

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220526001

文章编号: 1672-9331(2023)05-0126-10

引用格式: 陈林靖, 余其凤, 郑俊. 复合荷载作用下坡顶面双排桩设计要素数值模拟[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 126-135.

Citation: CHEN Linjing, YU Qifeng, ZHENG Jun. Numerical simulation of design elements of double-row piles on slope top under composite load[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 126-135.

复合荷载作用下坡顶面双排桩设计要素数值模拟

陈林靖¹, 余其凤¹, 郑俊²

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省林业勘察设计院, 福建 福州 350002)

摘要:【目的】研究坡顶面承重、阻滑双排桩的受力变形特性, 分析桩间距、连梁高度、桩身嵌固深度等因素对桩身受力变形特性的一般影响规律, 尤其是反映竖向荷载及桩身自由段长度对桩身水平位移及最大弯矩的影响。【方法】借助 ABAQUS 有限元软件, 通过单变量的变化, 模拟双排桩在不同影响因素下的受力变形特性。【结果】滑动面的存在使桩身水平位移及弯矩在桩间距为 $1d \sim 2d$ (d 为桩径) 时发生突变, 故在确定桩间距时应注意滑动面产生的影响; 连梁高度对桩身受力变形特性的影响微乎其微, 按标准取值即可; 在滑动面位置桩身嵌固深度对桩身水平位移及弯矩有较大影响, 但继续增大桩身嵌固深度后, 影响变小, 在工程设计中桩身嵌固深度适当超过滑动面即可; 当增大桩身自由段长度时, $P-\Delta$ 效应也更加显著, 对于不同的自由段长度, 前后排桩桩身的最大弯矩近乎相等。【结论】位于坡顶面的双排桩须承受轴、横向复合荷载, 可起到承重、阻滑的双重作用, 其承载机理及受力形式较护坡桩更为复杂。本文研究成果可为相关工程设计要素的取值提供一定参考。

关键词: 复合荷载; 坡顶面; 双排桩; 数值模拟; 桩间距; 连梁高度; 嵌固深度

中图分类号: TU47

文献标志码: A

0 引言

在受地形限制的情况下, 有些建、构筑物, 如桥梁、高压输电塔、信号塔等不得不建设在斜坡坡顶上。这些建、构筑物下部结构——桩基的承载机理及受力变形特性与水平面桩基的大不相同。该类桩基除受自重荷载外, 还受风荷载、汽车制动荷载等水平向荷载, 另外还承受斜坡对其造成的交叉影响。而目前相关设计多是按水平面桩基进行计算的, 然后取经验值, 其结果与实际情况存在一定差异。相关研究对承重阻滑双排桩工程设计要素的影响规律也缺少认识与总结^[1-5]。

目前, 对受斜坡及复合荷载影响的桩基的研究大体可分为3类: 第一类是针对水平面复合荷载桩的研究, 如郑刚等^[6]通过有限元软件的仿真模

拟, 研究了轴、横向荷载的交叉影响, 认为加载顺序对桩体水平位移的影响大于桩体沉降对其的影响; 赵明华等^[7-9]通过理论分析得到了倾斜荷载作用下柔性桩的内力及位移分析解, 提出了有限元-有限层法, 并通过试验模拟确定了该方法的可行性; HUSSEIN 等^[10]通过室内模型试验分析水平面桩基竖向荷载的横向响应特性; 第二类是针对斜坡单向受荷桩的研究, 如 MUTHUKUMARAN^[11]通过室内模型试验研究坡面单桩加载方向(水平向)及桩到坡顶的距离对桩身性状的影响; SAWANT 等^[12]通过数值模拟研究了坡边距、坡率对单桩在仅受水平荷载时的位移、弯矩的影响, 并与水平面桩的模拟结果进行对比, 得出不同坡边距及坡率的修正公式; 程刘勇等^[13-14]通过室内模型试验及数值模拟方法, 研究坡顶面单桩在仅受水平荷载及仅受竖向荷载时的坡率、临坡距变化

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-08-01; 接受日期: 2022-08-01

基金项目: 中铁十一局集团第四工程有限公司项目(00502132)

通信作者: 陈林靖(1983—)(ORCID: 0000-0002-7976-4518), 女, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究。

E-mail: cljquite@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

对单桩承载力及位移的影响规律;第三类是针对坡顶面复合受荷桩的研究,如年廷凯等^[15]、鲁志杰^[16]、RANDOLPH等^[17]得到了坡顶桩内力及位移的幂级数解,并通过室内模型试验分析了荷载加载角度、坡角、坡边距等因素影响下的 p - y 曲线。

综上所述,第一类桩基的研究,因为存在斜坡,仅按水平面复合受荷桩基取经验值进行了修正,其计算结果与实际情况存在一定差异;第二类研究对单向受荷情况分别计算,然后对结果进行叠加,这与实际情况不符;第三类研究缺少对双排桩特性的研究,因而对诸多影响因素的分析尚显不足^[18-20]。

本文针对目前对坡顶面复合受荷双排桩基础的应用较多,但研究还存在一定不足的实际情况^[21-26],借助ABAQUS软件平台建立有限元模型对其设计要素(桩间距、连梁高度、自由段桩长、嵌固深度等)逐一进行控制变量分析,以期获得桩身内力变形特性在单一变量变化时的随动规律,为实际工程设计提供有益参考。

1 模型建立

1.1 工程概况

本研究先建立模型,通过文献^[15-16]的室内模型试验数据反演得到有限元模型的参数取值,并对其进行调整,使计算结果与试验结果一致,然后在此基础上进行影响因素分析。室内试验模型槽的尺寸为2.0 m×1.2 m×1.3 m,试验桩为圆形桩。在初始情况下,桩长为1.10 m,桩径 d 为0.105 m,嵌固深度 h 为0.85 m,桩间距 D 为 $1d$,临坡距 $B=2d$,边坡坡高为1.0 m,坡角为 60° ,双排桩模型几何尺寸如图1所示。

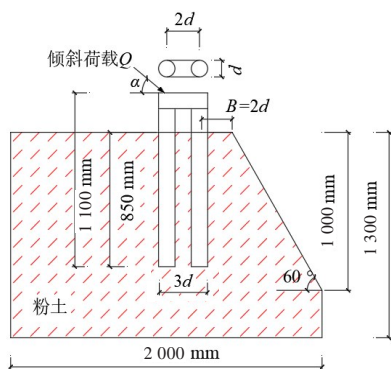


图1 双排桩模型几何尺寸

Fig. 1 Geometric size of the double-row-pile model

1.2 三维数值有限元模型的建立

在ABAQUS软件的应用平台上,不考虑土中排水,采用总应力方法进行分析。为提高位移的精确度,桩及粉土均采用C3D8R单元类型,即八节点六面体线性减缩积分单元。该单元在每个方向上均比普通完全积分单元少用一个积分点,对位移的求解更加精确;此外,网格的扭曲变形对于计算精度的影响不会太大,并且在弯曲荷载作用下采用C3D8R单元也不容易出现剪切自锁等问题。在桩周土受力产生弹塑性变形时,桩基依然处于弹性变形状态,故桩基采用线弹性本构模型;桩周粉土为均质弹塑性体,对其可采用摩尔-库伦屈服准则。桩的变形模量取26.8 GPa,泊松比设为0.30;粉土变形模量取10.5 MPa,泊松比设为0.25。

在接触摩擦方面,桩-土的接触采用罚函数法,桩土摩擦行为采用小滑动,其中桩土摩擦角 δ 按式(1)计算:

$$\delta = \arctan(\sin \varphi \times \cos \varphi / (1 + \sin^2 \varphi)) \quad (1)$$

式中: φ 为土体内摩擦角。

当 $\varphi=32.15^\circ$ 时,通过式(1)求得 $\delta=19.37^\circ$,则摩擦系数为 $\tan \delta=0.352$ 。据式(2)计算剪胀角 ψ :

$$\tan \psi = 2 \sin \varphi' / (1 + \sin \varphi') \quad (2)$$

式中: $\varphi' = \varphi - 30^\circ$ 。由此求得 $\psi = 5^\circ$ 。

1.3 材料参数

本文模型所用土体及桩的参数见表1~2^[15-16]。

表1 模型桩参数

Table 1 Parameters of model pile

桩径/m	弹性模量/GPa	惯性矩/ 10^{-6} m^4	抗弯刚度/ $(10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2)$
0.105	26.8	6.2	16.6

表2 土体参数

Table 2 Parameters of soil

最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	塑限/ %	液限/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	水平地基 反力系数/ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-4}$)
1.79	7.78	15.09	14.32	32.15	14.269

1.4 边界条件

为便于分析计算,假设坡面和地表面均为自由边界,在竖向边界设置水平向位移约束,底面边界全约束,桩顶自由。在桩基与边坡岩土层之间设置接触面来模拟桩、土的接触变形,接触时允许出现滑动和分离。在桩端设置与桩端形状一致的接触单元。在边坡部分采用扫掠单元。承重阻滑双排桩有限元模型网格如图2所示。

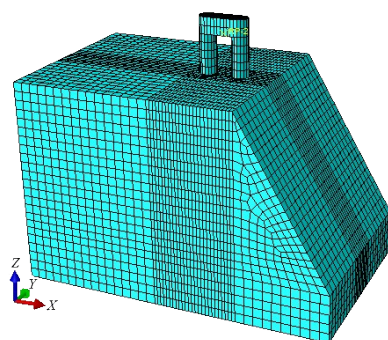


图2 承重阻滑双排桩有限元模型网格

Fig. 2 Finite element model grid of load-bearing and anti-slide double-row piles

2 数值模拟分析结果

2.1 双排桩与单桩性状对比

为了对比研究坡顶面斜向受荷单桩和双排桩中单桩的性状,在图2所示的模型桩桩顶连梁中心位置施加倾角为 45° 的倾斜荷载(0.81 kN)。边坡斜向受荷单桩和双排桩中单桩的计算结果对比如图3所示。

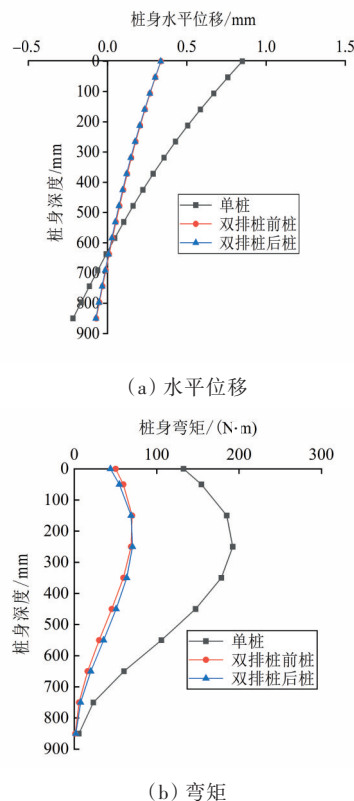


图3 桩身水平位移与弯矩对比

Fig. 3 Comparison of horizontal displacement and bending moment of pile

由图3可知,双排桩前桩、后桩、单桩桩身的最大水平位移(地面处)分别为0.335、0.335、0.850 mm,最后者的水平位移较前两者的水平位移总和增加了26.87%;三者的桩身最大弯矩分别为70.12、70.62、192.30 N·m,最后者的桩身最大弯矩较前两者的桩身最大弯矩总和增加了36.63%。

可见,双排桩的性状并不是单桩性状的简单相加。与单桩相比,双排桩更能有效限制桩体的水平位移,桩身的受力分布更为合理,工程中对桩身强度的要求有所降低。此外,由图3(a)所示的桩身水平位移可知,桩身位移的变化奇点皆在 $2h/3$ 左右的位置;由图3(b)所示的桩身弯矩可知,桩身最大弯矩出现在 $h/3$ 的位置。单桩与双排桩表现出了近乎相同的水平位移和弯矩特性。

桩侧土压力分布如图4所示。由图4可知,单桩与双排桩桩侧土压力的分布规律相似。由于刚性桩在受到荷载作用时会绕着某一点转动,并逐渐发生倾倒变形破坏,即在该分界点上方桩后土与桩身发生脱离,在该分界点下方桩前土与桩身发生脱离。当桩与桩侧土出现裂缝后,桩周土压力减小至0。土压力为0的位置与桩身水平位移为0的位置相同。

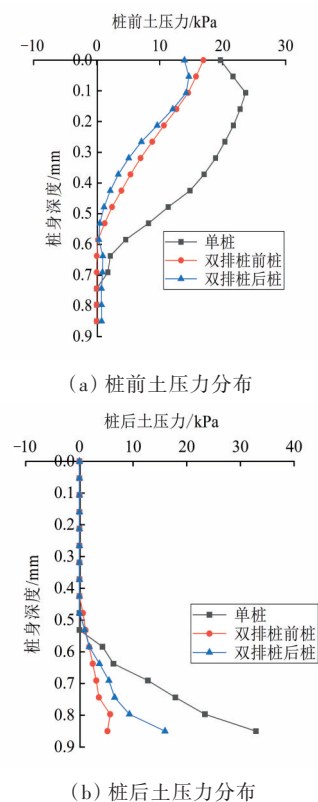


图4 桩侧土压力分布

Fig. 4 Distribution of soil pressure on the side of pile

2.2 竖向荷载对桩、土性状的影响

为研究竖向荷载对桩、土性状的影响,以下设计两个工况进行对比分析。工况1:水平荷载为1 kN;工况2:轴、横向荷载均为1 kN。图5所示为这两个工况下竖向荷载对桩、土性状的影响。

由图5可知,桩顶竖向荷载增大了桩身的最大弯矩及位移,但桩两侧的土压力呈现出基本相似的分布规律。在工况1下后排桩地面处的水平位移为0.79 mm,在工况2下后排桩地面处的水平位移为1.03 mm,比工况1下的增大了30.38%。比较工况1和工况2下的桩身弯矩可知,两种工况下弯矩的分布规律一致,最大弯矩位置也相同,且同

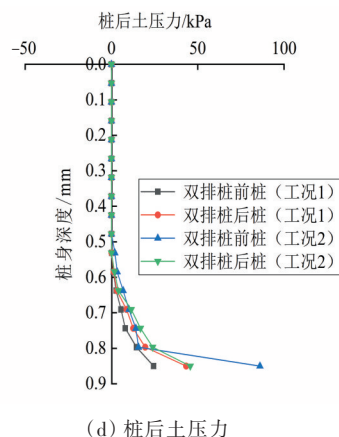
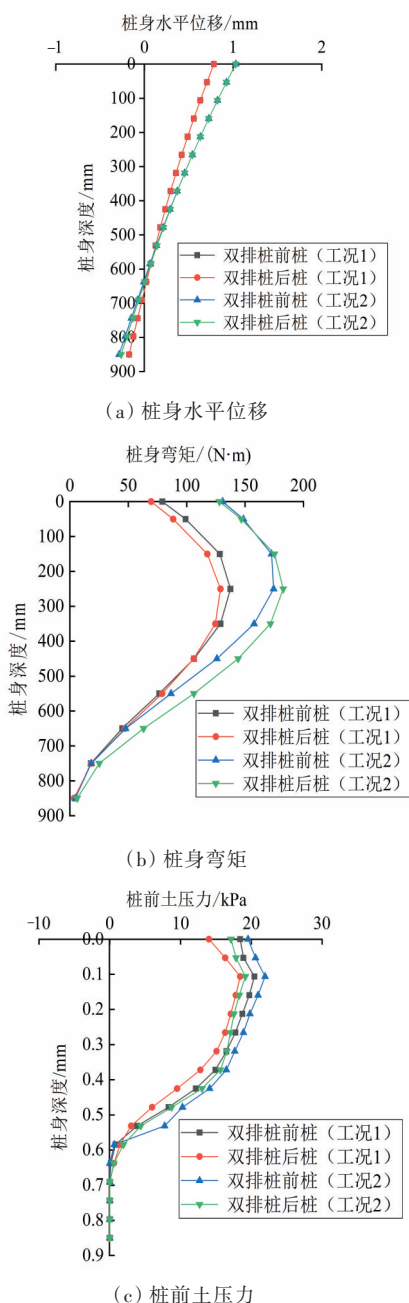


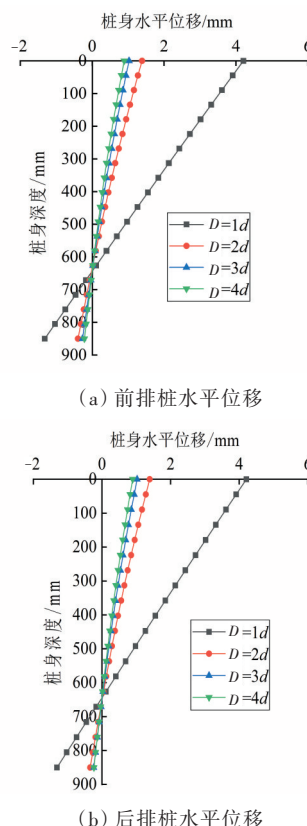
图5 竖向荷载对桩、土性状的影响

Fig. 5 Effect of vertical load on properties of pile and soil

一工况下总体上后排桩的弯矩比前排桩的大。在轴、横向荷载共同作用时,后排桩的最大正弯矩由129.0 N·m增大至182.7 N·m,增大了41.63%;前排桩的最大正弯矩由137.5 N·m增大至174.5 N·m,增大了26.91%。可见,桩的竖向荷载对桩身弯矩及水平位移的影响十分明显,但对弯矩的分布规律没有影响。

2.3 桩间距对双排桩水平位移及弯矩的影响

保持其他参数不变,仅改变桩间距的大小,取桩间距 D 分别为 $1d$ 、 $2d$ 、 $3d$ 和 $4d$,研究不同桩间距对桩身弯矩和水平位移的影响,结果见图6。



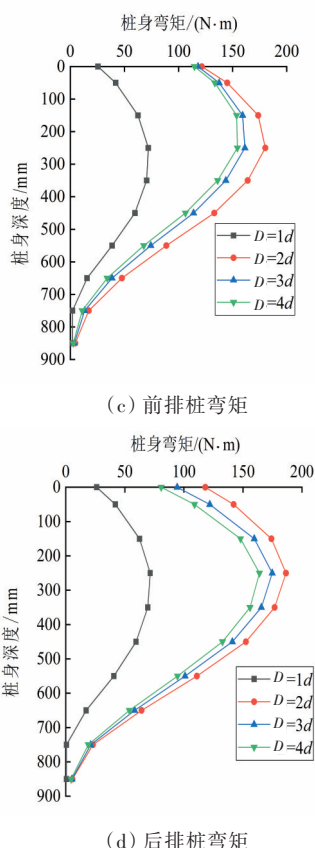


图6 桩间距对桩身水平位移及弯矩的影响

Fig. 6 Effect of pile spacing on horizontal displacement and bending moment of pile

连梁的存在使前后桩桩身水平位移近乎相同。由图6(a)及6(b)可知,当桩间距由 $1d$ 增加到 $2d$ 时,前、后排桩地面处的水平位移由 4.21 mm 逐渐减小到 1.39 mm ,故在这个范围内改变桩间距,能够有效控制桩身的水平位移;而当桩间距由 $2d$ 增加到 $3d$ 时,桩身水平位移的减小幅度较小;当桩间距由 $3d$ 增加到 $4d$ 时,桩身的水平位移受桩间距变化的影响较小,基本不发生变化。可见,桩间距为 $1d\sim 2d$ 时对桩身水平位移的影响较明显,当继续增大桩间距后,桩间距对桩身水平位移的影响急剧减小。

由图6(c)及6(d)可知,前后排桩之间连梁的拉力随着桩间距的增大而增大,在此过程中桩身弯矩先增大后减小。当桩间距从 $1d$ 增大到 $2d$ 时,桩身各截面弯矩显著增大,前排桩最大弯矩从 $72.09\text{ N}\cdot\text{m}$ 增大至 $180.20\text{ N}\cdot\text{m}$,增大了 149.97% ;后排桩最大弯矩从 $71.48\text{ N}\cdot\text{m}$ 增大至 $186.40\text{ N}\cdot\text{m}$,增大了 160.77% 。但当桩间距由 $2d$ 增大到 $3d$ 时,桩身弯矩反而减小了,并且当桩间距由 $3d$ 减小到 $4d$ 时,桩身弯矩进一步减小,但减小幅度有所降低。

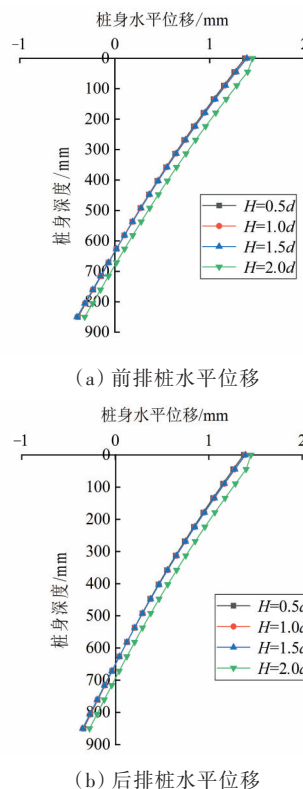
由此可以推断,随着桩间距的进一步增大,桩身弯矩及位移将分别趋于某定值。桩身弯矩及位移在桩间距由 $1d$ 增大至 $2d$ 时发生的突变及由 $2d$ 增大至 $3d$ 时的减小,本研究认为是滑动面的存在导致的。

2.4 连梁高度对双排桩水平位移及弯矩的影响

双排桩支护结构通过连梁将前后排桩连成一个空间组合结构,来共同承受外部荷载,其整体性较强。对于双排桩空间支护体系,连梁对力的传递和对支护体系的强化起到了非常重要的作用。对连梁作用规律及机制的研究,已成为双排桩支护结构研究的关键。连梁的存在可使前后排桩的桩身变形得到约束和协调,这样可有效控制和约束桩身的水平位移。与单排桩相比,这种具有空间组合结构的双排桩具有更好的支护效果。

为了研究连梁高度对双排桩水平位移及弯矩的影响,本研究通过改变连梁高度,分析连梁高度 H (分别取 $0.5d$ 、 $1.0d$ 、 $1.5d$ 、 $2.0d$)对双排桩受力变形特性的影响,结果如图7所示。

由图7可知,在连梁高度 $H=0.5d$ 、 $1.0d$ 、 $1.5d$ 和 $2.0d$ 时,桩身水平位移及弯矩均无明显变化,故改变连梁高度并不能有效增强桩身的性能。在实际工程中,建议将连梁高度取为 $1.0d$,这样兼顾了安全性和经济性。



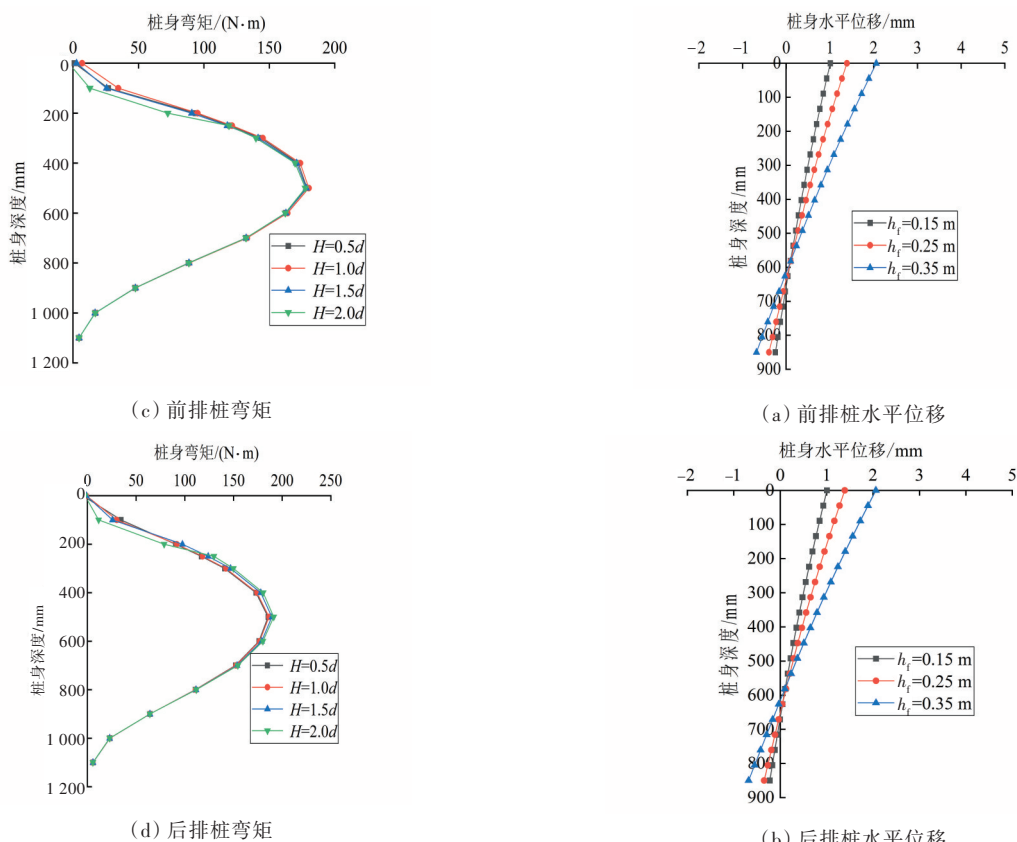


图7 连梁高度对桩身水平位移及弯矩的影响

Fig. 7 Effect of couple beams height on horizontal displacement and bending moment of pile

2.5 桩身自由段长度对双排桩水平位移及弯矩的影响

一般情况下,边坡上高承台桥梁桩基自由段长度的大小将直接影响桩身的弯矩、水平位移以及 $P-\Delta$ 效应。因此,为分析桩身自由段长度对桩身弯矩、水平位移的影响,在保持其他参数不变的情况下,对桩身自由段长度 h_f 分别为0.15、0.25、0.35 m的双排桩模型进行研究,结果如图8所示。

当双排桩桩身自由段长度从0.15 m增加到0.25 m时,前排桩桩身的最大弯矩从135.2 N·m增大到了180.2 N·m,桩身最大弯矩的 $P-\Delta$ 效应增大了33.28%;桩身地面处的水平位移从1.01 mm增大到了1.39 mm。后排桩桩身的最大弯矩从135.0 N·m增大到了186.4 N·m,桩身最大弯矩的 $P-\Delta$ 效应增大了38.07%。

综上所述,双排桩前、后排桩身的水平位移、弯矩和 $P-\Delta$ 效应随着桩身自由段长度的增加而显著增大。且随着桩身自由段长度的减小,后排桩对前排桩的拉锚作用逐渐增大,后排桩桩身最大弯矩的 $P-\Delta$ 效应比前排桩的更明显。

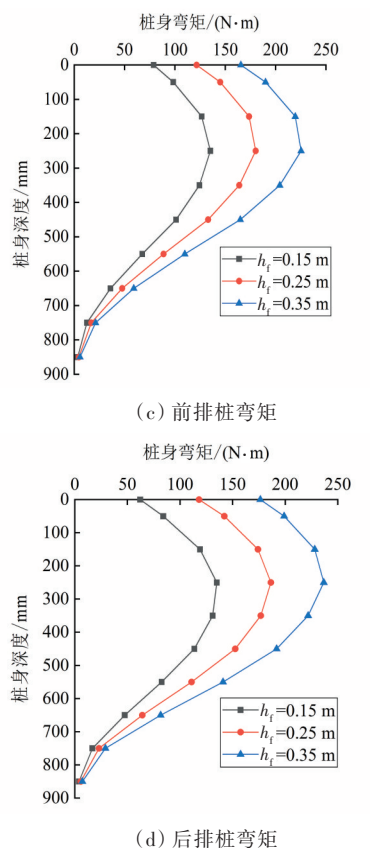


图8 桩身自由段长度对双排桩水平位移及弯矩的影响

Fig. 8 Effect of length of free segment on horizontal displacement and bending moment of pile

上述情况的出现是由于在复合荷载下,桩身水平位移和力矩的协同作用使桩身发生较大变形或弯曲,桩两侧土体承受了较大的挤压力,且部分土体开始进入塑性状态。由于桩身发生了变形,桩身在竖向荷载的作用下产生了附加弯矩,附加弯矩的存在又进一步加大了桩身变形,即 $P-\Delta$ 效应的影响进一步增大。

2.6 桩身嵌固深度对双排桩水平位移和弯矩的影响

在研究桩身嵌固深度对双排桩水平位移和弯矩的影响时,保持其他参数不变,分析嵌固深度 h 分别为0.65、0.75、0.85、0.95 m时,其对双排桩受力变形特性的影响,结果如图9所示。

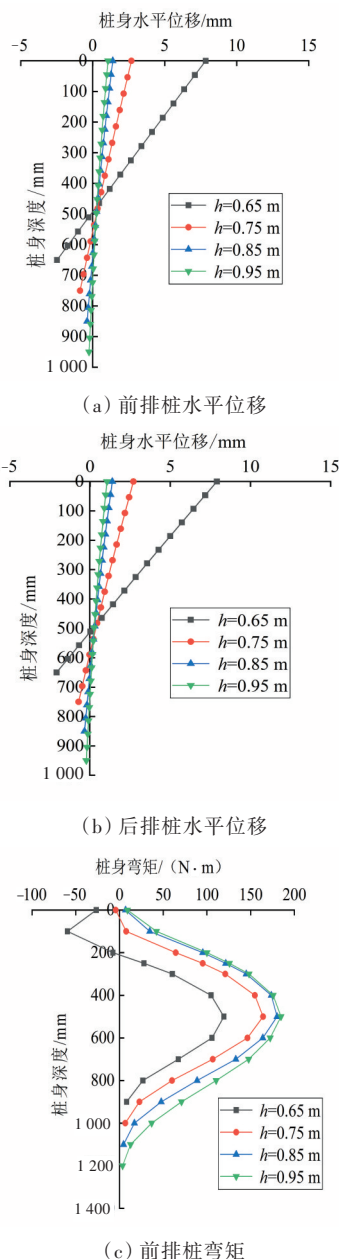


图9 桩身嵌固深度对双排桩水平位移及弯矩的影响

Fig. 9 Effect of embedded depth on horizontal displacement and bending moment of pile

由图9可知,当嵌固深度为0.65 m时,后排桩承担着大部分的弯矩作用。随着嵌固深度的增大前排桩的弯矩逐渐增大,后排桩的则逐渐减小。当嵌固深度从0.65 m增加到0.75 m时,前排桩地面处的负弯矩从26.62 N·m减小到了4.35 N·m,最大弯矩从119.40 N·m增大到了164.20 N·m,地面处桩身位移从7.84 mm减小到了2.69 mm,减小了65.69%。后排桩地面处的弯矩从24.61 N·m减小到了8.91 N·m,最大弯矩从201.30 N·m减小到了187.70 N·m,减小了6.76%。而当嵌固深度大于0.85 m时,前后排桩的弯矩以及水平位移规律基本一致。

综上可知,桩身的嵌固深度对双排桩结构的承重阻滑功能影响较大。当嵌固深度未超过滑动面时,其所发挥的作用很小;而当嵌固深度超过滑动面后,若继续增加桩长,虽能使双排桩结构更加稳定,但收效甚微。因此,在工程设计中使桩身嵌固深度适当超过滑动面即可,这样可以兼顾经济效益及安全指标。

3 结论

1) 通过分析竖向荷载对桩、土性状影响的模拟结果可知,竖向荷载的增大可使桩身水平位移及弯矩明显增大,但不影响桩身弯矩的分布规律,不同竖向荷载作用下,桩身最大弯矩的发生位置相近。竖向荷载对长桩结构桩侧土压力没有明显影响。此外,前排桩对后排桩有明显的遮拦效应。

2) 就本文模型而言,滑动面的存在使桩身的水平位移及弯矩在桩间距为 $1d \sim 2d$ 时发生突变,

此后随着桩间距的增大,桩身的水平位移及弯矩逐渐减小并分别趋于某定值,此时双桩结构的作用弱化成单桩的作用,故在确定桩距时,应注意滑动面对桩身水平位移及弯矩产生的影响。

3) 连梁高度对桩身性能的影响微乎其微,按标准取值即可。

4) 当增大桩身自由段长度时,桩身水平位移及弯矩增大明显, $P-\Delta$ 效应也更加显著,且当桩身自由段长度不同时前后排桩的最大弯矩几乎相等,但相较而言,在地面位置前排桩弯矩的增大幅度比后排桩的小。

5) 桩身嵌固深度对双排桩受力变形特性的影响在滑动面位置尤为突出,但继续增大桩身嵌固深度,影响变小。在工程设计中桩身嵌固深度适当超过滑动面即可。

[参考文献]

- [1] 杨金川,丁选明,王成龙,等.交通荷载下考虑倾斜基岩影响的单桩桩周土振动特性数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(6):1575-1583. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.06.012.
YANG Jinchuan, DING Xuanming, WANG Chenglong, et al. Numerical simulation of vibration response of soil around a single pile under traffic load and sloping bedrock condition [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51 (6) : 1575-1583. DOI: 10.11817/j. issn. 1672-7207.2020.06.012.
- [2] DEGRANDE G, SCHILLEMANS L. Free field vibrations during the passage of a thalys high-speed train at variable speed [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247 (1) : 131-144. DOI: 10.1006/j.svi.2001.3718.
- [3] SUN G C, KONG G Q, LIU H L, et al. Vibration velocity of X-section cast-in-place concrete (XCC) pile-raft foundation model for a ballastless track [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(9) : 1340-1345. DOI: 10.1139/cgj-2015-0623.
- [4] CONNOLLY D P, ALVES COSTA P, KOUROUSSIS G, et al. Large scale international testing of railway ground vibrations across Europe [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 71: 1-12. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.01.001.
- [5] 张垚豪,赵其华,姜琛,等.考虑基岩层面影响的水平受荷嵌岩桩模型试验研究[J].工程地质学报,2019,27(2):286-293. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-620.
ZHANG Chenghao, ZHAO Qihua, LOU Chen, et al. Model test study on horizontally loaded rock-socketed pile considering the influence of bedrock layer [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27 (2) : 286-293. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-620.
- [6] 郑刚,王丽.竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J].岩土工程学报,2008,30(12):1796-1804.
ZHENG Gang, WANG Li. Effect of loading level and sequence of vertical and lateral load on bearing capacity of single pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1796-1804.
- [7] 赵明华,邬龙刚,刘建华.考虑 $P-\Delta$ 效应的承重阻滑桩有限差分解析[J].工程力学,2008,25(3):102-106. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2004.03.024.
ZHAO Minghua, WU Longgang, LIU Jianhua. Finite difference solution for load-bearing and anti-slide pile with consideration of $P-\Delta$ effect [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (3) : 102-106. DOI: 10.3969/j. issn.1000-4750.2004.03.024.
- [8] 赵明华,侯运秋,曹喜仁.倾斜荷载下基桩的受力研究[J].湖南大学学报(自然科学版),1997,24(2):98-102,109.
ZHAO Minghua, HOU Yunqiu, CAO Xiren. Study on the behavior of inclinedly loading piles [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 1997, 24 (2) : 98-102, 109.
- [9] 赵明华.倾斜荷载下基桩的受力研究[D].长沙:湖南大学,2001.
ZHAO Minghua. Study on stress of foundation pile under inclined load [D]. Changsha: Hunan University, 2001.
- [10] HUSSEIN M N, TOBITA T, IAI S, et al. On the influence of vertical loads on the lateral response of pile foundation [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 392-403. DOI: 10.1016/j.compgeo.2013.09.022.
- [11] MUTHUKKUMARAN K. Effect of slope and loading direction on laterally loaded piles in cohesionless soil [J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14 (1): 1-7. DOI: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000293.
- [12] SAWANT V A, SHUKLA S K. Effect of edge distance from the slope crest on the response of a laterally loaded pile in sloping ground [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(1): 197-204. DOI: 10.1007/s10706-013-9694-7.
- [13] 程刘勇,许锡昌,陈善雄,等.斜坡基桩水平极限承载力及影响因素模型试验和数值模拟[J].岩土力学,2014,35(9):2685-2691. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.18.060.
CHENG Liuyong, XU Xichang, CHEN Shanxiang, et al. Model test and numerical simulation of horizontal bearing capacity and impact factors for foundation piles in slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (9) : 2685-2691. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815.2013.18.060.

- [14] 程刘勇, 陈善雄, 余飞, 等. 斜坡桩基上拔极限承载力数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5399-5403, 5422. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.18.033.
CHENG Liuyong, CHEN Shanxiong, YU Fei, et al. Numerical simulation for vertical ultimate bearing capacity of piles in sloped ground [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5399-5403, 5422. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.18.033.
- [15] 年廷凯, 鲁志杰, 杨庆. 坡顶斜向受荷桩工作性能的室内模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 89-94. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.06.017.
NIAN Tingkai, LU Zhijie, YANG Qing. Laboratory model test study on working performance of obliquely loaded piles at the top of slope [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(1): 89-94. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.06.017.
- [16] 鲁志杰. 坡顶斜向受荷桩承载性能的计算分析与模型试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
LU Zhijie. Calculation, analysis and model test of bearing capacity of obliquely loaded piles at the top of slope [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [17] RANDOLPH M F, WROTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles [J]. Géotechnique, 1981, 31(1): 143-157. DOI: 10.1680/geot.1981.31.1.143.
- [18] 李龙起, 赵皓璆. 竖直荷载作用下倾斜群桩受力及桩身变形性状研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 72-78. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.03.11.
LI Longqi, ZHAO Haoqiu. Stress and deformation behavior of inclined pile group under vertical load [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2022, 41(3): 72-78. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.03.11.
- [19] 孔德森, 张杰, 王士权, 等. 基坑支护倾斜悬臂桩受力变形特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 160-168. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2890.2016.18.186.
KONG Desen, ZHANG Jie, WANG Shiquan, et al. Experimental study on stress and deformation characteristics of cantilever inclined retaining pile for foundation pit support [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 160-168. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2890.2016.18.186.
- [20] GEROLYMOS N, GIANNAKOU A, ANASTASOPOULOS I, et al. Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(4): 705-722. DOI: 10.1007/s10518-008-9085-2.
- [21] 赵爽, 吴君涛, 张日红, 等. 砂土中斜桩单桩水平承载与变形特性数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 579-588. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.02.021.
ZHAO Shuang, WU Juntao, ZHANG Rihong, et al. Numerical analysis of horizontal bearing capacity and deflection behaviors of single batter pile in sand [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2): 579-588. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.02.021.
- [22] BAJAJ P, YADU L, CHOUKSEY S K. Study on vertical and batter piles subjected to lateral loads in different non-cohesive sub-soil conditions [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 14(6): 603-613. DOI: 10.1080/19386362.2018.1564181.
- [23] SHARMA B, HUSSAIN Z. Behaviour of batter micropiles subjected to vertical and lateral loading conditions [J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2019, 7(2): 206-220. DOI: 10.4236/gep.2019.72014.
- [24] 雷正保, 邢欢, 孙汉正. 桩基动力学模型参数反演识别方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 87-94. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.01.011.
LEI Zhengbao, XING Huan, SUN Hanzheng. A method of parameter inversion identification for dynamic model of pile foundation [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 87-94. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.01.011.
- [25] 周治钊, 向志坤, 田明锦, 等. 城步县某老堆积体滑坡特征及处治[J]. 国土资源导刊, 2022, 19(3): 29-32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5603.2022.03.007.
ZHOU Zhizhao, XIANG Zhikun, TIAN Mingjin, et al. The characteristics and control measures of an old landslide in Chengbu County [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(3): 29-32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5603.2022.03.007.
- [26] 程鑫, 张永杰, 罗志敏, 等. 降雨条件下隧道与堆积层边坡相互作用机理研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(1): 59-67. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210429001.
CHENG Xin, ZHANG Yongjie, LUO Zhimin, et al. Study on interaction mechanism between tunnel and accumulation slope under rainfall condition [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(1): 59-67. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210429001.

Numerical simulation of design elements of double-row piles on slope top under composite load

CHEN Linjing¹, YU Qifeng¹, ZHENG Jun²

(1.School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2.Fujian Provincial Forestry Survey and Design Institute, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Purposes] The stress and deformation characteristics of load-bearing and anti-slide double-row piles on slope top were studied. The impact of pile spacing, coupling beam height, pile embedded depth and other factors on deformation characteristic of pile was analyzed. In particular, the influence of the vertical load and the length of the free section on the horizontal displacement and the maximum bending moment was reflected. [Methods] Based on the finite element software ABAQUS, controlling the single variable, the deformation characteristics of double-row piles under different factors were simulated. [Findings] Due to the sliding surface, the horizontal displacement and bending moment of the pile change suddenly, when the pile spacing is $1d-2d$ (d is pile diameter). Therefore, the influences of sliding surface should be considered, when the pile spacing is designed. The value of the couple beams height had tiny impact on the function of piles, which can be selected according to the standard. The embedded depth had significant effect on the deformation and the moment of the piles in the location of the sliding surface. However, the effect will decrease as the increase of the depth. The embedded depth should exceed the sliding surface properly in project design. When the length of piles free section increases, the $P-\Delta$ effect change to more remarkable. The maximum bending moment of the front and back piles almost equal under different lengths of free section. [Conclusions] The double-row piles located on the top surface of the slope must bear the axial and transverse composite loads, the bearing mechanism and stress form are more complicated than those of slope protection piles. The research results can be used for the design of related engineering.

Key words: composite load; the top of slope; double-row pile; numerical simulation; pile spacing; couple beams height; embedded depth

Manuscript received: 2022-05-26; **revised:** 2022-08-01; **accepted:** 2022-08-01

Foundation item: Project (00502132) supported by the Fourth Engineering Limited Company of China Railway 11th Bureau Group

Corresponding author: CHEN Linjing (1983—) (ORCID: 0000-0002-7976-4518), female, associate professor, research interest: geotechnical engineering. E-mail: cljquite@126.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:陈璐)