

文章编号: 1001-1986(2016)06-0119-05

# 承台下摩擦倾斜桩工作性状分析

朱进军, 邵 勇, 马庆华

(连云港职业技术学院建筑工程学院, 江苏 连云港 222006)

**摘要:** 为了分析未经处理倾斜桩的承载力特性, 以连云港海相软土地区为例, 经过对倾斜桩的现场调查及实测数据的分析, 建立了承台—倾斜桩体系数值模型, 通过数值计算分析得到: 桩体倾斜程度对承台—倾斜桩体系承载力的影响存在阈值, 且桩体倾斜方向不同时其阈值也不同, 当倾斜程度为 4%之后承台—水平向倾斜桩的承载力有所降低, 当倾斜程度为 6%之后承台—垂直向倾斜桩的承载力有所降低, 另外从位移及内力分析来看, 桩体垂直向倾斜时的承台水平向位移及桩身弯矩较水平向倾斜时要小。

**关 键 词:** 桩基工程; 倾斜群桩; 承台; 承载力; 数值模拟

**中图分类号:** TU437    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.06.022

## Analysis on bearing capacity behavior of cap-inclined pile

ZHU Jinjun, SHAO Yong, MA Qinghua

(Department of Architectural Engineering, Lianyungang Technical College, Lianyungang 222006, China)

**Abstract:** In order to analyze the bearing capacity characteristics of untreated inclined pile, Lianyungang marine soft soil areas was taken as example, through on-site investigation and analysis of measured data of inclined pile, numerical model of cap-inclined pile system was established. It was obtained through numerical calculation and analysis that there was a threshold for the influence of tilt degree on the bearing capacity of the cap-inclined pile system and the tilt direction of the pile affected its threshold, when the tilt was 4%, bearing capacity of horizontal inclined pile degresed to some extent, when the tilt was 6%, the bearing capacity of vertically inclined pile decreased to some extent. In addition, from analysis of displacement and internal force, the horizontal displacement and the bending moment of vertical inclined pile were smaller than that of horizontal inclined pile.

**Keywords:** pile foundation engineering; inclined pile group; cap; bearing capacity; numerical simulation

由于软土的工程性质较差, 桩基础是最为常用的基础形式, 但是由于软土的特殊性及施工扰动, 桩体倾斜事故时有发生<sup>[1-3]</sup>, 而对于倾斜事故的处理每年均造成大量的经济损失, 仅以连云港地区为例, 每年约有上万米的倾斜桩出现, 给工程建设带来了极大的困扰。因此倾斜桩的利用与处理一直是工程建设者比较关心的问题。

国内外一些学者对倾斜桩的工作性状已有研究, 并取得了一定成果, 郑刚等<sup>[4]</sup>、王起龙等<sup>[5]</sup>、王新泉等<sup>[6]</sup>采用模型试验、数值模拟等手段对单根倾斜桩的承载力特性以及倾斜桩的加固措施进行了研究。胡文

红等<sup>[7]</sup>结合现场试验和数值模拟研究桩侧土体加固对桩基承载力的影响, 得到了加固范围对加固效果的影响。Nikos Gerolymos 等<sup>[8-9]</sup>采用数值模拟手段对倾斜群桩在地震荷载下的工作性状进行了研究。梁发云等<sup>[10]</sup>采用模型试验研究了土体侧移对单桩及双排桩工作性状的影响。前人的研究主要集中在倾斜单桩承载力性状的研究, 而对倾斜桩未经处理直接加承台的承载力特征尚无明确描述, 因此未经处理倾斜桩利用的可能性是一个值得探讨的问题。

本文以连云港海相软土条件下桩基工程为例, 以现场调查及实测数据为依据, 研究承台—倾斜桩

收稿日期: 2015-12-15

基金项目: 江苏省高职院校青年教师企业实践培训资助项目(2016QYSJ027); 住房和城乡建设部科技计划项目(2015-K3-023); 江苏省建设系统科技项目(2015ZD37)

**Foundation item :** Jiangsu Province Higher Vocational Colleges Enterprise Practical Training Project of Young Teachers(2016QYSJ027); Science and Technology Project of Housing and Urban Ministry(2015-K3-023); Science and Technology Project of Jiangsu Construction Systems(2015ZD37)

第一作者简介: 朱进军(1981—), 男, 江苏连云港人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程方面的教学及科研工作. E-mail: 664649736@qq.com

引用格式: 朱进军, 邵勇, 马庆华. 承台下摩擦倾斜桩工作性状分析[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 119-123.

ZHU Jinjun, SHAO Yong, MA Qinghua. Analysis on bearing capacity behavior of cap-inclined pile[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 119-123.

的承载力性状，分析了承台下倾斜桩的数量、倾斜桩倾斜角度等对桩基承载力的影响。

## 1 现场调查及实测数据

连云港地区在大地构造上属中朝地台、鲁东

古隆起地块。岩土种类既有古老的变质岩，又有近代沉积的海相淤泥，其软土呈压缩性大、孔隙大、含水率高及承载力低等特点，在连云港地区大部分的建筑均采用桩基础。典型土层物理力学参数见表 1。

表 1 地基物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of foundation soil

名称	厚度/m	孔隙比	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	变形模量/MPa	承载力/kPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	泊松比
黏土	1	0.96	18.2	3.44	0.33	16	12	0.31
淤泥	8	1.45	18.3	1.41	0.35	11	8	0.34
粉质黏土	4	0.92	18.7	6.57	0.33	17	13	0.32
黏土	8	0.88	19.3	7.30	0.32	20	14	0.32
全风化片麻岩	2		22.4	450	0.30	55	27	0.29
强风化	8		23.1	640	0.28	77	31	0.28
中风化	18		23.5	3 230	0.25	153	34	0.25

在施工过程中，桩体倾斜事故屡见不鲜，其根本因素为海相软土的工程性质，外在因素为施工扰动，如土方开挖、打桩施工、不平衡荷载等。图 1 为土体开挖导致的倾斜桩现场图片。



图 1 桩体倾斜图片展示

Fig.1 Photograph of inclined piles

从图 1 中可以看出，桩体倾斜方向基本一致，现场情况图片右侧为基坑边坡，由于土方开挖导致桩体两侧存在压力差，从而致使桩体倾斜。从位移量来看，距离坑边越近的桩体偏移量越大，数值在 150 mm 左右，个别桩体达 200 mm 以上，而远离坑边的桩体偏移量较小，一般在 80 mm 左右。

目前单桩承载力试验比较常见，而对承台加倾斜桩体系的承载力试验，由于操作比较困难，因此数据缺乏，本文利用单桩实测数据来验证数值模拟的可行性，然后采用数值模拟手段分析承台—倾斜桩体系的承载力特征，图 2 为单桩试验数据与数值模拟数据对比，从中可以看出，两者数据基本一致，证明了数值模拟手段是可行的。数值模拟中土层参数取自表 1 中数据。

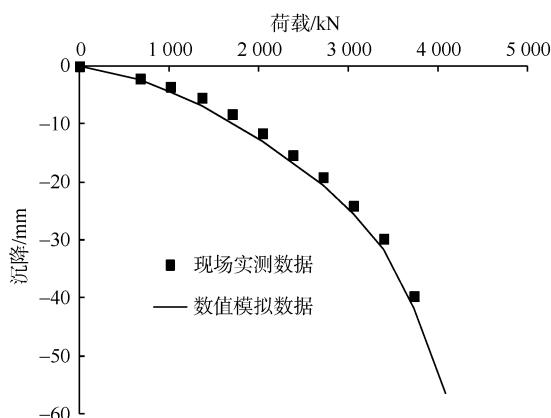


图 2 现场实测数据与数值模拟数据对比

Fig.2 Comparison of field and numerical simulation data

## 2 数值模型及计算条件

数值模拟软件采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>，模型尺寸根据文献[9]中建议，长宽均为 50 m，高 50 m，承台采用实体单元模拟，管桩采用软件自带的结构单元 pile 模拟，承台弹性模量为 33 GPa，管桩弹性模量 29 GPa，桩长为 24 m，直径 500 mm，承载力特征值为 3 400 kN，桩身设计弯矩为 274 kN·m。数值模型如图 3 所示，计算时岩土体本构为摩尔—库伦模型，物理力学参数采用表 1 中数据。数值模拟边界条件为在模型底部施加全约束，模型四周约束其水平向变形，模型顶部无约束。

模拟时取两根桩加承台为研究对象，根据现场调查的情况显示，桩体大多沿着同一方向倾斜，故数值模拟所取工况如图 4 所示，工况 1 为桩体沿水平向倾斜，工况 2 为桩体岩垂直向倾斜，各工况下桩体倾斜程度为 0%、1%、2%、4%、6%、8%、12% 共 7 种情况。

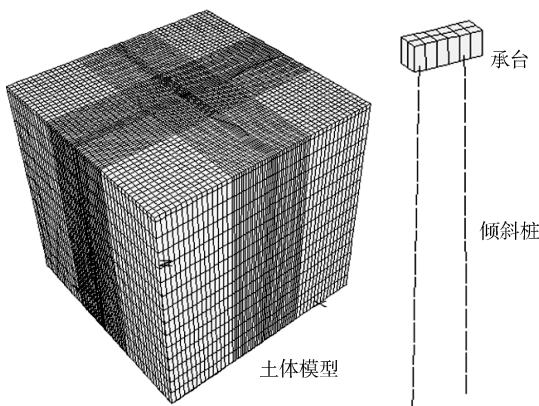


图3 数值模型  
Fig.3 Numerical model

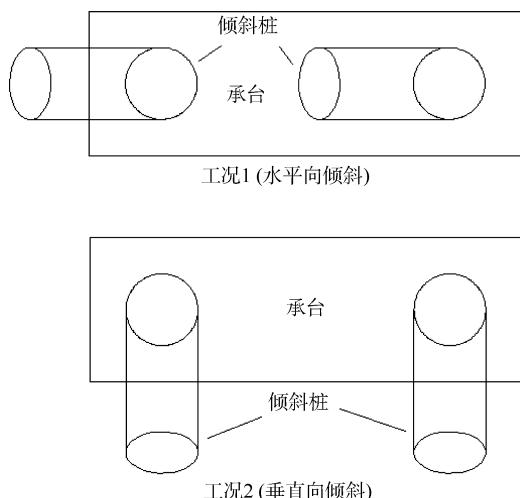


图4 倾斜桩倾斜方向平面示意图  
Fig.4 Plan sketch of tilt direction of inclined pile

### 3 计算结果分析

#### 3.1 水平向倾斜桩受力特征

图5为各级荷载下承台的沉降，从中可以看出，当桩身倾斜程度在4%以内时，工况1即承台—水平

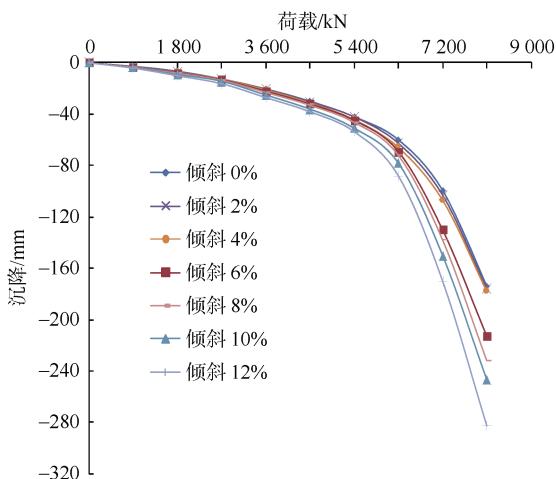


图5 荷载与沉降的关系曲线  
Fig.5 Relationship between the load and the settlement

向倾斜桩体系的承载力并未降低，而当倾斜程度达到4%之后，体系的承载力有所降低，表现为承台沉降明显增大。

图6为在荷载5 400 kN、6 300 kN、7 200 kN及8 100 kN下承台的沉降，可以看出荷载为5 400 kN及6 300 kN时承台沉降随桩体倾斜程度变化不大，而当荷载为7 200 kN及8 100 kN之后，承台沉降显著增大，同样说明当倾斜程度达到4%之后体系承载力逐渐下降。

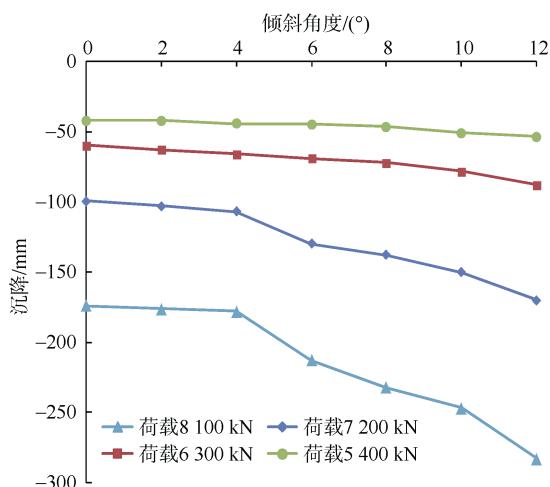


图6 倾斜程度与沉降的关系曲线  
Fig.6 Relationship between the inclination and the settlement

图7为不同桩体倾斜程度下承台的水平位移，从中也可以看出，当桩体倾斜程度达4%之后，承台水平位移显著增大，在实际使用中即可能发生位移过大而导致建筑物破坏。

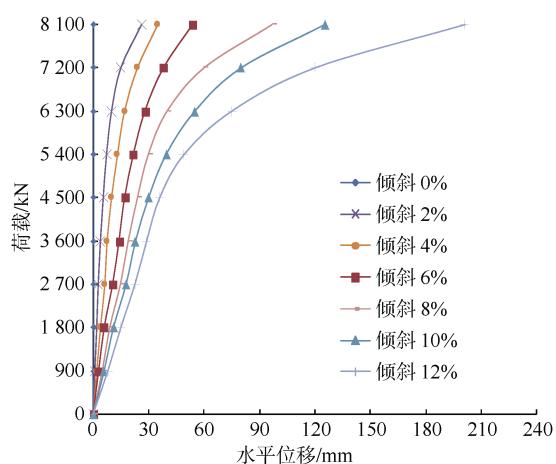


图7 承台水平位移  
Fig.7 Horizontal displacement of cap

图8为不同倾斜程度桩在8 100 kN荷载下的桩身弯矩分布情况，从中可以看出桩倾斜程度越大，桩身弯矩就越大，且桩身最大弯矩位于桩顶，在桩

身存在明显的反弯点，即桩身下部承受反号弯矩，而且反弯点随着倾斜程度的增加逐渐下移。当倾斜程度达 12% 时，桩身已超过了设计值，将发生弯曲破坏。

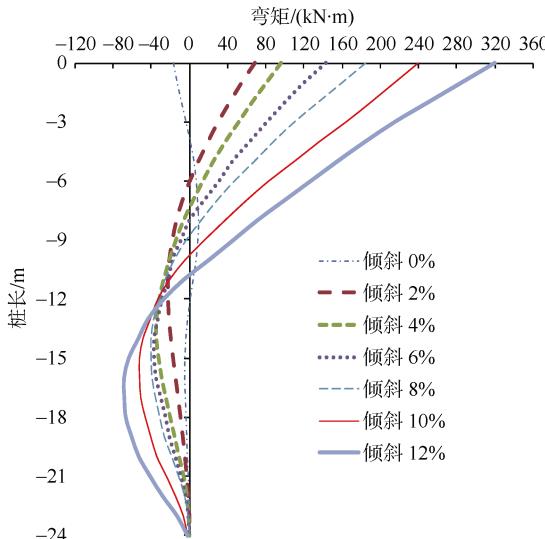


图 8 桩身弯矩分布图

Fig.8 Distribution of bending moment of pile

通过变形及内力分析可知，桩体倾斜会导致桩身弯矩增大，倾斜过大时还将出现弯曲破坏，当倾斜程度达 4% 时，承台—水平向倾斜桩体系的承载力会有所下降。

### 3.2 垂直向倾斜桩受力特征

图 9 为各级荷载下承台的沉降，从中可以看出，当桩身倾斜程度在 6% 以内时，工况 2 即承台—垂直向倾斜桩体系的承载力并未降低，而当倾斜程度达到 6% 之后，承台沉降明显增大，体系的承载力有所降低。

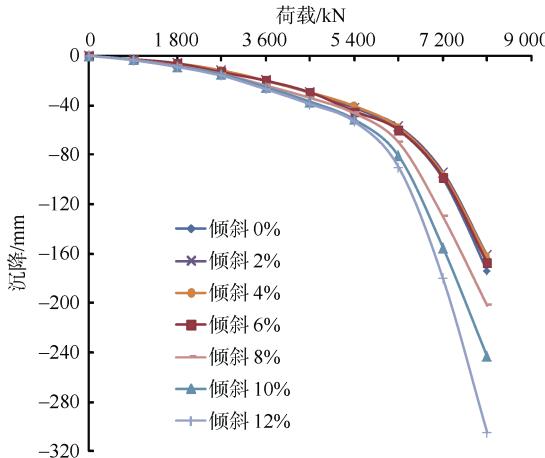


图 9 荷载与沉降的关系曲线

Fig.9 Relationship between the load and the settlement

图 10 为在荷载 5 400 kN、6 300 kN、7 200 kN 及 8 100 kN 下承台的沉降，可以看出荷载为 5 400

kN 及 6 300 kN 时承台沉降随桩体倾斜程度变化不大，而当荷载为 7 200 kN 及 8 100 kN 之后，承台沉降显著增大，与水平向倾斜桩的计算结果类似，同样说明当倾斜程度达到 6% 之后体系承载力逐渐下降。

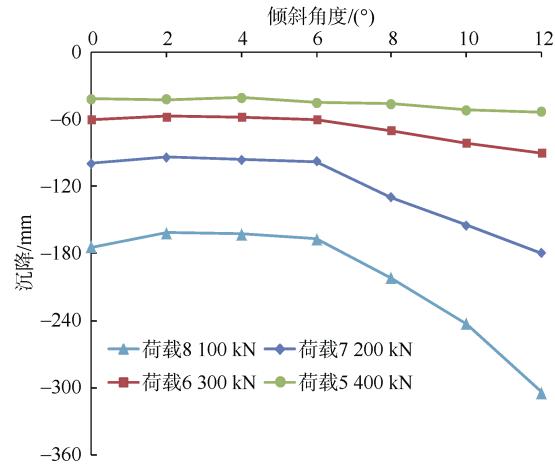


图 10 倾斜程度与沉降的关系曲线

Fig.10 Relationship between the inclination and the settlement

图 11 为不同桩体倾斜程度下承台的水平位移，从中也可以看出，当桩体倾斜程度达 6% 之后，承台水平位移显著增大，在实际使用中即可能发生位移过大而导致建筑物破坏。与水平向倾斜桩的弯矩进行比较发现，当桩体发生垂直向倾斜时，桩身弯矩要小于水平向倾斜，桩身倾斜程度为 8%、10%、12% 时，桩身弯矩分别为水平向倾斜桩的 0.51、0.72、0.80 倍。

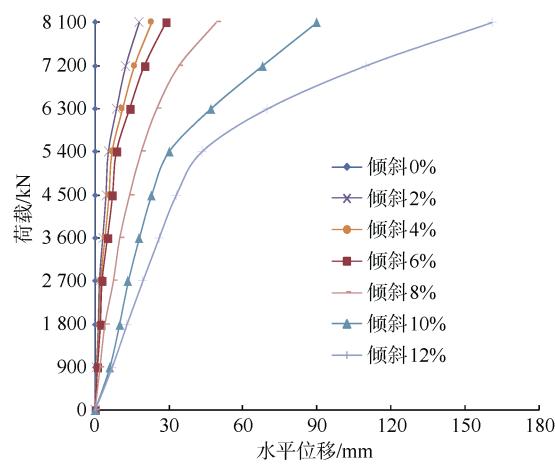


图 11 承台水平位移

Fig.11 Horizontal displacement of cap

图 12 为不同倾斜程度桩在 8 100 kN 荷载下的桩身弯矩分布情况，从中可以看出与水平向倾斜的规律类似，即桩倾斜程度越大，桩身弯矩就越大，且桩身最大弯矩位于桩顶，在桩身存在明显的反弯点，即桩身下部承受反号弯矩，而且反弯点随着倾

斜程度的增加逐渐下移。但是当倾斜程度达到分析的最大值 12% 时，桩身仍未达到弯矩设计值。与水平向倾斜桩的弯矩进行比较发现，当桩体发生垂直向倾斜时，桩身弯矩要小于水平向倾斜，桩身倾斜程度为 8%、10%、12% 时，桩身弯矩分别为水平向倾斜桩的 0.73、0.72、0.72 倍。

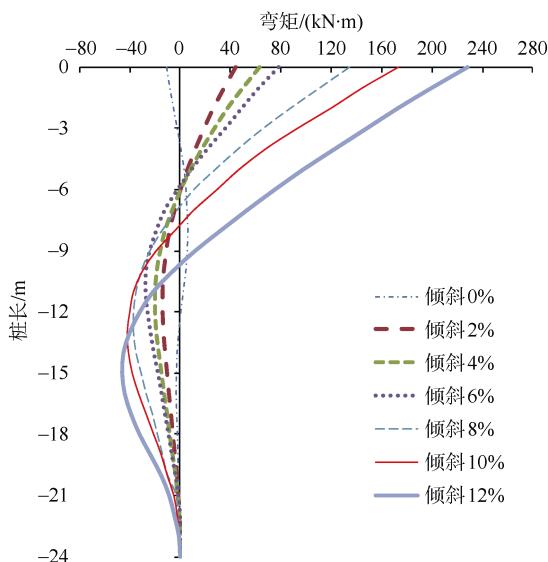


图 12 桩身弯矩分布图

Fig.12 Distribution of bending moment of pile

## 4 结论

通过对承台—水平向倾斜桩及承台—垂直向倾斜桩两种体系的计算分析，可以得到以下几点认识：

a. 桩体倾斜程度对承台—倾斜桩体系承载力的影响存在阈值，且桩体倾斜方向不同时，其阈值也不同。承台—水平向倾斜桩体系的阈值为 4%，即当桩体倾斜达 4% 之后体系承载力有所降低，而承台—垂直向倾斜桩体系的阈值则为 6%。

b. 通过不同荷载下的承台位移可以发现，当荷载较小时，承台—倾斜桩体系的沉降无明显变化，但是当荷载较大时，承台沉降显著增加，导致体系承载力的降低。

c. 倾斜桩倾斜方向不同，承台的水平位移及桩身弯矩也有所区别，桩体垂直向倾斜时，承台的水平位移及桩身弯矩均小于水平向倾斜。说明垂直向倾斜桩较水平向倾斜桩更利于承载。

## 参考文献

- [1] KIM D , BICA A , SALGADO R , et al. Load testing of a closed-ended pipe pile driven in multilayered soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2009 , 135(4) : 463–473.
- [2] 周德泉，杨帆，谭焕杰. 土体中倾斜桩工程性状研究[J]. 中外公路 , 2012 , 32(3) : 14–18.  
ZHOU Dequan , YANG Fan , TAN Huanjie. Research of project traits of inclined pile in soil[J]. Foreign Highway , 2012 , 32(3) : 14–18.
- [3] 朱进军，韩选江，朱连勇. 软土地基预应力管桩倾斜事故分析与处理[J]. 建筑技术 , 2007 , 38(9) : 658–660.  
ZHU Jinjun , Han Xuanjiang , ZHU Lianyong. Analysis and treatment of pipe pile inclined accident on soft soil site[J]. Building Technology , 2007 , 38(9) : 658–660.
- [4] 郑刚，王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究[J]. 岩土工程学报 , 2008 , 30(3) : 323–330.  
ZHENG Gang , WANG Li. Load transfer and bearing capacity of inclined pile under vertical load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2008 , 30(3) : 323–330.
- [5] 李龙起，罗书学. 非均匀地基中倾斜桩竖向承载特性模拟试验研究[J]. 岩土力学 , 2012 , 33(5) : 1300–1305.  
LI Longqi , LUO Shuxue. A simulation test study of vertical bearing capacity of inclined pile foundation in inhomogeneous strata[J]. Rock and Soil Mechanics , 2012 , 33(5) : 1300–1305.
- [6] 王新泉，陈永辉，安永福，等. 塑料套管现浇混凝土桩倾斜对承载性能影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2011 , 30(4) : 834–842.  
WANG Xinquan , CHEN Yonghui , AN Yongfu , et al. Model test study of effect of inclination on bearing behaviors of plastic tube cast-in-place concrete pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2011 , 30(4) : 834–842.
- [7] 胡文红，郑刚. 浅层土体加固对倾斜桩竖向承载力影响研究[J]. 岩土工程学报 , 2013 , 35(4) : 697–706.  
HU Wenhong , ZHENG Gang. Influence of shallow soil improvement on vertical bearing capacity of inclined piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2013 , 35(4) : 697–706.
- [8] GEROLYMOS N , GIANNAKOU A , ANASTASOPOULOS I , et al. Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses[J]. Bulletin of Earthquake Engineering , 2008 , 6 : 705–722.
- [9] MROUEH H , SHAHROUR I. Numerical analysis of the response of battered piles to inclined pullout loads[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics , 2009 , 33 : 1277–1288.
- [10] 梁发云，姚国圣，陈海兵，等. 土体侧移作用下既有轴向受荷桩性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报 , 2010 , 32(10) : 1603–1609.  
LIANG Fayun , YAO Guosheng , CHEN Haibing , et al. Model tests on behavior of axially loaded piles subjected to lateral soil movement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2010 , 32(10) : 1603–1609.

(责任编辑 张宏)