑工程 .....	125
【工程实例 3】 天津塘沽温州大厦基坑工程 .....	133
【工程实例 4】 深圳地下铁道软岩地基采用水平旋喷桩加固 .....	138
【工程实例 5】 天津天嘉湖基坑工程 .....	142
【工程实例 6】 天津欧铂苑地下车库基坑支护 .....	147
<b>第 13 章 深基坑支护技术工程造价分析</b> .....	166
13.1 工程造价预算编制的步骤 .....	166

13.2	混凝土搅拌桩支护工程计算实例 .....	172
13.3	深圳赛格广场逆作法施工的经济分析 .....	173
13.4	四种支护方案的技术经济比较 .....	175
13.5	加筋混凝土桩锚支护的工程造价 .....	177
13.6	结论与建议 .....	177
<b>第 14 章</b>	<b>扩大支盘搅拌劲芯桩技术</b> .....	<b>178</b>
14.1	扩大支盘搅拌劲芯桩原理 .....	178
14.2	支盘搅拌劲芯桩承载机理 .....	180
14.3	扩大搅拌劲芯桩施工的多功能机械和钻具 .....	181
14.4	工程应用实例 .....	184
	<b>参考文献</b> .....	<b>188</b>



# 第 1 章 深基坑支护工程的技术进步与发展

随着我国工业和城市建设的发展, 重型厂房、高层建筑以及各种大型地下设施日益增多, 这些建筑物的基础大多埋置很深, 荷载很大, 设计要求也愈来愈高。同时, 由于受到城市中原有建筑物与正常生产活动的限制, 往往在极其狭窄的场地或在密集的建筑群中施工。特别是在软土条件下, 施工中所面临的困难更为突出, 采用深基坑施工的传统方法常常不能解决这些问题, 例如沉井、沉箱、桩基以及板桩支护、井点降水开挖等传统施工方法, 有的由于施工用地面积大、影响范围广, 或者由于造价高, 有噪声、振动等公害, 或者由于难于确保相邻建筑物的安全等缺点, 在上述不利的施工条件下往往使方案选择或实施都感到很大困难。面临日益增长的建设规模和社会需求, 基坑支护工程从简单到复杂, 又从复杂发展到简单, 发展迅速, 经过近 30 多年的推广与改进, 现已在深基坑施工中采用多种支护手段, 为土木建筑工程界所广泛采用。

## 1.1 基坑工程技术的发展

从 20 世纪 80 年代中期以来, 随着我国国民经济的快速发展和人民生活水平的提高, 各项建设工程以前所未有的规模和速度发展, 在很大程度上改变了我国的城乡面貌。以高层和超高层建筑为例, 建造了高 383.9m、81 层的深圳地王商业大厦, 高 389.3m、80 层的广州中天广场和高 492m、101 层的上海环球金融中心等规模宏大、结构新颖、技术难度大的建筑物。仅上海的高层建筑即已超过 4600 幢, 在世界大城市中屈指可数。此外, 还进行了大量的市政工程建设, 如大桥、地铁、隧道、高架道路等。这些大规模的工程建设和与之相应的科学研究, 都有力地促进了基坑工程学科的发展。

基坑工程是近年来土木工程领域发展起来的一门新学科, 它包括基坑支护结构的设计和施工、地下水控制、基坑土方开挖、工程监测和周围环境保护等。

基坑工程学科涉及工程地质、土力学和基础工程、结构力学、工程结构、施工技术 etc 学科, 是一门综合性学科。再加上基坑工程实践性强, 影响基坑工程的不确定因素多 (如土工参数的准确性、气候影响、计算假定、施工条件和队伍的素质等), 周围环境的多样性 (如邻近建筑物的结构和基础形式、结构现状和重要程度, 地下各种管线的种类、距离、埋深、材质和接头形式, 周围道路情况及其重要性等), 都使基坑工程成为风险性较大的一种工程。

我国地域广阔, 土层变化大。如我国东南沿海一带除少数城市地质条件较好外, 主要是海相沉积的软土地层, 不少地区以淤泥及淤泥质土为主, 土质松软、地下水位高、含水量饱和、土的渗透系数大、土壤内摩擦角和粘聚力小、具有蠕变特性。对大城市而言, 建筑物密集、地下管线众多、交通网络纵横、环境保护要求较高, 给基坑工程设计和施工都

带来很多困难。因此,进行基坑工程的设计和施工要结合具体情况,因地制宜,不能生搬硬套,否则会带来严重后果。我国在深基坑工程方面虽然近年来也发生过一些失效事例,但总体水平有很大提高,已达到国际水平。

目前,高层建筑基础埋置很深,地下室一般是2~3层,有的地下室为4~6层,所以,基坑支护工程庞大。基坑支护工程是一门系统工程,又是一门风险工程,工程技术人员应充分认识基坑支护工程的特点,在设计和施工时,既要保证整个支护结构在施工过程中的安全,又要控制结构的变形及其周围土体的变形,以保证周围建筑和地下管线的安全。在安全前提下,设计既要合理,又要降低造价、方便施工、缩短工期。因此,基坑设计和施工技术人员要不断地总结成功经验,努力提高设计和施工水平。

## 1.2 建筑深基坑的支护类型

### 1.2.1 钢板桩支护

20世纪80年代修建的高层建筑的地下室一般是1~2层基坑,埋深最多4~7m,因此基坑支护绝大多数采用钢板桩支护。钢板桩支护的优点是施工简便,速度快,而工程造价低。进入20世纪90年代,高层建筑的地下室发展到3~5层,再用钢板桩支护,已不能满足支护工程的安全要求,所以基坑支护频频发生失效。据统计,在软土地区基坑支护失效每年达1/4左右,在其他地区基坑失效也达10%~15%以上。当时主要是设计和施工都缺乏经验。之后原建设部下发文件规定当基坑深度达到7m时,各地必须对基坑支护方案经过专家评审后,方能施工。

### 1.2.2 地下连续墙支护

1950年在意大利米兰,连续钻孔成墙的排桩式地下连续墙施工成功,引起世界各国的注意,这一技术被纷纷引进。起先,这种地下连续墙仅作为土坝的防渗心墙,后来很快发展成为深基础和地下构筑物施工中的一项重要手段。其中,意大利在1954~1963年间就浇筑了约200万 $m^2$ 的地下连续墙;法国在1956年前,只施工完成1000 $m^2$ 的地下连续墙,但到1968年,施工完成的地下连续墙就上升到100万 $m^2$ 。这一时期,成槽工艺也有了很大的改进。如西欧较著名的有意大利的采用导板抓斗和冲击钻成槽的伊科斯(ICOS)法、单斗挖槽的埃尔塞(ELSE)法,法国的冲击回转式钻机成槽的索列汤舍(Solet-anche)法,西德的反循环法等。

拉美以墨西哥为代表,从法国引进地下连续墙支护技术后,发展很快,1967~1968年在首都墨西哥城的地下铁道建造中,采用地下连续墙,以16个月的工期,高速度地完成了全长41.5km的地下铁道,创造了高速度施工的记录。

日本于1959年引进这一新技术,并结合本国的具体情况,成功研制了许多本国独创的地下连续墙的新工艺专利,发展极为迅速,有后来居上之势。较著名的有BW工法,为多头钻切削式成槽机;TBW法,为双头滚刀式成槽机;TM法,为凿削式成槽机等,大量地用于各种地下设施和按抗震要求设计的深基础施工中。1959~1969年的11年中,日本浇筑了约250万 $m^2$ 的地下连续墙。



美国于1963年才开始使用地下连续墙，到1969年浇筑完成的地下连续墙仅有9.5万 $\text{m}^2$ 。但为了赶超其他国家，1974年美国在伊利诺大学举办了世界性地下连续墙专题讨论会，并出版了有关专著，以期引起美国工程界的注意。

前苏联迟至1966年开始试制导板抓斗。波兰于1970年开始在厂房基础中采用地下连续墙。此外，澳大利亚和东南亚各国也都先后采用了这一新技术。

1958年，我国在山东月子口水库和河北密云水库（现隶属于北京市）土坝工程中采用了排桩式素混凝土地下连续墙作为防渗心墙，并获得成功。之后地下连续墙支护技术在全国各地50多项水利工程中推广采用，总计成墙面积约达35万 $\text{m}^2$ ，最大深度为65.4m，最大厚度为1.3m，所用造孔设备为红旗20型及22型冲击式钻机。

1974年，我国已将地下连续墙施工推广到工业与民用建筑、城建和矿山等建设项目中。以后煤炭部试用排桩式地下连续墙于地下水位较高的覆盖层中修建竖井成功。此后两年多时间内，这一技术即已在17座竖井中使用，最深为57m。上海市隧道建设工程公司成功研制了液压导杆抓斗，并在上海冲积软土淤泥层中开挖了深达30m的槽段，然后搁置一年多，进行长期观测，槽段维持稳定不塌。北京市市政三公司也采用排桩式地下连续墙建成一座直径10m、深12.5m的顶管工作井。交通部各工程局也都致力于地下连续墙技术的研究，其中第一航务工程局在塘沽新港，以4台潜水电钻并联组成四钻头成槽机，成功地完成了岸坡抗滑墙工程。广东省则率先将地下连续墙技术应用到施工环境较复杂的大型锻锤振动基础上。

1977年，上海市基础工程公司又试制成功了导板抓斗成槽机和SF—60型多头钻成槽机，并结合工程完成了四项较为典型的试验性施工任务，效果较好。这四项试验性施工任务是：①某修船港池，长70m，宽17m，港池开挖深8m，成墙深度为1m，部分为26m（26m部分地下墙兼作升船机墩柱桩基）。②某钢厂高炉车间冲渣池，长60m，宽18m，深6~6.5m，成墙深度为12.5m。值得注意的是该工程的施工环境极差，位于密集的重要建筑群中，离高炉仅10m，距专用泵房仅6m，与运行频繁的出钢专用铁路线相隔仅5m，场地极为狭窄。③某轧钢厂沉渣池，施工条件极为不利，工程位于车间内部，设有50t级桥式行车。后述两项工程在如此不利与复杂的施工环境与条件下，采用地下连续墙施工，没有影响邻近基础，并在施工期间保证了这些生产设施的正常工作。④甬江管道工作井，直径16m，开挖深度20.5m，墙深达26m，并在深度16.3m处墙体内预留了直径2.6m的孔洞。以上工程施工速度快，质量高，全面完成了各项技术经济指标。而SF—60型多头钻成槽机经过原国家建委召开现场技术鉴定会正式鉴定通过，专家们一致认为其工艺及机组已达到实用阶段，其主机性能已基本赶上国际上先进的BW多头钻，适合在沿海软土及无大粒径的松散无黏性土层中使用，已成为主要的特种基础施工手段。

但地下连续墙也存在不足之处，主要有以下几个方面。

(1) 在岩溶地区，含有较高承压水头的夹层细、粉砂地层不能适用地下连续墙；对于沿海、河口三角洲处于不稳定流态软黏土以及具有动水渗流的细、粉砂层，如不辅以其他措施，则很难成槽。

(2) 对于小型的独立单体深基坑支护以及深度不大的地下构筑物，如采用地下连续墙，设备笨重，操作不灵活，则工程造价较高，不如其他施工方案经济。



(3) 施工技术要求高。如果施工掌握不当、成槽机械选用欠妥,均易造成超挖浪费和成墙表面粗糙等缺陷,致使地下连续墙完工后,增加大量的表面光洁处理工作量,有时甚至墙段下端不能连锁合拢,带来开挖基坑时的困难。

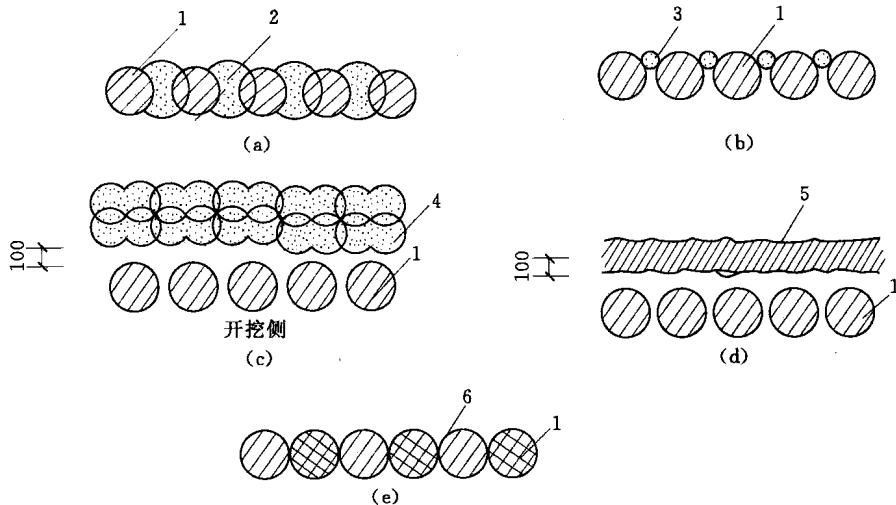
(4) 槽段接头处的质量控制比较复杂,尤其对于整体性要求很高的结构,更是如此。

(5) 如组织管理不善,易于造成施工现场泥泞不堪,影响施工场地条件和周围的环境。

(6) 若地下连续墙单纯用于基坑开挖中的临时性支护措施,则不如采用板桩,后者可以拔出重复利用。

### 1.2.3 改良的地下连续墙——柱列式灌注桩排桩支护

地下连续墙由于施工设备笨重、工程造价高,所以采用小型钻机或冲扩桩机,用柱列式间隔布置,包括桩与桩之间有一定净距的疏排布置形式和桩与桩相切的密排布置形式,实际上是改良的地下连续墙。为降低工程造价和施工方便,柱列式灌注桩作为挡土围护结构也有很好的刚度,但各桩之间的连系差,必须在桩顶浇筑较大截面的钢筋混凝土帽梁加以可靠连接。为了防止地下水并夹带土体颗粒从桩间空隙流入(渗入)坑内,应同时在桩间或桩背采用高压注浆、设置深层搅拌桩、旋喷桩等措施,或在桩后专门构筑防水帷幕(图 1-1)。灌注桩施工较连续墙简便,可用机械钻孔或人工挖孔,成本大大低于地下连续墙,可以不用大型机械,又无打入桩的噪声、振动和挤压周围土体带来的危害。人工挖孔桩的施工费用低,可以多组并行作业,成孔精度(垂直中心偏差)也高,但桩径截面较大。灌注桩围护结构在建筑主体结构外墙设计时也可视为外墙中的一部分参与受力(承受侧压),这时在桩与主体侧墙之间通常不设拉结筋并用防水层隔开。当坑底下卧坚硬岩层



桩间咬合搭接,其中 ⊙ 为先施工的灌注桩 ⊗ 为后施工的灌注桩

图 1-1 柱列式排桩支护形式

(a) 灌注桩与高压密注浆; (b) 灌注桩与高压旋喷; (c) 水泥搅拌桩与灌注桩;

(d) 注浆帷幕与灌注桩; (e) 灌注桩与桩间搭接部分

1—灌注桩; 2—桩高压密注浆; 3—桩间高压旋喷; 4—水泥搅拌桩; 5—注浆帷幕; 6—桩间搭接部分



时,采用挖孔桩还可在底部设置竖向锚杆将桩体与岩层连成整体而减少嵌入深度。排桩支护形式分为悬臂式排桩支护和支锚式排桩支护,而支锚式又分单点支锚和多点支锚(图1-2)。在大多数情况下悬臂式柱列桩适用于安全等级为三级的基坑支护工程,支锚式柱列桩适合于一、二级安全等级的基坑支护工程。但如在地下水位以下的砂层或软土中施工且出水量丰富时,人工挖孔就比较困难,而且容易引起土体流失,从而造成地层沉降,这时应采用套管钻孔、泥浆护壁和水下浇注混凝土。在做好隔水防渗的前提下,钻孔灌注桩围护结构也可用于深层软土中的支护,如上海港汇广场基坑工程采用直径1000mm钻孔灌注桩,用两排深层搅拌桩止水,开挖深度15m。上海国际航运大厦基坑深11.5~13.5m,用直径1000mm和直径1100mm钻孔灌注桩,以水泥搅拌桩和间隙高压注浆作为防水帷幕,造价比地下连续墙节约1000万元。灌注桩在京、广等地的深基坑工程中应用得最为普遍,尤其是人工挖孔桩,经常成为首先考虑的方案。例如北京东方广场基坑深度为16m,采用人工挖孔桩作挡土结构,桩长18.5m,桩径分别为1m、1.2m、1.5m,桩间距为1m、1.8m、1.5m,设置了3道锚杆,锚杆钻孔孔径为200mm,采用 $\Phi 40+1\Phi 32$ 粗钢筋制作,最大设计轴力为1656kN。广东地区还用人工挖孔桩的施工方式构筑地下连续墙体,如深圳地王大厦基坑(深15.75m)的围护墙。柱列式灌注桩的工作比较可靠,但要重视帽梁的整体拉结作用,在基坑边角处,帽梁应连续交圈。当灌注桩围护结构要求起到抗水防渗作用时,必须做好桩间和桩背的深层防水搅拌桩或旋喷桩;用一般的钻孔压密注浆方法不易保证止水,并曾引发过多起重大事故。柱列式灌注桩支护结构的监测项目见表1-1。

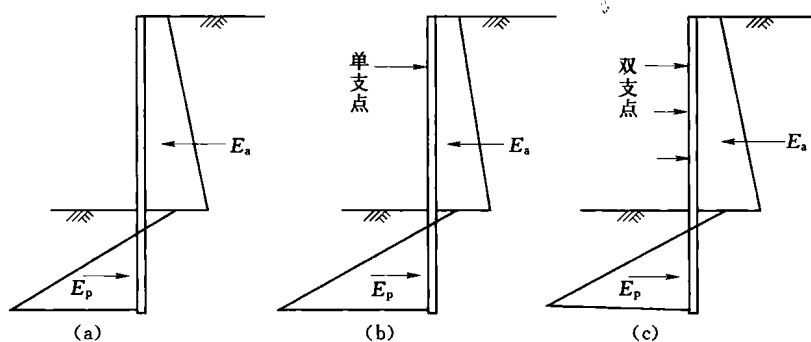


图1-2 排桩支护

(a) 悬臂式; (b) 单点支锚式; (c) 多点支锚式

表1-1

不同安全等级支护结构的监测项目

序号	监测项目	柱列式灌注桩支护等级		
		一级	二级	三级
1	支点力	应测	宜测	不规定
2	排桩倾斜	应测	宜测	不规定
3	排桩钢筋应力	应测	宜测	不规定
4	排桩桩顶水平位移	应测	必测	应测
5	邻近建筑物沉降观测	应测	必测	应测

### 1.2.4 内支撑和锚杆支护

作为基坑围护结构墙体的支承，内支撑（水平横撑、角撑、斜撑等）和锚杆（斜锚杆、锚碇板拉杆等）的作用对于保证基坑稳定和控制周围地层变形极为重要（图1-3和图1-4）。大量的内支撑多用直径600mm以上的钢管或大截面的组合型钢作为横撑，中间用立柱（型钢）支承，两端搁置在围护结构墙体上的牛腿并支撑于墙面。支撑的水平间距应考虑到柱列式灌注桩的间距大小，支撑端部可以分叉同时抵住两个或三个桩体（图1-5）。

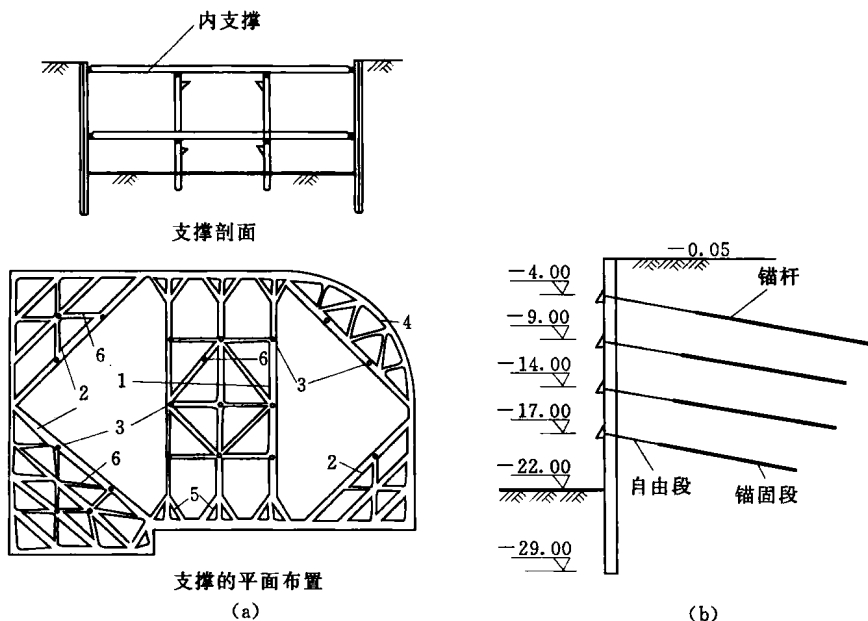


图1-3 内支撑和锚杆支护

(a) 内支撑；(b) 锚杆

1—对撑；2—角撑；3—立柱；4—拱形支撑；5—八字撑；6—连系杆

支撑平面布置如图1-4所示，支撑现场实景如图1-5所示。

支撑与墙体相抵处的垫板（楔块）构造与施工质量以及温差变形，将会严重影响支撑的纵向刚度，在挪威奥斯陆地铁施工中，曾实测得到支撑的纵向刚度竟只有理想刚度 $\frac{EA}{L}$ （ $E$ 、 $A$ 、 $L$ 分别为支撑的弹性模量、截面积和长度）的1/50，所以内支撑应该施加预应力以消除各种可能间隙。支撑的端部连接以及用千斤顶施加预应力都必须严格保证能使支撑中心受压，尽量减少偶然偏心。内支撑必须经过仔细的分析计算。在上海地区曾大量应用过钢筋混凝土内支撑，工程界认为现浇钢筋混凝土支撑的刚度大，可靠程度高，控制软土地层变形较有效。但钢筋混凝土支撑的施工和拆除均很复杂，不能重复使用，而且强度发展有一个过程，不能立即起到支撑作用。钢筋混凝土支撑适合于各侧边长较为接近的基坑，对于高层建筑这样的条形平面基坑不能充分发挥其长处。

锚杆支护是一种岩土主动加固和稳定技术，作为其技术主体的锚杆，一端锚入稳定的土（岩）体中，另一端与各种形式的支护结构物连接，通过杆体的受拉作用，调用深部地

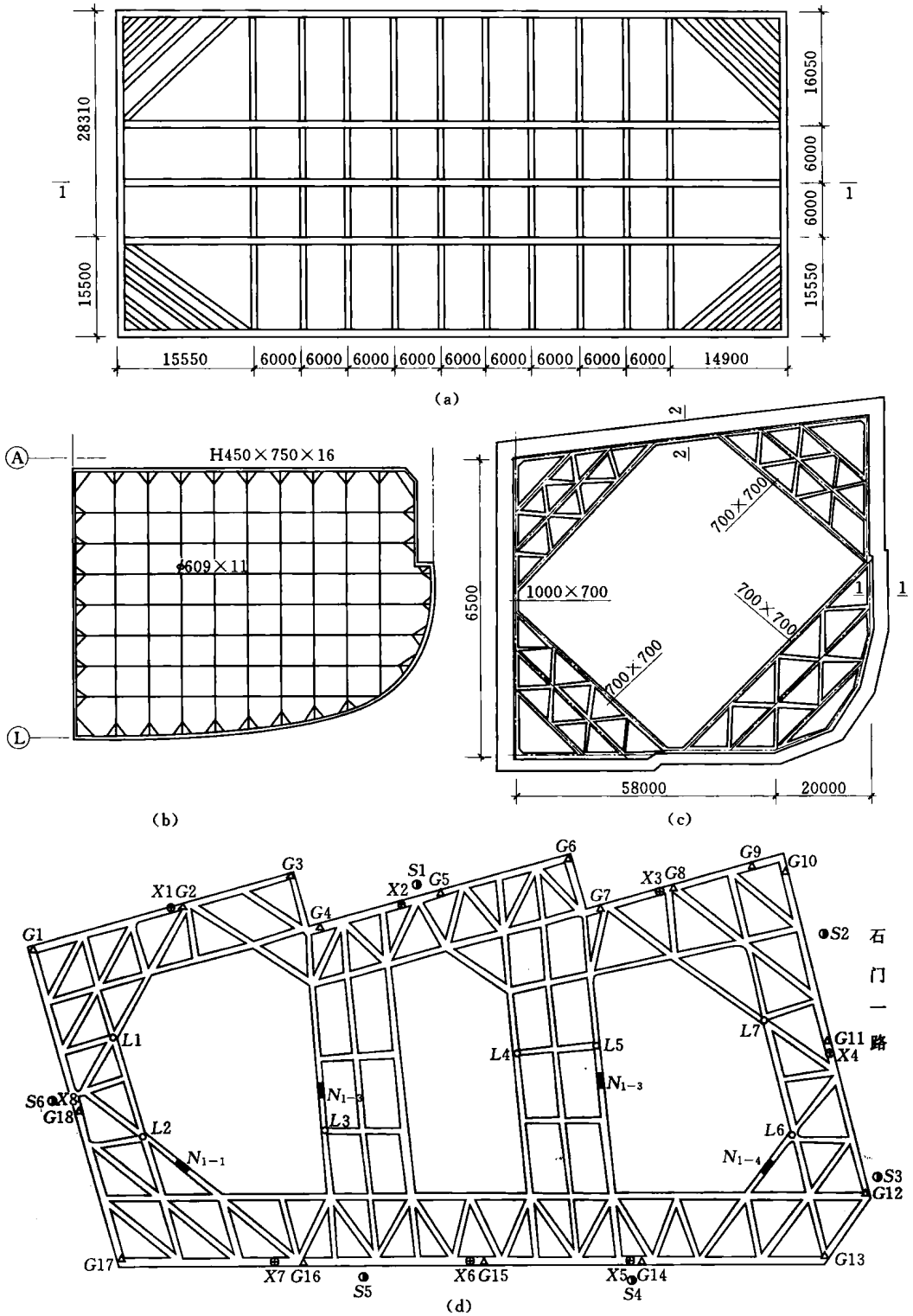
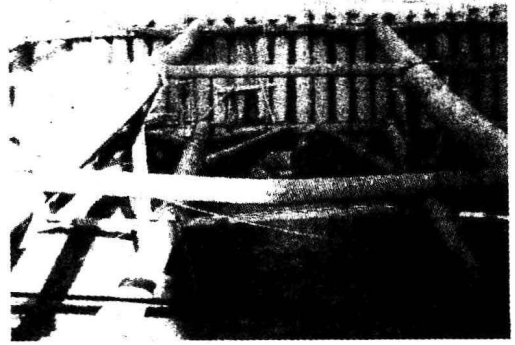
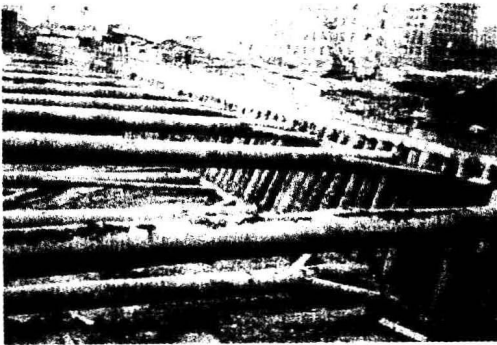
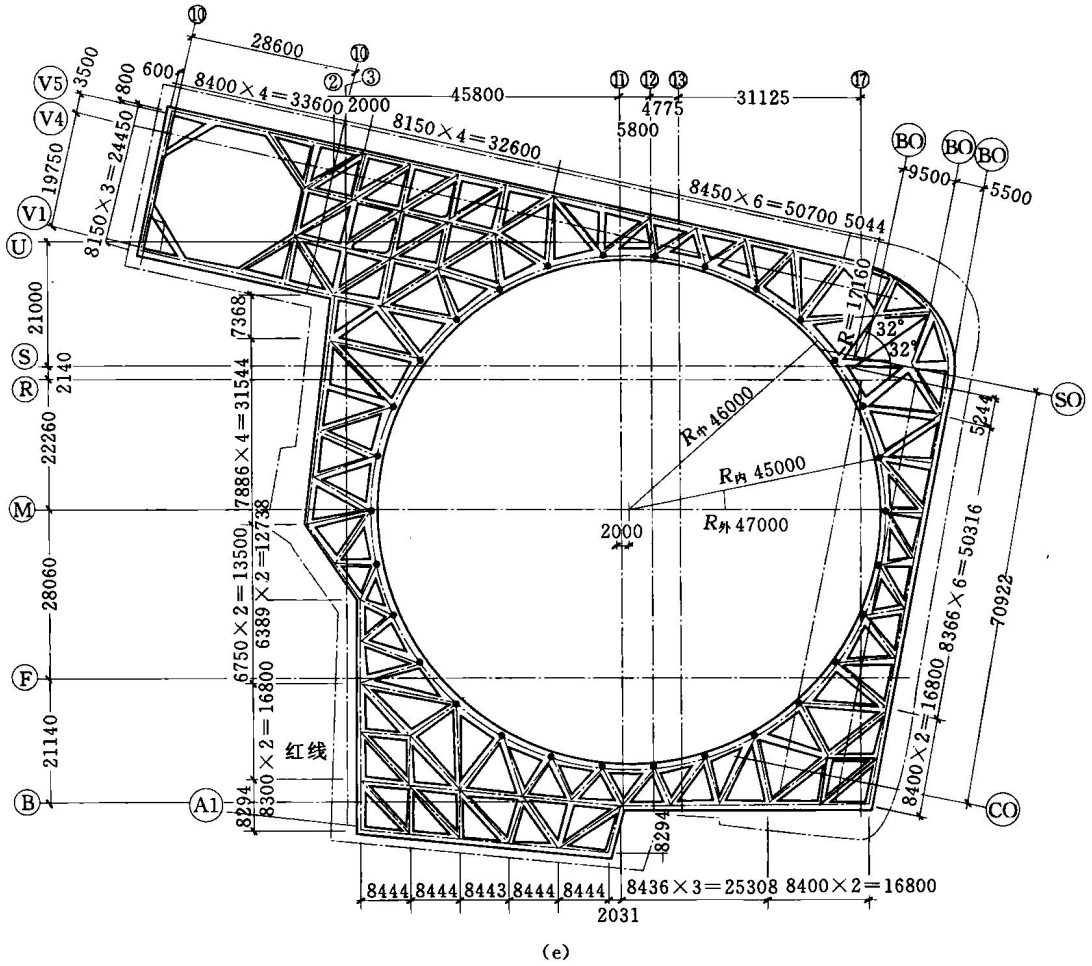


图 1-4 (一) 支撑平面布置图

(a) 角撑与对撑; (b) 对撑与角撑; (c) 边桁架内支撑; (d) 边桁架和对撑的内支撑;



(a)

(b)

图 1-5 基坑支撑实景照片  
(a) 基坑支撑一角; (b) 基坑支撑概貌





层的潜能，达到基坑和建筑物稳定的目的。鉴于深基坑支护的特点和目前的工程实践经验，本书主要是针对粘结型预应力土层锚杆提出的。这种锚杆的基本特点是：长度一般大于15m，设计轴向拉力一般大于200kN，借助于粘结材料实现锚固作用，通常对其施加预应力，应用对象主要是各类土层。岩石中的锚杆适应性强，基本不受基坑深度的限制；机动灵活，可与多种其他支护形式配套使用，这是锚固支护的两大特点。因此，锚固技术在深基坑中的应用具有显著的技术经济效益。根据目前国内外深基坑锚固支护工程应用的实践经验，锚杆可与各种支挡桩（人工挖孔灌注桩、钻孔灌注桩等）组成桩锚体系，也可与各种墙（地下连续墙、土钉墙、钢筋混凝土挡墙等）组成锚杆挡墙。至于选择何种形式，则应根据具体情况，在进行全面的技术经济比较后决定之。

锚杆技术在国内已有长足的发展，并积累了丰富的工程实践经验。背拉锚杆宜斜向插入深部的强度较高的土体中，但过大的倾角可能增加墙体的竖向沉降并削弱锚杆的效能。即使在软黏土中，采用二次挤裂注浆和扩孔注浆等方法也可以做出有效的锚固段，这在上海等软土地区都有成功实例。软黏土中为减少锚杆蠕变，要求提高土锚的极限承载力，使锁定荷载与极限承载力的比值得以降低。采用二次高压灌浆工艺可使锚固端直径加粗（如上海太平洋饭店饱和淤泥中锚杆采用二次高压注浆，直径从一次常压灌浆的168mm增至400mm）。锁定荷载对极限承载力的比值在饱和淤泥地层中以不大于0.55为宜。采用重复张拉也有利于减少变形。锚杆通常张拉到120%~150%的设计荷载进行检验，然后锁定在75%或更大的设计荷载。锚杆将锚固端与墙面之间的土体压缩，形成一种很宽的重力式墙，其变形较内支撑墙小。

在极度软弱松散土层中，一则因为锚固段单位面积摩擦阻力太低，难以达到实用的锚固力量级；二则因为锚杆会产生很大的徐变，甚至是有损的变形，故国内外有关规范都明确规定，永久锚杆不适用于有机质土、液限 $w_L > 50\%$ 、液性指数 $I_L > 0.9$ 和相对密实度 $D_r < 0.3$ 的土层。作为临时锚杆，可以比永久锚杆稍有放松，但为慎重起见，除非上述地层经过处理，一般仍不宜采用。

国外有研究资料认为，锚杆预应力的最大设计值，为等于或稍大于Peck的经验土压力值，这时墙体位移能得到最有效控制，超过这一压力水平对减少位移的作用就不大。天津华信大厦基坑锚杆支护在开挖初期曾进行试验，在粉质黏土中如用常压注浆，锚杆极限抗拔力在200~300kN之间，锚头位移有高达80mm的；若用二次高压注浆（压力3MPa），抗拔力大都在460kN以上，位移量减少到15mm左右。所以只要基坑周围有合适的地下空间和适宜的土体，就应首先考虑背拉锚杆而不是内支撑方案。

工程实践证明，背拉锚杆限制支护变形的效果要优于内支撑。虽然锚杆的本身刚度不能与内支撑相比，但可以施加更高的预应力，而且施工安装时为设置锚杆所需的挖土深度（指低于支承点位置以下的超挖）要比内支撑小，在与墙体连接处的接触变形也小。内支撑的最大缺陷还在于占据基坑内的空间，给挖土和主体结构施工造成许多困难，干扰并影响施工进度；随着主体结构施工进度，在自下至上逐步卸去支撑时还有可能进一步增加周围地层的位移。此外，环境温度变化可对内支撑的内力产生很大影响，比如20m宽的基坑，若环境温度降低10℃，支撑就会缩短25mm使基坑变形增加，而在温度升高后，这一变形并不能完全恢复，相反会使支撑内力增加过多，所以国外报道有对支撑在高温气候