

# 全埋刚架抗滑桩参数影响数值模拟研究

徐祥, 钟华, 黄剑斌

(福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 针对某实际边坡工程, 依据混凝土用量相等原则, 将原文献中得到的最优单排抗滑桩转化为全埋刚架桩, 并采用有限元软件 ABAQUS 建立其三维有限元模型, 并与最优单排抗滑桩进行对比分析。由于全埋刚架桩更具有抗滑优势, 可提高边坡稳定性, 考虑刚架桩桩底支承约束条件、后排桩长和连梁高度等参数的变化对边坡和桩身的影响, 均设置 5 种工况进行数值模拟计算。结果表明: 后排桩长增加, 前后排桩弯矩差逐渐减小, 分布趋于均匀, 但存在一个最优长度; 连梁刚度增加, 有利于减小边坡和桩身位移, 后排桩的最大负弯矩作用点的位置发生在连梁高度的 1.34 ~ 1.35 倍处, 前排桩最大负弯矩发生的位置逐渐向连梁底部靠近。为充分发挥前后排桩材料属性, 以及提高刚架桩的整体抗滑能力, 建议桩底约束设置为后排桩桩底固定前排桩桩底铰支或两桩底端均铰支。

**关键词:** 全埋刚架桩; 边坡; 参数分析; 数值模拟; 有限元

中图分类号: U213.1<sup>+</sup>52.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0177-07

## Numerical Simulation on the Influence of Parameters of Fully Buried Rigid Frame Anti-slide Piles

XU Xiang, ZHONG Hua, HUANG Jianbin

(School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** Focusing on an actual slope engineering project, this work firstly developed a three-dimensional finite element model based on the finite element software ABAQUS, to analyze the optimal single row anti slip pile obtained in a literature which is transformed into a fully buried rigid frame pile based on the principle of equal concrete dosage. The result was compared and analyzed with the optimal single row anti slip pile. It is shown that fully buried rigid frame piles have more anti slip advantages and improve slope stability. Secondly, considering the influence of parameters such as the support constraint conditions at the bottom of the rigid frame pile, the length of the rear pile, and the height of the connecting beam on the slope and pile body, five working conditions are set up for numerical simulation calculations, aiming to provide reference for the design of rigid frame piles. The results indicate that to fully utilize the material properties of the front and rear piles and improve the overall anti-sliding capacity of the rigid frame pile, it is recommended that the pile bottom constraints be set as fixed at the bottom of the rear pile and hinged at the bottom of the front pile, or both pile bottoms are hinged. As the length of the rear pile increases, the difference in bending moments between the front and rear piles gradually decreases, and the distribution becomes more uniform, but there is an optimal length. The increase in the height of the connecting beam is beneficial for reducing the displacement of the slope and pile body. The position of the maximum negative bending moment acting on the rear pile occurs at 1.34 to 1.35 times the height of the connecting beam, and the position where the maximum negative bending moment occurs in the front pile gradually moves closer to the bottom of the connecting beam.

**Keywords:** fully buried rigid frame piles; slope; parameter analysis; numerical simulation; finite element

全埋刚架抗滑桩(以下简称刚架桩)是人们常采用的边坡抗滑支护结构之一<sup>[1]</sup>。刚架桩的最早应用可追溯至 1967 年美国旧金山某铁路隧道上方受公路开挖引起的山体滑坡的治理<sup>[2]</sup>,我国的应用报道始见于 1982 年枝柳铁路罗依溪滑坡的治理工程<sup>[3]</sup>。后续学者在基坑和边坡方面进行了大量的研究,例如,何颐华等<sup>[4]</sup>、赵波等<sup>[5]</sup>通过室内试验研究了门架桩的内力、位移等变化规律;Wu 等<sup>[6]</sup>对一双排桩加固边坡进行了振动台试验,揭示了双排桩加固边坡的变形特征,为抗震设计提供了参考;周翠英等<sup>[7]</sup>、王羽等<sup>[8]</sup>、张玲等<sup>[9]</sup>建立了刚架桩的平面计算模型;钱同辉等<sup>[10]</sup>建立了刚架桩的空间计算模型;周应华<sup>[11]</sup>用数值模拟方法分析了刚架桩的内力位移分布特征;吕美君等<sup>[1]</sup>研究了滑坡推力为矩形和三角形时其在前、后排桩之间如何分配;于洋等<sup>[12]</sup>对刚架桩的锚固深度、刘鸣等<sup>[13]</sup>考虑桩体刚度、连梁高度和排距的变化对刚架桩的影响进行了分析;彭文祥等<sup>[14]</sup>通过室内模型试验得到了双排桩的最佳排距和支护结构内力变化规律;Wang 等<sup>[15]</sup>通过三维数值模拟,研究了基坑周围不同位置的双排桩的性状差异并做了桩埋深、桩径、排距、桩间距等参数分析;邱红胜等<sup>[16]</sup>基于  $P-y$  曲线法计算了基坑双排桩的位移;高阳等<sup>[17]</sup>和欧孝夺等<sup>[18]</sup>对双排桩的桩径、桩距、连梁等设计参数对基坑变形影响的敏感性进行了对比分析;郭成超等<sup>[19]</sup>用有限元法探讨了装配式可回收的双排桩的支护能力;张立等<sup>[20]</sup>对超深基坑采用的双排微型钢管桩支护结构进行了受力原位试验;郑刚等<sup>[21]</sup>和曹卫平等<sup>[22]</sup>分别对前排倾斜的双排桩基坑支护结构做了原位试验和模型试验。综上所述,这些模型试验、理论(或计算方法)和数值分析(有限差分 and 有限元)的研究成果对刚架桩(双排桩)的应用提供了很好的基础。但相较于基坑工程,在边(滑)坡中较少涉及刚架桩的参数影响分析。

由于滑坡治理中的刚架桩受力和基坑中悬臂式刚架桩的受力存在显著差别,如相似条件下前者所受滑坡推力远较后者所受的土压力大,且后者在基坑面以上不像前者那样承受桩前滑动面上土抗力的作用。本文将以前文[23]中实际边坡工程为例,将该文献中单排抗滑桩(以下简称单排桩)按混凝土用量相等原则转换成刚架桩,并利用有限元软件 ABAQUS 建立单榀刚架桩三维有限元计算模型,从定量的角度分析桩底支承约束条件、后排桩长、连梁

高度等因素的变化,对边坡位移、桩身位移和其内力的影响,探究刚架桩的受力特性,以期为刚架桩的设计提供参考。

## 1 边坡工程概况

依托文献[23]中的边坡工程案例,具体工况为:该边坡位于福建省龙岩市,为多级边坡,土质为单一坡残积土,坡顶和坡脚处均有房屋建筑,最上一级台阶是人行道路。该边坡坡面已在早期采用了水泥浆及砌块石,和设置三道浆砌块石重力式挡土墙等边坡防治措施(见图 1)。由于周边沉降以及水土流失,在边坡坡面及周边发现裂缝和变形(见图 2),对坡顶和底部的房屋建筑构成潜在危险。考虑到坡顶的居民楼与围墙所产生的荷载作用对边坡稳定性的影响,将其转化为等效均布荷载施加于边坡,其值与文献[23]一致,分别约为 41 kPa、66 kPa,具体边坡尺寸、荷载及桩位置见图 3。



图 1 边坡概貌



图 2 边坡裂缝

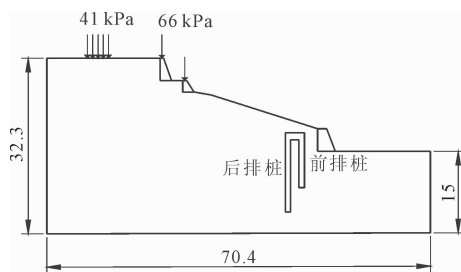


图 3 边坡尺寸及桩位置示意图(单位:m)

## 2 有限元模型建立

年廷凯等<sup>[24]</sup>指出,当滑动方向明确,抗滑桩采用矩形或方形截面优于圆形截面,更利于边坡安全。据此本文采用方形截面刚架桩模拟计算,计算厚度取相邻两樁抗滑桩的桩心净距3 m。文献[23]中确定了采用圆形单排桩加固边坡的最优设计方案,其桩身尺寸见表1。用混凝土用量相等原则,得到刚架桩截面尺寸为1 m×1 m,具体尺寸详见表1。图4是刚架桩加固边坡有限元计算模型。

表1 桩身尺寸及混凝土用量

桩型	桩径(宽) /m	前后桩距 /m	桩长 /m	混凝土 用量/m <sup>3</sup>
单排桩	1.5	—	15.5	27.38
刚架桩	1.0	1	15.5(后桩)/ 10.5(前桩)	27.00

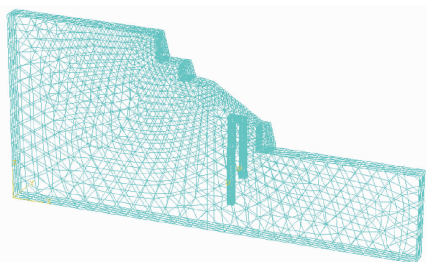


图4 刚架桩加固边坡三维模型

计算参数如表2所示,与文献[23]一致。土体采用摩尔-库仑理想弹塑性本构模型,抗滑桩及挡土墙采用线弹性本构模型,单元类型均为C3D10。桩与土之间设置库伦摩擦,摩擦系数为0.3。模型边界条件:(1)模型的前后左右边界施加相应坐标轴方向的位移约束;(2)模型底部施加X、Y和Z三个方向的位移约束;(3)边坡的坡顶及坡面为自由边界。

表2 计算参数<sup>[23]</sup>

材料	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
坡残积土	19	0.30	12	14.99	20.64
抗滑桩	24	0.17	30000	—	—
挡土墙	24	0.21	20000	—	—

采用强度折减法和采用塑性区贯通判别标准,经过计算刚架桩加固后的安全系数为1.36,比单排桩的安全系数1.21<sup>[23]</sup>提高了约12.4%。其表明,在控制抗滑桩的混凝土用量相近的条件下,刚架桩支护结构比单排桩更能有效提高边坡的安全系数,增强边坡的稳定性,确保工程安全。

## 3 参数影响分析

### 3.1 桩底约束条件的影响

由于该实际边坡计算范围内无硬岩存在,不能实现固支约束,依据文献[2-12]建议,本文规定,嵌固深度为桩长1/4视为固定支承,嵌固深度为桩长1/6视为铰支承,自由支承则不设置约束。为探讨桩底约束条件对边坡及刚架桩的影响,设置5种工况,具体为后排桩固支前排桩固支(工况1,简称后固前固,下同)、后固前铰(工况2)、后铰前铰(工况3)、后固前自由(工况4)、后铰前自由(工况5)。

#### 3.1.1 水平位移分析

图5为工况1(工况2和工况3与之相似,仅数值不同,故未列出,下同)和工况5(工况4与之相似)边坡的水平位移U1等值云剖面图(下同)。图6是前后排桩水平位移分布曲线。由计算结果可知,工况1—工况5边坡最大水平位移分别为9.97 mm、10.35 mm、10.44 mm、29.04 mm和35.59 mm,前三者工况的最大土体位移增量很小,但工况4和工况5相比于工况3增幅分别为178.2%以及240.1%,其原因在于桩底端约束力降低,桩身发生了更大的水平位移,如图6所示,工况1—工况5的前后排桩桩顶水平位移值分别为3.72 mm、4.47 mm、4.62 mm、24.6 mm和31.2 mm,工况4和工况5水平位移值是工况1—工况3的5倍以上。此外,由于连梁的协调作用,前后排桩桩顶位移是一致的。因此在设计中应尽量避免前排桩底端自由支承条件。

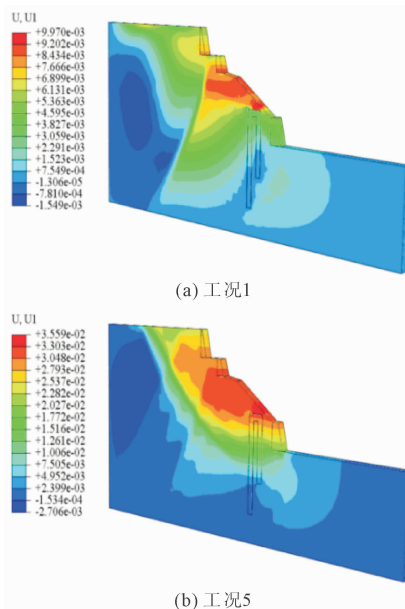


图5 不同桩底约束土体水平位移等值云图(单位:m)

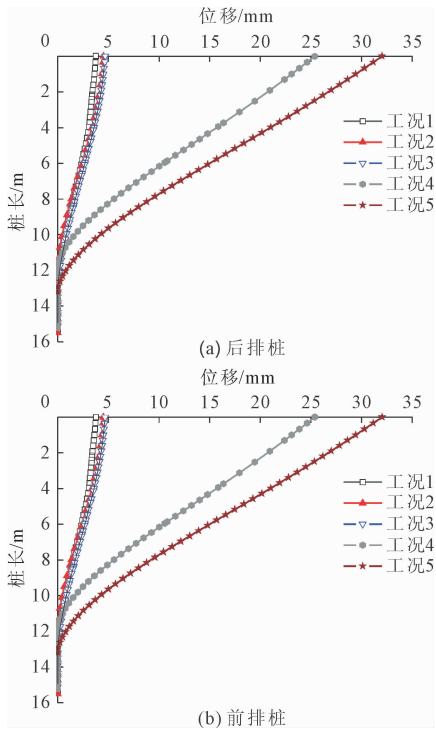


图 6 不同桩底约束桩身水平位移分布曲线

### 3.1.2 桩身弯矩分析

图 7 为桩身弯矩分布曲线。

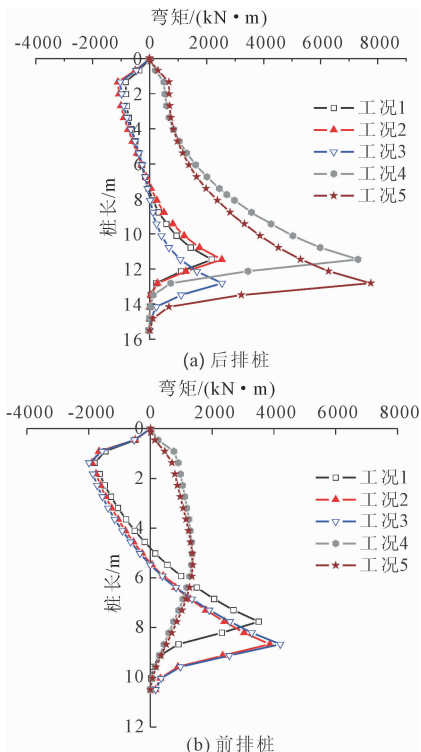


图 7 不同桩底约束桩身弯矩分布

由图 7 可知,① 由于工况 1—工况 3 前后排桩均有约束,其桩身弯矩分布近似“S”形,且前后排桩

的弯矩值分布相较于工况 4 和工况 5 的更均匀,前后排桩更能发挥协同抗滑作用;② 前后排桩的约束条件变化对最大负弯矩发生位置不影响,均出现在距桩顶 1.34 m 左右处,而前后排桩的最大正弯矩位置随嵌固深度的加大逐渐上移。

综上,在实际工程设计中,在满足工程安全要求条件下,从经济效益角度出发,建议刚架桩的桩底支承方式采用后固前铰或两端铰支,与弹性抗滑桩设计相符合<sup>[23-25]</sup>。

## 3.2 后排桩桩长的影响

任鹏等<sup>[26]</sup>指出在基坑工程中,不等长刚架桩支护结构能够节省大量工程材料,减少造价及工期,且后排桩的桩长变化更能影响桩身位移和内力。为分析后排桩桩长的变化对边坡和刚架桩的影响,设置 5 种工况,分别为 10.5 m (工况 6)、12.5 m (工况 7)、14.5 m (工况 8)、16.5 m (工况 9) 以及 18.5 m (工况 10)。本节计算模型仍采用 3.1 节计算模型,桩底约束设置为后固前铰。

### 3.2.1 水平位移分析

图 8 为工况 6 和工况 10 (工况 7—工况 9 与之相似) 边坡的水平位移 U1 等值云。图 9 是 5 种工况的前后排桩水平位移分布曲线。

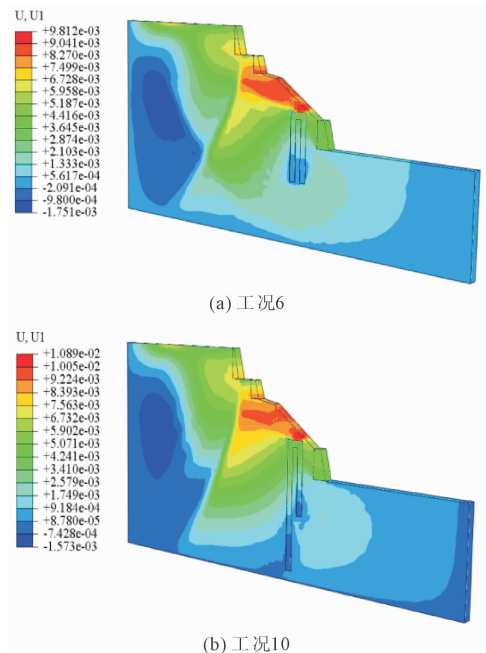


图 8 不同后排桩长边坡水平位移等值云(单位:m)

由图 8、图 9 可知,相比基坑中后排桩长增长,桩身位移减小<sup>[17-26]</sup>,刚架桩和边坡浅层水平位移增大,桩后边坡深层水平位移逐渐减小。表明刚架桩后排桩长的增长可能会导致深层滑坡转化为浅层滑

坡。桩身水平位移增大是由于后排桩桩长增长,其支挡土体的范围增大,所承受的滑坡推力也随之增大。此外,桩身位移增幅逐渐减小,说明桩长达到一定深度后,其桩长的变化对于桩身的位移影响逐渐减小。

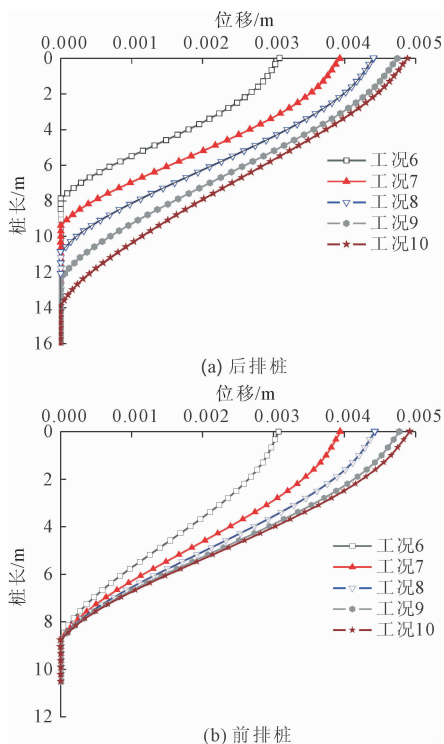


图 9 不同后排桩长桩身水平位移分布

### 3.2.2 桩身弯矩分析

图 10 为 5 种工况桩身弯矩分布曲线。由图 10 可知,桩身弯矩均呈“S”形分布;随桩长的增加后排桩的弯矩值减小,前排桩的弯矩值增大,与任鹏等<sup>[26]</sup>所得结论相反。这是由于文献[26]在基坑中前排桩长、后排桩短与本文设置不同,另一个原因是在基坑与边坡中刚架桩受力不同导致的。与文献[26]均得到桩身弯矩变化幅度随桩长增加逐渐减小,后排桩桩长存在一个最优长度。此外,桩长变化,仅后排桩的最大弯矩作用点位置发生改变,随桩长的增加而下移。

综上,为防止因前后排桩长相差太大导致未能充分发挥前后排桩抗滑能力,达到整体抗滑最优,综合对比这 5 种工况,工况 7 和工况 8 的桩身长度设置更合理。

### 3.3 连梁高度的影响

相比于单排桩和独立双排桩,连梁将前后排桩连接起形成一个整体结构,可提高抗滑桩的整体刚度,增强结构的抗滑作用。因此,本节将分析连梁高

度的变化(也即改变连梁刚度)对边坡和刚架桩的影响。设置连梁高度  $H = 0.5D、1.0D、1.5D、2.0D$  以及  $3.0D(D$  为桩宽,  $1\text{ m})$  5 种工况。计算模型仍采用 3.1 节计算模型,桩底约束设置为后固前铰。

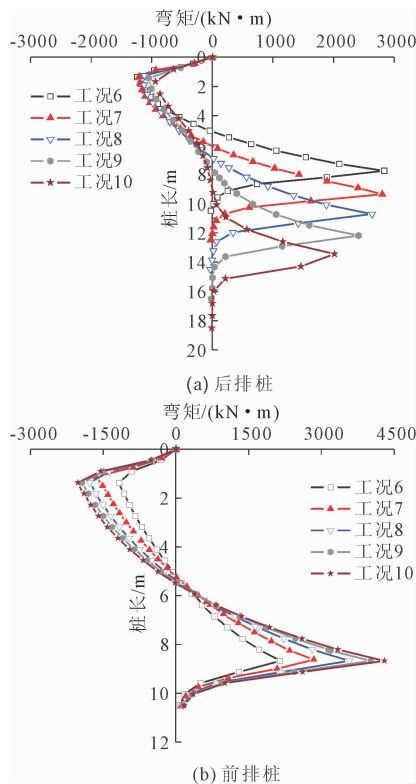


图 10 不同后排桩长桩身弯矩分布

### 3.3.1 水平位移分析

图 11 为工况  $H = 0.5D$  和工况  $H = 3.0D$ (工况  $H = 1.0D、1.5D$  和  $2.0D$  与之类似)边坡水平位移  $U_1$  等值云。图 12 为 5 种工况的桩身位移分布曲线。从图 11、图 12 可知,连梁刚度变化不影响边坡土体和桩身位移分布规律,但连梁高度的加大边坡和桩身的水平位移减小。这是因为连梁高度增加,刚架桩整体刚度增大,提高了抗变形能力。就后排桩而言,其最大水平位移分别为  $5.07\text{ mm}、4.53\text{ mm}、4.22\text{ mm}、3.97\text{ mm}$  和  $3.50\text{ mm}$ ,其减幅分别为  $10.7\%、6.8\%、5.92\%、11.84\%$ 。其中工况  $H = 3.0D$  时,减幅为  $11.84\%$ ,这可能是由于连梁高度较前一工况增加  $1.0D$  导致的。减幅总体呈下降趋势,表明连梁高度增大到一定高度时,对边坡和桩身水平位移减小的效果降低,因此连梁高度应避免过大造成材料浪费。

### 3.3.2 桩身弯矩分析

图 13 为 5 种工况桩身弯矩分布曲线。由图 13 可知,桩身弯矩均呈“S”形分布;不同工况之间,连

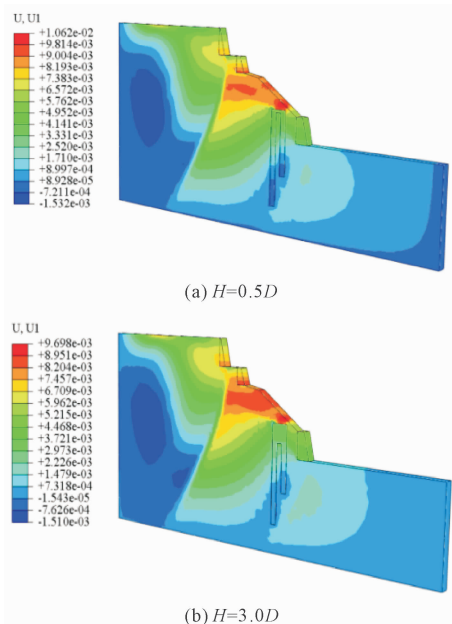


图 11 不同连梁高度土体水平位移等值云图(单位:m)

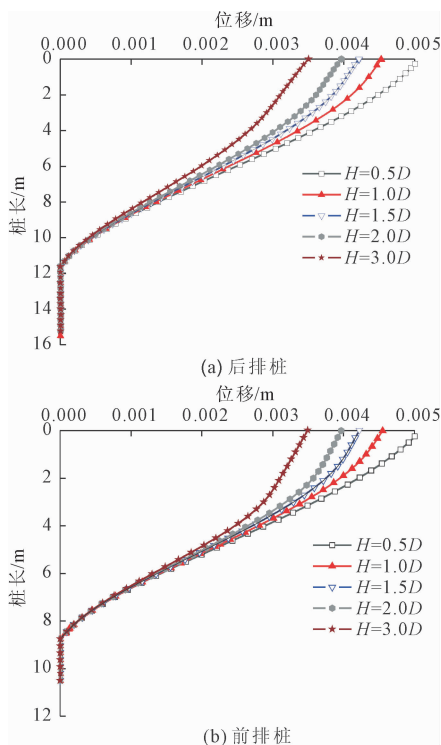


图 12 不同连梁高度下桩身位移分布曲线

梁高度的增加,桩身弯矩沿桩身呈现减小、增大和再减小变化规律;前后排桩最大正弯矩的作用点位置基本未发生变化,而最大负弯矩作用点位置逐渐下移,后排桩的位置分别为 0.67 m(1.34 倍 0.5D)、1.34 m(1.34 倍 1.0D)、2.02 m(1.35 倍 1.5D)、2.69 m(1.35 倍 2.0D)以及 4.04 m(1.35 倍 3.0D),前排桩的位置分别为 0.91 m(1.82 倍 0.5D)、1.37

m(1.37 倍 1.0D)、1.82 m(1.21 倍 1.5D)、2.28 m(1.14 倍 2.0D)以及 3.19 m(1.06 倍 3.0D)。由括号内数据可知后排桩的最大负弯矩作用点的位置发生在连梁高度的 1.34~1.35 倍处,前排桩的位置逐渐向连梁底部靠近。该结论可为刚架桩的负筋布置提供参考。

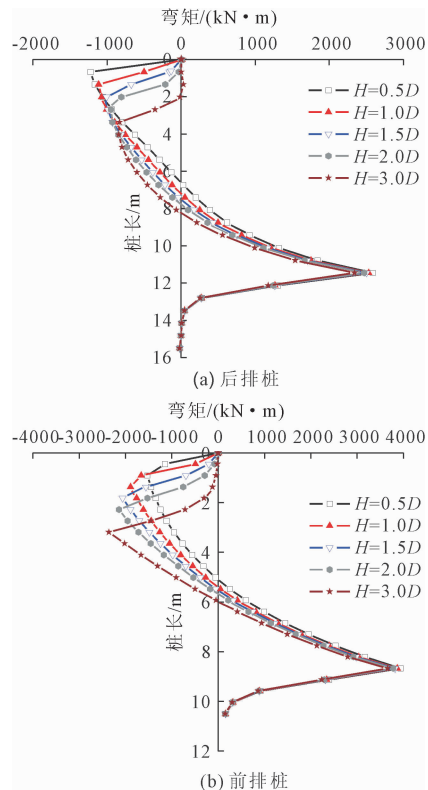


图 13 不同连梁高度桩身弯矩分布

综上,在满足工程要求的前提下,建议连梁高度的合理范围是桩宽的 1~2 倍。

## 4 结 论

本文为探究全埋刚架桩桩底约束条件、后排桩长和连梁高度对边坡和刚架桩的影响,本文依托一实际边坡工程,利用有限元软件 ABAQUS 建立三维有限元计算模型并进行数值模拟对比分析,得到以下结论:

(1) 混凝土用量一致情况下,全埋刚架桩比单排桩更具有抗滑优势。

(2) 刚架桩桩底约束条件由自由到固支,边坡土体及桩水平位移逐渐减小,桩身位移由线性转变为曲线分布;前后排桩的弯矩呈“S”形分布,桩身最大负弯矩作用点的位置基本不变,而最大正弯矩作用点位置上移。综合分析,在满足工程要求下,考虑经济效益,建议桩底约束采用后排桩固定前排桩铰

支或者两端铰支支承情况。

(3) 后排桩桩长增加,能有效减小边坡深层土体水平位移,但不利于边坡浅层土体和桩身水平位移;前排桩弯矩增大,后排桩的弯矩减小,即前后排桩弯矩差逐渐减小,弯矩分布趋于均匀。此外,桩身弯矩变化幅度随桩长增加逐渐减小,后排桩桩长存在一个最优长度。

(4) 连梁高度的增加,会引起边坡位移、桩身位移和弯矩减小,且后排桩的最大负弯矩作用点的位置发生在连梁高度的1.34~1.35倍处,前排桩最大负弯矩发生的位置逐渐向连梁底部靠近。

## 参考文献:

- [1] 吕美君,晏鄂川.埋入式双排抗滑桩滑坡推力分配研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S1):4866-4871.
- [2] 铁道部第二勘测设计院.抗滑桩设计与计算[M].北京:中国铁道出版社,1983.
- [3] 王金生.罗依溪滑坡抗滑刚架桩的设计与施工[J].路基工程,1985(4):67-71.
- [4] 何颐华,杨 斌,金宝森,等.双排护坡桩试验与计算的研究[J].建筑结构学报,1996,17(2):58-66.
- [5] 赵 波,王运生,王 羽,等.门架式抗滑桩结构模型试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2017,39(1):101-105.
- [6] Wu H G, Pai L F. Shaking table test for reinforcement of soil slope with multiple sliding surfaces by reinforced double-row anti-slide piles[J]. Journal of Mountain Science, 2022,19(5):1419-1436.
- [7] 周翠英,刘祚秋,尚 伟,等.门架式双排抗滑桩设计计算新模式[J].岩土力学,2005,26(3):441-449.
- [8] 王 羽,柴贺军,吴祖松,等.基于桩-土作用效应的组合式抗滑桩结构研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(1):90-93.
- [9] 张 玲,朱幸仁,欧 强.考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析[J].水文地质工程地质,2019,46(5):72-80.
- [10] 钱同辉,唐辉明.双排门式抗滑桩的空间计算模型[J].岩土力学,2009,30(4):1137-1141.
- [11] 周应华.门架式双排桩受力位移特性分析[J].铁道工程学报,2009(6):30-33.
- [12] 于 洋,孙红月,尚岳全.锚固深度对双排抗滑桩力学性能影响[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):1999-2007.
- [13] 刘 鸣,黄 华,韩 冰,等.延安地区某边坡双排抗滑桩支护分析[J].长安大学学报(自然科学版),2011,31(2):63-67.
- [14] 彭文祥,刘 彬.深基坑双排桩支护排距室内模型试验研究[J].湖南大学学报,2018,45(1):121-127.
- [15] Wang Z H, Zhou J. Three-dimensional numerical simulation and earth pressure analysis on double-row piles with consideration of spatial effects[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2011,12(10):758-770.
- [16] 邱红胜,周子煜.基于 $p-y$ 曲线法的门式双排桩支护变形研究[J].大连交通大学学报,2022,43(1):77-81.
- [17] 高 阳,孙浩凯,刘日成.基坑的双排桩支护设计及变形规律[J].山东大学学报(工学版),2019,49(3):86-94.
- [18] 欧孝夺,谭智杰,罗方正,等.设计参数对深基坑双排桩支护结构影响的数值分析[J].科学技术与工程,2021,21(7):2873-2878.
- [19] 郭成超,朱传鑫.装配式可回收双排桩支护结构的开挖支护分析[J].郑州大学学报(工学版),2022,43(2):78-83.
- [20] 张 立,白晓宇,杲晓东,等.深基坑双排微型钢管桩支护受力特性原位试验[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3621-3634.
- [21] 郑 刚,王玉萍,程雪松,等.软土地区基坑前排倾斜双排桩支护现场试验及工作机理[J].长江科学院院报,2024,41(6):98-105,113.
- [22] 曹卫平,罗龙平,赵 敏,等.黄土基坑斜直桩支护结构受力及变形特性模型试验研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(1):141-147.
- [23] 戴自航,徐 祥.边坡抗滑桩设计计算的三维有限元法[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2572-2578.
- [24] 年廷凯,徐海洋,李东晨.不同截面型式抗滑桩加固边坡数值分析[J].大连理工大学学报,2013,53(5):695-701.
- [25] 焦世杰,苏爱军,何 啸.弹性抗滑桩桩底支承条件对其内力和位移的影响分析[J].安全与环境工程,2018,25(1):39-44.
- [26] 任 鹏,唐 印,王 鹏.非等长双排桩的受力性状研究[J].水利水电技术,2018,49(5):153-164.