

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.101



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



带承台缩颈单桩的水平承载性能

徐志军, 宗飞龙, 郭兆翔, 王政权, 安瑞军

(河南工业大学 土木工程学院, 郑州 450001)

摘要: 桩基在施工与使用过程中易出现缩颈, 为上部结构埋下安全隐患。厘清带承台缩颈单桩的水平承载特性对桩基的工程设计及加固修补工作具有重要指导意义。采用熔融石英砂与等折射率的孔隙液配制透明砂土, 开展带承台完整桩与缩颈桩的透明土模型加载试验, 探究缩颈对桩基水平极限承载力的影响规律; 借助 Mat-PIV 增量程序处理加载前后的土体散斑场, 获取桩周土体的变形特征; 结合三维有限元数值仿真方法, 揭示缩颈影响带承台单桩水平承载特性的内在机理。结果表明: 缩颈会削弱水平荷载沿桩身的传递能力, 加剧桩身上部变形, 同时增大桩侧土反力。缩颈距桩顶越近、尺寸越大, 桩基水平极限承载力的损失越严重。桩身发生弯曲变形时, 承台将沿加载侧发生斜向下位移, 对土体产生竖向压力, 有效提高浅部土体强度并产生摩擦力, 约束桩身变形, 进而改善桩基整体承载性能。

关键词: 桩基; 带承台单桩; 缩颈桩; 桩土相互作用; 透明土

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)04-0089-08

Horizontal bearing performance of single necking pile with cap

XU Zhijun, ZONG Feilong, GUO Zhaoxiang, WANG Zhengquan, AN Ruijun

(College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: Pile foundation is easy to develop necking during construction and service, which would bring potential safety hazards to the superstructure. Clarifying the characteristics of horizontal bearing capacity of a necking pile with cap is important for engineering design and reinforcement repair. Transparent soil made by fused silica sand and pore liquid with the same refractive index is utilized to carry out model experiments and investigate the effect of necking on the horizontal bearing capacity of a necking pile with cap. The soil deformation around piles was obtained after processing the soil particle speckle field assisted with Mat-PIV incremental program. Subsequently, three-dimensional finite element numerical simulations are incorporated to explain the change reason of horizontal bearing capacity induced by necking. Results show that necking would weaken the transfer capacity of horizontal load along pile shaft, and drive the deformation of upper pile shaft and soil resistance on pile side to increase. The ultimate horizontal bearing capacity decreases with the increase of necking dimension or the reduction of the distance from necking to pile top. The pile bending can cause the pile cap to develop oblique downward displacement, which would exert vertical pressure on the soil. Subsequently,

收稿日期: 2024-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51978247); 河南省高等学校青年骨干教师培养项目(2021GGJS058)

作者简介: 徐志军(1984-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程研究, Email: xuzhijun@haut.edu.cn.

Received: 2024-07-11

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978247); Henan Provincial Higher Education Youth Backbone Teacher Training Project (No. 2021GGJS058)

Author brief: XU Zhijun (1984-), PhD, associate professor, doctoral supervisor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: xuzhijun@haut.edu.cn.

the strength of the shallow soil is enhanced and the developed friction limits pile deformation, resulting in the improved bearing capacity of the pile.

Keywords: pile foundation; single pile with cap; necking pile; pile-soil interaction; transparent soil

桩基础广泛应用于输电塔、近海平台、烟囱等承受水平荷载的工程结构中^[1]。然而,受不良环境、施工不规范等因素影响,桩基础易出现缩颈等缺陷^[2],导致桩身结构强度降低、桩基承载力下降,进而埋下安全隐患^[3]。以往在缺陷桩的工程处理中多采用先修补、后检测承载性能的方式,部分桩基甚至直接废弃或重建,造成资金浪费^[4]。传统的低应变法和声波透射法在基桩完整性检测中已得到广泛验证^[5],三维激光扫描、钻孔光学成像等新兴技术可为工程设计提供更为详细的信息^[6],为开展缩颈桩承载性能的定量分析奠定了重要基础。

作为传统研究方法,土工试验与数值模拟在基桩受力特性研究中发挥了重要作用。Poulos^[7]采用扩展边界元程序 DAMPIG 对缩颈缺陷桩开展研究发现,降低缺陷区域材料强度对缩颈缺陷桩承载性能的模拟研究具有重要意义。王成华等^[8]通过现场模型试验发现,缩颈桩与断桩的竖向极限承载力分别下降了 14.6% 和 26.8%。王际凯等^[9]结合数值模拟与模型试验探究了基坑开挖条件下倾斜长短组合桩的支护效果。陈志雄等^[10]通过试验模拟温度变化后发现,土体黏聚力受温度影响程度显著大于内摩擦角。周德泉等^[11]、de Freitas Neto 等^[12]利用室内模型试验研究了复合地基内缩颈桩、断桩及扩径桩的沉降与承载特性,指出桩体出现缺陷后需检测复合地基承载力、验算沉降量与稳定性,必要时依据组合桩型复合地基原理实施补桩加固。上述研究中,预埋传感器会影响模型试验精度,且无法捕捉土体连续变形场;单纯采用数值模拟则难以验证数据的真实性。桩周土体变形规律是研究基桩承载性能的关键^[13]。为揭示带承台缩颈桩的承载机理,将水平加载过程的可视化与数值模拟定量分析相结合是一种有效的研究方法。

为实现土体变形的可视化,Mannheimer 等^[14]采用无定形二氧化硅替代玻璃珠制备透明土,达到了土体内部全透明的效果。Iskander 等^[15]通过研究证实了上述材料的岩土工程特性与天然土体相似。为测量与分析土体内部变形数据,White 等^[16]开发了粒子图像测速技术(PIV)。目前,透明土材料与 PIV 技术已广泛应用于各类岩土试验。刘汉龙等^[17]利用透明土观测隧道开挖引发的土体沉降规律;徐志军等^[18]结合透明砂土模型试验与 Mat-PIV 技术监

测土体位移,揭示了缩颈桩的竖向承载机理;Luo 等^[19]通过透明砂土模型试验探究了锚杆桩的工作性能及桩周土体的位移特征。上述研究均取得了良好效果。

笔者设计了一套可视化水平加载试验装置,系统模拟不同参数条件下缩颈桩的水平加载全过程。结合有限元数值仿真结果,深入分析缩颈桩水平承载力、桩周土体变形及桩侧土反力的变化规律,进一步深化对缩颈桩工作机理的认识,以期更加准确地评估缩颈桩在实际工程中的安全性能。

1 试验设计及数值模型建立

1.1 试验设计

1.1.1 试验装置及材料选择

透明土由熔融石英砂与孔隙液配制而成。熔融石英砂粒径为 0.5~1.0 mm,经洗净烘干处理后,在 25 °C 条件下折射率为 1.458。为实现折射率匹配,按质量比 1:8.8 将 90# 白油与正十二烷充分搅拌均匀混合,配制得到折射率为 1.458 5 的孔隙液。将石英砂与孔隙液按照配制透明土所需的质量和体积分层铺设,每层厚度为 100 mm,共铺设 3 层;之后利用真空箱抽真空处理,静置养护 8 h。具体配制过程及实物见图 1。

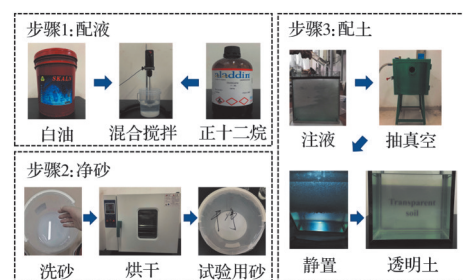


图 1 透明土配制流程

Fig. 1 The preparation process of transparent soil

试验装置由水平加载系统、散斑制作系统、模型箱及图像采集系统 4 个部分组成,见图 2。水平加载系统包含水平加载架、合成纤维绳、0.5 N 砝码、1 N 砝码托盘与位移计;散斑制作系统由绿色面激光发射器(光学棱镜嵌入激光镜头内)组成;模型箱由 5 mm 厚的钢化玻璃制成,内尺寸为 320 mm×180 mm×350 mm;图像采集系统由 CCD 工业相机与计算机组成。

为保证透明观测效果,模型桩与承台均采用有

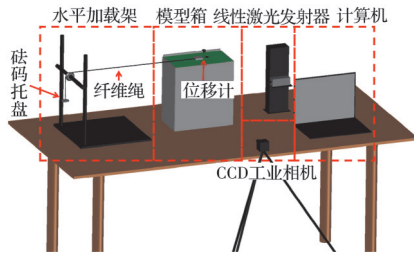


图 2 试验装置

Fig. 2 Test equipment

机玻璃制作,并用砂纸打磨桩体表面,使其摩擦系数达到 0.4^[20]。二者设计形状与尺寸分别见图 3、表 1,桩、土物理力学参数见表 2。

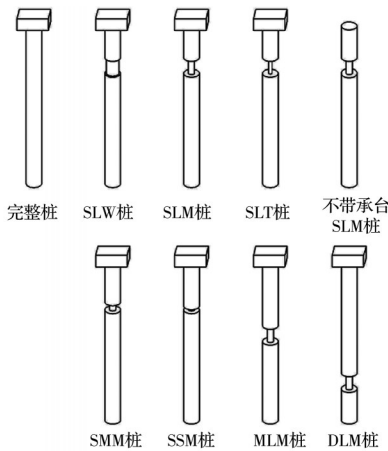


图 3 模型桩示意图

Fig. 3 Schematic of model pile

表 1 模型桩尺寸

Table 1 Dimensions of model piles

模型桩类型	缩颈长度 l/mm	l/L	缩颈直径 d/mm	d/D	缩颈底部距桩端距离 L_d/mm
完整桩					
SLW 桩	20	0.1	16	0.8	140
SLM 桩	20	0.1	8	0.4	140
不带承台 SLM 桩	20	0.1	8	0.4	140
SLT 桩	20	0.1	4	0.2	140
SMM 桩	10	0.05	8	0.4	140
SSM 桩	5	0.025	8	0.4	140
MLM 桩	20	0.1	8	0.4	100
DLM 桩	20	0.1	8	0.4	40

注:模型桩命名中,第 1 个字母表示缩颈位置,S、M 和 D 分别对应浅部、中部和深部;第 2 个字母表示缩颈长度,L、M 和 S 分别对应长缩颈、中缩颈和短缩颈;第 3 个字母表示缩颈处直径,W、M 和 T 分别对应粗缩颈、中缩颈和细缩颈。桩长 $L=200\text{ mm}$,桩径 $D=20\text{ mm}$,承台尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 。

1.1.2 试验加载方案及散斑场处理

试验采用分级加载方式,加载等级为预加载极限承载力的 1/10,即 0.5 N。加载过程中,利用位移计记录每级加载稳定后的桩顶水平位移。根据测

表 2 材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of materials

材料	密度/ (kg/m^3)	黏聚力/ kPa	弹性模 量/MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)
桩	1 180		3 000	0.2	
土	800	0.1	30	0.3	39.4

得的荷载与位移数据绘制荷载-位移曲线,单桩水平极限承载力取曲线陡降起点对应的荷载值。在每级加载稳定后,采集面激光光源照射透明土得到散斑图像,通过 Mat-PIV 增量程序对各荷载等级前后的散斑图像进行灰度值相关性计算,得到桩周土体位移矢量图。

1.2 数值模型的建立

为分析水平荷载作用下缩颈桩的桩侧土反力分布特征,揭示缩颈桩水平承载力损失的内在机理,利用 Abaqus 有限元软件建立带承台缩颈桩的数值模型,见图 4。桩体与土体分别采用线弹性模型与 Mohr-Coulomb 模型,模型尺寸、材料物理力学参数及加载方案均与模型试验保持一致。边界条件设置为:土体 4 个侧面采用横向约束,底面采用全固定约束。

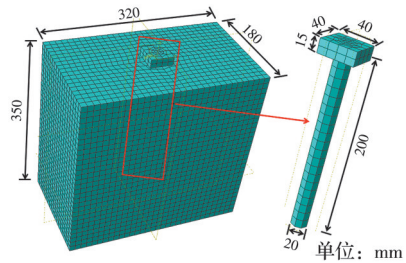


图 4 有限元数值模型

Fig. 4 Finite element numerical model

为验证数值模型的准确性,将完整桩桩顶荷载-位移曲线的模拟与试验结果进行对比,见图 5。由图可知,模拟与试验结果曲线基本一致;在 5 N 荷载作用下,二者误差仅 10.6%,且曲线陡降点均出现在同一荷载等级下。说明该数值模型可靠。

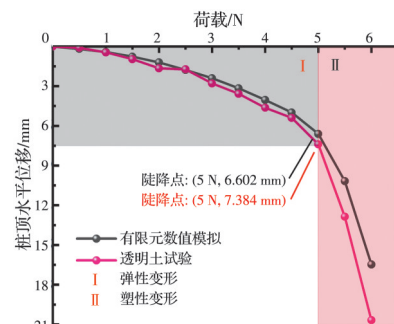


图 5 试验结果与模拟结果的对比

Fig. 5 Comparison of test and simulation results

2 试验结果与分析

2.1 水平承载力

通过试验得到不同参数(缩颈位置、长度、直径)缩颈桩、完整桩的水平荷载-位移曲线,见图6~图9。由此可知,完整桩、SLM桩和不带承台SLM桩的水平极限承载力分别为5、2.5、2 N(图6);SLM桩、MLM桩和DLM桩的水平极限承载力分别为2.5、3.5、5 N,相较完整桩分别降低了50%、30%和0(图7);SLM桩、SMM桩和SSM桩的水平极限承载力分别为2.5、4.5、5 N,相较完整桩分别降低了50%、10%和0(图8);SLT桩(为防止断桩,仅加载至4 N)、SLM桩和SLW桩的水平极限承载力分别为2、2.5、5 N,相较完整桩分别降低了60%、50%和0(图9)。

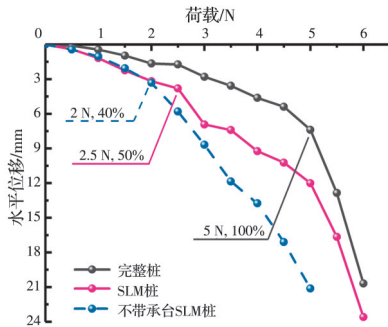


图6 SLM桩与不带承台SLM桩的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of SLM piles with and without cap

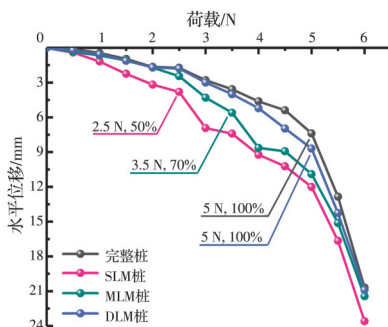


图7 不同缩颈位置的带承台单桩的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of single piles with cap and different necking positions

图7~图9表明,缩颈位置越浅、缩颈轴向长度越长、缩颈直径越小,带承台单桩的水平极限承载力损失越严重。其中,DLM桩、SSM桩与SLW桩对应的缩颈参数(缩颈位于桩身深部、缩颈长度小于 $0.025L$ 、缩颈直径大于 $0.8D$)对水平承载性能的不利影响较小;其余缩颈桩的极限承载力均有较大损失,或桩顶水平位移显著增大,不宜承载。对于SLM桩,承台的存在提高了其水平极限承载力,且

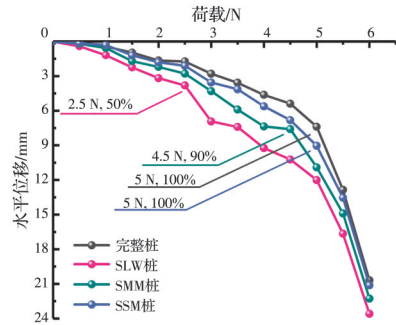


图8 不同缩颈长度的带承台单桩荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of single piles with cap and different necking lengths

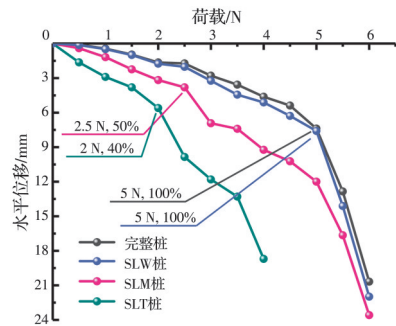


图9 不同缩颈直径的带承台单桩荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of single piles with cap and different necking diameters

在出现陡降点后位移增长有放缓趋势,说明承台提升对基桩水平承载能力具有积极作用。

2.2 桩周土体位移

在试验中,桩体变形主要分为弯曲变形与转动变形两类,进而使桩周土体产生两种不同位移模式。弯曲变形影响I区,桩体两侧土体均产生朝向加载方向的水平位移。转动变形影响II区,桩身绕一点转动;在桩身左侧(加载侧),上部土体受桩身挤压向左下方移动,下部土体向右下方移动;在桩身右侧,下部土体受桩身抬升作用向右上方移动,上部土体向左上方移动。当缩颈位于浅部时,缩颈处弯曲变形较大,缩颈上方桩身大幅度偏离初始位置,桩周土体随之形成第3种位移模式——缩颈上方转动影响III区。该区域桩身左侧土体受强烈挤压而向左上方膨胀,地表甚至出现隆起现象;桩身右侧土体则向缩颈处塌陷。

图10~图12为不同带承台缩颈单桩在施加5 N水平荷载时的位移矢量图,箭头越长,表示位移量越大。由此可知,桩身左侧土体扰动范围较大,右侧扰动主要集中在2D范围内。土体位移在I区与III区相对显著,为主要变形区;II区位移较小,为次要变形区。缩颈处桩身抗弯刚度降低,会加剧弯曲变形,并削弱下部桩身承载性能,破坏桩身变形协调性,进而导致上部桩身与桩周土体变形增大,降

低了基桩整体承载能力。缩颈位置越浅、程度越大,该现象越明显。缩颈位置相同时,土体主要变形区范围基本不变;随着缩颈程度的加深,缩颈处桩身弯曲变形与缩颈上方转动变形不断增大,土体变形逐渐超出弹性范围,最终形成Ⅲ区。由于缩颈

处弯曲刚度过小,SLT桩产生了较大弯曲变形,导致上部荷载难以传递至下部桩身,因此出现Ⅱ区扩大的特征。当缩颈位置向深部发展时,下部桩土相对刚度减小,土体嵌固能力下降,进而需调动更多Ⅱ区土体维持桩身变形稳定。

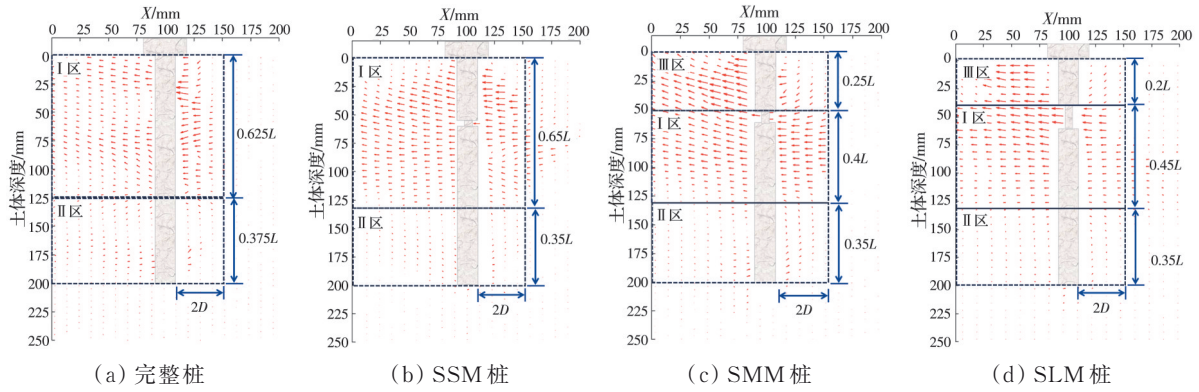


图 10 不同缩颈长度的带承台单桩桩周土体位移矢量图

Fig. 10 Vector diagrams of soil displacement around single piles with cap and different necking lengths

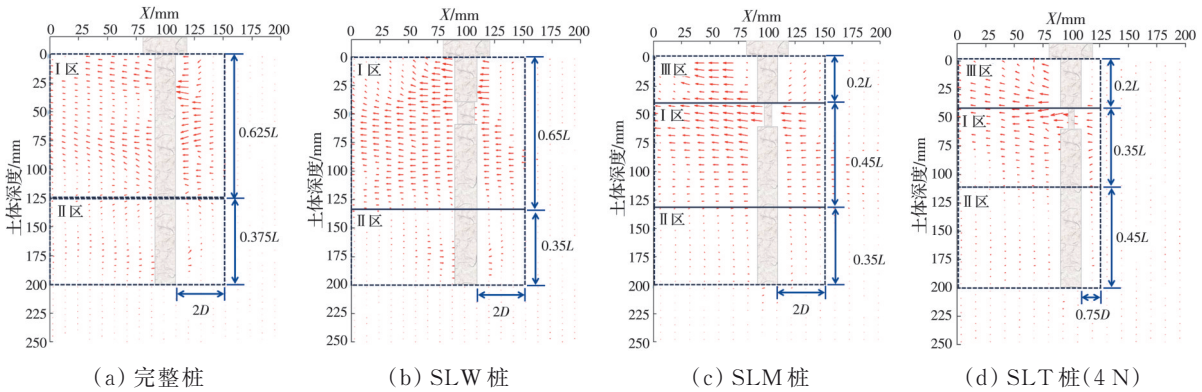


图 11 不同缩颈直径的带承台单桩桩周土体位移矢量图

Fig. 11 Vector diagrams of soil displacement around single piles with cap and different necking diameters

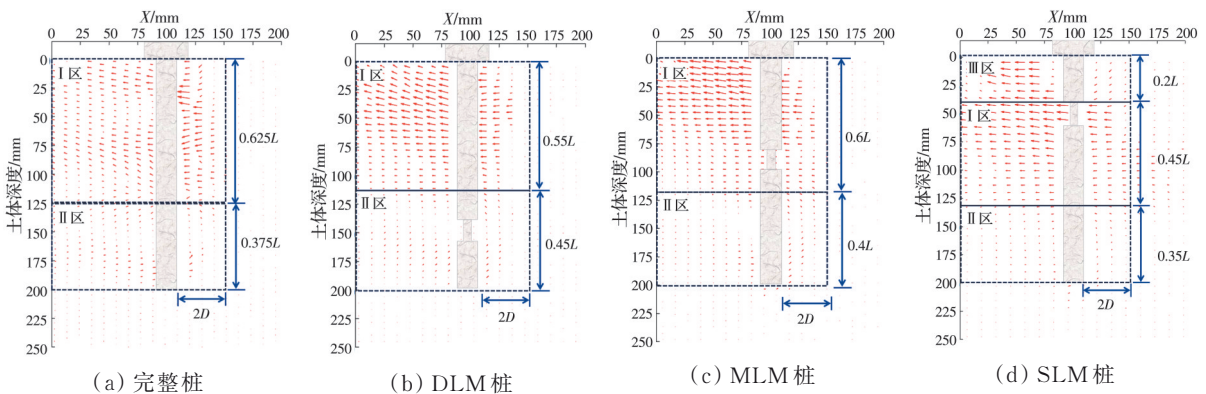


图 12 不同缩颈位置的带承台单桩桩周土体位移矢量图

Fig. 12 Vector diagrams of soil displacement around single piles with cap and different necking positions

相较于 SLM 桩,不带承台 SLM 桩桩周土体Ⅱ区、Ⅲ区范围明显扩大,见图 13。表明桩身变形更大,协调性也更差。由此可知,承台与表层土体接触可约束桩身变形。

3 桩侧土反力与承台作用

为探究水平荷载沿桩身的传递规律及桩、土相互作用特征,进一步分析缩颈对基桩水平承载力的影响机理。提取 5 N 水平荷载作用下有限元数值模

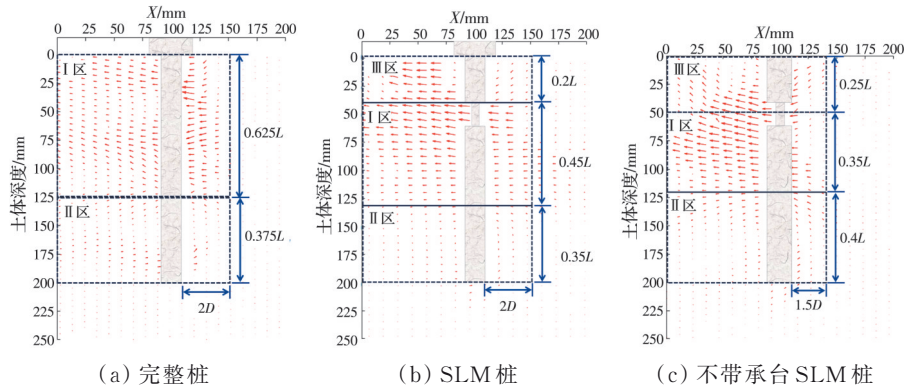


图 13 SLM 桩与不带承台 SLM 桩桩周土体的位移矢量图

Fig. 13 Vector diagrams of soil displacement around SLM piles with and without cap

拟中桩身与承台的土反力数据,各作用力均垂直于接触面。

图 14 为完整桩、SLM 柱与不带承台 SLM 桩的桩身土反力沿深度变化曲线以及 SLM 桩的承台土反力变化规律。由图 14 可知,完整桩的土反力曲线整体呈抛物线状,最大值位于 $2.5D$ ($Z=50\text{ mm}$) 处。桩顶位置土体自重应力小、土体强度低,所能提供的桩侧土反力较小;随着埋深的增加,土体强度逐渐增大,桩侧土反力随之增大。上部土体分担部分荷载后,传递至下部桩体的荷载逐渐降低,因此埋深超过 $2.5D$ 后,桩侧土反力逐渐减小。承台的存在使 SLM 桩缩颈上方的土反力明显高于不带承台 SLM 桩。同时,SLM 桩与完整桩的土反力在近地表位置均呈先减小后增大的变化趋势,SLM 桩地表位置的土反力为不带承台 SLM 桩的 1.82 倍。表明桩身发生弯曲变形时会造成承台加载侧下沉、非加载侧上升;进而增大加载侧承台下方土体围压,提升土体强度,同时产生竖向土反力与水平摩擦力,有效减小桩顶位移。

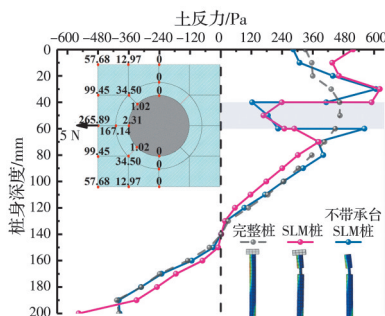


图 14 SLM 桩与不带承台 SLM 桩土反力

Fig. 14 Soil reaction forces of SLM piles with and without cap

为量化承台受力特征,选取各带承台单桩加载侧的 8 个节点土反力数据以及 5 N 荷载作用下的桩顶水平位移(因 SLT 桩在 4 N 荷载下已发生剧烈变形,不再进行对比分析),结果如图 15 所示。由图 15

可知,各承台 8 个节点的平均土反力随桩顶水平位移的增大而增大。但当 MLM 桩和 SMM 桩桩顶位移基本相当时,承台边缘与内侧节点的土反力变化规律相反。表明缩颈尺寸及位置的差异会改变桩身弯曲形态,导致承台不同节点下沉幅度存在差异,进而影响土反力的分布规律。

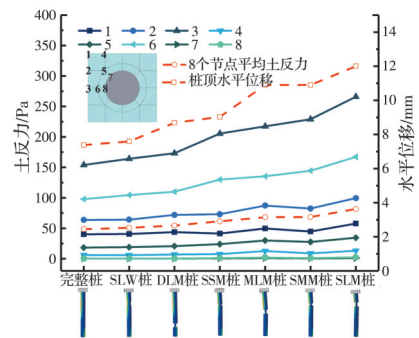


图 15 带承台单桩的承台土反力

Fig. 15 Soil reaction forces on the pile cap of single piles with cap

图 16 为不同带承台缩颈桩的桩身土反力沿深度变化曲线。由图 16 可知,桩身存在一个反弯点(土反力为 0),反弯点的高度变化趋势与 II 区的范围变化趋势一致。在反弯点上方,桩身受到土体向右的反力作用;反弯点下方则相反。当缩颈存在时,土反力均在缩颈位置发生骤降,然后再逐渐增长至接近完整桩的原有水平。总体呈现出缩颈桩在缩颈上方的土反力大于完整桩、缩颈下方小于完整桩的分布规律。

当缩颈位于浅部时,不同缩颈长度的带承台单桩在缩颈下方 $1D$ 深度处出现一个分界点。在分界点下方,3 根缩颈桩的土反力基本一致。这表明当缩颈位置与缩颈尺寸相同时,缩颈的影响范围基本一致。在缩颈上方,承台加载侧竖向压力随桩身变形的增大而增大,桩身土反力也随缩颈长度的增长而增大。而在缩颈区域,桩身土反力急剧减小,且

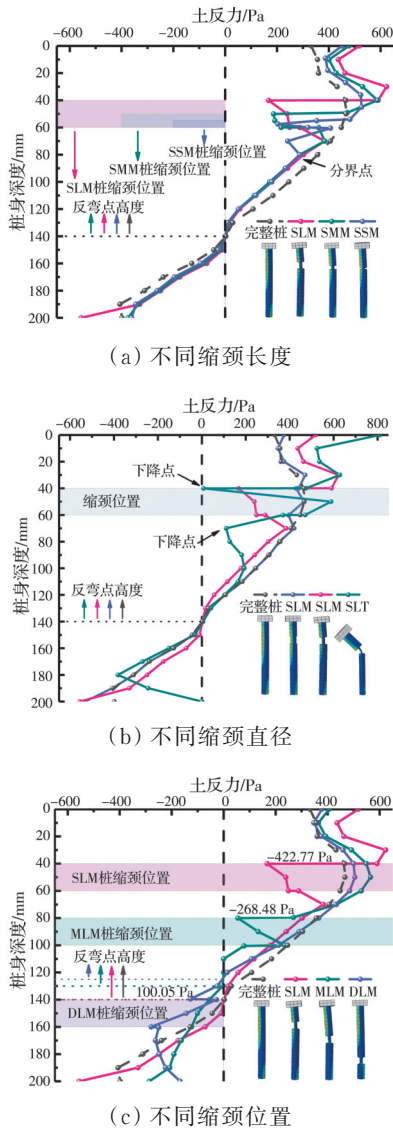


图 16 不同带承台缩颈桩的桩身土反力曲线
 Fig. 16 Soil reaction curves along the length of different necking piles with cap

减小幅度与减小量均随缩颈长度的增加而增大;因此,缩颈越长对基桩整体承载性能的削弱作用越显著。

当缩颈直径不同时,SLW 桩的桩身土反力与完整桩基本保持一致;SLM 桩的桩身土反力在缩颈位置出现明显下降点;SLT 桩(4 N)的桩身土反力分别在缩颈顶部及缩颈下方出现两个下降点。第 1 个下降点处接触应力直接降为 0;第 2 个下降点以下,土反力虽重新呈现抛物线分布规律,但数值与其余基桩有较大差异。说明缩颈直径越小,缩颈位置的弯曲变形越严重。当上部桩身绕缩颈处产生过大转动时,下部桩身基本丧失承载作用;同时,缩颈上端受上部桩身遮拦,无法与土体有效接触,进一步降低了基桩的承载能力。

当缩颈位置不同时,SLM 桩与 MLM 桩缩颈顶

部的土反力分别缩减了 422.77、268.48 Pa。随着埋深的增加,土反力虽逐渐增大,但整体始终小于完整桩。表明缩颈会降低桩身荷载的传递性能,致使缩颈下方的桩、土相互作用难以充分发挥,其中浅部缩颈的负面影响最大。缩颈位置较深时(DLM 桩),缩颈虽会削弱土体对桩体的嵌固能力,但因其远离加载处,且处于土体次要变形区,缩颈起始处土反力仅缩减 100.05 Pa,整体负面影响较弱。

4 结论

通过透明土水平加载试验研究带承台单桩存在缩颈时的水平承载特性与桩周土体变形规律;结合有限元数值仿真结果,进一步分析缩颈对带承台单桩水平承载性能的影响机理。主要结论如下:

1) 缩颈会降低带承台单桩的水平承载力。缩颈尺寸越大、位置距桩顶越近,桩体水平承载性能越差。当浅部缩颈直径为 $0.4D$ 、长度为 $0.1L$ 时,桩基承载力损失可达 50%。

2) 缩颈会使桩身弯曲刚度下降,产生更大弯曲变形。桩周土体主要变形区位于上部区域,桩身右侧土体扰动范围约 $2D$ 。桩身变形过大时,浅部土体发生塑性变形,加载侧土体出现挤胀现象,另一侧土体产生塌陷;承台可有效约束部分桩身位移。

3) 带承台完整桩的桩身土反力沿深度整体呈先增大后减小的抛物线分布。缩颈会削弱水平荷载沿桩身的传递能力,造成缩颈上方土反力增大,缩颈位置土反力急剧减小后小幅回升,缩颈下方土反力减小。当桩身发生弯曲变形时,承台随之发生位移,导致加载侧土体产生土反力与摩擦力,进而提高浅层土体强度及基桩承载能力。

参考文献

[1] Hariswaran S, Premalatha K. Experimental investigation on the behavior of a defective pile subject to a lateral load [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2021, 58(4): 339-346.

[2] 范小雪, 李原, 吴文兵, 等. 饱和土中大直径缺陷桩水平振动响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 413-423.

Fan X X, Li Y, Wu W B, et al. Horizontal vibration response of defective large-diameter piles embedded in saturated soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 413-423. (in Chinese)

[3] Lee J S, Song J U, Hong W T, et al. Application of time domain reflectometer for detecting necking defects in bored piles[J]. NDT & E International, 2018, 100: 132-141.

- [4] 潘天睿. 施工过程中桥梁桩基缺陷成因分析及加固方案研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
Pan T R. Cause analysis of defects in bridge pile foundation during construction and research on reinforcement scheme[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021. (in Chinese)
- [5] Di T Y, Zhang Y P, Wu W B, et al. Dynamic response of bored piles with gradient defects during low strain integrity test[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 588: 118520.
- [6] Liu L, Shi Z M, Li S J, et al. A system for inspecting Karst voids during construction of cast-in-place pile foundations[J]. *Engineering Geology*, 2023, 320: 107124.
- [7] Poulos H G. Pile defects-Influence on foundation performance[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Deep Foundations, Singapore, CI Premier, 1999: 57-69.
- [8] 王成华, 李全辉, 张美娜, 等. 几种缺陷单桩竖向承载性状的现场模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3207-3213, 3230.
Wang C H, Li Q H, Zhang M N, et al. Field model test study of vertical bearing behavior of some kinds of single defect piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3207-3213, 3230. (in Chinese)
- [9] 王际凯, 石钰锋, 刘伟煌, 等. 基坑开挖下倾斜长短组合桩的受力变形特性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(4): 35-44.
Wang J K, Shi Y F, Liu W H, et al. Mechanical and deformation characteristics of inclined long short composite pile under foundation pit excavation[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(4): 35-44. (in Chinese)
- [10] 陈志雄, 甘丰嘉, 王成龙, 等. 温度影响下能量桩-土接触面剪切特性试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(3): 16-23.
Chen Z X, Gan F J, Wang C L, et al. Experimental study on shear behavior of energy pile-soil interface affected by temperature[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(3): 16-23. (in Chinese)
- [11] 周德泉, 李健, 刘宏利, 等. 缺陷桩复合地基受压特性模型试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(7): 131-139.
Zhou D Q, Li J, Liu H L, et al. Model test on compression characteristics of composite foundation with defective piles[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(7): 131-139. (in Chinese)
- [12] de Freitas Neto O, da Cunha R P, de Albuquerque P J R, et al. Experimental and numerical analyses of a deep foundation containing a single defective pile[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2020, 17(3): e270.
- [13] Liu S W, Zhang Q Q, Cui C Y, et al. A simplified approach for the response of pile groups composed of dissimilar piles[J]. *Structures*, 2021, 34: 4548-4559.
- [14] Mannheimer R J, Oswald C J. Development of transparent porous media with permeabilities and porosities comparable to soils, aquifers, and petroleum reservoirs[J]. *Groundwater*, 1993, 31(5): 781-788.
- [15] Iskander M G, Lai J, Oswald C J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17(4): 425-433.
- [16] 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.
- [17] 刘汉龙, 钟海怡, 顾鑫, 等. 平行隧道开挖引起场地沉降的透明土模型试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(1): 1-10.
Liu H L, Zhong H Y, Gu X, et al. Transparent soil model testing on ground settlement induced by parallel tunnels excavation[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 1-10.
- [18] 徐志军, 王云泰, 杜建平, 等. 缩径基桩竖向承载性能的透明土试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(7): 214-221.
Xu Z J, Wang Y T, Du J P, et al. Experimental study on vertical bearing capacity of necking pile assisted with transparent soil test[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(7): 214-221. (in Chinese)
- [19] Luo G Y, Wang Z T, Kong G Q, et al. Model tests on chain-soil interaction of anchor pile for taut mooring system through transparent sand[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118419.
- [20] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
GB 50007—2011 Code for design of building foundation [S]. (in Chinese)

(编辑 朱备)