

钢板桩支护在城市更新旧路改造工程中的应用研究

何俊雄, 唐 维

(中机中联工程有限公司, 重庆 400041)

摘要:为探究钢板桩支护在城市更新旧路改造工程中的应用效果,文章以 FLAC^{3D} 数值模拟为研究手段,分析了实际基坑开挖过程中的钢板桩水平位移、结构内力以及桩后土压力变化情况,研究表明:1)钢板桩水平位移沿桩长方向逐渐减小,基坑开挖结束后,桩身水平位移峰值出现在二次横撑附近 1.5 m 处,较首次开挖后的峰值位移增加 9.21%;2)钢板桩弯矩峰值出现在埋深 7.5 m 处,剪力峰值出现在埋深 8.3 m 处,第一道横撑上部钢板桩内力较小,结构内力在第二道横向支撑附近达到峰值;3)桩后土压力整体分布趋势随埋深增大而增大,二次横撑会桩后土压力的分布形式,土压力在埋深 5.5 m 处由峰值 138.6 kPa 陡降至 92.6 kPa,降低幅度达 33.2%,之后土压力呈现波动变化,直至开挖结束。本文研究成果可为城市道路改造工程中的钢板桩基坑支护工程提供一定的工程指导性建议。

关键词:钢板桩支护; 基坑工程; 受力分析; 数值模拟

中图分类号:U418.8;TU753

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)05-0036-04

doi:10.13402/j.gcjs.2025.05.059

Research on application of steel sheet pile support in the reconstruction project of urban renewal old road

HE Junxiong, TANG Wei

(CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400041, China)

Abstract: In order to explore the application effect of steel sheet pile support in the reconstruction project of urban renewal old road, using FLAC^{3D} numerical simulation as a research method, this paper analyzes the horizontal displacement, structural internal force and soil pressure changes of steel sheet piles in the actual excavation process, and draws the following main conclusions: 1) The horizontal displacement of steel sheet pile gradually decreases along the pile length direction. After the excavation of foundation pit, the peak value of the horizontal displacement of pile body appears at 1.5 m near the secondary transverse brace, which increases by 9.21% compared with the peak displacement after the first excavation. 2) The peak moment of steel sheet pile appeared at the buried depth of 7.5 m, and the peak shear force appeared at the buried depth of 8.3 m. The internal force of steel sheet pile at the upper part of the first transverse brace was small, and the structural internal force reached the peak near the second transverse support. 3) The overall distribution trend of earth pressure after the pile increases with the increase of the buried depth. The distribution pattern of earth pressure after the secondary transverse bracing changes sharply from the peak value of 138.6 kPa to 92.6 kPa at the buried depth of 5.5 m, with a decrease of 33.2%. After that, the earth pressure fluctuates until the end of excavation. The research results of this paper can provide some engineering guidance suggestions for the steel sheet pile foundation pit support engineering in urban road reconstruction projects.

Key words: steel sheet pile support; foundation pit engineering; FLAC^{3D} numerical simulation; force analysis

收稿日期: 2024-03-01

作者简介: 何俊雄(1986—),男,工程师,从事道路设计工作。

旧路改造过程中, 受城市空间布局和施工条件的影响, 基坑支护工程的应用较为广泛, 其中最为常见的支挡技术便是钢板桩支护工程, 钢板桩具有施工便捷, 建材环保, 适用条件广等优点, 在城市道路改造基坑支护工程中具有独特的优势^[1]。关于钢板桩的工程应用和理论研究已经相对成熟, 在工程应用方面: 胡海兵^[2]对某钢板桩基坑支护工程的施工过程进行了研究, 对基坑开挖和钢板桩支护的施工顺序进行了优化分析; 李贲^[3]对钢板桩围堰方案展开研究, 结果表明钢板桩对围堰工程的支护效果良好, 且对环境的影响较小。数值模拟方面, 刘迪等^[4]结合桩土相互作用, 模拟了双排钢板桩施工流程, 印证了传统双排钢板桩抗剪、抗滑稳定性理论计算方法; 陈磊等^[5]利用三维数值模拟软件 PLAXIS 3D 对钢板桩围堰进行了参数优化数值模拟, 结果表明桩间距 4.5 m 时稳定性最佳; 孔德国^[6]依据工程实际, 利用 Midas GTS /NX 模拟结果与实际监测对比发现: 数值模拟结果与实际数据误差在 3.6% 以内, 模拟效果良好。

关于钢板桩支护工程的应用与研究已较为完善, 本文以传统钢板桩支理论为依据, 结合老城改造中的基坑支护工程案例, 通过 FLAC^{3D} 数值模拟, 分析拉森钢板桩在道路改造工程中的变形规律、内力分布, 以及基坑沉降变化, 以期可为实际工程提供施工指导性意见。

1 有限元法

1.1 工程背景

广履路道路全长 1 188 m, 红线宽度为 16 m, 车行道宽度为 10 m, 设计时速为 20 km/h, 双向两车道布置, 道路等级为城市支路, 根据勘察结果, 场地地层主要覆第四系人工堆积 (Q^4_{al}) 路基填土、杂填土和素填土; 第四系全新统冲洪积 (Q^{4al+pl}) 的粉质黏土和卵石组成。现状道路沉降较为严重, 原因在于老旧路基中的杂填土层未进行清理, 路基承载力不足, 道路改造过程中, 受市政保通条件限制, 该工程改造过程中需保通半幅路面, 另一侧采用拉森钢板桩支护方式进行杂填土层开挖, 最大基坑开挖深度达 7.3 m, 现状土层

力学参数如表 1 所示。

表 1 土层力学参数

土层	层厚/ m	剪切模 量/MPa	容重/ ($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
素填土	2.7	17.24	18.0	10	5
杂填土	4.6	16.73	18.0	8	12
粉质黏土	2.7	10.50	19.5	33	17
卵石层	10.0	32.00	21.0	3	35

拉森钢板桩重量轻、施工便捷, 对于狭长地带的基坑工程具有很好的适用性。根据施工顺序, 工程中采用分步逆作法施工, 钢板桩采用静压法打桩, 具体步骤: 1) 工况 1: 开挖深度 2 m; 2) 工况 2: 在距离桩顶 1.5 m 施加第一道横撑; 3) 工况 3: 继续开挖 5.3 m; 4) 工况 4: 在距离桩顶 5.8 m 处施加第二道横撑。清除底部杂填土后换填合格路基土, 采用小型夯土机分层夯实后进行路基填筑。

1.2 有限元模型

FLAC^{3D} 基本计算原理为快速拉格朗日有限差分法, 在外荷载作用下, 结构发生变形, 网格上的节点随着结构的变形产生相应的位移, 根据工程对称性, 选取实际工程的 1/2 部分进行数值模拟, 模型高度为基坑开挖高度的 5 倍, 钢板桩外侧车辆荷载换算结果为 105 kPa, 模型网格划分为 $0.1 m \times 0.1 m \times 0.1 m$ 。为模拟钢板桩与岩土层之间的相互作用关系, 设置接触面单元为三节点的三角形单元, 钢板桩模型力学参数如表 2 所示, 钢板桩支护锚固深度为 10 m, 数值模拟模型如图 1 所示。

表 2 钢板桩力学参数

材料	层厚/ mm	弹性模 量/GPa	泊松比	本构关系
钢板桩	15.5	200	0.30	弹性模型
横撑	8.0	180	0.25	弹性模型

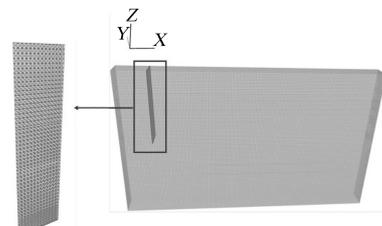


图 1 钢板桩支护模型示意

2 位移及内力分析

基坑开挖过程中, 钢板桩悬臂部分随基坑凌空面增大而增大, 基坑开挖过程中钢板桩位移及内力分布会发生较大变化, 为探究此过程中钢板桩位移及内力变化情况, 特模拟工况 1~ 工况 4 施工过程, 结构变形及内力分析如下。

2.1 位移变形分析

基坑开挖后, 随即在施工过程中增设横向支撑用以稳定钢板桩, 为此特研究增加横撑后的钢板桩水平位移变化情况, 工况 2 中, 开挖深度为 2 m, 横向支撑施加于距顶端 1.5 m 处。工况 2 施工完成后, 钢板桩最大横向位移位于桩顶位置为 1.58 cm, 沿桩长方向位移均匀减小, 横向支撑位置位移无明显改变。由此可见当开挖深度较小时, 横向支撑的作用不明显, 开挖面处钢板桩水平位移为 0.8 cm, 较桩顶最大位移减小了 49.36%。

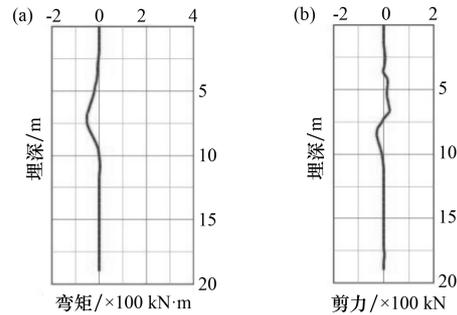
工况 4 中, 在距离桩顶 6.3 m 处施加二次横向支撑, 钢板桩最大水平位移为 1.72 cm, 较工况 2 增加了 9.21%, 最大水平位移发生在靠近横向支撑的位置, 最大位移影响范围为 5.8~ 7.3 m 内, 沿该区域水平位移向外部扩散并随之减小。对比工况 2 和工况 4 水平位移: 随着基坑开挖深度的增加, 基坑周边岩土体位移分布出现规律性变化, 开挖深度较浅时, 最大水平位移在钢板桩顶端, 横向支撑处位移变化不明显, 沿桩长方向逐渐减小, 呈现出一定的线性相关性, 当开挖深度较大时, 桩身水平位移峰值不在桩顶, 而在二次横撑附近 1.5 m 处, 并以二次横撑点为圆心向外部递减。

产生上述现象的原因在于开挖深度改变了钢板桩支护的悬臂长度, 悬臂较小时, 桩端锚固即可承担绝大部分的侧向土压力, 当开挖达到一定的深度后, 钢板桩悬臂段增大的同时, 侧向土压力也在不断增加, 钢板桩桩端锚固不足以平衡侧向土压力, 此时需要横向支撑提供抵抗力, 并且深层的横向支撑提供的侧向支撑效果更为显著。由此可知: 两道横向支撑所发挥的承载能力并不相同, 工程中应充分保证下层横撑强度, 并将上层横撑作为强度储备或适当降低上层横撑以减小

工程造价^[7]。

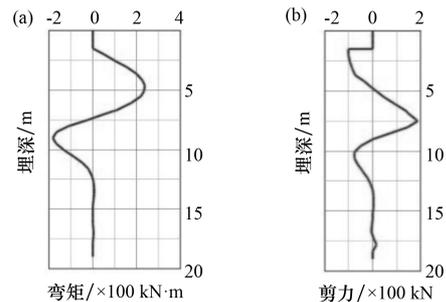
2.2 内力分析

钢板桩支护结构随基坑开挖过程, 桩身受力结构也随之发生改变, 选取工况 2 和工况 4 为研究对象, 统计钢板桩沿桩长方向上的剪力和弯矩变化情况如图 2、3 所示。



(a) 弯矩; (b) 剪力

图 2 工况 2 钢板桩内力分布



(a) 弯矩; (b) 剪力

图 3 工况 4 钢板桩内力分布

工况 2 钢板桩弯矩分布范围为 $-5.35 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 范围内, 最大峰值弯矩出现在埋深 7.5 m 处, 开挖部分无明显弯矩分布, 同时桩身剪力分布呈现锯齿状分布, 剪力分布范围为 $-2.74 \times 10^3 \sim 2.57 \times 10^3 \text{ kN}$, 最大峰值剪力出现在埋深 8.3 m 处, 根据钢板桩支护结构形式, 钢板桩埋入地下部分应视为完全锚固段, 理论弯矩和剪力值均应为 0, 但模拟结果在锚固段出现了弯矩和剪力峰值, 原因在于数值模型中通过接触面反映了桩与土之间的相互作用关系, 触面上允许产生错动、滑移或者开裂, 在横向支撑施加过程中, 钢板桩受力体系发生改变, 接触面发生滑移, 实际锚固段减小, 因此在未开挖部分仍产生了较大弯矩和剪力。

对比工况 4, 桩身轴力和弯矩分布发生较大变化, 最为明显的是内力峰值, 具体表现: 桩身弯

矩分布范围为 $-1.82 \times 10^4 \sim 2.36 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 弯矩峰值距桩顶 5.1 m, 同时, 第一道横撑上部钢板桩几乎不再受弯, 上部弯矩传递至第一道横撑中, 该现象在桩身剪力分布中具有相同的表现, 从弯矩峰值的位置可以看出, 弯矩分布趋势与应力分布云图具有相关性, 在第二道横向支撑附近弯矩达到峰值。桩身剪力分布范围为 $-1.02 \times 10^4 \sim 1.86 \times 10^4 \text{ kN}$, 峰值剪应力出现在距桩顶 7.5 m 处, 剪力整体呈现锯齿状, 且比工况 2 剪力分布更为明显。由此可知, 第二道横向支撑对钢板桩受力存在较大影响, 工程中应重点关注基坑下部横向支撑的强度^[8-9]。

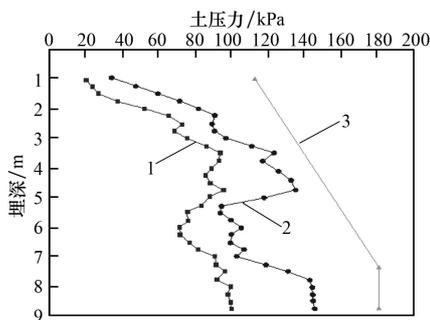
3 土压力分析

基坑开挖过程中, 钢板桩结构与周围土体发生共同变形, 当整体状态达到平衡后, 桩土应力会重新分布, 达到极限平衡状态, 施加横向支撑的过程中, 桩后土体压力由静止土压力转变为被动土压力, 根据朗肯被动土压力计算理论, 黏性土土压力分布呈梯形分布, 可根据公式(1)计算获得。

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p + 2CH \sqrt{K_p} \quad (1)$$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (2)$$

式中: E_p 为朗肯被动土压力, kPa; γ 为土体容重, kN/m^3 ; K_p 为朗肯土压力系数, 其计算方式为公式(2)所示; C 、 φ 分别为土体黏聚力(kPa)和内摩擦角($^\circ$); H 为土体高度, m。根据数值模拟结果, 钢板桩桩后土压力变化情况如图 4 所示。



1—工况 2 结束; 2—工况 4 结束; 3—朗肯土压力。

图 4 桩后土压力变化情况

钢板桩桩后土压力随桩身出现明显规律性增大, 整体分布趋势为随埋深增大而逐渐增大, 图

中仅示意埋深 9 m 范围内的土压力变化情况, 纵向来看, 1 号曲线中, 工况 2 结束后, 桩后土压力沿桩长方向逐渐增大, 开挖深度范围内, 土压力呈线性增长, 由 21.5 kPa 增加至 68 kPa, 随后增长速率放缓, 埋深 3~4 m 范围土压力有降低的趋势, 降低幅度约 18%, 随后出现间断性增长过程, 直至土层深处, 该过程基本与朗肯土压力理论值变化趋势相吻合。2 号曲线中, 工况 4 结束后, 桩后土压力分布情况发生较为明显变化, 主要体现在二次横撑的位置, 纵向来看, 埋深 2.5 m 范围内, 桩后土压力基本呈现线性增长趋势, 由最初的 36.5 kPa 增加至 91.2 kPa, 随后土压力出现小幅度降低, 之后又逐渐增大, 但增长速度明显较前一段为缓, 在埋深 5.5 m 处(二次横撑位置附近)达到 138.6 kPa, 该处土压力值也是开挖深度范围内的峰值土压力, 随后陡降至 92.6 kPa, 降低幅度达 33.2%, 之后土压力基本维持在 95 kPa 附近波动, 直至开挖结束。

横向对比 1~3 号曲线可以看出, 桩后土压力整体变化趋势基本与理论朗肯土压力变化趋势相同, 尤其在工况 2 开挖完成之前, 土压力分布基本为梯形分布, 在此也说明上层横撑对桩后土压力的影响较小, 钢板桩依靠自身锚固即可平衡桩后土压力。但 2 号曲线中, 土压力在下层横撑处出现明显变化, 表明下层横撑改变了桩后土压力的分布形式, 此时钢板桩承载力有部分来源于横向支撑的作用, 同时, 对于桩后土体而言, 土压力被横向作用力部分抵消随之逐渐减小, 土压力分布曲线也与朗肯理论土压力分布形式不一致^[10]。综上所述, 在存在横向支撑的钢板桩支护体系中, 完全利用土压力理论解析分析实际工程是存在一定局限性的, 应结合工程实际情况和实际边界条件进行分析。

4 结论

(1) 基坑开挖增加一次横撑后的钢板桩水平位移, 沿桩长方向逐渐减小, 呈现出一定的线性相关性, 增加二次横撑后, 桩身水平位移峰值出现在二次横撑附近 1.5 m 处, 峰值较首次开挖后增加 9.21%。

(下转第 54 页)

(3) 通过桩基静载荷试验验证了桩基设计的合理性, 2 000 kN 荷载下沉降量为 6 mm, 5 000 kN 荷载下沉降量为 25 mm, 验证了泥浆护壁钻孔灌注桩的设计合理性和施工效果。试验结果表明, 桩基在最大荷载下的沉降量符合设计要求, 承载力表现出色, 确保了建筑物的安全性和长期稳定性。

本研究为复杂地质条件下高层建筑的岩土勘察与地基处理技术应用提供了科学依据和实践指导。合理的勘察分析和技术选择能够显著提高地基承载力, 减少不均匀沉降, 从而保障建筑物的安全与稳定。

参考文献:

- [1] 陈俊任. 高层建筑岩土工程勘察分析及地基处理技术应用研究[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(5): 2.
- [2] 邓衍成. 建筑工程的岩土勘察及地基处理技术分析[J]. 住宅与房地产, 2020, 565(6): 188 - 193.

- [3] 孙富强. 某高层建筑岩土勘察分析及地基处理技术应用探讨[J]. 中华民居(下旬刊), 2013(3): 231 - 232.
- [4] 黄龙. 高层建筑岩土工程勘察分析及地基处理技术应用[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(24): 133 - 134.
- [5] 陈启贵. 高层建筑岩土勘察分析及地基处理技术应用研究[J]. 工程与建设, 2023, 37(6): 1688 - 1690.
- [6] 王远达, 王益梁, 许德程. 关于建筑工程的岩土勘察及地基处理技术分析[J]. 石化技术, 2023, 30(12): 294 - 296.
- [7] 叶林米, 陈芊竹. 岩土工程勘察与地基处理技术研究[J]. 工程建设与设计, 2022(24): 177 - 179.
- [8] 李登科, 韩锐. 岩土工程勘察与地基施工处理技术分析[J]. 石材, 2023(2): 19 - 21.
- [9] 袁增会, 赵玉瓚. 高层建筑岩土工程勘察分析及地基处理技术[J]. 四川建材, 2023, 49(10): 43 - 45.
- [10] 李泽彬. 沿海区域某高层建筑岩土工程勘察分析与评价[J]. 工程技术研究, 2024, 9(10): 38 - 40.

(上接第 39 页)

(2) 基坑开挖结束后, 弯矩最大峰值出现在埋深 7.5 m 处, 剪力峰值出现在埋深 8.3 m 处, 同时, 第一道横撑上部钢板桩几乎不再受弯, 上部弯矩传递至第一道横撑中, 结构内力在第二道横向支撑附近达到峰值。

(3) 桩后土压力整体分布趋势为随埋深增大而逐渐增大, 但二次横撑改变了桩后土压力的分布形式, 土压力在埋深 5.5 m 处由峰值 138.6 kPa 陡降至 92.6 kPa, 降低幅度达 33.2%, 之后土压力呈现波动变化, 直至开挖结束。

参考文献:

- [1] 李广, 杨泽平, 张敏思等. 复杂环境下深大基坑逆作法拉森钢板桩支护设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(22): 141 - 146.
- [2] 胡海兵. 拉森钢板桩在深基坑支护中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(11): 32 - 34.
- [3] 李贵. 钢板桩施工技术在桥梁主墩承台深基坑支护

- 中的应用[J]. 科学技术创新, 2023(22): 162 - 165.
- [4] 刘迪, 余龙, 陈勇. 双排钢板桩围堰设计计算方法探讨[J]. 公路, 2023, 68(6): 272 - 282.
- [5] 陈磊, 谢靖宇, 洪钊等. 双排钢板桩围堰支护结构参数优化及稳定性验算[J]. 铁道勘察, 2023, 49(3): 144 - 148.
- [6] 孔德国. 基于 Midas GTS/NX 的双排拉森钢板桩数值模拟及其工程应用[J]. 工程建设, 2019, 51(7): 39 - 42.
- [7] 马光星. 钢板桩支护在市政工程深基坑施工中的应用[J]. 工程机械与维修, 2023(2): 240 - 242.
- [8] 朱荣浩, 章晨昊, 刘松涛等. 拉森钢板桩围堰施工有限元数值模拟及优化研究[J]. 科学技术创新, 2021(28): 98 - 101.
- [9] 陈丕辉. 拉森钢板桩的支护特性及其横撑水平间距研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 123 - 126.
- [10] 李连祥, 王兴政. 考虑基坑支护结构变形模式的土压力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1024 - 1033.