

止水帷幕挡土作用对拉森钢板桩变形影响研究

张洪旭¹, 王晓磊^{1,2}, 刘历波¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038;
2. 邯郸市城市地下空间工程技术创新中心, 邯郸 056038)

摘 要: 对现有钢板桩基坑支护工程设计中忽视止水帷幕挡土作用的问题, 以邯郸市大型地下综合管廊项目为依托, 建立布置不同参数止水帷幕的拉森钢板桩基坑开挖有限元模型, 通过对比拉森钢板桩水平位移模拟值与现场实测值验证模型正确性, 进而对止水帷幕的影响展开参数化分析, 探究止水帷幕不同弹性模量、排数、插入比以及止水帷幕与钢板桩距离和拉森钢板桩长度的比值对基坑变形的作用机制。研究发现, 在一定范围内, 随着帷幕弹性模量、排数、插入比的增大, 钢板桩侧向变形逐渐减小, 超出该范围后变形减小幅度趋于平缓; 止水帷幕与钢板桩间距离和基坑深度的比值对钢板桩侧向变形影响显著, 当比值从 3 : 4 减小到 1 : 2 时, 钢板桩侧向变形呈现大幅降低。研究成果可为基坑支护工程的安全性和经济性提供参考。

关键词: 止水帷幕; 拉森钢板桩; 挡土作用; 变形

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0116-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.019

Study on the Influence of Waterstop Curtain on the Deformation of Larsen Steel Sheet Pile

ZHANG Hongxu¹, WANG Xiaolei^{1,2}, LIU Libo¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Urban Underground Space Engineering Technology Innovation Center in Handan City, Handan 056038, China)

Abstract: Aiming at the problem that the soil-retaining effect of waterproof curtains is ignored in the existing design of steel sheet pile foundation pit support engineering, relying on the large-scale underground comprehensive pipe gallery project in Handan City, a finite element model of Larsen steel sheet pile foundation pit excavation with waterproof curtains of different parameters is established. The correctness of the model is verified by comparing the simulated values of horizontal displacement of Larsen steel sheet piles with the field measured values. Then, a parametric analysis of the influence of waterproof curtains is carried out to explore the mechanism of action of different elastic moduli, numbers of rows, insertion ratios of waterproof curtains, and the ratio of the distance between waterproof curtains and steel sheet piles to the length of Larsen steel sheet piles on foundation pit deformation. The study finds that within a certain range, with the increase of the elastic modulus, number of rows, and insertion ratio of the curtain, the lateral deformation of the steel sheet pile gradually decreases, and when exceeding a certain parameter range, the reduction amplitude tends to be gentle; the ratio of the distance between the waterproof curtain and the steel

项目来源: 河北省建设科技项目 (2022-2013)。

作者简介: 张洪旭 (1998—), 男, 硕士, 研究方向: 岩土工程。

通信作者: 王晓磊 (1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 岩土工程。

收稿时间: 2023-08-31

sheet pile to the foundation pit depth has a significant impact on the lateral deformation of the steel sheet pile, especially when the ratio decreases from 3 : 4 to 1 : 2, the lateral deformation decreases significantly. The research results can provide a reference for the safety and economy of foundation pit support engineering.

Key words: cutoff curtain; larssen steel sheet pile; soil-retaining effect; deformation

0 引言

拉森钢板桩支护是深基坑支护结构中一种常见的支护形式, 因其便于施工、易于回收等特点, 在基坑支护工程中得到了广泛应用。止水帷幕作为一种常用的基坑止水技术, 工程上主要用于阻止地下水的渗透和流入基坑, 而对于其挡土作用却鲜有考虑。

在深基坑开挖过程中, 水土压力为支护结构主要的荷载来源^[1-2]。现有的基坑设计计算一般认为钢板桩承受水土压力, 并根据钢板桩的受力、变形等进行设计计算, 以控制基坑整体的侧向变形、基坑内外侧土体的沉降和隆起^[3-4]。目前一般不考虑钢板桩支护结构与止水帷幕之间的相互影响^[5]。在深基坑止水设计中, 通常采用单排或多排止水帷幕桩体。基坑外部的水土压力首先作用于止水帷幕, 然后传递并作用于钢板桩, 可见止水帷幕有着明显的挡土作用^[6]。谢林辉^[7] 针对跨海大桥施工中钢板桩围堰在复杂海洋环境下的变形问题, 通过现场监测与数值模拟, 分析其在波浪、潮汐及深水荷载作用下的变形特性, 揭示了支护结构的关键变形机制; 张健等^[8] 对板桩变形及桩土相互作用机制进行了研究, 提出土压力理论计算值较实验值相比偏向保守; 王傲寒^[9] 结合工程实例, 对比分析单双排拉森钢板桩与灌注桩加高压旋喷桩两种支护形式的安全性、经济性进行了研究, 明确各支护形式的位移控制效果、止水性能及成本差异; 王贵妃等^[10] 以通过对比分析水下与非水下基坑开挖过程中土体有效主应力、变形及地下连续墙弯矩的变化特点, 揭示了不同开挖场景下的力学响应规律及降水操作对基坑变形和地连墙受力的影响; 郭枫^[11] 通过现场测试、模型试验与数值分析, 探究砂土地基在振动沉-拔钢板桩过程中的动力响应及振动影响, 提出振动参数优选原则及振动影响控制对策; 陈鹏飞等^[12]、谢晓风^[13-14]、刘燕茹^[15] 运用数值模拟手段研究了止水帷幕对基坑

变形的影响, 但均未充分考虑基坑开挖的空间效应或控制变量进行研究。

以邯郸市赵王大街地下综合管廊工程深基坑为研究对象, 建立基坑开挖有限元模型, 通过分析止水帷幕桩体弹性模量、排数、插入比取值以及止水帷幕桩体与钢板桩之间的距离与钢板桩长度比值对深基坑变形的影响, 研究止水帷幕的挡土作用对钢板桩变形的影响规律。

1 工程概况

赵王大街地下综合管廊工程位于河北省邯郸市。以 K0+780~K0+820 标段基坑工程为研究对象, 基坑长 40 m, 宽 12 m, 开挖深度约 8 m。支护结构采用拉森Ⅳ型钢板桩+两道内支撑的内撑式支护形式, 并在基坑外侧布置有 15 m 深的高压旋喷桩止水帷幕。拉森Ⅳ型钢板桩桩长 15 m, 基坑内设两道 $\phi 609 \times 14$ 型号钢支撑, 水平间距 4 m, 垂直间距 3 m。拉森钢板桩与钢支撑之间采用双拼工字钢围檩进行连接, 拉森钢板桩支护结构剖面图如图 1 所示。

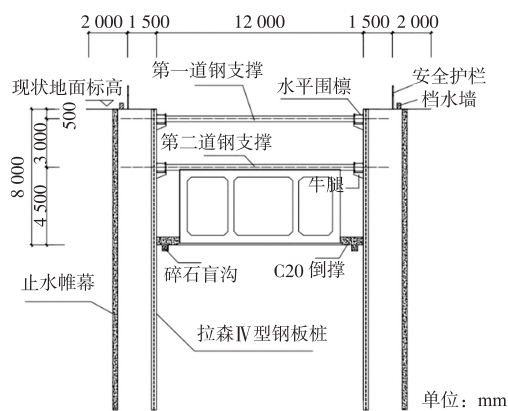


图 1 钢板桩支护结构剖面图

Fig. 1 Sectional view of steel sheet pile support structure

2 有限元模型的建立与验证

采用 Midas GTS NX 对 K0+780~K0+820 标段建立基坑开挖有限元模型, 并对相关参数进行适当的

岩土力学

简化。基坑开挖模型的影响深度和宽度均取 3~5 倍开挖深度^[16]，综合实际情况和工程经验，模型尺寸定为 100×40×40 m（长×宽×高），地下水位线为地表以下 2 m。土层分为 5 层，各土层参数见表 1。

表 1 地层物理力学参数表

Table 1 Table of physical and mechanical parameters of strata

土层名称	厚度/m	重度 γ / (kN/m ³)	黏聚力 c /kPa	摩擦角 φ / (°)
素填土	2	19.0	14.0	12.0
粉土	5	19.2	18.8	26.0
淤泥质土	3	18.8	14.0	20.0
黏土夹粉质黏土	3	19.6	18.6	15.8
粉质黏土	2	20.1	18.8	26.0

考虑到深基坑开挖过程中，加载与卸载模量不同，模型中的土体单元采用修正摩尔库伦本构模型，拉森钢板桩和高压旋喷桩止水帷幕均采用 2D 板单元进行模拟，钢支撑和钢围檩采用 1D 梁单元进行模拟。模型基坑边缘两侧施加 20 kPa 的施工荷载，模型四个侧面边界条件设置为法向约束，底面边界条件设置为完全约束，上表面设置为自由无约束，建立的有限元模型如图 2 所示。

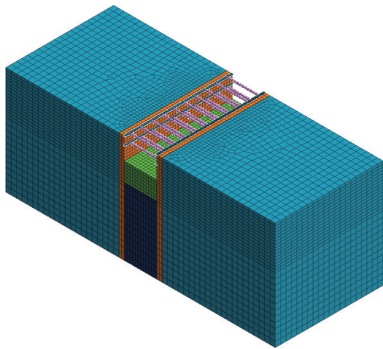


图 2 基坑开挖模型图
Fig. 2 Model diagram of foundation pit excavation

施工过程采用分步开挖的方法共进行了 3 次开挖，每次开挖到一定深度后安装围檩和支撑。3 次开挖深度分别为 2、4、8 m。为了研究止水帷幕不同弹性模量、排数、插入比以及止水帷幕和钢板桩间的距离与基坑深度的比值对基坑变形的影响，设置了八组弹性模量参数、四组插入比参数、四组排数参数以及八组止水帷幕与钢板桩之间的距离与基坑深度比值参数。每次模拟计算时，固定其他参数，对所研究参数进行分析。

为便于对比验证数值模拟计算所得结果值的准确

性，模拟值选取最后一个施工阶段结束所得钢板桩变形计算结果，实测值取基坑开挖至基底标高后所测得的实测值结果，并对二者进行比较，如图 3 所示。

钢板桩水平位移的实测值与模拟值在钢板桩主动区的下半部分基本一致，但在靠近地表的上部区域，两者表现出较大差异。原因可能为实际施工过程中钢围檩及支撑安装不规范，导致钢支撑产生应力损失，使得该区域水平位移的监测值与模拟值差异较大。总体来说，二者水平位移值峰值误差较小，位移变化趋势总体基本一致，验证了有限元模型的正确性。

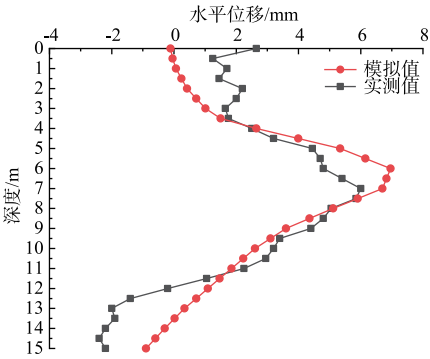


图 3 模拟值与实测值对比
Fig. 3 Comparison between simulated and measured values

3 结果与分析

3.1 止水帷幕弹性模量的影响

选择止水帷幕长度为 15 m，止水帷幕与钢板桩间距为 2 m 的模型对弹性模量进行计算研究，计算结果如图 4 所示。随着止水帷幕弹性模量的增加，钢板桩的最大水平位移逐渐减小。止水帷幕的弹性模量超过 800 MPa 后，钢板桩的水平位移几乎无变化。因此，为了兼顾工程的经济性和安全性，止水帷幕的弹性模量不宜过大。

3.2 止水帷幕插入比的影响

选择止水帷幕与钢板桩间距为 2 m，止水帷幕为双排的模型对插入比进行计算研究，计算结果如图 4~5 所示。插入比即止水帷幕的长度与基坑开挖深度的比值。一般来说，止水帷幕长度要大于基坑开挖深度^[17-18]。由图 5 可知，当止水帷幕插入比小于 1 时，随着止水帷幕插入比的增加，钢板桩变形几乎无变化，当止水帷幕插入比大于 1 时，随着止水帷幕

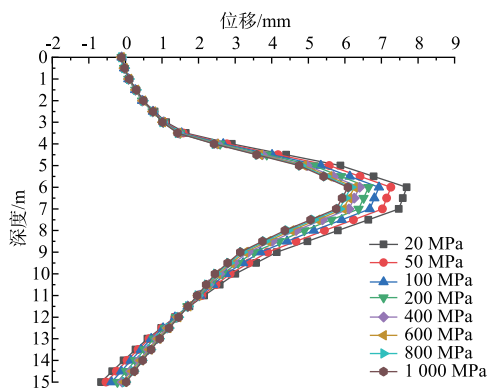


图4 止水帷幕弹性模量的影响

Fig. 4 The influence of elastic modulus of waterstop curtain

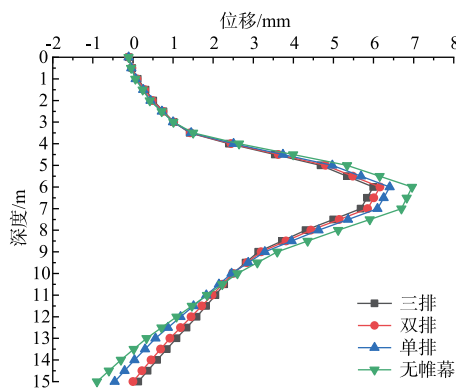


图6 止水帷幕排数的影响

Fig. 6 The influence of the number of rows of waterstop curtains

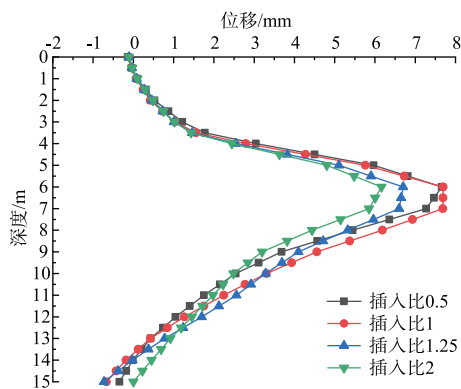


图5 止水帷幕插入比的影响

Fig. 5 The influence of waterstop curtain insertion ratio

插入比的增加, 钢板桩变形明显减小。由此可见, 止水帷幕的插入比不宜过小。对于实际工程, 为更好地发挥控制钢板桩变形的作用, 止水帷幕插入比需要选择一个合理的取值。

3.3 止水帷幕排数的影响

选择止水帷幕与钢板桩间距为 2 m, 止水帷幕长度为 15 m 的模型对排数进行计算研究, 计算结果如图 6 所示。

随着止水帷幕排数的增加, 钢板桩的水平位移峰值逐渐减小。尤其是在未布置止水帷幕至布置单排止水帷幕时, 钢板桩的水平位移显著减小。因此, 在设计基坑支护结构时, 可以将止水帷幕分担水土压力的支护作用纳入基坑设计计算考虑。

3.4 止水帷幕与钢板桩距离与基坑深度比值的影响

选择深度为 15 m 的双排止水帷幕和止水帷幕与钢板桩之间距离与基坑深度比值进行计算研究, 弹性模量取 800 MPa, 止水帷幕和拉森钢板桩间距与基

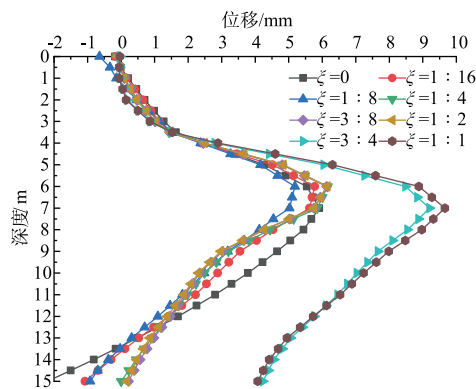


图7 止水帷幕与钢板桩距离与基坑深度比值的影响

Fig. 7 The influence of the ratio of the distance between the waterproof curtain and the steel sheet pile to the depth of the foundation pit

坑深度比值分别为 0、1 : 16、1 : 8、1 : 4、3 : 8、1 : 2、3 : 4、1 : 1 共八种情况。模拟计算的结果如图 7 所示。

随着止水帷幕与钢板桩间距增大, 钢板桩水平位移逐渐增加, 但增加量不明显。当止水帷幕与拉森钢板桩的间距与基坑开挖深度比值为 3 : 4 时, 桩体侧向位移显著增大。可见, 在现场施工条件允许的情况下, 应适当减小二者之间的距离, 以使止水帷幕更好地发挥挡土作用, 减小钢板桩的水平变形。

4 结论

采用 Midas GTS NX 建立了拉森钢板桩和高压旋喷桩止水帷幕复合支护结构的基坑开挖模型, 分析了止水帷幕的弹性模量以及插入比、排数 (宽度)、位置等因素对钢板桩变形的影响。主要结论如下:

(1) 随着止水帷幕的排数和弹性模量的增加,

岩土力学

钢板桩的侧向变形会减小。然而,当止水帷幕的排数或弹性模量强度增加到一定值后,这种影响将变得很小。

(2) 随着止水帷幕插入比增加到一定限度,钢板桩的侧向变形明显减小。随着止水帷幕深度的继续增加,钢板桩的侧向变形仍会继续减小,但减小量有限。

(3) 钢板桩的侧向变形随着止水帷幕和钢板桩之间的距离增加而逐渐减小,当止水帷幕与钢板桩间的距离与基坑深度比值为 1:8 时,钢板桩的峰值变形最小。当该比值大于 1:1 时,可以忽略其对钢板桩变形的影响。

参 考 文 献

- [1] 张旭,王杰杰. 基坑施工对邻近既有地铁区间影响的安全评估[J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (6): 47-53+128.
- [2] 陈晨,赵富章,高帅,等. 双排桩与旋喷止水帷幕在饱和粉砂层中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46 (1): 21-4.
- [3] 许凯奇,李启明. 钻孔灌注桩与旋喷桩组合止水帷幕的设计和应用[J]. 工业建筑, 2007 (增刊): 759-62.
- [4] 黄涛. 被动区深层搅拌桩加固对深基坑变形的影响研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4 (6): 120-1.
- [5] 游锦坚. U 型钢板桩弯曲力学特性试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [6] 缪言. 热轧组合 U 型钢板桩抗弯性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [7] 谢林辉. 跨海大桥钢板桩围堰变形规律及监测分析[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2024.
- [8] 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 (增刊 1): 202-206.
- [9] 王傲寒. 华东沿海地区软土深基坑支护工程的选型及应用分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- [10] 王贵妃,李磊,王占彬,等. 不同条件下开挖软土基坑地连墙的力学特性研究[J]. 土木工程与绿色建筑, 2025, 1 (3): 138-143.
- [11] 郭枫. 振动沉一拔钢板桩砂土动力响应及施工影响研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2024.
- [12] 陈鹏飞,龚晓南,刘念武. 止水帷幕的挡土作用对深基坑变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (增刊): 254-8.
- [13] 谢晓风,华建兵. 基于 HSS 模型对深基坑止水帷幕的挡土效应分析[J]. 四川建材, 2022, 48 (7): 57+68.
- [14] 谢晓风. 水泥土止水帷幕在深基坑支护中的挡土效应分析研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [15] 刘燕茹. 止水帷幕与排桩复合支护结构的空间效应分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [16] 黄明辉,陈乐意. 二元结构地层基坑嵌岩支护变形性状研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33 (4): 93-100.
- [17] 骆祖江,成磊,张兴旺,等. 悬挂式止水帷幕深基坑降水方案模拟优化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52 (6): 1946-56.
- [18] YU Z, ZUODONG J, YUNLONG H, et al. Fluid-Solid Coupling Effect on Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Deformation in Soft Soil Area[J]. Applied Sciences, 2022, 12 (21).