

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210320001

锥型组合桩竖向承载力模型试验研究*

周先齐¹, 叶金钹^{1,2}, 金晓勤^{1,2}, 郭登圻¹

(1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门, 361024;
2. 厦门理工学院风灾害与风工程福建省重点实验室, 福建 厦门, 361024)

摘要: 阶梯型变截面桩竖向承载力大, 但在变径处应力集中现象明显, 限制了该桩型的适用范围, 为减轻其在变径处的轴力突变, 将水平变截面设置为一定倾角, 形成锥型组合桩。为了摸清该新桩型的竖向承载性能, 基于室内模型试验对锥型组合桩在竖向荷载作用下的力学响应进行测试, 并与传统等截面桩、阶梯型桩进行对比, 揭示锥型组合桩的竖向承载机理。模型试验依据相似理论进行设计, 在试验中保持三种桩型的体积近似相等, 竖向荷载采用分级加载, 获取桩顶沉降曲线以及桩身轴力分布。研究表明: (1) 等截面桩的竖向承载力最小, 阶梯型桩的竖向承载力居中, 锥型组合桩的竖向承载力最大; (2) 等截面桩的轴力随深度增大近似线性减小, 阶梯型桩在截面变小处轴力发生突变, 产生应力集中, 锥型组合桩在上下两个截面变化处轴力未发生显著突变, 在下变截面处往下一定位置产生轴力极大值, 轴力分布较为均衡; (3) 等截面桩侧阻力占比随荷载增大急剧减小, 阶梯型桩侧阻力占比随着荷载非线性变化, 锥型组合桩侧阻力占比稳定在55%左右; (4) 锥型组合桩既可以发挥阶梯型桩承载力大的优点, 又可以克服阶梯型桩在变截面处的轴力突变问题, 竖向承载力大于阶梯型桩, 具有良好的工程应用价值。

关键词: 锥型组合桩; 模型试验; 倾角; 竖向承载力

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1097-07

Experimental Study on Vertical Bearing Capacity of Conical Composite Piles

ZHOU Xianqi¹, YE Jinbi^{1,2}, JIN Xiaoqin^{1,2}, GUO Dengqi¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Wind Disaster and Wind Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: The step-tapered pile has a large vertical bearing capacity, but the stress concentration phenomenon is obvious at the variable cross-section, which limits the application range of this pile type. In order to reduce the abrupt change of axial force at the variable cross-section, the taper angle was employed in the design of the step-tapered pile to form the conical composite pile. To determine the vertical bearing capacity of the new type of pile, the static response of the conical composite pile under vertical load was tested based on the physical scale model test, and the behaviors of the conical composite pile were revealed by comparing it with the traditional uniform-section pile and step-tapered pile. The model test was designed according to the similarity theory and the volume of the three types of the pile was approximately equal. The vertical load was applied on the pile head by steps, then the settlement curve and the axial force of the pile under loading were obtained. The results show that :

* 收稿日期: 2021-03-20; 修回日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077254, 51874144)、福建省自然科学基金(2020J05238, 2020J01280)资助

作者简介: 周先齐(1981—), 男, 副教授, 博士。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: xqzhou@xmut.edu.cn

(1) The vertical bearing capacity of the uniform-section pile was the smallest, that of the step-tapered pile was in the middle, and that of the conical composite pile was the largest. (2) The axial force of the uniform-section pile decreased approximately linearly with the increase of depth. The axial force of the step-tapered pile changed sharply when the cross-section became smaller, while that of the cone-type pile did not change remarkably at the upper and lower variable sections. The position of the maximum axial force of conical composite was located below the lower variable section, and the overall axial force distribution was more harmonious. (3) The ratio of shaft resistance of uniform-section piles decreased sharply with the increase of load, while that of step-tapered piles changed non-linearly with the increase of load. The ratio of shaft resistance of conical composite piles was stable at around 55%. (4) The conical composite pile can not only give full play to the advantages of the large bearing capacity of the step-tapered pile, but also overcome the defect of abrupt change of axial force at the variable section. The vertical bearing capacity of the conical composite pile is larger than that of the step-tapered pile, which has great engineering application value.

Keywords: conical composite pile; model test; angle; vertical bearing capacity

引言

变截面桩是相对于等截面桩而言,它是指桩身横截面形状及尺寸沿桩身轴向发生变化的桩。随着超高层建筑、跨海和越江桥梁、高速铁路与公路的快速发展,各种变截面桩不断涌现。阶梯型变截面桩由于竖向承载力巨大、桩身横向抗变形能力良好、地基适应性强且经济效益好,引起了工程界的广泛关注^[1]。方焘等^[2-3]通过室内模型试验,对阶梯型变截面桩的竖向和水平承载力进行了系统研究,试验结果表明阶梯型桩竖向承载特性受变截面比影响显著,最优的变截面比受地层特性控制,水平承载力与变截面位置相关,最佳变截面位置在 $0.33L$ (桩长)。L.X. Xiong等^[4]通过数值模拟对阶梯型变截面桩在竖向与水平荷载组合作用下的力学性能进行了研究,研究表明变截面处轴力衰减明显。虽然阶梯型变截面桩优点突出,但该桩型在变截面处应力集中,影响该桩型的使用范围。因此,亟待改进现有的阶梯型变截面桩,减轻其在变截面处的应力集中。

楔形桩通过角度可以增加侧阻力^[5-6],并可以减小负摩擦阻力^[7],最早可以追溯到木桩的使用,是一种古老又充满活力的桩型,其截面未出现突变,不易出现明显的应力集中现象,且竖向和水平向承载力均优于等截面桩,众多学者对其展开深入研究。N. Hataf等^[8]利用有限元软件PLAXIS 3D计算了砂土中锥形桩的承载力,锥型桩竖向承载力相比圆柱型

桩得到极大提高。J. Wang等^[9]提出施工扰动引起的径向非均匀饱和土中锥形桩竖向阻抗的计算方法,锥形桩被假设为一系列步进圆柱段。J. Liu等^[10]推导了锥形桩的临界屈曲荷载计算理论,研究边界条件、锥度比、刚度比、摩擦角和侧向刚度的影响。S. Singh等^[11]采用理论方法对锥形桩的竖向性能进行了评价。K. Paik等^[12]基于室内模型试验,标定了桩身承载力与锥角的关系,锥形桩的极限承载力随着锥角的增大而增大。M. Sakr等^[13]通过模型试验研究了不同围压下锥形桩的性能。事实上,阻碍锥型桩发展的最大障碍是其在沉桩过程中挤土效应比等截面桩显著,杨贵等^[14]通过PFC离散元发现楔形桩的沉桩总阻力约为等截面桩的1.37倍,曹兆虎等^[15]对透明土中的楔形桩静压沉桩过程进行测试,研究表明楔形桩对桩周土的影响范围约为等截面桩的1.2倍。

通过对上述两种桩型的分析可知,阶梯型桩与楔形桩各有优点,但是其本身存在一些难以克服的问题。结合上述两种桩型,在阶梯型桩基础上进行优化,将变截面由水平面转变为锥形,形成锥型组合桩,解决阶梯型桩在变截面处应力过于集中以及楔形桩挤土效应过大的问题。与阶梯型桩相比,锥型组合桩将水平变截面设置为锥型,在承受竖向荷载时楔形面对土体产生斜向挤压,楔形面作用机理类似梁的加腋,轴力过渡变得更为均衡,避免应力过于集中的现象。与楔形桩相比,由于锥型组合桩的楔形面面积较小,不会产生过大的斜向挤压作用,挤土效应将有一定程度的削弱。基于室内模型试验,对锥型组合桩在竖向荷载作用下的力学特性

进行研究,探索其荷载传递机理并确定竖向承载力。研究成果将丰富变截面桩的设计理论,可以为相关桩基工程的承载力计算和设计提供参考依据。

1 模型试验设计

1.1 试验方案

为了确定锥型组合桩在竖向荷载作用下的力学性能,对等截面桩、阶梯型桩和锥型组合桩三种桩型进行测试。受限于加工精度,三种桩型的体积并不完全相等,三种桩的体积分别为 754.0、777.5 cm^3 和 781.1 cm^3 ,最大体积差值不超过 3.6%,近似认为三种桩型体积相等,其尺寸如图 1 所示。模型试验根据相似理论进行设计,在桩基模拟中,需要重点把握桩长 L 、材料特性(E 、 μ 、 ρ)、截面特征(A 、 I 、 W)、内力 M 、 N ,以及截面应力 σ 、应变 ϵ 等物理参数,本次试验满足的主要相似关系见表 1。其中 λ 为模型缩尺比,根据试验槽的条件以及相似模型需求,取 $\lambda=1:25$ 。

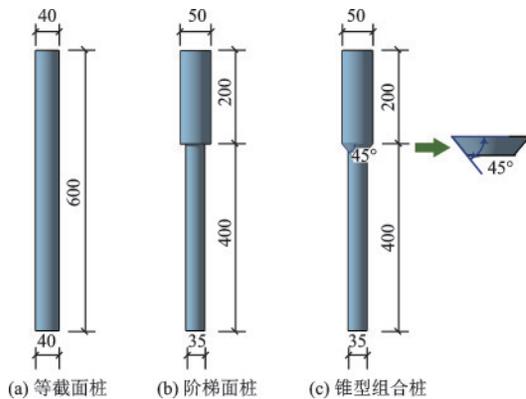


图 1 试验方案
Fig. 1 Test schemes

表 1 模型相似关系

Table 1 Model-prototype scale relationships

物理量	符号	相似关系
长度	L	λ
抗压刚度	EA	$\lambda_E \lambda^2$
抗弯刚度	EI	$\lambda_E \lambda^4$
应变	ϵ	1
重度	γ	λ

1.2 试验装置

试验设备主要包括模型箱、模型桩、土体和静

态应变采集系统。模型箱采用钢板焊接而成,尺寸为 550 mm(长)×550 mm(宽)×1 200 mm(高),钢板厚度为 8 mm,保证模型箱在试验过程中的刚性。模型桩采用尼龙材料制作而成,在表面黏贴应变片以测试桩身应变,在桩顶布置电子位移计测试桩顶位移。模型桩轴力可以由 $N=EA \cdot \epsilon$ 求得,而对于变截面桩而言,截面面积不是常数,桩身轴力为桩身应变 ϵ 乘以相应截面的 EA 。在模型桩表面黏贴电阻式应变片对桩的应变进行测试即可求得桩身沿深度方向的轴力分布。为了增大模型桩与土体间的摩阻力,模型桩表面采取特殊处理,即用万能胶黏贴砂子。制作完成的模型桩如图 2 所示。



图 2 模型桩
Fig.2 Model piles

竖向荷载由 5.0 kN 小型液压式压力试验机施加,在试验前进行标定以确保荷载的准确性。桩顶处安装不锈钢牛眼万向球以确保竖向荷载垂直向下,如图 3 所示。砂土采用产自福建省厦门市的 ISO 标准砂,级配良好,如图 4 所示。采用人工分层



图 3 不锈钢牛眼万向球
Fig.3 Stainless steel bull's eye universal ball

压实填筑方法来填筑砂土,每层填筑厚度为20 cm,采用橡皮锤由固定落距(40 cm)落下,确保各个试验间的密实度保持一致。试验砂土的基本物理力学性质见表2。



图4 模型试验用标准砂

Fig.4 Standard sand for model testing

表2 土体参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the soil

土体分类	含水量/ %	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ °
砂土	5.3	16.8	0	32

1.3 试验过程

本试验采用采用维持荷载法进行分级加载,各级荷载沉降稳定标准以及终止加载条件参照文献[16]关于单桩竖向静荷载试验的规定确定,每级荷载为50 N,每级荷载稳定30 min后施加下一级荷载。为了减少模型箱侧壁摩擦力对试验的干扰,对侧壁进行润滑处理,即在侧壁上先涂上一层凡士林,再铺上摩擦系数很小的双层塑料薄膜。试验中模型桩采取预埋设置,桩体埋深600 mm。填筑完成后静待土体固结2天后开始试验,并覆盖塑料薄膜进行保湿,防止水分蒸发影响砂土力学性状。通过电子位移计测量桩顶沉降,通过应变片测量桩身应变,采用DH3819无线静态应变采集系统进行数据采集。

2 模型试验结果及分析

2.1 荷载位移曲线

等截面桩、阶梯型桩和锥型组合桩在加载过程中荷载—沉降曲线如图5所示。三种桩型在竖向荷载作用下的荷载—沉降曲线可分为三个阶段:缓慢沉降阶段、加速变形阶段和破坏阶段。在第一阶段

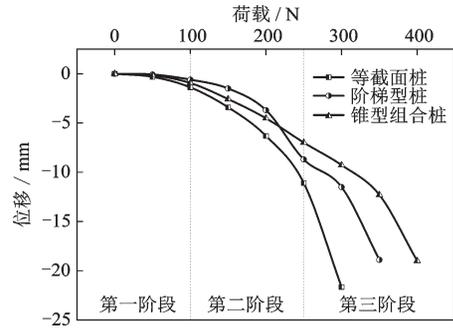


图5 荷载—沉降曲线

Fig.5 Load-settlement curves

的末端100 N时,三种桩型的沉降量差值不大,等截面桩的沉降值为-1.38 mm,阶梯型桩为-0.60 mm,锥型组合桩为-0.94 mm。进入第二阶段后,随着荷载增大,三种桩型的差异性较为明显,等截面桩荷载位移增长最快,呈指数型增大;阶梯型桩在荷载小于200 N时,位移仍较小,在荷载达250 N时,位移出现明显增大,可能是变截面处土体出现塑性;锥型组合桩变形平缓,未出现明显加速现象。在进入第三阶段后,等截面桩位移产生陡降,发生破坏;阶梯型桩在荷载从250 N增大至300 N时,位移增长较平缓,在荷载增大至300 N时,位移出现陡降;锥型组合桩位移随着荷载增大而缓慢增长,加载至400 N时,位移出现显著增长。从三种桩型的荷载—沉降曲线来看,等截面桩位移增长最快,随荷载增大位移呈现非线性增长;阶梯型桩的荷载—沉降曲线呈现阶梯状特征,在第一个平台段出现后继续加载位移出现显著增大,其后位移增长减缓形成第二个平台段,在接近破坏时位移发生陡降;锥型组合桩的荷载—沉降曲线在最初阶段增长缓慢,其后的变形呈稳步增长的态势,没有出现平台现象。取破坏时的前一级荷载作为极限承载力,等截面桩、阶梯型桩、锥型组合桩的极限承载力分别为250、300、350 N。

2.2 桩身轴力随荷载变化曲线

图6为等截面桩在竖向荷载作用下的桩身轴力分布。随着荷载的增大,桩身轴力不断增大。沿着桩身向下,桩身轴力不断减小,呈近似直线下降。桩底处轴力仍然较大,说明桩端阻力承担了很大一部分荷载。可能原因是桩长仅为0.6 m,长径比为15.0,长径比较小,摩阻力发挥的作用有限,端阻力得到充分发挥。

图7为阶梯型桩在竖向荷载作用下的桩身轴力

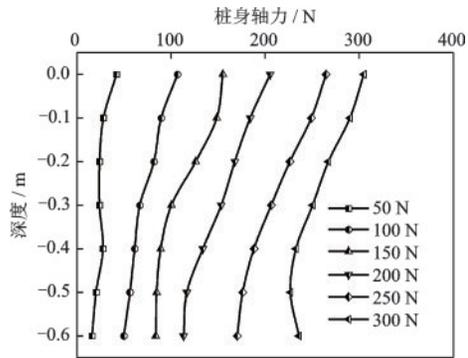


图6 等截面桩的桩身轴力分布

Fig. 6 Axial force distribution of uniform-section piles

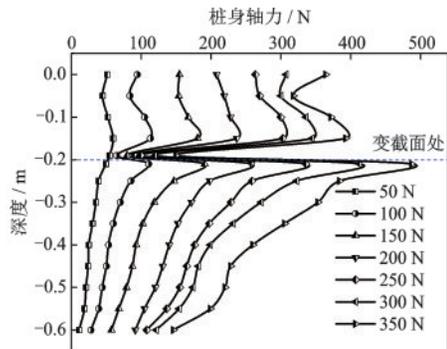


图7 阶梯型桩的桩身轴力分布

Fig.7 Axial force distribution of the step-type pile

分布。随着荷载的增大,桩身轴力不断增大。桩身轴力在变截面处出现突变, $z = -0.19$ m处桩身轴力急剧变小, $z = -0.21$ m处急剧增大,但在深度大于 $z = -0.21$ m后,轴力逐渐减小,与文献[3]的桩身轴力分布相吻合。变截面处承担较大的荷载,在缩径处存在明显的应力集中现象。

图8为锥型组合桩在竖向荷载作用下的桩身轴力分布。随着荷载的增大,桩身轴力不断增大。沿着桩身向下,桩身轴力先减小,在 $z = -0.2$ m处增

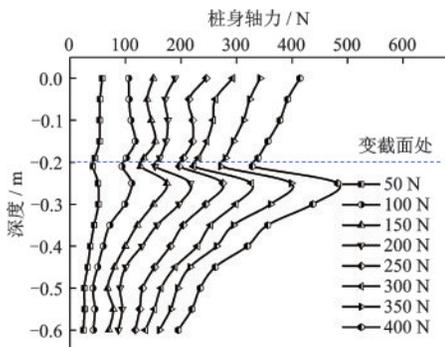


图8 锥型组合桩的桩身轴力分布

Fig.8 Axial force distribution of pyramidal composite piles

大,其后逐步减小。其应力集中现象相比阶梯型桩有所减小。

2.3 各桩型桩身轴力分布对比

为了明确不同桩型在竖向荷载作用下的荷载传递机理,对三种桩型的桩身轴力分布进行对比分析。选取3种工况,分别为100、250 N和破坏荷载,在100 N时,荷载较小,对应缓慢沉降阶段的末段;在250 N时,沉降加速,对应加速变形阶段的末段;在破坏时,三种桩型的桩顶荷载大小不同。

图9为三种桩型在100 N竖向荷载作用下的轴力分布。三种桩型都有明显的轴力产生,等截面桩在桩底处轴力最大,也即等截面桩将更多的荷载由桩端阻力承担。阶梯型与锥型组合桩的最大轴力相差不大,也即在竖向荷载较小时,锥型组合桩性能与阶梯型桩相当。在深度 $z = -0.2$ m往下,阶梯型桩和锥型组合桩的轴力均出现明显衰减,表明变截面处承担的荷载比例较大。

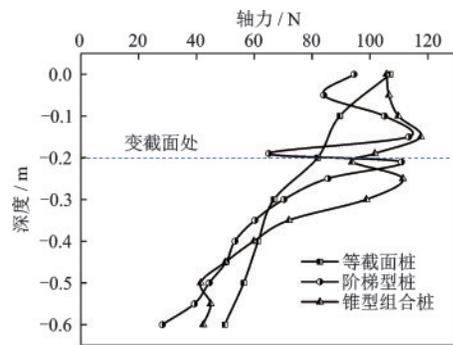


图9 100 N荷载作用下桩身轴力分布

Fig.9 Axial force distribution of piles under 100 N load

图10为三种桩型在250 N竖向荷载作用下的轴力分布。在深度 $z = -0.2$ m以上,阶梯型桩轴力最大,等截面桩次之。阶梯型桩的轴力最大值出现

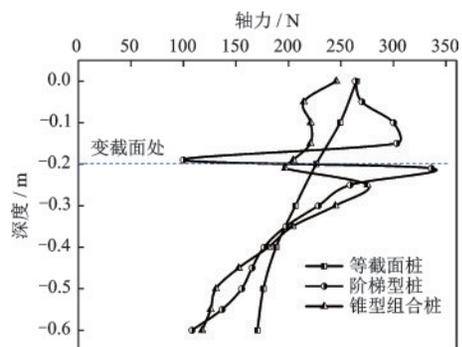


图10 250 N荷载作用下桩身轴力分布

Fig.10 Axial force distribution of piles under 250 N load

在 $z = -0.2 \text{ m}$ 向下不远处,显著大于锥型组合桩的最大轴力值,阶梯型桩轴力最大值位置稍高于锥型组合桩。阶梯型桩轴力在 $z = -0.2 \text{ m}$ 处出现显著突变。

图 11 为三种桩型在破坏时的桩身轴力分布。等截面桩的桩身轴力近似呈直线衰减分布,阶梯型桩的轴力突变比 250 N 时更为显著,锥型组合桩的桩身轴力分布较为均衡,轴力最大值所在位置低于阶梯型桩。在发生破坏时,等截面桩难以充分调动周围土体抗力以致在轴力较小时就发生破坏,阶梯型桩和锥型组合桩的最大轴力值显著大于等截面桩,且其轴力值大体相当。

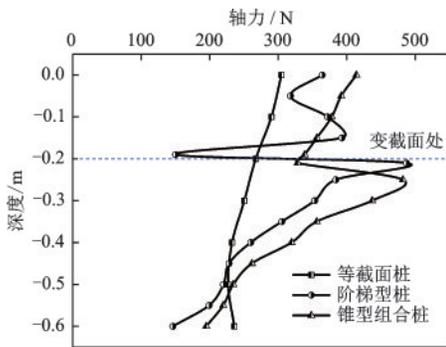


图 11 破坏时桩身轴力分布

Fig.11 Axial force distribution of piles when damage

2.4 荷载分担比例分析

桩基的承载力由侧阻力和端阻力共同组成,对侧阻力 Q_s 和端阻力 Q_p 的分担比进行分析有利于掌握其承载机制,也为确定单桩极限侧阻力 q_s 和极限端阻力 q_p 提供依据。定义桩顶处荷载为 Q ,对侧阻力占总荷载比例 Q_s/Q 和端阻力占总荷载比例 Q_p/Q 进行分析。

侧阻力占比 Q_s/Q 随荷载 Q 变化的曲线如图 12

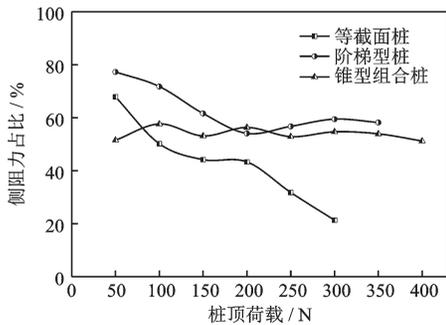


图 12 侧阻力占比

Fig.12 Share ratio of the shaft resistance

所示。等截面桩侧阻力占比随着荷载增大呈非线性减小,在荷载为 50 N 时,侧阻力占比为 67.9%,而在发生破坏时,侧阻力仅占 21.3%。阶梯型桩侧阻力占比则出现下凹型变化,在荷载为 50 N 时,侧阻力占比高达 77.3%,而在荷载为 200 N 时,侧阻力占比最低,为 54.1%,其后侧阻力占比又有所上升,最终破坏时占比为 58.2%。锥型组合桩侧阻力占比为稳定,最低为 400 N 时 51.2%,最高为 100 N 时 57.6%,波动幅度较小。从三种桩型侧阻力的占比来看,等截面桩侧阻力占比随荷载增大而减小;阶梯型桩侧阻力占比随着荷载变化,先减小后增大;锥型组合桩侧阻力占比稳定在 55%。

端阻力占比 Q_p/Q 随荷载 Q 变化的曲线如图 13 所示。由于端阻力占比和侧阻力占比叠加之和为 1.0,故呈反向变化,在此不再赘述。

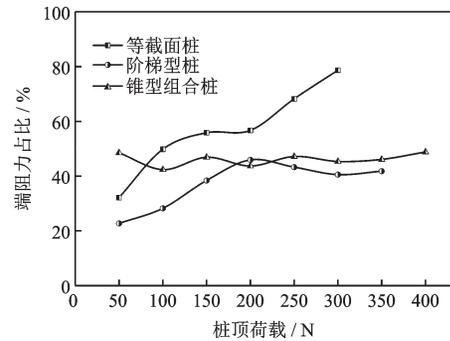


图 13 端阻力占比

Fig.13 Share ratio of the end resistance

3 结论

根据室内模型试验对等截面桩、阶梯型桩和锥型组合桩三种桩型在竖向荷载作用下的力学特性进行对比分析,得出结论如下:

(1) 锥型组合桩的竖向承载力最大,阶梯型桩居中,等截面桩的竖向承载力最小。

(2) 等截面桩的轴力随深度增大近似线性减小,阶梯型桩在截面变小处轴力发生突变,锥型组合桩在上下两个截面变化处轴力变化幅度小于阶梯型桩,在下变截面处往下一定位置产生轴力极大值,轴力分布较为均衡。

(3) 等截面桩侧阻力占比随荷载增大而急剧减小;阶梯型桩侧阻力占比随着荷载波动,先减小后增大;锥型组合桩侧阻力占比稳定在 55% 左右。

(4) 锥型组合桩既可以发挥阶梯型桩承载力大

的优点,又可以克服阶梯型桩在变截面处轴力突变的问题,竖向承载力大于阶梯型桩,具有良好的工程应用价值。

受限于试验条件,该试验中模型桩的长度为0.6 m,长径比较小,侧摩阻力的发挥不充分,造成桩底处轴力仍然较大。该研究成果是否适用于长桩以及其他土质情况,需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] Ismael N F. Behavior of step tapered bored piles in sand under static lateral loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136 (5) : 669-676.
- [2] Fang T, Huang M. Deformation and load-bearing characteristics of step-tapered piles in clay under lateral load [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19 (6): 04019053.
- [3] 方焘,刘新荣,耿大新,等.大直径变径桩竖向承载特性模型试验研究(I) [J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 2947-2952.
Fang T, Liu X R, Geng D X, et al. Model testing study of vertical bearing behaviors for large diameter pile with variable cross-section (I) [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(10):2947-2952. (in Chinese)
- [4] Xiong L X, Chen H J. A numerical study and simulation of vertical bearing performance of step-tapered pile under vertical and horizontal loads [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2019, 50(5):1-27.
- [5] Kodikara J, Kong K H, Haque A. Numerical evaluation of side resistance of tapered piles in mudstone [J]. *Géotechnique*, 2006, 56(7): 505 - 510.
- [6] Valia R, Khotbehsarab E M, Saberianc M, et al. A three-dimensional numerical comparison of bearing capacity and settlement of tapered and under-reamed piles [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 13(1):1-13.
- [7] Kong G Q, Zhou L, Peng H, et al. Reduction rate of dragload and downdrag of piles by taper angles [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2016, 22 (5) : 434-440.
- [8] Hataf N, Shafaghat A. Optimizing the bearing capacity of tapered piles in realistic scale using 3D finite element method [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, 33(6):1465-1473.
- [9] Wang J, Zhou D, Zhang Y, et al. Vertical impedance of a tapered pile in inhomogeneous saturated soil described by fractional viscoelastic model [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 75:88-100.
- [10] Liu J, Shao X, Cheng B, et al. Study on buckling behavior of tapered friction piles in soft soils with linear shaft friction [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 6:1-9.
- [11] Singh S, Patra N R. Axial behavior of tapered piles using cavity expansion theory [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 15(6):1-16.
- [12] Paik K, Lee J, Kim D. Calculation of the axial bearing capacity of tapered bored piles [J]. *Geotechnical Engineering*, 2013, 166(GE5):502-513.
- [13] Sakr M, Hesham El Naggar M, Nehdi M. Load transfer of fibre-reinforced polymer (FRP) composite tapered piles in dense sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41:70-88.
- [14] 杨贵,孔纲强,曹兆虎,等.楔形桩和等截面桩沉桩施工过程数值模拟对比分析 [J]. *铁道科学与工程*, 2016, 13(1):40-45.
Yang G, Kong G Q, Cao Z H, et al. Comparative numerical analysis on tapered pile and equal section pile driving process [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(1):40-45. (in Chinese)
- [15] 曹兆虎,孔纲强,周航,等.基于透明土的静压楔形桩沉桩效应模型试验研究 [J]. *岩土力学* 2015, 36(5): 1363-1367,1374.
Cao Z H, Kong G Q, Zhou H, et al. Model test on installation effect of tapered piles in transparent soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (5) : 1363-1367, 1374.(in Chinese)
- [16] 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

(本文责编:赵霞)