

螺杆桩的极限承载力计算

郝 杰

兰州交通大学, 土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年2月26日; 录用日期: 2022年3月18日; 发布日期: 2022年3月25日

摘 要

螺杆桩是一种带螺牙的特殊桩型。由于其桩侧螺纹段的存在, 与常规桩型相比, 其桩侧受力不同。而螺纹段受力又与螺距相关, 本文根据不同螺距, 提出不同螺纹段土体的破坏模式, 并得出了不同的螺距情况下的螺杆桩极限承载力计算方法, 并结合实际案例与数值模拟发现本文提出的理论更加贴合实际。

关键词

螺杆桩, 螺距, 极限承载力, 数值模拟, 理论计算

Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Screw Pile

Jie Hao

College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 26th, 2022; accepted: Mar. 18th, 2022; published: Mar. 25th, 2022

Abstract

Screw pile is a special type of pile. Because of the existence of the screw section on the side of the pile, the stress on the side of the pile is different from that of the conventional pile. In this paper, according to different screw pitches, the failure modes of soil in different screw sections are proposed, and the calculation method of ultimate bearing capacity of screw pile under different screw pitches is obtained. Combined with practical cases and numerical simulation, it is found that the theory proposed in this paper is more practical.

Keywords

Screw Pile, Pitch of Screw, Ultimate Bearing Capacity, Numerical Simulation, Theoretical Calculation



1. 引言

螺杆桩是一种上部直杆段与下部螺纹段相结合特殊桩型,研究表明[1] [2]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),因此很多学者[3] [4] [5]对螺杆灌注桩的承载机理进行了研究,发现螺杆桩改变了桩与土之间相互作用的方式,极大地提高了了桩侧阻力,与普通灌注桩不同,螺杆桩的桩侧阻力主要为螺纹段的螺牙与土的相互作用力。因此在分析螺杆桩承载机理时,螺牙处的受力特性十分重要。但是有一些学者[6] [7]提出的螺杆桩承载力计算公式,并没有详细分析螺牙处的受力和螺牙下土体的破坏模式,只是简单的将其简化或增加一个摩阻力系数,但是不同地区土质往往不同,因此得到的结果与实际情况不符。

一般而言,桩身侧摩阻力是随着桩身位移变化而发挥出来的。桩身受到压缩而产生相对于土的向下位移,桩侧表面受到桩周土的向上摩擦阻力,从而将桩身荷载通传递到桩周土层中。螺杆桩也不例外,因此可以假定螺杆桩螺纹与土的作用力是按照螺纹顺序由上到下一级一级发挥的,当上级螺牙的承载力达到极限时,下级螺牙才开始发挥作用,直至形成多级的旋转滑裂体[8],因此螺杆桩极限承载条件是各级螺牙叶片均达到极限承载力,并形成上下相连的滑裂面后继续受力直至桩端阻力达到极限。此时螺杆达到其承载力。因此要想螺纹叶片承载力达到极限,必须考虑两叶片之间的距离(即螺距)下土体的破坏。

本文利用数值模拟与理论推导,提出不同螺距下螺纹段土体的破坏模式,从而得出了不同螺距情况下的螺杆桩极限承载力计算方法。

2. 螺距设计

虽然螺杆桩是一种特殊桩型,但在极限荷载作用下,螺杆桩符合地基仍然遵循深基础的破坏规律。依照其破坏规律,螺杆桩桩周的塑性区由桩底向上扩展,并且在桩周土中形成一个梨形滑裂面,如图 1 所示。此时基础极限荷载与滑裂面土体的剪力平衡[9]。

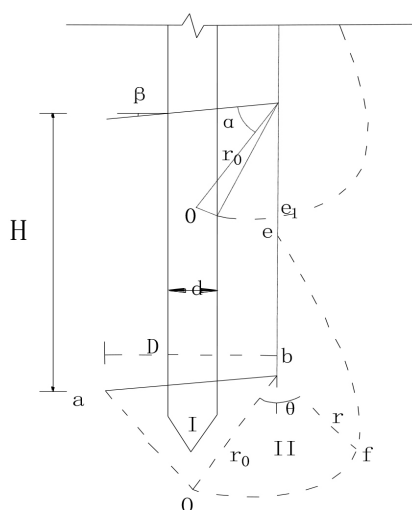


Figure 1. Ultimate Load shear failure surface of spiral pile foundation

图 1. 螺旋桩基础极限荷载剪切破坏面

根据太沙基极限平衡理论,从实用角度考虑,螺杆桩的螺牙可假定为条形基础,螺牙以上的土体看作是作用在螺牙侧面的均布荷载。太沙基假定基础底面是粗糙的,与螺牙受力状态相符,螺牙下土体滑动面如图1所示,Ⅰ区是在螺牙底面下的土楔abo(为弹性压密区),由于假定螺牙是粗糙的,具有很大的摩擦力,因此ab面不会发生剪切位移,它与螺牙底面一起移动。Ⅱ区是通过ofe点的曲线(为滑动面)。

为充分发挥螺牙的承载力,设计最优螺距,假定上下两级螺牙滑裂面的e点和e₁点重合。并且假定滑动面ob与水平面成α角。可得出螺距H与向径r之间的关系[10]。

$$r = r_0 e^{\theta \tan \varphi} \quad (1)$$

$$r_1 + r_2 = H \quad (2)$$

$$H = \left[e^{\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi} + e^{\left(\frac{3\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi} \right] r_0 \quad (3)$$

根据图示abo的三角关系,可得

$$r_0 = \frac{D \cos \beta}{2 \cos \alpha} \quad (4)$$

因此当螺牙间土体所提供的承载力只能使上级螺牙破坏时,此时得到的螺距为最小螺距:

$$H = e^{\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi} \frac{D \cos \beta}{2 \cos \alpha} \quad (5)$$

当螺牙间土体所提供的承载力恰好能使上下两级螺牙均破坏时,此时得到的螺距为最优螺距:

$$[H] = \left[e^{\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi} + e^{\left(\frac{3\pi}{2}-\alpha\right)\tan\varphi} \right] \frac{D \cos \beta}{2 \cos \alpha} \quad (6)$$

式中 $\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$, r_1, r_2 为竖直方向上的向径,即上级叶片的be段和下级叶片的b₁e₁段长度,[H]为最优螺距,H为最小螺距, φ 为土的内摩擦角; β 为螺牙倾角; r_0 为初始向径; θ 为向径旋转角。

从上式中可知,螺杆桩最优和最小螺距与土的物理力学性质有关。因此设计时要求提供准确的土层参数。

3. 螺杆桩承载力计算方法

3.1. 经验法计算

一般而言,螺杆桩承载力由直杆段侧阻力、螺纹段阻力和桩端阻力三部分组成,螺纹段侧阻力为桩螺牙与土的机械咬合力通过桩孔侧壁土的抗剪强度体现。因此按照《螺杆桩技术设计与施工技术规程》[11],螺杆桩承载力可以根据以下方法进行计算。

$$Q_{uk} = u_i \sum_{i=1}^{i=n} q_{sik} l_i + u_j \sum_{j=1}^{j=m} \tau_j l_j + q_{pk} A_p \quad (7)$$

$$\tau_j = (c_j + \sigma_j \tan \varphi_j) \quad (8)$$

Q_{uk} 为螺纹桩极限承载力标准值; u_i 为直杆段桩身桩周长; u_j 为螺纹段桩身外径计算的周长; q_{sik} 为直杆段桩的侧阻力标准值; l_i 为直杆段桩身在第*i*层土内的长度; l_j 为螺纹段桩身在第*j*层土内的长度; φ_j 为第*j*层土的内摩擦角; C_j 为第*j*层土的黏聚力; A_p 桩端面积; q_{pk} 为极限端阻力标准值; τ_j 表示第*j*层土的抗剪强度值; σ_j 为螺纹桩穿透第*j*层土的法向应力。

此时桩的破坏模式表现为螺纹间土体与桩共同运动，并与桩侧土体发生剪切破坏，螺牙受力表现为螺牙与土的机械咬合力，螺杆菌承载力发挥表现为各螺牙下地基土承载力发挥完毕后带动螺牙间和螺牙外的地基土一起破坏。当荷载达到极限时，其破坏特征是以螺牙外的土体达到了土的极限抗剪强度。极限承载力可根据土体抗剪强度决定。

3.2. 改进的剪切位移法

当螺距小于最小螺距时，螺杆菌与土体沿螺牙外径圆柱面上发生剪切滑移。螺杆菌螺纹段侧摩阻力的计算是单桩极限承载力的关键，采用荷载传递法对螺纹段的侧阻力进行分析时，不同桩身位移下，桩身各段土体发挥的侧摩阻力也不同。因此计算时要考虑桩侧阻力与桩身位移之间的关系。如图 2 所示桩侧阻力与桩身位移之间的函数关系[11]可用图 2 表示。

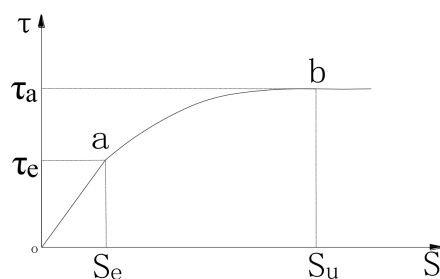


Figure 2. Relationship between pile side resistance and pile displacement in threaded section

图 2. 螺纹段桩侧阻力与桩身位移关系图

在 oa 段桩身位移较小时，桩侧阻力与位移呈直线函数关系，此时可以看作为只有螺杆菌直杆段侧摩阻力发挥作用；ab 段表示桩侧阻力与桩身位移呈近似双曲线函数关系，过了 a 点后螺纹段侧阻力开始发挥作用；过了 b 点后，桩身侧阻力达到极限值。如图 3 所示。

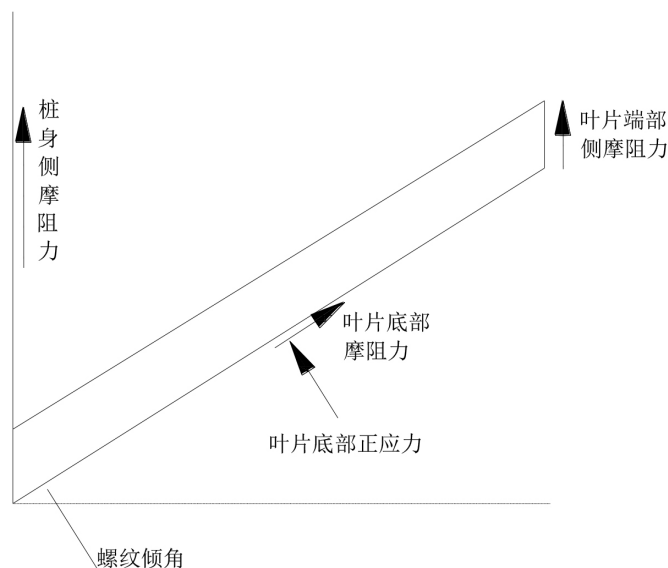


Figure 3. Stress diagram of thread section

图 3. 螺纹段受力示意图

此时螺杆桩受直杆段侧摩阻力和叶片端部侧摩阻力作用，也受到桩-土之间的正应力和侧摩阻力作用。随着桩身位移的增加，螺纹叶片与土体之间发生剪切滑移，螺纹叶片随叶片间的土体一同向上滑动，此时叶片与内部土体间的作用力不再起作用。螺杆桩下部的桩身阻力由叶片内部的土体与桩周土体的抗剪强度和叶片端部的侧摩阻力组成。

因此螺杆桩的承载力可在常规剪切位移法基础上将叶片所受的土体作用力分为两部分，叶片下部与土体的剪切力和叶片端部的侧摩阻力[12]。所以螺杆桩承载力可按下式进行计算为：

$$Q_{uk} = u_i \sum_{i=1}^{i=n} q_{sik} l_i + u_j \sum_{j=1}^{j=m} (c_j + \sigma_j \tan \varphi_j) l_j + u_j b \tau_{sjk} + q_{pk} A_p \quad (9)$$

σ_j 为螺纹桩穿透第 j 层土的法向应力； τ_{sjk} 表示为螺纹段桩的侧阻力极限值； b 表示螺纹叶片端部厚度。其余符号同前。

3.3. 单级叶片承载力算法

当螺距大于最小螺距小于最优螺距时，桩的破坏表现为螺纹下土体的受压破坏，单桩的极限承载力由叶片下土的塑性滑裂面阻力、叶片滑裂面间土柱剪切阻力和桩侧剪切摩阻力组成。如图 4 所示。

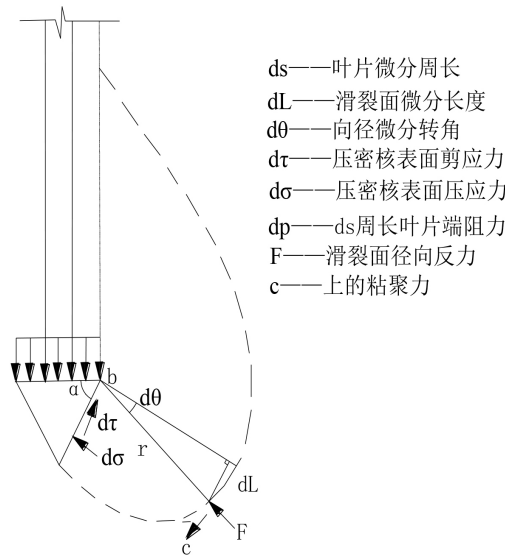


Figure 4. Calculation diagram of ultimate bearing capacity of single stage blade

图 4. 单级叶片极限承载力计算简图

螺距不同，单桩极限承载力的计算方法亦不同，可根据螺杆桩的不同螺距分别计算[13]，具体如下：
单级叶片的面积：

$$A = \pi(D^2 - d^2)/4$$

螺牙下土体所能提供的承载力：

$$P_1 = \int_0^{2\pi} A d_p \quad (10)$$

d_L 周长微分段叶片的端阻力：

$$d_p = c \left[\cot \varphi (e^{2\theta \tan \varphi} - 1) \cos \varphi + e^{2\theta \tan \varphi} \sin \alpha \right] \quad (11)$$

积分后可得单级叶片承载力:

$$P_1 = \frac{\pi c A}{4} \cot \varphi (e^{2\theta \tan \varphi} - 1) \cos \varphi + e^{2\theta \tan \varphi} \sin \alpha$$

因此螺杆桩的承载力为:

$$Q_{uk} = np_1 + q_{pk} A_p \quad (12)$$

式中, P_1 为桩单级叶片的承载力; n 为叶片数量, D 为螺旋桩的螺旋外径; d 为螺旋桩的螺旋内径; A 为螺牙的投影面积; d_p 为该微分段叶片端阻力; 其余符号同前。

当设计螺距大于最优螺距时, 叶片下土体较厚, 不会发生土体剪切破坏, 可近似的按照叶片的抗压承载力进行计算。

$$Q_{uk} = \frac{n\pi(D^2 - d^2) \sum P_{ui}}{4} + q_{pk} A_p \quad (13)$$

P_{ui} 为相应土层的极限承载力; 其它符号同前。

一般而言, 桩身周围土体相对与桩而言更容易发生破坏, 但当螺旋桩的螺距大于计算的最优螺距时, 螺牙下土体发生破坏前, 螺纹段叶片也可能发生剪切破坏, 并且保证螺齿在传力过程中能正常工作, 因此需要保证螺牙的厚度使其不会发生剪切断裂螺齿的厚度。

可根据《混凝土设计规范》[14]利用宽厚比进行螺齿厚度的确定。

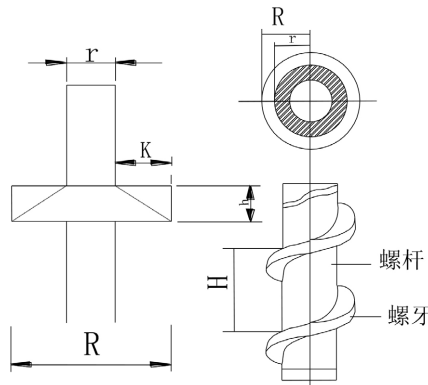


Figure 5. Shear destruction diagram of the screw tooth
图 5. 螺牙剪切破坏图

如图 5 所示, 螺齿的宽厚比应满足

$$k/h \leq \tan \alpha \quad (14)$$

式中: k 为螺齿宽度, h 为螺齿厚度, α 为刚性基础台阶的宽厚比最小允许值。

基础板极限承载力[15]

$$p_{\max} = \varphi A_p f_c \quad (15)$$

螺牙的厚度需满足下式:

$$h \geq \frac{(D^2 - d^2) p_{\max}}{4 f_c d} \quad (16)$$

f_c : 混凝土强度设计值, A_p : 叶片面积, φ : 安全系数。

4. 实例分析

4.1. 案例背景

为验证本文所提出公式的合理性, 选取了一个实际案例并对其进行拓展分析。该工程项目位于河南省三门峡市某小区高层建筑, 基础采用螺杆桩基。桩身参数如表 1 所示。

Table 1. Pile parameters

表 1. 桩身参数

桩长(m)		直径(mm)		叶片厚度(mm)		螺距(mm)
直杆段	螺纹段	直杆段	螺纹段	根部	端部	
9	7	500	380	100	50	350

土层主要的物理力学指标如表 2 所示。

Table 2. Main physical and mechanical indicators of soil layer

表 2. 土层主要的物理力学指标

土层	重度 kN/m	承载力特征值 KPa	$\varphi/^\circ$	C/KPa	厚度 m
填土					0.85
粉质粘土	18.5	120	6.6	22.9	3.17
粉土	18.8	120	7.8	7.8	6.52
粉质粘土	17.8	140	12.6	21.9	4.93
卵石	22	500	11.7	60	6.18
粉土	18.2	220	20.6	12.8	1.5

土层极限侧阻力和端阻力标准值如表 3 所示。

Table 3. Standard values of limit side resistance and end resistance of each soil layer

表 3. 各土层极限侧阻力和端阻力标准值

土层	极限侧阻力标准值(kPa)	极限端阻力标准值(kPa)
黄土状粉质粘土	65	220
黄土状粉土	70	210
黄土状粉质粘土	60	220
卵石	140	540

利用公式(5)和(6)计算桩的最小螺距和最优螺距时, 必须结合土的物理性质指标, 由表 2 可知现场土层不同深度范围内土层性质各不相同因此螺旋桩的最小螺距和最优螺距并不相同。对最小螺距, 为了使

桩侧土体全部都发生桩周土的剪切破坏，取计算值的最小值；对控制螺距取计算值的最大值。本文设计螺距为 350 mm。

将螺纹倾角和桩径： $\beta = 22^\circ$ $D = 500$ 代入公式(5)和(6)

得到：

当 $\varphi = 6.6^\circ$ 时为最小螺距 $H = 338$ mm。

当 $\varphi = 12.6^\circ$ 时为最优螺距 $H = 780$ mm。

因为现场螺杆桩螺距均为 350 mm，无法确定不同螺距的实测值，所以采用数值模拟的方法来确定不同螺距下桩的极限承载力。计算时要根据公式(14)调整叶片宽度。

4.2. 数值模拟

本文以有限元软件 ABAQUS 6.14 为研究平台，建立螺杆桩复合地基的数值分析模型，从而获得不同螺距下桩的承载力。

桩身参数和土层参数如表 1 和表 2 所示。土体采用摩尔 - 库伦本构模型，螺杆桩采用线弹性模型，桩土之间采用面 - 面约束，由于螺杆桩螺纹段的存在会使桩土作用增强，为简化计算，通过增大桩土接触的摩擦系数来进行模拟计算，定义直杆段与土体摩擦系数定为 0.48，螺纹段系数为 0.85。法向为“硬”接触，不允许接触后分离。

并且在定义模型的边界条件时，对模型四周的土体限制 X-Y 两个方向上的位移，使其仅能在竖直方向移动；对模型底部限制所有方向的位移。数值模型图如图 6 所示。

土体和桩体均用四边形单元进行网格划分。与现场单桩静载试验加荷相同，加载时采用分级加载，根据现场一级荷载大小及桩径可得模型一次加载大小为：

$$P = \frac{F}{A} = \frac{100}{\pi(0.25)^2} = 500 \text{ KN}$$

螺杆桩破坏判断标准参照 Naggar 等[16]的研究成果：土体位移达到桩身螺纹最大直径的 8%，即 $500 \text{ mm} \times 8\% = 40 \text{ mm}$ 。

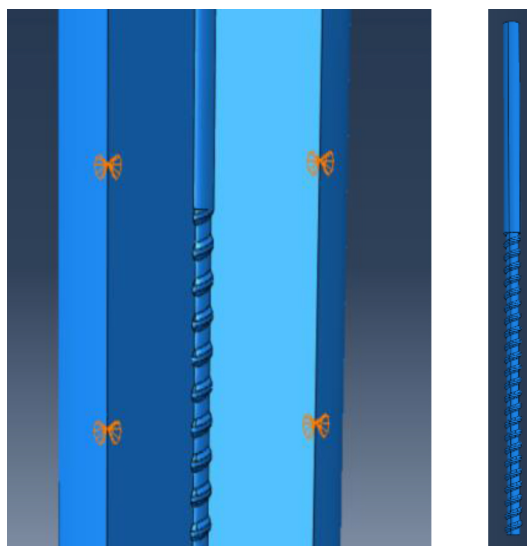


Figure 6. Numerical model diagram
图 6. 数值模型图

分别利用经验法(7)、改进的剪切位移法(9)个单级叶片承载力算法(12) (13)以及数值模拟得到的螺杆桩极限承载力如表 4 所示。

Table 4. Bearing capacity comparison chart

表 4. 承载力对比图

螺距(mm)	数值模拟	公式(7)	公式(9)	公式(12)	公式(13)
350	4203.17	3591.53	4103.54	4438.64	562.13
450	4284.82	3591.53	4246.37	4438.64	562.13
500	4321.52	3591.53	4224.88	4438.64	562.13
550	4386.73	3591.53	4253.29	4418.64	562.13
650	4436.29	3591.53	4324.39	4438.64	562.13
700	4421.34	3591.53	4368.59	4438.64	562.13
750	4258.45	3591.53	4379.61	4438.64	562.13

注：表中所有单位均为 KN。

由表 4 可以看出当螺纹桩螺牙间距小于最小螺距时，利用改进的剪切位移法公式(9)计算所得到的承载力值相较于其它公式而言与模拟所得的结果更加吻合，此时桩的破坏模式表现为螺纹间土体与桩共同运动，并与桩侧土体发生剪切破坏；当螺距大于最小螺距时，利用单级叶片承载力算法公式(12)计算所得到的承载力值相较于其它公式与模拟结果更加吻合，此时桩的破坏表现为螺纹下土体的受压破坏；当螺距大于最优螺距时，发现利用公式计算所得的承载力要远大于数值模拟结果，原因是将螺牙叶片等同于板来计算与实际不符，会使结果不准确。并且螺距太大有可能使螺纹叶片发生剪切断裂。

5. 结论

1) 在桩型设计中，设计螺距时首先应满足最优螺距条件，从而使叶片充分发挥承载作用。当然，当桩的螺距大于计算所得的控制值或小于所得的最小值时，螺纹的存在依然能提高单桩的承载力，只是不能完全发挥螺杆桩的承载力。

2) 螺杆桩的破坏模式与螺牙间距密切相关，不同螺距的单桩破坏模式是不同的，当螺杆桩螺牙间距较小时，桩的破坏模式表现为螺纹间土体与桩共同运动，并与桩侧土体发生剪切破坏；当螺距大于最小螺距时，桩的破坏表现为螺纹下土体的受压破坏；当螺距大于最优螺距时，不仅需要考虑螺纹下土体的破坏，还要保证螺纹段螺牙的厚度使叶片在传力过程中能正常工作，不会发生剪切断裂。

3) 工程中在计算螺杆桩承载力时，常采用经验公式或在计算时采用放大系数来计算。并没有对其桩进行分类，因不同地区土质不同，所以结果与实际有较大的差距。本文按螺距进行分类后，利用相对应的公式计算和数值模拟分析，发现结果更加贴合实际。

参考文献

- [1] 陈亚东, 王安汀, 蔡江东, 孙华圣. 竖向受荷螺杆桩承载变形特性模型试验[J]. 施工技术, 2017, 46(14): 116-119.
- [2] 孟振, 陈锦剑, 王建华, 尹振宇. 砂土中螺纹桩承载特性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 141-145.
- [3] 胡金山. 黄土地区螺杆桩与 CFG 桩复合地基承载特性对比研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(6): 104-107.
- [4] 徐学燕, 于琳琳, 刘复孝. 滚压成型灌注螺纹桩承载性能研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 19-24.

- [5] 张亚军, 梁力, 董天文, 李明. 竖向承压螺旋桩基础极限承载力判定[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(4): 570-573.
- [6] 杨启安, 沈保汉. 螺旋桩承载机理及承载力计算方法[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 67-70.
- [7] 李成巍, 陈锦剑, 吴琼, 等. 灌注螺旋桩承载机理与计算方法[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(6): 726-730.
- [8] 地基与基础译文集编委会. 地基与基础译文集: 桩基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982: 180-181.
- [9] 胡家忠. 滚压成型螺旋灌注桩受力机理分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [10] Kezdi, A. (1957) The Bearing Capacity of Pile and Pile Groups. *4th ICSMFE*, London, Vol. 2, 46-51.
- [11] LGZ-2006JG. 螺杆桩技术设计与施工技术规程[S]. 海口: 海南卓典工程有限公司, 1998.
- [12] 杨启安, 沈保汉. 螺旋桩承载机理及承载力计算方法[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 67-70.
- [13] 董天文, 梁力, 王明恕, 张成金. 极限荷载条件下螺旋桩的螺距设计与承载力计算[J]. 岩土工程学报, 2006(11): 2031-2034.
- [14] 中华人民共和国建设部. GB50010-2002. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [15] 中华人民共和国建设部. GB50007-2002. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [16] Livneh, B. and El Naggar, M.H. (2008) Axial Testing and Numerical Modeling of Square Shaft Helical Piles under Compressive and Tensile Loading. *Canadian Geotechnical Journal*, **45**, 1142-1155. <https://doi.org/10.1139/T08-044>