

DOI: 10.11779/CJGE202102019

# 竖向荷载作用下螺杆灌注桩受压承载机理的试验研究

王曙光<sup>1, 2</sup>, 冯浙<sup>3</sup>, 唐建中<sup>1</sup>, 赵志鹏<sup>1</sup>

(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. 国网四川省电力公司建设分公司, 四川 成都 610052)

**摘要:** 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, 由于具有承载力高、节约材料、文明施工程度高等特点, 在工程中得到广泛应用。螺杆灌注桩由于其特有的施工工艺及截面形式, 使得其承载机理不同于等截面灌注桩。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的破坏形态, 进而对其承载机理和承载力计算进行探讨, 并采用现场试验进行验证。模型试验和现场试验表明, 螺杆桩的单桩承载力高于同直径的等截面桩, 螺纹段的侧阻力与等截面桩的侧阻力相比明显提高。螺纹段和直杆段的极限侧阻力产生机理有所不同。对于螺纹段, 在极限状态下, 由于螺牙的机械咬合作用使得螺牙以及螺牙之间的土体作为整体与周边土体产生剪切位移, 螺纹段的极限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; 对于直杆桩, 在极限状态下, 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。根据试验结果, 给出螺杆灌注桩单桩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; 变形形态; 竖向承载机理; 模型试验; 现场试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)02-0383-07

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 bearing mechanism of screw cast-in-place piles under vertical loads

WANG Shu-guang<sup>1, 2</sup>, FENG Zhe<sup>3</sup>, TANG Jian-zhong<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-peng<sup>1</sup>

(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. State Grid Sichuan Construction Company, Chengdu 610052, China)

**Abstract:** The screw cast-in-place pile is a kind of variable-section cast-in-place pile with cylindrical top and threaded bottom. Due to its special construction technology and section form, the bearing mechanism of screw piles is different from that of piles with the same section. Through the indoor model tests, the failure modes of the screw piles and the straight rod piles are obtained intuitively by using the image processing technology, and then the bearing mechanism and the calculation of the bearing capacity are discussed, and the field tests are used for verification. The model and field tests show that the bearing capacity of a single screw pile is higher than that of the pile with the same diameter, and the lateral resistance of the screw pile is obviously higher than that of the pile with the same diameter. The mechanism of limit lateral resistance is different between the screw segment and the straight segment. For the screw section, under the limit state, because of the teeth of mechanical interlocking between the teeth and the teeth of the soils as a whole and the shear displacement of surrounding soils, the lateral resistance is shear strength of surrounding soils, the fracture surface is continuously arch-shaped, and the average diameter of the arch section is higher than the diameter of the screw teeth. For the straight pile, under the limit state, the lateral resistance is the friction resistance between the pile body and the soils around the pile, and the failure surface is the cylinder around the pile. According to the test results, the expression for the ultimate bearing capacity of a single screw cast-in-place pile is given, and the value of the relevant parameters are suggested.

**Key words:** screw cast-in-place pile; displacement feature; vertical 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，其施工需要采用带有加压装置和同步技术的专用桩机以及特制的螺纹钻具。施工过程中，桩机通过控制钻杆的钻进（提升）速度和旋转速度来实现不同的截面形式。在螺纹段，向下钻进时采用正向同步技术，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，泵送的混凝土随之形成螺纹状的桩体。成桩以后，再采用导入装置将钢筋笼插入桩体中。

螺杆灌注桩由于具有承载力高、节约材料、文明施工程度高等特点，在工业与民用建筑、公路铁路等工程中得到广泛应用。螺杆灌注桩可用于黏性土、粉土、砂土、碎石土、全风化岩及黄土等地层。在一般的土层中施工的螺杆灌注桩，螺纹段都应采用加压及同步技术，以确保螺纹段的成桩质量；当遇到密实卵石或岩层，同步钻进困难时，也可采用非同步技术，但螺纹质量不能保证，此类桩不在本文讨论范围内。

螺杆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同直径的等截面灌注桩（以下简称直杆桩），很多学者对螺杆灌注桩进行了研究，例如孟振等<sup>[1]</sup>通过室内模型试验，分析了不同螺距对螺杆桩承载力的影响；钱建固等<sup>[2]</sup>通过室内模型试验对注浆成型螺纹桩接触面特性进行了研究；方崇等<sup>[3]</sup>通过对海南某工程的螺杆灌注桩静载试验对螺杆灌注桩的受力特征进行了探讨；高建中等<sup>[4]</sup>通过对延安新区螺杆灌注桩的静载试验对湿陷性黄土地基的螺杆灌注桩承载特性进行了研究；彭奎森等<sup>[5]</sup>采用数值分析的方法通过 ANSYS 软件对螺杆桩竖向承载特性进行了研究；杨启安等<sup>[6]</sup>对螺纹桩承载机理及承载力计算方法进行了探讨。以上对螺杆灌注桩的研究主要集中在模型试验、静载试验和数值分析等方面，对其破坏形态和承载机理的研究还不完善。本文拟通过室内模型试验，采用图像处理技术直观地得到螺杆桩和直杆桩的破坏形态，定性地探讨二者承载机理的差异，进而采用现场试验进行验证，并对其单桩承载力计算方法进行探讨。

## 1 室内模型试验

螺杆灌注桩与常规的直杆桩相比，其承载力提高的机理主要体现在两个方面：①螺杆灌注桩的螺纹段施工过程中采用同步技术，钻具对土体产生螺旋挤压效应，可以一定程度地提高土体的密实度和强度，进而提高土的抗力，文献[7]通过模型试验对类似钻具钻进过程中的挤土效应进行了研究；②螺杆灌注桩螺纹

段与桩周土体特殊的接触形式产生的咬合作用导致的桩土位移形态及破坏模式不同于直杆桩，与直杆桩相比单桩承载力有一定幅度的提高。针对第二方面的问题，本文通过室内模型试验，利用数字图像软件对螺杆桩和直杆桩在竖向荷载作用下的桩土位移场进行分析研究<sup>[8]</sup>，直观地得到其破坏形态，进而定性地探讨二者承载机理的差异。

模型试验在砂箱中进行，模型桩为采用钢材制作的半桩模型（见图 1），分别模拟螺杆桩和直杆桩，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。试验砂箱采用高透光率玻璃，试验桩采用预埋的方式，分别将螺杆桩和直杆桩模型桩紧贴砂箱玻璃放置，采用中砂分层铺填并压实（图 2（a）），本次试验压实后的中砂呈中密状态。为减小二者的相互影响，预埋时螺杆桩和直杆桩的桩间距大于 4 倍桩身直径。模型桩桩顶上放置力传感器和千斤顶，采用混凝土承台提供反力（图 2（b））。加载过程中，采用千斤顶加载，采用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分析，得到每一级荷载下桩周土体的位移云图。试验过程中，严格按照《建筑地基基础设计规范：GB50007—2011》附录 Q 规定的沉降稳定标准执行。

表 1 模型桩参数

桩型	桩长	外径	内径	Table 1 Parameters of model piles (mm)		
				螺距	螺牙宽度	螺牙厚度
螺杆桩	400	40	30	50	5	2
直杆桩	400	40	—	—	—	—

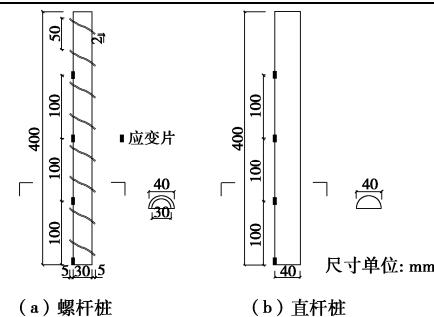


图 1 模型桩详图

Fig. 1 Schematic diagram of model piles

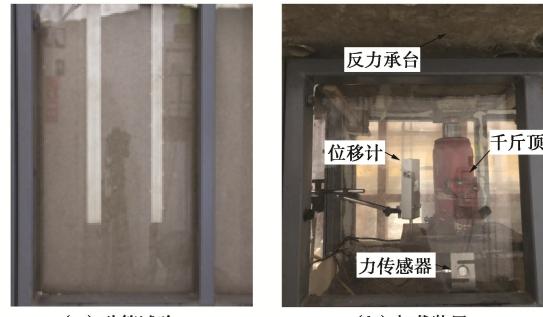


图 2 砂箱及加载装置

Fig. 2 Sand box and loading devices

从室内模型试验得到的模型桩荷载沉降曲线(图3)可以看出,本次模型试验中的螺杆桩和直杆桩的荷载沉降曲线均为缓降型,未出现明显陡降,没有得到桩的极限承载力,因此按桩顶沉降达到40 mm时对应的桩顶荷载进行分析。桩顶沉降达到40 mm时,直杆桩的桩顶荷载为0.52 kN,螺杆桩的桩顶荷载为0.69 kN,螺杆桩桩顶荷载比直杆桩桩顶荷载提高32%,说明在相同桩顶位移条件下螺杆桩的承载力明显提高。

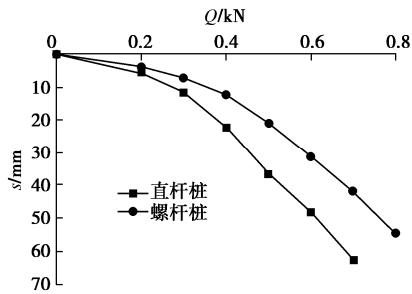


图3 模型桩的荷载沉降曲线

Fig. 3 Load settlement curves of model piles

桩的竖向承载力是由侧阻力和端阻力组成的,在相同条件下螺杆桩与直杆桩承载力的差异必然体现为侧阻力和端阻力的差异。本次模型试验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平均侧阻力和平均端阻力如图4所示。

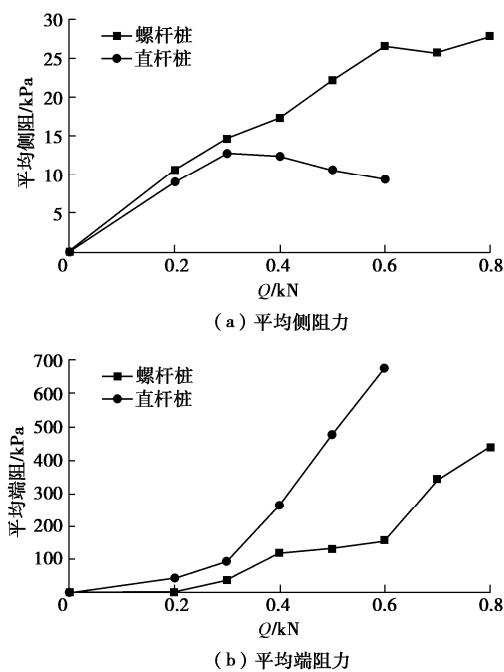


图4 模型桩的平均侧阻力和平均端阻力曲线

Fig. 4 Average lateral and terminal resistances of model piles

图4(a)为模型桩的平均侧阻力随荷载变化曲线,前期加载时,随荷载的增加平均侧阻力线性增长,桩顶荷载为0.3 kN时,直杆桩的平均侧阻力达到峰值,

约为12.7 kPa,螺杆桩的平均侧阻力约为14.6 kPa,两者相差不大。但随着荷载的继续施加,直杆桩和螺杆桩的侧阻力发挥发生很大的差异。继续加载后,直杆桩的平均侧阻力出现了小幅降低,桩顶沉降为40 mm时直杆桩的平均侧阻力约为10.6 kPa,比峰值降低16.5%。而继续加载后,螺杆桩的平均侧阻力仍然随荷载的增加线性增长,桩顶荷载达到0.6 kN时,螺杆桩的平均侧阻力达到线性顶点,其后随着荷载增加,平均侧阻力变化不大,但没有发生明显的软化现象,平均侧阻力最大值约为25.7 kPa,桩顶荷载达到0.6 kN时,螺杆桩平均侧阻力约为直杆桩平均侧阻力的2.4倍。

图4(b)为模型桩的平均端阻力随荷载变化曲线,前期加载时,螺杆桩和直杆桩的平均端阻力均随荷载增加而缓慢增长,荷载为0.3 kN时,直杆桩的平均端阻力约为95.5 kPa,螺杆桩的平均端阻力约为39.8 kPa。在加载中后期,直杆桩的端阻力增长较快,桩顶沉降为40 mm时直杆桩的平均端阻力达到了477.7 kPa,而螺杆桩的平均端阻力则随着荷载均匀增长,同条件下其平均端阻力为343 kPa,直杆桩的平均端阻力为螺杆桩平均端阻力的1.39倍。

从模型桩的平均侧阻力和平均端阻力曲线可以看出,本次模型试验,两种模型桩的平均侧阻力都得到了充分的发挥,但平均端阻力并未完全发挥。桩顶沉降为40 mm时,螺杆桩的平均侧阻力约为直杆桩平均侧阻力的2.4倍,但螺杆桩的平均端阻力约为直杆桩平均端阻力的72%,因此螺杆桩承载力高的主要原因是螺杆桩的侧阻力明显提高。

室内模型试验在加载过程中,采用PhotoInfor数字图像软件,将荷载作用下的桩周土体的高清照片与加载前的桩周土体的高清图片进行对比分析,得到荷载作用下螺杆桩和直杆桩的桩周土体位移场如图5所示。

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5(a), (b)所示),螺杆桩螺牙周围土体及桩端土体产生了一定的位移,说明在荷载作用下螺牙挤压土体,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下的端承力;桩端土体发生压缩变形产生桩端阻力。直杆桩桩周土体位移主要表现为桩端处的压缩变形,以及桩与紧贴桩侧的土体的剪切位移。

随着荷载的增加(如图5(c), (d)所示),螺杆桩桩周及桩端土体位移继续增大,螺牙周边土体的位移区域沿桩身不断扩大的,与相邻螺牙的土体位移区域

相连；同时桩端土体位移场沿深度方向也有一定的发展。直杆桩的土体变形主要表现在桩端土体的位移场向深部进一步发展，紧贴桩侧的土体的变形区域有所增加。

在加载后期（如图 5 (e), (f) 所示），螺杆桩桩周和桩端处土体位移明显加大，螺牙与螺牙之间的土体作为整体与周围的土体产生相对位移，发生位移的区域超出了螺牙外径的范围，呈连续的拱形，说明螺杆桩通过螺牙的机械咬合作用使螺牙间土体与周边土体发生剪切错动；桩端土体的位移向深部进一步发展，图 5 (e) 中桩端位移场出现了明显的不对称现象，是由于在本次试验中加载后期随着桩体位移的增加，荷载出现了一定的偏心所致。直杆桩的桩侧发生土体位移的范围变化不大，桩端土体的位移场继续向深部扩大。

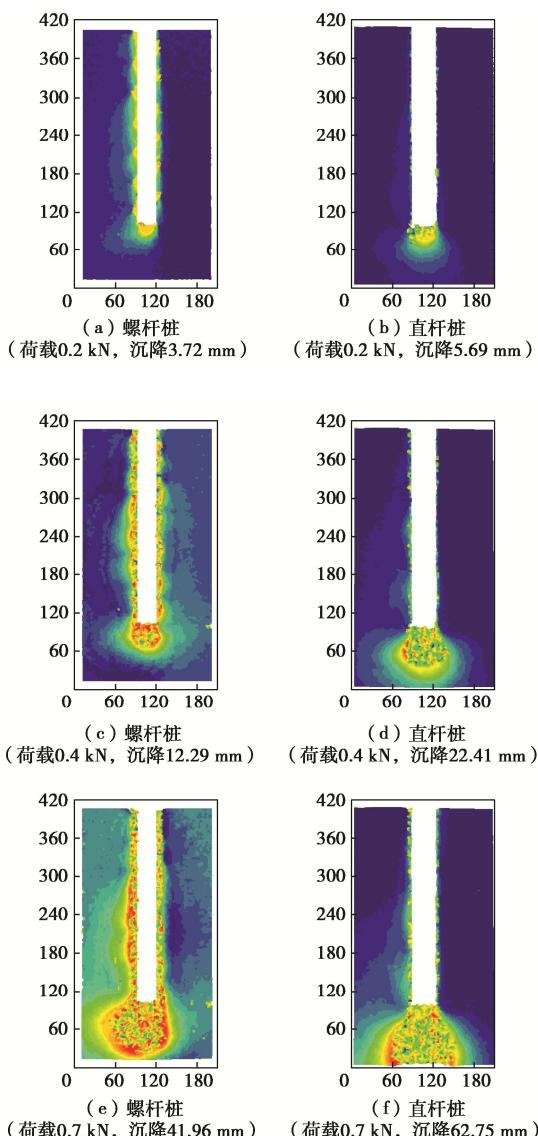


图 5 模型桩桩周土体位移场

Fig. 5 Displacement fields of soils around model piles

通过上述对模型桩桩周土体位移场的分析可以看出，螺杆桩和直杆桩的位移形态和破坏机理有所不同（如图 6 所示）。对于螺杆桩而言，在极限状态下，由于螺牙的机械咬合作用使得螺牙以及螺牙之间的土体作为整体与周边土体产生剪切位移，螺纹段的极限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<sup>[2]</sup>对螺杆桩接触面试验研究的结论基本一致；螺杆桩的桩端土体产生压缩进而产生端阻力，桩顶位移相同的条件下，螺杆桩的桩端位移量小于直杆桩，因而限制了螺杆桩桩端阻力的发挥（未考虑螺杆桩施工的挤土效应可能造成的桩端土体压密、桩端阻力提高的因素）。对于直杆桩而言，在极限状态下，桩侧与紧贴桩侧的土体发生剪切位移，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；桩端土体产生压缩进而产生端阻，桩顶位移相同的条件下，与螺杆桩相比，直杆桩的桩端位移量较大，桩端阻力发挥较充分。综上所述，螺杆桩和直杆桩桩端阻力的产生机理和破坏形态基本一致，二者端阻力的发挥程度不同；但是二者桩侧阻力的产生机理和破坏形态有较大差异，一方面螺杆桩侧阻力表现为周边土的抗剪强度，直杆桩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<sup>[9]</sup>，另一方面螺杆桩的桩侧破坏面的直径大于直杆桩的桩径，因此螺杆桩的侧阻力明显高于直杆桩的侧阻力，这是螺杆桩承载力明显高于直杆桩的根本原因。

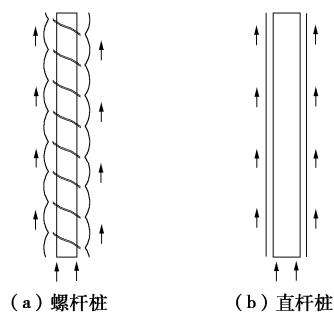


图 6 模型桩的极限破坏形态

Fig. 6 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。现场试验是在四川进行的，试验场地为山前坡洪积地貌，场地的工程地质剖面见图 7，土的物理力学性质指标见表 2。场地内连续分布有较厚的④层含碎石粉质黏土，根据地勘报告该层土的成因为坡洪积，褐红色、褐黄色、青灰色，稍湿—湿，可塑—

表 2 土性指标

Table 2 Property indices of soils

岩土 名称	天然重度 $\gamma$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	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 $a_{1-2}$ /(MPa <sup>-1</sup> )	黏聚 力 $c$ /kPa	内摩擦 角 $\varphi$ /(°)	承载力特征值 $f_{ak}$ /kPa
素填土①	17.0	—	—	—	—	3.0	—	10	8	80
粉质黏土③-2	19.5	26.47	0.767	14.3	0.41	5.5	0.27	25	15	120
含碎石粉质黏土④	19.0	27.66	0.796	16.2	0.38	6.0	0.26	30	18	160
含粉质黏土碎石⑨	21.5	—	—	—	—	30.0	—	8	35	380
昔格达组粉砂岩⑩	19.0	—	—	—	—	15.0	—	30	26	260

表 3 试验桩的参数

Table 3 Specific parameters of test piles

桩号	桩长/m	直杆段桩长/m	螺纹段桩长/m	外径/mm	内径/mm	螺距/mm
1	10	10	—	600	—	—
3	10	3	7	600	540	500

硬塑, 无摇振反应, 稍有光泽, 干强度中等, 韧性中等; 碎石含量 15%~40%, 局部充填物以角砾为主。

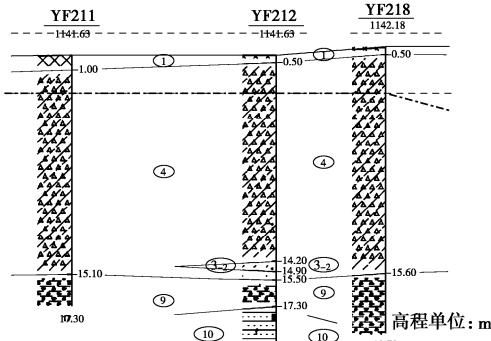


图 7 工程地质剖面

Fig. 7 Geological prospecting section

本次试验采用螺杆钻机施工 3 根试验桩, 其中 #1 桩位为直杆灌注桩 (提钻时采用非同步技术), #2、#3 桩为螺杆灌注桩, 桩径 600 mm, 混凝土强度等级为 C45。本次试验的目的主要是要验证螺纹段对侧阻力和端阻力的影响, 为减少试验的影响因素, 螺纹段完全设置在同一土层, 即④层含碎石粉质黏土中, 试验桩桩长设计为 10 m, 试验桩的参数见表 3。螺杆灌注桩的配筋见图 8 (a), 试验过程中采用电阻式应变片对桩身应变进行测试, 应变片沿桩身的布置见图 8 (b), 对于直杆桩, 其配筋及应变片的布置与螺杆灌注桩一致。

对 3 根试验桩分别进行单桩静载荷试验, 静载试验严格按照《建筑地基基础设计规范: GB50007—2011》附录 Q 进行, 得到试验桩的荷载沉降曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 3 根试验桩的荷载沉降曲线形态基本一致, 均为缓降型, 未出现明显陡降, 取桩顶沉降为 40 mm 时的桩顶荷载进行比较, #1 桩的荷载为 2100 kN; #2 桩的荷载为 2400 kN; #3 桩的荷载为 2650 kN。由此可见本次试验中, 螺杆灌注桩的承载力比直杆灌注桩提高了 15% 和 26%。需要说明的是, 本次试验的桩体主要位于④层含碎石粉质黏土中, 粉

质黏土呈可塑—硬塑状态, 碎石含量和粉质黏土的状态对桩的承载力影响较大, #2 桩施工的过程中, 发现桩端附近的粉质黏土为可塑偏软塑状态, 这是导致#2 桩承载力较#3 桩偏低的主要原因。

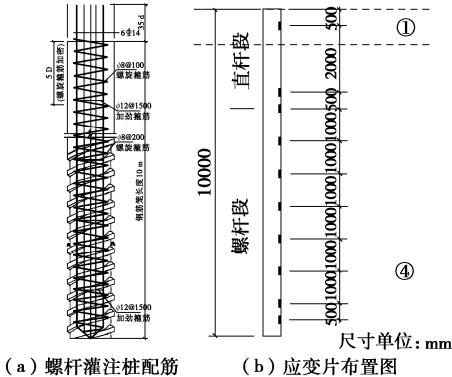


图 8 螺杆灌注桩详图

Fig. 8 Schematic diagram of screw cast-in-place piles

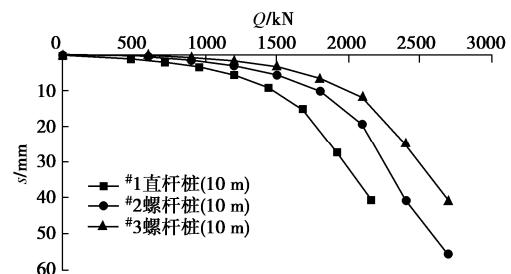


图 9 试验桩的荷载沉降曲线

Fig. 9 Load-settlement curves of test piles

图 10 为试验桩的轴力随深度的分布图。#1 桩为直杆桩, 其桩身轴力沿深度线性衰减, 加载到最大的荷载时, #1 桩的端阻力占总荷载的比例为 16.61%。#2、#3 桩为螺杆灌注桩, 以#3 桩为例, 其桩身轴力也是沿深度衰减, 在前几级荷载作用下, 轴力沿深度基本上是线性衰减, 后几级荷载作用下, 轴力曲线呈折线, 螺纹段轴力衰减更快, 说明极限状态下螺纹段的侧阻的优势得以发挥, 在最大荷载作用下, #2、#3 桩桩端

阻力占总荷载的比例分别为 10.99% 和 11.39%。本次试验螺杆桩端阻力的绝对值以及桩端阻力占总荷载的比例均低于直杆桩。

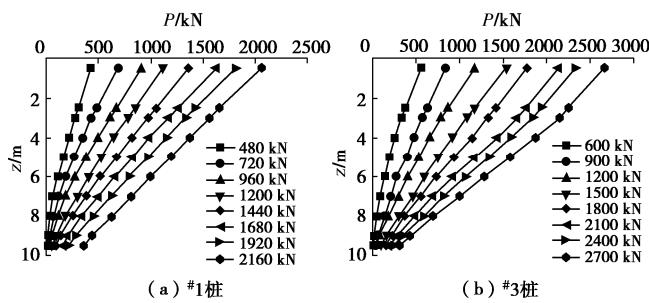


图 10 试验桩轴力分布图

Fig. 10 Axial forces of test piles

图 11 为根据桩身轴力反算的试验桩的侧阻力随深度的分布图。对于直杆桩 (图 11 (a)), 荷载较小时桩身上部的侧阻力先发挥, 随着荷载的增大, 桩身上部的侧阻力增大的同时桩身下部的侧阻力也逐步发挥, 最后几级荷载作用下, 桩身上部的侧阻力几乎不增长, 桩身下部的侧阻力继续增长, 最大荷载作用下, 桩身上部和下部的侧阻力几乎同步发挥。对于螺杆灌注桩以#3 桩为例 (图 11 (b)), 荷载较小时, 桩身上部的侧阻力先发挥, 随着荷载的增加, 桩身上部直杆段的侧阻力增长到一定量值后几乎不再增长, 桩身下部螺纹段的侧阻力仍然随荷载不断增长, 最大荷载作用下, 直杆段的侧阻力与直杆桩的侧阻力基本相当, 螺纹段的侧阻力比直杆段显著增大, #2 桩直杆段的平均侧阻力为 103 kPa, 螺纹段的平均侧阻力为 132 kPa, 螺纹段侧阻力为直杆段侧阻力的 1.28 倍, #3 桩直杆段的平均侧阻力为 108 kPa, 螺纹段的平均侧阻力为 151 kPa, 螺纹段侧阻力为直杆段侧阻力的 1.40 倍。

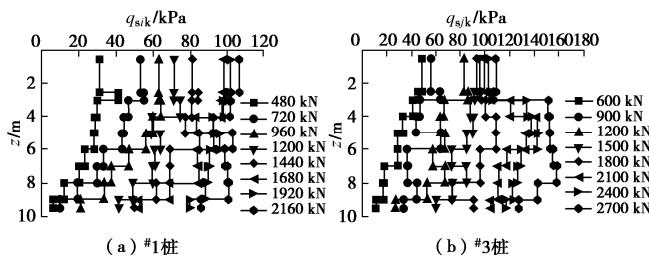


图 11 试验桩侧阻力分布图

Fig. 11 Lateral resistance diagram of test piles

### 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, 螺杆灌注桩的破坏模式和承载机理与常规的等截面灌注桩有较大的差异, 其单桩承载力也有明显的提高。根据室内模型试验, 螺杆灌注桩的侧阻力主要表现为周边土体对螺牙及螺牙间土体的抗剪强度, 而直

杆桩的侧阻力为桩周土体与桩身混凝土两种材料之间的摩擦阻力, 二者的机理存在本质的不同, 螺杆灌注桩的侧阻力明显高于普通灌注桩的侧阻力。而对于端阻力而言, 二者的机理没有本质的区别, 但是当二者发生同等的桩顶位移时, 直杆桩的桩端刺入量大于螺杆桩, 端阻力发挥得更充分, 螺杆灌注桩的端阻力发挥程度相对较低 (未考虑螺杆桩施工的挤土效应可能造成的桩端土体压密、桩端阻力提高的因素)。根据以上试验结果, 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桩基承载力计算公式的基础上引入相关系数进行修正。本文建议螺杆灌注桩单桩极限承载力在传统的单桩承载力表达式的基础上, 螺纹段的极限侧阻力部分引入增大系数  $\lambda$  体现土的抗剪强度与桩土摩擦阻力的差异, 同时引入极限端阻力折减系数  $\beta$ , 螺杆灌注桩单桩极限承载力表达式如下:

$$Q_{uk} = u(\sum q_{sik} l_i + \sum \lambda_j q_{sjk} l_j) + \beta q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中  $u$  为按外径计算的螺杆灌注桩周长;  $q_{sik}$  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;  $\lambda_j$  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;  $\beta$  为螺杆灌注桩极限端阻力折减系数;  $q_{pk}$  为极限桩端阻力值;  $A_p$  为按外径计算的桩端面积。

螺杆灌注桩设计时应根据地质条件、荷载情况、桩的受力特性等确定桩长、桩径和螺纹段长度, 为充分发挥螺杆桩的优势, 一般直杆段长度宜为桩长的 1/3, 螺纹段长度宜为桩长的 2/3, 螺纹段一般应设置在承载力较高且分布比较稳定的岩土层。设计时还应分别对桩顶截面和螺纹段顶面进行桩身强度验算, 螺纹段的桩身面积按内径计算。

对于螺杆灌注桩螺纹段侧阻力提高系数的问题, 很多学者都进行了探讨, Tomlinson<sup>[10]</sup>提出了在饱和黏土中, 螺纹段的侧阻力是普通直杆段的 1~5 倍, 文献 [6] 建议螺纹段等效侧阻力增强系数取 1.3~2.0。考虑到螺纹段侧阻力提高系数主要是土的抗剪强度与桩土摩擦阻力之比, 本文建议螺杆灌注桩螺纹段极限侧阻力增大系数:

$$\lambda = \frac{\tan \varphi}{\tan \delta} \quad (2)$$

式中  $\varphi$  为土的内摩擦角;  $\delta$  为桩土界面的摩擦角, 可根据地区经验取值, 无地区经验时, 对于砂性土可取  $0.4\varphi \sim 0.5\varphi$ , 对于黏性土可取  $0.6\varphi \sim 0.7\varphi$ , 对于粉土取值介于两者之间。

对于螺杆灌注桩极限端阻力折减系数  $\beta$ , 根据现

有试验结果, 可取 0.7~1.0, 对于缓降型的桩取小值, 对于陡降型的桩取大值。实际工程的螺杆灌注桩属于缓降型还是陡降型应根据地区经验判断, 一般螺纹段及桩端位于承载力较高的岩土层时, 通常为缓降型。

以上螺杆灌注桩极限侧阻力增大系数和极限端阻力折减系数是根据现有试验结果给出的建议值, 随着后续测试工作的开展, 还将进一步细化和调整。

## 4 结 论

螺杆灌注桩是一种上部为圆柱形、下部为螺纹形的组合式灌注桩, 本文通过室内模型试验和现场载荷试验, 对螺杆灌注桩和等截面灌注桩承载机理的差异、以及螺杆灌注桩承载力计算问题进行探讨, 得到以下 3 点结论。

(1) 本次室内模型试验和现场载荷试验都表明, 螺杆桩的单桩承载力高于同直径的等截面桩, 螺纹段的侧阻力与等截面桩的侧阻力相比明显提高。

(2) 螺纹段和直杆段的极限侧阻力产生机理有所不同。对于螺纹段, 螺纹段的极限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, 在极限状态下, 侧阻表现为桩体与桩周土体的摩擦阻力, 破坏面为桩周圆柱面。

(3) 根据试验结果, 给出螺杆灌注桩单桩极限承载力的表达式, 并给出螺杆灌注桩极限侧阻力增大系数的计算方法和螺杆灌注桩极限端阻力折减系数的取值建议。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的承载力计算参数的取值。

## 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 Jin-jian, WANG Jian-hua, et al. Study of model test on bearing capacity of screw piles in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 141~145. (in Chinese))
- [2] 钱建固, 陈宏伟, 贾 鹏, 等. 注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1744~1749. (QIAN Jian-gu, CHEN Hong-wei, JIA Peng, et al. Experimental study of mechanical behaviors of grouting-screw pile interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1744~1749. (in Chinese))
- [3] 方 崇, 张信贵, 彭桂皎. 对新型螺杆灌注桩的受力特征与破坏性状的探讨[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(6): 316~319. (FANG Chong, ZHANG Xin-gui, PENG Gui-jiao. Discussion on the bearing force characteristic and the failure behavior of a new kind half-screw filling pile[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2006, 20(6): 316~319. (in Chinese))
- [4] 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 Jian-zhong, ZHANG Rui-song. Experimental study on static load bearing capacity of screw piles in collapsible loess area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017, 31(3): 109~114. (in Chinese))
- [5] 彭奎森, 马石城. 坚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, 2010, 20(3): 67~71. (PENG Kui-sen, MA Shi-cheng. Solution of load-settlement function and finite element analysis of single screw stake under axial pressure[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2010, 20(3): 67~71. (in Chinese))
- [6] 杨启安, 沈保汉. 螺纹桩承载机理及承载力计算方法[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 67~70. (YANG Qian, SHEN Bao-han. The bearing mechanism and calculation method of bearing capacity of screw pile[J]. Industrial Construction, 2013, 43(1): 67~70. (in Chinese))
- [7] 邓益兵, 周 健, 刘 钟, 等. 砂土中螺旋挤扩钻具下旋成孔过程的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2558~2566. (DENG Yi-bing, ZHOU Jian, LIU Zhong, et al. Model test study of augered piling of screw displacement auger in sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2558~2566. (in Chinese))
- [8] 冯 浙. 螺杆灌注桩坚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))
- [9] RANDOLPH M F, DOLWIN J B. Design of driven pile in sand[J]. Géotechnique, 1994, 44(3): 427~448.
- [10] TOMLINSON M J. Pile Design and Construction Practice [M]. London: E&FN Spon, 1977.