

DX 旋挖挤扩灌注桩群桩数值分析研究

万 飞, 张德华

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

[摘要] 通过数值计算软件 FLAC^{3D}对 DX 旋挖挤扩灌注桩(简称 DX 桩)群桩的承载性状和桩周土体的沉降规律进行了研究。分析了桩间距、承力盘布置对群桩极限承载力和沉降控制能力的影响,并比较了 6 根基桩的 DX 群桩和 8 根基桩的直桩群桩的极限承载力。研究表明:DX 群桩的基桩具有 DX 单桩的受力性状。承力盘下方土体位移大于承力盘上方土体位移,盘腔上部出现临空面。 $3D(D$ 为盘径)桩间距的承载力和沉降控制能力最佳。同一地层内,承力盘布置方式(平行、错开布置)对 DX 群桩的承载力影响甚微。6 根基桩的 DX 群桩的极限承载力是 8 根基桩的直桩群桩的 1.27 倍。采用 DX 群桩不仅可以有效地控制沉降,而且可以消减桩数,节省工程成本。研究成果为合理设计该类型群桩提供了依据。

[关键词] 桩基础;极限承载力;数值计算;DX 群桩

[中图分类号] TU473 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0046-05

1 前言

桩在实际工程中的应用,常以群桩的形式出现,即在一个基础(或墩基)下至少有两根或三根桩,甚至有更多的桩。在桩的顶部有承台,上部荷载通过承台分配给各桩的桩顶及与承台底相接触的土。桩顶荷载又传递到桩侧的土和桩端的土。因此承台一群桩一土形成一个相互影响和共同作用的体系,使群桩的工作性状较之单桩更为复杂。

目前,国内学者虽然已经对 DX 单桩进行了大量研究^[1~7],但针对 DX 群桩的研究仍为空白。在原型群桩上进行载荷试验是很不经济的。通过原型群桩试验来研究其工作性状往往是不现实的。主要是通过缩小比例尺的模型试验及理论分析来研究群桩的传递和破坏机理。然而模型试验的影响因素复杂,试验条件无法精确控制,还难以揭示 DX 群桩的承载力机理。运用数值方法可以快速、方便地进行应力变形分析,对 DX 群桩的承载力机理进行研究。

为能了解 DX 群桩的承载性状和桩周土体的受

力机理,笔者采用数值模拟手段,对 DX 群桩进行模拟,分析群桩的基桩受力情况,研究桩间距和承力盘布置方式对 DX 群桩承载力和沉降的影响。

2 计算模型及参数

1)单元及其网格的生成。模型为 6 桩 2 盘群桩,桩长 20 m,桩径 1 m,承力盘半径 2 m,盘高 1 m,于桩身 8 m 和 16 m 处各设置一道承力盘,桩间距为 3 倍桩径,其中自左上角基桩编号为 1 号桩,相邻中间桩编号为 2 号桩,依次编号。为了减小边界效应的影响,建模时按承台相应方向尺寸的 3 倍选取计算范围,深度方向按应力影响深度为 1.7 倍桩长。模型如图 1 所示。

2)本构模型和材料性质。计算采用三维有限差分软件 FLAC^{3D},土体选用 Mohr-Coulomb 模型,桩体选用各向同性线弹性 elastic 模型,桩与桩周土设置无厚度的 Goodman 接触面单元模拟桩土之间的滑裂。具体参数见表 1。

[收稿日期] 2011-11-14

[基金项目] 铁道部重点科技项目(2009J010-F)

[作者简介] 万 飞(1982—),男,山东东营市人,北京交通大学博士研究生,主要研究方向为桩基工程;E-mail: 10115272@bjtu.edu.cn

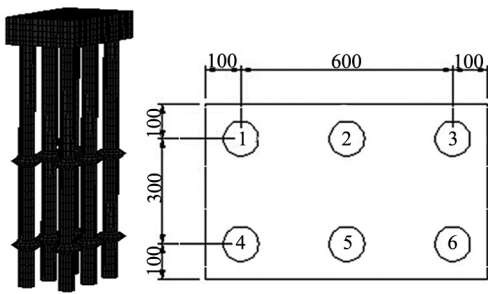


图1 群桩模型(单位:cm)

Fig. 1 Pile group model (unit:cm)

表1 材料参数

Table 1 Parameters of the material

材料	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量 /MPa	内聚力 /kPa	摩擦角 /($^\circ$)
桩体	2 500	0.2	53 250	—	—
土体	1 960	0.3	51	35	22

加载仅仅模拟竖向加载,没有考虑组合加载。加载等级参照实际工程中测桩试验的规定确定,而最大荷载根据计算极限承载力的经验公式估算。竖向加载分10次等级加载,群桩基础模型加载第一级为6 180 kN,第十级为61 800 kN,加载直至破坏。

3 计算结果分析

3.1 DX 群桩承受竖向荷载时的受力性状和地基土的变形情况

由表2可以看出:

1)第一级加载时,桩顶平均位移为4.4 mm,桩上部土体位移最大,与桩身位移相等,此时桩与桩周土体未出现相对位移,侧摩阻力起主要控制作用,且由于外侧边桩侧摩阻力引起的附加应力在桩中间处进行叠加,桩间土体位移大于桩外侧土体位移。

2)第二级加载后,桩顶位移为7.7 mm,桩周土体仍然与桩共同位移,但不同于一级加载的是,桩间土体受到应力叠加位移增大的区域减小了,仅局限在桩身周围。

3)第三级加载后,桩顶位移为12 mm,此时第一级承力盘已经发挥承载力,承力盘下的土体受到承力盘的压力而位移增大。

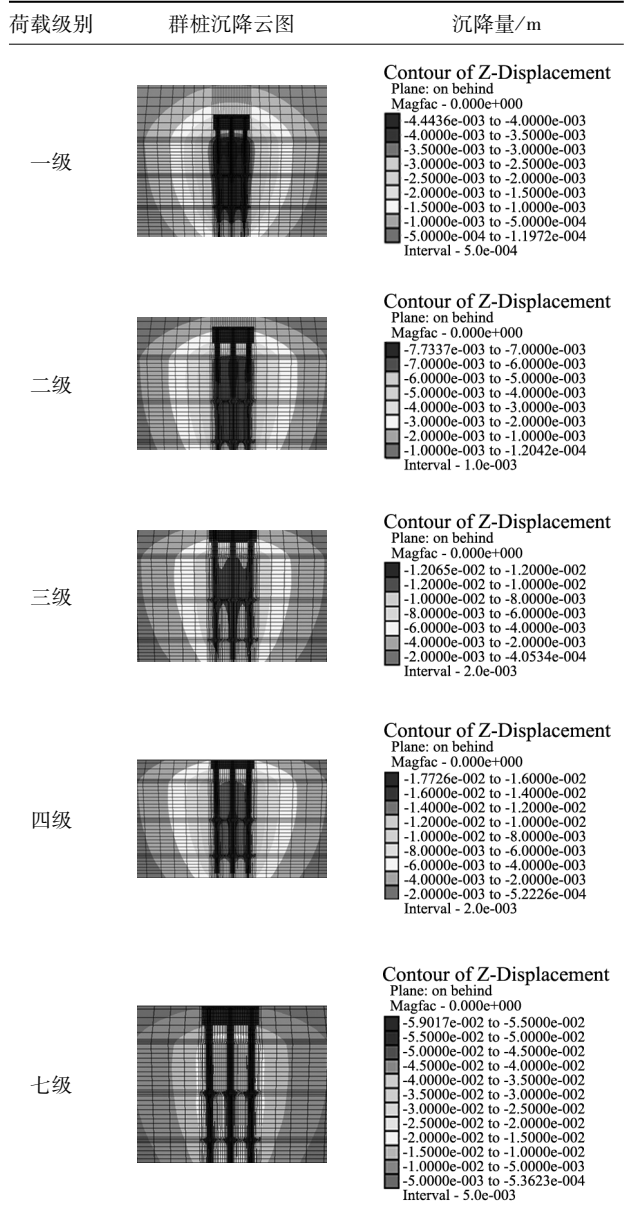
4)第四级加载后,桩顶位移为17 mm,此时第二级承力盘的承载力也开始发挥,第二级承力盘下的土体沉降增大。

5)综合第五、六、七级加载位移云图,桩顶位移为26 ~ 59 mm,在此过程中,可以看到土体位移最

明显的变化特征是,桩下部土体位移逐渐增大,桩上部土体位移变化不大,此现象原因是侧摩阻力已经达到极限状态,桩身与桩周土体产生相对位移,且承力盘上盘面与土体脱离,在空腔区出现临空面,而盘阻在不断增大,致使承力盘下部土体受压位移增大,导致了这种下部土体位移大于上部土体位移的情况。

表2 桩土位移云图

Table 2 Pile-soil displacement cloud



3.2 承受各级竖向荷载时桩身应力传递特性

桩身应力传递特性是桩承载性状的综合反映,它既能表现侧摩阻力的发挥性状,也能反映端阻力的发挥特性。图2、图3分别为3D(D为盘径)桩间距群桩在各级荷载作用下的桩身应力计算曲线,从

图中可以看出：

1) 在较小荷载时, 承力盘以外桩身应力随着桩顶荷载的增大而增大, 应力曲线斜率变小, 说明此段桩身侧摩阻力增大。在承力盘标高位置, 应力曲线有突变出现, 说明承力盘发挥承载力使桩身应力减小。

2) 桩顶荷载较大时, 随着桩顶荷载的增大, 此段曲线斜率没有变化, 说明侧摩阻力已经发挥到极限承载力。而在承力盘标高处的曲线斜率在继续减小, 说明随着荷载的增大, 上部侧摩阻力发挥到极限后, 主要由承力盘承担荷载, 承力盘是 DX 群桩的主要承载构件。

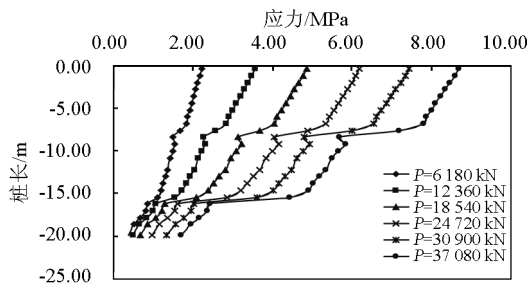


图 2 1 号桩桩身应力图
Fig. 2 Stress of pile 1

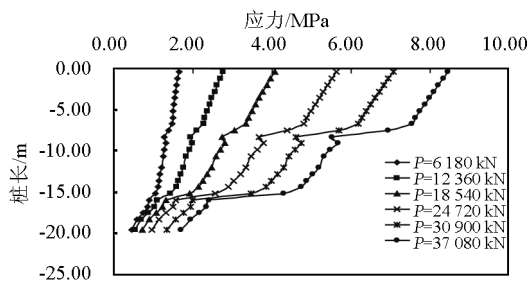


图 3 2 号桩桩身应力图
Fig. 3 Stress of pile 2

3.3 桩间距对群桩 $Q-s$ 曲线的影响

选取 3 种桩间距进行研究, 其几何参数见表 3。

表 3 设计参数

Table 3 Parameters of design

编号	桩数	桩长 / m	桩径 / m	盘径 / m	桩距	承台尺寸 / m × m
1	6	20	1	2	3D	8 × 5
2	6	20	1	2	4D	10 × 6
3	6	20	1	2	6D	14 × 8

各桩间距群桩的 $Q-s$ 曲线如图 4 所示。按

《建筑桩基技术规范》JGJ94-2008 取沉降 40 mm 时为群桩的极限承载力, 用内插值的方法可以得到 3D、4D、6D (D 为盘径) 桩间距群桩极限承载力分别为 37 451、38 442、33 802 kN。比较可知 4D 桩间距布置时极限承载力最大, 3D 桩间距布置时其次, 最小为 6D 桩间距布置。可以看出, 当桩间距超过一定值时, 群桩的极限承载力会随桩间距的增大而减小。

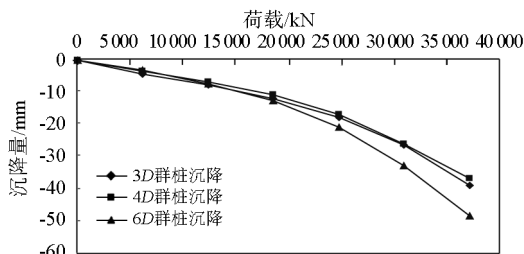


图 4 各桩间距群桩 $Q-s$ 曲线
Fig. 4 $Q-s$ curves of pile group with different pile space

3.4 桩间距对基桩 $Q-s$ 曲线的影响

不同桩间距布置的基桩 $Q-s$ 曲线见图 5。由图 5 可以看出, 相同承台厚度的情况下, 在 3D、6D 间距布置时, 各基桩的 $Q-s$ 曲线基本重合, 说明沉降均匀。4D 间距布置时, 各基桩的 $Q-s$ 曲线不重合, 其中 3 号桩和 6 号桩沉降偏大, 即右侧角桩沉降大, 存在沉降差, 沉降不均匀。由此说明 DX 群桩在 3D、6D 桩间距布置时, 沉降更均匀, 不会出现沉降差。

3.5 承力盘布置对群桩 $Q-s$ 曲线的影响

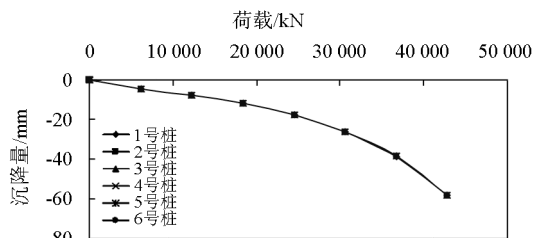
研究选取的桩数均为 6 根, 桩长均为 20 m, 桩径均为 1 m, 盘径均为 2 m, 桩距为 3D, 承台均为高承台, 承力盘有错开布置和平行布置两种。其中错开布置群桩的基桩桩型有两种: 承力盘标高为 -8、-16 m 和承力盘标高为 -8.5、-16.5 m。平行布置群桩的基桩桩型承力盘标高均为 -8、-16 m。模型见图 6。

用内插值的方法得到承力盘错开和承力盘平行群桩的极限承载力分别为 37 445、37 451 kN, $Q-s$ 曲线见图 7。即在桩间距相同、承台相同的情况下, 承力盘平行布置的承载力略大于承力盘错开布置, 但差距微小。

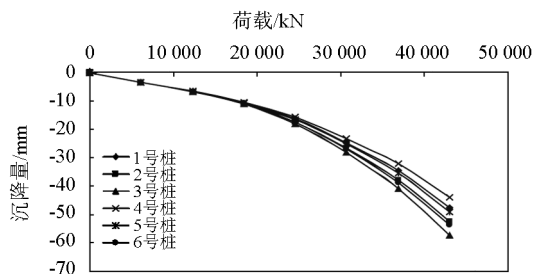
3.6 DX 群桩与直桩群桩极限承载力比较

研究选取的直桩群桩桩数为 8 根, 桩长均为

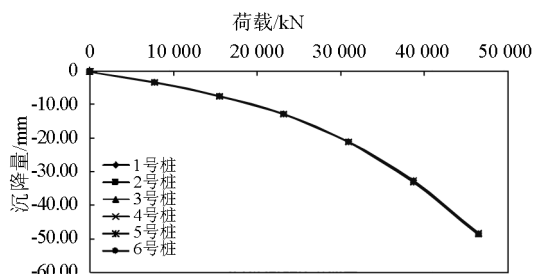
20 m, 桩径均为 1 m, 桩距为 3D, 承台为高承台。DX 群桩桩数为 6 根, 桩长为 20 m, 桩径为 1 m, 盘径为 2 m, 桩距为 3D, 承台为高承台。计算结果见图 8。



(a) 3D桩间距Q-s曲线



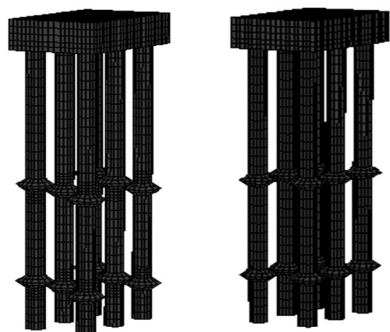
(b) 4D桩间距Q-s曲线



(c) 6D桩间距Q-s曲线

图 5 各桩间距群桩的基桩 Q-s 曲线

Fig. 5 Q-s curves of the piles of pile group with different pile space



(a) 承力盘错开 0.5 m 模型 (b) 承力盘平行模型

图 6 群桩网格模型

Fig. 6 Grid model of pile group

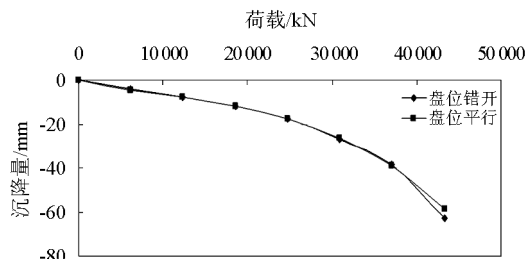


图 7 承力盘错开与承力盘平行群桩 Q-s 曲线

Fig. 7 Q-s curves of pile group with plate staggered arrangement and plate parallel arrangement

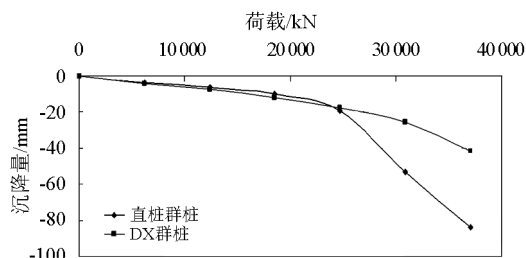


图 8 直桩群桩与 DX 群桩 Q-s 曲线

Fig. 8 Q-s curves of straight pile group and DX pile group

由图 8 可以看出:

1) DX 群桩的 Q-s 曲线是缓变型, 直桩群桩的 Q-s 曲线是陡降型。在荷载小于 24 720 kN 时, 直桩群桩与 DX 群桩在相同荷载下沉降量差别不大, 直桩群桩沉降控制能力略优于 DX 群桩。当荷载大于 24 720 kN 时直桩群桩的 Q-s 曲线出现拐点, 突然增大, 说明此时直桩群桩已经无法控制沉降, 失去了承载力。而此时 DX 群桩 Q-s 曲线仍然缓慢变化, 由此可以说明 DX 群桩的沉降控制能力优于直桩群桩。

2) 用内插值的方法可以得到直桩群桩和 DX 群桩的极限承载力分别为 28 527、36 463 kN, 即在相同桩间距、相同承台情况下, DX 群桩的极限承载力为直桩群桩极限承载力的 1.27 倍。

4 结语

1) 考虑群桩的承载力和沉降控制能力, 3D 和 4D 桩间距布置的承载力相接近且最大, 但 3D 桩间距的 DX 群桩沉降更均匀, 所以 DX 群桩的最佳桩形布置为 3D 桩间距。

2) DX 群桩的桩间土体沉降大于桩周外侧土体的沉降,并且随着荷载的增大,由于侧摩阻力达到极限值,并且承力盘承载力的增加,桩间土体的沉降由承力盘标高上方的土体沉降控制,转变为以承力盘下方的土体沉降为控制要素,承力盘下方土体的沉降值大于承力盘上方土体的沉降值,致使盘腔上部出现临空面。

3) 桩身应力曲线在承力盘部位出现陡降,说明承力盘起了很大的承载作用,并且侧摩阻力达到极限值后,承力盘承载力更是起了控制作用,继续发挥承载力,大约能占到整个桩基承载力的 50 % 左右,因此 DX 群桩的 $Q-s$ 曲线呈缓变状发展,不会出现直桩 $Q-s$ 曲线的陡降现象。

4) 在相同地层内,承力盘错开布置的 DX 群桩的承载力略小于承力盘平行布置的 DX 群桩,且差距微小。总体来说,在同一地层内,承力盘的布置方式对 DX 群桩的承载力影响不大。

5) 6 根桩的 DX 群桩的极限承载力大于 8 根桩的直桩群桩的极限承载力,大概是直桩群桩的极限

承载力的 1.27 倍。在相同荷载下,6 根桩的 DX 群桩的沉降量小于 8 根桩的直桩群桩,因此以沉降为主要控制要素的工程中,采用 DX 群桩可以有效地控制沉降,并且可以消减桩数,极大地节省了工程成本。

参考文献

- [1] 常林润. 挤扩多支盘灌注桩 (DX 桩) 在工程中的应用 [J]. 建筑技术开发, 2003, 30(1): 31-32.
- [2] 乔京生, 邓永红, 黄浩. 竖向荷载作用下群桩效应的数值模拟研究 [J]. 唐山学院学报, 2007(3): 72-74.
- [3] 吴鹏. 超大群桩基础竖向承载性能及设计理论研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [4] 蒋建平, 高广运, 汪明武. 基于试验的群桩基础承载性状研究 [J]. 探矿工程, 2004(6): 1-5.
- [5] 徐斌, 王大通, 高大钊. 群桩沉降验算中接触单元模型应用的若干问题 [J]. 同济大学学报, 1998, 26(2): 149-152.
- [6] 胡汉兵, 余祖明, 杨升威. 竖向荷载下群桩承载特性的弹塑性分析 [J]. 长江科学院院报, 2001, 18(1): 41-44.
- [7] 王幼青, 张克绪, 朱腾明. 桩-承台-地基土相互作用试验研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998(2): 31-37.

Numerical analysis for casted-in-place DX pile groups

Wan Fei, Zhang Dehua

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] DX pile group is simulated by numerical analysis software FLAC^{3D} to study the mechanics behavior and the pile-soil settlement rules. Analysis of the influence of pile spacing and plate arrangement to ultimate bearing capacity and settlement control, and comparison of the ultimate bearing capacity of straight pile group with 8 piles with the DX pile group with 6 piles are done. The result indicates that the pile of DX pile group has the same bearing mechanism with the DX single pile. The displacement of the soil below the bearing plate is greater than that above the bearing plate, which leads to the free surface of the upper cavity. $3D$ (D is the diameter of the bell) pile spacing can perform the best bearing capacity and settlement control. Within the same stratum, bell arrangement (staggered arrangement and parallel arrangement) has little effect to the bearing capacity of DX pile group. The ultimate bearing capacity of DX pile group with 6 piles is as 1.27 times as the straight pile group with 8 piles. With DX pile group, we can not only effectively control the settlement, but also reduce the number of piles and save the project cost. These research results provide valuable basis for the rational design of pile groups of this type.

[Key words] pile foundation; ultimate bearing mechanism; numerical analysis; DX pile group