

DOI: 10.11779/CJGE201411007

# 水平偏心荷载下斜桩群桩受力性状的离心机模型试验

顾 明<sup>1, 2</sup>, 陈仁朋<sup>1, 2\*</sup>, 孔令刚<sup>1, 2</sup>, 陈云敏<sup>1, 2</sup>, 张浙杭<sup>3</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 为研究斜桩群桩在水平偏心荷载下的受力性状, 在砂土中开展了一系列离心机模型试验, 着重对比了直桩群桩和斜桩群桩抵抗水平及偏心荷载的不同特性。详细介绍了模型试验的装置、方法以及内容。试验结果表明: 水平荷载偏心距大小对群桩水平承载力有一定的影响, 但是对群桩扭转承载力的影响较小。对于直桩群桩, 在试验范围内小偏心距(4.3倍桩径)加载对应的水平承载力大于零偏心距(即纯水平加载)及大偏心距(7.1倍桩径)加载的水平承载力。相同条件下, 斜桩群桩抵抗水平、偏心及扭转荷载的能力显著强于直桩群桩。水平偏心荷载下, 斜桩群桩中各基桩的桩顶水平位移相互差异较直桩群桩更大, 且该差异随偏心距的增加而增大; 在多向荷载的共同作用下, 基桩桩顶剪力与桩顶位移方向有所不同。水平荷载下斜桩群桩中的基桩轴力显著大于直桩群桩。斜桩群桩较好地发挥了基桩的轴向承载能力, 从而能够更有效地抵抗水平荷载。

**关键词:** 群桩; 斜桩; 水平荷载; 偏心荷载; 离心机试验

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)11-2018-07

作者简介: 顾 明(1985-), 男, 江苏常州人, 博士研究生, 主要从事桩基工程方面的研究。E-mail: chenrp@zju.edu.cn。

## Centrifugal model tests on batter pile groups under eccentric lateral loads

GU Ming<sup>1, 2</sup>, CHEN Ren-peng<sup>1, 2</sup>, KONG Ling-gang<sup>1, 2</sup>, CHEN Yun-min<sup>1, 2</sup>, ZHANG Zhe-hang<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and  
Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou  
310014, China)

**Abstract:** A series of centrifugal model tests are conducted to investigate the behavior of pile groups in sand subjected to eccentric lateral loads, especially the role of batter pile groups in resisting lateral or eccentric loads. The preparation and the procedure of the tests are described. The test results reveal that the eccentric distance of the lateral loads will affect the lateral response of the pile groups to some extent within the experimental range, but have little effect on the torsional behavior of the pile groups. The bearing capacity of the plumb pile group under lateral loads with eccentric distance of 4.3D is higher than that of zero and 7.1D. The capacity of the batter pile groups subjected to lateral, eccentric or torsional loads is much higher than that of the plumb pile groups. Under the eccentric loads, the differences between the lateral displacements of individual piles within the batter pile groups are larger than those in the plumb pile groups, and they also increase with the eccentric distance of the lateral loads. The shear forces and lateral displacements at head of individual piles are different in direction. The axial forces of individual piles within the batter pile groups are dramatically larger than those in the plumb pile groups under the same load condition, which illustrates that batter pile groups can more effectively resist the lateral loads than the plumb pile groups by taking full advantages of the axial capacity of individual piles.

**Key words:** pile group; batter pile; lateral load; eccentric load; centrifugal model test

## 0 引言

近年来, 随着海洋经济的高速发展, 海上桥梁、钻井平台、风机及输电塔等大型结构不断涌现。群桩作为一种常见的基础形式, 在类似的工程中得到越来越广泛的应用。实践中, 为了更有效地抵抗水平荷载, 群桩中有时可能会根据需要部分设置甚至全部采用斜

桩基桩, 从而形成斜桩群桩。另一方面, 风、波浪、水流乃至船舶撞击等水平荷载在某些情况下可能以偏心的形式作用在群桩基础上, 从而引起复杂的桩土响

基金项目: 国家自然科学基金项目(51225804, U1234204); 浙江省电力公司科技项目

收稿日期: 2014-01-02

\*通讯作者

应<sup>[1]</sup>。因此, 研究斜桩群桩在水平偏心荷载下的受力性状具有重要的工程意义。

Hu 等<sup>[2]</sup>通过单桩水平偏心加载的离心机模型试验, 发现扭矩将显著降低单桩的水平承载力。陈仁朋等<sup>[3]</sup>、王书行<sup>[4]</sup>针对水平偏心受荷的  $3 \times 3$  群桩  $1g$  大比尺模型试验研究以及 Zhang 等<sup>[5]</sup>和 Kong 等<sup>[6-8]</sup>的群桩扭转离心机试验研究表明: 群桩中各基桩承受的水平和扭转荷载之间存在明显的耦合效应; 荷载偏心矩对群桩水平承载能力有着较为显著的影响; 群桩中各基桩内力表现出较大的差异, 且随着偏心距增加, 差异进一步加大; 基桩的水平剪力与扭转反力对抵抗群桩扭矩都发挥了重要的作用。Gu 等<sup>[1]</sup>开展了  $1 \times 2$  群桩水平偏心受荷的模型试验研究, 并计算讨论了偏心荷载对不同基桩布置形式的群桩承载特性的影响。贺炜等<sup>[9]</sup>针对群桩受扭问题提出了一个简化的分析模型。陈仁朋等<sup>[10]</sup>建立了考虑水平和扭转荷载共同作用的群桩非线性计算模型并利用牛顿迭代法进行了求解。然而, 考虑斜桩影响的群桩水平偏心受荷研究在文献中鲜有报道。

本文开展了砂土中群桩基础承受水平及偏心荷载的系列离心机模型试验, 着重对比研究了直桩群桩与斜桩群桩在不同荷载条件下的变形及承载特性, 总结分析了斜桩基桩在群桩抵抗水平及偏心荷载过程中所发挥的作用。

## 1 试验概况

### 1.1 试验系统

本文试验在浙江大学 ZJU-400 土工离心机中进行 (如图 1)。该离心机采用电机驱动, 最大容量达  $400 \text{ g} \cdot \text{t}$ , 有效臂长  $4.5 \text{ m}$ , 可以开展  $150g$  加速度以下的静态试验和  $100g$  加速度以下的动态试验, 并且配备了相应的刚性模型箱、层状剪切模型箱以及振动台系统, 是研究岩土工程、水利工程和环境工程等领域复杂问题的重要试验平台<sup>[11]</sup>。



图 1 ZJU-400 离心机

Fig. 1 Centrifuge ZJU-400

### 1.2 模型桩制作

本文离心机试验的模型桩采用直径  $14 \text{ mm}$ 、壁厚  $1.5 \text{ mm}$  的铝合金管进行制作。综合考虑离心机配套模型箱的大小, 并依据桩基抗弯刚度的相似原则, 确定离心机试验加速度为  $127.2g$ , 即模型比尺为  $127.2$ 。模型群桩中直桩桩长  $737 \text{ mm}$ , 对应原型桩长  $93.75 \text{ m}$ ; 斜桩沿承台中心轴对称布置, 斜度  $1:5$ , 桩长  $752 \text{ mm}$ , 对应原型为  $95.65 \text{ m}$ 。各桩端设置有锥形桩尖以形成闭口桩。为量测基桩内力, 各桩沿桩身布置有不同数量的弯矩、轴力及扭矩应变片, 其中土面以上部分布置弯矩应变片两道以及扭矩、轴力应变片各一道。

群桩承台由铝块和相应的连接构件组成, 外部尺寸为  $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  (图 2)。群桩基桩采用  $2 \times 2$  的布置形式, 桩中心间距 (对于斜桩群桩, 为承台底面处的桩中心间距) 取 3 倍桩径, 即  $42 \text{ mm}$ 。在承台一侧设有加载臂以便于施加水平偏心荷载。承台与基桩之间采用穿孔螺栓连接, 可以提供较强的桩顶约束。组装完成后的斜桩群桩承台构造如图 2 所示。

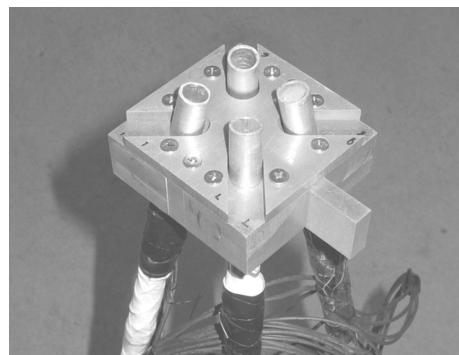


图 2 斜桩群桩承台

Fig. 2 Pile cap of batter pile groups

### 1.3 模型土制备

试验专门制作了尺寸为  $850 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$  的模型箱用于制备模型地基土。模型箱壁厚  $10 \text{ mm}$ , 外表面设置了加劲肋以增加整体刚度, 设计可同时容纳 2 个模型群桩进行加载试验。

模型地基土选用相对密实度为  $55\%$  的福建标准砂, 采用落砂法分层制备, 填筑高度为  $640 \text{ mm}$ 。该砂土平均粒径为  $0.17 \text{ mm}$ , 土粒比重为  $2.633$ , 最大干密度为  $1.638 \text{ g/cm}^3$ , 最小干密度为  $1.349 \text{ g/cm}^3$ 。从而可以计算得到试验土样的密度为  $1.494 \text{ g/cm}^3$ , 每箱土质量为  $569 \text{ kg}$ 。

根据事先标定的砂土密实度曲线 (图 3), 可以确定相对密实度为  $55\%$  时对应的落砂高度为  $40 \text{ cm}$ 。相应的制备过程如图 4 所示。各组试验砂土制备完成后称重计算得到的实际平均密实度在  $51\% \sim 56\%$  之间, 证明该套土体制备方法具有较好的可控性及稳定性。

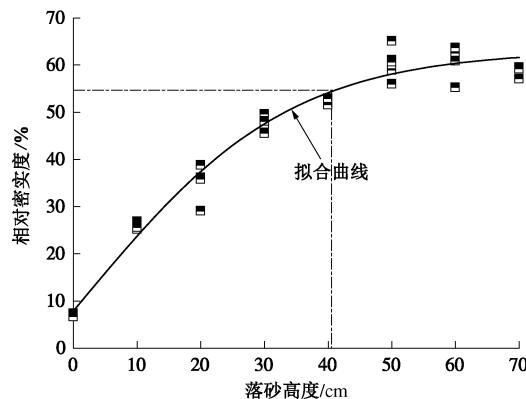


图 3 砂土密实度标定曲线

Fig. 3 Calibration curve of relative density of sand



图 4 落雨法制备砂土

Fig. 4 Preparation of sand

#### 1.4 模型桩压桩

砂土制备完成后, 采用专门设计的压桩装置(图 5)将模型桩压入地基土中。该套装置具有压桩角度可调, 速度可控的特点, 可精确实现任意倾斜角度斜桩的压桩作业。实际操作中, 对于直桩群桩, 将各基桩与承台连接成整体后可利用该装置一次性压入土中; 而对于斜桩群桩, 则需先将各基桩按照设计倾斜角依次压入土中至指定深度后, 再与承台拼装连接成整体, 最后采用高强度螺栓固定承台各构件以保证其足够的刚度(如图 2)。

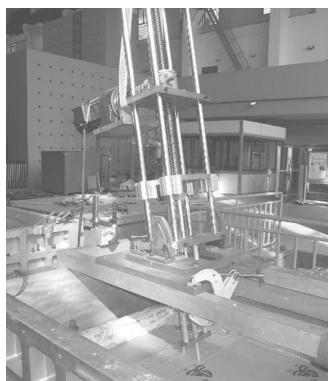


图 5 压桩装置

Fig. 5 Devices for pile driving

图 6 给出了模型群桩的剖面布置示意图。如图 6 所示, 模型桩垂直方向入土深度为 548 mm(对应原型 69.71 m), 土面以上自由长度为 189 mm(对应原型 24.04 m), 且直桩群桩与斜桩群桩中各基桩的桩端均处在同一水平高度。

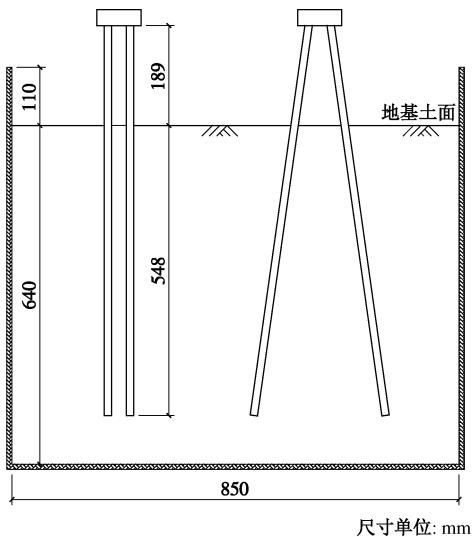


图 6 群桩试验剖面布置

Fig. 6 Profile of pile groups in tests

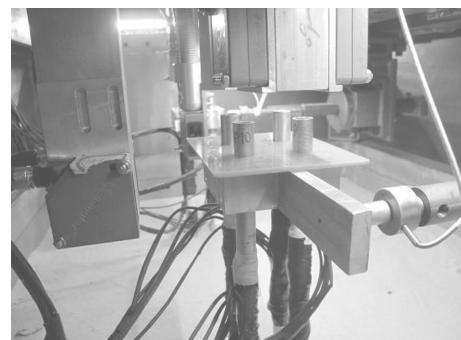
#### 1.5 加载及测量装置

本文群桩试验均以位移控制的方式采用低速电机进行加载。试验前对电机进行了调试测速, 试验过程中控制作动杆的加载速率约为 0.1 mm/min。

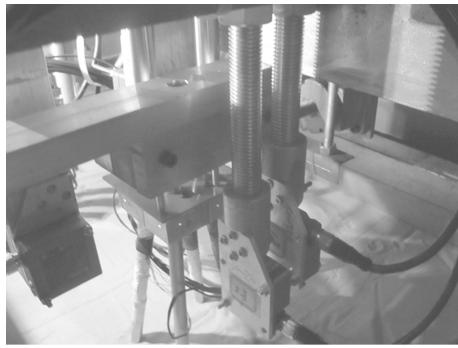
在承台周围布置有多只激光传感器以量测承台在各个方向的位移, 在电机水平加载杆前端设置轴力传感器测量水平荷载的大小, 如图 7 所示。包括桩身应变片在内, 所有量测数据均由 ZJU-400 离心机配套动态数采系统实时采集。

## 2 试验内容

本文试验分多组进行, 内容包括不同的群桩形式及加载类型。各组试验的布置情况大体相似, 即在一个模型箱中同时布置两个群桩, 单桩试验则视情况安排在模型箱中群桩试验影响范围以外的区域进行。



(a) 直桩群桩加载试验



(b) 斜桩群桩加载试验

图 7 试验加载装置及传感器布置

Fig. 7 Loading devices and measuring system in tests

具体试验内容及安排如表 1 所示。表中相同批次的试验即表示在同一箱模型土中完成。对于  $2 \times 2$  直桩群桩, 在两箱土中各进行了一次无偏心的水平加载试验 (#3 和 #7), 并分别开展了 60 mm (约  $4.3D$ ) 和 100 mm (约  $7.1D$ ) 两种偏心距的水平偏心加载试验。对于  $2 \times 2$  斜桩群桩, 则分别开展了无偏心水平加载和 60 mm 水平偏心加载试验。

表 1 模型试验汇总

Table 1 Summary of model tests

试验项目	荷载类型	编号	批次
直桩-单桩	竖向 (下压+上拔)	#1	A 直桩-单桩
直桩-单桩	水平	#2	C 直桩-单桩
直桩-群桩	水平	#3	A 直桩-群桩
斜桩-群桩	水平	#4	A 斜桩-群桩
直桩-群桩	水平偏心 $e=60$ mm	#5	B 直桩-群桩
斜桩-群桩	水平偏心 $e=60$ mm	#6	B 斜桩-群桩
直桩-群桩	水平	#7	C 直桩-群桩
直桩-群桩	水平偏心 $e=100$ mm	#8	C 直桩-群桩

### 3 试验结果

为了讨论方便, 定义群桩中各基桩编号、荷载偏心距以及相应的坐标系如图 8 所示。下文中除特别说明外, 所有数据均换算成原型单位进行讨论。

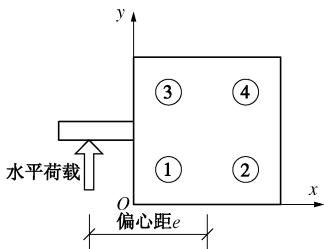


图 8 群桩加载示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pile groups

#### 3.1 单桩竖向承载力

单桩竖向加载试验获得的荷载-位移曲线如图 9 所示。从而根据桩基规范<sup>[12-13]</sup>, 取曲线发生明显陡降

的起始点对应的荷载值, 确定本文单桩的下压和上拔极限承载力分别为 83.5, 33.5 MN。

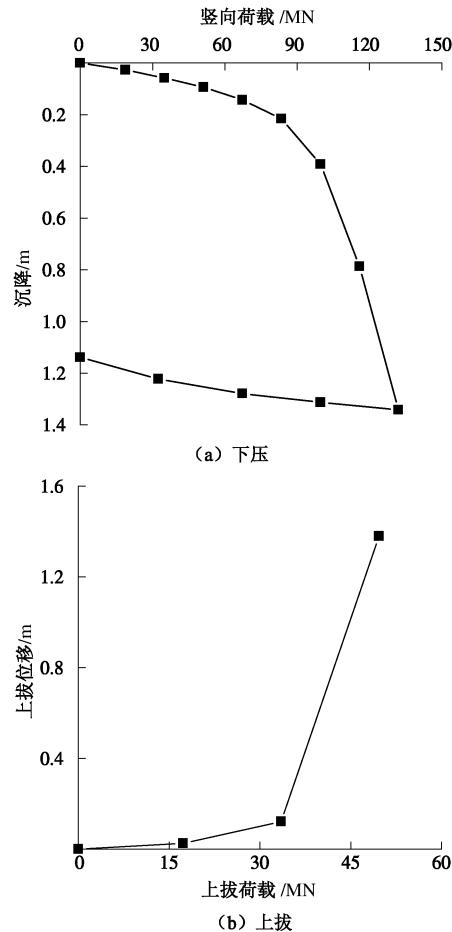


图 9 单桩竖向加载试验结果

Fig. 9 Results of vertical loading tests on a single pile

#### 3.2 群桩荷载-位移关系

图 10 给出了  $2 \times 2$  直桩群桩在水平及偏心荷载下的荷载-位移曲线。图中不同批次的两组水平加载试验的结果吻合较好, 表明本文试验具有较好的可重复性, 因而各组试验的结果可以进行相互比较。

从图 10 中可以看到, 对应相同的承台水平位移, 小偏心 (偏心距  $e=60$  mm, 即  $4.3D$ ) 加载的荷载大于无偏心 ( $e=0$  mm) 加载, 而大偏心 ( $e=100$  mm, 即  $7.1D$ ) 加载的荷载大小近似等于无偏心加载。这表明在本文试验的加载范围内, 荷载偏心对群桩的水平承载力具有一定的影响, 其影响程度与偏心距的大小相关。笔者认为, 试验中小偏心加载对应的群桩水平承载力大于无偏心加载的结果, 可能与砂土的剪胀特性有关。在一定的扭矩/荷载比 (即荷载偏心距) 条件下, 基桩的扭转运动可能导致桩土界面附近的砂土发生剪胀, 从而在一定程度上提高了基桩的水平承载力。此外, 不同批次的试验中, 地基砂土密实度的轻微差异也可能对结果产生一定的影响。具体原因还有待进一步的研究证实。

需要说明的是, 本文试验施加的荷载水平相对较低, 群桩实际处于正常受荷状态, 基桩未发生轴向承载力破坏。而王书行<sup>[4]</sup>通过  $3 \times 3$  群桩的  $1g$  大比尺模型试验指出, 在承载极限状态下, 无偏心、小偏心 ( $6D$ ) 和大偏心 ( $11D$ ) 水平加载对应的群桩承载力是依次递减的。因此可以推断, 偏心距对群桩水平承载力的影响还与荷载水平, 即群桩的实际受荷状态有关。

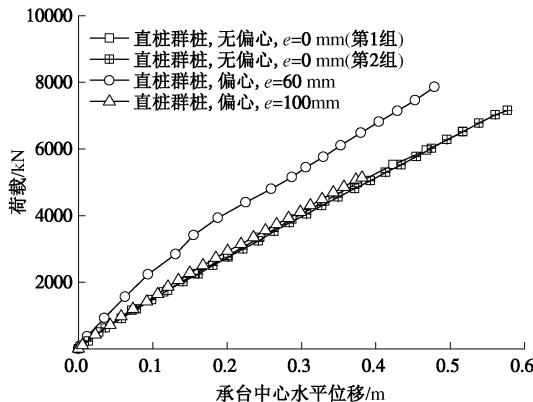


图 10 不同荷载下直桩群桩荷载 - 位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of plumb pile groups

直桩群桩和斜桩群桩在水平及偏心荷载下的位移对比如图 11 所示。由图可知, 无论对于水平加载还是偏心加载, 斜桩群桩的承载力较直桩群桩均有非常明显的提高。相同位移下, 前者对应的荷载大小约为后者的 3 倍, 说明斜桩群桩抵抗水平或偏心荷载的能力要显著强于直桩群桩。此外, 对于斜桩群桩, 小偏心 ( $4.3D$ ) 荷载下的水平承载力同样略大于水平加载, 该结论与图 10 中直桩群桩的试验结果一致。

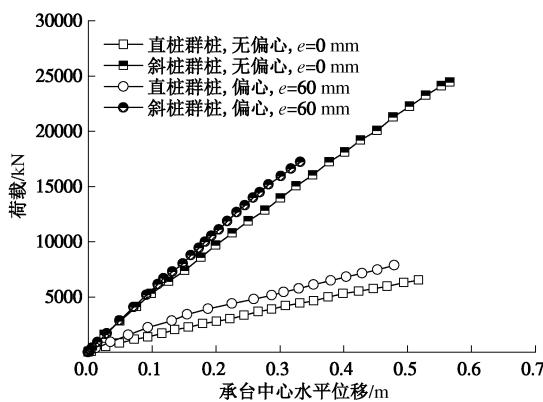


图 11 不同荷载下直桩及斜桩群桩荷载 - 位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of plumb and batter pile groups

图 12 揭示了水平及偏心荷载下  $2 \times 2$  群桩的扭转变形规律。图中不同荷载偏心距条件下直桩群桩的扭矩-转角曲线基本相同。这可以说明群桩的扭转刚度与荷载偏心距的大小无明显关系。然而, 相同条件下斜桩群桩的扭转刚度显著大于直桩群桩, 表明斜桩群桩

抵抗扭转荷载的能力也要优于直桩群桩。

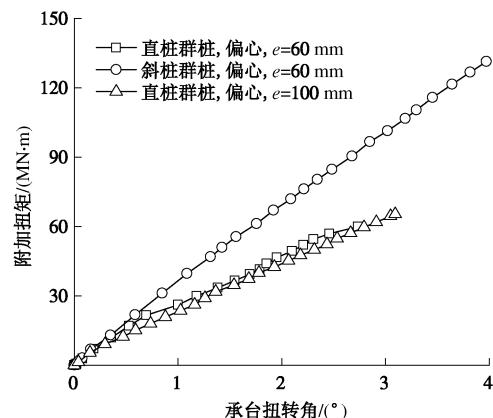


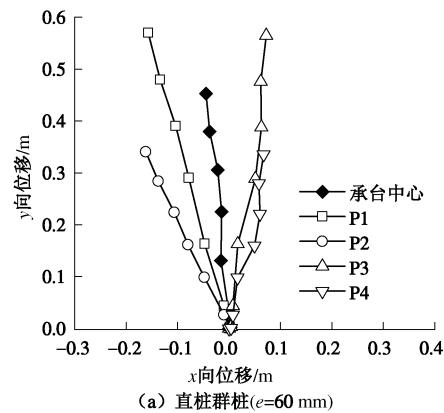
图 12 水平偏心荷载下群桩扭矩 - 转角曲线

Fig. 12 Torque-twist angle curves of pile groups

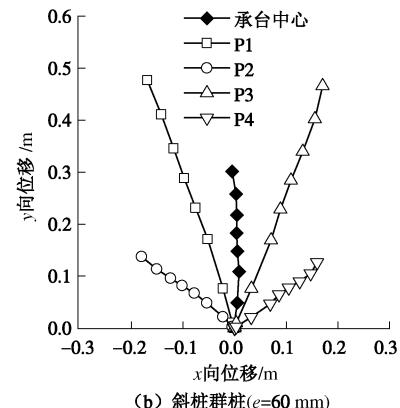
### 3.3 基桩位移

根据承台周围激光传感器的测量数据, 可以计算得到各组偏心加载试验中群桩承台中心及各基桩桩顶的水平位移路径, 如图 13 所示。图 13 中横纵坐标的比尺相同, 因而可以直观地判断各基桩的位移方向, 各数据点与坐标原点的距离即表示了相应的桩顶位移大小。对于群桩无偏心水平加载试验, 各基桩的桩顶位移显然与荷载方向相同, 故不再给出。

从图 13 中可看到, 各群桩中 P1 和 P3 桩的  $y$  向位移大致相同, 且明显大于 P2 和 P4 桩的  $y$  向位移; P1 和 P2 桩的  $x$  向位移相同, 且与 P3 和 P4 桩的  $x$  向位移方向相反。该结果实质上是承台发生刚性位移的表现。



(a) 直桩群桩 ( $e=60$  mm)



(b) 斜桩群桩 ( $e=60$  mm)

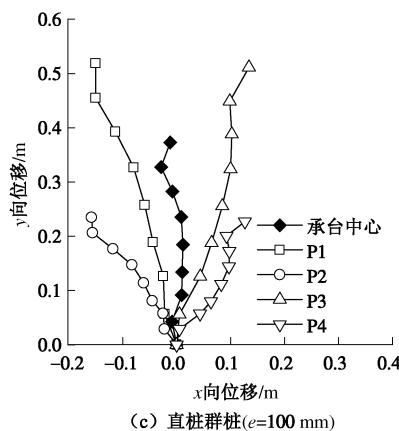


图 13 水平偏心荷载下群桩基桩桩顶位移

Fig. 13 Displacements at head of individual piles within pile groups under eccentric lateral loads

对比图 13 (a)、(b) 可以发现, 水平偏心荷载下斜桩群桩中各基桩的位移方向与荷载方向的夹角较直桩群桩更大, 且斜桩群桩中各基桩的位移相互表现出更大的差异性。而继续对比图 13 (a)、(c) 则可以发现, 偏心距的增加也会在一定程度上导致各基桩位移差异的加大。

此外, 虽然各组试验中承台中心的水平位移路径与荷载方向基本一致, 但斜桩群桩 (图 13 (b)) 在  $x$  向的位移分量几乎为零, 显著小于相同条件下直桩群桩的  $x$  向位移 (图 13 (a))。这说明按轴对称的形式布置斜桩群桩, 可以有效地减小群桩承台在各个方向的水平位移。

### 3.4 基桩内力

从本文试验中可以发现, 水平偏心荷载下群桩中各基桩的桩顶剪力方向与荷载方向不完全相同。以直桩群桩的大偏心加载 ( $7.1D$ ) 试验为例, 图 14 给出了各基桩桩顶的剪力发展情况。

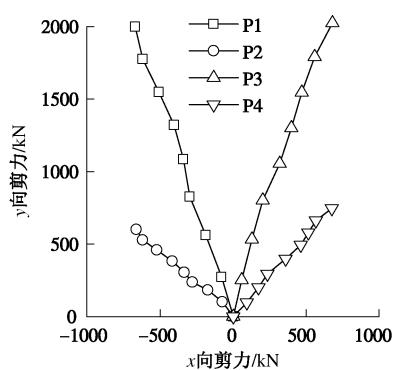
图 14 水平偏心荷载下直桩群桩基桩剪力 ( $e=100$  mm)

Fig. 14 Shear forces at head of individual piles within plumb pile groups under eccentric lateral load ( $e=100$  mm)

首先, 由图 14 可见, 各桩桩头剪力的大小及方向相互均存在较大的差异。其中, 靠近加载点的 P1 及

P3 桩剪力显著大于 P2 及 P4 桩, 与此同时各桩剪力的  $x$  向分量仍然保持平衡。其次, 和图 13 (c) 进行比较可以发现, 对于群桩中的任意基桩, 其桩头位移和剪力的方向也不完全一致, 即两者存在一定的夹角。这是由于承台具有较强的约束作用, 使群桩中的各基桩同时受到多个方向的剪力和弯矩作用, 实际桩头的荷载状态十分复杂, 从而导致基桩在不同方向的水平刚度有着显著的区别。此外, 群桩偏心扭转运动引起的桩-土-桩相互作用也是造成该现象的重要原因之一<sup>[14]</sup>。

图 15 给出了直桩和斜桩群桩承受水平荷载时, P3 桩的桩顶轴向压力。由图 15 可见, 相同水平位移情况下, 斜桩群桩中 P3 桩的轴力约为直桩群桩的 2.5 倍。而对比图 9 可以发现, 在试验加载过程中, P3 桩的实测轴力远小于单桩竖向极限承载力, 这说明未发生基桩的轴向承载力破坏, 群桩始终处于正常受荷状态。

事实上, 斜桩群桩的水平承载力较直桩群桩提升明显, 主要原因就在于斜桩基桩能够通过轴向受荷来更有效地分担部分水平荷载。

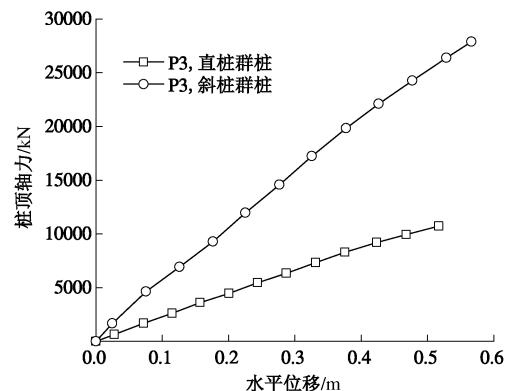


图 15 水平加载群桩中#3 基桩桩头轴力

Fig. 15 Axial forces at head of P3 within pile groups subjected to lateral loads

## 4 结 论

本文主要介绍了砂土中直桩及斜桩群桩基础承受水平偏心荷载的系列离心机模型试验, 详细描述了试验的准备过程及试验内容, 分析讨论了各组群桩的整体变形以及基桩内力等试验结果。本文介绍的土样制备及模型试验方法具有较好的可重复性, 各组试验结果可以有效地进行比较, 得到以下 4 点结论。

(1) 荷载偏心会在一定程度上影响群桩的水平承载性状, 其影响程度与偏心距的大小以及施加的荷载水平 (即群桩的受荷状态) 有关。在本文试验范围内, 荷载偏心距为  $4.3D$  时对应的直桩及斜桩群桩水平承载力大于无偏心水平加载的承载力。

(2) 相同条件下, 斜桩群桩的水平承载力高于直桩群桩, 表明斜桩群桩能够更有效地抵抗水平及偏心荷载。荷载偏心距不会明显改变群桩的扭转承载力, 但斜桩群桩的抗扭转能力显著强于直桩群桩。

(3) 水平偏心荷载下, 斜桩群桩中各基桩的桩顶位移差异较直桩群桩更大; 同时偏心距越大, 基桩的相互位移差异也越大; 按照轴对称的形式布置斜桩基桩可以有效减小群桩在各个方向上的水平位移。

(4) 水平偏心荷载下, 群桩中各基桩处在极为复杂的荷载状态, 各向水平刚度的差异导致桩顶剪力方向与位移方向有所不同。斜桩群桩中的基桩轴力远大于直桩群桩, 表明斜桩群桩可以通过基桩轴向受荷来更有效地抵抗水平荷载。

## 参考文献:

- [1] GU M, KONG L G, CHEN R P, et al. Response of  $1 \times 2$  pile group under eccentric lateral loading[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **57**: 114 – 121.
- [2] HU Z H, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Influence of torque on lateral capacity of drilled shafts in sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(4): 456 – 464.
- [3] 陈仁朋, 王书行, 孔令刚, 等. 不同水平偏心距下群桩内力变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(3): 603 – 609. (CHEN Ren-peng, WANG Shu-hang, KONG Ling-gang. Test investigation on distribution of internal forces in pile groups under different lateral eccentricities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(3): 603 – 609. (in Chinese))
- [4] 王书行. 水平偏心荷载下群桩受荷性状模型试验及设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (WANG Shu-hang. Model tests investigation and design method of the behavior of the pile group under eccentrically lateral loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [5] ZHANG L M, KONG L G. Centrifuge modeling of torsional response of piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(5): 500 – 515.
- [6] KONG L G, ZHANG L M. Centrifuge modeling of torsionally loaded pile groups[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(11): 1374 – 1384.
- [7] KONG L G, ZHANG L M. Experimental study of interaction and coupling effects in pile groups subjected to torsion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(7): 1006 – 1017.
- [8] KONG L G, ZHANG L M. Nonlinear analysis of torsionally loaded pile groups[J]. Soils and Foundations, 2009, **49**(2): 275 – 286.
- [9] 贺 炜, 陈仁朋, 孔令刚, 等. 群桩受扭工作性状及非线性计算理论研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(5): 751 – 756. (HE Wei, CHEN Ren-peng, KONG Ling-gang, et al. Bearing behaviors and nonlinear theory of pile groups subjected to torque[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(5): 751 – 756. (in Chinese))
- [10] 陈仁朋, 郑 中, 孔令刚, 等. 水平及扭转荷载作用下群桩基础受力分析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1463 – 1469. (CHEN Ren-peng, ZHENG Zhong, KONG Ling-gang, et al. Analysis method for pile groups subjected to lateral and torsional loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1463 – 1469. (in Chinese))
- [11] 陈云敏, 韩 超, 凌道盛, 等. ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1887 – 1894. (CHEN Yun-min, HAN Chao, LING Dao-sheng, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1887 – 1894. (in Chinese))
- [12] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [13] JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 2003. (JGJ 106—2003 Technical code for testing of building foundation piles[S]. 2003. (in Chinese))
- [14] 姜丽红. 不同桩头约束及水平偏心荷载下桩基础响应分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (JIANG Li-hong. Responses of pile foundations with different pile-head restraint and under eccentric lateral loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))