

文章编号:1673-9469(2023)02-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.001

既有竖向荷载对承台桩水平承载特性影响的PIV试验研究

罗凯^{1,2}, 张小勇^{1,2}, 陈家勋¹, 徐美娟⁴, 梅国雄^{1,2,3*}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 4. 浙大城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310025)

摘要: 为研究既有竖向荷载下承台桩的水平承载特性,进行了2组PIV模型试验,分析了不同竖向荷载对承台桩的水平位移量、桩身弯矩及桩周土体位移场的影响规律,研究了竖向荷载对承台桩下桩土作用的影响机理。试验结果表明:在同一水平荷载下,桩顶既有竖向荷载有利于减小桩身水平位移,削弱水平荷载引起的桩身弯矩;在水平加载过程中,桩土作用的主要区域为桩周土体的中上部区域,桩顶竖向荷载的施加会调动桩侧土体,形成更大的土体扰动区;竖向荷载引起的土体密实化效应会降低桩身的水平位移和弯矩,提高承台桩的水平承载力;同时这一密实现象也降低了桩侧土体的隆起量与塌陷面积。

关键词: 竖向荷载;水平承载特性;承台桩;模型试验;PIV

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

PIV Experimental Study of Existing Vertical Load on Horizontal Bearing Capacity of Pile with Cap

LUO Kai^{1,2}, ZHANG Xiaoyong^{1,2}, CHEN Jiayun¹, XU Meijuan⁴, MEI Guoxiong^{1,2,3*}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China; 4. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou, Zhejiang 310025, China)

Abstract: To study the horizontal bearing capacity of pile with cap under the existing vertical load, two groups of PIV model test were carried out. The effects of different vertical loads on the horizontal displacement, bending moment of pile and soil displacement field around pile are analyzed. The influential mechanism of vertical load on pile-soil interaction under pile with cap is studied. The results show that the existing vertical load decreases the horizontal displacement, weakens the bending moment of pile under the same horizontal load. In the process of horizontal loading, the main region of pile-soil action is the middle and upper region of the soil around the pile. The application of the vertical load on the pile top will mobilize the soil around the pile, form a larger soil disturbance area. The soil densification effect caused by vertical load will reduce the horizontal displacement and bending moment of pile and increase the horizontal bearing capacity of cap pile. Meanwhile, this densification phenomenon also reduces the uplift and collapse area of pile side soil.

Key words: vertical load; horizontal bearing capacity; pile with cap; model test; PIV

承台桩由于其更小的整体沉降、更好的整体稳定性被广泛应用于城市高层建筑、桥梁工程及近海港口工程中^[1]。然而,考虑到日益复杂的工

程概况,承台桩不仅承担上部建筑物传递的竖向荷载,还需承受风、地震作用、车辆制动力、行船及水流等引起的水平荷载。因此,研究既有竖向荷

收稿日期:2022-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168046,52178321);广西自然科学基金资助项目(2019GXNSFBA185028)

作者简介:罗凯(1997-),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,主要从事桩土相互作用机理等方面研究。

* 通讯作者:梅国雄(1975-),男,湖北黄梅人,博士,教授,主要从事固结理论和桩土相互作用等方面研究。

载作用下的承台桩水平承载特性存在一定的工程应用价值^[2]。

国内外学者基于现场载荷试验及室内模型试验,对不同类型桩基在既有竖向荷载作用下的水平承载特性开展了相关研究。柴红涛等^[3]通过多组离心机模型试验,对桩基在竖向、水平荷载作用下的承载特性进行研究,发现既有竖向荷载对桩基的水平承载力起削弱作用,Goryunov^[4]经过理论分析,认为当桩基承受一稳定水平力时,桩顶竖向荷载的作用会增大其水平变形,降低桩基水平承载力;木林隆等^[5]针对既有荷载对梁板式桩筏基础水平承载性能的影响展开了室内模型试验,研究了竖向荷载下桩筏基础两端弯矩和承台底土压力分布规律,发现竖向荷载可以提高桩筏基础的水平承载能力,提高其抗弯强度,这与冯凯等^[6]、朱小军等^[7]的研究结论一致。

上述学者采用试验手段研究了竖向荷载对桩基水平承载特性的影响机理,分析了桩身加载过程中弯矩、侧摩阻力等变化规律,但其研究结论存在矛盾性,且大多数研究主要集中在桩基的宏观承载和变形特性上,对桩周土体位移变形的量化研究及相关研究方法鲜有涉及,对桩-土作用机制缺乏关注。粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV)是基于流体显影的传统方式,结合数字图像后处理技术而产生的新型流体力学测量法,由White等^[8]将其引入到土体变形的测量中,该技术由于直接以土体为研究对象、可进行土体的小变形监测等特点被广泛用于岩土工程的试验研究中^[9-10]。

基于上述研究,为得到竖向荷载下桩基水平

承载特性的一致性结论,需开展进一步的研究。本文设计2组PIV模型试验以探究既有竖向荷载作用下的承台桩水平承载特性问题,分析既有竖向荷载对桩身水平位移、桩身弯矩的影响规律,采用PIV法揭示桩侧土体位移场分布发展规律,阐释既有竖向荷载下桩-土相互作用机制,以期指导实际工程。

1 室内试验

1.1 试验装置

试验装置布置如图1所示。可视化模型箱的内部尺寸为900 mm(长)×450 mm(宽)×1 000 mm(高),模型箱正面为厚度20 mm的钢化玻璃,在玻璃表面每隔90 mm粘贴控制点,控制点内径为6 mm,外径为10 mm,用于后续PIV法分析桩周土体位移变形^[11],除顶面留空外,其余面使用木板连接,模型箱成型后在外部以角钢焊接框架,在模型箱左侧安装有定滑轮装置,以便进行水平方向加载。

试验时需要拍摄高像素图片,为后续PIV分析所用,本文采用尼康D70数码相机,分辨率设置为2 600×2 340,为避免相机抖动对试验结果造成误差,通过蓝牙连接的方式遥控拍摄过程,将相机拍摄间隔调整为2 s,进行不间断拍摄,同时在相机两侧放置2盏聚光灯,作为面光源,提高图片亮度^[12]。

1.2 试验土样

试验土样为相对密度 $D_r=70\%$ 的福建标准

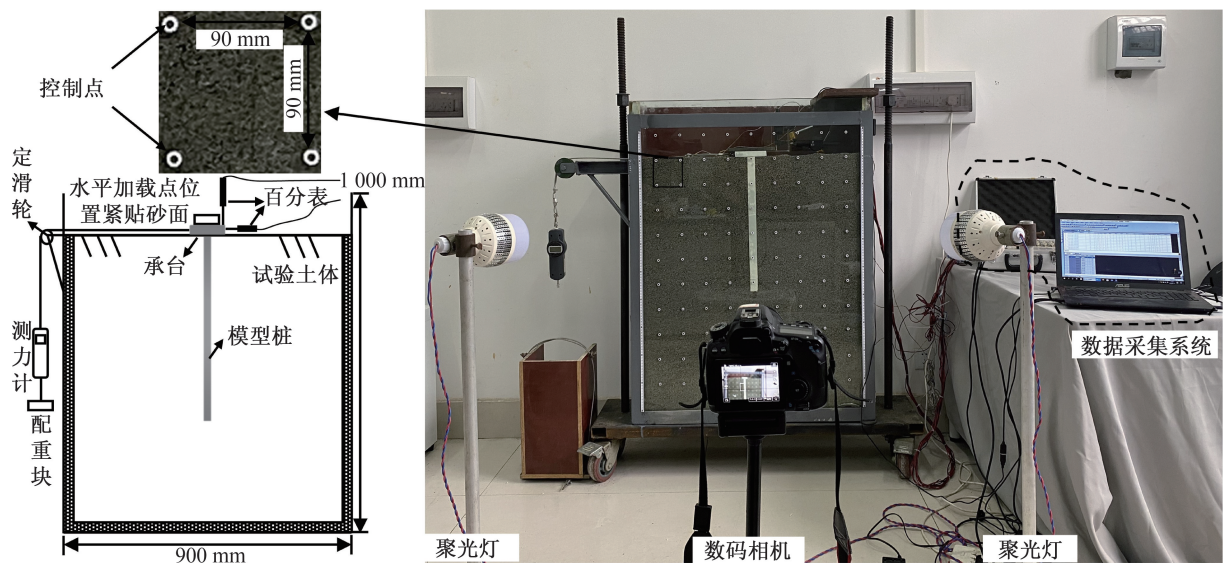


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental instrumentation

砂,试验前依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[13]进行基本土工试验,测定土体力学指标,其主要指标见表1。

表1 标准砂物理参数

初始密度	最大干密度	最小干密度	比重
$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_{dmin}/(g \cdot cm^{-3})$	G_s
1.630	1.740	1.416	2.643

为便于观察桩基受荷过程中地基土的变形情况,同时满足PIV法对于标准砂自身结构形成的测量精度要求,在不改变砂土物理性质的情况下,需人为制造土体可识别的纹理特征。因此在试验前将20%的砂土用油性墨水染成黑色,将其烘干后,与原状砂均匀混合^[14],如图2所示。填砂时根据上述设计的相对密实度及砂土密度,采用质量-体积法将砂土分层填入模型箱中,每层10 cm,分层压实后静置24 h,保证试验时砂土的密实度一致。



图2 试验用砂

Fig. 2 Sand used in experiments

1.3 模型桩及监测布设

模型桩及承台采用有机玻璃制作,弹性模量 $E_p = 3.07$ GPa,均为半模闭口桩,桩与承台间采用螺栓连接,以模拟桩头与承台的固定连接。模型桩及承台的具体参数:桩径 $d = 30$ mm,桩长 $l = 500$ mm,承台的尺寸为120 mm(长)×60 mm(宽)×20 mm(高)。模型桩侧应变片与土压力盒的布置见图3(a)所示,沿桩身以100 mm间距对称布设如图3(b)。试验中模型桩与模型箱侧壁及模型箱底部之间的预留距离为400 mm,约为13d,该尺寸可以忽略试验过程中边界效应的影响^[15]。

1.4 试验加载方案

试验加载方案一共为2组,具体加载方案如表2所示。这种通过改变桩顶所受的竖向荷载的大小,再施加水平荷载的加载过程既可以模拟不同施工期下桩基的受力情况,又可以反映建筑竣工

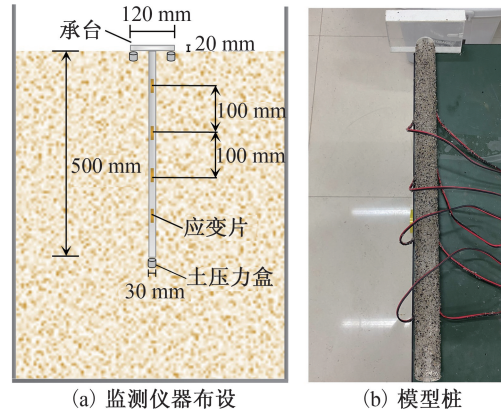


图3 监测仪器布设与模型桩

Fig. 3 Layout of monitoring instruments and the pile

后桩基中分担不同竖向荷载工况下的各个桩的水平承载力^[16]。其中,既有竖向荷载是通过承台顶部的配重块施加,水平荷载通过侧向的轮滑系统施加。

表2 试验加载方案

组号	竖向荷载大小	竖向荷载性质	水平荷载大小	水平荷载性质
1	Q_u	分步施加	0	恒定
	0	恒定	H_u	分步施加
	$Q_u/4$	恒定	H_{u1}	分步施加
2	$Q_u/2$	恒定	H_{u2}	分步施加
	$Q_u/3/4$	恒定	H_{u3}	分步施加
	Q_u	恒定	H_{u4}	分步施加

加载方法:第1组模型试验采用配重块堆载法进行分级加载,第2组模型试验的加载顺序依次为竖向荷载、水平荷载,由于在试验加载过程中存在不同方向的荷载,因此在模型桩的加载过程中其竖向与水平向均按照慢速荷载稳定法。当达到试验所需竖向荷载后,维持竖向荷载不变,利用定滑轮施加水平荷载,加载方向水平向左,参考《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[17]及曹卫平等^[18]提出的方法,将竖直沉降和水平位移均不超出0.01 mm且荷载持续作用不低于30 min作为每级荷载的稳定标准。

终止加载标准:单级荷载作用下的水平或竖向位移超过上级荷载作用下的位移2倍且1 h仍不能维持稳定。

2 模型试验结果

2.1 竖向荷载作用下的极限承载力

试验得到的竖向荷载-沉降曲线如图4所示。

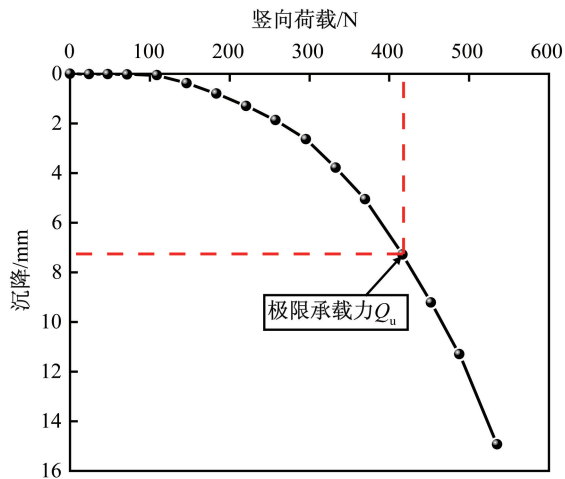


图4 竖向荷载-沉降曲线

Fig. 4 Vertical load-displacement curve

由图4可知,在加载前期时,桩顶的沉降变化较小,当竖向荷载大于200 N时,沉降迅速增加。由于本次试验的竖向荷载-沉降曲线为缓变趋势,为确定其竖向极限承载力,参考规范[17]绘制时间对数与沉降($\lg T-s$)关系曲线,见图5,取 $\lg T-s$ 曲线尾部出现明显拐点的前一级荷载为竖向极限承载力,确定本次试验第14级荷载的前一级第13级荷载为极限承载力, $Q_u=416.8$ N。

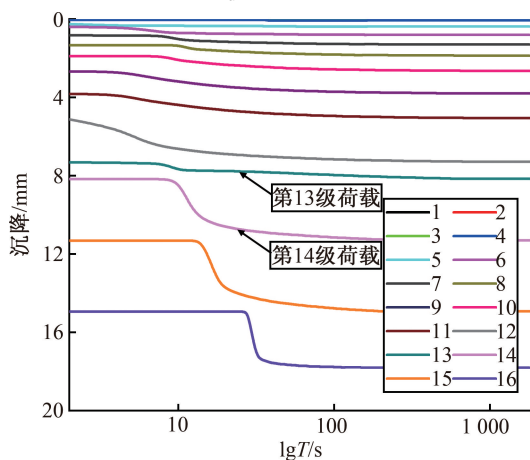


图5 时间对数-沉降曲线

Fig. 5 Logarithm of time-displacement curves

2.2 水平荷载-水平位移关系曲线

图6为承台桩在竖向荷载分别为0、 $Q_u/4$ (104.2 N)、 $Q_u/2$ (208.4 N)、 $Q_u/3/4$ (312.6 N)以及 Q_u (416.8 N)时的水平荷载-位移曲线,为确定承台桩水平极限承载力,根据《工程地质手册》^[19]绘制水平荷载-位移梯度曲线(位移梯度为各级位移变化量与各级荷载变化量的比值),见图7,取水平荷载-位移梯度曲线的第二拐点对应的水平荷载值为承台

桩水平极限承载力,则有: $H_{u1}=187.2$ N、 $H_{u2}=211.1$ N、 $H_{u3}=234.6$ N、 $H_{u4}=248.5$ N、 $H_{u5}=278.7$ N。

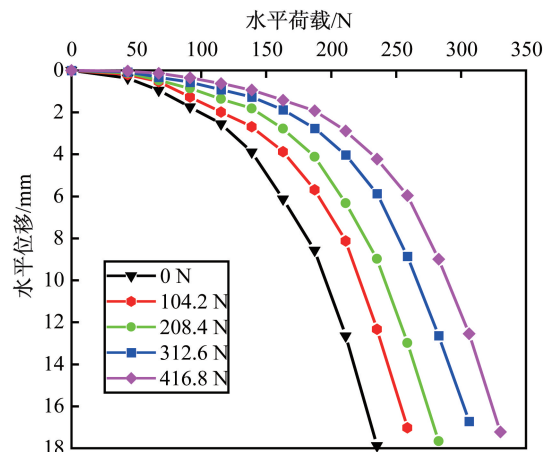


图6 桩基水平荷载-位移曲线

Fig. 6 Horizontal load-displacement curves of pile

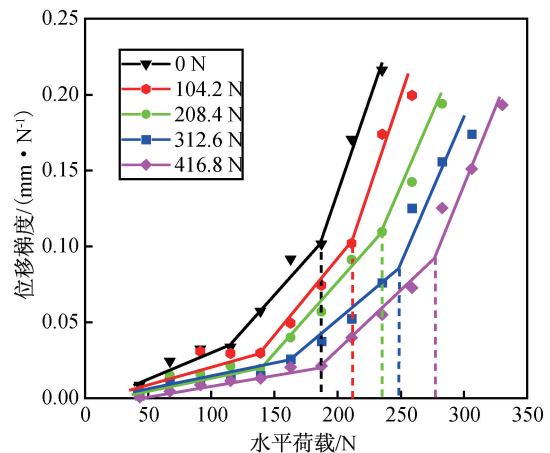


图7 水平荷载-位移梯度曲线

Fig. 7 Horizontal load-displacement gradient curves

对比图6和图7的试验结果,可知:①随着桩顶竖向荷载的施加,桩身水平位移在同一水平荷载作用下逐渐减小,当水平荷载为187.2 N时,竖向荷载为416.8、208.4、0 N时的水平位移分别为1.92、4.12和8.57 mm,其相较于竖向荷载为0 N时的水平位移分别减小了77.60%和51.92%,说明在砂土地基中,承台桩上预先施加的竖向荷载会使承台的底部出现更大的摩阻力,有利于桩身水平位移的减小^[20];②随着桩顶竖向荷载的增加,承台桩的水平极限荷载均有提高,说明预先施加的竖向荷载有利于桩基水平承载力的提高^[21]。

2.3 桩身弯矩

通过试验测定的桩身两侧监测点处的拉应变 ε_+ 和压应变 ε_- ,计算桩身截面的弯矩 M :

$$M = \frac{E_p I_p \Delta \varepsilon}{b_0} \quad (1)$$

式中: M —弯矩, $N \cdot m$; E_p —桩弹性模量, Pa ; I_p —桩身截面惯性矩, m^4 ; $\Delta \varepsilon$ —同一截面拉应变与压应变差值, b_0 —同一桩身截面高处拉、压应变测点间距, mm 。

本次试验分别设置桩顶的竖向荷载为 $0 N$ 、 $Q_u/4$ ($104.2 N$)、 $Q_u/2$ ($208.4 N$)、 $Q_u/3/4$ ($312.6 N$) 以及 Q_u ($416.8 N$), 用以对比分析不同竖向荷载下, 承台桩水平承载特性的变化规律, 对应选取水平荷载为 $187.2 N$ 时的桩身弯矩绘制图 8。

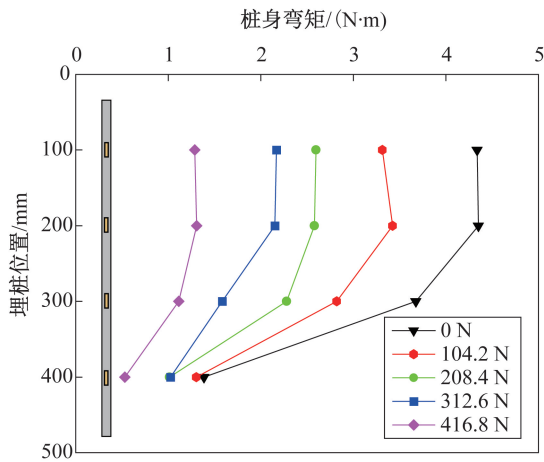


图 8 不同竖向荷载下桩身弯矩对比 ($H=187.2 N$)

Fig. 8 Comparisons of bending moment of pile subjected to different vertical loads ($H=187.2 N$)

由图 8 可知: 当桩顶水平荷载相同时, 不同竖向荷载作用下的桩身弯矩变化规律相似, 桩身弯矩随埋深的增大先增大后减小, 桩身最大弯矩位于埋深 $100 \sim 200 mm$ 处; 预先施加的竖向荷载使得桩身的最大弯矩值得到不同程度的降低, 当施加的竖向荷载为 416.8 、 $208.4 N$ 时, 桩身的最大弯矩

值与竖向荷载为 $0 N$ 时分别减小了 70.02% 和 40.75% , 与同一水平荷载下位移的减小量接近, 说明预先施加的竖向荷载在模型桩各截面处产生了预压应力, 模型桩的抗弯强度提高, 随着竖向荷载的增大, 桩基抵抗弯矩能力越强, 表现为桩身弯矩的减小^[22]。

3 桩周土体位移场

对试验过程中拍摄的照片进行图像处理, 是本次 PIV 模型试验的关键步骤, 本文使用 Stanier 等^[23] 基于 MATLAB 编译的 GeoPIV-RG 程序获得桩周土体的位移矢量场、位移云图及位移轮廓图等。整个分析过程包括图像前处理、PIV 分析及后期导出。

3.1 位移矢量场分析

图 9 为水平极限承载力下竖向荷载为 0 、 208.4 及 $416.8 N$ 的桩周土体位移矢量图。由图 9 可知, 桩左侧的中上层土体被压缩, 处于被动受压的状态, 桩右侧土体因桩身的偏移而产生桩土分离现象, 处于主动状态; 对比图 9(a) — (c) 的试验结果可知, 桩侧土体的变形因桩顶竖向荷载的不同而存在差异, 随着桩顶竖向荷载增大, 荷载通过承台桩传递到桩周的土体中, 此时承台下方土体在竖向荷载的挤压下受扰动范围更广, 会调动桩侧更多的土体参与抵抗水平荷载^[24], 因此形成的土体剪切带范围更大, 说明竖向荷载的增大提高了土体被动区的土体抗力^[25], 其抵抗桩基变形能力提高。

3.2 土体位移区分析

图 10(a) — (c) 为承台桩在水平极限荷载下

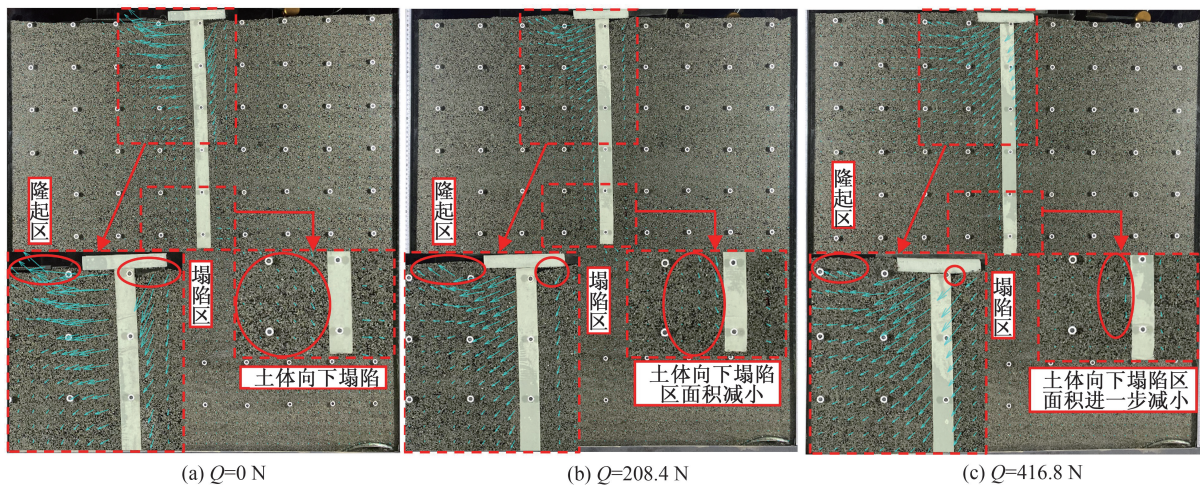


图 9 极限水平荷载下桩周土体位移矢量图

Fig. 9 Displacement vector diagram of soil around pile under ultimate horizontal load

不同工况的位移云图。由图 10 可知,桩土相互作用区域内土体位移场都是沿着水平方向和深度方向逐渐发展的,其主要作用范围为埋桩深度 $9d$ 范围内的土体,桩左、桩右影响范围分别距离桩身初始轴线 $7.2d$ 和 $3d$,并在深度 $9d$ 处存在一旋转点,旋转点以上左侧土体位移场呈扇形,右侧土体位移场呈弧形;而旋转中心下方土体由于桩体的旋转形成弧形位移场,由此可以看出桩身在受水平荷载时,桩周土体的变形量主要集中在上部桩体,桩端处土体产生的位移远远小于上层土体,主要是土体对桩身存在嵌固作用^[26]。对比图 10(a)~(c)的结果分析可知,在水平极限荷载下,由于桩顶竖向荷载的存在,位移区域的影响深度相较于竖向荷载为 0 N 时,分别增大了 7.8% 和 19.6% ,桩左、桩右位移影响宽度增大了 6.1% 和 18.9% ,说明承台上方所受的竖向荷载通过承台传递到下侧土层,并随着土体的沉降带动周围土体位移,形成更大的土体扰动区,对土体的抗剪强度有提高作用。

为探究既有竖向荷载对桩周土体的扰动情况,将施加单一竖向荷载下的试验结果描绘成桩周土体位移云图,图 11 为承台桩受竖向荷载的位移云图,由图 11 可知承台桩承受竖向荷载时,桩侧周围的土体,尤其是接近承台底面处的土体,由于砂土和承台之间的摩擦而被向下挤密形成楔形土体位移区,即产生弹性核^[14],荷载通过土体中的弹性核向下传递,将桩周土体挤开,进一步形成拱状位移区,同时桩端下方的土体由于桩身的沉降被压密,形成土体压密区,这两种向下的桩基沉降过程均会导致土体产生密实化现象^[24-25],这一现象是竖向荷载引起桩身水平受荷过程中位移量与弯矩减小的原因,并随着竖向荷载的增大,密实化效应增强。

3.3 既有竖向荷载下的桩-土水平变形机制分析

图 12 为承台桩在砂土地基中的水平变形模机制,结合图 10、图 11 的试验结果可知,其主要的桩土作用区域集中在桩周土体的中上部区域^[26],即图 12 中的 II 区和 III 区为水平荷载主要的桩-土相互作用区,II 区为桩左土体被动受压区,由于桩身的水平位移而使土体受到挤压,承台左侧方向的土体会发生隆起现象;III 区为桩右土体主动受压区,部分土体随桩身前倾而失去桩身支撑,滑落到桩身右下方,产生土体塌落区,可能造成地表塌陷,导致桩基随土体整体滑动破坏,进而使承台桩上部建筑失稳。当桩基出现较大的水平位

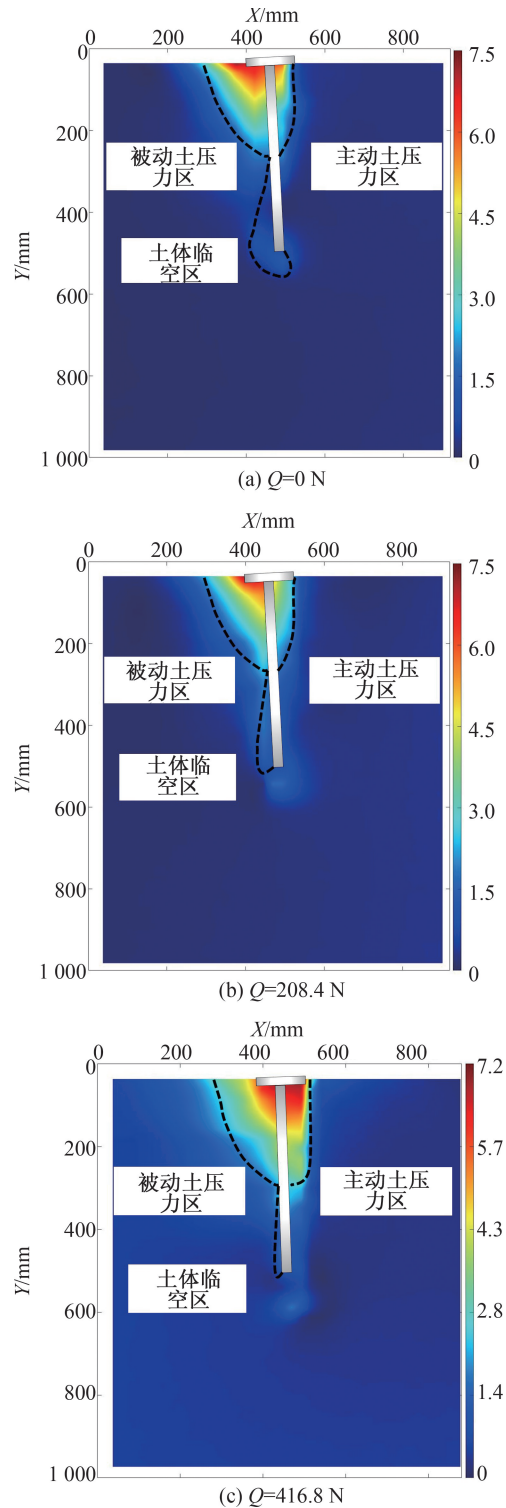


图 10 极限水平荷载下桩周土体位移云图

Fig. 10 Displacement cloud images of soil around pile under ultimate horizontal load

移时,承台桩桩身下部出现明显的旋转中心,同时旋转中心下方的 I 区土体会因桩身的水平位移主动施压而失去支撑,上部土体向下塌陷,易发生主动破坏,形成临空区,IV 区土体则处于被动受压的状态。

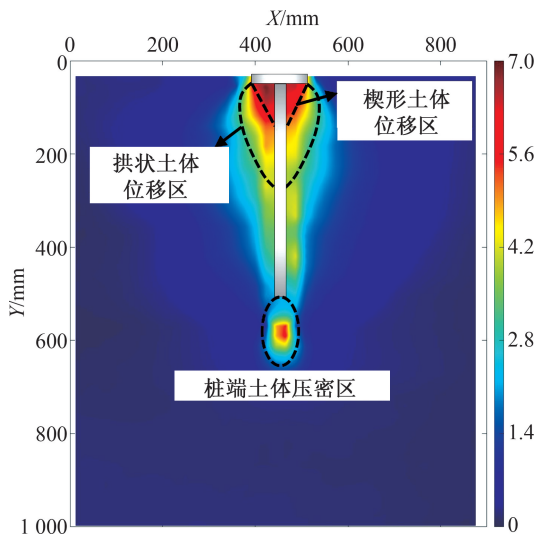


图 11 竖向荷载下承台桩桩周土体位移云图

Fig. 11 Displacement cloud images of soil around pile with cap under vertical load

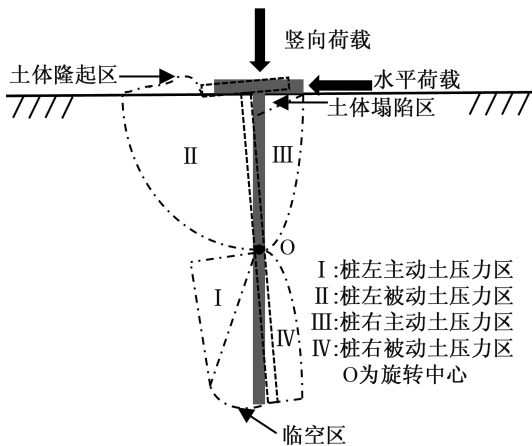


图 12 既有竖向荷载作用下承台桩-土变形机制

Fig. 12 Pile with cap-soil deformation mechanism under existing vertical load

当桩顶承受竖向荷载时由于桩基沉降产生的密实化效应,提高了土体的密实度,使桩侧的土体隆起区及塌陷区的高度均有减小,也降低了临空区土体的塌陷面积。

在实际工程中,当上层建筑受水平荷载时,在保证桩基安全性的前提下,可通过减少基桩数目,提高桩顶承受的竖向荷载,以此降低承台基础两侧土体的隆起塌陷变形,减小桩端土体处的塌陷面积,充分发挥桩基的承载特性;另一方面,可以降低工程造价,具有一定的经济效益。

4 结论

1) 在砂土地基中,承台桩顶预先施加的竖向荷载会使承台底部的摩阻力增加,从而减小桩身

的水平位移,提高桩基的水平承载力;另一方面,竖向荷载会使桩身各截面处产生预压应力,抵抗水平力产生的弯矩,提高桩身抗弯强度,从而降低桩身的最大弯矩值。

2) 桩周土体变形规律表明,土体位移场是沿着桩基水平向和深度方向逐渐发展的,桩周土体的位移变形主要集中在上部桩体距离地基土表面 $9d$ 范围内,而竖向荷载的提高会带动承台下方的土体产生沉降,被扰动的土体进一步调动桩侧土体,形成更大的土体扰动区,进而形成更大范围的土体剪切带抵抗桩基变形。

3) 桩周土体产生的土体密实化现象是竖向荷载引起的承台桩的水平承载力提高的原因。

4) 桩顶竖向荷载的施加会降低桩身两侧土体隆起区与土体塌陷区的高度,减小桩端处土体的临空区面积,提高承台桩的稳定性。

参考文献:

- [1] NGUYEN D C, JO S B, KIM D S. Design Method of Piled-Raft Foundations Under Vertical Load Considering Interaction Effects [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 47: 16-27.
- [2] 刘红军,王永玮,王建收. 既有竖向荷载对单桩水平承载特性影响的研究进展[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2017, 47(8): 119-125.
- [3] 柴红涛,文松霖. 水平竖直组合荷载作用下桩基承载特性的离心模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(12): 87-90+96.
- [4] GORYUNOV B F. Discussion on Analysis of Piles Subjected to the Combined Action of Vertical and Horizontal Loads[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1973, 10: 10-13.
- [5] 木林隆,李杰,张延军,等. 竖向荷载对风机基础水平承载性能影响试验研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2017, 36(2): 55-60.
- [6] 冯凯,木林隆,张静,等. 竖向荷载对砂土中大直径桩水平加载反应的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 53-58.
- [7] 朱小军,孔伟阳,龚维明,等. 非连接式桩筏基础水平特性试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 97-105+115.
- [8] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil Deformation Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV) and Photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619-631.
- [9] 孔纲强,曹兆虎,周航,等. 水平荷载下扩底楔形桩承载力特性透明土模型试验[J]. 土木工程学报, 2015, 48(5): 83-89.

- [10] 王鹏鹏,郭晓霞,桑勇,等.基于数字图像相关技术的砂土全场变形测量及其DEM数值模拟[J].工程力学,2020,37(1):239-247.
- [11] 张敏,吴宏伟.颗粒图像测速技术在离心试验变形分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3858-3864.
- [12] 刘宇飞,樊健生,聂建国,等.结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J].土木工程学报,2021,54(6):79-98.
- [13] GB/T 50123—2019,土工试验方法标准[S].
- [14] 杨济铭,张小勇,张福友,等.砂土中桩-土-承台协同作用下桩基承载特性细观研究[J].岩土力学,2020,41(7):2271-2282.
- [15] 赵春风,刘丰铭,邱志雄,等.砂土中竖向和水平荷载共同作用下的单桩承载特性研究[J].岩土工程学报,2015,37(1):183-190.
- [16] 陈正,刘宇,梅国雄.既有竖向荷载对微型桩水平承载特性的影响[J].南京工业大学学报:自然科学版,2011,33(1):101-106.
- [17] JGJ 106—2014,建筑桩基检测技术规范[S].
- [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.
- [19] 化建新,郑建国.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [20] 朱克文,吕国顺,马超.水平-竖向耦合荷载下单桩承载性状试验研究[J].建筑结构,2018,48(S2):861-864.
- [21] 丁选明,周仕礼.复杂荷载作用下桩基承载特性模型试验系统研发[J].科学技术与工程,2016,16(11):69-74.
- [22] 郑刚,刘双菊,伍止超,等.刚性桩复合地基在水平荷载作用下工作性状的模型试验[J].岩土工程学报,2005,27(8):865-868.
- [23] STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al. Improved Image-based Deformation Measurement for Geotechnical Applications[J]. Canadian Geotechnical Journal,2016,53(5):727-739.
- [24] ZHANG X Y, JIANG M J, YANG J M, et al. The Macroscopic and Mesoscopic Study on Strengthening Mechanisms of the Single Pile with Raft Under Pile-Soil-Raft Combined Interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2022,144:104630.
- [25] LU W J, ZHANG G. Influence Mechanism of Vertical-Horizontal Combined Loads on the Response of a Single Pile in Sand[J]. Soils and Foundations,2018,58(5):1228-1239.
- [26] 袁炳祥,吴跃东,陈锐,等.侧向受荷桩周土体内部位移场的模型试验研究[J].浙江大学学报:工学版,2016,50(10):2031-2036.

(责任编辑 周雪梅)