

第 16 章 内支撑系统的设计与施工

16.1 内支撑概述

深基坑工程中的支护结构一般有两种形式,分别为围护墙结合内支撑系统的形式和围护墙结合锚杆的形式。作用在围护墙上的水土压力可以由内支撑有效地传递和平衡,也可以由坑外设置的土层锚杆平衡。内支撑可以直接平衡两端围护墙上所受的侧压力,构造简单,受力明确;锚杆设置在围护墙的外侧,为挖土、结构施工创造了空间,有利于提高施工效率。本节主要介绍内支撑系统的设计与施工。

内支撑系统由水平支撑和竖向支承两部分组成,深基坑开挖中采用内支撑系统的围护方式已得到广泛的应用,特别对于软土地区基坑面积大、开挖深度深的情况,内支撑系统由于具有无需占用基坑外侧地下空间资源、可提高整个围护体系的整体强度和刚度以及可有效控制基坑变形的特点而得到了大量的应用。图 16-1 和 16-2 为常用的钢筋混凝土支撑和钢管支撑两种内支撑形式的现场实景。



图 16-1 钢筋混凝土内支撑实景



图 16-2 钢管内支撑实景

16.1.1 内支撑体系的构成

围檩、水平支撑、钢立柱和立柱桩是内支撑体系的基本构件,典型的内支撑系统示意图见图 16-3。

围檩是协调支撑和围护墙结构间受力与变形的重要受力构件,其可加强围护墙的整体性,并将其所受的水平力传递给支撑构件,因此要求具有较好的自身刚度和较小的垂直位移。首道支撑的围檩应尽量兼作为围护墙的圈梁,必要时可将围护墙墙顶标高落低,如首道支撑体系的围檩不能兼作为圈梁时,应另外设置围护墙顶圈梁。圈梁作用可将离散的钻孔灌注围护桩、地下连续墙等围护墙连接起来,加强了围护墙的整体性,对减少围护墙顶部位移有利。

水平支撑是平衡围护墙外侧水平作用力的主要构件,要求传力直接、平面刚度好而且分布均匀。

钢立柱及立柱桩的作用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,要求具有较好自身刚度和较小垂直位移。

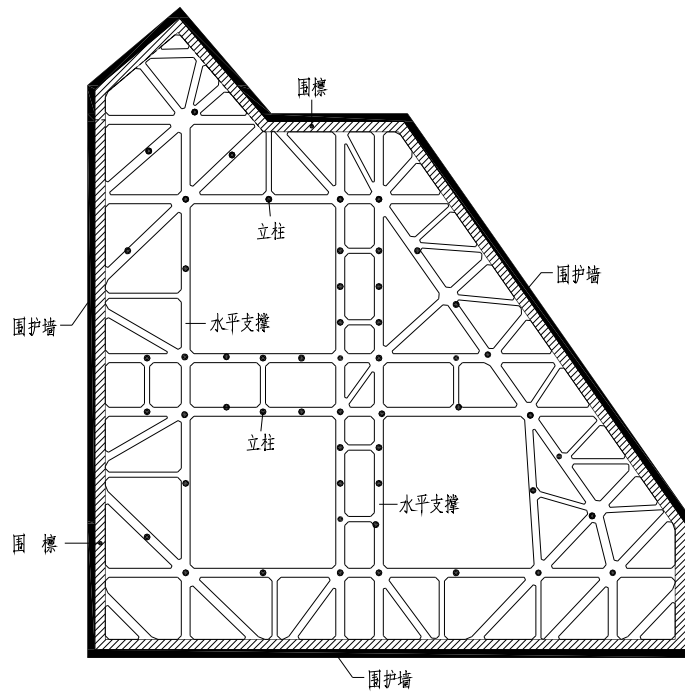


图 16-3 内支撑系统示意图

16.1.2 支撑体系

支撑体系常用型式有单层或多层平面支撑体系和竖向斜撑体系，在实际工程中，根据具体情况也可以采用类似的其他形式。

平面支撑体系可以直接平衡支撑两端围护墙上所收到的侧压力，其构造简单，受力明确，使用范围广。但当支撑长度较大时，应考虑支撑自身的弹性压缩以及温度应力等因素对基坑位移的影响。

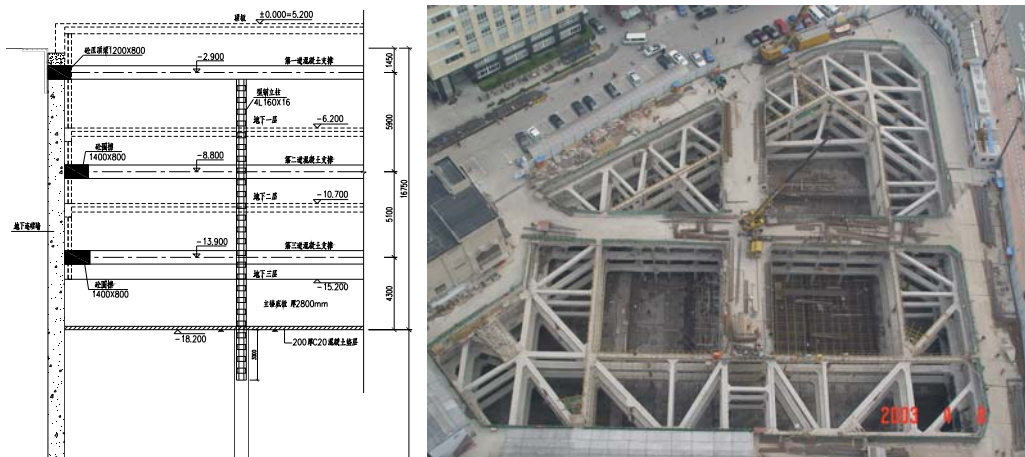


图 16-4 多层平面支撑体系

竖向斜撑体系的作用是将围护墙所受的水平力通过斜撑传到基坑中部先浇筑好的斜撑基础上。其施工流程是：围护墙完成后，先对基坑中部的土方采用放坡开挖，其后完成中部的斜撑基础，并安装斜撑，在斜撑的支挡作用下，再挖除基坑周边留下的土坡，并完成基坑周边的主体结构。对于平面尺寸较大，形状不很规则的基坑，采用斜支撑体系施工比较方便，也可大幅节省支撑材料。但墙体位移受到基坑周边土坡变形、斜撑弹性压缩以及斜撑基础变形等多种因素的影响，在设计计算时应给予合理考虑。此外，土方施工和支撑安装应保证对称性。

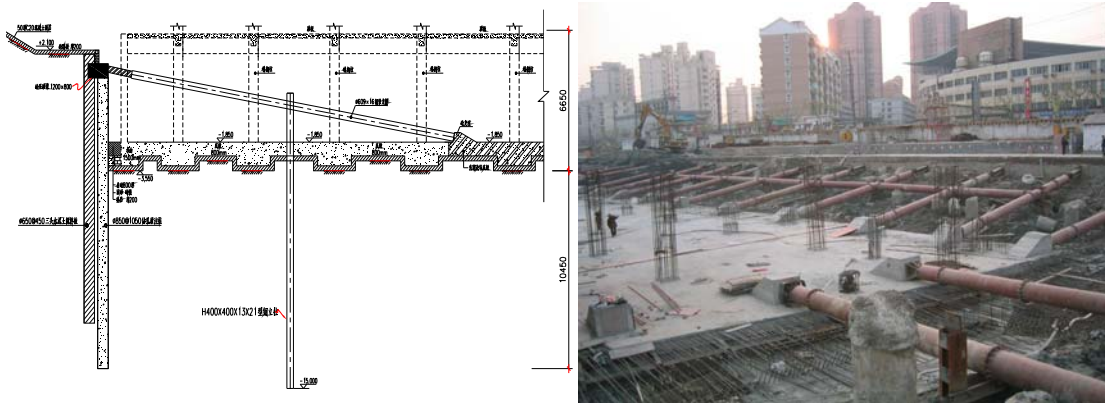


图 16-5 竖向斜撑体系

16.1.3 支撑材料

支撑材料可以采用钢或混凝土，也可以根据实际情况采用钢和混凝土组合的支撑形式。

钢结构支撑除了自重轻、安装和拆除方便、施工速度快以及可以重复使用等优点外，安装后能立即发挥支撑作用，对减少由于时间效应而增加的基坑位移，是十分有效的，因此如有条件应优先采用钢结构支撑。但是钢支撑的节点构造和安装相对比较复杂，如处理不当，会由于节点的变形或节点传力的不直接而引起基坑过大的位移。因此，提高节点的整体性和施工技术水平是至关重要的。表 16-1 和表 16-2 为常用 H 型钢和钢管支撑型号。

表 16-1 常用 H 型钢支撑表

尺寸 (mm)	单位重量 (kg/m)	断截面 (cm ²)	回转半径 (cm)		截面惯性矩 (cm ⁴)		截面抵抗力 (cm ²)	
			ix	iy	Ix	Iy	Wx	Wy
A×B×t1×t2	W	A	ix	iy	Ix	Iy	Wx	Wy
800×300×14×26	210	267	33	6.62	254000	9930	7290	782
700×300×12×14	185	236	29.3	6.78	201000	10800	5760	722
600×300×12×20	151	193	24.8	6.85	118000	9020	4020	601
500×300×11×18	129	164	20.8	7.03	71400	8120	2930	541
400×400×13×21	172	220	17.5	10.1	66900	22400	3340	1120

表 16-2 常用钢管支撑表

尺寸 (mm)	单位重量 (kg/m)	断截面 (cm ²)	回转半径 (cm)	轴惯性矩 (cm ⁴)
D×t	g	A	ix	Ix
609×16	234	298	21	131117
609×12	177	225	21	100309
580×16	223	283	20	112815

现浇混凝土支撑由于其刚度大，整体性好，可以采取灵活的布置方式适应于不同形状的基坑，而且不会因节点松动而引起基坑的位移，施工质量相对容易得到保证，所以使用面也较广。但是混凝土支撑在现场需要较长的制作和养护时间，制作后不能立即发挥支撑作用，需要达到一定的强度后，才能进行其下土方作业，施工周期相对较长。同时，混凝土支撑采用爆破方法拆除时，对周围环境（包括震动、噪音和城市交通等）也有一定的影响，爆破后的清理工作量也很大，支撑材料不能重复利用。因此，提高混凝土的早期强度，提高材料的经济性，研究和采用装配式预应力混凝土支撑结构是今后值得研究的课题。

16.2 支撑系统的设计

支撑系统的设计应包含支撑材料的选择、结构体系的布置、支撑结构内力和变形计算、支撑构件的强度和稳定性计算、支撑构件的节点设计以及支撑结构的安装和拆除。前面几个章节已针对支撑材料、结构体系的布置以及支撑系统的计算方法进行了论述，本章节主要内容为支撑系统的设计原则、支撑构件的设计与构造。

16.2.1 水平支撑系统平面布置原则

水平支撑系统中内支撑与围檩必须形成稳定的结构体系，有可靠的连接，满足承载力、变形和稳定性要求。支撑系统的平面布置形式众多，从技术上，同样的基坑工程采用多种支撑平面布置形式均是可行的，但科学、合理的支撑布置形式应是兼顾了基坑工程特点、主体地下结构布置以及周边环境的保护要求和经济性等综合因素的和谐统一。通常情况下可采用如下方式：

1) 长条形基坑工程中，可设置以短边方向的对撑体系，两端可设置水平角撑体系。短边方向的对撑体系可根据基坑短边的长度、土方开挖、工期等要求采用钢支撑或者混凝土支撑，两端的角撑体系从基坑工程的稳定性以及控制变形角度上，宜采用混凝土支撑的形式。

如已实施完毕的上海浦东恒大小区基坑工程，基坑形状呈狭长的手枪状，基坑东西方向长度较长约为 240m，西侧南北方向长度约为 43m，东侧南北方向长度约为 83m。综合考虑工程周边环境、基坑面积及形状、基坑开挖深度以及工期等因素，支撑系统采用了钢和混凝土组合支撑的形式，东侧基坑角撑结合对撑的混凝土支撑形式，西侧基坑采用角部混凝土支撑，短边设置钢支撑对撑的形式。

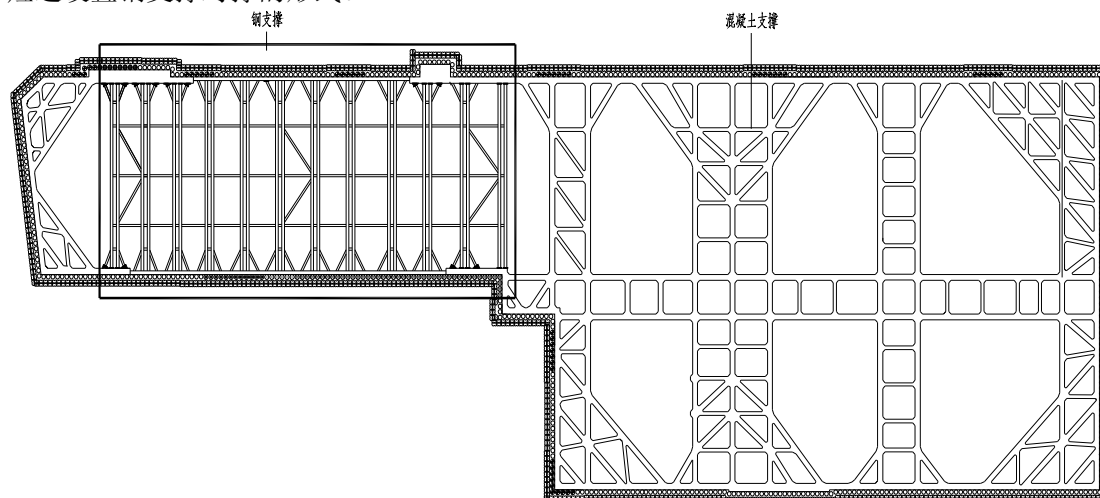


图 16-6 恒大小区基坑支撑平面布置图



图 16-7 恒大小区东侧混凝土支撑实景

图 16-8 恒大小区西侧钢支撑实景

2) 当基坑周边紧邻保护要求较高建(构)筑物、地铁车站或隧道,对基坑工程的变形控制要求较为严格时,或者基坑面积较小、两个方向的平面尺寸大致时,或者基坑形状不规则,其他形式的支撑布置有较大难度时,宜采用相互正交的对撑布置方式。该布置型式的支撑系统具有支撑刚度大、传力直接以及受力清楚的特点,适合在变形控制要求高的基坑工程中应用。

上海解放日报新闻业务楼基坑地处上海市黄浦区中心位置,基坑形状呈不规则矩形,基坑面积较小约为 2300m^2 ,开挖深度约为 12m ,基坑东侧紧邻一高层建筑物,根据本基坑的面积、形状以及周围的环境特点,采用了抗侧刚度大、可适应不规则形状的十字正交布置形式的钢筋混凝土支撑形式。

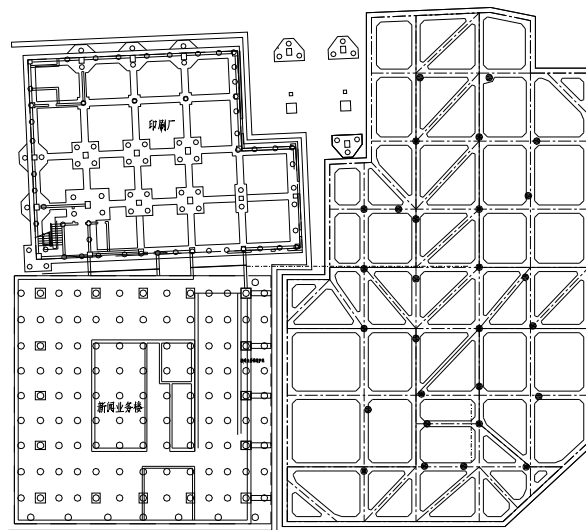


图 16-9 上海解放日报新闻业务楼基坑支撑平面

3) 当基坑面积较大,平面形状不规则时,同时在支撑平面中需要留设较大作业空间时,宜采用角部设置角撑、长边设置沿短边方向的对撑结合边桁架的支撑体系。该类型支撑体系由于具有较好的控制变形能力、大面积无支撑的出土作业面以及可适应各种形状的基坑工程,同时由于支撑系统对撑、各榀对撑之间具有较强的受力上的独立性,易于实现土方上的流水化施工,此外还具有较好的经济性,因此几乎成为上海等软土地区首选的支撑平面布置形式,近年来得到极为广泛的应用。

上海虹桥综合交通枢纽工程东交通中心、磁悬浮基坑工程面积巨大,地下二层区域长约 404m ,宽约 $77\sim 136\text{m}$,基坑开挖深度约 $18\sim 25\text{m}$,基坑形状呈不规则长方形。根据基坑形状的特点,采用了两端角撑中部对撑的支撑布置形式,该布置形式的支撑为流水化施工支撑和土方开挖创造了条件,从而大大加快了基坑工程的施工速度和缩短了施工工期。

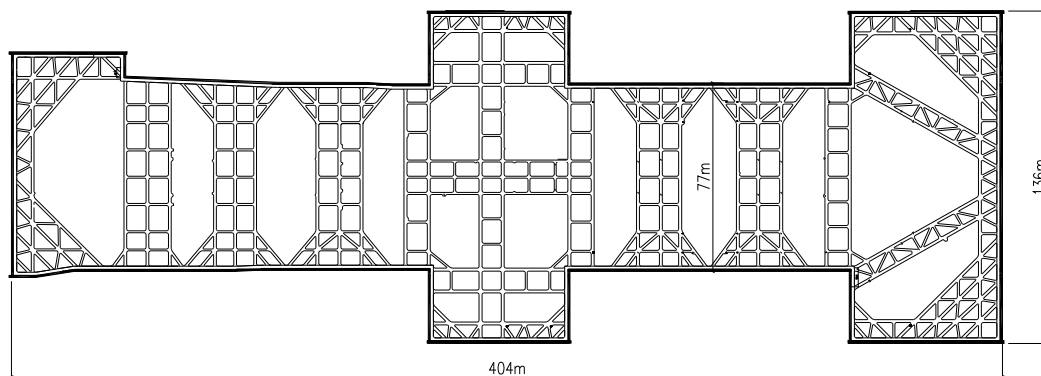


图 16-10 上海虹桥综合交通枢纽工程基坑支撑平面布置



图 16-11 上海虹桥综合交通枢纽基坑支撑实景

4) 基坑平面为规则的方形、圆形或者平面虽不规则但基坑两个方向的平面尺寸大致相等, 或者是为了完全避让塔楼框架柱、剪力墙等竖向结构以方便施工、加快塔楼施工工期, 尤其是当塔楼竖向结构采用劲性构件时, 临时支撑平面应错开塔楼竖向结构, 以利于塔楼竖向结构的施工, 可采用单圆环形支撑甚至多圆环形支撑布置方式。

天津响螺湾中钢大厦项目位于天津市响螺湾地区, 基坑开挖深度达到 18~22m, 基坑面积达到 2 万 m^2 , 是当地规模最大的基坑工程之一。根据围护结构受力计算的需要, 本工程内部需设置四道钢筋混凝土支撑体系。由于平面形状不规则, 采用较为传统的角撑、对撑结合边桁架布置, 需要设置大量穿越基坑内部的杆件, 不利于土方的开挖和地下室结构的施工。因此结合本工程的平面形状和塔楼的分布位置, 采用双半圆环的支撑平面布置体系。双半圆环支撑形式的采用, 基本上避开了整个塔楼区域的所有竖向构件, 基坑开挖到底后, 完成基础底板施工后, 两个主要的地面建筑即可在不拆撑的情况下向上施工主体结构, 加快整体工期进度。

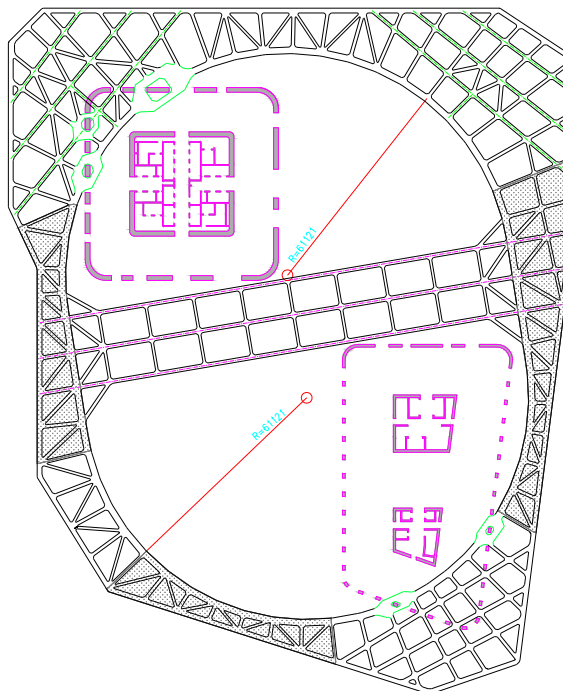


图 16-12 天津响螺湾中钢大厦基坑支撑平面示意图

上述圆环形支撑形式的支撑杆件均采用钢筋混凝土材料,在一定条件下也可采用组合结构环形内支撑的形式,该形式与钢筋混凝土环形支撑基本相似,其根本区别在于组合结构环形内支撑形式中,环形支撑由于需承受巨大的轴向压力,因此采用钢筋混凝土支撑材料,其余杆件承受的轴向压力相对较小,采用施工速度快、可回收以及经济性较好的钢结构材料截面承载力也能满足要求。

下图 16-13 为新华明珠深基坑支护工程采用组合结构环形内支撑的基坑工程实景,该基坑支撑采用钢筋混凝土大圆环,圆环直径 68m,其余杆件均采用钢结构,实施效果良好。



图 16-13 新华明珠基坑工程开挖全景

5) 基坑平面有向坑内折角(阳角)时,阳角处的内力比较复杂,是应力集中的部分,稍有疏忽,最容易在该部分出现问题。阳角的处理应从多方面进行考虑,首先基坑平面的设计应尽量避免出现阳角,当不可避免时,需作特别的加强,如在阳角的两个方向上设置支撑点,或者可根据实际情况将该位置的支撑杆件设置现浇板,通过增设现浇板增强该区域的支撑刚度,控制该位置的变形。无足够的经验可借鉴时,最好对阳角处的坑外地基进行加固,提高坑外土体的强度,以减少围护墙体的侧向水土压力。

6) 支撑结构与主体地下结构的施工期通常是错开的,为了不影响主体地下结构的施工,支撑系统平面布置时,支撑轴线应尽量避免避开主体工程的柱网轴线,同时,避免出现整根支撑位于结构剪力墙之上的情况,其目的是减小支撑体系对主体结构施工时的影响。另外,如主体地下结构竖向结构构件采用内插钢骨的劲性结构时,应严格复核支撑的平面分布,确保支撑杆件完全避让劲性结构。

7) 支撑杆件相邻水平距离首先应确保支撑系统整体变形和支撑构件承载力在要求范围之内,其次应满足土方工程的施工要求。当支撑系统采用钢筋混凝土围檩时,沿着围檩方向的支撑点间距不宜大于 9m;采用钢围檩时,支撑点间距不宜大于 4m;当相邻支撑之间的水平距离较大时,应在支撑端部两侧与围檩之间设置八字撑,八字撑宜左右对称,与围檩的夹角不宜大于 60 度。

16.2.2 水平支撑系统竖向布置原则

在基坑竖向平面内需要布置的水平支撑的数量,主要根据基坑围护墙的承载力和变形控制计算确定,同时应满足土方开挖的施工要求。基坑竖向支撑的数量主要受土层地质特性以及周围环境保护要求的影响。基坑面积、开挖深度、围护墙设计以及周围环境等条件都相同的条件下,不同地区不同土层地质特性情况下,支撑的数量区别是十分显著的,如开挖深度 15m 的基坑工程,在北方等硬土地区也许无需设置内支撑,仅在坑外设置几道锚杆即可满足要求,而在沿海软土地区,则可能需要设置三~四道水平支撑;另外即使在土层地质一致的

地区，当周围环境保护要求有较大的区别时，支撑道数也是相差较大的。一般情况下，支撑系统竖向布置可按如下原则进行确定：

1) 在竖向平面内，水平支撑的层数应根据基坑开挖深度、土方工程施工、围护结构类型及工程经验，有围护结构的计算工况确定。

2) 上、下各层水平支撑的轴线应尽量布置在同一竖向平面内，主要目的是为了便于基坑土方的开挖，同时也能保证各层水平支撑共用竖向支承立柱系统。此外，相邻水平支撑的净距不宜小于 3m，当采用机械下坑开挖及运输时应根据机械的操作所需空间要求适当放大。

3) 各层水平支撑与围檩的轴线标高应在同一平面上，且设定的各层水平支撑的标高不得妨碍主体工程施工。水平支撑构件与地下结构楼板间的净距不宜小于 300mm；与基础底板间净距不小于 600mm，且应满足墙、柱竖向结构构件的插筋高度要求。

4) 首道水平支撑和围檩的布置宜尽量与围护墙结构的顶圈梁相结合。在环境条件容许时，可尽量降低首道支撑标高。基坑设置多道支撑时，最下道支撑的布置在不影响主体结构施工和土方开挖条件下，宜尽量降低。当基础底板的厚度较大，且征得主体结构设计认可时，也可将最下道支撑留置在主体基础底板内。

16.2.3 竖向斜撑的设计

竖向斜撑体系一般较多的应用在开挖深度较小、面积巨大的基坑工程中。竖向斜撑体系一般由斜撑、压顶圈梁和斜撑基础等构件组成，斜撑一般投影长度大于 15m 时应在其中部设置立柱。斜撑一般采用钢管支撑或者型钢支撑，钢管支撑一般采用 $\Phi 609 \times 16$ ，型钢支撑一般采用 $H700 \times 300$ 、 $H500 \times 300$ 以及 $H400 \times 400$ ，斜撑坡率不宜大于 1:2，并应尽量与基坑内土堤的稳定边坡坡率相一致，同时斜撑基础与围护墙之间的水平距离也不宜小于围护墙插入深度的 1.5 倍，斜撑与围檩及斜撑与基础之间的连接，以及围檩与围护墙之间的连接应满足斜撑的水平分力和竖向分力的传递要求。

采用竖向斜撑体系的基坑，在基坑中部的土方开挖后和斜撑未形成前，基坑变形取决于围护墙内侧预留的土堤对墙体所提供的被动抗力，因此保持土堤边坡的稳定至关重要，必须通过计算确定可靠的安全储备。

16.2.4 支撑节点构造

支撑结构，特别是钢支撑的整体刚度更依赖构件之间的合理连接构造。支撑结构的设计，除确定构件截面外，须重视节点的构造设计。

1. 钢支撑的长度拼接

钢结构支撑构件的拼接应满足截面等强度的要求。常用的连接方式有焊接和螺栓连接。螺栓连接施工方便但整体性不如焊接，为减少节点变形，宜采用高强螺栓。构件在基坑内的接长，由于焊接条件差，焊缝质量不易保证，通常采用螺栓连接。

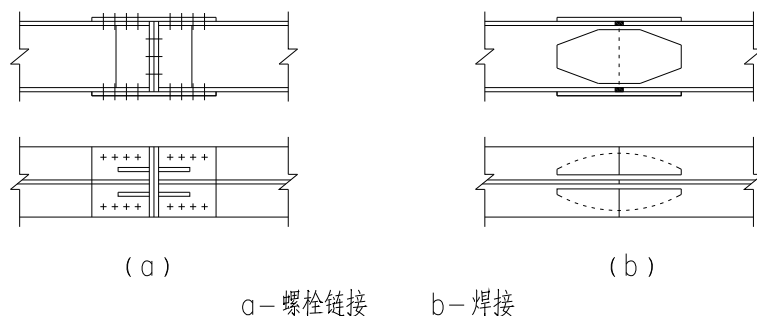


图 16-14 型钢支撑的长度拼接

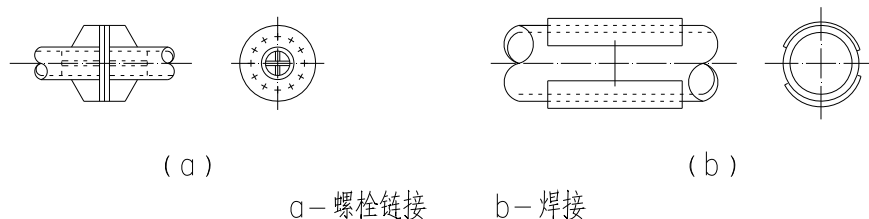


图 16-15 钢管支撑的长度拼接

钢腰梁在基坑内的拼接点由于受操作条件限制不易做好，尤其在靠围护墙一侧的翼缘连接板较难施工，影响整体性能。设计时应将接头设置在截面弯矩较小的部位，并应尽可能加大坑内安装段的长度，以减少安装节点的数量。

2. 两个方向的钢支撑连接节点

纵横向支撑采用重迭连接，虽然施工安装方便，但支撑结构整体性差，应尽量避免采用。当纵横向支撑采用重迭连接时，则相应的围檩在基坑转角处不在同一平面相交，此时应在转角处的围檩端部采取加强的构造措施，以防止两个方向上围檩的端部产生悬臂受力状态。

纵横向支撑应尽可能设置在同一标高上，采用定型的十字节点连接。这种连接方式整体性好，节点比较可靠。节点可以采用特制的“十”及“井”字接头，纵横管都与“十”字或“井”字接头连接，使纵横钢管处于同一平面内。后者可以使钢管形成一个平面框架，刚度大，受力性能好。



图 16-16 “十”字接头图



图 16-17 “井”字接头

3. 钢支撑端部预应力活络端构造

钢支撑的端部，考虑预应力施加的需要，一般均设置为活络端，待预应力施加完毕后固定活络端，且一般配与琵琶撑。除了活络端设置在钢支撑端部外，还可以采用螺旋千斤顶等设备设置在支撑的中部。由于支撑加工及生产厂家不同，目前投入基坑工程使用的活络端有以下两种形式，一种为契型活络端、一种为箱体活络端。详见下图。



图 16-18 契型活络端

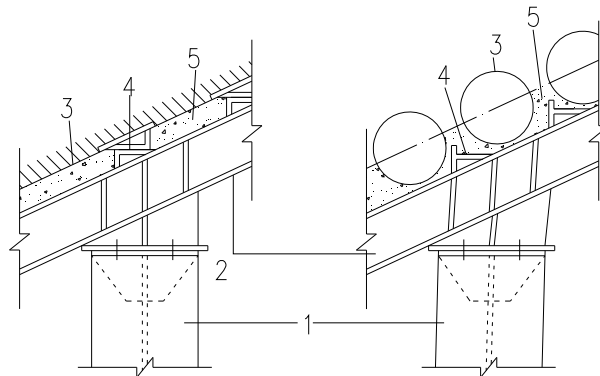


图 16-19 预应力箱体

钢管支撑为了施加预应力常设计一个预应力施加活络头子，并采用单面施加的方法进行。由于预应力施工后会产生各种预应力损失（详见预应力相关规范），基坑开挖变形后预应力也会发生损失，为了保证预应力的强度，当发现预应力损失达到一定程度时须及时进行补充，复加预应力。

4. 钢支撑与钢腰梁斜交处抗剪连接节点

由于围护墙表面通常不十分平整，尤其是钻孔灌注桩墙体，为使钢围檩与围护墙接合得紧密，防止钢围檩截面产生扭曲，在钢围檩与围护墙之间采用细石混凝土填实，如二者之间缝宽较大时，为了防止所填充的混凝土脱落，缝内宜放置钢筋网。当支撑与围檩斜交时，为传递沿围檩方向的水平分力，在围檩与围护墙之间需设置剪力传递装置。对于地下连续墙可通过预埋钢板，对于钻孔灌注桩可通过钢围檩的抗剪焊接件。

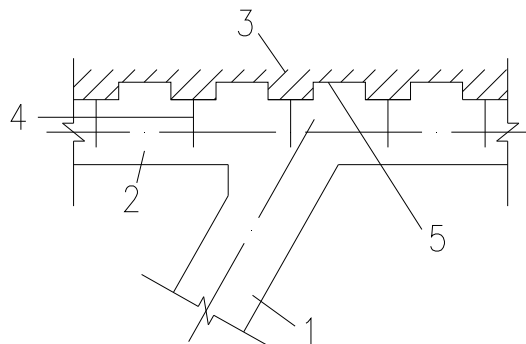


1—钢支撑; 2—钢腰梁; 3—围护墙; 4—剪力块; 5—填嵌混凝土

图 16-20 钢支撑与腰梁斜交时连接

5. 支撑与混凝土腰梁斜交处抗剪连接节点

通常情况下，围护墙与混凝土围檩之间的结合面不考虑传递水平剪力。当基坑形状比较复杂，支撑采用斜交布置时，特别是当支撑采用大角撑的布置形式时，由于角撑的数量多，沿着围檩长度方向需传递十分巨大的水平力，此时如围护墙与围檩之间应设置抗剪件和剪力槽，以确保围檩与围护墙能形成整体连接，二者接合面能承受剪力，可使得围护墙也能参与承受部分水平力，既可改善围檩的受力状态、又可减少整体支撑体系的变形。围护墙与围檩结合面的墙体上设置的抗剪件一般采用预埋插筋，或者预埋埋件，开挖后焊接抗剪件，预留的剪力槽可间隔抗剪件布置，其高度一般与围檩截面相同，间距 150~200mm，槽深 50~70mm。



1—支撑; 2—腰梁; 3—地下连续墙

4—预留受剪钢筋; 5—预留剪力槽

图 16-21 地下连续墙预留剪力槽和插筋与围檩连接示意图

16.3 水平支撑的计算方法

16.3.1 水平支撑系统计算方法

水平支撑系统计算可分为在土压力水平力作用下的水平支撑计算和竖向力作用下的水平支撑计算，现阶段的计算手段已可实现将围护体、内支撑以及立柱作为一个整体采用空间模型进行分析，支撑构件的内力和变形可以直接根据其静力计算结果确定即可，但空间计算模型其实用程度上存在若干不足，因此现阶段绝大部分内支撑系统均采用相对简便的平面计算模型进行分析，当采用平面计算模型进行分析时，水平支撑计算应分别进行水平力作用和竖向力作用下的计算，以下分别进行说明。

1. 水平力作用下的水平支撑计算方法

1) 支撑平面有限元计算方法

水平支撑系统平面内的内力和变形计算方法一般是将支撑结构从整个支护结构体系中截离出来，此时内支撑（包括围檩和支撑杆件）形成一自身平衡的封闭体系，该体系在土压力作用下的受力特性可采用杆系有限元进行计算分析，进行分析时，为限制整个结构的刚体位移，必须在周边的围檩上添加适当的约束，一般可考虑在结构上施加不相交于一点的三个约束链杆，形成静定约束结构，此时约束链杆不产生反力，可保证分析得到的结果与不添加约束链杆时得到的结果一致。

内支撑平面模型以及约束条件确定之后，将由平面竖向弹性地基梁法（如图 16-16）或平面连续介质有限元方法得到的弹性支座的反力作用在平面杆系结构之上，采用空间杆系有限元的方法即可求得土压力作用下的各支撑杆件的内力和位移。

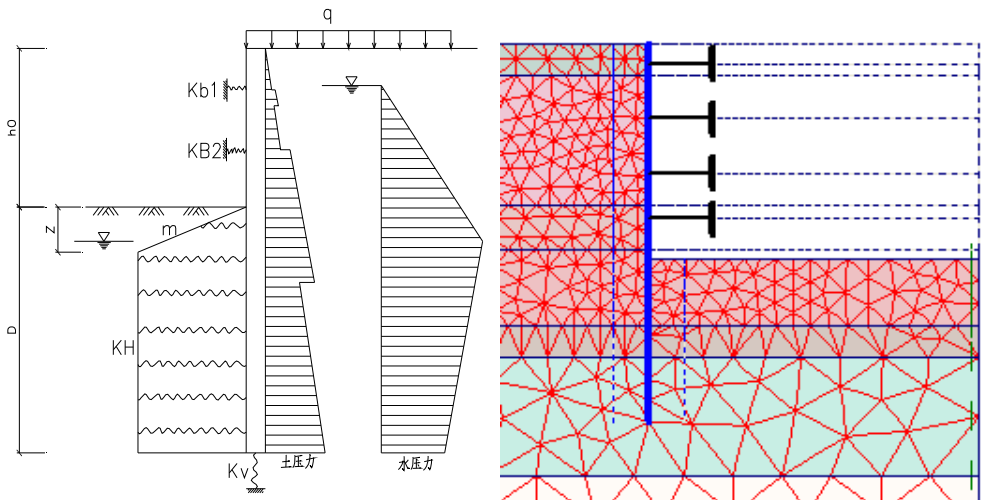


图 16-22 平面竖向弹性地基梁法计算简图 图 16-23 平面连续介质有限元法计算模型

采用平面竖向弹性地基梁法或平面连续介质有限元法时需先确定弹性支座的刚度，对于形状比较规则的基坑，并采用十字正交对撑的内支撑体系，支撑刚度可根据支撑体系的布置和支撑构件的材质与轴向刚度等条件按如下计算公式（16-1）确定。在求得弹性支座的反力之后，可将该水平力作用在平面杆系结构之上，采用有限元方法计算得到各支撑杆件的内力和变形，也可采用简化分析方法，如支撑轴向力，按围护墙沿围檩长度方向的水平反力乘以支撑中心距计算，混凝土围檩则可按多跨连续梁计算，计算跨度取相邻支撑点的中心距。钢围檩的内力和变形宜按简支梁计算，计算跨度取相邻水平支撑的中心距。

$$K_B = \frac{2\alpha EA}{l \cdot S} \quad (16-1)$$

式中 K_B ——内支撑的压缩弹簧系数 (kN/m^2)；

α ——与支撑松弛有关的折减系数，一般取 0.5~1.0；混凝土支撑与钢支撑施加预压

力时，取 $\alpha = 1.0$ ；

E ——支撑结构材料的弹性模量 (kN/m^2)；

A ——支撑构件的截面积 (m^2)；

l ——支撑的计算长度 (m)；

S ——支撑的水平间距 (m)。

对于较为复杂的支撑体系，难以直接根据以上公式确定弹性支撑的刚度，且弹性支撑刚度会随着周边节点位置的变化而变化。这里介绍一种较为简单的处理方法，即在水平支撑的围檩上施加与围檩相垂直的单位分布荷载 $p=1\text{kN}/\text{m}$ ，求得围檩上各结点的平均位移 δ （与围檩方相垂直的位移），则弹性支座的刚度为：

$$K_{Bi} = p / \delta \quad (16-2)$$

需指出的是，式（16-2）反映的是水平支撑系统的一个平均支撑刚度。

2) 支撑三维计算方法

一般情况下，基坑外侧的超载、水土压力等侧向水平力通过围护体，将全部由坑内的内支撑系统进行平衡，围护体仅起到挡土、止水以及将水平力通过竖向抗弯的方式全部传递给内支撑，并不参与坑外水平力的分担。当基坑形状具有较强的空间效应时，比如拱形、圆形情况或者基坑角部区域，围护体还将同时承受部分坑外水平力，在该情况下如按照上述计算方法对内支撑进行内力和变形进行计算分析，将高估了内支撑实际的内力和变形，造成不必要的浪费，此时应采用能考虑空间效应的空间计算模型，空间弹性地基板法的求解可采用通用有限元软件，一般可先通过有限元软件自带的前处理模块或其它有限元前处理软件建立考虑围护结构、水平支撑体系和竖向支承系统共同作用的三维有限元模型，模型需综合考虑结构的分布、开挖的顺序等，然后用有限元程序分步求解。下图 16-24 为基坑工程三维计算模型图。

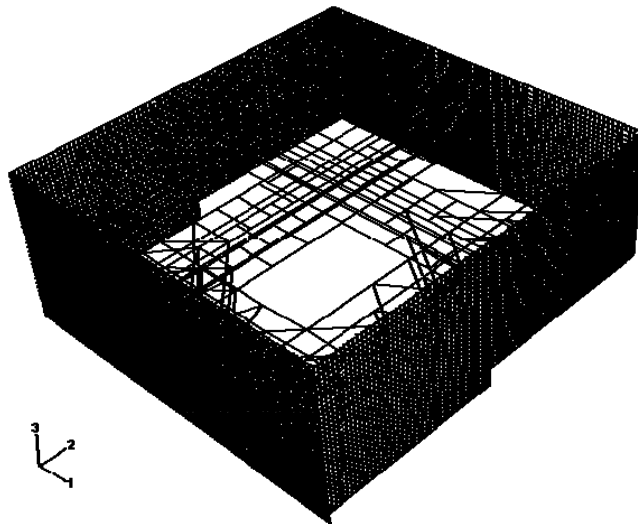


图 16-24 基坑工程三维计算模型

一般情况下，基坑外侧的超载、水土压力等侧向水平力通过围护体，将全部由坑内的内支撑系统进行平衡，围护体仅起到挡土、止水以及将水平力通过竖向抗弯的方式全部传递给内支撑，并不参与坑外水平力的分担。当基坑形状具有较强的空间效应时，比如拱形、圆形情况或者基坑角部区域，围护体还将同时承受部分坑外水平力，在该情况下如按照上述计算方法对内支撑进行内力和变形进行计算分析，将高估了内支撑实际的内力和变形，造成不必要的浪费，此时应采用能考虑空间效应的空间计算模型，空间弹性地基板法的求解可采用通用有限元软件，一般可先通过有限元软件自带的前处理模块或其它有限元前处理软件建立考

考虑围护结构、水平支撑体系和竖向支承系统共同作用的三维有限元模型，模型需综合考虑结构的分布、开挖的顺序等，然后用有限元程序分步求解。

3) 计算实例

以下对某基坑项目的支撑系统采用平面有限元计算方法分析过程进行说明，该项目基坑面积约 6500m²，开挖深度约 16.4m，基坑围护体采用钻孔灌注桩结合搅拌桩止水帷幕作为围护体，基坑竖向设置三道钢筋混凝土支撑，支撑采用圆环支撑平面布置形式，平面简图如下图所示：

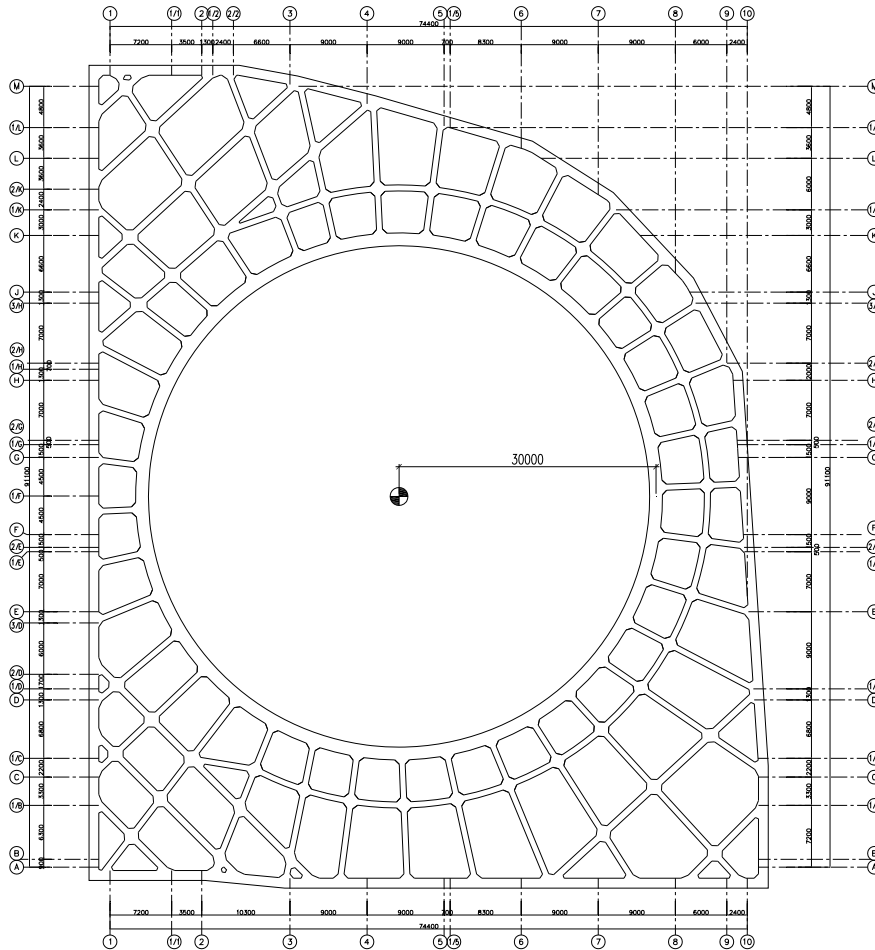


图 16-25 支撑平面布置图

支撑信息如下表所示：

表 16-3 支撑信息一览表

项目	围檩(mm)	圆环撑(mm)	角撑及腹杆(mm)	连杆(mm)
第一道支撑系统	1200×700	1500×700	800×700	600×600
第二道支撑系统	1300×800	2200×1200	900×800	700×700
第三道支撑系统	1200×800	2000×1000	900×700	700×700

a) 确定支撑系统刚度

建立三道钢筋混凝土支撑系统的计算简图，如图 16-26 所示，其后分别沿着围檩作用垂直向的单位分布荷载 $p=1\text{kN/m}$ ，进而求得三道支撑系统在单位分布荷载作用下的平均位移 δ 以及支撑系统刚度 K 。

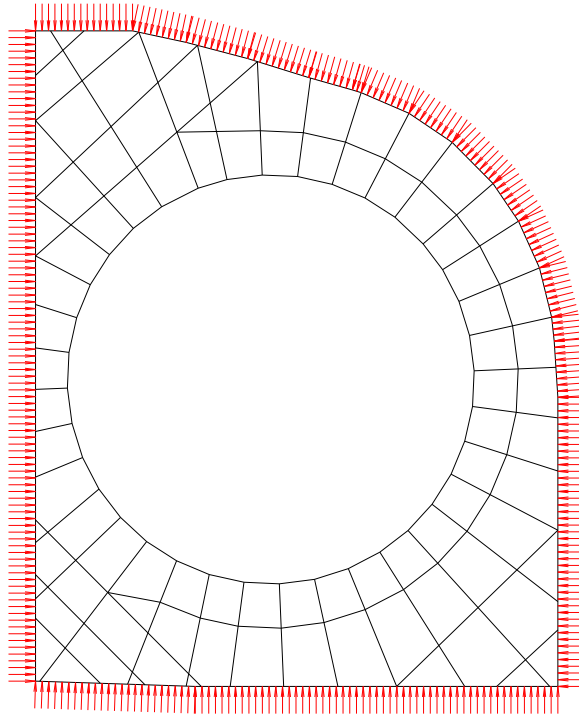


图 16-26 支撑平面计算简图

表 16-4 支撑信息一览表

项目	$P(kN/m)$	$\delta (mm)$	$K(MN/m^2)$
第一道支撑系统	1	0.03	33.3
第二道支撑系统	1	0.01	100
第三道支撑系统	1	0.02	50

b) 计算支撑支座反力

根据以上通过计算确定的支撑刚度,采用竖向弹性地基梁法求得第一~三道支撑系统的支撑反力,具体图 16-27 所示。

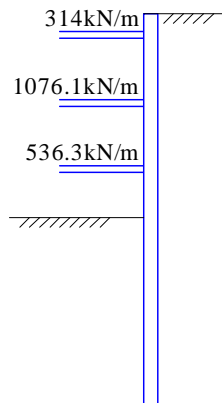


图 16-27 支撑反力计算结果图

c) 计算支撑系统的变形和内力

根据图 16-27 可知,第一道支撑水平荷载为 314kN/m,第二道支撑水平荷载为 1076.1kN/m,第三道支撑水平荷载为 536.3kN/m,将三道支撑的水平荷载分别施加在围檩上,求得三道支撑系统的变形和内力。

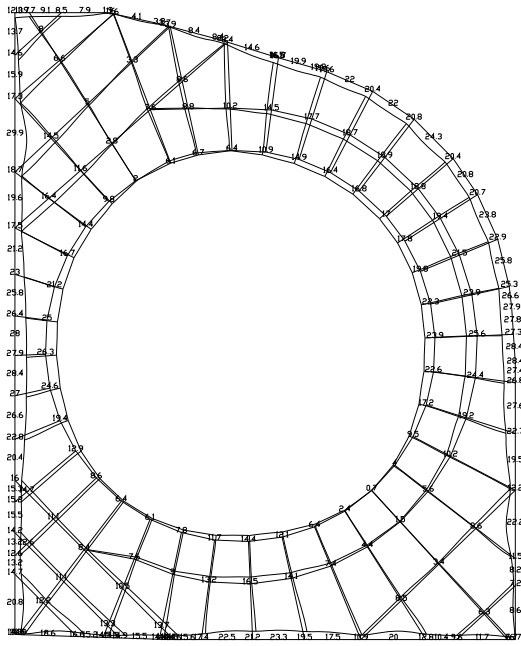


图 16-28 支撑变形计算结果

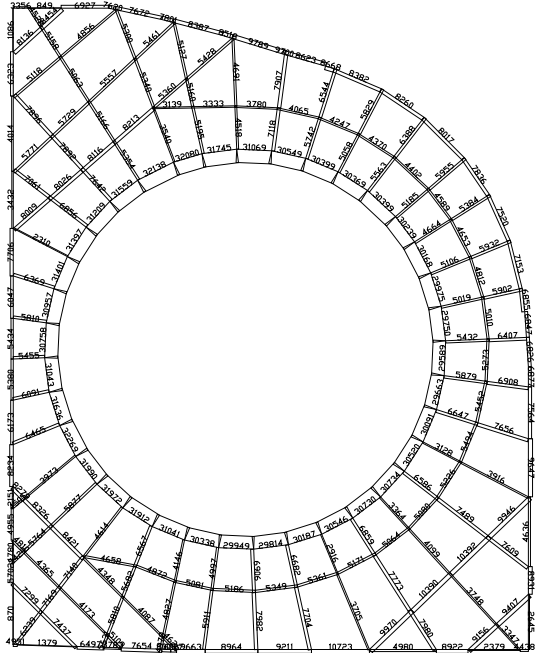


图 16-29 支撑轴力计算结果

2. 竖向力作用下的水平支撑计算方法

竖向力作用下，支撑的内力和变形可近似按单跨或多跨梁进行分析，其计算跨度取相邻立柱中心距，荷载除了其自重之外还需考虑必要的支撑顶面如施工人员通道的施工活荷载。此外，基坑开挖施工过程中，基坑由于土体的大量卸荷会引起基坑回弹隆起，立柱也将随之发生隆起，立柱间隆沉量存在差异时，也会对支撑产生次应力，因此在进行竖向力作用下的水平支撑计算时，应适当考虑立柱桩存在差异沉降的因素予以适当的增强。

16.3.2 支撑系统设计计算要点

支撑结构上的主要作用力是由围护墙传来的水、土压力和坑外地表荷载所产生的侧压力。支撑系统的整体分析方法在上一节中已作了专门的说明，本节关注的支撑体系的设计计算更倾向于支撑构件的强度、稳定性以及节点构造等方面内容，主要有如下几个方面的内容：

1) 支撑承受的竖向荷载，一般只考虑结构自重荷载和支撑顶面的施工活荷载，施工活荷载通常情况下取 4kPa，主要是指施工期间支撑作为施工人员的通道，以及主体地下结构施工时可能用作混凝土输送管道的支架，不包括支撑上堆放施工材料和运行施工机械等情况。支撑系统上如需设置施工栈桥作为施工堆载平台或施工机械的作业平台时应进行专门设计。

2) 围檩与支撑采用钢筋混凝土时，构件节点宜采用整浇刚接。采用钢围檩时，安装前应在围护墙上设置竖向牛腿。钢围檩与围护墙间的安装间隙应采用 C30 细石混凝土填实。采用钢筋混凝土围檩，且与围护墙和支撑构件整体浇筑连接时，对计算支座弯距可乘以调幅折减系数 0.8~0.9，但跨中弯距相应增加。钢支撑构件与围檩斜交时，宜在围檩上设置水平牛腿。

3) 支撑结构上的主要作用力是由围护墙传来的水、土压力和坑外地表荷载所产生的侧压力。对于温度变化和加在钢支撑上的预压力对支撑结构的影响，由于目前对这类超静定结构所做的试验研究较少，难以提出确切的设计计算方法。温度变化的影响程度与支撑构件的长度有较大关系，根据经验和实测资料，对长度超过 40m 的支撑宜考虑 10%左右支撑内力的变化影响。

4) 支撑与围檩体系中的主撑构件长细比不宜大于 75；联系构件的长细比不宜大于 120。

16.4 换撑设计

顺作法基坑工程一般均历经基坑开挖和地下结构施工阶段，两个阶段都必须解决好对基坑周周围护体的支撑问题，以控制围护体的受力和变形在要求范围之内。基坑开挖阶段通过在基坑竖向设置一道或多道支撑系统，提供围护体水平支撑点，以满足围护体的受力和变形控制要求；地下结构施工阶段，即基坑开挖至基底之后地下结构的回筑阶段，该阶段为不妨碍地下结构的施工，将结合地下结构的施工流程逐层的拆除临时支撑，所谓换撑即指在该阶段，通过利用回筑的地下结构合理的设置换撑，调整基坑围护体的支撑点，实现围护体应力的安全有序的调整、转移和再分配，达到各个阶段基坑变形的控制要求。

换撑的设计大体上可分成两个部分的设计，一为基坑围护体与地下结构外墙之间的换撑设计；二为地下结构内部结构开口、后浇带等水平结构不连续位置的换撑设计。

16.4.1 围护体与结构外墙之间的换撑设计

当基坑围护体采用临时围护体时，由于围护体与结构外墙之间通常会留设不小于 800mm 的施工作业面，作为地下室外墙外防水的施工操作面，地下结构施工阶段需对该施工空间进行换撑处理，该区域的换撑标高应分别对应地下各层结构平面标高，以利于水平力的传递。以下分几个方面进行说明：

1. 围护体与基础底板间换撑

基坑开挖至基底便进入地下结构施工阶段，基础底板浇筑形成之后需拆除最下一道支撑，围护体将形成从基底至上一道支撑较大的暴露跨度，如基础底板未对其有效支撑作用，围护体将发生较大的变形甚至引发安全问题，因此基础底板施工时应同时完成基坑周边基础底板与围护体之间的换撑施工。

基础底板周边的换撑板带为了施工上的便利，通常采用与基础底板同等标号的混凝土进行充填处理即可，由于仅起到了支挡围护体的抗压作用，无需对换撑板带进行配筋。为避免正常使用阶段主体结构与基坑周围围护体之间存在差异沉降对主体结构造成不利影响，换撑与围护体之间设置低压缩性的隔离材料。另外，当基础底板厚度较厚时，如超过 1000mm 时，如在围护体与基础底板之间设置同厚的换撑，换撑混凝土量相当可观，换撑板带的厚度通过计算满足换撑传力要求即可，其余部分可采用造价较低的砖模及回砂进行处理。当然，如果围护体与基础底板之间距离较大时，采用素砼充填其间空档混凝土工程量将过大，此种情况下，可沿围护体设置一圈围檩，之间设置间隔布置的临时钢或混凝土支撑，以减少换撑的工程量。

当出现基础底板完成，拆除最下道支撑后围护体计算跨度过大，变形不能满足计算要求的情况，可通过在基础底板周边设置上翻的换撑牛腿，换撑牛腿高于基础底板面标高一定距离，目的是缩短拆撑工况下的围护体计算跨度和控制其变形。

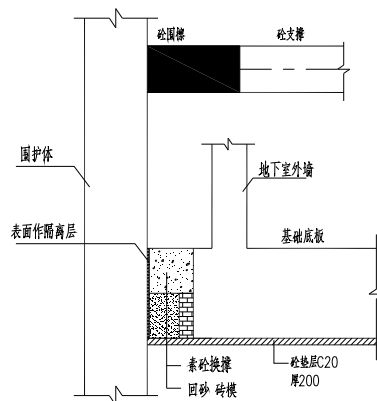


图 16-30 围护体与基础底板素砼换撑

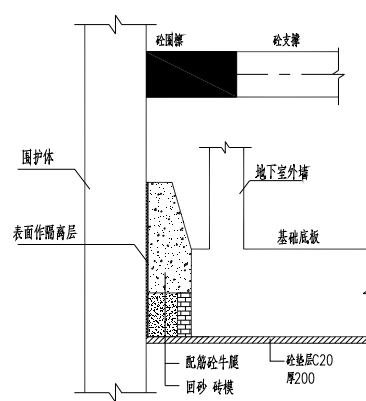


图 16-31 围护体与基础底板配筋砼牛腿换撑

2. 围护体与地下各层结构间换撑

临时支撑的拆除需在其下方的地下结构浇筑完成并设置好换撑之后方可进行,围护体与地下各层结构之间的换撑一般采用钢筋混凝土换撑板带的方式,换撑板带与地下结构同步浇筑施工,其混凝土标高可取同相邻的地下结构构件的混凝土标号,换撑板带应根据施工人员作业荷载对其计算并适当配筋。

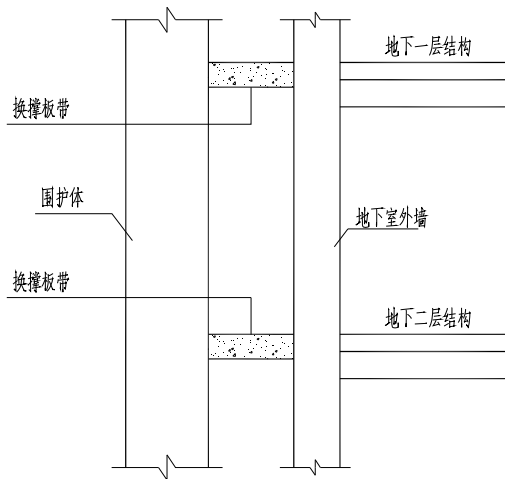


图 16-32 围护体与地下各层间换撑板带

换撑板带应间隔设置开口,作为施工人员拆除外墙模板以及外墙防水施工作业的通道以及将来围护体与外墙之间密实回填处理的通道,开口大小应能满足施工人员的通行要求,一般不应小于 $1000 \times 800\text{mm}$,平面上应间隔布置,开口的中心距离一般控制在 6m 左右,也可根据实际施工要求适当调整其间距。

换撑板带由于需承受施工人员的作业荷载,应设置一定数量的吊筋以解决其竖向支承问题,同时为了避免正常使用阶段主体地下结构与围护体之间的差异沉降引发的问题,换撑板带与围护体之间应设置压缩性小的隔离材料,同时换撑板带锚入结构外墙的钢筋采用交叉形的方式以形成铰的连接,削弱换撑板带与结构外墙的连接刚度。

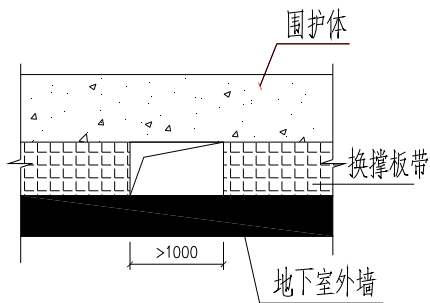


图 16-33 换撑板带开口

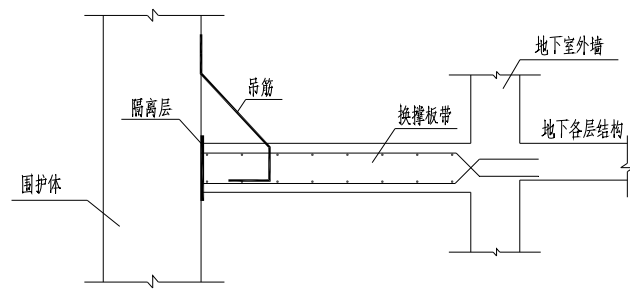


图 16-34 换撑板带节点详图

16.4.2 地下结构的换撑设计

地下结构由下往上顺做施工过程中,将经历临时支撑的逐层拆除,围护体外侧的水土压力将逐步转移至刚施工完毕的地下结构上,因此必须进行地下结构的换撑设计,主要是施工后浇带、楼梯坡道或设备吊装口等结构开口、局部高差、错层较大等结构不连续位置的水平传力设计。

1. 后浇带位置换撑设计

超高层建筑通常有主楼和裙楼组成,主楼和裙楼之间由于上部荷重的差异较大,一般两者之间均设置沉降后浇带,此外,当地下室超长时,考虑到大体积混凝土的温度应力以及收

缩等因素，通常间隔一定距离设置温度后浇带。但地下结构施工阶段是将地下室各层结构作为基坑开挖阶段的水平支撑系统，后浇带的设置无异于将承受压力的支撑从中一分为二，使得水平力无法传递，因此必须采取措施解决后浇带位置的水平传力问题。

根据大量实际工程的设计施工经验，后浇带位置水平力传递问题可通过计算在框架梁或次梁内设置小截面的型钢，后浇带内设置型钢一方面可以传递水平力，另一方面，尤其型钢抗弯刚度相对混凝土梁的抗弯刚度小许多（30号工字钢截面抗弯刚度仅为500×700框架梁的1/100），不会约束后浇带两侧的单体的自由沉降。

2. 结构缺失位置的换撑设计

楼梯、车道以及设备吊装口位置的结构缺失区域如比较大时，必要时应设置临时支撑以传递缺失区域的水平力，临时支撑的材料应根据工程的实际情况确定，钢筋混凝土和型钢或钢管均可采用，另外结构缺失区的边梁根据计算必要时应加强其截面以及配筋。结构缺失区的换撑待整个地下结构全部施工完毕，形成整体刚度，并在基坑周边密实回填之后方可拆除。

16.5 竖向支承的设计

基坑内部架设水平支撑的工程，一般需要设置竖向支承系统，用以承受混凝土支撑或者钢支撑杆件的自重等荷载。基坑竖向支承系统，通常采用钢立柱插入立柱桩桩基的型式。

竖向支承系统是基坑实施期间的关键构件。钢立柱的具体型式是多样的，它要求承受较大的荷载，同时要求断面不应过大，因此构件必须具备足够的强度和刚度。钢立柱必须具备一个具有相应承载能力的基础。根据支撑荷载的大小，立柱一般可采用角钢格构式钢柱、H型钢柱或钢管柱；立柱桩常采用灌注桩，也可采用钢管桩。基坑围护结构立柱桩可以利用主体结构工程桩；在无法利用工程桩的部位应加设临时立柱桩。

16.5.1 立柱设计

立柱的设计一般应按照轴心受压构件进行设计计算，同时应考虑所采用的立柱结构构件与水平支撑的连接构造要求以及与底板连接位置的止水构造要求。基坑工程的立柱与主体结构的竖向钢构件的最大不同在于，立柱需要在基坑开挖前置入立柱桩孔中，并在基坑开挖阶段逐层与水平支撑构件完成连接。因此，立柱的截面尺寸大小要有一定的限制，同时也应能够提供足够的承载能力。立柱截面构造应尽量简单，与水平支撑体系的连接节点也必须易于现场施工。

1. 立柱的结构型式

竖向支承钢立柱可以采用角钢格构柱、H型钢柱或钢管混凝土立柱。

角钢格构柱由于构造简单、便于加工且承载能力较大，因而近几年来，它无论是在采用钢筋混凝土支撑或是钢支撑系统的顺作法基坑工程中，还是在采用结构梁板代支撑的逆作法基坑工程中，均是应用最广的钢立柱型式。最常用的型钢格构柱采用4根角钢拼接而成的缀板格构柱，可选的角钢规格品种丰富，工程中常用L120mm×12mm、L140mm×14mm、L160mm×16mm和L180mm×18mm等规格。依据所承受的荷载大小，钢立柱设计钢材牌号常采用Q235B或Q345B。典型的型钢格构柱如图16-35所示。

为满足下部连接的稳定与可靠，钢立柱一般需要插入立柱桩顶以下3~4m。角钢格构柱在梁板位置也应当尽量避让结构梁板内的钢筋。因此其断面尺寸除需满足承载能力要求外，尚应考虑立柱桩桩径和所穿越的结构梁等结构构件的尺寸。最常用的钢立柱断面边长为420mm、440mm和460mm，所适用的最小立柱桩桩径分别为Φ700mm、Φ750mm和Φ800mm。

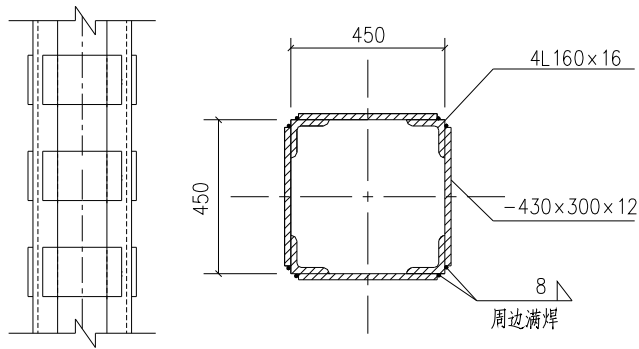


图 16-35 角钢拼接格构柱

为了便于避让临时支撑的钢筋，钢立柱拼接采用从上至下平行、对称分布的钢缀板，而不采用交叉、斜向分布的钢缀条连接。钢缀板宽度应略小于钢立柱断面宽度，钢缀板高度、厚度和竖向间距根据稳定性计算确定，其中钢缀板的实际竖向布置，除了满足设计计算的间距要求外，也应当尽量设置于能够避开临时支撑主筋的标高位置。基坑开挖施工时，在各道临时支撑位置需要设置抗剪件以传递竖向荷载。

2. 立柱的设计要点

1) 竖向支承钢立柱由于柱中心的定位误差、柱身倾斜、基坑开挖或浇筑桩身混凝土时产生位移等原因，会产生立柱中心偏离设计位置的情况，过大偏心将造成立柱承载能力的下降，同时会给支撑与立柱节点位置钢筋穿越处理带来困难，而且可能带来钢立柱与主体梁柱的矛盾问题。因此施工中必须对立柱的定位精度严加控制，并应根据立柱允许偏差按偏心受压构件验算施工偏心的影响。

一般情况下钢立柱的垂直度偏差不宜大于 $1/200$ ，立柱长细比应不大于 25。设计图纸中对于角钢格构柱等截面具有方向性的立柱放置角度应提出具体要求，以利于水平支撑杆件钢筋穿越钢立柱。

2) 基坑施工阶段，应根据每一施工工况对立柱进行承载力和稳定性验算。同时，当基坑开挖至坑底、底板尚未浇筑前，最底层一跨钢立柱在承受最不利荷载的同时计算跨度也相当大，一般情况下，该工况是钢立柱的最不利工况。

无论对于哪种钢立柱型式，所采用的定型钢材长度均有可能小于工程所需的立柱长度。钢立柱的接长均要求等强度连接，并且连接构造应易于现场实施。图 16-36 为工程中常用的角钢格构柱拼接构造。

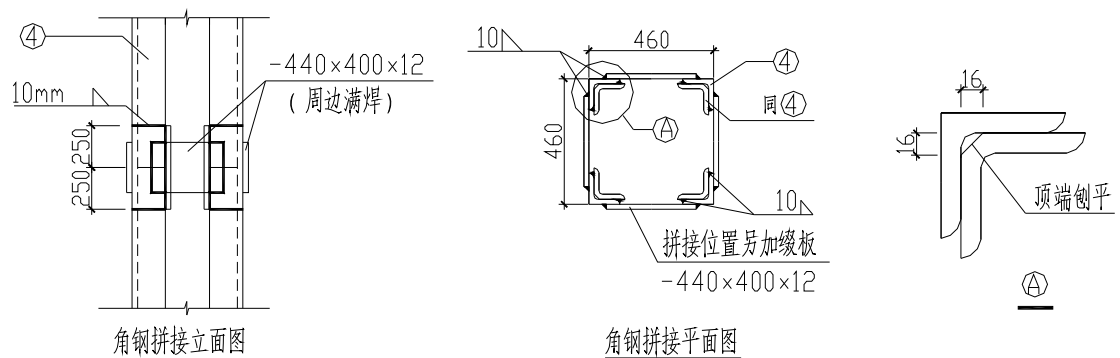


图 16-36 角钢格构柱拼接构造图

钢立柱的可能破坏形式有强度破坏、整体失稳破坏和局部失稳等几种。一般情况下，整体失稳破坏是钢立柱的主要破坏形式；强度破坏只可能在钢立柱的受力构件截面有削弱的条件下发生。

3. 钢立柱的计算要点

钢立柱的竖向承载能力主要由整体稳定性控制，若在柱身局部位置有截面削弱，必须进行竖向承载的抗压强度验算。

一般截面型式的钢立柱计算，可按国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017-2003) 等相关规范中关于轴心受力构件的有关规定进行。具体计算中，在两道支撑之间的立柱计算跨度可取为上一道支撑杆件中心至下一道支撑杆件中心的距离。最低层一跨立柱计算跨度可取为上一道支撑中心至立柱桩顶标高。

角钢格构柱和钢管立柱插入立柱桩的深度计算可按下式计算：

$$l \geq K \frac{N - f_c A}{L \sigma} \quad (16-3)$$

式中 l ——插入立柱桩的长度 (mm)；

K ——安全系数，取 2.0~2.5；

f_c ——混凝土的轴心抗压强度设计值 (N/mm²)；

A ——钢立柱的截面面积 (mm²)；

L ——中间支承柱断面的周长 (mm)；

σ ——粘结设计强度，如无试验数据可近似取混凝土的抗拉设计强度值 f_t (N/mm²)。

钢立柱在实际施工中不同程度存在水平定位偏差和竖向垂直度偏差等施工偏差情况，因此在按照上式计算钢立柱的承载力时，尚应按照偏心受压构件验算一定施工偏差下钢立柱的承载力，以确保足够的安全度。此外，基坑开挖土方钢立柱暴露出来之后，应及时复核钢立柱的水平偏差和竖向垂直度，应根据实际的偏差测量数据对钢立柱的承载力进一步校核，如有施工偏差严重者，应采取限制荷载、设置柱间支撑等措施确保钢立柱承载力满足要求。

16.5.2 立柱桩设计

1. 立柱桩的结构型式

立柱桩必须具备较高的承载能力，同时钢立柱需要与其下部立柱桩具有可靠的连接，因此各类预制桩难以利用作为立柱桩基础，工程中常采灌注桩将钢立柱承担的竖向荷载传递给地基，另外也有工程采用钢管桩作为立柱桩基础，但由于造价高，与立柱连接构造相对更加复杂，且施工工艺难度比较高，因此其应用范围并不广泛。

当立柱桩采用钻孔灌注桩时，首先在地面成桩孔，然后置入钢筋笼及钢立柱，最后浇筑混凝土形成桩基。要求桩顶标高以下混凝土强度必须满足设计强度要求，因此混凝土一般都有 2m 以上的泛浆高度，可在基坑开挖过程中逐步凿除。钢立柱与钻孔灌注立柱桩的节点连接较为便利，可通过桩身混凝土浇筑使钢立柱底端锚固于灌注桩中，一般不必将钢立柱与桩身钢筋笼之间进行焊接。施工中需采取有效的调控措施，保证立柱桩的准确定位和精确度。

实施过程中，在桩孔形成后应将桩身钢筋笼和钢立柱一起下放入桩孔，在将钢立柱的位置和垂直度进行调整满足设计要求后，浇筑桩身混凝土。

立柱桩可以是专门加打的钻孔灌注桩，但在允许的条件下应尽可能利用主体结构工程桩以降低临时围护体系工程量，提高工程经济性。立柱桩应根据相应规范按受压桩的要求进行设计，目前建筑基坑支护技术规程未要求对基坑立柱桩进行专门的荷载试验。因此在工程设计中需保证立柱桩的设计承载力具备足够安全度，并应提出全面的成桩质量检测要求。

2. 立柱桩的设计要点

立柱桩的设计计算方法与主体结构工程桩相同，可按照国家标准或工程所在地区的地方标准进行。立柱桩以桩与土的摩阻力和桩的端阻力来承受上部荷载，在基坑施工阶段承受钢立柱传递下来的支撑结构自重荷载与施工超载。

钢立柱插入立柱桩需要确保在插入范围内，灌注桩的钢筋笼内径大于钢立柱的外径或对角线长度。若遇钢筋笼内径小于钢立柱外径或对角线长度的情况，可以将灌注桩端部一定范

围进行扩径处理，其作法如图 16-37 所示。使钢立柱的垂直度易于进行调整，钢立柱与立柱桩钢筋笼之间一般不必采用焊接等任何方式进行直接连接。

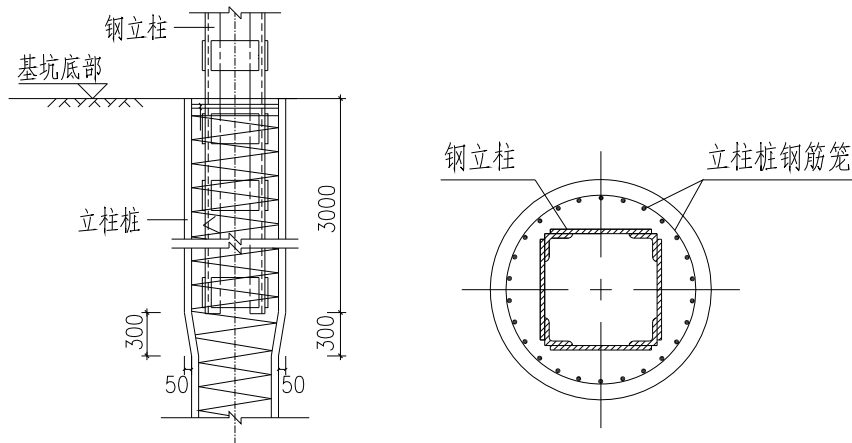


图 16-37 钢立柱插入钻孔灌注立柱桩构造图

16.5.3 竖向支承系统的连接构造

竖向支承系统钢立柱与临时支撑节点的设计，应确保节点在基坑施工阶段能够可靠地传递支撑的自重和各种施工荷载。这里对工程实践中各种成熟的竖向支承系统与支撑的连接构造进行介绍。

1. 角钢格构柱与支撑的连接构造

角钢格构柱与支撑的连接节点，施工期间主要承受临时支撑竖向荷载引起的剪力，设计一般根据剪力的大小计算确定后在节点位置钢立柱上设置足够数量的抗剪钢筋或抗剪栓钉。图 16-38 为设置抗剪钢筋与临时支撑连接的节点示意图。

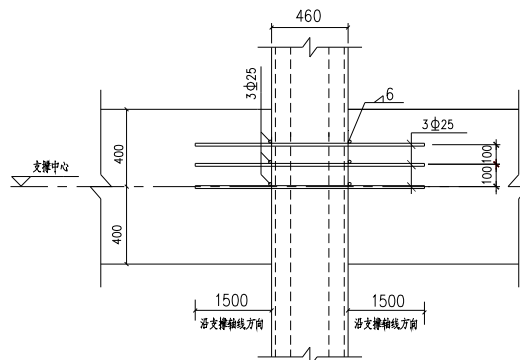


图 16-38 钢立柱设置抗剪钢筋与临时支撑的连接节点

施工阶段在直接作用施工车辆等较大超载的施工栈桥区域，需要在栈桥梁下钢立柱上设置钢牛腿或者在梁内钢牛腿上焊接抗剪能力较强的槽钢等构件。图 16-39 为钢格构柱设置钢牛腿作为抗剪件时的示意图和实景图。

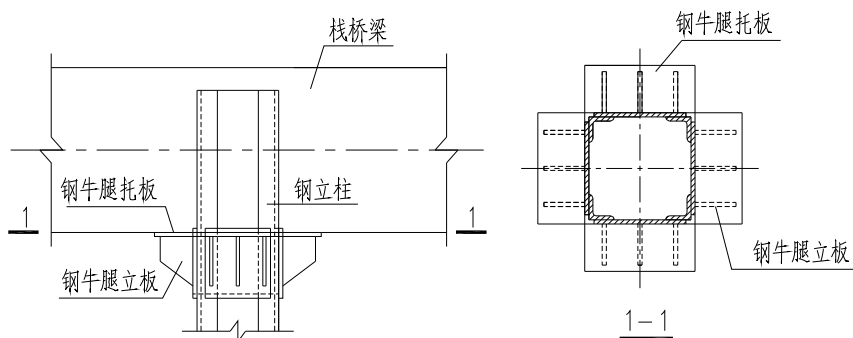




图 16-39 钢格构柱设置钢牛腿作为抗剪件的示意图与实景图

2. 钢立柱在底板位置的止水构造

由于钢立柱需在水平支撑全部拆除之后方可割除，水平支撑则随着地下结构由下往上逐层施工而逐层拆除，因此钢立柱需穿越基础底板，钢立柱穿越基础底板范围将成为地下水往上渗流的通道，为防止地下水渗，钢立柱在底板位置应设置止水构件，通常采用在钢立柱构件周边加焊止水钢板的型式。

对于角钢拼接格构柱通常止水构造是在每根角钢的周边设置两块止水钢板，通过延长渗水途径起到止水目的，图 16-46 为角钢拼接格构柱在底板位置止水构造图。对于钢管混凝土立柱，则需要在钢管位于底板的适当标高位置设置封闭的环形钢板，作为止水构件。

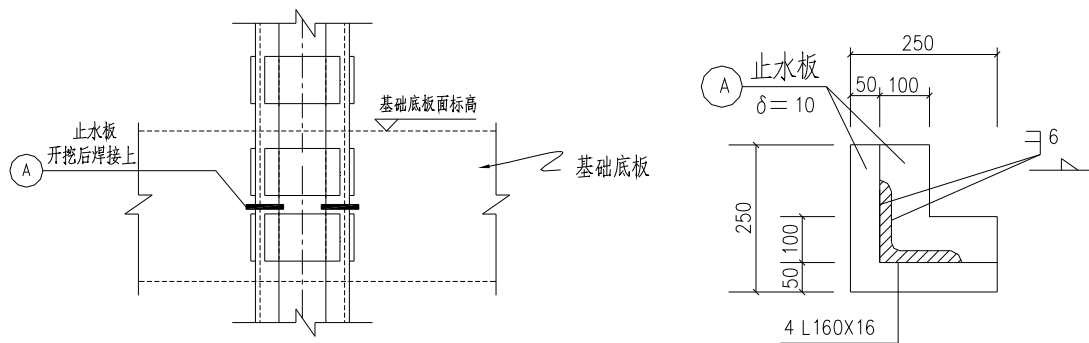


图 16-40 角钢拼接立柱在底板位置止水钢板详图

16.7 支撑结构施工

深基坑施工技术发展至今，支撑结构的形式有多种，常用的有钢结构支撑和钢筋混凝土支撑两类。其中钢支撑多用圆钢管或大规格的 H 型钢，为减少挡墙的变形，用钢结构支撑时可用液压千斤顶施加预应力，如根据变形的发展，分阶段多次施加预应力更有效，钢筋混凝土支撑则采用钢筋混凝土结构作为水平支撑，支撑刚度大，通常首道支撑兼作施工栈桥使用。深基坑施工过程中也可采用钢支撑及混凝土支撑混合使用。支撑除根据其材料不同进行分类外，另根据支撑的平面布置形式也可分为环形支撑、钢支撑可细分为对撑、角撑、及有围檩体系支撑、无围檩体系支撑。

16.7.1 支撑施工总体原则

无论何种支撑、其总体施工原则都是相同的，土方开挖的顺序、方法必须与设计工况一致，并遵循“先撑后挖、限时支撑、分层开挖、严禁超挖”的原则进行施工，尽量减小基坑无支撑暴露时间和空间。同时应根据基坑工程等级、支撑形式、场内条件等因素，确定基坑开挖的分区及其顺序。宜先开挖周边环境要求较低的一侧土方，并及时设置支撑。环境要求较高一侧的土方开挖，宜采用抽条对称开挖、限时完成支撑或垫层的方式。

基坑开挖应按支护结构设计，降排水要求等确定开挖方案，开挖过程中应分段、分层、随挖随撑、按规定时限完成支撑的施工，作好基坑排水，减少基坑暴露时间。基坑开挖过程中，应采取措施防止碰撞支护结构、工程桩或扰动原状土。支撑的拆除过程时，必须遵循“先换撑、后拆除”的原则进行施工。

16.7.2 钢筋混凝土支撑

钢筋混凝土支撑应首先进行施工分区和流程的划分，支撑的分区一般结合土方开挖方案，按照盆式开挖、“分区、分块、对称”的原则确定，随着土方开挖的进度及时跟进支撑的施工，尽可能减少围护体侧开挖段无支撑暴露的时间，以控制基坑工程的变形和稳定性。

钢筋混凝土支撑的施工有多项分部工程组成，根据施工的先后顺序，一般可分为施工测量、钢筋工程、模板工程以及混凝土工程。以下对这些分部工程逐一进行说明：

1. 施工测量

施工测量的工作主要有平面坐标系内轴线控制网的布设和场区高程控制网的布设。

平面坐标系内轴线控制网应按照“先整体、后局部”、“高精度控制低精度”的原则进行布设。根据城市规划部门提供的坐标控制点，经复核检查后，利用全站仪进行平面轴线的布设。在不受施工干扰且通视良好的位置设置轴线的控制点，同时做好显著标记。在施工全过程中，对控制点妥善保护。根据施工需要，依据主轴线进行轴线加密和细部放线，形成平面控制网。施工过程中定期复查控制网的轴线，确保测量精度。支撑的水平轴线偏差控制在 30mm 之内。

场区高程控制网方面应根据城市规划部门提供的高程控制点，用精密水准仪进行闭合检查，布设一套高程控制网。场区内至少引测三个水准点，并根据实际需要另外增加，以此测设出建筑物高程控制网。支撑系统中心标高误差控制在 30mm 之内。

2. 钢筋工程

钢筋工程的重点是粗钢筋的定位和连接以及钢筋的下料、绑扎，确保钢筋工程质量满足相关规范要求。

1) 钢筋的进场及检验

钢筋进场必须附有出厂证明（试验报告）、钢筋标志，并根据相应检验规范分批进行见证取样和检验。钢筋进场时分类码放，做好标识，存放钢筋场地要平整，并设有排水坡度。堆放时，钢筋下面要垫设木枋或砖砌垫层，保证钢筋离地面高度不宜少于 20cm，以防钢筋锈蚀和污染。

2) 钢筋加工制作

钢筋的加工制作方面，受力钢筋加工应平直，无弯曲，否则应进行调直。各种钢筋弯钩部分弯曲直径、弯折角度、平直段长度应符合设计和规范要求。箍筋加工应方正，不得有平行四边形箍筋，截面尺寸要标准，这样有利于钢筋的整体性和刚度，不易发生变形。钢筋加工要注意首件半成品的质量检查，确认合格后方可批量加工。批量加工的钢筋半成品经检查验收合格后，按照规格、品种及使用部位，分类堆放。

3) 钢筋的连接

钢筋的连接方面，支撑及腰梁内纵向钢筋接长根据设计及规范要求，可以采用直螺纹套筒连接、焊接连接或者绑扎连接，钢筋的连接接头应设置在受力较小的位置，一般为跨度的1/3处，位于同一连接区段内纵向受拉钢筋接头数量不大于50%。

钢筋绑扎在支撑底部垫层完成后开始，钢筋的绑扎按规范进行，对支撑与腰梁、支撑与支撑、支撑与立柱之间的节点钢筋绑扎应引起充分注意，由于在节点上的钢筋较密，钢筋的均匀摆放、穿筋合理安排将对施工质量和进度有较大的影响。在施工过程中，如第一道支撑梁钢筋与钢格构柱缀板相遇穿不过去时，在征得设计同意的情况下，缀板采用氧气乙炔焰切割，开孔面积不能大于缀板面积的30%；如支撑梁钢筋与钢格构柱角钢相遇穿不过去时，将支撑梁钢筋在遇角钢处断开，采用同直径帮条钢筋同时与角钢和支撑梁钢筋焊接，焊接满足相关规范要求。第二道支撑施工时，由于钢立柱已经处于受力状态，其角钢和缀板不能割除，对于第二道支撑在实际施工中钢筋穿越难度较大的节点，应及时与设计联系协商确定处理措施，通常采用的措施为钢筋遇角钢处断开并采用同直径帮条钢筋与角钢和支撑梁焊接。

4) 钢筋的质量检查

钢筋工程属于隐蔽工程，在浇筑砼前应对钢筋进行验收，及时办理隐蔽工程记录。钢筋加工均在现场加工成型，钢筋工程的重点是粗钢筋的定位和连接以及梁的下料、绑扎，钢筋绑扎，以上工序均严格按照相关规范要求进行施工。钢筋绑扎、安装完毕后，应进行自检，重点检查以下几方面：

- a. 根据设计图纸检查钢筋的型号、直径、根数、间距是否正确。
- b. 检查钢筋接头的位置及搭接长度是否符合规范规定。
- c. 检查混凝土保护层厚度是否符合设计要求。
- d. 钢筋绑扎是否牢固，有无松动变形现象。
- e. 钢筋表面不允许有油渍、漆污。
- f. 钢筋位置的允许偏差详见下表：

表 16-5 钢筋绑扎允许偏差表

项次	项目		允许偏差	检验方法
1	网眼尺寸	绑扎	±20	尺量连续三档取其最大值
2	骨架的宽度、高度		±5	尺量检查
3	骨架的长度		±10	
4	箍筋、构造筋间距	绑扎	±20	尺量连续三档取其最大值
5	受力钢筋	间距	±10	尺量两端中间各一点取其最大值
		排距	±5	
6	钢筋起弯点位移		20	尺量检查
7	受力钢筋保护层	梁	±5	
		板	±3	

- g. 临时支撑钢筋的保护层厚度为30mm，梁底钢筋保护层采用20mm厚水泥砂浆垫层。

3. 模板工程

模板工程的目标为支撑混凝土表面颜色基本一致，无蜂窝麻面、露筋、夹渣、锈斑和明显气泡存在。结构阳角部位无缺棱掉角，梁柱、墙梁的接头平滑方正，模板拼缝基本无明显痕迹。表面平整，线条顺直，几何尺寸准确，外观尺寸允许偏差在规范允许范围内。

钢筋混凝土支撑底模一般采用土模法施工，即在挖好的原状土面上浇捣 10cm 左右素砼垫层。垫层施工应紧跟挖土进行，及时分段铺设，其宽度为支撑宽度两边各加 200mm。为避免支撑钢筋砼与垫层粘在一起，造成施工时清除困难，在垫层面上用油毛毡做隔离层。隔离层采用一层油毛毡，宽度与支撑宽等同。油毛毡铺设尽量减少接缝，接缝处应用胶带纸满贴紧，以防止漏浆。

冠梁、腰梁以及支撑的模板典型做法如下图所示：

1) 冠梁模板

将围护体顶凿至设计标高，即可作为第一道支撑压顶圈梁底模，梁底采用 30mm 厚水泥砂浆垫层，在垫层上面涂刷脱模剂。梁模板及其支护详见大样图。

2) 腰梁模板

第二道及第二道支撑以下的腰梁底模采用 30mm 厚水泥砂浆垫层，在垫层上面涂刷脱模剂，侧模一边利用围护体，另一边支木模板加固，同时为了保证腰梁与围护体紧密接触，避免腰梁与围护体之间存在空隙，将腰梁与围护体接触部分混凝土表面凿毛清理干净后，再进行腰梁施工，以便保证腰梁与围护体连成整体。腰梁模板施工详见如下大样图：

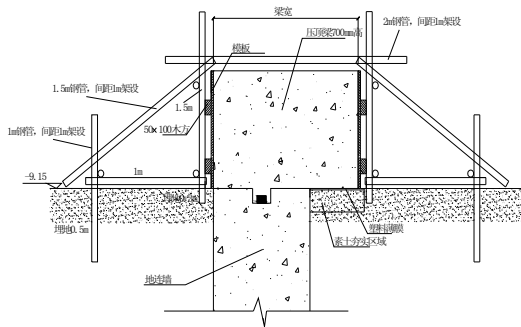


图 16-41 压顶圈梁模板施工详图

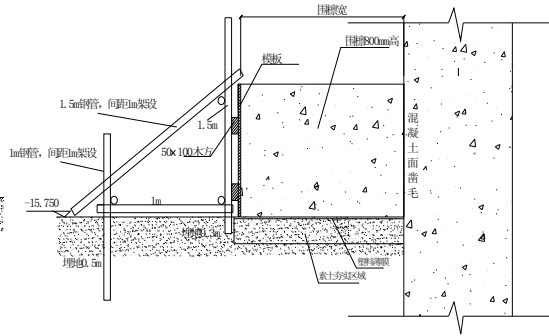


图 16-42 腰梁模板施工详图

3) 支撑模板

支撑梁底模采用 30mm 厚水泥砂浆垫层，在垫层上面涂刷脱模剂。支撑梁模板施工详见下图：

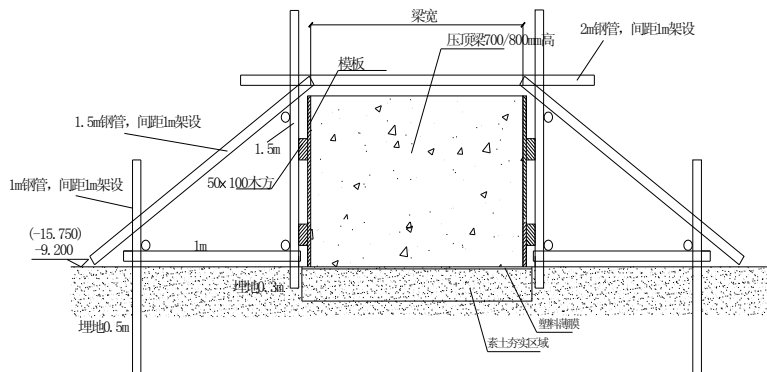


图 16-43 支撑模板施工详图



图 16-44 支撑模板现场实景

4) 栈桥区域梁板模板

栈桥区域采用土体挖至梁底标高处，梁板模采用木胶合板，模板拼缝严密，防止漏浆，所有木枋施工前均双面压刨平整以保证梁板及柱墙的平整度，要求所有木枋找平后方可铺设胶合板，以确保顶板模板平整。梁需用对拉螺杆加固；次梁安装应等主梁模板安装并校正后进行；模板安装后要拉中线进行检查，复核各梁模中心位置是否对正；待平板模安装后，检查并调整标高。

栈桥区域平台板和梁的模板施工支撑体系采用普通扣件式钢管脚手架满堂架的形式，在基层土壤上铺 4m×0.3m×0.05m 木跳板作为钢管脚手架支撑的基础垫层。梁板模板施工大样图如下所示：

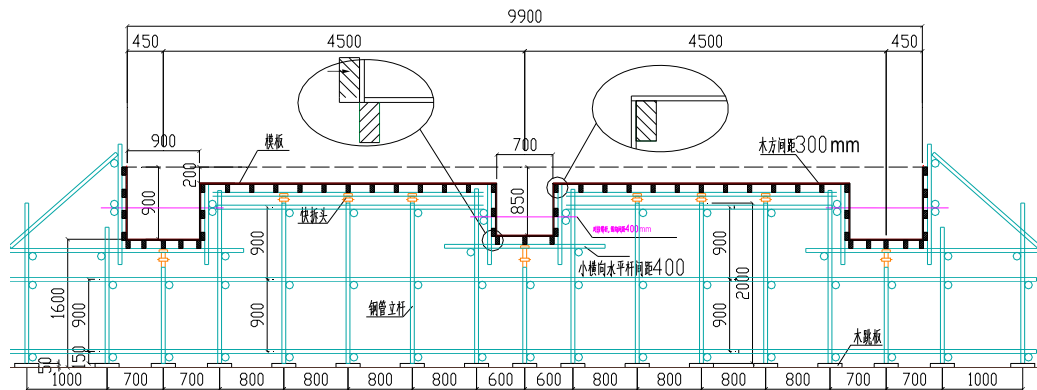


图 16-45 栈桥梁板模板施工详图

5) 模板体系的拆除

模板拆除时间以同条件养护试块强度为准。模板拆除注意事项：

- a. 在土方开挖时，必须清理掉支撑底模，防止底模附着在支撑上，在以后施工过程中坠落。特别是在大型钢筋混凝土支撑节点处，若不清理干净，附着的底模可能比较大，极易引起安全隐患
- b. 拆模时不要用力太猛，如发现有影响结构安全问题时，应立即停止拆除，经处理或采取有效措施后方可继续拆除。
- c. 拆模时严禁使用大锤，应使用撬棍等工具，模板拆除时，不得随意乱放，防止模板变形或受损。

表 16-6 模板质量通病防治措施表

序号	项 目	防治措施
1	混凝土表面不平、粘连	控制拆模时间，清理模板和涂刷隔离剂必须认真，要有专人检查验收
2	竖向钢筋位移	钢筋保护层采用垫块来控制

4. 混凝土工程

钢筋混凝土支撑的混凝土工程施工目标为确保混凝土质量优良，确保混凝土的设计强度，特别是控制混凝土有害裂缝的发生。确保混凝土密实、表面平整，线条顺直，几何尺寸准确，色泽一致，无明显气泡，模板拼缝痕迹整齐且有规律性，结构阴阳角方正顺直。

1) 技术要求

塌落度方面：砼采用输送泵浇筑的方式，其塌落度要求入泵时最高不超过 20cm，最低不小于 16cm；确保砼浇筑时的塌落度能够满足施工生产需要，保证砼供应质量。

和易性方面：为了保证混凝土在浇筑过程中不离析，在搅拌时，要求混凝土要有足够的粘聚性，要求在泵送过程中不泌水、不离析，保证混凝土的稳定性和可泵性。

初、终凝时间要求：为了保证各个部位混凝土的连续浇筑，要求混凝土的初凝时间保证在 7 至 8 小时；为了保证后道工序的及时跟进，要求混凝土终凝时间控制在 12 小时以内。

2) 混凝土输送管布置原则

根据工程和现场平面布置的特点，按照混凝土浇筑方案划分的浇筑工作面和连续浇筑的混凝土量大小、浇筑的方向与混凝土输送方向进行管道布置。管道布置在保证安全施工、装拆维修方便、便于管道清洗、故障排除、便于布料的前提下，尽量缩短管线的长度、少用弯管和软管。

在输送管道中应采用同一内径的管道，输送管接头应严密，有足够强度，并能快速拆装。在管线中，高度磨损、有裂痕、有局部凹凸或弯折损伤的管段不得使用。当在同一管线中有新、旧管段同时使用时，应将新管布置泵前的管路开始区、垂直管段、弯管前段、管道终端接软管处等压力较大的部位。

管道各部分必须保证固定牢固，不得直接支承在钢筋、模板及预埋件上。水平管线必须每隔一定距离用支架、垫木、吊架等加以固定，固定管件的支承物必须与管卡保持一定距离，以使排除堵管、装折清洗管道。垂直管宜在结构的柱或板上的预留孔上固定。

3) 混凝土浇筑

钢筋砼支撑采用商品砼泵送浇筑，泵送前应在输送管内用适量的与支撑砼成分相同的水泥浆或水泥砂浆润滑内壁，以保证泵送顺利进行。砼浇筑采用分层滚浆法浇筑，防止漏振和过振，确保砼密实。砼必须保证连续供应，避免出现施工冷缝。砼浇筑完毕，用木泥板抹平、收光，在终凝后及时铺上草包或者塑料薄膜覆盖，防止水位蒸发而导致混凝土表面开裂。

4) 施工缝处理

当前基坑工程的规模呈愈大愈深的趋势，单根支撑杆件的长度甚至达到了 200m 以上，混凝土浇筑后会发生压缩变形、收缩变形、温度变形及徐变变形等效应，在超长钢筋混凝土支撑中的负作用非常明显。为减少这些效应的影响必须分段浇筑施工。

支撑分段施工时设置的施工缝处必须待已浇筑混凝土的抗压强度不小于 1.2MPa 时，才允许继续浇筑，在继续浇筑混凝土前，施工缝混凝土表面要剔毛，剔除浮动石子，用水冲洗干净并充分润湿，然后刷素水泥浆一道，下料时要避免靠近缝边，机械振捣点距缝边 30cm，缝边人工插捣，使新旧混凝土结合密实。

临时支撑结构与围护体等连接部位都要按照施工缝处理的要求进行清理：剔凿连接部位混凝土结构的表面，露出新鲜、坚实的混凝土；剥出、搬直和校正预埋的连接钢筋。需要埋设止水条的连接部位，还须在连接面表面干燥时，用钢钉固定延期膨胀型止水条。冠梁上部需通长埋设刚性止水片，在混凝土浇筑前应做好预埋工作，保证止水钢板埋设深度和位置的准确性。在浇筑混凝土前要冲洗混凝土接合面，使其保持清洁、润湿，即可进行混凝土浇筑。

5) 混凝土养护

支撑梁、栈桥上表面采用覆盖薄膜进行养护，侧面在模板拆模后采用浇水养护，一般养护时间不少于 7 天。

5. 支撑拆除

1) 钢筋混凝土支撑拆除要点

钢筋混凝土支撑拆除时,应严格按设计工况进行支撑拆除,遵循先换撑、后拆除的原则。采用爆破法拆除作业时,应遵守当地政府的相关规定。内支撑拆除要点主要为:a)内支撑拆除应遵照当地政府的有关规定,考虑现场周边环境特点,按先置换后拆除的原则制定详细的操作条例,认真执行,避免出现事故;b)内支撑相应层的主体结构达到规定的强度等级,并可承受该层内支撑的内力时,可按规定的换撑方式将支护结构的支撑荷载传递到主体结构后,方可拆除该层内支撑;c)内支撑拆除应小心操作,不得损伤主体结构。在拆除下层内支撑时,支撑立柱及支护结构在一定时期内还处于工作状态,必须小心断开支撑与立柱,支撑与支护桩的节点,使其不受损伤;d)最后拆除支撑立柱时,必须作好立柱穿越底板位置的加强防水处理;e)在拆除每层内支撑的前后必须加强对周围环境的监测,出现异常情况立即停止拆除并立即采取措施,确保换撑安全、可靠。

2) 钢筋混凝土支撑拆除方法

目前钢筋混凝土支撑拆除方法一般有人工拆除法、用静态膨胀剂拆除法和爆破拆除法。以下为三种拆除方法的简要说明:

人工拆除法,即组织一定数量的工人,用大锤和风镐等机械设备人工拆除支撑梁。该方法的优点在于施工方法简单、所需的机械和设备简单、容易组织。缺点是由于需人工操作,施工效率低,工期长;施工安全较差;施工时,锤击与风镐噪音大,粉尘较多,对周围环境有一定污染。

静态膨胀剂拆除法,即在支撑梁上按设计孔网尺寸钻孔眼,钻孔后灌入膨胀剂,数小时后利用其膨胀力,将混凝土胀裂,再用风镐将胀裂的混凝土清掉。该方法的优点在于施工方法较简单;而且混凝土胀裂是一个相对缓慢的过程,整个过程无粉尘,噪音小,无飞石。其缺点是要钻的孔眼数量多;装膨胀剂时,不能直视钻孔,否则产生喷孔现象易使眼睛受伤,甚至致盲;膨胀剂膨胀产生的胀力小于钢筋的拉应力,该力可使混凝土胀裂,但拉不断钢筋,要进一步破碎,尚困难,还得用风镐处理,工作量大;施工成本相对较高。

爆破拆除法,即在支撑梁上按设计孔网尺寸预留炮眼,装入炸药和毫秒电雷管,起爆后将支撑梁拆除。该办法的优点在于施工的技术含量较高;爆破率效率较高,工期短;施工安全;成本适中,造价介于上述二者之间。其缺点是爆破时产生爆破振动和爆破飞石,爆破时会产生声响,对周围环境有一定程度的影响。



图 16-46 支撑浇筑时预留爆破孔



图 16-47 支撑浇筑形成时爆破孔实景



图 16-46 混凝土支撑爆破安全防护

上述三种支撑拆除方法中，爆破拆除法由于其经济性适中而且施工速度快、效率高以及爆破之后后续工作相对简单的特点，近年来得到了广泛的推广应用。

16.7.3 钢支撑

钢支撑钢支撑架设和拆除速度快、架设完毕后不需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的特点，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。但与钢筋混凝土结构支撑相比，变形较大，比较敏感，且由于圆钢管和型钢的承载能力不如钢筋混凝土结构支撑的承载能力大，因而支撑水平向的间距不能很大，相对来说机械挖土不太方便。在大城市建筑物密集地区开挖深基坑，支护结构多以变形控制，在减少变形方面钢结构支撑不如钢筋混凝土结构支撑，如能根据变形发展，分阶段多次施加预应力，亦能控制变形量。



图 16-47 钢支撑施工

钢支撑体系施工时，根据围护挡墙结构形式及基坑的挖土的施工方法不同，围护挡墙上的围檩形式也有所区别。一般情况下采用钻孔灌注桩、SMW、钢板桩等等围护挡墙时，必须设置围檩，一般首道支撑设置钢筋混凝土围檩、下道支撑设置型钢围檩。混凝土围檩刚度大，承载能力高，可增大支撑的间距。钢围檩施工方便，钢围檩与挡墙间的空隙，宜用细石混凝土填实。



图 16-48 混凝土围檩



图 16-49 型钢围檩

当采用地下连续墙作为围护挡墙时，根据基坑的形状及开挖工况不同，可以设置围檩、以可以不设置围檩，当设置围檩体系时，可采用钢筋混凝土或钢围檩。无围檩体系一般用在地铁车站等狭长型基坑中，钢支撑与围护挡墙间常采用直接连接，地墙的平面布置为对称布置，一般情况下一幅地墙设置两根钢支撑。下图 16-50 为上海市某地铁站局部钢支撑平面布置图，图中每副地墙设置两根钢支撑、端部采用角撑部位设置预埋件与钢支撑连接。

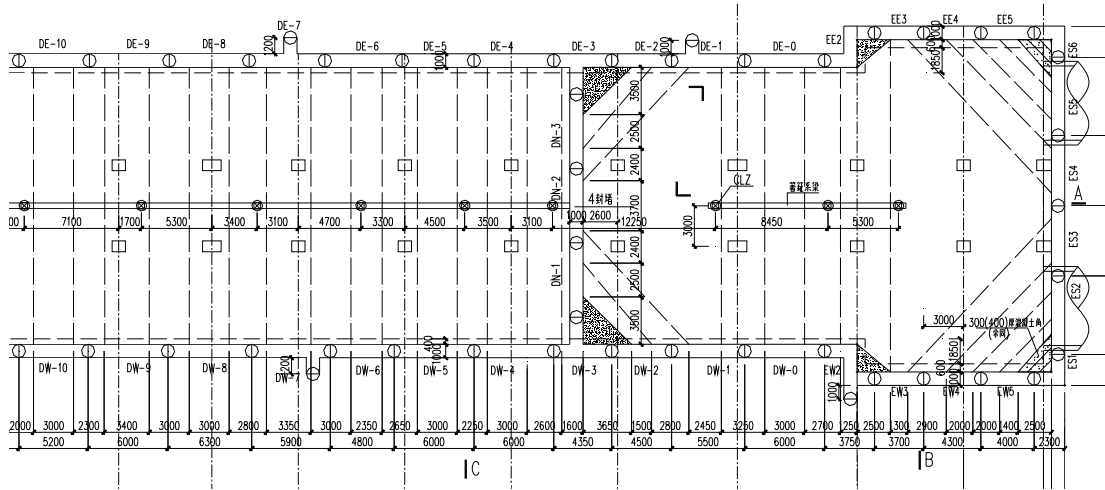


图 16-50 某地铁车站钢支撑平面布置图

无围檩支撑体系施工过程中，应注意当支撑与围护挡墙垂直时支撑与挡墙可直接连接，无需设置预埋件，当支撑与围护挡墙斜交时，应在地墙施工时设置预埋件，用于支撑与挡墙间连接。无围檩体系的支撑施工应注意基坑开挖发生变形后，常产生松弛现象，导致支撑坠落。目前常用方法有两种：1) 凿开围檩处围护墙体钢筋，将支撑与围护墙体钢筋连接；2) 围护墙体设置钢牛腿，支撑搁置在牛腿上。



图 16-51 无围檩体系

钢支撑的施工根据流程安排一般可分为测量定位、起吊、安装、施加预应力以及拆撑等施工步，以下分别为各个施工步进行说明：

1. 测量定位

钢支撑施工之前应做好测量定位工作，测量定位工作基本上与混凝土支撑的施工相一致，包含平面坐标系内轴线控制网的布设和场区高程控制网的布设两个大方面的工作。

钢支撑定位必须精确控制其平直度，以保证钢支撑能轴心受压，一般要求在钢支撑安装时采用测量仪器（卷尺、水准仪、塔尺等）进行精确定位。安装之前应在围护体上作好控制点，然后分别向围护体上的支撑埋件上引测，将钢支撑的安装高度、水平位置分别认真用红漆标出。

2. 钢支撑的吊装

从受力可靠角度，纵横向钢支撑一般不采用重迭连接，而采用平面刚度较大的同一标高连接，以下针对后者对钢支撑的起吊施工进行说明。

第一层钢支撑的起吊与第二及以下层支撑的起吊作业有所不同，第一层钢支撑施工时，空间上无遮拦相对有利，如支撑长度一般时，可将某一方方向（纵向或者横向）的支撑在基坑外按设计长度拼接形成整体，其后 1~2 台吊车采用多点起吊的方式将支撑吊运至设计位置

和标高，进行某一方向的整体安装，但另一方面的支撑需根据支撑的跨度进行分节吊装，分节吊装至设计位置之后，再采用螺栓连接或者焊接连接等方式与先行安装好的另一方向的支撑连接成整体。

第二及以下层钢支撑在工时，由于已经形成第一道支撑系统，已无条件将某一方向的支撑在基坑外拼接成整体之后在吊装至设计位置。因此当钢支撑长度较长，需采用多节钢支撑拼接时，应按“先中间后两头”的原则进行吊装，并尽快将各节支撑连起来，法兰盘的螺栓必须拧紧，快速形成支撑。对于长度较小的斜撑在就位前，钢支撑先在地面预拼装到设计长度，拼装连接。

支撑钢管与钢管之间通过法兰盘以及螺栓连接。当支撑长度不够时，应加工饼状连接管，严禁在活络端处放置过多的塞铁，影响支撑的稳定。

3. 预加轴力

钢支撑安放到位后，吊机将液压千斤顶放入活络端顶压位置，接通油管后开泵，按设计要求逐级施加预应力。预应力施加到位后，在固定活络端，并烧焊牢固，防止支撑预应力损失后钢楔块掉落伤人。预应力施加应在每根支撑安装完以后立即进行。支撑施加预应力时，由于支撑长度较长，有的支撑施加预应力很大，安装的误差难以保证支撑完全平直，所以施加预应力的时候为了确保支撑的安全性，预应力分阶段施加。支撑上的法兰螺栓全部要求拧到拧不动为止。

支撑应力复加应以监测数据检查为主，以人工检查为辅（监测数据检查：监测数据检查的目的是控制支撑每一单位控制范围内的支撑轴力。其复加位置应主要针对正在施加预应力的支撑之上的一道支撑及暴露时间过长的支撑。复加应力时应注意每一幅连续墙上的支撑应同时复加，复加应力的值应控制在预加应力值的 110%之内，防止单组支撑复加应力影响到其周边支撑。

采用钢支撑施工基坑时，最大问题是支撑预应力损失问题，特别深基坑工程采用多道钢支撑作为基坑支护结构时，钢支撑预应力往往容易损失，对在周边环境施工要求较高的地区施工、变形控制的深基坑很不利。造成支撑预应力损失的原因很多，一般有以下几点：1) 施工工期较长，钢支撑的活络端松动；2) 钢支撑安装过程中钢管间连接不精密；3) 基坑围护体系的变形；4) 下道支撑预应力施加时，基坑可能产生向坑外的反向变形，造成上道钢支撑预应力损失。5) 换撑过程中应力重分布。

因此在基坑施工过程中，应加强对钢支撑应力的检查，并采取有效的措施，对支撑进行预应力复加。预应力复加通常按预应力施加的方式，通过在活络头子上使用液压油泵进行顶升，采用支撑轴力施加的方式进行复加，施工时及其不方便，往往难以实现动态复加。目前国内外也可设置专用预应力复加装置，一般有有螺杆式及液压式两种动态轴力复加装置。采用专用预应力复加装置后，可以实现对钢支撑动态监控及动态复加，确保了支撑受力、及基坑的安全性。



图 16-52 螺杆式预应力复加装置



图 16-53 液压式预应力复加装置

对支撑的平直度、连接螺栓松紧、法兰盘的连接、支撑牛腿的焊接支撑等进行一次全面检查。确保钢支撑各节接管螺栓紧固、无松动，且焊缝饱满。

4. 钢支撑施工质量控制

- ①钢立柱开挖出来后，用水准仪根据设计标高来划线焊接托架。
- ②基坑周围堆载控制在 $20\text{kPa}/\text{m}^2$ 以下。
- ③作好技术复核及隐蔽验收工作，未经质量验收合格，不得进行下道工序施工。
- ④电焊工均持证上岗，确保焊缝质量达到设计及国家有关规范要求，焊缝质量由专人检查。
- ⑤法兰盘在连接前要进行整形，不得使用变形法兰盘，螺栓连接控制紧固力矩，严禁接头松动。
- ⑥每天派专人对支撑进行 1-2 次检查，以防支撑松动。
- ⑦钢支撑工程质量检验标准为：支撑位置标高允许偏差 30mm ，平面允许偏差： 100mm ；预加应力：允许偏差： $\pm 50\text{kN}$ ；立柱位置标高允许偏差： 30mm ，平面允许偏差： 50mm 。

5. 支撑的拆除

按照设计的施工流程拆除基坑内的钢支撑，支撑拆除前，先解除预应力。

16.7.5 支撑立柱的施工

内支撑体系的钢立柱目前用得最多的形式为角钢格构柱，即每根柱由四根等边角钢组成柱的四个主肢，四个主肢间用缀板或者缀条进行连接，共同构成钢格构柱。

钢格构柱一般均在工厂进行制作，考虑到运输条件的限制，一般均分段制作，单段长度一般最长不超过 15m ，运至现场之后再组成整体进行吊装。钢格构柱现场安装一般采用“地面拼接、整体吊装”的施工方法，首先将工厂里制作好运至现场的分段钢立柱在地面拼接成整体，其后根据单根钢立柱的长度采用两台或多台吊车抬吊的方式将钢格构柱吊装至安装孔口上方，调整钢格构柱的转向满足设计要求之后，和钢筋笼连接成一体后就位，调整垂直度和标高，固定后进行立柱桩混凝土的浇筑施工。

钢格构柱作为基坑实施阶段的重要的竖向受力支承结构，其垂直度至关重要，将直接影响钢立柱的竖向承载力，因此施工时必须采取措施控制其各项指标的偏差度在设计要求的范围之内。钢格构柱垂直度的控制首先应特别注意提高立柱桩的施工精度，立柱桩根据不同的种类，需要采用专门的定位措施或定位器械，其次钢立柱的施工必须采用专门的定位调垂设备对其进行定位和调垂。目前，钢立柱的调垂方法基本分为气囊法、机械调垂架法和导向套筒法三大类（具体方法详见 18.2.2 一柱一桩施工）。其中机械调垂法是几种调垂方法中最经济实用的，因此大量应用于内支撑体系中的钢立柱施工中，当钢立柱沉放至设计标高后，在钻孔灌注桩孔口位置设置 H 型钢支架，在支架的每个面设置两套调节丝杆，一套用于调节钢格构柱的垂直度，另一套用于调节钢格构柱轴线位置，同时对钢格构柱进行固定。

具体操作流程为：钢格构柱吊装就位后，将斜向调节丝杆和钢柱连接，调整钢格构柱安装标高在误差范围内，然后调整支架上的水平调节丝杆，调整钢柱轴线位置，使钢格构柱四个面的轴向中心线对准地面（或支撑架 H 型钢上表面）测放好的柱轴线，使其符合设计及规范要求，将水平调节丝杆拧紧。调整斜向调节丝杆，用经纬仪测量钢柱的垂直度，使钢立柱柱顶四个面的中心线对准地面测放出的柱轴线，控制其垂直度偏差在设计要求范围内。

16.8 工程实例

16.8.1 中国平安金融大厦设计实例

1. 工程概况

中国平安金融大厦工程由 39 层主楼和 4 层裙楼组成。主楼采用 SRC 框架-钢核心筒结构

体系，裙楼采用钢筋混凝土框架结构体系，均设置3层地下室；基础采用桩筏基础，工程桩均采用钻孔灌注桩。主楼基础底板厚度2.5m，裙楼基础底板厚度1.5m。工程基坑面积约为18000m²，基坑开挖深度主楼区域约为17.90m，裙楼区域约为16.90m，属超大型深基坑工程，基坑保护等级为一级。

2. 基坑总体设计方案

本基坑工程属于超深基坑工程，周边环境保护要求极高，为了最大限度控制基坑开挖阶段对周边环境产生的不利影响，本工程采用地下连续墙作为基坑围护结构，地下连续墙施工工艺成熟，施工对环境的影响较小，水平抗侧刚度大，水平变形小，可有效地保护周边环境，已大量应用于上海的深基坑工程中，特别是地铁周边的深基坑工程，因此有着成熟和丰富的设计施工经验。同时考虑到经济性等因素，地下连续墙采用“两墙合一”的设计思路，即地下连续墙作为围护结构的同时又作为地下室外墙，基坑工程施工阶段地下连续墙既作为挡土结构又作为止水帷幕，起到挡土和止水的目的，同时地下连续墙在结构永久使用阶段作为主体地下室结构外墙，通过与主体地下室结构内部水平梁板构件的有效连接，不再另外设置地下室结构外墙。基坑围护体地下连续墙厚度综合主体结构使用要求，周围环境条件以及基坑开挖阶段水平位移的控制要求等因素进行计算确定，在裙楼区域采用800厚地下连续墙作为基坑围护结构，主楼区域及临近地铁侧采用1000厚度的地下连续墙。

基坑竖向设置三道钢筋混凝土支撑，呈边桁架加对撑布置，该支撑布置形式受力明确，可加快土方开挖、出土速度。钢筋混凝土内支撑可发挥其混凝土材料抗压承载力高、变形小、刚度大的特点，对减小围护体水平位移，并保证围护体整体稳定具有重要作用，同时第一道支撑对撑位置又可作为施工开挖、运土用的栈桥，方便了施工，降低了施工技术措施费。基坑开挖到坑底后再由下而上顺作地下室结构，并相应拆除支撑系统。

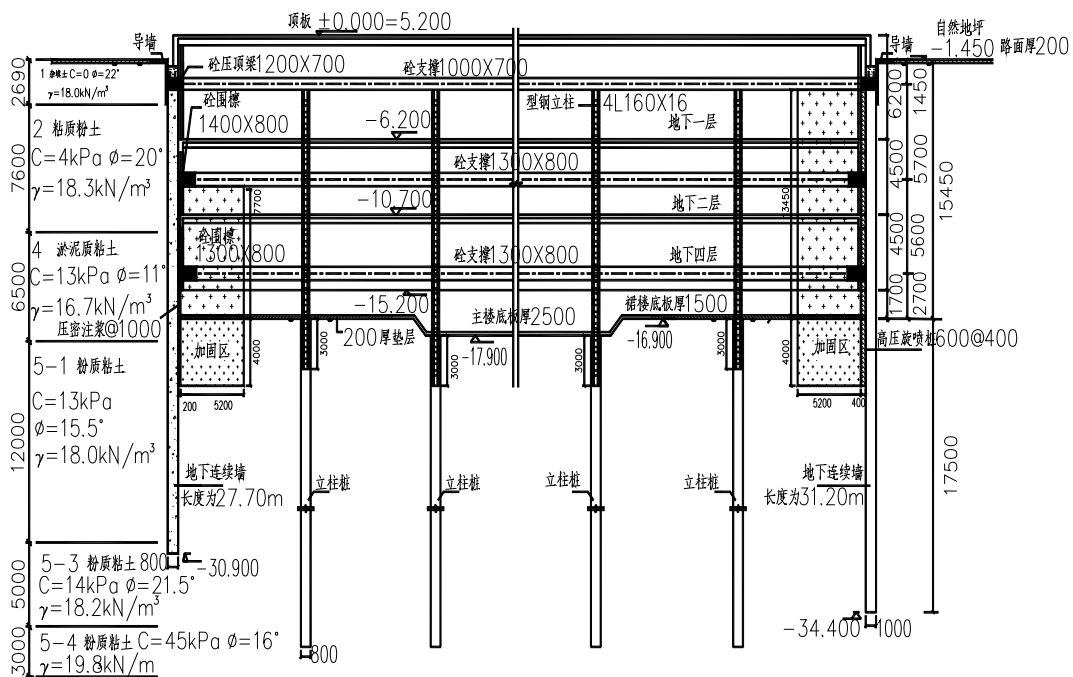


图 16-54 基坑围护结构剖面图

3. 支撑体系设计

基坑竖向设置三道水平钢筋混凝土支撑系统，钢筋混凝土内支撑可发挥其混凝土材料抗压承载力高、变形小、刚度大的特点，对减小围护体水平位移，并保证围护体整体稳定具有重要作用，同时第一道支撑对撑位置又可作为施工开挖、运土用的栈桥，方便了施工，降低了施工技术措施费。地下连续墙顶部设置压顶圈梁兼作第一道支撑的围檩，支撑结构平面见

图 6。

三道钢筋混凝土支撑截面参数具体如下表所示：

竖向支撑截面尺寸表

项目	围檩 (mm×mm)	主撑 (mm×mm)	八字撑 (mm×mm)	连杆 (mm×mm)	支撑系统中心标高 (m)
第一道支撑	1200×700	1000×700	800×700	700×700	-2.900
第二道支撑	1400×800	1300×800	1000×800	900×800	-8.600
第三道支撑	1300×800	1200×800	900×800	800×800	-14.200

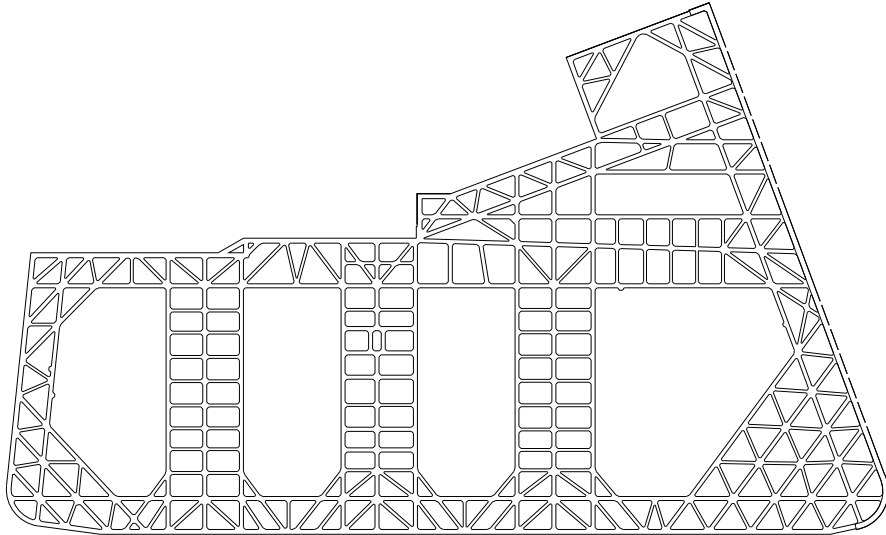


图 16-55 支撑平面布置图



图 16-56 支撑实景图

16.8.2 天津津塔基坑工程

1. 工程概况

本工程位于天津市和平区大沽北路、滨江道与张自忠路围成的地块内，基地临近天津市的河流干道海河。主体结构为一幢超高层商务楼、一幢公寓和整体地下车库。其中超高层的建筑高度达到 330m，建成后将成为天津市内最高的建筑物。主体结构均设置四层地下室，

基础形式为桩筏基础。

2. 总体设计方案

本工程塔楼为超高层结构，公寓为高层结构，其它区域为纯地下室，地面主要以绿化为主。围护设计前期根据不同的工期安排，进行了多个基坑设计方案的比选：①塔楼顺作——公寓和纯地下室逆作；②塔楼和公寓顺作——纯地下室逆作；③整体顺作。经过多次比较分析，最终确定采用整体顺作法的基坑支护设计方案。在整体基坑工程实施的过程中，应通过合理的支护设计尽量减少对塔楼和公寓主体结构的阻挡，确保基坑开挖到底后，塔楼和公寓可以及早进入上部结构施工。

本工程周边围护结构采用“两墙合一”的地下连续墙，即在基坑开挖阶段作为基坑支护结构，在永久使用阶段作为主体结构的地下室外墙。塔楼区域开挖深度较深，因此采用 1000mm 厚的地下连续墙；公寓和纯地下室区域开挖相对较浅，采用 800mm 厚的地下连续墙。基坑周边围护结构的入土深度综合围护结构的变形和稳定性计算以及基坑降水、隔水措施综合确定。

根据围护结构受力计算的需要，本工程内部需设置四道钢筋混凝土支撑体系。由于平面形状不规则，采用较为传统的角撑、对撑结合边桁架布置，需要设置大量穿越基坑内部的杆件，不利于土方的开挖和地下室结构的施工。因此结合本工程的平面形状和塔楼的分布位置，采用双圆环的支撑平面布置体系。

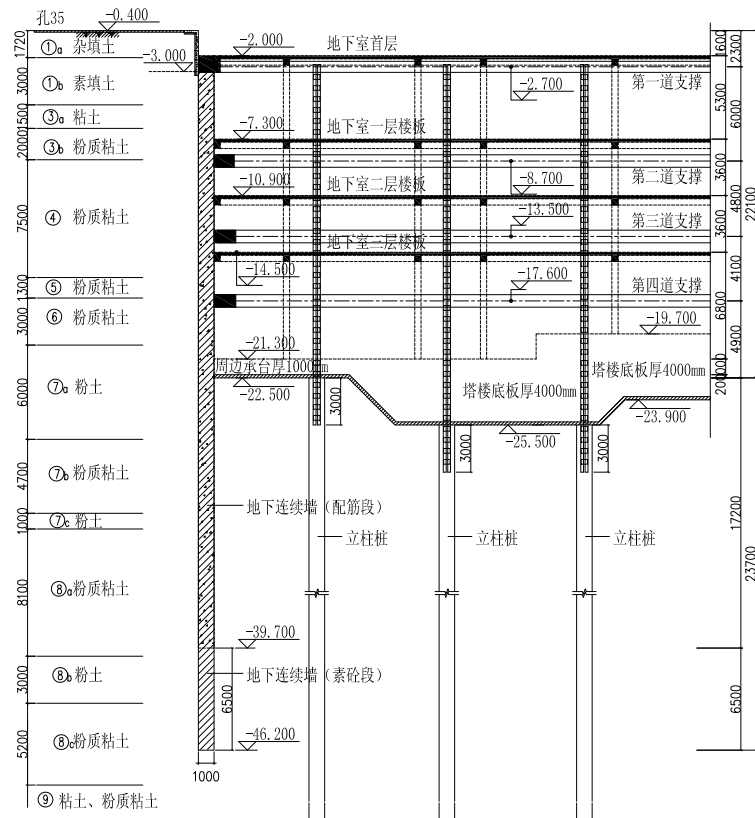


图 16-57 基坑围护结构剖面图

3. 支撑体系设计

基坑竖向设置的四道圆环形支撑体系可以最大限度的发挥混凝土的受压能力，并形成中部开阔的空间。本工程中大圆环直径 97.5m，小圆环直径 60m。支撑角落位置设置角撑，中部采用对撑桁架进行连接，角撑和对撑的连杆结合径向杆件设置，使其达到局部区域受力平衡的同时也对整个圆环系统的稳定和水平力的传递提供了有效的途径。

大圆环的设计完全避开整个塔楼区域的所有竖向构件,小圆环区域也避开部分公寓竖向结构,中部对撑区域的支撑杆件与公寓的竖向结构尽量避开或垂直穿越,基坑开挖到底后,完成基础底板施工后,两个主要的地面建筑即可在不拆撑的情况下向上施工主体结构,加快整体工期进度。

双圆环支撑体系的设置,在避让主体结构的同时也给整个基坑留下了较大的出土空间,方便土方车辆的进出和挖土机械的操作。但由于圆环形支撑体系整体性较强,需要在整道支撑体系全部形成,整体受力后方可进行其下的土方开挖。基坑施工过程中,可以利用双圆环支撑体系中,对撑和角撑局部体系平衡的特点,分区开挖与分区支撑施工相结合,采用岛式挖土,及时形成各道水平支撑体系。

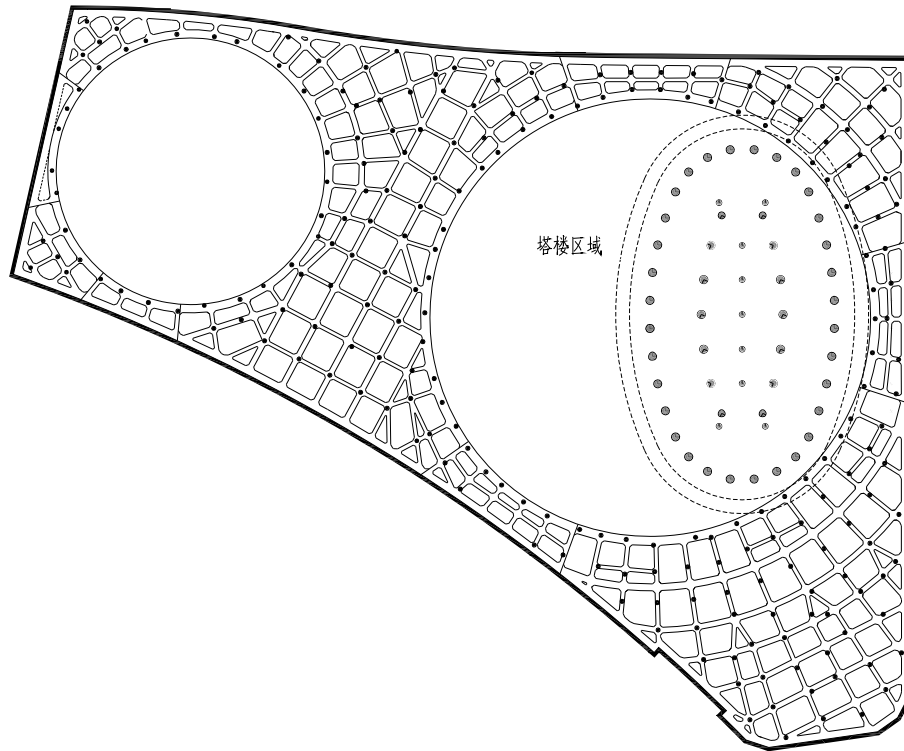


图 16-58 支撑平面布置图

16.8.3 浙江家园（十字正交钢支撑）

1. 工程概况

本工程位于上海市长寿路与陕西北路的东南角处,主体结构为一幢 26 层主楼(框-剪结构)和地下车库,均设置二层地下室,基坑面积约为 5212m^2 ,基坑挖深主楼约为 10.55m ,地下车库约为 9.35m 。周边建筑物、地下管线众多,周边保护要求较高。本工程基坑开挖较深,施工难度较高。

2. 围护设计方案

综合考虑本工程周边环境、道路管线分布、基坑挖深以及浅层土砂性较重,渗透性系数较大等因素,本方案拟采用 SMW 工法作为围护体。SMW 工法即是在多头钻水泥土搅拌桩中内插型钢,基坑开挖期间水泥土搅拌桩可作为止水帷幕,内插型钢可作为挡土受力结构,SMW 工法具有强度大、止水性好以及内插的型钢可拔出反复使用、经济性好的优点。本工程 SMW 工法采用 $\Phi 850@600$ 的进口多头钻头水泥土搅拌桩,另外根据主楼区和地下车库区基坑挖深以及分布范围的实际情况,通过计算分析确定主楼区的三头水泥土搅拌桩中内插 $2\text{H}700\times 300\times 13\times 24@1800$ 型钢,地下车库区的三头水泥土搅拌桩内插 $\text{H}700\times 300\times 13\times$

24@1200 型钢，由此三头水泥土搅拌桩与内插型钢构成复合挡土和止水结构，结合坑内竖向设置两道水平钢支撑系统，呈正交对撑布置，钢支撑架设和拆除速度均较快，有利于加快施工进度，同时还可通过预加和复加轴力达到控制基坑变形的目的，其经济指标优于钢筋混凝土支撑。该方案的优势在于 SMW 工法的内插型钢可重复利用，因此必须在施工结束后拔出型钢。

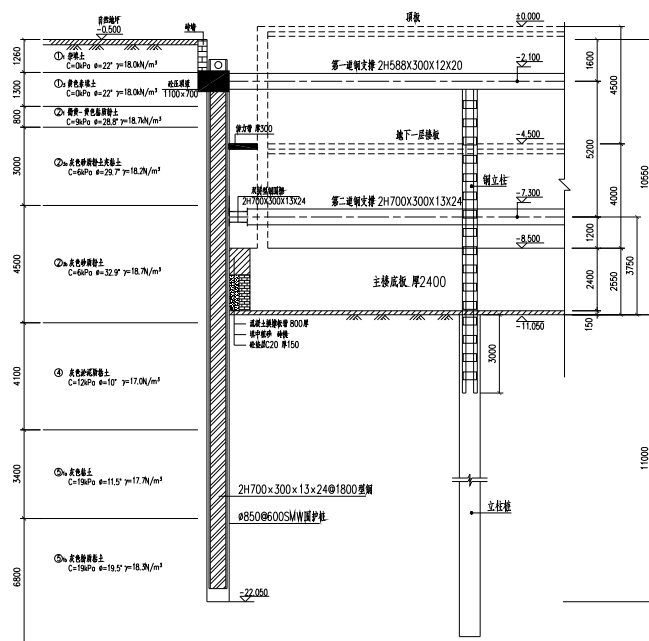


图 16-59 基坑围护结构剖面图

3. 支撑体系设计

本基坑工程竖向设置二道水平型钢支撑系统，第一道钢支撑主撑采用 2H588×300×12×20，八字撑及连杆采用 H588×300×12×20，压顶梁兼作第一道混凝土围檩，其截面为 1100×700，第一道支撑系统中心标高为-2.100；第二道钢支撑主撑采用 2H700×300×13×24，八字撑及连杆采用 H700×300×13×24，围檩采用双拼 H700×300×13×24 型钢围檩，第二道支撑系统中心标高-7.300。

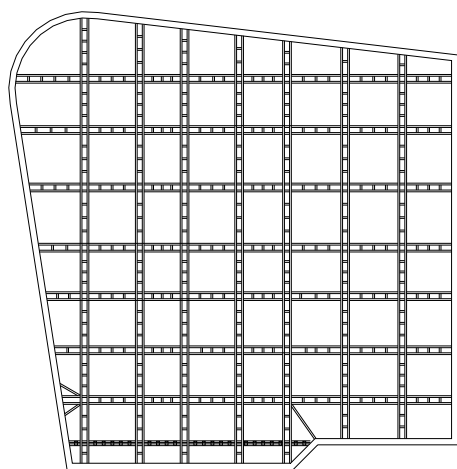


图 16-60 支撑平面布置图



图 16-61 支撑实景图

16.8.4 大宁商业中心（竖向钢斜撑）

1.工程概况

上海市闸北区大宁商业中心位于大宁路以南、共和新路南北高架路以西，基坑开挖面积约 44365m²，开挖深度基坑东侧约为 6m~6.7m，其它侧约为 6.2m~8m。基地周边环境如图 3 所示，场地周边存在较多的多层建筑与地下管线，且基坑东侧有南北走向的地铁一号线北延伸段区间隧道，隧道顶部埋深 11.8m，该侧围护体与地铁隧道的最小净距仅为 5.45m。地铁控制范围内的保护要求极高，对水平变形和沉降等控制要求十分严格。

2.基坑围护设计方案

综合考虑基地周边环境保护要求、基坑面积、开挖深度以及经济性等因素，本工程采用了重力坝和排桩结合坑内钢斜撑的多种组合支护形式，其中重力坝主要应用在基坑开挖深度约 6.2m~7m，以及周边环境保护要求相对宽松的西南侧，排桩结合钢斜撑体系主要应用在环境保护要求极高的东侧地铁隧道侧，以及开挖深度相对较深，约 7m~8m 的北侧和西北侧。东侧紧邻本基坑工程的重点保护对象地铁一号线北延伸段区间隧道，因此围护设计中针对该侧采取了一系列的技术对策，以确保基坑施工过程中地铁隧道的安全和正常运营：

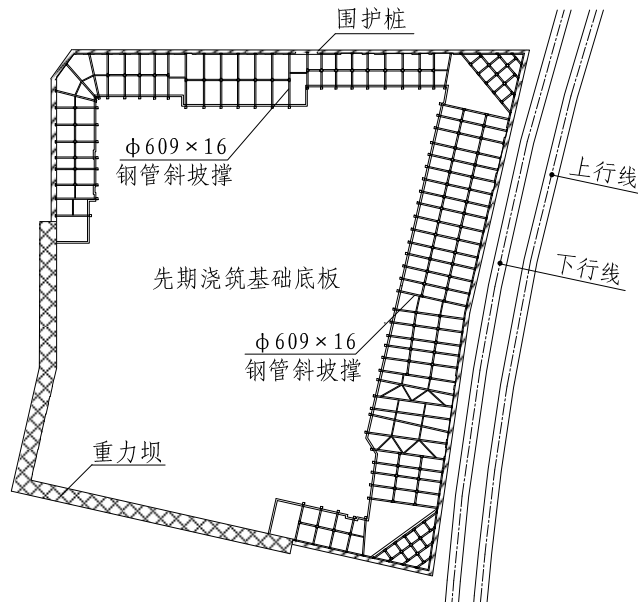


图 16-62 围护体及支撑平面布置图

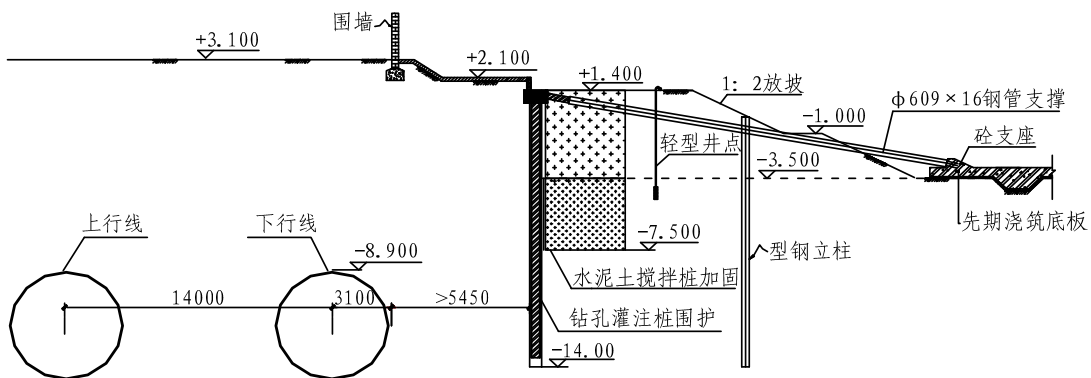


图 16-63 邻近地铁侧基坑围护剖面图

3.支撑体系设计

基坑在竖向采用竖向钢斜撑系统,同时为增强围护桩整体性在围护桩顶部设置一道砼顶圈梁,截面为 1200×700 。主支撑断面 $\Phi 609\times 12$;支撑具体布置详见相关方案图。支撑杆件的设置也遵循了避开结构柱以及剪力墙的原则,局部必须穿剪力墙的支撑拟采用 H 型钢支撑来替代,或可通过在剪力墙预留孔以及该局部剪力墙后作等方式来解决。



图 16-64 竖向钢斜撑实景

16.8.5 组合结构环形内支撑工程案例

组合结构环形内支撑形式是钢筋混凝土环形支撑形式基本一致,其根本区别在于组合结构环形内支撑形式中,环形支撑由于需承受巨大的轴向压力,因此支撑杆件仍选择抗压性能更优越的钢筋混凝土材料,其余杆件相对而言,承受的轴向压力相对环形支撑要小得多,

实例 1: 中国石油大厦,是世界 500 强企业--中国石油在武汉建设的第一座五星级酒店,三层地下室,地下空间周边有煤气管网,且距基坑边仅 1.6m,东面为城市主干道--长青路,另两边为高层住宅,该工程的地下室底比周边建筑物的地下室底低 6~8m,基坑深 14.65 ~ 17m,首次采用长轴直径为 56m,短轴直径为 49.2m 的椭圆形钢筋混凝土环形内支撑和钢结构腹杆支撑的组合结构环形内支撑(如图 27-77 所示),首次采用竖向两层椭圆形组合结构内环形支撑,达到了控制基坑变形、加快施工进度、降低成本、减少扰民的效果。

实例 2: 铁道第四勘察设计院科研大楼深基坑(如图 27-78)采用长轴直径为 84m,短轴直径为 76m 的椭圆形钢筋混凝土撑和钢结构腹杆撑的组合结构椭圆形内支撑,采用竖向两层椭圆形组合结构内支撑,成功地解决了控制深基坑支护的侧向变形和保护周边既有建、构筑物安全和减少大型内支撑拆除时对办公和居民生活产生影响的问题。



图 16-65 中石油基坑工程开挖全景

图 16-66 铁四院科研大楼基坑工程开挖实景