

# 水平荷载群桩三维有限元分析研究

茜平一 周洪波

(武汉水利电力大学土木建筑学院, 武汉 430072)

**【摘要】** 利用三维弹性有限元法对水平荷载群桩基础进行了特性分析研究, 讨论了桩距、桩数、桩长、桩径和土质等各种因素对群桩基础位移群桩效应的影响, 得出了一些有益的结论。

**【关键词】** 三维有限元; 水平荷载; 位移群桩效应

**【Abstract】** This paper makes a thoroughly study on the behavior of laterally loaded pile groups by 3D FEM. Some conclusions relating to the displacement group effect are obtained from simulating the influence of several factors.

**【Key words】** 3D FEM; lateral loading; displacement group effect

## 0 引言

对于高压输电线路杆塔、海洋石油钻采平台、港口码头等结构物的桩基础而言, 水平荷载成为设计时应考虑的重要因素, 有时甚至成为其控制荷载。因而对桩基础在水平荷载作用下的反应特性进行研究显得日趋重要。

国内外对水平荷载群桩基础进行了一些研究, 提出了一些计算方法, 主要是在单桩计算方法的基础上加以分析, 其中比较合理的有以下几种: ①福克(Foch)和科克(Koch)<sup>[1]</sup>基于Poulos弹性理论提出的综合法; ②地基反力折减法, 如布朗(Brown, D.A.)<sup>[2]</sup>等人提出群桩反力折减系数的概念, 杨克己<sup>[3]</sup>、谢耀峰<sup>[4]</sup>等人在模型试验研究的基础上分别提出了粘土、砂土中群桩基础的后排桩  $p-\gamma$  曲线折减系数的经验公式。但这些方法均存在着一些不足。对于综合法而言, 由于采用弹性理论考虑群桩中各桩间的相互作用, 虽然能够求得比较合理的群桩位移值, 但无法正确

反映群桩基础中前排桩和后排桩的荷载分担比; 对于折减法而言, 由于群桩基础试验所需费用较大, 试验资料较少, 所得出的经验公式尚不具有普遍性。

## 1 计算模型及计算方案的选择

群桩基础试验所需费用巨大, 耗时较长, 进行大规模的试验研究是很难的, 因而现有试验资料非常少, 不足以阐明群桩基础在水平荷载作用下的反应特性。采用数值分析方法对群桩基础试验进行模拟, 可以比较方便地调节其桩距、桩长、桩径、桩数, 进行不同形式的群桩基础在不同土体中的受荷分析, 具有试验研究所不可比拟的优点。由于模拟三维结构所需的单元数目非常庞大, 三维有限元分析对计算机的容量和运算速度的要求较高, 计算比较复杂, 造成费用昂贵, 但为了阐明群桩的工作性状, 进行群桩基础的三维有限元分析是非常有必要的。本文采用目前国内应用较为广泛的商用软件 Super SAP 对群桩基础进行三维有限元分析。

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(编号: 9549302)

**作者简介:** 茜平一, 1956年生, 男, 汉族, 河北省魏县人, 教授, 博士学位。多年来一直从事土力学及基础工程方面的教学与研究工作。

计算时,假定桩、土、承台均为无重、线弹性的均匀介质,不考虑桩、土和承台的初应力对群桩基础受荷特性的影响。采用三维八节点等参单元对群桩基础和土体进行离散。

为了减少单元数目,群桩基础有限元分析的区域大小及其网格的划分是在试算的基础上进行的,其确定原则是:群桩基础的应力与位移分布不随边界尺寸的增减而有明显变化;在高应力梯度区,单元应尽可能小,在边界附近,单元可以适当划大些。试算表明,群桩基础分析区域按下列原则取值可以满足精度要求:沿受荷方向其边界长度取  $L \geq 50d$ ,同时  $L \geq 2.5L_0$ ;垂直受荷方向其边界长度  $D$  取  $D \geq 35d$ ,同时  $D \geq 2L_0$ ;深度方向边界长度  $H$  应大于  $1.5L_0$  及  $25d$ ,其中  $L_0$  为桩长,  $d$  为桩径。计算分析典型网格见图 1( $d=1\text{ m}$ ,  $L_0=18d$ ,  $L=53d$ ,  $D=36d$ ,  $H=36d$ )。



(a) 立面图



(b) 平面图

图 1 有限元分析典型网格立面图和平面图

为了明确地阐明群桩基础水平受荷特性,本文进行了下列方案的三维有限元分析:

- ①  $1 \times 2$ ,  $1 \times 3$ ,  $1 \times 4$ ,  $1 \times 6$ ,  $3 \times 3$ ;

$d=1\text{ m}$ ;  $s=3d$ ;  $L=18d$ ;

② 纵向桩排:  $1 \times 3$ ;  $s=2d, 3d, 5d, 8d$ ;  $d=1\text{ m}$ ;  $L=18d$ ;

③ 纵向桩排:  $1 \times 3$ ;  $s=3d$ ;  $L=9d$ ;  $18d, 32d, 60d$ ;  $d=1\text{ m}$ ;

④ 纵向桩排:  $1 \times 3$ ;  $s=3d$ ;  $L=18d$ ;  $d=0.2\text{ m}, 0.6\text{ m}, 1.0\text{ m}, 2.0\text{ m}$ ;

⑤ 纵向桩排:  $1 \times 3$ ;  $s=3d$ ;  $L=18d$ ;  $d=1\text{ m}$ ;  $E_p/E_s=30\ 000, 10\ 000, 2\ 000, 1\ 000, 500, 100$ 。

以上各方案中,群桩基础均由混凝土方桩、承台和桩周土体组成,承台厚度为  $2\text{ m}$ ,桩和承台的弹性模量取  $3 \times 10^4\text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.167$ 。分析过程中还进行了与各方案相对应的单桩方案计算,以便更好地揭示群桩基础的工作性状。

## 2 群桩基础工作性状分析

就水平荷载群桩基础而言,其群桩效应受到桩距、桩数、桩径、桩长、桩的排列方式、所处土体土质参数和荷载性质等不同因素的影响。采用弹性理论分析群桩基础时,无法正确反映群桩基础中各桩的荷载分担比,但能够求得比较合理的群桩位移值,因此本文主要分析各种因素对群桩位移的影响。目前国内流行的做法是定义在相同荷载和工作条件下,群桩基础水平位移  $y_g$  与单桩位移值  $y_s$  之比为考察位移群桩效应大小的指标。群桩基础水平位移与单桩位移值之比越大,位移群桩效应愈显著;群桩基础水平位移与单桩位移值之比越小,位移群桩效应愈微弱;当该比值为  $1$  时,可视为无位移群桩效应。

### ① 桩距对位移群桩效应的影响

桩距的变化直接影响到群桩变形和承载力的大小,关系到群桩基础的可靠性和经济上的可行性。桩距的大小一般用距径比  $s/d$  来表示,距径比越大,群桩桩距越大。

图 2 为  $2$  桩、 $3$  桩和  $9$  桩群桩基础不同桩距时承台中心水平变位图,其中  $9$  桩基础为方形布置,其余为纵向桩排。从图中可以看

出,在一定的水平荷载作用下,群桩基础的位移随桩距的增大而减小。

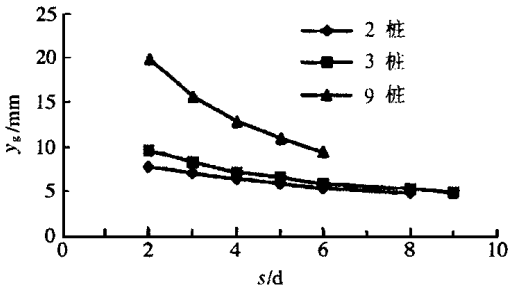


图2 桩距-群桩位移关系曲线

图3为相应群桩基础的桩距-位移群桩效应关系曲线,不难看出两图表现出相一致的规律。同时从以上两图中可以看出,当桩距接近或大于8倍桩径时,不同桩数的群桩基础水平位移趋于同一值(相应单桩位移值),也即位移群桩效应趋近于1。这与文献[3]的总结相一致,从数值方法的角度说明了取8倍桩径作为临界桩距是合理的。

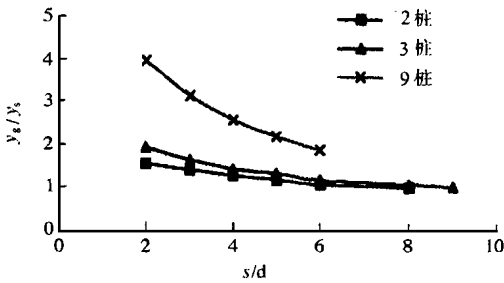


图3 桩距-位移群桩效应关系曲线

### ②桩数对位移群桩效应的影响

桩数的多少也直接影响到群桩基础的变形和承载力的大小,是判定群桩基础经济可行性的一个非常重要的因素。在其它条件一定的情况下,群桩基础桩数越多,其承载力也相应较大,但所需费用也越多。

从图2、图3中可以看出,在一定水平荷载作用下,桩数越多,群桩桩顶位移越大,位移群桩效应也愈显著。图4、图5分别是桩

距为3倍桩径不同桩数之纵向桩排的桩数-群桩位移关系曲线图和桩数-位移群桩效应关系曲线图。从两图中可以看出,对于纵向桩排来说,桩数与群桩位移近乎成双曲线关系,桩数越多,位移群桩效应愈明显;随着桩数的逐渐增加,位移群桩效应指标值的增长幅度逐渐减缓,最后趋于不变。这和国内外一些重要试验的成果相一致,我国的桥梁设计规范<sup>[5]</sup>中纵向桩排土反力折减系数的规定也与此不谋而合。

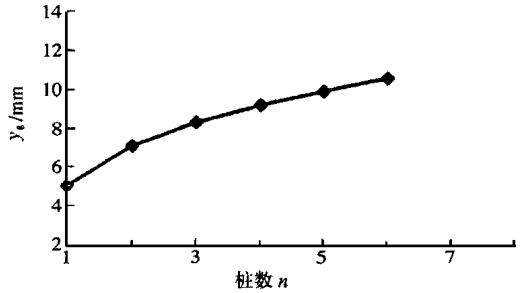


图4 桩数-群桩位移关系曲线图

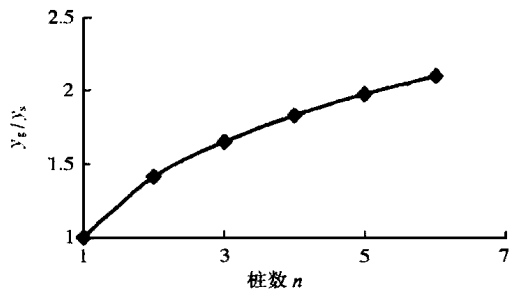


图5 桩数-位移群桩效应关系曲线图

### ③桩长对位移群桩效应的影响

图6为桩径1m、不同桩长的单桩基础(除说明外本文单桩桩顶均由承台嵌固)在一定水平荷载作用下的位移曲线图。从图6中可以看出,当桩的长径比小于一定数值时,随着桩长的增大,单桩位移值减少;而当桩长度大于一定数值后,随着桩长的增大,单桩位移值反而缓慢增大。图7系3桩纵向桩排(s/d=3)不同桩长时的群桩位移曲线图。

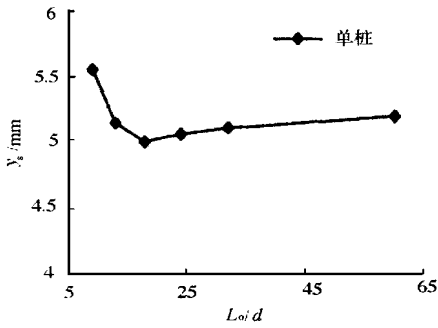


图 6 单桩位移-桩长关系曲线

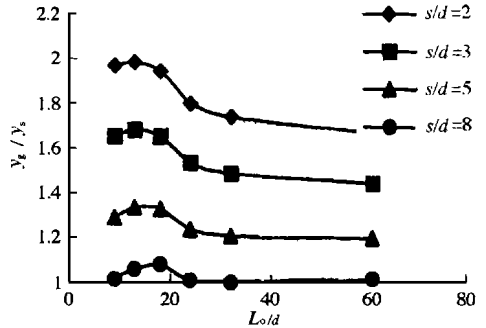


图 8 桩长-位移群桩效应关系曲线

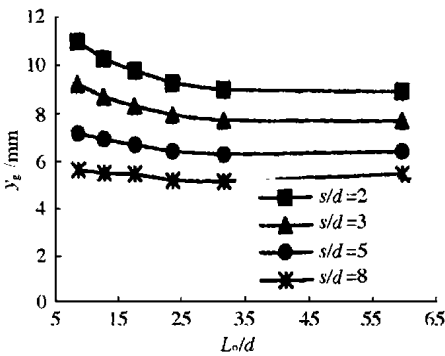


图 7 桩长-群桩位移关系曲线

从图 7 可以看出，群桩位移值与桩长之间表现出和单桩相同的规律。只是由于群桩基础中各桩之间的相互作用，其变化规律不如单桩明显。若将桩基础位移由减小转变为增大时的桩身长度定义为临界长度(或最优长度)，不难发现，群桩基础的临界长度大于相应单桩基础的临界长度值，且群桩基础的临界长度值由于群桩基础的相互作用而变得不易确定。图 8 为相应桩长-位移群桩效应曲线图。从图 8 可以看出，位移群桩效应随着桩身长度的增加而增强，达到一定程度后，又随桩身长度的增加而逐渐降低，最后趋于一稳定值。桩距越小，这一转变长度也愈小。

④ 桩径对位移群桩效应的影响

当设计水平荷载一定时，桩径越大，所需桩数越少。如何选择适当的桩径，是一个值得广泛重视的课题。

图 9 是长径比为 18，不同桩径的单桩基础位移曲线图。从图 9 可以看出，在同一水平荷载作用下，桩径越大，单桩位移越小，桩顶位移值与桩径近似成双曲线关系。图 10 为相应三桩纵向桩排(不同桩径时)的位移群桩效应曲线图。从图 10 可以看出，位移群桩效应指标值与桩径几乎没有关系。桩径变化时，位移群桩效应指标值几乎不变。这说明了在水平荷载群桩基础设计中可不计桩径变化对位移群桩效应的影响。

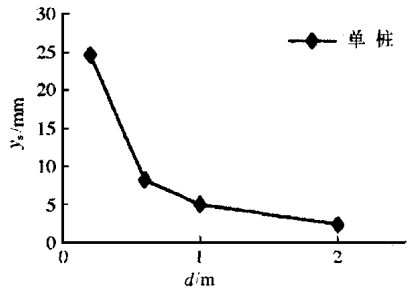


图 9 桩径-单桩位移关系曲线

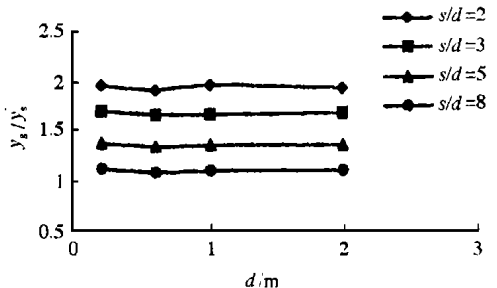


图 10 桩径-位移群桩效应关系曲线

### ⑤土质参数对位移群桩效应的影响

讨论土质条件对位移群桩效应的影响,就可以利用现有不同场地上的群桩基础作为设计时的参考,分析由于土质条件的不同而引起的群桩位移的变化,为群桩基础的正确设计提供可靠保证。

从图 11 中可以看出,在双对数坐标图上,单桩位移与土体模量之间成线性关系,土体模量越大,单桩位移越小。图 12 为 3 桩纵向桩排( $s/d=3$ )土体模量-位移群桩效应曲线图。从图 12 可以看出,位移群桩效应指标值先是随着土体模量的增加而降低,达到某一最低值后又缓慢增长。不过,和桩距对位移群桩效应的影响比较,土体模量对位移群桩效应的影响小得多。

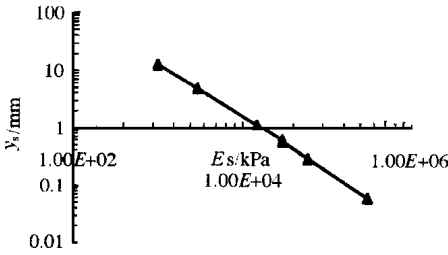


图 11 土体模量-单桩位移关系曲线

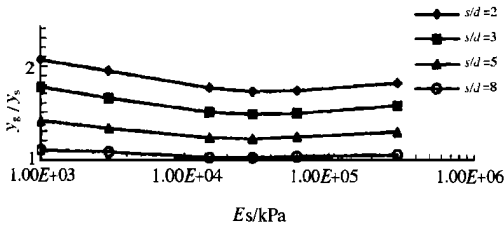


图 12 土体模量-位移群桩效应关系曲线

### 3 关于位移群桩效应的几点讨论

①在桩距、桩数、桩长、桩径、土质参数等因素中,桩距和桩数对位移群桩效应的影响显著,后者与位移群桩效应指标值近似成双曲线关系,而桩长、桩径、土质参数等因素则对群桩效应影响不大。

②桩长是影响桩基础可靠性和经济性的重要参数。三维有限元分析研究发现,不论是单桩基础还是群桩基础均存在着一个最优桩长的概念,在这个长度时,该桩基础位移值最小。水平荷载群桩基础设计时,最好能够选取此长度为设计桩长。

③对于桩基础设计而言,在一定的承载力和位移控制标准下,如何选择适当的桩径、桩数和桩距以实现群桩基础的优化设计是一个需要周密考虑的问题。应拟定几种不同的方案进行技术经济可行性对比,从中选择最佳方案以实现群桩基础的最优化设计。

### 参 考 文 献

- 1 Focht J A, Koch K J. Rational analysis of the lateral performance of offshore pile groups, 1973, OTC 1896; 701~708
- 2 Brown D A, Reese L C, O'Neill. Cyclic lateral loading of a large scale pile groups. J Geotech Engng, ASCE, 1987, 113(11); 1326~1343
- 3 杨克己,李启新,王福元. 水平力作用下群桩性状的研究. 岩土工程学报, 1990, 12(3); 42~52.
- 4 谢耀峰. 横向承载群桩性状及承载力研究. 岩土工程学报, 1996, 18(6); 39~45
- 5 铁道部第三勘测设计院主编. 铁路工程设计手册. 北京:中国铁道出版社, 1991

收稿日期:1999-06-21