

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.022

输电塔基础斜桩非线性 p - y 曲线

杨征宇¹, 杨 剑^{2,3}, 王天慧¹, 程永锋⁴

(1. 新疆生产建设兵团农一师勘测设计院, 新疆 阿克苏 843000;

2. 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;

3. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092; 4. 国家电网北京电力建设研究院, 北京 100055)

摘要:为了解黏性土中斜桩对侧向荷载作用的响应规律,利用非线性 p - y (土抗力-挠度)曲线法研究了斜桩特性.基于试验得到的斜桩土抗力分布曲线,将斜桩理想化为梁单元,土体离散为弹塑性弹簧单元,通过自编计算机程序对斜桩非线性 p - y 曲线进行了计算和分析.结果表明:计算得到的 p - y 曲线与试验结果吻合较好,轴向荷载引起的负斜桩沉降小于正斜桩.在相同侧向荷载作用下,负斜桩桩身挠度和内力均小于正斜桩.负斜桩具有侧向承载力大而变形小的工程特性,工程设计应尽量采用负斜桩布置形式.

关键词:输电塔;斜桩;侧向荷载; p - y 曲线

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2010)01-0104-05

p - y (土抗力-挠度)曲线法^[1-4]是一种弹塑性法,它考虑了土体的非线性特性、分层特性以及荷载类型等因素,特别适用于侧向荷载作用下有较大变位的桩结构分析^[5-6].由于 p - y 曲线可以较真实地反映土的应力-应变关系,因此 p - y 曲线法成为目前桩受侧向荷载计算最为流行的方法.

输电塔基础除了会受到上部结构的自重荷载作用外,还常会受到风荷载和地震荷载等侧向荷载的作用,为了提高这类基础的侧向承载力,通常采用斜桩基础形式.根据斜桩所受侧向荷载与桩倾斜的方向^[7-8]或斜桩与土体作用的滑移面挠曲形状^[9-10],可将斜桩分成正斜桩和负斜桩 2 种.由于负斜桩(荷载方向与桩倾斜方向相反或挠曲面向下)能提供更大的侧向土抗力,因而其应用更为广泛.目前,斜桩已在我国电力建设中得到应用,但相关的理论分析则较少^[11],尤其是雪灾造成的我国南方大部分地区输电线路基础的损毁,暴露出了输电线路基础设计方面存在的问题.本文基于直桩基础的 p - y 曲线理论以及斜桩受侧向荷载相关试验的土抗力分布规律,编制出了求解斜桩受侧向荷载的弹塑性 p - y 曲线程序,分析了斜桩受侧向荷载的桩身内力特性.

1 斜桩 p - y 曲线法

1.1 p - y 曲线理论

当桩顶受到较大侧向力作用后,桩附近的土从土体表面开始屈服,塑性区逐渐向下扩展.根据 p - y 曲线法的假设,弹性区地基反力规律符合弹性虎克定律,塑性区地基反力为常量(极限地基反力),故由弹性区与塑性区边界上的连续条件可求得桩的侧向土抗力,如图 1 所示.求解桩 p - y 曲线的关键是要确定桩受侧向荷载的土体表面下不同深度 p 与 y 的关系,其中 p 为土体对桩身的反力, y 为桩的挠度.

非线性土弹簧 p 与 y 的关系通常采用双曲线函数^[12]来表达,即

$$p = \frac{y}{k^{-1} + yp_u^{-1}}$$

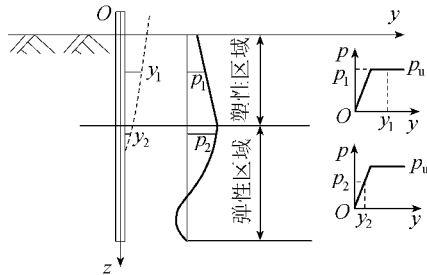


图 1 桩受侧向荷载的 p - y 曲线

Fig. 1 p - y curves for laterally loaded piles

(1)

其中

$$k = 1.3 \sqrt{\frac{E_s D^4}{EI} \frac{E_s}{1 - \nu^2}} \tag{2}$$

式中： p_u ——极限土抗力； k —— p - y 曲线的初始刚度； E_s ——土体弹性模量； D ——桩身直径； E ——桩身弹性模量； I ——桩身惯性矩； ν ——土体泊松比。

Bowles^[13]通过对大量试验资料的分析,得出了式(2)的简化表达式

$$k = 1.2 \frac{E_s}{1 - \nu^2} \tag{3}$$

极限土抗力 p_u 表达式^[4]为

$$p_u = N_p c_u D \tag{4}$$

其中

$$N_p = \begin{cases} 3 + (\rho g z / c_u) + J(z/D) & (z < z_R) \\ 9 & (z \geq z_R) \end{cases} \tag{5}$$

$$z_R = \frac{6D}{\rho g D / c_u + J} \tag{6}$$

式中： c_u ——黏土不排水剪切强度； N_p ——承载力系数,土体表面 $N_p = 3$ ； ρ ——土体密度； g ——重力加速度； J ——经验系数,在 0.25 ~ 0.50 之间取值； z_R ——土体表面以下桩侧土抗力变化深度。

1.2 斜桩 p - y 曲线法的应用

相对于直桩来说,斜桩非线性 p - y 曲线法的研究较少.典型的输电塔斜桩基础如图 2 所示.横山幸满^[5]指出,含有斜桩的桩结构物必须用 p - y 曲线法进行分析计算.尽管斜桩受到的是侧向荷载,但土抗力不仅受到土体非线性因素的影响,而且受到轴向荷载的影响.斜桩局部坐标系下单元体受力如图 3 所示,斜桩极限土抗力如图 4 所示.将负斜桩沿桩身轴线方向的荷载分解成侧向和上拉荷载,正斜桩沿桩身轴线方向的荷载分解成侧向和下压荷载,假定轴向力处于平衡状态,不考虑桩侧面的摩擦力^[5],则可得到斜桩桩身挠曲微分方程

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + N \frac{d^2 y}{dz^2} - p(y, z) = 0 \tag{7}$$

式中： N ——轴力； $p(y, z)$ ——点 (y, z) 处的土抗力。

由式(7)可见,斜桩桩身挠曲微分方程考虑了轴向荷载的影响. Meyerhof 等^[7-8]的试验分析结果表明,在侧向荷载作用下,负斜桩的极限承载力最大,直桩的极限承载力次之,正斜桩的极限承载力最小.在侧向荷载作用下,桩的承载力大小与桩侧土抗力分布形式(p - y 曲线)密切相关,桩利用桩周土抗力来承担侧向荷载.在侧向荷载作用下,桩会变位,并将使桩周土发生相应的变形,从而产生相应的抗力,这一抗力会阻止桩位移进一步产生.因此,斜桩极限土抗力分布规律是斜桩 p - y 曲线法应用的关键.根据 Meyerhof 等^[7-9]的研究结果,对侧向荷载作用下斜桩的极限土抗力分布采用以下假设:(a)负斜桩极限土抗力沿桩长均匀分布,其值为 $9c_u$;(b)正斜桩极限土抗力地表为 $3c_u$,并随深度线性增加,在深度 z_R 处达到最大值 $9c_u$,然后保持不变.由此假设可以得出斜桩极限土抗力分布,如图 4 所示.有了斜桩极限土抗力分布,就可以由桩基础 p - y 曲线的数学表达式即双曲线函数,得到桩身不同深度的 p - y 关系,从而可进行侧向荷载作用下的斜桩的简化弹塑性分析。

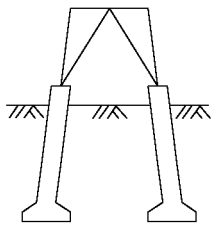


图 2 输电塔斜桩基础
Fig. 2 Configuration of batter piles for transmission tower

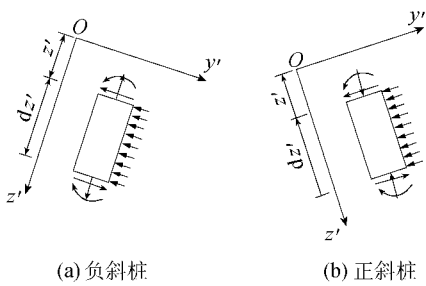


图 3 局部坐标系下桩单元受力示意图

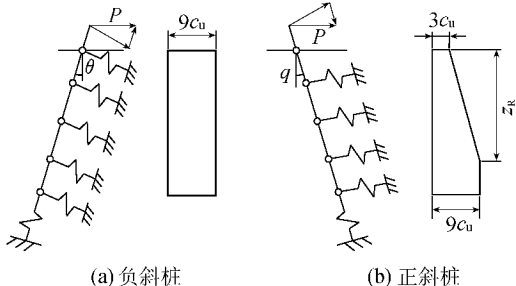


图 4 斜桩极限土抗力分布

Fig. 3 Force equilibrium of elements of batter piles in local coordinate system

Fig. 4 Distribution of ultimate soil resistance along depth of batter piles

2 斜桩 p - y 曲线的逐次渐近解法

为了能把反映斜桩动态变化的 p - y 曲线引入斜桩结构的计算中,采用逐次渐近解法^[5]进行求解.首先,进行第 1 次增量荷载下的线弹性分析,求得弹簧力.然后将弹簧力与极限土抗力进行比较,如果弹簧力大于极限土抗力,则认为弹簧刚度为零,节点力等于施加在挠度相反方向上的极限土抗力.这一过程改变了下一次迭代的节点刚度矩阵和力矢量,重复迭代循环直至得到桩身结果.具体求解过程如下^[5,13-14]:(a)建立斜桩-土相互作用的 Winkler 梁-弹簧结构体系分析模型;(b)假定土体为弹性体,确定第 1 次近似计算时模型各节点初始土抗力系数;(c)在桩顶施加荷载,求得 Winkler 梁各节点位移 y_i ;(d)根据 y_i 求得各节点的土抗力 p_i ;(e)根据 y_i 在 p - y 曲线上查得相应的 p'_i ,如果 p'_i 与 p_i 的差值大于或等于某一较小的容差,则转到(c)步进行迭代计算,直至桩身各节点的弯矩、剪力和轴力计算结果满足要求为止.

为了验证本文计算方法的合理可行性,根据上述求解过程,首先采用 Fortran90 语言编制了求解斜桩侧向荷载作用下的 p - y 曲线程序,并利用该程序计算(J 取 0.25)得到了倾角为 $+30^\circ$ 和 -30° 的斜桩桩侧侧向 p - y 曲线,然后将该计算结果与 Ranjan 等^[15]所得到的埋入软土深度为 360 mm,桩身直径为 9.5 mm,壁厚为 1 mm,倾角为 $+30^\circ$ 和 -30° 的铝桩侧向荷载作用下桩顶侧向 p - y 特性试验结果进行了比较(图 5).Ranjan 等^[15]试验铝桩和土体的物理性质指标如表 1 所示.由图 5 可知,计算与试验结果有较好的一致性.这说明求解桩顶侧向 p - y 曲线时考虑斜桩与土之间的非线性相互作用是有意义的,也就是说,本文计算方法是合理可行的.

3 斜桩侧向荷载作用下 p - y 曲线分析

利用自编的 p - y 曲线程序求解了一受侧向荷载的斜桩,分析了斜桩桩身内力变化规律及桩侧土的塑性区发展过程.计算所采用的土体材料参数(表 2)取自文献^[16],假设刚性混凝土斜桩的埋入深度为 9 m,直径为 1 m,露头高度为 1 m,并以最常用的桩顶自由、桩端嵌固为约束条件,分别在倾角为 $+15^\circ$ 和 -15° 的斜桩桩顶沿 x 正向施加 500 kN,1 000 kN 和 1 500 kN 的侧向荷载.

负斜桩由于桩侧极限土抗力均匀分布,沿桩侧不同深度的 p - y 曲线完全一样,如图 6(a)所示.正斜桩存在土抗力减小区,用式(6)计算 z_R ,并取 $J = 0.25$,得 $z_R = 5.5$ m,沿桩侧不同深度的 p - y 曲线如图 6(b)所示.

从图 7(a)可以看出,在相同侧向荷载下,负斜桩的侧向挠度小于正斜桩.原因是正斜桩的上段极限土抗力小于负斜桩,在相同荷载下,正斜桩桩侧土先于负斜桩达到极限抗力,随着荷载的增加,土体塑性区进一步扩展并向桩身下部传递.

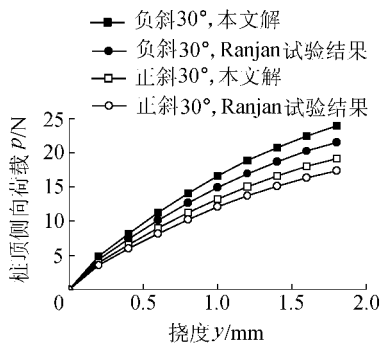


图 5 本文计算与 Ranjan 等^[15]试验得到的 p - y 曲线对比

Fig. 5 Comparison between p - y curves of present study and test results of Ranjan et al. ^[15]

表 1 铝桩和土体的物理性质指标

Table 1 Physical properties of aluminum piles and soil			
材料	弹性模量/ MPa	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa
土	6	1.8	15.2
铝	73 100	2.0	

表 2 混凝土桩和土体的物理性质指标

Table 2 Physical properties of concrete piles and soil			
材料	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa
土	11	0.45	21.7
混凝土	30 000	0.30	2.00

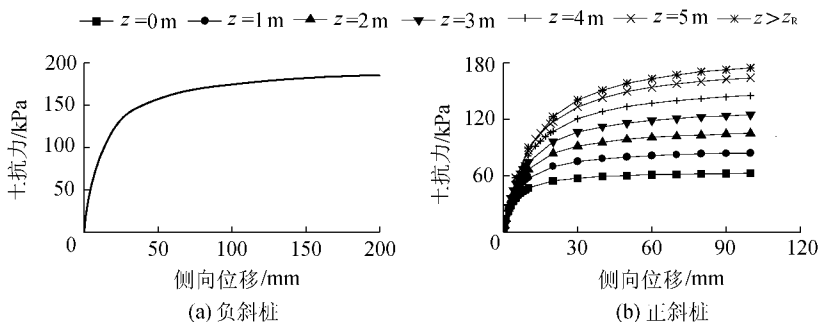


图 6 斜桩 p - y 曲线

Fig. 6 p - y curves for batter piles

从图 7(b)可以看出,负斜桩的沉降小于正斜桩.原因是负斜桩受轴向上拔荷载作用,而正斜桩受轴向下压荷载作用.

从图 7(c)可以看出,在相同荷载作用下,桩顶剪力最大,剪力随着 z 的增大而逐渐减小,但负斜桩的桩身剪力要明显小于正斜桩.

从图 7(d)可以看出,正、负斜桩的轴力方向相反,大小基本相同.原因是负斜桩受轴向上拔荷载作用,而正斜桩受轴向下压荷载作用.

从图 7(e)可以看出,桩顶弯矩很小,桩底弯矩较大,负斜桩的桩身弯矩明显小于正斜桩.原因是:负斜桩受上拔荷载作用,一定程度上减小了桩身受侧向荷载作用产生的弯矩.正斜桩受轴向下压荷载作用,增大了桩身受侧向荷载作用产生的弯矩.

从图 7(f)可以看出,桩身上部土抗力达到了极限,即桩身上部土体已进入塑性区,而桩身下部土体还处于弹性区.这说明, p - y 曲线法对土体不同工作性状所采取的不同分析方法更符合实际.随着侧向荷载的增大,桩侧土体进入塑性区的范围也越来越大,桩下半部分仍处于弹性区.从图 7(f)还可以看出,由于正斜桩从地表到 z_R 范围内的土抗力较小,因此在相同侧向荷载作用下,正斜桩侧的上半部分土体要先于负斜桩达到极限抗力而破坏,这也是正斜桩比负斜桩侧向极限承载力小的一个主要原因.

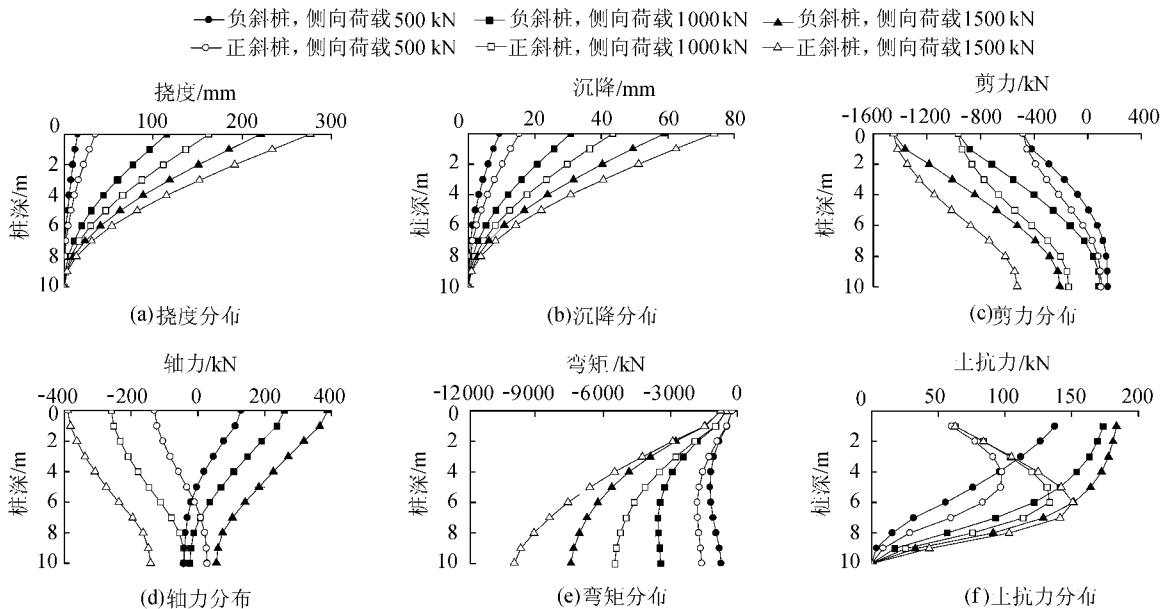


图 7 斜桩受侧向荷载作用的特性

Fig. 7 Properties of laterally loaded batter piles

4 结 论

本文基于黏性土中斜桩受侧向荷载作用的双曲线土抗力分布,利用自编的考虑斜桩与土接触非线性特性的 p - y 曲线法有限程序,对受侧向荷载的斜桩进行分析,探讨了斜桩受侧向荷载作用的特性,并得出以下结论:(a)侧向荷载沿桩轴线的轴向分量对斜桩特性的影响显著.由于正斜桩受轴向下压荷载作用,负斜桩受轴向上拔荷载作用,使得正斜桩桩身沉降大于负斜桩桩身沉降.(b)负斜桩的侧向承载力和极限土抗力大于正斜桩的侧向承载力和极限土抗力,相应地,负斜桩桩身的挠度、剪力和弯矩都小于正斜桩桩身的挠度、剪力和弯矩,这体现了负斜桩承载力大和受力合理的特性.(c)随着侧向荷载的增大,桩侧土体进入塑性区的范围越来越大,桩下半部分仍处于弹性区,这较好地反映了土体屈服和破坏范围逐渐扩展的渐进性现象.

本文只进行了输电塔 15° 斜桩基础受侧向静力荷载作用的简化弹塑性 p - y 曲线分析,对输电塔来说,更多的是受风荷载等循环荷载的作用,在循环荷载作用下,不同倾角斜桩土抗力的变化需通过试验确定.

参考文献:

[1] MATLOCK H S. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay [C]//Proceedings of 2nd Offshore Technology Conference. Houston, Texas: [s. n.], 1970: 577-593.

- [2] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded piles in sand[C]//Proceedings of 6th Offshore Technology Conference. Houston, Texas :[s. n.], 1974 473-485.
- [3] REESE L C, WELCH R C. Lateral loadings of deep foundations in stiff clay[J]. ASCE Journal Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(7) 633-649.
- [4] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay[C]//Proceedings of 7th Offshore Technology Conference. Houston, Texas :[s. n.], 1975 672-690.
- [5] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清, 吴庆荪, 译. 北京 中国铁道出版社, 1984.
- [6] 苏静波, 邵国建, 刘宁. 基于 p - y 曲线法的水平受荷桩非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10) :1781-1785. (SU Jing-bo, SHAO Guo-jian, LIU Ning. Nonlinear finite element analysis of piles under lateral load based on p - y curves [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10) :1781-1785. (in Chinese))
- [7] MEYERHOF G G, YALCIN A S. Behaviour of flexible batter piles under inclined loads in layered soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30 247-256.
- [8] ZHANG L M, MCVAY M C, HAN S J, et al. Effects of dead loads on the lateral response of battered pile groups [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3) 561-575.
- [9] RAJASHREE S S, SITHARAM T G. Nonlinear finite-element modeling of batter piles under lateral load [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2001, 127(7) 604-612.
- [10] RAMAKRISHNA V G S T, RAO S N. Laterally loading pile bents in marine clay [J]. Geotechnical Engineering, 2003(1) 1-11.
- [11] 鲁先龙, 程永锋. 我国输电线路基础工程现状与展望 [J]. 电力建设, 2005, 26(11) 25-27. (LU Xian-long, CHEN Yong-feng. Current status and prospect of transmission tower foundation engineering in China [J]. Electric Power Construction, 2005, 26(11) 25-27. (in Chinese))
- [12] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFIEKOU S. Cyclic lateral loading of piles in soft clay [J]. Geotechnical Engineering, 1992 (23) 47-60.
- [13] BOWLES J E. 基础工程结构分析及程序 [M]. 胡人礼, 陈太平, 林亚超, 译. 北京 中国铁道出版社, 1982.
- [14] 赵明华, 邬龙刚, 刘建华. 基于 p - y 曲线法的承重阻滑桩内力及位移分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6) :1220-1225. (ZHAO Ming-hua, WU Long-gang, LIU Jian-hua. Inner-force and displacement analyses of load-bearing and anti-slide piles by p - y curve method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6) :1220-1225. (in Chinese))
- [15] RANJAN G, RAMASAMY G, TYAGI R P. Lateral response of batter piles and pile bents in clay [J]. Indian Geotechnical Journal, 1980, 10(2) 135-142.
- [16] ZHAO H Y, JEREMIC B. Numerical analysis of pile behaviour under lateral loads in layered elastic-plastic soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(14) 1385-1406.

Nonlinear p - y curve for batter piles in foundation of transmission towers

YANG Zhen-yu¹, YANG Jian^{2, 3}, WANG Tian-hui¹, CHENG Yong-feng⁴

(1. Survey and Design Institute of First Agricultural Division, Production and Construction Corps in Xinjiang, Aksu 843000, China ;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China ;

4. Beijing Electric Power Construction Research Institute of SGCC, Beijing 100055, China)

Abstract : The nonlinear p - y (load-deflection) curve method was employed to analyze the properties of batter piles in order to understand the response of batter piles in cohesive soil to lateral loads. Based on the distribution curves of soil resistance of batter piles in tests, the nonlinear p - y curve method for batter piles was developed and analyzed using a computer program in which the piles were idealized as beam elements and the soil as elasto-plastic spring elements. The results show that the calculated results of p - y curves agree with the test ones. The settlement of negative batter piles induced by the axial loads is smaller than that of the positive batter piles. The deflection and internal force of the negative batter piles are smaller than those of the positive batter piles under the same lateral loads. The negative batter piles have higher lateral bearing capacity and relatively smaller deformation compared with the positive batter piles. Accordingly, the negative batter piles should be employed as much as possible in the design of projects.

Key words : transmission tower ; batter pile ; lateral load ; p - y curve