

水平荷载作用下斜桩群桩的有限元分析

顾明

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 采用三维有限元数值方法对斜桩群桩在水平荷载作用下的承载特性进行了研究,对比了相同布置形式的 3×3 直桩和斜桩群桩的各项响应差异。分析结果表明,在3倍桩径桩间距条件下,斜桩群桩中基本不存在与直桩群桩相类似的群桩效应。斜桩群桩由于较好地发挥了基桩的轴向承载特性,故而整体抵抗水平荷载的能力显著高于直桩群桩。

关键词: 斜桩;水平荷载;群桩效应;三维有限元

中图分类号: U443.15

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)02-0217-04

0 引言

斜桩基础由于其突出的水平承载特性,被广泛应用于桥梁、码头、水上输电线路等大型基础工程中,工程前景非常广阔。然而相对于其实际应用,针对斜桩基础,尤其是斜桩群桩水平承载问题的理论研究仍较为滞后^[1]。由于欠缺对斜桩群桩水平受荷机理的深入了解,国内现行规范尚未明确斜桩的计算方法,一般仍沿用直桩的分析手段。工程实践中如若考虑不当则有可能造成重大的安全隐患,因此有必要对该问题展开相应的研究。

McVay等^[2]报道了一组斜桩群桩的离心机模型试验。试验结果表明,对于试验所采用的中密砂,斜桩群桩的水平承载力要显著高于直桩群桩;此外竖向荷载的作用也有助于提高斜桩群桩的水平承载力。另对比不同桩间距的群桩水平加载试验结果发现,5倍桩径(5D)桩间距的斜桩群桩的水平承载力高于3倍桩径(3D)桩间距的群桩。

Zhang等^[3]同样通过离心机模型试验研究了竖向荷载对斜桩群桩水平承载力的影响。试验结果指出,竖向荷载对斜桩群桩水平承载力的影响程度与基桩布置、基桩斜度及土体密实度等众多因素相关。就试验采用的 4×4 群桩而言,竖向荷载越大,群桩水平承载力越高。

吕凡任^[4]在砂土中开展了一系列微型群桩的模型试验研究。结果表明,不同倾斜方向的斜桩群桩

的水平承载力有着显著的区别。其中,由伸向四周的斜桩基桩组成的 2×2 群桩相比其它布置形式的群桩具备更好的抵抗水平荷载的能力。

顾明^[5]采用三维有限元数值方法分析了斜桩单桩在不同方向水平荷载作用下的承载特性,讨论了水平加载角和桩基倾斜度对其的影响。结果表明,砂土中斜桩单桩的水平刚度随水平加载角的增大而减小;且桩基的倾斜度越大,前述规律越明显。

本文以文献[5]的单桩研究为基础,进一步建立斜桩群桩的有限元数值分析模型,并通过与直桩群桩的比对,以揭示斜桩群桩在水平荷载作用下的响应规律。

1 分析方法

本文基于ABAQUS建立考虑桩-土相互作用的群桩三维有限元数值模型展开分析,以研究水平荷载作用下特定布置形式的斜桩群桩的承载变形特性。数值分析的基本思路如下:

(1)结合物理模型试验建立单桩分析模型,将数值计算结果与试验进行对比,验证模型单元和参数的准确性;

(2)依托某近海工程建立模拟现场单桩的直桩模型,分析其在水平荷载下的承载变形特性;

(3)以上述单桩模型为基础,建立 3×3 布置的两组群桩模型,其中一组为直桩群桩,另一组为1:5斜度的斜桩群桩,分别分析其在相同水平荷载作用下的承载变形特性;

(4)对比上述直桩与斜桩群桩的分析结果,讨论水平荷载作用下斜桩群桩承载变形的基本规律。

收稿日期: 2020-07-14

作者简介: 顾明(1985—),男,博士,高级工程师,从事市政工程结构设计工作。

其中,(1)及(2)的相关论证分析在文献[5]中已给出了详尽的介绍,本文不再赘述。以此研究作为基础,确定本次数值分析桩基及群桩承台均采用线弹性模型,桩周土体采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)模型。经过对比验证,模型采用 C3D8R 减缩积分单元^[6]。另在桩-土接触面设置三节点接触单元,法向采用“硬接触”允许桩土相互脱开,切向采用弹性库伦摩擦模型。

2 分析过程

文献[5]报道的工程单桩系采用外径 1.2 m,壁厚 20 mm 的 Q345b 钢管桩,桩长 62.5 m,其中管桩上部 25 m 长度范围内灌注 C20 混凝土,海床最大冲刷面深度以上的桩基自由长度为 18.5 m。模型桩周土体选择项目现场最具代表性的砂性土,有效内摩擦角为 36° ,饱和重度 18.6 kN/m^3 ,杨氏模量 30 MPa 。

以该单桩模型为基础,本文分别建立了一组直桩群桩和一组 1:5 斜度的斜桩群桩模型。两组模型均采用 3×3 的轴对称布置形式,基桩间距取为 3 倍桩径(3D),承台厚度取 2.0 m,各基桩的桩长及嵌固比与前述单桩保持一致。两组模型的平面及剖面示意图见图 1。利用该模型,在承台中心位置施加相同的水平荷载,以此对比斜桩群桩与直桩群桩两者的水平承载性状差异。

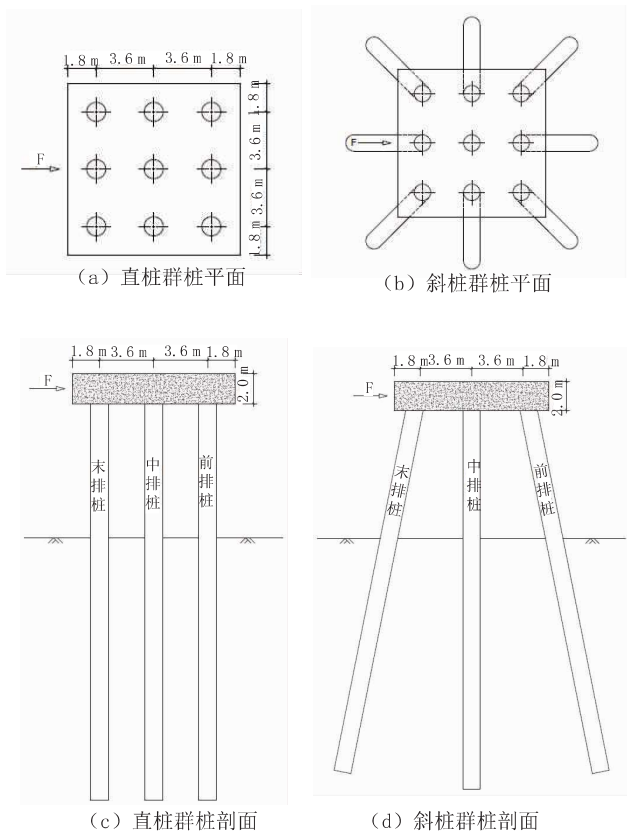
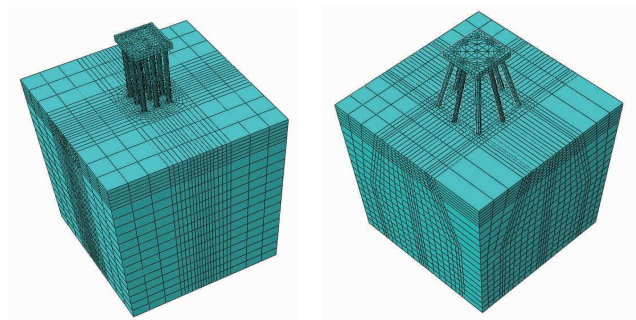


图 1 群桩加载示意图

采用与文献[5]相同的桩土模型参数,分别建立群桩有限元模型见图 2。



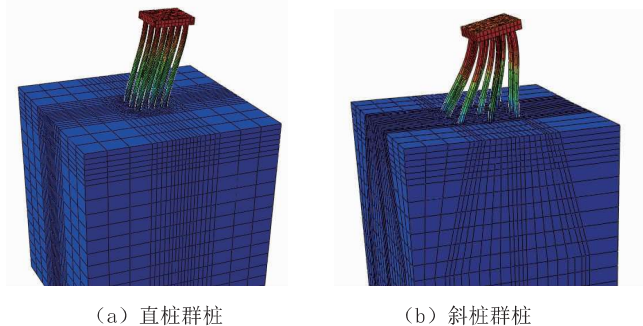
(a) 直桩群桩

(b) 斜桩群桩

图 2 群桩有限元模型

3 分析结果

统一在群桩承台中心位置施加相同大小的水平荷载,两组群桩的大致变形情况见图 3。由图 3 可见,两组群桩的整体变形差异较为显著。对于群桩而言,由于承台对基桩的强约束作用,使得土面以上的基桩桩身位移出现明显的反弯点。此外,随着水平加载的进行,直桩承台产生竖直平面内的转角,其方向表现为随荷载“前倾”;而斜桩承台的转动方向与直桩相反,表现为随荷载“后仰”。斜桩群桩中的各基桩由于倾斜方向互不相同,因此群桩整体变形协调的结果显然要比直桩群桩更加复杂。



(a) 直桩群桩

(b) 斜桩群桩

图 3 群桩水平受荷变形

图 4 给出了群桩有限元分析得到的水平荷载-位移曲线,以及按照 API 规范方法^[7]的相应计算结果。由图 4 可以看到,对于直桩和斜桩群桩,有限元及规范计算结果总体较为吻合,斜桩群桩抵抗水平荷载的性能要明显优于直桩群桩。具体而言,在相同大小的水平荷载作用下,斜桩群桩基础的承台水平位移较直桩群桩减小可达 70%,前者水平刚度约为后者的 3 倍。这一结论符合工程界对斜桩群桩水平受荷的常规认知,也与以往文献报道的大多数试验结果一致^[2-4]。

图 5 给出了两组群桩模型中不同位置基桩的桩顶水平荷载-位移曲线,该图实际上揭示了外部水

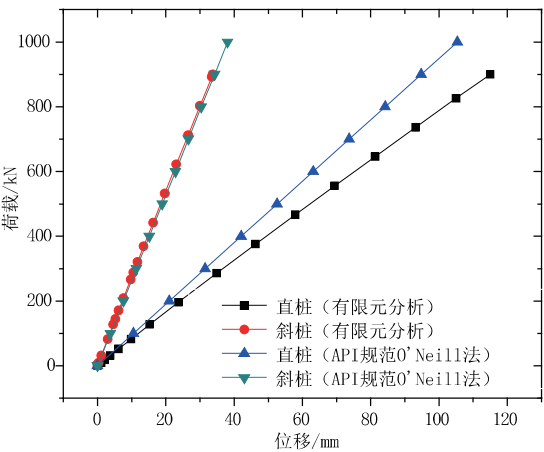
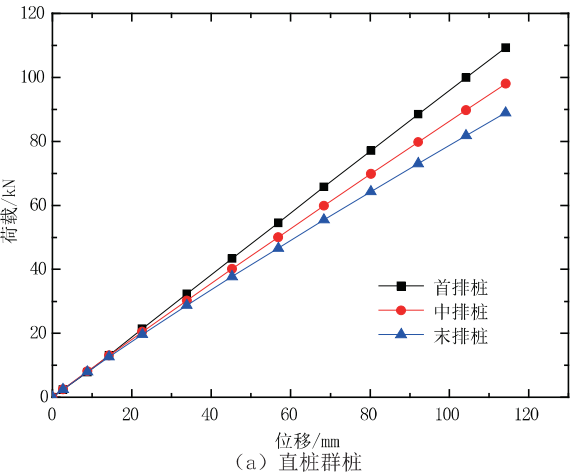
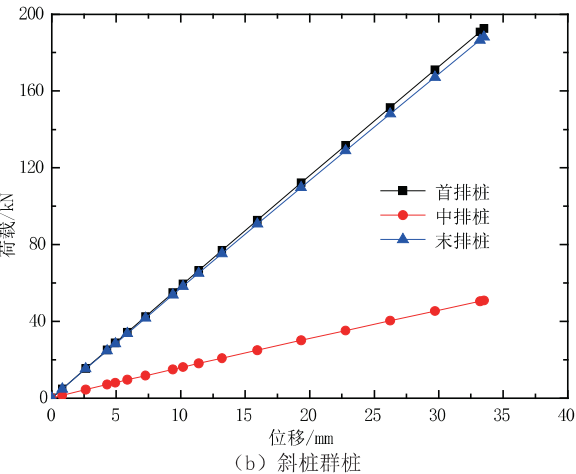


图4 直桩群桩与斜桩群桩水平荷载-位移曲线

平荷载在群桩内部各基桩间的分配规律，其中前、中、末排桩的位置定义可参见图1(c)、图1(d)。图5(a)表明由于水平群桩效应[8]的存在，前、中、末排桩的水平刚度依次减小，即对应相同的水平位移，前排桩承担的水平荷载最大，中排桩次之，末排桩最小。图5(b)则表现出了截然不同的荷载分配规律。斜桩群桩中，前排及末排桩所承担的水平荷载非常接近，且要显著大于中排桩。



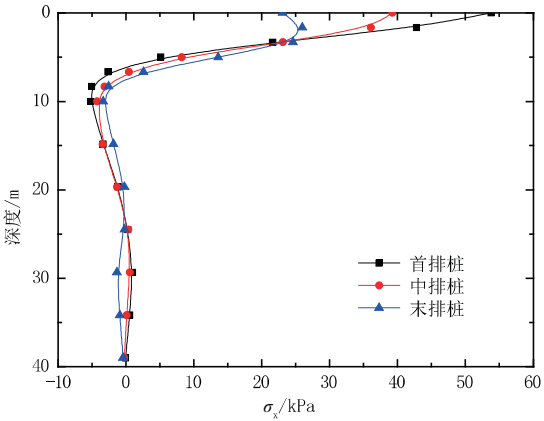
(a) 直桩群桩



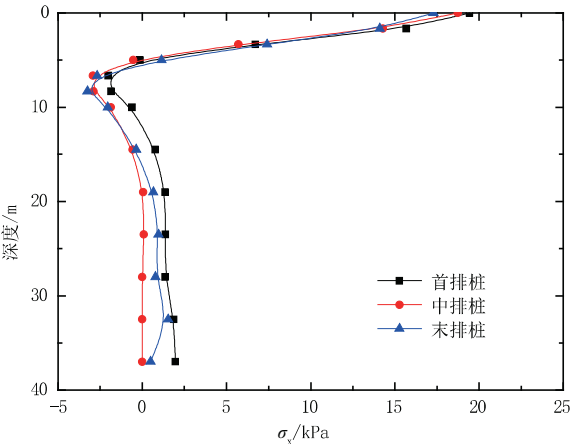
(b) 斜桩群桩

图5 群桩中不同位置基桩的水平荷载-位移曲线

为进一步从受力角度探讨上述规律，从数值模型中提取了不同位置基桩的桩周法向土应力 σ_x 沿桩身的分布结果见图6。由图6(a)不难发现，直桩群桩中各排桩桩周的浅层土应力分布状况与图5(a)揭示的规律相吻合，即前排桩的桩周土应力最高，末排桩最低。这表明在本文模型较小的桩间距(3D)情况下，水平受荷群桩中的前、后排桩之间产生了较为明显的“遮蔽效应^[1]”。该效应实质上即为水平群桩效应的体现之一，沿荷载作用方向的后排桩由于前排桩的存在，其桩周土应力受到影响而改变。图6(b)斜桩群桩计算结果中，各桩周浅层土应力相对接近，则说明本文斜桩群桩模型的水平群桩效应不甚明显。其主要原因在于本次分析采用了高承台的群桩型式，斜桩在土面位置的桩间距实际较大(见图1(d))，因此前后桩的遮蔽效应显著减弱。



(a) 直桩群桩



(b) 斜桩群桩

图6 桩周土应力 σ_x 随桩身分布(水平荷载900 kN)

此外，对比图6(a)、图6(b)的横坐标数值还可以发现，对应相同的群桩水平荷载(900 kN)，斜桩群桩的桩周土体应力水平显著小于直桩群桩。该结果间接表明，斜桩群桩更多地依赖基桩轴向承载力的发挥来参与抵抗外部水平荷载，故而其整体水平承载能力显著优于直桩群桩。

4 结 语

本文分别建立了直桩群桩和斜桩群桩的三维有限元模型,对比分析了两者在水平荷载作用下的整体变形、荷载分配及桩周土应力等方面的不同响应。数值分析结果表明,斜桩群桩与直桩群桩在水平荷载下的变形响应差异较大。在本文3倍桩径桩间距及高桩承台的条件下,斜桩群桩中基本不存在与直桩群桩相类似的群桩效应。斜桩群桩由于更好地发挥了基桩的轴向承载特性,故而整体抵抗外部水平荷载的能力显著高于直桩群桩。因此在技术可行的前提下,设计时宜优先考虑采用斜桩群桩的基础型式来承担水平荷载。

参考文献:

- [1] 张麒麟,卓卫东,范立础.斜桩基础工作性状的研究进展[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):60-66.
- [2] McVay M C,Shang T I,Casper R.Centrifuge testing of fixed-head laterally loaded battered and plumb pile groups in sand[J].Geotechnical Testing Journal,1996,19(1):41-50.
- [3] Zhang L M,McVay M C,Han S J,etc.Effects of dead loads on the lateral response of battered pile groups [J].Canadian Geotechnical Journal,2002,39:561-575.
- [4] 吕凡任.倾斜荷载作用下斜桩基础工作性状研究[D].浙江杭州:浙江大学,2004.
- [5] 顾明.不同方向水平荷载下斜桩的有限元分析[J].城市道桥与防洪,2018(8):290-293.
- [6] 庄茁,由小川,廖剑晖,等.基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [7] Reese L C,Wang S T,Vasquez L.GROUP 7.0 for Windows technical manual (Analysis of a group piles subjected to axial and lateral loading)[M].Ensoft, Inc,Austin,Texas,2006.
- [8] Brown D A,Morrison C,Reese L C.Lateral load behavior of pile group in sand [J].Journal of Geotechnical Engineering,1988,114(11):1261-1277.

(上接第208页)

对称决定着其能否采用沉井施工工艺。如何结合工艺功能合理布置竖向框架,是大型沉井有效控制壁厚和内力的关键步骤。

(2)在软土地区,沉井的下沉系数与下沉稳定系数是一对相互制约的系数,既要保证沉井能顺利下沉,同时还要防止沉井的突沉。当软弱土层较厚时,还应当在软弱土层中间适当位置处进行下沉稳定性验算。

(3)水下封底及顶管施工阶段采取临时降低井外水位的措施,是比较经济合理的方法,尤其是对于沉井体型较大、埋深较深、实际水位较高时,更为适宜。

(4)对于泵房沉井,在使用阶段的设计,应考虑泵房运行期间的实际情况。尤其是当泵房内存在多格水池时,应考虑所有可能出现的工况,并进行包络设计。

参考文献:

- [1] 给水排水工程结构设计手册编委会.给水排水工程结构设计手册[M].第二版.北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] CECS 137:2015,给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程[S].
- [3] CECS 246:2008,给水排水工程顶管技术规程[S].
- [4] 葛春辉.钢筋混凝土沉井结构设计施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.