



# 双排桩护岸在高边坡航道“三改二”工程中的应用

王智海, 王曙光, 张楠, 郑子涵

(山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:** 双排桩具有施工方便、受力条件好、变形小等优点, 广泛应用在各类临时工程和永久工程中。本文以某高边坡航道“三改二”工程为例, 基于施工过程对双排桩护岸进行有限元分析, 探求合理的桩长和桩距, 并以此分析航道开挖过程中双排桩位移和弯矩的变化情况。计算结果表明: 1) 桩长的增加会明显降低双排桩的最大水平位移, 但对双排桩最大正、负弯矩影响较小。2) 桩距的增加将略微增大双排桩的最大水平位移, 但显著增大双排桩最大正、负弯矩。3) 综合考虑结构位移、结构内力和工程造价等因素, 该工程前、后排桩的桩长均为 22.0 m, 前、后排桩的桩距分别为 1.0 和 3.0 m。4) 随着开挖深度的增大, 前、后排桩的最大水平位移和最大正、负弯矩均显著增加。

**关键词:** 双排桩; 高边坡航道; 桩长; 桩距; 最大水平位移; 最大正、负弯矩

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0176-06

## Application of double-row piles in upgrading project of high-slope waterway from level three to level two

WANG Zhihai, WANG Shuguang, ZHANG Nan, ZHENG Zihan

(Shandong Province Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** The double-row piles which have the advantages of convenient construction, good mechanical behavior, small deformation, and are widely used in the various types of temporary and permanent projects. This paper takes the upgrading project of high-slope waterway from level three to level two as an example, performs finite element analysis on the double-row piles based on the construction process, and then explores the reasonable pile length and pile spacing, hereby analyzes the changes in displacement and bending moment of double-row piles during the excavation process of the waterway. The calculation results show that 1) The growth of pile length will significantly reduce the maximum horizontal displacement of double-row piles, but has little effect on the maximum positive and negative bending moments of double-row piles. 2) The growth of pile spacing will slightly increase the maximum horizontal displacement of double-row piles, but significantly increases the maximum positive and negative bending moments of double-row piles. 3) Taking into account a variety of factors such as structural displacement, structural stress and construction cost, the pile length of front and rear piles is equally determined to be 22.0 m, and the pile spacing of front and rear piles is determined to be 1.0 m and 3.0 m, respectively. 4) As the excavation depth increases, the maximum horizontal displacement and maximum positive and negative bending moments of front and rear piles significantly increases.

**Keywords:** double-row pile; high-slope waterway; pile length; pile spacing; maximum horizontal displacement; maximum positive and negative bending moments

收稿日期: 2023-12-13

作者简介: 王智海 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事航道及通航建筑物研究。

双排桩起源于 20 世纪 80 年代末至 90 年代初, 是指基坑侧壁排列设置相隔一定间距的前、后排桩及桩顶梁构成的刚架结构, 具有施工方便、受力条件好、变形小等优点, 广泛应用于基坑支护、围堰等临时工程和边坡防护、防洪堤、码头等永久性工程。

针对双排桩结构的作用机理, 国内专家学者开展了大量的研究。邓小鹏等<sup>[1]</sup>利用平面应变有限元法, 分析桩身及连梁的刚度、排距、土体参数对双排桩受力和变形的影响; 聂庆科等<sup>[2]</sup>根据实测资料, 对双排桩支护结构上的土压力分布特征进行研究, 认为用传统土压力计算方法估算双排桩支护结构上的土压力存在较大偏差; 史海莹<sup>[3]</sup>运用有限元软件 Abaqus 对双排桩支护的深基坑开挖过程进行数值模拟, 分析土压力分布形式、桩身内力和变形等在基坑开挖过程中的变化情况; 胡俊强<sup>[4]</sup>运用有限元软件 Abaqus, 并结合室内试验, 对矩形布置和梅花形布置的悬臂双排桩的土拱效应和嵌固段受力特性进行了研究。

目前, 双排桩的研究主要集中在基坑工程, 而在航道工程中的应用和研究较少。随着船舶大型化和标准化, 内河航道不断加宽挖深, 但受制于堤防、基本农田、生态红线等空间因素, 航道升级采用传统的斜坡式护岸难以实现, 因此, 具

有占地少、施工方便的双排桩护岸被提出, 并得到广泛应用。本文以某高边坡航道“三改二”工程为例, 基于施工过程对双排桩护岸进行有限元分析, 探求合理的桩长和桩距, 并分析了航道开挖过程中双排桩位移和弯矩的变化情况, 旨在为类似项目提供参考。

## 1 工程概况

某段航道位于济宁市京杭运河上京沪铁路桥下游, 现状采用浆砌石斜坡式护岸: 底高程 26.8 m、顶高程 36.0 m、坡比 1:1.5。护岸坡顶设 7.0 m 宽平台, 平台后衔接防洪大堤, 堤顶高程 40.4 m, 迎水坡坡比 1:1.5。该段航道设计最高通航水位 35.8 m, 设计最低通航水位 31.3 m, 常水位 32.3 m。地勘揭示该段航道自上而下土层依次为素填土、姜石、含姜石黏土、全风化泥岩与粉砂岩互层。

为提高通过能力, 该航道需进行升级改造, 底宽由现状 45.0 m 扩宽至 60.0 m, 导致现状护岸需拆除重建。考虑施工期通航和防洪大堤安全, 该段航道还建护岸采用双排桩形式, 见图 1。一级坡采用自然边坡, 底高程 26.8 m、顶高程 28.6 m、坡比 1:4。一级坡坡顶设宽 2.0 m 平台, 平台后衔接双排桩护岸。双排桩护岸顶高程 36.0 m, 后接防洪大堤。

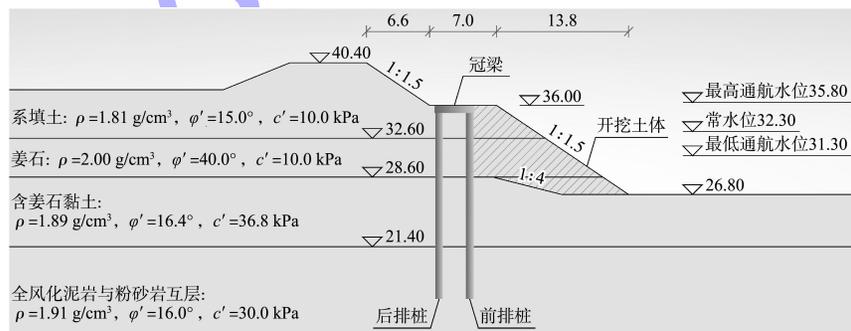


图 1 双排桩护岸断面 (单位: m)

## 2 计算模型

基于 Midas GTS NX 选择代表性断面, 按轴对称结构建立三维模型, 对双排桩护岸进行有限元分析。模型整体尺寸为 100 m×10 m×44 m (长×宽×高), 见图 2。模型采用实体单元模拟土体, 梁单

元模拟双排桩, 板单元模拟冠梁, 并设库仑摩擦界面模拟土体与双排桩之间的相互作用。模型采用六面体网格为主的混合网格, 网格尺寸 0.5~1.0 m, 包含 15.905 3 万个节点和 16.278 4 万个单元。模型采用位移边界条件: 底部设置固定约

束, 顶部设置自由边界, 左侧和右侧设置  $Y$  方向的水平约束, 前侧设置  $YZ$  平面的对称约束, 后侧设置  $X$  方向的水平约束。

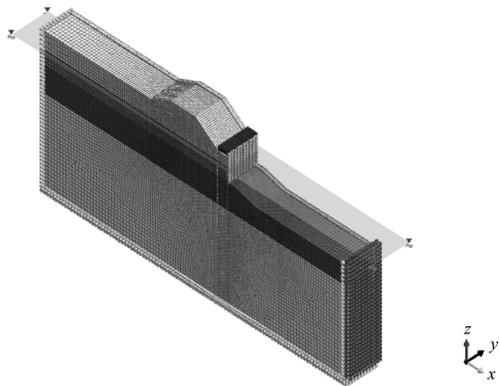


图2 双排桩护岸有限元模型

双排桩混凝土强度等级为 C30, 采用线弹性本构, 密度  $\rho$  为  $2.50 \text{ g/cm}^3$ , 弹性模量  $E$  为  $30 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu$  为  $0.167$ 。

土体本构采用修正摩尔库仑模型 (Modified mohr coulomb model, 简称 MMC 本构)。MMC 本构是基于摩尔库仑本构 (mohr coulomb model, MC) 发展而来的弹塑性本构, 考虑土体的剪切硬化和压缩硬化, 在主应力空间中的屈服面随塑性应变而改变, 可较好地描述土体的破坏和变形行为。MMC 本构共 11 个参数, 包括 3 个控制塑性行为参数: 有效黏聚力  $c'$ 、有效内摩擦角  $\varphi'$ 、剪胀角  $\psi$ ; 4 个刚度参数: 三轴排水试验的参考割线刚度  $E_{50}^{\text{ref}}$ 、固结试验的参考切线刚度  $E_{\text{wed}}^{\text{ref}}$ 、卸荷再加荷模量  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、刚度应力水平相关幂指数  $m$ ; 4 个高级参数: 泊松比  $\nu$ 、参考应力  $p^{\text{ref}}$ 、破坏比  $R_f$ 、正常固结条件下的侧压力系数  $K_0$ 。根据地勘报告及 MMC 本构参数取值方法<sup>[5-9]</sup>, 结合工程经验, 各土层 MMC 本构参数取值见表 1。

表1 各土层 MMC 本构主要参数

地层名称	层底高程/m	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c' / \text{kPa}$	$\varphi' / (^\circ)$	$\psi / (^\circ)$	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{wed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$m$	$\nu$	$p^{\text{ref}} / \text{kPa}$	$R_f$	$K_0$
素填土	32.6	1.81	10.0	15.0	0	3.450	4.140	20.700	0.8	0.35	100	0.9	0.73
姜石	28.6	2.00	10.0	40.0	8	20.000	20.000	60.000	0.8	0.35	100	0.9	0.36
含姜石黏土	21.4	1.89	36.8	16.4	0	6.800	8.160	40.800	0.8	0.35	100	0.9	0.72
全风化泥岩与粉砂岩互层	-	1.91	30.0	16.0	0	8.080	9.696	48.480	0.8	0.35	100	0.9	0.72

### 3 双排桩尺寸设计

#### 3.1 桩径、排距和冠梁设计

杨靖<sup>[10]</sup>利用有限元软件 Abaqus 进行双排桩尺寸效应影响分析, 提出适宜桩径  $600 \sim 800 \text{ mm}$ ; 郭淋等<sup>[11]</sup>利用有限差分软件 FLAC3D, 并结合实测资料, 对双排桩的结构参数进行优化, 认为最优桩径为  $800 \text{ mm}$ 。根据上述研究成果, 结合工程经验, 确定双排桩桩径为  $800 \text{ mm}$ 。

孙涛等<sup>[12]</sup>利用有限元软件 PLAXIS 并结合实测资料, 对双排桩支护结构的最优排距进行研究, 提出排距在  $2 \sim 4$  倍桩径时支护效果最好; 彭文祥等<sup>[13]</sup>通过室内模型试验, 提出当桩径为  $600 \sim 1200 \text{ mm}$  时, 双排桩排距为  $3 \sim 4$  倍桩径最合理。根据上述研究成果, 结合现场施工条件, 本文确定双排桩排距取 4 倍桩径, 即  $3.2 \text{ m}$ 。

JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》<sup>[14]</sup>指出, 当冠梁高度大于 1 倍的桩径时, 再增大梁高

桩顶水平位移基本不变。因此, 本文确定冠梁高度为 1 倍桩径, 即  $0.8 \text{ m}$ 。

#### 3.2 桩长设计

以常水位工况 (桩前、桩后水位均为常水位  $32.3 \text{ m}$ ) 为例, 按前、后排桩等长, 通过对桩长  $16.0$ 、 $18.0$ 、 $20.0$ 、 $22.0$ 、 $24.0$ 、 $26.0 \text{ m}$  的双排桩进行有限元计算, 以探求合理的桩长。计算时, 除桩长外, 其他设计参数均保持不变: 桩径  $0.8 \text{ m}$ 、前/后排桩排距  $3.2 \text{ m}$ 、桩距  $1.0 \text{ m}$ 、冠梁高  $0.8 \text{ m}$ 。

不同桩长下前排桩和后排桩的水平位移见图 3。由图可知, 受冠梁的约束作用, 前、后排桩发生位移变形协调: 水平位移变化趋势基本一致; 最大水平位移接近, 均发生在桩顶处。高程  $23.0 \sim 24.0 \text{ m}$  以上桩体的水平位移随桩长的增加而减小, 但降幅逐渐降低; 高程  $23.0 \sim 24.0 \text{ m}$  以下桩体的水平位移随桩长的增加而增加, 但增幅亦逐渐降低。

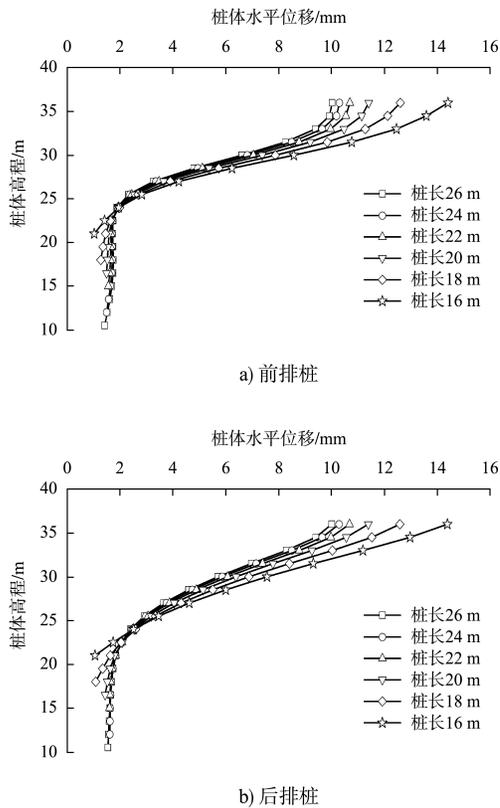
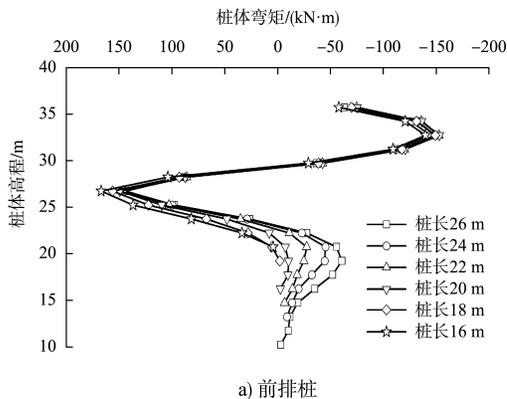
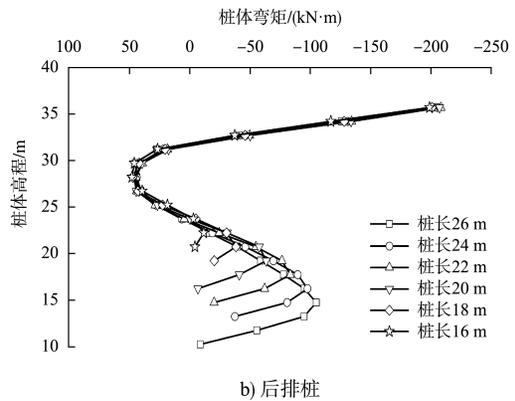


图 3 不同桩长下前排桩和后排桩的水平位移

图 4 表示不同桩长下前排桩和后排桩的弯矩。由图可知, 受交变应力的影响, 前、后排桩均存在 2 个反弯点。前、后排桩的弯矩在高程 26.8 m (航道底高程) 以上受桩长变化的影响较小, 在高程 26.8 m 以下则相反。前排桩最大正弯矩均位于高程 26.8 m, 其值随桩长的增加而略微减小; 最大负弯矩均位于高程 33.0 m (桩顶以下 3.0 m), 其值对桩长变化不敏感。后排桩最大正、负弯矩的位置和大小随桩长的变化基本保持不变, 最大正弯矩位于高程 27.8 m, 最大负弯矩均位于高程 36.0 m (桩顶)。



a) 前排桩



b) 后排桩

图 4 不同桩长下前排桩和后排桩的弯矩

目前作为永久支护时, 双排桩最大水平位移允许值尚无定论。参考北京市地方标准 DB 11/489—2016 《建筑基坑支护技术规程》<sup>[15]</sup> 的规定, 双排桩最大水平位移允许值取一级基坑最大水平变形限值的报警值, 即 11.84 mm。

当桩长大于 20.0 m 时, 双排桩的最大水平位移均小于允许值, 但当桩长超过 22.0 m 后, 桩长的增加对抑制桩体水平位移的效果越来越弱。因此, 双排桩的合理桩长应为 20.0~22.0 m。考虑一定安全富余, 确定双排桩的桩长为 22.0 m, 对应最大水平位移值为 10.70 mm。

### 3.3 桩距设计

考虑到船行波对桩间土的淘刷, 桩间土可能从前排桩桩间滑出, 进而引发整体失稳。因此, 双排桩作为航道的永久性水工建筑物, 前排桩的桩距不宜过大, 且前排桩桩间应设置高压旋喷桩对桩间土进行遮拦。参考类似项目, 结合工程经验, 本文确定前排桩桩距为 1.0 m。

为探究后排桩的桩距对双排桩位移和弯矩的影响, 以常水位工况为例, 按前排桩的桩距 1.0 m, 后排桩的桩距 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 m 分别进行有限元计算。除桩距外, 其他设计参数均保持不变: 前/后排桩的桩长 22.0 m、排距 3.2 m、冠梁高度 0.8 m。

图 5 表示不同后排桩桩距下前排桩和后排桩的水平位移。由图可知, 前、后排桩的水平位移变化趋势一致, 最大水平位移接近, 均发生在桩顶处。前、后排桩的水平位移在高程 28.6 m (一级

坡坡顶)以上随桩距的增加而增加,但增幅逐渐降低;在高层 28.6 m 以下基本不随桩距的变化而改变。这是因为桩距的增大导致结构体系整体刚度下降,进而引起位移增大,但一级坡坡顶以下桩体由于受到土体的约束作用,水平位移较一级坡坡顶以上的桩体变化不明显。

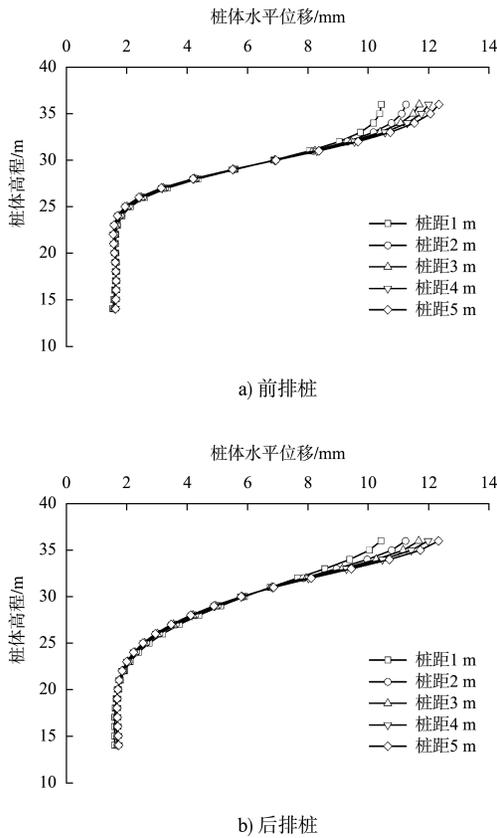


图 5 不同后排桩桩距下前排桩和后排桩的水平位移

图 6 表示不同后排桩桩距下前排桩和后排桩的弯矩。由图可知,受交变应力的影响,前、后排桩均存在 2 个反弯点。随着桩距的增大,前、后排桩最大正、负弯矩均增大,但后排桩的增幅明显高于前排桩。随着桩距的增大,前排桩最大正、负弯矩比值基本不变,接近于 1.0;后排桩最大正、负弯矩比值逐渐增大,但均小于 1.0。前、后排桩最大正、负弯矩的位置基本不随桩距的变化而改变:前排桩最大正、负弯矩分别位于高程 26.8 和 33.0 m,后排桩最大正、负弯矩分别位于高程 27.8 和 36.0 m。结合以上分析,桩长变化和后排桩桩距变化基本不引起前、后排桩最大正、负弯矩位置的改变。

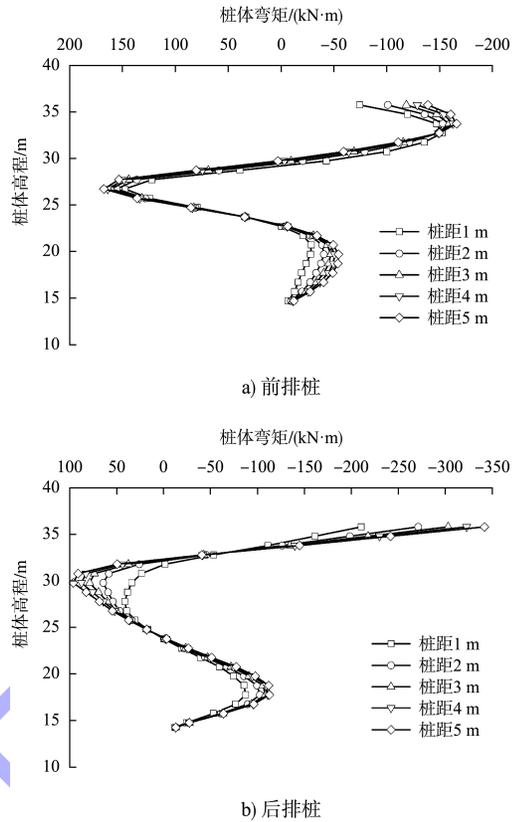


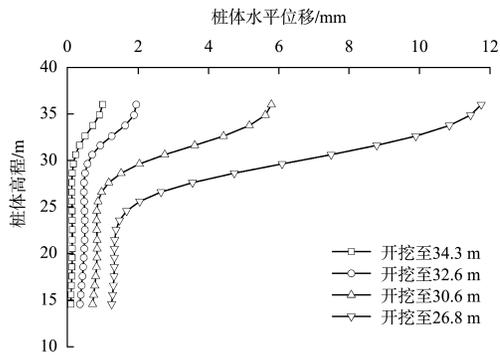
图 6 不同后排桩桩距下前排桩和后排桩的弯矩

当桩距不大于 3.0 m 时,双排桩的最大水平位移均小于允许值,但桩距越小,后排桩最大正、负弯矩的比值越远离 1.0,结构受力相对越不合理。综合考虑结构位移、结构受力和工程造价等因素,本文确定后排桩的桩距为 3.0 m,对应双排桩最大水平位移值为 11.68 mm。

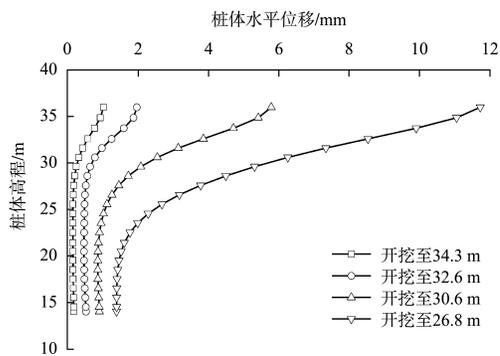
#### 4 考虑施工过程的双排桩静力分析

参考双排桩结构参数,以常水位工况为例,对开挖过程中双排桩位移和弯矩的变化进行分析。开挖过程共分为 4 步,每步开挖土层厚度依次为 1.7、1.7、2.0 和 3.8 m。

图 7 表示开挖过程中前排桩和后排桩的水平位移。由图可知,开挖过程中,前、后排桩的水平位移变化趋势基本一致,水平位移在桩顶至某高程范围内随高程的降低而逐渐减小,在某高程至桩底范围内随高程的降低基本保持一致。随着开挖深度的增加,前、后排桩的水平位移越来越大,最大水平位移均发生在桩顶处,开挖完成后的最大水平位移为 11.68 mm。



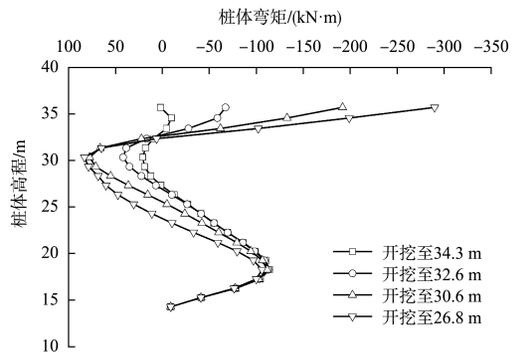
a) 前排桩



b) 后排桩

图 7 开挖过程中前排桩和后排桩的水平位移

图 8 表示开挖过程中前排桩和后排桩的弯矩。由图可知, 前、后排桩受交变应力的影响, 均存在 2 个反弯点。随着开挖深度的增加, 前排桩最大正、负弯矩均显著增大, 最大正弯矩位置明显下移, 最大负弯矩位置由桩顶向桩顶以下 2.0 m 转移; 后排桩最大正、负弯矩亦显著增大, 最大正弯矩位置约在高程 30.5 m; 最大负弯矩位置由高程 18.5 m 向桩顶转移。开挖完成后, 前排桩最大正、负弯矩分别为 164.1 和 156.5 kN·m, 后排桩最大正、负弯矩分别为 82.8 和 266.5 kN·m。



b) 后排桩

图 8 开挖过程中前排桩和后排桩的弯矩

### 5 结语

1) 桩长的增加将明显降低双排桩的最大水平位移, 但对双排桩最大正、负弯矩影响较小; 当桩长超过某一长度后, 桩长的增加对抑制双排桩水平位移的效果越来越小。

2) 桩距的增加将略微增大双排桩的最大水平位移, 却显著增大双排桩最大正、负弯矩, 其中对后排桩弯矩的影响大于前排桩。

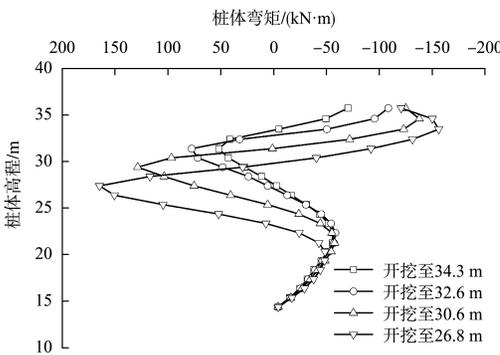
3) 桩长变化和后排桩桩距变化基本不会引起前、后排桩最大正、负弯矩位置的变化。

4) 综合考虑结构位移、结构受力和工程造价等因素, 确定前、后排桩的桩长均为 22.0 m, 前、后排桩的桩距分别为 1.0 和 3.0 m。

5) 前、后排桩的水平位移变化趋势基本一致, 最大水平位移均发生在桩顶处。随着开挖深度的增大, 前、后排桩的最大水平位移和最大正、负弯矩均显著增加。

### 参考文献:

[1] 邓小鹏, 陈征宙, 韦杰. 深基坑开挖中双排桩支护结构的数值分析与工程应用[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(4): 42-47.  
 [2] 聂庆科, 胡建敏, 吴刚. 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3089-3094.  
 [3] 史海莹. 双排桩支护结构性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
 [4] 胡俊强. 双排桩土拱效应及嵌固段受力特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.



a) 前排桩

(下转第 199 页)