

# 防汛抢险螺旋桩改进设计及沉桩试验

庞洪臣<sup>1</sup>,王玉兴<sup>2</sup>,唐艳芹<sup>2</sup>

(1. 广东海洋大学工程学院,广东 湛江 524088; 2. 华南农业大学工程学院,广东 广州 510642)

**摘要:**为进一步提高防汛抢险螺旋桩的便携性并降低能耗,根据桩土作用原理及力学平衡理论对沉桩阻力进行分析,提出了相应的桩体结构改进措施,即适当减小空心圆柱体外径并保持锥体底面外径不变和适当减小螺旋叶的长度。通过改型前后桩体的现场沉桩试验,得到了沉桩扭矩对比曲线。试验结果表明,两种措施可使防汛抢险螺旋桩的最大沉桩扭矩大幅度下降(分别下降了39.3%和16.5%);防汛抢险螺旋桩的沉桩扭矩存在极值,且改型后的桩体提高了沉桩时桩体截面强度的安全系数;改型后的桩体受到横向载荷后横向位移会有所偏大,但能满足实际使用要求。

**关键词:**螺旋桩;农田水利;防汛抢险;沉桩试验;桩体改进设计

中图分类号:TV223.2<sup>+2</sup>

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)04-0095-04

**Improved design and pile-driven experiment analysis of anti-flood spiral pile**//PANG Hongchen<sup>1</sup>, WANG Yuxing<sup>2</sup>, TANG Yanqin<sup>2</sup> (1. School of Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Based on the pile-soil interaction principle and mechanical equilibrium theory, we analyzed the pile-driven resistance and proposed two relevant measures to improve pile-body structure in order to improve portability and reduce energy consumption of anti-flood spiral pile. The first measure is to properly reduce outside diameter of hollow cylinder with invariable bottom outside diameter of cone, and the second measure is to properly reduce length of spiral blades. Thus, we obtained the contrast pile-driven torque curves by driving original pile and modified pile. The curves show that the maximum pile-driven torque is greatly reduced by 39.3% and 16.5%, respectively, due to the two measures. It also shows that the pile-driven torque of anti-flood spiral pile has an extreme value, and the modified pile increased the safety coefficient of pile section intensity when pile-driven. Moreover, the modified pile still meets the actual requirements although its lateral displacement would be larger than the original pile for lateral load.

**Key words:** spiral pile; irrigation and water conservancy; flood control and risk prevention; pile-driven experiment; improved design of pile body

沉桩作业是农田水利防护和洪涝灾害治理中必不可少的手段,防汛抢险螺旋桩是一种新颖的抢险装备。传统击打沉桩方式效率低、劳动强度大,而大型沉桩机械作业易造成堤坝滑坡、坍塌和裂缝等次生危害。防汛抢险螺旋桩是根据消防部门要求专门设计的一种便携式高效抢险装备,主要用于承受挂缆等横向载荷,它以减速电动机作为动力源对桩体施加旋转扭矩将其旋入土体之中。韦谢恩等<sup>[1-3]</sup>对桩体结构进行了初步设计,并对螺距和螺旋叶宽度进行了优化,但在实际沉桩应用中发现仍然存在沉桩所需扭矩偏大、电动机重量过大等问题。为进一步提高桩体、动力源的便携性及减少能耗,还需对桩

体结构进一步改进。防汛抢险螺旋桩在沉桩过程中桩土作用机理比较复杂,本文结合桩土作用原理及力学平衡理论对沉桩阻力进行了简要分析,在此基础上提出了相应的桩体结构改进措施,设计了沉桩试验并对试验结果进行了对比分析。

## 1 沉桩阻力理论分析

防汛抢险螺旋桩主要由桩体下端锥体、空心圆柱体、螺旋叶、挂缆处及桩顶五大部分组成,如图1所示。沉桩时,减速电动机在桩顶施加旋转扭矩使得桩体克服土体阻力,将电动机输出轴的旋转运动转变成桩体的下旋运动,此时桩端锥体挤压前部土

基金项目:国家自然科学基金(50778075)

作者简介:庞洪臣(1977—),男,山东昌乐人,讲师,博士,主要从事螺旋桩研究。E-mail:panghc123@163.com

通信作者:王玉兴(1963—),男,山东莱阳人,教授,博士,主要从事农业机械装备研究。E-mail:scau.wyx@tom.com

体产生桩端阻力矩、桩侧圆柱体表面与土体摩擦产生桩侧阻力矩、螺旋叶与土体之间的挤压及相对滑动产生螺旋叶阻力矩。

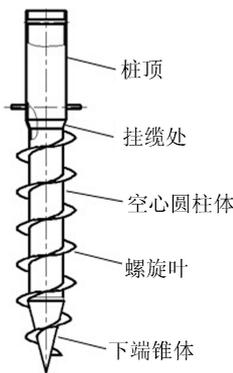


图1 桩体结构示意图

### 1.1 桩端锥体阻力

沉桩过程中土体对下端锥体部分的反作用将产生桩端阻力<sup>[4]</sup>。桩土相互作用有一个十分重要的特性就是在桩土交界处会产生极限应力<sup>[5]</sup>推动土体向周边扩张。根据静压桩贯入地基的球孔扩张-滑动摩擦计算模式<sup>[6]</sup>,旋转时桩端锥体与土体产生的周向摩擦阻力矩 $M_z$ <sup>[7]</sup>可表示为

$$M_z = \frac{2\pi\mu RP_u}{3\sin a} \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为桩土之间的摩擦因数; $a$ 为锥体母线与中心线的夹角; $P_u$ 为锥体对土体的极限扩孔压力; $R$ 为空心圆柱体和锥体底面的半径。

### 1.2 桩侧阻力

根据桩体与桩侧土体作用原理<sup>[8-10]</sup>,桩侧压力将随土体深度的增加而线性增加<sup>[11-12]</sup>。土体与桩侧摩擦产生的周向阻力矩 $M_c$ 可表示为

$$M_c = K\rho gL^2\mu\pi R^2 \quad (2)$$

式中: $K$ 为侧向土压系数(砂土取1~2,黏土、淤泥取1); $\rho$ 为土体有效密度; $L$ 为桩身入土深度。

### 1.3 螺旋叶阻力

沉桩过程中土体对螺旋叶上表面产生下压力推动桩体下沉,但这个下压力同时也会产生沉桩阻力矩;另外螺旋叶与土体之间的相对运动产生的摩擦也会产生阻力矩。假定土体对螺旋叶表面的压力为均布压力<sup>[13-14]</sup>,根据受力分析可得土体压力作用在螺旋叶表面所产生的周向阻力矩为圆锥表面螺旋叶与土体压力产生的周向阻力矩 $M_1$ 和空心圆柱体表面螺旋叶与土体压力产生的周向阻力矩 $M_2$ 之和,土体与螺旋叶摩擦产生的周向阻力矩为圆锥表面螺旋叶与土体摩擦产生的周向阻力矩 $M_3$ 和空心圆柱体表面螺旋叶与土体摩擦力产生的周向阻力矩 $M_4$ 之和, $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 表达式为

$$M_1 = \frac{WL_1P(r+R+W)\sin\beta}{2} \quad (3)$$

$$M_2 = WL_2P\left(R + \frac{W}{2}\right)\sin\beta \quad (4)$$

$$M_3 = \frac{\mu WL_1P(r+R+W)\cos\beta}{2} \quad (5)$$

$$M_4 = \mu WL_2P\left(R + \frac{W}{2}\right)\cos\beta \quad (6)$$

式中: $L_1$ 为锥体部分螺旋叶的长度; $L_2$ 为空心圆柱体部分螺旋叶的长度; $P$ 为土体对螺旋叶的均布压力; $\beta$ 为螺旋叶的螺旋升角; $W$ 为螺旋叶的宽度; $r$ 为螺旋叶的起始点半径。

螺旋桩若要产生匀速下旋运动,根据动力学平衡理论则有外加扭矩 $T$ 等于上述阻力矩的总和:

$$T = M_z + M_c + M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \quad (7)$$

## 2 桩体结构改进措施

根据前述理论分析可知,减少螺旋桩的沉桩阻力矩可以从两个方面考虑:一是缩颈,即适当减小空心圆柱体外径而锥体底面外径不变。根据土体力学特性<sup>[15]</sup>可知,当土体受到挤压时会产生固结现象导致土体的回移量较小,因此沉桩时下端锥体首先将对土体挤压产生扩孔作用,后接空心圆柱体沿其轨迹下行时其外表面将与周边土体之间产生微小空隙,两者之间的摩擦力及阻力矩理论上将变为零,即式(2)中的 $M_c=0$ ;二是适当减小螺旋叶的长度 $L_2$ ,从而会减小螺旋叶与土体之间的摩擦,根据式(4)和(6)可知会减小阻力矩,由式(7)可知上述两种措施均会减小沉桩所需扭矩。

## 3 沉桩试验

### 3.1 试验准备

#### 3.1.1 试验用桩体设计

根据前面的分析,设计制造两个试验桩体,其中一个为未缩颈未减螺旋叶的桩体结构,桩体尺寸如下:总长度为1000 mm,空心圆柱体外径80 mm,壁厚3 mm,螺旋叶宽度35 mm,螺距100 mm,桩身柱体高度500 mm,锥体高度200 mm,桩顶外径114 mm,标记为DLX-WS;将另一个桩体缩颈,即将空心圆柱体半径减小了1个壁厚,其外径由原来的80 mm变为74 mm,其余部分与前者的桩体结构完全相同,标记为DLX-S。

#### 3.1.2 桩体标定

在桩顶同一高度沿桩体表面均布粘贴4个阻值为120  $\Omega$ 的应变片,应变片与桩体轴线的夹角成45°或者135°,使其成为4片均布的双竖八字布置,用

导线将其与动态数据采集系统相连。然后,将螺旋桩用台钳固定加紧,并将事先设计好长度为1m的扭力杆件固定在桩体上部合适的位置。根据防汛抢险螺旋桩实际加载工况确定桩体的标定扭矩范围为0~700 N·m,用7个10 kg的砝码逐次加载,为保证数据采集的稳定性每次加载后均稳定一段时间。分别逐次加载3次,记录砝码重量及其对应的应变值。根据材料力学特性可知标定扭矩与应变值之间应呈线性关系,对所测的数据进行处理后,得到DLX-WS和DLX-S两个桩体的应变值与标定扭矩之间的线性拟合曲线如图2所示。

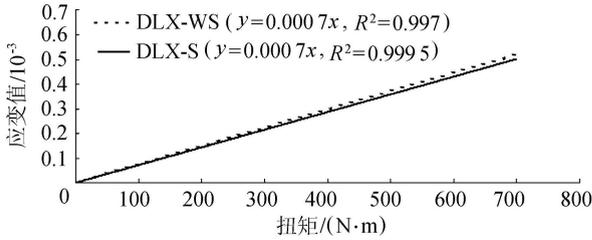


图2 桩体标定曲线

### 3.2 沉桩试验结果分析

#### 3.2.1 桩体缩颈沉桩试验

选取一土质均匀场地,分别对桩体DLX-WS和DLX-S各沉桩3次,测得两个桩体各自对应的应变变化曲线,剔除沉桩过程中桩体与石头等异物接触产生的异常波动数据,根据标定公式换算出各次沉桩所需的最大沉桩扭矩及其均值如表1所示,沉桩扭矩均值对比曲线如图3所示。

表1 缩颈沉桩试验最大沉桩扭矩及其均值 N·m

桩体	最大沉桩扭矩	均值
DLX-WS	493,365,501	453
DLX-S	315,252,258	275

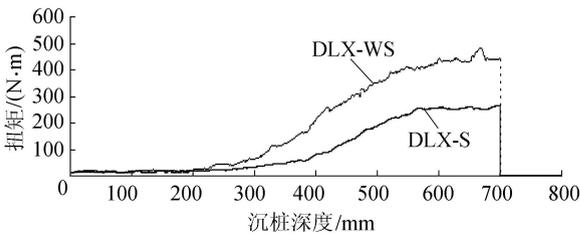


图3 缩颈沉桩试验沉桩扭矩均值

a. 表1中的单次最大沉桩扭矩和均值对比均表明:桩体缩颈后沉桩所需扭矩大幅度下降,其中最大沉桩扭矩均值由未缩颈前的453 N·m降至缩颈后的275 N·m,下降了39.3%,降阻效果明显。

b. 从图3可以看出,两条曲线在沉桩深度约200 mm处,即在桩体下端锥体的高度发生分离,而该分离处恰恰是桩体缩颈的起始位置,之后未缩颈桩体扭矩曲线比缩颈后表现出明显的快速增长趋势,

表明桩体缩颈后由于后端桩身空心圆柱体表面与土体间摩擦的减小导致了沉桩扭矩的降低。

c. 两个桩体的沉桩扭矩均在达到某一沉桩深度后基本保持不变,说明沉桩扭矩存在极值,但DLX-S桩体的沉桩扭矩曲线在深度约550 mm处出现了较为明显拐点,而DLX-WS在沉桩深度约600 mm处才出现拐点,说明缩颈后沉桩扭矩达到极值的位置提前。

#### 3.2.2 减螺旋叶沉桩试验

根据前面提出的改进措施,观察减小螺旋叶长度对沉桩扭矩的影响,为了防止加工桩体产生的误差,采取在原桩体DLX-S基础上去掉最上部2个螺距的螺旋叶,即空心圆柱体表面剩余2个螺距螺旋叶,标记为DLX-S-2,进行3次沉桩试验。然后在桩体DLX-S-2基础上从上部再去掉1个螺距的螺旋叶,即空心圆柱体表面剩余1个螺距螺旋叶,标记为DLX-S-3,再进行3次沉桩试验。桩体DLX-S-2和DLX-S-3的外形对比如图4所示。每次沉桩所需的最大沉桩扭矩及其均值如表2所示,DLX-S、DLX-S-2和DLX-S-3桩体的沉桩扭矩均值曲线对比如图5所示。

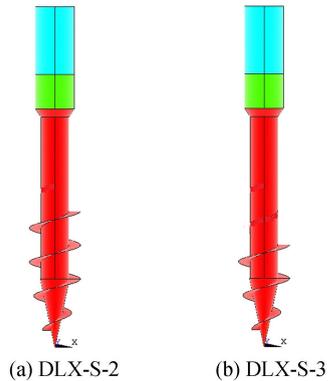


图4 DLX-S-2和DLX-S-3桩体外形

表2 减螺旋叶沉桩试验最大沉桩扭矩及其均值 N·m

桩体	最大沉桩扭矩	均值
DLX-S-2	281,237,225	248
DLX-S-3	209,221,163	200

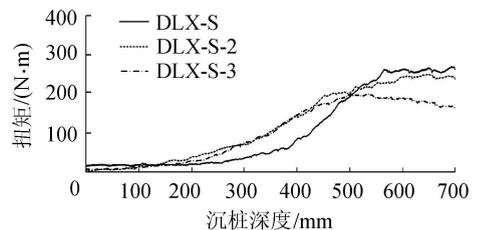


图5 减螺旋叶沉桩试验沉桩扭矩均值

由表1、2及图5可以看出:①减掉2个螺旋叶后沉桩扭矩略有下降,桩体DLX-S-2最大沉桩扭矩均值为248 N·m,而仅缩颈未减螺旋叶的桩体DLX-S最大沉桩扭矩均值为275 N·m,减小了

9.8%。②DLX-S-2 沉桩扭矩均值曲线出现极值的位置明显比 DLX-S 提前,说明去掉最上端的两个螺旋叶后在一定程度上起到了降阻作用,但沉桩扭矩下降得较小,也表明靠近桩顶部位的螺旋叶对沉桩扭矩的影响较小。③第 3 个螺距螺旋叶的去除,沉桩扭矩由 248 N·m 降到 200 N·m,下降了 19.4%,可知靠近下端锥部位置的螺旋叶比其后的螺旋叶产生的阻力矩要大得多。也说明土体对螺旋叶的作用载荷并非均布,这与之前的假设相矛盾。④由于上部第 3 个螺旋叶的去除使得在深度约为 400 mm 处,即靠近去掉第 3 个螺距螺旋叶的起始点,两条曲线产生了分离。与 DLX-S-2 扭矩均值的变化相比,DLX-S-3 的沉桩扭矩表现出增长变缓的趋势使得沉桩扭矩进一步减小。⑤DLX-S-3 扭矩均值曲线在沉桩深度约 500 mm 处出现极值,之后却出现反常的扭矩下降现象,这个现象与其他试验所测得的沉桩扭矩变化曲线不一致。产生这种现象的原因极可能是:当螺旋桩沉降到该位置时,螺旋叶已无法为桩体提供足够的下沉力,土体开始破碎,螺旋桩处在“边钻土边下旋”的状态,导致沉桩扭矩变小。但从沉桩试验的现场来看该桩与前几种桩体在沉桩时间和沉桩效果上相差不大。

### 3.2.3 缩颈后桩体截面强度验算

根据材料力学公式,空心圆柱体的最大应力,即柱体外表面剪切应力和扭矩之间有如下关系:

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_t} \quad (8)$$

其中  $W_t = \frac{\pi D^3(1 - \alpha^4)}{16}$

式中: $T$  为沉桩扭矩; $W_t$  为抗扭截面模量; $D$  为螺旋桩空心圆柱体最大直径; $\alpha$  为空心圆柱体内外直径之比。代入对应的最大沉桩扭矩和几何尺寸,两个桩体沉桩时产生的最大应力之比如下:

$$\frac{\tau_{DLX-WS}}{\tau_{DLX-S-3}} = \frac{T_{DLX-WS}/W_{DLX-WS}}{T_{DLX-S-3}/W_{DLX-S-3}} = 1.92 \quad (9)$$

从式(9)可知,沉桩时改型后桩体 DLX-S-3 表面产生的最大剪切应力约为桩体 DLX-WS 的 1/2,若桩体材料不变则改型后的桩体提高了沉桩时桩体截面强度的安全系数。

## 4 横向载荷对比试验

根据发生洪涝灾害时桩体使用的实际情况,利用消防部队冲锋舟的系缆力作为防汛抢险螺旋桩使用时所承受的横向载荷。消防部队当前主要配备 TZ590 型冲锋舟,冲锋舟紧急救援时水体流速一般在 2.5~3.5 m/s。

根据手册可知,冲锋舟的长、宽、高分别为 6 m、1.9 m 和 0.75 m。经过计算,冲锋舟完全空载整个船体受到 9 级风力作用时受到 2.1 kN 的风成系缆力;而冲锋舟满载后船体最高位置与水面平行时受到水流 3.4 kN 的流成系缆力,这两种情况不可能同时发生,因此取流成系缆力 3.4 kN 作为螺旋桩的最大横向水平受拉载荷。由于试验时横向载荷的施加不好精确控制,因此施加的横向拉力略大于计算值。将两个桩体沉降到相同深度,凸出部分距离地表高度均为 320 mm。为保证两个桩体施加的是相同的横向拉力,使用同一条缆绳连接到两个桩体的顶端,将拉力传感器串接在缆绳和桩体之间。对两个桩体施加如图 6 所示随时间变化的拉力,测得桩体的横向位移如表 3 所示。试验施加的最大横向拉力为 3800 N,已经超出了前面利用冲锋舟计算的系缆力,表 3 中的数据表明在该拉力下改型后的桩体顶部横向位移增大了 61%。同时现场试验表明,两个桩体顶端受到横向拉力后均没有产生拔出现象,桩体没有弯曲等现象发生,满足实际的使用要求。

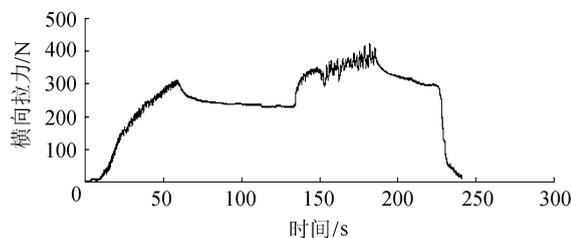


图 6 横向拉力变化曲线

表 3 桩顶横向位移

试验序号	位移/mm		位移增幅/%
	DLX-WS	DLX-S-3	
1	24	51	113
2	51	82	61
3	40	71	78

## 5 结语

从沉桩试验的总体效果来看,缩颈和减小螺旋叶长度措施各自都对防汛抢险螺旋桩的减阻起到了较为明显的效果,沉桩扭矩由最初的 453 N·m 降至 200 N·m,总共下降了 55.8%,其中由缩颈引起的下降为 39.3%。减去上部 2 个螺旋叶使得扭矩下降了 27 N·m,而第 3 个螺旋叶的去除却使得扭矩下降了 48 N·m,约为前者的 1.8 倍,但第 3 个螺旋叶的去除导致沉桩过程的后期有转变为螺旋钻状态的趋势。桩体需要螺旋叶长度多少为最佳还需根据具体参数进一步优化,土体对螺旋叶的作用载荷分布

(下转第 104 页)

Mechanics, 2006, 23 (10): 141-144. (in Chinese))

[21] 谈慕华, 黄蕴元. 表面物理化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 16-28.

[22] 程传焯. 表面物理化学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 3-9.

[23] 王海龙, 李庆斌, 孙晓燕, 等. 水饱和混凝土静力抗拉强度降低细观机理及本构模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16 (1): 65-72. (WANG Hailong, LI Qingbin, SUN Xiaoyan, et al. Mesomechanism of tensile strength reduction and tension constitutive model of saturated concrete [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(1): 65-72. (in Chinese))

[24] WITTMANN F H. Surface energy and fracture energy [C]//The 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London: Taylor & Francis Ltd., 2010: 13-18.

[25] WITTMANN F H. Strength and fracture energy of concrete in seawater [C]//The 6th International Conference on

Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London: Taylor & Francis Ltd., 2007: 213-217.

[26] MATSUSHITA H, ONOUE K. Influence of surface energy on compressive strength of concrete under static and dynamic loading [J]. Advanced Concrete Technology, 2006(4): 409-421.

[27] 孙志伟, 任昭君, 赵铁军. 海水对混凝土断裂能及强度的影响[J]. 混凝土, 2007(7): 9-13. (SUN Zhiwei, REN Zhaojun, ZHAO Tiejun. Influence of seawater on the fracture energy and strength of concrete [J]. Concrete, 2007(7): 9-13. (in Chinese))

[28] 孙志伟, 任昭君, 赵铁军. 液体表面张力对混凝土断裂能及其应变变化的影响[J]. 工程建设, 2007, 39(3): 6-9. (SUN Zhiwei, REN Zhaojun, ZHAO Tiejun. Influence of liquid surface tension on the concrete fracture energy and its strain softening [J]. Engineering Construction, 2007, 39(3): 6-9. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-04-15 编辑: 熊水斌)

(上接第 98 页)

还需进一步探讨。防汛抢险螺旋桩在沉桩过程中沉桩扭矩存在较为明显的极值, 当沉桩到一定深度之后沉桩扭矩将基本保持稳定。改型后的桩体结构提高了沉桩时桩体强度的安全系数, 同时, 改型后的桩体受到横向载荷后横向位移有所变大, 但能满足实际使用要求。

### 参考文献:

[1] 韦谢恩. 防汛抢险螺旋桩沉桩过程仿真研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2010.

[2] WEI Xie'en, WANG Yuxing, TANG Yanqin. Simulation of anti-flood spiral pile driving process based on ANSYS/LS-DYNA [C]//Proceedings of 2010 World Automation Congress. Kobe: Curran Associates, 2010: 239-243.

[3] 王亚利. 防汛抢险螺旋桩头结构参数优化[D]. 广州: 华南农业大学, 2011.

[4] 叶建忠, 周健. 关于桩端阻力问题的分析与研究现状[J]. 建筑科学, 2006, 22(2): 64-68. (YIE Jianzhong, ZHOU Jian. Analysis and review of research on the issue of pile end bearing capacity [J]. Building Science, 2006, 22(2): 64-68. (in Chinese))

[5] POULOS H G. Pile behaviour-theory and application [J]. Geotechnique, 1989, 39(3): 365-415.

[6] 张明义, 邓安福. 静压桩贯入地基的球孔扩张-滑动摩擦计算模式[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 701-704. (ZHANG Mingyi, DENG Anfu. A spherical cavity expansion-sliding friction calculation model on penetration of pressed-in piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 701-704. (in Chinese))

[7] 孙鸣. 钢筋混凝土螺旋桩可行性分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2001, 7(3): 187-190. (SUN Ming. Analysis of the feasibility of reinforced concrete screw pile [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2001, 7(3): 187-190. (in Chinese))

[8] US Army Corps of Engineers. Design of pile foundations [M]. Washington, D. C.: University Press of the Pacific, 1991.

[9] POULOS H G. Pile behaviour-theory and application [J]. Geotechnique, 1989, 39(3): 365-415.

[10] RANDOL M F. Science and empiricism in pile foundation design [J]. Geotechnique, 2003, 53(10): 847-875.

[11] GAVIN K G, LEHANE B M. The shaft capacity of pipe pile in sand [J]. Can Geotech, 2003, 40: 36-45.

[12] ABBAS J M, CHIK Z H, TAHA M R, et al. Time-dependent lateral response of pile embedded in elastoplastic soil [J]. J Cent South Univ, Technol, 2010, 17: 372-380.

[13] KIM N, PARK J S, KIM S K. Numerical simulation of ground anchors [J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(6): 498-507.

[14] MERIFIELD R S, SMITH C C. The ultimate uplift capacity of multi-plate strip anchors in undrained clay [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(4): 504-514.

[15] 周葆春, 王靖涛. 论土体应力应变关系曲线类型和临界状态[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(1): 63-67. (ZHOU Baochun, WANG Jingtao. On the type of stress-strain relation curves and the critical state for soils [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1): 63-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-03-20 编辑: 郑孝宇)