

# 砂土中水平受荷斜桩性状模型试验研究

曹卫平<sup>1,2</sup>, 赵 呈<sup>1</sup>, 葛 欣<sup>3</sup>, 赵 敏<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 中铁二局第三工程有限公司, 四川 成都 610031; 4. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 为了解斜桩的水平承载变形性状及荷载传递性状, 本文在砂土地基中开展了 2 组斜桩的水平承载模型试验, 研究了桩身倾角及长径比对斜桩水平承载力的影响, 分析了水平荷载作用下斜桩桩身轴力、弯矩、剪力及摩阻力的分布特征。试验结果表明: 桩长相同时, 正斜桩的水平承载力最大, 负斜桩的水平承载力最小, 直桩的水平承载力居中。水平荷载作用下, 正斜桩桩身全长受拉, 负斜桩桩身上部区段受压, 下部区段受拉, 不论正斜桩还是负斜桩, 桩身轴力最大值均在桩顶下一定深度的截面。承受相同的水平荷载时, 正斜桩的弯矩最小, 负斜桩的弯矩最大, 直桩弯矩居中, 桩较长时, 桩身弯矩较小。正斜桩的剪力最小, 直桩居中, 负斜桩最大, 不论正斜桩还是负斜桩, 剪力最大值均在桩顶截面, 桩顶下一定深度处还存在极值剪力。正负斜桩桩身上部区段均存在负摩阻力, 下部区段为正摩阻力。

**关键词:** 斜桩; 模型试验; 桩身倾角; 长径比; 水平承载力

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0168-09

## Model tests on behaviors of horizontally loaded single batter piles in sand

CAO Weiping<sup>1</sup>, ZHAO Cheng<sup>1</sup>, GE Xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Min<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Lab. of Geotechnical & Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China.

3. China Railway ERJU 3st Engineering Co. Ltd., Chengdu 610031, China;

4. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Two series of model tests were conducted to investigate the behaviors of single batter piles embedded in sand under horizontal load, the effect of inclined angle and pile length to shaft diameter ratio( $L/D$ ) on the lateral capacity, the axial force, the bending moment, the shear force and the skin friction of batter piles was analyzed. The results show that the horizontal bearing capacity of the positive inclined pile is the biggest; the negative inclined pile has the smallest capacity, while the vertical pile's capacity falls in between the former and the latter. The horizontally loaded positive inclined piles will be tensioned over its full length, while compressed over upper segment and tensioned over lower segment for negative inclined piles. The maximum axial force, for either the positive or the negative batter piles doesn't appear at pile head but at a position below the pile head. The bending moments induced in the vertical piles by horizontal load are bigger than that in the positive batter piles but smaller than that in the negative batter piles; and the longer the length of the pile, the smaller the bending moments. A maximum value and an extreme value of shear force will be caused on the pile head and a position below the pile head respectively for vertical piles as well as for batter piles. The shear force for the positive batter piles is the smallest while the biggest for the negative batter piles and the intermediate for the vertical ones. The horizontal load will cause negative skin friction on the upper shaft, irrespective of positive or negative battered.

**Key words:** batter pile; model test; inclined angle; pile length to shaft diameter ratio; horizontal bearing capacity

由于斜桩基础能将部分水平荷载转化为轴向荷载使其水平承载力显著提高<sup>[1]</sup>, 因此近年来斜桩被广泛应用于主要承受风、波浪等水平荷载的建(构)筑物, 如海上钻井平台、桥梁码头、高压输电线塔等。水平荷载作用下, 斜桩工作性状在很

大程度上取决于桩与桩周土的变形特性, 且其破坏机理十分复杂<sup>[2]</sup>。因此本文开展水平荷载作用下斜桩承载变形性状的研究对揭示其破坏机理和拓展进一步的工程应用具有指导意义。

缩尺试验与现场试验是斜桩水平承载性状研

究的主要试验方法. 龚健等<sup>[3]</sup>、郑刚等<sup>[4]</sup>对斜桩基础进行试验研究, 结果表明斜桩抵抗水平荷载的能力明显高于直桩. Zhang 等<sup>[1]</sup>、Meyerhof 等<sup>[5]</sup>、Manoppo 等<sup>[6]</sup>、Hazzar 等<sup>[7]</sup>研究发现桩身倾角对斜桩水平承载力有显著影响, 且桩身倾斜方向与水平荷载方向一致时斜桩水平承载力最大. 顾明等<sup>[8]</sup>对群桩开展了模型试验研究, 指出斜群桩抵抗水平偏心荷载的能力明显高于直群桩. Subramanian 等<sup>[9]</sup>通过水平动力试验, 发现共振区水平位移峰值随桩身斜角的增大而减小, 且荷载越大这种效果越显著. Murad 等<sup>[10]</sup>通过斜群桩原位试验, 采用高阶多项式拟合法分析试验结果, 得到了斜桩群桩周土的  $p$ - $y$  曲线.

另外, 数值分析法也常用于斜桩水平承载变形性状的研究. Aminfar 等<sup>[11]</sup>通过有限元分析法, 发现桩身倾角是近海斜桩水平承载特性的主要影响因素之一. 杨剑等<sup>[12]</sup>、Jeyapriya 等<sup>[13]</sup>通过数值分析法, 指出桩身倾斜方向与水平受荷方向一致时斜桩基础能提供更高的水平抗力. Dubey 等<sup>[14]</sup>采用隐式动力有限元分析法, 发现中等及以上振动荷载作用下斜桩的水平承载特性明显高于直桩. Xie 等<sup>[15]</sup>通过三维有限元分析法, 推导并提出了单桩和含斜桩高桩码头水平荷载与水平位移的关系式.

斜桩水平承载特性也常用  $p$ - $y$  曲线和理论分析法进行研究. Reese 等<sup>[16]</sup>、Rajashree 等<sup>[17]</sup>基于  $p$ - $y$  曲线法, 得到了斜桩水平承载力的解析表达式. 凌道盛等<sup>[18]</sup>通过理论分析, 对 Reese 等<sup>[16]</sup>提出的直桩  $p$ - $y$  曲线进行了修正, 得到了斜桩的  $p$ - $y$  曲线. Su 等<sup>[19]</sup>考虑了非线性桩土相互作用, 提出了求解水平受荷桩非线性弹塑性  $p$ - $y$  曲线模型. 袁廉华等<sup>[20]</sup>基于破坏理论, 得到了轴向荷载作用下斜桩水平承载力的计算公式. 吕凡任<sup>[21]</sup>基于弹性理论, 给出了倾斜荷载作用下斜桩桩身响应的理论解答.

上述分析表明, 目前国内外对斜桩所进行的研究倾向于水平承载力的影响因素与计算方法. 但工程设计时, 不仅需要确定斜桩水平承载力, 还必须确定桩身内力, 以便配筋计算与截面设计, 同时还需掌握桩身倾角、长径比对斜桩水平承载力、桩身内力的影响规律, 然而, 这些正是目前斜桩研究工作中所欠缺的内容. 本文开展了桩顶自由的斜桩室内模型试验, 分析了桩身倾角、长径比的变化对斜桩水平承载性状的影响, 对比了斜桩与直桩承载力的大小, 研究了水平荷载作用下斜桩桩身内力及桩侧摩擦阻力的分布特征.

1 试验设计

1.1 试验装置

本文斜桩水平加载试验在模型箱中进行, 模型箱主骨架由角钢和钢片通过焊接制作而成, 长、宽、高分别为 1.47、0.8、2.9 m, 模型箱四周壁板采用厚度为 12 mm 的钢化玻璃拼装而成, 拼装高度由地基土深度确定, 模型试验示意图如图 1 所示.

本文试验所用设备及其用途如下:

- (1)行程 50 mm 的液压千斤顶, 反力梁: 施加水平荷载;
- (2)轴力传感器及液晶显示仪: 量测水平荷载的大小;
- (3) DDJK-80 静态电阻应变仪: 采集桩身应变;
- (4)百分表: 测读桩顶水平和竖向位移.

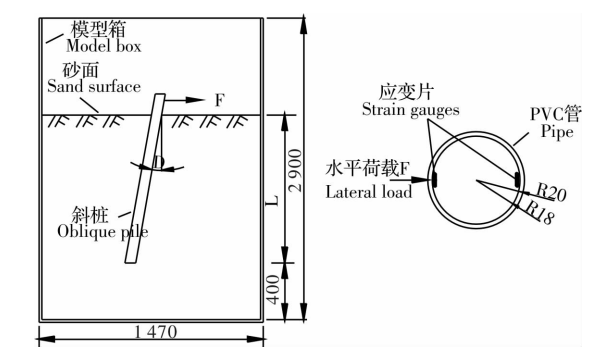


图 1 模型箱及应变片布置示意图(单位: mm)  
Fig. 1 Test setup and the arrangement of strain gauges  
(Unit: mm)

1.2 试验方案

本文设计了以桩身倾角为变量的组内试验, 旨在得出不同桩身倾斜角度条件下斜桩桩身的响应. 同时, 为了得出长径比对斜桩水平承载性状的影响, 本文设计了以长径比为变量的组间试验, 试验方案见表 1.

表 1 试验方案  
Tab. 1 Test program

试验组号	桩身倾角 $\alpha/^\circ$	桩身直径 $D/\text{m}$	桩长 $L/\text{m}$	长径比
T1	$-20^\circ$	40	1 200	$L/D=30$
	$-10^\circ$	40	1 200	
	$0^\circ$	40	1 200	
	$10^\circ$	40	1 200	
	$20^\circ$	40	1 200	

续表 1

试验组号	桩身倾角 $\alpha/^\circ$	桩身直径 $D/\text{m}$	桩长 $L/\text{m}$	长径比
T2	-20°	40	2 000	$L/D=50$
	-10°	40	2 000	
	0°	40	2 000	
	10°	40	2 000	
	20°	40	2 000	

### 1.3 试验材料

模型桩制作采用外径  $D=40\text{ mm}$ 、内径  $d=36\text{ mm}$  的硬质 PVC 管。将管材沿纵轴线方向对称剖开,在剖开的两个管片内壁同一截面最大拉、压应变处分别粘贴一道应变片,如图 1 所示。由于水平荷载作用下桩身变形主要集中在桩身上部区段<sup>[22]</sup>,因此应变片的布设采用上密下疏的方式。两组试验中,在砂面处布设一对应变片,砂顶面以下以间距 40 mm 布设 6 对应变片,T1 中再以间距 80、100、160、50 mm 分别布设 3、2、3、1 (共 9 对)对应变片;T2 中以间距 80、100、150、300、230、50 mm 分别布设 1、2、2、3、1、1 (共 10 对)对应变片。

应变片布设完成后,沿两管片剖开截面涂强力胶后合拢,并沿桩长以 50 mm 间距绑扎直径为 1 mm 的细铁丝。模型桩弹性模量  $E_p$  由简支梁理论反算得到,即根据简支梁在集中荷载作用下四分点的挠度值计算,本文求得  $E_p=3.51\text{ GPa}$ 。为增大桩身表面摩擦系数,在管壁外用胶水均匀粘贴试验用砂。在桩顶粘贴一个矩形钢化玻璃板以便使用百分表测量桩顶位移。两组试验中桩顶露出砂面高度均为 100 mm,加载点距砂顶面距离均为 70 mm,桩端采用铝帽封堵。

试验选用洁净、干燥的中粗河砂模拟地基土,砂土的孔隙比  $e_{\min}=0.331$ ,  $e_{\max}=0.739$ ,界限粒径  $d_{10}=0.145\text{ mm}$ 、 $d_{30}=0.370\text{ mm}$ 、 $d_{60}=0.920\text{ mm}$ ,不均匀系数  $C_u=6.345$ ,曲率系数  $C_c=1.026$ 。

### 1.4 试验步骤

按预设倾斜角度固定模型桩,采用“落雨法”分层填筑砂土,每层虚铺厚度约 20 cm,铺筑完成后采用轻型振动仪分区振动密实,每次振动时间为 2 min,共 2 次,以确保两组试验中砂土的密实度基本保持一致。试验测得两组试验砂土干密度  $\rho_d$  分别为 1.794、1.816  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,平均干密度为 1.798  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,内摩擦角  $\varphi=41.9^\circ$ ,相对密实度

$D_r=0.62$ ,为中密砂土。

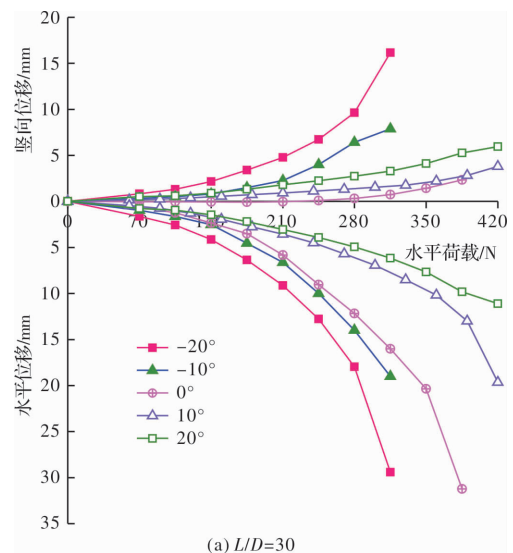
试验过程中桩顶水平荷载作用方向始终处于与桩身剖开平面垂直的平面内,以避免水平荷载使桩身产生扭转效应。分级施加水平荷载,并按规范<sup>[23]</sup>规定,各级水平荷载施加完成后,在第一个小时内第 5、15、30、45、60 分钟时分别测读一次数据,之后以 30 分钟间隔测读数据,当连续两次出现一小时内的桩顶水平位移不超过 0.1 mm 时,施加下一级荷载,出现桩身折断、桩顶水平位移超过 30 mm 或桩顶水平荷载-水平位移曲线有明显拐点等现象时即终止加载。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 斜桩水平承载特性随桩身倾角、长径比的变化规律

图 2 给出了试验过程中斜桩桩顶位移随水平荷载增加的变化曲线。需要说明的是,正斜桩、直桩及负斜桩的桩顶水平位移均与水平荷载同向,正斜桩及直桩的桩顶竖向位移向下,而负斜桩的桩顶竖向位移向上,为表示方便且易于对比,图中的桩顶竖向位移均为其绝对值。不难看出,水平荷载作用下,桩顶自由的斜桩会同时产生水平位移和竖向位移,且以水平位移为主,竖向位移较小且主要受桩身倾斜方向和倾斜角度控制。从图 2 可以看出,水平荷载不变时,长径比的变化可改变,对正斜桩、直桩、负斜桩桩顶水平位移依次增大的趋势。同时,可以看出正斜桩桩身倾斜角度越大,其水平位移越小,而负斜桩则正好相反。这说明正斜桩的水平承载力大于直桩和负斜桩,且水平荷载桩身倾角越大,水平承载力差异越显著。

迄今为止,桩基规范<sup>[23]</sup>没有给出斜桩水平承

(a)  $L/D=30$

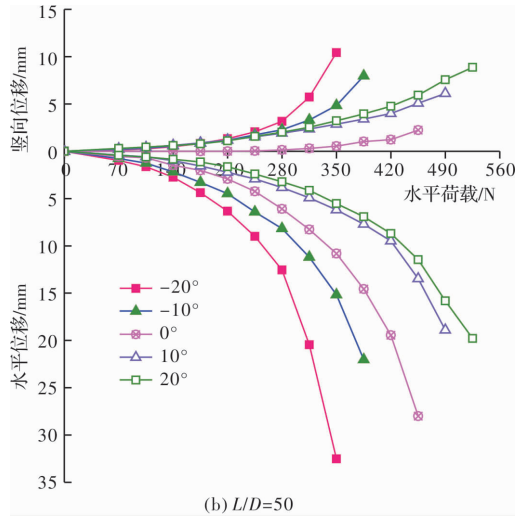


图2 水平荷载-位移曲线

Fig. 2 Curves of the horizontal load and displacement of piles 载力的确定方法. 因此本文参照直桩的规定<sup>[23]</sup>, 取水平荷载位移曲线上位移为 10 mm 所对应荷载的 0.75 倍为斜桩水平承载力特征值. 显然, 该方法并未考虑竖向位移对斜桩水平承载力的影响, 但试验结果表明, 当桩顶水平位移达到 10 mm 时, 竖向位移约为 2 mm, 因此本文忽略了竖向位移的影响.

水平承载力特征值与桩身倾角、长径比的关系如图 3 所示. 不难看出, 长径比保持不变时, 桩身倾角从  $-20^\circ$  变化到  $0^\circ$  再到  $20^\circ$ , 水平承载力特征值得到了明显的提高. 如长径比为 30 的  $20^\circ$  斜桩水平承载力 291 N 比  $0^\circ$  直桩 192 N 提高了 52%, 比  $-20^\circ$  斜桩 163 N 提高了 79%. 同时, 可以看出长径比较大的桩其水平承载力较高. 如桩身倾斜  $10^\circ$ , 长径比为 50 比 30 的斜桩水平承载力提高了 19%.

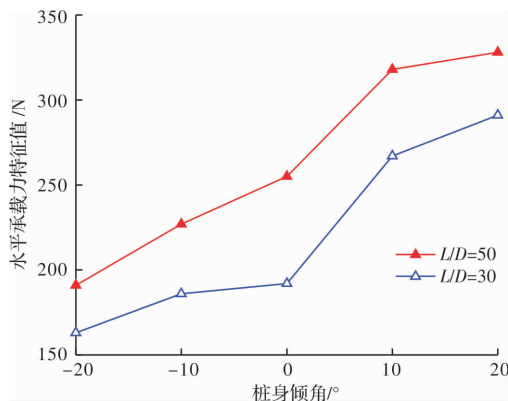


图3 斜桩及直桩水平承载力

Fig. 3 The horizontally bearing capacity of piles

将斜桩桩顶所受水平荷载  $F$  沿桩轴线及其垂线方向的分量  $F_1$ 、 $F_2$  绘于图 4. 对于正斜桩, 荷

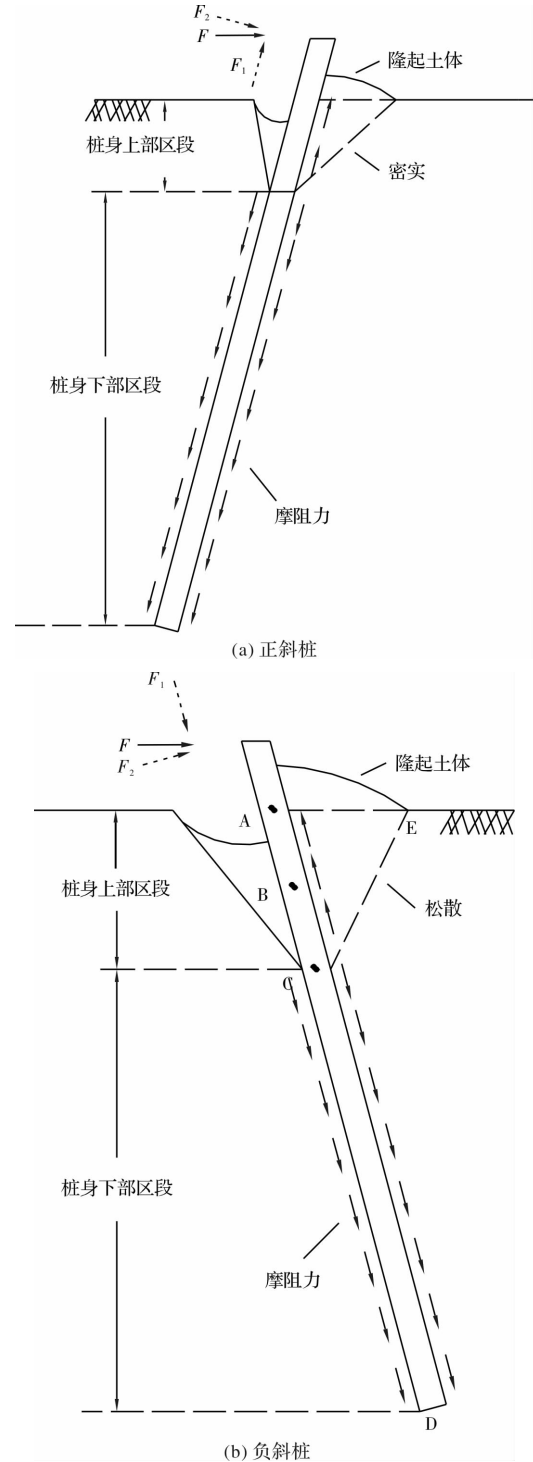


图4 斜桩桩顶荷载及摩阻力示意图

Fig. 4 The pile head load and the skin friction

载  $F_2$  促使正斜桩挤压右侧的土体, 使其变得越来越密实, 强度得到提高, 因此提供给桩的抗力较大, 桩顶水平位移相应较小, 所以正斜桩的水平承载力较大. 而荷载  $F_2$  使得负斜桩右侧的土体上抬隆起, 变得松散, 强度降低, 抵抗变形的能力减弱, 桩顶水平位移就较大, 因此负斜桩的水平承载力较小. 一方面直桩对桩侧土的挤密效果不如正斜桩, 另一方面直桩对桩侧土体的松散化程

度小于负斜桩,因此直桩水平承载力居于二者之间。

## 2.2 斜桩桩身轴力随桩身倾角、长径比的变化规律

桩顶水平荷载沿斜桩轴线的分力  $F_1$  会使正斜桩受拉,负斜桩受压,因此斜桩横截面上存在轴力,本文规定斜桩轴力以拉力为正、以压力为负。按下式计算  $Q_i$ ,即

$$Q_i = \bar{\varepsilon}_i \cdot E_p \cdot A \quad (1)$$

式中:  $Q_i$  表示截面  $i$  处的轴力,  $\bar{\varepsilon}_i$  表示截面  $i$  处的平均应变;  $E_p$  表示弹性模量;  $A$  为桩身横截面积。

将  $F=210\text{ N}$  时斜桩轴力与深度的关系曲线绘于图 5。显然,正斜桩桩身轴力不受长径比与桩身倾角的影响沿桩身全长为正,即水平受荷正斜桩全长受拉,但最大拉力并未出现在桩顶截面,而是出现在桩顶下一定深度的截面上。长径比  $L/D=30、50$  的正斜桩,其最大轴力分别在相对深度  $z/L=0.13、0.08$  处,该深度约为  $4D$  ( $D$  为桩身直径)。如长径比  $L/D=30$  的  $10^\circ$  及  $20^\circ$  正斜桩,其最大轴力分别是桩顶轴力的 3.82 倍、2.30 倍。

图 4a 给出了水平受荷正斜桩桩身摩阻力的分布示意。水平荷载分力  $F_2$  使得桩身上部区段发生向右的弯曲变形,因此桩身右侧上部土体受到挤压而产生隆起变形,产生相对于桩身向上的滑动位移,随着桩顶水平位移的增大,桩身上部区段的土压力逐渐演化为被动土压力,且其沿桩身轴线的分力(桩侧摩阻力)方向向上,因此桩身上部区段内,桩身轴力随深度逐渐增加。桩身下部区段弯曲变形较小,以轴向变形为主,桩身摩阻力沿桩轴线向下,因此桩身轴力向下逐渐减小。所以斜桩桩身最大轴力值不在桩顶而在桩顶下一定深度。

与正斜桩全长受拉不同,负斜桩桩顶下有一段桩身受压,随深度增加负斜桩轴力迅速减小为零并转变为拉力,桩身拉力达到最大值后随深度增大又逐渐减小并接近于零。长径比  $L/D=30、50$  的负斜桩,其最大轴力分别在相对深度  $z/L=0.2、0.12$  处,该深度约为  $6D$ 。长径比为 30 的  $-10^\circ$  及  $-20^\circ$  斜桩,轴力最大值分别是其桩顶轴力的 2.42 倍、1.67 倍,长径比为 50 的  $-10^\circ$  及  $-20^\circ$  斜桩,轴力最大值分别是其桩顶轴力的 1.58 倍、1.07 倍。图 4b 给出了水平受荷负斜桩桩身摩阻力的分布示意。水平荷载分力  $F_2$  使负斜桩挤压右侧 ACE 区域土体并使其向右上方隆起,即桩顶上部

承受被动土压力,且其沿桩轴线的分量(即摩阻力)沿桩轴向上,所以负斜桩桩身上部区段截面压力随着深度逐渐减小,在桩身 B 点,AB 段的摩阻力恰好抵消了桩顶压力  $F_1$ ,因此 B 点轴力为零。BC 段摩阻力沿桩轴向上,因此 BC 段轴力表现为拉力且随深度增大而增大, C 点处取最大值。由于 BC 段桩身受拉,所以 CD 段桩相对于土向上位移,因此该段桩身摩阻力向下,所以从 C 点开始,桩身轴力逐渐减小。因此负斜桩轴力出现了如图 5b 所示变化规律。需要说明的是,这里的桩身 B、C 点仅为定性说明负斜桩轴力分布特征而设。另外,从图 5 可以看出,不论正斜桩还是负斜桩,长径比  $L/D=50$  的斜桩的轴力明显小于长径比  $L/D=30$  的斜桩,即较长斜桩的轴力较小。

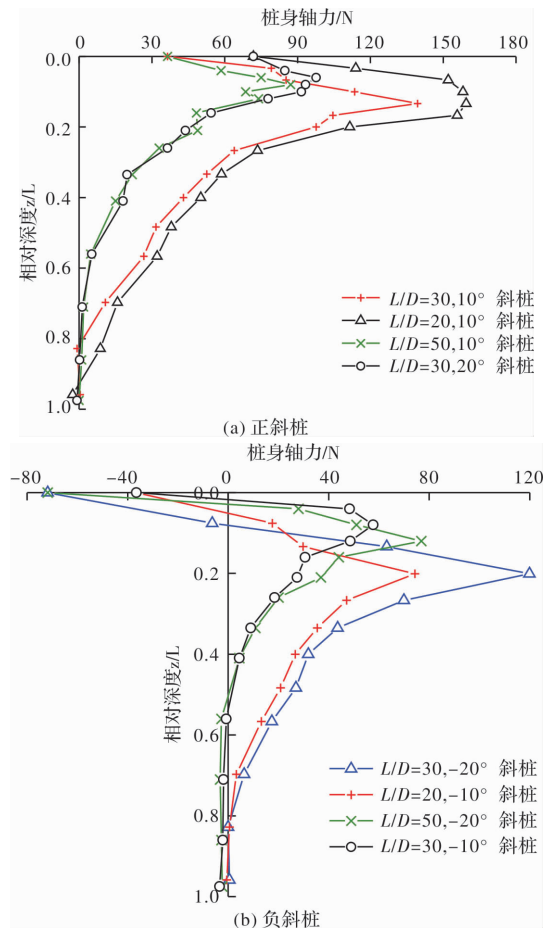


图 5 斜桩轴力沿深度的分布

Fig. 5 The distribution of the axial force of batter piles

## 3.3 桩身弯矩随桩身倾角、长径比的变化规律

水平荷载作用下,桩身各截面的弯矩  $M_i$  可按式计算,即

$$M_i = \frac{E_p \cdot I \cdot \Delta \varepsilon_i}{d} \quad (2)$$

式中:  $E_p \cdot I$  表示截面抗弯刚度;  $\Delta \varepsilon_i$  表示截面  $i$  处拉、压应变差值;  $d$  表示桩身内径将  $F=210\text{ N}$



时桩身弯矩与深度的关系曲线绘于图 6。可以看出, 相同荷载、相同长径比条件下, 负斜桩桩身弯矩值最大, 正斜桩最小。同时, 随桩身倾斜角度的增加负斜桩弯矩最大值增大, 而正斜桩则呈相反的趋势。

正斜桩桩顶荷载分量  $F_2$  (见图 4a) 使得桩侧土压密, 正斜桩倾角越大, 桩侧土的挤密效果就越好, 因而桩侧土能提供给桩身更大的抗力, 使得桩身弯曲变形减小, 桩身弯矩相应减小。负斜桩桩顶荷载分量  $F_2$  (见图 4b) 使得桩侧土上抬而变得

松散, 负斜桩倾角越大, 桩侧土松散化程度增加, 所以桩侧土抗力减小, 使得桩身弯矩因桩身弯曲变形增大而增大。由于直桩对桩侧土的挤密效果不如正斜桩, 同时直桩对桩侧土体的松散化程度小于负斜桩, 因而直桩桩身弯矩值介于二者之间。

将  $F=210\text{ N}$  时桩身最大弯矩值列于表 2。不难看出, 正斜桩比直桩最大弯矩值减小幅度可达 10%。另外, 相同条件下长径比较大的桩桩身最大弯矩值较小。

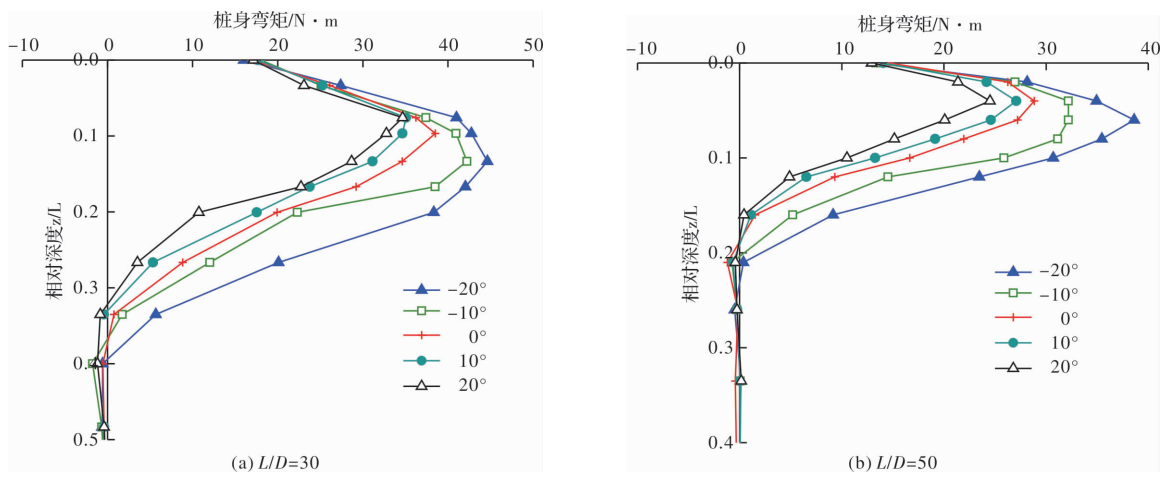


图 6 桩身弯矩沿深度的分布  
Fig. 6 The distribution of the bending moment of piles

表 2 桩身最大弯矩  
Tab. 2 The maximum bending moment of piles

长径比 $L/D$	桩身最大弯矩/(N·m)				
	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$
	斜桩	斜桩	直桩	斜桩	斜桩
30	45.0 (16.7%)	44.6 (15.8%)	38.5	35.1 (-8.8%)	34.7 (-9.8%)
50	36.6 (35.1%)	32.2 (18.8%)	27.1	25.9 (-4.4%)	24.5 (-9.6%)

注: 括号中数字为斜桩弯矩比直桩弯矩减小或增加的百分比

从图 6 还可以看出, 桩身弯矩仅分布在桩顶下长度有限的桩长范围内, 弯矩最大值在桩顶下一定深度处。长径比  $L/D=30$  的斜桩桩身弯矩主要分布在相对深度  $z/L=0.40$  区段内, 该区段长度约为  $12D$ , 而长径比  $L/D=50$  的斜桩桩身弯矩主要分布在相对深度  $z/L=0.25$  区段内, 长度约为  $12.5D$ 。桩顶荷载分力  $F_2$  (见图 4) 会使桩身发生弯曲变形, 根据弹性地基梁理论, 横向荷载引起的地基梁弯曲变形位移模式仅与桩土相对刚度有关。本文各试验采用的模型桩、砂土均相同, 并采用了相

同的方法填筑砂土, 这样能保证各试验填入模型槽的砂土物理力学性质基本相同, 即各试验的桩土相对刚度相近, 因此无论长径比及桩身倾角的大小, 水平荷载使斜桩发生弯曲变形的长度基本相同。

2.4 桩身剪力随桩身倾角、长径比的变化规律

水平荷载作用下, 桩身横截面产生剪力, 桩顶处剪力等于水平荷载沿与桩轴线垂直方向的分量, 其余各横截面的剪力按下式计算, 即

$$F_{si} = \frac{dM_i}{dx}$$

(3)

式中,  $F_{si}$ 、 $M_i$ 分别为第*i*截面桩身剪力及弯矩。

将  $F=210\text{ N}$  时桩身剪力与深度的关系曲线绘于图 7。可以看出, 不论长径比及桩身倾角大小, 桩身最大剪力均发生于桩顶, 桩顶下一定深度处还出现极值剪力。如  $L/D=30$  的  $20^\circ$ 、 $-20^\circ$  斜桩的极值剪力分别为  $-148.5\text{ N}$ 、 $-185.8\text{ N}$ 。相同荷载、相同长径比条件下, 负斜桩桩身剪力最大, 正斜桩最小。同时, 随桩身倾斜角度的增加负斜桩剪力增大, 而正斜桩剪力减小。可见采用正斜桩抵抗水平荷载能有效减小桩身剪力。从图 7 还可以看出, 长径比  $L/D=30$ 、 $50$  的斜桩, 其剪力主要分布在相对深度  $z/L=0.26$ 、 $0.2$  以上桩身区段, 该区段长度分别约为  $8D$ 、 $10D$ 。可见水平荷载作用下斜桩剪力主要分布在桩身上部区段。

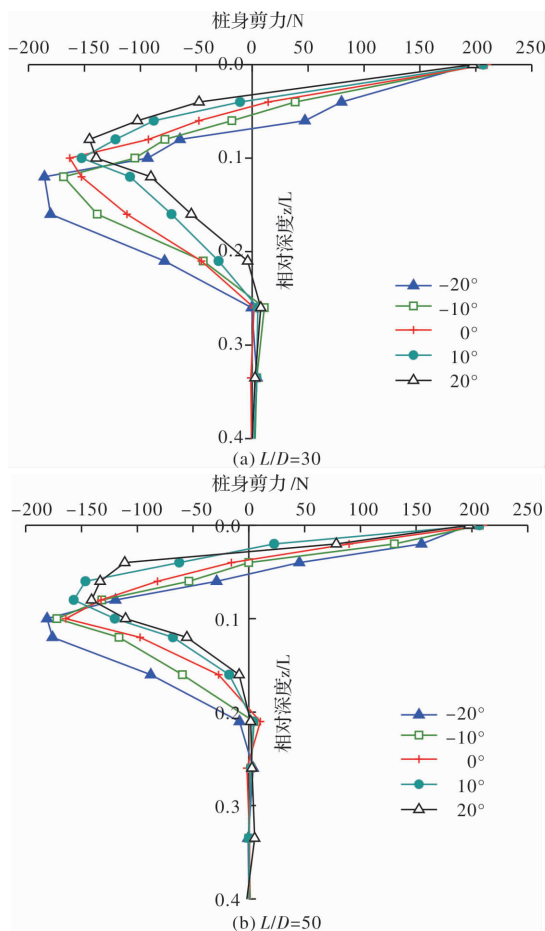


图 7 桩身剪力沿深度的分布

Fig. 7 The distribution of the shearing force of piles

分析图 6 及图 7 也可以发现, 当桩长相同时, 正斜桩最大弯矩、极值剪力所在位置深度最浅, 直桩的稍深, 而负斜桩的最深。根据弹性地基梁理论<sup>[24]</sup>, 横向荷载作用下地基梁的弯矩及剪力最大值在荷载作用点处, 而第一极值弯矩及剪力所在位置与横向荷载作用点的距离仅与桩土相对刚度有关, 桩土相对刚度越大, 该距离越大。本文

各试验所用模型桩材料相同, 砂土及填筑方法相同, 因此在未施加桩顶水平荷载前, 桩土相对刚度基本相同, 但施加水平荷载后, 正斜桩向斜下方挤压桩侧土使其变得更密实, 承载力因土抗力增大而提高, 负斜桩承载力则因桩侧土松散化程度提高、土抗力减小而被削弱。相应的, 正斜桩桩身弯矩最大值及极值剪力所在深度最浅, 负斜桩的最深, 直桩居中。以上仅是定性地对图 6 及图 7 表现出的现象进行了解释, 但这也具体地说明了正斜桩、负斜桩与桩侧土之间相互作用的差异, 同时也佐证了 Meyerhof 等<sup>[5]</sup>认为正斜桩桩侧土的极限抗力大于负斜桩的观点。

## 2.5 桩侧摩阻力随桩身倾角、长径比的变化规律

水平荷载作用下, 桩身上部区段一侧桩挤压土体向右位移, 导致桩体右侧土压力由静止土压力向被动土压力发展, 相反另一侧桩土脱离, 因而桩侧土压力由静止土压力向主动土压力转变而后完全脱开<sup>[25]</sup>。因而相同深度处斜桩桩身两侧摩阻力因土压力的不同而相差较大, 使得桩侧摩阻力的变化难以准确描述。同时, 实际工程中倾向于关注摩阻力的总和。因此本文采用桩侧平均摩阻力  $q_{si}$  来描述摩阻力随深度的变化关系。按下式计算  $q_{si}$ , 即

$$q_{si} = \frac{Q_{i-1} - Q_i}{ul_i} \quad (4)$$

式中,  $Q_{i-1}$ 、 $Q_i$  表示第  $i-1$ 、 $i$  截面处桩身轴力,  $u$  表示横截面周长,  $li$  表示第  $i-1$  与  $i$  截面之间的距离。本文规定斜桩桩侧平均摩阻力以沿桩纵轴线斜向上为负, 斜向下为正。

将  $F=210\text{ N}$  时桩侧平均摩阻力与深度的关系曲线绘于图 8。可以看出, 斜桩桩侧摩阻力主要集中在桩身上部区段, 这是因为桩顶水平荷载分量  $F_1$ 、 $F_2$  分别使斜桩发生沿轴线的拔出(对正斜桩)或压入(对负斜桩)以及弯曲变形主要发生于桩身上部区段。另外, 正斜桩及负斜桩的上部区段均出现了负摩阻力, 这是斜桩挤压桩侧土使其向上隆起的结果, 上文已详细分析。

从图 8 不难看出, 长径比相同时, 斜桩桩侧平均摩阻力沿深度的分布形式及大小基本相同, 即桩身倾角对摩阻力的影响较小。同时, 可以看出长径比较小时, 摩阻力值较大。这是因为长径比小表示桩较短, 水平承载力低, 因而在相同水平荷载作用下沿轴线的拔出或压入以及弯曲变形较大, 引起桩土之间相对位移与接触压力增大。

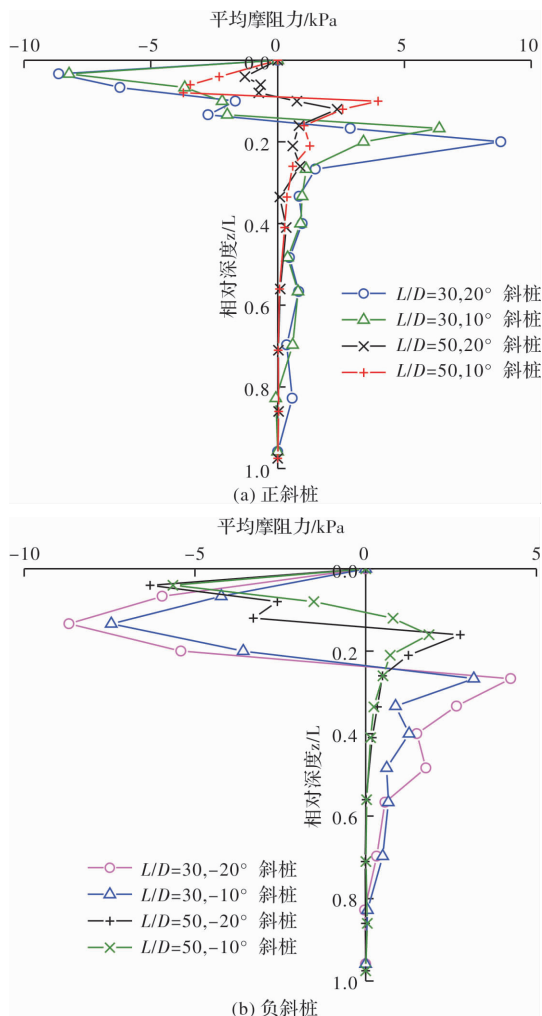


图8 斜桩摩阻力沿深度的分布

Fig. 8 The distribution of the skin friction

### 3 结论

本文通过模型试验研究了砂土中水平受荷斜桩的承载变形性状,分析了桩身倾角及长径比对斜桩水平承载性状的影响,主要结论如下:

(1)同等条件下,正斜桩水平承载力最高,且增大长径比和桩身倾角能进一步提高其水平承载力。

(2)与正斜桩桩身轴力沿桩长范围受拉不同的是负斜桩在其上部区段出现了压力,但斜桩轴力最大值均出现在桩顶下一定深度处。对于本文试验,正、负斜桩轴力最大值在桩顶下的深度分别为 $4D$ 及 $6D$ 。正斜桩轴力最大值可达其桩顶轴力的3.82倍。

(3)水平受荷斜桩的弯矩主要分布在桩身上部区段,该区段约为桩顶以下 $12D$ 范围内。同等条件下,正斜桩桩身弯矩小于负斜桩,且最大弯矩值减小幅度可达10%。

(4)水平荷载作用下,正/负斜桩桩身上部区

段因桩侧土隆起而产生了负摩阻力,增大长径比较可有效减小摩阻力。

(5)需要说明的是,本文是在中密砂土中进行了桩顶自由条件下的斜桩水平承载试验,没有考虑水平荷载对斜桩的扭转效应等复杂情况,对于粘性土中、桩顶位移边界条件更复杂的斜桩水平承载性状还需要进行更多的试验来研究。

### 参考文献 References

- [1] ZHANG Limin, MICHAEL C McVay, PETER W Lai. Centrifuge modelling of laterally loaded single battered piles in sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1074-1084.
- [2] MEYERHOF G G. The uplift capacity of foundations under oblique loads [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, 10(1):64-70.
- [3] 龚健,陈仁朋,陈云敏,等. 微型桩原型水平荷载试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3541-3541.  
GONG Jian, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Prototype testing study on micropiles under lateral loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20):3541-3546.
- [4] 郑刚,白若虚. 倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究 [J]. 岩土工程学报, 2010(S1):39-45.  
ZHENG Gang, BAI Ruoxu. Behaviors study of inclined single row contiguous retaining piles under horizontal force [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S1):39-45.
- [5] MEYERHOF G G, YALCIN A S. Behavior of flexible batter piles under inclined loads in layered soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30 (2): 247-256.
- [6] MANOPPO Fabian Johanes. Behavior of the ultimate bearing capacity of single flexible batter pile under horizontal loads in homogeneous sand [J], Dinamika Teknik Sipil, 2010,10 (2): 116-119.
- [7] LASSAAD Hazzar, HUSSEIN Mahmoud N, KARRAY Mourad. Numerical investigation of the lateral response of battered pile foundations [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 11 (4): 376-392.
- [8] 顾明,陈仁朋,孔令刚,等. 水平偏心荷载下斜桩群桩受力性状的离心机模型试验 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11):2018-2024.  
GU Ming, CHEN Renpeng, KONG Linggang, et al. Centrifugal model tests on batter pile groups under eccentric lateral loads [J]. Chinese Journal of Geotechni-



- cal Engineering, 2014, 36(11): 2018-2024.
- [9] SUBRAMANIAN R M, BOOMINATHAN A. Dynamic experimental studies on lateral behaviour of batter piles in soft clay [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 10(4): 317-327.
- [10] MURAD Abu-Farsakh. Field testing and analyses of a batter pile group foundation under lateral loading [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 22(12): 42-55.
- [11] ALI A, AHMADI H, MOHAMMAD H A. Parametric study on the effects of pile inclination angle on the response of batter piles in offshore jacket platforms [J]. Journal of Marine Science and Application, 2016, 15, (2): 193-200.
- [12] 杨剑, 高玉峰, 程永峰, 等. 输电线路斜掏挖基础在水平荷载作用下的特性 [J]. 水利水电科技进步, 2008, 28(4): 55-59.
- YANG Jian, GAO Yufeng, CHENG Yongfeng. Behavior of inclined excavated foundation of transmission lines under lateral loading [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(4): 55-59.
- [13] SUBANANTHARAJ P J, SENTHILKUMAR P K. Behavioural analysis of vertical and batter pile groups under vertical and lateral loading in sand [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(22): 706.
- [14] DUBEY R N, BHARATHI M. Dynamic response of batter piles [C]. 16th World Conference on Earthquake. Chile, 16WCEE 2017.
- [15] XIE Yaofeng. Lateral load bearing capacity of offshore high-piled wharf with batter piles [J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 377-387.
- [16] REESE Lydon C, ISENHOWER William M, WANG Shintower. Analysis and design of shallow and deep foundations [J]. John Wiley, 2006.
- [17] RAJASHREE S S, SITHARAM T G. Nonlinear finite element modeling of batter piles under lateral load [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (7): 604-612.
- [18] 凌道盛, 任涛, 王云岗. 砂土地基斜桩水平承载特性 p-y 曲线法 [J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 155-162.
- LING Daosheng, REN Tao, WANG Yungang. A p-y curves method for horizontal bearing characteristics of single batter pile in sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 155-162.
- [19] SU, D. Non-dimensional solutions for laterally loaded piles in sand considering nonlinear soil-pile interactions [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(7): 04018077.
- [20] 袁廉华, 陈仁朋, 孔令刚, 等. 轴向荷载对斜桩水平承载特性影响试验及理论研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1958-1964.
- YUAN Lianhua, CHEN Renpeng, KONG Linggang, et al. Test and theoretical research on influence of axial load on lateral bearing capacity of batter piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1958-1964.
- [21] 吕凡任. 倾斜荷载作用下斜桩基础工作性状研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- LÜ Fanren. Study on behavior of batter piles under inclined load [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [22] 曹卫平, 夏冰, 赵敏, 等. 砂土中水平受荷斜桩的 p-y 曲线及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 743-753.
- CAO Weiping, XIA Bing, ZHAO Min, et al. p-y curves of laterally loaded batter piles in sand and its applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 743-753.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ106-2014. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- MHURD PRC. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ106-2014. [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [24] 丁大钧. 弹性地基梁计算理论和方法 [M]. 南京: 南京工学院出版社, 1986.
- DING Dajun. Theory and method of elastic foundation beam calculation [M]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology Press.
- [25] 曹卫平, 陆清元, 樊文甫, 等. 竖向荷载作用下斜桩荷载传递性状试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3048-3056.
- CAO Weiping, LU Qingyua, FAN Wenfu, et al. Experimental study of load transfer behavior of batter piles under vertical loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3048-3056.

(编辑 桂智刚)