

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.06.073

SMW 工法桩在超深基坑中的适用性研究

李雪洋^{1,2}

(1.中铁第五勘察设计院集团有限公司,北京市 100000; 2.苏州众通规划设计有限公司,江苏 苏州 215000)

摘要: SMW 工法桩常用于深度不大于 11 m 基坑的支护结构,具有工期短、无污染、噪声小、可回收等特点。为研究此工法桩在超深基坑的适用性,以苏州某基坑工程(基坑深度 15 m)为例,计算超深基坑开挖各工况下 SMW 工法桩的侧向变形、钢材强度承载力、地表沉降等规律,并现场施工验证。结果表明,SMW 工法桩可作为深度 15 m 左右基坑的围护结构,且在工期、环保、经济性上具有明显优势,为其他类似工程提供借鉴。

关键词: SMW 工法桩;型钢水泥土搅拌桩;基坑支护;深基坑工程;基坑变形

中图分类号: TU753

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)06-0287-05

0 引言

SMW 工法桩(soil mixing wall)也称为新型水泥土搅拌桩墙,是指在未凝固的水泥土桩内插入 H 型钢等,凝固后的水泥土与 H 型钢组成复合型围护结构,同时具备受力、抗渗两种功能。

SMW 工法桩在国内由上海率先开始使用。凭借施工便利、造价低、适用性强等特点,此工法桩在沿海软土地区迅速推广并向内陆发展。

2010 年,中国住建部发布了行业标准《型钢水泥土搅拌墙技术规程》(JGJ/T 199—2010)^[1],文中提到:搅拌桩直径 850 mm 的型钢水泥土搅拌墙适用于开挖深度不大于 11 m 的基坑。同时提供了工法桩适用深度限值。但近几年来,随着 SMW 工法桩施工工艺的成熟、搅拌桩机械设备的改良,越来越多超深基坑也选择用 SMW 工法桩作为基坑支护结构。

本文以苏州某基坑工程(基坑深度 12~15 m)为例,通过数值模拟理论计算基坑的内力变形、地表沉降、整体稳定性、抗倾覆、型钢承载力、水泥土抗剪验算等,分析规律、提出结论,并结合现场施工监测数据进行验证,研究 SMW 工法桩在超深基坑中的适用性。

1 工程概况

1.1 项目简介

拟建工程位于现状道路和地块内,周边环境简

单,无重要建(构)筑物。基坑呈东西向,长 171.8 m,宽 11.4~14.4 m,深 12.0~15.0 m。基坑平面示意图如图 1 所示,基坑横断面和地层分布如图 2 所示。

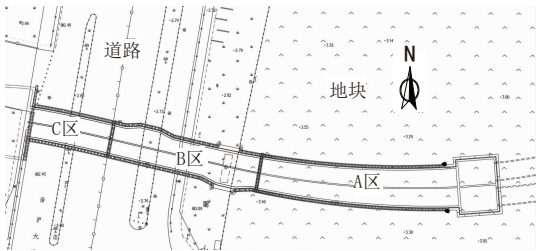


图 1 计算模型简图

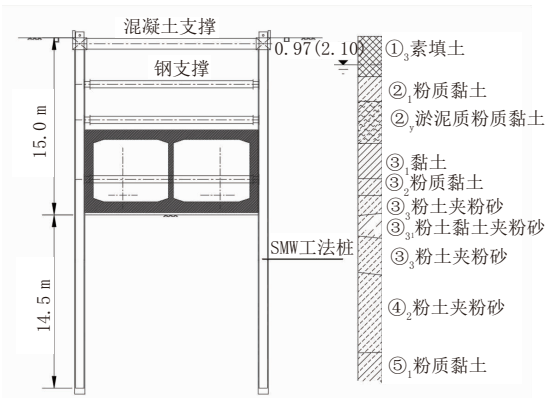


图 2 基坑横断面和地层分布情况示意图

基坑围护结构选用 $\phi 850@600$ mm SMW 工法桩,内插 $700\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ H 型钢。基坑最大深度为 15.0 m,型钢采用密插布置。竖向采用 1 道混凝土支撑 + 3 道 $\phi 609$ 钢管支撑。

1.2 地质参数

工程所处地质为第四系全新世至早更新世沉积的疏松沉积物,黏性土与粉砂性土交错,土层物理力学参数指标见表 1。

收稿日期: 2022-08-11

作者简介: 李雪洋(1990—),男,本科,工程师,从事隧道工程、地下结构设计工作。

表 1 土层物理力学参数指标

层号	岩土名称	重度 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	固快(C_u)		侧压力 系数 K_0	水平基床 系数 $K_H/$ ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-3}$)	垂直基床 系数 $K_V/$ ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-3}$)	比例 系数 $m/$ ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-4}$)	渗透系数	
			c_{eq}/kPa	$\varphi_{eq}/(^{\circ})$					垂直 $K/$ ($\times 10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	水平 $K/$ ($\times 10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
① ₃	素填土	18.5	10	10	0.75	6.0	5.0	1.5	45	50
② ₁	粉质黏土	19.0	28.0	12.9	0.60	10.0	8.0	4.5	5.5	6.0
② _v	淤泥质粉质黏土	17.7	11.5	11.0	0.80	5.0	4.0	2.3	6.5	7.0
③ ₁	黏土	19.9	52.6	13.9	0.40	28.0	32.0	8.0	2.0	2.5
③ ₂	粉质黏土	19.1	28.0	14.1	0.45	19.0	22.0	6.5	4.5	5.0
③ ₃	粉土夹粉砂	19.2	8.0	20.3	0.56	20.0	22.0	8.0	3 000	3 500
③ ₃₁	粉质黏土夹粉砂	18.9	24.6	13.6	0.62	13.0	11.0	4.5	50	60
④ ₂	粉土夹粉砂	19.2	8.7	19.7	0.54	22.0	24.0	9.5	4 500	5 000
⑤ ₁	粉质黏土	18.7	23.6	13.5	0.75	14.0	12.0	4.0	6.5	7.0

2 基坑计算

2.1 假定条件

- (1)采用朗肯土压力计算公式,水土分算。
- (2)采用 m 法计算土的水平反力系数。
- (3)水土侧压力全部由 H 型钢承担,计算不考虑水泥土对型钢强度和刚度的贡献。
- (4)支护结构计算包含内力变形计算、地表沉降计算、整体稳定计算、抗倾覆计算、型钢承载力计算、水泥土抗剪验算。
- (5)采用同济启明星深基坑支挡结构设计计算软件 FRWS v9.0。

2.2 计算结果

2.2.1 内力变形计算

基坑内力计算结果包络图如图 3 所示。

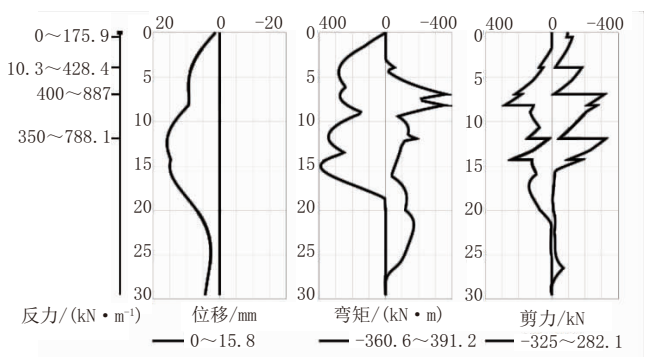


图 3 基坑(15.0 m 深断面)内力计算结果包络图

由图 3 可以看出:

- (1)基坑开挖至坑底工况,型钢所受正弯矩最大,为 391.2 $\text{kN}\cdot\text{m}$;拆除最下道支撑的工况,型钢所受负弯矩最大,为 -360.6 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。
- (2)基坑开挖至坑底工况,型钢所受正剪力最大,为 282.1 kN ;拆除最下道支撑的工况,型钢所受负剪力最大,为 -325.0 kN 。

(3)基坑最大水平位移为 15.8 mm。本工程基坑变形等级按一级控制,基坑水平位移限值为 0.14% H (H 为基坑深度),为 21 mm。最大水平位移满足设计要求。

2.2.2 地表沉降计算

计算方法:同济抛物线模式。地表最大沉降值为 13.6 mm,如图 4 所示。

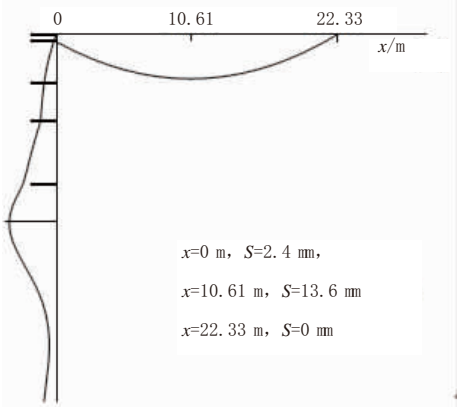


图 4 基坑(15.0 m 深断面)地面沉降图

2.2.3 整体稳定计算

整体稳定性计算采用圆弧滑动条分法,整体稳定性计算结果如图 5 所示,基坑整体稳定性系数 $K=1.36$,满足设计要求。

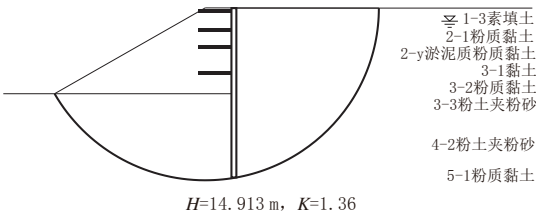


图 5 基坑(15.0 m 深断面)整体稳定计算图

2.2.4 抗倾覆计算

以最下道支撑为转动点的抗倾覆计算结果如图 6 所示,基坑抗倾覆系数 $K=1.31$,满足规范^[2]要求。

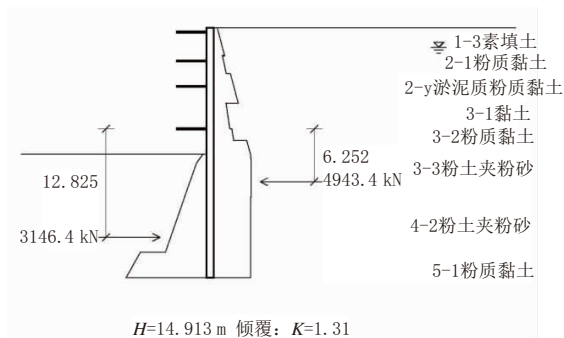


图6 基坑(15.0 m深断面)抗倾覆计算图

2.2.5 型钢钢材抗弯强度验算

$$\sigma = \frac{1.25\gamma_0 M_k}{W} \leq f$$

式中: σ 为钢板桩截面边缘处最大应力; M_k 为设计的弯矩标准值; γ_0 为重要性系数,取1.1; W 为H型钢的截面模量; f 为H型钢的抗弯强度设计值,为205 MPa。

经计算, $\sigma = 136 \text{ MPa} \leq [\sigma] = 205 \text{ MPa}$ 。

2.2.6 型钢钢材抗剪强度验算

$$\tau = \frac{1.25\gamma_0 V_k S}{I \cdot t_w} \leq f_v$$

式中: V_k 为型钢水泥土搅拌墙的剪力标准值; S 为H型钢的中和轴的面积矩; I 为H型钢的毛截面惯性矩; t_w 为型钢的腹板厚度; f_v 为H型钢的抗剪强度设计值,为125 MPa。

经计算, $\tau = 65.5 \text{ MPa} \leq f_v = 125 \text{ MPa}$ 。

2.2.7 钢材与水泥土间错动受剪承载力验算

受剪承载力验算分为:钢材与水泥土间错动受剪承载力验算、水泥土最薄弱截面的局部受剪承载力验算,示意图分别为图7、图8。

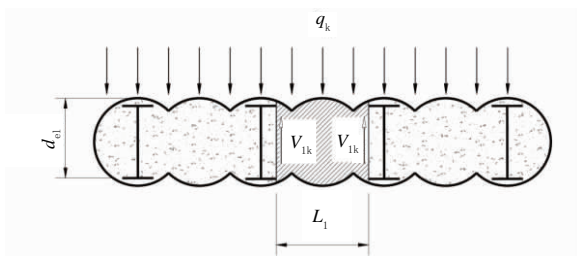


图7 型钢与水泥土间错动受剪承载力验算示意图

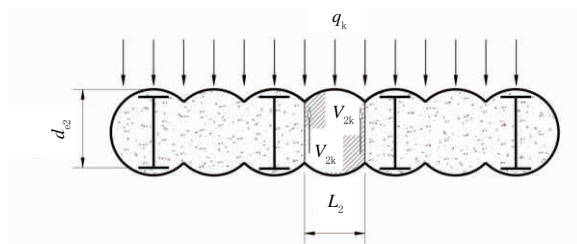


图8 水泥土最薄弱截面局部受剪承载力验算示意图

$$\tau_1 = \frac{1.25\gamma_0 V_{1k}}{d_{e1}} = \frac{1.25\gamma_0 q_k L_1}{2d_{e1}} \leq \tau \leq \frac{\tau_{ck}}{1.6}$$

式中: τ_1 为H型钢与水泥土的错动剪应力值; V_{1k} 为H型钢与水泥土的错动剪力标准值; q_k 为H型钢水泥土搅拌墙的侧压力强度标准值; L_1 为相邻H型钢之间的净距; τ 为水泥土的抗剪强度设计值; d_{e1} 为水泥土墙体有效厚度; τ_{ck} 为水泥土抗剪强度标准值,可取搅拌桩28 d龄期无侧限抗压强度的1/3。

经计算,基坑深度15 m处钢材与水泥土间错动受剪 $\tau_1 = 180.3 \text{ kPa} < \tau = 208.2 \text{ kPa}$ 。

2.2.8 水泥土最薄弱截面局部受剪承载力验算

$$\tau_2 = \frac{1.25\gamma_0 V_{2k}}{d_{e2}} = \frac{1.25\gamma_0 q_k L_2}{2d_{e2}} \leq \tau \leq \frac{\tau_{ck}}{1.6}$$

式中: τ_2 为水泥土最薄截面的剪应力设计值; V_{2k} 为水泥土最薄截面的剪力标准值; L_2 为水泥土相邻最薄截面的有效净距; d_{e2} 为水泥土最薄截面墙体的有效厚度。

经计算,基坑深度15 m处的水泥土最薄弱截面剪应力 $\tau_2 = 158.8 \text{ kPa} < \tau = 208.2 \text{ kPa}$ 。

2.2.9 设计结论

(1)根据基坑内力计算结果,型钢弯曲应力、剪应力均满足材料性能要求,且富余量较大。

(2)基坑整体稳定性、抗倾覆计算、地表沉降、基坑水平位移,均满足设计要求。

(3)钢材与水泥土、水泥土最薄弱位置的抗剪验算,是关系到基坑安全的重要验算,也是SMW工法桩能否在超深基坑中应用的关键性指标。从计算结果可以看出,当搅拌桩无侧限抗压强度为1.0 MPa时,基坑15 m深度处钢材与水泥土的剪应力虽然满足水泥土抗剪强度设计值,但富余量较小,已接近容许值。

(4)SMW工法桩相比于钻孔灌注桩,刚度较小,基坑变形相对较大(基坑最大水平位移为15.8 mm,最大地表沉降值为13.6 mm)。

3 施工阶段验证分析

3.1 围护桩体水平位移

在基坑深15 m位置,分别设2组桩体水平位移监测点CX4、CX10。其中,监测点CX4数据如图9所示。

从图9可以看出,随着基坑开挖,围护桩水平位移逐渐增大,竖向在11~16.5 m深度范围内达到最大。在底板混凝土浇筑完成5 d后,最大水平位移有所减少,同时桩顶负位移也有明显增加。直至顶板混凝土浇筑完成后,水平位移变化平稳。最大水平位移

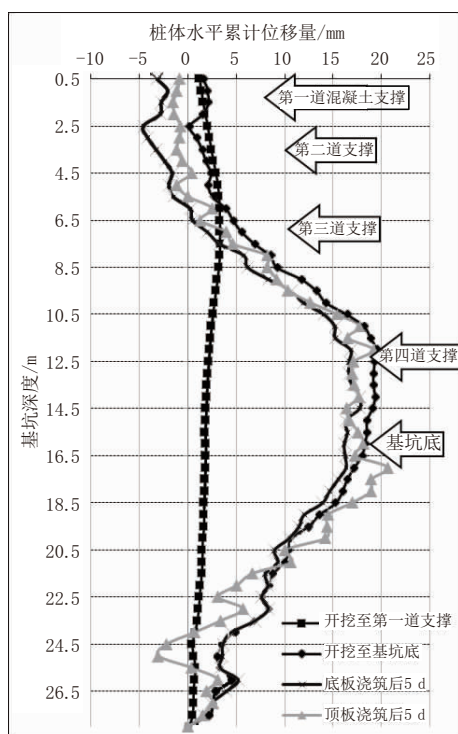


图9 桩体水平位移 CX4 监测数据

值 $\delta_{\max} = 18.44 \text{ mm} = 1.23\% H$, 与设计结论基本相吻合。

3.2 地表沉降

5月3日基坑开始开挖,至6月6日基坑开挖至坑底标高。在基坑深15 m位置,分别设2组地表沉降监测断面 DB4、DB10,每组断面分别设5个地表沉降监测点。监测点 DB4-1~DB4-5、DB10-1~DB10-5 距离基坑边的距离分别为:2 m、5 m、10 m、17 m、28 m。其中,地表沉降监测点 DB4 数据如图10所示。从图10可以看出,DB4-1、DB4-2 随基坑开挖沉降值逐渐加大,地表最大沉降量为-7.27 mm。DB4-3 初期随基坑开挖沉降值逐渐加大,5月17日后开始隆起,最终隆起值为0.47 mm。距离基坑较远的 DB4-4、DB4-5,开挖初期均为微隆起状态,随着基坑见底,监测数据由隆起逐步转为沉降状态,最终沉降值固定为-3.87 mm。基坑开挖过程中,地表最大沉降值为-7.27 mm,远小于理论计算值-13.6 mm,满足基坑变形控制要求。

3.3 支撑轴力监测值

在基坑深15 m位置,竖向架设1道混凝土支撑+3道钢支撑,分别布置支撑轴力监测点 ZL5-1~ZL5-4。支撑轴力 ZL5 数据如图11所示。

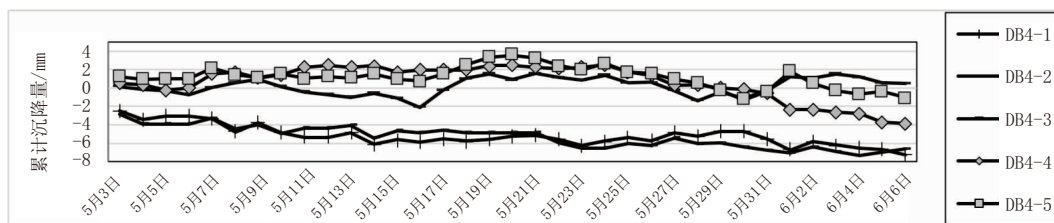


图10 地表沉降断面 DB4 累计沉降值监测数据

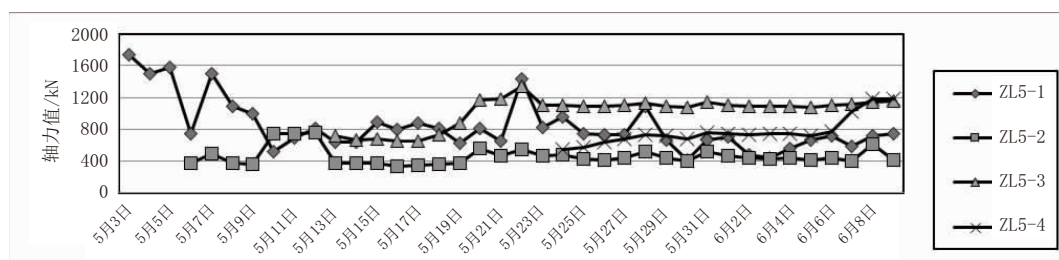


图11 支撑轴力 ZL5 轴力值监测数据

从图11可以看出,第一道混凝土支撑轴力在刚架设时支撑轴力最大达到1739 kN,随着首层土方开挖,轴力逐渐减小至409 kN。

第二道钢支撑轴力在架设时短暂达到760 kN,随后维持在420 kN左右。

第三道钢支撑轴力在架设时为700 kN,随基坑开挖维持在1100 kN左右。

第四道钢支撑轴力在架设时为550~750 kN,随基坑开挖见底,轴力突增至1200 kN左右。

支撑轴力监测数据与理论计算对比情况见表2。

从表2可以看出,第一道混凝土支撑最大值与理论值基本相吻合,浇筑完成后测得409 kN轴力值,分析可能由于混凝土体积收缩在自重荷载下发生徐变引起轴力异常。

第二至第四道钢支撑,变化趋势基本与理论计算值一致。第三道钢支撑轴力最大。第四道支撑轴力最大值约为第三道支撑最大轴力的88%,第二道支撑轴力最大值约为第三道支撑最大轴力的50%。

基坑编号	表 2 支撑轴力对比		单位:kN
	支撑轴力		
	现场监测数据	理论设计值	
第一道混凝土支撑	409~1 739	0~1 583	
第二道钢支撑	358~762	31~1 285	
第三道钢支撑	658~1 345	1 200~2 661	
第四道钢支撑	545~1 183	1 050~2 364	

钢支撑监测数据最大值与理论值差异的原因分析:设计时,钢支撑预加轴力按支撑轴力的 70%进行预加,导致理论计算值偏大。实际现场施工时,支撑预加轴力未施加至设计值,导致基坑开挖时,轴力监测数据偏小。

4 结 语

本文以苏州某基坑工程为案例,通过理论计算

分析 SMW 工法桩的变形等规律,并结合现场施工监测数据进行验证,得到以下结论:

(1)SMW 工法桩可作为深度 15 m 左右基坑的围护结构,且在工期、环保、经济性上具有明显优势。

(2)15 m 基坑深度下,钢材承载力满足性能要求且有较大富余量。可通过减小支撑竖向距离,增加支撑层数,可控制基坑变形。

(3)随着基坑深度的增加,侧向水土压力逐渐加大。钢材与水泥土、水泥土最薄弱位置的抗剪,是关系到基坑安全的重要因素。通过增加 SMW 工法桩无侧限抗压强度,可提高基坑安全系数。

参考文献:

[1] JGJ/T 199—2010,型钢水泥土搅拌墙技术规程[S].
[2] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].

(上接第 286 页)

[9] 彭功勋,赵旭光,张陆军.管波探测法在广州西北部复杂岩体桩基勘察中的应用[J].广东土木与建筑,2018,25(11):5-9,16.
[10] 单娜林.工程地震勘探[M].北京:冶金出版社,2006.
[11] 李学文,郭金根,饶其荣.桩位溶洞探测新技术—管波探测法[J].工程地球物理学报,2005,2(2):129-133
[12] 李望明,吴述来,易强,等.利用管波信息进行定量解释的方法[J].物探与化探,2017,41(2):311-315.
[13] 马锦国.地震勘探在桩底岩溶探测的效果分析[J].工程地球物理学报,2019,16(2):168-173.
[14] 刘春生,石振明,刘臻,等.复杂岩溶地区桩位岩溶探测方法研究综述 [C]//第十五届全国工程物探与岩石工程测试学术会论文集,2017:7-3.
[15] 林少忠.管波探测法在英德市北江三桥岩溶勘察中的应用[J].西南公路,2013(2):219-222.