文章编号:1674-2974(2025)05-0079-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025049

带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩承载力试验研究

王奎华[1],耿少寒[1],许应豪[1],吴君涛[1†],邱尚印[1],黄山[2,3]
(1. 浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058;
2. 浙江大地勘测设计有限公司,浙江 杭州 310030;
3. 中天建设集团有限公司,浙江 杭州 310016)

摘 要:为了满足当前社会对于桩基础日益增长的低成本、高强度的需求,提出了一种新桩型——带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩基础.该新桩型具有低耗高效的优势,一方面该桩型施工步骤简便,施工设备常规,便于工程推广应用;另一方面底部扩大桩靴增加了桩的有效直径,提高了桩端承载力,同时水泥浆液渗入周围土体中,可改善桩土接触面特性,进而提高桩侧摩阻力.为进一步探明带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩基础的承载特性,本文开展室内模型试验进行研究.试验结果表明,带扩大桩靴桩侧同步灌浆模型桩在桩顶受压时,桩基承载力明显高于等截面常规桩,而且桩侧水泥浆液凝固后,其承载力将进一步提升.本研究揭示了新桩型的承载机理,显示了新桩型承载能力的优越性.相关研究结果可以为新桩型工程实践提供理论支撑.

关键词:桩基础;扩大桩靴;桩侧灌浆;承载力;静载荷模型试验
中图分类号:TU473.1 **文献标志码**:A

Experimental Study on Bearing Capacity of Precast Piles with Enlarged Pile Toes and Pile Side Synchronous Grouting

WANG Kuihua[1], GENG Shaohan[1], XU Yinghao[1], WU Juntao[1†], QIU Shangyin[1], HUANG Shan[2,3]
(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Zhejiang Dadi Geological Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;
3. Zhongtian Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310016, China)

Abstract: To meet society's increasing demand for low-cost and high-strength pile foundations, this paper proposes a new type of pile, a precast pile foundation with enlarged pile toes and synchronous grouting on the side of piles. The new pile type has the advantages of low energy consumption and high efficiency. On the one hand, it has easy construction steps and conventional construction equipment, which is convenient for engineering popularization and application. On the other hand, enlarged pile toes increase the effective diameter of the piles and thus improve the bearing capacity of pile end. Meanwhile, the cement slurry infiltrates into the surrounding soil, which can

* **收稿日期**:2024-03-19
基金项目:浙江省自然科学基金重点资助项目(LXZ22E080001), Key Program of the Natural Science Foundation of Zhejiang Pvovince (LXZ22E080001);国家自然科学基金资助项目(52178358, 52108349), National Natural Science Foundation of China (52178358, 52108349)
作者简介:王奎华(1965—),男,江苏盐城人,浙江大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: wujuntao31@126.com

improve the characteristics of the pile soil contact surface, thereby increasing the pile side friction. To further prove the load-bearing characteristics of the synchronously grouted precast pile foundation with enlarged plie toes, an indoor model test is carried out in this paper. The test results show that the bearing capacity of the synchronous grouting model pile with enlarged pile toe is higher than that of the conventional pile with equal cross-section when the pile top is compressed, and its bearing capacity is further improved due to the existence of cement slurry on the pile side. The test results reveal the bearing mechanism of the new pile type and show the superiority of the new pile type's bearing capacity. The results of this research can provide theoretical support for new pile-type engineering practices.

Key words: pile foundation; enlarged pile toes; pile side grouting; bearing capacity; static load model test

近年来,随着工程建设的发展,桩基础作为一种承载力能力高、适用范围广、历史久远的基础形式,得到越来越广泛的应用.桩基础通过将上部建筑物的荷载传递到深处承载力较强的土层中,以满足承载力和沉降要求,是目前应用最广泛的深基础类型[1-3]之一.在当前的工程实践中,常通过改变桩基设计尺寸来提高桩基承载力,然而这种方法不仅会增加施工难度,还会导致工程成本大幅上升.因此工程领域一直在寻求一种既能有效提高单桩承载力、不显著增加成本,又便于施工应用的桩基础形式.

因此,竹节桩[4-11]、楔形桩[12-17]、螺旋桩[18-22]等异型桩应运而生,以满足更为复杂的工况需求.实践证明,这些异型桩凭借独特的结构形式和施工工艺,有效提高了桩基承载力,拓展了桩基础的应用场景.然而,与常规桩相比,异型桩施工设备和施工工艺更为复杂,施工成本较高,对施工条件和施工人员要求也更为严苛.所以,目前这些异型桩目前仅在特定工况下得以应用,而尚未在其他工程普及.

目前常用来提高桩基承载力的另一个措施是注浆[23],即通过注浆操作加强桩周及桩底土体强度以提高桩基承载力[24].20世纪90年代,在日本已有利用桩侧注浆使管桩扩径的方法,如STJ施工法(超级双喷法)[25]、桩基旋喷施工法(testifying systematic rotary method)、水泥浆灌注法(cement milk method)等,这些工法通过配合专用的打桩机械[26],或配合特制的钢制桩尖,有效提高了预制桩的承载力[27].此外,众多学者通过大量的理论和试验研究了管桩的注浆技术和注浆效果.例如,胡涛等[28-29]基于饱和土对《公路桥梁灌注桩后压浆技术规程》(T/CECS G:D67-01—2018)中钻孔灌注桩注浆压力计算公式进行参数优化,进一步提出了可预测大直径长钻孔灌注桩注浆量及注浆终止压力的方程;胡涛等[30-31]也通过现场试验证明了后注浆对改善大直径超长入岩钻孔桩及海上钻孔桩承载能力的显著作用;Stocker等[32]发明了一种袖阀管与压力腔联合注浆装置,并分别对桩端和桩侧进行注浆,试验表明桩端阻力和桩侧摩阻力均有提升;Bruce等[33]针对后注浆对桩基承载力的影响开展研究,结果显示后注浆能提高桩基承载力并减少桩基沉降;Fleming[34]的研究结果也表明桩底注浆可明显提高桩基承载力.然而,注浆工艺同时存在一定的局限性,尤其是在具有明显触变性的软黏土地基中,随着沉桩后桩侧土体变形恢复,注浆效果可能难以达到设计要求[35-37].

为了解决上述问题,本文提出一种带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩基础(已授权专利[38]).该新桩型由预制桩桩身和直径略大于桩身外径的扩大桩靴构成.在沉桩过程中,采用桩侧同步灌浆技术,往桩身与孔壁之间的空隙灌注水泥浆液,在低压力作用下水泥浆液能充分填满桩周空隙.施工完成后,桩侧水泥浆液会逐渐凝固,一方面可以增大桩身有效直径,提高桩端承载力;另一方面水泥浆液会在一定程度上渗入周围土体,改善桩土接触面特性,进而提高桩侧摩阻力.值得注意的是,新桩型沉桩施工时不需要特殊设备,也无需增加额外施工工序.因此,新桩型可以达成提高单桩承载力、降低沉桩难度、节约施工成本的目的.

该新桩型通过改进桩基形式和施工方法,具有节约成本、环境友好的特点,因此探究新桩型承载特性对于其推广应用具有重要意义.当前专家学者通常使用数值模拟、理论分析、模型试验等方法探究桩

基的承载能力. Józefiak 等[39]通过 Abaqus 软件建立了土-桩系统模型,并将桩基承载力和沉降的模拟结果与现场静载试验进行了对比验证;Amjad 等[40]通过 XGBoost 算法开发了一种新的桩基承载力预测模型,并验证了模型的可靠性;Paik 等[41]通过模型桩荷载试验研究了土塞对预制管桩承载能力的影响. 为探明该新桩型的承载特性,本文主要通过开展室内模型试验研究,分别对三组对比模型桩进行室内静载试验,以揭示该新型桩基的承载机理,为工程实践提供理论支持.

1　模型试验概况

带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩示意图如图 1 所示.本节主要介绍室内模型试验所需的模型箱、土样、模型桩及加载方案等内容,为下文试验相关数据结果的分析提供依据.

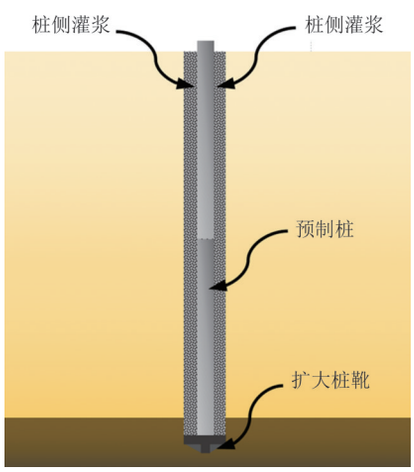


图 1　带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩示意图

Fig.1　Schematic diagram of the synchronous grouting precast pile on the side of the enlarged pile shoe

1.1　模型箱选择及土样制备

本次试验选用 0.80 m×0.80 m×1.20 m 的铁质箱. 所填砂土为中密石英砂,其相对密度为 2.65 g/cm^3,相对密实度为 0.74,夯实砂孔隙比为 68%(如图 2 所示).

模型箱填砂时采用落雨法分层击实,填砂高度为 0.90 m,桩基埋深为 0.60 m. 在模型箱中每 0.10 m 处进行标记,并向模型箱中加入 100.95 kg 石英砂夯平. 初次填砂至距模型箱底部 0.30 m 处,待模型桩制备完成后,将桩身垂直插入上述制备的砂土中进行二次填砂,直至桩身埋入土体 0.60 m,完成填砂操作.

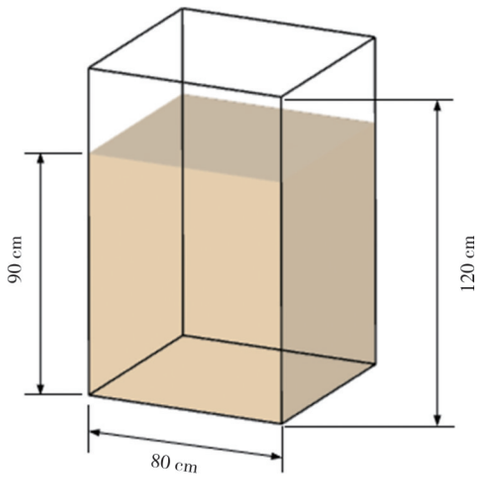


图 2　模型箱示意图

Fig.2　Schematic diagram of model box

1.2　模型桩参数

如表 1 所示,P1、P2、P3 分别代表常规桩、带扩大桩靴预制桩、带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩.模型桩桩身采用 PVC 管[42-43]模拟,长度 800 mm,壁厚 3 mm. 其中,P1 模型桩底部采用直径 50 mm 的 PVC 管帽,P2、P3 模型桩底部采用直径 50 mm 的圆锥形扩大桩靴. 考虑到边界效应[44],所用模型桩的最大桩身直径为 50 mm(如图 3 所示). 桩侧灌浆材料选用硅酸盐 42.5 水泥,水灰比为 1∶0.6.

表 1　模型桩参数

Tab.1　Parameters for model piles

编号	桩身直径/mm	扩大桩靴直径/mm	是否注浆
P1	50	—	否
P2	40	50	否
P3	40	50	是

将上述模型桩的桩身底部与扩大桩靴连接,其中 P1 使用配套的 PVC 管帽使桩端形成闭口,P2、P3 使用直径 50 mm 圆锥形扩大桩靴,并分别在 P1、P2、P3 桩身上距桩底 5、40、70 cm 处贴设 3 组应变片,如图 4 所示.

对于 P3 模型桩还需在距桩底 20、40、60 cm 处桩身对侧钻孔,保证水泥浆液能够顺利流出,以便进行桩侧同步灌浆. 待 P3 埋入模型箱后,向桩体中一次性倒入 210 mL 的水泥浆液,待水泥浆液凝固后开始进行后续静载实验.

1.3　加载方案

按照上述试验方法完成模型桩的安装后,分别对各模型桩进行室内静载试验,试验步骤如下:



图3 模型桩图

Fig.3 Model pile diagram

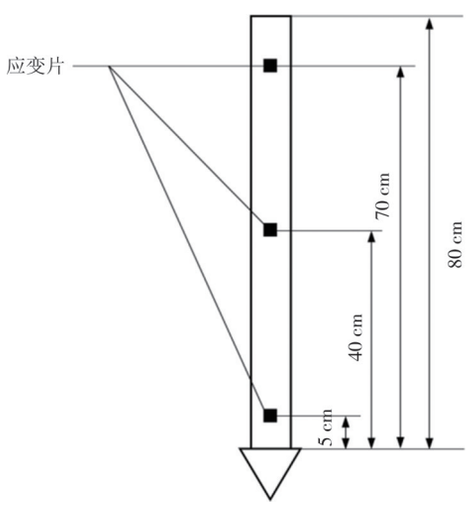


图4 桩身应变片位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the position of the pile strain gauge

1)安装调试试验装置(如图5所示).将反力装置、加载装置、数据采集装置等部分组装调试完毕.

2)进行模型桩静载试验.首先,利用试桩加载确定竖向极限承载力范围.然后,通过千斤顶对桩基进行加载,本试验按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)[45]中的相关规定采用慢速维持荷载法,加载时按照预估的承载力对桩顶进行分级加载,按照每级加载值为试桩极限承载力的1/10进行分级加载,第一级加载值为极限承载力的2/10,试验过程中每间隔5 min进行读数,当桩顶竖向位移值变化不超过0.01 mm时记录应变仪数据.随着每级荷载施加,当荷载示数回落同时位移计读数大幅增加时结束试验.

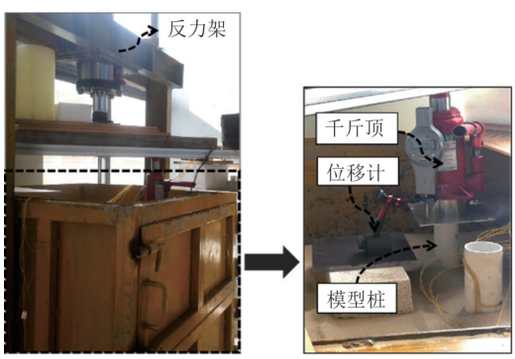


图5 试验装置图

Fig.5 Test device diagram

2 试验结果分析

本节通过对上述模型桩P1、P2、P3分别进行的静载试验,得到了各模型桩的桩基承载力.

2.1 模型桩P1结果分析

P1桩侧摩阻力/端阻力-桩土相对位移曲线,如图6所示.图中桩端阻力基本呈直线上升,增长速率基本不变,桩侧摩阻力在位移值小于1 mm时上升较快,随后曲线趋于平缓.经分析,位移值小于0.50 mm时,常规桩桩端阻力和侧摩阻力接近,但随着位移增大,侧摩阻力趋于极限值,而桩端阻力持续增加承担大部分承载力;位移大于0.50 mm时,桩土接触面相对位移较大,此时由桩端阻力提供主要承载力.

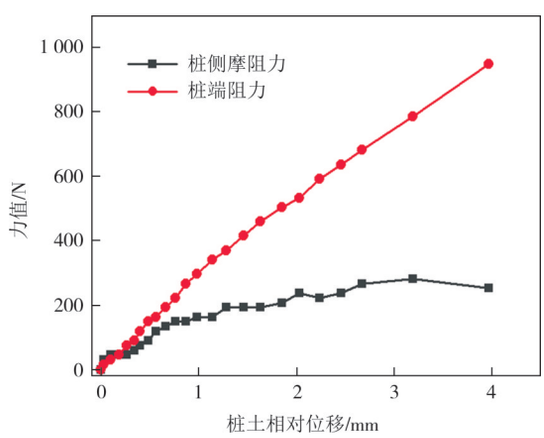


图6 P1桩侧摩阻力/端阻力-桩土相对位移曲线

Fig.6 Pile side friction resistance/end resistance-pile-soil relative displacement curve of P1

P1桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线,如图7所示,桩身上半部分曲线呈波动上升趋势,极限值为29.60 N;桩身下半部分曲线在位移较小时上升较快,222 N时达到极限值.曲线表明,P1桩侧摩阻力主要由桩身下半部分提供,桩-土作用力随土体深度增加

而增加,且桩身下半部分大于上半部分.

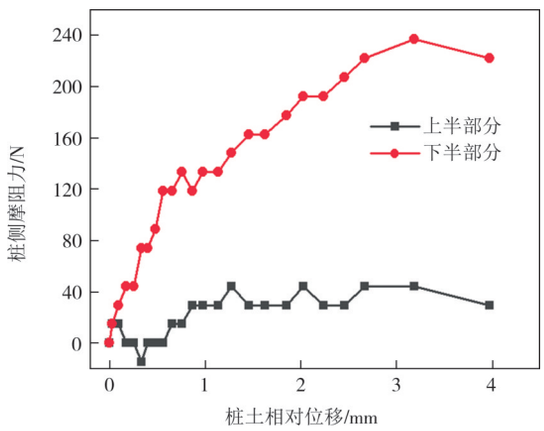


图 7　P1 桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线

Fig.7　Pile side friction resistance-pile-soil relative displacement curve of P1

2.2　模型桩 P2 结果分析

P2 桩侧摩阻力/端阻力-位移曲线,如图 8 所示,加载过程中桩端阻力持续增长,且位移小于 1 mm 时增长速度最快. 侧摩阻力则是在达到 182.30 N 后逐渐趋于平缓. 曲线表明,在位移小于 2 mm 时,桩端阻力和侧摩阻力的值接近,之后端阻力增幅远大于侧摩阻力. 初步分析,当位移较小时,桩-土接触良好,侧摩阻力不断增加,故承载力由桩端、桩侧共同承担;而当位移较大时,桩侧土体破坏,侧摩阻力趋于极限值,此时由桩端提供承载力.

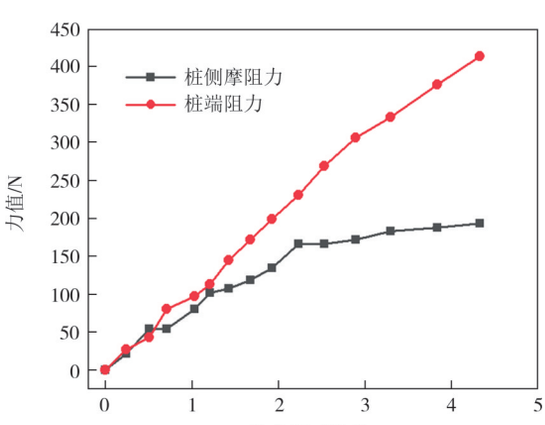


图 8　P2 桩侧摩阻力/端阻力-桩土相对位移曲线

Fig.8　Curve of side friction resistance/end resistance-pile-soil relative displacement of P2

图 9 为 P2 桩侧摩阻力-位移曲线图. 当位移小于 2 mm 时桩身上半部分侧摩阻力增长速度较快,随后增长速度减缓. 而桩身下半部分阻力在 0 附近波动,在位移较小时为正值,当位移大于 3 mm 时出现并保持为负值. 曲线表明,P2 桩侧摩阻力主要由桩身上半部分提供. 初步分析,由于桩靴尺寸大于桩身,加载时扩大桩靴上方会形成“空腔”,而“空腔”上部土体会逐渐下落填充,进而导致桩侧下半段周围砂土变得“松散”,因此在后续加载过程中,桩侧下半段周围砂土颗粒位移方向与模型桩位移一致,导致桩身下半部分侧摩阻力丧失,甚至出现负值.

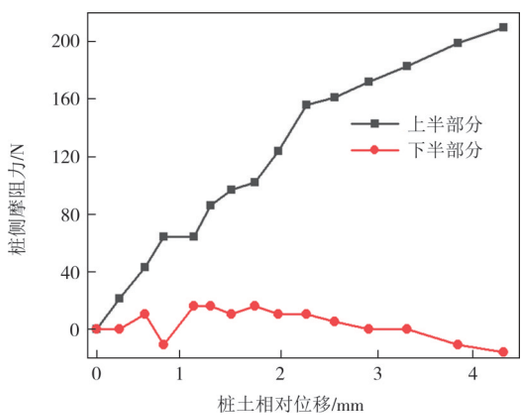


图 9　P2 桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线

Fig.9　Pile side friction resistance-pile-soil relative displacement curve of P2

2.3　模型桩 P3 结果分析

图 10 为 P3 桩侧摩阻力/端阻力-桩土相对位移曲线图. 桩端阻力的增长速度基本恒定,而桩侧摩阻力先快速增长,而后趋于平缓,且位移值小于 0.5 mm 时其增长速度大于桩端阻力. 经分析模型桩 P3 在相对位移小于 3 mm 时,桩侧摩阻力发挥主要作用,而后端阻力发挥主要作用. 由于灌浆后,水泥浆液在桩侧形成了表面粗糙的水泥浆液固化圈层,能产生较大摩阻力. 前期,由于水泥浆液固化圈层的存在,压力直接作用于桩体,因此两者增速基本一致. 而在水泥浆液固化圈层承受的压力和侧摩阻力达到极限后,桩端阻力开始发挥主要作用.

P3 桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线图,如图 11 所示,桩身下半部分曲线在初期增长速率较快,而后趋于极限值;上半部分曲线呈增长趋势但速率慢于桩身下半部分. P3 桩侧摩阻力主要由桩身下半部分提供. 经初步分析,在前期受压时,上半部分主要由侧摩阻力发挥作用,下半部分的阻力则是以压力的形式直接作用在水泥浆液固化圈层上,故下半部分曲线在位移小于 1 mm 时增长极快,进而摩阻力开始发挥主要作用. 由于水泥浆液固化圈层粗糙度大于桩身其他部位,中期桩身下半部分增速仍略大于上半部分.

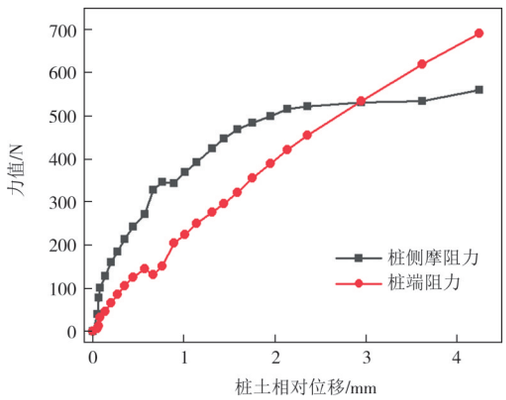


图 10 P3 桩侧摩阻力/端阻力-桩土相对位移曲线

Fig.10 Pile side friction resistance/end resistance-pile-soil relative displacement curve of P3

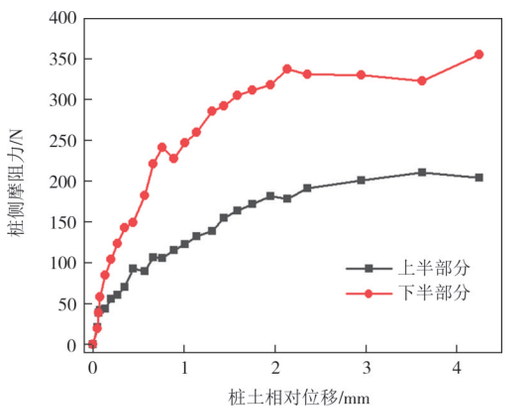


图 11 P3 桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线

Fig.11 Pile side friction resistance-pile-soil relative displacement curve of P3

2.4 综合分析

3 种模型桩的总桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线如图 12 所示,在位移值小于 1 mm 时,3 条曲线均保持较大增长速率,而后上升速度逐渐变缓.曲线显示,P3 曲线斜率远大于 P1 和 P2.在产生相同位移时,P3 总桩侧摩阻力值明显大于 P1,且 P1 大于 P2.这是由于桩侧的水泥浆液固化圈层增大了桩-土接触面积,改变了桩-土接触面性质.而圆锥形的扩大桩靴使得 P2 下半部分桩土应力变小,导致桩侧摩阻力小于 P1.

3 种模型桩的总桩端阻力-桩土相对位移曲线如图 13 所示,P1 曲线增长速率最大,大致呈直线上升,而其余两桩曲线增长速率呈变缓趋势.当产生相同位移时,P1 的桩端阻力值显著大于 P3,且 P3 大于 P2.初步分析可知,在贯入土体时,桩底为平底桩帽的常规桩所受阻力大于底部为圆锥形的扩大桩.而 P3 因采用桩侧同步灌浆技术,这相当于增大了桩身有效直径,所以当桩土相对位移小于 0.5 mm 时 P3 桩

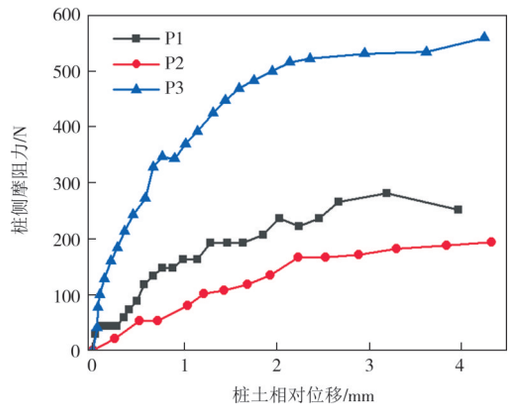


图 12 总桩侧摩阻力-桩土相对位移曲线图

Fig.12 Total pile side friction resistance-pile-soil relative displacement curve

端阻力与 P1 接近,而随着桩土相对位移的增加,P1 的桩端阻力明显大于 P2、P3.

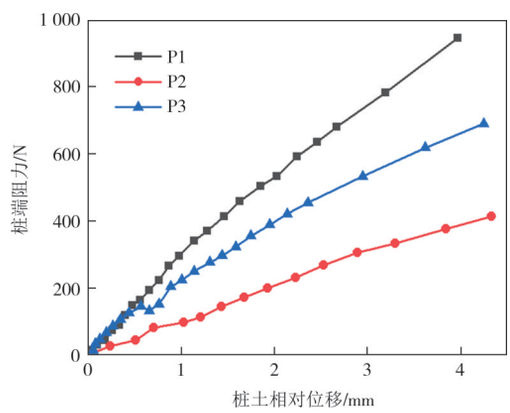


图 13 总桩端阻力-桩土相对位移曲线图

Fig.13 Total pile end resistance-pile-soil relative displacement curve

3 种模型桩的荷载-桩土相对位移曲线如图 14 所示.图中 P1、P3 曲线趋势相似,变化速率均小于 P2.分析可知,当产生相同位移时,P1 的承载能力小于 P3,但均明显大于 P2.

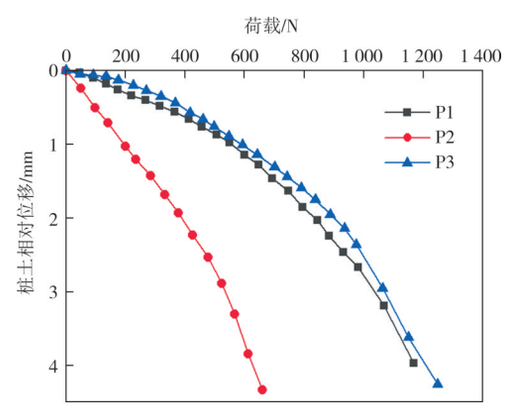


图 14 荷载-桩土相对位移曲线图

Fig.14 Load-pile-soil relative displacement curve

3 种模型桩的桩侧摩阻力/桩径比值-桩土相对位移曲线如图 15 所示. 图中 P3 曲线增长速率最大,远大于 P1 和 P2. 分析可知,当产生相同位移时,桩侧摩阻力与桩径的比值 P3>P1>P2. 结合建筑基桩检测技术规范(JGJ 106—2014)[45]可知,在一般桩基础中,桩侧极限阻力与桩径成正比,而曲线结果表明桩侧同步灌浆对桩侧摩阻力影响极大,常用的桩侧阻力公式可能不适用于此类型桩基础.

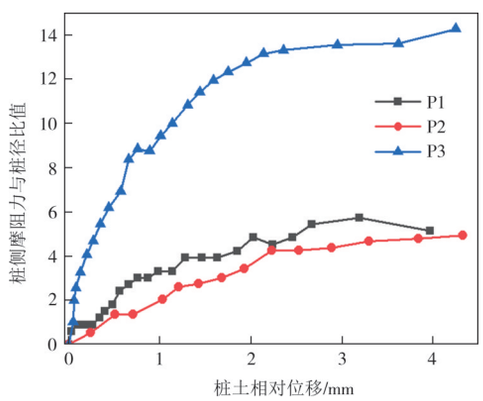


图 15　桩侧摩阻力与桩径比值-桩土相对位移曲线图

Fig.15　Pile side friction resistance to pile diameter ratio-pile-soil relative displacement curve

3 种模型桩的桩端阻力占总承载力比值-桩土相对位移曲线如图 16 所示. 图中各桩桩端阻力占总承载力比值均呈上升趋势且 P1>P2>P3. 说明扩大桩靴及桩侧同步灌浆技术主要提高了桩侧摩阻力,由于扩大桩靴呈圆锥状对桩端阻力的提高作用不明显,常用的桩端阻力公式可能不适用于此类型桩基础.

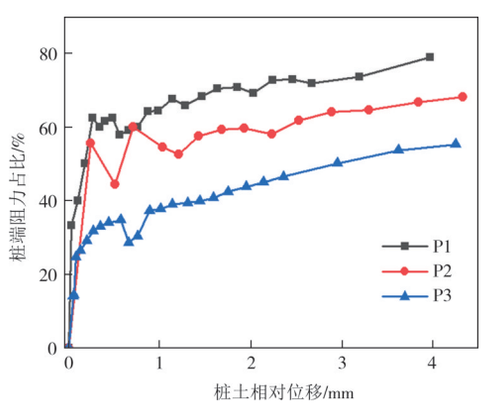


图 16　桩端阻力占总承载力比值-桩土相对位移曲线

Fig.16　Ratio of pile tip resistance to total bearing capacity-pile-soil relative displacement curve

3　结 论

本文提出一种带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩基础. 底部扩大桩靴增加了桩端承载力,同步灌浆改善了桩土接触面的特性,提高了桩侧摩阻力. 通过对常规桩、带扩大桩靴预制桩、带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩分别进行室内静载模型试验,得出以下结论:

1)带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩在受压时,桩身下半部分桩侧摩阻力大于上半部分,总桩侧摩阻力大于常规桩和带扩大桩靴预制桩,且承载能力高于常规桩. 因此,在工程应用中,选用新桩型相较于常规桩,能够有效节约成本.

2)在受压时,带扩大桩靴桩预制桩和常规桩受力规律相似,均为桩端阻力发挥主要作用. 而带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩承载机理有所不同,前期桩侧摩阻力更大,待桩侧摩阻力达到极限值后,桩端阻力发挥主要作用.

3)桩侧同步灌浆对新桩型桩侧摩阻力影响极大,未注浆时扩大桩靴上方会形成“空腔”,而“空腔”上部土体会逐渐下落填充,导致桩身下半部分侧摩阻力丧失,甚至出现负值. 而采用桩侧同步灌浆的新桩型在受压后期桩侧摩擦阻力发挥主要作用.

参考文献

[1]　建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)

[2]　史佩栋. 桩基工程手册(桩和桩基础手册)[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
SHI P D. Pile and pile foundation handbook [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015. (in Chinese)

[3]　徐至钧,李智宇,张亦农. 预应力混凝土管桩设计施工及应用实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
XU Z J, LI Z Y, ZHANG Y N. Design, construction and application examples of prestressed concrete pipe piles [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)

[4]　蔡邦国,姜玉龙,王理璞,等. 填砂竹节桩的承载性能对比研究[J]. 山西建筑,2018,44(31):55-57.
CAI B G, JIANG Y L, WANG L P, et al. Comparative study on bearing behavior of sand-filled nodular pipe piles [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(31): 55-57. (in Chinese)

[5]　龚晓南,解才,周佳锦,等. 静钻根植竹节桩抗压与抗拔对比研究[J]. 上海交通大学学报,2018,52(11):1467-1474.
GONG X N, XIE C, ZHOU J J, et al. A comparative study on the static drill rooted nodular piles under tension and compression[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(11): 1467-

1474.(in Chinese)

[6] 李富远,王忠瑾,谢新宇,等. 静钻根植能源桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(10):3307-3316.
LI F Y, WANG Z J, XIE X Y, et al. Model test on bearing characteristic of static drill rooted energy pile[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(10): 3307-3316.(in Chinese)

[7] 刘鑫,王奎华,涂园. 双向非均质土中填砂竹节管桩纵向振动理论与试验研究[J]. 振动与冲击,2020,39(14):43-52.
LIU X, WANG K H, TU Y. Theoretical and experimental study on the longitudinal vibration of sand-filled nodular pipe piles in bidirectional inhomogeneous soil[J]. Journal of Vibration and Shock,2020,39(14):43-52.(in Chinese)

[8] 王奎华,刘鑫,吴君涛,等. 考虑横向惯性下填砂竹节管桩纵向振动特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(5):58-69.
WANG K H, LIU X, WU J T, et al. Longitudinal vibration characteristics of sand-filled nodular pipe pile considering lateral inertial effect [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020,47(5):58-69.(in Chinese)

[9] 王奎华,肖偲,高柳,等. 静钻根植竹节桩竖向动力响应研究[J]. 振动与冲击,2019,38(15):49-56.
WANG K H, XIAO S, GAO L, et al. Vertical dynamic response of a static drill rooted nodular pile[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(15): 49-56.(in Chinese)

[10] 肖偲,王奎华,张日红,等. 静钻根植桩低应变动力响应的现场试验和数值模拟[J]. 上海交通大学学报,2020,54(4):406-412.
XIAO S, WANG K H, ZHANG R H, et al. Field test and numerical simulation for the dynamic response of low-strain testing on static drill rooted pile[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2020,54(4):406-412.(in Chinese)

[11] 周佳锦,王奎华,龚晓南,等. 静钻根植抗拔桩承载性能数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版),2015,49(11):2135-2141.
ZHOU J J, WANG K H, GONG X N, et al. Numerical simulation on behavior of static drill rooted pile under tension[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(11): 2135-2141.(in Chinese)

[12] 高柳,王奎华,李振亚,等. 考虑桩周土竖向作用和施工扰动效应时大直径楔形桩的纵向振动特性[J]. 振动与冲击,2018,37(2): 30-37.
GAO L, WANG K H, LI Z Y, et al. Vertical vibration characteristics of a large diameter tapered pile considering vertical action of surrounding soil and construction disturbance effect[J]. Journal of Vibration and Shock,2018,37(2):30-37.(in Chinese)

[13] 童魏烽. 基于渐变截面模型的楔形桩振动特性研究及应用[D]. 杭州:浙江大学,2019.
TONG W F. Study and application on vibration characteristics of tapered pile based on gradient section model[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2019.(in Chinese)

[14] 王奎华,童魏烽. 基于非等截面桩体模型的楔形桩动力响应[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(8):104-110.
WANG K H, TONG W F. Dynamic response of tapered pile based on non-equal-section pile model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(8):104-110.(in Chinese)

[15] 王奎华,童魏烽,王磊. 基于非等截面桩体模型的缺陷楔形桩动力响应研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(12):1238-1245.
WANG K H, TONG W F, WANG L. Dynamic response of defective tapered pile based on non-equal-section pile model[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(12): 1238-1245.(in Chinese)

[16] 王奎华,童魏烽,肖偲,等. 楔形桩的动力响应与试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 94-102.
WANG K H, TONG W F, XIAO S, et al. Study on dynamic response of tapered pile and model test[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(5): 94-102.(in Chinese)

[17] 杨紫健,吴文兵,陆洪智,等. 黏弹性地基中楔形桩水平振动特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(11):74-83.
YANG Z J, WU W B, LU H Z, et al. Horizontal vibration characteristics of tapered pile embedded in viscoelastic foundation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(11): 74-83.(in Chinese)

[18] 林祥军,张魁,赵成昆,等. 套管螺旋桩抗压承载性能模型试验研究[J]. 江苏建筑,2021(6): 95-97.
LIN X J, ZHANG K, ZHAO C K, et al. Model test study on compressive bearing characteristics of casing screw pile [J]. Jiangsu Construction, 2021(6): 95-97.(in Chinese)

[19] 张新春,韩春雨,白云灿,等. 螺旋桩承载特性受桩体几何结构影响的试验研究[J]. 结构工程师,2019,35(2):178-183.
ZHANG X C, HAN C Y, BAI Y C, et al. The experimental study on the bearing capacity of steel screw piles owing to the effects of geometrical structures of piles[J]. Structural Engineers, 2019, 35(2):178-183.(in Chinese)

[20] 张新春,郝洪策,胡燃,等. 砂土中螺旋桩纵向振动响应的模型试验研究[J]. 中国工程机械学报,2021,19(6):530-535.
ZHANG X C, HAO H C, HU R, et al. Model test study on longitudinal vibration response characteristics of screw piles in sand[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2021, 19(6):530-535.(in Chinese)

[21] 赵成昆,宗钟凌,张魁,等. 海相软土区注浆螺旋桩承压性能试验研究[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版),2021,30(2): 66-71.
ZHAO C K, ZONG Z L, ZHANG K, et al. Experimental study on bearing capacity of grouting screw pile in marine soft soil area[J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition), 2021, 30(2): 66-71.(in Chinese)

[22] 赵宇. 注浆式螺旋钢管桩抗压承载力试验研究及设计方法[D]. 济南:山东大学,2021.
ZHAO Y. Experimental study and design method of compressive

bearing capacity of grouting helical pile [D]. Jinan: Shandong University,2021.(in Chinese)

[23] 官厚兵. 旋挖钻孔灌注桩及后注浆工艺在桩基工程中的应用[J]. 建材世界,2020,41(6): 43-46.
GUAN H B. Application of rotary bored cast-in-place pile and post-grouting technology in pile foundation engineering[J]. The World of Building Materials,2020,41(6): 43-46.(in Chinese)

[24] 胡文军,许晓杰,侯亚辉,等. 岩溶区桩基溶洞注浆关键施工技术研究[J]. 山东交通科技,2019(5): 38-40.
HU W J, XU X J, HOU Y H, et al. Study on key construction technology of pile foundation karst cave grouting in karst area[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2019, (5): 38-40.(in Chinese)

[25] WANG Z F, SHEN S L, HO C E, et al. Jet grouting practice: an overview[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2013, 44(4): 88-96.

[26] 赵春风,杜兴华,赵程,等. 中掘预应力管桩挤土效应试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(3):415-421.
ZHAO C F, DU X H, ZHAO C, et al. Squeezing effect of inner-digging prestressed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(3):415-421.(in Chinese)

[27] VICKARS R A, CLEMENCE S P. Performance of helical piles with grouted shafts [C]//New Technological and Design Developments in Deep Foundations. Denver, Colorado, USA. American Society of Civil Engineers,2000:327-341.

[28] 胡涛,万志辉,戴国亮,等. 饱和土中后注浆灌注桩的注浆压力回归分析及优化[J]. 东南大学学报(自然科学版),2022,52(5):875-882.
HU T, WAN Z H, DAI G L, et al. Regression analysis and optimization for grouting pressure of post-grouting pile in saturated soil [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2022,52(5):875-882.(in Chinese)

[29] HU T, WAN Z H, DAI G L, et al. Prediction and design of grouting parameters for long and large-diameter postgrouted drilled shafts[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(2):04023265.

[30] HU T, DAI G L, WAN Z H, et al. Field study of the effects of composite excavation and combined grouting on the response of large-diameter and superlong rock-socketed bored piles [J]. Acta Geotechnica,2024,19(4):1853-1871.

[31] HU T, DAI G L, WAN Z H, et al. Full-scale tests on the grouting effectiveness of offshore bored piles with various bearing strata[J]. Applied Ocean Research,2023,141:103791.

[32] STOCKER M. The influence of post-grouting on the load-bearing capacity of bored piles [J]. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1983, 1: 167-170.

[33] BRUCE D. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. Ground Engineering, 1986, 19(4): 9-15.

[34] FLEMING W G K. The understanding of continuous filght ouger piling, its monitoring and control[J]. International Geotachnical Engineering, 1995, 113(3): 157-165.

[35] 安爱军. 深厚软土地区高速铁路后注浆桩基承载机理与试验研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
AN A J. Study on experiments and load-bearing mechanism of post grouting for pile foundation of high-speed railway in the deep soft soil region[D]. Changsha: Central South University, 2014.(in Chinese)

[36] 房凯. 桩端后注浆过程中浆土相互作用及其对桩基性状影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
FANG K. Grout-soil interaction during base grouting and its effects on the behavior of grouted piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2013.(in Chinese)

[37] 张文学,刘海陆,谢全懿. 岩溶区桩基注浆加固效果的影响因素分析[J]. 铁道建筑,2014,54(7):28-30.
ZHANG W X, LIU H L, XIE Q Y. Affected factors analysis of pile foundation grouting reinforcing effect in karst region[J]. Railway Engineering, 2014, 54(7): 28-30.(in Chinese)

[38] 王奎华,童魏烽,吴君涛,等. 带扩大桩靴桩侧同步灌浆预制桩施工结构及其施工方法:CN108149676A[P]. 2018-06-12.
WANG K H, TONG W F, WU J T, et al. Construction structure and method of precast pile with enlarged spudcan and synchronous side grouting:CN108149676A[P]. 2018-06-12.(in Chinese)

[39] JÓZEFIAK K, ZBICIAK A, MAŚLAKOWSKI M, et al. Numerical modelling and bearing capacity analysis of pile foundation [J]. Procedia Engineering,2015,111:356-363.

[40] AMJAD M, AHMAD I, AHMAD M, et al. Prediction of pile bearing capacity using XGBoost algorithm: modeling and performance evaluation [J]. Applied Sciences, 2022, 12(4): 2126.

[41] PAIK K, SALGADO R. Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2003,129(1):46-57.

[42] 亢佳帅. 考虑时效性的湛江组结构性黏土中群桩模型试验[D]. 桂林:桂林理工大学,2022.
KANG J S. Model test of pile group in structural clay of Zhanjiang Formation considering aging [D]. Guilin: Guilin University of Technology,2022.(in Chinese)

[43] 孟凡星. 基坑倾斜支护桩受力变形特性研究[D]. 荆州:长江大学,2023.
MENG F X. Study on the mechanical deformation characteristics ofinclined retaining piles in foundation [D]. Jingzhou: Yangtze University,2023.(in Chinese)

[44] MO P Q, MARSHALL A M, YU H S. Centrifuge modelling of cone penetration tests in layered soils[J]. Géotechnique, 2015, 65(6):468-481.

[45] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京:中国建筑科学研究院, 2014.
Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Academy of Building Research, 2014.(in Chinese)