

# 长输管道工程顶管工作井 SMW 工法参数影响变形研究

陈 烁 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026)

**摘 要:** 依托于某沿海长输管道项目基坑工程, 利用有限元分析软件, 研究了型钢布置形式、支护桩入土深度、不同型钢型号、不同预加支撑轴力等参数对 SMW 围护结构变形的影响, 得出最优设计参数。

**关键词:** 长输管道工程; SMW 工法; 变形分析

顶管穿越发送井、接收井基坑常用的支护形式有钢筋混凝土竖井支护、拉森钢板桩支护、钻孔灌注桩、地下连续墙、SMW 等。在某沿海长输管道项目发送井基坑设计过程中, 面临基坑开挖深度大、地下水位高等问题, 常用的钢筋混凝土竖井及拉森钢板桩支护形式不能满足支护要求。SMW 工法是利用三轴搅拌桩, 以水泥浆作为固化剂, 在土层中与土拌合形成水泥土, 并在水泥土混合体硬化前插入 H 型钢作为应力补强材料, 形成的连续完整地下墙体。SMW 工法基坑支护能加快施工速度, 还能有效节省工程费用, 经多种支护方案对比分析, 最终确定超过 8m 深基坑采用 SMW 工法支护。

SMW 工法具有止水性能好, 构造简单, 型钢插入深度一般小于搅拌桩深度, 施工速度快, 排土量少, 型钢可回收重复使用, 成本低, 对周围地层的影响小等特点。该工法以水泥土搅拌桩法为基础, 凡是适合应用水泥土搅拌桩的场合都可以使用该工法, 特别适合于以黏土和粉细砂为主的松软地层, 含砂卵石的地层要经适当处理方可采用。SMW 工法适宜的基坑深度与施工机械有关, 在国内开挖深度 6~13m 的基坑比较适宜, 在国外如日本开挖深度达到 20m 以上时也曾应用。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 工程地质概况

表 1 土层物理力学指标

| 岩土名称               | 层厚          | 层底标高           | 含水率  | 孔隙比   | 重度                | 黏聚力  | 内摩擦角 |
|--------------------|-------------|----------------|------|-------|-------------------|------|------|
|                    |             |                | %    | -     | kN/m <sup>3</sup> | kPa  | °    |
| 2 层粉质黏土            | 11.90~3.90m | 1.860~1.220m   | 27.5 | 0.690 | 20.2              | 32.0 | 15.7 |
| ③ <sub>1</sub> 层粉土 | 2.50~3.80m  | -4.360~-2.580m | 26.3 | 0.775 | 19.1              | 16.0 | 21.0 |
| ③ <sub>2</sub> 层粉质 | 4.50~4.80m  | -8.860~-7.380m | 28.8 | 0.843 | 18.7              | 24.7 | 13.1 |

根据岩土工程勘察报告, 穿越场地地层为填土 ( $Q_{m4}$ )、第四系全新统冲积层黏性土 ( $Q_{al4}$ ) 及海相沉积层粉土 ( $Q_{m4}$ )、黏性土 ( $Q_{m4}$ ) 等, 自上而下

共分为 4 个工程地质层, 各土层地质及物理力学指标 (见表 1)。根据岩土工程勘察报告, 穿越场地地下水位埋深为 1.20~2.40m, 地下水稳定水位高程为 1.940~2.220m。勘探深度内场地的地下水类型主要为第四系孔隙潜水, 补给来源以大气降水及侧向径流为主, 以蒸发和地下径流排泄, 地下水年变化幅度约 1.00m。

### 1.2 入土深度的确定

在型钢水泥土复合搅拌桩墙计中需确定两部分入土深度: ① H 型钢的入土深度  $D_h$ ; ② 水泥土搅拌桩的入土深度  $D_c$ 。为了在基坑施工结束后型钢能顺利回收, 一般型钢的入土深度可比水泥土搅拌桩的入土深度小一些。型钢的入土深度主要由基坑的抗隆起稳定性和挡土墙的内力、变位不超过允许值, 以及能顺利拔出等条件决定。在进行挡墙结构内力、变位和基坑抗隆起稳定分析时, 挡墙结构的深度仅计算至型钢底端, 不计型钢底面以下那部分水泥土搅拌桩对抗弯、抗隆起的作用。水泥土搅拌桩的入土深度主要由 3 方面条件决定: ① 确保坑内降水不影响到基坑外环境; ② 防止管涌发生; ③ 防止坑底隆起过大。建模过程中采用工程类比法, 初步确定  $D_h$  长度为 11.34m (型钢总长 20m)。  $D_c$  的长度由管涌计算和确保坑内降水不影响基坑外的环境以及防止底鼓发生等因素确定。水泥土搅拌桩的入土深度一般要比 H 型钢的入土深度要大一些, 取  $D_c$  的长度比  $D_h$  大 1m。

### 1.3 计算模型

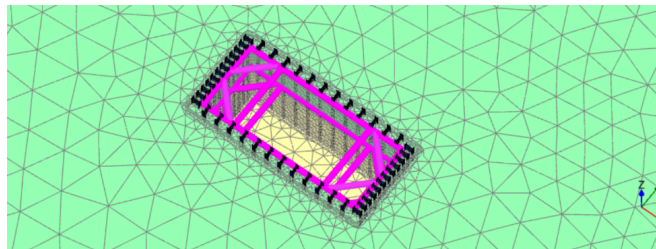


图 1 有限元计算三维模型图

本模型取几何尺寸 76m × 66m × 40m (长 × 宽 × 高) 建立模型, 模型内土层分为三层, 型钢布置形式

为跳一插一型布置, 型号采用 HN700×300。围护结构开挖深度按实际情况考虑取 8.66m, 水泥土桩与型钢长度类比其他工程取 20m, 布置两道内支撑, 距离地面分别为 0.7m 和 3.86m。计算的边界条件为: 模型上表面为自由面, 侧面限制法向位移, 底面为固定约束, 网格划分后的基本模型 (图 1)。

#### 1.4 基本假设

本文在建立数值计算模型时, 提出如下假设: ①基坑土层是成层分布的, 假定水泥土、型钢以及周围的土体均为理想弹塑性体; ②由于水泥土的约束作用, 可不考虑型钢的屈曲; ③假定水泥土和型钢间的粘结力足够大, 不存在相对滑动; ④将圆截面的水泥土桩简化为与圆内切的矩形, 未考虑的部分作为安全储备。

#### 1.5 参数选择

土体本构模型选用修正 Mohr-coulomb 模型, 选取基坑开挖范围内分布较广的土层为代表, 简化其他较少的土层, 根据地质情况, 土体计算参数选取见表 1。型钢的翼缘和腹板通过板单元模拟, 采用线弹性模型, 其弹性模量  $E=210\text{GPa}$ , 密度  $\rho=7800\text{kg/m}^3$ , 泊松比  $\nu=0.25$ 。钢支撑和腰梁通过梁单元模拟, 采用线弹性模型, 计算参数同型钢。

水泥土桩采用弹性模型, 其物理力学参数采用参考文献<sup>[1]</sup>提供的数据, 弹性模量  $E=210\text{MPa}$ , 密度  $\rho=2000\text{kg/m}^3$ , 泊松比  $\nu=0.2$ 。水泥土搅拌桩直径  $D$  为 850mm, 桩间距  $t$  为 600mm。水泥土桩按等价的地下连续墙设计, 壁厚取  $h=850\text{mm}$ 。

### 2 围护结构参数对变形的影响

#### 2.1 型钢布置形式对支护结构变形的影响

型钢水泥土搅拌墙中型钢的间距和平面布置形式应根据计算确定, 常用的内插型钢布置形式可采用密插型、插二跳一型和插一跳一型三种。

在第二节初步建立基坑三维有限元力学特性模型时, 型钢采用插一跳一的形式进行模拟, 现分别对 3 种型钢布置形式进行数值模拟, 研究不同型钢布置形式对支护结构位移的变化规律, 不同型钢布置形式下桩身水平位移 (图 2)。

由图 2 可知, 3 种型钢布置形式桩身水平位移曲线变化规律较为一致, 围护结构最大变形均位于坑底附近。密插型最大侧向位移为 18.46mm, 插二跳一型最大侧向位移为 15.45mm, 插一跳一型最大侧向位移为 13.34mm, 密插型布置最大水平位移要比插一跳一型布置情况下减小 27.8%。具体采用哪种内插型钢的布置方式, 要结合工程地质条件等因素综合考虑。增加型钢的密度能明显提高支护结构的抵抗变形能力,

但增加型钢将造成工程成本的提高, 也给现场施工带来难度。结合考虑基坑施工环境以及水平位移模拟计算结果, 当采用“插一跳一”布置形式时, 能较好的满足变形及成本控制要求。

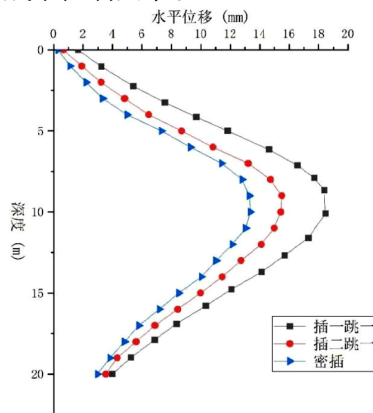


图2 型钢布置形式对基坑变形的影响

#### 2.2 支护桩入土深度对围护结构变形的影响

本节型钢形式选用插一跳一型, 支护桩的入土深度分别取  $0.5H$  (桩长 13m)、 $0.75H$  (桩长 15m)、 $1.0H$  (桩长 17.5m)、 $1.2H$  (桩长 19m)、 $1.4H$  (桩长 21m), 其中  $H$  为开挖深度, 进行计算, 型钢长度与支护桩相同。为了分析支护桩入土深度对基坑垂直方向变形的影响, 本模型垂直方向选择 3 倍开挖深度范围。支护桩入土深度小于  $0.5H$  时, 当开挖至坑底附近时, 数值计算结果表明坑底位移过大, 已经不满足基坑稳定整体稳定性的要求。因此, 支护结构的入土深度一定要保证, 否则导致支护结构位移增加, 造成“踢脚”现象, 影响基坑稳定。

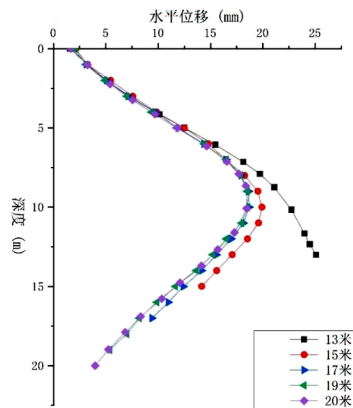


图3 支护桩入土深度对基坑变形的影响

图3为不同入土深度下支护结构的水平位移曲线, 当支护桩入土深度为  $0.5H$  时, 支护桩变形特点与其他长度变形不同, 最大水平位移出现在支护桩最下部, 且变形较大, 此时基坑虽未破坏, 但是处于不稳定状态, 当支护桩入土深度大于  $0.5H$  时, 围护结构水平位移最大值均发生在基坑深 10m 附近。当入土深

度为  $0.75H$  时, 支护桩的水平位移最大值为  $20.3\text{mm}$ , 当入土深度为  $1.0H$  时, 支护桩的水平位移最大值为  $18.70\text{mm}$ , 当入土深度超过  $1.0H$  后效果不再明显。支护结构的埋深应该满足一定的要求, 增大埋深能够减少支护结构的侧向位移, 但是当入土深度达到一定深度后, 再增加入土深度对减小支护结构水平位移的效果甚微。支护桩入土深度是支护结构设计的重要内容, 若入土深度过浅, 会产生危险。但是单纯用增大入土深度来控制变形, 其效果并不明显, 还会增加工程造价, 要保持基坑稳定性, 需要综合考虑这些因素。根据数值模拟分析结果, 基坑围护结构嵌固深度考虑 1 倍坑深时, 能较好满足稳定性及经济性要求。

### 2.3 型钢截面积对支护结构变形的影响

本节数值模型中周围土体和水泥土参数均采用第二章模型参数, 桩长均为  $20\text{m}$ , 仅改变型钢的型号, 选取规范推荐的  $\text{HN}500 \times 200$ 、 $\text{HN}500 \times 300$ 、 $\text{HN}700 \times 300$ 、 $\text{HN}800 \times 300$ 、 $\text{HN}900 \times 300$  五种不同型钢型号, 分析计算不同型钢型号对支护结构的变形影响。图 4 为不同型钢型号下支护结构的水平位移曲线。

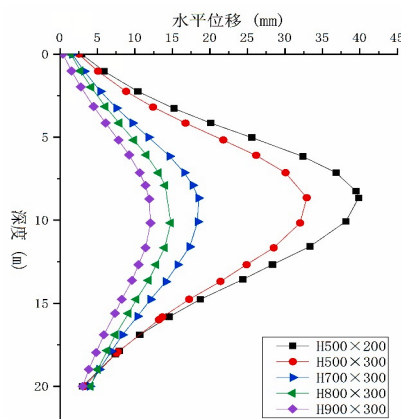


图4 不同型钢型号对基坑变形的影响

由图 4 可见, 三种不同型钢型号的水平位移曲线大致相同。当型钢型号从  $\text{HN}500 \times 300$  增大到  $\text{HN}700 \times 300$  时, 支护结构最大水平位移从  $32.86\text{mm}$  减小到  $18.41\text{mm}$ , 减小率为  $43.97\%$ ; 当型钢型号从  $\text{HN}700 \times 300$  增大到  $\text{HN}900 \times 300$  时, 支护结构最大水平位移从  $18.41\text{mm}$  减小到  $12.07\text{mm}$ , 减小率为  $34.44\%$ 。说明当型钢型截面积较小时, 增大型钢截面积对减小支护结构水平位移效果明显; 当型钢截面达到  $\text{HN}700 \times 300$  后, 继续增大型钢截面积对减小支护结构水平位移效果开始下降。结合基坑设计规范对变形的要求, 型钢规格应采用  $\text{HN}700 \times 300$ 。

### 2.4 预应力对支护结构变形的影响

本节选取变形较大时的型钢截面尺寸, 即选取  $\text{HN}500 \times 300$  型钢, 预应力取 3.3 节计算值的  $10\%$ 、

$50\%$ 、 $80\%$ 、 $100\%$  四种情况, 通过改变基坑两道支撑不同预加轴力情况进行计算分析。图 5 为不同支撑预加轴力时围护结构水平位移曲线, 各道支撑的轴力由设计值的  $10\%$  增加到  $100\%$  时, 支护结构最大水平位移  $29.97\text{mm}$ , 减小到  $20.51\text{mm}$ , 说明增加基坑预加轴力可以有效减小支护结构变形, 因此, 对变形要求严格的工程中, 通过加大支撑的预加轴力来减小变形是行之有效的。

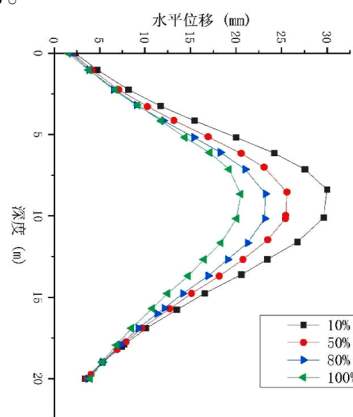


图5 不同预加轴力对基坑变形的影响

## 3 结论

依托于某沿海长输管道项目基坑工程, 通过理正计算及数值模拟分析, 主要得出以下结论: ①采用密插型水泥土桩的土体水平位移最小, 故增加型钢的密度能明显提高支护结构的变形能力。但增加型钢明显提高工程成本, 也给现场施工带来难度, 实际工程应结合工程地质条件等因素综合考虑; ②当支护桩入土深度为  $0.5H$  时, 基坑由于水泥土桩入土深度过小入土深度不够而不满足稳定性要求。在入土深度满足支护结构稳定性要求后, 增大围护结构入土深度一定程度上能减小围护结构最大变形, 但当围护结构入土深度超过 1 倍开挖深度后, 再增加入土深度对减小支护结构水平位移的效果很小; ③型钢的型号对基坑的变形影响较大, 说明当型钢型截面积小于  $\text{HN}700 \times 300$  时, 型钢截面尺寸对控制围护结构变形作用较明显, 当型钢型截面积大于  $\text{HN}700 \times 300$  时, 型钢截面尺寸对与控制围护结构变形作用效果开始下降; ④增加支撑预加轴力可以有效的减小基坑围护结构最大变形; ⑤通过数值模拟分析, 确定最优方案为内插  $\text{HN}700 \times 300 \times 13 \times 24$  型钢, 型钢长  $17.5\text{m}$ , 布置形式采用插一跳一。

### 参考文献:

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册 (第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.