

## 均质地基中纵截面异形桩受扭弹塑性分析

张海峰<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>1†</sup>, 邹新军<sup>2</sup>, 车平<sup>3</sup>

(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. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007)

**摘要:**为了探讨纵截面异形桩的受扭性状, 考虑桩身纵向变截面特性, 将桩-土体系沿深度方向划分为有限个微元段, 建立均质地基中纵截面异形桩受扭弹塑性分析理论模型; 基于传统圆形桩桩顶  $T-\varphi$  曲线与桩身扭矩、转角关系曲线, 推导获得纵截面异形桩的桩身扭矩和扭转角近似解答, 并基于 MATLAB 编制了相应的计算程序。继而, 初步探讨了纵截面异形桩与等截面圆形桩受扭性能的异同点, 并开展楔形桩受扭性能影响因素分析。研究表明: 上端桩身直径对抗扭承载性能影响显著; 等体积混凝土用量下, 纵截面异形桩的抗扭性能相对优于等截面圆形桩, 且楔形桩抗扭性能最优; 相同桩顶扭矩荷载下, 楔形桩抗扭承载力随桩身剪切模量、桩径、楔角的增加而增大, 桩径提高 1 倍, 桩顶抗扭承载力提高 3~5 倍。

**关键词:**桩基; 纵截面异形桩; 扭矩荷载; 弹塑性分析

**中图分类号:** TU473.1

**文献标志码:** A

## Torsional Elasto-plastic Analysis of Longitudinal Shaped Pile Embedded in Homogeneous Soil

ZHANG Haifeng<sup>1</sup>, KONG Gangqiang<sup>1†</sup>, ZOU Xinjun<sup>2</sup>, CHE Ping<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Eastern China Geological & Mining Organization for Non-Ferrous Metals in Jiangsu Province, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to study the torsional behavior of longitudinal special-shaped piles, a longitudinal cross-section pile torsion elasto-plastic analysis model was built in homogeneous soil ground. The model considers variable cross-section of the special-shaped pile, and the pile-soil system along the depth direction is divided into finite segments. Based on the  $T-\varphi$  curve at traditional circular pile top and the torque-angle distribution curves along the pile shaft, the corresponding formula was obtained. The calculation program was run through MATLAB software. The torsional behaviors of longitudinal special-shaped piles and uniform circular piles were comparatively analyzed. The optimum design parameters for tapered pile were analyzed. The results show that the torsional performance is influenced by the top pile diameter obviously. The torsional performances of longitudinal cross-section special-shaped

\* 收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306080), National Natural Science Foundation of China(51306080)

作者简介: 张海峰(1992—), 男, 江苏南通人, 河海大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: gqkong1@163.com

pile are relatively better than those of uniform circular pile with the same concrete usage. The torsional bearing capacity of tapered pile increases with the increase of the shear modulus, diameter, and taper angle, and the torsional bearing capacity is improved to 3~5 times under two times diameter.

**Key words:** pile foundation; longitudinal special-shaped pile; torque load; elastoplastic analysis

海上结构桩基础通常受到风力、水流等水平偏心荷载的作用,导致其桩基承受相对较大的扭矩。若忽略这类扭矩荷载的作用,工程将会偏向不安全,甚至发生破坏<sup>[1]</sup>。因此,研究桩基受扭问题,尤其是扭矩荷载与其它水平、竖向等荷载耦合作用下的桩基性状具有重要意义<sup>[2]</sup>。关于单桩受扭特性的研究,主要可分为两大类:

1) 单桩扭转与轴向受荷相关性研究。Stoll<sup>[3]</sup>开展了两根管桩的现场受扭试验,通过桩抵抗扭矩所需的贯入深度确定桩承受轴向荷载所需的贯入深度,扭转受荷与轴向受荷相应有着类似的性质。Poulos<sup>[4]</sup>在高岭土中进行了轴向受荷和扭转受荷小比尺模型试验,利用轴向受荷试验得到的土体参数,通过模拟计算得到单桩受扭下的扭矩-转角曲线,证明了桩扭转与轴向受荷响应之间的相关性。Georgiadis<sup>[5]</sup>认为桩对扭矩和轴向荷载的承载都是通过桩侧摩阻力实现的,且桩侧总侧摩阻力为两者的矢量和;假定轴向与扭矩荷载共同作用时的总侧摩阻力为定值,由此提出了单桩扭转与轴向受荷共同作用时的分析模型。Georgiadis 和 Safleku<sup>[6]</sup>通过小比尺模型试验得到扭转与轴向荷载之间相互削弱的结论,验证了桩扭转承载力的本质是桩侧摩阻力的发挥。邹新军等<sup>[7]</sup>基于水平力与扭矩组合加载装置开展了单桩模型试验,发现桩顶在扭矩与水平力组合作用下,极限承载力较单一受水平力或扭矩均有所减小。

2) 扭转荷载下单桩抗扭转承载能力问题研究。Poulos<sup>[4]</sup>利用弹性理论建立了圆形桩单桩桩顶受扭矩荷载的扭转计算方法,并列出了桩头的扭矩-转角的参数解;Randolph<sup>[8]</sup>假设土体为理想弹塑性模型,得到了单桩桩头扭转响应的闭合解;但是,这两种解法均不能得到桩身的应力和转角分布,不利于对整个桩身内力进行系统分析。Dutt 等<sup>[9]</sup>分别在松散干砂与密实干砂中采用圆桩与方桩进行了试验,发现土体密实度与桩型均能影响桩身的受扭形状。Chow<sup>[10]</sup>提出了单桩计算的离散单元法,由于该方法对桩身划分了单元,因此可以考虑土体分层等情

况,且能得到桩身各单元的应力与转角,但其解答仅适用于桩侧土体的弹性阶段。Zhang 和 Kong<sup>[11]</sup>利用离心机在砂土中开展了单桩扭转试验,得到了典型的单桩扭转曲线。邹新军等<sup>[12]</sup>假定成层土中各土层单元均质,基于平衡原理获得桩身微段扭矩递推计算式,进而获得桩头及桩身的扭矩-扭转角分布曲线,桩顶扭矩沿桩身的传递主要发生在浅部土层中。吴文兵等<sup>[13]</sup>建立了动态扭转荷载下,楔形桩与桩侧土耦合扭转振动的定解问题,讨论了桩身参数对楔形桩扭转振动特性的影响规律。

近年来,为了优化桩基承载性能、提高单位混凝土材料利用率,国内外相关学者提出了横截面异形桩和纵截面异形桩等新型桩基形式;这些桩型具有承载力大、单位混凝土用量低、用途广等技术优点。所谓横截面异形桩是通过改变桩横向截面几何形状得到的异形桩,如 Y 形桩、X 形桩等<sup>[14-15]</sup>;纵截面异形桩即通过改变桩身纵向截面形状得到的变截面异形桩,目前常用的纵截面异形桩有楔形桩、扩底楔形桩、竹节桩等<sup>[16-19]</sup>。然而,针对扭剪荷载下异形桩桩基承载性能的研究仍相对较少。因此,本文考虑纵截面异形效应,将其桩身沿竖向划分为多个微元段,基于已有桩身微元段递推计算式<sup>[12]</sup>,推导获得纵截面异形桩的桩顶与桩身扭矩转角关系式;针对楔形桩、扩底楔形桩和竹节桩等 3 种纵截面异形桩,开展其受扭承载特性对比研究,并针对楔形桩开展系统的影响因素分析,以期对纵截面异形桩的扭转特性计算与设计提供技术支撑。

## 1 理论模型的建立与验证

### 1.1 基本假定

楔形桩、扩底楔形桩和竹节桩等 3 种纵截面异形桩的桩-土系统相互作用的模型如图 1 所示。将桩-土系统沿竖直方向划分为  $n$  个微元段,各微元段分别标识为  $1, 2, 3, \dots, j, \dots, m, \dots, n$ ; 其中,扩底楔形桩桩身扩大头的楔形段均匀分为  $m$  段,扩大头

的圆形段无需分段,非扩底段均匀分为  $n-m$  段,则扩底楔型桩第  $j$  微元段桩径  $d_j$  计算式为:

$$\begin{cases} d_j = d_1 - \frac{(d_1 - d_2)}{n - m}(j - 1), j \leq n - m - 1 \\ d_j = d_2 + \frac{(D - d_2)}{m}(j - n + m), j \geq n - m \end{cases} \quad (1)$$

同理,可得楔形桩在竖向均匀划分为  $n$  段时,第  $j$  微元段桩径计算式为:

$$d_j = d_1 - \frac{(d_1 - d_2)}{n}(j - 1) \quad (2)$$

式中  $d_1$ 、 $d_2$  和  $D$  为分段桩径。

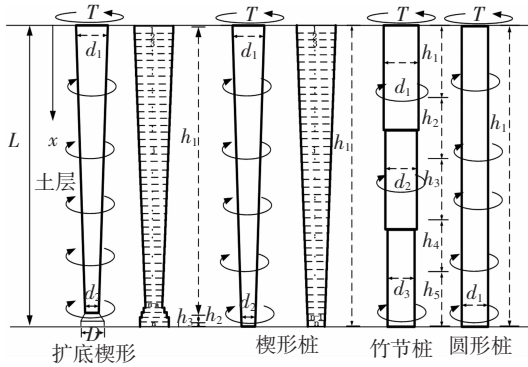


图 1 单桩受扭分析模型

Fig. 1 Torsional analysis model of single pile

为了简化分析,理论模型基本假定如下:

1) 楔形桩与扩底楔形桩为各向同性、竖直、圆形变截面锥体,分段后桩的每一微元段为圆柱体,土层物理性质不变,即为均质地基;

2) 桩侧土处于弹性阶段时,桩-土扭转位移协调;

3) 随着桩顶扭矩的增加,桩侧土塑性区由上至下逐渐开展,桩-土系统的破坏以桩侧土塑性区开展至桩底处为准。

## 1.2 纵截面异形桩-土体系受扭响应方程及其求解

### 1.2.1 弹性阶段

采用荷载传递法中双折线和指数非线性两种模型分析竖向受荷桩。对于均质各向同性弹性介质中的桩给出了土体初始抗扭刚度  $k$  的计算式:

$$k = 4\pi r_0^2 G_s \quad (3)$$

邹新军等<sup>[12]</sup>采用桩身荷载传递双折线模型,由平衡条件提出了圆形桩桩侧土处于弹性阶段下,桩身扭转控制方程及边界条件:

$$\begin{cases} G_p J_p \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} - k \varphi(x) = 0 \\ G_p J_p \frac{d \varphi(x)}{dx} \Big|_{x=L} = -T_B, \varphi(x)_{x=L} = \varphi_B \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T_B$  和  $\varphi_B$  分别为桩端处的扭矩与扭转角;  $G_p$  和  $J_p$  分别为桩身的剪切模量与极惯性矩。

令  $b = [k/(G_p J_p)]^{0.5}$ , 并引入桩端边界条件:

$$T_B = K_B \varphi_B \quad (5)$$

式中:  $K_B$  为系数,  $K_B = 16G_{SB} r_0^3/3$ ,  $G_{SB}$  为桩端处桩侧土的剪切模量。

由式(4)(5)即可推得桩顶扭矩与转角为:

$$\begin{cases} T = -G_p J_p \frac{d \varphi(x)}{dx} \Big|_{x=0} = -G_p J_p \left( \frac{b \varphi_B - \frac{T_B}{G_p J_p}}{2b e^{bL}} - \frac{b \varphi_B + \frac{T_B}{G_p J_p}}{2b e^{-bL}} \right) \\ \varphi = \varphi(x)_{x=0} = \frac{b \varphi_B - \frac{T_B}{G_p J_p}}{2b e^{bL}} - \frac{b \varphi_B + \frac{T_B}{G_p J_p}}{2b e^{-bL}} \end{cases} \quad (6)$$

桩顶处桩身扭矩与扭转角之比为:

$$K = \frac{T}{\varphi} = b G_p J_p \frac{K_B + b G_p J_p \tanh(bL)}{b G_p J_p + K_B \tanh(bL)} \quad (7)$$

当桩身按图 1 所示分段且桩侧土处于弹性阶段时,可得到第  $i$  个桩土微元段的桩身扭转控制方程及边界条件为:

$$\begin{cases} G_p J_{pi} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} - k_i \varphi(x) = 0 \\ G_p J_{pi} \frac{d \varphi(x)}{dx} \Big|_{x=z_i} = -T_{i+1}, \varphi(x)_{x=z_i} = \varphi_{(i+1)} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $z_i$  为第  $i$  段底部深度(m);  $T_{i+1}$  和  $\varphi_{i+1}$  分别为第  $i$  桩段底部的扭矩及扭转角;  $k_i$  为第  $i$  桩段桩侧土的抗扭刚度; 同理令  $b_i = [k_i/(G_p J_p)]^{0.5}$ , 可以解得第  $i$  桩段顶部的扭矩  $T_i$  和扭转角  $\varphi_i$  分别为:

$$\begin{cases} T_i = \frac{1}{2} G_p J_{pi} b_i \left[ \left( \varphi_{i+1} + \frac{T_{i+1}}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{b_i L_i} - \left( \varphi_{(i+1)} + \frac{T_{i+1}}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{-b_i L_i} \right] \\ \varphi_i = \frac{1}{2} \left[ \left( \varphi_{i+1} - \frac{T_{i+1}}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{-b_i L_i} + \left( \varphi_{i+1} + \frac{T_{i+1}}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{b_i L_i} \right] \end{cases} \quad (9)$$

因此,  $z_{i-1}$  处桩身扭矩与扭转角之比为:

$$K_i = \frac{T_i}{\varphi_i} = b_i G_p J_{pi} \frac{K_{i+1} + b G_p J_{pi} \tanh(b_i L_i)}{b G_p J_{pi} + K_{i+1} \tanh(b_i L_i)} \quad (10)$$

式中:  $K_{i+1} = T_{i+1} / \varphi_{i+1}$ ;  $L_i$  为第  $i$  桩段长度 (m);  $i = n$  时,  $b_n = [k_n/(G_p J_p)]^{0.5}$ ;  $T_{n+1} = \varphi_{n+1} K_{n+1}$ , 其中  $K_{n+1} = K_B = 16G_{SB} r_0^3/3$ 。

在某一桩顶扭矩下,由式(9)可逆向导得弹性阶段第  $i$  桩段底截面的扭矩和扭转角递推公式为:

$$\begin{cases} T_{i+1} = \frac{1}{2} G_p J_{pi} b_i \left[ \left( \varphi_i + \frac{T_i}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{-b_i L_i} - \left( \varphi_{i+1} - \frac{T_{i+1}}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{b_i L_i} \right] \\ \varphi_{i+1} = \frac{1}{2} \left[ \left( \varphi_i - \frac{T_i}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{-b_i L_i} + \left( \varphi_{i+1} - \frac{T_{i+1}}{G_p J_{pi} b_i} \right) e^{b_i L_i} \right] \end{cases} \quad (11)$$

1.2.2 塑性阶段

当桩顶扭转角大于  $\varphi_u$  时, 随着桩顶扭矩的增加, 桩侧土由上至下逐渐进入塑性阶段, 假定塑性区开展深度为  $l_d$ , 则  $l_d$  以上为塑性区, 桩土位移不再协调,  $l_d$  以下为弹性区, 对于塑性阶段有桩身受扭控制方程及边界条件:

$$\begin{cases} G_p J_p \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} - k \varphi_u = 0 \\ G_p J_p \frac{d\varphi(x)}{dx} \Big|_{x=l_d} = -T_d, \varphi(x)_{x=l_d} = \varphi_d \end{cases} \quad (12)$$

式中  $T_d$  和  $\varphi_d$  分别表示  $l_d$  深度处桩身的扭矩和扭转角。

同理可得, 异形桩桩侧土处于弹塑性阶段时, 设塑性开展深度  $l_d = z_i$  时可得第  $i$  个桩土微元段的桩身扭转控制方程及边界条件为:

$$\begin{cases} G_p J_{pi} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} - k \varphi_u = 0 \\ G_p J_{pi} \frac{d\varphi(x)}{dx} \Big|_{x=l_d} = -\varphi_d, \varphi(x)_{x=l_d} = \varphi_d \end{cases} \quad (13)$$

式中  $T_d$  和  $\varphi_d$  可由式(9)通过边界条件  $T_{n+1}$  与  $\varphi_{n+1}$  迭代计算得到。

由(13)可解得第  $i$  桩段桩顶的扭矩与转角为:

$$\begin{cases} T_i = T_d + k_i \varphi_u l_i \\ \varphi_i = \varphi_d + \frac{T_{i+1} l_i}{G_p J_{pi}} + \frac{1}{2} \frac{k_i \varphi_u}{G_p J_{pi}} l_i^2 \end{cases} \quad (14)$$

对于桩侧土处于塑性状态的桩段, 顶端截面的扭矩与转角递推计算公式为:

$$\begin{cases} T_i = T_{i+1} + k_i \varphi_u l_i \\ \varphi_i = \varphi_{i+1} + \frac{T_{i+1} l_i}{G_p J_{pi}} + \frac{1}{2} \frac{k_i \varphi_u}{G_p J_{pi}} l_i^2 \end{cases} \quad (15)$$

在某一桩顶扭矩下, 由式(15)可反推得塑性段第  $i$  桩段底截面的扭矩和扭转角递推公式为:

$$\begin{cases} T_{i+1} = T_i + k_i \varphi_u l_i \\ \varphi_{i+1} = \varphi_i + \frac{T_i l_i}{G_p J_{pi}} + \frac{1}{2} \frac{k_i \varphi_u}{G_p J_{pi}} l_i^2 \end{cases} \quad (16)$$

1.2.3 竹节桩变截面处与土体接触面相互作用分析

对竹节桩而言, 在变截面处, 控制方程只考虑桩侧土体的作用(即图 2 中  $AB$ 、 $HG$ 、 $FE$ 、 $CD$  处土体接触的作用), 不考虑桩身变截面处与土体接触的作用(即图 2 中  $BC$ 、 $FG$  处土体接触的作用)。竹节桩扭转过程中, 其桩身变截面处与土体接触引起的滑动摩擦力能提供部分扭矩, 故本节将该部分扭矩定量计算后与根据桩侧土体接触计算得到的桩体抗扭承载力进行对比, 进行定性分析。

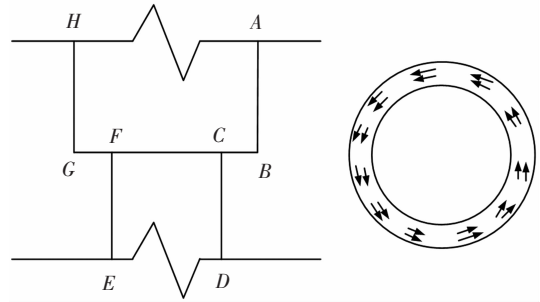


图 2 竹节桩桩身变截面处受扭分析模型

Fig. 2 Torsional analysis model of variable cross-section of nodular piles

在不考虑桩身上部荷载时, 桩身变截面处与土体接触的作用力  $\sigma_{sz}$  可简化为:

$$\sigma_{sz} = \gamma z \quad (17)$$

式中:  $\gamma$  为土体重度;  $z$  为变截面处土体的深度。

水平面上的滑动摩擦力有计算公式:

$$\sigma_{sx} = \mu_r \gamma z \quad (18)$$

因此, 某一桩身变截面处由  $\sigma_{sz}$  引起的扭矩积分计算式为:

$$T_f = \int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_1}^{r_2} r \sigma_{sx} r dr = \frac{2}{3} \pi (r_1^3 - r_2^3) \gamma z \quad (19)$$

式中  $r_1, r_2$  分别为该变截面处下部、上部桩段半径。

取桩身剪切模量为 25 GPa, 其余参数如上, 可得竹节桩其桩身变截面处与土体接触引起的滑动摩擦力能提供最大扭矩值为 0.027 6 MN·m; 而由桩侧截面与土体接触的扭矩承载力为 3.794 5 MN·m. 计算可得桩身变截面处扭矩承载能力为总抗扭承载力的 0.7%, 故可不考虑该部分的影响。

1.2.4 计算步骤

主要计算步骤如下:

1) 将异形桩划分为  $n$  个单元, 确定单元桩-土体系微元段的几何与力学参数 ( $l_i, G_p, J_{pi}$ ) 及土层力学参数 ( $k_i, \varphi_u, G_s$ )。

2) 当桩-土体系处于弹性阶段时, 由式(10)递推计算得到桩顶扭矩与转角的比值  $K_1$ , 按  $T_1 = K_1 \varphi$  计算桩顶扭矩转角曲线, 并按照式(11)迭代计算此时桩身扭矩转角的分布。

3) 当桩侧土由上至下开始进入塑性阶段时, 以塑性区开展深度  $l_d$  为变量, 计算桩顶的  $T-\varphi$  曲线和桩身的扭矩转角分布曲线。  $l_d=0$  时, 取桩顶扭转角为土体抗扭极限扭转角  $\varphi_u$ , 按式(11)递推计算弹塑性极限扭矩值。  $l_d>0$  时, 当  $l_d$  所对应的点位于某个桩段时, 则以该点为界将桩段再细分为两个桩段, 其余桩段划分不变。

4)分别按式(11)与式(16)递推计算弹性区和塑性区的桩身扭矩转角曲线. 不断增加  $l_d$  进行循环计算, 直至  $l_d=L$  时即可获得桩顶的  $T-\varphi$  曲线.

### 1.3 微元段分段精度分析

选取扩底楔形桩作为研究对象, 分析微元段划分数量对解法的可靠性和精度的影响. 几何参数选取为分段桩长  $h_1=28.5\text{ m}, h_2=1.5\text{ m}$ ; 分段桩径  $d_1=1.338\text{ m}, d_2=0.675\text{ m}, D=1\text{ m}$ ; 取桩周土参数为: 剪切模量  $G_s=5\text{ MPa}, \varphi_u=0.008\text{ rad}$ . 微元段划分数量  $n$  对计算精度的影响如图 3 所示. 由图 3 可见, 微元段划分数量过少时, 桩顶扭矩计算偏大, 扭转角计算偏小, 当微元段数逐渐增加, 计算得到的桩身扭矩转角曲线趋于一致: 当  $n>300$  时, 计算得到的曲线基本不再改变, 计算结果能够满足精度要求; 因此, 后续计算中扩底楔形桩与楔形桩统一沿竖向等长度划分为 300 个微元段.

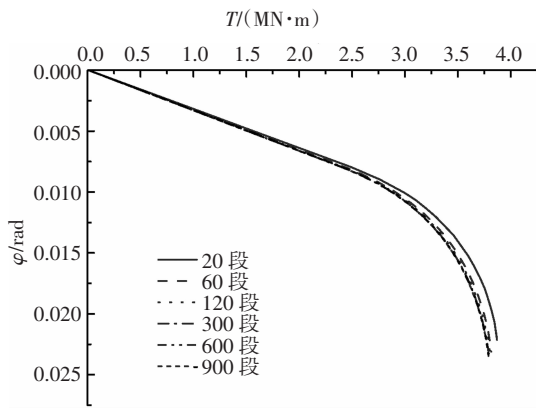


图 3 分段数量  $n$  对计算精度的影响  
Fig. 3 Calculation accuracy influenced by  $n$

### 1.4 理论模型验证与分析

将文中解答退化为等截面圆形桩后与文献[10]基于离散元的方法一同利用文献[3]的 pile-3 桩试验参数进行计算并与其扭桩试验结果进行对比验证. Pile-3 桩为桩长 17.4 m、外径 0.273 m、壁厚 6.3 mm 的钢管桩; 桩内浇注混凝土, 桩身扭转刚度为  $(GJ)P=12.8\text{ MN}\cdot\text{m}^2$ ; 桩周土的土体剪切模量为 4.59 MPa; 弹性极限扭转角  $\varphi_u$  为 0.001 5 rad.

基于本文解答以及文献[10]离散元法获得的桩顶扭矩-转角曲线与实测曲线的对比分别如图 4 所示. 由图 4 可知, 本文解答在弹性及塑性区开展初期阶段与实测结果吻合相对较好, 而文献[10]解答高估了弹性阶段桩头的转角, 在较大桩顶扭矩尤其是 0.02 MN·m 之后本文方法和文献[10]都与实测值出现了相对较大偏差; 可能原因在于随着桩顶扭矩的

增大, 桩身承担的扭矩和转角逐渐增大导致了桩内回填混凝土的渐进开裂、钢管与回填混凝土的相对滑移, 本文理论模型中未能考虑这些因素的影响. 而本文方法与文献 [10] 对抗扭极限承载力的预测相近, 都很靠近实测值, 故本文理论解答可以一定程度上预测桩顶扭矩-转角曲线, 尤其在允许工作荷载作用情况下, 因此, 可用于预测极限抗扭剪承载力.

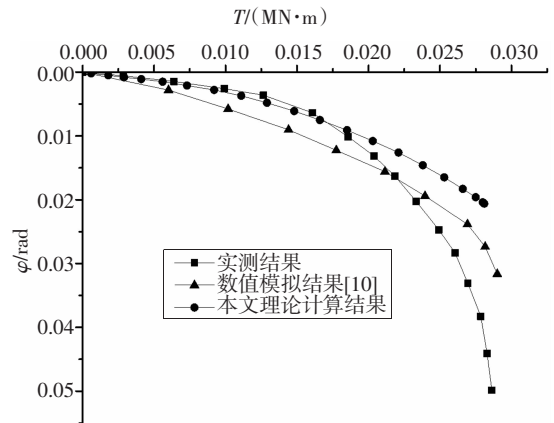


图 4 实测  $T-\varphi$  曲线与理论方法计算结果对比曲线  
Fig. 4 Comparative curves on  $T$ -between measured and calculation

## 2 受扭承载性能对比分析

桩身材料用量与桩周土力学参数相同情况下, 将楔形桩、扩底楔形桩和竹节桩等 3 种纵截面异形桩与等截面圆形桩的抗扭承载性能进行对比. 各类型桩尺寸分别为: 1) 等截面圆形桩尺寸为  $r_0=0.5\text{ m}, L=30\text{ m}$ ; 2) 扩底楔形桩桩分段桩长  $h_1=28.5\text{ m}, h_2=1.5\text{ m}$ ; 分段桩径  $d_1=1.338\text{ m}, d_2=0.675\text{ m}, D=1.0\text{ m}$ ; 3) 楔形桩桩长  $h=30\text{ m}$ , 顶端桩径  $d_1=1.352\text{ m}$ , 底端桩径  $d_2=0.6\text{ m}$ ; 4) 竹节桩由上至下分节桩径分别为:  $d_1=1.058\text{ m}, d_2=0.998\text{ m}, d_3=0.938\text{ m}$ . 桩周土参数为: 剪切模量  $G_s=5\text{ MPa}$ , 极限扭转角  $\varphi_u=0.008\text{ rad}$ , 土体重度  $\gamma=20\text{ MPa}$ . 桩身剪切模量  $G_p$  选取 2 GPa 与 25 GPa 2 种情况.

### 2.1 桩身扭矩、转角分布对比分析

由图 5 可知, 桩身剪切模量取 25 GPa, 在相同的桩顶扭矩 1.5 MN·m 下, 3 类纵截面异形桩的桩身扭矩沿深度方向上的减小速度较为接近, 但都明显快于等体积的等截面圆形桩; 楔形桩减小速度最快, 竹节桩与扩底楔形桩次之; 由于桩顶扭矩由桩侧土承担, 任意深度处桩身扭矩之于桩顶扭矩的减

小值即为桩顶至该深度处桩侧土承担扭矩大小的总和。

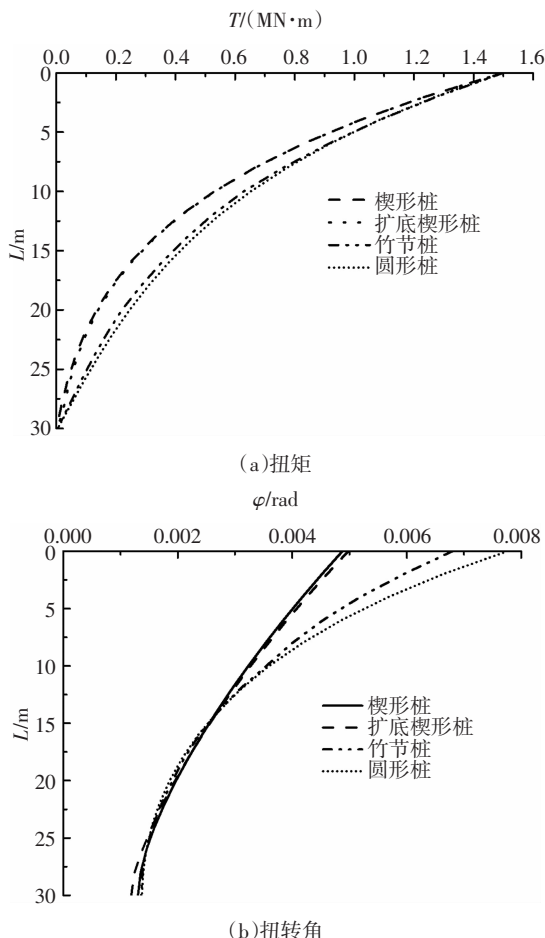


图5 桩身扭矩和转角分布曲线

Fig.5 Distribution curves of the torque and twist angle along the pile shaft under various torque at the pile top

由此可得:相同条件下,纵截面异形桩桩侧土对桩顶扭矩荷载的承载在上部土层完成更多;桩顶扭矩沿桩身的传递都主要发生在上部土层中,与纵截面形式无关.另外,在桩身上部,3类异形桩中扩底楔形桩与楔形桩的桩身扭转角分布较为接近,都要小于等体积的竹节桩,而圆形桩分布转角较大。

### 2.2 桩顶 $T-\varphi$ 曲线对比分析

由图6可知,在相同的桩顶扭矩荷载作用下,3种纵截面异形桩桩顶产生的扭转角度相近,都明显小于等体积的等截面圆形桩,且其中楔形桩扭转角度最小,竹节桩与扩底楔形桩次之;在相同的桩顶扭转角下,3种纵截面异形桩桩顶承受的扭矩相近,均高于等体积的等截面圆形桩,且其中楔形桩桩顶承受扭矩最高,竹节桩与扩底楔形桩次之.由此可得,等体积的纵截面异形桩抗扭承载性能要好于等

截面圆形桩,且楔形桩抗扭性能最佳,由微元段土体抗扭刚度的计算公式  $k_i = 4\pi r_i^2 G_s$  易知,当微元段桩径越大时,土体初始抗扭刚度也就越大.桩侧土对桩顶扭矩的承载主要发生在上部土层,因此上部体积较大的异性桩有着更好的抗扭承载性能。

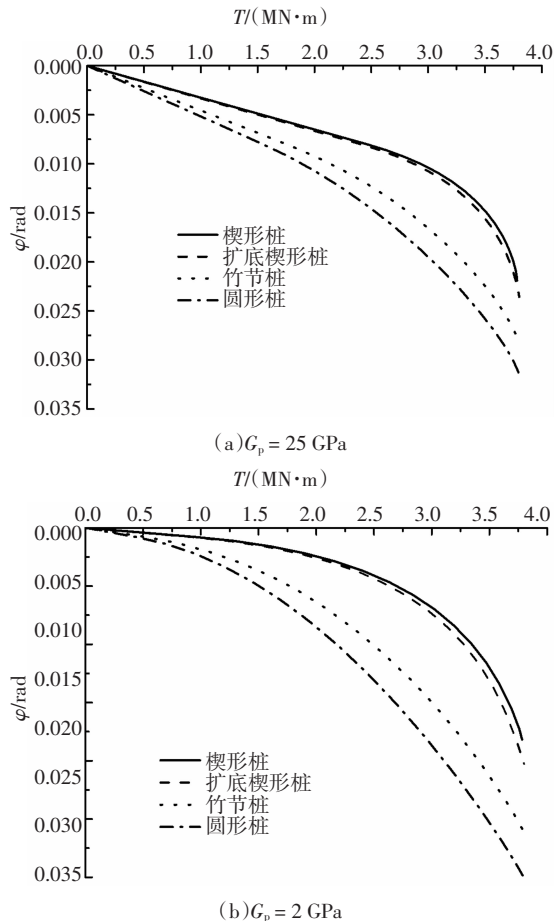


图6 4种类型桩  $T-\varphi$  对比曲线

Fig.6 Comparative curves on  $T-\varphi$  for four types of piles

### 3 影响因素分析

由第2节可知,楔形桩有着相对最优的抗扭承载性能;因此,针对楔形桩进行系统参数分析;考虑桩身剪切模量  $G_p$ 、桩径  $d_1$ 、 $d_2$  以及楔角等因素影响。

#### 3.1 桩身模量对抗扭承载性能的影响

分别取桩身材料剪切模量  $G_p$  为 2 GPa、16 GPa、25 GPa 和 65 GPa 进行对比分析.桩身尺寸与桩周土的力学参数与上节中选取相同.由图7可见,桩顶扭矩保持不变时,楔形桩桩顶扭转角随  $G_p$  的增加而减小;对于某一桩顶扭转位移控制值,桩顶所能承受的扭矩随  $G_p$  的增大而显著增加,即桩身抗扭能力随着  $G_p$  的增加而不断提高。

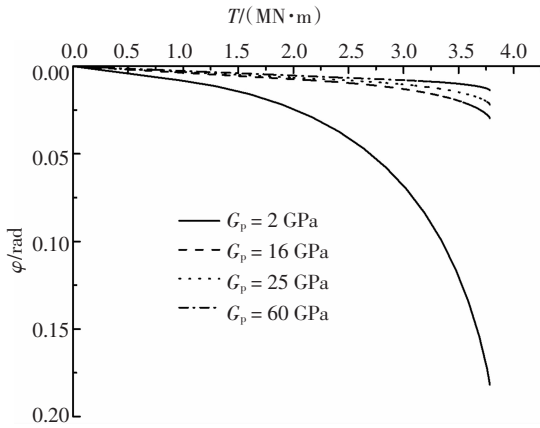


图 7 桩身剪切模量对楔形桩桩顶  $T-\varphi$  曲线的影响

Fig. 7 Curves on  $T-\varphi$  of tapered pile influenced by shear modulus

### 3.2 楔形角对抗扭承载性能的影响

为了探讨楔角的影响,控制体积相等取楔角分别在  $0.5^\circ, 0.7162^\circ, 1^\circ$  和  $0^\circ$  (圆形桩) 进行对比分析,其余参数同上.由图 8 可知,等体积的楔形桩随着桩型越“尖”,即楔角越大,桩-土系统抵抗桩顶扭矩荷载的性能越好,该参数分析结论与吴文兵等在扭转振动荷载下得到的结论一致.而随着楔形角的增大,承载性能的增加幅度会越来越小;因此,在进行受扭性能设计时,适当考虑增加楔角来达到提高受扭承载性能的目的,可见楔形桩在静动荷载下增大楔角都对抗扭承载力有着增强作用.

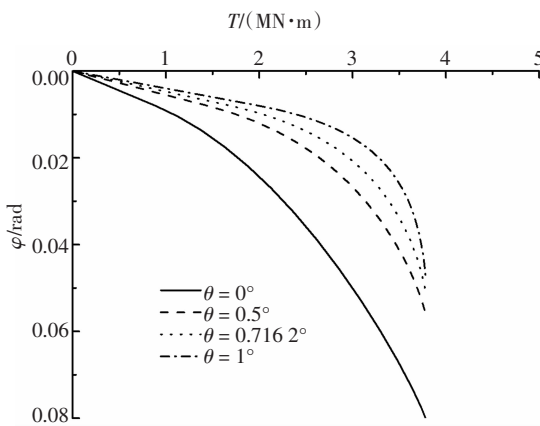


图 8 桩身楔形角  $\theta$  对楔形桩桩顶  $T-\varphi$  曲线的影响

Fig. 8 Curves on  $T-\varphi$  of tapered pile influenced by taper angle  $\theta$

### 3.3 楔形桩桩径对抗扭承载性能的影响

取楔形桩分段桩径  $d_1, d_2$  分别在  $2/3, 1, 1.5$  和  $2$  倍的第 2 章等体积对比分析中楔形桩所对应的桩径进行分析.参数选取中,桩身剪切模量  $G_p = 16 \text{ GPa}$ ,其余参数均同上.由图 9 可知,桩顶扭矩一

定时,桩顶扭转角随桩径的增加而显著减小;且桩径增加一倍时,相同扭转角下桩顶能承受的扭矩值上升 3~5 倍.而吴文兵等得到可在一定范围内增大楔形桩截面半径来提高楔形桩扭转振动受荷承载力的结论.

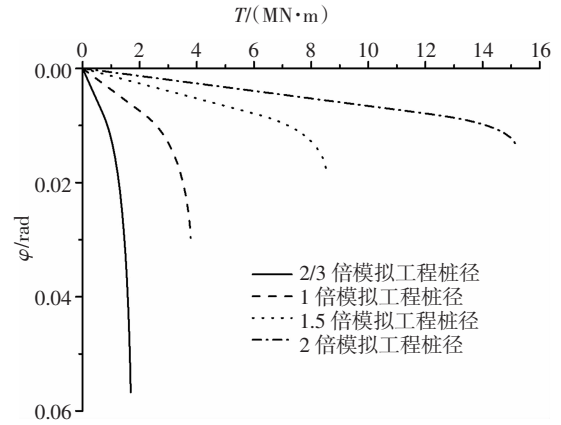


图 9 桩径对楔形桩桩顶  $T-\varphi$  曲线的影响

Fig. 9 Curves on  $T-\varphi$  of tapered pile influenced by diameter

## 4 结论

本文在已有圆形桩扭剪特性相关解答的基础上,推导了纵截面异形桩的受扭性状分析关系式,对比分析几类纵截面异形桩与等截面圆形桩的受扭性能异同点,并开展影响参数研究;得到如下几点主要结论:

- 1) 本文所建立的纵截面异形桩桩-土体系桩身扭矩与扭转角计算模型,以桩侧土中塑性区开展深度为变量,可以分析桩侧土处于弹性与塑性阶段时的桩顶、桩身的扭矩与扭转角的关系,适用于均质土中楔形桩、扩底楔形桩及竹节桩等各类纵截面异形桩.
- 2) 等体积相同条件下,纵截面异形桩的抗扭承载性能要优于等截面圆形桩,且楔形桩的抗扭承载性能相对最好.
- 3) 可以通过合理增大楔形角、桩径或利用桩身剪切模量更高的材料,以提高桩身抗扭承载力.

## 参考文献

[1] WHITBREAD R E. Wind effects on buildings and structures [J]. Nature, 1963, 199(4898): 1049—1050.  
 [2] 陈仁朋, 郑中, 孔令刚, 等. 水平及扭转荷载作用下群桩基础受力分析方法 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1463—1469.  
 CHENG R P, ZHENG Z, KONG L G, et al. Analysis method for pile

- groups subjected to lateral and torsional loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (8): 1463—1469. (In Chinese)
- [3] STOLL U W. Torque shear test of cylindrical friction piles[J]. Civil Engineering, 1972, 42(4): 63—64.
- [4] POULOS H G. Torsional response of piles [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1975, 101(10):1019—1035.
- [5] GEORGIADIS M. Interaction between torsional and axial pile responses [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1987, 11(6): 645—650.
- [6] GEORGIADIS M, SAFLEKOU S. Piles under axial and torsional loads[J]. Computers & Geotechnics, 1990, 9(4): 291—305.
- [7] 邹新军, 丁仕进, 赵灵杰, 等. 水平力(H)-扭矩(T)组合受荷桩承载特性模型实验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 126—133.  
ZOU X J, DING S J, ZHAO L J, *et al.* Experimental study on bearing capacity characteristics of loaded piles under horizontal force(H)-torque(T) combination[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 126—133. (In Chinese)
- [8] RANDOLPH M F. Piles subjected to torsion [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(8): 1095—1111.
- [9] DUTT R N, O'NEILL M W. Torsional behavior of model piles in sand [C]//Geotechnical Practices in Offshore Engineering. Austin: ASCE, 1983: 315—334.
- [10] CHOW Y K. Torsional response of piles in nonhomogeneous soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(7): 942—947.
- [11] ZHANG L M, KONG L G. Centrifuge modeling of torsional response of piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(43): 500—515.
- [12] 邹新军, 徐洞斌, 王亚雄. 成层地基中单桩受扭弹塑性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(9): 72—78.  
ZOU X J, XU D B, WANG Y X. Elastic-plastic torsional behavior of single pile in double-layered non-homogeneous subsoil [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(9): 72—78. (In Chinese)
- [13] 吴文兵, 谢帮华, 黄生根, 等. 考虑挤土效应时楔形桩纵向振动阻抗研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1042—1048.  
WU W B, XIE B H, HUANG S G, *et al.* Vertical dynamic impedance of tapered piles considering compacting effects [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 1042—1048. (In Chinese)
- [14] 王新泉, 陈永辉, 刘汉龙. Y型沉管灌注桩荷载传递机制的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 615—623.  
WANG X Q, CHEN Y H, LIU H L. In-situ study on load transfer mechanism of Y-shaped vibro-pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 615—623. (In Chinese)
- [15] 王智强, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 现浇X形桩竖向承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 903—907.  
WANG Z Q, LIU H L, ZHANG M X, *et al.* Full scale model tests on vertical bearing characteristics of cast-in-place X-section piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 903—907. (In Chinese)
- [16] KONG G Q, YANG Q, LIU H L, *et al.* Numerical study of a new belled wedge pile type under different loading modes[J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2013, 17(S1): 65—82.
- [17] 刘杰, 王忠海. 楔形桩承载力试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2002, 35(2): 257—260.  
LIU J, WANG Z H. Experimental study on the bearing capacity of wedge pile [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2002, 35(2): 257—260. (In Chinese)
- [18] 孔纲强, 杨庆, 年廷凯, 等. 扩底楔形桩竖向抗压和负摩阻力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 503—509.  
KONG G Q, YANG Q, NIAN T K, *et al.* Study of characteristics of compression capacity and negative skin friction for belled wedge pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 503—509. (In Chinese)
- [19] 熊厚仁, 牛志荣, 蒋元海, 等. 新型带肋预应力管桩承载特性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2009, 2(4): 32—35.  
XIONG H R, NIU Z R, JIANG Y H, *et al.* Experimental study on bearing characteristics of new ribbed prestressed pipe pile [J]. China Concrete and Cement Products, 2009, 2(4): 32—35. (In Chinese)