

DOI: 10.11779/CJGE20220926

螺杆灌注桩抗拔承载机理的试验研究

王曙光^{1,2}, 王浩宇¹, 唐建中¹, 赵志鹏¹, 彭桂皎³, 王新华⁴

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013; 2. 住房和城乡建设部防灾研究中心, 北京 100013;

3. 海南卓典高科技开发有限公司, 海南 海口 570208; 4. 重庆卓典建设工程有限公司, 重庆 401120)

摘要: 通过室内模型试验和现场试验对螺杆灌注桩抗拔承载机理进行了研究, 研究表明螺杆灌注桩作为抗拔桩优势较为明显。通过室内模型试验, 采用图像处理技术直观地得到上拔荷载作用下螺杆桩和直杆桩的桩周土体位移场和上拔破坏模式, 进而对其抗拔承载机理进行探讨, 并采用现场试验进行验证。模型试验和现场试验表明, 螺杆桩的单桩抗拔承载力高于同直径的等截面桩, 螺纹段的抗拔侧阻力与等截面桩的侧阻力相比明显提高。对于螺纹段, 极限抗拔侧阻力表现为周边土体的抗剪强度, 破坏面为连续的拱形; 对于直杆段, 极限抗拔侧阻力表现为桩体与桩周土体的摩擦阻力, 破坏面为桩周圆柱面。根据试验结果从工程实用的角度, 引入抗拔折减系数给出螺杆灌注桩单桩抗拔极限承载力的表达式, 并给出相关参数的取值建议。

关键词: 螺杆灌注桩; 破坏模式; 抗拔承载机理; 模型试验; 现场试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)10-2156-09

作者简介: 王曙光(1972—), 男, 工学博士, 研究员, 主要从事上部结构地基基础共同作用、基坑支护、地基处理等方面的研究工作。E-mail: wshgcabr@aliyun.com。

Experimental study on vertical tensile bearing mechanism of screw cast-in-place piles

WANG Shuguang^{1,2}, WANG Haoyu¹, TANG Jianzhong¹, ZHAO Zhipeng¹, PENG Guijiao³, WANG Xinhua⁴

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Disaster Prevention Research

Center, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100013, China; 3. Hainan Zhuodian High Technique Development

Limited Company, Haikou 570203, China; 4. Chongqing Zhuodian Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The vertical tensile bearing capacity of the screw cast-in-place pile is studied through the indoor model tests and field tests, and it is shown that the screw cast-in-place pile is superior to be used as the uplift piles. Through the indoor model tests, the failure modes of the screw pile and the straight rod pile by uplift loads are obtained intuitively by using the image processing technology, then the tensile bearing mechanisms are discussed, and the field tests are used for verification. The model and field tests show that the tensile bearing capacity of the single screw pile is higher than that of the straight rod pile with the same diameter, and the tensile lateral resistance of the screw pile is obviously higher than that of the straight rod pile with the same diameter. For the screw section, the tensile ultimate lateral resistance is the shear strength of the surrounding soil, and the fracture surface is a continuous arch. For the straight rod section, the tensile ultimate lateral resistance is the friction resistance between the pile body and the soil around the pile, and the failure surface is the cylinder around the pile. According to the test results and from an engineering practical point of view, the expression for the tensile ultimate bearing capacity of a single screw cast-in-place pile is given by introducing the drawdown coefficient, and the values of the relevant parameters are suggested.

Key words: screw cast-in-place pile; failure mode; vertical tensile bearing mechanism; model test; field test

0 引言

螺杆灌注桩是一种上部为圆柱形、下部为螺丝形的组合式灌注桩, 由于其特有的施工工艺及截面形式, 工程实践表明其单桩承载力高于外直径相同的等截面灌注桩, 该桩型还具有节约材料、文明施工程度高等特点, 因而在工程中有广泛的应用前景。

目前已有许多学者对螺杆灌注桩进行了研究^[1-5], 主要通过模型试验、静载试验和数值分析等方法对螺杆灌注桩的竖向受压承载特性进行了研究, 这些研究表明: 螺杆桩的单桩抗压承载力高于外直径相同的等

收稿日期: 2022-07-26

截面桩（以下简称直杆桩）的主要原因是因为螺纹段的侧阻力与直杆桩的侧阻力相比明显提高^[5]。对于抗拔桩而言，其抗拔承载力主要表现为桩的侧阻力，基于以上对螺杆灌注桩承载特性的研究结果可以预见，螺杆灌注桩作为抗拔桩使用时，其优势更为明显，而目前工程建设中抗拔桩的应用越来越多，采用螺杆灌注桩作为抗拔桩具有很好的经济效益和社会效益。但是目前对于螺杆灌注桩的抗压承载特性的研究较多，对于螺杆灌注桩抗拔承载特性的研究较少，相关技术规程^[6]尚未给出螺杆灌注桩抗拔承载力的计算方法，急需对螺杆灌注桩的抗拔承载特性进行研究。

本文拟通过室内模型试验和现场试验对螺杆灌注桩的抗拔破坏形态和承载机理进行研究，首先通过室内模型试验，采用图像处理技术直观地得到螺杆桩和直杆桩在竖向上拔荷载作用下的位移发展规律及上拔破坏形态，进而探讨螺杆桩和直杆桩抗拔承载力及抗拔承载机理的差异，然后通过螺杆灌注桩和直杆灌注桩的现场抗拔静载荷试验对模型试验的相关结果进行验证，并对螺杆灌注桩抗拔承载力计算方法进行探讨。

1 室内模型试验

本文通过自行设计的室内砂箱模型试验，利用数字图像处理分析技术和应变测试技术，对设置于不同密实度砂土中螺杆桩和直杆桩在竖向上拔荷载作用下的桩周土的位移场、桩身轴力及侧阻力等进行分析研究^[7]。

模型试验在砂箱中进行，试验砂箱采用高透光率玻璃制作，模型桩采用尼龙PA6材料制作的螺杆桩和直杆桩的半桩模型（见图1），模型桩按照1：15进行缩尺，模型桩的参数见表1，模型桩桩身每隔100 mm布置一个应变片，对试验过程中的桩身应变进行测试。试验用砂采用细砂，土颗粒较均匀。试验桩采用预埋的方式，分别将螺杆桩和直杆桩半桩模型紧贴砂箱玻璃放置，采用细砂分层铺填并压实（见图2（a）），本次试验的填砂分别设计了松散、中密、密实3种密实度，相关物理力学参数见表2。为减小试验桩的相互影响，预埋时模型桩的桩间距约为10倍桩径。

表 1 模型桩参数

Table 1 Parameters of model piles

单位: mm

桩型	桩长	外径	内径	螺距	螺牙宽度	螺牙厚度
螺杆桩	400	40	30	50	5	2
直杆桩	400	40	—	—	—	—

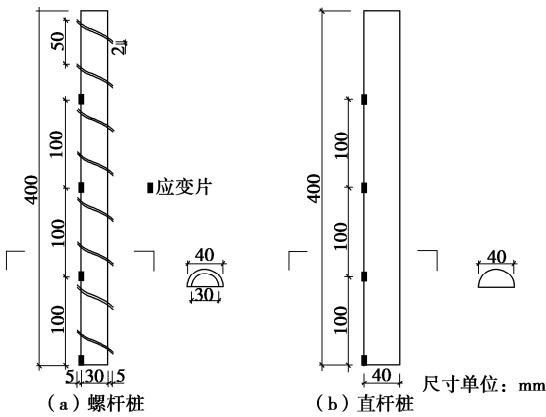


图 1 模型桩详图

Fig. 1 Schematic diagram of model piles

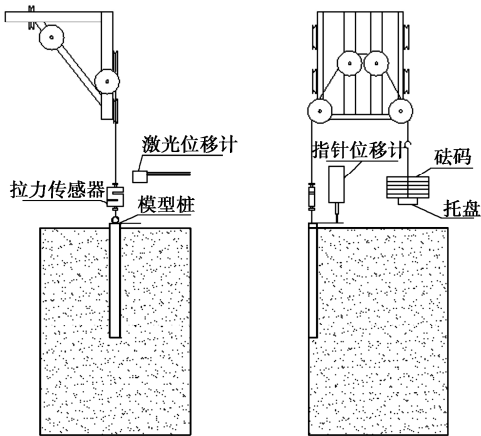
表 2 土性指标

Table 2 Property indices of soil

密实程度	相对密实度 D_r	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / kPa
松散	0.22	1.43	22.99	4.5
中密	0.40	1.50	23.34	5.0
密实	0.72	1.65	26.57	6.0



(a) 砂箱试验



(b) 加载装置

图 2 砂箱及加载装置

Fig. 2 Sand box and loading device

本次试验根据预估的加载量级，自行设计了一套

加载装置，采用滑轮组改变力的方向的设计，采用加载砝码和改变钢绞线走线方式，根据试验目的可以实现对模型桩施加拔荷载或下压荷载。加载装置安装过程全程采用水准仪校准，以保证加载方向竖直。装置顶部布置质量为360 kg的千斤顶提供反力并保证整个试验装置在试验过程中的稳定性，试验加载装置见图2（b）。

本次抗拔试验加载过程中，采用砝码进行加载，采用拉力传感器量测桩顶荷载，采用位移计量测桩顶位移，采用应变片对桩身应变进行测量，同时通过数字图像软件，对每一级加载过程中采集到的图像进行计算分析，得到每一级荷载下桩周土体的位移云图。试验过程中，按照《建筑地基基础设计规范：GB50007—2011》附录T的相关规定，采用慢速维持荷载法进行试验。

图3为设置于不同密实度砂土中的模型桩的抗拔荷载-位移曲线，从室内模型试验得到的模型桩荷载-位移曲线可以看出，本次模型试验中的直杆桩均为突然拔出破坏，而螺杆桩的荷载位移曲线较为平缓，但最终也发生拔出破坏。在砂土密实度相同的条件下，螺杆桩的抗拔承载力明显高于直杆桩的抗拔承载力。

本次试验不同密实度砂土中的模型桩的抗拔极限承载力结果见表3和图4。从表3和图4可以看出，不管是螺杆桩还是直杆桩，其极限抗拔承载力都是随着砂土密实度的提高而提高，但是从表3、图5螺杆桩相对于直杆桩抗拔极限承载力提高比例随相对密实度的变化曲线可以看出，螺杆桩相对于直杆桩的极限抗拔承载力提高幅度并不是随着砂土密实度的提高单调增加的。从本次试验结果可以看出，当桩周土处于松散到中密状态时，螺杆桩相对直杆桩抗拔承载力提高比例是随着密实度的提高而增长的，但是中密状态时提高比例达到峰值，密实状态时的提高比例略有降低。

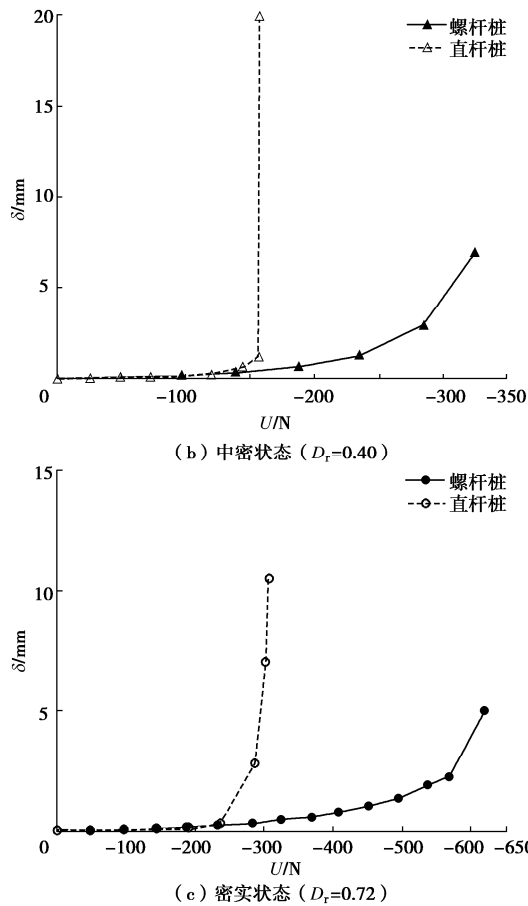
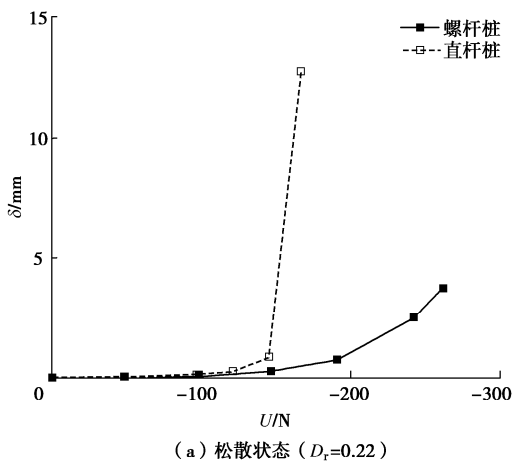


图3 模型桩的抗拔荷载-位移曲线

Fig. 3 Tensile load-displacement curves of model piles

表3 模型试验抗拔极限承载力

Table 3 Tensile bearing capacities of model piles

相对密实度 D_r	抗拔极限承载力/N		螺杆桩抗拔极限承载力相对直杆桩提高比例/%
	螺杆桩	直杆桩	
0.22	261.6	145.4	80.0
0.40	324.2	156.5	107.3
0.72	619.4	306.4	102.2

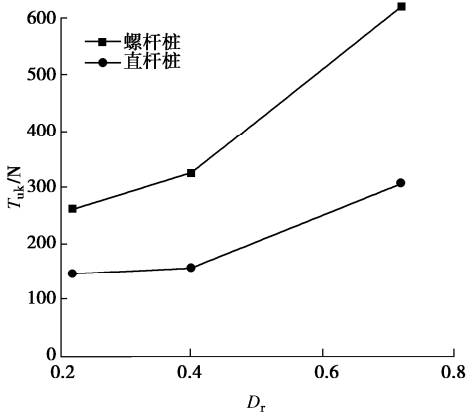


图4 模型桩抗拔极限承载力随相对密实度的变化曲线

Fig. 4 Tensile bearing capacity-relative compactness curves of model piles

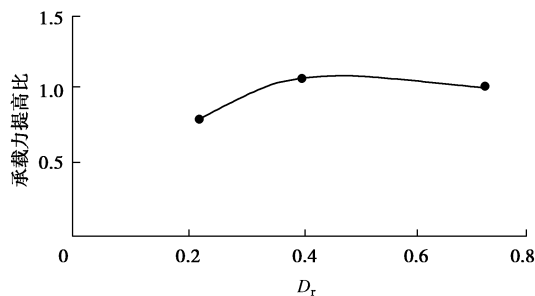


图 5 螺杆桩相对于直杆桩抗拔极限承载力提高比例随相对密实度的变化曲线

Fig. 5 Curves of increase ratio of tensile bearing capacity of model piles

桩的竖向抗拔承载力主要是由侧阻力和桩的自重组成的, 本次模型试验为了研究螺纹段与直杆段的抗拔侧阻力, 通过应变片对桩身应变进行测试, 进一步换算得到桩身轴力, 并通过计算分析得到桩的抗拔侧阻力, 图6为不同密实度砂土中模型桩的平均抗拔侧阻力随桩顶位移的变化曲线。

图6 (a) 为松散砂土中模型桩的平均抗拔侧阻力随桩顶位移的变化曲线, 加载前期随上拔荷载的增加平均侧阻力线性增长, 直杆桩加载至0.12 kN之前平均抗拔侧阻力随荷载线性增长, 随后一级上拔荷载的作用下平均抗拔侧阻力呈非线性增长, 加载至0.145 kN时, 直杆桩被拔出, 直杆桩极限平均抗拔侧阻力为4.95 MPa; 对于螺杆桩加载至0.19 kN之前平均抗拔侧阻力随荷载线性增长, 随后两级上拔荷载的作用下平均抗拔侧阻力呈非线性增长, 加载至0.26 kN时, 螺杆桩被拔出, 螺杆桩极限平均抗拔侧阻力为9.77 MPa。

图6 (b) 为中密砂土中模型桩的平均抗拔侧阻力随桩顶位移的变化曲线, 加载前期随上拔荷载的增加平均侧阻力线性增长, 直杆桩加载至0.12 kN之前平均抗拔侧阻力随荷载线性增长, 随后两级上拔荷载的作用下平均抗拔侧阻力呈非线性增长, 加载至0.156 kN时, 直杆桩被拔出, 直杆桩极限平均抗拔侧阻力为5.64 MPa; 对于螺杆桩加载至0.234 kN之前平均抗拔侧阻力随荷载线性增长, 随后两级上拔荷载的作用下平均抗拔侧阻力呈非线性增长, 加载至0.324 kN时, 螺杆桩被拔出, 螺杆桩极限平均抗拔侧阻力为10 MPa。

图6 (c) 为密实砂土中模型桩的平均抗拔侧阻力随桩顶位移的变化曲线, 加载前期随上拔荷载的增加平均侧阻力线性增长, 直杆桩加载至0.236 kN之前平均抗拔侧阻力随荷载线性增长, 随后3级上拔荷载的作用下平均抗拔侧阻力呈非线性增长, 加载至0.306 kN时, 直杆桩被拔出, 直杆桩极限平均抗拔侧阻力为12.04 MPa; 对于螺杆桩加载至0.568 kN之前平均抗拔侧阻力随荷载线性增长, 随后两级上拔荷载的作用下

平均抗拔侧阻力呈非线性增长, 加载至0.619 kN时, 螺杆桩被拔出, 螺杆桩极限平均抗拔侧阻力为24.82 MPa。

从图6可以看出, 尽管直杆桩和螺杆桩的极限抗拔侧阻力值有较大的差别, 但是直杆桩和螺杆桩的抗拔侧阻力随位移的变化规律基本一致, 加载前期随上拔荷载的增加平均侧阻力线性增长, 增长至线性段终点后, 抗拔侧阻力在随后的一、两级上拔荷载的作用下呈非线性增长, 随后桩体即被拔出, 抗拔侧阻力随位移的变化曲线中没有明显的侧阻软化现象, 抗拔破坏都呈现突然的脆性破坏特征。

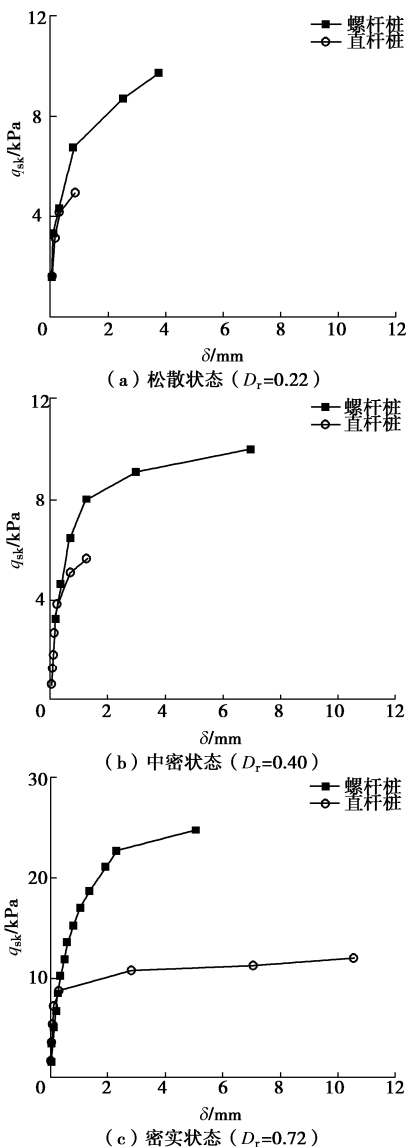


图 6 模型桩的平均抗拔侧阻力随桩顶位移的变化曲线

Fig. 6 Curves of average tensile lateral resistance of model piles

表4为本次模型试验应力测试的误差分析, 实测极限抗拔侧阻力是根据上述应变测试结果推算出的平均极限抗拔侧阻力, 计算极限抗拔侧阻力是根据载荷试验的极限抗拔承载力扣除模型桩自重后计算得到的平

表 4 模型试验误差分析
Table 4 Error analysis of model piles

相对密实度 D_r	实测极限抗拔侧阻力/kPa		计算极限抗拔侧阻力/kPa		误差/%	
	螺杆桩	直杆桩	螺杆桩	直杆桩	螺杆桩	直杆桩
0.22	9.77	4.95	10.33	5.66	-5.4	-12.5
0.40	10.00	5.64	12.83	6.11	-22.0	-7.7
0.72	24.82	12.04	24.57	12.07	1.0	-0.2

均极限抗拔侧阻力，二者的差值即为试验测试误差。
本次试验螺杆桩平均极限抗拔侧阻力按下式计算：

$$q_s = (T_{uk} - G) / ul \quad (1)$$

式中： u 为按螺纹外径计算的螺杆桩（半桩）周长；
 T_{uk} 为螺杆桩极限抗拔承载力； G 为螺杆桩自重； l 为
螺杆桩长度。

从表4可以看出，本次试验整体误差不大，可以满足岩土工程测试的精度要求。其中最大误差为中密状态砂性土中螺杆桩的极限抗拔侧阻力误差偏低22%，其次是松散状态砂性土中直杆桩的极限抗拔侧阻力误差为12%，其他误差都在10%以内，且除了密实状态砂性土中的螺杆桩实测极限抗拔侧阻力实测值大于计算值1%以外，其他都是实测值小于计算值。

室内模型试验在加载过程中，采用PhotoInfor数字图像软件，将上拔荷载作用下的桩周土体的高清照片与加荷载前的桩周土体的高清图片进行对比分析，得到上拔荷载作用下螺杆桩和直杆桩的桩周土体位移场。本次模型试验分别在松散、中密及密实状态的砂土中进行了螺杆桩和直杆桩的试验，由于图件较多，且不同密实度状态下的螺杆桩和直杆桩的桩周土体位移场规律大致相当，因此本文仅以中密砂土中的螺杆桩和直杆桩的桩周土体位移场（如图7所示）为例进行说明。

通过将螺杆桩和直杆桩的桩周土体位移场进行对比分析可以发现：在加载初期（如图7（a），（b）所示），在上拔荷载的作用下，螺杆桩顶部桩周一定范围内的土体发生明显的位移，且螺牙上部及周边土体产生了一定的位移，说明在上拔荷载作用下螺牙挤压上部土体，带动其周围土体一起位移，此时螺牙周围土体的抗力得到了发挥，主要表现为沿螺旋状螺牙上部土体的端承力。直杆桩与桩周土体位移不明显。

随着上拔荷载的增加（如图7（c），（d）所示），螺杆桩桩顶及桩周土体位移继续增大，螺杆桩顶部桩周土体的位移量增大，发生位移的土体范围有一定的发展，螺牙上部土体的位移区域及位移量沿桩身不断向上扩大，与相邻螺牙的土体位移区域相连。直杆桩的土体变形仍不明显，但是在桩顶部位及桩侧部位出现一定的变形区域。

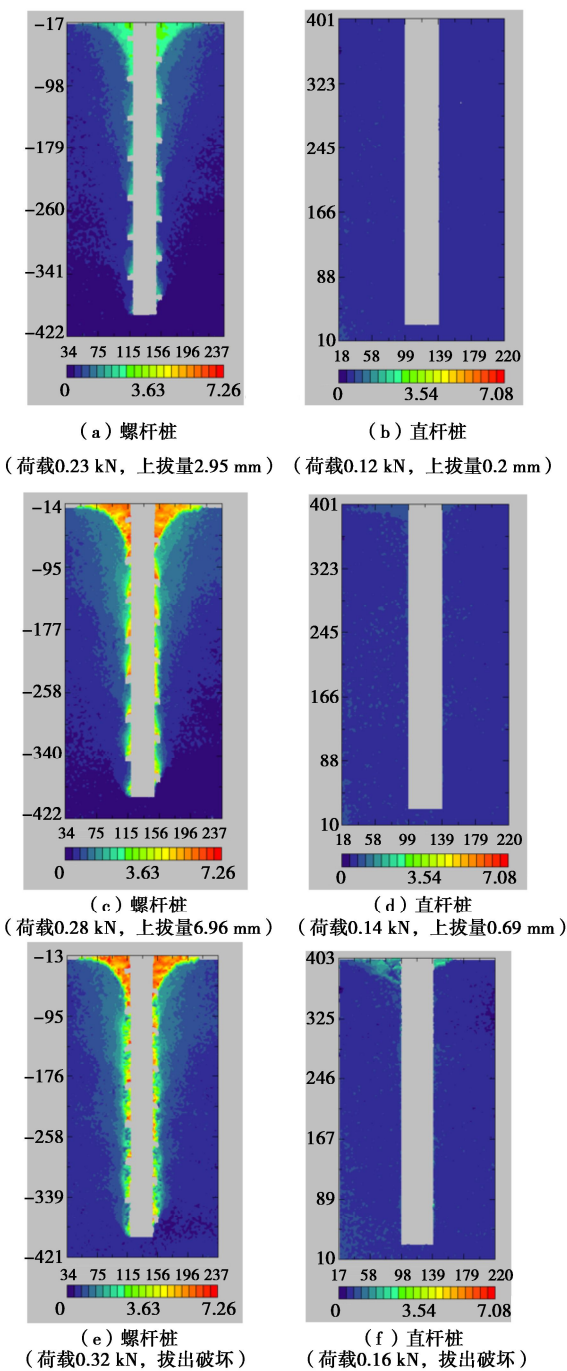


图 7 模型桩桩周土体位移场

Fig. 7 Displacement fields of soil around model piles

在加载后期（如图7（e），（f）所示），螺杆桩桩顶及桩周土体位移明显加大，螺牙与螺牙之间的土体作为整体连同桩顶周边一定范围的土体一同被拔出，

破坏面顶部呈倒八字型, 其下为螺牙与螺牙之间的土体形成的拱形破坏面, 从破坏状态的位移云图可以看出, 桩顶部位的影响范围约为螺杆桩外径的1.4~1.5倍, 桩周土影响范围区域约为2~3倍螺牙高度。直杆桩发生拔出破坏时, 其顶部的破坏面也呈倒八字, 但水平范围及竖向范围都小于螺杆桩, 桩侧与桩周土体发生位移, 但位移范围和位移量值都不大, 从破坏状态的位移云图可以看出, 桩周土影响范围仅为桩周区域, 桩顶部位的影响范围约为0.6~1.5倍桩径。

通过上述对模型桩桩周土体位移场的分析可以看出, 螺杆桩和直杆桩在上拔荷载作用下的位移形态和破坏机理有所不同 (如图8所示)。对于承受上拔荷载的螺杆桩, 在极限状态下, 由于螺牙的机械咬合作用使得螺牙与上部螺牙之间的土体作为整体与周边土体发生剪切破坏, 螺纹段的极限抗拔侧阻力表现为周边土体的抗剪强度, 破坏面为连续的拱形, 拱形截面的平均直径大于螺牙的外径, 这与文献[4]的结论基本一致, 但侧阻力的作用方向相反; 极限状态下, 螺杆桩的桩顶一部分土体也会随桩体被拔出, 但该部分土体的体积不好定量表达, 且占抗拔承载力的比例不大, 抗拔承载力计算时可以不考虑其作用, 作为安全储备。对于承受上拔荷载的直杆桩, 在极限状态下, 桩体与桩周土体发生剪切位移, 侧阻力表现为桩体与桩周土体的摩擦阻力, 破坏面为桩周的圆柱面; 极限状态下, 直杆桩的桩顶一部分土体也会随桩体被拔出, 但其土体的体积远小于螺杆桩顶被拔出的土体体积, 抗拔承载力计算时可以忽略其作用, 作为安全储备。综上所述, 螺杆桩和直杆桩抗拔侧阻力的产生机理和破坏形态有较大差异, 一方面螺杆桩抗拔侧阻力表现为周边土的抗剪强度, 直杆桩抗拔侧阻力表现为桩土界面的摩擦阻力, 而土的抗剪强度要大于桩土摩擦阻力^[8], 另一方面螺杆桩的桩周拱形破坏面的直径大于直杆桩的桩径, 因此螺杆桩的抗拔侧阻力与直杆桩相比有显著的提高, 这是螺杆桩抗拔承载力明显高于直杆桩的根本原因。

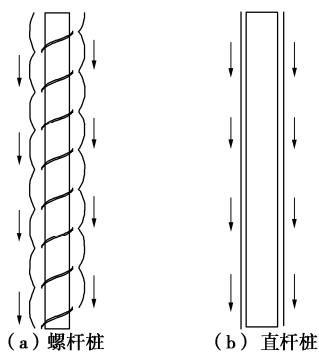


图 8 模型桩的抗拔极限破坏形态

Fig. 8 Tensile ultimate failure modes of model piles

2 现场载荷试验

通过室内模型试验, 对螺杆桩的抗拔承载机理和破坏形态有了定性的认识, 但是模型试验存在尺寸效应, 且反映不了施工因素的影响, 因此需要采用现场试验进行验证。现场试验在四川省遂宁市高新区进行, 试验场地为浅丘地貌, 勘察揭露的地层由第四系全新统素填土 (素填土①)、第四系全新统坡洪积层 (粉质黏土②、粉质黏土③) 和侏罗系上统遂宁组砂质泥岩 (强风化砂质泥岩④-1、中风化砂质泥岩④-2) 组成。场地的工程地质剖面见图9, 土的物理力学性质指标见表5。场地内连续分布有较厚的素填土①, 呈灰褐色、褐黄色、褐红等色, 松散, 稍湿一湿, 主要由黏性土及泥岩、砂岩岩块组成, 为新近回填, 其回填年限小于5 a。

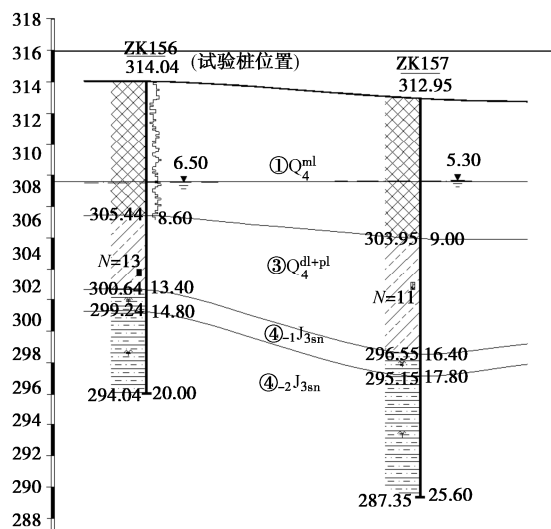


图 9 工程地质剖面

Fig. 9 Geological prospecting section

本次试验的目的主要是验证螺纹段、直杆段抗拔侧阻力的差异、以及螺纹段、直杆段抗压侧阻力与抗拔侧阻力的差异, 因此本次试验将试验桩桩身完全设置在素填土中, 减小土体不均匀对试验的影响; 另外考虑到本次试验采用钢筋应变片对抗拔桩的内力进行测试, 采用钢筋应变片测试的是桩身钢筋的应变、并采用钢筋的应变代表桩身截面的应变, 这就需要保证在上拔荷载作用下桩身混凝土应变与钢筋应变相同, 所以要求桩身混凝土在上拔过程中不出现开裂, 因此设计桩长不能太长, 本次试验桩长设计为6 m, 通过初步计算在达到单桩极限抗拔承载力时, 桩身混凝土的拉应力不大于混凝土轴心抗拉强度。

本次试验采用螺杆桩钻机施工5根试验桩, 其中2根直杆灌注桩, 编号分别为CL1、CL2, 3根螺杆灌注桩, 编号分别为LG1、LG2、LG3, 试验桩相关参数见表6, 混凝土强度等级为C35, 纵向主筋采用8根直径

表 5 土性指标

Table 5 Property indices of soil										
岩土名称	天然重 度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然含 水率 $w/\%$	孔隙 比 e	塑性 指数 I_{p}	液性指 数 I_{L}	压缩模 量 E_{s} / MPa	压缩系数 $a_{1\sim 2}$ / MPa^{-1}	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 φ / ($^{\circ}$)	承载力特征 值 f_{ak}/kPa
素填土①	18.0	—	—	—	—	—	—	5	8	—
粉质黏土②	19.0	32.7	0.903	13.1	0.62	3.28	0.62	20	11.4	80
粉质黏土③	19.7	25.6	0.74	14.9	0.36	6.13	0.29	38	15.2	150

表 6 试验桩的参数

Table 6 Specific parameters of test piles							
桩号	桩长/m	直杆段桩 长/m	螺杆段桩 长/m	外径/ mm	内径/ mm	螺距/ mm	螺牙高度/ mm
LG1/ LG2/ LG3	6	2	4	600	540	500	30
CL1/CL2	6	6	—	600	—	—	—

18 mm的HRB400钢筋。图10为试验桩的详图及应变片布置图。为保证螺纹段成桩质量，螺杆灌注桩严格按同步技术施工，向下钻进时采用正向同步技术，钻杆每正向旋转一周，钻杆向下位移一个螺距，在土体中形成螺纹。钻进至桩底标高时，先泵送混凝土，然后开始提钻。在螺纹段，采用反向同步技术边提钻边泵送混凝土，即钻杆每反向旋转一周，钻杆向上相应位移一个螺距，确保钻杆顺着成孔时形成的螺纹退出，泵送的混凝土随之形成螺纹状的桩体。提升至上部直杆段时，采用非同步技术提钻，提升钻杆同时泵送混凝土将同步钻进形成的螺纹扫掉形成圆柱状桩体。直杆桩施工时钻进和提钻都采用非同步技术，形成圆柱状桩体。

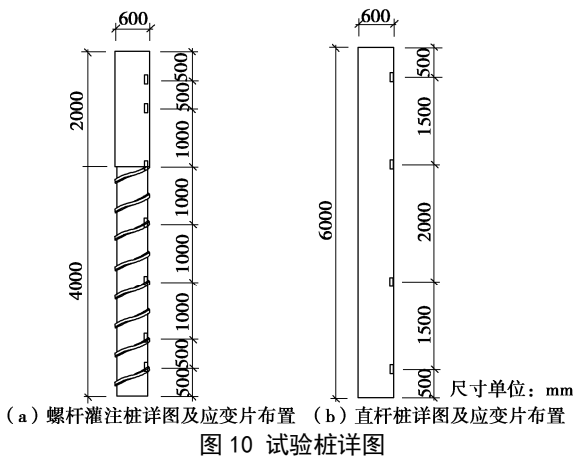


Fig.10 Schematic diagram of experiment piles

对5根试验桩分别进行单桩抗压、抗拔静载荷试验，单桩抗压、抗拔静载试验分别按照《建筑地基基础设计规范：GB50007—2011》附录Q和附录T进行，其中LG1、CL1号桩进行单桩抗压静载试验，LG2、LG3、CL2号桩进行单桩抗拔静载试验，3根抗拔桩静载试验的荷载位移曲线如图11所示。从图11中可以看出，LG2、CL2号桩加载过程中最后一级荷载作用下的位移超出前一级荷载作用下位移的5倍停止加载，其单桩极限抗拔承载力分别为800，600 kN，LG3号桩加

载至900 kN时仍为缓变形，但试验装置不支持继续加载，其单桩极限抗拔承载力可按900 kN考虑。尽管在试验设计时已经考虑到桩身开裂对应变测试的影响，但是本次试验中LG3在加载后期还是发生了由于桩体开裂导致局部应变片失效的问题，因此后续桩身轴力及侧阻力的分析仅给出LG2、CL2号桩的分析结果。

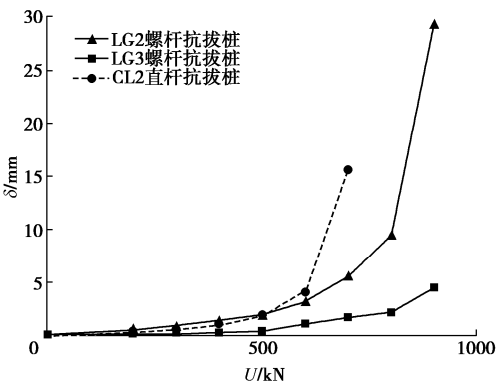


图 11 试验桩的抗拔荷载-位移曲线

Fig. 11 Tensile load-displacement curves of test piles

图12为LG2、CL2号桩的桩身轴力随深度的分布图，从图12可以看出，螺杆桩和直杆桩的桩身轴力分布都是上大下小，轴力随深度衰减，不同部位衰减的程度不同，体现为轴力曲线的斜率不同，该斜率反映了该部位的侧阻力的大小。本次试验的桩身轴力是采用实测的钢筋应变代表该断面的桩体应变、然后乘以桩身混凝土的弹性模量计算得到的，本次试验采用的混凝土的弹性模量是根据现场预留的试块通过室内试验测得的弹性模量，根据室内试验得到的混凝土弹性模量平均值为21.3 GPa，由此计算的桩顶轴力值比实际荷载偏大9.6%~15.1%，这个误差主要是由于采用实测的钢筋应变代表该断面的桩体应变产生的，因为钢筋笼的主筋都是布置在桩体的外侧，而抗拔试验的荷载是通过拉拔钢筋然后传递给混凝土桩身，导致桩身内部混凝土的应变小于钢筋的应变，而且距离桩顶越近，这个差异越大，因此采用实测的钢筋应变代表

该断面的桩体应变计算的桩顶轴力偏大。从本次试验达到极限承载力时的误差约为9.6%~15.1%，基本可以满足岩土工程测试的误差要求。

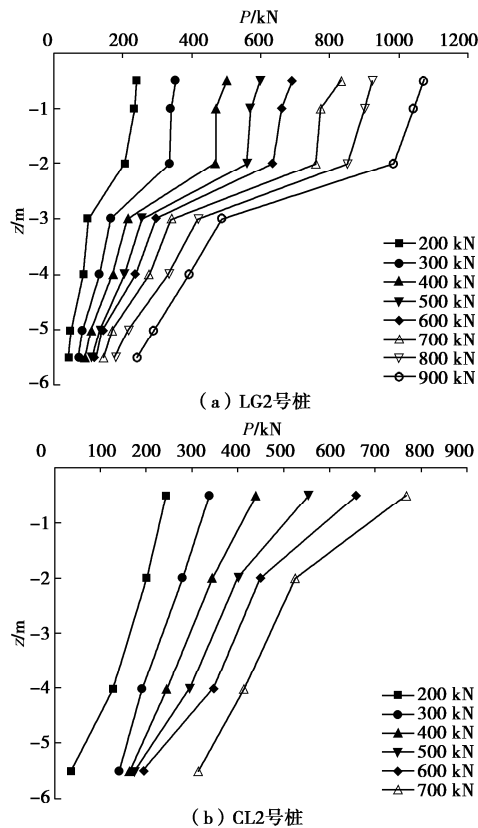


图 12 试验桩轴力分布图
Fig. 12 Axial forces of test piles

图13为LG2、CL2号桩的抗拔侧阻力随深度的分布图，螺杆桩和直杆桩的抗拔侧阻力随深度的分布规律有很大的不同，由图13（b）可以看出，直杆桩的抗拔侧阻力分布主要呈上大下小分布，上部的侧阻力发挥比较充分，由图13（a）可以看出，螺杆桩的抗拔侧阻力分布为中部较大，尤其是与直杆段相连的下部的螺纹段部位侧阻力最大，螺纹段的抗拔侧阻力远大于直杆段的侧阻力，直杆段的侧阻力发挥不充分，小于直杆桩的平均侧阻力。

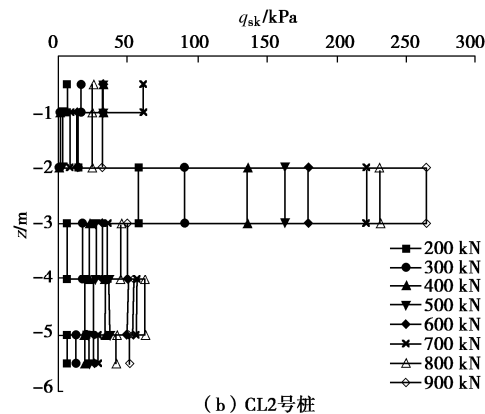
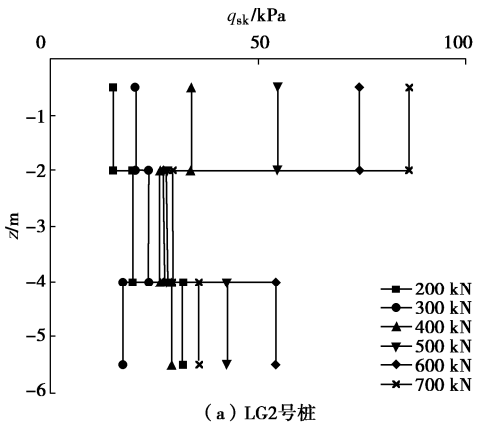


图 13 试验桩抗拔侧阻力分布图
Fig. 13 Tensile lateral resistances of test piles

本次现场试验的主要试验成果汇总表见表7，本次试验螺杆抗压桩单桩极限承载力为1409 kN，直杆抗压桩单桩极限承载力988 kN，螺杆桩抗压承载力比直杆桩提高42.6%，螺杆抗拔桩极限承载力为800 kN，直杆抗拔桩极限承载力为600 kN，螺杆桩抗拔承载力比直杆桩提高为33.3%。螺杆抗压桩螺纹段的平均侧阻力为143.62 kPa，直杆抗压桩的平均侧阻力为58.13 kPa，螺纹段的抗压侧阻力提高系数为2.47；螺杆抗拔桩螺纹段的平均侧阻力为102.57 kPa，直杆抗拔桩的平均侧阻力为49.39 kPa，螺纹段的抗拔侧阻力提高系数为2.08；螺杆抗拔桩螺纹段侧阻力相对于螺杆抗压桩螺纹段侧阻力的抗拔折减系数为0.71，直杆抗拔桩侧阻力相对于直杆抗压桩侧阻力的抗拔折减系数为0.85，螺纹段侧阻力的抗拔折减系数略低于直杆桩的抗拔折减系数。

表 7 现场静载试验主要试验成果					
Table 7 Results of field static load tests					
静载试验 类型		极限承 载力/kN	分段平均侧阻力/ kPa		抗拔 折减 系数
			直杆段	螺纹段	
抗压静 载试验	LG1	1409	53.25	143.62	—
	CL1	988	58.13	—	—
抗拔静 载试验	LG2	800	24.77	102.57	0.71
	CL2	600	49.39	—	0.85

3 螺杆灌注桩承载力计算方法探讨

通过以上室内模型试验和现场载荷试验可以发现，螺杆桩和直杆桩在上拔荷载作用下的位移形态和破坏机理有所不同，其单桩抗拔承载力也有明显的提高，其单桩抗拔承载力的计算方法也应有所区别，这主要体现在螺纹段侧阻力的计算。抗拔桩承载力可以采用理论公式和经验公式进行计算，根据以上试验结果揭示的螺杆桩的抗拔承载机理，螺杆灌注桩螺纹段的侧阻力采用土的抗剪强度表达更合理，但目前采用

该方法计算的抗拔承载力与实测结果有较大的差异,尚不适合工程应用,这主要是因为土的抗剪强度的计算涉及到法向应力、抗剪强度指标以及拱形面的形状等因素,后续还需要做进一步的深入研究,目前从工程实用的角度,简便易行的方法就是在现有螺杆桩抗压承载力计算公式的基础上引入抗拔折减系数进行修正,螺杆灌注桩单桩极限抗拔承载力表达式如下:

$$T_{uk} = u(\sum \lambda_i q_{sik} l_i + \sum \lambda_j \beta_j q_{sjk} l_j) \quad (2)$$

式中: u 为按螺纹外径计算的螺杆灌注桩周长; λ_i 为直杆段第 i 层土的抗拔折减系数; q_{sik} 为直杆段第 i 层土的极限侧阻力值; l_i 为直杆段第 i 层土的厚度; λ_j 为螺纹段第 j 层土的抗拔折减系数; β_j 为螺纹段第 j 层土的极限侧阻力增大系数; q_{sjk} 为螺纹段第 j 层土的极限侧阻力值; l_j 为螺纹段第 j 层土的厚度。

式(2)与普通等截面抗拔桩的承载力计算公式相比,增加了3个系数,分别是螺纹段极限侧阻力增大系数 β_j 、直杆段抗拔折减系数 λ_i 和螺纹段抗拔折减系数 λ_j 。对于螺杆灌注桩螺纹段侧阻力增大系数 β_j ,可参考《螺杆灌注桩技术规程: T/CECS 780—2020》^[6]取值。对于螺杆灌注桩直杆段的抗拔折减系数 λ_i 可以参考《建筑桩基技术规范: JGJ94—2008》进行取值,对于螺杆灌注桩螺纹段的抗拔折减系数 λ_j ,根据已有试验结果,该系数略低于直杆段的抗拔折减系数,建议后续加大测试工作,进一步积累地区经验。

4 结 论

(1) 本次室内模型试验和现场载荷试验都表明,螺杆桩的单桩抗拔承载力明显高于同条件下直杆桩的单桩抗拔承载力。

(2) 室内模型试验表明:直杆桩和螺杆桩在加载前期,随上拔荷载的增加平均侧阻力线性增长,增长至线性段终点后,抗拔侧阻力在随后的一、两级上拔荷载的作用下呈非线性增长,随后桩体被拔出,没有明显的侧阻软化现象,抗拔破坏呈现突然的脆性破坏特征。

(3) 对于螺纹段,极限抗拔侧阻力表现为周边土体的抗剪强度,破坏面为连续的拱形,拱形截面的平均直径大于螺牙的外径;对于直杆段,极限抗拔侧阻力表现为桩体与桩周土体的摩擦阻力,破坏面为桩周圆柱面。同条件下螺纹段与直杆段相比,抗拔侧阻力显著提高。

(4) 根据试验结果从工程实用的角度,引入抗拔折减系数给出螺杆灌注桩单桩极限抗拔承载力的表达式。今后还应加强对螺杆灌注桩的工程实测及经验积

累,进一步完善螺杆桩灌注桩螺纹段抗拔折减系数的取值。

参考文献:

- [1] 孟 振, 陈锦剑, 王建华, 等. 砂土中螺纹桩承载特性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(增刊 1): 141-145. (MENG Zhen, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, et al. Model test study on bearing characteristics of threaded piles in sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(S1): 141-145. (in Chinese))
- [2] 高建中, 张瑞松. 湿陷性黄土地区螺杆桩承载力静载试验研究[J]. 岩土工程技术, 2017, **31**(3): 109-114. (GAO Jianzhong, ZHANG Ruisong. Static load test study on bearing capacity of screw pile in collapsible loess area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017, **31**(3): 109-114. (in Chinese))
- [3] 彭奎森, 马石城. 竖向荷载作用下螺杆桩荷载沉降函数解及有限元分析[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2010, **20**(3): 67-71. (PENG Kuisen, MA Shicheng. Solution of load-settlement function and finite element analysis of single screw stake under axial pressure[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2010, **20**(3): 67-71. (in Chinese))
- [4] 冯 浙. 螺杆灌注桩竖向承载机理的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2019. (FENG Zhe. Experimental Study on Vertical Bearing Characteristics of Screw Cast-In-Place Pile[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2019(in Chinese))
- [5] 王曙光, 冯 浙, 唐建中, 等. 竖向荷载作用下螺杆灌注桩受压承载机理的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(2): 383-389. (WANG Shuguang, FENG Zhe, TANG Jianzhong, et al. Experimental study on bearing mechanism of screw cast-in-place piles under vertical loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(2): 383-389. (in Chinese))
- [6] 螺杆灌注桩技术规程: T/CECS 780—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020. (Technical Specification for Part-Screw Pile: T/CECS 780—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020. (in Chinese))
- [7] 王浩宇. 螺杆灌注桩竖向抗拔承载特性的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2022. (WANG Haoyu. Experimental Study on Vertical Tensile Bearing Characteristics of Screw Cast-in-Place Pile[D]. Beijing: China academy of Building Research, 2022. (in Chinese))
- [8] RANDOLPH M F, DOLWIN J B. Design of driven pile in sand[J]. Géotechnique, 1994, **44**(3):427-448.