

## 第14章 钢板桩支护结构与施工

### 14.1 概述

钢板桩支护结构属板式支护结构之一，适用于地下工程施工因受场地等条件的限制，基坑或基槽不能采用放坡开挖、而必需进行垂直土方开挖及地下工程施工时采用。钢板桩支护结构在国内外的建筑、市政、港口、铁路等领域都有悠久的历史。

#### 14.1.1 钢板桩

钢板桩是一种带锁口或钳口的热轧（或冷弯）型钢，靠锁口或钳口相互连接咬合，形成连续的钢板桩墙，用来挡土和挡水；具有高强、轻型、施工快捷、环保、美观、可循环利用等优点。

钢板桩断面形式很多，英、法、德、美、日本、卢森堡、印度等国的钢铁集团都制定有各自的规格标准。常用的钢板桩截面形式有 U 型、Z 型、直线型及组合型等，参见图 14-1。

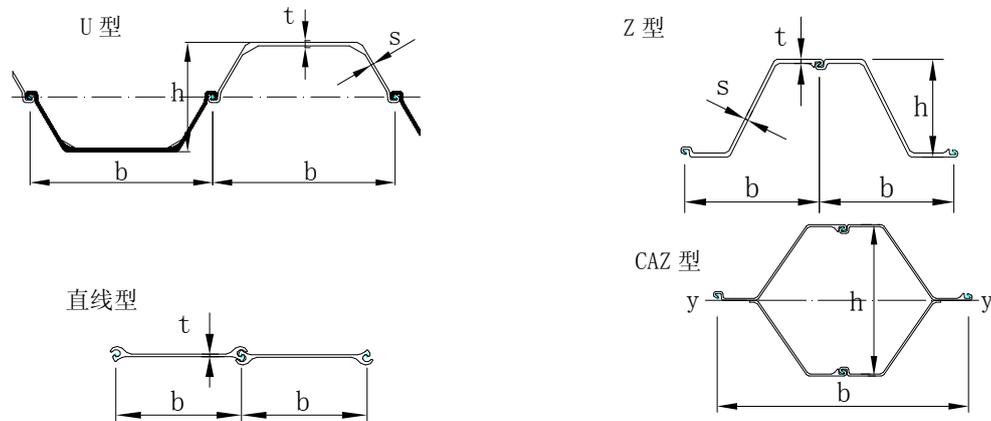


图 14-1 常用钢板桩截面形式

由于种种原因，以前我国国内生产钢板桩规格很少，仅鞍钢等少数钢厂生产过小规格的“拉森”式（U 型）钢板桩，在沿海地区港口工程中多使用日本、卢森堡等国钢铁集团生产的钢板桩，而进口钢板桩的价格较高，这些因素都限制了在我国国内钢板桩的大规模应用。近年来随着国民经济的高速发展，国内各种建设项目钢板桩的用量逐年递增，钢板桩应用水平也在不断提高，带动了钢板桩行业的发展。为此在 2007 年，由中国钢铁工业协会牵头，制订了国内热轧 U 型钢板桩标准《热轧 U 型钢板桩（GB/T 20933-2007）》，为大力推广国产钢板桩的生产和应用打下了良好的基础。

近年来钢板桩朝着宽、深、薄的方向发展，使得钢板桩的效率（截面模量/重量之比率）不断提高，此外还可采用高强度钢材代替传统的低碳钢或是采用大截面模量的组合型钢板桩，这都极大地拓展了钢板桩的应用领域。

#### 14.1.2 钢板桩支护结构

钢板桩支护结构由打入土层中的钢板桩和必要的支撑或拉锚体系组成，以抵抗水、土压力并保持周围地层的稳定，确保地下工程施工的安全。从使用的角度可分为永久性结构和临时性结构两大类，永久性结构主要应用于码头、船坞坞壁、河道护岸、道路护坡等工程中；临时性结构则多用于高层建筑、桥梁、水利等工程的基础施工中，施工完成后钢板桩可拔除。本章中主要述及后者，重点介绍作为临时工程的钢板桩支护结构的设计和施工的要点。

根据基坑开挖深度、水文地质条件、施工方法以及邻近建筑和管线分布等情况，钢板桩支护结构型式主要可分为悬臂板桩、单撑（单锚）板桩和多撑（多锚）板桩等，此外常见的围护（挡土、挡水）结构还有桩板式结构、双排或格型钢板桩围堰等。

##### 1. 悬臂式结构

悬臂式钢板桩挡墙无撑无锚，完全依靠板桩的结构强度和入土深度保持挡墙的稳定和整

体的安全。坑侧土体易于产生变形，围护结构的桩顶位移和弯矩值均较大。此外，该结构形式要求坑底及板桩底部土体有足够的强度以抵抗产生的反力，因此，在基坑底部被动区土体地质条件不良时，可考虑采用土体加固的方式以提高被动区土压力。

#### 2. 单撑（单锚）及多撑（多锚）式结构

单撑（单锚）式钢板桩支护结构由钢板桩围护体系和单道内支撑（或墙后锚拉结构）组成。内支撑可以采用钢筋砼支撑或钢支撑，墙后锚拉结构根据地基条件的不同可以采用锚杆（或钢或钢筋砼）拉杆连接锚桩（或锚碇墙）构成。单锚式钢板桩支护结构同一般的板式内支撑结构类似，但它属于无内支撑支护结构，后方须有足够的场地条件以设置锚拉结构。

多撑（多锚）式钢板桩支护结构由钢板桩围护体系和多道内支撑（或墙后锚拉结构）组成。内支撑或锚拉结构的增多使得该结构形式可适用于较大开挖深度的基坑围护中。

由于钢板桩间锁口相互咬合，锁口处止水技术的发展使得单撑或多撑式的钢板桩支护结构也可应用于临水的基坑工程中，临水基坑钢板桩支护结构是在水上施打钢板桩，钢板桩自身（或与陆域结构）形成封闭的围护体系，并通过设置单道（或多道）钢（或钢筋砼）内支撑（或圆形环梁）形成的支护结构。

#### 3. 桩板式支护结构

桩板式支护结构是采用工字钢、钢管桩或箱型钢板桩等结合横档板构成，根据需要设内支撑体系或拉锚结构。该支护结构主要由钢桩承受土压力，由于不能挡水，只能用于能干施工的情况下。该结构形式曾常用于浅埋地下铁道、箱涵等施工中。

#### 4. 其它钢板桩结构形式

双排钢板桩围堰结构是将钢板桩围护结构呈两排打入地基中，顶部依靠（钢筋砼或钢）拉杆相连，内部填充砂土形成一定宽度的墙体。格型钢板桩围堰则是将直线型钢板桩打设成圆形或圆弧形，在其中间充填砂土以形成连续墙体。两者均可视为一种“自力式”的重力体，以钢板桩结构强度和内部填充物的自重和抗剪能力来抵抗外力。常用于水利基坑开挖的临时支护、码头岸壁结构或圈围造地的围护结构。

## 14.2 钢板桩支护结构的设计

### 14.2.1 钢板桩支护结构设计参考资料

钢板桩支护属传统的板式支护结构之一，由于具有施工速率快、可重复利用等明显的优点，世界各国应用均较为广泛，也展开了较为全面的研究。世界大型的钢板桩制造商如ARCELORMITTAL、新日本制铁株式会社等有自行编制的钢板桩的设计施工手册，具有很好的借鉴意义。

此外也可参照我国《建筑基坑支护技术规程 JGJ120-99》、《板桩码头设计与施工规范 JTJ 292-98》、日本建筑学会《挡土墙设计施工准则》及《深基坑工程设计施工手册》、欧洲《EN1993-5 2003 : Design of steel structures: Piling》、DIN EN 12063《Execution of special geotechnical work-sheet piling construction》、United States Steel 的《Steel Sheet Piling Design Manual》、US Army Corps《Design of Sheet Pile Walls (EM 1110-2-2504)》等规范或专著。

### 14.2.2 钢板桩支护结构的荷载作用

#### 1. 水土压力

如第四章所述，一般砂土地基采用水土分算，而黏土和粉土地基一般采用水土合算。支护结构承受的土压力，与土层地质条件、地下水状况、支护结构各构件的刚度以及施工工况、方法、质量等因素密切相关，且呈现出时空效应，由于这些因素千变万化，十分复杂，因此难于计算土压力的精确值，目前国内外常用的计算土压力方法仍以库仑公式或朗肯公式为基本计算公式。具体土压力模式及计算公式可参见第四章相关内容。库仑公式及朗肯公式均为假设土体为极限平衡状态下的计算公式，实测资料表明，围护结构变形和土压力的调整使得作用于基坑围护结构上的土压力往往处于非极限平衡状态，第四章给出了 4 种非极限平衡条件下土压力与墙体位移的函数模型，此外，在 US Army Corps《Design of Sheet Pile Walls (EM 1110-2-2504)》中提供了一种简化的函数模型，即假设极限平衡土压力间土压力与墙体位移呈线性关系。

水土分算下水压力的计算根据具体情况可分别考虑按照三角形分布（考虑渗流）或梯形

分布（不考虑渗流）来进行计算，具体参见第四章中有关水压力计算的相关内容。

## 2. 水流力、波浪力

临水基坑钢板桩结构一侧或多侧临水，围护结构可能承受水流力及周期性波浪作用力。而在潮汐河口或河流中，受潮汐作用影响，水压力将处于实时变动之中；此外，临水基坑可能一侧临水，一侧挡水土，本身两侧压力不均。因此，水上基坑钢板桩支护结构同陆上基坑有所不同，应考虑对基坑围护结构两侧压力不平衡所带来的影响。

受潮汐影响的临水基坑，基坑外设计水位一般取设计高、低水位，25 年一遇极端高、低水位（基坑使用周期较长，基坑破坏损失严重时可考虑使用 50 年一遇）进行校核计算。不受潮汐影响的基坑，其临水侧坑外设计水位按对应水体的设计高、低水位取值，并应考虑暴雨预降水位工况。当有防洪、防汛要求的基坑，坑外设计水位应按相应防洪、防汛要求选用。

临水基坑钢板桩结构上的水流力可按下式进行计算：

$$F = C_w \frac{\rho}{2} V^2 A \quad (14-1)$$

式中：  $F$ ——水流作用力（kN）；

$V$ ——水流设计流速（m/s），取基坑所处范围内可能出现的最大平均流速；

$C_w$ ——水流阻力系数，根据表 14-1 取值；

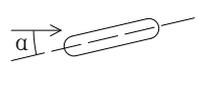
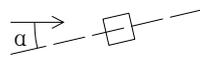
$\rho$ ——水的密度（t/m<sup>3</sup>），淡水取 1.0，海水取 1.025；

$A$ ——钢板桩围护结构与流向垂直平面上的投影面积（m<sup>2</sup>）。

钢板桩迎水侧水流力可考虑采用倒三角形分布，即上式水流力作用点作用于水面下 1/3 水深处。

矩形	长/宽	1.0	1.5	2.0	≤3.0
	$C_w$	1.50	1.45	1.30	1.10
圆形		0.73			

此外，若考虑临时基坑受斜向水流作用的影响，水流阻力系数应乘以影响系数  $m$ ， $m$  应按表 14-2 取值：

名称	简图	$m$					
		$\alpha$ (°)	0	5	10	15	
圆端			1.0	1.13	1.25	1.37	
			1.0	1.13	1.25	1.37	
方形			1.0	0.67	0.67	0.71	0.75
			1.0	0.67	0.67	0.71	0.75

若钢板桩支护结构需考虑波浪作用时，设计波浪的重现期可取为 25 年一遇。由于波峰作用时，钢板桩结构受到波压力作用；而波谷作用时，钢板桩结构受到波吸力作用。因此，应根据可能出现的不同工况，按最不利的组合进行计算。

根据波浪要素、基坑围护外形及尺度、钢板桩外侧水深等参数的不同，波浪对钢板桩结构的作用主要表现为波浪对直墙式建筑物的作用（图 14-2）或波浪对斜坡式建筑物的作用。具体作用力的计算与波态、波要素、水深等因素有关，较为复杂，因篇幅有限，此处不再一一列出，可参照我国《海港水文规范（JTJ214-2000）》或美国《Coastal Engineering Manual（EM1110-2-1100）》中有关波浪力的计算内容。

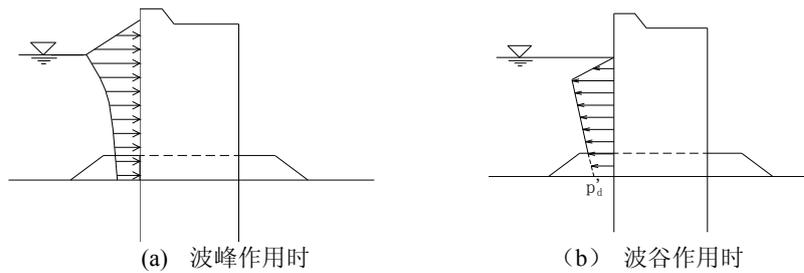


图 14-2 波浪对直墙式建筑物的作用

### 3. 其它作用力

同其它支护形式的基坑一样，在基坑设计时还需要考虑施工车辆荷载及基坑周边的超载、建筑基础荷载等荷载。而临水基坑的钢板桩支护结构中，钢板桩除受波浪、水流荷载作用外，还可能出现其它环境荷载，特别是当钢板桩在水面以上的悬臂段较长时，风荷载成为不可忽略的因素，风荷载的可参照相关规范计算。

上述支护结构计算所用的荷载计算理论或方法，虽经长期实践证明是可行的。但从安全、经济等因素综合评价，尚有不足之处。因为基坑土方开挖，钢板桩围护墙两侧土压和水压的平衡即被破坏，使钢板桩受力发生变形，圈梁支撑等相继承受作用力，随着土方向下继续开挖，变形不断发展，结构承受的作用力亦不断发生变化。因此，整个土方开挖及支护结构施工过程中，支护系统呈现复杂的受力状态。本节中上述各种荷载的计算方法没有反映出支护结构所承受的侧压力随基坑开挖而变化的实际状态。因此，有条件时最好采用能动态反映支护结构受力的弹塑性法进行设计，相关内容可参见第 6 章，但计算中采用的有关参数，应尽可能地反映地层的实际情况，并结合实践经验进行反分析以综合判断。而临水基坑所受波浪水流力的计算亦可采用模型试验加以确定。

## 14.2.3 钢板桩支护结构的计算

钢板桩支护结构的计算方法很多，包括古典的静力平衡法、等值梁法等，和解析求解的弹性法到弹性地基梁法（平面/空间）、连续介质数值计算方法等。弹性地基梁法（平面/空间）、连续介质数值计算方法等参见第 6 章相关内容，本章主要介绍古典计算方法。

古典的静力平衡法、等值梁法均不考虑墙体及支撑变形，将土压力作为外力施加于支护结构，然后通过求解水平方向合力及支撑点弯矩为零的方程得到结构内力，虽然这些方法未考虑墙体变形及墙体与土的相互作用，但在工程界仍广泛运用，在国内外的板式支护结构、钢板桩结构的计算规范或手册中均有推荐。

### 1. 悬臂式钢板桩计算

悬臂式钢板桩挡墙无撑无锚，完全依靠钢板桩的入土深度保持挡墙的稳定。一般用于开挖支护深度不大的基坑工程中。

静力平衡法（自由支撑法）：

悬臂式板桩的入土深度和最大弯矩的计算通常按以下步骤进行（图 14-3）。

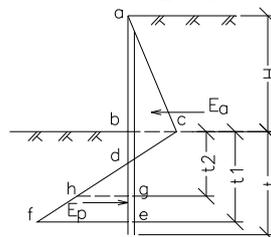


图 14-3 悬臂式板桩计算简图

(1) 通过试算确定板桩埋入深度  $t_1$ ，假定埋入深度为  $t_1$ ，然后将净主动土压力  $acd$  和净被动土压力  $def$  对  $e$  点取力矩，要求由  $def$  产生的抵抗力矩大于由  $acd$  所产生的倾覆力矩的 2 倍，即防倾覆的安全系数为 2 以上。

(2) 确定实际所需深度  $t$ ，将通过试算求得的  $t_1$  增加 15%，以确保钢板桩的稳定。

(3) 求入土深度  $t_2$  处剪力为零的点  $g$ ，通过试算求出  $g$  点，该点净主动土压力  $acd$  应等于净被动土压力  $dgh$ 。

(4) 计算最大弯矩，此值应等于  $acd$  和  $dgh$  绕  $g$  点的力矩之差值。

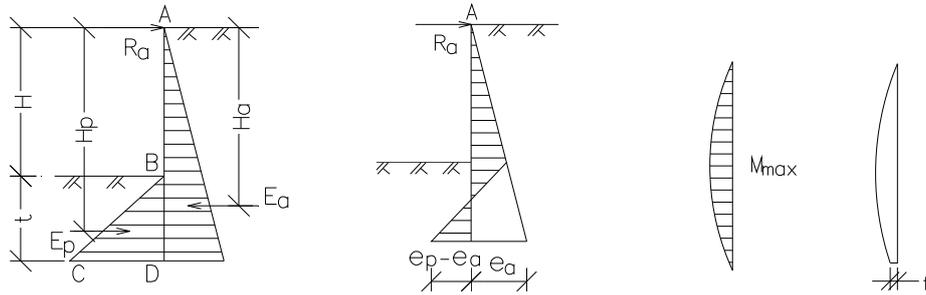
(5) 选择板桩截面，根据求得的最大弯矩和钢板桩材料的允许应力（钢板桩取钢材屈服应力的 1/2），计算板桩的最小横截面积。确定板桩型号。

## 2. 单撑（单锚）钢板桩计算

单撑（单锚）板桩根据入土深度的深浅，计算方法分为两种，当入土深度较浅时，板桩上端为简支，下端为自由支承；当入土深度较深时，下端则为固定支承。

### (1) 单撑浅埋钢板桩计算

假定上端为简支，下端为自由支承。这种板桩相当于单跨简支梁，作用在板桩后的土压力为主动土压力，作用在墙前的为被动土压力（图 14-4）。



(a) 土压力分布 (b) 叠加后的土压力分布图 (c) 钢板桩弯矩图 (d) 钢板桩变形图  
图 14-4 单撑浅埋板桩计算计算简图

为使钢板桩保持稳定，作用在板桩上的力  $R_a$ 、 $E_a$ 、 $E_p$  必须平衡，对 A 点取矩等于零，即  $\sum M_A = 0$ ，亦即

$$E_a H_a - E_p H_p = E_a \cdot \frac{2}{3}(H + t) - E_p \cdot (H + \frac{2}{3}t) = 0$$

整理上式可求得最小入土深度  $t$ ：

$$t = \frac{(3E_p - 2E_a)H}{2(E_a - E_p)} \quad (14-2)$$

再由  $\sum X = 0$ ，即可求得作用在 A 点的支撑反力  $R_a$

$$R_a = E_a - E_p \quad (14-3)$$

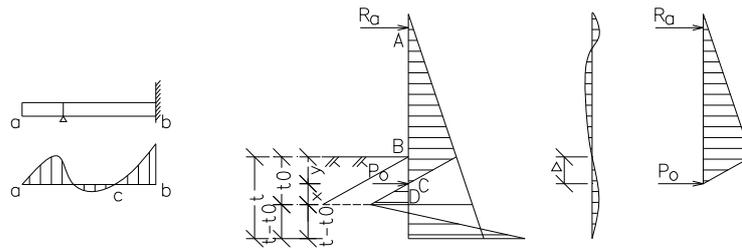
根据求得的入土深度  $t$  和支撑反力  $R_a$ ，可计算并绘出钢板桩的内力图，依此求得剪力为零的点，该点截面处的弯矩即为板桩最大弯矩  $M_{max}$ ，据此最大弯矩和钢板桩材料的允许应力选择板桩的截面。而由支撑反力即可设计内支撑或锚拉结构。

由于  $E_a$  和  $E_p$  均为  $t$  的函数，所以先要假定  $t$  值，进行验算，如不合适，再重新假定  $t$  值，直至合适为止。

板桩的入土深度主要取决于桩前的被动土压力，而被动土压力只有当土体产生较大变形时才会产生，因此计算时，被动土压力（三角形  $BCD$ ）只取其一部分，安全系数多取为 2。

### (2) 单撑深埋钢板桩计算

单撑深埋板桩上端为简支，下端为固定支承，用等值梁法计算为简便。其计算简图如图 14-5 所示。



(a) 等值梁法 (b) 板桩上土压力分布图 (c) 板桩弯矩图 (d) 等值梁

图 14-5 用等值梁法计算单撑板桩简图

$ab$  为一根梁，一端为简支，另一端固定，其反弯点在  $C$  点。如  $C$  点切断  $ab$  梁，并于  $C$  点置一自由支承形成  $ac$  梁，则  $ac$  梁上的弯矩图将保持不变，此  $ac$  梁即为  $ab$  梁上  $ac$  段的等值梁。

用等值梁法计算板桩，为简化计算，常用土压力等于零点的位置来代替反弯点的位置。其计算步骤如下：

(1) 计算作用于钢板桩上的土压力强度，并绘出土压力分布图，计算土压力强度时，应考虑板桩墙与土的摩擦作用，将板桩墙前和墙后的被动土压力分别乘以修正系数（为安全起见，对主动土压力则不予折减），钢板桩的被动土压力修正系数见表 14-3。 $t_0$  深度以下的土压力分布可暂不绘出。

土的内摩擦力	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°
K (墙前)	2.3	2.0	1.8	1.7	1.6	1.4	1.2
K (墙后)	0.35	0.4	0.47	0.55	0.64	0.75	1.0

(2) 计算板桩墙上土压力强度等于零的点离挖土面的距离  $y$ ，在  $y$  处板桩墙前的被动土压力等于板桩墙后的主动土压力，即

$$\begin{aligned} \gamma K K_p y &= \gamma K_a (H + y) = P_b + \gamma K_a y \\ y &= \frac{P}{\gamma(KK_p - K_a)} \end{aligned} \quad (14-4)$$

式中  $P_b$ ——挖土面处板桩墙后的主动土压力强度值；  
其余符号意义同前。

(3) 按简支梁计算等值梁的最大弯矩  $M_{\max}$  和两个支点的反力（即  $R_a$  和  $P_0$ ）

(4) 计算板桩墙的最小入土深度  $t_0$ 。

$$t_0 = y + x$$

$x$  可根据  $P_0$  和墙前被动土压力对板桩底端  $D$  点的力矩相等求得，即：

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{\gamma(KK_p - K_a)}{6} x^2 \\ x &= \sqrt{\frac{6P_0}{\gamma(KK_p - K_a)}} \end{aligned} \quad (14-5)$$

板桩下端的实际埋深应位于  $x$  之下（图 14-5 (b)），所需实际板桩的入土深度为

$$t = (1.1 \sim 1.2)t_0$$

一般取下限 1.1，当板桩后面为填土时取 1.2。

用等值梁法计算板桩是偏于安全的，实际计算时常将最大弯矩予以折减，US Army 《Design of Sheet Pile Walls (EM 1110-2-2504)》中给出了砂土和粘性土中钢板桩结构计算弯矩的折减计算图表。折减系数经验为 0.6~0.8 之间，一般采用 0.74。

### 3. 多撑（多锚）式钢板桩计算

#### (1) 支撑（锚杆）的布置和计算

支撑（锚杆）层数和间距的布置，影响着钢板桩、支撑、围檩的截面尺寸和支护结构的材料量，其布置方式有以下两种：

##### 1) 等弯矩布置

这种布置是将支撑布置成使板桩各跨度的最大弯矩相等，充分发挥钢板桩的抗弯强度，可使钢板桩材料用量最省，计算步骤为：

- ① 根据工程的实际情况，估选一种型号的钢板桩，并查得或计算其截面模量  $W$ 。
- ② 根据其允许抵抗弯矩，计算板桩悬臂部分的最大允许跨度  $h$ 。

$$f = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{\frac{1}{6} \gamma K_a h^3}{W}$$

由

$$\therefore h = \sqrt[3]{\frac{6fW}{\gamma K_a}} \quad (14-6)$$

式中  $f$  ——板桩的抗弯强度的设计值；

$\gamma$  ——板桩墙后的土的重度；

$K_a$  ——主动土压力系数。

③ 计算板桩下部各层支撑的跨度（即支撑的间距），把板桩视作一个承受三角形荷载的连续梁，各支点近似地假定为不转动，即把每跨看作两端固定，可按一般力学计算各支点最大弯矩都等于  $M_{\max}$ 、 $M_{\min}$  时各跨的跨度，其值如图 14-6 所示。

④ 如果算出的支撑层数过多或过少，可重新选择板桩的型号，按以上步骤进行计算。

##### 2) 等反力布置

这种布置是使各层围檩和支撑所受的力都相等，使支撑系统简化。

计算支撑的间距时，把板桩视作承受三角形荷载的连续梁，解之即得到各跨的跨度如图 14-7 所示：

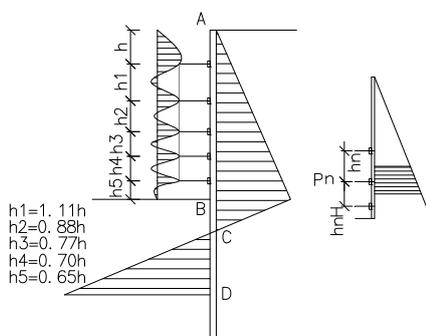


图 14-6 支撑的等间距布置

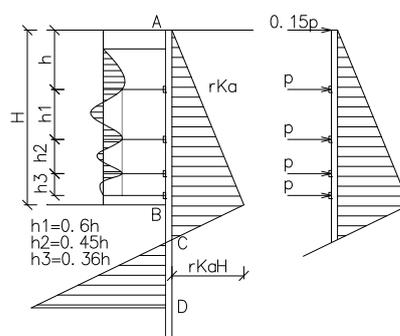


图 14-7 支撑的等反力布置

这样除顶部支撑压力为  $0.15P$  外，其他支撑承受的压力均为  $P$ ，其值按下式计算：

$$(n-1)P + 0.15P = \frac{1}{2} \gamma K_a H^2$$

$$P = \frac{\gamma K_a H^2}{2(n-1+0.15)} \quad (14-7)$$

通常按第一跨的最大弯矩进行板桩截面的选择。

以上两种支撑布置方法是一种理想状况，实际施工中可能由于主体结构影响等各种原因不能按上述方法布撑，此时，则将板桩视作承受三角形荷载的连续梁，用力矩分配法计算板桩的弯矩和反力，用来验算板桩截面和选择支撑规格。

由于多撑（多锚）式钢板桩结构为超静定结构，其计算中常引入新的假设条件，如前述

等值梁法分工况计算钢板桩及支撑结构内力时，假设上一工况所得上一道支撑轴力不变。而1/2 分担法假设支撑承担半跨内的主动土压力。此外，多撑（多锚）式钢板桩结构计算中常用的还有 Terzaghi（塑性铰法），该方法假设钢板桩结构在支撑点（第一道支撑除外）以及基坑开挖底面标高位置均有一塑性铰，根据静力平衡条件求得各支撑点的反力和钢板桩的弯矩。值得一提的是，该方法中根据实测及模型试验结果，假设开挖深度内墙后的土压力采用梯形分布图式，水压力则按照三角形分布，Terzaghi（塑性铰法）在工程界应用较广，在现今较多国外设计规范中仍然采用。

(2) 多撑（多锚）式板桩入土深度计算  
 多层支撑（锚杆）板桩入土深度，可用盾恩近似法或等值梁法进行计算。

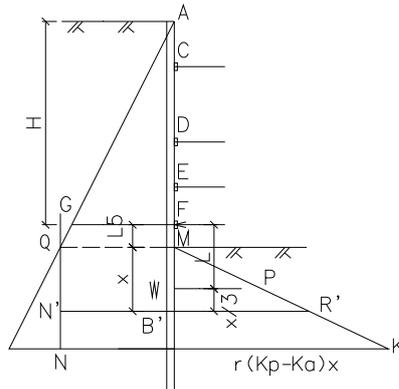


图 14-8 多层支撑板桩计算简图

1) 盾恩近似法计算

其计算步骤如下：

- ① 绘出板桩上土压力的分布图，经简化后的土压力分布如图 14-8 所示。
- ② 假定作用在板桩  $FB'$  段上的荷载  $FGN'B'$ 。一半传至  $F$  点上，另一半由坑底土压力  $MB'R'$  承受。

由图 14-8 几何关系可得：

$$\frac{1}{2} \gamma K_a H (L_5 + x) = \frac{1}{2} \gamma (K_p - K_a) x^2$$

即

$$(K_p - K_a) x^2 - K_a H x - K_a H L_5 = 0 \quad (14-8)$$

式中  $K_a$ 、 $K_p$ 、 $H$ 、 $L_5$  均为已知，解得  $x$  值即为入土深度。

- ③ 坑底被动土压力的合力  $P$  的作用点，在离基坑底  $2/3x$  处的  $W$  点，假定此  $W$  点即为板桩入土部分的固定点，所以板桩最下面一跨的跨度为：

$$FW = L_5 + \frac{2}{3} x \quad (14-9)$$

- ④ 假定  $F$ 、 $W$  两点皆为固定端，则可以近似地按两端固定计算  $F$  点的弯矩。

2) 等值梁法计算

其计算步骤同单撑（单锚）板桩：

- ① 绘出土压力分布图，如图 14-9
- ② 计算板桩墙上土压力强度等于零点离开挖面的距离  $y$  值。
- ③ 按多跨连续梁  $AF$ ，用力矩分配法计算各支点和跨中的弯矩，从中求出最大弯矩  $M_{max}$ ，以验算板桩截面，并可求出各支点反力  $R_B$ 、 $R_C$ 、 $R_D$ 、 $R_F$ ，即作用在支撑上的荷载。

- ④ 根据  $R_F$  和墙前被动土压力对板桩底端  $O$  的力矩相等的原理可求得  $x$  值，而

$$t_0 = y + x$$

所以板桩入土深度为：

$$t = (1.1 \sim 1.2)t_0 \quad (14-10)$$

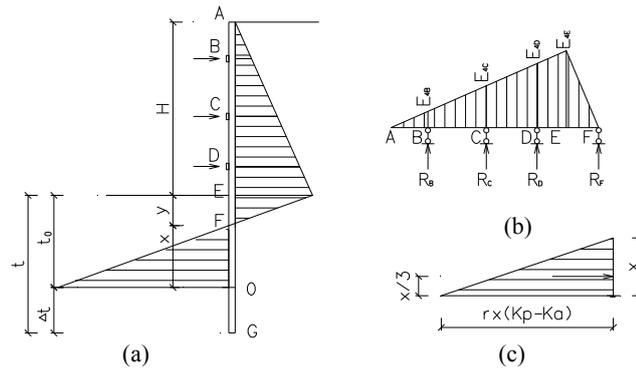


图 14-9 等值梁法计算多层支撑板桩计算简图

(a) 土压力分布图；(b) 等值梁；(c) 入土深度计算见图

#### 4. 其它钢板桩支护结构的计算

##### (1) 临水基坑支护结构计算要点

临水基坑钢板桩支护结构及基坑稳定性的计算方法与陆上基坑围护计算方法类似，但由于水上钢板桩外部水压力、波浪力等处于变动之中，因而在计算中应根据所计算的荷载按最不利组合进行计算。在临水钢板桩实际施工中，随着基坑内抽水和开挖，钢板桩受周边水压力的作用发生变形，一般钢板桩中部凸向基坑内侧而钢板桩端部有外扩趋势，因而造成钢板桩上层支撑有受拉的趋势；此外，水上钢板桩支护结构一般两侧荷载不均衡，如在波浪作用下，波峰作用和波谷作用使得钢板桩两侧压力不均且呈现一定的周期性摆动；这些因素使得围护体系的变形或位移呈现一定的复杂性，而这往往对内支撑结构包括止水体系均为不利。考虑到以上特点，在进行临水基坑设计计算时，为反映基坑整体变形对结构内力的影响，应优先考虑使用整体有限元方法指导设计，且应加强支撑系统中各节点的抗拉、抗剪、抗弯能力。

工程实测资料表明，钢板桩支护结构在变化的水压力、波浪力作用下，呈现一定的“摆动”现象，因此，在设计时可通过抛石护底、钢板桩外侧加设钢板桩等措施增强基坑支护体系的刚度，以保障基坑的整体安全。

##### (2) 桩板式支护结构计算要点

桩板式支护结构一般适用于能够干施工的条件下，墙后土压力由衬板传递给钢桩承受，钢桩间距一般为 0.8~1.6m 左右，间距过小则钢桩数量增多，间距过大则衬板厚度增加、钢桩强度增加。桩板式支护结构的计算与常规板式支护类似，只是单根钢桩承受着桩中心距范围内的土压力。

##### (3) 双排（格型）钢板桩结构

双排或格型钢板桩一般用于临水侧的围堰结构，均为利用钢板桩结构以及内部填充的砂土来抵抗外力的作用。双排（格型）钢板桩围堰的设计计算可参见我国《干船坞设计规范》。

#### 5. 钢板桩支护结构的稳定性验算

钢板桩支护结构一般作为围护墙也兼作止水墙，因此钢板桩的入土深度不仅要满足自身结构的安全，还要满足基坑稳定性的要求。

钢板桩支护结构同板式结构一样，都需要进行：整体稳定性验算、抗滑移验算、抗倾覆稳定性、抗隆起稳定以及渗流稳定性验算。

基坑稳定性验算参见第 5 章内容。

### 14.2.4 钢板桩型号的选择

由结构计算求得钢板桩结构的最大弯矩后，可根据强度要求确定钢板桩的截面模量和钢板桩的材质，最终选择确定钢板桩型号。钢板桩的强度验算一般按下式进行：

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} + \frac{N}{A} \leq [\sigma] \quad (14-11)$$

式中  $\sigma$  —— 钢板桩的计算应力

$M_{\max}$  ——最大弯矩值设计值或标准值

$W$  —— 截面模量

$N$  —— 轴向力

$A$  —— 截面面积

$[\sigma]$  ——钢板桩强度设计值或允许应力

表 14-4 给出了欧洲、日本和国内相关规范中热轧钢板桩的抗拉和屈服强度指标：

热轧钢板桩的力学性能

表 14-4

钢号	抗拉强度 (Mpa)	屈服强度 (Mpa)	钢号	抗拉强度 (Mpa)	屈服强度 (Mpa)
S240GP (欧)	340	240	Q295bz (中)	390~570	295
S270GP (欧)	410	270	Q390bz (中)	490~650	390
S320GP (欧)	440	320	Q420bz (中)	520~680	420
S355GP (欧)	480	355	SY295 (日)	480	295
S390GP (欧)	490	390	SY390 (日)	540	390
S430GP (欧)	510	430			

表 14-5、表 14-6、表 14-7 分别给出了中国、日本、卢森堡等钢铁生产企业生产的部分热轧钢板桩规格以供参考：

需注意的是：对于 U 型钢板桩，由于锁口在中性轴上，受弯时剪力最大，但由于实际锁口一般不予焊接，使得钢板桩容易形成斜向转动，中性轴偏转降低了截面抗弯的有效高度从而削弱了钢板桩挡墙的截面模量；此外，内支撑的设置的不同以及施工方法、锁口中的土粒等因素均会使得钢板桩斜向转动，削减截面模量。

国家标准《热轧 U 型钢板桩》中部分钢板桩技术规格表

表 14-5

型号	断面尺寸(mm)			每延米面积 cm <sup>2</sup> /m	板桩重量 kg/m	每延米 W cm <sup>3</sup> /m
	B	h	t <sub>1</sub>			
400×150	400	150	13.1	74.4	58.4	1520
600×130	300	130	10.3	78.7	61.8	1000
600×180	600	180	13.4	103.9	81.6	1800
750×205	750	205.5	11.5	109.9	86.3	1600
750×220	750	222	12.0	123.4	96.9	2000
750×225	750	225	14.5	140.6	110.4	2500

因此，对于 U 型钢板桩，在应用公式 (14-11) 进行计算时，其钢板桩截面模量  $W$  应该有所折减，对于钢板桩上有刚性胸墙时，可考虑将截面模量乘以折减系数 0.9，对于上部不设胸墙且钢板桩打入软土中时，有关资料建议可考虑乘以折减系数 0.7。

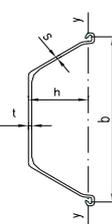
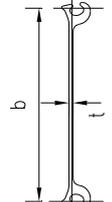
为了考虑到钢板桩锁口能够转动带来的结构计算的影响，在钢板桩实际计算时，可采用有限元软件进行精细化模拟，如 ABAQUS 软件的连接单元可用来模拟钢板桩接头的特性。计算过程中，将连接单元特性选为 HINGE，运用局部坐标的运动约束，耦合连接单元两个节点位移及两个转动自由度，只允许连接单元两个节点在一个自由度上进行转动，如图 14-10。由于钢板桩之间并不能完全自由转动，而是存在极限转动角度，需采用 STOP 命令来制定其转动的上下限角度。

另外值得一提的是：式 (14-11) 属于弹性分析计算的范畴，在欧洲钢板桩设计规范

《EN1993-5 2003 : Design of steel structures: Piling》中给出了塑性设计方法，此前主要应用于丹麦，塑性设计方法可大大节约钢板桩材料（最大可达 35%），塑性设计主要方法是引入塑性截面模量代替弹性截面模量；即允许钢板桩最大弯矩处形成塑性铰而不是以钢板桩最外层纤维应力控制。

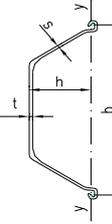
日本新日本制铁株式会社生产的钢板桩

表 14-6

断面形式	型号	尺寸				截面积	重量		惯性矩	截面模量
		b	h	t	s		每延米	每平方		
		mm	mm	mm	mm		kg/m	kg/m <sup>2</sup>		
	FSP-I <sub>A</sub>	400	85	8.0	8.0	113	35.5	88.8	4500	529
	FSP-II	400	100	10.5	10.5	153	48.0	120	8740	874
	FSP-III	400	125	13.0	13.0	191.0	96.9	150	16800	1340
	FSP-IV	400	170	15.5	15.5	242.5	102.1	136.1	38600	2270
	FSP-V <sub>L</sub>	500	200	24.3	24.3	267.6	105	210	63000	3150
	FSP-VI <sub>L</sub>	500	225	27.6	27.6	306.0	120	240	86000	3820
	NSP-II <sub>w</sub>	600	130	10.3	10.3	131.2	61.8	103	13000	1000
	NSP-III <sub>w</sub>	600	180	13.4	13.4	173.2	81.6	136	32400	1800
	NSP-IV <sub>w</sub>	600	210	18.0	18.0	225.5	106	177	56700	2700
	直线型									
	YSP-FL	500	44.5	9.5			61.7	123	396	89
	YSP-FXL	500	47.0	12.7			77.2	154	570	121

ARCELORMITTAL 生产的钢板桩

表 14-7

断面形式	型号	尺寸				截面积	重量		惯性矩	截面模量
		b	h	t	s		每延米	每平方		
		mm	mm	mm	mm		kg/m	kg/m <sup>2</sup>		
	AU16	750	411	11.5	9.3	146.5	86.3	115	32850	1600
	AU18	750	441	10.5	9.1	150.3	88.5	118	39300	1780
	AU20	750	444	12	10	164.6	96.9	129.2	44440	2000
	AU23	750	447	13	9.5	173.4	102.1	136.1	50700	2270
	AU25	750	450	14.5	10.2	187.5	110.4	147.2	56240	2500
	AU26	750	451	15	10.5	192.2	113.2	150.9	58140	2580
	PU28	600	454	15.2	10.1	216.1	101.8	169.6	64460	2840
	PU32	600	452	19.5	11	242	114.1	190.2	72320	3200
	AZ19	630	381	10.5	10.5	164	81	128.6	36980	1940
	AZ25	630	426	12	11.2	185	91.5	145.2	52250	2455
	AZ26	630	427	13	12.2	198	97.8	155.2	55510	2600
	AZ28	630	428	14	13.2	211	104.4	165.7	58940	2755

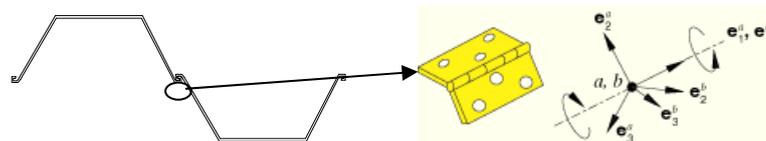


图 14-10 钢板桩锁口节点模拟

总之，选择确定钢板桩型号应综合考虑使用年限、结构强度、允许挠度、施工可行性等

各种因素，最大化地利用钢材，做到技术、经济效益显著且施工可行、质量有保证。

#### 14.2.5 钢板桩的防腐蚀设计

永久性钢板桩支护结构的防腐蚀措施包括选择耐腐蚀钢种、预留腐蚀裕量、防腐涂层、阴极保护等。

处于腐蚀环境中，作为永久性支护结构的钢板桩，在选择型号时，需根据结构使用年限及环境条件的不同预留一定的腐蚀裕量。一般钢板桩随着所处大气、水质条件等的不同年腐蚀量亦不同，在淡水环境中钢板桩（单面）年腐蚀量约为 0.03mm/a~0.06mm/a，在海水环境中约为 0.05mm/a~0.5mm/a，其中在水位变动区及浪溅区腐蚀速率最快。此外，有必要时应考虑部分砂的磨蚀。

除了考虑预留腐蚀量外，并可采取其它防腐措施，如涂刷防腐涂层、外加电流或牺牲阳极进行阴极保护、钢材添加合金材料等，具体参见相关防腐规范和专著。

#### 14.2.6 钢板桩支护止水设计

基坑工程要求支护结构有可靠的止水体系以保证干施工的施工环境并防止流土、流砂、管涌、坑底隆起等破坏。钢板桩支护结构通过锁口连接单片钢板桩，最理想的状态是钢板桩锁口完全没有缝隙的咬合，但从钢板桩打设及转动方面考虑，一般锁口处均有富裕，因此需要通过锁口的密封及自身的插入深度起到止水、保障基坑安全的作用。当然，同其它板式支护结构一样，也可以通过设置独立的止水体系，如在锁口后方施工深层搅拌桩、高压喷射注浆止水帷幕等，这可以参见第 12 章等相关内容。

钢板桩锁口止水密封效果与多方面因素有关，如自身锁口形状（阴阳连接、环形、套型等）及咬合程度、钢板桩施打后的弯曲变形、倾斜旋转、水土的腐蚀、地质条件等。钢板桩锁口的止水密封不外乎天然密封及人工密封两种方式。天然密封是指依靠钢板桩背侧的浮游物或者土砂等细颗粒物堵塞锁口间隙，起到止水的效果。一般，粒径分布越好，止水效果越好。但当钢板桩背侧是水或是土粒较粗时，一般需要很长时间才能体现堵塞效果。实际施工中，可以采取一定的辅助措施加快天然密封的效果，如在水中倒入炉渣等密封材料、基坑内抽水开始时加快抽水速度形成较大水位差以将密封材料冲入锁口等。

天然密封的锁口止水一般需要一定的时间，而且在有波浪作用或是变动水压力作用下的临水基坑中，钢板桩围护结构呈现一定的摆动，因此，完全依靠天然密封来止水是不可靠的。人工密封可以在钢板桩沉桩前或是之后采取密封措施。在钢板桩沉桩前，可以通过预先焊接锁口；在钢板桩锁口内预先涂上止水材料，止水材料主要是膨润性的溶剂、弹性密封料、树脂类溶剂及膨胀性橡胶等构成；可以预先在钢板桩沉桩位置成槽以水泥膨润土替换原状土；在钢板桩锁口位置预先钻孔换填水泥膨润土；在锁口附近预先或沉桩后换填膨胀性止水料等措施进行人工密封锁口。而在钢板桩沉桩后，可考虑在锁口中用木楔（膨胀型）、圆的或成型橡胶绳或塑料绳加上膨胀性的填料填充；将锁扣焊接，若锁口缝干净不透水可直接焊接，若锁口缝透水可通过用扁钢或型钢覆盖加以角钢焊接完成密封。在止水要求较高或强渗透性的支护工程中亦可考虑同时使用多种止水措施。

当然，钢板桩的止水除了竖向锁口密封以外，钢板桩相接处、钢板桩与圈梁（或底板）、钢板桩与拉杆（锚杆）等节点均需要止水，主要可采取焊接、设置防水垫圈或止水带（止水片）等地下工程防水技术措施或是节点构造措施完成。

钢板桩的止水效果影响因素较多，现今对钢板桩止水性还没有统一的界定或定义，也没有统一的测试方法，因而也难以定量测定漏水量，一般仍通过渗透试验得出钢板桩相对的渗透止水效果。

### 14.3 钢板桩的施工

#### 14.3.1 钢板桩施工前准备

在钢板桩沉桩前，应该作充分的调查和准备，以在施工时制定可行的施工组织计划和施工工艺。施工场地条件的调查主要包括场地周边环境、地质条件的调查，场地周边环境包括场地周边的建筑、地下管道等及其对施工作业在净空、噪音、振动方面的限制；周边道路交通状况；施工场地钢板桩堆放及运输的能力；施工设备及水电供应条件；沉桩条件（陆上打

桩还是水上打桩)；施工作业气象或海象条件以及钢板桩施工对周边通航等方面的环境影响等。而地质条件主要需要调查地层的分布、颗粒组成、密实度、土体强度、静/动力触探及标贯试验结果等。此外，还需掌握工程所用钢板桩数量、尺寸、截面形状、钢材材质及其施工难易程度，如 Z 型钢板桩由于形心不对称可能造成钢板桩的旋转等。

### 14.3.2 钢板桩沉桩设备及其选择

钢板桩沉桩机械设备种类繁多且应用均较为广泛，沉桩机械及工艺的确定受钢板桩特性、地质条件、场地条件、桩锤能量、锤击数、锤击应力、是否需要拔桩等因素影响，在施工中需要综合考虑上述多种因素，以选择既经济又安全的沉桩机械，同时又能确保施工的效率。常用的沉桩机械主要有：冲击式打桩机械、振动打桩机械、压桩机械等。表 14-8 给出了各种沉桩机械的适用情况，供选型时参考。

各类打桩机的使用情况

表 14-8

机械类别		冲击式打桩机械			振动锤	压桩机
		柴油锤	蒸汽锤	落锤		
钢板桩型	型式	除小型板桩外所有板桩	除小型板桩外所有板桩	所有形式板桩	所有形式板桩	除小型板桩外所有板桩
	长度	任意长度	任意长度	适宜短桩	很长桩不适合	任意长度
地层条件	软弱粉土	不适	不适	合适	合适	可以
	粉土、黏土	合适	合适	合适	合适	合适
	砂层	合适	合适	不适	可以	可以
	硬土层	可以	可以	不可以	不可以	不适
施工条件	辅助设备	规模大	规模大	简单	简单	规模大
	发音	高	较高	高	小	几乎没有
	振动	大	大	小	大	无
	贯入能量	大	一般	小	一般	一般
	施工速度	快	快	慢	一般	一般
费用		高	高	便宜	一般	高
工程规模		大工程	大工程	简易工程	大工程	大工程
其它	优点	燃料费用低、操作简单	打击时可调整	故障少,改变落距可调整锤击力	打拔都可以	打拔都可以
	缺点	软土启动难、油雾飞溅	烟雾较多	容易偏心锤击	瞬时电流较大、或需要专门液压装置	主要适用于直线段

由于在具体施工时可增加各种辅助沉桩措施，建议在正式施工前采用初选的机械进行试沉桩试验，证明是合适后再最终选定沉桩设备。

#### 1. 冲击式打桩机械

冲击式打桩机械沉桩打桩力大，具有机动、可调节特性，施工快捷，但应选择适合的打桩锤以防止钢板桩桩头受损。冲击式打桩机械沉桩一般易产生噪音和振动，在居民区等区域使用受到限制，但在港湾或偏远地区使用。常见的主要有以下几种：

##### (1) 柴油打桩锤

由于打击能量大，需要辅助设备不多，从而成为常用的打桩机械，它的驱动方式为单动或双动，主要由缸体、活塞（夯锤）和缸体底部冲击块构成，燃料雾化方式为冲击雾化或喷射雾化，冷却有水冷和气冷等形式，国产与进口的柴油锤规格见表 14-9：

柴油锤选择是否恰当，关系到板桩的顺利打入及作业效率的高低。有经验的施工人员可根据土质情况很快决定选用何种桩锤，此外亦可参照相关书籍通过图表等进行初步选型。

柴油锤使用时应注意以下几点：适当选择桩帽及缓冲材料并正确安装；燃料及润滑油选用正确，润滑油按规定期限补充；使用前燃烧室要清理干净，柴油喷出量控制恰当；不可偏心锤击，活塞冲程不能超越界限；导向机构与导向杆间的间隙要经常检查并保持合适的尺寸；各部分螺栓要经常检查是否松动；要经常注意桩锤与桩架发生的异常振动，一旦出现即停止施工，检查原因；一般情况每击 2mm 为停锤标准，当 10 击的贯入度为 5mm 时，应停止锤击。

各类柴油锤的规格

表 14-9

型号 性能	D <sub>1</sub> -25 (国产)	D <sub>1</sub> -40 (国产)	D62 (国产)	D80 (国产)	K25 (日产)	K35 (日产)	K45 (日产)
撞锤质量 (kg)	2500	4000	5400	7300	2500	3500	4500
总质量 (kg)	5650	9258	10000	14000	5200	7500	10500
最大冲击能 (kg·m/次)	6250	10000	22700	31050	7350	10290	13230
每分钟锤击次数	40~60	40~60	36~50	36~45	39~60	39~60	39~60
冷却方式	水冷	水冷	水冷	水冷	水冷	水冷	水冷
燃料消耗 (l/h)	18.5	23.0	24.0	30.0	9~12	12~16	17~21
形式	筒式	筒式	筒式	筒式	筒式	筒式	筒式

### (2) 下落式打桩锤

下落式打桩锤可应用于柴油锤所适合的各种场地条件下，且能得到与柴油锤同样的夯锤重量比。可以将达 11T 的夯锤提高至最大 1.2m，在最大锤击能量下，每分钟锤击次数可以达到 40 下。施工时，可选择重锤低打来减小桩头损伤和降低噪音。若控制精确，该方法可获得 75~80% 的额定输出能量，同时内置数据记录装置可自动进行打桩记录。

下落式打桩锤根据桩锤下落方式的不同分为三类：缆绳式下落桩锤、蒸汽式下落桩锤及液压落锤等。

### (3) 双动式液压打桩锤（液压锤）

双动式液压锤低噪声、无油烟、低能耗，正不断被扩大使用，目前国内主要是使用进口的液压锤。双动式液压锤内部有封闭夯锤，夯锤由液压抬升，在下落过程中得到额外增加的能量，可产生 2g 的重力加速度，在最大锤击距 1m 的情况下即相当于 2m 的自由落差；液压锤在每分钟 50/60 击的情况下可产生 35kN·m 到 3000kN·m 的最大冲击能量；其配置的电动控制系统可以控制锤击能量；每锤的锤击能量可以数字化测量显示；结构相对简单，部件数量较少；液压桩同时可以用来进行拔桩。这是这些优点，使得液压锤在施工中效果很好。一般选择的夯锤与桩体及桩帽的重量比例为 1: 1~1: 2，每次的打击能量应在 35kN·m 到 90kN·m。表 14-10 给出了进口液压锤的规格：

日产液压打桩锤的规格

表 14-10

型号 性能	MHF3-4	MHF3-5	MHF3-7	HK45	NH-40	NH-70	HNC65
撞锤质量 (kg)	4000	5000	7000	4500	4000	7000	6500
总质量 (kg)	6500	7500	9500	9100	9800	14300	13300
最大冲击能 (kg·m/次)	50	60	80	53.3	59.6	87.8	76
每分钟锤击次数	1~85	1~80	1~80	22~60	28~80	25~70	20~70
液压压力 (Mpa)	25.0	28.0	32.0	17.7	20.6	20.6	17.2

#### (4) 蒸汽/空气打桩锤

蒸汽/空气锤用得不多。主要是需配置一套锅炉及管道等，较为麻烦。蒸汽锤有单动与双动，各种汽锤的型号、性能见表 14-11。

国外双动式蒸汽/空气打桩锤的夯锤要小得多；该打桩锤若与压缩机使用可以最大效率运行，且压缩空气能量损失要少；最大的双动式打桩锤每击能量约为  $30\text{kN}\cdot\text{m}$ ，小于其它打桩锤，但其打桩速度却很快，较大的桩锤每分钟能达 100 下，而小点的能达到 400 下；为防止能量损失，该方法沉桩一般不需要使用桩帽；该桩锤可以用来拔桩和水下作业。双动式空气/蒸汽打桩锤锤重与桩重比一般不小于 1:5，由于以上优点，在国外双动式蒸汽/空气打桩锤仍有使用。

蒸汽锤施工应注意：必须确保中心锤击；施工时，操作人员要离开桩锤至少 5m；当每击贯入量小于 3mm 就需停止锤击；桩锤不能超负荷作业；当每击贯入量超过 200mm 时，要调整冲程，减少锤击力。

各类蒸汽锤的规格

表 14-11

型号 性能	单动 3t (国产)	单动 7t (国产)	MBR270 日产(单动)	MBR600 日产(单动)	SB180 日产(单动)	SB400 日产(单动)
撞锤质量 (kg)	3100	6600	3000	6750	600	1300
总质量 (kg)			4200	9500	2880	5940
最大冲击能 (kg·m)	3240	8900	3750	8430	940	2160
每分钟锤击次数	60~90	24~30	50	50	150	115
冲程 (mm)	1350	1650	1250	1250	410	500
蒸汽压力 (Mpa)	0.7~0.8	0.7~1.0	1.0	1.0	0.8~1.0	0.8~1.0
空气压力 (Mpa)			0.7~0.8	0.7~0.8	0.6~0.7	0.6~0.7

#### 2. 振动打桩机械

振动打桩机的原理是将机器产生的垂直振动传给桩体，导致桩周围的土体结构因振动而降低强度。对砂质土层，颗粒间的结合被破坏，产生微小液化；对黏土质土层，破坏了原来的构造，使土层密度改变，粘聚力降低，灵敏度增加，板桩周围的阻力便会减少。对砂土还会使桩尖下的阻力减少，利于桩的贯入。对结构紧密的细砂层，这种减阻效果不明显，当细砂层本身较松散时，还会因振动而加密，更难于沉桩。

振动打桩锤现今主要有电动振动锤及液压振动锤等。振动锤根据最高工作频率的大小，主要有：低频振动锤 ( $f \leq 15\text{Hz}$ )、中频振动锤 ( $15\text{Hz} \sim 25\text{Hz}$ )、高频振动锤 ( $25\text{Hz} \sim 60\text{Hz}$ )、超高频振动锤 ( $f \geq 60\text{Hz}$ )。近年来，我国也自主研发并在一些重点工程中开始推广应用液压高频振动桩锤。

电动式振动沉桩锤的性能

表 14-12

性能 机型	偏心力矩 (N·m)	振动频率 (t/min)	振动力 (kN)	振幅 (mm)	电动机功率 (kW)	机械质量 (kg)
CH-20 (国产)	392	725	250	11	55	3500
VHZ-4000A (日产)	350 410	950 900	360 380	9.8 11.5	60	3650
VM2-5000A (日产)	300 400	1100	410 550	6.1 8.2	90	5310
VM4-10000A (日产)	600 800	1100	810 1080	9.2 12.3	150	8590

振动打桩施工速度较快；如需拔桩时，效果更好；相对冲击打桩机施工的噪声小；在施工净空受限时可以使用；不易损坏桩顶；操作简单；无柴油或蒸汽锤施工所产生的烟雾。但

是对硬土层（砂质土  $N > 50$ ，粘性土  $N > 30$ ）贯入性能较差；对桩体周围土层要产生振动；设备容量的大小与停打之间的关系不明确；电动式振动时，瞬间电流较大，耗电较多；使用液压振动时，大多需要有专门的液压设备。表 14-12 为部分电动式振动沉桩锤的规格。

### 3. 压桩机械

由于板桩打桩带来的振动和噪音，使得开发新的“无污染”的施工工艺成为迫切需要，而压桩机的广发运用也就应运而生。压桩机特别适用于粘性土壤，在硬土地区可采用辅助措施沉桩。压桩机一般以液压驱动，从先前沉入的一片或多片钢板桩获得反作用力，其工作机理参见图 14-11。压桩机同时可用来进行拔桩操作，常见的压桩机械有如下三种：

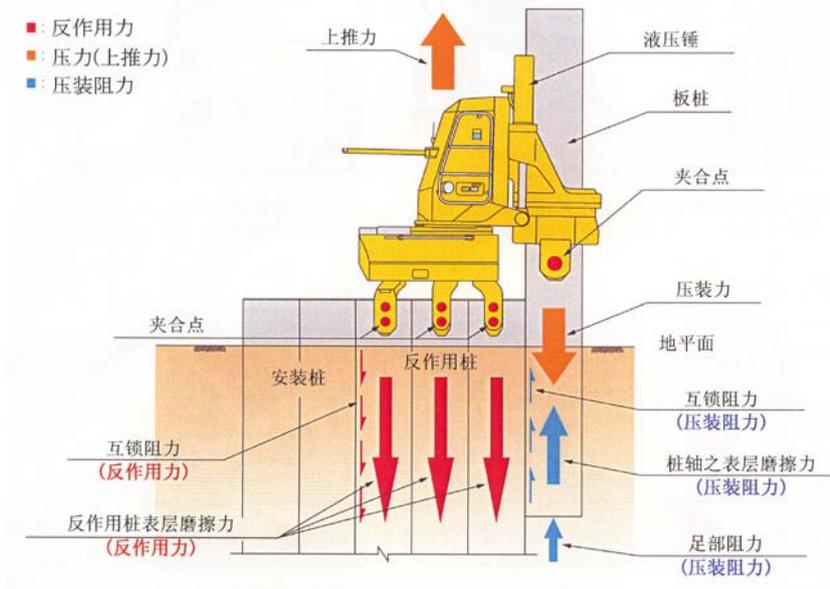


图 14-11 压桩机械工作原理

一种是将板桩呈屏风式安放，而后压桩机通过吊车放在桩墙上。夯锤连接至钢板桩上，通过对两个夯锤加压将钢板桩压入地面一下，一般一次推入两根，夯锤完全压出的同时收回夯锤，这使得压桩机内的十字头及动力单元压力下降，从而可以重复进行。这种液压锤可以施加高达 3000kN 的压力。其工作步骤见图 14-12：

另一种性能相似，但需要使用移动装置来固定安装的板桩墙并且可从一面墙移动到另外一面墙上，完全不依赖于吊车。在此装置中，先用长螺旋钻预先松土。运行时通过一链条牵引至固定点或是先沉板桩来提供补充压桩力。见图 14-13。

第三种压桩机可以在板桩墙上行走，一根一根地将板桩全部压入全部深度。这种压桩机不用吊车，此外还可以施打圆形的钢板桩。其工作步骤如图 14-14，表 14-13 为日产部分液压机规格。

### 4. 其它

除了上述通常的打桩设备外，也有许多特定的打桩设备，如有打桩锤设置特殊的缓冲设备来缓冲传递给桩的锤击力；同时可以振动和静压的设备；液压驱动、可以快速打桩的脉冲型冲击锤；同时可以振动和冲击的打桩设备等。

除了上述的打桩设备外，钢板桩沉桩还需要其他一些辅助设备：

桩架：需要行走方便且结实可靠，操作灵活方便。桩架有履带式、步履式两种，前者可以拆卸导杆；后者较为稳固，适合于场地较差的情况。其选择需要考虑桩锤、作业空间、打桩顺序、施工管理水平等因素选定。

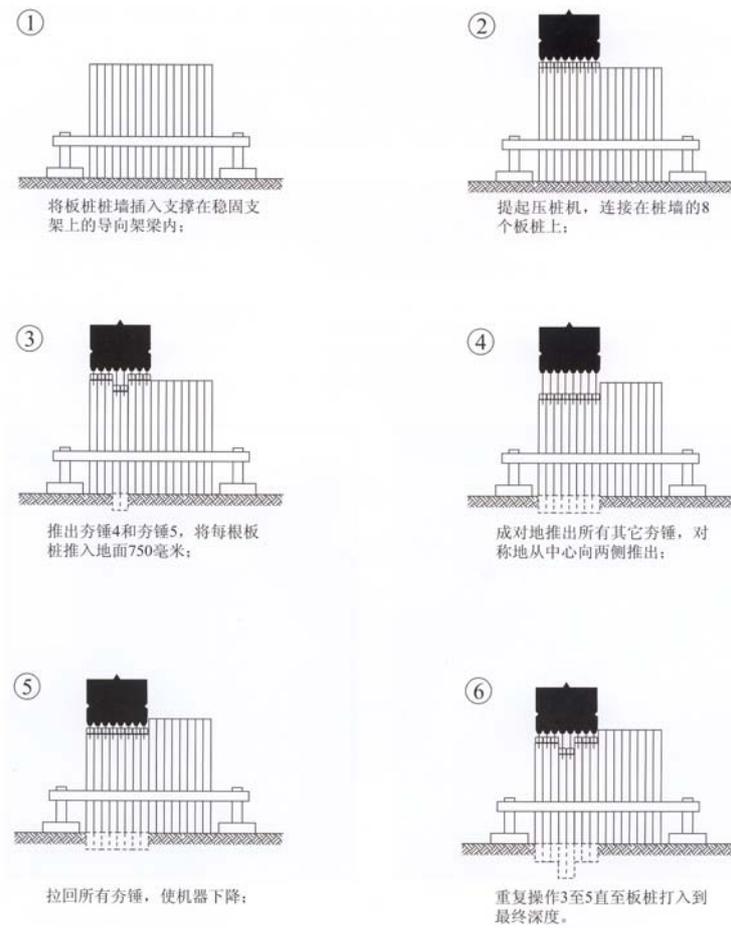


图 14-12 第一种压桩机械工作步骤



图 14-13 第二种压桩机械工作步骤

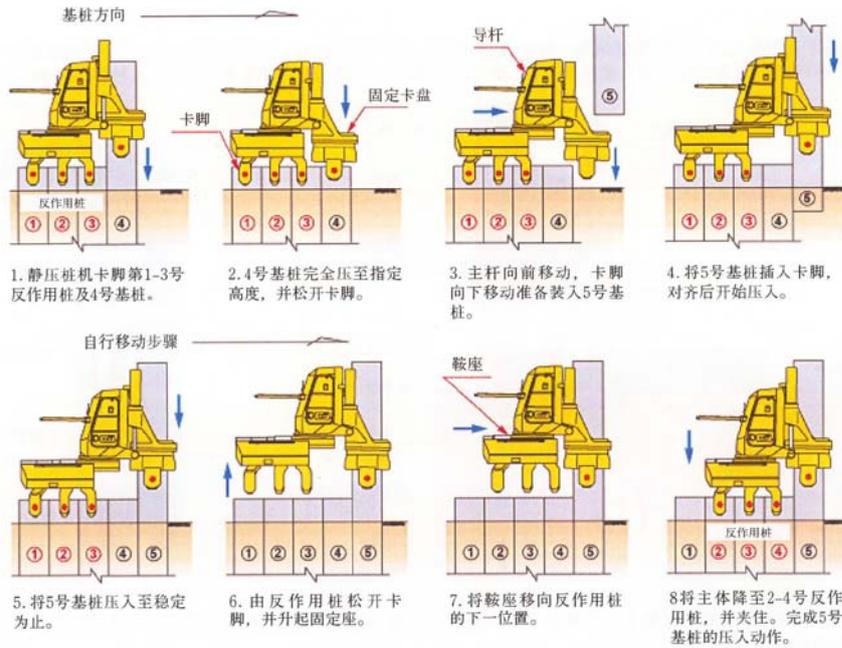


图 14-14 第三种压桩机械工作步骤

日产液压静力压/拔桩机规格（自行式）

表 14-13

形式	SA75	SA100	SW100	SW150	GPII 150	STP 30
压入力 (kN)	750	1000	1000	1500	1500	300
拔出力 (kN)	800	1100	1100	1600	1600	350
压入速度 (m/min)	5.0~16.7	1.5~35.2	1.5~35.2	2.2~19.2	1.4~22.7	2.0~16.4
拔出速度 (m/min)	5.3~14.1	3.2~27.5	3.2~27.5	2.6~16.1	2.2~17.6	2.3~14.9
动力 (kW)	96	147	147	147	147	32
适用钢板桩 (日产)	I <sub>A</sub> ~ IV <sub>A</sub> 400mm 宽	I <sub>A</sub> ~ IV <sub>A</sub> 400mm 宽	II <sub>W</sub> ~ IV <sub>W</sub> 600mm 宽	II <sub>W</sub> ~ IV <sub>W</sub> 600mm 宽	V <sub>L</sub> ~ VI <sub>L</sub> 500mm 宽	轻型 333mm 宽

导向架：确保钢板桩在沉桩时水平和竖直向对齐。可以有上层导向架、下层导向架。

卸扣及穿引器：主要用于固定钢板桩桩头，有地面释放和棘轮释放两种方式，这可以使得桩头与吊车的连接在需要高度就可分开，更加快速、高效、安全。卸扣利用桩头上起吊孔利用剪切销来连接，这避免了摩擦连接会突然滑落的安全隐患。钢板桩吊起后，通过穿引器完成桩的咬合，通过穿引器完成桩的咬合更安全、快捷，可适用于恶劣的天气。

桩帽、桩垫：特别在使用冲击式沉桩设备时，需要设置桩垫、桩帽以将锤击能量给桩体且桩头不受损害，桩帽也起到保证夯锤在锤击形心不对称或是组合型钢板桩时，能够均匀传力避免偏心锤击，桩帽需要做到与板桩的接触面尽可能得大，需能承受较大的锤击能量，其内部一般设定向块以保证板桩的位置。桩垫起到缓冲作用，一般由塑料或木质、铁块等材料构成。

加强靴：可用来加强桩尖强度，以在穿越人为或自然障碍物如卵石、砾石、旧木桩等保持桩体形状、防止变形损伤，增加穿越能力。

#### 14.3.4 钢板桩的沉桩方法

##### 1. 沉桩方法

钢板桩沉桩方法分为陆上沉桩和水上沉桩两种。沉桩方法的选择应综合考虑场地地质条件、是否能达到需要的平整度和垂直度以及沉桩设备的可靠性、造价等各种因素。

陆上打桩，导向装置设置方便，设备材料容易进入，打桩精度容易控制。应尽量争取这种方法施工。在水中水深较浅时，也可回填后进行陆上施工，但需考虑到水受污染及河流流域面积减少等因素。但水深很大，靠回填经济上不合理，需用船施工，船上施工的桩架高度比陆上施工低，作业范围广，但是材料运输不方便，作业受风浪影响大，精度不易控制，对导向装置要求较高，为解决此类不足，也可在水上打设打桩平台，用陆上的打桩架进行施工，这样对精度控制较有力，但打桩平台的搭设在技术和经济上要求较均高。

##### 2. 沉桩的布置方式

钢板桩沉桩时第一根桩的施工较为重要，应该保证其在水平向和竖直向平面内的垂直度，同时需注意后沉的钢板桩应与先沉入桩的锁口应可靠连接。沉桩的布置方式一般有三种，即：插打式、屏风式及错列式。

插打式打桩方法即将钢板桩一根根地打入土中。这种施工法速度快，桩架高度相对可低一些，一般适用于松软土质和短桩。由于锁口易松动板桩容易倾斜，对此可在一根桩打入后，把它与前一根焊牢，既防止倾斜又可避免被后打的桩带入土中。

屏风式打桩法将多根板桩插入土中一定深度；使桩机来回锤击，并使两端 1~2 根桩先打到要求深度再将中间部分的板桩顺次打入。这种屏风施工法可防止板桩的倾斜与转动，对要求闭合的围护结构，常采用此法。此外还能更好的控制沉桩长度。其缺点是施工速度比单桩施工法慢且桩架较高。

错列式打桩每隔一根桩进行打入，然后再打击中间的桩。这样可以改善桩列的线形，避免了倾斜问题。图 14-15 显示了该方法的操作顺序，这种施工方法一般采取 1、3、5 桩先打、2、4 桩后打。

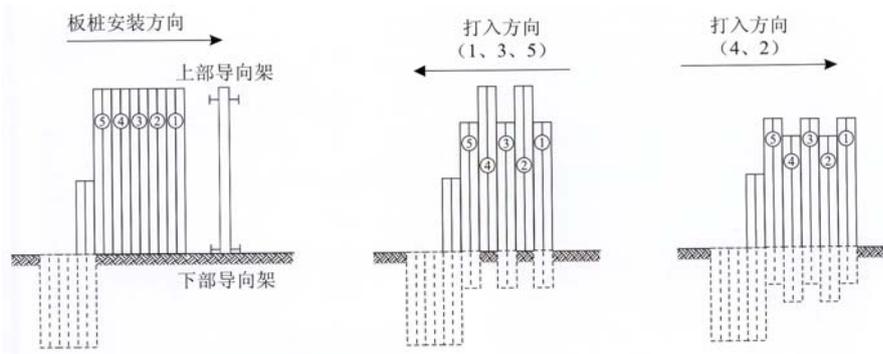


图 14-15 错列式打桩法操作步骤

在进行组合钢板桩沉桩时，常用错列式沉桩法，一般先沉截面模量较大的主桩，后沉中间较小截面的板桩。

屏风式打桩法有利于钢板桩的封闭，工程规模较小时可考虑将所有钢板桩安装成板桩墙后再进行沉桩。用插打法沉桩时为了有利于钢板桩的封闭，一般需从离基坑角点约 5 对钢板桩的距离开始沉桩，然后在距离角点约 5 对钢板桩距离的地方停止，封闭时通过调整墙体走向来保证尺度要求，且在封闭前需要校正钢板桩的倾斜，有必要的时候补桩封闭。对于圆形支护结构，若尺度较小可安装好所有板桩后沉桩；直径较小的支护结构只通过锁口转动不能达到预定效果，可使用预弯成型的板桩封闭；尺度较大时需要严格控制板桩的垂直度，否则可能需要调整板桩的走向但会增加或减小结构直径，因此亦可使用预弯成型的钢板桩。

### 3. 辅助沉桩措施

在用以上方法沉桩困难时，可能需要采取一定的辅助沉桩措施，如：水冲法、预钻孔法、爆破法等。

水冲法：包括空气压力法、低压水冲法、高压水冲法等。原理均是通过在板桩底部设置喷射口，并通过管道连接至压力源，通过喷射松散土体利于沉桩。但水冲法大量的水可能引起副作用，如沉降问题等。高压水冲水量比低压水冲要小，因此更为有利，而且低压水冲可能会影响土体性质，应慎用。表 14-14 给出常用水冲参数：

振动加速度对比表

表 14-14

水冲法	管径 (mm)	管嘴 (mm)	供给压力 (bar)	供给量	适用土壤
空气压力	25	5~10	5~10	4.5~6m <sup>3</sup> /min	粘性土壤
低压水冲	20~40	5~10	10~20	200~500 l/min	密实颗粒性土
高压水冲	30	1.2~3.0	250~500	20~60 l/min	非常密实课粒状土

预钻孔法：通过预钻孔降低土体的抵抗力利于沉桩，但若钻孔太大需回填土体。一般直径为 150~250mm。该方法甚至可用于含有硬岩层上的钢板桩沉桩。在没有土壤覆盖底岩的海洋环境中特别有效。

爆破法：主要有常规爆破或振动爆破。常规爆破先将炸药放进钻孔内然后覆上土点燃，这样在沉桩中心线可以形成 V 形沟槽。振动爆破则是用低能炸药将坚硬岩石炸成细颗粒材料。这种方法对岩石的影响较小，而后板桩应尽快打入以获得最佳沉桩时机。

#### 14.3.5 钢板桩沉桩的质量控制

在钢板桩沉桩时容易产生以下问题影响钢板桩的沉桩质量：

##### 1. 打桩阻力过大不易贯入

这由两种原因造成。一是在坚实的砂层或砂砾层中打桩，桩的阻力过大；二是钢板桩连接锁口锈蚀，变形，致使板桩不能顺利沿锁口而下。对第一种原因，需在打桩前对地质情况作详细分析，充分研究贯入的可能性，在施工时可伴以辅助沉桩办法，不能用锤硬打。第二种原因，应在打桩前对板桩逐根检查，有锈蚀或变形的及时调整。还可在锁口内涂以油脂，以减少阻力。

##### 2. 板桩向行进方向倾斜

在软土中打板桩时，由于连接锁口处的阻力大于板桩周围的土体阻力，形成一个不均衡力，使板桩向前进方向倾斜。这种倾斜要尽早调整，可用卷扬机钢索将板桩反向拉住后再锤击，或可以改变锤击方向。当倾斜过大，靠上述方法不能纠正时，可使用特别的楔形板桩，达到纠偏的目的。

##### 3. 将相邻板桩带走

这种现象常发生在软土中打板桩，当遇到了不明障碍物，孤石或板桩倾斜等情况时，板桩阻力增加，便会把相邻板桩带入。可以按下列措施处理：

(1) 不是一次把板桩打到标高，留一部分在地面，待全部板桩入土后，用屏风法把余下部分打入土中。

(2) 把相邻板桩焊牢在围檩上。

(3) 数根板桩用型钢、夹具连在一起。

(4) 在连接锁口上涂以黄油等油脂，减少阻力。

(5) 运用特殊塞子，防止土砂进入连接锁口。

板桩被带入土中后，应在其顶部焊以同类型的板桩以补充不足的长度。

##### 4. 钢板桩转动

在水上或海上施打钢板桩时，由于波浪等作用的影响，特别是海面上导桩长度越长导向

能力变弱后，钢板桩的沉桩可能会以锁口为中心发生转动而偏离位置，影响板桩墙平整度和后期围檩的安装。为了限制钢板桩的转动，需要设置导架以保证施工精度，且在导架的导梁与钢板桩间应插入垫块。且应在法线和法线垂直方向设置经纬仪，细心观察避免转动。

#### 5. 其它问题

在地面下地下水位以下的砂性地层易液化时，打桩振动会引起地层液化使板桩蠕动，在此情况下要考虑先降水疏干地层。

由于锁口压缩或拉伸造成的钢板桩的打伸或打缩，这可能使得规定长度钢板桩数量不足。可采取通过修正下个钢板桩打击方法、更改下个钢板桩有效宽度、使用异型钢板桩、追打钢板桩等对策。此外，还需要在钢板桩锁口内涂止水材料或充填止水材料，防止钢板桩沉桩时锁口较大变形造成锁口分离楔现象。

### 14.3.6 钢板桩的拔除

#### 1. 拔桩阻力的计算

拔桩阻力  $F$  由下列公式确定：

$$F = F_E + F_S \quad (14-12)$$

式中  $F_E$ ——钢板桩与土的吸附力；

$F_S$ ——钢板桩的断面阻力。

#### (1)、钢板桩与土的吸附力计算

$$F_E = f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_e \quad (14-13)$$

式中  $f_1$ 、 $\dots$ 、 $f_e$ ——钢板桩在不同上层中的吸附力

$$f = UL\tau \quad (14-14)$$

式中  $U$ ——钢板桩的周长；

$L$ ——板桩在各层土中的长度；

$\tau$ ——不同土层中静吸附力（用于静力板桩）或动吸附力（用于振动板桩），参见表 14-15。

当有关土层的各类指标可以确定时，对静吸附力  $F_E$  也可用下式计算：

$$F_E = LuS \quad (14-15)$$

$L$ 、 $U$  同上， $S$  由下式确定

$$S = \sum (c_i + Kq_i \tan \varphi_i) \Delta H_i / \sum \Delta H_i \quad (14-16)$$

式中： $S$ ——钢板桩与土的平均静吸附（ $\text{kN/m}^2$ ）；

$\Delta H_i$ ——钢板桩所在各层土的厚度（ $\text{m}$ ）；

$c_i$ ——钢板桩所在土层的粘着力（ $\text{kN/m}^2$ ）；

$q_i$ ——钢板桩所在土层中心点上的压力（ $\text{kN/m}^2$ ）

$\varphi_i$ ——钢板桩所在土层的内摩擦角（ $^\circ$ ）；

$K$ ——土压力系数。

一般情况下， $\varphi_i$  取土层抗剪内摩擦角的  $2/3 \sim 3/4$ ， $K$  为  $0.3 \sim 0.5$ 。

#### (2) 钢板桩的断面阻力

拔桩时钢板桩的断面阻力较难分析，精确求解困难，一般考虑为作用在钢板桩上的土压与表面间的摩擦阻力。当拔桩时，支撑已拆除，开挖部分是回填土，一般不密实，实际上这

部分的板桩成了悬臂梁，承受主动土压力。埋入部分的钢板桩两侧主、被动土压力差予以忽略，故该部分断面阻力无需考虑，这种单根板桩的断面阻力按下式计算：

$$F_s = 1.2E_aBH\mu \quad (14-17)$$

式中  $F_s$ ——单根板桩的断面阻力 (kN)；  
 $E_a$ ——作用在钢板桩上的主动土压力强度 ( $kN/m^2$ )  
 $B$ ——钢板桩宽度 (m)；  
 $H$ ——除去埋入深度后的钢板桩长度 (m)；  
 $\mu$ ——钢板桩与土的摩擦阻力系数 (0.35~0.40)。

不同土质中的吸附力 (钢板桩)

表 14-15

土 质	静吸附力 $\tau_d$ (kPa)	动吸附力 $\tau_v$ (kPa)	土 质	静吸附力 $\tau_d$ (kPa)	动吸附力 $\tau_v$ (kPa)
中砂	36	3.0	粉质黏土	30	4.0
细砂	39	3.5	黏土	50	7.5
粉砂	24	4.0	硬黏土	75	13.0
砂质粉土	29	3.5			

## 2. 拔桩方法

钢板桩运用较早，拔桩方法也较成熟。不论何种方法都是从克服板桩的阻力着眼据所用机械的不同，拔桩方法分为静力拔桩、振动拔桩、冲击拔桩、液压拔桩等。

静力拔桩：所用的设备较简单，主要为卷扬机或液压千斤顶，受设备及能力所限，这种方法往往效率较低，有时不能将桩顺利拔出，但成本较低。

振动拔桩：利用机械的振动，激起钢板桩的振动，以克服板桩的阻力，将桩拔出。这种方法的效率较高，由于大功率振动拔桩机的出现，使多根板桩一起拔出有了可能。

冲击拔桩：是以蒸汽、高压空气为动力，利用打桩机的原理，给予板桩向上的冲击力，同时利用卷扬机将板桩拔出。这类机械国内不多，工程中不常运用。

液压拔桩：采用与液压静力沉桩相反的步骤，从相邻板桩获得的反力。液压拔桩操作简单，环境影响较小，但施工速度稍慢。此处不再详细介绍，主要介绍静力拔桩和振动拔桩。

### (1) 静力拔桩

#### 1) 用卷扬机与滑轮组拔桩

图 14-16 为这种方法拔桩的示意图，其中立柱可以用型钢、钢管甚至钢桁架等能承受轴向压力并移动方便。有时也可用打桩架。立柱的长度需考虑到板桩的长度附件要能经受较大的拔力。

#### 2) 滑轮组的应用

卷扬机的单索拉力与滑轮组的总拔力由下式决定

$$Q = nT\eta \quad (14-18)$$

式中：  $Q$ ——滑轮组的总拔力 (kN)；  
 $n$ ——钢索根数；  
 $T$ ——卷扬机的单索拉力 (kN)；  
 $\eta$ ——滑轮组的效率，用下式表示：

$$\eta = \frac{1}{n} \frac{\varepsilon^n - 1}{\varepsilon^n (\varepsilon - 1)} \quad (14-19)$$

或

$$\eta = \frac{1}{n+1} \frac{\varepsilon^{n+1} - 1}{\varepsilon^n (\varepsilon - 1)} \quad (14-20)$$

式中  $n$  ——滑轮数；

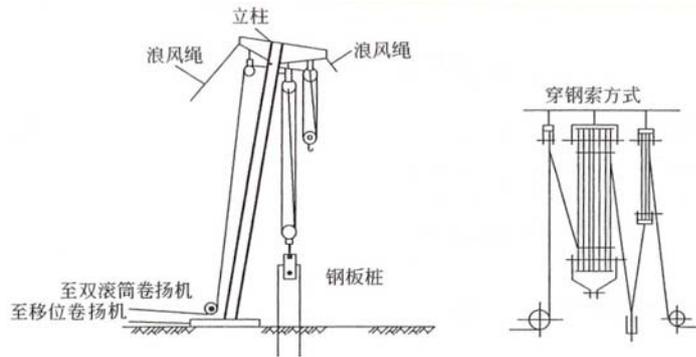


图 14-16 静力拔桩

$\varepsilon$  ——滑轮的摩擦损失系数。

当滑动摩擦时： $\varepsilon = 1.05$ ；当转动摩擦时： $\varepsilon = 1.02$ 。

式 (14-18) 适用于图 14-17 a)，式 (14-19) 适用于图 14-17 b)，当计算出的总拔力仍不足时可按图 14-18 的方法增大总拔力。

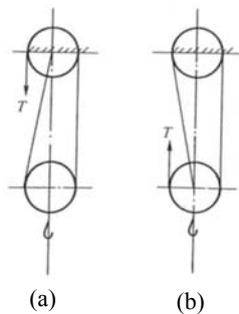


图 14-17 滑轮组的布置

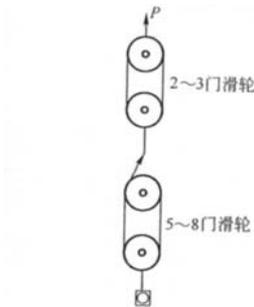


图 14-18 增大静拔力的方法

### 3) 施工要点

- ① 静力拔桩对操作人员的技能要求较高，必须配备有足够经验与操作技术的施工人员；
- ② 由于总拔力很大，对地面的接地压力较高，要防止桩架或板桩设备的沉降，宜在桩架或拔桩设备下设置钢板或路基箱以扩散荷载；
- ③ 拔桩所用卸扣，钢索，滑轮，浪风绳等要加强检查，经常更换；
- ④ 静力拔桩不同于振动或冲击拔桩，在拔桩初期因桩周阻力从静止到破坏需有一段过程，不能操之过急。宜将卷扬机间歇启动，渐渐地将桩拔出，切忌一次性地启动卷扬机，否则会引起钢索崩断，设备损坏甚至人身事故。

#### (2) 振动拔桩

振动拔桩，效率高，操作简便，是施工人员优先考虑的一种方法。振动拔桩产生的振动为纵向振动，这种振动传至土层后，对砂性土层，颗粒间的排列被破坏，使强度降低，对粘

性土由于振动使土的天然结构破坏，密度发生变化，粘着力减小，土的强度降低，最终大幅度减少桩与土间的阻力，板桩被轻易拔出。

### 1) 与土质有关的振动拔桩机参数

#### ① 振动频率

在某一振动频率时，土对板桩的阻力会被破坏，从而使板桩能容易地拔出，这一频率对不同的土层是不一样的，粗砂在 5Hz 时，产生液化；坚硬的黏土在 50Hz 时，出现松动现象。工程中的土层为各类土质分层构成，实用的频率为 8.3~25Hz。

#### ② 振幅

要使砂层产生液化或使黏土、粉土减少其粘着力而使用强制振动的最小振幅值（当振动频率为 16.7Hz 时），对砂土需达到 3mm 以上，对粉土，黏土要达到 4mm。

#### ③ 激振力

强制振动的激振力必须超过前述已被振动减弱以后的土的阻力。

### 2) 选用振动拔桩机

目前市场上振动拔桩机型号较多，有国产的也有进口的，功率从几千瓦至 150kW，甚至 1000kW，机种选择的合适与否直接影响到工程的成败。拔桩机的能力应尽可能地使拔桩机在机器限定的范围内作业。表 14-16 为振动打拔桩锤性能表。拔桩机型的选择可参考相关文献。

### 3. 拔桩施工

钢板桩拔除的难易，多数场合取决于打入时顺利与否，如果在硬土或密实砂土中打入板桩，则板桩拔除时也很困难，尤当一些板桩的咬口在打入时产生变形或者垂直度很差，在拔桩时会碰到很大的阻力。此外，在基础开挖时，支撑不及时，使板桩变形很大，拔除也很困难，这些因素必须予以充分重视。在软土地层中，拔桩引起地层损失和扰动，会使基坑内已施工的结构或管道发生沉陷，并引起地面沉陷而严重影响附近建筑和设施的安全，对此必须采取有效措施，对拔桩造成的地层空隙要及时填实，往往灌砂填充法效果较差，因此在控制地层位移有较高要求时必须采取在拔桩时跟踪注浆等新的填充法。

振动打拔桩锤性能表

表 14-16

型号	质量 (t)	功率 (kW)	偏心距 (N·m)	激振力 (kN)	许用抗拔 力(kN)	尺寸 (m×m×m)	振幅 (mm)	频率 (r/min)	制造 国家
DZ30	2.4	30	154	120	130	1.4×0.9×1.8		900	中国
DZ45	3.1	45	210	275	147	1.9×1.2×1.2	8~10	780	中国
DZ60	4.5	60	367	531	250	1.4×1.5×1.4	7.5	1100	中国
DZ90	5.3	90	300~500	400~600	255	2.4×1.5×1.4			中国
DM <sub>1</sub> -5000		90	300	550		4.6×1.3×1.1	8.2	1100	日本
DZ120	8.4	120	693	760	350	4.6×1.3×1.1			中国
DZ150	9.3	150	980	1354	500	1.4×1.3×4.7			中国
DM <sub>2</sub> -2500		150	2000	860		4.4×1.7×1.4	27	620	日本
450	2	1100	4500	7500	800	6.1×2.4×2.4	75	700	荷兰

#### (1) 拔桩要点

##### 1) 作业开始时的注意事项：

① 作业前必须对土质及板桩打入情况，基坑开挖深度及支护方法，开挖过程中遇到的问题等作详细调查，依此判断拔桩作业的难易程度，做到事先有充分的准备。

② 基坑内的土建施工结束后，回填必须要有具体要求，尽量使板桩两侧土压平衡，有利于拔桩作业。

③ 由于拔桩设备的重量及拔桩时对地基的反力，会使板桩受到侧向压力，为此需使板桩设备同拔桩保持一个距离。当荷载较大时，甚至要搭临时脚手，减少对板桩的侧压。

④ 作业时地面荷载较大，必要时要在拔桩设备下放置路基箱或垫木，确保设备不发生倾斜。

⑤ 作业范围内的高压电线或重要管道要注意观察与保护。

⑥ 作业前，对设备要认真检查，确认无误后方可作业，对操作说明书要充分掌握。

⑦ 有关噪声与振动等公害，需征得有关部门认可。

2) 作业中需注意事项：

① 作业过程中必须保持机械设备处于良好的工作状态。

② 加强受力钢索等检查，避免突然断裂。

③ 为防止邻近板桩同时拔出，可将邻近板桩临时焊死或在其上加配重。

④ 板桩拔出时会形成孔隙，必须及时填充，否则极易造成邻近建筑或地表沉降。填充效果更好。可采用膨润土浆液填充，也可跟踪注水泥浆。

3) 作业结束后的注意事项：

① 对孔隙填充的情况要及时检查，发现问题随时采取措施弥补。

② 拔出的板桩应及时清除土砂，涂以油脂。变形较大的板桩需调直时运出工地，堆置在平整的场地上。

(2) 钢板桩拔不出时的对策

1) 将钢板桩用振动锤或柴油锤等再复打一次，可克服上的粘着力或将板桩上的铁锈等消除。

2) 要按与打板桩顺序相反的次序拔桩。

3) 板桩承受土压一侧的土较密实，可在其附近并列地打入另一块板桩，也可使原来的板桩顺利拔出。

4) 也可在板桩两侧开槽，放入膨润土浆液，拔桩时可减少阻力。

(3) 有利于拔桩的其它辅助手段

1) 以便于拔桩为目标的特殊打桩方法

① 膨润土泥浆槽施工法

膨润土浆随板桩一起跟入土层中，在板桩表面形成一薄膜，有如润滑既有利于打桩又有利拔桩。使用的膨润土泥浆浓度为5%—10%，这种方法对粘性土效果更好，对板桩周围土层的上升亦可抑制。除膨润土浆外，还可使用10%—20%浓度的粘上浆，或者黏土，水和磷酸钠的悬浮液都可减少板桩表面的阻力，为使板桩表面保持全部的悬浮液，可在桩尖处设置一台阶较好。

② 排除板桩齿口中的土砂。

在砂上层中打板桩，在板桩的齿口内会进入一部分砂，在打下一块桩时，少量砂被挤出齿口外，大量留在齿口内且被压实，造成打桩阻力增大，齿口变形，以致拔桩的阻力也增大。可用排砂器具，可将砂土排除。也可在齿口的开口部放入发泡塑料以防止砂土进入，有利于下一块板桩打入且可减少拔桩阻力。

③ 涂以油脂或沥青

在钢板桩齿口内，桩表面涂以油脂或沥青可减少齿口内部或桩表面的摩阻，也可防止表面锈蚀同样达到降低摩阻的目的。

④ 使用水冲或用长螺旋钻松动板桩周围土体

2) 为减少已打入钢板桩的摩阻而采用的特殊施工方法

① 钻孔法

在板桩的侧面钻孔，松动土层以减少周围摩阻。当与振动或冲击并用效果更佳。有时可用小型钻机钻孔，放入小型管道，压入高压水减阻效果也是好的。

② 电渗施工法

当粘土中含水量增加时，其抗剪强度会降低。利用此现象，以板桩作为阴极，阳极置于上层中，通电后，土中孔隙水便会集结在钢板桩周围，使其周围的黏土含水量大大增加，在板桩与土之间产生水膜并有气泡发生，起到减阻作用。图 14-36 为施工布置。电源的功率与土层的导电率，电渗系数及工程规模有关，一般电压为 220V，电流 20—30A 即可。当电渗发生时在板桩顶部施加振动力或竖向冲击力效果更好。

### ③ 不同的机械并用

板桩相互连接处锈蚀后使拔桩阻力增大。可用落锤在起拔前锤击板桩，使铁锈掉落，再用高能量拔桩机将桩拔出。

## 14.3.7 钢板桩施工对环境的影响及对策

### 1. 噪声

噪声对人体的危害，已经越来越得到人们的重视。各国政府对噪声的管理都有相关的控制标准。钢板桩施工产生的噪声随着施工设备的不同而有所不同。若采用下落锤，则产生有规律脉冲式的噪声。而柴油锤、液压锤、空气锤虽然锤击速度较快，但产生的噪声也是脉冲式的。振动锤虽然噪声较低，但有间歇性，仍表现为脉冲式的噪声。而静压桩产生的有限噪声则是稳定的或几乎没有噪声。一般高脉冲式的噪声比稳定的噪声更让人们难受。

噪声有专门的等级测定方法，噪声等级跟声源强度、距离、风速、温度、建筑物反射等因素有关，一般声音随着距离的增加而衰减。距离沉桩机械约 7m 处，冲击沉桩设备产生声音约 90~115dB，蒸汽/空气锤约 85~110 dB，振动锤约 70~90dB，压入锤约 60~75dB。而烦恼的街道为 85dB，人正常说话一般为 55~63dB。因此，为了降低噪声，特别是在对噪声控制较为严格的地区，在选择沉桩或拔桩设备时应该考虑到噪声及环境保护的要求，虽然可以采用隔音屏、防音罩等措施，但最好降低声源强度，选择产生噪声较低的施工设备，或者采用如水冲等辅助沉桩或拔桩措施来松动土体降低钢板桩施工难度以降低噪声。

### 2. 振动

钢板桩引起的振动可能引起地基的变形（沉降、陷落、裂缝等），从而影响周边建筑物、管道等设施的正常运用，引起精密仪器工作性能上的损害。国内尚无振动控制标准。表 14-17 给出了建筑物的允许振动参数：

振动拔桩机的作业范围表

表 14-17

类别	极限值 (mm/s)	类别	极限值 (mm/s)
1.住宅、房屋和类似结构	8	1、2 类以外和受保护的建筑物	4
2.重型构件和高刚度骨架的建筑物	30		

打桩引起的振动亦体波和面波的形式向外传波，随着距离的增加而衰减。为了钢板桩沉桩引起的振动，可采取如下措施：

(1) 采用桩垫或缓冲器沉桩，选用低振动和高施工频率的桩锤；采用辅助施工措施，如水冲，钻孔等，合理安排施工顺序等。

(2) 设置减振壁。在需要保护设施附近设置减振壁以吸收传播过来的振动，一般减振壁为 60~80cm 宽，深度 4~5m，当软土层较厚时宜深一些。壁的距离离打桩区 5~10m。其形式有空沟（为保持墙体稳定，可充填泥浆等松散料）、沥青壁、发泡塑料壁型、混凝土壁型，亦可用一定间距的钻孔替代。

(3) 对原有建筑进行加固，或拆除危险部件，精密设备工作避开桩基施工等措施。

### 3. 拔桩对环境的影响

除了上述噪声、振动外，若钢板桩靠近建筑物、地下管线时，钢板桩的回收拔出容易造成附近建筑物的下沉和裂缝、管道损坏等。这主要是由于拔桩易形成空隙、导致板桩附近土

体强度降低。因此,在进行钢板桩拔除施工时,应充分评估拔桩可能引起的地层位移,制定相应的对策,如在钢板表面涂抹沥青等润滑剂降低桩土之间的摩擦作用;优化拔桩顺序;在桩侧一定范围内注浆,增加土体的强度,增加土颗粒的移动阻力,减少拔桩对土体的破坏作用;即时注浆等,具体参见拔桩施工要点。

#### 4. 其它

钢板桩沉桩过程中可能产生其它环境污染,如:柴油锤在锤击时常有油烟产生。燃烧不充分时,可产生大量黑色烟雾冒出。可以设置隔离罩或是圈栏施工区域,当然施工人员的认真操作也是重要的积极因素。

此外,在水上施工时,可能造成对水、海洋的污染,用施工船水上打桩时也可能影响航道通航等等。

总之,钢板桩的施工应该重视其对周边环境的影响,优先选用低噪音、低振动的施工设备和施工 mm 工艺,充分预估对环境的影响,制定相应的计划和对策。

## 14.4 钢板桩支护工程实例

### 14.4.1 中船长兴造船基地一期工程 1#、2#坞坞口基坑

#### 1. 工程概况

中船长兴造船基地一期工程 1#、2#坞两个坞口基坑的平面尺度分别为 98m×30m 和 128m×30m,原始泥面标高在-4~-6m 之间,0~-13m 等深线间平均坡度平均在 1:2.5~1:4 左右,最陡处只有 1:2。基坑外侧水下地形较为复杂,特别是 1 号坞坞口外侧泥面既深且陡,对基坑的施工极为不利。基坑开挖面标高为-10.65m,围护墙外侧正常情况下设计高水位为 4.13m,以此计算基坑开挖深度约为 15m。

#### 2. 水文地质条件

##### (1) 潮流

最大涨潮流速达 2.3~2.5m/s,落潮流速达 2.0m/s

##### (2) 设计水位

设计高水位: 4.13m (潮峰 10%)      设计低水位: 0.56m (潮谷 90%)  
极端高水位: 5.79m (五十年一遇)      极端低水位: -0.33m (五十年一遇)

##### (3) 波浪

基坑长度方向所受正面波浪,SSW 向,50 年一遇  $H_{1\%}=1.96\text{m}$ , $T=4.1\text{s}$ , $L=26.2\text{m}$ ;  
考虑短边方向所受正面波浪,SE 向,50 年一遇  $H_{1\%}=3.83\text{m}$ , $T=5.8\text{s}$ , $L=52.5\text{m}$ 。

##### (4) 地质条件

表 14-18 为相关地层物理力学参数表:

#### 3. 基坑围护方案

本基坑围护墙外侧是水位一直变动的水体,且受到波浪、水流(涨落潮)的影响,水上基坑周边的荷载是不均衡的;坞口处整个基坑在横断面上是处于水下的一个坡面之上,原有的水下泥面坡度一般在 1:1~1:4 左右,要在这样的一个坡面上进行直立式的基坑开挖,存在一个岸坡及基坑稳定的问题。设计施工最大的难点就在于如何采取足够的工程措施来维持基坑周边水土荷载的平衡,并通过加强整个围护体系的完整性和整体刚度,使其变形或位移控制在我们可以接受的范围内,确保整个基坑尽可能达到一个安全、稳定状态。

本基坑围护墙采用 PU32 钢板桩,桩长 31m,其顶标高 3.65m、底标高-27.35m,由打桩船施打。为了增强止水效果和抗风浪的稳定性,在外侧和东西两侧的围护墙外围距离 3m 附加了一排 16m 长的 PU16 钢板桩,该排桩通过顶部的圈梁兼挡浪墙连成一体,两排板桩之间回填砂。

地层物理力学参数表

表 14-18

土层编号	土层名称	土层层面标高 (m)	容重 kN/m <sup>3</sup>	天然 孔隙比	天然 含水量 (%)	固快直剪		渗透系数 K (cm/sec)
						内聚力 C (kPa)	内摩擦角 Φ (°)	
① <sub>1-2</sub>	灰色淤泥质粉质粘土夹粉性土	-14.3~-2.4	17.5	1.18	42.6	0	10.8	8.0×10 <sup>-5</sup>
① <sub>2</sub>	灰色粘质粉土夹淤泥质粘性土	-15.6~-3.7	18.3	0.93	33.1	8	17.0	5.0×10 <sup>-4</sup>
② <sub>3</sub>	灰色砂质粉土	0.20~0.79	18.6	0.85	29.6	3	25	1.0×10 <sup>-4</sup>
④	灰色淤泥质粘土	-16.35	16.9	1.37	49.3	11	12.5	3.0×10 <sup>-7</sup>
⑤ <sub>1-1</sub>	灰色粘土	-21.0	17.5	1.17	41.1	17	15.0	2.5×10 <sup>-7</sup>
⑤ <sub>1-2</sub>	灰色粉质粘土	-27.23	18.0	1.01	34.9	21	18.0	3.0×10 <sup>-6</sup>
⑤ <sub>3-1</sub>	灰色粉质粘土夹粉性土	-31.10	18.1	0.96	32.9	23	20.5	2.0×10 <sup>-6</sup>

内设 5 道支撑围檩体系。支撑布置采用南北向对撑加角撑的方案，主支撑间距一般为 7.5m，并且每隔 30m 左右设置一个平面桁架，其中：第一道圈梁（兼作防浪墙顶标高 7.00m）采用钢筋砼结构以保证顶部的刚度，支撑断面尺度 800×800mm；第二道~第五道内支撑体系均采用钢围檩、钢支撑。每根对撑（总长度 31m）下设三根立柱，间距约 7.5m 左右。立柱桩均利用主体结构 Φ800PHC 桩，将 Φ700 钢管焊接在预制桩顶和预制桩一起由打桩船打至设计标高。基坑平剖面图参见 14-19、14-20。

#### 4. 工程实施效果

经实测，围护钢板桩最大变形约 180mm，最大变形点在标高-11.0m 左右。

目前，中船长兴造船基地 1#、2#船坞已经顺利建成投产。在工程建设过程中，利用有限元软件动态模拟，充分研究对比设计方案，信息化指导反馈施工过程，在施工中采用较多加强基坑稳定性的工程措施。在整个使用期内，水上基坑经受住了高潮位、大风浪等诸多不利自然因素的考验，取得了工程实践的成功。



图 14-19 水上基坑平面图

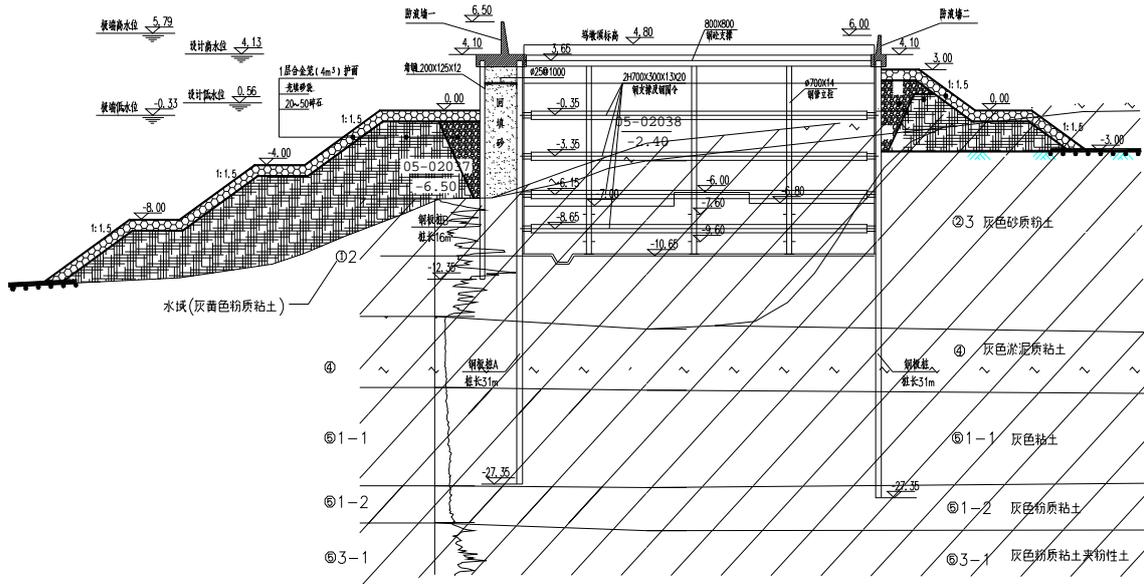


图 14-20 水上基坑剖面图

### 14.4.2 长江引水三期取水泵房基坑围护

#### 1. 工程概况

该取水泵房为直径 46 米的圆形结构，所处水深约 5 米，是目前长江口规模最大的江中取水泵站，泵房为钢筋混凝土结构，为达到泵房干施工条件，需建造一 50.4 米直径的圆形围护结构。场地现状标高约-1.0m（吴淞零点，下同）。

#### 2. 水文地质条件

##### (1) 水流

最大水流流速 1.58m/s

##### (2) 设计水位

设计平均高潮位+3.25m

##### (3) 设计波浪

设计波浪参数为  $H=1.861m$ ,  $T=4s$ ,  $L=21m$ ,

##### (4) 地质条件

表 14-19 为相关地层物理力学参数表：

#### 3. 基坑围护方案

该工程中钢板桩围护结构内径达 50.4m，挡水高度约 15m，水上无支撑顺作法施工在上海尚无先例。经过方案分析对比，采用圆形单排钢板桩基坑围护方案。

采用 AU25 单排钢板桩作为支护结构，以一道钢筋混凝土顶圈梁和四道环向钢圈梁作为内支撑体系，经围堰内抽水后，进行顺作法干施工。基坑平剖面图参见 14-21、14-22。

施工围堰内径 50.4m；基坑开挖底标高-10.15m，开挖深度 9.15m。围堰采用 AU25 型钢板桩（约 214 根）。钢板桩桩顶标高+4.00m，底标高-21.00m，长度 25 米。施打前，在钢板桩锁口内灌注柔性止水材料，以有效阻隔长江水，保证取水泵房的干施工顺作条件。钢板桩顶部设置 1 道钢筋混凝土顶圈梁兼作施工期的防浪墙，环向再设置 4 道水平桁架式钢拱圈梁，沿圆形钢板桩底和围堰内侧的坑底以下部分，采用旋喷桩进行局部地基加固。

围堰内抽水挖泥前，在其外侧 15~20 米范围内-8.00 米标高以上部分抛填护坦，自上向下采用 50~200kg 块石厚 1600、袋装碎石层厚 400、300g 土工布一层。

施工顺序大致是：水下挖泥至-8.00m 最下道钢拱圈梁安装所需标高；施打钢板桩定位

桩、立柱桩、工程桩；搭设施工平台；在钢板桩顶端浇注钢筋混凝土圈梁；平台上拼装钢拱圈梁，整体吊装就位；施打围堰钢板桩；地基加固施工；围堰外 15~20 米范围内铺设防冲护底；围堰内抽水、开挖-8.00m 以下土方至设计标高；浇筑泵房底板和主体结构混凝土；护底施工至设计标高；施工完毕拆除支护钢板桩。

地层物理力学参数表

表 14-19

土层号	土层名称	含水量 W (%)	容重 r KN/M <sup>3</sup>	孔隙比 e	压缩模量 Es Mpa	内摩擦角 $\phi$	内聚力 C MPa
①	淤泥	32.9	18.20	0.94	5.47	22.0	14.0
④1	淤泥质粉质粘土	55.2	16.50	1.53	2.02	6.0	7.0
④2	粘质粉土夹粉质粘土	41.1	17.50	1.15	3.11	15.0	13.0
⑤1	粉质粘土	52.80	16.60	1.48	2.24	9.00	10.0
⑤2	粉质粘土	41.70	17.40	1.18	3.14	12.50	13.0
⑤3-1	粉质粘土	36.30	18.00	1.03	4.01	17.0	17.0
⑤3-2	粉质粘土	24.70	19.50	0.71	6.41	19.0	39.0
⑦2	粉细砂	26.60	19.20	0.77	6.19	21.50	31.0
⑦2 夹	粉质粘土	28.70	18.60	0.83	9.96	30.0	7.0
⑦2	粉细砂	27.30	18.80	0.79	12.30	31.5	6.0



图 14-21 基坑平面图

#### 4. 工程实施效果

本工程有效地控制了圆型钢板桩围堰的施工误差、内力分布和变形（最大变形 21mm），在长江口复杂的风浪流条件下成功实施了无内支撑的水上基坑围护，满足了复杂体系的泵站主体结构施工空间、环境、进度和安全要求。

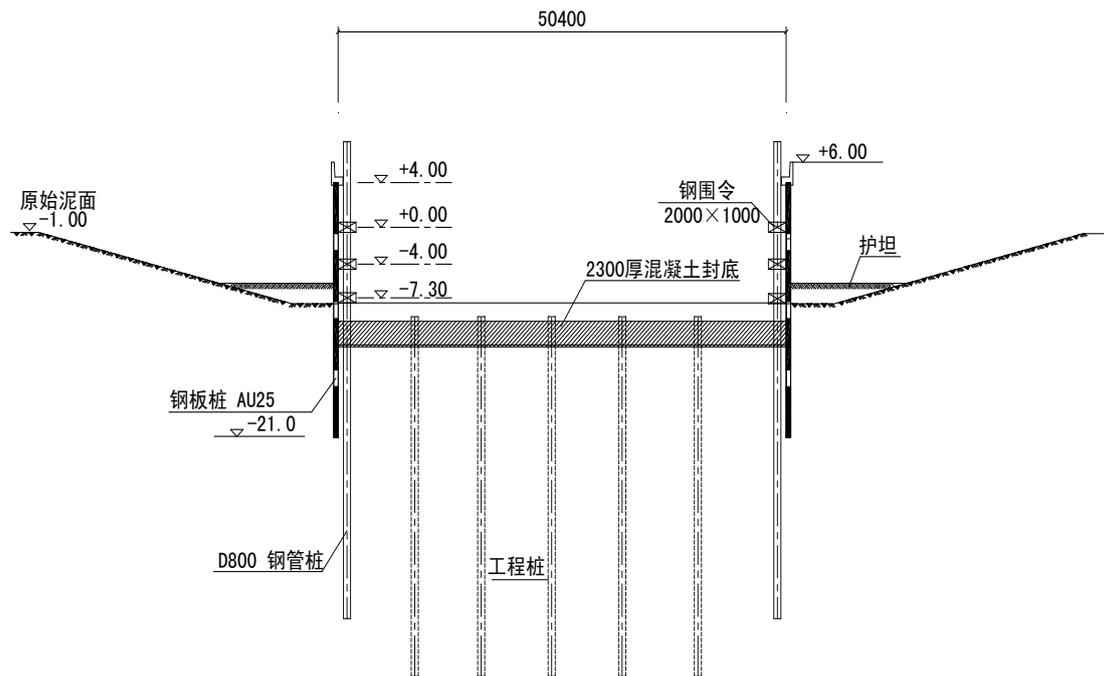


图 14-22 基坑剖面图

#### 14.5 钢板桩支护结构的新进展

最近，日本推出了 NS BOX 型钢板桩，根据其锁口可分为 GH-R 型和 GH-H 型，见图 14-23，可以作为钢制地下墙，也可以取代地下墙中的钢筋笼，可减少 30~40% 的墙厚，见图 14-24，图 14-25。

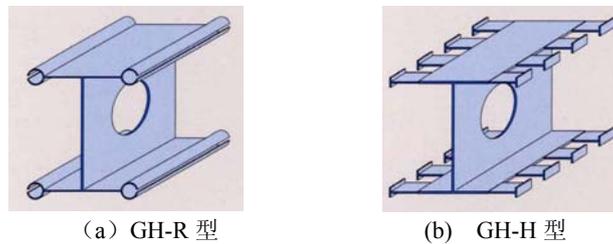


图 14-23 NS BOX 型钢板桩种类

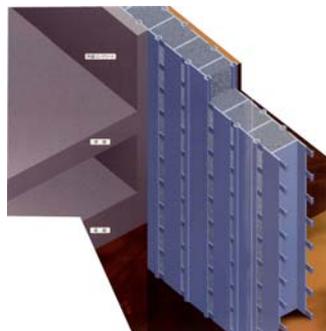


图 14-24 钢制地下连续墙

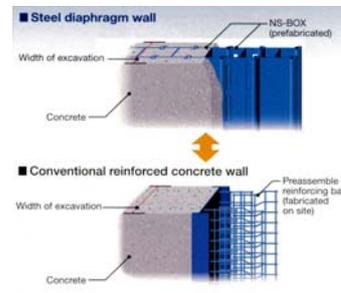


图 14-25 取代地下墙中的钢筋笼

其中 NS BOX 地下墙的施工顺序：a) 先导槽段的开挖；b) 安放 NS-BOX 板桩；c) 浇筑底部混凝土；d) 充填混凝土；e) Excavation for succeeding elements；f) 清理 NS-BOX 锁口；

g) 插 NS-BOX 板桩; h) 浇筑混凝土。该结构型式施工快捷, 用料节省, 具有较广阔的应用前景。

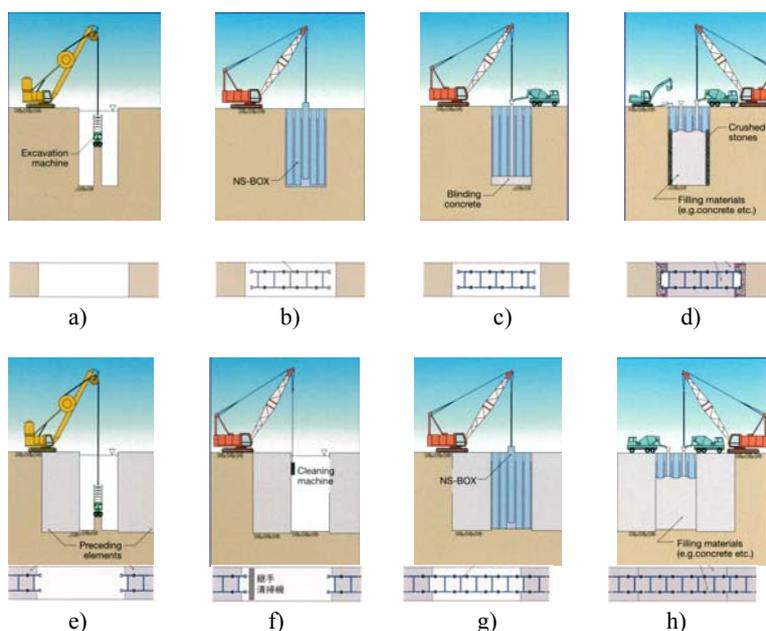


图 14-26 NS BOX 地下墙的施工顺序

### 参考文献

- [1] 刘建航, 侯学渊, 基坑工程手册 [M], 中国建筑工业出版社, 1997
- [2] 史佩栋, 桩基工程手册 [M], 人民交通出版社, 2008
- [3] 龚晓南, 深基坑工程设计施工手册 [M], 中国建筑工业出版社, 2001
- [4] EN1993-5: 2003: Design of Steel structures: Piling [S]
- [5] EN12063: 1999, Execution of special geotechnical work [S]
- [6] EM 1110-2-2504: DESIGN OF SHEET PILE WALLS [S], U.S. Army Corps of Engineers, 1994
- [7] Steel Sheet Piling Design Manual [M], United States Steel, 1984
- [8] Installation of steel sheet piles [M], Technical European Sheet Piling Association, 2001
- [9] Sheet Piling Handbook Design [M], ThyssenKrupp Gft Bautechnik, 2008
- [10] Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2004 [M] , Committee for Waterfront Structures of the Society for Harbours Engineering and the German Society for Soil Mechnics and Foundation Engineerin, 2006
- [11] Arjen Kort, Steel Sheet Pile Wall in Soft Soil [M] , DUP Science,2002