

# 邯郸富水地层深基坑支护优化和应用研究\*

Research on Optimization and Application of Deep Foundation Pit Support in Handan Water-rich Strata

梁晟<sup>1</sup>, 王晓磊<sup>2</sup>, 曹妮娜<sup>2</sup>, 张建英<sup>3</sup>, 于庭富<sup>3</sup>

(1. 新疆理工学院 机电工程学院, 新疆 阿克苏 843100; 2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 中国二十二冶集团有限公司路桥工程分公司, 河北 唐山 064000)

**摘要:** 河北省邯郸市地处华北平原, 地下水资源较为丰富, 在城市建设中基坑支护设计既要保证工程的安全性还要兼顾一定的经济性。以邯郸市赵王大街地下综合管廊深基坑工程为背景, 利用 Midas-GTS 软件对基坑降水开挖进行了全过程的数值模拟, 在验证模型的准确性后, 分别分析支护桩的插入比、内支撑预应力和止水帷幕对基坑变形的影响。结果表明: 支护桩的嵌固深度减小会导致桩前、后土压力差值增大, 造成基坑失稳破坏; 内支撑的预应力值在 200 kN 时, 可以有效控制基坑变形; 止水帷幕的增设可以延长渗流路径, 减缓渗流速度, 对抑制基坑变形有积极作用。

**关键词:** 基坑开挖; 数值模拟; 基坑变形; 富水地层

**中图分类号:** TU924 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0068-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.014

LIANG Sheng<sup>1</sup>, WANG Xiaolei<sup>2</sup>, CAO Nina<sup>2</sup>, ZHANG Jianying<sup>3</sup>, YU Tingfu<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China;  
2. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;  
3. Road and Bridge Engineering Branch of China 22 Metallurgy Group Co., Ltd., Tangshan 064000, China)

**Abstract:** Handan City, Hebei Province is located in the North China Plain. The groundwater resources in this area are abundant. In urban construction, the design of foundation pit support should not only ensure the safety of the project, but also take into account the economy. Based on the deep foundation pit engineering of underground comprehensive pipe gallery in Zhaowang Street of Handan City, Midas-GTS software is used to simulate the whole process of foundation pit dewatering and excavation. After verifying the accuracy of the model, the influence of the insertion ratio of supporting pile, the prestress of internal support and the waterproof curtain on the deformation of foundation pit is analyzed respectively. The results show that the decrease of the embedded depth of the supporting pile will lead to the increase of the difference between the soil pressure before and after the pile, resulting in the instability and failure of the foundation pit. When the prestress value of the inner support is 200 kN, the deformation of the foundation pit can be effectively limited. The addition of waterproof curtain can prolong the seepage path, slow down the seepage velocity, and play a positive role in inhibiting the deformation of foundation pit. The relevant results can provide experience and reference for the optimization of similar water-rich strata support.

**Keywords:** foundation pit excavation; numerical simulation; foundation pit deformation; water-rich strata

\* 基金项目: 河北省建设科技项目 (2022-2013)。

作者简介: 梁晟 (1997—), 男, 硕士, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2023-02-12

## 0 引言

随着我国经济的高速发展，城市中的深基坑工程也越来越多，而深基坑支护体系作为一项临时性的工程，具有安全储备小、区域差异性强等特点。地下综合管廊作为 21 世纪城市现代化的标志之一，具有美化环境、降低管线维修费用等优点，考虑到施工环境较为复杂，要解决富水区深基坑的支护问题，关键是要掌握基坑的变形特征，邯郸市目前没有可供借鉴的经验，因此对设计和施工提出了更高的要求。

工程界对深基坑工程的支护方案展开了多方面的研究，配合有限元软件，能较好地反映出基坑各种工况下的变形特征，从而为优化支护方案、指导施工提供技术支持<sup>[2-6]</sup>。秦夏强<sup>[7]</sup>通过调研国内软土深基坑工程的支护止水技术的应用现状，分析了降水放坡大开挖、重力式挡墙和排桩等不同支护方式的特点，论证了拉森钢板桩适用于地下水含量丰富的地区。袁钊等<sup>[8]</sup>通过现场试验，将原设计方案土钉墙支护更改为拉森钢板桩支护，结果表明基坑深度在 8 m 左右且地下水含量丰富的地区施工，拉森钢板桩能够保证基坑的稳定；对基坑变形要求较高的地段，增设内支撑可提高整体抗弯刚度。魏鹏飞等<sup>[9]</sup>依托宁波某深基坑工程实例，面对地下水丰富的软土地层，研究了“锁扣钢管桩 + 拉森钢板桩”组合支护施工技术，结果表明该设计方案有效降低施工工期、具有较高的经济性以及对周围环境影响较小。李广等<sup>[10]</sup>依托某工程实例，分析深基坑支护工程的难点，提出了拉森钢板桩 + 内支撑 + 水泥搅拌桩止水帷幕的支护方案，结果表明拉森钢板桩在地下水丰富的场地可以起到良好的支护和隔水作用。王渭明等<sup>[11]</sup>以山东省济南市黄河冲积地层某工程为背景，采用现场监测和数值模拟相结合的方法，讨论了支护桩插入比、支护桩刚度、锚索预应力等因素对基坑变形稳定性的影响，提出了适合于该地区深基坑支护的合理参数。

综上，多数研究仅仅集中在支护桩施工工艺的改进，而对支护结构的优化研究较少。以邯郸市地下综合管廊深基坑工程为例，采用 Midas - GTS 有限元软件进行基坑开挖全过程模拟，将监测数据与模

拟结果进行对比验证模拟的可靠性，分别分析支护桩插入比、内支撑预应力和止水帷幕对深基坑降水开挖过程中对地表沉降和基坑变形的影响，可为类似富水地层深基坑施工和设计提供参考依据。

## 1 工程实例

### 1.1 工程概况

赵王大街管廊项目，施工范围：北起邯临路南侧，南至娲皇路。主线全长约 5.2 km，采用明挖法施工，基坑深度平均达 8 m。根据地质勘察报告可知，施工土层自上而下的顺序是：杂填土、粉质黏土、黏土夹粉质黏土、黏土、粉土，其物理力学参数见表 1。地下水主要分布在粉土层和砂土层，属于潜水。粉土层的渗透系数为 0.89 m/d，在勘测中，初期水位未见明显，而稳定的地下水埋深通常为 0.50 ~ 5.50 m。

表 1 土层物理力学性质  
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层名称	重度 / (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模 量/MPa	黏聚力 /kPa	摩擦 角/ (°)	层厚 /m
杂填土	19.0	5.10	14.00	12.00	3.0
粉质黏土	19.2	5.82	16.70	18.11	4.5
黏土夹粉 质黏土	18.8	4.39	14.00	20.00	2.0
黏土	19.6	4.96	17.78	16.18	3.5
粉土	20.1	21.44	18.88	26.98	27.0

### 1.2 支护结构概况

为了保证施工过程的安全稳定，采用放坡 + 拉森钢板桩 + 钢支撑的支护形式。按照施工现场的实际工况，放坡比例 1:1，拉森钢板桩长 15m，两道钢支撑水平距离 4 m、垂直距离 3 m，支护结构设计剖面如图 1 所示。

## 2 数值模型计算

### 2.1 计算模型

地下综合管廊深基坑呈长条形，采用真实反映基坑开挖加载卸载过程的修正摩尔 - 库仑模型，通过 Midas - GTS 有限元软件建立三维数值模型，模型计算区域要充分考虑到开挖降水的主要影响区和次要影响区，根据已有研究成果，设定本次模型在 X、Y、Z 方向取基坑深度的 3 ~ 5 倍<sup>[12]</sup>，即：62 m × 48 m × 24m。模型共划分 10 567 个单元，7 170 个节点。在模型的底部，设置了多个方向的位移限制。

### 岩土力学

拉森钢板桩简化成板单元，钢支撑、围檩等简化成梁单元。支护结构的模型如图 2 所示。

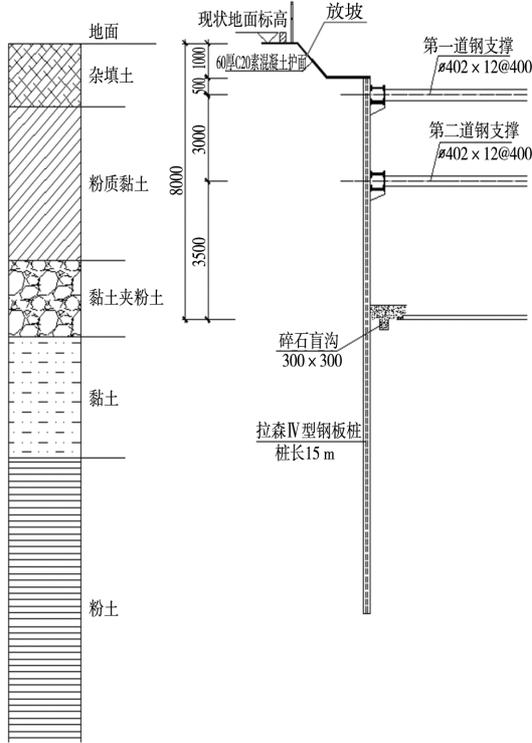


图 1 基坑支护设计图  
Fig. 1 Design of foundation pit support

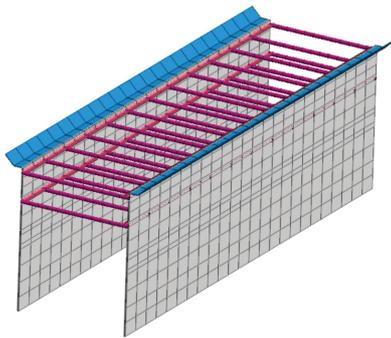


图 2 数值模型  
Fig. 2 Numerical model

考虑到地下水对基坑支护结构变形的影响，将模拟施工过程采用一次降水和分层开挖的方式，主要流程：初始渗流场分析→初始地应力平衡（位移清零）→上部放坡 + 打桩→基坑降水（降水至 - 9 m）→基坑开挖至 - 2 m（打第一道撑）→基坑开挖至 - 4 m→基坑开挖至 - 6 m（打第二道撑）→基坑开挖至 - 8 m。

#### 2.2 模型有效性验证

支护桩的水平变形量的大小是判断基坑稳定的

标准之一。将现场的实测结果与模拟结果分别提取，并绘制支护桩随基坑深度变化的曲线，如图 3 所示。桩体的水平变形呈现“两头小，中间大”开口向下的抛物线特征。在开挖初期，支护桩的最大水平位移处于桩顶位置；随基坑开挖深度的增加，支护桩的水平位移值也增大，桩体变形最大的位置呈下移趋势。当开挖至基底标高时，此时桩体的变形累积达到最大，其中模拟值和实测值分别达到 14.05、16.27 mm。实测值相较于模拟值大 2.22 mm，其原因是：在模拟的过程中缺乏对现场天气、施工荷载等因素的考虑。通过有限元模拟所得到的支护桩变形特征曲线与实测结果较为吻合，验证了所建模型的有效性。

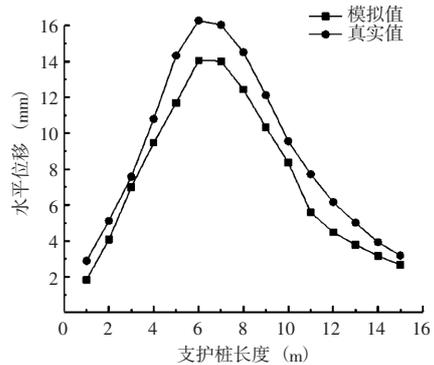


图 3 桩体水平位移模拟与实测值曲线  
Fig. 3 Pile horizontal displacement simulation and measured value curve

### 3 影响因素分析

#### 3.1 拉森钢板桩插入比影响

拉森钢板桩的插入比指的是基坑开挖深度与拉森钢板桩的嵌固深度之比。当拉森钢板桩设置完成后，基坑的稳定主要依靠拉森钢板桩与周围土体的嵌固作用，为了研究嵌固深度对基坑稳定的影响，取插入比 0.7、0.875、1、1.4 四种工况，支护桩的水平位移情况如图 4 所示。不同插入比下的支护桩最大水平位移 ( $X_{max}$ ) 及发生位置见表 2。从图 4 可以看出，当支护桩的插入比增大时，支护桩的最大水平位移逐渐增大，最大水平位移的位置呈下降趋势。当插入比为 0.875 时，此时的最大水平位移是 14.05 mm，明显小于插入比为 1、1.4 时支护桩的最大水平位移。这主要是因为桩身的位移由桩身弯曲和桩身的旋转位移共同构成，在基坑深度相同、刚性不变的情况

下，桩身的弯曲变形与桩身的旋转位移相当，但随着埋入深度的减小，桩身的旋转位移也随之增大。

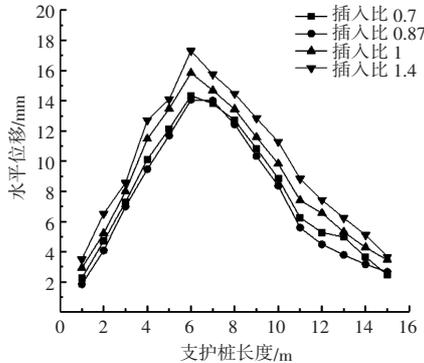


图4 不同插入比时桩体水平位移图

Fig. 4 Horizontal displacement of pile at different insertion ratios

表2 桩体最大位移和位置变化量

Table 2 Maximum displacement and position variation of pile

插入比	$X_{\max}$	$h$	$\Delta X_{\max}/\%$	$\Delta h/\%$
0.7	14.34	6.0	2.06	0
0.875	14.05	6.0	—	—
1	15.84	6.5	12.74	8.33
1.4	17.31	6.5	23.20	8.33

同时，基坑深度保持不变，支护桩的嵌固深度减小时，支护桩的前后土压力差值递增，支护桩的旋转位移增大。当支护桩的嵌固深度增加时（插入比=0.7），最大水平位移增量较小，最大水平位移的位置保持不变，这是因为支护桩插入土体的深度足够深，支护桩前后土压力差可以忽略不计，支护桩的转动位移减小。

从表2可以看出，当支护桩的嵌固深度由原来的8 m分别减少至7、5 m时，支护桩的最大水平位移分别增加了12.74%、23.20%，同时最大水平位移位置向下移动了0.5 m，需要注意支护桩底部的变形情况，必要时增设1道内支撑，避免基坑失稳造成破坏；当支护桩的嵌固深度由原来的8 m增至10 m时，支护桩最大位移变化仅为2.06%。可见，为了降低支护桩的水平位移，仅仅通过增加支护桩嵌固深度的方法，不仅无法达到预期效果，还造成了经济浪费。

### 3.2 钢支撑预应力影响

预应力是影响桩身变形的主要因素，文中对50、100、200、300 kN四种工况的预应力情况进行分析，相应的桩身水平位移与深度关系如图5所示。

由图5可知，预应力的改变对桩身横向位移的影响很小，而在预应力作用下，桩身的最大水平位移

随预应力的增加而降低，并在一定程度上改变了桩身变形的的位置。这是由于在预应力作用下，桩身的最大位移在上部，而随着预应力的增加，桩身的旋转变形得到了有效的抑制，这时的桩身与超静定简支梁相似，产生了更多的挠度，最大位移的位置向下移动。当预应力为0时，桩身最大水平位移为14.05 mm，而桩顶位移的变化并不明显，表明钢支撑的设置很好地控制了支护桩顶部的变形；当预应力提高至50、100 kN时，最大水平位移分别减少了1.2%、4.6%，对桩体控制效果较差。其原因是钢支撑架设完成后，预应力通过钢支撑传递给支护桩，但由于地基的结构比较复杂，在一定的预应力作用下，无法形成较好的传力系统，导致桩体水平位移变化不明显；当预应力提高至200 kN时，最大水平位移减少了10.8%，对桩体控制效果良好；当预应力提高至300 kN时，支护桩的变形不降反增，是由于预应力过大，导致内支撑与支护桩连接处遭到破坏。因此，设置钢支撑的预应力需要考虑周围地层条件、支护桩自身强度等因素。

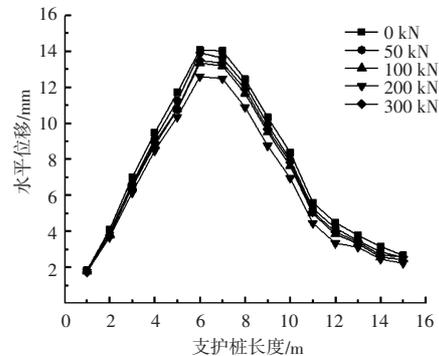


图5 不同预应力时桩体水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of pile under different prestress

## 4 结论

(1) 随着支护桩的插入比增大，支护桩的最大水平位移也呈现出增大的趋势。插入比由0.875分别增加至1、1.4时，支护桩的位移显著增大，故不能任意降低其嵌固深度；在插入比降低到0.7的情况下，由于桩身前后的土压力差逐渐降低，接近于0，对降低桩的水平位移影响不大，也不能使桩的整体性能得到最大程度的发挥，因此，建议采用0.875的插入比。

(2) 内支撑对桩顶位移影响较大，当内支撑预

## 岩土力学

应力增加时, 支护桩的最大水平位移呈现先减少后增加的趋势。确定预应力的应该综合考虑土层、支护桩本身等多种因素, 因此, 该工程预应力不宜超过 200 kN。

### 参 考 文 献

- [1] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地区深基坑墙体变形特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (11): 2344-2353.
- [2] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究 [J]. 岩土工程学报, 2008 (6): 818-823.
- [3] BORJA R I. Analysis of incremental excavation based on critical state theory [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1990, 116 (6): 964-985.
- [4] 顾亮. 盘锦地区某基坑工程变形特性三维数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (5): 1092-1096.
- [5] 王明龙, 王景梅. 深基坑桩锚支护中桩内力变化规律数值模拟研究. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (3): 576-584.
- [6] 李佳宇, 张子新. 圆砾层地铁车站深基坑变形特性三维数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8 (1): 71-76.
- [7] 秦夏强. 软土地基大型复杂基坑工程设计与施工 [J]. 岩土工程学报, 2006 (增刊1): 1628-1632.
- [8] 袁钊, 郑明新, 吴刚. 某深基坑工程坑中坑支护施工问题综合分析 [J]. 施工技术, 2016, 45 (17): 25-28.
- [9] 魏鹏飞, 刘杰. 软土地基深基础组合结构支护技术研究 [J]. 公路, 2019, 64 (1): 136-140.
- [10] 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, 108.
- [11] 王渭明, 严纪兴, 赵增辉. 黄河冲积地层深基坑支护优化及应用研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12 (1): 176-180.
- [12] 吴意谦, 朱彦鹏. 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (增刊2): 404-411.

(上接第 5 页)

水泥土峰值强度在不断的变大, 同时峰值强度对应的应变大致呈减小的趋势, 水泥土试件向脆性发展。

(4) 粉煤灰的变形模量与水泥掺量、围压以及养护龄期存在正向增强关系。试件破坏模式主要包括塑性破坏和脆性破坏两种, 水泥掺量的提升、围压的增大以及养护龄期的延长促进了试件的破坏模式向脆性破坏转变。

### 参 考 文 献

- [1] 周丽萍, 申向东. 水泥土力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28 (2): 359-365.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [3] 高亚成, 郑建青. 水泥土的室内试验研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 1999 (5): 103-106.
- [4] MOSES G G, RAO S N, RAO P N. Undrained strength behaviour of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading [J]. Ocean Engineering, 2003, 30 (14): 1765-1789.
- [5] KANIRAJ S R, HAVANAGI V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash - soil mixtures [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29 (5): 673-677.
- [6] 储诚富, 洪振舜, 刘松玉, 等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (4): 645-649.
- [7] 刘忠, 朱俊高, 刘汉龙. 水泥砾质土三轴试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (7): 2013-2020.
- [8] 阮波, 彭学先, 邓林飞. 水泥土抗剪强度参数试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13 (4): 662-668.
- [9] 秦网根, 蔡正银, 关云飞, 等. 典型区域软弱土室内水泥固化三轴 CD 试验 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, 39 (1): 103-108, 114.
- [10] 尹志祥. 荆州城区水泥土力学特性研究及其应用 [D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- [11] 宋新江, 徐海波. 平面应变条件下水泥土强度特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (8): 2325-2330.
- [12] 周海龙, 申向东, 薛慧君. 小龄期水泥土无侧限抗压强度试验研究 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2014, 44 (1): 75-79.
- [13] YANG L, WOODS R D. Shear stiffness modeling of cemented clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52 (2): 156-166.
- [14] 水泥土配合比设计规程: JGJ/T233—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (2): 473-477.