

复杂地质条件下深沟槽钢板桩支护体系稳定性 与参数优化设计研究

刘洋

(中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津 300450)

摘要: 随着城镇化进程的加速, 深基坑支护结构的安全性与经济性成为城市雨污水管网工程的关键问题。本文以遂宁市船山区开善路雨污水管网工程为背景, 针对复杂地层中钢板桩支护体系的优化展开研究。通过建立数值模型并对比现场监测数据, 验证了模型的合理性, 进而分析首道支撑布置位置与内支撑刚度对支护性能的影响。研究表明: 本工程采用深沟槽第一道支撑布置在 1.4 m、第二道支撑位置固定于开挖深度 3.8 m、支撑材料为 Q235b 的支护方案时, 支护体系抗隆起稳定系数 $K_b = 3.116$, 抗倾覆稳定系数 $K_o = 1.893$, 整体稳定系数 $K_s = 1.749$, 均满足规范要求。在此基础上, 对首道支撑位置与内支撑刚度进行优化分析可得: 首道支撑位于基坑顶 0.8 ~ 2.0 m 时, 可降低钢板桩最大水平位移约 15%; 若首道支撑与下层支撑间距小于 1.2 m, 则协同约束效应减弱; 适度提升内支撑刚度可进一步抑制侧向变形, 实际设计需兼顾经济性进行综合比选。研究结果可为类似地质条件下深基坑支护设计提供理论与应用参考。

关键词: 深沟槽; 钢板桩支护体系; 稳定性分析; 参数优化设计

中图分类号: TU753.3

文献标识码: A

Research on Key Construction Technologies of Water-Stop Steel Plates in Deep Trenches under Complex Geological Conditions

LIU Yang

(China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd. Fifth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the safety and cost-effectiveness of deep excavation support systems have become critical issues in urban stormwater and wastewater pipeline projects. This study is based on the stormwater and wastewater pipeline project along Kaishan Road in Chuanshan District, Suining City, and focuses on the optimization of a steel sheet pile support system in complex ground conditions. A numerical model was established and validated through comparison with field monitoring data, after which the effects of the installation position of the first strut and the stiffness of internal bracing on the support performance were analyzed. The results indicate that, for the case study trench, when the first strut is installed at a depth of 1.4 m, the second strut is fixed at an excavation depth of 3.8 m, and Q235b steel is used as the bracing material, the uplift stability coefficient is $K_b = 3.116$, the overturning stability coefficient is $K_o = 1.893$, and the overall stability coefficient is $K_s = 1.749$, all of which satisfy the relevant code requirements. On this basis, an optimization analysis of the first strut position and internal bracing stiffness shows that placing the first strut within 0.8 ~ 2.0 m below the ground surface can reduce the maximum horizontal displacement of the steel sheet piles by approximately 15%. However, if the spacing between the first strut and the lower strut is too small, the synergistic restraint effect is weakened. Appropriately increasing the stiffness of the internal bracing can further restrain lateral deformation, while economic efficiency should be comprehensively considered in the final design. The findings of this study provide theoretical guidance and practical reference for the design of deep excavation support systems under similar geological conditions.

Key words: deep trench; steel sheet pile support system; stability analysis; parameter optimization design

收稿日期: 2025-10-10

作者简介: 刘洋, 工程师, 本科, 研究方向为工程技术管理

随着我国城镇化进程的加速推进，城市基础设施建设规模不断扩大。雨污水管网工程作为城市生命线工程的重要组成部分，其施工安全性和经济性日益受到关注。特别是在复杂地质条件下的深基坑开挖工程中，支护结构的设计与优化是保障工程安全的关键技术问题^[1-3]。

目前，已有大量学者针对深基坑工程中的钢板桩支护技术展开研究^[3-4]。例如，任俊刚等^[5]通过动力有限元模拟，研究了桩锤振动作用下双排悬挂钢板桩支护岸坡的稳定性时程变化；朱江^[6]利用有限元模型分析了不同开挖尺寸对窄型基坑钢板桩支护性能的尺寸效应；喻卫华等^[7]探讨了锚拉式钢板桩在深厚软土层深基坑中的适用性；杨军峰^[8]提出了拉森钢板桩与型钢内支撑复合支护方案以提升沟槽稳定性；王志坚等^[9]对比了自进式钢管桩与拉森钢板桩在管廊基坑中的施工与经济差异；李银川等^[10]通过数值模拟优化了钢板桩支撑结构设计；张朗^[11]监测并分析了顶管深基坑中拉森钢板桩的变形规律；张健等^[12]通过现场试验研究了钢板桩变形及桩土相互作用机制。

然而，现有研究多集中于单一支护形式或特定地质条件，对于复杂地层中钢板桩支护体系的参数优化研究相对较少，特别是在支撑布置位置和刚度优化方面的系统性研究尤为不足。因此，本研究以遂宁市船山区开善路雨污水管网工程为背景，结合复杂地质条件，采用钢板桩支护技术开展稳定性分析，同时建立钢板桩支护结构的数值模型，通过与现场实际监测数据对比，验证该模型的合理性与准确性；再从首道钢管支撑布置位置和内支撑钢管刚度两个角度出发对管网施工过程中深基坑支护参数开展优化设计，研究成果可为类似工程提供参考。

1 工程及地质概况

1.1 工程概况

遂宁市船山区开善路雨污水管网工程项目建设场地位于四川盆地腹地涪江中游，属于典型城市道路及管网改造区域。该工程的主要施工内容包括雨水管网、雨水泵站及新增污水管网建设（图1）。其中，雨水管道埋深3.3~5.9 m，管径为1 600~1 800 mm，采用Ⅱ级钢筋混凝土管明挖施工；污水管道埋深5.05~6.37 m，管径为1 600 mm，采用HDPE中空壁塑钢缠绕管明挖施工。

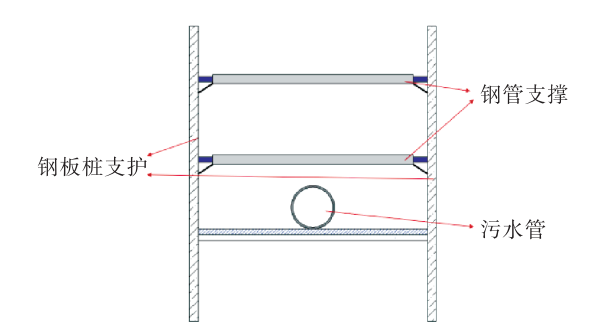


图1 工程概况

1.2 地质及水文情况

工程场地地貌为城市建成区，地层结构复杂。场地自上而下依次分布素填土、可塑及软塑粉质黏土、卵石层，下伏基岩为侏罗系泥岩。各土层物理力学参数如表1所示。场地地下水类型主要包括上层滞水、卵石层孔隙潜水及基岩裂隙水，地下水位埋深浅、水位较高，且受季节性降水影响显著，对基坑开挖过程中的止水与边坡稳定均存在不利影响。

表1 地层物理力学参数

土层名称	重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
素填土	18.2	5.2	5.2	8
粉质黏土	19.4	7.9	28	17
卵石层	20.8	24.5	10.6	28
泥岩	21.3	31.5	32	22

2 钢板桩支护技术

2.1 钢板桩支护组成

基坑内支撑采用Φ356 mm×12 mm钢管，沿沟槽长度方向分层布置，形成有效的空间受力体系。支撑系统的布置充分考虑钢板桩强度、稳定性及基坑变形控制要求，间距及数量根据实际地质条件和基坑深度进行优化设计。支护结构采用拉森型止水钢板桩，雨水管网沟槽分别选用6 m、9 m、12 m及15 m的Ⅳ型钢板桩，污水管网沟槽采用12 m的Ⅲ型钢板桩。钢板桩沿基坑侧壁双排布置，结合横向钢板桩或钢板，形成栅式空间受力体系。

该体系通过横向钢板桩与主桩的合理间距设计，有效提升了钢板桩的整体强度与刚度，增强了基坑侧壁的稳定。钢板桩材质选用Q235，满足基坑支护的强度与耐久性要求。为进一步提高基坑底部稳定性，基坑底部采用C30强度等级、厚度500 mm的封底混凝土。基坑角部封底

混凝土局部加厚至 1 000 mm，以增强角部受力性能。封底混凝土不仅能作为止水和防渗结构，同时兼作地下结构底板，充分发挥材料的综合效益。

2.2 支护流程

钢板桩支护施工实施步骤如下：①依据设计进行基坑测量与放线，准确定位钢板桩轴线；②安装导向架，采用振动锤逐根插设拉森钢板桩至设计标高；③遵循“分层开挖、及时支撑”原则，在挖土过程中同步安装钢管内支撑；④主体结构完成后，使用振动设备拔出钢板桩，并对桩孔进行回填处理。该流程确保了支护体系的及时形成与拆除，兼顾了施工效率与基坑稳定性。

2.3 支护结构稳定性验算

(1) 抗隆起验算。根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)规定的基坑抗隆起计算方法，结合本工程 9 m 钢板桩支护结构的设计参数，采用条分法和相关土层参数逐层验算，计算得到支护结构抗隆起稳定性系数 $K_h = 3.116$ ，远高于规范要求的不小于 1.60，满足基坑抗隆起稳定性要求。

(2) 抗倾覆验算。将 9 m 钢板桩支护结构视为连续墙整体，参考《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)规定的抗倾覆计算方法，代入本工程支护结构设计参数及土压力、支撑反力等数据，计算得到支护结构抗倾覆稳定性系数 $K_o = 1.893$ ，高于规范要求的不小于 1.20，满足抗倾覆安全性要求。

(3) 整体稳定性验算。本工程 9 m 钢板桩支护结构整体稳定性采用瑞典条分法进行验算，结合基坑土层结构和支护体系参数，计算得到整体稳定安全系数 $K_s = 1.749$ ，高于规范要求的不小于 1.30，满足基坑整体稳定性要求。

3 基于数值模拟的优化设计研究

3.1 基本假设

为提高计算效率并满足工程适用性，本项目基于工程地质特征及既有研究基础，对模型建立作如下理论简化^[13]：①岩层按均质层状分布处理，初始地应力场仅考虑自重应力作用。②支护结构及衬砌按理想弹性体模型处理。③不考虑岩土时效变形及时间相关性因素对围岩稳定性的影响。

3.2 数值模型建立

由于管网工程长度较大，通常采用分段施工的方式。因此，本研究在进行数值分析时，依据分段施工的实际情况结合典型断面，建立施工段内的基坑数值模型。考虑圣维南原理，为减小边界效应，基坑横向、纵向两侧土体距模型横向、纵向边缘均大于 3 倍的基坑开挖深度，因此模型尺寸为 60 m×40 m×27 m（长×宽×高）。其中模型地层本构采用 Mohr-Coulomb，物理力学参数按照表 1 进行设置。其余结构材料参数和单元类型如表 2 所示。钢板桩采用板单元模拟，内支撑采用梁单元模拟。为简化模拟过程、提高计算效率并保证模型收敛，钢板桩与地层、钢板桩与内支撑之间的连接与接触均采用共节点方式处理。即在不同接触部位，采用不同材料属性及网格划分，但在连接和接触区域共享节点，实现各部分的有效耦合。基坑模型底部采用固定约束，四周设置为法向约束，上部为自由边界。数值模型网格划分如图 2 所示，模型共 132 782 个节点和 54 243 个单元。

表 2 支护结构物理力学参数

结构名称	单元类型	本构模型	弹性模量 /(MPa)	容重 /(kN/m ³)	泊松比
钢板桩	2D 板单元	弹性	210 000	78.5	0.25
钢管内支撑	1D 梁单元	弹性	210 000	78.5	0.25

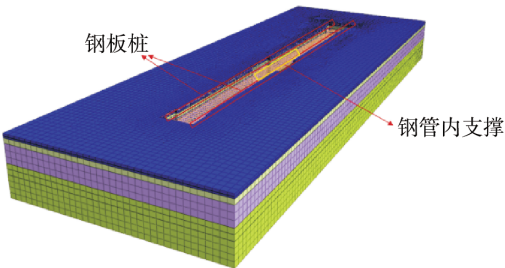


图 2 数值模型

在数值模拟中，参考实际工程施工阶段，设置模拟施工阶段，如表 3 所示。

表 3 模拟施工阶段

施工阶段	施工内容
I	平衡地应力并施工钢板桩
II	开挖基坑土体至 2.4 m
III	在距基坑顶部 0.8 m 处施工第 1 道内支撑
IV	开挖基坑土体至 3.8 m
V	在距基坑顶部 3.8 m 处施作第二道内支撑
VI	开挖基坑土体至 5.2 m
VII	浇筑封底混凝土

3.3 模型合理性验证

管网施工完成后,钢板桩水平与现场监测对比如图3所示。由图可知,无论是实测曲线还是模拟曲线,围护桩体侧向变形随着桩体深度的增加均表现出先增加后减小的“鼓胀形”,即钢板桩体两端的侧向变形较小,桩体中部侧向变形较大并在某个深度达到最大值。具体而言,钢板桩现场实测的最大侧向变形值为10.51 mm,最大变形对应深度为5.5 m,数值模型中对应位置的钢板桩结构最大侧向变形值为9.21 mm,最大变形的对应深度为5.8 m。模拟值与实测值最大变形差值为1.3 mm,其原因可能是场地地表施工荷载和坑外堆载的作用使实测的围护桩顶部侧向变形偏大,而数值模型未考虑施工期间基坑周边复杂的荷载情况和地面超载。但是数值模拟值与实际监测值变形规律相似且差值不大,因此该数值模型具备合理性。

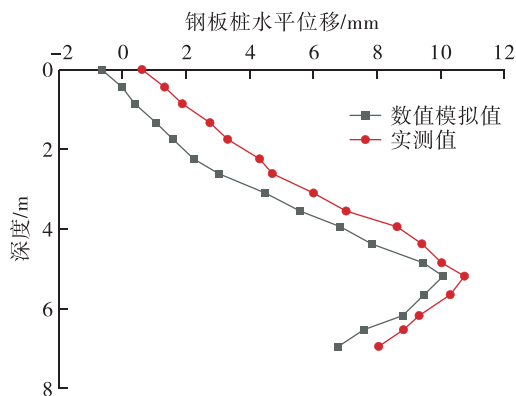


图3 数值模拟与实际监测对比

4 参数设计优化研究

4.1 首道钢管布置对钢板桩变形的影响

将第二道支撑位置固定于开挖深度3.8 m处,把第一道支撑分别布置在0.8 m处、1.4 m、2.0 m、2.6 m处,对钢板桩墙的侧向位移进行对比分析,结果如图4所示。由图可知,当第一道支撑由0.8 m下移至1.4 m和2.0 m时,第二道支撑附近的侧移抑制最为明显,而在第二道支撑以下,即3.8 m以下的钢板桩水平位移减幅则随深度逐步衰减。进一步将第一道支撑下移至2.6 m时,由于与第二道支撑竖向间距过小,墙体侧移不降反升,两道支撑难以形成有效协同,整体位移水平反而增大。据此可见,适度下移第一道支撑有利于控制钢板桩侧移,而两道支撑竖向距离过近不利于基坑变形的稳定控制。

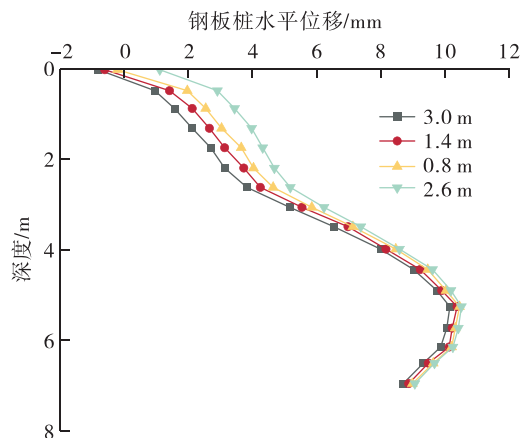


图4 不同首道支撑位置对应的钢板桩水平位移

分析其原因在于将钢板桩近似看作弹性梁—地基反力体系,支撑提供位移约束与转角约束,最大侧移通常出现在支撑间跨中或开挖面附近,第一道支撑下移后,更接近上部主动土压力合力作用区,可更有效分担上部推力,减少下传至第二道支撑的弯曲应力。而当两道支撑距离过近时,过近的支撑使反力集中于上部狭窄区,两道支撑难以形成分层分担的受力体系,土拱与侧向约束的协同被削弱,整体控制效果变差^[14]。

进一步分析其在不同支撑布置下的力学机制发现,支撑位置下移使其更接近主动土压力合力的作用点,可更有效地分担上部荷载,从而减少传递至下部桩体的弯矩。当第一道支撑布置在0.8~2.0 m处时,桩身弯矩分布更为均匀,跨中弯矩峰值降低,形成“上拉下撑”的协同受力体系。然而当第一道支撑继续下移至2.6 m、与第二道支撑竖向间距小于1.2 m时,两道支撑约束区域重叠,导致支撑反力集中在上部狭窄范围内,难以形成分层约束效应。此时桩体在中下部形成新的弯矩峰值,被动土压力区域未能充分发挥抗力,整体协同作用减弱,桩体侧移不降反升。说明支撑布置不仅影响位移大小,更通过改变桩身弯矩分布与土压力传递路径,决定支护体系的整体受力性能。

4.2 内支撑钢管刚度对钢板桩变形的影响

为分析内支撑刚度对钢板桩变形的影响,本文在钢管截面形式与尺寸保持不变的前提下,通过更换钢材强度等级来调整内支撑刚度,故而选取Q195、Q235a、Q235b、Q355四种材料。不同刚度条件下钢板桩水平变形如图5所示。随着内支撑刚度提高,基坑内壁水平位移整体呈减小趋势,具体而言,当材料为Q195时,钢板桩最大水平位移为11.75 mm;当材料为Q235a时,钢板桩最大水平位移为9.55 mm,较上一工况,最

大水平位移降低了 2.2 mm; 当材料为 Q355 时, 位移进一步降至 8.75 mm。

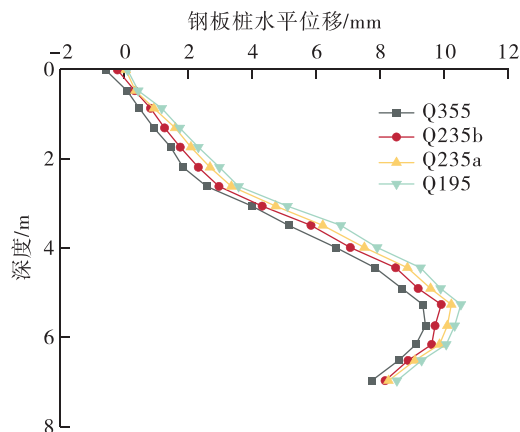


图5 不同支撑刚度对应的钢板桩水平位移

从受力机理上看, 支撑刚度直接影响其抗弯与轴向压缩刚度, 进而改变支撑对桩体的约束效能。刚度较高的支撑能更有效地限制桩体在土压力作用下的侧移与转动, 减小桩身曲率, 使桩体弯矩分布向更均匀的方向发展。同时, 刚度的提高增强了支撑系统的整体空间协同作用, 使各道支撑反力分配更合理, 被动区土体得以更早参与承载。然而, 刚度提升虽有利于变形控制, 却伴随材料成本显著增加。因此在工程设计中, 应依据变形控制目标, 综合考虑刚度效应与经济性, 在安全储备与造价之间取得平衡^[12-15]。

5 结论

本文依托遂宁市船山区的实际工程, 通过数值模拟与现场监测相结合的方法, 对复杂地层中深沟槽钢板桩支护体系的性能进行了系统分析, 主要结论如下:

(1) 支护体系稳定性满足规范要求。验算结果表明, 该工程中钢板桩支护结构的抗隆起稳定系数 $K_n = 3.116$ 、抗倾覆稳定系数 $K_o = 1.893$ 、整体稳定系数 $K_s = 1.749$ 均高于规范限值, 说明支护系统在复杂地质条件下具有可靠的安全储备。

(2) 首道支撑位置对变形控制影响显著。首道支撑设置在距基坑顶 0.8 ~ 2.0 m 范围内时, 能有效降低钢板桩最大水平位移, 降幅可达 15% 左右; 但若与第二道支撑间距过小, 则协同作用减弱, 反而不利于变形控制。

(3) 内支撑刚度提升可抑制侧向变形, 但需兼顾经济性。随着支撑钢材强度等级的提高, 钢板桩最大水平位移逐步减小, 说明增加刚度有助于变形控制; 在实际工程中应结合变形控制要求与材料成本, 进行刚度与造价的综合优化。

本研究成果适用于与本研究地质条件及开挖深度相近的明挖沟槽工程, 支护形式为双排拉森钢板桩结合钢管内支撑体系。研究中未考虑动力荷载、极端降水及周边复杂堆载等偶然工况的影响, 且数值模型对土体本构及支护-土相互作用进行了适当简化, 实际工程中应结合现场监测进行动态调整。后续研究将考虑土体流变、地下水动态变化等多因素耦合的时变分析, 并基于机优化算法对支撑布置、刚度、桩长等多参数进行优化, 由此完善深沟槽钢板桩支护领域的研究。

参考文献:

- [1] 余馨, 刘小刚, 陈恺. 沉积岩复杂环境下大管径污水管设计与施工技术[J]. 现代工程科技, 2025, 4(16): 1-4.
- [2] 田甜, 胡海英, 蒋乐欣, 等. 雨污水管混接及调蓄池对城市内涝的影响分析: 以广州市某高校为例[J]. 给水排水, 2024, 60(S1): 381-388.
- [3] 孔超. 跨河特大桥承台深基坑钢板桩围堰施工技术分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2023, 35(6): 73-78.
- [4] 张祥聪. 复杂地质环境下大型基坑支护与降水施工[J]. 浙江水利水电学院学报, 2021, 33(5): 56-60.
- [5] 任俊刚, 高永胜, 韩丰骏, 等. 桩锤冲击作用下钢板桩支护岸坡稳定性时程分析[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(1): 128-133.
- [6] 朱江, 吴干华. 软土地区窄型基坑钢板桩尺寸效应分析[J]. 江苏建材, 2025(4): 106-109.
- [7] 喻卫华, 马春景, 刘添俊, 等. 锚拉式钢板桩在软土地区深基坑中的应用[J]. 广州建筑, 2025, 53(8): 17-21.
- [8] 杨军峰. 拉森钢板桩施工技术在道路深基坑沟槽支护中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(15): 7-9.
- [9] 王志坚, 肖兴勇, 尹兴哲, 等. 自进式钢管桩与拉森钢板桩在管廊基坑中的应用对比分析[J]. 现代工程科技, 2025, 4(12): 97-100.
- [10] 李银川, 张兴诚, 杨科, 等. 电缆隧道深基坑沟槽钢板桩支护优化研究[J]. 安徽建筑, 2025, 32(6): 150-152.
- [11] 张朗. 顶管工作井深基坑拉森钢板桩施工变形分析[J]. 工程技术研究, 2025, 10(3): 30-32.
- [12] 张健, 杨立功, 张宇亭, 等. 钢板桩加固岸坡变形与桩土相互作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(S1): 202-206.
- [13] 郭晓航, 龚伦, 钟建, 等. 复合地层围岩分区对隧道稳定性的影响及支护优化[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(6): 52-65.
- [14] 王子鸣. 钢板桩在地下综合管廊工程建设中的应用[J]. 建筑科学, 2024, 40(3): 178.
- [15] 陈瑞生, 侯向阳, 周小勇. 悬臂式钢板桩弹性地基梁模型修正及嵌固深度算法优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 35-42.