

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.04.016

输电线路斜掏挖基础在水平荷载作用下的特性

杨 剑^{1 2},高玉峰^{1 2},程永锋³,鲁先龙³

(1.岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098;
3.国家电网公司北京电力建设研究院,北京 100055)

摘要 通过数值模拟,分析输电线路倾斜掏挖式基础在水平荷载作用下的荷载挠度特性。计算了垂直、正斜和负斜掏挖单基基础的侧向挠度和内力分布,结果表明在相同的水平荷载作用下,负斜掏挖单基基础比垂直掏挖单基基础能提供更高的抗力,而正斜掏挖单基基础与垂直掏挖单基基础只有较小的抵抗水平荷载的能力。根据输变电线路常用的桩顶自由的四基基础分别采用 4 种不同的配置形式:全部垂直、前排倾斜、后排垂直、前排垂直、后排倾斜、全部倾斜。通过变化倾斜掏挖基础的倾角表明四基基础全部倾斜以及前排垂直、后排倾斜的基础有较大的水平极限承载力,这 2 种基础形式中都有负斜掏挖式基础,因此有较大的抵抗水平荷载的能力。

关键词 输电线路;倾斜基础;水平荷载;挠度;基础受力分析;基础内力

中图分类号:TU413.4 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2008)04-0055-05

Behavior of inclined excavated foundation of transmission lines under lateral loading//YANG Jian^{1 2}, GAO Yu-feng^{1 2}, CHENG Yong-feng³, LU Xian-long³(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geo-technical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Electric Power Construction Research Institute, State Power Corporation, Beijing 100055, China)

Abstract: The load-deflection characteristics of inclined excavated foundations of transmission lines in homogeneous soil under lateral loads are analyzed using a 3-D numerical simulation model. Calculation results of lateral deflection and internal force distribution of vertical, positive inclined and negative inclined foundations show that the negative inclined foundation has greater resistance to lateral loads than the vertical foundation and positive inclined foundation. Four different kinds of excavated foundations that are often applied in transmission lines, i. e. both vertical, front inclined and rear vertical, front vertical and rear inclined, and both inclined, are presented and discussed. It is demonstrated that the both inclined foundation and front vertical and rear inclined foundation proved to be the best configuration, and can provide greater resistance to lateral loads.

Key words: transmission lines; inclined excavated foundation; lateral loads; deflection; analysis of forces on foundation; internal force of foundation

输电线路杆塔基础常用的是四基基础,其上部支撑着铁塔,通常铁塔腿脚斜插入杆塔混凝土基础,为了保证基础轴向受力,将基础倾斜与上部荷载作用方向一致。然而,输电线路基础除了承受倾斜铁塔腿脚传来的轴向荷载外,还经常受到风荷载等水平荷载的作用。与竖直基础在水平荷载作用下不同,倾斜基础在水平荷载作用下的特性较复杂^[1]。因此,有必要对其进行研究。国外学者主要通过模型试验得出倾斜基础在水平荷载作用下的特性,并取得了一定的成果^[1-5]。彭文祥等^[6]、侯运秋等^[7]、赵明华等^[8-12]通过模型试验或是简化的解析方法得到了倾斜基础在倾斜荷载或水平荷载作用下的内力

分布。以上主要是通过模型试验或是简化假设得出倾斜基础受力的经验公式,本文通过数值模拟对输电线路常用的基础进行了足尺数值仿真,采用设计中基础的实际尺寸和实测工程地质资料,以期真实地反映基础的受力过程。

计算中首先分析了输电线路中常用的 3 种单基基础形式,如图 1 所示。如果倾斜基础与竖直方向夹角为正值(顺时针),定义为正斜掏挖基础,如果倾斜基础与竖直方向夹角为负值(逆时针),则定义为负斜掏挖基础。对位于均质地基上的输电线路垂直、正斜和负斜掏挖式单基基础在水平荷载作用下的荷载-挠度特性及基础受力特性进行了数值模拟,

基金项目 江苏省青蓝工程项目(2006)
作者简介 杨剑(1975—),男,陕西安康人,工程师,博士研究生,从事岩土工程数值分析研究。E-mail: fhyi175@163.com

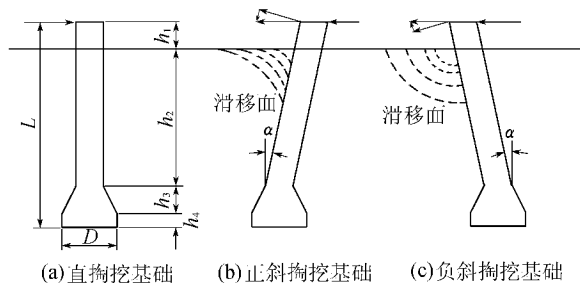


图1 输电线路直掏挖和斜掏挖基础形式

得出了倾角对不同基础形式水平特性的影响规律,然后分析了输电线路基础顶部自由的四基基础,共采用了4种不同的布置方式:全部垂直(简称基础形式a);前排倾斜、后排垂直(简称基础形式b);前排垂直、后排倾斜(简称基础形式c);全部倾斜(简称基础形式d),如图2所示。分析中同时考虑了群基础中斜掏挖基础倾角对群基水平承载力的影响。

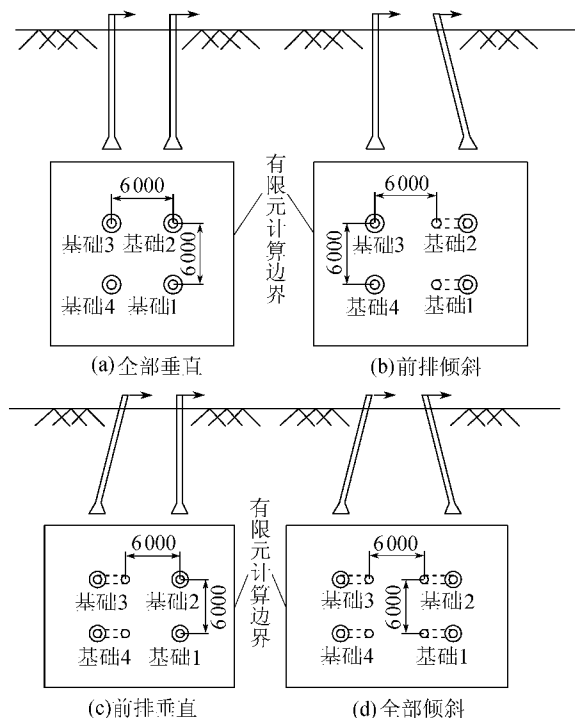


图2 不同基础配置形式的截面和平面示意图(单位:mm)

1 掏挖式基础三维数值模拟

1.1 计算模型及本构模型

利用岩土分析软件 ABAQUS 计算输电线路掏挖式基础在水平荷载作用下的特性。如图1所示,基础总长 $L = 7.5\text{ m}$, 直径 $D = 1\text{ m}$, 基础露头高度 $h_1 = 1\text{ m}$, 桩基础扩大端高度 $h_3 = 1\text{ m}$, 基础台阶高度 $h_4 = 0.5\text{ m}$ 。为了保证数值计算结果的合理性,在基础与土体接触位置处布置了较密的网格,确保基础与土的相互作用。有限元网格及计算边界如图3所示,基础和土采用六面体八节点单元,不同基础形式的

单元数大约为6000个。荷载和边界条件如下:水平荷载沿着 x 轴正方向作用在桩顶平面的所有节点;底部边界约束所有方向的位移自由度,侧边界约束水平方向的自由度。荷载分级施加,以 ABAQUS 强大的非线性计算能力及先进的接触对算法模拟基础和土之间的相互作用,以数值计算不收敛或基础顶部挠度 50 mm 作为基础水平极限承载力^[3]。

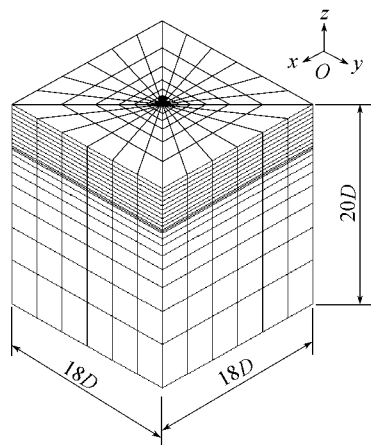


图3 有限元网格及计算边界

考虑桩身的最大应力不会超出混凝土屈服应力,将基础视为各向同性弹性模型^[13]。基础的弹性模量为 $2.55 \times 10^{10}\text{ Pa}$, 泊松比为 0.2。周围的土体为 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。土体材料参数采用某输电线路工程实测资料,土体为各向同性均质土,密度为 1470 kg/m^3 , 弹性模量为 $1 \times 10^8\text{ Pa}$, 泊松比为 0.3, 黏聚力为 30 kPa , 摩擦角为 24° , 静止土压力系数为 1.0。在三维有限元分析中,基础-土界面模型采用接触对实现。通过计算2个相反方向节点的间隙来检查是否接触,正的间隙意味着接触对分离,接触面之间没有作用力传递;2个面接触时,满足库仑摩擦原理,当2个面之间的剪应力达到界面最大的剪切强度时,接触面产生相对滑移。

1.2 室内模型试验数值验证

为了确保数值分析结果的合理性,与文献[14]中桩的荷载试验数据进行了对比,桩长为 3 m , 桩径为 0.6 m 。桩埋设在成层地基中,其中上层土厚为 6 m , 弹性模量和泊松比分别为 25000 kPa 和 0.35, 黏聚力和摩擦角分别为 18 kPa 和 18° ; 下层土厚为 7 m , 弹性模量和泊松比分别为 20000 kPa 和 0.40, 黏聚力和摩擦角分别为 24 kPa 和 14° 。首先在桩顶施加 400 kN 垂直方向的荷载,然后施加水平方向的荷载,水平荷载~挠度曲线如图4所示,试验得出的桩水平承载力大约为 110 kN ,可见与计算结果是比较接近的,可以进一步对该问题进行计算分析。

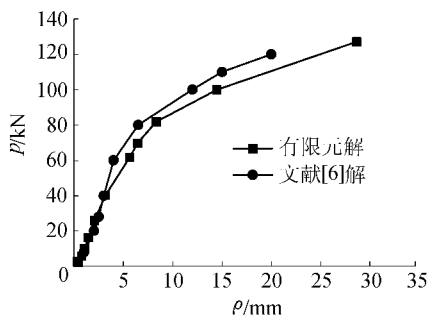


图4 有限元分析与现场试验结果对比

2 分析及讨论

2.1 输电线路掏挖式单基基础承载力及内力

输电线路掏挖式单基基础如图1所示。计算分析中3种基础露头高度 h_1 统一为1m,基础桩身埋深 h_2 为5m,直径为1m。通过变化正斜掏挖基础倾角分别为 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 40° 、 45° ,负斜掏挖基础倾角为 -10° 、 -15° 、 -20° 、 -25° 、 -30° 、 -40° 、 -45° ,考虑倾角对掏挖式基础荷载-挠度特性及基础内力的影响。

图5为不同倾角的负斜掏挖基础在水平荷载作用下的荷载~挠度曲线。可见,随着基础倾角的增加,基础的水平承载力相应增加,结果与文献[1-2]的试验结论一致。分析其原因是:对于负斜掏挖基础,水平荷载的法向分量使基础压缩周围的土,因此迫使滑移面向下挠曲,作用在负斜掏挖基础上的水平荷载的法向分力及滑移面形状见图1(c)。图6为不同倾角的正斜掏挖基础在水平荷载作用下的荷载

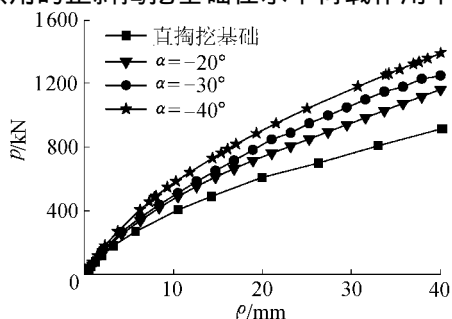


图5 负斜掏挖基础荷载~挠度曲线

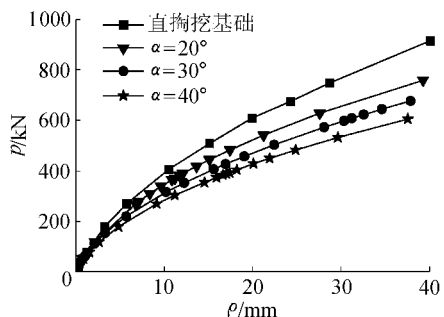


图6 正斜掏挖基础荷载~挠度曲线

~挠度曲线。随着基础倾角的增加,基础的水平极限承载力相应减小。其原因是对于正斜掏挖基础,水平荷载的法向分量使基础把周围的土向外挤,因此迫使滑移面向上挠曲导致了较小的侧向抗力^[3-5],作用在正斜基础上的水平荷载的法向分力及滑移面形状见图1(b)。基础的荷载-挠度特性表明,与直掏挖基础和正斜掏挖基础相比,负斜掏挖基础有更大的水平荷载抗力,因此有较大的水平极限承载力。

图7和图8分别为200kN水平荷载作用下不同倾角的负斜掏挖基础和正斜掏挖基础的弯矩分布。随着基础倾角的增加,负斜掏挖基础桩身中部的最大弯矩相应减小,同时,基础底部扩大端位置处的弯矩也减小,从而解决了直掏挖基础在水平荷载作用下扩大端位置受较大弯矩而需多配钢筋的问题;随着基础倾角的增加,正斜掏挖基础的桩身中部的最大弯矩相应减小,同时桩身底部扩大端位置处的弯矩也减小,但减小的幅度要大于桩身中部,当倾角大于 30° 时,基础扩大端位置处的弯矩则逐渐增加。

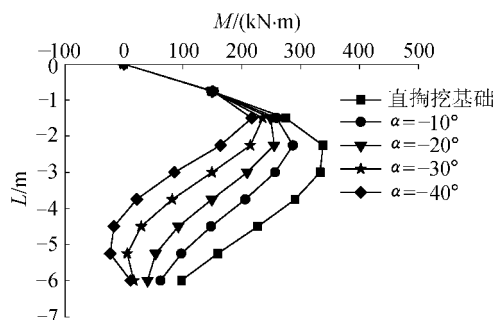


图7 负斜掏挖基础在200kN水平荷载作用下的弯矩分布

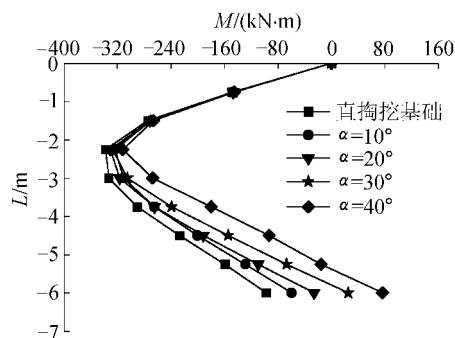


图8 正斜掏挖基础在200kN水平荷载作用下的弯矩分布

图9为基础负斜倾角对桩身弯矩的影响。随着倾角的增加,桩身中部最大弯矩和基础扩底端位置处的弯矩都相应减小,但桩身中部弯矩的减小更为明显。图10为基础正斜倾角对桩身弯矩的影响。随着倾角的增加,桩身中部最大弯矩改变很小,桩身扩底端位置处的弯矩相应减小,但倾角超过 30° 时,扩底端处的弯矩又逐渐增加。基础内力分布表明,负斜掏挖基础比正斜掏挖基础受力合理,并且随着负斜倾角的增加桩身弯矩改善越明显。

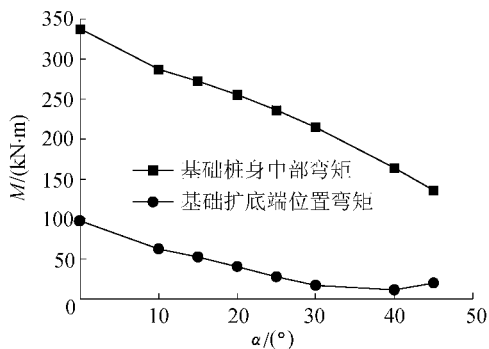


图9 负斜倾角对桩身弯矩的影响

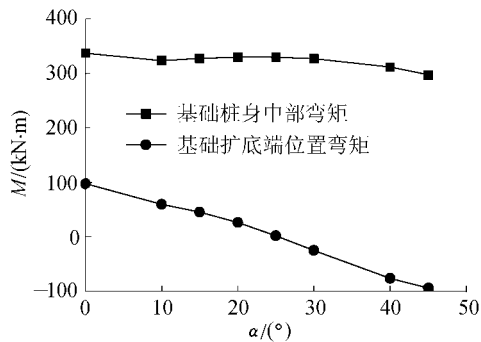


图10 正斜倾角对桩身弯矩的影响

2.2 输电线路掏挖式四基基础承载力及内力

对于常用的顶部自由的输电线路四基基础,基础的不同配置形式如图2所示,基础顶部的间距统一为6m,同时扩底基础间距大于 $1.5D^{[15]}$ 。4个基础的编号如图2所示,不同基础形式的单基编号均相同,其中正斜掏挖基础和负斜掏挖基础的倾角分别为 15° 和 -15° 。为便于比较,水平荷载统一为200kN,荷载施加方向为水平方向。上节分析表明,负斜掏挖单基基础可提供较高的水平承载力,限于篇幅,此处只列出了有负斜掏挖基础的群基基础形式c和群基基础形式d中的各单基基础的弯矩。

图11和图12分别为基础形式c和基础形式d在200kN水平荷载作用下的4个单基基础的弯矩图。其中基础形式c中的基础1和基础2为直掏挖基础,基础3和基础4为负斜掏挖基础。由图11可

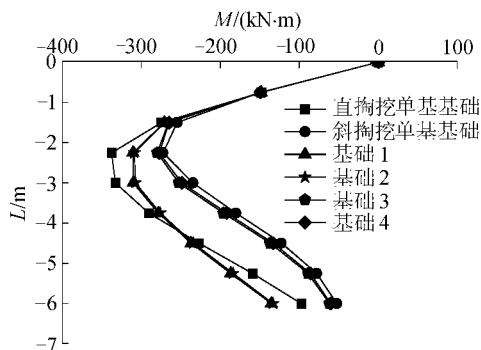


图11 基础形式c在200kN水平荷载作用下各掏挖基础的弯矩分布

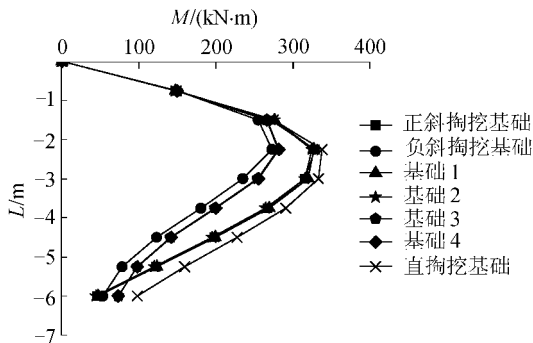


图12 基础形式d在200kN水平荷载作用下各掏挖基础的弯矩分布

知,基础1和基础2的中部最大弯矩小于直掏挖单基基础的弯矩,但扩大端位置处的弯矩大于直掏挖单基基础的弯矩,基础3和基础4的弯矩与相应单基基础受力时的弯矩很接近。基础形式d中基础1和基础2为正斜掏挖基础,基础3和基础4为负斜掏挖基础。如图12所示,群基基础中的2种基础形式与单基基础受力时的弯矩很接近,只是负斜掏挖基础的最大弯矩要小于正斜掏挖基础的最大弯矩,这也与单基基础受力分析的情况是一致的。

图13是倾角为 15° 的4种不同配置的基础在500kN水平荷载作用下基础1和基础3的荷载~挠度曲线对比,由于基础顶部自由,因此在相同水平荷载作用下,除相同配置的群基基础形式a,其余群基基础中不同形式的基础表现出不同的挠度形状。如果以群基基础不同基础形式中单基基础较小的极限承载力作为群基基础的极限承载力,由图13可以看出,群基基础极限承载力从大到小依次为:基础形式d、基础形式a、基础形式c、基础形式b。

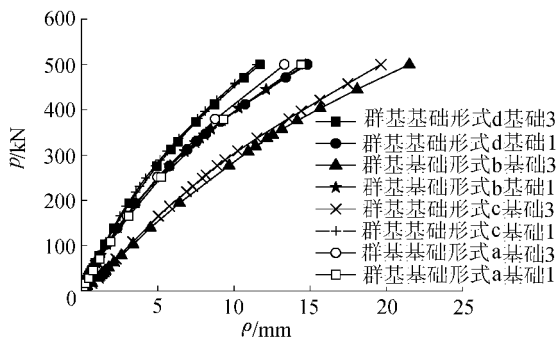


图13 倾角 15° 不同基础形式在500kN水平荷载作用下不同掏挖基础的荷载~挠度曲线

此外,笔者还对群基基础中倾斜基础为 $\pm 25^\circ$ 的基础形式b、c、d的受力特性及荷载~挠度关系进行了分析,水平荷载为200kN,作用方向为水平方向。仍以有负斜基础的基础形式c和基础形式d为研究对象,群基基础中各单基基础的弯矩分布特性及荷载~挠度分布规律与基础倾角为 15° 时规律一致。图11

和图 12 表明,群基基础中各基础的内力与单基基础受力时的内力基本一致,原因是基础倾斜,群基基础中各基础之间的相互影响较小。在相同水平荷载作用下,群基基础中各单基基础有不同的挠度,以各单基基础的最小极限承载力作为群基基础的极限承载力。4 种基础形式的极限承载力从大到小依次为:基础形式 c、基础形式 a、基础形式 d、基础形式 b。

3 结 语

输电线路斜掏挖式基础是目前用于输电线路杆塔基础的一种新型基础形式,通常是为了在上部倾斜塔腿传来的荷载作用下基础轴向受压时将基础倾斜,以确保轴向承载力。有必要对倾斜基础在水平荷载作用下的水平承载特性进行研究。根据基础倾向与水平荷载作用方向的不同可分为正斜基础和负斜基础,不同的倾斜基础有不同的荷载-挠度特性,利用商用 ABAQUS 有限元软件,首先对已有室内模型试验结果进行对比分析,保证数值计算的合理性,在此基础上,对水平荷载作用下正斜和负斜掏挖式单基基础进行了不同倾角的受力分析,并对不同配置形式基础顶部自由的四基基础进行了分析,初步得出以下结论:

a. 在水平荷载作用下负斜掏挖基础比直掏挖基础和正斜掏挖基础能提供更大的抗力,因此有较大的水平承载力,其主要原因是:对于负斜掏挖基础,与基础轴线垂直的水平荷载分量使基础向下压缩基础周围的土,因此滑移面向下挠曲,这导致了对侧向挠度较高的抗力。而对于正斜掏挖基础,与基础轴线垂直的水平荷载分量使基础向上挤土,因此滑移面向上挠曲而导致了较小的侧向抗力。

b. 负斜掏挖基础桩身中部的最大弯矩比直掏挖基础和正斜掏挖基础的小,并且随着基础倾角的增大,基础中部的最大弯矩减小。综合基础的受力特点,负斜掏挖基础倾角范围宜在 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 受力最合理。

c. 对于桩顶自由的输电线路四基基础,由于在水平荷载作用下,群基基础中不同形式的各单基基础的受力是不相同的,因此有不同的荷载-挠度特性,如果以其中单基基础的最小承载力作为群基基础的极限承载力,在倾斜基础倾角为 $\pm 15^{\circ}$ 的情况下,四基基础全部倾斜配置形式是最优的,在倾斜基础倾角为 $\pm 25^{\circ}$ 的情况下,前排垂直、后排负斜基础的配置形式是最优的。由此也可得出有负斜基础组成的群基础具有较高侧向抗力的结论。

d. 此次分析主要是通过数值分析手段对掏挖

式正斜和负斜基础在水平荷载作用下的极限承载力和基础内力分布进行多工况比较,今后将进行足尺模型试验,进一步分析负斜和正斜基础不同的挤土机理带来的不同承载力特性。

参考文献:

[1] RAMAKRISHNA V G S T, RAO S N. Laterally loaded pile bents in marine clay[J]. Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, 2003(6): 1-11.

[2] ZHANG L M, MCVAY M C, LAI P W. Centrifuge modelling of laterally loaded single battered piles in sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 1074-1084.

[3] 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: 561-575.

[4] RAJASHREE S S, SITHARAM T G. Nonlinear finite-element modeling of batter piles under lateral load[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(7): 604-612.

[5] 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.

[6] 彭文祥, 赵明华. 成层地基中倾斜荷载作用下桩的受力研究[J]. 中南公路工程, 1999, 24(1): 27-30.

[7] 侯运秋, 赵明华, 曹喜仁. 倾斜荷载下基础的承载力研究[J]. 中南公路工程, 1998, 23(1): 39-42.

[8] 赵明华, 刘建华, 杨明辉. 倾斜荷载下高陡边坡桥梁桩基内力计算[J]. 岩石力学与岩土工程学报, 2006, 25(11): 2352-2357.

[9] 赵明华. 倾斜荷载下基桩的受力研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2001.

[10] 赵明华, 邹新军, 邹银生, 等. 倾斜荷载下基桩的改进有限元-有限层分析方法[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 129-133.

[11] 赵明华, 侯运秋, 曹喜仁. 倾斜荷载下基桩的受力研究[J]. 湖南大学学报, 1997, 24(2): 98-102.

[12] 赵明华, 侯运秋, 单远铭. 倾斜荷载下桥梁桩基的计算与试验研究[J]. 湖南大学学报, 1999, 26(2): 86-91.

[13] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. Three-dimensional analysis of single pile response to lateral soil movement[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26: 747-758.

[14] KARTHIGEYAN S, RAMAKRISHNA V V G S T, RAJAGOPAL K. Influence of vertical load on the lateral response of piles in sand[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33: 121-131.

[15] 左名麒, 胡人礼, 毛洪渊. 桩基础工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.

(收稿日期: 2007-06-25 编辑: 方宇彤)