

文章编号:1671-6833(2015)04-0067-05

竖向荷载下群桩受力特性研究

杜思义, 石磊

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 竖向荷载下群桩基础的受力特性较为复杂, 尤其是现场试验, 由于受到荷载大、费用高、设备复杂等条件的限制, 难以普遍开展. 通过一定量群桩承载力的现场试验, 结合计算机数值仿真分析研究竖向荷载下群桩基础的受力特性, 结果表明: 群桩整体承载力随桩中心距的增大而增大, 但当桩间距 S 大于 5 倍桩径后, 增大趋势不再显著; 群桩中各桩桩顶应力分布很不均匀, 但其随桩中心距、上部荷载的增加而逐渐趋于均匀; 单桩长径比为 20~30 时, 群桩承载力随桩长的增加而有效增加, 超过此范围时, 增加桩长, 群桩承载力增加效果不明显.

关键词: 静荷载试验; 群桩基础; 数值分析; 承载力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.04.016

0 引言

由多根桩通过承台联成一体所构成的群桩基础, 在竖向荷载作用下, 不仅桩直接承受荷载, 而且在一定条件下桩间土也可能通过承台底面参与承载; 同时各个桩之间通过桩间土产生相互影响; 来自桩和承台的竖向力在桩侧和桩端平面形成应力叠加, 从而使桩端平面的应力水平大大超过了单桩, 应力扩散的范围也远大于单桩, 因此正确认识和分析群桩的受力特性是搞好桩基设计的前提.

端承桩在竖向荷载作用下, 基础沉降主要是桩身的弹性压缩变形而整体沉降较小, 桩侧摩擦阻力的发挥受到较大限制, 可以认为群桩基础各桩的工作情况与独立单桩相同. 由此可见, 研究群桩效应主要针对摩擦型群桩^[1-3].

笔者根据国内外最新研究成果^[4-5], 利用 FLAC3D 软件建立了多桩基础的数值模型, 再利用现场多桩静载试验结果, 对先期建立的数值模型的岩土参数进行修正, 得到符合工程实际的精细模型, 再利用这种精细模型对竖向荷载作用下群桩的受力特性进行计算研究, 得出普遍规律, 从而指导桩基础的设计与施工.

1 多桩静载试验及数值模拟

1.1 多桩静荷载试验

某住宅楼地上高 33 层, 地下 2 层, 剪力墙结

构, 筏板加桩基础, 钻孔灌注桩, 混凝土强度等级 C30, 直径 $D=500$ mm, 桩长 15 m, 桩间距 1.2 m, 正方形布桩. 本场地条件下, 进行 3 根单桩静载试验和 3 组 (每组 4 根桩) 多桩静载试验, 对多桩在竖向荷载下的桩土作用关系进行试验分析.

反力采用压重平台提供, 加载设备采用 2 个 YDT5000 型 5 000 kN 千斤顶. 试桩反力梁装置及仪器仪表布置详见图 1. 静载试验采用正方形多桩刚性承压板, 放置方式见图 2.



图 1 多桩静载试验加载装置图

Fig.1 Static load test of pile group

3 点多桩静荷载试验的 $p-s$ 曲线如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 3 组静荷载试验的 $p-s$ (压力 - 沉降) 曲线均未出现陡降, 属于缓变形, 并且在最大荷载作用下, 各试点均未进入极限状态, 根据规范要求, 3 组试桩的极限承载力可取最大试验荷

收稿日期:2015-02-30; 修订日期:2015-05-19

作者简介:杜思义 (1970-), 男, 河南淮阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事工程结构分析和实验研究. E-mail: dsy3227@163.com.

载值 1 000 kPa.



图 2 承压板放置方式示意图
Fig. 2 Placement sketch of bearing plate

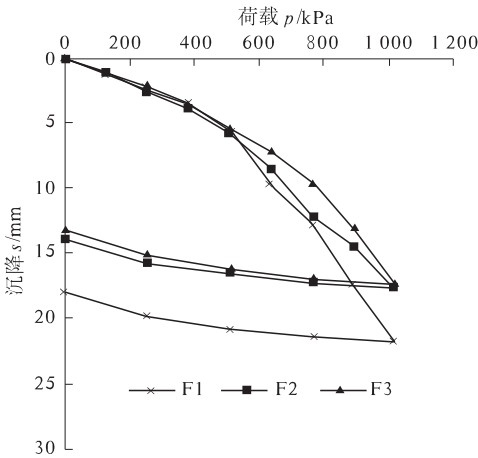


图 3 各试点荷载沉降 $p-s$ 曲线
Fig. 3 Load-settlement $p-s$ curve of each pilot

1.2 群桩静载荷试验的数值模拟分析

针对上述静载荷试验过程建立 FLAC3D 数值模型^[6],桩的建立采用柱体网格(cylinder),周围土体采用柱形隧道外围渐变放射网格单元(radcylinder)分层建立,桩周约束土体均取 10 m,数值模型如图 4 所示,模拟荷载-沉降曲线如图 5 所示.

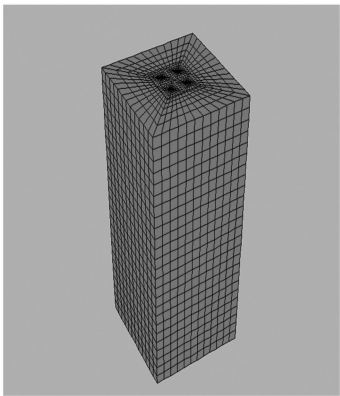


图 4 多桩试验 FLAC3D 数值模型
Fig. 4 FLAC3D model of static load test of pile group

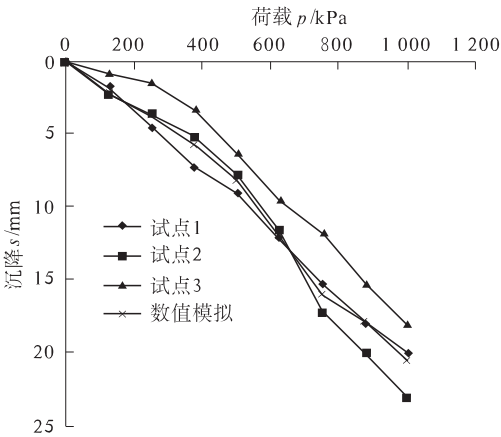


图 5 试验模拟 $p-s$ 曲线对比
Fig. 5 $p-s$ curve of calculated and experimental results

承台的弹性模量 E 非常大,因此在上部竖向荷载作用下,承台整体位移是相同的,这也保证了承台下各桩的均匀受力,与现场试验刚性承压板效果一致.

2 竖向荷载下群桩受力特性研究

国内外已有研究成果表明^[7-9],群桩承载力及沉降的影响因素主要包括桩中心距、桩体刚度、桩周土的性质、桩长、桩径等几个方面^[10].下面对以上几个因素对群桩承载力等方面的影响做对比计算分析.

2.1 不同桩中心距对群桩承载力的影响

2.1.1 不同桩中心距群桩模型的建立

桩距 $S_a = nD$ (n 为桩数; D 为桩径), n 分别取 2, 3, 4, 5, 6, 桩顶嵌入刚性承台中,群桩模型中材料物理力学参数取值如表 1 所示,群桩模型布置如图 6 所示,土层分布及网格划分如图 7 所示.在承台上分 10 级施加荷载,最大荷载取 28 126 kN.

2.1.2 不同桩中心距对群桩承载力的影响

利用上述不同桩中心距的力学模型计算并提取每级荷载下桩顶沉降值,绘制各级荷载下群桩的 $Q-s$ 曲线,如图 8 所示.

由不同桩中心距下的 $Q-s$ 曲线可以得出:相同竖向荷载作用下,群桩整体沉降量随桩中心距的增大而不断减小.沉降值 $s = 40$ mm 时对应的竖向荷载值,也随桩间距的增大,不断增加.由此得出,群桩整体承载力随桩中心距的增大而增大,但当桩距 $S > 5D$ 后,增大趋势不再显著.

表 1 FLAC3D 群桩模型中材料物理力学参数表

Tab. 1 The mechanical parameters of materials in FLAC3D model

名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/$ MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
承台	78.50	200 000	0.25	—	—
桩体	25.00	30 000	0.2	—	—
0-2.0 m 土层	19.20	21.9	0.25	22.1	22.4
2.0-5.0 m 土层	19.40	15.5	0.25	17.0	23.9
5.0-12.0 m 土层	19.30	16.9	0.25	16.0	24.1
12.0-15.0 m 土层	19.50	27.6	0.25	20.9	25.1
15.0-25.0 m 土层	19.60	25.7	0.25	35.0	19.6

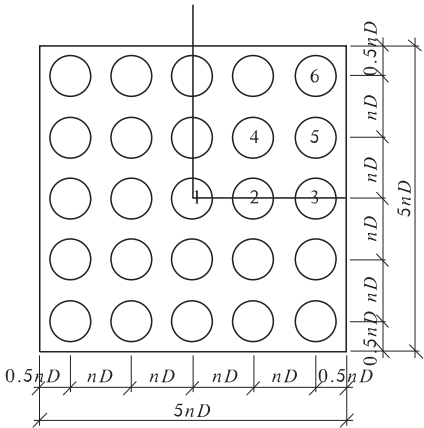


图 6 群桩布置示意图

Fig. 6 Model of pile group

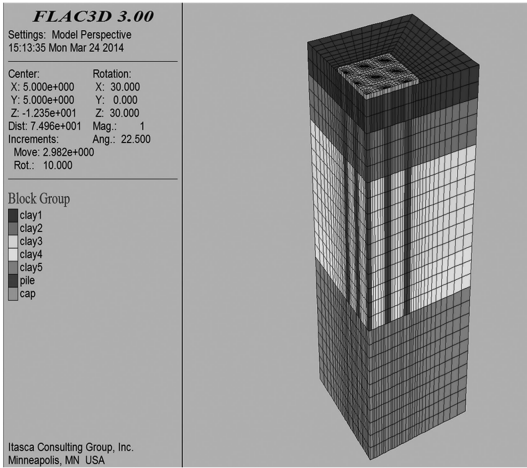


图 7 土层分布及网格划分

Fig. 7 Distribution and meshing of the soil

2.2 不同桩中心距对群桩应力分布的影响

不同桩中心距、不同荷载等级下,群桩中各单桩承担的荷载不同.利用上述群桩基础不同桩中心距的 FLAC3D 模型,变化荷载等级,计算各单桩的桩顶应力,提取不同位置各桩顶应力值,发现同级荷载下,不同桩间距,各桩分担的荷载不同,边桩分担的荷载大于中心桩分担的荷载,尤其是角桩分担荷载最大,上部荷载值 $Q=5\,625\text{ kN}$ 下,各

桩分担荷载大小如图 9 所示,随着桩间距的增大,图 9 曲面变得平缓,边桩、中心桩分担的荷载比变小,边桩与中心桩分担的荷载比接近 1.在桩间距不变的情况下,增加荷载等级,边桩、中心桩分担的荷载比变小,在极限荷载下,边桩与中心桩分担的荷载比趋于 1.

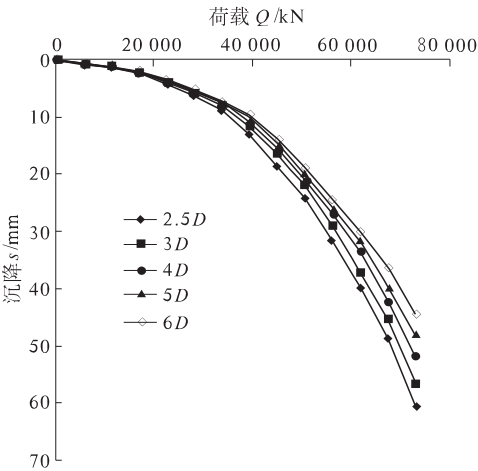


图 8 不同桩距群桩 $Q-s$ 曲线对比

Fig. 8 Contrast $Q-s$ curve of pile group under different pile spacing

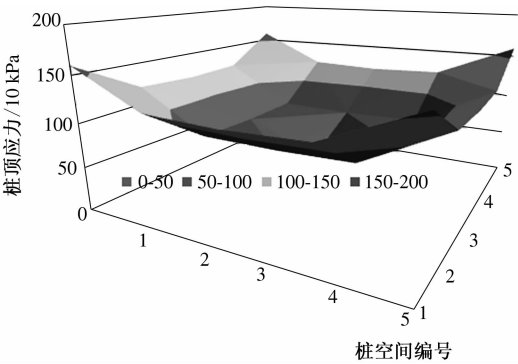


图 9 不同空间位置各桩分担荷载图

Fig. 9 Load shared by pile in different spatial location

中心桩桩周土由于受到四周邻桩侧阻力发挥期间的附加应力叠加作用,会产生较大的竖向的压

缩变形,桩土相对位移减小,其桩侧阻力的发挥小于边桩和角桩,因此其分担的荷载也小于边桩和角桩.随着桩中心距的增加,桩间土之间的应力叠加效应变小,当桩中心距 $S_a \leq 3D$ 时,桩间土之间的应力叠加效应会使群桩承载力相对单桩承载力之和明显变小,而当桩中心距较大时,比如 $S_a = 6D$ 时,群桩中各桩的受力状况接近单桩.至于荷载等级增加,边桩、中心桩分担的荷载比变小,是因为不同位置基桩的桩土接触面相对滑移量并非随荷载量的增大而等量的增加,而是非线性增长.

2.3 土体特性对群桩承载作用的影响

桩承载力主要是根据桩顶荷载与沉降的关系曲线判定,而桩的沉降主要取决于桩周土的变形模量,因此研究土体特性对群桩承载力的影响主要是研究不同变形模量的土体对群桩承载力的影响.研究模型取桩长 15 m,桩径 0.5 m,桩周土变形模量分别取 10,20,30,40 MPa,建立模型并计算不同变形模量土体对群桩承载力的影响.将不同土体变形模量下的竖向应力与整体沉降值进行整理,绘制应力-沉降曲线如图 10 所示.

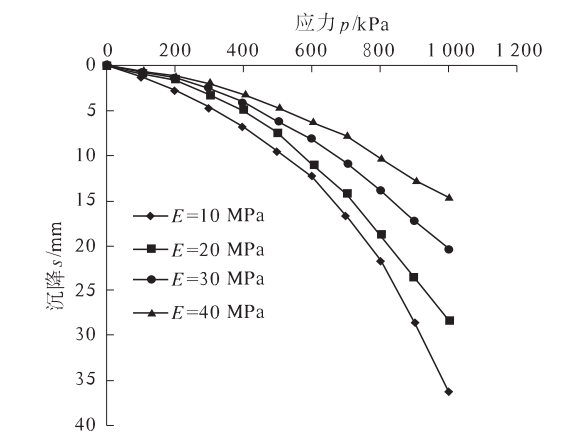


图 10 不同土体变形模量的群桩 p - s 曲线
Fig. 10 Contrast p - s curve of pile group under different deformation modulus of soil

由图 10 看出:同级桩顶荷载条件下,桩顶沉降量随土的变形模量的增大而减小.如桩顶荷载 $p = 1\,000\text{ kPa}$ 时,土变形模量由 $E = 10\text{ MPa}$ 增大至 $E = 40\text{ MPa}$ 时,桩顶沉降量由 36.4 mm 减小为 14.7 mm ,桩顶沉降量减小了 59.6% ,这说明土体变形模量对群桩承载力及沉降具有显著的影响,土体变形模量的增加可以有效地增大群桩的整体承载力,减小群桩沉降.

2.4 桩长对群桩承载作用的影响

2.4.1 桩长对群桩承载力的影响

取桩身弹性模量 $E = 30\text{ GPa}$,桩距 $S_a = 3D$,在

保持群桩及土体其他参数不变的条件下,建立桩长为 10,12.5,15,17.5,20 m 的群桩模型,并分级加载计算,得到不同桩长下群桩荷载-沉降曲线如图 11 所示.

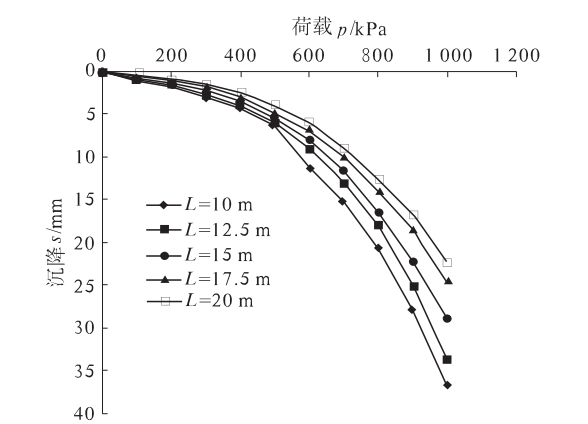


图 11 不同桩长条件下群桩 p - s 曲线对比
Fig. 11 Contrast p - s curve of pile group under different pile length

由图 11 可以看出:随着桩长的增加,群桩的承载力逐步增大,沉降值减小,当桩长达到 17.5 m 时(即长径比 $R = 35$),继续增大桩长,对群桩承载力的提高效果不明显.

2.4.2 桩长对桩土荷载分担比的影响

利用上述模型,变化桩长,计算桩土荷载分担比曲线关系如图 12 所示.

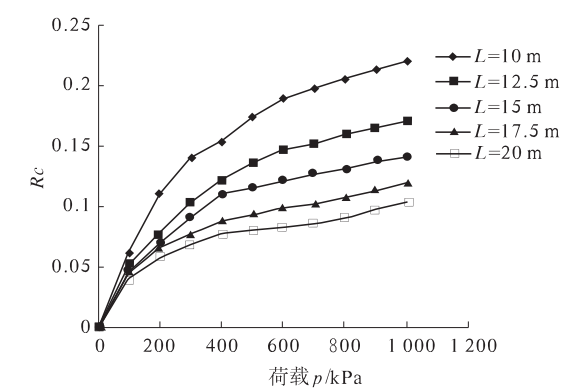


图 12 不同桩长条件下土抗力分担比随荷载的变化
Fig. 12 Pile-soil load share ratio under different pile length

由图 12 可看出:群桩承担荷载比例随桩长的增加而增加,当长径比 $L/D > 30$ 之后,随着桩长的增加,群桩承担荷载比例增加速度同样减缓,从这个角度来讲,竖向荷载作用下桩土相互作用存在合理桩长的问题,本例中,合理桩长介于 10 ~ 17.5 m 之间,即长径比 $L/D = 20 \sim 30$ 之间,因此,在确定群桩基础的过程中,对于桩长的选择需要

从承载力、群桩整体沉降和较为充分的发挥承台土抗力等角度综合考虑并确定出最优桩长。

3 结论

- (1)采用合理的岩土参数特别是接触面黏聚力和摩擦角等参数时,FLAC3D 软件可以很好地计算群桩的承载力与沉降趋势;
- (2)群桩整体承载力随桩中心距的增大而增大,但当桩距 $S > 5D$ 后,增大趋势不再显著;
- (3)群桩中各桩桩顶应力分布很不均匀,但其随桩中心距、上部荷载的增加而逐渐趋于均匀;
- (4)单桩长径比为 20 ~ 30 时,群桩承载力随桩长的增加而有效增加,超过此范围时,增加桩长,群桩承载力增加效果不明显。

参考文献:

[1] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
[2] 赖琼华. 桩的 P - S 曲线计算方法[J]. 岩石力学与

工程学报,2003,22(3):509-513.
[3] Guo Wei-dong. Vertically loaded single piles in Gibson soil[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering,2000,126(2):189-193.
[4] WONG C S. POULOS H G. Approximate pile-to-pile interaction factors between two dissimilar piles [J]. Computers and Geotechnics,2005,32,(8):613-618
[5] 建设部. JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
[6] 孙书伟,林杭,任连伟,等. FLAC3D 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
[7] 刘金砺,黄强. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J]. 岩土工程学报,1995,17(6):1-13.
[8] 徐亚利,刘增荣. 群桩基础受力特性的模型试验研究[J]. 工程勘察,2011(3):6-23.
[9] 胡道华,邓安富. 钻孔灌注群桩受力特性的研究[J]. 天然气与石油,1997,15(1):42-50.
[10] 杜金龙,杨敏. 软土基坑开挖对邻近桩基影响的时效分析[J]. 岩土工程学报,2008,30(7):1038-1043.

The Research on Mechanics Characteristic of Pile Group Foundation under Vertical load

DU Si-yi, SHI Lei

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University,Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Field static load test of pile group foundation is difficult to carry out because the limitation of funds or equipments. At the same time, the bearing capacity mechanism of pile group foundation and interaction between piles and soil is complex, there are still large gaps between the theory research and practice. In the paper mechanics characteristics of pile group foundation under vertical load were researched by the local testing and computer numerical value. Some solutions were educed that the bearing capacity of pile group foundation will increase while the pile spacing increases, but the trend is very weak while $S > 5D$. The difference of stress between piles in different positions will decrease while the pile spacing increases. The stress distribution on the pile top tends to be uniform with the increase of load. The bearing capacity of pile group can increase as pile length increases, when length-diameter ratio $L/D = 20 \sim 30$, The bearing capacity of pile group is greater and the expense is lower.

Key words: static load test; pile group foundation; numerical analysis; bearing capacity