

软土地基深基坑围护结构中 SMW 工法桩施工技术应用研究

蒋兴华

上海海怡建设（集团）有限公司，上海 201300

DOI:10.61369/ERA.2026060022

摘要： 以上海浦东新区 D13-C103#、104#、105# 通用厂房项目为工程背景，针对软土地基深基坑围护施工中的技术难点，系统研究了 SMW 工法桩施工技术及其配套措施。该项目基坑面积 7280 m²，开挖深度 5.7m，采用双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢围护结构，结合坑内真空深井降水与分层开挖工艺。本文详细阐述了双轴搅拌桩施工技术、H 型钢插入工艺、钢支撑安装技术以及降水 - 开挖协同施工技术，总结了软土地基深基坑围护施工的关键经验，为类似工程提供参考。

关键词： 软土地基；深基坑；SMW 工法桩；双轴搅拌桩；基坑降水；H 型钢

Research on the Application of SMW Construction Technique Piles in the Enclosure Structure of Deep Excavations on Soft Soil Foundations

Jiang Xinghua

Shanghai Haiyi Construction (Group) Co., Ltd., Shanghai 201300

Abstract： Taking the D13-C103#, 104#, and 105# general factory building projects in the Pudong New Area of Shanghai as the engineering background, this study systematically investigates the SMW construction technique piles and their supporting measures, addressing the technical challenges encountered in the enclosure construction of deep excavations on soft soil foundations. The excavation area of the project is 7,280 square meters, with an excavation depth of 5.7 meters. It employs a biaxial cement-soil mixed pile with inserted H-section steel enclosure structure, combined with vacuum deep well dewatering and layered excavation techniques within the pit. This paper elaborates on the construction techniques of biaxial mixed piles, the insertion process of H-section steel, the installation technology of steel supports, and the coordinated construction techniques for dewatering and excavation. It summarizes key experiences in the enclosure construction of deep excavations on soft soil foundations, providing references for similar projects.

Keywords： soft soil foundation; deep excavation; SMW construction technique piles; biaxial mixed piles; excavation dewatering; H-section steel

引言

软土地基具有高含水量、高压缩性、低承载力等特点，深基坑施工中围护结构的稳定性与变形控制是工程核心问题^[1]。SMW 工法桩作为一种兼具挡土与止水功能的围护结构，在软土地区得到广泛应用^[2]。本文依托上海浦东高桥镇富特北路 559 号厂房项目，基坑实际开挖深度 5.7m，周边环境复杂（东侧紧贴既有建筑、南北两侧临近市政道路、西侧紧靠高架道路），围护结构采用双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢（SMW 工法桩），结合坑内真空深井降水与分层开挖工艺。通过施工过程中的技术控制与监测数据分析，验证了 SMW 工法桩在软土地基深基坑中的适用性，总结形成系统的施工技术要点。

一、工程概况与工程地质环境条件

（一）工程基本概况

拟建项目位于上海市浦东新区高桥镇富特北路 559 号，建设用地面积 11016 m²，总建筑面积 30043.3 m²。其中 103# 厂房 7561.94 m²、104# 厂房 8407.00 m²、105# 厂房 7359.93 m²，地库

建筑面积 6714.43 m²。103#、104#、105# 厂房均为地上 4 层，地下室 1 层。基础形式为筏板及桩承台基础，工程桩采用先张法预应力混凝土管桩，共计 325 根，采用静力压桩工艺。基坑面积 7280 m²，基坑围护结构采用水泥土搅拌桩加内插 H 型钢（SMW 工法桩），基坑实际开挖深度 5.7m，集水井局部落深 1.3m~1.85m。现场原始地面标高为 4.3m。

（二）工程地质条件

本工程基坑施工环境复杂，主要体现在三个方面：一是场地土层以软黏土及淤泥质土为主，土体强度低、压缩性大，基坑开挖过程中容易产生较大侧向位移；二是基坑周边环境敏感，东侧紧邻既有建筑，南北两侧为市政道路，西侧为高架道路，一旦围护结构变形过大，可能对周边建筑物安全造成影响；三是地下水位埋深浅，基坑开挖深度超过地下水位约5.2m，若降水措施不到位，容易引发流砂、管涌等工程风险。因此在围护结构设计及施工过程中，需要综合考虑止水、抗变形和施工效率等因素。

二、软土地基深基坑工程施工难点与 SMW 工法桩适用性分析

（一）软土地基深基坑围护施工核心难点

场地内存在饱和软黏土及暗浜分布，土层含水量高、孔隙比大、抗剪强度低，基坑开挖卸荷后易产生较大变形^[3]。暗浜范围内淤泥质土必须彻底清除处理，否则将直接影响围护结构稳定性。基坑东侧紧贴既有建筑，南北两侧临近市政道路，西侧紧靠高架道路，开挖深度5.7m，卸荷产生的水平位移及沉降需严格控制，围护结构变形量须满足环境安全要求。地下水位埋深仅0.5m，坑底位于地下水位以下5.2m，若不采取有效降水措施，坑底易发生流砂、管涌，围护墙背侧可能产生水土流失，危及周边环境安全。围护桩施工、降水、土方开挖、支撑安装等工序需紧密衔接，软土中桩基施工后需一定时间恢复土体强度，降水效果须达到设计要求方可开挖，工序间相互制约。

（二）SMW 工法桩在本工程中的适用性与优势

SMW 工法桩采用双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢，兼具挡土与止水功能^[4]。双轴搅拌桩形成的水泥土墙体渗透系数 $<10^{-7}\text{cm/s}$ 、28d 强度 $>1.2\text{MPa}$ ，止水且具有一定刚度；内插 H 型钢承载土压，与钢支撑组成支护体系。在本工程条件下，围护结构形式的选择需综合考虑止水性能、施工周期及周边环境影响。若采用地下连续墙，虽然结构刚度较大，但施工周期长、造价较高，并且对施工场地要求较高；若采用钻孔灌注桩加止水帷幕，施工过程中需多道工序配合，施工效率较低。相比之下，SMW 工法桩通过水泥土搅拌形成连续墙体，同时内插 H 型钢承担结构受力，不仅具有良好的止水性能，还能够有效控制围护结构变形，并且施工设备简单、施工效率较高。因此在本工程软土地基条件及复杂周边环境条件下，SMW 工法桩具有较好的适用性。

三、SMW 工法桩关键施工技术及工艺控制

（一）暗浜处理

本工程北侧存在暗浜区域，该区域土体以淤泥质土为主，含水量高、强度低，若处理不当将影响 SMW 工法桩围护结构稳定性。因此在围护桩施工前，对暗浜范围进行专项处理。施工过程中首先对暗浜区域进行开挖清淤，清除至原状老土层后采用素粘土分层回填，并通过压实度检测确保回填质量。在暗浜区域施工

双轴搅拌桩时适当提高水泥掺量至16%，以提高桩体强度和止水性能。

（二）施工机械与试桩

水泥掺量是影响搅拌桩强度及止水性能的重要因素。若掺量过低，桩体强度不足，易导致围护结构变形增大；若掺量过高，则会增加工程成本并影响施工效率。本工程通过试桩试验及室内强度试验，确定水泥掺量为13%。试验结果表明，在该掺量条件下，水泥土28d 无侧限抗压强度可达到0.8MPa 以上，满足围护结构设计要求。对于暗浜区域，由于土体含水量较高，适当提高水泥掺量至16%，以提高桩体强度和整体稳定性。

（三）H 型钢插入施工技术

H 型钢表面平整度控制在规范允许范围内，除锈后在干燥条件下涂抹减摩剂以利于后期回收，搬运使用过程中防止碰撞和强力擦挤。型钢接头设在基坑底标高以下，翼板与腹板焊接相互错开，满足等强度焊接要求。搅拌桩施工完成后30min 内插入 H 型钢，若水灰比或水泥掺量较大，插入时间可相应增加；型钢采用隔一插一布置，插入时保持垂直，定位准确。插入过程中利用桩架导向架控制垂直度，插入到位后临时固定防止移位，型钢顶标高控制准确以便与支撑体系有效连接。在实际施工过程中发现，个别搅拌桩垂直度接近规范允许偏差上限。为提高施工精度，施工中加强搅拌机就位控制，采用经纬仪对桩机垂直度进行实时监测，并通过导向架进行调整，确保搅拌桩垂直度控制在0.5% 以内。同时在 H 型钢插入过程中利用桩架导向架进行二次校正，保证型钢位置准确。

（四）钢支撑制作与安装施工技术

本工程采用 $\Phi 609\times 16$ 钢管支撑，中心标高-1.35m，沿竖向设一道钢管水平支撑，立柱为 $\text{H}400\times 400\times 13\times 21$ 型钢，支撑体系安装便捷、可周转、成本低；在钢支撑施工过程中，为防止预应力损失影响支撑体系稳定性，支撑安装完成后采用两次施加预应力。第一次施加250KN 用于调整支撑直线度并初步受力，焊接连接件完成后进行第二次施加至500KN，使支撑预应力达到设计值。同时对活络头螺母进行锁紧并焊接固定，以减少施工过程中预应力损失。土方开挖至工作面后，测放控制点并焊接槽钢托架，测定支撑位置确保轴线垂直围护，根据实测距离选配中间管段（规格包括7m、6m、3m、4m、3m、2m、1m、0.8m、0.7m、0.6m、0.5m、0.4m、0.3m），活络头长2.3m；支撑采用汽车吊分段二点吊装，东侧用塔吊，就位后暂不松钩，拉出活络头顶紧支座预埋件，用两台50t 千斤顶施加预应力，首根支撑先施加少量预应力调整直线，第一组安装并施加第一次预应力后焊接连接杆，再安装第二组，相邻组安装后焊接较长连接件，验收合格后施加第二次预应力至设计值，全过程记录；所有节点按设计要求焊接或螺栓连接，局部设加劲板。

四、基坑降水与分层开挖协同施工技术

（一）坑内降水方案设计与施工实施

根据开挖深度5.7m、水位埋深0.5m 地质，坑内采用真空深

井降水。基坑7280 m²形状规则，抽水半径9m，布35口梅花形疏干井，距围护墙6~8m、井距15m，避支撑沿支撑边布置。井管/滤管Φ273钢管外包铁丝网，底板止水片；滤管长4+2m，内6目铁丝网、外60目尼龙网。每井配深井水泵（5~15t/h，扬程24~30m），每3~5口井配真空泵使管内压力>0.06MPa，同步开启。成井用wk-1000旋挖钻机，孔径≥Φ650，垂直度保证；下管电焊连接，滤料瓜子片加粗砂填实。吸水头置滤管下口沉砂管，电机座与井口密封；真空泵与深井泵硬管或波纹管连接，接头密封。坑内分区设观测井（每区≥1口），坑外四周≥4口监测水位。施工穿插围护，围护后二周内完成，安装后验收预降水；开挖前预降水三周，至底板浇筑养护结束，截止时间抗浮计算。在降水施工过程中，通过监测发现局部区域降水效果不均匀。针对该情况，通过调整并泵运行时间及增加抽水强度，使坑内地下水位稳定控制在坑底以下0.5~1.0m范围内，从而保证基坑开挖过程中坑底稳定。

（二）基坑分层开挖原则与施工工艺

基坑开挖分层分段、对称平衡、限时，控制卸土速度以减少对围护及桩基影响，与底板流水施工缩短暴露时间。流向自远及近、周边向中间汇集，按由南向北（104#楼暂缓）。深度分两层：第一层至支撑底（-1.70m），一次性挖，PC200大挖机作业，及时浇筑支撑；第二层至垫层面以上0.85m（-5.20m），第三层土采用120小挖机+人工清底跟进挖至坑底（含承台等深坑），每2m打竹板桩控标高，留20~30mm人工铲平，严禁超挖；高差≤3m，放坡1:1.5（宜1:2），钢立柱及塔吊周边对称掏挖。垫层分段紧跟，见底12h内浇筑，平板振捣密实并打磨。提前掌握天气，坑周设排水沟，坑内明排水；土层异常及时通知勘察、设计处理并签证。

（三）降水-开挖-SMW工法桩围护协同施工技术

SMW工法桩完成并达到设计强度后开始坑内降水，预降水三周且水位降至坑底以下0.5~1.0m后开始第一层土方开挖；第一层土开挖后及时安装钢支撑，待支撑形成整体并达到设计强度80%后方可进行第二层土开挖；第二层土开挖至坑底后12h内完成垫层浇筑并随即进行底板施工。在软土地基深基坑工程中，降水与开挖之间具有密切关系。若降水深度不足，基坑开挖过程中可能出现坑底隆起或流砂现象；若降水范围过大，则可能导致周边地基沉降。本工程通过布置35口真空深井进行降水，使坑内地下水位稳定控制在坑底以下约1.0m。在降水稳定后再进行分层开挖，可以有效减少坑底土体扰动，保证基坑施工安全。

五、施工实施效果检测与分析

（一）围护结构整体稳定性检测

成桩7d后采用轻便触探抽取桩身土样（检验数量≥成桩数量的2%），观察搅拌均匀性，对比判定强度。触探结果显示，桩身搅拌均匀，击数满足强度要求。对部分桩身取芯样试压，28d无侧限抗压强度达不小于0.8MPa，满足设计要求。型钢插入后检查垂直度及平面位置，偏差均在允许范围内。型钢顶标高控制准

确，与钢支撑连接牢固。支撑安装后检查焊缝质量及预应力施加记录。所有焊缝经外观检查合格，预应力施加值达设计要求，支撑体系受力可靠。具体见表1：

表1 SMW工法桩施工质量检测结果统计

检测项目	设计/规范要求	检测数量	检测结果	合格率
搅拌桩垂直度	≤0.4%桩长	45根	0.3%~0.4%	100%
桩位偏差	≤50mm	45根	15~45mm	100%
水泥掺量	234kg/m	12组	236~247kg/m	100%
28d抗压强度	≥0.8MPa	18组	0.80~1.53MPa	100%
H型钢垂直度	≤0.5%	30根	0.2%~0.5%	100%
钢支撑预应力	设计值	35道	达设计值	100%

（二）基坑周边沉降与位移监测结果

施工过程中对基坑周边环境进行监测，项目包括围护墙顶水平位移与沉降、周边地表沉降、邻近建筑沉降、地下水位变化及深层土体侧向位移。从监测数据可以看出，围护墙顶最大水平位移为28.5mm，发生在基坑长边中部位置。该位置为基坑受力最不利区域，通常容易产生较大侧向变形。根据软土地基深基坑工程经验，当基坑开挖深度为6m左右时，围护结构水平位移一般为开挖深度的0.2%~0.5%。本工程最大位移约为开挖深度的0.46%，处于合理范围内，说明SMW工法桩围护体系整体刚度能够满足工程要求。具体见表2：

表2 基坑监测主要数据汇总

监测项目	测点数量	累计最大值 (mm)	报警值 (mm)	备注
围护墙顶水平位移	18	28.5	40	位于基坑长边中部
围护墙顶沉降	18	15.2	30	-
周边地表沉降	24	22.3	30	东侧邻近建筑处
邻近建筑沉降	12	8.5	20	-
深层土体侧移	8	32.1	45	深度5.7m处

（三）效果分析

①桩基施工：325根预应力管桩采用静力压桩，21天完成，日均压桩15~16根，桩位偏差满足规范要求。低应变检测显示Ⅰ类桩比例95%，无Ⅲ、Ⅳ类桩。②SMW工法桩施工：四台双轴搅拌机同步作业，围护桩施工18天，坑内加固桩12天，进度符合计划。搅拌桩成桩质量稳定，H型钢插入顺利。③降水效果：35口真空深井抽水三周后，坑内水位降至坑底以下约1.0m，开挖过程中坑底干燥，无明水及流砂管涌现象。④土方开挖与支撑安装：分层开挖有序，钢支撑安装与土方开挖衔接紧密，预应力施加及时，围护结构变形可控。

六、工程应用经验总结

双轴搅拌桩水泥掺量13%（≥234kg/m）、水灰比0.6、下沉速度≤1m/min、提升速度≤0.5m/min，必须严格控制，试桩确定参数后方可大面积施工。H型钢插入时机与减摩处理影响回收效率：搅拌桩完成后30min内插入型钢，水灰比较大时可适当延长；型钢表面涂刷减摩剂应均匀，搬运中避免碰撞。支撑系统及时性至关重要，第一层土开挖后立即安装钢支撑并施加预应

力，预应力应均匀、对称、分两次施加，待支撑体系形成整体后方可下层开挖。降水与开挖协同是安全前提：水位降至坑底以下 0.5 ~ 1.0m 后方可开挖，降水井布置避开支撑，保持连续降水确保坑底稳定。

七、结语

上海浦东 D13-C103#、104#、105# 厂房项目深基坑工程，采

用 SMW 工法桩（双轴水泥土搅拌桩内插 H 型钢）作为围护结构，结合坑内真空深井降水与分层开挖工艺，成功解决了软土地基深基坑施工中的稳定与变形控制难题。施工中严格控制搅拌桩垂直度、水泥掺量、提升速度等参数，确保 H 型钢插入质量与钢支撑及时安装；降水与开挖协同进行，保证坑底干燥稳定。监测数据显示，围护结构最大水平位移 28.5mm，周边地表沉降 22.3mm，均在控制范围内，工程实施效果良好。本文总结的关键施工技术与控制要点，可为类似软土地区深基坑工程提供有益参考。

参考文献

- [1] 张敏. 深基坑支护中 SMW 工法桩施工技术的应用研究 [J]. 2025(8):56-57.
- [2] 张蕴中. SMW 工法桩在深基坑围护结构中的应用研究 [J]. 建设科技, 2025(1):103-105.
- [3] 王嘉操. SMW 工法在深基坑围护结构中的应用研究 [J]. 散装水泥, 2025(5):88-90.
- [4] 张祥. SMW 工法桩在高层建筑深基坑围护施工中的使用分析 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2023.
- [5] 何敬锋. 建筑工程项目中的基坑 SMW 工法施工工艺 [J]. 四川建材, 2023, 49(3):192-194.