

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.049

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



钙质砂中单桩水平承载特性模型试验研究

刘建宇¹, 王春艳¹, 刘冒佚², 丁选明¹, 刘欢²

(1. 重庆大学土木工程学院山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆市城投公租房建设有限公司, 重庆 400000)

摘要:通过室内模型试验研究钙质砂地基中桩基的水平承载特性,分析桩长对桩顶位移、桩顶转角、桩身弯矩以及桩侧土体压力分布的影响,并与福建标准砂地基中的模型桩进行了比较。试验结果表明:桩长对水平承载特性具有显著影响;增加桩长能明显提高单桩水平极限承载力,桩身变形逐渐由刚性转动转变为弯曲变形;弯矩沿桩身的分布范围由全段分布转变为集中在桩身上半部分;桩侧土压力主要分布在迎土侧的上部土层中,土体压力随着水平荷载的增加而发生明显变化;在低应力水平下,钙质砂中单桩水平承载力要大于标准砂中桩基承载力,钙质砂在较高应力水平下的模型试验有待进一步探究。

关键词:钙质砂;桩基础;单桩;模型试验;承载特性

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)06-0074-08

Horizontal loading model test of single pile in calcareous sand

LIU Jianyu¹, WANG Chunyan¹, LIU Maoyi², DING Xuanming¹, LIU Huan²

(1. College of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Chengtong Public Rental Housing Construction Co., Ltd, Chongqing 400000, P. R. China)

Abstract: Through a series of model tests in laboratory, the horizontal bearing characteristics of the pile in the calcareous sand foundation were investigated. The influence of the pile length on the pile top displacement, the rotation of the pile head, bending moment of the pile body and the distribution of the pile side soil pressure were analyzed. In addition, it is compared with model piles in silica sand (Fujian standard sand). The test results show that the horizontal displacement-load curve of the model pile in the calcareous sand is abrupt, and the pile length has a significant influence on the horizontal bearing characteristics. Increasing the pile length can significantly increase the ultimate horizontal bearing capacity of model pile, and the pile deformation gradually changes from rigid rotation to bending deformation. The distribution range of the bending moment along the pile body is changed from the whole pile length to half. The soil pressure on the side of the pile is mainly distributed in the upper soil layer on the soil-facing side, and the

收稿日期: 2021-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(51778092, 51878103); 重庆市自然科学基金创新群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0003)

作者简介: 刘建宇(1997-), 男, 主要从事钙质砂中桩基承载特性研究, E-mail: 957605112@qq.com.

丁选明(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: dxmhu@163.com.

Received: 2021-02-07

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51778092, 51878103); Innovation Group Science Foundation of the Natural Science Foundation of Chongqing, China (No. cstc2020jcyj-cxttX0003)

Author brief: LIU Jianyu (1997-), main research interest: bearing characteristic of piles in calcareous sand, E-mail: 957605112@qq.com.

DING Xuanming (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: dxmhu@163.com.

soil pressure changes significantly with the increase of the horizontal load. Under low stress levels, the horizontal bearing capacity of a single pile in calcareous sand is greater than that in silica sand. The model test of calcareous sand under higher stress levels needs to be further explored.

Keywords: calcareous sand; pile foundation; single pile; model test; bearing characteristics

钙质砂广泛分布在中国南海海域,因具有极高的碳酸钙含量而得名。与石英砂相比,钙质砂具有内部孔隙多、颗粒易破碎、重度较低、棱角和内摩擦角较大等特点^[1-4]。由于其独特的物理特性,钙质砂与石英砂在工程力学性质上有较大的差异,导致在钙质砂地基上进行工程建设时,现有的设计理论和设计方法不再适用^[5],需要对其进行专门研究。

学者们对钙质砂中桩基承载特性展开了大量的研究。秦月等^[5]采用室内模型试验,模拟了单桩在不同受力方向下的承载特性,分析了钙质砂地基中桩-土相互作用机制。江浩^[6]对钙质砂中单桩和群桩分别进行了室内模型试验,通过与石英砂中桩基模型试验结果进行对比,发现钙质砂地基中桩侧阻力较低是由颗粒破碎引起的。刘家易^[7]研究了钙质砂中X形桩的竖向承载特性。邓玮婷等^[8]研究了钙质砂中膨胀混凝土桩竖向承载特性,发现提高桩体线膨胀率可以有效提高桩的极限承载力和侧摩阻力。Agarwal等^[9]给出了极限端阻力和极限侧阻力随不同碳酸盐含量的取值。Angemeer等^[10]在澳大利亚的巴斯海峡通过打入全尺寸桩,发现在钙质砂中钢管桩的侧阻力非常小,随着深度增加几乎不发生改变。Dewi等^[11]利用有限元软件 PLAXIS 3D 模拟了钙质砂中单桩在竖向循环荷载作用下的响应。然而,上述研究都是针对钙质砂中桩基的竖向承载特性,对水平承载特性的研究尚少。

在海洋工程建设中,建筑物所承担风荷载或者波浪荷载等水平方向的荷载通常由桩基础传递到地基,所以,有必要研究钙质砂中桩基的水平承载特性。笔者通过室内模型试验,探究钙质砂中单桩水平承载特性,对钙质砂和石英砂地基中不同长度单桩的桩顶位移、桩顶转角、桩身弯矩以及桩侧土体压力进行详细的分析和讨论。

1 试验概况

1.1 试验材料

模型试验中土体难以按照相似关系改变其性质,所以采用原状土。为了保证试验中土体满足连续性和均匀性假定,消除地基土粒径对单桩承载特性产生的粒径效应,徐光明等^[12]发现结构与土料粒径之比大于23时可忽略粒径效应。试验采用的

钙质砂取自南海某岛,石英砂为福建标准砂。为了消除粒径效应,烘干后筛去原状土中少量粒径大于2 mm的粗颗粒,中值粒径约为0.8 mm,桩径与粒径比均不小于23。两种试验用砂的颗粒级配曲线如图1所示,钙质砂的不均匀系数 $C_u=2.64$,曲率系数 $C_c=0.95$,标准砂的不均匀系数 $C_u=4.50$,曲率系数 $C_c=1.19$ 。试验过程中,在模型槽上每隔10 cm标记一个刻度线,采用分层填筑的方式,倒入一定质量的砂样后进行压实以控制土体的相对密实度为70%。

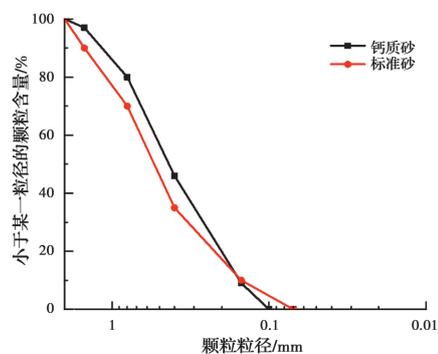


图1 级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curves of test soil

通过直剪试验,得到试验用砂的 τ - σ 关系曲线,如图2所示。标准砂黏聚力 $c=0$,摩擦角 $\varphi=38.65^\circ$;钙质砂黏聚力 $c=12.23$ kPa,摩擦角 $\varphi=43.46^\circ$ 。与刘崇权等^[4]得到的直剪试验结果相近,钙质砂具有微小的黏聚力, $c\approx 10$ kPa, φ 为 $35^\circ\sim 45^\circ$ 。由于颗粒形状极不规则、表面粗糙、棱角度高,钙质砂所表现出来的 c 值主要来源于颗粒之间的咬合嵌固作用,产生机理与粗颗粒土相似^[13]。直剪试验完成后,在钙质砂样的下剪切盒中有部分砂发生“胶结”,如图3所示,而标准砂样没有出现此现象。同时,钙质砂不规则的颗粒形状和较粗糙的表面也是导致其具有较大内摩擦角的主要原因。钙质砂和石英砂的物理力学参数见表1。

表1 试验土体物理力学参数

Table 1 Physical parameters of test soil

材料	黏聚力 c /kPa	摩擦角 φ /($^\circ$)	比重 G_s	最小干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
钙质砂	12.23	43.46	2.81	1.22	1.67
石英砂	0	38.65	2.65	1.56	1.69

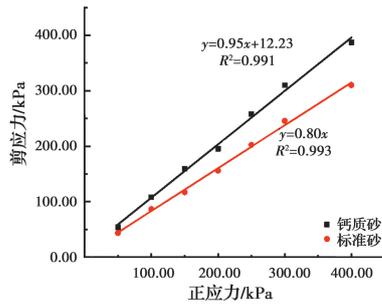
图 2 τ - σ 的关系曲线Fig. 2 τ - σ relationship curves

图 3 下剪切盒中砂样

Fig. 3 Sand sample in lower shear box

模型桩采用 C30 细石混凝土浇筑,采用外径为 50 mm,内径为 45 mm 的 PVC 管材作为模板。桩内布置有钢筋笼,钢筋笼由 4 根 12 # 直钢丝组成,并每隔 150 mm 设置一个箍筋。桩的埋置深度分别为 700、550、400 mm。混凝土配合比为水泥:水:砂:石=1:0.38:1.11:2.72。待混凝土强度足以保证其表面在拆模过程中不发生损坏时拆除 PVC 管,并在标准环境下养护 28 d。通过简支梁法测得模型桩的抗弯刚度 $EI=5\ 340\ \text{N}\cdot\text{m}^2$,弹性模量 $E=26.54\ \text{GPa}$ 。模型桩参数如表 2。

表 2 模型桩参数

Table 2 Parameters of model piles

桩号	埋深/mm	砂土种类	直径/mm	抗弯刚度 $EI/(\text{N}\cdot\text{m})$	弹性模量 E/GPa
P1	700	钙质砂	45	5 340	26.54
P2	550	钙质砂			
P3	400	钙质砂			
P4	700	标准砂			

1.2 试验方案

试验装置包括自制模型槽、加载系统和测量系统。自制模型槽尺寸为 $1\ \text{m}\times 0.8\ \text{m}\times 0.8\ \text{m}$ 。

Ovesen^[14]通过试验得到模型与箱内侧壁之间的距离大于模型尺寸的 2.82 倍时可忽略边界效应的影响。为消除边界效应的影响,将模型桩布置于模型槽的中央,长度和宽度方向模型桩和模型箱内侧壁之间的距离与模型桩外径的比值分别为 10.6 和 8.4,均满足要求。模型箱采用角钢作为骨架,亚克力板作为挡板。采用砝码、滑轮和钢绞线进行水平向加载。在地表处水平安置一个位移计,以测量桩顶的水平位移。在高出地表 100 mm 处安置另一个位移计,通过两位移计的差值计算桩顶的转角。在模型桩所对应的亚克力板处,竖向每隔 160 mm 设置一个直径为 10 mm 的孔,插入空心钢管,其内抵模型桩,外设小滑轮,一端连接桩身测点的斯百克线穿其而过,顺过滑轮连接电子位移计,以测量加载过程中桩身的侧向位移。试验模型如图 4。

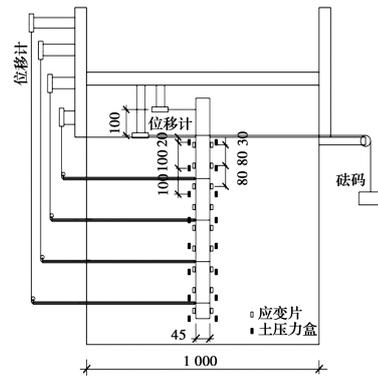


图 4 试验模型

Fig. 4 The device of test

通过对称布设在桩周的应变片来测量桩身应变。采用浙江黄岩测试仪器厂生产的 BX-120-3AA 型应变片,其栅长 3 mm,栅宽 2 mm,灵敏系数为 $(2.08\pm 1)\%$,电阻值为 $(120.1\pm 0.1)\ \Omega$ 。从加载点下 30 mm 起每隔 80 mm 布设一对应变片。通过布设在桩周的微型土压力盒来测量桩周土压力的变化,采用南京丹陌电子科技有限公司生产的 DMTY 系列应变式土压力盒,尺寸为 $\Phi 16\ \text{mm}\times 4.8\ \text{mm}$,量程为 0.2 MPa。从地表下 20 mm 起每隔 100 mm 布设一对土压力盒。位移计采用江苏泰斯特 TST-100 应变式顶杆位移计,其量程为 100 mm,灵敏度 $80\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。采用 DH3821 静态应变测试分析系统采集应变、位移以及土压力等信息。

采用慢速维持荷载法,取预估最大荷载的 1/10 作为加载量。参考相关研究,取每级荷载增量为 0.1 kN。每级荷载维持 1 h,加载后每隔 1、5、15、

30、60 min 各读一次,当连续两次桩顶位移不超过0.1 mm/h时施加下一级荷载。当桩顶水平位移达到0.15倍桩径或者出现明显拐点时停止加载。

2 试验结果分析

2.1 桩顶水平位移及桩顶转角

图5、图6分别为各桩桩顶水平位移-荷载曲线和桩顶转角-荷载曲线。可以看出,随着水平荷载的增加,桩基在地表处的水平位移和桩顶转角具有类似的变化规律。随着桩长的增加,相同荷载作用下桩顶水平位移减小。在加载初期,抗力主要由靠近地面部分的土体提供,桩周土体处于弹性阶段,土体的变形也主要是弹性变形,桩顶水平位移近似线性增大,随着荷载进一步增加,桩身的变形加大,土体由上至下逐渐发生屈服,水平荷载向更深层土体传递,桩周土体逐渐进入塑性阶段,位移变化速率逐渐提高。

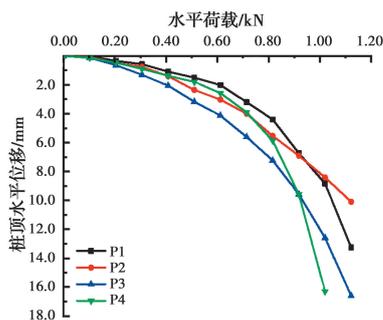


图5 桩顶水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curves of pile top

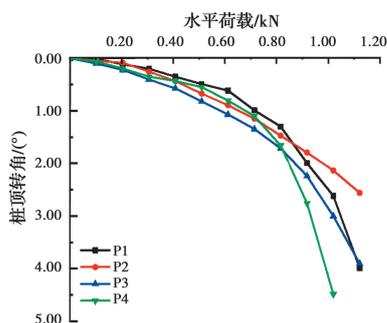


图6 桩顶转角曲线

Fig. 6 Angle curves of pile top

桩基横向承载力可取当桩基地表处侧向位移达到0.1倍外径或桩顶转角达到 2° 时所对应的横向荷载中的较小值^[15]。通过比较可以得到P1、P2、P3和P4的水平极限承载力为0.82、0.74、0.64、0.75 kN,对应的桩顶转角为 1.30° 、 1.20° 、 1.15° 和

1.25° 。在钙质砂地基中,相比于最短的P3,P2和P1的水平极限承载力分别提高了15.6%和28.1%,桩顶转角增大了4.3%和13%。当桩长相同时,钙质砂中P1的水平极限承载力相较于标准砂中的P4提升了9.3%,桩顶转角增加了4%。

随着桩长的增加,模型桩的水平极限承载力得到了明显提升,对应的桩顶转角也随之增大,一方面可能是对应的水平力增加了,另一方面可能是随着桩长的增加,桩的相对刚度减弱,桩逐渐由刚性桩向柔性桩转化,桩身的弯曲变形逐渐增大。

当水平荷载较小时,P4和P1的位移-荷载曲线几乎重合。随着荷载的增加,标准砂中P4的水平位移逐渐大于P1。可能是由于标准砂颗粒的表面较为圆润光滑,钙质砂颗粒形状不规则且表面粗糙,使其具有一定的黏聚力和较大的内摩擦角,相比于标准砂具有更大的抗剪强度,从而钙质砂中的P1具有更大的水平承载力。同时,采用的是模型试验,未考虑围压作用,土体所达到的应力水平较低。钙质砂在围压很低时加载,其颗粒破裂极少,土体变形以颗粒的相对错动滑移为主,与普通剪胀性土没有太大差别^[16]。钙质砂在较高应力水平下的桩基试验有待进一步开展。

2.2 桩身侧向位移

桩身侧移通过竖向设置的一系列位移计测得,由于装置设计的原因,各桩底部有一部分的侧向位移未能采集。图7为各桩在各级水平荷载作用下桩身侧向位移沿深度的分布曲线。可以看出,随着水平荷载的增加,桩身侧向位移逐渐增大,位移零点逐渐下移。随着埋深的增加,桩身侧向位移表现出明显的非线性。侧移主要集中在桩身上部,下部侧移较小。P1的侧向位移零点大约在 $-0.25 \sim -0.35$ m处,随着荷载增加逐渐下移,当深度超过侧向位移零点后,下部桩身侧向位移几乎为零。P2的侧向位移零点大约在 $-0.3 \sim -0.35$ m处,当深度超过侧向位移零点后,桩身出现较小的反向位移。随着荷载的增加,P3侧向位移的零点约在 $-0.25 \sim -0.3$ m处,该桩下部分的侧向位移虽然未能采集,但根据发展趋势可以判断下部分会出现反向位移。

随着桩长的增加,下部桩身侧向位移受桩顶水平力作用的影响逐渐减小。当桩身长度较短时,受到土体约束较小,桩的相对刚度较大,在水平荷载作用下桩身绕着侧向位移零点发生了一定的转动,弯

曲变形不明显。随着桩长的增加,土体对桩的约束增强,桩侧土体有足够大的抗力,使得桩身发生弯曲变形,超过水平侧移零点后,下部桩身的变形几乎不受荷载影响。

图 7(e)为 P1 和 P4 在各级荷载作用下的桩身

侧移,可以发现,在相同的水平荷载作用下,P4 桩身侧移大于 P1,可能是由于钙质砂在低应力水平下抗剪强度大于标准砂,土体能提供更大的抗力。当达到其水平极限承载力时,P4 的侧移小于 P1,可能是由于 P4 的水平极限承载力较小。

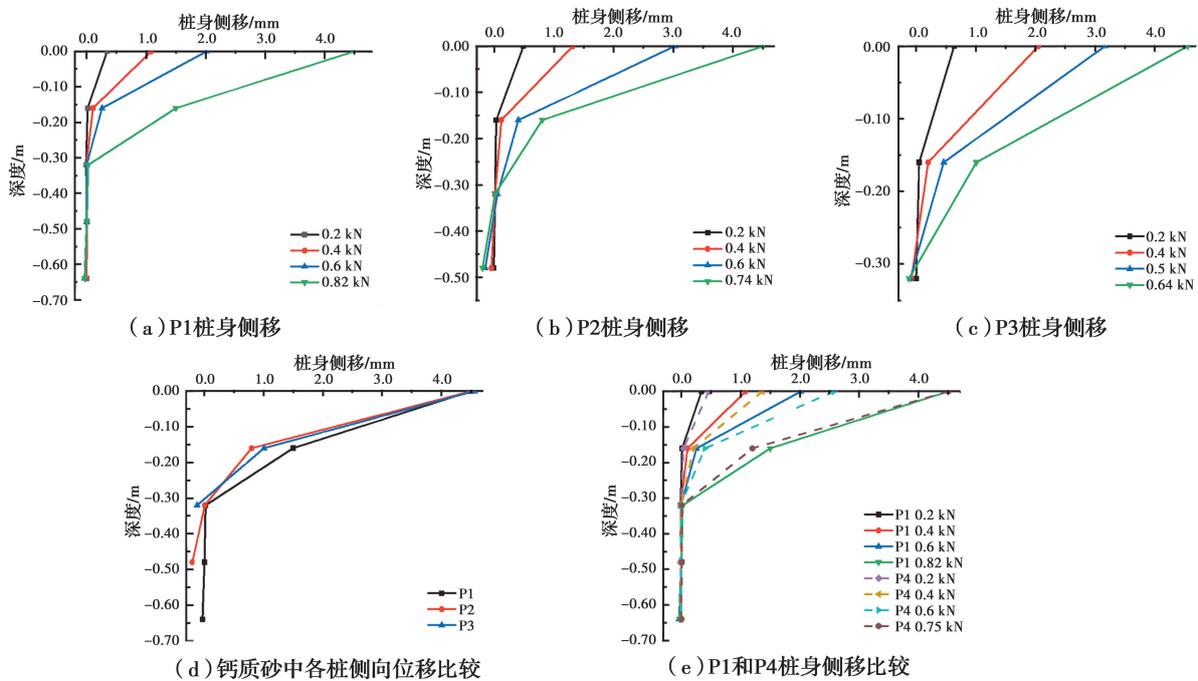


图 7 桩身侧向位移曲线

Fig. 7 Lateral displacement curves of piles

2.3 桩身弯矩

模型桩某一截面桩身弯矩 M 和对应的应变片数据 ϵ 满足关系式

$$M = EI \Delta \epsilon / D \quad (1)$$

式中: EI 为抗弯刚度; $\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$, 为同一截面的应变差值; D 为两应变片的间距, 即桩身外径 ($D = 45 \text{ mm}$)。

图 8 为各模型桩的桩身弯矩图。可以看出, 随着深度的增加, 桩身弯矩呈现出先增大后减小的发展趋势。同时, 随着水平荷载的增加, 桩身弯矩也呈增加趋势。对比各桩弯矩图, P1 的桩身弯矩主要集中在桩身上部, 当深度达到 0.45 m 处时出现反弯点, 随着深度的增加出现一定的负弯矩, 但弯矩变化非常小, 几乎为零。P2 桩身弯矩分布范围较 P1 要广, 当深度达到 0.5 m 后, 桩身弯矩几乎为零, 但没有出现反向弯矩。P3 全段均有弯矩分布, P4 桩身弯矩分布与 P2 类似。各桩弯矩峰值点出现在深度约为 0.15~0.2 m 的上部土层内, 位于桩长的 1/4~1/2 处, 说明中上部的桩身质量对桩基水平承载力

具有很大的影响。桩身长度对桩身受弯特性具有明显影响。随着桩长的增加, 桩身峰值弯矩逐渐增大, 说明增加桩长可以提高桩基水平承载力。同时, 峰值弯矩点的相对位置逐渐上移, 弯矩分布范围由桩身全段逐渐转向埋深较浅的桩段。随着水平荷载的增加, 中下部桩段的弯矩有所发展, 说明中下部土层也逐步分担水平荷载。

2.4 桩侧土压力

桩侧土压力是桩-土相互作用的结果, 埋在桩周的土压力盒测得加载过程中桩侧土压力的变化如图 9。规定在水平荷载作用下桩土挤压侧为迎土侧, 在图中采用实线表示; 桩土分离侧为离土侧, 采用虚线表示。加载之前对土压力盒的数据进行清零处理, 在加载过程中土压力盒数值为正值则说明该点土压力增大, 负值则说明该点土压力减小。

由图 9 可以发现, 桩身长度对桩侧土压力分布具有明显的影响。迎土侧土压力沿着深度方向先增大后减小, 主要集中在土体的上部, 峰值点的深度为 0.1~0.2 m, 即 0.2~0.4 倍桩长之间。桩身中下部

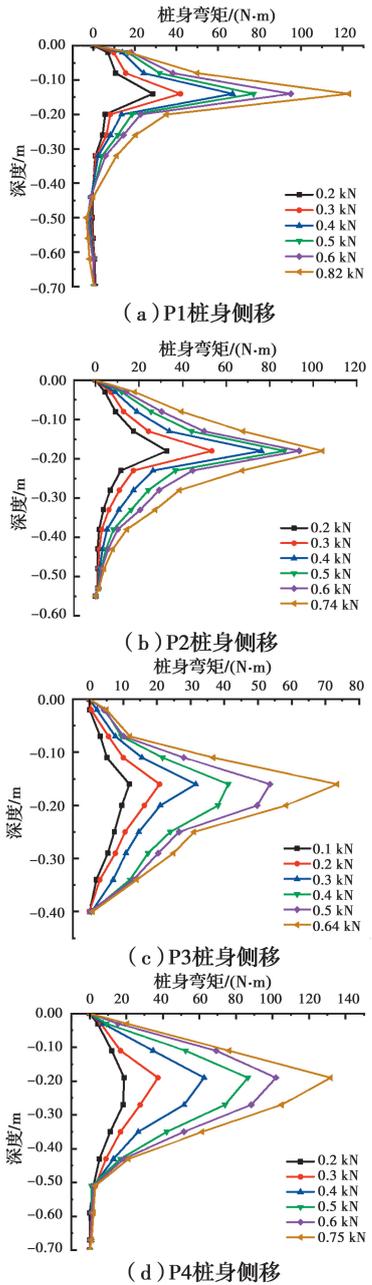


图 8 各模型桩的桩身弯矩图

Fig. 8 Bending moment curves of piles

的土压力变化较小,出现一定的负值,说明土压力减小,桩土有分离的趋势。各桩迎土侧土压力的最大值随着水平荷载的增加而增大,土体压力变化较为明显。离土侧的土压力变化较小,上部土体的压力几乎不随水平荷载的增加而变化,随着荷载的增加中下部土压力出现正值,说明桩底产生了反向位移。并且随着桩身长度的减小,离土侧下部土压力随着水平荷载增加而逐渐增大,可能是因为桩身长度减小,导致土体对桩身下半部分约束减小,尤其是桩底的约束减小,从而桩身下部土体压力增大,与短桩下

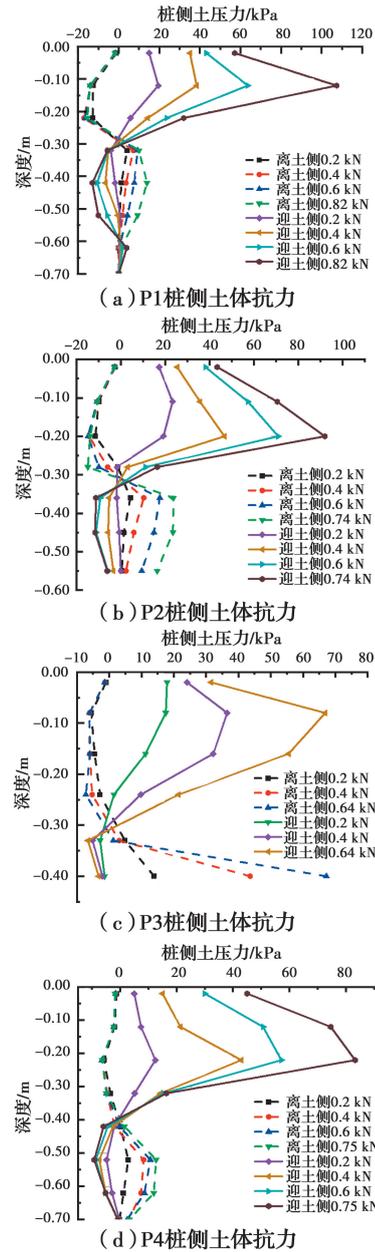


图 9 各桩桩侧土体抗力

Fig. 9 Soil pressure around piles

部桩身出现反向位移的结论相吻合。两侧土压力具有零点,钙质砂中各桩土压力零点约分别位于0.42、0.54、0.75 倍桩长处,随着桩长的减小,土压力零点的位置相对于桩身长度逐渐下移。在相同的水平荷载下,P1 桩侧土体压力大于 P4,说明 P1 桩周土体能够提供更大的桩-土抗力。同时可以发现,在水平极限承载力范围内,桩周土体的土压力值峰值约在 100 kPa,参考柴维等^[17]开展的钙质砂在不同剪速率下的直剪试验,当正压力在 100 kPa 左右时,其相对破碎势 B_r 约为 1%,颗粒破碎较小。

3 结论

对钙质砂中不同长度单桩的水平承载特性进行了研究,对比分析了各桩的变形特征、桩身弯矩以及桩侧土压力的分布规律,得到以下结论:

1) 桩长对水平承载特性具有显著影响,随着桩长的增加,相同荷载作用下桩顶水平位移减小,单桩水平极限承载力得到明显的提升。

2) 在低应力水平下,钙质砂中桩基水平承载力大于标准砂中桩基承载力,可能是在低应力水平下钙质砂的颗粒破碎并不明显,颗粒破碎对水平承载力的影响并不显著,钙质砂在较高应力水平下的模型试验有待进一步探究。

3) 桩身变形主要集中在桩身上部。当长度较小时,下部出现一定的反向位移,当长度较大时,下部水平位移几乎为零。随着桩长的增加,桩身变形逐渐呈现出由刚性转动到弯曲变形的特征。

4) 桩长对桩身弯矩分布具有较大影响,随着桩长的增加,弯矩的分布范围逐渐由桩身全段缩减至桩身上部分,在桩身下部出现反弯点,并有一定的反向弯矩。

5) 各桩承受水平荷载时,桩侧土体压力主要集中在桩身上部,上部土体对桩基水平承载力有较大的影响,改善上部土体的质量对桩基水平承载有利。迎土侧土压力随水平荷载增加变化较为明显,离土侧土压力变化较小。

参考文献:

- [1] 刘崇权, 单华刚, 汪稔. 钙质土工程特性及其桩基工程[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 331-335.
LIU C Q, SHAN H G, WANG R. The geotechnical characters of calcareous soils and the pile foundation engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 331-335. (in Chinese)
- [2] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831-1836.
ZHU C Q, CHEN H Y, MENG Q S, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831-1836. (in Chinese)
- [3] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的

几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 209-212.

LIU C Q, WANG R, WU X S. Some problems for the tests of physico-mechanical properties of calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 209-212. (in Chinese)

[4] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 32-37, 44.

LIU C Q, WANG R. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(1): 32-37, 44. (in Chinese)

[5] 秦月, 孟庆山, 汪稔, 等. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1714-1720, 1736.

QIN Y, MENG Q S, WANG R, et al. A study on bearing characteristics of single pile in calcareous sand based on model experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1714-1720, 1736. (in Chinese)

[6] 江浩. 钙质砂中桩基工程承载性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.

JIANG H. Research on bearing behavior of pile foundations in calcareous sands [D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)

[7] 刘家易. 珊瑚砂地基中 X 形桩竖向承载特性试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

LIU J Y. Research on vertical bearing properties of X-section pile foundation in calcareous sand [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)

[8] 邓玮婷, 丁选明, 彭宇. 珊瑚砂地基中膨胀混凝土桩竖向受压承载性能研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2814-2820.

DENG W T, DING X M, PENG Y. A study of vertical bearing capacity of expansive concrete pile in coral sand foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2814-2820. (in Chinese)

[9] AGARWAL S L, MALHOTRA A K, BANERJEE R L. Engineering properties of calcareous soils affecting the design of deep penetration piles for offshore structures [C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, 1977.

[10] ANGEMEER J, CARLSON E G, KLICK J H.

- Techniques and results of offshore pile load testing in calcareous soils [C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, 1973.
- [11] DEWI K, VU A T, MATSUMOTO T. Numerical study on behaviour of single piles in a coral sand [C]//Soft Soils 2016, September 27-28, 2016, Bandung, Indonesia, 2016.
- [12] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86.
XU G M, ZHANG W M. Study on particle size effect in centrifugal model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 80-86. (in Chinese)
- [13] 翁贻令. 钙质土的抗剪强度及其影响机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
WENG Y L. Research on shear strength and influence mechanism of calcareous soil [D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [14] OVESEN N K. The use of physical models in design: the scaling law relationships [C]//Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, 1979, 4: 318-323.
- [15] ZDRAVKOVIĆ L, TABORDA D, POTTS D, et al. Numerical modelling of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications [M]//Frontiers in Offshore Geotechnics III. CRC Press, 2015: 759-764.
- [16] 孙吉主, 汪稔. 钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 641-644.
SUN J Z, WANG R. Influence of confining pressure on particle breakage and shear expansion of calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 641-644. (in Chinese)
- [17] 柴维, 龙志林, 旷杜敏, 等. 直剪剪切速率对钙质砂强度及变形特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(Sup1): 359-366.
CHAI W, LONG Z L, KUANG D M, et al. Effect of shear rate on shear strength and deformation characteristics of calcareous sand in direct shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup1): 359-366. (in Chinese)
- [18] 杨超, 江浩, 岳健, 等. 钙质砂中桩基承载性状的模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 87-90.
YANG C, JIANG H, YUE J, et al. Model test on bearing behaviors of single pile in calcareous sand [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1): 87-90. (in Chinese)
- [19] WANG X Z, JIAO Y Y, WANG R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea [J]. Engineering Geology, 2011, 120(1-4): 40-47.

(编辑 胡玲)