

# 第 11 章 地下连续墙的设计与施工

## 11.1 概述

1950 年意大利米兰的 C.Veder 开发了地下连续墙的施工技术,并最早应用于 Santa Malia 大坝的防渗墙(深达 40m)中。50 年代后期传入法国、日本等国,60 年代推广至英国、美国、前苏联等国,世界各国都是首先从水利水电基础工程中开始应用,然后推广到建筑、市政、交通、矿山、铁道和环保等部门的。60 年代,日本开发了许多连续墙施工机具,之后,地下连续墙的施工技术在全世界范围内得到了较广泛的应用。早期的地下连续墙多用于大坝的防渗墙,一般是在地下先凿出一条沟槽,然后浇灌混凝土以形成一透水性很低的薄膜,由于其目的主要是隔水,因此对墙面的垂直度、平整度及混凝土的强度的要求并不严格,主要是控制其水密性。1961 年法国巴黎费利浦大楼深基础工程首先成功地采用了较高精度的地下连续墙技术,这是地下连续墙施工技术在高层建筑中的首个应用实例。我国也是较早应用地下连续墙施工技术的国家之一,首先应用是水电部门于 1958 年在青岛月子口水库建造深 20m 的桩排式防渗墙以及在北京密云水库建造深 44m 的槽孔式防渗墙。1971 年在台湾地区的台北市吉林路中国国际银行大楼中采用了地下连续墙,墙厚 550mm,深 15m,是国内也是东南亚地区首先应用在高层建筑中的地下连续墙工程<sup>[109]</sup>。1977 年在上海研制成功了导板抓斗和多头钻成槽机之后,首次用这种机械施工了某船厂升船机港地岸壁,为我国加速开发这一技术起到了积极推动作用。

最初地下连续墙厚度一般不超过 0.6m,深度不超过 20m。到了 20 世纪 60~80 年代,随着成槽施工技术设备的不断提高,墙厚达到 1.0~1.2m,深度达 100m 的地下连续墙逐渐出现。从 1965 年至 1987 年,日本利用地下连续墙作为围护结构的工程多达 365 例。东京都涩谷区 NHK 新广播电台大楼,地下 2 层,地上 3 层。基坑围护结构采用 T 字形大断面地下连续墙,墙厚为 60cm 和 100cm,深度为 18~22m,地下连续墙作为地下室外墙兼作双层车道的地基;营团地铁有乐町线基坑工程采用 80cm 地下连续墙厚度作为围护结构;日本国室兰港的白鸟大桥<sup>[112]</sup>(主跨 720 m 悬索桥)主塔墩为直径 37 m、深 70 m 的基坑采用地下连续墙围堰,从筑岛顶面算起地下连续墙打入地层以下 100 m(嵌岩 30 m),成功地修建了主塔墩的直接基础。到了 20 世纪 90 年代,由于成功研制并使用了水平多轴铣槽机,出现了超厚(3.20m)和超深(170m)的地下连续墙结构。已建成的日本东京湾跨海大桥的川崎人工岛(墙厚 2.8,直径 108m)的地下连续墙基础,最大深度已达 140m。

在国内自从引进地下连续墙技术至今地下连续墙作为基坑围护结构的设计施工技术已经非常成熟。进入 90 年代中期,国内外越来越多的工程中将支护结构和主体结构相结合设计,即在施工阶段采用地下连续墙作为支护结构,而在正常使用阶段地下连续墙又作为结构外墙使用,在正常使用阶段承受永久水平和竖向荷载,称为“两墙合一”。如新闻路地铁车站、上海银行大厦、越洋广场、平安保险广场和上海二十一世纪中心大厦等均采用了“两墙合一”设计。“两墙合一”减少了工程资金和材料投入,充分体现了地下连续墙的经济性和环保性。2000 年以后,随着国内新一轮建筑高潮的兴起,深大基坑和市区内周边环境保护要求较高的基坑工程不断涌现,对工程的经济性和社会资源的节约要求越来越高,一系列外部条件的发展,促进了地下连续墙工艺又得到了进一步推动,同时也出现了一批设计难度较高的工程。例如上海 500kV 世博地下变工程直径 130m 的圆形基坑,基坑开挖深度为 34m,采用了 1.2m 厚的地下连续前作为围护结构,同时在正常使用阶段又作为地下室外墙。

### 11.1.1 地下连续墙的特点与适用条件

#### 1. 地下连续墙的特点

在工程应用中地下连续墙已被公认为是深基坑工程中最佳的挡土结构之一,它具有如下显著的优点:

- (1) 施工具有低噪音、低震动等优点,工程施工对环境的影响小;
- (2) 连续墙刚度大、整体性好,基坑开挖过程中安全性高,支护结构变形较小;
- (3) 墙身具有良好的抗渗能力,坑内降水时对坑外的影响较小;
- (4) 可作为地下室结构的外墙,可配合逆作法施工,以缩短工程的工期、降低工程造价。

但地下连续墙也存在弃土和废泥浆处理、粉砂地层易引起槽壁坍塌及渗漏等问题<sup>[106]</sup>,因而需采取相关的措施来保证连续墙施工的质量。

## 2. 地下连续墙的适用条件

由于受到施工机械的限制,地下连续墙的厚度具有固定的模数,不能像灌注桩一样对桩径和刚度进行灵活调整,因此,地下连续墙只有用在一定深度的基坑工程或其它特殊条件下才能显示其经济性和特有的优势。对地下连续墙的选用必须经过技术经济比较,确实认为是经济合理时才可采用。一般情况下地下连续墙适用于如下条件的基坑工程:

- (1) 深度较大的基坑工程,一般开挖深度大于 10m 才有较好的经济性;
- (2) 邻近存在保护要求较高的建、构筑物,对基坑本身的变形和防水要求较高的工程;
- (3) 基地内空间有限,地下室外墙与红线距离极近,采用其它围护形式无法满足留设施工操作空间要求的工程;
- (4) 围护结构亦作为主体结构的一部分,且对防水、抗渗有较严格要求的工程;
- (5) 采用逆作法施工,地上和地下同步施工时,一般采用地下连续墙作为围护墙;
- (6) 在超深基坑中,例如 30m~50m 的深基坑工程,采用其它围护体无法满足要求时,常采用地下连续墙作为围护体。

### 11.1.2 地下连续墙的结构形式

目前在工程中应用的地下连续墙的结构形式主要有壁板式、T 型和 II 形地下连续墙、格形地下连续墙、预应力或非预应力 U 形折板地下连续墙等几种形式。

#### 1. 壁板式

该形式又可分为直线壁板式(如图 11-1 (a) 所示)和折线壁板式(如图 11-1 (b) 所示),折线壁板式多用于模拟弧形段和转角位置。壁板式在地下连续墙工程中应用得最多,适用于各种直线段和圆弧段墙段,例如,在上海世博 500kV 地下变电站直径 130m 的圆筒形基坑地下连续墙设计中,就采用了 80 幅直线壁板式地下连续墙来模拟圆弧段。

#### 2. T 型和 II 形地下连续墙

T 型(如图 11-1 (c) 所示)和 II 形地下连续墙(如图 11-1 (d) 所示)适用于基坑开挖深度较大、支撑竖向间距较大、受到条件限制墙厚无法增加的情况下,采用加肋的方式增加墙体的抗弯刚度。

#### 3. 格形地下连续墙

格形地下连续墙(如图 11-1 (e) 所示)是一种将壁板式和 T 形地下连续墙两种形式组合在一起的结构形式,格形地下连续墙结构型式的构思出自格形钢板桩岸壁的概念,是靠其自身重量稳定的半重力式结构,是一种用于建(构)筑物地基开挖的无支撑空间坑壁结构。格形地下连续墙多用于船坞及特殊条件下无法设置水平支撑的基坑工程,目前也有应用于大型的工业基坑,如上海耀华一皮尔金顿二期熔窑坑工程,熔窑建成后坑内不允许有任何永久性支撑和隔墙结构,而且要保护邻近一期工程的正常使用。该工程采用了重力式格形地下连续墙方案,利用格形地下连续墙作为基坑支护结构,同时作为永久结构。格形地下连续墙在特殊条件下具有不可替代的优势,但由于受到自身施工工艺的约束,一般槽段数量较多。

#### 4. 预应力或非预应力 U 形折板地下连续墙

这是一种新形式的地下连续墙，已应用于上海某地下车库工程。折板是一种空间受力结构，有良好的受力特性，还具有抗侧刚度大、变形小、节省材料等特点。

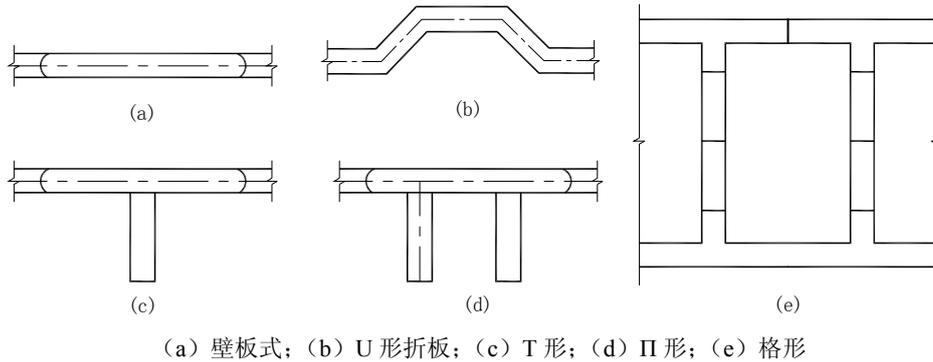


图 11-1 地下连续墙平面结构形式

## 11.2 地下连续墙的设计

作为基坑围护结构，主要基于强度、变形和稳定性三个大的方面对地下连续墙进行设计和计算，强度主要指墙体的水平和竖向截面承载力、竖向地基承载力；变形主要指墙体的水平变形和作为竖向承重结构的竖向变形；稳定性主要指作为基坑围护结构的整体稳定性、抗倾覆稳定性、坑底抗隆起稳定性、抗渗流稳定性等，稳定性计算方法见本手册第六章。以下针对地下连续墙设计的主要方面进行详述。

### 11.2.1 墙体厚度和槽段宽度

地下连续墙厚度一般为 0.5~1.2m，而随着挖槽设备大型化和施工工艺的改进，地下连续墙厚度可达 2.0m 以上。日本东京湾新丰洲地下变电站圆筒形地下连续墙的厚度达到了 2.40m。上海世博 500kV 地下变电站基坑开挖深度 34m，围护结构采用直径 130m 圆筒形地下连续墙，地下连续墙厚度 1.2m，墙深 57.5m。在具体工程中地下连续墙的厚度应根据成槽机的规格、墙体的抗渗要求、墙体的受力和变形计算等综合确定。地下连续的常用墙厚为 0.6、0.8、1.0 和 1.2m。

确定地下连续墙单元槽段的平面形状和成槽宽度时需考虑众多因素，如墙段的结构受力特性、槽壁稳定性、周边环境的保护要求和施工条件等，需结合各方面的因素综合确定。一般来说，壁板式一字形槽段宽度不宜大于 6m，T 形、折线形槽段等槽段各肢宽度总和不宜大于 6m。

### 11.2.2 地下连续墙的入土深度

一般工程中地下连续墙入土深度在 10~50m 范围内，最大深度可达 150m。在基坑工程中，地下连续墙既作为承受侧向水土压力的受力结构，同时又兼有隔水的作用，因此地下连续墙的入土深度需考虑挡土和隔水两方面的要求。作为挡土结构，地下连续墙入土深度需满足各项稳定性和强度要求，作为隔水帷幕，地下连续墙入土深度需根据地下水控制要求确定。

#### 1. 根据稳定性确定入土深度

作为挡土受力的围护体，地下连续墙底部需插入基底以下足够深度并进入较好的土层，以满足嵌固深度和基坑各项稳定性要求。在软土地层中，地下连续墙在基底以下的嵌固深度一般接近或大于开挖深度方能满足稳定性要求。在基底以下为密实的砂层或岩层等物理力学性质较好的土（岩）层时，地下连续墙在基底以下的嵌入深度可大大缩短。例如上海轨道交通七号线耀华路站综合开发项目开挖深度约 20.4m，基底以下主要以软塑的粘土层为主，采

用地下连续墙作为围护结构，墙体嵌入基底以下 19m 方满足稳定性要求。南京绿地紫峰大厦开挖深度约 21.4m，基底以下均为中风化安山岩，地下连续墙嵌入基底以下 7m 即满足稳定性要求。

## 2. 考虑隔水作用确定入土深度

作为隔水帷幕，地下连续墙设计时需根据基底以下的水文地质条件和地下水控制确定入土深度，当根据地下水控制要求需隔断地下水或增加地下水绕流路径时，地下连续墙底部需进入隔水层隔断坑内外潜水及承压水的水力联系，或插入基底以下足够深度以确保形成可靠的隔水边界。如根据隔水要求确定的地下连续墙入土深度大于受力和稳定性要求确定的入土深度时，为了减少经济投入，地下连续墙为满足隔水要求加深的部分可采用素混凝土浇筑。

天津津塔基坑开挖深度 22.1m，采用 1.0m 厚的“两墙合一”地下连续墙作为围护体。其地面下约 40m 深分布有 (8b) 粉土层第二承压含水层，基坑不满足承压水突涌稳定性要求，根据基地周边环境要求需采取隔断措施。根据稳定性计算，地下连续墙插入基底以下 17.2m 即可满足各项稳定性要求。而要隔断第二承压水，地下连续墙底部需进入 (8c) 粉质粘土层，插入基底以下的深度需达到 23.7m。因此综合考虑稳定性和隔承压水两方面的因素，地下连续墙插入基底以下 23.7m，并根据受力和稳定性要求在基底以下 17.2m 范围采用钢筋混凝土，在基底以下 17.2~23.7m 段采用素混凝土段作为隔水帷幕。该工程已经竣工，地下连续墙下部素混凝土段有效的隔断了第二承压水。

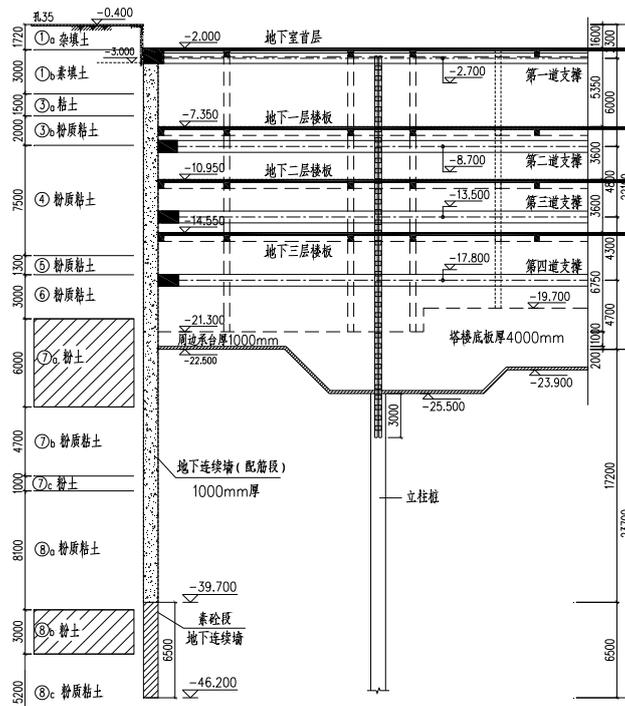


图 11-2 津塔地下连续墙支护结构剖面图

## 11.2.3 内力与变形计算及承载力验算

### 1. 内力和变形计算

地下连续墙作为基坑围护结构的内力和变形计算目前应用最多的是平面弹性地基梁法，该方法计算简便，可适用于绝大部分常规工程；而对于具有明显空间效应的深基坑工程，可采用空间弹性地基板法进行地下连续墙的内力和变形计算；对于复杂的基坑工程需采用连续介质有限元法进行计算。

墙体内力和变形计算应按照主体工程地下结构的梁板布置，以及施工条件等因素，合理确定支撑标高和基坑分层开挖深度等计算工况，并按基坑内外实际状态选择计算模式，考虑

基坑分层开挖与支撑进行分层设置,以及换撑拆撑等工况在时间上的先后顺序和空间上的位置不同,进行各种工况下的连续完整的设计计算。具体可参照第六章的相关内容对地下连续墙内力和变形计算。

## 2. 承载力验算

应根据各工况内力计算包络图对地下连续墙进行截面承载力验算和配筋计算。常规的壁板式地下连续墙需进行正截面受弯、斜截面受剪承载力验算,当需承受竖向荷载时,需进行竖向受压承载力验算。对于圆筒形地下连续墙除需进行正截面受弯、斜截面受剪和竖向受压承载力验算外,尚需进行环向受压承载力验算。

当地下连续墙仅用作基坑围护结构时,应按照承载能力极限状态对地下连续墙进行配筋计算,当地下连续墙在正常使用阶段又作为主体结构时,应按照正常使用极限状态根据裂缝控制要求进行配筋计算。

地下连续墙正截面受弯、受压、斜截面受剪承载力及配筋设计计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的相关规定。

### 11.2.4 地下连续墙设计构造

#### 1. 墙身混凝土

地下连续墙混凝土设计强度等级不应低于 C30,水下浇筑时混凝土强度等级按相关规范要求提高。墙体和槽段接头应满足防渗设计要求,地下连续墙混凝土抗渗等级不宜小于 S6 级。地下连续墙主筋保护层在基坑内侧不宜小于 50mm,基坑外侧不宜小于 70mm。

地下连续墙的混凝土浇筑面宜高出设计标高以上 300~500mm,凿去浮浆层后的墙顶标高和墙体混凝土强度应满足设计要求。

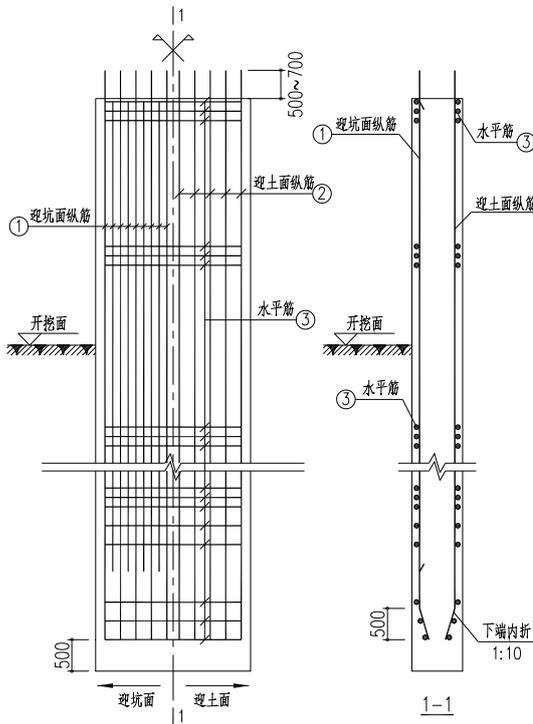


图 11-3 地下连续墙槽段典型配筋立面图

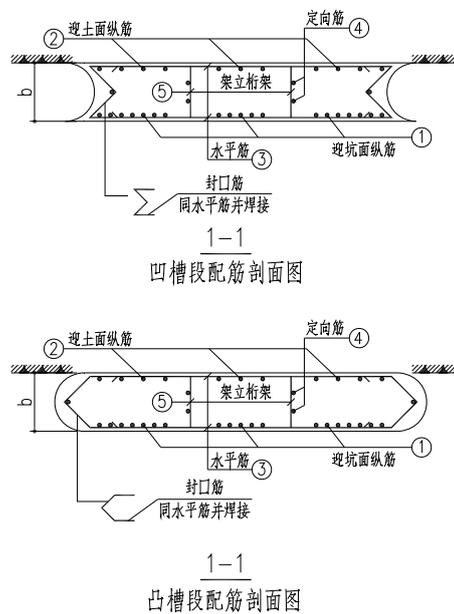


图 11-4 地下连续墙槽段典型配筋剖面图

#### 2. 钢筋笼

地下连续墙钢筋笼由纵向钢筋、水平钢筋、封口钢筋和构造加强钢筋构成。纵向钢筋沿墙身均匀配置,且可按受力大小沿墙体深度分段配置。纵向钢筋宜采用 HRB335 级或 HRB400 级钢筋,直径不宜小于 16mm,钢筋的净距不宜小于 75mm,当地下连续墙纵向钢筋配筋量较大,

钢筋布置无法满足净距要求时，实际工程中常采用将相邻两根钢筋合并绑扎的方法调整钢筋净距，以确保混凝土浇筑密实。纵向钢筋应尽量减少钢筋接头，并应有一半以上通长配置。水平钢筋可采用 HPB235 级钢筋，直径不宜小于 12mm。封口钢筋直径同水平钢筋，竖向间距同水平钢筋或按水平钢筋间距间隔设置。地下连续墙宜根据吊装过程中钢筋笼的整体稳定性和变形要求配置架立桁架等构造加强钢筋。

钢筋笼两侧的端部与接头管（箱）或相邻墙段混凝土接头面之间应留有不大于 150mm 的间隙，钢筋下端 500mm 长度范围内宜按 1:10 收成闭合状，且钢筋笼的下端与槽底之间宜留有不小于 500mm 的间隙。地下连续墙钢筋笼封头钢筋形状应与施工接头相匹配。封口钢筋与水平钢筋宜采用等强焊接。

单元槽段的钢筋笼宜在加工平台上装配成一个整体，一次性整体沉放入槽。当单元槽段的钢筋笼必须分段装配沉放时，上下段钢筋笼的连接宜采用机械连接，并采取地面预拼装措施，以便于上下段钢筋笼的快速连接，接头的位置宜选在受力较小处，并相互错开。

### (1) 转角槽段钢筋笼

转角槽段小于 180 度角侧水平筋锚入对边墙体内应满足锚固长度，且宜与对边水平钢筋焊接，以加强转角槽段吊装过程中的整体刚度。转角宜设置斜向构造钢筋，以加强转角槽段吊装过程中的整体刚度。

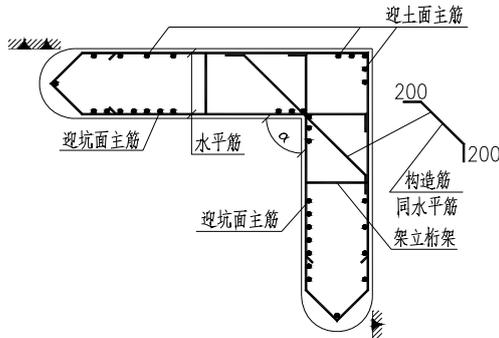


图 11-5 锐角及直角槽段

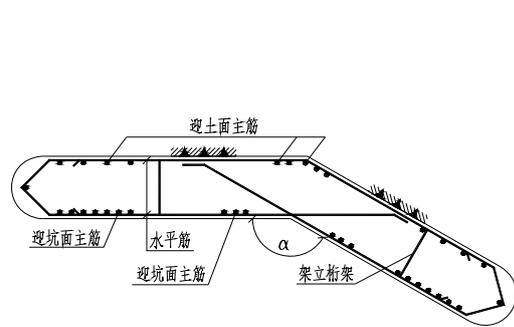


图 11-6 钝角槽段

### (2) T 型槽段钢筋笼

T 形槽段外伸腹板宜设置在迎土面一侧，以防止影响主体结构施工。根据相关规范进行 T 型槽段截面设计和配筋计算，翼板侧拉区钢筋可在腹板两侧各一倍墙厚范围内均匀布置。

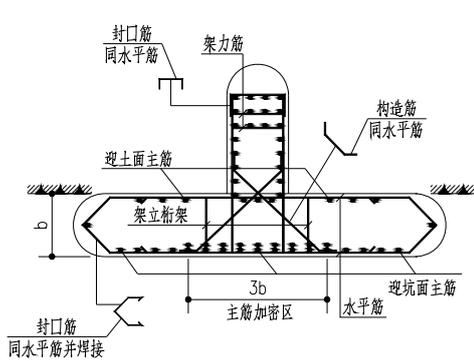


图 11-7 T 型槽段截面构造

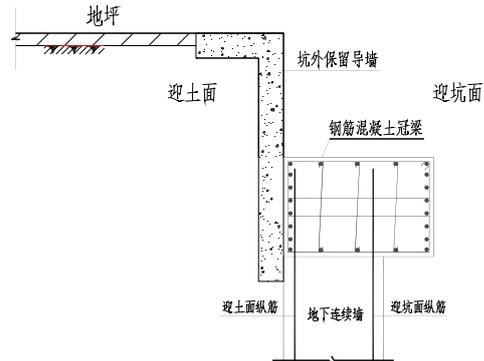


图 11-8 地下连续墙钢筋混凝土冠梁示意图

## 3. 墙顶冠梁

地下连续墙顶部应设置封闭的钢筋混凝土冠梁。冠梁的高度和宽度由计算确定，且宽度不宜小于地下连续墙的厚度。地下连续墙采用分幅施工，墙顶设置通长的顶圈梁有利于增强

地下连续墙的整体性。顶圈梁宜与地下连续墙迎土面平齐，以便保留导墙，对墙顶以上土体起到挡土护坡的作用，避免对周边环境产生不利影响。

地下连续墙墙顶嵌入圈梁的深度不宜小于 50mm，纵向钢筋锚入圈梁内的长度宜按受拉锚固要求确定。

### 11.2.5 地下连续墙施工接头

#### 1. 类型与形式

施工接头是指地下连续墙单元槽段之间的连接接头。根据受力特性地下连续墙施工接头可分为柔性接头和刚性接头。能够承受弯矩、剪力和水平拉力的施工接头称为刚性接头，反之不能承受弯矩和水平拉力的接头称为柔性接头。

#### 2. 柔性接头

工程中常用的柔性接头主要有圆形（或半圆形）锁口管接头、波形管（双波管、三波管）接头、楔形接头、钢筋混凝土预制接头和橡胶止水带接头，接头平面形式如图 11-9 所示。

图 11-10 为几种接头管的实物图。

柔性接头抗剪、抗弯能力较差，一般适用于对槽段施工接头抗剪、抗弯能力要求不高的基坑工程中。

##### (1) 锁口管接头

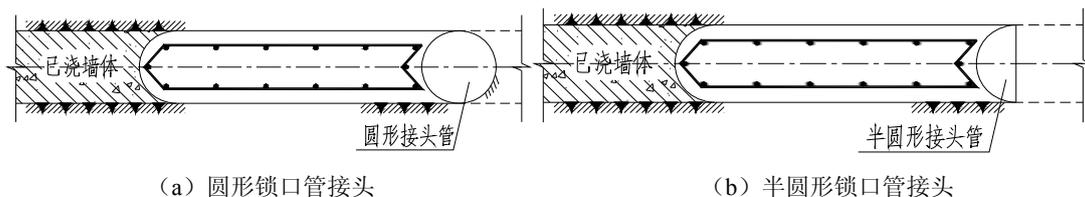
圆形（或半圆形）锁口管接头、波形管（双波管、三波管）接头统称为锁口管接头，锁口管接头是地下连续墙中最常用的接头形式，锁口管在地下连续墙混凝土浇筑时作为侧模，可防止混凝土的绕流，同时在槽段端头形成半圆形或波形面，增加了槽段接缝位置地下水的渗流路径。锁口管接头构造简单，施工适应性较强，止水效果可满足一般工程的需要。

##### (2) 钢筋混凝土预制接头

钢筋混凝土预制接头可在工厂进行预制加工后运至现场，也可现场预制。预制接头一般采用近似工字型截面，在地下连续墙施工过程中取代锁口管的位置和作用，沉放后无需顶拔，作为地下连续墙的一部分。由于预制接头无需拔除，简化了施工流程，提高了效率，有常规锁口管接头不可比拟的优点。特别适用于顶拔锁口管困难的超深地下连续墙工程。当受到运输和吊放设备能力限制等因素限制时，预制接头一般在深度方向分节吊放，分节长度应根据基坑开挖深度确定，以确保分节接缝位置处于基坑底面以下一定深度为原则。上下节之间可采用预制钢筋混凝土方桩分节桩之间的钢板接头连接方式，并使接缝处于平整密实的连接状态。也可将预制接头上下节先采用螺栓与连接固定，再焊接。

##### (3) 工字形型钢接头

该接头形式是采用钢板拼接的工字形型钢作为施工接头，型钢翼缘钢板与先行槽段水平钢筋焊接，后续槽段可设置接头钢筋深入到接头的拼接钢板区。该接头不存在无筋区，形成的地下连续墙整体性好。先后浇筑的混凝土之间由钢板隔开，加长了地下水渗透的绕流路径，止水性能良好。工字形型钢接头的施工避免了常规槽段接头施工中锁口管或接头箱拔除的过程，大大降低了施工难度，提高了施工效率。该接头在直径 130m，挖深 34m 的世博地下变电站圆筒形地下连续墙设计中得到成功应用。工字形型钢接头如图 11-9 (g) 所示。



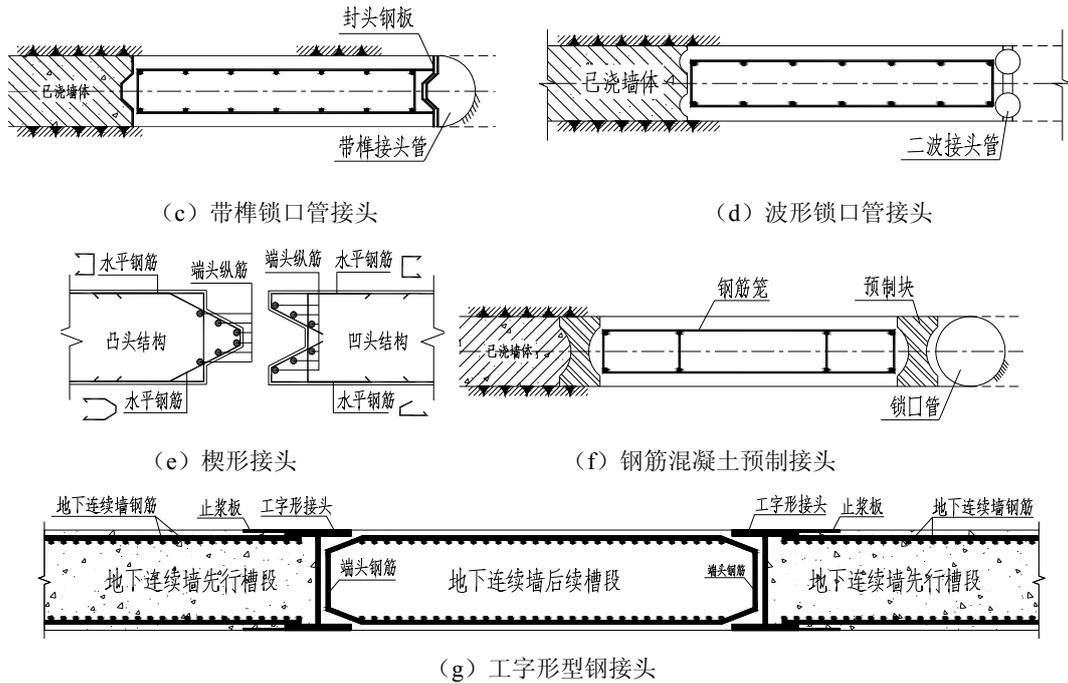
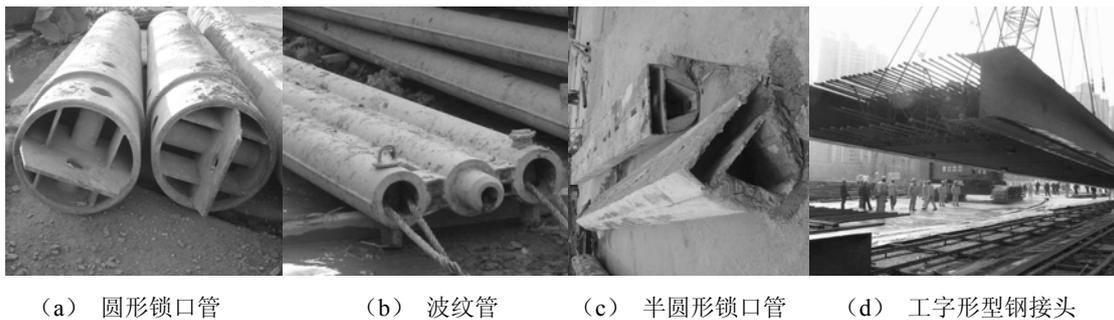


图 11-9 地下连续墙柔性施工接头形式



(a) 圆形锁口管 (b) 波纹管 (c) 半圆形锁口管 (d) 工字形型钢接头

图 11-10 施工接头（管）实物图

### 3. 刚性接头

刚性接头可传递槽段之间的竖向剪力，当槽段之间需要形成刚性连接时，常采用刚性接头。在工程中应用的刚性接头主要有一字或十字穿孔钢板接头、钢筋搭接接头和十字型钢插入式接头。

#### (1) 十字穿孔钢板接头

十字穿孔钢板接头是地下连续墙工程中最常用的刚性接头形式，是以开孔钢板作为相邻槽段间的连接构件，开孔钢板与两侧槽段混凝土形成嵌固咬合作用，可承受地下连续墙垂直接缝上的剪力，并使相邻地下连续墙槽段形成整体共同承担上部结构的竖向荷载，协调槽段的不均匀沉降；同时穿孔钢板接头亦具备较好的止水性能。十字钢板接头如图 11-11 (a) 所示。该刚性接头在地下连续墙设计中应用较为广泛，工艺较成熟。上海银行大厦、解放日报新闻中心、兰馨公寓、盛大中心等工程中均采用了十字钢板刚性接头。

采用十字穿孔钢板接头应注意以下几个问题：

- a. 为了防止混凝土浇筑过程中出现从侧面绕流，影响相邻槽段施工，十字穿孔钢板应沿槽段深度通长设置，且应嵌入槽底沉渣内一定深度，彻底隔断混凝土的绕流路径。对于设计上需要地下连续墙加深隔断地下水的槽段，应将钢筋笼加深至槽底，以固定十字钢板。

- b. 当采用十字穿孔钢板刚性接头时，如墙体钢筋笼超长，在钢筋笼吊装和沉放过程中用易出现十字穿孔钢板弯曲变形，而使十字钢板无法沿接头箱槽口顺利下行，影响钢筋笼沉放。因此在超过 40m 深的超深地下连续墙槽段中一般不宜采用十字穿孔钢板接头。
- c. 当地下连续墙采用“两墙合一”时，为了确保地下连续墙的防渗性能，在满足受力的条件下，十字钢板穿孔应尽量设置在基底以下，以减少地下连续墙基底以上渗漏的可能性。

(2) 钢筋搭接接头

钢筋搭接接头采用相邻槽段水平钢筋凹凸搭接，先行施工槽段的钢筋笼两面伸出搭接部分，通过采取施工措施，浇灌混凝土时可留下钢筋搭接部分的空间，先行槽段形成后，后施工槽段的钢筋笼一部分与先行施工槽段伸出的钢筋搭接，然后浇灌后施工槽段的混凝土。钢筋搭接接头平面形式如图 11-11 (b) 所示。这种连接形式在接头位置有地下连续墙钢筋通过（水平钢筋和纵向主筋），为完全的刚性连接。有关试验研究表明其结构连接刚度和接头抗剪能力均优于开孔钢板接头。日本道路协会《地下连续壁基础设计施工指针》中，依据不同的钢筋搭接长度及钢筋比以及钢筋的间隙所作的试验结果，建议接缝处的单位允许应力采用地下连续墙墙体允许应力的 80% 来设计。

(3) 十字型钢插入式接头

十字型钢插入式接头是在工字形型钢接头上焊接两块 T 形型钢，并且 T 形型钢锚入相邻槽段中，进一步增加了地下水的绕流路径，在增强止水效果的同时，增加了墙段之间的抗剪性能，形成的地下连续墙整体性好。十字型钢插入式接头如图 11-11 (c) 所示。

图 11-12 为几种刚性接头和接头箱的实物图。

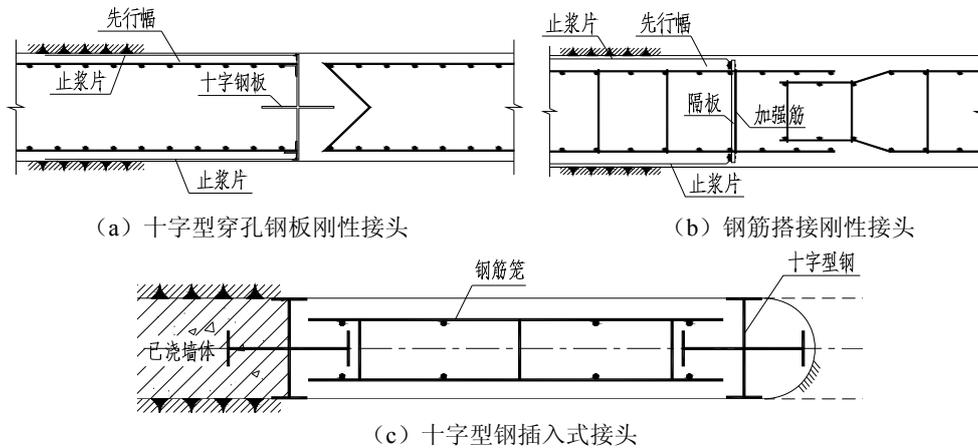


图 11-11 地下连续墙刚性施工接头



(a) 十字钢板接头

(c) 十字钢板接头箱

图 11-12 刚性接头及接头箱实物图

#### 4. 施工接头选用原则

由于地下连续墙施工接头种类和数量众多,在实际工程中在满足受力和止水要求的前提下,应结合地区经验尽量选用施工简便、工艺成熟的施工接头,以确保接头的施工质量:

- (1) 由于锁口管柔性施工接头施工方便,构造简单,一般工程中在满足受力和止水要求的条件下地下连续墙槽段施工接头宜优先采用锁口管柔性接头;当地下连续墙超深顶拔锁口管困难时建议采用钢筋混凝土预制接头或工字形型钢接头。
- (2) 当根据结构受力要求需形成整体或当多幅墙段共同承受竖向荷载,墙段间需传递竖向剪力时,槽段间宜采用刚性接头,并应根据实际受力状态验算槽段接头的承载力。

### 11.3 地下连续墙的施工

地下连续墙(简称地墙)的施工,就是在地面上先构筑导墙,采用专门的成槽设备,沿着支护或深开挖工程的周边,在特制泥浆护壁条件下,每次开挖一定长度的沟槽至指定深度,清槽后,向槽内吊放钢筋笼,然后用导管法浇注水下混凝土,混凝土自下而上充满槽内并把泥浆从槽内置换出来,筑成一个单元槽段,并依此逐段进行,这些相互邻接的槽段在地下筑成一道连续的钢筋混凝土墙体,以作承重、挡土或截水防渗结构之用。施工流程如图 11-13 所示。

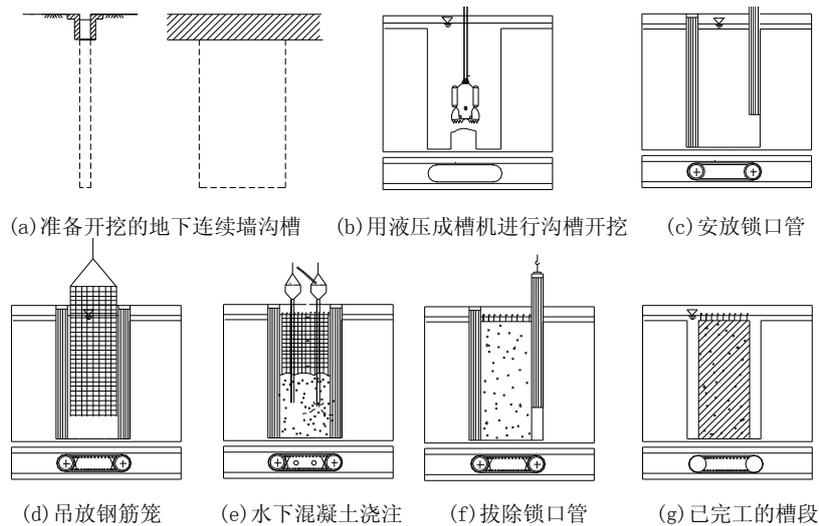


图 11-13 地下连续墙施工程序示意 (以液压抓斗式成槽机为例)

#### 11.3.1 国内主要成槽工法介绍

成槽工艺是地下连续墙施工中最重要工序,常常要占到槽段施工工期一半以上,因此做好挖槽工作是提高地下连续墙施工效率及保证工程质量的关键。随着对施工效率要求的不断提高,新设备不断出现,新的工法也在不断发展。目前国内外广泛采用的先进高效的地下连续墙成槽(孔)机械主要有抓斗式成槽机、液压铣槽机、多头钻(亦称为垂直多轴回转式成槽机)和旋挖式桩孔钻机等,其中,应用最广的要属液压抓斗式成槽机。

常用的成槽机械设备按其工作机理主要分为抓斗式、冲击式和回转式三大类,相应来说基本成槽工法也主要有三类:(1)抓斗式成槽工法;(2)冲击式钻进成槽工法;(3)回转式钻进成槽工法。

##### 1. 抓斗式成槽工法

抓斗式成槽机已成为目前国内地下连续墙成槽的主力设备,已拥有百多台(多数为进口设备)。抓斗挖槽机以履带式起重机来悬挂抓斗,抓斗通常是蚌(蛤)式的,根据抓斗的机

械结构特点分为钢丝绳抓斗、液压导板抓斗、导杆式抓斗和混合式抓斗。抓斗以其斗齿切削土体，切削下的土体收容在斗体内，从槽段内提出后开斗卸土，如此循环往复进行挖土成槽。该成槽工法在建筑、地铁等行业中应用极广，北京、上海、天津、广州等大城市的地下连续墙多采用这种工艺。如北京国家大剧院、上海金茂大厦、天津鸿吉大厦、南京新街口地铁车站、上海环球金融中心等工程的地下连续墙均采用抓斗法施工工艺。

使用抓斗成槽，可以单抓成槽，也可以多抓成槽，槽段幅长一般为 3.8~7.2m。单抓成槽，即一次抓取一个槽幅；多抓成槽，每个槽幅由三抓或多抓形成。通常单序抓的长度等于抓斗的最大开度（2.4m 左右），双序抓的长度小于抓斗最大开度。

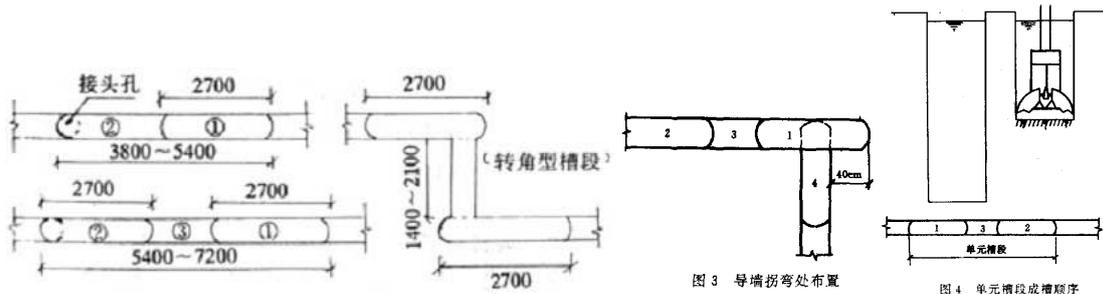


图 11-14 槽段长度与抓挖顺序示意

适用环境：地层适应性广，如  $N < 40$  的粘性土、砂性土及砾卵石土等。除大块的漂卵石、基岩外，一般的覆盖层均可。

优点：低噪音低振动；抓斗挖槽能力强，施工高效；除早期的蚌式抓斗索式导板抓斗外多设有测斜及纠偏装置（如纠偏液压推板）随时调控成槽垂直度，成槽精度较高（1/300 或更小）。

缺点：掘进深度及遇硬层时受限，降低成槽工效。需配合其它方法一道使用。

设备：钢丝绳抓斗—如意大利的土力（SOILMEC）和卡沙特兰地（Casagrande）公司、德国的宝峨（BAUER）、LEFFER 和 WIRTH 公司、日本真砂（MASAGO）公司均生产各型的钢丝绳抓斗；液压导板抓斗—如德国宝峨（BAUER）公司生产的 DHG 和 GB 两种类型，日本真砂（MASAGO）公司生产的 MHL 和 MEH（为超大型，最大闭斗力高达 1725kN，可在砂卵石地基开挖深达 150m 和厚大 3.0m 的地下墙）型，利伯海尔公司生产的 HSWG 抓斗；导杆式抓斗—如法国的 KELLY、意大利的 KRC 和日本的 CON 系列；混合式液压抓斗—如意大利土力（SOILMEC）公司的 BH-7/12 等和 MAIT 公司的 HR160 抓斗。

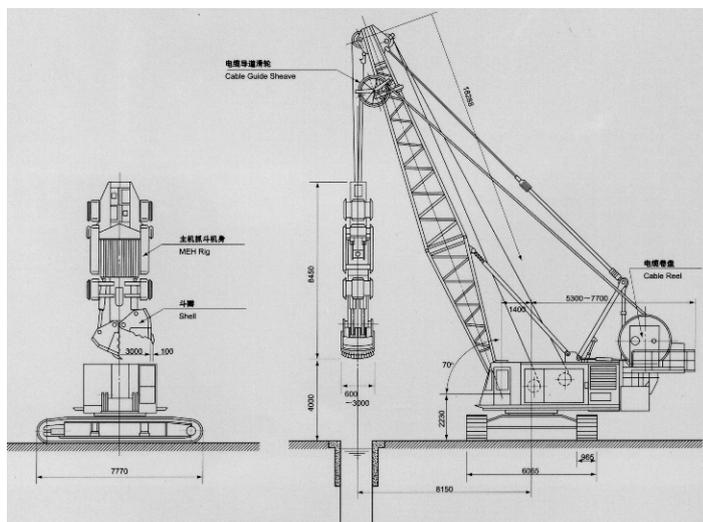


图 11-15 MEH 液压抓斗

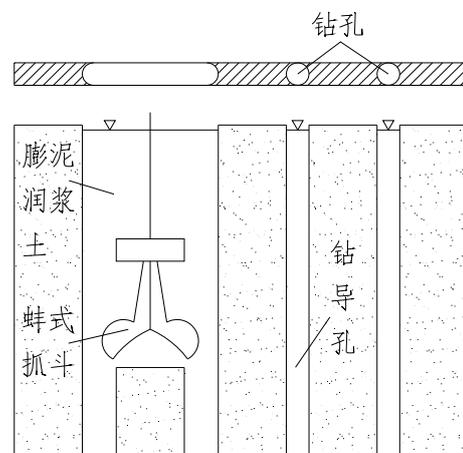


图 11-16 钻抓法示意图（三钻两抓）

## 2. 冲击式钻进成槽工法

世界上最早出现的地下连续墙是用冲击钻进工法(如意大利的依克斯(ICOS)法—冲击钻进、正循环出渣)建成的,我国也是这样。随着施工技术水平的不断提高,冲击钻进工法不再占主导地位。不过如将其与现代施工技术和设备相结合,冲击钻进工法仍然有不可忽视的优点。

国内冲击钻进成槽工法主要有冲击钻进式(钻劈法)和冲击反循环式(钻吸法)。冲击钻进法采用的是冲击破碎和抽筒掏渣(即泥浆不循环)的工法,即冲击钻机利用钢丝绳悬吊冲击钻头进行往复提升和下落运动,依靠其自身的重量反复冲击破碎岩石,然后用一只带有活底的收渣筒将破碎下来的土渣石屑取出而成孔。一般先钻进主孔,后劈打副孔,主副孔相连成为一个槽孔。

冲击反循环式是以冲击反循环钻机替代冲击钻机,在空心套筒式钻头中心设置排渣管(或用反循环砂石泵)抽吸含钻渣的泥浆,经净化后回至槽孔,使得排渣效率大大提高,泥浆中钻渣减少后,钻头冲击破碎的效率也大为提高,槽孔建造既可以用平打法,也可分主副孔施工。这种冲击反循环钻机的钻吸法工效大大高于老式冲击钻机的钻劈法。

适用环境:在各种土、砂层、砾石、卵石、漂石、软岩、硬岩中都能使用,特别适用于深厚漂石、孤石等复杂地层施工,在此类地层中其施工成本要远低于抓斗式成槽机和液压铣槽机。是国内水利部门在防渗墙施工中仍在使用的—种方法。

优点:施工机械简单,操作简便,成本低,不失为一种经济适用型工艺。

缺点:成槽效率低,成槽质量较差。

主要机型:冲击钻机主要有 YKC 型、CZ-22 和 CZ-30 型,冲击反循环钻机主要有 CZF 系列、CJF 系列、CIS-58 等。

在我国,冲击式钻机用于地下连续墙施工已有五十多年的历史了,冲击反循环钻机成墙深度最大达 101m(四川冶勒水电站),在长江三峡和润扬长江大桥等嵌岩地下连续墙工程中也发挥了重要作用。

## 3. 回转式成槽工法

回转式成槽机根据回转轴的方向分垂直回转式与水平回转式。

### (1) 垂直回转式

垂直式分垂直单轴回转钻机(也称单头钻)和垂直多轴回转钻机(也称多头钻)。单头钻主要用来钻导孔,多头钻多用来挖槽。

#### a. 单头钻

单头钻机多采用反循环钻进工艺,在细颗粒地层也可采用正循环出渣。由于钻进中会遇到从软土到基岩的各种地层,一般均配备多种钻头以适应钻进的需要。单轴回转钻机主要有:法国的 CIS-60、CIS-61、德国的 BG 和我国的 GJD、GPS、GQ 等。

还有一种是泥浆不循环的旋挖钻进工法,其工作原理是机器施加强大的动力(扭矩)使钻头、振动沉管、摇管、全套管等在回转过程中切削破碎岩(土)体,再用旋挖斗、螺旋钻、冲抓斗等设备直接挖土至孔外。主要机型有:法国索列旦斯公司的 CIS-71 型、意大利的 KCC 型和 MR-2 型、日本的 KPC-1200 和我国的 GJD-1500 等。

旋挖钻进工法中比较先进的是一种全回转式全套管钻进工法,其特点是在非常坚硬的地质条件下(即使是抗压强度大于 250MPa 的岩石)进行连续套管切割并确保钻进速度。主要机型有德国的 RDM 型和日本的 RT 型(上海基础公司 2006 年引进 RT-200AIII 型全回转全套管钻机,用于外滩十六铺地区综合改造工程中施工穿越江边深厚卵石层的地下连续墙的清障处理,效果较好),其在地下连续墙领域的应用有待进一步挖掘潜力。

#### b. 多头钻

垂直多头回转钻是利用两个或多个潜水电机，通过传动装置带动钻机下的多个钻头旋转，等钻速对称切削土层，用泵吸反循环的方式排渣进入振动筛，较大砂石、块状泥团由振动筛排出，较细颗粒随泥浆流入沉淀池，通过旋流器多次分离处理排除，清洁泥浆再供循环使用。多头钻一次下钻挖成的幅段称为掘削段，几个掘削段构成一个单元槽段。

适用环境： $N < 30$  的粘性土、砂性土等不太坚硬的细颗粒地层。深度可达 40m 左右。

优点：施工时无振动无噪音，可连续进行挖槽和排渣，不需要反复提钻，施工效率高，施工质量较好，垂直度可控制在 1/200~1/300 之间。在上世纪 80 年代前期应用较多，是一种较受欢迎的施工方法。

缺点：在砾石卵石层中及遇障碍物时成槽适应性欠佳。

设备：主要机型有日本的 BW 系列（目前国外仅此一家生产，BWN 型最深挖深已达 130m，墙厚达 1.5m）、我国的 SF 型（上海基础公司上世纪 70 年代后期研制成功，SF-60/SF-80）和 ZLQ 等。多头钻近年来已受到挑战，逐渐为抓斗及水平多轴回转钻机（铣槽机）所替代，但对于土砂等细颗粒地层仍有其市场。

### c. 水平回转式—铣槽机

水平多轴回转钻机，实际上只有两个轴（轮），也称为双轮铣成槽机。根据动力源的不同，可分为电动和液压两种机型。铣槽机是目前国内外最先进的地下连续墙成槽机械，最大成槽深度可达 150m，一次成槽厚度在 800mm~2800mm 之间。

优点：

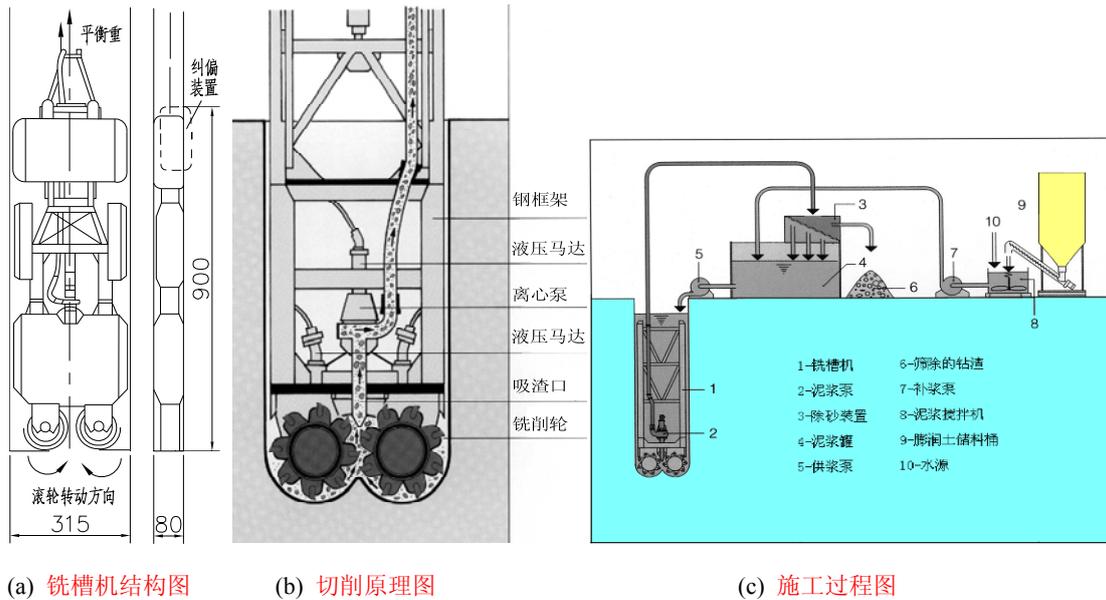
- (a) 对地层适应性强，淤泥、砂、砾石、卵石、中等硬度岩石等均可掘削，配上特制的滚轮铣刀还可钻进抗压强度为 200MPa 左右的坚硬岩石；
- (b) 施工效率高，掘进速度快，一般沉积层可达 20~40m<sup>3</sup>/h（较之抓斗法高 2~3 倍），中等硬度的岩石也能达 1~2m<sup>3</sup>/h。
- (c) 成槽精度高，利用电子测斜装置和导向调节系统、可调角度的鼓轮旋铣器，可使垂直度高达 1‰~2‰。
- (d) 成槽深度大，一般可达 60m，特制型号可达 150m；
- (e) 能直接切割混凝土，在一、二序槽的连接中不需专门的连接件，也不需采取特殊封堵措施就能形成良好的墙体接头；
- (f) 设备自动化程度高，运转灵活，操作方便。以电子指示仪监控全施工过程，自动记录和保存测斜资料，在施工完毕后还可全部打印出来作工程资料；
- (g) 低噪音、低振动，可以贴近建筑物施工。

局限性：

- (a) 设备价格昂贵、维护成本高；
- (b) 不适用于存在孤石、较大卵石等地层，需配合使用冲击钻进工法或爆破。
- (c) 对地层中的铁器掉落或原有地层中存在的钢筋等比较敏感。

铣槽机性能优越，在发达国家已普遍采用，受施工成本、设备数量限制（我国自从 1997 年长江三峡工程引进首台后，至今社会保有量约 10 台不到），目前还未在国内全面推广。日本利用铣槽机完成了大量超深基础工程，最深已达 150 m，厚度达 2.8~3.2 m，试验开挖深度已达 170 m。国内利用铣槽机已成功施工了三峡工程、深圳地铁车站（嵌微风化岩地墙）、南京紫峰大厦、上海 500kV 世博变电站等多个工程。

设备：液压式有德国宝峨（BAUER）公司的 BC 型（在我国市场占有率较大）、法国的 HF 型、意大利卡沙特兰地（Casagrande）公司的 K3 和 HM 型、日本的 TBW 型等；电动式有日本利根公司的 EM、EMX 型等。



(a) 铣槽机结构图 (b) 切削原理图 (c) 施工过程图

图 11-17 铣槽机工作原理图

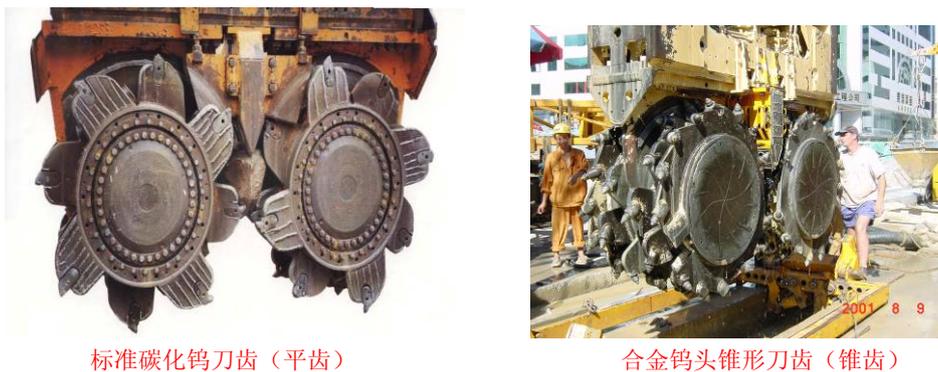
1-铣槽机；2-离心吸泥泵；3-除砂机；4-泥浆箱；5-供浆泵；6-分离出的钻渣；7-补浆泵；8-泥浆搅拌机；9-膨润土筒仓；10-水源

(1) 铣槽机工作原理

设备主要由三部分组成：起重设备（履带吊）、铣槽机（铣刀架，12m 高）、泥浆制备及筛分系统等。

其工作原理是：以动力驱使安装在机架上的两个鼓轮（也称铣轮）向相互反向旋转来削掘岩（土）并破碎成小块，利用机架自身配置的泵吸反循环系统将钻掘出的土岩渣与泥浆混合物通过铣轮中间的吸砂口抽吸出排到地面专用除砂设备进行集中处理，将泥土和岩石碎块从泥浆中分离，净化后的泥浆重新抽回槽中循环使用，如此往复，直至终孔成槽。图 11-17 所示为液压双轮铣工作原理图。

铣轮刀可根据不同地层相应选配，其形式主要有三类：标准碳化钨刀齿（平齿）、合金镶钨钢头的锥形刀齿（锥齿）和配滚动式钻头的轮状削掘齿（滚齿），分别适用于最大抗压强度为 60MPa、140MPa 及 250MPa 的岩石挖掘。



标准碳化钨刀齿（平齿）

合金钨头锥形刀齿（锥齿）

图 11-18 铣轮刀图片

(2) 单元槽段划分原则与刀法设计

根据铣槽机的成槽特点，以 BC 型为例，两个铣轮张开最大时（称 1 个满刀）铣削头长度为 2.8m，闭合刀的范围在 0.8~1.6m 间。当开挖土（岩）体为以下两种情况时为铣槽机的适宜工作环境：

- a、预开挖土体两侧均未开挖，此时预开挖土（岩）体尺寸 B=2.8m（1 个满刀）；

b、预开挖土(岩)体两侧均已开挖,此时铣销机预开挖土(岩)体尺寸  $B$  须在  $800\sim 1600$  (一个闭合刀) 之间,且成槽施工时应尽量使铣轮中心与土(岩)体中心吻合,避免由于偏心而使成槽施工时铣轮产生水平偏移,从而保证铣削效果。

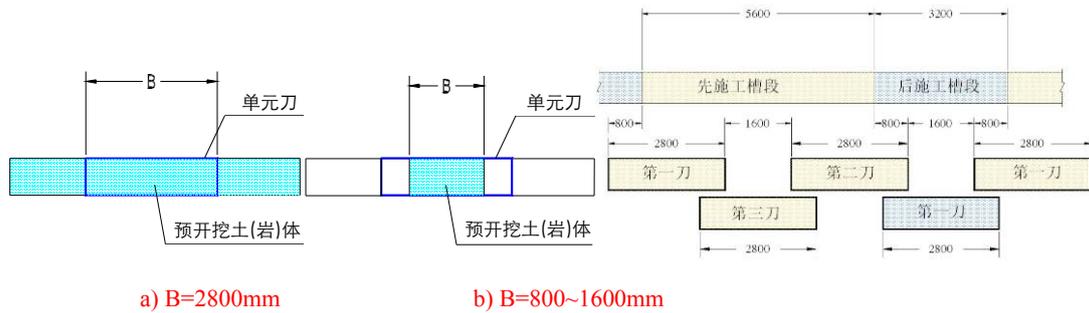


图 11-19 铣槽机刀法示意 (a-满刀; b-闭合刀)

图 11-20 标准刀法大样图

由于铣槽机对预开挖土体的特殊要求,相应对单元槽段尺寸划分提出了一定要求,由下标准刀法大样图可看出,考虑适当的预挖区搭接长度,单元槽段划分长度在  $2.8\sim 5.6\text{m}$  比较合适。通常一序槽(先施工槽段)以三刀成槽,槽段划分长度较长,二序槽(后施工槽段)以一刀成槽,槽段划分长度较短,有时一序槽也可以一刀成槽。

### (3) 铣接头

铣槽机成槽槽段之间的连接有一种比较有特色的方法,称为“铣接法”,如图 11-21 所示。即在进行一序槽段开挖时,超出槽段接缝中心线  $10\text{cm}\sim 25\text{cm}$ ,二序槽段开挖时,在两个一序槽段中间下入铣槽机,铣掉一序槽段超出部分的混凝土以形成锯齿形搭接,形成新鲜的混凝土接触面,然后浇筑二序槽混凝土。

由于有铣刀齿的打毛作用,使得二序槽混凝土可以很好地与一序槽混凝土相结合,密水性能好,形成了一种较为理想的连续墙接头形式,称为“铣接头”(或套铣接头)。铣槽机切削形成的一期混凝土表面如图 11-22 所示。

铣接头施工工艺简单,方法成熟,出现事故的几率很低。在国内外大型地下连续墙项目中得到了广泛的采用。铣接法还有一个显著的特点就是省去了接头管(箱)吊放及顶拔环节,避免了接头管拔断或埋管的风险。对于超深地下连续墙的施工可以说是一个利好因素。

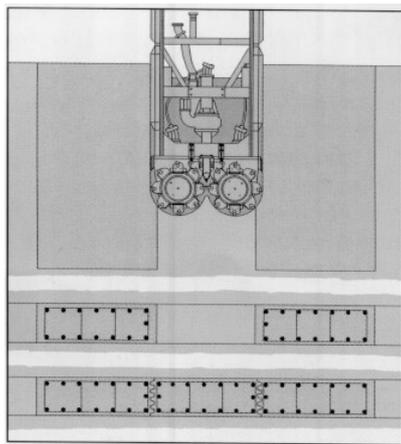


图 11-21 铣接法施工示意图

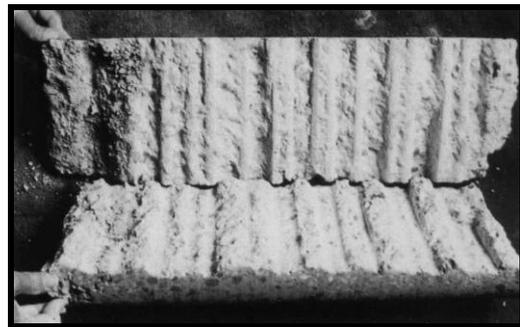


图 11-22 铣槽机切削形成的一期混凝土表面

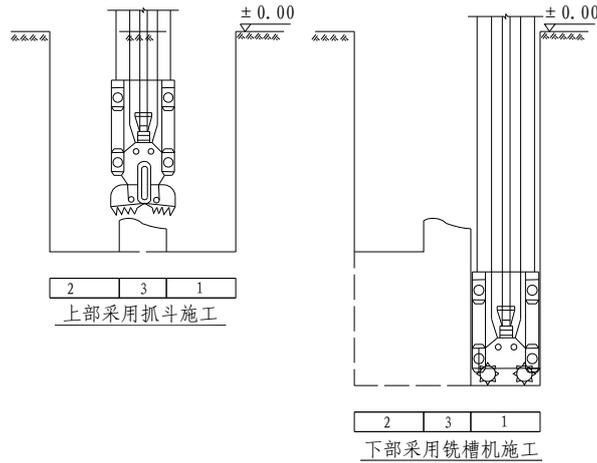


图 11-23 抓铣结合成槽工艺示意图

国内利用铣槽机施工的槽段接头形式还有工字钢（H 型钢）刚性接头，如深圳地铁老街站及上海世博 500kV 变电站工程等。目前正在建的上海第一高楼—上海中心工程中的地墙接头就采用了型钢接头和套铣接头两种形式，其中铣接头是该地区的首次应用。

总之，铣槽机作为一种先进的地下连续墙成槽设备，其突出优点是在硬层中的施工速度远远快于传统施工工艺并且施工精度高。相信随着不断的市场拓展和国产化深化预期，必将成为地下工程施工设备中的中坚力量。

#### 四、成槽工法组合

随着城市地下空间开发利用朝着大深度发展的态势，地下连续墙作为一种重要的深基础形式与深基坑围护结构，也有了越做越深、越做越厚的趋势，相应穿越地层也越来越复杂。在复杂地层中的成槽施工，也由单一的纯抓、纯冲、纯钻、纯铣工法等发展到采用多种成槽工法的组合工艺，后者相比前者往往能起到事半功倍的作用—效率高、成本低、质量优。

主要的工法组合有抓斗还可以和冲击钻或钻机配合使用形成“抓冲法”或“钻抓法”（如两钻一抓、三钻两抓或四钻三抓等）。“抓冲法”以冲击钻钻凿主孔，抓斗抓取副孔，这种方法可以充分发挥两种机械的优势，冲击钻可以钻进软硬不同的地层，而抓斗取土效率高，抓斗在副孔施工遇到坚硬地层时随时可换上冲击钻或重凿（“抓凿法”）克服。此法可比单用冲击钻成槽显著提高工效 1~3 倍，地层适应性也广。“钻抓法”是以钻机（如潜水电钻）在抓斗幅宽两侧先钻两个导孔，再以抓斗抓取两孔间土体，效果较好。早期的蚌式抓斗索式导板抓斗由于没有纠偏装置，多是利用钻抓法来进行成槽的，以导孔的垂直度来直接控制成槽的垂直度。

随着铣槽机的应用，出现了“抓铣结合”、“钻铣结合”、“铣抓钻结合”等新工法组合。如上海 500kV 世博变电站地下连续墙施工中（墙深 57.5m/墙厚 1.2m）采用了“抓铣结合”工法组合，该工艺即是一对于上部软弱土层采用抓斗成槽机成槽，进入硬土层（或软岩层）后采用铣槽机铣削成槽，大幅度提高了成槽掘进效率，并在铣槽机下槽的过程中对上部已完成的槽壁进行修整，确保整个槽壁垂直度达到要求。三峡二期上游围堰防渗墙深达 73.5m 的槽段，采用的就是“铣抓钻结合”工法组合，即上部风化砂用液压铣铣削，中部砂卵石用抓斗抓取，下部块球体及基岩用冲击反循环钻进，三种工法扬长避短，确保了成槽质量和进度。

在硬岩、孤石等坚硬地层中，发展的组合工法有“钻凿法”和“凿铣法”等。“钻凿法”是用 8~12t 的重凿冲凿并与冲击反循环钻机相配合的一种工艺，如在润扬长江大桥北锚碇地墙工程中（墙深 56m/墙厚 1.2m），这种工法取得了在硬岩中施工效率较高，成本低的

效果，宜很有推广价值。而“凿铣法”是用重凿冲凿与液压铣槽机配合的一种工艺，其优点是成槽质量好，噪音低，适合城市施工作业。

### 11.3.2 施工工艺与操作要点

地下连续墙施工工艺流程见图 11-24。其中导墙砌筑、泥浆制备与处理、成槽施工、钢筋笼制作与吊装、混凝土浇筑等为主要工序。

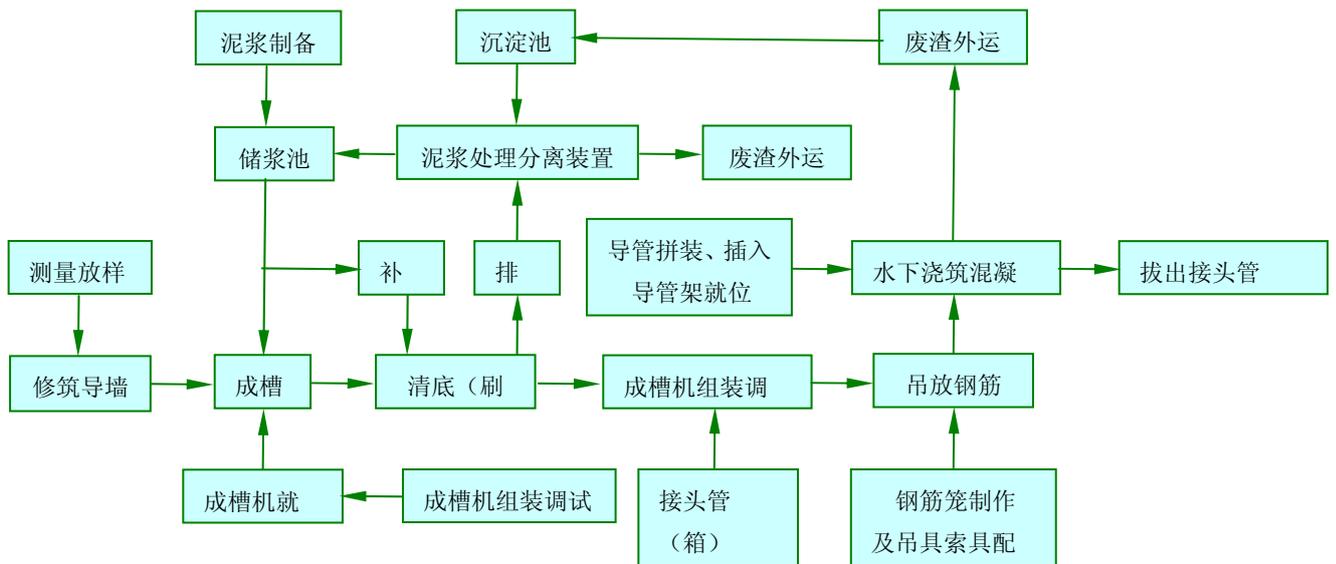


图 11-24 地下连续墙工艺流程图

#### 一、导墙施工

##### 1. 导墙的作用

地下连续墙在成槽前，应构筑导墙，导墙质量的好坏直接影响到地下连续墙的轴线和标高控制，应做到精心施工，确保准确的宽度、平直度和垂直度。

导墙的作用是：a)测量基准、成槽导向；b)存储泥浆、稳定液位，维护槽壁稳定；c)稳定上部土体，防止槽口坍方；d)施工荷载支承平台—承受诸如成槽机械、钢筋笼搁置点、导管架、顶升架、接头管等重载动载。

##### 2. 导墙的形式

导墙多采用现浇钢筋混凝土结构，也有钢制的或预制钢筋混凝土的装配式结构，可供多次使用。根据工程实践，预制式导墙较难做到底部与土层结合以防止泥浆的流失。

导墙断面常见的有三种形式：倒 L 形、“J”形及 L 形。倒 L 形多用在土质较好土层，后两者多用在土质略差土层，底部外伸扩大支承面积。

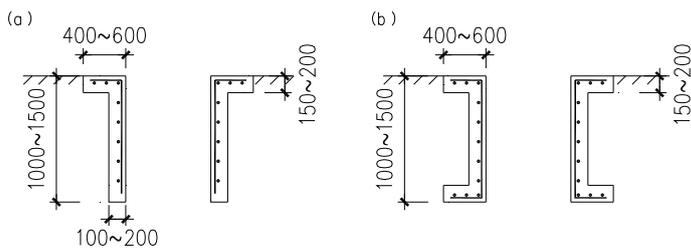


图 11-25 常见导墙断面形式图

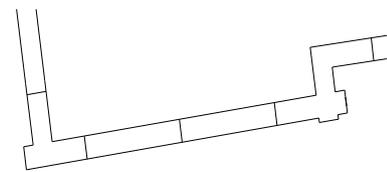


图 11-26 导墙转角外放处理图

### 3. 施工要点及质量要求

(1) 导墙多采用 C20~C30 钢筋混凝土，双向配筋  $\Phi 8\sim 16@150\sim 200$ 。现浇导墙施工流程为：平整场地→测量定位→挖槽→绑扎钢筋→支模板→浇筑混凝土→拆模及设置横撑。内外导墙间净距比设计地墙厚度大 40~60mm，肋厚 150~300mm，高 1.2~1.5m，墙底进入原土 0.2m。

(2) 导墙要对称浇筑，强度达到 70%后方可拆模。拆除后立即设置上下二道 10cm 直径圆木（或 10cm 见方方木）支撑，防止导墙向内挤压，支撑水平间距 1.5~2.0m，上下为 0.8~1.0m。

(3) 导墙外侧填土应以粘土分层回填密实，防止地面水从导墙背后渗入槽内，并避免被泥浆掏刷后发生槽段坍塌。

(4) 导墙顶墙面要水平，内墙面要垂直，底面要与原土面密贴。墙面不平整度小于 5mm，竖向墙面垂直度应不大于 1/500。内外导墙间距允许偏差 $\pm 5$ mm，轴线偏差 $\pm 10$ mm。

(5) 混凝土养护期间成槽机等重型设备不应在导墙附近作业停留，成槽前支撑不允许拆除，以免导墙变位。

(6) 导墙在地墙转角处根据需要外放 200mm~500mm（如图 11-26），成 T 形或十字形交叉，使得成槽机抓斗能够起抓，确保地墙在转角处的断面完整。

### 二、护壁泥浆

泥浆是地下连续墙施工中成槽槽壁稳定的关键，泥浆主要起到护壁、携渣、冷却机具和切土润滑的作用。

#### 1. 泥浆材料发展

泥浆材料的使用随着成槽工艺的发展主要有三类：粘土泥浆、膨润土泥浆和超级泥浆。

早期六七十年代制浆材料多是就地采用粘土（如黄粘土、红粘土等），这是与当时的冲击钻进工艺相适应的，浆液密度大，便于钻渣悬浮，材料成本低廉。

进入八十年代后，随着抓斗等先进成槽设备和新工艺的大量使用，粘土泥浆因密度大而不适用，护壁泥浆的制浆材料主体已经变为膨润土，这是一种以蒙脱石为主要成分的矿物原料，制出的浆液密度小、粘度高、失水量小，所形成的泥皮致密坚韧，护壁效果好，同时泥浆可通过循环系统及专门除砂除泥设备进行净化回收和重复使用，在成本上可与低廉的粘土泥浆相媲美。

近十多年来，一种不加（或掺很少量）膨润土粉的超级泥浆（Super Mud）材料开始进入我国，这是一种以聚丙烯酰胺（Polyacrylamide）为主材的高分子聚合物材料，遇水之后产生膨胀作用，提高粘度的同时可在槽壁表面形成一层坚韧的胶膜，防止槽壁坍塌。它制得的泥浆（称超泥浆或 SM 泥浆）无毒，不会产生公害，且不与槽段开挖出的土砂发生物理和化学反应，不产生大量的废泥浆，钻渣含水量小，可以直接装车运走，故称其为环保泥浆。这种泥浆已经在上海（1996 年试验性应用）、北京（1993 年）和长江堤防等工程中试用，固壁效果良好，确有环保效应，具有一定推广价值。目前的问题是，如何使这一产品国产化，并提高其重复利用率，从而降低成本，以提高市场竞争力。

#### 2. 泥浆配制

目前工程中较大量使用的主要是膨润土泥浆，本节将作主要介绍。

##### (1) 配合比

膨润土泥浆是将以膨润土为主、CMC（羧甲基纳纤维素，又称人造糨糊，增粘剂、降失水剂）、纯碱（ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ，分散剂）等为辅的泥浆制备材料，利用 PH 值接近中性的水（自来水）按一定比例进行拌制而成。膨润土品种和产地较多，应通过试验选择。

不同地区、不同地质水文条件、不同施工设备，对泥浆的性能指标都有不同的要求，为了达到最佳的护壁效果，应根据实际情况由试验确定泥浆最优配合比。一般软土地层中可按

下列重量配合比试配：水：膨润土：CMC：纯碱=100：（8~10）：（0.1~0.3）：（0.3~0.4）。泥浆指标控制表如表 11-1 所示。

泥浆质量的控制指标 表 11-1

泥浆性能	新配制		循环泥浆		废弃泥浆		检验方法
	粘性土	砂性土	粘性土	砂性土	粘性土	砂性土	
比重	1.04~1.05	1.06~1.08	<1.15	<1.25	>1.25	>1.35	比重计
黏度 (s)	20~24	25~30	<25	<35	>50	>60	漏斗粘度计
含砂率 (%)	<3	<4	<4	<7	>8	>11	洗砂瓶
PH 值	8~9	8~9	>8	>8	>14	>14	试纸
胶体率 (%)	>98	>98	-	-	-	-	量杯法
失水量	<10mL/30min	<10mL/30min	<20mL/30min	<20mL/30min	-	-	失水量仪
泥皮厚度	<1mm	<1mm	<2.5mm	<2.5mm	-	-	

在特殊的地质和工程的条件下，泥浆的比重需加大，单靠增加膨润土的用量不行时，可在泥浆中掺入一些比重大的掺合物如重晶石粉，达到增大泥浆比重的目的。同时，在透水性大的砂或砂砾层中，出现泥浆漏失现象，可掺入锯末、稻草末等堵漏剂，达到堵漏的目的。

泥浆应经过充分搅拌，常用方法有：低速卧式搅拌机搅拌、螺旋浆式搅拌机搅拌、压缩空气搅拌、离心泵重复循环。新配制的泥浆应静置 24h 以上，使膨润土充分水化后方可使用，使用中应经常测定泥浆指标。成槽结束时要对泥浆进行清底置换，不达标的泥浆应按环保规定予以废弃。

## (2) 泥浆拌制

### a. 泥浆池

泥浆池位置以不影响连续墙施工为原则，泥浆输送距离不宜超过 200m，否则应在适当地点设置泥浆回收接力池。泥浆池分搅拌池、储浆池、重力沉淀池及废浆池等，其总容积为单元槽段体积的 3~3.5 倍左右。

### b. 泥浆搅拌

制备泥浆用搅拌机搅拌或离心泵重复循环搅拌，并用压缩空气助拌。制备泥浆的投料顺序，一般为水、膨润土、CMC、分散剂、其他外加剂，过程为：搅拌机加水旋转后缓慢均匀地加入膨润土（7~9min）；慢慢地分别加入 CMC、纯碱和一定量的水充分搅拌后的溶液（搅拌 7~9min，静置 6h 以上）倒入膨润土溶液中再搅拌均匀。搅拌后抽入储浆池待溶胀 24h 后使用。制备膨润土泥浆一定要充分搅拌并溶胀充分，否则会影响泥浆的失水量和粘度。

### c. 泥浆储备量

泥浆的储备量按最大单元槽段体积的 1.5~2 倍考虑（工程经验）；或按考虑泥浆损失的如下经验公式进行估算：

$$Q = \frac{V}{n} + \frac{V}{n} \left(1 - \frac{K_1}{100}\right)(n-1) + \frac{K_2}{100} V \quad (11-1)$$

式中：Q—泥浆总需要量(m<sup>3</sup>)；V—设计总挖土量(m<sup>3</sup>)；n—单元槽段数量；K<sub>1</sub>—浇筑混凝土时的泥浆回收率(%)，一般为 60%~80%；K<sub>2</sub>—泥浆消耗率(%)，一般为 10%~20%，包括泥浆循环、排水、形成泥皮、漏浆等泥浆损失。

## 3. 泥浆处理

地墙成槽至成墙过程中，泥浆要与地下水、砂、土、混凝土等接触，膨润土、外加剂等成分会有所消耗，而且混入的一些土渣和电解质离子等，使泥浆受到污染而质量恶化。

泥浆处理方法通常因成槽方法而异。对于有泥浆循环的挖槽方法（如钻吸法、回转式成槽工法），在挖槽过程中就要处理含有大量土渣的泥浆，以及混凝土浇筑所置换出来的泥浆；而对于直接出渣挖槽方法（如抓斗式成槽工法），在挖槽过程中无需进行泥浆处理，而只处理混凝土浇筑置换出的泥浆。因此泥浆处理分为土渣的分离处理(物理再生处理)和污染泥浆的化学处理(化学再生处理)，其中物理处理又分重力沉淀和机械处理两种，重力沉降处理是利用泥浆与土渣的比重差使土渣产生沉淀的方法，机械处理是使用专用除砂除泥装置回收。

泥浆再生处理用重力沉淀、机械处理和化学处理联合进行效果最好。

从槽段中回收的泥浆经振动筛除去其中较大的土渣，进入沉淀池进行重力沉淀，再通过旋流器分离颗粒较小的土渣，若还达不到使用指标，再加入掺加物进行化学处理。化学处理一般规则见表 11-2。

混凝土浇筑置换出来的泥浆，因水泥浆中含有大量钙离子，会使泥浆产生凝胶化，一方面使得泥浆的泥皮形成性能减弱，槽壁稳定性较差；另一方面使得泥浆粘性增高，土渣分离困难，在泵和管道内的流动阻力增大。对这种恶化了的泥浆（PH≤11）要进行化学处理。化学处理一般用分散剂，经化学处理后再进行土渣分离处理。通常槽段最后 2~3m 左右浆液因污染严重而直接废弃。处理后的泥浆经指标测试，根据需要可再补充掺入泥浆材料进行再生调制，并与处理过的泥浆完全融合后再重复使用。

化学调浆的一般规则 表 11-2

调整项目	处理方法	对其他性能的影响
增加粘度	加膨润土	失水量减小，稳定性、静切力、比重增加
	加 CMC	失水量减小，稳定性、静切力增加，比重不变
	加纯碱	失水量减小，稳定性、静切力、PH 值增加，比重不变
减少粘度	加水	失水量增加，比重、静切力减小
增加比重	加膨润土	粘度、稳定性增加
减少比重	加水	粘度、稳定性减小，失水量增加
增加静切力	加膨润土和 CMC	粘度、稳定性增加，失水量减小
减少静切力	加水	粘度、比重减小，失水量增加
减少失水量	加膨润土和 CMC	粘度、稳定性增加
增加稳定性	加膨润土和 CMC	粘度增加，失水量减小

注：泥浆稳定性是指在地心引力作用下，泥浆是否容易下沉的性质。测定泥浆稳定性常用“析水性试验”和“上下比重差试验”。对静置 1h 以上的泥浆，从其容器的上部 1/3 和下部 1/3 处各取出泥浆试样，分别测定其密度，如两者没有差别则泥浆质量合格。

#### 4. 泥浆控制要点及质量要求

(1) 严格控制泥浆液位，确保泥浆液位在地下水位 0.5m 以上，并不低于导墙顶面以下 0.3m，液位下落及时补浆，以防槽壁坍塌。在容易产生泥浆渗漏的土层施工时，应适当提高泥浆粘度和增加储备量，并备堵漏材料。如发生泥浆渗漏，应及时补浆和堵漏，使槽内泥浆保持正常。

(2) 在施工中定期对泥浆指标进行检查测试，随时调整，做好泥浆质量检测记录。一般做法是：在新浆拌制后静止 24h，测一次全项目；在成槽过程中，一般每进尺 1~5m 或每 4h 测定一次泥浆比重和粘度；挖槽结束及刷壁完成后，分别取槽内上、中、下三段的泥浆进行比重、粘度、含砂率和 PH 值的指标设定验收，并作好记录。在清槽结束前测一次比重、粘度；浇灌混凝土前测一次比重。后两次取样位置均应在槽底以上 200mm 处。失水量和 PH

值，应在每槽孔的中部和底部各测一次。含砂量可根据实际情况测定。稳定性和胶体率一般在循环泥浆中不测定。

(3) 在遇有较厚粉砂、细砂地层(特别是埋深 10m 以上)时，可适当提高粘度指标，但不宜大于 45s；在地下水位较高，又不宜提高导墙顶标高的情况下，可适当提高泥浆比重，但不宜超过 1.25 的指标上限，并采用掺加重晶石的技术方案。

(4) 减少泥浆损耗措施：①在导墙施工中遇到的废弃管道要堵塞牢固；②施工时遇到土层空隙大、渗透性强的地段应加深导墙。

(5) 防止泥浆污染措施：①灌注混凝土时导墙顶加盖板阻止混凝土掉入槽内；②挖槽完毕应仔细用抓斗将槽底土渣清完，以减少浮在上面的劣质泥浆数量；③禁止在导墙沟内冲洗抓斗。④不得无故提拉浇注混凝土的导管，并注意经常检查导管水密性。

### 三、槽壁稳定性分析

地下连续墙施工保持槽壁稳定性防止槽壁坍塌十分关键。一旦发生坍塌，不仅可能造成“埋机”危险、机械倾覆，同时还将引起周围地面沉降，影响到邻近建筑物及管线安全。如坍塌发生在钢筋笼吊放后或浇筑混凝土过程中，将造成墙体夹泥缺陷，使墙体内外贯通。

#### 1. 槽壁失稳机理

槽壁失稳机理主要可以分为两大类：整体失稳和局部失稳。如图 11-27 所示。

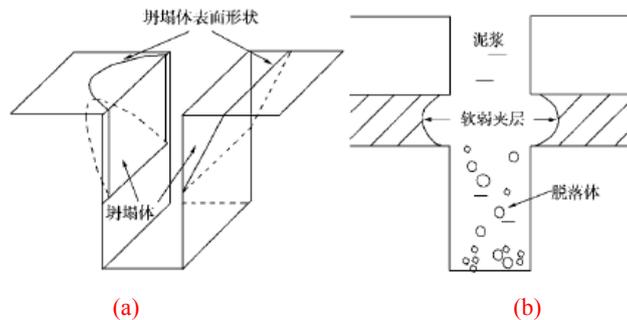


图 11-27 槽壁失稳示意图图 (a-整体失稳；b-局部失稳)

#### (1) 整体失稳

经事故调查以及模型和现场试验研究发现，尽管开挖深度通常都大于 20 m，但失稳往往发生在表层土及埋深约 5~15 m 内的浅层土中，槽壁有不同程度的外鼓现象，失稳破坏面在地表平面上会沿整个槽长展布，基本呈椭圆形或矩形。因此，浅层失稳是泥浆槽壁整体失稳的主要形式。

#### (2) 局部失稳

在槽壁泥皮形成以前，槽壁局部稳定主要靠泥浆外渗产生的渗透力维持。当诸如在上部存在软弱土或砂性较重夹层的土层中成槽时，遇槽段内泥浆液面波动过大或液面标高急剧降低时，泥浆渗透力无法与槽壁土压力维持平衡，泥浆槽壁将产生局部失稳。引起超挖现象。导致后续灌注混凝土的充盈系数增大，增加施工成本和难度（如图 11-28 所示，俗称“大肚皮”现象，开挖暴露后要行凿除）。



图 11-28 槽壁局部坍塌混凝土“鼓肚子”图片

## 2. 影响槽壁稳定因素

影响槽壁稳定的因素可分为内因和外因两方面：内因主要包括地层条件、泥浆性能、地下水位以及槽段划分尺寸、形状等；外因主要包括成槽开挖机械、开挖施工时间、槽段施工顺序以及槽段外场地施工荷载等。

泥浆护壁的主要机理是泥浆通过在地层中渗透在槽壁上形成泥皮，并在压力差(泥浆液面与地下水液面的差值)的作用下，将有效作用力(泥浆柱压力)作用在泥皮上以抵消失稳作用力从而保证槽壁稳定。

### (1) 内因

地层的级配和颗粒粒径会影响泥浆向槽壁周围地层的渗透、泥皮的形成及其厚度，从而影响槽壁性。颗粒孔隙较大的地层（如松散填土、砂性土中），泥浆在地层中渗透路径过长，容易流失，发生漏浆，不利于泥浆颗粒形成泥皮，从而降低了稳定性。

泥浆性能对槽壁稳定起着至关重要的作用。从泥浆护壁机理可以看出，其必须具备两个条件才能达到护壁效果，一是必须形成一定高差的泥浆液柱压力，二是泥浆在渗透的作用下形成一定厚度的泥皮。因此在施工中应适当调整泥浆容重、并尽量提高泥浆液面的高度与及时补浆以保持槽壁的稳定；另一方面尽快形成薄而韧、抗渗性好、抗冲击能力强的泥皮对泥浆的粘度、失水量、含砂量等也提出了一定的要求。失水量小的泥浆在槽壁形成的泥皮薄而致密，质量高，有利于槽壁稳定。反之，泥皮厚而软，护壁效果就差。

地下水位的高低直接影响着泥浆护壁的有效作用力(泥浆液面与地下水位面的高差)的大小。压差小，泥浆渗透缓慢，渗透时间长，则泥皮不易形成，不利于槽壁的稳定；反之，则有利于槽壁的稳定。实践也证明，降低地下水位措施能有效提高成槽槽壁稳定性。

槽段分幅宽度是影响槽壁稳定性的主要因素，通常适宜幅宽在 5~7m 内。相比而言，槽段深度对稳定性的影响并不显著。单元槽段宽深比的大小影响土拱效应的发挥，宽深比越大，土拱效应越小，槽壁越不稳定。

### (2) 外因

#### 1) 开挖机械

成槽机械影响槽壁稳定性与机械撞击有关。如用抓斗进行成槽，抓斗上下移动时对槽壁的撞击作用打，而用潜水电钻等反循环钻孔方法对槽壁的撞击作用小。

#### 2) 地面超载

若成槽过程中有超载的情况下对槽壁的稳定亦是有影响，负孔隙水压力值远大于无超载时负孔隙水压力。另一方面，由于超载的存在大大加大了槽壁及其附近的土体的剪应力值，就有可能超过破坏线，从而使槽壁附近的土体破坏。

#### 3) 开挖时间

成槽的开挖时间对土体暴露期间及整个施工阶段的槽段变形有着显著影响,随着成槽开挖时间的延长，槽段内土体变形将随时间的推移而加大，控制成槽时间也是槽壁稳定的关键因素。

#### 4) 施工顺序

先后施工的两个槽段应尽量隔开一定的距离，以减少各槽段成槽之间的相互影响，避免槽壁坍塌。

## 3. 槽壁稳定验算

### (1) 槽壁稳定计算

泥浆对槽壁的支撑可借助于楔形土体滑动的假定所分析的结果进行计算。

地墙在黏性土层内成槽。当槽内充满泥浆时，槽壁将受到泥浆的支撑护壁作用，此时泥浆使槽壁保持相对稳定。假定槽壁上部无荷载，且槽壁面垂直，其临界稳定槽深宜采用梅耶霍夫(G.G.Meyerhof)经验公式：

$$\text{沟槽开挖临界深度: } H_{cr} = \frac{NC_u}{(\gamma' - \gamma_1')K_0} \quad (11-2)$$

式中  $H_{cr}$ —沟槽的临界深度 (m);

N—条形基础的承载力系数, 对于矩形沟槽  $N = 4(1+B/L)$ ;

B—沟槽宽度 (m);

L—沟槽平面长度 (m);

$C_u$ —土壤的不排水抗剪强度 ( $N/mm^2$ );

$K_0$ —静止土压力系数;

$\gamma'$ 、 $\gamma_1'$ —分别为土和泥浆的浮容重 ( $N/mm^2$ );

沟槽的倒塌安全系数, 对于粘性土为:

$$K = \frac{NC_u}{P_{0m} - P_{1m}} \quad (11-3)$$

对于无粘性的砂土 (内聚力  $c=0$ ), 倒塌安全系数为:

$$K = \frac{2(\gamma - \gamma_1)^{1/2} \text{tg} \psi}{(\gamma - \gamma_1)} \quad (11-4)$$

式中  $P_{0m}$ —沟槽开挖面侧的土压力和水压力 (MPa);

$P_{1m}$ —沟槽开挖面内侧的泥浆压力 (MPa);

$\gamma$ —砂土的重力密度 ( $N/mm^3$ );

$\gamma_1$ —泥浆的重力密度 ( $N/mm^3$ );

$\psi$ —砂土的内摩擦角 ( $^\circ$ )。

## (2) 槽壁稳定措施

1) 槽壁土加固: 在成槽前对地下连续墙槽壁进行加固, 加固方法可采用双轴、三轴深层搅拌桩工艺及高压旋喷桩等工艺。

2) 加强降水: 通过降低地墙槽壁四周的地下水位, 防止地墙在浅部砂性土中成槽开挖过程中易产生塌方、管涌、流砂等不良地质现象。

3) 泥浆护壁: 泥浆性能的优劣直接影响到地墙成槽施工时槽壁的稳定, 是一个很重要的因素。为了确保槽壁稳定, 选用黏度大、失水量小、能形成护壁泥薄而坚韧的优质泥浆, 并且在成槽过程中, 经常监测槽壁的情况变化, 并及时调整泥浆性能指标, 添加外加剂, 确保土壁稳定, 作到信息化施工; 及时补浆。

4) 周边限载: 地下连续墙周边荷载主要是大型机械设备如成槽机、履带吊、土方车及钢筋混凝土搅拌车等频繁移动带来的压载及震动, 为尽量使大型设备远离地墙, 在正处施工过程中的槽段边铺设路基钢板加以保护, 并且严禁在槽段周边堆放钢筋等施工材料。

5) 导墙选择: 导墙的刚度影响槽壁稳定。根据工程施工情况选择合适的导墙形式, 通常导墙采用“] [”型或“] [”形, 。

## 四、钢筋笼加工和吊放

### 1. 钢筋笼平台制作要求

根据成槽设备的数量及施工场地的实际情况, 在工程场地设置钢筋笼安装平台, 现场加工钢筋笼, 平台尺寸不能小于单节钢筋笼尺寸。钢筋笼平台以搬运搭建方便为宜, 可以随地槽的施工流程进行搬迁。

平台采用槽钢制作，钢筋平台下需铺设地坪。为便于钢筋放样布置和绑扎，在平台上根据设计的钢筋间距、插筋、预埋件的位置画出控制标记，以保证钢筋笼和各种埋件的布设精度。

如钢筋笼需分节制作应在同一平台上一次制作拼装成型后再拆分。

## 2. 钢筋笼加工

钢筋笼根据地下连续墙墙体配筋图和单元槽段的划分来制作。钢筋笼最好按单元槽段做成一个整体。如果地下连续墙很深或受起重设备起重能力的限制，可分段制作，在吊放时再逐段连接，接头宜用绑条焊接。纵向受力钢筋的搭接长度，如无明确规定时可采用 60 倍的钢筋直径。

钢筋笼端部与接头管或混凝土接头面间应留有 15~20cm 的空隙。主筋净保护层厚度通常为 7~8cm，保护层垫块厚 5cm，在垫块和墙面之间留有 2~3cm 的间隙。由于用砂浆制作的垫块容易在吊放钢筋笼时破碎，又易擦伤槽壁面，所以一般用薄钢板制作垫块，焊于钢筋笼上。对做为永久性结构的地下连续墙的主筋保护层，根据设计要求确定。

制作钢筋笼时要预先确定浇筑混凝土用导管的位置，由这部分空间要上下贯通，因而周围需增设箍筋和连接筋进行加固。尤其在单元槽段接头附近插入导管时，由于此处钢筋较密集更需特别加以处理。

由于横向钢筋有时会阻碍导管插入，所以纵向主筋应放在内侧，横向钢筋放在外侧(图 11-29a)。纵向钢筋的底端应距离槽底面 10~20cm。纵向钢筋底端应稍向内弯折，以防止吊放钢筋笼时擦伤槽壁，但向内弯折的程度亦不要影响插入混凝土导管。

加工钢筋笼时，要根据钢筋笼重量、尺寸以及起吊方式和吊点布置，在钢筋笼内布置一定数量(一般 2~4 根)的纵向桁架(图 11-29b)。

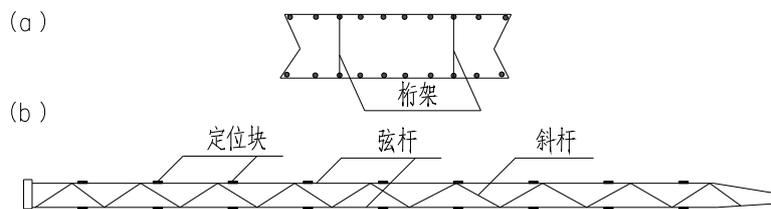


图 11-29 钢筋笼构造示意图

(a)横剖面图；(b)纵向桁架纵剖面图

制作钢筋笼时，要根据配筋图确保钢筋的正确位置、间距及根数。纵向钢筋接长宜采用气压焊接、搭接焊等。钢筋联接除四周两道钢筋的交点需全部点焊外，其余的可采用 50% 交叉点焊。成型用的临时扎结铁丝焊后应全部拆除。

钢筋笼应在型钢或钢筋制作的平台上成型，平台应有一定的尺寸(应大于最大钢筋笼尺寸)和平整度。为便于纵向钢筋笼定位，宜在平台上设置带凹槽的钢筋定位条。加工钢筋所用设备皆为通常用的弧焊机、气压焊机、点焊机、钢筋切断机、钢筋弯曲机等。

钢筋笼的制作速度要与挖槽速度协调一致，由于钢筋笼制作时间较长，因此制作钢筋笼必须有足够大的场地。

## 3. 钢筋笼的吊放

钢筋笼的起吊、运输和吊放应周密地制订施工方案，不允许在此过程中产生不能恢复的变形。

根据钢筋笼重量选取主、副吊设备。并进行吊点布置，对吊点局部加强，沿钢筋笼纵向及横向设置桁架增强钢筋笼整体刚度。选择主、副吊扁担，并须对其进行验算，还要对主、副吊钢丝绳、吊具索具、吊点及主吊把杆长度进行验算。

钢筋笼的起吊应用横吊梁或吊架。吊点布置和起吊方式要防止起吊时引起钢筋笼变形。起吊时不能使钢筋笼下端在地面上拖引，防止造成下端钢筋弯曲变形，为防止钢筋笼吊起后在空中摆动，应在钢筋笼下端系上拽引绳以人力操纵。

插入钢筋笼时，最重要的是使钢筋笼对准单元槽段的中心、垂直而又准确的插入槽内。钢筋笼进入槽内时，吊点中心必须对准槽段中心，然后徐徐下降，此时必须注意不要因起重臂摆动或其他影响而使钢筋笼产生横向摆动，造成槽壁坍塌。

钢筋笼插入槽内后，检查其顶端高度是否符合设计要求，然后将其搁置在导墙上。

如果钢筋笼是分段制作，吊放时需接长，下段钢筋笼要垂直悬挂往导墙上，然后将上段钢筋笼垂直吊起，上下两段钢筋笼成直线连接。

如果钢筋笼不能顺利插入槽内，应该重新吊出，查明原因加以解决，如果需要则在修槽之后再吊放。不能强行插放，否则会引起钢筋笼变形或使槽壁坍塌，产生大量沉渣。

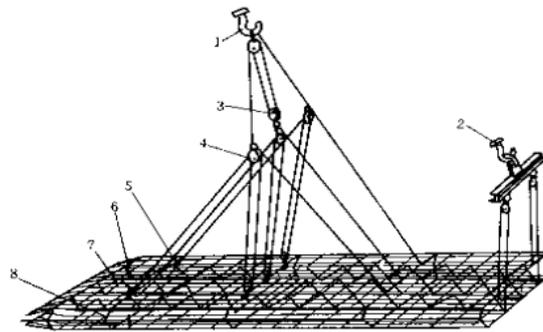


图 13-41 钢筋笼的构造与起吊方法

1、2—吊钩；3、4—滑轮；5—卸甲；6—钢筋笼底端向内弯折；  
7—纵向桁架；8—横向架立桁架

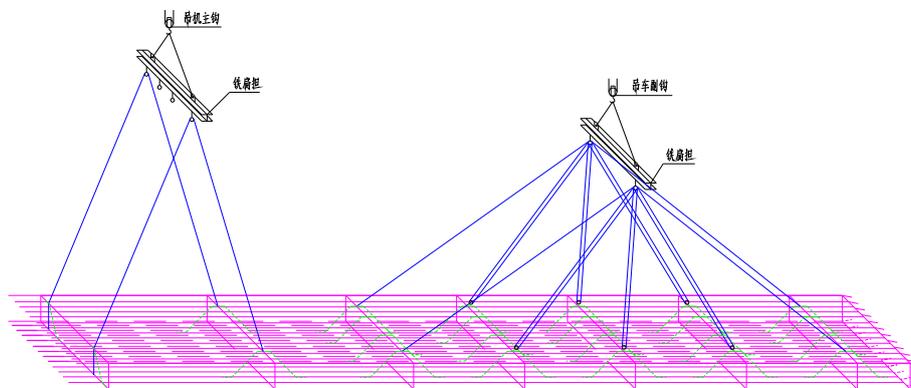


图 11-30 钢筋笼的构造与起吊方法

## 五、施工接头

施工接头应满足受力和防渗的要求,并要求施工简便、质量可靠,并对下一单元槽段的成槽不会造成困难。但目前尚缺少既能满足结构要求又方便施工的最佳方法。施工接头有多种形式可供选择。目前最常用的接头形式有以下几种:

### 1. 锁口管接头

常用的施工接头为接头管(又称锁口管)接头,接头管大多为圆形,此外还有缺口圆形、带翼或带凸榫形等,后2种很少使用。

该类型接头的优点是:

- 1) 构造简单;
- 2) 施工方便,工艺成熟;
- 3) 刷壁方便,易清除先期槽段侧壁泥浆;
- 4) 后期槽段下放钢筋笼方便;
- 5) 造价较低。

其缺点是:

- 1) 属柔性接头,接头刚度差,整体性差;
- 2) 抗剪能力差,受力后易变形;
- 3) 接头呈光滑圆弧面,无折点,易产生接头渗水;
- 4) 接头管的拔除与墙体混凝土浇筑配合需十分默契,否则极易产生“埋管”或“坍塌”事故。

其常用施工方法为先开挖一期槽段,待槽段内土方开挖完成后,在该槽段的两端用起重设备放人接头管,然后吊放钢筋笼和浇筑混凝土。这时两端的接头管相当于模板的作用,将刚浇筑的混凝土与还未开挖的二期槽段的土体隔开。待新浇混凝土开始初凝时,用机械将接头管拔起。这时,已施工完成的一期槽段的两端和还未开挖土方的二期槽段之间分别留有一个圆形孔。继续二期槽段施工时,与其两端相邻的一期槽段混凝土已经结硬,只需开挖二期槽段内的土方。当二期槽段完成土方开挖后,应对一期槽段已浇筑的混凝土半圆形端头表面进行处理。将附着的水泥浆与稳定液混合而成的胶凝物除去。否则接头处止水性能就很差。胶凝物的铲除须采用专用设备,例如电动刷、刮刀等工具。

在接头处理后,即可进行二期槽段钢筋笼吊放和混凝土的浇筑。这样,二期槽段外凸的半圆形端头和一期槽段内凹的半圆形端头相互嵌套,形成整体。

除了上述将槽段分为一期和二期跳格施工外,也可按序逐段进行各槽段的施工。这样每个槽段的一端与已完成的槽段相邻,只需在另一端设置接头管,但地下连续墙槽段两端会受到不对称水、土压力的作用,所以两种处理方法各有利弊。

由于接头管形式的接头施工简单,已成为目前最广泛使用的一种接头方法。

### 2. “H”型钢接头、十字钢板接头、“V”形接头

以上3种接头属于目前大型地下连续墙施工中常用的3种接头,能有效地传递基坑外土水压力和竖向力,整体性好,在地下连续墙设计尤其是当地下连续墙作为结构一部分时,在受力及防水方面均有较大安全性。

#### (1) 十字钢板接头

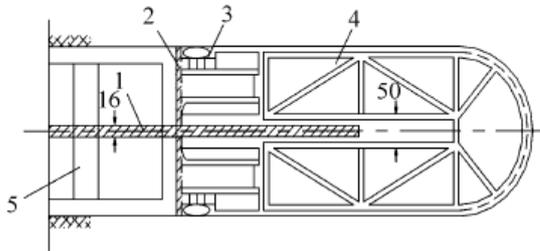
由十字钢板和滑板式接头箱组成,如图1-10所示。当对地下连续墙的整体刚度或防渗有特殊要求时采用。

其优点有:

- 1) 接头处设置了穿孔钢板,增长了渗水途径,防渗漏性能较好;
- 2) 抗剪性能较好。

其缺点有:

- 1) 工序多,施工复杂,难度较大;
- 2) 刷壁和清除墙段侧壁泥浆有一定困难;
- 3) 抗弯性能不理想;
- 4) 接头处钢板用量较多,造价较高。



1—接头钢板;2—封头钢板;3—滑板式接箱;  
4—U形接头管;5—钢筋笼

#### 十字钢板接头(滑板式接头箱)

十字钢板接头是在H型钢接头上焊接两块T形型钢,并且T形型钢锚入相邻槽段中,进一步增加了地下水的绕流路径,在增强止水效果的同时,增加了墙段之间的抗剪性能。形成的地下连续墙整体性好。

#### (2) “H”型钢接头

是一种隔板式接头,能有效地传递基坑外土木压力和竖向力,整体性好,在地下连续墙设计尤其是当地下连续墙作为结构一部分。在受力及防水方面均有较大安全性。



其优点有:

- 1) “H”型钢板接头与钢筋骨架相焊接,钢板接头不须拔出,增强了钢筋笼的强度,也增强了墙身刚度和整体性;
- 2) “H”型钢板接头存在槽内,既可挡住混凝土外流,又起到止水的作用,大大减少墙身在接头处的渗漏机会,比接头管的半圆弧接头的防渗能力强;
- 3) 吊装比接头管方便,钢板不须拔出,根本不用害怕会出现断管的现象;
- 4) 接头处的夹泥比半圆弧接头更容易刷洗,不影响接头的质量。

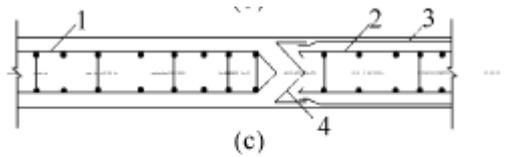
从以往施工工程看,“H”型接头在防砼浇渗方面易出现一些问题,尤其是接头位置出现塌方时,若施工时处理不妥,可能造成接头营漏,或出现大量涌水情况。

为此,应尽量避免偏孔现象发生。加强泡沫塑料块的绑扎及检查工作,改用较小的砂包充填接头使其尽量密实等施工中应注意的环节。

### (3) “V”形接头

是一种隔板式接头，施工简便，多用于超深地下连续墙。施工中，在 I 期槽钢筋笼的两端焊接型钢作为墙段接头，钢筋笼及接头下设安装后，为避免混凝土绕流至接头背面凹槽，可将接头两侧及底部型钢做适当的加长，并包裹土工布或者铁皮，使其下放入槽及混凝土浇筑时，自然与槽底及槽壁密贴。

当 II 期槽成槽后，在下设钢筋笼前，必须对接头作特别处理外，采用专用钢丝刷的刷壁器进行刷壁，端头来回刷壁次数保证不少于 10 次，并且以刷壁器钢丝刷上无泥渣为准，必要时采用专门铲具进行清除。



1—在施工槽段钢筋；2—已浇槽段钢筋笼；3—罩布(化纤布)；  
4—钢隔板；5—接头钢筋

其优点是：

- 1) 设有隔板和罩布，能防止已施工槽段的混凝土外溢；
- 2) 钢筋笼和化纤罩布均在地面预制，工序较少，施工较方便；
- 3) 刷壁清浆方便，易保证接头混凝土质量。

其缺点是：

- 1) 化纤罩布施工困难，受到风吹、坑壁碰撞、塌方挤压时易损坏；
  - 2) 刚度较差，受力后易变形，造成接头渗漏水。
- ### 3. 铣接头

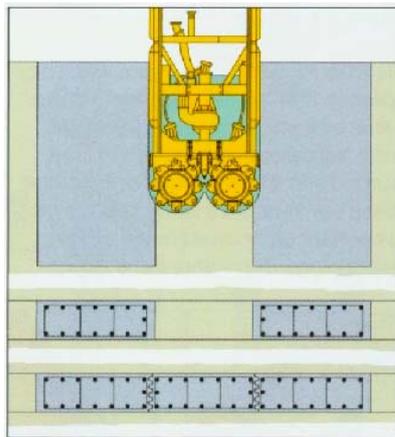
铣接头是利用铣槽机可直接切削硬岩的能力直接切削已成槽段的混凝土，在不采用锁口管、接头箱的情况下形成止水良好、致密的地下连续墙接头。

对比其它传统式接头，套铣接头主要优势如下：

- (1) 施工中不需要其它配套设备，如吊车、锁口管等。
- (2) 可节省昂贵的工字钢或钢板等材料费用，同时钢筋笼重量减轻，可采用吨数较小的吊车，降低施工成本且利于工地动线安排。

(3) 不论一期或二期槽挖掘或浇注混凝土时，均无预挖区，且可全速灌注无绕流问题，确保接头质量和施工安全性。

(4) 挖掘二期槽时双轮铣套铣掉两侧一期槽已硬化的混凝土。新鲜且粗糙的混凝土面在浇注二期槽时形成水密性良好的混凝土套铣接头。



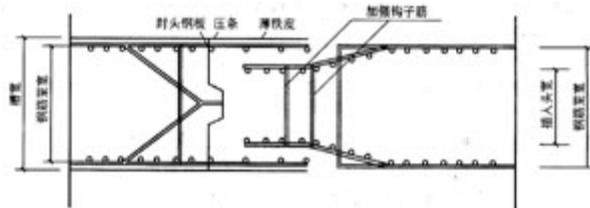
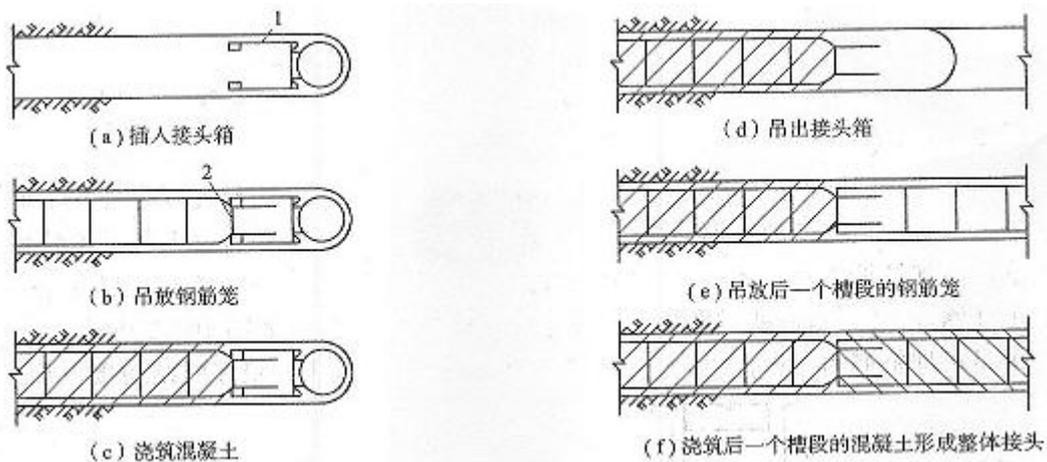
套铣接头示意图



套铣接头实际效果图

#### 4. 承插式接头（接头箱接头）

接头箱接头的施工方法与接头管接头相似，只是以接头箱代替接头管。一个单元槽段挖土结束后，吊放接头箱，再吊放钢筋笼。由于接头箱在浇筑混凝土的一面是开口的，所以钢筋笼端部的水平钢筋可插入接头箱内。浇筑混凝土时，由于接头箱的开口面被焊在钢筋笼端部的钢板封住，因而浇筑的混凝土不能进入接头箱。混凝土初凝后，与接头管一样逐步吊出接头箱，待后一个单元槽段再浇筑混凝土时，由于两相邻单元槽段的水平钢筋交错搭接，而形成整体接头，其施工过程如图所示。



接头箱接头的施工过程

1-接头箱 2-焊在钢筋笼端部的钢板

该类型接头的优点是：

- 1) 整体性好，刚度大；
- 2) 受力后变形小，防渗效果较好。

其缺点有：

- 1) 接头构造复杂，施工工序多，施工麻烦；
- 2) 刷壁清浆困难；
- 3) 伸出接头钢筋易碰弯，给刷壁清泥浆和安放后期槽段钢筋笼带来一定的困难。

## 六、水下混凝土灌注

### 1. 水下混凝土灌注一般要点

地下连续墙混凝土用导管法进行浇筑。由于导管内混凝土和槽内泥浆的压力不同，在导管下口处存在压力差使混凝土可从导管内流出。

为便于混凝土向料斗供料和装卸导管，我国多用混凝土浇筑机架(图 11-1)进行地下连续墙的混凝土浇筑。机架跨在导墙上沿轨道行驶。

导管在首次使用前应进行气密性试验，保证密封性能。

地墙开始浇筑混凝土时，导管应距槽底 0.5m。

在混凝土浇筑过程中，导管下口总是埋在混凝土内 1.5m 以上，使从导管下口流出的混凝土将表层混凝土向上推动而避免与泥浆直接接触，否则混凝土流出时会把混凝土上升面附近的泥浆卷入混凝土内。但导管插入太深会使混凝土在导管内流动不畅，有时还可能产生钢筋笼上浮，因此无论何种情况下导管最大插入深度亦不宜超过 9m。当混凝土浇筑到地下连续墙顶部附近时，导管内混凝土不易流出，可采取降低浇筑速度，将导管的最小埋入深度减为 1m 左右，并将导管上下抽动，但上下抽动范围不得超过 30cm。

在浇筑过程中，导管不能作横向运动，导管横向运动会把沉渣和泥浆混入混凝土内。

在混凝土浇筑过程中，不能使混凝土溢出料斗流入导沟，否则会使泥浆质量恶化，反过来又会给混凝土的浇筑带来不良影响，

在混凝土浇筑过程中，应随时掌握混凝土的浇筑量、混凝土上升高度和导管埋入深度，防止导管下口暴露在泥浆内，造成泥浆涌入导管。

在浇筑过程中需随时量测混凝土面的高程，量测的方法可用测锤，由于混凝土非水平，应量测三个点取其平均值。亦可利用泥浆、水泥浮浆和混凝土温度不同的特性，利用热敏电阻温度测定装置测定混凝土面的高程。

浇筑混凝土置换出来的泥浆，要送入沉淀池进行处理，勿使泥浆溢出在地面上。

导管的间距一般为 3~4m，取决于导管直径。单元槽段端部易渗水，导管距槽段端部的距离不得超过 2m。如管距过大，易使导管中间部位的混凝土面低，泥浆易卷入，如一个单元槽段内使用两根或两根以上导管同时进行浇筑，应使各导管处的混凝土面大致处在同一标高上。浇筑时宜尽量加快单元槽段混凝土的浇筑速度，一般情况下槽内混凝土面的上升速度不宜小于 2m/h。

在混凝土顶面存在一层浮浆层，需要凿去，因此混凝土需要超浇 30~50cm，以使在混凝土硬化后查明强度情况，将设计标高以上部分用风镐凿去。

### 2. 高强度等级混凝土灌注特点介绍

水下混凝土应具备较好的和易性，为改善和易与缓凝，宜掺加外加剂。水下混凝土强度比设计强度提高的等级无试验情况下可参照下表选择：

水下混凝土强度等级对照表

设计强度等级	C25	C30	C35	C40	C45	C50
水下混凝土强度等级	C30	C35	C40	C50	C55	C60

## 七、接头管顶拔

接头管一般适用于柔性接头，大都是钢制的，且大多采用圆形。圆形接头管的直径一般要比壁厚小。管身壁厚一般为 19~20mm。每节长度一般为 3~10m，可根据要求，拼接成所需的长度。在施工现场的高度受到限制的情况下，管长可适当缩短。

此外根据不同的接头形式，除了最常用的圆形接头管外，还有一些刚性接头所采用的接头箱形式，例如：H 型钢接头采用蘑菇型接头箱，十字形接头采用马蹄形接头箱等。

接头箱接头的施工方法与接头管接头相似，只是以接头箱代替接头管。一个单元槽段挖土结束后，吊放接头箱，再吊放钢筋笼。混凝土初凝后，与接头管一样逐步吊出接头箱。

接头管所形成的地下空间具有很重要的作用，它不仅可以保证地下墙的施工接头，而且在挖下一个槽段时不会损伤已浇灌好的混凝土，对于挖槽作业也不会有影响，因此在插入接头管时，要保持垂直而又完全自由地插入到沟槽的底部。否则，会造成地下墙交错不齐或由此而产生漏水，失去防渗墙的作用以至使周围地基出现沉降等。地下墙失去连续性，会给以后的作业带来很大麻烦。

接头管的吊放，由履带起重机分节吊放拼装。操作中应控制接头管的中心与设计中心线相吻合，底部回填碎石，以防止砼倒灌，上端口与导墙处用榫楔实来限位。另外当接头管吊装完毕后，还须重点检查锁口管与相邻槽段的土壁是否存在空隙，若有则应通过回填土袋来解决，以防止砼浇筑中所产生的侧向压力，使接头管移位而影响相邻槽段的施工。

接头管的提拔与砼浇注相结合，砼浇注记录作为提拔接头管时间的控制依据，根据水下砼凝固速度的规律及施工实践，砼浇注开始拆除第一节导管后推 4 小时开始拔动，以后每隔 15 分钟提升一次，其幅度不宜大于 50~100mm，只需保证砼与锁口管侧面不咬合即可，待砼浇注结束后 6~8 小时，即砼达到初凝后，将锁口管逐节拔出并及时清洁和疏通。

## 11.4 特殊形式地下连续墙的设计与施工

### 11.4.1 圆筒形地下连续墙

#### 1. 特点

圆筒形地下连续墙多用于主体结构为圆形，或受到主体结构限制需采用无支撑大空间施工的工程。圆筒形地下连续墙围护结构的有以下特点：

- (1) 充分利用了土的拱效应，降低了作用在支护结构上的土压力；
- (2) 圆形结构具有更好的力学性能，与常规形状的基坑不同，它可将作用在其上面的荷载基本上转化为地下连续墙的环向压力，可充分发挥混凝土抗压性能好的特点，有利于控制基坑变形。
- (3) 在工程中圆筒形地下连续墙平面形状实际为多边形，并非理想的圆形结构，其受力状态以环向受压为主，受弯为辅。

#### 2. 墙体变形和内力计算方法

##### (1) 荷载

圆筒形基坑工作过程中实际作用的土压力是一种非极限状态土压力。相对于极限状态，非极限状态下的土压力是一个更为复杂的问题，它与围护结构的变形密切相关，围护结构的刚度越大其变形越小，主动区作用的土压力就越接近于静止土压力。由于圆筒形连续墙的水平刚度大，围护结构变形较小，基于工程安全的考虑，在分析圆形基坑时，主动区作用的土压力可按静止土压力进行计算。

##### (2) 计算方法

对于圆筒形地下连续墙，可供选用的计算方法有平面竖向弹性地基梁法、空间弹性地基板法和三维连续介质有限元法三种方法。三种计算方法详见本手册第六章。圆筒形布置的地下连续墙理想状态下受力以环向轴压为主，受力性能较好。在实际工程中，考虑到土方并非

理想状态下对称开挖、土层分布不均匀和施工荷载等因素的影响，以及“两墙合一”地下连续墙正常使用阶段可能受到的地震荷载影响，应对圆筒形布置的地下连续墙处于非均匀围压受力状态下进行计算分析。

#### a. 平面竖向弹性地基梁法

平面竖向弹性地基梁法已经成为目前工程界普遍采用的方法，且相关的设计软件提供了相应的分析模块，应用较为方便。对于空间效应明显圆形基坑，当采用平面弹性地基梁法求解地下连续墙的变形与内力时，忽略了圆形基坑的拱效应，地下连续墙是通过竖向梁作用来承受水土压力，作为抗弯构件，其厚度（抗弯刚度）决定了变形与受力的大小。在这种未考虑圆形基坑空间拱效应的受力模式下，计算得到的连续墙变形与弯矩无疑代表了一种极端值。采用平面竖向弹性地基梁法忽略了圆形围护结构的三维拱效应，分析结果并不合理。并且平面弹性地基梁法仅提供地墙竖向计算内力，对于圆筒形地下连续墙环向内力无法给出。在平面分析模式下，作用在地下连续墙外侧的水土压力全部由内支撑体系和坑内土体提供的抗力来平衡，各道水平支撑皆会产生较大的轴力。

#### b. 空间弹性地基板法

根据第六章的计算分析，空间弹性地基板法能反映圆筒形地墙的整体受力特性。圆筒形结构把大部分侧向荷载转移给连续墙环向拱结构，相应减轻连续墙竖向梁结构的负担，克服平面计算中竖向应力过大的缺点，且通过环向拱作用直接提供水平抗力减小内支撑受力，达到结构整体应力分布均匀，设计趋于经济合理。

#### c. 三维连续介质有限元法

与空间弹性地基梁（板）法相比，连续介质有限元法用实体单元来模拟土体，在以下几个方面较为合理：

- (a) 墙土之间的作用关系得到更好模拟，可以在一个模型中解答工程所关心的诸如环境变形等问题，而非仅仅是地墙本身；
- (b) 反映作用于桩侧的土压力随围护体的变形而动态改变的事实，而非极限状态下的朗肯土压力；
- (c) 可以反映土体的本构关系及土与土之间的相互作用，而非彼此相互独立的弹簧；可以反映土体与地墙之间的共同作用。

综合以上分析，由于圆筒形地下连续墙具有较强的空间效应，相对于竖向弹性地基梁法，采用空间弹性地基板法和三维连续介质有限元法更能准确反应地下连续墙的实际受力状态。

### 3. 圆筒形地下连续墙设计

#### (1) 墙体截面及配筋

在采用圆筒形布置地下连续墙的工程中，水土压力的作用将主要转化为环向压力，地下连续墙表现出以环向拱受压的为主，竖向梁受弯为辅的结构受力特点，这与常规非圆形基坑地下连续墙的受力特点完全不同，因此根据地下连续墙的受力特点，圆筒形地下连续墙的截面厚度应根据环向压力经计算确定，墙体也按环向水平钢筋为主，竖向钢筋为辅的原则进行配筋。

#### (2) 施工接头的设计与分析

##### a. 施工接头设计

圆筒形地下连续墙槽段施工接头需承受巨大的压应力，应选择工字形型钢接头等受压性能较好的施工接头以利于巨大环向压力的传递。工字形型钢接头不存在无筋区，形成的地下连续墙整体受力性能好，可适应接头区复杂的受力要求。而且该接头还可免除常规地下连续墙需在接头部位设置和拔出锁口管或接头箱流程。

##### b. 施工接头分析

圆筒形地下连续墙通常采用一字形或L形槽段拟合，而非理想的圆形结构，而且在实际工程中，考虑到土方并非理想状态下对称开挖、土层分布不均匀和施工荷载等因素的影响，圆筒形地下连续墙并非处于理想的均匀环向受压状态，施工接头可能同时存在弯、剪、扭受力状态，因此需要根据施工接头的实际受力状态，对其进行专门的计算分析。实际工程中可采用三维有限元分析模型对接头受力状态进行模拟计算分析。

以采用工字形型钢接头的世博地下变圆筒形地下连续墙为例，详述三维有限元分析模型对接头受力状态进行模拟，分析型钢接头在多种荷载作用下的受力性能的过程。世博地下变电站圆筒形地下连续墙的直径 130m，挖深 34m，施工接头全部采用工字型钢接头。工字形型钢接头见图 11-31、32。

(a) 计算模型

为了既能反映圆筒形地下连续墙以环向受压为主的受力性能，又能充分利用计算资源，计算平面按圆筒形墙体的实际平面形状取近似圆形、竖向取 1.5m 深度范围内的地下连续墙作为分析模型，所取的深度为地墙整体计算结果中侧向位移最大值所处位置。三维有限元模型包括一期和二期槽段、两期槽段之间的工字形型钢接头。为反映一期槽段与二期槽段之间的薄弱段(见图 11-32)，模型中也考虑了一期与二期槽段的配筋，图 11-31 与图 11-32 分别为一期与二期槽段的配筋图。

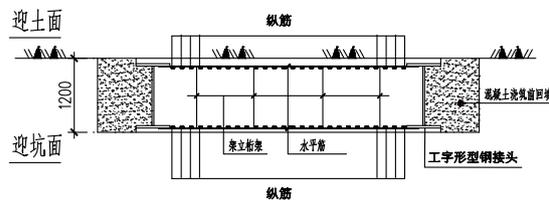


图 11-31 一期槽段配筋图

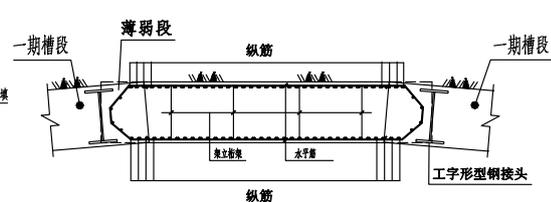


图 11-32 二期槽段配筋图

图 11-33 为圆筒形地下连续墙模型的局部视图，其中地下连续墙槽段采用实体单元模拟；工字形型钢接头采用板单元模拟；钢筋采用空间梁单元模拟。各部分模型见图 11-34~图 11-35。

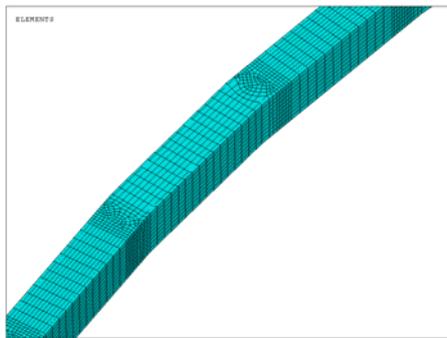


图 11-33 圆筒形地下连续墙模型局部视图

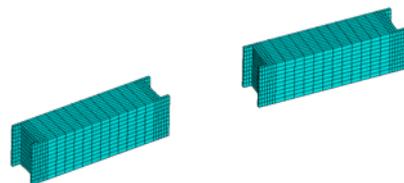


图 11-34 一期槽段模型

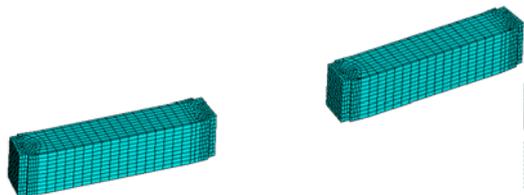


图 11-35 二期槽段模型



图 11-36 工字形型钢与钢筋关系



图 11-37 工字形型钢模型

(b) 荷载取值

圆筒形结构所受到的水土压力主要以环向压力为主(如图 11-38 所示)，而考虑到基坑施工阶段土方并非理想状态下对称开挖、土层分布不均匀和施工荷载等因素的影响，以及“两

墙合一”地下连续墙正常使用阶段可能受到的地震荷载影响，圆筒形地下连续墙并非处于理想的均匀环向受压状态。因此为了模拟圆筒形地下连续墙的不均匀受荷状态，进而分析施工接头的复杂受力状态，在环向水土压力的基础上另外考虑水平向的单侧推压荷载作用。水土压力取为该深度处的静止土压力值，水平单侧推压荷载相应位置均压荷载值的 20%左右。

#### 4. 施工要点

由于常规成槽机只能施工一字形或转角槽段，在槽段施工时可采用直形槽段或大角度的折线槽段拟合成近似圆筒形的形状。因此，需根据槽段划分形式确定导墙的平面形状，在转交部位将导墙向外延伸 400~600mm，以确保成槽时角部泥土挖除干净。圆筒形地下连续墙槽段接缝尽量设置在平直段，利于保证接头施工质量。圆筒形地下连续墙受力以环向轴力为主，施工接头为受力的薄弱环节，施工接头的处理尤为重要，在地下连续墙施工过程中，应严格清刷结构部位，保证混凝土的浇筑质量，防止结构夹泥影响地下连续墙整体受力性能。圆筒形地下连续墙的水平钢筋为受力钢筋，水平钢筋分布在纵向钢筋外侧。

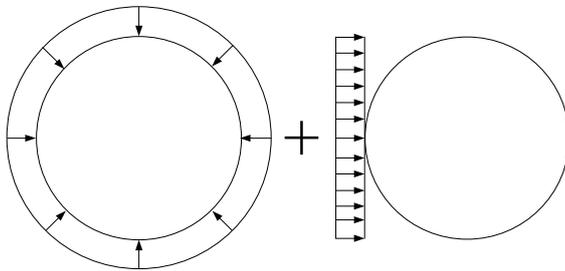


图 11-38 荷载分布模式



图 11-39 上海宝钢热轧旋流池圆筒形基坑

#### 5. 工程实例

##### (1) 上海宝钢热轧旋流池

上海宝钢 1880mm 热轧旋流池基坑内径 28.0m 的圆形，开挖深度 35.3m。基坑周边环境复杂，相邻有生产厂房等构筑物。采用正 40 边形地下连续墙作为围护结构，内壁切圆直径 29.6m，外壁切圆直径 31.6m。地下连续墙厚 1.0m，深 53.0m，槽段中心周长为 96.76m。该工程于 2005 年 11 月 30 日开始施工，至 2006 年 9 月 30 日完成底板浇筑。

##### (2) 上海人民广场地下变电站[122, 123]

人民广场地下变电站位于上海市人民广场东南角，处于古河道边缘，地质情况复杂，土层厚度分布极不均匀。该变电站为一圆筒形结构，外径 62.4m，内径 58m，采用地下连续墙与内衬联合受力的结构形式。基坑开挖深度 23.2m，地下连续墙平面形状为一内切直径 60m 的正 91 边形，厚 1.2m，深 38.0m，共划分为 38 个施工槽段，槽幅间采用刚性接头。内衬厚 1.0m，深 18.22m。另有 4.0m 厚的底板。基坑开挖到底时连续墙最大变形仅为 19.7mm。

##### (3) 上海交通大学海洋深水试验池[125]

上海交通大学海洋深水试验池深井的最大工作水深 40 m，直径 5 m，最大开挖深度为 39 m。基坑施工采用地下连续墙作为围护结构，平面为正十二边形，墙厚 1000 mm，深 47m。开挖至底后施作 600 mm 厚钢筋混凝土内衬结构，封底厚度 4 m，采用水下 C30 素混凝土，在抽水后干施工 C35 钢筋混凝土底板，厚 1.5 m。地下连续墙与底板采用钢筋接驳器连接。基坑采用水下开挖方式进行施工。开挖到底时连续墙的最大侧移仅为 8.9mm。

##### (4) 上海环球金融中心塔楼基坑[126, 127]

上海球金融中心塔楼深基坑工程采用 100m 大直径圆形薄壁地下连续墙自立式围护结构的设计方案。地下连续墙混凝土强度设计等级为水下 C30，内径 100m，墙厚 1.0m，墙厚与内径之比为 1:100。普遍区域墙深 31.55m，邻近电梯井深坑处为墙深 33.55m。地下连续墙

槽段平面布置为正 156 边形，每边外侧边长约 2.054m，每 3 边组成一个槽段，接头为圆形锁口管。竖向设置四道圈梁。基坑开挖到底时连续墙的最大侧移为 30.1mm。

#### (5) 日本东京湾新丰洲 500 kV 地下变[128]

日本东京湾新丰洲 500 kV 地下变采用圆筒形地下连续墙支护，基坑内径 144m，开挖深度 29.2m。连续墙深达 70m，其中从地面至 44m 深度范围内连续墙厚 2.4m，自 44m 至 70m 深度的连续墙主要起隔断地下水流的作用，因此连续墙的厚度减为 1.2m。连续墙由 39 个先期开挖槽段和 39 个后期开挖槽段组成，如图 11-40 所示。基坑自上而下分 7 层开挖并依次逆作厚 2.4m 的内衬墙。基坑开挖到底时连续墙最大侧移小于 20mm。

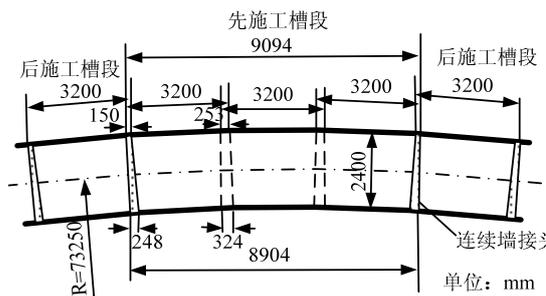


图 11-40 东京湾 500 kV 地下变地下连续墙槽段

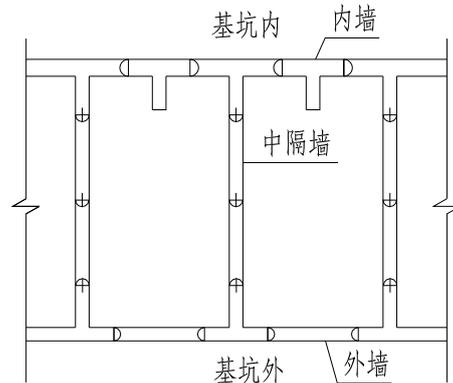


图 11-41 格形地下连续墙典型平面布置图

### 11.4.2 格形地下连续墙

#### 1. 特点与形式

格形地下连续墙结构型式出自格形钢板桩岸壁的概念，是靠其自身重量稳定的半重力式结构，是一种涉及建（构）筑物地基开挖的无支撑空间坑壁结构。格形地下连续墙由内墙、中隔墙、外墙等构成。格形地下连续的外墙通过中间墙体与内墙连接，以实现结构的整体性和空间结构效应。

#### 2. 计算方法

格形地下连续墙受力状况与墙体的变形状态有直接的关系，而墙体的变形又与结构形式、外荷载大小及土壤特性有关，实质上格形地下连续墙的内力和变形计算一个结构与土体共同作用的问题。

##### (1) 土压力

格形地下连续墙内墙迎土面侧采用谷仓压力，或直接采用静止土压力，内墙迎坑面采用水平基床系数模拟土抗力，开挖面处为零，开挖面以下一定深度内三角形分布，其下按矩形分布。外墙迎坑面同样采用水平基床系数模拟土抗力；外墙迎土面侧采用静止土压力。

##### (2) 整体稳定验算

应参照第五章关于重力式围护结构各项稳定性验算方法，对格形地下连续墙在基坑开挖阶段的整体稳定、抗倾、抗滑、抗渗流计算。此外，尚应进行基础底面和墙前地基应力的验算。

##### (3) 内力和变形计算

##### a. 传统弹性地基理论有限元分析方法

将基坑底面以上的墙体理想化为薄板弯曲单元，将入土部分墙体作为文克尔弹性地基上的薄板单元。薄板单元可为各向同性，亦可为各向异性。在结构横向受力计算中，考虑结构形式及其在荷载作用下的变形、结构与地层的刚度，在被动区设置水平土弹簧支承，在结构底面设置竖向弹簧支承。将地下墙的向上摩擦力及下端反力综合为地下墙下端的弹性支承

力，其弹簧系数  $K$  参照相关规范或地区经验选用。

在槽段平面上截取以横向剪力墙间距为单位计算长度，将内墙、外墙、中隔墙及顶部承台板作整体结构，并认为在边界上所有节点沿墙体长度方向的水平位移为零，并利用结构对称性，简化成空间计算模型进行结构内力分析。可采用三维有限元结构分析软件进行空间结构计算。计算简图如下：

b. 三维弹塑性土体非线性理论有限差分分析方法

利用格形地下墙的结构对称性，简化空间结构计算模型，取横向剪力墙间距为结构计算宽度。地下墙用壳单元模拟采用弹性本构模型；土体与地下墙间用间隙元连接只能传递压力和一定的摩擦力，不能传递拉力。计算中模拟实际的施工过程，首先计算在没有地下墙情况下土体的自重场，然后将其位移置零，加入地下墙模型，再计算基坑内开挖后的工况。

在空间计算模型中，土体单元本构模型采用 Mohr—Coulomb 准则，需要输入土体的体积模量  $K$ 、剪切模量  $G$ 、泊松比  $\nu$ 、粘聚力  $C$ 、内摩擦角  $\phi$  及天然容重  $\gamma$ ，钢筋混凝土弹性模量  $E$ ，泊松比  $\mu$  以及朗肯土压力系数。

c. 两种分析方法对比

- (a) 采用上述两种方法进行工况仿真模拟计算，并与实测成果分析研究，其主要误差是计算模型的体量，选用一定宽度和高度的土体区域，可以减少并避免计算模型周边约束的不利影响。
- (b) 按方法（2）分析，直接引用勘察资料的土体力学指标，结合工程监测，模拟直接选取土体材料参数，结构计算模式反映结构与周围地层的相互作用，而土体采用经典土力学理论，避免了外墙土弹簧高度及数值的人为假定。相对而言，其计算的参数取值误差较小。
- (c) 按方法（1）分析，比方法 2 计算较为简单，对在工程经验较为丰富的区域的一般工程，方法 1 的计算精度能满足工程需求；对复杂工程有必要采用方法 2 进行复核。

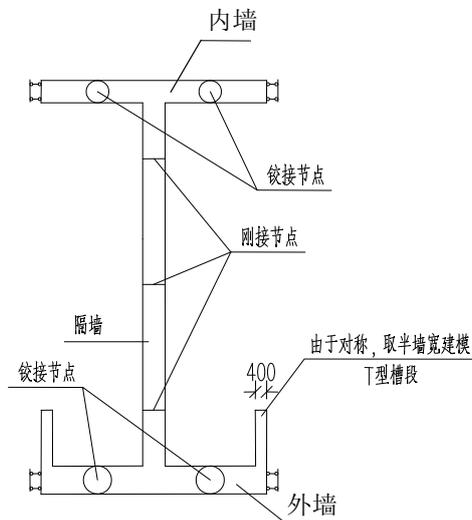


图 11-42 格形地下连续墙单元示意图

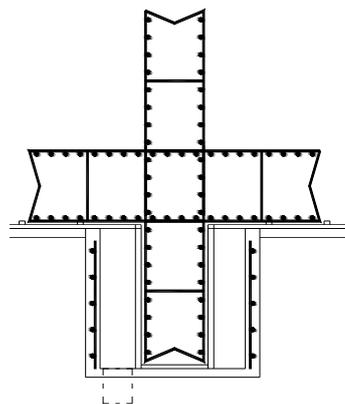


图 11-43 开槽法钢筋笼制作平台

### 3. 设计要点

#### (1) 墙体设计

- a. 格型地下连续墙总宽度和入土深度应满足整体稳定要求，同时地下连续墙的插入深度尚需满足地下水控制要求。
- b. 应根据结构内力计算分析确定中隔墙平面间距和进行墙体截面设计。
- c. 格形地下连续墙墙顶应设置通长的冠梁或顶板连接内墙、外墙和中隔墙，使格形地下连续墙形成整体受力体系。内墙和外墙宜采用 T 型槽段与中隔墙连接。

- d. 当格形地下连续墙需承受较大的竖向荷载或对墙体竖向变形要求较高时，墙底应选择较好的持力层，墙底可采取注浆措施以满足竖向承载力和变形要求。
- e. 当地下连续墙设有钢筋混凝土内衬墙时，内衬墙与地下连续墙结合面除按施工缝凿毛清洗外，尚应通过墙面预埋钢筋、接驳器与预留剪力槽等措施，使二者作为主体结构复合墙共同工作。

(2) 施工接头设计

格形地下连续墙中隔墙作为内墙和外墙的联系墙，其受力状态主要以受拉为主，因此中隔墙槽段之间以及中隔墙与内墙、外墙之间的连接接头需满足抗拉要求。中隔墙槽段之间及中隔墙与内墙、外墙之间应采用剪拉型刚性接头连接，并按承载能力极限状态进行接头设计。内墙槽段之间以及外侧槽段之间一般可采用柔性接头。

4. 施工要点

(1) 异形钢筋笼加工

在格型地下连续墙施工中经常会遇到“T”型槽段、“十”字型槽段等异形槽段，钢筋笼放样布置及绑扎对场地要求高，操作难度大。为了确保钢筋笼绑扎制作的质量，施工前应根据钢筋笼的形状设置相应的加工平台。对于“T”型槽段、“十”字型槽段钢筋笼加工平台可采用挖槽法设置加工平台。可根据“十”字型钢筋笼尺寸较短方向尺寸为开槽深度进行开槽，开槽宽度大于“十”字型钢筋笼肢部宽度，开槽长度大于钢筋笼长度，开槽深度除满足钢筋笼深度外还需满足工人施工空间，一般为1800mm~2000mm；为防止槽底积水，须在槽内设置两个集水井，分别设置在长度方向两头位置。

(2) 槽壁稳定性

在异形槽段地下连续墙成槽时，容易出现坍槽现象，因此在成槽时需采取措施确保槽壁稳定性。可采用槽壁预加固、浅层降水、优化泥浆配比、缩短每幅地下连续墙施工周期以及控制周边荷载等措施确保槽壁的稳定性

5. 工程实例

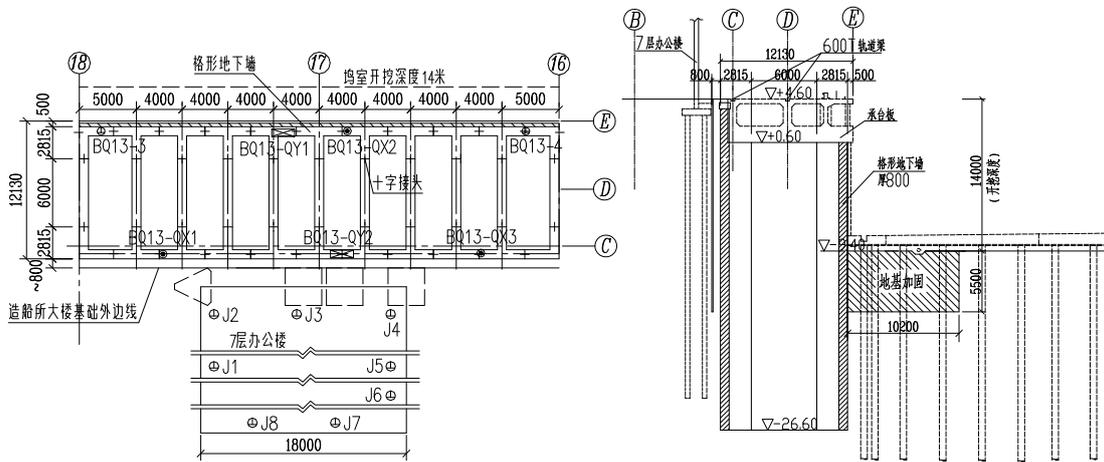


图 11-45 格形地下连续墙平面图

图 11-46 格形地下连续墙剖面图

- (1) 沪东造船厂（造船坞）二期工程某干船坞矩形坞室平面面积约 33200m<sup>2</sup>，一边为水域，另三边的围护内边周长约 812m，开挖深度为 14~16m。在 7 层办公大楼建筑处，长度为 42 米段的坞壁采用地下墙承重结构作船坞坞壁基础，地下墙采用格形连续墙布置，地下墙厚度 0.8m，墙顶标高 0.6（3.75m），考虑两墙合一及坞壁承重需要，将地下墙墙趾插入第⑥1 层粉质粘土中，墙底标高-26m，地下墙插入比接近 1:1。中间槽段为 6X0.8m，间距 4m，共计 11 幅。T 形槽段外尺寸为 4X2.815m，共计 18 幅，L 形槽段外尺寸为 2.99X2.815m，共计 4 幅。槽段之间采用十字穿孔钢板连接。在地下墙底设置

压浆管进行墙底注浆加固，每幅槽段埋设注浆管不少于 2 个，以便进行墙底注浆加固。

- (2) 上海耀华皮尔玻璃有限公司的浮法玻璃熔窑基坑：平面尺寸为 49.9×89.1 米，开挖深度 8.5~12.9 米，围护结构采用了半重力式格形地墙。内墙为 T 型槽段，厚 0.8m，深 19.1m；外墙为“一”型槽段，厚 0.6m，深 20.1m；中间剪力墙为“一”型槽段，厚 0.6m，深 11.8m。前外墙、中间剪力墙间距均为 12m。86 年竣工。设计成果在 86 年北京国际深基础会议上进行了交流。

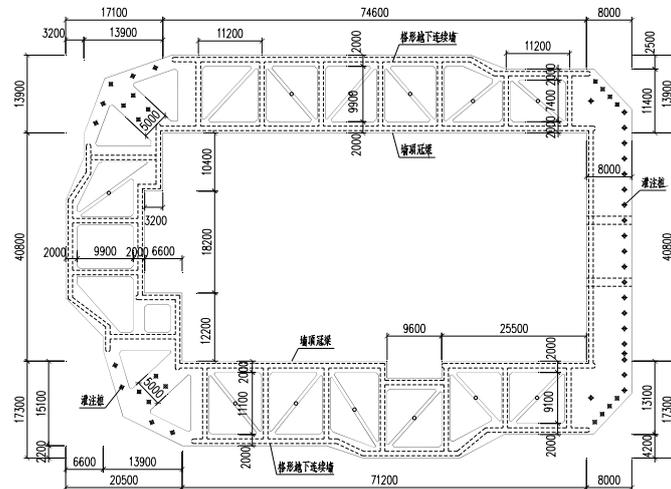


图 11-47 皮尔金顿玻璃熔窑地下连续墙平面布置图

### 11.4.3 预制地下连续墙

近年来，预制地下连续墙技术成为国内外地下连续墙研究和发展的一个重要方向，其施工方法是按常规的施工方法成槽后，在泥浆中先插入预制墙段、预制桩等预制构件，然后以自凝泥浆置换成槽用的护壁泥浆，或直接以自凝泥浆护壁成槽插入预制构件，以自凝泥浆的凝固体填满墙后空隙和防止构件间接缝渗水，形成地下连续墙。采用预制地下连续墙技术施工的地下墙墙面光洁、墙体质量好、强度高，并可避免在现场制作钢筋笼和浇混凝土及处理废浆。

在常规预制地下连续墙技术的基础上，国内又研究和发展了一种新型预制地下连续墙，即采用常规的泥浆护壁成槽，在成槽后，插入预制构件并在构件间采用现浇混凝土将其连成一个完整的墙体，该工艺是一种相对经济又兼具现浇地下墙和预制地下墙优点的又一种研究发展方向。

#### 1. 预制地下连续墙的形式和特点

与常规现浇地下连续墙相比，预制地下连续墙有其特有的优点。

- (1) 工厂化制作可充分保证墙体的施工质量，墙体构件外观平整，可直接作为地下室的建筑内墙，不仅节约了成本，也增大了地下室面积。
- (2) 由于工厂化制作，预制地下连续墙与基础底板、剪力墙和结构梁板的连接处预埋件位置准确，不会出现钢筋连接器脱落现象。
- (3) 墙段预制时可通过采取相应的构造措施和节点形式达到结构防水的要求，并改善和提高了地下连续墙的整体受力性能。
- (4) 为便于运输和吊放，预制地下连续墙大多采用空心截面，减小自重节省材料，经济性好。
- (5) 可在正式施工前预制加工，制作与养护不占绝对工期；现场施工速度快；采用预制墙段和现浇接头，免掉了常规拔除锁口管或接头箱的过程，节约了成本和工期。
- (6) 由于大大减少了成槽后泥浆护壁的时间，因此增强了槽壁稳定性，有利于保护周边环境。

#### 2. 设计技术

## (1) 墙体设计

由于采用地面预制，并综合考虑运输、吊放设备能力限制和经济性等因素，预制地下连续墙通常设计成空心截面。在截面设计中可按初步确定的截面形式和相应的抗弯刚度，计算在水土压力等水平荷载作用下各开挖工况的墙体内力和变形，根据计算内力包络图确定设计截面、开孔面积和截面空心率，并进行竖向受力主钢筋和水平钢筋的配筋设计。预制地下连续墙墙段典型截面型式见图 11-48。

目前预制地下连续墙施工需采用成槽机成槽、泥浆护壁、起吊插槽的施工方法，因此墙体截面尺寸受成槽机规格限制。通常预制墙段厚度较成槽机抓斗厚度小 20 毫米，墙段入槽时两侧可各预留 10 毫米空隙便于插槽施工。

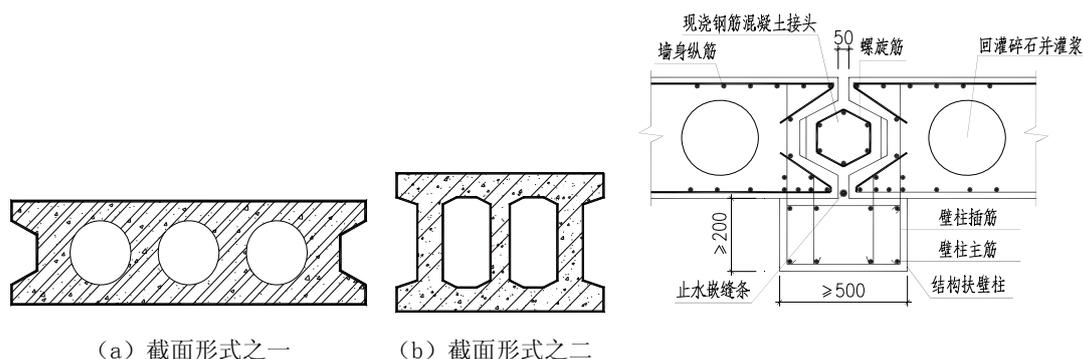


图 11-48 预制地下连续墙墙段典型截面图

图 11-49 现浇钢筋混凝土接头示意图

## (2) 接头设计

预制地下连续墙接头可分为施工接头和结构接头，施工接头是指预制地下连续墙墙段之间的连接接头，结构接头是指按照两墙合一设计时预制地下连续墙与主体地下结构构件的连接接头。

### a. 施工接头

预制墙段施工接头可分为现浇钢筋混凝土接头和升浆法树根桩接头。两种接头形式单幅墙段的两端均采用凹口形式。现浇钢筋混凝土接头施工中两幅墙段内外边缘尽量贴近，待两幅墙段均入槽固定就位后，在接缝的凹口当中下钢筋笼并浇筑混凝土用以连接两幅墙段，其深度同预制地下连续墙。现浇钢筋混凝土施工接头节点示意图见图 11-49。

升浆法树根桩接头与现浇钢筋混凝土接头施工方法相似，区别在于树根桩接头是在接缝的凹口当中下钢筋笼，以碎石回填后再注入水泥浆液用以连接两幅墙段。

### b. 竖向连接设计

深基坑工程中当地下连续墙墙体较深较厚时，在满足结构受力的前提下，综合考虑起重设备的起重能力以及运输等方面的因素，可将预制地下连续墙沿竖向设计成为上、下两节或多节，分节位置尽量位于墙身反弯点位置。由于反弯点位置剪力最大，因此必须重点进行抗剪承载力验算。通常可采用钢板接头连接，即将预埋在上下两节预制墙段端面处的连接端板采用坡口焊连接并结合钢筋锚接连接。工厂制作墙段时，在上节预制墙段底部实心部位预留一定数量的插筋，在下节墙段顶部实心部位预留与上节插筋相对应的钢筋孔。现场对接施工时，先在下节墙段预留孔内灌入胶结材料，然后将上节墙段下放使钢筋插入预留孔中，形成锚接，再将连接端板采用坡口焊连接。钢板连接节点构造示意图见图 11-50。

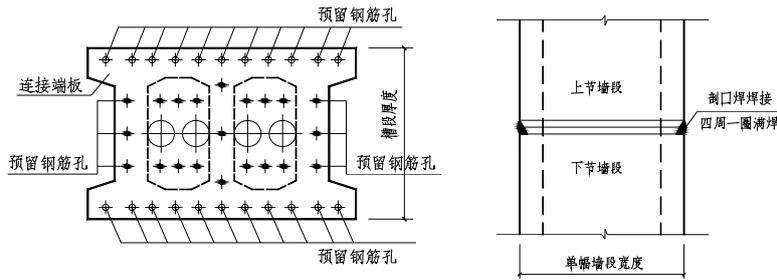


图 11-50 钢板连接节点构造示意图

### (3) 空心截面回填

预制地下连续墙的空心截面有利于减轻构件自重，节省材料，提高预制地下连续墙的经济性，但另一方面也存在正常使用阶段的抗渗防水问题。通常预制地下连续墙均作为两墙合一的永久结构外墙，为了满足永久抗渗要求，需对底板面以上的截面空心区域进行可采用素混凝土或密实粘土进行回填，材料可采用素混凝土或密实粘土。从工程使用情况来看，能达到永久结构抗渗的设计要求。

## 3. 施工要点

### (1) 墙段预制

预制墙段采用的模具由底模、芯模、外模三部分组成。芯模宜采用可重复利用的充气胶囊。受构件截面特殊性 & 胶囊芯模安放的限制，墙段混凝土的浇捣分三层进行，即底层、中间肋部层及板面层。为防止上层板面混凝土最后浇捣而影响胶囊芯模放气抽拔，避免板面混凝土出现裂缝，必须适当降低上层混凝土的坍落度。

### (2) 成槽和吊放

因受起重设备性能的限制，预制地下连续墙墙段划分宽度一般为 3.0~4.0m。成槽时，一般按照先转角幅，后直线幅的顺序施工，槽段之间应连续成槽。通常导墙宽度需比预制墙段的厚度大 4cm 左右，成槽深度需大于设计深度 10~20cm。

墙段的吊放应根据其重量、外形尺寸选择适宜的吊装设备，并在导墙上安装垂直导向架以确保墙段平面位置沉放准确。预制墙段厚度方向的垂直度则主要通过成槽时的垂直度、垂直导向架来控制。预制墙段的竖向向设计标高则是通过导墙上搁置点标高、专用搁置横梁高度、临时定位吊耳及墙段的长度来控制的。

### (3) 接头施工

预制地下连续墙槽段之间的接头处理，需同时满足抗渗和受力要求，是预制地下连续墙设计和施工中的关键问题。目前，常用的预制地下连续墙接头有现浇钢筋混凝土接头和升浆法树根桩接头等。多项工程的实践结果表明，采用升浆法树根桩接头和小口径导管浇筑的现浇钢筋混凝土接头抗渗止水效果一般均良好，均能达到工程使用的一般要求，但由于两种接头实质上均为柔性连接，尚不能完全满足墙体承受剪力的要求，因此需在接头位置墙板内侧设置嵌缝式止水条、接缝外侧加固封堵以及在地下室内部设置结构扶壁柱等构造措施。在增强槽段之间连接整体性、并提高抗剪能力的同时，也在建筑内部设置了抗渗止水的预备措施。

## 4. 工程实例

达安城单建式地下车库全预制地下连续墙工程位于上海市石门二路新闻路交界处，地下车库面积约为 1725m<sup>2</sup>，采用“两墙合一”预制地下连续墙作为围护体，深度 11m，有 224 延长米，共设 76 幅墙段。坑内竖向设置

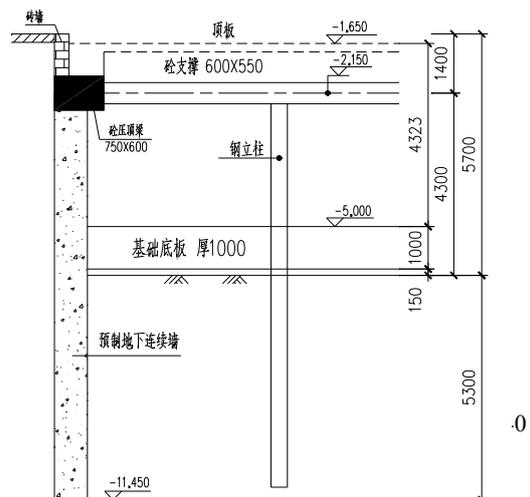


图 11-51 围护结构剖面图

一道用 H400×400 的型钢支撑。

预制地下连续墙墙身混凝土设计强度等级 C30，抗渗等级 S6，墙体厚度为 580 毫米，槽段墙板深度为 9.2 米，槽段宽度有 3.7 米、2.56 米、2.2 米和 2.375 米四种。为了减小槽段重量又满足受力要求，预制墙槽段在底板厚度范围内设计成实心截面，在其余设计成圆形开孔截面，开孔直径为 360 毫米，孔距为 520 毫米。预制地下连续墙施工接头采用树根桩接头，在树根桩两侧采用注浆两次注浆处理。每幅预制墙墙底设置两根注浆管，注浆总量不小于  $2\text{m}^3$ ，且应上泛至墙顶，可有效控制了墙身的沉降。

从实施结果来看，预制地下连续墙的施工相当顺利，施工快捷，不占绝对工期。经基坑开挖后复核，所有技术指标均满足规范和设计要求，墙体受力性能良好，其墙面质量、平整度、接头处的抗渗水等技术指标均大大优于现浇的地下连续墙。经测试墙体垂直度偏差均小于 1/300。预埋件的定位准确，其位置偏差均小于 2cm。基坑施工过程中周边管线及路面变形均满足规范要求。

## 11.5 地下连续墙工程问题的处理

### 11.5.1 地下连续墙防渗漏措施

地下连续墙由于施工工艺原因，其槽段接头位置是最容易发生渗漏的部分，同时由于施工工序多，每个环节的控制都相关成墙质量。有必要对渗漏情况作针对性专门处理。

#### 1. 地下连续墙接缝渗漏

地下连续墙接缝的渗水采取双快水泥结合化学注浆的方式处理。

应先观察地下连续墙接缝湿渍情况，确定渗漏部位，并对渗漏处松散砼、夹砂、夹泥进行清除。其次手工凿“V”形槽，深度控制在 50~100mm。然后按水泥：水=1：0.3-0.35(重量比)配制双快水泥浆作为堵漏料并搅拌至均匀细腻，将堵漏料捏成料团，放置一会儿(以手握有硬热感为宜)后塞进“V”形槽，并用木棒挤压，轻砸使其向四周挤实。若渗漏比较严重，则采用特种材料处理，埋设注浆管，待特种水泥干硬后 24 小时内注入聚氨酯。

#### 2. 墙身有大面积湿渍

针对墙身有大面积湿渍的部位，采用水泥基型抗渗微晶涂料涂抹。

首先对基面进行清理，将基面上的突起、松散砼、水泥浮浆、灰尘，且用钢丝刷将基面打磨粗糙后，用水刷洗干净。然后用水充分湿润基面，将结晶水泥干粉和水按 1：0.22~0.24（重量比）混合，搅拌均匀，用鬃毛刷将混合好涂料涂地地下连续墙有湿渍基面（二涂），每拌料宜在 25 分钟内用完。

#### 3. 接缝严重漏水

由于锁口管拔断或浇注水下混凝土时夹泥等原因引起的严重漏水。

先按地下连续墙渗漏作临时封堵、引流。根据现场情况进行处理：a.如是锁口管沉断引起，按地下连续墙渗漏作临时封堵、引流后，可将先行幅钢筋笼的水平筋和拔断的锁口管凿出，水平向焊接  $\Phi 16@50\text{mm}$  以封闭接缝（根据需要可作加密）。b.如是导管拔空等引起的地下连续墙墙缝或墙体夹泥，则将夹泥充分清除后再作修补。再在严重渗漏处的坑外进行双液注浆填充、速凝，深度比渗漏处深 3m。

双液注浆参数：体积比—水泥浆：水玻璃=1：0.5。

其中，水泥浆水灰比 0.6，水玻璃浓度 35Be°、模数 25。

注浆压力：视深度而定（0.1~0.4MPa）

### 11.5.2 地下连续墙的墙身缺陷的处理措施

#### 1. 地下连续墙表面露筋及孔洞的修补

由于地下连续墙采用泥浆护壁，水下浇筑混凝土，易出现墙体表面夹泥，主筋外露现象。

当基坑开挖后，遇地下连续墙表面出现露筋问题，应及时处理。首先将露筋处墙体表面的疏松物质清除，并采取清洗、凿毛和接浆等处于措施，然后用硫铝酸盐超早强膨胀水泥和一定量的中粗砂配制成的水泥砂浆来进行修补。如再槽段接缝位置或墙身出现较大的孔洞，再采用上述清洗、凿毛和接浆等处于措施后，采用微膨胀混凝土进行修补，混凝土应较墙身混凝土至少高一级。

### 2. 地下连续墙的局部渗漏水的修补

地下连续墙常因夹泥或混凝土浇筑不密实而在施工接头位置甚至墙身出现渗漏水现象，为了防止围护体漏水影响周边环境和危害基坑安全，必须对渗漏点进行及时修补。堵漏施工工艺为：首先找到渗漏来源，将渗漏点周围的夹泥和杂质去除，凿出沟槽，并清水冲洗干净；其次在接缝表面两侧一定范围内凿毛，凿毛后在沟槽处埋入塑料管对漏水进行引流，并用封缝材料（即水泥掺合材料）进行封堵，封堵完成并达到一定强度后，再选用水溶性聚氨酯堵漏剂，用注浆泵进行化学压力灌浆，待浆液凝固后，拆除注浆管。该方法施工方便，止水可靠，目前在工程中应用较多。

### 3. 地下连续墙槽段钢筋被切割导致结构损伤

实际工程中如遇到成槽范围内有地下障碍物，又无法清除时，为了保证钢筋笼的下放，需将钢筋笼切割掉一部分，再下放钢筋笼并浇筑混凝土，这使得连续墙结构局部受到损伤。对于这种情况，通常的修复方法是：

#### (1) 增加一幅地下连续墙槽段

如地下连续墙破损较严重，在破损的地下连续墙外侧增加一幅地下连续墙槽段，如图 2-51 所示，但增加一幅地下连续墙后并不能解决缺口位置的渗漏水问题，为防止基坑开挖阶段漏水，必须在连续墙接缝位置增加高压旋喷桩等止水措施。在加固和止水措施施工完后，方可进行坑内土体开挖。如破损位置位于基底以上，可在开挖后再对切割处进行修复。具体的修复方法是：凿去该处的劣质混凝土，将相邻两槽段的钢筋笼在接缝处凿出，清洗两侧面，焊上这部分所缺的钢筋，并封上连续墙内侧的模板，在此空洞内浇筑与地下连续墙相同强度等级或高一等级的混凝土，同时在地下连续墙内侧设置钢筋混凝土内衬墙等，以完成地下连续墙的修复。

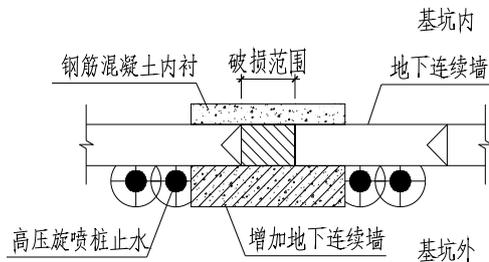


图 2-51 外侧增加地下连续墙补强

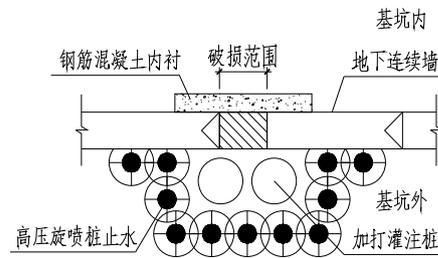


图 2-52 外侧增加钻孔灌注桩补强

#### (2) 外侧增加钻孔灌注桩的修复方法

如果地下连续墙的破损情况不很严重，被切割掉的钢筋笼仅是局部、或一小部分，那么就可以在坑内施工钢筋混凝土钻孔灌注工程桩时，利用施工机械在地下连续墙外侧增做几根钻孔灌注桩进行加固，如图 2-52 所示。钻孔灌注桩做好后也需要在其两侧和桩间进行高压旋喷注浆，以形成隔水帷幕。完成了这些加固处理后，如破损位置位于基底以上，即可如前述那样进行坑内土体开挖和地下连续墙的修复。

#### (3) 在地下连续墙外侧注浆加固

如地下连续墙破损位置出现在基底以下受力较小位置，且破损情况不严重，不影响地下连续墙的整体受力性能，可在破损位置仅施工旋喷桩，以确保地下连续墙的止水性能，如图 2-53 所示。

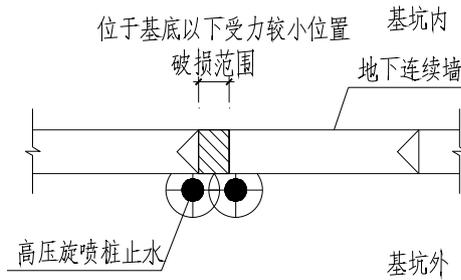


图 2-53 外侧采用旋喷桩止水

### 11.5.3 地下连续墙的修补

尽量采取各种方法加以事先预防，但由于在水下进行混凝土浇筑，还可能会碰到各种意想不到的复杂条件，在施工实践中还可能发生钢筋笼因槽段内有混凝土占据而放不下去，导致钢筋笼被切割掉一部分，使连续墙结构受到损伤的质量问题。通常的修复方法是：

#### 1. 增做一幅地下连续墙槽段加以修复

在破损的地下连续墙外侧增做一幅地下连续墙槽段，但必须注意的是，增做一幅地下连续墙后并不能解决原切割部分地下连续墙的渗漏水问题。在外侧完成这些加固止水封堵处理后，方可进行坑内土体开挖，在开挖后再对切割处进行修复。具体的修复方法是：凿去该处的劣质混凝土，将相邻两槽段的钢筋笼在接缝处凿出，清洗两侧面，焊上这部分所缺的钢筋，并封上连续墙内侧的模板，在此空洞内浇筑与地下连续墙相同强度等级或高一等级的混凝土，以完成地下连续墙的修复。这种做法安全可靠，但代价较高。

#### 2. 外侧增做钻孔灌注桩的修复方法

如果地下连续墙的破损情况不很严重，被切割掉的钢筋笼仅是局部、或一小部分，那么就可以在坑内施工钢筋混凝土钻孔灌注工程桩时，利用施工机械在地下连续墙外侧增做几根钻孔灌注桩进行加固，钻孔灌注桩做好后也需要在其两侧和桩间进行高压旋喷注浆，以形成隔水帷幕。完成了这些加固处理后，即可如前述那样进行坑内土体开挖和地下连续墙的修复。这种方法比较经济。

#### 3. 在地下连续墙外侧注浆加固

如同前述，当施工出现质量问题，需要进行钢筋笼切割时，其槽壁两侧土体一定有较大扰动和坍塌，所以当地下连续墙施工完成后外侧土体内常常有较多空隙需要进行注浆加固，以防止外侧相邻建筑物的长时间的固结沉降。因此，如果是局部较小的钢筋笼切割，可结合外侧注浆加固，做好地下连续墙外的隔水挡土帷幕，而后在土方开挖后，对原钢筋笼切割部分进行修复，这种方法最为经济。

## 11.6 工程实例

### 11.6.1 上海银行大厦（现浇地下连续墙、T型槽段）

#### 1. 工程概况

上海银行大厦地处上海市浦东新区陆家嘴地区，主体结构由一栋 3 层裙楼和一栋 46 层框筒结构的主楼组成。整体设置三层地下室，基础采用桩基筏板形式，主楼底板厚 3.2m，裙房底板厚 1.0m，主楼桩型为  $\Phi 600$  (AB 型) PHC 桩，桩尖持力层为⑦<sub>2</sub>层粉细砂；裙房桩型为 450×450 抗拔混凝土方桩，桩尖持力层为⑥层粉质黏土。采基坑面积约为 7500m<sup>2</sup>，基坑开挖深度为主楼区 17.15m，裙楼区 14.95m。

场地内缺失第②层褐黄色粉质黏土、第③层淤泥质粉质黏土和第⑧层黏性土，裙房区第⑥层暗绿色硬土层，受古河道影响，具有一定起伏。场地浅层②<sub>3</sub>层土为褐灰色砂质粉土夹黏质粉土，层厚约7.3m，透水性强，渗透系数 $k=1.45 \times 10^{-4}$ cm/s，极易产生塌方、流砂等事故。

## 2. 围护结构设计

### (1) 墙体设计

本工程采用地下连续墙作为基坑围护结构，基坑施工阶段地下连续墙既作为挡土结构又作为止水帷幕，同时在永久使用阶段地下连续墙同时作为主体地下室结构外墙。主楼区域的地下连续墙厚度为1000mm，裙楼区域的墙厚为800mm。基坑内竖向设置三道水平钢筋混凝土支撑系统。

本工程银城路侧地墙承受上部结构垂直荷载，槽段接头设计采用十字穿孔钢板刚性接头。其它三侧地下连续墙槽段间均采用圆形锁口管柔性接头。

银城路侧基坑开挖深度达17.15m，基坑竖向仅设置三道钢筋混凝土水平支撑系统，而该侧不远处地下埋藏有一条共同沟，因此基坑开挖阶段对该侧围护墙的侧向位移提出较高的控制要求。同时银城路一侧主体结构有8根型钢柱直接落在该侧的地下连续墙顶部，需在地下连续墙中设置钢柱，作为结构永久使用阶段的竖向承重构件，因此其竖向承载力及沉降应满足结构正常使用阶段的要求。考虑到以上所述情况，为满足基坑工程施工施工期间及结构永久使用阶段对地下连续墙不同的使用要求，针对银城路侧地下连续墙采取如下一系列的技术措施：

- 该侧地下连续墙长度适当增加，将地下连续墙底置于较好持力层，根据该区域土层地质的实际分布情况，墙底选择进入相对稳定第⑦层；
- 银城路侧地下连续墙设置T型槽段，T型槽段的布置结合8根型钢立柱的布置位置。T型槽段一方面由于梁肋的增设其整体抗弯刚度较常规直型槽段得到显著提高，另一方面由于增大了地下连续墙和土层接触面，从而提高了地下连续墙的竖向承载能力，经过计算单幅槽段均可独立满足主体结构竖向承载要求。
- 该侧地下连续墙槽段间采用十字钢板刚性接头，该接头可使相邻地下连续墙槽段共同承担上部结构的垂直荷载，协调地下连续墙槽段间的不均匀沉降。
- 采取地下连续墙墙底注浆的技术措施，在减少地下连续墙沉降的同时，还可大幅提高地墙的竖向承载能力；
- 主体结构在银城路侧地墙内部同时设置边桩，以增加竖向承载的安全储备，并协调地下连续墙和主体结构的沉降。

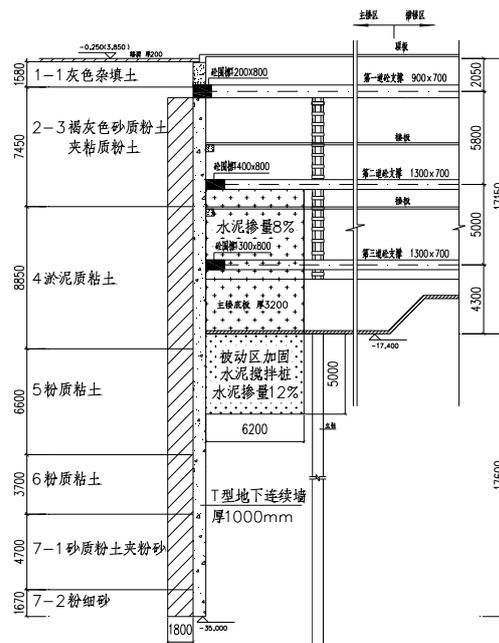


图 11-56 围护结构剖面图

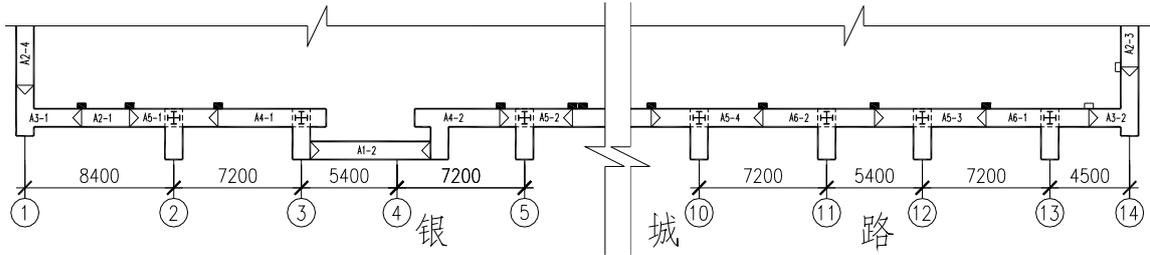


图 11-57 银城路侧地下连续墙 T 型槽段布置图

### 3. 地下连续墙施工

#### (2) 本工程地墙施工的主要难点及特点

- a. 墙底土层较坚硬，给成槽掘进带来困难。⑦<sub>1</sub> 层土比贯入阻力  $P_s=11.06\text{MPa}$ 、标贯击数  $N=39$ ；⑦<sub>2</sub> 层土更甚（俗称“铁板砂”），其比贯入阻力  $P_s>25.0\text{MPa}$ （相当于 C25 混凝土）、标贯击数  $N>50$ 。土层硬，对成槽施工效率带来极大难度，直接影响到工期进度。同时场地⑦层土为承压含水层，对槽壁稳定也是一个不利因素。
- b. 场地浅层杂填土较厚，为 1.2~2.9m，一般由碎石、煤渣组成；尤其是浅层存在较深厚的透水性土层—②-3 层砂质粉土夹黏质粉土，该层层厚达 7.3m，渗透系数  $k=1.45\times 10^{-4}\text{cm/s}$ ，极易产生塌方、流砂等事故，对槽壁稳定极为不利。
- c. 地墙施工前期场地大范围高密度的满堂打入桩施工，对场地上部软弱地基土扰动较大，打桩产生的超孔隙水压力还未及时消散，土体强度还未恢复就要求紧接进行地墙施工，这对成槽期间槽壁的稳定更是加剧了难度。
- d. 地墙设计从墙深、墙厚到接头类型等种类繁多，需要合理规划槽段施工顺序。
- e. 因受力需要，槽段设计含钢量较大，较大的几幅 T 型槽段钢筋笼较重，最大重量达 50 吨以上，因此对吊点可靠性、设备吊装能力等均要求较高。
- f. 墙体垂直度要求高（1/500），工期要求紧。等等。

#### (3) 地墙施工要点

- a. 选择机械性能好，挖槽能力大且带自动纠偏的高规格液压抓斗式成槽机（真砂 MHL 型），来保证成槽掘进与垂直度。施工实际反映下来，成槽机进入硬层⑥层土时基本能保证成槽掘进，进入⑦层时成槽效率下降较明显，经抓斗斗齿调整，还是“啃”下了⑦<sub>2</sub> 层难度。
- b. 为确实保障在本工程诸多不利条件下成槽的稳定性，经设计、施工、业主等多方协商，最终决定所有地墙槽段两侧采取搅拌桩槽壁加固措施，深度穿过②-3 层进入粘性土层。如图 11- 所示。为此控制水泥土搅拌桩的平面位置及垂直度就显得比较重要。若搅拌桩太靠近地墙，一旦垂直度控制不好导致桩身进入地墙界限，将成为障碍物加大成槽难度；若搅拌桩离地墙较远，则其内侧未加固土体易产生塌方，增加材料成本。最后确定搅拌桩与地墙间的净距为 100mm，同时严格控制搅拌桩平面位置偏差（ $\leq 2\text{cm}$ ）与垂直度偏差（ $\leq 1/200$ ）。



国外进口施工设备，但由于没有相关的施工经验，地下连续墙的成槽开挖、钢筋笼的吊放安装以及水下混凝土的浇捣等施工技术也不成熟，势必会对地下连续墙的施工质量造成一定的不利影响。而且地下连续墙的墙体厚度越大，成槽时间越长，成槽时槽壁的稳定性越差，墙体施工质量越难以保证。

b. 受力分析：

本方案设计采用1200mm厚的地下连续墙作为围护结构，施工阶段内部逆作四层结构梁板替代水平支撑结合三道临时环形支撑的多道支撑体系。

在常用的平面分析模式下，地下连续墙是通过竖向梁作用来挡土和传递水土压力，作用在地下连续墙外侧的水土压力全部由内支撑体系和坑内土体提供的抗力来平衡。墙体本身并不能提供水平抗力，作为抗弯构件，其厚度（抗弯刚度）决定了变形与受力的大小。在这种受力模式下，计算得到的地下连续墙变形与弯矩无疑代表了一种极端值。计算结果得知，如采用平面计算方法，地下连续墙的水平变形为54.4mm，尚能满足对变形控制的要求。地下连续墙的最大正弯矩为4196.6kN.m，表明产生了较大的弯矩，但仍在1.2m厚地下连续墙的截面承受能力之内，只是竖向配筋率较大。

在三维分析模式下，圆筒形地下连续墙的空间效应显著，外部侧向水土压力很大部分由地下连续墙自身的环向拱作用来承担，相应减轻了地下连续墙梁结构的负担，克服了竖向应力过大的缺点，且通过环向拱作用直接提供水平抗力减小内支撑受力，使结构整体应力分布均匀，设计趋于经济合理。三维计算结果表明地下连续墙是以环向拱受力为主、竖向梁受力为辅的结构体系。

考虑到本工程地下连续墙的曲率半径较大，且在开挖过程中可能出现卸荷不对称性等因素，圆筒形地下连续墙并非处在理想的均匀围压受力状态，可能会增加地下连续墙的受力。在逆作施工的过程中，逐步浇筑开挖面以上的内衬结构墙，使地下连续墙和内衬结构墙和二为一，又进一步提高了墙体受力的安全储备。

c. 止水要求：

出于本工程建筑用途的考虑，地下结构外墙的止水要求较高。地下连续墙本身采用防水混凝土浇筑，同时设置止水性能良好的槽段接头，接头位置还在坑外设置了高压旋喷桩止水。开挖以后紧跟施工800mm厚的内衬结构墙，施工质量更能得到保证。双墙一同工作，确保结构外墙的止水效果。

综上所述，1200mm厚的地下连续墙完全可以满足支护结构的受力要求。地下连续墙和内衬结构墙二者的协同工作，为外墙的止水提供了可靠的保证。

(2) 地下连续墙的深度

地下连续墙的插入深度直接关系到整体稳定、坑底抗隆起和抗倾覆等各项稳定性指标的计算。一般来说，地下连续墙的插入深度越大，基坑稳定性越好，对周边环境的影响越小，当然造价也越大。对于超深地下连续墙来说，插入深度越大，施工难度越大，施工速度也就越慢。因此，地下连续墙深度的确定要遵循安全、经济、合理的原则。本工程基坑底面已进入⑦<sub>1</sub>砂质粉土层，考虑将连续墙底置入⑧<sub>1</sub>粉质粘土层，地下连续墙深度57.5m。

一、圆筒形地下连续墙施工

(1) 本工程地墙施工的主要难点及特点

- a. 地下连续墙设计为1200mm厚，埋深57.5m，为超深大厚度地下连续墙。地下连续墙需穿越⑦<sub>1</sub>层砂质黏土和粉砂层、⑦<sub>2</sub>层粉砂层，尤其是⑦<sub>2</sub>层粉砂层（厚约8.3m），标贯击数达50.1击，比贯入阻力达23.23MPa，地下连续墙施工成槽难度相当大。

- b. 成槽垂直度要求小于 1/600，在超深的地墙施工中的高垂直度控制难度比较大。
- c. 地下连续墙成槽时槽壁稳定性控制难度高。
- d. 地下连续墙需穿越⑦<sub>1</sub>层砂质黏土和粉砂层、⑦<sub>2</sub>层粉砂层，层底夹大量粉砂，而设计沉渣控制要求较高（沉渣厚度≤10cm）。因此，槽底沉渣控制难度较大。
- e. 成槽厚度大，接头形式采用 H 型钢接头，进行混凝土浇筑时，如何采取有效措施来防止钢筋混凝土绕流，避免给后续槽段的施工带来不利影响也是施工中面临的一个难题。



图 11-1 施工现场实景图

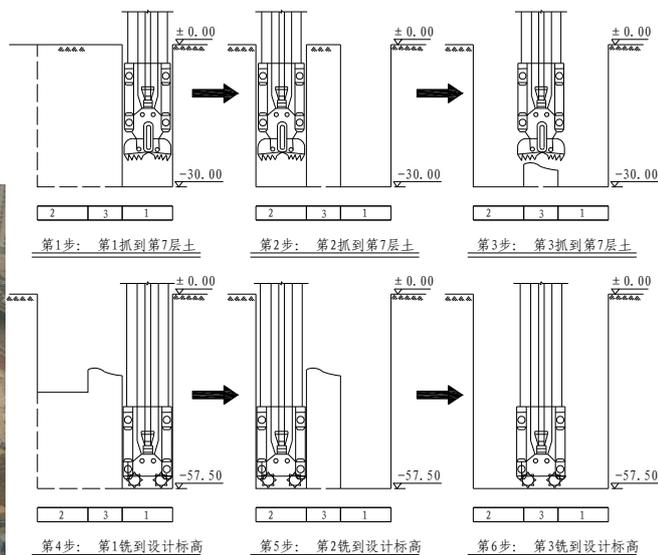


图 11-1 抓铣结合工艺流程图

## (2) 施工措施及控制手段

### a. 成槽设备的选择

目前上海地区地下连续墙成槽工艺主要采用抓斗式成槽机和“二钻一抓”成槽的施工工艺。抓斗式成槽机成槽的施工方法速度较快，但是成槽垂直度只能控制在 1/300 以内，远远达不到 1/600 的槽壁垂直度要求，该工艺也无法在上海地区地下第⑦层土中成槽施工；“二钻一抓”成槽施工工艺成槽速度相对较慢，垂直度也只能控制在 1/300 以内。

结合本工程难点中超深大厚度地下连续墙成槽的各项要求，综合考虑土层特点及垂直度控制，决定了抓、铣结合的成槽工艺。因此，本工程引进铣槽机（MBC30 液压铣），结合 CCH500-3D 真砂抓斗成槽机配套进行地连续墙成槽施工。

### b. 成槽垂直度的控制

工程中采用的成槽机和铣槽机均具有自动纠偏装置，可以实时监测偏斜情况，并且可以自动调整。施工时按照设计槽孔偏差控制斗体和液压铣铣头下放位置，将斗体和液压铣铣头中心线对正槽孔中心线，缓慢下放斗体和液压铣铣头施工成槽。

抓斗每抓 2~3 斗即旋转斗体 180 度，每抓 2m 检测中心钢丝绳偏移距离，做到随时监控槽孔偏斜，以此保证槽孔垂直。每一抓到底后（到砂层），用 KODEN 超声波测井仪检测成槽情况，如果抓斗在抓取上部黏土层过程中出现孔斜偏大的情况，可用液压铣吊放自上而下慢铣修正孔形，但槽孔偏斜关键在抓斗抓取过程中控制。

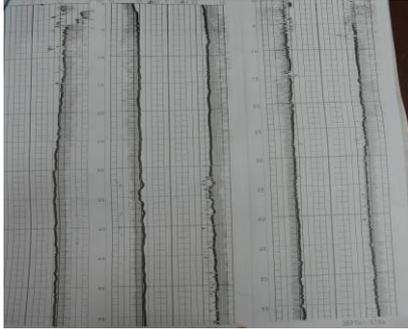


图 11-1 某槽段侧壁曲线

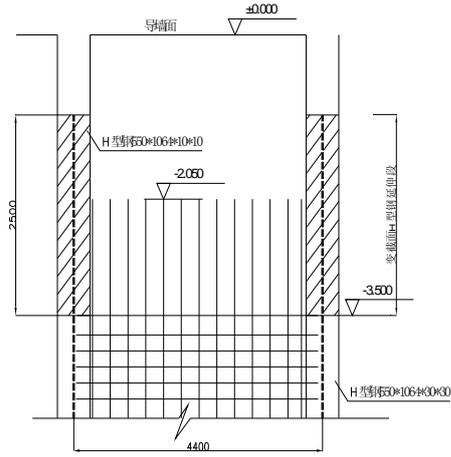


图 11-1 顶部防砼向两侧溢出措施图

### c. 槽壁稳定性的控制

工程中根据实际试成槽的施工情况，调节泥浆比重，控制在 1.18 左右，但不得大于 1.2，并对每一批新制的泥浆进行泥浆的主要性能的测试。并控制成槽机掘进速度和铣槽进尺速度，特别是在软硬层交接处，以防止出现偏移、被卡等现象。施工过程中大型机械不得在槽段边缘频繁走动，泥浆应随着出土及时补入，保证泥浆液面在规定高度上，以防槽壁失稳。

另外，在地下连续墙外侧浅部采用水泥搅拌桩加固，起到了地下墙施工时的隔水和土体加固作用；对于暗浜区，采用水泥搅拌桩将地下墙两侧土体进行加固，以保证在该范围内的槽壁稳定性。

### d. 槽底沉渣的控制

施工中采用液压铣及泥浆净化系统联合进行清孔换浆，将液压铣铣削架逐渐下沉至槽底并保持铣轮旋转，铣削架底部的泥浆泵将槽底的泥浆输送至泥浆净化系统，由除砂器去除大颗粒钻渣后，进入旋流器分离泥浆中的细砂颗粒，然后进入预沉池、循环池，进入槽内用于换浆的泥浆均从鲜浆池供应，直至整个槽段充满新浆。

### e. 混凝土浇筑时的防绕流控制

施工中将“H”型钢底端接长 300mm~500mm，以阻挡钢筋混凝土从槽底流向相邻槽幅。采取在“H”型钢边缘包 0.5mm 厚铁皮，一期槽段空腔部分采用石子回填等措施防止混凝土侧向绕流。具体详见右图

此外，由于“H”型钢比钢筋笼顶低 1200mm，在浇筑砼时为确保墙顶有效砼强度必须有翻浆 300~500mm 的高度，因此砼翻浆从槽端两侧溢出，针对以上情况将采取以下措施：

- (a) 把一期槽幅二侧“H 型钢”以变截面形式接长至导墙面-1.0m 处，这样就可以阻挡砼翻浆向两侧溢出。
- (b) 导墙面至-1.0m 处范围采用可拆式挡板；

## 二、工程监测及结果评价

(1) 本工程中采用了抓铣结合的成槽工艺，经过工程实践验证，这种成槽工艺在上软下硬的土层中成槽是合理而有效的。工程中，地下连续墙的高垂直度，沉渣厚度等方面均较好的达到了设计要求，同时成槽效率也大大加快。

### a. 成槽垂直度均满足设计要求

经检测，已完成的地下连续墙垂直度均小于 1/600，达到了设计要求，成槽效果良好。

### b. 沉渣控制符合设计要求

工程中采用了专门的泥浆处理循环系统，沉渣厚度控制在 20mm~80 mm，平均为 40mm，均小于 100 mm，满足了设计要求。循环泥浆比重控制在  $1.16\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.19\text{g}/\text{cm}^3$ ，平均控制在  $1.18\text{g}/\text{cm}^3$ ，泥浆含砂率控制在 2~3%。

- (2) 工程中采用的专用泥浆处理循环系统，能控制泥浆指标、槽底沉渣厚度，并提高泥浆的循环使用与回收，解决了第⑦层砂性土破坏泥浆的问题。泥浆循环系统确保了成槽的顺利进行，槽壁的稳定性得到有效的保证，各阶段的泥浆性能及沉渣厚度均符合设计要求。
- (3) 工程中采用的 H 型钢接头型式，经实践证明，效果较明显，缩短处理头时间，节约工期与成本，产生了较好的经济效益。但根据工程中的实测与分析，如果施工中钢筋混凝土浇筑过程不能得到很好的控制，接头 H 型钢容易产生侧向变形，如果变形较大的话，将会影响二期槽段施工，施工中必须引起足够的重视。
- (4) 工程中采用的防混凝土绕流措施起到了良好的效果，有效的解决了 H 型钢接头容易产生钢筋混凝土绕流的弊病，保证了工程二期槽段的顺利施工，确保了地下连续墙的施工质量。但工程实践中，用于防钢筋混凝土绕流的碎石也存在着绕流的现象，因此，为了确保钢筋混凝土浇筑的质量，应采取有效措施来防止碎石绕流。

### 11.6.3 中船长兴岛造船基地（格型地下连续墙、十字钢板接头）

#### 一、工程概述

中船长兴造船基地位于上海市宝山区长兴岛新开港的下游以东的岸线区域内，长江口深水航道南港南、北槽分流口的北侧，距园沙航道最近距离仅 875m。

本次工程施工内容主要有船闸（舾装港池进出通道 240×40m）、舾装港池（约 11.5 万 m<sup>2</sup>）、船坞（240×40m）、浮箱平台（220×91.3m）、露天船台（210×30m）、室内水平船台（8 个）、横移区（11800m<sup>2</sup>）、船坞水泵房等。

第②<sub>3</sub>层灰色砂质粉土，呈松散~稍密状，该层土的渗透性较大，在一定的动水压力条件下极易产生流砂、管涌等不良地质现象。

第②<sub>2</sub>中所夹的淤泥质黏性土及第④层灰色淤泥质土，呈流塑状、强度低、高压缩性等软弱黏性土特征；在陆域拟建大部分区域内均有分布。

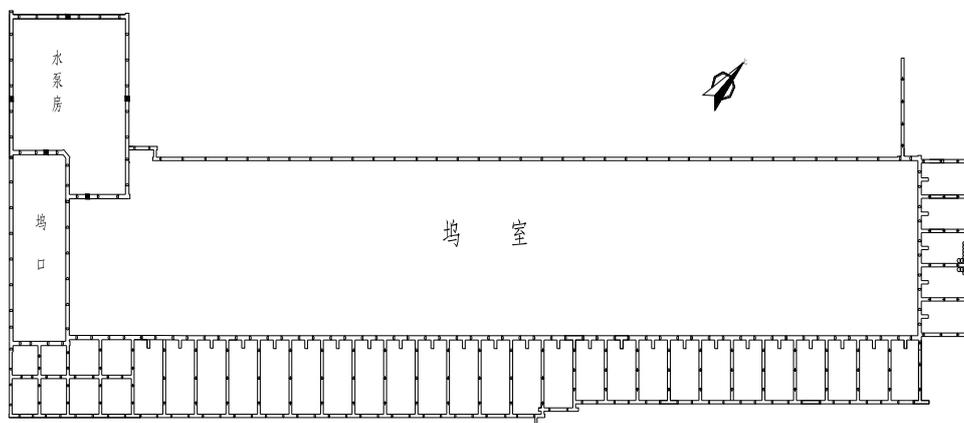
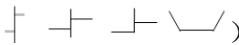


图 11-1 槽段分幅图

#### 二、设计介绍

本工程地下连续墙作为槽段的形状规格多样，且还有不规则形状的槽段。船坞东侧及西侧均设计为格型地下连续墙，共分为 216 个槽段，其中 T 字型槽段共 96 幅，占据将近半数，十字型槽段 3 幅，L 型槽段 1 幅，不规则异型槽段 5 幅（形如 ），其余均为一字型槽段。格型地墙分部区域总长达 280 余米。（见地墙槽段分幅图）。

#### 三、地下连续墙的施工

##### 1. 本工程地墙施工的主要难点及特点

- a. 本工程地下连续墙槽段的形状规格多样, 且还有不规则形状的槽段。格型地墙分部区域总长达 280 余米, 数量大, 槽段形式多样化成为本工程地墙施工的一大难点。
- b. 工程为大型临水基坑, 所处场地地质条件差。场地北侧范围内分布有较多的河、沟、鱼塘等地表水体, 浅部②<sub>1</sub>层灰黄色粉质黏土缺失, 而下层土质以淤泥质土为主, 对地墙施工极为不利。
- c. 地下连续墙施工场地内地坪标高约为 2.5m~3m, 而地墙顶标高约为-2.05m 左右。在满足常规的施工技术要求的同时, 又要针对墙顶落低对地墙成槽采取有效措施及施工技术以保证地下连续墙的顺利施工。
- d. 本工程需要先完成约 2300 根预制打入桩的施工, 桩非常密集, 且距离坞室地墙只有约 3m, 在桩基施工后土体扰动必然对地墙成槽有较大的影响, 而工期的要求又不可能保证相应的土体休止期, 因此打桩后土体扰动对地墙成槽的影响也是本工程一个施工难点。

## 2. 施工措施及控制手段

### a. 成槽设备的选择

工程位于上海市宝山区长兴岛新开港的下游以东的岸线区域内, 地质条件具有上海典型的浅层以软质黏土为主的特点。本工程地墙长度 27~36m, 并结合场地情况及工程经验, 配备 1 台真砂成槽机, 配备 DHG-C 抓斗, 1 台宝鹅成槽机, 采用抓斗式成槽工艺进行施工。

### b. 槽壁稳定的控制

本工程地下连续墙施工要满足常规的施工技术要求, 又有其特殊的地方。本工程地下连续墙施工中, 影响槽壁稳定的因素很多。针对墙顶落低、地质条件差、槽段形式复杂(异型、格型)、打桩后土体扰动对地墙成槽有一定的影响的施工难点及特点, 需要采取一定措施及施工技术以保证地下连续墙的顺利施工。

(a) 槽壁土加固: 本工程在成槽前对地下连续墙槽壁进行加固, 为减少加固成本, 仅在部分复杂形式的槽段两侧进行加固。如十字型及异型槽段。加固方法采用双轴深层搅拌桩工艺及高压旋喷桩工艺, 在槽段边距离搅拌桩边 10cm 处进行两侧加固, 加固深度为 15m。

(b) 加强降水: 通过降低地墙槽壁四周的地下水位, 防止地墙在浅部砂性土中成槽开挖过程中易产生塌方、管涌、流砂等不良地质现象。本工程结合后期基坑降水布置, 先进行地墙周围的管井降水, 间距约 20m 一口, 距离地墙约 5m。并结合进行轻型井点降水: 在坞墙的外侧的地下连续墙成槽施工前在外侧布置一排轻型井点, 井点深 7m, 井点间距 1.5m, 一套 60m, 约 5 套。来降低浅部砂性土中的地下水位。

### c. 施工工艺优化: 施工中根据以往施工经验, 对地下连续墙施工工艺的各环节进行了优化。

#### (a) 合理安排各槽段施工顺序

为尽量减少各槽段成槽之间的相互影响, 先后施工的两个槽段应尽量隔开一定的距离。

#### (b) 导墙形式的调整

通常地下连续墙导墙采用“] [”型整体式钢筋钢筋混凝土结构, 在本工程施工中, 改成“] [”形, 即将导墙下部加宽至 1 米, 以增强上部槽壁的稳定和导墙的刚度。在导墙拆模后除了在导墙中间用圆木对撑外, 本工程还特制了预制钢筋混凝土挡板插入导墙中间, 以确保槽段尺寸。

#### (c) 控制地下连续墙周边荷载

地下连续墙周边荷载主要是大型机械设备如成槽机、履带吊、土方车及钢筋混凝土搅拌车等频繁移动带来的压载及震动, 为尽量使大型设备远离地墙, 施工中钢筋笼的吊放采用回转半径大的 150t 履带吊, 对成槽机、土方车及钢筋混凝土搅拌车等必须靠近地下连续墙的设备, 在正处施工过程中的槽段边铺设路基钢板加以保护, 并且严禁在槽段周边堆放钢筋等

施工材料。

(d) 优化泥浆配比

在地墙施工时，泥浆性能的优劣直接影响到地墙成槽施工时槽壁的稳定性的，是一个很重要的因素。为了确保槽壁稳定，选用黏度大、失水量小、能形成护壁泥薄而坚韧的优质泥浆，并且在成槽过程中，经常监测槽壁的情况变化，并及时调整泥浆性能指标，添加外加剂，确保土壁稳定，作到信息化施工；及时补浆，保证泥浆液面高出地下水位 50~80cm，并不低于导墙顶面 20~30cm。施工过程中，泥浆比重控制在 1.15~1.20 克/立方厘米，黏度 25~28 秒(漏斗黏度)，PH 值 9~10。

(e) 缩短每幅地下连续墙施工周期

槽壁放置时间越短，对槽壁稳定越有利。为此施工中，加强施工交底与协调，使各施工环节环环相扣，不脱节。施工间隙，加强设备的保养与维护，减少故障频率。关键岗位安排技术好、经验丰富、操作熟练的人员。通过这些措施，使每幅地下连续墙的平均施工周期控制在 16~18 小时之间。

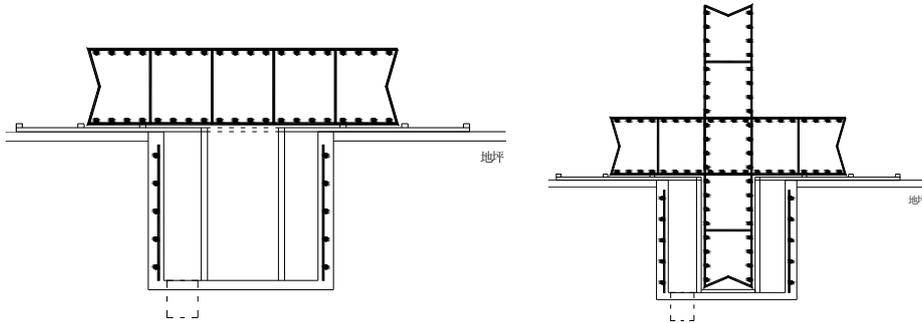


图 11-1 异型钢筋笼加工平台

d. 异型钢筋笼的制作与吊装

(a) 异形钢筋笼的制作：本工程地下连续墙槽段的形状规格多样，且还有不规则形状的槽段。比如 L 型、T 型、“十”字型等槽段幅数占据将近半数。整体加工异形槽段中钢筋笼时，因为与一般一字型槽段钢筋笼相差较大，在通常的钢筋笼加工平台上难以完成异形钢筋笼的绑扎和焊接。

本工程中独创的加工平台既能提供异形钢筋笼绑扎空间，保证钢筋笼尺寸，亦可作为普通钢筋制作平台使用，一举两得。根据成槽设备的数量及施工场地的实际情况搭设钢筋笼制作平台，本工程搭设 2 只可移动钢筋笼制作平台，现场加工钢筋笼，分布间隔为 50~100m，平台尺寸 7×32 米。

以在平台上进行“十”字型钢筋笼加工为例：

步骤一：槽钢架上加工“十”字型钢筋笼一肢；

步骤二：钢筋工进入槽内加工“十”字型钢筋笼另一肢，完成“十”字型钢筋笼的加工。

用钢板覆盖在开槽处，即可制作普通钢筋笼。

(b) 异形钢筋笼的吊装：由于地下连续墙异形槽段的钢筋笼存在不对称性，起吊时吊点的把握和入槽时钢筋笼的垂直度把握都很难控制，钢筋笼的变形也较大，因此施工前通过有限元软件对钢筋笼的起吊进行模拟分析，通过计算结论来指导施工。

在钢筋笼水平起吊时，钢筋笼本身的应力分布处于均匀且较小的状态，在 5Mpa~11Mpa，钢筋笼最大变形 17.13mm；钢筋笼入槽前的竖直吊装阶段，钢筋笼本身的应

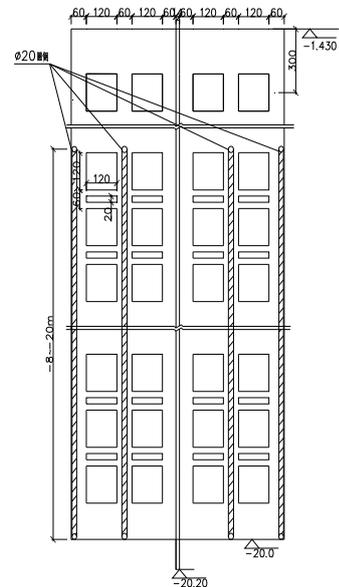


图 11-1 十字钢板

力分布处于均匀且较小的状态，在 1Mpa~8Mpa，钢筋笼最大变形 1.9mm。通过计算结论，确定了合理的起吊点位置和起吊。

筋笼最重为 42.5t，采用 1 台 150 吨和 1 台 100 吨履带吊抬吊，主钩起吊钢筋笼顶部，副钩起吊钢筋笼中部，多组葫芦主副钩同时工作，使钢筋笼缓慢吊离地面，并改变笼子的角度逐渐使之垂直，吊车将钢筋笼移到槽段边缘，对准槽段按设计要求位置缓缓入槽并控制其标高。钢筋笼放置到设计标高后，利用槽钢制作的扁担搁置在导墙上。

e. 受拉状态下十字钢刚性接头的调整

原设计刚性接头十字钢板开孔周围均有小钢板，工作量很大，根据现场实际施工情况及满足设计抗剪力要求的前提下，对十字钢板的具体节点作出以下调整：将原十字钢板开孔周围的小钢板改为通长的  $\Phi 20$  圆钢。

#### 四、工程监测及结果评估

1. 通过采用上述施工措施及方法，本工程格形地下连续墙的施工顺利完成，施工过程绝大多数槽段未发生大的坍方现象。
2. 虽然本工程地墙顶混凝土未浇筑至导墙底部，但经过一系列的施工措施，仅有少数几幅槽段发生导墙塌坍情况，其槽段导墙均保持完好。
3. 通过槽壁加固措施，异型槽段钢筋混凝土浇筑方量控制在正常范围以内，并且钢筋笼下放均比较顺利。
4. 本工程针对粉土、打桩扰土、墙顶落低、异型地墙施工等不利因素，采取了多种措施综合利用的方案有效的保证了槽壁稳定性。提供了一个多方案综合示例。

### 11.6.4 深圳国贸地铁车站（工字形型钢接头、嵌岩）

#### 1. 工程概述

深圳地铁一期工程 3A、3B 标段即国贸车站和老街车站，分别位于深圳市的南国和东门老街的商业繁华区，是深圳市的重点工程项目之一，均是地下三层车站现浇钢筋混凝土框架结构。

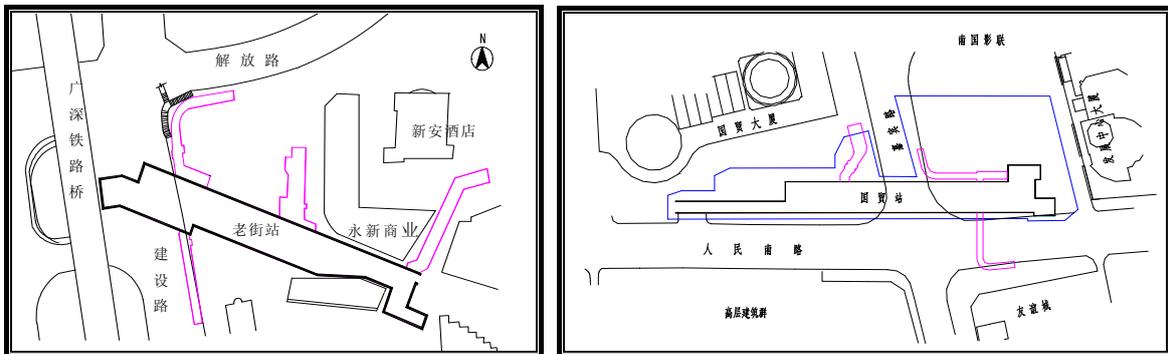


图 11-34 老街站及国贸站现场平面图

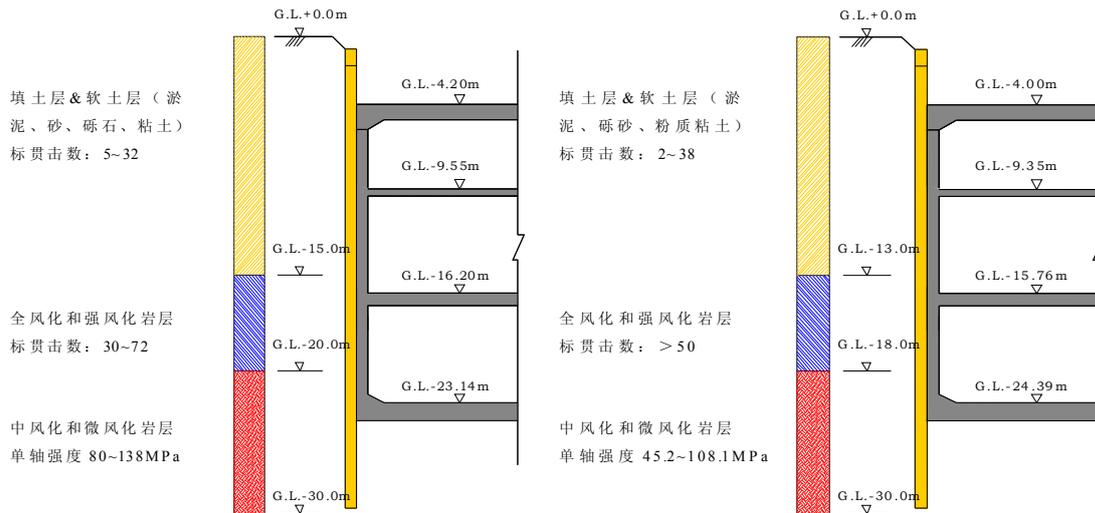


图 11-1 地质情况图（左：老街站 右：国贸站）

两车站工程所处区域的地质由三个不同厚度变化的地层构成，如下图所示分别为：上层的软土层，全风化到强风化的岩石层，中风化到微风化的硬岩层。经现场调查勘测，地下水位约在地表下 2.5M 呈静态分布，岩石的最大单轴抗压强度为 138MPa。

## 2. 设计介绍

两个车站工程的围护结构均采用了 800mm 地下连续墙，成槽深度至坚硬的微风化岩层中，槽段接头形式为工字钢刚性接头，地墙既作为施工阶段的临时支挡结构，又是车站主体结构一部分与内衬墙形成复合式结构。（地墙施工数据见下表）

表 11-1 地墙施工数据表

项目	老街站	国贸站
延长米	471m	546m
厚度	800mm	800mm
深度	平均 28.6m (27.0 — 31.0m)	平均 28m (26.0—30.0m)
槽段数	115 幅	96 幅
接头类型	工字钢 (700x350x10mm) 刚性搭接	工字钢 (700x350x10mm) 刚性搭接
垂直度要求	3/1000	3/1000
墙体钢筋混凝土	10759m <sup>3</sup>	11343m <sup>3</sup>
入岩深度	9m (入中、微风化岩 4-6m)	5-14m (入微风化岩 6m)
岩石单轴抗压强度	80-138 MPa	45.2-108.1 MPa

## 3. 地下连续墙的施工

### 1. 本工程地下连续墙施工的主要难点及特点

- e. 地墙施工的地质条件复杂，在地墙深度范围内存在三种不同类型的地质构造，而不同的地质类型对于地墙施工的要求是完全不同的。尤其是鉴于地墙设计需嵌入坚硬的岩层，地下连续墙遇强风化插入 5m、遇中风化插入 4m、遇微风化插入 3m，岩层的总挖掘量约为 3500m<sup>3</sup>，其中岩石单轴抗压强度超过 100MPa 的挖掘方量超过近 1000m<sup>3</sup>。
- f. 本工程地处深圳市的南国和东门老街的商业繁华区，基坑周边紧邻楼群，施工场地狭窄，周围管线密布，如何避免地墙入岩对周边环境造成影响以及在如此紧凑的环境下保证地下连续墙的顺利施工也是本工程的一大难点。

- g. 按照设计要求,采用工字钢接头(350×700mm),对垂直度要求较高,同时为避免相邻槽段成槽时挖掘设备破坏接头工字钢和设备本身受损,需设置较大的预挖区,因此槽段的划分方式有别于常规。

## 2. 施工措施及控制手段

### a. 成槽设备的选择

地铁国贸站和老街站的地墙施工,对于上部软土的抓取均采用液压抓斗成槽机予以挖掘,对下部大量硬岩的处理则分别采用国内的冲(钻)破岩和国外的铣槽机掘入岩的设备和工法。

由于老街站地处深圳东门商业繁华区,车站周边管线密布楼房林立与围护结构地墙距离较近(1.5m),不但场地狭窄而且施工环境较恶劣。鉴于该站设计入岩深度大、岩质坚硬、墙体垂直度和周边建筑物安全度要求较高等原因,故在地墙入岩施工上考虑采用了德国宝峨公司进口的BC-25铣削式成槽机。该机是国外专为满足地墙入岩施工这一特殊要求而设计制造的一款专用设备,具有破岩效率高,槽壁垂直度和平整精度较好,适用土(岩)层范围广;铣轮切削岩层时安静,无震动,槽内泥浆不受破坏的优点。施工中我们根据实际情况也对铣槽机作了些局部改进,如为提高破岩工作效率和减少耗损,铣轮削掘齿由最初配置的碳化钨刀齿更换为合金镶钨钢头的锥形削掘齿。将离心泵由5"换成了6"以增大功率及对铲鏖吸石口直径的调整等,这些改进确实对加快施工进度起到了极大的推动作用。

国贸站地处深圳南国商业繁华区,车站周边施工环境相对老街站较好,建筑物也离围护结构地墙较远,且场地较宽阔适于设备的大量投入,故在地墙入岩施工上考虑采用重锤冲击破岩(圆锤冲孔+方锤扫孔)进行地墙入岩施工,并投入了多种冲岩设备,几乎囊括了国内的所有型号。

### b. 老街站 BC-25 铣削式成槽机入岩施工

#### ① 成槽施工

a.) 铣轮削掘齿应根据岩石的单轴抗压强度资料来选择配置,入强风化岩的可选择碳化钨刀齿,入中、微风化岩的要选择合金镶钨钢头的锥形齿,以确保较高的削岩效率。

b.) 在岩层中的铣削速度主要取决于岩石的强度,也可在一定范围内通过对铣轮的转速、油压、铣齿的形式、铣轮的压重值及离心泵的排放量进行适度调整来控制铣岩速度,但需注意避免机械超负荷运转。一般来讲铣轮压重控制在2-3T(强风化岩)或5-6t(中风化岩)、油压控制在60-120Bar、转速为16-20r/min、排浆量在200-220m<sup>3</sup>/h,铣岩速度保持在4-7cm/min(强风化)和1-3cm/min(中、微风化)。

c.) BC-25 铣槽机施做的槽壁垂直度理论上可达1/500,铣槽时通过在铣轮内安装的传感器和主机上设置的电子微偏器,可以测量出削掘时水平与垂直两个方向的偏离量,并及时在驾驶室里的电脑显示屏上,同时用度和厘米来连续的显示该偏离量。假如偏离了它的垂直轴,电脑会自动示警显示提醒操作员使用油压操控的导板来进行纠偏调整,确保达到设计精度。

d.) BC-25 铣槽机铣槽时供应的泥浆品质,在拌制和性能指标要求方面与常规地墙施工所用泥浆基本一致,并无其它特殊要求。但在供应量方面需满足铣轮离心泵的工作要求,否则不但会影响削岩效率还会引起设备故障造成停机。因此在泥浆储备上需满足3倍于最大槽段的消耗量。

② 接头清洗及清基的方法:在吊放钢筋笼前用接头刷对浸没在泥浆中的相邻接头工字钢清刷干净,以确保接头处钢筋混凝土质量。槽底清基只需将铣削轮盘直接下放至槽底,利用其自身配置的泵吸反循环系统来完成岩渣的清除和泥浆置换,时间控制在1小时左右。

③ 钢筋笼吊放和墙体钢筋混凝土浇筑这两道工序与常规的地墙施工无甚区别。但要注意的是由于BC-25 铣槽机进行成槽入岩施工时需设置预挖区,而采用工字钢接头使预挖区又需

设置较大（以避免相邻槽段铣槽时破坏接头工字钢和铣轮受损），故在钢筋混凝土浇筑前一定要对预挖区进行回填（用碎石），防止浇筑时钢筋混凝土外逸至工字钢背侧，影响相邻槽段的成槽和吊放钢筋笼施工。

#### c. 国贸站地墙重锤冲击入岩施工

在槽段内按 $\Phi 800$ 的圆孔划分孔位（孔与孔间距1m），用吊机或专用机架吊着重锤以自由落体的冲击力来破碎岩石形成 $\Phi 800$ 的圆孔。单元槽段内所有圆孔每冲深30-40cm后，就用方锤进行扫孔（冲碎各圆孔间的岩梗），再由成槽机抓斗(或用空吸法)进行岩渣清理。重复上述步骤直至逐步达到设计深度，进行槽底清基、泥浆置换和吊放钢筋笼浇钢筋混凝土工作。

##### a.) 锤体提升高度的控制

锤体提升太低，冲击力度不够，对岩石冲击破碎效果不好；提升太高，看来冲程加长了，但是冲程加长，也增加了提升时间，降低了冲岩频率。施工中通过观察及测试，锤体每次提升的最佳高度应保持在4米左右。

##### b.) 最佳锤体重量和型式的确定

锤体重量对于冲岩效率非常重要，2.5~3T的冲锤现场施工效率低、耗时长、成槽质量较难保证效果很差。通过对各项数据的汇总对比和分析，6.5t十字星型冲锤+9t方锤的组合入岩效果较好，并在后期施工的过程中收到了较好的效果。

##### c.) 更换锤体及磨损修补时间的控制

由于岩石坚硬冲锤磨损快，一般圆锤在连续冲击一个半小时以后，就需要停止锤击更换锤体，以免影响冲岩效果造成下一轮冲岩困难。对于圆锤的磨损修补，材料上要选用进口抗冲击耐磨损的E60Kb焊材，以延长锤体的工作时间。

##### d.) 对冲岩施工垂直度的控制

锤体提至顶点时应停留几秒，待锤体稳定后再落下冲岩；每次锤击进尺在30~40cm，不宜太深；冲岩时一个孔位结束更换到另一个孔位时，应将锤体提升至地面再移位；吊机冲岩过程中，起重指挥要认真观测，以保证冲岩槽段的垂直度

冲岩时，还应确保槽段左右两端的高度始终低于中间部分，以保证槽段横向垂直度。

#### d. 对于工字钢接头的施工措施

由于地墙接头设计采用工字钢，其宽度仅为710mm，而地下连续墙厚度为800mm，工字钢将无法限制混凝土溢流到相邻槽段的预挖区，为避免影响相邻槽段的成槽和钢筋笼吊放工作，施工中对钢筋笼和预挖区用角铁和薄铁皮配合锁口管及回填碎石进行了处理，本工程施工实践证明采取该措施是必要的并取得了一定的效果，但施工操作的时间较长，偶然因素较多，质量比较难控制。对工字钢的处理也可采用对钢筋笼采用帆布全包处理的方法，但投入会较大。

就老街站而言，由于本工程地墙采用工字钢接头，为避免后续槽段施工时铣轮与相邻已完工槽段的接头工字钢碰触，而损伤工字钢接头、铣轮及其它机械部件，同时考虑到先施工槽段钢筋笼吊放时可能产生的水平误差及倾斜，故在刀法划分上①除双雄槽段其余均设置了预挖区（预挖区长度 $\geq 1.8$ -相邻槽段中间土体尺寸/2）；②与相邻槽段工字钢接头中心保证至少有40cm间隙。因此，本工程单元槽段长度划分的变化范围在3.6m到5.2m之间。

由于铣槽机对预开挖土体的特殊要求，因此，工程开工前，必须首先结合连续墙各单元槽段尺寸及铣槽机成槽特点，对地下连续墙整体进行全面的刀法设计。

## 4. 工程监测及结果评价

### 1. 老街站 BC-25 铣削式成槽机入岩效果

#### (1) 施工质量方面

从开挖后裸露墙体的外观质量情况来看，地墙墙面较平整无明显鼓包突出，经测量墙体垂直度均在 2.5-3%范围内满足设计要求；开挖后裸露墙体和接头处钢筋混凝土质量较好，表观密实、孔洞、蜂窝和露筋现象均在规范允许范围内，而且墙体经抽芯试压和超声波检测，墙体钢筋混凝土密实连续无断层，无夹泥夹砂现象，强度和抗渗功能均满足设计规范要求。

### (2) 施工功效方面

BC-25 铣槽机的岩石铣削率平均达到了 3.36-4.12 m<sup>3</sup>/hr。削掘齿消耗量每立方米岩石平均 1.5 个，单元槽段的完成（开槽-浇筑完钢筋混凝土）时间平均需 28.5 小时，月完成量最高的尽达 39 幅。对于大深度入硬岩的地墙施工来讲效率已是相当惊人了。对于大面积、大深度的地墙入岩施工，选用 BC-25 铣槽机来进行在施工工期方面是有保障的。

## 2. 国贸站地墙重锤冲击入岩效果

### (1) 施工质量方面

由于入岩处理时间过长、冲岩过程泥浆质量下降和施工中设备对槽壁的过大振动，而易造成槽壁上部土体的坍方，墙面的平整度较难保证。冲岩施工对垂直度的控制较难把握，再加上扫孔时圆孔边角岩梗难于彻底冲除干净，槽壁的垂直精度较难满足要求，造成钢筋笼下放困难且无法放置到位，影响到各结构层预埋件位置准确度和易产生墙体倾斜。冲岩施工的槽段，泥浆比重和黏度均过大，沉淀也相当快，槽底清基很难彻底干净，水下钢筋混凝土浇筑容易夹带泥渣，钢筋混凝土质量也较难保证。

### (2) 施工功效方面

冲岩效率平均达到了 0.2m<sup>3</sup>/h。但从整体来讲，由于设备、工艺的效率有限再加上岩石强度较高等各方面原因，可能造成入岩处理时间较长，降低破岩效率，施工进度较难保证。以一个采用 6.5t 重锤冲岩的宽 6m 深 28m 入岩 6m 的槽段为例，从成槽到浇筑钢筋混凝土一般需要 10-15 天。

## 11.6.5 上海瑞金医院单建式地下车库（预制地下连续墙）

### 1. 工程概况

瑞金医院地下车库全预制地下连续墙工程地处上海市瑞金医院内，为单建式单层地下车库，车库埋深为 5.8m，平面尺寸约为 40×90m，总面积约 3500 m<sup>2</sup>。顶板以上覆土约 1m，作为绿化及健身娱乐场所。院方要求在保护绿地周围原有大树的前提下最大限度地利用该地块的地下空间，以满足医院日益紧张的停车需要，同时由于医院的特殊性，必须文明施工，尽可能减少对环境的影响。此外，院方对造价和施工工期也提出了较高的要求。针对本工程的特点，经过反复比较，决定在设计施工中采用预制地下连续墙技术。

### 2. 设计与施工简介

本工程采用主体结构与支护结构相结合的方案，利用预制地下连续墙既作为地下车库施工阶段的基坑围护墙，在正常使用阶段又作为地下室结构外墙，即“两墙合一”。本工程地下结构采用逆作法施工，施工阶段利用地下结构梁、板等内部结构作为水平支撑构件，采用一柱一桩即钻孔灌注桩内插型钢格构柱作为竖向支承构件。

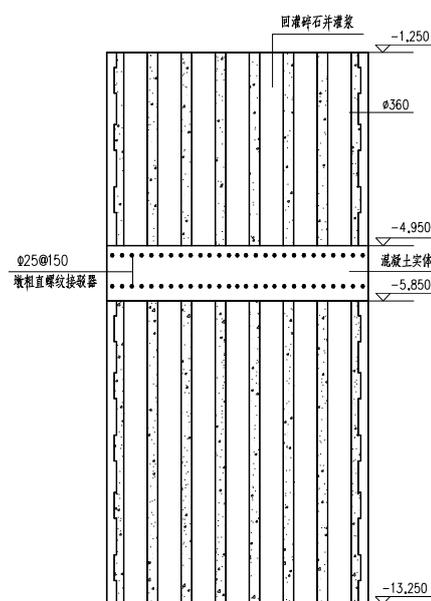


图 11-72 瑞金医院预制墙段典型立面图

本工程车库外墙采用预制地下连续墙加现浇混凝土接头的工艺，预制地下连续墙厚度为600mm，槽段墙板深度12m，槽段宽度一般为3.0m~4.05m，共有73幅槽段。由于采用了与主体结构相结合的结构形式，地下室结构梁板作为水平支撑，水平刚度大，墙体的变形和内力均大为减小，因而墙体截面设计和配筋较为经济。本工程在每两幅墙体的接缝处均设置壁柱，既加强了墙体的整体性，又有利于墙体的抗渗。预制墙段典型立面图如图11-72所示。

地下连续墙顶设置顶圈梁且与顶板整浇。地下连续墙在与底板连接位置设计成实心截面，并在墙段内预埋接驳器与底板钢筋相连，同时沿接缝设置一圈水平钢板止水带以防止接缝渗水。每幅预制地下连续墙墙底设置两个注浆管，总注浆量不小于2m<sup>3</sup>且应上泛至墙顶，该措施有效控制了墙身的沉降，工程结束后经检测地下连续墙墙身累计沉降量较小。预制墙段配筋典型平剖面图如图11-73所示。预制墙段基础底板预埋件详图如图11-74所示。

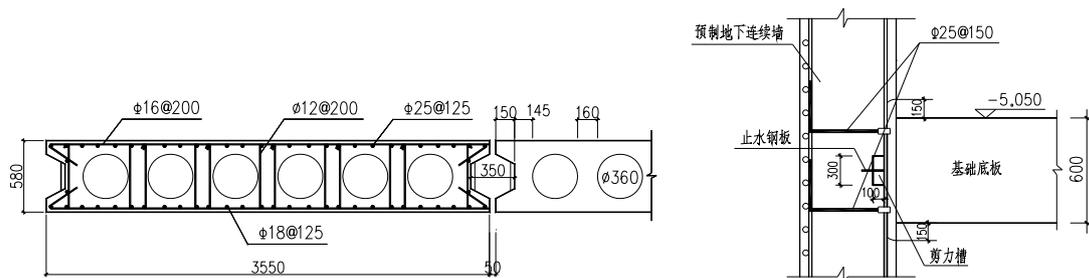


图11-73 瑞金医院预制墙段配筋典型平剖面图

图11-74 瑞金医院预制墙段基础底板预埋件详图

### 3. 施工监测及结果

本工程的施工过程中，对以下内容进行了监测：医院内道路地下管线的沉降与水平位移、连续墙墙体的侧移、连续墙墙顶的沉降与水平位移及立柱桩的沉降。

监测结果表明，地下管线累计最大沉降量为6.0mm，平均沉降量为2.96mm，地下管线最大水平位移为3.0mm，平均位移为1.0mm。在预制连续墙墙体内设置了2个测点对墙体的侧移进行了监测，从测斜数据的变化情况来看，随着开挖深度的增加，墙体的侧移逐渐增大。在开挖到基坑底部位置的时候侧移值最大，达到了10.84mm（位于地面下约6.5m深度处）。预制地下连续墙墙顶的沉降与水平位移变化情况与周边环境的变形规律基本一致。施工阶段立柱桩平均隆起量为2.3mm，最大隆起量为4.6mm，未对结构梁板产生不良影响，在正常使用阶段结构整体状况良好。