

旋喷桩止水帷幕对拉森钢板桩变形的影响分析*

Analysis on the Influence of Rotary Jet Grouting Pile Waterproof Curtain on the Deformation of Larsen Steel Sheet Pile

梁 晟¹, 王晓磊¹, 张建英², 于庭富², 张泽浩¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 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: 以河北省邯郸市某富水地层拉森钢板桩+高压旋喷桩止水帷幕设计的管廊深基坑工程为依托, 利用 Midas-GTS 软件对基坑降水开挖进行了全过程的数值模拟, 研究了止水帷幕对支护结构变形和受力的影响。在验证模型准确的基础上, 分别分析了止水帷幕与支护桩不同间距和止水帷幕不同排数对支护桩的影响。结果表明, 旋喷桩止水帷幕能够延长地下水的渗流路径, 减缓渗流速度, 分担部分桩后土压力, 对抑制支护桩变形和弯矩的产生有积极作用; 旋喷桩止水帷幕与支护桩不同的间距增加了整体抗弯刚度, 可以有效地限制支护桩变形和弯矩的产生, 间距建议保持在 1~3 m 适宜, 超过 5 m 后抑制作用不明显; 旋喷桩止水帷幕的排数越多支护效果越明显, 相关结果对富水地层基坑工程的优化有一定的参考意义。

关键词: 数值模拟; 深基坑开挖; 富水地层; 止水帷幕

中图分类号: TU94+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0119-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.021

LIANG Sheng¹, WANG Xiaolei¹, ZHANG Jianying², YU Tingfu², ZHANG Zehao¹

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China ;

2. Road and Bridge Engineering Branch of China 22 Metallurgy Group Co., Ltd., Tangshan 064000, China)

Abstract: Based on the deep foundation pit project of pipe gallery designed by the waterproof curtain of Larsen steel sheet pile + high pressure jet grouting pile in a water-rich stratum in Handan City, Hebei Province, the whole process of dewatering excavation of foundation pit was numerically simulated by Midas-GTS software, and the influence of waterproof curtain on the deformation and stress of supporting structure was studied. On the basis of verifying the accuracy of the model, the influences of different spacings between waterproof curtain and supporting pile and different rows of waterproof curtain on supporting pile are analyzed respectively. The results show that the waterproof curtain can not only prolong the seepage path and slow down the seepage velocity, but also share some soil pressure, which has a positive effect on inhibiting the deformation and bending moment of the supporting pile. The different spacing between the rotary jet grouting pile and the supporting pile increases the bending stiffness, which can effectively limit the deformation and bending moment of the supporting pile. It is suggested that the spacing should be maintained at 1~3 m, but the inhibitory effect is not obvious after exceeding 5 m. The more rows of rotary jet grouting pile waterproof curtain, the more obvious the supporting effect is. The relevant results have certain reference significance for the optimization of foundation pit engineering in water-rich strata.

Keywords: numerical simulation; deep foundation pit excavation; water-rich strata; water-stopping curtain

* 基金项目: 河北省建设科技项目 (2022-2013)。

作者简介: 梁晟 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2022-07-19

0 引言

随着中国经济的高速度高质量发展，为城市化进程开启了加速键，这也使得基坑工程逐渐向更深、更广地发展^[1-2]。基坑工程是一个古老而传统的土力学问题，也是一个复杂的岩土工程问题^[3]。在富水地层深基坑工程中，要避免地下水涌入基坑，保证基坑内部干燥，提高基坑整体的稳定性，防止因基坑外侧地下水流失导致路面下沉、建筑物产生裂缝等问题的产生^[4]，因此需要着重解决基坑开挖过程中挡土和挡水的双重问题，止水帷幕配合支护桩形成的联合支护是一种行之有效的方案^[5-6]。在以往的设计中，止水帷幕仅仅考虑止水的作用，采用高压旋喷法进行土体加固后，形成的水泥圆柱固结体其抗剪强度、刚性比自然软土高出几十甚至几百倍，因此在设计过程中要充分考虑对支护结构变形的影响。

近年来众多学者对深基坑工程展开了一系列研究，周济民等^[7]通过总结国内基坑止水技术现状，分析地下连续墙和旋喷桩等不同桩体的应用条件和特点，结果表明高压旋喷桩止水帷幕适用于富水地层；袁淑文等^[8]考虑地层与周围环境，基坑采用高压旋喷桩与拉森钢板桩组合方式，结果表明止水效果好且经济环保；姜波^[9]利用有限元数值模拟，利用现场监测数据验证了模拟的准确性，研究了改变支护桩的桩径、桩体入土深度等因素对基坑变形的影响规律；邱明明等^[10]利用 PLAX- IS^{2D} 有限元软件，研究了在富水砂砾层中的连续墙进行了各种工作状态下的变形特性分析；付瑞勇等^[11]采用井管降水与旋喷桩止水相结合的措施对地下水进行控制，这种组合手段保证施工过程安全且高效；朱明诚等^[12]借助室内试验，分析了地层特征对桩径尺寸的影响，研究显示高压旋喷技术能够在富水地层中起到加固和止水的作用；毛政跃等^[13]采用有限元 FLAC 3D 数值模拟，通过改变地下水位、基坑与道路的不同距离等因素，研究了基坑降水开挖对道路变形的影响规律。杨汝贤等^[14]利用有限元软件，通过改变止水帷幕嵌固深度等，研究了局部止水帷幕对基坑变形的影响规律。

综上所述，绝大多数研究是集中在改进止水帷幕的施工工艺或不同地质的承载特性影响等方面，

对于富水地层止水帷幕对支护桩的影响鲜有报道。依托河北省邯郸市某富水地层地下综合管廊深基坑工程，利用 Midas-GTS 有限元软件研究了拉森钢板桩+高压旋喷桩止水帷幕联合作用下，基坑降水开挖后支护桩的变形特征，通过分别改变止水帷幕的不同排数与支护桩不同间距等工况，对支护桩变形和受力情况进行了分析，揭示了止水帷幕止水且挡土的作用机理，对止水帷幕制约支护桩变形的有效性进行了评估，以期对富水地层类似条件基坑工程设计优化提供参考。

1 工程概况

本工程是河北省邯郸市东区的赵王大街管廊项目，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，属于深基坑工程。对施工地层进行简化，共分为 5 层，从上至下分别是杂填土、粉质黏土、黏土夹粉质黏土、黏土、粉土。基坑支护方式：选用拉森钢板桩作为支护桩，外侧设置 $\phi 600@400$ 的高压旋喷桩止水帷幕，布设两道钢支撑，水平间距 4 m、垂直距离 3 m。在此次勘测中，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，降水以大

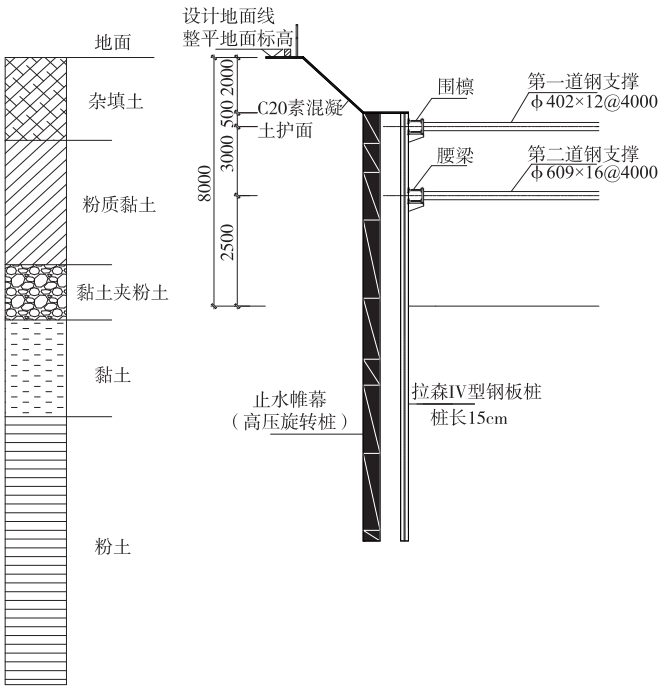


图 1 基坑支护设计图

Fig. 1 Design of foundation pit support

气降水为主，其水位随季节变化而异。基坑支护设计图，如图 1 所示。

2 有限元模拟

2.1 模型建立

采用有限元分析软件 Midas-GTS NX 对基坑进行三维建模，建立深基坑-止水帷幕-拉森钢板桩围护结构相互作用下支护结构的变形分析，采用能真实反映基坑开挖加载卸载过程中非线性力学特征的修正 Mohr-Coulomb 模型。本基坑的实际开挖宽度 12 m，开挖深度 8 m，在模型的支护桩后侧土体方向上，取 7 倍的基坑深度 56 m，高度取 5 倍的基坑深度 40 m，厚度也取 5 倍的基坑深度 40 m，模型尺寸为 120 m×40 m×40 m，模型共划分 13546 个单元，8593 个节点。图 2 为对有限元模型实施了网格层次划分。在模型的底部，设置了三个方向的位移限制，上部为自由边界，对两侧进行水平约束。模型采用激活-钝化的方式模拟开挖过程。

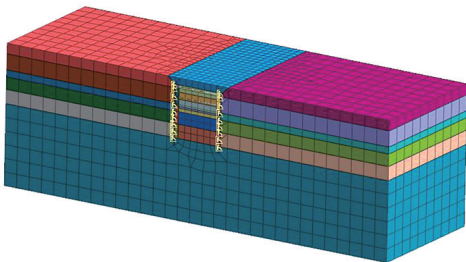


图 2 网格划分示意图
Fig. 2 Grid division diagram

模型基本假定的依据^[15]：模型中同种材料是均质、连续和各向同性的材料，同时考虑土体的分层；拉森钢板桩、高压旋喷桩止水帷幕、围檩、腰梁和内支撑均是线弹性材料，单元类型是梁、板单元；土体是弹塑性材料，单元类型是四面体单元；忽略围护结构与土体的相对位移。

2.2 模型参数

在真实的施工区域和结构形式是复杂的，因此在建模过程中要对实际几何形状进行合理的简化，为了使模型计算便于收敛，选取容易处理的几何模型。其中，高压旋喷桩止水帷幕模型尺寸：桩径为 0.6 m，桩心间距 0.4 m，桩长 15 m；将钢板桩简化为等厚度的 2D 板单元，模型的桩长 15 m，嵌固深度 9 m，厚度 0.1667 m。土体、拉森钢板桩和高压旋

喷桩等材料参数见表 1。

表 1 地层力学性质参数取值
Table 1 Values of mechanical properties of strata

土层名称	重度 / (kN/m ³)	弹性模量 /MPa	黏聚力 C/kPa	摩擦角 φ/ (°)	层厚 /m
杂填土	19	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
旋喷桩	—	960	—	—	—
钢板桩	—	210000	—	—	—

2.3 模拟过程

考虑到地下水对基坑支护结构变形的影响，模拟施工过程采用一次降水和分层开挖的方式，因为在施工现场的基坑边缘堆放材料和土方，所以在模拟中基坑两侧施加 15 kPa 的均布荷载，具体操作。

初始地应力平衡，位移清零；激活拉森钢板桩、高压旋喷桩和止水帷幕，位移归零；基坑降水（降水至-8.5 m）；开挖第一层土到-4 m（激活均布荷载 15 kPa）并激活第一道内支撑；开挖第二层土到-6 m并激活第二道内支撑；开挖第三层土到-8 m。

3 止水帷幕挡土和隔水的机理分析

采用支护桩和止水帷幕共同构成的复合支护结构，在基坑开挖区域内的主动土体压力先通过旋喷止水帷幕传至拉森钢板桩。高压旋喷桩是一种在承受外力作用下，使土体增加屈服应力的一种加固措施，可以视其为刚性的物体，在一定程度上产生了应力的扩散效应，从而降低了对支护结构的土压力。图 3~4 分别表示为不考虑、考虑止水帷幕时地下水的渗流路径图。由于止水帷幕的存在，地下水从高压旋喷桩止水帷幕底部绕流，再流入基坑，使地下水渗透距离延长，减小了渗流速率，在富水地区施工要考虑地下水，否则会使地下水从渗水层直接渗透到基坑内，造成施工难度加大、危险系数增加。总之，止水帷幕对地下水的渗透通道产生了一定的影响，对渗流场基本分布产生了明显的影响，并使渗透速率下降，起到了隔水作用。同时，也具有辅助作用，改善支护桩的变形，保证施工质量和安全。

4 模拟结果分析

4.1 监测数据与模拟结果对比

图 5 为开挖后的基坑水平位移云图。由图 5 可

岩土力学

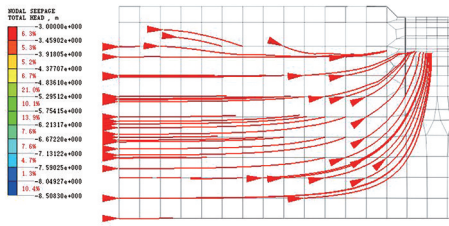


图 3 不考虑止水帷幕渗流路径
Fig. 3 Seepage path of waterproof curtain not considered

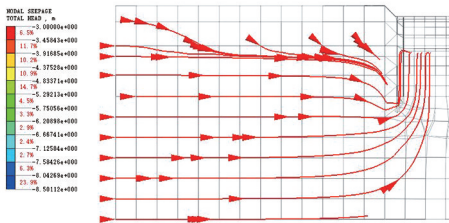


图 4 考虑止水帷幕渗流路径
Fig. 4 Considering seepage path of waterproof curtain

知, 基坑变形呈现鼓腹型, 随着基坑开挖深度的增加, 支护结构所承受的主应力也随之增大, 同时, 基坑内外的水压差异也随之增大, 导致支护桩受力点的位置也会随开挖向下移, 使得主要位移区域和最大水平位移集中在基坑底部。因此实际工程中要加强对基坑底部的变形监测, 必要时补加内支撑。

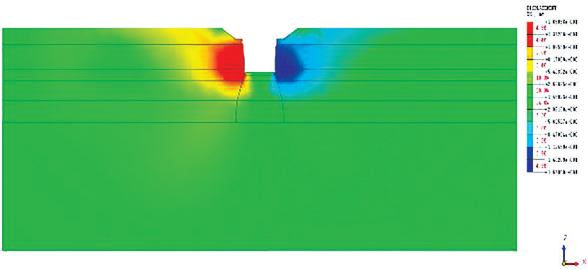


图 5 基坑水平位移云图
Fig. 5 Horizontal displacement nephogram of foundation pit

为了验证模拟的准确性, 桩体水平位移的监测值和模拟值进行对比, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 利用 Midas-GTS 模拟不考虑止水帷幕的支护桩水平位移曲线形态近似抛物线, 与现场监测的数据基本吻合, 桩身水平位移的最大值在桩长-5 m 深度, 是 15.44 mm, 与实测值 16.67 mm 差别很小。实测值略大于模拟值, 考虑到现场施工存在许多不确定因素, 例如: 机械的震动、遭遇特殊天气和内支撑安装不及时等都不可避免地加剧基坑变形, 在模拟中无法

将这些客观条件体现, 因此导致实测值与模拟值的结果存在一定差异, 二者曲线动态变化的趋势高度一致, 验证了模型的准确性。

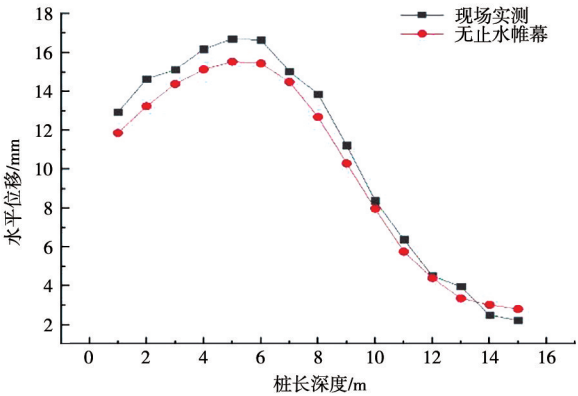


图 6 支护桩水平位移的实测值与模拟值对比
Fig. 6 Comparison of measured and simulated horizontal displacement of supporting pile

4.2 有无止水帷幕的影响分析

图 7 是基坑降水开挖导致支护桩变形的曲线对比。由图 7 (a) 可知随着基坑开挖深度的增加, 支护桩朝坑内方向发生偏移, 且有增大的趋势。前期基坑放坡且开挖深度较浅, 桩体位移无明显变化, 但随着深度的增加和渗流作用的加剧, 桩体位移曲线呈现出“凸”形, 在不同施工阶段支护桩的最大水平位移分别是: 12.93、12.86、14.80、14.85 和 15.44 mm, 最大位移是 15.44 mm, 位于桩长-5 m 深度, 考虑到基坑红线距离道路较近, 行人与社会车辆是导致桩体变形的原因之一; 两道钢管内支撑均有效的抑制了桩身的位移, 特别是激活第二道内支撑后, 桩体位移趋势明显放缓。图 7 (b) 反映现场实测、无止水帷幕和有止水帷幕三种工况的桩身位移曲线, 三种工况的最大水平位移分别: 16.67、15.44 和 9.62 mm。现场监测数值作为参照, 模拟有止水帷幕的最大水平位移是现场实测值的 57.71%, 模拟无止水帷幕的地表沉降最大值是现场实测值的 92.62%, 可见旋喷桩的设置可以有效抑制基坑的变形。

图 8 是基坑降水开挖引起的支护桩弯矩曲线的对比。由图 8 可知, 考虑与不考虑止水帷幕的两种工况, 最大正弯矩分别是: 36.95 kN·m、47.81 kN·m。地下水是支护桩产生弯矩的原因之一, 由于止水帷幕的设置改变了渗流路径, 因此支护桩弯矩在一定程度上得到了有效抑制。

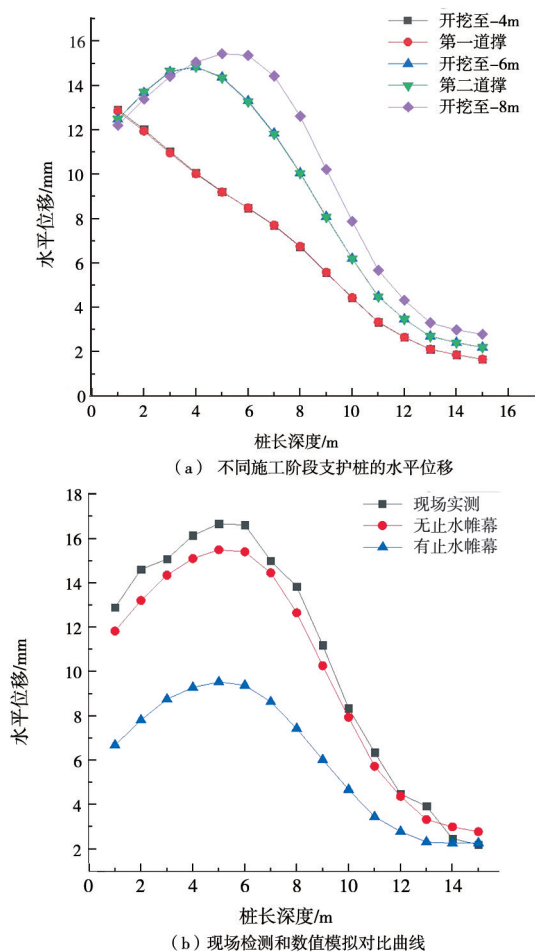


图 7 基坑降水开挖导致的支护桩变形曲线
Fig. 7 Deformation curve of supporting pile caused by dewatering excavation of foundation pit

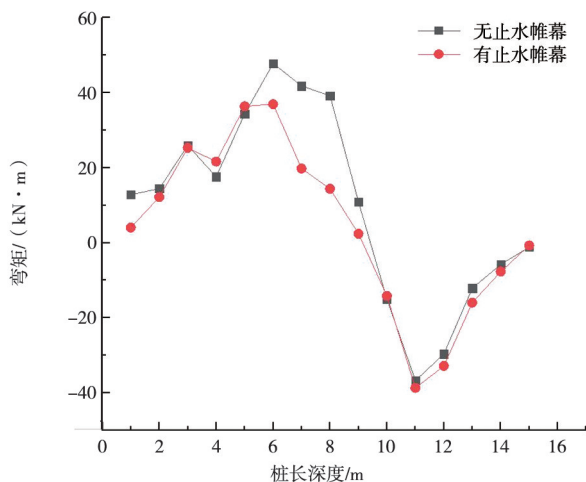


图 8 基坑降水开挖引起的支护桩受力曲线
Fig. 8 The stress curve of supporting pile caused by foundation pit dewatering excavation

4.3 止水帷幕与支护桩不同间距的影响分析

常规的止水帷幕布置方式是将旋喷桩向后放置, 根据现场环境、施工条件和施工经验设定一个与支护桩存在一定距离的止水帷幕。通过数值模拟手段, 研究了六种不同桩心间距的工况 (0.7、1、1.2、1.5、3、5 和 8 m) 下的旋喷桩止水帷幕与支护桩间距对支护桩水平位移的抑制作用效果, 其中最小间距选择 0.7 m, 目的是避免在打桩过程中发生挤土效应^[16], 见图 9。当支护桩与旋喷桩止水帷幕的桩心距大约是 0.7 m 时, 相较于无止水帷幕, 支护桩的最大水平位移减小了约 4.81 mm, 减小率达 31.2%; 当桩心间距是 1.2 m 时, 支护桩最大水平位移减小了约 5.93 mm, 减小率达 38.45%; 当桩心距在 5 m 左右时, 支护结构最大水平位移的减小幅度放缓, 当二者桩心距达到 8 m 时, 对支护结构影响很小, 与桩心距 5 m 支护结构水平位移曲线接近。因此, 支护桩与止水帷幕的间距对支护结构变形存在积极影响, 但超过一定的范围, 止水帷幕的挡土作用无明显差异。

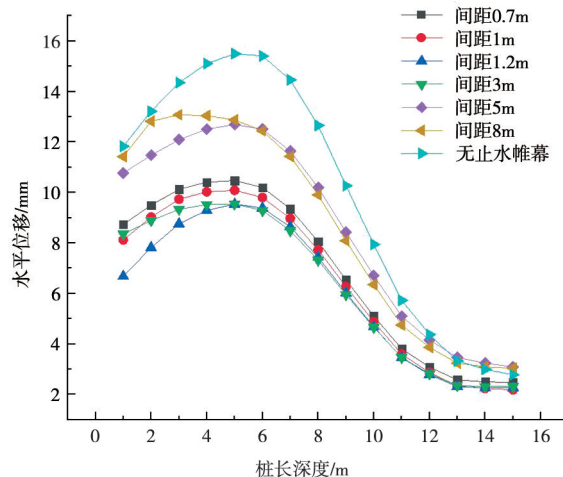


图 9 不同间距对支护桩水平位移的影响
Fig. 9 Influence of Different Spacing on Horizontal Displacement of Support Pile

支护桩与止水帷幕不同间距时支护桩的弯矩曲线见图 10。由图 10 可知, 通过数值模拟六种不同桩心间距的工况, 最大正弯矩分别为 40.16、33.79、36.94、35.39、43.40 和 43.15 kN·m, 与无止水帷幕的最大正弯矩 47.81 kN·m 做比, 最大正弯矩分别减小 16%、29.32%、22.74%、25.98%、9.22%、9.75%。支护桩与止水帷幕的不同间距对改善支护桩

岩土力学

的弯矩都有积极作用,当二者的间距 1~3 m 时,抑制弯矩的效果更好。

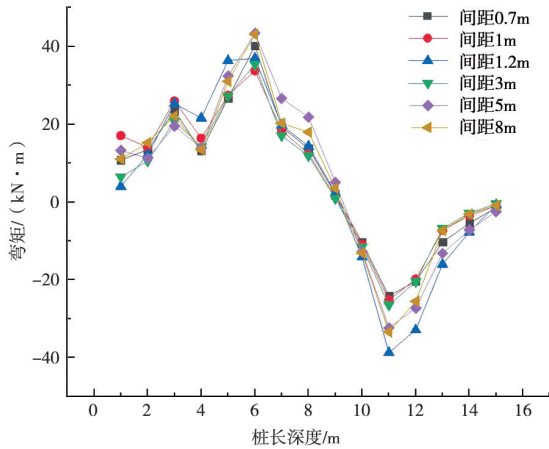


图 10 不同间距对支护桩受力的影响

Fig. 10 Influence of Different Spacing on Force of Support Pile

4.4 止水帷幕排数的影响分析

随着基坑开挖深度的增加,原初始地应力被破坏,应力平衡重新分布,使得桩后土体对桩身的挤压程度加大,导致支护桩产生侧向位移,为保证支护桩的变形在安全范围内,对原单排旋喷桩止水帷幕进行优化,模拟了双排高压旋喷止水帷幕和三排高压旋喷止水帷幕两种工况。当增加旋喷桩的厚度时,两种工况的抗弯刚度增大,能够更好地起到支护作用。图 11 为止水帷幕排数对支护桩水平位移的影响。由图 11 中可知,与原工况单排高压旋喷桩比,支护桩的基坑底部和结构底部位移随着排数的增加略有降低,而桩顶的位移有小幅度的增加。三种工况的支护桩最大水平位移分别是:9.54、9.02 和 8.58 mm,均位于桩长-5 m 深度,双排、三排止水帷幕对比原设置的单排止水帷幕的最大位移分别减小 5.5%、10.1%;可见随着旋喷桩止水帷幕的排数增加,提高了抑制桩身变形的能力。

图 12 是改不同水帷幕排数的支护桩弯矩对比的曲线。由图 12 中可以看出,与原工况比,支护桩顶部弯矩略大,随着止水帷幕的增加,三种工况的支护桩最大正弯矩数值与排数成反比,分别是:36.95、31.87 和 26.22 kN·m。双排、三排止水帷幕对比原设置的单排止水帷幕的最大正弯矩分别减小 13.75%、29.04%。

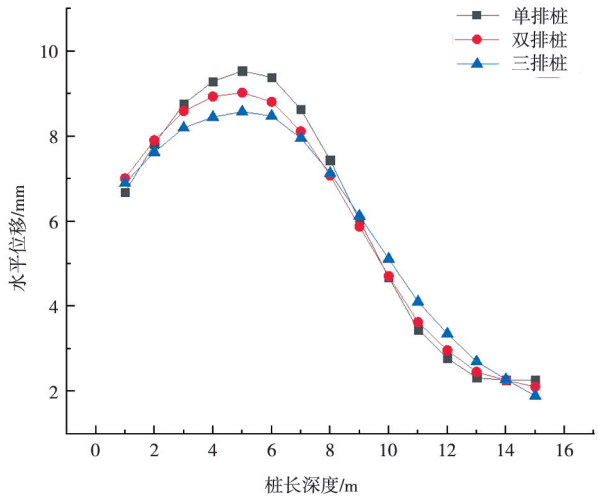


图 11 止水帷幕不同排数对支护桩水平位移的影响

Fig. 11 Influence of different row numbers of waterproof curtain on horizontal displacement of supporting pile

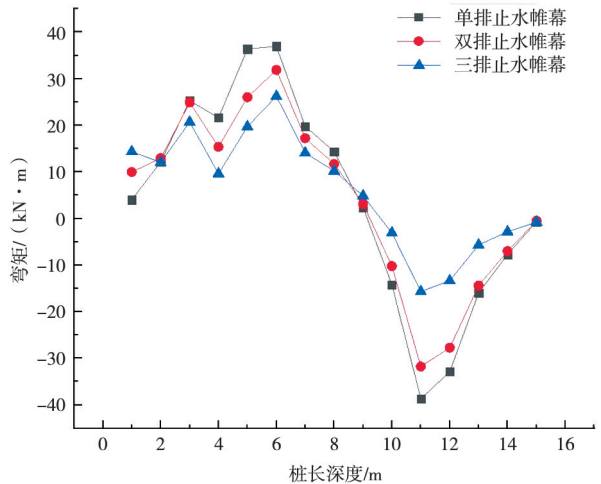


图 12 止水帷幕不同排数对支护桩受力的影响

Fig. 12 Influence of Different Rows of Waterpro of Curtain on Force of Support Pile

5 结论

利用 Midas-GTS NX 软件进行了模拟,结合工程实例分析了拉森钢板桩+高压旋喷桩止水帷幕联合支护结构中支护桩变形情况,得到以下结论:

(1) 高压旋喷桩止水帷幕具备的止水功能,延长了地下水的渗流路径,降低了渗流速度,同时它具备一定的支护能力。因此,在止水帷幕与支护桩联合支护结构优化设计时要充分考虑止水帷幕对基坑变形的影响。

(2) 随着旋喷桩止水帷幕与支护桩间距的增大,支护桩的最大水平位移呈现出先降低后增大的趋势。在实际工程中,防止打桩时产生挤土效应^[16],止水帷幕与支护桩净距一般最小取 0.7 m,当二者桩心距控制在 1~3 m 时,止水帷幕对桩体水平位移和受力的抑制作用明显,但随着间距的增大,当二者桩心距大于 5 m 时,止水帷幕的抑制作用无明显差异。

(3) 当高压旋喷桩的排数增多时,其止水和支护效果更好。建议在建筑群较多的地段采用多排高压旋喷桩止水帷幕,保证支护桩变形在安全范围内,对建筑和道路的影响降到最低;在开阔地段综合考虑,采用最优的止水帷幕设置方式,从而减少施工难度,节省工程造价。

参 考 文 献

- [1] 涂成立,徐祯祥. 地铁站深基坑监测与分析 [J]. 市政技术, 2007, 25 (5): 420-422.
- [2] 周勇,郭楠,朱彦鹏. 兰州地铁世纪大道站基坑支护监测与数值模拟 [J]. 铁道工程学报, 2014 (1): 83-88.
- [3] 龚晓南,高有潮. 深基坑工程设计施工手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [4] 周勇,祁彦龙. 某深基坑降水对周边建筑环境的影响分析 [J]. 甘肃科学学报, 2016, 28 (2): 58-61.
- [5] YOO C, LEE D. Deep excavation - induced ground surface movement characteristics - a numerical investigation [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35 (2): 231-252.
- [6] WANG J X, HU L S, WU L G, et al. Hydraulic barrier function of the underground continuous concrete wall in the pit of subway station and its optimization [J]. Environmental Geology, 2009, 57 (2): 447-453.
- [7] 周济民,李名淦. 北京地区地铁车站深基坑地下水控制技术 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 (S2): 2042-2048.
- [8] 袁淑文,薛毅,冯岳良,等. 高压旋喷桩与拉森钢板桩组合在综合管廊深基坑中的应用 [J]. 施工技术, 2018. 47 (S1): 248-251.
- [9] 姜波. 某深基坑支护结构变形分析与数值模拟 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版): 2016, 35 (1): 37-41.
- [10] 邱明明,杨果林,申权,等. 地下连续墙与止水帷幕共同作用下富水砂层深基坑变形性状 [J]. 长江科学院院报, 2020. 37 (11): 81-88, 95.
- [11] 付瑞勇,武登辉,叶胜林,等. 复杂环境下医院扩建工程深基坑设计与施工实例 [J]. 岩土工程技术, 2020, 34 (6): 339-343, 361.
- [12] 朱明诚,韩强,赵贵斌,等. 卵砾石含水层高压旋喷注浆止水帷幕技术 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48 (4): 7479.
- [13] 毛政跃,刘春丽. 降水开挖对基坑及邻近道路变形的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 0045-0048.
- [14] 杨汝贤,靳高明,张荣海,等. 富水圆砾地层局部止水帷幕作用下基坑开挖变形数值分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (7): 2848-2855.
- [15] 俞建霖. 基坑性状的三维数值分析研究 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23 (4): 65-70.