DOI：10.16285/j.rsm.2016.0253

水平荷载下纵截面异形桩承载特性试验

孔纲强[1, 2]，彭怀风[1, 2]，朱 希[2]，顾红伟[2]，周立朵[2]

（1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室，江苏 南京 210098；2. 河海大学 土木与交通学院，江苏 南京 210098）

摘 要：针对纵截面异形桩（扩底桩和楔形桩）、等混凝土用量常规等直径桩的水平向承载特性进行对比模型试验研究，测得不同水平荷载等级下扩底桩和楔形桩的内力、变形、极限承载力和桩侧土压力分布等变化规律特性；初步探讨 3 种桩型的水平极限承载特性和桩侧土压力分布规律。考虑纵向截面异形效应，基于水平土抗力与水平位移（*p-y*）曲线法建立纵截面异形桩水平向承载特性理论计算方法，进一步分析弯矩分布规律，并开展影响因素分析。研究结果表明，在当前试验条件下，等混凝土用量楔形桩的水平向承载力比等直径桩的高，砂性土和黏性土中楔形桩水平向极限承载力约分别为等直径桩的 1.25 倍和 1.33 倍。相关研究成果可为今后类似土层下水平受荷纵截面异形桩的设计与计算提供参考依据。

关 键 词：水平荷载；极限承载力；桩侧土压力；扩底桩；楔形桩；模型试验

中图分类号：TU 473 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 01－0229－08

Model tests on bearing capacity of longitudinal section shaped pile under lateral load

KONG Gang-qiang[1, 2], PENG Huai-feng[1, 2], ZHU Xi[2], GU Hong-wei[2], ZHOU Li-duo[2]

（1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China）

Abstract: A series of model tests was conducted to compare the horizontal bearing capacities of longitudinal section shaped pile (belled pile and tapered pile), and traditional equal-diameter pile, which have identical volume of concrete. The distribution of the internal force and deformation of piles, the ultimate bearing capacity, and lateral soil pressure were measured under different levels of horizontal load. The distribution of the ultimate bearing capacity and lateral soil pressure of three different pile types were comparatively analyzed. A theoretical method was developed to calculate the lateral bearing capacity of longitudinal section shaped pile based on *p-y* curve method and by considering shape effect. The distribution of pile moments and influencing factors were discussed. The results show that the horizontal bearing capacity of tapered pile is larger than those of belled pile and equal-diameter pile with identical volume of concrete. The ultimate horizontal bearing capacity of tapered pile embedded in sand and clay is nearly 1.25 times and 1.33 times of that of equal-diameter pile. These experimental results are useful for practical engineering and analysis of longitudinal section shaped piles in different applications.

Keywords: horizontal load; ultimate bearing capacity; lateral soil pressure; belled pile; tapered pile; model test

1 引 言

近年来，针对桩基水平向承载力特性，相关学者开展了系列研究，并取得了一定的成果。针对嵌岩桩、水泥土增强灌注桩的水平向承载特性，分别开展了现场试验研究。研究结果表明，嵌岩段长度对水平向承载力影响明显，打设水泥土桩能够控制灌注桩水平位移的发展，并能提高灌注桩水平承载能力[1−3]。基于离心机模型试验方法，荣冰等[4]开展了边坡桩基、风电机桩基础的水平向承载特性试验研究[5−7]；基于常规模型试验方法，研究人员开展了桥梁桩基、JPP 桩等水平向承载特型试验，且研究结果表明，水平荷载作用下桩顶以下 3～4 倍芯桩桩径处弯矩最大，且最易破坏[8−9]。

扩底桩和楔形桩作为纵截面异形桩的典型代表，在提高桩基承载力上起到重要作用[10−11]。蒋建平等[11]针对扩底桩、楔形桩和等直径桩的竖向承载特性进行了对比模型试验研究，试验结果表明，等

收稿日期：2016-01-31
基金项目：国家自然科学基金(No. 51278170)；江苏省研究生科研与实践创新计划项目(No. KYLX16_0725, No. 2016B42914)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51278170), the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. KYLX16_0725, No. 2016B42914).
第一作者简介：孔纲强，男，1982 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事桩−土相互作用及能量桩技术与应用方面的教学与科研工作。
E-mail: gqkong1@163.com

混凝土用量情况下，扩底桩和楔形桩的竖向承载力大于等直径桩。然而，针对扩底桩、楔形桩的水平承载特性的对比研究却相对较少。

因此，本文基于模型试验方法，开展砂性土和黏性土两种桩周土情况下扩底桩、楔形桩和等直径桩的水平承载力特性对比试验研究，初步探讨了 3 种桩型的水平极限荷载和桩侧土压力分布规律。考虑纵向截面异形效应，基于水平土抗力−水平位移（*p*-*y*）曲线法建立纵截面异形桩水平向承载特性理论计算方法，进一步分析弯矩分布规律以及影响因素，为今后类似土层下水平受荷扩底桩和楔形桩的设计与计算提供参考依据。

2 模型试验概况

2.1 模型试验设备

2.1.1 模型试验布置及水平向加载系统

试验模型槽的尺寸为 2.0 m×2.0 m×2.5 m（长×宽×高），水平向加载系统包括液压千斤顶、荷载传感器和荷载读数仪。水平推力通过液压千斤顶施加，千斤顶的最大行程为 10 cm，所能提供最大的荷载为 500 kN，配套荷载传感器和荷载读数仪来控制荷载的大小。模型试验布置及水平荷载加载系统如图 1 所示。

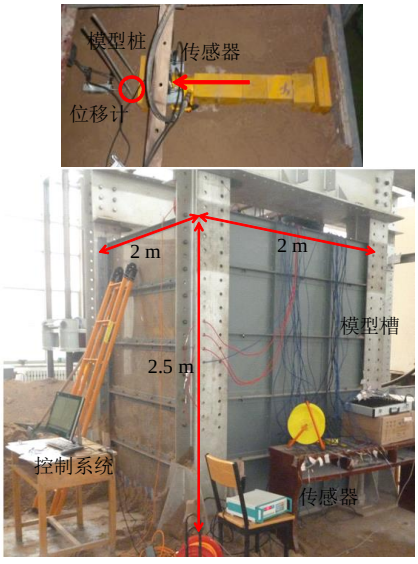


图 1 模型试验布置及水平加载系统

Fig.1 Model test setup and horizontal loading system

2.1.2 量测系统

试验过程中使用的量测系统包括荷载传感器、位移计（量程为 50 mm）和土压力盒等。其中，振弦式测试元件采用 XP02 型振弦频率及采集读数，应变式测试元件采用 TST3826 静态应变测试分析系统采集。

采用维持荷载法分级加载，各级荷载沉降稳定标准以及终止加载条件都参照《建筑地基基础设计规范》（GB50007−2011）[12]中关于静载荷试验的内容确定。试验中每级加载后，恒载 15 min 测读水平位移，同时测取桩侧土压力的读数，然后再加下一级荷载，直到试验终止条件出现。

2.2 模型试验材料

2.2.1 试验土体

试验选用砂性土和黏性土两种典型土样；模型桩端 0.5 m 范围内采用砂性土，模型桩周土体分别采用砂性土和黏性土进行对比分析。采用人工分层碾实方法填筑土料，先填筑 20 cm 厚土层，用小型振动器振动 3 遍。试验土样的基本物理、力学性质如表 1 所示。砂性土颗分试验结果参见文献[13]，砂性土在模型槽中填筑完成后现场静力触探 CPT 试验结果参见文献[13−14]。

表 1 试样土样基本物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土样名称	w/%	ρ/(g/cm^3)	c/kPa	φ/(°)	E_s/MPa
黏性土	32.1	1.93	26.7	31.2	5.23
砂性土	2.3	1.45		35.9	11.1

2.2.2 模型桩

模型桩的混凝土强度等级为 C20（实测混凝土抗压强度为 21.2 GPa），3 种模型桩尺寸示意图如图 2 所示。采用铁皮制作浇注模型桩的模具，制作钢筋笼，桩的配筋情况为：主筋 3ϕ8 mm，箍筋 ϕ6@155 mm，主筋均匀布置。桩顶以下 35 mm 处开始，水平荷载方向的桩体前后两侧每隔 200 mm 对称布置一对土压力盒。

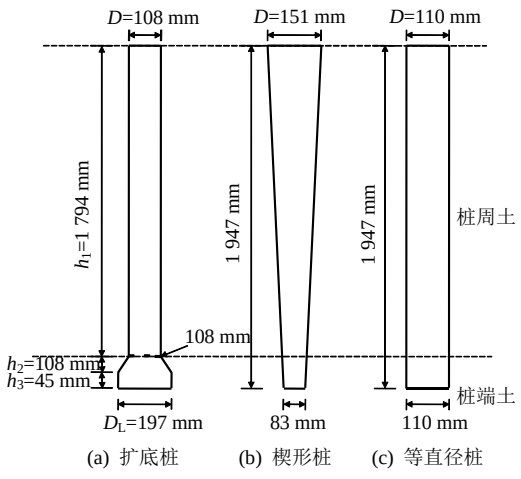


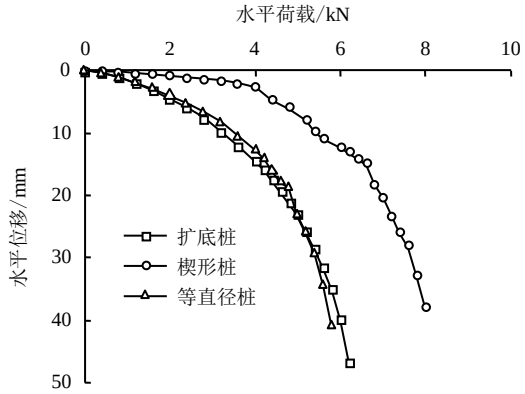
图 2 3 种模型桩尺寸示意图

Fig.2 Schematic of model pile size of three pile types

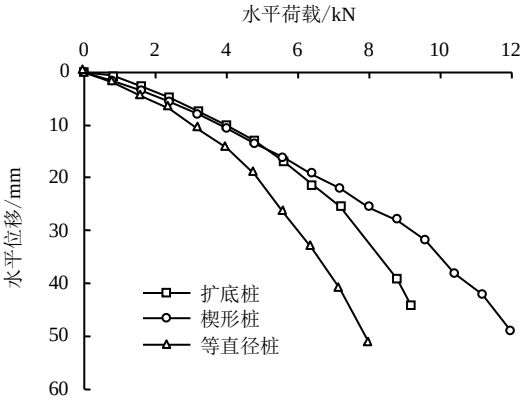
3　模型试验结果与分析

3.1　水平荷载–位移关系曲线

砂性土和黏性土中扩底桩、楔形桩和等直径桩的水平荷载–位移关系曲线分别如图 3(a)和 3(b)所示。由图可知，扩底桩、楔形桩和等直径桩 3 种类型桩的水平荷载–位移关系曲线变化规律基本一致；相同水平荷载等级作用下，楔形桩的水平位移值相对最小。当桩周土体为砂性土时，扩底桩的水平位移值与等直径桩的水平位移值基本相近；当桩周土体为黏性土时，扩底桩的水平位移值比等直径桩的水平位移值小。



(a) 砂性土



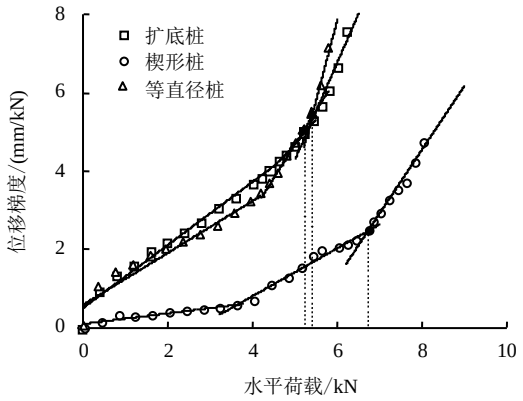
(b) 黏性土

图 3　水平荷载–水平位移关系曲线

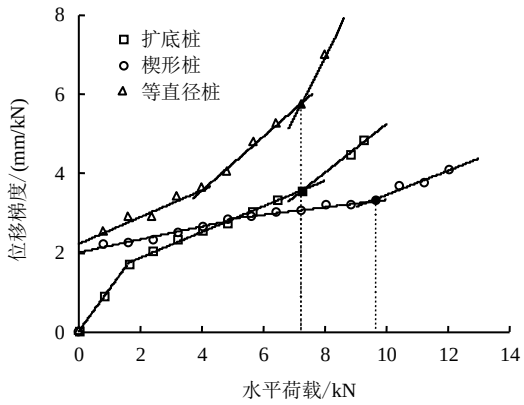
Fig.3　Curves of displacement vs. horizontal load

3.2　临界荷载和极限荷载分析

砂性土和黏性土中扩底桩、楔形桩和等直径桩的水平荷载–位移梯度关系曲线分别如图 4(a)和 4(b)所示。根据《建筑桩基技术规范》[15]方法，确定单桩水平临界荷载和水平极限荷载。由图 4 可得不同桩周土情况下扩底桩、楔形桩和等直径桩水平临界荷载 H_{cr} 和水平极限荷载 H_u，相对应的水平位移如表 2 所示。



(a) 砂性土



(b) 黏性土

图 4　水平荷载–位移梯度关系曲线

Fig.4　Curves of displacement gradient vs. horizontal load

表 2　3 种模型桩水平向承载力值

Table 2　Horizontal bearing capacities of three pile types

桩周土体	桩型	临界荷载 H_{cr}/kN	H_{cr} 对应的水平位移/mm	水平极限荷载 H_u/kN	H_u 对应的水平位移/mm
砂性土	扩底桩	4.8	21.33	5.8	35.14
	楔形桩	3.6	2.03	6.8	18.34
	等直径桩	4.2	14.25	5.4	23.46
黏性土	扩底桩	1.6	2.72	7.2	25.55
	楔形桩	4.8	13.68	9.6	31.82
	等直径桩	4.0	14.33	7.2	41.12

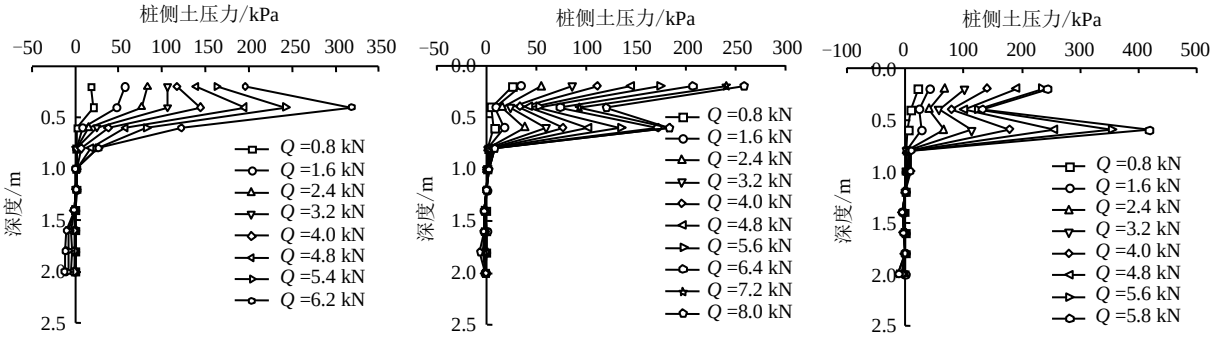
由表 2 可知，砂土地基中，楔形桩的水平承载能力相对最高，分别是扩底桩和等直径桩的 1.17 倍和 1.25 倍，等直径桩的水平极限承载力相对最低，由于楔形桩桩身刺入土体后能够较好地发挥桩侧摩阻力的作用，而且桩头处的截面面积最大，在水平向受力的过程中能够有效地发挥桩侧土体的摩擦作用，间接地提高水平承载能力；扩底桩与等直径桩相比，由于桩底存在扩大头的作用，桩受到水平向作用时扩大头能起到一定的抵抗作用，所以水平承

载能力比等体积的等直径桩提高一些。黏土地基中，楔形桩的水平承载能力相对最高，扩底桩和等直径桩的相同，其中楔形桩的水平承载能力是扩底桩和等直径桩的 1.33 倍。本文试验条件下，与砂土地基中的相比，黏性土地基中楔形桩、扩底桩和等直径桩的水平承载能力分别提高了 41.2%、24.1%和 33.3%。

3.3 桩侧土压力分布规律

砂性土或黏性土地基中桩侧土压力分布规律分别如图 5 和图 6 所示。由图 5(a)可知，水平荷载 Q 较小时，扩底桩桩顶处的桩侧土压力最大，并沿桩身逐渐降低。当水平荷载 Q 增大到 4.0 kN 时，桩侧土压力呈现先增大后减小的趋势，且在桩顶下 0.4 m 处出现最大值，当桩顶以下深度达到 1.0 m 时桩侧土压力值基本保持不变且维持在 0 左右；随着水平荷载的增大，土压力逐渐向下扩散，桩顶以下土体逐渐发挥作用，桩顶附近的桩侧土压力是最大的，主要桩侧土压力集中在桩的上部，下部桩侧土压力值显著减小，可见扩底桩的水平承载力主要由桩顶以下 1.0 m 范围内的土体强度控制的。图 5(b)和图 5(c)中楔形桩和等直径桩桩侧土压力沿深度的变化趋势基本上一致；随着荷载的增大，桩侧土压力先减小后增大再减小，其中楔形桩和等直径桩的桩侧最大土压力分别出现在桩顶往下 0.4 m 和 0.6 m 处，两者在深度达到 1.2 m 附近时土压力保持不变，即水平承载力主要由桩顶以下 1.2 m 左右范围内的土体强度控制的。

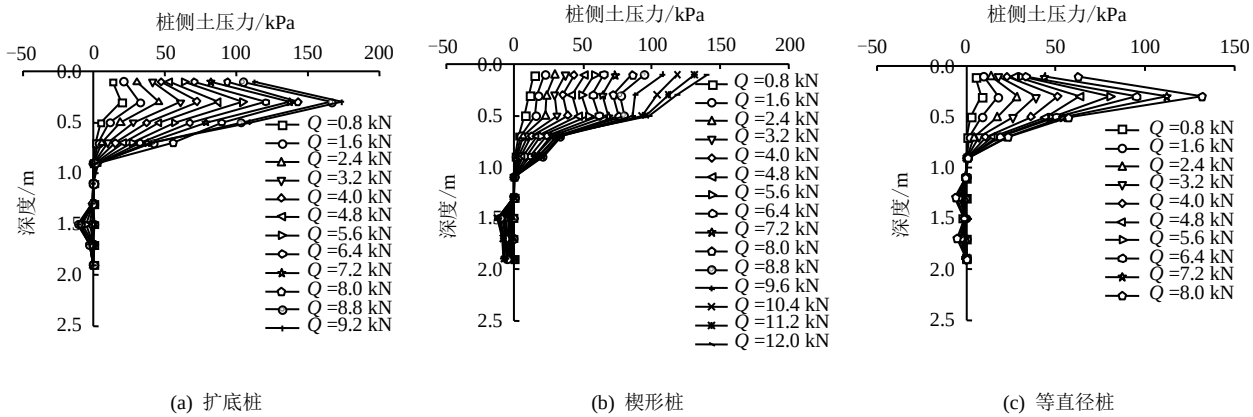
图 6(a)中扩底桩的桩侧土压力变化基本是呈现先增大后减小的趋势，在距离桩顶 0.3 m 位置处的土压力最大，离桩顶 1.0 m 处的桩侧土压力已经为 0，说明 1.0 m 以上桩周土承载了全部的土压力；图 6(b)楔形桩承受水平荷载的能力随深度的增加是逐渐降低的，由于桩身截面从上往下是变小的，截面越大承受的桩的水平向荷载就越大，在桩顶下 1.2 m 的位置处土压力基本不变维持在 0 左右；图 6(c)中等直径桩在受到桩顶水平荷载时，桩侧土压力先增大后减小，峰值出现在 0.3 m 位置处，桩顶下 0.9 m 处土压力值变为 0。



(a) 扩底桩 (b) 楔形桩 (c) 等直径桩

图 5 砂土地基中桩侧土压力沿深度变化规律

Fig.5 Earth pressure distribution around a pile embedded in sand along depth



(a) 扩底桩 (b) 楔形桩 (c) 等直径桩

图 6 黏性土地基中桩侧土压力沿深度变化规律

Fig.6 Earth pressure distribution around a pile embedded in clay along depth

4　理论计算分析

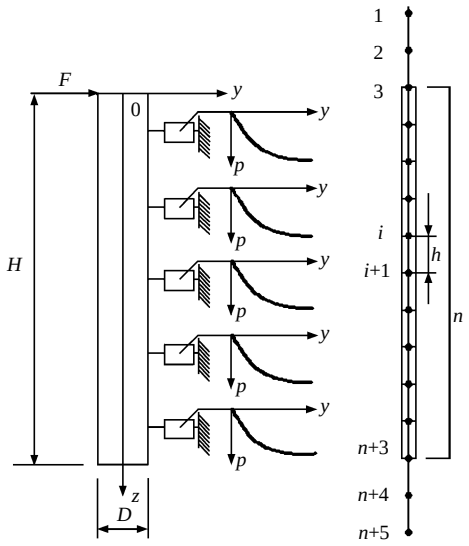
根据桩身截面形式，建立随桩身方向变化的截面惯性矩表达式[16]；*p*-*y* 曲线采用《港口工程桩基规范》（JTS 167−4−2012）[17]中对黏性土、砂性土的相关公式；最后，基于以下桩身绕曲微分方程：

$$E_{\mathrm{p}}I_{\mathrm{p}}(z)\frac{\mathrm{d}^4y}{\mathrm{d}z^4}+D(z)\times k_{\mathrm{h}}(z)\times y(z)=0 \qquad (1)$$

式中：E_{p} 为弹性模量；$I_{\mathrm{p}}(z)$为桩截面惯性矩；$D(z)$为桩身截面直径；$k_{\mathrm{h}}(z)$为地基土的水平地基抗力系数；$y(z)$为桩体水平向位移；z 为深度。

将桩周土体离散为一系列相互独立的弹塑性模型来模拟水平荷载作用下的桩−土相互作用，如图 7(a)所示，不考虑土体间的连续性。利用有限差分的方法对其进行求解，获得相应的荷载−位移关系曲线、桩侧土压力以及桩身弯矩分布规律。

以等直径桩为例，将桩身划分为 n 个单元，每单元长度为 h，设桩顶编号 3，桩端编号 n+3，在两端的延长线上建立假想点 1、2 及 n+4、n+5，如图 7(b)所示。



(a) 力学模型　　(b) 计算模型

图 7　桩−土相互作用力学模型和计算模型

Fig.7　Mechanics model and calculation model for pile-soil interaction

建立差分式：

$$\left(\frac{\mathrm{d}^4y}{\mathrm{d}z^4}\right)_i\approx\frac{y_{i+2}-4y_{i+1}+6y_i-4y_{i-1}+y_{i-2}}{h^4} \qquad (2)$$

对桩身各计算点导数以差分式近似代替，将式（2）代入式（1）化简得

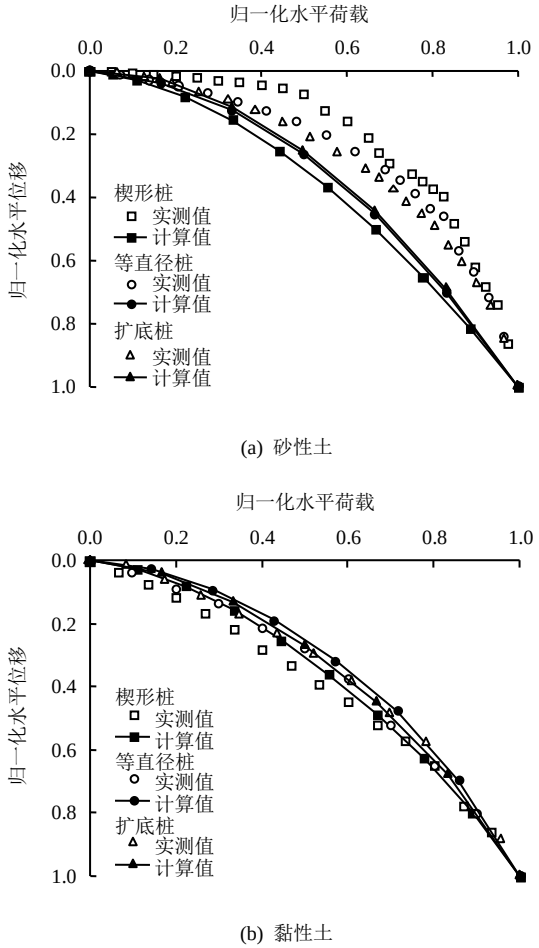
$$y_{i+2}-4y_{i+1}+(6+A_i)y_i-4y_{i-1}+y_{i-2}=0 \qquad (3)$$

式中：$A_i=Dk_{hi}/(EI\cdot h^4)$（$i=3,4,\ldots,n+2,n+3$）

结合桩顶和桩端 4 个边界条件，与式（3）联立，采用迭代法求解。

理论计算中模型桩尺寸和土体参数与试验中基本一致，根据《港口工程桩基规范》（JTS 167−4−2012），砂土地基中土抗力的初始模量取 40 000 kN/m^3。

归一化后理论公式计算所得桩顶荷载−位移关系曲线、4 kN 水平荷载作用下桩侧土压力分布规律与模型试验所得结果分别如图 8、9 所示。由图 8、9 可知，理论计算所得结果规律与模型试验结果类似，由此说明利用理论计算公式分析桩身弯矩分布规律是切实可行的。相比较而言，黏性土中荷载−位移关系理论计算结果与模型试验结果相似性相对更好。

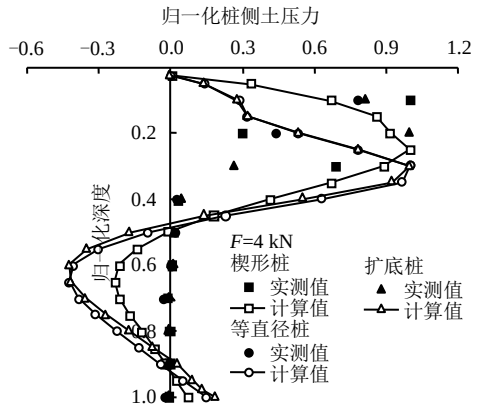


(a) 砂性土

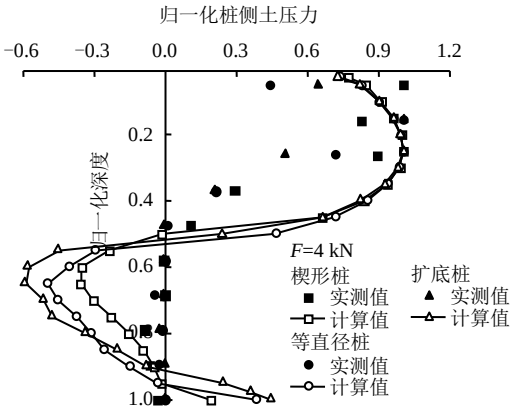
(b) 黏性土

图 8　桩顶荷载−位移关系曲线

Fig.8　Curves of displacement vs. load for pile top



(a) 砂性土



(b) 黏性土

图 9 桩侧土压力−深度曲线

Fig.9 Curves of depth vs. earth pressure on pile shaft

理论公式计算所得桩身弯矩分布规律曲线如图 10 所示。由图可知，相同水平荷载等级作用下，楔形桩、扩底桩及等直径桩 3 种类型桩的桩身弯矩分布规律一致；最大弯矩值发生位置均随着荷载等级的增加而逐渐往下发展；楔形桩的桩身弯矩数值相对比扩底桩和等直径桩的弯矩值要小一些。

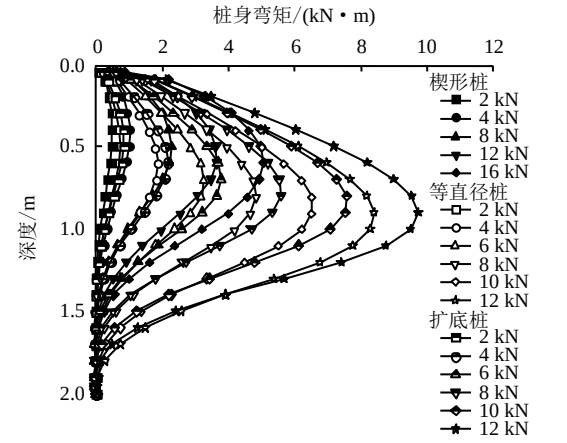
5 影响因素分析

5.1 楔形角的影响规律

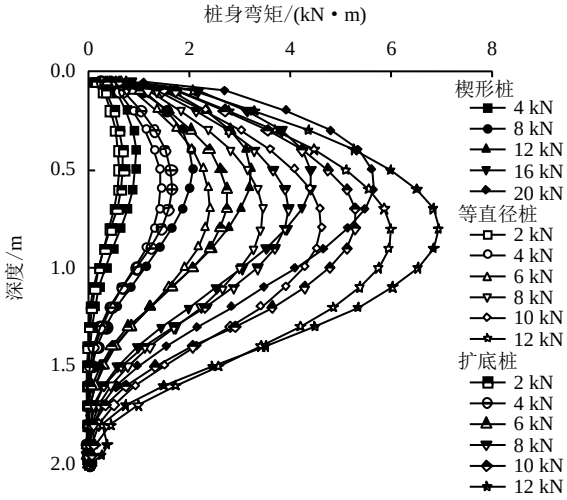
保持桩体体积不变，调整楔形角为 0.8°、1.0°和 1.1°3 种情况；等混凝土用量情况下不同楔形角下楔形桩桩顶水平荷载−位移对比曲线如图 11 所示。由图可知，曲线的变化规律一致。在相同荷载下，楔形角为 0.8°的桩顶水平位移大于楔形角为 1.1°的桩顶水平位移；说明楔形角越大，楔形桩水平向承载性能越好，同时也验证了等混凝土用量情况下，楔形桩水平极限荷载大于等直径桩。

5.2 不同混凝土用量的影响规律

保持楔形角不变，不同体积的楔形桩桩顶水平荷载−位移对比曲线如图 12 所示。由图可知，曲线的变化规律基本一致，相同荷载下，水平位移随着体积的增大而减小，说明增大模型桩的体积是一种有效增加水平向承载力的方法。



(a) 砂性土



(b) 黏性土

图 10 桩身弯矩−深度曲线

Fig.10 Curves of depth vs. pile moments

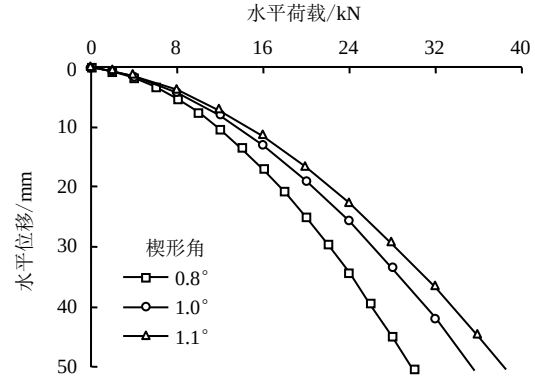


图 11 不同楔形角下桩顶水平荷载−位移对比曲线

Fig.11 Curves of displacement vs. horizontal load influenced by taper angles

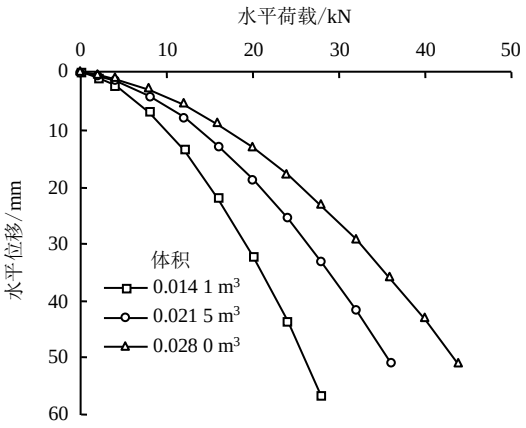


图 12　不同体积下桩顶水平荷载–位移曲线
Fig.12　Curves of displacement vs. horizontal load influenced by volumes

相同楔形角下，不同体积的楔形桩桩顶水平荷载与体积的比值–位移对比曲线如图 13 所示。由图可知，单位体积水平荷载相同下，水平位移随着体积的增大而增大，说明仅依靠增加模型桩体积来提高水平承载力并不是一种好的思路。在不增加施工难度和不影响其他方向承载性能条件下，尽可能增大楔形角是提高楔形桩水平承载力比较合适的方法之一。

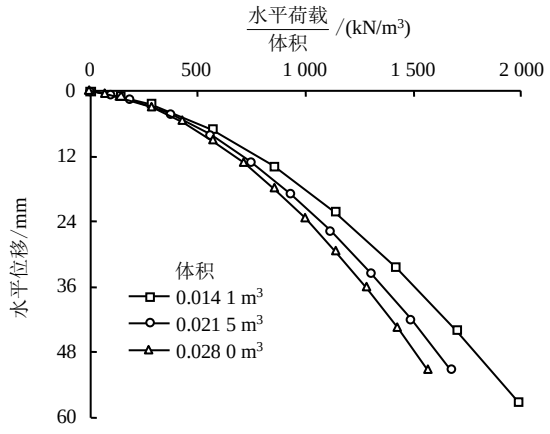


图 13　不同体积下桩顶水平荷载与体积的比值–位移曲线
Fig.13　Curves of displacement vs. volume to horizontal load ratio given different volumes

6　结　论

（1）本文试验条件下楔形桩的水平向承载能力相对最高，扩底桩和等直径桩的水平向极限承载力基本相同；砂土地基中，楔形桩的水平向极限承载力约分别为扩底桩和等直径桩的 1.17 倍和 1.25 倍；黏土地基中，楔形桩的水平向极限承载力约为扩底桩和等直径桩的 1.33 倍。

（2）本文试验条件下，与砂土地基中的相比，黏土环境下楔形桩、扩底桩和等直径桩的水平承载能力分别提高 41.2%、24.1%和 33.3%。

（3）土压力分布主要集中在土体上部（桩顶以下 1.0～1.2 m 范围内），土压力值沿着深度增加而不断降低。桩顶下一定深度范围内的土体特性将直接影响着桩的水平承载力，因此，在工程应用中可采用楔形桩纵向截面异形桩来提高水平向承载力。

参 考 文 献

[1] 王建华, 陈锦剑, 柯学. 水平荷载下大直径嵌岩桩的承载力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1194－1198.
WANG Jian-hua, CHEN Jin-jian, KE Xue. Characteristics of large diameter rock-socketed piles under lateral loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(8): 1194－1198.

[2] 王俊林, 王复明, 任连伟, 等. 大直径扩底桩单桩水平静载试验与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1406－1411.
WANG Jun-lin, WANG Fu-ming, REN Lian-wei, et al. Horizontal static load test and numerical simulation of single large diameter under-reamed pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(9): 1406－1411.

[3] 黄银冰, 赵恒博, 顾长存, 等. 考虑水泥土桩增强作用的灌注桩水平承载性能现场试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1109－1115.
HUANG Yin-bing, ZHAO Heng-bo, GU Chang-chun, et al. Field experimental study of lateral load capacity of filling pile enhanced by soil-cement pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1109－1115.

[4] 荣冰, 张嘎, 张建民. 水平荷载作用下风电机桩基础的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 428－432.
RONG Bing, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge model tests for pile foundation of wind power generation under horizontal loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 428－432.

[5] 龚先兵, 杨明辉, 赵明华, 等. 山区高陡横坡段桥梁桩基承载机理模型试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 56－62.
GONG Xian-bing, YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua,

et al. Load-bearing mechanism model test for bridge pile foundation in high-steep transverse slope[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2013, 26(2): 56－62.

[6] 任连伟, 顿志林, 李果, 等. JPP 桩不同组合水平承载性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 101－106.
REN Lian-wei, DUN Zhi-lin, LI Guo, et al. Model tests research on horizontal bearing behavior of JPP pile under different combinations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp. 2): 101－106.

[7] 高博雷, 张陈蓉, 张照旭. 砂土中边坡附近单桩水平抗力的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3191－3198.
GAO Bo-lei, ZHANG Chen-rong, ZHANG Zhao-xu. Model tests on effect of slopes on lateral resistance of near single piles in sand[J]. **Rock and Soil Mechanic**s, 2014, 35(11): 3191－3198.

[8] 文松霖. 扩底桩桩端承载机理初探[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1970－1974.
WEN Song-lin. A discussion on pile-tip bearing mechanism of pedestal pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 1970－1974.

[9] 高盟, 王滢, 高广运, 等. 一种大直径扩底桩端阻力和侧阻力的确定方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 797－801.
GAO Meng, WANG Ying, GAO Guang-yun, et al. A method for determining tip and side resistances of large diameter pedestal pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 797－801.

[10] LIU J, HE J, WU Y P, et al. Load transfer behaviour of a tapered rigid pile[J]. **Géotechnique**, 2012, 62(7): 649－652.

[11] 蒋建平, 高广运, 顾宝和. 扩底桩、楔形桩、等直径桩对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 764－766.
JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun, GU Bao-he. Comparison of belled pile, tapered pile and equal-diameter pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(6): 764－766.

[12] 中国人民共和国住房和城乡建设部. GB50007–2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
People's Republic of China Ministry of Construction. GB50007–2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.

[13] 孔纲强, 顾红伟, 车平, 等. 桩侧截面形式对扩底桩竖向抗压特性影响分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 361－367.
KONG Gang-qiang, GU Hong-wei, CHE Ping, et al. Impact of pile shaft shapes on vertical bearing capacity of belled piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 361－367.

[14] 任连伟, 顾红伟, 彭怀风, 等. 三种工况下扩底楔形桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1887－1893.
REN Lian-wei, GU Hong-wei, PENG Huai-feng, et al. Research on bearing capacity of belled wedge pile model under three working conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1887－1893.

[15] 中国人民共和国建设部. JGJ94–2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
People's Republic of China Ministry of Construction. JGJ94–2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.

[16] 孔纲强, 周立朵, 杨庆, 等. 基于 *p-y* 曲线法的扩底楔形桩水平向承载力理论分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 179－185, 206.
KONG Gang-qiang, ZHOU Li-duo, YANG Qing, et al. Theoretical analysis on horizontal bearing capacity of belled wedge pile basing on *p-y* curves[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2016, 29(6): 179－185, 206.

[17] 中国人民共和国交通运输部. JTS 167–4–2012 港口工程桩基规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
People's Republic of China Ministry of Transport. JTS 167–4–2012 Code for pile foundation of harbor engineering[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.