

第 15 章 钢筋混凝土板桩设计与施工

15.1 概述

钢筋混凝土板桩不仅仅是单独的板桩式构件，而是指由钢筋混凝土板桩构件沉桩后形成的组合桩体，是一种易工厂化、装配化的基坑围护结构。

钢筋混凝土板桩具有强度高、刚度大、取材方便、施工简易等优点，其外形可以根据需要设计制作，槽榫结构可以解决接缝防水，与钢板桩相比不必考虑拔桩问题，因此在基坑工程中占有一席之地，在地下连续墙、钻孔灌注桩排桩式挡墙尚未发展以前，基坑围护结构基本采用钢板桩和混凝土板桩。由于国内长期以来仅限于锤击沉桩，且锤击设备能力有限，桩的尺寸、长度受到一定限制，基坑适用深度有限，钢筋混凝土板桩应用和发展一度低迷。近年来，随着沉桩设备的发展，且沉桩方法除锤击外又增加了液压沉桩、高压水沉桩，支撑方式从简单的悬臂式、锚碇式发展到斜地锚和多层内支撑等各种形式，给钢筋混凝土板桩带来了广泛的应用前景。如目前板桩的厚度已达到 50cm，长度达到 20m，配筋方式有普通钢筋及预应力配筋，截面形式由单一的矩形截面发展到薄壁工字形等截面，又与深层搅拌桩以及地下连续墙结合，弥补了钢筋混凝土板桩在较深基坑支护中的缺陷，钢筋混凝土板桩以其独特的优越性而再度倍受到青睐。作为深基坑围护结构，在上海虹桥太平洋大饭店深基坑工程中，其支护开挖深度已达到 12.6m；通过与搅拌桩结合，形成以钢筋混凝土板桩为劲性构件的 SMW 工法支护，在宝钢某冷轧工程中支护开挖深度已达到 9.5m；作为地下连续墙预制接头桩，在宝钢某热轧厂深基坑工程支护开挖深度已达到 35.4m。当前钢筋混凝土板桩已与地下连续墙、钻孔灌注桩、SMW 工法等成为深基坑开挖支护的主要手段之一。此外，钢筋混凝土板桩利用水力插板技术在港务水利工程中也得到了广泛应用，如松花江防洪堤坝，采用了厚 0.24m、长 8m 的钢筋混凝土板桩，在黄河取水工程中还广泛用于水闸、泵站和输水渠道等。

钢筋混凝土板桩最适用范围包括：开挖深度小于 10m 的中小型基坑工程，作为地下结构的一部分，则更为经济；大面积基坑内的小基坑即“坑中坑”工程，不必坑内拔桩，降低作业难度；较复杂环境下的管道沟槽支护工程，可替代不便拔除的钢板桩；水利工程中的临水基坑工程，内河驳岸、小港码头、港口航道、船坞船闸、河口防汛墙、防浪堤及其他河道海塘治理工程。

15.2 钢筋混凝土板桩构造设计

作为内河驳岸和一般小型基坑使用的钢筋混凝土板桩，通常厚度为 16~25cm，宽度 40~70cm，长度 10m 左右。矩形钢筋混凝土板桩构造，如图 15-1 所示。

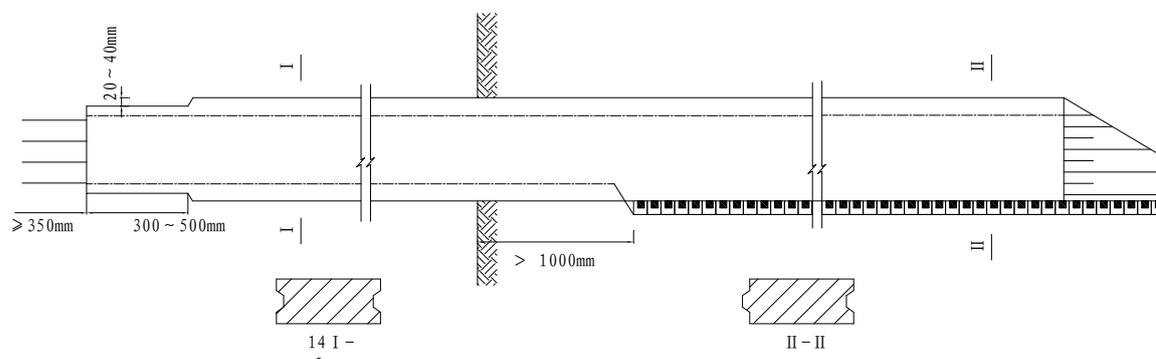


图 15-1 矩形钢筋混凝土板桩构造图

15.2.1 截面形式

钢筋混凝土板桩有矩形、“T”形和“工”形截面，也可采用圆管形或组合型。板桩墙转角与封闭分为矩形转角、T形封闭、扇形转角等形式，如图 15-2 所示。

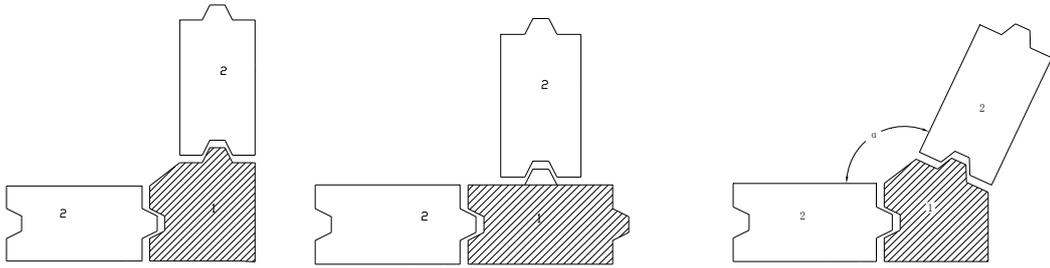


图 15-2 混凝土板转角连接形式图

1. 矩形截面槽榫结合

矩形截面槽榫结合为目前常用方式，板桩桩尖一边为直边，一边为斜边，靠沉入时相互紧挤形成板桩墙。作为挡水和挡土结构，为了增加其封闭性，提高防水效果，每根板桩桩身两侧设有凹凸榫槽企口，只起挡土作用的为全榫板桩，需挡水的为半榫板桩。板桩沉入后凹槽内须冲洗干净并灌细石混凝土，凹榫槽深度不宜小于 5.0cm。其截面形式及配筋构造如图 15-3、图 15-4 所示。如截面较厚时可以在中间留孔，用抽管法或气囊法生产均可，如在现场设置长线台座用预应力钢丝先张法生产，或在工厂生产均可。

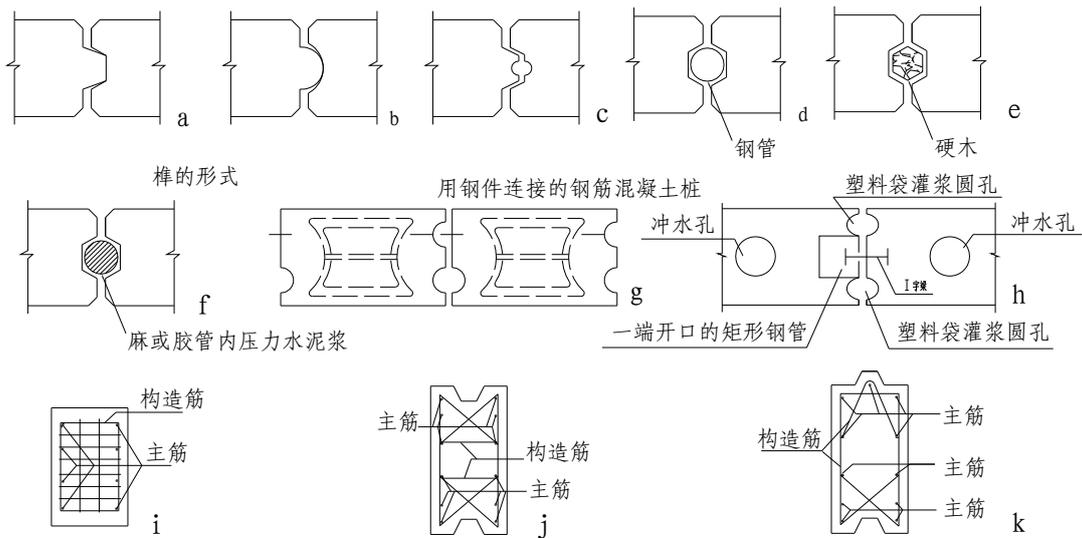


图 15-3 钢筋混凝土板桩的榫槽及配筋布置图

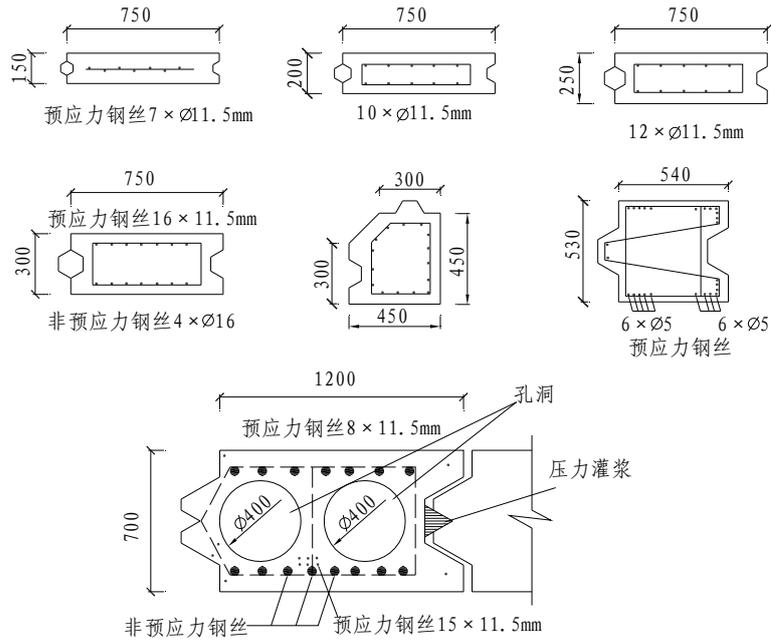


图 15-4 美国及前苏联预应力板桩的几种截面

常用的非预应力钢筋混凝土板桩桩长一般在 20m 之内。预应力钢筋混凝土板桩主要用在船坞及码头工程上，用水上打桩船施工，桩长一般在 20m 以上。

2. 工字形薄壁截面

大截面薄壁板桩由于其截面刚度较大，挤土少、易打入，工程应用比较经济。现场制作时可以翼板预制再与腹板浇成整体或腹板预制与两翼板现场浇成整体。由于无槽榫结合，沉桩时必须有导架保证桩位整齐垂直。

至于用两块预制槽板现浇筑成中空方形截面的板桩，现场制作工作量较少，刚度亦较大，薄壁截面板桩均可采用预应力钢丝长线台座法生产，进而可充分发挥其薄壁特性。工形及方形预制现浇整体式薄壁板桩构造，如图 15-5 所示。

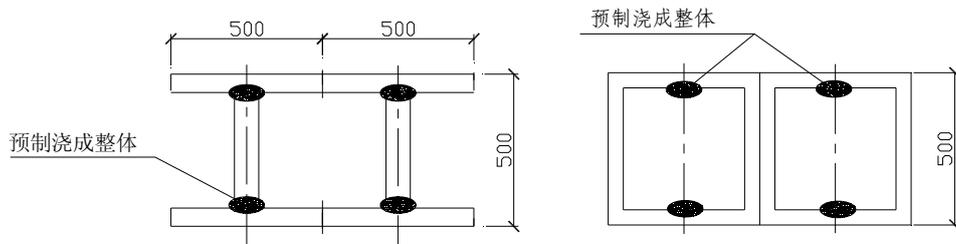


图 15-5 预制现浇整体式薄壁板桩图

工字形板桩已广泛用做地下连续墙接头，或与搅拌桩形成复合结构，图 15-6 工字形板桩的复合支护示意图。工字形板桩的复合支护形式，如图 15-6a、图 15-6b 所示。

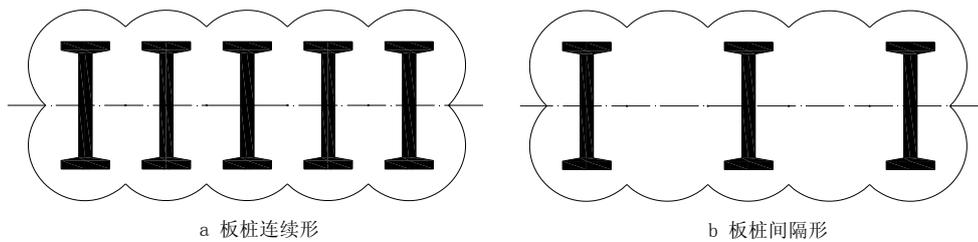


图 15-6 工字形板桩的复合支护示意图

15.2.2 截面强度计算

截面计算原则：钢筋混凝土板桩当被用于基坑支护时，系临时工程受弯构件，一般按强

度控制原则计算截面，即按承载能力极限状态进行计算，当作为永久结构的一部分有耐久性要求时应验算裂缝宽度是否满足限值，当轴向力较大时，应按照偏心受压构件设计。由于地下工程土压力随开挖深度与时间而变化，以及某些不确定因素，因此截面设计时按计算最大弯矩双面配筋，同时还要根据起吊和运输工况进行受力和变形验算。此外，还应验算板桩混凝土断面的抗剪强度，但一般板桩墙均以抗弯作为混凝土断面的计算控制。

长度较长的板桩当截面过于单薄时，要验算锤击沉桩时桩身的侧向弯曲应力，因此从一般的使用角度长细比可以供参考表，如表 15-1 所示。

板桩长细比参考表 表 15-1

桩长	10m	15m	20m
桩的厚度	16cm	35cm	50cm

如采用中空截面时，桩的截面设计还应加大。

钢筋混凝土板桩的具体截面构造、配筋形式可参见有关工程实例。

15.2.3 构造要求

混凝土设计强度等级不低于 C25，强度达 70% 方可场内吊运，达 100% 时方可施打；受力筋采用直径不小于 16mm II 级钢筋，桩顶主筋外伸长度不小于 350mm，构造筋采用直径不宜小于 8mm I 级钢筋；吊钩钢筋采用直径不小于 20mm I 级钢筋，需绑扎在下层主筋上，不得用冷拉钢筋；主筋保护层：顶部为 80mm，底部为 50mm，侧面为 30mm。

15.3 钢筋混凝土板桩支撑或锚碇设计

板桩墙支护结构分类有悬臂式结构、内支撑式结构、锚杆式结构、锚碇式结构四种。

15.3.1 悬臂式结构

悬臂式板桩结构亦称自立式板桩结构，或称无拉结无支撑板桩结构，由于在开挖过程中不需要采取任何拉锚或支撑的设置，对于开挖浅基坑或水工基坑易被采用，如图 15-7 悬臂式板桩结构图所示。但由于自立式板桩墙对于高度、载荷、土质、地下水位的变化特别敏感，与锚碇式或支撑式情况相比易于产生较大的侧向变形，除非对侧向变形无严格要求，否则不宜采用。另一方面其挡土高度亦有所限制，一般在软土地区不宜超过 3m。其插入深度按抗倾覆计算，要保证其抗倾覆安全系数不小于 2，由此算得的插入深度尚须增加 15%。由于计算插入深度要比锚碇式、支撑式深得多，且要验算截面抗弯能力，技术经济上不占优势。

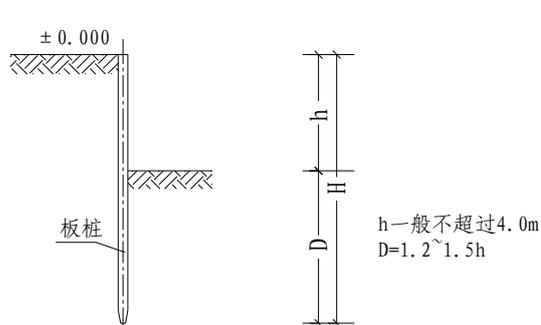


图 15-7 悬臂式板桩结构图

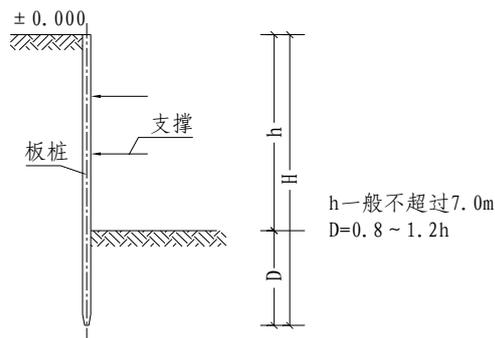


图 15-8 内支撑板桩结构图

15.3.2 内支撑式结构

内侧支撑板桩结构也可以说是一种最基本最原始的支护方式，采取边撑边挖法施工，板桩位移可以得到有效控制，内支撑一般采用 H 型钢、各种钢管或现浇钢筋混凝土支撑，如图 15-8 内支撑板桩结构图所示。钢支撑可施加预应力，支撑时必须保持先撑后挖紧密配合，支撑的拆除也必须结合内部结构情况，及时换撑或回填，以尽量减少因拆除支撑而带来的板

桩的位移。

内支撑预加应力的一般方法，即在钢管支撑或H型钢支撑两侧对称设液压千斤顶，顶紧后其端部缝隙浇灌快硬混凝土，一天后，据试块强度，拆除千斤顶。这项技术已在国内外多项大型工程中普遍采用，效果较好，可以保证支撑的顶紧与传力的合理。

15.3.3 锚杆式结构

大型基坑采用内支撑方式，因内部支撑纵横交叉，支柱林立，挖土机具难以直接下坑作业，挖土进度缓慢，有时难以满足工期要求，尤其是边长较大或形状复杂的大面积基坑，内支撑布置也很困难，往往是成本高、工期长。采用斜地锚方式替代内部支撑可以解决上述难题，锚杆式板桩结构如图 15-9 所示。因此近几年锚杆支护技术在国内外已得到了明显发展。

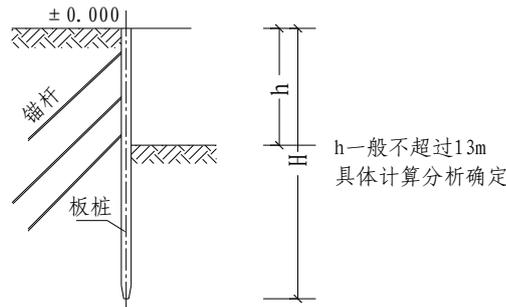


图 15-9 锚杆式板桩结构图

采用斜地锚式挡墙结构后内部地下结构施工就可以完全按照地上结构同样方法施工，既毋须考虑支撑与结构层施工时的相互影响，亦毋须考虑支撑如何拆除以及拆除时是否增加挡墙的变形，这些都是当前大基坑采用斜地锚的主要优点。斜地锚在国内外已获得广泛应用，国内北京、广州等地已大量使用。上海地区由于土质软弱地下水位高，在淤泥质软粘土中锚杆的抗拉能力低，施工期间的蠕变位移等问题一直没有完全搞清，锚杆的使用发展受到一定影响。1986年上海太平洋大饭店基坑开挖深 12.6m，长宽 80m×120m，首次采用钢筋混凝土板桩斜地锚，由于采用先进的二次劈裂注浆工艺，每根锚杆的承受能力在 $N=0\sim 2$ 的淤泥质土层中可达到 880~1000KN，为在淤泥质土层中采用锚杆支护开创了一条道路。2007年在宝钢某改造项目中应用斜地锚，在老厂房内闭口施工，开挖深 10m、长 60m、宽 30m 基坑，围护墙最大累计水平位移仅仅 29.5mm，宝钢某改造项目地锚，如图 15-10a 和 15-10b 所示。



图 15-10a 宝钢某改造项目锚杆施工图



图 15-10b 宝钢某改造项目锚杆板桩基坑开挖图

15.3.4 锚碇式结构

锚碇式板桩结构系在板桩墙后用拉杆将板桩所受侧向推力锚拉至其后较远的结构上，通常为另一组锚碇板桩，如图 15-11 锚碇式板桩结构图所示。采用锚拉的方式使基坑内无支撑，便于开挖及坑内作业。锚座式锚碇板桩应设置在下述范围以外：当为非粘性土时，应使锚座或锚碇板桩的被动土楔位于挡墙主动土楔之外而不发生相互影响；当为粘性土时，拉杆长度应使该拉杆长度范围内的总水平抗剪力不小于锚座的极限抵抗力，且不小于构成墙身的板桩

总长度。由于锚座设计中采用的被动土压力值都是极限值，因此一般对锚座工作载荷必须乘以不小于 2.0 的载荷系数。对于拉杆，要尽量采用屈服点的 0.45~0.50 作为稳妥的拉杆工作应力，拉杆端头必须配以螺栓或用花篮螺栓（紧固器）紧固拉杆以减少拉杆的延伸伸长。

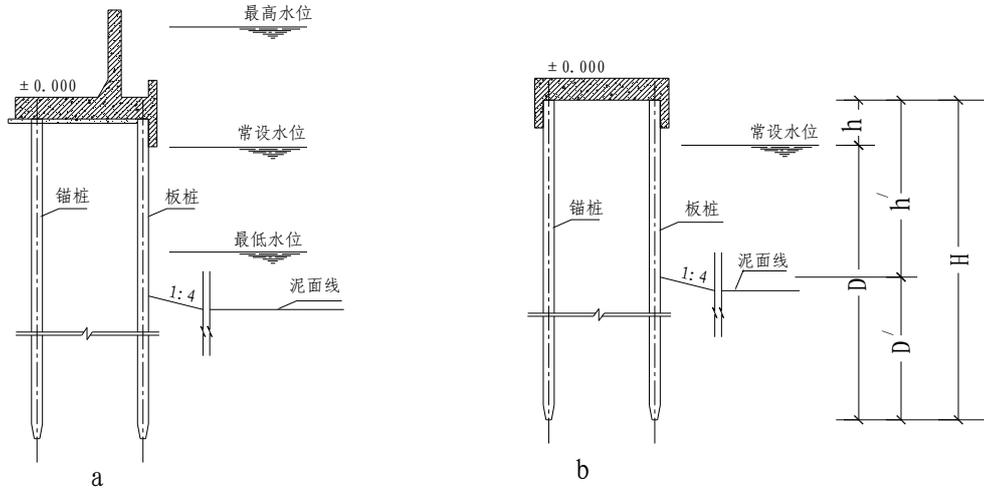


图 15-11 锚碇式板桩结构图

由于锚碇方式很难有效控制位移，对位移要求比较严格支护工程就不得不采取坑内支撑或用斜地锚锚拉方式。

15.4 钢筋混凝土板桩内力计算要点

15.4.1 板桩计算概述

板桩的设计计算要考虑到板桩的工作特性，由于板桩一般普遍采用单支点支撑或锚拉方式，因此板桩墙的内力，弯矩，剪力，支撑力或锚拉力可根据不同工作状态，一般采用自由支承法计算，假定在最小入土深度范围内板桩墙前全部出现极限被动土压力，并由力和力矩平衡求得入土深度以及板桩墙的内力和支锚力，板桩墙的入土深度应满足踢脚要求。单锚或多锚板桩墙当采用竖向弹性地基梁法计算时，板桩墙的内力和变位可采用杆件有限元法求解。板桩墙计算可参照“建筑基坑支护技术规程（JGJ120-99）”，交通部“板桩码头设计与施工规范（JTJ292-98）”，其与地下连续墙等板式结构计算原则基本相同。近年来由于微机的普及，板桩墙采用杆件有限元计算时均在微机上操作，计算快捷，效果较好，计算结果是否符合实际取决于计算参数的取值。随着国内外岩土有限元计算软件的推广，采用平面有限元软件计算已日趋普及，无论在应力、应变、位移、塑性分布等的分析比用杆件有限元分析，内容更深入与丰富，但土工参数取值由于试验条件有限，往往难于取得恰当，所以计算结果须分析判断。至于用 3D 有限元法计算除特殊基坑外，因计算繁杂，应用较少。

15.4.2 板桩用杆件有限元计算

板桩用杆件有限元计算，国内比较常用的计算软件有理正深基坑（6.0 版），以及同济启明星 FRWS（2006 版），只要计算参数取值得当则计算结果基本一致，可以用于工程实际。下面就计算取值上常见的几个问题说明如下：

1. 水土压力的计算参数取值

计算地下水位以下的有效土压力时，取浮重度 and 有效应力抗剪强度指标 (C' 、 ϕ')。粘性土无条件取得有效抗剪强度指标时，可用总应力固结不排水强度指标 (C_{cu} 、 ϕ_{cu})，并按地区经验作必要的调整。一般土工试验如缺乏固结不排水试验数据时，可采用直剪固结快剪试验峰值强度指标，按上海市基坑工程设计规程（DBJ08-61-97）5.3.1 条，或上海市地基基础设计规范（DGJ-11-1999）条文说明 10.1.10-12 条规定。除砂性土地基应采用水

土分算外，一般可按水土合算并按直剪固快试验峰值平均值的 0.7 倍计算，地下水位以下土的重度取饱和重度。

2. 土压力分布模式

板桩大部分采用单支点或悬臂板式，当用经典理论极限平衡法计算时，板桩入土部分的无论主动侧或被动土压力水土压力宜按三角形分布；当用杆件有限元计算时，板桩入土部分水土压力主动侧按矩形分布，被动侧用弹性抗力并与变形协调。

3. 弹性抗力的计算

板桩用杆件有限元计算时，土的弹性抗力宜用 K 法计算，无论用 K 法或 m 法计算时，板桩入土部分三米以内按三角形分布，其下按 K 法或 m 法分布。

K 的取值建议按下述方法取用，根据基坑断面各层土的性质，参考国外大量资料，取 $K = Es$ ，(Hopkin' s)， Es 为各层土的压缩模量。根据工程实践，取 $K = Es$ ，计算结果经大量工程实践比较符合实际。

当采用 m 法时，建筑基坑支护技术规程 (JGJ120-99) 附录 C，C. 3. 2 指出当无试验或缺少当地经验时，第 i 土层水平抗力系数的比例系数 m_i 可按下列经验公式计算：

$$m_i = \frac{1}{\Delta} (0.2\phi_{ik}^2 - \phi_{ik} + C_{ik})$$

式中 ϕ_{ik} ——第 i 层土的固结不排水 (快) 剪内摩擦角标准值 ($^\circ$)；

C_{ik} ——第 i 层土的固结不排水 (快) 剪粘聚力标准值 (KPa)；

Δ ——基坑底面处位移值 (mm)，按底面经验取值，无经验时可取 10。

此计算式已广泛为土工勘察报告所应用，同济启明星基坑支护软件亦采用此式，并按 $\Delta = 10\text{mm}$ 取值。但此式有个缺陷，即 Δ 如变化较大时，m 值亦相应变化，如 $\Delta = 20\text{mm}$ 时则较之 $\Delta = 10$ 时，m 值小一倍，而土的 m 值主要系按照该层土的性质而定，不应随 Δ 而急剧变化。

根据国外资料包括原德国 DIN 4014, 德国 HOKTIEF 公司；日本“土与基础”杂志，日本横山幸满，日本地铁等资料综合取舍，建议取 $m = \frac{1}{2} Es$ 。 Es —该层土得压缩模量，此值完全可以根据该土层特性由土工试验报告上取得。

另外，根据基坑开挖深度大小，如考虑时间因素时，建议按同济杨林德教授提出的意见取 $m_t = m(0.7 + 0.3e^{-0.1t})$ ，如 t 为 15 天，则 $m_t = 0.77m$ 。0.77 为时间因素折减。当采用 K 法时，亦可按此折减。

以上 K 及 m 的取值通过大量工程的实践，包括深度在 15m 以内的深坑时使用情况与实际相符的结果。

15.4.3 平面有限元计算

目前岩土工程常用的软件国内有同济曙光，国外平面有限元软件有:Plaxis、Z-Soil、Studio-Sigma、Flac，另外还有 Ansys、Abaqus，其中以 Plaxis 最实用，运算方便，界面清晰明了。采用平面有限元软件计算时有两个问题需要注意：

1. 土的本构模型的选取

土的本构模型很多，但使用起来却很困难，原因是本构模型中的很多参数，除非做单独土工试验，一般土工勘测报告根本没有，无法采取，也是枉然。因此，建议采用 Mohr-Coulomb 模型，简单易行。

2. 土的弹塑性模量的选取

土的弹塑性模量的选取，由于基坑开挖要采用土的卸载模量，挖土卸载，土因卸载而膨胀，而卸载弹性模量要比加载弹性模量大得多，而卸载弹性模量一般也不易取得，一般认为：砂土卸载模量，约为加载模量的 3—4 倍；粘土卸载模量，约为加载模量的 1.5—2 倍。

根据 $E_0 = (1 - \frac{2u}{1-u^2}) E_s$, 式中 E_s ——压缩模量; E_0 ——变形模量。

因此, 建议可取卸载模量约为三倍 E_s , E_s 土工勘测报告所提出的压缩模量, 按此值计算结果比较符合实际。

采用平面有限元计算时, 很主要的就是参数的选取, 选取得当则计算结果比较符合实际, 选取不当则往往失之毫厘, 差之千里, 不可不慎, 最重要的是要用多种办法计算比较分析, 而经验的判断尤为重要, 不能认为软件先进而轻信之。

3. 边界条件

用平面有限元计算时, 建模时的边界条件要符合施工工况的实际情况。

15.4.4 计算结果的综合判断

由于板桩施工不可能整齐划一, 而多支撑板桩, 一般采用拉锚或用钢围圈、钢支撑, 支撑的不严密, 接点的松弛往往非计算所能计及, 如不充分考虑则再严密的计算也无济于事, 因此, 必须要充分考虑施工条件。计算结果尽可能对比已有建设同类工程, 往往可以得到借鉴, 因此工程师利用计算进行分析, 利用实例进行对比, 综合判断决定取舍是最好的诀窍。

以上为板桩基坑计算的经验, 可供参考。有关土压力的计算详见第 4 章, 挡土结构内力详细分析见第 6 章。

15.5 钢筋混凝土板桩施工

15.5.1 钢筋混凝土板桩制作

1. 制作方法

钢筋混凝土板桩制作不受场地限制, 可以现场或工厂制作, 钢筋混凝土板桩制作一般采用定型钢模板或木钢组合模板。养护方式有自然养护和蒸汽养生窑中养护。制作场地应制作同条件养护的混凝土试块, 以便确定板桩的起吊、翻身和运输条件。

2. 预制加工和施工中的制作要求

钢筋混凝土板桩的特殊构造和特定的用途, 制作时要求必须保证板桩墙的桩顶在一个设计水平面上、板桩墙轴线在一条直线上, 榫槽顺直、位置准确。

- (1) 桩身混凝土应一次浇注, 不得留有施工缝。
- (2) 钢箍位置的混凝土表面不得出现规则的裂缝。
- (3) 板桩的凸榫不得有缺角破损等缺陷。
- (4) 预制板桩起吊时的强度应大于设计强度的 70%。
- (5) 吊点位置的偏差不得超过 200mm, 吊索与桩身轴线的夹角不得小于 45°。
- (6) 板桩堆存时应注意: 采用多支垫, 支垫均匀铺设; 多层堆放的每层支垫均应在同一垂直线上; 现场堆垛不超过 3 层, 工厂堆垛不超过 7 层。

(7) 板桩装运时应注意: 按沉桩顺序绘制装桩图, 按图装船、车; 运输中, 用木楔将支垫垫实, 按实际情况采取适当的加固措施; 按多支垫少垛层原则装运。板桩工厂制作、堆放, 如图 15-12a 和图 15-12b 所示。

3. 板桩制作的允许偏差

板桩制作的允许偏差, 如表 15-2 所示。

项目	允许偏差
钢筋混凝土桩	
(1)横截面相对两边之差	5mm
(2)凸榫或凹榫	±3mm

(3)保护层厚度	±5mm
(4)桩尖对桩轴线位移	10mm
(5)桩身弯曲矢高	0.1%桩长，且不得大于10mm



图 15-12a 板桩制作图



15-12b 板桩堆放图

15.5.2 钢筋混凝土板桩沉桩施工

沉桩对附近建筑物的影响必须充分考虑。打桩过程由于振动和排土对周围环境的影响进行预测并采取相应措施，采用静力压桩或者桩侧土中埋设袋装砂井或塑料排水板，包括放慢打桩速度等措施均有明显效果。

1 沉桩方法

沉桩方法包括打入法、水冲插入法和成槽插入法，目前最常用的还是打入法。

打入法分单桩打入、排桩打入（或称屏风法）或阶梯打入等。封闭式板桩施工还可以分为敞开式和封闭式打入。所谓封闭式打入就是先将板桩全部通过导向架插入桩位后使桩墙合拢后再打入地下，此种打入方法有利于保证板桩墙的封闭尺寸。如图 15-13 所示。

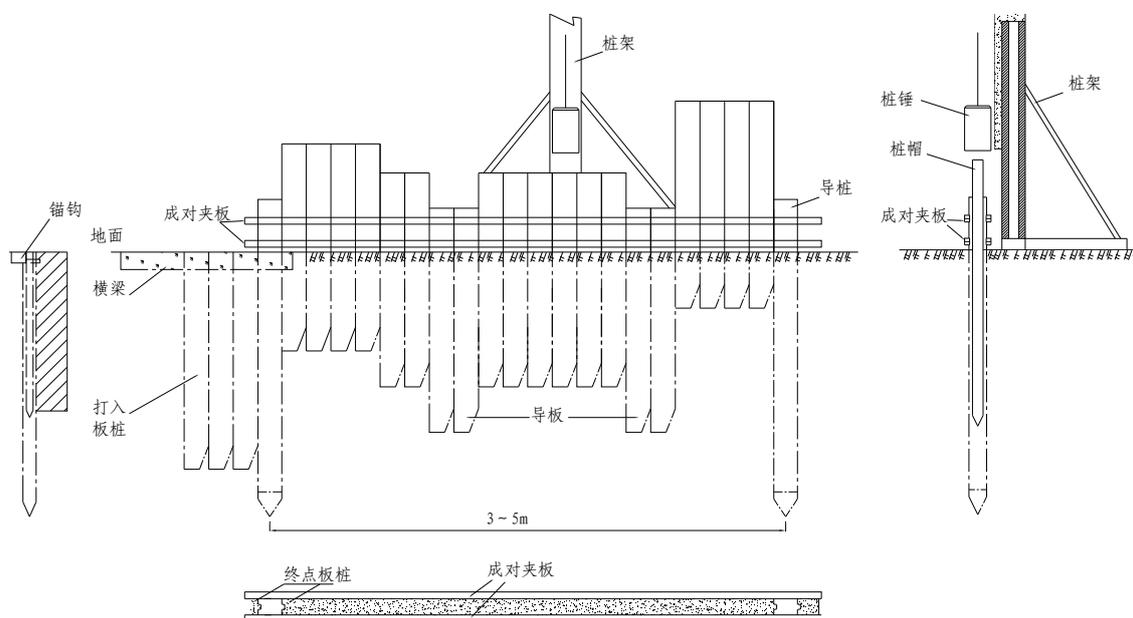


图 15-13 打设板桩程序

2 沉桩前的准备工作

(1) 桩材准备

板桩应达到设计强度的 100%，方可施打，否则极易打坏桩头或将桩身打裂。施打前要严格检查桩的截面尺寸是否符合设计要求，误差是否在规定允许范围之内，特别对桩的相互咬合部位，无论凸榫或凹榫均须详细检查以保证桩的顺利施打和正确咬合，凡不符合要求的

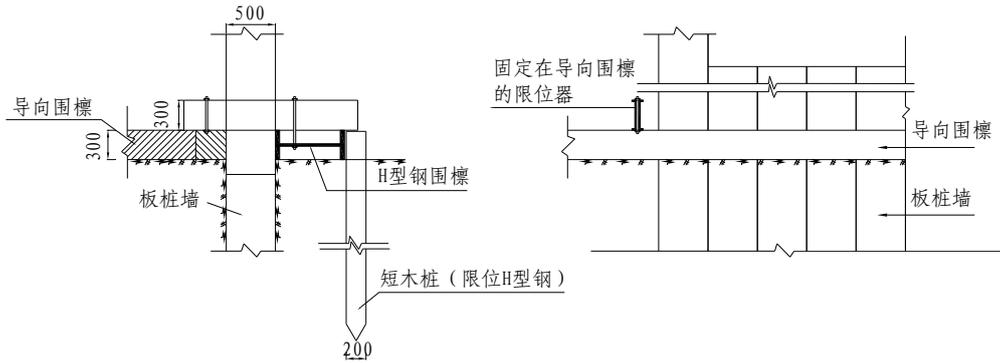


图 15-15 导向围檩示意图

(3) 插入板桩

定位桩基本插打到位后即可依次插入其他板桩。

将板桩顺着定位桩（或前一根已插桩到位的桩）的凹槽在导向围檩内逐一插桩到位，插入土体的深度根据桩长、打桩架高度及地质情况等因素而定。要求用桩锤静压，并留有 1/3 桩长进行送打桩，在插入桩过程中，尽量不要开锤（尤其是开重锤）施打。

屏风法施工时，每排桩插桩数量为 10~20 根为宜，如果一次插桩数量过多，在桩打入时由于板桩间挤压力较大，打桩较困难并容易把桩打坏。

当地质较硬时，可采用钢制桩尖，在桩上端及桩顶加钢板套箍或增加钢筋并提高混凝土标号以提高板桩抗锤击能力。

(4) 拆除导向围檩装置

板桩屏风墙体形成并确认不会因为拆除导向围檩装置后导致墙体倾斜、晃动，即可将导向围檩装置拆除并按施工流水布置进行下一导向围檩的施工。为能与下一施工段接口平顺，导向装置保留最后一段不拆，与下一施工段顺接。

(5) 送打板桩

围檩装置拆除后即可对已插桩成屏风墙体的板桩墙逐一打到设计高程。送打桩的顺序与插入桩时顺序相反，即后插的桩先送，先插的桩后送。在送打过程中发现相邻桩体有带下或板桩出现倾斜（指顺板桩墙方向）时，要考虑再分层送打桩。分层送打桩的顺序一般与上述相同。每一屏风段墙体的最后几根桩不送打，与下一施工段流水接口。

a. 斜截面桩施工（亦称斜锥桩）

由于挤土等影响，板桩凹凸榫较难在全桩范围内均紧密咬合，桩墙会产生沿轴线方向倾侧，倾侧过大时施工将很困难。此时可通过打入斜截面桩即楔子桩进行调整。斜截面桩打入数量及位置应根据施工经验及情况而定。

b. 转角施工

转角处可采取特制钢桩，两根 H 型钢桩焊接成型，也可采用 T 字型封口。为保证转角处尺寸准确，也可先施打转角处的桩而后打其它桩。转角板桩桩尖如同方桩尖，桩长比一般板桩长 2m，沉桩时一定要控制好转角方向。

(6) 凹槽内灌注袋装混凝土

板桩之间的相对凹槽一般会伸入泥面（开挖面）1.0m 以下，在基坑开挖前要用高压水枪将凹槽内冲洗干净，用周边大于双凹槽内边长（不小于 5cm）的、长度大于双凹槽长度 0.2m 以上的有足够强度的密封塑料袋放入双槽内，再在袋内灌装塌落度不小于 10cm 和板桩等强的细石混凝土，对凹槽充填密实，以起到止水防渗作用。

4. 沉桩施工标准

板桩插入垂直度偏差不得超过 0.5%；板桩施打平面位置允许偏差 100mm；板桩施工垂

直度允许偏差 1%；板桩用于防渗时板桩的间隙不得大于 20mm；用于挡土时不得大于 25mm；板桩轴线允许偏差 20mm；板桩施工桩顶标高允许偏差 ±100mm。

沉桩施工质量标准如表 15-3 所示。

沉桩质量标准表

表 15-3

施工阶段	项次	项目	允许偏差 (mm)		备注
			国家标准	企业标准	
施放板桩	1	桩轴线位置			
		(1)板桩	20	≤5	
		(2)单排桩	10	≤5	
打桩	1	桩平面位移	100		L 为 桩 长
	2	桩垂直度	L/100		
	3	钢筋混凝土板桩间的缝隙		L/300	
		(1)用于防渗时	≤20		
	(2)用于挡土时	≤25			
送桩	1	桩顶标高		+50~-50	

5. 板桩脱榫、倾斜预防措施

对沉桩过程中，出现桩顶破碎、桩身裂缝、沉桩困难等常见质量问题的预防及处理方法，与一般钢筋混凝土方桩基本相同，这里仅对钢筋混凝土板桩施工中特有的脱榫，倾斜问题进行阐述。

(1) 预制钢筋混凝土板桩的凹凸榫的尺寸及顺直度不满足设计 requirements 是造成脱榫的主要原因，故施工前必须逐根检查验收，避免上述桩体打入土中。

(2) 当桩尖与桩身不在同一条轴线上或沉桩过程中桩尖的某一侧遇到硬土或异物时桩身会产生转动（即桩横断面与板桩墙轴线产生夹角），若不及时采取措施，必然出现脱榫。对此，首先认真验收预制桩，桩尖与桩身不在同一轴线上的桩不能使用。另外在沉桩过程中出现桩身转动而无法拔出该桩时，可在有转动趋势的板桩相对应的两侧的导向围檩上，各焊接一根用型钢制作的有足够强度的小限位，该小限位与板桩体贴紧（贴紧处要求光滑，最好是滚动接触），而后继续缓慢小心施打该桩。经过上述纠偏措施后一般均能予以纠正，至少能阻止脱榫发展，该措施的成功与否关键在早发现脱榫趋势，早落实纠正措施。

(3) 有的板桩之间凸榫侧会有一个削角，如图 15-16 所示，设计者本意是便于桩体破土打入，但在桩体入土的过程中此削角处若遇小石块或其他硬物时，桩体易发生脱榫趋势，故建议取消上述削角。

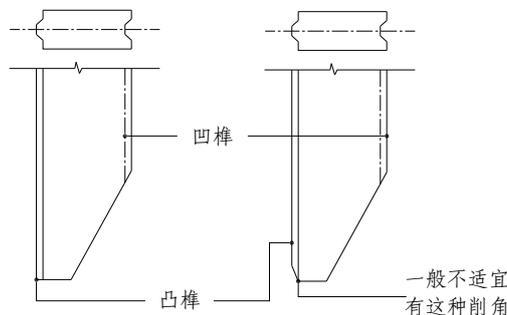


图 15-16 板桩桩尖削角示意图

(4) 板桩墙前、后方向的倾斜，在插桩时注意桩尖与桩顶控制在一条垂直线上（即桩顶与围檩槽保持在同一垂直线上）即可。特别是起始桩（定位桩）更要注意控制，因该桩的凹榫是以后形成的板桩墙体的垂直度的导向与“靠山”。因此起始桩的定位要求零误差控制，确认无误后再插桩，这对以后的施工控制极有好处。

(5) 板桩在逐根沉入后常会向墙体形成方向（即桩体凹榫方向）倾斜。主要原因是插（打）入时，插（打）桩的桩体靠已打入的一侧与前一根桩之间的摩擦阻力大于另一侧与土体的侧摩擦阻力。另外板桩的桩尖除了定位桩外一般在凹榫侧有斜角，因为有该斜角的存在，板桩在打入过程中会越打越向前一根桩靠紧。设计这种形式的本意是使得板桩墙体接缝搭接不脱榫。但也会使得在桩体打入过程中，与前一根桩之间的摩擦阻力大大增加，从而增加了桩体倾斜产生的几率。所以，在板桩施工中，一般均会发生逐渐向板桩墙体形成方向倾斜的趋势。为此，采用屏风法施工而不采用逐根打入法工艺，可以从根本上减少桩体倾斜发生的几率。为进一步避免、减少及纠正上述桩体倾斜的发生，也可再选用下述措施：

a. 围檩上设置“定位角铁”，并与插入桩紧贴，限制住往该桩的倾斜趋势。在“定位角铁”与插入桩之间可抹上黄油，便于板桩的插入。

b. 插桩时在板桩的凹榫内插入一竹（青）片（厚度 1cm 左右，宽度略小于凹榫槽宽），以减少插（打）入桩与已打入桩体之间的摩擦阻力。

c. 修正图 15-16 中所示的桩尖斜角，可有效控制桩体倾斜，但在施打板桩时，板桩一般均已预制好，再作调整已不可能。为便于现场调整可预制几根如同起始桩同样桩尖类型（即桩尖两面均有斜角，下桩时不会倾斜趋势）的板桩。在施打过程中，视现场情况每隔一段距离插打一根这类似板桩，对调整倾斜很有效果（若现场没有这类板桩而且桩尖所处土层不在硬土中时，也可凿去桩尖成为“平头桩”代替）。

(6) 板桩脱榫处理

对板桩脱榫处拟采用压密注浆对脱榫处进行补强处理。即在接榫处除用细石混凝土将接榫处灌密实外，另在靠近河岸边用压密注浆对该接榫进行补强。对没有脱榫的钢筋混凝土板桩按照设计要求采用细石混凝土灌浆。钢筋混凝土板桩处理前将高出设计标高的板桩凿除至设计标高。

板桩脱榫大于 80mm 的采用双排压密注浆，且在板桩中间的注浆空中还采用树根桩补强，用高压水将板桩接榫部位的泥土冲洗干净，放下注浆管，然后填上重量比为 1：2 的中粗砂和 5~25 碎石，再用粘土将表面夯压密实，然后再开始注浆；板桩脱榫大于 25mm 小于或等于 80mm 的部位仅采用双排压密注浆。双排注浆时先注外排，再注内排。对于没有脱榫的板桩在板桩接榫部位注单排水泥浆。注浆浆液中掺入 1：0.3（水泥：细砂重量比）的细砂和 2% 的水玻璃。注浆量控制在约 25Kg/m，压浆压力控制在 0.4~0.5MP。注浆时要严格控制压浆压力在规范范围内。

6. 沉桩倾斜纠正措施

板桩在施打时应用经纬仪经常观测保持板桩在两个方向的垂直，如有倾斜时，可按表 15-4 所列方法纠偏。

打桩倾斜纠正法表

表 15-4

类型	概略图	说明
(a)		两端导桩倾斜歪曲时应 用卷扬机较磨拽正

(b)		板桩倾斜时用钢丝导向， 但注意钢丝绳不宜绷得太紧，以免绷断发生危险
(c)		板桩下端可削成倾斜(斜 向已打板桩)，利用土压 力将板桩挤紧
(d)		板桩倾斜时应逐步调整， 并一面调整一面施打，施 打方向应与倾斜方向反 向进行
(e)		板桩倾斜时可调整锤击 角度施打
(f)		板桩倾斜较大时，可塞入 楔形板桩调整之，此时一 般倾斜已超过 1/400

15.5.3 钢筋混凝土板桩沉桩设备选择

板桩可以采用柴油打桩锤，落锤，气动锤等各种机具打设，桩锤大小视板桩而定。

1. 锤型要求

钢筋混凝土板桩，最适宜采用导杆式柴油锤施工，1.8t 的双导杆式柴油锤，其锤击能量在 30~40KN.m 之间，适宜施工 10~15m 长的桩；2.5~3.2t 的双导杆式柴油锤，其锤击能量在 65~85KN.m 之间，适宜施工 20m 长的桩；20~30m 长的板桩施工，也有选用冲击块在 2.5~4.6t，锤击能量在 60~140KN.m 之间筒式柴油锤施工。用筒式柴油锤施工，宜采用重锤轻打的方法，也可选择同等锤击能量的坠锤、汽锤施工。近几年有一批锤击能量在 20~150KN.m 的小型液压锤投入市场，也可用于钢筋混凝土板桩施工，其施工质量优于其他锤。

2. 桩帽的形式

采用锤击工艺施工钢筋混凝土板桩，都要使用桩垫（杆式柴油锤）或桩帽加桩垫（筒式柴油锤）。因为板桩构造的特点和板桩墙结构及其施工工艺的特殊要求，为了达到板桩桩顶在一个设计平面上，它的桩帽形式与施工混凝土方桩的形式不一样，在靠已插桩到的一侧，是没有桩帽挡板的，为一侧开口；当它在送桩阶段时，桩帽在两侧面都是没有挡板的，

为两侧开口。

当钢板桩采用收头桩顶时，也可采用四面都有挡板的类似混凝土方桩的桩帽。

3. 锤垫、桩垫材料要求

由于钢筋混凝土板桩在使用中桩长受到一定限制，施工中所用锤的锤击能量较低，所以施工中所用桩垫、锤垫也与沉钢筋混凝土方桩有所不同；桩垫大都采用纸箱或纤维板加工，一般为5~10cm厚，也可用5cm厚松木加工；锤垫大都采用白棕绳盘成；有时用硬木加工做锤垫。

白棕绳加工的锤垫一般要锤击50~100根桩后才调换一次（一般不坏不换），硬木锤垫要损坏后才调换，一般可用到500根桩以上。

15.5.4 射水法预制钢筋混凝土板桩简介

射水法预制钢筋混凝土板桩^[3]，又称为水力插钢筋混凝土板桩，对于沿海地区或江河水域的建设项目特别适用，如图15-17所示，这些地区有着充足的水源进行喷射，海水的使用对于自然环境没有显著的影响。水力插板技术已成功应用于建设港口码头、道路交通桥、水中人工岛、污水处理池、地下涵洞、泵站、水闸、输水渠道等。该技术在防止水患灾害方面可以建成长治久安的防洪堤坝和防潮堤坝；在海洋工程方面可以解决破除拦门沙建设深水航道这一世界性难题；在桩基工程方面可以形成多种多样的桩基结构形式为增大承载能力走出一条新路。该技术的推广和应用，对水利工程、桩基工程、港口航道工程以及消除水患灾害都将产生重大而深远的影响。

该技术主要包括以下步骤：一、工厂预制，进行专为喷射和灌浆设计的混凝土桩的预制；二、现场插桩，利用吊机、浮船或平台上的起重机等设备吊起板桩，开动水泵在水力喷射作用将桩插入土体；三、整体连接，进行孔道灌浆将板桩之间纵向连结成整体，顶部现浇钢筋混凝土将板桩之间横纵向连接成整体，以加强连接并提高承载力。

1. 构造要求

除了普通钢筋混凝土之外，射水法预制钢筋混凝土板桩设计还包括一些工艺构造要求，如图15-19射水法预制钢筋混凝土板桩构造图所示。

(1) 中心管道

板桩沿其中心轴线带有一根竖向钢管，该管道在桩头处敞开以便与塑料软管相连，并将压力水流从软管传至桩尖。

(2) 桩尖喷管

桩尖有预埋水平钢管，该管道将水从中心管引入桩尖喷管，并通过小孔喷射入土体，如图15-18所示。该桩尖管包含大量间距规则的直径约为3mm的孔，中心管与桩尖管相连。



图15-17 预制钢筋混凝土桩插桩



图15-18 板桩射水喷射方法

(3) 工字梁

一根工字钢梁沿其一边部分浇筑于混凝土板桩内，如图15-19所示。工字梁侧面为两个

半圆形沟槽。

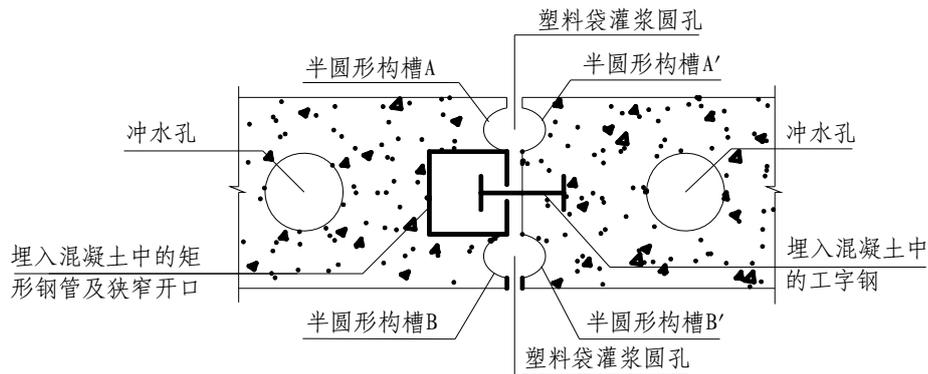


图 15-19 射水法预制钢筋混凝土板桩构造图

(4) 矩形管道

一根矩形截面钢管道（矩形管道）沿工字梁对边浇筑在钢筋混凝土板桩内，如图 15-19 所示。矩形管道带有狭窄的开口，略厚于工字梁腹板但比工字梁翼缘窄。矩形管道的内部宽度略大于工字梁翼缘的宽度。

矩形管道的内部长度大于一半腹板的长度与翼缘厚度之和。矩形管道侧面为两个预制在混凝土内的半圆形沟槽。工字梁、矩形管道和 4 个半圆形开口槽的下方端部位于板桩桩尖上方 1m 处。

2. 施工要求

(1) 板桩制作

按照 15.5.1 钢筋混凝土板桩制作要求，预制用于喷射、灌浆和联接的特殊设计的钢筋混凝土板桩。

(2) 喷射法沉桩

从桩内管道喷射水流的喷射方法有：一是从桩尖的一个喷嘴采用锥形喷射水流；二是从钢筋混凝土板桩桩尖的许多小型喷嘴采用许多向下的直线高速水流方式喷射水流。

当板桩竖立到正确位置时，通过塑料软管将压力水流泵送至垂直中心管。塑料软管与桩尖的一系列小型喷嘴相连，这些喷嘴将水喷射入土体，如图 15-18 所示。泵送压力大约在 1.0 到 2.0Mpa。总的排水速率为 50 - 80L/s。沉桩速度约 1m/s。

为保证桩尖处小孔不会被沙子或砂砾阻塞，泵送和喷射的水不得包含任何大型固体颗粒。根据经验，建议水里固体颗粒的含量不应超过水总质量的 0.1%。

桩尖下方的土体被喷射作用冲散和液化，因此能使起重机控制下的钢筋混凝土板桩利用自重沉入土中。起重机操作员连续进行喷射，直到桩达到设计深度为止。当桩沉至设计深度以上约 0.5m 处时，他减小排水速率和水压以便将对永久桩尖下方土体的扰动降至最小。

第一根桩已安装到位后，按类似的施工程序进行第二根桩施工。喷射前，第二根板桩垂直侧边上的工字梁自由翼缘应插入第一根板桩垂直侧边上的矩形管内，第二根桩工字梁的自由翼缘与第一根板桩矩形管道内部相匹配。如水下插板堤坝工程，在板桩的侧面需要增设插入滑道定位。这一过程在以后所有的桩中重复进行。

(3) 板桩连接

采用袋状水泥砂浆，将两根板桩相对应四个半圆形沟槽组成了两个垂直圆柱形孔、钢管道和两根混凝土桩侧墙间的间隙进行泥浆置换，使钢筋混凝土板桩之间纵向连成整体。最后利用顶部预留钢筋与新增加的横向钢筋绑扎起来，浇注钢筋混凝土压顶圈梁，使整体板桩横向连接成整体。

15.6 工程实例

常用的非预应力钢筋混凝土板桩桩长一般在 20m 之内,水运工程常用在内河小港的板桩码头、防汛墙、小型船坞坞墙等;预应力钢筋混凝土板桩主要用在大型船坞及码头工程上,用水上打桩船施工,桩长可达 20m 以上。由于施工手段的进步,板桩的厚度可以做到 50cm,有的采用中间抽孔,或预加应力,长度单根可以做到 20m。因而板桩已不单纯用在小型基坑支护上,而被逐渐推广到大型基坑支护工程。

目前钢筋混凝土板桩已向薄壁工字形方向发展,宽度为 40cm,高度为 50cm~100cm,壁厚 10~12cm,有的仅 8cm。在现场预制时,腹板可预制,再与现场现浇的翼板浇筑成整体,在宁波已成功地应用在基坑开挖支护上。尤其是作为地下连续墙预制接头桩的基坑支护,目前已广泛应用于地铁、市政及冶金工程深基坑施工。

此外,高压水喷射沉桩法已在水工基坑工程得到广泛应用,采用该技术建设的黄河河道整治工程、松花江防洪堤坝工程、港口码头、航道、水闸、泵站、涵洞、桥梁、水库围堤等八十多项工程。

15.6.1 板桩基坑支护工程

1986 年上海太平洋大饭店基坑开挖深 12.6m,长宽 80m×120m,首次采用钢筋混凝土板桩斜地锚,由于采用先进的二次劈裂注浆工艺,每根锚杆的承受能力在 $N=0\sim 2$ 的淤泥质土层中可达到 880~1000KN,张拉曲线未出现破坏点,且每个月的应力损失仅为 10%~12%,历时半年一直稳定不变,为在淤泥质土层中采用锚杆支护开创了一条道路。该工程锚杆长 30~35m,每根锚杆用 4~5 根 $\Phi 15.2\text{mm}$ 的高强钢绞线,共用锚杆 260 多根。该工程的地下三层混凝土结构,混凝土量 1.53 万 m^3 ,整个基坑从打板桩、锚拉、开挖直至结构完成仅一年时间。

15.6.2 板桩码头工程(护岸)

上海市苏州河下游段段的防汛墙加固和底泥疏浚工程是苏州河整治三期工程的子项工程之一,工程范围为苏州河市中心城区段,即真北路桥至河口的 16.52km 河段,并包括该区段内的支流河口段,分 4 个标段,每个标段再划分为不同分副段多个作业队施工,工期 2 年半。

防汛墙针对不同加固型式,采取不同施工方案。主要结构形式:防汛墙分为前板桩、后方桩或钻孔灌注桩“L”型 C30 钢筋混凝土挡土墙,钻孔灌注桩桩基、板桩防渗“L”型 C30 钢筋混凝土挡土墙。板桩采用了 250*500 长 7m、10m、13m、18m 的 C40 钢筋混凝土板桩,锚桩采用 250*250、300*300 的 C40 钢筋混凝土方桩及 $\Phi 600$ 钻孔灌注桩。

钢筋混凝土板桩全部工厂制作,运输采用船运与陆运结合方式。

施工时采用小型工程船或岸上打桩机施打,在距岸 5m 范围内架设排架用以构筑水上施工支架,进行打入板桩或钻孔桩施工,如图 15-20a 和图 15-20b 所示。施工期间保持通航。



图 15-20a 苏州河防汛墙加固板桩沉桩图



图 15-20b 苏州河防汛墙加固板桩沉后外观图

15.6.3 板桩船坞工程

缅甸希姆莱船厂船坞工程^[2]地处仰光市内莱茵河东岸。船坞总长 172.6m，有效宽度 28m，有效深度 10.2m。船坞为非预应力钢筋混凝土板桩加衬砌结构，钢筋混凝土板桩围绕坞室 3 面布置，共计有 BZ1、BZ2、BZ2a 板桩 700 根，桩长 21.4m，桩顶高程+3.57m，桩尖进入砂质粘土。

所有板桩都现场制作。配 250KN 履带吊开桩，采用轻轨及运桩小车内驳运桩。

采用锤击法沉桩，装备 2 台 DH-408 打桩架，配 250KN 履带吊喂桩，1 号桩挂架 D-46 型筒式柴油锤插桩，入土约 1/3 后，用 2 号桩架挂 D-62 型筒式柴油锤采用屏风式送桩方法送桩到位。

根据现场的实际情况，插桩时的导向装置为单层双向导向围檩，利用桩架底盘前沿刚度很大的导板作为“靠山”，用型钢接宽该导板成为板桩墙插桩内导向限位，再在板桩墙外侧用一大型 H 型钢（用打入地下的小木桩限位）作为板桩墙插桩外导向限位。再由一双槽钢进行间距定位，该双槽钢同时又起到对插入桩的前进方向的限位，插桩限位装置在板桩沉桩中控制了桩的轴线及双向倾斜，效果很好。

该船坞坞墙仅靠钢筋混凝土板桩和薄壁混凝土衬砌构成的轻型结构止水，坞墙钢筋混凝土板桩榫槽静压注浆，每次注 2min 左右，待钢筋混凝土板桩顶冒浆时立即停止。间隔 0.5d 再复灌，至少灌 3 次以上，直至注浆体表面至桩顶位置不再下沉为止。

15.6.4 复合结构围护工程—搅拌桩板桩复合结构

宝钢某冷轧基坑围护工程采用了水泥搅拌桩插入工字型板桩。

该工程位于宝钢老厂区热轧卷取机附近，距离已建并处于运行的钢卷运输机轨道 1.0m，基坑设计长为 203m，宽为 16~26m 不等，基坑开挖深度为 9.5m，为地下二层钢筋混凝土结构。采用 $\Phi 700@500$ 双排水泥搅拌桩，深度 16.5m，每间隔 1.5m 插入工字型薄壁钢筋混凝土板桩，形成复合支护结构，如图 15-21、图 15-22 所示，内部为 $\Phi 609$ 钢管支撑，板桩在现场预制。水泥搅拌桩采用 42.5# 硅酸盐水泥，水灰比 0.5，水泥掺量 16%，搅拌速度 0.5m/min。施工时先水冲洗湿润钢筋混凝土板桩，减少插入时的吸水率，采用 2.5T 打桩机及配套设备进行钢筋混凝土板桩压桩，提高沉入工效。顶部浇注了一道钢筋混凝土圈梁。基坑开挖后露出的工字钢筋混凝土板桩复合结构墙体平整，墙面无渗漏。支护结构最大位移仅仅 24mm。

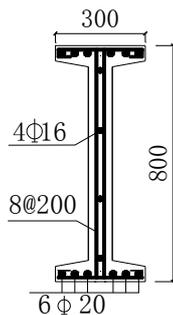


图 15-21 工字型板桩配筋图

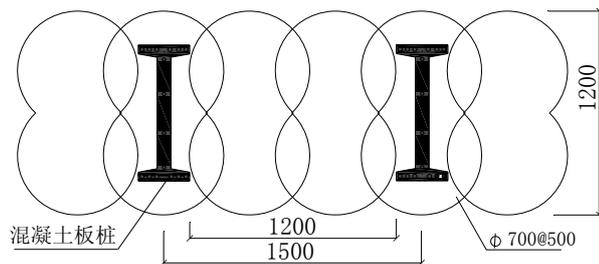


图 15-22 搅拌桩板桩复合结构平面图

15.6.5 渤海海岸近黄河口防浪堤—射水法预制钢筋混凝土板桩

1998 年 7 月在渤海岸边靠近黄河建造了一个防浪堤抵挡严重的海床腐蚀，建造过程中采用了射水法预制混凝土板桩的技术^[3]。防浪堤位于主岸堤外 30m 处，单块钢筋混凝土板桩长 16m，宽 1.2m，厚 0.3m。防浪堤顶部设置了 0.3m 的现浇钢筋混凝土帽梁，每隔 6m 在防浪堤前墙加入 T 形桩增强侧支撑，每块 T 形桩与两块平行于前墙的板桩相连并与一块垂直于前墙的板桩相连，每块 T 形桩与另三块板桩通过一个工字梁和两个矩形钢管连接。

防浪堤建好后板桩处的海水深度将迅速达到 3m，同时板桩桩基深埋于地下 10.5m 处，

板桩顶端位于水面上方 2.5m 处。混凝土承台高 0.4m，宽 0.3m。从 1998 年至 2002 年防浪堤前方海底由于海潮影响已经降低了 1m，而该防浪堤依然安然无恙，如图 15-23 所示。



图15-23 渤海岸边钢筋混凝土板桩防浪堤

参考文献

- [1] 刘建航，侯学渊主编. 基坑工程手册. 11 章[J]. 北京：中国建筑业出版社，1997.
- [2] 中交第三航务工程局有限公司. 桩基施工手册[J]. 人民交通出版社.
- [3] 许国辉，Grouted jetted precast concrete sheet piles:Method,experiments,and applications[D] G. H. Xu, Z. Q. Yue, D. F. Liu, and F. R. He, Can. Geotech. J. 43 , ©2006 NRC Canada

专有名词：

钢筋混凝土板桩

一种钢筋混凝土预制构件，呈长板状，带有榫槽和桩尖，沉桩后形成组合墙体，是一种易工厂化、装配化的基坑围护形式。