

曹卫平,陶 鹏,赵 敏,等. 砂土中循环荷载与单调荷载组合作用下斜桩水平承载变形特性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2020,40(3): 11-21.

CAO Wei-ping,TAO Peng,ZHAO Min, et al. Model test on bearing deformation behavior of batter piles under combined horizontal cyclic loads and monotonic loads in sand[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(3): 11-21.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.03.002

砂土中循环荷载与单调荷载组合作用下 斜桩水平承载变形特性

曹卫平^{1,2},陶 鹏¹,赵 敏³,李煜璇¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室,陕西 西安 710055; 3. 西安工业大学 建筑工程学院,陕西 西安 710021)

摘 要:针对斜桩基础受风荷载作用的工况,分析水平循环荷载对其承载变形特性的影响。通过室内干砂中的模型试验,研究了斜桩在经历水平循环荷载后再承受单调水平荷载时的承载变形性状,与仅在单调水平荷载作用下斜桩的性状进行了比较,分析了循环荷载幅值大小对斜桩水平极限承载力、桩身轴力、弯矩及剪力的影响。结果表明:斜桩先经历循环荷载后再承受单调水平荷载比仅受单调水平荷载作用时的水平极限承载力有一定程度的提高,提高幅度 10%~14%;水平荷载作用下,正斜桩桩身全长受拉,负斜桩桩顶下一定长度区段受压,其余区段受拉;经历循环荷载后再受单调水平荷载作用比仅受单调水平荷载作用时斜桩的桩身最大轴力大,正倾斜桩的最大轴力大于负倾斜桩,两者桩身轴力最大值均在距桩顶约 4.5d(d 为桩径)的桩身截面;斜桩桩身的弯矩主要出现在桩顶下约 15d 的桩身长度范围内,经历循环荷载后再承受单调水平荷载的斜桩与仅承受单调静载时斜桩的最大弯矩基本相当,最大弯矩截面距桩顶距离均约为 4.5d;负斜桩的桩身最大弯矩大于正斜桩,前者约为后者的 1.4 倍;经历循环荷载后再受单调水平荷载作用和仅受单调水平荷载的斜桩,其桩身最大剪力均在桩的顶部,并且在桩顶下方 7.5d 处存在极值剪力。

关键词:道路工程;斜桩;模型试验;水平承载力;循环荷载

中图分类号:U418.7

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2020)03-0011-11

Model test on bearing deformation behavior of batter piles under combined horizontal cyclic loads and monotonic loads in sand

CAO Wei-ping^{1,2}, TAO Peng¹, ZHAO Min³, LI Yu-xuan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. School of Civil and Architecture Engineering,

Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reveal the effect of the horizontal cyclic loads on the bearing deformation behavior of batter piles for the working condition of batter piles foundation of transmission tower

收稿日期:2019-09-12

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019-JM-006)

作者简介:曹卫平(1969-),男,陕西杨凌人,教授,工学博士,E-mail:caowp@xauat.edu.cn.

subjected to wind loads, model tests were conducted to explore the bearing deformation behavior of single batter piles embedded in dry sand and two different kinds of loads were applied on the pile top, horizontal cyclic loads followed by monotonous horizontal loads and only monotonous horizontal loads. The effect of the cyclic loads on the horizontal ultimate bearing capacity, axial force, bending moment and shear force of pile was analyzed. The results show that the horizontal ultimate bearing capacity of batter piles under cyclic loads is improved, compared with batter piles only subjected to monotonous horizontal loads, and the improvement is about 10% to 14%. The entire length of the positive batter pile shaft is tensioned under horizontal load, while the upper part of the negative batter pile shaft is compressed and the remaining pile shaft is tensioned. The batter pile subjected to horizontal cyclic loads has a larger maximum axial force than that of the pile only subjected to monotonous horizontal loads. The maximum axial force of the positive batter pile is larger than that of the negative batter pile, and the position are both at about $4.5d$ (d is the pile diameter) from the top of the pile. Whatever positively or negatively inclined, the bending moment of the batter piles mainly appears within the length of the pile shaft about $15d$ below the pile top. The batter piles subjected to combined loads have nearly the same maximum bending moment with the piles only subjected to monotonous horizontal loads, and the maximum bending moment of negative batter piles are larger than that of the positive batter piles, and the former is about 1.4 times the latter. The maximum shear force of the batter piles is always at the pile top whether subjected to combined loads or only monotonous horizontal loads. There exists an extreme shear force in shaft at the position of $7.5d$ below the pile top. 3 tabs, 12 figs, 31 refs.

Key words: road engineering; batter pile; model test; horizontal bearing capacity; cyclic load

0 引言

风荷载下斜桩基础往往要承受水平向循环荷载的作用^[1-4]。国内外学者对循环荷载下水平承载桩开展了系列研究。汪明元等对海洋风电直桩基础进行室内模型试验,得出循环荷载下桩侧向位移及桩身弯矩的变化规律^[5-6]。张勋等基于室内模型试验与数值软件,建立了预测水平循环荷载下直桩桩侧累积位移模型^[7-8]。Hong 等研究了软黏土中水平循环作用下,半刚性直桩的侧向响应及破坏机理^[9]。这些研究考虑了循环荷载的幅值、加载路径对桩水平累积位移的影响,并建立了累积位移预测模型,但其研究主要集中于垂直桩,对斜桩的研究较少。斜桩的桩身轴线倾斜,与竖向成一定倾角,桩身周围土体的应力-应变关系与直桩相比呈非轴对称分布,因而斜桩的承载变形特性较直桩更为复杂。

目前,有学者对斜桩竖向承载特性进行了研究。徐江等对大口径钢管斜桩竖向承载性状进行了研究,发现斜桩(倾角 12°)比对应直桩的竖向极限承载力要小^[10]。曹卫平等基于模型斜桩在砂土地基中的试验,对斜桩的竖向承载特性进行了研究,分析

了桩身倾角及长径比 2 个因素对斜桩桩身内力分布和端阻比的影响^[11]。但斜桩除了承受竖向荷载外,还承受水平荷载,故有学者基于模型试验,考虑了荷载角度、桩身倾角以及地基土的密实度等因素对斜桩水平承载力的影响。如 Meyerhof 等基于砂土中受倾斜荷载作用下刚性模型斜桩的室内试验,研究荷载倾角对斜桩极限承载力的影响^[12]。Zhang 等基于砂土地基中水平受荷斜桩的离心机模型试验,研究了桩身倾角、砂土相对密度(36%、55%)这 2 个因素对斜桩水平承载力的影响^[13]。袁廉华等研究了斜桩水平承载特性受轴向荷载的影响^[14]。顾明等研究了偏心荷载对砂土中斜桩群桩承载特性的影响^[15]。但上述研究仅反映了水平受荷斜桩的承载性状,未能揭示水平受荷斜桩桩-土相互作用机理,故有学者通过抗力-位移($p-y$)曲线法进一步研究了桩-土相互作用机理。Rajashree 等基于修正双曲线形 $p-y$ 曲线,采用数值模拟手段,对受水平循环荷载作用斜桩的承载变形特性进行了研究,分析了循环荷载次数、循环荷载大小对斜桩 $p-y$ 曲线的影响^[16]。曹卫平等通过模型试验和数值方法,研究了水平受荷斜桩的承载性状、桩身内力的分布特征及

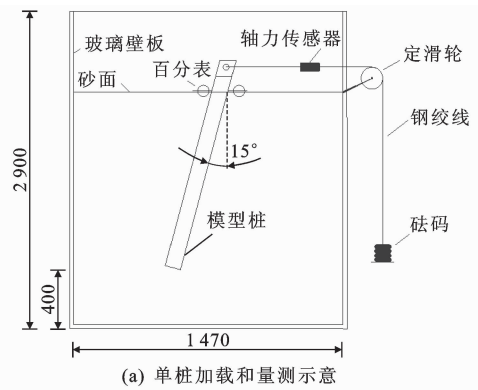
桩-土的相互作用,并基于水平受荷斜桩的模型试验结果,建立了 $p-y$ 曲线^[17-18]。凌道盛等通过假设水平受荷斜桩桩身上部土层发生楔形体破坏,提出了修正的 $p-y$ 曲线^[19]。李雨润等在液化土中开展了斜桩水平动力性状的研究,得出动荷载下桩身弯矩及 $p-y$ 曲线的变化规律^[20]。

但上述研究主要针对斜桩水平承载特性,未对水平受荷斜桩桩身内力开展相关研究,且施加的水平荷载多为单调荷载,对工程中风荷载这种循环荷载作用下斜桩承载变形特性的研究鲜有报道。虽然一些学者从理论上对斜桩桩身进行了求解,可以计算任意荷载下任意桩身倾斜角度的变形和内力。如云天铨在明德林解的基础上,用线荷载积分方程法给出了各向同性弹性半空间中斜桩桩顶受任意荷载作用的数值解^[21]。吕凡任等基于地基土体为半无限空间弹性体的假想,对任意荷载作用下各桩身倾角的斜桩进行了弹性求解^[22]。但前提是假设土体为弹性体,与实际工程中的土体性状不符。本文针对目前研究中,垂直桩多施加水平循环荷载,而对斜桩主要施加水平单调荷载;对水平受荷斜桩的研究主要关注其承载特性,而忽略其桩身内力分布的现状。因此,基于实际中存在风荷载这种水平循环荷载作用下斜桩基础,开展了室内砂土中水平循环荷载作用下斜桩的模型试验,研究了循环荷载幅值对斜桩水平极限承载力、桩身轴力、弯矩及剪力的影响,以期为此类工程中斜桩基础的设计提供参考。

1 模型试验概况

1.1 试验设备

试验设备由土工模型槽、加荷系统、测量系统 3 个部分构成。模型槽长为 1.47 m,宽为 0.8 m,高为 2.9 m,如图 1 所示。模型槽的 4 个侧面及底面用厚度为 10 mm 的钢化玻璃制作。加荷系统由定滑轮、钢绞线和砝码组成,为保证水平荷载和斜桩的轴线处在同一平面且钢绞线传力路径始终水平,采用定滑轮实现上下左右 4 个方向位置微调。桩顶荷载采用 DYLY-104 型轴力传感器测量,桩身应变采用 BF120-3AA 型电阻式应变片测量。该应变片基座尺寸为 6.6 mm×3.4 mm,敏感栅尺寸为 3.0 mm×2.4 mm,电阻值为 121.3±0.1 Ω,灵敏系数为 2.1%±1%,室温应变极限为 20 000 μm/m。采用 CML-1H-32 型电子应变仪采集应变值,使用百分表读取桩身砂面处位移。



(a) 单桩加载和量测示意



(b) 试验现场

单位: mm

图 1 试验装置布置

Fig. 1 Layout of test setup

1.2 试验方案

试验分 2 组,每组试验包含 1 根仅受水平单调荷载的斜桩和 2 根先经历不同幅值水平循环荷载后再受水平单调荷载的斜桩,试验方案见表 1。在预试验中发现,当循环荷载次数大于 20 时,砂面处桩身水平位移不再增长,桩身内力不再出现明显变化,并结合相关文献,确定本文试验荷载循环次数取 20^[23-25]。本文循环荷载主要模拟的是风荷载,风的大小不同,风荷载的幅值就不同。考虑到工程设计时,桩承受的循环荷载要比其极限承载力小,而受荷斜桩的水平极限承载力在本文试验预试验中已确定,故本试验选取 1/4、1/2 水平极限承载力,即 105、210 N 来模拟桩受到的循环荷载。本文规定,桩顶所受水平荷载方向与桩身倾斜方向一致为正斜桩,反之为负斜桩,如图 1 所示。

1.3 试验材料

模型斜桩由硬质 PVC 管制成,桩长为 1 200 mm、壁厚为 2.0 mm、外径为 40 mm。桩的入土深度为 1 100 mm,故本文试桩桩顶位置指在砂面处。将管材沿纵向对称劈成 2 个管片,沿各自管片内壁从桩顶到桩端纵向粘贴应变片,在同一个截面处粘贴 2 个应变片,两者平面位置间的夹角为 180°;然后

表1 试验方案
Tab. 1 Test program

分组	编号	斜桩倾角/(°)	桩径 d /mm	桩长 L /mm	荷载循环次数	循环荷载幅值/N
1	P11	15	40	1 200		
	P12	15	40	1 200	20	105
	P13	15	40	1 200	20	210
2	P21	-15	40	1 200		
	P22	-15	40	1 200	20	105
	P23	-15	40	1 200	20	210

沿剖切线将2个管片用AB胶粘接合并,为保证其粘接强度及PVC管的整体性,沿管纵向每隔5 cm 绑扎直径1 mm的环状细铁丝,并放置7 d。之后用游标卡尺测量模型桩的直径,发现其与原始PVC管的直径相同。然后用电子万能试验机对制作的PVC模型桩(截取长度15 cm)进行拉、压试验,测量得到的应力-应变曲线与原PVC管无差异。最后,对模型桩进行受弯试验至极限状态,发现模型桩折断时2个管片接缝处未出现破裂。这说明本文制作模型桩的方法能保证2个管片如同1根完整的管子协同工作^[26]。

应变片位置见图2,在桩头安装高度为50 mm 钢套管,从钢套管中引出数据线,PVC管材的应力-应变(σ - ϵ)关系如图3所示。

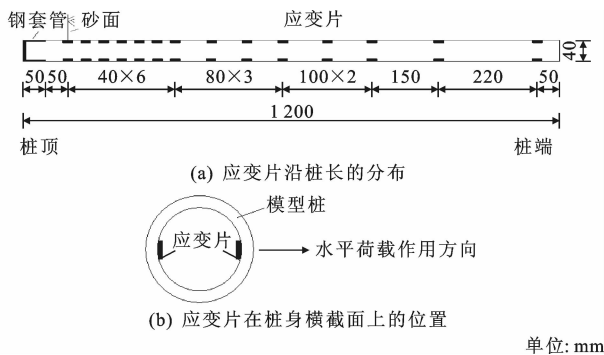


图2 应变片位置

Fig. 2 Positions of strain gauges

试验选用中粗河砂作为地基土,砂土含水率为0%,砂土界限粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为0.140、0.367、0.904 mm,平均粒径 d_{50} 为0.636 mm,不均匀系数 $C_u=6.457$,曲率系数 $C_c=1.064$,最小、最大干密度分别为1.54、1.91 g/cm³。

1.4 试验步骤

试验中将同组的3根模型斜桩固定到预定设计位置。为避免边界效应以及桩与桩间的互相影响,桩与模型槽内壁的距离及桩间距均不小于6倍桩

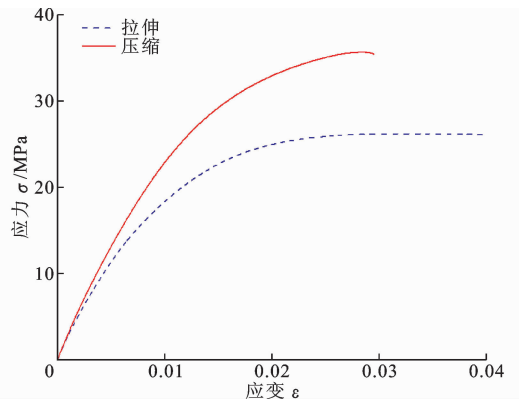


图3 PVC管材 σ - ϵ 曲线

Fig. 3 σ - ϵ curves of PVC pipe

径。桩所在土层按砂雨法分层填筑砂土,每层虚铺厚度约200 mm。然后用平板振动机(振频3 000次/min,质量7.5 kg)进行压实,时间为2 min,每层压实2遍,之后抚平砂土表面,重复上述步骤直至砂面达到预定高度。经过计算,装入模型槽的砂土经振动密实后,2组试验中使用的砂土密度分别为1.83、1.85 g/cm³,平均密度为1.84 g/cm³。通过三轴试验测得砂土的内摩擦角 $\varphi=41.0^\circ$ 。

对于每组试验,先进行单调水平加载试验(P11、P21),然后进行其他2根桩的水平循环加荷试验,循环荷载幅值分别为105(P12、P22)、210 N(P13、P23)。

对于单调水平加载试验,参考规范^[27],采用慢速荷载维持法进行加载,并且以预先估计的水平极限承载力的1/10分级施加荷载。本文试验时,当桩顶水平位移在1 h内不超过0.1 mm,并且连续出现2次后即可施加下一级荷载;某一级荷载作用下的桩顶水平位移大于前一级荷载作用下的2倍且24 h尚未稳定,则终止加载。在施加每级荷载后的第5、10、15 min时各测读1次桩顶水平位移,以后每隔15 min读1次,累计1 h后每30 min读1次,每级荷载下桩顶水平位移稳定后对桩身各截面处应变片的应变值进行采集。

对于水平循环加荷试验,先在桩顶施加一定幅值的循环荷载,共计20次,之后再按照慢速维持荷载法进行水平单调加载试验。每次循环荷载分成2级施加,每级荷载大小均为循环荷载幅值的一半,2级荷载间隔30 s,荷载施加完成1 min后卸载至0,至此完成一个加载循环。如此重复20次即完成水平循环加载试验。每次循环荷载加载及卸载完成1 min后采集桩顶位移和桩身各截面应变。

2 试验结果与分析

2.1 循环荷载对斜桩水平极限承载力的影响

图4为斜桩在单调荷载(静载)、循环荷载作用下,砂面处桩身水平位移的变化过程。从图4可以得出:在水平循环荷载作用下,桩身水平位移逐渐累积增加,经历20次循环后,循环荷载幅值 Q 较大时引起的桩身水平累积位移远大于循环荷载幅值较小时,如循环荷载幅值从105增大到210 N时,正斜桩及负斜桩的水平位移均增大了约3倍;当循环荷载相同时,负斜桩的水平累积位移大于正斜桩;在20次的荷载循环过程中,前几次循环荷载引起的桩身水平位移增量远大于后续循环时,以首次循环荷载引起的桩身砂面处水平位移最大;当循环荷载 $Q=210$ N时,首次循环引起正、负斜桩水平位移分别占其20次循环总位移的47.7%、52.8%。无论正、负斜桩,首次循环的水平荷载-位移曲线切线刚度小于后续循环时,且切线刚度随着循环次数的增加而增大,最终趋于一个定值。这说明在循环荷载作用下桩侧土逐渐压密。不论正、负斜桩,在经历幅值较大的循环荷载作用后,再承受单调水平荷载作用时,其水平承载力比只受单调荷载作用时有所提高。

图5为斜桩水平荷载-位移梯度关系曲线($Q-\Delta X_0 \Delta Q^{-1}$)(ΔX_0 为水平位移增量、 ΔQ 为循环荷载的增量)。参考规范,曲线上第2个直线段终点对应的水平荷载为斜桩水平极限承载力^[27]。则各斜桩的水平极限承载力如表2所示。

可知,对正斜桩,当循环荷载幅值为105、210 N时,正斜桩的水平极限承载力较仅受静载时的增量 W 均为10%。对于负斜桩,当循环荷载幅值为105 N时,负斜桩的水平极限承载力与仅受静载时相同。而当循环荷载幅值为210 N时,负斜桩的水平极限承载力比只受静载时增加了14%。这说明斜桩在经受循环荷载作用后,其水平极限承载力比只受单调荷载作用时有所提高。

2.2 循环荷载对斜桩桩身轴力的影响

粘贴应变片处斜桩桩身横截面轴力可根据测得的桩身应变求得,即

$$N_i = \frac{E_t \epsilon_{ti} + E_c \epsilon_{ci}}{2} A \quad (1)$$

式中: N_i 为模型桩桩身第 i 横截面处的轴力; ϵ_{ti} 、 ϵ_{ci} 分别为桩身第 i 横截面处2个应变片的拉、压应变值; E_t 、 E_c 分别为桩材拉、压模量; A 为模型桩横截面面积。

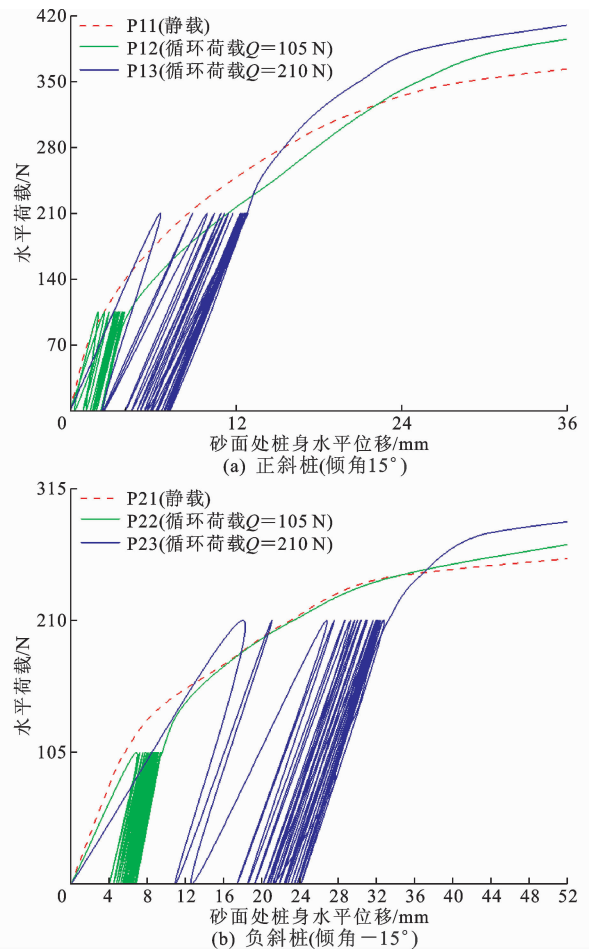


图4 斜桩荷载-位移曲线

Fig. 4 Curves of load-displacement of batter pile

本文规定桩身轴力以拉为正、以压为负。由于应变片量测的应变是管壁内侧应变而非管材截面上的平均应变,由此引起的应变相对误差为5.6%。

图6以水平荷载(静载取210 N)为例,给出了仅受单调水平荷载和经历循环荷载后再承受单调水平荷载的斜桩桩身轴力分布曲线。不论循环荷载幅值的大小,正斜桩轴力沿桩身全长均为正,即水平受荷正斜桩全长受拉。然而,最大拉力并未出现在桩顶,而是出现在桩顶下相对深度 $z/L=0.15$ 处,该深度约为 $4.5d$ (z 为土面下某一深度, L 为桩长, d 为桩身直径)。

正斜桩桩顶在水平荷载作用下,桩身侧摩阻力分布如图7(a)所示。可知,水平荷载 P 在垂直桩身方向上的分力 P_2 会使得桩体上部的区段受弯发生变形,并产生侧向水平位移,挤压桩右侧土体,使得桩侧土体向上隆起,产生相对于桩身向上的位移。同时,受挤压的土体对桩身作用被动土压力,这使得桩侧受到沿桩身轴线向上的侧摩阻力,因而桩顶下一定深度内,桩身的轴力沿深度方向逐渐增大。与

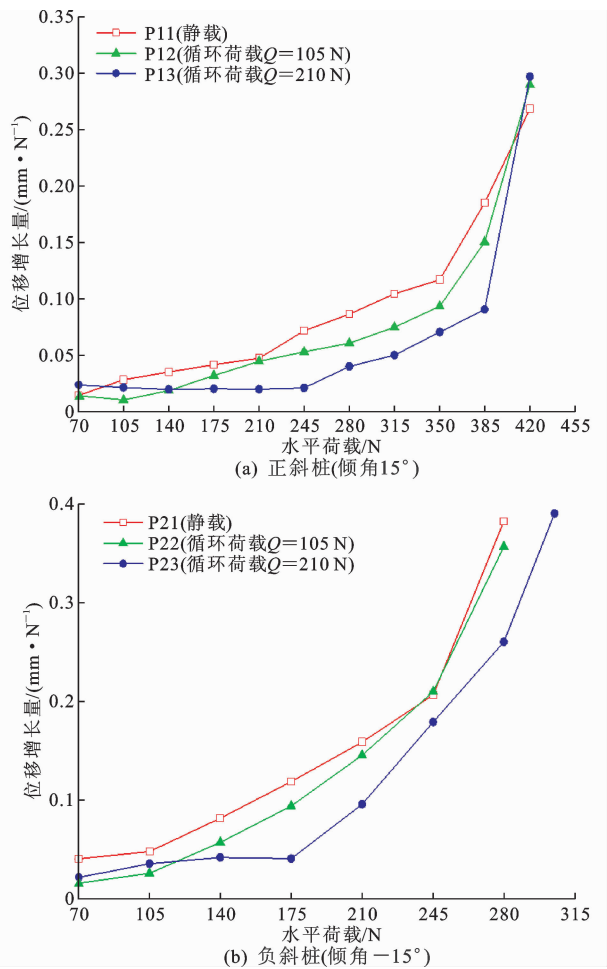


图 5 斜桩水平荷载-位移梯度关系曲线

Fig. 5 Horizontal load-displacement gradient curves of batter pile

表 2 斜桩水平极限承载力

Tab. 2 Horizontal ultimate bearing capacity of batter pile

桩身倾角 $\alpha/(\circ)$	桩号	循环荷载幅值/N	水平极限承载力/N	W/%
正斜桩 (15°)	P11		350	
	P12	105	385	10
	P13	210	385	10
负斜桩 (-15°)	P21		245	
	P22	105	245	0
	P23	210	280	14

桩顶下一定深度,即桩身上部区段产生较显著的弯曲变形不同的是,桩身下部区段产生的弯曲变形不显著,该区段桩身以轴向变形为主,在桩顶荷载分力 P_1 作用下,该区段桩身摩阻力沿桩轴线向下,因而桩身轴力沿深度的增加逐渐减小。这也解释了正斜桩在水平荷载作用下,桩身最大轴力未出现在桩顶而出现在桩顶下一定深度的原因^[28-29]。

与正斜桩桩身全长受拉不同,负斜桩桩顶下一定深度内桩段还可受压。在受压桩段内桩身轴力沿

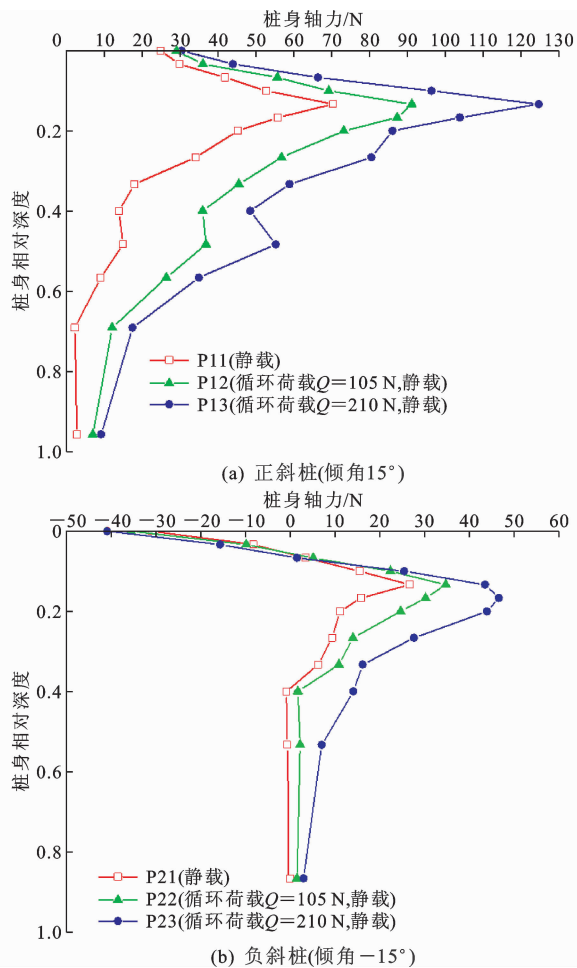


图 6 桩身轴力的分布

Fig. 6 Distributions of pile shaft axial force

着深度增加急剧减小至 0。在受拉桩段内,桩身轴力沿深度增加从 0 先增加到最大值,然后又逐渐减小,几乎至 0。负斜桩桩身最大轴力在相对深度 $z/L=0.15$ 处,即约为 $4.5d$ 。

水平荷载作用下负斜桩桩顶荷载及桩身摩阻力如图 7(b)所示。可知,水平荷载 P 在垂直于桩身方向上的分力 P_2 使负斜桩桩身产生水平位移并挤压右侧 ACE 区域土体,致使此区域土体向右上方隆起,产生相对于桩身向上的相对位移并对桩身作用被动土压力。这使得桩身受到沿轴线方向向上的侧摩阻力,因而负斜桩桩身上部区段截面压力随着深度增加而逐渐减小,在桩身 B 点,AB 段的摩阻力恰好抵消了桩顶压力 P_1 (P_1 为水平荷载 P 沿桩轴线的分力),因此 B 点轴力为 0。BC 段桩身摩阻力向上,因此 BC 段桩身轴力为拉力并随深度逐渐增大,在 C 点达到最大值。由于 CD 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。这就

是水平荷载作用下负斜桩轴力表现出图 6(b) 所示特征的原因。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^[30-31]。

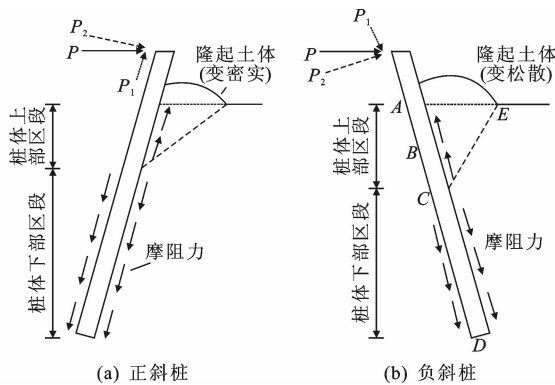


图7 斜桩桩顶荷载及摩阻力示意

Fig. 7 Sketch of pile head load and skin friction

从图 6 还可看出,与仅承受单调水平荷载作用的斜桩相比,经历循环荷载作用后,斜桩桩身最大轴力所在的深度位置虽未发生明显变化,但最大轴力却增大了,循环荷载幅值越大,最大轴力增加的越多。

图 8 为斜桩桩身最大轴力随加荷过程的变化曲线。可以看出,在循环加荷阶段,正、负斜桩桩身最大轴力随荷载循环次数的增加均逐渐增大,但增大的幅度很小。循环荷载幅值相同时,负斜桩的桩身最大轴力要小于正斜桩。经历循环荷载后再承受单调静载与仅承受单调静载的斜桩相比,桩身最大轴力更大。

2.3 循环荷载对斜桩桩身弯矩的影响

斜桩桩身粘贴应变片处横截面弯矩 M_i 可由下式求得,即

$$M_i = \frac{(E_t \epsilon_{ti} - E_c \epsilon_{ci}) I}{d} \quad (2)$$

式中: I 为桩身截面惯性矩。

图 9 以水平荷载(静载取 210 N)为例,给出了仅受单调水平荷载及经历循环荷载作用后再承受单调水平荷载的斜桩桩身弯矩分布曲线。可知,不论循环荷载幅值的大小,正、负斜桩桩身弯矩均随深度的增加先增大,达到最大值后逐渐减小并趋近于 0,桩身弯矩主要分布在相对深度 $z/L=0.5$ 以上桩身区段,该区段长度为 $15d$ 。另外,不论正斜桩还是负斜桩,桩身最大弯矩均约在相对深度 $z/L=0.15$ 处,且其不随循环荷载幅值变化,该深度约为 $4.5d$ 。

图 10 为正、负斜桩在承受 105、210 N 的水平荷载时,桩身最大弯矩随着加荷过程变化的关系曲线。

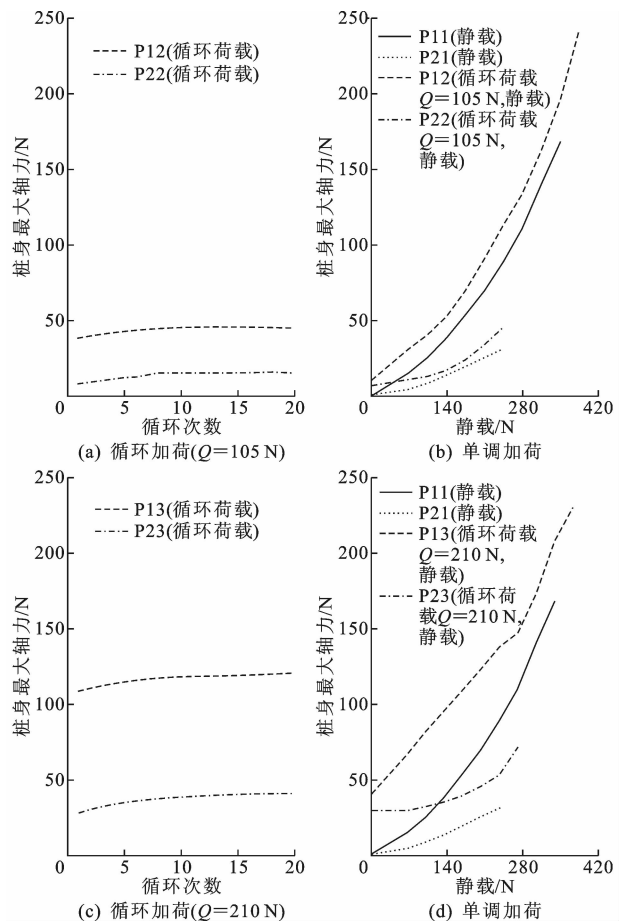


图8 桩身最大轴力随加荷过程的变化

Fig. 8 Variations of maximum axial force during loads

可以看出,在循环加荷阶段,正、负斜桩桩身最大弯矩随荷载循环次数的增加均逐渐增大,但增大的幅度很小。循环荷载幅值相同时,正斜桩的桩身最大弯矩小于负斜桩。经历循环荷载后再承受单调静载与仅承受单调静载的斜桩相比,当静载大于 210 N 时,前者桩身最大弯矩更小。

表 3 给出了斜桩在承受 210 N 水平荷载时的桩身弯矩最大值。从表 3 可以得到,不管正、负斜桩,经历循环荷载后再承受单调水平荷载的斜桩与仅承受单调静载斜桩最大弯矩值基本相当,负斜桩的桩身最大弯矩大于正斜桩,前者约为后者的 1.4 倍。

2.4 循环荷载对斜桩桩身剪力的影响

在桩顶水平荷载作用下,斜桩桩身横截面剪力可由下式求得,即

$$F_{si} = \frac{dM(x)}{dx} \quad (3)$$

式中: F_{si} 为桩身第 i 横截面剪力; $M(x)$ 为桩身连续可导的弯矩分布函数。

需要先根据试验测得的应变并利用式(2)计算桩身各截面弯矩,再对弯矩进行数据拟合得到沿桩

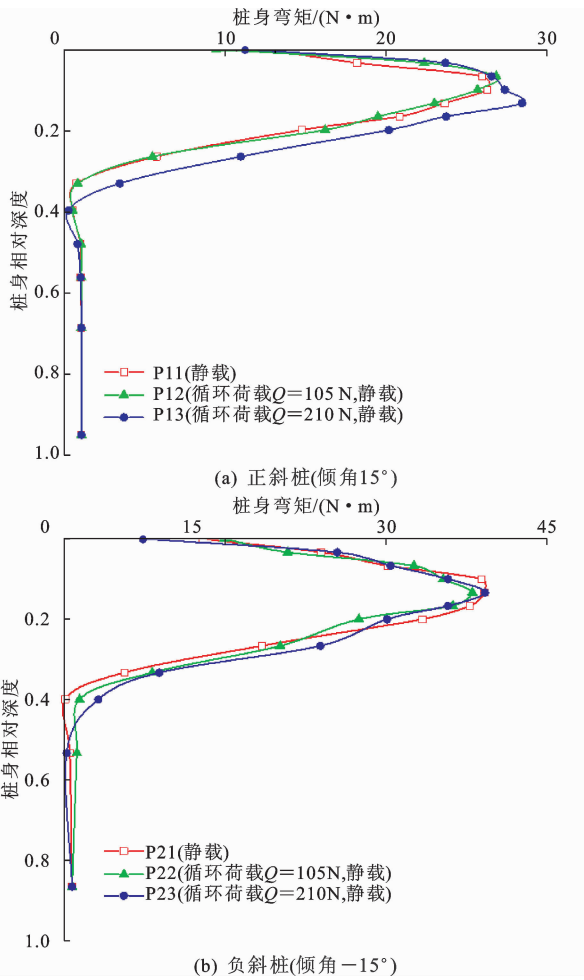


图9 桩身弯矩沿深度的分布

Fig. 9 Distributions of bending moment of pile along depth

身深度的分布函数 $M(x)$, 最后按式 (3) 对弯矩分布函数 $M(x)$ 进行求导, 即可得到桩身各截面处的剪力。

图 11 以承受 210 N 的水平荷载为例, 给出了仅受单调水平荷载及经历循环荷载作用后再承受单调水平荷载的斜桩桩身剪力的分布曲线。可知, 不论正斜桩还是负斜桩, 斜桩桩身剪力随深度增加先逐渐减小至 0, 后反向逐渐增大, 达到最大值后再急速减小至 0。从图 11 还可以看出: 正、负斜桩的最大剪力均在桩顶处, 但桩顶下一定深度处还存在极值剪力, 其值小于桩顶处的剪力; 该极值剪力均约在相对深度 $z/L=0.25$ 处, 该深度约为 $7.5d$ 。另外, 桩身剪力主要分布在相对深度 $z/L=0.5$ 以上桩身区段, 该区段长度为 $15d$ 。

图 12 为斜桩桩身极值剪力随加荷过程变化的曲线。可以看出, 在循环加荷阶段, 正、负斜桩桩身极值剪力随荷载循环次数的增加逐渐增大, 但增大的幅度很小。循环荷载幅值相同时, 正斜桩的桩身

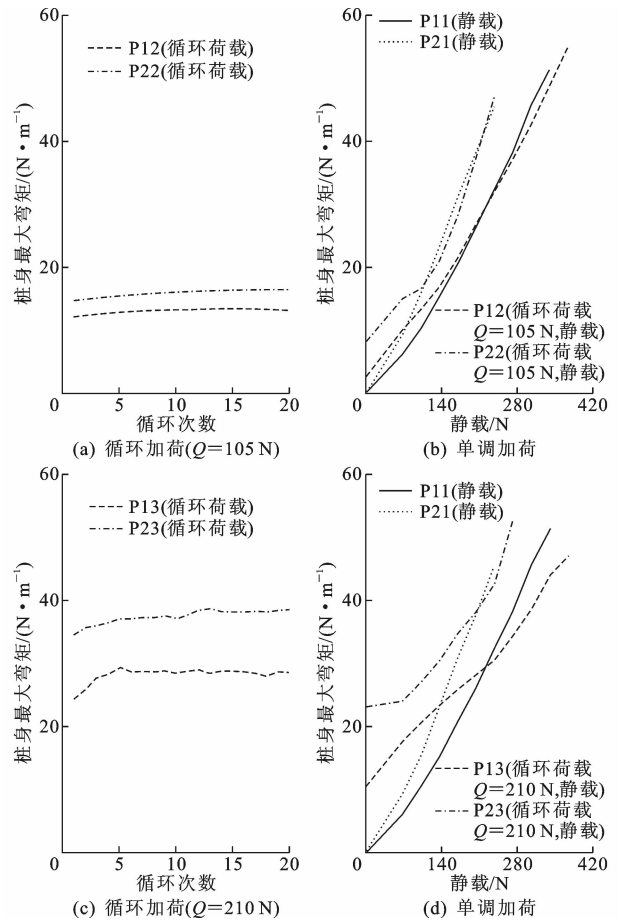


图 10 桩身最大弯矩随加荷过程的变化

Fig. 10 Variations of maximum bending moment

表 3 斜桩桩身最大弯矩

Tab. 3 Maximum bending moments of batter piles

循环荷载幅值/N	正斜桩		负斜桩		负斜桩比正斜桩最大弯矩增幅/%
	桩号	最大弯矩/(N·m)	桩号	最大弯矩/(N·m)	
0	P11	26.1	P21	38.4	47.1
105	P12	26.7	P22	37.3	39.7
210	P13	28.4	P23	38.4	35.2

极值剪力小于负斜桩。经历循环荷载后再承受单调静载与仅承受单调静载的斜桩相比, 桩身极值剪力更小。

3 结 语

(1) 不论正、负斜桩, 在承受循环荷载作用后, 其桩顶均产生残余水平位移。正斜桩的残余水平位移要小于负斜桩。斜桩经历循环荷载作用后再承受单调水平荷载时比仅受单调水平荷载时的水平极限承载力有一定程度的提高, 循环荷载幅值较大时, 这种提高作用更显著。对于本文试验, 前者比后者水平极限承载力提高了 10%~14%。

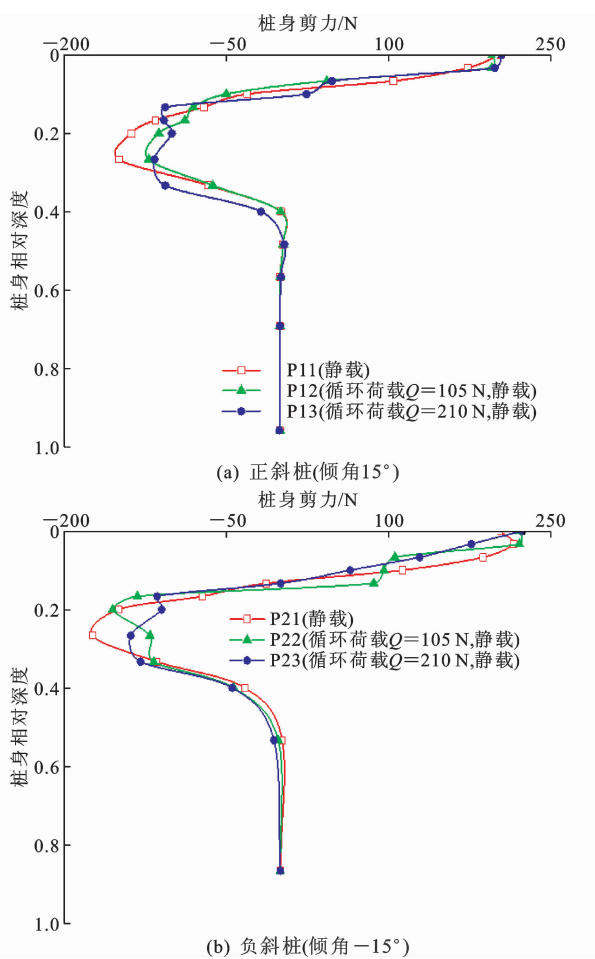


图 11 桩身剪力的分布
Fig. 11 Distributions of shear force of pile shaft

(2) 水平荷载作用下, 负斜桩桩顶下一定深度内桩身区段受压, 其余区段受拉, 而正斜桩桩身全长受拉; 不论正、负斜桩, 以及循环荷载幅值的大小, 桩身轴力最大值均在距桩顶约 $4.5d$ 的截面; 经历循环荷载后再受单调水平荷载作用时斜桩的桩身最大轴力要大于仅受单调水平荷载作用时, 循环荷载幅值越大, 桩身最大轴力越大; 当桩顶水平荷载相同时, 正斜桩的桩身最大轴力要大于负斜桩。

(3) 经历循环荷载后再受单调水平荷载作用及仅受单调水平荷载的斜桩, 桩身弯矩主要分布在桩身上部约 $15d$ 的长度范围内, 不论正、负斜桩, 桩身最大弯矩截面距桩顶距离均约 $4.5d$; 经历循环荷载后再承受单调水平荷载的斜桩与仅承受单调静载时的最大弯矩值基本相当, 负斜桩的桩身最大弯矩大于正斜桩, 前者约为后者的 1.4 倍。

(4) 经历循环荷载后再受单调水平荷载作用的斜桩及仅受单调水平荷载的斜桩, 其桩身剪力主要分布在桩顶下长度约 $15d$ 的区段内; 正、负斜桩最

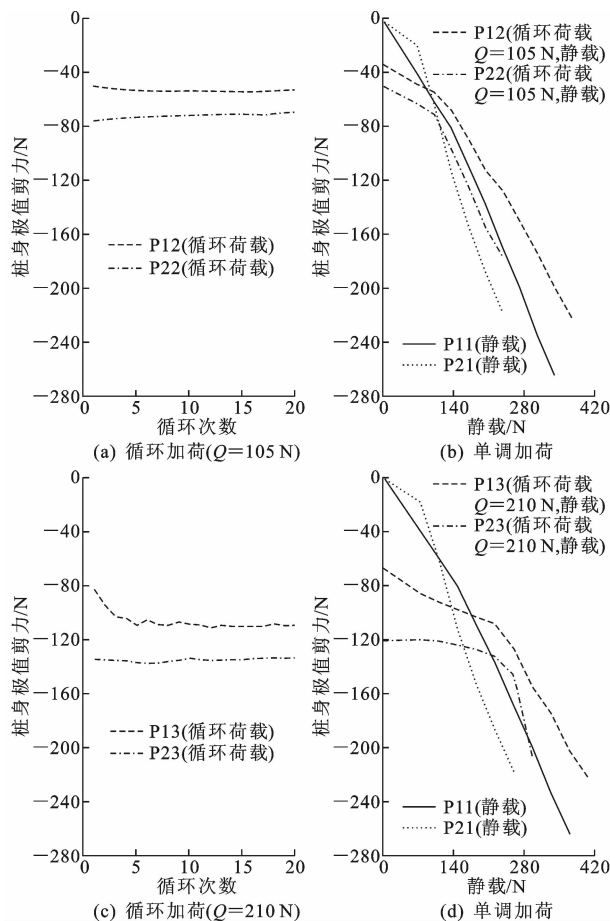


图 12 桩身极值剪力的变化

Fig. 12 Variations of extreme shear force

大剪力均在桩顶处, 距桩顶约 $7.5d$ 深度截面处存在极值剪力, 其值小于桩顶处的剪力。

(5) 以往水平受荷斜桩的研究多以承受单调荷载为主, 本文的工作可以为风荷载(水平循环荷载)作用下斜桩基础的水平承载特性和桩身内力分布提供依据。通过本文的研究可知, 在设计此类工程的斜桩基础时, 设计斜桩所能承受的水平极限承载力比仅受单调荷载作用时高 $10\% \sim 14\%$ 。此外, 斜桩桩身最大轴力、最大弯矩所处截面的位置均约距桩顶 $4.5d$ 处, 桩身最大剪力在桩顶处, 此为桩身设计的控制截面。另外, 对斜桩桩身进行截面弯矩和剪力设计时存在有效桩长的问题, 两者内力的分布主要集中在桩顶下部约 $15d$ 长度范围内的桩身。

(6) 在实际工程中, 斜桩基础除受到水平循环荷载的作用外还可能受到上拔荷载或下压荷载的作用, 为考虑这 2 个因素产生的影响, 建议进一步开展组合荷载下斜桩水平承载变形特性的研究, 且本文结论均是建立在均质砂土及模型试验的基础上, 对黏性土的适用性也需开展试验研究。

参考文献:

References:

- [1] CHEN R, SUN Y, ZHU B, et al. Lateral cyclic pile-soil interaction studies on a rigid model monopile[J]. Geotechnical Engineering, 2015, 168(2): 120-130.
- [2] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1807-1815.
ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jin-chao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1807-1815.
- [3] LIANG F, CHEN H, JIA Y. Quasi-static p - y hysteresis loop for cyclic lateral response of pile foundations in offshore platforms[J]. Ocean Engineering, 2018, 148: 62-74.
- [4] 孙永鑫, 刘海涛, 何春晖, 等. 循环荷载作用下粉土地基中刚性桩土相互作用研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(11): 111-115, 181.
SUN Yong-xin, LIU Hai-tao, HE Chun-hui, et al. Research on pile-soil interaction of a rigid pile subjected to cyclic loads in silt foundation[J]. Industrial Construction, 2018, 48(11): 111-115, 181.
- [5] 汪明元, 吴金标, 张建经, 等. 一种适用于室内模型试验的循环加载装置研制及试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1145-1151.
WANG Ming-yuan, WU Jin-biao, ZHANG Jian-jing, et al. Development of a cyclic loads instrument for laboratory model test and its experimental study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1145-1151.
- [6] 朱姝, 陈仁朋. 软黏土中导管架基础水平循环加载离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增2): 204-208.
ZHU Shu, CHEN Ren-peng. Centrifuge modelling of jacket foundation subjected to cyclic lateral loads in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 204-208.
- [7] 张勋, 黄茂松, 胡志平. 砂土中单桩水平循环累积变形特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 933-941.
ZHANG Xun, HUANG Mao-song, HU Zhi-ping. Model tests on cumulative deformation characteristics of single pile subjected to lateral cyclic loads in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 933-941.
- [8] 罗如平, 李卫超, 杨敏. 水平循环荷载下海上大直径单桩累积变形特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(增2): 607-612.
LUO Ru-ping, LI Wei-chao, YANG Min. Accumulated response of offshore large-diameter monopile under lateral cyclic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 607-612.
- [9] HONG Y, HE B, WANG L Z, et al. Cyclic lateral response and failure mechanisms of semi-rigid pile in soft clay: Centrifuge tests and numerical modelling[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(6): 806-824.
- [10] 徐江, 龚维明, 张琦, 等. 大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447.
XU Jiang, GONG Wei-ming, ZHANG Qi, et al. Numerical simulation and field test study on vertical bearing behavior of large diameter steel of batter piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447.
- [11] 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 Wei-ping, LU QING-yuan, FAN Wen-fu, et al. Experimental study of load transfer behavior of batter piles under vertical loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3048-3056.
- [12] MEYERHOF G G, RANJA R. The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand: II Batter piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1973, 10(1): 71-85.
- [13] ZHANG L M, MCVAY M C, LAI P W. Centrifuge modeling of laterally loaded single batter piles in sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1074-1084.
- [14] 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 Lian-hua, CHEN Ren-peng, KONG Ling-gang, 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.
- [15] 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 Ren-peng, KONG Ling-gang, et al.

- Centrifugal model tests on batter pile groups under eccentric lateral loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2018-2024.
- [16] 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.
- [17] 曹卫平, 樊文甫. 水平荷载作用下斜桩承载变形性状数值分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 34-43.
CAO Wei-ping, FAN Wen-fu. Numerical analysis on bearing and deformation behavior of horizontally loaded batter piles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 34-43.
- [18] 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 Wei-ping, XIA Bing, ZHAO Min, et al. $p-y$ curves of laterally loaded single battered piles in sand and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 743-753.
- [19] 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 Dao-sheng, REN Tao, WANG Yun-gang. A $p-y$ curve method for horizontal bearing characteristics of single batter pile in sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 155-162.
- [20] 李雨润, 张雨雷, 陈张升, 等. 液化土中对称双斜桩动力反应特征及 $p-y$ 曲线规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 239-250.
LI Yu-run, ZHANG Yu-lei, CHEN Zhang-sheng, et al. Dynamic response and $p-y$ curve of symmetric inclined piles in liquefied soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 239-250.
- [21] 云天铨. 线载荷积分方程法分析桩顶受任意荷载的弹性斜桩[J]. 应用数学和力学, 1999, 20(4): 351-357.
YUN Tian-quan. Analysis of elastic batter piles with arbitrary loads on pile top by line load integral equation method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1999, 20(4): 351-357.
- [22] 吕凡任, 陈云敏, 陈仁朋, 等. 任意倾角斜桩承受任意平面荷载的弹性分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(2): 191-194, 248.
LU Fan-ren, CHEN Yun-min, CHEN Ren-peng, et al. Analysis of batter pile under arbitrary inclined loads in semi-infinite solid[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(2): 191-194, 248.
- [23] QIN H, GUO W D. Response of static and cyclic laterally loaded rigid piles in sand[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(2): 138-153.
- [24] ZHU B, LI T, XIONG G, et al. Centrifuge model tests on laterally loaded piles in sand[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2016, 16(4): 160-172.
- [25] 任宇, 朱斌, 陈仁朋. 大型风电机组群桩基础受荷特性及长期累积沉降控制[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 75-80.
REN Yu, ZHU Bin, CHEN Ren-peng. Performance and control of long-term settlement of pile group foundations for large wind turbines[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 75-80.
- [26] 冯忠居, 王富春, 张其浪, 等. 钢管混凝土复合桩竖向承载特性离心模型试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2018, 38(2): 42-49.
FENG Zhong-ju, WANG Fu-chun, ZHANG Qi-lang, et al. Centrifuge model tests of vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38(2): 42-49.
- [27] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].
GB 50007—2011, Code for design of building foundation[S].
- [28] 秦强毅. 上拔荷载作用下斜桩承载变形性状模型试验及数值分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
QIN Qiang-yi. Model test and numerical analysis of bearing and deformation behavior of batter piles under uplift load[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [29] CONTE E, TRONCONE A, VENA M. Behavior of flexible piles subjected to inclined loads[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 199-209.
- [30] WANG J, ZHOU D, JI T, et al. Horizontal dynamic stiffness and interaction factors of inclined piles[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(9): 04017075.
- [31] BHARATHI M, DUBEY R N, SHUKLA S K. Experimental investigation of vertical and batter pile groups subjected to dynamic loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 116: 107-119.