

第 13 章 型钢水泥土搅拌墙的设计与施工

13.1 概述

型钢水泥土搅拌墙（如图 13-1 所示），通常称为 SMW 工法^{[1]、[2]}（Soil Mixed Wall），是一种在连续套接的三轴水泥土搅拌桩内插入型钢形成的复合挡土截水结构，即利用三轴搅拌桩钻机在原土层中切削土体，同时钻机前端低压注入水泥浆液，与切碎土体充分搅拌形成截水性较高的水泥土柱列式挡墙，在水泥土浆液尚未硬化前插入型钢的一种地下工程施工技术。

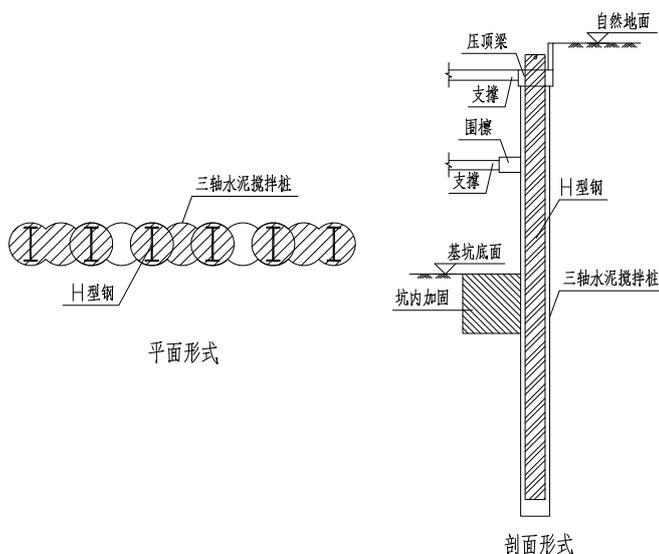


图 13-1 型钢水泥土搅拌墙

型钢水泥土搅拌墙源于基坑工程，随着对于该工法认识的深入和施工工艺的成熟，型钢水泥土搅拌墙也逐渐应用于地基加固、地下坝加固、垃圾填埋场的护墙等领域。本章所探讨的型钢水泥土搅拌墙仅限于基坑围护工程的范畴。

型钢水泥土搅拌墙是基于深层搅拌桩施工工艺发展起来的，这种结构充分发挥了水泥土混合体和型钢的力学特性，具有经济、工期短、高截水性、对周围环境影响小等特点。型钢水泥土搅拌墙围护结构在地下室施工完成后，可以将 H 型钢从水泥土搅拌桩中拔出，达到回收和再次利用的目的。因此该工法与常规的围护形式相比不仅工期短，施工过程无污染，场地整洁干净、噪音小，而且可以节约社会资源，避免围护体在地下室施工完毕后永久遗留于地下，成为地下障碍物。在提倡建设节约型社会，实现了可持续发展的今天，推广应用该工法更加具有现实意义。

目前工程上广为采用的水泥土搅拌桩主要分为双轴和三轴两种，双轴水泥土搅拌桩相对于三轴水泥土搅拌桩具有以下缺点：

- (1) 双轴水泥土搅拌桩成桩质量和均匀性较差，成桩的垂直精度也较难保证；
- (2) 施工中很难保持相邻桩之间的完全搭接，尤其是在搅拌桩施工深度较深的情况；
- (3) 施工过程中一旦遇到障碍物，钻杆易发生弯曲，影响搅拌桩的截水效果；
- (4) 在硬质粉土或砂性土中搅拌较困难，成桩质量较差。

考虑到型钢水泥土搅拌墙中的搅拌桩不仅起到基坑的截水帷幕作用，更重要的是还承担着对型钢的包裹嵌固作用，因此规定型钢水泥土搅拌墙中的搅拌桩应采用三轴水泥土搅拌桩，以确保施工质量和围护结构较好的截水封闭性。

13.1.1 型钢水泥土搅拌墙国内外发展和应用现状

1. 国外发展和应用现状

型钢水泥土搅拌墙源于美国的 MIP 工法^[4] (Mixing in-Place Pile)。1955 年在大阪市安治川河畔进行的 MIP 工法试验性施工中, 尝试将 MIP 工法依次连续施工做成一道柱列式地下连续墙, 这就是 SMW 工法的雏形。

为了解决 MIP 工法相邻桩搭接不完全、成桩垂直度较难保证、在硬质粉土或塑性指数较高的黏性土中搅拌较困难等问题, 1971 年, 日本成幸工业株式会社开发出多轴搅拌钻机, 使相邻搅拌桩套接施工, 有效地解决了以前钻机的缺陷。多轴搅拌钻机的研制成功为型钢水泥土搅拌墙的广泛应用创造了条件。之后型钢水泥土搅拌墙在成桩设备、施工工艺等方面得到了不断的完善和发展。作为一种新的基坑围护施工工艺, 80 年代后期传至台湾地区, 90 年代在泰国、马来西亚等东南亚国家和美国、法国等西方国家和地区被广泛应用。目前型钢水泥土搅拌墙围护形式已经成为日本基坑围护的主要工法, 并且型钢水泥土搅拌墙的施工业绩仍在不断提高, 用途日益扩大。

2. 国内发展和应用现状

在我国水泥土搅拌桩作为重力式挡土墙或防渗帷幕的设计理论和施工方法较为成熟, 但作为型钢水泥土搅拌墙基坑围护结构的应用和其他国家相比存在一定的滞后。虽然型钢水泥土搅拌墙具有较好的经济效益和社会效益, 但一直以来由于国内对该工法的作用机理、设计理论缺乏研究, 没有可依据的型钢水泥土搅拌墙设计规范和理论著作, 并受到水泥土搅拌桩施工设备滞后和型钢回收困难等因素影响, 制约了型钢水泥土搅拌墙在我国的推广应用。

早在 80 年代末, 型钢水泥土搅拌墙曾引起了我国工程界的关注, 并做了一些研究, 但并未在实际工程应用。我国最早的工程实例是 1994 年上海静安寺附近的环球世界商厦基坑围护工程, 工程获得了成功, 但未做到型钢的回收利用, 因此围护工程造价与钻孔灌注桩相比并不具有优势。

1994 年上海隧道工程股份有限公司等单位对型钢水泥土搅拌墙的施工方法、施工设备、型钢水泥土的组合作用性能及设计计算方法、型钢起拔回收技术等进行了系统的研究。1998 年至 1999 年, 型钢水泥土搅拌墙在上海地区逐步推广应用, 主要工程有地铁二号线静安寺站下沉式广场、陆家嘴站五号出入口地下人行通道、浦东国际会议中心和明珠线二期工程蓝村路站等。据不完全统计, 90 年代上海地区采用型钢水泥土搅拌墙施工的最大基坑面积为 1.34 万 m², 最大成桩深度为 25m, 最大基坑开挖深度为 15m。

目前型钢水泥土搅拌墙在我国上海、江苏、浙江、天津等沿海软土地区应用已经比较普遍, 并逐步推广到福建、安徽、湖北等地区, 相关的设计施工规范、规程的编制也在进行中。1997 年 8 月“型钢水泥土复合搅拌桩支护结构研究”通过了上海市科委技术鉴定, 1999 年被建设部列为科技成果重点推广项目。上海市工程建设规范《型钢水泥土搅拌墙技术规程》(DGJ08-116-2005) 和天津市工程建设标准《天津市地下铁道 SMW 施工技术规程》(J10591-2005) 已经开始试行, 国家相应的技术规程也已经编制完成。

3. 日本 SMW 工法施工机械及工艺简介

国内的型钢水泥土搅拌墙施工机械和工艺最初从日本引进, 消化吸收后又进行了技术创新。目前日本常用的三轴水泥土搅拌桩主要有 550 和 850 两个系列, 其中 550 系列中水泥土搅拌桩直径包含 500mm、550mm、600mm、650mm 四种类型, 850 系列中水泥土搅拌桩直径包含 850mm 和 900mm 两种类型, 每种直径对应相应的水泥土搅拌桩施工设备和内插型钢规格。国内从日本引进的三轴水泥土搅拌桩施工设备主要为 650mm 和 850mm 两种, 经过改进, 国内又研发了 1000mm 搅拌桩施工机械。

日本三轴水泥土搅拌桩一般采用两种型号水泥, 即高炉水泥和工法标准水泥。高炉水泥的强度较高, 28 天龄期抗压强度可达 61N/mm², 相当于国内普通硅酸盐水泥标号 C60~C80 以上, 高炉水泥的水泥掺量一般为 200kg/m³, 水灰比为 1.5。工法标准水泥与国内常用的 P42.5 强度基本一致。

日本对水泥土搅拌桩的质量控制极为重视, 为了规范设计、施工, 加强质量管理, 专门编制了

《SMW 工法协会标准》。标准中对搅拌桩的质量检测采用现场水泥石浆液取样试验和现场取芯强度试验两种方式，搅拌桩无侧限抗压强度要求不低于 0.5MPa。

日本的型钢水泥石浆液搅拌墙在地下室结构施工完成后一般不拔除，永久留在地下，国内引进后进行了工艺改进，型钢一般在地下室施工后拔除，这与日本存在不同。

13.1.2 型钢水泥石浆液搅拌墙的特点

型钢水泥石浆液搅拌墙是一种由水泥石浆液搅拌桩柱列式挡墙和型钢（一般采用 H 型钢）组成的复合围护结构，同时具有截水和承担水土侧压力的功能。型钢水泥石浆液搅拌墙与基坑围护设计中经常采用的钻孔灌注桩排桩相比，具有下面几方面的不同。

首先，型钢水泥石浆液搅拌墙由 H 型钢和水泥石浆液组成，一种是力学特性复杂的水泥石浆液，一种是近似线弹性材料的型钢，二者相互作用，工作机理非常复杂；其次，针对这种复合围护结构，从经济角度考虑，H 型钢在地下室施工完成后可以回收利用是该工法的一个特色，从变形控制的角度看，H 型钢可以通过跳插、密插调整围护体刚度，是该工法的另一特色；第三，在地下水水位较高的软土地区钻孔灌注桩围护结构尚需在外侧施工一排截水帷幕，截水帷幕可以采用双轴水泥石浆液搅拌桩也可以采用三轴水泥石浆液搅拌桩。当基坑开挖较深，搅拌桩入土深度较深时（一般超过 18m），为保证截水效果，常常采用三轴水泥石浆液搅拌桩截水。而型钢水泥石浆液搅拌墙是在三轴水泥石浆液搅拌桩中内插 H 型钢，本身就已经具有较好的截水效果，不需额外施工截水帷幕，因此造价一般相对于钻孔灌注桩要经济。

与其他围护形式相比，型钢水泥石浆液搅拌墙还具有以下特点：

1. 对周围环境影响小

型钢水泥石浆液搅拌墙施工采用三轴水泥石浆液搅拌桩就地切削土体、使土体与水泥石浆液充分搅拌混合形成水泥石浆液，并用低压持续注入的水泥石浆液置换处于流动状态的水泥石浆液，保持地下水泥石浆液总量平衡。该工法无须开槽或钻孔，不存在槽（孔）壁坍塌现象，从而可以减少对邻近土体的扰动，降低对邻近地面、道路、建筑物、地下设施的危害。

2. 防渗性能好

由于搅拌桩采用套接一孔施工，实现了相邻桩体完全无缝衔接。切削与搅拌反复进行，使浆液与土体得以充分混合形成较为均匀的水泥石浆液，与传统的围护形式相比具有更好的截水性，水泥石浆液渗透系数很小，一般可以达到 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm/sec}$ 。

3. 环保节能

三轴水泥石浆液搅拌桩施工过程无需回收处理泥浆。少量水泥石浆液浮浆可以存放至事先设置的基槽中，限制其溢流污染，待自然固结后运出场外。如果将其处理后还可以用于敷设场地道路，达到降低造价，消除建筑垃圾公害的目的。型钢在地下室施工完毕后可以回收利用，避免遗留在地下形成永久障碍物，是一种绿色工法。

4. 适用土层范围广

三轴水泥石浆液搅拌桩施工时采用三轴螺旋钻机，适用土层范围较广，包括填土、淤泥质土、黏性土、粉土、砂性土、饱和黄土等。如果采用预钻孔工艺，还可以用于较硬质地层。

5. 工期短，投资省

型钢水泥石浆液搅拌墙与地下连续墙、钻孔灌注桩等围护形式相比，工艺简单、成桩速度快，工期缩短近一半。在一般入土深度 20~25m 情况下，日平均施工长度 8~10m，最高可达 12m；造价方面，除特殊情况由于受到周边环境条件的限制，型钢在地下室施工完毕后不能拔除外，绝大多数情况下内插型钢可以拔除，实现型钢的重复利用，降低工程造价。型钢水泥石浆液搅拌墙如果考虑型钢回收，当租赁期在半年以内时，围护结构本身成本约为钻孔灌注桩的 70~80%左右，约为地下连续墙的 50~60%左右。

13.1.3 型钢水泥石浆液搅拌墙的适用条件

从广义上讲，型钢水泥石浆液搅拌墙以水泥石浆液搅拌桩为基础，凡是能够施工三轴水泥石浆液搅拌桩的场

地都可以考虑使用该工法。从黏性土到砂性土，从软弱的淤泥和淤泥质土到较硬、较密实的砂性土，甚至在含有砂卵石的地层中经过适当的处理都能够进行施工，适用土质范围较广。表13-1为土层性质对型钢水泥土搅拌墙施工难易的影响^[7]。

土层性质对型钢水泥土搅拌墙施工难易的影响

表 13-1

粒径	0.001		0.005	0.074	0.42	2.0	5.0	20	75	300
土粒区分	淤泥质土	黏土	粉土	细砂	粗砂	砂砾	中粒	粗粒	大卵石	大阶石
施工性质	较易施工，搅拌均匀				较难施工				难施工	

从型钢水泥土搅拌墙在实际工程中的应用来看，基坑围护设计方案选用型钢水泥土搅拌墙主要考虑以下几点因素。

1. 型钢水泥土搅拌墙的适用条件与基坑的开挖深度、基坑周边环境条件、场地土层条件、基坑规模等因素有关，另外与基坑内支撑的设置也密切相关。从基坑安全的角度看，型钢水泥土搅拌墙的选型主要是由基坑周边环境条件所确定的容许变形值控制的，即型钢水泥土搅拌墙的选型及参数设计首先要能够满足周边环境的保护要求。

2. 型钢水泥土搅拌墙的选择也受到基坑开挖深度的影响。根据上海及周边软土地区近些年的工程经验，在常规支撑设置下，搅拌桩直径为 650mm 的型钢水泥土搅拌墙，一般开挖深度不大于 8.0m；搅拌桩直径为 850mm 的型钢水泥土搅拌墙，一般开挖深度不大于 11.0m；搅拌桩直径为 1000mm 的型钢水泥土搅拌墙，一般开挖深度不大于 13.0m。当然这不是意味着不同截面尺寸的型钢水泥土搅拌墙只能被限定应用于此类开挖深度的基坑，而是表明当用于超过此类开挖深度的基坑时，工程风险将增大，需要采取一定的技术措施，确保安全。

3. 当施工场地狭小或距离用地红线、建筑物等较近时，采用钻孔灌注桩+截水帷幕等围护方案常常不具备足够的施工空间，而型钢水泥土搅拌墙只需在三轴水泥土搅拌桩中内插型钢，所需施工空间仅为三轴水泥搅拌桩的厚度和施工机械必要的操作空间，具有较明显的优势。

4. 与地下连续墙、钻孔灌注桩相比，型钢水泥土搅拌墙的刚度较低，因此常常会产生相对较大的变形，在对周边环境要求较高的工程中，例如基坑紧邻运营中的地铁隧道、历史保护建筑、重要地下管线时，应慎重选用。

5. 当基坑周边环境对地下水位变化较为敏感，搅拌桩桩身范围内大部分为砂（粉）性土等透水性较强的土层时，若型钢水泥土搅拌墙变形较大，搅拌桩桩身易产生裂缝、造成渗漏，后果较为严重。这种情况，如果围护设计采用型钢水泥土搅拌墙，围护结构的整体刚度应该适当加强，并控制内支撑水平及竖向间距，必要时应选用刚度更大的围护方案。

13.1.4 型钢水泥土搅拌墙在工程应用中存在的问题

型钢水泥土搅拌墙在工程应用过程中主要存在如下问题：

1. 目前型钢水泥土搅拌墙主要应用于沿海软土地区，并积累了一定的经验。在其他地区特别是在内地硬土地区应用较少。作为一种有发展前景的绿色工法，在工程条件具备时，应提倡选用；

2. 一直以来由于对型钢水泥土搅拌墙研究重视不够，缺乏有效的科研投入，相关规范规程和理论著作匮乏，在一定程度上制约了其工程应用。

3. 型钢水泥土搅拌墙设计计算理论还有待进一步完善，特别是在搅拌桩和型钢协同工作方面，仍有许多问题需要进一步深入研究。

4. 对型钢水泥土搅拌墙的一些设计施工参数还没有统一的标准，如搅拌桩的水泥用量、水灰比等问题，因此施工单位经常凭经验施工，施工质量难于保证。

5. 目前工程中对搅拌桩强度的争议比较大，各种规范和手册的要求也不统一，而工程实践中通过钻孔取芯试验得到的搅拌桩强度值普遍较低，特别是比一般规范、手册中要求的强度值要低，如何合理地确定搅拌桩 28 天强度值，需要结合试验深入分析研究。

6. 在水泥土搅拌桩的强度检测中, 几种方法都存在不同程度的缺陷, 试块试验不能真实地反映桩身全断面在土中(水下)的强度值, 钻孔取芯对芯样有一定破坏, 检测出的无侧限抗压强度偏低, 而原位测试的方法目前还缺乏大量的对比数据, 建立强度与试验值之间的关系。因此, 亟待对水泥土搅拌桩的强度检测方法进行系统研究, 制定一种简单、可靠、可操作的搅拌桩强度检测方法。

7. 搅拌桩的施工工艺有待进一步完善, 施工机械有待进一步改进。主要包括如何提高施工时水泥土搅拌桩的均匀性和垂直度、改进和研制超深搅拌桩的施工工艺和设备等问题。

13.2 型钢水泥土搅拌墙相互作用机理

13.2.1 型钢与水泥土的相互作用研究现状

型钢水泥土搅拌墙实质上是由型钢和搅拌桩组成的一种复合围护结构。目前对水泥土与型钢之间黏接强度的研究还不充分, 一般认为水泥土与型钢之间的黏接是一种柔性黏结, 其黏结强度不能与混凝土与钢筋之间的刚性黏结相比。因此通常认为水土侧压力全部由型钢承担, 水泥土搅拌桩的主要作用是抗渗截水, 但这并不是意味着水泥土搅拌桩对型钢不起作用, 试验研究表明^[1]水泥土对型钢的包裹作用能够提高型钢的刚度, 防止型钢失稳。

日本材料学会较早就制定了《SMW 工法设计施工指南》, 其对型钢与水泥土的共同作用主要设计思想是: 当 SMW 工法作为挡土墙时, 墙体的应力实际上是由芯材和水泥土共同承担的, 但在设计中一般只考虑芯材的刚度而忽略水泥土的贡献, 将水泥土的刚度贡献作为墙体的刚度储备。国内一直以来对于型钢水泥土搅拌墙的设计和施工较多地参照了日本的经验。近些年来, 随着型钢水泥土搅拌墙的逐步应用, 设计、施工水平得到了不断提高, 同时对于型钢与水泥土相互作用机理及水泥土的包裹作用对型钢刚度的贡献均进行了一些理论和试验探讨。

13.2.2 型钢与水泥土相互作用过程

对于型钢水泥土的共同作用, 国内一些学者进行了一些模型试验^{[6]、[7]}, 从试验结果看, 型钢水泥土受荷过程中截面的应力变化分为五个阶段:

1. 第一阶段: 弯矩较小时, 截面上水泥土与型钢应力均呈线性分布, 如图 13-2a 所示;
2. 第二阶段: 随着弯矩增大, 受拉区水泥土应力达到抗拉强度, 开始开裂。水泥土开裂后即退出工作, 中性轴略上移, 这一阶段一般持续时间较短, 如图 13-2b 所示;
3. 第三阶段: 型钢受拉区达到屈服强度, 应力分布不再呈线性, 而受压区由于水泥土的分担作用, 型钢还未屈服, 如图 13-2c 所示;
4. 第四阶段: 型钢受压区达到屈服强度。由于水泥土弹性模量较低, 水泥所受应力一般还未达到其抗压强度, 中和轴继续上移。弯矩—挠度曲线表现出明显的非线性, 如图 13-2d 所示;
5. 第五阶段: 受压区水泥土达到抗压强度, 开始出现破碎, 所受应力下降, 中性轴下移, 型钢塑性区扩大, 直至结构破坏, 如图 13-2e 所示。

通过上面的分析, 可以看出型钢水泥土搅拌墙从受力特征角度可以分为三个工作阶段: 1) 弹性共同作用阶段。其特征主要表现为: 水泥土开裂前, 型钢水泥土组合结构基本处于弹性工作状态, 组合刚度即为型钢材和水泥土刚度之和; 2) 非线性共同作用阶段。水泥土开裂初期, 两材料之间发生微量黏结滑移, 组合结构的挠度增大, 但组合结构的刚度下降速率较慢; 3) 型钢单独工作阶段。随着荷载的增加, 水泥土开裂深度越来越大, 新的裂缝不断产生, 组合结构挠度增长较快, 水泥土的作用已不明显, 可以认为只有型钢单独起作用。

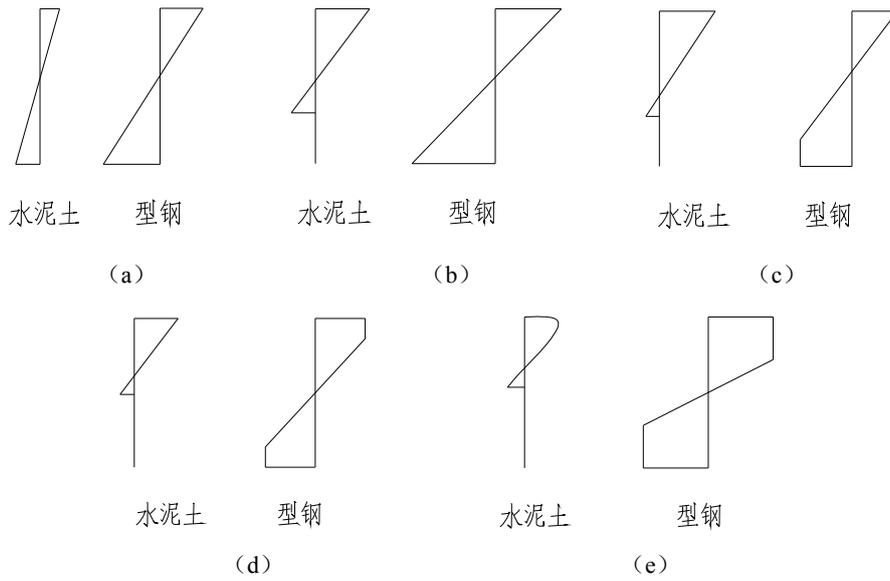


图 13-2 型钢水泥土相互作用过程

13.2.3 型钢与水泥土组合刚度探讨

工程实践和试验研究发现，在小变形条件下，水泥土对型钢水泥土搅拌墙的刚度贡献是不能忽视的。由于型钢与水泥土的相互作用，水泥土对型钢的包裹作用提高了型钢刚度、减少了位移。试验表明，型钢水泥土搅拌墙围护结构中，如果型钢与水泥土的接触足够紧密，在接触面处没有水平和垂直分离，可以认为它们是可以共同作用的。

对搅拌桩的荷载分担作用，国外学者常采用搅拌桩的刚度贡献率来考虑，如日本学者铃木健夫按照弹性力学方法计算了水泥土搅拌桩的刚度贡献率^[1]，并与实验结果进行了比较。图 13-3 为型钢与水泥土共同作用的试验结果，*a* 表示型钢水泥土组合体荷载挠度关系，*b* 为型钢的荷载挠度关系。由图可见，相同荷载作用下，水泥土与型钢混合体的抗弯刚度比相应型钢的刚度要大 20%，挠度相应减小。从另一方面看，由于水泥土起到的套箍作用，可以防止型钢失稳，这样在一定程度上可以减小型钢翼缘的厚度。

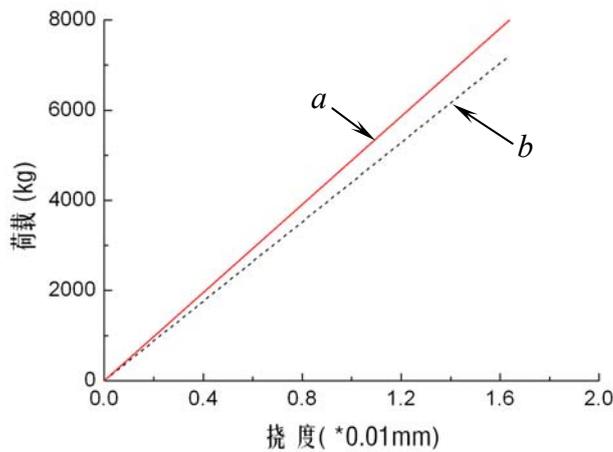


图 13-3 型钢水泥土搅拌墙与 H 型钢荷载挠度关系比较

根据日本学者铃木健夫所作的模型试验和现场测试研究成果，考虑水泥土的包裹作用对型钢的贡献，即考虑型钢与水泥土共同作用的设计方法，可以通过分析水泥土对于型钢的刚度贡献入手。

考虑型钢水泥土共同作用的复合刚度 EI ，可按下列式简化计算。

$$EI = E_s I_s (1 + \alpha) \quad (13-1)$$

式中： E_s 、 I_s 为型钢的弹性模量、惯性矩； α 为水泥土的刚度贡献系数；

准确确定水泥土的刚度贡献系数 α 值，对于合理设计型钢水泥土搅拌墙具有重要意义。根据现有经验， α 取值范围为 0~0.2，根据基坑开挖深度和周边环境的重要性及保护要求取值。

应当指出，目前由于试验数据及工程经验还很有限，仍不能准确地确定水泥土对型钢刚度的提高程度，所以在围护结构的设计计算中，本节探讨的水泥土刚度贡献系数仅供参考，实际工程中不推荐考虑水泥土的刚度贡献进行设计，水泥土搅拌桩的刚度贡献只作为安全储备加以考虑。

13.3 型钢水泥土搅拌墙设计与计算

13.3.1 型钢水泥土搅拌墙设计参数的确定

型钢水泥土搅拌墙中型钢是主要的受力构件，承担着基坑外侧水土压力的作用。对于型钢的设计计算主要包括两方面内容^{[9]、[13]、[14]}：首先是型钢平面形式的确定，即确定型钢的布置方式、间距、型钢的截面尺寸等参数。另一方面是从围护结构受力平衡和抗隆起安全的角度确定型钢的入土深度。对于水泥土搅拌桩的设计计算主要是通过抗渗流和抗管涌验算确定搅拌桩的入土深度。

1. 型钢、水泥土搅拌桩入土深度的确定

型钢水泥土搅拌墙的入土深度可分为型钢的入土深度 D_H 和水泥土搅拌桩的入土深度 D_C 两部分。

(1) H 型钢入土深度的确定

型钢的入土深度 D_H 主要由基坑整体稳定性、抗隆起稳定性和抗滑移稳定性综合确定，H 型钢尚应满足围护墙内力、变形的计算要求及考虑地下结构施工完成后型钢能顺利拔出。具体可以参考钻孔灌注桩排桩的相关章节。在进行围护墙内力和变形计算以及基坑上述各项稳定性分析时，围护墙的深度以内插型钢底端为准，不计型钢端部以下水泥土搅拌桩的作用。

根据工程经验，基坑整体稳定性、抗隆起稳定性和抗滑移稳定性验算中，基坑抗隆起稳定性常常成为控制条件。

(2) 水泥土搅拌桩入土深度的确定

沿海软土地区或者地下水位较高的地区，在基坑开挖过程中极易在渗流力的作用下产生土体的渗透破坏，即当地下水的向上渗流力大于上覆土的有效重度时，土粒会处于浮动状态，产生渗流失稳现象。要防止这种现象的发生就要求水泥土搅拌桩截水帷幕入土深度满足基坑抗渗流或者抗管涌的要求，使渗流水力坡度不大于地基土的临界水力坡度。

型钢水泥土搅拌墙中的水泥土搅拌桩，担负着基坑开挖过程中截水帷幕的作用。水泥土搅拌桩的入土深度 D_C 主要由坑内降水不影响到基坑以外周边环境的水力条件决定，防止降水引起渗流、管涌发生，同时应满足 $D_C \geq D_H$ 。

2. 型钢水泥土搅拌墙截面设计

型钢水泥土搅拌墙截面设计主要是确定墙体厚度、型钢截面和型钢间距。

(1) 型钢截面

型钢的截面由型钢的强度验算确定，即需要对型钢所受的应力进行验算，包括型钢的抗弯及抗剪强度问题。

1) 抗弯验算

型钢水泥土搅拌墙的弯矩全部由型钢承担，型钢的抗弯承载力应符合下列式要求：

$$\frac{1.25\gamma_0 M_k}{W} \leq f \quad (13-2)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，按照《建筑基坑支护技术规程》JGJ120 取值；
 M_k ——型钢水泥土搅拌墙的弯矩标准值（N·mm）；
 W ——型钢沿弯矩作用方向的截面模量（mm³）；
 f ——钢材的抗弯强度设计值（N/mm²）。

2) 抗剪验算

型钢水泥土搅拌墙的剪力全部由型钢承担，型钢的抗剪承载力应符合下式要求：

$$\frac{1.25\gamma_0 Q_k S}{I \cdot t_w} \leq f_v \quad (13-3)$$

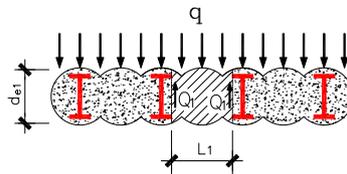
式中： Q_k ——型钢水泥土搅拌墙的剪力标准值（N）；
 S ——计算剪应力处的面积矩（mm³）；
 I ——型钢沿弯矩作用方向的截面惯性矩（mm⁴）；
 t_w ——型钢腹板厚度（mm）；
 f_v ——钢材的抗剪强度设计值（N/mm²）。

实际工程中，内插型钢一般采用 H 型钢，型钢具体的型号、规格及有关要求按《热轧 H 型钢和部分 T 型钢》（GB/T11263-1998）和《焊接 H 型钢》（YB3301-92）选用。

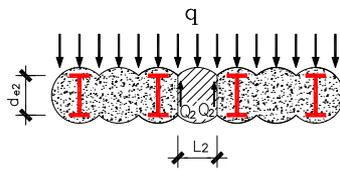
(2) 型钢的间距

型钢水泥土搅拌墙中的型钢往往是按一定的间距插入水泥土中，这样相邻型钢之间便形成了一个非加筋区，如图 13-4 所示。型钢水泥土搅拌墙有加筋区和非加筋区承担着同样的水土压力。但在加筋区，由于型钢和水泥土的共同作用，组合结构刚度较大，变形较小，可以视为非加筋区的支点。型钢的间距越大，加筋区和非加筋区交界面上所承受的剪力就越大。当型钢间距增大到一定程度，该交界面有可能在挡墙达到竖向承载力之前发生破坏，因此应该对型钢水泥土搅拌墙中型钢与水泥土搅拌桩的交界面进行局部承载力验算，确定合理的型钢间距。

型钢水泥土搅拌墙应该满足水泥土搅拌桩桩身局部抗剪承载力的要求。局部抗剪承载力验算包括型钢与水泥土之间的错动剪切和水泥土最薄弱截面处的局部剪切验算。



(a) 型钢与水泥土间错动剪切破坏验算图



(b) 最薄弱截面剪切破坏验算图

图 13-4 搅拌桩局部抗剪计算示意图

1) 当型钢隔孔设置时，按下式验算型钢与水泥土之间的错动剪切承载力：

$$\tau_1 = \frac{1.25\gamma_0 Q_1}{d_{e1}} \leq \tau \quad (13-4)$$

$$Q_1 = q_k L_1 / 2 \quad (13-5)$$

$$\tau = \tau_{ck} / 1.6 \quad (13-6)$$

式中： τ_1 ——型钢与水泥土之间的错动剪应力设计值（N/mm²）；

Q_1 ——型钢与水泥土之间单位深度范围内的错动剪力标准值 (N/mm);

q_k ——计算截面处作用的侧压力标准值 (N/mm²);

L_1 ——型钢翼缘之间的净距 (mm);

d_{e1} ——型钢翼缘处水泥土墙体的有效厚度 (mm);

τ ——水泥土抗剪强度设计值 (N/mm²);

τ_{ck} ——水泥土抗剪强度标准值 (N/mm²), 可取搅拌桩 28 天龄期无侧限抗压强度标准值;

2) 当型钢隔孔设置时, 按下式对水泥土搅拌桩进行最薄弱断面的局部抗剪验算:

$$\tau_2 = \frac{1.25\gamma_0 Q_2}{d_{e2}} \leq \tau \quad (13-7)$$

$$Q_2 = qL_2 / 2 \quad (13-8)$$

式中: τ_2 ——水泥土最薄弱截面处的局部剪应力标准值 (N/mm²);

Q_2 ——水泥土最薄弱截面处单位深度范围内的剪力标准值 (N/mm);

L_2 ——水泥土最薄弱截面的净距 (mm);

d_{e2} ——水泥土最薄弱截面处墙体的有效厚度 (mm)。

(3) 搅拌桩抗剪强度与无侧限抗压强度

水泥土搅拌桩的强度应能够满足上述的抗剪验算, 而水泥土抗剪强度 τ 与 28 天无侧限抗压强度 q_u 存在一定的对应关系。冶金部建筑研究总院 SMW 工法研究组研究成果表明: 水泥土的抗剪强度 $\tau = 0.3 \sim 0.45q_u$ 。日本 SMW 工法学会根据直剪试验得到了水泥土的抗剪强度和单轴抗压强度之间类似的关系, 如图 13-5 所示。

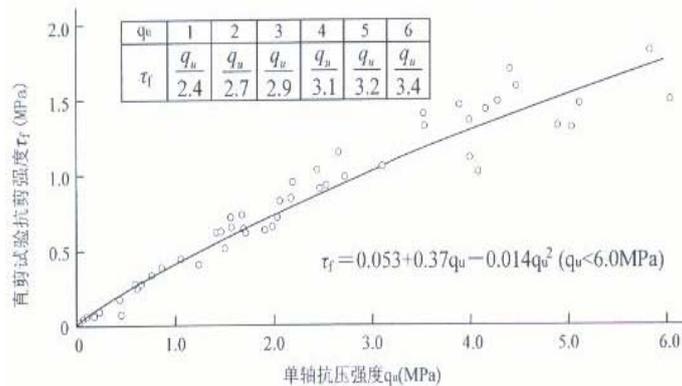


图 13-5 抗剪强度和单轴抗压强度的关系

实际工程中, 当基坑开挖深度为 10m 左右, 型钢采用插一跳一或插二跳一时, 型钢与水泥土之间的错动剪切应力为 0.08~0.12MPa。按偏于安全的 $q_u = 3\tau$ 考虑, 并同时考虑安全系数为 2 时, 水泥土无侧限抗压强度需达到 0.5MPa, 即水泥土无侧限抗压强度不小于 0.5 MPa 时, 可以满足搅拌桩的抗剪要求。从目前搅拌桩现场取芯检测结果看, 绝大部分工程搅拌桩 28 天无侧限抗压强度都在 0.5 MPa 以上, 能够满足型钢水泥土搅拌墙的局部抗剪要求。

从目前型钢水泥土搅拌墙在实际工程的应用看, 搅拌桩的抗剪强度验算一般都能满足要求, 但当基坑开挖深度较大、内插型钢的间距较大、紧贴坑边有较重的超载 (如建筑物, 高填土等) 时, 这一问题是不容忽视的, 此时型钢间距往往需要根据水泥土局部抗剪确定。

实际工程中, 型钢水泥土搅拌墙的墙体厚度、型钢截面和型钢的间距一般是由三轴水泥土搅拌桩的桩径决定。三轴水泥土搅拌桩的桩径分为 650 mm、850 mm、1000 mm 三种, 型钢常规布置形式有: 密插、插二挑一和插一跳一三种, 则如图 13-6 所示, H 型钢分别插入 $\Phi 650\text{mm}$ 、 $\Phi 850\text{mm}$ 、 $\Phi 1000\text{mm}$ 三轴水泥土搅拌桩内, H 型钢的间距为: 密插间距 450mm、600mm、750mm; 插二挑一间距 675mm、900mm、1125mm; 插一跳一间距 900mm、1200mm、1500mm。

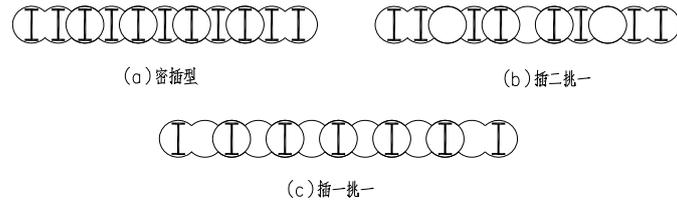


图 13-6 型钢布置形式

13.3.2 内插型钢拔出验算

1. 型钢拔出影响因素

型钢水泥土搅拌墙围护结构构造简单，在基坑临时围护结束以后，H 型钢可以回收再次利用，一方面减少了钢材的浪费，另一方面也降低了工程造价。据测算，H 型钢的费用一般要占整个基坑工程围护造价的 40%~50% 以上，这是型钢水泥土搅拌墙经济指标具有优势的重要原因之一，因此，研究型钢水泥土搅拌墙中 H 型钢在拔出荷载作用下的工作机理与拔出力的影响因素具有重要意义。

影响型钢拔出的主要因素有两点：一是型钢与水泥土之间的摩擦阻力；另一点就是由于基坑开挖造成的型钢水泥土搅拌墙变形致使型钢产生弯曲，从而在拔出时产生的变形阻力。为了使得型钢能够顺利拔出，对于前一点可通过在型钢表面涂抹减摩材料来降低型钢与水泥土之间的摩擦阻力，并且要求该减摩材料在工作期间具有较好的黏结力，提高型钢与水泥土的共同作用；对于后一点必须采取有效措施减小挡墙变形，做到精心设计、精心施工、严格管理等。

型钢能否拔出还与工程的周边环境条件和场地条件有关，因为当工程的地下室施工完毕基坑回填后虽然具备了型钢拔出的必要条件，但型钢拔出常常不可避免的要对周边环境产生和影响，特别是当周边环境对变形控制要求较严格时，为了保护周边建筑物、重要的地下管线、运营中的地铁等设施，型钢往往不能拔除。此外当施工场地狭小，型钢拔除机械不能进入施工场地时，也会导致型钢在地下室施工完毕后不能拔除的情况。

2. 型钢拔出作用机理

对于型钢水泥土搅拌墙复合结构，水泥土本身的力学性质比较复杂，再加上减摩剂的作用，使得水泥土—型钢的黏结滑移更加复杂。一般认为：若不考虑减摩剂的影响，型钢与水泥土之间的界面黏结作用由三部分组成：水泥土中水泥胶体与型钢表面的化学胶结力；型钢与水泥土接触面上的摩擦阻力；型钢表面粗糙不平的机械咬合力。

当荷载作用于型钢端部，型钢和水泥土之间发生黏结破坏。这种破坏由端部逐渐向底部扩展，两种材料接触界面产生微量滑移，减摩材料剪切破坏，拔出阻力主要表现为静摩擦力。在拔出荷载达到总静摩擦力前，拔出位移很小。当荷载达到起拔力时，型钢拔出位移加快，拔出荷载迅速下降，这时摩擦阻力由静摩擦力转化为滑动摩擦力和滚动摩擦力。H 型钢与水泥土接触界面上部破碎，破碎小颗粒填充于破裂面中，有利于减小后期的摩擦阻力。当拔出荷载降至一定程度，摩擦阻力主要表现为滚动摩擦力。

为了反映 H 型钢的拔出规律，图 13-7 为实测的 H 型钢拔出力 P ~滑移 u 关系曲线^{[6]、[7]}。图中 P_d 为脱结力， P_m 为最大拔出力， u 为相对滑移。

试验表明，起拔力 P_0 与型钢垂直度、变形形状密切相关。由 H 型钢的拔出特征曲线看， P_0 在静止摩擦力变为动摩擦力后迅速减少，拔出型钢的 P 小于最大抗拔力 P_m 。

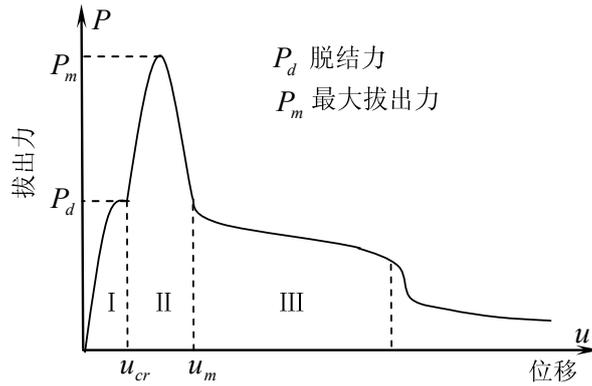


图 13-7 H 型钢拔出的实测拔出曲线。

根据水泥土与 H 型钢的黏结程度，将 H 型钢的拔出过程大致划分为三个阶段：无脱结阶段、部分脱结阶段、完全脱结阶段。

(1) 型钢从受荷至开始脱结这一阶段，即第 I 阶段（无脱结阶段）。从型钢滑移理论上，这段曲线可视为线弹性，实际情况与理论大致相符。

(2) 当拔出力超过脱结力 P_d 时，即进入部分脱结阶段。在这个阶段，两种材料间的摩擦剪切应力较复杂，拔出力既要克服 H 型钢和水泥土接触界面上的静摩擦力，又要克服挡墙变形所产生的弯曲变形阻力。这种弯曲变形在拔出力的作用下增加了接触界面的法向应力，从而导致静摩擦力增大。因此，这时的起拔力要比无侧向变形时起拔力大很多。

(3) H 型钢拔动后，H 型钢和水泥土完全脱结。由于减摩材料的抗剪强度较低，可认为 H 型钢在拔出过程中摩擦剪应力是常数，因此摩擦拔出阶段理论上为一直线。实际情况由于基坑开挖围护结构变形的影响，H 型钢拔动后主要由弯曲阻力控制。当 H 型钢末端通过较大弯曲点后，阻力主要由摩擦阻力控制，型钢迅速拔出，曲线呈陡降形态。

3. 型钢完整回收验算

型钢和水泥土两种材料共同作用机理的复杂性决定了型钢拔出过程较为复杂。通常工程设计中为了方便，假设型钢拔出时阻力沿接触界面均匀分布。要保证 H 型钢的完整回收，首先设计过程中需进行型钢的抗拔验算。根据静力平衡条件知，H 型钢的起拔力 P_m 等于静摩擦阻力 P_f 、变形阻力 P_d 和自重 G 三部分之和，即

$$P_m = P_f + P_d + G \quad (13-9)$$

由于起拔机具的起拔力有限，应尽可能的降低其起拔力 P_m 大小。为减少起拔时的静摩阻力，H 型钢表面涂有减摩剂：当变位速率 $\Delta m / l_H \leq 0.5\%$ （ Δm 为墙体最大水平变位， l_H 为型钢在水泥土搅拌桩中的总长度），其最大变形阻力 $P_d \approx P_f$ ；拔出试验表明，自重 G 在起拔力中所占比重相当小，可以忽略。因此，上式简化为

$$P_m \approx 2P_f = 2\mu_f S l_H \quad (13-10)$$

式中： μ_f ——H 型钢与水泥土之间的单位面积静摩阻力，平均取 0.04MPa；

A ——H 型钢与水泥土之间的接触面积。

为保证 H 型钢回收后的重复利用，要求 H 型钢在起拔过程中处于弹性状态，取其屈服极限强度 σ_s 的 70% 作为允许应力，故型钢的允许拉力为：

$$[P] = 0.7\sigma_s A_H \quad (13-11)$$

式中： A_H ——H 型钢的截面面积。

那么起拔力必须满足下式：

$$P_m \leq [P] \quad (13-12)$$

13.3.3 型钢水泥土搅拌墙构造设计

1. 型钢与冠梁的连接节点

在型钢水泥土搅拌墙的顶部需要设置冠梁，冠梁宜与第一道钢筋混凝土冠梁合二为一。围护设计时需考虑由于型钢穿越对冠梁截面的削弱影响，一般应满足如下要求：

(1) 冠梁截面高度不小于 600。当搅拌桩直径为 650 时，冠梁的截面宽度不应小于 1000；当搅拌桩直径为 850 时，冠梁的截面宽度不应小于 1200；当搅拌桩直径为 1000 时，冠梁的截面宽度不应小于 1300。

(2) 冠梁的主筋应避开型钢设置。为便于型钢拔除，型钢顶部要高出冠梁顶面一定高度，一般不宜小于 500，型钢与腰梁间的隔离材料在基坑内侧应采用不易压缩的硬质材料。

(3) 冠梁的箍筋宜采用四肢箍筋，直径不应小于 $\Phi 8$ ，间距不应大于 200；在支撑节点位置，箍筋宜适当加密；由于内插型钢而未能设置的箍筋应在相邻区域内补足面积。

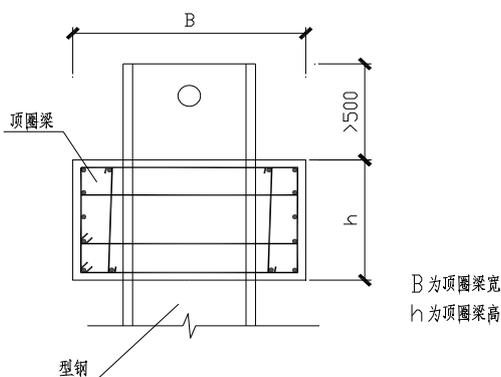


图 13-8 型钢与冠梁节点图

型钢水泥土搅拌墙的顶部，应设置封闭的钢筋混凝土冠梁。冠梁在板式支护体系中，对提高围护体系的整体性，并使围护桩和支撑体系形成共同受力的稳定结构体系具有重要作用。由于型钢水泥土搅拌墙由两种刚度相差较大的材料组成，冠梁作用的重要性更加突出。

与其他形式的板式支护体系相比，型钢水泥土搅拌墙冠梁存在一些特殊性：

(1) 为便于型钢拔除，型钢需锚入冠梁，并高于圈梁顶部一定高度。一般该高度值宜大于 50cm，根据具体情况略有差异；同时为了方便施工，型钢顶端不宜高于自然地面。

(2) 由于型钢整体锚入冠梁，为便于今后拔除，圈梁和型钢之间需采用一定的材料隔离。型钢对圈梁截面的削弱是不能忽略的，因此围护设计中需要考虑这种不利影响，对圈梁截面进行适当的加强。

综合上述两方面的因素，对于型钢水泥土搅拌墙的冠梁，必须保证一定的宽度和高度，且宜与第一道支撑的冠梁合二为一，同时在构造设计上也应有一定的加强措施。冠梁与型钢的接触处，一般需采用一定的隔离材料。若隔离材料在围护受力后产生较大的压缩变形，对控制基坑总的变形量是不利的。因此，隔离材料一般采用不宜压缩的硬质材料。

2. 型钢与腰梁及支撑的连接节点

在型钢水泥土搅拌墙基坑的支撑体系中，支撑与腰梁的连接、腰梁与型钢的连接以及钢腰梁的拼接，特别是后二者对于整个腰梁支撑体系的整体性非常关键。应对上述连接节点的构造充分重视，施工单位应严格按设计图纸施工。型钢水泥土搅拌墙围护体系中腰梁可以采用钢筋混凝土腰梁，也可以采用钢腰梁。钢腰梁和钢支撑杆件的拼接一般应满足等强度的要求，但在实际工程中受到拼接

现场施工条件的限制，很难达到要求，应在构造上对拼接方式予以加强，如附加缀板、设置加劲肋板等。同时应尽量减少钢腰梁的接头数量，拼接位置也尽量放在腰梁受力较小的部位。

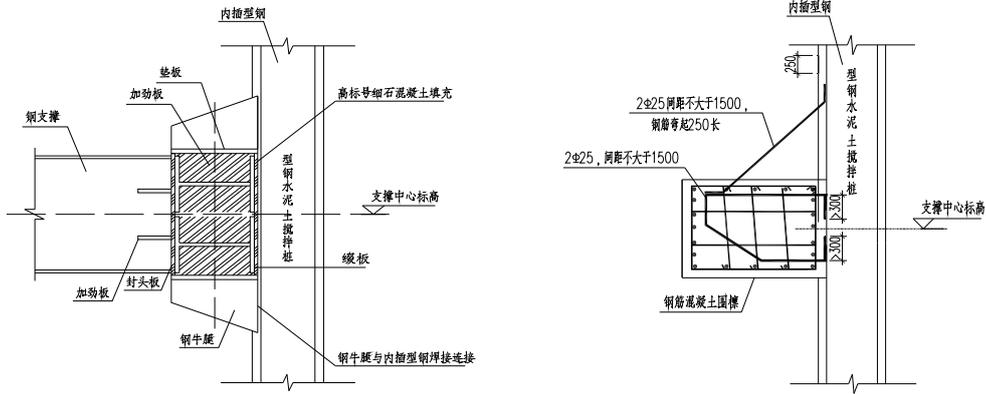


图 13-9 型钢与钢腰梁及支撑连接示意图 13-10 型钢与混凝土腰梁连接示意图

3. 型钢水泥土搅拌墙转角加强措施

为保证转角处型钢水泥土搅拌墙的成桩质量和截水效果，在转角处宜采用“十”字接头的形式，即在接头处两边都多打半幅桩。为保证型钢水泥土搅拌墙转角处的刚度，宜在转角处增设一根斜插型钢，如图 13-11 所示。

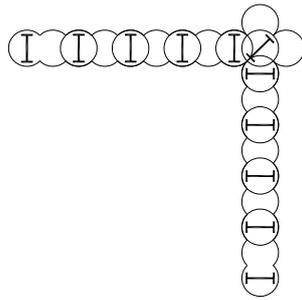


图 13-11 型钢水泥土搅拌墙转角处加强示意图

4. 型钢水泥土搅拌墙截水封闭措施

当型钢水泥土搅拌墙遇地墙或灌注桩等围护结构的需断开时，或者在型钢水泥土搅拌墙施工中出现冷缝时，一般应采用旋喷桩封闭，以保证围护结构整体的截水效果，如图 13-12 所示。

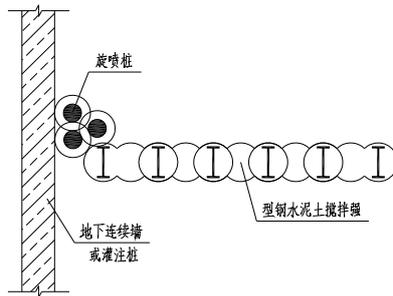


图 13-12 型钢水泥土搅拌墙封闭示意图

13.3.4 三轴水泥土搅拌桩主要设计控制参数

1. 水泥浆配比

水泥浆配比是关系到型钢水泥土搅拌墙施工质量的重要因素。搅拌桩水泥浆配比主要与土层的性质有关，设计上应以考虑水泥土硬化为核心。进入施工阶段，还须考虑施工上的要求，有必要对配比进行调整，以满足设计要求。目前工程上常规的不同土层内搅拌桩水泥浆配比见表 13-2

所示。

不同土层型钢水泥土搅拌墙水泥浆配比

表 13-2

土质特征		配合比（每 1m ³ 的土）			抗压强度 (Mpa)
		水泥(Kg)	膨润土(Kg)	水(L)	
黏性土	粉质黏土、黏土	300~450	5~15	450~900	0.5~1.0
砂质土	细砂、中砂、粗砂	200~400	5~20	300~800	0.5~0.3
砂砾土	砂砾土、砂粒夹卵石	200~400	5~30	300~800	0.5~0.3
特殊黏土	有机质土、火山灰黏土	根据室内试验配置			不确定

2. 主要控制参数

三轴水泥土搅拌桩桩体应搅拌均匀，表面要密实、平整。桩顶凿掉部分的水泥土也应注浆，确保桩体的连续性和桩体质量。搅拌桩的深度宜比型钢适当加深，一般桩端比型钢端部深 0.5~1.0m。

施工过程中主要施工参数为：

- (1) 水泥浆流量：280~320L/min（双泵）；
- (2) 浆液配比：水:水泥=1.5~2.0:1；
- (3) 泵送压力：1.5~2.5MPa；
- (4) H 型钢的间距（平行基坑方向）偏差：L±5cm（L 为型钢间距）；
- (5) H 型钢的保护层（面对基坑方向）偏差：s±5cm（s 为型钢面对基坑方向的计保护层厚度）；
- (6) 机架垂直度偏差不得超过 1/250，成桩垂直度偏差不得超过 1/200，桩位布置偏差不大于 20mm；
- (7) 钻头下沉与提升速度，以标准施工能力为前提，各种土层中原则性标准速度如下表：

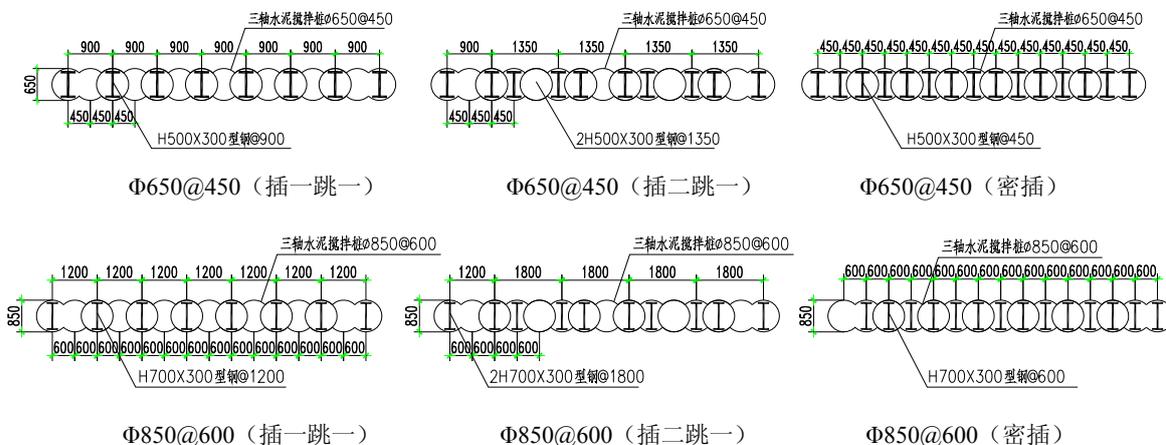
下沉与提升速度

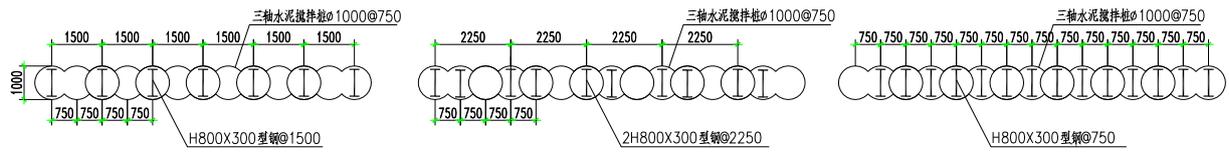
表 13-3

土性	下沉搅拌速度（m/min）	提升拌速度（m/min）
黏性土	0.3~1.0	1~2
砂性土	0.5~1.0	
砂砾土	根据现场状况	
特殊土		

3. 型钢水泥土搅拌墙标准配置

三轴水泥土搅拌桩 Φ650@450，平均厚度 593mm，内插 H500×300 或 H500×200 型钢。三轴水泥土搅拌桩 Φ850@600，平均厚度 773mm，内插 H700×300 型钢。三轴水泥土搅拌桩 Φ1000@750，平均厚度 896mm，内插 H800×300、H850×300 型钢。





Φ1000@750 (插一跳一)

Φ1000@750 (插二跳一)

Φ1000@750 (密插)

图 13-13 型钢水泥土搅拌墙标准配置图

13.4 型钢水泥土搅拌墙的施工

13.4.1 型钢水泥土搅拌墙施工机械

1. 搅拌桩施工机械在我国的发展

型钢水泥土搅拌墙施工机械在我国的发展大致经历了以下三个阶段：

第一个发展阶段是从 1993 年至 1996 年，主要是对原国产双轴搅拌桩机及配套桩架进行完善。改造后的施工机械具有桩架立柱垂直度调整方便、增加了主卷扬无级调速与 H 型钢插入功能，为型钢水泥土搅拌墙在我国的应用与推广打下了基础。

第二个发展阶段是从 1996 年至 1998 年。随着型钢水泥土搅拌墙在我国的成功应用，该施工工艺逐渐得到认可，但当型钢水泥土搅拌墙在用于基坑开挖深度超过 10m，成桩深度超过 18m 时，国内原有双轴深层搅拌机在成桩垂直度、施工质量与效率上都难以保证。1996 年~1997 年，国内开始从日本引进三轴水泥土搅拌机整套施工机械设备。在 1997 年至 1998 年一年多的时间，应用工程达 16 个，最大基坑开挖深度达 11.5m，促进了型钢水泥土搅拌墙在我国的进一步推广应用。

第三个发展阶段是从 1998 年至今，型钢水泥土搅拌墙施工工艺和施工机械逐步成熟，在我国沿海软土地区积累了比较丰富的经验。搅拌桩新的施工工艺和施工设备也开始出现，如：为了扩大型钢水泥土搅拌墙的应用深度，开发了加接钻杆施工工艺；为了加强三轴水泥土搅拌桩的均匀性和截水效果，TRD 工法等更为先进的施工机械和工艺也开始出现。

2. 三轴水泥土搅拌桩施工机械

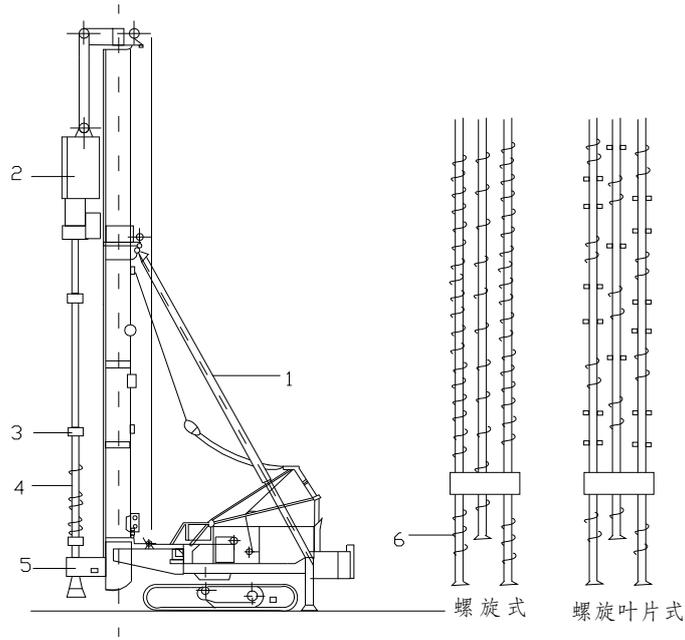
型钢水泥土搅拌墙施工应根据地质条件、作业环境与成桩深度选用不同形式或不同功率的三轴搅拌机，配套桩架的性能参数必须与三轴搅拌机的成桩深度和提升能力相匹配。型钢水泥土搅拌墙标准施工配置详见表 13-4 所示。

三轴搅拌机由多轴装置（减速器）和钻具组成（如图 13-14 所示），钻具包括：搅拌钻杆、钻杆接箍、搅拌翼和钻头。表 13-5、表 13-6 所示为三轴搅拌机和机架主要技术参数。三轴搅拌机有普通叶片式、螺旋叶片式或同时具有普通叶片和螺旋叶片的形式，搅拌转速也有高低两档，高速档（35~40r/min）和低档速（16r/min）。在黏性土中宜选用以叶片式为主的搅拌形式；在砂性土中宜选用螺旋叶片式为主的搅拌形式；在砂砾土中宜选用螺旋叶片搅拌形式。钻头的选用在软土地层选用鱼尾式平底钻头；在硬土地层选用定心螺旋尖式钻头（如图 13-15 所示）。图 13-16 为日本工法桩施工设备选定流程图。

型钢水泥土搅拌墙标准施工配置表

表 13-4

1	散装水泥运输车	2	30T 水泥筒仓
3	高压洗净机	4	2m ³ 电脑计量拌浆系统
5	6m ³ ~12m ³ 空压机	6	型钢堆场
7	50T 履带吊	8	DH 系列全液压履带式（步履式）桩架
9	三轴水泥土搅拌机	10	铺钢板
11	0.5m ³ 挖掘机	12	涌土堆场



1-桩架 2-动力头 3-连接装置 4-钻杆 5-支承架 6-钻头

图 13-14 三轴水泥土搅拌机及桩架

表 13-5 桩架主要技术参数

参数		型号		DH558-110M-2	DH658-135M-3	JB160	
立柱筒体直径 (mm)				Φ660.4	Φ711.2	Φ920	
最大立柱长度 (m)				33	33	39	
卷扬机	单绳拉力 (KN)			130 (第一层)	140 (第一层)	91.5 (第一层)	
	卷、放绳速度 (m/min)			32 (第一层)	30 (第一层)	0—26 (无级变速)	
行走方式				全液压履带式	全液压履带式	全液压步履式	
额定输出功率 (kw)		柴油发动机	132	柴油发动机	147	电动机	45
接地比压 (Mpa)				0.153	0.173	0.10	
外型尺寸 (M) (长×宽×高)				8.51×4.4×35.4	8.89×4.6×35.5	14×9.5×41	
桩机总质量 (T)				114	136	130	

表 13-6 三轴搅拌机主要技术参数

参数		型号		
		ZKD65-3	ZKD85-3	ZKD100-3
钻头直径 (mm)		Φ650	Φ850	Φ1000
钻杆根数 (根)		3	3	3
钻杆中心距 (mm)		450×450	600×600	750×750
钻进深度 (m)		30	30	30
主功率 (KW)		45×2	75×2 (90×2)	75×3
钻杆转速 (正、反) (r/min)		17.6-35	16-35	16-35

13.4.2 型钢水泥土搅拌墙施工顺序和工艺流程

1. 型钢水泥土搅拌墙施工顺序

三轴水泥土搅拌桩应采用套接一孔施工，施工过程如图 13-17 所示。为保证搅拌桩质量，在土性较差或者周边环境较复杂的工程，搅拌桩底部采用复搅施工。

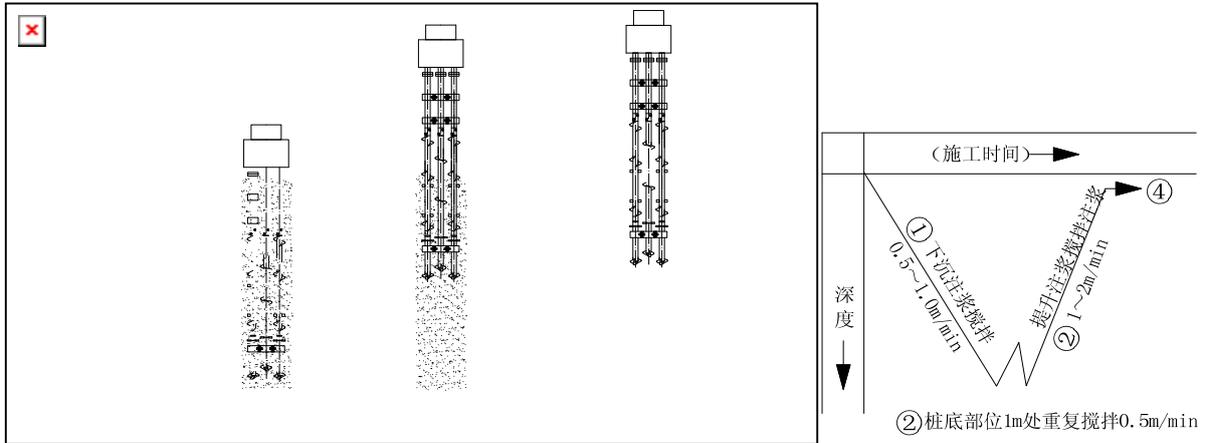


图 13-17 水泥土搅拌墙施工过程

搅拌桩的施工顺序一般分为以下三种：

(1) 跳槽式双孔全套打复搅式连接方式

跳槽式双孔全套打复搅式连接是常规情况下采用的连续方式，一般适用于 N 值 50 以下的土层。施工时先施工第一单元，然后施工第二单元。第三单元的 A 轴及 C 轴分别插入到第一单元的 C 轴孔及第二单元的 A 轴孔中，完全套接施工。依次类推，施工第四单元和套接的第五单元，形成连续的水泥土搅拌墙体，如图 13-18 (a) 所示。

(2) 单侧挤压式连接方式

单侧挤压式连接方式适用于 N 值 50 以下的土层，一般在施工受限制时采用，如：在围护墙体转角处，密插型钢或施工间断的情况下。施工顺序如图 13-18 (b) 所示，先施工第一单元，第二单元的 A 轴插入第一单元的 C 轴中，边孔套接施工，依次类推施工完成水泥土搅拌墙体。

(3) 先行钻孔套打方式

先行钻孔套打方式适用于 N 值 50 以上非常密实的土层，以及 N 值 50 以下，但混有 $\Phi 100\text{mm}$ 以上的卵石块的砂卵石层或软岩。施工时，用装备有大功率减速机的螺旋钻孔机，先行施工如图 13-18 (c)、13-18 (d) 所示 a1、a2、a3.....等孔，局部疏松和捣碎地层，然后用三轴水泥土搅拌机用跳槽式双孔全套打复搅连接方式或单侧挤压式连接方式施工完水泥土搅拌墙体。表 13-7 为推荐的搅拌桩直径与先行钻孔直径关系表。

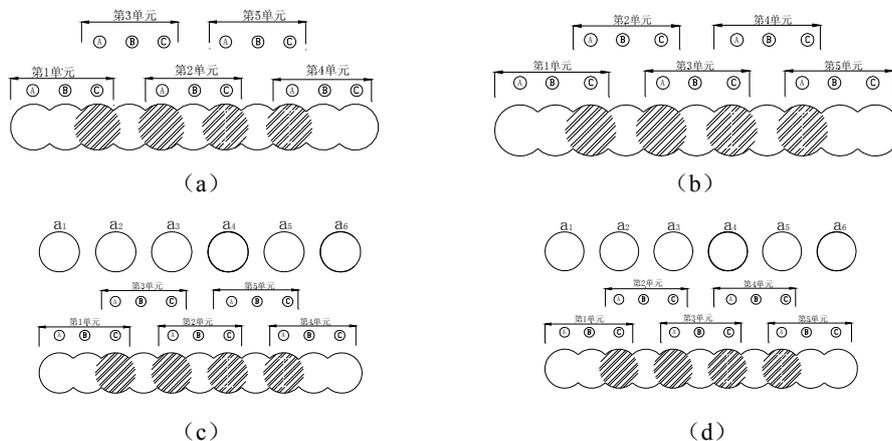


图 13-18 水泥土搅拌墙施工顺序

搅拌桩直径与先行钻孔直径关系表

表 13-7

搅拌桩直径 (mm)	650	850	1000
先行钻孔直径(mm)	400~650	500~850	700~1000

2. 型钢水泥土搅拌墙施工工艺流程

型钢水泥土搅拌墙的施工工艺是由三轴钻孔搅拌机，将一定深度范围内的地基土和由钻头处喷出的水泥浆液、压缩空气进行原位均匀搅拌，在各施工单元间采取套接一孔法施工，然后在水泥土未结硬之前插入 H 型钢，形成一道有一定强度和刚度，连续完整的地下连续墙复合挡土截水结构。施工工艺流程图如图 13-19 所示。

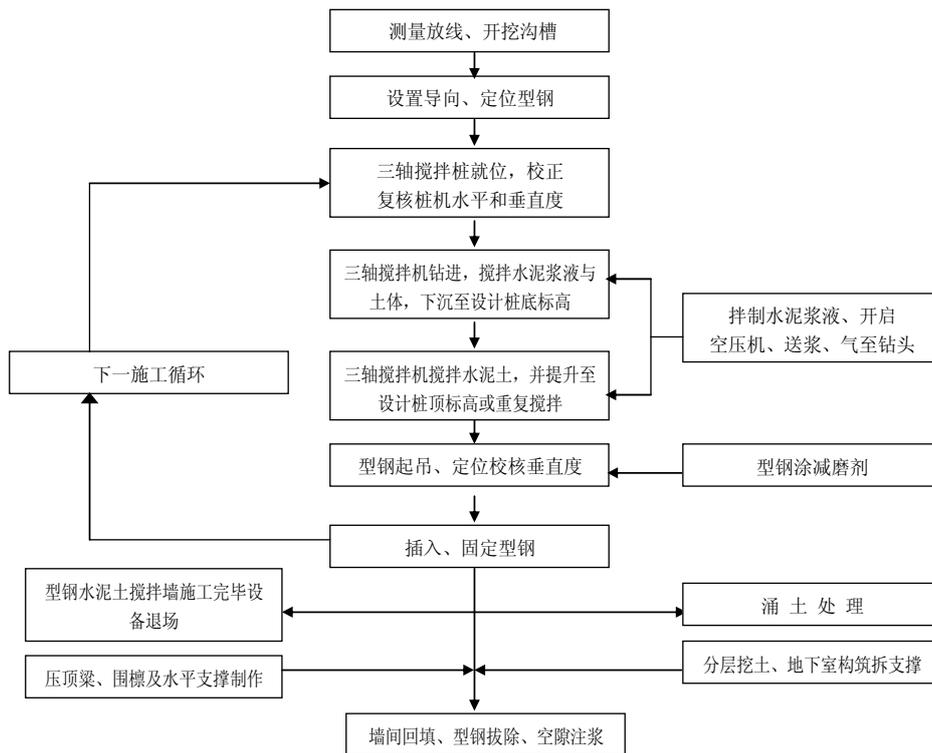


图 13-19 型钢水泥土搅拌墙施工工艺流程图

13.4.3 型钢水泥土搅拌墙施工要点

1. 试成桩

水泥土搅拌墙应按施工组织设计要求，进行试成桩，确定实际采用的各项技术参数、成桩工艺和施工步骤，包括：浆液的水灰比、下沉（提升）速度、浆泵的压送能力、每米桩长或每幅桩的注浆量。土性差异大的地层，要确定分层技术参数。水泥土搅拌墙的成桩工艺应保证水泥土强度和型钢较易插入，水泥土能够充分搅拌。搅拌机下沉和提升速度、水灰比和注浆量对水泥土搅拌桩的强度及截水性起着关键作用，施工时要严格控制。

每幅水泥土搅拌桩，单位桩长 (m) 内，水泥浆液的喷出量 $Q(L)$ 取决于三轴搅拌机钻头断面积、水泥掺入比、水灰比、搅拌机下沉（提升）速度，其关系如下：

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 r_s c_p w_c / v \quad (13-13)$$

式中： D ——三轴搅拌机钻头断面积 (m^2)；

r_s ——土的重度 (kN/m^3)；

c_p ——水泥掺入比 (%)；

w_c ——水灰比 (%)；

V ——三轴搅拌机下沉 (提升) 速度 (m/min)。

日本 SMW 工法桩协会根据不同土质的 N 值确定一幅桩下沉搅拌时间 T_1

$$T_1 = \gamma \times L_1 \quad (\text{min/幅})$$

式中: γ ——不同土质下沉 1m 喷浆搅拌时间 (min/m)；

L_1 ——一幅桩喷浆下沉搅拌长度。

不同土质下沉 1m 喷浆搅拌时间 (γ) (min/m)

表 13-8

下沉 1m 搅拌时间	砂质土、砂砾土	黏性土
γ	$(0.03N+1.5) \times 1.2$	$(0.05N+1.5) \times 1.2$

一幅桩提升搅拌时间 T_2

$$T_2 = 0.8 \times L_2 + 5 \quad (\text{min/幅}) \quad (13-14)$$

式中: L_2 ——一幅桩提升搅拌长度 (m)。

2. 工艺要求

根据施工工艺要求, 采用三轴搅拌机设备施工时, 应保证型钢水泥土搅拌墙连续性和接头的施工质量, 桩体搭接长度满足设计要求, 以达到截水作用。在无特殊情况下, 搅拌桩施工必须连续不间断地进行。如因特殊原因造成搅拌桩不能连续施工, 时间超过 24h 的, 必须在其接头处外侧采取补做搅拌桩或旋喷桩的技术措施, 以保证截水效果。对浅部不良地质现象应做事先处理, 以免中途停工延续工期及影响质量。施工中, 如遇地下障碍物、暗浜或其他勘察报告未述及的不良地质现象, 应及时采取相应的处理措施。

3. 桩机就位、校正

桩机移位结束后, 应认真检查定位情况并及时纠正, 保持桩机底盘的水平和立柱导向架的垂直, 并调整桩架垂直度偏差小于 1/250, 具体做法是在桩架上焊接一半径为 4cm 的铁圈, 10m 高处悬挂一铅锤, 利用经纬仪校直钻杆垂直度, 使铅锤正好通过铁圈中心, 每次施工前必须适当调节钻杆, 使铅锤位于铁圈内, 即把钻杆垂直度误差控制在 0.4% 内, 桩位偏差不得大于 50mm。螺旋钻头及螺旋钻杆的直径应符合设计要求。

4. 三轴搅拌机钻杆下沉 (提升) 及注浆控制

三轴搅拌机就位后, 主轴正转喷浆搅拌下沉, 反转喷浆复搅提升, 完成一组搅拌桩的施工。对于不易匀速钻进下沉的地层, 可增加搅拌次数, 完成一组搅拌桩的施工, 下沉速度应保持在 0.5~1.0m/min, 提升速度应保持在 1.0~2.0m/min 范围内, 在桩底部分适当持续搅拌注浆, 并尽可能做到匀速下沉和匀速提升, 使水泥浆和原地基土充分搅拌, 具体适用的速度值应根据地层的可钻性、水灰比、注浆泵的工作流量、成桩工艺计算确定。

注浆泵流量控制应与三轴搅拌机下沉 (提升) 速度相匹配。一般下沉时喷浆量控制在每幅桩总浆量的 70%~80%, 提升时喷浆量控制在 20%~30%, 确保每幅桩体的用浆量。提升搅拌时喷浆对可能产生的水泥土体空隙进行充填, 对于饱和疏松的土体具有特别意义。三轴搅拌机采用二轴注浆, 中间轴注压缩空气进行辅助成桩时应考虑压缩空气对水泥土强度的影响。施工时如因故停浆, 应在恢复压浆前, 将搅拌机提升或下沉 0.5m 后, 注浆搅拌施工, 确保搅拌墙连续性。

5. 施工工艺参数的控制

严格按设计要求控制配制浆液的水灰比及水泥掺入量, 水泥浆液的配合比与拌浆质量可用比重计检测。控制水泥进货数量及质量, 控制每桶浆所需用的水泥量, 并由专人做记录。

水泥土搅拌过程中置换涌土的数量是判断土层性状和调整施工参数的重要标志。对于黏性土特别是标贯 N 值和内聚力高的地层, 土体遇水湿胀、置换涌土多、螺旋钻头易形成泥塞, 不易匀速钻进下沉, 此时可调整搅拌翼的型式, 增加下沉、提升复搅次数, 适当增大送气量, 水灰比控制在 1.5~

2.0；对于透水性强的砂土地层，土体湿胀性小，置换涌土少；此时水灰比宜调整在 1.2~1.5，控制下沉和提升速度和送气量，必要时在水泥浆液中掺 5%左右的膨润土，堵塞漏失通道，保持孔壁稳定，又可以用膨润土的保水性，增加水泥土的变形能力，提高墙体抗渗性。

日本 SMW 协会提供的不同土质三轴搅拌机置换涌土发生率 表 13-9

土 质	置换涌土发生率 (%)
砾质土	60
砂质土	70
粉土	90
黏性土 (含砂质黏土、粉质黏土、粉土)	90~100
固结黏土 (固结粉土)	比黏性土增加 20~25

6. 减少三轴搅拌桩施工对城市周围环境，特别是地铁运营影响的措施

- (1) 控制日成桩数量，并采用跳打，即隔五打一，以减少对地铁隧道的叠加变形。
- (2) 密切与地铁监护部门和监测单位的配合，根据变形情况，按排或调整施工计划。
- (3) 合理的调整水灰比，控制下沉速度和注浆泵换档时间。
- (4) 施工前应对施工场地的地层情况有比较细仔的了解，针对不同地层采取不同的工艺规程和成桩参数。尽可能减少提升搅拌时，孔内产生负压。造成对周边环境的沉降。

13.4.4 型钢插入和拔除施工

1. 型钢的表面处理

- (1) 型钢表面应进行清灰除锈，并在干燥条件下，涂抹经过加热融化的减摩剂。
- (2) 浇注压顶圈梁时，埋设在圈梁中的型钢部分必须用油毡等材料将其与混凝土隔开，以利型钢的起拔回收。

2. 型钢插入

- (1) 型钢的插入宜在搅拌桩施工结束后 30min 内进行，插入前必须检查其直线度，接头焊缝质量，并确保满足设计要求；
- (2) 型钢的插入必须采用牢固的定位导向架，用吊车起吊型钢，必要时可采用经纬仪校核型钢插入时的垂直度，型钢插入到位后，用悬挂物件控制型钢顶标高；
- (3) 型钢插入宜依靠自重插入，也可借助带有液压钳的振动锤等辅助手段下沉到位，严禁采用多次重复起吊型钢，并松钩下落的插入方法，若采用振动锤下沉工艺时，不得影响周围环境；
- (4) 当型钢插入到设计标高时，用吊筋将型钢固定，溢出的水泥土必须进行处理，控制到一定标高以便进行下道工序施工；
- (5) 待水泥土搅拌桩硬化到一定程度后，将吊筋与槽沟定位型钢撤除。

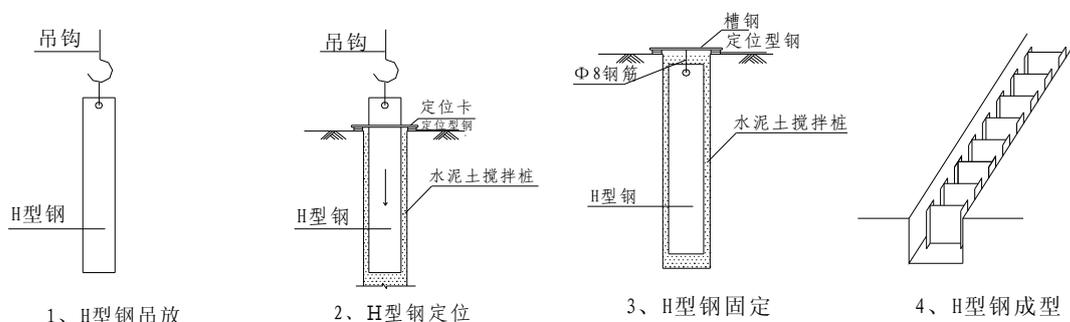


图 13-20 定位型钢示意图

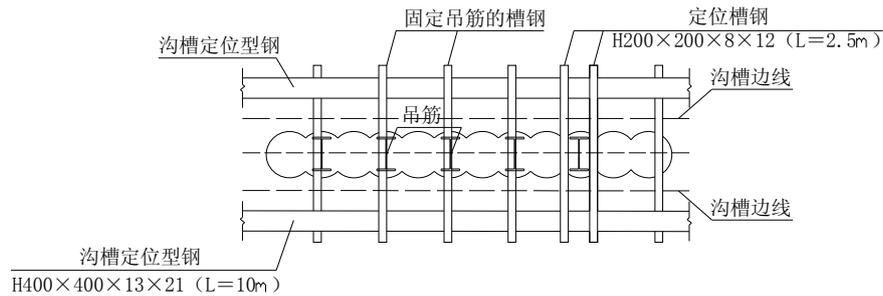


图 13-21 内插 H 型钢定位示意图

3. 型钢拔除

(1) 型钢回收应在主体地下结构施工完成，地下室外墙与搅拌墙之间回填密实后方可进行，在拆除支撑和腰梁时应将型钢表面留有的腰梁限位或支撑抗滑构件，电焊等清除干净。

(2) 型钢拔除通过液压千斤顶配以吊车进行，对于吊车无法够到的部位由塔吊配合吊运或采取其他措施。液压千斤顶顶升原理：通过专用液压夹具夹紧型钢腹板，构成顶升反力支座，咬合型钢受力后，使夹具与型钢一体共同提升。2 只 200t 千斤顶分别放置在型钢两侧，座落在混凝土压冠梁上，型钢套在液压夹具内，两边液压夹板咬合，顶紧型钢腹板。顶升初始阶段由于型钢出露短，液压夹具不能使用，则采用专用丁字形钢结构构件支座顶升，见图 13-22。型钢端部中心的 $\Phi 100\text{mm}$ 圆孔通过钢销与丁字形钢结构构件支座孔套接，受力、传力。2 只 200t 千斤顶左右两侧同步平衡顶升丁字形钢结构构件支座，千斤顶到位后，调换另一提升孔继续重复顶升，直到能使用液压夹具为止，见图 13-23。型钢拔除过程中，逐渐升高的型钢用吊车跟踪提升，直至全部拔除，驳运离现场。



图 13-22 专用顶升支座



图 13-23 液压顶升支座

(3) 型钢拔除回收时，应根据环境保护要求可采用跳拔，限制日拔除型钢数量等措施，并及时对型钢拔出后形成的空隙注浆充填。

13.5 型钢水泥土搅拌墙质量控制与措施

13.5.1 型钢水泥土搅拌墙施工质量控制措施

1. 搅拌桩施工中的质量控制措施

(1) 搅拌桩桩机对位后应复测桩位，如定位架有误或偏位必须调整桩机重新就位，只有桩位对中准确无误，且桩机保持垂直度偏差 $\leq 1/250$ ，方可进行搅拌桩施工。

(2) 下搅与上提喷浆时的搅拌效果与钻头的钻速有关，应确保土体任何一点均能经过 20 次以上的搅拌。下搅与上提喷浆的速度太快，土体任何一点搅拌的次数低于 20 次，且喷浆量达不到要求，喷搅效果差，将影响成桩质量；下搅与上提喷浆的钻速低，喷浆量达到或超过要求，水泥浆与土体搅拌效果好，成桩质量好，但成桩时间长，不经济。下搅喷浆的速度应控制在 $< 1\text{m}/\text{min}$ 以内，上提

喷浆的速度应控制在 $<2\text{m}/\text{min}$ 以内，成桩质量较好且经济。发生喷浆中断再喷浆时（中断时间不超 1h），要求上提喷浆必须将钻头放至原喷浆位置以下 0.5m 然后再上提喷浆，继续施工；下搅喷浆时应提至原喷浆位置以上 0.5m，然后再下搅喷浆，继续施工。

(3) 喷浆量的控制。控制每根桩的水泥浆用量，确保搅拌桩桩身质量。进行搅拌桩施工时，下搅喷浆搅拌与提升喷浆搅拌一次后，重叠搭接的桩再下搅和提升喷浆一次，即每次都有 2 根桩须重复下搅和提升喷浆，注浆时的压力由水泥浆输送量控制，且泵送必须连续进行，不得中断送浆。

(4) 其它技术措施：1) 制备的水泥浆不得离析，配制水泥浆停置超过 2h，应降强度等级使用；2) 水泥浆的搅拌时间不能少于 3min，如果时间较短，水泥浆搅拌不均匀，注入后将影响搅拌桩的成桩质量；3) 不论何种原因重叠搭接施工间隔超过 24h，应进行补桩处理；4) 提升喷浆到地面发现钻头被泥包住时，必须下搅上提，用高速甩掉黏泥，避免出现空心搅拌桩；5) 当搅拌桩施工中喷浆未到设计桩顶面（或桩底）浆池内供注浆泵的水泥浆已没有，或浆池内供注浆泵的水泥浆泵出较少，对这些将直接影响搅拌桩成桩质量的问题，施工单位必须找出原因并及时补救。

2. 型钢施工质量控制措施

(1) 对型钢质量的要求：1) 进场的型钢应检查其平整度，需焊接的型钢应检查 2 根型钢是否同心，型钢长度是否符合设计要求，加工是否按图纸要求等；2) 型钢本体的处理。插入搅拌桩内的型钢应进行除锈和清污处理，使型钢表面较光滑，以减少型钢与搅拌桩的摩阻力；3) 减摩剂的配制。现场常用石蜡和柴油混合加温配制减摩剂，施工前根据不同的室外温度，将石蜡和柴油按不同比例进行几组配制试验，从中确定出满足要求的配比；采用其它材料配制的减摩剂，不管配制材料如何，都应确保地下室施工完毕后，型钢能顺利从搅拌桩内拔出；4) 减摩剂的使用。型钢进行除锈和清污处理后，应在其表面均匀涂刷减摩剂，厚度以 2mm 为宜；遇雨、雪天必须用抹布擦干型钢表面，并均匀涂刷减摩剂。型钢插入搅拌桩前还应检查所涂减摩剂是否已脱落、开裂，发现有脱落、开裂的应将型钢表面减摩剂铲除清理干净后，重新涂刷减摩剂于型钢表面。涂刷减摩剂的型钢放置在场地的枕木上。

(2) 型钢的插入：1) 设置定位架。为确保型钢插入搅拌桩居中和垂直，可制作型钢定位架，定位架应按现场和型钢有关尺寸制作和放置并固定好，不允许在型钢插入搅拌桩过程中出现位移；2) 插入型钢。搅拌桩施工完毕，吊机起吊型钢，型钢吊起应用经纬仪调整其垂直度，达到垂直度要求后，将垂直的型钢底部中心对正插入中心，沿定位架徐徐垂直插入搅拌桩内，当插入搅拌桩内 1/3 后才可以快放，直至放至设计标高位置；如不能下放到位，可借助挖掘机或振动器将型钢送到位，此时必须确保型钢居中垂直，并利用水准仪控制型钢的顶部标高；插入搅拌桩内的型钢施工必须在成桩后 4h 内完成，否则型钢插入搅拌桩内不仅困难，还会影响搅拌桩桩身质量。浇注压冠梁时，应将埋设在圈梁中的型钢用泡沫塑料板将其与混凝土隔开，以利于型钢的起拔回收。

(3) 对型钢拔出时的要求。待地下主体结构完成并达到设计强度后，可起拔回收型钢。拔起型钢时应垂直拔出，不得继续斜向拔起型钢。拔出后的型钢应逐根检查其平整度和垂直度，不合要求的型钢，经调直处理仍不符合要求的，不得使用，否则会增加施工成本。拔出型钢后搅拌桩内的空隙，应用水泥砂浆自流充填或充填黄砂等其它物质。

13.5.2 改善搅拌桩强度的技术措施

1. 多次搅拌

在深层搅拌法施工中，为了使水泥浆液均匀地分布到土颗粒中，可以对土体进行多次搅拌。对搅拌头下沉和上升的速度应加以控制。在搅拌头下沉进程中，遇较硬土层时候，可以降低搅拌头下沉的速度，以便更好地切削土体，使切片更薄，以利于水泥与土拌合。遇较软土层时，可以将调速电动机调到高速，加快搅拌头搅拌速度，并进行多次复搅，增加土颗粒的比表面积，使水泥与土充分接触，提高桩体强度和抗弯刚度。

2. 加压喷浆

加压喷浆搅法施工可以提高水泥浆喷射压力，使水泥与土充分搅拌，从而提高桩体强度和单桩承载力。搅拌头在下沉和上提过程中进行加压喷浆处理，可以使浆液与土体充分接触，增强了土体搅拌的均匀程度，从而可以提高水泥土搅拌桩的强度。

3. 掺加外加剂

对高含水量或富含有机质的软黏土，选用外加混合固化剂，促进水泥水化反应，可以使水化物生成量增多，水泥土搅拌桩孔隙减小，强度提高，同时也有助于提高水泥土搅拌桩的抗侵蚀特性。常用的外加剂有粉煤灰、石膏、减水剂、缓凝剂等。水泥浆中的外加剂除了掺入一定量的减水剂、缓凝剂以外，还应掺入一定量的膨润土，这样可以利用膨润土的保水性增加水泥土搅拌桩的抗变形能力，防止墙体变形后过早开裂而影响其抗渗性。

4. 基坑开挖时对水泥土搅拌桩的保护

由于水泥土搅拌桩不仅有截水作用，而且更重要的是对型钢的侧向移动和扭转有约束作用，以保证型钢的稳定性，所以在基坑开挖过程中，必须注意对型钢水泥土搅拌墙复合围护结构中水泥土搅拌桩的保护，尤其是对型钢间的水泥土搅拌桩禁止任何的超挖与损害，以确保水泥土搅拌桩对型钢的有效约束，从而保持围护结构整体稳定性。

13.5.3 型钢水泥土搅拌墙质量检查与验收

1. 型钢水泥土搅拌墙质量检查与验收分为成墙期监控，成墙验收和基坑开挖期质量检查三个阶段。

2. 型钢水泥土搅拌墙成墙期监控内容包括：验收施工机械性能、材料质量、试成桩资料以及逐根检查搅拌桩和型钢的定位、长度、标高、垂直度等；严格查验搅拌桩的水灰比、水泥掺量、下沉与提升速度、搅拌桩施工间歇时间以及型钢的规格、型材质量、拼接焊缝质量等是否满足设计和施工工艺要求。表 13-10、13-11 为水泥土搅拌桩和型钢的检验标准。

3. 型钢水泥土搅拌墙的成墙验收宜按施工段划分若干检验批，除桩体强度检验项目外，每检验批至少抽查桩数的 20%。

4. 基坑开挖期间应着重检查开挖面墙体的质量以及渗漏水情况，如不符合设计要求应即时采取补救措施。

水泥土搅拌桩成桩质量检验标准

表 13-10

序号	检查项目	允许偏差或允许值	检查频率	检查方法
1	桩底标高 (mm)	+100, -50	每根	测钻杆长度
2	桩位偏差 (mm)	50	每根	用钢尺量
3	桩径 (mm)	±10	每根	用钢尺量钻头
4	施工间歇	<24 小时	每根	查施工记录

型钢插入允许偏差

表 13-11

序号	检查项目	允许偏差或允许值	检查数量	检查方法
1	型钢长度 (mm)	±10	每根	用钢尺量
2	型钢顶标高 (mm)	±50	每根	水准仪测量
3	型钢平面位置 (mm)	50 (平行于基坑边线)	每根	用钢尺量
		10 (垂直于基坑边线)	每根	用钢尺量
4	形心转角 φ (°)	3°	每根	量角器测量

13.5.3 水泥土搅拌桩的强度检测

1. 目前工程中对水泥土搅拌桩强度检测的一般方法

目前水泥土搅拌桩强度检测方法可分为两类，即水泥土试块强度方法和原位测试方法。水泥土试块强度方法包括水泥土强度室内配比试验、取浆试块强度试验、钻芯试块强度试验三种检测方法，

原位测试方法主要包括标准贯入试验（SPT）、圆锥动力触探试验（DPT）和静力触探试验（CPT）。

(1) 水泥土强度室内配比试验

水泥土强度室内配比试验是检测水泥土强度的一种常规方法，是在搅拌桩施工前，在施工现场取原状土，按照施工参数配比，做成试块养护，28天后进行单轴抗压强度试验。水泥土强度室内配比试验不能真实的反映场地土层情况，施工参数，水泥土养护条件和实验室差别较大，不能真实地反映桩身全断面在土中（水下）的强度值。

目前水泥土的室内物理、力学试验尚未形成统一的操作规程，一般是利用现有的土工试验仪器和砂浆、混凝土试验仪器，按照土工、砂浆（或混凝土）的试验操作规程进行试验。试样制备所用的土料应采用原状土样（不应采用风干土样）。水泥土试块宜取边长为 70.7mm 的立方体。为便于与钻取桩芯强度试验等作相对比，水泥土试块也可制成直径 100mm、高径比 1:1 的圆柱体。

(2) 取浆试块强度试验

在搅拌桩施工过程中采取浆液进行浆液试块强度试验，是在搅拌桩刚搅拌完成、水泥土处于流动状态时，及时沿桩长范围进行取样，采用浸水养护一定龄期后，通过单轴无侧限抗压强度试验，获取试块的强度试验值。

浆液试块强度试验应采用专用的取浆装置获取搅拌桩一定深度处的浆液，严禁取用桩顶泛浆和搅拌头带出浆液。取得的水泥土混合浆液应制备于专用的封闭养护罐中浸水养护，浆液灌装前宜在养护罐内壁涂抹薄层黄油以便于将来脱模，养护温度宜保持与取样点的土层温度相近。养护罐的脱模尺寸及试验样块制备、养护龄期达到后进行无侧限抗压强度试验等，可参照水泥土强度室内配比试验的方法和要求进行。

浆液试块强度试验采取搅拌桩一定深度处尚未凝固的水泥土浆液，主要目的是为了克服钻孔取芯强度检测过程中不可避免的强度损失，使强度试验更具可操作性和合理性。目前日本一般将取样器固定于型钢上，并将型钢插入刚刚搅拌完成的搅拌桩内获取浆液。

图 13-24 所示为现代设计集团上海申元岩土公司研制的一种专用取样设备，该装置原理简单，整个过程操作也较方便。取样装置附着于三轴搅拌桩机的搅拌头并送达取样点指定标高。送达过程由拉紧牵引绳 B 使得上下盖板打开，此时取样器处于敞开状态，保证水泥土浆液充分灌入，就位后由牵引绳 A 拉动控制摆杆关闭上下盖板，封闭取样罐，使浆液密封于取样罐中，取样装置随搅拌头提升至地面后可取出取样罐，得到浆液。

浆液试块强度试验对施工中的搅拌桩没有损伤，成本较低，操作过程也较简便，且试块质量较好，试验结果离散性小。目前在日本普遍采用此方法（钻取桩芯强度试验方法一般很少用），作为搅拌桩强度检验和施工质量控制的手段。随着各地型钢水泥土搅拌墙的广泛应用和浆液取样装置的完善普及，宜加以推广发展。

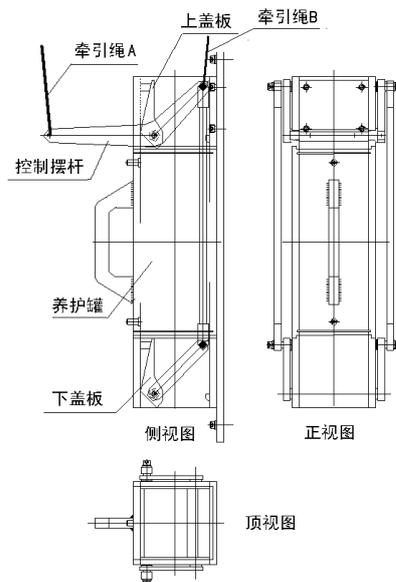


图 13-24 取浆液设备图

(3) 取芯

取芯检测是一种直观的水泥土搅拌桩施工质量检测方法。该方法在搅拌桩施工后达到一定龄期后，通过地质钻机，连续钻取全桩长范围内的桩芯，并对取样点芯样进行无侧限抗压强度试验。

一般认为钻取桩芯强度试验是一种比较可靠的桩身强度检验方法，但该方法缺点也较明显，主要是由于钻取桩芯过程和试验中总会在一定程度上损伤搅拌桩；取芯过程中一般采用水冲法成孔，由于桩的不均匀性，水泥土易产生损伤破碎；钻孔取芯完成后，对芯样的处置方式也会对试验结果产生影响，如芯样暴露在空气中会导致水分的流失，取芯后制作试块的过程中会产生较大扰动等。由于以上原因导致一般通过钻取桩芯强度试验得到的搅拌桩强度值偏低，特别是较目前一些规范和手册上的要求值低。

钻取桩芯强度试验宜采用扰动较小的取土设备来获取芯样，如采用双管单动取样器，且宜聘请有经验的专业取芯队伍，严格按照操作规定取样，钻取芯样应立即密封并及时进行强度试验。

(4) 原位测试方法

水泥土搅拌桩的原位检测方法主要包括静力触探试验、标准贯入试验、动力触探试验等方法。

1) 标准贯入试验 (SPT)

标准贯入试验 (SPT) 是用质量为 63.5kg 的穿心锤，以 76cm 的落距，将标准规格的贯入器自钻孔底部预打 15cm，记录再打入 30cm 的锤击数，判定土的力学特性。

2) 圆锥动力触探试验 (DPT)

圆锥动力触探试验 (DPT) 是利用一定质量的重锤，将与探杆相连接的标准规格的探头打入土中，根据探头贯入土中一定距离所需的锤击数，判定土的力学特性，具有勘探与测试双重功能。根据锤击能量，动力触探常常分为轻型、重型和超重型三种。

3) 静力触探试验 (CPT)

静力触探试验 (CPT) 是岩土工程勘察中使用最为广泛的一个原位测试项目。其基本原理就是用准静力将一个内部装有传感器的标准规格探头匀速压入土中，由于地层中各种土的状态或密实度不同，探头所受的阻力不一样，传感器将这种大小不同的贯入阻力转换成电信号，借助电缆传送到记录仪表并记录下来，通过贯入阻力与土的工程地质特性之间的定性关系和统计相关关系来获取岩土工程勘察相关参数。

静力触探试验轻便、快捷，能较好地检测水泥土桩身强度沿深度的变化，但静力触探试验最大的问题是探头因遇到搅拌桩内的硬块和因探杆刚度较小而易发生探杆倾斜。因此，确保探杆的垂直度很重要，建议试验时采用杆径较大的探杆，试验过程中也可采用测斜探头来控制探杆的垂直度。

标准贯入试验和动力触探试验在试验仪器、工作原理方面相似，都是以锤击数作为水泥土搅拌桩强度的评判标准。标准贯入试验除了能较好地检测水泥土桩身强度外，尚能取出搅拌桩芯样，直观地鉴别水泥土桩身的均匀性。

搅拌桩施工完成后一定龄期内进行现场原位测试，是一种较方便和直观的检测方法，能够更直接地反映水泥土搅拌桩的桩身质量和强度性能，但目前该方法工程应用经验还较少，需要进一步积累资料。

2. 目前强度检测中存在的问题

型钢水泥土搅拌墙基坑围护结构实际应用已经有 10 多年历史，上海市 2005 年编制了专门的技术规程，国家行业标准型钢水泥土搅拌墙技术规程也在 2009 年编制完成，而涉及到水泥土搅拌桩的规范、著作更多。但对三轴水泥土搅拌桩的强度指标和检测方法的研究和认识，仍很缺乏，在一定程度上制约了这一技术的推广应用。

相比国外特别是日本，目前国内对水泥土搅拌桩的施工过程质量控制还比较薄弱，如为保证施工时墙体的垂直度，从而使墙体有较好的完整性，需校验钻机的纵横垂直度；带计重装置的每方注浆量是保证墙体完整性和施工质量的重要的施工过程控制参数，需要在施工中加强检测；以上这些还没有有效地建立起来。因此，为了保证水泥土搅拌桩的施工质量和工程安全，对其强度进行检测，是必不可少的一个重要手段。

搅拌桩强度检测目前主要存在如下问题：

(1) 首先目前工程中对搅拌桩强度的争议较大，各种规范的要求也不统一，而工程实践中通过钻取桩芯强度试验得到的搅拌桩强度值普遍较低，特别是比一般规范、手册中要求的数值要低。

(2) 其次国内尚无专门的水泥土搅拌桩检测技术规范，虽然相关规范对搅拌桩的强度及检测都有一些相应的要求，但这些要求并不统一、系统和全面。

(3) 在搅拌桩的强度试验中，几种方法都存在不同程度的缺陷，浆液试块强度试验不能真实地反映桩身全断面在场地内一定深度土层中的养护条件；钻孔取芯对芯样有一定破坏，检测出的无侧限抗压强度值离散性较大，且数值偏低；原位试验目前还缺乏大量的对比数据建立搅拌桩强度与试验值之间的关系。

3. 搅拌桩强度检测试验分析

为分析研究搅拌桩的强度及检测方法，配合国家行业标准型钢水泥土搅拌墙技术规程的编制，专门组织力量，在上海、天津、武汉、宁波、苏州等地，共进行了 6 个场地的水泥土搅拌桩强度试验，每个场地均专门打设 5 根三轴水泥土搅拌桩，采取套接一孔施工工艺，不插型钢，深度一般在 15m~25m 之间，桩径为 $\phi 850$ 或 $\phi 1000$ 。在专门施工的三轴水泥土搅拌桩内分别进行了 7 天、14 天、28 天龄期条件下的钻取桩芯强度试验、多种现场原位试验（静力触探试验、标准贯入试验、重型动力触探试验等），部分试验场地进行了在搅拌施工过程中采取浆液进行浆液试块强度试验。以下从 3 个方面对本次试验结果进行介绍。

(1) 浆液试块强度试验

配合本次规程编制，在上海某大厦工程场地专门进行了浆液试块强度和钻取桩芯试块强度的对比试验，表 13-12 为取芯与取浆液单轴抗压强度对比。

水泥土取芯与取浆液单轴抗压强度对比 表 13-12

水泥土龄期	取浆液强度平均值 (MPa)	取芯强度平均值 (MPa)	取浆强度值/取芯强度值
7 天	0.19	0.12	1.6
14 天	0.34	0.21	1.6
28 天	0.54	0.41	1.3

从试验结果看，28 天取浆试块强度平均值为 0.54MPa，同时进行的 28 天取芯试块强度平均值为 0.41 MPa，取浆强度值与取芯强度值的比值在 1.3~1.6 之间。可见，由于取芯过程中对芯样的损伤而使试验强度值偏低。上海的“地基处理技术规范”与“基坑工程设计规程”的条文说明中允许对双轴搅拌桩的取芯强度试验值乘以补偿系数（约 1.1~1.4）。综合分析，如考虑取芯过程中对芯样的损伤，同时又适当考虑安全储备，对取芯试块强度乘以系数 1.2~1.3 作为水泥土搅拌桩的强度是合适的。

取浆强度试验结果相对于取芯强度试验结果比较均匀、离散性小，更加接近于搅拌桩的实际强度。由于取浆试块强度检测方法是专用设备获取搅拌桩施工后一定深度且尚未凝固的水泥土浆液，不会对搅拌桩桩身的强度和截水性能带来损伤，是值得推广的一种方法。

取浆试验现场操作方便，但取浆试验需要在浆液获取后进行养护，养护条件可能与搅拌桩现场条件存在一定差别，需要进一步规范和制定相应的标准。

(2) 钻取桩芯强度试验

在上海、天津、宁波、苏州、武汉等地共 6 个工程进行了现场取芯试验，其中武汉地区试验由于取芯过程中芯样破坏较为严重，芯样基本不成形，未纳入分析统计。表 13-13 为各地水泥土搅拌桩钻取桩芯试块单轴抗压强度一览表。

各地水泥土搅拌桩钻取桩芯试块单轴抗压强度一览表 表 13-13

背景工程	钻芯试块抗压强度平均值(MPa)		
	7 天	14 天	28 天
上海某隧道工程	0.13	/	0.44
上海某大厦工程	0.12	0.21	0.41
苏州某工程	0.17	0.41	0.78
天津某工程	0.48	4.33	6.4
宁波某工程	0.06	/	0.49

由表 13-12 可见，各地水泥土搅拌桩 28 天取芯强度值为 0.41 MPa~6.4MPa，试验结果离散性较大，但一般强度值都在 0.40MPa 以上。如果考虑试验误差，去掉试验值最高的天津某工程试验结果

和最低的上海市某大厦工程试验结果，28 天强度平均值为 0.57 MPa。搅拌桩强度较目前一般规范和手册上要求的强度值要低。考虑到日本搅拌桩 28 天强度控制值采用 0.5MPa，将目前普遍要求的 28 天无侧限抗压强度值适当降低是合适的。

通过试验发现，水泥土强度不但与龄期有关，还与土层性质有关，在同等条件下，粉质粘土搅拌的水泥土试块强度较粉土、粉砂搅拌的水泥土试块强度低。搅拌桩套打区域与非套打区域的强度未检测到有明显差异。

(3) 现场原位试验

表 13-14、表 13-15、表 13-16 分别为在上海、天津、宁波、苏州、武汉等地工程进行的静力触探、标准贯入和重型触探三种现场原位试验结果的统计表。

各地水泥土桩静力触探比贯入阻力 Ps 平均值一览表 表 13-14

背景工程	静力触探比贯入阻力 Ps 平均值(MPa)		
	7 天	14 天	28 天
上海某隧道工程	1.60	/	4.25
上海某大厦工程	2.00	3.00	3.90
苏州某工程	2.68	4.78	/
武汉某工程	2.84	/	/

各地水泥土桩标准贯入击数平均值一览表 表 13-15

背景工程	标准贯入击数平均值(击)		
	7 天	14 天	28 天
上海某隧道工程	7.9	/	12.7
上海某大厦工程	5.7	10.4	13.4
苏州某工程	18.7	26.2	/
武汉某工程	11.5	/	18.0
宁波某工程	14.5	/	16.2

各地水泥土桩重型动力触探击数平均值一览表 表 13-16

背景工程	重型动力触探击数平均值(击)		
	7 天	14 天	28 天
上海某隧道工程	6	/	10
苏州某工程	9.4	11.9	/
武汉某工程	6.6	/	9.5
宁波某工程	5.3	/	7.8

对搅拌桩进行的现场原位试验结果总结如下：

静力触探试验轻便、快捷，能较直观地反映水泥土搅拌桩桩体的成桩质量和强度特性。标准贯入试验和重型动力触探试验在试验仪器、工作原理方面相似，都是以锤击数作为水泥土搅拌桩强度的评判标准。静力触探、标准贯入和重型动力触探三种原位试验都能比较直观的反应搅拌桩的成桩质量和强度特性。从试验过程和试验结果看，在上海等软土地区可以进行水泥土搅拌桩 7 天、14 天和 28 天龄期的静力触探试验、标准贯入试验和重型动力触探试验。相对来说，标准贯入试验和重型动力触探试验人为因素影响较多一些，误差相对较大，试验精度稍差一些。

基于在上海、天津、苏州、武汉、宁波等地进行的静力触探试验、标准贯入试验和重型动力触探试验发现，随着搅拌桩龄期的增加，静力触探比贯入阻力、标准贯入试验和重型动力触探试验的锤击数都相应增加，规律性较好，这三种方法都可以作为搅拌桩强度检测的辅助方法。

目前静力触探、标准贯入和重型动力触探三种原位试验工程应用经验还较少，尚未建立原位试验结果与搅拌桩强度值之间的对应关系，需要进一步积累资料。重型动力触探试验和标准贯入试验机理基本相同，二者亦能较好地检测水泥土桩身的强度，但精度不高。重要工程建议可以结合这两者试验方法进行补充强度检测。

13.6 型钢水泥土搅拌墙新发展

13.6.1 型钢水泥土搅拌墙坚硬砂砾土等复杂地层和超过 35m 深墙施工

近些以来，随着型钢水泥土搅拌墙施工工艺逐步完善，作为基坑围护、截水帷幕和土体加固工

程得到了广泛应用，但也出现了在坚硬砂砾土等复杂地层中施工效率低，超过 30m 以上深桩难以施工等问题。根据日本 SMW 协会相关技术资料和上海地区的工程实践经验，可以采取以下措施：

1. 在坚硬砂砾土层施工

采用预钻孔后成墙的方式，该方式适用于 N 值在 50 以上非常密实的土质和 N 值在 50 以下但有粒径 100mm 以上的砂砾土质。在进行水泥土搅拌墙施工前，预先用装备有强力减速机的单轴螺旋钻孔机隔孔先打出 1.3.5...孔，使地基有一定的松动并将石块等粉碎，然后再用三轴水泥土搅拌机将 1.2.3.4.5....孔连接起来形成水泥搅拌墙体。

2. 在直径大于 500mm 的漂石、块石地层的施工

采用直径 $\Phi 800\text{mm} \sim \Phi 1500\text{mm}$ 全套管跟管钻进，冲抓锥抓取直径超过 500mm 的漂、块石，在钻达预定孔深后，回填素土，依次构筑素土墙，再用三轴搅拌机作业形成水泥土搅拌桩墙体。

3. 超过 30m 深墙施工

由于受到搅拌机桩架高度的限制，目前常规三轴搅拌机最大施工深度为 30m。如果三轴水泥土搅拌桩设计深度超过 30m，可以采用加接钻杆的工艺实现。当桩架高度 18m~30m 时，通过加接 2~3 根钻杆，搅拌墙深度可施工至 35m~45m，施工过程见图 13-25。表 13-17 为日本超深水水泥土搅拌墙施工采用的钻杆组合表，施工采用 850mm 三轴水泥土搅拌机，臂杆 24m，钻孔机为 MAC-240 型，主机为 DH608-120M，施工形式为臂杆可回转方式。

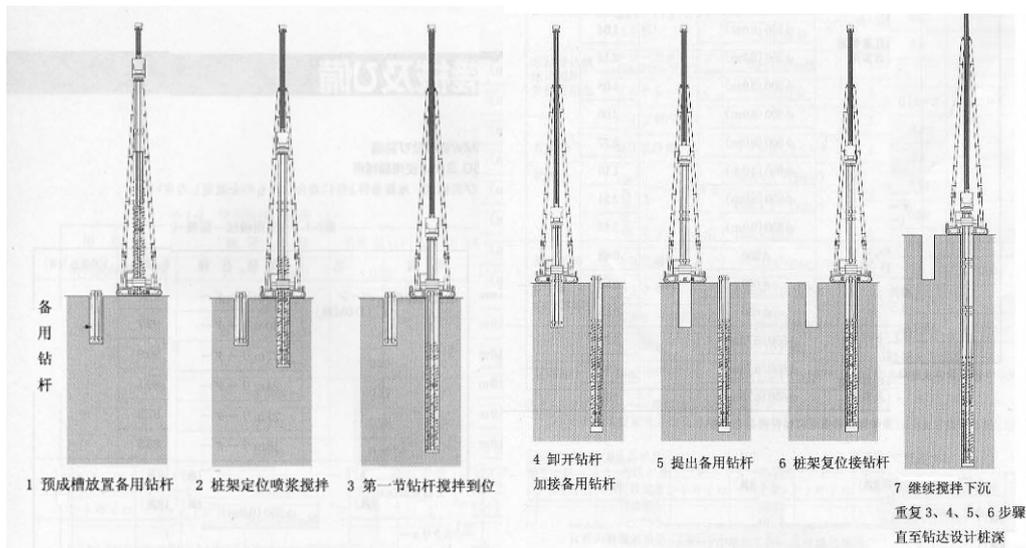


图 13-25 超深水水泥土搅拌墙施工顺序图

表 13-17 为日本超深水水泥土搅拌墙施工采用的钻杆组合表。

壁长 (m)	钻杆连 接次数 (回)	第1节					螺旋 杆 (6.75m)	第2节					第3节					第4节					
		(0.82m)	(1.0m)	(2.0m)	(3.0m)	(6.75m)		(0.82m)	(1.0m)	(2.0m)	(3.0m)	(6.75m)	(0.82m)	(1.0m)	(2.0m)	(3.0m)	(6.75m)	(0.82m)	(1.0m)	(2.0m)	(3.0m)	(6.75m)	
14.101	0	1	1		1		2																
15.101	0	1		1	1		2																
15.921	1	1	1		1		2	1	1														
16.921	1	1	1		1		2	1		1													
17.921	1	1	1		1		2	1			1												
21.671	1	1	1		1		2	1				1											
22.671	1	1	1		1		2	1	1				1										
23.671	1	1	1		1		2	1		1				1									
24.671	1	1	1		1		2	1			1	1											
28.421	1	1	1		1		2	1				2											
30.241	2	1	1		1		2	1				2	1	1									
31.241	2	1	1		1		2	1				2	1		1								
32.241	2	1	1		1		2	1				2	1			1							
35.991	2	1	1		1		2	1				2	1				1						
36.991	2	1	1		1		2	1				2	1	1				1					
37.991	2	1	1		1		2	1				2	1		1				1				
38.991	2	1	1		1		2	1				2	1			1	1						
42.741	2	1	1		1		2	1				2	1				2						
44.561	3	1	1		1		2	1				2	1				2	1	1				
45.000	3	1	1		1		2	1				2	1				2	1		1			

4. 超深水泥土搅拌墙施工实例

上海某酒店由一幢 36 层主楼和 4 层裙房组成，工程占地面积 8470m²，基坑边长 305m，工程整体地下三层，开挖深度为 14.65m，局部落深区开挖深度为 16.15m。基坑围护采用地下连续墙加钢筋混凝土内支撑的方案。基坑周边环境复杂，北侧有一条地铁正在运营，东侧另一条地铁正在施工，南、北两侧地下分别有两条 $\Phi 1200$ 、 $\Phi 1800$ 大直径污水管线，对于基坑变形和防渗漏要求非常高，要求确保地铁运营和施工的绝对安全。

工程场地土层以②₂层和⑤₂层砂质粉土为主，且层厚达 45m。地下连续墙施工过程中容易造成孔壁坍塌，接头绕流，沉渣超标等质量问题。在这种地层，地墙一旦漏水，将产生严重后果。为此围护设计方案将地下连续墙两侧进行槽壁加固（如图 13-26 所示），地墙外侧为深度 42~52m 的 $\Phi 850$ mm 三轴搅拌桩，套打施工。地墙内侧为深度 24m 的 $\Phi 650$ 三轴搅拌桩，搭接施工。外侧深度为 48m~52m 的三轴搅拌桩采用加接二次钻杆施工，本工程超深三轴搅拌桩工 270 幅，平均每天施工 5 幅，工期 60 天，基坑开挖后，地下连续墙及墙体接头防渗和截水性能良好。

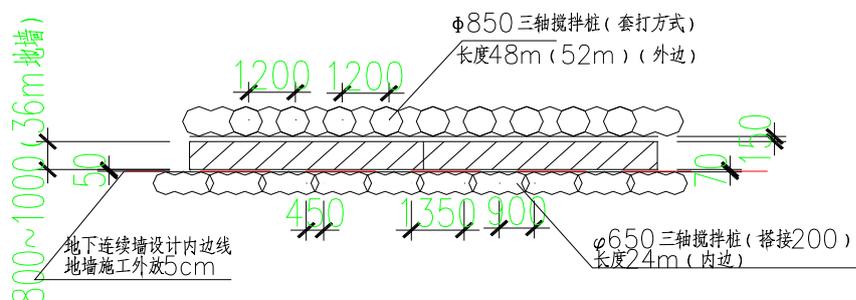


图 13-26 三轴水泥土搅拌桩与地墙施工节点详图

搅拌桩施工相关技术参数：1) 水泥掺量。上部 0~25m，采用搅拌土体重量的 20%。下部

25m~48(52)m, 采用搅拌土体重量的 30%; 2) 水灰比为 1.8; 3) 外掺剂。掺入膨润土的重量为水泥重量的 3%; 4) 下沉、提升速度。深度为 52m 桩下沉速度 $\leq 0.8\text{m}/\text{min}$, 深度为 35m 桩下沉速度 $\leq 1.5\text{m}/\text{min}$ 。提升速度 $\leq 2.0\text{m}/\text{min}$; 5) 泵浆量为: 400L/min, 采用 2 台 200L/min 注浆泵。

13.6.2 TRD 工法

1. 工艺原理

TRD 工法是由日本神户制钢所开发的一种新型水泥土搅拌墙施工技术。该工法机具兼有自行掘削和混合搅拌固化液的功能。与传统的 SMW 工法采用垂直轴纵向切削和搅拌施工方式不同, TRD 工法首先将链锯型切削刀具插入地基, 掘削至墙体设计深度, 然后注入固化剂, 与原位土体混合, 并持续横向掘削、搅拌, 水平推进, 构筑成高品质的水泥土搅拌连续墙。

2. 适应范围

TRD 工法机具成墙厚度、深度视设备型号不同而异。TRD-I 型: 成墙厚度 450—550mm, 深度 20m; TRD-II 型: 成墙厚度 550—700mm, 深度 35m; TRD-III 型: 成墙厚度 550—850mm, 深度 60m。TRD 工法不仅可以适用于 N 值小于 100 的软土地层, 还可以在直径小于 100mm, $q_u \leq 5\text{Mpa}$ 的卵砾石、泥岩和强风化基岩中施工, 适应地层广泛。

3. TRD 工法的特点

(1) TRD 工法成桩质量好, 沿桩长方向水泥土搅拌均匀, 在相同地层条件下可节约水泥 25%。相对于传统的水泥土搅拌桩, 在相同地层条件下, TRD 工法桩身深度范围内的水泥土强度普遍提高。水泥土无侧限抗压强度在 0.5~2.5Mpa 范围之内。

(2) 墙体连续等厚度, 截水性能好。经过 TRD 工法加固的土体渗透系数在砂质土中可以达到 $10\text{E}^{-7}\text{cm}/\text{s} \sim 10\text{E}^{-8}\text{cm}/\text{s}$, 在砂质粘土中达到 $10\text{E}^{-9}\text{cm}/\text{s}$ 。成墙作业连续无接头, 型钢间距可以根据设计需要调整, 不受桩位限制。

(3) TRD 工法施工机架重心低、稳定性好。TRD 工法可施工墙体厚度为 450~850mm, 深度最大可达 60m, 而 TRD (I、II、III) 三种型机中最大高度仅为 12m。

(4) TRD 工法可将主机架变角度, 与地面的夹角最小为 30° , 可以施工倾斜的水泥土墙体, 满足特殊设计要求。



图 13-27 TRD-III型机全貌



图 13-28 机架变角度水泥土搅拌墙施工

13.6.3 CSM 工法

1. 工艺原理

CSM 工法是德国宝峨公司开发的一种新型水泥土搅拌墙施工技术。该工法利用钻具底部的一对水平轴双轮铣垂直纵向对土体进行切削破碎, 同时注入水泥浆液搅拌, 形成水泥土搅拌墙。

2. 适应范围

CSM 工法机具成墙规格、深度视设备型号而异。墙厚 500mm~1200mm, 墙宽 2200mm~

2800mm。当采用旋挖钻机挺杆式桩架和双轮铣组合时，最大施工深度 35m，如图 13-29 所示。当采用钢绳悬挂导正系统与双轮铣组合时，最大施工深度可达 80m，详见图 13-30 所示。



图 13-29 双轮铣挺杆式组合

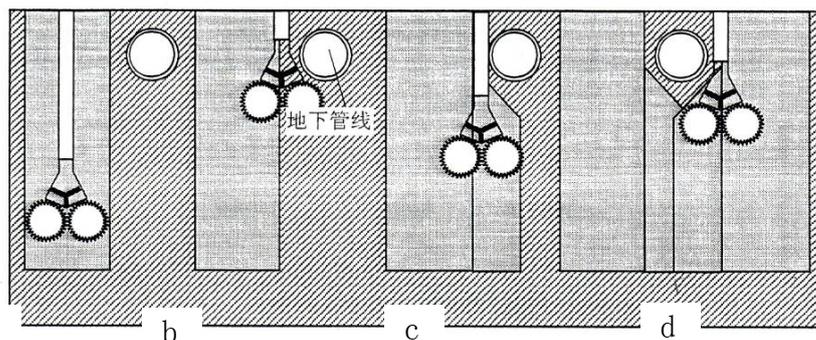


图 13-30 双轮铣钢绳悬挂式组合

CSM 工法适用于：均质土层，松散、中密的砂砾土、卵砾石甚至在不侧限强度达到 15Mpa-35Mpa 的花岗岩中，平均切削、搅拌速度仍可达 2.3cm/min。

3. CSM 工法特点

- (1) 墙体等厚度，截水性能好。经 CSM 工法加固的土体渗透系数可达 $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$;
- (2) CSM 工法对不同地层，可选用不同结构形式的双轮铣，地层适应能力强，施工效率高，对环境的影响小，污染小，无噪音，无振动。
- (3) 对于不同功能的水泥土搅拌墙采用不同的配合比。作为截水帷幕，每立方土体水泥掺量 100 kg~200kg，水灰比 1.5~2.0，墙体无侧限抗压强度可达 0.5Mpa~2.0 Mpa；作为挡土墙，每立方土体水泥掺量 200 kg~450kg，水灰比 0.5~0.6，墙体无侧限抗压强度可达 5Mpa~15 Mpa。
- (4) CSM 工法施工时有完备的施工质量实时监控，可以将施工的信息和参数及时提供给操作者，包括：搅拌深度、泥浆总体积、管内压力、槽内泥浆压力、泵量、垂直度和铣轮旋转速度等。
- (5) CSM 工法可实现管线下方截水帷幕的施工，详见图 13-31。



(6) (a) 施工左侧墙体 (b) 施工左下侧墙体 (c) 完成左下侧墙体 (d) 施工右侧及右下侧墙体

图 13-31 CSM 工法管线下方截水帷幕的施工

13.7 工程实例

13.7.1 华东医院扩建市民门急诊病房大楼

1. 工程概况

本工程位于上海市延安西路 221 号，总建筑面积 23980 平方米，地上 19 层（包括设备层），地下一层，建筑高度 83m。基础形式为桩筏基础，工程桩采用 $\Phi 800$ 钻孔灌注桩。基坑开挖面积 1600m²，

周长 200m，基坑开挖深度为 6.20m，局部电梯井落深区，基坑开挖深度为 9.80m。

工程场地周边环境比较复杂，基坑西面、东面和北面都有建筑物，且距离较近，工程施工场地狭小。**基坑北侧**紧邻原华东医院老西楼，老西楼为 17 层混凝土框架结构，地下一层，桩箱基础，桩基采用 450×450mm 预制方桩。本工程与老西楼底板水平向最近距离为 1m。**基坑东北侧**为华东医院北楼。北楼是一幢八层的现浇钢筋混凝土框架结构房屋，基础型式为混凝土片筏+木桩基础。**基坑西侧**为上海戏剧学院 18 层建筑和 3 层裙房。**基坑南侧**戏剧学院 4 层教学楼，基础形式为天然地基浅基础，距离围护结构外边线约 5.1m。**基坑东侧**为拟建地下二层车库。场地土层情况见表 13-18 所示。

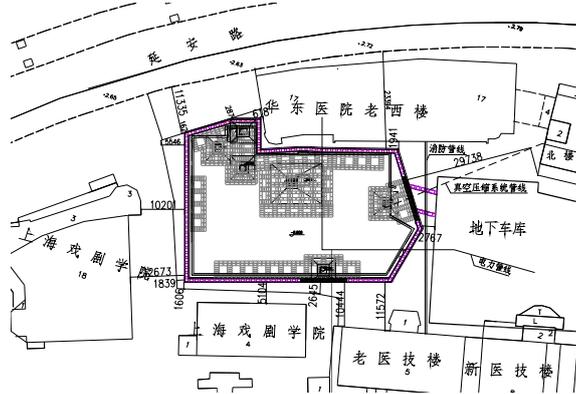


图 13-32 周边环境总平面图

土层物理力学性质综合成果表

表 13-18

土层编号	土层名称	层厚 h (m)	重度 r (kN/m ³)	φ (°)	C (kPa)	渗透系数建议值 K(cm/sec)
①	填土	2.16				
②	褐黄~灰黄色粉质粘土	1.60	18.2	16.0	20	7.0E-07
③	灰色淤泥质粉质粘土	4.06	17.5	16.0	11	3.0E-06
④	灰色淤泥质粘土	7.86	16.8	12.5	10	2.0E-07
⑤ _{1a}	灰色粘土	5.24	17.4	12.5	14	2.5E-07
⑤ _{1b}	灰色粉质粘土	8.40	18.1	20	18	
⑥	暗绿色粉质粘土	3.14	19.8	19.5	49	
⑦	草黄色粉砂	18.85	18.9	32	4	
⑧	灰色粉质粘土	17.05	18.4	18	23	
⑨	灰色粉砂	为钻穿	18.9	32	3	

2. 围护设计方案

(1) 围护方案选择探讨

本工程位于上海市中心城区，场地狭小，周围建筑物较多，基坑开挖深度 6.20m，局部落深处开挖 9.8m，上海地区适合此类开挖深度的围护结构有型钢水泥土搅拌墙、钻孔灌注排桩+截水帷幕、地下连续墙。

从结构安全度方面看，地下连续墙刚度最大、整体性最好、墙体变形最小，围护结构体系安全性最好，型钢水泥土搅拌墙和钻孔灌注桩次之，其中型钢水泥土搅拌墙刚度比钻孔灌注桩略小，围护体变形也较钻孔灌注桩略大。

从工期角度讲，型钢水泥土搅拌墙施工速度最快，钻孔灌注桩较型钢水泥土搅拌墙长一些，而地下连续墙施工工艺复杂，施工速度最慢。

总体上围护结构若采用地下连续墙方案，即使利用地下连续墙兼作地下室外墙，造价仍相对偏高。考虑到基坑北侧拟建建筑地下室底板与相邻老西楼地下室底板净距仅 1m，钻孔灌注桩围护尚需在外侧施工一道截水帷幕，没有足够的施工空间。而型钢水泥土搅拌墙为在三轴水泥土搅拌桩中内插型钢，占用空间较小。因此根据本工程基坑开挖深度，周边环境条件，选用型钢水泥土搅拌墙+内支撑围护方案。

为加快施工进度、方便支撑体系的安装与拆除，同时保护周边环境安全，内支撑采用钢管支撑，支撑采用双拼支撑以增加其刚度。支撑形式以对撑为主，局部设置角撑。该布置形式，造价经济，支撑受力明确、可靠，有利于控制围护结构变形，保护周边环境安全。

(2) 型钢插入间距选择

本工程型钢水泥土搅拌墙采用 $\Phi 850@600$ 三轴水泥土搅拌桩，内插 H700×300 型钢，型钢根据周边环境的保护要求采取密插和跳插。

1) 基坑一般开挖深度为 6.20m 的区域，内插 H700×300 型钢采取插一跳一的方式。

2) 基坑西侧、南侧区域及西北侧部分区域距离红线相对较近，西侧红线外为戏剧学院 18 层建筑，南侧红线外为戏剧学院 4 层建筑，周边环境比较复杂，对控制变形要求较高，将内插型钢改为插二跳一方式，适当加密。

3) 基坑北侧紧邻华东医院老西楼，由于相对距离较近，施工时紧贴其基础底板，对变形、位移要求较高。内插型钢采用密插形式。为加强对老西楼的保护，在地下室施工结束后，基坑北侧的内插型钢不拔除。

3. 围护设计方案对周边环境的保护措施

本工程场地周边环境比较复杂，保留建筑众多，对变形较为敏感，容易产生裂缝；基坑西面、东面和北面都有建筑物，且距离较近，工程施工场地狭小。围护结构选择了型钢水泥土搅拌墙+一道坑内钢支撑设计方案。

(1) 内插型钢根据周边环境的保护要求采取密插、跳插。基坑北侧由于紧邻老西楼，型钢采用密插，并且在地下室施工结束后不拔除，基坑南侧距离戏剧学院四层教学楼较近，内插型钢采用插二跳一的布置形式。

(2) 根据基坑形状、开挖深度及周边环境保护要求，支撑采用双拼支撑以增加其刚度，支撑形式以对撑为主，图13-33为现场钢支撑的布置情况。



图 13-33 现场内支撑布置图

(3) 钢支撑施工速度快，安装方便，施加预应力后即可开挖，减少了基坑侧壁及开挖面无支撑暴露时间，可以有效减小土体随时间增长所增加的变形。钢支撑根据围护结构变形情况还可以复加预应力，能够在一定程度上控制周围地层变形，保护周边环境。

(4) 为了减小拆撑带来的围护体变形，在基坑底板浇筑完成后设置斜向换撑（如图13-34所示）。换撑采用H400×400型钢，换撑施工完毕后拆除是水平支撑。

(5) 在局部开挖深度为9.8m的深坑区域，增加一道临时钢支撑，以控制围护结构变形，保护环境，如图13-35所示。

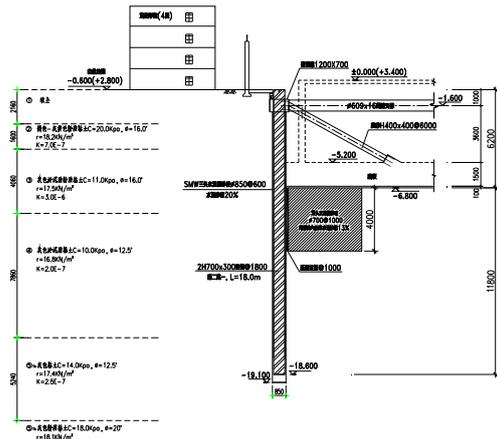


图 13-34 斜向换撑布置图

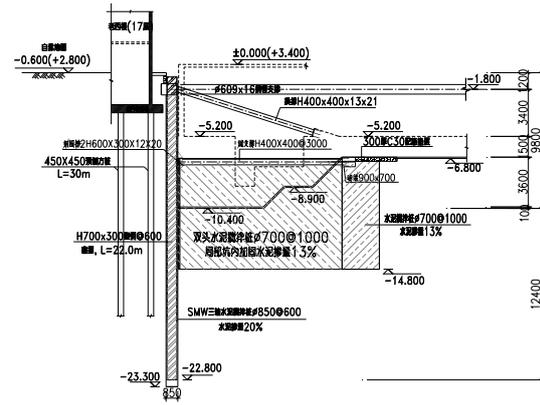


图 13-35 落深区围护剖面图

13.7.2 苏州地铁钟南街站工程

1. 工程概况

苏州轨道交通一号线工程是一条东西走向的市区轨道交通线，全长约 26km，全线共设 24 座车站，钟南街站为第 24 座车站。钟南街站位于钟南街与翠园路的交叉口下，其中钟南街为南北向城市主干道，规划道路红线宽 53 米，翠园路为规划道路，东西走向，规划道路红线宽度为 31 米。钟南街站基坑周长为 1011m，开挖面积 33000m²，开挖深度 14.8~16.5m。

2. 地质条件

苏州地区的土层地下水位较高，土层较软，特别是砂性较重，表 13-19 为场地土层参数表。

土层物理力学性质综合成果表

表 13-19

土层编号	土层名称	层厚 h (m)	重度 r (kN/m ³)	φ (°)	C (kPa)	渗透系数建议值 K(cm/sec)
① ₁	素填土	2.16		10.0	15.0	
③ ₁	粘土	1.60	19.9	10.8	51.7	7.0E-07
③ ₂	粉质粘土	4.06	19.4	11.6	28.7	3.0E-06
④ _{1a}	粉质粘土	7.86	18.9	11.5	21.4	2.0E-07
④ ₂	粉砂	5.24	18.8	20.4	15.9	2.5E-07
④ ₃	粉粘夹粉土	8.40	19.1	4.9	16.4	
⑤	粉质粘土	3.14	19.3	11.0	25.0	
⑥ ₁	粘土	18.85	20.2	12.4	46.2	
⑥ ₂	粉质粘土	17.05	19.1	12.2	30.1	
⑦ ₂	粉土夹粉砂	未钻穿	18.7	29.0	10.6	

3. 围护方案选型探讨

本工程周边环境相对宽松，但基坑的开挖深度较深，基坑围护设计考虑采用上部卸土放坡+下部内支撑的方案，总体可以下采用以下两种方案：

- (1) 放坡+工法桩方案：采用 45°放坡+Φ1000@750 工法桩作围护；
- (2) 放坡+钻孔咬合桩方案：采用 45°放坡+Φ1000@800 钻孔咬合桩围护。

具体比选内容见表 13-18：

围护结构方案比较表

表 13-18

围护结构型式	优点	缺点	造价比
放坡+钻孔咬合桩	1. 技术成熟，防水效果好； 2. 浑、素桩结合，配筋率较低； 3. 施工灵活，适合各种形状基坑。	1. 成孔需专用设备； 2. 造价相对较高； 3. 咬合桩施工工艺较复杂；	1
放坡+工法桩	1. 技术成熟，工艺相对简单； 2. 特别适用于软土地区，有成熟经验； 3. 机械化施工，质量、速度有保证。	1. 适用范围受基坑深度限制； 2. 对环境有一定影响。	0.96

从上述的分析对比看，放坡+工法桩围护方案在造价、施工速度等方面具有较明显的优势。结合本工程的地质条件及周边环境特点，围护设计最终选用了放坡+工法桩方案。

车站主体围护结构支护参数如下：一般区域开挖深度 14.8m，采用 45°放坡+Φ1000@750mm 型钢水泥土搅拌墙，内插型钢采用 H800×300 型钢，插一跳一；端头井区域基坑开挖深度 16.5m，内插型钢采用密插形式。支撑系统采用 Φ609×12 钢支撑，竖向 2 道，水平向间距一般为 3m。图 13-36 为围护结构剖面图，图 13-37 为基坑施工现场图。

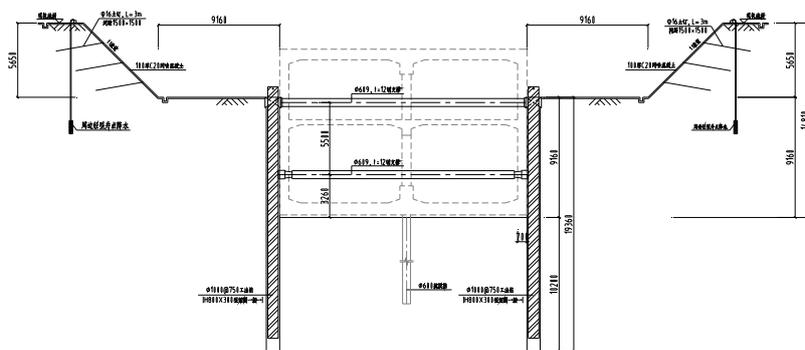


图 13-36 围护剖面图



图 13-37 基坑施工现场图

4. 围护方案施工方法及技术措施

本车站的施工方法应根据基坑周边环境条件、车站埋深、规模、建筑特点、并结合工程地质、水文地质，施工对地面交通和环境的影响、施工工期、工程经济指标等方面因素进行综合分析确定。

根据钟南街站的实际情况，车站位于钟南街和规划翠园路路口下方，路面车流量较少，且园区道路如棋盘，路网较发达，有比较充足的交通疏散条件，钟南街断道施工不会造成交通问题，而且

周边无需特殊保护的重要管线，故拟采用明挖法施工。

主要施工步骤：

- (1) 施工围护结构、抗拔桩，放坡开挖至设计标高后，进行第二次开挖；
- (2) 架设第一道钢支撑，进行第三次开挖；
- (3) 架设第二道钢支撑，向下开挖至基底；
- (4) 施工底板垫层，铺设防水层，浇筑底板，待混凝土达到规定强度后拆除第二道钢支撑；
- (5) 施工站台层侧墙防水层，浇筑站台层侧墙、中柱及中板，待混凝土达到规定强度后拆除第一道钢支撑；
- (6) 施工站厅层侧墙、中柱及顶板，待混凝土达到规定强度后，施工侧墙、顶板防水层和其它内部结构，回填覆土，恢复路面。

参考文献

- [1] 刘建航，侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1997.
- [2] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1998.
- [3] 赵志缙，应惠清. 简明深基坑工程设计施工手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1999.
- [4] 孔德志. 劲性搅拌桩性能与分析理论研究[D]. 博士学位论文. 上海：同济大学，2004.
- [5] 贾坚. 控制基坑变形的坑内加固机理研究及实践[D]. 博士学位论文. 上海：同济大学，2003.
- [6] 王健. H型钢—水泥石组合结构试验研究及SMW工法的设计理论与计算方法[D]. 博士学位论文. 上海：同济大学，1998.
- [7] 顾士坦. 基坑SMW工法围护结构复合作用分析及模型试验研究[D]. 博士学位论文. 上海：河海大学，2004.
- [8] 高文华，杨林德. 基于Mindlin板理论的深层搅拌桩墙体受力变形的空间效应[J]. 土木工程学报 1999. 32(5): 71-75.
- [9] 王健，夏明耀，傅德明. H型钢与水泥石搅拌桩围护结构的设计与计算[J]. 同济大学学报，1998，26(6): 636-639.
- [10] 周希圣，陈裕康，张伟. SMW围护深基坑逆筑法设计研究与工程实践[J]. 岩土工程学报，2004，26(4): 511-515.
- [11] 周顺华，刘建国，潘若东，王炳龙. 新型SMW工法基坑围护结构的现场试验和分析[J]. 岩土工程学报，2001，23(6): 692-695.
- [12] 史佩栋. 日本SMW法地下连续墙[J]. 地基基础工程，1995，5(1): 59-65.
- [13] 日本SMW协会. SMW工法标准预概算资料 [设计、施工、概预算][G]. 东京: SMW协会. 2008
- [14] 上海市工程建设规范. 型钢水泥石搅拌墙技术规程（试行）DGJ08-116-2005 [S].
- [15] 国家行业规程. 型钢水泥石搅拌墙技术规程（征求意见稿）[S]. 2009.