

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.09.008

# 螺纹桩截面几何特性研究

李 佳, 丁选明, 王竞州, 周 航

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 为了便于螺纹桩在工程应用中的设计计算, 文中基于螺纹桩截面内半径、螺牙间距、螺牙高度以及螺牙厚度 4 个控制变量, 推导了螺纹桩截面面积、周长的计算公式, 建立了螺纹桩截面惯性矩的计算方法, 在工程应用的尺寸范围内, 分析了 4 个控制变量对截面几何特性的影响规律, 并将螺纹桩与圆桩进行了对比分析。结果表明, 螺纹桩截面面积和周长随内半径、螺牙厚度和高度的增大而增大, 随螺牙间距的增大而减小, 面积增大比周长显著。其中, 内半径对截面面积和周长的影响最为明显, 当内半径由 0.2 m 变化到 0.5 m 时, 面积增大了 4.4 倍, 周长增大了 1.3 倍。螺纹桩与相同截面圆桩的周长比为 1.00~1.05, 与相同截面周长圆桩的面积比为 0.91~0.99。所以, 相同桩长和相同混凝土用量时, 螺纹桩的周长仅比圆桩大 0~5%。螺纹桩截面存在关于截面对称轴的主惯性矩  $I_{yc}$  和垂直对称轴过形心的轴线的主惯性矩  $I_{xc}$ , 且  $I_{xc}$  比  $I_{yc}$  高 13%~72%。两主惯性矩随螺纹桩内半径指数增大, 随螺牙厚度以相反趋势增大, 随螺牙高度线性增大, 随螺牙间距线性减小。相较于圆桩, 主惯性矩  $I_{yc}$  较小, 主惯性矩  $I_{xc}$  较大, 但当螺牙厚度小于 0.06 m 时主惯性矩  $I_{xc}$  小于相同截面周长圆桩惯性矩。

**关键词:** 桩基础; 螺纹桩; 设计计算; 截面几何特性; 惯性矩

**中图分类号:** TU473.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2022)09-083-12

## Geometric characteristics of the cross section of screw pile

LI Jia, DING Xuanming, WANG Jingzhou, ZHOU Hang

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In order to facilitate the application of the screw pile in civil engineering, this paper deduces the expressions of the cross-sectional area and perimeter of the screw pile, and establishes the numerical calculation methods of the inertia moment based on four key sectional parameters (inside radius, screw pitch, height and thickness of thread). Then, the section geometric characteristics of the screw pile influenced by sectional parameters are discussed and compared with those of the circular pile within the scope of the size in engineering application. The results show that the screw pile cross-sectional area and perimeter increase with the increase of inside radius, height and thickness of the screw thread, but decrease with the increase of screw pitch. What's more, area increases more significantly than perimeter. The inside radius plays the most important part in influencing the cross-sectional area and perimeter. When the inside radius varies from 0.2 m to 0.5 m, the area increases 4.4 times and the perimeter increases 1.3 times. The

**收稿日期:** 2021-04-07

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51878103)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51878103).

**作者简介:** 李佳(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事预制螺钉桩竖向承载机理研究, (E-mail) lij001816@163.com。

**通信作者:** 丁选明, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) dxmhh@163.com。

perimeter ratio between the screw pile and the circular pile with the same sectional area is 1.00 to 1.05, and the area ratio between the screw pile and the circular pile with the same sectional perimeter is 0.91 to 0.99. Therefore, the perimeter of screw pile is only 0% to 5% larger than that of the circular pile with the same pile length and the same amount of concrete. The screw section has two main inertia moments:  $I_{xc}$  relative to symmetry axis of section and  $I_{yc}$  relative to axis perpendicular to symmetry axis and intersects with centroid of section, and  $I_{xc}$  is 13% to 72% larger than  $I_{yc}$ . They increase exponentially with inside radius, increase in contradictory trend with thickness of the screw thread, increase linearly with height of the screw thread, and decrease linearly with screw pitch. Compared with circular piles, the main inertia moment  $I_{yc}$  is smaller, while the other one  $I_{xc}$  is larger. However, compared with the circular pile with the same perimeter, the main inertia moment  $I_{xc}$  is smaller when thread thickness is less than 0.06m.

**Keywords:** pile foundation; screw pile; design and calculation; section geometric characteristics; inertia moment

桩基础承载力高、沉降小,能够较好地解决场地的承载问题,桩基已成为最广泛的地基加固处理技术<sup>[1]</sup>,是岩土工程中的热门研究课题,其中对单桩<sup>[2]</sup>和群桩<sup>[3]</sup>的研究尤为突出。基桩的种类繁多,除了传统的圆桩和方桩,异形截面桩也广泛应用于工程中,如:X形桩<sup>[4-6]</sup>、Y形桩<sup>[7]</sup>、螺纹桩等。螺纹桩是一种新型的地基处理桩型,其桩侧摩阻力较大,极大地提高了桩基的竖向承载力<sup>[8]</sup>。在相同桩径和桩长条件下,两段式螺纹桩的单桩复合地基极限承载力相比于普通光滑桩可以提高 67%<sup>[9]</sup>。螺纹桩与其他桩型相比,桩的承载力高,适应性强,桩身质量可靠,经济效益显著。

螺纹桩最初是由桩身带有螺旋叶片的螺旋桩发展而来,螺旋桩目前已得到广泛应用<sup>[10]</sup>,众多学者对螺旋桩承载性能进行研究,有现场试验方法研究<sup>[11-12]</sup>、有限元方法研究<sup>[13]</sup>等。日本首先应用全螺旋预制桩,随后由 Fukuei Kosan 公司研发了预制钢纤维混凝土螺旋桩,但主要是通过现场载荷试验确定其极限承载力。国内对螺纹桩承载特性的研究起步较晚,吴敏等<sup>[14]</sup>指出螺纹桩的承载机理相较于普通圆桩是有差别的,他们的关系就像日常生活中的螺丝钉和钉子。李成巍等<sup>[15]</sup>通过将室内模型试验与数值模拟的结果进行分析,提出灌注螺纹桩的承载能力取决于土体的抗剪强度。通过室内模型试验,孟振等<sup>[16]</sup>指出螺纹桩的极限承载力是与其内径相同的普通圆桩的 3~4 倍,与其外径相同的普通圆桩的 1~2 倍。周杨等<sup>[17]</sup>对变截面螺纹桩与螺纹直桩进行了分析。马文杰等<sup>[18]</sup>通过对螺纹桩的研究,提出了螺纹桩竖向承载力计算公式,并对螺纹桩的桩身结构参数对螺纹桩承载力的影响进行了研究。

螺纹桩是在圆桩的外侧增加凸起的螺纹,也就是螺纹桩的螺牙部分,其横截面为不规则形状,如图 1 所示,有些类似于圆截面,但也存在差异性。到目前为止,关于螺纹桩的截面积和周长的计算公式尚未见报道,也少有对其结构几何特性进行理论分析。然而,要在工程应用中推广螺纹桩,对其结构进行理论计算是必不可少的。文中对螺纹桩的截面进行几何解析,从理论上推导出截面的面积、周长、形心以及惯性矩的理论公式,采用控制变量的方法讨论了螺纹桩螺牙结构参数的影响,为螺纹桩受竖向和水平向荷载作用的力学特性进行数值分析提供了理论。

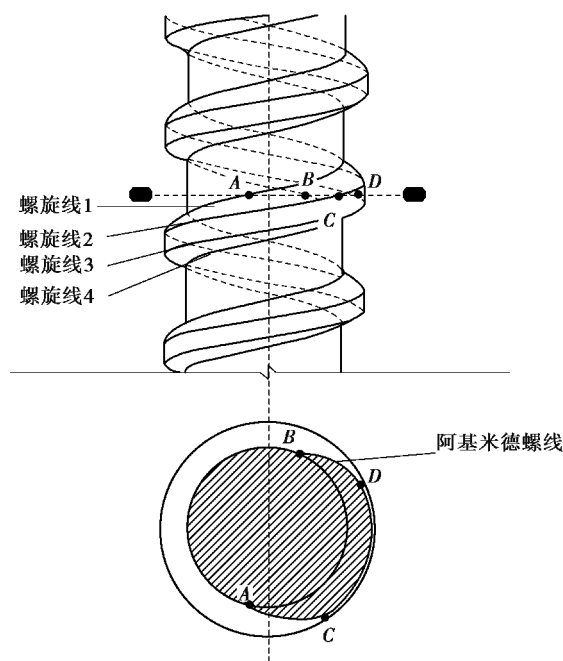


图 1 螺纹桩截及横截面

Fig. 1 Screw pile and cross-section of screw pile

## 1 螺纹桩截面几何特性计算方法

螺牙相同的螺纹直桩和变直径的螺钉桩的截面形状是相同的,不同的是螺钉桩不同高度处截面的内径不同。根据《螺纹桩技术规程 JGJ/T 379—2016》<sup>[19]</sup>中尺寸表可见,螺牙的内侧厚度大于外侧厚度,常用螺纹桩轴向剖面的螺牙轮廓是直线,可以认为,螺纹桩截面与机械中常用的阿基米德蜗杆(ZA 蜗杆)<sup>[20]</sup>的齿轮部分是相似的,也就是说螺纹桩横截面轮廓线包含阿基米德螺线<sup>[21]</sup>。阿基米德螺线是指一个点匀速离开一个固定点的同时又以固定的角速度绕该固定点转动而产生的轨迹,其极坐标方程式可表示为

$$r(\theta) = a + b\theta, \quad (1)$$

其中: $a$  表示螺线起点与圆心点的距离; $b$  表示螺旋线每增加单位角度  $r$  随之对应增加的数值, $a$  和  $b$  的值均为实数。

螺纹桩截面的 4 个控制变量为螺纹桩内半径  $r_1$ 、螺牙间距  $s$ 、螺牙高度  $h$  以及螺牙厚度  $t$ ,但是螺牙内外侧厚度不同。在《螺纹桩技术规程 JGJ/T 379—2016》的常用螺纹桩尺寸表中显示螺牙内侧厚度为外侧厚度的 2 倍或是接近于 2 倍,为了减少变量,文中默认螺牙内侧厚度是外侧的 2 倍。

螺纹桩的任意截面形状是由 2 条镜面对称的阿基米德螺线以及直径为桩内径和外径的 2 条圆弧线的部分段组成的不规则形状,可以将其拆分为多个规则形状的组合,如图 2 所示。根据图 2 中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  4 点的关系可以得到:

$$\theta_1 = \frac{2\pi t}{s}, \quad (2)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi t}{s}, \quad (3)$$

$$a = r_1, b = \frac{2hs}{\theta_1 - \theta_2} = \frac{2hs}{\pi t}, \quad (4)$$

将式(2)、式(3)、式(4)代入式(1),并结合图 2 中的坐标系,可得到阿基米德螺线的 AC 段的极坐标方程:

$$r(\theta) = r_1 + \frac{2hs}{\pi t} \left( \theta + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi t}{s} \right), \theta \in \left[ \frac{3\pi}{2} - \frac{\pi t}{s}, \frac{3\pi}{2} - \frac{\pi t}{2s} \right]. \quad (5)$$

### 1.1 面积

螺纹桩截面面积按照划分的  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  4 个区域进行计算,其中, $A_1$  和  $A_2$  为 2 个包含阿基米德螺线的边界且镜面对称的部分, $A_3$  是半径为  $(r_1 + h)$ 、角度为  $\theta_2$  的扇形,而  $A_4$  是半径为  $r_1$ 、角度为  $(\pi - \theta_1)$  的扇形。 $A_1$  部分的面积是根据阿基米德螺线的极坐标方程进行积分运算得到。故  $A_1$  区域的面积  $A_1$  为

$$A_1 = \int_{\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi t}{s}}^{\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi t}{2s}} dA = \frac{\pi t}{6sh} [(r_1 + h)^3 - r_1^3], \quad (6)$$

螺纹桩截面总面积  $A$  为

$$\begin{aligned} A &= 2A_1 + A_3 + A_4 = 2A_1 + \pi r_1^2 \frac{2\pi - \theta_1}{2\pi} + \pi(r_1 + h)^2 \frac{\theta_2}{2\pi} = \\ &= \frac{\pi t}{6sh} [(r_1 + h)^3 - r_1^3] + r_1^2 \frac{\pi(s - t)}{s} + \pi(r_1 + h)^2 \frac{t}{2s}. \end{aligned} \quad (7)$$

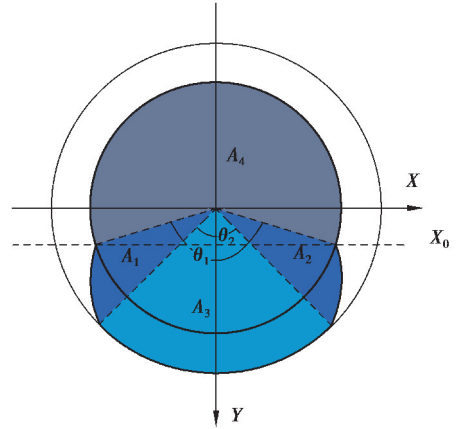


图 2 螺纹桩截面示意图

Fig. 2 Section diagram of screw pile

## 1.2 周长

螺纹桩截面周长同样是根据 4 个区域的组合进行计算的,包括阿基米德螺线长度和圆弧长度。根据阿基米德螺线极坐标方程,通过积分可得阿基米德螺线 AC 的长度  $l$  为

$$l = \frac{1}{b} \int_{r_1}^{r_1+h} \sqrt{b^2 + r^2} dr = \frac{1}{b} \left[ \left( \frac{1}{2} r \sqrt{b^2 + r^2} + \frac{1}{2} b^2 \ln |r + \sqrt{b^2 + r^2}| + C \right) \right]_{r_1}^{r_1+h} \quad (8)$$

则螺纹桩截面的周长  $C$  为

$$C = 2l + 2\pi(r_1 + h) \frac{\theta_2}{2\pi} + 2\pi r_1 \frac{2\pi - \theta_1}{2\pi} = \frac{2}{b} \left[ \left( \frac{1}{2} r \sqrt{b^2 + r^2} + \frac{1}{2} b^2 \ln |r + \sqrt{b^2 + r^2}| + C \right) \right]_{r_1}^{r_1+h} + \frac{\pi(ht + 2r_1s - r_1t)}{s} \quad (9)$$

## 1.3 形心和惯性矩

由图 2 可知,螺纹桩截面为对称图形,其对称轴为过形心的  $Y$  轴,仅有 1 条,故  $Y$  轴即为截面的 1 条形心主轴。螺纹桩截面的另一条形心主轴即为过图形形心且垂直于  $Y$  轴、平行于  $X$  轴的  $X_0$  轴。

设形心坐标为  $(0, y_c)$ , 可得:

$$y_c = \frac{\int y dA}{A}, \quad (10)$$

其中,螺纹桩截面在图 2 坐标系中的面积矩可分为内圆面和内圆外螺牙截面 2 个部分进行计算,而内圆面的面积矩为 0,故截面面积矩为

$$\int y dA = \iint_D r^2 \sin\theta d\theta dr = 2 \int_{\frac{3\pi-\theta_1}{2}}^{\frac{3\pi-\theta_2}{2}} \sin\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+b\left(\theta-\frac{3\pi-\theta_1}{2}\right)} r^2 dr + 2 \int_{\frac{3\pi-\theta_2}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \sin\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+h} r^2 dr, \quad (11)$$

联立式(7)、式(10)、式(11)即可解得:

$$y_c = \frac{2 \int_{\frac{3\pi-\theta_1}{2}}^{\frac{3\pi-\theta_2}{2}} \sin\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+b\left(\theta-\frac{3\pi-\theta_1}{2}\right)} r^2 dr + 2 \int_{\frac{3\pi-\theta_2}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \sin\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+h} r^2 dr}{\frac{\pi t}{6sh} [(r_1+h)^3 - r_1^3] + r_1^2 \frac{\pi(s-t)}{s} + \pi(r_1+h)^2 \frac{t}{2s}} \quad (12)$$

对于桩截面的惯性矩计算,在进行受力分析中关注的是截面的主惯性矩。螺纹桩截面有 2 条形心主轴,其主惯性矩计算公式如下:

螺纹桩截面相对于对称轴  $Y$  轴的主惯性矩  $I_{yc}$  为

$$I_{yc} = \int x^2 dA = \iint_D r^3 \cos^2\theta d\theta dr + \frac{\pi(2r_1)^4}{64} = 2 \left[ \int_{\frac{3\pi-\theta_1}{2}}^{\frac{3\pi-\theta_2}{2}} \cos^2\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+b\left(\theta-\frac{3\pi-\theta_1}{2}\right)} r^3 dr + \int_{\frac{3\pi-\theta_2}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \cos^2\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+h} r^3 dr \right] + \frac{\pi(2r_1)^4}{64} \quad (13)$$

螺纹桩截面相对于过形心垂直于对称轴的  $X_0$  轴的主惯性矩  $I_{xc}$  为

$$I_x = I_{xc} + m^2 A, \quad (14)$$

式中,  $m$  表示  $X$  轴与  $X_0$  轴的距离。

$$I_{xc} = I_x - y_c^2 A = \iint_D r^3 \sin^2\theta d\theta dr - y_c^2 A = 2 \int_{\frac{3\pi-\theta_1}{2}}^{\frac{3\pi-\theta_2}{2}} \sin^2\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+b\left(\theta-\frac{3\pi-\theta_1}{2}\right)} r^3 dr + 2 \int_{\frac{3\pi-\theta_2}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \sin^2\theta d\theta \int_{r_1}^{r_1+h} r^3 dr - y_c^2 A \quad (15)$$

## 2 螺纹桩截面几何特性分析

为了讨论螺纹桩截面螺纹桩内半径  $r_1$ 、螺牙间距  $s$ 、螺牙高度  $h$ 、螺牙厚度  $t$  4 个控制变量对截面几何特性的影响,根据工程应用中螺纹桩结构尺寸范围取值,分别在  $s, h$  ( $s=0.4$  m,  $h=0.1$  m)一定和  $t, r_1$  ( $t=0.12$  m,  $r_1=0.3$  m)一定 2 种情况下,采用 Mathematica 软件绘制三维图形,其中  $r_1$  从 0.2 m 变化到 0.5 m,  $t$  从

0.05 m变化到 0.2 m,  $s$  从 0.3 m变化到 0.5 m,  $h$  从 0.03 m变化到 0.11 m,并对截面的几何特性进行分析。

## 2.1 截面面积

图3和图4中分别表示了螺纹桩截面面积在2种情况下的变化规律,给出了  $s$ 、 $h$ 、 $t$  和  $r_1$  4个控制变量对截面面积的影响。螺纹桩截面面积随着内半径、螺牙厚度和高度的增大而增大,随着螺牙间距的增大而减小。在  $s$ 、 $h$  一定时,  $t$  取 0.12 m,在  $r_1$  的变化范围内,截面面积从  $0.16 \text{ m}^2$  增大到  $0.86 \text{ m}^2$ ;  $r_1$  取 0.3 m,在  $t$  的变化范围内,截面面积由  $0.30 \text{ m}^2$  增大到  $0.36 \text{ m}^2$ 。在  $t$ 、 $r_1$  一定时,  $h$  取 0.1 m,在  $s$  的变化范围内,截面面积从  $0.35 \text{ m}^2$  减小到  $0.32 \text{ m}^2$ ;  $s$  取 0.4 m,在  $h$  的变化范围内,截面面积由  $0.30 \text{ m}^2$  增大到  $0.34 \text{ m}^2$ 。内半径对截面面积的影响最为明显,内半径由 0.2 m变化到 0.5 m,面积增大了 4.4 倍。4个变量中,根据实际工程的合理性考虑,  $s$  和  $t$  的是相互影响的,  $t$  始终小于  $s$ 。

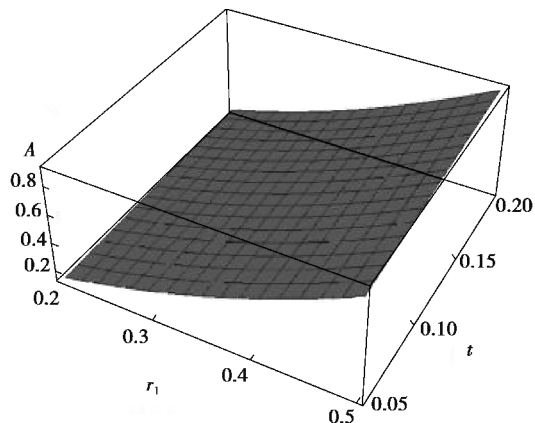


图3  $t$ 、 $r_1$  对截面面积的影响

Fig. 3 The influence of  $t$  and  $r_1$  on cross-sectional area

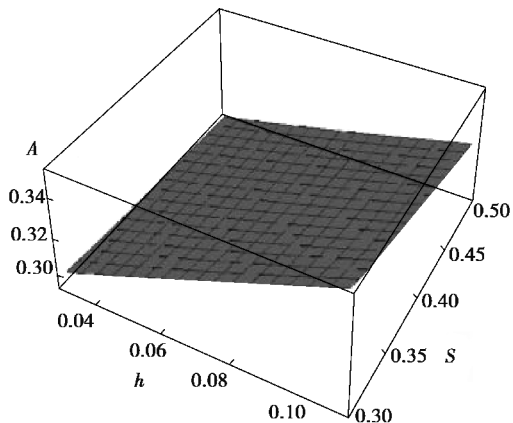


图4  $s$ 、 $h$  对截面面积的影响

Fig. 4 The influence of  $s$  and  $h$  on cross-sectional area

## 2.2 截面周长

图5和图6分别表示了螺纹桩截面的周长在2种情况下的变化规律。螺纹桩截面周长随着内半径、螺牙厚度和高度的增大而增大,随着螺牙间距的增大而减小。在  $s$ 、 $h$  一定时,  $t$  取 0.12 m,在  $r_1$  的变化范围内,截面周长从 1.47 m增大到 3.32 m;  $r_1$  取 0.3 m时,在  $t$  的变化范围内,截面周长从 2.05 m增大到 2.15 m。在  $t$ 、 $r_1$  一定时,  $h$  取 0.1 m,在  $s$  的变化范围内,截面周长从 2.12 m减小到 2.07 m;  $s$  取 0.4 m时,在  $h$  的变化范围内,截面周长从 1.93 m增大到 2.11 m。内半径对截面周长的影响最为显著,内半径由 0.2 m变化到 0.5 m,周长增大了 1.3 倍。

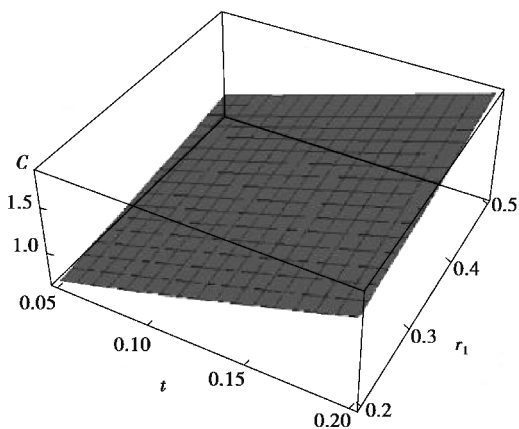


图5  $t$ 、 $r_1$  对截面周长的影响

Fig. 5 The influence of  $t$  and  $r_1$  on cross-sectional circumference

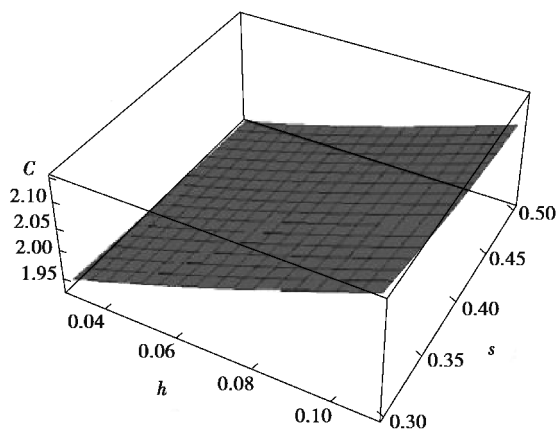


图6  $s$ 、 $h$  对截面周长的影响

Fig. 6 The influence of  $s$  and  $h$  on cross-sectional circumference



### 2.3 截面周长与面积的比

螺纹桩截面周长与面积的比  $\lambda$  的计算公式如下:

$$\lambda = \frac{C}{A} = \frac{\frac{2}{b} \left[ \left( \frac{1}{2} r \sqrt{b^2 + r^2} + \frac{1}{2} \ln |r + \sqrt{b^2 + r^2}| + C \right) \right]_{r_1}^{r_1+h} + \frac{\pi(ht + 2r_1s - r_1t)}{s}}{\frac{\pi t}{6Sh} [(r_1 + h)^3 - r_1^3] + r_1^2 \frac{\pi(s-t)}{s} + \pi(r_1 + h)^2 \frac{t}{2s}} \quad (16)$$

截面周长与截面积的比值实质上就是桩侧表面积与桩身体积的比值,从桩侧摩阻力的角度考虑,反映了螺纹桩桩身材料的利用效率情况,是工程应用中评价螺纹桩经济效益的重要指标。

图 7、图 8 分别表示了螺纹桩截面周长与面积之比  $\lambda$  的变化规律。螺纹桩截面周长与面积比  $\lambda$  随着内半径、螺牙厚度和高度的增大而减小,随着螺牙间距的增大而增大。在  $s, h$  一定时,  $t$  取 0.12 m, 在  $r_1$  的变化范围内, 截面周长与面积比  $\lambda$  从 9.19 减小到 3.85;  $r_1$  取 0.3 m 时, 在  $t$  的变化范围内, 截面周长与面积比  $\lambda$  从 6.76 减小到 5.92。在  $t, r_1$  一定时,  $h$  取 0.1 m, 在  $s$  的变化范围内, 截面周长与面积比  $\lambda$  从 6.09 增大到 6.42;  $s$  取 0.4 m 时, 在  $h$  的变化范围内, 截面周长与面积比  $\lambda$  从 6.53 减小到 6.25。在 4 个控制变量的影响下, 周长与面积的比  $\lambda$  与面积和周长的变化规律相反, 因为 4 个控制变量对截面面积的影响要大于周长。

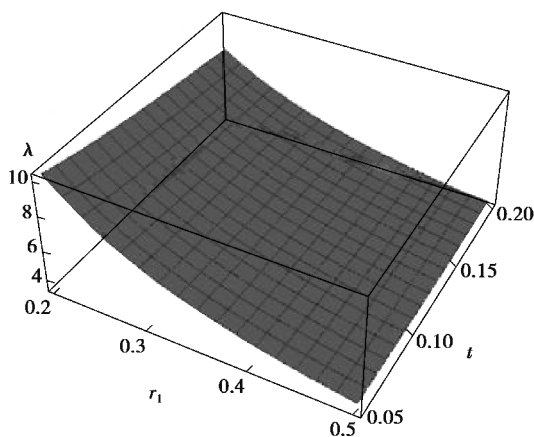


图 7  $t, r_1$  对  $\lambda$  的影响

Fig. 7 The influence of  $t$  and  $r_1$  on  $\lambda$

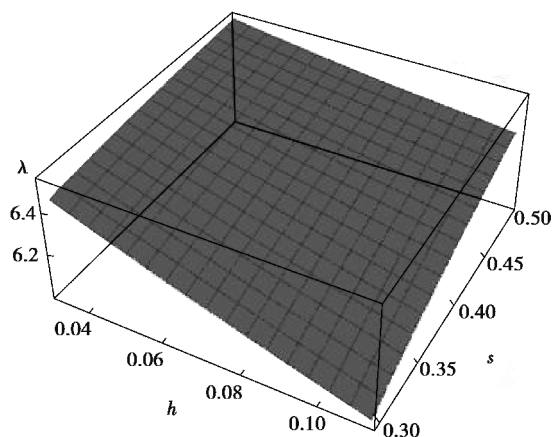


图 8  $s, h$  对  $\lambda$  的影响

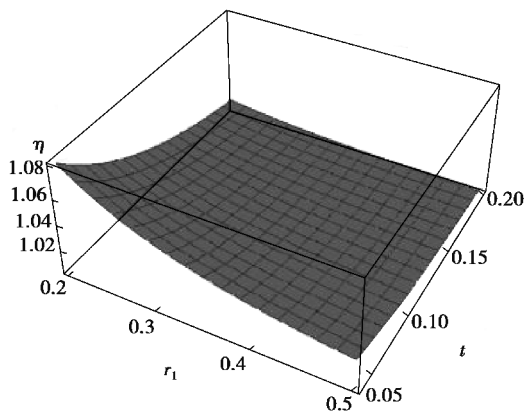
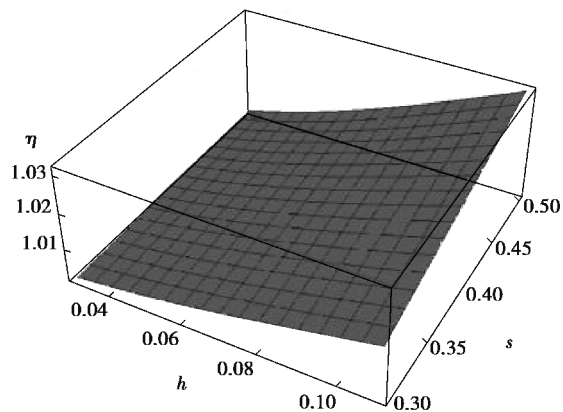
Fig. 8 The influence of  $s$  and  $h$  on  $\lambda$

### 2.4 相同截面面积的螺纹桩与圆桩的周长比

相同截面面积的螺纹桩与圆桩周长比  $\eta$  的计算公式如下:

$$\eta = \frac{C_s}{C_o} = \frac{\frac{2}{b} \left[ \left( \frac{1}{2} r \sqrt{b^2 + r^2} + \frac{1}{2} \ln |r + \sqrt{b^2 + r^2}| + C \right) \right]_{r_1}^{r_1+h} + \frac{\pi(ht + 2r_1s - r_1t)}{s}}{2\pi \sqrt{\frac{t}{6Sh} [(r_1 + h)^3 - r_1^3] + r_1^2 \frac{(s-t)}{s} + (r_1 + h)^2 \frac{t}{2s}}} \quad (17)$$

从图 9、图 10 可以发现, 在相同的截面面积的情况下, 螺纹桩与圆桩截面周长比  $\eta$  随着内半径和螺牙厚度的增大而减小, 随着螺牙高度和间距的增大而增大。在  $s, h$  一定时,  $t$  取 0.12 m, 在  $r_1$  的变化范围内, 截面周长比  $\eta$  从 1.04 减小到 1.01;  $r_1$  取 0.3 m 时, 在  $t$  的变化范围内, 截面周长比  $\eta$  从 1.05 减小到 1.01。在  $t, r_1$  一定时,  $h$  取 0.1 m, 在  $s$  的变化范围内, 截面周长比  $\eta$  从 1.01 增大到 1.03;  $s$  取 0.4 m 时, 在  $h$  的变化范围内, 截面周长比  $\eta$  从 1.00 增大到 1.02。可以看出, 在相同截面面积情况下, 螺纹桩的截面周长比圆桩大 1%~5%, 所以相同混凝土用量下, 螺纹桩周长略大于圆桩。

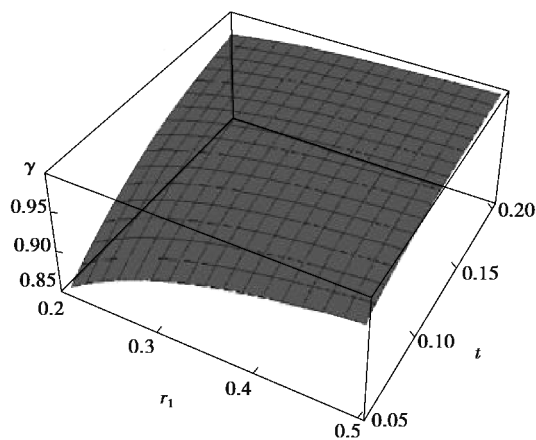
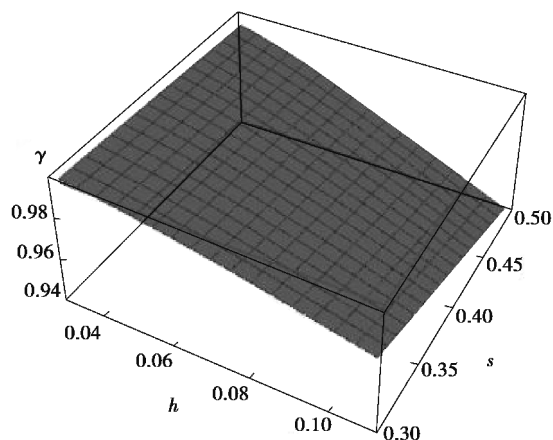
图9  $t$ 、 $r_1$  对  $\eta$  的影响Fig. 9 The influence of  $t$  and  $r_1$  on  $\eta$ 图10  $s$ 、 $h$  对  $\eta$  的影响Fig. 10 The influence of  $s$  and  $h$  on  $\eta$ 

## 2.5 相同截面周长的螺纹桩与圆桩的面积比

相同截面周长的螺纹桩与圆桩的面积比  $\gamma$  的计算公式如下:

$$\gamma = \frac{A_s}{A_o} = \frac{\frac{8\pi^3 t [(r_1 + h)^3 - r_1^3]}{3sh} + \frac{4r_1^2 \pi^2 (s - t)}{s} + \frac{2\pi^2 (r_1 + h)^2 t^2}{s}}{\left[ \frac{\pi t (r_1 + h) \sqrt{\left(\frac{2hs}{\pi t}\right)^2 + (r_1 + h)^2}}{2hs} - \frac{\pi t r_1 \sqrt{\left(\frac{2hs}{\pi t}\right)^2 + r_1^2}}{2hs} + \frac{2hs}{\pi t} \ln \left[ \frac{(r_1 + h) + \sqrt{\left(\frac{2hs}{\pi t}\right)^2 + (r_1 + h)^2}}{r_1 + \sqrt{\left(\frac{2hs}{\pi t}\right)^2 + r_1^2}} \right] + \frac{\pi(ht + 2r_1 s - r_1 t)}{s} \right]^2} \quad (18)$$

在截面周长相等的前提下,螺纹桩与圆桩的面积比  $\gamma$  的变化规律,如图 11 和图 12 所示。螺纹桩与圆桩截面面积比  $\gamma$  随着内半径和螺牙厚度的增大而增大,随着间距和螺牙高度的增大而减小。在  $s$ 、 $h$  一定时,  $t$  取 0.12 m,在  $r_1$  的变化范围内,截面面积比  $\gamma$  从 0.93 增大到 0.98;  $r_1$  取 0.3 m 时,在  $t$  的变化范围内,截面面积比  $\gamma$  从 0.91 增大到 0.98。在  $t$ 、 $r_1$  一定时,  $h$  取 0.1 m,在  $s$  的变化范围内,截面面积比  $\gamma$  从 0.97 减小到 0.95;  $s$  取 0.4 m 时,在  $h$  的变化范围内,截面面积比  $\gamma$  从 0.99 减小到 0.95。可以看出,在相同截面周长情况下,螺纹桩的截面面积比圆桩小 1%~9%。

图11  $t$ 、 $r_1$  对  $\gamma$  的影响Fig. 11 The influence of  $t$  and  $r_1$  on  $\gamma$ 图12  $s$ 、 $h$  对  $\gamma$  的影响Fig. 12 The influence of  $s$  and  $h$  on  $\gamma$

### 3 螺纹桩截面惯性矩分析

在螺纹桩结构 4 个控制变量的影响下,研究了截面形心的位置变化,分析了螺纹桩截面惯性矩的变化规律,并将螺纹桩与圆桩的惯性矩进行了对比分析。

#### 3.1 截面形心

螺纹桩的纵截面为非对称图形,在任意高度处的横截面形状是相同的。螺纹桩是由其横截面图形在高度范围内不停地绕着其内圆的圆心  $O$  匀速旋转,在高度方向匀速运动而形成的柱体结构。如图 13 所示, $O_1$  点是螺纹桩横截面的形心位置。根据螺纹桩的柱体结构形成过程可知,螺纹桩所有横截面的形心  $O_1$  在其柱体结构内的轨迹是一条以  $d$  为半径, $s$  为间距的螺旋线,且  $O_1$  的轨迹在截面平面内的投影为以  $d$  为半径的圆。

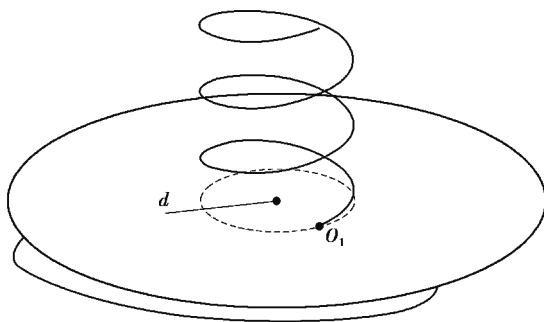


图 13 形心轨迹示意图

Fig. 13 Diagram of centroid trajectory

从式(12)可以看出,截面形心的位置受螺纹桩结构的 4 个控制变量的影响。通过分析图 14 和图 15 可以发现,螺纹桩横截面形心位置与内圆圆心的距离  $d$  随着螺牙厚度和高度的增大而增大,随着内半径和螺纹间距的增大而减小。

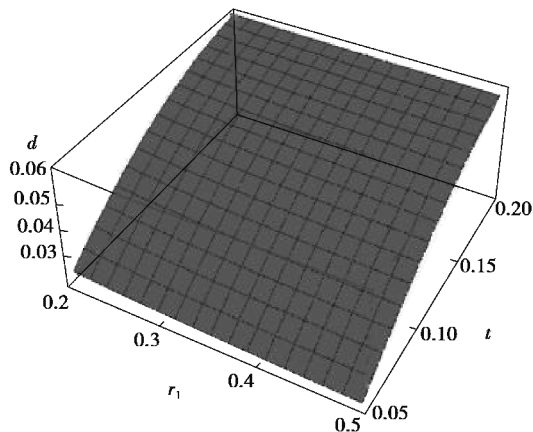


图 14  $t, r_1$  对  $d$  的影响

Fig. 14 The influence of  $t$  and  $r_1$  on  $d$

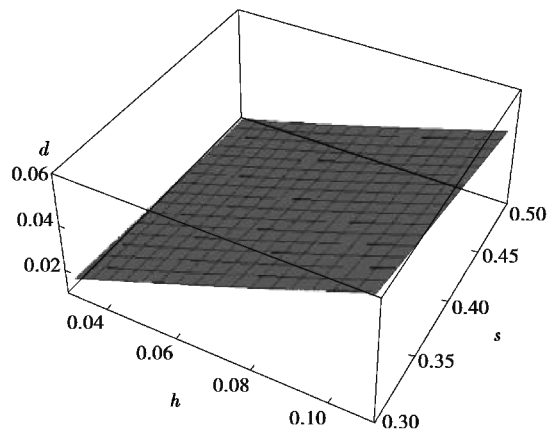


图 15  $s, h$  对  $d$  的影响

Fig. 15 The influence of  $s$  and  $h$  on  $d$

#### 3.2 截面主惯性矩

螺纹桩截面不同于普通的圆桩、方桩以及 X 型桩等,2 个主惯性矩  $I_{yc}$ 、 $I_{xc}$  的数值大小不同,其中  $I_{xc}$  总是大于  $I_{yc}$ 。在文中分析的参数范围内, $I_{xc}$  比  $I_{yc}$  高 13%~72%。相较于圆桩,主惯性矩  $I_{yc}$  较小,主惯性矩  $I_{xc}$  较大。从图 16~图 19 可以看出,螺纹桩主惯性矩随着内半径、螺牙厚度和高度的增大而增大,随着螺牙间距的增大而减小。



由图 16 可知,螺纹桩和圆桩的主惯性矩随着内半径的增大呈指数型增大。相同截面积和相同截面周长的圆桩惯性矩在内半径的影响下变化规律相近,数值大小始终在螺纹桩两主惯性矩值之间。当内半径在  $0.2 \sim 0.5$  m 范围内时,主惯性矩  $I_{xc}$  比主惯性矩  $I_{yc}$  高  $27\% \sim 72\%$ ,  $I_{xc}$  比相同截面面积圆桩高  $13\% \sim 33\%$ ,比相同截面周长圆桩高  $9\% \sim 14\%$ 。

由图 17 可知,在螺牙厚度的影响下,螺纹桩主惯性矩  $I_{xc}$  随螺牙厚度的增大速率减小,而主惯性矩  $I_{yc}$  随螺牙厚度的增大速率增大。所以,存在 1 个螺牙厚度的较小值和 1 个较大值使主惯性矩  $I_{xc}$  与主惯性矩  $I_{yc}$  相等。此时,相当于是没有螺牙结构的圆桩,螺纹桩主惯性矩  $I_{xc}$ 、螺纹桩主惯性矩  $I_{yc}$  和相同截面面积圆桩这 3 条曲线相交于这两点。其中,相同截面周长的圆桩惯性矩与螺纹桩主惯性矩  $I_{xc}$  对比发现,当螺牙厚度较大时,螺纹桩主惯性矩  $I_{xc}$  较大,此时螺纹桩截面积的分布距主轴较远而占优势;当螺牙厚度较小时,螺纹桩截面中因螺牙产生的异形区域面积减小而逐渐趋于圆形截面,而且相同截面周长圆桩的面积比螺纹桩大,此时截面较大的圆桩惯性矩较大,在螺牙厚度  $t=0.06$  m 附近两者相等。

由图 18 可知,螺纹桩主惯性矩  $I_{xc}$ 、相同截面周长圆桩的惯性矩、相同截面面积圆桩的惯性矩和螺纹桩主惯性矩  $I_{yc}$ ,均随螺牙高度的增大线性增大,其线性斜率依次减小。由图 19 可知,随着螺牙间距的变化,螺纹桩和圆桩惯性矩的变化情况几乎一致,呈线性减小的趋势,其线性变化斜率较小。可以发现,在螺牙高度和间距分别影响下,圆桩惯性矩始终介于螺纹桩两主惯性矩之间。

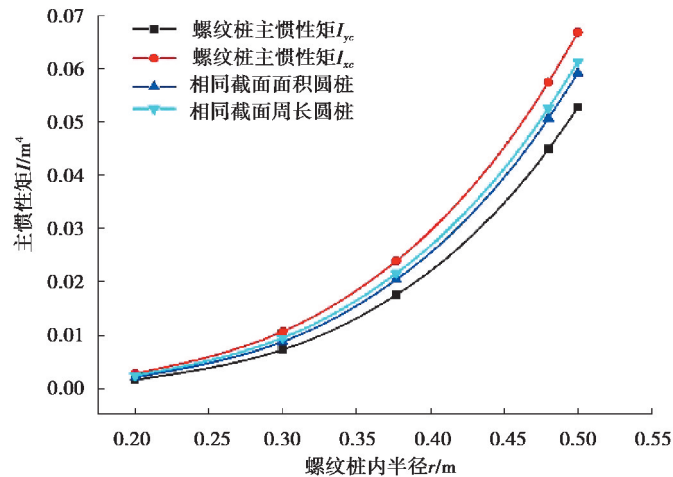


图 16 螺纹桩与圆桩主惯性矩受内半径影响的变化规律

Fig. 16 The changes of the main inertia moment of screw pile and circular pile affected by the radius of screw pile

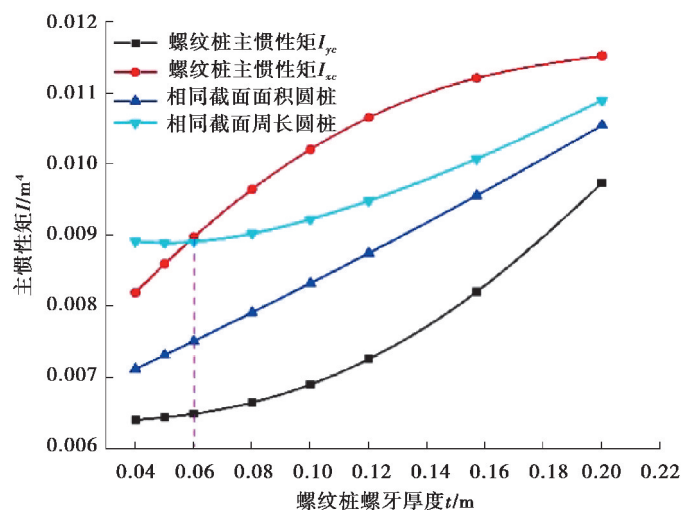


图 17 螺纹桩与圆桩主惯性矩受螺牙厚度影响的变化规律

Fig. 17 The changes of the main inertia moment of screw pile and circular pile affected by the thickness of screw thread

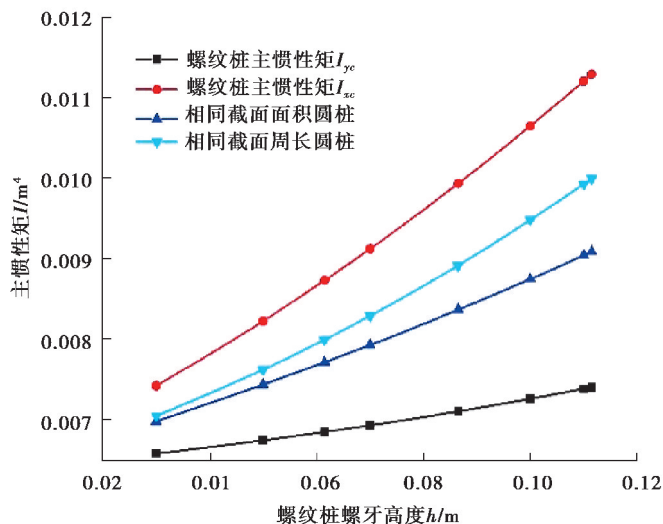


图 18 螺纹桩与圆桩主惯性矩受螺牙高度影响的变化规律

Fig. 18 The changes of the main inertia moment of screw pile and circular pile affected by the height of screw thread

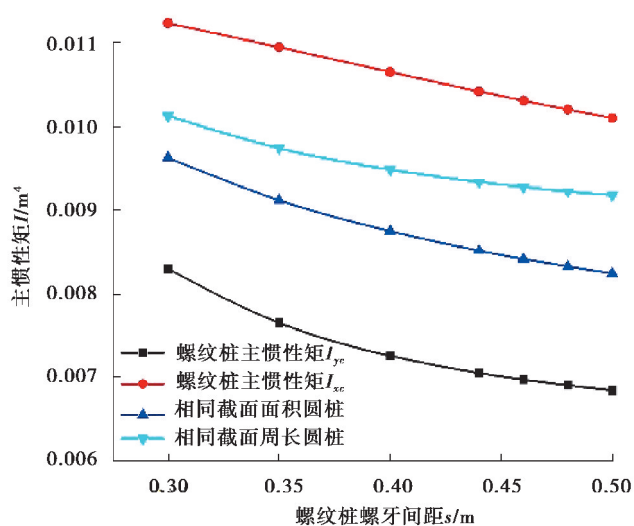


图 19 螺纹桩与圆桩主惯性矩受螺牙间距影响的变化规律

Fig. 19 The changes of the main inertia moment of screw pile and circular pile affected by the screw pitch

## 4 结 论

文中通过理论推导,建立了螺纹桩截面面积、周长、惯性矩等计算公式,探讨了截面参数对几何特性的影响规律,得到如下结论:

1) 螺纹桩截面面积和周长都随内半径、螺牙的厚度和高度的增大而增大,随螺牙间距的增大而减小。其中,内半径对截面面积和周长的影响最为明显。当内半径由 0.2 m 变化到 0.5 m,面积增大了 4.4 倍,周长增大了 1.3 倍。

2) 螺纹桩截面周长与面积的比值  $\lambda$  随内半径、螺牙的厚度和高度的增大而减小,随螺牙间距的增大而增大,与面积和周长的变化规律相反,因为 4 个控制变量对截面面积的影响大于周长。在内半径范围,比值  $\lambda$  从 9.19 减小到 3.8;在厚度范围,比值  $\lambda$  从 6.76 减小到 5.92;在间距范围,比值  $\lambda$  从 6.09 增大到 6.42;在高度范围,比值  $\lambda$  从 6.53 减小到 6.25。

3) 螺旋桩与圆桩相比,在各个控制变量的单一影响下,相同截面面积时的周长比为 1.00~1.05,相同截面周长时的面积比为 0.91~0.99。所以,在相同桩截面周长和桩长时,螺旋桩的混凝土用量比圆桩少 1%~9%。

4) 螺旋桩截面存在 2 个大小不同的主惯性矩  $I_{yc}$  和  $I_{xc}$ ,  $I_{xc}$  总是大于  $I_{yc}$ ,在文中分析的参数范围内,  $I_{xc}$  比  $I_{yc}$  高 13%~72%。2 主惯性矩随螺旋桩内半径指数增大,随螺牙厚度以相反趋势增大,随螺牙高度线性增大,随螺牙间距线性减小。相较于圆桩,主惯性矩  $I_{yc}$  较小,主惯性矩  $I_{xc}$  较大,但当螺牙厚度小于 0.06 m 时主惯性矩  $I_{xc}$  小于相同截面周长圆桩惯性矩。

从螺旋桩与圆桩的几何特性对比分析来看,相同混凝土用量下,螺旋桩的周长仅仅比圆桩大 0~5%,根据已有的试验表明,桩侧螺旋大大增加了桩-土界面咬合力,螺旋桩的承载力要比圆桩大很多。文中通过几何分析推导出螺旋桩的面积、周长、惯性矩等的理论公式,有助于后续进一步对螺旋桩截面受到水平或竖直荷载作用的力学特性进行理论分析,在一定程度上促进了螺旋桩的工程应用。笔者后续将基于文中研究,进一步探究螺旋截面以及桩-土界面的力学性能。

#### 参考文献:

- [1] 程麦理. 黄土地基桩基横向力学行为数值模拟[J]. 工程力学, 2019, 36(S1): 229-233.  
Cheng M L. Numerical simulation of transverse mechanical behavior of pile foundation in loess site[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(S1): 229-233.(in Chinese)
- [2] Ding X M, Luan L B, Zheng C J, et al. An analytical solution for wave propagation in a pipe pile with multiple defects[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2020, 33(2): 251-267.
- [3] Luan L B, Ding X M, Zheng C J, et al. Dynamic response of pile groups subjected to horizontal loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(4): 469-481.
- [4] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 型混凝土桩截面几何特性研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 17-23.  
Liu H L, Liu Z P, Wang X Q. Study on the geometric characteristics of the cast-in-place X-type vibro-pile section[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 17-23.(in Chinese)
- [5] 吕亚茹, 丁选明, 刘汉龙, 等. X 形桩桩土相互作用对截面形状的力学响应[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 357-364.  
Lyu Y R, Ding X M, Liu H L, et al. Mechanical response of pile-soil interactions of X-section cast-in-place concrete piles to cross-sectional shape[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 357-364.(in Chinese)
- [6] Zhou H, Yuan J R, Liu H L, et al. Analytical model for evaluating XCC pile shaft capacity in soft soil by incorporating penetration effects[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(5): 1093-1112.
- [7] Ren L W, Guo W D, Yang Q W. Analysis on bearing performance of Y-shaped piles under compressive and tensile loading[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2020, 173(1): 58-69.
- [8] 窦德功, 鲁子爱. 螺旋桩承载性状分析与研究[J]. 水运工程, 2012(4): 32-35, 43.  
Dou D G, Lu Z A. Bearing behavior of screw pile[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(4): 32-35, 43.(in Chinese)
- [9] Jiang P C, Xu W, Zhang Y J. Analysis of the bearing behaviour of a screw-pile foundation in silt soil[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2019, 172(4): 257-263.
- [10] Ali O K, Abbas H O. Performance assessment of screw piles embedded in soft clay[J]. Civil Engineering Journal, 2019, 5(8): 1788-1798.
- [11] Guo Z Y, Deng L J. Field behaviour of screw micropiles subjected to axial loading in cohesive soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(1): 34-44.
- [12] Lanyi Bennett S A, Deng L J. Axial load testing of helical pile groups in glaciolacustrine clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(2): 187-197.
- [13] Kurian N P, Shah S J. Studies on the behaviour of screw piles by the finite element method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(6): 627-638.
- [14] 吴敏, 李波扬. 全螺旋灌注桩: 螺旋桩竖向承载力初探[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(5): 109-112.  
Wu M, Li B Y. Primary discussion on vertical load bearing capacity of screwed filling piles[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(5): 109-112.(in Chinese)
- [15] 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.

- Li C W, Chen J J, Wu Q, et al. Bearing mechanism and calculation method of screw pile[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2010, 44(6): 726-730.(in Chinese)
- [16] 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(S1): 141-145.  
Meng Z, Chen J J, Wang J H, 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)
- [17] 周杨, 肖世国, 徐骏, 等. 变截面螺纹桩竖向承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 747-754, 783.  
Zhou Y, Xiao S G, Xu J, et al. Model test on vertical bearing capacity of variable cross-section thread piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 747-754, 783.(in Chinese)
- [18] 马文杰, 王博林, 王旭, 等. 螺纹桩承载特性的初步探讨[J]. 建筑结构, 2018, 48(S1): 738-741.  
Ma W J, Wang B L, Wang X, et al. Preliminary study on load characteristics of thread pile[J]. Building Structure, 2018, 48(S1): 738-741.(in Chinese)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 螺纹桩技术规程: JGJ/T 379—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for screw concrete pile: JGJ/T 379—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [20] 曹文钢, 李辉. 基于特征的阿基米德蜗杆(ZA)的参数化造型设计[J]. 机床与液压, 2006, 34(2): 207-208, 222.  
Cao W G, Li H. Using pro/E to realize the parameterized designing of Archimedes worms[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 34(2): 207-208, 222.(in Chinese)
- [21] T.L.希思, 朱恩宽, 李文铭. 阿基米德全集[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.  
T.L. heath, Zhu E K, Li W M. The complete works of Archimedes [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)