

斜向抗拔螺旋群桩基础承载性状试验研究

董天文¹, 张亚军², 李士伟², 黄连壮³

(1. 辽宁省交通高等专科学校, 辽宁 沈阳 110122; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110004; 3. 辽宁省电力勘测设计院, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 通过3桩等边三角形承台原型群桩基础的4次斜向抗拔、2次垂直抗拔和5次单桩垂直抗拔试验, 绘制了相应的荷载位移关系曲线。依据地基变形特点和曲线变化特征, 建议采用具有明确物理特征的 $H-(\Delta x/\Delta H)$ 曲线判定螺旋群桩基础水平方向极限荷载, 垂直方向抗拔极限荷载依据单位荷载的桩顶位移变化率、桩顶位移增量以及地基变形特征判定, 并讨论了群桩基础在斜向荷载和垂直荷载上拔过程中的群桩效率。试验表明: 抗拔群桩基础的群桩效率与外荷载的作用角度有关, 斜向抗拔螺旋群桩基础的群桩效率小于垂直抗拔群桩基础的群桩效率, 荷载水平分量加快了该种群桩基础的上拔破坏, 斜向抗拔群桩的极限破坏荷载和极限位移要小于垂直抗拔螺旋群桩基础。

关键词: 桩基础; 螺旋桩; 极限荷载; 群桩效率

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0429-05

作者简介: 董天文(1970-), 男, 天津人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: dongtianwen111@163.com。

Bearing capacity of screw pile group determined by inclined pull-out test

DONG Tian-wen¹, ZHANG Ya-jun², LI Shi-wei², HUANG Lian-zhuang³

(1. Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang 110122, China; 2. Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3.

Liaoning Electric Power Survey and Design Institute, Shenyang 110016, China)

Abstract: Through 4 times of inclined pull-out field tests and 2 times of vertical pull-out field tests on a pile group with 3 piles composing an equilateral triangle in plane, and 5 times of vertical pull-out field tests on a screw pile, some curves of load and settlement were drawn. On the basis of the characteristics of ground deformation and the above curves, the horizontal and vertical ultimate loads were respectively estimated by the $H-(\Delta x/\Delta H)$ curve and the composed method of the ratio of displacement to unite load, the incremental displacement of pile head, the characteristics of ground deformation, and the group efficiency were analyzed for the screw pile group under inclined and vertical loads. It is shown that, the group efficiency of pile group is related to the working angle of load, the pull failure of the pile group is quickened by the horizontal component of force, and the ultimate load and displacement of pile group under inclined pull-out load are less than those under vertical pull-out load.

Key words: pile foundation; screw pile; ultimate load; group efficiency

0 前言

由于桩的几何形状、桩间距、承台形式、加载方式以及地基材料的不同, 导致群桩基础的桩土相互作用较单桩复杂, 其承载性状亦因此不同。

目前, 竖向承压群桩基础的承载性状试验研究较多, 与抗拔、水平承载的群桩基础研究相比, 已经得到了较多丰富的试验资料和理论成果, 总结出了对工程设计应用有指导意义的设计参数和方法。随着新结构、新基础形式和施工方法的出现, 还陆续开展了群桩基础的抗水平荷载性能(如抗震性^[1]、水流冲刷^[2])、抗斜向荷载性能^[3-6](如因深基坑降水使原有建筑桩基承受斜向荷载)、抗拔桩的承载机理^[9-14]和极限承载力设计方法^[3,14]等研究工作, 取得了一定的研究成果,

完善了群桩基础设计理论。

螺旋群桩基础是由多根螺旋桩组成, 基桩表面分布有连续的或分层的螺旋形叶片, 通过桩头或桩身施加扭矩旋入地基, 最后浇筑承台混凝土成桩。基桩表面几何非连续, 使得桩土的相互作用比等截面桩群复杂。因此, 对于斜向荷载作用下的螺旋群桩基础的极限荷载判定、群桩效率以及承载性状影响因素等方面的研究, 有助于了解螺旋群桩基础的承载机理, 推动该桩型在建筑、桥梁、道路路堤以及输电塔等领域基础工程的应用。

1 螺旋群桩抗拔试验

1.1 地质条件及群桩参数介绍

试验场地地貌为滨海冲积平原地貌。地下水稳定水位为 4.5 m, 地层从上到下依次为^[15]: ①耕土, 灰褐色, 黏性土颗粒组成, 含植物草根, 很湿, 可塑到流塑状态, 厚度 0.5 m; ②粉质黏土, 灰黑色, 含铁锰结核以及云母, 有腥臭味, 含水率情况为很湿到饱和, 软塑到流塑状态, 厚度 7 m, 含水率平均为 47.18%, 比重 2.69, 湿密度 1.63 g/cm³, 天然重度 15.97 kN/m³, 饱和度 88.63%, 液限 38.87%, 塑限 22.25%, 压缩模量 1.30 MPa, 黏聚力 9.33 kPa, 内摩擦角 2°, 地基承载力 80 kPa; ③粉砂, 灰黑色, 以石英、长石为主, 含云母和淤泥, 饱和, 稍密, 深度超过 7.5 m, 勘察未穿透, 地基承载力 120 kPa。该层为地震液化层, 液化指数 ILE=8, 液化等级为中等液化。场地的粉质黏土层为流塑状态, 4 m 以下麻花钻取样受到限制, 其指标根据临近场地钻探资料选取。

螺旋的桩体和叶片选用钢材 Q235, 钢管直径 0.108 m, 桩体长 5 m, 叶片为三层, 叶片直径 0.65 m, 螺距 0.144 m, 叶片间距为 1.08 m, 端部焊接锥形铸铁墩头 (见图 1)。群桩由三根桩组成, 承台为边长为 1.3 m 的等边三角形, 承台高为 0.8 m, 桩边到承台边为 0.1 m, 桩伸入承台 0.7 m。



图 1 螺旋桩照片

Fig. 1 Photo of screw piles

1.2 群桩基础斜向和垂直抗拔试验

螺旋桩通过人工施加扭矩旋入地基, 达到设计深度后, 在钢管内浇筑 C20 混凝土, 最后施工 C15 承台混凝土。承台混凝土强度达到设计强度的 90% 后, 开始斜向抗拔和竖向抗拔试验。

斜向抗拔试验和竖向抗拔试验 (见图 2) 加载采用人字形加荷架加载, 手板葫芦加力, 拉力表读数, 手板葫芦的额定值大于试验拉力。桩顶位移测量采用经纬仪和标尺。螺旋桩抗拔试验采用维持荷载法, 初始荷载取设计荷载的 10%, 而后加载按设计荷载的 1/7~1/10 增加, 达到抗拔试验破坏终止条件时, 卸载。

群桩基础的斜向抗拔试验共进行 4 次, 试验编号 #1~#4 群桩试验; #5 和 #6 群桩试验是垂直抗拉试验; 单桩的垂直抗拉试验共进行 5 次, 试验编号为 #7—1

到 #7—5。

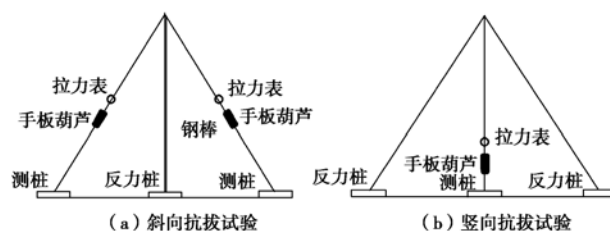


图 2 抗拔试验示意图

Fig. 2 Sketch of pullout tests

2 试验结果分析和极限荷载判定

2.1 群桩基础的垂直抗拔极限荷载判定

借鉴异形桩基础竖向承压极限荷载判定方法——LogP-s 法, 光滑 U-Δ 曲线 (上拔荷载-位移曲线), 见图 3。其中, #3 和 #4 螺旋群桩基础的 LogU-Δ 曲线为所施加的斜向上拔荷载的垂直分量 (U) 的对数和对应的桩顶上拔位移曲线, #5 和 #6 群桩基础施加了垂直上拔荷载。

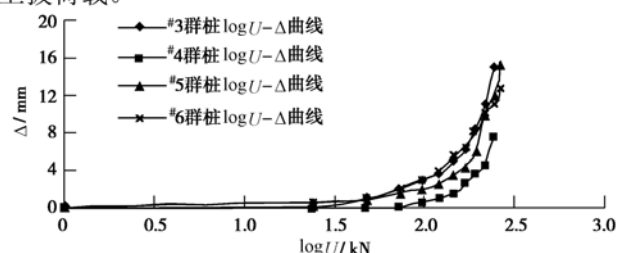


图 3 群桩基础的 LogU-Δ 曲线

Fig. 3 LogU-Δ curves of screw pile group

从图 3 可知, LogU-Δ 曲线与竖向承压桩的荷载位移曲线形式接近, 具有较为明显的初始直线段 (地基弹性变形)、曲线段 (地基弹塑性阶段) 和末端的直线段 (群桩的破坏阶段)。曲线段表明螺旋群桩基础在上拔过程中, 叶片推动地基, 使之发生从弹性到塑性的变化过程, 这与等截面桩的群桩基础上拔过程略有不同。末端的直线段斜率激增, 对应着群桩基础地基出现塑性变形。

依据单位荷载的桩顶位移变化率、桩顶位移增量以及地基变形特征判定的螺旋群桩基础的极限荷载值和对位移分别为: #3 群桩基础为 168 kN、6 mm; #4 群桩基础为 192 kN、4.5 mm; #5 和 #6 群桩基础为 216 kN、10 mm。对于受斜向上拔荷载的群桩基础垂直方向上拔极限荷载平均判定值 180 kN, 平均位移为 4.75 mm (该值为倾斜荷载的垂直分量极限值和极限位移); 垂直上拔的螺旋桩基础平均判定极限荷载为 216 kN, 平均位移 10 mm。

2.2 群桩基础水平极限荷载判定

群桩基础的水平承载能力一般受到承台的几何形式、承台下表面与地基摩擦情况、承台周围填土密实

情况、群桩的桩周地基材料的物理性质以及施工方法等因素有关。群桩基础水平临界荷载和极限承载力的判定方法有水平荷载 - 时间 - 位移曲线法 ($H-t-x$ 曲线)、水平荷载 - 位移双对数曲线法($\text{Log}H\text{-Log}x$ 曲线)和水平荷载 - 位移梯度法 ($H-(\Delta x/\Delta H)$ 曲线) 等判定方法^[16]。本次试验加载方法采用的是持续加载, 因此绘制 $H-x$ 曲线用于研究长期水平载荷作用下的螺旋桩基础承载性状, 见图 4。图 3 和图 4 分别是 $\text{Log}H\text{-Log}x$ 曲线和 $H-(\Delta x/\Delta H)$ 曲线。

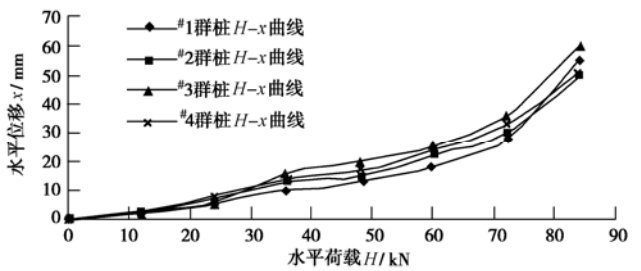


图 4 群桩基础的 $H-x$ 曲线
Fig. 4 $H-x$ curves of screw pile group

从图 4 分析可知, 4 条 $H-x$ 曲线基本在 36 kN 处出现第一拐点, #1, #2, #3 和 #4 群桩水平位移分别为 10, 13, 16 和 14 mm。在 72 kN 处出现明显的第二拐点, #1~#4 群桩的水平位移分别为 28, 30, 36 和 33 mm, 并且曲线的斜率变化率增大。

由于螺旋桩基础的桩体是一种具有较大螺旋形叶片 (直径为 0.65 m) 的异形桩体, 在水平荷载作用下, 单桩的水平反力包括: 桩体的水平反力、部分叶片对地基的压力的抗力水平分量和剩余叶片上部地基自重的水平分量。加载过程中因桩的角度发生变化, 桩周地基抗力和叶片上部地基自重反力的水平分量改变, 地基应力应变发生变化并出现弹塑性变形, 导致曲线发生波动。同时, 因叶片对地基的压缩作用, 使第一和第二拐点呈现出较为明显的曲线段, 表明地基进入弹塑性变形阶段。

图 5 为水平荷载作用下的群桩基础 $\text{Log}H-\text{Log}x$ 曲线。四条曲线基本出现两次陡升段, 第一次从 12 kN 到 36 kN, 可以认为叶片下地基发生弹塑性变形; 随后进入一个相对平缓的区段, 曲线有显著的离散性, 表现出地基硬化特征。在 72 kN 后, 曲线第二次陡升, 开始部分其斜率接近于第一陡升段, 地基发生弹塑性变形阶段; 曲线末段斜率加大, 表明螺旋群桩地基已发生塑性破坏。

图 6 中水平荷载 - 位移梯度曲线出现明显的连续波动现象, 第一波峰的水平荷载为 36 kN, 第二波峰出现在水平荷载为 60 kN 时, 除 #3 群桩外, 第二波峰的位移梯度略大于第一波峰的位移梯度, 但水平荷载

达到 72 kN 后, 位移梯度发生激增。曲线分析表明, 第一波峰后, 地基进入弹塑性变形, 在两个峰值点之间地基有强化现象发生, 叶片抗力发挥, 桩顶水平荷载达到 60 kN 后, 地基发生塑性破坏。

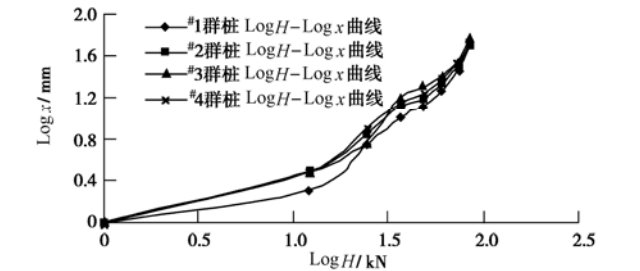


图 5 群桩基础的 $\text{Log}H\text{-Log}x$ 曲线
Fig. 5 $\text{Log}H\text{-Log}x$ curves of screw pile group

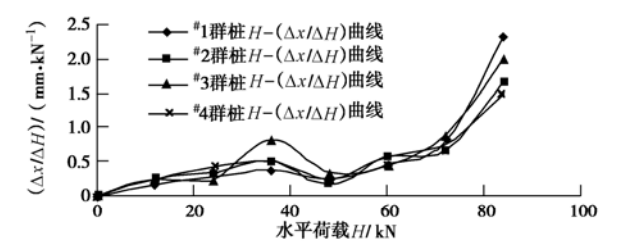


图 6 群桩基础的 $H-(\Delta x/\Delta H)$ 曲线
Fig. 6 $H-(\Delta x/\Delta H)$ curves of screw pile group

表 1 中列出了依据以上 3 种曲线判定的水平载荷作用下的群桩基础临界荷载、极限荷载。方法 1 为使用桩基规范判定的临界荷载和极限荷载, 两种荷载的数据离散性较大; 方法 2 的判定值是依据地基的变形特征从图 4 到图 6 判定的屈服荷载和极限破坏荷载, 偏于安全的临界荷载和极限荷载的判定值分别为 36 kN 和 60 kN, 若取安全系数为 2, 则设计荷载和极限荷载的判定值分别为 30 kN 和 60 kN。

对于异形的螺旋群桩基础来说, 由于桩体结构复杂, 桩体外表面非连续, 进一步加剧了复杂的桩土相互作用, 因此桩基规范条件 (方法 1) 判定的群桩基础水平荷载的临界值或极限值有较大地离散性。通过 $H-x$ 曲线、 $\text{Log}H\text{-Log}x$ 曲线及 $H-(\Delta x/\Delta H)$ 曲线的对比分析, $H-(\Delta x/\Delta H)$ 曲线有较明显的变化特征, 其峰值点的物理意义明确, 判定的螺旋群桩基础的水平向临界荷载值和极限荷载值偏于安全。

表 1 水平临界荷载、极限荷载判定值				
Table 1 Critical and ultimate values of horizontal load				
判定方法	临界荷载/kN		极限荷载/kN	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
$H-x$ 法	36	36	60	72
$\text{Log}H\text{-Log}x$ 法	12	36	—	72
$H-(\Delta x/\Delta H)$ 法	24	36	72	60

3 抗拔螺旋群桩承载性状分析

3.1 斜向和垂直上拔群桩基础的群桩效率对比分析

本次试验中,单桩的垂直上拔试验编号为#7-1 到 #7-5,垂直上拔对数荷载-位移曲线(Log U - Δ 曲线),见图 7。抗拔试验未出现拔出体破坏阶段,因此,综合单位荷载的桩顶位移变化率、桩顶位移增量以及地基变形特征判定桩的平均抗拔极限荷载和平均极限位移分别为 76 kN 和 15.3 mm。

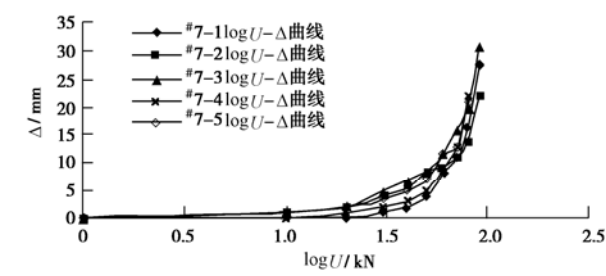


图 7 螺旋单桩的 Log U - Δ 曲线
Fig. 7 Log U - Δ curves of screw piles

根据文献[17],对于水平荷载作用的有限嵌固低承台群桩而言,群桩效率一般大于 1。本文试验的承受垂直上拔力的螺旋群桩基础的群桩效率为 0.947,略小于 1,其原因与桩侧叶片围成的群桩地基中桩土相互作用减弱有关。斜向上拔螺旋群桩基础(荷载与承台夹角为 60 度)的群桩效率为 0.789,该值是斜向上拔群桩极限承载力同 3 根垂直上拔单桩平均极限承载力的比。由于荷载水平分量的影响,加速了桩周地基的塑性破坏,从而导致了斜向上拔群桩的竖向极限承载力和群桩效率比垂直上拔群桩降低了 20%。

垂直上拔的群桩效率要高于斜向上拔群桩的群桩效率,但对于群桩效率随荷载角度的变化规律应进一步通过试验讨论。

表 2 极限荷载与群桩效率

Table 2 Estimated ultimate load and group efficiency			
桩型及荷载工况	判定垂直方向平均极限荷载/kN	对应位移/mm	群桩效率
垂直上拔单桩	76	15.30	—
垂直上拔群桩	216	10.00	0.947
斜向上拔群桩	180	4.75	0.789

3.2 水平荷载分量对竖向承载力的影响

螺旋群桩基础的上拔荷载的作用角度不同,群桩的承载性状不同。倾斜荷载作用的群桩基础,荷载的水平分量(H)以桩端为轴,推动桩身一侧叶片(沿力的方向)压缩地基(地基压力为 f_1),桩身另一侧叶片向上推动地基(地基压力为 f_2),加速叶片周围地基的塑性滑移,地基的塑性变形加快,群桩承台的位移增加,导致斜向上拔的群桩基础破坏要快于垂直上拔

的群桩基础,见图 8。

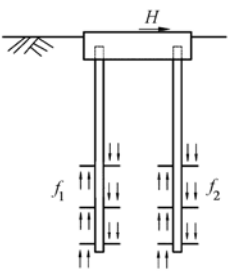


图 8 斜向载荷叶片周围地基受力简图

Fig. 8 Ground around laminae under the inclined load

从 2.1 节中可知,斜向上拔群桩基础(#3 和#4)的平均极限荷载值(180 kN)小于垂直上拔群桩基础(#5 和#6)的平均极限荷载值(216 kN)约 17%,平均位移从 4.75 mm 增大到 10 mm。试验结果表明:在荷载水平分量的作用下,叶片推动地基产生塑性滑动,加速了地基破坏,呈现出斜向上拔群桩基础的极限荷载和极限位移一般小于垂直上拔的群桩基础。

4 结 论

本文依据对斜向抗拔群桩荷载位移曲线特征和地基变形特点分析,建议采用具有明确物理特征的 H -($\Delta x/\Delta H$)曲线判定螺旋群桩基础水平方向极限荷载,垂直方向抗拔极限荷载依据单位荷载的桩顶位移变化率、桩顶位移增量以及地基变形特征判定。讨论了群桩基础在斜向荷载和垂直荷载上拔过程中基础的群桩效率,试验表明抗拔群桩基础的群桩效率与外荷载的作用角度有关,斜向抗拔螺旋群桩基础的群桩效率小于垂直抗拔群桩基础的群桩效率,荷载水平分量加快了群桩基础的抗拔破坏,斜向抗拔群桩的极限破坏荷载和极限位移要小于垂直抗拔的螺旋群桩基础。

致谢:感谢全体螺旋桩抗拔试验的工作人员。

参考文献:

- [1] MYLONAKIS George, NIKOLAOU Aspasia, GAZETAS George. Soil-pile-bridge seismic interaction: kinematic and inertial effects, part i: soft soil[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26: 337 - 359.
- [2] YUKSEL Ayse, CELIKOGLU Yesim, CEVIK Esin, YUKSEL Yalcin. Jet scour around vertical piles and pile groups[J]. Ocean Engineering, 2005, 32: 349 - 362.
- [3] 谢 涛, 蒋泽中, 马庭林, 袁文忠. 组合荷载下超大群桩受力变形模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 171 - 176. (XIE Tao, JIANG Ze-zhong, MA Ting-lin, YUAN Wen-zhong. Physical model assessment of the deformation

- behavior of a super-large pile group under the combined load[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, **12**(2): 171 - 176. (in Chinese))
- [4] 龚 健, 陈仁朋, 陈云敏, 程光明, 应建国. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(20): 3541 - 3546. (GONG Jian, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, CHENG Guang-ming, YING Jian-guo. Prototype testing study on micropiles under lateral loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(20): 3541 - 3546. (in Chinese))
- [5] 王 钊, 刘祖德, 程葆田. 螺旋锚的试制和在基坑支护中的应用[J]. *土木工程学报*, 1993(4): 47 - 53. (WANG Duo, LIU Zu-de, CHENG Bao-tian. Trial-produce of crew anchor and its application in fencing foundation pit[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1993(4): 47 - 53. (in Chinese))
- [6] 赵明华, 李微哲, 单远铭. DX 桩抗拔承载机理及设计计算方法研究[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(2): 199 - 203. (ZHAO Ming-hua, LI Wei-zhe, SHAN Yuan-ming. Study on uplift mechanism and calculation of DX pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(2): 199 - 203. (in Chinese))
- [7] ADAMS J I, HAYES U C. The uplift capacity of shallow foundations[J]. *Ontario Hydro Research Quarterly*, 1967, **19**(1): 1 - 13.
- [8] UDWARI J J, RODGERS T E, SINGH H. A rational approach to the design of high capacity multi-helix screw anchors[C]// 7th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dames & Moore Washington D C, 1979: 606 - 610.
- [9] CLEMENCE S P, PEPER F D. Measurement of lateral stress around multi-helix anchors in sand[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1984, **7**(3): 145 - 152.
- [10] HANNA A M, GHALY A. Ultimate pullout resistance of groups of vertical anchors[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(5): 673 - 682.
- [11] 郭方胜. 倾斜螺旋锚片锚杆上拔性能室内试验研究[J]. *武汉冶金科技大学学报*, 1997, **20**(4): 453 - 457. (GUO Fang-sheng. Experimental studies on the behavior of inclined anchors in sand[J]. *Journal of Wuhan Yejin University of Science and Technology*, 1997, **20**(4): 453 - 457. (in Chinese))
- [12] 陈基成, 柏文正, 魏文伯. 小型螺旋锚的快拉试验和研究[J]. *水利水运科学研究*, 1999(3): 296 - 301. (CHEN Ji-cheng, BAI Wen-zheng, WEI wen-bo. The fast pulling experiment and research on minitype screw anchor[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1999(3): 296 - 301. (in Chinese))
- [13] A B Chance Co. Helical pier foundation systems[R]. Bulletin: Hubbell Inc, 2000: 1 - 12.
- [14] 汪 滨. 螺旋锚技术及其在工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 31 - 45. (WANG Bin. The technique and use of screw anchor in engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 辽宁省电力勘测设计院. 螺旋锚基础试验研究[R]. 沈阳: 辽宁电力勘测设计院, 2002: 12 - 13. (Electric and Reconnaissance Research of Liaoning. Testing and research of screw anchor[R]. Shenyang: Electric and Reconnaissance Research of Liaoning, 2002: 12 - 13. (in Chinese))
- [16] 沈保汉. 桩基础测试、勘察、设计和施工(十三)——群桩的水平承载力及影响桩水平承载力的因素[J]. *工业建筑*, 1991(10): 43 - 49. (SHEN Bao-han. Test, prospecting, design and construction of pile foundation (XIII)—The lateral bearing capacity of pile group[J]. *Industrial Construction*, 1991(10): 43 - 49. (in Chinese))
- [17] 刘金砺. 桩基研究与应用若干问题浅析[J]. *岩土工程界*, 2000, **3**(2): 10 - 14. (LIU Jin-li. Explanation for some using and study questions of pile foundation[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2000, **3**(2): 10 - 14. (in Chinese))